

博士論文

知識結合を軸としたロボット分野の
イノベーション進展に関する研究

古瀬 利博

要旨

論文題目 知識結合を軸としたロボット分野のイノベーション進展に関する研究

ロボットは、少子高齢化に伴う深刻な人手不足といった社会的ニーズの高まり、生活の質（QOL）を高めるための家庭・生活面への普及、第4次産業革命の担い手として、IoT、AI との融合による更なる進展などが見込まれることから、わが国のみならず、主要国において、ロボット戦略を策定し振興を図るなど、国際競争力の維持・発展のための重要なハイテク産業と位置付けられている。しかしながら、期待ほどサービス分野へのロボットの導入は進んでおらず、ロボットへの期待と現実との間に乖離が生じている。

本研究は、ロボットが、ロボットとしての機能を発揮させる技術開発とともに、ロボットを導入する分野へ応用・適用するための応用技術開発、用途開発を伴うことを特徴とすること、すなわち、応用分野の適用技術を含む多様なロボット技術と応用分野の技術との結合・融合で成り立っていることに着目し、ロボットを用いたサービスを適用しようとする分野において、ロボットの導入、社会実装を妨げているのは、アプリケーションの実現に必要な多様な技術の結合・融合の遅れが大きな要因ではないかとの問題意識から出発する。

最近の学術研究（Science）と技術開発（Technology）の進展のスピードはますます早くなりかつ細分化され、異なる分野間の融合や新たな分野の出現でイノベーションが進展しており、また、応用分野が広範囲に渡るために結合・融合の対象となる技術の幅広さと比較して事業領域が狭いロボット産業においては、必要な研究開発をすべて単独で行うことは難しく、いわゆるオープンイノベーションが不可欠になっている。したがって、異なる学術研究分野間、技術開発分野（特許）間の結合・融合（「知識結合」と呼ぶ。）の現状や潜在力を把握することが、研究開発面、ビジネス面、さらには国や地方自治体のイノベーション政策の企画立案面において、極めて重要になっている。

その観点から、知識結合を伴うイノベーションの企画立案に役立つ一連の手法の開発と検証を行うとともに、当該手法を、ロボットに関する学術研究論文および特許に適用して、ロボット分野におけるイノベーションの重要な特徴を明らかにすることを本研究は目指している。

第1章では、問題意識・背景、研究の目的と学術研究（Science）と技術開発（Technology）

からみたロボットをめぐる最近の状況をまとめている。

本研究の目的を、入手できる学術研究論文および特許のデータに基づき、知識結合を軸として、ロボット分野におけるイノベーションの進展の重要な特徴を明らかにすることとし、具体的には、マクロ、メソ、ミクروسケール、すなわち、主要なアプリケーションおよび機関の単位で、知識結合を定量的に把握し特徴量を抽出する手法を開発するとともに、開発した手法を、ロボットに関する学術研究論文および特許データに適用して、ロボット分野における知識結合の状況に関する知見を抽出し、専門家の評価も得て、ロボット分野におけるイノベーションの重要な特徴を明らかにし、知識結合の観点からの政策立案、研究企画、技術経営に資する知見とする。

第2章では、本研究に関連するクラスタ・ネットワーク分析、技術結合・融合 (Technology convergence)、ロボット分野のイノベーション計測に関する先行研究の検討を通じて、俯瞰的あるいは概括的に学術研究や技術の結合・融合を抽出・把握するに留まっている先行研究に対し、本研究で開発し提案した手法 (「MM 手法 (Module-based Mining Method)」と呼ぶ。) は、細かい粒度で知識結合ネットワークの構造やイノベーションの進展状況を定量的に把握する手法として優位であることをまとめている。

第3章では、本研究の分析の基礎となる MM 手法とそれを構成する個々の分析手法の開発と実験を通じた評価をまとめている。具体的には、クラスタ・ネットワーク分析による引用ネットワークの形成と学術研究分野と技術開発分野 (特許) のカテゴリ化、ノードに複数の分野が割り付けられている場合に、共引用 (co-citation) を利用して単一分野間ネットワークに分解 (Factorizing) する手法、知識結合ネットワークの構築と平均クラスタリング係数、次数中心性などのネットワーク指標による特徴量の抽出と社会ネットワーク分析を中心に研究されているコア/周辺構造の考え方に基づくハブ、コア、周辺、関連の各分野を抽出する方法、特許ポートフォリオに加え、新たに「知識結合ポートフォリオ」と「クラスタポートフォリオ」を導入し、複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っているロボットの場合であっても、技術ポートフォリオに、機関間の相違がより粒度細かく計測できる手法からなる。

第4章では、第3章で開発した MM 手法を、学術研究論文と特許の両方に適用し、クラスタ・ネットワーク分析によりカテゴリ分けしたクラスタごとに知識結合ネットワークを構築し、平均クラスタリング係数、次数中心性などの知識結合ネットワークの特徴量を計測している。その特徴量に基づき、ハブ分野、コア分野、周辺分野、関連分野となる学術研究分野と技術開発分野 (特許) を抽出し、その抽出結果とロボットに関する文献と専門家による知見と評価に基づき、MM 手法を用いた知識結合を軸とした分析が、

研究開発の進捗や社会実装の度合いを把握できることを明らかにしている。

具体的な例を挙げると、学術研究分野では、産業用ロボットからサービスロボット、医療・ヘルスケア分野向けロボットへ学術研究のウエイトが移っていること、手術用ロボットは1つの主要な学術研究分野を形成し、咽頭がん、子宮がん、心臓手術などに手術用ロボットが適用されていたことが、外科学 (Surgery) と医療・ヘルスケア分野との間の知識結合の形成から把握できる一方、医療・ヘルスケア分野と工学分野との間の知識結合はロボティクスなどの一部に限られていること、技術開発分野 (特許) では、90年代の産業用ロボットの成長期には、産業用アプリケーションとして、マニピュレータなどのロボットの基盤技術と溶接、塗装、半導体デバイスなどの技術との知識結合が形成され、2000年代以降には、ゲーム/アミューズメント、家電、医療・ヘルスケア分野の技術との知識結合が形成されているなど、ロボットの基盤技術とロボットが応用される分野の技術との組み合わせで、知識結合が形成されていることなどが抽出された。

第5章では、特許の技術分類をもとに計測する特許ポートフォリオに加え、第3章で新たに定義した「知識結合ポートフォリオ」と「クラスタポートフォリオ」を特許保有上位50機関に適用し、各機関の特許ポートフォリオ、知識結合ポートフォリオおよびクラスタポートフォリオを計測して、各機関の保有する特許の特徴を把握するとともに、機関間の各技術ポートフォリオの相違を比較することにより、その競合状況、補完状況を定量的に把握できることを示している。ロボットのように応用分野への適用技術を含む複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合には、特許ポートフォリオから機関間の相違を検出することは難しかったが、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオを用いることで、機関間の技術ポートフォリオの相違が、より細かい粒度で定量的に計測できるとともに、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオから、その競合状況、補完状況を定量的に把握できることを明らかにし、その分析結果と専門家による知見と評価に基づき、企業の競合分析、補完分析への応用可能であることを示している。

第6章では、第3章の手法の開発と第4章、第5章の分析結果を、ロボットの研究開発の進捗や社会実装の事例、ロボットの研究開発動向や医学系の学術専門誌などの文献および専門家の知見、評価に基づき考察し、①MM手法が、学術研究論文と特許データにより、ロボット分野のアプリケーションレベルでの知識結合の構造、特徴を捉えられていること、②知識結合と研究開発の進捗や社会実装の度合いの関係を把握できること、③ロボットのように複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合においても、機関間の相違を把握できることを示し、知識結合を軸とした提案手法の有用性、

新規性を明らかにするとともに、知識結合に着目する意義と知識結合に関する指標の意味、本研究の貢献、本研究の限界と課題、他分野への活用可能性をまとめている。

第7章では、本研究の結論として、学術研究 (Science) と技術開発 (Technology) に関して、一般に入手できる学術研究論文の書誌情報と特許情報を用いて「知識結合」を軸に分析することで、ロボット分野のイノベーションの進展が、マクロおよびメソスケールで、定量的に把握できること、主要アプリケーションごとに、知識結合の構造と中心的役割を持つ学術研究分野、技術開発分野 (特許) の抽出ができること、そして、知識結合の形成が、ロボットの研究開発の進捗や社会実装、実用化の度合いを把握できること、ミクروسケールの機関間の技術ポートフォリオの相違が、新たに提案した知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオにより、ロボットのように複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っているロボットの場合においても、定量的に把握でき、企業間の競合分析、補完分析にも適用可能であることなど本研究の目的が達成できていることを結論としてまとめている。

目次

目次.....	1
図目次.....	4
表目次.....	6
第1章 序論.....	9
1.1 問題意識・背景.....	9
1.1.1 ロボットへの期待と現実との乖離.....	9
1.1.2 技術の結合・融合によるイノベーションの進展.....	11
1.2 ロボット技術の特徴.....	12
1.2.1 ロボットの定義と本研究で対象とするロボット.....	12
1.2.2 関連技術の多様化・拡大と結合・融合の進展.....	14
1.2.3 技術の結合・融合の具体例 — 溶接ロボットを事例として.....	15
1.3 研究目的.....	16
1.4 ロボットをめぐる最近の状況.....	18
1.4.1 ロボットに関する学術研究論文および特許の動向.....	18
1.5 本研究の枠組み.....	23
第2章 先行研究.....	26
2.1 クラスタ・ネットワーク分析.....	28
2.2 技術結合・融合 (TECHNOLOGY CONVERGENCE)	32
2.3 ロボットのイノベーション計測.....	39
第3章 知識結合に関する分析手法の開発.....	41
3.1 MM 手法 (MODULE-BASED MINING METHOD)	42
3.1.1 MM 手法開発の狙いと従来の手法との相違点.....	42
3.1.2 MM 手法による分析プロセス.....	44
3.2 MM 手法の開発.....	46
3.2.1 学術研究論文および特許情報の収集.....	47
3.2.2 引用ネットワークの形成とクラスタ分析によるカテゴリ化.....	49
3.2.3 知識結合ネットワーク (知識結合行列) の構築.....	50
3.2.4 共引用 (co-citation) 関係を利用した複数分野から単一分野間ネットワークへの	

変換(Factorizing).....	53
3.2.5 知識結合の近さ・強さを表す指標.....	59
3.2.6 知識結合ネットワークの特徴量の抽出.....	60
3.2.7 技術ポートフォリオ分析.....	62
3.3 分析手法の評価.....	65
3.3.1 複数分野から単一分野へのネットワークへの分解 (Factorization)	65
3.3.2 知識結合の近さ・強さに関する指標の評価.....	68
3.3.3 クラスタ化 (カテゴリ分け) による知識結合抽出の影響.....	72
3.3.4 分析期間の相違に伴うクラスタリングのカテゴリ組み換えの影響.....	74
3.3.5 引用関係 (direct citation) と共分類 (co-classification) による知識結合ネット ワークの比較.....	76
3.4 MM 手法のまとめ.....	78
3.5 MM 手法を用いた分析手順.....	79
3.5.1 知識結合ネットワーク.....	79
3.5.2 技術ポートフォリオ.....	80
第4章 知識結合からみるロボット分野のイノベーション.....	81
4.1 学術研究における知識結合からみるロボット分野のイノベーション.....	81
4.1.1 クラスタ分析によるロボットに関する学術研究の動向.....	82
4.1.2 ロボットに関する学術研究における知識結合ネットワーク構築.....	86
4.1.3 学術研究における知識結合ネットワークの特徴量の抽出.....	96
4.1.4 考察.....	105
4.1.5 まとめ.....	115
4.2 技術開発における知識結合からみるロボット分野のイノベーション.....	118
4.2.1 クラスタ分析によるロボットの技術開発分野 (特許) の動向.....	119
4.2.2 ロボットに関する技術開発における知識結合ネットワーク.....	124
4.2.3 技術開発における知識結合ネットワークの特徴量の抽出.....	134
4.2.4 考察.....	143
4.2.5 まとめ.....	155
第5章 機関の技術ポートフォリオと技術経営.....	158
5.1 機関の技術ポートフォリオの計測.....	158
5.2 機関間の技術ポートフォリオの相違の測定.....	163
5.2.1 機関間の技術ポートフォリオのコサイン距離 (Cosine distance)	163

5.2.2 中国の大学・研究機関の技術ポートフォリオの相違.....	168
5.3 機関間のポートフォリオ間の距離.....	172
5.4 機関間の競争状況の把握.....	178
5.5 考察.....	186
5.6 まとめ.....	188
第6章 考察.....	190
6.1 ロボット分野のアプリケーションレベルでの知識結合の構造、特徴把握.....	191
6.1.1 知識結合を軸としたロボット分野のイノベーション進展の把握.....	191
6.1.2 ロボットにおける知識結合の学術研究と技術開発の比較.....	194
6.2 知識結合からみた研究開発の進捗、社会実装の進展.....	197
6.2.1 ロボット分野の研究開発の進捗、社会実装とイノベーション進展の比較.....	198
6.2.2 知識結合からみた医療・ヘルスケア分野と工学分野の関係.....	202
6.3 機関間の相違の把握と、競合分析、M&A、アライアンス分析への活用.....	206
6.3.1 アライアンス検討マップとしての活用.....	206
6.3.2 企業のロボットの事業展開の広さや特徴の特定の可能性.....	209
6.4 知識結合に着目する意義と知識結合に関する指標の意味.....	214
6.4.1 学術研究 (Science)、技術開発 (Technology) の知識結合に着目する意義...	214
6.4.2 知識結合に関する指標の意味.....	215
6.5 専門家からの評価を踏まえた MM 手法の有用性と新規性.....	218
6.6 本研究の貢献.....	220
6.6.1 学術的な貢献.....	220
6.6.2 政策的な貢献.....	221
6.6.3 実務的な貢献.....	222
6.7 本研究の限界および課題.....	222
6.8 今後の研究と他分野への活用の可能性.....	223
第7章 結論.....	226
参考文献.....	229
謝辞.....	239
APPENDIX	241

図目次

図 1-1 用途別にみたロボットの種類.....	13
図 1-2 ロボットの技術開発分野（特許）の拡大.....	14
図 1-3 アーク溶接ロボットにおける技術の結合・融合の例.....	16
図 1-4 学術研究誌に掲載されたロボットに関する学術研究論文の推移.....	18
図 1-5 ロボットに関する特許の推移.....	21
図 1-6 登録特許庁別ロボット関連特許の動向.....	21
図 1-7 特許保有上位20機関別ロボット関連特許動向.....	22
図 1-8 研究分析の流れ.....	25
図 2-1 先行研究と本研究の関係.....	28
図 2-2 引用の定義.....	29
図 2-3 CONVERGENCE と FUSION の定義.....	34
図 3-1 MM 手法の知識結合分析への適用プロセス.....	45
図 3-2 クラスタ・ネットワーク分析の手順.....	48
図 3-3 引用関係の定義を利用した複数分野の分解（FACTORIZATION）.....	54
図 3-4 複数分野から単一分野への分解（FACTORIZING）.....	56
図 3-5 引用関係の定義を利用した複数分野の分解（FACTORIZING）の例.....	57
図 3-6 複数分野を3以上の個別分野に分解（FACTORIZING）する方法の例.....	57
図 3-7 引用行列上での複数分野の因数分解の方法.....	59
図 3-8 知識結合状態の定量化.....	61
図 3-9 特許ポートフォリオ、知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオの関係.....	64
図 3-10 単一分野のみ知識結合ネットワーク（2011-2015 年）.....	67
図 3-11 分解(FACTORIZING)後の単一分野間知識結合ネットワーク（2011-2015 年）.....	67
図 3-12 コサイン距離による知識結合ネットワーク.....	70
図 3-13 JACCARD による知識結合ネットワーク.....	70
図 3-14 共分類と引用関係による知識結合ネットワークの比較（1）.....	77
図 3-15 共分類と引用関係による知識結合ネットワークの比較（2）.....	77
図 4-1 ロボットに関する学術研究論文のクラスタ別シェアのトレンド.....	86
図 4-2 知識結合ネットワーク（クラスタ #1）.....	88
図 4-3 知識結合ネットワーク（クラスタ #2）.....	90
図 4-4 知識結合ネットワーク（クラスタ #3）.....	92

図 4-5 知識結合ネットワーク（クラスタ #4）	94
図 4-6 ロボット関連特許の分布（IPC コード クラス (C)）	119
図 4-7 ロボット関連特許の分布（IPC コード サブクラス (M)）	120
図 4-8 ロボット関連特許のクラスタシェアの推移	122
図 4-9 ロボットに関する特許のクラスタ別件数の推移	123
図 4-10 クラスタ #1 の知識結合ネットワークの変遷	126
図 4-11 クラスタ #2 の知識結合ネットワークの変遷	128
図 4-12 クラスタ #3 の知識結合ネットワークの変遷	130
図 4-13 クラスタ #4 の知識結合ネットワークの変遷	131
図 4-14 クラスタ #5 の知識結合ネットワーク（2014-2016 年）	133
図 5-1 機関の特許ポートフォリオ（上位 20 機関）	160
図 5-2 機関の知識結合ポートフォリオ（上位 20 機関）	161
図 5-3 機関のクラスタポートフォリオ（上位 20 機関）	162
図 5-4 特許ポートフォリオの機関間の相違（20 機関）	164
図 5-5 知識結合ポートフォリオの機関間の相違（20 機関）	165
図 5-6 クラスタポートフォリオの機関間の相違（20 機関）	166
図 5-7 特許ポートフォリオの機関間の相違（50 機関）	167
図 5-8 知識結合ポートフォリオの機関間の相違（50 機関）	167
図 5-9 クラスタポートフォリオの機関間の相違（50 機関）	168
図 5-10 中国の特許保有上位機関間の特許ポートフォリオ	169
図 5-11 中国の特許保有上位機関間の知識結合ポートフォリオ	170
図 5-12 中国の特許保有上位機関間のクラスタポートフォリオ	172
図 5-13 機関の技術ポートフォリオ間のコサイン距離（安川電機）	173
図 5-14 機関の技術ポートフォリオ間のコサイン距離（ソニー）	175
図 5-15 機関の技術ポートフォリオ間のコサイン距離（美的集団）	176
図 5-16 機関の技術ポートフォリオ間のコサイン距離（新松机器人）	177
図 5-17 その他の主要機関の技術ポートフォリオ間のコサイン距離	186
図 6-1 知識結合ネットワークの形成成長（図 3-9 再掲）	192
図 6-2 分野間（ハブ、コア、周辺、関連）の関係	193
図 6-3 企業のアライアンス検討マップ	207
図 6-4 特許ポートフォリオとクラスタポートフォリオの情報エントロピー（2011-2016 年）	212
図 6-5 特許ポートフォリオとクラスタポートフォリオの情報エントロピー（1991-2000 年）	213

表目次

表 1-1 各国によるロボット戦略.....	9
表 1-2 ロボットの分野別学術研究論文の推移.....	19
表 1-3 ロボットに関連する学術研究分野.....	19
表 1-4 ロボットに関する学術研究論文の数および学術研究分野数.....	20
表 1-5 省略記号と各特許庁名.....	21
表 3-1 共分類による知識結合ネットワーク（知識結合行列）の例.....	52
表 3-2 単一学術研究分野の学術研究誌のみに掲載された学術研究論文と分解後の引用行列.....	66
表 3-3 知識結合の指標の比較.....	69
表 3-4 WoS のデータセット間のクラスタ組み換え.....	75
表 3-5 DERWANT INNOVATION のデータセット間のクラスタ組み換え.....	75
表 4-1 クラスタごとの学術研究分野数の推移.....	82
表 4-2 ロボットに関する学術研究論文の学術研究分野別分布.....	83
表 4-3 ロボットの学術研究論文のクラスタリング結果.....	84
表 4-4 クラスタ # 1 における知識結合の動向（結合率（COR））.....	87
表 4-5 クラスタ # 2 における知識結合の動向（結合率（COR））.....	89
表 4-6 クラスタ # 3 における知識結合の動向（結合率（COR））.....	91
表 4-7 クラスタ # 4 における知識結合の動向（結合率（COR））.....	93
表 4-8 知識結合を形成する学術研究分野（クラスタ # 5～# 8）.....	95
表 4-9 クラスタ # 5～8 の関連分野.....	96
表 4-10 ネットワーク特徴量から抽出した学術研究分野の位置付け（クラスタ # 1）.....	97
表 4-11 学術研究分野の抽出結果（クラスタ # 1）.....	97
表 4-12 ネットワーク特徴量から抽出した学術研究分野の位置付け（クラスタ # 2）.....	99
表 4-13 学術研究分野の抽出結果（クラスタ # 2）.....	100
表 4-14 サブクラスタ # 2-1～3 のコア分野と周辺分野.....	101
表 4-15 ネットワーク特徴量から抽出した学術研究分野の位置付け（クラスタ # 3）.....	103
表 4-16 学術研究分野の抽出結果（クラスタ # 3）.....	103
表 4-17 学術研究分野の抽出結果（クラスタ # 4）.....	104
表 4-18 学術研究分野の抽出結果（クラスタ # 4）.....	105
表 4-19 学術研究分野のクラスタ別分布.....	106

表 4-20 クラスタ間で共通する知識結合を形成する分野 (1991-1995 年)	108
表 4-21 各クラスタの知識結合を形成する学術研究分野 (1991-1995 年)	109
表 4-22 クラスタ間で共通する知識結合を形成する分野 (2001-2005 年)	110
表 4-23 各クラスタの知識結合を形成する学術研究分野 (2001-2005 年)	111
表 4-24 クラスタ間で共通する知識結合を形成する分野 (2014-2016 年)	113
表 4-25 各クラスタの知識結合を形成する学術研究分野 (2014-2016 年)	114
表 4-26 ロボットに関する特許のクラスタ分析結果	121
表 4-27 クラスタごとの IPC コード数の推移(C)	121
表 4-28 クラスタ # 1 における知識結合の動向 (C)	125
表 4-29 クラスタ # 2 における知識結合の動向 (C)	127
表 4-30 クラスタ # 3 における知識結合の動向 (C)	129
表 4-31 クラスタ # 4 における知識結合の動向 (C)	131
表 4-32 クラスタ # 5 における知識結合の動向 (C)	133
表 4-33 技術開発 (特許) 分野の知識結合ネットワーク特徴量 (クラスタ # 1)	135
表 4-34 技術開発 (特許) 分野の位置付け (クラスタ # 1)	135
表 4-35 技術開発 (特許) 分野の知識結合ネットワーク特徴量 (クラスタ # 2)	136
表 4-36 技術開発 (特許) 分野の位置付け (クラスタ # 2)	136
表 4-37 技術開発 (特許) 分野の知識結合ネットワーク特徴量 (クラスタ # 3)	137
表 4-38 技術開発 (特許) 分野の位置付け (クラスタ # 3)	138
表 4-39 技術開発 (特許) 分野の知識結合ネットワーク特徴量 (クラスタ # 4)	139
表 4-40 技術開発 (特許) 分野の位置付け (クラスタ # 4)	139
表 4-41 技術開発 (特許) 分野の知識結合ネットワーク特徴量 (クラスタ # 5)	140
表 4-42 技術開発 (特許) 分野の位置付け (クラスタ # 5)	140
表 4-43 技術開発 (特許) 分野 (IPC サブクラス (M)) の位置付け	142
表 4-44 クラスタ別 IPC コード 分布 (クラス (C))	145
表 4-45 クラスタ間で共通する知識結合を形成する分野 (1991-2000 年)	146
表 4-46 各クラスタの知識結合を形成する分野 (IPC コード サブクラス (M)) (1991-2000 年)	147
表 4-47 クラスタ間で共通する知識結合を形成する分野 (2001-2005 年)	148
表 4-48 各クラスタの知識結合を形成する分野 (IPC コード サブクラス (M)) (2001-2005 年)	150
表 4-49 クラスタ間で共通する知識結合を形成する分野 (2014-2016 年)	152
表 4-50 各クラスタの知識結合を形成する分野 (IPC コード サブクラス (M)) (2014-2016 年)	154
表 5-1 特許保有上位 20 機関の略号と機関名	159
表 5-2 中国の特許保有主要企業の知識結合ネットワーク (2011-2016 年) の比較	177

表 6-1 ロボットの学術研究と技術開発（特許）の知識結合ネットワークの特徴比較.....	195
表 6-2 AROADMAP FOR US ROBOTICS 2013 EDITION の研究開発と応用分野.....	199
表 6-3 技術開発（特許）分野の知識結合ネットワーク特徴量（クラスタ # 7）	205
表 6-4 技術開発（特許）分野の位置付け（クラスタ # 7）	206
表 6-5 図 6-3 および 6-4 の機関の分類.....	211
表 6-6 知識結合を把握するための指標とその意味.....	216
表 6-7 構成技術が広く、応用分野が多様な製品または技術の例.....	225

第1章 序論

1.1 問題意識・背景

1.1.1 ロボットへの期待と現実との乖離

ロボットは、ハイテク分野の重要な一つとして、わが国のみならず、主要国において、ロボット戦略を策定し振興（表1-1）を図っており、国際競争力の維持・発展のための重要なハイテク産業の1つとなっている。ロボットは第4次産業革命が進行中と言われる中、IoT（Internet of things：モノのインターネット）、人工知能（Artificial Intelligence（AI））との融合により更なる進展が見込まれるとともに、少子高齢化社会到来に伴う深刻な人手不足といった社会面のニーズの高まりもあいまって、自動車やエレクトロニクスなどの製造業の工場内の自動化のための産業用ロボットから、食品加工、流通・物流などでの自動化や生産性向上の他、農業、橋梁、トンネル、大規模構造物などの大規模インフラの建設やメンテナンス、医療・ヘルスケア分野での利活用などサービス分野の生産性向上や人手不足対策、さらには生活の質（QOL）を高めるための家庭・生活場面での応用が期待されている。

表 1-1 各国によるロボット戦略

国	ロボット戦略名	発表年
USA	National Robotics Initiative advanced Manufacturing Partnership	2011
EU	Rpbotics project Horizon 2020	2015
フランス	France Robotics Initiatives	2013/2014
日本	新ロボット戦略	2015
韓国	Next-Gen Industrial Robotization	2015
中国	中国製造2025 Robotics technology roadmap in 13th Five-Year Plan(2016-20)	2015

そのような高い期待にもかかわらず、そうした分野へのロボットの導入は期待ほど進んでいない。日本ロボット工業会が2001年に、2010年の日本の医療・福祉分野での市

¹ WIPO Economic Research Working Paper No. 30 (2015)[98]、内閣府「ロボットによる社会変革推進会議」第1回経済産業省資料[124]より作成。

場規模を 2,600 億円、家庭向けなどのサービス分野を 1.5 兆円と予測した[37]が、2013 年に経済産業省が発表した資料[106]では、2012 年のサービス分野でのロボット市場が約 600 億円（製造分野は、約 6,600 億円）とあり、製造産業における産業ロボットの導入と比べると大きな差があり、期待よりも普及が進んでいないのが現状である。

期待と現実とにこれだけの乖離があるのは、ロボット技術と社会ニーズとの間に何らかの大きなギャップ（いわゆる死の谷）があり、それが障害になってロボットが期待ほど普及しないのではないかが最初の問題意識である。

その乖離は、技術のみに帰するのではなく、法制度、安全、コスト、慣習を含めた社会システムなど様々な要因が考えられる。しかしながら、特区制度や補助金などで支援し、米国高等研究計画局（DARPA: Defence Advanced Research Projects Agency）が、2013 年に競技形式の DARPA Robotics Challenge を開催するなど、ロボットの普及に向けた研究開発が行われていても、壁を乗り越えることは簡単ではなく、社会が受容できるほどには、技術的にも依然乖離が存在すると考えられる。

最近になってようやくこの乖離を乗り越えつつある統計が、国際ロボット連盟（IFR: International Federation of Robotics）から発表された。国際ロボット連盟が 2018 年に発表した統計によれば[34]、サービス分野のロボットが 2017 年に前年度比 85%と急増し、109,500 台、66 億米ドルとなり、2018-2021 年は、年率 18%増と予測している。市場別にみると、物流（Logistics）が前年比 162%伸び、売上高が約 24 億米ドルで最もシェアが多くなり、次が、医療用ロボットで、19 億米ドル、搾乳ロボットを中心とするフィールドロボットが 9.66 億米ドル、個人用サービスロボットが 21 億米ドル、掃除機など家庭用ロボットが 16 億米ドルといずれも前年比 25-27%増し、人協働ロボットや AI 活用により、サービス分野向けのロボットについても離陸しつつあるとしている。また、農業用ロボット（栽培、収穫など）の販売台数は 520 台と少ないものの、市場に根付きつつあるとしている。一方、産業用ロボットは、2017 年は 30%増（381,335 台、162 億米ドル）し、過去 5 年間（2013-2017 年）で 114%増加、2018-2021 年は、年率 14%増を予測している。

ロボットは、機械工学、制御システム、電子工学などの様々な先端技術を融合しながら開発されてきているが、ロボットはロボットの機能を発揮するための技術開発とともに、ロボットを導入する分野へ応用・適用するための応用技術開発、用途開発を伴うことを特徴とする。そのため、ロボットの基盤技術と応用技術とが結合・融合することが必要となる。異なる学術研究分野間、技術開発分野（特許）間での知識や技術の結合・融合がイノベーションを促進する重要な要素であることに着目し、技術間の結合・融合

の状態が研究開発の進展や社会実装、実用化に影響を与えると考え、技術の結合・融合の構造やメカニズムを解明することが、サービス分野や新しいアプリケーションへのロボット導入の促進に貢献すると考えた。

1.1.2 技術の結合・融合によるイノベーションの進展

インターネットやデジタル技術の普及により、技術の境界がますます不明確となる一方、スマートフォンのように新しい製品・サービスが異なる技術の結合・融合から生まれることから、「技術的収れん (Technology convergence)」あるいは、「技術的融合 (Technology fusion)」といった概念に関するイノベーション研究が 2000 年代以降行われている (C. Curran[19]、S. Jeong et al.[38]、B. Yan et al.[91]など)。Technology convergence が、イノベーションを促進し、新製品・サービスを開発する重要な要素と認識されるようになった (Hacklin et al., 2009[32], Choi et al., 2015[13]など)。

“Convergence”に関しては、定義、特徴の解明、計測、特徴量の抽出などに関する研究などがなされているが、未だ、日本語の用語についても定まったものはないなど途上の学術研究分野である。特に、ロボットのように多様な技術の複合体で形成されているような3つ以上の複数分野間の Technology convergence についての研究はほとんどなされていない (J. Kim, S. Lee, 2017[45])。シュンペータがイノベーションを「新結合」²と定義したように、異なる学術研究 (Science) および技術開発 (Technology) 間の結合がイノベーションを促進する重要な要素であることに着目し、ロボットに関する学術研究 (Science) と技術開発 (Technology) において、分野間での結合・融合 (Convergence) を分析することにより、ロボット分野のイノベーション進展を解明することを目指すこととした。

最近の学術研究 (Science) と技術開発 (Technology) の進展のスピードはますます早くなり細分化され、異なる分野間の融合や新たな分野が出現や成長しており、必要な研究開発をすべて単独で行うことは難しく、いわゆるオープンイノベーションが不可欠になっている。したがって、異なる学術研究分野間、技術開発分野 (特許) 間の結合・融合を把握することが、研究開発面、ビジネス面、さらには国や地方自治体のイノベーション政策の企画立案において、極めて重要になっている。また、研究開発から生まれる

² シュンペータは、イノベーションを「新結合」とし、イノベーションには、1. 新しい財貨の生産、2. 新しい生産方法の導入、3. 新しい販売先の開拓、4. 原料あるいは半製品の新しい供給源の獲得、5. 新しい組織の実現の5類型があるとしたが、本研究では、学術研究 (science) と技術開発 (technology) における結合を対象に研究を進めた。

特許などの知的財産は、企業にとっては事業の根幹をなすことから、他者がどのような技術を持ち、競合相手になるのか、戦略的パートナーとしてアライアンスできるのかを判断することなど技術経営戦略策定の鍵となる。しかし、重要性は増しているものの、学術研究部門や民間部門の研究者だけでなく、企業の新製品やサービスの企画立案者や開発者、政策立案者にとっても、結合・融合が進む技術の動向を理解することはますます困難になっている。

本研究の成果が、ロボットに関する研究開発の推進、イノベーション政策の企画立案、そして、企業の競合分析や M&A、企業間アライアンスなどの技術経営戦略策定の支援に活用され、ロボットが人手不足の解消や QOL の向上など社会的課題解決に資することを目指して、本研究を進めた。

1.2 ロボット技術の特徴

1.2.1 ロボットの定義と本研究で対象とするロボット

ロボットの定義については、ISO、JIS 等において、ロボットおよびロボティックデバイスの用語 (JISB0143/ISO 8373) [127]、パーソナルケアロボットの安全性に関する規格 (ISO13482) [108]、手術ロボットが ISO と IEC の合同作業グループで医用電器機器としての規格 (IEC/TC62,) [126]があるが、一般的にコンセンサスを得られた定義は存在しない[105]。2006 年に発表された経済産業省のロボット政策研究会報告書[109]では、ロボットを「センサー、知能・制御系、駆動系の3つの要素技術を有する、知能化した機械システム」として広く定義した。この定義によれば、ドローンや自動運転車なども含まれることとなる。

米国連邦政府の NSF (National Science Foundation) が、2011 年に、ロボットの研究開発プロジェクトである NRI (National Robotics Initiative) の設立のきっかけとなった A Roadmap for US Robotics[14]では、製造業、医療・ヘルスケア、サービス、宇宙、軍事の5つの分野についてのロボットに関する研究開発と今後の方向をまとめているが、宇宙、軍事も含まれるため、遠隔操作の探査車や無人飛行機までも含まれている。

特許庁のロボットの技術動向調査[113]では、マニピュレータ技術を持つロボット、医用およびリハビリテーション用ロボットを対象にしており、ドローンや自動運転車は含まれていない。また、センサーはロボットの機能として重要な技術であるが、ロボット以外にも使用されることから含めずに調査を行なっている。

本研究では、学術研究論文は、Clarivate Analytics が提供する Web of Science のデー

データベースから、特許は、Derwant Innovation から、クエリ “robot*” により抽出している。したがって、robot の用語が学術研究論文や特許の中に含まれない場合にはロボットを対象とした学術研究あるいは技術開発であっても抽出されないこととなる。しかしながら、本研究ではロボットに関するあらゆる研究や技術を網羅することではなく、主要なロボットのアプリケーションごとの技術の結合・融合についての分析を対象とするので、学術研究論文の執筆者や特許出願者がロボットを対象とした学術研究あるいは特許と認識していれば、“robot” の用語を用いると考え、クエリ “robot*” で抽出された学術研究論文および特許をロボット分野に関する学術研究論文、特許として分析を進めることとした。

図 1-1 は、特許庁技術動向調査[113]、経済産業省ロボット政策研究会[109]、内閣官房ロボット新戦略[123]などの資料を元に、ロボットの用途別にみたロボットの種類をまとめたものである。図 1-1 のロボットは、これらの文献によると、産業用ロボット、ペットロボット、家庭用掃除ロボット、手術ロボットなど実用化されているか、研究開発が行われているロボットであり、学術研究論文への投稿か特許出願がなされていると推察されることから、学術研究論文、特許から抽出したデータに基づき研究分析した本研究のロボットは概ね図 1-1 の分野を含むと考えられる。

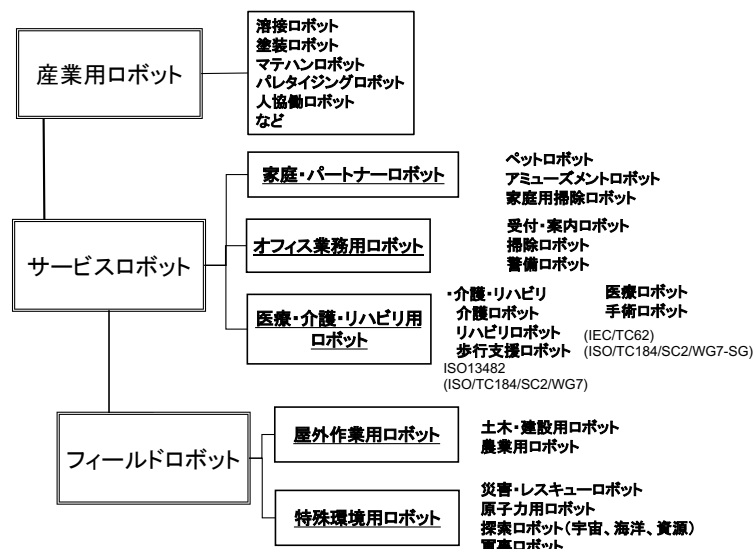


図 1-1 用途別にみたロボットの種類

しかしながら、automation machine（自動機械）、Welding equipment（溶接装置）など、“robot” の用語が用いられていないため、ロボットに関する学術研究論文あるいは特許として抽出されていない可能性がある。また、広義のロボットの定義ではドロー

ンや自動運転車なども範疇に入るが、本研究では、主要なロボットのアプリケーションごとの技術の結合・融合の分析を対象としているので、“robot*”で抽出できる学術研究論文と特許に限ることとした。

1.2.2 関連技術の多様化・拡大と結合・融合の進展

ロボットは、IoT や AI といった新しい技術を取り入れてロボットの機能を高度化するとともに、ロボットの適用分野やプロセスのニーズや課題に合致するための用途開発や応用開発が伴い、ロボット技術の高度化と新しい応用分野（フロンティア）の開拓の両方を取り入れて実装・実用化し新市場の創造とともに成長するという特徴を有する。すなわち、ロボットは多様な技術の複合体で成り立っており、ロボットの機能を発揮させる要素技術および基盤技術とロボットの応用分野における適用技術の結合・融合により社会実装されていくというのがロボット特有の特徴である。

ロボットの技術的変遷を、ロボット技術に関する特許動向により概観する。個々の特許は、その特許が属する特許分類が割り付けられて登録され、特許の技術が複数の特許分類にわたる場合は、1つの特許に複数の特許分類が割り付けられている。したがって、その割り付けられている特許分類の動向を見ることで、ロボットがどのような技術を取り入れて研究開発されているかをみることができる。

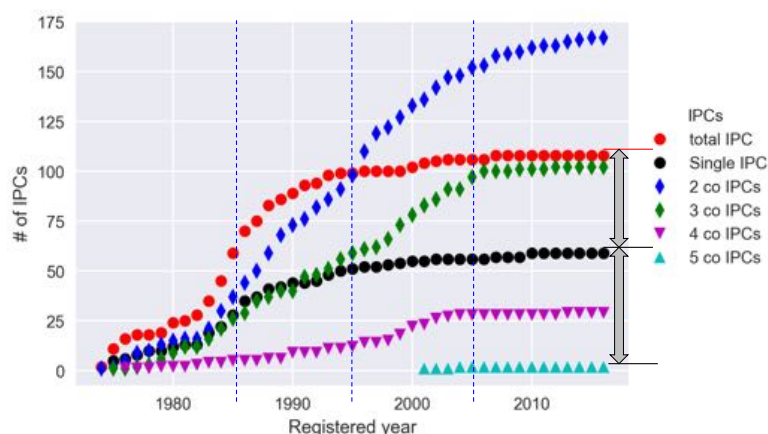


図 1-2 ロボットの技術開発分野（特許）の拡大

図1-2は、ロボット関連技術の特許に割り付けられた IPC コード（クラス（C））の

数ごとに IPC コードの種類の累積の推移を示す³。推移を年代ごとにみると、1980 年代半ば以前の新規技術を盛んに取り入れたロボットの黎明期、1980 年代半ばから 2000 年代半ばの新規技術（新たな IPC コード）の導入と技術間の結合・融合の両方が進行した時期、および 2000 年代半ば以降の既存技術（既存 IPC コード）間の結合・融合の時期の大きく 3 つの期間に分類できる。新規技術の導入と技術間の結合・融合の両方が進行した 1980 年代半ばから 2000 年半ばまでの期間は、さらに新規技術（新たな IPC コード）の増加した 1990 年代半ばまでと、それ以降の新規技術の増加がほとんどなくなった 2 つの期間に分けることができる。

1990 年代半ばまでは、ロボット技術開発に新しい技術（新たな IPC コード）を導入し、IPC コードの数が増加していたが、1990 年代半ば以降は、ロボットが新たな技術を取り入れることよりは、技術の組み合わせによる開発が継続していることを表している。2000 年代半ば以降になると、新たな IPC コードの技術を取り入れるよりも、既存の IPC コード間の組み合わせでロボットの新規技術開発が行われていることを示している。

また、単一の IPC コードが割り付けられた特許の IPC コードの数（図 1-5 の黒点）に対して、全体の特許の IPC コードの数（図 1-5 の赤点）は、ほぼ倍の数で推移しており、これは、単独ではロボット技術の特許としての登録はないが、技術が組み合わせることでロボット技術の特許として登録されている技術（IPC コード）がほぼ同数あることを示しており、これからもロボットがロボットの機能を発揮する技術と応用分野の技術など様々な技術の複合により成り立っていることが伺える。

1.2.3 技術の結合・融合の具体例 — 溶接ロボットを事例として

図 1-3 は、アーク溶接ロボットが、ロボット技術と応用分野の溶接技術との結合・融合により成り立っている事例を示す。アーク溶接ロボットは、予め計画した位置に正確に溶接することが求められるが、それを実現するためには、溶接技術の原理を利用して、ロボットが溶接すべき位置でアークを発生する必要がある。アークの芯線の先端がワークに接触した時に電流が流れることを利用して、タッチセンサーとして機能させることにより、ロボットはアークの芯線の先端がワークに接触した瞬間をタッチセンサー信号

³ "Single IPC"とは、特許に単一の IPC コードが割り付けられた特許の IPC コードの種類の数。"2 co IPCs"とは、特許に 2 種類の IPC コードが割り付けられた特許の IPC コードのペアの種類数を表す。3 co IPCs 以降は、IPC コードの組合せの種類数を表す。Total IPC は、これらの IPC コードを単一の IPC コードに分解した場合の総数を表す。

として受け取り、その時のロボットの各関節の駆動モータの位置情報から、ロボットの先端の位置を逆算する。そして、溶接すべき位置と逆算した位置の差を補正するようにロボットを駆動させることで、溶接すべき点でアーク溶接を正確に実行できることとなる。

このように、ロボットは、自らを制御するロボット技術と応用分野の技術を組み合わせ、結合・融合することにより、具体的なアプリケーションを実行できることとなる。

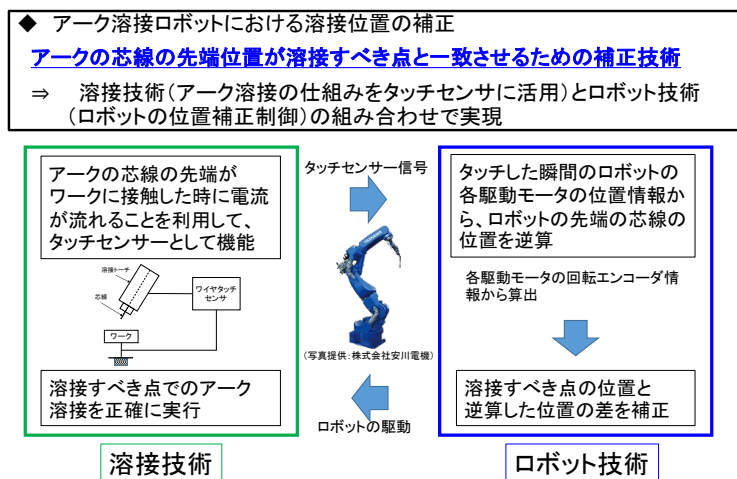


図 1-3 アーク溶接ロボットにおける技術の結合・融合の例

1.3 研究目的

1.2で述べたように、ロボットの技術的な特徴は、多様な技術の複合体で成り立っており、アーク溶接ロボットの事例のように、ロボットの機能を発揮させる要素技術および基盤技術とロボットの応用分野における適用技術の結合・融合により成り立っていることである。また、1.1において、サービス分野へのロボットへの期待と現実との乖離が存在していることを指摘した。

そこで、ロボットが応用分野の適用技術を含む多様な技術の結合・融合で成り立っていることに着目し、ロボットを用いたサービスを適用しようとする分野において、ロボットの導入、社会実装を妨げているのは、アプリケーションの実現のために必要な多様な技術の結合・融合の遅れが大きな要因ではないかとの問題意識から出発する。そして、主要なアプリケーションごとに、技術の結合・融合の構造や特徴を明らかにすることによって、ロボット分野の研究開発、技術開発における課題を特定し、技術の結合・融合を伴うイノベーションを促すための施策の企画立案、大学・機関の研究企画、企業の競

合分析や M&A、企業間アライアンスなどの技術経営戦略策定などの支援に貢献できないかとの動機から、本研究に取り組むこととした。

本研究の目的を、「入手できる学術研究論文および特許のデータに基づき、学術研究 (Science) と技術開発 (Technology) における分野間の結合・融合（以下、両者を合わせて、「知識結合」と呼ぶ。）を軸として、ロボット分野におけるイノベーションの進展の重要な特徴を明らかにすること」とする。具体的には、マクロ、メソ、ミクروسケール、すなわち、主要なアプリケーションおよび機関の単位で、知識結合を定量的に把握し特徴量を抽出する手法を開発するとともに、開発した手法を、ロボットに関する学術研究論文および特許データに適用して、ロボット分野における知識結合の状況に関する知見を抽出し、専門家の評価も得て、ロボット分野におけるイノベーションの重要な特徴を明らかにし、知識結合の観点からの政策立案、研究企画、技術経営に資する知見とする。

そして、

- ① 本研究で提案した手法が、ロボット分野のアプリケーションレベルでの知識結合の構造、特徴を捉えているか？
- ② 本研究で提案した手法が、知識結合を軸とした研究開発の進捗や社会実装の度合いを把握できているか？
- ③ 複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合に、本研究で提案した手法が、機関間の相違を把握できているか？

との3つのリサーチクエスチョンを設定し、これらのリサーチクエスチョンに対して応えるため、以下の（１）～（３）の手順で研究を進める。

- （１） ロボット分野のアプリケーションレベル（マクروسケール/メソスケール）で知識結合を定量的に把握する手法を提案する。（第３章）
- （２） 知識結合からみたロボット分野のイノベーションの進展の特徴を解明し、研究開発の進捗、社会実装の現状と比較検討する。（第４章）
- （３） ロボットのように複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合の機関間の相違を計測できる新たなポートフォリオを提案し、競合分析や M&A、企業間アライアンスなど企業の技術経営戦略策定を支援する手法を提案する。（第５章）

1.4 ロボットをめぐる最近の状況

1.4.1 ロボットに関する学術研究論文および特許の動向

(1) ロボットに関する学術研究論文

ロボットに関する学術研究論文数は、図1-4のように、2000年以降急増している⁴。学術研究分野別に学術研究論文の推移をみると⁵（表1-2）、1961-1980年には、約9割が工学分野であったが、徐々に、医療・ヘルスケア分野の学術研究論文が増加し、2011-2016年には、工学分野が62.5%、医療・ヘルスケア分野が23.9%と、医療・ヘルスケア分野のウェイトが約1/4になるほど医療・ヘルスケア分野でのロボットに関する研究が盛んに実施されている。

4工学分野（Engineering、Robotics、Computer Science、Automation & Control Systems）と2医学分野（SurgeryとUrology & Nephrology）で全体の60%以上を占め、それ以外の分野は140余りの学術研究分野に細分化されているので、表1-3のとおり、4工学分野を主要工学分野（Major engineering sectors）、4工学分野以外の工学分野をその他の工学分野（Other engineering sectors）、SurgeryおよびUrology & Nephrologyの2医学分野を主要医学分野（Major medical sectors）、2医学分野以外の医学分野をその他の医学（Other medical sectors）とし、バイオテクノロジー（Biotechnology sectors）、純粋科学（Pure science）、社会科学（Social science）、文化関連（Culture related issues）の8つのカテゴリに分けた。

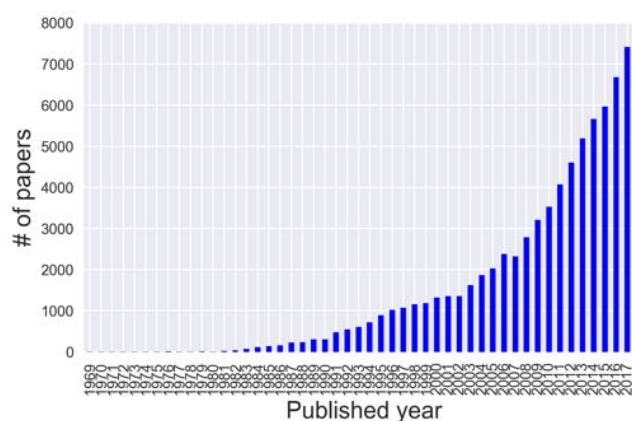


図 1-4 学術研究誌に掲載されたロボットに関する学術研究論文の推移

⁴ Clarivate Analytics が提供する Web of Science から、クエリ “robot*” で抽出した学術研究論文数

⁵ 各学術研究論文に割り付けられている学術研究分野は、正確には、掲載された学術研究誌の学術研究分野であり、学術研究論文の分野ではないことに留意する必要がある。

表 1-2 ロボットの分野別学術研究論文の推移

year	Engineering	Robotics	Computer Science	Automation & Control Systems	Other Eng	Eng. Total	Surgery	Urology & Nephrology	Other Med	Med. Total	Bio. Tech	Others	Total
1961-1980	26 39.4%		21 31.8%	4 6.1%	8 12.1%	59 89.4%			1 1.5%	1	0	6 100.0%	66
1981-1990	689 26.2%	461 17.5%	348 13.2%	385 14.6%	389 14.8%	2272 86.3%	3 0.1%		73 2.8%	76 2.9%	35 1.3%	250 9.5%	2633 100.0%
1991-2000	3500 21.5%	3183 19.6%	3137 19.3%	2775 17.1%	1386 8.5%	13981 85.9%	169 1.0%	23 0.1%	663 4.1%	855 5.3%	261 1.6%	1178 7.2%	16275 100.0%
2001-2010	6513 17.6%	6063 16.4%	6096 16.5%	4260 11.5%	3335 9.0%	26267 71.0%	1430 3.9%	1215 3.3%	3785 10.2%	6430 17.4%	808 2.2%	3484 9.4%	36989 100.0%
2011-2016	9397 17.9%	7046 13.4%	5828 11.1%	4662 8.9%	5899 11.2%	32834 62.5%	2875 5.5%	2480 4.7%	7224 13.7%	12579 23.9%	883 1.7%	6251 11.9%	52548 100.0%

Unit: Upper row: the number of papers on Robotics/Lower row: %)

表 1-3 ロボットに関連する学術研究分野⁶

Category	Sectors
Major Engineering sectors	Engineering
	Robotics
	Computer Science
	Automation & Control Systems
Other Engineering Sectors	Instruments & Instrumentation, Materials Science, Operations Research & Management Science, Optics, Acoustics, Imaging Science & Photographic Technology, Environmental Sciences & Ecology, Metallurgy & Metallurgical Engineering, Remote Sensing, Astronomy & Astrophysics, Construction & Building Technology, Thermodynamics, Transportation, Spectroscopy, Polymer Science, Energy & Fuels, Mining & Mineral Processing, Architecture, Microscopy, Food Science & Technology, Mechanics, Sport Sciences, Telecommunications, Information Science & Library Science
Major Medical Sectors	Surgery
Other Medical & Healthcare Sectors	Urology & Nephrology
	Neurosciences & Neurology, Oncology, Rehabilitation, Cardiovascular System & Cardiology, Obstetrics & Gynecology, Radiology, Nuclear Medicine & Medical Imaging Orthopedics, Otorhinolaryngology, Respiratory System, General & Internal Medicine, Gastroenterology & Hepatology, Physiology, Research & Experimental Medicine, Pharmacology & Pharmacy, Medical Informatics, Pediatrics, Medical Laboratory Technology, Health Care Sciences & Services, Anesthesiology, Pathology, Transplantation, Dentistry, Oral Surgery & Medicine, Psychiatry, Geriatrics & Gerontology, Endocrinology & Metabolism, Veterinary Sciences, Ophthalmology, Nursing, Public, Environmental & Occupational Health, Immunology, Anatomy & Morphology, Legal Medicine, Hematology, Virology, Dermatology, Rheumatology, Infectious Diseases, Medical Ethics, Parasitology, Mycology, Tropical Medicine, Allergy, Substance Abuse, Emergency Medicine, Toxicology, Audiology & Speech-Language Pathology, Integrative & Complementary Medicine, Life Sciences & Biomedicine - Other Topics
Biotechnology Sectors	Biochemistry & Molecular Biology, Biophysics, Biotechnology & Applied Microbiology, Genetics & Heredity, Mathematical & Computational Biology, Cell Biology, Microbiology, Evolutionary Biology, Developmental Biology, Marine & Freshwater Biology, Reproductive Biology
Pure Science	Mathematics, Chemistry, Physics , Meteorology & Atmospheric Sciences, Electrochemistry, Geochemistry & Geophysics, Entomology, Geography, Nuclear Science & Technology, Crystallography, Paleontology, Plant Sciences, Physical Geography, Geology, Mineralogy, Science & Technology-Other Topics
Social Science	Psychology , Communication, Social Issues, Sociology, Anthropology, International Relations, Government & Law, Mathematical Methods In Social Sciences, Biomedical Social Sciences, Women's Studies, Archaeology, Area Studies, Cultural Studies, History, Urban Studies, Biodiversity & Conservation, Behavioral Sciences, Business & Economics, Education & Educational Research, History & Philosophy of Science, Nutrition & Dietetics, Public Administration, Philosophy, Family Studies, Social Sciences-Other Topics,
Nature Science	Fisheries, Forestry, Oceanography, Agriculture, Water Resources, Zoology
Culture related issues	Art, Film, Radio & Television, Linguistics, Music, Religion, Theater, Arts & Humanities-Other Topics

⁶ 太字は、学術研究論文数上位 20 の学術研究分野を表す。

表 1-4 ロボットに関する学術研究論文の数および学術研究分野数

Overlapped Scientific sectors	Papers (all)			Papers (at least 10 papers per sector)		
	# of all papers	Share of papers	# of sectors	# of papers (>=10/sector)	Share of papers	# of sectors
1 sector	40,556	51.0	127	40,354	50.7	80
2 sectors	25,362	82.8	130	24,589	81.6	85
3 sectors	12,709	98.8	121	12,255	97.0	58
4 sectors	892	99.9	91	770	98.0	28
5 sectors	65	100.0	30	58	98.0	15
Total	79,584	100.0	143	78,026	98.0	121

表 1-3 の通り、143 の学術研究分野が抽出されたが、これらは正確には学術研究論文の分野ではなく、学術研究論文が掲載された学術研究誌の学術研究分野である。そのため、表 1-4 のとおり、学術研究誌に割り付けられた学術研究分野数ごとの、ロボットに関する学術研究論文の件数と学術研究分野数をまとめたところ、143 のうち、127 (10 以上の学術研究論文では、80 分野) の学術研究分野が、単一の分野の学術研究誌に掲載された学術研究論文であった。また、Web of Science (以下、WoS と略す。) で、“robot*” のクエリにより抽出したので、1 分野あたりの論文数が少ない学術研究分野は、ロボットに関する学術研究分野と言えるとは限らないため、1 分野に 10 以上掲載された学術研究論文に限ると、その合計は学術研究分野が 121 分野となり、学術研究論文数では、学術研究分野の情報が付与されている学術研究論文の 98.0% を占める。

(2) ロボットに関する特許の動向

図 1-5 は、各国の特許庁、WIPO、および欧州特許庁 (EPO) に登録されたロボット関連の特許の動向を示す⁷。学術研究論文数と同様に、ロボットに関する特許件数についても急増しており、特に、2000 年以降の特許件数の伸びが著しい。登録特許庁別にみると (図 1-6)⁸、米国および欧州諸国のロボット関連特許は、1980 年代のロボット関連特許の総数の 90% 以上を占めていたが、日本の産業用ロボット産業が急速に成長した 1990 年代には、日本が過半を占めるようになった。2000 年以降になると、中国特許庁に登録されるロボット関連の特許が急速に増加しており、2014 年から 2016 年までの間では、全世界のロボット関連特許総数の約 65% を占めるようになった。

⁷ Cravates Analytics の Derwant Innovation から、クエリ “robot*” で抽出した特許件数

⁸ 表 1-5 に、図 1-6 に使用した省略記号の特許庁の名称を示した。

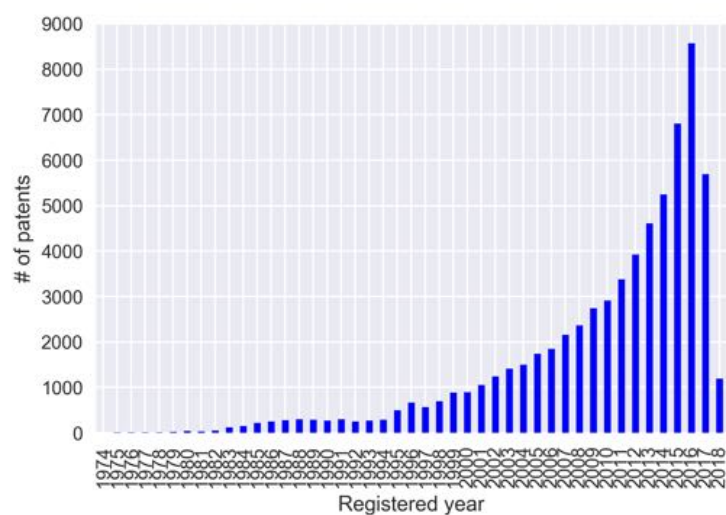


図 1-5 ロボットに関する特許の推移

表 1-5 省略記号と各特許庁名

Abbreviation	Name of Patent Offices
CN	SIPO (State Intellectual Property Office of the P.R.C)
US	USPTO (United States Patent and Trademark Office)
JP	JPO (Japan Patent Office)
WO	WIPO (World Intellectual Property Office)
KR	KIPO (Korean Intellectual Property Office)
EP	EPO (European Patent Office)
DE	German Patent Office

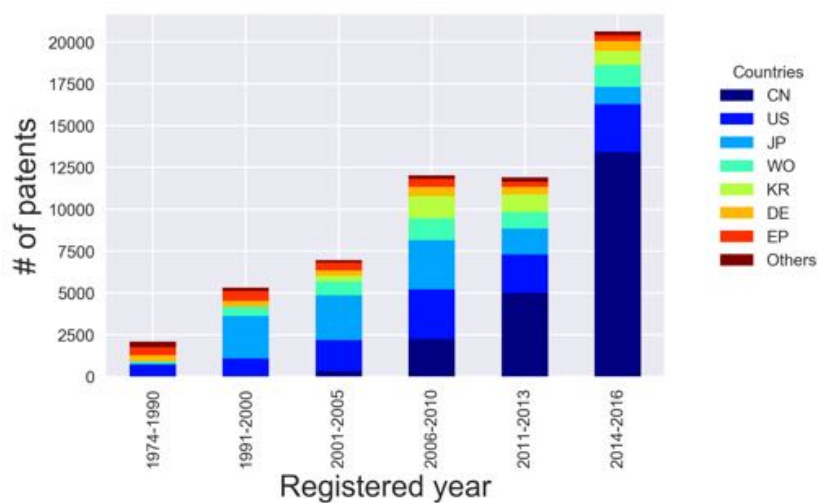


図 1-6 登録特許庁別ロボット関連特許の動向

図1-7は、特許保有上位20機関によるロボットに関する特許件数の推移を示す。ファナック、安川電機、本田技研工業、トヨタ自動車、川崎重工業、パナソニック、三菱電機、デンソー、セイコーエプソン、ソニー、東芝の日本企業の他、大手産業用ロボットメーカーであるABBおよびKUKA、そして、韓国企業のサムソンとLG Electronics、手術用ロボット Da Vinci の開発・販売を行っている Intuitive Surgical Inc.、家庭用掃除ロボットの開発・販売を行っている iRobot、そして、中国からは、中国国家電網 (State Grid Corporation of China) と大学としては唯一上海交通大学 (University of Shanghai Jiaotong) がトップ20に入っている。中国国家電網[86]は、中国の電力配送会社であるが、世界最大の電力会社であり、特許取得件数では、2017年時点で、ファーウェイを抑え、中国で第1位である。ロボットに関しては、送電線の検査ロボットを開発し、自ら活用している。

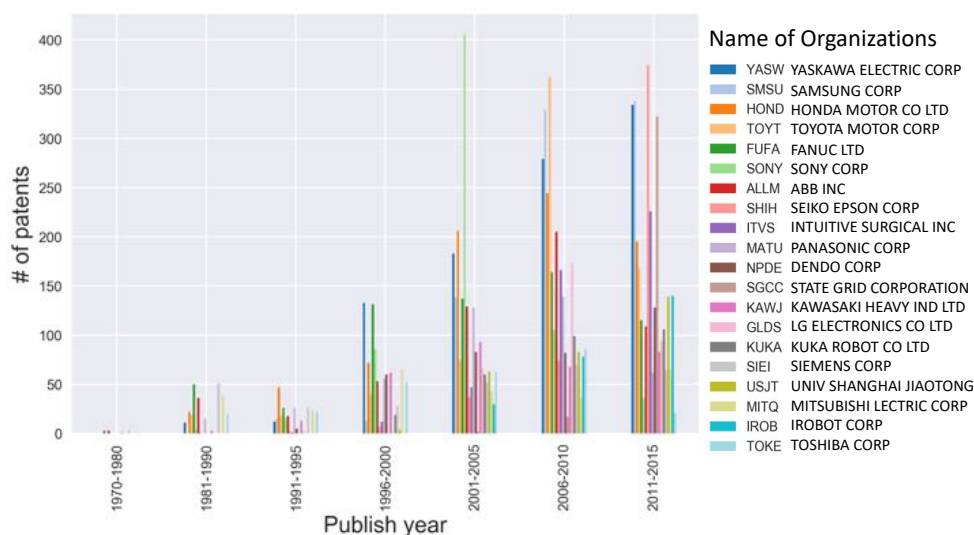


図 1-7 特許保有上位20機関別ロボット関連特許動向

安川電機は1980年代からロボットに関する特許を着実に増加させており、現在、ロボットに関する最大の特許保有者である。トヨタ自動車と本田技研工業は、2006年から2010年にかけてロボットに関する特許を集中的に登録し、2011年から2015年にかけても登録を継続している。2005年、愛知県で開催された万国博覧会ではトヨタ自動車や本田技研工業を含む多くのロボットが展示されており、特許登録に反映したものと考え

られる。ソニーは 2001 年と 2005 年の間に 400 件以上のロボットに関する特許を登録していたが、それ以来、劇的に特許登録を減らした。ソニーが 2006 年にペットロボットである AIBO の事業を停止したことが原因と考えられるが、2017 年に新しい AIBO ロボットの販売を再開しており、再びロボットに関する特許登録が増加してくる可能性がある。

サムソンは 2000 年代から急速にロボットに関する特許を登録し、現在ではロボットに関する 2 番目に大きな特許保有者である。サムソンは、2009 年にロボット掃除機を発売し、2014 年以来、ロボット技術の投資を加速しており、サムソンのホームページ[75]によればロボティクスにも力を入れているとある。産業用ロボットメーカのファナックと ABB は、ロボットに関する特許を着実に登録し続けているが、中国の家電メーカーである美的集団 (Midea Group) に 2016 年に買収された KUKA は、この期間を通じてロボットに関するそれほど多くの特許を登録していない。

シーメンスは、エレクトロニクス、デジタル化、自動化の分野のグローバルな企業であり、シーメンスのホームページによれば[80]、エネルギー、ヘルスケア、産業、インフラストラクチャおよび都市、株式投資、および金融サービスの 6 つの事業セグメントに取り組んでおり、デジタルファクトリー事業部は、統合ハードウェア、ソフトウェアおよび技術ベースのサービスを提供し、ロボット工学に関する研究開発を実施している。

中国国家電網 (State Grid Corporation of China) は、2011 年から 2015 年にかけて、ロボットに関する特許登録を急増させており、上海交通大学 (University of Shanghai Jiaotong) は、大学のウェブサイト[76]によると、28 の学校/学部、21 の研究機関、13 の関係病院、2 の関係医学研究所などを有し、16,195 人の学部生および 30,270 人の大学院生を擁しており、2000 年代からロボットに関する特許を急拡大してきた。

1.5 本研究の枠組み

本研究の目的を達成し、リサーチクエスションに応えるために、第 2 章において、(1) クラスタ・ネットワーク分析、(2) 知識結合、(3) ロボットのイノベーションに関する先行研究の検討を通じて、先行研究では、クラスタ・ネットワーク分析により、技術の結合・融合や技術の類似性や距離を計測し、萌芽分野や急成長技術を特定する先行研究や情報通信、バイオ、ナノテクなど色々な分野で分析事例があるものの、技術の結合・融合に関する研究は、俯瞰的、概括的な分析に留まっており、本研究の第 3 章で開発し

提案した手法（「MM 手法（Module-based Mining Method）⁹⁾」と呼ぶ。）は、細かい粒度で知識結合ネットワークの構造やイノベーションの進展状況を定量的に把握する手法として優位であることをまとめている。

第3章以下が、本研究の研究内容であり、全体の研究フローを図1-8に示す。

第3章では、本研究の分析の基礎となる MM 手法とそれを構成する個々の分析手法の開発と実験を通じた評価をまとめている。具体的には、クラスタ・ネットワーク分析による引用ネットワークの形成とのカテゴリ化、ノードに複数の分野が割り付けられている場合に、単一分野間ネットワークに分解（Factorizing）する手法、知識結合ネットワークの構築とネットワーク指標による特徴量の抽出とコア/周辺構造の考え方に基づくハブ、コア、周辺、関連の各分野を抽出する方法、特許ポートフォリオに加え、新たに「知識結合ポートフォリオ」と「クラスタポートフォリオ」を導入し、複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合であっても、技術ポートフォリオに、機関間の相違がより粒度細かく計測できる手法からなる。

第4章では、第3章で開発した MM 手法を、学術研究論文と特許の両方に適用し、クラスタ・ネットワーク分析によりカテゴリ分けしたクラスタごとに知識結合ネットワークを構築し、知識結合ネットワークの特徴量を計測している。その特徴量に基づき、ハブ分野、コア分野、周辺分野、関連分野を抽出し、その抽出結果とロボットに関する文献と専門家による知見と評価に基づき、MM 手法を用いた知識結合を軸とした分析が、研究開発の進捗や社会実装の度合いを把握できることを明らかにしている。

第5章では、特許の技術分類をもとに計測する特許ポートフォリオに加え、第3章で新たに定義した「知識結合ポートフォリオ」と「クラスタポートフォリオ」を計測して、各機関の保有する特許の特徴を把握するとともに、機関間の各技術ポートフォリオの相違を比較することにより、その競合状況、補完状況を定量的に把握できることを示している。知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオを用いることで、機関間の技術ポートフォリオの相違が、より細かい粒度で定量的に計測できるとともに、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオから、その競合状況、補完状況を定量的に把握できることを明らかにし、その分析結果と専門家による知見と評価に基づき、企業の競合分析、補完分析への応用可能であることを示している。

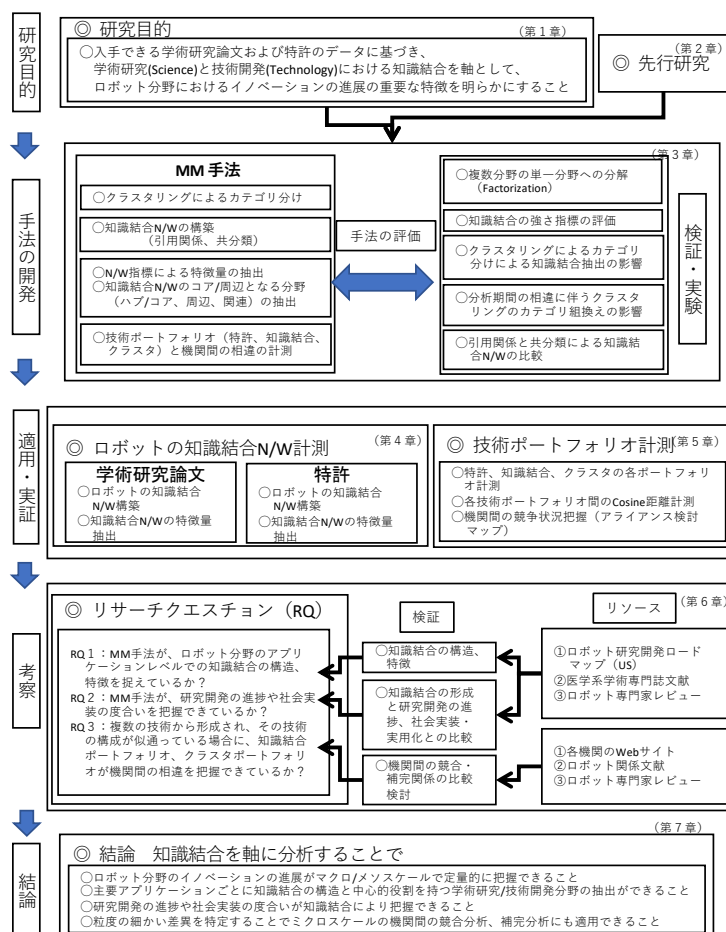
第6章では、考察として、第3章の手法の開発と第4章、第5章の分析結果を、ロボットの研究開発の進捗や社会実装の事例、ロボットの研究開発動向や医学系の学術専門

⁹⁾ 技術経営に関する国際ジャーナル Technological Forecasting & Social Change の特集”Forecasting technical emergence”に採択され、特集号の introduction において (Y. Zhang, A. Porter et al. (2019)[101])、technology convergence のパターンを認識する手法として、MM Method が紹介された。

誌などの文献および専門家の知見、評価に基づき考察し、①MM手法が、学術研究論文と特許データにより、ロボット分野のアプリケーションレベルでの知識結合の構造、特徴を捉えられていること、②知識結合と研究開発の進捗や社会実装の度合いの関係を把握できること、③ロボットのように複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合においても、機関間の相違を把握できることを示し、知識結合を軸とした提案手法の有用性、新規性を明らかにするとともに、知識結合に着目する意義と知識結合に関する指標の意味、本研究の貢献、本研究の限界と課題、他分野への活用可能性をまとめている。

第7章では、本研究の結論として、一般に入手できる学術研究論文の書誌情報と特許情報を用いて「知識結合」を軸に分析することで、ロボット分野のイノベーションの進展が、マクロ、メソ、ミクروسケールで、定量的に把握でき、本研究の目的が達成できていることを結論としてまとめている。

図 1-8 研究分析の流れ



第2章 先行研究

データ・サイエンスの進展により、クラスタ・ネットワーク分析の研究は 2000 年以降盛んになっており、重要論文や重要技術の抽出・特定、萌芽技術・領域の発見、技術間の距離・関連性の解析、コミュニティの抽出や特定とコミュニティの特徴や構造の解明、技術や知識の伝搬・流れの解明など様々な応用分野に活用されている。また、知識結合に関連した研究は、学術研究分野間や技術開発分野（特許）間の技術的距離や類似性を算出して、科学全体のマッピングや比較的広範囲の学術研究分野あるいは技術開発分野（特許）の俯瞰的分析は多いが、特定の技術分野を構成する主要なアプリケーションや技術群レベルでの学術研究分野あるいは技術開発分野（特許）の技術の結合・融合を分析した先行研究はほとんどない。

ネットワークのトポロジカルな構造の解析には、ネットワーク全体の構造を捉える研究 ([3][47][60]など) と次数中心性、近接中心性、媒介中心性などの各種中心性により、特定のノードやエッジの重要性や特徴を捉える研究 ([43]など) の 2 つのアプローチの研究が行われているが、前者のネットワーク全体の構造解明の研究では、俯瞰的に把握することに重点が置かれていること、後者の特定のノードやエッジの抽出の研究では、その抽出したノードやエッジの重要性や特徴を捉えることを主眼にしているため、その周辺の結合関係を分析した研究も見当たらない。

学術研究論文を対象にしたクラスタ・ネットワーク分析では、個々の学術研究論文に割り当てられた学術研究分野は、学術研究誌の分野であり、個々の学術研究論文の分野ではないことから、学術研究誌間の関係のネットワーク分析が個々の学術研究論文に含まれる重要キーワードを抽出し学術研究論文間の関係を導き出す研究もあるが、機械学習によるか専門家によりキーワードを抽出作業が必要であり、自然言語の処理に深層学習などの AI が進歩してきたとはいえ、引用関係で学術研究論文間の関係を解析するクラスタ・ネットワーク分析と比較すると、所望の結果を得るためのモデル構築がさらに必要となり研究分析に困難さがある。

特許を対象にしたクラスタ・ネットワーク分析では、学術研究論文とは異なり、特許に複数割り付けられた特許分類の間で既に技術の結合・融合が生じていると考え、共分類による知識結合ネットワークを構築することができる ([38][97]) ことから、特定のアプリケーションや技術群に対してのネットワーク構造や特徴を分析することは可能であ

るが、技術間の距離や類似性の計測結果を用いて、対象とする技術の全体をカテゴリ分けする研究など、俯瞰的に技術間の関係を把握することに主眼が置かれている。

また、特許ポートフォリオを用いて技術類似性の計測がなされている ([4][5][59]) が、特に、複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合には、特許ポートフォリオによる技術類似性の計測では良い結果が得られず、改善のための研究が必要としている[102]。

本研究では、ロボット分野におけるアプリケーションレベルでの知識結合の構造、特徴を把握しようとするものであり、クラスタリング手法 (Newman 法)、技術の類似性を計測するコサイン距離などは先行研究で多く用いられている手法や計測法であるが、先行研究で俯瞰的、概括的に知識結合を捉える研究よりも、粒度が細かく、多様な技術の複合体であるロボットの技術間の結合・融合の構造を捉えることができるところが先行研究より優れている点である。それを可能にしたのが、クラスタ・ネットワーク分析と知識結合に関する定量的な計測手法の両方を適用して、ロボットの学術研究分野 (Science) と技術開発 (特許) 分野 (Technology) における知識結合を定量的に把握する MM 手法 (Module-based Mining Method) である。

学術研究論文においては、掲載された学術研究誌の学術研究分野が、割り付けられているため、それを単一の学術研究分野に分解 (Factorizing) する手法を提案し、俯瞰的、マクロ的にしか捉えられていなかった学術研究分野間の結合・融合関係を、粒度を細かく把握することを可能とした。

また、技術の結合・融合を計測する指標として、独自に定義した引用率 (CIR) と結合率 (COR) を導入し、コサイン距離や Jaccard より知識結合の近さ・強さを検知する指標として、引用率 (CIR) が優れていることを検証した上で、引用率 (CIR)、結合率 (COR) を用いて、本研究で開発した MM 手法により分析を行った。

本章では、本研究に関連するクラスタ・ネットワーク分析と知識結合に関連した技術的距離 (Technological distance) あるいは技術の類似性 (technological similarity)、ネットワークの特徴量や構造分析、ロボットのイノベーション計測に関する先行研究を中心に概観する。

図 2-1 は、本研究と先行研究との関係を表したものである。クラスタ・ネットワーク分析、技術結合・融合に関する先行研究は、データ・サイエンスの進展により大量な学術研究論文や特許の分析が可能となったこともあり、様々な研究がなされているが、ロボットのように複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合には、相違が必ずしも明確に分析できなかったこともあり、ロボット分野に関する技術の結合・

融合に関する研究はほとんどなく、クラスタ・ネットワーク分析を用いたロボットのイノベーション計測についても、各国間の比較優位の研究などに限られていた。クラスタ・ネットワーク分析には Newman 法、ネットワークの特徴量には、平均クラスタリング係数や次数中心性などよく用いられる手法や指標を活用したが、引用率 (CIR)、結合率 (COR)、知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオなど本研究独自の指標、分析手法も取り入れている¹⁰。また、クラスタ・ネットワーク分析によるカテゴリ分けと技術の結合・融合の計測を組み合わせた MM 手法を提案し、知識結合を軸としてマクロスケール、メソスケールからミクロスケールまでのロボット分野のイノベーションを、分析した研究は先行研究には見当たらず独自性のある研究である。

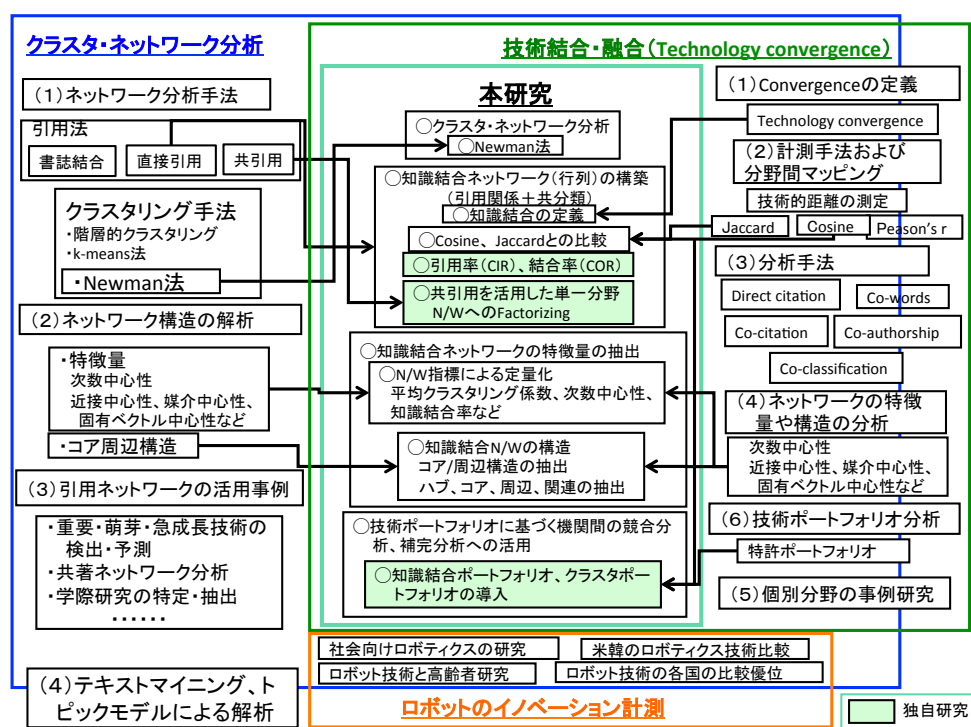


図 2-1 先行研究と本研究の関係

2.1 クラスタ・ネットワーク分析

(1) ネットワーク分析手法

Garfield が 1955 年に引用ネットワーク分析を提案 (E. Garfield, 1955[26]) し、1960 年、Institute for Scientific Information を設立して、学術研究論文の引用関係から学術

¹⁰ 図 2-1 の黄緑の背景色部分は、本研究独自の研究分析である。

研究論文を評価する可能性を拓いて以来(E. Garfield, 1970[27])、H. Small, (1973) (1977) (1980)[81][82][83]、L. Leydesdorff[57][58][60]、A. Porter[73]らを始め、学術研究論文と特許にクラスタ・ネットワーク分析を適用して、学術研究や技術開発などに関わる大量の文書から、有益な情報や知識（鍵となる研究・技術分野、研究者など）を抽出・特定分析する研究が盛んに行われている。具体的には、学術研究論文あるいは特許の引用関係に着目し、学術研究論文あるいは特許をノード、引用関係をエッジとみなすことでネットワークを形成し、グラフ理論を基礎としたネットワーク解析手法を適用することにより、ネットワーク分析や、ネットワークの特徴を捉える各種中心性などの指標を活用した様々な研究がなされている。例えば、重要技術や萌芽技術の検出や予測の研究を始めとして、ノードを、著者、学術研究分野、技術分野とすることにより、共著者ネットワーク分析による重要な研究者、研究論文の特定・抽出 ([73])、学際研究の特定・抽出 ([48][57][58][73][89])、萌芽、重要、急成長分野などの特定 ([78][83][90][97])、技術間の関連性や技術的距離の測定 ([41][69][91]) など様々な応用研究が行われている。

引用には、直接引用（direct citation）の他に、図 2-2 のように、直接の引用関係がなくとも、他のノードが引用することで関係付ける共引用（co-citation）、同じノードを引用することで関係付ける書誌結合（bibliographic coupling）がある。関係する先行研究においても、研究目的により直接引用（N. Shibata (2011) [78] など）や共引用（H. Small, (1973), (1977), (1980)[81][82][83] など）、書誌結合（S. Chen et al.[11]）などが適用されている。K. W. Boyack, R. Klavans, (2010) [4] は、直接引用、共引用、書誌結合の引用分析により先端の研究（Research front）の抽出の精度比較を行い、直接引用と書誌結合が最も精度よく、共引用がやや劣るとの分析結果を報告している。

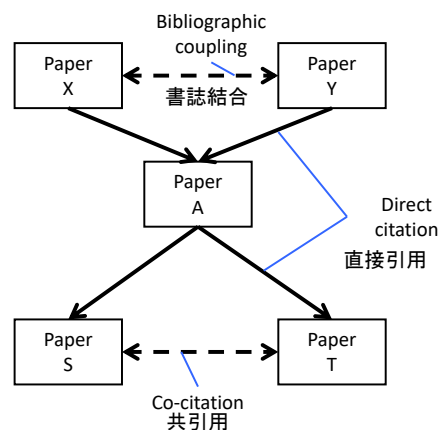


図 2-2 引用の定義

本研究では、直接引用によりネットワークを構築するが、1つの学術研究論文あるいは特許に複数の分野が割り付けられている場合があり、複数分野間の引用関係のエッジから、単一の分野間どうしのエッジに分解 (Factorizing) するために、共引用 (co-citation) の関係を利用した。

ネットワーク内を関係のあるグループ (Community) 分けするクラスタリング手法にも階層的クラスタリングや k-means 法 ([44])、Newman (M.J. Newman, 2004[71]) が開発した Newman 法など多くの手法がある (S. Fortunato, 2010[24])。

本研究では、大規模ネットワークにおいても計算可能な時間でネットワーク構造を俯瞰的に見てクラスタリングができることから Newman 法を実装した東京大学イノベーション政策研究センターの学術俯瞰システムを活用した。

(2) ネットワーク構造の解析

ネットワークのトポロジカルな構造の解析には、ネットワーク全体の構造を捉えることと個々のノード、エッジの重要性や特徴を捉える2つのアプローチが取られる。現実のネットワークでは、ノード間が密に関係したネットワーク部分とノード関係が薄いネットワーク部分の組み合わせであることが多い。ネットワーク全体の構造や特徴を捉える手法としては、S. P. Borgatti, M. G. Everett (1999) [1]が、コア/周辺構造を行列で表現し、コア/周辺構造 (core/periphery structure) を特定するアルゴリズムを提案し、社会ネットワーク研究を中心として、コア/周辺構造 (core/periphery structure) に関する研究が行われている。実際のネットワークのコア/周辺構造は複雑で複数のコアが存在する場合があるため、B. Xiang et al. (2018)[74][100] などコア/周辺構造の特定・抽出には様々な手法が提案されている。本研究では、知識結合ネットワークが密に結合し合うコア部分のノードとそれに結合する周辺のノードで構成されることが明らかになったことから、コア/周辺構造の考え方を知識結合ネットワークの構造解析に取り入れ、完全グラフ¹¹をなすノードの分野をコア分野、コア分野に知識結合する分野を周辺分野、次数中心性の最も大きいノードの分野をハブ分野とすることで分析を進めた。

後者の各ノードの特徴量では、次数中心性 (degree centrality) (P. Chang et al. (2010)[8] W. J. Lee et al. (2016)[56]など)、近接中心性 (closeness centrality) (E. Kim et al. (2014)[43]など)、媒介中心性 (betweenness centrality) (L. Leydesdorff (2007a)

¹¹ 各ノード間がすべてエッジで結合しているグラフを「完全グラフ」と呼ぶ。クリーク (Clique) とも呼ばれる。

(2007b) [57][58], E. Kim et al. (2014)[43]など)、固有ベクトル中心性 (eigenvector centrality) などが指標として使用され、研究目的に応じて、各種指標が用いられている。

本研究では、分野間の知識結合の強さとともに広がりをつめるため、次数中心性を採用した。

(3) 引用ネットワーク分析の活用事例

引用ネットワーク分析の活用事例は多岐にわたっている。重要技術や萌芽分野の特定や抽出に関しては、N. Shibata, et al. (2011) [78]は、学術研究論文の直接引用関係から、再生医療の急進的な研究前線 (emerging research front) を検知分析し、S. Chen et al. (2012) [10][11]は、smart grid technology を事例として、Girvan-Newman 法によりクラスタリングし、新技術の萌芽を抽出する研究を行った。H. Small et al. (2014) [83]は、Scopus database から 2007-2010 年のデータにより、直接引用と共引用とで、科学技術の急進的トピックの特定の比較検討を行い、急進的なトピック (emerging topics) の場合は、共引用 (co-citation) が適しているとした。また、PICMET2019 のコンファレンスで発表した Proceeding[52]で、本研究につながる共分類 (co-classification) による知識結合ネットワークを構築しロボットにおける急成長する技術分野を検知する手法を提案した。

他の活用事例としては、M. Zitt et al. (2003) [103]は異なる分野間での引用の評価を行うため、引用指標の正規化・標準化 (Standardization) が与える影響を評価した。M. Hashimoto, et al. (2012)[33] は、イノベーション研究の学術的俯瞰の分析を行い、日米の National intonation systems の比較を分析した。H. Choe et al. (2013) [12]は、organic photovoltaic cells について、特許の引用ネットワーク分析と中心性指標を用いて、国、機関、技術分野についてそれぞれトポロジカルなネットワーク構造を明らかにし、中心的な国、機関、技術分野を特定した。G. Kim, J. Bae. (2017) [44]は、特許のネットワーク分析と前方引用 (forward citations)、欧米日に登録した特許 (triadic patents families) などの指標により、有望技術 (promising technology) の予測分析を行った。

(4) テキストマイニング (text mining)、トピックモデル (topic model) による解析

引用ネットワーク分析が学術研究論文や特許の引用関係に着目して分析するのに対し、学術研究分野や特許のタイトルや概要などで使用されている文書にテキストマイニング

することによりキーワードを抽出し、そのキーワードを手掛かりに、重要技術の特定や分野間の距離を計測する研究も行われている（B. Yoon, Y. Park (2004)[95], C. Yau et al. (2014)[94], W. S. Lee et al. (2015)[55], A. Suominen et al. (2016)[87], Y. Tu, J. Seng (2012)[90]）。

トピックモデルによるクラスタリングの例としては、B. Yoon, Y. Park (2004)[95] がキーワードの頻度による特徴ベクトルからユークリッド距離により特許間の関係を算出し、技術中心性¹²、技術サイクル時間（technology cycle time）などの指標により、評価する手法を開発した。また、C. Yau et al. (2014) [94]は、k-means 法で学術研究論文を7つの技術分野にクラスタリングした結果とトピックモデルの4種類の方法によるクラスタリング結果との比較検討を行い、HDP¹³という手法のみ k-means 法と同様の精度でクラスタリングできたとしているが、トピックモデルのアルゴリズムとプロセスについてさらなる研究が必要と結論している。また、A. Suominen, H. Toivanen (2016) [87] はフィンランドの学術文献を対象に、トピックモデル手法で、教師なし機械学習（unsupervised learning）により科学マップ（map of science）と人による既存の分類との比較分析し、新規の領域を特定できるので急進的な研究トピックを抽出には良いとしている。テキストマイニング、トピックモデルによる解析手法は、テキストの内容を解明する自然言語処理や機械学習などの人工研究の一分野として研究されており、引用関係によるネットワーク分析とは異なる研究領域ではあるが、先行研究として取り上げた上記の研究のように、重要技術、急進的研究領域の抽出などクラスタ・ネットワーク分析で行われている研究と同様の研究が行われている。

2.2 技術結合・融合（Technology convergence）

学際的な研究や異なる技術間の結合・融合が引き金になってイノベーションが促進されることから、学際研究や技術の結合・融合の定量的な把握や技術の類似性、技術間の距離の計測する研究や、急成長する新興技術（emerging technologies）の特定および予測を、ネットワーク分析、自然言語処理や機械学習を活用した先行研究が多くなされている。

特に、デジタル技術を基盤として通信と情報が融合することにより、スマートフォン、デジタルカメラといった新たな製品が登場し市場の成長を牽引したことから、Media

¹² technology centrality index : 次数中心性に同じ。

¹³ HDP (Hierarchical Dirichlet Process) とは、トピックモデルの分析で用いられる手法の1つで、広く用いられている Latent Dirichlet allocation (LDA) を拡張した手法。

convergenceあるいはDigital convergenceが注目されるようになった。2000年以降は、バイオテクノロジー、ナノテク、ロボットなどでも同様の結合・融合が起きイノベーションを促進するとの事例研究が行われるようになって、技術収れん（Technology convergence）あるいは技術的融合（Technology fusion）を対象にした研究が盛んに行われている。

しかしながら、技術的収れん（Technology convergence）の研究は、概念的な定義はなされているものの、Technology convergence とは何かも研究により様々で、計測手法もコサイン距離（Cosine distance）、Jaccard、Pearson's r などいくつか提案されており、どの計測手法が適しているかも確立されていない[38]。全般的な技術からTechnology convergence している分野を抽出しマッピングする研究、ICT、ナノテクなどの特定分野での事例研究に止まっているのが現状で、日本語での用語も未だ定着していない。また、J. Kim, S. Lee (2017)[45]が指摘しているように、2つの分野間のTechnology convergence の研究は多いが、3つ以上の複数のTechnology convergence はほとんどない。

Technology convergence 関係の研究には幅があるので、（１）Technology convergence の定義・類型化に関する研究、（２）コサイン距離（Cosine distance）、ユークリッド距離（Euclid distance）、ジャカード（Jaccard）など計測手法とそれに基づくマッピングに関する研究、（３）分析手法に関する研究、（４）ネットワークの特徴量や構造に関する研究、（５）特定の分野、技術、産業についての事例研究、（６）技術ポートフォリオに関する研究に分けて、項目ごとに先行研究を見ていくこととする。

（１）Convergence の定義・類型化

Convergence の定義や類型化に関しては、C. Curran et al. (2010) [19] （2011） [20] が、“a blurring of boundaries between two or more industries, moving of items towards a common points” と定義し、Convergence に、Scientific convergence、Technology convergence、Industry convergence、Market convergence の4つのタイプに分類した。

図2-2は、C. Curran らが示したConvergence と Fusion を表した模式図である。Convergence とは、A、B がそれぞれ離れた領域にあったものが、A'、B'の新しい領域に移動し、円の領域が重複した領域ができるプロセスを言い、Fusion は、A、B いずれかの領域（図では、B）に他方の領域が A'に移動して融合し、重複した領域ができるプロセスと定義している。しかし、Fusion については、“the blurring of the terms in the

very same place of the objects” と定義したが、Convergence と Fusion は同様のものとして扱われることがあるとしている。

C. Luan et al. (2013)[62]は、Curran らの Convergence の定義が抽象的で、Divergence と Convergence とが並行して進展すると指摘している。S. Jeong et al. (2015)[38]は、25 件の Convergence に関する先行研究を比較検討し、先行研究が Technology convergence の性質 (nature) を示しているのみで、未だ発展途中であるとしている。

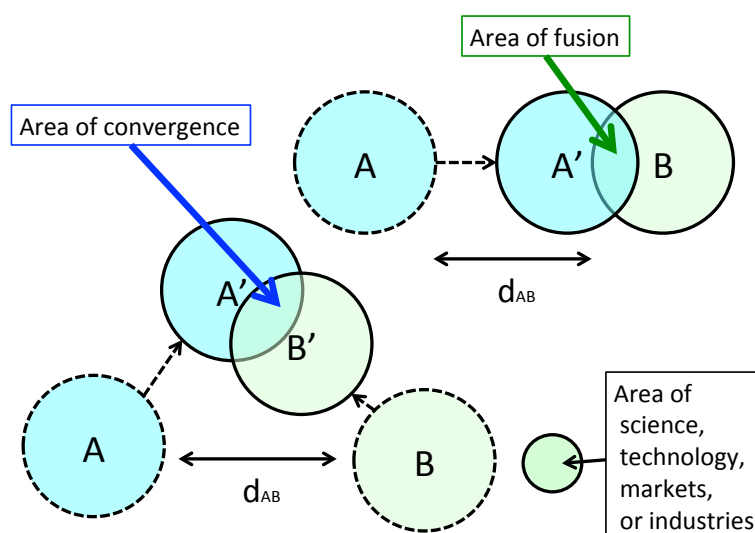


図 2-3 Convergence と fusion の定義¹⁴

Y. Geum, et al. (2016)[29]は、Industry convergence に成功している韓国企業 100 社を対象に分析を行い、Industry convergence を 4 つに類型化し、Convergence の駆動 (driver)、価値 (value)、効果 (effect) について分析している。その後の研究では、Curran らの定義を採用する学術研究論文が多くある。本研究では、Technology convergence 自体、日本語の用語として定着していないことから、本研究では、広く知識の結合・融合と捉え、1.2 で定義したように「知識結合」と呼ぶこととした。

¹⁴ C. Curran et al. (2011)[20]の Convergence と Fusion の図をもとに作成。

(2) 計測手法および分野間マッピング

計測手法と分野間のマッピングに関しては、A. B. Jaffe (1989) [36]が R&D のスピルオーバー効果 (spillover effects) の証拠として、コサイン距離 (Cosine distance) を使用し分析を行った。A. Porter et al. (2007) [73]は、学際研究の計測に、Person correlation とコサイン距離 (Cosine distance) で計測し、コサイン距離の結果が強固 (robust) であることを示し、学際研究を定量的に評価する指標を開発し提案した。

Moya-Anegon et al. (2004) [67] は、2000 年におけるスペインの全学術研究論文について、共引用 (co-citation) からネットワークを構築し、正規化した共引用指標をもとに科学分野のマッピング手法を提案した。K. W. Boyack, R. Klavans, K. Borner (2005)[3], R. Klavans, K. Boyack (2006) [47]は、学術研究論文に基づき全ての科学の構造を表現するために、直接引用と共引用の両ネットワークで、コサイン距離、Jaccard、Pearson と他の指標を使用し分析を行い、直接引用のコサイン距離が最良の計測であったことを報告している。さらに、K. W. Boyack, R. Klavans (2010) [4]は、コサイン距離、Jaccard、Pearson などのいくつかの類似性の測定値を比較し、それらの精度を評価し、直接引用ネットワークのコサイン距離が最良であるとしている。

L. Leydesdorff, I. Rafols (2009)[60]は、Science Citation Index 2006 の Journal Citation Reports のデータから引用関係を抽出し、コサイン距離によりネットワークを構築して全体の科学 (Science) の学際間をマッピングした。L. Kay et al. (2014) [41]は、欧州特許庁 (EPO) の 2000-2006 年の特許の IPC コード間の関係とコサイン距離により求めた技術間の関係ネットワークとの比較を行い、階層的な分類の IPC コードでは技術的類似性をみるには必ずしも適当でないとしている。

H. Nakamura, et al. (2015) [69]は、特許の引用ネットワーク分析による技術領域の特定とコサイン距離による技術の類似性の定量化により自動車と航空機の技術領域の相違を定量的に計測する知識組合せモデル (knowledge combination model) を提案した。C. H. Song, et al. (2017)[85] は、特許の引用関係が、技術知識の流れ (knowledge flow) を表すとの考えに基づき、ネットワーク分析により、収れんしている技術 (converging technology) を特定することを、栄養機能食品 (nutraceuticals and functional food)、ナノテクノロジー (nanotechnology)、ウェアラブル機器 (wearables) について IPC コードでの技術分野間の関係を明らかにしている。

(3) 分析手法

ネットワーク分析手法では、R. J. W. Tijssen(1992)[89]は、共分類 (co-classification) 分析により、エネルギー研究における科学技術の学際的構造の定量的評価を行った。C. Curran et al. (2010) [19]は、co-citation、co-authorship、co-applicants、co-words により計測した場合、co-citation が、Industry convergence の最初のシグナルとして検知するのは適しているとした。C. Curran J. Leker (2011)[20]は、共分類 (co-classification) 分析により、栄養機能食品 (Nutraceuticals and functional foods) と ICT 分野で、convergence が生じている分野を特定し、Convergence を計測する指標を提案した。

N. Kim et al. (2015)[46]は、米国の 1989–2012 年の全産業の 2 百万の記事を対象に、text mining の手法で共起分析 (co-occurrence-based analysis) を行い、Industry convergence のパターンを分析した。W. S. Lee et al. (2015) [55]は、1955–2011 年の米欧日の特許の IPC コードを使用して、トピックモデル手法により、Technology convergence のパターンを予測する試みを行っている。

F. Caviggioli (2016)[7]は、1991 年から 2007 年までの欧州特許庁 (EPO) の全特許を用い、共分類 (co-classification) 分析を行い、初めて共分類となった IPC コードのペアが現れた時を、Technology fusion が生じたとみなしその特徴分析を行った。

B. Yan, J. Luo (2017)[91]は、1976–2006 年の米国特許情報と IPC コードにより、技術的距離 (technological distance) の 1 2 の測定方法との比較検討を行い、正規化した共参照 (co-reference : 引用の Jaccard 指標に同じ) が最も妥当としている。

Z. Wang, et al. (2019)[97]は、IPC コードによる共分類 (co-classification) により 3D printer を事例に、Technology convergence の急進的なトピックス (emergent topics) を抽出する手法を提案している。

このように、direct citation、co-citation、co-authorship、co-word など様々な手法により分析されているが、特許の場合には、共分類 (co-classification) を用いた分析が多くみられる。

(4) ネットワークの特徴量や構造の分析

ネットワークの特徴量や構造の分析では、L. Leydesdorff (2007a) (2007b)[57][58]が、次数中心性 (Degree centrality)、近接中心性 (Closeness centrality)、媒介中心性 (Betweenness centrality) などを比較検討し、学際研究の指標としては、媒介中心

性 (Betweenness centrality) が適していることを示している。

S. Gauch, K. Blind (2015)[28]は、Technology convergence のレベルとトレンドを計測し、標準化が Technology convergence に与える影響を分析した。

Technology convergence の先行研究の比較検討を行った研究もある。S. Jeong et al. (2015)[38]は、Technology convergence に関する 25 の研究を Science convergence、Technology convergence、および Industry convergence に分類し、それらを分析手法により、共ワード (co-word) 分析、共引用 (co-citation) 分析、共著 (co-author) 分析、共分類 (co-classification) 分析などに分類し比較検討し、必ずしも、計測がうまくできているとは限らず、Technology convergence の計測は発展途上である指摘している。

本研究では、独自に定義した引用率 (CIR) と結合率 (COR) で分析を行っているが、Boyack と Klavans[3]が定義した IC cosine と Jaccard と比較検討を第3章で行い、知識結合の強さを検知する指標として、引用率 (CIR) が優れていることを検証した上で、第4章において、第3章で開発した手法にもとづき、CIR、COR により分析を行った。

(5) 個別分野を対象にした事例研究

個別分野の事例研究では、C. Curran et al. (2010)[19](2011) [20]は、phytosterols を例に、化粧品(Cosmeceuticals)、栄養食品(Nutraceuticals)、機能食品(Functional Foods) の分野間の Technology convergence 計測を行った。

P. Chang, et al. (2010)[8]は、カーボンナノチューブのディスプレイ (Carbon nanotube field emission display: CNT-FED) を事例として、特許ネットワーク分析により、急進的技術分野の技術動向の把握を行った。98 の特許に対して、専門家により選択したキーワードの特許における頻度を特徴ベクトルとし、ユークリッド距離で特許間の技術的類似性を計測し、技術中心性 (technology centrality : 次数中心性と同じ定義)、技術のサイクル時間 (technology cycle time)、結合密度 (density : 完全グラフとのエッジ数比率) の指標を用いて分析を行った。

C. Luan et al. (2013)[62]は、イノベーションの創出が、技術の拡散 (Divergence) と収れん (Convergence) の相互作用により生じることを、太陽光エネルギー産業における技術の関連性を分析することにより示した。手法は、共引用 (co-classification) 分析で Jaccard 指標を用いた。

E. Kim et al. (2014)[43]は、プリント電子基盤技術 (Printed electronics technology) についての Technology convergence の特徴の分析を直接引用ネットワーク分析で行い、

近接中心性 (Closeness centrality) と媒体中心性 (Betweenness centrality) で評価した。

F. Hacklin et al. (2009)[32]は、先行研究に ICT 分野における Convergence の現象に、拡散 (Disintegration) と融合 (Consolidation) の両方の面があることを指摘するとともに、ICT のみならず、食品とライフサイエンス、パルプ・紙と IT、通信とカメラについて例に挙げ ICT と同様の Convergence が nanoscience と biotechnology (NBT) の間でも起こりうることを分析した。

M. Karvonen, T. Kassi, (2013)[40]は、RFID に関する 84 社の特許をもとに、初期の段階の Convergence を分析するため、引用、非特許引用などの指標により分析を行った。N. Ko et al. (2014)[48]は、新エネルギー・再生可能エネルギーに関する鉄道技術に関して、特許引用分析により技術融合 (Technology fusion) の技術間分析に適用した。

(6) 技術ポートフォリオの分析

技術ポートフォリオの分析に関しては、K.K Brockhoff (1992)[5]は、独、英、米、日のハイテク企業 5 社の特許を技術分野別のポートフォリオを作成し、コサイン距離により、技術ポートフォリオの類似度を算出し企業間の比較分析を行った。

B. Lin et al. (2005)[61]は、1976-1995 年の米国の技術企業 78 社の特許情報をもとに、技術ポートフォリオと研究開発パフォーマンスの比較検討を行い、研究開発業績と技術ポートフォリオの関係を分析した。

S. Chang (2012)[9]は、米国の USPTO のビジネスモデル特許を保有する 38 社に対して、特許の企業間の引用関係によるクラスタリング結果と企業の特許ポートフォリオの比率に基づく特化係数に似た指標を開発し、競合関係か補完関係にあるかの企業の位置を特定する手法を提案した。38 社の企業がソニー、富士通、Kodak、Citibank、VISA MasterCard、マイクロソフト、アマゾン、IBM、インテルなどと業種が異なること、ビジネスモデル特許の技術分類が、Operations research、POS terminal、Electronic shopping、Finance などと異なる分野であるなど、本研究のように特許ポートフォリオが似通っている場合には適用が難しい。

M. Grimaldi et al. (2015)[31]は、特許の重要性を、技術的な範囲 (Technical scope)、前方引用頻度 (Forward citation frequency)、国際範囲 (International scope) といった指標で定量化し、企業の特許戦略と特許の経済的価値を指標化し評価するという枠組みを提案し、航空防衛産業の 2 社についての特許戦略について比較分析した。

Y. Zhang et al. (2016)[102]は、特許ポートフォリオ (Patent portfolio) による技術類似性の計測が K. W. Boyack, R. Klavans (2010)[4], K. W. Boyack et al. (2011)[5], L. Leydesdorff (2008)[59]などで計測されているが、特許の類似性計測は未だ説明しにくい (elusive) であるとして、技術類似性の計測を、IPC コードによる計測とテキストマイニング (text mining) による計測の組合せで分析することを試み、さらに改善のための研究が必要としている。

ロボットのように複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合には、特許ポートフォリオによる機関間の相違を定量的に把握することは難しかった課題を、知識結合ネットワークの構築と特徴量の抽出での分析での知見を利用して、知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオという新しい技術ポートフォリオを提案し、機関間の相違の計測を可能にするとともに、機関間の競合分析や M&A、アライアンスなどの企業の技術経営戦略策定を支援する手法を提案した本研究は独自性のある研究である。

2.3 ロボットのイノベーション計測

ロボットのイノベーションに関するクラスタ・ネットワーク分析や知識結合に関連する学術研究論文は少ないがいくつか行われている。

V. Ittipanuvat et al. (2014) [35]は、ロボット技術と高齢者研究 (gerontology) との関係、クラスタ・ネットワーク分析手法によるクラスタリングと LBD (Literature Based Discovery) という手法¹⁵を活用して、ヘルスケアや高齢者の健康維持へのロボット技術の貢献可能性について分析を行った。

G. Ghiasi, V. Lariviere. (2015) [30]は、ロボティクス研究活動に関して、1995-2009年の学術研究文献に tech mining 手法を用いて、ロボットのマニピュレータ (robot manipulator)、モバイル・ロボット (mobile robotics)、遠隔ロボット (telerobots) 分野について、定義した技術優位指標 RTA に基づき、各国の優位比較を行い、主要機関の研究活動比較を分析した。

W. J. Lee et al. (2016)[56]は、米国と韓国のロボットに関する特許ロボット技術を 45 に分類した上で、特許文書の共起 (co-occurrence) ネットワーク形成し、ロボット技術の convergence を計測し、次数中心性 (degree centrality)、媒介中心性

¹⁵ 1986年に、Don R. Swanson がレイノー病 (Raynaud's disease) と魚油 (eicosapentaenoic acid) との関係を見つけた手法で、文献からはわからない2つの主体間の関係の科学的な関係を見出す手法として、主に、医学研究で探求されている。[35]

(Betweenness centrality)、固有ベクトル中心性 (Eigenvector centrality) を算出することにより、両国のロボット技術に関する特徴を明らかにした。

H. J. Yun et al. (2016)[96]は、自動運転車 (autonomous car) とインテリジェントロボット (intelligent robot industries) について、技術、ビジネスモデル、市場との関係の Diagram を開発し、特許の引用ネットワーク分析と企業へのインタビューにより、規制、標準、リーディング企業効果の3つの要素に加え、ビジネスモデルが重要であることを分析した。

C. Mejia, Y. Kajikawa (2017)[63]は、社会向けロボティクスの研究 (Social robotics research) についてクラスタ・ネットワーク分析を行い、社会向けロボティクスは、学術研究分野に多様性があり、米国、英国、日本の順で学術研究論文が多く、突出した研究機関はないことを明らかにした。また、PICMET2017 のコンファレンスにおいて本研究の出発点となったクラスタ・ネットワーク分析によるロボットと AI の間の結びつき (linkages) とロボットの技術の進展の検知[49]について発表した。

以上のように、ロボットを対象にした学術研究や特許のネットワーク分析は、技術と社会とのリンケージ、国際間の技術競争力比較などの先行研究はあるものの、本研究のような知識結合ネットワークの分析に基づき、ロボットのイノベーションの特徴を分析し、機関間の技術ポートフォリオの相違をクラスタ・ネットワーク分析と知識結合を活用することにより、より詳細に分析した研究は見当たらない。

第3章 知識結合に関する分析手法の開発

本研究の目的は、第1章で述べたように、入手できる学術研究論文および特許のデータに基づき、学術研究(Science)と技術開発(Technology)における知識結合を軸として、ロボット分野におけるイノベーションの進展に重要な特徴を明らかにすることであり、ロボット分野におけるイノベーションの進展を、学術研究分野と技術開発分野（特許）における知識結合の分析を通じて解明し、結合・融合を伴うイノベーションを促すための施策の企画立案、大学・機関の研究企画、企業の競合分析や M&A、企業間アライアンスなどの技術経営戦略策定などの支援に貢献しようとするものである。

そのためには、第2章の先行研究でみたように、知識結合に関連した研究では大まかな結合・融合の抽出に留まっており、多くの分野が関連するロボットの場合、分野間の関係が複雑になるために、知識結合のより詳細な分析評価はできていない。本研究では、知識結合に着目して、ロボット分野のイノベーション進展を、マクロ/メソスケール、ミクロスケールで技術間の結合・融合関係を解明しようとしているが、その目的を達成するためには、ロボットに関する学術研究論文と特許文献を主要なアプリケーションごとにカテゴリ分けし、主要なアプリケーションごとに、技術の結合・融合関係を、粒度を上げて分析する必要がある。

ロボットの知識結合の状況をより詳細に分析するために、既存の分類に囚われることなく、新しく成長する分野を含めた主要アプリケーションや主要技術群ごとに抽出できるクラスタ・ネットワーク分析手法を用いてカテゴリ分けし、知識結合の計測・分析にもクラスタ・ネットワーク分析のネットワーク特徴量計測を適用することにより、マクロ/メソスケールで、知識結合の強さや知識結合ネットワークのトポロジカルな関係に着目した特徴量による知識結合の形成および構造を定量的に把握する MM 手法 (Module-based Mining Method) を新たに開発した。

技術経営に関する国際ジャーナル Technological Forecasting & Social Change の特集 "Forecasting technical emergence" に掲載された先行研究[51]で提案した MM 手法は、クラスタリングによりブレイクダウンしたカテゴリごとにロボット分野における学術研究論文や特許をマクロスケールあるいはメソスケールでの知識結合の構造や特徴を把握するために有効であるが、ミクロスケール、すなわち、個々の企業レベルでの技術経営戦略に知識結合を活用することにも MM 手法が適用可能である。従来、企業間の技術力

や競争力を比較するため、企業が有する特許をもとに特許ポートフォリオを分析した研究はあるが、ロボットのように複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合には、保有する特許分類も同様の分布となり特許ポートフォリオが似てくるために、特許ポートフォリオからその相違を検出することは難しかった[102]。PICMET2018のコンファレンスで発表した **Proceeding**[50]では、クラスタリングにより分類したクラスタ分類ごとの特許数をもとに計測した特徴ベクトルを用いることで、機関間の技術ポートフォリオの相違が明確に計測できることを示した¹⁶。それを発展させて、技術ポートフォリオに、特許ポートフォリオに加え、クラスタ分類をもとに算出した特徴ベクトルを「クラスタポートフォリオ」と定義し、知識結合の要素を特徴ベクトルとする「知識結合ポートフォリオ」の概念を新しく導入することにより、企業他社と比較した立ち位置 (positioning) を定量的に把握し、企業の競合分析や M&A、アライアンスを支援する手法を提案する。新たに定義したクラスタポートフォリオと知識結合ポートフォリオは、①クラスタリング結果の各クラスタは技術的に関連性のあるグループをなしていること、②保有する特許分類が同じであっても機関の知識結合ネットワークの構造は異なっていることという知見から、よりきめ細かく機関の技術ポートフォリオ間の相違を峻別できるであろうとの洞察から開発したものである。

本章では、開発した MM 手法の開発の狙いと従来の手法との相違点、MM 手法として開発した個々の分析手法の開発内容とその評価、そして、第4章の知識結合からみたロボット分野のイノベーションと第5章の機関の技術ポートフォリオと技術経営とを分析するための MM 手法の分析手順について述べる。

この MM 手法をロボットに関する学術研究論文と特許に適用した知識結合の分析は第4章に、クラスタ・ネットワーク分析と知識結合ネットワークの知見をもとに機関の知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオを加えた技術ポートフォリオ分析は第5章にまとめた。

3.1 MM 手法 (Module-based Mining Method)

3.1.1 MM 手法開発の狙いと従来の手法との相違点

MM 手法は、①主要なアプリケーションや分野ごとに、技術の結合・融合の構造・特徴を捉えたい、②機関間の技術ポートフォリオの相違を把握したいとの狙いから開発したものである。しかしながら、第2章の先行研究で概観したように、(1) 科学全体のマ

¹⁶ 本研究では、「クラスタポートフォリオ」と定義した。

ッピングや、IT、BT、栄養機能食品など比較的広範囲の技術分野にまたがっている技術間の類似性や関係の俯瞰的研究は多いが、限定したアプリケーションの範囲内での技術の結合・融合を分析した先行研究はほとんどない[85]、(2) 3つ以上の学術研究分野あるいは技術開発分野（特許）が複合した技術の結合・融合を対象にした先行研究はほとんどない[45]、(3) ロボットのように複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合、特許ポートフォリオが似てくるため、機関間の相違を定量的に把握することが難しい[102]、という状況があり、①②の狙いに応える分析を行うことは難しい。

主要なアプリケーションや分野ごとに、技術の結合・融合の構造・特徴を捉えたいという①の狙いに対しては、成長分野の抽出や関連するグループごとにカテゴリ分けできるというクラスタ・ネットワーク分析の特徴を活用することで、学術研究論文あるいは特許のロボットに関する全データをクラスタリングしてカテゴリ分けし、カテゴリ分けした後のクラスタごとに知識結合ネットワークを構築するというプロセスで分析を進めた。

カテゴリ分けと知識結合ネットワークの構築に用いたクラスタ・ネットワーク分析は既存の手法であり、手法を組み合わせることも、別段新しいことではないにも関わらず、両方に適用して主要アプリケーションごとに知識結合ネットワークの構築した例は先行研究には見当たらなかった。先行研究では、クラスタ・ネットワーク分析を用いて、科学や技術の関係を俯瞰的あるいは概括的に捉えようとする研究や、各種ネットワーク中心性の指標により萌芽的技術や重要技術を特定する研究を志向していること、技術の結合・融合（Technology convergence）の研究としては、技術間の類似性に基づくカテゴリ分けを試みる先行研究はあるが、技術的に比較的近い学術研究論文あるいは特許を主要なアプリケーションレベルで知識結合ネットワークを構築し、分野間の構造や技術の結合・融合関係を分析しようとする研究はなされていない。

それは、粒度をあげて、知識結合ネットワークの分析を行おうとすると、特に、学術研究論文においては、掲載された学術研究誌の学術研究分野が割り付けられており、それが複数の学術研究分野である場合には、単一の学術研究分野間のネットワークに変換しなければならないという問題に直面する。先行研究では、学術研究誌間でのネットワークを構築する研究[3][57][58][60]、共引用（co-citation）を利用して、学術研究分野の関係を導き出し、学際研究の関係を計測する研究[73] あるいは、専門家により選定したキーワードの頻出を元に特許間の距離を計測し特許間ネットワークを構築する研究[8]、はあるが、概括的、俯瞰的關係に留まっているか、ネットワーク分析の他、専門家によるキーワード選定や自然言語処理や機械学習などの適用が必要となる。本研究では、引

用関係のネットワーク分析のみで、人の関与を介さないデータ解析により分析を可能とするため、複数分野に割り付けられた学術研究論文を単一の分野間に分解 (Factorizing) する方法を MM 手法の中に取り入れ、主要なアプリケーションごと、すなわち、クラスタごとの知識結合ネットワークを構築した。

機関間の技術ポートフォリオの相違を把握したいとの②の狙いに対しては、機関が保有する特許の特許分類がほぼ同じでも、知識結合ネットワークの構造は異なっていることと、クラスタリング結果の各クラスタは技術的に関連性のあるグループにカテゴリ分けされているので、クラスタごとの特許の保有件数の分布は、その機関が注力するロボットのアプリケーションを反映していることの知見を活用し、特許保有分布が似ているために特許ポートフォリオによる機関間の相違の検出が難しかったことを、ロボットのように複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合でも、機関間の相違を検出できる新しい技術ポートフォリオである「知識結合ポートフォリオ」と「クラスタポートフォリオ」を導入することにより解決した。

3.1.2 MM 手法による分析プロセス

図 3-1 に、知識結合ネットワークの分析の場合の MM 手法の分析プロセスを示す。MM 手法の特徴は、クラスタ・ネットワーク分析をクラスタリングと知識結合の計測の両方に適用し、クラスタごとにカテゴリ分けしたモジュールごとに、知識結合ネットワークを構築し、マクロスケールのみならず、メソスケールでロボットのイノベーションの特徴を定量的に捉えることができることである。既存の分類コードによらずに引用関係により関連のある学術研究分野あるいは技術開発分野（特許）ごとにカテゴリ分けでき、ロボットをはじめとして、次々起こるハイテク技術や急成長する萌芽技術を抽出する場合に既存の分類によらずイノベーションの進展の特徴を捉えることに有用な分析手法である。

まず、1.において、学術研究論文は、Clarivate Analytics が提供するデータベースである Web of Science から、特許は、同 Derwent Innovation から、クエリ “robot*” でデータを抽出する。

2.～6.が、MM 手法の分析プロセスである。2.においては、東京大学イノベーション政策研究センターが提供する学術俯瞰システムにより、Newman の高速クラスタリングアルゴリズム法によるクラスタリングを行い、学術研究論文または特許のデータが、引用関係で関連づけられた技術やアプリケーションごとにカテゴリ分け、すなわち、

Module に分解される。

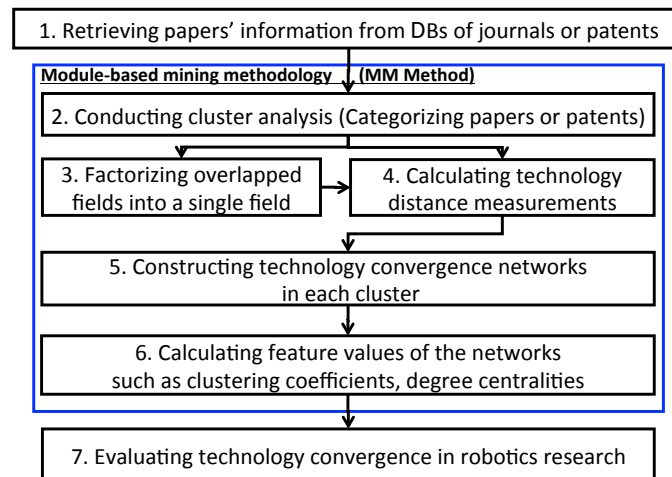


図 3-1 MM 手法の知識結合分析への適用プロセス

3.～6.が、MM 手法として新たな開発した個々の手法の部分である。

3.～5.で、クラスタごとに、学術研究分野間あるいは特許分類間の知識結合ネットワークを構築する。学術研究論文に複数の分野が割り付けられている場合には、知識結合ネットワークが構築できないので、3.において、共引用（co-citation）の引用関係を利用して、単一分野間のネットワークに変換する。特許の場合は、複数の特許分類が割り付けられた場合、それらの特許分類の技術間で、既に結合・融合が形成されたとみなすことができることから、共分類（co-classification）による知識結合ネットワーク形成が可能であるが、共引用（co-citation）の引用関係を利用して、引用関係に基づく知識結合ネットワークも構築できるので、第4章では、学術研究論文と特許とも引用関係に基づく知識結合ネットワークを構築し、両者の結果の比較検討を行う。

4.の技術的距離の計測では、本研究で定義した「引用率（CIR）」あるいは「結合率（COR）」¹⁷で計測し分析する。5.において、クラスタごとに、知識結合ネットワークを構築し、6.において、クラスタごとに、平均クラスタリング係数や次数中心性などのネットワーク特徴量を抽出する。MM 手法で分析した結果を7.において評価し、知識結合の分析により、第1章で設定したリサーチクエスチョンに答えられ、研究目的を達成しているか評価を行う。

技術ポートフォリオの分析の場合は、3.の単一分野への分解を経ずに、4.、5.で

¹⁷ 引用率（CIR）、結合率（COR）の定義については、3.3.4参照。

共分類 (co-classification) による知識結合ネットワークを構築し、6. において、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオによる機関間の技術類似性の分析を行う。

3.2 MM 手法の開発

MM 手法を用いて、知識結合ネットワークの分析手順は、3.1.2の手順を踏むが、そのうち、図3—1の3.~6.は、本研究で開発した手法である。本節では、MM 手法の分析プロセスに沿って、(1) 学術研究論文および特許情報の収集、(2) 引用ネットワークの形成とクラスタ分析によるカテゴリ化、(3) 共引用 (co-citation) 関係を利用した複数分野から単一分野間ネットワークへの変換、(4) 引用関係および共分類 (co-classification) による知識結合ネットワークの構築、(5) 知識結合ネットワークの特徴量の抽出、そして、技術ポートフォリオ分析として、(6) 特許ポートフォリオ、知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオの計測、(7) 機関の技術ポートフォリオの分析について述べる。

以下は、(1) ~ (7) で用いた手法および開発した手法の概要である。

(1) の学術研究情報と特許情報は、学術研究については、Clarivate Analytics が提供する Web of Science (以下、“WoS” と表す。) から、特許情報については、同じく、Clarivate analytics が提供する Derwent Innovation (旧 Thomson Innovation) から、それぞれ書誌情報を抽出した。(2) のクラスタ分析では、(1) で抽出したデータを東京大学イノベーション政策センターが提供する「学術俯瞰システム」で分析し、学術研究分野と技術開発分野 (特許) のカテゴリ化を行った。

学術研究論文、特許には、それぞれ学術研究分野、特許分類 (WIPO の IPC コード) が付与されているが、双方とも、複数分野の分類が付与されているものが含まれているため、分野間の知識結合を計測するためには、それぞれ、単一分野間のネットワークへ変換する必要がある。(3) では、引用ネットワーク分析における共引用 (co-citation) 関係を適用することで、複数分野を単一分野に分解 (Factorizing) する手法を新たに提案した。

(4) の引用関係による知識結合ネットワークの測定では、技術の類似性や関係性を測定するコサイン距離と Jaccard および本研究で新たに導入した引用率 (CIR) と CIR を最大の CIR 値で除して正規化した結合率 (COR) で比較検討を行い、測定と各指標の評価を実施した。特許の場合には、1つの特許に、複数技術の分類コードが割り付けられている場合には、その特許自体が、複数の技術を結合・融合したものと考えられるこ

とから、特許の共分類（co-classification）による知識結合ネットワークを構築することができる。共分類（co-classification）により Technology convergence を計測した研究も行われている[28][38][89][97]。引用関係に基づく知識結合ネットワーク構築の結果と比較検討し、引用関係による知識結合ネットワークの方が知識結合の形成が若干早いことが明らかになった。

共分類（co-classification）による知識結合ネットワークは、引用関係による知識結合ネットワークよりは知識結合の形成が遅れるが、特許ごとの共分類（co-classification）から算出できることから、個別機関の保有する特許においても構築できる。その利点を活用して、機関ごとの知識結合ネットワークを構築し、技術ポートフォリオ分析において、第5章の分析で用いる。

（5）の知識結合ネットワークの特徴量の抽出では、学術研究論文、特許とも、知識結合のパターンに特徴があることから、それらを定量的に測定する指標として、平均クラスタリング係数、次数中心性、知識結合率などを用い、知識結合ネットワークの特徴を把握するための定量的な指標を提案した。

（6）特許ポートフォリオ、知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオの計測では、機関が保有する特許の特許分類別¹⁸の件数のシェアを要素とする特許ポートフォリオに加え、知識結合の特許分類のペアの件数のシェアを要素とする「知識結合ポートフォリオ」、クラスタ・ネットワーク分析によりクラスタリングした結果の各クラスタに属する特許件数のシェアを要素とする「クラスタポートフォリオ」を新たに定義した¹⁹。

（7）機関の技術ポートフォリオの分析では、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオにより、従来の特許ポートフォリオと比較して、機関間の技術ポートフォリオの相違がより明確に定量的に把握できることを示し、競合分析や M&A、アライアンスなどの企業の技術経営戦略策定の支援となる手法を提案する²⁰。

3.2.1 学術研究論文および特許情報の収集

図 3-2（1）に示すように、学術研究論文²¹は、WoS から、特許は、Derwent Innovation

¹⁸ 本研究では、IPC の3桁コードのクラス（C）での分析を中心にを行い、サブクラス（M）でも、知識結合ネットワークを構築して、技術関係をより詳細に分析する際には、サブクラス（M）での分析も行なった。

¹⁹ 特許、知識結合、クラスタの各技術ポートフォリオの定義等の詳細は、3.2.6に記述した。

²⁰ 機関の技術ポートフォリオの分析は、第5章に記述した。

²¹ 自動機械（Automation machine）など robot との記述がない場合でも、robot の範疇に入る学術研究論文

のデータベースから、“robot*”のクエリ（検索語）で検索し、その結果得られたものを、それぞれロボットに関する学術研究論文、ロボットに関する特許として扱う。

学術研究論文に関しては、WoS から 2016 年 10 月 10 日と 2018 年 11 月 9 日に取得し、それぞれ、86,015 本、108,675 本の学術研究論文を収集した²²。特許に関しては、Derwent Innovation から 2017 年 11 月 26 日と 2018 年 11 月 10 日に取得し、それぞれ、167,268 件、187,256 件の特許を収集した²³。

なお、学術研究論文、特許とも、データセット 1 は、“robot OR robotics”を、データセット 2 は、“robot*”をクエリとして検索し、情報取得した。

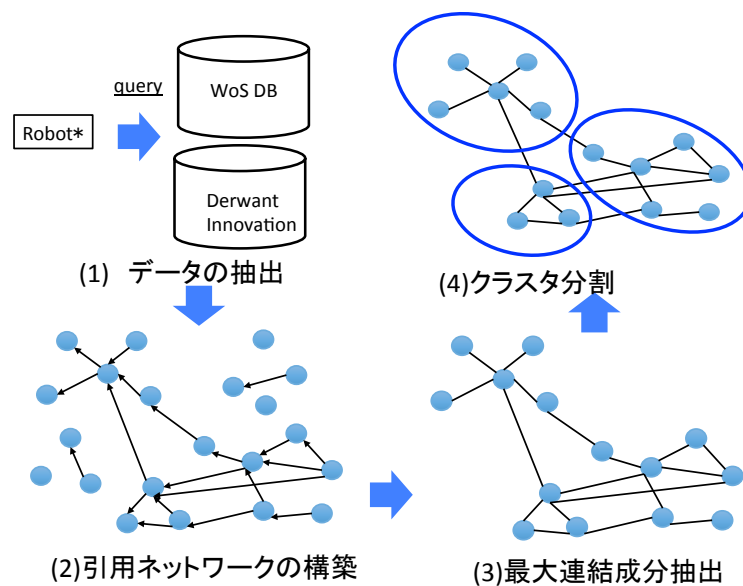


図 3-2 クラスタ・ネットワーク分析の手順

本章の分析手法の開発と評価は、学術研究論文と特許のデータセット 1 を使用し、第 4 章、第 5 章では、両者の比較検討するために、データセット 2 の最新の情報により分析を行った。クラスタ・ネットワーク分析はそれぞれ取得した全データで実施したが、両者の比較検討するために、2016 年までのデータをそれぞれ一定期間に区切り分析を行った。

文や特許があるが、それらは少数と考えられるので “robot*” のクエリとした。

²² 前者のデータセットを「WoS データセット 1」、後者を「WoS データセット 2」と呼ぶこととする。

²³ 前者のデータセットを「DI データセット 1」、後者を「DI データセット 2」と呼ぶこととする。

3.2.2 引用ネットワークの形成とクラスタ分析によるカテゴリ化

学術研究論文あるいは特許の1つ1つをノードと見なし、引用関係をノード間のエッジと見なすことでネットワークが構成できる。引用関係は、引用ノードと被引用ノードは、厳密には有向グラフである。本研究では、学術研究論文あるいは特許間の引用関係の繋がりに着目した知識結合ネットワークを、引用と被引用関係にあるノードとその逆の引用と被引用関係のノードを合成して形成するので、無向グラフとして扱う。引用ネットワーク分析では、書誌情報にある研究者、機関、国などの情報を元に、研究者間ネットワーク分析、共著ネットワーク分析、重要論文や特許の特定、新興技術分野の抽出や予測、学際研究の抽出、技術の結合や融合、技術的類似性など様々な応用がなされている。本研究では、ロボットに関する学術研究や技術開発のカテゴリ分けの他、学術研究分野間、技術開発分野（特許）間の知識結合の分析にも、ネットワーク分析を用いる。

WoS、Derwent Innovation から抽出したデータの引用関係から、引用ネットワークを構築する（図3-2（2））。作成された引用ネットワークのうち、引用の最大連結成分のデータのみを抽出し、最大連結成分に繋がりのない学術研究論文あるいは特許を削除する（図3-2（3））。その結果の最大連結成分のネットワークを Newman によって開発された高速クラスタリングアルゴリズムを用いて、引用ネットワークをクラスタに分割する（図3-2（4））。

Newman の高速クラスタリングアルゴリズムは、1)大規模ネットワーク(数万ノード規模)に適用して、現実可能な計算時間で、クラスタリング実行可能、2)ネットワーク構造を局所的でなく、俯瞰的に見てクラスタ間のエッジを切断できるという利点がある。

図3-2（2）から（4）の分析については、東京大学イノベーション政策研究センターが提供している分析ツール「学術俯瞰システム」を利用した。学術俯瞰システムは、Newman によって開発された高速クラスタリングアルゴリズム[71]を用いてクラスタリングしている。

Newman のクラスタリングアルゴリズムは、次のように定義されるモジュール性 Q に基づく。

$$Q = \sum_{s=1}^{N_m} \left[\frac{l_s}{1} - \left(\frac{d_s}{2l} \right)^2 \right] \quad (3-1)$$

N_m はクラスタ数、 l_s はクラスタ s 内のノード間のリンク数、 d_s はクラスタ s 内のノードの次数の合計を表す。 Q の値が高いほど良い分割を表すことから、 ΔQ が負になったときにクラスタリングは終了する。このアプローチは、ネットワークをクラスタに効

果的に分割できることがわかっている。

3.2.3 知識結合ネットワーク（知識結合行列）の構築

（１）引用関係に基づく知識結合ネットワークの構築

引用関係に基づく知識結合ネットワーク（知識結合行列） $[P_{ij}]$ は、有向グラフである直接引用の引用行列 $[C_{ij}]$ （ C_{ij} ：i 分野に割り付けられた学術研究論文が j 分野の学術研究論文を引用した数）から、式 3-2 により、無向グラフの行列として表す。

$$\begin{aligned} P_{ij} &= P_{ji} = C_{ij} + C_{ji} \quad (i \neq j) \\ &= C_{ij} \quad (i = j) \end{aligned} \quad (3-2)$$

最初に、学術研究論文の引用関係から、引用行列 $[C_{ij}]$ を算出する。この段階では、複数割り付けられた学術研究分野についても、1つの学術研究分野としてみなし、単一の学術研究分野と複数の学術研究分野を要素とする行列となっており、 $[C_{ij}]$ は有向の引用行列である。式 3-2 により、 $[C_{ij}]$ から、無向の引用行列 $[P_{ij}]$ を算出する。

$[P_{ij}]$ は、 $[C_{ij}]$ と同じく、単一の学術研究分野と複数の学術研究分野を要素とする行列であるため、3.2.4の方法により、単一の学術研究分野の要素で構成される $[P_{ij}]$ へ分解（Factorization）する。学術研究分野では、最大5、特許情報では、最大17の複数の特許分類が割り付けられており、分解（Factorization）は、最も多く割り付けられている分野から開始し、単一の学術研究分野あるいは特許分類に分解されるまで計算を繰り返す、すべての行列の要素が単一の学術研究分野あるいは特許分類の知識結合ネットワーク（知識結合行列） $[P_{ij}]$ を算出する。

（２）共分類（co-classification）に基づく特許の知識結合ネットワークの構築

特許の1つ1つに割り付けられた技術開発分野（特許）は、学術研究論文の場合とは異なり、その特許が属する技術分野を表す。したがって、特許に、複数の技術分野（特許分類）が割り付けられている場合、その複数技術分野間で技術結合がすでに生じているとみなすことができる。先行研究においても、technology convergence の計測には、引用関係（citation）[3][4][67]と共分類（co-classification）[28][38][89][97]の双方の事例がある。

Derwant Innovation から抽出した特許には WIPO[98]が提供する IPC コードが割り付けられているので、以下の手順で IPC コードを技術分野として共分類 (co-classification) による知識結合ネットワークを構築する^{24,25}。

所与の期間において、特定のクラスタに属するまたはある機関が所有する特許の特許分類群が、 n 種類の IPC コード²⁶からなる IPC コード集合 $S = \{IPC_k: (1 \leq k \leq n)\}$ とし、 IPC_k に含まれる単一の IPC コードの種類を m_k 、 IPC_k に割り付けられた特許の件数を num_k とする。

IPC_k には、 m_k 種類の単一の IPC コードで構成されているので、 IPC_k は、 m_k 種類の IPC コードの間で結合・融合しているとみることができ、 IPC_k の共分類に基づく部分知識結合行列は、要素が num_k の $m_k \times m_k$ の部分特許共分類行列 $[P_{ij}]_k$ ($1 \leq k \leq n$) を以下の通り、表現できる。

$$[P_{ij}]_k = \begin{bmatrix} num_i & \cdots & num_i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ num_i & \cdots & num_i \end{bmatrix} \quad (1 \leq i \leq n) \quad (3-3)$$

(ただし、 $[P_{ij}]_k$ は、 $m_k \times m_k$ の正方行列)

部分特許共分類行列 $[P_{ij}]_k$ を式3-3の通り、IPC コード集合 S の要素ごとに足しあげることにより、共分類 (co-classification) に基づく特許の知識結合ネットワーク (知識結合行列) $[P_{ij}]$ を算出する。

$$[P_{ij}] = \sum_1^n [P_{ij}]_k \quad (3-4)$$

全ての IPC コード集合 S の要素 IPC_k が単一の IPC コードの場合、 $m_k = 1$ となり、式3-3の $[P_{ij}]_k$ は、 num_k の要素を1つ持つ部分行列となり、式3-5のように対角線上にしか要素のない知識結合行列となる。

$$[P_{ij}] = \sum_1^n [P_{ij}]_k = \begin{bmatrix} num_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & num_n \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

$[P_{ij}]$ は、引用関係により算出した知識結合行列と同じ対象行列であり、共分類 (co-

²⁴ 3桁ベースのクラス (C) と4桁ベースのサブクラス (M) について分析を実施。IPC には4段階のコード S,C,M,Uがあるが、それぞれについても同様の方法で知識結合ネットワークの構築が可能。

²⁵ 本研究で用いられた IPC コードは、Appendix の付表1に、クラス (C)、付表2に、サブクラス (M) の定義を掲載した。

²⁶ 複数の IPC コードで構成される IPC コードについても異なる1つの IPC コードとみなす。

classification) においても、3.2.5、引用率 (CIR)、結合率 (COR)、コサイン距離などを算出でき、3.2.6 の知識結合ネットワークの特徴量の抽出も可能である。

表 3-1 は、安川電機、ファナック、ABB、KUKA の DI データセット 2 の 2011-2016 年における特許を上記の定義に従って算出した共分類 (co-classification) による知識結合ネットワーク (知識結合行列) である²⁷。ロボットの基盤的技術である B25、G05、G06、G01 と産業用ロボットに必要な技術として、B23 (溶接等²⁸)、B65 (運搬・包装等)、B05 (スプレー技術)、B21 (金属加工)、F16 (機械要素等)、H02 (発電・変電・配電技術) などの特許を保有している。また、安川電機、KUKA は、A61 (医学等) の特許も保有しており、医療・ヘルスケア分野向けのロボットの開発にも携わっていることがわかる。

表 3-1 共分類による知識結合ネットワーク (知識結合行列) の例

安川電機

	B25	G05	B65	B23	H01	G06	F16	G01	H02	B66	B05	A61	B21
B25	370	102	74	55	51	47	32	20	11	14	12		
G05	102	107	16	17		26		9	6				
B65	74	16	78	6	37	16							
B23	55	17	6	61									
H01	51		37		57	7							
G06	47	26	16		7	48		6					
F16	32						32		5				
G01	20	9				6		27					
H02	11	6					5		16				
B66	14									15			
B05	12										13		
A61												8	
B21													7

KUKA

	B25	G05	G01	G06	A61	F16	H02
B25	156	54	22	19	13	8	7
G05	54	55	8	11			
G01	22	8	22				
G06	19	11		19			
A61	13				18		
F16	8					8	
H02	7						7

ABB

	B25	G05	G06	B23	H02	F16	B65	G01	H04	B21	B05	H01
B25	121	31	17	6	8	8		6	5			
G05	31	41	11									
G06	17	11	19									
B23	6			11								
H02	8				10							
F16	8					8						
B65							7					
G01	6							6				
H04	5								6			
B21										5		
B05											5	
H01												5

ファナック

	B25	G05	G06	B23	G01	H02	F16	H04	B65	B05
B25	176	76	35	18	23	13	11	10	7	5
G05	76	81	18	13	7	5			5	
G06	35	18	36		6				6	
B23	18	13		28						
G01	23	7	6		26				5	
H02	13	5				13	6			
F16	11					6	11			
H04	10	5	6		5			10		
B65	7								8	
B05	5									6

特許ポートフォリオは、知識結合行列の対角線の要素のシェア、知識結合ポートフォリオは、対角線以外の片側半分の要素のシェア²⁹を特徴ベクトルとして表したものとなる。4 大産業用ロボットメーカーの知識結合行列においても相違があり、知識結合行列が

²⁷ 行列の要素が 5 未満の IPC コードは削除した。

²⁸ B23 は、工作機械および機械加工技術であるが、サブクラスでは、B23K (溶接)、B23Q (コンポーネントおよび部品)、B23P (その他の機械加工) が主な分類であることから「溶接等」と略した。

²⁹ 知識結合行列は、対称行列であることから、対角線の要素を除く片側半分が特徴ベクトルの要素となる。

ら算出する特許ポートフォリオと知識結合ポートフォリオ、そして、クラスタ番号に割り振られた特許をもとに算出するクラスタポートフォリオにより、機関ごとの特徴と機関間の相違を計測する。これらの技術ポートフォリオは保有する特許により変化するので、機関のこれらの技術ポートフォリオも時間とともに変化する。

3.2.4 共引用 (co-citation) 関係を利用した複数分野から単一分野間ネットワークへの変換(Factorizing)

本研究では、学術研究分野間の結合関係について分析するので、WoS から得られる学術研究誌に複数割り付けられた分野はそのうちどの分野に学術研究論文が属しているかを推定する必要がある。1つ1つの学術研究論文に当たって学術研究分野かを特定するのでは、大量の学術研究論文がある場合には現実的ではない。

また、特許情報に関しては、特許に割り付けられた技術の特許分類は、特許が属する技術開発分野（特許）そのものであるので、特許の場合は3.2.3（2）の共分類（co-classification）に基づき知識結合ネットワークを構築することができる。しかしながら、特許が複数のIPCコードが割り付けられて初めて技術の結合・融合が形成されるのに対して、特許の引用関係をみることにより、共分類（co-classification）よりは早期に知識結合を検知できる可能性があること、特許の知識結合ネットワークと学術研究分野の知識結合ネットワークと比較検討を行うためにも、知識結合ネットワークを構築する手法は同じであることが望ましい。

そのため、計量書誌学での引用ネットワーク分析の手法を応用し、単一の学術研究分野および単一の技術開発分野（特許）間のネットワークに分解する手法（Factorization Method）を提案する。以下の手法は、学術研究論文と特許の両方に適用でき、同様の手法で分析できるので、説明は、学術研究論文を例に説明する³⁰。

引用ネットワーク分析では、引用関係として、直接引用(direct citation)、共引用(co-citation)、書誌結合(bibliographic coupling)がある。直接引用と共引用の定義を適用することによって、複数の学術研究分野あるいは技術開発分野（特許）を単一の分野間の共引用関係に分解する新しい方法を提案する。この分解法（Factorization Method）は、複数割り付けられた学術研究分野の学術研究論文あるいは技術開発分野（特許）を、個々の単一の分野間の知識結合に変換することを可能にする。

³⁰ 学術研究論文の場合は、著者が引用するのに対して、特許の引用に関しては、出願者引用、審査官引用、第3者引用があり、また、国により特許制度や運用に相違があることに留意する必要がある。

図 3-3 (a) は引用ネットワーク分析[3][47]で用いられてきた引用の定義を示し、図 3-3 (b) は複数の学術研究分野を単一の学術研究分野に分解 (Factorizing) する概念を示す[51]。Paper As が、Paper Ss、Paper Ts をそれぞれ、 n 、 m 引用し、Paper Ss、Paper Ts がそれぞれ学術研究分野 SC1、SC2 に属している場合、Ss と Ts は Paper As によって引用されていることから、共引用(co-citation)関係になる。

n と m がそれぞれ As と Ss および As と Ts の間の引用数の場合、As の論文の数は $n:m$ の比で Ss と Ts の分野の学術研究論文として分配する。さらに、引用数 n 、 m は、Ss と Ts の間の共引用数を計算するために用いる。学術研究論文数と学術研究分野間の引用数は、その合計が分解する前と変わらないように分配する。

この式は、複数の学術研究分野が、その複数の学術研究分野内に含まれる 1 つまたは複数の学術研究分野を引用している限り、任意の数の複数の学術研究分野が割り付けられた場合にも拡張することができる。ただし、引用する分野の論文が複数の学術研究分野に含まれる分野を 1 つも引用していない場合、この式は適用できないため、その場合、その複数の学術研究分野が割り付けられた学術研究論文は分析から除外する。

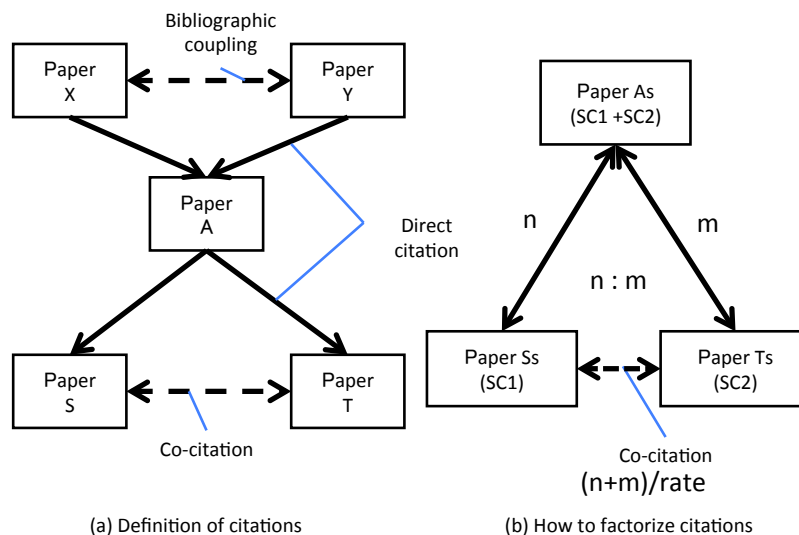


図 3-3 引用関係の定義を利用した複数分野の分解 (Factorization)

共引用 (co-citation) による分解 (Factorizing) を、 k 種類の分野が割り付けられた分野を分解する方法 (Factorization Method) に拡張し一般化した定式化を行う。分解 (Factorizing) する複数の IPC コードが割り付けられた分野や分解 (Factorizing) 後

の分野が知識結合行列のどの行と列にあるかはわからないが、行あるいは列の分野の順番を入れ替えても、知識結合ネットワーク（知識結合行列）における分野間の引用関係は普遍なので、説明の便宜上、分解（Factorizing）しようとする k 種類の UPC コードを含む分野を SC_n とし、分野 SC_n は、分野 $SC_{n-k} \sim SC_{n-1}$ ($1 \leq k \leq n-1$) から構成されているとする。分野数 n （各分野は、複数割り付けられた分野を含む）の SC_1 から SC_n の分野からなる知識結合ネットワーク（知識結合行列）は、 $[P_{ij}]$ ($1 \leq i, j \leq n$) と表すことができる。

図 3-4 は、知識結合ネットワーク（知識結合行列） $[P_{ij}]$ ($1 \leq i, j \leq n$) を図に表したもので、分野 SC_n は、分野 $SC_{n-k} \sim SC_{n-1}$ ($1 \leq k \leq n-1$) の部分知識結合行列を含む知識結合行列を構成する。この知識結合行列から、 SC_n の要素、 $P_{n1} \sim P_{nn}$ （対称行列なので、 $P_{1n} \sim P_{nn}$ に同じ）を分解（Factorizing）し、分野数 $n-1$ の知識結合行列 $[P_{ij}]$ ($1 \leq i, j \leq n-1$) に変換する。

k 種類の IPC コードを含む分野 SC_n の値の P_{nj} ($n-k \leq j \leq n-1$) を分解（Factorizing）した後の知識結合行列を $[R_{st}]$ ($1 \leq s, t \leq n-1$)、 k 種類の分野 $SC_{n-k} \sim SC_{n-1}$ ($1 \leq k \leq n-1$) の値 P_{nj} ($n-k \leq j \leq n-1$) の合計を SUM_{within} 、新しく構築された知識結合行列を $[newP_{ij}]$ ($1 \leq i, j \leq n-1$) とすると、

$$SUM_{within} = \sum_{j=n-k}^{n-1} P_{nj} \quad (3-6)$$

$$[newP_{ij}] = [P_{ij}] + [R_{ij}] \quad (1 \leq i, j \leq n-1) \quad (3-7)$$

と表せる。

P_{nn} は、 $SC_{n-k} \sim SC_{n-1}$ の対角線の要素 $P_{(n-k)(n-k)} \sim P_{(n-1)(n-1)}$ に、 $P_{n(n-k)}$ から $P_{n(n-1)}$ の値に応じて比例分配する。 $P_{n(n-k)}$ から $P_{n(n-1)}$ までは、図 3-3 (b) の分解方法にしたがって、 $SC_{n-k} \sim SC_{n-1}$ の対角線以外の要素 P_{st} ($n-k \leq s, t \leq n-1, s \neq t$) に分解（Factorizing）される。また、分野 $SC_1 \sim SC_{n-k-1}$ の要素 $P_{n1} \sim P_{n(n-k-1)}$ は、 $P_{n(n-k)}$ から $P_{n(n-1)}$ の値に応じて比例分配する。これらを定式化すると以下の通りとなる。

1) $1 \leq i \leq n-k-1$ のとき

$$R_{ij} = P_{nj} * P_{ij} / SUM_{within} \quad (n-k \leq j \leq n-1) \quad (3-8)$$

2) $n-k \leq i \leq n-1$ のとき

$$R_{ii} = P_{nn} * P_{ii} / SUM_{within} \quad (3-9)$$

$$R_{st} = (P_{ns} + P_{nt}) / (k-1) \quad (n-k \leq s, t \leq n-1, s \neq t) \quad (3-10)$$

式 3-8 ～ 3-10 を、式 3-7 に代入することにより、 SC_n の分野が $SC_1 \sim SC_{n-1}$ の分野に P_{n1} から P_{nn} の各要素が分解され、 $n \times n$ の知識結合行列が、 $(n-1) \times (n-1)$ の知識結合行列に変換される。これを複数割り付けられた分野が全て単一の分野になるまで繰り返す

ことにより、単一分野の知識結合ネットワーク（知識結合行列）を構築する。

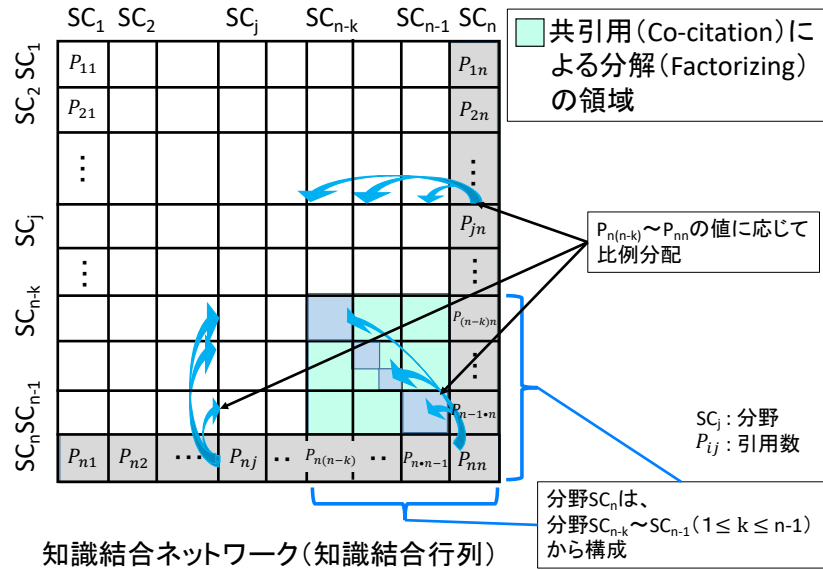


図 3-4 複数分野から単一分野への分解 (Factorizing)

図 3-5 と図 3-6 は、複数の学術研究分野が割り付けられた学術研究論文の掲載論文数と引用数がこれらの式により分配した場合の事例を掲載した。複数の学術研究分野 i の学術研究論文がその学術研究分野に含まれる k 分野を引用している場合、引用の総数を維持するために、引用の合計 $\sum_k P_i$ を $(k-1)$ で割る必要がある³¹。

図 3-5 で算出方法の例を説明すると、Computer science + Engineering の論文数であるノード数は、271 であり、Engineering と Computer science をそれぞれ、50 と 128 引用していることから、Engineering と Computer science とは、 $50 + 128 = 178$ の共引用関係となる。Computer science + Engineering のノード数は、50 : 128 の比で、Engineering と Computer science とに比例配分されることから、Engineering は、元のノード数 288 に、 $271 \cdot 50 / (50 + 128) = 76$ が足され、364 になり、Computer science は、元のノード数 228 に、 $271 \cdot 128 / (50 + 128) = 195$ が足され、423 となる。Robotics は、Computer science + Engineering と 228 の引用関係にあるので、50 : 128 の比で、Robotics は Engineering と $228 \cdot 50 / (50 + 128) = 64$ 、Computer science と $228 \cdot 128 / (50 + 128) = 164$ の引用関係となる。

³¹ 図 3-4 の (b) において、 $rate = k - 1$ である。図 3-6 の場合、 $k = 2$ であることから、共引用数は、 $50 + 128 = 178$ となり、図 3-7 の場合は、 $k = 4$ であるため、各共引用数を 3 で割る。

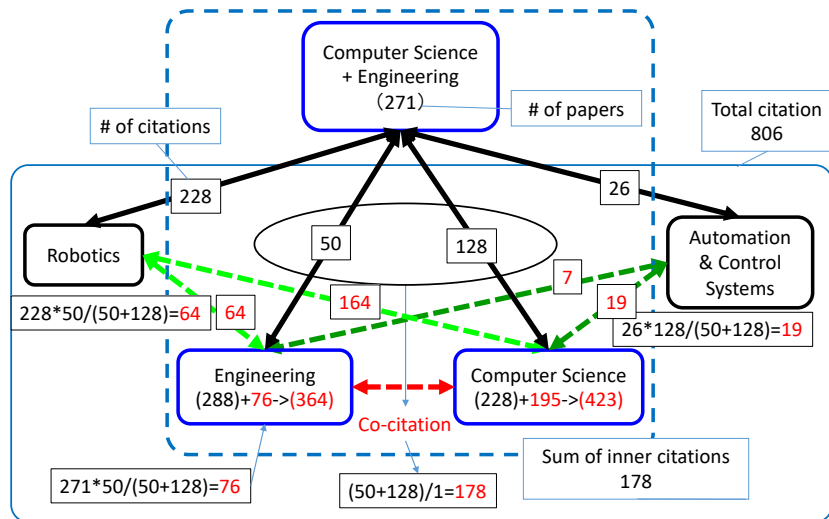


図 3-5 引用関係の定義を利用した複数分野の分解 (Factorizing) の例

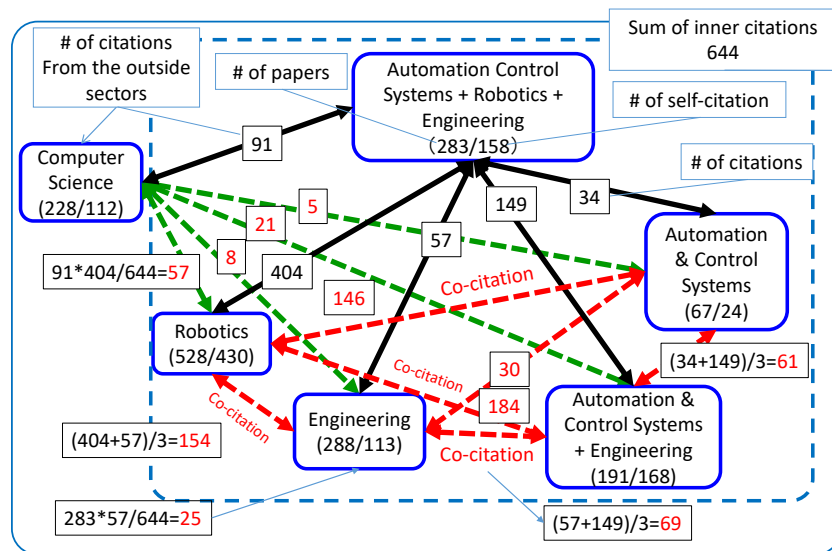


図 3-6 複数分野を3以上の個別分野に分解 (Factorizing) する方法の例

図3-6のAutomation & control systems + Robotics + Engineeringの3分野が割り付けられたノードが、Automation & control systems + Engineering、Automation & control systems、Robotics、Engineeringの4分野を引用している場合で、計算方法を説明すると、例えば、Automation & control systems + Robotics + Engineeringは、

Robotics と 404、Engineering と 57 引用しているので、Robotics と Engineering は、 $(404 + 57)/(4-1) = 154$ の共引用関係となる。同様に、Automation & control systems + Engineering、Automation & control systems、Robotics、Engineering の 4 分野間の共引用関係を計算した結果が、図 3-6 の通りである。

また、これら 4 分野以外の分野との引用関係は、式 3-8 を適用し、Computer science は、Automation & control systems + Robotics + Engineering と 91 の引用関係にあるので、Automation & control systems + Robotics + Engineering が、Automation & control systems + Engineering、Automation & control systems、Robotics、Engineering とそれぞれ、149、34、40、457 の引用関係にあるので、合計 644 との比で、91 を分配する。たとえば、Computer science と Robotics は、 $91 \times 404 / 644 = 57$ の引用関係となる。Computer science と Engineering、Automation & control systems + Engineering、Automation & control systems は、同様の計算式により 91 がそれぞれ、 $57/644$ 、 $149/644$ 、 $34/644$ の比で分配され、8、21、5 の引用関係となる。図 3-6 に記述はないが、Automation & control systems + Robotics + Engineering のノード数 283 は、 $404/644$ 、 $57/644$ 、 $149/644$ 、 $34/644$ の比で、各ノードに分配される。

この分配の計算を、行列で表したものが、図 3-7 である。SC8 は、Automation & control systems、Robotics、および Engineering の 3 つの学術研究分野が割り付けられた複合分野で、これら 3 つの学術研究分野を含んだ分野として、SC4 (Robotics)、SC5 (Engineering)、SC6 (Automation & control systems と Engineering の複合分野)、SC7 (Automation & control systems) と引用関係にある。SC6 は、Automation & control systems と Engineering との複合分野として、SC5、SC7 とは異なる分野として扱う。

SC8 の行と列の値はそれぞれ P_{8j} と P_{i8} を表す。SC8 は、Automation & control systems、Robotics、および Engineering の分野が割り付けられている複合分野である。SC8 は、SC4 (Robotics)、SC5 (Engineering)、SC6 (Automation & control systems および Engineering)、および SC7 (Automation & control systems) と引用関係にあり、それぞれ 404、57、149、および 34 の学術研究論文を引用している。これらの引用の合計は 644 であり、SC8 の 644 の直接引用は、式 3-10 を適用して、共引用として SC4、SC5、SC6、および SC7 に分配する。図 3-7 の通り、それぞれの共引用数が計算される。 $158 (P_{88})$ は、SC8 に割り付けられた論文が同じ分野 SC8 を自己引用していることを意味する。SC8 からの引用割合に応じて、 P_{88} の値を式 3-9 により、 P_{44} 、 P_{55} 、 P_{66} 、 P_{77} に分配する。SC1~SC3 の引用数も、式 3-8 により引用割合に従って分配する。

これにより、SC8 の引用の合計を変えないという条件で、SC8 の引用値が他の学術研

究分野に分配することができる。これらのプロセスを、複数の分野が割り付けられたすべての複合分野が単一の分野になるまで続けることにより、単一の学術研究分野間の引用行列が算出できる。

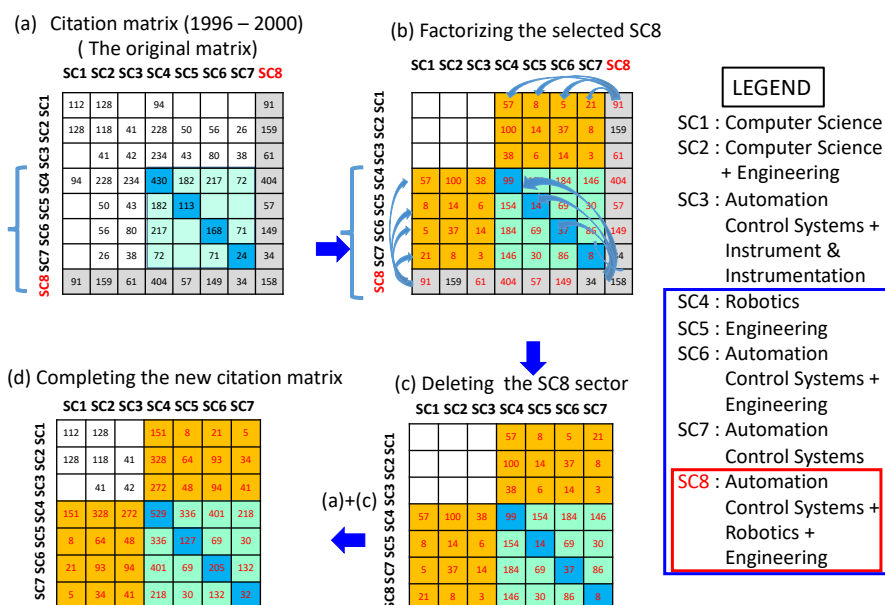


図 3-7 引用行列上での複数分野の因数分解の方法

3.2.5 知識結合の近さ・強さを表す指標

異なる学術研究分野あるいは技術間の結合・融合は、学際的研究または共同研究開発などの相互作用プロセスを通じて進む。第2章で先行研究をみたように、この前提の下、コサイン距離、Jaccard、Pearson's r など、さまざまな方法で技術の類似性あるいは技術の距離または関連性を定量的に測定の試みがなされてきた。[36][41][60][73]

本研究では、知識結合の近さ・強さを計測するため、新たに引用率 (Citation Rate) CIR_{ij} と引用率(Citation Rate) CIR_{ij} をその最大値 $\max(CIR_{ij})$ で除し正規化した指標を結合率 (Connection Rate) COR_{ij} ($0 \leq COR_{ij} \leq 1$) として定義する。引用率(Citation Rate)あるいは結合率 (Connection Rate) COR_{ij} が、知識結合ネットワークの特徴を把握できているかを評価するため、Klavans と Boyack が分析で定義しているコサイン距離と Jaccard[4]を用い、指標間を比較検討した。

各測定値は次のように計算される。

$$\text{Citation Rate} : \text{CIR}_{ij} = P_{ij}/(P_{ii} + P_{jj}) * 2 \quad (3-11)$$

$$\text{Connection Rate: } \text{COR}_{ij} = \text{CIR}_{ij}/\max(\text{CIR}_{ij}) \quad (3-12)$$

$$\text{Cosine} : \text{COS}_{ij} = P_{ij}/\sqrt{S_i S_j} \quad (3-13)$$

(ただし、 $S_i = \sum_{j=1}^n P_{ij}$)

$$\text{Jaccard} : \text{JAC}_{ij} = P_{ij}/(S_i + S_j - P_{ij}) \quad (3-14)$$

式3-11は、分野*i*と分野*j*間の引用数が、分野*i*と分野*j*の自己引用数の平均で除している。分野*i*と分野*j*との引用関係からみた分野間の近さ・強さをみる指標としては、その他に、分野*i*と分野*j*の自己引用数の幾何平均との比や分野*i*と分野*j*の学術研究論文数あるいは特許件数との比などが考えられるが、前者は、分野*i*、*j*のいずれかの自己引用数がゼロの場合は、無限大になってしまうこと、後者は、学術研究論文数や特許件数が多い分野が中心となった知識結合ネットワークとなり、学術研究論文数や特許件数が少ない分野との知識結合が検出されにくいという傾向にあることから、式3-11を用いることとした。

3.2.6 知識結合ネットワークの特徴量の抽出

3.2.3で構築した知識結合行列を、Networkx³²で描写すると、クラスタの大きさや特徴により、図3-8のように、学術研究論文、特許とも、2分野間で結合（2つのノードと1つのリンク）の最小単位の結合から、帯状、放射状、相互に結合した完全グラフ、これらの組み合わせの結合となることが観察された。また、そのクラスタにより、相互結合が強いネットワークから、1つのノードとのみ結合する枝状の多いネットワークなど多様である。

Engineering、Robotics、Computer science、Automation & control systems の4工学分野は、1990年代から、お互いに接合し完全グラフを形成し、Surgery は、放射状に、Urology & Nephrology、Engineering、Oncology などの学術研究分野と結合していることが観察された。前者は、これらの学術研究分野が密接に関係し、結合・融合しながら、研究開発が行われていること、後者は、Surgery を中心に、それぞれの学術研究分野との研究開発が行われていることと考えられる。

そこで、これらを定量的に把握し、比較検討できる指標について検討した。

³² Python のネットワーク分析パッケージソフトウェア

図 3-8 の右図のように、お互いに結合し完全グラフを形成するノード、完全グラフではないが、複数のノードに結合するノード、枝のように1つのノードとのみ結合するノードの組み合わせとなっていることがわかった。また、クラスタ内のノードには、他の分野とは結合していないノードが多くあることもわかった。

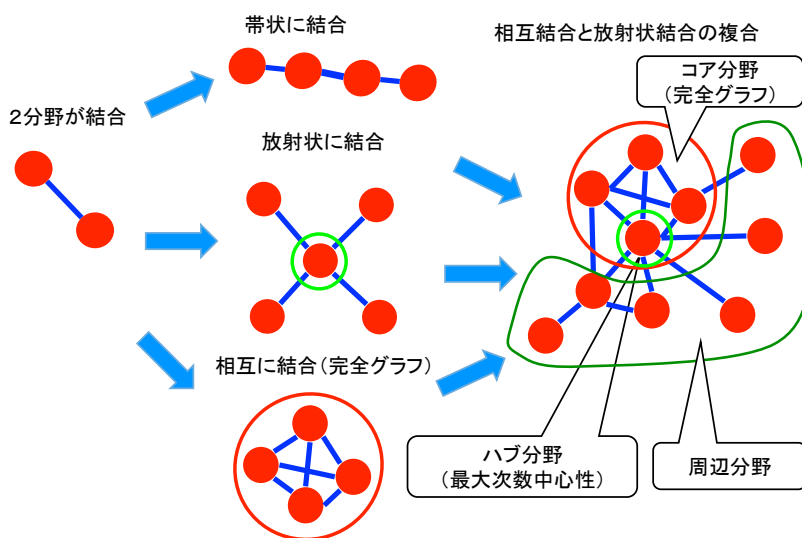


図 3-8 知識結合状態の定量化

ソーシャルネットワーク (social network) などのネットワーク構造を解析する研ため、コア/ 周辺構造 (Core/Periphery Structure) という概念の構造解析研究が行われてきている[1][74]。ネットワークには、緊密に結合したコア部分とネットワークの結合が疎 (sparse) である周辺 (Periphery) に別れ、このコア/周辺構造を検知するアルゴリズムを開発する研究である。本研究で構築した知識結合ネットワークは、同様にコア部分と周辺部分とに概ね分かれていることから、コア/ 周辺構造 (Core/Periphery Structure) の概念を知識結合ネットワークにも適用した。

ノード (学術研究分野あるいは技術開発分野 (特許)) については、

- 1) コア分野 (中核分野) : 完全グラフをなすノード群 (Nd_{core})
- 2) 周辺分野 : コア分野に結合しているノード群 (Nd_{peri})
- 3) 関連分野 : 知識結合していないノード (Nd_{rel})
- 4) ハブ分野 (中心分野) : 最大次数中心性 (最も多くのノードに結合) のノード (Nd_{hub})

と定義する。

また、知識結合ネットワークの特徴を表す指標として、

1) 平均クラスリング係数 (average clustering coefficient) (C_{co})

3つのノードが互いに接続し三角形を成すノードであるクラスタ³³の数のクラス
タ (三角形を成すノード) の最大数との比。

$$(式) C_{co} = \frac{1}{N_d} \sum_i Ctr_i \quad (3-15)$$

$Ctr_i =$ (ノード i を含むクラスタ (ノードの三角形) の数) / (ノード i
とつながっているノードとでできる三角形の総数) $(3-16)$

($0 \leq C_{co} \leq 1$) (0 : 1つもクラスタがない。 1 : 完全グラフ)

2) 次数中心性 (degree centrality) (Cen_{Di})

$$Cen_{Di} = (\text{ノード } i \text{ とつながっているエッジ数}) / (N_d - 1) \quad (3-17)$$

(N_d : ノード数)

3) 平均次数中心性 (Cen_D)

$$Cen_D = \frac{1}{N_d} \sum_i Cen_{Di} \quad (3-18)$$

4) コアノード数 (n_{core})

5) 周辺ノード数 (n_{peri})

6) 関連ノード数 (n_{rel})

7) クラスタ内のノード数合計 ($n_{total} = n_{core} + n_{peri} + n_{rel}$) $(3-19)$

8) 知識結合率 (r_{KC})

$$r_{KC} = (n_{core} + n_{peri}) / n_{total} \quad (3-20)$$

を採用する。

これらの指標を用いて分析することで、知識結合ネットワークの特徴を捉える。

第4章において、上記手法を使用し、学術研究分野、技術開発分野 (特許) における知識結合ネットワークの分析評価を行った。

3.2.7 技術ポートフォリオ分析

機関の技術ポートフォリオを分析するために、過去の研究では、IPC コードなどの特許分類を用いた分析は多い[4][5][59]。ただし、特許分類を用いた技術ポートフォリオ分

³³ ネットワーク分析では、「クラスタ」と呼ぶ。

析の場合、全技術分野を対象に多岐・多様にわたる場合には機関の保有する主要な技術間の相違や類似性を計測できるが、技術の構成が似通っている場合には計測結果が必ずしも良く説明できないことが報告されている[102]。

ロボットに関する特許について、機関が保有する特許件数をもとに特許ポートフォリオを計測したが、保有する IPC コードの分布が似通っているため、類似性が強く指標に反映してしまうため、手術用ロボットを開発販売する Intuitive Surgical Inc.や家庭用掃除ロボットの開発販売を行う iRobot など特徴ある機関を除き、機関間の相違が明確には出なかった。そこで、クラスタ分析結果のクラスタ番号を利用した技術の特徴ベクトルを導入することで、ロボットのように、複数の技術より形成され、その技術の構成が似通っている場合であっても、機関の技術ポートフォリオの相違が分解できることを示した (T. Kose, I. Sakata (2018)[51])。

しかしながら、クラスタ番号によるポートフォリオの場合、特許ポートフォリオが全く異なっている場合でも、同様のクラスタに属した場合には、クラスタポートフォリオが近似するためにうまく技術ポートフォリオの相違が計測できない場合があることも判明した。そこで、特許ポートフォリオが同様でも機関によって知識結合ネットワークの構造が異なることが知識結合ネットワークの構造分析で明らかになったので、特許ポートフォリオに加え、新たに、「クラスタポートフォリオ」と「知識結合ポートフォリオ」を定義し、技術ポートフォリオ分析を行うこととした。

まず、各機関のある一定期間ごと IPC コードベースの特許保有分布から、各機関の技術ポートフォリオの特徴ベクトルを、特許ポートフォリオベクトル V_{ipc_k} 、クラスタポートフォリオベクトル $V_{cluster_k}$ 、知識結合ポートフォリオベクトル V_{kc_k} をそれぞれ以下のように定義する。

$$V_{ipc_k} = [IPC_{11k}, IPC_{22k}, \dots, IPC_{nnk}] \quad (k: \text{Organization}) \quad (3-21)$$

$$IPC_{iik} = P_{iik} / \sum_i P_{iik} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-22)$$

$$V_{kc_k} = [NKC_{12k}, NK C_{ijk} \dots, NK C_{(n-1)nk}] \quad (3-23)$$

$$NKC_{ijk} = P_{ijk} / \sum_{ij} P_{ijk} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) (i < j \text{ \& } i \neq j) \quad (3-24)$$

$$V_{cluster_k} = [CL_{1k}, CL_{2k}, \dots, CL_{mk}] \quad (3-25)$$

$$CL_{ik} = CLS_{ik} / \sum_i CLS_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3-26)$$

P_{ijk} は機関 k の知識結合行列の (i, j) の要素、すなわち、IPC コード の i と j とが知識結

合した特許数を表す。i=j の場合、すなわち、 P_{iik} は、機関 k の IPC コード i の特許数を表す。

CL_{ik} は機関 k の保有する特許のうち、クラス i に属する特許の数の割合を表す。

特徴ベクトル間の類似度は、距離として表される。ベクトル間の距離を測定する方法はいくつかあるが、以下に定義するコサイン距離 (Cosine distance) を採用した。

V_{ipc_i} と V_{ipc_j} との間、 V_{kc_i} と V_{kc_j} との間および $V_{cluster_i}$ と $V_{cluster_j}$ との間のコサイン距離は次のように計算される。

$$CD_{ipc_{ij}} = \frac{V_{ipc_i} \cdot V_{ipc_j}}{\|V_{ipc_i} \cdot V_{ipc_j}\|} \quad (3-27)$$

$$CD_{kc_{ij}} = \frac{V_{kc_i} \cdot V_{kc_j}}{\|V_{kc_i} \cdot V_{kc_j}\|} \quad (3-28)$$

$$CD_{cluster_{ij}} = \frac{V_{cluster_i} \cdot V_{cluster_j}}{\|V_{cluster_i} \cdot V_{cluster_j}\|} \quad (3-29)$$

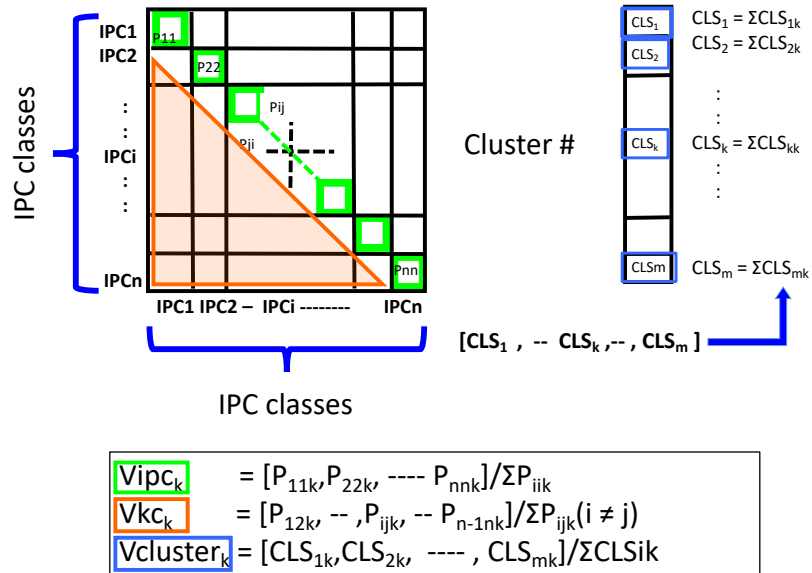


図 3-9 特許ポートフォリオ、知識結合ポートフォリオ、クラスターポートフォリオの関係

特許ポートフォリオベクトル V_{ipc_k} 、クラスタポートフォリオベクトル $V_{cluster_k}$ 、知識結合ポートフォリオベクトル V_{kc_k} と知識結合ネットワークを表す知識結合行列との対応関係は、図3-9に示した。知識結合行列の対角線を要素とするベクトルが、特許ポートフォリオ、行列の対角線の要素を除いた片側を要素とするベクトルが知識結合ポートフォリオ³⁴に対応する。機関 k のクラスタポートフォリオベクトルは、式3-25の通り、知識結合行列をクラスタごとの特許件数のシェアを要素とするベクトルであり、図3-9の右図に対応する。

3.3 分析手法の評価

3.3.1 複数分野から単一分野へのネットワークへの分解 (Factorization)

表3-2は、3.2.3 (1) で定義した引用行列 P_{ij} を引用数の上位10の学術研究分野について、WoS データセット1の2011年～2015年までの期間の学術研究論文と、単一分野のみに割り付けられた学術研究論文を比較したものである。行列の要素の値は異なるものの、引用行列 P_{ij} の構造はほぼ同じとなっている。すなわち、単一分野に割り付けられた学術研究論文は、ロボットに関する全学術研究論文の約半数(51.0%) (表1-4参照)であり、複数の分野にまたがる学術研究誌に同等の数の学術研究論文が掲載されているが、ロボットに関する学術研究としては、学術研究領域としてはほぼ同様であることを示している。学術研究領域は同様であっても、一部の分野および一部の分野間の引用数が大幅に増えている。1,000件以上増加した分野には、黄色の背景色としたが、特に、主要工学4分野、すなわち、Robotics、Engineering、Computer science、Automation & control systemsの各分野と4分野間の引用が全て大幅に増えている。これは、元の学術研究論文数も1,000件以上増加しているので、4つの分野を対象にした学術研究誌に多くのロボット関係の学術研究論文が掲載されていることもあるが、同様に4工学分野間の引用数も大幅に増加しており、これら4工学分野間での引用が多く、ロボットに関する学術研究として、これら4工学分野が中心的な研究となっていることを反映していると考えられる。それ以外で1,000件以上増加した学術研究分野は、Surgery、Urology & Nephrology (泌尿器学・腎臓病学)、Otorhinolaryngology (耳鼻咽喉科学)である。この医学3分野は、元の学術研究論文数(# of original papers)はそれほど増加していないにもかかわらず、引用数が増加しており、共引用関係の分解

³⁴ 知識結合ネットワークは、対称行列であり、行列の対角線の要素を除く片側の要素の特徴ベクトルが、知識結合ポートフォリオとなる。

(Factorization) により増加したものであり、強い共引用関係があると考えられる。

分解 (Factorization) の結果により、Otorhinolaryngology (耳鼻咽喉科学) と Surgery との関係があることを単一の学術研究分野に分解したことにより見出しやすくなったことを示している。その他、Obstetrics & Gynecology (産婦人科学) が Surgery と Urology & Nephrology (泌尿器学・腎臓学) との間で引用数の増加がみられ、産婦人科学とロボットによる手術、泌尿器学・腎臓学との関連が深いことを示している。

Urology に関しては、Da Vinci の手術ロボットが FDA の承認を得て、前立腺がんの手術を行なって普及したとの医学系の学術専門誌にある[93]。Otorhinolaryngology と Surgery との関係の文献[1][25]によると、2006 年に、米国ペンシルバニア大学の臨床現場で、ロボットによる手術が導入されて以来、喉頭がんや甲状腺手術にロボットによる手術が普及したとある。また、産婦人科においても、腹腔鏡手術によりロボットによる手術が急速に広まったと全米産婦人科大学協会 (The American College of Obstetricians and Gynecologists:ACOG) [88]にあり、上記の結果は実際に耳鼻咽喉科や産婦人科においてロボットによる手術の普及に合致しており、知識結合が実際の研究開発を反映したものであると考えられる。

表 3-2 単一学術研究分野の学術研究誌のみに掲載された学術研究論文と分解後の引用行列

Factorized Citaion Matrix		# of Original papers	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC8	SC9	SC10
SC1	Urology&Nephrology	2,011	15,457	43	3,502	187			746	17		
SC2	Robotics	4,817	43	10,016	310	14,167	11,921			8,677	1,237	
SC3	Surgery	1,876	3,502	310	7,274	756	54		1,373	71	121	1,641
SC4	Engineering	4,368	187	14,167	756	9,295	5,030			6,531	527	
SC5	ComputerScience	2,576		11,921	54	5,030	3,488			3,586	553	
SC6	Meteorology&AtmosphericSciences	195						1,482				
SC7	Obstetrics&Gynecology	477	746		1,373				2,063			
SC8	Automation&ControlSystems	1,744	17	8,677	71	6,531	3,586			3,623	129	
SC9	Science&Technology-OtherTopics	595		1,237	121	527	553			129	839	
SC10	Otorhinolaryngology	279			1,641							1,766

Single Sector's Citation Matrix		SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC8	SC9	SC10
SC1	Urology&Nephrology	1895	13823	43	2869	155		441			
SC2	Robotics	3084	43	8301	228	3224	2286		1237	650	
SC3	Surgery	1278	2869	228	5681	409	49	785		121	273
SC4	Engineering	1729	155	3224	409	2043	506		327	195	
SC5	ComputerScience	1249		2286	49	506	1773		264	289	
SC6	Meteorology&AtmosphericSciences	169					1129				
SC7	Obstetrics&Gynecology	335	441		785			1058			
SC8	Automation&ControlSystems	584		1237		327	264		600	50	
SC9	Science&Technology-OtherTopics	477		650	121	195	289		50	359	
SC10	Otorhinolaryngology	160			273						344

※ 主要工学4分野: Engineering、Robotics、Computer science、Automation & control systemsの4分野

※ : 1,000以上増加した分野

これらの事実は、単一分野のみの知識結合ネットワークから読み取れないわけでは
ないが、複数分野にまたがる学術研究論文を分解（Factorization）することにより得られ
る単一分野間の知識結合ネットワークでは、より顕著にその傾向が現れており、分野を
分解する手法（Factorization Method）が分野間の知識結合を検知するのに有用である
と考える。

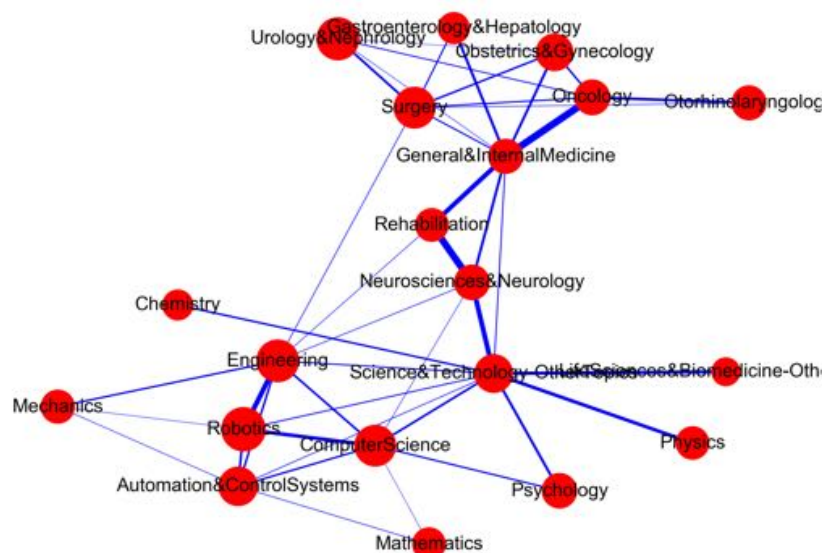


図 3-10 単一分野のみ知識結合ネットワーク（2011-2015 年）

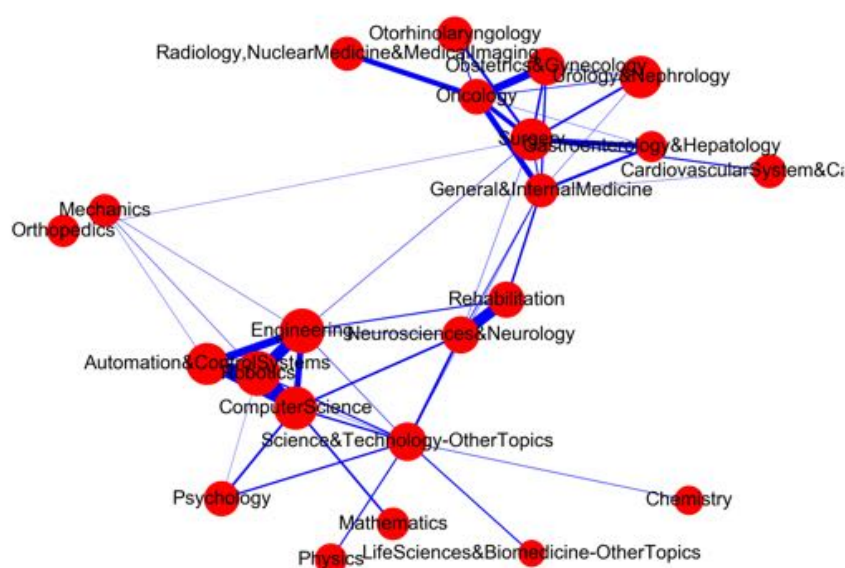


図 3-11 分解(Factorizing)後の単一分野間知識結合ネットワーク（2011-2015 年）

図 3-10、図 3-11 に、それぞれ単一学術研究分野の学術研究誌に掲載された学術研究論文の引用行列と分解後の引用行列の引用ネットワークのグラフを示す。ノードの大きさは、対数スケールで各学術研究分野に割り付けられた学術研究論文の数を表す。エッジの幅は 3.2.5 の式 3-11 で計算された引用率 (CIR) を表す。

引用のネットワーク構造は、図に示すように基本的に互いに似ている。2 つの大きなグループ、すなわち工学系グループと医学系グループが見られる。Neuroscience & Neurology と Rehabilitation からなる結合ペアは、工学系グループと医学系グループの間の橋渡しのようである。工学系グループと医学系グループの両方において、図 3-11 の主要分野間の関係は、図 3-10 の単一分野の引用行列のグラフよりも強調されている。

これは、複数の分野に割り付けられた学術研究論文の引用行列の分解 (Factorization) により、これらが含まれる学術研究分野間の関係が共引用により強調されたと解釈できる。これは、複数の分野に割り当てられた学術研究誌自体が学際的な研究が多いことを反映していると考えられる。

単一の学術研究分野および技術開発分野 (特許) の知識結合ネットワークが構築できたことにより、ロボット分野における学術研究 (Science) および技術開発 (Technology) において知識結合の分析が可能となった。

3.3.2 知識結合の近さ・強さに関する指標の評価

表 3-3 の左側は、それぞれ結合率 (COR)、コサイン距離、および Jaccard の指標を計算し比較したものである。これらの計測値は、それぞれの指標のなかでの大きい値の学術研究分野間の結合ペアはどの指標でも検出できている。

結合率 (COR) とコサイン距離の指標を比較すると、Oncology と General & Internal Medicine、General & internal medicine と Gastroenterology & Hepatology、Computer Science と Neuroscience & neurology は、結合率 (COR) では、平均値以上であるが、コサイン距離では、平均値以下となっている一方、Surgery と Cardiovascular system & Cardiology、Engineering と Rehabilitation、Surgery と General & internal medicine、Urology & Nephrology と Oncology、Urology & Nephrology と General & internal medicine では、結合率 (COR) では平均値以下と値は小さいが、コサイン距離の値では平均値以上と検出されている。

一部に計測値の大小に違いはあるが、ほぼ同じの結合ペアが抽出されており、知識結合ネットワークの構造を見る場合はどちらの指標でも良いと考える。

Total					Cluster #1		
Sector1	Sector2	COR	Cosine	Jaccard	Sector1	Sector2	COR
Robotics	ComputerScience	1.000	0.333	0.189	Robotics	ComputerScience	1.000
Robotics	Engineering	0.831	0.326	0.193	Robotics	Engineering	0.682
Neurosciences&Neurology	Rehabilitation	0.804	0.351	0.212	Robotics	Automation&ControlSystems	0.668
Robotics	Automation&ControlSystems	0.721	0.260	0.138	Engineering	Automation&ControlSystems	0.612
Engineering	Automation&ControlSystems	0.573	0.219	0.118	ComputerScience	Automation&ControlSystems	0.497
ComputerScience	Automation&ControlSystems	0.571	0.146	0.078	ComputerScience	Engineering	0.461
Obstetrics&Gynecology	Oncology	0.565	0.216	0.121	ComputerScience	Neurosciences&Neurology	0.169
Engineering	ComputerScience	0.446	0.157	0.083	ComputerScience	Psychology	0.152
Oncology	General&InternalMedicine	0.413	0.035	0.016	Psychology	Neurosciences&Neurology	0.065
Surgery	Gastroenterology&Hepatology	0.385	0.328	0.112			
Radiotherapy NuclearMedicine&MedicalImaging	Oncology	0.380	0.087	0.030			
Surgery	Oncology	0.320	0.202	0.085			
General&InternalMedicine	Gastroenterology&Hepatology	0.214	0.012				
Surgery	Otorhinolaryngology	0.206	0.185	0.068			
Urology&Nephrology	Surgery	0.175	0.159	0.086			
ComputerScience	Psychology	0.169	0.097	0.021			
Surgery	Obstetrics&Gynecology	0.167	0.123	0.052			
ComputerScience	Neurosciences&Neurology	0.164	0.058	0.021			
ComputerScience	Mathematics	0.160	0.099	0.019			
Rehabilitation	General&InternalMedicine	0.157	0.060	0.029			
Obstetrics&Gynecology	General&InternalMedicine	0.141	0.079	0.036			
Surgery	CardiovascularSystem&Cardiology	0.121	0.153	0.036			
Engineering	Rehabilitation	0.109	0.078	0.024			
Surgery	General&InternalMedicine	0.108	0.103	0.030			
Otorhinolaryngology	Oncology	0.092	0.038	0.019			
Neurosciences&Neurology	General&InternalMedicine	0.087	0.027	0.013			
Urology&Nephrology	Oncology	0.075	0.100	0.040			
Engineering	Neurosciences&Neurology	0.055	0.037	0.012			
Surgery	Engineering	0.052	0.026	0.013			
Urology&Nephrology	Obstetrics&Gynecology	0.048	0.067	0.028			
Robotics	Mechanics	0.047	0.061				
Surgery	Neurosciences&Neurology	0.042	0.030	0.012			
Engineering	Mechanics	0.039	0.052				
Urology&Nephrology	General&InternalMedicine	0.038	0.078	0.022			
CardiovascularSystem&Cardiology	General&InternalMedicine	0.036	0.011				
Oncology	Gastroenterology&Hepatology	0.034					
Automation&ControlSystems	Mechanics	0.033	0.023				
Surgery	Orthopedics	0.033	0.054				
Robotics	Psychology	0.030	0.035				

Cluster #2			
Sector1	Sector2	COR	
Robotics	Engineering	1.000	
Rehabilitation	Neurosciences&Neurology	0.852	
Robotics	Automation&ControlSystems	0.791	
Robotics	ComputerScience	0.653	
Engineering	Automation&ControlSystems	0.631	
Automation&ControlSystems	ComputerScience	0.485	
Engineering	ComputerScience	0.372	
Engineering	Rehabilitation	0.209	
Rehabilitation	General&InternalMedicine	0.160	
Neurosciences&Neurology	General&InternalMedicine	0.115	
Robotics	Mechanics	0.094	
Engineering	Neurosciences&Neurology	0.092	
Robotics	Rehabilitation	0.070	
Engineering	Mechanics	0.068	

Cluster #3			
Sector1	Sector2	COR	
Obstetrics&Gynecology	Oncology	1.000	
General&InternalMedicine	Oncology	0.892	
Engineering	Robotics	0.882	
Surgery	Gastroenterology&Hepatology	0.636	
Surgery	Oncology	0.521	

69

要がある。

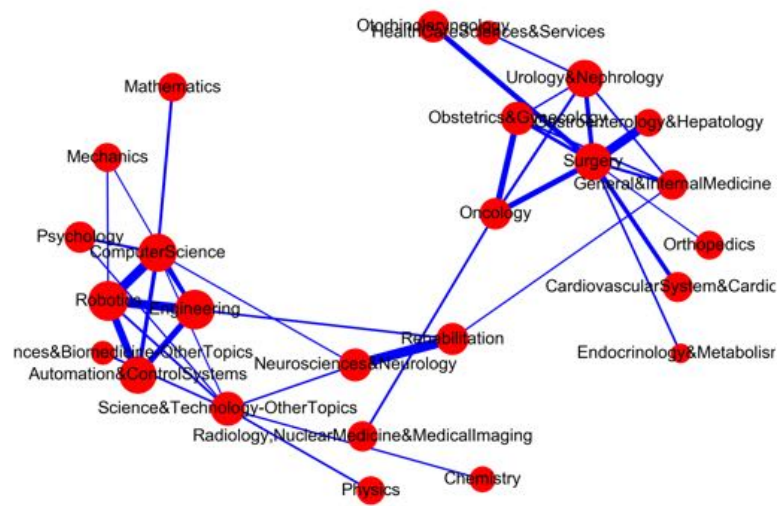


図 3-12 コサイン距離による知識結合ネットワーク

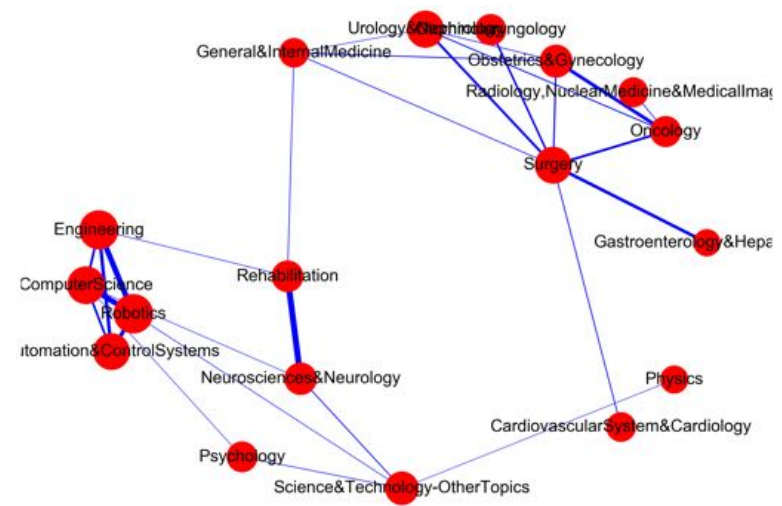


図 3-13 Jaccard による知識結合ネットワーク

引用率（CIR）あるいは結合率（COR）とコサイン距離では、知識結合ネットワークの構造はほぼ同様であることが確かめられたが、本研究では、知識結合の形成により、研究開発の進捗や社会実装、実用化の度合いを把握することを目指しているので、学術研究分野間、技術開発分野（特許）間の結合・融合の近さ・強さも重要である。そこで、引用率（CIR）とコサイン距離で指標としてどちらが学術研究分野間、技術開発分野（特許）間の結合・融合の強さを表すのに適しているかを、それぞれの式3-1 1、3-1 3

より、検証する。

$$CIR_{ij} = P_{ij} / (P_{ii} + P_{jj}) * 2 \quad (3-11)$$

$$COS_{ij} = P_{ij} / \sqrt{S_i \cdot S_j} \quad (3-13)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (3-30)$$

引用率 (CIR_{ij}) とコサイン距離 (COS_{ij}) との比を取り、指標としてどの条件の場合に、引用率がコサイン距離より結合・融合の指標が大きくなるかを検証する。

引用率 (CIR_{ij}) とコサイン距離 (COS_{ij}) の比を RT_{ij} と定義すると、

$$RT_{ij} = CIR_{ij} / COS_{ij} = \frac{2 \cdot \sqrt{S_i \cdot S_j}}{(P_{ii} + P_{jj})} \quad (3-31)$$

すなわち、知識結合行列の i 行、 j 行 (あるいは、 i 列、 j 列) の合計が大きくなるほど、 RT_{ij} は大きくなる。Jaccard ほどではないが、コサイン距離 (COS_{ij}) についても、式 3-31 から、知識結合する要素が多いと小さくなる傾向があり、特定の分野間の知識結合の強さをみる場合、コサイン距離 (COS_{ij}) はそれ以外の分野間の知識結合を受けることとなる。

他の分野の知識結合の影響を受けず、かつ、 S_i 、 S_j が最も小さい値となるのは、 P_{ii} 、 P_{jj} 、 P_{ij} 以外の行の要素がゼロの場合であるので、 S_i および S_j が、式 3-32、3-33 の場合に、 RT_{ij} が 1 以上になる条件を求める。

$$S_i = P_{ii} + P_{ij} \quad (3-32)$$

$$S_j = P_{jj} + P_{ij} \quad (3-33)$$

式 3-31 に式 3-32、3-33 を代入し計算すると、

$$\begin{aligned} RT_{ij} &= \frac{2 \cdot \sqrt{(P_{ii} + P_{ij}) * (P_{jj} + P_{ij})}}{(P_{ii} + P_{jj})} \\ &= \frac{2 \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{P_{ij}}{P_{ii}}\right) * \left(\frac{P_{jj}}{P_{ii}} + \frac{P_{ij}}{P_{ii}}\right)}}{\left(1 + \frac{P_{jj}}{P_{ii}}\right)} \\ RT_{ij} &= \frac{2 \cdot \sqrt{(1 + \alpha) * (r + \alpha)}}{(1 + r)} \end{aligned} \quad (3-34)$$

ただし、

$$\alpha = \frac{P_{ij}}{P_{ii}} \quad (3-35)$$

$$r = \frac{P_{jj}}{P_{ii}} \quad (3-36)$$

P_{ii} 、 P_{jj} で、大きい値を i 行とすると、 $0 \leq r \leq 1$ となる。

式3-34で、 $RT_{ij} \geq 1$ 、すなわち、 CIR_{ij} が COS_{ij} 以上となる条件を求める。

$$\frac{2 \cdot \sqrt{(1+\alpha)(r+\alpha)}}{(1+r)} \geq 1 \text{ より、} 4(1+\alpha)(r+\alpha) \geq (1+r)^2$$

したがって、

$$4\alpha^2 + 4(1+r)\alpha - (r-1)^2 \geq 0$$

$0 \leq r \leq 1$ より、

$$\alpha \geq \frac{-r-1+\sqrt{2(r^2+1)}}{2} \geq 0 \quad (0 \leq r \leq 1) \quad (3-37)$$

$r = 0$ のとき ($P_{jj} = 0$ のとき)、 $\alpha \geq \frac{-1+\sqrt{2}}{2} \cong 0.2$ すなわち、 $P_{ij} \geq 0.2P_{ii}$

$r = 1$ のとき ($P_{jj} = P_{ii}$ のとき)、 $\alpha \geq 0$ すなわち、 P_{ij} は、どんな時でも、 CIR_{ij} が COS_{ij} 以上となる。また、 α は、 $0 \leq r \leq 1$ の間で、単調減少である。

本研究では、知識結合の弱い値の検知より、知識結合の強さにより、研究開発の進捗や社会実装、実用化の度合いをみることに重点があるので、少なくとも自らの引用 P_{ii} 数より、約1/5以上であれば、 P_{ij} はコサイン距離よりは大きく計測されるので、 CIR_{ij} を指標として用いることは妥当である。本研究では、知識結合の強さを計測する尺度として、引用率 (CIR_{ij}) または、 CIR_{ij} を正規化した結合率 (COR_{ij}) を用い分析した。

3.3.3 クラスタ化（カテゴリ分け）による知識結合抽出の影響

学術研究論文全体で算出した知識結合ネットワークにおける学術研究分野間の結合関係が、クラスタリングした後のクラスタごとの知識結合ネットワークにおける学術研究分野間の関係が維持されており、かつ、クラスタごとに、ある特徴を持った各クラスタの知識結合関係が抽出されるのであれば、クラスタごとに、知識結合ネットワークの構造と特徴を分析することによって、より詳細に評価することができる。全体の知識結合ネットワークから抽出した結合ペアとクラスタごとの知識結合ネットワークから抽出し

た結合ペアとを比較し、全体とクラスタ間で抽出された結合ペアが維持されているか、また、各クラスタにおいて特徴的な結合ペアが抽出できているかを検証する。

表3-3は、WoS データセット1の2011年から2015年の間の全ての学術研究論文と、クラスタ#1からクラスタ#3までのクラスタごとの学術研究論文の学術研究分野間の結合率 COR_{ij} を降順で示したものである。表3-3によれば、クラスタ#1、#2、および#3の学術研究分野の平均値以上の結合ペア（黄色の背景色）は、全体の学術研究論文においても上位に含まれており、各クラスタのみにしか現れない結合ペアについてもほぼ、全体の学術研究論文の結合ペアにもあるが、各クラスタにのみ抽出された結合ペアもある。たとえば、クラスタ#1のPsychologyとNeuroscience & Neurology、クラスタ#2のRoboticsとRehabilitation、クラスタ#3のEngineeringとRadiology, Nuclear Medicine & medical Imagingである。逆に、全体の学術研究論文の結合ペアには現れているが、各クラスタにはないものも一部ある。(Radiology, Nuclear Medicine & medical ImagingとOncology、Computer ScienceとMathematics、SurgeryとNeuroscience & Nephrology、Cardiovascular System & CardiologyとGeneral & Internal Medicine)。これは、クラスタ#1～3以外に含まれる場合とクラスタ#1～3の閾値を全体と同じ閾値で設定（論文数10以上、 $COR0.05$ 以上）しているために、規模の小さくなる各クラスタでは削除されるためである。

各クラスタのみに含まれる結合ペアは、表3-3の通り、クラスタ#3が医療・ヘルスケア分野中心に多く抽出されているほか、クラスタ#1、#2においても、特に、結合率の平均以下において抽出されており、各クラスタの特徴を反映した知識結合が形成されている。全学術研究論文においても学術研究分野間の結合率 (Connection Rate) COR_{ij} を抽出できていることがわかったが、各学術研究分野間が複雑に結びつくため、個々の結合関係を全学術研究論文で分析することは困難である。

一方、①クラスタごとにおいても、学術研究分野間の結合率 COR_{ij} を抽出できていることと、②各クラスタは引用関係で結ばれた関連性のある学術研究論文の群（グループ）をなしていること、③結合率 COR_{ij} は引用関係から算出される指標であることから、クラスタ化によって結合ペアの関係が維持され、関連性のある学術研究論文の群（グループ）ごとに知識結合の関係を分析することができるとわかった。

各クラスタの各学術研究分野間の結合率 COR_{ij} をみると、いくつかの特定の学術研究分野間で互いに強い結合関係があることが観察される。たとえば、論文全体、クラスタ#1、#2において、4つの工学分野（Engineering、Robotics、Computer science、Automation & control systems）がお互い全て結合、すなわち、完全グラフを構成してい

る。

クラスタ #2 の Rehabilitation、Neuroscience & Neurology、General & internal medicine、クラスタ #3 の Engineering、Robotics、Computer science は 3 次の完全グラフを形成している。また、Surgery、Urology & Nephrology、Oncology、General & internal medicine も完全グラフを構成している。

クラスタ #3 では、2011 年と 2015 年の間に、医療・ヘルスケア分野において、Surgery と医学系の学術研究分野が互いに密接に関係していることがわかり、Surgery などのいくつかの医療・ヘルスケア分野は工学分野との結合関係が見られる。例えば、Surgery は Engineering や Robotics と結びつき、Radiology, nuclear medicine & medical imaging は Engineering と結合している。

この学術研究分野の結合の関係を定量化することで、知識結合ネットワークの特徴を定量的に把握することが可能となる。知識結合ネットワークから、3.2.6 で設定した知識結合ネットワークに関する指標を用いて、その結合の仕方の特徴やハブやコアとなっている中心的役割の学術研究分野の抽出と特徴量の把握が可能となる。

3.3.4 分析期間の相違に伴うクラスタリングのカテゴリ組み換えの影響

Newman の高速クラスタリングアルゴリズムによるクラスタ・ネットワーク分析では、引用関係をもとにクラスタリングを行うことから、分析期間によりクラスタリングの結果のカテゴリが変動する。これは、後年の学術研究論文が過去の学術研究論文を新たに引用するために、新たな引用関係によってカテゴリに組み替えが生じるためである。特許によるクラスタ・ネットワーク分析も同様である。したがって、クラスタ・ネットワーク分析の結果を用いる場合、分析期間によるカテゴリ組み換えの影響を考慮する必要がある。

表 3-4 は、WoS データセット 1 (～2016 年)、WoS データセット 2 (～2018 年) のデータセット間で、個々の学術研究論文がそれぞれのデータセットのクラスタに割り付けられたかを示す。また、表 3-5 は、DI データセット 1 (～2017 年)、DI データセット 2 (～2018 年) のデータセット間で、個々の特許がそれぞれのデータセットのクラスタに割り付けられたかを示す。

WoS データセット 1 と 2 では、ほぼ 2 年間の差であるが、その間に、新しい学術研究論文は、18,304 件加わったことにより、WoS データセット 1 のクラスタ # 1 が、WoS データセット 2 のクラスタ # 1 と # 2 にほぼ 2 分され、WoS データセット 1 のクラス

タ#2は、約6割がWoSデータセット2のクラスタ#1に、WoSデータセット1のクラスタ#3は、ほぼWoSデータセット2のクラスタ#3に移行し、WoSデータセット1のクラスタ#4は、約2/3がWoSデータセット2のクラスタ#2に組み込まれるなど結構大きな組み替えが起こっていることがわかった。

表 3-4 WoS のデータセット間のクラスタ組み換え

		WoS Dataset2 (~2018)											
Cluster #		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Others	Total
WoS Dataset1 (~2016)	New data	4771	6546	3945	1250	274	221	148	105	95	74	875	18304
	1	9280	9669	51	438	4	3			206	52	589	20292
	2	11021	4507	13	1421	6			49	9	7	234	17267
	3	45	219	10914	15			3				55	11251
	4	76	2351	20	577	12			1	79	14	289	3419
	5	57	58	3	1343					4		214	1679
	6	6	4		15	1447						0	1472
	7	43	752		67	24				1	1	261	1149
	8						700				7	0	707
	9	41	12	3	392					5		73	526
	10	14	1		447							9	471
	Others	395	297	69	231	28	17	402	360	17	218	1055	3089
	Total	25749	24416	15018	6196	1795	941	553	515	416	373	3654	79626

表 3-5 Derwant Innovation のデータセット間のクラスタ組み換え

		DI Dataset2 (~2018)											
Cluster #		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Others	Total
DI Dataset1 (~2017)	New data	5678	1556	2073	1230	946	1086	624	433	682	645	6476	21429
	1	3562	46	137	9	140	18	413	27	37	44	1030	5463
	2	33	2757	549	1138	182	25	1	26	9		528	5248
	3	2194	41	14	132	34	35	234	87	608	15	724	4118
	4	30	71	29	2960	198	9	33	12	1	1	187	3531
	5	72	509	1311	53	25	14	59	73	13		936	3065
	6	49	245	1	142	2237		2	1		1	86	2764
	7	113	1510	48	12	1	41	35	38	3		447	2248
	8	58	275	34	13	2	1196	27	12	5		116	1738
	9	53	328	801	5	1	81		4	22	13	319	1627
	10	44	21	123	31	1	18	16	874			144	1272
	Others	705	1345	1021	193	525	610	681	212	51	536	7414	13293
	Total	12591	8704	6141	5918	4292	3133	2125	1799	1431	1255	18407	65796

DI データセット1と2では、ほぼ1年間の差であり、その間に、新しい特許は、21429件加わり、DI データセット1からDI データセット2では、クラスタ間での組み換えが起こっている。例えば、DI データセット1のクラスタ#1の約2/3は、DI データセット2のクラスタ#1に組み込まれているが、その他は、広くDI データセット2の各クラスタに分配され、DI データセット1のクラスタ#2は、DI データセット2のクラスタ#2に52.5%、クラスタ#4に21.7%組み込まれ、DI データセット1のクラスタ#3は、DI データセット2のクラスタ#1に53.3%、そのほかは広く他のクラスタに分配され、DI データセット1のクラスタ#4は、DI データセット2のクラスタ#4に、83.8%組み込まれている。

クラスタ・ネットワーク分析の結果を利用する場合には、クラスタリングの期間によ

るカテゴリの組み替えの影響を考慮する必要があるが、(1) 引用関係に基づいたクラスタリングにより、関連のある学術研究や技術の群（グループ）が形成されていること、(2) 既存の分類に寄らずに、新しく成長している群を含む分類がなされていること、(3) MM 手法においては、クラスタリングされたカテゴリごとに引用関係をベースの知識結合ネットワークの構築とネットワーク特徴量の計測とハブ、コア、周辺、関連の分野を抽出していることから、ある時点あるいは最新のデータセットに MM 手法を適用することで、その時点での関連ある学術研究や技術開発の群（グループ）ごとに知識結合ネットワークの構造や特徴が捉えられていると考えられる。多くの先行研究においても、分析期間を揃えて分析を行っており、本研究においても、分析期間を揃えている限り、研究分析への影響は少ないと考えられる。3.3.3において、各クラスタの知識結合の関係はクラスタリング前の関係を維持していることが観察されており、WoS あるいは DI の同じデータセットを用いて分析を行う。ただし、表 3-4、3-5のように、クラスタリングの分析期間により、カテゴリ分けが変わることには留意すべきである。

3.3.5 引用関係（direct citation）と共分類（co-classification）による知識結合ネットワークの比較

特許の場合は、既に、3.2.3で述べたように、知識結合を計測する場合、引用関係（citation）と共分類（Co-classification）による方法がある。図 3-14、3-15は、DI データセット2のクラスタ#1～#4について、2011-2016 年の共分類による方法と引用関係による方法での知識結合ネットワークを比較したものである。

共分類（co-classification）では、登録された特許に付された IPC コードが複数となって初めて、知識結合が形成されたとすることから、規模の大きいクラスタレベルでは、引用関係による知識結合ネットワークの方が、知識結合ネットワークを形成する IPC コードの数も、知識結合を形成する IPC コードのペアの数も多くなることが計測された。

したがって、マクロスケールあるいはメソスケールレベルで、新しく知識結合する技術のペアを検出するためには、引用関係による知識結合の方が優れているが、規模の小さいクラスタやミクロスケールの個別の機関の知識結合ネットワークの場合では、引用数が限られるために、引用（direct citation）では知識結合ネットワークの形成がされないことがある。

共分類（co-classification）による方法では、個々の特許に割り付けられた共分類（co-classification）のみで知識結合ネットワークを算出するので形成できることから、各々

の機関や小さいクラスタでも引用関係の有無に関係なく知識結合ネットワークを構築することが可能という利点がある。機関の技術ポートフォリオの比較分析を行う場合には、個々の機関でも計測できる共分類（co-classification）による知識結合を用いて分析することとした。

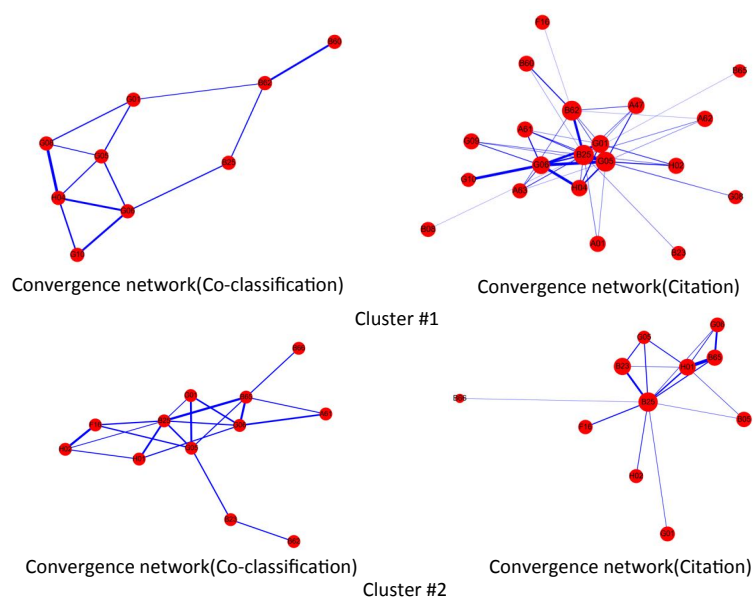


図 3-14 共分類と引用関係による知識結合ネットワークの比較 (1)

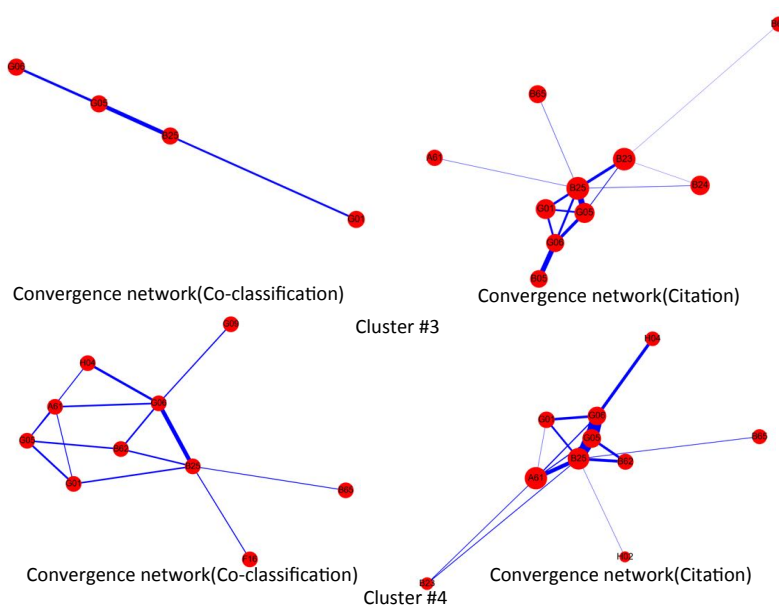


図 3-15 共分類と引用関係による知識結合ネットワークの比較 (2)

3.4 MM 手法のまとめ

以上、クラスタ・ネットワーク分析によるクラスタリングと知識結合ネットワークの構築およびネットワーク特徴量の抽出による知識結合の特徴を捉える MM 手法について開発・提案するとともに、それぞれの手法や指標を評価し、MM 手法が、知識結合の分析と技術ポートフォリオの分析に適用できることを示した。

MM 手法として用いたクラスタ・ネットワーク分析によるクラスタリング、技術的距離の計測、ネットワークの特徴量として採用した平均クラスタリング係数、次数中心性、コア/周辺構造に着目したコア、周辺分野の抽出など個々の手法は、引用率 (CIR)、結合率 (COR)、共引用 (co-citation) を利用した複数分野から単一分野間ネットワークへの変換、知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオなど独自に定義した指標や手法はあるものの、先人たちの研究により開発されグラフ理論などにより裏付けされた手法の組み合わせで成り立っている。しかしながら、第2章でみたように、先行研究では、概括的な学術研究分野や技術開発分野（特許）の間の関係やマッピング、科学技術分野の距離や類似性に基づくグループ分けといったマクロスケールでの分析に留まっており、技術ポートフォリオの相違の定量化は、ロボットのように複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合には必ずしもうまく計測できていない。

提案した MM 手法が、マクロスケールからメソスケール、ミクロスケールまで、知識結合ネットワークの結合度とネットワーク構造がブレイクダウンできたのは、Newman の高速クラスタリングアルゴリズムが引用関係によりお互い関係のある部分のネットワーク群にカテゴリ分けができること、そして、カテゴリ後の知識結合ネットワークが学術研究や技術開発に関して何らかの関連を持ったネットワークを形成していることを利用し、そのカテゴリ群を反映したコア/周辺構造として、知識結合ネットワークの構造や平均クラスタリング係数や次数中心性などのネットワークの特徴量、中心的役割を果たすハブ、コアとなるノードを抽出していることによる。また、技術ポートフォリオの分析では、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオを表す特徴ベクトルの要素の値が、保有する技術やアプリケーションの特徴を反映していることから、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオの相違をコサイン距離で計測することで機関間の相違が、特許ポートフォリオのみの計測の計測よりも細かい粒度で定量化できている。

MM 手法の特徴をまとめれば、以下の通り。

- (1) 既存の分類に依存せずに、共通の技術やアプリケーションをなすクラスタリング

によりカテゴリ化されたグループ（群）ごとに知識結合ネットワークの構造と中心（ハブ）や中核（コア）となる分野の特定が可能であり、主要なロボットのアプリケーションごとに、コアとなる分野の知識結合の構造と特徴が、恣意的、主観的な要素を排して、客観的な手法、指標により把握できること

- (2) 本研究で定義した引用率 CIR あるいは結合率 COR は、学術研究分野間あるいは技術開発分野（特許）間の知識結合の近さ・強さを計測するに適していること
- (3) マクロスケールからメソスケール、ミクロスケールでの知識結合の計測が可能なこと
- (4) 時系列での変化をみることで、特定の技術やアプリケーションにおける知識結合の形成の変化、機能の高度化、成長の分析が可能なこと
- (5) 本研究で定義した知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオにより、特許ポートフォリオよりも細かい粒度で機関間の相違を定量的に表すことができること

3.5 MM 手法を用いた分析手順

3.5.1 知識結合ネットワーク

第4章において分析するロボットに関する学術研究と技術開発における知識結合は、以下の手順で分析を行う。

- (1) 学術研究情報および特許情報の収集
- (2) 引用ネットワークの形成とクラスタ分析によるカテゴリ化
- (3) 共引用関係を利用した複数分野から単一分野間ネットワークへの変換
- (4) 引用関係による知識結合ネットワーク（知識結合行列）構築
- (5) 知識結合ネットワークの特徴量の抽出・特定

(1) の学術研究情報と特許情報は、学術研究については、Clarivate Analytics が提供する Web of Science から、特許情報については、同じく、Clarivate analytics が提供する Derwent Innovation（旧 Thomson Innovation）から、それぞれ書誌情報を抽出し、(2) 以降の分析に活用する。(2) のクラスタ分析は、東京大学イノベーション政策センターが提供する「学術俯瞰システム」を活用し、学術研究分野と技術開発分野（特許）のカテゴリ化を行う。

(3) の単一分野間ネットワークへの変換において、引用ネットワーク分析における

共引用 (co-citation) 関係を適用することで、複数分野を単一分野に分解 (Factorizing) する。(4) の引用関係による知識結合ネットワークの測定では、本研究で新たに導入した結合率 (COR) で比較検討を行い、測定と各指標の評価を実施する。

(5) の知識結合ネットワークの特徴量の抽出では、平均クラスタリング係数、次数中心性、知識結合率などを用い、知識結合ネットワークの特徴を把握し、クラスタ間で知識結合を形成する分野を、研究開発の進捗、社会実装の現状と比較検討する。

3.5.2 技術ポートフォリオ

第5章において分析する機関の技術ポートフォリオの分析では、3.5.1の(1)(2)までの結果のデータを技術ポートフォリオの分析でも活用し、(3)～(5)で、技術ポートフォリオの算出と分析を以下の手順で行う。

- (1) 学術研究情報および特許情報の収集
- (2) 引用ネットワークの形成とクラスタ分析によるカテゴリ化
- (3) 共分類 (co-classification) による知識結合ネットワーク構築
- (4) 特許ポートフォリオ、知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオの計測
- (5) 機関の技術ポートフォリオの分析

(3) 共分類 (co-classification) による知識結合ネットワークの構築を個別機関レベルに適用し、機関ごとの知識結合ネットワークを構築する。(4) 特許ポートフォリオ、知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオの計測では、機関の保有する特許から、機関が保有する特許の特許分類別³⁵の件数のシェアを要素とする特許ポートフォリオに加え、知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオをそれぞれ算出する。(5) 機関の技術ポートフォリオの分析では、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオにより、従来の特許ポートフォリオと比較して、機関間の技術ポートフォリオの相違がより明確に定量的に把握できることを示し、競合分析や M&A、アライアンスなどの企業の技術経営戦略策定の支援となる手法を提案する。

³⁵ 本研究では、IPC の3桁コードのクラス (C) で分析した。

第4章 知識結合からみるロボット分野のイノベーション

序論においても述べたように、ロボットは、IoT や AI といった新しい技術を取り入れてロボットの機能を高度化するとともに、ロボットの適用分野やプロセスのニーズや課題に合致するための用途開発や応用開発が伴い、ロボットの機能を発揮する技術と新しい応用分野（フロンティア）の開拓の両方を取り入れ新市場の創造とともに成長するという特徴を有する。第3章で開発した MM 手法を学術研究（Science）と技術開発（Technology）のそれぞれに適用して、知識結合を軸としてロボット分野のイノベーションの進展と特徴の分析を、4.1、4.2にてそれぞれ行う。

知識結合ネットワークの平均クラスタリング係数、次数中心性などのネットワーク特徴量を抽出し、学術研究分野、技術開発分野（特許）において、ハブ、コア、周辺となる分野を特定する。知識結合を形成しない分野（ノード）は、関連分野とした。考察として、学術研究分野、技術開発分野（特許）それぞれについて、MM 手法による分析により得られたロボットに関する学術研究（Science）、技術開発（Technology）の特徴が研究開発の進捗、社会実装の現状を把握できているかを、A Roadmap for US robotics 2013 Edition、医学系の学術専門誌などの文献および専門家の知見、評価を得て、比較検討を行う。

4.1 学術研究における知識結合からみるロボット分野のイノベーション

図1-4で示したように、ロボットに関連する学術研究論文は、2000年以降急増している。WoS から抽出したデータセット2の学術研究論文 186,015 を学術俯瞰システムによりクラスタ分析し、79,851 の学術研究論文が抽出された。すでに第1章で述べた通り、年々ロボットに関する学術研究分野は増加しており、143 分野（10 件以上の学術研究論文では、121 分野）（表1-4）に拡大している。

クラスタ分析後の各クラスタ内での学術研究分野数の推移をみると（表4-1）、全体では、2000 年以降では、概ね 60～90 ほどの学術研究分野があり、各クラスタ内でも、大きいクラスタでは概ね 20～50 の学術研究分野あり、分野とその分布により、クラ

スタ内がどのような分野の学術研究の集合であることはある程度予想できても、クラスタ内の分野がどのような関係にあるかは引用ネットワーク図で読み取ることは難しくなる。

第3章で開発した分析手法を適用することにより、クラスタ内の各分野の関係を分野間の知識結合の強さと知識結合のネットワークのトポロジカルな構造を定量的に把握することが可能となり、ロボットのイノベーションがどのような分野でどのように進展しているかの分析が可能となる。

ロボットに関する学術研究分野のクラスタ分析の結果を、4.1.1に、その結果のデータを元に構築した知識結合ネットワークと知識結合を形成する分野の特徴分析を、4.1.2に、知識結合ネットワークの特徴量の算出とハブ(Hub)、コア(Core)、周辺(Periphery)関連(Related)の各分野として抽出した結果分析を、4.1.3にまとめた。

表 4-1 クラスタごとの学術研究分野数の推移

	Cluster #	1	2	3	4	5	6	7	8	total
Term	1961-1980				1					2
	1981-1985	5	1		8	1				9
	1986-1990	7	5		8	5				17
	1991-1995	9	10	3	8	9				24
	1996-2000	13	16	12	12	7	1		3	42
	2001-2005	17	22	20	14	14	4	2	4	67
	2006-2010	23	42	28	17	15	7	5	4	80
	2011-2013	24	44	28	19	11	6	5	5	79
	2014-2016	30	50	36	21	9	7	3	5	88

4.1.1 クラスタ分析によるロボットに関する学術研究の動向

表4-2は、学術研究論文の主な学術研究分野別の推移を示したものである。表4-2では、学術研究分野は、学術研究論文ではなく学術研究誌に割り付けられたものであることに留意する必要があるが、ロボットに関する学術研究論文がどのような学術研究分野で行われているかの概要を捉えることができる。

表4-2によると、1980年以前には、工学一般(Engineering)、ロボティクス(Robotics)、コンピュータサイエンス(Computer Science)、および自動化・制御システム

(Automation & Control Systems)のなどの工学分野で約9割 (89.4%) がロボットに関する学術研究論文を占めていた。工学分野は現在もロボット研究の主要分野であり62.5%を占めているが、医療・ヘルスケア分野(Medical & healthcare)が2番目に大きい学術研究分野に成長し、23.9%とロボットに関する全学術研究論文の約4分の1を占めるに至っている。純粋科学(Pure Science)、社会科学(Social Science)、文化関連分野(culture issues)など、その他の分野も増加しており、2011年～2016年の間にはこれらで11.9%を占めた。

表4-2の下表は、クラスタ#1から#4の学術研究分野の分布を示す。これらすべてのクラスタにおいて工学分野のシェアは、1990年代以降減少し続けており、ロボットに関する研究が、医療・ヘルスケア、農業、地球環境などの工学以外の分野に広がっていることを示している。クラスタ#3 (Surgery) に関しては、成長し始めた1990年代以降でみると、工学分野(Engineering)の割合は1991～2000年の28.9%から2011～2016年の8.9%へと減少する一方、医療・ヘルスケア分野 (Medical & healthcare) のシェアは、1991～2000年の68.6%から2011～2016年の88.5%に増加した。

表 4-2 ロボットに関する学術研究論文の学術研究分野別分布

year	Engineering	Robotics	Computer Science	Automation& Control Systems	Other_Eng	Eng.Total	Surgery	Urology& Nephrology	Other_Med	Med.Total	Bio_Tech	Others	Total
1961-1980	26		21	4	8	59			1	1	0	6	66
	39.4%		31.8%	6.1%	12.1%	89.4%			1.5%				100.0%
1981-1990	689	461	348	385	389	2272	3		73	76	35	250	2633
	26.2%	17.5%	13.2%	14.6%	14.8%	86.3%	0.1%		2.8%	2.9%	1.3%	9.5%	100.0%
1991-2000	3500	3183	3137	2775	1386	13981	169	23	663	855	261	1178	16275
	21.5%	19.6%	19.3%	17.1%	8.5%	85.9%	1.0%	0.1%	4.1%	5.3%	1.6%	7.2%	100.0%
2001-2010	6513	6063	6096	4260	3335	26267	1430	1215	3785	6430	808	3484	36989
	17.6%	16.4%	16.5%	11.5%	9.0%	71.0%	3.9%	3.3%	10.2%	17.4%	2.2%	9.4%	100.0%
2011-2016	9397	7048	5828	4662	5899	32834	2875	2480	7224	12579	883	6251	52548
	17.9%	13.4%	11.1%	8.9%	11.2%	62.5%	5.5%	4.7%	13.7%	23.9%	1.7%	11.9%	100.0%

Unit: Upper row: the number of papers on Robotics/Lower row: %

year	Engineering	Robotics	Computer Science	Automation& Control Systems	Other_Eng	Eng.Total	Surgery	Urology& Nephrology	Other_Med	Med.Total	Bio_Tech	Others	Total
Cluster #1													
1961-1980	6		3	2	2	13			0	0	0	1	14
1981-1990	341	287	173	291	149	1241			2	2	0	36	1279
1991-2000	2032	1890	1446	1886	796	8050			26	26	0	321	8397
2001-2010	3039	2808	2682	2581	1285	12395	4		52	56	10	676	13137
2011-2016	3890	2797	2525	2691	2064	13967	4		54	58	25	1322	15372
Cluster #2													
1961-1980	7		5	1	0	13			0	0	0	4	17
1981-1990	53	38	26	16	21	154			12	12	1	19	186
1991-2000	417	668	884	446	127	2542	1		179	180	11	245	2978
2001-2010	1663	2324	2391	1085	863	8326	36	1	1325	1362	164	1338	11190
2011-2016	3326	3460	2340	1347	2172	12645	64	5	2336	2405	329	2978	18358
Cluster #3													
1961-1980						0	0		0	0	0	0	0
1981-1990	7				1	8	3		7	10	0	1	19
1991-2000	70	22	64	14	6	176	151	23	243	417	13	2	608
2001-2010	341	133	122	66	82	744	1257	1198	1679	4134	44	48	4970
2011-2016	508	103	100	86	131	928	2688	2428	4103	9219	110	146	10403
Cluster #4													
1961-1980	12		8	1	6	27			0	0	0	0	27
1981-1990	237	109	125	65	161	697			1	1	0	64	762
1991-2000	748	424	457	272	282	2183			5	5	5	149	2342
2001-2010	960	516	448	368	433	2725	3		20	23	5	319	3072
2011-2016	983	428	492	342	517	2762	6		28	34	14	545	3355

表4-3に WoS データセット2 のロボットに関する学術研究論文のクラスタ分析の結果を示す。平均発行年数年は2,009.8 年である。

ロボットに関する学術研究論文は、規模の大きいクラスタから順に、Robot control systems (クラスタ#1)、Robot application systems (クラスタ#2)、および Surgery & medical issues (クラスタ#3) で、この3つの大きなクラスタで全体の学術研究論文数の81.9%を占める。クラスタ#3は3つのクラスタの中で最も若く、平均発行年数は2012.5年である。4番目以降のクラスタは、Application systems for robots (クラスタ#4、平均発行年：2006.3年)、Automation in bio & chemistry (クラスタ#5、平均発行年：2004.6年)で、クラスタ#6以降は、1,000未満の小さなクラスタを構成しており、全部で、303のクラスタに分解された。

表 4-3 ロボットの学術研究論文のクラスタリング結果

# of cluster	Cluster Name	#Nodes	#Edges	Average Year	Keywords				
Robot total		79,851	496,565	2009.8	robot	system	control	robotic	based
1	Robot control systems	25,801	146,432	2008.1	manipulator	control	controller	tracking	path
1 - 1	Control for mobile robots	9,850	50,593	2010.0	localization	mobile robot	path	mobile	navigation
1 - 2	Control of manipulators	8,296	44,383	2006.0	manipulator	parallel	joint	control	dynamic
1 - 3	Adaptive control	6,133	31,325	2008.1	controller	control	tracking	adaptive	manipulator
2	Robot Application Systems	24,476	146,965	2011.3	gait	walking	rehabilitation	human	locomotion
2 - 1	Biped robots	7,724	38,974	2009.5	walking	gait	learning	biped	locomotion
2 - 2	Robots for rehabilitation	7,323	45,430	2012.6	rehabilitation	stroke	exoskeleton	gait	limb
2 - 3	Soft robotics	6,860	39,786	2012.6	soft	actuator	force	tactile	muscle
3	Surgery	15,084	119,790	2012.5	surgery	patient	laparoscopic	prostatectomy	surgical
3 - 1	Robotic prostatectomy	4,549	33,301	2011.7	prostatectomy	patient	radical	radical prostatectomy	laparoscopic
3 - 2	Laparoscopic robotic surgery	4,225	36,736	2013.2	surgery	laparoscopic	hysterectomy	patient	cancer
3 - 3	Transoral robotic surgery	4,179	23,704	2012.0	surgery	surgical	transoral	patient	thyroidectomy
4	Application systems for robots	6,208	20,677	2006.3	robot	system	method	robotic	based
4 - 1	calibration systems	1,224	4,794	2006.5	calibration	error	kinematic	accuracy	chasing
4 - 2	Educational robots	689	1284	2008.3	student	education	course	remote	laboratory
4 - 3	Agricultural robots	630	2288	2009.6	fruit	weed	harvesting	crop	agricultural
4 - 4	welding robots	480	1150	2008.5	welding	weld	seam	arc	arc welding
4 - 5	Object recognition	406	554	1996.9	object	recognition	vision	object recognition	image
5	Automation in bio & chemistry	1,798	3,523	2004.6	system	sample	high	protein	automated
6	Aerosol robotic network	945	6,466	2012.0	aerosol	aeromnet	aod	aerosol optical	modis
7	robotic radiosurgery	558	2,018	2011.9	radiosurgery	cyberknife	radiotherapy	stereotactic	dose
8	Biomechanical function	517	2,436	2010.3	knee	acl	ligament	anterior	tibial
9	Networked robotics	419	840	2010.9	cloud	soccer	network	wireless	communication
10	Robots for space	375	585	2009.1	mar	mission	lunar	exploration	moon

クラスタ#5は、バイオや化学分野での自動化に関するクラスタ、クラスタ#6は、米国 NASA が中心となって設立したエアゾールの粒子が与える気候への影響を研究している科学者ネットワークのクラスタ、クラスタ#7は、ロボット放射線手術、クラスタ#8は、生体力学をロボットに応用する研究のクラスタと関連性の深い研究がそれぞれのクラスタを形成していることがわかる。

表4-3には、クラスタ#1～#4をさらにクラスタ分析したサブクラスタの結果も掲載した。クラスタ#1は、サブクラスタ#1-1（移動ロボット用制御：Control for mobile robots）、#1-2（マニピュレータ制御：Control of manipulators）、#1-3（適用制御：Adaptive control）はいずれもロボット制御に必要な制御技術であり、この3つのサブクラスタで、クラスタ#1の94.1%を占める。クラスタ#1は、ロボットに関する基盤的な制御技術の学術研究論文が集まった集合ということができる。

クラスタ#2は、サブクラスタ#2-1（二足歩行ロボット：Biped robots）、サブクラスタ#2-2（リハビリ用ロボット：Robots for rehabilitation）、サブクラスタ#2-3（ソフトロボット：Soft robotics）で、クラスタ#2の89.5%を占める。クラスタ#2のサブクラスタは人間の二足歩行に関連した学術研究分野が重なりあるいは関連していることから、同一のクラスタとなったと考えられるが、サブクラスタの研究領域としては異なった学術研究が幅広く含まれ、学術研究分野が約50と多くの学術研究分野が関連するクラスタを構成した。

クラスタ#3は、サブクラスタ#3-1（ロボット前立腺手術：Robotic prostatectomy）、サブクラスタ#3-2（ロボット腹腔鏡手術：Laparoscopic robotic surgery）、サブクラスタ#3-3（ロボット経口腔手術：Transoral robotics surgery）で、クラスタ#3の85.9%を占める。クラスタ#3には、ロボットによる手術の学術研究論文が集まった集合である。

クラスタ#4は、ロボットに関連した応用システムの集合であり、サブクラスタ#4-1（Calibration systems）の他、教育用ロボット（サブクラスタ#4-2）、農業用ロボット（サブクラスタ#4-3）、溶接ロボット（サブクラスタ#4-4）、物体認識（サブクラスタ#4-5）など様々なロボット応用システムが含まれている（サブクラスタ#4-1～#4-5で、クラスタ#4の55.2%）。

図4-1は、ロボットに関する学術研究論文に関して、クラスタ別のシェアを時系列にみたものであり、クラスタの成長のトレンドをみることができる。クラスタ#1は、1980年中頃から2000年までは全学術研究論文の過半を占め、クラスタ#4と併せてロボットの機能を発揮するための研究と応用研究が中心であったものが、2000年前後を境として、二足歩行やリハビリなど（クラスタ#2）、医療・ヘルスケア分野（クラスタ#3）の研究に重点がシフトしていることがわかる。最近5年では、クラスタ#3よりもクラスタ#2のシェアが高まっており、二足歩行や柔らかいものを対象としたロボットのより高度な応用の研究開発が盛んに行われていることが伺われる。

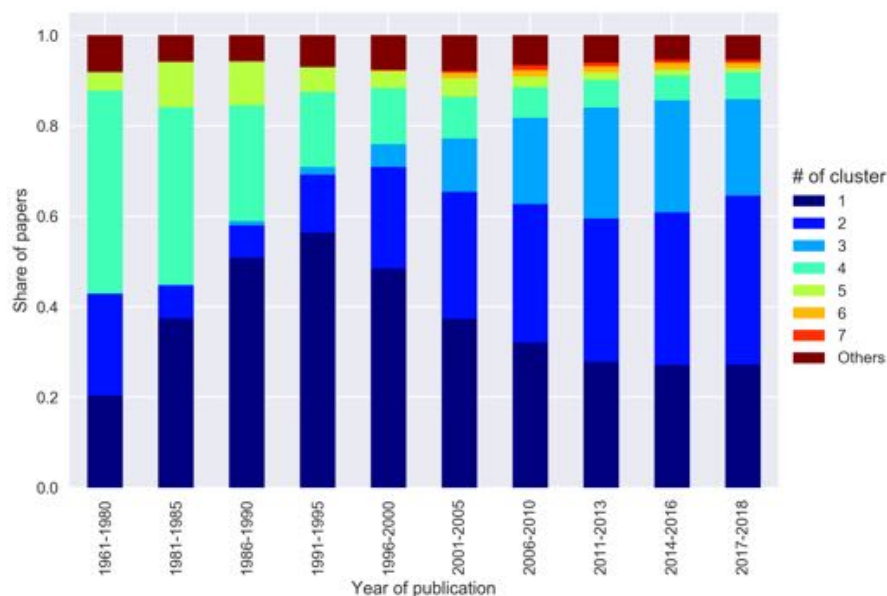


図 4-1 ロボットに関する学術研究論文のクラスター別シェアのトレンド

4.1.2 ロボットに関する学術研究における知識結合ネットワーク構築

4.1.1において、ロボットに関する学術研究論文について引用関係に基づきカテゴリ分けとそれぞれのクラスターの学術研究の特徴を把握することができた。本節では、そのカテゴリ分けしたクラスターごとに、第3章3.2.3～3.2.5の手法を適用して、学術研究分野間の知識結合ネットワークを構築する。クラスター#1～#4で全学術研究論文数の89.6%を占めることから、これら4クラスターの知識結合ネットワークについて比較検討するとともに、クラスター#5～#8の知識結合の特徴についての分析を行った。

表4-4、4-5、4-6、4-7は、それぞれクラスター#1～#4における学術研究分野間の知識結合度合いを示す結合率（ COR_{ij} ）の時系列変化を示す。各表により、ロボットに関する学術研究分野間の知識結合がどのように推移したかを比較検討する。

(1) クラスター#1（Robot control systems）の知識結合ネットワーク

クラスター#1は、ロボット制御システム（Robot control systems）に関する学術研究論文の集合であるが、1980年代中頃から、EngineeringとRoboticsに加え、Computer ScienceとAutomation Control systemsの主要4工学分野が互いに結合することで、ロボットの学術研究が進められたことが伺える。ロボットの学術研究全体でも、主要4工

学分野のみで全学研究論文数の 57.3%を占めており、主要 4 工学分野間の知識結合がみられるが、クラスタ # 1 の主要 4 工学分野間の知識結合は 1986-1990 年以降全期間に渡って現れ、1996-2000 年以降は 0.5 以上の強い結合となる一方、他の分野間の知識結合の値は平均以下の低い値であるのがクラスタ # 1 の特徴である。

表 4-4 クラスタ # 1 における知識結合の動向 (結合率 (COR))

	1981-1985	1986-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2013	2014-2016
Engineering - Robotics	1.000	0.807	0.627	0.787	0.884	0.801	0.995	0.984
Automation&ControlSystems - Robotics		1.000	1.000	1.000	0.968	0.777	0.818	0.864
Automation&ControlSystems - Engineering		0.774	0.707	0.838	0.860	0.841	1.000	1.000
ComputerScience - Engineering		0.435	0.323	0.527	0.614	0.679	0.831	0.740
ComputerScience - Robotics		0.417	0.425	0.764	1.000	1.000	0.950	0.949
Automation&ControlSystems - ComputerScience		0.323	0.302	0.527	0.675	0.788	0.795	0.790
Automation&ControlSystems - Instruments&Instrumentation			0.266					0.288
Engineering - Instruments&Instrumentation			0.097					0.172
ComputerScience - Mathematics				0.293	0.347	0.407	0.363	0.303
Engineering - Mechanics				0.076	0.094	0.185	0.215	0.241
Engineering - Mathematics				0.047	0.044	0.074	0.154	0.171
Automation&ControlSystems - Mathematics				0.037	0.077	0.116	0.169	0.154
Automation&ControlSystems - Mechanics				0.035	0.063	0.096	0.085	0.072
Mathematics - Robotics				0.031	0.040	0.030	0.057	0.058
Mechanics - Robotics				0.030	0.063	0.097	0.083	0.074
ComputerScience - Mechanics						0.046	0.062	0.043
Mathematics - Mechanics							0.226	0.250
ComputerScience - Telecommunications							0.057	0.074
ComputerScience - Instruments&Instrumentation								0.124
Instruments&Instrumentation - Robotics								0.117
Agriculture - Instruments&Instrumentation								0.115
Agriculture - ComputerScience								0.051
Engineering - Telecommunications								0.035

1990 年代中頃からは、Mathematics、Mechanics が Engineering、Computer Science、Automation & Control Systems と結合し、2006-2010 年以降は、Mathematics、Mechanics を加えた 6 分野が知識結合のコア分野となっている。1991-1995 年に、Instruments & Instrumentation が、Engineering および Automation & Control Systems と一度結合し、その後消えていたが、直近の 2014-2016 年に再び主要 4 工学分野等と結合した。また、2014-2016 年には、農業分野 (Agriculture) が Instruments & Instrumentation と Computer science とに結合して初登場した。農業分野(Agriculture)においても、ロボットの活用は期待されており、農業分野のロボットに関する学術研究論文は、2000 年代以降少ないながらも発行されており、知識結合が計測される程度に学術研究が行われ、知識結合が生じ始めた可能性がある。

図 4-2 は、クラスタ # 1 の知識結合ネットワークの形成の推移をグラフ化したものである。この図では、主要 4 工学分野の完全グラフも確認できる。知識結合ネットワー

クとしては、お互いのノードとの結合は密である。2014-2016 年では、知識結合ネットワークが主要工学4分野をコアとして、複数の学術研究分野が星型の4グループに分かれており、これからも複数のアプリケーションがクラスタ # 1 に含まれると考えられる。

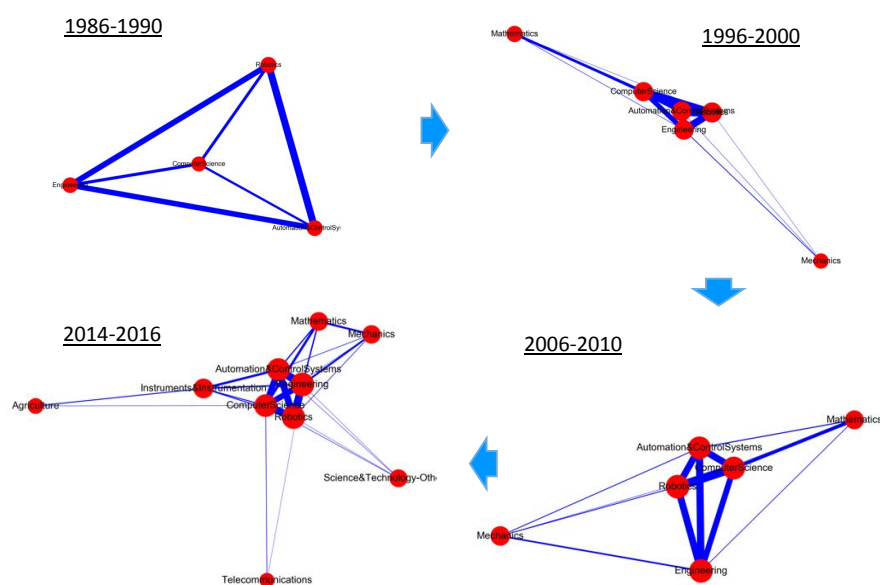


図 4-2 知識結合ネットワーク (クラスタ #1)

(2) クラスタ # 2 (Robot application systems) の知識結合ネットワーク

表 4-5 は、クラスタ # 2 の知識結合の時系列変化である。クラスタ # 2 は、表 4-1 によると関連する学術研究分野数が増加し 2010 年代には、約 50 分野と多いのが特徴であり、ロボットのいくつかのアプリケーションが含まれているが、研究としては引用関係で何らかの関連があつてクラスタ # 2 に統合されている。

1990 年代中頃までは、Robot control systems であるクラスタ # 1 の学術研究分野とほぼ同じで推移していたが、1990 年代後半から、Neuroscience & neurology が Computer science および Robotics と知識結合し、Psychology が Computer Science が知識結合するようになり、Rehabilitation が 2000 年以降に Neuroscience & Neurology、Engineering、Computer science などと知識結合している。2006 年以降になると、COR の値は小さいが、Surgery が Engineering に結合している。また、2016 年以降、Material science、Physics や Chemistry などが、知識結合するようになっており、材料系の学術

研究分野との結合・融合が見られ、サブクラスタ# 2-3の Soft robotics として、柔らかい物質を扱うロボットの研究が行われたことが抽出されている。

表 4-5 クラスタ# 2における知識結合の動向 (結合率(COR))

	1986-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2013	2014-2016
Engineering - Robotics	1.000	0.353	0.449	0.627	0.639	0.815	0.894
Automation&ControlSystems - Robotics		1.000	0.760	0.764	0.525	0.504	0.459
Automation&ControlSystems - Engineering		0.621	0.817	0.796	0.469	0.482	0.478
ComputerScience - Robotics		0.609	1.000	1.000	1.000	1.000	0.836
Automation&ControlSystems - ComputerScience		0.288	0.691	0.615	0.535	0.621	0.499
ComputerScience - Engineering		0.243	0.312	0.513	0.524	0.554	0.556
ComputerScience - Neurosciences&Neurology			0.335	0.393	0.325	0.371	0.368
ComputerScience - Psychology			0.161	0.246	0.379	0.512	0.288
Neurosciences&Neurology - Robotics			0.063	0.081	0.082	0.095	0.098
ComputerScience - Mathematics				0.072	0.066	0.121	0.082
Neurosciences&Neurology - Rehabilitation				0.306	0.627	0.955	1.000
Engineering - Rehabilitation				0.221	0.431	0.446	0.431
Automation&ControlSystems - Mathematics				0.136		0.053	0.080
Engineering - Neurosciences&Neurology				0.133	0.257	0.295	0.351
Neurosciences&Neurology - Psychology				0.123	0.061	0.208	0.292
ComputerScience - Rehabilitation				0.063	0.029	0.073	0.116
Mathematics - Physics					0.518	0.600	0.218
Communication - Psychology					0.327		
MaterialsScience - Physics					0.259	0.302	0.547
Engineering - MaterialsScience					0.146	0.181	0.224
Communication - ComputerScience					0.117		
Automation&ControlSystems - Mechanics					0.113	0.067	0.083
Engineering - Mechanics					0.095	0.085	0.095
Automation&ControlSystems - MaterialsScience					0.094	0.124	0.112
Engineering - Surgery					0.094	0.055	0.082
General&InternalMedicine - Rehabilitation					0.090	0.201	0.398
Engineering - Physics					0.086	0.095	0.104
General&InternalMedicine - Neurosciences&Neurology					0.062	0.168	0.141
MaterialsScience - Robotics						0.062	0.118
Chemistry - Physics						0.375	0.471
Chemistry - MaterialsScience						0.331	0.764
Linguistics - Psychology						0.301	
Instruments&Instrumentation - MaterialsScience						0.271	0.419
Engineering - Instruments&Instrumentation						0.246	0.193
Instruments&Instrumentation - Physics						0.182	0.207
Automation&ControlSystems - Instruments&Instrumentation						0.176	0.184
Education&EducationalResearch - Psychology						0.134	0.163
Chemistry - PolymerScience							0.341
Mathematics - Mechanics							0.289
MaterialsScience - PolymerScience							0.204
Mechanics - Physics							0.164
Physics - PolymerScience							0.131
Chemistry - Mechanics							0.100
Chemistry - Instruments&Instrumentation							0.100

クラスタ# 2は、表4-3のように、Biped robot (2足歩行ロボット)、robots for rehabilitation (リハビリテーションロボット)、Soft robotics (ソフトロボティクス) が主なサブクラスタとして抽出され、クラスタ# 2は複数の異なるアプリケーションで形成されている。リハビリテーションは、失われたあるいは衰えた運動機能や神経機能の回復、改善を目的とし、人への接触が必要となることから、共通する学術研究分野を有

する2足歩行ロボットやソフトロボティクスと同じクラスタとして抽出されたと考えられる。

図4-3により、知識結合ネットワークの形成をみると、1986-1990年には、RoboticsとEngineering間のみ結合から主要工学4分野をコアとして、1996-2000年以降には、Neuroscience & neurology、Rehabilitation、Psychology、2006-2010年以降には、MathematicsやPhysicsの純粋科学、Material science、Chemistryの材料系科学など様々な学術研究分野が加わり、お互いの分野の知識結合が密なネットワークを形成し成長していることが抽出された。

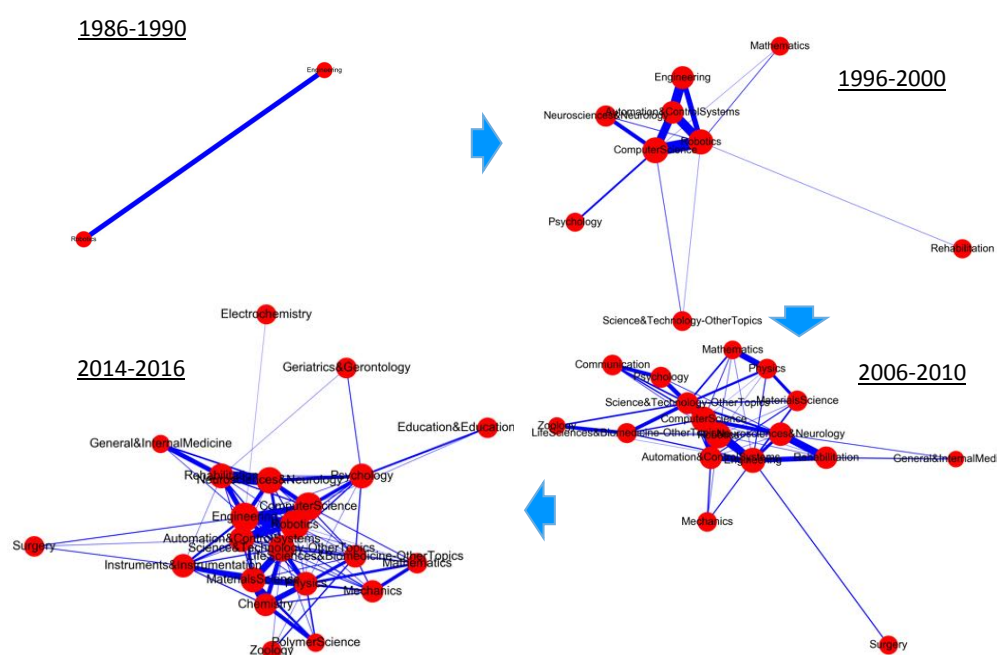


図 4-3 知識結合ネットワーク (クラスタ #2)

(3) クラスタ # 3 (Surgery) の知識結合ネットワーク

表4-6は、クラスタ # 3の知識結合の時系列変化である。知識結合は、Surgeryを中心に進展しており、クラスタ # 1、# 2とは異なる成長をしている。特に、工学一般(Engineering)と医療・ヘルスケア分野の学術研究分野との知識結合は進んでいるものの他の工学分野と医療・ヘルスケア分野の学術研究分野との知識結合は Radiology, nuclear medicine & medical imaging と Robotics を除き進んでおらず、医療・ヘルス

ケア分野間での知識結合がほとんどである。また、クラスタ#3のサブクラスタは、表4-3のように、いずれも外科学（Surgery）を中心としたクラスタを形成している。

表 4-6 クラスタ#3における知識結合の動向（結合率(COR)）

	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2013	2014-2016
ComputerScience - Engineering	1.000	0.315	0.379	0.293	0.273
CardiovascularSystem&Cardiology - Surgery	0.115	0.371	0.447	0.192	0.090
Surgery - Urology&Nephrology	0.083	0.176	0.272	0.233	0.204
General&InternalMedicine - Surgery	0.057	0.082	0.118	0.160	0.121
Orthopedics - Surgery		0.050	0.050		
ComputerScience - Radiology,NuclearMedicine&MedicalImaging		1.000			
Engineering - Robotics		0.707	1.000	1.000	0.976
ComputerScience - Robotics		0.554	0.756	0.520	0.461
Engineering - Radiology,NuclearMedicine&MedicalImaging		0.399	0.678	0.570	0.425
Radiology,NuclearMedicine&MedicalImaging - Robotics		0.346	0.344	0.117	0.218
CardiovascularSystem&Cardiology - General&InternalMedicine		0.129	0.000	0.101	0.070
Engineering - Otorhinolaryngology		0.090			0.055
Engineering - Surgery		0.062	0.255	0.163	0.125
Otorhinolaryngology - Surgery			0.141	0.303	0.252
Oncology - Otorhinolaryngology			0.866	0.333	0.553
Obstetrics&Gynecology - Oncology			0.839	0.886	0.653
General&InternalMedicine - Oncology			0.654	0.584	0.568
Obstetrics&Gynecology - Surgery			0.343	0.258	0.178
Oncology - Radiology,NuclearMedicine&MedicalImaging			0.252	0.256	0.136
Oncology - Surgery			0.220	0.484	0.454
Gastroenterology&Hepatology - Surgery			0.218	0.399	0.465
Oncology - Urology&Nephrology			0.188	0.162	0.137
General&InternalMedicine - Otorhinolaryngology			0.141		0.122
General&InternalMedicine - Obstetrics&Gynecology			0.116	0.225	0.186
CardiovascularSystem&Cardiology - Engineering			0.115	0.164	0.166
General&InternalMedicine - HealthCareSciences&Services				0.500	0.329
Anesthesiology - General&InternalMedicine				0.452	0.362
Gastroenterology&Hepatology - General&InternalMedicine				0.251	0.274
Anesthesiology - CardiovascularSystem&Cardiology				0.234	0.058
HealthCareSciences&Services - Oncology				0.196	0.114
CardiovascularSystem&Cardiology - Radiology,NuclearMedicine&MedicalImaging				0.150	0.103
Otorhinolaryngology - Research&ExperimentalMedicine					1.000
CardiovascularSystem&Cardiology - RespiratorySystem					0.351
Gastroenterology&Hepatology - Oncology					0.343
General&InternalMedicine - RespiratorySystem					0.227
Neurosciences&Neurology - Orthopedics					0.169
Oncology - RespiratorySystem					0.141

医療・ヘルスケア分野の学術研究分野をより詳しくみると、Cardiovascular systems & cardiology（循環器系・心臓学）、Urology & nephrology（泌尿器学・腎臓学）、General internal medicine（一般医療・内科学）が、1996-2000年から、Surgeryと知識結合を形成し、2001-2005年からは、Radiology, nuclear medicine & medical imagingが

Engineering、Robotics と、Otorhinolaryngology（耳鼻咽喉科学）と Engineering と知識結合し、2006-2010 年には、Otorhinolaryngology、Oncology（腫瘍学）、Obstetrics & gynecology（産婦人科学）、2011-2013 年には、Anesthesiology（麻酔学）、Gastroenterology & hepatology（消化器病学・肝臓学）、Healthcare science & services、2014-2016 年には、Research & experimental medicine（研究・実験医学）、Respiratory system（呼吸器系）が知識結合している。

医学系の専門学術誌[1][25][54][88][93]によると、ロボットによる手術の臨床への適用をみると、Intuitive Surgical Inc.の Da Vinci が 2000 年に、米国 FDA から認証を受けると、腹腔鏡手術により、前立腺切除、咽頭がん、甲状腺がん、子宮がんの摘出手術に適用されるようになり、クラスタ # 3 の知識結合する医療・ヘルスケア分野の学術研究分野が、手術ロボットの実用化にほぼ一致していることが判明した。

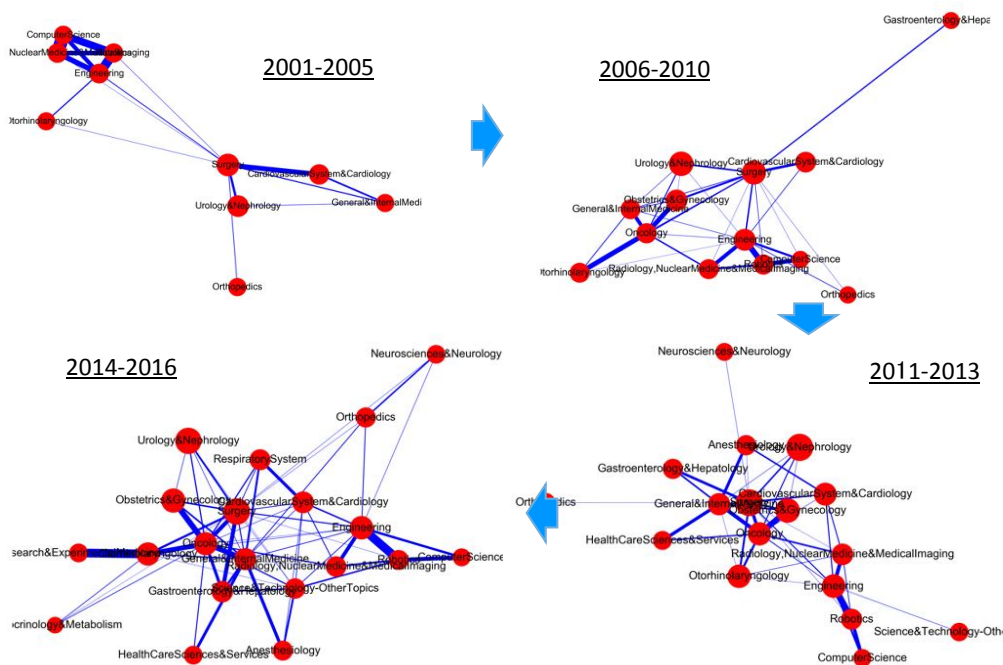


図 4-4 知識結合ネットワーク（クラスタ #3）

図 4-4 の知識結合ネットワークの形成をみると、Surgery をハブとしてネットワークが形成し成長していることが観察されるが、Surgery をハブとした医学系の学術研究分野間の強い結合のネットワークと Engineering、Robotics と Computer science をコアとした工学系のネットワークがハイブリッドで知識結合を形成している。

(4) クラスタ#4 (Application systems of robots) の知識結合ネットワーク

表4-7は、クラスタ#4の知識結合の時系列変化である。クラスタ#4は、サブクラスタを見ると、補正システム (Calibration systems)、教育用ロボット、農業用ロボット、溶接ロボット、物体認識まででも、クラスタ#4の55.2%しかカバーしておらず、様々なアプリケーションの学術研究の集合である。コア分野は、主要4工学分野を軸として、クラスタ#1、#2とは異なり、1996-2000年以降は、Operation research & management scienceを加えた5分野がコア分野を形成している。

Agricultureが1996-2000年以降、Computer science、Engineering、Roboticsと知識結合し、年を経るに従って、結合率(COR)の値が大きくなっており、農業分野でのロボットに関する研究が進捗していることが観察される。Material scienceは、2001-2005年以降、Engineeringと知識結合し、2011-2013年にはMetallurgy & metallurgical Engineering (金属学および金属工学)がRoboticsと知識結合している。

図4-5の知識結合ネットワークの推移をみると、主要工学4分野をコアとしているのは、クラスタ#1と#2と同じであるが、2011-2013年以降は、枝葉のように、1つの分野が主要工学4分野のいずれかに結合しているのが、クラスタ#4の特徴である。Agricultureについては、1996-2000では、枝葉として知識結合していたが、2014-2016年には、Computer science、Engineering、Roboticsと知識結合し、コア分野との結合が密になっていることが観察される。

表 4-7 クラスタ#4における知識結合の動向 (結合率(COR))

	1981-1985	1986-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2013	2014-2016
ComputerScience - Engineering	1.000	1.000	0.859	0.725	0.779	0.674	0.502	0.727
Engineering - Robotics		0.611	1.000	0.802	1.000	1.000	0.862	1.000
ComputerScience - Robotics		0.533	1.913	1.000	0.856	0.862	1.000	0.833
Automation&ControlSystems - ComputerScience				0.720	0.613	0.366	0.530	0.532
Automation&ControlSystems - Robotics				0.711	0.718	0.440	0.525	0.425
Engineering - OperationsResearch&ManagementScience				0.327	0.384	0.364	0.282	0.358
Automation&ControlSystems - Engineering				0.318	0.537	0.619	0.519	0.716
Agriculture - ComputerScience				0.237	0.126	0.380	0.310	0.645
ComputerScience - OperationsResearch&ManagementScience				0.168	0.234	0.131	0.203	0.695
OperationsResearch&ManagementScience - Robotics				0.052	0.107	0.071	0.077	0.037
Agriculture - Engineering					0.066	0.052	0.056	0.096
Automation&ControlSystems - OperationsResearch&ManagementScience					0.114	0.111	0.206	0.182
Engineering - MaterialsScience					0.097	0.082		0.148
Agriculture - Robotics					0.061	0.170	0.136	0.310
ComputerScience - Mathematics						0.265		
Mathematics - OperationsResearch&ManagementScience						0.183		
Engineering - Mathematics						0.118		
Metallurgy&MetallurgicalEngineering - Robotics							0.127	
ComputerScience - Education&EducationalResearch								0.252
Education&EducationalResearch - Robotics								0.090

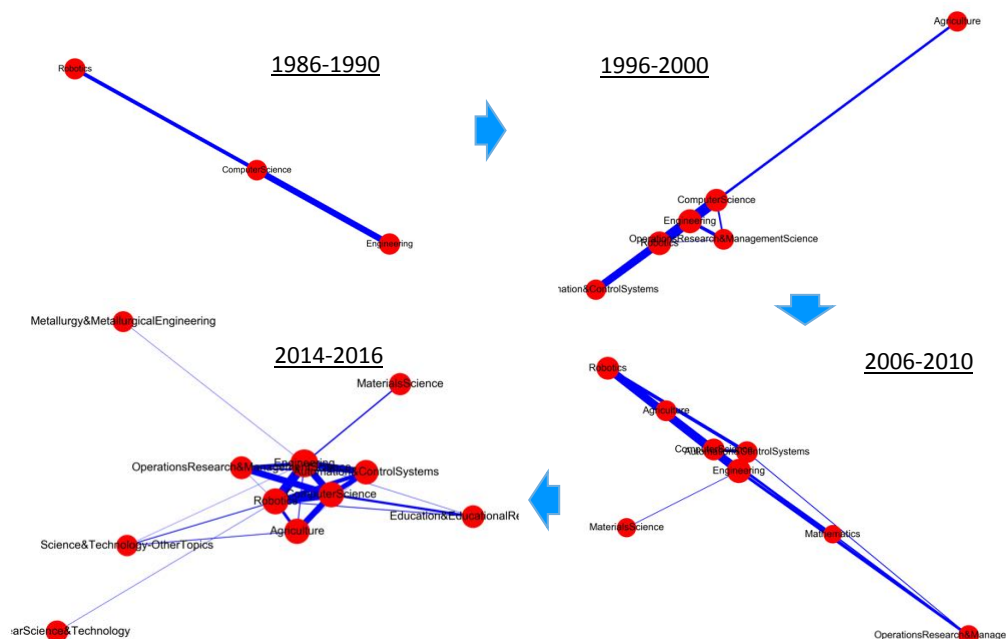


図 4-5 知識結合ネットワーク (クラスタ #4)

(5) クラスタ # 5以降の知識結合ネットワーク

クラスタ # 5以降のクラスタは、表 4-3 のとおり、学術研究論文数が、クラスタ # 5 の 1798 件以降は、1000 件を下回り、知識結合する分野も少なく、表 4-1 のとおり、クラスタ内の学術研究分野も一桁台である。コア分野は完全グラフを形成する分野と定義したことから、最低3分野がお互いに知識結合することが必要であるが、小さいクラスタの場合は、知識結合ネットワークの特徴量を算出するまでもなく、クラスタ内の全学術研究分野と知識結合する分野の推移を見ることで、クラスタの特徴を判断する。

表 4-8、4-9 は、それぞれ、クラスタ # 5～# 8 について、知識結合を形成する分野と関連分野をまとめたものである。知識結合を形成する分野は、2～4 分野であり、関連分野についても、1～10 分野程度である。クラスタ # 5 は、化学や生物学、バイオ技術などが、クラスタ # 6 は、気象学および大気科学 (Meteorology & atmospheric science) やリモートセンシング (Remote sensing) などが、クラスタ # 7 は、放射線学、核医学および医用画像 (Radiology, nuclear medicine & medical imaging) などが、クラスタ # 8 は、工学一般 (Engineering) や整形外科 (Orthopedics) が知識結合する分

野となっており、表4-9の関連分野がカバーする分野を勘案することで、それぞれ、化学・バイオ分野におけるロボットに関する学術研究、地球観測関係のロボットに関する学術研究、放射線医療に関するロボットに関する学術研究、整形やスポーツサイエンスに関するロボット研究であることがわかる。

表 4-8 知識結合を形成する学術研究分野（クラスタ#5～#8）

コア分野			
Cluster #		5	6
Term	1991-1995	Chemistry	
	1996-2000		
	2001-2005	Biochemistry&MolecularBiology	
	2006-2010	Biotechnology&AppliedMicrobiology	
	2011-2013		
	2014-2016	Chemistry	Meteorology&AtmosphericSciences; RemoteSensing
Cluster #		7	8
Term	2001-2005		
	2006-2010	Surgery; Radiology,NuclearMedicine&MedicalImaging ; Oncology	
	2011-2013	Radiology,NuclearMedicine&MedicalImaging ; Neurosciences&Neurology; Oncology	
	2014-2016		
周辺分野			
Cluster #		5	6
Term	1991-1995	MedicalLaboratoryTechnology; Biochemistry&MolecularBiology	
	1996-2000	Chemistry; Biochemistry&MolecularBiology	
	2001-2005	Pharmacology&Pharmacy; Chemistry	Geology; Meteorology&AtmosphericSciences
	2006-2010	Biotechnology&AppliedMicrobiology; Chemistry	
	2011-2013	Biochemistry&MolecularBiology; Chemistry	Meteorology&AtmosphericSciences; RemoteSensing
	2014-2016	Biochemistry&MolecularBiology; Biotechnology&AppliedMicrobiology	EnvironmentalSciences&Ecology; Geology
Cluster #		7	8
Term	2001-2005		Engineering; Orthopedics
	2006-2010		Engineering; Orthopedics
	2011-2013		Engineering; Orthopedics
	2014-2016	Radiology,NuclearMedicine&MedicalImaging ; Oncology	Engineering; Orthopedics

表 4-9 クラスタ# 5～8の関連分野

Cluster #		5	6	7	8
Term	1991-1995	Robotics;ComputerScience; Automation&ControlSystems; Instruments&Instrumentation; Mathematics; Pharmacology&Pharmacy			
	1996-2000	Robotics; Automation&ControlSystems; Biotechnology&AppliedMicrobiology; Pharmacology&Pharmacy; MedicalLaboratoryTechnology	Meteorology&AtmosphericSciences		Engineering; Orthopedics; SportSciences
	2001-2005	Instruments&Instrumentation; MaterialsScience;Physics; Biophysics; Biotechnology&AppliedMicrobiology; PolymerScience; MedicalLaboratoryTechnology; Crystallography;Spectroscopy; Genetics&Heredity	Meteorology&AtmosphericSciences; ImagingScience&PhotographicTechnology; RemoteSensing;Geology	Surgery; Neurosciences&Neurology	Surgery; SportSciences
	2006-2010	Engineering;ComputerScience; Instruments&Instrumentation; MaterialsScience; Physics;Biophysics; Pharmacology&Pharmacy; MedicalLaboratoryTechnology; CellBiology;Crystallography; Spectroscopy	Engineering; Meteorology&AtmosphericSciences; ImagingScience&PhotographicTechnology; EnvironmentalSciences&Ecology; RemoteSensing;Geology; Geochemistry&Geophysics	Engineering; Neurosciences&Neurology; Oncology;	Surgery; SportSciences
	2011-2013	Engineering;ComputerScience; Physics;Biophysics; Biotechnology&AppliedMicrobiology; Pharmacology&Pharmacy; CellBiology;Crystallography	Engineering; ImagingScience&PhotographicTechnology; EnvironmentalSciences&Ecology; Geochemistry&Geophysics	Engineering; Surgery	Surgery; SportSciences; Biophysics
	2014-2016	Engineering;MaterialsScience; Physics;Biophysics; Biotechnology&AppliedMicrobiology; Crystallography	Engineering; ImagingScience&PhotographicTechnology; Geochemistry&Geophysics	Surgery;	Surgery; SportSciences; Biophysics

4.1.3 学術研究における知識結合ネットワークの特徴量の抽出

4.1.2で構築した知識結合ネットワーク（知識結合行列）から、3.2.6で定義した特徴量を算出し、各クラスタの知識結合ネットワークの特徴を分析する。

（1）クラスタ# 1（Robot control systems）の知識結合ネットワーク特徴量

表4-10は、クラスタ# 1（Robot control systems）について、第3章3.2.6で定義した平均クラスタリング係数、平均次数中心性を算出し、知識結合分野数、コア分野数、周辺分野、関連分野数を抽出したものである。1986-1990年においては、主要4工学分野がお互いに結合し完全グラフを構成しているので、平均クラスタリング係数が1となっているが、それ以降においても、0.810～0.933 とかなり高い平均クラスタリング係数となっており、平均次数中心性についても同様に高い数値である。これは、各ノードが密に結合している、すなわち、知識結合が分野間で密に形成していることを表して

いる。各ノードの結合度をみると、周辺分野は、1～3分野と少なく、完全グラフに近い、すなわち、各学術研究分野がお互い密に結合していることを示している。

表 4-10 ネットワーク特徴量から抽出した学術研究分野の位置付け（クラスタ # 1）

期間	平均クラ スタリング 係数	平均次数 中心性	知識結合 率	知識結合 分野数	コア分 野数	周辺分 野数	関連分 野数
1986-1990	1.000	1.000	0.571	4	4	0	3
1991-1995	0.867	0.800	0.556	5	4	1	4
1996-2000	0.900	0.867	0.462	6	5	1	7
2001-2005	0.900	0.867	0.375	6	5	1	10
2006-2010	0.933	0.933	0.273	6	6	0	16
2011-2013	0.810	0.762	0.304	7	6	1	16
2014-2016	0.848	0.639	0.310	9	6	3	20

表 4-11 学術研究分野の抽出結果（クラスタ # 1）

期間	ハブ分野	コア分野	周辺分野	関連分野
1986-1990	Automation&ControlSystems; ComputerScience; Engineering;Robotics	Engineering; Automation&ControlSystems; ComputerScience;Robotics		OperationsResearch&ManagementScience; Mathematics;Instruments&Instrumentation
1991-1995	Automation&ControlSystems; Engineering	Engineering; Automation&ControlSystems; ComputerScience;Robotics	Instruments&Instrumentation	OperationsResearch&ManagementScience; Mechanics;Acoustics;Mathematics
1996-2000	Automation&ControlSystems; Engineering; Robotics	Engineering; Automation&ControlSystems; ComputerScience; Mathematics;Robotics	Mechanics	MaterialsScience;Optics; Acoustics;Instruments&Instrumentation; Oceanography; OperationsResearch&ManagementScience; Neurosciences&Neurology
2001-2005	Automation&ControlSystems; Engineering; Robotics	Engineering; Automation&ControlSystems; ComputerScience; Mathematics;Robotics	Mechanics	MaterialsScience;Optics;Acoustics; Instruments&Instrumentation; ImagingScience&PhotographicTechnology; OperationsResearch&ManagementScience; Oceanography;Neurosciences&Neurology; Telecommunications;Physics
2006-2010	Automation&ControlSystems; ComputerScience; Engineering; Robotics	Mathematics; Engineering; ComputerScience; Mechanics; Robotics; Automation&ControlSystems		Electrochemistry;MaterialsScience;Optics; Chemistry;Instruments&Instrumentation; ImagingScience&PhotographicTechnology; OperationsResearch&ManagementScience; Education&EducationalResearch; Acoustics;Oceanography; Construction&BuildingTechnology; Transportation;Agriculture; Telecommunications; Metallurgy&MetallurgicalEngineering; Physics
2011-2013	ComputerScience	Mathematics; Engineering; ComputerScience; Robotics; Automation&ControlSystems; Mechanics	Telecommunications	Electrochemistry;MaterialsScience;Optics; Chemistry;Instruments&Instrumentation; Education&EducationalResearch; OperationsResearch&ManagementScience; Acoustics;Thermodynamics;Oceanography; Construction&BuildingTechnology; Transportation;Neurosciences&Neurology; Agriculture; Metallurgy&MetallurgicalEngineering; Physics
2014-2016	ComputerScience	Mathematics; Engineering; ComputerScience; Mechanics; Robotics; Automation&ControlSystems	Instruments&Instrumentation; Agriculture; Telecommunications	Electrochemistry;Chemistry; OperationsResearch&ManagementScience; Construction&BuildingTechnology; Transportation;Neurosciences&Neurology; NuclearScience&Technology; Metallurgy&MetallurgicalEngineering; ImagingScience&PhotographicTechnology; Geology;PhysicalGeography; MaterialsScience;Physics;Optics; Meteorology&AtmosphericSciences; Acoustics;Thermodynamics;Oceanography; RemoteSensing;Astronomy&Astrophysics

ネットワーク特徴量から抽出した学術研究分野をみると、1986年～1990年から主要4工学分野がコア分野(完全グラフを形成)となり、1996年から Mathematics、2006年から Mechanics が加わり、コア分野を形成していることがわかった。

クラスタ#1は、ロボットを制御するために不可欠な学術研究分野の学術研究論文がグループをなすクラスタであり、上記6分野の学術研究分野がコアとなってお互いの学術研究分野が結合・融合していることが抽出できた。

表4-11は、クラスタ#1に関して、学術研究分野を、ハブ、コア、周辺、関連の各分野に抽出したものである。クラスタ#1には、知識結合した学術研究分野は、1986-1990年の4分野から2006-2010年以降は9分野まで徐々に増加し、コア分野は、2006-2010年以降は6分野となっている。ハブ分野については、主要4工学分野が完全グラフを構成していることもあって、Automation & control systems、Engineering、Robotics が2006-2010までがハブ分野となることが多かったが、2011-2013年以降は、Computer Science が単独で、ハブ分野となった。これは、Computer Science が他の主要工学分野よりも多くの学術研究分野と結合・融合したことを示している。IoT、AI が普及するに従って、ロボット制御システム研究の集合であるクラスタ#1では Computer Science がロボットの学術研究の中心的分野となっていると伺える。

また、クラスタ#1には、知識結合を形成しない関連分野が知識結合した分野のほぼ倍の10～20分野ある。農業分野(Agriculture)は、2006-2010年から、通信分野(Telecommunications)は、2001-2005年から関連分野に既にあり、Instruments & Instrumentation については、1986-1990年から知識結合の周辺分野にない場合は、関連分野にある。知識結合度の結合率(COR)が比較的強い場合には、知識結合のコア分野あるいは周辺分野のいずれかに位置付けられるが、結合度(COR)が小さい場合には、Instruments & Instrumentation のように知識結合を形成しない場合には、クラスタ内の関連分野にはあることがわかった。

(2) クラスタ#2の知識結合ネットワーク特徴量

表4-12は、クラスタ#2(Robot application systems)について、クラスタ#1と同様にネットワーク特徴量を算出したものである。表4-13はクラスタ#2について、ハブ、コア、周辺、関連の各分野を抽出したものである。このクラスタは、2番目に大きいクラスタを形成しているが、知識結合する分野数が、クラスタ#1と比較すると2倍強、関連分野を合わせると、クラスタ#2は、2001-2005年以降は約20分野から約

50分野へと増加しており、多くの学術研究分野がクラスタ#2に関わっている。

平均クラスタリング係数は、クラスタ#1ほど大きくないが、0.583～0.725と比較的高い値一方で、平均次数中心性は、知識結合数が増加した2006年以降は、0.316～0.390と相対的に低く、クラスタ#2がいくつかのアプリケーションのグループの集合体であることを反映していると考えられる。また、ハブ分野は、2001～2005年までComputer scienceやRoboticsであったのが、2006年以降、Engineeringが単独のハブ分野となっていることから、ロボットのアプリケーションに関する研究がクラスタを形成していると考えられる。

表 4-12 ネットワーク特徴量から抽出した学術研究分野の位置付け（クラスタ#2）

期間	平均クラスタリング係数	平均次数中心性	知識結合率	知識結合分野数	コア分野数	周辺分野数	関連分野数
1986-1990	0.000	1.000	0.400	2	0	2	3
1991-1995	1.000	1.000	0.444	4	4	0	5
1996-2000	0.583	0.429	0.615	8	4	4	5
2001-2005	0.725	0.556	0.474	9	7	2	10
2006-2010	0.666	0.390	0.385	15	6	9	24
2011-2013	0.681	0.316	0.463	19	10	9	22
2014-2016	0.694	0.368	0.426	20	10	10	27

表4-13によると、主要4工学分野は、1991-1996年以降コア分野を形成しているが、2001年以降からは、Neuroscience & nephrology、Rehabilitationがコア分野に加わるとともに、周辺分野も含めると、Mathematics、Psychology、Instruments & instrumentations、Material science、Chemistryが中心的な学術研究分野をなしていることがわかる。1990年代までは、クラスタ#1とクラスタ#2は共通の学術研究領域を形成していたものが、2000年代以降、クラスタ#1はロボットの制御などの基盤的研究を主な学術研究領域、クラスタ#2はロボットのアプリケーションに関する学術研究を主な領域とする研究となったことが伺われる。

表 4-13 学術研究分野の抽出結果（クラスタ # 2）

期間	ハブ分野	コア分野	周辺分野	関連分野
1986-1990			Engineering; Robotics	ComputerScience; Automation&ControlSystems; Instruments&Instrumentation
1991-1995	Automation&ControlSystems; ComputerScience; Engineering; Robotics	Engineering; Automation&ControlSystems; ComputerScience; Robotics		Rehabilitation; Mathematics; Instruments&Instrumentation; Psychology; Neurosciences&Neurology
1996-2000	ComputerScience; Robotics	Engineering; Automation&ControlSystems; ComputerScience; Robotics	Neurosciences&Neurology; Mathematics; Rehabilitation; Psychology	BehavioralSciences; Instruments&Instrumentation; OperationsResearch&ManagementScience; Mechanics;Physics
2001-2005	ComputerScience; Robotics	Neurosciences&Neurology; Mathematics; Engineering; Rehabilitation; ComputerScience; Robotics; Automation&ControlSystems	Psychology; Mechanics	Mathematical&ComputationalBiology; MaterialsScience;Physiology; BehavioralSciences; Instruments&Instrumentation; OperationsResearch&ManagementScience; ImagingScience&PhotographicTechnology; Zoology;SportSciences;Physics
2006-2010	Engineering	Neurosciences&Neurology; Engineering; Rehabilitation; ComputerScience; Robotics; Automation&ControlSystems	Mathematics; Physics; Communication; General&InternalMedicine; Mechanics; MaterialsScience; Psychology; Zoology; Surgery	Electrochemistry;Chemistry; OperationsResearch&ManagementScience; Pediatrics;PolymerScience; SportSciences; EnvironmentalSciences&Ecology; Orthopedics; Mathematical&ComputationalBiology; Geriatrics&Gerontology; Instruments&Instrumentation; Telecommunications;Linguistics; CardiovascularSystem&Cardiology; Physiology;BehavioralSciences; Biophysics; Education&EducationalResearch; Philosophy; Biochemistry&MolecularBiology; Optics;Acoustics;Oceanography; MedicalInformatics
2011-2013	Engineering	Neurosciences&Neurology; Engineering;Physics; Rehabilitation; ComputerScience; Robotics; Instruments&Instrumentation; Automation&ControlSystems; MaterialsScience; Psychology	Research&ExperimentalMedicine; Mathematics; Chemistry; Education&EducationalResearch; General&InternalMedicine; Mechanics; Linguistics; Surgery; Geriatrics&Gerontology	Electrochemistry; OperationsResearch&ManagementScience; Zoology;PolymerScience; SportSciences; Gastroenterology&Hepatology; EnvironmentalSciences&Ecology; Orthopedics; Mathematical&ComputationalBiology; Communication;Telecommunications; CardiovascularSystem&Cardiology; Physiology; BehavioralSciences;Biophysics; Philosophy; HealthCareSciences&Services; Biochemistry&MolecularBiology; Optics;Acoustics;Oceanography; MedicalInformatics
2014-2016	Engineering	Engineering; Physics; Chemistry; Rehabilitation; ComputerScience; Mechanics;Robotics; Instruments&Instrumentation; Automation&ControlSystems; MaterialsScience	Neurosciences&Neurology; Mathematics; PolymerScience; Education&EducationalResearch; Surgery; Geriatrics&Gerontology; General&InternalMedicine; Psychology; Zoology; Electrochemistry	OperationsResearch&ManagementScience; SportSciences; Research&ExperimentalMedicine; Metallurgy&MetallurgicalEngineering; EnvironmentalSciences&Ecology; Orthopedics; Mathematical&ComputationalBiology; Communication; Radiology,NuclearMedicine&MedicalImaging; Business&Economics; Telecommunications;CellBiology; Linguistics; CardiovascularSystem&Cardiology; Physiology;BehavioralSciences; Biophysics;Philosophy; HealthCareSciences&Services; Biochemistry&MolecularBiology; Optics;Thermodynamics; Oceanography; InformationScience&LibraryScience; MedicalInformatics;Psychiatry; Biotechnology&AppliedMicrobiology

そこで、クラスタ # 2 のサブクラスタの知識結合のコア分野と周辺分野を抽出すると（表 4-14）、サブクラスタ # 2-1（Biped robots）、サブクラスタ # 2-2（Robots for rehabilitation）、サブクラスタ # 2-3（Soft robotics）では、知識結合を形成する分野で共通点と相違点があることもわかった。いずれのサブクラスタにおいても、主要 4 工

学分野はほぼコア分野となっているが、サブクラスタ # 2-1 では、Neuroscience & neurology、Psychology、サブクラスタ # 2-2 では、Rehabilitation、Neuroscience & neurology、Psychology、サブクラスタ # 2-3 では、Physics、Material science、Chemistry がコア分野に入っており、各サブクラスタの研究の特徴を反映した学術研究分野が抽出されている。知識結合する学術研究分野からもクラスタの特徴を捉えられることが確認できた。

表 4-14 サブクラスタ # 2-1～3のコア分野と周辺分野³⁶

期間	サブクラスタ #2-1		サブクラスタ #2-2		サブクラスタ #2-3	
	コア分野	周辺分野	コア分野	周辺分野	コア分野	周辺分野
1991-1995	Engineering; Automation&ControlSystems; ComputerScience; Robotics				Engineering; ComputerScience; Robotics	
1996-2000	Engineering; Automation&ControlSystems; Robotics; Neurosciences&Neurology; ComputerScience		Engineering; ComputerScience; Robotics		Engineering; Automation&ControlSystems; ComputerScience; Robotics	
2001-2005	Psychology; Engineering; Automation&ControlSystems; Robotics; Neurosciences&Neurology; ComputerScience	Mechanics	Engineering; ComputerScience; Robotics; Neurosciences&Neurology	Rehabilitation	Engineering; Automation&ControlSystems; ComputerScience; Robotics	
2006-2010	Psychology; Engineering; Automation&ControlSystems; Robotics; Neurosciences&Neurology; ComputerScience; Mechanics		Rehabilitation; Psychology; Engineering; Automation&ControlSystems; Robotics; Neurosciences&Neurology; ComputerScience		Physics; PolymerScience; MaterialsScience; Engineering; Automation&ControlSystems; Surgery; Robotics; Neurosciences&Neurology; ComputerScience; Mechanics	
2011-2013	Psychology; Engineering; Automation&ControlSystems; Robotics; Neurosciences&Neurology; ComputerScience	Physics; Mathematics	Rehabilitation; Psychology; Engineering; Robotics; Neurosciences&Neurology; ComputerScience	Education&EducationalResearch; General&InternalMedicine; Automation&ControlSystems; Geriatrics&Gerontology	Physics; Chemistry; MaterialsScience; Engineering; Automation&ControlSystems; Surgery; Robotics; ComputerScience; Mechanics	
2014-2016	Psychology; Engineering; Automation&ControlSystems; Robotics; Neurosciences&Neurology; ComputerScience	Mechanics;	Rehabilitation; Psychology; Engineering; Automation&ControlSystems; Robotics; Neurosciences&Neurology; ComputerScience	Education&EducationalResearch; Geriatrics&Gerontology	Physics; Chemistry; MaterialsScience; Engineering; Automation&ControlSystems; Robotics; ComputerScience; Mechanics; Instruments&Instrumentation	Surgery; PolymerScience

サブクラスタ # 2-1 は、Neuroscience & neurology と Psychology が知識結合のコア分野に入っていることが特徴で、二足歩行ロボットの研究には、人間の行動をロボットにさせるために、人間の神経系のメカニズムと心理的状況を含めた学術研究が行われていることが伺われる。サブクラスタ # 2-2 は、Rehabilitation、Neuroscience & neurology、Psychology が特徴で、2011-2013 年からは、周辺分野に、Education & educational research、Geriatrics & gerontology（老年医学・老年学）が加わっており、

³⁶ 各サブクラスタの特徴的な分野を赤字とした。

高齢者向けのリハビリテーションやリハビリテーションの効果を上げるための教育や訓練の学術研究が関連して研究されていると推察される。サブクラスタ # 2-3 は、Physics、Material science、Chemistry をコア分野としていることから、材料系の研究を核として、柔らかいものを扱うロボットの研究のサブクラスタであるが、2006-2010 年からは、Surgery が知識結合する分野に加わっている。Surgery は人間に対して施すものであり、人間の体は、柔らかいので、ソフトロボティクスの研究の 1 領域としてこのサブクラスタに含まれたと推察される。

(3) クラスタ # 3 の知識結合ネットワーク特徴量

表 4-15、4-16 は、クラスタ # 3 (Surgery & medical issues) についてのネットワーク特徴量とそれに基づき抽出した学術研究分野である。このクラスタは、外科学 (Surgery) のクラスタであり、クラスタ # 1、# 2 とは全く異なる知識結合の仕方をしている。表 4-15 によると、知識結合を形成する分野は、2000 年代以降、10 分野以上となり、徐々に増加し、2014-2016 年には、19 分野となり、平均クラスタリング係数もほぼ 0.7 を超えており、知識結合を形成する分野間では結合が比較的密である。一方、平均次数中心性はほぼ 0.3 から 0.41 の間とやや低い。図 4-4 によると、医学系の分野のコア分野と工学系の分野のハイブリッドなコアを形成しており、それが、平均クラスタリング係数は比較的高いが、平均次数中心性がやや低くなっている原因と考えられる。表 4-16 によると、ハブ分野は、全ての期間に渡って、Surgery であり、クラスタ # 3 は、Surgery (外科学) を中心に、知識結合が進んでいることがわかる。コア分野をなす学術研究分野もほとんどは医療・ヘルスケア分野で、工学分野で知識結合を形成しているのは、Engineering、Robotics、Computer science の 3 分野のみである。関連分野においても、医療・ヘルスケア分野中心であり、工学では、Automation & control systems、Material science、Instruments & instrumentation などに限られている。結合する学術研究分野は年代とともに増加傾向にあるが、増加しているのは医療・ヘルスケア分野であり、医療・ヘルスケア分野内でのロボットによる手術の応用が広がっていることを示している。

4.1.2 (3) でも述べたが、Urology & nephrology (泌尿器学・腎臓学)、Otorhinolaryngology (耳鼻咽喉科学)、Oncology (腫瘍学)、Obstetrics & gynecology (産婦人科学)、Gastroenterology & hepatology (消化器病学・肝臓学) などは、医学系の専門学術誌[1][25][54][88][93]に、ロボットによる手術が、前立腺切除、咽頭がん、

甲状腺がん、子宮がんの摘出手術に適用されるようになったとあり、知識結合を形成する医療・ヘルスケア分野の学術研究分野に一致している。

表 4-15 ネットワーク特徴量から抽出した学術研究分野の位置付け（クラスタ # 3）

期間	平均クラスタリング係数	平均度数中心性	知識結合率	知識結合分野数	コア分野数	周辺分野数	関連分野数
1996-2000	0.000	0.238	0.417	5	1	4	7
2001-2005	0.715	0.378	0.500	10	5	5	10
2006-2010	0.747	0.410	0.481	13	7	6	14
2011-2013	0.677	0.333	0.593	16	9	7	11
2014-2016	0.709	0.298	0.543	19	9	10	16

表 4-16 学術研究分野の抽出結果（クラスタ # 3）

期間	ハブ分野	コア分野	周辺分野	関連分野
1996-2000	Surgery	Surgery	Urology&Nephrology; Orthopedics; General&InternalMedicine; CardiovascularSystem&Cardiology;	Neurosciences&Neurology; ComputerScience;Robotics; Engineering; MedicalLaboratoryTechnology; Radiology,NuclearMedicine&MedicalImaging; RespiratorySystem
2001-2005	Surgery	Engineering; ComputerScience; Robotics; Radiology,NuclearMedicine&MedicalImaging; Surgery	Urology&Nephrology; Otorhinolaryngology; CardiovascularSystem&Cardiology; General&InternalMedicine; Orthopedics	Anesthesiology; Automation&ControlSystems; Neurosciences&Neurology; ImagingScience&PhotographicTechnology; Pediatrics;MedicalInformatics; Oncology; Research&ExperimentalMedicine; Gastroenterology&Hepatology; RespiratorySystem
2006-2010	Surgery	Otorhinolaryngology; Engineering; Obstetrics&Gynecology; Surgery; Urology&Nephrology; Oncology; General&InternalMedicine	Orthopedics; ComputerScience; Robotics; CardiovascularSystem&Cardiology; Radiology,NuclearMedicine&MedicalImaging; Gastroenterology&Hepatology	Anesthesiology; Automation&ControlSystems; Pediatrics;Ophthalmology; Pharmacology&Pharmacy; ReproductiveBiology; HealthCareSciences&Services; MedicalInformatics; Research&ExperimentalMedicine; Neurosciences&Neurology; Transplantation;RespiratorySystem; EnvironmentalSciences&Ecology; Physics
2011-2013	Surgery	Otorhinolaryngology; Engineering; Obstetrics&Gynecology; Surgery; Oncology; Urology&Nephrology; General&InternalMedicine; CardiovascularSystem&Cardiology; Radiology,NuclearMedicine&MedicalImaging	Anesthesiology; Gastroenterology&Hepatology; Robotics; ComputerScience; HealthCareSciences&Services; Neurosciences&Neurology; Orthopedics	MaterialsScience; Automation&ControlSystems; Instruments&Instrumentation; Pediatrics;ReproductiveBiology; Dentistry,OralSurgery&Medicine; RespiratorySystem; Research&ExperimentalMedicine; Transplantation; Endocrinology&Metabolism; Pathology
2014-2016	Surgery	Otorhinolaryngology; RespiratorySystem; Engineering; Obstetrics&Gynecology; Surgery; Oncology; Urology&Nephrology; General&InternalMedicine; CardiovascularSystem&Cardiology	Neurosciences&Neurology; Gastroenterology&Hepatology; ComputerScience; Robotics; Endocrinology&Metabolism; Anesthesiology; Orthopedics; HealthCareSciences&Services; Radiology,NuclearMedicine&MedicalImaging; Research&ExperimentalMedicine	MaterialsScience;Optics; Automation&ControlSystems; Instruments&Instrumentation; Nursing;Pediatrics;Biophysics; Pharmacology&Pharmacy; ReproductiveBiology; Education&EducationalResearch; Public,Environmental&OccupationalHealth; MedicalInformatics; Biochemistry&MolecularBiology; Transplantation; Dentistry,OralSurgery&Medicine; Biotechnology&AppliedMicrobiology

(4) クラスタ#4の知識結合ネットワーク特徴量

表4-17、4-18は、クラスタ#4 (Application systems of robotics) についてのネットワーク特徴量とそれに基づき抽出した学術研究分野である。クラスタ#4は、主要工学4分野に加え、1996-2000年以降に Operation research & management science がコア分野になっていることがクラスタ#1、2とは異なるが、クラスタ#4も様々なロボットの応用システムの研究の集合であり、サブクラスタの4-1～5で55.2%しか占めない。2011-2013年までの知識結合を形成する分野が一桁の数のうちは、平均クラスタリング係数も平均次数中心性も0.6～1.0と比較的高い値であったが、2014-2016年になって、知識結合分野数が10分野になると、それぞれ、0.569、0.418と低下した。これは、周辺分野が4分野となったことによるが、新しく知識結合した分野をみると、Education & educational research、Nuclear science & technology と Material science であるが、Education & educational research が1996-2000年から、Nuclear science & technology が2006-2010年から、Material science が2011-2013年から関連分野に現れており、知識結合が形成する前にも、関連分野としてクラスタ内で関連分野として研究が行われていることが確認できた。関連分野に、Business & economics、Construction & building technologies、Optics、Instrument & instrumentation、材料系の Chemistry、Electrochemistry、Metallurgy & metallurgical engineering などが入っており、これからも様々なアプリケーションの学術研究に関するクラスタを形成していることが観察される。

表 4-17 学術研究分野の抽出結果 (クラスタ#4)

期間	平均クラスタリング係数	平均次数中心性	知識結合率	知識結合分野数	コア分野数	周辺分野数	関連分野数
1986-1990	1.000	1.000	0.375	3	3	0	5
1991-1995	1.000	1.000	0.375	3	3	0	5
1996-2000	0.839	0.733	0.500	6	5	1	6
2001-2005	0.733	0.667	0.500	7	5	2	7
2006-2010	0.718	0.607	0.500	8	5	3	8
2011-2013	0.857	0.714	0.389	7	5	2	11
2014-2016	0.569	0.418	0.524	11	6	5	10

表 4-18 学術研究分野の抽出結果（クラスタ#4）

期間	ハブ分野	コア分野	周辺分野	関連分野
1986-1990	ComputerScience; Engineering; Robotics	Robotics; Engineering; ComputerScience		Optics; Automation&ControlSystems; Instruments&Instrumentation; OperationsResearch&ManagementScience; Agriculture
1991-1995	ComputerScience; Engineering; Robotics	Robotics; Engineering; ComputerScience		Automation&ControlSystems; Mathematics; Instruments&Instrumentation; OperationsResearch&ManagementScience; Agriculture
1996-2000	ComputerScience; Engineering	Automation&ControlSystems; Robotics; Engineering; OperationsResearch&ManagementScience; ComputerScience	Agriculture	MaterialsScience; Optics; Instruments&Instrumentation; Education&EducationalResearch; Mathematics; Physics
2001-2005	Engineering	Automation&ControlSystems; Robotics; Engineering; OperationsResearch&ManagementScience; ComputerScience	Agriculture; MaterialScience	Mathematics; Education&EducationalResearch; Instruments&Instrumentation; Construction&BuildingTechnology; Business&Economics; Metallurgy&MetallurgicalEngineering; Physics
2006-2010	Engineering	Automation&ControlSystems; Robotics; Engineering; OperationsResearch&ManagementScience; ComputerScience	Mathematics; Agriculture; MaterialScience	Optics; Instruments&Instrumentation; Education&EducationalResearch; Construction&BuildingTechnology; Business&Economics; NuclearScience&Technology; Metallurgy&MetallurgicalEngineering; Physics
2011-2013	Engineering; Robotics	Automation&ControlSystems; Robotics; Engineering; OperationsResearch&ManagementScience; ComputerScience	Agriculture; Metallurgy&MetallurgicalEngineering	MaterialsScience; Electrochemistry; Optics;Chemistry; Instruments&Instrumentation; Mathematics; Education&EducationalResearch; Construction&BuildingTechnology; Mechanics; NuclearScience&Technology; Physics
2014-2016	Engineering	Automation&ControlSystems; Agriculture; Robotics; Engineering; OperationsResearch&ManagementScience; ComputerScience	Education&EducationalResearch; NuclearScience&Technology; MaterialsScience; Metallurgy&MetallurgicalEngineering	Electrochemistry; Optics;Chemistry; Instruments&Instrumentation; Mathematics; Thermodynamics; Construction&BuildingTechnology; Mechanics; Telecommunications; Physics

4.1.4 考察

4.1.1～4.1.3において、学術研究分野について、カテゴリ分けされたクラスタごとに分析を行ったが、知識結合ネットワークの分析結果をクラスタ間で比較し、ロボットの学術研究分野における特徴について分析を深める。知識結合の形成と研究開発の進捗の現状との比較検討を行う。

(1) ロボットの学術研究分野における特徴

4.1.1のクラスタ・ネットワーク分析により、ロボットの学術研究分野の特徴が関連のある主な学術研究群（グループ）ごとに抽出されたが、本節においては、学術研究分野の分布の比較と4.1.3で抽出された知識結合を形成するコア分野、周辺分野を比較検討することにより、ロボット分野の学術研究全体の特徴が、MM手法により把握できているのかの評価を行う。

表4-19は、クラスタ別の学術研究分野の分布とシェアおよびシェアが全体の平均と比較した割合で算出した特化係数³⁷である。学術研究分野全体では、Engineering（18.4%）、Robotics（14.7%）、Computer science（13.6%）、Automation & control systems（10.7%）の主要4工学分野で過半をしめ、工学全体で68.3%、医療・ヘルスケア分野で18.9%となっているが、個々のクラスタにおける特化係数をみることでクラスタの特徴がより明確になる。

表 4-19 学術研究分野のクラスタ別分布

クラスタ別分野分布													
Cluster #	Engineering	Robotics	Computer Science	Automation & Control Systems	Other_Eng	Eng.Total	Surgery	Urology & Nephrology	Other_Med	Med.Total	Bio_Tech	Others	Total
Cluster #	1	11177	8778	7971	8699	5435	42060	11	1	179	191	51	3100
	2	7090	7988	6763	3506	4817	30164	136	7	5022	5165	612	6624
	3	1167	296	346	206	293	2308	5241	4376	7755	17372	226	311
	4	3410	1647	1736	1216	1696	9705	11		61	72	30	1362
	5	82	55	69	68	290	564		1	446	447	1083	1174
	6	71	1	2		531	605			2	2	23	741
	7	59	3	1	1	4	68	87	6	659	752	5	17
	8	148	25	14	14	230	431	148		362	510	61	12
	9	170	100	214	66	181	731	1		1	2	0	53
	10	95	43	51	24	158	371			50	50	5	202
Others	1114	611	947	417	948	4037	87	87	454	628	177	1257	6100
total	24583	19547	18114	14217	14583	91044	5722	4478	14991	25191	2273	14853	133366

クラスタ別分野シェア													
Cluster #	Engineering	Robotics	Computer Science	Automation & Control Systems	Other_Eng	Eng.Total	Surgery	Urology & Nephrology	Other_Med	Med.Total	Bio_Tech	Others	Total
Cluster #	1	0.246	0.193	0.176	0.192	0.120	0.926	0.000	0.004	0.004	0.001	0.068	1
	2	0.167	0.188	0.159	0.082	0.113	0.709	0.003	0.118	0.121	0.014	0.156	1
	3	0.058	0.015	0.017	0.010	0.014	0.259	0.216	0.384	0.859	0.011	0.015	1
	4	0.305	0.147	0.155	0.109	0.152	0.869	0.001	0.005	0.006	0.003	0.122	1
	5	0.025	0.017	0.021	0.021	0.089	0.173	0.000	0.136	0.137	0.331	0.359	1
	6	0.052	0.001	0.001	0.000	0.387	0.441	0.000	0.001	0.001	0.017	0.540	1
	7	0.070	0.004	0.001	0.001	0.005	0.081	0.103	0.007	0.783	0.893	0.006	0.020
	8	0.146	0.025	0.014	0.014	0.227	0.425	0.146	0.000	0.357	0.502	0.060	0.012
	9	0.216	0.127	0.272	0.084	0.230	0.930	0.001	0.000	0.001	0.003	0.000	0.067
	10	0.151	0.068	0.081	0.038	0.252	0.591	0.000	0.080	0.080	0.080	0.322	1
Others	0.183	0.100	0.155	0.068	0.155	0.662	0.014	0.014	0.074	0.103	0.029	0.206	1
total	0.184	0.147	0.136	0.107	0.109	0.683	0.043	0.034	0.112	0.189	0.017	0.111	1

分野の特化係数													
Cluster #	Engineering	Robotics	Computer Science	Automation & Control Systems	Other_Eng	Eng.Total	Surgery	Urology & Nephrology	Other_Med	Med.Total	Bio_Tech	Others	Total
Cluster #	1	1.336	1.319	1.293	1.797	1.095	1.357	0.006	0.001	0.035	0.022	0.066	0.613
	2	0.904	1.280	1.170	0.773	1.035	1.038	0.074	0.005	1.050	0.642	0.844	1.397
	3	0.313	0.100	0.126	0.096	0.133	0.167	6.042	6.446	3.413	4.549	0.656	0.138
	4	1.656	1.006	1.144	1.021	1.389	1.273	0.023	0.000	0.049	0.034	0.158	1.095
	5	0.136	0.115	0.155	0.195	0.812	0.253	0.000	0.009	1.214	0.724	19.444	3.226
	6	0.281	0.005	0.011	0.000	3.542	0.646	0.000	0.000	0.013	0.008	0.984	4.853
	7	0.380	0.024	0.009	0.011	0.043	0.118	2.408	0.212	6.963	4.728	0.348	0.181
	8	0.791	0.168	0.102	0.129	2.072	0.622	3.399	0.000	3.173	2.660	3.526	0.106
	9	1.173	0.888	2.005	0.788	2.106	1.362	0.030	0.000	0.011	0.013	0.000	0.605
	10	0.821	0.467	0.598	0.358	2.301	0.865	0.000	0.000	0.708	0.422	0.467	2.888
Others	0.991	0.683	1.143	0.641	1.421	0.969	0.332	0.425	0.662	0.545	1.703	1.850	1

³⁷ 貿易の比較優位の分析等で使用される。特化係数を学術研究分野のシェアに適用。
特化係数 SI_{ij} は、(j クラスタの i 分野のシェア)/(全体の i 分野のシェア)で算出。

特化係数で、クラスタ間を比較すると、ロボットの制御やシステムなどの基盤的研究は、クラスタ#1、#2、#4などで、工学分野のウエイトが高く、クラスタ#3、#7、#8などでは、医療・ヘルスケア分野関係のウエイトが高くなっている。医療・ヘルスケア分野では、クラスタ#3に **Surgery** と **Urology & Nephrology** が集中しており、全医療・ヘルスケア分野の学術研究論文のうち、69.0%を占めているが、クラスタ#2 (**Robot application Systems**) にも、医療・ヘルスケア分野の学術研究論文が、5165 件の 20.5%を占め、クラスタ#3 と合わせて約9割を占めている。クラスタ#2の学術研究分野には、リハビリテーション (**Rehabilitation**)、神経科学・神経学 (**Neuroscience & neurology**)、心理学 (**Psychology**) があり、リハビリテーションやヘルスケア関連の学術研究論文が多く含まれると考えられる。それ以外で、医療・ヘルスケア分野のウエイトが高いクラスタは、クラスタ#7 (ロボット放射線外科学: **robotic radiosurgery**) の 752 件 (89.3%)、クラスタ#8 (生体力学機能: **Biomechanical function**) の 510 件 (50.2%) である。

特化係数の高い分野をみると、**Surgery** は、クラスタ#3、#7、#8に、**Urology & Nephrology** は、クラスタ#3にのみ特化係数が 6.446 と **Surgery** が 6.042 と同様に高く、クラスタ#3は、医療・ヘルスケア分野全体でも、4.549 と高いことから、手術特に泌尿器系の手術がクラスタ#3に集中していることがわかる。クラスタ#8は、**Biomechanical functions** であるが、**Surgery** 3.399 のほか、医療・ヘルスケア分野全体で 2.660、バイオテクノロジー分野 3.526 となっており、生体機能のメカニズムの学術研究として、手術がロボットハンド・フィンガーによる微妙な操作が必要なこと、生体機能を理解するためには医療・ヘルスケアやバイオテクノロジーの知識が必要なことからクラスタ#8の主要な研究テーマとなっていることを反映していると考えられる。

クラスタ#5 (**Automation in bio & chemistry**) は、バイオテクノロジー分野 19.444 と集中し、純粋科学などその他の分野も 3.226 と高いのが他のクラスタと比較すると特徴的であり、バイオと化学に関するロボットの学術研究が1つの学術研究領域となっていることが伺える。クラスタ#6 (**Aerosol robotic network**) が、その他の工学 3.542、純粋科学などのその他の分野 4.853 のみ特化係数が高く、バイオテクノロジー分野が 0.984 と全体とほぼ同じシェアである以外は主要4工学分野、医療・ヘルスケア分野とも、0.0 ~ 0.281 など極端に小さくロボットに関連する学術研究分野としては独立した領域の研究が行われていると考えられる。**Aerosol robotic network** のウェブサイト[70]をみると、米国 NASA が中心となって設立したエアゾールの粒子が与える気候への影響を研究している科学者ネットワークであり、エアゾールの粒子が与える気候への影響という特定

目的の研究であることが特化係数にも表れていることが判明した。

(2) 知識結合を形成する分野のクラスタ間比較によるロボットの学術研究の特徴把握

4.1.3において、クラスタごとの知識結合ネットワークの特徴を分析したが、クラスタ間で知識結合形成する分野を比較検討することにより、ロボットの学術研究の特徴を明らかにする。表4-20、4-22、4-24は、1991-1995年、2001-2005年、2014-2016年について、4.1.3において抽出したコア分野と周辺分野をクラスタ間で比較し、クラスタ間のクロスしたマス目にクラスタ間で共通に知識結合した学術研究分野を抽出したものである³⁸。また、表4-21、4-23、4-25は、学術研究分野ごとに、どのクラスタで知識結合しているかを一覧にしたもので、二重丸はコア分野、一重丸は周辺分野に位置付けられた学術研究分野であることを示す。

表 4-20 クラスタ間で共通する知識結合を形成する分野（1991-1995 年）

CLS01	Engineering; Automation&ControlSystems; ComputerScience; Robotics Instruments&Instrumentation				
CLS02	Engineering; Robotics; ComputerScience; Automation&ControlSystems	Engineering; ComputerScience; Robotics; Automation&ControlSystems			
CLS03	-	-	-		
CLS04	Engineering; Robotics; ComputerScience;	Engineering; Robotics; ComputerScience;		Robotics; Engineering; ComputerScience	
CLS05	-	-	-	-	Chemistry; MedicalLaboratoryTechnology Biotechnology&MolecularBiology
	CLS01	CLS02	CLS03	CLS04	CLS05

1991-1995 年においては、クラスタ # 1 とクラスタ # 2 との間で主要工学 4 分野が既に共通のコア分野となっており、クラスタ # 4 (Application systems for robots) とは、Automation & control systems を除く 4 分野とが共通のコア分野となっており、産業用ロボットの成長期には、これらの主要工学 4 分野がロボットの基盤的研究として研究がなされていたことがわかる。また、3つのクラスタに分かれているが、いずれも産業用ロボットに関連したクラスタであり、この時期は、Engineering、Robotics、Computer

³⁸ 赤字の学術研究分野は、両クラスタともコア分野であることを示す。

science の3工学分野がロボットの共通の学術研究分野として研究がなされていたとみることができる。その他のクラスタでは、クラスタ#5 (Automation in bio & chemistry) のみ知識結合を形成した分野が抽出されているが、抽出された分野は、Chemistry、Medical laboratory technology、Biochemistry & molecular biology であり、主要工学4分野は1分野も知識結合しておらず、クラスタ#1、#2、#4とは独立性の高い学術研究分野として進められたと考えられる。クラスタ#3 (Surgery) には知識結合する分野は未だなく、学術研究としては黎明期であり知識結合の形成もなかった。

表 4-21 各クラスタの知識結合を形成する学術研究分野 (1991-1995 年) ³⁹

Sectors	Cluster #				
	CLS01	CLS02	CLS03	CLS04	CLS05
Engineering	◎	◎		◎	
ComputerScience	◎	◎		◎	
Robotics	◎	◎		◎	
Automation&ControlSystems	◎	◎			
Instruments&Instrumentation	○				
Chemistry					◎
MedicalLaboratoryTechnology					○
Biotechnology&MolecularBiology					○

表 4-22 により、2001-2005 年の共通する学術研究分野をみると、クラスタ#1、#2、#4は、主要工学4分野が共通のコア分野、クラスタ#1と#2では、Mechanics が周辺分野で共通に知識結合を形成し、クラスタ#3とクラスタ#1、#2、#4との間においても、Engineering、Robotics、Computer science の3工学分野が共通のコア分野となっている。学術研究分野においては、クラスタ#3 (Surgery) は、4.1.2、4.1.3において、1990年代に Surgery (外科学) をハブとして知識結合を形成しロボットの一領域として成長したことが判明したが、Engineering、Robotics、Computer science などの工学分野とも共通基盤研究として研究がなされた。クラスタ#5以降は、クラスタ#7が知識結合の形成はないが、クラスタ#5、#6、#8のみ知識結合する学術研究分野は、主要工学4分野などは抽出されておらず、それぞれ独自のロボットの学術研究領域として研究がなされている。

³⁹ 表 4-21 の◎は、知識結合を形成するコア分野、○は、周辺分野であることを表す。表 4-23、4-25 も同じ。

表 4-22 クラスタ間で共通する知識結合を形成する分野 (2001-2005 年)

CLS01	Engineering; Automation&ControlSystems; ComputerScience; Mathematics;Robotics Mechanics	Neuroscience&Neurology; Engineering; Mechanics; Rehabilitation; ComputerScience; Robotics Automation&ControlSystems Psychology; Mechanics	Engineering; ComputerScience; Robotics; Radiology/NuclearMedicine&MedicalImaging Surgery Urology/Nephrology; Otorhinolaryngology; CardiovascularSystem&Cardiology; General&InternalMedicine; Orthopedics	Automation&ControlSystems; Robotics; Engineering; OperationsResearch&ManagementScience; ComputerScience Agriculture; MaterialScience	Chemistry; Biochemistry&MolecularBiology MedicalLaboratoryTechnology Biotechnology&AppliedMicrobiology	Meteorology&AtmosphericScience; Geology		Engineering Orthopedics	CLS07	CLS08
CLS02	Engineering; Robotics; ComputerScience; Automation&ControlSystems Mechanics		Engineering; Robotics; ComputerScience;	Engineering; Robotics; ComputerScience; Automation&ControlSystems						
CLS03	Engineering; Robotics; ComputerScience;			Engineering; Robotics; ComputerScience; Automation&ControlSystems						
CLS04	Engineering; Robotics; ComputerScience; Automation&ControlSystems									
CLS05	-	-	-	-						
CLS06	-	-	-	-						
CLS07	-	-	-	-						
CLS08	Engineering	Engineering	Engineering Orthopedics							
	CLS01	CLS02	CLS03	CLS04	CLS05	CLS06				

表 4-23 によると、クラスタ # 1 ~ # 4 は、Engineering、Robotics、Computer Science が共通の学術研究分野となり、クラスタ # 1、# 2、# 4 は、Automation & control systems も共通の学術研究分野として、コア分野に位置付けられている。クラスタ # 1、# 2 については、ロボットの機能を発揮させる基礎的な学術研究分野である

Mathematics（コア分野）と Mechanics（周辺分野）が主要工学4分野と共に知識結合を形成しており、クラスタ#1、#2がロボットの基盤的研究領域として、ロボットの機能を高度化するための研究が加わったことを反映している。

クラスタ#3と#8（Biomechanical function）は、Orthopedics（整形外科）が周辺分野として知識結合を形成しており、医療・ヘルスケア分野のクラスタとして、整形外科の知識が必要になり、知識結合を形成することとなった。それ以外の学術研究分野では、クラスタ#3～#6独自の学術研究分野が知識結合を形成に加わっている。クラスタ#3では、Surgery、Radiology, nuclear medicine & medical imaging（放射線学・核医学・医用画像）、Urology & nephrology（泌尿器学・腎臓学）、Otorhinolaryngology（耳鼻咽喉科学）、Cardiovascular system & cardiology（循環器系・心臓学）、General & internal medicine（一般医療・内科学）と医療・ヘルスケア分野の学術研究分野が知識結合を形成しており、Surgeryをハブ分野として、医療・ヘルスケア分野に医療用ロボットを用いた手術が広がっていったことが反映されている。

表 4-23 各クラスタの知識結合を形成する学術研究分野（2001-2005年）

Sectors	Cluster #							
	CLS01	CLS02	CLS03	CLS04	CLS05	CLS06	CLS07	CLS08
Engineering	◎	◎	◎	◎				○
Robotics	◎	◎	◎	◎				
Computer Science	◎	◎	◎	◎				
Automation & Control Systems	◎	◎		◎				
Mathematics	◎	◎						
Mechanics	○	○						
Orthopedics			○					○
Neurosciences & Neurology		◎						
Rehabilitation		◎						
Psychology		○						
Radiology, Nuclear Medicine & Medical Imaging			◎					
Surgery			◎					
Urology & Nephrology			○					
Otorhinolaryngology			○					
Cardiovascular System & Cardiology			○					
General & Internal Medicine			○					
Operations Research & Management Science				◎				
Agriculture				○				
Material Science				○				
Chemistry					◎			
Biochemistry & Molecular Biology					◎			
Medical Laboratory Technology					◎			
Biotechnology & Applied Microbiology					○			
Meteorology & Atmospheric Sciences						○		
Geology						○		

医学系の学術専門誌によると、Otorhinolaryngology [1][25]は、2005年に初めて、ロボットによる咽頭の手術が行われて以来、咽頭がんや甲状腺がんの摘出に手術用ロボットが頻繁に活用されるようになり、2002年、心臓手術にIntuitive SurgicalのDa Vinci

surgical system が米国 FDA に承認されて以降、心臓の僧帽弁⁴⁰の手術に世界的に手術ロボットが活用されたとある[54]。Surgery をハブとして、知識結合を形成した Urology & nephrology、Otorhinolaryngology、Cardiovascular system & cardiology、General & internal medicine の分野では、ロボットによる手術が実用化しており、医療・ヘルスケア分野の知識結合は、研究開発の進捗や社会実装の度合いを示す指標となっていることが、医学系の学術専門誌の記事から明らかになった。

クラスタ # 4 (Application systems for robots) のみ知識結合を形成する学術研究分野は、Operations research & management science がコア分野として、Agriculture と Material science が周辺分野として、知識結合を形成している。クラスタ # 4 は、4.1.2 (4)、4.1.3 (4) の通り、様々なアプリケーションが集合したクラスタであり、2001-2005 年には、Agriculture は、結合率 (COR) は小さいながらも、Robotics、Engineering、Computer science と知識結合を形成しており、農業分野でのロボットの活用の研究が進められていることが明らかになった。

クラスタ # 5 (Automation in bio & chemistry) の知識結合する学術研究分野は、他のクラスタでは知識結合しておらず、Chemistry、Biochemistry & molecular biology、Medical laboratory technology、Biotechnology & applied microbiology はすべて、クラスタ # 5 のみであり、ロボットの学術研究としては独立した研究領域を形成している。クラスタ # 6 (Aerosol robotic network) は、NASA が中心となって設立したエアゾールの粒子が与える気候への影響を研究している科学者ネットワークの研究のクラスタであり、ロボットの学術研究で工学主要 4 分野他ロボット自身の昨日高度化に関する学術研究分野はなく、Meteorology & atmospheric science と Geology と地球や大気を研究する学術研究分野のみが知識結合を形成しており、クラスタ # 6 もロボットの学術研究としては独立した研究領域を形成している。

2014-2016 年の共通する学術研究分野をみると (表 4-24)、ロボット分野の学術研究の広がりが観察される。クラスタ # 1 と # 2 の間では、主要工学 4 分野に加え、Mechanics、Mathematics がコア分野として形成しており、クラスタ # 2 とクラスタ # 4 では Material science、Education & educational research、クラスタ # 2 とクラスタ # 3 の間では、Neuroscience & neurology と surgery、クラスタ # 1 と # 4 の間では、Agriculture、クラスタ # 3 とクラスタ # 7 との間では、Oncology と Radiology, nuclear medicine & medical imaging が共通の知識結合する分野として加わった。

⁴⁰ 心臓の左心房と左心室の間にある弁

表 4-24 クラスタ間で共通する知識結合を形成する分野 (2014-2016 年)

	Mathematics; Engineering Computer Science; Mechanics; Robotics; Automation & Control Systems Instruments & Instrumentation; Agriculture; Telecommunications	Engineering; Physics; Chemistry; Rehabilitation; Computer Science; Mechanics; Robotics; Instruments & Instrumentation; Automation & Control Systems; Materials Science	Engineering Computer Science Robotics Mechanics Automation & Control Systems Instruments & Instrumentation	Engineering Computer Science Robotics Neuroscience & Neurology Mathematics; Polymer Science; Education & Educational Research; Surgery; Geriatrics & Gerontology; General Internal Medicine; Psychology; Zoology; Electrochemistry	Orthopaedics; Respiratory System; Engineering Oncology; Ophthalmology; Surgery; Oncology; Biology & Neurology; General Internal Medicine; Neuroscience & Neurology Geriatrics & Gerontology; Computer Science; Robotics; Engineering & Mechanics; Anesthesiology; Orthopaedics; Health Care Science & Services; Radiology; Nuclear Medicine & Medical Imaging; Research & Experimental Medicine	Automation & Control Systems; Agriculture; Robotics; Engineering Operations Research & Management Science; Computer Science Education & Educational Research; Nuclear Science & Technology; Materials Science; Metallurgy & Metallurgical Engineering	chemistry Biochemistry & Molecular Biology; Biotechnology & Applied Microbiology	Remote Sensing; Geology; Meteorology & Atmospheric Sciences; Environmental Science & Ecology	Oncology; Radiology; Nuclear Medicine & Medical Imaging	Engineering Orthopaedics	Engineering Orthopaedics
CLS01											
CLS02											
CLS03											
CLS04											
CLS05											
CLS06											
CLS07											
CLS08											

クラスタ#3とクラスタ#8との間では、Orthopedics（整形外科）が共通の知識結合する分野となっている。クラスタ#1のAgricultureは周辺分野ではあるが、農業関係のロボットの学術研究の裾野の広がりを示すものと考えられる、このように、共通する知識結合を形成する学術研究分野は、ロボットに関する学術研究の共通基盤あるいは応用分野の広がりを表すものと考えられる。

表 4-25 各クラスタの知識結合を形成する学術研究分野（2014-2016年）

Sectors	Cluster #							
	CLS01	CLS02	CLS03	CLS04	CLS05	CLS06	CLS07	CLS08
Engineering	◎	◎	◎	◎				○
Robotics	◎	◎	○	◎				
Computer Science	◎	◎	○	◎				
Automation & Control Systems	◎	◎		◎				
Mechanics	◎	◎						
Instruments & Instrumentation	○	◎						
Mathematics	◎	○						
Chemistry		◎			◎			
Material Science		◎		○				
Education & Educational Research		○		○				
Neuroscience & Neurology		○	○					
Surgery		○	◎					
Oncology			◎				○	
Orthopedics			○					○
Radiology Nuclear Medicine & Medical Imaging			○				○	
Agriculture	○			◎				
Telecommunications	○							
Physics		◎						
Rehabilitation		◎						
Polymer Science		○						
Electrochemistry		○						
Biochemistry & Molecular Biology					○			
Biotechnology & Applied Microbiology					○			
Metallurgy & Metallurgical Engineering				○				
Geriatrics & Gerontology		○						
General & Internal Medicine		○						
Psychology		○						
Otorhinolaryngology			◎					
Respiratory System			◎					
Obstetrics & Gynecology			◎					
Urology & Nephrology			◎					
General & Internal Medicine			◎					
Cardiovascular System & Cardiology			◎					
Gastroenterology & Hepatology			○					
Endocrinology & Metabolism			○					
Anesthesiology			○					
Health Care Sciences & Services			○					
Research & Experimental Medicine			○					
Operations Research & Management Science				◎				
Nuclear Science & Technology				○				
Remote Sensing						◎		
Geology						◎		
Meteorology & Atmospheric Sciences						◎		
Environmental Sciences & Ecology						◎		
Zoology		○						

表4-24、4-25において、他のクラスタにはない学術研究分野をみると、クラスタ#2では、Physics、Neuroscience & neurology、Rehabilitation、Psychology、Geriatrics & gerontology（老年医学・老年学）、General & internal medicine、Polymer science、Electrochemistry、Zoology（動物学）が他のクラスタにない知識結合する学術研究分野であり、ロボットに関する複数の応用分野の学術研究が含まれている。クラスタ#3では、Urology & Nephrology、Otorhinolaryngology、Cardiovascular system & cardiology、Respiratory system、Gastroenterology & Hepatology（消化器病学・肝臓学）、Endocrinology & metabolism（内分泌学・新陳代謝）、Anesthesiology（麻酔学）、

Healthcare science& services、Research & experimental medicine、クラスタ # 4 では、Metallurgy & metallurgical engineering、Operations research & management science、Nuclear science & technology、クラスタ # 5 では、Biochemistry & molecular biology、Biotechnology & applied microbiology、クラスタ # 6 では、Remote sensing、Geology、Meteorology & atmospheric sciences、Environmental science & ecology がそれぞれのクラスタのみに抽出された知識結合する学術研究分野である。クラスタ # 2 が、リハビリテーション関係、クラスタ # 4 に農業関係のロボットの学術研究が新たな研究として取り組まれていることが知識結合ネットワークから確認できた⁴¹。

クラスタ # 2 の Geriatrics & gerontology (老年医学・老年学) は、リハビリテーションに関連しているが、Polymer science、Electrochemistry、Zoology は新たな学術研究分野が加わったと考えられる。クラスタ # 3 の学術研究分野は、すべて医学関係の分野であり、医学系の学術専門誌[1][25][88][93]にも、手術ロボットが、色々な医療・ヘルスケア分野に適用されていることが記述されており、医療・ヘルスケア分野のロボットに関する学術研究が深化し医療・ヘルスケア分野内でロボットの活用の広がりが出ている。

このように、知識結合の形成する学術研究分野を時系列で分析することで、ロボットの共通基盤となる学術研究分野の抽出、ロボットの応用分野での学術研究の新たな取り組み、特定の応用分野でのロボットに関する学術研究の深化と広がり特徴と動向が MM 手法により把握できることが確かめられた。

4.1.5 まとめ

4.1 では、学術研究分野について、MM 手法を適用し、ロボットの学術研究分野の動向を、知識結合ネットワーク構築とネットワーク特徴量の抽出により把握した。

本節での結果をまとめると以下の通り。

- (1) クラスタ・ネットワーク分析を引用関係に基づくクラスタリングと知識結合ネットワーク形成の両方に適用した MM 手法は、ロボットの学術研究分野を特徴ある学術研究分野群にカテゴリ分けでき、その学術研究分野群ごとに、学術研究分野間の知識結合の構造と特徴を把握できるとともに、中心となっている学術研究分野の抽出ができる。

⁴¹ クラスタ # 2 の Neuroscience & neurology、Rehabilitation、Psychology、クラスタ # 4 の Agriculture は、1996-2000 年には、知識結合する学術研究分野として抽出されている。

- (2) クラスタリング結果によると、上位4までのクラスタで全体の学術研究論文の約9割(89.6%)を占め、サブクラスタレベルにおいても、少数のサブクラスタで各クラスタの大半を占めており、学術研究では、引用を通じて、広くそれぞれの学術研究の情報が共有され、ロボットの研究が推進されていると考えられる。上位4クラスタの平均クラスタリング係数は、0.5~0.8と比較的大きいことから、学術研究分野間の結合が密であることが伺える。
- (3) ロボットの制御や機能を発揮させるための基盤的研究は、工学一般(Engineering)、ロボット工学(Robotics)、コンピュータサイエンス(Computer science)、自動化・制御システム(Automation & control systems)の主要4工学分野をコアの学術研究分野とし、ロボットの機能を高めるため Mechanics、Mathematics、Material scienceなどの学術研究分野とが結合・融合して進められていることが明らかになった。
- (4) サービスロボット、医療・ヘルスケア向けロボットの学術研究が増加し、産業用ロボットからサービスロボット、手術用ロボットへ学術研究のウエイトが移っていること、手術用ロボットは1つの主要な学術研究分野を形成し、咽喉がん、子宮がん、心臓手術などに手術ロボットが適用されていたことが外科学(Surgery)と医療・ヘルスケア分野との間の知識結合の形成から把握することができた。
- (5) 一方、医療・ヘルスケア分野のロボットの学術研究は、外科学(Surgery)が医療・ヘルスケア分野におけるロボットの学術研究の1分野を形成しているが、主に医療・ヘルスケア分野の学術研究分野との知識結合・融合が中心となっており、工学分野とは、工学一般(Engineering)、ロボット工学(Robotics)など一部に限られており、その他の工学とは知識結合が少ないことが明らかになった。
- (6) リハビリテーションに関するロボットの学術研究は、二足歩行ロボット(biped robot)やソフトロボティクス(Soft robotics)の学術研究と同じクラスタに属し、主要4工学分野および神経科学および神経学(Neuroscience & neurology)や心理学(Psychology)とコア分野をなして進められていることが明らかになった。
- (7) クラスタ#5~#8は、その知識結合を形成する分野は、他のクラスタとは異なる分野であり、知識結合からクラスタでカテゴリ分けされた学術研究群の特徴的な学術研究領域が抽出されている。
- (8) MM 手法で分析した学術研究論文データに基づくクラスタごとの知識結合ネットワークの構築と特徴量の抽出により、学術研究分野の知識結合の形成が、研究

開発の進捗を把握できていることが、文献および専門家の知見と評価により明らかになった。

4.2 技術開発における知識結合からみるロボット分野のイノベーション

第1章図1-5は、ロボットに関する特許の動向である。図1-4の学術研究論文と同様に、2000年以降急増しており、特許登録の平均年は2009.9年であり、学術研究論文とほぼ同じである。

Derwant Innovation から抽出した特許 187,256 件を学術俯瞰システムによりクラスター分析し、65,802 件の特許が抽出された。各特許には、WIPO の特許分類コードである IPC コードが割り付けられており、本論文では、3桁の IPC コードのクラス (C) により分析し、より詳細の分析が必要な場合には、4桁の IPC コードのサブクラス(M) による分析を行った。IPC コードの定義は、Appendix 付表 1、2 のとおりである。DI データセット 2 における IPC コードの種類は、3桁のクラスで、121 分野 (10 件以上の特許では、108 分野)、4桁のサブクラスで、548 分野 (10 件以上の特許では、334 分野) にわたっている。

IPC コード別の特許件数は、3桁のクラス(C)では、上位10分野で、74.3%、上位20分野で89.0%、上位30分野で94.2%占める⁴²。

学術研究分野と同様に、第3章で開発した分析手法を適用し、クラスター内の各技術開発分野 (特許) の関係を分野間の知識結合の強さと知識結合ネットワークのトポロジカルな構造を定量的に把握することが可能となり、ロボットのイノベーションが技術開発面でどのように進展しているかの分析を行った。

なお、特許の引用分析は、第2章の先行研究でみたとおり、様々な分野で行われているが、特許引用には、審査官引用、出願者引用などがあり、また、引用も、審査官が技術の新規性や進歩性を否定するために拒絶するための場合と一般的な技術水準を示す場合がある。さらに、各国の特許制度の違いから、引用に関して各国間でバイアスもある [64]。引用関係から特許の重要性を評価する場合には、引用の違いやバイアスが分析結果に影響を及ぼすが、本研究では、特許間の特許分類による技術の結合・融合を抽出しようとするものであり、審査官引用、出願者引用においても、特許間の技術関係の把握への影響は少ないと考える。しかしながら、各国間の特許制度の相違に伴うバイアスを除去することは難しく、その影響は無視して分析を行っていることには留意が必要である。

⁴² 4桁のサブクラス(M)では、上位10分野、20分野、30分野、100分野で、それぞれ、57.0%、68.0%、74.4%、91.6%を占める。

ロボットに関する技術開発分野（特許）のクラスタ・ネットワーク分析の結果を、4.2.1に、その結果のデータを元に構築した知識結合ネットワークの結果と分析を、4.2.2に、知識結合ネットワークの特徴量の算出と、ハブ分野、コア分野、周辺分野、関連分野の抽出した結果と分析を、4.2.3にまとめた。

4.2.1 クラスタ分析によるロボットの技術開発分野（特許）の動向

図4-6、図4-7は、ロボット関連特許の IPC コード⁴³の3桁のクラス（C）と4桁のサブクラス（M）での分布であるが、マニピレータである B25 のみで全特許の 28.6%（B25J では 26.2%）を占め、続いて、G05（制御）、G06（計算）、B23（溶接等）、G01（計測・試験）で 51.6%と過半数を超える。ロボットがこれら5つの技術分野で基盤的な技術として成り立っていることがわかる。その後続く A61（医学等）、B62（鉄道以外の陸上車両）、B65（運搬、包装等）はロボットを適用する応用分野に関する用途技術・応用技術であり、ロボットが自らを機能させる技術と適用する応用分野の技術との組み合わせである特徴がこの分布にも表れている。H01（基礎的電気要素技術）、A47⁴⁴（家電等）を合わせた10分野で、74.3%とほぼ4分の3を占めている。

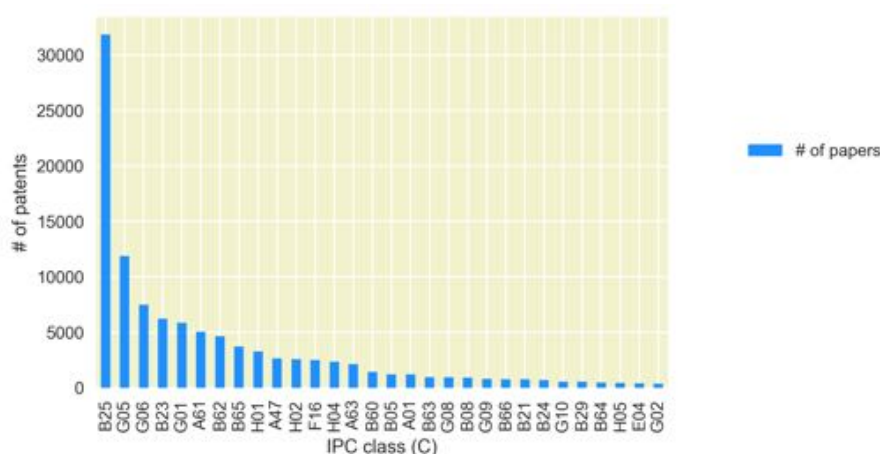


図 4-6 ロボット関連特許の分布 (IPC コード クラス (C))

⁴³ IPC コードの定義は、Appendix 付表 1、付表 2 参照のこと。

⁴⁴ A47 は、FURNITURE; DOMESTIC ARTICLES OR APPLIANCES; COFFEE MILLS; SPICE MILLS; SUCTION CLEANERS IN GENERAL であるが、以下、「家電等」と略す。

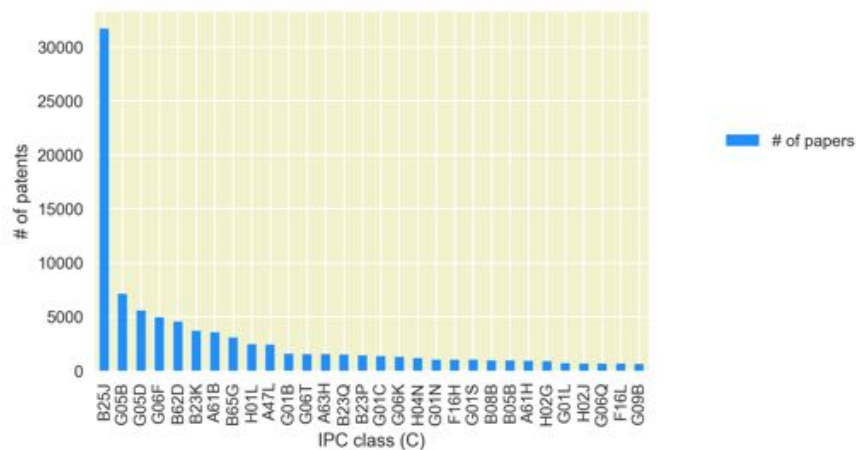


図 4-7 ロボット関連特許の分布 (IPC コード サブクラス (M))

表 4-2 6 は、DI データセット 2 のロボットに関する特許のクラスタ分析の結果である。65,802 件の特許が抽出され、569 のクラスタにカテゴリ分けされた。各クラスタは、引用関係で分類されているので、それぞれ関連のある技術群でクラスタが形成されており、クラスタの特徴を反映した名称をつけた。学術研究分野の上位 3 クラスタで 81.9% 占めていたことを比較すると、なだらかに分散している。クラスタ #1 は唯一の一万件を超えるクラスタであるが、全特許の約 5 分の 1 の 19.1% を占める。上位 5 位までのクラスタ、上位 10 位までのクラスタの特許件数は、それぞれ 57.2% と 72.0% を占め、上位 14 位までのクラスタまでが 1,000 件を超えている。表 4-2 6 には、クラスタ #1 ～ #5 について同様の手法でサブクラスタにカテゴリ分けした結果を掲載したが、サブクラスタの中においても、学術研究分野より多様化している。例えば、クラスタ #1 は、41 のサブクラスタにクラスタリングされ、上位 6 までのサブクラスタで、67.7%、クラスタ #2 は、69 のサブクラスタにクラスタリングされ、上位 5 までのサブクラスタで、44.4% 占めるに留まっている。

表 4-26 ロボットに関する特許のクラスタ分析結果

# of cluster	Cluster Name	#Nodes	#Edges	Average Year	Keywords				
Robot total		65,802	160,575	2009.9	robot	control	device	system	part
1	Service robots	12,592	23,385	2012.7	module	leg	wheel	walking	foot
1-1	mobile & humanoid robots	1,894	3,786	2012.6	leg	foot	wheel	walking	spherical
1-2	information & control for service robots	1,845	3,490	2013.9	module	service	intelligent	voice	service robot
1-3	navigation & control systems	1,447	2,416	2013.3	map	navigation	mobile robot	planning	path
1-4	Climbing robots	1,384	2,363	2012.8	climbing	climbing robot	wall climbing	wall climbing robot	wall
1-5	robots for fire or hazardous environment	1,005	1,586	2013.3	fire	inspection	inspection robot	extinguishing	fire extinguishing
1-6	robots for expositive or dangerous area	945	1,377	2012.8	wheel	crawler	walking	arm	module
2	Industrial robots	8,705	14,756	2005.9	wafer	arm	substrate	welding	shaft
2-1	robot systems for manipulation	1,071	1,877	2005.1	tool	welding	arm	member	collision
2-2	semiconductor robots	1,054	2,441	2006.4	wafer	substrate	chamber	semiconductor	transfer
2-3	robot operation systems	628	990	2003.3	welding	pallet	workpiece	station	article
2-4	robot arm manipulation	593	791	2004.9	wrist	cable	shaft	gear	arm
2-5	painting & spraying robots	517	691	2002.2	coating	paint	spray	painting	spraying
3	welding & machining robots	6,142	8,231	2009.7	welding	welding robot	laser	teaching	coordinate
3-1	Systems for positioning & tracking	624	1,051	2011.6	welding	calibration	coordinate	coordinate system	laser
3-2	Robotic welding systems	561	734	2013.2	welding	welding robot	welding system	robot welding	station
4	Control systems for robot operation	5,920	30,654	2008.7	surgical	instrument	surgical instrument	robotic	effector
4-1	robot control systems	1,597	3,927	2005.7	library	object	calibration	data	point
4-2	robot mechanism & control systems	1,489	4,675	2008.4	finger	joint	force	leg	actuator
4-3	Robotic surgery	1,269	10,010	2009.3	surgical	instrument	surgical instrument	robot surgical	medical
4-4	robot manipulation for surgery	608	1,109	2012.4	surgical	instrument	surgery	invasive	joint
5	Cleaning robots	4,293	28,776	2010	cleaner	cleaning	robot cleaner	mobile robot	mobile
5-1	Robot systems for cleaning & inhouse	1,553	3,007	2011.3	map	cleaner	cleaning	robot cleaner	information
5-2	Navigation & control systems for cleaning	596	11,958	2007.1	cleaning	cleaner	floor	robot cleaner	robot cleaner
5-3	Cleaning mechanism	552	1,610	2010.5	wheel	vehicle	chassis	flipper	mobile robot
6	Parallel robots	3,133	4,319	2011.3	platform	rod	chain	connecting rod	movable platform
7	rehabilitation robots	2,125	2,796	2010.4	rehabilitation	leg	training	joint	limb
8	robot hands & fingers	1,799	2,731	2009.8	finger	finger section	joint	robot hand	hand
9	Inspection robots	1,431	2,433	2013.1	climbing	wheel	transmission line	insulator	mechanism
10	underwater robots	1,255	1,719	2013.1	underwater	underwater robot	fish	propeller	fin
11	emergency & safety control systems	1,088	1,346	2008.1	teaching	emergency stop	emergency	switch	stop
12	Cleaning methods for cleaning robots	1,037	1,205	2012.6	cleaning	cleaner	cleaning robot	robot cleaner	dust
13	robots for plant systems	1,029	1,456	2011.6	pipeline	pipe	wheel	pipeline robot	cleaning
14	Recognition systems for mobile robots	1,004	1,086	2009.5	map	mobile robot	cleaning	information	landmark

表4-27は、クラスタごとのIPCコードクラス(C)レベルの数の推移である。全体では、1991-2000年以降は、56～67の技術開発分野(特許)数で推移しており、各クラスタでは、多くても30前後となっており、学術研究分野の大きいクラスタでは、50程度あることと比較すると、クラスタレベルでは関係する技術が限られている。

表 4-27 クラスタごとのIPCコード数の推移(C)

	Cluster #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	total
Term	1974-1990	1	17	4	8	5	3	0	1	0	29
	1991-2000	12	25	11	13	12	6	3	3	1	56
	2001-2005	19	32	11	16	18	5	10	8	1	62
	2006-2010	23	30	15	22	20	11	11	11	5	67
	2011-2013	26	23	12	17	21	11	10	10	6	56
	2014-2016	31	25	19	16	23	14	8	9	15	66

図4-8は、クラスタごとの特許のシェアの時系列推移をグラフにしたものであるが、2000年以前は、クラスタ#2がロボットに関する特許の中心で、#3、#4と合わせて過半を占めていたが、クラスタ#1の特許のシェアが着実に増加し、2011年以降は、最大のクラスタに成長した。クラスタ#10までのシェアは、概ね7割前後で推移しており、この図からも特許については、学術研究論文より多様化していることが伺える。

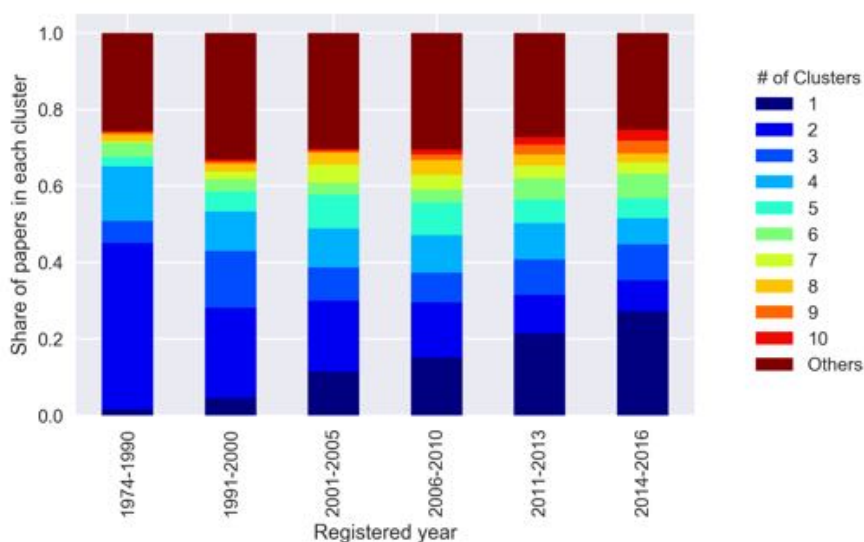


図 4-8 ロボット関連特許のクラスタシェアの推移

図4-9は、ロボットに関する特許件数のクラスタ別推移のグラフであるが、最大のクラスタであるクラスタ#1（Service robots）は、2000年代後半より急拡大し、2016年には、約2500件と他のクラスタが800件に届いていないのに比して、突出した最大のクラスタとなっている。クラスタ#2（Industrial robots）は、サブクラスタまで見ると、マニピュレータ、ロボットのオペレーティング・システムやロボットアームといったロボットに欠かせない機能のクラスタと半導体ロボットや塗装ロボットなどの産業用ロボットの応用分野に関連した特許が含まれている。図4-9によれば、クラスタ#2は2008年まで最大のクラスタであり、その後も着実に成長し続け、2014年にクラスタ#3にも件数で抜かされたものの、クラスタ#2がロボットの基盤的技術を含むクラスタとして位置付けられる。

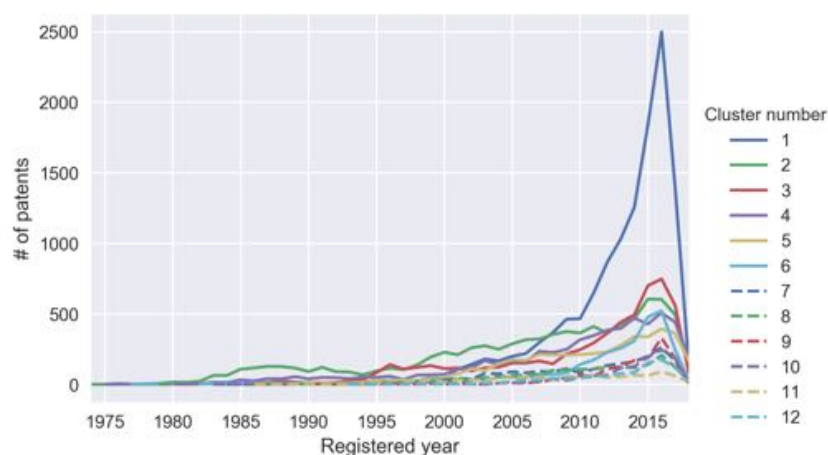


図 4-9 ロボットに関する特許のクラスター別件数の推移

クラスター # 3 は溶接と機械加工のロボットで、このクラスターの平均登録年数は、2009.7 年と全体のロボットの平均登録年数 2009.9 年とほぼ同じである。溶接は産業用ロボットの最初のアプリケーションの 1 つであり、自動車やその他の製造業で広く使用されている。製造業にとっては、溶接と機械加工が製造の主要プロセスであり、最近の中国における自動化ニーズの高まりに対応して、溶接ロボットと機械加工工程に産業用ロボットが盛んに使用されていることに一致している。クラスター #4 はロボット操作制御システム（Control systems for robot operation）でこのクラスターに手術用ロボットが含まれている。クラスター #4 も 2000 年代以降着実に増加し、2007 年以来 3 番目に大きなクラスターとなったが、第 4 次産業革命と呼ばれる新しいファクトリオートメーション、スマートファクトリー化の進展とサービス分野でのロボット開発の高まりを受けて、クラスター #1 と #2 が急速に成長し、直近ではクラスター #6 にも抜かされ、4 番目に留まっている。医療・ヘルスケア分野の主なクラスターは、クラスター #4 内のサブクラスターとクラスター #7 のリハビリテーション用ロボットのみであり、医療・ヘルスケア分野の特許である A61（医学等）の件数も 5060 件と全ロボット関係の特許の 4.5% に占めるに留まっており、学術研究分野の学術研究論文が約 5 分の 1 を占めていることとは対照的である。

クラスター #5 は、iRobot が Roomba を発売して以来、家庭に導入されてきた清掃ロボットのカテゴリであり、パナソニック、サムソンおよび LG Electronics などの企業も家

庭用掃除ロボット市場に参入したことを反映して、特許の登録数も着実に増加している。

それ以降のクラスタは、パラレルロボット（クラスタ#6）、リハビリテーション用ロボット（クラスタ#7）、ロボットハンド&フィンガ（クラスタ#8）、検査ロボット（クラスタ#9）、および水中ロボット（クラスタ#10）とそれぞれ特徴を持ったクラスタを形成している。

表4-26には特許件数の多いクラスタ#1～#5の主要サブクラスタについて掲載したが、各サブクラスタの名称のとおり、それぞれのサブクラスタは、あるロボットの機能を実現するための技術群の集合や特定の応用分野に関する技術群の集合をなしているとみることができる。

このように、ロボット関連の特許は、それぞれ特徴のあるクラスタにカテゴリ分けができていたことが確認できた。これらの結果データを元に、4.2.2において技術開発分野（特許）における知識結合ネットワークを構築する。

4.2.2 ロボットに関する技術開発における知識結合ネットワーク

表4-28～4-32は、ロボット関連の技術（特許）の知識結合の結合率（COR）を、クラスタ#1～#5について、時系列に算出したものである⁴⁵。

全体的には、知識結合する分野のペアは年代とともに増加傾向にあるが、クラスタ#2、#4、#5では、2006-2010年の期間以降に、知識結合した後に再び、知識結合がなくなる分野のペアがいくつかある。ほとんどはCORの値が小さい知識結合を中心に生じているが、#2には、B01とG01、G05とG06など、CORの値が大きいにもかかわらず、2011-2013年以降には、知識結合が検知されていない分野がある。学術研究分野の知識結合が時系列とともに増加していたとは異なり、技術開発分野（特許）においては、知識結合の進展の仕方に違いがある。

（1）クラスタ#1（Service robots）の知識結合ネットワーク

表4-28によると、2010年までは、B25と他の分野との知識結合がほとんどであるが、2006-2010年にG05とG06が知識結合を形成後の2011-2013年以降は、G05とG06が他の分野とが結合して、知識結合ネットワークが成長していることが観察できる。

⁴⁵ CORが0.05以上の知識結合を表示。各期間において平均より大きいCORは黄色の背景色で表示した。

B25、G05、G06 をコア分野として、A63（スポーツ、ゲーム、アミューズメント）、B62（鉄道以外の陸上車両）のアプリケーションの技術が結合し、2011-2013 年には、A01（農業）、A47（家電等）が、2014-2016 年には、A01⁴⁶（医学等）が結合し、アプリケーションが広がっている。G01（計測・試験）が 2006-2010 年以降、B25、G05、G06 に結合しているのは、ロボットの制御に必要なデータを計測し、ロボットの機能を高度化する開発が行われたことを表している。

図 4-10 により、クラスタ #1 の知識結合ネットワークの形状をみると、2001-2005 年では、B25（マニピレータ）をハブとして放射状に結合し、その後、B25 に G05（制御）、G06（計算）、G01（計測・試験）と B62 を核として知識結合ネットワークが成長している。2006-2010 年で、B25 を中心として、知識結合ネットワークが成長したことがよくわかる。2011-2013 年以降になると、B25、G01、G05、G06、H04 などが互いに結合しあってネットワークが拡大するとともに、例えば、A01、A47、A61、B23（溶接等）などが枝のようにコア分野の技術開発分野（特許）に結合していることが観察される。学術研究分野の知識結合ネットワークがお互いの結合が多く、枝葉が少なかったことと対照的である。

表 4-28 クラスタ #1 における知識結合の動向 (C)

	2001-2005	2006-2010	2011-2013	2014-2016
B25 - G06	1.000	0.567	0.378	0.381
A63 - B25	0.702	0.612	0.417	0.193
B25 - G05	0.511	0.726	0.852	0.955
B25 - B62	0.309	0.570	0.650	0.671
A63 - B62		1.000	0.212	0.122
G05 - G06		0.911	0.703	0.814
B60 - B62		0.312	0.179	0.287
B25 - H04		0.158	0.151	0.140
B25 - G10		0.158	0.044	
B25 - G01		0.141	0.184	0.174
B25 - G08		0.065	0.044	0.050
A47 - B25		0.061	0.068	0.120
A61 - B25		0.049	0.158	0.203
G06 - H04			1.000	0.736
G01 - G05			0.801	0.894
G01 - G06			0.622	0.674
G05 - H04			0.424	0.400
A01 - G06			0.232	
G01 - H04			0.228	0.289
G05 - H02			0.203	0.268
A47 - G05			0.116	0.258
G06 - G10				0.747
A61 - G06				0.295
G06 - G09				0.215

⁴⁶ A61 は、医学または獣医学；衛生学（Medical or veterinary science; hygiene）であるが、「医学等」と略す。

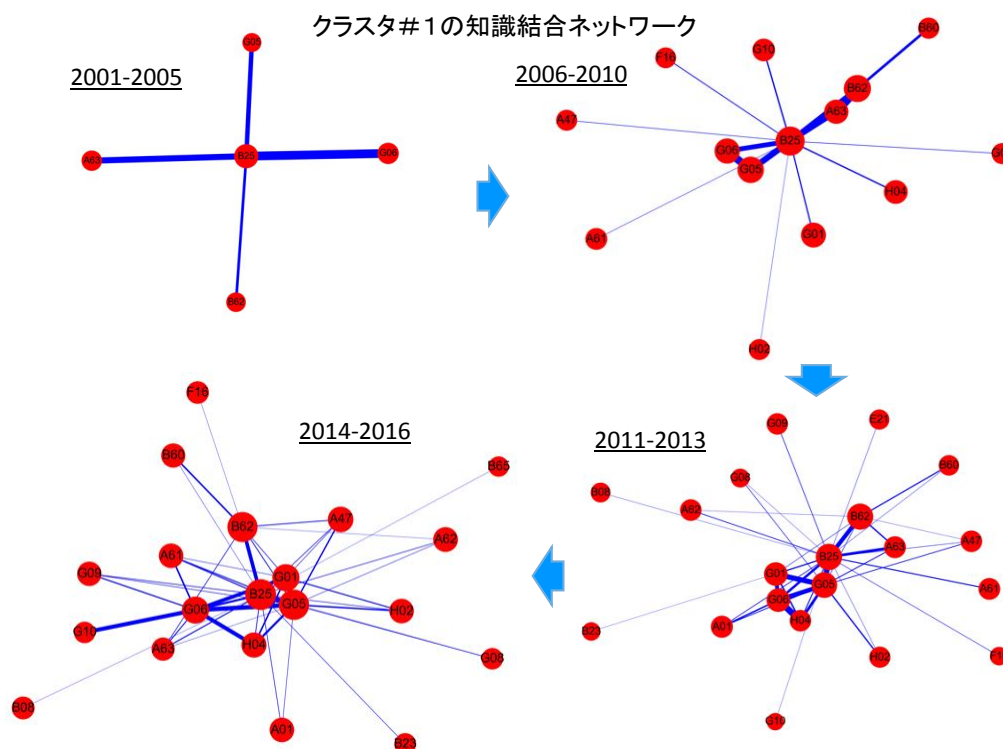


図 4-10 クラスタ#1の知識結合ネットワークの変遷

(2) クラスタ#2 (Industrial robots) の知識結合ネットワーク

クラスタ#2についても、B25が知識結合ネットワークのハブになって放射状に結合し、その後、B23、B65、G01、G05、G06、H01などがコアとして知識結合ネットワークが成長したが、2006-2010年の後、B23、B65、H01がB25以外との知識結合が消え、再び、B25をハブとする放射状に戻り、知識結合ネットワークが変化した。知識結合がなくなっているが、クラスタ内の特許としては関連分野として存在している。クラスタ#2においても、B08（清掃）、B23、B24（研削・研磨）、C23（材料一般）などが枝葉のように結合しているのが特徴である。

表 4-29 クラスタ # 2 における知識結合の動向 (C)

	1974-1990	1991-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2013	2014-2016
B23 - B25	1.000	1.000	0.508	0.480	0.334	0.569
B23 - B65	0.991		0.148			
B25 - G05	0.720	0.900	0.463	0.388	0.295	0.286
B25 - F16	0.505	0.720	0.274	0.231	0.362	0.311
B05 - B25	0.225	0.138	0.207	0.174	0.155	0.103
B25 - B66	0.150	0.399	0.133	0.164	0.086	0.076
B25 - B65	0.103	0.558	0.513	0.279	0.228	0.305
B65 - H01		0.998	1.000	0.930	1.000	1.000
B25 - H01		0.617	0.597	0.423	0.398	0.404
B23 - G05		0.457	0.332			0.301
B23 - B62		0.457		0.302		
G05 - G06			0.929	0.950		
C23 - H01			0.908	0.552	0.619	
B01 - G01			0.884	1.000		
G01 - H01			0.633	0.146		
G05 - H01			0.492	0.255		0.269
G06 - H01			0.422	0.360		0.218
B07 - B65			0.387			
B65 - G06			0.379	0.415		0.550
B25 - H02			0.243	0.167	0.167	0.213
B25 - G06			0.147	0.228	0.114	0.149
B24 - B25			0.078		0.040	
G01 - G11				0.750		
G06 - G11				0.375		
B65 - B66				0.245		
G01 - G06				0.196	0.423	
B65 - C23				0.177		
B66 - H01				0.148		
B08 - H01				0.140		
B05 - H01				0.113		0.135
B23 - G06				0.083		

表 4-29 によると、2000 年以前の初期の段階では、B25 をハブとして、産業用ロボットの初期のアプリケーションである B05（スプレー技術）、B23（溶接等）B65（運搬、包装等）B66（（ホイス、リフト等））、F16⁴⁷（機械要素等）など製造業の現場の作業工程に関係する技術分野が知識結合を形成しており、製造現場の自動化のため産業用ロボットの導入が進められたことが伺える。1991-2000 年からは、H01⁴⁸（基礎的電

⁴⁷ F16 は、機械要素または単位；機械または装置の効果的機能を生じ維持するための一般的手段

（Engineering elements or units; General measures for producing and maintaining effective functioning of machines or installations; Thermal insulation in general）であるが、「機械要素等」と略す。

⁴⁸ H01 は、基礎的電気要素技術であるが、IPC コードのサブクラス（M）を見ると、H01L（半導体デバイス）である。

気要素技術)が知識結合しており、半導体用ロボットが実用化されたことと合致している。また、2001-2005年と2006-2010年に、B01(物理的または化学的処理技術)、B05(スプレー技術) B08(清掃)、C23(コーティング材料) B66((ホイスト、リフト等))が半導体デバイスであるH01と結合し、その後、結合が消えているが、この時期に、半導体用のロボットとしての技術開発が進んだことが知識結合の形成から観察される。

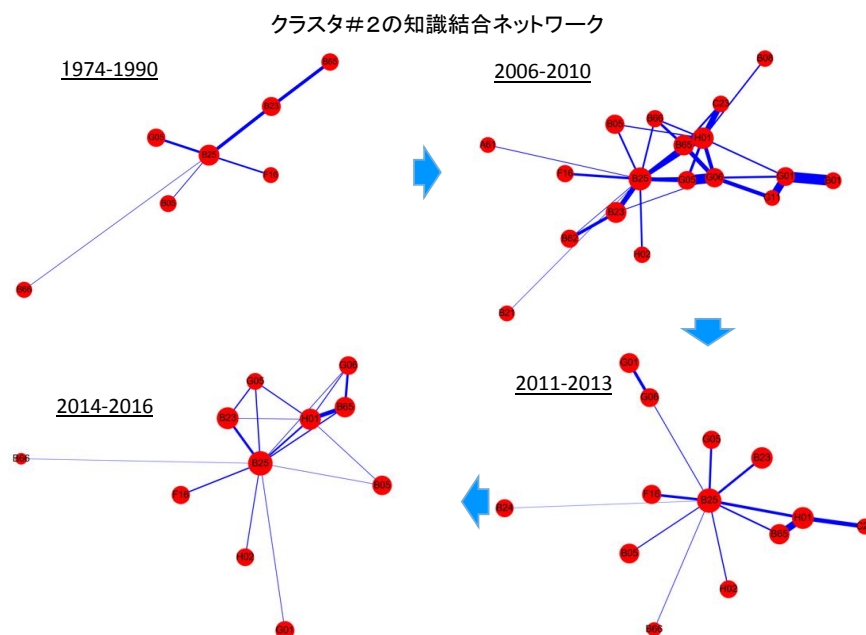


図 4-11 クラスタ#2の知識結合ネットワークの変遷

図4-11はクラスタ#2の知識結合ネットワーク形成の推移のグラフであるが、1974-1990年にB25をハブとした放射状のネットワークから、2006-2010年にはB25、G05、G06、B65、B66などのお互い結合する知識結合ネットワークを形成したにもかかわらず、2011-2013年は、B25をハブとするネットワークになり、2014-2016年には再びB25、G01、G05、G06などからなる密なネットワークが形成された。

ロボット技術の専門家にこの知識結合の推移を尋ねたところ、日本では、2005年の愛知万博で、各社様々なロボットの研究開発が行われたが、その後、リーマンショックもあって、ロボットの研究開発を行う企業も絞られ、日本企業は特許の出願を重要なものに絞り、国際出願に変わったことを反映している可能性があるとのことであった。

(3) クラスタ#3 (welding & machining robots) の知識結合ネットワーク

表4-30によると、B25とG05の知識結合が全期間を通して最も強い値を示し、B23（溶接等）、G01、G06でコア分野を形成している。クラスタ#1～#3ほどでないが、B24（研磨・研削）、B62（鉄道以外の陸上車両）、B65（運搬、包装等）などが枝葉のようにB25と結合している。クラスタ#3は、産業用ロボットの最初のアプリケーションである溶接ロボットと機械加工のクラスタである。依然製造業向けのアプリケーションとしては堅実なニーズがあり、自動車産業を始め、機械産業において広く活用されている。

図4-12で知識結合ネットワークの形状をみると、B25（マニピュレータ）、B23（溶接等）、G05（制御）を核として、G01、G06が結合に加わり、コア分野を形成し、B62（鉄道以外の陸上車両）、B65（運搬、包装等）、B24（研磨・研削）などが枝葉のように知識結合して成長していることが観察される。

クラスタ#3の特徴として、知識結合する技術分野がそれほど拡大しておらず、溶接や機械加工に必要な技術群が集合している。クラスタ#3のサブクラスタをみると、溶接ロボットに関するサブクラスタの他、研削・研磨（grinding & polishing）のアプリケーションもこのクラスタに含まれており、溶接や機械加工に必要なロボットの経路制御（path control）、位置決め（positioning）などが含まれている。

表 4-30 クラスタ#3における知識結合の動向 (C)

	1991-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2013	2014-2016
B25 - G05	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
B23 - B25	0.556	0.627	0.609	0.451	0.480
B23 - G05	0.321	0.373	0.433	0.186	0.129
B25 - G01		0.531	0.226	0.283	0.391
B25 - G06		0.480	0.354	0.254	0.363
B25 - B65		0.223		0.089	0.069
G05 - G06			0.723		0.524
B23 - G01			0.233	0.050	0.062
B23 - B62			0.215		0.034
A61 - B25			0.057		0.063
G01 - G06				0.446	0.337
G01 - G05				0.191	0.301
B24 - B25					0.081
B05 - G06					0.849

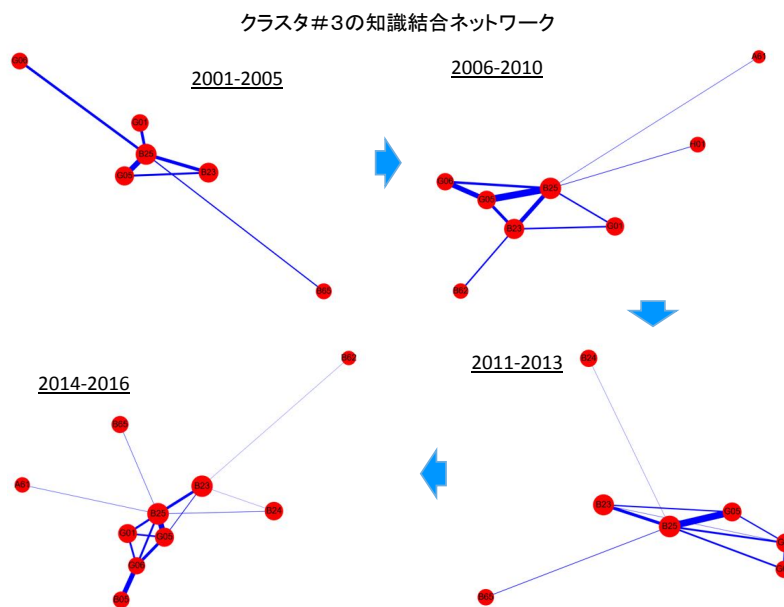


図 4-12 クラスタ#3の知識結合ネットワークの変遷

(4) クラスタ#4 (Control systems for robot operation) の知識結合ネットワーク

表4-3 1によると、B25 と制御関係の G05、G06 が初期段階より強く結合しており、G01 (計測・試験) が 1991-2000 年が知識結合し、2001-2005 年には、G11 (情報記録) が結合しており、制御系の結合が強く出ている。1991-2000 年には、A61 (医学等) が B25 と結合し、手術用のロボットが開発されたことが伺われる。

クラスタ#4の知識結合ネットワークの推移を、図4-1 3でみると、B25、G05、G06 が強い結合のコア分野を形成しているとともに、A61、B62、B23、G01 などが知識結合を形成し、知識結合する分野は、2000 年以降ほぼ 10 分野で推移している。このクラスタ内に手術用ロボット (Robotic surgery) 関係の特許が含まれていることから、医療関係の A61 が 2000 年以降はコア分野に位置付けられ、B25 と強い知識結合がある他、G05、G06、B23 とともに知識結合していることがわかった。

表 4-31 クラスタ#4における知識結合の動向 (C)

	1974-1990	1991-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2013	2014-2016
G05 - G06	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
B25 - G05	0.990	0.721	0.803	0.782	0.926	0.756
B25 - G06	0.434	0.400	0.676	0.742	0.672	0.590
B25 - B66	0.330		0.106			
G06 - H04		0.487		0.231		0.244
G01 - G06		0.363	0.282	0.181	0.162	0.200
B23 - G06		0.328	0.175	0.135		
B23 - G05		0.189	0.202	0.239	0.079	
B25 - G01		0.171	0.229	0.191	0.164	0.151
B25 - B62		0.151	0.319	0.139	0.198	0.226
A61 - B25		0.146	0.486	0.441	0.343	0.315
B23 - B25		0.136	0.098	0.076		0.063
G06 - G11			0.455	0.058		
B65 - G11			0.435			
G01 - G05			0.423	0.185		
A61 - G06			0.350	0.166	0.111	0.096
A61 - G05			0.201	0.143	0.084	0.084
G05 - G11			0.108			
B25 - H01			0.090			
A63 - B25			0.082			
G05 - H04				0.564		
B62 - G05				0.148	0.189	0.196
B65 - G06				0.065		
B62 - G06				0.060		
B25 - F16					0.068	

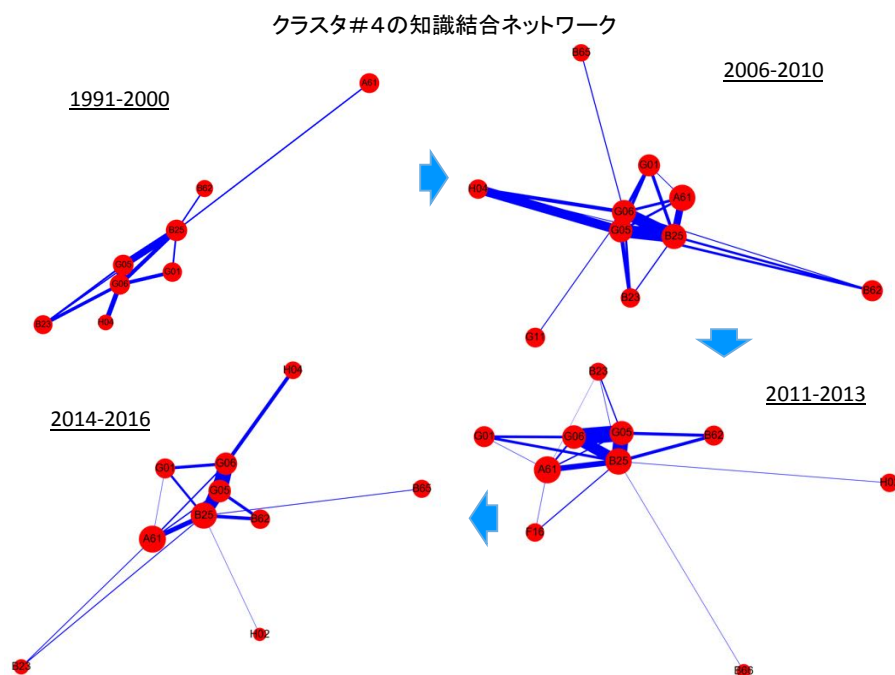


図 4-13 クラスタ#4の知識結合ネットワークの変遷

手術用ロボットは、人が行う手術を代替あるいは支援することから、ロボットやロボットフィンガーを制御するサブクラスタと同じクラスタの集合になったものと考えられる。その意味では、手術用ロボットは技術的に独立したものではなく、ロボット制御や位置決めなどの基盤技術が共通技術として引用されている。

また、**Robotic surgery** のサブクラスタは、表 4-2 6 によると、ノード（特許数）が 1,269 に対して、エッジが約 1 万件あり、特許間での引用が他のクラスタよりも格段と多く、技術的に密な関係があることがわかった。このように、密な引用ネットワークを構築しているのは、他には、サブクラスタ # 5-2 の **Navigation & control systems for cleaning** のみである。

（5） クラスタ # 5（Cleaning robots）の知識結合ネットワーク

表 4-3 2 によると、2001-2005 年から、B25、G01、G05、G06 のロボットの基盤技術がコア分野となり、A47（家電等）、A63（スポーツ、ゲーム、アミューズメント）、B62（鉄道以外の陸上車両）が結合しており、2006-2010 年には、H04（電気通信技術）も加わり、家庭用掃除ロボットに必要な技術が、知識結合する技術として抽出されている。また、2006-2010 年には、A61（医学等）が B25、G05、G06 と結合しており、医療・ヘルスケア関係の技術開発もクラスタ # 5 に含まれている。A01（農業）は、2011-2013 年から G05 と結合しており、農業関係のロボットの技術開発が行われていることも抽出された。

クラスタ # 5 は、**Cleaning robots**（掃除ロボット）のクラスタであるが、他のクラスタと比較すると、知識結合する分野のペアが多いのが特徴である。B25（マニピュレータ）、B62、A47、G01、G05、G06 をコア分野としてお互い結合しつつ、周辺分野として、A01（農業）、A63（スポーツ、ゲーム、アミューズメント）、E04（建築物）、G10（楽器、音響）など様々なアプリケーションが含まれていることも特徴である。同様の技術が、農業、建設、アミューズメント用などに共通している。（図 4-1 4）

Cleaning robots（掃除ロボット）において、ナビゲーションと制御技術は掃除機能を発揮させるための中核技術であり、それらの技術についても技術的に密な関係があることが確認できた。サブクラスタ # 5-2 は、表 4-2 6 によると、ノード（特許数）が 596 に対して、エッジが 11,958 件あり、**Robotic surgery** よりも特許間での引用が密であり、技術的に密な関係がある。

表 4-32 クラスタ#5における知識結合の動向 (C)

	2001-2005	2006-2010	2011-2013	2014-2016
G05 - G06	1.000	1.000	1.000	1.000
A47 - G05	0.793	0.606	0.862	0.793
G01 - G05	0.625	0.700	0.628	0.530
B25 - G05	0.541	0.723	0.877	0.928
B25 - G06	0.482	0.582	0.597	0.897
A47 - G06	0.303	0.203	0.343	0.247
G01 - G06	0.293	0.231	0.187	0.178
B25 - B62	0.234	0.223	0.423	0.237
A47 - G01	0.211	0.107	0.157	0.185
A63 - B25	0.143			0.056
B62 - G06	0.111	0.064	0.064	0.050
A47 - B25	0.070	0.142	0.309	0.221
G06 - H04		0.478	0.422	0.370
B60 - B62		0.417	0.428	0.287
G05 - H04		0.276	0.281	0.369
B25 - H04		0.261	0.298	0.353
A61 - G06		0.217	0.189	0.134
A61 - B25		0.141	0.130	0.185
B25 - G01		0.119	0.138	0.176
B62 - G05		0.100	0.105	0.088
B62 - B64		0.085		
B25 - B60		0.084	0.086	0.028
A61 - G05		0.082	0.087	0.078
B60 - G05		0.060	0.082	0.063
A63 - G06		0.055	0.091	
G06 - G09		0.055		
B64 - G05		0.053		
B25 - F41		0.053		
A63 - G05			0.058	
A61 - H04			0.380	
A01 - G05			0.102	0.229
G05 - H02			0.087	0.065
G01 - H04				0.359
B62 - B63				0.218
B62 - E04				0.090

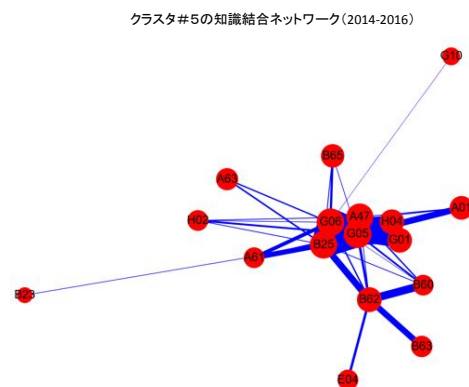


図 4-14 クラスタ#5の知識結合ネットワーク (2014-2016年)

4.2.3 技術開発における知識結合ネットワークの特徴量の抽出

4.2.2で構築した技術開発分野（特許）の知識結合ネットワークから、3.2.6で定義した特徴量を算出し、各クラスタの特許の知識結合ネットワーク間の比較検討を行う。

（1） クラスタ # 1（Service robots）の知識結合ネットワーク特徴量

表4-3 3は、クラスタ # 1（Service robots）について、第3章3.2.6で定義した平均クラスタリング係数、平均次数中心性を算出し、知識結合分野数、コア分野数、周辺分野、関連分野数を抽出したものである。2001-2005年は、B25（マニピュレータ）をハブとした放射状の知識結合であることから、平均クラスタリング係数が0.0であるが、それ以降、コア分野が増加し、2014-2016年には、0.589と比較的高い値となっている。また、知識結合率についても、0.609～0.769とクラスタ内のIPCコードのクラス（C）のうち6割以上が知識結合を形成している。

表4-3 4は、ネットワーク特徴量から抽出したハブ分野、コア分野、周辺分野、関連分野ごとにIPCコードをまとめたものであるが、B25（マニピュレータ）が2001-2005年以降ハブ分野と各分野と結合し、コア分野は、2006-2010年以降、G05、G06に加え、ロボット制御技術に関するG01（計測・試験）、H04（電気通信技術）がコア分野となり、アプリケーション分野の技術であるA63（スポーツ、ゲーム、アミューズメント）（2006-2010年のみ）、B62（鉄道以外の陸上車両）（2006-2010年と2014-2016年）、A47（家電等）（2014-2016年）の組み合わせで構成され、ロボット制御技術、アプリケーション分野の技術とも徐々に増加している。

周辺分野では、2006-2010年のA61（医学等）、G10（楽器、音響）、A47（家電等）、H02（発電・変換・配電技術）、B60（乗物一般）、2011-2013、2014-2016年のA63（スポーツ、ゲーム、アミューズメント）、B62（鉄道以外の陸上車両）、A01（農業）、B08（清掃）、E21（掘削・採掘）、B23（溶接等）などのアプリケーション技術が含まれている。

このように抽出されたIPCコードにおいて、ロボット自身に関する技術群とアプリケーション分野の技術の両方があり、ここからもロボットの機能を発揮するための技術と応用分野の技術との結合・融合で成り立っているというロボットの特徴を読み取ることができる。

また、クラスタ # 1 の知識結合を形成しない関連分野をみると、A61、G10、A47、H02、B62、B08 が 2001-2005 から、A62、A01、E21、B23 が 2006-2010 年からと知識結合を形成する前に、関連分野として現れている。

表 4-33 技術開発（特許）分野の知識結合ネットワーク特徴量（クラスタ # 1）

期間	平均クラスタリング係数	平均次数 中心性	知識結合率	知識結合分野数	コア分野数	周辺分野数	関連分野数
2001-2005	0.000	0.400	0.263	5	1	4	14
2006-2010	0.240	0.165	0.609	14	5	9	9
2011-2013	0.524	0.195	0.769	20	5	15	6
2014-2016	0.589	0.237	0.645	20	8	12	11

表 4-34 技術開発（特許）分野の位置付け（クラスタ # 1）

期間	ハブ分野	コア分野	周辺分野	関連分野
2001-2005	B25	B25	A63;B62;G06;G05	G01;H04;B08;H01;A47;G08;A61;G09;G10;B65;F16;B60;B64;H02
2006-2010	B25	B25;A63;B62;G06;G05	G01;F16;A61;H04;G10;A47;H02;G08;B60	E21;B08;B23;A62;G09;A01;B64;F41;B63
2011-2013	B25	B25;G01;G06;H04;G05	B60;G08;H02;A63;A47;B62;A62;A01;A61;G09;B08;F16;E21;B23;G10	G07;H01;E01;B05;B64;B63
2014-2016	B25	B25;A61;A47;B62;G01;G06;H04;G05	B60;G09;G08;H02;A63;A62;A01;B08;B23;B65;F16;G10	E04;E21;G07;F24;H01;B66;E01;B05;B64;F41;B63

（2）クラスタ # 2（Industrial robots）の知識結合ネットワーク特徴量

表 4-35 は、クラスタ # 2（Industrial robots）について、クラスタ # 1 と同様に、平均クラスタリング係数等の特徴量を算出したものである。平均クラスタリング係数は、0.2～0.475 と比較的 low、知識結合を形成する分野のうち、周辺分野の割合が多く、枝葉のようにコア分野の技術と結合していることを示す。知識結合を形成する分野は、2006-2010 年の 18 分野をピークにその後は減少し、2014-2016 年には、11 分野となり、知識結合率についても、2006-2010 年の 0.6 をピークに、0.4～0.6 と半分くらいの分野に留まっている。クラスタ # 2 の技術分野の数は、2001-2005 年に 32 分野となったが、その後は分野数が減少し、2014-2016 年には 25 分野となった。

知識結合の 2010 年前後の変化は、ロボット技術の専門家によると、2005 年の愛知万博で、各社様々なロボットの研究開発が行われたが、リーマンショックもあって、ロボットの研究開発を行う企業も絞られ、日本企業は特許の出願を重要なものに絞り、国際出願に変わったことを反映している可能性があるとのことである。

表 4-35 技術開発（特許）分野の知識結合ネットワーク特徴量（クラスタ# 2）

期間	平均クラスタリンク係数	平均次数 中心性	知識結合率	知識結合分野数	コア分野数	周辺分野数	関連分野数
1974-1990	0.295	0.333	0.412	7	3	4	10
1991-2000	0.340	0.244	0.400	10	5	5	15
2001-2005	0.204	0.200	0.469	15	5	10	17
2006-2010	0.475	0.203	0.600	18	7	11	12
2011-2013	0.259	0.179	0.565	13	5	8	10
2014-2016	0.511	0.309	0.440	11	6	5	14

表 4-36 技術開発（特許）分野の位置付け（クラスタ# 2）

期間	ハブ分野	コア分野	周辺分野	関連分野
1974-1990	B25	B25;B23;B65	G05;B05;F16;B66	G01;B62;H01;H05;B24;G06;B60;A63;H02;B29
1991-2000	B25	B25;B23;B65;H01;G05	B05;F16;G01;B66;B62	G02;B08;B21;H05;C12;A47;A61;B24;G06;B01;G11;B60;H02;C23;B29
2001-2005	B25	B25;B65;H01;G06;G05	B23;B05;B66;B24;F16;H02;B07;G01;B01;C23	C40;H04;C25;A63;G02;B08;B21;G03;H05;G08;C12;A61;B60;G11;B32;B62;B29
2006-2010	B25	B25;B66;G01;B65;H01;G06;G05	B23;B62;G11;B05;C23;F16;A61;B21;H02;B08;B01	H04;C25;G02;G03;H05;C12;A47;B24;B07;B60;A63;B29
2011-2013	B25	B25;G01;B65;H01;G06	B23;B05;B24;F16;G05;B66;H02;C23	H04;B08;B21;H05;A47;A61;B01;G11;B62;B29
2014-2016	B25	B25;B23;B65;H01;G06;G05	B05;G01;H02;F16;B66	H04;A63;B08;B21;H05;A47;A61;B24;B07;B01;B60;B62;C23;B29

表4-36は、クラスタ#2について、ネットワーク特徴量から、ハブ分野、コア分野、周辺分野、関連分野を抽出した結果である。1974-1980年の早期から知識結合ネットワークを形成し、一貫してB25（マニピュレータ）をハブ技術として、G05、G06、H01のロボット制御関係技術とB23、B65の産業用ロボットのアプリケーション技術をコア技術として発展してきている。周辺分野では、B05（スプレー技術）、B62、B66（ホイスト、リフト等）、F16、B07（個体相互の分離、仕分け）、B01（物理的・化学的方法または装置一般）などの応用分野の技術があり、関連分野においても、A47（家電等）、A61（医学等）、A63（スポーツ、ゲーム、アミューズメント）、B08（清掃）、C23（コーディング技術）などの応用分野の技術が多く含まれている。

クラスタ#2においても、ロボット自身に関係する技術群とアプリケーション分野の技術の両方があり、ロボットの機能を発揮するための技術と応用分野の技術との結合・融合で成り立っていることが知識結合ネットワークに表れている。

(3) クラスタ # 3 (Welding & machining robots) の知識結合ネットワーク特徴量

表4-37は、クラスタ # 3について、ネットワーク特徴量を算出した結果である。知識結合を形成する分野は、1991-2000 年は3分野のみであったが、その後、増加し、2014-2016 年には10分野となった。コア分野は3～5分野、周辺分野は、2001-2005 年以降3分野で、2014-2016 年に5分野となったが、知識結合率は、0.12～0.40 と比較的低下している。関連分野が2006-2010 年までは、20分野を超えていたが、2001-2005 年の26分野をピークに減少し、2014-2016 年は15分野となっている。これは、クラスタ # 3 (Welding & machining robots) が産業用を中心に様々な応用分野への適用を試みたが、2011-2013 年以降は、溶接や機械加工のアプリケーションの熟度が高まりつつあると考えられる。平均クラスタリング係数は、1991-2000 年が3分野で完全グラフを形成し1.0 となっている以外は、0.35～0.56 で、2011-2013 年の0.562 以外は、0.4 以下で比較的小さい。

表4-38は、クラスタ # 3について、ネットワーク特徴量から、ハブ分野、コア分野、周辺分野、関連分野を抽出した結果である。ハブ分野は、1991-2000 年は、コア分野がB23、B25、G05 の3分野のみで完全グラフを形成しており、この3分野がハブ分野として抽出されたが、2001-2005 年以降は、B25 がハブ分野となっている。コア分野は、B23、B25、G05 の3分野に加え、2006-2010 年以降は、G01 あるいはG05 が加わってコア分野を形成している。周辺分野は、期間によって入れ替えはあるものの、B65、A61、B62、B24、B05 など応用分野の技術が知識結合している。関連分野についてみると、A47、A61、C23、C12、F16 などの技術分野があり、多様な応用技術がクラスタ # 3に含まれていることが伺える。

クラスタ # 3においても、ロボットの機能を発揮するための技術と応用分野の技術との結合・融合で成り立っていることが知識結合ネットワークに表れている。

表 4-37 技術開発（特許）分野の知識結合ネットワーク特徴量（クラスタ # 3）

期間	平均クラスタリング係数	平均次数 中心性	知識結合率	知識結合 分野数	コア分 野数	周辺分 野数	関連分 野数
1991-2000	1.000	1.000	0.120	3	3	0	22
2001-2005	0.350	0.400	0.188	6	3	3	26
2006-2010	0.400	0.357	0.267	8	5	3	22
2011-2013	0.562	0.476	0.304	7	4	3	16
2014-2016	0.385	0.333	0.400	10	5	5	15

表 4-38 技術開発（特許）分野の位置付け（クラスタ#3）

期間	ハブ分野	コア分野	周辺分野	関連分野
1991-2000	B23;B25;G05	G05;B25;B23		G02;H01;B66;H05;A61; B05;B01;B65;F16;B62; H02;B08;B21;A47;C12; B60;B24;G06;G11;G01; C23;B29
2001-2005	B25	G05;B25;B23	G01;B65;G06	G02;H01;B66;G08;B01; B62;C40;H04;C25;B21; B32;C12;B24;A63;C23; B29;H05;A61;B05;F16; H02;B08;G03;B07;G11; B60
2006-2010	B25	B25;B23;G01;G06;G05	H01;A61;B62	G02;B66;B01;B65;H04; C25;B21;C12;B24;A63; C23;B29;H05;B05;F16; H02;B08;G03;A47;B07; G11;B60
2011-2013	B25	G01;B25;B23;G05	G06;B24;B65	H04;B08;H01;B66;B21; H05;A47;A61;B05;B01; G11;F16;B62;H02;C23; B29
2014-2016	B25	B25;B23;G01;G06;G05	B24;B62;B65;A61;B05	H04;B08;H01;B66;B21; H05;A47;B07;B01;F16; B60;A63;H02;C23;B29

（４） クラスタ#4（Control systems for robot operation）の知識結合ネットワーク特徴量

表4-39は、クラスタ#4について、ネットワーク特徴量を算出した結果である。知識結合分野数は、1974-1990年の4分野から2001-2005年の12分野まで増加し、その後は、10分野となっている。コア分野は、1974-1990年の3分野から、その後、5～6分野で、周辺分野についても、ほぼコア分野と同数の4～5分野で推移している。関連分野については、2001-2005年、2006-2010年に20分野と増加したが、その後は、13～15分野と減少した。それにより、平均クラスタリング係数は、0.45～0.65とやや高い値となった。知識結合率については、1991-2000年から2006-2010年までは、0.3台であったが、その後は、0.4台となっている。

表4-40は、クラスタ#4について、ネットワーク特徴量から、ハブ分野、コア分野、周辺分野、関連分野を抽出した結果である。ハブ分野は、2006-2010年のみ、G06（計算）となっているが、クラスタ#1～#3と同様、B25となっている。コア分野は、B25、G05、G06を中心に、1991-2000年から、B23⁴⁹（溶接等）、2001-2005年から、A61（医学等）が加わっている。周辺分野には、B62（鉄道以外の陸上車両）、H04（電気通信技術）が、1991-2000年から現れ、H04、A63、B65（運搬、包装等）、B66（ホイス、

⁴⁹ B23については、知識結合を形成する技術分野であるが、2006-2010年、2014-2016年は、コア分野から周辺分野に位置づけた。

リフト等）などが年により、関連分野との間を行き来している。関連分野には、B05（スプレー技術）、B24（研削・研磨）、B60（乗物一般）、B29（プラスチック加工）、F16（機械要素等）、H05（その他の電気技術）などの産業用ロボットのアプリケーション技術分野がクラスタ#4に含まれている。

表 4-39 技術開発（特許）分野の知識結合ネットワーク特徴量（クラスタ#4）

期間	平均クラスタリング係数	平均次数中心性	知識結合率	知識結合分野数	コア分野数	周辺分野数	関連分野数
1974-1990	0.583	0.667	0.235	4	3	1	13
1991-2000	0.458	0.393	0.308	8	4	4	18
2001-2005	0.457	0.318	0.375	12	5	7	20
2006-2010	0.648	0.467	0.333	10	5	5	20
2011-2013	0.622	0.400	0.435	10	6	4	13
2014-2016	0.502	0.356	0.400	10	5	5	15

表 4-40 技術開発（特許）分野の位置付け（クラスタ#4）

期間	ハブ分野	コア分野	周辺分野	関連分野
1974-1990	B25	G05;B25;G06	B66	G01;B62;B23;H01;H05;B05;B24;B65;F16;B60;A63;H02;B29
1991-2000	B25	G05;B25;G06;B23	G01;A61;B62;H04	G02;B08;H01;B66;B21;H05;C12;F16;A47;B05;B24;B01;G11;B65;B60;H02;C23;B29
2001-2005	B25	B25;A61;B23;G06;G05	G01;B66;G11;A63;B62;H01;B65	C40;H04;C25;G02;B08;B21;G03;H05;G08;C12;B60;B05;B24;B07;B01;F16;B32;H02;C23;B29
2006-2010	G06	B25;A61;G01;G06;G05	B62;H04;B23;G11;B65	C25;G02;B08;H01;B66;B21;H05;C12;G03;A47;B05;B24;B07;B01;F16;B60;A63;H02;C23;B29
2011-2013	B25	B25;A61;B23;G01;G06;G05	F16;B62;H02;B66	H04;B08;H01;B21;H05;A47;B05;B24;B01;G11;B65;C23;B29
2014-2016	B25	B25;A61;G01;G06;G05	B62;B23;B65;H02;H04	B08;H01;B66;B21;H05;A47;B05;B24;B07;B01;F16;B60;A63;C23;B29

（5） クラスタ#5（Cleaning robots）の知識結合ネットワーク特徴量

表4-41は、クラスタ#5について、ネットワーク特徴量を算出した結果である。知識結合分野数は、2001-2005年の7分野から、2006-2010年には17分野と急増したが、2011-2013年に13分野に減少した後、2014-2016年には、再び、17分野となった。周辺分野は、2006-2010年に11分野と拡大したが、2011-2013年には7分野、2014-

2016 年には9分野となり、関連分野については、2001-2005 年に26分野あったものが、徐々に減少し、2014-2016 年には12分野となっている。そのため、知識結合率は、2001-2005 年の 0.212 から 2014-2016 年には 0.586 と知識結合する技術分野のウェイトが高まり、平均クラスタリング係数についても、0.6～0.7 と比較的高い値となっている。

表4-42は、クラスタ#5について、ネットワーク特徴量から、ハブ分野、コア分野、周辺分野、関連分野を抽出した結果である。ハブ分野は、2001-2005 年が、B25 と G06 の2分野となっているのを除き、クラスタ#1～4と異なり、G05、G06 がハブ分野となっている。コア分野については、B25、G01、G05、G06 に、A47（家電等）を加えた技術開発分野（特許）となっており、掃除ロボットのコア技術を反映している。また、2006-2010 年以降は、B60（乗物一般）がコア分野に加わっており、掃除ロボットが自走して掃除することから、その必要技術として B60 がコア分野に位置付けられたと考えられる。

関連分野については、A61（医学等）、B01（物理的または化学的処理）、B29（プラスチック加工）、B24（研削・研磨）などのロボットの多様なアプリケーション分野の技術が含まれている。

クラスタ#5においても、ロボットの機能を発揮するための技術と応用分野の技術との結合・融合で成り立っていることが知識結合ネットワークに表れている。

表 4-41 技術開発（特許）分野の知識結合ネットワーク特徴量（クラスタ#5）

期間	平均クラスタリング係数	平均次数中心性	知識結合率	知識結合分野数	コア分野数	周辺分野数	関連分野数
2001-2005	0.667	0.571	0.212	7	5	2	26
2006-2010	0.626	0.316	0.472	17	6	11	19
2011-2013	0.700	0.410	0.481	13	6	7	14
2014-2016	0.604	0.324	0.586	17	8	9	12

表 4-42 技術開発（特許）分野の位置付け（クラスタ#5）

期間	ハブ分野	コア分野	周辺分野	関連分野
2001-2005	B25;G06	B25;A47;G01;G06;G05	B62;A63	G02;H01;B66;G08;B01;B65;C40;H04;C25;B21;B32;C12;B24;C23;B29;B23;H05;A61;B05;F16;H02;B08;G03;B07;G11;B60
2006-2010	G06	B60;B25;A47;B62;G06;G05	B64;G09;A61;G08;A63;G01;H04;B65;G10;A01;F41	C25;G02;B08;H01;B23;B66;B21;H05;C12;G03;B05;B24;B07;B01;G11;F16;H02;C23;B29
2011-2013	G05	B60;B25;A47;B62;G06;G05	A61;H02;A63;G01;H04;F24;A01	B08;H01;B23;B66;B21;H05;F16;B05;B24;B01;G11;B65;C23;B29
2014-2016	G06	B60;B25;A47;B62;G01;G06;H04;G05	A61;H02;A63;A01;B65;G10;B63;E04;B23	B08;H01;B66;B21;H05;B05;B24;B07;B01;F16;C23;B29

(6) IPC コード サブクラス (M) での分野の抽出

(1) ～ (5) において、IPC コードのクラス (C) での知識結合ネットワークの特微量の抽出とハブ、コア、周辺、関連分野の抽出を行ったが、より詳細に知識結合の形成をみるため、IPC コードのサブクラス (M) で知識結合ネットワークを構築し、ネットワーク特微量とハブ分野、コア分野、周辺分野について抽出した。表 4-4 3 は、IPC コードのサブクラス (M) レベルで、同様に知識結合ネットワークを構築し、特微量とハブ、コア、周辺の IPC コードを抽出したものである。IPC コードのサブクラス (M) では、特許分類がクラス (C) より細分化されたため、知識結合を形成しない IPC コードが多く、いずれのクラスタも関連分野の数が 2 桁から 3 桁と多くなったが、知識結合を形成する IPC コードはほぼ IPC コードのクラス (C) と同様の特許分類のコードが抽出された。

平均クラスタリング係数と平均次数中心性は、いずれのクラスタもクラス (C) の値よりは低めの値となっている。これは、クラス (C) では、同じ結合ペアであったものが、サブクラス (M) では別の結合ペアとなり、知識結合ネットワークの結合の密度が低下したことが要因と考えられる。ハブ、コア、周辺の各分野に位置付けられた IPC コードは、クラス (C) と比較すると、全体の傾向は同様であるが、コードが細分化されたことにより、いくつか特徴的な点が見られている。

クラスタ # 1 では、クラス (C) ではハブ分野は B25 であるが、サブクラス (M) では、B25J (マニピュレータ) に代わり、2014-2016 年に、G05D (非電気的変量の制御・調整系) がハブ分野に位置付けられた。コア分野には、B62D (自動車) が 2006-2010 年から、A47L (家庭の洗浄・清浄) が 2011-2013 年から位置付けられ、周辺分野も合わせると、A63H (玩具)、B60F (軌条と路面両用車両)、A62C (消防)、A01D (収穫・草刈り) などが抽出されており、知識結合ネットワークの技術開発分野 (特許) とそれら間の関係がより詳細に把握できている。

クラスタ # 2 (Industrial robots) では、ハブ分野が B25J であること、コア分野の IPC コードがほぼクラス (C) とサブクラス (M) で対応しており、例えば、H01L (半導体デバイス)、G05B (制御系一般)、B65G (運搬・貯蔵装置)、B23K (溶接等) と技術分野がより具体的に特定されて抽出された。これらは、産業用ロボットの重要なアプリケーションであり、ロボットの機能を発揮する B25J、G05B と応用分野の技術である H01L (半導体デバイス)、G05B (制御系一般)、B65G (運搬・貯蔵装置)、B23K (溶

接等) が結合しており、実用化したロボットでは、応用分野の技術が知識結合していることが確認できた。

表 4-43 技術開発 (特許) 分野 (IPC サブクラス (M)) の位置付け

クラスタ#1									
期間	平均クラス スタリング 係数	平均次数 中心性	知識結合数	コア分野数	周辺分野数	関連分野数	ハブ分野	コア分野	周辺分野
2001-2005	0.000	0.500	4	1	3	127	B25J	B25J	B62D;A63H;G05D
2006-2010	0.350	0.400	6	3	3	168	B25J	B62D;A63H;B25J	G05D;G05B;G06F
2011-2013	0.365	0.192	16	6	10	143	B25J	G05D;G05B;A47L;B62D;B25J; G06F	G01C;A63H;B60F;G09B;B08B; A62C;A01D;G06Q;E21F;H02J
2014-2016	0.547	0.170	23	9	14	159	G05D	G05D;G05B;A47L;G01C;B62D; B25J;G06T;G06F;G06K	G06N;A63H;H04L;G09B;A62C; G06Q;H04N;G01S;A01D;A61H; A61B;B60F;H02J;G10L
クラスタ#2									
期間	平均クラス スタリング 係数	平均次数 中心性	知識結合数	コア分野数	周辺分野数	関連分野数	ハブ分野	コア分野	周辺分野
1974-1990	0.000	0.333	6	1	5	43	B25J	B25J	B23Q;G05B;B66C;B23K;B05B
1991-2000	0.203	0.222	10	3	7	110	B25J	B23P;B25J;B23K	B65G;F16D;B23Q;H01L;G05B; G05G;F16H
2001-2005	0.194	0.154	12	5	7	119	B25J	H01L;G05B;B25J;B65G;B23K	G06F;B05B;B66C;B23Q;F16L; B07C;B08B
2006-2010	0.251	0.116	24	5	19	150	B25J	H01L;G05B;B25J;B65G;G06F	B65B;B05B;B05C;B66C;B23K; B21D;B62D;B23Q;F16H;B23P; A61B;B23B;B65H;H02K;H02G; G05G;B08B;C23C;G11B
2011-2013	0.124	0.200	11	3	8	148	B25J	H01L;B25J;B65G	B23K;B05B;G06F;G05B;F16H; B23Q;B66C;B65B
2014-2016	0.284	0.227	12	6	6	170	B25J	H01L;G05B;B25J;B65G;B23K;G 06F	B23P;B05B;B23Q;F16H;B05C; B65B
クラスタ#3									
期間	平均クラス スタリング 係数	平均次数 中心性	知識結合数	コア分野数	周辺分野数	関連分野数	ハブ分野	コア分野	周辺分野
1991-2000	1.000	1.000	3	3	0	117	B23K;B25 J;G05B	G05B;B25J;B23K	
2001-2005	1.000	1.000	3	3	0	128	B23K;B25 J;G05B	G05B;B25J;B23K	
2006-2010	0.256	0.286	8	3	5	166	B25J	G05B;B25J;B23K	H01L;G06F;G05D;G01B;G06T
2011-2013	0.256	0.286	8	3	5	151	B25J	G05B;B25J;B23K	B24B;G01B;G06F;G05D;B65G
2014-2016	0.454	0.220	14	5	9	168	B25J	G05D;G05B;G01B;B25J;B23K	G06T;B23P;B23Q;B24B;B65G; G06F;A61B;G01C;B05B
クラスタ#4									
期間	平均クラス スタリング 係数	平均次数 中心性	知識結合数	コア分野数	周辺分野数	関連分野数	ハブ分野	コア分野	周辺分野
1974-1990	1.000	1.000	3	3	0	46	B25J;G05 B;G06F	G05B;B25J;G06F	
1991-2000	0.205	0.333	7	3	4	113	B25J	G05B;B25J;G06F	A61B;G01L;B62D;H04N
2001-2005	0.279	0.273	11	4	7	120	A61B	G05B;B25J;G06F;A61B	B66C;G11B;B23Q;A61F;B62D; B65G;G01B
2006-2010	0.479	0.333	12	5	7	162	B25J	G05B;B25J;G06F;A61B;G06K	B62D;H04N;G01L;A61M;A61F; G01B;G06T
2011-2013	0.251	0.227	12	4	8	147	B25J	G05B;B25J;G06F;A61B	62D;A61M;A61F;B66C;G01L; G05D;G06T;G06K
2014-2016	0.382	0.273	11	4	7	171	B25J	G05B;B25J;G06F;A61B	B62D;A61F;A61M;G01L;G06T; B65G;G06K
クラスタ#5									
期間	平均クラス スタリング 係数	平均次数 中心性	知識結合数	コア分野数	周辺分野数	関連分野数	ハブ分野	コア分野	周辺分野
2001-2005	0.839	0.733	6	5	1	125	B25J;G06F	G05D;G05B;A47L;B25J;G06F	B62D
2006-2010	0.760	0.352	15	6	9	159	B25J;G06F	G05D;G05B;A47L;B62D;B25J ;G06F	G01V;H04N;G01C;G01S;G09G;B 0B;A61B;G06K;F41A
2011-2013	0.547	0.286	14	6	8	145	A47L;G06F	G05D;G05B;A47L;B62D;B25J; G06F	G01C;H04N;A61B;G01S;H02J; G01V;G06N;G06K
2014-2016	0.474	0.251	19	7	12	163	G06F	G05D;G06N;H04N;G05B;B25J; G06F;G06K	A47L;G01C;B62D;H02J;A61B; B65G;G06Q;B60B;A63H;G10L; A01D;G01S

クラスタ # 3 (Welding & machining robots) では、B25J、G05B とともに、B23K (溶接等) がコア分野を形成しており、周辺分野には、2011-2013 年以降、H01L (半導体デバイス)、B24B (機械的振動の発生・伝達一般)、B65G (運搬・貯蔵装置)、B05B (スプレー装置) が結合しており、応用分野の技術と知識結合している。

手術用ロボットが含まれるクラスタ # 4 では、A61B (診断、手術) が 1991-2000 年に周辺分野に位置付けられた後は、コア分野に含まれており、ロボットの基盤技術である B25J、G05B、G06F とコア分野を形成し、2001-2005 年には、ハブ分野にも位置付けられた。医療関係では、A61F (血管へ埋め込み可能なフィルタ)、A61M (身体内または表面への媒体導入装置) が周辺分野として 2001-2005 年以降に表れている。

クラスタ # 5 (Cleaning robots) では、コア分野に、B25J に加え、制御関係の G05B (制御系一般)、G05D (非電気的変量の制御・調整系)、G06F (電氣的デジタルデータ処理) と A47L (家庭の洗浄・清浄)、B62D (自動車)⁵⁰などが抽出され、ハブ分野には、2001-2005 年以降、G06F がなり、2011-2013 年には、A47L もハブ分野となった。4.2.3 (5) のクラスタ # 5 のクラス (C) レベルでの抽出結果とほぼ同様の傾向で、技術分野がより特定されて抽出された。

4.2.4 考察

4.2.1～4.2.3において、技術開発分野 (特許) について、カテゴリ分けされたクラスタごとの分析結果を、4.1.4で行った学術研究分野と同様にクラスタ間で比較し、ロボットの技術開発分野 (特許) における特徴について分析を深めるとともに、社会実装や実用化の現状と比較検討を行う。

(1) ロボットの技術開発分野 (特許) における特徴

4.2.1のクラスタ・ネットワーク分析により、ロボットの技術開発の特徴が特許の引用関係に基づき関連のある主な特許群 (グループ) ごとに抽出されたが、4.1.4 (1) の学術研究分野と同様に、技術開発分野 (特許) の分布の比較と 4.2.3 で抽出された知識結合を形成するコア分野、周辺分野を比較検討することにより、ロボット分野の技術開発全体の特徴が、MM 手法により把握できているのかの評価を行う。

表 4-4 4 は、クラスタ別に、上位 18 位までの IPC コード クラス (C) の特許につ

⁵⁰ B62D については、2014-2016 年は周辺分野に位置付け

いて、特許件数とシェア、特化係数を算出したものである。4.2.1で既に述べたように、B25（マニピュレータ）のみで全特許の28.6%を占め、G05、G06、B23、G01で過半数を超える。シェアの表で、10%以上をピンクで、5%以上10%未満のシェアを黄緑で、特化係数の表では、1.0以上をピンクの背景色で色付けした。

各IPCコードで特化係数が1.0以上のIPCコードは、そのコードのシェアが全体のシェアよりも大きいことを表す。クラスタ#1（Service robots）では、B62（鉄道以外の陸上車両）の特化係数が3.286と大きく、その他のIPCコードではA63（スポーツ、ゲーム、アミューズメント）、H04（電気通信技術）、B60（乗物一般）、A01（農業）などの特化係数が大きい。クラスタ#1では、移動体に関するロボットとアプリケーションとして、ゲーム、アミューズメント、農業などに関連した技術開発が行われていることが伺われる。G05（制御）、G06（計算）、G01（計測・試験）の特化係数が1.337～1.011と若干大きい一方、産業用ロボットでは特化係数が大きいB23、B65、H01、F16、B05などは、逆に特化係数が小さく、クラスタ#1の特徴が、IPCコードの分布にも表れていることがわかる。クラスタ#4、#7のA61（医学等）がそれぞれ4.952、4.243と特化係数が大きく、医療・ヘルスケア関係はクラスタ#4と#7に集中していることがわかる。クラスタ#7では、A63が5.666とかなり大きく、リハビリテーション用として運動やゲームの要素が取り入れられていることが伺われる。

その他特徴的なクラスタとして、クラスタ#5（Cleaning robots）のA47（家電等）の特化係数が3.44と他のクラスタが低いのに対して突出して大きく、その他H04（電気通信技術）、B60（乗物一般）、G06（計算）、G05（制御）などの特化係数も大きく、Cleaning robotsのクラスタの特徴がIPCコードの特化係数からも表れている。

産業用ロボット関係のクラスタであるクラスタ#2、#3、#6の特化係数をみると、B25（マニピュレータ）が1.13～1.733、B23（溶接等）が1.597～3.77、クラスタ#2と#6はそれぞれB65（運搬、包装等）が2.533と2.610、F16（機械要素等）が1.627と2.224、B05（スプレー技術）が2.477と2.753、クラスタ#3はG05（制御）、G01（計測・試験）がそれぞれ1.481、1.176と1.0を上回っている一方、B65、F16は小さい。産業用ロボット関係のクラスタでは、クラスタ#2と#6は、ロボットの機構や機械的要素の技術に特化し、クラスタ#3は、ロボットの制御系の技術に特化した技術群（グループ）であることが伺われる。

表 4-44 クラスタ別IPC コード 分布 (クラス (C))

クラス別IPC classごとの特許件数																				
Cluster #	IPC class	B25	G05	G06	B23	G01	A61	B62	B65	H01	A47	H02	F16	H04	A63	B60	B05	A01	B63	Others
	1	5002	2661	1395	149	991	339	2555	76	56	400	372	231	668	723	405	55	251	145	2157
	2	5266	860	611	1458	652	146	251	1376	1483	71	314	600	88	90	101	446	21	11	2446
	3	3549	1577	524	2106	617	71	127	192	85	8	59	67	83	23	25	108	9	10	731
	4	2960	1365	1322	229	503	2455	253	172	151	30	106	171	205	68	56	16	17	5	819
	5	1654	1917	1499	30	677	103	309	196	97	800	158	41	511	190	294	18	208	43	1073
	6	2216	94	52	452	76	129	22	389	45	9	31	225	5	34	16	136	17	11	511
	7	1283	272	143	15	103	653	154	12	32	11	57	54	36	372	34	3	9	13	129
	8	1432	66	67	81	195	128	29	57	64	8	64	99	17	66	6	3	6	8	340
	Others	8473	3075	1869	1715	2043	1036	944	1241	1279	1299	1432	1031	753	585	500	445	683	711	5973
Total	31835	11887	7482	6235	5857	5060	4644	3711	3292	2636	2593	2519	2366	2151	1437	1230	1221	957	14179	

クラス別IPC classごとのシェア																				
Cluster #	IPC class	B25	G05	G06	B23	G01	A61	B62	B65	H01	A47	H02	F16	H04	A63	B60	B05	A01	B63	Others
	1	0.268	0.143	0.075	0.008	0.053	0.018	0.137	0.004	0.003	0.021	0.02	0.012	0.036	0.039	0.022	0.003	0.013	0.008	0.1158
	2	0.323	0.053	0.038	0.089	0.04	0.009	0.015	0.084	0.091	0.004	0.019	0.037	0.005	0.006	0.006	0.027	0.001	7E-04	0.1501
	3	0.356	0.158	0.053	0.211	0.062	0.007	0.013	0.019	0.009	8E-04	0.006	0.007	0.008	0.002	0.003	0.011	9E-04	0.001	0.0733
	4	0.271	0.125	0.121	0.021	0.046	0.225	0.023	0.016	0.014	0.003	0.01	0.016	0.019	0.006	0.005	0.001	0.002	5E-04	0.0751
	5	0.168	0.195	0.153	0.003	0.069	0.01	0.031	0.02	0.01	0.081	0.016	0.004	0.052	0.019	0.03	0.002	0.021	0.004	0.1093
	6	0.496	0.021	0.012	0.101	0.017	0.029	0.005	0.087	0.01	0.002	0.007	0.05	0.001	0.008	0.004	0.03	0.004	0.002	0.1143
	7	0.379	0.08	0.042	0.004	0.03	0.193	0.045	0.004	0.009	0.003	0.017	0.016	0.011	0.11	0.01	9E-04	0.003	0.004	0.0381
	8	0.523	0.024	0.024	0.03	0.071	0.047	0.011	0.021	0.023	0.003	0.023	0.036	0.006	0.024	0.002	0.001	0.002	0.003	0.1243
	Others	0.241	0.088	0.053	0.049	0.058	0.03	0.027	0.035	0.036	0.037	0.041	0.029	0.021	0.017	0.014	0.013	0.019	0.02	0.1702
Total	0.286	0.107	0.067	0.056	0.053	0.045	0.042	0.033	0.03	0.024	0.023	0.023	0.021	0.019	0.013	0.011	0.011	0.009	0.1274	

IPC classのクラス別特化係数 (Specialization coefficient)																				
Cluster #	IPC class	B25	G05	G06	B23	G01	A61	B62	B65	H01	A47	H02	F16	H04	A63	B60	B05	A01	B63	Others
	1	0.939	1.337	1.114	0.143	1.011	0.4	3.286	0.122	0.102	0.906	0.857	0.548	1.687	2.008	1.684	0.267	1.228	0.905	0.9087
	2	1.13	0.494	0.558	1.597	0.76	0.197	0.369	2.533	3.077	0.184	0.827	1.627	0.254	0.286	0.48	2.477	0.117	0.079	1.1785
	3	1.244	1.481	0.782	3.77	1.176	0.157	0.305	0.577	0.288	0.034	0.254	0.297	0.392	0.119	0.194	0.98	0.082	0.117	0.5754
	4	0.949	1.172	1.804	0.375	0.877	4.952	0.556	0.473	0.468	0.116	0.417	0.693	0.884	0.323	0.398	0.133	0.142	0.053	0.5896
	5	0.589	1.828	2.271	0.055	1.31	0.231	0.754	0.599	0.334	3.44	0.691	0.185	2.448	1.001	2.319	0.166	1.931	0.509	0.8578
	6	1.733	0.197	0.173	1.805	0.323	0.635	0.118	2.61	0.34	0.085	0.298	2.224	0.053	0.394	0.277	2.753	0.347	0.286	0.8973
	7	1.325	0.752	0.628	0.079	0.578	4.243	1.09	0.106	0.32	0.137	0.723	0.705	0.5	5.686	0.778	0.08	0.242	0.447	0.2991
	8	1.83	0.226	0.364	0.528	1.354	1.029	0.254	0.625	0.791	0.123	1.004	1.599	0.292	1.248	0.17	0.099	0.2	0.34	0.9754
	Others	0.844	0.821	0.792	0.872	1.106	0.649	0.645	1.061	1.232	1.563	1.752	1.298	1.009	0.863	1.104	1.148	1.774	2.357	1.3362

クラスタ # 5 (Cleaning robots) の特化係数は、A47 (家電等) が 3.44 と他のクラス
タと比較し、クラスタ 9 以降のその他のクラスタの 1.563 を除き唯一大きい他、制御系
の IPC コード G01、G05、G06 と電気通信技術である H04、移動体技術一般である B60
(乗物一般) の特化係数が大きく、家庭用掃除ロボットの特徴が現れている。また、A01
(農業) の特化係数が 1.931 と大きいことも特徴であるが、収穫や草刈りに関する農業
ロボットに関連した技術であり掃除ロボットと共通の技術が含まれていることと考えら
れる。

以上、技術開発分野 (特許) においても、カテゴリ分けされたクラスタの技術的特徴
が特化係数により把握できることがわかった。

(2) 知識結合を形成する分野のクラスタ間比較によるロボットの技術開発の特徴

4.1.4 (2) の学術研究分野の分析と同様に、技術開発分野 (特許) においても、ク
ラスタ間の知識結合形成する分野を比較検討する。表 4-4 5、4-4 7、4-4 9 は、
1991-2000 年、2001-2005 年、2014-2016 年について、IPC コードのクラス (C) とサ
ブクラス (M) レベルで、コア分野と周辺分野をクラスタ間で比較し、クラスタ間のク

ロスしたマス目にクラスタ間で共通に知識結合した技術開発分野（特許）を抽出したものである⁵¹。また、表4-46、4-48、4-50は、IPCコード サブクラス（M）ごとに、どのクラスタで知識結合しているかを一覧にしたもので、学術研究分野と同様に、二重丸はコア分野、一重丸は周辺分野に位置付けられた特許分類であることを示す。

1991-2000 年においては（表4-45）、クラスタ#2～#4以外は、知識結合が形成されておらず、3つのクラスタ間の比較となった。クラスタ#2～#4は、IPCコードクラス（C）では、B25、B23、G05が共通技術となっている。サブクラスタ（M）では、B25Jがハブ技術となり、G05B（制御系一般）が共通技術となっており、クラスタ#2と#3の間では、B23K（溶接等）が、共通技術となっている。1990年代は産業用ロボットが成長した時期であり、マニピュレータの技術（B25J）をコア技術として、制御や機構、機械要素の技術、特に、クラスタ#2と#3は、産業用ロボットの最初のアプリケーションである溶接ロボットの技術が共通の基盤技術であったことが知識結合を形成するコア分野の技術開発分野（特許）のIPCコードからも把握できることが確認できた。

また、表4-46によれば、クラスタ#2は、B23P（その他の機械加工）、B23Q（コンポーネントおよび部品）、B65G（運搬・貯蔵装置）、F16D（回転伝達用継手）、H01L（半導体デバイス）がクラスタ単独の知識結合する特許分類となっており、産業用ロボットのアプリケーションの技術がクラスタ#2に含まれていることが確認できる。クラスタ#4では、G06F（電氣的デジタルデータ処理）、A61B（診断、手術）、G01L（力、応力、トルク等の測定）、B62D（自動車）、H04N（映像によるコミュニケーション）がクラスタ単独の知識結合する特許分類であり、医療系、移動体、通信などの多様な技術開発の特許技術が含まれており、産業用以外のロボットに関する技術のクラスタである。

表 4-45 クラスタ間で共通する知識結合を形成する分野（1991-2000 年）

(1) IPC コード クラス（C）

CLS01			
CLS02	B25;B23;B65;H01;G05 B05;F16;G01;B66;B62		
CLS03	B23,B25,G05	G05;B25;B23	
CLS04	B23,B25,G05 B62,G01,	B23,B25,G05	G05;B25;G06;B23 G01;A61;B62;H04
	CLS02	CLS03	CLS04

⁵¹ 赤字の学術研究分野は、両クラスタともコア分野であることを示す。

(2) IPCコード サブクラス (M)

CLS02	B23P;B25J;B23K B65G;F16D;B23Q;H01L;G05B; G05G;F16H		
CLS03	B25J;B23K	G05B;B25J;B23K	
CLS04	B25J	B25J;G05B	G05B;B25J;G06F A61B;G01L;B62D;H04N
	CLS02	CLS03	CLS04

表 4-46 各クラスターの知識結合を形成する分野 (IPC コード サブクラス (M)) (1991-2000 年)

52

IPC code(M)	Cluster #		
	CLS02	CLS03	CLS04
B25J	◎	◎	◎
G05B	○	◎	◎
B23K	◎	◎	
B23P	◎		
B65G	○		
F16D	○		
B23Q	○		
H01L	○		
G06F			◎
A61B			○
G01L			○
B62D			○
H04N			○

2001-2005 年においては (表 4-4 7)、IPC コード クラス (C) では、クラスター # 1 ～ # 7 までは知識結合を形成しており、これらのすべてのクラスター間で、B25 が共通技術として、IPC コード サブクラス (M) では、クラスター # 6 が知識結合の形成が未だないことを除き、B25J が共通技術として抽出された。ロボット技術が、マニピュレータを中核技術として成り立っていることを裏付けることとなった。知識結合のコア分野を形成するクラスター # 1 ～ # 5 を比較すると、IPC コード クラス (C) では、概ね G01、G05、G06 の制御系の技術が共通技術となっており、ロボットとして果たすべき機能の技術を共通基盤としていることが伺われる。

クラスター # 1 と # 4、# 5 の間では、B25、G05、G06 に加え、A63、B62 が共通技術となっており、ゲームやアミューズメントとして動き回るロボットが開発されたことが伺われる。IPC コード サブクラス (M) では、B25J をコアの共通技術となってい

⁵² 表 4-4 6 の◎は、知識結合を形成するコア分野、○は、周辺分野であることを示す。表 4-4 8、表 4-5 0 も同じ。

る他、クラスタ#2～#5の間では、G05B（制御系一般）が共通技術と抽出されており、ロボットの機能を発揮させるための制御技術がコア技術となっていることが知識結合の形成からも確認できた。その他の特徴を共通の知識結合を形成する特許技術を、表4-48からみると、クラスタ#2と#3で、B23K（溶接等）、B65G（運搬・貯蔵装置）、B05B（スプレー装置）が共通であり、いずれも産業用ロボットの代表的なアプリケーションである。クラスタ#2と#4では、B66C（クレーン）が共通技術に、クラスタ#3と#4では、A61B（診断、手術）が共通技術となっている。

表 4-47 クラスタ間で共通する知識結合を形成する分野 (2001-2005 年)

(1) IPCコード クラス (C)

[illegible]

(2) IPC コード サブクラス (M)

[illegible]

表 4-4 7、4-4 8において、他のクラスタにはない特許分類をみると、IPC コードクラス (C) では、クラスタ # 2で、B01 (物理的・化学的方法または装置一般)、B05 (スプレー技術)、B07 (固体相互の分離・仕分け)、B24 (研削・研磨)、C23 (金属材料への被覆)、F16 (機械要素等)、H02 (発電・変電・配電技術)、クラスタ # 4で、A61 (医学等)、G11 (情報記録) がそれぞれのクラスタのみに抽出された。サブクラス (M) では、クラスタ # 2で、H01L (半導体デバイス)、B07C (郵便等の仕分け)、B08B (清

掃一般)、F16L (管、管の継手・取付具)、クラスタ# 4で、A61F (血管へ埋め込み可能なフィルタ)、B65G (運搬・貯蔵装置)、B66C (クレーン)、G01B (長さ、角度、面積等の測定)、G11B (情報の記録) がそれぞれのクラスタのみに抽出された。クラスタ# 2が、産業用ロボットとして使用されるためのスプレー技術、研削などの機械加工などの技術が関連していること、クラスタ# 4が、手術などの医療・ヘルスケア分野に必要な技術とロボットを制御するために必要な測定や記録媒体などの技術が関連していることが知識結合を形成する技術開発分野 (特許) をみることで確認できた。

表 4-48 各クラスタの知識結合を形成する分野 (IPC コード サブクラス (M)) (2001-2005 年)

IPC code (M)	Cluster #						
	CLS01	CLS02	CLS03	CLS04	CLS05	CLS06	CLS07
B25J	◎	◎	◎	◎	◎		○
G06F		○	○	◎	◎		
G05B		◎	◎	◎			
B23Q		○	○	○			
B62D	○			○	○		
B23K		◎	◎				
B65G		◎	○				
A61B			○	◎			
G05D	○				◎		
B05B		○	○				
A63H	○						○
B66C		○		○			
H01L		◎					
A47L					◎		
B07C		○					
B08B		○					
F16L		○					
B23P			○				
B24B			○				
G01C			○				
G06T			○				
A61F				○			
B65G				○			
G01B				○			
G11B				○			

2014-2016 年では、クラスタ# 1～# 8間で、知識結合を形成する共通の特許分類が増えていることが観察される。IPC コード クラス (C) では (表 4-49 (1))、クラスタ# 1の知識結合する特許分類がコア分野で8、周辺分野で12、合計20分野あることから、クラスタ# 2～# 8の知識結合を形成するほとんどの特許分類を包含している。特に、# 1～# 8のすべてのクラスタに共通する特許分類はB25で、ほとんどのク

クラスターでA61⁵³、B65⁵⁴、G05⁵⁵、G06⁵⁶を共通技術としていることがわかった。また、クラスター#2を除くクラスターで、A61（医学等）が全体の約4%のシェアしか占めていないにもかかわらず、医療・ヘルスケア分野の技術が知識結合の特許分類として抽出されたことは、医療・ヘルスケア関係のロボットの技術開発が広く行われ始めた証拠として特筆すべき傾向が捉えられたと考える。

IPC コード サブクラス (M) の共通の知識結合を形成する特許分類は、表4-49 (2) の通りであるが、クラスター間のIPCコードの関係をみるため、知識結合を形成する特許分類を示す表4-50でみると、B25Jがクラスター#1～#7すべてのクラスターで共通のコア分野である他、G05B（制御系一般）がクラスター#6以外のクラスターで、G06F（電氣的デジタルデータ処理）がクラスター#1～#5で、B65G（運搬・貯蔵装置）がクラスター#2～#6で、知識結合を形成する特許分類となっている。IPC コード クラス (C) では、A61がクラスター#2を除き、クラスター#1～#7で知識結合を形成する特許分類となっていたが、サブクラス (M) では、医療・ヘルスケア関係は、クラスター#2と#6以外のクラスターで、A61関係のIPCコードが抽出された。

クラスター#1では、A61B（診断、手術）、A61H（物理的治療装置）、クラスター#3では、A61B、クラスター#4では、A61B、A61F（血管へ埋め込み可能なフィルタ）、A61M（身体内または表面への媒体導入装置）、クラスター#5では、A61B、クラスター#7では、A61F、A61Hと医学関係でも、技術内容に相違があることがサブクラス (M) レベルでみることで明らかになった。農業関係では、唯一A01D（収穫・草刈り）がクラスター#1と#5で知識結合を形成しており、農業関係でのロボットは、収穫や草刈り関係で利用されていることが抽出された。国際ロボット連盟 (IFR) が2018年発表した統計[34]で、農業用ロボットは栽培や収穫などの市場で根付きつつあるとしていることを合致しており、知識結合ネットワークの分析によっても確かめられた。

⁵³ A61は、クラスター#2を除くクラスターで知識結合を形成。

⁵⁴ B65は、クラスター#7を除くクラスターで知識結合を形成。

⁵⁵ G05は、クラスター#8を除くクラスターで知識結合を形成。

⁵⁶ G06は、クラスター#6、#8を除くクラスターで知識結合を形成。

(1) IPC コード クラス (C)

[illegible]

(2) IPC コード サブクラス (M)

CLS01	G05D;G05B;A47L;G01C;B62D; B25J;G06T;G06F;G06K G06N;A63H;H04L;G09B;A62C; G06Q;H04N;G01S;A01D;A61H;		H01L;G05B;B25J;B65G;B23K; G06F B23P;B05B;B23Q;F16H;B05C; B65B	G05D;G05B;G01B;B25J;B23K G06T;B23P;B23Q;B24B;B65G; G06F;A61B;G01C;B05B	G05B;B23P;B23Q;B65G;G06F	B25J;G05B;G06F B65G;	B25J;G05B;G05D A01D;A63H;A47L;A61B;B62D; G01C;G01S;G06N;G06Q;G10L; H02J;H04N	G05D;G06N;H04N;G05B;B25J; G06F;G06K A47L;G01C;B62D;H02J;A61B; B65G;G06Q;B60B;A63H;G10L;	B25J B65G;	B65B;B23Q;G09B;F16H;B65G; B23K;B05B;B65B	B25J B62D;G05B;G05D F16H	A61H;B25J;A61F B62D;G05D;G05B;F16H;A63B
CLS02	B25J;G05B;G06F											
CLS03	B25J;G05B;G05D A61B;G01C;G06F;G06T											
CLS04	B25J;G05B;G06F A61B;B62D;G06K;G06T;											
CLS05	B25J;G05B;G05D;G06F;G06K A01D;A63H;A47L;A61B;B62D; G01C;G01S;G06N;G06Q;G10L; H02J;H04N											
CLS06	B25J G09B;											
CLS07	B25J A61H;B62D;G05B;G05D											
CLS08												
CLS09												
CLS10												
CLS11												
CLS12												
CLS13												
CLS14												
CLS15												
CLS16												
CLS17												
CLS18												
CLS19												
CLS20												
CLS21												
CLS22												
CLS23												
CLS24												
CLS25												
CLS26												
CLS27												
CLS28												
CLS29												
CLS30												
CLS31												
CLS32												
CLS33												
CLS34												
CLS35												
CLS36												
CLS37												
CLS38												
CLS39												
CLS40												
CLS41												
CLS42												

表 4-50 各クラスターの知識結合を形成する分野 (IPC コード サブクラス (M)) (2014-2016 年)

IPC Code (M)	Cluster #						
	CLS01	CLS02	CLS03	CLS04	CLS05	CLS06	CLS07
B25J	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
G05B	◎	◎	◎	◎	◎		○
G06F	◎	◎	◎	◎	◎		
B65G		◎	○	○	○	○	
G05D	◎		◎		◎		○
B62D	◎			○	○		○
A61B	○		○	◎	○		
B23K		◎	◎			○	
B23Q		○	○			○	
F16H		○				○	○
G06K	◎			○	◎		
G06T	◎		○	○			
G01C	◎		○		○		
A01D	○				○		
A47L	◎				○		
A61F				○			○
A61H	○						◎
A63H	○				○		
B23P		○	○				
B65B		○				○	
G06N	○				◎		
G06Q	○				○		
G01S	○				○		
G09B	○					○	
G10L	○				○		
H02J	○				○		
H04N	○				◎		
A61M				○			
A62C	○						
A63B							○
B05C		○					
B24B			○				
B60B					○		
B60F	○						
G01B			◎				
G01L				○			
H01L		◎					
H04L	○						

各クラスター独自の知識結合する特許分類を抽出すると、IPC コード クラス (C) では、クラスター # 1 で、A62 (救命・消防)、B08 (清掃)、G08 (信号)、クラスター # 2 で、B66 (ホイスト、リフト等)、クラスター # 3 で、B05 (スプレー技術)、B24 (研

削・研磨)がそれぞれのクラスタのみで知識結合を形成した技術開発分野(特許)として抽出された。IPCコード サブクラス(M)では、クラスタ#1で、A62C(消防)、B60F(軌条と路面両用車両)、H04L(デジタル情報の伝達)、クラスタ#2で、B05C(液体を表面に適用する装置一般)、H01L(半導体デバイス)、クラスタ#3で、B24B(機械的振動の発生・伝達一般)、G01B(長さ、角度、面積等の測定)、クラスタ#4で、A61M(身体内または表面への媒体導入装置)、G01L(力、応力、トルク等の測定)、クラスタ#5で、B60B(車輪)、クラスタ#7で、A63B(訓練用具等)がそれぞれ抽出された。

これらの結果より、クラスタ#1ではサービスロボットが救命、消防、清掃などへ活用の広がり、クラスタ#2、#3では、産業用ロボットの用途が深化、クラスタ#7ではA63B(訓練用具等)がコア分野となっていることから、リハビリテーション用ロボットとして装置が開発されていることを反映していると考えられる。

第1章1.3.2において、1990年半ば以降は、ロボットに関する技術開発は、新たな技術開発分野(特許)を取り入れるのではなく、技術開発分野(特許)間の個々の組み合わせの技術開発が増加していることを指摘したが(図1-2)、その具体的内容が知識結合ネットワークの分析で明らかになった。

以上、知識結合を形成する技術開発分野(特許)を時系列で分析することで、ロボットの共通基盤となる技術開発分野(特許)の抽出、ロボットの応用分野での技術開発の新たな取り組み、特定の応用分野でのロボットに関する技術開発の深化と広がりの特徴と動向が把握でき、知識結合が形成された技術を用いたロボットが社会実装や実用化されていることが多いことが確認できた。

4.2.5 まとめ

4.2では、技術開発分野(特許)について、MM手法を適用し、4.1の学術研究分野の分析と同様に、ロボットの技術開発分野(特許)の動向を、知識結合ネットワーク構築とネットワーク特徴量の抽出により把握した。

本節での結果をまとめると以下の通り。

- (1) MM手法をロボットの特許に適用した結果は、ロボットの技術開発分野(特許)を特徴ある技術分野群にカテゴリ分けできるとともに、その技術分野群において、技術開発分野(特許)間の知識結合の構造と特徴を把握できるとともに、とハブ分野、コア分野として中心となっている技術開発分野(特許)の抽出がで

- きる。
- (2) クラスタリング結果によると、上位5までのクラスタ、上位10までのクラスタの特許件数でも、それぞれ57.2%、72.0%を占めるに留まり、上位14までのクラスタが1,000件を超え、学術研究分野が上位3クラスタで81.9%占めていたことと比較すると多様化・分散している。特許の場合、特許の権利範囲が明確に請求項で規定され、技術的に関連のある特許として引用関係が形成されているので、学術研究論文の引用よりは厳密に技術関係が定義されることが、クラスタリング結果に反映していると考えられる。
 - (3) 平均クラスタリング係数については、クラスタ間でばらつきがあるが、クラスタ#1が2011-2013年以降、0.5台、クラスタ#2～#3が、0.2台～0.5台と比較的低く、クラスタ#4～#5が、0.4台～0.6台となっており、学術研究分野の平均クラスタリング係数と比較すると若干低く、複数の技術間が密に結合しているというよりも、特定の2技術間との結合が多いことを反映していると考えられる⁵⁷。
 - (4) ロボットは、マニピュレータ (B25J) を中心に、制御 (G05)、計算 (G06)、計測・試験 (G01) などの基盤的技術を形成するとともに、応用分野の技術である、医学等 (A61)、家電等 (A47)、鉄道以外の陸上車両 (B62)、溶接等 (B23)、機械要素等 (F16)、運搬・包装等 (B65)、農業 (A01) などの技術との組み合わせで形成されていることが、知識結合ネットワークの構築と構造の解明によっても裏付けられた。
 - (5) 90年代の産業用ロボットの成長期には、産業用アプリケーションとして、マニピュレータなどのロボットの基盤技術と溶接、塗装、半導体デバイスなどの技術との知識結合が抽出され、2000年代以降には、ゲーム/アミューズメント、家電、医療・ヘルスケア関係の技術との知識結合が形成されていることが抽出され、MM手法による知識結合の形成を分析することで、研究開発の進捗や社会実装の度合いを把握できていることを明らかにした。
 - (6) 医療・ヘルスケア分野のロボット技術は、ロボットやロボットハンド・フィンガーの制御などの基盤技術を共通技術としつつ医学等 (A61) の技術を取り入れ

⁵⁷ 技術開発分野（特許）の平均次数中心性は、0.1台～0.4台と低い。学術研究分野のアプリケーション分野が多いクラスタ#2 (Robot application systems) や Surgery を中心に様々な分野と結合するクラスタ#3 (Surgery) の平均次数中心性と値が近いことから、特許の方が特定の技術開発分野（特許）との結びつきによりグループ形成されており、その結果、カテゴリが多くなり多様化していると考えられる。

開発されていることが、クラスタ・ネットワーク分析、知識結合ネットワークの構造から抽出された。例えば、手術用ロボットは、ロボット制御システム (Robot control systems) やロボット機構制御 (Robot mechanism & control systems) のサブクラスタと同じロボット操作制御システム (Control systems for robot operations) のクラスタ # 4 に属しており、これらの間で関連した技術が共通技術として含まれることを示している。

- (7) MM 手法により分析した特許データに基づくクラスタごとの知識結合ネットワークの構築と特徴量の抽出により、技術開発分野 (特許) の知識結合の形成が、社会実装、実用化の度合いを把握できていることが文献および専門家の知見と評価により明らかになった。

第5章 機関の技術ポートフォリオと技術経営

第4章では、クラスタ・ネットワーク分析と知識結合の計測・分析の両方を適用することで、学術研究分野群、技術分野群ごとに知識結合ネットワークを構築し、それぞれの群からハブ、コア、サブコア、周辺をなす分野を抽出することで、関連する技術やアプリケーションの集合であるクラスタごとに、知識結合の特徴を把握することができることを示した。

ロボットを構成する技術は、図4-6の通り、IPC コードベースで見ても、B25、G05、G06、B23、G01、A61、B62、B65などの限られた技術分野に集中しており、機関間のIPC コードベースでの特許ポートフォリオを比較すると、手術用ロボットに特化したIntuitive surgical Inc.や家庭用掃除ロボットを開発販売するiRobotなど突出した相違がない限り、その特許ポートフォリオは似通っており、その相違を把握することは容易ではない。特に、企業の場合、競合分析やM&Aなどの検討において、どの技術分野で競合するのか、技術の強み・弱みがどこにあるのか、あるいは、M&Aやアライアンスにより技術の補完や協業シナジーがどれだけあるのかを判断することは重要である。特許はそれを知る手がかりとしては重要な情報リソースではあるが、ロボットのように様々な技術の複合体でありながら、比較的似通った技術に集中している場合にはIPCコードなどの特許分類で分析することは大まかな傾向は掴めるものの機関間の相違を比較する場合難しいことがわかった。IPCコードによる特許ポートフォリオ分析では特許の相違を必ずしもうまく計測できないとの先行研究もある[102]。

本章では、その課題を克服するため、技術ポートフォリオを表す特徴ベクトルをIPCコードで表す特許ポートフォリオに加え、第3章3.2.7で新しく定義した知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオを導入し、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオによる特徴ベクトルを導入することで容易に機関間の相違を判断できること、その応用として、機関の競合分析、技術補完分析に応用可能であることを示す。

5.1 機関の技術ポートフォリオの計測

図5-1は、それぞれ特許保有上位20機関における特許ポートフォリオであるIPC

コードの件数分布を示す。上位20機関の略号と名称は、表5-1に掲載した⁵⁸。IPCコードの分布は、B25（マニピュレータ）、G05（制御）、およびG06（計算）が、ロボットにおける主要な技術のため、B25とG05は図5-1のすべての機関で特許を有しており、G06はほとんどの機関が保有している。一方、B25、G05、G06以外のIPCコードに、各機関の特徴が表れている。Intuitive Surgical Inc.が突出して、A61（医学等）が高いシェアであるが、シーメンス、上海交通大学（University of Shanghai Jiaotong）、KUKA、ソニー、パナソニック、サムソンもA61の特許を取得している。

表 5-1 特許保有上位20機関の略号と機関名

略号	機関名	略号	機関名
ALLM	ABB INC	NPDE	DENSO CORP
FUFA	FANUC LTD	SGCC	STATE GRID CORPORATION
GLDS	LG ELECTRONICS CO LTD	SHIH	SEIKO EPSON CORP
HOND	HONDA MOTOR CO LTD	SIEI	SIEMENS CORP
IROB	IROBOT CORP	SMSU	SAMSUNG CORP
ITVS	INTUITIVE SURGICAL INC	SONY	SONY CORP
KAWJ	KAWASAKI HEAVY IND LTD	TOKE	TOSHIBA CORP
KUKA	KUKA ROBOT CO LTD	TOYT	TOYOTA MOTOR CORP
MATU	PANASONIC CORP	USJT	UNIV SHANGHAI JIAOTONG
MITQ	MITSUBISHI ELECTRIC CORP	YASW	YASKAWA ELECTRIC CORP

これらの企業は、ホームページ（[53][75][76][80]）によれば、外科用ロボットシステムへの投資や、医療およびヘルスケア事業を行っている。上海交通大学（University of Shanghai Jiaotong）[76]は医療用ロボティクス研究所を設立し、医療用ロボティクスおよび関連技術を研究教育している。家庭用掃除ロボットを開発販売している iRobot や LG Electronics、サムソン、東芝は、A47の特許を保有している。このように、ある程度までは、登録された特許の保有分布をみることで、機関間の相違や特徴を推測することができるが、ロボットに関する特許のIPCコードの分布は互いに似通っている。そのため、IPCコードの分布の違いから、機関間の相違を見分けることは必ずしも容易ではない。例えば、産業用ロボットメーカーは、ファナック、安川電機、ABB、KUKAの他、川崎重工業、デンソー、パナソニック、三菱電機、セイコーエプソンなどであるが、これらの産業用ロボットメーカーのほとんどはB25、G05、およびG06の特許を保有している。一方、本田技研工業、ソニー、トヨタ自動車も同様にB25、G05、G06を保有しており、産業用ロボットメーカーとそれ以外の企業とを区別することは難しいことに直面す

⁵⁸ 上位50機関などの機関の略号と名称は、Appendix 付表2参照のこと。

る。

Intuitive Surgical Inc.は、医療用および手術用ロボットの開発と販売に特化しており、A61（医学等）の特許に集中していること、iRobot は Roomba と呼ばれる家庭用掃除ロボットの開発・販売をしていることから、A47 と、B25、G05、G06 の特許も保有していることは想像できるが、これらの会社に関する知識がなければ IPC コードの分布特性から明確に識別するのは容易ではない。

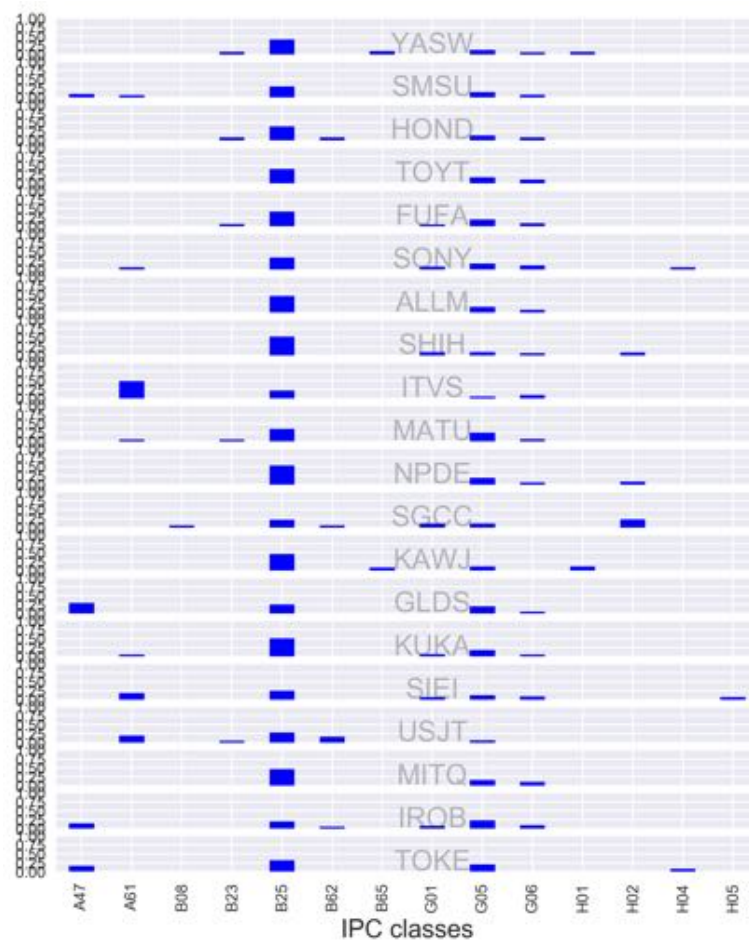


図 5-1 機関の特許ポートフォリオ（上位20機関）

そこで、第4章で得られた機関が保有する特許の特許分類がほぼ同じでも、知識結合ネットワークの構造は異なっていることと、クラスタリング結果の各クラスは技術的に関連性のあるグループにカテゴリ分けされているので、クラスタごとの特許の保有件数の分布は、その機関が注力するロボットのアプリケーションを反映していることの知見を活用して、知識結合を形成する IPC コードのペアを特徴ベクトルとした「知識結合

ポートフォリオ」とクラスタごとの保有特許件数のシェアを特徴ベクトルとした「クラスタポートフォリオ」で比較することで、機関間の技術ポートフォリオの差異がより明確に得られると気づき、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオを新たに定義し、計測した。

図5-2は、上位20機関について、知識結合したIPCコードのペアの件数の分布を表す。B25と知識結合するG05、G06、A61、A47、B23、F16、H01、H02などのほか、G05とG06、G01とG05などの知識結合ペアがあり、B25-G05のシェアが大きい機関が多く、Intuitive Surgical Inc.は、A61-B25のシェアが大きく、掃除ロボットを開発・販売するiRobotやLG Electronics、東芝などは、A47-B25のシェアが、安川電機や川崎重工業は、B25-H01、B25-B65、B65-H01のシェアが他の機関より大きいなどの特徴が読み取れ、基本的な分布は似通っているものの、特許ポートフォリオよりは、知識結合ポートフォリオの方が、その差異がより明確に現れている。

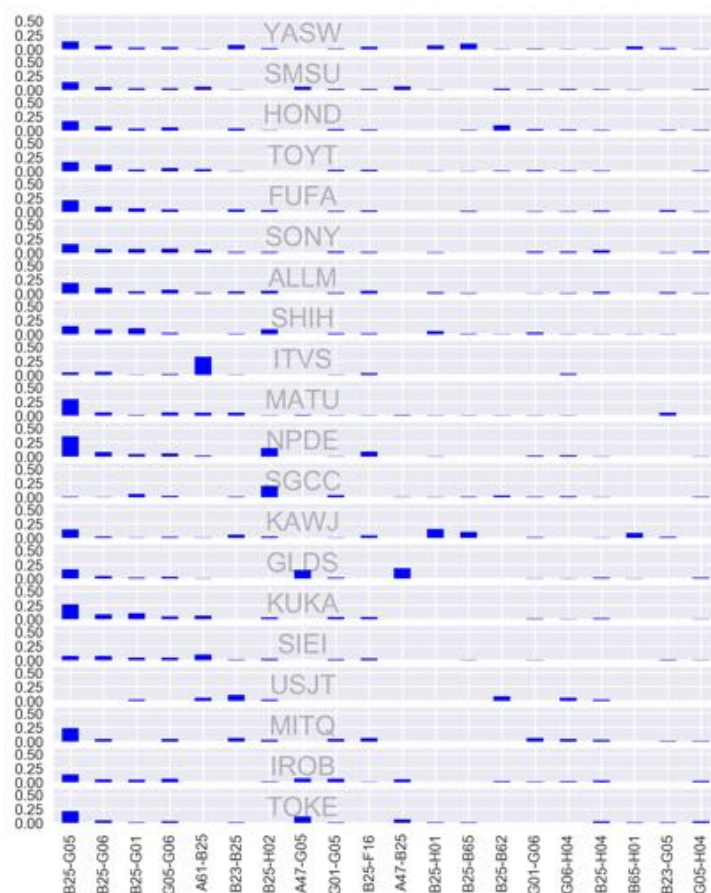


図 5-2 機関の知識結合ポートフォリオ（上位20機関）

一方、クラスタポートフォリオの分布は、図5-3に示すようにIPC コードの特許ポートフォリオよりも多様化していることがわかる。第4章で述べたように、クラスタ番号により、各クラスタは引用関係によりある技術的に関連性のあるグループをなす。したがって、クラスタ番号を特徴ベクトルとしたクラスタポートフォリオは、技術ポートフォリオの相違を特許ポートフォリオよりも明確に抽出できることを、PICMET2018のConferenceにて示した。[50]

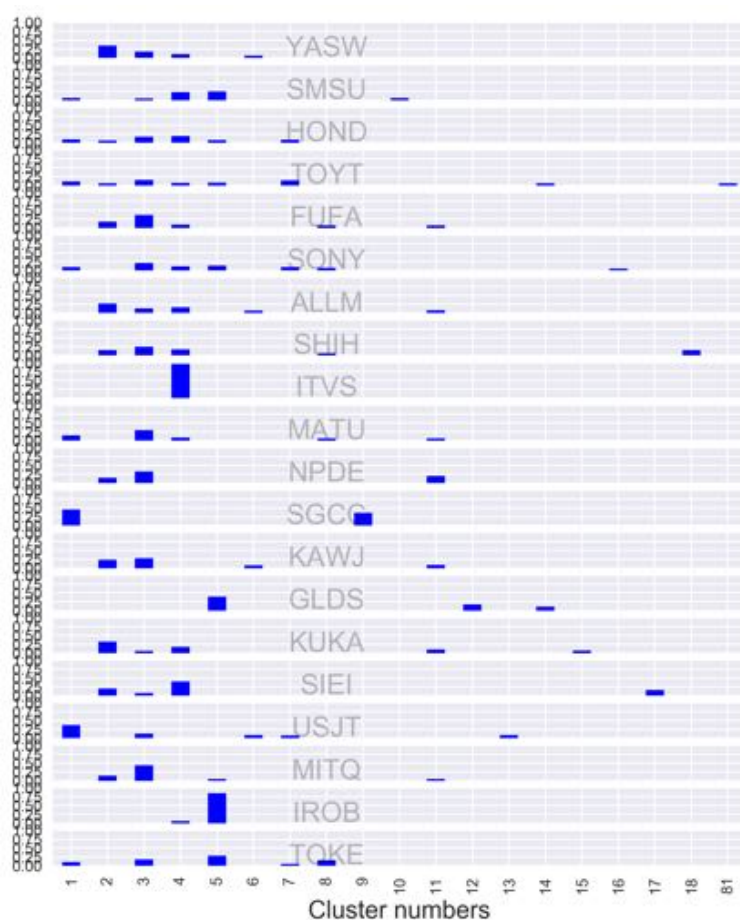


図 5-3 機関のクラスタポートフォリオ（上位20機関）

クラスタ分析結果をより注意深くみると、機関のより多くの特性を捉えることができる。たとえば、大手産業用ロボットメーカーは、クラスタ#2（Industrial Robots）、#3（Welding & machining robots）、#4（Control systems for robot operation）の特許を登録している。クラスタ#11（Emergency & safety control systems）についても、ファナック、ABB、KUKA、川崎重工業、デンソーなどの多くの産業用ロボットメーカ

が特許を取得している。

ソニー、パナソニック、トヨタ自動車、本田技研工業などのサービス&コミュニケーションロボットを開発する企業は、Cluster #1（サービスロボット）、#4（Control systems for robot operation）の特許を取得している。

クラスタ#12以降のマイナーなクラスタは機関の特性を表す。例えば、クラスタ#17は放射線治療とX線システムのクラスタである。シーメンスは医療およびヘルスケアのための放射線治療装置を開発し販売しており、シーメンスはそれらの特許を保有している。クラスタ#18は、圧電または超音波センサ／駆動装置のクラスタである。セイコーエプソンは、インクジェットプリンタメーカーの一つであり、ピエゾ式の圧電センサの特許を多く保有している。クラスタ#81は安全監視・制御システムのクラスタである。トヨタ自動車は、自動車の安全制御技術をロボット開発にも応用し、多くの特許を取得したと考えられる。

一方、Intuitive Surgical Inc.、中国国家電網（State Grid Corporation of China）、iRobotでは、1つか2つのクラスタに集中した分布となっており、産業用ロボットメーカーや大手企業が広くクラスタに分布して特許を保有しているのに対して、特徴的である。

知識結合ポートフォリオは、機関が有する特許の知識結合ネットワークの構造、すなわち、技術と技術との結合・融合の仕方を特徴ベクトルで表していることから、特に、機関の技術的な潜在力や能力を反映する指標と考えられる。また、クラスタポートフォリオは、各クラスタに属する特許の分布を表すものであるが、各クラスタは、サービスロボット、手術用ロボット、溶接ロボットなどの特定のアプリケーションを反映した引用関係で結びついた技術群の集合とみることができ、アプリケーションを実現するための技術的な潜在力や能力を反映する指標と考えられる。

知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオの2つのポートフォリオを用いて、機関間の技術ポートフォリオの距離の測定や競合分析、補完分析への応用へと展開する。

5.2 機関間の技術ポートフォリオの相違の測定

5.2.1 機関間の技術ポートフォリオのコサイン距離（Cosine distance）

特許ポートフォリオでは、複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合に、機関間の相違の判別が難しかった問題を解決するため、本研究で新しく定義し導入した知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオは、主要なアプリケーションごとに、知識結合の構造や特徴を把握するために開発したMM手法の中で、知識結合

の構造は、保有する特許分類の技術が同様であっても機関ごとで知識結合の構造は異なること、クラスタリング後の各クラスは、それぞれ引用によって関連づけられた技術群をなしていることの知見を活用して開発してものである。

図5-4、図5-5および図5-6は、機関の2011年から2016年までの期間の特許ポートフォリオ、知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオから、第3章3.2.7の式3-27、3-28、3-29により、コサイン距離を計算した結果である。1に近ければ近いほど、両機関の技術ポートフォリオのコサイン距離は近い、すなわち、ポートフォリオが似ていることを示す。特許ポートフォリオの場合、図5-4の通り、機関間のコサイン距離は、Intuitive Surgical Inc.、中国国家電網（State Grid Corporation of China）、上海交通大学（University of Shanghai Jiaotong）、LG Electronicsを除けば、0.8以上の高い値となっており、機関間の特許ポートフォリオがかなり似通った結果となっている。

産業用ロボットメーカーであるABB、KUKA、ファナック、安川電機、川崎重工業、三菱電機、デンソーとの間のコサイン距離は、概ね0.95以上であるが、ソニー、本田技研工場、トヨタ自動車との間も、ほぼ0.9以上と高く、それらの間での相違が特許ポートフォリオでははっきりしない。

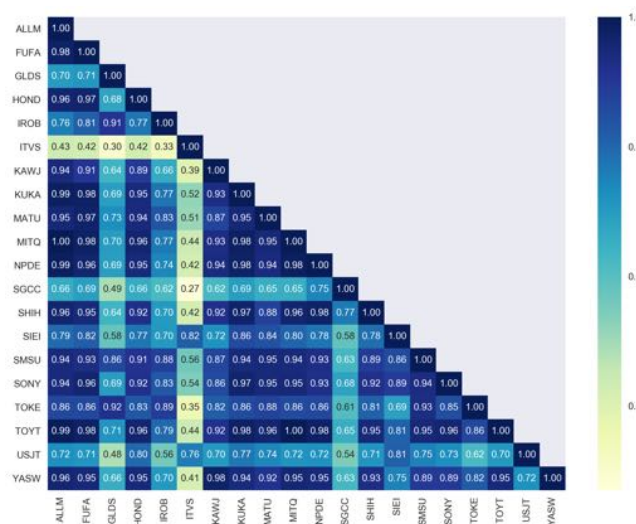


図 5-4 特許ポートフォリオの機関間の相違（20機関）

このため、ロボットのように複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合には、各機関の保有する特許ポートフォリオでは、機関間の保有する技術の相違を計測することが難しい。そこで、保有する特許が IPC コードの特許分類が同様であつ

でも、IPC コード間の知識結合ネットワークの構造は変わりうるという第4章で得られた知見を技術ポートフォリオの分析に応用できると考え、知識結合ポートフォリオという新しい定義を導入し、コサイン距離を算出した結果が、図5-5である。

図5-5の知識結合ポートフォリオのコサイン距離では、0.8以上の高い値も多くあるが、特許ポートフォリオのコサイン距離と比較すると、ポートフォリオの差が大きくなっており、特許ポートフォリオよりは相違をより明確に計測できることがわかった。0.9を超える知識結合ポートフォリオのコサイン距離の機関間についてみると、ABB とファナックが、KUKA、パナソニック、三菱電機、デンソーの産業ロボットメーカーやソニーおよびトヨタ自動車との間で0.9以上であり、安川電機と川崎重工業の間でも0.92と高い値となった。図5-2の知識結合ポートフォリオで比較すると、ABB からトヨタ自動車までの知識結合ポートフォリオはほぼ似通っており、安川電機と川崎重工業は、B25、B65、H01 との間の知識結合が他の機関と比べると強いことを反映しているものと考えられる。

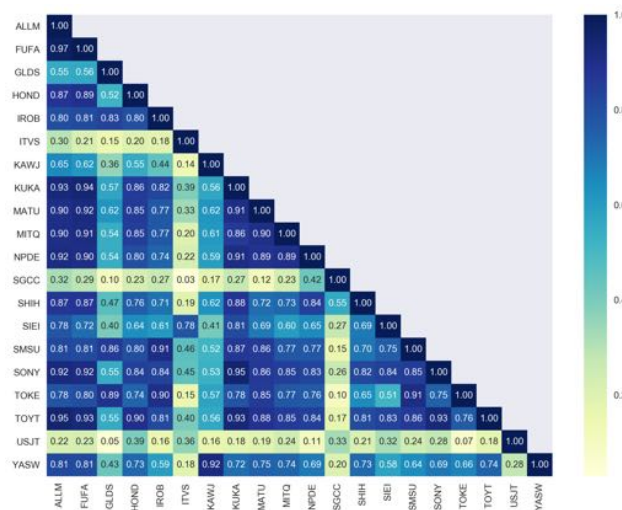


図 5-5 知識結合ポートフォリオの機関間の相違（20機関）

図5-6はクラスタポートフォリオのコサイン距離を表すが、産業用ロボットメーカーはお互い高い値となり、ソニー、本田技研工業、トヨタ自動車などのパートナーロボットを開発している企業、家庭用掃除ロボットを開発販売する iRobot、サムソン、LG Electronics などがお互い高いコサイン距離の値となっており、実際のロボットビジネスに近い計算結果となった。

上位20機関での機関間の技術ポートフォリオのコサイン距離により、技術ポートフ

オリオの相違が分解できることが分かったので、機関を上位50機関に拡張して、各技術ポートフォリオのコサイン距離を計算した（図5-7、図5-8、図5-9）⁵⁹。

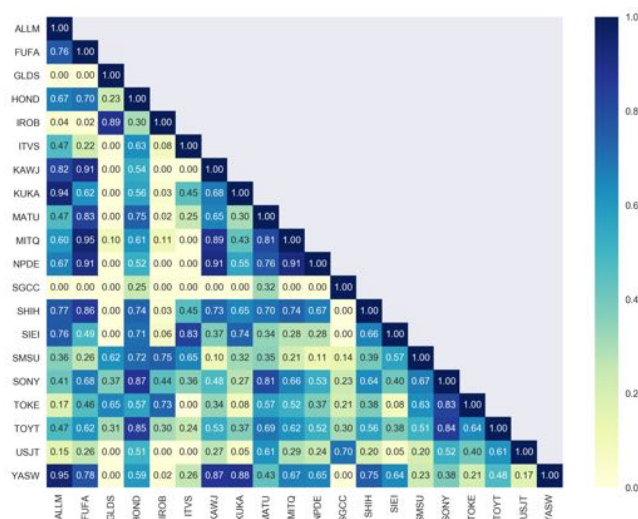


図 5-6 クラスポートフォリオの機関間の相違（20機関）

図5-7（特許ポートフォリオのヒートマップ）によると、Applied Materials Inc.、Ethicon Inc.、Intuitive Surgical Inc.、などの一部の機関が低い値であるのを除き、比較的高いコサイン距離となっている。特に、産業用ロボットメーカーであるファナック、安川電機、ABB、KUKA、川崎重工業、三菱電機、デンソー、セイコーエプソンやダイヘン、サムソン、ソニー、本田技研工業、トヨタ自動車、パナソニック、キャノンなどとの間でも高い値のコサイン距離となっている。中国の大学である北京理工大学 (Beijing Technology Inst.)、ハルビン工程大学 (Univ. Harbin Eng.)、上海大学 (Univ. Shanghai)、上海交通大学 (University of Shanghai Jiaotong)、華南理工大学 (Univ. South China Technology)、東南大学 (Univ. Dongnan)、浙江大学 (Univ. Zhejiang)、ハルビン工業大学 (Harbin Inst Technology) などの間では、0.9以上とかなり高い値である。

図5-8は、上位50機関の間の知識結合ポートフォリオのコサイン距離のヒートマップを示す。産業用ロボットメーカー間、ソニー、トヨタ自動車、本田技研工業間、iRobot とサムソン、LG Electronics、東芝間などが高いコサイン距離であるが、特許ポートフォリオと比較すると、高い値のコサイン距離は限られ、特許ポートフォリオは似ていても、知識結合ポートフォリオでは、相違があることを示している。特に、中国の大学間においては、特許ポートフォリオにおけるコサイン距離が0.9以上と高い値で

⁵⁹ Appendix 付表3、4、5に、それぞれのコサイン距離の計測値を掲載した。

あるが、知識結合ポートフォリオでは低い値となっており、大学間で研究開発分野に多様性があり、差別化されていると考えられる。

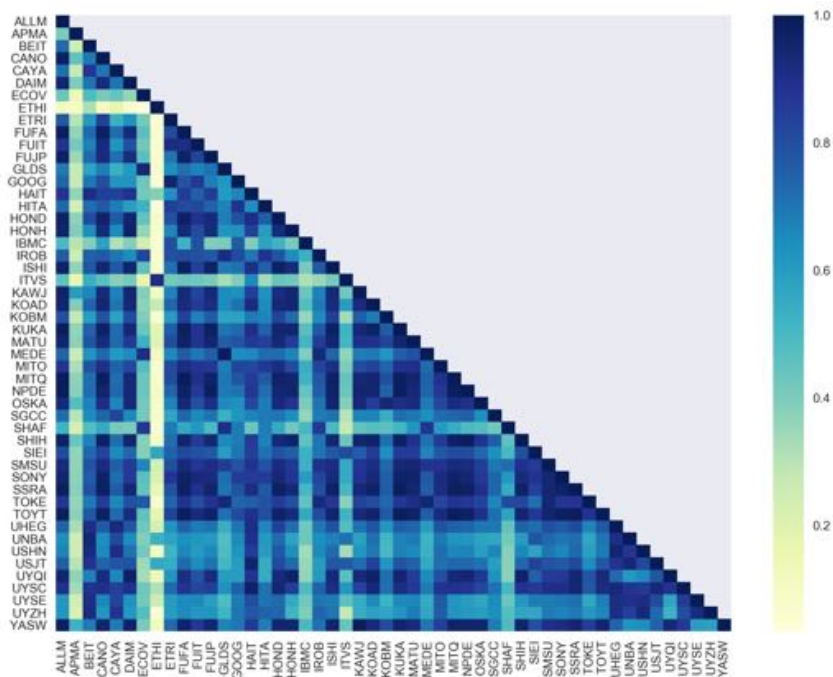


図 5-7 特許ポートフォリオの機関間の相違（50機関）

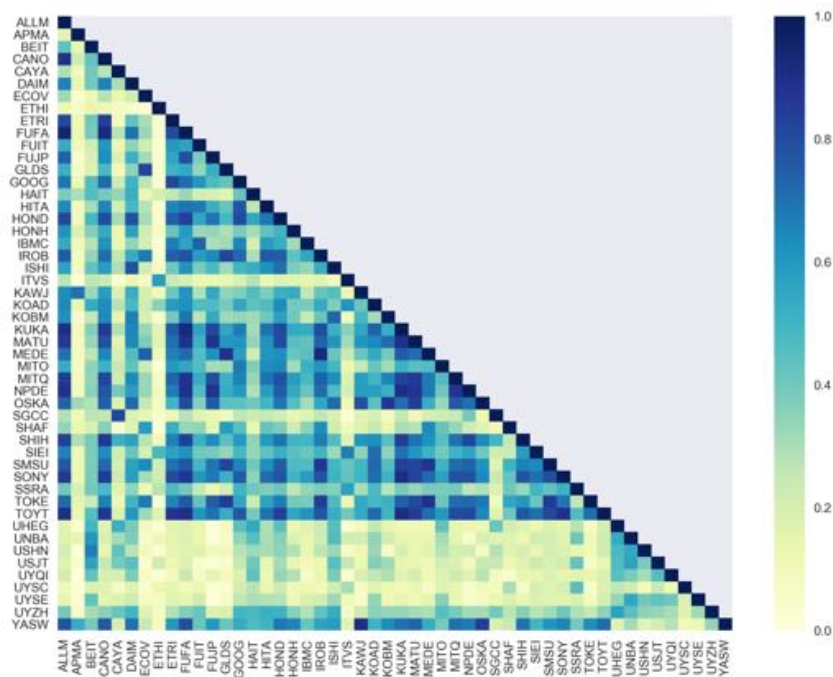


図 5-8 知識結合ポートフォリオの機関間の相違（50機関）

図 5-9 は、クラスタポートフォリオのコサイン距離のヒートマップを表す。クラスタポートフォリオの場合は、概ね、産業用ロボットメーカー間、中国の大学間、本田技研工業、トヨタ自動車、ソニーの間など実際の事業活動やアプリケーションに近い形で相違が計測されている。一方、Applied Material Inc.と Daimler-Benz AG のように、IPC コードでは、Applied Material Inc.が、B25、B65、C23、H01 の特許、Daimler-Benz AG が B23、B25、B62、G05 と特許ポートフォリオが異なるにもかかわらず、全ての特許がクラスタ # 2 (Industrial robots) に割り振られたために、コサイン距離が 1.0、すなわち、同じクラスタポートフォリオとして位置づけられた機関もあった。クラスタ分類は、表 4-26 によれば、ロボットの応用分野あるいは応用される市場ごとにカテゴリ分けされているとみなすことができることから、クラスタポートフォリオは、ロボット技術が応用される市場やアプリケーションを反映していると考えられる。

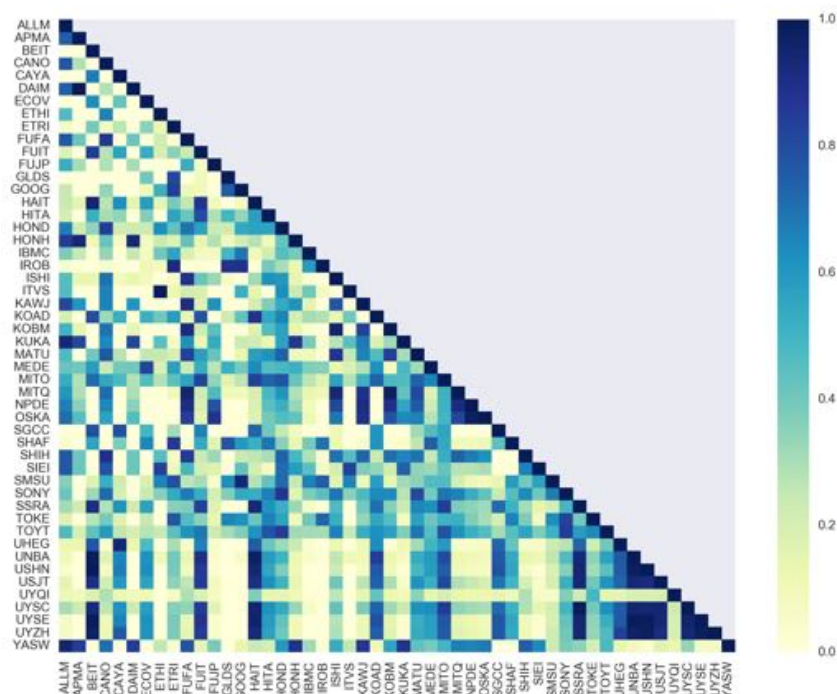


図 5-9 クラスタポートフォリオの機関間の相違 (50機関)

5.2.2 中国の大学・研究機関の技術ポートフォリオの相違

クラスタポートフォリオに基づくコサイン距離で高い値となっているのは、中国の大

学間である。中国の大学は、特許ポートフォリオとクラスタポートフォリオのコサイン距離の値は高い一方、知識結合ポートフォリオのコサイン距離は、低い値となった。クラスタ#1 (Service robots) の急進は、中国特許庁への登録がクラスタ#1に集中していることを反映しているが、特許保有上位機関に中国の大学が多くランクインしている。中国におけるロボットの研究開発は企業ではなく、大学や研究機関を中心として推進していることが特徴である。特許ポートフォリオとクラスタポートフォリオのコサイン距離が中国の大学間で高いという結果から、中国の大学は、サービスロボット分野でのロボットの研究開発を行なっていると考えられる。一方、知識結合ポートフォリオのコサイン距離が中国の大学間で低い値となっており、中国の大学でのロボットの研究開発が、大学間で差別化が図られている可能性がある。そこで、中国の大学と企業について、特許、知識結合、クラスタの各ポートフォリオの比較検討を行った。

図5-10、図5-11、図5-12は、それぞれ、中国の大学、企業について、特許ポートフォリオ、知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオをグラフ化したものである。

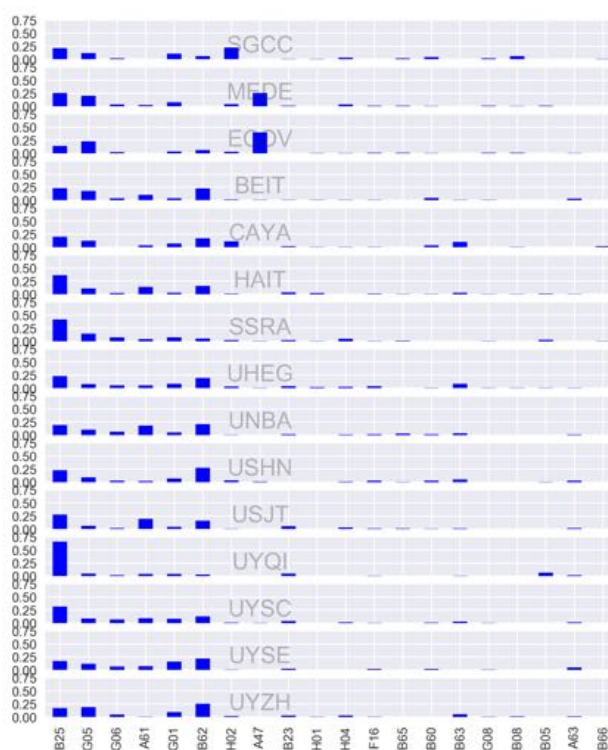


図 5-10 中国の特許保有上位機関間の特許ポートフォリオ

図5-10は、中国の企業である中国国家電網 (State Grid Corporation of China)、

美的集団 (Midea Group)、Ecovacs Robot (中国の家庭用掃除ロボット企業)、新松机器人 (Siasun Robot Automation Co Ltd) [79]の4社と11大学・研究機関の特許ポートフォリオを比較したものである。企業4社は、B25、G01、G05、C06などのロボットの基盤技術に関する特許と、それぞれの事業を反映して、中国国家電網 (State Grid Corporation of China) がH02を、美的集団 (Midea Group) と Ecovacs Robot がA47(家電等)の特許のウェイトが大きい。新松机器人 (Siasun Robot Automation Co Ltd) は、中国最大の産業用ロボットメーカーで、B25、G05の順でウェイトが大きく、G01、G06、H04などロボットの機能を発揮する技術の他、B62、A61、B05、B23など産業用(溶接、塗装など)、医療用の応用分野の特許も保有している。中国11大学・研究機関については、総じて、B25、G01、G05、G06を保有しているほか、B62(鉄道以外の陸上車両)の特許を保有しており、移動体のロボット関係の研究開発が多いことが伺われる。新松机器人のホームページ[79]をみると、アーク溶接、スポット溶接、運送・組立型AGV、クリーンルーム用ロボット、サービスロボットを事業としており、特許ポートフォリオはそれを反映していることがわかった。

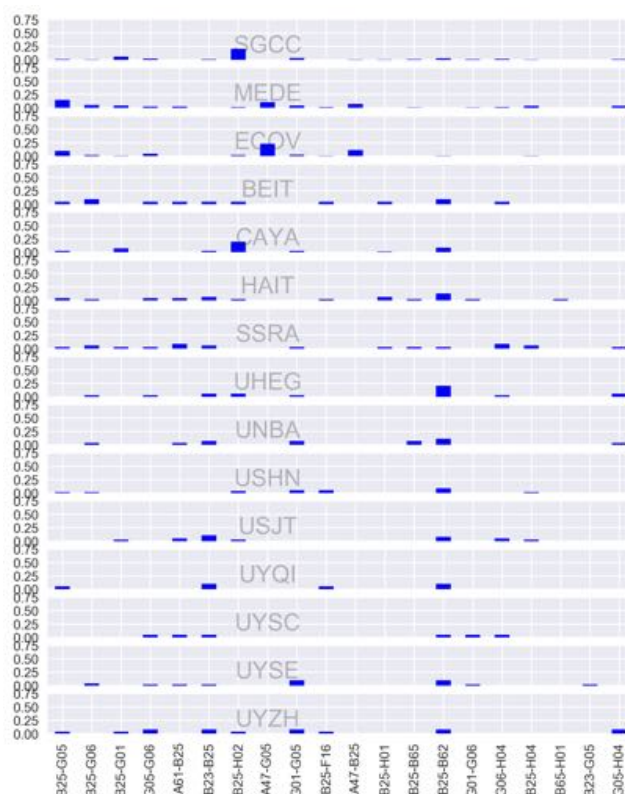


図 5-11 中国の特許保有上位機関間の知識結合ポートフォリオ

また、A61（医学等）の特許を保有している大学が多く、特に、北京理工大学（Beijing Technology Inst.）、ハルビン工業大学（Harbin Inst Technology）、北京航空航天大学（Univ. Beijing Aviation Spaceflight）、上海交通大学は保有シェアが比較的高く、医療用ロボットの研究開発に注力していることがわかる。他の大学とのコサイン距離が小さかった清華大学（Univ. Qinghua）については、他の大学と特許ポートフォリオが異なり、B25のシェアが最も大きく、B23（溶接等）、B05（スプレー技術）があるなど産業用ロボットに関する研究開発が行われていると考えられる。

図5-11は、中国の4企業と11大学・研究機関について、知識結合ポートフォリオを比較したものである。IPCコードの知識結合のペアは、特許ポートフォリオよりもそれぞれの機関の特徴を反映したポートフォリオとなっている。中国の大学は、B25-B62のシェアが比較的高く、特に、ハルビン工業大学（Harbin Inst Technology）とハルビン工程大学（Univ. Harbin Eng.）、北京航空航天大学（Univ. Beijing Aviation Spaceflight）は、他の知識結合のペアよりも最もシェアが高い。特徴的な知識結合のペアの特許を保有する大学・研究機関をあげると、中国科学院瀋陽自動化設備研究所（Chinese Academy of Science Shenyang Automation Institute）が、B25-H02（発電・変電・配電技術）とB25-B62、東南大学（Univ. Dongnan）がG01-G05とB25-B62、上海交通大学（University of Shanghai Jiaotong）がB23-B25、B25-B62などを保有し、清華大学（Univ. Qinghua）は、B25とG05、B23、F16、B62のそれぞれと知識結合を形成している。図5-2の特許保有上位20機関と比較すると、特許保有上位20機関が、B25-G05、B25-G06のロボットの基盤的技術のウエイトが高いのに比して、中国の大学は、B25-B62のウエイトが高いのが特徴的である。

図5-12は、中国の4企業、11大学・研究機関について、クラスタポートフォリオを比較したものである。クラスタ#1のシェアが高い機関がほとんどであるが、清華大学（Univ. Qinghua）がクラスタ#8、中国科学院瀋陽自動化設備研究所（Chinese Academy of Science Shenyang Automation Institute）とハルビン工程大学（Univ. Harbin Eng.）がクラスタ#9、10のシェアが高いのが特徴的で、これらのポートフォリオの相違が、図5-9のコサイン距離に反映されている。

中国企業のクラスタポートフォリオをみると、中国国家電網は、クラスタ#1に加え、クラスタ#9（Inspection robots）に特化している。中国国家電網は、配電線の検査ロボット開発に力を入れているとあり、実際の取り組みに一致している[86]。美的集団[65]は、クラスタ#1のウエイトが他の中国機関と比較し低い一方、クラスタ#2（Industrial robots）、掃除ロボットのクラスタであるクラスタ#5、#12とリハビリ

テーションロボットのクラスタ#7のウェイトがほぼ同様のウェイトを占めており、家庭用掃除ロボットの他、産業用ロボットも手がけていることが伺われる。美的集団のホームページ[65]で事業活動をみると、空調機器、総合家電メーカーであるとともに、KUKAを買収して産業用ロボットに参入し、ロボット事業にも注力している。Ecovas Roboticsは、クラスタ#1のほか、掃除ロボットのクラスタ#5、12に特化しており、Ecovas Roboticsのホームページ[21]に一致している。

中国の企業、大学・研究機関について、事前の知識がなくとも、入手可能な特許情報に基づき計測した知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオを分析することで、各機関が取り組んでいる研究や技術開発、事業の傾向を知ることができることが確認できた。

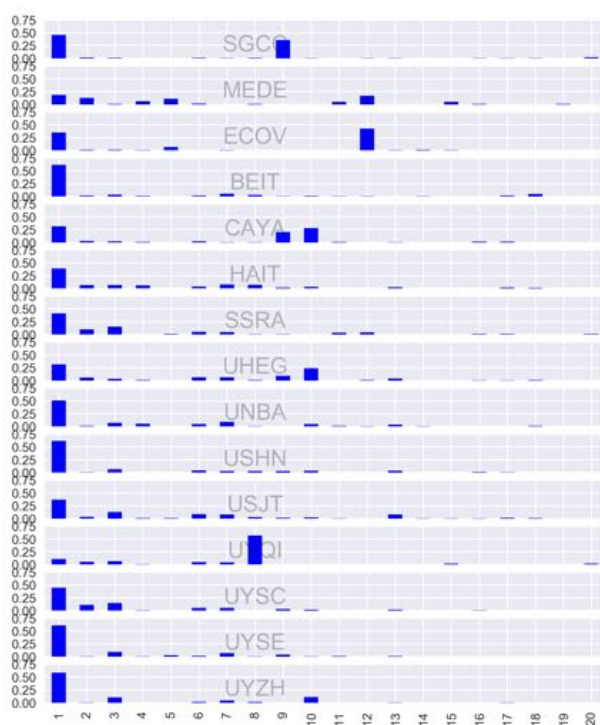


図 5-12 中国の特許保有上位機関間のクラスタポートフォリオ

5.3 機関間のポートフォリオ間の距離

5.2において、機関間の知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオにより機関の技術的特徴を把握でき、そのポートフォリオの相違が、コサイン距離により計測できることを示した。機関ごとに、X軸を知識結合ポートフォリオのコサイン距離、Y軸

をクラスタポートフォリオのコサイン距離をプロットすることで、各機関がどの機関とポートフォリオが近い、すなわち、競合関係にあるのかをXY座標上で確認できる。

図5-13～16は、安川電機、ソニー、美的集団、新松机器人について、それぞれ、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオの機関間のコサイン距離をプロットしたものである。自らの技術ポートフォリオのコサイン距離は、1.0となるので、XY座標の(1.0,1.0)にある機関が、当該機関となる⁶⁰。コサイン距離が1.0に近づけば近づくほど、両者の技術ポートフォリオは近いこととなる。

図5-13にて、安川電機と特許保有上位50機関との技術ポートフォリオのコサイン距離をみると、最も近い位置にある機関は川崎重工業で、ABB、ファナックが知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオのコサイン距離が両方とも0.75より大きい。川崎重工業は、産業用ロボットと半導体ロボットを開発製造する産業用ロボットメーカーで、産業用と半導体用のロボットを開発製造する安川電機で実際のビジネスでも競合している。また、知識結合ポートフォリオのコサイン距離が0.91となったダイヘンは、物流システムメーカーであるが溶接ロボットについても製造販売しており、溶接ロボットでは競合企業の1つである。

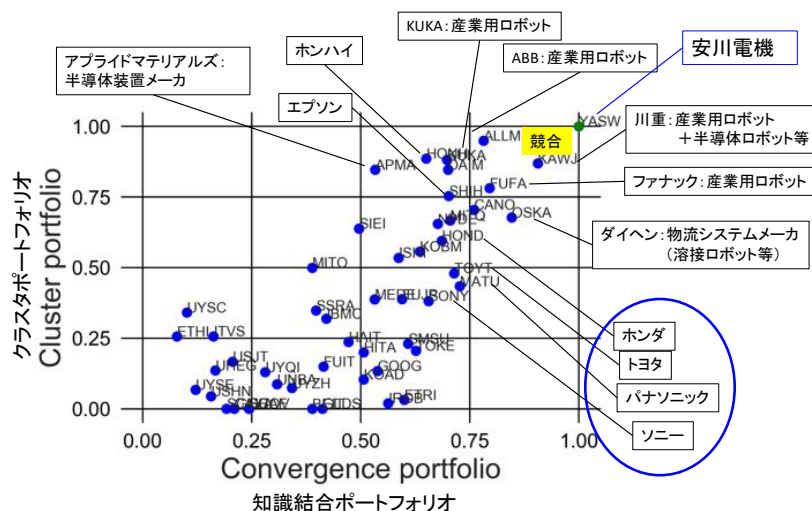


図 5-13 機関の技術ポートフォリオ間のコサイン距離 (安川電機)

コサイン距離が0.75よりは下回るが、KUKA、三菱電機、エプソンなども産業用ロ

⁶⁰ 自らのコサイン距離は、定義により、1.0となる。

⁶¹ 図の略号は機関を表し、略号の機関名は、付表2参照。

ロボットを製造販売しており、競合企業である。アプライドマテリアルズは、半導体製造装置メーカーであるが、クラスポートフォリオが、0.95 と高いのは、知的財産の専門家によると、アプライドマテリアルズは、半導体用ロボットを購入するだけでなく、自らも半導体を搬送するためなどのロボットも開発していることから、クラスポートフォリオの距離が近くなったとのことである。しかしながら、アプライドマテリアルズとは競合している訳ではなく、半導体用ロボットの購入者である。また、特許ポートフォリオでは、コサイン距離が近くなり、相違が判別できなかった本田技研工業、トヨタ自動車、ソニー、パナソニックといった企業は、知識結合ポートフォリオのコサイン距離は、0.75 未満で、クラスポートフォリオが、0.3~0.6 の間の領域の位置となっている。また、ホンハイがクラスポートフォリオのコサイン距離が 0.89、知識結合ポートフォリオのコサイン距離が 0.65 と比較的近い位置にあるが、台湾のファウンドリとして半導体を受託製造しており、半導体の製造関係で、ロボットに関する技術開発をしていると考えられる。アプライドマテリアルと同様、現時点で競合している訳ではない。しかしながら、クラスポートフォリオが近いということは、同様のアプリケーションの領域にあることを示しているので、将来の競合相手になるのか、そのアプリケーション分野での協業の可能性があるのかは注視する必要がある。

中国の産業用ロボットメーカーとして成長が著しい新松机器人との間のコサイン距離は、知識結合ポートフォリオ、クラスポートフォリオのコサイン距離が、それぞれ、0.40、0.35 と小さい。総じて、中国の大学・研究機関、企業との間のコサイン距離は、小さくなっている。

図 5-1 4 のソニーについてみると、機関の分布は、安川電機と同様に右肩あがりの分布であるが、機関の位置関係は全く異なる。ソニーと知識結合ポートフォリオ、クラスポートフォリオともに 0.75 以上の機関は、パートナーロボットを開発しているトヨタ自動車、本田技研工業と総合家電メーカーのパナソニックである。ソニーは、一度中止した犬型のペットロボットを AIBO の販売を再開したが、本田技研工業、トヨタ自動車は、パートナーロボットを開発はしているが、事業として製造販売していないので、競合企業とは言えないが、パートナーロボットを開発している企業群の知識結合ポートフォリオとクラスポートフォリオが近くなった。

ファナック、ABB、KUKA の産業用ロボットメーカーとは知識結合ポートフォリオのコサイン距離は高いものの、クラスポートフォリオのコサイン距離が 0.25~0.7 の間にある。知識結合ポートフォリオは近いが競合はない。

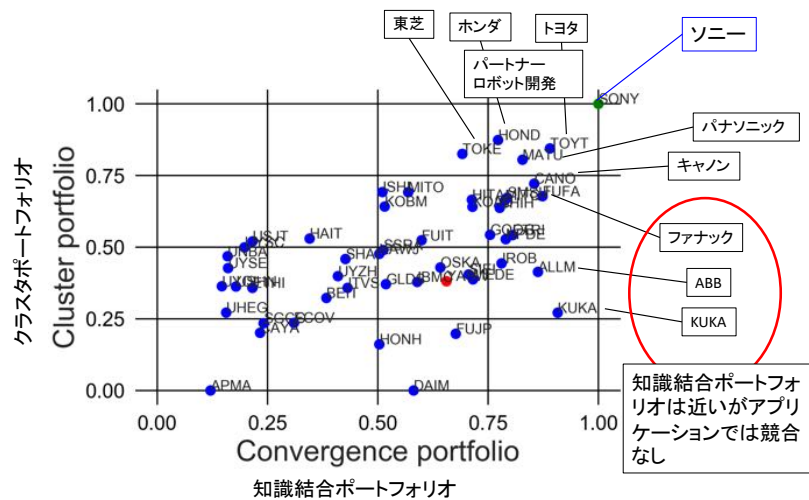


図 5-14 機関の技術ポートフォリオ間のコサイン距離 (ソニー)

図5-15の中国の家電メーカーで、ドイツの産業用ロボットメーカーである KUKA を買収した美的集団をみると、知識結合ポートフォリオとクラスターポートフォリオのコサイン距離が 0.75 以上となる機関はないものの、家庭用掃除ロボットを開発販売する LG Electronics、サムソン、東芝、iRobot は、知識結合ポートフォリオのコサイン距離が、0.9 前後と近く、家庭用掃除ロボットを開発販売する中国企業の Ecovas Robotics とスマート家電の1つとして、ロボット携帯電話や家庭用掃除ロボットを販売するシャープ [77]は、クラスターポートフォリオのコサイン距離が、0.75 以上と近い。美的集団は、家庭用掃除ロボット関係の技術開発を行なっている可能性が高い。買収した KUKA は、知識結合ポートフォリオのコサイン距離が 0.76、クラスターポートフォリオのコサイン距離が 0.48 にあり、それ以外の産業用ロボットメーカーは、KUKA よりコサイン距離が小さい領域に位置している。美的集団のホームページ[65]によれば、美的集団は、エアコンと家電製品を事業の中心として発展してきており、KUKA を買収したものの、事業の主力は、エアコンと家電である。美的集団は、安川電機と産業用ロボットとサービスロボットに関する合弁会社を立ち上げており、家電製品の製造のためにロボットを活用することとリハビリなどのサービス分野でのロボット事業を展開していくことを指向している。

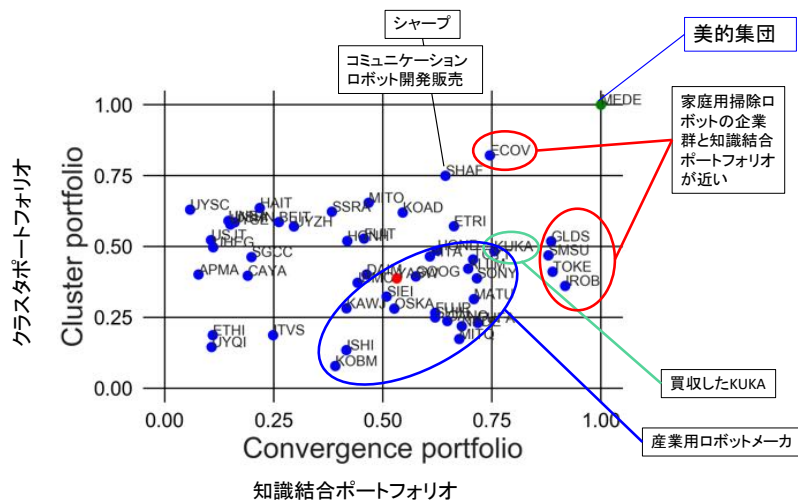


図 5-15 機関の技術ポートフォリオ間のコサイン距離（美的集団）

図5-16の中国の産業用ロボットメーカである新松机器人[79]をみると、安川電機、ソニー、美的集団とは異なり、知識結合ポートフォリオのコサイン距離に近い機関はないという機関マッピングとなっている。クラスポートフォリオのコサイン距離は、中国の大学と0.90以上とかなり近い結果となる一方、産業用ロボットメーカとは、0.5以下とそれほどコサイン距離は近くないこととなった。その原因を探るため、特許上位50機関に入っている中国の4企業の知識結合ネットワークの比較を表5-2にまとめた。

新松机器人とそれ以外の機関との相違は、新松机器人が対角線の要素の値に対して、行列の対角線以外の要素の値が非常に小さいということである。これは、新松机器人が、特許に付与された単一のIPCコードが多く、複数のIPCコードが付与された特許が少ないことを意味している。他の3社は、例えば、中国国家電網では、H02（発電・変電・配電技術）との組み合わせで複数のIPCコードが付与されており、美的集団とEcovas Roboticsは、B25、A47、G05と複数のIPCコードが付与されている。

一方、新松机器人のように、知識結合ポートフォリオのコサイン距離の近い機関がほとんどいないというマッピングになるのは、中国の大学・研究機関に多く、これらの大学・研究機関は、新松机器人と同様に、単一のIPCコードを付与された特許中心で、複数のIPCコードが付与された特許の保有が少ないことを確認した。知的財産の専門家に確認したところ、B25J（マニピュレータ）の特許に関して、中国特許庁と日本の特許庁と比較すると、日本のB25Jを含む特許の方が、中国のB25Jを含む特許より、複数の

特許が付与された特許の割合が多いが、中国特許庁が単独の特許分類を付与する傾向があるかまでは必ずしも言えないが、特許出願が急増している中国で、中国国家電網、美的集団など複数の特許分類が付与された特許を保有する企業もあるので、出願者側に複数の特許分類を付与する意識がないとのことであった。

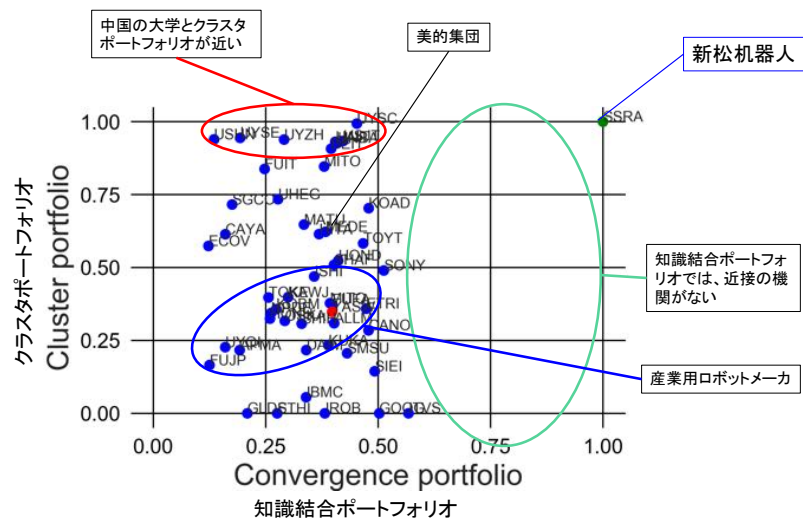


図 5-16 機関の技術ポートフォリオ間のコサイン距離（新松机器人）

表 5-2 中国の特許保有主要企業の知識結合ネットワーク（2011-2016 年）の比較

新松机器人								
	B25	G05	G01	G06	B62	H04	A61	B05
B25	76	1	1	2	1	2	3	
G05	1	26	1	1		1		
G01	1	1	13			1		
G06	2	1		13		3	3	
B62	1				9			
H04	2	1	1	3		8		
A61	3			3			7	
B05								5

中国国家電網												
	H02	B25	G05	G01	B08	B62	B60	H04	B65	G08	G06	G07
H02	196	63	9	10	12	12	3	9		5	2	2
B25	63	184	3	17	14	9	4	1	4	3	1	1
G05	9	3	101	11	1		1	4	1	3	7	1
G01	10	17	11	94	4	12		1	1	4	4	
B08	12	14	1	4	52			2		2		
B62	12	9		12		50	5					
B60	3	4	1			5	37		1		1	
H04	9	1	4	1	2			27		7	5	1
B65		4	1	1			1		17			
G08	5	3	3	4	2			7		17		
G06	2	1	7	4			1	5			16	
G07	2	1	1					1				10

美的集団							
	B25	A47	G05	G01	H02	G06	H04
B25	54	10	21	6	2	8	5
A47	10	54	15	7	3	1	4
G05	21	15	42	6	3	4	5
G01	6	7	6	16	1	1	
H02	2	3	3	1	9		
G06	8	1	4	1		8	2
H04	5	4	5			2	8
A61	4			1			5

Ecocvas						
	A47	G05	B25	B62	G01	H02
A47	99	27	13	11	3	3
G05	27	57	11	1	3	2
B25	13	11	35	1	1	2
B62	11	1	1	16	2	
G01	3	3	1	2	9	1
H02	3	2	2		1	7
G06	1	5	2			5

何れにしても、複数の特許分類が付与された特許が少ないことも含め、機関間の知識結合ネットワークの相違が表れるので、知識結合ポートフォリオによる機関の相違計測は、特許ポートフォリオが似たような分布となるのに対して、機関間の相違がよりよく計測できている。

以上、4社の知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオの特許保有上位50機関とのコサイン距離の比較からも、知識結合ポートフォリオは、当該機関の保有する技術との近さ、クラスタポートフォリオは、アプリケーション分野の近さを反映して計測されていることがわかった。

5.4 機関間の競争状況の把握

5.2において、機関間の知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオの相違が、コサイン距離により計測できることを示した。図5-13～16と同様に、図5-17に、産業用ロボットメーカーであるファナック、ABB、KUKA、川崎重工業、三菱電機、デンソー、産業用ロボット、家庭用掃除ロボットを開発・販売し、総合家電メーカーでもあるパナソニック、パートナーロボット、ペットロボットを開発しているトヨタ自動車、本田技研工業、手術用ロボットのIntuitive Surgical Inc.、家庭用掃除ロボットのiRobot、と特許保有上位20機関で海外の機関であるシーメンス、サムソン、LG Electronics、上海交通大学、中国国家電網の代表的な16機関について、知識結合ポートフォリオ（X軸）とクラスタポートフォリオ（Y軸）とのコサイン距離をプロットした。知識結合ポートフォリオの差異は、保有する特許の技術の差異を、クラスタポートフォリオの差異は、アプリケーションあるいは応用分野の差異を反映していると考えられる。

知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオの機関間のコサイン距離が、機関間の技術やアプリケーションの差異から、競合関係を判断できると考えた。コサイン距離は、1.0に近づけば近づくほど、その機関間は技術ポートフォリオが近いことからクラスタポートフォリオはアプリケーション、知識結合ポートフォリオは技術で競合しているとみる。

図5-17の（1）～（7）は、産業用ロボットメーカー7社について、特許保有上位50社の知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオのコサイン距離をプロットしたが、両ポートフォリオのコサイン距離が概ね0.75～1.0にある場合は、例えば、安川電機とABB、川崎重工業、ファナック、ファナックと三菱電機、デンソー、ABB、デンソーと三菱電機、パナソニックなど、実際でも市場で競合があり、1.0に近いほど競合

関係があると認められる。知識結合ポートフォリオのコサイン距離が 0.75~1.0 であって、クラスタポートフォリオが 0.75 未満の場合は、例えば、安川電機とダイヘン、キャノンとの間、ファナックと本田技研工業、ソニー、トヨタ自動車との間、三菱電機とキャノン、ソニー、トヨタ自動車との間など、知識結合ポートフォリオは近いものの、アプリケーションでは競合が少ないと考えられるが、ファナックと KUKA、不二越の間、三菱電機と ABB、KUKA、不二越の間、デンソーと ABB、KUKA など産業用ロボットメーカーとして競合する場合もある。逆に、クラスタポートフォリオのコサイン距離が概ね 0.75~1.0 であって、知識結合ポートフォリオが 0.75 未満の場合には、安川電機とセイコーエプソンとの間、ファナックと川崎重工業、神戸製鋼所、セイコーエプソンとの間、デンソーと川崎重工業など産業用ロボットメーカーとして競合する場合もあるが、安川電機とアプライドマテリアル、ダイムラーベンツの間など競合がない場合もある。

人型や大型のパートナーロボットを開発しているトヨタ自動車、本田技研工業、ソニーは、両ポートフォリオのコサイン距離とも 0.75~1.0 の間にあり、本田技研工業、トヨタ自動車は事業としてパートナーロボットを製造販売している訳ではないが、競合しているとなった。

家庭用掃除ロボットを開発・販売する iRobot は、多くの機関のクラスタポートフォリオのコサイン距離が 0.1 以下と小さい中で、家庭用掃除ロボットを販売する LG Electronics、サムソン、東芝との間で知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオともコサイン距離が近く、ETRI（韓国電子通信研究院）、グーグルとも、クラスタポートフォリオのコサイン距離が、0.9 前後、知識結合ポートフォリオのコサイン距離が、0.7 台と近い位置となった。

手術用ロボット Da Vinci を開発・販売する Intuitive Surgical Inc.は、知識結合ポートフォリオのコサイン距離が 0.70 以上の機関はなく、医療・ヘルスケア分野の特許を保有する Ethicon とシーメンスのみが、クラスタポートフォリオのコサイン距離が 0.8 以上と高い値となっており、他機関とは異なった技術を保有して、手術用ロボットを開発したことが、知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオからも読み取れる。

シーメンスについては、知識結合ポートフォリオのコサイン距離が 0.75 以上の機関はなく、医療・ヘルスケア分野の Ethicon と Intuitive Surgical Inc.、医療用やロボットのカメラ・ビジョンシステムの開発・販売を行うキャノン、医療用のロボットを手がける KUKA が 0.75 以上と高い値となっている。シーメンスは、ドイツの Industrie 4.0 を推進する主要企業の 1 つであり、IoT や FA(Factory Automation)の分野で世界的に事業を展開しており、サムソン、ファナック、本田技研工業、安川電機などが 0.5~0.75 の

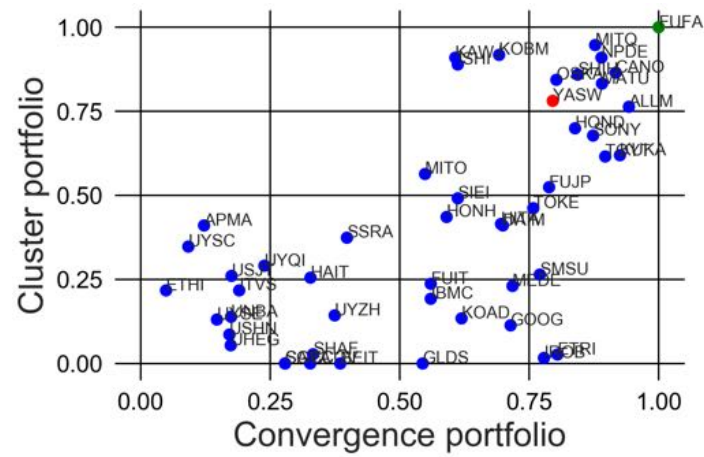
領域に位置付けられている。

LG Electronics は、家庭用掃除ロボットを開発・販売する iRobot と知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオのコサイン距離が、それぞれ、0.82、0.89 と近い他、東芝、サムソン、美的集団、Ecovacs Robot との間で知識結合ポートフォリオのコサイン距離が 0.75 以上となっている。

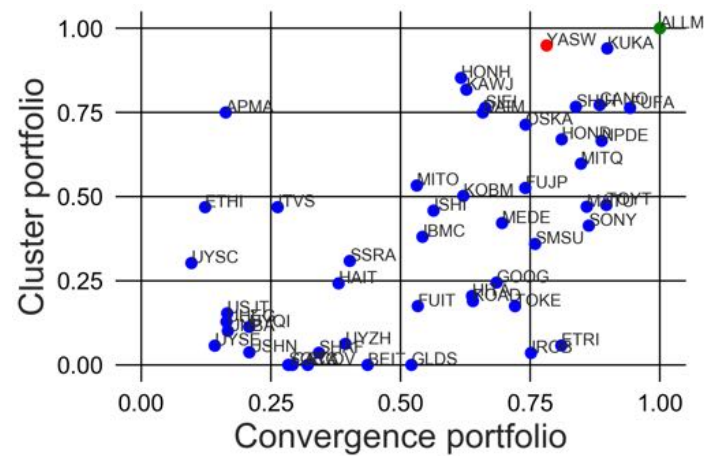
上海交通大学については、特許保有上位 20 機関に入った中国の大学であるが、知識結合ポートフォリオのコサイン距離のほとんどは 0.5 以下であるが、北京航空航天大学、北京理工大学、華南理工大学、東南大学、浙江大学、ハルビン工業大学、上海大学など中国の大学との間では、クラスタポートフォリオのコサイン距離が、0.9 以上と高くなっている。中国の大学は、上海交通大学と同様に、知識結合ポートフォリオのコサイン距離は 0.5 以下であるが、クラスタポートフォリオのコサイン距離は高いという傾向にあり、アプリケーション分野は近いがそれぞれが特徴ある研究開発を実施し差別化していると考えられる。また、中国の大学・研究機関と日米欧の企業との間の知識結合ポートフォリオ、クラスタポートフォリオのコサイン距離は、ほとんどがともに小さく、アプリケーションも研究開発分野も異なっていると思われる。

中国国家電網（State Grid Corporation of China）は、特許保有上位 20 機関に中国企業として唯一入った企業である。両ポートフォリオが 0.75 以上となった機関は、中国の中国科学院瀋陽自動化設備研究所のみで、それ以外の機関は、知識結合ポートフォリオのコサイン距離が 0.5 以下で、クラスタポートフォリオのコサイン距離も 0.0～0.8 の間に分布している。特許ポートフォリオ、知識結合ポートフォリオとも、B25 と H02（発電・変電・配電技術）に特化しており、クラスタポートフォリオも、クラスタ # 1 とクラスタ # 9（検査ロボット）に特化していることが図 5-10、11、12 からわかり、他機関とは特異なポジションにある。

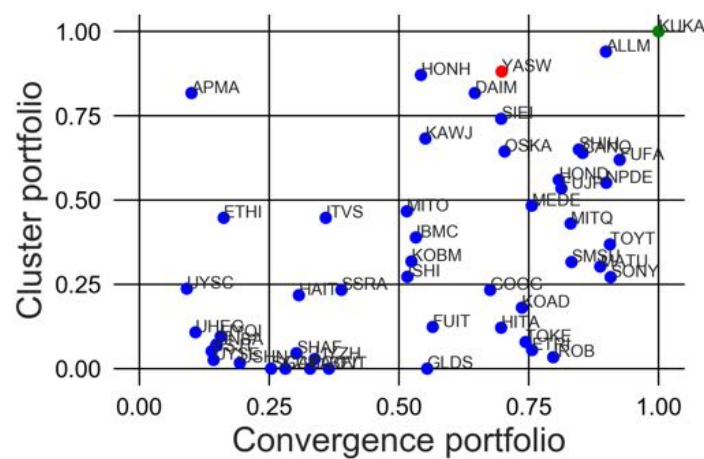
以上、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオを導入することで、アプリケーションと保有する技術における機関間の相違を定量的に把握することが可能となったと考える。



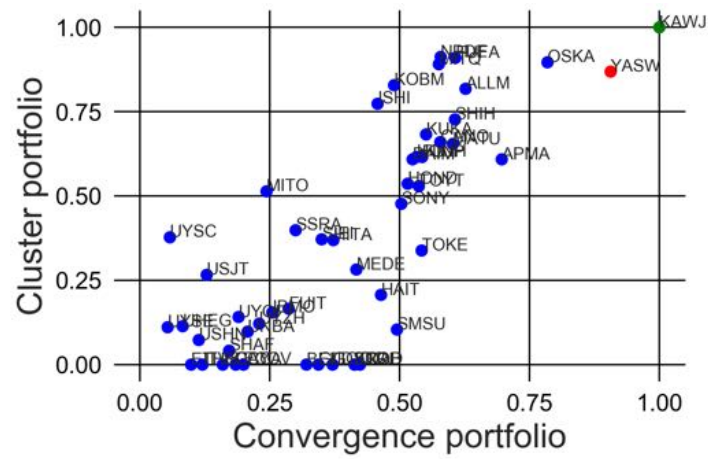
(1) ファナック



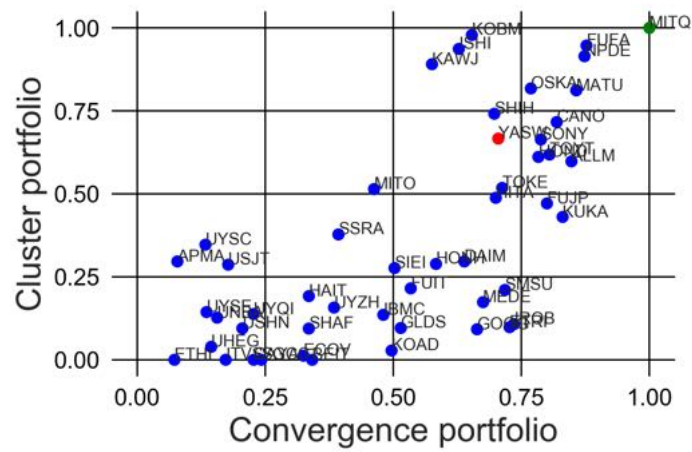
(2) ABB Inc.



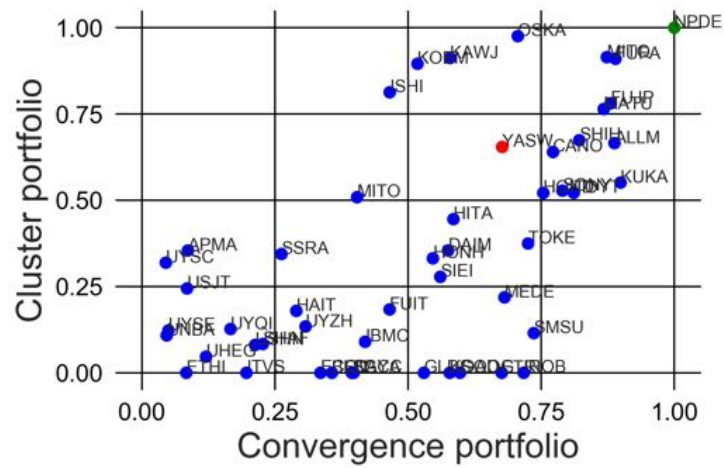
(3) KUKA



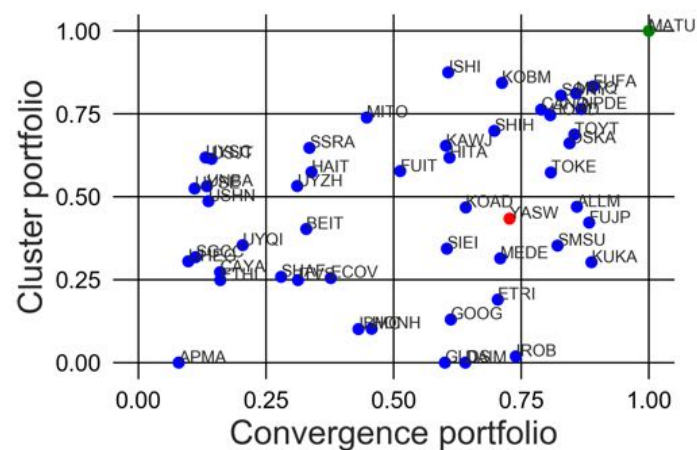
(4) 川崎重工業



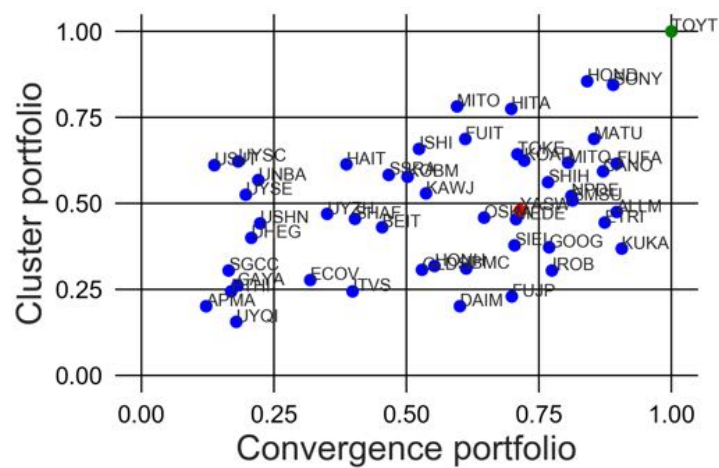
(5) 三菱電機



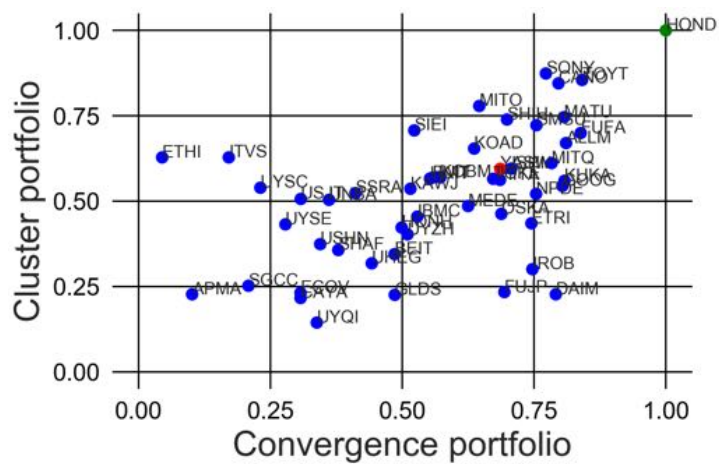
(8) デンソー



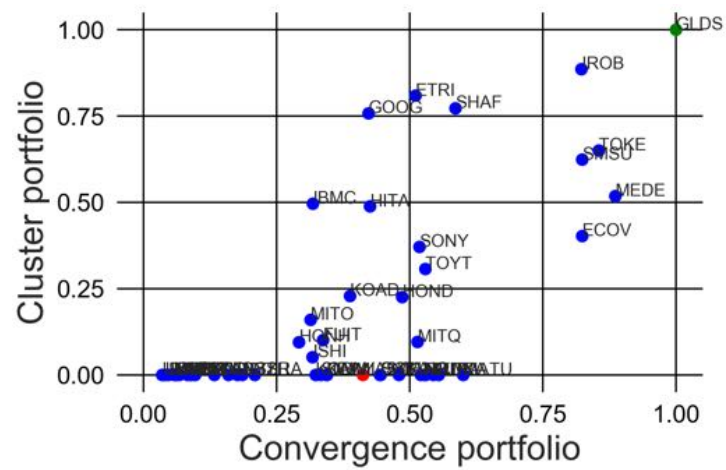
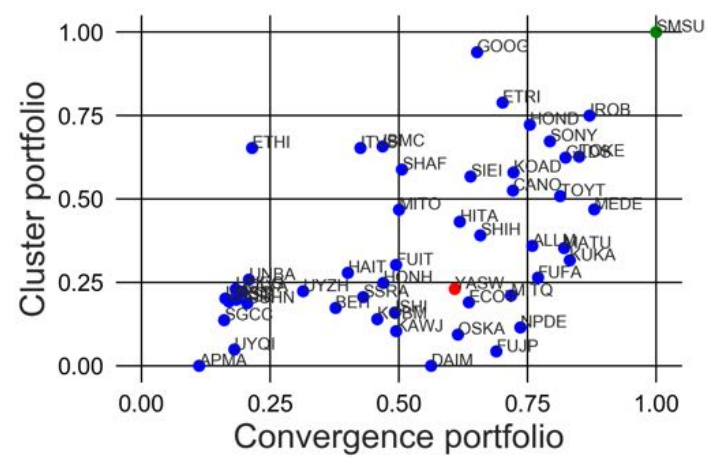
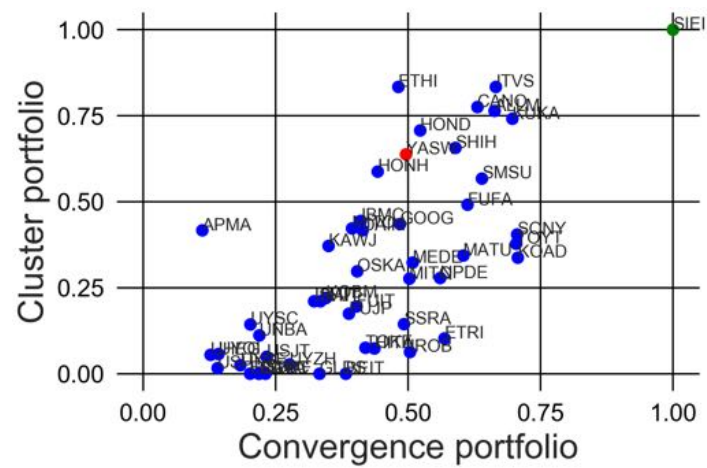
(9) パナソニック

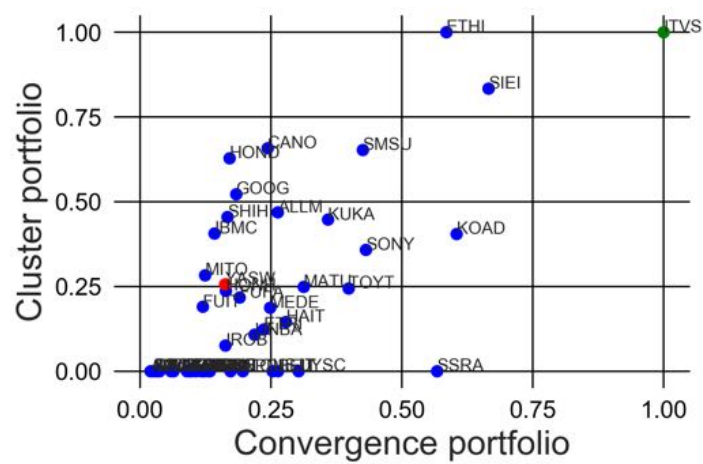


(8) トヨタ自動車

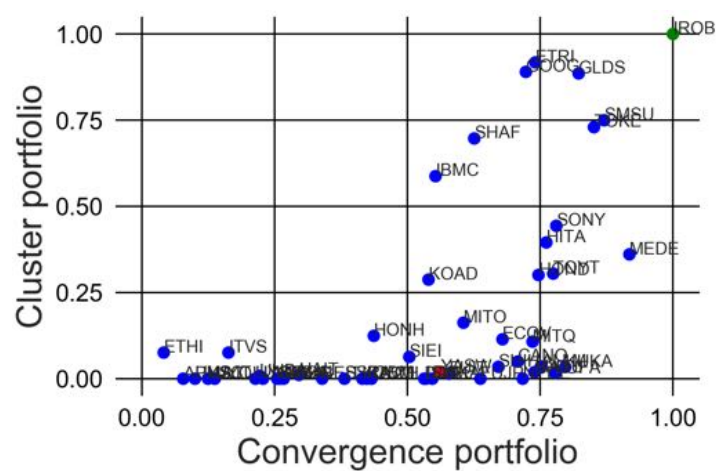


(9) 本田技研工業

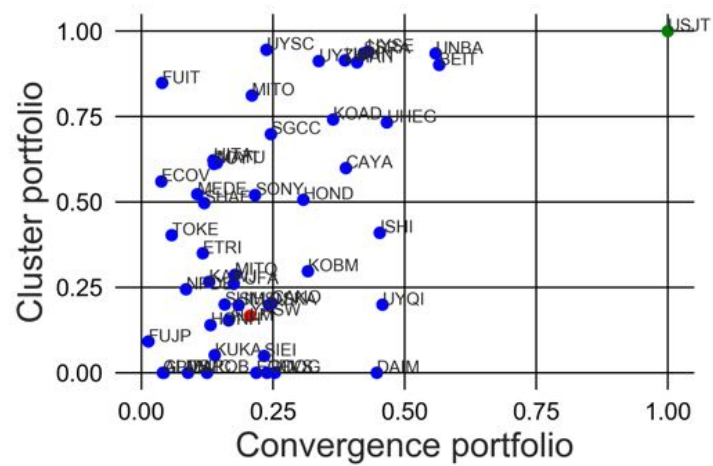




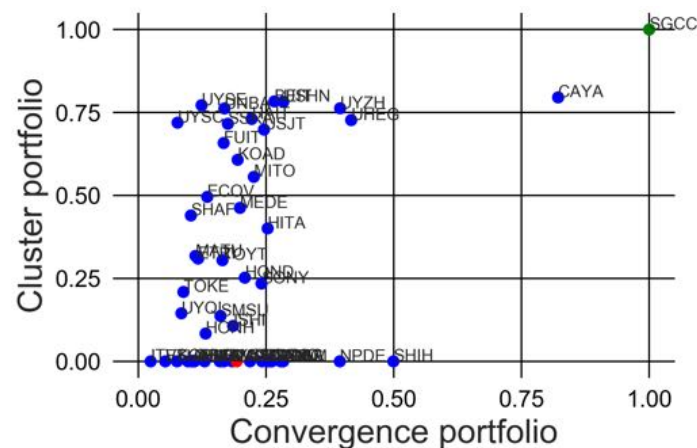
(1 3) Intuitive Surgical Inc.



(1 4) iRobot



(1 5) 上海交通大学



(16) 中国国家電網

図 5-17 その他の主要機関の技術ポートフォリオ間のコサイン距離

5.5 考察

第1章1.3で設定した「複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合に、本研究で提案した手法が、機関間の相違を把握できているか」とのリサーチクエストに応えるため、本章では、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオという新たな技術ポートフォリオを提案し、分析を行った。その結果を踏まえ、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオを活用して、競合分析や M&A、企業間アライアンスなど企業企業の技術経営戦略策定への支援手法となり得るかについて考察する。

技術間の関連性や距離を測定し、機関間の技術ポートフォリオの相違を抽出する試みは、先行研究において実施されてきたが、複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合、IPC コードなどの分類はお互いに類似している傾向があるため、機関間で特徴を区別することは難しかった。[102]

ロボットは、機械工学、制御システム、電子工学などの様々な先端科学術を融合しながら開発されてきており、ロボットの機能を発揮するための技術とロボットを適用する分野での応用開発、用途開発を組み合わせることで実用化される。第4章において、マクロ/メソスケールで、主要なアプリケーションごと、すなわち、クラスタ・ネットワーク分析によるクラスタリング後のカテゴリ分けされたクラスタごとに知識結合ネットワークを構築し、その結果、コアとなる分野の抽出と特徴量の計測により、知識結合ネッ

トワークが、ロボット技術の結合・融合の特徴を捉えていることを示した。

機関ごとにおいても、知識結合ネットワークの構造が異なっていること、クラスタリング結果の各クラスタは技術的に関連性のあるグループをなしているという知見を活用することにより、技術の構成が似通っている場合には難しかった機関間の相違を定量的に把握できるのではないかと気づきから、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオという新しい技術ポートフォリオを提案し、特許保有上位50機関で検証を行うこととした。

複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合、IPC 分類コードなどの特許分類は通常互いに類似している傾向があるため、手術用ロボットや家庭用掃除ロボットなどに特化した特徴ある企業の場合を除き、機関間の特許ポートフォリオから機関の特徴や機関間の相違を把握するのは難しい。MM 手法で活用した引用ネットワークによるクラスタ分析は、引用関係からある技術的特徴を持ったカテゴリ分けする分析手法と捉えれば、各クラスタに割り振られた特許の分布を技術ポートフォリオとして活用できるのではないかと考え、2018 年の PICMET において発表を行った[50]。クラスタによる技術ポートフォリオは、特許ポートフォリオが似通っていてもクラスタの特許分布の相違を反映して明確に分離できるが、アプライド・マテリアルズとダイムラーベンツのように、全く事業も特許ポートフォリオも異なっても、同じクラスタに位置付けられる問題に遭遇し、改めて、クラスタによる技術ポートフォリオの意味を考え直した。第5章5.3で示したように、主要機関のクラスタポートフォリオは、アプリケーション分野を反映していること、特許ポートフォリオが似通っていても、知識結合ネットワークの構造は機関ごとに異なっていることが明らかになったことから、新たに、クラスタポートフォリオと知識結合ポートフォリオを定義し分析を進めた。

機関の知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオは、5.1の通り、特許ポートフォリオよりも各機関の特徴を捉えた分布になることが確認できた。その結果を踏まえたコサイン距離による機関間の相違は、特許ポートフォリオのコサインよりは明確に相違が出ることを、5.2において確認した。5.3および5.4において、機関ごとに、X 軸を知識結合ポートフォリオのコサイン距離、Y 軸をクラスタポートフォリオのコサイン距離をプロットするグラフを活用し、主要な20機関により、各機関がどの機関とポートフォリオが近いかを分析した結果、事業の近さや競合関係を反映していることが確認できた。また、中国の企業や大学・研究機関などの詳細を知らずとも、各機関がどういった技術分野に注力し、研究開発を行なっているかについても把握できることが確認できた。

産業用ロボットの経営企画、技術、知的財産の専門家からの評価も、機関の知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオのコサイン距離のマッピングが概ね実際の研究開発や事業とも整合性が取れており、知識結合ポートフォリオが、機関の技術的な能力を反映していること、クラスタポートフォリオが、各機関が注力するアプリケーション分野を反映していること、この分析を発展させることで、企業の競合分析、補完分析やM&A、アライアンスの検討のツールとしての活用が可能であることの評価も受けた。

以上、知識結合に着目して新たに定義した知識結合ポートフォリオ、クラスタ・ネットワーク分析のクラスタリング結果を活用したクラスタポートフォリオが、「複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合に、本研究で提案した手法が、機関間の相違を把握できているか」とのリサーチクエスションの解決策となっていると考える。

なお、競合分析やM&A、企業間アライアンスなど企業の技術経営戦略策定を支援する手法については、第6章の考察で提案し議論する。

5.6 まとめ

本章では、クラスタ・ネットワーク分析と知識結合ネットワークの結果を活用して新たに定義した知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオによる機関間の相違を定量的に計測し、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオにより、機関間の技術とアプリケーションの相違を把握する手法を開発し、特許保有上位50機関に対し、比較検討するとともに、機関間の技術ポートフォリオの相違と実際の競合関係を加味した評価を行なった。

本章での結果をまとめると以下の通り。

- (1) IPC 分類コードなど既存の特許分類に基づいた技術ポートフォリオでは、複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合には機関間の相違を識別することが難しかったが、知識結合ネットワークの知識結合のペアのシェアを特徴ベクトルの要素とする知識結合ポートフォリオと各クラスタに属する特許シェアを特徴ベクトルの要素とするクラスタポートフォリオを導入することで、特許の保有する分布が近くても、機関の特徴と機関間の相違を定量的に計測することを可能とした。
- (2) クラスタ・ネットワーク分析によりカテゴリ分けされた各クラスタは、特許の引

用関係により、応用分野や基盤的技術などある特徴を持った技術群を反映していることから、各機関のクラスタポートフォリオは、アプリケーションごとの技術保有分布を反映していること、そして、クラスタポートフォリオを用いることにより、産業用ロボットメーカ、パートナーロボット開発企業、医療用ロボット企業、家庭用掃除ロボット企業などの間の相違を実際のロボット開発やビジネスに近いカテゴリで定量的に把握することを可能とした。

- (3) 知識結合ポートフォリオは、機関が有する特許の知識結合ネットワークの構造、すなわち、技術開発分野（特許）間との結合・融合の仕方を特徴ベクトルで表していることから、機関の技術的な潜在力や能力を反映していること、そして、特許ポートフォリオが似ているために識別することが難しい場合でも、知識結合ポートフォリオでは識別できること、特に、中国の大学・研究機関では、特許ポートフォリオとクラスタポートフォリオとも近似し、コサイン距離が 1.0 に近く識別できなかったが、知識結合ポートフォリオの相違から、中国の大学・研究機関間で研究開発が差別化していることを明らかにした。
- (4) クラスタポートフォリオが機関のアプリケーションごとの技術保有分布を反映していること、知識結合ポートフォリオが技術的な潜在的能力技術を反映していることから、機関間の知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオとの相違を元に、企業の競合分析、補完分析および M&A やアライアンスの検討に活用可能であることを示した。

第6章 考察

本研究の出発点は、第1章で述べたように、少子高齢化社会到来に伴う医療・介護、農業、建設などのサービス分野での深刻な人手不足や家庭・生活での質（QOL）を高めるためなどロボットの利活用の期待が高いにもかかわらず、このような分野での導入は期待ほど進んでいないという期待と現実との間に乖離があり、その原因を学術研究（Science）と技術開発（Technology）の視点から解明できないかとの問題意識からであった。本研究では、学術研究分野間、技術開発分野（特許）間の結合・融合として定義した知識結合を軸としてロボット分野のイノベーションの進展を把握するための研究を進めた。

開発した MM 手法（Module-based Mining Method）を用いて、学術研究（Science）と技術開発（Technology）について、マクロスケールおよびメソスケールレベルでの主要なカテゴリ毎の知識結合ネットワークの構築とネットワーク特徴量による知識結合ネットワーク構造の特徴を捉えた。ミクロスケールレベルでは機関の技術ポートフォリオの計測と機関間の相違を、新しく定義した知識結合ポートフォリオとクラスポートフォリオを用いて、定量的に把握し企業の競合分析や補完分析への適用についての研究を行った。

本章では、第3章の手法の開発と第4章、第5章の分析結果をロボットの研究開発の進捗や社会実装の事例、ロボットの研究開発動向や医学系の学術専門誌などの文献および専門家の知見・評価と比較検討することにより、①本研究で提案した手法が、ロボット分野のアプリケーションレベルでの知識結合の構造、特徴を捉えているか、②本研究で提案した手法が、知識結合を軸とした研究開発の進捗や社会実装の度合いを把握できているか、③複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合に、本研究で提案した手法が、機関間の相違を把握できているか、とのリサーチクエスチョンに対して、（1）ロボット分野のアプリケーションレベルでの知識結合の構造、特徴把握、（2）知識結合からみた研究開発の進捗、社会実装の進展、（3）機関間の相違の把握と競合分析、M&A、アライアンス分析への活用としてそれぞれ考察するとともに、知識結合に着目する意義と知識結合に関する指標の意味、専門家からの評価を踏まえた MM 手法の有用性と新規性、本研究の貢献、本研究の限界、課題他分野への活用可能性をまとめている。

6.1 ロボット分野のアプリケーションレベルでの知識結合の構造、特徴把握

6.1.1 知識結合を軸としたロボット分野のイノベーション進展の把握

第4章において、学術研究 (Science) と技術開発 (Technology) に関して、知識結合を軸としてロボット分野のイノベーションの進展について分析したが、知識結合ネットワークの特徴量や構造が明らかになることで、ロボット分野のイノベーションを促進するために、政策や企業戦略、あるいは研究開発の企画立案者などに有用な検討手段となりうるかについて考察する。マクロあるいはメソスケールでの分析結果はどのように個別の企画立案策定の支援ツールとなりうるかとの問いとなるが、企画立案のプロセスを想定して検討する。

ロボットの特徴は、ロボットの機能を発揮するための技術開発とともに、ロボットを導入する分野へ応用・適用するための応用技術開発、用途開発を伴うことである。第1章の1.2.2で指摘したように、ロボットは1980年代以降、積極的に新しい技術を取り入れて進展してきたが、1990年代中頃以降は、新しい技術を取り入れるよりは、異なる既存技術の組み合わせにより開発が進められている (図1-2) ことから、学術研究分野間、技術開発分野 (特許) 間の結合・融合に着目することでロボットのイノベーションの進展がより詳細に把握できると予想できる。

第4章のロボットに関する学術研究論文と特許の分析により、ロボットの学術研究については、工学一般 (Engineering)、ロボティクス (Robotics)、コンピュータサイエンス (Computer science)、自動制御システム (Automation & control systems) の主要4工学分野を中核の学術研究分野に、ロボットの機能を高度化するための機械機構 (Mechanics)、数学 (Mathematics)、材料科学 (Material science) などの基礎研究分野と外科学 (Surgery)、神経科学および神経学 (Neuroscience & neurology)、農業 (Agriculture) などの応用研究分野との結合・融合により学術研究が進められていること、ロボットの技術開発においては、マニピュレータ (B25)、制御 (G05)、計算 (G06) などのロボットの基盤技術に、計測・試験 (G01) などロボットの機能を高度化する技術と溶接等 (B23)、半導体デバイス (H01)、医学等 (A61)、鉄道以外の陸上車両 (B62)、家電等 (A47)、農業 (A01) などの応用技術分野との結合・融合により技術開発が進められていることが明らかになった。

また、知識結合ネットワークは、図6-1のように、知識結合ネットワークの形成は帯状や放射状に結合し、コア部分と周辺部分に別れる構造になることが明らかになり、グ

グラフ理論に基づく中心性や平均クラスタリング係数などのネットワーク特徴量の指標が活用できることと社会ネットワーク分析を中心に研究されているネットワークのコア/周辺構造を本研究に取り入れることでロボット分野のイノベーションの進展を定量的に把握し、ハブ、コア、周辺、関連といった分野の位置付けを抽出できることを第4章で示した。

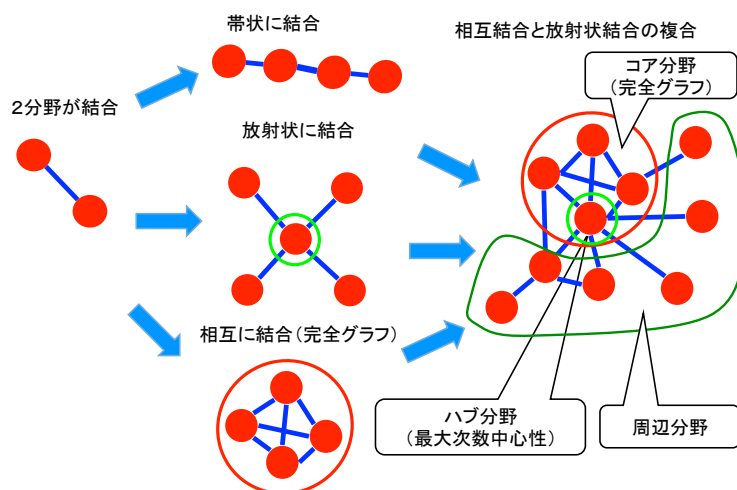


図 6-1 知識結合ネットワークの形成成長 (図3-9再掲)

ロボットのような成長が著しいハイテク産業の場合は、学際や業際に生じる新しい研究や技術を捉えることは難しく、異なる分野間の結合・融合によりイノベーションが生じる可能性もあり、既存の学術研究分類や特許分類による分析では見落とす可能性がある。MM 手法では、Newman により開発された高速クラスタリングアルゴリズム[71]を用いてクラスタリングしていることから、その結果は引用関係に基づいた関係のあるグループにカテゴリ分けされた後に知識結合ネットワークの形成と構造分析を行っており、既存分類の枠に囚われることなく、急成長するグループを捉えることが可能である。

また、平均クラスタリング係数、次数中心性、コア分野と定義した完全グラフを構成する分野などのネットワーク特徴量は、グラフ理論に基づく定義や算出式なので恣意的な要素が入り込む余地がなく、客観的に知識結合ネットワークの形成と構造を分析できるという利点がある。これは、ロボット以外の分野への適用する場合の優位点である。

政策や企業戦略、あるいは研究開発の企画立案者であれば、まず、全体を俯瞰して、ロボットの市場、アプリケーション、技術動向を押さえた上で、自らの経営資源と照らして、SWOT 分析を行い、目標とする KGI を定め、具体的な実行計画と KPI に落とし

込むプロセスを経ると考えられる。

カテゴリ分けされたクラスタは、第4章の分析結果のように、図6-1のいずれかのプロセスを経て、知識結合ネットワークは形成されていくので、企画立案者がターゲットとするアプリケーション分野あるいは市場に近いクラスタを選択し、その選択したクラスタ内の知識結合ネットワークの形成を分析検討する手順を辿ると想定される。そこで、知識結合ネットワークの形成と成長がどのように進むかを図6-2に模式的に示した。

カテゴリ分けされたクラスタの中には、図6-2のように、知識結合ネットワークを形成する分野と関連分野とした知識結合していない分野に分かれ、知識結合ネットワークを形成する分野は、さらに、ネットワーク上の位置付けによりハブ分野、コア分野、周辺分野に分かれる。これらの分野の位置付けは、時系列とともに変化し、新たに関連分野に加わったり、知識結合ネットワークを形成したり、逆に、外れたりして、クラスタは時間とともに変化する。

ロボットの機能を発揮するための技術開発と、ロボットの応用分野の応用技術開発、用途開発を伴うというロボットの特徴を踏まえれば、知識結合ネットワークの構造を分析することにより、知識結合の未だ弱い分野を特定し、当該学術研究分野あるいは技術開発分野（特許）において、知識結合が形成されるべく計画を検討したり、自らの強み・弱みに照らし、注力すべき分野を検討したりする活用が考えられる。

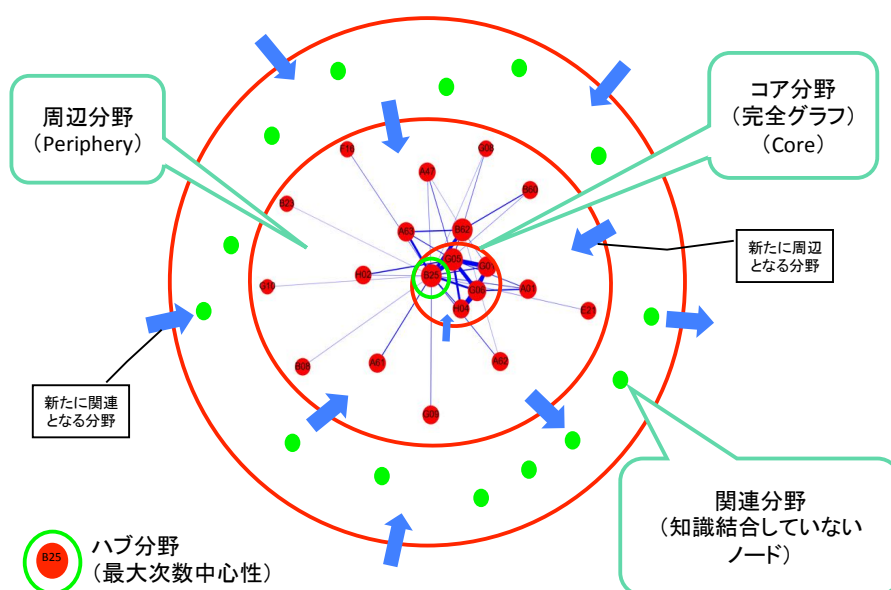


図 6-2 分野間（ハブ、コア、周辺、関連）の関係

例えば、学術研究分野の分析において、手術用ロボット関係のクラスタ#3では、外科学 (Surgery) がハブ分野となって医療・ヘルスケア分野の応用分野との結合・融合が中心で、工学分野との結合・融合は、工学一般 (Engineering) やロボティクス (Robotics) などに限られていたことが明らかになった。この結果から、手術用ロボットがどの医療・ヘルスケア分野への応用が盛んか、どの新しい医療・ヘルスケア分野への適用が試行されているかの把握が可能になり、その時に、こういった工学分野の知識や技術が必要となるかの手がかりとなる。

技術開発分野 (特許) では、農業 (A01) がクラスタ#1と#5に周辺分野として知識結合し、サブクラス (M) レベルでは、A01D (収穫・草刈り) が知識結合していることがわかり、仮に、収穫を自動化するために必要な画像認識技術や柔らかいロボットハンド技術を有しているのであれば、農業分野への新規事業開拓の検討として利用できる可能性がある。

第4章の分析結果を踏まえれば、MM手法による知識結合の形成と特徴量を抽出することにより、どの分野の研究開発が進捗しているか、あるいは、社会実装が進んでいるか否かの見当をつけることができ、政策立案、研究企画、技術経営の検討するための分析手法としての活用の可能性は十分ある。

6.1.2 ロボットにおける知識結合の学術研究と技術開発の比較

第4章では、ロボットの学術研究分野と技術開発分野 (特許) について、知識結合ネットワークを構築し、ネットワーク特徴量の算出とハブ、コア、周辺、関連の分野への抽出と分析をそれぞれ行ったが、学術研究分野と技術開発分野 (特許) との間でどのような共通点と相違点があるかの比較検討を行う。学術研究論文と特許では、学術研究論文が、著者の判断で引用する学術研究論文等を自ら決められること、特許では、関連する技術であるか否かを出願者と特許審査官が判断し引用するかどうかが決めるため、引用の仕方が異なることから比較にはその点を考慮する必要がある。また、特許においては、審査官が技術の新規性や進歩性を否定するために拒絶する場合と一般的な技術水準を示す場合があるとともに、各国の特許制度の違いから、引用に関して各国間でバイアスもある[64] ことにも留意する必要がある。

表6-1は、第4章の結果に基づき学術研究分野と技術開発分野 (特許) とにおいて、知識結合ネットワークの特徴を比較したものである。学術研究分野では、3つのクラスタで全学術研究論文の約8割を占めるなど、少数の大きなクラスタに集中しているのに

対し、特許では、上位10のクラスタまででも約7割と比較的多様なクラスタに分散している。その傾向は、サブクラスタレベルでも同様で、学術研究論文では、少数のサブクラスタでその属するクラスタの大半を占めるのに対して、特許の場合は、多様なサブクラスタに分かれた。

表 6-1 ロボットの学術研究と技術開発（特許）の知識結合ネットワークの特徴比較

	学術研究論文	技術開発（特許）
クラスタ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 3つのクラスタに集中（81.9%） ・ サブクラスタも少数のサブクラスタに集中傾向 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 多様に分散（上位10クラスタでも72.0%） ・ サブクラスタも多様なサブクラスタに分散傾向
平均クラスタリング係数	<ul style="list-style-type: none"> ・ 比較的高い（クラスタ#1～#4） ※クラスタ#5以降はN/Wが小さいため対象外（0.0か1.0になるため） クラスタ#1 0.848～0.933 クラスタ#2 0.666～0.725 クラスタ#3 0.677～0.747 クラスタ#4 0.569～0.857 	<ul style="list-style-type: none"> ・ クラスタにより違いがあるが、学術研究分野よりは低い傾向。クラスタ#4、5は比較的高い クラスタ#1 0.240～0.589 クラスタ#2 0.204～0.511 クラスタ#3 0.350～0.562 クラスタ#4 0.457～0.648 クラスタ#5 0.604～0.700
知識結合ネットワークのコア周辺構造	<ul style="list-style-type: none"> ・ 密に知識結合（コア分野のウエイトが高い） ・ 分野が多いクラスタ（クラスタ#2など）では、比較的多くの周辺分野がコア分野と結合 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 5～6の少数のコア分野と同数か比較的多くの周辺分野が結合
平均次数中心性	<ul style="list-style-type: none"> クラスタ#1 0.762～0.933 クラスタ#2 0.316～0.556 クラスタ#3 0.298～0.410 クラスタ#4 0.418～0.714 クラスタ#5 0.667～1.000 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 比較的低い クラスタ#1 0.165～0.237 クラスタ#2 0.179～0.309 クラスタ#3 0.333～0.476 クラスタ#4 0.318～0.467 クラスタ#5 0.316～0.410
知識結合率（全分野に対する知識結合する分野の割合）	<ul style="list-style-type: none"> ・ クラスタによりばらつきあり。 クラスタ#1 0.273～0.375 クラスタ#2 0.385～0.474 クラスタ#3 0.481～0.593 クラスタ#4 0.389～0.524 クラスタ#5 0.200～0.375 	<ul style="list-style-type: none"> ・ クラスタによりばらつきあり。 クラスタ#1 0.609～0.769 クラスタ#2 0.440～0.600 クラスタ#3 0.188～0.400 クラスタ#4 0.333～0.435 クラスタ#5 0.472～0.586
医療・ヘルスケア分野	<ul style="list-style-type: none"> ・ 18.9%（2011～2016年では、23.9%） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 4.5%
応用分野	<ul style="list-style-type: none"> ・ 広い（文化関連分野も約1割あり） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 製造業中心。 ・ 医療・ヘルスケア分野の他、家庭用掃除ロボット、農業（収穫など）、建設分野での特許あり
ハブ分野	<ul style="list-style-type: none"> ・ 主要工学4分野 ・ 医療分野では、手術（Surgery） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ B25(B25J)（マニピュレータ） ・ クラスタにより、A61（医療技術）がハブとなる場合あり
コア分野	<ul style="list-style-type: none"> ・ 主要工学4分野＋α ・ 医療分野では、Surgery、Urology & nephrology、Neuroscience & neorologyなど 	<ul style="list-style-type: none"> ・ B25、G05（制御）、G06（計算）など ・ A61（医療技術）などもあり ・ クラスタにより、コアとなるclassが変わる

平均クラスタリング係数は、3つの分野の結合・融合で形成されるノードであるクラスタ⁶²の最大のクラスタ数と実際のクラスタ数の比で表し、ノード同士がどのくらい密に結合しているかの指標である。特許は請求項で知財の権利範囲が規定され引用は関連技術として関連づけられている一方、学術研究論文は著者の判断・裁量で関連論文を引用できる。クラスタ・ネットワーク分析によるカテゴリ分け後では、クラスタリング結果の表4-3と表4-26を比較すると、学術研究論文1に対して、平均6.2のエッジ数であるが、特許1に対して、平均2.44のエッジ数と、学術研究論文の方が、ノード数に対して引用数が比較的多いことで、ネットワークが密になったことの影響と考えられる。

⁶² グラフ理論では、“クラスタ”と呼ぶ。

特許においても、平均エッジ数の大きいクラスタ#4（平均5.18）、クラスタ#5（平均6.70）の平均クラスタリング係数は比較的高いことが確認できた。

各クラスタ内の知識結合ネットワークの構造については、学術研究では、コア部分となる分野が多く、クラスタ#2のようにクラスタ内の分野数が多いクラスタは比較的多くの周辺分野とコア分野と結合・融合している。特許においては、コア部分となる分野数は5～6と少なく、コア部分に枝のように結合する周辺分野が多い。知識結合する分野数が、一桁台と少ない場合、特に4以下の場合には、3つのノードが結合するのみで平均クラスタリング係数が1.0となり、または、1つの分野をハブとして放射状に結合する場合には、平均クラスタリング係数は0.0となるため、知識結合数が少ない場合は、平均クラスタリング係数ではなく、知識結合ネットワークの結合状況を直接確認する必要がある。知識結合ネットワークが小さい時には、ある分野をハブとした放射状となることが多い。

平均次数中心性で比較すると、学術研究論文では、アプリケーションの分野の多いクラスタ#2と外科学（Surgery）をハブに様々な分野と知識結合するクラスタ#3が多少低いが、クラスタ#1、#4、#5は、高い値であり、これらの学術研究分野間の結合・融合が密であることが伺える。特許においては、平均次数中心性は0.4台以下と低く、平均クラスタリング係数の高いクラスタ#4、#5においても、平均次数中心性は、0.318～0.435の間にあり、学術研究論文と比較すると、特許は知識結合ネットワークが疎であることが平均次数中心性からもわかる。

知識結合率⁶³についてみると、学術研究論文も特許もクラスタによりばらつきはあるものの、クラスタごとに特徴がある。学術研究論文の場合は知識結合ネットワークを形成する分野間での結合が比較的密である一方、知識結合率は低い、すなわち、知識結合を形成した分野間では密に結合しているが、知識結合しない学術研究分野が多くあることを示している。一方、特許の知識結合率は、クラスタ#1、#2、#5が比較的高く、クラスタ#3、#4は0.435以下と比較的低いとの結果が得られた。知識結合していない分野は、引用数が少なく閾値以下となっているか、後年の学術研究論文あるいは特許から引用されていることから、その期間において、関連分野として位置付けられた分野であるので、知識結合率が低い場合には将来知識結合する分野となる可能性があり、今後出現する可能性のあるアプリケーションに関する研究開発の分野の候補と考えられる。

分野の広がりについては、学術研究分野の方が、医療・ヘルスケア分野で2011-2016年は約1/4占めるほか、純粋科学、社会科学、文化関連分野を併せると約1割あるなど

⁶³ 知識結合する分野数のクラスタ内の分野の全体数に対する比率

多様な学術研究が行われていることが伺えるが、特許に関しては、製造業向けのアプリケーション技術が多く、医療・ヘルスケア分野では4.5%に留まっている。コア分野については、学術研究論文が主要4工学分野、特許がマニピュレータ（B25）、制御（G05）、計算（G06）などを中心としていること、医療・ヘルスケア分野中心のクラスタでは、学術研究論文では、外科学（Surgery）が、特許では、医学等（A61）がコア分野に位置付けられていることも似通っている。

クラスタ・ネットワーク分析から、平均クラスタリング係数、次数中心性、知識結合率などの特徴量、抽出されたハブ、コア、周辺、関連の各分野の比較を行ったが、学術研究分野と技術開発分野（特許）の特徴をとらえられており、MM手法が、ロボットにおける学術研究分野と技術開発分野（特許）の両方の分析にも適用できることと、これらの指標に基づき、比較検討できることも明らかになった。

6.2 知識結合からみた研究開発の進捗、社会実装の進展

イノベーションは研究開発や発明のみでは起こらず、その成果が新製品として社会に普及し、社会システムに変革を与えて初めてイノベーションが進展する。知識結合の分析結果が、ロボットに関する実際の研究開発の進展や社会実装の度合いを反映しているかをみるためには、研究開発や技術開発の成果がどのように社会実装したかを追跡する必要があるが、第4章では、ロボットに関する学術研究論文と特許をマクロ/メソスケールで分析を行ったので、ロボット分野の研究開発の動向や社会実装に関する調査研究に関する文献との比較検討や専門家による評価により、検証する。

ロボットに関しては、第1章の冒頭で述べたように、主要国では、ロボット戦略を策定し、ロボット産業の振興を図っており、ロボットに関する現状やロボット技術の動向についてまとめられている。その中でも、米国連邦政府のNSF（National Science Foundation）が、2011年に、ロボットの研究開発プロジェクトであるNRI（National Robotics Initiative）の設立のきっかけとなったA Roadmap for US Robotics[14]⁶⁴には、製造業、医療・ヘルスケア、サービス、宇宙、軍事といった主要分野ごとに、研究開発の現状と今後の方向性がまとめられており、特に、2013年に発表した2013 Edition[15]

⁶⁴ 産学官連携によりコンピュータの研究と高等教育を強化するために、1972年に設立されたCRA（Computing Research Association）に設置されたCCC（Computing Community Consortium）がまとめた提言レポート。CCCには、産学官の著名な大学研究者、リーダー企業、NASAなどからなる有識者が120名参加し、2009年にまとめられた。その後、2013年、2016年にロードマップを見直し発表されている。[14][15][16]

では、研究開発とその応用分野について記述されている。本研究では、Clarivate Analytics が提供する Web of Science から抽出した英語の学術研究論文、Derwent Innovation から抽出した世界の特許情報により分析しているので、ロボット研究では先端を行く米国が産学官の専門家によりまとめられており、ロボットに関する研究開発や社会実装を反映していると考え、A Roadmap for US Robotics 2013 Edition との比較検討を行った⁶⁵。また、医療・ヘルスケア分野は学術研究では、産業用ロボットに次いで、主要な学術研究分野となっていること、ロボットの活用分野として手術ロボットやリハビリテーション用のロボットの文献[1][25][54][88]により比較検討を行った。また、産業用ロボットの専門家による評価も併せて行った。

6.2.1 ロボット分野の研究開発の進捗、社会実装とイノベーション進展の比較

A Roadmap for US Robotics 2013 Edition には、製造用ロボット、医療用・ヘルスケア用ロボット、サービス用ロボット、宇宙用ロボット、軍事用ロボットの5分野について、研究開発の動向と応用分野がまとめられている。表4—26は、A Roadmap for US Robotics 2013 Edition にある研究開発と応用分野についてまとめたものである。A Roadmap for US Robotics 2013 Edition と4.1.2～3、4.2.2～3の分析結果とを比較検討を行う。

製造用ロボットに関連するクラスタは、学術研究論文では、クラスタ#1 (Robot control systems)、#2 (Robot application systems)、#4 (Application systems for robots) など、特許では、クラスタ#2 (Industrial robots)、#3 (Welding & machining robots)、#6 (Parallel robots)、#8 (robot hand & fingers) などが関連する。学術研究論文では、主要工学4分野 (Engineering, Robotics, Computer science, Automation & control systems) がコア分野を占め、クラスタ#1では、Mathematics や Mechanics が1990年代後半よりコア分野に加わっていることは、表4—26の Mathematical models and simulation techniques を反映している部分もあるが、学術研究分野の主要工学4分野のくくりが広くそれよりブレークダウンできないこと、主要工学4分野の特許においても、B25、G01、G05、G06がコア分野をなしているが、IPCコードのクラスレベル(C)では、分類が荒く、大まかな傾向としては捉えているが、詳細なレベルで

⁶⁵ 米国のNRIは、宇宙用、軍事用と広くカバーしており、宇宙および軍事に関する研究開発については、軍事機密に関わることも多く、本研究で対象にした学術研究論文や特許には反映していない可能性があるため、A Roadmap for US Robotics の5分野のうち、製造業、医療・ヘルスケア、サービスの3分野での比較検討を中心に行った。

の確認はできなかった。

表 6-2 A Roadmap for US Robotics 2013 Edition の研究開発と応用分野

(1) 製造分野、ヘルスケア・医療分野、サービス分野

Areas	Research and Development Basic Research/Technologies	Details of Research and Development	Applications
Robotics in Manufacturing	Learning and Adaptation	<ul style="list-style-type: none"> *learning by demonstration *monitoring their actions, optimizing their performance *interactive learning techniques 	automotive sector, electronics sector integrated design, integration from design to manufacturing, cyber- physical systems, computer-mediated manufacturing
	Modeling, Analysis, Simulation, and Control	<ul style="list-style-type: none"> *improved models and simulation techniques *improved high-performance computing 	
	Formal Methods	<ul style="list-style-type: none"> *Mathematical models and the tools of logic 	
	Control and Planning	<ul style="list-style-type: none"> *advanced control and planning algorithms *robot arms on mobile bases 	
	Perception	<ul style="list-style-type: none"> *better tactile and force sensors, better methods of image understanding *non-invasive biometric sensors 	
	Novel Mechanisms and High-performance Actuators	<ul style="list-style-type: none"> *mechanical performance metrics such as accuracy, repeatability, and resolution *safe actuation *exoskeletons, smart prosthetics, and passive devices 	
	Human-Robot Interaction	<ul style="list-style-type: none"> *safety *simple, clear interfaces, observable, transparent behaviors *easy to train, easy to learn *new sensing systems 	
	Architecture and Representations	<ul style="list-style-type: none"> *new methods of representing environmental uncertainties and monitoring tasks that facilitate error recovery and skill enhancement 	
	Measurement Science	<ul style="list-style-type: none"> *fundamental metrology, performance metrics, test methods, reference artifacts and data, reference architecture, critical technical inputs to standards 	
	"Cloud" Robotics and Automation for Manufacturing	<ul style="list-style-type: none"> *wireless networking, *"big data " techniques * "Internet of Things" 	
Healthcare and Medical Robotics	Architecture and Representations	<ul style="list-style-type: none"> *interacting with complex real-world environments in real time *multimodal sensing, various types of embodied interactions, and challenges for data presentation and manipulation for timely response 	cardiothoracic, gynecology, and urology More recently, orthopedics, neurology, and general surgery rehabilitation and as a replacement for service dogs
	Formal Methods	<ul style="list-style-type: none"> *robust modeling, analysis, simulation tools, including formal modeling of human behavior and human-robot interaction 	
	Control and Planning	<ul style="list-style-type: none"> *contact/force control (maintain contact with the environment with a given force) *maintaining stable, safe contact 	
	Perception	<ul style="list-style-type: none"> *image-guided surgery *interpreting tactile, force and contact sensor data *understanding some aspects of how human perception functions *understanding how humans will interpret feedback from the robot *better models of human perception 	
	Robust, High-Fidelity Sensors	<ul style="list-style-type: none"> *biocompatible/implantable sensors, force/tactile sensing, and sensors that allow tracking and navigation 	
	Novel Mechanisms and High-performance Actuators	<ul style="list-style-type: none"> *very small actuators and mechanisms with high power-to-weight ratio 	
	Learning and Adaptation	<ul style="list-style-type: none"> *machine learning applied to real-world uncertainty and multimodal medical and health data 	
	Physical Human-Robot Interaction	<ul style="list-style-type: none"> *appropriate sensing, perception and action *haptics 	
	Interaction Algorithms for Socially Assistive Robots	<ul style="list-style-type: none"> *user interfaces and input devices *wearable sensors, wands, and other increasingly ubiquitous interaction modalities *social interaction *automated behavior detection and classification, and activity recognition 	
	Modeling, Analysis, Simulation, and Analysis	<ul style="list-style-type: none"> *people modeling *engineered systems modeling 	

(2) 宇宙分野、軍事分野

Areas	Research and Development Basic Research/Technologies	Details of Research and Development	Applications
Service Robotics	Architecture and Representations	•establishing architectural frameworks	vacuum cleaners, autonomous lawn mowers personal security applications inspection of power plants and infrastructure such as bridges logistics applications
	Control and Planning	•autonomy and flexibility in robot motion and task execution	
	Perception	•sensory processing, mapping and localization, laser scanners, GPS, RGB-D sensor technology •image recognition	
	Robust, High-Fidelity Sensors	•image sensors, MEMS technology, RFID	
	Novel Mechanisms and High-performance Actuators	•advances in mechanism design and high-performance actuators •highly dexterous hands, inherently compliant hands, energy-efficient, safe, high-performance actuators	
	Learning and Adaptation	•machine learning	
	Physical Human-Robot Interaction	•safety	
	Socially Human-Robot Interaction	•cooperative interaction with humans •interpretation of human intent (gestures, speech/sound, body motion/pose, and physical position)	
Robots Applications in Space	Sensing & Perception	•sensors and algorithms for decision making •perception •relative position & velocity estimation •terrain mapping, classification and characterization •natural and man-made object recognition •sensor fusion for sampling and manipulation •onboard science data analysis	science exploration of Mars, the international space station unmanned space exploration repetitive, high-precision and extended tasks
	Mobility	•extreme terrain mobility •below-surface mobility •above-surface mobility •small body/microgravity mobility	
	Manipulation Technology	•robot arms •dexterous manipulators •modeling of contact dynamics •mobile manipulation •collaborative manipulation •robotic drilling & sample processing	
	Human-Systems Interaction	•Multimodal Human-Systems Interaction •Supervisory Control •Robot-to-Suit Interfaces •Intent Recognition and Reaction •Distributed Collaboration •Common Human-Systems Interfaces •Safety, Trust, & Interfacing of Robotic/Human Proximity Operations	
	Autonomy	•Integrated Systems Health Management •Dynamic Planning & Sequencing Tools •Autonomous Guidance & Control •Adjustable Autonomy •Terrain Relative Navigation •Path & Motion Planning with Uncertainty •Autonomous Onboard Science Data Analysis	
Robots Applications in Defence	Interoperability	•the plug-and-play use of different sensors on an unmanned vehicle. •an open common ground control station (GCS) architecture for multiple, heterogeneous unmanned vehicles. •the ability of air, ground, and maritime vehicles to work cooperatively.	unmanned aerial systems, remotely piloted systems remotely piloted aircrafts
	Autonomy	•Autonomy that Dynamically Adjusts to Meet Mission Requirements •Sensing & Understanding Complex, Dynamic Environments •Collaboration with Other Autonomous Systems •Autonomy & Data Tasking, Processing, Exploitation, and Distribution (TPED) Processes •New Approaches to Verification & Validation	
	Communications		
	Propulsion & Power		
	Manned-Unmanned (MUM) Teaming		

そこで、産業用ロボットのロボット技術と知的財産の専門家からヒアリングしたところ、技術間の結合の有無を見ることで、社会実装された産業用ロボット（溶接ロボット（B25J と B23K の結合）、塗装ロボット（B25J と B05B（スプレー装置））など）では、知識結合の形成が見られること、試行錯誤して社会実装されていないロボットは、知識結合を形成せず、関連分野に位置付けられていることから、産業用ロボットでは、知識結合の形成で社会実装が進んでいることが読み取れるとのことであった。また、特許分析においては、IPC コードのサブクラスレベル（M）でみると、クラスタ # 2（Industrial robots）で、B23K（溶接等）B65G（運搬・貯蔵装置）、G06F（電氣的デジタルデータ処理）、H01L（半導体デバイス）などの技術が抽出されており、大まかな傾向をみるときは、IPC コードのクラス（C）でもよいが、具体的な技術関係を分析するには IPC コードのサブクラス（M）でより明確に研究開発の進捗と社会実装の度合いが測れているとのことであった。

医療・ヘルスケア分野に関連するクラスタは、学術研究論文では、サブクラスタ # 3-2（Robot for rehabilitation）クラスタ # 3（Surgery）、# 7（Robotic radiosurgery）、# 8（Biomechanical function）、特許では、サブクラスタ # 4-3、4-4、クラスタ # 7 が関連する。学術研究論文では、Surgery、Urology & nephrology が主要医学 2 分野である他、Cardiovascular system & cardiology（循環器系・心臓学）、Obstetrics & gynecology（産婦人科学）、Orthopedics（整形外科）、Neuroscience & neurology（神経科学・神経学）が知識結合を形成する分野として抽出されており、表 6-2（1）の医療・ヘルスケア用ロボットの応用分野に、cardiothoracic、gynecology、urology、orthopedics が手術ロボットの応用分野で普及していることの言及があり、ほぼ一致している。特許では、A61B（診断、手術）、A61H（物理的治療装置）、A61F（血管へ埋め込み可能なフィルタ）、A61M（身体内または表面への媒体導入装置）が抽出されており、implantable sensors、various types of embodies interaction、very small actuators and mechanisms など関連した記述があり、知識結合の形成と研究開発の進捗、社会実装との関係が観察される。

サービス分野に関するクラスタは、学術研究論文では、クラスタ # 2（robot application systems）、# 4（application system for robots）# 9（networked robotics）などに含まれ、特許では、クラスタ # 1（Service robots）、# 5（Cleaning robots）、# 8（robot hands & fingers）# 9（Inspection robots）などが該当する。表 6-2（2）のサービスロボットの応用分野に、vacuum cleaners、autonomous lawn mowers、Inspection of power plants and infrastructure、logistics application とあり、研究開発

としては、autonomy and flexibility in robot motion や highly dexterous hands、cooperative interaction with human など学術研究論文では、これらの研究として、サブクラスタ # 2-1 の二足歩行ロボットや # 2-3 のソフトロボティクスに、該当の学術研究分野が抽出されている。

特許においては、クラスタ # 5、# 8、# 9 が該当しており、技術についても、G06F（電氣的デジタルデータ処理）、A47L（家庭用洗濯・掃除）、B62D（自動車）、B65G（運搬・貯蔵装置）が抽出されており、知識結合の形成と研究開発の進捗、社会実装との関係がある程度観察される。

ロボットの宇宙での応用では、学術研究論文では、米国 NASA が中心となって設立したエアゾールの粒子が与える気候への影響を研究している科学者ネットワークのクラスタ # 6（Aerosol robotic network）が唯一のクラスタで、ネットワーク名に“robotic”が含まれているので抽出された。宇宙のミッションは、火星や月の探査、地球環境、あるいは軍事目的で研究開発や技術開発がなされ、ロボットはそれらの目的を支援するための手段に過ぎないため、クラスタ分析でクラスタ # 6 以外抽出されなかったと考えられる、宇宙関連のロボットに関する学術研究論文があったとしても、1つの領域を形成するまでになく、どこかのクラスタに属したと考えられ、明示的には現れていない。特許についても、宇宙に関連したクラスタとしては抽出されていない。

軍事用ロボットに関しては、特に、米国においては1つの重要なロボットの分野ではあるが、それらが、学術研究論文に発表されるとは考えられず、特許についても秘匿されている可能性が高いこともあり、学術研究論文、特許とも抽出したデータの中には含まれていない可能性が高く、クラスタ分析結果でも軍事的目的のキーワード等も見当たらないので、本節では、比較検討の対象とはしない。

以上、A Roadmap for US Robotics 2013 Edition にある分野の研究開発と応用分野との比較検討を行ったが、ロボットの研究開発の進捗と社会実装の度合いは、製造業分野、サービス分野について、専門家からの評価も加えると、関連性を示していることが言え、医療・ヘルスケア分野については、関連性が明確に観察された。

6.2.2 知識結合からみた医療・ヘルスケア分野と工学分野の関係

前節において、学術研究論文と特許のデータを用いた知識結合の分析で、医療・ヘルスケア分野におけるロボットの研究開発の進捗と社会実装の関係が明確に観察されたが、知識結合の形成を観察することにより、医療・ヘルスケア分野と工学分野の関係につい

て、掘り下げて分析する。医療・ヘルスケア分野について学術研究分野と技術開発分野（特許）で比較すると、表1-2のとおり、学術研究論文は、2011-2016年には全体の約1/4と工学分野について多く、医療・ヘルスケア分野に関するロボットの研究は盛んに行われていることが伺える。

学術研究論文のMM手法により抽出されたSurgeryとUrology & nephrology、Cardiovascular systems & cardiology、Otorhinolaryngologyなどとの知識結合、医学系の学術専門誌によるこれらの分野における手術ロボットの普及は確認できた。

しかし、知識結合ネットワークを形成し、分野間の知識結合を分析すると、ロボットに関する医療・ヘルスケア分野は、知識結合している分野に限ると、外科学（Surgery）をハブとした知識結合のクラスタ#3、リハビリテーション関係のクラスタ#2のリハビリテーション（Rehabilitation）と神経科学および神経学（Neuroscience & neurology）、工学一般（Engineering）、ロボティクス（Robotics）との知識結合、放射線手術関係のクラスタ#7の外科学（Surgery）、放射線・核医療および医療画像（Radiology, nuclear medicine & medical imaging）、腫瘍学（Oncology）間の知識結合に限られており、工学分野との知識結合は、工学一般（Engineering）、ロボティクス（Robotics）など工学分野との知識結合は限られた分野であることも明らかになった。

リハビリテーションに関しては、クラスタ#2のサブクラスタの1つとなっているように、外科学（Surgery）とは異なり、より工学との繋がりは広い。表4-14のサブクラスタ#2-1～3のコア分野と周辺分野を比較すると、リハビリテーションのサブクラスタ#2-2のコア分野は、リハビリテーション（Rehabilitation）、神経科学および神経学（Neuroscience & neurology）、心理学（Psychology）に加え、主要4工学分野が入っており、サブクラスタ#2-1（二足歩行ロボット）でも、神経科学および神経学（Neuroscience & neurology）と心理学（Psychology）と主要4工学分野がコア分野となって、共通の研究基盤があることが伺える。サブクラスタ#2-3（Soft robotics）は、柔らかい材料を対象にしたロボット研究であるが、主要4工学分野と化学、材料系の学術研究分野と外科学（Surgery）⁶⁶がコア分野に入っており、医療・ヘルスケア分野との関連性も見られるが、知識結合を形成する分野としてはサブクラスタ#2-1、2-2とは異なる学術研究分野を形成していることが伺える。また、サブクラスタ#2-1～3は周辺分野が少なく、6～9のコア分野が密に知識結合していることが特徴である。なお、RehabilitationとNeuroscience & neurologyがサブクラスタ#2-1、#2-1で知識結合しているので、医学系の学術専門誌で確認したところ、神経系疾患の患者のリハビ

⁶⁶ 2014-2016年は、Surgeryは周辺分野に位置付けられている。

リテーションのために、Neurorehabilitation という分野にロボット活用による研究が進められてきたことが確認できた[23][72]。

特許に関しては(表4-44)、医学関係のIPCコードであるA61は、全特許の4.5%の5020件しかなく、知識結合している分野では、クラスタ#4とクラスタ#7中心である。IPCコードのサブクラスMでみる(表4-43)と、A61B(診断、手術)、A61H(物理的治療装置)、A61F(血管内へ埋め込み可能なフィルタ)、A61M(身体内または表面への媒体導入装置)、A63B(訓練用具等)などに限られていることが判明した。クラスタ#4全体は、Control systems for robot operation であり、ロボットの基盤技術であるB25、G05、G06などは、手術におけるロボット操作の制御とも関連する技術で共通点があり、手術への応用がなされていると考えられる。しかしながら、手術は専門的分野であり、手術に関する医療・ヘルスケアの専門家との共同研究によって医療用ロボットの開発が行われる必要があり、工学など医療・ヘルスケアの専門外の者にとっては、簡単に参入できる分野ではないため、学術研究分野と比較すると技術開発分野(特許)では未だ約4%と少ない原因にもなっているように考えられる。第4章4.2.4(2)でも触れたが、表4-50のように、A61(医学等)が、クラスタ#2を除き、2014-2016年における知識結合を形成する分野に抽出されたことは、今後医療・ヘルスケア分野において、手術用ロボット以外でのアプリケーションが社会実装される可能性が出てきた兆候とも考えられる。

リハビリテーションのクラスタ#7は、表6-3によると、IPCコードのクラス(C)では、2011-2013年以降、A61とB25、A63(スポーツ、ゲーム、アミューズメント)がコア分野で、B25をハブに知識結合し、G05、G06などが周辺分野として知識結合を形成している。IPCコードのサブクラス(M)では、ハブ分野は、B25Jで、コア分野も2011-2013年までは、B25Jで、2014-2016年に、A61H(物理的治療装置)、A61F(血管へ埋め込み可能なフィルタ)がコア分野となった。周辺分野には、G05D(非電気的変量の制御・調整系)が2006-2010年から入り、A63H(玩具)、B62D(自動車)、A61H、A63B(訓練用具等)が年代ごとに加わっていることが観察され、リハビリテーション用ロボットに関しては、最近10年で、知識結合が形成され始めたところであることが明らかになった。また、IPCコードのクラス(C)の知識結合を形成する分野の知識結合率が、0.3未満と低く、知識結合を形成していない関連分野が、B01(物理的・化学的方法または装置一般)、B05(スプレー技術)、B07(固体の分離)、B08(清掃)、B21(機械的金属加工・金属の打ち抜き)、B24(研削・研磨)、B29(プラスチック加工)、B65(運搬、包装等)、B66(ホイスト、リフト等)、C23(金属材料へのコーティング)など

の様々な技術が関係しているにもかかわらず、知識結合を形成する分野が限られていることは、リハビリテーション分野のロボットが試行錯誤して開発しているもののなかなか事業として立ち上がっていない現状を反映しているとも考えられる。

以上から、医療・ヘルスケア分野におけるロボットに関する学術研究は、2011-2016年に学術研究論文の約1/4を占めながら、医療・ヘルスケア分野と工学分野との間では、工学一般 (Engineering)、ロボティクス (Robotics) と外科学 (Surgery)、リハビリテーション (Rehabilitation)、神経科学および神経学 (Neuroscience & neurology) など限られた分野間の知識結合に留まり、技術開発では、知識結合する技術開発分野 (特許) が手術や治療用装置、トレーニング装置などに限られ、手術用ロボットは一定の市場を作り出しているが、医療・リハビリテーション・介護用のロボット市場がようやく立ち上がり始めたという現状を、ロボットに関する学術研究論文と特許での知識結合の分析結果から観察することができた。

表 6-3 技術開発 (特許) 分野の知識結合ネットワーク特徴量 (クラスタ # 7)

(1) IPC コード クラス (C)

期間	平均クラスタリング係数	平均次数中心性	知識結合率	知識結合分野数	コア分野数	周辺分野数	関連分野数
2001-2005	0.000	1.000	0.063	2	0	2	30
2006-2010	0.000	0.333	0.200	6	1	5	24
2011-2013	0.295	0.333	0.292	7	3	4	17
2014-2016	0.295	0.333	0.280	7	3	4	18

(2) IPC コード サブクラス (M)

期間	クラスタリング係数	平均次数中心性	知識結合数	コア分野数	周辺分野数	関連分野数
2001-2005	0	1	2	0	2	129
2006-2010	0	0.5	4	1	3	170
2011-2013	0	0.333333	6	1	6	153
2014-2016	0.175	0.285714	8	3	5	174

表 6-4 技術開発（特許）分野の位置付け（クラスタ#7）

(1) IPC コード クラス (C)

期間	ハブ分野	コア分野	周辺分野	関連分野
2001-2005			B25;A63	G02;H01;B66;G08;B01;B65;B62;C40;H04;C25;B21;B32;C12;B24;G01;C23;B29;B23;H05;A61;B05;F16;H02;B08;G03;G05;G06;B07;G11;B60
2006-2010	B25	B25	A61;A63;B62;G06;G05	G02;H01;B66;B01;B65;H04;C25;B21;C12;B24;G01;C23;B29;B23;H05;B05;F16;H02;B08;G03;A47;B07;G11;B60
2011-2013	B25	B25;A61;A63	G05;G01;F16;B62	H04;B08;H01;B23;B66;B21;H05;A47;B05;B24;G06;B01;G11;B65;H02;C23;B29
2014-2016	B25	B25;A61;A63	B62;G05;G06;F16	H04;B08;H01;B23;B66;B21;H05;A47;B60;B05;B24;B07;B01;B65;G01;H02;C23;B29

(2) IPC コード サブクラス (M)

期間	ハブ分野	コア分野	周辺分野
2001-2005			A63H;B25J
2006-2010	B25J	B25J	G05D;B62D;A63H
2011-2013	B25J	B25J	G05D;A61H;A63H;A63B;B62D;
2014-2016	B25J	A61H;B25J;A61F	B62D;G05D;G05B;F16H;A63B

6.3 機関間の相違の把握と、競合分析、M&A、アライアンス分析への活用

6.3.1 アライアンス検討マップとしての活用

第5章の表5-13～17の結果を踏まえ、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオのコサイン距離のグラフを「アライアンス検討マップ」として活用することを考える。図6-3は、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオのコサイン距離に応じて、機関間のアライアンスの可能性を4つの領域に分け、経営企画、ロボット技術の専門家の意見も踏まえ、検討した。

領域 (a) は、知識結合ポートフォリオもクラスターポートフォリオのコサイン距離に近い領域で、アプリケーションも技術も近いことから、事業において競合関係にある可能性が高い。その場合、企業は、自らの事業領域においてリーダ的ポジションかフォロワー的ポジションによって打ち手は全く変わってくる。リーダ的ポジションであれば、自らの開発力、販売力を強化することも、競合相手を M&A や協業により傘下に入れ、リーダ的ポジションを固めることなどいくつか選択肢がある。フォロワー的ポジションであれば、リーダ的企業と対峙するために、他のフォロワー企業と合併、M&A を含む協業戦略を検討するだろう。この領域に、ベンチャーなどの新規参入企業が現れた場合には、M&A で傘下に収めるなどの行動も選択肢の 1 つとなる。

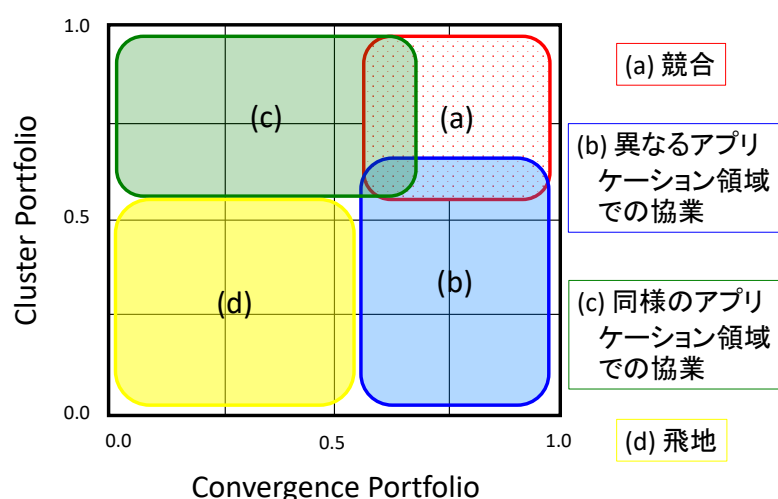


図 6-3 企業のアライアンス検討マップ

領域 (b) は、保有する技術のポートフォリオは近いが、提供する製品・サービスやアプリケーションが異なる、すなわち、事業領域が異なる可能性が高い。その場合、この領域の機関が新しい製品・サービスにより自分の事業領域へ参入の可能性がある一方、この領域の機関とのアライアンスにより、新領域への進出の可能性もあると考えられる。相手が、企業の場合は、M&A か協業で、大学・研究機関の場合は、共同研究により新事業開拓の可能性が出てくる。(a)の領域に新規参入して、競合相手となる可能性もあることから、(a)と(b)に重複部分がある。また、(a)と(b)との関係は相対的であり、概ね 0.5~0.75 の間にある。表 5-1 3~17 の 20 機関を比較検討すると、差別化した事業領域で事業を行う手術ロボットの Intuitive Surgical Inc.や送配電用の検査ロボットを

開発している中国国家電網などのマップでは、(b)の領域にほとんど他の機関がなく、川崎重工業やシーメンスでも、(b)のうち、知識結合ポートフォリオのコサイン距離が0.75以上の領域には他の機関がない。これは、当該機関の知識結合ポートフォリオが他機関と差別化できており、トヨタ自動車、三菱電機などはロボット以外の事業領域の技術開発やロボットのユーザとしてロボットを活用するための開発を行なっていて、知識結合ポートフォリオが広範囲の技術に渡って、(b)の領域に多くの機関が入っていると解釈できるとのことであった。

領域(c)は、アプリケーションの対象とする事業領域は近いが、提供する製品・サービスが異なっている可能性が高い。(c)の領域にあって、知識結合ポートフォリオのコサイン距離が0.5以上の場合は競合する可能性があるが、0.5より小さければ、この領域で事業を行なっている、競合する可能性は低く、その場合、同領域において新たなアプリケーションの開発のためのアライアンスが考えられる。領域(c)の機関とのアライアンスは、新しいアプリケーションでの事業シナジーがどのように見込まれるかのシナリオに応じて、検討がなされることとなる。しかし、トヨタ自動車、ホンダ技研工業や美的集団、新松机器人、中国国家電網では、(c)の領域に入る機関があるが、産業用ロボットメーカーでは、(c)領域に入ってくる機関が少ない傾向にあり、これは、産業用ロボットの事業領域では既に既存のメーカーにより市場が飽和して、新しい技術やアイデアを持って新規参入する企業が少なくとも解釈でき、アライアンスを組むにも、産業用ロボットの事業領域では、パートナーを見つけにくいという経営企画の専門家からの指摘があった。

領域(d)は、保有する技術のポートフォリオも提供する製品・サービスも異なるため、当該企業にとっては、飛地の領域となる。当該企業が持つ既存の技術や販売網など経営資源の直接的な活用は難しいが、将来の新事業の種となりうる領域であるとともに、この領域にある機関が持つ技術や製品・サービスを持つ企業とのアライアンスや共同研究などと既存の技術や販売網などの経営資源を活用することにより、既存の事業領域において、新しい製品・サービスの提供により事業を発展できる可能性もある。

このアライアンス検討マップの有用性について、経営企画とロボット技術の専門家からヒアリングしたところ、企業や大学・研究機関がどのような研究開発をしているかの調査は手間暇がかかり大変であるが、特許情報に基づく本分析で、保有する特許の特徴や技術あるいはアプリケーションの近さが計測できるので、水面下で行われているロボット関連の開発をしている機関の探索や検知の手がかりとなりうるとのことであった。

6.3.2 企業のロボットの事業展開の広さや特徴の特定の可能性

M&A やアライアンスを検討の際、相手企業がベンチャーの場合は、通常ある特化した技術や市場に特化しているので、事業を把握することは比較的容易であるが、大企業の場合は、どういった分野に特化や差別化しているのか、あるいはその事業領域において特徴を有しているかを知ることが重要である。機関が取り組むロボットの技術開発や事業展開を技術ポートフォリオから定量的に把握する手段を検討する。

各技術ポートフォリオベクトルは、機関が保有する特許の特許、知識結合、クラスタの分布をそれぞれのベクトルの要素シェアで表したものであり、特化度や多様度を計測する指標が応用できる。多様度は、Simpson の λ 、情報エントロピなど多様性を計測する方法は、いくつかあるが、情報エントロピを特許ポートフォリオとクラスタポートフォリオに適用して、機関の事業の特化度・多様化度を測定し、企業のロボットの事業展開の広さの把握や特徴の特定が可能かを検討する⁶⁷。

第5章5.1の図5-3の20機関のクラスタポートフォリオの分布は機関によって大きく異なる。Intuitive Surgical Inc.やiRobotなどのベンチャー企業は、1つまたは少数のクラスタに特許が集中している。逆に、大企業は、1つまたは少数の中心となるクラスタといくつかのクラスタに分散して特許を保有している。LG Electronicや中国国家電網などでは、少数のクラスタに特許が集中しており、ある特定のアプリケーションに特化したクラスタポートフォリオを保有していると考えられる。

図5-1の特許ポートフォリオを比較すると、産業用ロボットメーカーは、B25、B05、G06を中心に保有しつつも企業によって、特許ポートフォリオに多少の相違があるように見える。また、中国国家電網のように、クラスタポートフォリオは特定の少数のクラスタに集中しているが、特許ポートフォリオは送電設備の検査関係のロボットに注力していることを反映してH02のシェアは他のIPCコードよりは高いが、他の特許についても広く浅く保有している。

ベンチャー企業やある特定のアプリケーション向けロボットを持つ企業と広くロボットの事業を展開している企業の間では、特許ポートフォリオとクラスタポートフォリオにより、その違いが見えてくると考えられる。したがって、機関間の技術ポートフォリオのパターンにより、企業の事業展開の広さや特徴を特定できる可能性がある。

⁶⁷ 特許保有上位20社について、Simpson の λ と情報エントロピを計測し、両者には負の相関関係があることを確認した。Simpson の λ は、多様化するほど0に近いため、Intuitive Surgical Inc.やiRobotなどの一部の企業は0.5以上となるがほとんどは、0.1~0.4の間にあり比較検討するには差がないことから、情報エントロピを採用した。

第3章3.2.7の特許ポートフォリオベクトルとクラスポートフォリオベクトルの式3-21、3-22、3-25、3-26から、それぞれの情報エントロピを計測する。

$$Vipc_k = [IPC_{11k}, IPC_{22k}, \dots, IPC_{nnk}] \quad (k: \text{Organization}) \quad (3-21)$$

$$IPC_{iik} = P_{iik} / \sum_i P_{iik} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-22)$$

$$Vcluster_k = [CL_{1k}, CL_{2k}, \dots, CL_{mk}] \quad (3-25)$$

$$CL_{ik} = CLS_{ik} / \sum_i CLS_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3-26)$$

情報エントロピ H は、以下の定義で算出される。

$$H = -\sum_i^n P_i \cdot \log_2 P_i \quad (1 \leq i \leq n) \quad (6-1)$$

P_i は、 i 番目の要素のシェア。

式6-1の情報エントロピ算出式により、機関 k の特許ポートフォリオエントロピ H_{ipc_k} 、クラスポートフォリオエントロピ $H_{cluster_k}$ は、以下で定義される。

$$H_{ipc_k} = -\sum_i^n IPC_{iik} \cdot \log_2 IPC_{iik} \quad (6-2)$$

$$H_{cluster_k} = -\sum_i^m CL_{ik} \cdot \log_2 CL_{ik} \quad (6-3)$$

H_{ipc_k} 、 $H_{cluster_k}$ は、0 に近づくほど、ある特定の分野に特化し、値が大きいほど、多様化していることを表す。

H_{ipc_k} 、 $H_{cluster_k}$ を特許保有上位50機関について算出し、X 軸を特許ポートフォリオベクトルの情報エントロピ、Y 軸をクラスポートフォリオベクトルの情報エントロピを1991-2000年と2011-2016年で計測した⁶⁸。機関の属性ごとに情報エントロピを比較検討できるよう、表6-5の通り、機関をプロットした点の色により分類した。

2011-2016年の特許ポートフォリオとクラスポートフォリオの情報エントロピの分布の全体をみると（図6-4）、クラスポートフォリオの情報エントロピは、特定分野のロボットを開発販売している iRobot、Intuitive Surgical Inc.、エチコンと半導体製造装置メーカーのアプライド・マテリアルズが、1.0 以下である以外は、1.3～3.1 の間にあり、特許ポートフォリオの情報エントロピは、エチコン、不二越、神戸製鋼、清華大学が1.0～1.5 の間にあるが、それ以外は1.5～2.6 の間に固まっている。クラスポートフォリオの方が、特許ポートフォリオよりも、情報エントロピの大小の幅が大きい。

⁶⁸ Appendix の付表6に、1974-1990年から、2011-2016年までの特許ポートフォリオベクトルとクラスポートフォリオベクトルの情報エントロピの計測結果を添付した。

表6-5のカテゴリで分けた機関の分類ごとにみると、産業用ロボットメーカーでは、様々な産業用ロボットの品揃えを持つ4大産業用ロボットメーカーであるファナック、安川電機、ABB、KUKAは、概ね、特許ポートフォリオの情報エントロピが1.7～2.2、クラスタポートフォリオの情報エントロピが、2.2～2.6の間にある。その他の産業用ロボットメーカーで、特定の分野に特化した産業用ロボットを製造販売している不二越、神戸製鋼、ダイヘン⁶⁹は、クラスタポートフォリオの情報エントロピが、1.85以下、特許ポートフォリオの情報エントロピが1.65以下となっている以外は、クラスタポートフォリオの情報エントロピは、4大産業用ロボットメーカーとほぼ同様の2.2～2.6の間にある。特許ポートフォリオの情報エントロピは、デンソーが1.567と小さいが、それ以外は、1.7～2.2の間にある。

IBM、富士通、日立製作所、グーグルのIT企業は、総じて、特許ポートフォリオの情報エントロピが、それぞれ、2.187、2.233、2.201、2.324と産業用ロボットメーカーより大きい、クラスタポートフォリオの情報エントロピは、2.045、2.254、2.155、1.602とグーグルが小さいが、ほぼ同程度である。特許ポートフォリオの情報エントロピが産業用ロボットメーカーより大きい機関は、サムソンと三菱重工業が2.5を超えており、家電や電子機器、半導体等を製造販売するシャープ、シーメンス、ソニー、パナソニック、iRobot、ハルビン工程大学、中国科学院瀋陽自動化設備研究所、上海大学、華南理工大学、上海交通大学、北京航空航天大学、東南大学、浙江大学など中国の大学および研究所、中国国家電網などである。

表 6-5 図6-3および6-4の機関の分類

マーカ色	機関の分類
●	産業用ロボットメーカー
●	IT企業
●	中国の企業、大学、研究機関
●	自動車メーカー
●	家電等
●	医療関係企業
●	その他

⁶⁹ ダイヘンは、物流・搬送に強い機械メーカーであるが、溶接ロボット等特定分野の産業用ロボットを製造販売している。

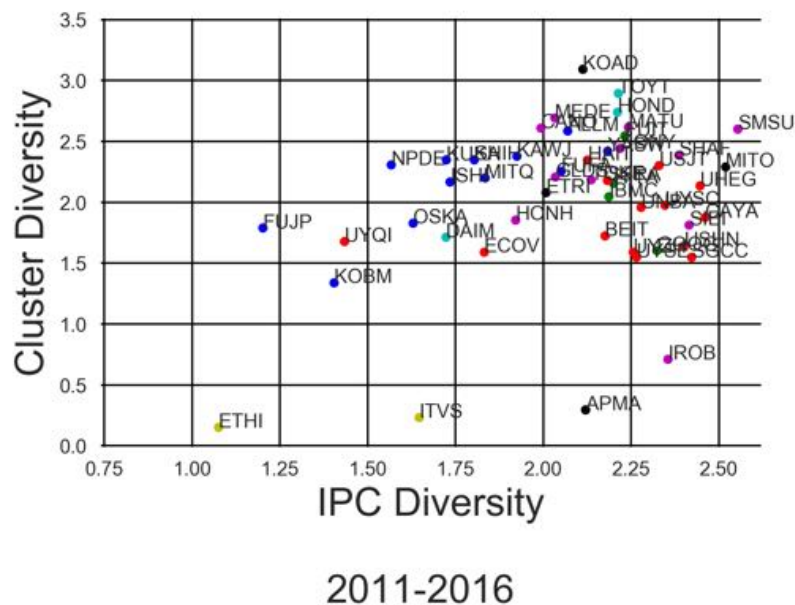


図 6-4 特許ポートフォリオとクラスタポートフォリオの情報エントロピー (2011-2016 年)

これらの機関は、特許ポートフォリオの情報エントロピーは産業用ロボットメーカより大きい、クラスタポートフォリオの情報エントロピーは、サムソン、三菱重工業、シャープ、中国科学院瀋陽自動化設備研究所、ハルビン工程大学がほぼ産業用ロボットメーカと同程度である以外は、2.0 未満と産業用ロボットメーカのクラスタポートフォリオの情報エントロピーより小さい。

クラスタポートフォリオの情報エントロピーが産業用ロボットメーカより大きい機関は、韓国の KIST が 3.092 と 3.0 を超えている他、トヨタ自動車、本田技研工業、美的集団、キャノン、パナソニック、サムソンと続く。サムソンは、特許ポートフォリオの情報エントロピーが 2.601 と 50 社中最大で、クラスタポートフォリオの情報エントロピーも 2.554 と産業用ロボットメーカよりも大きい。サムソンは、家庭用掃除ロボットは販売しているもののロボットの事業は未だ小さいが、ロボットに関する世界第 2 位の特許保有企業であり、広い範囲で研究開発を行なっていると考えられる。韓国の KIST は特許ポートフォリオの情報エントロピーは、2.113 と産業用ロボットメーカや他の機関の平均とほとんど変わらないが、クラスタポートフォリオの情報エントロピーが最大の 3.092 であり、幅広くロボットの応用分野に関する研究開発が行われていると考えられる。

図 6-5 は、1991-2000 年における特許ポートフォリオとクラスタポートフォリオの情報エントロピーをプロットしたものであるが、産業用ロボットが急成長した時期においても、産業用ロボットメーカの特許ポートフォリオとクラスタポートフォリオの情報エ

ントロピが、それぞれ、1.75～2.21、1.5～2.7 の範囲内にあり、2011-2016 年とほぼ同様の範囲にあるのに対し、三菱重工業、日立製作所、ソニーは両情報ポートフォリオが大きく、ABB には及ばないものの、特許ポートフォリオの情報エントロピは、サムソン、本田技研工業、キャノン、シーメンス、パナソニックなどが大きく、エチコン、Intuitive Surgical Inc.、アプライド・マテリアルズは、ほぼ 2011-2016 年のポジションと同様で、クラスタポートフォリオの情報エントロピが小さいことは興味深い。この時期は、中国では、唯一、清華大学が、情報エントロピは小さいが現れており、ある特定分野のロボットの研究開発を行なっていたと考えられる。

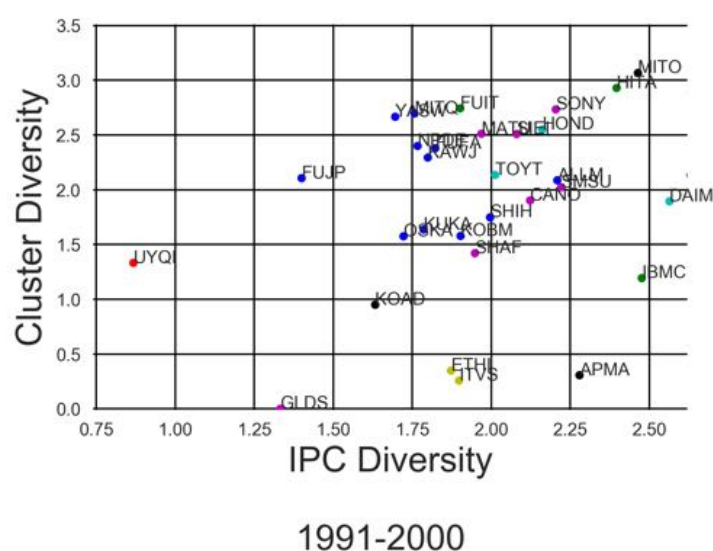


図 6-5 特許ポートフォリオとクラスタポートフォリオの情報エントロピ (1991-2000 年)

特許ポートフォリオとクラスタポートフォリオの情報エントロピの計測結果とロボット技術の専門家からのヒアリングも踏まえると、特許ポートフォリオとクラスタポートフォリオの情報エントロピから見たロボットの事業展開の広さや特徴を、以下のようにまとめられる。

- (1) 産業用ロボットメカは、幅広い用途の産業用ロボットを提供する産業用ロボットメカでも、特許ポートフォリオの情報エントロピは2.25以下、クラスタポートフォリオの情報エントロピで2.7以下である一方、大学や研究機関、自動車や家電・電子機器メカ、IT企業などは、産業用ロボットメカより、総じて、情報エントロピが大きい。
- (2) ベンチャーや特定のアプリケーションに特化してロボット事業を行なってい

る企業の情報エントロピは小さい。(iRobot、Intuitive Surgical Inc.、エチコン、アプライド・マテリアルズのクラスタポートフォリオの情報エントロピは、1.0 以下)

- (3) 情報エントロピの大きい大学や研究機関は、幅広いテーマで研究開発を行っていること、自動車や家電・電子機器メーカ、IT 企業などは、事業規模が産業用ロボットメーカより 1 桁ほど規模が大きく、ロボットを活用するユーザの立場から、ロボット利用の可能性についての研究開発に取り組んでいること、ロボットのみならず、他産業へ機器・システムを提供する企業であることなどが考えられる。

6.4 知識結合に着目する意義と知識結合に関する指標の意味

6.4.1 学術研究 (Science)、技術開発 (Technology) の知識結合に着目する意義

ロボットの特徴として、ロボットの機能を発揮するための基盤技術とロボットを導入する分野へ応用・適用するための応用技術との組み合わせで成り立っており、応用分野のニーズに合致し、従来の方法より便益があると認識された上で、安全性や法制度、ロボットを導入した時の費用対コストなどをクリアして初めて社会に実装されていく。

本研究で対象とした知識結合は、学術研究分野あるいは技術開発分野（特許）における分野間の結合・融合を計測したものであり、技術面からのアプローチで、安全性や法制度などの技術以外の側面は考慮されていない。現在、社会実装が進んでいるロボットとして産業用ロボットや手術用ロボット、家庭用掃除ロボットなどがあるが、産業用ロボットと手術用ロボットのように、ロボットが稼働する工場内や手術室内は一般の消費者が入ることはなく、安全柵の設置や労働安全規制や医療機器としての認可を得た上で、ロボットの操作を身につけた専門のオペレータや医師がロボットの操作を行っており、導入されるロボットは、要求される機能や仕様を満たして初めて使用に耐えるものとなる。

例えば、製造現場で使用する塗装ロボットは、ロボットを動かす電気が塗装材に引火して爆発しないような防爆機構を施し、塗装ムラのない品質で効率的に動作することが求められる。手術用ロボットは、人の生命に直接関わることから、最低限医師が行う手術のレベル以上が求められ、それらを実現するためには、技術的な裏付けが要求される。家庭用掃除ロボットの場合でも、人への危害はもとより、家庭内にある家具等を傷

つけないような安全対策を取りつつ、掃除機能として、人や掃除機が行う程度の性能が満たされなければ使われることはない。まず、これらの要求を満たすために技術的に解決して初めて、安全性や法制度などの技術以外の課題をクリアすることに社会的意義が出てくるものとする。

米国高等研究計画局（DARPA）が実施した DARPA Robotics Challenge、アマゾンが実施している Amazon Robotics Challenge⁷⁰、国内では、介護ロボットなどのロボットに関する特区を指定して開発普及を後押しする取り組みが行われているが、期待に反してなかなか普及しないのは、最初の技術的課題をクリアすることが未だ難しいためと考えられる。

したがって、学術研究分野と技術開発分野（特許）に焦点を絞り、分野間の結合・融合を計測することで、対象とする分野における知識結合ネットワークの構造と特徴が明らかになり、その構造と特徴を分析することで、取り組むべき技術開発や課題を抽出できると考える。

また、知識結合する分野の場合には、ロボットが社会実装するために必要な技術が何であるか、逆に、クラスタに属しながら、知識結合のない関連分野にある分野の場合には、将来社会実装されるために必要な技術は何であるかを、知識結合ネットワークの分析により見当をつけることなど、研究開発の企画検討に有力な情報を提供できることとなる。学術研究や技術開発の知識結合を対象にした本研究は、実務に貴重な情報を提供できることから、十分意義があると考えられる。

6.4.2 知識結合に関する指標の意味

本研究では、学術研究（Science）や技術開発（Technology）における分野間の結合・融合を「知識結合」と定義し、研究を進めたが、そもそも、知識結合を計測することについての意味を考える。本研究で用いた指標を中心に、知識結合を把握することにどのような意味があるのかを考察する。

表 6-6 は、先行研究で用いられている指標を含め、それぞれの指標が表す意味を考察し、それらを、知識結合の強さ・近さ、密度、広さ、速さなどとして整理したものである。

本研究で知識結合を把握するために用いた引用率（CIR）、結合率（COR）は、コサ

⁷⁰ アマゾンが 2015 年から始めた商品の仕分けなど物流の自動化を競う競技。当初、Amazon Picking Challenge として開催され、2017 年から Amazon Robotics Challenge と名称変更した。

イン距離、Jaccardなどの既存の指標との比較検討の中で、分野間の結合・融合の近さ・強さを計測するために、平均クラスタリング係数などは、個々の知識結合ネットワークの形状から、客観的に特徴を把握するために、グラフ理論で用いられている指標を導入したものである。その知識結合が何を表しており、どのように計測できるかとの観点から整理した。

引用率 (CIR)、結合率 (COR)、コサイン距離などは、技術的距離 (technological distance) や技術的類似性 (technological similarity) と呼ばれ、A. B. Jaffe[36]やH. Small[81]、A. Porter[73]などがコサイン距離などで計測を試みてきた。知識結合がどれだけ強く、あるいは分野間の距離がどれだけ近いかは、その技術の結合・融合がどれだけ熟度があり、社会実装されていくのかの重要な指標になる。

表 6-6 知識結合を把握するための指標とその意味

知識結合	指標	指標の意味
知識結合の近さ・強さ	・引用率 (CIR)、結合率 (COR) ・Cosine, Jaccardなど	技術的距離、技術的類似性など分野間の関連性の度合いを表す。指標が大きければ大きいほど、2分野間の結合・融合が進んでいると解釈。Cosine, Jaccard, Pearson's r など様々な指標の提案が先行研究にあり。本研究では、引用率 (CIR)、結合率 (COR)を用いて分析。
知識結合の密度	・平均クラスタリング係数 ・平均次数中心性 ・エッジ/ノード比	ネットワークの疎密を表す指標であるが、知識結合する分野間の結合・融合の度合いを表す。完全グラフに近づくほど、1に近くなる。ある特定の分野を中心に放射状のように結合・融合する場合は、指標の値が小さい。 エッジ/ノード比で、知識結合ネットワークの密度の目安とすることも可。
知識結合の広さ	知識結合するノードの数	知識結合を形成する分野の数。関連する技術やアプリケーションが多くなると、ノード数も拡大する傾向。
知識結合の速さ(成長)	・本研究では使用せず。 ・Technology cycle time [7][79]	萌芽分野や急成長分野の特定などでは知識結合の速さが重要な指標となる。本研究では、研究対象外。 Technology cycle timeとして、引用されるまでの平均やmedianを指標とした例あり。
知識結合の割合	・知識結合率(知識結合するノード数の全ノード数との比)	カテゴリ分けされたクラス内の分野のうち、知識結合を形成する分野の割合。割合が小さく、知識結合を形成しない分野が多い場合は、社会実装が進んでいない反映と考えられる。
知識結合の中心的役割(ハブまたはコア)	次数中心性 (Degree centrality)、媒介中心性 (Betweenness centrality)、近接中心性 (Closeness centrality) など	知識結合する分野のうち、中心的役割を果たす分野を抽出するための指標。知識や技術の伝搬に注目する場合などは、媒介中心性が使用される。ハブとなる分野がどれだけ分野と結合・融合しているかを抽出するため、本研究では、次数中心性を用いて分析。
知識結合の構造	コア/周辺構造 コア: 完全グラフ 周辺: 完全グラフ以外	知識結合の構造を把握するためにコア/周辺構造の考え方を導入。完全グラフを形成するコア分野は、基盤的分野を知るために有益。

分野間の結合・融合を表す知識結合は、ロボットの基盤技術と言える技術開発分野(特許) 同士の結合ペアであれば、ロボットの機能を高度化するための技術開発が進んでいること、基盤技術と応用技術との間の結合ペアであれば、応用分野の用途開発が進んでいることとして捉えることができる。そして、知識結合の近さ・強さを表す引用率 (CIR)、結合率 (COR) の大きさが、その結合ペアによる技術の熟度を反映しているものと考えられる。

平均クラスタリング係数と平均次数中心性は、知識接合を形成する分野がお互いにこど

のくらい密に結合・融合しているかを把握するための指標であり、知識結合の密度を表していると考えられる。エッジノード比によっても、知識結合ネットワークの密度の目安になる。6.1.2において述べたように、学術研究論文は、エッジノード比が6.2、特許2.44であり、学術研究論文の方が、ノード数に対して引用数が約2.5倍とネットワークが密であり、特許においても、クラスタ#4が5.18、クラスタ#5が6.70など、エッジノード比が大きいクラスタがあることもわかる。知識結合の密度により、分野間の結合・融合度合いを測る指標となる。

第4章で学術研究分野と技術開発分野（特許）の平均クラスタリング係数と知識結合する割合である知識結合率を計測して判明したことであるが、学術研究分野のクラスタ#1のように、平均クラスタリング係数は高いが、知識結合率が低く、ある特定の分野の間は密に結合・融合しているが、知識結合を形成しない分野が多いクラスタもあり、クラスタ内の分野のうち、どれだけ知識結合しているかで社会実装したロボットがあるのか、あるいは、今後のロボット化が進む分野のアプリケーションが潜在的にあることを反映している可能性があるので、知識結合率も併せて参考にすべき指標と考える。

例えば、第4章の分析結果から、溶接・塗装、搬送・ピッキングや半導体用途などの産業用ロボット、手術用ロボット、家庭用掃除ロボットなど社会実装が進んでいる分野では、ハブとなる技術開発分野（特許）を中心に、コアとなる技術開発分野（特許）が結合・融合し、周辺分野にも、応用分野の技術開発分野（特許）が結合していることが観察された。一方、市場としてなかなか立ち上がらないリハビリテーション分野においては、6.2.2の表6-4の結果の通り、知識結合を形成しない関連分野に多くの技術開発分野（特許）が含まれ、技術としての熟度が低いことが伺われる。また、第4章4.2の技術開発のクラスタ#1のA61、A62（救命・消防）、A47、B62（鉄道以外の陸上車両）、G10（楽器、音響）などのように、周辺分野となる前に、関連分野に位置付けられていたこと、2001-2005年は周辺分野に位置付けられていたG01（計測・試験）は、2006-2010年には周辺分野、2011-2013年からはコア分野に位置付けられており、時系列とともに、関連分野から知識結合を形成する周辺分野あるいはコア分野と移行する技術開発分野（特許）が観察されており、ロボットの基盤技術として、計測技術が取り入れられ、災害対策用のロボット開発、AGVのような移動ロボットなどが開発されていることが伺える。

したがって、知識結合ネットワークの構造とハブ、コアをなす技術開発分野（特許）とそれに結合する周辺分野の技術開発分野（特許）との結合関係性と分野間の結合・融合の強さを表す引用率（CIR）または結合率（COR）をみることで、社会実装されてい

るかどうかのシグナルとして活用できる可能性がある。知識結合ネットワークの構造から抽出されるハブ、コア、周辺、関連の分野に位置付けられる技術開発分野（特許）は、クラスタリングされたカテゴリの技術群（グループ）において、どの技術（特許）が、ハブ、コアとして中核的な技術か、あるいは、中核的技術を補完する従の技術かを判断する参考となり得る。また、関連分野に位置付けられる技術開発分野（特許）は、知識結合を形成していないが、これから社会実装される可能性のあるアプリケーションの技術の集合とみなすことができる。

技術開発分野（特許）が知識結合を形成してコア分野や周辺分野に位置付けられるとロボットが社会実装されていくことに関しては、6.5において専門家からも肯定の意見を得ており、知識結合ネットワークの構造と分野の位置付けと社会実装との間に着目して、医療・ヘルスケア分野など社会実装が待たれている分野において、ボトルネックとなっている技術の探索にも、知識結合の分析を活用できる可能性があり、今後の研究テーマにもなる。

6.5 専門家からの評価を踏まえた MM 手法の有用性と新規性

本研究で行なった MM 手法による学術研究論文と特許データによるロボット分野のイノベーション進展分析と、機関の技術ポートフォリオの分析結果がロボットの研究開発や社会実装の実態を把握できているかを検証するため、産業用ロボットの専門家⁷¹による評価を受けた。その結果は、第4章、第5章の分析結果の考察、第6章の各節に反映させているが、本節では、専門家からの評価を踏まえた MM 手法の有用性と新規性を考察する。

MM 手法によるロボット分野の学術研究および技術開発の分析結果による知識結合の構造と特徴については、技術の結合・融合という概念を意識したことはなかったが、産業用ロボット、溶接・機械加工ロボット、手術用ロボット、家庭用掃除ロボットなど主要なロボットのアプリケーションごとに、実態にあった学術研究分野間および技術開発分野（特許）間の結合・融合が抽出されている。今まで、個々の特許の技術を見ていたが、技術の結合・融合関係を加味することで、精度が上がっている。具体的には、溶接ロボット、塗装ロボット、手術用ロボット、家庭用掃除ロボットが、それぞれ、B25J（マニピュレータ）と、B23K（溶接等）、B05B（スプレー装置）、A61B（診断、手術）、

⁷¹ メーカ勤務の経営企画部長、開発研究所長、ロボット技術部長、元知的財産部長から、それぞれ、経営企画、研究開発、ロボット技術、知的財産権の観点から、貴重なご意見と評価を頂いた。

A47L（家庭の洗浄・清浄）との知識結合が形成されており、ロボットを制御するためのG01、G05、G06などとも知識結合の形成が抽出されており、主要なアプリケーションのロボットの構造や特徴を捉えられているとのことであった。また、知識結合が形成される、すなわち、技術間で結合・融合することでロボットの研究開発の進捗や社会実装あるいは実用化されることは、少なくとも、産業用ロボットについては分析結果で表れており、他の分野も含めて言えるのではないかとのことであった。

クラスタ間での知識結合を形成する分野の比較検討を時系列でみることにより、共通の研究基盤あるいは技術基盤の特定と技術の高度化や機能の分離が観察されている。例えば、学術研究分野のクラスタ#2のサブクラスタである二足歩行ロボット、リハビリテーション用ロボット、ソフトロボットが共通の研究領域を持ちながら、それぞれの研究を反映した学術研究分野が抽出されており、これらのロボット研究の間で共通の研究基盤があるとともに、それぞれの研究の特徴となる学術研究分野の進展や、技術の高度化・機能分化が把握できているとのことであった。

また、特許の分析で、2000年代まで、知識結合を形成する技術開発分野（特許）が増加後、一度減少し、2010年代に再び増加しているのは、日本で言えば、2005年の愛知万博で、各社様々なロボットの研究開発が行われたが、その後、リーマンショックもあって、ロボットの研究開発を行う企業も絞られ、日本企業は特許の出願を重要なものに絞り、国際出願に変わったことを反映している可能性があるとのことであった。

ロボットの特徴としては、家庭用掃除ロボットなどを除き、ロボットを購入すればすぐに使えるわけではなく、特に産業用ロボットは、外に対しても擦り合わせが必要である。リハビリ用ロボットも、理学療法士などの専門的な知識を持った人のサポートやトレーニングが必要で購入してすぐに使えるものではない。手術用ロボットも同じで、訓練しなければ、手術の効率や成功率は上がらない。知識結合の形成に着目したことは、ロボットの特徴を捉えるための有用な手法と評価できる。

また、引用方法は異なるが、学術研究論文と特許のクラスタ結果を比較することで、例えば、学術研究論文は特許の先行指標として、学術研究論文で得られたクラスタ結果で抽出された分類を、特許分類の新技术分類の提案に活用するなどが考えられるとの新たな気づきも得られた。

技術ポートフォリオの分析については、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオという新しい定義の技術ポートフォリオにより、機関間の相違を定量化できたことは有益であり、各企業のロボットの取り組みの特徴を反映して、機関間の相違は実態ともあっている。情報エントロピの分析で、自動車、家電、IT企業などの情報エントロ

ピが産業用ロボットメーカーより大きいのは、ロボットユーザとなる企業は、事業規模もあるが、ロボットを利用するために様々なトライを行なっていること、それに対して、産業用ロボットメーカーは、事業としてロボットを製造販売しているので、ターゲットを絞って開発しているという差が出ているとの評価であった。ロボットユーザといっても、トヨタ自動車はロボットを使う技術の開発、本田技研工業は、自らもロボット開発を行なっているなど企業によっての違いがあり、本研究の技術ポートフォリオ分析が、そうした差異を把握している可能性がある。

また、知識結合の形成と特徴は抽出できているが、それがイノベーションに繋がっているかどうかは、知識結合の分析のみではわからないとの指摘があり、知識結合の形成と研究開発の進捗と社会実装との関係を、専門家による評価とともに、A roadmap for US Robotics や医学系の学術専門誌との比較により検証を6.2において行った。

以上、専門家からの意見からも、MM 手法により、応用分野の技術を含む多様な技術の複合で成り立っている一方、その技術の構成が似通っているロボットにおいて、主要なアプリケーションごとに、技術の結合・融合の構造と特徴を定量的に把握し、知識結合の形成が、研究開発の進捗や社会実装を把握する指標となり得ることを示せたことは、実務的にも有用と判断され、マクロ/メソスケールでのロボットのイノベーションの進展の把握とミクロスケールである機関間の相違を精度よく計測し、機関間の競合分析、補完分析の手法としての可能性を示せたことに新規性があると評価された。

6.6 本研究の貢献

6.6.1 学術的な貢献

本研究は、クラスタ・ネットワーク分析を基礎としつつ、知識結合と定義した技術的結合・融合 (Technology convergence) から見たロボット分野のイノベーション進展を定量的に把握する MM 手法 (Module-based mining method) を開発・提案し、知識結合を軸として、マクロスケール、メソスケールでの主要なカテゴリ (クラスタ) ごとの知識結合の特徴と構造の解明とミクロスケールでのロボット分野での機関間の競争状況を分析する手法を提案したことは、Technology convergence の学術研究に一定の貢献ができたと考える。

具体的には、Technology convergence の学術研究においては、学術研究 (Science) あるいは技術開発 (Technology) の全体的あるいは俯瞰的なマッピングや ICT、ナノテクといった特定分野の学術研究は行われているが、ロボットのように多数の異なる技術の

結合・融合した Technology convergence を対象にした学術研究はほとんどなされておらず[45]、マクロスケールベースが数10社程度の特定企業を対象にした事例研究が多い。また、技術ポートフォリオに関する学術研究においては、IPC コードなどの特許分類を用いた分析は多いが、特許分類を用いた技術ポートフォリオ分析の場合、技術が多岐、多様に渡っている場合には機関の保有する主要な技術の間の相違や類似性を計測できても、ロボットのように特許の保有分布が似通っている場合には、特許分類を用いた特許ポートフォリオでは適していなかった[102]。新しく知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオを技術ポートフォリオとして導入することにより、相違を明確に計測できることとなり、その結果を機関間の競合分析・補完分析にも応用する手法を提案し、実際の機関間の競争関係を反映した結果が得られた。

これらの手法は、クラスタ・ネットワーク分析の応用分野を広げるとともに、ロボットに限らず、他の分野での適用や分析ツールとしての活用の可能性を拓いたと考える。

Newman の高速クラスタリングアルゴリズムを基礎に東京大学イノベーション政策研究センターが提供する学術俯瞰システムの活用分野を広げたことにもなり、今後、MM 手法を用いた研究分析が行われることが期待される。

6.6.2 政策的な貢献

第1章の序論冒頭に記述したように、ロボットを始めとするハイテク産業は、国際競争力の維持・発展と経済成長のため、わが国のみならず、主要国において、ハイテク産業振興のための戦略策定や推進に注力している。特に、第4次産業革命と言われる最近のIoTが産業、経済、社会、生活に影響を及ぼすことから、従来のセクターごとの政策立案では難しくなっている。一方、デジタル化と人工知能（AI）の進歩により、大量のデータに基づき政策立案を行い、より効果的な政策を推進しようとするエビデンスベースの政策立案の導入も進みつつある。

本研究で開発したMM手法は、学術研究（Science）と技術開発（Technology）に関して、全体的な動向の俯瞰や特徴把握が定量的に可能なこと、知識結合ネットワークによる成長分野の特定や探索、クラスタリングにより関連した分野のトレンドの把握などへの応用が可能であり、エビデンスベースの政策の企画立案の支援ツールとしての活用が見込まれる。

6.6.3 実務的な貢献

企業においては、グローバルな競争下にあって、自社の製品サービスの強化や新規事業開発のための研究開発、新製品・サービス開発などを適時的確に実施することが必須であるが、デジタル化、IoT、AIなどが業種や技術の垣根を無くし、M&Aの活発化とも相まって、今まで競合相手とは考えられなかった企業との競合も起きるようになった。また、IoT、AIの進展により、自社のみで全ての研究開発をまかなうことは難しくなり、いわゆる、オープンイノベーションが必要になっている。

こうした状況の中、MM手法は、ロボット分野の全体的な動向とクラスタリングした主要なカテゴリごとのトレンドや特徴を把握することができ、企業の経営計画や技術開発戦略の策定など次の一手の計画を策定検討するときの支援ツールや基礎資料を提供することができる。特に、技術ポートフォリオによる競合分析、補完分析は、M&Aやアライアンス戦略の基礎資料となり得る。

アライアンス検討マップを始め、MM手法で提案した個々の分析手法については、6.5において専門家からの意見からも、実務的な利用可能性があるとの評価を得た。

6.7 本研究の限界および課題

本研究では、知識結合を軸としてロボット分野のイノベーションの進展について研究を進めたが、分析の対象、分析手法や使用したデータなどで、以下のような限界および課題がある。

まず、本研究では、学術研究論文と特許のみを分析していることに関する限界である。ロボットが社会に実装されるのは、技術的な要因のみではなく、法規制、社会制度・慣習、安全性、労働問題、コスト、設備投資、生産能力、販売チャネルなど様々な要因が絡んでいるが、本研究では、学術研究論文と特許のみを対象にし、学術研究分野間、技術開発分野（特許）間の知識結合のみに着目して分析している。そのため、知識結合の形成や構造のみで、ロボットの応用分野への普及と直接結びつけての分析には留意が必要になる。

MM手法は、クラスタ・ネットワーク分析を基礎としており、クラスタ分析手法は、大規模ネットワークにおいても計算可能な時間でネットワーク構造を俯瞰的にみてクラスタリングできるNewman法を実装した東京大学イノベーション政策研究センターの学術俯瞰システムを使用した。それ以外にも、Girvan-Newman法、階層クラスタリ

ング法、k-means 法など様々な手法があり、そのクラスタリング法により、カテゴリ分けや知識結合ネットワークの構造に影響を与える。また、Newman 法でも、第3章3.3.4で示したように、クラスタリングの分析期間により、クラスタリングのカテゴリの組み換えが生じることに留意が必要である。また、直接引用の引用関係でクラスタリングしているため、直近のデータは引用が十分ないため分析に制約があることも認識しておくべきである。

本分析が、引用関係をベースに分析しており、学術研究論文や特許の内容にまで踏み込んでいないことにも限界がある。引用自身についても、学術研究論文が、著者が関係の文献を引用するのに対して、特許は、審査官引用、出願者引用などがあり、学術研究論文と特許との分析比較を行う場合、その相違に留意が必要であるとともに、特許は、国ごとに制度が異なり、引用に関して、各国間でバイアスがあることに留意が必要である[63]。また、学術研究論文、特許の分類は、WoS、Derwant Innovation がそれぞれ提供する既存の分類を利用しているために、知識結合の構造をさらに踏み込んだ分析には限界がある。具体的には、学術研究論文では、学術研究誌に割り付けられている分野以上のブレイクダウンは困難であり、特許では、IPC コードの特許分類を利用している限りは、その分類により制約を受けることとなる。また、学術研究論文、特許とも数のみで評価しており、学術研究論文や特許の価値や質は考慮されていない。特に、特許については、新製品・サービスに不可欠な特許を取得しているかで新製品・サービスの競争力は変わってくる。学術研究論文についても、研究成果の価値は異なることから同様である。学術研究論文や特許の重要性を判断する指標として、引用ネットワーク分析では、前方引用（forward citations）による評価を加えるなどの改善も必要となる。

知識結合においては、学術研究（Science）と技術開発（Technology）の間には密接な関係があるが、本研究では、学術研究と技術開発との間の結合は考慮していない。Derwant Innovation では、非特許の引用情報も提供しているので、今後の研究として、学術研究（Science）と技術開発（Technology）との間の知識結合の分析が必要である。

6.8 今後の研究と他分野への活用の可能性

本研究では、学術研究（Science）と技術開発（Technology）におけるロボット分野のイノベーションの進展を把握することを目的に研究を行った。MM 手法により知識結合を軸に分析することで、マクロスケール、メソスケールからミクロスケールまでの分析が可能であることを示した。本手法を、国別に適用することで、各国の特徴や各国間比

較の研究に容易に展開できるだろう。

本研究では、学術研究分野と技術開発分野（特許）は、それぞれ別々に分析を行い、学術研究（Science）と技術開発（Technology）との間のリンケージは考慮していない。実際には、学術研究と技術開発には密接なリンケージがあり、学術研究分野と技術開発分野（特許）間の知識結合を研究することにより、その間の結合・融合を明らかにすることは今後の研究として取り組むべきテーマと考える。特許は非特許の学術研究論文を引用することもあり、Derwant Innovation は、非特許の引用情報についても提供しているので、非特許である学術研究論文の引用関係から、学術研究と技術開発とのリンケージを把握することで、本研究を発展させることとなろう。

また、引用関係に基づく分析のために、引用されるまでのタイムラグに影響を受けるとともに、学術研究論文や特許の内容にまで踏み込むことは難しい。これらの課題を解決し分析を補完するために、機械学習などの手法を適用して、テキスト情報を用いた分析により研究を深掘りすることも必要になってくるであろう。

本研究で開発した MM 手法は、クラスタ・ネットワーク分析手法を引用関係に基づくカテゴリ分けと知識結合ネットワーク（行列）の両方に適用したものであり、知識結合ネットワークの構築から知識結合ネットワークの特徴量はグラグ理論に基づき平均クラスタリング係数、次数中心性などの各種指標、コア/周辺構造に基づき開発した客観的な指標である。MM 手法は、ロボット特有なものではなく、ロボットの学術研究分野、技術開発（特許）分野に限らず、適用が可能である。

ロボットは、ロボットの機能を発揮する技術と応用分野への適用技術との結合・融合で成り立っており、本研究で、知識結合に着目することにより、主要なアプリケーションや技術群ごとの構造や特徴が MM 手法により捉えられることが明らかになった。そこで、本手法が、どのような製品や技術群に適用できるかを検討するため、特許庁の技術動向調査の技術俯瞰図を参考に、表 6—7 に、応用分野への適用技術との結合を含め、多様な技術の結合・融合からなり、応用分野が多岐にわたる製品や技術をまとめた。

ここにあげた製品や技術はロボットの特徴に類似していると考えられ、これらの製品や技術に対して、MM 手法を適用して、知識結合ネットワークの特徴を捉えることにより、同様の研究分析ができると考える。

表 6-7 構成技術が広く、応用分野が多様な製品または技術の例⁷²

製品または技術	構成技術	応用分野
ドローン	機体構造(揚力・推力機構、動力機構、エネルギー源、安全機構など)、飛行制御(航路制御、姿勢制御、編隊・群体飛行、衝突回避)、センシング、無人機管制など	農水業、土木建設、空撮、搬送物流、防犯監視、点検、倉庫・工場、鉱業、計測・観測、保険、エンターテインメント、通信、公共
パワーアシストスーツ	機構、アクチュエータ、センサ・情報取得手段、エネルギー供給、制御、通信	介護、医療、防衛、産業、特殊環境作業、エンターテインメント、サービス用
3Dプリンター	機構、駆動系制御、環境制御(温度、湿度、雰囲気)後処理(熱的处理、含浸処理、表面処理等)、3Dデータ処理、付加製造材料、結合剤噴射、粉末床熔融結合、シート積層、材料押出、材料噴射、液槽光重合	(産業) 製造業(自動車/航空宇宙/機械/電機/消費財/化学 等)、創造産業・文化産業(デザイン/美術・芸術/博物館・美術館/個人・プロシューマ向け 等)、医療・ヘルスケア産業(医療系/歯科系/介護・福祉系 等) (用途) 試作品製作、実部品製造、成形型製造
人工知能技術	(人工知能基盤技術) 学習型AI(機械学習、ニューラルネット)、知識ベースAI(推論システム、知識ベース、知識の表現)、ファジィ型AI(ファジィ推論、ファジィ制御)など (人工知能技術) 認識、対人インターフェース、知識発見、機器・設備の操作など	(公共分野) 交通・運輸、通信、電力・ガス・水道、気象・環境、防災・防犯 (産業分野) 金融、製造、農林水産、法務・商取引、経営・管理 (生活分野) 娯楽・ゲーム、健康・医療、教育 (特定用途) 自動車、ロボット、医療・医薬
衛星測位システム	衛星信号処理(衛星信号、追尾、捕捉・相関処理等) 測位法(単独測位、DGNSS、干渉測位、ドブブラ)演算処理、各種誤差の補正、受信機の性能向上、時間短縮	情報提供サービス分野、測量・建設分野、物流分野、農業分野、鉄道分野、海洋・船舶分野(資源探査等)、自動車分野、宇宙分野、安心・安全(高齢者・子供等の見守り、インフラ監視、生活支援、救命・救助、気象観測、医療等)
ナノファイバー	(原料) 合成高分子、天然高分子、炭素 (製造) 前処理、紡糸、解繊、気相成長、後処理 (加工) 化学修飾、分散、シート化、成形、複合化、コーティング、積層化、紡織	(応用分野) フィルター材料、エレクトロニクス材料、複合材料、医療・バイオ材料、その他(化粧品、食品、衣類、包装材料、コーティング材) (応用産業) 環境、エネルギー、エレクトロニクス、輸送機器、医療・バイオ、産業資材
ウェアラブルコンピュータ	カメラ、ディスプレイ、操作部、センサー、電源、プロセッサ、通信モジュール、メモリ	電子決済、スポーツ、ヘルスケア、見守り、医療、保守点検、在庫管理等
仮想通貨・電子マネー決済システム	(決済システム一般) 暗号技術、認証、決済処理、記録、不正検出、チャージ (ブロックチェーン技術) 鍵の管理、データ管理、参加者構成、スクリプト記述、ブロックチェーン間接続、スケーラビリティ、価値の記録、関与者の記録、権利の記録、処理の自動化	(商取引) オンライン商取引(実店舗、自動販売機、交通、病院) オンライン商取引(仮想店舗、通信、公共料金、税、デジタルコンテンツ、オークション) (金融取引) 送金(海外送金、一斉送金、寄付、個人送金) 投融資(クラウドファンディング、証券取引、リース、保険・資産形成)

⁷² 特許庁技術動向調査中の技術俯瞰図を元に作成。

第7章 結論

現代は、いわゆる第4次産業革命と呼ばれる、全てのモノがインターネットにつながる IoT、データが価値の源泉となるデータ・ドリブンの経済の到来という新しい産業、経済、社会への移行期にあつて、あらゆる産業、技術が新たに結びつくことによって、イノベーションが生まれ、社会を変革していこうとしている。こうした背景から、シュンペンターがイノベーションを「新結合」と定義したように、異なる知識や技術の結合・融合がイノベーションを促進する要素としてますます重要となっている。

応用分野への適用技術を含む多様な技術の複合体であるというロボットの特徴から、ロボットを適用としようとする分野において、ロボットの導入、社会実装を妨げているのは、アプリケーションの実現のために必要な学術研究分野と技術開発分野（特許）における知識や技術の結合・融合の遅れが大きな要因ではないかとの問題意識の下、本研究に取り組んだ。

「知識結合」と定義した学術研究（Science）と技術開発（Technology）における分野間の結合・融合を軸として、クラスタ・ネットワーク分析を基礎に、マクロ、メソ、ミクロスケール、すなわち、主要なアプリケーションおよび機関の単位で、知識結合を定量的に把握し、特徴を抽出する手法である MM 手法を開発するとともに、開発した手法を、ロボットに関する学術研究論文と特許データに適用して、ロボット分野における知識結合の状況に関する知見を抽出し、専門家の評価も得て、ロボット分野におけるイノベーションの進展の重要な特徴を、第3章から第6章で具体的に明らかにしている。

第3章では、本研究の分析の基礎となる MM 手法とそれを構成する個々の分析手法の開発と実験を通じた評価を行った。具体的には、クラスタ・ネットワーク分析による引用ネットワークの形成と学術研究分野と技術開発分野（特許）のカテゴリ化、ノードに複数の分野が割り付けられている場合に、共引用（co-citation）を利用して単一分野間ネットワークに分解（Factorizing）する手法、知識結合ネットワークの構築と平均クラスタリング係数、次数中心性などのネットワーク指標による特徴量の抽出と社会ネットワーク分析を中心に研究されているコア/周辺構造の考え方に基づくハブ、コア、周辺、関連の各分野を抽出する方法、特許ポートフォリオに加え、新たに「知識結合ポートフォリオ」と「クラスタポートフォリオ」を導入し、複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合であっても、これら技術ポートフォリオをも用いて、機関間

の相違がより粒度細かく計測できる手法を開発した。

第4章では、第3章で開発したMM手法を、学術研究論文と特許の両方に適用し、クラスタ・ネットワーク分析によりカテゴリ分けしたクラスタごとに知識結合ネットワークを構築し、平均クラスタリング係数、次数中心性などの知識結合ネットワークの特徴量を計測した。その特徴量に基づき、ハブ分野、コア分野、周辺分野、関連分野となる学術研究分野と技術開発分野（特許）を抽出し、その抽出結果とロボットに関する文献と専門家による知見と評価に基づき、MM手法を用いた知識結合を軸とした分析が、研究開発の進捗や社会実装の度合いを把握できることを明らかにしている。

具体的な例を挙げると、学術研究分野では、産業用ロボットからサービスロボット、医療・ヘルスケア分野向けロボットへ学術研究のウエイトが移っていること、手術用ロボットは1つの主要な学術研究分野を形成し、咽頭がん、子宮がん、心臓手術などに手術用ロボットが適用されていたことが、外科学（Surgery）と医療・ヘルスケア分野との間の知識結合の形成から把握できた一方、医療・ヘルスケア分野と工学分野との間の知識結合はロボティクスなどの一部に限られていること、技術開発分野（特許）では、90年代の産業用ロボットの成長期には、産業用アプリケーションとして、マニピュレータなどのロボットの基盤技術と溶接、塗装、半導体デバイスなどの技術との知識結合が形成され、2000年代以降には、ゲーム/アミューズメント、家電、医療・ヘルスケア分野の技術との知識結合が形成されているなど、ロボットの基盤技術とロボットが応用される分野の技術との組み合わせで、知識結合が形成されていることが抽出された。

第5章では、特許の技術分類をもとに計測する特許ポートフォリオに加え、第3章で新たに定義した「知識結合ポートフォリオ」と「クラスタポートフォリオ」を特許保有上位50機関に適用し、各機関の特許ポートフォリオ、知識結合ポートフォリオおよびクラスタポートフォリオを計測して、各機関の保有する特許の特徴を把握するとともに、機関間の各技術ポートフォリオの相違を比較することにより、その競合状況、補完状況を定量的に把握できることを示している。ロボットのように応用分野への適用技術を含む複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合には、特許ポートフォリオから機関間の相違を検出することは難しかったが、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオを用いることで、機関間の技術ポートフォリオの相違が、より細かい粒度で定量的に計測できるとともに、知識結合ポートフォリオとクラスタポートフォリオから、その競合状況、補完状況を定量的に把握できることを明らかにし、その分析結果と専門家による知見と評価に基づき、企業の競合分析、補完分析への応用可能であることを示している。

第6章では、第3章の手法の開発と第4章、第5章の分析結果を、ロボットの研究開発の進捗や社会実装の事例、ロボットの研究開発動向や医学系の学術専門誌などの文献および専門家の知見、評価に基づき考察し、①MM手法が、学術研究論文と特許データにより、ロボット分野のアプリケーションレベルでの知識結合の構造、特徴を捉えられていること、②知識結合と研究開発の進捗や社会実装の度合いの関係を把握できること、③ロボットのように複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合においても、機関間の相違を把握できることを示し、知識結合を軸とした提案手法の有用性、新規性を明らかにするとともに、知識結合に着目する意義と知識結合に関する指標の意味、本研究の貢献、本研究の限界と課題、他分野への活用可能性をまとめている。

本研究では、学術研究 (Science) と技術開発 (Technology) に関して、一般に入手できる学術研究論文の書誌情報と特許情報を用いて「知識結合」を軸に分析することで、ロボット分野のイノベーションの進展が、マクロおよびメソスケールで、定量的に把握できること、主要アプリケーションごとに知識結合の構造と中心的役割を持つ学術研究分野、技術開発分野 (特許) が抽出できること、そして、本研究で開発した MM 手法による知識結合の形成が、ロボットの研究開発の進捗や社会実装、実用化の度合いを把握できること、ミクロスケールの機関間の技術ポートフォリオの相違が、新たに提案した知識結合ポートフォリオとクラスターポートフォリオにより、ロボットのように複数の技術から形成され、その技術の構成が似通っている場合においても、定量的に把握でき、企業間の競合分析、補完分析にも適用可能であることを示すことができ、本研究の目的を達成できたものと考えている。

参考文献

- [1] Bekeny, J. R., Ozer, E., 2016. Transoral robotics surgery frontiers, *World Journal of Otorhinolaryngology – Head and Neck Surgery* (2016) 2, 130-135, DOI: 10.1016/j.wjorl.2016.05.001.
- [2] Borgatti, S. P., Everett, M. Gm., 1999. Models of core/periphery structures, *Social Networks* 21 (1999) 375-395.
- [3] Boyack, K.W., Klavans, R., Borner, K., 2005. Mapping the backbone of science. *Scientometrics* 64 (3), 351–374.
- [4] Boyack, K.W., Klavans, R., 2010. Co-citation analysis, bibliographic coupling, and direct citation: which citation approach represents the research front Most accurately? *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.* 61 (12), 2389–2404. DOI: 10.1002/asi.21419.
- [5] Boyack, K. W., Newman, D., Duhon, R. J., Klavans, R., Patek, M., Biberstine, J. R., Borner, K. 2011. Clustering more than two million biomedical publications: Comparing the accuracies of nine tech-based similarity approached. *PLoS One*, 6(3), e18029.
- [6] Brockhoff, K.K., 1992. Instruments for patent data analyses in business firms. *Technovation* 12 (1), 41–58.
- [7] Caviggioli, F., 2016. Technology fusion: Identification and analysis of the drivers of technology convergence using patent data. *Technovation* 55-56 (2016) 22-32. DOI: 10.1016/j.technovation.2016.04.003
- [8] Chang, P., Wu, C., Lue, H., 2010. Using patent analyses to monitor the technological trends in an emerging field of technology: a case of carbon nanotube field emission display. *Scientometrics*. 82:5-19. DOI: 10.1007/s11192-009-0033-y.
- [9] Chang, S., 2012. Using patent analysis to establish technological position: Two different strategic approaches. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 79 2-15. DOI: 10.1016/j.techfore.2011.07.002.
- [10] Chen, S., Huang, M., Chen, D., 2012. Identifying and visualizing technology evolution: A case study of smart grid technology. *Technol. Forecast. Soc. Chang.*

- 79 1099-1110. DOI: 10.1016/j.techfore.2011.12.011.
- [11] Chen, S., Huang, M., Chen, D., Lin, S., 2012. Detecting the temporal gaps of technology fronts: A case study of smart grid field. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 79 1705-1791. DOI: 10.1016/j.techfore.2012.06.005.
 - [12] Choe, H., Lee, D. H., Seo, I. W., Kim, H. D., 2013. Patent citation network analysis for the domain of organic photovoltaic cells: Country, institution, and technology field. *Renewable and Sustainable energy Reviews.* 26 (2013) 492-505. DOI: 10.1016/j.rser.2013.05.037.
 - [13] Choi, J.Y., Jeong, S., Kim, K., 2015. A study on diffusion pattern of technology convergence: patent analysis for Korea. *Sustainability* 7, 11546–11569. <https://doi.org/10.3390/su70911546>.
 - [14] Computing Community Consortium (CCC) /Computing Research Association (CRA), A Roadmap for US Robotics From Internet to Robotics, 2009
 - [15] Computing Community Consortium (CCC) /Computing Research Association (CRA), A Roadmap for US Robotics From Internet to Robotics 2013 Edition, 2013
 - [16] Computing Community Consortium (CCC) /Computing Research Association (CRA), A Roadmap for US Robotics From Internet to Robotics 2016 Edition, 2016
 - [17] Computing Research Association's web site (<https://cra.org>), accessed on 28 December, 2019.
 - [18] Cunningham, S.W., Porter, A.L., Newman, N.C., 2006. Special issue on tech mining. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 73, 915–922.
 - [19] Curran, C., Broring, S., Leker, J., 2010. Anticipating converging industries using publicly available data. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 77, 385–395.
 - [20] Curran, C., Leker, J., 2011. Patent indicators for monitoring convergence – examples from NFF and ICT. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 78, 256–273. DOI: 10.1016/j.techfore.2009.10.002.
 - [21] Ecovacs Robotics' home page (<https://www.ecovacs.com/jp/about-ecovacs/>) accessed on December 28, 2019.
 - [22] Ethicon, Inc (<http://ethicon.jp>) accessed on Sep 16, 2019.
 - [23] Fazekas, G., Tavaszi, I., 2019. The future of robotics in neuro-rehabilitation. *Expert Review of Neurotherapeutics.* Vol. 19, 6, 471-473. DOI: 10.1080/14737175.2019.1617700.

- [24] Fortunato, S., 2010. Community detection in graphs. *Phys. Rep.* 486, 75–176.
- [25] Garas, G., Tolley, N., 2018. Robotics in otorhinolaryngology – head and neck surgery A look at the past, present and future, *Annals of the Royal College of Surgeons of England* 100(Suppl 7): 34-41., DOI: 10.1308/rcsann.suppl2.34
- [26] Garfield, E., 1955. Citation indexes for science. A new dimension in documentation through association of ideas. *Science*, 122, 3159, 108-111.
- [27] Garfield, E., 1970. Citation indexing for studying science. *Nature* 227, 669–671.
- [28] Gauch, S., Blind, K., 2015. Technology convergence and the absorptive capacity of standardisation. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 91, 236–249. DOI: 10.1016/j.techfore.2014.02.022.
- [29] Geum, Y., Kim, M., Lee, S., 2016. How industrial convergence happen: A taxonomical approach based on empirical evidences. *Technol. Forest. Soc. Chang.* 107 112-120. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.03.020.
- [30] Ghiasi, G., Lariviere, V., 2015. Sectoral systems of innovation: the case of robotics research activities. *Scientometrics* 104, 407–424. DOI: 10.1007/s11192-015-1611-9.
- [31] Grimaldi, M., Cricelli, L., Giovanni, M. D., Rogo, F., 2015. The patent portfolio value analysis: A new framework to leverage patent information for strategic technology planning. *Technol. Forecast. Soc. Change.* 94 (2015) 286-302. DOI: 10.1016/j.techfore.2014.10.013.
- [32] Hacklin, F., Marxt, C., Fahrni, F., 2009. Coevolutionary cycles of convergence: an extrapolation from the ICT industry. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 723–732.
- [33] Hashimoto, M., Kajikawa, Y., Sakata, I., Takeda, Y., Matsushima, K., 2012. Academic landscape of innovation research and national innovation system policy reformation in Japan and the United States. *Int. J. Innov. Technol. Manag.* 9 (6), 1230044. DOI: 10.1142/S0219877012500447
- [34] International Federation of Robotics' home page (<http://ifr.org>), accessed on July 30, 2019.
- [35] Ittipanuvat, V., Fujita, K., Sakata, I., Kajikawa, Y., 2014. Finding linkage between technology and social issue: a literature based discovery approach. *J. Eng. Technol. Manag.* 32, 160–184. DOI: 10.1016/j.jengtecman.2013.05.006.
- [36] Jaffe, A.B., 1989. Characterizing the “technological position” of firms, with

- application to quantifying technological opportunity and research spillovers. *Res. Policy* 18, 87–97.
- [37] Japan Robot Association, (JARA), 2001. Report on Technology Strategy for Creating a Robot Society in the 21st Century.
 - [38] Jeong, S., Kim, J., Choi, J.Y., 2015. Technology convergence: what developmental stage are we in? *Scientometrics* 100, 841–871. DOI: 10.1007/s11192-015-1606-6.
 - [39] Kajikawa, Y., Ohno, J., Takeda, Y., Matsushima, K., Komiyama, H., 2007. Creating an academic landscape of sustainability science: an analysis of the citation network. *Sustain. Sci.* 2, 221–231.
 - [40] Karvonen, M., Kassi, T., 2013. Patent citations as a tool for analyzing the early stages of convergence. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 80, 1094–1107. DOI: 10.1016/j.techfore.2012.05.006.
 - [41] Kay, L., Newman, N., Youtie, J., Porter, A.L., Rafols, I., 2014. Patent overlay mapping: visualizing technological distance. *J. Assoc. Inf. Sci. Technol.* 65 (12), 2432–2443. DOI: 10.1002/asi.23146.
 - [42] Kawasaki Heavy Industry INC LTD's home page (<http://robotics.kawasaki.com>), accessed on March 17, 2018.
 - [43] Kim, E., Cho, Y., Kim, W., 2014. Dynamic patterns of technology convergence in printed electronics technologies: patent citation network. *Scientometrics* 98, 975–998. DOI: 10.1007/s11192-013-1104-7
 - [44] Kim, G., Bae, J., 2017. A novel approach to forecast promising technology through patent analysis. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 117 228–237. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.11.023.
 - [45] Kim, J., Lee, S., 2017. Forecasting and identifying multi-technology convergence based on patent data: the case of IT and BT industries in 2020. *Scientometrics* 111:47–65. DOI: 10.1007/s11192-017-2275-4.
 - [46] Kim, N., Lee, H., Kim, W., Lee, H., Suh, J.H., 2015. Dynamic patterns of industry convergence: evidence from a large amount of unstructured data. *Res. Policy* 44, 1734–1748. DOI: 10.1007/s11192-013-1104-7.
 - [47] Klavans, R., Boyack, K.W., 2006. Identifying a better measure of relatedness for mapping science. *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.* 57 (2), 251–263. DOI: 10.1002/asi.20274

- [48] Ko, N., Yoon, J., Seo, W., 2014. Analyzing interdisciplinaryity of technology fusion using knowledge flows of patents. *Expert Systems with Applications*. 41 (2014) 1955-1963. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.08.091.
- [49] Kose, T., Sakata, I., 2017. Identifying Technology Advancements and Their Linkages in the Field of Robotics Research. *Portland International Conference on Management Engineering and Technology*
- [50] Kose, T., Sakata, I., 2018. Analysis of technology convergence in robotics and technological portfolios among robot-related organizations. *Portland International Conference on Management Engineering and Technology*
- [51] Kose, T., Sakata, I., 2018. Identifying technology convergence in the fields of robotics research, *Technol. Forecast. Soc. Chang.* Article in Press, DOI: 10.1016/j.techfore.2018.09.005.
- [52] Kose, T., Yamano, H., Sakata, I., 2019. Detecting Emerging Complex Technological Fields in Robotics. *Portland International Conference on Management Engineering and Technology*
- [53] KUKA Corp.'s home page (<http://www.kuka.com>), accessed on March 17, 2018.
- [54] Kumar, S. K., Tanmoy, G., Jishnu, N., 2015. Robotic Cardiac Surgery: A Systematic Review of the Past and Present. *La Prensa Medica Argentina, SciTechnol*, DOI: 10.4172/lpma.1000181.
- [55] Lee, W. S., Han, E. J., Sohn, S. Y., 2015. Predicting the pattern of technology convergence using big-data technology on large-scale triadic patents. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 100, 317–329. DOI: 10.1016/j.techfore.2015.07.022.
- [56] Lee, W.J., Lee, W.K., Sohn, S.Y., 2016. Patent network analysis and quadratic assignment procedures to identify the convergence of robot technologies. *PLoS One* 11 (10), e0165091. DOI: 10.1371/journal.pone.0165091.
- [57] Leydesdorff, L., 2007a. Betweenness centrality as an Indicator of the Interdisciplinarity of Scientific Journals. *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.* 58 (9), 1303–1319. DOI: 10.1002/asi.20614
- [58] Leydesdorff L., 2007b. Mapping interdisciplinary at the interfaces between the science citation index and the social science citation index. *Scientometrics* 71 (3), 391–405. DOI: 10.1007/s11192-007-1694-z
- [59] Leydesdorf, L., 2008. On the normalization and visualization of author co-citation

- data: Salton's Cosine versus the Jaccard index. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 59 (1), 77-85
- [60] Leydesdorff, L., Rafols, I., 2009. A global map of science based on the ISI subject categories. *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.* 60 (2), 348–362. DOI: 10.1002/asi.20967.
- [61] Lin, B., Chen, J., 2005. Corporate technology portfolios and R&D performance measures: a study of technology intensive firms. *R&D Management* 35, 2, 2005.
- [62] Luan, C., Lin, Z., Wang, Z., 2013. Divergence and convergence: technology-relatedness evolution in solar energy industry. *Scientometrics* 97, 461–475. DOI: 10.1007/s11192-013-1057-x.
- [63] Mejia, C., Kajikawa, Y., 2017. Bibliometric Analysis of social Robotics Research: Identifying Research Trends and Knowledgebase. *Appl. Sci.* 7,1316 DOI: 10.3390/app7121316.
- [64] Michel, J., Bettels, B., 2001. Patent citation analysis A closer look at the basic input data from patent search reports. *Scientometrics*, Vol. 41, No. 1 185-201
- [65] Midea Group (美的集团) 's home page (<https://www.midea-group.com>), accessed on December, 28,2019.
- [66] Ministry of Economy, Trade & Industry, Japan (METI), 2013. Report on market trend of Japanese robot industry. In: Press Release in Japanese. Ministry of Economy, Trade & Industry, Japan (METI), 2015. Japan's Robot Strategy.
- [67] Moya-Anegon, F., Vargas-Quesada, B., Herrero-Solana, V., Chinchilla-Rodriguez, Z., Corera-Alvarez, E., Munoz-Fernandez, F.J., 2004. A new technique for building maps of large scientific domains based on the co-citation of classes and categories. *Scientometrics* 64 (1), 129–145.
- [68] Nakamura, H., Suzuki, S., Tomobe, H., Kajikawa, Y., Sakata, I., 2011. Citation lag analysis in supply chain research. *Scientometrics* 87, 211–232. DOI: 10.1016/j.techfore.2014.09.009.
- [69] Nakamura, H., Suzuki, S., Sakata, I., Kajikawa, Y., 2015. Knowledge combination modeling: the measurement of knowledge similarity between different technological domains. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 187–201.
- [70] NASA aerosol robotic network's home page (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>), accessed on October 10, 2019
- [71] Newman, M.E.J., 2004. Fast algorithm for detecting community structure in

- networks. *Phys. Rev. E* 69, 066133.
- [72] Ona, E. D., Cuerda, R. C., Sanchez-Herrera, P., Balaguer, C., Jardon, A., 2018. A Review of Robotics in Neurorehabilitation: Towards an Automated Prosecc for Upper Limb. *J. of Healthcare Engineering*, DOI: 10.1155/2018/9758939.
 - [73] Porter, A.L., Cohen, A.S., Roessnsner, J.D., Perreault, M., 2007. Measuring researcher interdisciplinarity. *Scientometrics* 72 (1), 117–147. DOI : 10.1007/s11192-007-1700-5.
 - [74] Rombach, M. P., Porter, M. A., Fowler, J. H., Peter J Mucha, P. J., Core-periphery structure in networks. *SIAM Journal on Applied mathematics*, 74(1):167–190, 2014.
 - [75] Samsung Corp.'s home page (<http://www.samsung.com>), accessed on March 17, 2018.
 - [76] Shanghai Jiao Tong University's home page(<http://en.sjtu.edu.cn>), accessed on March 17, 2018.
 - [77] Sharp Corporation's home page (<https://corporate.jp.sharp>), accessed on December 30, 2019.
 - [78] Shibata, N., Kajikawa, Y., Takeda, Y., Sakata, I., 2011. Detecting emerging research fronts in regenerative medicine by the citation network analysis of science publications. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 78, 274–282. DOI: 10.1016/j.techfore.2010.07.006.
 - [79] Siasun Robot Automation Co Ltd's home page(<http://www.siasun.com>), accessed on December 15, 2019.
 - [80] Siemens Corp.'s home page (<http://www.siemens.com>), accessed on March 17, 2018.
 - [81] Small, H., 1973. Co-citation in the scientific literature: a new measure of the relationship between two documents. *J. Am. Soc. Inf. Sci.* 24 (4), 265–269. DOI: 10.1002/asi.4630240406.
 - [82] Small, H., 1977. A co-citation model of scientific specialty: a longitudinal study of collagen research. *Soc. Stud. Sci.* 7, 139–166. DOI: 10.1177/030631277700700202.
 - [83] Small, H., 1980. Co-citation context analysis and the structure of paradigms. *J. Doc.* 363, 183–196.
 - [84] Small, H., Boyack, K.W., Klavans, R., 2014. Identifying emerging topics in science

- and technology. *Res. Policy* 43, 1367–1450.
- [85] Song, C. H., Elvers, D., Leker, J., 2017. Anticipation of convergence technology areas – A refined approach for the identification of attractive fields of innovation. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 116 98-115. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.11.001.
 - [86] State Grid Corporation of China's home page(<http://www.sgcc.com.cn>), accessed on October 6, 2019
 - [87] Suominen, A., Toivanen, H., 2016. Map of Science with Topic Modeling: Comparison of Unsupervised Learning and Human-Assigned Subject Classification. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 67(10): 2464-2476. DOI: 10.1002_asi.23596.
 - [88] The American College of Obstetricians and Gynecologists' home page (<https://www.acos.org>), accessed on December 25, 2019
 - [89] Tijssen, R.J.W., 1992. A quantitative assessment of interdisciplinary structures in science and technology: co-classification analysis of energy research. *Res. Policy* 21, 27–44.
 - [90] Tu, Y., Seng, J., 2012. Indices of novelty for emerging topic detection. *J. Inf. Process. Manag.* 48, 303–325.
 - [91] Yan, B., Luo J., 2017. Measuring Technological Distance for Patent Mapping. *Journal of the association for information science and technology*. 68(2):423-437. DOI: 10.1002/asi.23664
 - [92] Yasunaga, Y., Watanabe, M., Korenaga, M., 2009. Application of technology roadmaps to governmental innovation policy for promoting technology convergence. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 76, 61–79. DOI: 10.1016/j.techfore.2008.06.004.
 - [93] Yates, D. R., Vaessen, C., Roupert, M., 2011. From Leonardo to da Vinci : the history of robot-assisted surgery in urology. *BIU International* 108, 1708-1714. DOI: 10.1111/j.1464-401X.2011.10576.x.
 - [94] Yau, C., Porter, A., Newman, N., Suominen, A., 2014. Clustering scientific documents with topic modeling. *Scientometrics* 100:767-786. DOI: 10.1007/s11192-014-1321-8.
 - [95] Yoon, B., Park, Y., 2004. A text mining-based patent network: Analytical tool for high-technology trend. *The Journal of High Technology Management Research*.

- vol. 15, pp. 37-50. DOI: 10.1016/j.hitech.2003.09.003.
- [96] Yun, J. J., Won, D., Jeong, E., Park, K., Yang, J., Park, J., 2016. The relationship between technology, business model, and market in autonomous car and intelligent robot industries. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* DOI: 10.1016/j.techfore.2015.11.016.
- [97] Wang, Z., Porter, A., Wang, X., Carley, S., 2019. An approach to identify emergent topics of technological convergence: A case study for 3D printing. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 146 723-732 DOI: 10.1016/j.techfore.2018.1.015.
- [98] WIPO (World Intellectual Property Organization) 2015. Economic Research Working Paper No.30
- [99] WIPO, IPC definition, (<http://www.wipo.int/classifications/ipc/en/ITsupport/version20150101/>), accessed on Nov. 18, 2017.
- [100] Xiang, B., Bao, Z., Ma, C., hang, X., Chen, H., Zhang, H., A unified method of detecting core-periphery structure in networks, *An interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. CHAOS* 28, 013122. DOI: 10.1063/1.4990734
- [101] Zhang, Y., Porter, A., Chiavetta, D., Newman, N. G., Guo, Y., 2019. Forecasting technical emergence: An introduction. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 146 626-627 DOI: 10.1016/j.techfore.2018.12.025
- [102] Zhang, Y., Shang, L., Huang, L., Porter, A., Zhang, G., Lu, J., Zhu, D., 2016. A hybrid similarity measure method for patent portfolio analysis. *Journal of Informetrics.* 10 1108-1130 DOI: 10.1016/j.jopi.2016.09.006
- [103] Zitt, M., Ramanana-Rahary, S., Bassecoulard, E., 2003. Relativity of citation performance measures: from cross-field to cross-scale effects of field-normalisation. *Scientometrics* 63 (2), 373–401.
- [104] NEDO 「平成 18 年度『ロボット技術戦略マップ』のローリングに関する調査研究成果報告書」 (2004)
- [105] NEDO 「ロボット白書 2014」 (2014)
- [106] 一般社団法人日本機械工業連合会・社団法人日本ロボット工業会 「21 世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略調査報告書」 (1999)
- [107] 一般社団法人日本機械工業連合会 「平成 25 年度ロボット産業・技術の振興に関する調査研究報告書」 (2014)
- [108] 一般財団法人日本品質保証機構「ISO 13482 (パーソナルケアロボット)」

(https://www.iqa.jp/service_list/fs/service/13482/) (2019年12月14日アクセス)

- [109] 経済産業省 「ロボット政策研究会報告書」(2006)
- [110] 経済産業省 「2012年ロボット産業の市場動向調査」(2012)
- [111] 特許庁 「特許技術動向調査報告書 ロボット」(2002)
- [112] 特許庁 「特許技術動向調査報告書 ロボット」(2007)
- [113] 特許庁 「特許技術動向調査報告書 ロボット」(2014)
- [114] 特許庁 「特許技術動向調査報告書 ドローン」(2018)
- [115] 特許庁 「特許技術動向調査報告書 パワーアシストスーツ」(2018)
- [116] 特許庁 「特許技術動向調査報告書 3Dプリンター」(2013)
- [117] 特許庁 「特許技術動向調査報告書 人工知能技術」(2014)
- [118] 特許庁 「特許技術動向調査報告書 衛星測位システム」(2015)
- [119] 特許庁 「特許技術動向調査報告書 ナノファイバー」(2015)
- [120] 特許庁 「特許技術動向調査報告書 ウェアラブルコンピュータ」(2015)
- [121] 特許庁 「特許技術動向調査報告書 仮想通貨・電子マネーによる決済システム」
(2018)
- [122] 特許庁ホームページ <http://www.jpo.go.jp> (2018年12月17日アクセス)
- [123] 内閣官房ロボット革命実現会議 「ロボット新戦略」(2015)
- [124] 内閣官房ロボット社会変革推進会議 第1回経済産業省資料(2019)
- [125] 内閣官房ロボット社会変革推進会議 報告書(2019)
- [126] 日本機械学会 「手術ロボットの国際規格 IEC 80601-2-77 策定動向」Vol.120
(2017)
- [127] 日本産業標準調査会 データベース検索 <https://www.jisc.go.jp> (2019年12月14日アクセス)

謝辞

本研究を行うにあたり、指導教官である東京大学大学院工学系研究科技術経営戦略学専攻の坂田一郎教授には、研究テーマの設定から方向付け、研究分析のアプローチ方法、博士論文のまとめ方まで、ご指導、アドバイスいただき、深く感謝いたします。本論文を審査していただいた東京大学先端科学技術センター 元橋一之教授、東京大学未来ビジョン研究センター 渡部俊也教授、東京大学工学系研究科技術経営戦略学 西野成昭准教授、東京大学未来ビジョン研究センター 佐々木一准教授からの分析の重要な視点の指摘、有用性、新規性の明確化、分析結果の評価の仕方などのアドバイスがなければ、本博士論文を仕上げることはできませんでした。ここに、改めてお礼申し上げます。

約30年ぶりに母校の博士課程に入学し、若い学生達とともに講義を受講し、坂田・森研究室の研究会では皆の研究発表に刺激を受けながら、新鮮な気持ちで社会人学生を送ることができたことは貴重な経験でありました。勤務地が北九州市となってからは、研究会への出席は儘なりませんでしたが、坂田・森研究室では、森純一郎潤教授からの分析に関するアドバイス、佐々木一准教授、山野泰子助教、大知正直特任研究員からは、投稿したジャーナルからのレビューに対するディフェンスの仕方から参考にすべき文献と研究分析手法の紹介など、中谷公威特任助教からは、Web of Science からのロボットに関する学術研究論文の抽出からネットワーク分析のアプローチの仕方などをいただきました。また、入学した当初に、研究の基礎となる学術俯瞰システムの使い方を教えていただいた岩見紫乃さん、研究分析の手法に加え、パイソンのプログラミングと学内のネットワーク環境設定をサポートして頂いた大知正直特任研究員、PICMET に一緒に参加して、研究の進め方などを情報交換した郷治友孝さん、田中和哉さん、松田貴成さん、企業の研究開発について教えていただいた政策ビジョン研究センター客員研究員でダイキン工業株式会社顧問の鳥越邦和さん、事務手続きで支えていただいた研究室の石原絢さん、佐藤妙子さん、粥川敬子さんなど多くの方から、博士課程在籍期間中様々な形でご支援頂きましたことに心から感謝いたします。

本博士論文の骨格である MM 手法は、Technology Forecasting & Social Change (TSFC) のレビューワからのご指摘やアドバイスがなければ開発できませんでした。TSFC の特集号への投稿を推薦していただいた University of Technology Sydney の Dr Yi Zhang とレビューワに感謝いたします。

また、経済産業省の先輩でもある橋本正洋東京工業大学教授と松島克守名誉教授（現一般社団法人俯瞰工学研究所長）の薦めにより、坂田・森研究室にて、博士取得するきっかけを作っていただき、お礼を申し上げます。

株式会社安川電機 筒井幸雄開発研究所長、一木靖司経営企画部長、村井真二ロボット技術部長、石橋一郎知的財産部技師長（元知的財産部長）には、業務忙しい中、研究分析の内容を実際のロボット事業との関連で貴重なご意見、ご示唆を頂けたことにより、本論文が現実のロボットビジネスとの関係性をつなげることができましたこと、心からお礼申し上げます。

最後に、博士を取得しようと決めたのは、妻美和子から、海外出張時に渡された1冊の自己啓発本でした。「何事もやることに遅いことはない。本人の意思次第。」ということに触発されて、博士取得に臨みましたが、取得まで簡単ではありませんでした。プログラミングと分析、参考文献の調査、PICMETでの研究発表、ジャーナルへの投稿、そして博士論文執筆に休日や土日に費やした日々を辛抱強く応援してくれた、妻美和子、娘加奈子に改めて感謝するとともに、博士取得を最も喜んでいるであろう今は亡き両親に本論文を捧げます。

Appendix

付表 1 ロボット関連技術（特許庁技術動向調査（ロボット）の技術俯瞰図より作成）

		2002年	2006年	2013年
応用技術	産業用ロボット	製造業用	・製造業、バイオ産業	・製造業、三品産業
	特殊環境用ロボット	宇宙、原子力、消防・防災、ライフメンテナンス、	・探査、水中・海洋、宇宙、原子力、メンテナンス、災害対応、廃棄物処理、軍事	・探査、災害対応、メンテナンス、廃棄物処理、原子力、軍事
	サービスロボット	ゴミ処理・清掃、土木・建設、運輸・倉庫、オフィス、サービス、医療・福祉、ホーム、教育・アミューズメント	ゴミ処理・清掃、土木・建設、運輸・倉庫、農林業、畜産、警備、医療、介護・福祉、ホーム、エンターテインメント、オフィスワーク	ゴミ処理・清掃、土木・建設、運輸・倉庫、農林業、畜産、警備、医療、介護・福祉、リハビリ、パワーアシスト、エンターテインメント、ホーム、オフィスワーク
要素技術	全体構造技術	主従型、移動型、マイクロロボット、プログラム制御型、マニピュレータ装置付き小室	マスタースレーブ型、移動型、マイクロロボット、プログラム制御型、マニピュレータ装置付き小室	マスタースレーブ型、プログラム制御型、移動型、マニピュレータ装置付き小室、マイクロロボット、ヒューマノイド、人体装着型
	部分構造技術	モジュラー構造、把持部、関節・手首、腕、付属装置	把持部、関節・手首、腕、指、センサ、アクチュエータ	把持部、関節、手首、腕、指、センサ、アクチュエータ
	制御技術	、移動型ロボット制御・遠隔制御、位置決め、プログラム制御、手で掴む制御、足で操作する制御、ティーチングシステム、VR、N/W化	位置決め、その他プログラム制御、ティーチングシステム、インターフェース、遠隔制御、パワーアシスト・ウェアラブル	位置決め、その他プログラム制御、ティーチングシステム、パワーアシスト、遠隔制御、インターフェース
	安全技術	安全装置	安全装置	出力・駆動、安全装置、信頼設計
	知能化技術	人工知能	人工知能、自律移動制御、ロボット協調・群ロボット	人工知能、自律移動制御、ロボット協調・群ロボット、クラウド・ネットワーク
	認識・コミュニケーション技術	画像認識、音声認識	画像認識、音声認識、音声合成・対話技術、音声・画像に依らないコミュニケーション技術	画像認識、音声認識、音声合成・対話技術、物体認識、人物認識、音声画像に依らないコミュニケーション技術

付表 2 医療・ヘルスケア分野の日本語名

医療・ヘルスケア分野	日本語名
Surgery	外科学
Urology & Nephrology	泌尿器学・腎臓学
Neurosciences & Neurology	神経科学・神経学
Oncology	腫瘍学
Rehabilitation	リハビリテーション
Cardiovascular System & Cardiology	循環器系・心臓学
Obstetrics & Gynecology	産婦人科学
Radiology, Nuclear Medicine & Medical Imaging	放射線学・核医学・医用画像
Orthopedics	整形外科学
Otorhinolaryngology	耳鼻咽喉科学
Respiratory System	呼吸器系
General & Internal Medicine	一般医療・内科学
Gastroenterology & Hepatology	消化器病学・肝臓学
Physiology	生理学
Research & Experimental Medicine	研究・実験医学
Pharmacology & Pharmacy	薬理学・薬学
Medical Informatics	医療情報学
Pediatrics	小児科学
Medical Laboratory Technology	臨床検査技術
Health Care Sciences & Services	ヘルスケア科学・サービス
Anesthesiology	麻酔学
Pathology	病理学
Transplantation	移植
Dentistry	歯科学
Oral Surgery & Medicine	口腔外科・医療
Psychiatry	精神医学
Geriatrics & Gerontology	老年医学・老年学
Endocrinology & Metabolism	内分泌学・新陳代謝
Veterinary Sciences	獣医学
Ophthalmology	眼科学
Nursing	看護
Public, Environmental & Occupational Health	公衆衛生・環境衛生・労働衛生学
Immunology, Anatomy & Morphology	免疫学・解剖学・形態学
Legal Medicine	法医学
Hematology	血液学
Virology	ウイルス学
Dermatology	皮膚病学
Rheumatology	リュウマチ学
Infectious Diseases	感染症
Medical Ethics	医療倫理
Parasitology	寄生虫学
Mycology	菌類学
Tropical Medicine	熱帯医学
Allergy	アレルギー
Substance Abuse	薬物乱用
Emergency Medicine	救急医学
Toxicology	毒物学
Audiology & Speech-Language Pathology	聴覚学・言語病理学
Integrative & Complementary Medicine	統合・補完医学

付表 3 IPC コード (クラス (C))

IPC code	Definition	IPC code	Definition
A	SECTION A : HUMAN NECESSITIES	C21	METALLURGY OF IRON
A01	AGRICULTURE; FORESTRY; ANIMAL HUSBANDRY; HUNTING; TRAPPING; FISHING	C22	METALLURGY; FERROUS OR NON-FERROUS ALLOYS; TREATMENT OF ALLOYS OR NON-FERROUS METALS
A21	BAKING; EQUIPMENT FOR MAKING OR PROCESSING DOUGHS; DOUGHS FOR BAKING	C23	COATING METALLIC MATERIAL; COATING MATERIAL WITH METALLIC MATERIAL; CHEMICAL SURFACE TREATMENT; DIFFUSION TREATMENT OF METALLIC MATERIAL; COATING BY VACUUM EVAPORATION, BY SPUTTERING, BY ION IMPLANTATION OR BY CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION, IN GENERAL; INHIBITING CORROSION OF METALLIC MATERIAL OR INCRUSTATION IN GENERAL
A22	BUTCHERING; MEAT TREATMENT; PROCESSING POULTRY OR FISH	C25	ELECTROLYTIC OR ELECTROPHORETIC PROCESSES; APPARATUS THEREFOR
A23	FOODS OR FOODSTUFFS; THEIR TREATMENT, NOT COVERED BY OTHER CLASSES	C30	CRYSTAL GROWTH
A24	TOBACCO; CIGARS; CIGARETTES; SMOKERS' REQUISITES	C40	COMBINATORIAL TECHNOLOGY
A41	WEARING APPAREL	D	SECTION D : TEXTILES, PAPER
A43	FOOTWEAR	D01	NATURAL OR MAN-MADE THREADS OR FIBRES; SPINNING
A45	HAND OR TRAVELLING ARTICLES	D02	YARNS; MECHANICAL FINISHING OF YARNS OR ROPES; WARPING OR BEAMING
A46	BRUSHWARE	D03	WEAVING
A47	FURNITURE; DOMESTIC ARTICLES OR APPLIANCES; COFFEE MILLS; SPICE MILLS; SUCTION CLEANERS IN GENERAL	D04	BRAIDING; LACE-MAKING; KNITTING; TRIMMINGS; NON-WOVEN FABRICS
A61	MEDICAL OR VETERINARY SCIENCE; HYGIENE	D05	SEWING; EMBROIDERING; TUFTING
A62	LIFE-SAVING; FIRE-FIGHTING	D06	TREATMENT OF TEXTILES OR THE LIKE; LAUNDERING; FLEXIBLE MATERIALS NOT OTHERWISE PROVIDED FOR
A63	SPORTS; GAMES; AMUSEMENTS	D21	PAPER-MAKING; PRODUCTION OF CELLULOSE
B	SECTION B : PERFORMING OPERATIONS; TRANSPORTING	E	SECTION E : FIXED CONSTRUCTIONS
B01	PHYSICAL OR CHEMICAL PROCESSES OR APPARATUS IN GENERAL	E01	CONSTRUCTION OF ROADS, RAILWAYS, OR BRIDGES
B02	CRUSHING, PULVERISING, OR DISINTEGRATING; PREPARATORY TREATMENT OF GRAIN FOR MILLING	E02	HYDRAULIC ENGINEERING; FOUNDATIONS; SOIL-SHIFTING
B03	SEPARATION OF SOLID MATERIALS USING LIQUIDS OR USING PNEUMATIC TABLES OR JIGS; MAGNETIC OR ELECTROSTATIC SEPARATION OF SOLID MATERIALS FROM SOLID MATERIALS OR FLUIDS; SEPARATION BY HIGH-VOLTAGE ELECTRIC FIELDS	E03	WATER SUPPLY; SEWERAGE
B04	CENTRIFUGAL APPARATUS OR MACHINES FOR CARRYING-OUT PHYSICAL OR CHEMICAL PROCESSES	E04	BUILDING
B05	SPRAYING OR ATOMISING IN GENERAL; APPLYING LIQUIDS OR OTHER FLUENT MATERIALS TO SURFACES, IN GENERAL	E05	LOCKS; KEYS; WINDOW OR DOOR FITTINGS; SAFES
B06	GENERATING OR TRANSMITTING MECHANICAL VIBRATIONS IN GENERAL	E06	DOORS, WINDOWS, SHUTTERS, OR ROLLER BLINDS, IN GENERAL; LADDERS
B07	SEPARATING SOLIDS FROM SOLIDS; SORTING	E21	EARTH OR ROCK DRILLING; MINING
B08	CLEANING	F	SECTION F : MECHANICAL ENGINEERING; LIGHTING; HEATING; WEAPONS; BLASTING
B09	DISPOSAL OF SOLID WASTE; RECLAMATION OF CONTAMINATED SOIL	F01	MACHINES OR ENGINES IN GENERAL; ENGINE PLANTS IN GENERAL; STEAM ENGINES
B21	MECHANICAL METAL-WORKING WITHOUT ESSENTIALLY REMOVING MATERIAL; PUNCHING METAL	F02	COMBUSTION ENGINES; HOT-GAS OR COMBUSTION-PRODUCT ENGINE PLANTS
B22	CASTING; POWDER METALLURGY	F03	MACHINES OR ENGINES FOR LIQUIDS; WIND, SPRING, OR WEIGHT MOTORS; PRODUCING MECHANICAL POWER OR A REACTIVE PROPULSIVE THRUST, NOT OTHERWISE PROVIDED FOR
B23	MACHINE TOOLS; METAL-WORKING NOT OTHERWISE PROVIDED FOR	F04	POSITIVE-DISPLACEMENT MACHINES FOR LIQUIDS; PUMPS FOR LIQUIDS OR ELASTIC FLUIDS
B24	GRINDING; POLISHING	F15	FLUID-PRESSURE ACTUATORS; HYDRAULICS OR PNEUMATICS IN GENERAL
B25	HAND TOOLS; PORTABLE POWER-DRIVEN TOOLS; HANDLES FOR HAND IMPLEMENTS; WORKSHOP EQUIPMENT; MANIPULATORS	F16	ENGINEERING ELEMENTS OR UNITS; GENERAL MEASURES FOR PRODUCING AND MAINTAINING EFFECTIVE FUNCTIONING OF MACHINES OR INSTALLATIONS; THERMAL INSULATION IN GENERAL
B26	HAND CUTTING TOOLS; CUTTING; SEVERING	F17	STORING OR DISTRIBUTING GASES OR LIQUIDS
B27	WORKING OR PRESERVING WOOD OR SIMILAR MATERIAL; NAILING OR STAPLING MACHINES IN GENERAL	F21	LIGHTING
B28	WORKING CEMENT, CLAY, OR STONE	F22	STEAM GENERATION
B29	WORKING OF PLASTICS; WORKING OF SUBSTANCES IN A PLASTIC STATE IN GENERAL	F23	COMBUSTION APPARATUS; COMBUSTION PROCESSES
B30	PRESSES	F24	HEATING; RANGES; VENTILATING
B31	MAKING ARTICLES OF PAPER OR CARDBOARD; WORKING PAPER OR CARDBOARD	F25	REFRIGERATION OR COOLING; COMBINED HEATING AND REFRIGERATION SYSTEMS; HEAT PUMP SYSTEMS; MANUFACTURE OR STORAGE OF ICE; LIQUEFACTION OR SOLIDIFICATION OF GASES
B32	LAYERED PRODUCTS	F26	DRYING
B33	ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY	F27	FURNACES; KILNS; OVENS; RETORTS
B41	PRINTING; LITHOGRAPHY; TYPEWRITERS; STAMPS	F28	HEAT EXCHANGE IN GENERAL
B43	WRITING OR DRAWING IMPLEMENTS; BUREAU ACCESSORIES	F41	WEAPONS
B44	DECORATIVE ARTS	F42	AMMUNITION; BLASTING
B60	VEHICLES IN GENERAL	G	SECTION G : PHYSICS
B61	RAILWAYS	G01	MEASURING; TESTING
B62	LAND VEHICLES FOR TRAVELLING OTHERWISE THAN ON RAILS	G02	OPTICS
B63	SHIPS OR OTHER WATERBORNE VESSELS; RELATED EQUIPMENT	G03	PHOTOGRAPHY; CINEMATOGRAPHY; ANALOGOUS TECHNIQUES USING WAVES OTHER THAN OPTICAL WAVES; ELECTROGRAPHY; HOLOGRAPHY
B64	AIRCRAFT; AVIATION; COSMONAUTICS	G04	HOROLOGY
B65	CONVEYING; PACKING; STORING; HANDLING THIN OR FILAMENTARY MATERIAL	G05	CONTROLLING; REGULATING
B66	HOISTING; LIFTING; HAULING	G06	COMPUTING; CALCULATING; COUNTING
B67	OPENING OR CLOSING BOTTLES, JARS OR SIMILAR CONTAINERS; LIQUID HANDLING	G07	CHECKING-DEVICES
B81	MICRO-STRUCTURAL TECHNOLOGY	G08	SIGNALLING
B82	NANO-TECHNOLOGY	G09	EDUCATING; CRYPTOGRAPHY; DISPLAY; ADVERTISING; SEALS
C	SECTION C : CHEMISTRY; METALLURGY	G10	MUSICAL INSTRUMENTS; ACOUSTICS
C01	INORGANIC CHEMISTRY	G11	INFORMATION STORAGE
C02	TREATMENT OF WATER, WASTE WATER, SEWAGE, OR SLUDGE	G12	INSTRUMENT DETAILS
C03	GLASS; MINERAL OR SLAG WOOL	G16	INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY [ICT] SPECIALLY ADAPTED FOR SPECIFIC APPLICATION FIELDS [2018.01]
C04	CEMENTS; CONCRETE; ARTIFICIAL STONE; CERAMICS; REFRACTORIES	G21	NUCLEAR PHYSICS; NUCLEAR ENGINEERING
C07	ORGANIC CHEMISTRY	H	SECTION H : ELECTRICITY
C08	ORGANIC MACROMOLECULAR COMPOUNDS; THEIR PREPARATION OR CHEMICAL WORKING-UP; COMPOSITIONS BASED THEREON	H01	BASIC ELECTRIC ELEMENTS
C09	DYES; PAINTS; POLISHES; NATURAL RESINS; ADHESIVES; COMPOSITIONS NOT OTHERWISE PROVIDED FOR; APPLICATIONS OF MATERIALS NOT OTHERWISE PROVIDED FOR	H02	GENERATION, CONVERSION, OR DISTRIBUTION OF ELECTRIC POWER
C10	PETROLEUM, GAS OR COKE INDUSTRIES; TECHNICAL GASES CONTAINING CARBON MONOXIDE; FUELS; LUBRICANTS; PEAT	H03	BASIC ELECTRONIC CIRCUITRY
C12	BIOCHEMISTRY; BEER; SPIRITS; WINE; VINEGAR; MICROBIOLOGY; ENZYMOLOGY; MUTATION OR GENETIC ENGINEERING	H04	ELECTRIC COMMUNICATION TECHNIQUE
		H05	ELECTRIC TECHNIQUES NOT OTHERWISE PROVIDED FOR

付表 4 IPC コード (クラス (M))

IPC class (M)	Definition
A01D	HARVESTING; MOWING
A01G	HORTICULTURE; CULTIVATION OF VEGETABLES, FLOWERS, RICE, FRUIT, VINES, HOPS, OR SEAWEED; FORESTRY; WATERING
A01J	MANUFACTURE OF DAIRY PRODUCTS
A01K	ANIMAL HUSBANDRY; CARE OF BIRDS, FISHES, INSECTS; FISHING; REARING OR BREEDING ANIMALS, NOT OTHERWISE PROVIDED FOR; NEW BREEDS OF ANIMALS
A47L	DOMESTIC WASHING OR CLEANING
A61B	DIAGNOSIS; SURGERY; IDENTIFICATION
A61F	FILTERS IMPLANTABLE INTO BLOOD VESSELS; PROSTHESES; DEVICES PROVIDING PATENCY TO, OR PREVENTING COLLAPSING OF, TUBULAR STRUCTURES OF THE BODY, E.G. STENTS; ORTHOPAEDIC, NURSING OR CONTRACEPTIVE DEVICES; FOMENTATION; TREATMENT OR PROTECTION OF EYES OR EARS; BANDAGES, DRESSINGS OR ABSORBENT PADS; FIRST-AID KITS
A61G	TRANSPORT, PERSONAL CONVEYANCES, OR ACCOMMODATION SPECIALLY ADAPTED FOR PATIENTS OR DISABLED PERSONS; OPERATING TABLES OR CHAIRS; CHAIRS FOR DENTISTRY; FUNERAL DEVICES
A61H	PHYSICAL THERAPY APPARATUS, e.g. DEVICES FOR LOCATING OR STIMULATING REFLEX POINTS IN THE BODY; ARTIFICIAL RESPIRATION; MASSAGE; BATHING DEVICES FOR SPECIAL THERAPEUTIC OR HYGIENIC PURPOSES OR SPECIFIC PARTS OF THE BODY
A61L	METHODS OR APPARATUS FOR STERILISING MATERIALS OR OBJECTS IN GENERAL; DISINFECTION, STERILISATION, OR DEODORISATION OF AIR; CHEMICAL ASPECTS OF BANDAGES, DRESSINGS, ABSORBENT PADS, OR SURGICAL ARTICLES; MATERIALS FOR BANDAGES, DRESSINGS, ABSORBENT PADS, OR SURGICAL ARTICLES
A61M	DEVICES FOR INTRODUCING MEDIA INTO, OR ONTO, THE BODY; DEVICES FOR TRANSDUCING BODY MEDIA OR FOR TAKING MEDIA FROM THE BODY; DEVICES FOR PRODUCING OR ENDING SLEEP OR STUPOR
A61N	ELECTROTHERAPY; MAGNETOTHERAPY; RADIATION THERAPY; ULTRASOUND THERAPY
A63B	APPARATUS FOR PHYSICAL TRAINING, GYMNASTICS, SWIMMING, CLIMBING, OR FENCING; BALL GAMES; TRAINING EQUIPMENT
A63F	CARD, BOARD OR ROULETTE GAMES; INDOOR GAMES USING SMALL MOVING PLAYING BODIES; VIDEO GAMES; GAMES NOT OTHERWISE PROVIDED FOR
A63H	TOYS, e.g. TOPS, DOLLS, HOOPS, BUILDING BLOCKS
B05B	SPRAYING APPARATUS; ATOMISING APPARATUS; NOZZLES
B05C	APPARATUS FOR APPLYING LIQUIDS OR OTHER FLUENT MATERIALS TO SURFACES, IN GENERAL
B05D	PROCESSES FOR APPLYING LIQUIDS OR OTHER FLUENT MATERIALS TO SURFACES, IN GENERAL
B08B	CLEANING IN GENERAL; PREVENTION OF FOULING IN GENERAL
B21C	MANUFACTURE OF METAL SHEETS, WIRE, RODS, TUBES, PROFILES OR LIKE SEMI-MANUFACTURED PRODUCTS OTHERWISE THAN BY ROLLING; AUXILIARY OPERATIONS USED IN CONNECTION WITH METAL-WORKING WITHOUT ESSENTIALLY REMOVING MATERIAL
B21J	FORGING; HAMMERING; PRESSING METAL; RIVETING; FORGE FURNACES

IPC class (M)	Definition
B23B	TURNING; BORING
B23K	SOLDERING OR UNSOLDERING; WELDING; CLADDING OR PLATING BY SOLDERING OR WELDING; CUTTING BY APPLYING HEAT LOCALLY, e.g. FLAME CUTTING; WORKING BY LASER BEAM
B23P	OTHER WORKING OF METAL; COMBINED OPERATIONS; UNIVERSAL MACHINE TOOLS
B23Q	DETAILS, COMPONENTS, OR ACCESSORIES FOR MACHINE TOOLS, e.g. ARRANGEMENTS FOR COPYING OR CONTROLLING); MACHINE TOOLS IN GENERAL, CHARACTERISED BY THE CONSTRUCTION OF PARTICULAR DETAILS OR COMPONENTS; COMBINATIONS OR ASSOCIATIONS OF METAL-WORKING MACHINES, NOT DIRECTED TO A PARTICULAR RESULT
B24B	MACHINES, DEVICES, OR PROCESSES FOR GRINDING OR POLISHING ; DRESSING OR CONDITIONING OF ABRADING SURFACES; FEEDING OF GRINDING, POLISHING, OR LAPPING AGENTS
B24C	ABRASIVE OR RELATED BLASTING WITH PARTICULATE MATERIAL
B25B	TOOLS OR BENCH DEVICES NOT OTHERWISE PROVIDED FOR, FOR FASTENING, CONNECTING, DISENGAGING, OR HOLDING
B25J	MANIPULATORS; CHAMBERS PROVIDED WITH MANIPULATION DEVICES
B29C	SHAPING OR JOINING OF PLASTICS; SHAPING OF SUBSTANCES IN A PLASTIC STATE, IN GENERAL; AFTER-TREATMENT OF THE SHAPED PRODUCTS, e.g. REPAIRING
B60B	VEHICLE WHEELS; CASTORS; AXLES FOR WHEELS OR CASTORS; INCREASING WHEEL ADHESION
B60F	VEHICLES FOR USE BOTH ON RAIL AND ON ROAD; VEHICLES CAPABLE OF TRAVELLING IN OR ON DIFFERENT MEDIA, e.g. AMPHIBIOUS VEHICLES
B60G	VEHICLE SUSPENSION ARRANGEMENTS
B60K	ARRANGEMENT OR MOUNTING OF PROPULSION UNITS OR OF TRANSMISSIONS IN VEHICLES; ARRANGEMENT OR MOUNTING OF PLURAL DIVERSE PRIME-MOVERS IN VEHICLES; AUXILIARY DRIVES FOR VEHICLES; INSTRUMENTATION OR DASHBOARDS FOR VEHICLES; ARRANGEMENTS IN CONNECTION WITH COOLING, AIR INTAKE, GAS EXHAUST OR FUEL SUPPLY OF PROPULSION UNITS IN VEHICLES
B60L	PROPULSION OF ELECTRICALLY-PROPELLED VEHICLES); SUPPLYING ELECTRIC POWER FOR AUXILIARY EQUIPMENT OF ELECTRICALLY-PROPELLED VEHICLES; ELECTRODYNAMIC BRAKE SYSTEMS FOR VEHICLES IN GENERAL; MAGNETIC SUSPENSION OR LEVITATION FOR VEHICLES; MONITORING OPERATING VARIABLES OF ELECTRICALLY-PROPELLED VEHICLES; ELECTRIC SAFETY DEVICES FOR ELECTRICALLY-PROPELLED VEHICLES
B60R	VEHICLES, VEHICLE FITTINGS, OR VEHICLE PARTS, NOT OTHERWISE PROVIDED FOR
B60S	SERVICING, CLEANING, REPAIRING, SUPPORTING, LIFTING, OR MANOEUVRING OF VEHICLES, NOT OTHERWISE PROVIDED FOR
B62D	MOTOR VEHICLES; TRAILERS
B63B	SHIPS OR OTHER WATERBORNE VESSELS; EQUIPMENT FOR SHIPPING
B63C	LAUNCHING, HAULING-OUT, OR DRY-DOCKING OF VESSELS; LIFE-SAVING IN WATER; EQUIPMENT FOR DWELLING OR WORKING UNDER WATER; MEANS FOR SALVAGING OR SEARCHING FOR UNDERWATER OBJECTS)
B63G	OFFENSIVE OR DEFENSIVE ARRANGEMENTS ON VESSELS; MINE-LAYING; MINE-SWEEPING; SUBMARINES; AIRCRAFT CARRIERS
B63H	MARINE PROPULSION OR STEERING
B64C	AEROPLANES; HELICOPTERS (air-cushion vehicles B60V)

IPC class (M)	Definition
B65B	MACHINES, APPARATUS OR DEVICES FOR, OR METHODS OF, PACKAGING ARTICLES OR MATERIALS; UNPACKING
B65D	CONTAINERS FOR STORAGE OR TRANSPORT OF ARTICLES OR MATERIALS, e.g. BAGS, BARRELS, BOTTLES, BOXES, CANS, CARTONS, CRATES, DRUMS, JARS, TANKS, HOPPERS, FORWARDING CONTAINERS; ACCESSORIES, CLOSURES, OR FITTINGS THEREFOR; PACKAGING ELEMENTS; PACKAGES
B65G	TRANSPORT OR STORAGE DEVICES, e.g. CONVEYORS FOR LOADING OR TIPPING, SHOP CONVEYOR SYSTEMS OR PNEUMATIC TUBE CONVEYORS
B65H	HANDLING THIN OR FILAMENTARY MATERIAL, e.g. SHEETS, WEBS, CABLES
B66B	ELEVATORS; ESCALATORS OR MOVING WALKWAYS
B66C	CRANES; LOAD-ENGAGING ELEMENTS OR DEVICES FOR CRANES, CAPSTANS, WINCHES, OR TACKLES
B66F	HOISTING, LIFTING, HAULING, OR PUSHING, NOT OTHERWISE PROVIDED FOR, e.g. DEVICES WHICH APPLY A LIFTING OR PUSHING FORCE DIRECTLY TO THE SURFACE OF A LOAD
E04H	BUILDINGS OR LIKE STRUCTURES FOR PARTICULAR PURPOSES; SWIMMING OR SPLASH BATHS OR POOLS; MASTS; FENCING; TENTS OR CANOPIES, IN GENERAL
F16B	DEVICES FOR FASTENING OR SECURING CONSTRUCTIONAL ELEMENTS OR MACHINE PARTS TOGETHER, e.g. NAILS, BOLTS, CIRCLIPS, CLAMPS, CLIPS OR WEDGES; JOINTS OR JOINTING
F16C	SHAFTS; FLEXIBLE SHAFTS; MECHANICAL MEANS FOR TRANSMITTING MOVEMENT IN A FLEXIBLE SHEATHING; ELEMENTS OF CRANKSHAFT MECHANISMS; PIVOTS; PIVOTAL CONNECTIONS; ROTARY ENGINEERING ELEMENTS OTHER THAN GEARING, COUPLING, CLUTCH OR BRAKE ELEMENTS; BEARINGS
F16D	COUPLINGS FOR TRANSMITTING ROTATION
F16F	SPRINGS; SHOCK-ABSORBERS; MEANS FOR DAMPING VIBRATION
F16H	GEARING
F16L	PIPES; JOINTS OR FITTINGS FOR PIPES; SUPPORTS FOR PIPES, CABLES OR PROTECTIVE TUBING; MEANS FOR THERMAL INSULATION IN GENERAL
F16P	SAFETY DEVICES IN GENERAL
G01B	MEASURING LENGTH, THICKNESS OR SIMILAR LINEAR DIMENSIONS; MEASURING ANGLES; MEASURING AREAS; MEASURING IRREGULARITIES OF SURFACES OR CONTOURS
G01C	MEASURING DISTANCES, LEVELS OR BEARINGS; SURVEYING; NAVIGATION; GYROSCOPIC INSTRUMENTS; PHOTOGRAMMETRY OR VIDEOGRAMMETRY
G01D	MEASURING NOT SPECIALLY ADAPTED FOR A SPECIFIC VARIABLE; ARRANGEMENTS FOR MEASURING TWO OR MORE VARIABLES NOT COVERED BY A SINGLE OTHER SUBCLASS; TARIFF METERING APPARATUS; TRANSFERRING OR TRANSDUCING ARRANGEMENTS NOT SPECIALLY ADAPTED FOR A SPECIFIC VARIABLE; MEASURING OR TESTING NOT OTHERWISE PROVIDED FOR
G01L	MEASURING FORCE, STRESS, TORQUE, WORK, MECHANICAL POWER, MECHANICAL EFFICIENCY, OR FLUID PRESSURE
G01M	TESTING STATIC OR DYNAMIC BALANCE OF MACHINES OR STRUCTURES; TESTING OF STRUCTURES OR APPARATUS, NOT OTHERWISE PROVIDED FOR
G01N	INVESTIGATING OR ANALYSING MATERIALS BY DETERMINING THEIR CHEMICAL OR PHYSICAL PROPERTIES
G01P	MEASURING LINEAR OR ANGULAR SPEED, ACCELERATION, DECELERATION OR SHOCK; INDICATING PRESENCE OR ABSENCE OF MOVEMENT; INDICATING DIRECTION OF MOVEMENTS

IPC class (M)	Definition
G01R	MEASURING ELECTRIC VARIABLES; MEASURING MAGNETIC VARIABLES
G01S	RADIO DIRECTION-FINDING; RADIO NAVIGATION; DETERMINING DISTANCE OR VELOCITY BY USE OF RADIO WAVES; LOCATING OR PRESENCE-DETECTING BY USE OF THE REFLECTION OR RERADIATION OF RADIO WAVES; ANALOGOUS ARRANGEMENTS USING OTHER WAVES
G01V	GEOPHYSICS; GRAVITATIONAL MEASUREMENTS; DETECTING MASSES OR OBJECTS; TAGS
G02B	OPTICAL ELEMENTS, SYSTEMS, OR APPARATUS
G02F	DEVICES OR ARRANGEMENTS, THE OPTICAL OPERATION OF WHICH IS MODIFIED BY CHANGING THE OPTICAL PROPERTIES OF THE MEDIUM OF THE DEVICES OR ARRANGEMENTS FOR THE CONTROL OF THE INTENSITY, COLOUR, PHASE, POLARISATION OR DIRECTION OF LIGHT, e.g. SWITCHING, GATING, MODULATING OR DEMODULATING; TECHNIQUES OR PROCEDURES FOR THE OPERATION THEREOF; FREQUENCY-CHANGING; NON-LINEAR OPTICS; OPTICAL LOGIC ELEMENTS; OPTICAL ANALOGUE/DIGITAL CONVERTERS
G05B	CONTROL OR REGULATING SYSTEMS IN GENERAL; FUNCTIONAL ELEMENTS OF SUCH SYSTEMS; MONITORING OR TESTING ARRANGEMENTS FOR SUCH SYSTEMS OR ELEMENTS
G05D	SYSTEMS FOR CONTROLLING OR REGULATING NON-ELECTRIC VARIABLES
G05G	CONTROL DEVICES OR SYSTEMS INSOFAR AS CHARACTERISED BY MECHANICAL FEATURES ONLY
G06F	ELECTRIC DIGITAL DATA PROCESSING
G06K	RECOGNITION OF DATA; PRESENTATION OF DATA; RECORD CARRIERS; HANDLING RECORD CARRIERS
G06N	COMPUTER SYSTEMS BASED ON SPECIFIC COMPUTATIONAL MODELS
G06Q	DATA PROCESSING SYSTEMS OR METHODS, SPECIALLY ADAPTED FOR ADMINISTRATIVE, COMMERCIAL, FINANCIAL, MANAGERIAL, SUPERVISORY OR FORECASTING PURPOSES; SYSTEMS OR METHODS SPECIALLY ADAPTED FOR ADMINISTRATIVE, COMMERCIAL, FINANCIAL, MANAGERIAL, SUPERVISORY OR FORECASTING PURPOSES, NOT OTHERWISE PROVIDED FOR
G06T	IMAGE DATA PROCESSING OR GENERATION, IN GENERAL
G08B	SIGNALLING OR CALLING SYSTEMS; ORDER TELEGRAPHS; ALARM SYSTEMS
G08C	TRANSMISSION SYSTEMS FOR MEASURED VALUES, CONTROL OR SIMILAR SIGNALS
G08G	TRAFFIC CONTROL SYSTEMS
G09B	EDUCATIONAL OR DEMONSTRATION APPLIANCES; APPLIANCES FOR TEACHING, OR COMMUNICATING WITH, THE BLIND, DEAF OR MUTE; MODELS; PLANETARIA; GLOBES; MAPS; DIAGRAMS
G10L	SPEECH ANALYSIS OR SYNTHESIS; SPEECH RECOGNITION; SPEECH OR VOICE PROCESSING; SPEECH OR AUDIO CODING OR DECODING

IPC class (M)	Definition
H01B	CABLES; CONDUCTORS; INSULATORS; SELECTION OF MATERIALS FOR THEIR CONDUCTIVE, INSULATING OR DIELECTRIC PROPERTIES
H01H	ELECTRIC SWITCHES; RELAYS; SELECTORS; EMERGENCY PROTECTIVE DEVICES
H01L	SEMICONDUCTOR DEVICES; ELECTRIC SOLID STATE DEVICES NOT OTHERWISE PROVIDED FOR
H01M	PROCESSES OR MEANS, e.g. BATTERIES, FOR THE DIRECT CONVERSION OF CHEMICAL ENERGY INTO ELECTRICAL ENERGY
H01R	ELECTRICALLY-CONDUCTIVE CONNECTIONS; STRUCTURAL ASSOCIATIONS OF A PLURALITY OF MUTUALLY-INSULATED ELECTRICAL CONNECTING ELEMENTS; COUPLING DEVICES; CURRENT COLLECTORS
H02G	INSTALLATION OF ELECTRIC CABLES OR LINES, OR OF COMBINED OPTICAL AND ELECTRIC CABLES OR LINES
H02J	CIRCUIT ARRANGEMENTS OR SYSTEMS FOR SUPPLYING OR DISTRIBUTING ELECTRIC POWER; SYSTEMS FOR STORING ELECTRIC ENERGY
H02K	DYNAMO-ELECTRIC MACHINES
H02N	ELECTRIC MACHINES NOT OTHERWISE PROVIDED FOR
H02P	CONTROL OR REGULATION OF ELECTRIC MOTORS, ELECTRIC GENERATORS OR DYNAMO-ELECTRIC CONVERTERS; CONTROLLING TRANSFORMERS, REACTORS OR CHOKE COILS
H04B	TRANSMISSION
H04L	TRANSMISSION OF DIGITAL INFORMATION, e.g. TELEGRAPHIC COMMUNICATION
H04M	TELEPHONIC COMMUNICATION
H04N	PICTORIAL COMMUNICATION, e.g. TELEVISION
H04Q	SELECTING
H04W	WIRELESS COMMUNICATION NETWORKS
H05K	PRINTED CIRCUITS; CASINGS OR CONSTRUCTIONAL DETAILS OF ELECTRIC APPARATUS; MANUFACTURE OF ASSEMBLAGES OF ELECTRICAL COMPONENTS

付表 5 特許保有上位機関の略号と機関名

略号	機関名	略号	機関名
ALLM	ABB CORP AG(ABB)	KUKA	KUKA ROBOTICS CORP(KUKA)
APMA	APPLIED MATERIALS INC(アプライド・マテリアルズ)	MATU	PANASONIC CORP(パナソニック)
BEIT	BEIJING TECHNOLOGY INST(北京理工大学)	MEDE	MIDEA GROUP CO LTD(美的集団)
CANO	CANON INC(キャノン)	MITO	mitsubishi heavy ind co ltd(三菱重工業)
CAYA	CHINESE ACAD SCI SHENYANG AUTOMATION INST(中国科学院瀋陽自動化設備研究所)	MITQ	MITSUBISHI ELECTRIC CORP(三菱電機)
DAIM	DAIMLER-BENZ AG(ダイムラー・ベンツ)	NPDE	DENSO CORP(デンソー)
ECOV	ECOVACS ROBOT CO LTD(エコバックス)	OSKA	DAIHEN CORP(ダイヘン)
ETHI	ETHICON INC(エチコン)	SGCC	STATE GRID CORPORATION OF CHINA(国家电网)
ETRI	ELECTRONICS&TELECOMMUNICATIO RES INST(韓国電子通信研究院)	SHAF	SHARP CORP(シャープ)
FUFA	FANUC CORP(ファナック)	SHIH	SEIKO EPSON CORP(エプソン)
FUIT	FUJITSU LTD(富士通)	SIEI	SIEMENS CORP(シーメンス)
FUJP	NACHI FUJIKOSHI CORP(不二越)	SMSU	SAMSUNG CORP(サムソン)
GLDS	LG ELECTRONICS INC	SONY	SONY CORP(ソニー)
GOOG	GOOGLE TECHNOLOGY HOLDINGS LLC(グーグル)	SSRA	SHANGHAI XINSONG ROBOT AUTOMATION CO LTD
HAIT	HARBIN INST TECHNOLOGY(ハルビン工業大学)	TOKE	TOSHIBA CORP(東芝)
HITA	HITACHI LTD(日立製作所)	TOYT	TOYOTA MOTOR CORP(トヨタ自動車)
HOND	HONDA MOTOR CO LTD(本田技研工業)	UHEG	UNIV HARBIN ENG(ハルビン工程大学)
HONH	HON HAI PRECISION IND CO LTD(鴻海精密工業)	UNBA	UNIV BEIJING AVIATION SPACEFLIGH(北京航空航 天大学)
IBMC	IBM CORP(IBM)	USHN	UNIV SHANGHAI(上海大学)
IROB	IROBOT CORP(iRobot)	USJT	UNIV SHANGHAI JIAOTONG(上海交通大学)
ISHI	IHI CORP(IHI)	UYQI	UNIV QINGHUA(清華大学)
ITVS	INTUITIVE SURGICAL INC	UYSC	UNIV SOUTH CHINA TECHNOLOGY(華南理工大学)
KAWJ	KAWASAKI HEAVY IND LTD(川崎重工業)	UYSE	UNIV DONGNAN(東南大学)
KOAD	KIST KOREA INST SCI&TECHNOLOGY	UYZH	UNIV ZHEJIANG(浙江大学)
KOBM	KOBE STEEL LTD(神戸製鋼)	YASW	YASKAWA ELECTRIC CORP(安川電機)

黄色の背景色は、特許保有上位20機関

付表 6 特許ポートフォリオのコサイン距離

[illegible]

付表 7 知識結合ポートフォリオのコサイン距離

[illegible]

付表 8 クラスタポートフォリオのコサイン距離

[illegible]

付表 9 特許ポートフォリオとクラスポートフォリオのエントロピー

特許ポートフォリオのエントロピー				
機関	期間			
	1974-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2016
ALLM	1.871	2.209	2.202	2.070
APMA		2.279	2.523	2.121
BEIT			2.043	2.176
CANO	1.733	2.123	2.300	1.994
CAYA		0.000	2.146	2.461
DAIM	1.523	2.564	2.241	1.723
ECOV			1.242	1.832
ETHI		1.872	0.956	1.076
ETRI			1.921	2.008
FUFA	1.520	1.823	2.004	2.051
FUIT	1.413	1.901	2.316	2.233
FUJP	0.693	1.400	1.516	1.202
GLDS		1.332	2.315	2.035
GOOG				2.324
HAIT			2.092	2.126
HITA	1.681	2.396	2.459	2.201
HOND	2.202	2.161	2.438	2.212
HONH			2.545	1.922
IBMC	2.060	2.476	2.200	2.187
IROB			2.592	2.355
ISHI	0.693	2.630	2.080	1.735
ITVS		1.898	1.732	1.647
KAWJ	1.314	1.799	2.046	1.925
KOAD		1.633	1.881	2.113
KOBM	1.595	1.903	1.288	1.405
KUKA		1.786	2.129	1.724
MATU	2.104	1.968	2.444	2.243
MEDE			1.982	2.033
MITO	1.503	2.464	2.486	2.519
MITQ	2.007	1.757	1.973	1.835
NPDE		1.767	1.977	1.567
OSKA	1.055	1.722	1.847	1.630
SGCC			1.730	2.423
SHAF	0.000	1.948	2.408	2.387
SHIH	0.693	1.996	2.136	1.804
SIEI	1.985	2.080	2.569	2.415
SMSU		2.220	2.558	2.554
SONY	1.609	2.204	2.050	2.219
SSRA			2.062	2.183
TOKE	2.580	2.633	2.529	2.137
TOYT	1.663	2.012	2.158	2.214
UHEG			2.214	2.447
UNBA		0.693	2.309	2.279
USHN		0.000	1.922	2.402
USJT		0.500	2.385	2.330
UYQI		0.868	1.761	1.434
UYSC			1.998	2.347
UYSE			2.254	2.266
UYZH			2.578	2.256
YASW	1.511	1.696	1.895	2.184

クラスポートフォリオのエントロピー				
機関	期間			
	1974-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2016
ALLM	2.000	2.086	2.503	2.586
APMA		0.307	0.440	0.295
BEIT			1.422	1.724
CANO	1.040	1.903	2.339	2.609
CAYA		0.000	1.828	1.875
DAIM	1.179	1.895	2.078	1.713
ECOV			0.918	1.590
ETHI		0.349	0.997	0.152
ETRI			2.290	2.080
FUFA	1.778	2.379	2.123	2.254
FUIT	1.667	2.743	2.557	2.546
FUJP	0.693	2.106	2.511	1.789
GLDS		0.000	2.551	2.207
GOOG				1.602
HAIT			2.233	2.346
HITA	1.949	2.929	2.285	2.155
HOND	1.625	2.550	2.900	2.739
HONH			1.993	1.853
IBMC	1.037	1.193	1.696	2.045
IROB			0.368	0.710
ISHI	0.000	2.132	2.507	2.167
ITVS		0.257	0.254	0.232
KAWJ	1.332	2.294	2.383	2.378
KOAD		0.950	2.930	3.092
KOBM	0.837	1.578	1.155	1.338
KUKA		1.636	2.317	2.348
MATU	1.523	2.511	2.984	2.616
MEDE			1.474	2.692
MITO	1.427	3.066	2.656	2.290
MITQ	1.745	2.697	2.630	2.200
NPDE		2.400	2.827	2.307
OSKA	0.693	1.575	2.128	1.828
SGCC			0.856	1.548
SHAF	0.000	1.421	2.465	2.386
SHIH	0.000	1.748	2.510	2.348
SIEI	2.360	2.508	2.495	1.812
SMSU		2.022	2.666	2.601
SONY	0.000	2.734	2.477	2.442
SSRA			1.547	2.178
TOKE	2.609	2.892	2.654	2.185
TOYT	1.737	2.136	2.875	2.894
UHEG			2.270	2.135
UNBA		0.000	1.994	1.958
USHN		0.000	2.217	1.641
USJT		0.693	2.029	2.301
UYQI		1.332	1.722	1.677
UYSC			1.205	1.975
UYSE			1.767	1.549
UYZH			1.904	1.590
YASW	1.642	2.666	2.689	2.419