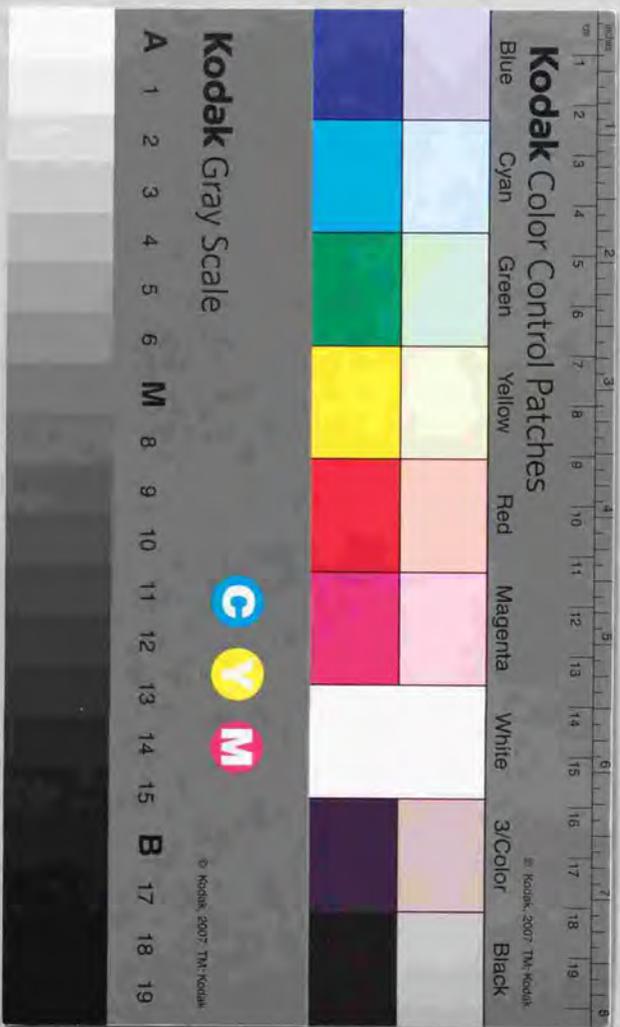


機械設計の高度計算機支援のための
対象表現論

小野 里 雅 彦



①

機械設計の高度計算機支援のための 対象表現論

小野里 雅彦

概要

本研究は機械設計における高度計算機支援のための対象モデリングの形式的手法を確立し、それに基づいた設計対象モデリング・システムを構築することを目的としている。

本研究では、まず、従来からの設計対象表現に関するさまざまな手法の分析、評価を行った。その結果、総合としての設計においては、設計対象を物理的な観点からより形式的に取り扱うことの重要性和、製品や部品などを形式的対象表現の基本要素とした場合に生じる問題点を指摘し、設計対象の形式的表現に求められる規範を明らかにした。

つぎに、空間-時間の枠組みの中で設計対象を表現する物理表現の概念を提案し、それに対する数学的定式化として、対象記述の有限性を仮定した有限物理世界とさらに離散性を仮定した離散物理世界を示した。

導入した設計対象の物理表現の概念に基づき、対象を決定していく設計過程について考察を行い、離散物理世界に基づく設計過程のモデルを提示した。また、設計者の意図や事象の間の因果を取扱い、物理表現を補完する役割をもつ意味表現の導入を行った。こうした設計対象のモデリングの方法は設計のみならず、製品のライフサイクル全般への適用が可能である。

最後に、以上に述べた考えを計算機上を実現するために設計対象モデリング・システムの構築を行った。このシステムは、設計の進捗に応じた詳細度を有した対象表現と、空間、時間、物理的性質ならびに、設計者の意図の総合的な取扱いを可能とした。

目次

1 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	2
1.3 研究の構成	3
1.4 論文の構成	5
2 設計対象モデリングの現状と問題点	6
2.1 機械設計における対象表現法の現状	6
2.1.1 設計における対象表現法	6
2.1.2 代表的な対象表現法	7
2.1.3 設計対象表現法の現状のまとめ	14
2.2 対象表現法の分析	15
2.2.1 対象表現と表現スキーマ	15
2.2.2 表現対象としての機械	16
2.2.3 対象記述のメタスキーマ	16
2.2.4 機械製品の表現スキーマ	18
2.2.5 表現スキーマの分類	20
2.3 設計対象の表現スキーマにおける問題点	20
2.3.1 属性の記述	21
2.3.2 関係の記述	22
2.3.3 構造の記述	23
2.3.4 時間の記述	26
2.3.5 対象表現における記述の基本原則	27
2.4 機能と対象表現	28
2.5 設計過程と設計対象表現	30
2.5.1 設計過程に関する既存の研究の概要	30
2.5.2 対象表現における設計過程	34
2.6 本研究における対象表現へのアプローチ	35

目次

2.6.1 本研究における対象表現の3つの実現目標	35
2.6.2 形式化の徹底	36
2.6.3 物理的等価性の追求	36
2.6.4 対象表現の進化の実現	37
2.7 本章のまとめ	39
3 設計対象の物理表現基礎論	41
3.1 物理世界の記述に関する基本概念の導入	41
3.1.1 空間	41
3.1.2 時間	43
3.1.3 局所時空系	45
3.1.4 時空強度	46
3.1.5 時空強度分布	48
3.2 有限物理世界	49
3.2.1 物理世界への有限性の仮定の導入	49
3.2.2 有限な物理世界の定式化	50
3.2.3 有限な物理世界の性質	51
3.3 有限物理世界における物理概念	53
3.3.1 相の概念	54
3.3.2 物理制約と物理法則	55
3.3.3 場	57
3.3.4 作用	58
3.3.5 状態	58
3.3.6 状態変化	60
3.3.7 事象	60
3.3.8 状況	60
3.3.9 因果関係	61
3.4 有限物理世界における対象の形式化	62
3.4.1 有限物理世界と物質	62
3.4.2 物理実体の導入	62
3.4.3 物理実体の形状、位置、姿勢	64
3.4.4 物理実体と時空強度値	64
3.4.5 物理実体の物理的属性	66
3.4.6 物理実体間の関係	67
3.4.7 物理実体の挙動	67
3.5 離散物理世界	68
3.5.1 有限物理世界への離散性の導入	68

3.5.2	離散物理世界の性質	71
3.6	離散物理世界による有限物理世界の近似	72
3.6.1	離散物理世界による有限物理世界の限定化	72
3.6.2	不確定な定状態素概念の導入	73
3.6.3	不確定さをもった離散物理世界	75
3.6.4	離散物理世界と情報量	76
3.7	離散物理世界の特徴と評価	77
3.7.1	離散物理世界による物理表現の特徴	77
3.7.2	他の研究との関連	79
3.8	本章のまとめ	81
4	設計対象表現と設計過程	83
4.1	離散物理世界による設計対象表現	83
4.1.1	離散物理世界と設計対象表現との相違点	83
4.1.2	状況の多様性と離散物理世界	84
4.1.3	状況の包括性	85
4.1.4	設計対象の進化性	86
4.1.5	設計対象の目的性	86
4.2	離散物理世界における設計過程	87
4.2.1	設計対象表現の進化	87
4.2.2	離散物理世界の詳細化による設計過程モデル	91
4.2.3	設計過程と定状態素の操作	94
4.2.4	設計過程と対象に関するプロセス	96
4.3	設計対象における意味の表現	98
4.3.1	設計対象表現と意味	98
4.3.2	対象表現の意味表現と言語	100
4.3.3	意味表現言語の基本概念	102
4.3.4	基本概念間の結び付き	103
4.3.5	意味表現の言明	105
4.3.6	言明間の関係	107
4.3.7	設計対象の意味表現	109
4.3.8	意味表現と物理表現との関連	114
4.3.9	意味表現についてのまとめ	116
4.4	本章のまとめ	117
5	設計対象モデリング・システム	119
5.1	設計対象モデリング・システムの概要	119
5.2	時間情報モデリング・システム	121

5.2.1	時間情報のモデリング概念	121
5.2.2	時間情報の分類と整理	121
5.2.3	時間情報の表現と推論	125
5.2.4	時間情報モデリング・システム	131
5.2.5	時間情報モデリング・システムの動作例	134
5.2.6	評価と課題	135
5.3	空間情報モデリング・システム	138
5.3.1	空間情報のモデリング	138
5.3.2	空間領域の包含関係管理: REGIN/REL	143
5.3.3	空間領域の段階的詳細化: EGM/2D	146
5.3.4	形状と位置, 姿勢の分離: SHAPES	148
5.3.5	評価と課題	154
5.4	時空強度値データベース	156
5.4.1	時空強度値データベースの構成	156
5.4.2	時空強度データベースの利用	160
5.4.3	評価と課題	161
5.5	状態モデリング・システム	162
5.5.1	状態モデリング・システムの基本構成	162
5.5.2	状態モデリング・システムの機能	163
5.5.3	評価と課題	165
5.6	意味表現処理システム	168
5.6.1	意味表現処理システムの概要	168
5.6.2	意味表現処理システムの構成と機能	170
5.6.3	評価と課題	174
5.7	設計対象モデリング・システム DOMS の評価	175
5.7.1	DOMS の設計への適用例	175
5.7.2	DOMS の評価	176
5.7.3	DOMS と他の研究との関連	180
5.8	本章のまとめ	181
6	結論と展望	183
6.1	結論	183
6.2	今後の研究課題と展望	186
	参考文献	196
	関連する発表論文	198

謝辞	200
A 記号一覧	201
A.1 空間関連記号	201
A.2 時間関連記号	202
A.3 局所時空系関連記号	202
A.4 時空強度関連記号	203
A.5 状態素関連記号	203
A.6 有限物理世界関連記号	203
A.7 物理実体関連記号	204
A.8 物理法則関連記号	205
A.9 離散物理世界関連記号	205
B 主要な物理属性一覧	206
B.1 基本物理属性	206
B.1.1 空間属性	206
B.1.2 時間属性	206
B.1.3 時空強度	207
B.2 複合物理属性	209
B.2.1 空間属性と単独の時空強度による複合物理属性	209
B.2.2 複数の定状態素の間に定義される複合物理属性	210
C 乾式複写機の設計過程の離散物理世界での表現例	211
C.1 考慮する時空強度	211
C.2 初期仕様	211
C.3 電子写真の原理	213
C.4 電子写真の原理の初期仕様への適用	216
D 定性関係の遷移律表	217
D.1 Allenの定性関係ネットワークの制約伝播アルゴリズム	217
D.2 時間区間の定性関係(線形)	219
D.3 時間区間の定性関係(環状)	220
D.4 領域間の定性関係	221
D.5 方向間の定性関係	222

図目次

1.1 本研究の基本構成図	4
2.1 動的構造表現図の例	9
2.2 形状特徴の解釈が複数可能な形状の例	11
2.3 背景理論によるモデル間の対応付け	13
2.4 スキーマ間の整合性の管理の2つの形態	16
2.5 対象表現の表現スキーマ・キューブ	21
2.6 複数の属性値を有する対象の例	22
2.7 3項関係の2項関係への還元	23
2.8 2つの板金部品	23
2.9 複数の観点からの構造をもつ対象の例	24
2.10 段付き軸の表現	25
2.11 3つの機能の考え方	29
2.12 機械の図式と機能	29
2.13 関係の指定による詳細化	38
2.14 対象の詳細化	38
3.1 空間の諸概念	42
3.2 時間軸と時間システム	44
3.3 局所時空系の主要な概念(空間を2次元に縮退)	47
3.4 局所時空系の時空強度値による直和分割	51
3.5 時空強度分布、状態素と物理実体	64
3.6 定時空領域の間に存在する定性的な空間、時間関係	69
3.7 状態素の定状態素による近似	70
3.8 定状態素による近似の誤差	72
3.9 単純化された物理世界の例(謄写版による印刷のプロセス)	78
3.10 謄写版印刷における空間上の一点での時空強度の変化	78
4.1 複数の離散物理世界と設計対象	84
4.2 複写機の初期仕様	88

4.3	電子写真の原理の概要	89
4.4	電子写真の原理の複写機への適用	90
4.5	離散物理世界における設計の素過程	93
4.6	定状態素の分割と結合に関する操作	97
4.7	時空強度値の汎化による空間と時間の拡張	98
4.8	概念依存構造の例 [Schanck 75]	101
4.9	対象に関する統語規則の図式表現	104
4.10	方向関係と相対記述	104
4.11	述語に関する構文規則の図式表現	105
4.12	言明の図式表現	106
4.13	言明の表現例	107
4.14	意図関係の4つの場合とその図式表現	108
4.15	4つのタイプの共起関係とそれらの図式表現	109
4.16	複数の言明における共起関係とそれらの図式表現	110
4.17	静電潜像形成プロセスに関する意味表現の図式表現	111
4.18	意味表現における3つの機能	114
4.19	物理表現と意味表現との関連	115
4.20	意味表現の言明と物理表現の定状態素との対応	117
5.1	設計対象モデリング・システム (DOMS) の基本構成	120
5.2	時間情報のモデリングの概念	121
5.3	時間値の連続と離散	122
5.4	時点による表現と区間による表現の違い	123
5.5	環状時間軸と線形時間軸との対応	126
5.6	環状時間軸における時間区間関係	127
5.7	時間区間の定性的関係と端点の時刻との関係	131
5.8	時間情報の表現間でのやりとり	132
5.9	時間情報モデリング・システム:TIM の基本構成	133
5.10	時間区間のグラフィック表示	134
5.11	時間情報モデリング・システム TIM の実行例 (1)	135
5.12	時間情報モデリング・システム TIM の実行例 (2)	136
5.13	時間情報モデリング・システム TIM の実行例 (3)	137
5.14	時間情報モデリング・システム TIM の実行例 (4)	138
5.15	形状の進化の過程の概念図	139
5.16	空間情報モデリングの分類立体	140
5.17	空間情報モデリング・システムの構成要素	142
5.18	3次元ソリッドモデリング用ツール	142

5.19	REGION/REL による不確定2次元領域の評価	144
5.20	REGION/REL による不確定3次元領域の定性関係と確定領域表示	145
5.21	REGION/REL による不確定3次元領域の評価	145
5.22	EGM/2D の基本構成	147
5.23	EGM/2D による形状定義の例	149
5.24	EGM/2D による不確定形状の評価例	150
5.25	設計における形状、位置、姿勢定義の3つの場合	150
5.26	SHAPE のデータ構造の例	151
5.27	SHAPES による形状定義例 (プリンタヘッド部)	152
5.28	ヘッドと保持板との干渉部位	153
5.29	干渉部分を除去したプリンタヘッド形状	153
5.30	時空強度値の語彙のプールの構成手順の例	158
5.31	時空強度値の語彙の粗雑化の実行例	159
5.32	時空強度値の用語、プール束ならびに時空強度値定数、変数の関係	159
5.33	プール束の例	160
5.34	状態モデリング・システムにおけるデータの構成と関連	163
5.35	SMS による設計対象表現の表示例 (複写機)	164
5.36	SMS による記述対象のスナップショット	166
5.37	SMS における記述対象の属性による抽出 (金属の例)	166
5.38	SMS における記述対象の相による抽出 (電気相の例)	167
5.39	SMS における物理実体の表示 (感光ドラムの例)	167
5.40	意味表現処理システムにおける処理の基本概念	169
5.41	意味表現におけるオブジェクトのネットワークの概略	171
5.42	意味表現処理システムにおける言明間のブラウジングの例	172
5.43	意味表現処理システムへの入力例 (一部)	172
5.44	意味表現処理システム内部における言明の表現形態の例	173
5.45	DOMS による謄写版印刷機的设计 (1) 初期仕様	177
5.46	DOMS による謄写版印刷機的设计 (2) 基本プロセス定義	177
5.47	DOMS による謄写版印刷機的设计 (3) 付随的要求への対処	178
5.48	DOMS による謄写版印刷機的设计 (4) 最終結果	178

表目次

3.1 諸効果の関係 [効果辞典 72]	56
4.1 意図と確定性との組合せによる言明の状態	108
4.2 言明の成立の有無と妥当な共起関係	112
4.3 意味表現と物理表現の基本概念間の対応関係	116
5.1 時間情報表現法の分類マトリックス	123
D.1 Allen による時間区間の定性関係に対する遷移律 [Allen 83]	219
D.2 環状時間軸上の時間区間の定性関係に対する遷移律	220
D.3 領域間の定性関係に対する遷移律	221
D.4 2次元の方向間の定性関係に対する遷移律	222

第1章

序論

1.1 研究の背景

現在、機械設計の技術者は、非常に大きな環境の変化と技術革新の流れの中にその身をおいている。それらを思いつまま挙げてみると、まず、設計対象としての機械は、ますます高機能化、集積化、複雑化、メカトロ化が進んでいる。機械は機械工学、材料工学、電気工学、電子工学、情報処理、光学、化学、人間工学など、さまざまな分野の成果を集大成した構造物となり、ひとりの人間がそうした製品の全体像を詳しく理解することは、非常に困難となってきた。

設計者を取り巻く環境は、開発リードタイムの削減に伴う設計期間の短縮化、製造物責任法に代表される製造者の社会的責任の増大、廃棄や再利用の考慮 [松村 92][木田 92]、製造プロセスでの有害物質の排除などの環境問題に対する配慮の高い必要性、といったように、設計、生産者に対してより大きな負担と責任を求めている。

さらには、技術者の設計を支援する技術も大きく変化している。たとえば、CAD(computer-aided design)システムに代表されるような、各種の計算機支援システムは、もはや設計業務において日常的に利用されているし、人工知能と知識工学の手法の適用や、オブジェクト指向プログラミングに代表される各種のソフトウェア工学の概念のCADシステムへの借用も盛んに試みられている。グループウェア(group ware)に代表される協働作業のための計算機ソフトウェア [Grudin 91] やマルチメディアデータベース(multi-media database) [川越 87] なども、遠からず設計現場へと導入されるであろう。こうした情報処理を中心とした技術の急速な進歩は、それぞれの企業、設計者が培い、長年にわたって慣れ親しんできた設計スタイルの変革を迫っている。

設計の取り巻く環境の進歩、変化とは対照的に、設計の内部 — すなわち、人間の思考活動、創造行為としての設計 — に対するわれわれの理解には、あまり進展がみられない。“設計とは何か”，という設計の本質への問いに答えることを保留、忌避したままに、設計に関する研究や各種システムの開発が進められ、表層的に設計の高度化、自動化が行われているのが現状であろう。

それでは、このまま設計に対する基礎的な研究を怠ってよいのであろうか？ この問いに対して設計の基礎研究の重要性を改めて認識させたのは、近年の知的CAD(Intelligent CAD)に関する数多くの研究、開発であろう。それは、初期の人工知能研究が人間の知能に対する認識を新たにし、人間の知能の優位性を明らかにしたのと同様に、知的CADの研究は、知的システムの開発の困難さを通じて、人間の設計という行為が、いかに高度な思考、莫大な知識と豊かな経験から成り立っているかを再認識させ

た。同時に、現在の大きく変化する設計の外的環境によりよく適応するためには、設計に対する本質的な理解が不可欠であることも広く認識されたといってもよい。

これまで、設計の本質に対する研究がまったく無かったわけではない。たとえば、東京大学の吉川はすでに1970年代に、人間の設計行為一般に対する科学的な探求を目指すものとして、一般設計学 (General Design Theory) [吉川 79] を提唱している。そこでは、実際の設計作業の持つさまざまな様相にとらわれず、設計を行なう人間の概念構造を位相空間として数学的定式化し、公理的アプローチから設計のもつ様々な性質を導出している。しかしながら、こうした設計に対する基礎的研究の成果は、設計業務の見直しや計算機支援のあり方を革新するには至らなかった。次々に現れる情報処理分野の新技術を、設計の計算機支援に適用することに関心の主眼が行き、設計に対する基礎的研究はこれまで地味な存在であったといえる。

1980年代の終わり以降の知的CADや設計エキスパートシステムなどの盛んな研究、開発を経た現在、これまでのアプローチの限界が意識されるようになった。先にも述べた現在の設計を取り巻く環境の変化に適応し、より高度な設計を実現するためには、設計の理論的基盤の確立が必要であり、多くの研究者が設計論を中心とした設計の基本的でより本質的な部分に対する研究に関心を抱くようになっていく。現在は、設計というものをその根底から再び問い直す時期をまさに迎えていると考えられる。

1.2 研究の目的

本研究は、先の研究の背景で述べた設計の基礎的研究のひとつとして行ったものである。本研究の目的は、以下にあげる3点に集約される。

- 物理世界の存在物としての設計対象を、形式的な計算機内表現するための方法を確立する。
- 設計過程を設計対象への操作の観点から形式化し、設計過程に対応する設計対象操作の方法を確立する。
- これら2つの成果を基にして、機械設計—特に設計の初期段階—の計算機支援システムにおける対象表現法を提案する。

1番目の設計対象に対する形式的表現方法の確立は、利用者や作成者の主観に依存しない、形式的な設計対象の表現、解釈、操作の体系を構築することを目的とする。そのために、以下の2つの問いに答えることから始める。

- われわれは設計対象を物理世界においてどのように認識しているか？
- 認識された設計対象に対してどのような数学的形式化が可能か？

本研究は、これまで無条件に採用されていたり常識とされていた設計対象や物理世界に関する諸概念を徹底して解体し、より明確な意味を持つものへと還元していく方法をとる。それにより、設計対象表現のための確固たる基盤が確立できるものと考ええる。

2番目の設計過程に関する目的は、対象表現の側から設計過程を分析し、対象に内在する論理に従って、どのような設計過程が構成できるかを提示することを目的としている。設計過程の研究は、設計組

織、業務形態、人間の思考プロセス、情報処理技術といった観点からこれまで多く研究されてきたが、本研究のアプローチは、設計対象自身のもつ性質から設計プロセスを導出していく。

第3番目の目的は、設計対象表現と設計過程に関して上記の成果が得られたならば、それを基にどのような計算機による設計支援システムが構成でき、どのような設計者—計算機系としての設計が可能となるのかを示すことにある。本研究では、とくに設計初期段階における設計対象のモデリングに重点をおく。そこにおいて設計者が考える設計対象のイメージの内の、論理的に表現可能な部分を、計算機内に構成し、操作することを目的に、より広く基礎的な対象記述の枠組みに基づいた設計対象モデリング・システムを開発する。

これら3つの目的に対して、より一般性をもって、より基礎的な立場から取り組んでいくのが本研究のアプローチである。

1.3 研究の構成

本研究は図1.1に示す研究項目や関連項目から構成される。図中において、実施された研究項目を長方形枠、本研究が影響を受けたり参照、利用した研究、技術、思想を角の丸い枠、さきに述べた本研究の目的に該当する3つの項目を太線長方形枠で示してある。

本研究は大きく分けて、理論的な研究事項 (図1.1の1-10) と、システムの構築に関する研究事項 (同図1.1-27) とに分かれる。理論的な部分では、設計の対象表現とそれを決定していく過程のあるべき姿について研究を行い、システム構築の部分においては、そのあるべき姿は、現在の情報処理技術を中心とした技術、方法論を援用することにより、どこまで、どのように実現できるかを議論し、検証する。

理論的な部分は、物理的な世界において設計対象をどのように理解するか、から出発する(4)。そうした対象世界のとらえ方を定めるにあたっては、まず、これまでの研究における対象表現ならびに設計過程に対する考え方を分析し、検討を行なう。その分析をもとに、設計対象の物理的な表現法(6)と設計対象を決定していく過程(7)を定めていく。本研究は一般設計学により提示される形式化された設計モデルの考え方に大きく影響を受けている。

物理的な対象表現と設計過程はそれぞれはモデリングの方法(8, 9)へと展開したのち、それらを総合して設計対象のモデリングの方法を提示する(10)。

つぎに、提示された対象モデリング法による設計—とくに概念設計—の計算機支援システムを構築することを目指す。システム構築に際しては、従来のCADシステムに関する研究、開発によって実現されているもの(ソリッドモデリングおよびプロダクトモデリング、形状特徴モデリングなど)については、システム構築の対象から除いている。これは、さまざまな既存の要素技術を取り込むことで総合的に能力の高いシステムを構築することが本研究の目的ではなく、本研究が提示する対象表現に関する方法の有効性と限界を明らかにすることを目指していることによる。

システム構築は、大きく分けて状態のモデリング・システムに関する部分(12, 16-19)と、設計者とのインタフェースに関わる部分(14, 20, 21)に関する研究から成り立つ。前者は理論における対象表現法、後者は設計過程に対応している。

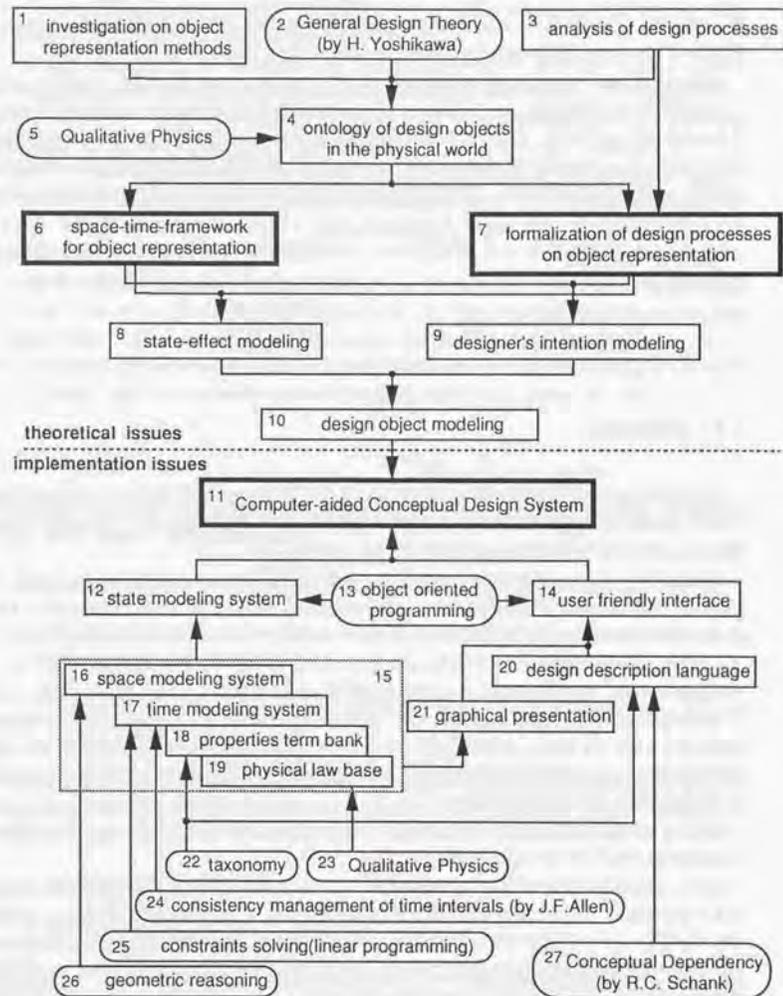


Figure 1.1: 本研究の基本構成図

1.4 論文の構成

本論文は、本章を含めて6つの章より構成される。次章以降の概要を以下に示す。各章の説明のあとにつけられたカッコ内の数字は、図1.1において該当する項目の番号を表している。

まず、第2章においては、設計対象の表現に関する現状と問題点を考察し、より広くかつ基本的な設計対象表現を実現するために必要なことがらを明らかにする。さらに、設計において対象をどのように認識し、表現すべきかを展開する。(1, 4)また、設計における機能についても、これまでの考え方を整理し、どのように理解すべきかを述べる。次に、設計過程に関するこれまでの研究を概観し、設計過程に対応した設計対象表現に要求されることがらを明確にする。以上の設計対象表現に対する諸要求に対して、本研究でとったアプローチを本章の最後に示す。(1, 2, 3)

第3章では、第2章での設計対象表現の問題点に関する議論を踏まえて、設計対象の物理的な表現の基礎論を論じていく。まず、設計対象が存在する物理世界を記述するための枠組みとして時空の概念を導入し、数学的定式化を行ない、その性質を明らかにしていく。次に、設計対象の物理表現に関する諸概念を、時空の中で明示的に定義される物理的基本概念へと還元していき、物理的な意味が明確で、形式的表現、操作が可能な対象表現法を確立する。また、章の最後において、ここで提案する手法の長所について議論し、さらに対象の認識の歴史的な経緯と、本研究の考え方の関連について述べる。(4, 5, 6)

第4章では、第3章で提示した設計対象の物理表現の枠組みにおいて、設計過程がどのようにとらえることができるかを考える。次に、第3章で提示した対象表現法に基づいて、設計過程に対応した設計対象の進化について述べる。さらに、設計者の意図について考察を加え、設計者の意図を構造化することの意義と方法について述べる。(7, 8, 9, 10)

第5章においては、第4章までに述べた設計対象の表現法と設計過程に対応した対象モデルの進化の実現を目的とした、設計対象のモデリング・システムと、設計者の意図を構造化するシステムについて述べる。(11-26)

最後の第6章においては、本研究を総括して提案した設計対象表現法とシステム構成法について評価を行なう。さらに、今後の研究課題と、長期的な展望について述べる。

第2章

設計対象モデリングの現状と問題点

本章においては、まず設計対象表現に関する研究を概観した後、より形式的な機械製品の表現における要求事項と実現上の問題点を明らかにする。さらに設計過程に関する既存の研究を整理し、設計過程に対応するために設計対象の表現、操作に求められることを考察する。それらをおまえて、設計のための形式的対象表現の枠組みに対する本研究での考え方を最後に述べる。

2.1 機械設計における対象表現法の現状

2.1.1 設計における対象表現法

機械製品の設計、生産においては、実世界(物理世界)での存在物を主な対象としている¹。対象の表現とは、そうした物理世界に存在するもの(あるいは存在させようとするもの)を、情報の世界へと写像することを意味する。そうした設計対象の情報化に際しては、実世界において対象のもつ複雑性、階層性、多面性、多様性を、十分に考慮し、なるべく忠実に反映しなくてはならない。

様々な設計・生産に関わる諸活動を統合する上で中心的役割を担うことを期待されているのが、対象に関する全ての情報を統合し、管理する統合対象モデルである。たとえば製品の生産に対する統合対象モデルの概念のひとつとして、プロダクト・モデル [Kimura 82][Iwata 82] が提案されている。

統合対象モデルは CIM (Computer Integrated Manufacturing) や知的 CAD (Intelligent CAD) を実現する上で、もっとも重要な役割を有するが、その具体的な内容と実現方法に関しては十分な研究が行われていないと言えない。また、包括的な製品情報をシステム間で交換を実現することを目的とした STEP [小林 90] の制作品業が国際的な協力のもとに進められているが、形状定義以外の製品情報に関しては、標準化を行なうための必要な基礎が確立していない状況といえる。

一方、知識工学やソフトウェア工学などの情報処理分野での技術の発展に伴い、さまざまなデータモデルを対象のモデリングに直接に用いることや、複雑な対象表現スキーマを容易に実現することが可能になってきている(これに関しては [Webster 88] に詳しい)。たとえば、Smalltalk-80 [Gold 83] に代表されるオブジェクト指向言語は、オブジェクト、クラス、メッセージ、メソッド、インスタンスなどの、設計・生産の分野においても有効な概念を提供している。こうした情報処理分野での諸概念を

¹ここではソフトウェアは考えないこととする

2.1. 機械設計における対象表現法の現状

CAD/CAM にとりいれることも多くおこなわれている [木村 85][川越 89][小山 91]。

しかしながら、こうした高度なデータモデルは本質的には情報処理の概念であり、さきに述べたように、実世界における設計・生産対象の特徴に直接には対応しない。たとえば、柳生は [柳生 84][柳生 85] において、データベースの世界における“もの”、“こと”、“属性”の概念と実世界における対象の認識との違いを指摘し、実世界の構造を忠実に反映するためのデータモデルについて述べている。

情報処理分野での成果を有効に利用するためにも、単に利用可能なデータモデルの適用をはかるのではなく、設計・生産側での対象領域の性質を十分に分析し、整理する必要がある。

本節では、設計の対象表現における代表的な手法に関して概観し、それらの特徴についてさらに述べていくこととする。

2.1.2 代表的な対象表現法

ここでは、設計対象の構造や属性を表現する代表的な手法について整理する。製品を製造する NC データも、工作機械のオペレーション列によって暗黙に対象を表現しているときみならず、ここではそうした間接的な表現は対象表現から除外して考える。また、解析を目的とした対象表現も FEM モデルをはじめとしてさまざまなものがあるが、ここでは解析用の対象表現も省くこととする。

実モデル

設計対象を情報化して表現するのではなく、設計対象と同等な物(実モデル、あるいは実モデル)を実際に製作する手法がある。

実モデルは従来より鋳型を作るための模型や、ならい旋盤のならい型(モデル)などにおいて用いられてきた。設計の現場においても、細かな修正を加えることのできるクレイモデル(clay model)、実物大で作成するモックアップ(mockup)、大型製品を縮尺したり、小型製品を拡大して作成するスケールモデル(scale model)などが用いられ、製品の質感、動きによる干渉の有無の判定、面のなめらかさなどを評価する手段として重要な役割を担っている。

実モデルと実際の製品とは、素材、仕上げ、精度、内部構造、細部や縮尺などの面で異なっており、実モデルを製品とすることはできない。また、実モデルを作成することにより設計対象の製造可能性を直接的に検討することはできるが、寸法や形状などの情報は実モデル上では陽に示されていないため、情報化にはそれらの測定が必要となる。

現在は、設計作業の合理化を目的に、これらの実モデルを計算機内モデルへと移行させる努力が進められているが、その一方で、光硬化性樹脂を用いたラピッド・プロトタイプング(rapid prototyping)により実モデルを作成し、計算機内モデルの妥当性を評価することが行われている [CAD&CIM 91]。

図面

図面は設計対象に関する情報を、人間と人間の間で交換する手段として、最も一般的に用いられている。図面にも、個人的に用いるアイデアスケッチ、ラフスケッチ、ボンチ絵などから、規格化、標準化された製図法による図面(製図)までさまざまな表現形態がある。

製図においては、投影法による正確な形状情報の表現、数字や記号による寸法、公差、精度などの技術情報の表現、部品表による構成要素の表現や注記による製作上の留意事項等の表現など、多様なこと

がらが図面に対して盛り込まれている。

製図は従来は人間の手作業であったが、2次元CADシステムの登場により製図作業を支援し、製図された結果を格納、検索することが可能となった。ただし、その場合においても計算機内に表現されているのは製図法に則った設計対象の“表記のデータ”であり、設計対象の“計算機内モデル”であるとはいえない。

製図は技術者にとって長年慣れ親しんだ対象表現法であり、後述の対象表現を計算機内モデルとする設計支援システムと技術者とのユーザインタフェースに用いられた。たとえば、手書きの3面図から計算機内モデルを生成する試みや、計算機内モデルのユーザへの提示の手段として図面(グラフィック表示)を用いることが多く行なわれている。

構造モデル

構造モデルは、機械を構成する要素の属性(形状、寸法、材質など)を抽象し、要素間の関係を明示することによって構造を表現するものである。

要素間の関係を2項関係に限定することにより、構造モデルはグラフとして表現される。たとえば、吉川は部品間や基本的な要素である形状素との関係を接続グラフとして表現し、そこから機械の機能を抽出できることを示した[吉川 72]。

また、北嶋らは、機械を階層的にとらえて構造モデルを作成し、それを用いて組立品の設計の計算機支援[北嶋 81][北嶋 82]や、構造モデルから組立可能性を判定すること[北嶋 83]を行なっている。

構造モデルは計算機内モデルとして利用される以外に、機械の基本構造や動作を技術者がより容易に理解するために用いられることもある。たとえば、図2.1はメカトロニクス製品の機構を分かりやすく表現することを目的に岩田、松尾らによって提案された動的構造表現図の一例である[Iwata 92]。動的構造表現図においては、記号化された機構部品とそれらの接続関係、機構部品に付加された運動記号などにより、技術者が複雑な機構を直観的に理解することを助けている。

構造モデルの用途を大別すると、設計の初期段階における対象表現と、設計が終了した後の対象表現がある。設計初期段階においては、設計対象の基本構造は定まっても細部は未定であるため、構造モデルのレベルでしか設計対象を記述できない。その場合の構造モデルは実現すべき設計対象に対する要求仕様となる。構造モデルに論理的な矛盾が存在すると、設計解が存在しない仕様を与えてしまうことになる。よって、構造モデルの整合性を保証することが重要となる。

他方、設計終了後における構造モデルは、すでに存在している設計対象の細部を抽象し、機械の基本構造を簡に表現するために用いられる。この場合、すでに存在している設計対象により構造モデルの整合性は保証される。

形状モデル

設計対象の3次元形状を、計算機内で操作可能な形式としてモデル化したものが形状モデル(geometric model)である。形状モデルには、多面体をワイヤフレームとして表現するものや、最小単位立体のマトリックスとして表現するものなど、さまざまな方法が考案されたが、3次元立体を精度よくかつ高度な利用が可能な形式で表現したのがソリッドモデル(solid model)である。そのさきがけとなったのが沖野らにより提案されたCSG(constructive solid geometry)に基づくTIPS-1[Okino 73]と、

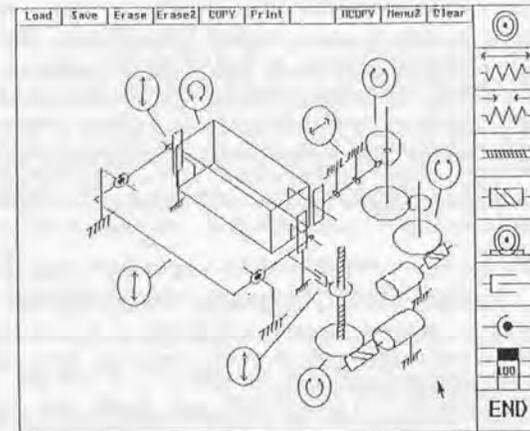


Figure 2.1: 動的構造表現図の例

ブレイド(L.C. Braid)らの境界表現(boundary representation)によるBUILD[Braid 73]であった。

これらソリッド・モデリング・システムは、基本立体から段階的に複雑な形状モデルを作り上げていくことができ、設計者による対話的な形状定義が可能であった点が、計算機内での形状表現として優れている。

リケッジャ(A.A.G. Requicha)[Requicha 80]によると、ソリッドモデルによりモデル化される立体(抽象立体とよぶ)は次の6つの条件を満足する必要がある[中塚 85]。

1. 剛性(rigidity): 抽象立体は、位置や向きに依存しない不変的な形状をもつ。
2. 同次3次元性(homogeneous three dimensionality): 立体は、内部をもち、境界は孤立点または浮遊部分をもってはならない(正則閉集合)。
3. 有限性(finiteness): 立体は、空間の有限部分を占めるものでなければならない(コンパクト集合)。
4. 閉包性(closure): 剛体運動(移動、回転)や他の立体を付加あるいは除去する操作を適用しても、やはり立体になる(正則演算集合)。
5. 有限記述可能性(finite describability): 計算機内で表現可能であることを保証するため、頂点、稜、面などが有限でなければならない(半解析集合)。

6. 境界決定主義 (boundary determinism): 立体の境界は「内部」であり、立体を決定するのは境界である (閉多様体).

これらの条件のうち、同次3次元性の制約を緩めたものがワイラー (K.J.Weiler) の非多様体モデリング (non-manifold geometric boundary modeling) [Weiler 86] である。非多様体モデリングは、3次元形状と0,1,2次元の各形状要素 (点, 線, 面) を同等に取り扱うことができるため、内部構造の表現や形状操作の履歴記録、さらには後述する形状特徴の表現に有効であると考えられる。

設計過程における対象表現という観点から形状モデルを見たときの問題は、形状モデルは形状として完全なもの、具体化されたもののみを取り扱い、形状として不完全なもの、座標値が不定なものなどを取り扱うことができない。そのため、設計途中の部分的にしか定まっていない形状は、形状モデルによって表現することができない。非多様体モデルにおいても同様の問題を生じる。

プロダクトモデル

形状に加えて、従来の製図図面に含まれる形状以外の情報 — たとえば、精度、公差、工作法など — の情報を陽に表現することを目指すのがプロダクトモデル (product model) である。プロダクトモデルは、1980年代に入って盛んに研究、開発されるようになった (たとえば、[Iwata 82] [Kimura 82] [川辺 85] [鈴木 86] [Björk 89] [CAD*1 91] など)。

また、多様な計算機内表現形式をもつプロダクトモデルのデータ交換を目的とした国際規格の制定がSTEP (STandard for the Exchange of Product model data) としてISO/TC184/SC4において進められており、プロダクトモデルで表現すべきデータ項目が示されている (たとえば、[小林 90] や [Bloor 91] に解説がある)。

プロダクトモデルが表現する製品情報は単に最終製品にとどまらず、製品が企画されてから、設計、解析、試作が行なわれ、さらに製造準備、製造、検査などを経て、ユーザーの手に渡り、最後に廃棄されるまでの製品ライフサイクル全般に関わるものを目指している [鈴木 91]。しかしながら、各段階における設計対象を総合的に表現する方法はこれまでのところ確立されていない。

属性モデル

属性モデル (feature-based model または attribute oriented model) は設計に必要な属性を抽出し、その集合により設計対象を表現するものである。属性モデルはプロダクトモデルの一種と考えることもできるが、プロダクトモデルが設計・生産の各アクティビティに対する独立性を指向しているのに比べて、属性モデルは、設計方法を設計対象表現へ積極的に取り込み、さらには、設計を行なう際に有効な仮想的な実体もモデリングの対象に含めている点に特徴がある [伊藤 90]。

商用のCADシステムの中にも、ICADのように属性値や属性値を求める手続きを有したフレーム形式によって属性モデルを実現しているものもある。そうしたCADシステムは設計手順や対象の基本構造が変化しない編集設計に対して有効であることが示されている [酒井 92]。

属性モデルの考え方は、設計対象に関して必要最小限の決定すべき属性項目が定まっている定型設計のような場合においては、設計対象の表現手段として有効である。ただしその場合には、表現されている属性が実世界においてどのような意味 (指示する内容) を持つかは、人間の解釈に任されているか、あるいは別の対象表現 (たとえば形状モデル) を有していて、その上で属性の意味を解釈できる必要があ

る。

形状特徴モデル

形状特徴モデル (form feature model) は、溝や穴などの局所的な形状パターン (形状特徴とよばれる) を用いて、対象を定義していくモデルである。各形状特徴には、それが担っている意味が明示的に与えられ、形状とともに形状のもつ機能や特徴に関する情報がモデル化される。

形状特徴モデルはプロダクトモデルの一部を構成するものと考えられる。従来の形状モデルと比較して、マンティラ (M. Mäntylä) は以下の3点を形状特徴モデルの長所としてあげている [Mäntylä 89]。

- 形状特徴を用いることにより、穴や溝などの利用者にとって馴染みのある語彙を用いて形状定義を行なうことができる (たとえば、[Dixon 89] の Design-With Features System など)。
- 形状特徴はそのタイプを指定するレベルと詳細な幾何的屬性の2つのレベルに分けることができるため、詳細な幾何的屬性が定まっていない場合でも形状定義を行なうことができる。
- 形状特徴モデルは多様な生産計画に関する情報を表現する手段を与えている。

形状特徴は、人間が形状をどのように認識しているかということに深く結びついており、形状を眺める観点 (たとえば、設計、機械加工、組立、検査など) が異なると、形状特徴と認める形状の部位が変わったり、同一の部位に対して異なる意味付け (名前付け) がされたりする。そうした一例を図2.2に示す。

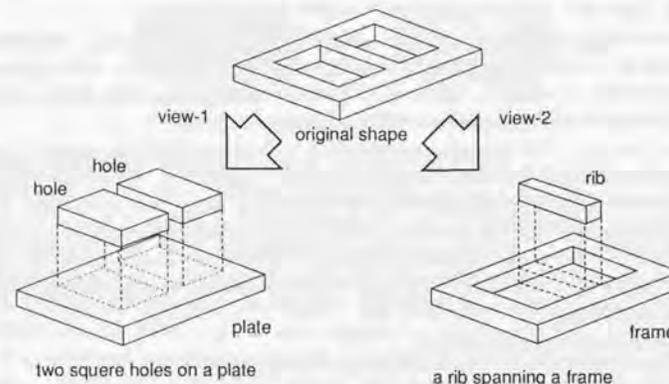


Figure 2.2: 形状特徴の解釈が複数可能な形状の例

そうした解釈の多義性を有した形状特徴の概念を対象表現に導入することは、連続的に変化する形状の部分に対してある価値に基づいた類別を与えることに相当する。そのため、

- 連続的な形状から、どのようにして部分形状を明確に取り出すか (境界の判定)

- ある部分形状が形状特徴の類に含まれるか否かをどのように決定するか(類の判定)

が重要となってくる。

物理的对象モデル

形状特徴モデルが対象の形状を表現の中心においていたのに対して、物理的な属性や振舞いの表現に関心をもちモデル化の考え方がある。これを物理的对象モデルとよぶこととする。

物理的对象モデルは、数値計算を基礎としたものと、記号処理を基礎としたものに大別される。前者の例は、有限要素法などを用いた変形、伝熱、流体などに関する解析や機構、運動解析などが挙げられる。後者の例は、定性推論(定性物理)の考えに基づいたCADシステムに多く見られる。ここでは、記号処理を基礎とした物理的对象モデルについて概観する。

物理的对象モデルの例としては、まずマーティン(S.S. Murthy)らのPROMPT[Murthy 87]が挙げられる。PROMPTは、設計プロトタイプデータベースと、物理的な特性と形状を含めた属性操作との間に定型的な関係付けを与えるルールベースを持つ。設計仕様に近いプロトタイプを選びだし、その物理的な特性を評価し、物理的設計仕様を満足するようにプロトタイプの属性を変更していくことで、設計解へと近づいていく。

また、村上らは部品の物理量の入出力関係を記述した物理的な対象モデル(feature descriptionとよばれる)を用いて、設計が完了した設計対象の振舞いに関する機能検証を行なっている[Murakami 89]。

桐山らは物理法則とそれに関連する属性などをまとめたものをフィジカル・フィーチャー(physical feature)とよび、それらをフォーブス(K. Forbus)の定性プロセス理論[Forbus 84]の考えに基づいて収集、記述したデータベースの構築を進めている[桐山 92]。

梅田らは定性プロセス理論の考え方を拡張し、機能(Function)、挙動(Behavior)、状態(State)という対象のもつ3つの側面を相互関係を含めて記述する枠組みであるFBSダイアグラムを提唱している[Umeda 90]。この記述法は、機能という人間に依存した主観的な記述と、状態、挙動という物理的で客観的な記述との融合を図っている点に特徴がある。

ファルケンハイナー(B. Falkenhainer)らは対象とするシステムや状況(これをscenarioとよぶ)の物理的挙動に関する問い合わせに対する適切なモデルを生成する手法として、合成モデリング(compositional modeling)の概念を提案している[Falkenhainer 91]。合成モデリングにおいては、シナリオ(scenario)に対する問い合わせの内容を分析し、どのような物理量や現象に注目すべきかを導出する。そして、問い合わせの内容を求めるのに適したシナリオのモデル(scenario model)を、各領域における理論を構成する個別的な要素であるモデル片(model fragments)を組み合わせることで構築する点に特徴がある。

物理的对象モデルが現在抱える問題は、

1. 対象の物理的特性や挙動の表現法
2. 物理法則や物理的な制約の収集と表現
3. 表現された対象への物理法則の適用、制約の充足のための推論方式

に対する一般的な枠組みが確立されていない点にある。個々の対象表現と設計法、および一般的な物理法

則とが表現において十分には分離されておらず、物理的对象モデルに期待される「物理法則レベルに還元することで新しい構造をもった機械を設計する」ことの実現は困難である。

メタモデル

設計対象は、用途に応じた複数のモデルを持つことがあるが、それら複数のモデルによって表現されている対象が実世界に存在できるということ—すなわち複数のモデルで記述されている内容の間の整合性が保たれていること—を何等かの方法により保証する必要がある。

富山らは、各モデルの背景に存在している理論のレベルにおいて物理概念間の一般的な対応関係を管理することにより、モデル間の属性の対応関係付けを行なうメタモデルの概念を提唱している[富山 85][桐山 91](図 2.3参照)。

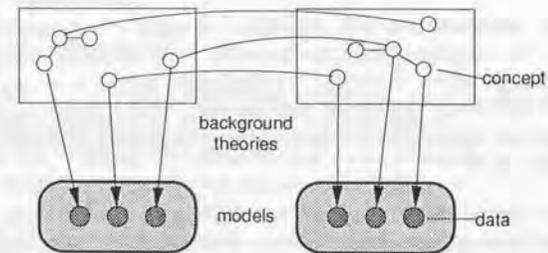


Figure 2.3: 背景理論によるモデル間の対応付け

これは、計算機の内部に実世界のもつ物理的メカニズム(原理、法則)などを作り込み、仮想的な物理世界を構築することによって、計算機内で多面から表現される対象の斉一性を保証することを目指している。こうしたアプローチは、人工知能の分野においてヘイズ(P. Hayes)が提唱している素朴物理(naive physics)[Hayes 85]での物理概念の収集とその体系化と方向を同じくしているといえる。

富山らのメタモデルは、一般的に成り立つ物理概念間の関係を管理するメカニズムであると同時に、個別的な設計対象の中心モデルとしての役割を持つ。設計の進行に伴い中心モデルとしてのメタモデルは詳細化されていくことから、これをメタモデルの進化モデルとよんでいる。

メタモデルの概念は、物理的存在としての設計対象を総合的に記述することを目指す点と、設計過程に対応した進化という概念を含んでいる点において、今後の設計対象の計算機内表現の方向を示しているといえよう。ただし、その実現には解決すべき問題も数多く残されている。重要な問題としては、

- 設計の視点に対応した各モデルにおいて用いられる属性は、物理的な意味により定義されるのではなく、分野ごとの常識、慣例や規約により定義されるものが多い。そうしたモデル間の整合性を保証するには、物理的な背景理論では十分ではなく、設計に依存した諸概念に対する知識を計算機にもたせる必要がある。

- 進化モデルを実現するには、抽象的な内容を含むモデルから具体的なモデルにいたる、各進化レベルの推移に対して対応できるモデルの表現手法が必要である。しかしながら、そうした多様な抽象性を包含するモデリングに関して、有効な方法論が確立していない。

などが挙げられる。

2.1.3 設計対象表現法の現状のまとめ

以上、機械設計における代表的な対象表現法について概観してきた。対象表現に関してはさまざまな概念、手法が提案され、研究されているがその指向性を整理すると以下のようにまとめることができる。

技術情報指向: 製品のライフサイクルを通して見たときに、製品に関わる情報を製品のモデルに盛り込んでいく方向。たとえば、設計、生産の各アクティビティの間の情報交換手段としてのプロダクトモデルや、技術情報を取り込んだ形状特徴モデルがこれに相当する。

物理指向: 対象の物理的性質、挙動、存在可能性について推論したり、製造や組立など、製品に対するプロセスを物理的に評価することを行なう方向。CAE(Computer Aided Engineering)における解析モデルがこれに相当し、より実世界に近い、詳細なシミュレーションが指向されている。また、先に述べた物理的対象モデルにおいては、従来のCAEモデルの取り扱うことのできなかった、定性的な物理現象の表現と推論や、複数の観点からの総合的な物理現象の取り扱いを目指している。

統合指向: さまざまな観点による複数のモデルをひとつの統合モデルにまとめたり、複数のモデルを相互に関連付ける仕組みを実現していく方向。前者は共通のスキーマにより対象に関する情報をモデリングしていく考え方であり、後者は複数のスキーマを取りまとめ、対応をとるメタスキーマレベルでの統合化を行なう考え方である。統合的なプロダクトモデルは前者に相当し、メタモデルの考え方は後者に対応する。

設計過程指向: 対象表現と設計過程を融合化したり、設計過程の詳細度の異なる対象表現を実現する方向。前者は属性モデルに代表されるように、対象を構成する主要な属性を設計パラメータとして抽出し、それらの間の整合性を保ちながら決定していく仕組みを内在する方向。後者の考え方は、メタモデルの進化モデルにみられるように、設計の進行に伴う設計対象の詳細化に対応できるモデリングの実現を目指している。

これら4つの方向の中で、特に今後の基礎的研究が必要とされるのは物理指向のモデルと、設計過程指向での進化を実現するモデルであると考えられる。物理指向のモデルは現在その必要性が叫ばれている仮想的な設計・生産環境の実現にとって不可欠なものであるし、進化モデルは設計者の一貫した計算機支援と、コンカレント・エンジニアリング・デザイン(concurrent engineering design)の実現において重要な役割を担うと期待される。しかしながら、これらのモデリングに関しては、技術情報指向や統合指向のモデリングと比べてそれを実現するための方法や要素技術に関する検討が十分ではなく、大部分が今後の課題として残されているのが現状である。

2.2 対象表現法の分析

2.2.1 対象表現と表現スキーマ

対象表現を行なう際には、ある特定の目的に従って、どの情報をどのようにして記述するのか、ということ明らかにする必要がある。スキーマ(schema)はそのための枠組みであり、スキーマを通じてわれわれは対象を観察し記述することができる。もしも、異なるスキーマを用いたならば、記述された同一対象が、全く異なる様相を呈することもある。

計算機内に対象を記述するときには、その記述のレベルについて明確にしておく必要がある。データベース分野において広く用いられている3層スキーマ[SPARC 75]では、下記の3つのレベルが設定されている。

- 対象領域レベル: 対象とする世界の選択
- 論理レベル: 論理表現の選択
- 実装レベル: データ構造の選択

対象領域のレベルは、どのような観点から対象を観察し、記述するか、ということを決める。どのような物理的要因や影響を考慮に含めるかを定める問題も、このレベルに相当する。

論理レベルにおいては、対象領域レベルで定められた情報の記述のための枠組みを定めることを行なう。この枠組みをここでは表現スキーマ(representation schema)とよぶこととする。

実装レベルにおいては、論理レベルにおいて指定された表現スキーマを計算機上に実装することを行なう。一般に実装レベルにおいては同一の表現スキーマに対して、いくつかの異なる実現の方法が考えられる。たとえば、論理レベルにおいて、順序列として指定されたものに対して、実装レベルにおいては配列、ポインタ、リストなど、異なる実現の仕方が考えられる。

ここでは、論理レベルにおける表現スキーマの問題に焦点をあてて議論を行ない、分析型の問題と総合型の問題における表現スキーマの違いについて考えてみる。

一般に分析型問題においては、同一の対象に対する異なるスキーマでの表現間の整合性や対応関係には注意を払う必要がない。それは、既に実世界に存在している分析対象が、データ間の整合性や対応付けを保証するからである。

設計に代表される総合型の問題においては、記述対象は実世界に存在せず、実世界に生み出さなくてはならない。よって異なるスキーマ間の整合性は、実世界の存在物を介して保証することはできない。矛盾を含んだ記述は、対象を実現出来なかったり、意図したものと異なる対象を生み出す可能性がある。そのため、スキーマ間の整合性を論理的に保証する方法が必要となる。

スキーマ間の整合性を保持する方法には、2つの代表的なアプローチが存在する。スキーマの任意の2つの組それぞれについて直接に対応関係を定義する方法(図2.4(a))と、基本となるスキーマと個別のスキーマとの間の対応関係を定義することにより間接的にスキーマ間の対応を定める方法(図2.4(b))である。

今、 N 個の異なるスキーマがあるとすると、その中の任意の2つのスキーマ間の直接的な変換の総数は $N(N-1)/2$ となり、スキーマの種類数が増えるときには、それらの間の整合性保持が困難とな

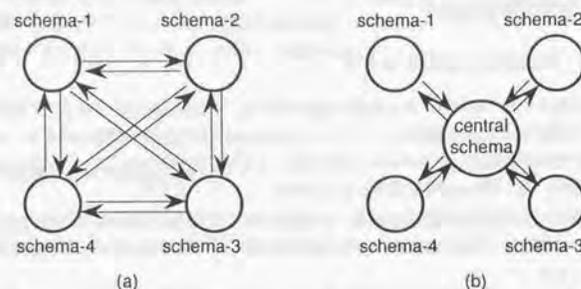


Figure 2.4: スキーマ間の整合性の管理の2つの形態

る。他方、個々のスキーマに対する基本的なスキーマが存在すれば、スキーマ間の変換は基本スキーマと個々のスキーマとの間の N 個を定めることで実現できる。

基本スキーマの可能性には様々な議論があるが、強力な対象モデリング・システムの実現には、基本スキーマの存在は不可欠であるといえる。本章のこれより後においては、基本スキーマを改めて統合スキーマとよぶこととし、それについて検討を行なう。

2.2.2 表現対象としての機械

2.2.1で述べたように、対象の表現スキーマは、記述の対象をどのように認識するか、という対象領域レベルに依存して定まる。本研究では、以下の5つを表現対象としての機械の特徴としている。

有境界性 対象は他の対象と明確に区別しうる境界を有する。これにより、対象物は数え上げることが可能となる。明確な境界を持たないものは、ここでは考慮の対象に含めない。

有属性 対象は内的な性質としての属性を有する。属性はその名前と値からなるものとする。

有関係性 対象間には関係が認められる。関係の間にさらに関係を考えることができる(高次な関係)が、それは本研究の考察の範囲外とする。

有構造性 対象物は構造を持ち得る。構造はそれを構成する複数の対象とそれらの間の関係により定義される。

有変化性 対象物、属性値、関係や構造は、時間の経過とともに変化し得るものとする。

以降、対象は上記の5つの性質を有しているものとして議論を進める。

2.2.3 対象記述のメタスキーマ

スキーマ間の差異を議論するために、スキーマ記述のためのスキーマ(メタスキーマ)を導入する。

2.2. 対象表現法の分析

1. 記法

- (a) 集合: $\{A B C \dots Z\}$
 A, B, C, \dots, Z を要素とする集合
- (b) 順序列: $\langle A B C \dots Z \rangle$
 $A < B < C < \dots < Z$ なる全順序が導入された集合
- (c) 任意回の繰り返し: $A^* = A A A \dots$
 A で示されたタイプの任意回の繰り返し
- (d) 指定回の繰り返し: $A^N = A A A \dots A$
 A で示されたタイプの N 回の繰り返し
- (e) 記述: $\langle A | B \rangle$
 B は A に関する記述本体 (representation body)

2. 記述本体

- (a) 対象指示子: $E, E_1, E_2, \dots, E_i, \dots$
 対象物と一対一対応した記号
- (b) 関係指示子: $R, R_1, R_2, \dots, R_j, \dots$
 関係の種類と一対一対応した記号
- (c) 属性指示子: $Q, Q_1, Q_2, \dots, Q_k, \dots$
 属性の種類と一対一対応した記号
- (d) 属性値集合: $V_q, V_{q1}, \dots, V_{qn}$
 ある属性指示子 Q に関して取りうる値の集合
- (e) 手続き指示子: P, P_1, P_2, \dots
 手続きの種類と一対一対応した記号
- (f) 関係: $R(E^*)$
 R は関係指示子, E は対象指示子
- (g) 属性: $[Q v_q]$
 Q は属性指示子, $v_q \in V_q$
- (h) 手続き: $P(A^*)$
 A は手続きの引き数で任意のタイプの記述本体
- (i) 構造: $S \langle E^* \rangle$
 E は構成要素の対象指示子, R は要素間の関係指示子
 $\langle E_1 | S \langle E_2^* \rangle \rangle \iff \langle E_1 | \{ E_2^* \} \{ R(E_2^*)^* \} \rangle$
- (j) 時系列: $T \langle B^* \rangle$
 B は記述本体

3. 変形規則

- (a) 結合: $\{ \langle A | B \rangle \langle A | C \rangle \} \iff \langle A | \{ B C \} \rangle$
 (b) 連結: $\{ \langle A | B \rangle \langle B | C \rangle \} \implies \langle A | C \rangle$
 (c) 繰込み: $\{ \langle A | \text{Rep}(\dots, B, \dots) \rangle \langle B | C \rangle \}$
 $\iff \langle A | \text{Rep}(\dots, \langle B | C \rangle, \dots) \rangle$
 ただし, $\text{Rep}(\dots, B, \dots)$ は B を含む記述本体

たとえば, 個々の対象の属性値に関する変化を記述するスキーマは以下のように表現される。

$$\{ \langle E | \{ [P \ T \langle V \ * \rangle] \ * \} \rangle \ * \} \quad (2.1)$$

これはたとえば, 次に示す表現スキーマを一般化したものと考えられる。

$$\begin{aligned} & \{ \langle \text{unit-1} | \{ [\text{electric } T \langle \text{high low} \rangle] [\text{status } T \langle \text{on off on} \rangle] \} \rangle \\ & \langle \text{unit-2} | \{ [\text{electric } T \langle \text{high none low} \rangle] [\text{status } T \langle \text{off on} \rangle] \} \rangle \\ & \dots \dots \dots \\ & \langle \text{unit-N} | \{ [\text{electric } T \langle \text{high low high} \rangle] [\text{status } T \langle \text{off on off} \rangle] \} \rangle \end{aligned}$$

すなわち, メタスキーマによる表現スキーマの記述は, 個々の対象指示子, 属性名, 属性値などの意味を捨象し, それらの間の関係を抽出したものである。

ただし, ここで定義したメタスキーマは, 機械の特徴を踏まえて表現スキーマの属性, 構造と時系列相互の関係を明示したものであり, 純粋なメタスキーマ(たとえば[柳生 84]による data metamodel)とは異なる。

2.2.4 機械製品の表現スキーマ

次に, 既存の代表的な対象表現スキーマについて, 先に定義したメタスキーマを用いて表現する。

テーブル

テーブル(表)は複数の対象に対する属性の組を記述するために用いられる。テーブルは個々の対象に関する記述を集合として取りまとめたものであり, 対象の出現する順番は一般に意味をもたない。表現スキーマは次のようになる。

$$\{ \langle E | \{ [P \ v_p] \ * \} \rangle \ * \} \quad (2.2)$$

たとえば, 部品表においては, E は部品名(たとえば, M6 ボルト, ハウジング), P は属性名(たとえば, 長さ, 重量, 材質), V_p は属性値(たとえば, 25.0mm, 135g, S45C)に相当する。

2.2. 対象表現法の分析

製図図面

製図図面における対象物は, 線分の構造として記述される。また, 個々の線分に対して, 長さや表面粗さなどの属性が付加される。立体や表面などは陽には表現されない。たとえば3面図のスキーマは次のように表現できる。

$$\langle E_1 | S \langle \langle E_2 | S \langle \langle E_3 | [P \ v_p] \ * \rangle \ * \rangle \ * \rangle \rangle \quad (2.3)$$

ただし, E_1 は3面図, E_2 は上面図, 立面図, 側面図の各面図, E_3 は線要素に相当する。

接続グラフ

接続グラフは, 対象の構成要素をグラフのノードとし, 要素間の2項関係をアークとしたグラフである。これは, 製品の組立・分解計画や機能構造表現等に多く用いられる。たとえば, 部品接続グラフは

$$\langle E_1 | S \langle E_2 \ * \rangle \rangle, S \langle E_2 \ * \rangle = \langle \{ E_2 \ * \} \{ R(E_2 \ E_2) \ * \} \rangle \quad (2.4)$$

と表される。ただし, E_1 は組立品(アセンブリ), E_2 は部品を表す。

階層構造

階層構造は, 接続グラフの複数の層からなる構造であり, 上位の層の属性や関係は下位の層へと還元できる。ソリッド・モデルの代表的な表現スキーマのひとつである境界表現のウイングド・エッジ構造(winged-edge structure)は複雑な関係を有する階層構造として定義される。大部分の構造的情報は稜線レベルで記述されており, さらに, 属性については頂点レベルで指定される座標が主となる。そこから他のレベルでの構造や属性は, 手続き的に導出され, データとして陽には表現されない。単純化した境界表現のスキーマは次のように表される。

$$\begin{aligned} & \langle E_1 | \{ \{ E_2 \ * \} \} \rangle \\ & \langle E_2 | \{ \{ E_3 \ * \} \} \rangle \\ & \langle E_3 | \{ \{ E_4 \ * \} \} \rangle \\ & \langle E_4 | \{ \{ E_5 \ * \} \} \rangle \\ & \langle E_5 | \{ \{ E_6 \ * \} \} \{ R(E_5) \ * \} \{ R(E_4) \ * \} \} \rangle \\ & \langle E_6 | [X \ v_x] [Y \ v_y] [Z \ v_z] \rangle \end{aligned} \quad (2.5)$$

ただし, E_1, E_2, \dots, E_6 はそれぞれ, 立体, シェル, 面, ループ, 稜線, 頂点を表す。

タイムチャート

タイムチャートは, 対象の属性の時間的変化を表現するのに用いられる。その際に対象の構造は一般に考慮されない。属性の変化の相互関係(前後関係, 同期関係等)については, 陽に与えられることは少なく, 個々の時間区間の属性(時刻)より導出される。

$$\{ \langle E | [P \ T \langle v_p \ * \rangle] \rangle \ * \} \quad (2.6)$$

タイミングチャートやガントチャートも, タイムチャートの一環である。

構造変化

構造の変化の表現として、構造の履歴を記述することが多く行なわれる。これは、ある瞬間における対象のスナップショットを時間順に並べることにより記述される。

$$\langle E | T \langle S \langle E_1 * \rangle * \rangle \rangle \quad (2.7)$$

フレームとオブジェクト

近年の対象表現の研究において、フレーム [Minsky 75] による表現スキーマが多く用いられている (たとえば [Takeshige 85])。その理由としては、フレームは対象表現スキーマを柔軟に定義、利用ができる点にある。フレームは基本的には次のように属性と手続きの対の集まりとして表現される。

$$\langle E | \{ \langle [Q v_p] P(v_p *) \rangle * \} \rangle \quad (2.8)$$

フレームにおいては、各 Q をスロット名、 v_p をスロット値、手続き P を付加手続き (attached procedure) とよぶ。

また、フレームと同様な対象表現として、オブジェクト指向プログラミングにおけるオブジェクトがある。オブジェクトでは、手続きはスロットではなく対象指示子に付加されている。

$$\langle E | \{ \{ [Q v_p] * \} \{ P(v_p *) * \} \} \rangle \quad (2.9)$$

2.2.5 表現スキーマの分類

他にも多くの表現スキーマが考えられるが、それらは上記のスキーマの一部分であるか、あるいはそれらを複合したものと考えられる。

表現すべき主要な要因として構造、時間、属性の3つを考え、多様なスキーマを分類・整理する。図2.5は、その3つの要因の表現の有無を軸にとった「表現スキーマ・キューブ」を表わしている。対象表現スキーマは、構造、時間、属性の表現能力の有無によって、キューブの頂点に対応付けられる。

これまでの対象表現スキーマは、多くても3つの要因のうちの2つのみに注目している。これまでの対象表現は主に分析を目的としており、対象の記述に際しては必要最小限の要因のみを表現しているため、それ以外の要因は捨象されるか、あるいは固定されて表現されることがその理由として考えられる。

総合としての設計を目的とし、対象表現能力をより高度化していくためには、構造、時間、そして属性の3つの表現を可能とする統合的なスキーマが必要と考える。

2.3 設計対象の表現スキーマにおける問題点

ここでは、従来の対象表現スキーマが抱える問題点について考察を加え、設計のための対象表現に求められている課題を明らかにしていく。

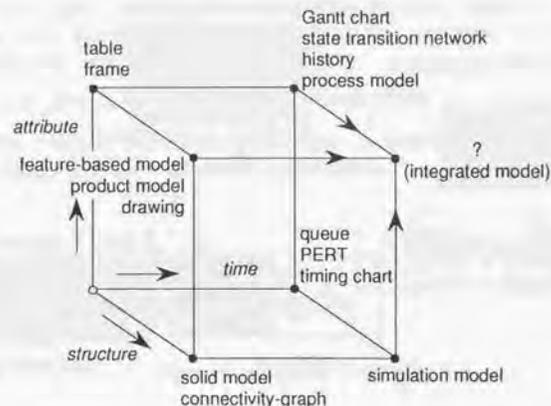


Figure 2.5: 対象表現の表現スキーマ・キューブ

2.3.1 属性の記述

対象表現における属性の記述の基本は、「対象 E の属性 Q の値は v_q 」という形式である。これはメタスキーマを用いると以下のように記述される。

$$\langle E | \{ [Q v_q] * \} \rangle \quad (2.10)$$

いま、図2.6に示すように、白と黒に色分けがされ、さらに鋼と銅を張り合わせた作られた対象 A を考える。

すると、この対象は従来の対象表現法では通常、

$$\langle A | \{ [COLOR \{black white\}] [MATERIAL \{steel copper\}] \} \rangle$$

として記述されるであろう。この場合、対象 A の色は、〈白と黒〉であるが、〈白と黒〉の意味する内容は、〈白かつ黒〉ではないし、〈白または黒〉でもない。それは白と黒は排反的な概念であることから〈白かつ黒〉を同時に満足できない、また、対象の色は定まっているから、〈白または黒〉のように可能性として白か黒があることを述べているのでもない。この記述では、対象 A に関しては、色が〈白い部分〉と〈黒い部分〉が存在することを述べているわけである。同様に、材質についても対象 A には〈鋼の部分〉と〈銅の部分〉があることが述べられている。すなわち、属性(色と材質)が、対象 A そのものではなく、対象 A の部分に対して指定されている。このことを簡に表現すると以下のような。

$$\langle E | \{ S \langle E_1 E_2 \rangle, \langle E_1 | [COLOR white] \rangle, \langle E_2 | [COLOR black] \rangle, \\ S \langle E_3 E_4 \rangle, \langle E_3 | [MATERIAL steel] \rangle, \langle E_4 | [MATERIAL copper] \rangle \} \rangle$$

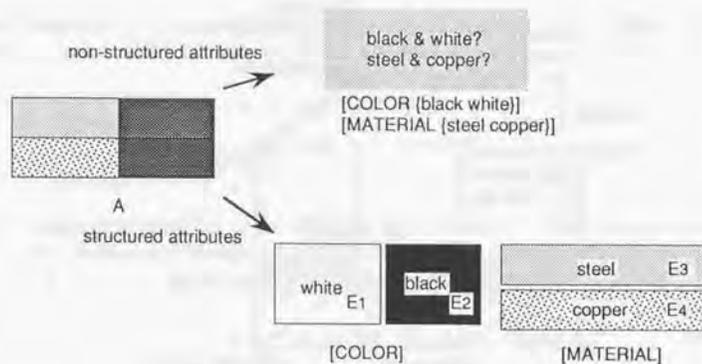


Figure 2.6: 複数の属性値を有する対象の例

ここでの $E_1 \dots E_4$ は色が白い部分であるところの E_1 という、内包的に定義される領域である。この例において留意すべき点は、”まず対象が与えられ、次にその属性を記述する”、という考え方は、属性の記述に内部構造を暗に含めることが起こり易い、ということである。そうした暗黙の記述を避けるには、対象がはじめに既定されるのではなく、”逆に属性が等しい領域を属性を記述する対象として選ぶ”、という考え方が必要である。こうした考えに基づくと、ある属性に対して異なる値を有する複数の部分から対象が構成されている場合には、その対象に対して属性値を与えることはできない。先の式に示したように、属性値が指定可能な部分からなる構造として対象を記述することになる。

2.3.2 関係の記述

次に、対象間の関係記述における問題点について考えてみる。2つの対象 A, B の間に、順序の2項関係 $Succ$ が成り立つとき、その関係は通常は $Succ(A, B)$ という一箇の記述として表現される。対象 A, B はその関係記述の中の構成要素として現れる。フレームのように対象を記述の中心としている表現スキーマでは、2項関係を直接記述せずに、関係を構成する2つの対象の属性(たとえば、NEXTとPREV)により関係を間接的に記述することが多く行なわれる。すなわち、

$$Succ(A, B) \implies Next(A, B), Prev(B, A) \\ \implies \langle A | [NEXT B] \rangle, \langle B | [PREV A] \rangle$$

のように、表現すべき2項関係をそれを構成する対象それぞれを第一引数とするような2つの2項関係へと展開し、その展開された関係を属性名、第二引数を属性値とする属性を、第一引数の対象に与える方法である。

2項関係の場合には、このような双方向のアーキをもつラベル付きの有向グラフと等価な表現が可能

である。しかしながら、3項以上の関係の場合には関係を属性に還元して表現することは、本質的に困難となる。いま、 $Between(A, B, C)$ という3項関係を考え、それを展開して3つの対象それぞれの属性へ還元すると、次のような記述となる。(図2.7参照)

$$\langle A | [NEXT B] \rangle, \langle B | \{ [PREV A] [NEXT C] \} \rangle, \langle C | [PREV B] \rangle$$

ここからは、もはや元の $Between$ という関係が意味していた内容を陽に読みとることはできない。こうした n 項関係の2項関係への還元における本質的な問題点については、柳生 [柳生 84] に詳しい。



Figure 2.7: 3項関係の2項関係への還元

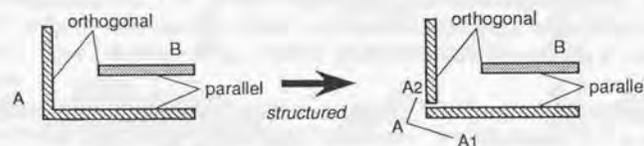


Figure 2.8: 2つの板金部品

関係の記述で注意すべきもうひとつの問題を例に基づいて説明する。図2.8に示すような2つの板金部品 A と B があつたとする。この2つの板金部品の間の空間的な関係を、

$$Parallel(A, B), Orthogonal(A, B)$$

と記述すると、” A と B は平行でありかつ垂直である” というように関係に矛盾が生じてしまう。これは属性における問題点と同様の理由によるものであり、

$$\langle A | S \langle A_1, A_2 \rangle \rangle, Parallel(A_1, B), Orthogonal(A_2, B)$$

のように、関係を記述する上での適切な範囲に対象を分割して記述することが必要である。

2.3.3 構造の記述

対象の構造は、対象を構成する要素と、要素間の関係を指定することで陽に記述される。

$$\langle E | S \langle E_1 E_2 \dots E_n \rangle \rangle \iff \langle E_1 | \{ E_1 E_2 \dots E_n \} \{ R(E_i E_j) * \} \rangle \quad (2.11)$$

構造の記述には対象を構成要素に分割することが必要となる。その際に属性の一意性によって分割する方法と、関係の一意性によって分割する方法が考えられる。どちらの方法をとっても、先に指摘した属性記述における問題か、関係記述における問題が生じてくる。

すなわち、属性が一意に定まるように要素を選ぶと、要素間の関係がうまく定義できないことがある。逆に、関係がうまく定義できるように要素を分解すると、その要素の属性値は必ずしも一意には定まらない。その場合には、関係あるいは属性が一意に定まるように、構成要素をさらに分割する必要がある。たとえば、図2.9の対象を、属性の一つである材質に分割した場合には、

$$\begin{aligned} < E \mid \{ < E_1 \mid [\text{MATERIAL copper}] > \\ < E_2 \mid [\text{MATERIAL steel}] \ S < E_{21} \ E_{22} > \}, \\ \{ \text{Contact}(E_1 \ E_{21}) \ \text{Exclusive}(E_1 \ E_{22}) \} > \end{aligned}$$

のように、一意な属性を有する構成要素を再構造化し、その分割された部分を用いて関係が記述される。

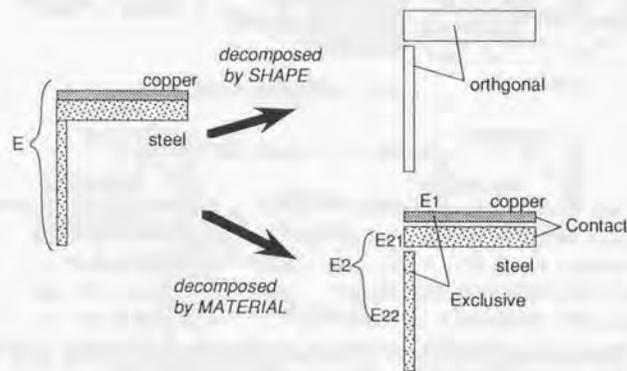


Figure 2.9: 複数の視点からの構造をもつ対象の例

逆に関係を元に分割した場合には、

$$\begin{aligned} < E \mid \{ < E_1 \mid S < < E_{11} \mid [\text{MATERIAL copper}] > \\ < E_{12} \mid [\text{MATERIAL steel}] > > > \\ < E_{22} \mid [\text{MATERIAL steel}] > \}, \\ \{ \text{Exclusive}(E_1 \ E_{22}) \} > \end{aligned}$$

となり、属性が一意になるように再構造化がなされる。

構造に関する次の問題点は、構造の階層化に関するものである。構造記述として、予め構造の階層を設定しておくことは、通常よく行われる。機械製品の記述における「製品-ユニット-部品」階層や形状の境界表現における、「立体-面-稜線-点」階層がそれにあたる。

階層的表現の代表として広く用いられている境界表現の特徴を考察してみると、以下の条件を満足していることがわかる。

1. 各階層は、異なる概念を表す(たとえば、面、稜線、頂点など)。
2. 構成要素は必ずどこか一つの階層に属する。
3. 上位の階層の要素の下位の階層の要素への分割は一意に与えられる(境界の一意性)。
4. 要素間の関係は、階層ごとに定義される。

ところが、製品-ユニット-部品といった機械の階層は、これらの条件を満足していない。たとえば、ユニットと製品という階層は、明確な概念の違いによるものではなく、包含関係から相対的に定まることが多い。ユニットであると同時に製品でもある、というように同一の対象が複数の階層に属することも起こりうる。部分への分割も必ずしも一意ではなく、複数の分割方法が考えられる。さらに関係は、製品-ユニット-部品などの階層に対して縦断的に定義されることがある²ため、階層ごとに関係を明確に分けることはできない。

以上のことを整理すると、製品-ユニット-部品などの階層構造においては、上位の階層と下位の階層との質的差異は存在しない。そのため、階層を形成するのは、恣意的に導入される全体-部分関係であり、形成された階層構造を整合性を保証しながら操作するための、構造に対する形式的な規則は存在しない。よって、機械製品の対象表現に対して、固定的な階層構造を安易に導入することは避けなければならない。

次に、別の種類の構造記述における問題について考えてみる。フレームなどによる対象表現の記述においては構造を陽に表現せず、構造を代表する属性を用いて陰に構造表現を行なうことが多い。たとえば、図2.10(a)の対象物を、次のようにフレームで記述することは一般によく行われる。

$$< \text{shaft-1} \mid [D_1 \ 10] [D_2 \ 20] [L \ 50] \dots >$$

図の(a)を参照しながらこの表現を見た場合には、それぞれのスロット(属性)の意味内容がよく了解さ

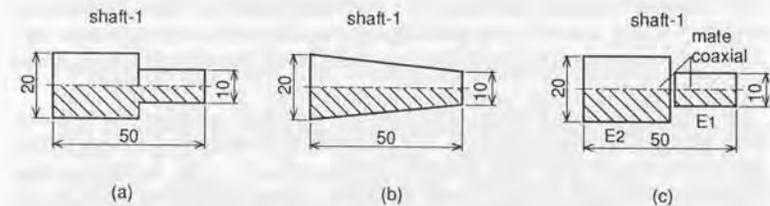


Figure 2.10: 段付き軸の表現

れる。しかしながら、このフレームによる表現は必ずしも、図(a)の対象のみを表現しているわけではなく、たとえば図(b)もこの表現に該当し得る。また、スロット名に現われる D_1 や D_2 は、便宜的に

²たとえば、部品とユニットの接触関係など

導入された名前であり、その解釈はフレームを利用する側に完全に依存している。こうした暗黙の表現を避けた、明示的な構造表現として次の表現を考える。

$$\begin{aligned} < \text{shaft-1} \mid \{ [L 50] \dots \} \\ & \{ < E_1 \mid [\text{SHAPE cylinder} \mid [D 10] > \\ & \quad < E_2 \mid [\text{SHAPE cylinder} \mid [D 20] > \\ & \quad \{ \text{Mate}(E_1, E_2) \text{ Coaxial}(E_1, E_2) \} > \end{aligned}$$

この表現においては、shaft-1は2つの部分 E_1 、 E_2 より成り、それぞれの部分の形状と直径が明確になっている(図2.10(c)参照)。また、この表現には図(h)の部品は該当しない。

先に示した(2.3.3)のような、構造表現を暗に内包したフレーム表現は、対象物の構造が固定で、属性のみに関心があるときには有効である。しかし対象の構造そのものを記述し操作するときには、属性内に構造を暗黙に規定しているような表現スキーマは適当ではない。このことは、フレーム表現に代表される構造が固定している属性中心型対象表現が、分析型問題やパラメトリックな設計問題に対して有効であるのに比べて、総合型の設計問題に対するスキーマとしては柔軟性を欠き、不適当であることの原因と考えられる。

2.3.4 時間の記述

属性、関係、構造のそれぞれの記述の問題点について述べたときには、属性、関係、構造は時間の流れに対して一定のものとして議論した。しかしながら、実際には属性や関係は時間とともに変化することがあり、それゆえ構造も変化し得るものとして考えなければならない。

変化の記述は、“不変なものに関する記述”の時系列として表現することができる。たとえば、属性の変化は、一定の属性値を有する状態の連鎖として表現される。

$$\begin{aligned} < E \mid [Q \mid T < v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n > > \\ T < R_1(E_1, E_2) \ R_2(E_1, E_2) \ \dots \ R_m(E_1, E_2) > \\ < E \mid T < S_1 < E_1 \ \dots \ E_i > \ S_2 < E_1 \ \dots \ E_i > \ \dots \ S_k < E_1 \ \dots \ E_i > > \end{aligned}$$

このよう変化を考えた場合に、対象の属性や構造、対象間の関係の指定には、「部品 E の時刻 t_1 における属性 Q の値は v 」というように常に時間の情報を付加する必要がある。このことは、対象を一意に指示するはずであった対象指示子(対象名)が、変化を考えると記述の分離機能を充分には有していないことを意味している。

属性や構造、関係の変化を考えると、これまで不変としていた製品(あるいは対象の構成部品)そのものが、変化できると考える必要がでてくる。たとえば部品 A の属性が変化したとしても部品 A で有り続けると考えることはできる。しかし、その部品 A を2つに分割してしまうと、もはや部品 A は存在しないと考えるのが自然であろう。また、2つに分割された一方が部品 A を継承するものとして考えても、他方の部分という新たな対象の出現という問題は避けられない。

こうした問題は、これまで対象は不変なものと考えて記述されていた属性や関係、構造の概念に対しても大きな影響を与える。属性の指定対象や、関係の引数、構造の構成要素に現れる対象は、不変でかつ予め与えられるものとして考えられてきたが、変化を考えた世界においては、対象は属性や関係により動的に定まってくるもの、という考え方が必要となる。

それでは、製品(部品)に代わって記述の対象と成りうるものは何であろうか。先の属性や関係の議論において、“対象は属性や関係により、その空間的な存在範囲が規定されるべきである”ということ述べた。変化を考えた場合には、さらに時間軸上で存在している時間区間によって、対象は規定される必要がある。よって、時空間における領域という概念が、属性、構造、時間の各要因を陽に表現する基礎を与えると考える。これについては第3章で詳細に議論する。

2.3.5 対象表現における記述の基本原則

以上、対象表現における諸問題に関して指摘を加えてきた。ここで取り上げた問題の多くは、記述された内容の解釈のあいまいさから生じている。それは、柔軟なスキーマによる自由な対象記述が情報処理技術の進歩により可能となった一方で、機械製品の記述に対する規範が欠如していたことに起因している。

記述された内容のもつあいまいさは、これまでは人間により適宜解釈が行われてきたために、特に重要な問題としては認識されて来なかった面がある。しかし、計算機による高度な対象操作や表現内容の交換を実現するためには、そうした対象記述のもつあいまいさを極力排し、形式的な解釈が可能な記述体系を確立する必要がある。

こうした形式的記述体系を実現するために、本研究では下記に示す5つの項目を、機械製品表現において遵守すべき規範としている。

1. 指示子の無意味化

指示子そのものに暗黙の意味を持たせてはならないということ。指示子は、記述されたデータ群(チャンク)を相互に区別する識別子としての機能か、受け手のもつデータベース(あるいは記憶、知識)の検索キーとしての機能のみを有する。

よって、記述を行なう者が指示子に自分のみが了解できる意味を込めることは排除すべきことである。記述すべきことは明示的に記述することが必要である。

2. 属性の一貫性

記述される対象のもつ属性は、任意の時点において一意な属性値をもつものでなくてはならない。すなわち、対象はある属性に関して同時に2つ以上の値を持つことはない。

属性の記述がこの条件を満足すると、ある対象 E が属性名 Q_i に対して属性値 v_i を有するということ($< E \mid [Q_i \mid v_i] >$)が、時点 t_j で成り立つことを、対象と時間から属性値への関数として $Q_i(E, t_j) = v_i$ のように考えることができるようになり、属性の形式的取り扱いが容易となる。

この条件は、見方を変えると、ある記述対象の属性となるためには、その対象において一意な値をもたなくてはならない、ということの意味する。

3. 関係の一貫性

ある観点(たとえば、接続関係や包含関係など)からみたとき、対象間の関係は任意の時点において一意に定まらなくてはならない。すなわち、同一の観点に対して、関係 $R_i(A, B)$ でありかつ $R_j(A, B)$ であることは R_i と R_j が排他的である場合には許されない。

これは、対象の集合を \mathcal{E} 、ある観点からみたときに、対象間に成り立ちうる排他的 N 項関係の集合を \mathcal{R}^N としたときに、

$$\underbrace{\mathcal{E} \times \mathcal{E} \times \cdots \times \mathcal{E}}_N \xrightarrow{f} \mathcal{R}^N \quad (2.12)$$

のように、一意に関係 $f(E_1, \dots, E_N) \in \mathcal{R}^N$ を定める関数 f が存在することを意味している。

対象の選択の面からみると、この条件は関係が一意となるものだけを関係における対象として選ばなくてはならないことを述べている。

4. 構造の明示化

対象の構造はそれを構成する要素の集まりと、構成要素間の関係により明示的に表現されなくてはならない。すなわち、

- (a) 指示子名に構造を暗黙に含む表現
- (b) 便宜的な属性を用いた構造表現
- (c) 固定的に設定された階層による構造表現

などは、極力排除しなくてはならない。

5. 変化の明示化

記述対象の時間変化は陽に記述されなければならない。それには、対象指示子によって指示される対象の任意の時点における存在の有無、対象の属性値、対象間の関係、対象の構造、が記述された内容より導き出すことができなくてはならない。

以上挙げた原則は形式的対象記述ならびに形式的対象操作を実現する上で不可欠なものと考えられる。

2.4 機能と対象表現

ここまでの議論の中においては、設計対象の機能の表現に関して触れなかった。しかしながら、機能は設計を考えていく際の最も重要な概念であり、本節にて機能と対象表現について考察を加えることとする。

機能についてはさまざまな考え方、定義が存在するが、機械設計における機能の代表的な考え方に関しては、富山ら[富山 90]による詳しい解説がある。また、機械の設計と関連の深い定性推論の分野における機能の考え方についても西田[西田 90]により整理されている。

本研究では、これらの解説などを参考にし、これまで主張されてきた機械の機能の考え方を物理的な観点から以下の3つのタイプに分類して考える[小野里 87]。

1. 挙動 (behavior): ものをある状況(場)においたときの挙動として機能をとらえる立場。その挙動が他にどのような影響を与えるかは陽には意識されない。たとえば、モータの機能として「回転運動を発生する」を考えたとき、その発生した回転運動が他のものにどのような影響を与えているかは問題ではなく、潜在的に影響を与えうる事が重要視される。この考え方では、外的状況によらず、機能は挙動を起こしたものに帰着させることができる。シミュレーションにより機能を評価する際には、この意味で機能をとらえていることが多い。

2. 変換 (translation): 入力の出力への変換として機能を定義する立場。その考え方の基本には、変換を受けながら流れていくフローという、方向性を有したものの存在を想定している。制御理論におけるブロック線図や定性物理におけるデバイスモデルは、このような考え方で機能をとらえている。ただし、機械においては締結や蓄積のようにフローの変換として表現されない機能も多く存在する。
3. 作用 (effect): 機能を対象物への作用としてとらえる立場。この場合には作用を及ぼす側(作用の発生物)への入力やそこでの変化は陽には意識されず、機能は作用を引き起こす現象に帰着される。VE(Value Engineering)において用いられる「～を～する」という機能のとらえ方は、この立場に相当する。また、システム設計においては、機能とは「他に対するそのものの存在意味」であり、存在意味は働きを通じて他に対して与える効用としてとらえられる[吉谷 86]。

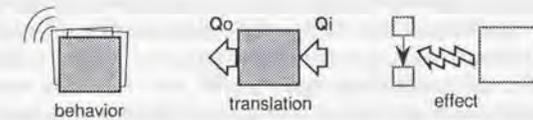


Figure 2.11: 3つの機能の考え方

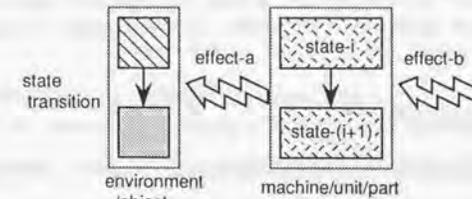


Figure 2.12: 機械の図式と機能

これらの考え方の相違と相互の関連を明確にするため、ここでは、機械を図2.12に示す図式で考える。すなわち、外界におかれたある対象を、目標とする状態へと変化させるのが機械であるとする。対象の所望の状態変化は、そこへ適当な作用を与え、影響を加えることで実現される(作用としての機能)。対象への作用は機械の挙動—すなわち、状態の変化—によって生じる(挙動としての機能)。その挙動自身は機械がある作用を受けている状況に置かれたことで生じたものと考えられ、機械が外から受けた作用を対象への影響を与える作用に変換したとみなすこともできる(変換としての機能)。

ここにあげた3つの機能のとらえ方の違いは、図2.12に示す図式の上のどの部分に注目しているかの違いであり、機能を実現している機械のメカニズムそのものに対する理解の違いではない。よって、機

能の定義としてどのような立場をとるにせよ、図 2.12 に示す機械の図式を陽に記述することで、機能と物理的な対象表現との間の対応を取ることができると考えられる。

こうした同一の対象に対する機能の定義が複数存在することに関して、機能は挙動や構造とは違い主観依存的であり、機能の記述には目的論的 (teleological) な視点が必要となる、ということが指摘されている (たとえば、[富山 90])。すなわち、機能は物理世界における実在ではなく、物理的な実在の記述に込められた意図と解釈によって形成される主観的な概念である、と考えるものである。

また、機能と設計対象表現との関係を設計過程の面から考えると、機能は既存の対象記述に対する解釈と考えるよりは、むしろ、設計対象への要求仕様を記述しているものと考えられる。要求仕様はすべてが始めに与えられるのではなく、設計が進行し、設計対象表現が進化するのに伴って、要求仕様としての機能の記述も構造化され、詳細化していく。

よって、対象表現の客観性と物理性を保証するためには、こうした主観性の強い機能に関する記述を物理的な対象表現の枠組みから明確に分離する。さらに、物理的な対象表現に対するひとつの解釈と設計の要求仕様を与えるものとして、物理的な対象表現とは別の枠組みで機能を表現することが重要であると考えられる。

ここでは、そうした物理世界に対する要求や解釈を記述したものをまとめて設計対象の意味表現 (semantic representation) とよぶことにする。また、意味表現と対比させる意味で、物理的な設計対象表現を単に物理表現 (physical representation) とよぶことにする。よって、設計における対象は、意味表現と物理表現との組として表現されることになる。

物理表現と意味表現へと対象表現を分離することの理由には、形式的な操作や演算が可能であるか否かの問題がある。物理表現に関しては、各種の操作や複数の表現を重ね合わせるといったある種の演算が構成でき、そうした操作や演算の物理的妥当性についても、(広義の)物理法則という一般に正しいと認められた規範に基づいて検証できる。しかしながら、物理表現と同様の一般性をもった操作、演算の体系が意味表現に存在するとは考えられない。そうした、異なる体系を有する表現をひとつの表現の枠組みにまとめることは、物理表現のもつ能力を制限し、さらには意味表現そのものに関する推論、操作も困難にすると考えられる。

2.5 設計過程と設計対象表現

2.5.1 設計過程に関する既存の研究の概要

ここで設計対象表現から目を転じて、機械の分野における設計過程に関して、これまでどのような研究がされ、設計過程がどのように理解されているかについて概観する。

ここでは、設計過程に関するさまざまな考え方を、次の5つの観点で整理し、分類を行なう。

1. 設計段階による分類
2. 設計対象の変換による分類
3. 思考プロセスによる分類
4. 情報処理の面からの分類
5. 設計のタイプによる分類

2.5. 設計過程と設計対象表現

以下、それぞれに関して代表的な研究とそこにおける基本的な考え方を説明していく。

設計段階による分類

まず、設計過程全体を、設計の進行に沿っていくつかの段階へと分割することを考える。一般によく用いられる設計の段階分けとしては、

概念設計 → 基本設計 → 詳細設計 → 生産設計

がある。こうした各段階 (ステージ) への分割の方法や、それぞれの段階の呼び名は、対象分野、企業、部門や研究者によって異なることが多い。たとえば、概念設計の前段階としてさらに機能設計を考える、概念設計と基本設計とをまとめて構想設計とよぶ、詳細設計に生産設計を含めて考える、基本設計を計画設計とよぶ、という具合である。

これらの設計の各段階は、設計過程に設定されている中間的な成果物により分割される。すなわち、概念図を作る過程が概念設計段階であり、概念図を受けて基本図を出図する過程が基本設計段階である。これら概念図や基本図などの中間生成物は、設計を段階的に進めて行くための手順を定めると同時に、設計業務の権限と責任、設計業務の進捗状況把握などの設計の管理面の役割も担っている [宮田 85]。

実際の機械設計においては、これらの段階が順序よく進行しているわけでは必ずしもなく、機械の部分によって進行度合いが異なっていたり、詳細設計から基本設計へと後戻りしたりということが生じることがある [瀬口 87]。こうした設計の繰り返し性に注目した設計過程のモデル化が、ハル (D.A. Hall) の問題解決スパイラルである [Hall 70]。ハルは、問題解決としての設計には、1) 問題設定、2) 価値システム設計、3) システム合成、4) システム解析、5) 最適化、6) 意思決定、7) 実行計画、の7つの相があると考え、実行計画の結果が新たな問題設定への入力となるスパイラルとして設計過程をモデル化している。

設計対象の変換

設計対象の隣相間の変換過程として設計過程をとらえる考え方がある。

まず、ローデナッカー (Rodenacker) に代表されるドイツ設計論では、設計の過程を、

初期機能 → 機能展開 → 物理現象 (作動原理) → 要素装置 (機能担体)

の対応をつけていく過程であるとした。この過程を実現するために、対応関係の表としてのデザイン・カタログを体系的に整備することが行なわれている [吉川 81c]。

吉川の提唱する一般設計学においては、機能空間上で与えた設計仕様に対応した属性空間上での設計解への収束を与える過程を設計過程であるとして、集合論を基礎に定式化を行なった [吉川 81a]。富山は、この考え方を拡張し、機能空間から属性空間への対応の仲立ちをするメタモデル概念を導入し、

機能空間 → メタモデル → 属性空間

という対応を考え、メタモデルを進化させる変換過程を設計過程と考えた [富山 83]。

スー (N.P. Suh) は設計過程を製造までを含めた、

機能空間 (F) → 構造空間 (S) → 物理空間 (P) → プロセス空間 (P)

の間の変換からなる F-S-P-P ダイアグラムと呼ばれる図式としてとらえている [Suh 90].

先に述べた設計過程の段階分けも、各段階における入力と出力の情報に注目すると、変換過程とみなすことができる。たとえば概念設計は要求仕様から概念図への変換過程と考えられる。ここで述べた設計対象の持つ複数の採用の間の変換過程として設計過程をとらえる考え方は、設計過程の本質をモデル化する上で重要な観点を提供している。しかしながら、現実の設計に適用する場合には、機能、構造、挙動、属性などの諸概念の定義、関連、区別が明確ではないため、ある項目が機能と属性のどちらにも解釈しようという事態が生じることも考えられる。

思考プロセス

設計過程の様相を外部から観察する先の2つの考え方は異なり、設計を行なっている設計者の思考プロセスに注目し、その思考プロセスを構成する基本的な思考のサブプロセスを明らかにすることにより、設計過程を解明しようとする、認知心理学的なアプローチがある。

こうしたアプローチの先駆的な研究としては、吉川らによる設計実験を通じた設計過程における思考の素過程の分析がある [吉川 81b]。ここでは、設計の思考単位を、機能表現間、属性表現間、あるいは機能表現と属性表現の間の変換として分類を行い、設計過程はそれらのマルコフ過程とみなして分析している。

また、武田らは、設計実験でのプロトコル解析等を通じて、設計過程は1) 問題提起、2) 提案、3) 展開、4) 評価、5) 決定、の5つのサブプロセスのサイクルにより構成されるとした [武田 91]。さらに、武田らは設計者の行なり推論は Abduction, Circumscription, Deduction の3つのタイプの推論の組合せから構成されると主張した [武田 92]。

ウィリアムス (D.O. Williams) は、設計の問題解決における思考プロセスを、1) 問題認識 (confrontation)、2) モデル推定 (conjecture)、3) 仮説生成 (prediction)、4) 実行 (action)、5) 学習 (learning) の5つから成り立つものと主張している [Williams 91]。

こうした思考プロセスに注目した設計過程は、設計過程を構成するミクロな思考サイクルの構成要素を明らかにしている。しかしながら、こうしたミクロな思考プロセスが、マクロな設計過程にどのような影響を与えているかということや、逆にマクロな設計過程がどのようにミクロな設計者の思考プロセスを制約しているか、というミクロな思考プロセスとマクロな設計過程との関連については、これまでほとんど研究がされておらず、明らかになっていない。

情報処理

設計過程を情報処理の面から分析し、どのような情報処理の基本操作から成り立っているかについて述べた研究も多い。

まず、設計仕様を制約と考え、設計仕様を満足する解を得る過程を制約解消 (constraint solving) とする研究がある。その先駆的な研究としてサスマン (G.J. Sussman) とスティール (G. L. Steele Jr.) による制約伝播に基づく制約プログラミング言語 CONSTRAINTS の開発がある [Sussman 80]。

制約解消技術を設計へと適用した初期の研究には、長澤らによる設計システム記述言語 ADL の開発がある [長澤 84]。長澤らは定型的設計の設計過程を、拘束条件のリダクションの過程であると考えて、ADL を用いて機械設計支援システムの開発を行なった [長澤 86]。

設計問題では、設計仕様として与えた制約の変更や取り消しが起こりうる。乾らは乾式複写機のバリエーション設計を例に、変更、後戻りを含んだ設計過程を ATMS の考え方を用いてモデル化し、設計支援システムの開発を行なった [Inui 91]。

設計過程を、問題解決 (problem solving) の過程ととらえる立場でも、これまでに多くの研究がなされている。ニューウェル (A. Newell) らの GPS (General Problem Solver) [Newell 63] に代表される問題解決のアプローチは、問題を表す状態空間 S を考え、現在の状態 $S_0 \in S$ に対して、よりよい評価値を有する中間状態 $S_1, S_2, \dots, S_n \in S$ を順次生成していくことで、目標の状態 S_f へと収束させていく。

$$S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow \dots \rightarrow S_n \rightarrow S_f$$

ただし、実際の設計においては、初期状態 S_0 や目標状態 S_f が明示的には与えられない。さらには状態空間 S を事前に定めることができるのはパラメトリック設計のような定型的な設計に限られる。そこで、実際の設計過程の計算機化に際しては、GPS のような汎用的な問題解決器ではなく、個別的な知識をプロダクションルールとして持ち、それを後向き推論に用いることにより設計を行なうエキスパートシステムが盛んに開発された。

設計問題を最適化問題として定式化することも従来から広く行なわれている。その場合の設計過程は、与えられた制約式と評価関数のもとでの求解プロセスである。これは、いわゆる最適化設計とよばれる分野を形成しており、線形計画法や整数計画法に代表される各種の数値計画法や、最近ではシミュレーション・アニーリング法、遺伝アルゴリズム、ニューラル・ネットワークなどによる疑似最適解を求める求解方法の適用が行なわれている。ただし、そうした求解のプロセスは人間の思考のプロセスとは大きく異なっており、完全に計算機内でブラックボックス化されたプロセスである。そのため、最適化設計は設計問題として見たときの自由度が低く、適用範囲が狭い。こうした問題点を解決するための試みも行なわれている。たとえば、藤田らは、制約解消と最適化のプロセスとを融合化した設計過程を提唱し、それに基づいた計算機支援システムの開発を行なっている [藤田 92]。

製品に対する計算機内モデルが存在する場合には、設計過程をモデリングの過程としてとらえることができる。たとえば、大須賀は設計過程を、モデルに対する操作の面からとらえ、モデルの構築、分析/評価、修正などの基本操作のサイクルから設計過程は構成されるとした [Oshuga 89]。

この他にも、設計過程を定理の証明過程としてみたり、論理型言語における単一化 (unification) のプロセスとしてとらえたりと、様々な情報処理面からのモデル化が行なわれている。こうした情報処理の観点からの設計過程のモデル化は、それらが計算可能 (実行可能) であるため、設計の計算機支援という点において有効である。しかしながら、それぞれの情報処理技術の適用可能な設計過程の種類と範囲は、かなり限定されている。

設計のタイプによる分類

最後に、設計のタイプによる設計過程の分類について述べる。設計のタイプとしては、従来より、新規設計 (あるいは開発設計)、編集設計、パラメトリック設計 (あるいはバリエーション設計)、改良設計などの分類が行なわれている。

また、吉川は、設計過程を機能と属性との対応関係から全数対応 (カタログ) モデル、計算モデル、生成モデル、範例 (パラダイム) モデルの4つのモデルに分類している [吉川 81a]。

これらは、設計のタイプ分けであり、設計過程に関する分割ではないが、設計過程はいくつかの異なっ

たタイプの部分設計から構成されるものとみなすことにより、部分設計のタイプにより設計過程を分類、整理できる。たとえば、設計過程のある部分は編集設計の様相、ある部分は改良設計の様相をもつとみなすことで、設計過程はこれらのタイプ分けされた部分設計により構造化できる。

2.5.2 対象表現における設計過程

次に、表現、操作される設計対象の立場から設計過程を考えてみることにする。

設計の着想から生産設計に至る設計の過程を考えたとき、設計対象というものが実在物と同様な明確さをもって存在している訳では決していない。それは、

- 設計が設計者の内部で行なわれるため、設計対象が外在化しないことがある。たとえば、概念設計段階においては、多数の設計案が候補として考えられるが、図や文として外在化されるのは、そのうちのごく一部である。
- 設計の際の思考の対象が、製品や部品などの「もの」そのものではなく、「もの」が満たすべき条件や、振舞い、機能などの「こと」に関わることがらであることが多い。

などの理由による。

ここでは、設計され、実体化されるべき「もの」に関連して、設計者が思考しているあらゆる内容を含むとして設計対象表現を考える。すなわち、必ずしも現在において明示的に表現されていないことでも、適切な表現法と支援手段が提供されれば、陽に記述されうるものは、設計対象の表現に含む。また、設計対象表現には、設計物の形状や属性などの内的記述ばかりではなく、その振舞いや環境との関係などの外的記述も含まれる。

設計対象およびその表現をこのように広い意味で理解することとし、設計対象と設計過程との関係を考えてみる。

設計対象表現の立場から見たときの、設計過程は一体どのように観察されるであろうか。前項での設計過程への考察などから、設計過程に伴う設計対象表現上での変化は、次の4点にまとめられる。

1. 表現内容の変化:

吉川の一般設計学における機能から属性への写像としての設計の考え方や、スーの F-S-P-P ダイアグラムの概念に示されるように、設計の進行に伴い、思考対象(すなわち表現対象)の内容が異なってくるのが考えられる。たとえば、設計初期段階における表現内容は、機能や挙動、相互関係など外的なことがらが主となるが、設計の進行に伴う、内部構造や形状、精度、材質など内的なことがらが主となる。

2. 表現精度の向上:

設計の進行に伴い、抽象的、一般的、選択的であった表現内容が、より具体的、個別的、確定的になり、詳細化される。すなわち、設計の進行に伴って、設計対象表現により記述される実世界が、より限定され、精度よく指示、あるいは実現できるようになる。これは、設計を制約解消としてみる立場では、制約の数が増えて、制約により決定される実行可能解領域がより限定されていくことに対応している。

3. 表現範囲の拡大:

設計は、設計対象の全域で等しく抽象から具体へと進行するのではなく、設計対象の核となる部

分から順次成長していく。すなわち、設計対象の最重要部分に対してまず設計が行なわれ、そこでの決定内容を要求仕様として、周辺部へと設計が波及していき、設計対象の記述範囲が順次拡張していくものと理解される。

4. 表現意図の推移:

表現されていることがらには、それが1) 要求仕様(実現目標)、2) 仮説(候補)、3) 既定事実、のいずれかで与えられる表現の意図をもつ。意図は設計の進行に伴い、要求仕様-仮説-既定事実へと推移していく。たとえば、要求として提示された内容は、満足すべき仕様として対象表現に盛り込まれる。その要求仕様に対して、設計候補としての仮説を考え、それらの中で適当なものを、既定事実とする。設計対象表現の個々のことがらは、そうした意図の推移を経て決定されている。

設計対象表現の面から設計過程を観察すると、上記の4つがさまざまな組合せで設計対象表現上に生じていると考えられる。

機械設計における従来の対象表現スキーマは、設計過程における対象表現のこうした4つの変化すべてに対応しているわけではない。

たとえば、3次元CADシステムの対象表現の中核をなす3次元形状モデルは、4つの項目に対して次のような性質をもつ。

1. 表現内容: 対象の形状のみを表現する。
2. 表現精度: 全てが確定している具体的な対象のみを表現しうる。
3. 表現範囲: 形状モデルの追加、変更により表現範囲を拡大できる。
4. 表現意図: 表現される形状に、表現の意図による区別はない。

3次元形状モデルによる設計過程への対応は、基本的には表現範囲の拡大のみである。しかし、実際には表現精度の変化の代わりに、簡単な形状で目標とする形状を近似し、その近似形状を順次詳細な形状へと変更していくことで、表現精度の変化を実現している。ただし、その場合には、表現されている形状が近似形状であるのか、あるいは目標とする最終形状であるのかの区別(表現の意図)は、利用者に任されている。

2.6 本研究における対象表現へのアプローチ

2.6.1 本研究における対象表現の3つの実現目標

以上、機械設計における対象表現の現状、抱える問題点と課題について考察した。本節ではこうした考察結果を踏まえ、機械設計における対象表現に対する本研究のアプローチについて述べる。

本研究では、次の3つのがらの実現を、対象表現研究の目的としている。

- 対象表現の形式化の徹底
- 実世界と物理的等価性を有した対象表現の実現

- 設計過程に対応して進化できる設計対象表現と操作の体系の確立

以下それぞれについて詳しく述べる。

2.6.2 形式化の徹底

本研究では、計算機が理解、操作可能な対象の表現と操作の形式的体系を構築することを第一の目的とする。そのために、2.3.5で指摘した表現のあいまいさ、恣意性、暗黙に込められた意味を極力排除する。形式化を進める具体的な方針を挙げると、以下の通りとなる。

1. 従来の機械、ユニット、部品などの暗黙の意味内容を含んでいる対象の概念を、恣意的とみなして対象記述の基本から排除し、代わりに、特定の意味を担うことの無い、時空領域を記述の基本単位とする。これにより、指示子の無意味化の原則は満足される。
2. 時空領域を記述の基本単位とすることにより、指示子の無意味化だけでなく、他の属性の一意性、関係の一意性、構造の明示化、変化の明示化などの他の規範も満足される。
3. 対象表現に用いられる概念は、形式的な操作が定義された基本的な概念と、基本的な概念から形式的に組み立てられる概念に限定する。それ以外の概念は無定義なものとして、単なる識別子としてのみ機能するものとする。
4. 機械、ユニット、部品など恣意的な概念は、形式的に記述されている内容に対するひとつの解釈 (interpretation) とする。同一の内容に対して複数の解釈が存在してもよい。

この方針を忠実に実現すると、設計者の意図の理解、特定の利用目的に対する利便性、人間による表現の可読性、記述の容易性などに関して問題が生じてくる。これらの問題に対処するためには、形式化された対象表現の上に、設計過程、利用目的や人間とのインタフェースに応じた枠組みを構築することが必要であろう。形式的、汎用的表現としての物理表現と、主観的、目的依存的な表現である意味表現とを明確に分離しようというのがここでの重要な主張である。

2.6.3 物理的等価性の追求

本研究では実世界に存在している対象と物理的に等価であることを目標に、論理の世界で対象の記述、操作を行なう。すなわち、存在可能性の判定、物理現象の推論などを可能とし、実世界と等価な物理的機構を、論理的な表現体系に組み入れることにより、表現対象の物理的等価性を保証できる仕組みを実現することを目指す。これは、2.1.2で述べた物理的対象モデルの考え方をより徹底したものである。

具体的には、以下に示す対象表現とその操作体系の確立を目指す。

1. 物理現象および物理的存在を陽に記述する枠組みとして、3次元の空間と1次元の時間軸により張られる4次元の時空を採用する。
2. 物理的な諸概念を、すべて4次元時空における属性や関係、それらの組合せや制約を用いて表現する。

3. 物理的な意味内容が明確なものに限って表現し、それ以外のことがら (たとえば、価値や目的、意図) は、記述された内容に対する解釈であるとして、対象記述そのものからは排除する。
4. 物性や物理法則に代表される物理制約を満足し、物理的な妥当性を保証できる体系を確立する。

物理的等価性の追求と、先に挙げた形式化の追求とは密接に関わっている。すなわち、物理的に整合性の高い記述と操作の体系を築くためには、形式化の徹底が必要不可欠であるし、また、表現、推論能力の高い形式的表現体系を実現するためには、表現体系と物理世界との同形性を積極的に求めて行くことが重要である。

2.6.4 対象表現の進化の実現

対象表現に対する3番目の目標は、設計の初期段階から詳細設計段階にいたるまで、一貫した対象表現のための方法を提供することである。これは、すでに2.1.2において触れたメタモデルの進化モデルの目指すところと等しい。表現される内容を物理的な内容に限定しても、設計の初期段階と詳細設計段階とでは、記述される内容が当然のことながら異なってくる。設計の初期段階においては記述内容は定性的かつ断片的であると考えられるし、詳細設計段階においては全体にわたる詳細な形状や定量的な物理的属性が記述と操作の対象となってくる。設計過程に一貫した設計対象表現を行なうためには、定性一定量、断片性-全体性というような幅広いスペクトルを有する対象の記述と、段階的な具体化を可能にする必要がある。これまで述べてきた設計過程に対応する設計対象表現の実現に向けての本研究のアプローチを以下に整理する。

● 表現内容の変化:

設計過程を通じて、機能、挙動、構造、形状を含む属性など表現すべき内容の様相が変化していく。これらを統一的に表現できる対象表現の枠組みが存在すれば最もよい。しかしながら、すでに2.4で議論したように、機能は一般的に人間の価値観と解釈を伴う多義的なものであり、挙動や構造、属性などの客観的記述が可能なものとは、本質的に異質なものである。そこで、本研究では、機能を2.4で示した機械の図式に対する要求仕様、あるいは解釈であると考え、機械の図式にあらわれる挙動、構造、属性は、物理表現として総合的に記述し、機能は物理表現に対する設計者の意図の一部として、物理表現に対する意味表現として記述する。

● 表現精度の向上:

人間の意図を含んだ意味表現に関しては、ある記述を、それと矛盾しない、より詳細な記述と置換することにより、表現精度の向上を実現する。また、挙動、構造、属性などの物理表現に関しては、以下の3つの操作を詳細化の基礎とする。

- 属性値に関する詳細化: 対象の属性の値として取りうる範囲を限定したり、新たな属性を指定することで、対象の詳細化を行なう。たとえば、材質の属性値として“金属”よりも“アルミ合金”は詳細な属性概念であり、取りうる材質をより限定している。
- 関係に関する詳細化: 対象間においてとりうる関係を限定したり、新たな対象間関係を指定することで、対象の詳細化を行なう。たとえば、対象Aの空間的包含関係を考えたときに、 $Inside(A, B)$ 、 $Exclusive(A, C)$ に対して、空間関係 $Contact(A, D)$ を追加

することにより、対象 A のとりうる関係はより限定化され、結果として対象 A は詳細化されたとみなすことができる。(図 2.13)

- 対象に関する詳細化: 新たに対象を定義したり、対象を部分へと分割して属性、関係を定義することで詳細化を行なう。たとえば、対象 A をその部分 A_1, \dots, A_n に分割してそれぞれに属性や関係を定義することは、対象 A を詳細化したとみることができる。(図 2.14)

実際の設計過程における設計対象の詳細化は、これらを複合したものと考えられる。上で挙げた

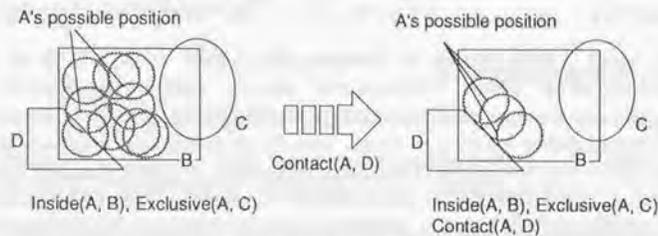


Figure 2.13: 関係の指定による詳細化

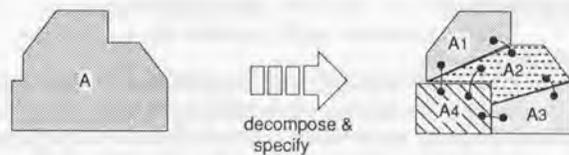


Figure 2.14: 対象の詳細化

3つの中で、関係に関する詳細化は、設計対象の進化モデルを実現するうえにおいて、最も重要な役割を果たすと考えられる。属性や部分(構造)は対象の内的なことがらの記述であるのに対して、関係は対象の外的なことがらの記述である。機械設計の基本的な流れを、基本仕様から外部仕様を段階的に詳細化し、それを満足する内部仕様決定としてとらえると、関係の詳細化は外部仕様の詳細化、属性や構造の詳細化は内部仕様の詳細化に相当する。関係の詳細化は、属性や構造の詳細化に先行して行なわれ、その詳細化された関係を満足するように、内的な属性や構造が詳細化され、決定されていく。こうした理由により、関係概念による対象の相対的記述が、進化モデルの実現の重要課題であると考えられる。

● 表現範囲の拡大:

表現範囲の拡大に関しては、記述の追加として実現される。ただし、表現範囲の拡大に際しては、追加される記述がそれまでの記述に対して矛盾しない必要があり、整合性を維持しながら記述の追加を行うことを実現する。

● 表現意図の推移:

対象表現における表現意図とその推移の記述は、物理表現には含まず、すべて意味表現として取り扱う。すなわち、物理表現の内容(たとえば、状態、事象、作用など)には目的や手段、帰結などの意味的な相違はなく、すべて等しく存在しているものとして扱う。物理表現に対する意味付け(意図)は、物理表現の内容を指示している意味表現に与えられる。物理表現の内容の意図や関係の意味的解釈(たとえば因果関係)は、意味表現を参照することで求まる仕組みを考える。

本研究は、計算機内に表現された対象に対して、計算機自身がどれだけ多くのことを推論したり操作したりすることができるか、を追求する立場と言える。しかしながら、当然、対象表現には違う立場もある。たとえば、人間に対してより多くの発想を与えることを目的とした立場[JSAI 93]からみると、対象表現への要求は本研究とは違ってくる。本研究は、こうした異なる立場での対象表現を排除するものではなく、また、完全自動設計を目指すものでもない。設計の高度な計算機支援に対して、計算機内での形式的対象表現と操作という、共通に利用可能な基盤を提供することを目的としている。

以上、本研究における対象表現に対する考え方と、研究方針について述べた。ここで挙げた、物理表現と意味表現については、それぞれ第3章と第4章において詳しく議論する。

2.7 本章のまとめ

最後に、本章において述べたことがらをここで整理しておく。

1. 機械設計における対象の表現方法に関して、実モデル、図面、構造モデル、形状モデル、プロダクトモデル、属性モデル、形状特徴モデル、物理的对象モデル、メタモデルそれぞれの特徴および問題点について述べた。
2. 現在の対象表現に関する研究は、技術情報指向、物理指向、設計過程指向に分類でき、その中で物理指向および設計過程指向の研究が今後の課題として特に重要である。
3. 表現対象としての機械は、境界、属性、関係、構造、変化を有することをその特徴としている。
4. 対象表現のスキーマの比較のためにメタスキーマを導入し、代表的な対象表現スキーマであるテーブル、製図図面、接続グラフ、階層構造、タイムチャート、構造変化、フレーム、オブジェクトをメタスキーマで表現し、その特徴を論じた。さらに、それらを構造、時間、属性の3つの項目に関する表現能力の有無で分類し、これら3つの項目を総合的に記述できる枠組みが必要であるとした。
5. 属性、関係、構造、時間の記述に関して、既存の対象表現法の問題点を指摘し、形式的対象表現の規範として、1) 対象指示子の無意味化、2) 属性の一意性、3) 関係の一意性、4) 構造の明示化、および5) 変化の明示化、の5つを提示した。
6. 機械設計と機能との関係について考察を加え、機能、構造、挙動などの概念間の関係を与える機械の図式を提案した。さらに、対象表現を物理的な対象表現(物理表現)と、機能などの人間の意図を含んだ内容を記述した表現(意味表現)へ分離して取り扱うことを主張した。

7. 本研究では、1) 形式化の徹底、2) 物理的等価性の追求、ならびに3) 設計過程への対応、を実現する設計対象表現の確立を目的とする。形式化の徹底に際しては、従来の記述の単位であった部品などの概念を排し、時空における領域を記述の際の基本単位として、形式的記述の体系を組み上げいく。対象を物理的存在としてのみ考慮し、それ以外の要因は物理的対象表現の枠組みから除外する。また、設計の進行に伴う設計対象の詳細化に一貫して対応できるように、関係概念を中心とした詳細化可能な対象表現の手法の確立を目指す。

第3章

設計対象の物理表現基礎論

本章では、物理的な存在としての設計対象を認識し、記述するための考え方を明確にし、定式化することを行なう。さらに、対象の認識、表現に関する歴史的な流れを概観し、本研究の位置づけを明らかにする。

3.1 物理世界の記述に関する基本概念の導入

本節では対象記述の枠組みを構成する空間と時間の数学的構造を明確にし、物理世界の記述に関する基本的な概念を導入する。

3.1.1 空間

3次元ユークリッド空間 R^3 の部分集合の中で、実数上の閉区間 $U = [0, 1]$ の直積空間 $U^3 = U \times U \times U$ と位相同型となるものを3次元閉空間、または単に空間 (space) とよび、 S, S_1, S_2, \dots であらわす。また、すべての空間の集合を3次元閉空間集合、または空間集合 (space set) とよび、 \mathfrak{S} と記す。

$$\mathfrak{S} = \{S \in \mathcal{P}(R^3) \mid S \cong U^3\} \quad (3.1)$$

ただし、 $\mathcal{P}(A)$ は集合 A のべき集合をあらわす。このように定義された空間 $S \in \mathfrak{S}$ は、実数上の閉区間 $U = [0, 1]$ の直積空間 U^3 と位相同型であるから、 R^3 における閉でかつ連結な部分集合である。

空間は3次元実数ベクトル空間の部分集合であり、 S の中にひとつの点 s_0 を定めると、 S 中の任意の点の $a \in S$ の座標が $\vec{s}_0 \vec{a}$ により与えられる。点 a の S における座標を $pos(a)$ と表す。

S における、連結な部分集合を空間領域 (spatial region)¹ とよび、 $\bar{S}, \bar{S}_1, \bar{S}_2, \dots$ により表す。また、すべての空間領域の集合を空間領域集合 (spatial region set) とよび \mathfrak{R} と記す。(図3.1参照) U^3 と \mathfrak{R} との関係は以下のようにまとめられる。

¹ここで定義する領域は、形状モデリングにおける3多様体の領域 (region) とは異なる。

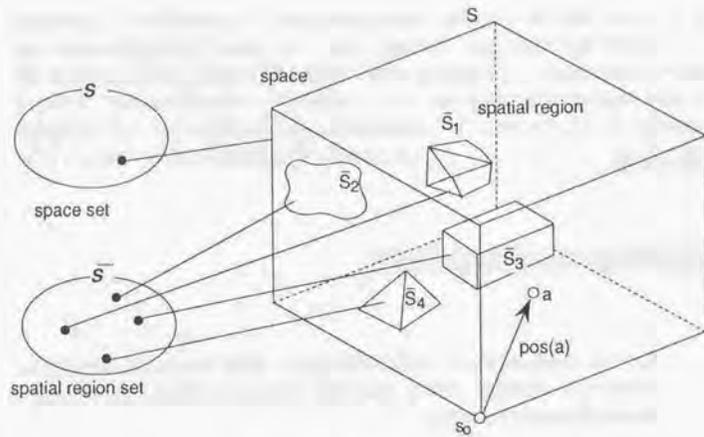
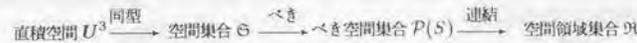


Figure 3.1: 空間の諸概念



いま、空間領域集合 M に対して、次のような同値関係 EQ を考える。

$$EQ = \{(\bar{S}_\lambda, \bar{S}_\mu) \in M \times M \mid \exists \gamma \in \Gamma, \gamma(\bar{S}_\lambda) \equiv \bar{S}_\mu\} \quad (3.2)$$

ただし、 Γ は 3 次元空間における回転ならびに並進を合成した変換 (同次変換) すべての集合を表すものとする。

空間領域の集合 M とその元 \bar{S} の間の同値関係 EQ 、および M の元 \bar{S} が与えられたとき、 M の以下の条件を満足する部分集合 $EQ(\bar{S})$ を、 \bar{S} を代表元とする EQ に関する同値類とよぶ。

$$EQ(\bar{S}) = \{\bar{S}_\lambda \in M \mid (\bar{S}, \bar{S}_\lambda) \in EQ\} \quad (3.3)$$

この同値類を用いて M の商集合 M/EQ を作る。

$$M/EQ = \{X \in P(M) \mid \exists x (x \in M \wedge X = EQ(x))\} \quad (3.4)$$

この商集合の各元に対して、その元の中のひとつの空間領域を対応付ける写像 ψ とする。

$$\psi : M/EQ \rightarrow M \quad (3.5)$$

ψ の像 $\psi[M/EQ] \subset M$ を形状集合 (shape set) とよび、 G と記す。

以上の準備により、空間領域の形状、位置、姿勢は次のように定義される。

空間領域の形状: 空間領域 $\bar{S} \in M$ に対して、 $\psi(EQ(\bar{S})) \in M$ で与えられる空間領域を形状 (shape) とよぶ。

空間領域の位置と姿勢: 空間領域を $\bar{S} \in M$ 、その形状を a としたとき、 $\bar{S} \equiv \gamma(a)$ を満足する変換 $\gamma \in \Gamma$ の回転成分 $Rot(\gamma)$ を空間領域の姿勢 (orientation)、並進成分 $Tran(\gamma)$ を位置 (position) とよぶ。

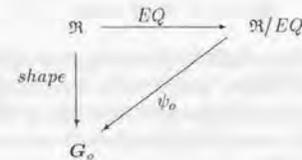
空間領域 \bar{S} が対称な場合には、 $\bar{S} \equiv \gamma(a)$ を与える変換 H が複数存在し、位置と姿勢は一意には定まらない。その場合、不定のパラメータを自由度として残したものを位置、姿勢とよぶことにする。同じ同値類に属する空間領域 $\bar{S}_\lambda, \bar{S}_\mu$ が与えられた時に、 $\bar{S}_\lambda \equiv H(\bar{S}_\mu)$ なる変換 H を $H(\bar{S}_\lambda \leftarrow \bar{S}_\mu)$ と記す。

定義より明らかであるように、空間領域の形状、位置、姿勢は、商集合から形状集合を作る際の代表元の選び方に依存している。このことは、幾何モデルにおいてプリミティブの局所座標系の取り方が複数存在すること²と同様である。

ここでは、標準的な代表元が選ばれる写像を ψ_0 、それにより定まる形状集合を G_0 とする。対称性をもつ空間領域に関しては、対称性の中心点 (対称軸、対称面の交点) が s_0 と一致するものを代表元を選ぶ。これにより、対称性を有する空間領域の位置に関しては、一意に定めることができる。

この標準的な形状集合 G_0 を用いて、空間領域 $\bar{S} \in M$ の形状、位置、姿勢を与える写像を以下のよう

$$\begin{aligned} \text{空間領域の形状: } & \text{shape}(\bar{S}) = \psi_0(EQ(\bar{S})) \\ \text{空間領域の位置: } & \text{position}(\bar{S}) = \text{Trans}(H(\bar{S} \leftarrow \text{shape}(\bar{S}))) \\ \text{空間領域の姿勢: } & \text{orientation}(\bar{S}) = \text{Rot}(H(\bar{S} \leftarrow \text{shape}(\bar{S}))) \end{aligned}$$



また、3次元ユークリッド空間における包含関係などの関係、変換、演算、長さ、面積、体積などの諸量が空間領域に対しても同様に定義されているものとする (B.1.1参照)。

3.1.2 時間

次に、時間軸について定義を与える。実数 R の連結な閉区間 $U = [0, 1]$ と位相同型な集合を時間軸 (time axis) とよび、 T, T_1, T_2, \dots と記す。

²たとえば、立方体において、原点を体心にとるか、底面の面心にとるか、頂点にとるかなど

また、時間軸の集合を時間軸集合 (time axes set) と呼び、 \mathfrak{T} と記す。

$$\mathfrak{T} = \{T \in \mathcal{P}(\mathbb{R}) \mid T \cong U\} \quad (3.6)$$

時間軸を構成する元を時点 (time point), 連続な部分集合を時間区間 (time interval) とよぶ。また、時点を t, t_1, t_2 , 時間区間を $\bar{T}_1, \bar{T}_2, \bar{T}_3$ と記す。さらに、時間区間 T の下界, 上界の時点を時間区間の始点, 終点とよび, それぞれ $Start(T), End(T)$ と記す。

時間軸は実数上の単位区間 U と位相同型であるから, 同一の時間軸 T の任意の2つの時点 $t_i, t_j \in T$ の間には, 順序関係が定義される。

いま, ある全順序集合 V_i に対して, 関数 $\tau: T \rightarrow V_i$ が条件,

$$\forall t_i \in T \forall t_j \in T (t_i < t_j \implies \tau(t_i) \leq \tau(t_j))$$

を満足するとき, 関数 τ を時間マッピング関数 (time mapping function), 値域である V_i を時間スケール (time scale) $\langle T, V_i, \tau \rangle$ の組を時間システム (time system), さらに $\tau(t)$ を時間システム $\langle T, V_i, \tau \rangle$ における時点 t の時間値 (time value) とよぶ。(図3.2参照)

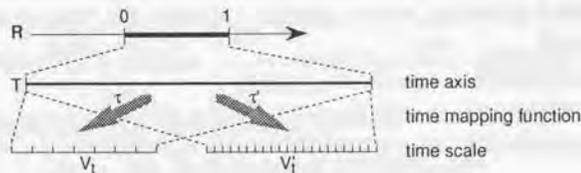


Figure 3.2: 時間軸と時間システム

また, 時間区間 \bar{T} の始点と終点の時間値, $\tau(Start(\bar{T})), \tau(End(\bar{T}))$ をそれぞれ, 時間区間 \bar{T} の始点時間値, 終点時間値という。さらに, 時間スケール V_i に対して任意の2つの要素 a, b の間に, 差 $d_i(a, b)$ が定義されているとき, 始点時間値と終点時間値との差 $d_i(\tau(Start(\bar{T})), \tau(End(\bar{T})))$ を, 時間区間 \bar{T} の時間区間長 (time interval length) とよぶ。

同一の時間軸に対して複数の時間システムが存在してもよい。時間軸 T に対して2つの時間システム $\langle T, V_i, \tau \rangle$ と $\langle T, V'_i, \tau' \rangle$ があるとき, 時間軸 T 上の任意の2点, $t_i, t_j \in T$ に対して,

$$\tau(t_i) \leq \tau(t_j) \iff \tau'(t_i) \leq \tau'(t_j)$$

が常になりつつ。

いま, 時間軸 T の時間スケールとして T 自身をとり, 恒等写像 $1_D: T \rightarrow T$ を時間マッピング関数として選んだ時間システム $\langle T, T, 1_D \rangle$ を考える。これを標準的時間システムとよび, 今後特に断わらない限り, 時間システムとしてこの標準的な時間システムを用いる。

3.1.3 局所時空系

空間と時間軸により構成される, 物理的な世界の記述を行なうための枠組みを導入する。いま, 任意の空間 $S_\lambda \in \mathfrak{S}$ と, 時間軸 $T_\mu \in \mathfrak{T}$ の直積集合 $S_\lambda \times T_\mu$ を空間 S_λ と時間軸 T_μ により張られる局所時空系 (local frame of space and time) とよぶ。局所時空系を F, F_1, \dots により表す。

また, 直積 $S_\lambda \times T_\mu$ のすべての集合を局所時空系集合と呼び, \mathfrak{F} と記す。

$$\mathfrak{F} = \{S_\lambda \times T_\mu \mid S_\lambda \in \mathfrak{S}, T_\mu \in \mathfrak{T}\} \quad (3.7)$$

局所時空系 $F \in \mathfrak{F}$ は, 空間と時間軸の定義より, U^4 と位相同型となる³。

$$F = S \times T \cong U^3 \times U = U^4 \quad (3.8)$$

すなわち, 局所時空系 $F = S \times T$ は, 4次元時空 (spatio-temporal) において S で与えられる超平面を T に沿って挿引したとき閉でかつ連結な部分空間である。

局所時空系 $F = S \times T \in \mathfrak{F}$ には, 直積の定義より, それを構成する空間 S , 時間軸 T に関して

$$proj_S: F \rightarrow S \quad (3.9)$$

$$proj_T: F \rightarrow T \quad (3.10)$$

なる標準的射影 $proj_S, proj_T$ が存在する。局所時空系の点 $a \in F$ に関して, $proj_S(a), proj_T(a)$ をそれぞれ局所時空系の点 a の空間位置 (spatial position), 時間位置 (time position) とよぶ。

局所時空系の任意の点 a は, その空間位置 $proj_S(a)$ および時間位置 $proj_T(a)$ により一意に定まる。すなわち, $a, b \in F$ に対して,

$$a = b \iff proj_S(a) = proj_S(b) \wedge proj_T(a) = proj_T(b) \quad (3.11)$$

となる。

局所時空系の点 a を, 空間位置 $s = proj_S(a)$ と時間位置 $t = proj_T(a)$ を用いて, 順序対 (s, t) により表す。また, s の座標は3次元実ベクトル $pos(s)$, t の時間値は $\tau(t)$ により与えられるから, 局所時空系の点 $a = (s, t)$ の座標は, 4次元ベクトル $(pos(s), \tau(t))$ により定まる。これを局所時空系の点 a の時空座標 (spatiotemporal coordinates) とよぶ。

局所時空系の2点 a, b に対して, 局所時空系におけるベクトル \vec{ab} を考える。

$$\vec{ab} = ((pos(proj_S(b)) - pos(proj_S(a))), d_t(\tau(proj_T(b)), \tau(proj_T(a)))) \quad (3.12)$$

この式の中で, $(pos(proj_S(b)) - pos(proj_S(a)))$ は局所時空系の点 a と b の空間的隔たりを表す3次元ベクトルであり, $d_t(\tau(proj_T(b)), \tau(proj_T(a)))$ は時間的隔たりである2点の時間値の差を表している。さきの標準的射影 $proj_S, proj_T$ の表記を用いて, 空間的隔たりと時間的隔たりをそれぞれ, $proj_S(\vec{ab}), proj_T(\vec{ab})$ と記す。

³これは4次元の Hilbert cube とよばれる

また, $proj_S, proj_T$ の定義域を $\mathcal{P}(F)$ に, 値域をそれぞれ $\mathcal{P}(S), \mathcal{P}(T)$ に拡張した射影も考えられる。それらは, 局所時空系 F の部分集合 $F' \in \mathcal{P}(F)$ に関して,

$$proj_S[F'] = \{proj_S(a) \mid a \in F'\} \quad (3.13)$$

$$proj_T[F'] = \{proj_T(a) \mid a \in F'\} \quad (3.14)$$

と定義される。それぞれ, 局所時空系 F の部分集合 F' を構成する点の空間位置の集合, 時間位置の集合の和を表している。 F' が連結な集合のときには $proj_S[F'], proj_T[F']$ はそれぞれ, 移動, 変形しうる立体を包絡する空間領域, 存在している最大時間区間となる。局所時空系 F の部分集合のうち, 連結な部分集合を特に時空領域 (spatiotemporal region) とよび, それらを D, D_1, D_2, \dots と記す。また, 局所時空系 F におけるすべての時空領域の集合を \mathcal{D}_F とあらわし, F が明らかなきときは添え字を省略して単に \mathcal{D} とする。

局所時空系に関する定義の最後として, 局所時空系の一部を取り出すために有用な概念である断面, スパン, 軌跡を以下のように定義する。

断面: 局所時空系 F の任意の部分集合 $F' \subset F$ に関して, $t_a \in proj_T[F']$ を時間位置としてもつ F' の点の集合の空間射影 $proj_S[\{(s, t) \in F' \mid t = t_a\}]$ を F' の時間位置 t_a における断面 (section) とよび, $F'|_{t=t_a}$ とあらわす。

スパン: $s_a \in proj_S[F']$ なる点を空間位置とする F' の点の集合の時間射影 $proj_T[\{(s, t) \in F' \mid s = s_a\}]$ を, F' の空間位置 s_a におけるスパン (span) とよび, $F'|_{s=s_a}$ とあらわす。

軌跡: 各時間位置 t における空間位置 s を一意に定める4次元時空の連続な超曲線 $s = h(t)$ を構成する点の集合 $\{(s, t) \in F' \mid s = h(t)\}$ を F' の h による軌跡 (trace) とよび, $F'|_h$ によりあらわす。

断面は空間的な存在範囲, スパンは存在する時間区間, 軌跡は運動履歴の表現などに用いられる。

3.1.4 時空強度

次に, 局所時空系という時空の部分空間に対して, 物理的概念の導入を考える。人間は, 物理世界にある特定の切り口を設定し, その切り口での世界の有り様を特定の知覚や測定手段を通じて物理世界の認識を行なう。物理世界の総体としての有り様は, そうした特定の切り口での有り様をより多く総合することで, よりよく認識され得ると考えられる。

4次元時空の任意の点 (すなわち, ある瞬間における, ある位置) に対して定義される, 空間と時間に独立な物理概念を時空強度 (spatiotemporal intensity: STI) とよぶ。

たとえば, 重量という概念はある空間的な広がりをもつ対象に依存する物理概念であるため, ここで定義する時空強度とはならない。また, 速度という概念も, 空間における移動と, 時間の経過に依存する物理概念であるため, 同様に時空強度ではない。時空強度と, 時空強度以外の物理概念との関係については, 3.4.5において詳しく論じる。

すべての時空強度と自然数とが一意に対応付けられているとして, いま, 第 i 番目の時空強度 (STI- i とよぶ) を考える。STI- i の値域を時空強度値集合 (STI value set), その元を時空強度値 (STI value)

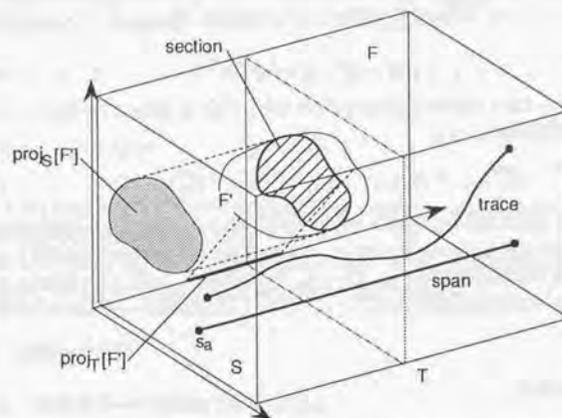


Figure 3.3: 局所時空系の主要な概念 (空間を2次元に縮退)

とよび, それぞれ Q^i , および $q_{\lambda_1}^i, q_{\lambda_2}^i, \dots$ により記す。また, すべての時空強度に関する時空強度値集合の集合 $\{Q_1, Q_2, \dots\}$ を Ω と表す。

ここでは局所時空系の点の属性としての時空強度を, 以下の3つに分類する。

- 状態強度: 局所時空系の点の状態量 (温度, 電界強さ等)
- 物性強度: その点を占める物質に依存して定まる時空強度 (密度, 屈折率等)
- 臨界強度: その点の時空強度値の変化の臨界値としての時空強度 (沸点, 気化熱, 降伏応力等)

ある STI- i に関して, 局所時空系 F から時空強度値集合 Q^i への対応を与える関数を時空強度関数とよび, $p^{i,F}$ と記す⁴。すなわち,

$$p^{i,F}: F \rightarrow Q^i \quad (3.15)$$

いま, 任意に選んだ2つの局所時空系 F, F' から, 時空強度値集合 Q^i への時空強度関数を, それぞれ $p^{i,F}, p^{i,F'}$ とするとき, 次の条件が満足されなくてはならない。

$$a \in F \wedge a \in F' \implies p^{i,F}(a) = p^{i,F'}(a) \quad (3.16)$$

ただし, $p^{i,F}: F \rightarrow Q^i, p^{i,F'}: F' \rightarrow Q^i$

この条件は, 時空の点の時空強度の値は, その時空の点を含む局所時空系の選択法によらず一定であることを要請している。

⁴局所時空系 F が明らかなきときは, F を上添字から省略して p^i と記す。

決定論的物理世界観では、ある時点における時空強度値を与えると、それ以降の時空強度値は一意に定まることになる。すなわち、無限の領域と時間からなる4次元時空 R^4 から Q^1 への2つの時空強度関数、

$$p_{\lambda_1}^{i,\Omega}, p_{\lambda_2}^{i,\Omega} : R^4 \rightarrow Q^1 \quad (3.17)$$

が、ある時点 t_0 において等しい時空強度値の分布を有しているとき、 t_0 以降の任意の時点 $t > t_0$ においても時空強度値の分布は等しくなる。

$$p_{\lambda_1}^{i,\Omega}|_{t=t_0} = p_{\lambda_2}^{i,\Omega}|_{t=t_0} \implies p_{\lambda_1}^{i,\Omega}|_{t>t_0} = p_{\lambda_2}^{i,\Omega}|_{t>t_0} \quad (3.18)$$

しかしながら、空間、時間を有限とし、境界を考えた局所時空系においては式(3.18)は成り立たない。局所時空系の境界の外の時空強度値の分布の違いが、局所時空系内の時空強度値の分布に影響するため、ある時点において等しい時空強度値分布を有しているも、それ以降も等しくなるという保証はない。よって、局所時空系において時空強度関数を定めることは、同時にこの局所時空系への外界からの影響⁵を設定したことになる。

3.1.5 時空強度分布

局所時空系 F から Q^1 への関数全体を $(Q^1)^F$ とする。いま、 $(Q^1)^F$ からある一つの関数 p_{λ}^i を選ぶことにより、STI-iに関する局所時空系 F の各点の時空強度値が一意に定められる。 F, Q^1, p_{λ}^i の3つ組 $\langle F, Q^1, p_{\lambda}^i \rangle$ を、局所時空系 F のSTI-iに関する時空強度分布(STI distribution)、あるいは単に分布とよぶこととする。

時空強度の定義より、時空強度分布は以下の条件を満足しなくてはならない。

分布の一意性: ある時空強度に関して、局所時空系 F に対する分布は一意でなくてはならない。

$$\langle F, Q^1, p_{\lambda_1}^i \rangle, \langle F, Q^1, p_{\lambda_2}^i \rangle \implies p_{\lambda_1}^i = p_{\lambda_2}^i \quad (3.19)$$

分布の無矛盾性: 時空強度の分布は、局所時空系の選び方によらず一定でなくてはならない。

$$\langle F, Q^1, p_{\lambda_1}^{i,F} \rangle, \langle F', Q^1, p_{\lambda_2}^{i,F'} \rangle \implies p_{\lambda_1}^{i,F}|_{F \cap F'} = p_{\lambda_2}^{i,F'}|_{F \cap F'} \quad (3.20)$$

これらの一意性により、異なる局所時空系 F, F' の同一の時空強度に関する分布は以下のよう一つの分布にまとめられる。

$$\langle F, Q^1, p_{\lambda_1}^{i,F} \rangle, \langle F', Q^1, p_{\lambda_2}^{i,F'} \rangle \implies \langle F \cup F', Q^1, p_{\lambda_1}^{i,F} \cup p_{\lambda_2}^{i,F'} \rangle \quad (3.21)$$

ただし、

$$(p_{\lambda_1}^{i,F} \cup p_{\lambda_2}^{i,F'})(x) = \begin{cases} p_{\lambda_1}^{i,F}(x), & \text{for } x \in F \wedge x \notin F' \\ p_{\lambda_2}^{i,F'}(x), & \text{for } x \in F' \wedge x \notin F \\ p_{\lambda_1}^{i,F}(x) = p_{\lambda_2}^{i,F'}(x), & \text{for } x \in F \wedge x \in F' \\ \text{undefined,} & \text{otherwise} \end{cases}$$

⁵たとえば、人間による働きかけや機械の使用環境

時空強度分布の概念を用いて考えると、局所時空系 F における物理世界の有り様は、以下のように全ての時空強度について時空強度分布を定めること以外ならない。

$$\begin{aligned} \langle F, Q^1, p^1 \rangle, \quad & \langle F, Q^2, p^2 \rangle, \dots, \langle F, Q^i, p^i \rangle, \langle F, Q^{i+1}, p^{i+1} \rangle, \dots \\ & = \langle F, Q^1 \times Q^2 \times \dots, p^1 \times p^2 \times \dots \rangle \end{aligned} \quad (3.22)$$

ただし、 $p^i \in (Q^i)^F$

式(3.22)を局所時空系 F における物理世界の記述(physical world description)、あるいは単に物理世界(physical world)とよび、 PWF と記す。

実際に、式(3.22)に基づいて物理世界を記述する際に、時空強度の数の有限性が問題となってくる。そのために、いくつかの有限性を仮定した物理世界を次節で議論する。

3.2 有限物理世界

3.2.1 物理世界への有限性の仮定の導入

ここでは、対象とする物理世界に関して、次の3つの有限性に関する仮定を導入する。

時空強度集合の有限性: 物理世界は有限個の種類の時空強度を用いて定めることができる。

時空強度値集合の有限性: 各時空強度に関して、時空強度値集合の元の個数は有限個である。

時空強度分布の連結成分の有限性: 局所時空系は、各時空強度分布が与える各点の時空強度値の同値性を用いて、有限個の時空領域に分割できる。

時空強度集合の有限性に対する仮定は、物理世界の記述における、時空強度の種類(すなわち、時空強度値集合の集合 Ω の元の数)は有限であると仮定している。この仮定は、われわれの物理世界の認識能力の限界と、記述という行為の有限性より、自然に導入される。

次の時空強度値集合の有限個仮定は、ある観点(時空強度)から物理世界を認識し、記述するには、値の種類は有限個でよいことを主張している。この仮定は物理世界を分節する過程の有限性を主張しており、先の仮定に比べて物理世界に強い制限を与えている。

時空強度の値を測定する場合、その値は実数値として得られることが多い。たとえば、絶対温度の時空強度値集合は非負の実数集合と対等な集合として通常は考えている。しかし、世界を認識、記述するには、有限個の値で充分であることをこの仮定は物理世界に要請している。

最後の時空強度分布の分割における時空領域の有限性に関する仮定は、物理世界における時空強度の値は、局所連結であり、時空間において、めまぐるしく変化することはない、ということ述べている。時空強度分布による分割で時空領域の数が有限個とならない例を以下にあげる。

局所時空系 F の任意の点 x について、時空強度関数 p が、点 c からの3次元ユークリッド空間上での距離

$$d(c, x) = D(\text{projs}(c), \text{projs}(x))$$

の関数として次のように与えられたとする。

$$p(x) = \begin{cases} red, & \text{for } x = c \text{ or } \sin(1/d(c, x)) = 0 \\ green, & \text{for } \sin(1/d(c, x)) > 0 \\ blue, & \text{for } \sin(1/d(c, x)) < 0 \end{cases}$$

これにより局所時空系 F は3色に色分けがされるが、これを連続な4次元の"色タイル"で埋めようとすると無限個の"色タイル"が必要となる。時空強度関数のこうした性質を認めると、物理世界が有限個の時空領域へと分割できないことが生じ、物理世界の有限回の手続きによる観測と有限の記述が不可能となる。

以上の3つの有限性に関する仮定を導入した物理世界について次節以降に述べていく。

3.2.2 有限な物理世界の定式化

有限性に関する仮定のうち、1番目の仮定である「時空強度集合の有限性」を採用することで、時空強度の数は有限個として取り扱うことができる。その数を個々では $|\Omega| = N$ とする。先に(3.22)にて与えた物理世界は、以下のように有限の時空強度分布の重ね合わせとして与えられる。

$$\langle F, Q^1, p^1 \rangle, \langle F, Q^2, p^2 \rangle, \dots, \langle F, Q^N, p^N \rangle \\ = \langle F, Q^1 \times Q^2 \times \dots \times Q^N, p^1 \times p^2 \times \dots \times p^N \rangle \quad (3.23)$$

ただし、 $p^i \in (Q^i)^F, (i = 1, \dots, N)$

また、仮定の2番目の「時空強度値集合の有限性」の仮定に基づき、任意の時空強度値集合 $Q^i \in \Omega$ の元の数—すなわち、時空強度値の数—は有限個となる。いま、STL- i に対する時空強度値集合 Q^i を $\{q_1^i, q_2^i, \dots, q_{M_i}^i\}$ のように M 個の元からなるものとする。

すると、時空強度分布 $\langle F, Q^i, p^i \rangle$ により、局所時空系 F は高々 Q^i の元の数 M 個の部分集合へと一意に直和分割される。(図3.4(a))

$$F = F_1 \oplus F_2 \oplus \dots \oplus F_M \quad (3.24)$$

ただし、 $F_j = \{x \in F \mid p^i(x) = q_j \in Q^i\}$

この F の直和分割を与える各部分集合 $F_j (j = 1, \dots, M_i)$ は、 F において必ずしも連続ではない。そこで $F_j (i = 1, \dots, N_i)$ をそれぞれ連続な部分集合の最小の組へと直和分割する。ここでの直和分割を与える部分集合の数は、有限性に関する3番目の仮定である「時空強度分布の連結成分の有限性」の仮定により、有限個となる。

$$F_j = F_{j1} \oplus F_{j2} \oplus \dots \oplus F_{jm_j} \quad (j = 1, \dots, M) \quad (3.25)$$

ただし、 $F_{ju} \cup F_{jv} (u \neq v)$ は非連結

式(3.24)と式(3.25)をまとめることで、

$$F = (F_{11} \oplus F_{12} \oplus \dots \oplus F_{1m_1})$$

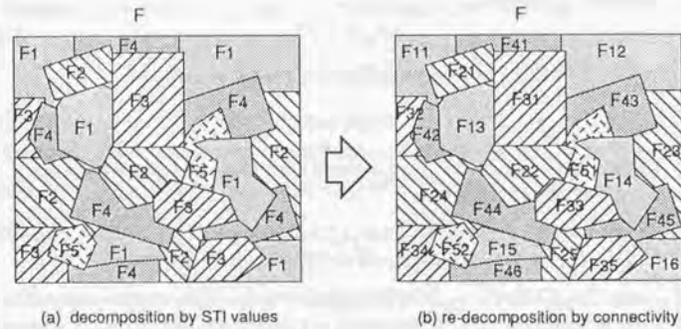


Figure 3.4: 局所時空系の時空強度値による直和分割

$$\oplus (F_{21} \oplus F_{22} \oplus \dots \oplus F_{2m_2}) \\ \dots \\ \oplus (F_{j1} \oplus F_{j2} \oplus \dots \oplus F_{jm_j}) \\ \dots \\ \oplus (F_{M1} \oplus F_{M2} \oplus \dots \oplus F_{Mm_M}) \quad (3.26)$$

のように、局所時空系 F は有限個の連続な部分集合へと分割できる。(図3.4(b))

こうした部分集合への分割は、時空強度分布 $\langle F, Q^i, p^i \rangle$ に対して一意に定まる。 F の直和分割を与える3.26の部分集合の集合(すなわち集合族)を F_λ^i と記す。すなわち、

$$F_\lambda^i = \{F_{11}, F_{12}, \dots, F_{ij}, \dots, F_{Mm_M}\} \quad (3.27)$$

これは、局所時空系 F の、時空強度関数 p_λ^i の値の等価性と連結性により定まる関係を同値関係とした商集合である。

もしもすべての連結成分 F_{ij} が内部に空洞を持たないならば、 F_{ij} は n 胞体 ($0 \leq n \leq 3$) となり、 F_λ^i は、Hausdorff空間である局所時空系 F に対して、時空強度関数 p_λ^i による胞体分割を与える。ここで分割している胞体は有限個であり、 F は有限な胞体複体であるCW複体となる。

3.2.3 有限な物理世界の性質

先の3つの有限性に関する仮定が導入された物理世界を、とくに有限物理世界とよぶことにする。

STL- i における時空強度関数 p_λ^i による分割でできる局所時空系 F の商集合 F_λ^i を、改めて時空セグメント集合(state-time segment set)とよぶ。また、時空強度関数 p_λ^i が自明なときには、時空強度関数の区別を与える下添字を省略して単に F^i と記す。

有限物理世界において、時空強度関数の定義域を局所時空系から局所時空系のべき集合へと拡張することを考える。まず、商集合のもつ一般的性質より、局所時空系 F から時空セグメント集合 F^i への対

応を与える自然写像 ω^i が存在する。

$$\omega^i : F \rightarrow F^i \quad (3.28)$$

また、時空セグメント集合 F^i から時空強度値集合 Q^i への関数を \bar{p}^i とする。

$$\bar{p}^i : F^i \rightarrow Q^i \quad (3.29)$$

ただし、 $\forall x \forall y (x \in F^i, y \in F^i \iff \bar{p}^i(x) = \bar{p}^i(y))$ ここで定義した ω^i, \bar{p}^i と時空強度関数 p^i との間には、次のような可換な図式が成り立つ。

$$\begin{array}{ccc} F & \xrightarrow{p^i} & Q^i \\ \omega^i \downarrow & \searrow \bar{p}^i & \\ F^i & & \end{array}$$

以上により、時空強度値の分布の表現は、時空強度関数 p^i を与えるのではなく、 ω^i と \bar{p}^i を与えることによっても、一意に記述できる。有限物理世界において時空強度分布 $\langle F, Q^i, p^i \rangle$ は、以下のようになり ω^i と \bar{p}^i の合成へと展開でき、さらに時空セグメント集合から時空強度値集合への対応へと離散化することができる。

$$\langle F, Q^i, p^i \rangle = \langle F, Q^i, \omega^i \circ \bar{p}^i \rangle \quad (3.30)$$

$$= \langle F^i, Q^i, \bar{p}^i \rangle \quad (3.31)$$

すなわち、 ω^i により、まず局所時空系 F を F^i へと分割し、各 F^i に対して \bar{p}^i により時空強度の定めることにより、分布を求めることができる。

有限物理世界を定めることは、すべての時空強度に関して時空強度値の分布を定めることであり、先に(3.23)で与えた式は、(3.31)によって、以下のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} & \langle F, Q^1 \times Q^2 \times \dots \times Q^N, p^1 \times p^2 \times \dots \times p^N \rangle \\ &= \langle F, Q^1, \bar{p}^1 \rangle, \langle F, Q^2, \bar{p}^2 \rangle, \dots, \langle F, Q^N, \bar{p}^N \rangle \\ &= \langle F, Q^1, \omega^1 \circ \bar{p}^1 \rangle, \langle F, Q^2, \omega^2 \circ \bar{p}^2 \rangle, \dots, \langle F, Q^N, \omega^N \circ \bar{p}^N \rangle \\ &= \langle F^1, Q^1, \bar{p}^1 \rangle, \langle F^2, Q^2, \bar{p}^2 \rangle, \dots, \langle F^N, Q^N, \bar{p}^N \rangle \end{aligned} \quad (3.32)$$

ただし、 $p^i \in (Q^i)^{F^i}, (i = 1, \dots, N)$

いま、時空セグメント集合の要素である時空領域 $D \in F^i$ とそこにおける STI- i の時空強度値 $q^i = \bar{p}^i(D)$ の組 (D, q^i) を局所時空系 F における STI- i の状態素 (state primitive) とよび P^1, P^1, \dots で表し、状態素の集合を状態素集合 (state primitive set) とよび、 P^i と記す。また、STI- i に関する全ての状態素集合の集合 $\{P_1^i, P_2^i, \dots\}$ を \mathfrak{P}^i とする。

$$P^i = \{(D_j, q_j^i) \mid \exists D_j (D_j \in F^i, q_j^i = \bar{p}^i(D_j))\} \quad (3.33)$$

状態素集合 P^i から時空セグメント集合 F^i 、時空強度値集合 Q^i への自然写像

$$seg : P^i \rightarrow F^i \quad (3.34)$$

$$val : P^i \rightarrow Q^i \quad (3.35)$$

を、それぞれ、 $P_j^i = (D_j, q_j^i)$ に対して、 $seg(P_j^i) = D_j$ 、 $val(P_j^i) = q_j^i$ となるように定める。状態素のもつ重要な性質としては以下に示す内部均一性と隣接差異性がある。

内部均一性: $a, b \in seg(P^i) \implies p^i(a) = p^i(b) = val(P^i)$

隣接差異性: $P_j^i, P_k^i \in P^i, contact(seg(P_j^i), seg(P_k^i)) \implies val(P_j^i) \neq val(P_k^i)$

ただし、 $contact(A, B)$ は、時空領域 A, B の隣接を表す。

内部均一性は、状態素の内部のどの点でも時空強度値が等しいことを述べている。このことは状態素が時空強度値の等価性を用いて定義されることから明かである。また、隣接差異性は、隣接する状態素は、その時空強度値が必ず異なる、ということである。もしも隣接する状態素の時空強度値の値が等しいと、それらは同じ同値類に属するため、別々の状態素として存在することは矛盾となる。

局所時空系の状態素への分割において重要なことは、その分割 (ω^i) は、時空強度関数 p^i に依存しており、時空強度が変われば、局所時空系は異なる分割をもつことである。すなわち、ある局所時空系 F に関して、STI- $i, STI-k (i \neq k)$ のそれぞれについての時空セグメント集合を F^i, F^k とすると、一般には、 $F^i \neq F^k$ である。状態素を、物理世界を認識する際の $\langle \text{もの} \rangle$ の単位として考えると、この分割の違いは、観点 (時空強度) により $\langle \text{もの} \rangle$ のとらえ方が異なることを意味している。

局所時空系 F に対して状態素集合 P^i を与えることは、式(3.31)で示した有限物理世界において STI- i に関する分布を明示することと等価である。すなわち、 $seg[P^i] = F^i, val[P^i] \subset Q^i, val(P_j^i) = \bar{p}^i(seg(P_j^i))$ であることから、 P^i より分布 $\langle F^i, Q^i, \bar{p}^i \rangle$ を構成できる。よって、 P^i をもって STI- i に関する局所時空系 F の分布とよぶこともある。また、式(3.32)で示された有限物理世界の記述は、それぞれの時空強度に対する分布

$$P^1, P^2, \dots, P^N \quad (3.36)$$

を与えることにはかならない。このようにして与えられた局所時空系 F の有限物理世界の記述を $FPWF$ により表す。

次に、局所時空系の断面でみたときの状態素集合について考える。状態素集合 $P^i = \{P_1^i, \dots, P_N^i\}$ に対して、

$$\{(X, q) \mid P_j^i \in P^i, X = seg(P_j^i)|_{t=t_0} \in \mathfrak{R}, X \neq \phi, q = val(P_j^i)\} \quad (3.37)$$

を状態素集合 P^i の時点 t_0 におけるスナップショット (snapshot) とよび、 $P^i|_{t=t_0}$ と表す。また、スナップショットの要素 $a = (\bar{S}, q) \in P^i|_{t=t_0}$ から、それを構成する空間領域 \bar{S} と時空強度値 q への対応を与える自然写像を、それぞれ $\phi_s(a), \phi_q(a)$ とする。

3.3 有限物理世界における物理概念

つぎに、われわれが物理世界を考える際に用いる物理的な諸概念に関して、それらが有限物理世界においてどのように形式化されるかについて述べることにする。

3.3.1 相の概念

ここまでの有限物理世界の議論においては、すべての時空強度を独立なものと考え、時空強度間の関連については考慮していない。よって、「誘電率」と「電荷密度」はそれぞれ独立した時空強度として考えている。しかしながら、われわれが物理世界を認識し、考えるときには、これらがともに「電氣的性質」であり、密接な関係に有ることを知っている。「電荷密度」を考える上で「誘電率」は不可欠であり、また逆も成り立つ。さらには、「電荷密度」の変化と「電流密度」も相互に関連を有する。

われわれは、こうした関連の深い複数の時空強度分布をまとめて取り扱うことを通常行っている。たとえば、「電氣的な観点からみると、 ρ であるとか、 ϵ 光学の視点から考えると、 ϵ という際には、複数の時空強度を経合して物理世界を考えていると理解できる。物理世界を認識し、考えるための時空強度分布のこうしたまとまりを、ここではとくに相 (phase) とよぶことにする。

相は人間が培ってきた物理世界をとらえる際の経験的な視点であり、どのような時空強度の分布の組をもって相を構成するかについての明確な基準があるわけではない。相の構成に対するひとつの物理的解釈は、後述する物理制約の存在を時空強度の間に考えたときに、密に制約が存在する時空強度どうしで相を構成すると考えることである。物質相、力学相、熱相、電気相、磁気相、光学相といった時空強度の分類は、相のとらえ方のひとつの例である。

また、3.1.4において述べたように、時空強度は1) 状態強度、2) 物性強度、3) 臨界強度、の3つに大別されるが、これらが密接に関わり合っている場合には、そうした組を相とするのが適当であろう。たとえば、材料力学における、応力(状態強度)-弾性率(物性強度)-降伏応力(臨界強度)、は相互に密接に関連しており、材料の力学を考える際にはこれらをまとめて考慮するのが普通である。

つぎに、相の概念を定式化することを考える。いま、 $M (< N)$ 個の相を考え、その集合を $PH = \{PH_1, PH_2, \dots, PH_M\}$ とし、すべての時空強度を集めたものを $\Omega = \{Q^1, Q^2, \dots, Q^N\}$ とする。すると、相のとらえ方を定めるということは、 PH と時空強度集合のべき集合 $\mathcal{P}(\Omega)$ との対応付けを与えるということに相当する。この対応付けを α とする。

$$\alpha: PH \rightarrow \mathcal{P}(\Omega) \quad (3.38)$$

時空強度はいずれかの相に属することとすると、この対応 α は次の条件を満足しなくてはならない。

$$\sum_{1 \leq i \leq M} \alpha(PH_i) = \Omega \quad (3.39)$$

また、有限物理世界 $FPW = \{ \langle F, Q^1, p^1 \rangle, \langle F, Q^2, p^2 \rangle, \dots, \langle F, Q^N, p^N \rangle \}$ に対して、 $\alpha(PH_i)$ に属している時空強度の分布の集合を、ここでは相分布 (phase distribution) とよび、 $\langle F, PH_i \rangle$ と記す。

$$\langle F, PH_i \rangle = \{ \langle F, Q^i, p^i \rangle \in FPW \mid Q^i \in \alpha(PH_i) \} \quad (3.40)$$

有限物理世界の理論的な面においては、相の概念の必要性はないが、設計問題における部分問題への分割や物理制約の適用の制御の際には有用である。

3.3.2 物理制約と物理法則

物理制約の分類

有限物理世界において、それぞれの時空強度は任意の値をとることができる訳ではなく、物理的な制約を受けている。この制約をここでは物理制約 (physical constraints) とよぶ。有限物理世界における物理制約は、時空強度や相の概念を用いて以下のように分類される。なお、分類の説明における、集合 B は、存在可能を表す $!$ と存在不可能を表す nil からなる集合 $\{!, nil\}$ とする。

時空強度値の制約 (PhC-I): $PhC-I: Q^i \rightarrow B$

局所時空系における点 f は $STI-i$ に関して、時空強度値集合 Q^i の部分集合 $Q^{i'} (C Q^i)$ の元のみを値することができるという制約。すなわち、 $q \in Q^{i'}$ のとき $PhC-I(q) = !$ 、 $q \notin Q^{i'}$ のとき $PhC-I(q) = nil$ である。

時空強度関数の制約 (PhC-II): $PhC-II: (Q^i)^F \rightarrow B$

任意の時空強度に関して、取り得ない時空強度関数が存在する。

時空強度値の組合せの制約 (PhC-III): $PhC-III: Q^1 \times Q^2 \times \dots \times Q^N \rightarrow B$

局所時空系の任意の点について、取り得ない時空強度値の組合せが存在する。

時空強度関数の組合せの制約 (PhC-IV): $PhC-IV: (Q^1)^F \times (Q^2)^F \times \dots \times (Q^N)^F \rightarrow B$

取り得ない複数の時空強度の分布の組合せが存在する。

有限物理世界の各時空強度における任意の時空強度関数 p_j^i (あるいは、セグメント化された時空強度関数 \bar{p}_j^i) はこうした制約を満足しなくてはならない。

時空強度値の制約 (PhC-I) は、たとえば温度に関して $-5K$ という値はとることができないというものである。この制約を満足するように時空強度値集合を再設定することで、制約を有限物理世界に容易に取り込むことができる。

時空強度関数の制約 (PhC-II) は、たとえば、閉じた系の場合、各時点でのスナップショットに関して物質の総量は一定 (質量保存の原理) であるといった制約や、ある空間位置における時空強度値の変化に対する制約 (たとえば [de Kleer 84a] による連続性の公理) などが相当する。

時空強度値の組合せに関する制約 (PhC-III) には、たとえば物質と物性の関係がある。物質を定めることで、密度、導電率、透磁率、比熱などの時空強度の値が一意またはある範囲で定まる。逆にいくつかの時空強度を与えることで、そこに存在しうる物質の選択の幅が狭められる。さらに3.3.1で導入した相の概念は、この PhC-III の制約によって、相互に密接に関連付いた時空強度の組であると考えることができる。

最後の時空強度関数の組合せに関する制約 (PhC-IV) においては、時空強度の間には、物性による制約 (PhC-III) 以外の、相互関連が存在していることを述べている。すなわち、状態素から場の生起、場の状態素への作用などは、この時空強度関数の組合せに関する制約を満足してはならない。

これら4つのタイプの制約のうち、PhC-I と PhC-III は有限の記述により明示的に表現することができる。このため、これらの物理制約の実際の取り扱いに関しては、従来、物理的な常識事項や物性のデータブックなどの形式によってまとめられている。

Table 3.1: 諸効果の関係 [効果辞典 72]

現象		逆の現象	
相関関係	名称	名称	相関関係
熱が電気にかわる	○熱電効果	電熱効果	電気が熱にかわる
光が電気にかわる	○光電効果	○電気光効果	電気が光にかわる
圧力が電気にかわる	○圧電効果 (ピエゾ効果)	○逆圧電効果	電気が圧力にかわる (逆ピエゾ効果)
磁気と電気の相互作用	○磁電効果	○電流磁気効果	電流と磁界の相互作用
熱と磁界の相互作用	○熱磁気効果	磁気熱効果	
光と磁気相互作用	○光磁気効果	○磁気光効果	磁界と光との相互作用
力を加えると磁界が生ずる	○逆磁歪効果 (ヒュリ効果)	○磁歪効果	磁界によってひずみが生じる (ジュール効果)
	熱光効果	光熱効果	
	圧光効果	光圧力効果	
	熱圧効果	圧熱効果	

○は現在、効果として知られているもの

残りの2つのタイプの制約は前の2つと異なり、制約を満足する時空強度関数や時空強度関数の組合せすべてを枚举することはできない。それは、任意の時空強度に関する時空強度関数の総数 $|(Q^i)^F|$ は、局所時空系の時空セグメントへの分割方法が連続であることから、有限個とはならない。

物理法則と効果

物理制約記述の無限性問題を解決するために導入されるのが物理法則 (physical laws) や効果 (effects) である。表 3.1 に効果の分類を示す。

物理法則や効果は、個々の事象を対象とするのではなく、一般化された事象に対する局所的な制約を内包的に与えるものである。たとえば、時空強度関数に関する制約の場合を考えてみると、 $\text{PhC-II}^i : (Q^i)^F \rightarrow B$ に対して、物理法則群 $\text{PL-II}_j^i (j = 1, \dots, M)$ が存在する。それぞれの物理法則 PL-II_j^i は、以下の条件を満足する $(Q_j^i)^F \subset (Q^i)^F$ を内包的に定める。

$$(Q_j^i)^F = \{x \in (Q^i)^F \mid \text{PL-II}_j^i(x) = t\}$$

$$y \notin (Q_j^i)^F \Rightarrow \text{PhC-II}^i(y) = \text{nil} \quad (3.41)$$

すなわち、物理法則 PL-II_j^i は、物理制約 PhC-II^i を満足することのできない時空強度関数を排除する役割をもつ。たとえば、 $\text{PL-II}_j^i(x) = \text{true}$ なる時空強度関数 x は、物理制約 PhC-II^i を満足する可能性があるが、 $\text{PL-II}_j^i(x) = \text{nil}$ なる x は PhC-II^i を必ず満足しない。

物理制約 PhC-II^i を満たす時空強度関数 x は、すべての物理法則に関して $x \in (Q_j^i)^F$ でなくてはならないから、物理制約 PhC-II^i を満足する時空強度関数全体 $(\text{PhC-II}^i)^{-1}(t)$ は次のようにそれぞれの

物理法則を満足する時空強度関数集合の積となる。

$$(\text{PhC-II}^i)^{-1}(t) = (Q_1^i)^F \cap (Q_2^i)^F \cap \dots \cap (Q_M^i)^F \quad (3.42)$$

ただし、物理法則が不十分であるときには、式(3.42)は'左辺 ⊂ 右辺'となる。また物理法則が過剰で物理制約で存在しえるものを排除してしまう場合には'左辺 ⊃ 右辺'となる。

式(3.42)で示されるように、物理制約を表現する時空強度に関する物理法則の数が有限であれば、任意の時空強度関数が物理制約 PhC-II^i を満足するかどうかを有限回の手続きにて求めることができる。

時空強度関数の組合せの制約 (PhC-IV) の場合にも同様に物理法則を考えることができる。物理法則群 $\text{PL-IV}_k (k = 1, \dots, L)$ は以下の条件を満足する部分集合 $Q_k^{PL} \subset (Q^1)^F \times \dots \times (Q^N)^F$ を内包的に定める。

$$Q_k^{PL} = \{(x_1, x_2, \dots, x_N) \in (Q^1)^F \times \dots \times (Q^N)^F \mid \text{PL-IV}_k(x_1, x_2, \dots, x_N) = t\} \quad (3.43)$$

ただし、

$$(y_1, y_2, \dots, y_N) \notin Q_k^{PL} \Rightarrow \text{PhC-IV}(y_1, y_2, \dots, y_N) = \text{nil}$$

これにより、物理制約 PhC-IV を満足する時空強度関数の組合せは、

$$\text{PhC-IV}^{-1}(t) = Q_1^{PL} \cap Q_2^{PL} \cap \dots \cap Q_M^{PL} \quad (3.44)$$

として求めることができる。

有限物理世界では、時空強度関数 p^i による時空強度分布はセグメント化された時空強度関数 \bar{p}^i 、さらには状態素集合 P^i として表されるから、物理法則 PL-II_j^i や PL-IV_k も、状態素集合を評価対象としてその存在可能性を判別する。すなわち、たとえば、式(3.41)で導入した $(Q_j^i)^F$ は、状態素集合を用いて次の形式に書き換えることができる。

$$(Q_j^i)^F = \{P^i \in \mathfrak{P}^i \mid \text{PL-II}_j^i(P^i) = t\} \quad (3.45)$$

時空強度関数の組合せの制約に関する式(3.43)も、複数の時空強度における状態素集合の間の制約として同様に書き換えることができる。

3.3.3 場

電場、磁場、重力場など、一般に場 (field) はある特定の性質を有した空間領域をあらわす概念として用いられる。場は、それ自身は永続的ではなく、他の<存在物>によって生起される⁶。

ただし、生起する、生起される、といった関係は、必ずしも物理的に明確な定義を有する概念ではない。すなわち逆に解釈して、場の存在が<存在物>を生起していると解釈しても問題を生じない。たとえば、電界の存在が電荷を存在させると考えても不都合はない。

重要なことは、場を生起している<存在物> (これを A とよぶ) と場 (これを B とする) の間に、A の存在するときには必ず B が存在する、という共起性が成立することであり、こうした共起性を規定するのが物理法則である。

⁶たとえば、電場に対する電荷、重力場に対する質量

また、場の概念を考える上でもうひとつ大事なことは、場は、その時空領域内を占めている物質により直接に生じられるのではなく、時空領域外の、遠隔の<存在物>により生じられる点である。たとえば、電場を考える上で、電場の存在している空間を占めている物質は、誘電率という時空強度により電界強度に影響を与えているが、電場の存在そのものと共起性は有していない。電場の存在と共起性を有しているのは電場の外にある電荷である。すなわち場は、その場の存在している時空領域の物質によって発現しているのではないと考える。

有限物理世界における場は、特定の時空強度に属する状態素であると定義する。すなわち、時空強度の集合 Ω を物質に依存しない時空強度の集合 Ω^* と、物質に依存する時空強度の集合 Ω' の2つに分け、 $Q^i \in \Omega^*$ に関する分布 P^i に含まれる任意の状態素 I_j^i が場であるとする。たとえば、平行板コンデンサの電場は、電界の強さという時空強度でみたときの、ベクトル量を時空強度値とする状態素により表現される。

3.3.4 作用

場が場以外の状態素と異なる点は、場の内部の物質との非共起性に加え、場の時空領域の中にある他の<存在物>に対して、なんらかの影響を与え得ることである。このことにより、場を生起している<存在物>と、場から影響を受けている<存在物>との間の作用を媒介するものとしての役割を場は担っている。

ただし、場の生起に関する議論と同様に、場とそこでの<存在物>の変化との間の影響関係の有無は必ずしも明確に定められるものではない。つまり、場の影響範囲において変化が生じたからといって、その変化は場に起因するものであるとは、必ずしも言えない。自発的に生じる変化も有り得るし、異なる時空強度の場が同じ時空領域に存在している場合もある。

場と変化の影響関係も、結局は場の存在と変化の発生との間の共起性の問題として解釈する必要がある。物理的な共起性については3.3.9において、因果関係としてさらに詳しく考察することとし、ここでは、影響関係の有無が判別できるものとして議論を進める。場が他の<存在物>に対して影響を与えたときに、それを場の作用(action)とよぶことにする。

ここでの議論において、場を生起したり、場から作用を受ける主体に対して、<存在物>という用語を無定義で用いてきたが、有限物理世界における<存在物>とは何であろうか。それは、場や作用に関わる共起性や変化といった物理的な概念を、形式的に定義できるようなものでなくてはならない。

有限物理世界において、場を生起するもの、および場から作用をうけるものは、状態素あるいは状態素の集合である。場からの作用による変化は、単一の状態素の位置、姿勢、形状などの空間的属性的変化、空間的属性的変化に付随する複合的な物理属性的変化、あるいは複数の状態素によって表される空間領域の時空強度値の時間的変化として表現される。

3.3.5 状態

一般に物理世界における対象(ものや系)の状態(state)は、観測している物理パラメータを軸として構成される状態空間上の点(あるいは領域)として定義される。いま、ある対象が v_1, \dots, v_n の n 個の物理パラメータの値により観察され、識別されるとき、その対象の状態は n 次元の状態空間内における座標 $v = (v_1, \dots, v_n)$ として、 n 次元のベクトルにより記述できる。

こうした定義される状態は、観測に用いる物理パラメータと、それらの組の選択の方法に依存し、先に定義を与えた有限物理世界の状態素に比べると、恣意的な概念といえる。

それでは、状態空間を与えられたとき、状態は有限物理世界でどのように定式化されるであろうか。いま、状態を考える対象としてある時空領域 $D \in \mathcal{D}$ を選び、それに対して観測すべき状態ベクトルとして $v = (v_1, \dots, v_n)$ を考える。

任意の時点 t_a における時空領域 D の状態を考えるために、まず、有限物理世界 $FPWF$ のすべての時空強度 P^i ($i = 1, \dots, N$) に関して、 t_a でのスナップショットを考える。

$$P^1|_{t=t_a}, P^2|_{t=t_a}, \dots, P^N|_{t=t_a} \quad (3.46)$$

次に、それぞれのスナップショットを時空領域 D に制限したもの—局所時空系 F の部分集合 D における有限物理世界のスナップショット—を求める。

$$P^1|_{t=t_a}^D, P^2|_{t=t_a}^D, \dots, P^N|_{t=t_a}^D \quad (3.47)$$

このスナップショットに含まれる時空強度、空間的屬性、時間的屬性から、時空領域 D の物理パラメータを求めることができる。よって、状態ベクトルは以下のように状態を考える時空領域と時点の関数として与えられる。

$$v(D, t_a) = (h_1(P^1|_{t=t_a}^D, \dots, P^N|_{t=t_a}^D), \dots, h_n(P^1|_{t=t_a}^D, \dots, P^N|_{t=t_a}^D)) \quad (3.48)$$

ただし、 h_i は、状態を記述する i 番目の物理パラメータを、STL-1 ~ STL-N のスナップショットより導出する関数である。

また、状態記述の物理パラメータとして時間変化量(たとえば速度)を用いる場合には、内部状態素集合の時間的に近接する複数のスナップショットから導出すればよい。

いま、式(3.48)で与えられる時空領域の状態ベクトルの値を、時間区間 $\bar{T} \subset T$ の上の同値関係とすることにより、時間区間 \bar{T} は等しい状態ベクトルをもつ有限個の部分時間区間へと直和分割される⁷。

$$\bar{T} = \bar{T}_1 \oplus \bar{T}_2 \oplus \dots \oplus \bar{T}_M \quad (3.49)$$

各 \bar{T}_i は、 $v(D, t)$ に関して同値類であるから、

$$t_a, t_b \in \bar{T}_i \implies v(D, t_a) = v(D, t_b) \quad (3.50)$$

であり、かつ、

$$t_a \in \bar{T}_i, t_b \in \bar{T}_{i+1} \implies v(D, t_a) \neq v(D, t_b) \quad (3.51)$$

である。

\bar{T}_i の内部の時点における状態ベクトル $v(D, t)$ は常に一定の値を有するから、それを $v(D, \bar{T}_i)$ とあらわす。直和分割している時間区間と、そこにおける状態ベクトルの組

$$H_i = (\bar{T}_i, v(D, \bar{T}_i)) \quad (3.52)$$

を、状態区間(state interval)、区間状態を時間の順序にならべた列

$$H_1 \rightarrow H_2 \rightarrow \dots \rightarrow H_i \rightarrow H_{i+1} \rightarrow \dots \rightarrow H_M \quad (3.53)$$

を、時空領域 D 、時間区間 \bar{T} における v に関する状態区間列(state interval sequence)とよび、これを $H(D, \bar{T}, v)$ と表すことにする。

⁷部分時間区間が有限個であることは、有限物理世界の3つの仮定より導くことができる。

3.3.6 状態変化

状態変化 (state change) または状態遷移 (state transition) は状態区間列

$$H(D, \bar{T}, v) = H_1 \rightarrow \dots \rightarrow H_M \quad (3.54)$$

における隣接する状態区間列 $H_i \rightarrow H_{i+1}$ の状態ベクトルの変化

$$v(D, \bar{T}_i) \rightarrow v(D, \bar{T}_{i+1}) \quad (3.55)$$

として定式化することができる。

ここで定義する状態変化は、変化前後の状態ベクトルにのみ依存し、変化の起こる時空領域に関係しない。

3.3.7 事象

状態変化が状態ベクトルの変化のみに関係し、変化が生じた局所時空系の座標によらない概念であるのに対し、事象 (event) は、いつ、どこで変化したのか、といった場所と時刻に依存した概念である。同じ状態変化であっても、それらの生じる局所時空系における位置が異なれば、それらは異なる事象であると考える。

よって、事象はそれの生じる空間領域、時点、状態変化の組

$$(D, t, v \rightarrow v') \quad (3.56)$$

により記述される。

これら3つの項は、時空領域 D の状態区間列において、事象に対応する隣接する2項 $H_i \rightarrow H_{i+1}$ より導出される。すなわち、状態変化は

$$H_i = (\bar{T}_i, v), H_{i+1} = (\bar{T}_{i+1}, v') \quad (3.57)$$

のそれぞれの第2項から得られ、時点および空間領域も、

$$t = \text{End}(\bar{T}_i) = \text{Start}(\bar{T}_{i+1}), \quad S = \theta(D)|_{t=t} \quad (3.58)$$

から求められる。よって、状態区間の対を用いた

$$\text{event}(H_i \rightarrow H_{i+1}) \quad (3.59)$$

にて事象を表すこともある。

3.3.8 状況

状況 (situation) は、状況とは、有限物理世界 $FPW^F = (P^1, \dots, P^N)$ の記述を、関心のある時空領域ならびに時空強度に限定したものと考える。いま、関心のある時空領域を D 、関心のある時空強度を

$$P^{i_1}, \dots, P^{i_m} \quad (1 \leq i_1 < \dots < i_m \leq N) \quad (3.60)$$

とすると、状況は

$$(P^{i_1}|^D, \dots, P^{i_m}|^D) \quad (3.61)$$

として与えられる。ただし、状況という概念が、「AとBとは同じ状況である」という様に用いられることからわかるように、状況は、絶対位置 (時空座標) に対して不変なもの (仮にそれをパターンとよぶ) により識別される。

よって、状況に対しては空間的、時間的に異なる有限物理世界の部分を類別する同値関係が定義される。

状況は、事象が生起する前提条件と、事象が生起したことによって生じる結果を明示するための重要な概念である。

3.3.9 因果関係

われわれが物理現象を解釈し、理解する上において、物理現象の間には因果の連鎖 (因果関係) が存在すると仮定している。しかしながら、因果関係は物理的な客観的存在ではなく、現象を時系列に秩序付ける、人間によるひとつの解釈 (因果理解) である、という考え方もある (たとえば、[田中 89] に詳しい)。

有限物理世界における物理的諸概念は、4次元の時空系の構造の中において定義されており、時間的な先行関係は存在物の存在可能性に直接には影響しない。これは、存在を規定する順序と時間軸上に現われる順序とが同一である必要はなく、時間的に後に存在するものが、先行するものを存在させるものとしてもかまわない。よって、ここでは因果関係という時間的順序関係を内在させた概念は、物理的諸概念の定義から注意深く排除する。本論文では因果関係の代わりに共起性の概念を用いてきた。ここで有限物理世界における共起性に対して定義を与えることとする。

時空強度関数の集合 $(Q^i)^F$ において、ある局所パターン P_1, P_2, \dots をもつ時空強度関数の集合を $(Q^i)^F / \{P_1, P_2, \dots\}$ と配すこととする。いま、2つの事象 A, B を考え、時空強度関数におけるそれぞれのパターンを P_A, P_B とする。また、物理制約を満足する時空強度関数の集合は式 (3.42) で与えたとように $(\text{PhC-II}^i)^{-1}[t]$ とする。次の条件を満足するとき、事象 B は事象 A に対して共起性を有するといふ。

$$((Q^i)^F / \{P_A\}) \cap ((\text{PhC-II}^i)^{-1}[t]) = ((Q^i)^F / \{P_A, P_B\}) \cap ((\text{PhC-II}^i)^{-1}[t]) \quad (3.62)$$

この式は、事象 A のパターン P_A を含む時空強度関数は、必ず事象 B のパターンを含むという条件を示している。すなわち、事象 A が起きるときに、事象 B が必ず起きれば、事象 B は事象 A に対して共起性を有すると定義する。定義より明らかなように、共起性は対称ではなく、事象 B が事象 A に共起性を有していても逆は必ずしも真ではない。これは、因果関係の文脈で考えると、原因に対して結果は一意に定まるが、同じ結果を得る原因は複数存在し得る、ということに対応する。

この定義では、事象のパターンの時空系での位置関係は共起性の成立の可否には影響しない。しかしながら、人間の思考で因果関係を認められるためには、この共起性の成立に加えて、事象の間の空間的、時間的近接性が必要とされる [de Kleer 84a]。この因果関係における空間的、時間的近接性の条件を取り込んでいるのが、すでに述べた場の作用の概念である。場による作用は、局所時空系における時空領域に限定されている。これはすなわち、空間的、時間的近接性の条件となっている。よって、有限物理世界における因果関係は、場による作用の連鎖として理解するのが、最も自然であると考えられる。

3.4 有限物理世界における対象の形式化

これまで導入した概念はあくまで局所時空系における点や領域を考察の対象としており、いわゆるわれわれがふだんの思考を行なう際の取り扱いの単位である \langle もの \rangle や \langle 実体 \rangle に対応した概念は現われなかった。これは、2.3においてすでに述べたように、われわれが日常において \langle もの \rangle や \langle 実体 \rangle とよぶものが、物理世界な意味合いにおいて明確な定義を有さない、恣意的な概念であることがその原因である。

しかしながら、物理世界をあるまとまりとして記述し、操作するための手段として、なんらかの \langle もの \rangle に対応した概念は必要である。ここでは、そうした \langle もの \rangle に代わる概念を、有限物理世界の上に構築していく。

3.4.1 有限物理世界と物質

\langle もの \rangle を議論するまえに、物理世界を構成する上で基本となる物質とその分布についてまず考える。身の回りにある物理的な対象としての \langle もの \rangle は、なんらかの物質により構成されている。氷のかけらは水(H_2O)でできているし、鉛筆は木材と炭素などからできている。

ただし物理世界を詳細にみると、物質は \langle もの \rangle を稠密に占めているわけではなく、 \langle もの \rangle を構成する物質の原子や分子が \langle もの \rangle の空間中にまばらに分布しているのが実際である。さらには、物質を構成しているのは必ずしも同一の種類の原子や分子ばかりではなく、複数の種類の原子や分子が混在している場合も多い(たとえば、空気、溶液、合金など)。

有限物理世界における物質の概念を考える上では、分子や粒子により物質が構成されているという微視的なとらえ方ではなく、連続で均一な物質が空間を占有しているという巨視的なとらえ方を採用する。

たとえば、ある容器中に空気が充填されている場合には、 N_2 や O_2 などの分子が分布しているのではなく、 \langle 空気 \rangle という物質が稠密にその空間を占有しているとして考える。

このした考え方に基づくと、局所時空系の任意の点に関して、そこを占めるなんらかの物質(ただし、真空を含む)が一意に定まる。また、先に述べた時空強度値の有限性と分布の有限性についての仮定を満足していることから、物質を局所時空系の時空強度のひとつとして考えることができる。

3.4.2 物理実体の導入

本研究においては、有限物理世界における \langle もの \rangle に物理実体(physical entity)という名前を与えることとする。物理実体は、一意に与えられる名前 e と、局所時空系における存在を示す時空領域 D の組 (e, D) により定まる複合概念として定義する。

すなわち、物理実体を区別するための識別子の集合 E を考え、これを実体識別子集合とよぶ。また、局所時空系 F に対して、実体識別子集合 E から局所時空系 F における時空領域の集合 \mathcal{D}_F への対応を与える写像 $\theta: E \rightarrow \mathcal{D}_F$ を実体化写像とよぶ。 $\theta(e_i) \in \mathcal{D}_F$ は、実体識別子 e_i の指示する実体の存在する時空領域をあらわしている。ただし、 $\theta(e_i) = \phi$ のとき、実体識別子 e_i の指示する実体は、局所時空系 F には存在しないものとする。

実体の存在する時空領域の定め方、すなわち、実体化写像 θ の定め方に関して物理的な制約は存在せず、観測者(表現者)の恣意により、いかなる対応付けも許される。

しかしながら、 \langle もの \rangle を認識するためには、 \langle もの \rangle の内と外を切り分け、他の \langle もの \rangle との区別を与える明確な境界が必要である。しかしながら、この境界を形式的に一意に与える方法はない。このことに関して、ワインベルグ(G.M. Weinberg)は彼の一般システム論において次のように述べている[Weinberg 75]。

必ずしもすべてのシステムが物理的に目に見える形をしているわけではないので、境界という考え方は一般に言葉の上の考えにすぎない。たとえ物理的な境界を持つシステムを扱う場合でも、その判定が困難な場合があることを見てきた。これは境界として何をとるかが経験とか慣習とかに大いに左右されるからである。 — 中略 — たとえば、境界を策定する場合、容易に認識できる物理的特徴に強く影響される。色の差、手ざわりのちがひ、固体と液体の接触面、液体と気体の接触面……このようなところがよく境界として策定される。ところが、固く結合されて一体となって移動している2つの固体間に境界を策定するのは、何となくちゅうちょされる。

有限物理世界においては、時空強度値の変化する境界(状態素の境界)が、物理的にもっとも自然な境界を与えると考える。特に、物質に関する状態素が \langle もの \rangle を与えていることが多い。

また、さきに物理実体は観測者(あるいは表現者)の恣意によって局所時空系の上に定められると述べたが、実際には局所時空系の分割のされかた(状態素集合)と無関係では有り得ない。多くの場合、物理実体の境界は、どれかの時空強度による状態素の境界と一致しているはずである。状態素境界と一致しない例としては、“ブロックAの左半分”という物理実体の境界がそうであり、“ブロックAの左半分”と“ブロックAの右半分”とを分けるているのは、空間的な座標値のみであり、時空強度値は関与していない。

存在範囲を局所時空系 F における時空領域としたことにより、物理実体は一般的な \langle もの \rangle よりも以下の点で制限された概念となっている。

1. 物理実体は空間的に連続なスナップショットをもつ。すなわち、空間的に交わりをもたない複数の時空領域をまとめてひとつの物理実体とすることはできない。
2. 物理実体は時間的に連続して存在する。すなわち、時間的に分断されている複数の時空領域をまとめて物理実体とすることはできない。
3. 物理実体は永続的ではない。すなわち、途中で発生あるいは消滅することがある。
4. 物理実体はお互いに排他的ではなく、局所時空系において重なりをもつことができる。

物理実体という恣意的な概念を有限物理世界に導入することの利点は、複数の時空強度によりそれぞれ分割された局所時空系の各部分を、物理実体というひとつの思考の単位へとまとめることにある。

以上述べた物理実体の考え方を以下にまとめる。

1. 物理実体は、局所時空系の上の関心のある領域を分節するための便宜的な概念である。
2. 物理実体の境界の多くは、状態素の境界と一致する。
3. 物理実体は、複数の状態素を空間的、時間的、時空強度的にとりまとめる働きがある。

物理実体と時空強度分布、状態素との関係を概念的にあらわしたものを図3.5に示す。

次に有限物理世界から導出される、物理実体に関する属性や関係について述べる。

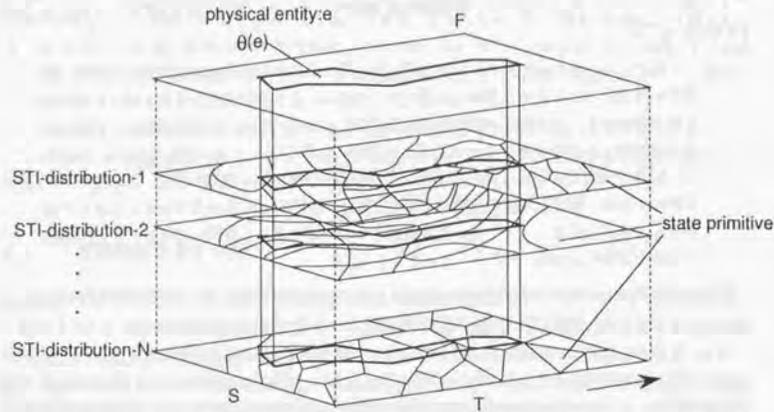


Figure 3.5: 時空強度分布, 状態素と物理実体

3.4.3 物理実体の形状, 位置, 姿勢

まず, 物理実体の基本的な属性である形状と位置, 姿勢について考える。運動を行なう物理実体であれば位置や姿勢は, 観測する時点により異なり, 形状に関しても, 変形や分割, 合成などによって変化する。よって, 形状, 位置, 姿勢は時間に依存した概念であることがわかる。実体識別子 e により指示される物理実体の時点 t_a における形状, 位置, 姿勢は以下のように与えられる。

形状: $shape(\theta(e)|_{t=t_a})$

位置: $position(\theta(e)|_{t=t_a})$

姿勢: $orientation(\theta(e)|_{t=t_a})$

物理実体の時点 t_a における体積や面積といった空間的な属性は, 時点 t_a における形状から計算できる。

3.4.4 物理実体と時空強度値

次に, 分布 P^i における, 物理実体 e の STI- i の値を考える。物理実体の時空領域 $\theta(e)$ が状態素の持つ時空領域と一般には一致しないため, 時空強度は物理実体の存在する時空領域において複数の値をもちうる。

STI- i に関する状態素集合

$$P^i = \{ P_1^i \dots P_j^i \dots P_N^i \}$$

の各状態素 P_j^i と, 物理実体の存在する時空領域 $\theta(e)$ から, 次の集合をつくる。

$$\{(D, q) \mid j = 1, \dots, N, D = seg(P_j^i) \cap \theta(e) \wedge D \neq \phi \wedge q = val(P_j^i)\} \quad (3.63)$$

これは, STI- i に関して物理実体 e の内部が, 状態素によりどのように分割されているかを表している。

物理実体を分割している各要素を内部状態素 (internal state primitive), 内部状態素の集合を内部状態素集合 (internal state primitive set) とよぶ。

分布 P^i における物理実体 e の内部状態素集合は, P^i を物理実体 e の存在時空領域に制限したものであるから, $P^i|_e$, 同様に物理実体 e の内部状態素を $P^i|_e, P_j^i|_e, \dots$ と表すこととする。

内部状態素の定義より明らかのように, 内部状態素 $P^i|_e = (D, q) \in P^i|_e$ に対応する状態素は

$$P^i = (D', q) \in P^i, \text{ where } D' \in F^i \wedge D' \cap D \neq \phi \quad (3.64)$$

として一意に定まる。この内部状態素集合から状態素集合への写像を,

$$\sigma: F^i \times P^i|_e \rightarrow P^i \quad (3.65)$$

とおく。

内部状態素 $P^i|_e$ の時空領域と時空強度値を与える写像をそれぞれ seg', val' とすると, それらは σ を用いることで

$$seg(P^i|_e) = seg(\sigma(P^i|_e)) \cap \theta(e) \quad (3.66)$$

$$val(P^i|_e) = val(\sigma(P^i|_e)) \quad (3.67)$$

と定義できる。

式(3.37)において定義した, 状態素集合に対するスナップショットと同様に内部状態素集合 $P^i|_e$ の時点 t_a におけるスナップショットを次のように定義し, $P^i|_{t=t_a}$ と記す。

$$P^i|_{t=t_a} = \{(X, q) \mid P_j^i|_e \in P^i|_e, X = seg(P_j^i|_e)|_{t=t_a} \in \mathfrak{R}, X \neq \phi, q = val(P_j^i|_e)\} \quad (3.68)$$

物理実体 e が時点 t_a においてどのような STI- i に関する値をもっているかは, 内部状態素集合 $P^i|_e$ の時点 t_a におけるスナップショット

$$P^i|_{t=t_a} = \{(D_1, q_1^i) (D_2, q_2^i) \dots (D_N, q_N^i)\} \quad (3.69)$$

により求められる。すなわち,

物理実体の空間領域 D_1 においては値 q_1^i , D_2 においては値 q_2^i , ..., D_N においては値 q_N^i

という形で, 物理実体の任意の時点における任意の時空強度に関する時空強度値を, 内部構造を含めて求めることができる。

3.4.5 物理実体の物理的属性

有限物理世界における基本的な量である空間的、時間的諸属性、時空強度値(これらを基本物理属性とよぶ)の組合せとして、さまざまな物理実体の物理的属性が導出できる。こうした有限物理世界の基本物理属性の組合せから得られる物理量を総称して複合物理属性とよぶ。たとえば、物理実体の“質量”という物理概念は、質量を求める範囲を V 、微小体積要素を dv 、そこにおける密度を ρ として、

$$\int_V \rho(s, t) dv \quad (3.70)$$

で与えられる。 ρ が定数であれば、これは ρV となるが、一般には ρ は場所と時間に依存する量である。そのため、有限物理世界における質量は以下のように求められる。

まず、密度は局所時空系の各点に対して定義されており、時空強度のひとつである。いま、密度に関する状態素集合を、 P^{ρ} とする。先の項において述べたように、時点 t_0 における物理実体 e の内部状態素集合のスナップショットを $P^{\rho}|_{t=t_0}^e = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ とすると、密度は以下のように定まる。

$$\begin{aligned} \text{空間領域 } \phi_s(a_1) \text{ においては密度 } \rho &= \phi_s(a_1), \quad \phi_s(a_2) \text{ においては } \rho = \phi_s(a_2), \dots \\ \phi_s(a_n) \text{ においては } \rho &= \phi_s(a_n) \end{aligned}$$

こうして求まる密度 ρ を用いると、式(3.70)は

$$\sum_{i=1}^n (\phi_s(a_i) \times \text{vol}(\phi_s(a_i))) \quad (3.71)$$

のように総和の形に書き換えることができる。ただし、式中の vol は空間領域の体積を与える関数とする。

物理実体は融合や分離が起こり得るため、質量も不変ではない。“時点 t_0 における質量”のように、質量について述べるときには時点(すなわちスナップショット)を明示的に指定する必要がある。

次に、速度が有限物理世界においてどのように定式化されるかをみてみる。局所時空系における点の運動の平均速度は、運動の始点 a 、運動の終点 $b \in F$ に対して、

$$\text{proj}_S\left(\frac{\vec{ab}}{|\text{proj}_T(\vec{ab})|}\right) \quad (3.72)$$

として与えられる。これは、局所時空系において時間の経過と空間の移動を表すベクトル \vec{ab} を、時間軸上への射影した長さが1になるように正規化したベクトルの空間に関連した成分として考えることができる。空間と時間の関係を逆にとった

$$\text{proj}_T\left(\frac{\vec{ab}}{|\text{proj}_S(\vec{ab})|}\right) \quad (3.73)$$

は、単位距離だけ空間を移動するのに要する時間区間長をあらわす。

物理実体の運動における速度の算出には、物理実体の時空領域から適当な2点を取り出す必要がある。いま、物理実体 e の時点 t_0 と $t_0 + \delta t$ の間の平均速度を求めてみる。物理実体の占める時空領域 $\theta(e)$ の l_0

および、 $t_0 + \delta t$ におけるスナップショットから、それぞれの時点における物理実体の位置は3.4.3において述べたように、それぞれ $s_0 = \text{position}(\theta(e)|_{t=t_0})$ 、 $s_{\delta t} = \text{position}(\theta(e)|_{t=t_0+\delta t})$ と定めることができる。よって、 $a = (s_0, t_0)$ 、 $b = (s_{\delta t}, t_0 + \delta t)$ とおくことで、式(3.72)により平均速度が求まる。同様の考え方により、加速度や回転速度、慣性モーメント、熱容量などの物理的な属性も、空間、時間、時空強度の基本物理属性の組合せから構成される複合物理属性である。

見方を変えると、複合物理属性それぞれが、有限物理世界の何に対して、どのように定義される量であるかが、明示的に表現されており、このことは物理世界の形式化において重要なことである。

3.4.6 物理実体間の関係

物理実体間のさまざまな関係は、それらの占有する時空領域の関係から導出される。たとえば、物理実体 e_i と e_j の時点 t_0 における位置関係は、それぞれの t_0 における空間領域 $\theta(e_i)|_{t=t_0}$ と $\theta(e_j)|_{t=t_0}$ から、 $s_i = \text{position}(\theta(e_i)|_{t=t_0})$ 、 $s_j = \text{position}(\theta(e_j)|_{t=t_0})$ とし、 $\vec{s_i s_j}$ により定められる⁸。

また、物理実体の包含関係に関して、 $\theta(e_i) \subset \theta(e_j)$ であれば、物理実体 e_i は物理実体 e_j に“常に含まれる”と言えるし、 $\theta(e_i) \cap \theta(e_j) \neq \emptyset$ であれば、物理実体 e_i と e_j は“時空領域において干渉している”、といえる。

このように、物理実体に関するさまざまな関係は、局所時空系においてそれらが占有している時空領域間の関係として取り扱うことができる。物理実体に関する関係を局所時空系において取り扱うことで、関係の継続性に関する側面—たとえば、常に成り立つのか、あるいは一時的に成立すればよいのかなど—が明示されるという利点を有する。

3.4.7 物理実体の挙動

物理実体に関する挙動あるいは振舞い (behavior) という概念は、通常、少なくとも2つの見方がされている。ひとつは、ある瞬間において、対象がどのように変化するか、という差分としての見方であり、もうひとつは、ある期間においてどのように変化してきたか(あるいは、どのように変化しなかったか)という履歴としての見方である。前者の例としては「ベース電圧を0Vにした時のトランジスタの挙動」、後者の例としては「連成振子の挙動」などが該当する。

有限物理世界においては、状態の差分としての挙動も履歴としての挙動も、どちらも内部状態素集合により定式化できる。物理実体 e の挙動の履歴は、その内部状態素集合

$$P^i|_e \quad (i = 1, \dots, N) \quad (3.74)$$

そのものであり、また差分としての挙動は、各時空強度についてある時点 t_0 における内部状態素集合のスナップショットと、 δt だけ時間経過した時点でのスナップショットの対

$$P^i|_{t=t_0}^e \rightarrow P^i|_{t=t_0+\delta t}^e \quad (3.75)$$

として定式化できる。

⁸関係の定義は一通りである必要はなく、恣意的である。

先に述べた事象と挙動との違いは、事象は2つの状態区間の関係、挙動は内部状態素集合のスナップショット間の関係である。挙動の方が事象と比べ基本的であり、事象は挙動の概念に包含される。すなわち、事象はある観点(状態の選定)からみた変化(状態変化)であるのに対して、挙動は有限物理世界を記述されるすべての時間強度および空間的性質の時間経過に伴う変化を含む。

3.5 離散物理世界

物理的な面から設計をとらえると、局所時空系 F に対して有限物理世界 FPW^F を定め、その上に物理実体を割り付けていくプロセスと考えることができる。有限物理世界は、時空強度に関する3つの有限性の仮定を導入することでその複雑さを減じてはいるが、設計対象表現の枠組みとしては、依然として時空の自由度が大きく、表現(あるいは指定)に多大な記述を必要とする。

そこで、本節においては設計対象表現の枠組みの構築を目的に、時空強度に関する有限性に加えて記述に対する離散性を物理世界に取り入れた離散物理世界の概念を導入する。さらに離散物理世界による有限物理世界の近似的表現について述べる。

3.5.1 有限物理世界への離散性の導入

空間領域 S と時間区間 T の直積により作られる時空領域 $S \times T$ を定時空領域(constant spatiotemporal region) とよび、 \bar{D} , D_i, \dots と記す。また、局所時空系 F における定時空領域の集合を \mathcal{D}_F と記す⁹。任意の定時空領域は時空領域でもあるから、 $\mathcal{D}_F \subset \mathcal{D}$ である。

ここで、定時空領域 $\bar{D} = S \times T$ の持つ性質をまとめておく。

1. 任意の時点 $t_i, t_j \in T$ における定時空領域の断面は、常に S に等しい。

$$\bar{D}|_{t=t_i} = \bar{D}|_{t=t_j} = S \tag{3.76}$$

2. 任意の空間位置 $s_i, s_j \in S$ における定時空領域のスパンは、常に T に等しい。

$$\bar{D}|_{s=s_i} = \bar{D}|_{s=s_j} = T \tag{3.77}$$

3. 2つの定時空領域の共通部分は、定時空領域である。

$$\bar{D}_i, \bar{D}_j \in \mathcal{D} \iff \bar{D}_i \cap \bar{D}_j \in \mathcal{D} \tag{3.78}$$

4. 2つの定時空領域の間の空間関係、時間関係はそれぞれ一意に定まる。

2つの定時空領域の間の定性的な関係のひとつの例を図3.6に示す。ここでは、空間の間の定性関係として7つの包含・隣接関係、時間区間の間の定性関係として、アレン(J.F. Allen)による13の先行関係[Allen 83]を用いて表している。

定時空領域に対し、STI-iの時空強度値を与えたものをSTI-iの定状態素(constant state primitive)とよび、 P^i, P_j^i, \dots と記す。定時空領域 $\bar{D} = S \times T$ に対して、時空強度値 q_j^i を与えた定状態素を、その構成を明示するために (D, q_j^i) あるいは $(S \times T, q_j^i)$ と記すこともある。

⁹局所時空系 F が自明の時には、 \mathcal{D} と添え字を省略する。

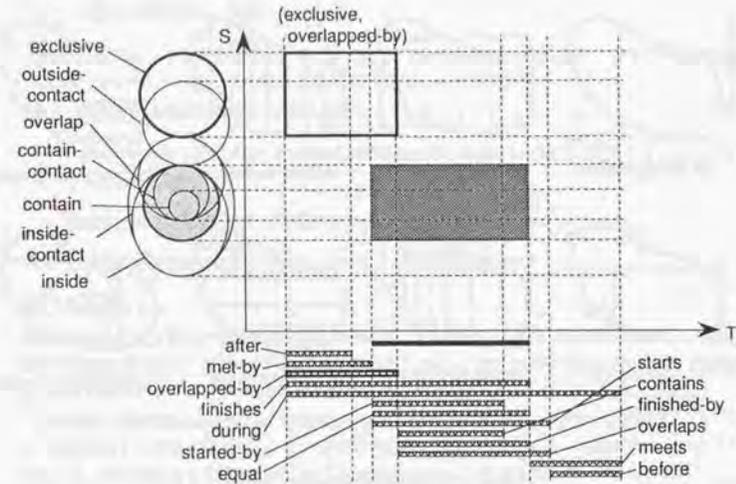


Figure 3.6: 定時空領域の間に存在する定性的な空間、時間関係

状態素と定状態素との違いは、状態素がその存在時間区間においてその形状、姿勢、位置などの空間的屬性を変化させ得るのに対して、定状態素はそれらが固定されている点である。

ここで、状態素を定状態素を用いて近似することを考える。図3.7に示すように、ある状態素の定状態素による近似の方法としては、

1. 単一の定状態素による近似(図中(h))
2. 時間軸にそって複数の定状態素を連続的に配置する近似(図中(c))
3. 空間的に複数の定状態素を連続的に配置する近似(図中(d))
4. 時空に対して複数の定状態素を連続的に配置する近似(図中(e))
5. 時間軸にそって複数の定状態素を離散的に配置する近似(図中(f))
6. 空間的に複数の定状態素を離散的に配置する近似(図中(g))
7. 時空に対して複数の定状態素を離散的に配置する近似(図中(h))

が考えられる。

(h)の近似は、近似される状態素の空間的屬性が大きく時間変化するときには、近似の精度が悪くなる。(c)-(e)の近似の方法は、定状態素を細かくとることで近似の精度を高めることができるが、記述量は増大する。(f)-(h)の離散的な近似法は、離散的に配置された定状態素により、状態素を部分的に記述

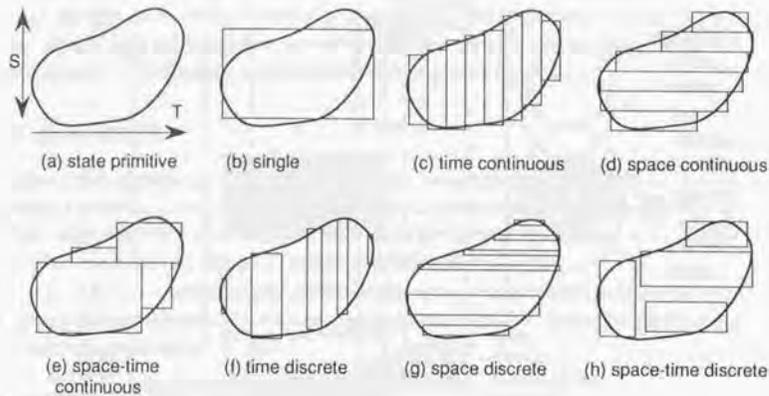


Figure 3.7: 状態素の定状態素による近似

する。定状態素によって覆われていない部分に対しては内挿や外延による推測を必要とするが、記述量は少なくてすむ。

われわれが、物理世界に対する近似的な理解の方法を考えてみると、時間軸にそって特徴的な状態を離散的に選び、それらを系列化することを多く行っている。たとえば、ある変化する対象に対しては、「この対象は、AからBになってCを経てDに至る」といった、時間軸にそって経路するいくつかの状態を列として変化する対象を理解すること(図3.7(f))は多いが、「この対象は、時間 t_a から t_b までの部分Aと、時間 t_c から時間 t_d までの部分Bよりなる」といったように、定常的な空間的部分の集合によりとらえること(図3.7(g))は少ない。

本研究では、有限物理世界の近似の方法は、時間軸にそって離散的に定状態素を配する方法を採用する。いま、局所時空系 F の分布 P^i を近似する定状態素の集合を離散分布近似集合あるいは単に近似集合とよび、 \bar{P}^i と記す。時空強度分布を近似する離散分布近似集合は複数考えられるから、それらを区別する際には、下添字を加えて、 $\bar{P}_1^i, \bar{P}_2^i, \dots$ と表記することとする。

有限物理世界の時空強度を離散分布近似集合により近似したものをここでは離散物理世界(discrete physical world)とよび、 DPW^F であらわす。すなわち、有限物理世界 FPW^F が、

$$FPW^F = \langle P^1, P^2, \dots, P^N \rangle \quad (3.79)$$

として与えられるとき、

$$DPW^F = \langle \bar{P}_1^1, \bar{P}_2^1, \dots, \bar{P}_N^1 \rangle \quad (3.80)$$

は有限物理世界 FPW^F に対するひとつの離散物理世界を与える。

3.5.2 離散物理世界の性質

離散物理世界は、有限物理世界の一類であるので、有限物理世界の諸概念は、そのまま離散物理世界にも適用できる。ここでは、離散物理世界に特有な性質のみを議論する。

まず、離散物理世界は定状態素を表現の基礎としていることにより、

- 定状態素の記述が空間領域、時間区間、時空強度値を定数として独立に指定することで行なわれる(記述の直交性)
- 空間領域が定状態素において不変である(空間領域の不変性)
- 定状態素間の関係が時間によらず一意に定まる(関係の一意性)

の3つの性質がある。

状態素が完全な4次元の連続な時空領域を対象としているのに対して、記述の直交性により、定状態素の時空領域は空間の3次元と時間の1次元が分離した3+1次元の形式で記述される。これは記述できる対象に制限を加えることで記述の容易性を得たことになる。

定状態素の空間領域の不変性は、定状態素の定義から直接に導かれる。任意の定状態素 $(\bar{S} \times \bar{T}, q^i)$ は、時間区間 \bar{T} の任意の時点において一定の時空領域を占有することから、空間的属性も一定である。さらには、定状態素の存在する時間区間 \bar{T} 内の任意の時点 t_a におけるスナップショット $(\bar{P}^i)_{t=t_a}$ は常に (\bar{S}, q^i) に等しくなる。

関係の一意性は、2つの定状態素 $P_a^i = (\bar{S}_a \times \bar{T}_a, q_a^i), P_b^j = (\bar{S}_b \times \bar{T}_b, q_b^j)$ の間の任意の関係は、これらの定状態素の共通に存在する時間区間 $\bar{T}_a \cap \bar{T}_b$ においては一定であることを述べている。状態素においては、空間的關係が時点によって変化した場合には、状態素間の関係は時点によって変化する可能性がある。定状態素においては、任意の関係 R に対して、 $R(P_a^i, P_b^j)$ の時間値によらずに成立、不成立を一意に決定できる。

また、定状態素により離散的に近似したことにより、有限物理世界と離散物理世界とは以下のような差異がある。

- 離散物理世界の定状態素の持つ空間領域が、有限物理世界の状態素の該当する時間区間における空間領域と一致しない(空間領域の不一致)。
- 定状態素が定義されないため、時空強度値が不定の時空領域が存在する(時空強度の不定性)。
- 物理実体の状態が不定となる時点が存在する(状態の不定性)。

空間領域の不一致が生じた場合には、時空強度値が有限物理世界と離散物理世界とで異なる値を有する局所時空系の点が存在してしまう。すなわち、有限物理世界の状態素 $P_a^i \in \mathcal{Q}^1$ に対して、時間区間 $\bar{T}_a \subset \text{proj}_T[\text{seg}(P_b^j)]$ を近似する離散物理世界の定状態素を $\bar{P}_a^i = (\bar{S}_a \times \bar{T}_a, q_a^i) \in \bar{\mathcal{P}}^1$ とする。

時間区間 \bar{T}_a に含まれる任意の時点 t_x における空間領域の不一致の部分は、

$$\Delta \bar{S}_{x1} = \text{seg}(P_b^j)|_{t=t_x} - \bar{S}_a, \quad \Delta \bar{S}_{x2} = \bar{S}_a - \text{seg}(P_b^j)|_{t=t_x} \quad (3.81)$$

の2つに分けられる(図3.8参照)。式(3.81)において、 $\Delta \bar{S}_{x1} \neq \emptyset$ であるときには、局所時空系の点 (s, t_x) 、 $s \in \Delta \bar{S}_{x1}$ は本来は時空強度値 q_a^i となるはずであるが、時空強度値 q_a^i をもつ定状態素 \bar{P}_a^i に

含まれない。また、 $\Delta S_{x2} \neq \phi$ であるときには、本来、 q_a^i なる時空強度値の局所時空系の点が、定状態素 P_a^i に含まれてしまう。これらの空間的不一致に起因する時空強度値の不整合は、精密な制約の充足判定などを行なう場合に問題となってくる。

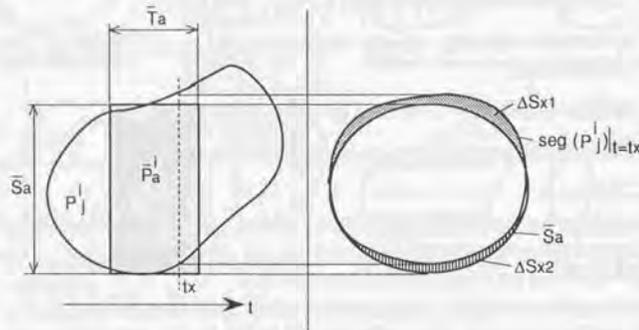


Figure 3.8: 定状態素による近似の誤差

時空強度の不定性は、離散物理世界の近似集合 P^i が局所時空系 F を被覆しないため、定状態素の被覆しないところで時空強度値が定義されないために生じる。

状態の不定性は、同時空強度の不定性を物理実体の側から述べたものである。物理実体の状態区間列 $H_1 \rightarrow H_2 \rightarrow \dots \rightarrow H_n$ において、時空強度が不定なために状態が不定となる時間区間が存在する。

時空強度の不定性および状態の不定性は、定状態素による離散的な近似法によるものであり、離散物理世界では避けられない。

これらの不定性に対して別の見方をすると、離散物理世界は、ある特定の有限物理世界に対する不完全な近似ではなく、ある条件を満足する有限物理世界全体の記述とみなすことができる。すなわち、離散物理世界は有限物理世界に対する要求仕様となる。この考え方を次節で詳しく述べることにする。

3.6 離散物理世界による有限物理世界の近似

3.6.1 離散物理世界による有限物理世界の限定化

本節では先の節において導入した、離散物理世界と有限物理世界との関係について述べる。まず、はじめに、離散物理世界による有限物理世界の限定化について論じる。

いま、局所時空系 F において物理制約を満足する有限物理世界全体の集合を $\bigcup FPW^F$ 、離散物理世界全体の集合を $\bigcup DPW^F$ とする。ある離散物理世界 DPW_a^F が有限物理世界 FPW_b^F の近似であるかどうかの判定が一意に決定できると仮定する。そうして、 DPW_a^F が FPW_b^F を近似していると認められるとき、

$$appr(DPW_a^F, FPW_b^F) \tag{3.82}$$

と記すこととする。

近似の判定に関する仮定に基づく、離散物理世界全体から可能な有限物理世界全体のべき集合への写像

$$spec: DPW^F \rightarrow \mathcal{P}(\bigcup FPW^F) \tag{3.83}$$

の存在がいえる。

$$\forall x(x \in spec(DPW_a^F) \iff appr(DPW_a^F, x)) \tag{3.84}$$

$spec(DPW_a^F)$ は、離散物理世界 DPW_a^F が近似する有限物理世界の集合を表している。

2つの離散物理世界 DPW_a^F, DPW_b^F に関して、それらが近似する有限物理世界の間には包含関係

$$spec(DPW_a^F) \supset spec(DPW_b^F) \tag{3.85}$$

が成り立つとき、 DPW_b^F は DPW_a^F より有限物理世界を限定化するという。

また、ある有限物理世界 FPW^F に対して

$$spec(DPW_a^F) \supset spec(DPW_b^F) \supset FPW^F \tag{3.86}$$

が成り立つとき、離散物理世界 DPW_b^F は離散物理世界 DPW_a^F と比べて、有限物理世界 FPW^F のよい近似となっているという。

次により限定化された離散物理世界を作ることを考える。いま、ある有限物理世界

$$FPW^F = \langle P^1, \dots, P^i, \dots, P^N \rangle \tag{3.87}$$

に対して、 $appr(DPW_a^F, FPW^F)$ を満たす離散的物理世界

$$DPW_a^F = \langle P_a^1, \dots, P_a^i, \dots, P_a^N \rangle \tag{3.88}$$

が与えられているとする。 DPW_a^F の近似集合 P_a^i における時空強度が不定な時空領域に対して、定状態素 \bar{P}_a^{i*} を定義したとすると、写像 $spec$ に関して、以下のことがなりたつ。

$$spec(\langle P_a^1, \dots, P_a^i, \dots, P_a^N \rangle) \supset spec(\langle \bar{P}_a^1, \dots, \bar{P}_a^i \cup \{\bar{P}_a^{i*}\}, \dots, P_a^N \rangle) \tag{3.89}$$

すなわち、定状態素の離散物理世界への追加は、その離散物理世界が近似する有限物理世界を限定化する。

3.6.2 不確定な定状態素概念の導入

これまで離散世界の記述に用いてきた定状態素は、その時空領域と時空強度値がともに確定していた。ここでは、時空領域あるいは時空強度値が唯一には定まらない不確定な定状態素について考える。

一般に不確定な対象の記述の方法としては、

1. $\{A_1 A_2 \dots A_n\}$ のように、取り得る対象を外延的に列挙する、
2. $\{x \in X \mid attribute(x) < V_{max}\}$ のように、対象の満足すべき属性を指定して内包的に記述する、

3. $\{x \in X \mid \text{Contain}(x, A_i) \wedge \text{Exclusive}(x, A_j)\}$ のように、対象の満足すべき関係を指定して内包的に記述する。

および、これらの組合せて記述する方法が考えられる。

いずれの方法であっても、不確定な対象は、台の集合の部分集合を変域とする変数として表現することができる。ある集合 A 上の変数 X の取りうる値の集合を $[X]$ と記し、条件 A を満足する変数 x を、条件を陽に示すときには $[x|A]$ と表記する。

ここで定義した、変数、変域、条件の間には、以下のことが成り立つ。ただし、 $null$ は条件無し、 $false$ は恒偽式、 A は変数の台となる集合とする。

無条件: $[(x|null)] = A$

矛盾条件: $[(x|false)] = \phi$

共通条件: $[(x|P \wedge Q)] = [(x|P)] \cap [(x|Q)]$

選択条件: $[(x|P \vee Q)] = [(x|P)] \cup [(x|Q)]$

条件追加: $[(x|P)] \supset [(x|P \wedge Q)]$

ある2つの変数 X, Y の間に、 $[X] \supset [Y]$ が成り立つとき、 X より Y は詳細であるといひ、

$$X \rightarrow Y \quad (3.90)$$

と記す。

定状態素 $(\bar{S} \times \bar{T}, q^i)$ の定時空領域 $\bar{S} \times \bar{T}$ はそれを構成する空間領域 \bar{S} または時間区間 \bar{T} を不確定とすることで、定時空領域も不確定なものとなる。定時空領域集合 \mathcal{C}_F を台とする、定時空領域の変数を X^D, X_j^D, \dots とあわすこととする。

時空強度値 q^i の不確定さも、時空領域と同様に、時空強度値集合 Q^i の部分集合を変域として持つ変数を導入することで表現できる。その変数を $X^{Q^i}, X_j^{Q^i}, \dots$ を用いて表す。時空強度値の変数 X^{Q^i} は、変域 $[X^{Q^i}] = \{q_{a_1}^i, q_{a_2}^i, \dots, q_{a_n}^i\}$ のどれかの値をとることを意味する。

不確定な定状態素は、これらの変数を用いて、 (X^D, X^{Q^i}) により表現できる。このような変数を含んだ定状態素を特に定状態素変数とよび、 $X^{P^i}, X_j^{P^i}, \dots$ で記す。また、定状態素変数と区別するために、時空間ならびに時空強度値に変数を含まない、確定された定状態素を表すものを特に定状態素定数とよぶ。

定状態素変数の変域は、定時空領域の変数と時空強度値の変数のそれぞれの変域を用いて以下のように定義される。

$$[(X^D, X^{Q^i})] = \{(D_j, q_k^i) \mid D_j \in [X^D], q_k^i \in [X^{Q^i}]\} \quad (3.91)$$

定状態素変数の変域の包含関係から、定状態素変数の間の詳細さが定義できる。

$$[X_j^{P^i}] \supset [X_k^{P^i}] \iff X_j^{P^i} \rightarrow X_k^{P^i} \quad (3.92)$$

これは、

$$X_j^{P^i} = (X_j^D, X_j^{Q^i}), X_k^{P^i} = (X_k^D, X_k^{Q^i}) \quad (3.93)$$

とすると、式(3.91)より、

$$\begin{aligned} (X_j^D, X_j^{Q^i}) \rightarrow (X_k^D, X_k^{Q^i}) &\iff (X_j^D \rightarrow X_k^D \wedge X_j^{Q^i} \rightarrow X_k^{Q^i}) \\ &\vee (X_j^D \rightarrow X_k^D \wedge [X_j^{Q^i}] = [X_k^{Q^i}]) \\ &\vee ([X_j^D] = [X_k^D] \wedge X_j^{Q^i} \rightarrow X_k^{Q^i}) \end{aligned} \quad (3.94)$$

のように、定状態素を構成する定時空領域の変数と時空強度値の変数のそれぞれにおける詳細さに分解して考えることができる。

3.6.3 不確定さをもった離散物理世界

次に、定状態素変数を含む近似集合の記述について考えてみる。いま、ある時空強度に関する離散分布近似集合 X^{P^i} が定状態素定数 \bar{P}_j^i ($j = 1, \dots, n$) と定状態素変数 $X_k^{P^i}$ ($k = 1, \dots, m$) によって、以下のように記述されたとする。

$$X^{P^i} = \{\bar{P}_1^i, \bar{P}_2^i, \dots, \bar{P}_n^i, X_1^{P^i}, X_2^{P^i}, \dots, X_m^{P^i}\} \quad (3.95)$$

この記述は定状態素変数を含むことで不確定な部分を有するから、ある特定の離散分布近似集合ではなく、可能となる離散分布近似集合の集合を表している。よって、 X^{P^i} は離散分布近似集合に関する変数であるとみなすことができ、その変域は、

$$[X^{P^i}] = \{(\bar{P}_1^i, \dots, \bar{P}_n^i, \bar{P}_{n+1}^i, \dots, \bar{P}_{n+m}^i) \mid \bar{P}_{n+j}^i \in [X_j^{P^i}], 1 \leq j \leq m\} \quad (3.96)$$

となる。定状態素変数を含む離散分布近似集合の記述の間にも、変域の包含関係を用いて詳細さについての関係 " \rightarrow " が定義できる。すなわち、離散分布近似集合の記述 $X_j^{P^i}, X_k^{P^i}$ に対して

$$[X_j^{P^i}] \supset [X_k^{P^i}] \iff X_j^{P^i} \rightarrow X_k^{P^i} \quad (3.97)$$

により、離散分布近似集合の記述 $X_j^{P^i}$ に対して離散分布近似集合の記述 $X_k^{P^i}$ はより詳細であると定める。

離散分布近似集合の記述の間の詳細さが定義されたことで、複数の時空強度に関する近似集合の重ね合わせである離散物理世界の記述の間にも、記述の詳細さの概念を導入できる。すなわち、離散物理世界に関する記述

$$DPW_a^F = \langle X_a^{P^1}, \dots, X_a^{P^n} \rangle \quad (3.98)$$

が与えられたとする¹⁰。

式(3.98)は、複数の離散物理世界に対応するから、その対応する離散物理世界を変域の記号を用いて $[DPW_a^F]$ と記すと、

$$[DPW_a^F] = [X_a^{P^1}] \times \dots \times [X_a^{P^n}] \quad (3.99)$$

により表すことができる。

¹⁰定状態素定数のみからなる場合の離散分布近似集合 P_a についても、定状態素定数をただひとつの元を変域とする定状態素変数 $\{P_a\}$ と考えて取り扱う。

2つの離散物理世界の記述 DPW_a^F と DPW_b^F の間に、 $[DPW_a^F] \supset [DPW_b^F]$ が成り立つときに、離散物理世界 DPW_a^F より DPW_b^F の方が、詳細であると定義し、

$$DPW_a^F \supset DPW_b^F \quad (3.100)$$

と記す。

また、離散物理世界 DPW_a^F に、ある条件 c を追加することで、より詳細な離散物理世界 DPW_b^F が得られたとき、その条件を明示するために、

$$DPW_a^F \xrightarrow{c} DPW_b^F \quad (3.101)$$

と表現する。

不確定な離散分布近似集合を含む離散物理世界 DPW_a^F と、有限物理世界集合 $\cup FFW^F$ との対応は、式(3.84)で定義した写像 $spec$ を以下のように不確定な離散物理世界に拡張することで求めることができる。

$$spec(DPW_a^F) = \bigcup \{spec(X) \mid X \in [DPW_a^F]\} \quad (3.102)$$

有限物理世界からみると、確定した離散物理世界も不確定な離散物理世界も有限物理世界集合において取り得る世界を限定するものとして、同等に考えることができる。よって、これ以降の離散物理世界に関する議論においては、離散物理世界に不確定な離散分布近似集合を含んでいる場合でも特に断わらずに、確定した離散物理世界と同様に単に離散物理世界と表すこととする。

3.6.4 離散物理世界と情報量

本節の最後に、離散物理世界の詳細さを定量的に評価する方法として、離散物理世界および、離散物理世界に対して付加される条件のもつ情報量について考えてみる。

いま、離散物理世界 DPW_j^F がある条件 c_j を追加して離散物理世界 DPW_{j+1}^F が得られたとする。

$$DPW_j^F \xrightarrow{c_j} DPW_{j+1}^F \quad (3.103)$$

離散物理世界 DPW_j^F が近似する有限物理世界の集合は、 $spec(DPW_j^F) \subset \cup FFW^F$ と表される。同様に、条件 c_j を加えることで、取りうる有限物理世界の集合は $spec(DPW_{j+1}^F) \subset \cup FFW^F$ となる。どの有限物理世界も等しく選択され得ると仮定すると、離散物理世界 DPW_j^F に対して条件 c_j のもつ情報量 $I(c_j, DPW_j^F)$ は次のように定義できる。

$$\begin{aligned} I(c_j, DPW_j^F) &= \log |spec(DPW_j^F)| - \log |spec(DPW_{j+1}^F)| \\ &= \log \frac{|spec(DPW_j^F)|}{|spec(DPW_{j+1}^F)|} \end{aligned} \quad (3.104)$$

離散物理世界 DPW_j^F の不確定さを $\log |spec(DPW_j^F)|$ と定義すると、離散物理世界 DPW_j^F のもつ情報量 $I(DPW_j^F)$ は、

$$I(DPW_j^F) = \log |\cup DPW^F| - \log |spec(DPW_j^F)| \quad (3.105)$$

として求めることができ、さらに条件 c_k のもつ情報量 $I(c_k)$ は、

$$I(c_k) = I(DPW_{j+1}^F) - I(DPW_j^F) \quad (3.106)$$

で与えられる。

3.7 離散物理世界の特徴と評価

3.7.1 離散物理世界による物理表現の特徴

本節では、物理表現としての離散物理世界がどのような利点を有するかを議論し、従来の対象表現との違いを明確にする。また、対象の認識、表現に関する哲学を中心としたこれまでの研究を歴史的に振り返り、本章で述べた対象の表現基礎論との関連を考察する。

まず、これまで本章で述べてきた有限物理世界ならびに離散物理世界による物理表現が有する特徴を以下に整理する。

- 対象表現の枠組みを、従来の空間領域から時間を含んだ時空間領域に拡張したことにより、対象のもつ空間的広がりと同時に時間的な変遷も同時に記述することが可能となった。
- 対象表現の基本単位として、従来の部品や製品といった恣意的な単位を採用せず、空間領域と時間区間から構成される定状態素を用いることで、対象のもつ物理的な意味が明確となった。
- 対象の内的性質を表現する際の基礎として、時空の各点に対して定義される時空強度を用い、そこから多様な属性が構成されるものとした。
- 物性や電気、磁気、光学などの物理世界の有する物理的観点を相として導入し、対象を記述する定状態素を各相ごとに定義する多相の対象表現を可能とした。
- 対象、属性、関係などすべてが時間的に変化するものと考え、それらの記述に際して存在する空間領域と時間区間とを明示するようにした。
- 物理世界を記述したり参照したりする上で有用な物理的概念(たとえば、場、状態、作用、因果関係など)に対して明確な定義と相互の関係を与えた。

ここで離散物理世界による物理表現を理解することを助けるために、例として謄写版を印刷する機械を表現することを考えよう。(図3.9(a)-(f)参照)。

ここでの謄写印刷には、多孔質ポリマーのシートにワックスが塗布されたものを用いることにする(図3.9(a))。そこにカーボンを含んだ顔料で描かれた原稿を密着させ、強い光を当てる。光はシートを透過して原稿上のカーボンに当たり、そこで熱を発生させる(図3.9(b))。熱によりカーボンに接している部分のワックスが溶けて流れ出る(図3.9(c))。シート全面にインクをのせ(図3.9(d))、そこに上から圧力を加えると多孔質シート上のワックスの溶けた部分のインクが透過して下においた紙に付着する(図3.9(e))。紙を取り外すと、原稿のカーボンに該当する部分にインクが着き、印刷ができる(図3.9(f))。

こうした一連の現象や状態を表現するには、物質、光、熱、圧力といった多様な内容を密接に表現しなくてはならない。離散物理世界における物理表現では、そうした内容を空間と時間の枠組みの中で、物理法則を用いて相互に関連させながら記述することが可能である。ここでは3.5次元の局所時空系のそれぞれの相を直接に図示することはできないので、空間上のある一点(ここではカーボンと接する多孔質シート)に関してどのように時空強度が変化しているかを、図3.10に示す。

先に述べた特徴を持つことにより、離散物理世界による物理表現は第2章で考察したような従来の対象表現と比較して以下のような長所を有するものと考えられる。

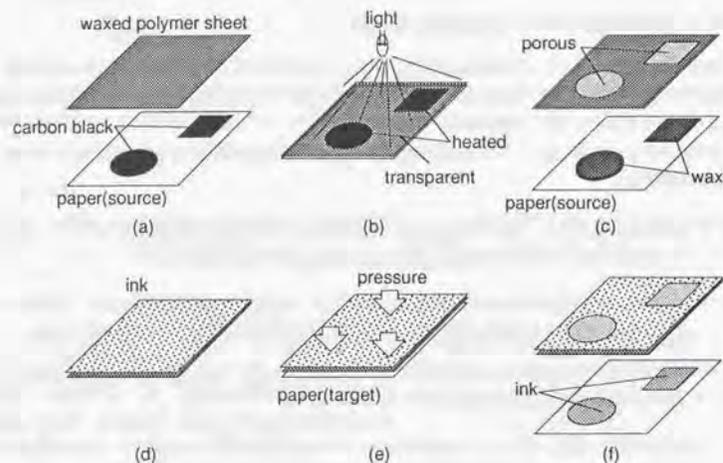


Figure 3.9: 単純化された物理世界の例 (謄写版による印刷のプロセス)

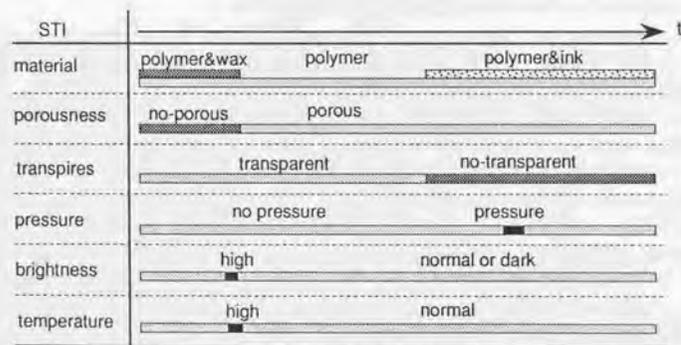


Figure 3.10: 謄写版印刷における空間上の一点での時空強度の変化

- これまでの対象表現では時間的な変化を陽に表現せずに、シミュレーションを通じて逐次、各時刻における対象の表現を生成することが行われてきた。この方法では、異なる時刻に現れる対象を比較する場合、シミュレーションを行なう規則が明確ではない場合、さらには時間的な順序によらずに対象を規定していく場合などに対処するのが困難であった。離散物理世界による物理表現は、時空領域を記述の枠組みとし、対象のもつ空間的広がりのみならず、時間的存在範囲をも陽に記述するために、上に挙げた問題を容易に取り扱うことが可能である。
- 従来の対象表現においては、各属性の物理的な意味内容や、属性相互の関係が必ずしも明確になっていなかった。離散物理世界による物理表現では、対象の内的性質の記述に対して、時空上の点に対して定義される時空強度を基礎として、そこから組み立てられた物理的属性のみを用いている。このことにより、対象の存在や挙動の物理的妥当性の評価や、対象の合成に伴う物理的属性の計算などを形式的に行なうことができる。
- 対象 A と B を合成して対象 C を生成することを考えたとき、対象 C の“重量”は対象 A と対象 B のそれぞれの重量の単純和で与えられる。こうした場合には、単に属性値の和という処理で合成の結果が計算できるため、フレームなどを用いた対象表現で対応できる。しかしながら、“最大長”の場合には合成の仕方によりその値が異なり、単純に A と B の“最大長”を足すことでは算出されない。離散物理世界による物理表現においては、各属性の意味する内容を、基本的な空間的、時間的属性に還元することができるため、対象 C の“最大長”についても、対象 A と B の空間領域の和の結果から算出することができる。
- これまでの対象表現の手法においては、対象は物性、電磁気、光学など、さまざまな物理的観点(相)からの個別のモデルによって記述される。その場合、相互のモデルの間の関連は陽には意識されることが多い。それに対して離散物理世界による物理表現では、多様な相を時空という共通の枠組みで取り扱う。各相における記述は、時空という共通の場を通じて相互に関連付けられ、記述間の整合性管理を行なうことが可能となる。

このように、離散物理世界による物理表現は、従来の対象表現において困難であった、対象のより高度な物理的内容を、形式的に表現、操作することに対して有効であると考えられる。

3.7.2 他の研究との関連

つぎに、対象とその認識、表現に関する主な考え方を歴史的に振り返り、本章で述べた対象の表現基礎論との関連を考察する。

空間-時間概念

本研究での対象表現の基本である空間-時間の概念は、自然科学者および哲学者にとって常に大きな問題であった。それは

1. 空間-時間についての科学的表象は、物質・運動・相互作用についての科学的な表象と不可分の関連を持つ。

2. 空間-時間に関する知識は、物理学および宇宙論の原理的問題の解決にとって、必要不可欠である。

ことによる [シュテイマン 67].

たとえば、デモクリトス (Demokritos) に代表されるギリシャの原子論者は、物の容器である空虚な空間の存在を主張し、形や大きさが不変な粒子-原子-が充滿しているのが<もの>であると考えた。

また、ニュートン (I. Newton) は空間を物質を入れる空虚な等質な容器、時間を事件の容器であると考え、絶対空間および絶対時間の概念に基づいて、物理理論を展開した。彼は空間や時間は物質の存在や事象の発生によってなら影響を受けることがないものと考えた。

絶対的な空間と時間により構成される空虚な時空に、物質の存在と事象の存在を配置するという古典的な空間-時間観は、19世紀末の電磁気学の発生や20世紀初頭の相対論の登場により否定され、時間と空間の非独立、物質と時空(場)との相互関係の存在といった現代的な時空概念が構成されることとなる。

本研究における世界観は、古典的な空間-時間概念に基づいている。すなわち、空間と時間は独立であり、時空そのものはそこに存在する物質や事象には影響されない。このことは、機械設計において対象とする世界は、古典的な空間-時間概念による素朴な物理世界観が有効であるとの考えに基づいている。

物理対象の規定

物理対象としての<もの>をどの様に規定するかについても、古来より哲学の中心課題としてつねに存在している。

まず、アリストテレス (Aristoteles) は、<もの>が「質料」と「形相」の2つの実在的要素から成立していると述べた。すなわち、「質料」は<もの>の物質としての存在の基礎を示し、「形相」は<もの>により現実にとらわれている特定の形を表すと考えた [渡辺 78]。アリストテレスにおける実体概念は、自立した個体としての<もの>の存在を提示している。

デカルト (R. Descartes) は物心二元論において<もの>は、等質的な空間における広がりをもつもの(延長をもつもの)として規定されている。あらゆる<もの>は空間という秩序によって関係付けられ、形、位置、運動といったものはすべて、この延長という空間性の線態とされる [新田 89].

認識とは独立に<もの>(対象)が存在するという従来の考え方に対して、カント (I. Kant) は対象が認識に依存するという考え方を説いた。カントによる自然世界は、まず空間と時間という感性の形式を通して与えられたものが、因果性その他のカテゴリーによって思惟され、法的に構成された対象の世界であるとされた [新田 89].

また、近代物理学における<もの>は、知覚される多様な性質を担い、多様に変化する事象の根底にあって、自己同一に止まるべきものとしての実体概念によりとらえている [現代哲学 70]。たとえば、ラッセル (B. Russell) は<もの>を感覚所与 (sense data) に還元し、<もの>を無数の感覚所与の群としてとらえた。これに対してカルナップ (R. Carnap) は<もの>は感覚所与言語で語ることはできても、構成することはできず、<もの>の振舞いの時空枠の中での物言語 (thing language) による記述を基本命題¹¹とする物理主義を展開した。

¹¹プロトコル命題と呼ばれる

こうした自然界における<もの>の存在の根拠は自然界の側にはなく認識する側にあり、しかも認識の仕方には一意性はないという考え方は、ソシュール (F. Saussure) より明確に主張された。彼は「一般言語学講義」において、言葉には世界を切り出してくる働き(分節)があり、世界は言語と無関係に個々の事象に区切られているのではなく、言語により世界の区切り方が変わってくることを説いた。

<もの>を単に空間的な広がりとしてだけでなく、時間的な流れにおいて明示的にとらえる必要があることが主張されている。

たとえば、ヴィトゲンシュタイン (L. Wittgenstein) は「論理哲学論考」において、対象を次のように時空間の中でとらえている [Wittgen 61].

2.025 実体は形式と内容である。

2.0251 空間、時間、そして色(有色性)、これらが対象の形式である。

また、トゥルチン (V.F. Turchin) は物理的对象を次のように時系列の中における同一性を与えるものと考えた [Turchin 77].

映画のフィルムでは、「ボール」はただ一つのこまの中の状況の部分のみならず、多数のこまの中に繰り返し現れる。— <中略>— フィルムの次々のこまの中の当該部分を結ぶ時間線を引き、この線上にあるものはすべて「同じ」物体だと宣言しているようなものだ。この線のある一組の属性と組み合わせたものが、物理的对象(物体)という概念を形成する。

人工知能の分野においても<もの>の概念はいろいろな観点から議論されている。そうした中で時空に関連させた研究として、ヘイズ (P.J. Hayes) の提唱する素朴物理学 (Naive Physics) がある。彼は物理世界の変化を空間-時間の中でとらえるために、History と呼ばれる基本実体を導入した。History は<もの>概念ではないが、事象が起こりうる空間-時間的連結体を、外延的に記述するものである。

本研究の<もの>に対する考え方は、3.4.2において述べたように、<もの>は恣意性な存在であることから記述の基本単位とはせず、時空間の属性に還元された状態素を新たな記述の基本単位としている。そして<もの>は時空間の属性に対して恣意的に定義される二次的なものとしている。こうした時空枠における属性、関係、振舞いを明示的に記述するという考え方は、カルナップの物理主義に近い。

これまでの<もの>に対する考え方は、すでに存在している<もの>をどのようにとらえるかが中心となってきた。そこにおいてはカルナップが指摘するように、存在している<もの>を語ることはできても新たに<もの>を物理世界に生み出していくことはできない。本研究では、まだ存在しない<もの>を構成していく設計には物理世界の有り様の記述を<もの>の存在に先行させることは不可欠であると考えた。

3.8 本章のまとめ

本章においては、機械設計の対象表現の基礎としての物理世界に関して述べてきた。その内容を以下に要約する。

1. 物理世界を表現する基本的な枠組みとして、4次元の時空間である局所時空系を定義し、物理世界は、強度に関する物理量である時空強度の局所時空系における分布の重ね合わせとしてとらえられるものとした。これにより、物理世界の記述は局所時空系における〈もの〉の存在とは独立に行なうことができた。
2. 物理世界の認識可能性および記述可能性を保証するために、1) 時空強度集合の有限性、2) 時空強度値集合の有限性、3) 分布の連続成分の有限性、の3つの有限性を物理世界に仮定する有限物理世界の概念を導入した。これにより、物理世界の各時空強度分布は、一意な値を有する有限個の状態素により、有限個の直和分割としてとらえることが可能となった。
3. 有限物理世界における〈もの〉の概念として、局所時空系における連続領域としての物理実体の概念を導入した。物理実体は時空強度という「質料」の上に、その存在範囲を示す「形相」としての時空領域を明示的に定義したものであり、各時空強度分布をとりまとめる役割を担ったものとして形式化される。
4. 形状、位置、姿勢、属性、関係、状態、状態変化、事象、状況、場、作用、挙動、物理法則、因果関係といった物理的な諸概念に対して、局所時空系における意味内容を明確化し、有限物理世界の枠組みにおける定義を与えた。
5. 連続的な有限物理世界を近似的に記述するために、一定の空間領域と時間区間を持つ定状態素より構成される離散物理世界を導入した。離散物理世界においては、定状態素のもつ各種の属性や定状態素間の関係が時間によらず一定となるために、有限物理世界と比較して記述が容易となる。
6. 離散物理世界とそれにより近似される有限物理世界の集合との対応関係について述べ、離散物理世界による有限物理世界の限定化の概念を説明した。さらに、変数としての定状態素を有する不確定な離散物理世界の考え方を導入した。
7. 物理世界のとらえ方についての歴史的な流れを哲学を中心に概観した。本研究でとられている対象表現の基礎的な考え方は、〈もの〉を属性へと還元し、古典物理学の空間-時間概念上に構成する物理主義的なアプローチと位置づけることができる。

本章においては、本章で展開した物理的な対象記述の枠組みを基に、設計対象がどのように表現され、設計過程の進行とともにどのように具体化されていくかについて述べる。

第4章

設計対象表現と設計過程

本章においては、前章で示された離散物理世界の考え方に基づいて、設計対象はどのように記述されるか—設計対象表現—と、具体化されていくのかということ—設計対象の表現からみた設計過程—を論じる。

4.1 離散物理世界による設計対象表現

4.1.1 離散物理世界と設計対象表現との相違点

設計過程と設計対象表現との関係について議論する前に、第3章で導入した離散物理世界と、設計の対象表現との関係を整理する。

離散物理世界の概念を簡潔にまとめると、

ある空間の領域の、ある時間長さにおける、物理世界の有り様を近似的に表現したもの

と理解することができる。ここで重要なことは、離散物理世界の記述の対象は、設計対象そのものではなく、設計対象が存在する時空間ということである。また、離散物理世界の基になっている有限物理世界に、〈もの〉を表す概念として物理実体を導入したが、物理実体は物理的な意味を担うための抽象的な存在であり、機械設計における設計対象の構成要素である部品などは直接には対応しない。

ここでは、離散物理世界を機械設計における対象表現の基礎として位置付けるために、離散物理世界と設計対象との関連と相違について議論する。離散物理世界を設計対象表現として考える上での留意点は以下の4点へと整理される。

1. 離散物理世界はあるひとつの物理的状況の記述であるが、設計対象はさまざまな状況を想定して設計される。(状況の多様性)
2. 離散物理世界には、設計対象を取り巻く環境、仮想的な対象、設計対象の操作物、設計対象が利用する資源といった、設計対象そのものの以外のことながら関に含まれる。(状況の包括性)
3. 離散物理世界は、ある詳細度をもった記述であるが、設計対象の記述は設計過程に応じた異なる詳細度を有する。(設計対象の進化性)

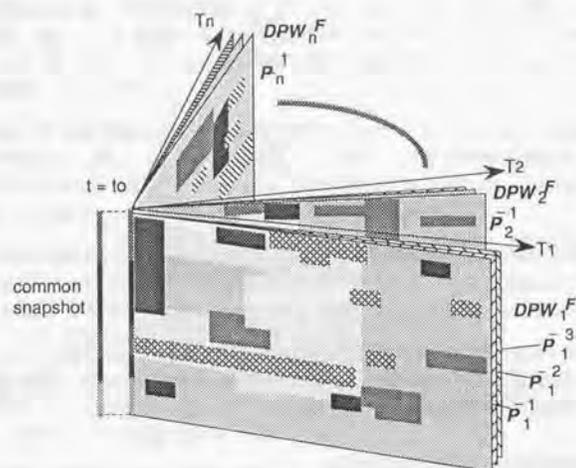


Figure 4.1: 複数の離散物理世界と設計対象

4. 離散物理世界は、人間の恣意性を排除した客観的な記述体系であるが、設計対象の存在、属性、構造、挙動の多くにはそこに込められた設計者の意図がある。(設計対象の目的性)

これらのことがらのそれぞれについて、より詳しく考察していく。

4.1.2 状況の多様性と離散物理世界

設計される製品はある特定の状況においてのみ、動作し、機能を発揮するわけではない。機械は、さまざまな外的環境、人間による選択的な操作などが想定される状況で動作する。よって、設計の対象表現においては、単一の離散物理世界ではなく、異なる状況に対応した複数の離散物理世界

$$DPW_1^F, DPW_2^F, \dots, DPW_n^F \quad (4.1)$$

を考慮に入れる必要がある。

複数の離散物理世界による対象表現の概念を図4.1に示す。この図ではわかりやすくするために、空間次元を3次元から1次元へと縮退させ、時間の1次元を加えて2次元平面として各局所時空系を表している。また、各離散物理世界は3つの離散相からなるものとして描いている。

離散物理世界 $DPW_1^F, DPW_2^F, \dots, DPW_n^F$ は、それぞれ異なる時間軸 T_1, T_2, \dots, T_n によって張られる局所時空系に対する物理世界の記述であり、それぞれが独立した物理世界を構成する。

しかしながら、これら複数の離散物理世界は相互に無関係ではなく、同一の設計対象が現出する状況であるから、複数の状況に対応する離散物理世界のすべてに対して共通の状態を想定できる。その共通

状態の現出する時点 $t = t_0$ とおくと、 t_0 ではすべての離散物理世界は共通の様相を呈する¹。

$$DPW_1^F|_{t=t_0} = DPW_2^F|_{t=t_0} = \dots = DPW_n^F|_{t=t_0} \quad (4.2)$$

すなわち、各離散物理世界の時間軸は t_0 において、状態を共有し、そこから各状況へと分岐するものと考えられる。

ここで述べたような複数の世界の概念は、論理型プログラミング言語における多重世界機構 [中島 87]、様相論理における可能世界 [Kripke 63]、状況意味論 [白井 85]、状況理論 [鈴木 92] における状況においても同様の概念をみることができる。

4.1.3 状況の包括性

離散物理世界における記述の範囲は、空間領域と時間区間との直積としての局所時空系であり、以下の内容が含まれている。

設計対象を取り巻く環境: 離散物理世界には、設計対象が設置され、使用される環境が定状態素として記述される。たとえば、真空、大気中、液体中といった対象を取り囲む雰囲気、外界の温度、明るさ、重力や慣性力の大きさと方向、電界や磁界の様子などがここでいう環境に相当する。

仮想的な対象: 離散物理世界においては仮想的な対象が物理実体として表現されることも重要である。ここでいう仮想的な対象とは、設計の思考において、 $\langle \text{もの} \rangle$ として考えられているが、物質的には実在を持たない、空なものを目指す。たとえば、何かを格納する空間、電極間の空隙、光の行路、排気口などが仮想的な対象に該当する。これらは対象を設計していく際には思考の対象となるが、これらを直接に作り出すことはできないため、製作図としての部品図に陽に描かれることはない。

設計対象に対する作用: 設計対象である機械は、動作に必要なエネルギーと物質の供給などを受けて動作し、人間や他の機械による外からの操作により、その振舞いを変えていく。これら設計対象への作用や供給も、離散物理世界においては定状態素として陽に記述できる。

操作対象とその変化: 一般に機械は、何か操作、処理すべき対象を持つ。それに対して適切な作用を与えることで、要求される変化を操作対象に引き起こす。操作対象自身は設計対象の一部ではないが、設計を考える上で最も重要な考慮対象である。離散物理世界は、設計対象と同様に、これら操作対象とその時間変化(処理プロセス)が物理的に記述されている。

このように、離散物理世界には通常の設計対象表現で取り扱われない内容が含まれている。ただし、離散物理世界ではここで述べたさまざまな内容を区別していない。対象表現も含めてすべて定状態素という、同一の形式によって表現している。よって、どの部分が設計対象であり、どの部分が設計対象外であるかは、離散物理世界には記されておらず、離散物理世界に対する解釈として、それらに区別を付与することが必要である。

¹ 状況は時空の絶対座標には依存しないので、各離散物理世界において等しい状態をとる時点の時間値をそろえることができる。

4.1.4 設計対象の進化性

設計対象の進化と離散物理世界の関係について議論する前に、まず、設計と離散物理世界との関係を考える。

設計とは、世界の局所的な有り様を、意図を満足するように定めていく行為と考えることができる。世界の局所的な有り様は、有限物理世界として表現できるから、設計とは、有限物理世界を限定していく、最後にはひとつに定めることとする。また、3.6に述べたように、離散物理世界は、それが近似している有限物理世界の集合を表している。

以上のことを総合すると、離散物理世界の詳細化列

$$DPW_0^F \supseteq DPW_1^F \supseteq \dots \supseteq^{c_{j-1}} DPW_j^F \supseteq^{c_j} \dots \supseteq^{c_{n-1}} DPW_n^F \supseteq \dots \supseteq FPW_n^F \quad (4.3)$$

によって、ある有限物理世界 FPW_n^F に収斂させていくことが設計であると考えられることができる。その収斂させる過程の途中における離散物理世界に、設計過程における設計対象が表現されており、収斂した有限物理世界 FPW_n^F が設計解である。

ただし、実際の設計においては設計解として有限物理世界を厳密な意味で一意に定めることは行わないし、また実際それは不可能である。それは記述量の問題、設計解として許容される範囲の存在、製造上実現できる精度などの理由による。よって、一般に設計解とされる離散物理世界の記述は、設計に要求される物理制約を満足する有限物理世界の集合を与えることになる。

いま、ある有限物理世界 FPW_j^F が設計に要求されている物理制約 PC_j を満足しているということとを $PC_j(FPW_j^F) = t$ と記すと、ある離散物理世界の記述 DPW_n^F が

$$FPW_j^F \in \text{spec}(DPW_n^F) \implies PC_j(FPW_j^F) = t \quad (4.4)$$

を満足するとき、それは設計解である。

離散物理世界が設計の進行に伴い、どのように詳細化されていくかについては、後ほど4.2で述べることにする。

4.1.5 設計対象の目的性

これまで繰り返し述べてきたように、離散物理世界は、物理的客観性を重視し、人間の恣意性や意図を極力排除した記述となっている。これは、先に2.6で述べた対象表現のうちの物理表現に相当する。

それに対して、人工物である設計対象は何らかの目的を実現するために存在しており、設計対象の各部分は、その目的を実現するための役割を担っている。設計対象の表現においても、そうした設計者の設計対象に対する意図(設計意図)を、陽に記述できることが望ましい。この設計者の意図を表したのが、2.6で述べた意味表現である。

物理表現と意味表現とは、設計対象表現として相補的な関係にあると考えられる。すなわち、物理表現は意味表現に対して、意味表現に現れる内容の物理的な参照先を与えるし、逆に意味表現は物理表現に現れる存在や事象に対して意味を与える。

よって、離散物理世界による物理表現に対して、設計者の意図を表現した意味表現を結合することにより、客観性と目的性とを兼ね備えた設計対象表現が構成できるものと考えられる。

意味表現に関しては、この後4.3において詳しく述べる。

4.2 離散物理世界における設計過程

4.2.1 設計対象表現の進化

設計過程の進行にともない、離散物理世界による物理表現がどのように進化していくのかを理解するために、複写機の設計を簡略化したものを例に取り上げて説明する。また、離散物理世界の詳細化のためには、どのような機能が要求されるのかについても列挙していく。なお、ここでは理解を容易にするために、離散物理世界を2次元の模式図により表現する。ここで挙げた例の形式的な離散物理世界の表現は付録としてCに示す。

複写機の最も基本的な要求仕様は次のように与えられる。

- はじめに、複写対象となる紙(原稿)と、複写先となる紙(複写用紙)がある。
- 原稿の表面は白い部分と黒い部分から成り、複写用紙の表面はすべて白い。
- 複写機的作用により、原稿の黒い部分と合同の黒いパターンが、複写用紙の上に転写される。
- 原稿は複写前と複写後において位置、姿勢の変化を除いては、状態の変化は生じない。

この初期仕様を定状態素の考え方に基いて記述することを考える。

原稿は、紙(paper)を材質に、白い部分—光学的に見て高反射率(high-ref)の部分—と黒い部分—反射しない(no-ref)部分—を表面に持つものとして記述される。複写後の原稿は、初期仕様により状態を変化させない。ただし、複写後は複写前に比べて時間が経過しており、さらに位置が移動していてもかまわない。これらのことから、材質、反射率の時空強度に関して、それぞれ定状態素変数を導入し、時空関係を与える(定状態素の生成)。

複写用紙に関しても同様で、定状態素変数を導入する。複写前に関しては、複写用紙の表面はすべて白く、高反射の性質を有している。また、複写後の複写用紙は、反射率に関して、反射しない部分が生じており、それが原稿の反射しない部分の形状と等しくなる(定状態素間の関係指定)。

原稿と複写用紙それぞれの、複写前後における位置関係については任意とする(不定な定状態素、すなわち定状態素変数の導入)。ただし、原稿は移動しないものとする。この初期仕様からは原稿と複写用紙との局所時空系での相対関係は一意には定まらず、設計の自由度が生じる。この関係の不定性は、設計の過程で関係が限定化され、決定されていく。

原稿と複写用紙をそれぞれ離散物理世界の物理実体と考えると、先に定義した定状態素変数と物理実体との対応関係が記述できる(定状態素と物理実体との対応付け)。

こうして記述された離散物理世界を DPW_0 とする。 DPW_0 の模式図を図4.2に示す。

初期仕様として与えられた離散物理世界 DPW_0^F は、すべての物理制約PC-I, II, III, IVを満足するとは限らず、離散物理世界 DPW_0^F が代表している有限物理世界の集合 $\text{spec}(DPW_0^F)$ の中には物理制約を満足していないものが当然含まれる。

$$\exists k (FPW_k^F \in \text{spec}(DPW_0^F) \wedge PC_j(FPW_k^F) \neq t) \quad (4.5)$$

この離散物理世界で与えられる初期仕様は、無条件—すなわち、 DPW_0^F で指定された部分以外に関しては、任意でよいということ—に満足されるわけではなく、設計解とはならない。よって、物理

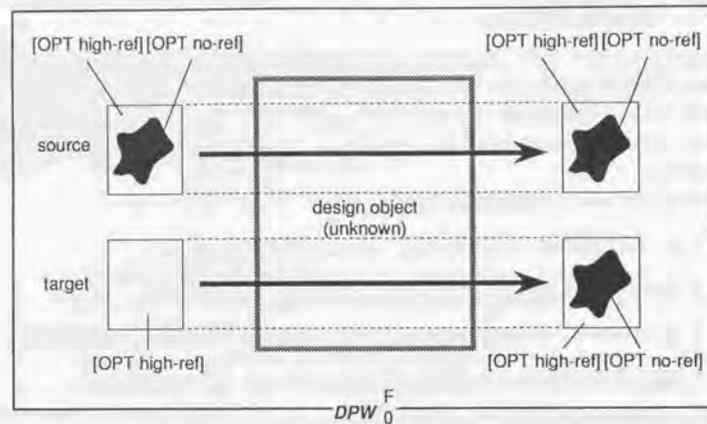


Figure 4.2: 複写機の初期仕様

制約が必ず満足されるように、離散物理世界 DPW_0^F を詳細化し、初期仕様として与えられた定状態素の間を物理現象の連鎖として結ぶ必要がある (物理法則による定状態素の存在可能証明)。

ここでは、初期仕様で与えられた複写用紙の状態変化を実現する既知の方法として、電子写真の原理を用いて内挿することを考える。

電子写真の原理の概要は以下の通りである (図 4.3)。

1. 帯電: 暗所 ([LIGHT dark]) において感光体 ([MATERIAL opt-elec]) でかつ誘電体の性質 ([ELEC-COND none]) をもつ表面に、一様な正の電荷 ([CHARGE plus]) を与える。
2. 露光: 原稿の像 ([LIGHT dark], [LIGHT bright]) を感光体上に照射する。
3. 潜像形成: 明るく照射された部分 ([LIGHT bright]) における電気的性質が誘電体から導電性 ([ELEC-COND high]) に変化し (光伝導効果), その電荷がなくなる ([CHARGE none])。また, 照射の暗い部分 ([LIGHT dark]) の電荷はそのまま残る ([CHARGE plus])。
4. 現像 [1]: 負に荷電している黒色粉体であるトナー ([MATERIAL toner], [PHASE powder], [CHARGE minus]) を感光体上にのせる。
5. 現像 [2]: 感光体の正電荷のある部分 ([CHARGE plus]) とトナーの負電荷により形成された感光体の面方向 (ここでは a とする) への電界 ([ELEC-FLD a]) により, トナーの一部が感光体方向へと引きつけられ, 感光体の面方向に結合する ([CONNECT a])。

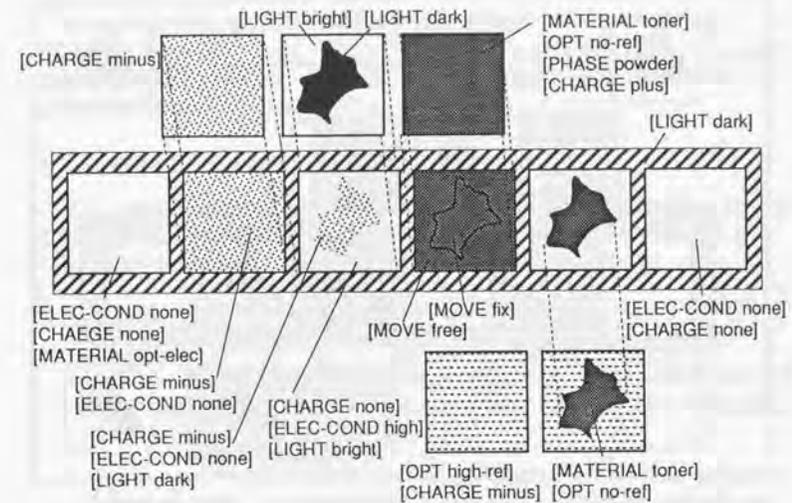


Figure 4.3: 電子写真の原理の概要

6. 現像 [3]: 感光体を移動させると, トナーは感光体に結合している部分のみが感光体と一体となって移動する。
7. 転写: 感光体上の負電荷のトナーをクーロン力で引き ([ELEC-FLD $-a$]), 感光体との結合を解消して正に帯電させた複写用紙側に結合させる ([CONNECT $-a$])。

ここで挙げた電子写真の原理に現われる各物理現象は, それが物理制約を満足することを保証する物理法則や物理効果が存在している。たとえば, 感光体 (photo-conduction) が, 光が当たることで, 誘電体から導電体へとその電気的性質を変化させることは, 光伝導効果として知られており, 時空強度値の組合せに関する制約 (PC-II) を満足する。そうした制約は以下のように表現される。以下の式で t となる制約は, 時空強度値の組み合わせが必然的に存在することを, $false$ となる制約は, 与えられた時空強度値の組み合わせが取り得ないことを表す。

$$PC-II([MATERIAL photo-cond], [LIGHT bright], [ELEC-COND high]) = t$$

$$PC-II([MATERIAL photo-cond], [LIGHT dark], [ELEC-COND none]) = t$$

$$PC-II([ELEC-COND high], [CHARGE charged(={plus minus})]) = false$$

この電子写真の原理を離散物理世界として表現し, 先の初期仕様の離散物理世界に埋め込む (離散物理世界の合成)。これにより, 複写前の状態と複写後の状態との間が中間状態へと分割され (定状態素の内挿), 初期仕様で与えられた離散物理世界は, 図 4.4 のように詳細化される。

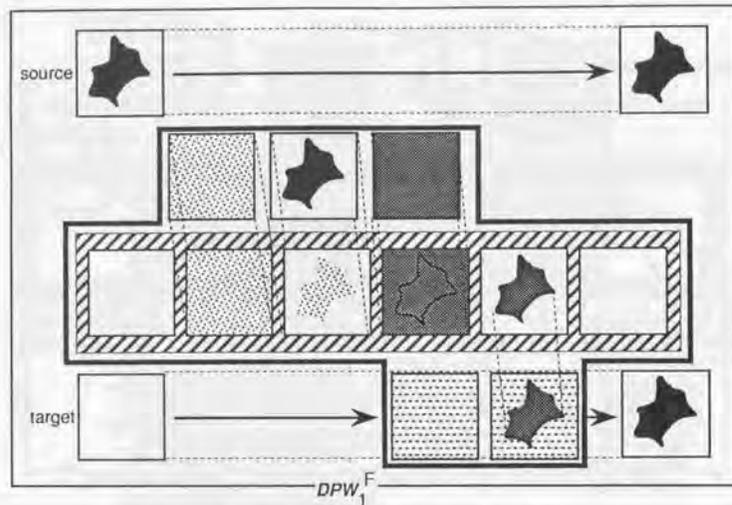


Figure 4.4: 電子写真の原理の複写機への適用

原理や法則を、具体的な離散物理世界へと埋め込むためには、原理や法則に現われる定状態素変数を、現在の離散物理世界の局所時空系に対して割り付ける必要がある(定状態素変数の時空割付)。割り付けは絶対的な時空座標を用いることは通常考えられず、他の定状態素との相対的な時空関係により、割り付けられる。

定状態素変数の割り付けの際に、割り付ける先の時空領域にすでに定状態素が存在する場合には、2つの定状態素を重ね合わせることで物理的な矛盾が生じないか—すなわち、物理制約を満足するか—の検証が必要となる(定状態素間の整合性管理)。また、原理や法則の中に現れる定状態素変数と、既存の定状態素が同じものを指し示すと考えられるときには、定状態素変数を既存の定状態素により置き換える(定状態素の同一化)。

電子写真の原理を適用した図4.4で示される離散物理世界は、有限物理世界を定めるには、大部分のことがらはまだ未定であり、さらに詳細化を進めていかなくてはならない。

例えば、露光のプロセスに関しては、照射領域の決定(空間領域の詳細化)照射時間の決定(時間区間の詳細化)、照射する光の強さの決定(時空強度値の詳細化)などの定状態素の詳細化に加えて、原稿の像をどのようにして作るか、原稿の像をどう感光体上に結像させるか、その際の露光をどうするか、原稿と感光体との位置関係をどのようにするか、各プロセスの時間長さはどのくらいにするか、などある。さらには、転写の時点で、トナーと紙との結合はクーロン力によるものであり、電荷が除去されたり大きな力が加わったりするとこの結合は壊されるため、熱と圧力による定着のプロセスが必要となる。このように、電子写真の原理を初期仕様で埋め込んだ後にも、新たな設計課題が生じ、多くのことがらを決定していく必要がある。

これらのことがらの多くは独立でなく物理制約で相互に関係付けられている。さらには決定していく順序も設計によって異なる。よって、あるひとつの決定が他にどのような影響を与えるのかを、物理的な観点から強力に推論できること(因果推論)、離散物理世界の詳細化の過程は任意の順序を許すこと(詳細化過程の任意性)が要求される。

4.2.2 離散物理世界の詳細化による設計過程モデル

ここで、上で述べた設計過程と離散物理世界の進化との関係を、より一般的な形で整理し、離散物理世界の枠組みでの設計の素過程モデルを考える。

離散物理世界で定状態素は、その存在の支持に関して、以下の3つの段階を有する。

- stage-1: 意図する定状態素、定状態素の変化あるいは定状態素の集合が与えられている段階。定状態素や定状態素の変化を可能にする周辺状況は決定されていない。
- stage-2: stage-1で設定された目的の定状態素/定状態素の変化/定状態素の集合が存在させることができる作用/場²が決定された段階。その作用/場がどのように実現されるかについては未定。
- stage-3: stage-2で設定された作用、場が存在させる定状態素や定状態素の変化、定状態素の集合が決定された段階。これらが存在すれば、stage-1で設定された定状態素/定状態素の変化/定状態素の集合は存在できる。この段階において設定された定状態素や定状態素の変化自身は、stage-1の存在未定の段階にある。

これは、先に2.4の図2.12で示した機械の図式での考え方に対応している。

設計の素過程は、これらの段階の間の遷移としてとらえることができる。

start → stage-1: 意図される定状態素/定状態素の変化/定状態素の集合の指定。例えば、先の複写機の例では初期仕様を定義する部分がこれに相当する。(初期目標:initial objective)

stage-1 → terminate: 必要とされる定状態素/定状態素の変化/定状態素集合を所与のものへと対応付ける。これは、要求されているものが設計の所与の条件である場合や、存在することが明白な場合に相当する。先の複写機の例では、複写前の原稿と複写用紙に関する定状態素は、所与のものとして考えている。(状態既存化:state instantiation)

stage-1 → stage-2: 定状態素/定状態素の変化/定状態素の集合の存在を支持する作用/場の策定。これは、要求されているものを存在させたり、引き起こしたりすることが原理的に可能な作用/場の中から、どれかを選択する過程である。例えば、ある温度の値をもった定状態素が存在させるのに、伝熱、高周波、赤外線、化学反応、圧縮、などさまざまな加熱の手段が考えられるが、それらの中からどれかを選択するのがこの素過程に相当する。(作用計画:effect planning)。

stage-1 → stage-1: 意図される定状態素/定状態素の変化/定状態素の集合の、より詳細な部分への展開。これは、必要とされた定状態素/定状態素の変化/定状態素の集合が、先にあげた状態既存化や作用計画を行うには、内容が不十分で具体性に欠ける場合に、時空強度の詳細化、空

²3.3.3で述べたように作用/場も時空領域をもった定状態素として表現される。

間的な分割による構造化、時間的なプロセスの分解などで、より詳細な定状態素/定状態素の変化/定状態素の集合からなる部分目標へと展開する過程である。(状態展開:state refinement)

stage-2 → terminate: 必要とされる作用/場の所与のものへの対応付け、実現したい作用/場が、設計仕様などによって存在するものとして仮定されている場合や、実現できることが明白であると考えられる過程である。たとえば、交流100Vの電圧が必要となったときに、それは環境から供給されるとみなしたり、ある力学的作用が人間などによって外部から与えられるものとみなしたりすることが、この素過程に相当する。(作用既存化:effect instantiation)

stage-2 → stage-3: 作用/場を実現する定状態素/定状態素の変化/定状態素の集合の策定。これは、必要とされる作用/場をどのようにして発現させるかを考え、それを生起させる定状態素/定状態素の変化/定状態素の集合を可能性の中から選択する過程である。例えば、光を発生することを考えたときに、光を発生させるメカニズム(すなわち、定状態素/定状態素の変化/定状態素の集合)は蛍光、熱放射、燃焼、発振、プラズマなど多数考えられるが、それらの選択肢からどれかひとつを選択することに相当する。(状態計画:state planning)

stage-2 → stage-2: 必要とされる作用/場の、より詳細な部分への展開。これは、必要とされた作用/場が、内容が未確定で、作用既存化や状態計画を行うには不十分であるとき、作用/場の時空強度値を詳細化したり、空間的、時間的、時空強度的に分割、細分化したりすることで、作用既存化や状態計画を可能にする過程である。例えば、複写機の例では、帯電させる作用を空間的に複数の異なる作用に分割したり、時間的に分けて複数の作用の時系列として実現することなどがこれに相当する。(作用展開:effect refinement)

stage-3 → stage-1: 必要とされる定状態素/定状態素の変化/定状態素の集合の目標化。要求される作用/場を発生させるために必要として存在を仮定させた定状態素/定状態素の変化/定状態素の集合は、つぎの段階にはそれ自身が実現の目標となることから、stage-1の段階にいたる。(付随目標:pre-conditional objective)。

実際の設計過程における設計対象の進化は、これら8つの素過程を組合せとして実現されるものと考えられる。図4.5にこれらの段階とその間の素過程の模式図を示す。

設計過程に対応した対象表現の条件として2.6.4で、1.表現内容の変化、2.表現精度の向上、3.表現範囲の拡大、4.表現意図の推移、の4つを挙げた。これらの条件と素過程との関係について考えてみる。

1. 表現内容の変化

物理表現である離散物理世界の記述には、挙動、構造、属性が陽に記述されているが、機能は直接には記述されていない。これは機能が意図を含んだ概念であり物理表現で閉じていないことはすでに2.4で述べた。しかしながら、機能を図2.12で示した機械の図式に対する解釈であると理解すると、機能は直接には表現できないが、機能が言及している意味内容は機械の図式として物理表現の中に陽に記述されていると考えることができる。すなわち、離散物理世界の枠外で機能を記述するにしても、そこで記述されていることが物理的な参照(reference)を離散物理世界は与えることができる。

2. 表現精度の向上

素過程の中で表現精度の向上に直接に関与しているものは、stage-1 → stage-1の状態展開と

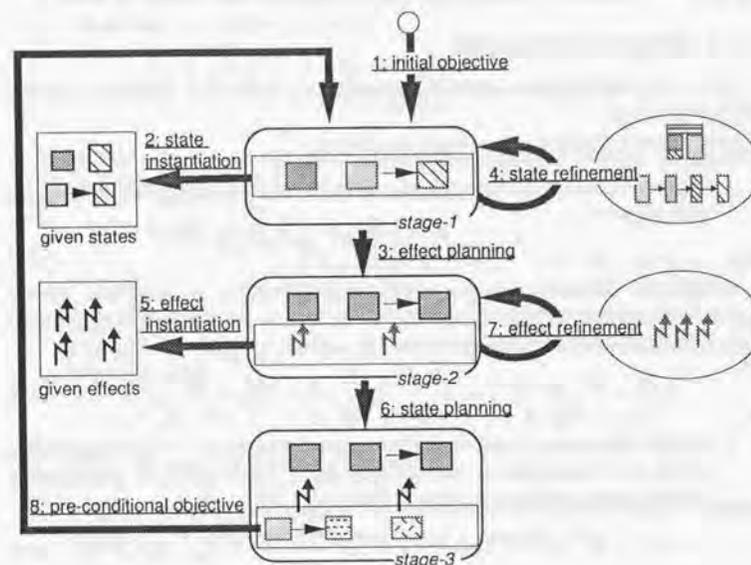


Figure 4.5: 離散物理世界における設計の素過程

stage-2 → stage-2の作用展開である。それぞれ、空間、時間、時空強度に関する定状態素の記述の解像度を細かくし、対象記述の表現精度を向上させるはたらきをもつ。

3. 表現範囲の拡大

表現範囲の拡大については、start → stage-1の初期目標、stage-1 → stage-2の作用計画、stage-2 → stage-3の状態計画、の3つの素過程が該当する。それぞれ新たな定状態素を生成することから、表現される範囲は時間、空間、時空強度について拡張される。

4. 表現意図の推移

表現意図も表現内容と同様に、離散物理世界では陽に記述されない。ただし、考慮する意図として、定状態素の存在する目的ということがらに限定すると、設計の素過程をたどることで、初期仕様として与えられたものか、あるいは別の定状態素/作用/場を存在させるために存在しているのかを求めることは可能となろう。また、定状態素の段階(stage-1~3)を用いることにより、その定状態素が現在、どの程度その存在が支持されているのかといったことがらを区別することもできよう。

表現内容の変化と同様に、表現意図の推移に関しても、離散物理世界の枠組みの外の記述——意味表現——に対して対象/事象の参照先を与える。

つぎに素過程を構成する上で必要となる定状態素への基本操作について考える。

4.2.3 設計過程と定状態素の操作

先に述べてきた離散物理世界での設計対象の進化を実現する上で必要となる、定状態素への基本操作をここで整理しておく。

定状態素に対する基本操作としてここでは以下のものを考える。

1. 生成 (create): ある離散相に対して空間領域, 時間区間, 時空強度値が不定の定状態素 (定状態素変数) を生成する。

$$\phi \rightarrow \langle X^S \times X^T, [Q^i X^{Q^i}] \rangle \quad (4.6)$$

2. 空間的属性 / 関係の詳細化 (s-refine): 定状態素の空間領域に対して, その形状や位置, 寸法などの空間的属性や, 他の空間領域との関係を新たに指定したり, 先に指定されている属性 / 関係をより詳細な属性 / 関係へと置換する。

$$\langle X_j^S \times X^T, [Q^i X^{Q^i}] \rangle, X_j^S \rightarrow X_{j+1}^S \rightarrow \langle X_{j+1}^S \times X^T, [Q^i X^{Q^i}] \rangle \quad (4.7)$$

3. 時間属性 / 関係の詳細化 (t-refine): 定状態素の存在する時間区間について, 始点や終点の時間値や時間長さなどの時間的属性や, 他の時間区間との関係を, 新たに指定したり, 先に指定されている関係 / 属性をより詳細な属性 / 関係へと置換する。

$$\langle X^S \times X_j^T, [Q^i X^{Q^i}] \rangle, X_j^T \rightarrow X_{j+1}^T \rightarrow \langle X^S \times X_{j+1}^T, [Q^i X^{Q^i}] \rangle \quad (4.8)$$

4. 時空強度値の詳細化 (STI-refine): 定状態素の時空強度値を指定したり, より詳細な時空間値で置換する。

$$\langle X^S \times X^T, [Q^i X^{Q^i}] \rangle, X_j^{Q^i} \rightarrow X_{j+1}^{Q^i} \rightarrow \langle X^S \times X^T, [Q^i X_{j+1}^{Q^i}] \rangle \quad (4.9)$$

5. 空間的属性 / 関係の一般化 (s-generalize): 定状態素の空間領域の空間的属性や, 他の空間領域との関係を, より一般的な属性 / 関係で置換する。

$$\langle X_j^S \times X^T, [Q^i X^{Q^i}] \rangle, X_j^S \rightarrow X_{j+1}^S \rightarrow \langle X_{j+1}^S \times X^T, [Q^i X^{Q^i}] \rangle \quad (4.10)$$

6. 時間属性 / 関係の一般化 (t-generalize): 定状態素の存在する時間区間の時間的属性や他の時間区間との関係を, より一般的な属性 / 関係で置換する。

$$\langle X^S \times X_j^T, [Q^i X^{Q^i}] \rangle, X_j^T \rightarrow X_{j+1}^T \rightarrow \langle X^S \times X_{j+1}^T, [Q^i X^{Q^i}] \rangle \quad (4.11)$$

7. 時空強度値の一般化 (STI-generalize): 定状態素の時空強度値をより一般的な時空間値で置換する。

$$\langle X^S \times X^T, [Q^i X_j^{Q^i}] \rangle, X_j^{Q^i} \rightarrow X_{j+1}^{Q^i} \rightarrow \langle X^S \times X^T, [Q^i X_{j+1}^{Q^i}] \rangle \quad (4.12)$$

8. 空間分割 (s-decompose): 定状態素の空間領域を複数の空間領域へと直和分割して, それらを新たな定状態素とする。(図4.6の $A \rightarrow B$)

$$\begin{aligned} \langle \bar{S} \times \bar{T}, [Q^i q_j^i] \rangle, \bar{S} = \bar{S}_1 \oplus \dots \oplus \bar{S}_n \rightarrow \\ \langle \bar{S}_1 \times \bar{T}, [Q^i q_j^i] \rangle, \dots, \langle \bar{S}_n \times \bar{T}, [Q^i q_j^i] \rangle \end{aligned} \quad (4.13)$$

9. 時間分割 (t-decompose): 定状態素の時間区間を複数の時間区間へと直和分割して, それらを新たな定状態素とする。(図4.6の $A \rightarrow C$)

$$\begin{aligned} \langle \bar{S} \times \bar{T}, [Q^i q_j^i] \rangle, \bar{T} = \bar{T}_1 \oplus \dots \oplus \bar{T}_n \rightarrow \\ \langle \bar{S} \times \bar{T}_1, [Q^i q_j^i] \rangle, \dots, \langle \bar{S} \times \bar{T}_n, [Q^i q_j^i] \rangle \end{aligned} \quad (4.14)$$

10. 時空強度値分割 (STI-decompose): ある定状態素について, その時空強度値 (q_j^i) を構成する成分 ($f_1(q_j^i), \dots, f_m(q_j^i)$) へと分解し, それぞれを時空強度値とする定状態素を生成すること。(図4.6の $A \rightarrow C$)

$$\langle \bar{D}, [Q^i q_j^i] \rangle \rightarrow \langle \bar{D}, [Q^{i1} f_1(q_j^i)] \rangle, \dots, \langle \bar{D}, [Q^{im} f_m(q_j^i)] \rangle \quad (4.15)$$

ただし, Q^{ij} は Q^i の j 番目の成分となる時空強度

11. 空間結合 (s-merge): 空間分割の逆操作。ただし, 結合される定状態素の時間区間および時空強度値が等しく, かつ空間領域の和が空間領域であること。(図4.6の $B \rightarrow C$)

$$\begin{aligned} \langle \bar{S}_1 \times \bar{T}, [Q^i q_j^i] \rangle, \dots, \langle \bar{S}_n \times \bar{T}, [Q^i q_j^i] \rangle \rightarrow \\ \langle (\bar{S}_1 \oplus \dots \oplus \bar{S}_n) \times \bar{T}, [Q^i q_j^i] \rangle \end{aligned} \quad (4.16)$$

12. 時間結合 (t-merge): 時間分割の逆操作。ただし, 結合される定状態素の空間領域および時空強度値が等しく, かつ時間区間の和が時間区間であること。(図4.6の $C \rightarrow A$)

$$\begin{aligned} \langle \bar{S} \times \bar{T}_1, [Q^i q_j^i] \rangle, \dots, \langle \bar{S} \times \bar{T}_n, [Q^i q_j^i] \rangle \rightarrow \\ \langle \bar{S} \times (\bar{T}_1 \oplus \dots \oplus \bar{T}_n), [Q^i q_j^i] \rangle \end{aligned} \quad (4.17)$$

13. 時空強度値結合 (STI-merge): 時空強度値分解の逆操作。ある時空強度値の成分を構成する定状態素の時空強度値を合成して定状態素を生成すること。(図4.6の $C \rightarrow A$)

$$\begin{aligned} \langle \bar{D}_1, [Q^{i1} q^{i1}] \rangle, \dots, \langle \bar{D}_m, [Q^{im} q^{im}] \rangle \rightarrow \\ \langle \bar{D}_1 \cap \dots \cap \bar{D}_m, [Q^i f(q^{i1}, \dots, q^{im})] \rangle \end{aligned} \quad (4.18)$$

14. 同一化 (unify): 2つの不定な定状態素 (定状態素変数) を同一のものとしなすこと。

$$X_a^{P^i}, X_b^{P^i} \rightarrow X_c^{P^i} \quad (4.19)$$

ただし $[X_c^{P^i}] = [X_a^{P^i}] \cap [X_b^{P^i}]$

15. 空間汎化 (s-expand): 時間区間に共通部分を持ち、空間的に隣接³する2つの定状態素について、異なる時空強度値を一般化した時空強度値をもつ定状態素を生成する。(図4.7(a))

$$\langle \bar{S}_a \times \bar{T}_a, [Q^i X_a^{Q^i}] \rangle, \langle \bar{S}_b \times \bar{T}_b, [Q^j X_b^{Q^j}] \rangle \longrightarrow \langle (\bar{S}_a \oplus \bar{S}_b) \times (\bar{T}_a \cap \bar{T}_b), [Q^i X_a^{Q^i} \cup X_b^{Q^j}] \rangle \quad (4.20)$$

ただし Outside-contact(\bar{S}_a, \bar{S}_b) \wedge $\bar{T}_a \cap \bar{T}_b \neq \phi$

16. 時間汎化 (t-expand): 空間領域に共通部分を持ち、かつ時間区間が隣接⁴する2つの定状態素について、異なる時空強度値を一般化した時空強度値をもつ定状態素を生成する。(図4.7(b))

$$\langle \bar{S}_a \times \bar{T}_a, [Q^i X_a^{Q^i}] \rangle, \langle \bar{S}_b \times \bar{T}_b, [Q^j X_b^{Q^j}] \rangle \longrightarrow \langle (\bar{S}_a \cap \bar{S}_b) \times (\bar{T}_a \oplus \bar{T}_b), [Q^i X_a^{Q^i} \cup X_b^{Q^j}] \rangle \quad (4.21)$$

ただし meets(\bar{T}_a, \bar{T}_b) \wedge $\bar{S}_a \cap \bar{S}_b \neq \phi$

17. 物理実体への帰属 (belong): 定状態素(変数)を指定された物理実体に帰属させる。すなわち、定状態素を $X_a^P = \langle X_a^D, [Q^i X_a^{Q^i}] \rangle$, 物理実体を (e, D_e) としたとき、定状態素の時空領域は物理実体の時空領域に含まれる。

$$\text{belong}(X_a^P, e) \implies X_a^D \subset D_e \quad (4.22)$$

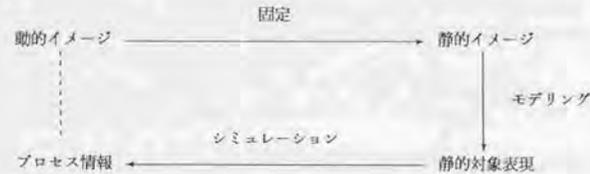
以上列挙した定状態素への基本操作の組合せとして離散物理世界の記述、詳細化を行う。

4.2.4 設計過程と対象に関するプロセス

第2章で述べたように、従来の設計対象表現は基本的には静的な対象表現であり、対象に関するさまざまなプロセスを陽に記述することはできない。

よって、設計者は各プロセスにおける製品の動的なイメージを、静的なものへと自らの内で固定し、それに基づいて静的な対象表現を行なっている。そのようにして記述された静的な対象表現には、もともとの設計対象にイメージされていた動的なプロセスへの適合性が構造の中に埋め込まれているが、それは明示的なものではない。

静的に表現された設計対象のプロセスへの適合性を陽に取り出すには、静的な表現を初期状態とするシミュレーションを実行するなどして、静的表現から時間の経過に伴う変化を取り出し、静的表現を評価する必要がある。



³図3.6における Outside-contact の関係をもつ
⁴図3.6における meets の関係をもつ

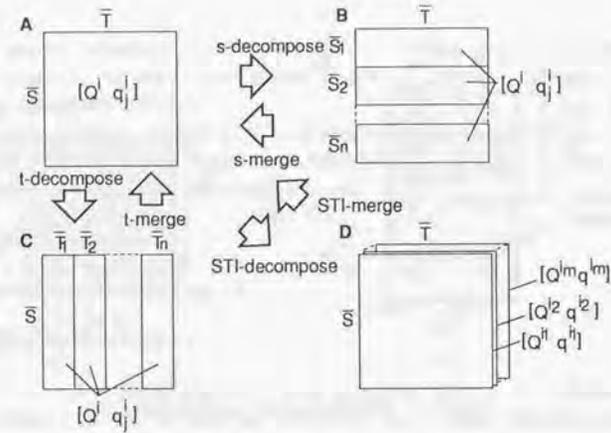
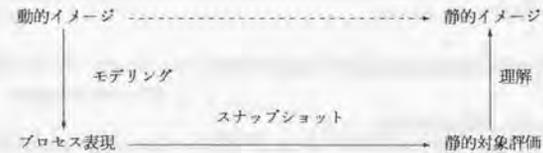


Figure 4.6: 定状態素の分割と結合に関する操作

このように、静的な対象表現を用いた設計過程においては、静的な構造を決定することと、動的なプロセスを決定することが手順として明確に分離され、静的な構造を定めてやらない限り挙動や変化などのプロセスを決定し、評価することはできない。そのため、静的な構造決定 → 挙動評価、という流れが固定され、“ある挙動を実現する構造”のように、まずプロセスがあり、それを実現する静的構造を定める、という方向性を持つことはできない。

離散物理世界は、時間を陽に意識し、対象とする機械の動作している状態をなるべく忠実に記述することを目標としている。設計対象の静的な構造は、離散物理世界の特定の時刻におけるスナップショットとして求めることができる。離散物理世界による設計対象表現は、静的な対象記述ではなく、設計対象を利用している状況を陽に記述する、プロセス指向の対象表現であるといえる。すなわち、機械の利用の段階での動作のプロセスを表現に包含した表現となっている。



この場合、従来の設計対象の静的な表現は離散物理世界に内包されてしまい⁵、挙動を決定していくこ

⁵たとえば、離散物理世界の初期状態を静的表現とみなす。

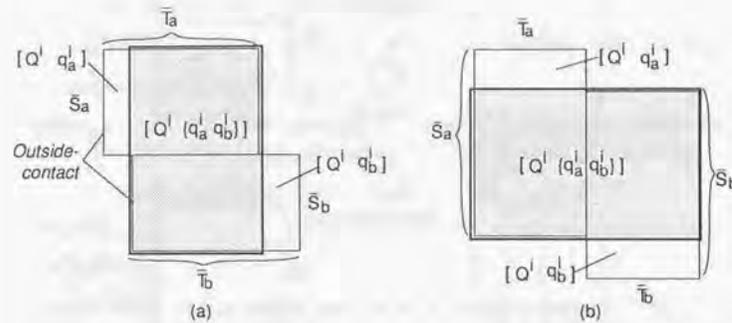


Figure 4.7: 時空強度値の汎化による空間と時間の拡張

が、結果的に静的な表現を定めていることになる。このことにより、静的な対象表現における“静的な構造決定→挙動評価”という流れに固定されず、挙動と構造とを密接に関連させながら並行して定めていくことが、対象表現上の問題としては可能となる。

4.3 設計対象における意味の表現

ここまで、設計対象の非目的的な物理表現に関して議論を行ってきた。本節では4.1.5において議論した設計対象のもつ目的性を表現するために、設計対象の意味表現の概念を導入する。

4.3.1 設計対象表現と意味

まずはじめに、設計対象表現における意味について明らかにする。

ここまでの本論文の対象表現の議論において、物理表現の範囲に含まず、意味表現により記述すべきものは、以下のようにまとめられる。

1. 物理事象の間の物理的因果関係。
2. 目的、手段、帰結などの関係。
3. 設計対象の機能。

これらを順に考えていく。

因果関係

物理的因果関係は、物理表現において陽に取り扱わない。3.3.9で議論したように、物理表現では因果関係を“共起性”という、原因と結果の区別を持たない概念によって置き換え、因果関係は共起していることからの間の解釈であると考えた。

よって、物理的因果関係は、共起性を有している物理事象(定状態素やその変化)の間に、原因と結果を対応付けることで表現される。共起性を有する物理事象間に対して、人間にとり“自然”に原因と結果を当てはめるためには、以下にあげる原則が有効である。

1. 原因と結果は共起性を有する。
2. 原因は結果に対して時間的に先行する。
3. 原因と結果は空間的に近接する。

たとえば、4.2.1で述べた複写機の例において、原稿の像を感光体に照射することと、静電潜像を形成することは共起性を有するが、像の照射(明暗のある光を当てること)を原因、潜像の形成(電荷のない部分が生じること)を結果と考えることは自然な解釈である。

定性推論の分野では、定性的に記述された物理的な系の挙動に対して、因果関係の解釈(因果的説明)を自動的に導出する研究が多く行なわれている(たとえば、[de Kleer 84a][de Kleer 84][田中 89])しかしながら、因果理解が本質的にもつ恣意性のため、自動的な因果関係の解釈には一般に多くの制約や仮定が伴う。ここではこうした因果解釈の自動化を目的とせず、設計者により明示的に与えられる因果関係のみを表現することとする。

目的、手段、帰結

因果関係がおもに物理的、客観的な解釈であったのに対して、目的や手段、帰結は、物理表現の目的論的な解釈である。すなわち、

- 目的: それが存在することが求められているもの。(たとえば、白熱電球における“光”)
- 手段: 目的を存在させるために必要とされるもの。(たとえば、白熱電球における“電流”と“フィラメント”)
- 帰結: 意図されていないが、目的や手段の存在から物理的な帰結として生じてしまうもの。(たとえば、白熱電球における“熱”)

のように、それぞれ人間の意図が含まれている。また、この目的や手段の事象や状態への割付は絶対的なものではなく、ある見方では手段であったものが、別の見方では目的とみなすこともできる。たとえば、白熱電球の“光”は、“熱”を得た帰結であるかもしれない。

ここでは、目的、手段、帰結は、物理表現の一連の物理事象に対する一種のテンプレートと考える。個々の物理事象は、異なるテンプレートに対しては違った役割を担い得る。

機能

対象表現における機能とは、2.4で議論したように、対象の挙動、変換、作用に関する目的論的な解釈、あるいは要求であると考えられる。よって、機能を表示するには、対象の挙動、変換、作用を陽に表示でき、かつそれらが目的であることを記述する必要がある。

離散物理世界における物理表現においては、2.4で導入した機械の図式を構成する定状態素の集合が表示されており、対象の挙動、変換、作用は、それらの定状態素の集合の該当する部分に対して、それぞれ、"～が～する"、"～を～に変換する"、"～を～にする"などのテンプレートを適用することで表示される。また、そうした挙動、変換、作用への意図は、先の目的、手段、帰結でのべた目的の明示化として表示すればよい。

ここで挙げたような対象表現における意味を、具体的にどのように表現するかについて、次に考える。

4.3.2 対象表現の意味表現と言語

設計対象のもつ意味を人間にとって自然に表現する方法は、自然言語を用いることであろう。たとえば、

- 光があたることで、電荷が消える。(因果関係)
- 電荷を与えるために、コロナ放電を行なう。(目的と手段)
- ランプは電流を光に変える働きをもつ。(機能)

を読む人は、そこに表現されている意味を明確に理解することができる。こうした自然言語による意味表現は、豊かである一方、対象表現の形式化という面からみると、ひとつの表現が複数の意味内容を持つ(多義性)、複数の表現が同一の意味内容を有する(多様性)、などの問題をもつ。

自然言語は語用上、構文上の理由により表面的には多様性、多義性を有する。そうした表層的な違いによらず、言語には深層的な意味構造があるとする考えがある。たとえば、フィルモア(C.J. Fillmore)による格文法における深層格フレーム、シャンク(R.C. Schank)らによる概念依存理論(conceptual dependency theory)における概念依存スキーマ[Schank 75]、機械翻訳における中間言語[野村 91]、などではそうした意味構造を形式的に記述することを目的としている。

本研究では、こうした自然言語理解のための意味構造の表現手段のひとつである、シャンクの概念依存理論の考え方に基づいて、設計対象の意味表現を行う。概念依存理論における意味は、1) 実世界の対象、2) 実世界の行動、3) 対象の属性、4) 行動の属性、5) 時間、6) 場所、の6つの概念のカテゴリ(ノードタイプ)、15の概念間の関係(ノードの結合規則)、11の基本的な行動、ならびにそれらを修飾するいくつかの要素からなる構造(概念依存構造)により表現される。概念依存構造の簡単な例を図4.8に示す。

概念依存理論では、複雑な意味内容をもつ文も、還元することで基本的概念(conceptual primitives)の組合せの意味構造として表現できるものとする。この概念依存の考え方を設計対象の意味表現に適用する利点として、

1. 常識や当然の帰結などの自然言語表現では暗黙の事項が、明示的に表現される。
2. 少数の概念要素と構造化の規則で、複雑な意味内容が表現できる。

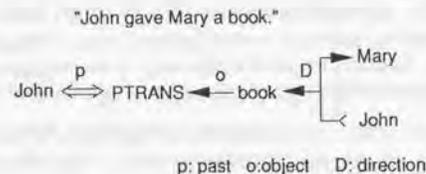


Figure 4.8: 概念依存構造の例 [Schank 75]

3. 1つの意味に対して、原則として1つの概念依存構造が対応する。

4. 因果関係などの言明間の関連が表現できる。

5. 表現の間の時間的な関係が明示的に記述できる。

6. 概念依存の意味表現の単位と、対象表現の意味のまとまりの大きさが近く、対応がつけやすい。

7. 概念依存では対象の状態や状態遷移が陽に表示されており、意味表現と定状態素を基礎とした物理表現との親和性がよいことが期待される。

などが挙げられる。また、概念依存の考え方はこうした利点を持つ一方で、設計対象の意味表現の手段として直接に適用すると、いくつかの問題点も生じてくる。

1. 概念依存は、信念や感情などの精神世界に関する意味構造も表現の対象としており、設計における物理世界には不要な概念や関係を多く含む。
2. 物理世界の表現に対する表現能力が十分ではない、とくに、対象の構造化や、性質、空間、時間の取扱いについて概念依存の枠内では十分な記述が難しい。

これらの問題に対して、本研究では、

- 概念依存の基本概念や関係を、先に述べた対象の意味表現に必要とされる概念、関係に限定することで、単純化をはかると同時に形式性を高め、
- 対象の構造表現や、性質、空間、時間に関する表現は、意味表現のレベルでは詳細に記述、推論せず、物理表現の表現を参照する。

という方針で、概念依存の考え方に基づく対象表現の意味表現言語を構成した。これについて次項で詳しく説明する。

4.3.3 意味表現言語の基本概念

まず、意味表現に用いる基本概念 (category) として以下の項目を言語へ導入する。

PE: 個々の対象を表す。対象は物理世界に存在するインスタンスに関する概念であり、前章で導入した物理実体に相当する。後述するクラスにより分類され、さらに、属性と存在の場所、時間によって規定される。行為に対して主格や目的格を占める。すべての対象概念の集合を PE、個々の対象を表す定数を PE, PE_i, PE_j, ..., 変数を pe, pe_i, pe_j, ... と記す。

CL: 対象の属するクラスを表す。クラスは対象の類を表す概念であり、机や椅子といった普通名詞に相当する。また、クラスは抽象-具象の階層構造を構成し、下位のクラスは上位のクラスのもつ属性、関係、構造を継承する。すべてのクラス概念の集合を CL、個々のクラスを表す定数を CL, CL_i, CL_j, ..., 変数を cl, cl_i, cl_j, ... とおく。

PRED: 物理世界の状態や事象について述語概念を表す。基本的な述語として 1) BE: 対象の存在と、2) CHANGE: 対象の変化、という2つの述語のみを考える。所有の移動や信念に関する述語は、物理世界の意味内容の表現には関係しないため除いてある。

LOC: 場所概念を表す。物理的な空間を表す概念。場所の概念には、3次元空間内での点、線、面、領域などさまざまな、次元のものが考えられるが、それらを含めた概念とする。場所概念の集合を LOC、個々の場所を表す定数を LOC, LOC_i, LOC_j, ..., 場所を表す変数を loc, loc_i, loc_j, ... とする。

TIME: 時間概念を表す。時間軸上の任意の時点あるいは区間を表す概念。時間概念を TIME、個々の時間を表す定数を TIME, TIME_i, TIME_j, ..., 変数を time, time_i, time_j, ... とする。

ATTR: PE, CL, LOC, TIME, REL の属性概念を表す。属性は、単一の対象、クラス、場所、時間、および後述する関係のもつ内的な情報を記述するための基本概念であり、属性名と属性値の組よりなる。それぞれの基本概念に対する属性としては、1) 対象: 状態量、形状に関する諸量、物性など、2) クラス: クラスに属する対象に共通の属性など、3) 場所: 位置、向き、形状など、4) 時間: 時刻、時間長など、5) 関係: 距離など、が考えられる。

すべての属性名の集合を ATTR、ある属性名 ATTR_i ∈ ATTR に対して取りうる属性値の集合を V_i^A、その元を V_{ij}^A とする。

REL: PE, LOC, TIME, ATTR の間の関係概念を表す。複数の対象、クラス、場所、時間、時間に関する情報を記述するための基本概念であり、“位置関係”や“包含関係”などの関係をとらえる観点を、関係名と、“右上”とか“排他”などのある観点で生じる関係値の対により定義される。それぞれの基本概念に対する関係としては、1) 対象: 全体-部分関係など、2) クラス: 抽象-具象関係など、3) 場所: 包含、隣接、方向の関係など、4) 時間: 前後、包含、長短関係など、5) 属性: 大小、排他関係など、がある。

すべての関係名の集合を REL、ある n 項の関係の関係名 REL_i^{R,n} ∈ REL に対して取りうる関係値の集合を V_{ij}^{R,n}、その元を V_{ij}^{R,n} とする。

意味内容はこれらの基本概念の組合せとして表現されるものとする。

4.3.4 基本概念間の結び付き

つぎに、上記の基本概念の間を接続し、意味内容を構成する規約である統語規則について述べる。

対象に関わる統語規則

対象の内的な性質を記述するための統語規則とそれらのリスト表記を以下に示す。

- クラス (class): 対象 (PE) はクラス (CL_i) をもつ。
(PE (CL CL_i))
- 属性 (attribute): 対象 (PE) は属性名 (ATTR_i) に関して属性値 (V_{ij}^A) をもつ。
(PE (ATTR (ATTR_i V_{ij}^A)))
- 場所 (location): 対象 (PE) はそれが存在する場所 (LOC_i) を有する。
(PE (LOC LOC_i))

各項目に複数の内容がある場合 (たとえば、属性名 ATTR_i と ATTR_j のそれぞれについて属性値の指定がある場合) には、項目のラベルの後に、それらを列挙する。

単一の対象または単一の対象に以上の項目を付加したものを対象記述とよぶ。対象記述の例を以下に示す。

$$(PE (CL CL_i) (ATTR (ATTR_i V_{im}^A) (ATTR_j V_{jn}^A)) (LOC LOC_i))$$

複数の対象の間には関係が定義できる。

- 関係 (relation): 複数の対象 (PE₁ ... PE_n) は関係名 (REL_i^{R,n}) に関して関係値 (V_{ij}^{R,n}) をもつ。
(REL (REL_i^{R,n} (PE₁, ..., PE_n) V_{ij}^{R,n}))

たとえば、複数の部分から構成される対象の内部構造は、対象とそれの構成要素との間の関係を記述することで与えられる。こうした対象の間の関係を述べたものを対象関係記述とよぶこととする。

対象に関する統語規則の図式表現を図 4.9 に示す。

場所、時間、クラス、属性に関する統語規則

場所および時間は、属性、関係をもつことがあり、前述の対象に関する属性、関係の統語規則の PE を LOC および TIME に置き換えたものが統語規則となる。

クラスに関しては属性ならびに関係が、属性値に関しては関係が定義され、それぞれ対象に準じた統語規則を持つ。

場所、時間、属性値に対して以下のような関係を用いた内包的な記述の形式を導入できる。

$$V_{ij}^{R,n}(A_1, \dots, A_{n-1}) \iff y \in \{x \mid (\text{REL} (\text{REL}_i^{R,n}(x, A_1, \dots, A_{n-1}) V_{ij}^{R,n}))\} \quad (4.23)$$

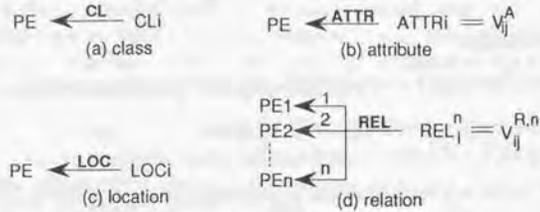


Figure 4.9: 対象に関する統語規則の図式表現

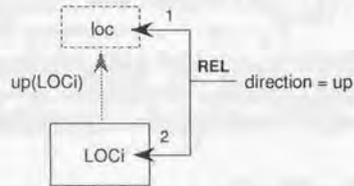


Figure 4.10: 方向関係と相対記述

ただし、 A_1, \dots, A_{n-1} は場所、時間または属性値を表す。たとえば、方向の(2項)関係名 direction、その一つの関係値を up とするとき、 $up(LOC_i)$ は、 $(REL (direction(loc, LOC_i) up))$ を満足する場所変数 loc と等価である(図4.10参照)。

このように、陽に場所、時間または属性値の定数を直接に指定せずに、他との関係により内包的に指定する記述を、ここでは相対記述とよぶ。式(4.23)の左辺の形式で与えられた相対記述は、右辺の形式へと展開して取り扱う。

述語に関する構文規則

次に、2つの述語-BEおよびCHANGE-についての構文規則を述べる。

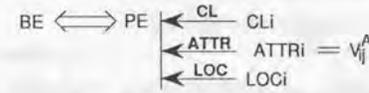
- BE: 存在を表す述語 BE は以下の構文を有する。

(BE <対象記述>) または (BE <対象関係記述>)

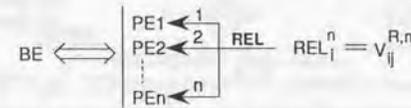
存在述語 BE は、ある対象がクラス、属性、場所、時間などを有していることや、複数の対象の間に記述された関係が存在していることを述べる。

- CHANGE: 変化を表す述語 CHANGE は以下の構文を有する。

(CHANGE PE (<CATEGORY> (FROM V_s) (TO V_e)))



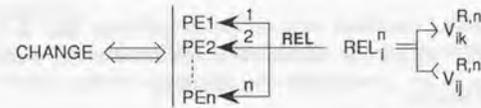
(a) BE (object description)



(b) BE (object-relation description)



(c) CHANGE (ATTR, LOC)



(d) CHANGE (object-relation)

Figure 4.11: 述語に関する構文規則の図式表現

<CATEGORY> は ATTR または LOC を表し、 V_s は変化前の属性または場所を、 V_e は変化後の属性または場所を表す。関係の変化は以下の構文を有する。

(CHANGE (PE₁ ... PE_n) (REL (FROM (REL_iⁿ V_{ij}^{R,n})) (TO (REL_iⁿ V_{ik}^{R,n}))))

以上の構文規則の図式表現を図4.11に示す。

以上の構文規則により結合された基本概念のまとまりが、1つの言明(statement)となる。意味表現の言明の分類と因果関係などの言明間の関連について次に述べる。

4.3.5 意味表現の言明

ここにおける言明(statement)とは、基本概念の連結により物理世界に関する何等かの事実、あるいは要求を述べるものとする。

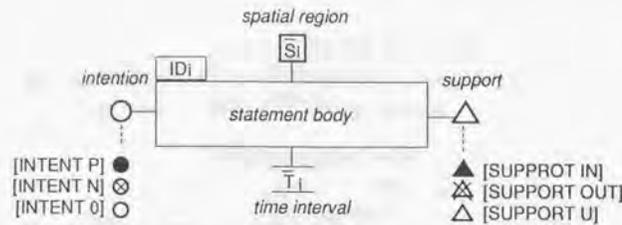


Figure 4.12: 言明の図式表現

言明 D_i は、述語を中心に連結された基本概念よりなる言明本体 (statement body) に対して

- 言明 D_i に対して一意な識別子 ID_i ;
- 言明本体が言及している空間領域 \bar{S}_i ;
- 言明本体が言及している時間区間 \bar{T}_i ;
- 言明本体が、成立することが意図されているのか ([INTENT P]), 成立しないことが意図されているのか ([INTENT N]), あるいは特に意図がされていないのか ([INTENT O]), の区別;
- 言明本体が、成立することが確定しているのか ([SUPPORT IN]), 成立しないことが確定しているのか ([SUPPORT OUT]), 不確定であるのか ([SUPPORT U]), の区別。

の各情報と言明本体と合わせた

$$(ID_i; \langle \text{body} \rangle; \bar{S}_i; \bar{T}_i; [INTENT \langle P | N | O \rangle]; [SUPPORT \langle IN | OUT | U \rangle])$$

として言明を表現する。これら情報を付加された言明の図式表現を図 4.12 に示す。また、言明の自然言語表現 (英語) と、それに対応する言明のリスト表現、図式表現の例を図 4.13 に示す。

言明に対して場所と時間区間を明示することにより、言明が言及する時空間を限定できる。こうした言明相互の時空間的関連を用いることにより、言明に対する推論を効率よく行なうことが可能となる。

また、言明に与えられた設計者の意図の有無や確定・不確定の区別は、設計を進める上で重要な情報を提供する。たとえば、意図されているにもかかわらず存在が確定していない言明がある場合には、そこにおいて設計は終了してならず、その言明の存在を確定させる新たな言明が必要とされる。

表 4.1 は意図の有無と確定の可否との組合せによる言明の状態を表したものである。

こうした付加情報を有する言明を形式論理の枠組みで取り扱うためには、時間を取り扱うための時相論理、同時刻に成立する独立な言明を扱うための多重世界機構、意図や確定の有無を信念や必然性として表す様相論理、などのさまざまな枠組みが必要となる。それらを総合して一つの論理表現とし、効率的な推論機構を与えるのは困難である。

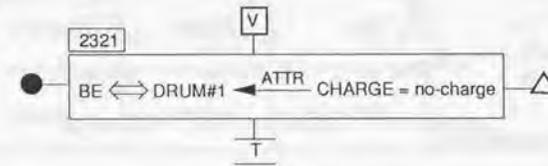
本研究では言明を形式論理によって記述、推論することはせず、意味表現に特化した表現ならびに推論手法を用いる。

The drum(DRUM#1) in region-V should be not charged during time interval-T.

(a) original statement (English)

(#2321 (BE (DRUM#1 (ATTR (CHARGE no-charge))) V T [INTENT P] [SUPPORT U]))

(b) list expression



(c) schematic expression

Figure 4.13: 言明の表現例

4.3.6 言明間の関係

言明は、相互に関連することで、より複雑な意味内容を作り出す。言明の間の関係として、本研究では以下に示す関係を用いる。

空間関係: 言明 D_i と言明 D_j の言及している空間領域間の関係を与える。言明 D_i の言及する空間領域 \bar{S}_i と言明 D_j の言及する空間領域 \bar{S}_j の間の空間関係が V_{ij}^S であることを次のように記す。

$$(S\text{-REL } D_i; D_j; V_{ij}^S)$$

空間関係は、言明で述べられている対象の存在や事象の、包含、排他、干渉などの可能性を与えるものであり、定性的には 69 ページの図 3.6 に示した 8 つの空間領域関係を用いることで表現ができる。

時間関係: 言明 D_i と言明 D_j の言及する時間区間の間の関係を与える。言明 D_i の言及する時間区間 \bar{T}_i と言明 D_j の言及する時間区間 \bar{T}_j との間の時間区間関係の値が V_{ij}^T であることを次のように記す。

$$(T\text{-REL } D_i; D_j; V_{ij}^T)$$

時間関係は、対象の存在や変化の発生に関する言明の間の、先行、同期、干渉などを与えるものであり、定性的には図 3.6 に示したアレンの 13 の時間区間関係を用いることで表現ができる。

意図関係 2 つの言明の間の目的-手段の関係を与える。意図関係は言明の間の意味的な関係を表現するものであり、記述者の希望や解釈が含まれる。目的-手段の間には物理的な裏付けがない点において後述の共起関係とは異なる。言明 D_j を目的、その手段として D_i を考えるとき、以下のように表現する。

$$(I\text{-REL } D_i; D_j)$$

Table 4.1: 意図と確定性との組合せによる言明の状態

SUPPORT INTENT	IN (exist)	OUT (not exist)	U (unknown)
P (to be realized)	success	fail	suspense
N (to be prevented)	fail	success	suspense
0 (no specification)	side-effect	no care	no care

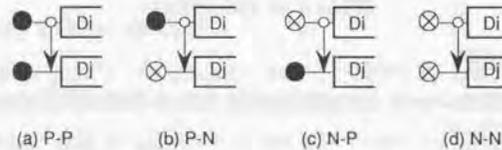


Figure 4.14: 意図関係の4つの場合とその図式表現

図式表現においては D_i の意図ラベルから D_j の意図ラベルへと向かうアークで意図関係の存在を表す。意図関係は2つの言明の意図の有無により以下の4つに分類される。(図4.14)

1. D_i -P, D_j -P: 言明 D_i の成立を目的に言明 D_j の成立が意図される。
2. D_i -P, D_j -N: 言明 D_i の成立を目的に言明 D_j の不成立が意図される。
3. D_i -N, D_j -P: 言明 D_i の不成立を目的に言明 D_j の成立が意図される。
4. D_i -N, D_j -N: 言明 D_i の不成立を目的に言明 D_j の不成立が意図される。

共起関係: 言明 D_i, D_j の間の成立・不成立の共起性に関する関係を与える。ここでは以下に示す4種類の関係を考慮する。

1. 必然生起: ある言明 (D_i) の成立には必ず別の言明 (D_j) の成立が伴う。
(C-REL $D_i D_j$ WITH)
2. 必然不生起: ある言明 (D_i) の成立には必ず別の言明 (D_j) の不成立が伴う。
(C-REL $D_i D_j$ WITHOUT)

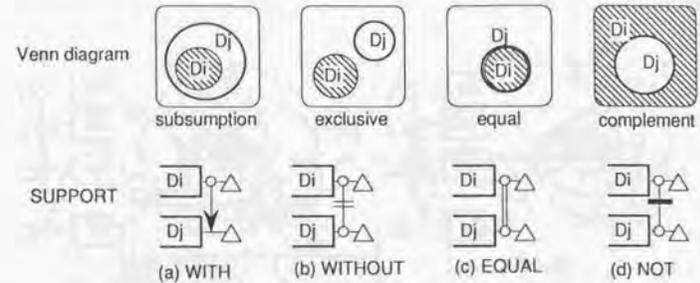


Figure 4.15: 4つのタイプの共起関係とその図式表現

3. 同値生起: ある言明 (D_i) の成立/不成立と別の言明 (D_j) の成立/不成立は常に等しい。
(C-REL $D_i D_j$ EQUAL)
4. 排反生起: ある言明 (D_i) の成立/不成立と別の言明 (D_j) の成立/不成立は常に逆となる。
(C-REL $D_i D_j$ NOT)

これら4つの共起性のそれぞれについて、言明が成立する可能世界を表したものと、その図式表現を図4.15に示す。共起関係のうち、必然生起と必然不生起に関しては、単一の言明 D_i の代わりに複数の言明の組 $D_{i1}, D_{i2}, \dots, D_{in}$ を第一項とした共起関係

$$(C-REL (D_{i1} \dots D_{in}) D_j <WITH | WITHOUT>)$$

も考える。これは、 $D_{i1}, D_{i2}, \dots, D_{in}$ それぞれ単独では言明 D_j と共起関係を持たないが、すべて成立したときに、言明 D_j が成立(必然生起)あるいは不成立(必然不生起)となるものである。図4.16に複数の言明における共起関係のVenn図とその図式表現を示す。

言明の成立の有無と共起関係とは独立ではなく、表4.2に示すように、論理的に妥当な組合せがある。この表に示された論理的に妥当な組み合わせを推論に用いることで、言明の成立、不成立を共起関係から決定できる場合がある。

いま、言明 D_i と D_j の間に (C-REL $D_i D_j$ WITH) が成り立っているとすると、言明 D_i が成立 (IN) のとき (表の第1行) には、WITH の共起性をもつ言明 D_j は成立 (IN) 以外にはなり得ない。逆に D_j が成立 (IN) であり (表の第1列)、WITH が成り立っている場合には D_i の成立 (IN)、不成立 (OUT)、未確定 (U) のいずれでもよい。

4.3.7 設計対象の意味表現

対象の意味表現は、相互に関係付けられた言明の集まりとして表現される。ここで具体的な例として、先に4.2.1で述べた複写機の複写プロセスにおける静電潜像形成のプロセスの意味記述を考える。このプロセスの要求事項を自然言語により表現すると次のようになる。

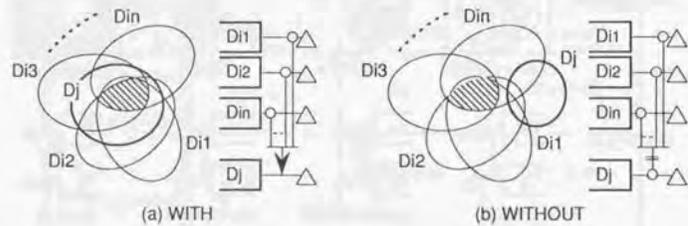


Figure 4.16: 複数の言明における共起関係とそれらの図式表現

1. 原稿となる紙があり、紙には白い部分と黒い部分とがある。
2. 黒い部分と同じ形状の静電潜像をドラム上に形成したい。
3. そのためには、ドラム上の正電荷を像の形を残して除去する必要がある。
4. それには、あらかじめドラム上は正電荷でなくてはならない。
5. 静電潜像、元になる正電荷、および除去の変化は明るいと存在しないため、ドラムの周辺は明るくてはいけない。

ここであげた文章の最初の文は、前提条件にあたり、原稿である紙の存在が仮定されている。2番目の文が目的であり、これを存在させることが意図される。3番目の文は2番目の文の目的を実現させる手段であり、この文の言明が成立すると2番目の文で意図される目的が実現される。4番目の文は3番目の文が成立するための前提条件であり、5番目の文は2、4番目の文を成立させるための必要条件である。

以上の5つの言明と、それに4つの言明を付加したものを図式表現により図4.17に示す。上記の文の番号が図中の言明の識別子に対応している。言明1は存在が仮定されているため [SUPPORT IN] (図中の黒の三角) である。また、それ以外の言明に関しては、まだその存在が成立するか否かが不定であるため、[SUPPORT U] (白い三角) となる。言明5は、言明2,4と排反共起関係にあり、双方が同時には成立しない。

言明2, 3, 4の存在が意図されている ([INTENT P] 黒い丸) のに対して、言明5は存在しないことが意図される ([INTENT N] ×付き丸)。また、前提である言明1は存在することが定まっており、成立の有無に対する意図はない ([INTENT 0] 白い丸)。

ここで導入した意味表現に4.3.1で議論した因果関係、目的-手段-帰結、機能がどのように表現されているか、図4.17を例に見てみることにする。

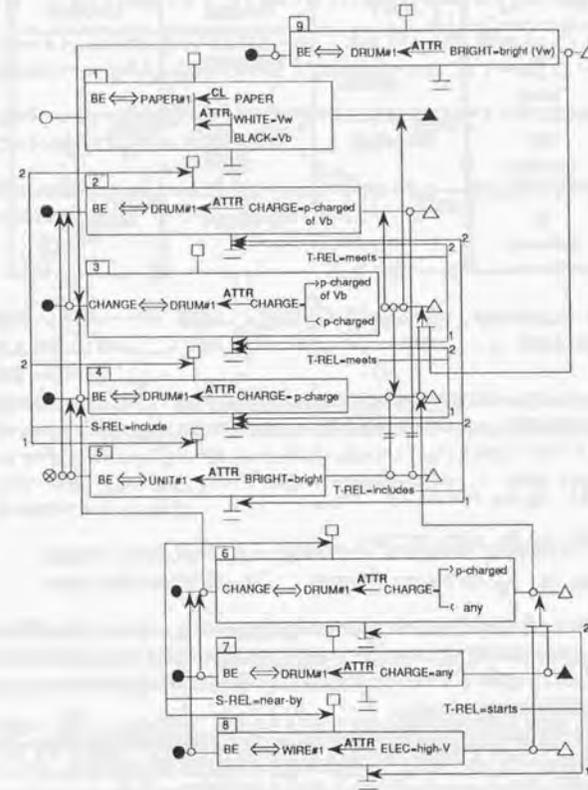


Figure 4.17: 静電潜像形成プロセスに関する意味表現の図式表現

Table 4.2: 言明の成立の有無と妥当な共起関係

SUPPORT (C-REL Di Dj X)			
Di \ Dj	IN (exist)	OUT (not exist)	U (unknown)
IN (exist)	WITH EQUAL	WITHOUT NOT	
OUT (not exist)	WITH WITHOUT NOT	WITH WITHOUT EQUAL	WITH WITHOUT
U (unknown)	WITH	WITHOUT	WITH WITHOUT EQUAL NOT

因果関係

4.3.1で述べたように、物理事象の間に因果関係を確認する基準として、1) 共起性、2) 時間的先行関係、3) 空間的近接関係、の3つが成立する必要がある。意味表現において事象 A についての言明を D_A 、事象 B についての言明を D_B としたとき、これら3つの条件は以下のように表現できる。

- (C-REL $D_A D_B$ WITH)
- (T-REL $D_A D_B$ PROCEEDS⁶)
- (S-REL $D_A D_B$ NOT-EXCLUSIVE⁷)

図4.17の例では、言明2(静電潜像の存在)と言明3(静電潜像の形成)の間には上記の条件を満足する関係が存在し、言明3を原因、言明2を結果とする因果関係が認められる。共起性の点では言明3と言明4(正電荷の存在)の間にも WITH が成立するが、時間的先行関係が逆転しているため、必要条件とはなっても因果関係とは認められない。

直接的な原因-結果の対だけでなく、多段階の原因-結果の連鎖を経た間接的な原因-結果の対にも因果関係を確認することもある。そのような場合には図4.17で示される共起関係のネットワークをたどることで原因と結果を結びつけることが可能である。たとえば、言明6と言明9の組を言明3の原因とすることは妥当な解釈といえる。

目的、手段、帰結

目的、手段、帰結は、言明間に与えた意図関係を用いて次のように導出される。

⁶before, meets, overlaps, finished-by, contains のどれかの関係
⁷exclusive 以外の空間領域関係

- 言明の意図の有無の値が [INTENT P] (存在が意図されている) であれば、その言明は目的である。(たとえば図4.17の言明2, 3, 4)
- 言明 D_i と言明 D_j に対して、(C-REL $D_i D_j$ WITH) および (I-REL $D_i D_j$) が成り立つとき、 D_i は D_j の手段である。(たとえば図4.17における言明2に対する言明3)
- 目的であり、かつ他のすべての言明 X に対して (I-REL $D_i X$) を持たない(すなわち、意図関係の有向グラフの根にある)言明 D_i は、根元的な目的である。(たとえば図4.17の言明2)
- 言明 D_i と D_j の間に前述のような因果関係が認められ、かつそれらの間に意図関係が与えられていない場合、 D_j は D_i の帰結である。

因果関係と同様に、目的と手段の関係についても、多段階の目的-手段の連鎖による間接的な目的-手段の解釈が可能である。

機能

因果関係および目的-手段-帰結が、共起関係ならびに意図関係により関に表現されるのに対して、機能は意味表現上に直接の記述を持たない。これは4.3.1でも述べたように、機能が挙動、作用、変換という多様な側面をもつことによる。

本研究では、機能を求める対象が関わる言明と、それらの間の意図関係、共起関係をもとに、機能を導出する。挙動、作用、変換のそれぞれの機能のとらえ方に対応した意味表現の解釈を以下に示す。

- 挙動: 挙動の観点からは、望ましい状態あるいは状態の変化としての振舞いを実現することが対象の機能である。すなわち、

機能を考える対象が関わっている言明のうち、最も根元的に意図されている言明の表す状態または状態の変化

を機能と考えればよい。たとえば、図4.17におけるドラム (DRUM#1) の、挙動としての機能は、DRUM#1を含む言明(2,3,4,6,7,9)の意図の系列の根元にある言明2(紙の黒い部分の形 (Vb) の荷電状態を存在させていること)となる。

- 作用: 作用としての機能は、機能を考える対象が他の対象を意図通りに存在させたり変化させたりすることである。このことは、機能を考える対象を含む言明によって、

- 存在させられている (WITH) 他の対象の存在や変化に関する言明のうち、存在が意図されている ([INTENT P]) もの、
- 存在させないようにされている (WITHOUT) 他の対象の存在や変化に関する言明のうち、存在しないことが意図されている ([INTENT N]) もの

が、作用としての機能である。たとえば、図4.17の言明8に現れる WIRE#1 に関しては、言明8が言明6を存在させ、かつ言明6の存在が意図されるから、言明6で記述される”ドラムを正に帯電させること”が作用としての機能となる。

- 変換: 変換としての機能は作用としての機能の考え方を基にして意味表現から取り出すことができる。機能を考える対象 PE に関して、その作用としての機能を与える言明の組を D_{o1}, \dots, D_{on} とする。また、PE に対して作用を与える対象を求め、その作用を生じる (因果関係の原因となる) 言明を D_{i1}, \dots, D_{im} とする。すると、PE は D_{i1}, \dots, D_{im} により作用を他から受け、 D_{o1}, \dots, D_{on} という作用を他に及ぼしており、 $((D_{i1} \dots D_{im}), (D_{o1} \dots D_{on}))$ の組を対象 PE の変換としての機能とみなすことができる。

図 4.18 に意味表現における 3 つの観点の機能を図式表現で示す。

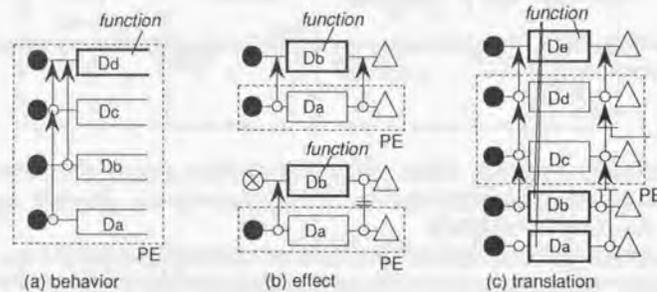


Figure 4.18: 意味表現における 3 つの機能

ここで取り扱う機能は意味的に見たときに低い (具体的な) レベルであり、物理的内容が明確なものに限られている。そのため、「時刻を表示する」といった抽象的な内容をもつ機能を表現することはできない⁸。

4.3.8 意味表現と物理表現との関連

以上に述べてきた意味表現は対象および事象を表現するひとつの方法であり、物理表現とは独立に議論を進めてきた。しかしながら、同一の対象に関して意味表現は目的論的表現を与え、他方、物理表現は現象論的表現を与えている。これら 2 つの表現の間には図 4.19 に示すように相互の密接な関連を有している。

図 4.19 に示された意味表現と物理表現との間の 4 つの対応を、図の左から順に以下に説明する。

specification: 意味表現は、物理表現がどのようにあるべきか、という仕様を与えていると見ることができる。こうした見方に基づくと、与えられた意味表現の内容を満足するように、物理表現の定状態素が生成されたり、詳細化されたりすることになる。

⁸2 つの針があってそれらがある速度関係をもって回転運動する、とすれば物理的に表現できる

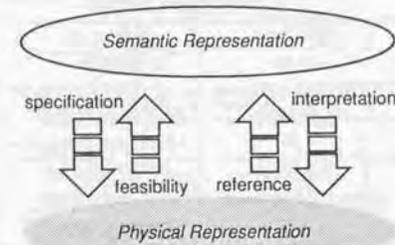


Figure 4.19: 物理表現と意味表現との関連

feasibility: 意味表現で記述された物理世界が存在可能であるかどうかの検証を行なう。必ず存在すれば意味表現の言明を [SUPPORT IN] に、必ず存在できなければ [SUPPORT OUT] とする。この場合には、物理表現は意味表現で記述されている内容の物理的妥当性を評価するものとなっている。形式論理の命題として意味表現としてとらえると、物理表現はその真偽を与えるモデルに相当する。

reference: 物理表現は、意味表現に対して推論に必要な対象に関する詳細な情報 (位置、形状、属性、関係など) を提供する。すなわち、意味表現において表現、推論することが困難な空間的な位置関係や時間的前後関係、より詳細な物理属性などの情報を物理表現で記述、推論する。意味表現から見ると、物理表現は物理的な情報に関する演繹データベースの機能を有している。

interpretation: 意味表現は物理表現で記述された物理世界に対して、目的、手段や因果関係の意味を与える。たとえば、物理表現のある定状態素が何を目的に存在しているのか、何によって存在しているのか、などは、対応する意味表現を参照することで求められる。

本節で導入した意味表現の基本概念と前章で述べた物理表現の基本概念とは表 4.3 に示す対応関係が成立する。

意味表現 (表 4.3 の左カラム) の各項目は、それに対応する右カラムの物理表現での内容へと翻訳される。たとえば、107 ページの図 4.13 にあげた言明

```
(#2321 (BE (DRUM#1 (ATTR (CHARGE no-charge)))) V T [INTENT P]
[SUPPORT U])
```

を物理表現への仕様として考えると、これは以下に示す物理表現上での一連の操作へと展開される。

1. create: 対象の状態を表すための定状態素 \bar{P} を生成し、
2. s-refine: 定状態素 \bar{P} の空間領域関係として隣に与えられた空間領域 V に含まれることを指定し、

Table 4.3: 意味表現と物理表現の基本概念間の対応関係

意味表現	物理表現
対象	物理実体
対象の状態	定状態素
対象の属性	定状態素の時空強度 または複合物理属性
対象の関係	定状態素間関係
対象の属性/場所の変化	事象(定状態素対)
場所	定状態素の空間領域
時間	定状態素の時間区間
言明のスコープ	時空領域

3. l-refine: 定状態素 P の時間区間関係として与えられた時間区間 T に含まれることを指定し,
4. STI-refine: 定状態素 P の時空強度である電荷密度に対して時空強度値に無電荷であることを指定し, さらに
5. belong: 定状態素 P を物理実体 DRUM#1 (存在しない場合には新たに生成し, DRUM#1 と名付けた物理実体) へと帰属させる

また, 意味表現から与えられた定状態素が物理的に存在不可能であるとき, 物理表現は意味表現に対して言明が存在不可能であるとして [SUPPORT OUT] を返す。

意味表現の言明とそれを仕様として生成された物理表現の定状態素とは相互に対応関係が付けられる。この対応関係を用いることで, 意味表現側では, 対象に関する詳細な情報(たとえば, 陽に記述していない属性や他の対象との関係など)を参照することができ, また逆に物理表現側からは, 定状態素がどのような因果関係や目的の元に存在しているか(すなわち, 定状態素の意味)を, 意味表現中にたどることができる。図 4.20 に意味表現の言明と物理表現の定状態素との対応の概念図を示す。

4.3.9 意味表現についてのまとめ

以上, 設計対象を表現する上において, 離散物理世界に基づく物理表現と対となる意味表現について述べてきた。本節の最後に意味表現の問題点について整理しておく。

これまで繰り返し述べてきたように, 意味表現は物理表現で抽象された因果, 目的, 機能などの非物理的な記述を表現したものであり, 物理世界の有り様を表現した物理表現に, 機械製品としての意味を与えるものである。また, 逆の見方をすると, 物理表現は意味表現で表される目的や意図の, 物理的な意味を与えている。

本研究では物理表現への対応関係を明確にすることを目的として, 意味表現の基本概念, 統語規則, 構文および言明の関係を定めた。よってここで導入された意味表現は本研究で用いた離散物理世界による物理表現に依存する部分が大きく, また物理的な制約を大きく反映したものになっている。そのため,

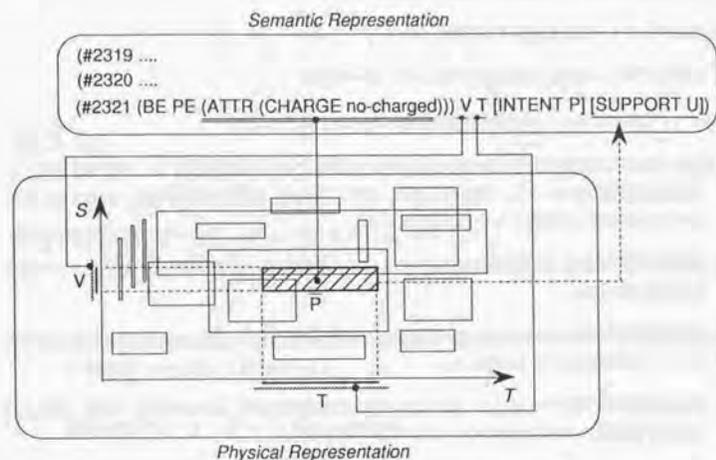


Figure 4.20: 意味表現の言明と物理表現の定状態素との対応

感性, 好み, コスト, 情報といった機械製品のもつ非物理的な意味を表現できない。これらのことを表現するには, 本研究で述べた“離散物理世界による物理表現”+“物理的に明確な基本概念により構成される意味表現”という対象表現の枠組みの外部に非物理的な意味を表現し, 解釈する仕組みが必要となる。

また, ここで述べた意味表現は, 設計過程において有用な情報—たとえば目的と手段の関係や意図の有無など—を提供できるが, 設計過程そのものは対象表現の枠組みに含まれていない。それに対して設計の意図と設計過程とを組み合わせて表現することも考えられる。たとえば, 岡田らの DPL (Design Process Language) は設計者の意図と設計対象のモデリング・プロセス(モデルとオペレーション)とを融合した形で表現するアプローチをとっている [岡田 93]。こうしたアプローチと比べると, 本研究の意味表現は静的な表現といえる。ここでいう静的とは表現される対象が静的ということではなく, 設計過程を表現に内包しないという意味である。本研究の意味表現が設計過程を陽に含まないのは, 実際の設計の過程は設計者によって異なるが, 設計対象の意味的な構造はそうした設計者によらない, 共通したものがあると考えたことによる。設計過程の記述は先の非物理的な意図と同様に, ここで提案する対象表現(物理表現ならびに意味表現)の外側に付与され, 対象表現の詳細化を駆動すると考える。

4.4 本章のまとめ

本章においては,

- 離散物理世界による対象表現の設計への適用について
- 設計対象のもつ意味を表現する手法について
- 本研究で提案した設計対象表現の考え方の、他への適用

の3点について述べてきた。そこで得られた結果を要約して以下に示す。

1. 前章で定義した離散物理世界と設計対象表現との関係について考察を加えた。設計対象表現として離散物理世界を考えると、状況の多様性、状況の包括性、設計対象の進化性、設計対象の目的性の4点を考慮して表現することが重要である。
2. 離散物理世界における設計過程を議論するために、単純化された乾式複写機の複写プロセス部の物理表現を与えた。
3. 離散物理世界の詳細化の段階を4つに分類し、段階から段階への遷移のプロセスを設計の素過程として、設計過程モデルを提案した。
4. 設計の素過程を実現するために、離散物理世界の定状態素に対する生成や空間、時間、時空強度の指定や詳細化、各種の演算についての基本操作群を定めた。
5. 本研究で提案された対象表現は、対象の静的な構造と動的なプロセスが同一のスキーマで表現できるため、製品に関するさまざまなプロセスを統合的に表現できる可能性を持つ。
6. 設計対象における意味について整理を行い、物理的因果関係、目的-手段-帰結、機能のそれぞれを意味表現においてはどのように取り扱えばよいかを考え、自然言語理解の分野における概念依存理論の考え方を援用し、意味表現言語を定義した。
7. 意味表現言語は対象、クラス、述語、場所、時間、属性、関係という基本概念から構成され、それらの基本概念の統語規則を与えた。また、これらの基本概念の組合せに対して意図の有無、存在の可否、言明されている場所と時間の情報を付加した言明を考え、言明の構造として意味表現をとらえた。
8. 言明の間の共起関係、意図関係、空間-時間関係を定義し、それらを用いて意味表現から因果関係、目的-手段-帰結、機能を取り出す方法について述べた。
9. 目的論的对象表現である意味表現と現象論的对象表現である物理表現との関連について述べた。意味表現は物理表現に対して、あるべき物理世界の仕様と、物理世界に対する解釈を与え、物理表現は意味表現に対して、存在物の参照(reference)と詳細な情報を提供する。

第5章

設計対象モデリング・システム

本章では定状態素の概念に基づく設計対象表現法の、設計対象モデリング・システムとしての実装について詳しく述べていく。

5.1 設計対象モデリング・システムの概要

本研究で開発した設計対象モデリング・システム(Design Objects Modeling System:DOMS)は第3章ならびに第4章で述べた設計対象の物理表現と意味表現を計算機上に実装し、設計過程に対応した段階の詳細化の実現を目指したものである。以下にDOMSの概略と機能、基本構成について簡単に説明する。

DOMSはEWS(Engineering Workstation)であるSun Workstation上に、オブジェクト指向プログラミング言語EUSLISP¹[松井91]で記述されており、SunOSとSunView環境下で動作する²。システムのプログラム量はLISPのソースコードでおよそ13,500行である。

DOMSは、設計初期段階から詳細設計段階にいたる対象の総合的なモデリングにより設計者を支援することを目的としている。そのために以下の基本機能を有する。

1. 設計対象を空間-時間の枠組みで記述でき、設計対象の挙動や属性の変化などを明示的に表すことができる。
2. 設計対象に関して、設計初期段階における定性的で部分的な内容から、定量的でかつ全体として整合性が要求される内容まで、一貫した表現が可能となる。
3. 設計対象に対する目的、前提、制約、意図、機能などの意味表現を陽に記述し、それらの間の整合性の管理や推論等を行なうことができる。

つぎにDOMSの基本構成を述べる。DOMSは図5.1に示す複数のサブシステムから構成される。DOMSは物理表現を扱う状態モデリング・システム(State Modeling System:SMS)と、意味表現を扱う意味表現処理システム(Semantic Representation Processing System:SRPS)に大

¹EUSLISPは工業技術院電子技術総合研究所の松井俊浩氏によって開発されたオブジェクト指向のLISP言語である。

²一部はX Windowでも動作可

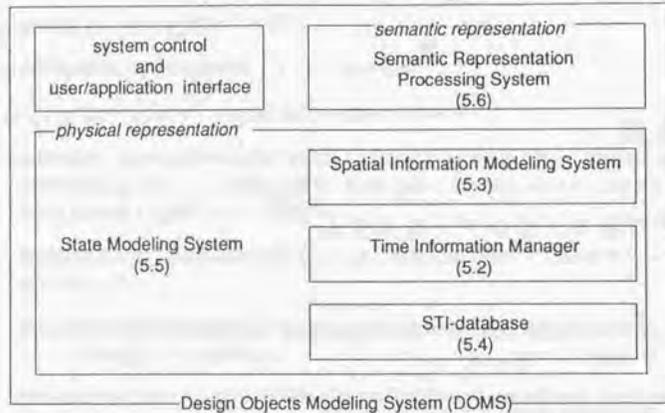


Figure 5.1: 設計対象モデリング・システム (DOMS) の基本構成

別される。状態モデリング・システムには、空間情報を取り扱う空間情報モデリング・システム (Spatial Information Modeling System: SIMS)、時間情報を取り扱う時間情報モデリング・システム (Time Information Manager: TIM)、時空強度値に関するデータベース (STI-database) などが含まれる。

時空の取扱いに対して、ここでは空間情報モデリング・システムと時間情報モデリング・システムという2つの独立したシステムを用いている。時空間は3次元の空間と1次元の時間により張られる空間であるが、3次元のユークリッド空間と1次元の時間軸は、それぞれが固有の属性、関係、制約を持つ。表現と処理を分離する方が時空の取扱いが容易となることと、離散物理世界で取り扱う定状態素が3.5次元で時間軸方向に空間領域が変化しないことを理由に、空間と時間を分離して表現、処理している。状態モデリング・システムはその結果を総合することで、時空間での属性、関係、演算等を行う。

本章では次節以降、

1. 時間情報モデリング・システム (5.2 節)
2. 空間情報モデリング・システム (5.3 節)
3. 時空強度値データベース (5.4 節)
4. 状態モデリング・システム (5.5 節)
5. 意味表現処理システム (5.6 節)

の順にその詳細を述べ、最後に DOMS により可能となったことについて論じる。

5.2 時間情報モデリング・システム

5.2.1 時間情報のモデリング概念

まず、局所時空系の時間を計算機で統合的に表現し、操作する方法について述べる。

空間 (とくに形状) の情報の取扱いが、形状モデリングとして研究、開発が盛んであるのに対して、時間情報の計算機での取扱いは、これまでアプリケーション・プログラムごとに個別の表現と処理が行われ、アプリケーションから独立した時間モデルの概念へと発展していない。それは、時間が形状と比べて簡単な構造と属性を持ち、モデルとしての取扱いが不要であったことがあげられる。しかしながら、そのことが時間の表現と処理の共通化を遅らせ、時間情報処理の高度化を妨げてきたともいえる。

本研究では、より汎用的でかつ強力な表現、推論機能をもつ時間情報のモデリングシステムを開発することを旨とした。

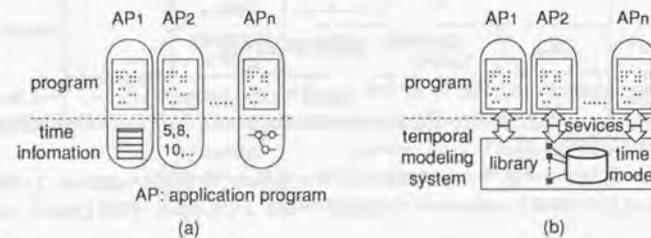


Figure 5.2: 時間情報のモデリングの概念

5.2.2 時間情報の分類と整理

まず、はじめに代表的な時間表現を分類、整理する [Onosato 92]。ここでは、分類に以下の5つの軸を考える。

時点 (point)–区間 (interval): 時間の表現の基本単位として、事象を中心とした時点と、状態を中心と考えると区間のどちらを選ぶかの選択。

絶対的 (absolute)–相対的 (relative): 属性や関係の指定に関して、絶対的な基準と相対的な関係のどちらを用いるかの区別。たとえば、“3時20分”は絶対的な記述であり、“到着後20分”は相対的な記述に該当する。

定量的 (quantitative)–定性的 (qualitative): 時間の属性や関係の指定において、数値で表現される定量的な値と、定性的な値や関係のどちらを用いるかの選択。前後関係を指定する場合に“20分前”とするのは定量的であるし、ただ単に“前”は定性的である。

連続的 (continuous)–離散的 (discrete): 時刻や時間長の時間値に連続的な値を許すか、離散値のみを許すかの違い。連続的な場合、2つの値 $a < b$ に対して、常に $a < c < b$ なる値 c が存在する (図 5.3(a))。離散値の場合にはそうした c が存在しないことがある (図 5.3(b))。

確定的 (unique)–選択的 (range): 時間の属性や関係の指定に際して、ある確定的な値のみを指定できるのか、あるいは選択可能な候補を指定できるのか、の区別。たとえば、時間区間長として $d = 10$ とするのは確定的であるし、 $10 < d < 20$ は選択的である。

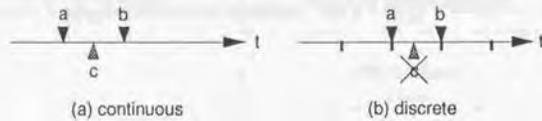


Figure 5.3: 時間値の連続と離散

これら5つの分類軸のそれぞれについて、どちらの考え方を採用するかで分類を行うと、 $2^5 = 32$ の要素をもつマトリックスが構成できる。既存の時間情報表現法をこのマトリックスの該当する箇所に記載して整理したものを表 5.1に示す。

たとえば、表 5.1において、5つの分類基準が1) 時点 (point), 2) 相対的 (relative), 3) 定性的 (qualitative), 4) 連続的 (continuous), 5) 選択的 (range), となる表現は、半順序 (partial order) がある。

離散物理世界をモデリングするためには、時間に関してどのような表現が適当であるかをこの分類軸について考える。

時点と区間

区間は時点の対 (t_a, t_c) として表現でき、また、時点も区間の境界 $Start(\bar{T}), End(\bar{T})$ として表現できることから、どちらを陽に表現しても他方を導出でき、同等の表現能力がある。しかしながら、時点に基づく表現と区間に基づく表現とでは、問題の性質により記述の容易さが異なる。たとえば、時点の前後関係を時間区間の関係 (3.6に示す Allen の定性関係) で表現すると、時間区間の複数の関係による表現となる (図 5.4(a))。逆に、時間区間の関係の "before または after" という表現は、時点の関係では単純な選言とならない (図 5.4(b))。本研究では区間を記述の基本とし、時点の表現を補助的な表現として併用する。これにより推論が効率化できるが、同時に、

- 時点と区間との表現が重複するため、整合性を保証する必要がある。
- 時点と区間との集合演算に関して、意味的な矛盾が生じる。

という問題が生じる。

Table 5.1: 時間情報表現法の分類マトリックス

		quantitative		qualitative		
point	continuous	time stamp	equation	full order		unique
		duration	inequality	partial order	tense	range
	discrete	alternative event	integer programming	disjunctive ordered event		
		numbering	timing chart	queue	date system	unique
interval	discrete	clock pulse	time chart			range
		alternative activity	integer programming			
	continuous	stochastic activity	inequality	Allen's method	tense	
		Gantt chart	PERT			unique
		absolute	relative		absolute	

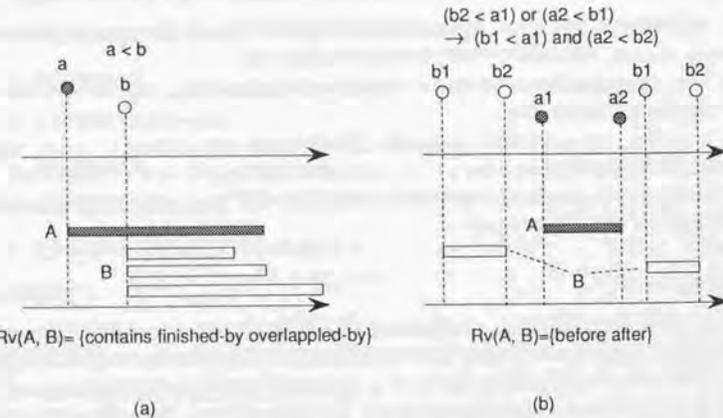


Figure 5.4: 時点による表現と区間による表現の違い

1番目の問題に対しては、時点の表現と区間の表現との間の依存関係を明確にし、表現間の情報交換を通じて整合性の管理を行う方法をとる。詳しくは次のインプリメンテーションについての項で述べる。

また、2番目の問題は、時間区間を実数軸の閉区間と考え、 $[a, b]$, $[b, c]$ の2つの区間を考えたとき、 $[a, b] \cap [b, c] = b$ となり、時点 b はどちらの時間区間にも属する。 $[a, b]$, $[b, c]$ を状態と考えたときには、時点 b は2つ状態を有してしまう。区間を開区間 (a, b) あるいは半开区間 $(a, b]$ $[a, b)$ で与えたとしても同様な問題が生じてくる。この問題に対しては、時間区間の集合演算として以下の正則集合演算を採用することで回避できる。

$$\begin{aligned} \bar{T}_a \cap^* \bar{T}_b &= Cl(Op(\bar{T}_a) \cap Op(\bar{T}_b)) \\ \bar{T}_a \cup^* \bar{T}_b &= Cl((Op(\bar{T}_a) \cup Op(\bar{T}_b)) \\ &\quad Cl(X) \text{ is a closure of } X \text{ and } Op(X) \text{ is an open kernel of } X. \end{aligned}$$

この場合、 $[a, b]$ と $[b, c]$ とは $[a, b] \cap^* [b, c] = \phi$ となって共通時点を有さない。

絶対的と相対的

絶対的な記述は、基準に対する相対的な記述へと変換できる。たとえば、長さ10cmという絶対的な長さの指定は、単位長の時間区間長 a の10倍 $(10a)$ の長さで表すこともできる。相対的な記述は絶対的な記述を包含している。

また、設計では絶対的な時間(時刻, 時間長)よりも他との相対関係として時間関係や値が与えられることが多い。こうした理由により、本研究では相対的記述を行なう。

定量的と定性的

時間の定性的な情報としては、時間情報の基本構造(時間区間や時点の位相)や、大まかな時間情報がある。たとえば、時間区間相互の干渉や包含は定性的な関係である。

他方、定量的情報は定性的情報で定まった時間情報の基本構造を詳細化し、具体的な時点や区間として構成する場合に必要とされる。

このように、設計の進行に応じて定性的情報と定量的情報を使い分ける必要がある。よって、定性的情報と定量的情報の双方が取り扱えることと、双方の情報を連続的に結びつけることが重要である。後者を実現するには、定性的記述に情報を追加して定量的記述に移行したり、逆に定量的記述から定性的記述を抽出することが必要とされる。

連続的と離散的

離散的な時間軸を整数の集合、連続的な時間軸を実数の集合として考えると、離散的な時間軸は連続的な時間軸の概念に含めることができる。ここでは、物理世界は連続的な時間軸でモデル化するのが適当であることと、より汎用的な表現を目指すことから、連続的な時間軸を取り扱いの対象とする。

連続的な時間軸で離散的な時間軸を表現できるが、操作や推論に関しては、連続と離散の区別した取り扱いが必要である。たとえば、最適化の手法として連続的な時間軸では線形計画法を、離散的な時間軸では整数計画法を用いる必要がある。

確定的と選択的

確定的記述では、値(属性値、関係)が一意であるのに対して、選択的な記述は複数の候補または可能な範囲として値が与えられる。よって、確定的記述は選択的記述に包含される。

設計における値や関係の指定においては、はじめから一意な値を直接に指定するのではなく、とりうる値、あるいは逆にとりえない値を制約として指定することが多い。段階的に制約を厳しくしていき、最終的に一意な値へと定めていく。

このような理由により、本研究では選択的な値の指定を行なう。このことを実現するには、制約を表現し、制約間の整合性を管理し、さらに制約を満足する候補を評価することを実現しなくてはならない。以上のことがらを要約すると、本研究では時間情報の表現に関して

- 時点と区間を併用し、
- 絶対的記述を包含する形で相対的記述を行い、
- 定性的情報と定量的情報の双方を関連させて取り扱い、
- 時間軸をより汎用性をもつ連続的なものとして考え、
- 確定的な値を含む、選択的な値の記述を可能とする、

というアプローチをとる。

5.2.3 時間情報の表現と推論

つぎに、上記の考え方に基づく時間情報のモデリングについて、

1. 時間の構成要素
2. 定性的関係表現
3. 定性的関係の整合性の管理
4. 定量的関係表現
5. 定量的関係の整合性の管理
6. 定性的関係と定量的関係との整合性の管理

の順に説明する。

時間の構成要素

時間の構成要素については以下のように考える。

- 時間軸: 連続な線形時間軸と周期性をもった環状時間軸がある。
- 時点: 時刻を有する。また、時間区間の境界を構成する。

- 時間区間： 連続な閉区間。始点、終点の時刻と、それらの時刻差としての区間長を属性として持つ。

時点や時間区間は少なくともひとつの時間軸に属する。また、環状時間軸は、工学に多く見られる周期性をもった時間情報を、効率よく記述するために導入されたものである。環状時間軸と線形時間軸との対応を与えることで、環状時間軸上の時点や時間区間は、線形時間軸上に周期数を表すインデックスが付いた形で展開される(図5.5)。

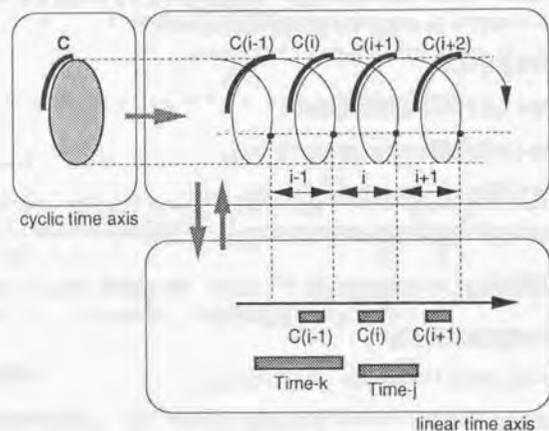


Figure 5.5: 環状時間軸と線形時間軸との対応

定性的関係表現

線形時間軸上の時点 a, b の定性的関係 R_p は,

$$\begin{aligned} a < b &\rightarrow R_p(a, b) = \text{before} \\ a = b &\rightarrow R_p(a, b) = \text{equal} \\ a > b &\rightarrow R_p(a, b) = \text{after} \end{aligned}$$

を基本とする。複数の関係を選択的に記述するには、たとえば、

$$a < B \vee a = b \rightarrow R_p(a, b) = \{\text{before equal}\}$$

のように、可能性のある要素を集約として記述する。また、定性的関係が確定した時点対は、半順序構造として構造化しておく。

線形時間軸上の時間区間の定性的関係 R_v は、3.6に示した、アレンによる13の定性的関係 [Allen 83] を基本とし、それらの選言として表現する。たとえば、時間区間 A, B の定性的関係が、meets または after であれば、

$$\text{meets}(A, B) \text{ after}(A, B) \rightarrow R_v(A, B) = \{\text{meets after}\}$$

と記す。

つぎに環状時間軸上の時点、時間区間の定性的関係について説明する。環状時間軸上の2点 a, b のとりうる関係は、線形時間軸と異なり前後の区別がないため、2つの時点が等しい ($R_p^C(A, B) = \text{equal}$) か、等しくない ($R_p^C(A, B) = \text{notequal}$) のどちらかである。また、時間区間の間の関係は、環状時間軸は線形時間軸と異なり、始点側と終点側の2箇所で重なりをもつことがある。それらの場合分けを考えると、図5.6に示す16種類の定性的な関係がある。



Figure 5.6: 環状時間軸における時間区間関係

定性的関係の整合性の管理

まず、時点に関しては、時点対に対して指定された前後関係から、時点をノード、先行関係をアークとする半順序グラフが構成できる。時点間の前後関係を追加するときには、この半順序グラフがループを構成しないことを調べることで整合性の管理ができる。

また、時間区間に関しては、時間区間の対に定性的関係を与えることで、時間区間をノード、とりうる定性的関係の組をアークとする制約ネットワークが構成される。この制約ネットワークに対して、ある制約を追加した際に

- 追加する制約は、制約ネットワークに矛盾しないかどうか
- 制約を追加すると、可能であった定性的関係がどう制限されるか

の2点に関して推論を行い、制約ネットワークの整合性管理を行なうことが必要である。

2項関係の制約ネットワークの整合性管理の手法として、アレンの整合性管理アルゴリズム [Allen 83] が有名である。これは、制約ネットワークから任意の3項 (A, B, C) をとりだし、 $A \rightarrow C$ の関係 R_{AC} と、 $A \rightarrow B \rightarrow C$ の合成として得られる $A \rightarrow C$ の関係 $R_{AB} * R_{BC} = R_{ABC}$ を求める。関係の合成には、 $before * contains = before$ といった関係の遷移規則 (transitivity rules) が用いられる。 $R_{AC} \cap R_{ABC} \subset R_{AC}$ であるとき、 $A \rightarrow C$ の関係は詳細化される。さらに $A \rightarrow C$ をアークとして含む他の3項関係を再計算し、変更を制約ネットワーク上に伝播させていく。

アレンの3項間の整合性に基づく、制約ネットワークの整合性管理アルゴリズムは、推論に関して完全であるが健全ではない。すなわち、とりうる関係はもれなく可能な関係として推論されるが、本来とれない関係までもが可能な関係の候補として推論される。これに対して、バンビーク (P. van Beek) は、整合性の管理の単位を3項間から4項間へと拡張することで、より健全性の高い整合性管理手法を提案している [Beek 90]。ただし、4項での整合性管理の手法は、3項間と比較して計算量の増大が激しく、またバンビークの手法でも、とりえない関係を完全に排除することはできない。また、制約ネットワークの整合性管理問題は、NP 困難 (NP-hard) の問題であることが知られており、健全性を保証する効率のよい手法は存在しない。

本研究では、実用的な面からみてアレンのアルゴリズムを整合性管理の手法として採用する。線形時間軸に関するアレンの遷移律表と、本研究で導入した環状時間軸の時間区間に関する遷移律表を付録の D.2 および D.3 に示す。

時点に関する定性的関係と、時間区間に関する定性的関係とは相互に密接に関係している。そのため、時点で定まった関係を時間区間の関係へ反映させたり、その逆を行なうことが必要となる。ここでは、時点の定性的関係と時間区間の定性的関係との変換テーブルを作成し、どちらかで定性的関係の更新が生じたときには、変換テーブルを介して他方の定性的関係へと更新を伝播させる方法をとっている。

定量的関係表現

時間に関する量は、時点の時刻と、時刻の差としての時間区間長がある。それぞれに関して、以下のように値の指定、範囲の指定、関係の指定の3種類の指定の方法がある。定量的関係表現は、これらの組合せとして以下のように与えられる。

- 値の指定: $a = 120, L = 12$
- 範囲の指定: $10 < a < 18, L < 100$
- 関係の指定: $a - b < 25, L_1 + 2L_2 < 3L_3$

時間の定量値は時刻と時間長のみであり、これらの間の演算としては、

$$\begin{aligned} \text{時刻} + \text{区間長} &= \text{時刻} \\ \text{時刻} - \text{時刻} &= \text{区間長} \\ \text{区間長} < + | - > \text{区間長} &= \text{区間長} \\ \text{区間長} < \times | \div > \text{実数} &= \text{区間長} \end{aligned}$$

のみが意味をもつ³。よって、時間の定量的関係の指定は、時点および実数倍された区間長の線形結合となるため、それらは時間の定量値を変数とする連立一次不等式⁴として表現できる。

定量的関係の整合性の管理

つぎに、時点や時間区間に対して指定された定量値あるいは定量的関係の整合性をどのようにして管理するかについて述べる。

時点に対して指定された値や範囲は、時点の半順序グラフのノードに、時間区間長に関する値や範囲はアークに対して付与される。値や範囲が与えられると、

1. すでに与えられていたり、前後より既定されてくる値や範囲と、新たに与えられた値や範囲が矛盾しないかどうかを調べる。
2. 矛盾していない場合には、与えられた値や範囲⁵で置き換える。
3. 書き換わった値や範囲を時点の半順序グラフ上に伝播させて、他の時点の値や範囲を更新する。

という方法で、整合性の管理を行なう。

また、連立一次不等式として与えられた定量的関係の整合性管理に関しては、

- 連立一次不等式として与えられた定量的関係 (制約) が、矛盾していないかどうか。
- 既存の定量的関係に対して、新たに制約として与えられた一次不等式が矛盾していないかどうか。
- ある式が現在の定量的関係の中で、どのような値を取りうるか。

の3つを実現する。そのため、本研究では、連立一次不等式の数式処理の手段として、線形計画法のシンプレックス法における2段階法の手法を用いている [岩田 91]。2段階法は、

- 第1段階: 与えられた連立一次不等式に、実行可能解が存在するかどうかの判別を行なう。
- 第2段階: 第1段階で得られた実行可能解を出発点として最適解を求める。

の2つの段階より構成される。

第1段階の実行可能解の有無は、すなわち、制約として与えた連立一次不等式が全体として矛盾していないかどうかの判別を与える。また、シンプレックス法では、新たに制約となる不等式を追加したときに、はじめから再計算を行なうことなく、効率よく解の有無の判定ができる。

第2段階の最適化に関しては、評価したい式を目的関数として最適化 (最大値および最小値) を行なうことで、とりうる値の範囲を得ることができる。

時間に関する定量的関係の整合性管理を、線形計画法の2段階法で効率よく処理するためには、時間の定量的な制約式の特徴である、係数が1である2変数の不等式が多く現れることをうまく利用するこ

³たとえ時刻の和や実数倍というのは時間としての意味をなさない。ただし、区間長の比はここでは除外する。

⁴この中には等式も含まれる。

⁵正確には、既存の範囲と指定された範囲との共通集合

とが効果的である。また、線形計画法において取り扱われる不等式は、等号を含む不等式(\leq)であり、等号を含まない不等式($<$)の取扱いの境界部の処理を特別に行っている。これらの処理の詳細についての説明は、本論文では省略する⁶。

このように、定量的情報は半順序グラフ上の数値や範囲と、連立一次不等式の2つの形態で存在することになる。シンプレックス法での処理の結果として導出された変数の値や範囲は、半順序グラフ表現へと渡され、管理される。このことによって、値の参照や範囲の評価がその都度、シンプレックス法による処理を行なうことと比べ効率化される。また、値が確定した変数はシンプレックス法での制約から除外され、シンプレックス法で処理される制約をなるべく簡略化することがはかられている。

定性的関係と定量的関係との整合性の管理

最後に定性的関係と定量的関係との整合性を管理する手法について述べる。

定性的な関係と、定量的な関係は独立ではなく、相互に関連している。たとえば、

$$R_v(A, B) = \text{during} \rightarrow \text{Length}(A) < \text{Length}(B)$$

のように、時間区間の定性的関係から区間長に関する定量的関係が導出されるし、逆に、

$$\text{Length}(A) < \text{Length}(B) \rightarrow \{\text{started-by equal contains finished-by}\} \cap R_v(A, B) = \phi$$

のように、定量的な関係から、とりうる定性的な関係が制約されることもある。図5.7に時間区間の端点の時刻と定性的関係との関係を図示したものを示す。

こうした定性的な関係と定量的な関係との相互の情報交換を随時行なうことが必要であるが、ここで定性的な関係と定量的な関係との取り扱い方法の違いに起因する問題点がある。

定性的な関係の管理においては、とりうる定性的関係はすべてひとつの制約ネットワークとして記述されており、選言(OR)として与えられている定性的関係のさまざまな組合せは制約ネットワークの中に内包されている。すなわち、

$$(r_{11} \vee r_{12} \vee \dots) \wedge (r_{21} \vee r_{22} \vee \dots) \wedge \dots$$

の形のまま管理されており、選言の部分を開いて展開することはしない。

他方、シンプレックス法に基づく定量的関係の管理においては、連立一次不等式として取り扱われる定量的関係は相互に連言(AND)で結びついたものに限定され、選言(OR)で結びついた式がある場合には、それを展開して、それぞれ連立一次不等式を構成する必要がある。たとえば、ある連立一次不等式 $F_1 \wedge \dots \wedge F_n$ に、選言で結合した2つの不等式 $F_a \vee F_b$ を追加すると、

$$F_1 \wedge \dots \wedge F_n \wedge (F_a \vee F_b) \rightarrow (F_1 \wedge \dots \wedge F_n \wedge F_a) \vee (F_1 \wedge \dots \wedge F_n \wedge F_b)$$

のように、2つの連立一次不等式の組として、それぞれに関して整合性の検証を行なわねばならない。

これは、定量的な関係の整合性を管理する手法のシンプレックス法においては、制約が作る解空間は、独立な変数の次元における単体(凸立体)となる必要があるが、制約に選言が含まれると単体とはならないため、単体となるように選言の制約をそれぞれの制約へと分割するためである。

⁶これについては、[岩田91]、[福田92]に詳しい。

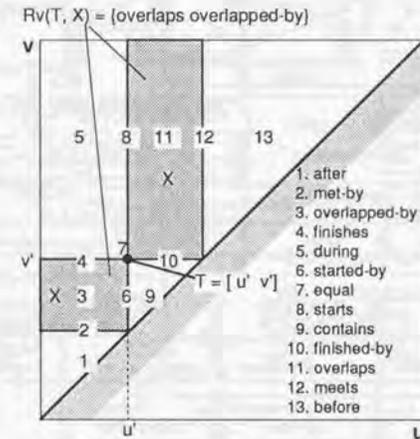


Figure 5.7: 時間区間の定性的関係と端点の時刻との関係

定性的な関係において管理されている選言的な関係は非常に多くの組合せを有しており、それを陽に展開して定量的な関係へと受け渡すことは、計算の効率上から考えて好ましくない。そこで、本研究では定性的な関係から定量的な関係への情報の受渡しは、定性的な関係が定まり、定量的な関係を与える不等式が一意に定まるときに行なうこととする。このことは言い替えると、定量的な制約の解空間が単体となるように定性的な関係が定まったときに、定性から定量へと情報の受渡しを行なうということである。

このような方法をとることで、定性的な関係の方では選言として考慮されている内容が、定量的な関係の方ではどれかに定まるまで考慮されないことになるが、定量的な関係の整合性管理の負担を大きく減らすことができる。

図5.8に時間区間の定性関係、時点の定性関係と確定値、および定量的な関係管理との間の情報のやりとりの概念図を示す。

5.2.4 時間情報モデリング・システム

これまで述べてきた考え方に基づき、時間情報モデリング・システム(Time Information Manager: TIM)を開発した。TIMの基本構成を図5.9に示す。

入力された時間情報は、ユーザ/アプリケーション・インタフェースにより、システム内部表現へと変換され、システム・マネージャを経て3つのデータベースへと分配される。

図5.9の(A)においては時間区間相互の定性的関係を、(B)においては時点の前後関係と時刻、区間

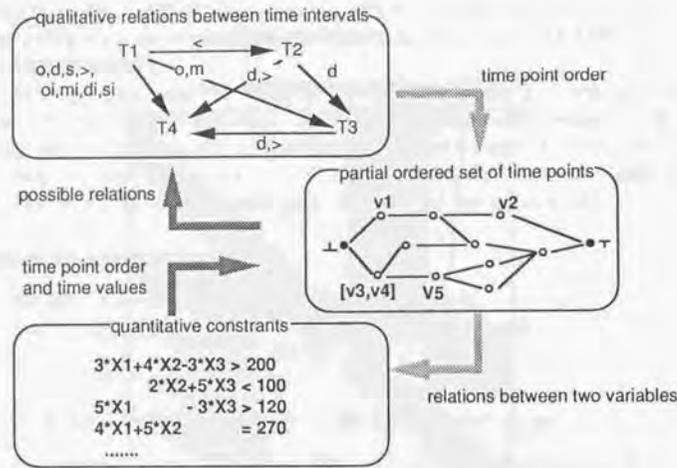


Figure 5.8: 時間情報の表現間でのやりとり

長の定量値を管理している。また、(C)において、連立一次不等式として与えられる定量的な制約を管理している。

TIM に用意されている基本機能は以下の通りである。

1. 時間軸、時点、時間区間の生成
2. 時刻や区間長の指定
3. 時間区間相互の定性的関係の指定と整合性管理
4. 時間区間相互の定量的関係の指定と整合性管理
5. 時間区間相互の定性的関係に関する問い合わせ
6. 時刻や区間長の取りうる値の範囲の評価
7. ある時間区間に対して、ある特定の関係にある時間区間の抽出
8. 複数の時間区間の間の定量的な関係の評価
9. 時間区間に対する集合演算
10. 時間情報のグラフィック表示

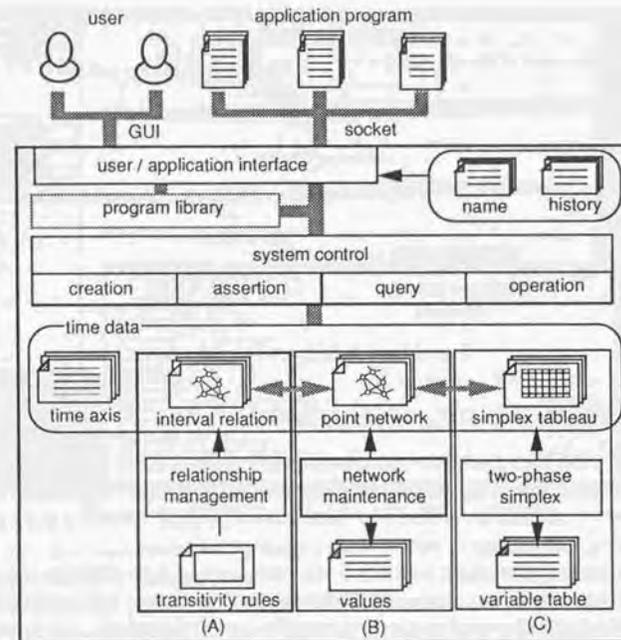


Figure 5.9: 時間情報モデリング・システム:TIM の基本構成

最後の時間情報にグラフィック表示に関しては、時間区間の始点の取りうる値の範囲、終点の取りうる値の範囲、区間長の取りうる最大長、最小長をそれぞれグラフィック表示によりユーザに提示している(図5.10参照)。

より複雑な機能は、これらの基本機能を組み合わせとして実現する。たとえば、

ある時間区間と指定された関係をとる時間区間の中で、最早の始点をもつ時間区間の抽出

という機能は、上記の7と6の基本機能を用いて定義することができる。

状態モデリング・システムをはじめとするアプリケーション・プログラムは、TIMを用いることで時間情報に関する推論や管理を独立させることができる。ただし、記述されている時間区間の意味付け—その時間区間が何を表現しているのか—は、アプリケーション・プログラム側で記述する必要がある。

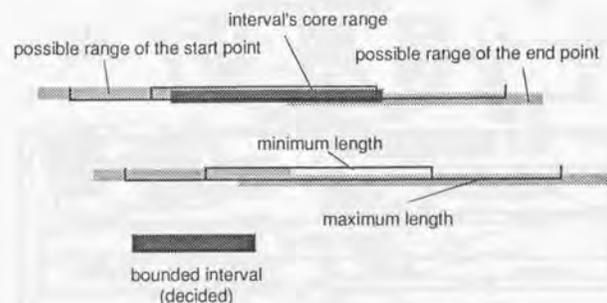


Figure 5.10: 時間区間のグラフィック表示

5.2.5 時間情報モデリング・システムの動作例

つぎに、TIM を用いた時間情報の生成、推論の例を図 5.11～5.14 に示す。ここでは、太郎、花子、次郎の 3 人の会社でのスケジュールを例にとり、定性的な関係の指定、時刻、区間長の指定、定量的な制約の指定などを順次指定していったときの、時間区間の取りうる状態をグラフィック表示させている。

図 5.11 では、時間軸は線形で、時間システムとしては時分での表現が用いられている。ここでは、太郎、花子、次郎の会社の滞在時間 (t-co, h-co, j-co) とそれぞれの昼食時間 (t-lu, h-lu, j-lu) が生成 (create-interval) され、それらの間の定性的関係 (昼食は会社の滞在時間内、等) の指定 (assert-rels) や時間的属性 (太郎の滞在時間は 10 時以降、18 時前のどこか、等) の指定 (set-value2) が行なわれている。ここまでの情報では時間区間がほとんど確定されず、始点時刻、終点時刻が広い存在可能範囲 (薄い網掛けで表示されている部分) をもつ。また、取りうる最大区間長と最小区間長との差も大きい。

図 5.12 では、先ほどの結果に対して太郎と次郎とのミーティング (m-tj) および太郎と花子とのミーティング (m-th) が新たに追加されている。ミーティングは参加者の会社滞在時間中 (during) に行なわれること、昼食とは干渉しない (not-conflict) こと、太郎の関わる 2 つの会議も干渉しないこと、ならびに会議の時間長さが指定 (set-length2) されている。これらの情報が追加されたことで、太郎の会社滞在時間 (t-co) と、花子の滞在時間 (h-co) に関して、必ず会社に滞在していなければならない時間区間 (図中の濃い網掛け部分) が生じている。時間区間によるグラフィック表示では、区間相互の定性的前後関係が不明であるので、ここでは時点の間の半順序関係を重ねて表示している。

図 5.13 では、来客に関する 2 つの時間区間 (g-v, j-v) を生成し、それに対して、時間値の範囲での指定や、既存の時間区間との定性的関係の指定を行なっている。これらの情報の追加により、図 5.12 の段階と比べて t-co, h-co, j-co, m-tj などの取りうる範囲が限定されてきているのがわかる。また、ここでは m-tj と他の時間区間との取りうる定性的関係を表示させている。m-tj に対する定性的関係が一意に決まっている時間区間 (たとえば、t-co, m-th) もあれば、g-v のようにまったく決まっていない (non-inf) の時間区間もあることがわかる。

図 5.14 では、“2 つの会議 (m-tj, m-th) と来客 (j-v) の時間長さの合計は 450 分以上である”と、



Figure 5.11: 時間情報モデリング・システム TIM の実行例 (1)

“花子の会社の滞在時間から昼食を引いた時間は 350 分以上である”，という 2 つの定量的関係を入れて、時間情報を詳細化している。ここで追加した定量的関係に対して、(eval-rel) で陽に評価することを指示することで、定量的関係と定性的情報との間で情報のやりとりが行なわれ、各時間区間の取りうる定性的関係も再計算される。この例では、m-tj, m-th, j-v などが先ほどに比べて取りうる範囲が限定されており、より確定的になってきているのがわかる。

5.2.6 評価と課題

TIM は時間情報のモデリング・システムとして、

1. 複数の時間軸のサポート
2. 複数の時間システムのサポート
3. 時点、時間区間の定性的、定量的関係の記述と整合性管理
4. 時間区間の集合演算 (定性的記述レベルならびに定量的記述レベル)
5. 定量的関係を制約とした最適化

などの機能を有しており、状態モデリング・システムのみならず、スケジューリングやシミュレーションなど、さまざまな用途にも適用可能である。

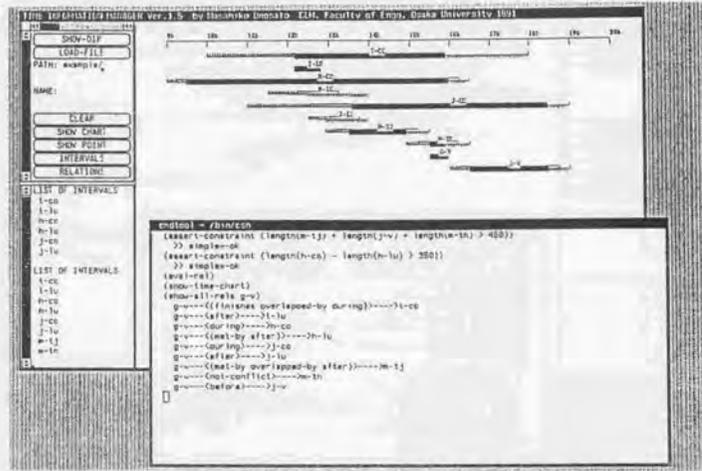


Figure 5.14: 時間情報モデリング・システムTIMの実行情形(4)

5.3 空間情報モデリング・システム

5.3.1 空間情報のモデリング

つきに、空間に関する情報を取り扱うシステムについて説明する。空間情報モデリングは定状態素のもつ空間領域の集合を表現することを目的とする。第3、4章での定状態素に関する議論より、空間情報モデリングに要求される機能は、以下のように整理される。

1. 3次元空間での位置、姿勢、形状、相対関係を記述できること。
2. 設計の初期段階の定性的、不確定的な空間情報の記述と、詳細設計段階における定量的、確定的な記述のどちらも同一の枠組みでできること。
3. 定性的な表現から定量的な表現へと連続的に移行できること。

こうした要件を満足する空間情報モデリングでの形状進化の過程の概念を図5.15に示す。

空間に関するもっとも原始的な情報は、

ある空間領域 A が存在する。

であろう(図5.15(a))。これには、 A の存在のみを述べ、形状や位置、姿勢などのいかなる空間情報も含まず、規定しない。

これに対して、

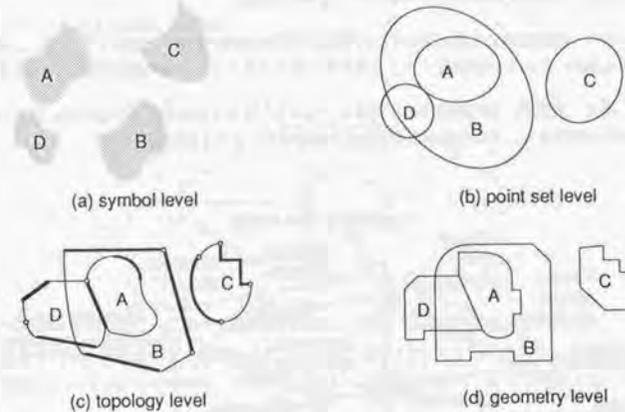


Figure 5.15: 形状の進化の過程の概念図

空間領域 A は空間領域 B とは排他であるが、 C には含まれる。

のような集合論レベルでの領域間の関係記述を与えることで、空間領域は相互に関連付けられ、弱く規定し合うことができる(図5.15(b))。

ただし、こうした空間領域間の包含関係の指定で記述できることには限りがある。より詳細に形状や位置、姿勢を規定するには、空間領域を構造化することが行われる。たとえば、空間領域の境界を考えて、

空間領域 A は、空間領域 D と境界の部分 E を共有する。

のような境界の包含関係や接触関係を与えることにより、空間領域間の関係は詳細化される(図5.15(c))。ここまでの記述では空間における位相を与えることができるが、位置や長さといった定量的な情報は一切含まれない。形状や位置を定めるためには、

境界を構成する線分 E の端点は $(10,20,30)$ と $(10,40,20)$ である。

といった定量値を与えることが必要である(図5.15(d))。

実際の空間情報の決定過程は、必ずしもここで述べたような集合論的なレベルから幾何的なレベルへの詳細化という過程を経るわけではなく、直接的に詳細な空間情報が決定されたり、定量値から逆に包含関係を定めたりすることも考えられる。しかしながら、ここで述べたことがらを実現する空間情報の取扱いは設計過程を支援する上で大変に有効であると考えられる。

次に、こうした空間情報のモデリングを実現する手法について考える。さきに挙げた空間情報モデリングに要求される機能の3つの項目に対応した3つの軸からなる分類立体を考える(図5.16)。

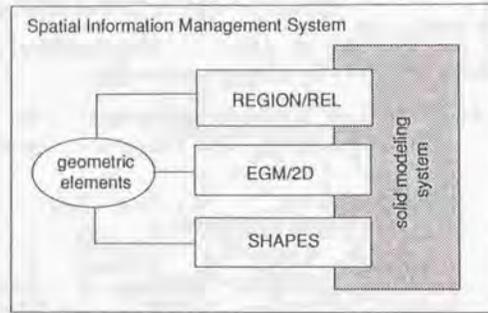


Figure 5.17: 空間情報モデリング・システムの構成要素

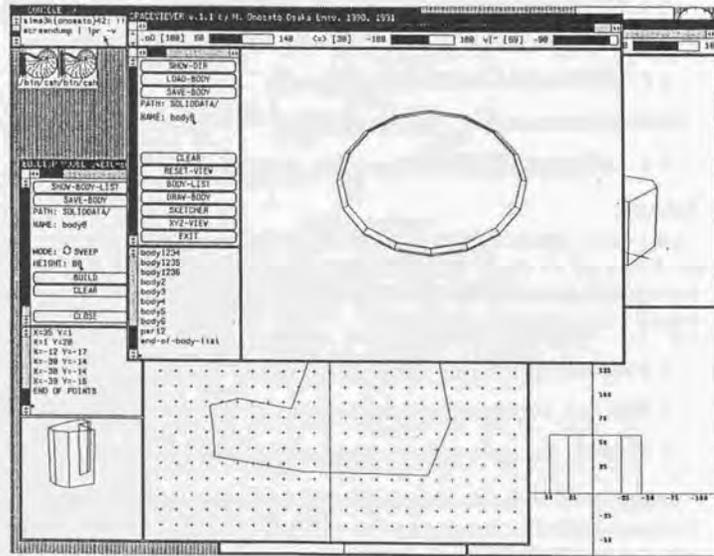


Figure 5.18: 3次元ソリッドモデリング用ツール

5.3.2 空間領域の包含関係管理：REGIN/REL

設計仕様などの設計対象に対する初期段階での情報では、どこになにを格納するか、であるとか、どの部品とどの部品は一緒にしてはいけない、といった対象の包含や排他に対する指定が多く現れる。REGIN/RELは、そうした対象の空間領域の包含や排他などの集合論的な関係の記述と、論理的整合性の管理を目的として作成されたシステムである。

ここで2つの空間領域(いま、 A, B とする)の間の関係としては、境界での接触を考慮にいて、 $equal(eq)$ 2つの空間領域が一致する。

$exclusive(ex)$ 2つの空間領域は共有点を持たない。

$outside-contact(oc)$ 2つの空間領域は境界でのみ共有点を持つ。

$overlap(ol)$ 2つの空間領域は、それぞれ相手の内点となる点と外点となる点を持つ。

$contain-contact(ic)$ B の点はすべて A の点であり、かつ B の境界は A の境界と共有点を持つ。

$inside-contact(id)$ $contain-contact$ の逆関係。

$contain(co)$ B の点はすべて A の点であり、かつ A の境界ではない。

$inside(cd)$ $contain$ の逆関係。

の8つを用いる(図3.6参照)。この8つの関係は、複数の関係が同時に成り立たないという独立性と、2つの空間領域の間の関係はかならずこの8つの関係のうちどれかをとるという完全性を満たしている。

任意の2つの空間領域の間の関係は、8つの関係の中で可能な関係を集合として与える。たとえば、空間領域 A からみて B が $overlap$ か $contain$ であれば、 $R(A, B) = \{ol, co\}$ とする。

N 個の空間領域間の関係を与えることは、空間領域を表す N 個のノードのすべての組み合わせで結ぶ $N C_2 = N(N-1)/2$ 本のアークに対して、関係の集合をラベルとして与えることに相当する。

アークに対するラベリングは独立に与えることはできず、他の空間領域との関係による制約を受ける。このような相互に依存した制約ネットワークのラベリングの整合性を管理する手法として、5.2.3の時間情報の定性的関係の整合性管理の部分で述べたアレンのアルゴリズムが適用できる。

アレンのアルゴリズムを適用するために用いる定性的関係の遷移律を付録のD.Aに示す。

いま、ある空間領域 S_0 が他の空間領域 S_1, S_2, \dots, S_n との包含関係が与えられており、かつ空間領域 S_1, S_2, \dots, S_n の存在範囲が確定しているとき、 S_0 の存在範囲は以下のように評価することができる。

$$S_0^{in} \subset S_0 \subset (S_0^{con} \cap \neg S_0^{out})$$

$$S_0^{in} = \cup \{X \in \{S_1 \dots S_n\} \mid REL(S_0, X) \subset \{co, ic\}\}$$

$$S_0^{con} = \cup \{X \in \{S_1 \dots S_n\} \mid REL(S_0, X) \subset \{cd, id\}\}$$

$$S_0^{out} = \cup \{X \in \{S_1 \dots S_n\} \mid REL(S_0, X) \subset \{ex, oc\}\}$$

ただし、 S_0^{in} は S_0 の内部として必ず存在する領域、 S_0^{con} はその内部に S_0 が必ず含まれる領域、 S_0^{out} は S_0 と決して交わりを持たない領域である。

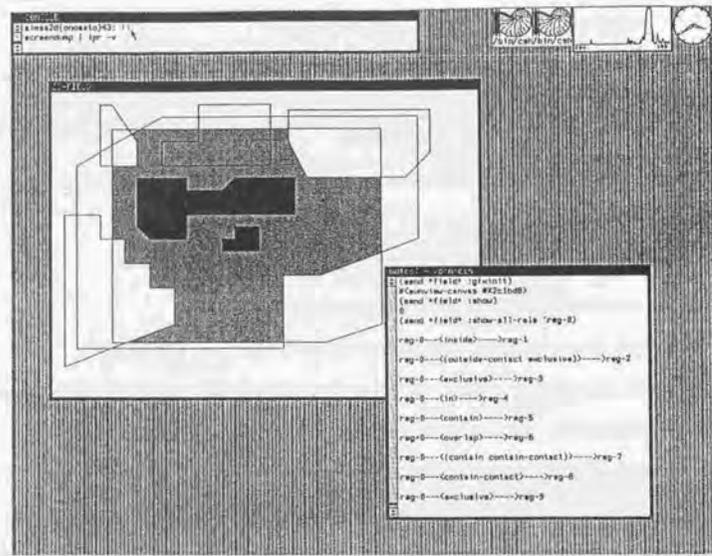


Figure 5.19: REGION/RELによる不確定2次元領域の評価

図5.19にREGION/RELによる不確定2次元領域の評価結果を示す。この例ではreg-0からreg-9まで10の2次元領域があり、reg-0の存在範囲は不定、reg-1～9の存在範囲は確定している。またreg-0と他の領域との定性的関係は、入力された関係とそこから推論された関係により、図の右下ウィンドウに示されるように求まる。このとき、reg-0の存在範囲を上記の考え方で評価した結果が左上のウィンドウに示されている。濃いグレーの領域は S^{in} 、薄いグレーの領域が S^{con} 、白い領域が S^{out} である。reg-0の境界は濃いグレーの領域を内部として、かつ薄いグレーの領域に存在しなくてはならない。

REGION/RELの手法は2次元領域だけでなく、3次元領域に関しても同様の考え方で評価できる。図5.20はプリンタのヘッド周辺を表すbody-0～body-11の12の3次元領域の表示である。ここではbody-11が境界を持たず、他のbody-0～body-10の確定した領域との定性的関係(図左下)により定義されている。これを評価したものを図5.21に示す。

REGION/RELによって空間領域の詳細化を行なうには、空間領域を部分空間領域へと分割し(すなわち、もとの空間領域に包含される複数の空間領域を設定し)、それらの部分空間領域と他の空間領域との間関係を定義することによって行なわれる。

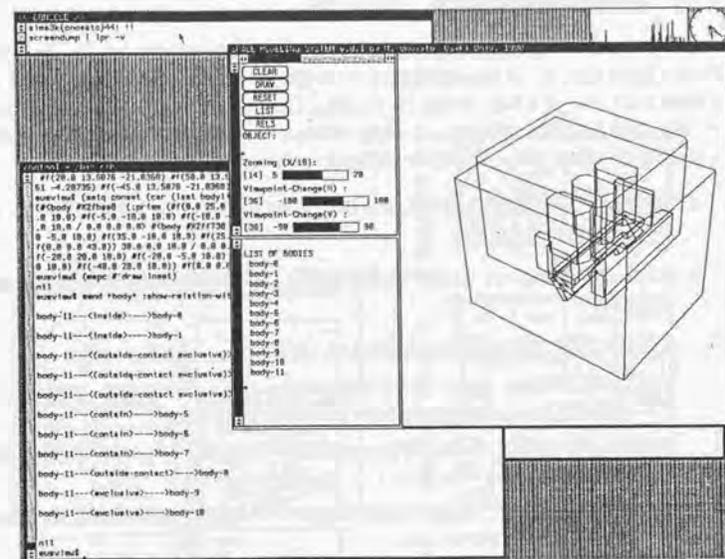


Figure 5.20: REGION/RELによる不確定3次元領域の定性関係と確定領域表示

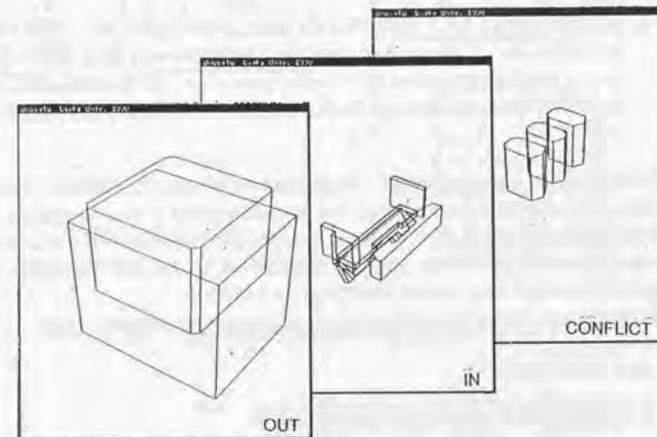


Figure 5.21: REGION/RELによる不確定3次元領域の評価

5.3.3 空間領域の段階的詳細化：EGM/2D

REGION/RELでの詳細化は同次元の多領域との包含、隣接関係の詳細化或部分空間領域への構造化により行なうに対して、N次元の幾何要素をN-1次元の境界を構成する幾何要素を確定させることで詳細化するアプローチもある。EGM/2D(Evolving Geometric Model/2 Dimensions)はループ、稜線、頂点などの境界を定性関係により記述、詳細化していくことで、不確定な2次元領域の記述と詳細化を行なう[岩田 89c]。EGM/2Dの概要は以下の通りである(図5.22参照)。

1. 形状要素は2次元領域(REGION), REGIONの閉じた境界(LOOP)線要素(LINE), ならびに点(PPOINT)より成る。
2. 同種類の形状要素間に対しては以下の関係が定義され、要素間の関係の整合性が制約伝播を通じて管理される。
 - (a) REGION-REGION: REGION/RELで定義した包含、隣接関係(7関係)
 - (b) LINE-LINE(1): 同一のLOOPに属する場合に、LOOP内での隣接、重複、排他などの関係(D.3に示した環状時間軸における時間区間の関係と同じ。)
 - (c) LINE-LINE(2): 2つのLINEが有向直線分であるとき、それらの間の相対的方向関係(9関係)(遷移律表をD.5に示す。)
 - (d) POINT-POINT: 8方向に同値関係を含めたりつの相対的方向関係(遷移律表は関係名を置き換えるとD.5と同等となる。)

形状要素間に対して、関係が確定していればその関係を1つ、不確定であれば、可能性のある関係すべてを与えることができる。

3. REGIONは境界として1つの外LOOPと0個以上の内LOOPをもつ。LOOPは0個以上のLINEをもつ。LOOPにおいてLINE同士は非連結であったり重複していてもかまわない。また、LINEは接続する複数のLOOPに属していてもよい。LINEは線分の始点、終点、内点にPOINTを持つことができる。POINTは座標値としてxおよびyの値を指定することができる。

EGM/2Dにおける形状表現の特徴は、ある形状要素の境界を構成している要素が、その数も含めて不確定でよいことが挙げられる。たとえば、ある2次元領域を考えたときに、その境界として一部のみが明確で、他の部分が何本のどのような線分によって構成されるのかわからなくともかまわない。それぞれの次元の形状要素において、個別に定性的な関係を有しているために、自分を構成している形状要素が確定していなくても、さまざまな推論を行なうことができる。

EGM/2Dには、形状の定義や詳細化の手段として以下の基本操作が定義されている。

1. 各形状要素の生成
2. 同種の形状要素間の関係の指定と推論を通じた参照
3. 異種の形状要素間の関係の指定と参照

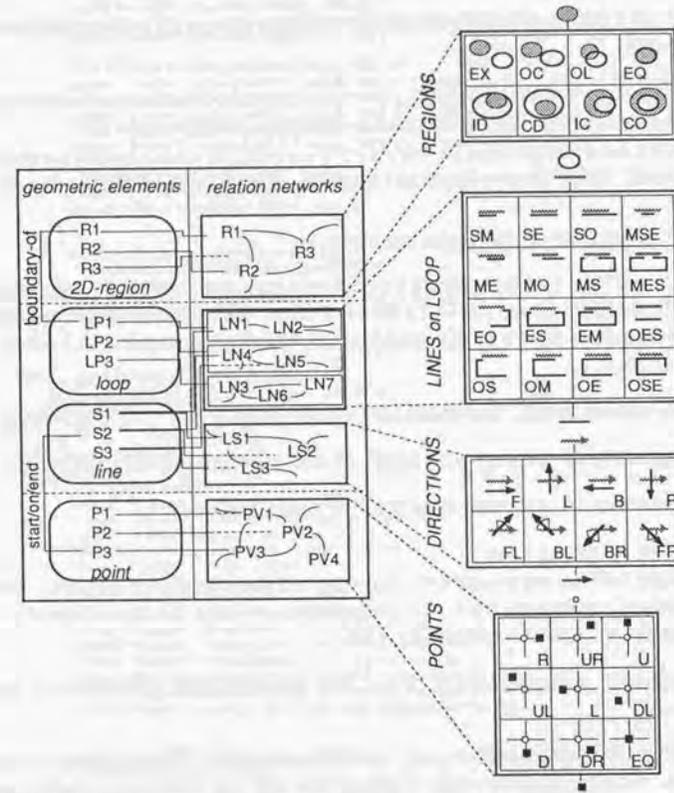


Figure 5.22: EGM/2Dの基本構成

4. REGION と REGION ならびに、同一の LOOP 上の LINE と LINE に対する和、差、積などの集合演算
5. REGION と LINE に対する分割操作
6. POINT 座標値の点間の関係を用いた他の点への伝播と、点の存在しうる x,y の範囲の推論による評価

EGM/2D による形状定義の例を図 5.23 に、グラフィック表示の例を図 5.24 に示す。図 5.24 の左のウィンドウには入力された点の関係から推論された点の間の関係の一部が表示されている。

現在のところ定量的に境界が確定していないとグラフィック表示が行えないために画面上に現れる情報は少ないが、EGM/2D 内での形状間の取り得る関係は、情報の追加に伴い段階的に確定している。

5.3.4 形状と位置、姿勢の分離：SHAPES

設計において"もの"の形状を決定することと、"もの"の位置、姿勢を決定することは密接に関連しており、一方が他方に必ず先行するということはない。たとえば、限られた空間内で運動する部品の形状は、その運動の軌跡に依存するし、逆に形状が与えられた部品の取り得る配位を求めることもある。こうした例に加えて、

- 同一形状の部品が複数、空間内に配置されている場合(図 5.25(a))
- 複数の部品が同一形状を有することは確定しているが、その形状が未定の場合(図 5.25(b))
- 形状は確定しているが、位置、姿勢が確定していない場合(図 5.25(c))

などが設計において多く見られる。

境界表現や CSG などの既存の形状モデルにおいては、まず基準座標において形状を定義し、その後適当な場所へと配置する流れをとる。こうした既存の形状モデルの考え方は、上記の形状モデリングへの要求に関して、以下のような問題点を有している。

- 形状は位置、姿勢に影響されない。よって、位置、姿勢の変化に対応して形状が変わることはない。
- 同一形状をもつ複数の部品であっても、それぞれが個別に重複して(複写された)形状データを持つ。そのため、形状が同一であることは陽には表現されず、形状データを比較した結果として得られる。
- 形状を定義しなければ位置、姿勢を定めることはできない。よって、常に形状定義が位置、姿勢定義に先行する。
- 形状が定まっているが位置、姿勢が未確定であるという状態が表現できない。位置、姿勢を与えない場合には、形状定義に用いた基準座標を基準とした位置、姿勢に配置されるが、これは位置、姿勢が未確定であることは異なる。

```
(setq *field* (instance fieldbank :init "2D-FIELD")
  <fieldbank #X2ea6b0>)

(send *field* :create-region 'reg-a)
(send *field* :create-region 'reg-b)
(send *field* :create-region 'reg-c)
(send *field* :create-region 'reg-d)

STARTING REGIONAL RELATION'S ASSERTION:
(send *field* :assert-rel 'reg-a 'reg-b 'inside t)
(send *field* :assert-rel 'reg-b 'reg-c 'exclusive t)
(send *field* :assert-rel 'reg-a 'reg-d 'outside-contact t)
(send *field* :assert-rel 'reg-b 'reg-d 'overlap t)
(send *field* :assert-rel 'reg-c 'reg-d 'exclusive t)

STARTING POINT CREATION:
(send *field* :create-point 'pnt-1)
(send *field* :create-point 'pnt-2)
:
:
(send *field* :create-point 'pnt-15)
STARTING POINT RELATION ASSERTION:
(send *field* :assert-rel 'pnt-2 'pnt-1 'down t)
(send *field* :assert-rel 'pnt-2 'pnt-3 'right t)
:
:
(send *field* :assert-rel 'pnt-14 'pnt-11 'left t)

SETTING COORDINATE VALUES:
(send *field* :set-xy 'pnt-1 600 600)
(send *field* :set-xy 'pnt-2 nil 240)
:
:
(send *field* :set-xy 'pnt-15 380 560)

INTER-RELATIONS:
(send *field* :create-loop 'loop-0)
(send *field* :region-loop 'reg-b 'loop-0)
(send *field* :create-line 'l-1)
(send *field* :loop-line 'loop-0 'l-1)
(send *field* :create-line 'l-2)
(send *field* :create-line 'l-3)
(send *field* :loop-line 'loop-0 'l-2)
(send *field* :loop-line 'loop-0 'l-3)
(send *field* :line-point 'l-1 'pnt-1 'pnt-2)
(send *field* :line-point 'l-2 'pnt-3 'pnt-4)
(send *field* :line-point 'l-3 'pnt-1 'pnt-5)
(send loop-0 :assert-rel 'l-1 'l-2 'exclusive t)
(send loop-0 :assert-rel 'l-1 'l-3 'e-connect t)
(send loop-0 :assert-rel 'l-3 'l-2 'exclusive t)
:
:
(send *field* :draw-region reg-a)
line-list t (l-4 l-9)
line- l-4 sv= (250 500) ev= (250 340)
line- l-9 sv= (500 500) ev= (380 560)
t
:
```

Figure 5.23: EGM/2D による形状定義の例

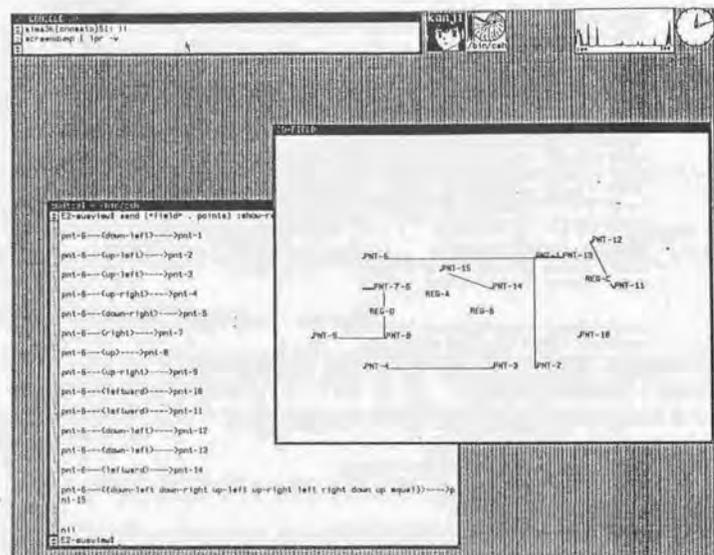


Figure 5.24: EGM/2Dによる不確定形状の評価例

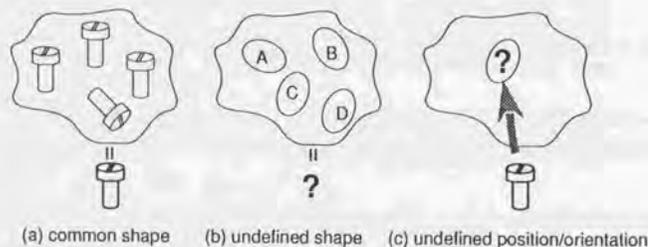


Figure 5.25: 設計における形状、位置、姿勢定義の3つの場合

こうした問題点は、形状モデルそのものが抱える問題点というよりも、むしろ形状モデルの機械設計の形状定義への適用上の問題点であると考えられる。すなわち、形状モデルが提供する形状、位置、姿勢を含めた空間情報と、機械設計において取り扱われる空間情報とが、意味的に異なるレベルにあることに問題がある。そこで、本研究では従来の形状モデルの上に、機械設計の形状定義用に SHAPES とよぶ形状定義の枠組みを構築し、形状モデルと機械設計との間の意味的な差異の解消を目指した。

SHAPES の提供する枠組みの概要は以下のようにまとめられる (図 5.26 参照)。

1. 個別的な空間領域を表すクラスである BODY と、形状そのものを表す SHAPE、位置/姿勢を表す POS という3つのクラスを導入する。
2. SHAPE の各インスタンスは基準座標系に対して定義された3次元形状モデルをデータとして持つことができる。形状モデルはなくてもかまわない。(たとえば図 5.26 の s3, s5)
3. POS の各インスタンスは位置、姿勢を表すための基準座標系からの同次変換行列をデータとして持つことができる。同次変換行列はなくてもかまわない。(たとえば p3)
4. BODY の各インスタンスは、BODY の形状を表す SHAPE のインスタンス名と BODY の位置/姿勢を表す POS のインスタンス名をデータとして持ち得る。
5. SHAPE と POS の各インスタンスは、自分を参照している BODY インスタンスの名前のリストを持つ。(図では省略)
6. BODY のインスタンスは、自分の持つ形状データと位置、姿勢データが確定している場合には、自分の空間領域を評価して陽に形状モデルを作成することができる。(たとえば b2)

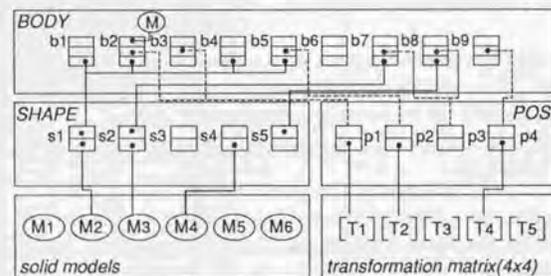


Figure 5.26: SHAPES のデータ構造の例

こうしたデータ構造を持つことにより、先に挙げた問題点に対して対処できる。まず、同一形状をもつ複数の部品を表現するには、同一の SHAPE インスタンスをもつ BODY をそれぞれの部品に対して生成すればよい (図 5.26 における b1, 2, 4, 5)。また、このとき SHAPE インスタンスに形状データが定義されていなくてもよいことから、「形状が未定義であるがとにかく同一形状である」という仕様も記述できる。

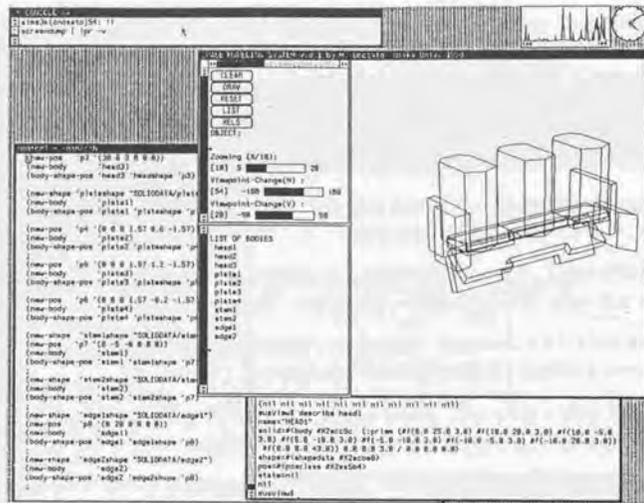


Figure 5.27: SHAPES による形状定義例(プリンタヘッド部)

形状は定まっているが位置、姿勢が不確定であるという場合には、POS インスタンスに同次変換行列が結び付いていないことで表現できる。また、具体的な位置、姿勢は不明確であるが、複数の BODY インスタンスが同一の同次変換行列を有する場合には、POS インスタンスを共有することでそれが表現可能となる。

図 5.27-5.29 に SHAPES を用いて定義される形状の例を示す⁸。この例では、プリンタヘッドに相当する 3 つの領域と、プレートに相当する 3 つの領域はそれぞれ同一の形状 (SHAPE インスタンス) と異なる位置姿勢 (POS インスタンス) を有している (図 5.27)。この例では、ヘッドが両端に移動した際に、両脇に設置してある保持板に干渉している部位がある (図 5.28)。干渉しないようにヘッドの形状を修正することを行なう。

この修正は、

1. 一方の端に位置している時のヘッドの空間領域と保持板との差演算を行い、干渉しないヘッドの空間領域を算出する。
2. 非干渉の空間領域とヘッドの POS インスタンスを用いて、非干渉領域の形状を計算する。
3. SHAPE インスタンスもつ形状データをヘッドの片側面を一部除去した形状へと更新する。
4. もう一方の端に位置している場合についても同様に計算を行なう。これによってヘッド両側面が除去された形状に修正される。

⁸この図は p.145 の図 5.20 の一部である。

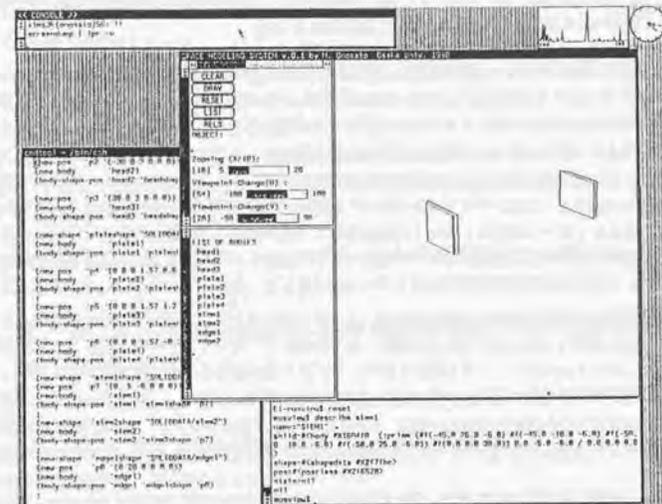


Figure 5.28: ヘッドと保持板との干渉部位

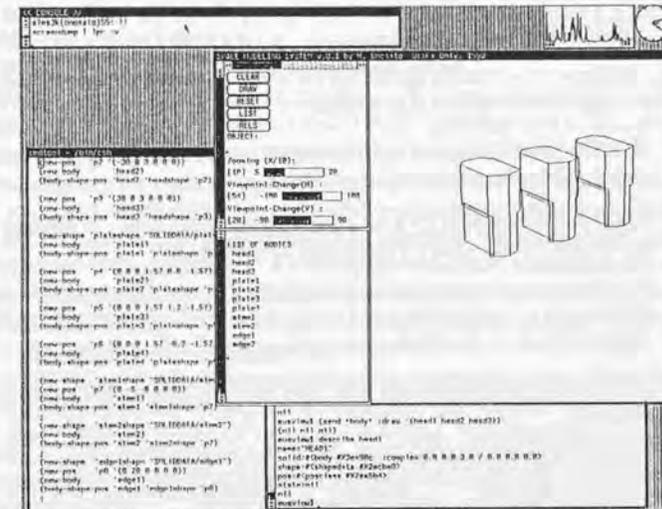


Figure 5.29: 干渉部分を除去したプリンタヘッド形状

5. 修正された形状データを参照している BODY では、更新後最初にその空間領域が評価された際（表示の際や参照された時）に、新たな空間領域となる。

という手順で実行される。こうした形状、空間領域あるいは位置の修正に伴う必要な伝播は SHAPES が自動的に実行する。干渉を避けるための形状修正をヘッドの形状に対して行った結果を図 5.29 に示す。保持板とは直接には干渉していない中央部のヘッドの形状も変化していることがわかる。

SHAPES においてはこのような包括的な形状の修正の他に、先に述べた REGION/REL の空間領域の包含、隣接関係の推論機能を用いることで、未確定の形状を評価することができる。その方法を以下に示す。

1. 同一の形状を有する空間領域 $BODY_1, BODY_2, \dots, BODY_n$ を考える。またそれぞれの位置、姿勢を表す同次変換行列は与えられているとして、それを T_1, T_2, \dots, T_n とする。
2. 各空間領域 $BODY_i$ を他の空間領域との包含、隣接関係から評価し、 $S_i^{in}, S_i^{con}, S_i^{out}$ を求める。
3. 上の結果を総合して形状 S は次のようにして評価される。

$$\bigcup (T_i^{-1} S_i^{in}) \subset S \subset (\bigcap (T_i^{-1} S_i^{con})) \cap (\neg (\bigcup (T_i^{-1} S_i^{out})))$$

こうした複数の場所における包含、隣接関係を総合して不確定な形状を評価する手法は、限られた空間内を運動する部品などの設計において有効と考えられる。

5.3.5 評価と課題

以上、空間情報モデリングに関して本研究で開発した3つのシステムの概要を述べた。これらのシステムにより実現されたことを整理して以下に列挙する。

- 空間領域間の包含関係や隣接関係を定義し、記号レベルで記述された領域間の関係を推論を通じて整合性の保持や形状の詳細化を行うことが可能となった。
- 位相要素間の重複や非連結性といった、より柔軟な位相要素関係を表現し、かつ座標値などの定量情報が不確定であることを許す2次元境界表現モデルを構築した。
- 空間領域の表現に際して、3次元形状モデルを直接用いるのではなく、空間領域のもつ形状と位置/姿勢を分離し、それぞれを陽に表現する手法を用いることで、形状および位置/姿勢の定義や操作をアプリケーションである機械設計の意味レベルに近くすることができた。

ここで本研究で提案した空間情報のモデリング・システムの手法と、関連した既存の研究について見てみることにする。

形状を言語（記号）で表現することに関しては、これまで多くの研究が行われてきた。たとえば、工程設計に用いられる GT (Group Technology) のコードは加工形状を規則的な対応関係をもつ番号によって表現したものである。また、形状のもつ規則性を形状文法 (shape grammar) として定式化し、形状文法に沿って形状を生成的に定義する形状言語も考案されている（たとえば、[Fenves 87]）。しか

しながらこれらの形状言語で表現できるものは単純な形状とその組合せに限られており、機械製品を表現するには記述力が不足している。

形状のもつ属性や形状間の関係を一階述語論理などを用いて論理表現し、演繹推論を行う試みも数多く行われている（たとえば [Nevins 75] [Arbab 88] [Suzuki 88] [Randell 89] [Shimada 89] など）。論理表現を用いることにより記述の形式化が図られ、また論理プログラミング言語でコンピュータに実装することで汎用の推論機構を用いることができ、柔軟に関係を推論することが可能となる。しかしながら論理表現を用いる場合でも、どのような関係や属性を関係述語として用い、それに関してどのような推論が成り立つのかについては、論理表現の表現能力が柔軟であるが故に逆に十分な検討が必要とされる。また、記号表現と数値情報との結合に関しては演繹推論とは違った機構が必要とされる。汎用的な演繹推論機構を用いた場合には、データ構造に対して特化された推論機構に比べて効率が劣るといった問題点もある。

記号により関係や制約を記述、処理する方法に対して、幾何的な関係や制約を幾何的な量の間の代数幾何学の式として表現し推論するアプローチが存在する。幾何的な関係式は一般に非線形形の連立方程式となり、これを効率的に評価あるいは簡略化するための手法が重要となる。これに対しては、ブッフベルガー (B. Buchberger) による Gröbner 基底の考え方 [Buchberger 76] や、ウー (W. Wu) の手法 [Wu 86] [伊庭 90] がある。こうした代数的アプローチは、処理の過程に理論的な裏付けがあり、統一的な処理が可能である一方で、代数式が表現している幾何的実体についての情報は捨棄されており、処理結果の幾何学的解釈は人間に委ねられる。

上に述べた研究は、その多くが形状あるいは形状の位相構造が既知の場合を取り扱っている。形状要素の数、構造、関係については概ね定まっており、残りの不定な部分に加えられた部分に関して幾何推論を行い、妥当な幾何形状を得るものである。こうしたアプローチはパラメトリック設計に代表される形状の修正問題に対しては有効な手法となりうる。しかしながら、形状を規定する制約が少ない場合—すなわち形状のもつ自由度が大ききとき—に用いることは適当ではない。

本研究で示した REGION/REL および EGM/2D は、こうした既存の手法が適用可能な段階までの形状表現、操作を実現することを目的としている。すなわち、既存の手法への入力となる関係や制約を決定していくことを支援するシステムと位置付けられる。

つぎに、開発したシステムの課題と問題点について述べる。本研究においては、総合的な空間情報のモデリング・システムの実現を目的に、従来の形状モデラでは取り扱われていない、あるいは取り組みが不十分である部分を中心に多くの試みを行ってきた。本論文で示した3つのシステムはその中で成果が得られた部分であり、空間情報のモデリングの実現には依然として多くの研究課題ならびにシステム開発上の問題点が残されている。そうした課題や問題点のうち、主要なものを以下に述べる。

1. 2次元での手法の3次元への拡張に関して

本研究において、2次元形状の段階的詳細化の1つの実現手法を EGM/2D より示した。記号表現された形状要素とその間の関係により形状を表現するアプローチは、2次元の問題に対してはある程度の成果をおさめることができた。しかしながら、この手法をそのまま3次元の問題へと適用できない。それは、次元が1つ増えることで形状要素同士の自由度が倍増⁹し、取り得る関係が組合せ的に増加することによる。

⁹並進2、回転1の合計3自由度から並進3、回転3の合計6自由度

そのため、3次元の問題を記号と記号間の関係により表現、操作、推論するためには、対象を直方体に制限するなど、問題を非常に特殊な場合に限定するか、あるいは3次元領域を分解して2次元問題の組合せへと帰着することが行われてきた。2次元へ帰着させる場合には、3次元でのさまざまな性質(たとえば体積や空間的配置関係)の多くは失われてしまう。

3次元形状および形状間の関係の定性的記述と操作に関しては、従来の考え方は異なる、新しいアプローチが必要と考える。

2. 設計過程に対応した一貫した形状表現の実現に関して

本研究で開発した3つのシステムは、概念設計段階から詳細設計段階までの設計過程全体での形状定義と操作からみると、

- (a) REGION/REL: 概念設計段階でのおおまかなレイアウト
- (b) EGM/2D: 概念設計から基本設計段階における2次元での概略形状の作成
- (c) SHAPES: 基本設計から詳細設計にいたる配置や干渉を考慮した形状定義、修正

の部分を支援している。しかしながら、これら3つのシステムが取り扱う部分は、設計過程全体からみると一部に限られており、設計過程を一貫して支援するためには、まだ多くの手法およびシステムが必要になる。とくに、形状要素間の関係や幾何属性に対する制約を統一的に取扱い、関係や制約を満足するような具体的な形状を定める過程を支援できる仕組みの実現が大きな課題となる。

3. 形状処理の高速化に関して

REGION/RELやEGM/2Dで用いた定性的関係の整合性管理の手法は、形状要素の数が多くなるに従って計算量が増大する¹⁰。また、SHAPESにおける空間領域間の干渉検出も形状要素数が増加すると多くの計算時間を必要とする。

定状態素に基づく対象表現は、一般に非常に多くの空間領域を必要とするため、こうした計算時間の増大は重要な問題である。

現在のところ、形状要素のグループ化により処理の範囲をグループ内に限定するなどの方法を用いている。こうした処理アルゴリズム面からの改善に加えて、最近発達をめざましいハードウェア面からの改善も重要であろう。特にここで必要とされる形状処理は並列に実行可能であることから、並列あるいは超並列計算機の利用は形状処理の高速化と大規模化に有効であると考えられる。

今後の空間情報モデリング・システムの開発に際しては、上記に述べた機能の向上と処理の高速化という2つの相反する要求に対して、それぞれをバランス良く実現していくことが重要と考える。

5.4 時空強度値データベース

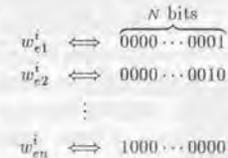
5.4.1 時空強度値データベースの構成

ここでは定状態素の表現において重要な、時空強度の語彙の取扱いについて述べる。

¹⁰単純には要素数 n に対して $O(n^2)$ の計算量

各時空強度に関して、その値を表現する語彙を整理し、適当な構造化を行なう必要がある。本研究では以下のような手順で、時空強度に関する語彙を構造化している。

1. まず、ある時空強度の値を表す言葉(時空強度値用語とよぶことにする)を収集する。その集められた時空強度値用語の集合(語彙)を W^i とする。
2. W^i の要素である時空強度値用語の間に、抽象-具体の半順序関係が認められるものを選び出す。 $w_{ia} \in W^i$ が w_{ib}, w_{ic}, w_{id} をより一般化した概念であるとき、 $(w_{ia} < (w_{ib}, w_{ic}, w_{id}))$ と記述する。こうした抽象-具象の順序対の集合を $Oder^i$ とおく。
3. W^i の要素のうち、 $Oder^i$ の順序対の左辺に現れない要素の集合を W_e^i とする。 W_e^i は時空強度値用語のうち、最も具体的な用語の集まりである。
4. W_e^i の要素数を N とし、その要素を順に $w_{e1}^i, w_{e2}^i, \dots, w_{en}^i$ とする。それぞれの要素に対して、その要素が j 番目であれば、 j 桁目のみが1で他は0であるような N 桁のビット列を与える。このビット列をその言葉のコードとよぶ。



5. $W^i - W_e^i$ の要素 w_j^i に対して N ビットのコードを与える。そのコードの内容としては、 w_j^i が $w_{ek}^i \in W_e^i$ と直接あるいは間接的に抽象-具象関係を持つならば、 k ビット目は1、関係を持たなければ0とする。たとえば w_j^i がより具体的な概念として $w_{ep}^i, w_{eq}^i, w_{er}^i$ の3つを持つとき、 w_j^i のコードは、 $w_{ep}^i, w_{eq}^i, w_{er}^i$ のコードをビットごとに論理和をとったものになる。

以上のような方法によって、ある時空強度に関して取り得る時空強度値の語彙 W^i は、 N ビットのコードと一意に対応が付けられる。 N ビットのコードにはすべてのビットが1であるもの(すべての値に対して可能性があるということであり、情報がないことに相当する)や、0であるもの(矛盾に相当する)も含めて全部で 2^N のコードが存在する。コードをノード、コード間の包含関係をアークとするブール束(Boolean lattice)が構成される。このブール束を B^i とする。時空強度の語彙を構成する各時空強度値用語は、 B^i 上の対応するノードに割り付けられる。基底ノード¹¹には必ず時空強度値用語が割り付けられる。

図5.30に時空強度値用語の収集から束の構成までの手順の簡単な例を示す。いま、時空強度値に関する用語を収集したところ、10個の用語が得られたとする。それぞれの用語を $A \sim J$ とし、それらの間に図5.30の2.で示される半順序が成り立つものとする。この例では基底となる用語は4つ(F, H, I, J)であり、 $2^4 = 16$ 個のノードからなるブール束が構成される。そのうち、10のノードに対しては時空強度値用語 $A \sim J$ が対応しており、残りの6つには対応する用語がない。こうした用語の存在しないノードは、それを直接に表現する言葉を持たないが、時空強度としてはある値に対応している。

¹¹対応するコード中にただ1つの1をもつもの

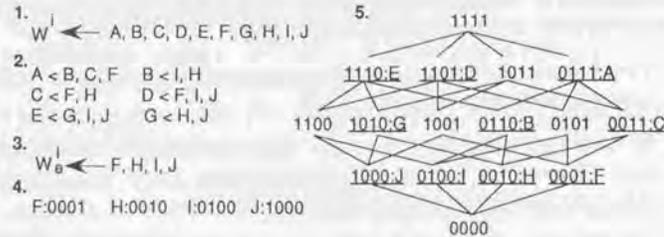


Figure 5.30: 時空強度値の語彙のプール束構成手順の例

こうした語彙のプール束を各時空強度ごとに作成する。図 5.31 に時空強度値用語の間の半順序関係の定義例と、それによって生成されたプール束のコードを示す。図中の右側のウィンドウに表示されているのが、用語の間の抽象-具象の半順序を定義したファイルの内容であり、右のウィンドウにはその定義をもとに各用語に割付けられたコードの一部が表示されている。

上に述べた時空強度値用語集合、プール束ならびに第3章にて導入した時空強度値に関する諸概念との関係について触れておく。まず、離散物理世界における時空強度値集合 Q^i の各元は、プール束 B^i の基底ノードに一一対応する。よって、時空強度値用語の集合 W_a^i に一一に対応する。任意の時空強度値変数 X^{Q^i} は、 B^i のノードに対応する。すなわち、時空強度値変数 X^{Q^i} の取り得る値の範囲が、

$$[X^{Q^i}] = \{q_{i1}^1, q_{i2}^1, \dots, q_{in}^1\}$$

であるとき、 X^{Q^i} は次のようにして定まるコードをもつノードに対応する。

$$code(q_{i1}^1) \cup code(q_{i2}^1) \cup \dots \cup code(q_{in}^1)$$

ただし、 $code(q)$ は時空強度値 q に対応する B^i 上のノードのコードを表す。時空強度値用語、プール束、時空強度値集合ならびに変数の間の関係を図示したものを図 5.32 に示す。

本研究では、時空強度値の計算機内表現として時空強度値用語ではなく、プール束のノードを用いており、それをビット列コードにより表現している。そうした表現の利点は、

- 文字列による用語をビット列コードに変換していることで、文字列表現における大文字小文字などの表記上の違いの問題(たとえば "high", "Ihigh", "HIGH", "高い" など)をデータベース内部の処理では回避できる。
- 時空強度値用語では "HIGH or MEDIUM" であるとか、"not METAL" というような複数の言葉の連言 (and)、選言 (or) や否定 (not) を含んだ表現も、それに対応したプール束のノードが存在し、単一のビット列のコードとして表現できる。すなわち、連言はビット列の各ビットごとの積演算 (プール束上の交)、選言は和演算 (結)、そして否定は各ビットの 0, 1 を逆転させたもの (補元) で表現できる。これらの演算については次項で詳しく述べる。



Figure 5.31: 時空強度値の語彙の組織化の実行例

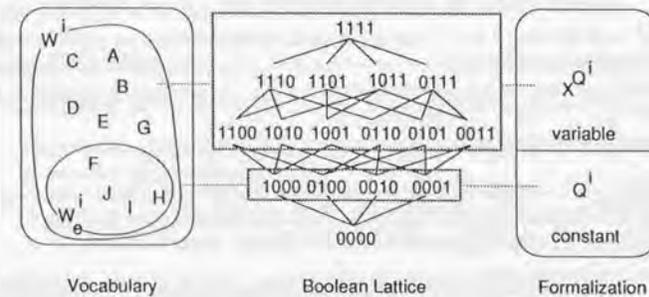


Figure 5.32: 時空強度値の用語、プール束ならびに時空強度値定数、変数の関係

- 各用語のもつ抽象度を、その言葉のコードに含まれる1のビット数によって容易に評価することができる。

などが挙げられる。

このように時空強度値用語をブール束として組織化し、用語とビット列表現との対応を管理したり、時空強度値の演算を行なうものを、ここでは時空強度値データベース(STI-database)とよぶ。

時空強度値データベースは現在のところ、約50の時空強度(付録B.1.3参照)に対して構築されている。

5.4.2 時空強度データベースの利用

次に、ブール束を用いた時空強度値データベースのもつ基本機能について述べる。例を説明するために、図5.30の中のブール束を改めて図5.33に示す。

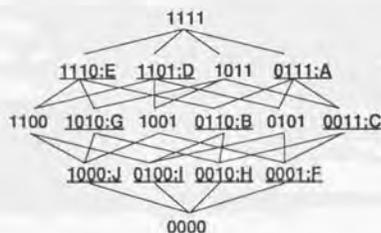


Figure 5.33: ブール束の例

1. コード化(記号 \rightarrow コード): 与えられた記号が時空強度値用語の集合 W^1 に含まれていれば対応するブール束 B^1 のノードのコードを返し、含まれていなければ偽を表す nil を返す。この関数により時空強度値に関する語彙がコントロールされる¹²。また、記号の代わりに記号の論理記号による式(たとえば、(and A (not (or B C))))でもよい。入力から内部表現への変換に用いられる。
(ex. G \rightarrow 1010, H \rightarrow 0010)
2. 記号化(コード \rightarrow 記号): 与えられたコードに対応する記号が存在する場合にはその記号を返し、存在しない場合には nil を返す。内部表現から外部への提示形式への変換に用いられる。
(ex. 1010 \rightarrow G, 1100 \rightarrow nil)
3. 積(コード \cap コード \rightarrow コード): 2つのコードのビット毎の論理積(ブール束上の積)に対応したコードを返す。これは、2つのコードによって表現される時空強度値変数の値域の共通部分をも

¹²すなわち時空強度値に関する物理制約 PC-1' の実装となっている。

つ、より限定された時空強度値変数¹³を求めることに相当する。時空強度値の詳細化に用いられる。

(ex. 1010 \cap 1011 \rightarrow 1010, 1100 \cap 0011 \rightarrow 0000)

4. 和(コード \cup コード \rightarrow コード): 2つのコードのビット毎の論理和(ブール束上の和)に対応したコードを返す。これは、2つのコードによって表現される時空強度値変数の値域を合成した値域をもつ、より一般化された時空強度値変数を求めることに相当する。時空強度値に関する制約を緩める際に用いられる。
(ex. 1010 \cup 1011 \rightarrow 1011, 1100 \cup 0011 \rightarrow 1111)
5. 補元(コード \rightarrow コード): コードの各ビットの0,1を反転させたコードを返す。これは与えられたコードと基底ノードを共有せず、かつブール束上で最も上位のノードに対応するコードである。与えられた時空強度値コード以外のどれか、というような否定表現の場合に用いられる。
(ex. 1010 \rightarrow 0101, 1100 \rightarrow 0011)
6. 記号基底展開(コード \rightarrow {記号...}): 与えられたコードを基底ノードに対応する概念の記号の論理和として展開する。これは記号と対応していないコードを記号化するための手段として用いられる。
(ex. 1001 \rightarrow J,F, 1011 \rightarrow J,H,F)
7. 記号下方展開(コード \rightarrow {記号...}): 与えられたコードを論理和を構成するより下位のノードの記号へと展開する。記号下方展開は複数存在することがある。また、記号下方展開には記号基底展開は必ず含まれる。
(ex. 1011 \rightarrow (G C),(J C),(G F),(J H F))
8. 記号上方展開(コード \rightarrow {記号...}): 与えられたコードを論理積を構成するより上位のノードの記号へと展開する。記号上方展開は存在しないことがある。
(ex. 1100 \rightarrow (E D), 1001 \rightarrow nil)

これらの基本機能を合成することで、時空強度値に関するさまざまな処理が可能となる。

5.4.3 評価と課題

以上、時空強度値の取り扱いについて述べてきた。その内容を整理すると以下のようにまとめられる。

- 時空強度の値を表現する語彙を取集し、それらの間の抽象-具体の半順序関係を元に、時空強度値のブール束を構成する手法を提案した。
- ブール束のノードに割り当てたビット列を、計算機内の時空強度値の表現として用いることにより、時空強度値の間の抽象-具体関係の導出、時空強度値の演算を効率化することができた。

時空強度値データベースの目的は、時空強度値を表現する語彙を整理し、関係の明確化を行なうことで、演算可能な時空強度値の形式的体系を構築することにある。本研究で用いたブール束による体系化の手法は、こうした目的に対して有効と考える。

¹³結果が基底ノードの時には定数

しかしながら、時空強度値あるいはより一般に属性値をより形式的に取り扱うためには、まだ多くの課題が残されている。その中で主要な課題をあげると、

- 用語により記号表現される時空強度値と定量的な時空強度値との対応をいかに整合的かつ自然に与えるか、という課題。たとえば、時空強度値の用語を定量的時空強度値の集合上のファジー集合として与える¹⁴などの方法を検討する。
- 時空強度値の用語の意味が、個人または状況により異なることが考えられる。たとえば、用語として温度で“高温”を考えたときに、これが表す温度の範囲には個人差があるであろうし、また身の回りの現象を記述している場合と、炉の中の現象を記述している場合とで当然、“高温”の意味が変わってくる。こうした言語の意味論、語用論に関わる差異をどのように吸収し、計算機内の形式的かつ齊一な属性の表現を実現するかは、実用的なデータベースの構築を行なう上で避けることのできない問題である。
- 時空強度値の語彙と、空間的属性、時間的属性と時空強度値との組合せにより定義される複合物理属性の語彙との対応をどのようにして整合させるか、という問題がある。たとえば、比重が“高い”ということと、重量が“重い”ということは直接に対応する訳ではなく、体積の“大きい”か“小さい”かにより変わってくる。こうした定性的な属性の表現の間の対応関係を整合的に定めてやる必要がある。

などが挙げられる。

5.5 状態モデリング・システム

5.5.1 状態モデリング・システムの基本構成

以上述べてきた時間情報モデリング・システム、空間情報モデリング・システムおよび時空強度値データベースの3つを総合することで、状態モデリング・システム(SMS)が構成される。

図5.34にSMSにおけるデータの構成と相互の関連を示す。以下に図中の各部分についての説明を述べる。

SMSにおいては定状態素および定状態素変数を表現の基本要素としている。各定状態素(変数)は、SMSの内部ではSTATEクラスのインスタンスとして生成される。定状態素は

- 空間情報モデリング・システム(SIMS)における空間領域オブジェクト名
- 時間情報モデリング・システム(TIM)における時間区間オブジェクト名
- 時空強度データベース(STI-database)における時空強度値コード

へのポイントを有する。

これらの各項目が一意に確定している場合—すなわち、占有する空間領域の形状、位置、姿勢と存在する時間区間の始点、終点時刻が定まっており、かつ時空強度値が基底ノードである場合—にそのオブジェクトは定状態素、基底ノードでない場合には定状態素変数を表す。

¹⁴すなわち、個々の時空強度値の語彙に membership 関数を定義する。

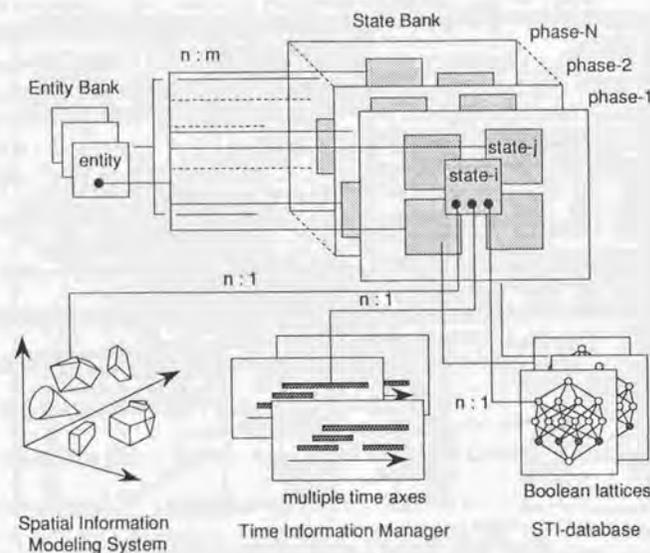


Figure 5.34: 状態モデリング・システムにおけるデータの構成と関連

定状態素(変数)に相当するオブジェクトは、属する相(phase)ごとに分類され、管理される。相として物質相、力学相、熱相、電気相、磁気相、光学相、音響相、化学相の8つ(付録のB.1.3参照)を用いる。各相に対しては、その相に固有な複合物理属性や物理法則が定義されている。

SMSにおいて、各相を管理する状態バンク(state bank)である。そこには4.2.3で述べた定状態素への基本操作がオブジェクト指向プログラミングのメソッドとして定義されている。定状態素への各種の操作や問い合わせは、この状態バンクにメッセージを送ることで実行される。

SMSにおける主要なオブジェクトとして、定状態素の外に物理実体がある。物理実体を表すオブジェクト—物理実体オブジェクト—は状態バンクに含まれる定状態素オブジェクトを構成要素とする。また、ある定状態素オブジェクトは複数の物理実体オブジェクトに含まれていてもかまわない。物理実体オブジェクトを管理するものとして実体バンク(entity bank)が設けられている。物理実体オブジェクトに対する操作や問い合わせの手続きは実体バンクにメソッドとして実装されている。

5.5.2 状態モデリング・システムの機能

つぎに、状態モデリング・システムSMSの機能について述べ、本システムにより設計対象がどのように表現、操作されるのかを例を用いて説明する。

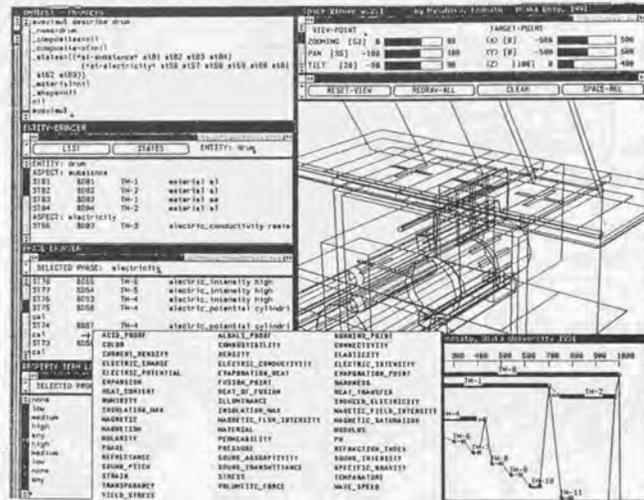


Figure 5.35: SMSによる設計対象表現の表示例(複写機)

図5.35はSMSの画面表示の例である。この例では乾式複写機の主要部分の動作ならびにドラムユニットを取り外す過程の一部がSMS内にモデル化されている。

SMSのユーザインタフェースの画面は以下に示す6つのサブウィンドウより成り立っている。

1. 空間情報モデリング・システム (SIMS, 画面右上部): 定状態素の位置, 姿勢, 形状をグラフィック表示する。
2. 時間情報モデリング・システム (TIM, 画面右下部): 離散物理世界に関わる時間区間をグラフィック表示する。
3. コンソール (画面左上部): 状態モデリング・システムへコマンド入力するためのコンソール。
4. 物理実体ブラウザ (画面左上から2番目): 指定された物理実体に対して, それを構成する定状態素を表示する。
5. 相ブラウザ (画面左上から3番目): 指定された相に関して, その相に関わる定状態素とその構成を表示する。
6. 時空強度値ウィンドウ (STI-database, 画面左最下部): 使用可能な時空強度と時空強度値の語彙のプルメニューでのコードを表示する。

SMSのユーザは, これらの各ウィンドウに提示される情報を元に, コンソールからのコマンド入力により離散物理世界の定義や操作を行なう。

現時点の実装では, 各サブシステムへの入力は表示関連のコマンドを除いてコンソールを通じてのみ行なわれる。また, 操作に関するコマンド各サブシステム固有の操作コマンドと, 4.2.3で列挙した定状態素に関する基本操作とそれらを組み合わせたマクロ操作などがSMSに用意されている。

SMSはシステム内にモデリングされた離散物理世界を, 用途に応じたさまざまな観点から眺めることができる。たとえば,

- 指定された時間区間に存在する, あるいは存在しうる定状態素(変数)の表示
- 指定された空間領域内に存在する, あるいは存在しうる定状態素(変数)の表示
- 指定された時空強度値を有する, あるいは有する可能性のある定状態素(変数)の表示
- 指定された離散分布近似集合あるいは相に属する定状態素(変数)の表示
- 指定された物理実体を構成する定状態素(変数)の表示
- ある定状態素(変数)と干渉する, あるいは干渉する可能性のある定状態素(変数)の表示

や, これらの組合せによって離散物理世界を提示することが可能である。

図5.36～図5.39に, ある時点(tm-5)でのスナップショット, 金属(METAL)を材質(material)の時空強度値としてもつ定状態素, 電気相(electricity)に属する定状態素, ある物理実体(drum)に属する定状態素, を取り出して表示した例を示す。

5.5.3 評価と課題

ここで, 状態モデリング・システムSMSの特徴と問題点について整理しておく。

状態モデリング・システムは第3章で導入した設計対象の形式的表現である離散物理世界を, 第4章で述べた設計過程により計算機内に構成していくことを目的に開発されたシステムである。その特長は以下のようにまとめられる。

1. 状態モデリング・システムで取り扱われる対象は, 物理実体, 定状態素ならびに空間領域-時間区間-時空強度という, 3つの異なる層に分けられている。物理実体の層では設計上の意味, 定状態素の層では物理的な意味, 空間領域-時間区間-時空強度の層では数学的な意味がそれぞれ分離されて取り扱われている。
2. 定状態素に対して定義されている物理法則を適用することで, 物理的な整合性の検証や演繹的な推論を行なうことができる。
3. 3.5次元の時空間を取り扱うことができ, 設計対象のもつ空間的な構造と時間的な変化を同一の対象記述の枠組みで表現できる。これにより, <構造の決定→挙動の推論>という従来の設計の流れに加えて, <挙動の決定→構造の推論>という逆の方向性も容易に実現できる。

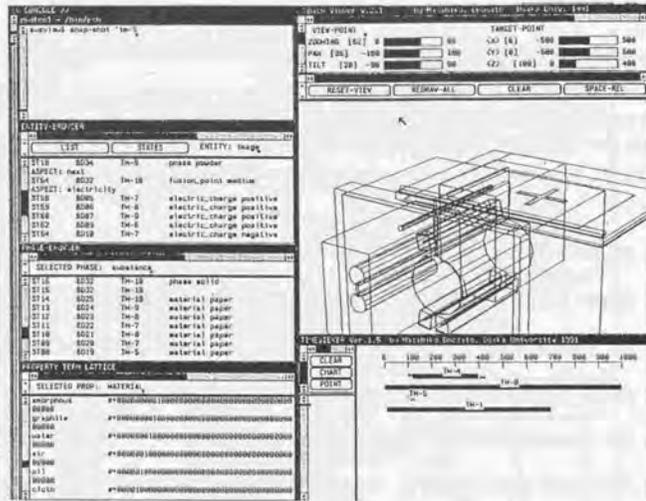


Figure 5.36: SMS による記述対象のスナップショット

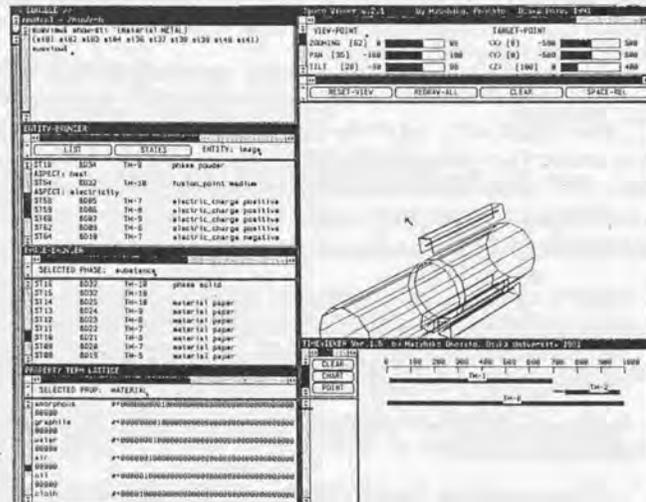


Figure 5.37: SMS における記述対象の属性による抽出 (金属の例)

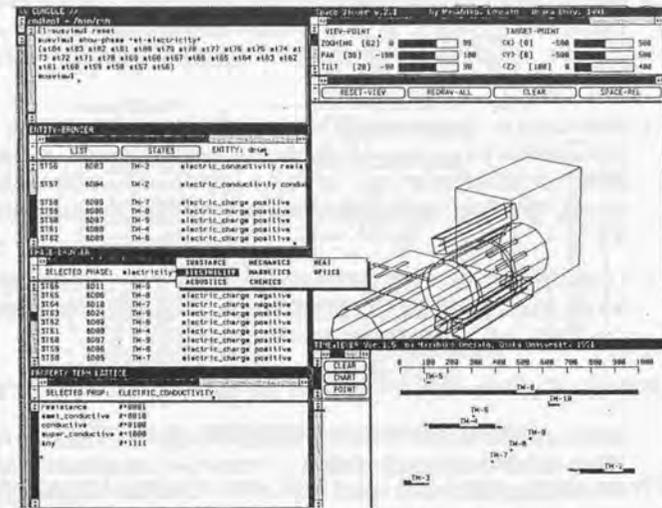


Figure 5.38: SMS における記述対象の相による抽出 (電気相の例)

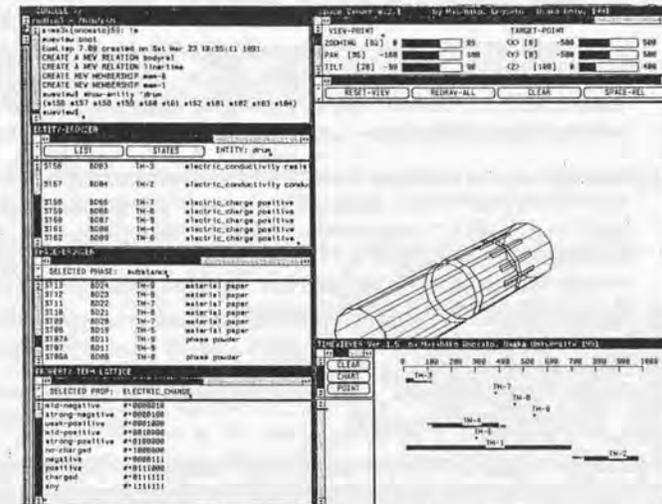


Figure 5.39: SMS における物理実体の表示 (感光ドラムの例)

- 状態モデリング・システム内に包括的に表現されている設計対象から、多様な観点での設計対象表現を取り出すことができる。たとえば、ある時点での設計対象の状態や空間構造、時系列での対象の変化、特定の性質(時空強度や相)に注目して見た設計対象の構造や挙動、などを、必要に応じて抽出できる。
- SMSにおいては、物理実体間の関係(たとえば全体-部分関係や接続関係など)や、異なる離散分布近似集合による異なる観点での対象記述の間の対応関係は、空間領域-時間区間-時空強度の層における基本関係に還元されて取り扱われる。このことにより、物理実体間の関係の形式的な表現、異なる観点の対象記述間の整合性の保持、対象記述間での演算の実現が容易になっている。
- 3.5次元空間における位置、形状、時空強度値などにあいまいさを有した対象記述が可能となっている。これは前述した、定状態素を表現する空間領域、時間区間ならびに時空強度値を取り扱うシステムが、それぞれ不確定な対象の表現と操作が可能であることによる。

状態モデリング・システム SMS はこうした特長を有している一方で、以下の課題も残している。

- 表現される時空間が3.5次元であるために、並進運動などの連続的变化を表現できない。これは、表現する物理世界を離散物理世界に限定したこと起因するが、離散物理世界から有限物理世界へと対象表現を詳細化するには、状態モデリング・システムの取り扱う時空間の完全な4次元化が望まれる。4次元などの高次元の形状モデリングの研究も、いくつか行なわれているが、実用段階には現在のところない。今後、こうした4次元の形状モデリングの研究・開発の動向を見極めつつ、状態モデリング・システムの4次元への拡張を図ることが必要である。
- 表現対象の詳細度(精度)に応じて、適用される物理法則も詳細度が異なるが、現在のSMSではそうした物理法則の詳細度の多様さには対応していない。表現されている対象に応じて、最も適切な詳細度を有した物理法則を適用する手法の開発と、物理法則の整合的な抽象-具象関係の体系化が今後の重要な課題となる。
- 状態モデリング・システムにおいては、設計対象をより多くの情報により記述するために、システム内で管理すべきデータ量は、従来のモデリング・システムと比較して大きくなる。また、それら多くのデータに対して、整合性を検証し、必要に応じて推論を行なうことから、単一の操作に伴う計算量も大きなものとなる。そうした多量のデータに基づく計算を、より効率的に実行する工夫が必要である。たとえば、物理法則のマッチングに対して Rete アルゴリズム [Forgy 82] のような高速化の手法を適用することなどが求められる。

5.6 意味表現処理システム

5.6.1 意味表現処理システムの概要

意味表現処理システム (Semantic Representation Processing System: SRPS) は、先に4.3において述べた設計対象の持つ意味の表現と処理を目的に開発されたシステムである。その概要を以下に列挙する。

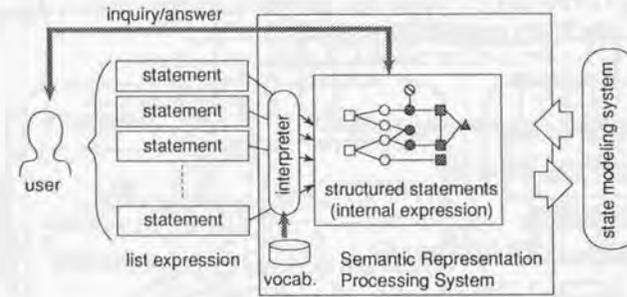


Figure 5.40: 意味表現処理システムにおける処理の基本概念

- 設計対象に対する物理的な要求、制約、事実についての言明を取り扱う。物理的な意味内容に展開できない言明¹⁵は取り扱わない。
- 与えられた言明は、空間、時間、目的-手段-帰結、因果、などの関係で相互に結び付けられ、構造化される。
- 構造化された言明に対して、推論による言明間の整合性の検証や付随する事実の導出、ユーザーからの問い合わせへの検索による回答などを行なう。
- 言明に対する要求の有無や、成立の肯定-否定はユーザーにより与えられる。
- 言明を記述する文法ならびに語彙は、SRPSに予め定義されているものに限定する。SRPSに定義されていない語は、他の語との区別しか持たない。
- SRPSはLISP言語のS式(リスト表現)に準じた形式で記述された言明を内部表現形式へと変換する。
- SRPS内部では、言明内の概念ならびに言明間の関係はオブジェクトとして表現される。言明の処理手続きは、それぞれ該当するオブジェクトのメソッドとして実装される。
- 状態モデリング・システムとのインタフェースを有し、設計対象の記述に関する情報のやりとりが可能である。

図5.40にSRPSの処理の基本概念を示す。

これらの機能のSRPS内での実現の詳細について、以下に述べていく。

¹⁵たとえば、コスト、感性、美意識など

5.6.2 意味表現処理システムの構成と機能

意味表現処理システム SRPS においては、言明や言明を構成する基本概念、言明間の関係など意味表現の要素はすべて、オブジェクト指向言語におけるクラスのインスタンス (instance) として表現されており、各インスタンスにはデータの格納、提示、処理に関する各種の手続きが付随している。

SRPS に定義されている主要なクラスは以下の通りである。

1. 個々の対象を表す PE
2. 対象の所属するクラスを表す CLASSCONCEPT
3. 述語を表す BE と CHANGE
4. 属性を表す ATTR
5. 場所と時間を表す LOC と TIME
6. 対象、時間、場所と属性との対応を与える INTERNAL
7. 対象や属性間の関係を表す RELATION
8. 言明を表す STATEMENT
9. 言明間の目的-手段-帰結の関係を表す INTENT-REL
10. 言明間の因果関係を表す SUPPORT-REL

これらのクラスには、局所変数としてのスロットがそれぞれ定義されている。スロットに他のオブジェクトへのポインタを与えることで、インスタンスが相互に結び付けられ、言明の内部を構造化できる。図 5.41 に SRPS に各クラスのオブジェクトの結合によって構成される意味表現ネットワークの概略図を示す。

SRPS はユーザが逐次的に与えた入力から、意味表現の基本概念、言明、言明間の関係をオブジェクトとし、それらの間を結合したネットワークを作成する。入力は、そこに含まれるラベルやオブジェクトのクラスに応じて階層的に解釈され、相互に関係付けられることで構造化がなされる。(図 5.41 参照)

オブジェクトは、情報を格納する場所であるとともに、解釈の主体でもある。たとえば、図 5.41 における BE オブジェクトは存在に関する言明の処理を行なった後に、内的な存在 (属性) か、外的な存在 (関係) かのラベルに応じて、INTERNAL オブジェクトか RELATION オブジェクトに未解釈部分を受け渡し、解釈を行なわせる。

こうして SRPS 内に構築された意味表現ネットワークを、ユーザに分かりやすく提示するために、意味表現ネットワークを図式表現として表示するブラウザが用意されている。図 5.42 にブラウザの表示例を示す。これは第 4 章の図 4.17 で用いた意味表現を SRPS に入力したものである。入力された意味表現の一部を図 5.43 に示す。

図 5.42 では、入力された言明や言明間の関係 (一部が画面左下に見える) が、ブラウザ (左上ならびに左中のウィンドウ) に表示されている。左上のウィンドウは言明の状態ならびに言明間の関係を図式表

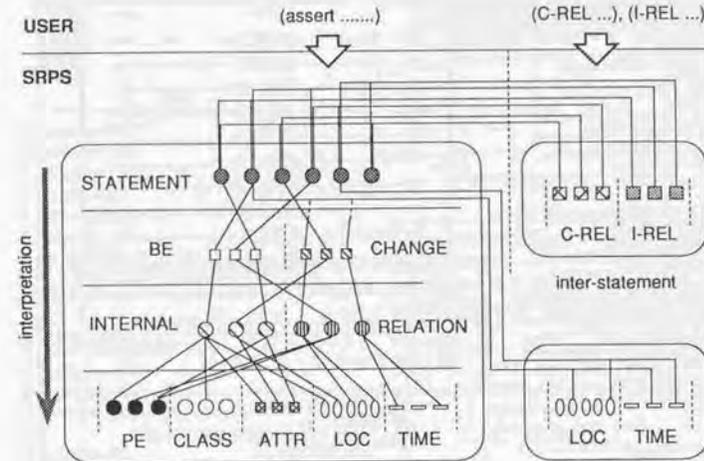


Figure 5.41: 意味表現におけるオブジェクトのネットワークの概略

現で表示しており、それらの言明のうち、マウスで選択された言明についての詳細な情報が、左中のウィンドウに表示されている。また、右側のウィンドウには入力された言明に対して SRPS が解釈された結果から生成された SMS へのコマンドリストが表示されている。

次に、SRPS の内部において入力された言明がどのように構造化されているかの例を図 5.44 に示す。こうして計算機内に構築された意味表現のネットワークに対して、SRPS は以下の処理ができる。

1. 言明内の整合性の検証: 成立が意図されている言明が不成立になっていたり、不成立が意図されている言明が成立していないかどうかを、第 4 章の表 4.1 に基づいて検証する。
2. 言明間の関係の整合性の検証: 2つの言明の成立の可否と、それらの言明間の共起関係との間に矛盾がないかどうかを、第 4 章の表 4.2 に基づいて検証する。
3. 言明の補充: システム内に予め蓄えられた対象世界に関する言明を用いて、与えられた言明に含まれる情報を補充する。たとえば、クラスについて既知である情報を用いて対象に関する言明を補充することや、変化の言明 (CHANGE) から変化前と変化後の言明 (BE) を生成することなどが該当する。
4. 言明間の関係の推論: 言明の成立の可否の情報と共起関係から、他の言明の成立の可否を推論したり、言明間の関係から、因果関係や目的-手段-帰結の関係について推論を行なう。
5. 局所パターンの検索: 意味表現のネットワーク中に、ある局所的なパターンが含まれているかどうかを、パターンマッチングにより検索を行なう。たとえば、第 4 章の図 4.18 に示した機能のバ

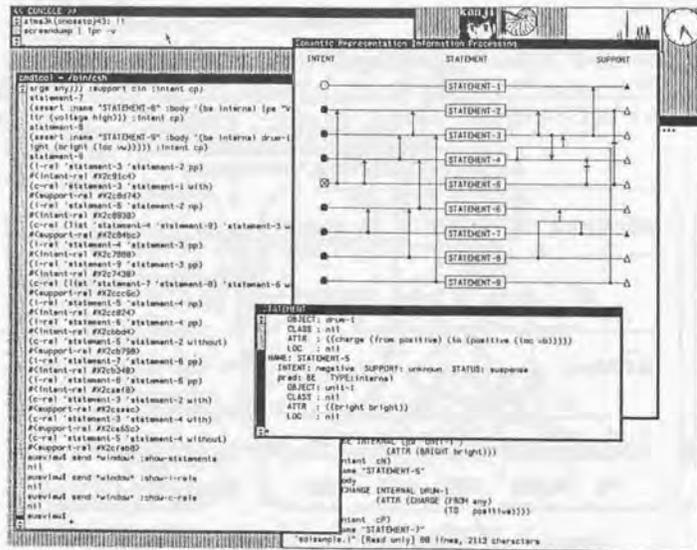


Figure 5.42: 意味表現処理システムにおける言明間のブラウジングの例

```
(assert :name "STATEMENT-4"
:body
  (BE INTERNAL DRUM-1
   (ATTR (CHARGE (positive))))
:whon (after statement-1)
:intent cp)
(assert :name "STATEMENT-5"
:body
  (BE INTERNAL (pe "UNIT-1")
   (ATTR (BRIGHT bright)))
:intent ch)
(assert :name "STATEMENT-6"
:body
  (CHANGE INTERNAL DRUM-1
   (ATTR (CHARGE (FROM any)
          (TO positive))))
:intent cp)
(assert :name "STATEMENT-7"
:body
  (BE INTERNAL DRUM-1 (ATTR (CHARGE any)))
:support cin
:intent cp)
(assert :name "STATEMENT-8"
:body
  (BE INTERNAL (pe "WIRE-1")
   (ATTR (VOLTAGE high)))
:intent cp)
```

Figure 5.43: 意味表現処理システムへの入力例 (一部)

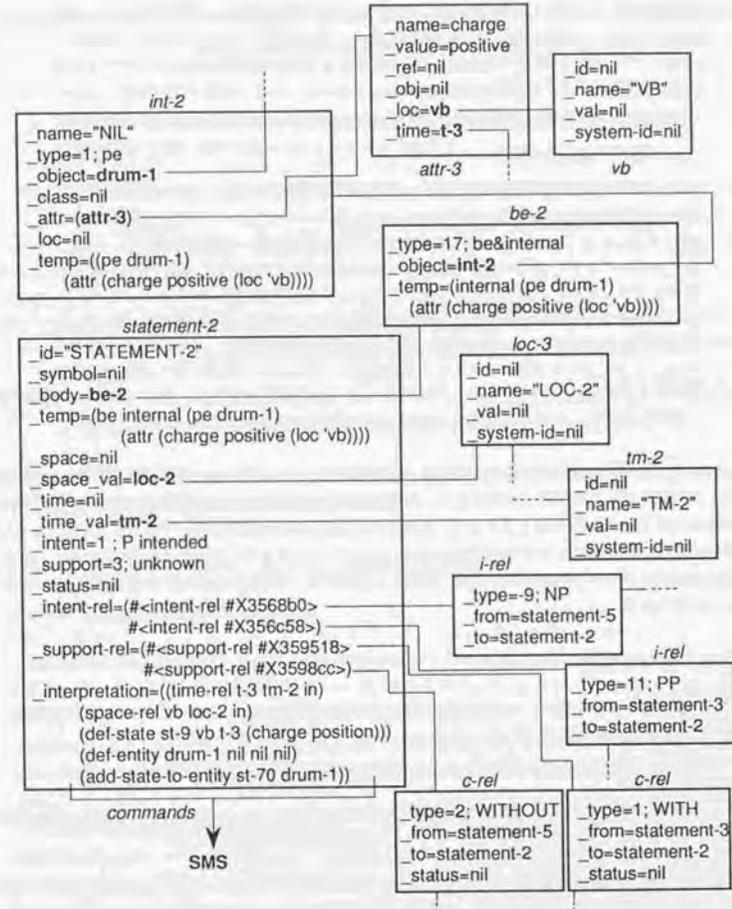


Figure 5.44: 意味表現処理システム内部における言明の表現形態の例

ターンをテンプレートとして意味表現のネットワークを検索することなどが考えられる。

6. 意味表現ネットワークへの各種の問い合わせ: 上に述べた処理を用いて、ユーザからの各種の問い合わせに対して回答する機能を有する。基本的な問い合わせとしては、

- (a) 対象などの有する属性
- (b) 対象の有する機能(挙動, 作用, 変換の機能の3タイプそれぞれについて)
- (c) 対象間に成り立つ関係
- (d) 言明の種類や状態(SUPPORTやINTENTの値)
- (e) 言明がなされた理由, あるいは成立する根拠

などがある。こうした問い合わせに対して回答を生成する手続きは、各オブジェクトのクラスに対するメソッドとして定義されており、オブジェクトに対して問い合わせのメッセージを送ることによって、定義されたメソッドが起動し、回答を生成する。回答を生成するプロセスにおいて、オブジェクトが別のオブジェクトに対して問い合わせを行なうこともある。

7. SMSに対するコマンドの生成: SRPSに与えられた入力に対して、そこに含まれる物理世界に関する内容を、SMSに対するコマンドとして解釈、生成することができる。

こうしたSRPSの機能を用いて設計者は、自分が設計している対象物の挙動や属性に関する設計意図を、時空間において構造的に記述できる。その記述された設計意図から物理世界に対する要求仕様を自動的に抽出し、SMSに与えることで、物理世界を決定する際の制約条件とすることができる。この意味において、設計者にとってSRPSはSMSへのフロントエンド・プロセッサの役割を持ち、また、SMSで記述されている物理世界を定義、参照する場合には、SRPSはSMSの背後で決定の根拠を与えるものとなる。

5.6.3 評価と課題

以上、第4章において導入した意味表現の実装である意味表現処理システムSRPSの概要を述べた。SRPSの評価と今後の課題を以下にまとめる。

まず、意味表現処理システムSRPSにより実現されたことを以下に列挙する。

1. 設計対象に対する要求、制約、事実の言語的表現を可能とした。人文文(リスト表現)は基本概念(オブジェクト)の構造(ネットワーク)としての内部表現へと変換される。
2. 言明の成立の意図の有無や成立の可否についての情報を属に持つことにより、言明の状態や言明間の整合性の保持、さらに目的-手段-帰結や因果関係に関する推論を実行できた。
3. 与えられた意味表現を状態モデリング・システムSMSへのコマンドに変換可能となった。また、状態モデリング・システムに表現される定状態素や物理実体との対応付けができた。

しかしながら、設計におけるさまざまな"意味"を取り扱うためには、以下の点での検討が必要である。

1. 語彙や背景知識の充実: 現在のSRPSでは、ユーザに多くのことを属に記述することを求めているが、ユーザが効率よく意味表現を行うためには、ユーザが用いる概念や、言明に対してさまざまな暗黙の意味を込めることを認めることが必要となる。そのためには、システム側に多くの語彙とそれに対する形式的表現(辞書)を与えることと、さらには設計の分野における常識やノウハウなどの背景知識を充実させて、ユーザの与えた入力情報を補完することが重要な課題となる。この課題に対しては、近年盛んに行われている大規模の電子化辞書や各種の大規模知識ベースの構築の研究、開発の成果を用いることができると考える。
2. 自然言語表現の実現: 現在のSRPSにおいては、構文上のあいまいさを避けるためにリストによる表現形式を用いているが、ユーザに分かりやすい自然言語表現形式を提供する必要がある。これは、現在の機械翻訳や自然言語理解に関する研究成果を適用することのできる部分、実現できるものと考えられる。
3. グラフィカル・ユーザインタフェースの高度化: 意味表現を容易にするためには、記号による言語表現だけでなく、図形などを用いた意味表現が有効と考える。たとえば、言語表現における指示代名詞などは、図形をマウス等にて直接指示することで代替できよう。こうしたグラフィック・ユーザ・インタフェースの実現が、使いやすいシステムの構築には重要であり、マルチメディアによるコミュニケーションの研究・開発の成果を取り入れることを検討している。

こうした課題を順次解決していくことで、より強力な意味の表現と処理が可能となり、設計対象に関する意図を広範に扱うことが可能になると期待される。

5.7 設計対象モデリング・システム DOMS の評価

5.7.1 DOMS の設計への適用例

以上、設計対象モデリング・システムDOMSを構成する時間情報モデリング・システム、空間情報モデリング・システム、時空強度値データベース、状態モデリング・システム、意味表現処理システムの各サブシステムについて、その構成と機能の詳細を述べてきた。

本節では、そうしたサブシステムを統合したDOMSを実現することにより、どのようなことが可能となったかについて述べる。また、DOMSと既存の他のシステムとの比較についても本節の終わりで論じる。

DOMSの基本機能ならびに基本構成については、本章の最初に述べた。ここではDOMSを用いて設計対象のモデリングした例をもとに、より具体的にDOMSの能力を述べることにする。

DOMSを用いた例として、第3章の3.7.1項で離散物理世界の対象表現の例に挙げた、謄写版印刷を行う機械(図3.9)を設計することを考える。

この場合のDOMSによる設計の流れについて概略を示すと以下ようになる。

1. 謄写版印刷機の初期仕様を意味表現処理システムSRPSに入力する。この場合には、カーボンで描かれた原稿の存在、印刷すべき白紙の存在が前提として仮定され、原稿のパターンをインクにより白紙へと転写することが根元の要求として意図される。SRPSから状態モデリング・システムSMSへと初期仕様情報が渡される。この場合には、原稿および白紙は既知であるとし

てSMSは原稿と白紙の形状や時空強度に関する定義データをライブラリから引用している。(図5.45)

- 基本プロセスをSRPSに入力する。この場合のプロセスとしては、ワックスが塗布された多孔質のポリマーシートを原稿に密着させる。そこに強い光を照射して熱を生じさせ、カーボン部の温度を上げる。ワックスを溶解、除去することで、液体が透過できるパターンが生成される。さらに、生成されたパターンにインクをのせて圧力を加えて透過させ、白紙にインクを付着させる。
- SRPSにより解釈、構造化された入力言明から物理実体、定状態素、空間領域や時間区間の関係に関するSMSコマンドの生成を行う。この場合に生成される関係は空間の包含関係や時間区間の前後関係などの定性的な関係が主である。
- SRPSで生成されたコマンドをSMSに渡して解釈させる。解釈された結果は対象の満足すべき物理的制約となる。設計者はこの制約を満足させながら、SMSのコマンドを用いて形状、位置、属性や挙動を詳細化していく。電池やフラッシュバルブは、意味表現と物理表現の対として予め定義されている標準部品である。(図5.46)
- 新たな要求等が生じた場合には、SRPSへの入力とSMSでの解釈を繰り返す。ここではフラッシュバルブを覆うことで光を関係しないところに届かないようにすることと、ランプが生じる熱により関係のない部分のワックスが溶けないようにすることが、要求として発生している。(図5.47)
- 意味表現における意味的な整合性をSRPSで、物理表現における物理的な整合性をSMSでそれぞれチェックする。

図5.48にDOMSによって設計された謄写版印刷機の最終的な状態を示す。

ここで示した例は、DOMSに蓄積されているデータをわかりやすく表示するために、定状態素の位置、形状や存在する時間区間に具体的な値を与え、表現対象の不確定性を減じている。実際には、確定された形状等を設計の早期に与える必要はなく、定性情報のみで関係の整合性の検証や物理的妥当性の検討など、多くの処理が可能である。

他のDOMSを用いた例としては、モデリングによる構造定義と、シミュレーションによる挙動定義を並行して行なうことにより、段階的に設計対象を規定していくことのできる設計支援システムの開発[大宮司 92][大宮司 93]や仮想生産システムにおける製品表現としての、プロダクト・ライフサイクル・モデリングへの適用[Onosato 93]が挙げられる。

5.7.2 DOMSの評価

ここでDOMSの設計対象モデリングに対する有効性と、DOMSの持つ限界、問題点について検討を加えることとする。

機械設計の高度計算機支援の実現に対するDOMSの持つ有効性は、おもに以下に挙げる4つの点にあると考えられる。

設計対象の総合的な取扱い：メカトロニクス設計に代表されるように、現在の機械はスタイル、機構、制御、エネルギー、熱、情報など、多様な相をその内部に有している。そうした多様な相は従来、

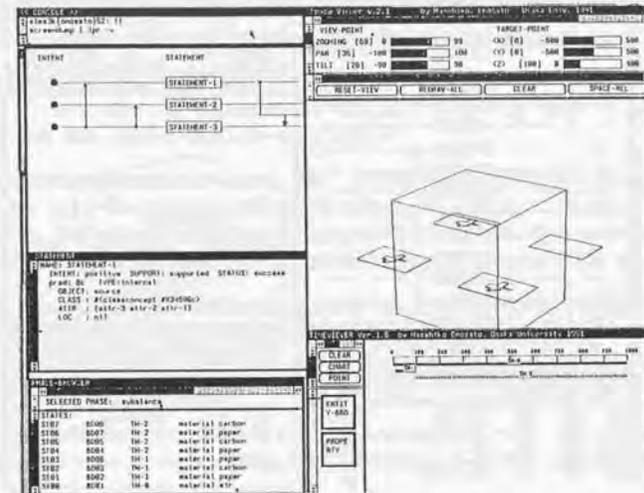


Figure 5.45: DOMSによる謄写版印刷機的设计(1) 初期仕様

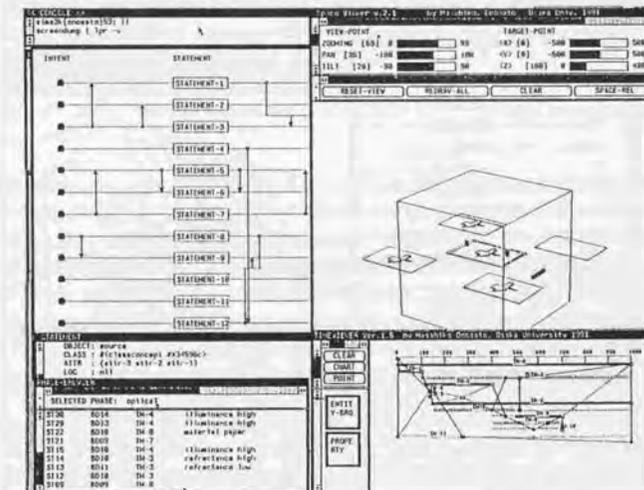


Figure 5.46: DOMSによる謄写版印刷機的设计(2) 基本プロセス定義

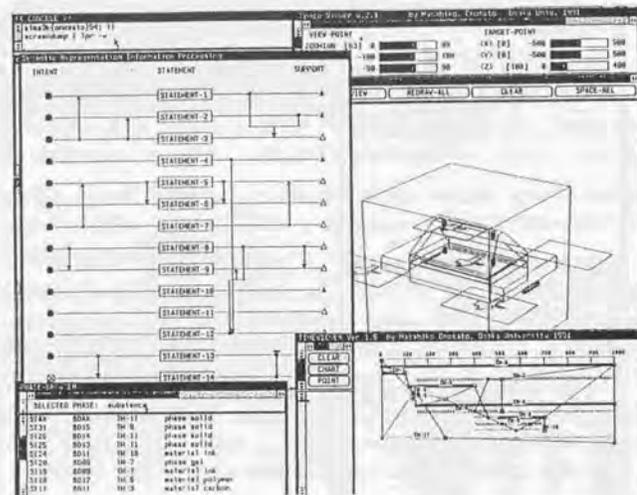


Figure 5.47: DOMSによる謄写版印刷機的设计(3) 付随的要求への対応

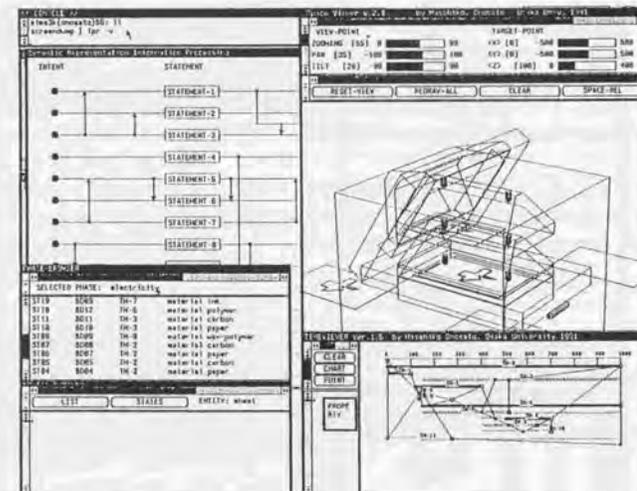


Figure 5.48: DOMSによる謄写版印刷機的设计(4) 最終結果

個別に取り扱われがちであった。DOMSは設計対象を多様な相を有する総合的存在と考え、多様な相を相互に関連付けて取り扱うことのできる統一された枠組みを提供している。

時空間における対象の物理的表現：対象を定義、操作する場として、DOMSは時空間を提供している。これにより設計者は、対象の挙動や変化を陽に記述できるようになったとともに、設計対象の挙動、構造、属性の決定順序に高い自由度を有する¹⁰。

設計過程に対応した詳細度の異なる対象表現、操作：DOMSは要求仕様の段階から詳細設計の段階まで、異なる内容と詳細度をもつ設計対象表現と操作を一貫して実現することを目的としている。現在のDOMSにおいては空間情報の取扱いが不十分なため、一貫した取扱いは実現されていないが、本システムの目指すアプローチは、柔軟な設計過程を実現する上で有効と考える。

設計対象の意味内容の明示化：対象表現が意味表現を有することで、設計対象に対する意図が明示される。これにより、設計意図からの設計対象への制約生成、設計の意図が満足されているかの検証、設計の修正の際の依存関係の管理など、設計者自身のために利用できる同時に、生産などの後工程における各種の意思決定に対して、有用な情報を提供することが可能と考える。

こうした利点を有する一方で、DOMSにはまだ多くの課題が残されている。そのうち、DOMSを構成しているサブシステムが抱える課題については既に議論した。DOMS全体に関わる課題、問題として重要と思われるものは、以下の点である。

対象表現のレベルの細かさ：DOMSにおいては、物理世界を計算機内に表現し、推論する能力を高めるために、定状態素による対象表現を用いている。しかしながら、定状態素は設計者が思考する際の対象の粒度 (granularity) と比較して細かいと考えられる。そのため、設計者が定状態素を用いて直接に物理世界を定義することはたいへんに繁雑であり、それはあたかもアセンブリ言語にて高度なアプリケーションを開発するのと同じ。ユーザーが必要とする粒度にまで表現や操作をマクロ化し、設計対象表現を人間に容易とするような、ユーザー定義 / 操作言語の開発が必要であろう。

応答速度の悪さ：本システムはワークステーション上のLisp言語を用いて実装されている。そのため、C言語で実装した場合に比べて処理の負荷が大きい。また、物理表現に含まれる定状態素の数が多くなると、空間領域や時間区間の関係に対する推論に要する時間が急激に大きくなる。各種の物理制約の評価に際しても、一般に定状態素の組合せの数に応じた計算時間が必要とされる。そのため、前節で示したDOMSによる設計の例では、各種の整合性管理の機構や推論機構は自動的に起動せず、利用者が適宜、起動している。こうした問題に対して、効率的な処理アルゴリズムの開発による計算量の低減、分散処理による計算能力の向上、および各種の推論機能等の効率的な起動による負荷の低減などが課題として挙げられる。

既存システムとの結合：DOMSの機能を向上させるためには、これまで開発されてきた多くのソフトウェア資産を有効に用いることが重要である。たとえば、非多様体モデラ、幾何推論システム、定性推論システムなどに関する既存の研究成果をDOMSに取り込んだり、各種のCAEシステムとのインタフェースを構築してデータのやりとりを行うことなどが現在の課題である。

¹⁰これについては[大宮93]に詳しい

ユーザインタフェースの改善：DOMSに貯えられている意味表現や物理表現は、設計が進行するに従って大きなデータ量となる。そうした多くの情報から適切な情報をユーザに提示することは今後の実用的なシステムの開発に当たって重要なことである。また、DOMSの有する多様な機能を、グラフィカル・インタフェースなどを通じて簡便に使用できるようにすることも今後の課題のひとつである。

こうした点について、今後改良を加えていくことで、より高度な設計支援システムの実現を目指す。

5.7.3 DOMS と他の研究との関連

本節の最後に、設計対象モデリング・システムDOMSと、他の既存のシステム研究、開発との関係について簡単に触れておく。

まずはじめに、従来の3次元CADシステムとDOMSとの違いについて述べる。3次元CADシステムにより形状情報と各種の技術情報を表現、操作できる。しかしながら、設計対象の振動や物理的な性質の記述や推論を行うことはできない。CAEシステムに形状情報や技術情報を与え、さらに物理的な特性(たとえば剛性や電気抵抗など)を補充して、振動や性質の解析を行い、その結果をもとに設計対象を修正するのが通常の方法である。

さらには、3次元CADシステムでは全てが確定した形状か、いくつかのパラメータとして変数化されている形状のみを取り扱う。DOMSにおいては、不確定な形状や位置、存在時間や属性を扱うことができる。このことについては本章の5.3節で詳しく述べた。

エキスパートCADシステムとよばれるCADシステムの中には、物理的な属性や挙動などを扱うことができるものがある。しかしながら、こうしたエキスパートCADシステムは特定の製品の物理的な属性や挙動を取り扱うための個別的な制約や手順などの知識を内包している。そのため、目的とは異なる製品の設計には対応できず、汎用性に欠ける。

ただし、本研究で開発したDOMSは従来のCADシステムを否定するものではない。CADシステムを従来の形状としての製品定義から、物理的存在としての製品定義へとその能力を発展させるための、システムの基盤を与えるものと位置付けられる。

次に、DOMSと定性推論の分野で研究されているシステムとの相違について述べる。DOMSでは定性的に定義された対象の挙動や物理的な性質を評価する際に、定性物理や定性シミュレーションの手法を一部取り入れている。しかしながら、DOMSと多くの定性推論システムとはその基本的な考え方において相違点を有する。

定性推論システムにおいては、既存の機械やシステムの挙動を予測したり、診断したりといった分析が関心の中心となる。機能的な要求と物理的な整合性を満足させながら、対象を新たに構成していくというDOMSの考え方は方向が異なる。

また定性推論のシステムでは、対象を記述する際の単位としてデバイスモデル(device model)の概念を導入しているものが多いが、これは標準部品以外に適用することが困難である。さらに、デバイスモデル間の影響関係がデバーストポロジとして与えられることが多いが、設計ではそうした影響関係は必ずしも既知ではなく、また影響関係は配置などに応じて動的に変化する。

定性推論に関連する研究の中でDOMSと最も関連が深いと考えられるのは、スタンフォード大学やマサチューセッツ工科大学、京都高度技術研究所、東京大学等で進められている物理世界に関する大規

模データベースの構築である。これらの研究成果はDOMSで取り扱う物理世界をより広く深いものにするに多いに役立つと期待される。

5.8 本章のまとめ

本章においては、前章までに述べてきた設計対象の表現論を設計対象モデリング・システムとして計算機上に実現する手法について述べてきた。その内容を整理して以下に列挙する。

1. 設計対象を記述する基本要素の1つである時間情報を、総合的にモデリングする手法の提案ならびにシステムの開発を行なった。既存の時間情報の記述形式の分析から、総合的な時間情報の取り扱いへの要求事項ことがらを明らかにした。それに基づき、段階的に定性的/定量的時間情報を詳細化できる時間情報モデリングの手法の提案し、その計算機上での実装であるTIMの開発を行なった。TIMにより離散物理世界の段階的詳細化に必要とされる、時間の表現と処理に関する機能が実現できた。

2. 離散物理世界の空間領域の表現、操作、段階的詳細化を計算機上で実現することを目的に、まず既存の形状表現について分析を行った。概念設計段階においては、形状、位置、姿勢などの空間情報が、1) 確定していない、2) 部分的にしか与えられていない、3) 他との関係により相対的に形状や位置、姿勢が規定されている、という特徴をもつが、それらを実現する有効な手段はこれまで確立されていない。これらの項目を実現することを目的に、

- REGION/REL: 空間領域の包含関係の表現と推論システム
- EGM/2D: 2次元領域の段階的詳細化システム
- SHAPES: 形状と位置・姿勢との分離表現システム

の3つのシステムを開発し、これらと3次元ブリッドモデリング・システムとを統合することで、離散物理世界の空間領域の計算機内表現と基本操作を実現した。しかしながら、本システムで実現できたのは形状の段階的詳細化の過程全体の一部分であり、より高度な幾何制約の取扱いや、今後の拡張が必要である。

3. 時空強度値を表す概念(記号)を、抽象-具象の半順序関係を用いてプール束へと組織し、時空強度値のデータベースを構成する手法を提案し、それに基づき時空強度値データベース・システムを開発した。これにより、時空強度値の語彙の管理、抽象-具象関係の利用、時空強度値の間の積、和、補元などの演算を形式的に行うことが可能となった。

4. 時間情報、空間情報、時空強度値のそれぞれに対して開発されたシステムを統合して、離散物理世界の定状態素を表現、操作する状態モデリング・システム(SMS)を構築した。SMSにより、機械製品の物理表現である離散物理世界を、定性から定量表現までの様々な詳細度で記述し、処理することが可能となり、設計過程に対応した段階的詳細化が実現された。また、SMSは従来の形状モデリング・システムと比べて、より設計対象の動的かつ物理的な側面を統一的に記述することが可能となった。

5. SMS を複写機概念設計に適用した例を示した。SMS においては、3.5次元の局所時空系をモデリングの対象としており、設計対象の空間的な配置関係である構造と、時間的な配置関係である挙動とが同一の表現の枠組みで取り扱い可能である。そのため、従来の計算機による設計支援の“構造の決定-挙動の評価”という方向性に固定されない、柔軟な設計が可能となった。
6. 第4章で述べた設計対象の意味表現の考え方にに基づき、設計対象に対する意味内容を記述、推論する意味表現処理システム (SRPS) を開発した。これにより設計対象への設計者の意図、目的-手段-帰結、および機能などが表現される意味表現が実現された。今回作成されたシステムにおいては、意味表現はリスト形式として入力されており、ユーザインタフェースの面で充分ではない。今後、構文解析部と用語の辞書を付け加えることにより、自然言語形式による入力も可能になると考えられる。
7. 意味表現を与える SRPS と、物理表現を与えている SMS とを結合することで、設計対象モデリング・システム (DOMS) を構築した。DOMS を用いることにより、意味表現を離散物理世界に対する仕様として、SMS への入力情報を生成することや、離散物理世界を意味表現を用いて解釈することが可能となった。DOMS に対して設計過程を制御する仕組みを実装することで、設計の初期段階を中心に支援する計算機システムが構成できるものと考えられる。

第6章

結論と展望

最後に、第2章から第5章までに述べてきた本研究の成果を総括し、併せて現時点での問題点を論じる。さらに今後の研究に対する課題と展望について述べる。

6.1 結論

本研究は、機械製品の設計の一貫した計算機支援を実現する上で重要となる、形式的対象表現の基礎的理論とそれに基づく計算機内での設計対象モデリング手法の確立を目的としている。この目的に対して本論文では、

- 既存の設計対象表現法に対する分析に基づき、高度な設計支援に必要とされる設計対象表現法の要求項目の提案
- 物理的存在としての設計対象を形式的に表現するための離散物理世界の定式化
- 設計過程に伴う対象表現の進化プロセスの定式化および設計対象のもつ意味の表現手法の導入
- 離散物理世界による設計対象の物理表現と、製品の意図や目的を含んだ意味表現を計算機に実装した、設計対象モデリング・システムの開発

をそれぞれ述べてきた。そこでの結論を要約して改めて以下に示す。

1. 第2章のまとめ

- (a) 機械設計における対象の代表的な表現方法を技術情報指向、物理指向、設計過程指向に分類し、物理指向および設計過程指向の研究が特に重要であることを述べた。
- (b) 対象表現のスキーマを構造、時間、属性の3つの項目に関する表現能力の有無で分類、分析し、形式的対象表現を実現するための規範として、1) 対象指示子の無意味化、2) 属性の一意性、3) 関係の一意性、4) 構造の明示化、および5) 変化の明示化、の5つを指摘した。

- (c) 対象表現における、1) 物理的な対象表現(物理表現)と、機能などの人間の意図を含んだ内容を記述した表現(意味表現)の分離 2) 従来の記述の単位であった部品などの概念を排し、時空における領域を記述の際の基本単位とした形式的記述体系、3) 関係概念を中心とした詳細化可能な対象表現、の必要性を述べた。

2. 第3章のまとめ

- (a) 従来の〈もの〉の概念の代わりに4次元の局所時空系における連結領域を用いた物理実体の概念を導入した。物理実体は時空強度の上に、その存在範囲を表す時空領域を明示的に定義したものと形式化される。
- (b) 形状、位置、姿勢、属性、関係、状態、状態変化、事象、状況、場、作用、挙動、物理法則、因果関係などの物理的な諸概念に対して、局所時空系における意味内容を明確化し、有限物理世界の枠組みにおける定義を与えた。
- (c) 連続的な有限物理世界を近似的に記述するために、一定の空間領域と時間区間を持つ定状態素より構成される離散物理世界を導入し、離散物理世界による有限物理世界の限定化の概念を導入した。
- (d) 物理世界の存在論の歴史的な流れを概観し、本研究の対象表現を、〈もの〉を属性へと還元し、空間-時間構成する物理主義的なアプローチと位置づけた。

3. 第4章のまとめ

- (a) 離散物理世界と設計対象表現との関係について考察し、状況の多様性、状況の包括性、設計対象の進化性、設計対象の目的性の4点を考慮することを提案した。
- (b) 離散物理世界の詳細化の段階を4つに分類し、段階から段階への遷移のプロセスを設計の素過程として、設計過程モデルを提案した。また、離散物理世界の定状態素に対する生成や空間、時間、時空強度の指定や詳細化、各種の演算についての基本操作群を定めた。
- (c) 設計対象における意味に関して整理を行い、物理的因果関係、目的-手段-帰結、機能を意味表現として扱うために概念依存理論の考え方を援用した意味表現言語を定義した。意味表現言語は対象、クラス、述語、場所、時間、属性、関係という基本概念から構成される。意図の有無、存在の可否、言明されている場所と時間の情報を基本概念の組合せに付加した言明を考え、言明間に共起関係、意図関係、空間/時間関係が定義された構造として意味表現をとらえた。

4. 第5章のまとめ

- (a) 段階的に定性的および定量的時間情報を詳細化できる時間情報モデリングの手法と、その計算機上での実装であるTIMの開発を行ない、離散物理世界の段階的詳細化に必要な時間の表現と処理に関する機能を実現した。
- (b) 離散物理世界の空間領域の表現、操作、段階的詳細化の計算機上での実現を目的に、空間領域の包含関係の表現と推論システム、2次元領域の段階的詳細化システム、形状と位置・姿勢との分離表現システムを開発した。これらと3次元ソリッドモデリング・システムとを結び付けることで、離散物理世界の空間領域の計算機内表現と基本操作を実現した。

- (c) 時空強度値を表す概念(記号)を、抽象-具象の半順序関係を用いてプール束へと組織する時空強度値データベース・システムを開発し、時空強度値の高階の管理、抽象-具象関係の利用、時空強度値の間の積、和、補元などの演算を形式的に行うことを可能とした。
- (d) 以上のシステムを統合して、離散物理世界の定状態素を表現、操作する状態モデリング・システムを構築した。これにより、機械製品の物理表現である離散物理世界を、定性から定量表現までの様々な詳細度で記述し、処理することを可能とし、設計過程に対応した段階的詳細化が実現された。設計対象の空間的な配置関係である構造と、時間的な配置関係である挙動とが同一の表現の枠組みで取り扱い可能であるため、従来の計算機による設計支援の“構造の決定-挙動の評価”という方向性に固定されない、柔軟な設計が可能となった。
- (e) 設計対象に対する意味内容を記述、推論する意味表現処理システムを開発した。言明間に与えた関係から推論することにより、設計対象に対する設計者の意図、目的-手段-帰結、および機能などが表現される意味表現を実現できた。
- (f) 意味表現を与える意味表現処理システムと、物理表現を与えている状態モデリング・システムとを結合することで、設計対象モデリング・システム(DOMS)を構築した。DOMSを用いることにより、意味表現を離散物理世界に対する仕様として、状態モデリング・システムへの入力情報を生成することや、離散物理世界を意味表現を用いて解釈することが可能となった。

つぎに、以上に述べてきた成果を総括し、本研究全体を通しての結論を述べる。

上で述べたように、本研究は設計対象の総合的かつ形式的な表現と操作の体系を構築することを主眼としている。対象表現において総合性と形式性を両立させることは容易ではない。総合的な記述を目指して記述能力を高めようとする、明確な定義を持たない概念や操作が含まれてしまい、形式性を壊してしまうし、逆に形式性を徹底すると、表現できる内容が制限されてしまう。本研究はこの相反する目標の実現に対して、設計対象の有する様々な諸相(機能、属性、構造、挙動など)を分析し、それらを明確な定義を与えられた少数の概念へと還元していくアプローチをとった。その結果として行き着いたのが、固定的な〈もの〉概念の解体と、時空領域と強度による対象表現の考え方-離散物理世界-であった。

離散物理世界により、設計対象表現の総合的ならびに形式的な基盤の構成が可能となった。対象表現から恣意性を極力排除し、対象表現を構成する諸概念には明確な定義を与えた。表現された対象に対する形式的な操作や演算が導入された。こうした離散物理世界による対象表現は、従来の分析を主とした“はじめに〈もの〉ありき”という記述の考え方とは異なり、“まだ存在しない、まだわからない”対象を記述する、という総合(synthesis)のための対象表現の中核となる部分は実現できたと考える。

しかしながら、本研究で提示した設計対象表現の考え方に基づいて実用的なCADシステムを構成するためには、以下に挙げる問題が残されている。

- 本研究で提示した設計対象表現の考え方は、抽象的、一般的であり、実際の個別な設計対象表現に適用するには、より具体的な方針が必要であろう。
- 本研究で示した対象表現手法を忠実にコンピュータ上に実装した場合には、実務に求められる応答速度を得ることは難しい。

本研究で示した設計対象表現の考え方の多くは、現状では「理屈」の段階に留まっており、その有用性を正確に評価するには、つぎのべる課題を実現することが必要である。

6.2 今後の研究課題と展望

本研究の研究対象の枠組みの中にも多くの未着手あるいは未解決の研究課題が残されている。それらの中で主要なものを理論、実装、応用の3つに分けて列挙し、以下に説明していく。

1. 理論面での主な研究課題

- (a) 離散から連続への拡張: 本研究では3.5次元時空間を基礎とする離散物理世界を中心に研究、開発を行ってきたが、4次元時空間を基礎とする有限物理世界の諸性質をより精密に議論し、定式化することが必要である。とくに、連続的な変化をする対象のidentityをどのように定式化するかは重要な課題である。
- (b) 離散による近似の扱い: 離散物理世界から連続的な有限物理世界への設計の進展に伴う移行の際の諸性質を明らかにする。特に、離散物理世界において近似されていた内容を、有限物理世界で厳密に表現した場合に生じる矛盾(離散物理世界での値と有限物理世界での値が異なること等)を、どのようにして解決するかが大きな課題である。
- (c) より複雑な構造をもった数学の適用: 設計対象表現の数学的定式化に際して、本研究では古典集合論を用いたが、離散物理世界をより精密に定式化を行なうには、層(sheaf)、圏(category)[竹内78]などの現代的集合論や、ファイバー空間(fiber space)[服部79]などの位相幾何学の諸概念が有効と考える。
- (d) 設計対象としての情報の扱い: 今回の離散物理世界と意味表現言語による対象表現の方法論には、情報という概念が陽には含まれない。しかしながら、情報は最近の機械の主要な構成要素であり、形式的対象表現に含めることが必要である。その際には物理的な対象表現の枠組みを再構築して、情報を対象として取り込むことが必要となる。

2. 実装面での主な研究課題

- (a) 空間の段階的詳細化のより高度な実現: 設計過程の初期段階から詳細設計段階までの連続した形状定義、操作に対応した、集合論レベルから幾何レベルまでの空間モデリング・システムの実現が大きな課題として残されている。3次元形状の段階的詳細化の実現に対して、現在盛んに研究が進められている非多様体形状モデリングや、幾何制約処理の成果を積極的に適用することが必要と考える。
- (b) データベース等の充実: 対象表現モデリングの実用化には、物理表現における時空強度、複合物理属性、物理制約(法則)や、意味表現におけるクラス、属性、関係などに関する語彙などのデータベースを量的に充実させていく必要がある。また、データ間の整合性管理のためにJTMSやATMSなどの手法を導入していくことが重要と思われる。
- (c) システムのモジュール化: 現時点での設計対象モデリング・システム(DOMS)は、特定のハードウェア環境(Sun Workstation)ならびにソフトウェア環境(Sun View+EUSLISP)を想定して開発されており、単一CPU上の1プロセスとして実行されている。しかしな

がら、システムを各機能ごとに高度化したり、異なる計算機上するには、システムの機能のモジュール化を行い、モジュール化された各機能間を標準化されたプロトコルにて結合することで、システム全体の機能を実現することが課題となる。

- (d) ユーザインタフェースの向上: 設計対象モデリング・システムにおいて表現される情報は、属性、形状、時間、意味表現など多様であり、かつ実際の対象を表現すると多量の情報が取り扱われる。ユーザである設計者がそうした大量のデータを入力、操作し、さらに構築された計算機内のモデルを認識するための分かりやすい手段が必要である。とくに、不確定な空間情報—たとえば、寸法や位相が未定な形状—のユーザへの提示方法に関しては現在のところ良い方法がなく、計算機内に保持されている空間情報に関する幾何制約や定性的関係を有効に利用できずにいる。モデリングのコアとしての対象モデリング・システムに対して優れたユーザインタフェースを付与することが今後の実用化に向けた課題として重要である。

3. 応用面での主な研究課題

- (a) 設計事例の蓄積と再利用: 応用面の課題として最も重要なことは、本研究で示した手法での設計対象モデリングの利点を明らかにすることである。そのための第一の課題として、DOMSを用いて行った設計結果を蓄積し、再設計などへ利用できるようにすることがある。設計対象モデリング・システムにより作成された設計対象表現を、機能や意図を表す意味表現と、それを実現する物理表現の対として蓄積をする。現在の設計で必要とされる機能を蓄積された設計事例の意味表現から検索し、適合した設計事例の物理表現の一部を、現在の設計対象の物理表現に適用する。ということは、DOMSの仕組みとして可能である。今後の課題として、こうした設計事例の作成、蓄積、再利用を行い、設計対象の総合的なモデリングのもつ利点を明らかにしていく。
- (b) 機械の制御設計への適用: 状態モデリング・システムによってモデリングされた機械は、その各部の動作シーケンスおよびタイミングが陽に記述されている。こうした記述は自動機械の制御設計を行う上で有用な情報と成りうる。またそれとは逆に、制御設計の結果として動作シーケンスを与えることにより、それを満足する機械の空間的構造や属性を設計する場合もある。従来、分離されていた機械系の設計と制御、情報系の設計と時空間での対象表現を介して融合化することは、メカトロニクスに代表される機械の設計に対して大きな影響を与え得るものとする。
- (c) 既存のシステムとの連携: 既存のシステムには解析を中心として優れたものが少なくない。こうした既存のシステムの機能を設計対象のモデリングに取り込むことは、設計作業の高度化にとって不可欠なことである。その場合には、DOMSの設計対象表現と、外部のシステムにおける対象表現との間の適切な変換を実現する必要がある。形状データに関してはSTEPなどの活動によりデータ交換に関する標準化が進められているが、挙動などの動的な情報を含んだ対象表現のデータ交換に関しては、現在のところ個別に対応することになる。本研究に限らず、動作や変化を含んだ対象表現のデータ交換についての研究が今後重要となるものと思われる。

こうした多くの課題を解決することによりわれわれが手にすることができるものは、いったい何であろうか? またそれはわれわれにとっていかなる価値を有するものなのであろうか? 本論文の最後に、

この問いに対する展望を述べることにする。

これまでの分析を主とする対象表現は、実世界の存在物を計算機内の世界(仮想世界とよぶことにする)のモデルへとより正確に移すことを目的としていたといえる。本研究での対象表現はそれと逆の方向性を持つ総合のための対象表現であり、仮想世界の存在物に対して、実世界に存在物を生み出すのに十分な豊かさと精度を持たせることを目指している。

こうした仮想世界の実現は、仮想生産の議論において繰り返し主張されている製品の事前評価といった利点に加えて、実世界に対するわれわれの理解を、より体系的で深いものにしてけると期待される。分析的手法により細分化された人工物である<もの>に対するわれわれの理解を、総合という観点から再構成することは、単なる実用上の利点以上のものがあると考えられる。

設計における<もの>の表現と操作を深く研究し、さらに実際のシステム構築を通じてそれを検証していくことは、実世界の<もの>に向き合って、考え、作り、使い、評価している、われわれ自身の知識、思考、認識、価値観などの仕組みを研究していることに外ならない。第2章で触れた吉川の一般設計学は、設計過程に対する観察や実験から抽出した公理から出発して設計者の内側である概念構造を論じた。それに対して著者は本研究を出発点として、人工物である<もの>の中に、それを生み出す人間の概念構造を映し出そうと考えている。

そうした試みは直接には効用に結び付かないかもしれない。しかしながら、工学を人間の利便のための単なる道具ではなく、人間に包含される「創造性の本質」— <もの>を生み出さずにはいられなくしているもの—を理解するための方法論としたい。本研究を行いながら常にそうした可能性を将来に模索している。

参考文献

- [Allen 83] J.F. Allen: Maintaining Knowledge about Temporal Intervals, *CACM*, Vol.26 No.11, pp.832-843 (1983).
- [Arbab 88] F. Arbab, B. Wang: Reasoning About Geometric Constraints, *Preprints of the 2nd IFIP WG5.2 Workshop on Intelligent CAD*, Cambridge, U.K., pp.16-30 (1988).
- [Beek 90] P. van Beek: *Exact and Approximate Reasoning about Qualitative Temporal Relations*, PhD thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada (1990).
- [Berta 68] L.von Bertalanffy: *General System Theory*, George Braziller, New York (1968); 長野 敬, 太田 邦昌 訳: 一般システム理論, みすず書房 (1973).
- [Björk 89] B.C. Björk: Basic structure of a proposed building product model, *computer-aided design*, Vol.21, No.2, pp.71 (1989).
- [Bloor 91] M.S. Bloor, J. Owen: CAD/CAM product-data exchange: the next step, *computer-aided design*, Vol.23, No.4, pp.237 (1991).
- [Braid 73] I.C. Braid, C.A. Lang: Computer-Aided Design of Mechanical Components with Volume Building Bricks, in *Computer Languages for Numerical Control*, J. Hatvany (ed), North-Holland, Amsterdam, pp.173 (1973).
- [Buchberger 76] B. Buchberger: A Theoretical Basis for the Reduction of Polynomials to Canonical Forms, *ACM SIGSAM Bull.*39, pp.19-29 (1976).
- [CAD&CIM 91] 栗山 龍平他7名: 特別企画: 製品開発を早める立体モデルの活用, *CAD&CIM* No.26, 工業調査会 (1991).
- [CAD*I 91] H.Grabowski, R. Anderl, M.J. Pratt (eds): *Advanced Modelling for CAD/CAM Systems*, Research Reports ESPRIT, Project 322 CAD Interface Vol.7, Springer-Verlag (1991).
- [Culler 76] J. Culler: *Saussure*, Fontana/Collins, London (1976); 川本 茂雄 訳: ソシュール, 岩波書店 (1978).
- [Cutkosky 93] M.R. Cutkosky, et.al.: PACT: An Experiment in Integrating Concurrent Engineering Systems, *IEEE Computer*, Vol.26, No.1, pp.28-38 (1993).
- [大宮司 92] 大宮司理晴, 小野里雅彦, 岩田一明: 概念設計における対象の表現と挙動の推論に関する研究, 1992年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.51-52 (1992).
- [大宮司 93] 大宮司理晴: 機械システムの概念設計における構造と挙動の表現と推論, 大阪大学大学院工学研究科 電子制御機械工学専攻 1992年度修士論文 (1993).

- [Dean 88] T. Dean, M. Boddy: Reasoning about Partially Ordered Events, *Artificial Intelligence*, Vol.36, pp.375-399 (1988).
- [Dechter 91] R. Dechter, I. Meiri, J. Pearl: Temporal Constraint Networks, *Artificial Intelligence*, Vol.49 (1991).
- [Dixon 89] J.R. Dixon, J.J. Cunningham, M.K. Simmons: Research in Designing With Features, in *Intelligent CAD, I*, H.Yoshikawa, D. Gossard (eds), North-Holland, pp.137 (1989).
- [Falkenhainer 91] B. Falkenhainer, K.D. Forbus: Compositional modeling: finding the right model for the job, *Artificial Intelligence*, Vol.51, pp.95-143 (1991).
- [Fenves 87] S.J.Fenves, N.C. Baker: Spatial and Functional Representation Language for Structural Design, in *Expert Systems in Computer Aided Design*, J. Gero (ed.), North-Holland, pp.511-530 (1987).
- [Forbus 84] K. Forbus: Qualitative Process Theory, *Artificial Intelligence*, Vol.24, pp.85-168 (1984).
- [Forgy 82] C.L. Forgy: Rete: A Fast Algorithm for the Many Pattern/Many Object Pattern Match Problem, *Artificial Intelligence*, Vol.19, No.1, pp.17-37 (1982).
- [藤田 92] 藤田喜久雄, 赤木新介, 長谷宏明, 仲戸川哲人, 竹内誠: 制約指向探索と最適化法とのハイブリッド化によるフロントの配置設計手法, 日本機械学会論文集(C編), Vol.58, No.547, pp.967-974 (1992).
- [福田 92] 福田圭一: 設計・生産のための時間情報管理システムに関する研究, 大阪大学大学院 工学研究科 修士論文 (1992).
- [現代哲学 70] 山崎 正一, 市川 浩 編: 現代哲学辞典, 講談社 (1970).
- [Ghallab 89] M. Ghallab, M. Alaoui: Managing Efficiently Temporal Relations Through Indexed Spanning Trees, *Proc. IJCAI'89*, pp.1297-1303 (1989).
- [Gold 83] A. Goldberg and D. Robinson: *Smalltalk-80: The Language and Its Application*, Addison Wesley, New York (1983).
- [Grudin 91] J. Grudin, et al.: Special Selection on Computer-Supported Cooperative Work, *CACM*, Vol.34, No.12 (1991).
- [Hall 70] A.D.Hall: システム工学方法論, 熊谷三郎監訳, 共立出版 (1970).
- [服部 79] 服部 章夫: 位相幾何学 III, 岩波講座 基礎数学, 岩波書店 (1979).
- [Hayes 85] P. Hayes: The Second Naive Physics Manifesto, in *Formal Theories of the Commonsense World*, J.Hobbs, R.C.Moore (eds), pp.1 (1985).
- [JSAI 93] 特集: 発想支援システム, 人工知能学会誌, Vol.8, No.5 (1993).
- [伊庭 90] 伊庭 斉志, 井上博允: 代数学的手法に基づく幾何学的概念の推論 — 第1報: Wu の手法を用いた幾何学的推論 —, 人工知能学会誌, Vol.5, No.3, pp.300-310 (1990).
- [Inui 91] M. Inui, F. Kimura: A Truth Maintenance System for Assisting Prototype based Machine Design, in *Intelligent CAD, III*, H.Yoshikawa, F.Arbab (eds), North-Holland, pp.141 (1991).
- [伊藤 90] 伊藤 公俊: 知的CADのための属性モデリング方法論, 人工知能学会研究会資料 SIG-KBS-9002, 人工知能学会 p.97 (1990).

- [Iwata 82] K. Iwata and E. Arai: Integrated modeling system for CAD/CAM of machine product, *Proc. of PROLAMAT 82*, pp.35-45 (1982).
- [岩田 88a] 岩田一明, 杉村延広, 小野里雅彦, 則兼秀信: 要求仕様記述に基づくCAD用内部モデルの生成, 昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.413-414 (1988).
- [岩田 88b] 岩田一明, 小野里雅彦: 設計のための状態モデリングに関する研究, 第6回設計自動化工学講演会論文集, pp.25 (1988).
- [Iwata 88c] K. Iwata, M. Onosato: A Basic Study on Object Representation Schemata for Machine Design, *Memoirs of the Graduate School of Science and Technology*, Kobe University, 7-A, pp.13-26 (1989).
- [岩田 88d] 岩田一明, 小野里雅彦: 状態モデリングへの物理制約の導入, 昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.93-94 (1988).
- [岩田 89a] 岩田一明, 小野里雅彦, 則兼秀信, 森田秀則: 要求仕様記述のための語彙とそれの辞書に関する研究, 1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.13-14 (1989).
- [Iwata 89b] K. Iwata, M. Onosato: A Computer Aided Conceptual Design System of Machine, *1989 the Annals of CIRP*, Vol.38/1, pp.137-140 (1989).
- [岩田 89c] 岩田一明, 小野里雅彦, 田中一正: 概念設計における幾何形状の段階的詳細化に関する研究 — 2次元幾何形状の場合 —, 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.237-238 (1989).
- [岩田 90] 岩田一明, 小野里雅彦: CAD技術の現状と将来, *GTSJ*, 18-71, pp.4-7 (1990).
- [岩田 91] 岩田一明, 小野里雅彦, 福田圭一, 尾形俊明: 時間情報管理システム-TIM-の開発(第2報 数式処理による定量情報の取り扱い), 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.473-474 (1991).
- [Iwata 92] K. Iwata, E. Matsuo, M. Onosato: Development of New Methodology for Mechanical Design by Symbolized Elements with Movement, *1992 the Annals of CIRP*, Vol.41/1, pp.161-164 (1992).
- [Kautz 91] H.A. Kautz, P.B. Ladkin: Integrating Metric and Qualitative Temporal Reasoning, *Proc. AAAI-91*, pp.241-246 (1991).
- [川辺 85] 川辺 真嗣: 次世代CAD/CAM, 工業調査会 (1985).
- [川越 87] 川越 恭二, 真名垣昌夫: CAD/CAMへのマルチメディアデータベースの応用, 情報処理, Vol.28, No.6, pp.730-739 (1987).
- [川越 89] 川越 恭二, 鶴岡 邦敏: 機械系CADへの応用を考えたオブジェクト指向データベース, システム/制御/情報, Vol.33, No.8, pp.399 (1989).
- [Kimura 82] F. Kimura, T. Sata, and M. Hosaka: Integration of Design and Manufacturing Activities Based on Object Modelling, *Proc. of PROLAMAT 82*, pp.375-386 (1982).
- [木村 85] 木村 文彦: オブジェクト指向によるCAD/CAMのためのモデリングとデータベース, 情報処理, Vol.29 No.4 (1985).
- [桐山 91] 桐山 孝司, 富山 哲男, 吉川 弘之: 設計対象モデル統合化のためのメタモデルの研究, 人工知能学会誌, Vol.6, No.3, pp.426 (1991).
- [桐山 92] 桐山 孝司, 富山 哲男, 吉川 弘之: フィジカル・フォーチャ・データベースにおける挙動表現の枠組, 人工知能学会研究会資料 SIG-FAI-9201-9, 人工知能学会, pp.87 (1992).

- [北嶋 81] 北嶋 克寛, 吉川 弘之: 階層的ネットワークモデルに基づく対話型機械設計システム HIMADES-1 の開発, 精密機械, Vol.47, No.6, pp.1490 (1981).
- [北嶋 82] 北嶋 克寛, 吉川 弘之: 機械のネットワークモデルに基づく運動ならびに寸法に関する統一規則の研究, 精密機械, Vol.48, No.6, pp.764 (1982).
- [北嶋 83] 北嶋 克寛, 吉川 弘之: 機械の有向接続グラフに基づく対話型組立可能性判定システムの開発, 精密機械, 49, 2, pp.208 (1983).
- [de Kleer 84a] J. de Kleer, J.S. Brown.: A qualitative physics based on confluences, *Artificial Intelligence*, Vol.24, 7-83 (1984).
- [de Kleer 84] J. de Kleer: How Circuits Work, *Artificial Intelligence*, Vol.24, pp.206-280 (1984).
- [小林 90] 小林 一也: 製品モデルのデータ交換標準:STEP 第4回 D&C セミナー論文集, 精密工学会 設計論と CAD 専門委員会, pp.102 (1990).
- [効果辞典 72] 高尾 利治, 藤井 寛一 編: 理工学における効果の辞典, 東京電機大学出版局 (1972).
- [小山 91] 小山 照夫: データモデルと CAD, 第5回 D&C セミナー論文集, 精密工学会 設計論と CAD 専門委員会, pp.33 (1991).
- [Kripke 63] S. Kripke: Semantical Analysis of Modal Logic, *Zeitschrift für Mathematische Logik und Grundlagen der Mathematik*, Vol.9, pp.67-96 (1963).
- [Mäntyla 89] M. Mäntyla: Directions for Research in Product Modeling, *Computer Applications in Production and Engineering CAPE'89*, North-Holland, pp.71 (1989).
- [鞠子 87] 鞠子 英雄: システムと認識 — 近代科学の脱構築 —, 海鳴社 (1987).
- [丸一 91] 丸一 智己, 安西祐一朗: 時間制約論理モデルとその応用, 人工知能学会誌, Vol.6, No.3, pp.407-415 (1991).
- [松井 91] 松井 俊浩: オブジェクト指向型モデルに基づくロボットプログラミングシステムの研究, 電子技術総合研究所研究報告, 第926号 (1991).
- [Meiri 91] I. Meiri: Combining Qualitative and Quantitative Constraints in Temporal Reasoning, *Proc.AAAIL-91*, pp.260-267 (1991).
- [Minsky 75] M. Minsky: A framework for representing knowledge, in *The Psychology of Computer Vision*, P. Winston (ed.), McGraw-Hill (1975).
- [宮田 85] 宮田 武: 製品の開発・設計管理 — 実務と改善法, 日刊工業新聞社 (1985).
- [Murakami 89] T. Murakami, N. Nakajima: Research on Design-Diagnosis Using Feature Description, in *Intelligent CAD, I*, H.Yoshikawa, D. Gossard (eds), North-Holland, pp.169 (1989).
- [Murthy 87] S.S. Murthy, S. Addanki: PROMPT: An Innovative Design Tool, *Proc. AAAIL-87*, pp.637 (1987).
- [松村 92] 松村 治夫: 廃棄物処理対策の動向 — とくに産業廃棄物対策について, 精密工学会誌, Vol.58, No.1, pp.24-29 (1992).
- [MIL 87] DARPA: *Technical Writing Style Guide*, KIL-HDBK-63038-2(TM), 藤岡啓介訳: スタイルガイド, IPC (1987).

- [長澤 84] 長澤 勲, 古川由美子, 荒牧重登: 論理プログラミングを基礎とした設計システム記述言語 ADD, 情報処理学会論文誌, Vol.25, No.4, pp.606 (1984).
- [長澤 86] 長澤 勲, 古川由美子: 拘束条件リダクション法を用いた機械設計計算支援システム, 情報処理学会論文誌, Vol.27, No.1, pp.112 (1986).
- [永田 92] 永田 勝也: 製品設計とリサイクル, 精密工学会誌, Vol.58, No.1, pp.18-23 (1992).
- [中島 87] 中島 秀之: 多重世界機構による常識推論, 人工知能学会誌, Vol.2, No.3, pp.367-374 (1987).
- [中塚 85] 中塚 久世: 形状モデルと知識工学 I — 境界表現, PIXEL, No.29, 図形処理情報センター (1985).
- [Nevins 75] A.J. Nevins: Plane geometry theorem proving using forward chaining, *Artificial Intelligence*, Vol.6, (1975).
- [Newell 63] A. Newell, H.A.Simon: GPS, A Program That Simulates Human Thought, in *Computer and Thought*, E.A. Feigenbaum & J. Feldman (eds.), MacGraw-Hill, New-York (1963).
- [西田 90] 西田 豊明: 機能の認識, 精密工学会誌, Vol.56, No.6, pp.969-972 (1990).
- [新田 88] 新田 克己: 時間を含む知識表現と推論, 人工知能学会誌, Vol.3, No.3, pp.563-571 (1988).
- [新田 89] 新田 義浩: 哲学の歴史, 講談社 (1989).
- [野村 91] 野村 浩郷 編: 言語処理と機械翻訳, 講談社サイエンティフィック, (1991).
- [則兼 89] 則兼 秀信: 機械設計における製品の機能表現に関する研究, 神戸大学大学院工学系研究科修士論文, (1989).
- [岡田 91] 岡田 直之: 語の概念の表現と蓄積, 電子情報通信学会, (1991).
- [岡田 93] 岡田 公治: 機械設計のための設計意図モデルに基づく CAD に関する研究, 静岡大学大学院 博士論文, (1993).
- [Okino 73] N. Okino, Y. Kakazu, H. Kubo: TIPS-1; Technical Information Processing System for Computer Aided Design, Drawing and Manufacturing, in *Computer Languages for Numerical Control*, J. Ilatvany (ed), North-Holland, Amsterdam, pp.141 (1973).
- [小野里 87] 小野里雅彦, 勝間田泰季, 吉川 弘之: 設計における機械構造表現法の研究 (第2報) — 機能構造表現 —, 昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.23-24 (1987).
- [Onosato 89] M. Onosato, H. Yoshikawa: A Framework on Formalization of Design Object for Intelligent CAD, in *Intelligent CAD, I*, H.Yoshikawa, D. Gossard (eds), North-Holland, pp.117-136 (1989).
- [Onosato 92] M. Onosato, K. Iwata, S. Nishida: Modeling Time Information in Manufacturing, *JSME Int. Journal*, 35-324C, pp.207-213 (1992).
- [Onosato 93] M. Onosato, K. Iwata: Development of a Virtual Manufacturing System by Integrating Product Models and Factory Models, *the Annals of CIRP*, Vol.42, No.1, pp.475-478 (1993).
- [Oshuga 89] S. Oshuga: A Consideration to Intelligent CAD Systems, in *Intelligent CAD, I*, H.Yoshikawa, D. Gossard (eds), North-Holland, pp.89 (1989).

- [Randell 89] D.A. Randell, A.G. Cohn: Modelling Topological and Metrical Properties in Physical Processes, *Proc. 1st Int. Conf. Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'89)*, pp.357-368 (1989).
- [Requicha 80] A.A.G.Requicha: Representation for Rigid Solids: Theory, Methods and Systems, *Computing Surveys*, Vol.12, No.4, (1980).
- [酒井 92] 酒井 利彦, 薄木 栄治, 村上 幸己, 木村 文彦, 伊藤俊太郎: プロダクトモデルに基づく鉄道台車 CAD システムの開発, *精密工学会誌*, Vol.58, No.6, pp.967 (1992).
- [佐々木 91] 佐々木 寛, 山田 誠二, 豊田 順一: 定量的制約とリレーションによる時区間の時間的性質の決定, *情報処理学会研究報告 92-AI-80* (1992).
- [Schank 75] R.C.Schank: *Conceptual Information Processing*, North-Holland (1975).
- [瀬口 87] 瀬口 靖幸, 尾田 十八, 室津 義定(共編): *機械設計工学 2[システムと設計]*, 培風館 (1987).
- [シュテイマン 67] シュテイマン著, 水戸 巖 訳: *空間と時間の物理学*, 東京図書 (1967).
- [Shimada 89] K. Shimada, M. Numao, H. Masuda, S. Kawabe: Constraint-based Object Description for Product Modeling, in *Computer Applications in Production and Engineering*, K. Kimura and A. Rolstadås(eds.), North-Holland, pp.95-106 (1989).
- [白井 85] 白井賢一郎: *形式意味論入門*, 産業図書 (1985).
- [SPARC 75] SPARC/DBMS Study Group : INTERIUM REPORT, ANSI/X3/SPARC Study Group on Data Base Management Systems, (1975).
- [Suh 90] N.P.Suh: *The Principles of Design*, Oxford University Press, UK (1990).
- [Sussman 80] G.J.Sussman, G.L.Steele Jr.: CONSTRAINTS—A Language for Expressing Almost-Hierarchical Descriptions, *AI Journal*, Vol.14, No.1 (1980).
- [鈴木 86] 鈴木 宏正他: プロダクトモデルに基づく幾何学的拘束関係の記述と寸法問題への応用, *精密工学会誌*, 52, 6, pp.1037 (1986).
- [Suzuki 88] H. Suzuki, H. Ando, F. Kimura: Synthesizing Product's Shapes with Geometric Design Constraints and Reasoning, *Preprints of the 2nd IFIP WG5.2 Workshop on Intelligent CAD*, Cambridge, U.K., pp.445-450 (1988).
- [鈴木 91] 鈴木 宏正: *プロダクトモデリングとインテリジェントCAD*, インテリジェントCAD(下), 吉川 弘之, 富山 哲男編, 朝倉書店 (1991).
- [鈴木 92] 鈴木 浩之: 状況理論の基礎概念, *人工知能学会誌*, Vol.7, No.3, pp.385-391 (1992).
- [武田 91] 武田 英明, 富山 哲男, 吉川 弘之: 知的CADの開発のための設計過程の分析と論理による形式化, *精密工学会誌*, Vol.57, No.6, pp.1047 (1991).
- [武田 92] 武田 英明, 富山 哲男, 吉川 弘之: 設計過程の計算可能モデルと設計シミュレーション, *人工知能学会誌*, Vol.7, No.5, pp.877 (1992).
- [Takeshige 85] A. Takeshige, T. Tomiyama, and H. Yoshikawa: An Application of Frame System to CAD, *Proc. of ICED 85*, Heurista, Zurich, pp.763-770 (1985).
- [竹内 78] 竹内 外史: 層・圏・トポス—現代集合像を求めて, 日本評論社 (1978).
- [田中 89] 田中 博: *定性推論とオントロジー*, 定性推論, 淵一博監修, 共立出版 (1989).

- [富山 83] 富山 哲男, 吉川 弘之: 設計過程モデル論——一般設計学における機械設計へのバイナリの応用——, *精密機械*, Vol.49, No.4, pp.441 (1983).
- [富山 85] 富山 哲男: *CAD 構成論*, 東京大学大学院工学系研究科 博士課程学位論文, (1985).
- [富山 90] 富山 哲男, 吉川 弘之: 機能論構築を目指して—設計の立場から—, *精密工学会誌*, Vol.56, No.6, pp.964-968 (1990).
- [Turchin 77] V.E. Turchin: *The Phenomenon of Science*, Columbia University Press, New York, (1977); 鎮目 恭夫, 林 一 訳: *人間現象としての科学 I*, 岩波現在選書 NS510, 岩波書店 (1979).
- [Umeda 90] Y. Umeda, H. Takeda, T. Tomiyama, H. Yoshikawa: Function, Behavior, and Structure, in *AIENG'90 Applications of AI in Engineering*, Springer-Verlag, pp.177-193 (1990).
- [渡辺 78] 渡辺 慧: *認識とパターン*, 岩波新書, 岩波書店 (1978).
- [Webster 88] D.E. Webster: Mapping the Design Information Representation Terrain, *IEEE COMPUTER*, Dec. 1988 pp.8 (1988).
- [Weiler 86] K.J.Weiler: *Topological Structure for Geometric Modeling*, PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY (1986).
- [Weinberg 75] G.M. Weinberg: *An Introduction to General Systems Thinking*, John Wiley & Sons, New York (1975); 松田武彦監訳: *一般システム思考入門*, 紀伊國屋書店 (1979).
- [Williams 91] D.O. Williams: A Philosophical Basic for Support Systems for Evolutionary Design, in *Intelligent CAD, III*, H.Yoshikawa, F. Arbab (eds), North-Holland, pp.319 (1991).
- [Wittgen 61] Wittgenstein, L.: *Tractatus Logico-Philosophicus*, Routledge & Kegan Paul Ltd., (1961); 奥 雅博訳論理哲学論考(ウィトゲンシュタイン全集1), 大修館書店 (1975).
- [Wu 86] W. Wu: Basic principles of mechanical theorem proving in elementary geometries, *J. Automated Reasoning*, Vol.2 (1986).
- [柳生 84] 柳生 孝昭: CADのための data metamodel, *日本ユニバック技法*, No.6 (1984).
- [柳生 85] 柳生 孝昭: Data Modellingにおける"もの"と"こと", *岩波情報科学講座 月報 13* (第18巻), 岩波書店 (1985).
- [吉田 77] 吉田 夏彦: *論理と哲学の世界*, 新潮選書, 新潮社 (1977).
- [吉川 72] 吉川 弘之: 機械のトポロジ, *精密機械*, Vol.38, No.12, pp.1018 (1972).
- [吉川 77] 吉川 弘之: 設計学研究, *精密機械*, Vol.43, No.1, pp.21 (1977).
- [吉川 78] 吉川 弘之: 機能と評価, *精密機械*, Vol.44, No.10, pp.1190 (1978).
- [吉川 79] 吉川 弘之: 一般設計学序説——一般設計学のための公理論的方法——, *精密機械*, Vol.45, No.8, pp.906 (1979).
- [吉川 81a] 吉川 弘之: 一般設計過程, *精密機械*, Vol.47, No.4, pp.405 (1981).
- [吉川 81b] 吉川 弘之, 荒井 栄司, 後藤 敏彦: *実験設計学——一般設計学のための実験的方法——*, *精密機械*, Vol.47, No.7, pp.830 (1981).

- [吉川 81c] 吉川 弘之: 設計論の最近の動向, 精密機械, Vol.47, No.8, pp.907 (1981).
- [吉谷 86] 吉谷 龍一, 高橋 輝男, 村越 稔弘, 松田 正一, 稲毛 教子: システムの設計法および分析法の総合化の研究 — システム設計の理論的基礎 —, 早稲田大学システム科学研究所特定課題研究報告書, (1986).

本論文に関連する発表論文

学術論文

1. M. Onosato, H. Yoshikawa: A Framework on Formalization of Design Object for Intelligent CAD, in *Intelligent CAD, I*, H. Yoshikawa, D. Gossard (eds), North-Holland, pp.117-136 (1989). (第2, 3章)
2. K. Iwata, M. Onosato: A Computer Aided Conceptual Design System of Machine, *1989 the Annals of CIRP*, Vol.38/1, pp.137-140 (1989). (第4, 5章)
3. M. Onosato, K. Iwata, S. Nishida: Modeling Time Information in Manufacturing, *JSME Int. Journal*, 35-324C, pp.207-213 (1992). (第5章)
4. M. Onosato, K. Iwata: Development of a Virtual Manufacturing System by Integrating Product Models and Factory Models, *1993 the Annals of CIRP*, Vol.42/1, pp.475-478 (1993). (第4, 5章)

学術報告

1. K. Iwata, M. Onosato : A Basic Study on Object Representation Schemata for Machine Design, *Memoirs of the Graduate School of Science and Technology*, Kobe University, 7-A, pp.13-26 (1989). (第2章)

参考となる学術論文

1. K. Iwata, E. Matsuo, M. Onosato: Development of New Methodology for Mechanical Design by Symbolized Elements with Movement, *1992 the Annals of CIRP*, Vol.41/1, pp.161-164 (1992).

解説・総説

1. 小野里雅彦: 吉川弘之, 富山哲男編著: インテリジェントCAD(上), 第2章 インテリジェントCADへの流れ, pp.53-68, 朝倉書店 (1989).

2. 岩田一明, 小野里雅彦: CAD技術の現状と将来, GTSJ, 18-71, pp.4-7 (1990).

関連する口頭発表

1. 小野里雅彦, 吉川 弘之: 設計における機械構造表現法の研究, 昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.439-440 (1986).
2. 小野里雅彦, 勝間田泰季, 吉川 弘之: 設計における機械構造表現法の研究(第2報)ー機能構造表現一, 昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.23-24 (1987).
3. 小野里雅彦, 吉川 弘之: 設計における機械構造表現法の研究(第3報)ー表現の形式化一, 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.277-278 (1987).
4. 岩田一明, 杉村延広, 小野里雅彦, 則兼秀信: 要求仕様記述に基づくCAD用内部モデルの生成, 昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.413-414 (1988).
5. 岩田一明, 小野里雅彦: 設計のための状態モデリングに関する研究, 第6回設計自動化工学講演会論文集, pp.25-27 (1988).
6. 岩田一明, 小野里雅彦: 状態モデリングへの物理制約の導入, 昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.93-94 (1988).
7. 岩田一明, 小野里雅彦, 則兼秀信, 森田秀則: 要求仕様記述のための語彙とそれの辞書に関する研究, 1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.13-14 (1989).
8. 岩田一明, 小野里雅彦, 田中一正: 概念設計における幾何形状の段階的詳細化に関する研究ー2次元幾何形状の場合一, 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.237-238 (1989).
9. 岩田一明, 小野里雅彦: 設計・生産システムにおける時間のモデリングに関する研究, 1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.715-716 (1990).
10. 岩田一明, 小野里雅彦: 設計対象表現法に関する考察, 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.773-774 (1991).
11. 岩田一明, 小野里雅彦, 福田圭一: 時間情報管理システム-TIM-の開発(第1報 基本概念, 機能ならびにシステム構成について), 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.471-472 (1991).
12. 小野里雅彦, 岩田一明: 設計過程における情報構造の記述に関する研究, 1992年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.67-68 (1992).

謝辞

本論文は東京大学工学部精密機械工学科の助手として1985年に採用されて以降、8年余りにわたる研究の成果をまとめたものである。その間に神戸大学、大阪大学と2度の異動をしたが、多くの方々の御指導ならびに御協力により継続して研究することができた。

東京大学工学部精密機械工学科の富山哲男助教授には、ご多忙の中、同じ研究室の先輩ということで本研究のご指導を無理をいってお引受けいただき、本論文の構成から詳細な点にいたるまで御指導、御助言いただいた。また、富山先生には、私が学生として大学、大学院に在籍中から一般設計学やCAD、知識工学などについて多くのことを教えていただいた。ここに改めて厚く御礼申し上げる次第である。

東京大学工学部精密機械工学科の木村文彦教授、新井民夫教授には大変にお忙しい中、時間を頂戴して本論文をまとめるに際しての御指導、御助言を仰いだ。また、東京大学先端科学技術センターの堀浩一助教授、東京大学工学部産業機械工学科の村上存助教授には、本研究の問題点に関して詳細に御指摘、御指導いただいた。心から感謝の意を表する。

本研究は、1985年当時、東京大学工学部精密機械工学科に在籍しておられた吉川弘之教授(現東京大学総長)の御指導のもとに始められた。吉川教授の提唱する一般設計学における設計者の概念空間の数学的定式化に大きく影響され、どのようにしたら設計対象をより数学的に明確に定式化できるか、という研究の出発点を得ることができた。

1987年10月に、神戸大学工学部生産機械工学科に異動して以来、岩田一明教授(現大阪大学工学部電子制御機械工学科教授)には本研究の遂行にあたり、多大な御指導、御支援をいただいた。とくに、これまで狭く設計を考えていた私に、生産を含めた広い観点の重要性を常にお教えいただいた。また、遅々として進まぬ私の研究を、辛抱強く見守り、時に励ましていただいた。

吉川、岩田両先生にこの場をお借りして感謝し、厚く御礼申し上げます。

私が同じ講座で研究生活をともにさせていただいた神戸大学杉村延広助教授、大阪大学高田祥三助教授(現早稲田大学理工学部工業経営学科教授)、平井慎一助手の各氏とは研究に関して多くの議論をさせていただいた。こうした議論が研究を進める上で大きな参考となった。また、本研究での計算機システムのインプリメンテーションにおいては、通産省工業技術院電子技術総合研究所の松井俊浩氏作成のオブジェクト指向言語Euslispを利用させていただいた。松井氏のEuslisp無しではシステムの実現は困難であったと思われる。各氏の御助言、御好意に感謝する。

本研究は多くの学生諸君との議論を通じて、その問題点が明らかになり、また彼らと多くの試行を重ねることで、解決する方向を模索することができた。特に、機械の機能構造について議論した勝間田泰季君(東京大学: 現日本IBM)、意味表現について議論した則兼秀信君(神戸大学: 現NTTデータ通信)、EGM/2Dの原型を試作した田中一正君(神戸大学: 現和興鉄工所)、時間情報モデリング・シス

テムの定量的制約処理の作成を行なった福田圭一君(大阪大学: 現 三菱電機), 状態モデリング・システムによるアプリケーションを開発した大宮司理晴君(大阪大学: 現 日鉱共石)らには多くのご協力をいただいたことを記し, この場を借りて感謝する。

この研究を始めたときには独身であったが, 雅美との結婚, 航平, 早苗の2人の子の誕生と, 研究をまとめたときには4人家族となっていた。研究がうまく進まずにくじけそうになる度, 家族の笑顔に支えられ, 励まされた。どうもありがとう。

平成5年9月 小野里雅彦

付録 A

記号一覧

A.1 空間関連記号

R	実数空間
U	実数上の閉区間 $[0, 1]$
$S_i, S_j, S_\lambda, \dots$	3次元閉空間, 空間
\mathcal{S}	3次元閉空間集合, 空間集合
$\mathcal{P}(A)$	集合 A のべき集合
$pos(a)$	空間 S における点 a の座標
$\bar{S}_i, \bar{S}_j, \bar{S}_\lambda, \dots$	空間領域
\mathcal{R}	空間領域集合
EQ	空間領域集合上の形状に関する同値関係
$EQ(\bar{S})$	空間領域 \bar{S} を代表元とする形状に関する同値類
γ, γ_i, \dots	3次元の回転ならびに並進変換
Γ	3次元におけるすべての回転ならびに並進変換の集合
ψ	形状の同値類から形状への写像
G	形状集合
ψ_0	形状の同値類から形状への標準的な写像
G_0	標準形状集合
$shape(\bar{S})$	空間領域 \bar{S} の形状
$position(\bar{S})$	空間領域 \bar{S} の位置
$orientation(\bar{S})$	空間領域 \bar{S} の姿勢

A.2 時間関連記号

時間	
T, T_i, T_λ	時間軸
\mathbb{T}	時間軸集合
t, t_i, t_λ	時点
$\bar{T}, \bar{T}_i, \dots$	時間区間
$Start(\bar{T})$	時間区間 \bar{T} の始点
$End(\bar{T})$	時間区間 \bar{T} の終点
τ, τ'	時間マッピング関数
$\tau(t_i)$	時点 t_i の時間値
V_i, V'_i	時間スケール
$\langle T, V_i, \tau \rangle$	時間システム
d_t	時間スケール V_i 上の距離関数
$\langle T, V_i, l_D \rangle$	標準的時間システム

A.3 局所時空系関連記号

F, F_i, \dots	局所時空系
\mathfrak{F}	局所時空系集合
$proj_S$	局所時空系から空間への標準的射影
$proj_T$	局所時空系から時間軸への標準的射影
$proj_S(a)$	局所時空系の点 a の空間位置
$proj_T(a)$	局所時空系の点 a の時間位置
(s, t)	局所時空系の点
$(pos(s), \tau(t))$	局所時空系の点 (s, t) の時空座標
$proj_S(\vec{ab})$	局所時空系のベクトル \vec{ab} の空間成分
$proj_T(\vec{ab})$	局所時空系のベクトル \vec{ab} の時間成分
$proj_S[F_i]$	局所時空系の部分集合 F_i の空間成分
$proj_T[F_i]$	局所時空系の部分集合 F_i の時間成分
D, D_1, \dots	時空領域
$\mathfrak{D}, \mathfrak{D}_F$	時空領域集合
$F' _{t=t_0}$	局所時空系の部分集合 F' の時間位置 t_0 における断面
$F' _{s=s_0}$	局所時空系の部分集合 F' の空間位置 s_0 におけるスパン
$F' _h$	局所時空系の部分集合 F' の $h: t \rightarrow s$ による軌跡

A.4 時空強度関連記号

STI- i	第 i 番目の時空強度
Q^i	STI- i の時空強度値集合
q^i, q_j^i	STI- i の時空強度値
Ω	すべての時空強度値集合の集合
$p^{i,F}, \bar{p}^i, p_\lambda^i$	STI- i に関する時空強度関数
$\langle F, Q^i, p^i \rangle$	局所時空系 F における分布
PWF^F	局所時空系 F における物理世界の記述
F/p_λ^i	局所時空系 F の p_λ^i による商集合
F_a^i, F^i	局所時空系 F の STI- i に関する時空セグメント集合
ω_a^i	局所時空系からその時空セグメント集合への自然写像
\bar{p}^i	セグメント化された時空強度関数

A.5 状態素関連記号

(D, q^i)	STI- i の状態素
P^i, P_j^i	STI- i の状態素
P^i	STI- i の状態素集合
\mathfrak{P}^i	全状態素集合の集合
$seg(P^i)$	状態素 P^i の存在する時空領域
$val(P^i)$	状態素 P^i の時空強度値
$P^i _{t=t_0}$	状態素集合 P^i の時点 t_0 におけるスナップショット
$\phi_s(a)$	スナップショットの要素 a の空間領域
$\phi_q(a)$	スナップショットの要素 a の時空強度値

A.6 有限物理世界関連記号

$FPWF^F$	有限物理世界
B	ブール集合 $\{nil, t\}$
PH	相集合
PH_i	相
α	相集合 PH と時空強度との対応 $\alpha(PH_i) \subset \Omega$

PhC-I, PhC-I'	時空強度値の制約
PhC-II, PhC-II'	時空強度関数の制約
PhC-III	時空強度値の組合せの制約
PhC-IV	時空強度関数の組合せの制約
Ω_*	場となる時空強度値集合の集合
Ω'	場とならない時空強度値集合の集合
$P^i _{t=t_0}^D$	STI-i に関する時空領域 D の時点 t_0 におけるスナップショット
$v(D, t)$	時空領域 D の時点 t における状態ベクトル
$v(D, \bar{T})$	時空領域 D の時間区間 \bar{T} における状態ベクトル
$H_i = (\bar{T}_i, v^D(\bar{T}_i))$	状態区間
$H_1 \rightarrow H_2 \rightarrow \dots$	状態区間列
$v(D, \bar{T}_i) \rightarrow v(D, \bar{T}_{i+1})$	状態変化, 状態遷移
$(D, t, v \rightarrow v')$	事象 (イベント)
$event(H_i \rightarrow H_{i+1})$	事象

A.7 物理実体関連記号

E	実体識別子集合
id, id_i, \dots	実体識別子
θ	実体化写像 $theta: E \rightarrow \mathbb{C}_F$
$\theta(e)$	物理実体 e の存在時空領域
(e, D)	物理実体
$P^i _e$	物理実体 e の内部状態素
$P^i _e$	物理実体 e の内部状態素集合
σ	内部状態素集合から状態素集合への写像
τ	内部時空セグメントのスナップショット集合から内部時空セグメント集合への写像
$P^i _{t=t_0}^e \rightarrow P^i _{t=t+\delta t}^e$	物理実体 e の STI-i に関する 時点 t_0 での挙動

A.8 物理法則関連記号

PL-II $_j^i$	STI-i に関する物理法則
PL-IV $_j$	異なる相間の時空強度分布に関する物理法則
$(Q^i)^F / \{P_1, P_2, \dots\}$	時空強度関数集合 $(Q^i)^F$ の時空強度関数のうち, 局所パターン P_1, P_2, \dots を含むものからなる集合.
\bar{D}, \bar{D}_i	定時空領域 $\bar{S} \times \bar{T}$

A.9 離散物理世界関連記号

\bar{D}, \bar{D}_i	定時空領域
\mathbb{C}_F, \mathbb{C}	定時空領域集合
\bar{P}^i, \bar{P}_j^i	定状態素
\bar{P}^i, \bar{P}_j^i	離散分布近似集合, 近似集合
DPW^F	離散物理世界
$appr(DPW_i^F, FPW_j^F)$	離散物理世界による有限物理世界の近似の成立を表す関係
$spec(DPW^F)$	離散物理世界 DPW^F によって近似される有限物理世界集合
$[x]$	変数 x のとりうる値の集合
$(x A)$	条件 A を満足する変数 x
$X \rightarrow Y$	X は Y より詳細 $[X] \supset [Y]$
X^D, X_j^D	定時空領域変数
$X^{Q^i}, X_j^{Q^i}$	STI-i に関する時空強度値変数
$X^{P^i}, X_j^{P^i}$	定状態素変数 (X^D, X^{Q^i})
$DPW_a^F \subseteq DPW_b^F$	離散物理世界の c による詳細化
PhC_j	要求される物理制約
$PhC_j(FPW_j^F)$	物理制約を満足する有限物理世界

付録 B

主要な物理属性一覧

B.1 基本物理属性

B.1.1 空間属性

p, p_i, p_j : 点, l : 線, A : 面, S : 空間領域

点座標	3次元空間内でのデカルト座標 (スカラ3組またはベクトル). $pos(p) = \overline{s_o p}$
距離	2点間の距離 (正のスカラ). $d_s(p_i, p_j) = \overline{p_i p_j} $
方向	始点 p_i と終点 p_j に対して定義される正規化されたベクトル. $direct(p_i, p_j) = \overline{p_i p_j} / \overline{p_i p_j} $
形状	空間領域の形状 $shape(S)$
位置	空間領域の局所座標の基準座標に対する変換の並進成分 (スカラ3組またはベクトル). $position(S)$
姿勢	空間領域の局所座標の基準座標に対する変換の回転成分 (3次元回転行列またはスカラ3組) $orientation(S)$
角度	2つの方向に対して定義される量 (スカラ). $angle(direct(), direct())$
法線	面と面上の点に対して定義される方向 (ベクトル). $normal(A, p)$
線長	線に沿った長さ (正のスカラ). $length(l)$
面積	面の有する面積 (正のスカラ). $area(A)$
体積	空間領域のもつ体積 (正のスカラ). $vol(S)$

B.1.2 時間属性

t, t_i, t_j : 時点, T : 時間区間

時間値	時点の時間スケールでの値 (スカラ). $\tau(t)$
時間差	2つの時点の時間値の差 (スカラ). $diff(t_i, t_j)$

B.1. 基本物理属性

時間距離	2つの時点の間の時間値の差の絶対値 (正のスカラ). $d_t(t_i, t_j)$
時間区間長	時間区間の始点 $Start(T)$ と終点 $End(T)$ の時間距離 (正のスカラ). $length(T) = d_t(Start(T), End(T))$

B.1.3 時空強度

(1): 状態強度, (2): 物性強度, (3): 臨界強度

物質相

モル濃度 (1)	単位体積中の物質質量 (正のスカラ).
物質相 (1)	固相, 液相, 気相など物質の存在状態 (記号).
稠密性 (1)	稠密, 発泡, 網目状など物質の時空の占有状態 (記号または正のスカラ).
結合 (1)	周囲の物質との結合状態 (記号または立体的角).
材質 (2)	Fe, Cu, H ₂ O, ... など, 時空を占める材質 (記号).
比重 (2)	単位体積あたりの質量 (正のスカラ).

力学相

応力 (1)	物質の内部に作用している力 (一般にはテンソル).
圧力 (1)	物質の表面に作用している単位面積当りの力 (ベクトル).
体積力 (1)	単位体積当りに作用している外力 (ベクトル).
ひずみ (1)	物質の各点における自然状態からの変位 (一般にはテンソル).
体積弾性率 (2)	応力とひずみの間の弾性域での関係を与える量 (スカラ/ベクトル).
硬度 (2)	物質の硬さを与える指標 (スカラ/ベクトル).
降伏応力 (3)	弾性限界を与える最大応力 (スカラ/ベクトル/テンソル).

熱相

温度 (1)	ある点における温度 (スカラ).
湿度 (1)	ある点の雰囲気における湿度 (スカラ).
熱量密度 (1)	ある点における単位体積中に含まれる熱量.
比熱 (2)	単位体積あたりの温度と熱量の関係の指標 (スカラ). 正しくは温度の関数.
体膨張率 (2)	単位体積あたりの体積増加量 (スカラ/ベクトル).
熱伝導率 (2)	ある点における熱の伝わり易さの指標 (スカラ/ベクトル).
気化熱 (3)	単位量の物質が液相から気相へと変化する際に吸収する熱量 (スカラ).
融解熱 (3)	単位量の物質が固相から液相へと変化する際に吸収する熱量 (スカラ).
融点 (3)	固相から液相へ相変移を生じる温度 (スカラ). 正しくは圧力の関数.
沸点 (3)	液相から気相へ相変移を生じる温度 (スカラ). 正しくは圧力の関数.

電気相

電荷密度 (1)	単位体積 (面積) あたりの電荷量 (スカラ).
電界強さ (1)	ある点における電界の強さ (スカラ/ベクトル).
電位の勾配 (1)	ある点における電位の勾配 (ベクトル).
電流密度 (1)	単位面積当りの電流 (ベクトル).
体積抵抗率 (2)	単位体積あたりの電気抵抗 (スカラ/ベクトル/テンソル).
誘電率 (2)	電界の生じ易さの指標 (スカラ).
絶縁破壊強さ (3)	単位厚さあたりの絶縁性を失う最低電圧 (スカラ).

磁気相

磁界強さ (1)	ある点における磁界の強さ (スカラ/ベクトル).
磁束密度 (1)	ある点において単位面積を貫く磁束 (スカラ/ベクトル).
磁化 (1)	単位体積当りの磁気モーメント (スカラ/ベクトル).
体積磁化率 (2)	磁界強さと磁化との関係を与える係数 (スカラ).
透磁率 (2)	磁界の強さと磁束密度との関係を与える係数 (スカラ).
飽和磁気モーメント (3)	単位体積当りの最大の磁気モーメント (スカラ/ベクトル).

光学相

色 (1)	ある点に対して観測される色 (記号/スペクトル).
照度 (1)	ある点における照度 (スカラ/ベクトル).
屈折率 (2)	ある点における光の屈折率 (スカラ/ベクトル). 正しくは光の波長などの関数.
反射率 (2)	ある点における光の反射率 (スカラ/分布). 正しくは光の波長などの関数.
透過率 (2)	単位長さあたりの光の減衰の比率 (スカラ). 正しくは光の波長, 偏光などの関数.

音響相

音の強さ (1)	ある点における音のエネルギー (スカラ/ベクトル).
周波数 (1)	ある点における音を構成する周波数 (スカラ/スペクトル).
音速度 (2)	ある点における音の進む速さ (スカラ). 正しくは温度の関数.
吸音率 (2)	ある点において入射した音に対する反射音の強さの比率 (スカラ).
透過損失 (2)	単位厚さを音が進むときに音の強さの減衰の比率 (スカラ).

化学相

pH (1)	酸性, アルカリ性の指標 (スカラ).
可燃性 (2)	燃え易さの指標 (記号).
耐酸性 (2)	酸に対する耐性の指標 (記号).
耐アルカリ性 (2)	アルカリに対する耐性の指標 (記号).
発火点 (3)	空気中で発火する最低の温度 (スカラ).

B.2 複合物理属性

B.2.1 空間属性と単独の時空強度による複合物理属性

空間属性と単独の時空強度の組合せにより求められる複合物理属性を示す.

線に関する複合物理属性

n 個の定状態素にまたがる線 l 上の時空強度値の総和は, $l = l_1 \oplus l_2 \oplus \dots \oplus l_n$ であつ, 線 l_i の上の点における時空強度値が v_i であるとする, 以下の式で与えられる.

$$\sum_{1 \leq i \leq n} v_i \text{length}(l_i)$$

変位	ひずみを線上に総和 (力学相)
電位	電位の傾きを線上に総和 (電気相)
絶縁破壊電圧	絶縁破壊強さを厚み方向に総和 (電気相)
光学距離	屈折率の光路に沿った総和 (光学相)
光透過率	透過率の対数を光路に沿って総和したものの指数 (光学相).
音伝播時間	音速度の逆数の, 音の導波路にそつた総和 (音響相)
音透過率	透過損失の対数を音の導波路にそつた総和したものの指数 (音響相).

面に関する複合物理属性

n 個の定状態素にまたがる面 A 上の時空強度値の総和は, $A = A_1 \oplus A_2 \oplus \dots \oplus A_n$ であつ, 面 A_i の上の点における時空強度値が v_i であるとする, 以下の式で与えられる.

$$\sum_{1 \leq i \leq n} v_i \text{area}(A_i)$$

面(作用力)	面上の圧力を合成 (力学相)
面電荷	電荷密度の面上の総和 (電気相)
電流値	電流密度と面の法線ベクトルとの内積を面上で総和 (電気相)
単位長抵抗	体積抵抗率の逆数の面上での総和の逆数 (電気相)
磁束	磁束密度と面の法線ベクトルとの内積を面上で総和 (磁気相)
光束	照度の面上の総和 (光学相)

領域に関する複合物理属性

n 個の定状態素にまたがる領域 \bar{S} の上の時空強度値の総和は、 $\bar{S} = \bar{S}_1 \oplus \bar{S}_2 \oplus \dots \oplus \bar{S}_n$ でかつ、領域 \bar{S}_i の上の点における時空強度値が v_i であるとすると、以下の式で与えられる。

$$\sum_{1 \leq i \leq n} v_i \text{vol}(\bar{S}_i)$$

物質量	モル濃度を領域内で総和 (物質相)
質量	比重を領域内で総和 (物質相)
合力	領域内の体積力を合成 (力学相)
熱量	熱量密度を領域内で総和 (熱相)
熱容量	比熱を領域内で総和 (熱相)
電荷量	電荷密度を領域内で総和 (電気相)
磁気モーメント	磁化を領域内で総和 (磁気相)

B.2.2 複数の定状態素の間に定義される複合物理属性

同一時刻に存在する定状態素の間の複合物理属性

同一時刻に存在している 2 つの定状態素の基本物理属性あるいは複合物理属性の差として定義される一群の複合物理属性がある。たとえば、以下のものは代表的な例である。

空間距離	2 つの空間領域の位置の差 (空間属性)
質量差	2 つの物理実体の間の質量の差 (物質相)
温度差	2 つの定状態素の温度の差 (熱相)
電位差	2 つの定状態素の電位の差 (力学相)

異なる時刻に存在する定状態素の間の複合物理属性

異なる時刻に存在し、かつ同一の物理実体に属する 2 つの定状態素の基本物理属性/複合物理属性の差分として定義される複合物理属性。たとえば、以下のものがある。

平均速度	ある物理実体の異なる時間での定状態素に関して、それらの空間領域の距離を、時間区間の差で正規化したもの。(空間/時間属性)
質量変化	2 つの定状態素の質量の時間変化分。(物質相)
温度変化	2 つの定状態素の温度の時間変化分。(熱相)

付録 C

乾式複写機の設計過程の離散物理世界での表現例

4.2 で述べた乾式複写機の設計の例の、離散物理世界での定状態素を用いた表現の詳細を示す。

C.1 考慮する時空強度

ここでは以下に挙げる時空強度を考える。

- 材質 (M): MATERIAL = {paper photo-cond toner...}
- 物質相 (P): PHASE = {solid powder liquid gas ...}
- 結合 (C): CONNECT = {none all plane line...}
- 応力 (F): FORCE = (vectors)
- 導電性 (E): ELEC-COND = {no-cond high-cond ...}
- 電荷密度 (D): CHARGE = {plus minus none...}
- 電界強さ (V): ELEC-FLD = (vectors)
- 反射率 (O): OPT = {no-ref, high-ref, transparent, ...}
- 照度 (L): LIGHT = {dark, bright, ...}

C.2 初期仕様

複写前原稿 (a)

最初の前稿に関する定状態素は、時空強度とその値により以下の 5 つを考える。

$$\begin{aligned} \bar{P}_a^M &= \langle \bar{S}_1 \times \bar{T}_1, [\text{MATERIAL paper}] \rangle \\ \bar{P}_{a1}^O &= \langle \bar{S}_{11} \times \bar{T}_1, [\text{OPT high-ref}] \rangle \\ \bar{P}_{a2}^O &= \langle \bar{S}_{12} \times \bar{T}_1, [\text{OPT no-ref}] \rangle \\ \bar{P}_a^P &= \langle \bar{S}_1 \times \bar{T}_1, [\text{PHASE solid}] \rangle \\ \bar{P}_a^C &= \langle \bar{S}_1 \times \bar{T}_1, [\text{CONNECT plane}] \rangle \\ &\quad \text{Boundary}(\bar{S}_1) = (\bar{S}_{11} \oplus \bar{S}_{12}) \end{aligned}$$

すなわち、空間領域の \bar{S}_1 、時間区間の \bar{T}_1 を材質の紙 (paper) が占めている。また、空間領域の境界 (表面) は 2つの部分 \bar{S}_{11} と \bar{S}_{12} に分けられ、それぞれの反射率は、白く見える高反射率 (high-ref) と黒い無反射 (no-ref) を時空強度としてもつ。

また、物質相は固相 (solid)、個々の点の周囲との結合関係は面内に結合 (plane) しているものとす¹。これらの時空強度は原稿複写に要する時間長さを想定した同一の時間区間 \bar{T}_1 に対してすべて定義されている。

複写後原稿 (b)

複写後の原稿は、初期仕様より状態を変化しない。ただし、複写後は時間が経過していることから、時間区間 \bar{T}_2 は複写前の時間区間 \bar{T}_1 よりも後でなくてはならない。また、原稿の位置は複写後には移動していてもかまわないから、複写前とは異なる空間領域を考える。

$$\begin{aligned} \bar{P}_b^M &= \langle \bar{S}_2 \times \bar{T}_2, [\text{MATERIAL paper}] \rangle \\ \bar{P}_{b1}^O &= \langle \bar{S}_{21} \times \bar{T}_2, [\text{OPT high-ref}] \rangle \\ \bar{P}_{b2}^O &= \langle \bar{S}_{22} \times \bar{T}_2, [\text{OPT no-ref}] \rangle \\ \bar{P}_b^P &= \langle \bar{S}_1 \times \bar{T}_1, [\text{PHASE solid}] \rangle \\ \bar{P}_b^C &= \langle \bar{S}_2 \times \bar{T}_2, [\text{CONNECT plane}] \rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Boundary}(\bar{S}_2) &= (\bar{S}_{21} \oplus \bar{S}_{22}) \\ \text{shape}(\bar{S}_1) &= \text{shape}(\bar{S}_2) \\ \text{shape}(\bar{S}_{1i}) &= \text{shape}(\bar{S}_{2i}) \quad (i=1,2) \\ \text{Relation}(\bar{S}_1, \bar{S}_{11}, \bar{S}_{12}) &= \text{Relation}(\bar{S}_2, \bar{S}_{21}, \bar{S}_{22}) \\ \text{End}(\bar{T}_1) &< \text{Start}(\bar{T}_2) \end{aligned}$$

複写前と複写後とでは、紙の形状や白黒の分布の形状が変化していないことが陽に記述されている。

ここでは複写前後で異なる空間領域を割り当てたが、これは結果として同一の空間領域となってもかまわない。すなわち、

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2, \bar{S}_{11} = \bar{S}_{21}, \bar{S}_{12} = \bar{S}_{22}$$

が満足される時、 \bar{P}_a^M と \bar{P}_b^M 、 \bar{P}_{a1}^O と \bar{P}_{b1}^O といったように、対応する定状態素をそれぞれ時間結合 (t-merge) してひとつの定状態素とすればよい。

複写前複写用紙 (c)

複写用紙に関しても同様に定状態素を定義する。複写前には複写用紙の表面はすべて白い (高反射率) とする。また、複写前には複写用紙は電荷を帯びていないものとする。

$$\begin{aligned} \bar{P}_c^M &= \langle \bar{S}_3 \times \bar{T}_1, [\text{MATERIAL paper}] \rangle \\ \bar{P}_c^O &= \langle \bar{S}_{31} \times \bar{T}_1, [\text{OPT high-ref}] \rangle \\ \bar{P}_c^P &= \langle \bar{S}_3 \times \bar{T}_1, [\text{PHASE solid}] \rangle \\ \bar{P}_c^C &= \langle \bar{S}_3 \times \bar{T}_1, [\text{CONNECT plane}] \rangle \\ \bar{P}_c^E &= \langle \bar{S}_3 \times \bar{T}_1, [\text{CHARGE none}] \rangle \\ \text{Boundary}(\bar{S}_3) &= \bar{S}_{31} \end{aligned}$$

存在する時間区間は、複写前原稿と同じ \bar{T}_1 を考える。また、複写用紙の形状や大きさについては、原稿と同じ形状や大きさであるとは指定していない。

¹ここでは厚みを無視できるものとする

複写後複写用紙 (d)

最後に、複写後の複写用紙の定状態素である。

$$\begin{aligned} \bar{P}_d^M &= \langle \bar{S}_4 \times \bar{T}_2, [\text{MATERIAL paper}] \rangle \\ \bar{P}_{d1}^O &= \langle \bar{S}_{41} \times \bar{T}_2, [\text{OPT high-ref}] \rangle \\ \bar{P}_{d2}^O &= \langle \bar{S}_{42} \times \bar{T}_2, [\text{OPT no-ref}] \rangle \\ \bar{P}_d^P &= \langle \bar{S}_4 \times \bar{T}_2, [\text{PHASE solid}] \rangle \\ \bar{P}_d^C &= \langle \bar{S}_4 \times \bar{T}_2, [\text{CONNECT plane}] \rangle \\ \bar{P}_d^E &= \langle \bar{S}_4 \times \bar{T}_2, [\text{CHARGE none}] \rangle \\ \text{Boundary}(\bar{S}_4) &= (\bar{S}_{41} \oplus \bar{S}_{42}) \\ \text{shape}(\bar{S}_3) &= \text{shape}(\bar{S}_4), \text{shape}(\bar{S}_{42}) = \text{shape}(\bar{S}_{22}) \end{aligned}$$

ここで重要なことは、複写後、紙の表面の光学的性質に関して、反射しない空間領域 \bar{S}_{42} が生じ、それが原稿の反射しない空間領域 \bar{S}_{22} の形状と等しくなっているということである。

物理実体の定義

ここまでの定状態素の定義において、〈原稿〉や〈複写用紙〉という実体の概念を用いて説明してきたが、定状態素そのものには、実体の区別はない。よって、〈原稿〉や〈複写用紙〉という区別を離散物理世界において明示的にするためには、それらを物理実体として定義する必要がある。

原稿と複写用紙に対応する物理実体ここでは e_a 、 e_t とする。それぞれの物理実体は以下の定状態素より構成される。

$$\begin{aligned} e_a &: \{ \bar{P}_a^M, \bar{P}_b^M, \bar{P}_{a1}^O, \bar{P}_{a2}^O, \bar{P}_{b1}^O, \bar{P}_{b2}^O, \bar{P}_a^P, \bar{P}_b^P, \bar{P}_a^C, \bar{P}_b^C \} \\ e_t &: \{ \bar{P}_c^M, \bar{P}_d^M, \bar{P}_c^O, \bar{P}_{d1}^O, \bar{P}_{d2}^O, \bar{P}_c^P, \bar{P}_d^P, \bar{P}_c^C, \bar{P}_d^C, \bar{P}_c^E, \bar{P}_d^E \} \end{aligned}$$

すなわち、ここでは物理実体 e_a 、 e_t のする時空領域が陽に与えられるのではなく、上記の定状態素の時空領域を包含するものとして、内包的に定義される。

また、状態素としては現われていないが設計対象としての複写機そのものも物理実体 (e_M X_M^D) として定義しておく。 X_M^D は設計される対象物の存在する時空領域である。

C.3 電子写真の原理

電子写真の原理は、個別の事例ではなく、一般化された概念であるから、そこに現れる時空領域はある制約をもつ変数として取り扱われる。

帯電 (e)

暗所中の感光体の誘電体の性質をもつ表面に一様な正電荷を与える。

$$\begin{aligned} \bar{P}_e^L &= \langle X_1^D, [\text{LIGHT dark}] \rangle \\ \bar{P}_e^M &= \langle X_1^S \times X_1^T, [\text{MATERIAL opt-elec}] \rangle \\ \bar{P}_e^P &= \langle X_1^S \times X_1^T, [\text{PHASE solid}] \rangle \\ \bar{P}_e^E &= \langle X_2^S \times X_2^T, [\text{ELEC-COND none}] \rangle \\ \bar{P}_e^D &= \langle X_3^S \times X_2^T, [\text{CHARGE plus}] \rangle \\ X_1^S \times X_1^T &\subset X_1^D, X_2^S \subset \text{Boundary}(X_1^S) \end{aligned}$$

露光 (f)

原稿の像を感光体上の帯電された領域内に照射する。

$$\begin{aligned} \bar{P}_{f1}^L &= \langle X_4^S \times X_3^T, [\text{LIGHT bright}] \rangle \\ \bar{P}_{f2}^L &= \langle X_5^S \times X_3^T, [\text{LIGHT dark}] \rangle \\ &X_4^S \oplus X_5^S \subset X_3^S \end{aligned}$$

潜像形成 (g)

照射された明るい部分の導電性が導電体に変化して、その部分の電荷がなくなる。暗い部分の電荷は残る。

$$\begin{aligned} \bar{P}_{g1}^E &= \langle X_4^S \times X_3^T, [\text{ELEC-COND high}] \rangle \\ \bar{P}_{g1}^D &= \langle X_4^S \times X_4^T, [\text{CHARGE none}] \rangle \\ \bar{P}_{g2}^E &= \langle X_5^S \times X_5^T, [\text{ELEC-COND none}] \rangle \\ \bar{P}_{g2}^D &= \langle X_5^S \times X_6^T, [\text{CHARGE plus}] \rangle \\ &\text{starts}(X_3^T, X_4^T), \text{starts}(X_3^T, X_5^T) \end{aligned}$$

現像 [1](h)

感光体とは逆に負に荷電された黒色粉体 (トナー) を感光体上にのせる。

$$\begin{aligned} \bar{P}_h^M &= \langle X_6^S \times X_7^T, [\text{MATERIAL toner}] \rangle \\ \bar{P}_h^P &= \langle X_6^S \times X_7^T, [\text{PHASE powder}] \rangle \\ \bar{P}_h^O &= \langle X_6^S \times X_7^T, [\text{OPT no-ref}] \rangle \\ \bar{P}_h^C &= \langle X_6^S \times X_8^T, [\text{CONNECT none}] \rangle \\ \bar{P}_h^D &= \langle X_6^S \times X_8^T, [\text{CHARGE minus}] \rangle \\ &\text{Contact}(X_6^S, X_3^S), \text{before}(X_3^T, X_8^T) \end{aligned}$$

現像 [2](i)

感光体の正電荷のある部分と接触するトナーの負電荷で電界が構成され、接触部のトナーが感光体の面方向に引きつけられる。その結果感光体の面方向にトナーが結合する。

$$\begin{aligned} \bar{P}_i^V &= \langle X_7^S \times X_9^T, [\text{ELEC-FLD } a] \rangle \\ \bar{P}_i^F &= \langle X_7^S \times X_9^T, [\text{FORCE } ka] \rangle \\ \bar{P}_{i1}^C &= \langle X_7^S \times X_9^T, [\text{CONNECT } a] \rangle \\ \bar{P}_{i2}^C &= \langle X_8^S \times X_9^T, [\text{CONNECT none}] \rangle \\ &X_7^S = X_5^S \cap X_6^S, X_8^S = X_6^S - X_7^S \\ &a = \text{normal}(X_5^S), \text{meets}(X_9^T, X_8^T) \end{aligned}$$

現像 [3](j)

感光体を移動させると、トナーは感光体に結合している部分のみが感光体と一体となって移動する。

$$\begin{aligned} \bar{P}_{j1}^M &= \langle X_9^S \times X_{10}^T, [\text{MATERIAL opt-elec}] \rangle \\ \bar{P}_{j2}^M &= \langle X_{10}^S \times X_{10}^T, [\text{MATERIAL toner}] \rangle \\ \bar{P}_{j3}^M &= \langle X_{11}^S \times X_{10}^T, [\text{MATERIAL toner}] \rangle \\ \bar{P}_{j1}^D &= \langle X_{10}^S \times X_{10}^T, [\text{CHARGE plus}] \rangle \\ \bar{P}_{j2}^D &= \langle X_{10}^S \times X_{10}^T, [\text{CHARGE minus}] \rangle \\ \bar{P}_j^V &= \langle X_{10}^S \times X_{10}^T, [\text{ELEC-FLD } a] \rangle \\ \bar{P}_j^F &= \langle X_{10}^S \times X_{10}^T, [\text{FORCE } ka] \rangle \\ \bar{P}_j^C &= \langle X_{10}^S \times X_{10}^T, [\text{CONNECT } a] \rangle \\ &X_9^S = \text{Tra}(X_1^S), X_{10}^S = \text{Tra}(X_7^S) \\ &\text{Exclusive}(X_{10}^S, X_{11}^S), \text{before}(X_9^T, X_{10}^T) \end{aligned}$$

転写 (k)

感光体上のトナーを逆向きの電界を作って感光体より引き離し、正に帯電している複写用紙側に転写する。

$$\begin{aligned} \bar{P}_{k1}^M &= \langle X_{12}^S \times X_{11}^T, [\text{MATERIAL paper}] \rangle \\ \bar{P}_{k2}^M &= \langle X_{13}^S \times X_{12}^T, [\text{MATERIAL toner}] \rangle \\ \bar{P}_{k1}^D &= \langle X_{12}^S \times X_{11}^T, [\text{CHARGE plus}] \rangle \\ \bar{P}_{k2}^D &= \langle X_{13}^S \times X_{12}^T, [\text{CHARGE minus}] \rangle \\ \bar{P}_k^V &= \langle X_{14}^S \times X_{12}^T, [\text{ELEC-FLD } -a] \rangle \\ \bar{P}_k^F &= \langle X_{13}^S \times X_{12}^T, [\text{FORCE } -ka] \rangle \\ \bar{P}_k^C &= \langle X_{13}^S \times X_{12}^T, [\text{CONNECT } -a] \rangle \\ &\text{shape}(X_{10}^S) = \text{shape}(X_{13}^S), X_{11}^S, X_{13}^S \subset X_{14}^S \\ &\text{contains}(X_{11}^T, X_{12}^T) \end{aligned}$$

物理実体との対応つけ

上記の定状態素変数と物理実体との対応付けを与える。ここでは、感光体 e_a 、複写用紙 e_b 、トナー e_c 、トナー像 e_d 、余分なトナー e_e を考える。

$$\begin{aligned} e_a &: \{ \bar{P}_e^M \bar{P}_e^P \bar{P}_e^E \bar{P}_e^D \bar{P}_{g1}^E \bar{P}_{g2}^E \bar{P}_{g1}^D \bar{P}_{g2}^D \bar{P}_{j1}^M \bar{P}_{j1}^D \} \\ e_b &: \{ \bar{P}_{k1}^M \bar{P}_{k1}^D \} \\ e_c &: \{ \bar{P}_h^M \bar{P}_h^P \bar{P}_h^O \bar{P}_h^C \bar{P}_h^D \} \\ e_d &: \{ \bar{P}_{i1}^C \bar{P}_i^F \bar{P}_{j2}^M \bar{P}_{j2}^D \bar{P}_j^F \bar{P}_j^C \bar{P}_{k2}^M \bar{P}_{k2}^D \bar{P}_k^C \} \\ e_e &: \{ \bar{P}_{i2}^C \bar{P}_{j3}^M \} \end{aligned}$$

ここでは、<トナー> e_c という物理実体が、途中でトナー像 e_d と余分なトナー e_e という2つの物理実体へと分割されている。物理実体は消滅したり発生したりするが、[MATERIAL toner]の分布から物質的には保存されている。

C.4 電子写真の原理の初期仕様への適用

電子写真の原理の複写機の初期仕様への適用は、電子写真の原理に現われる状態素を、初期仕様を記述している局所時空系へと割り付けることで行われる。

まず、電子写真の原理に現われたすべての状態素（これをいま P^{op} とする）は設計対象物の存在する時空領域 X_M^D の内部でなくてはならない。

$$\bar{P} \in P^{op} \implies \text{seg}(P) \subset X_M^D$$

また、初期仕様のうち、複写前の状態素は電子写真の原理の状態素に時間的に先行し、複写後の状態素は原理の状態素の後続とならねばならないから、その時間関係を与える。

$$\begin{aligned} \text{Start}(T_1) &< \text{Start}(X_2^T) \\ \text{End}(X_1^T) &< \text{Start}(T_2) \end{aligned}$$

これによって、電子写真の原理は、初期仕様で与えられた離散物理世界の時空領域内に埋め込まれたことになる。

さらに、初期仕様に見られる複写用紙 e_t と、電子写真の原理に見られる複写用紙 e_b は、同一の物理実体と考えるから、それらに属する状態素をまとめて、新たに複写用紙とする。

$$e_t \leftarrow e_t \cup e_b$$

ここまでの埋め込みでは、初期仕様の原稿側と電子写真の原理とは何の関連もたない。これは、初期仕様における原稿の無反射部分 P_{a2}^O と、電子写真の原理における照射光の照度の暗い部分 P_{f2}^I との間の物理的連鎖が存在しないためであり、原稿面の像を感光体上に結ぶ方法を与える設計が必要である。

付録 D

定性関係の遷移律表

D.1 Allen の定性関係ネットワークの制約伝播アルゴリズム

定性関係の遷移律表を用いたAllenの制約伝播アルゴリズム [Allen 83] を以下に示す。遷移律表において縦方向に示す関係を r_1 、横方向に示す関係を r_2 とし、 r_1 と r_2 で指定される表の内容 (遷移関係) を $T(r_1, r_2)$ と表すこととする。遷移律表は一意に確定した2つの関係による遷移関係を与えるものであるが、複数の関係を取る可能性がある関係による遷移関係は次のようにして与えられる。

2つの取りうる関係のリストをそれぞれ、 R_1, R_2 とする。この2つの関係によって定めることのできる遷移関係 $\text{Constraints}(R_1, R_2)$ は遷移律表を用いて以下のよう求めることができる。

```

Constraints( $R_1, R_2$ )
   $C \rightarrow \phi$ 
  For each  $r_1$  in  $R_1$ 
    For each  $r_2$  in  $R_2$ 
       $C \rightarrow C \cup T(r_1, r_2);$ 
  Return C;

```

つぎに要素をノード、2要素間の取りうる定性関係のリストをアークのラベルとする定性関係のネットワークを考える。このネットワークに対して、新たに2要素間の関係 $R(i, j)$ を追加する際の、ネットワークの整合性は以下の制約伝播アルゴリズム¹によって保持される。なお、以下のアルゴリズム中のToDoは待行列 (queue)、 $N(i, j)$ は制約ネットワークのアークのラベルとする。また、以下のアルゴリズム中に現れる $\text{Comparable}(i, j)$ は、2つの要素が比較可能であるかどうかを与える関数であり、制約伝播の範囲を制御し、計算を効率化する目的で用いられる。ここでの説明では、常に真 (t) を返すものと考えておけばよい。

```

To Add  $R(i, j)$ 
  Add  $\langle i, j \rangle$  to queue ToDo;
  While ToDo is not empty do
    begin

```

¹[Allen 83]の中に示されているアルゴリズムには i, j, k の順番にいくつかの間違いがあり、ここではそれらを訂正したものを示す。

```

Get next < i, j > from queue ToDo;
N(i, j) → R(i, j);
For each node k such that Comparable(k, j) do
begin
  R(k, j) → N(k, j) ∩ Constraints(N(k, i), R(i, j))
  If R(k, j) ⊂ N(k, j)
    then add < k, j > to ToDo;
end
For each node k such that Comparable(i, k) do
begin
  R(i, k) → N(i, k) ∩ Constraints(N(i, j), R(j, k))
  If R(i, k) ⊂ N(i, k)
    then add < i, k > to ToDo;
end
end
    
```

このアルゴリズムは以下の条件を満足するような定性関係に対して適用できる。

- 要素間の関係として 2 項関係のみを扱う。
- 2 要素間の取りうるすべての関係が枚举できる。すなわち、2 要素間の関係は有限でかつそれらはすべて既知である。(関係の有限性)
- 任意の 2 要素は必ずどれかの関係にある。(関係の完全性)
- 任意の 2 要素に対して、同時に複数の関係が成り立つことはない。(関係の独立性)

以下に示す遷移律表の関係はすべてこうした条件を満足している。

D.2 時間区間の定性関係 (線形)

Table D.1: Allen による時間区間の定性関係に対する遷移律 [Allen 83]

B r2 C	<	>	d	di	o	oi	m	mi	s	si	f	fi
A r1 B	<	>	d	di	o	oi	m	mi	s	si	f	fi
"before" <	<	no info	< o m d s	<	<	< o m d s	<	< o m d s	<	<	< o m d s	<
"after" >	no info	>	> oi ml d f	>	> oi ml d f	>	> oi ml d f	>	> oi ml d f	>	>	>
"during" d	<	>	d	no info	< o m d s	> oi ml d f	<	>	d	> oi ml d f	d	< o m d s
"contains" di	< o m di fi	> oi di ml si	o oi dur con =	di	o di fi	oi di si	oi di fi	oi di si	di fi o	di	di si oi	di
"overlaps" o	<	> oi di ml si	o d m di fi	< o m di fi	<	o oi dur con =	<	oi di si	o	di fi o	d s o	< o m
"overlapped-by" oi	< o m di fi	>	oi d m di si	> oi ml di si	o oi dur con =	>	oi di fi	>	oi d f	oi > ml	oi	oi di si
"meets" m	<	> oi ml di si	o d s	<	<	o d s	<	f fl =	m	m	d s o	<
"met-by" mi	< o m di fi	>	oi d f	>	oi d f	>	s si =	>	d f ol	>	mi	mi
"starts" s	<	>	d	< o m di fi	< o m	oi d f	<	mi	s	s si =	d	< m o
"started-by" si	< o m di fi	>	oi d f	di	o di fi	oi	o di fi	mi	s si =	si	oi	di
"finishes" f	<	>	d	> oi ml di si	o d s	> oi ml	m	>	d	> oi ml	f	f fl =
finished-by" fi	<	> oi ml di si	o d s	di	o	oi di si	m	si oi di	o	di	f fl =	fi

13 の時間区間の関係のうち、等価 (equal, =) については自明であるため表から省略してある。また、表中の no-info はすべての関係、dur は d, s, f を、con は di, si, fi をそれぞれ表す。

D.3 時間区間の定性関係 (環状)

Table D.2: 環状時間軸上の時間区間の定性関係に対する遷移律

R(B,C) \ R(A,B)	SM	SE	SO	MSME	ME	MO	MS	MEMS	EO	ES	EM	OEOS	OS	OM	OE	OSOE
SM	■															
SE		■														
SO			■													
MSME				■												
ME					■											
MO						■										
MS							■									
MEMS								■								
EO									■							
ES										■						
EM											■					
OEOS												■				
OS													■			
OM														■		
OE															■	
OSOE																■

■ possible
 □ impossible

D.4 領域間の定性関係

Table D.3: 領域間の定性関係に対する遷移律

R(A,B) \ R(B,C)	ex	oc	ol	ic	id	co	cd
exclusive (ex)	no-inf	ex oc ol id cd	ex oc ol id cd	ex	ex oc ol id cd	ex	ex oc ol id cd
outside-contact (oc)	ex oc ol ic co	ex oc ol ic id eq	ex oc ol id cd	ex oc	oc ol id cd	ex	ol id cd
overlap (ol)	ex oc ol ic co	ex oc ol ic co	no-inf	ex oc ol ic co	ol id cd	ex oc ol ic co	ol id cd
contain-contact (ic)	ex oc ol ic co	oc ol ic co	ol ic co	ic co	ol ic id eq	co	ol id cd
inside-contact (id)	ex	ex oc	ex oc ol id cd	ex oc ol ic cd eq	id cd	ex oc ol ic co	cd
contain (co)	ex oc ol ic co	ol ic co	ol ic co	co	ol ic co	co	ol ic id co cd eq
inside (cd)	ex	ex	ex oc ol id cd	ex oc ol id cd	cd	no-inf	cd

ex. if R(A, B)=id, R(B, C)=oc then R(A, C)= (ex oc)

8つの関係のうち自明な equal の場合を除いている。また表中の no-inf は、8つの関係すべてが取りうる一すなわち、その2つの空間領域の間の関係について何も情報がないことを表している。

D.5 方向間の定性関係

Table D.4: 2次元の方向間の定性関係に対する遷移律

R(B, C) \ R(A, B)	 F	 B	 L	 R	 FL	 BL	 FR	 BR
8-bit code	00000001	00000010	00000100	00001000	00010000	00100000	01000000	10000000
forward (F)	00000001	00000010	00000100	00001000	00010000	00100000	01000000	10000000
backward (B)	00000010	00000001	00001000	00000100	10000000	01000000	00100000	00010000
left (L)	00000100	00001000	00000010	00000001	00100000	10000000	00010000	01000000
right (R)	00001000	00000100	00000001	00000010	01000000	00010000	10000000	00100000
forward-left (FL)	00010000	10000000	00100000	01000000	00110100	10100010	01010001	11001000
back-left (BL)	00100000	01000000	10000000	00010000	10100010	11001000	00110100	01010001
forward-right (FR)	01000000	00100000	00010000	10000000	01010001	00110100	11001000	10100010
back-right (BR)	10000000	00010000	01000000	00100000	11001000	01010001	10100010	00110100

