

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 河原塚 健人

本論文は、「身体図式の逐次学習機能を有する知能ロボットシステムの研究」と題し、身体に冗長性や柔軟性を備え、道具を使い、環境へ適応する能力が必要となる知能ロボットに対して、身体-道具-動作環境におけるロボットの身体図式を逐次学習する機能を中核として構成する知能ロボットシステムの研究をまとめたもので、9章からなる。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的、本論文の構成について述べ、ロボット身体モデル化困難性や逐次変化への対応、一般性を考慮した身体図式の逐次学習機能を構築し、多様な知能ロボットの実験により研究評価を行うことを目的としている。第2章「身体図式の逐次学習機能を有する知能ロボットシステム」では、本研究での知能ロボットシステムの位置づけを述べ、感覚と運動の関係を身体という構造をもって表現した自己身体認知の暗黙的な枠組みである身体図式に対して、知能ロボットにおいて持つべき要件を多感覚性、汎用性、自律獲得性、変化適応性の4つとして論じ、それを満たすために身体-道具-動作環境の分類と身体図式学習の適用について論じている。また、身体設計・反射制御・身体図式学習についてその概要と先行研究をまとめ、身体図式の逐次学習機能を有する知能ロボットシステムによる環境適応能力向上について考察している。

第3章「身体図式の逐次学習システム」では、本論文の中核である身体図式の逐次学習機能の定式化と基礎システム、本ネットワーク構造の入出力自動決定による自律的モデル化について詳述している。身体図式の4つの要件をすべて満たすモデルとして、相関関係を表すマスク変数、暗黙の状態表現を可能にするパラメトリックバイアスを導入し、潜在空間を通して感覚と動作系の値を相互に予測し合う構造を一般化多感覚相関モデルとして提案し、入出力構造はデータから自動決定され、状態推定・制御・異常検知・逐次適応が可能となることを述べている。

第4章「身体図式学習に向けたハードウェア構成」では、身体図式学習に用いる軸駆動型・台車型・低剛性軸駆動型・筋骨格型ロボットについて詳述している。特に、柔軟性と冗長性の利点を最大化する筋骨格ヒューマノイドの学習制御プラットフォーム設計について、構成・再構成の容易化、冗長なセンサ・アクチュエータ配置のためのモジュール化、冗長性最大化のための設計最適化について述べている。開発した各モジュールを繋ぐことで単腕型、2脚型、2脚2腕全身型、2輪上半身、4輪全方位上半身型の各種筋骨格ロボットを構築し評価実験を示している。

第5章「身体図式学習を支える反射制御」では、柔軟性と冗長性の欠点による身体負荷や内力上昇を即座に考慮し、身体図式を長期的に学習するための反射制御を開発し

ている。長期学習を可能とするモータコアの動的溫度推定と制御、筋骨格ヒューマノイドに特有な筋の拮抗関係から生じる内力上昇・可動域制限・関節速度制限等を攻略する拮抗筋抑制制御・筋弛緩制御・関節速度最大化反射戦略・伸長反射制御の詳細について述べている。

第6章「身体図式学習の基礎実験」では、身体図式の逐次学習において構成される基礎的な4種類のネットワーク構造について、それぞれの有効性を確認可能なタスクの実験を行っている。具体的には、筋骨格ヒューマノイドの関節-筋空間マッピング学習による静的身体制御、筋骨格ハンドの把持モデルに基づく動的制御、軸駆動型・筋骨格型における静的な適応的道具先端操作学習と動作スタイル変化を考慮した動的模倣学習へ本身体図式の逐次学習を適用している。

第7章「身体図式の応用実験」では、第6章の基礎的なネットワーク構成では覆えていない機能として、ネットワーク入出力の減少と増加を伴う身体変化適応、身体図式の自動分割、ネットワーク出力への確率表現と平均分散表現の導入、ネットワークの展開による高速化、明示的パラメータ化による学習安定化について提案している。具体的には、筋骨格ヒューマノイドにおける冗長な筋肉の破断と追加による身体図式変化に適応する再学習、筋骨格構造における筋と関節の機能分割、身体間干渉における危険回避学習、分散最小化に基づく安定した台車制御、高速なペダル操作学習、明示的なモデル化に基づくモータ溫度制御について述べている。

第8章「身体図式の逐次学習機能を有する知能ロボットシステムによる環境適応能力の向上」では、第3―7章で開発した手法を統合した知能ロボットシステムに基づく、筋骨格ヒューマノイドによる自動車運転操作システムの実現、柔軟布を扱うテーブルセッティングシステムの実現、靴変化を考慮したバランス制御の実現、低剛性樹脂製ヒューマノイドによる適応的全身道具操作の実現等を行い、多様なロボットにおける身体図式学習に基づく環境適応能力の向上についてまとめている。

第9章「結論」では、各章の内容をまとめ、本研究でなされた身体図式の逐次学習機能を有する知能ロボットシステムの構成論を総括し、今後行われるべき発展への考察と本研究の結論を述べている。

以上、これを要するに本論文は、モデル化困難性や逐次的モデル変化性のある知能ロボットの身体-道具-動作環境において、感覚と運動の相関関係を自律的に獲得する身体図式の逐次学習機能により相関複雑性と時間的変容に対応する環境適応能力を得ることができることを、多自由度筋骨格ヒューマノイドの他、通常の軸駆動台車型や低剛性軸駆動型などの知能ロボットシステムでの行動実現へ統一的に適用して評価を行ったものであり、知能機械情報学上貢献する所少なくない。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。