

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 福井 類

本論文は、「生活環境中で物品搬送・収納を行うロボットシステムにおける柔軟な戦略と機構に関する研究」と題し、生活環境中で物品の搬送及び収納を行い、人を支援するロボットシステムの実現に必要な戦略とその戦略に適合する機構の設計論について述べた論文である。従来ロボットが活躍してきた工場環境とは異なり、生活環境において動作するロボット特有の解決困難な課題に取り組み、その取り組みのベースとなる解決指針を戦略としてまとめ、さらにその戦略に基づきモノとの接触が必要な物品搬送・収納ロボットシステムに柔軟な機構を導入することでロボット動作のロバスト性を向上させることを狙い、実際にシステムとしてそれらの戦略・機構を反映させることで、戦略及び機構設計論の妥当性について検証している。本論文は5章からなる。

第1章「緒論」ではまず、都市部における住宅事情、消費者を取り巻く物品情報の変化などに注目し、生活空間中にモノや情報が溢れる原因の分析をしている。そして抽出された原因を解決するためには(A)物品の入出力フローを適正化する、(B)バッファ（収納空間）を増設することが必要であると述べ、研究の目標を生活環境中で物品の搬送・収納を行うロボットシステムの実現と定めている。

さらに生活環境中でロボットがロバストな動作を実現する上で、阻害要因となる(1)生活環境の変化、(2)物品の多様性、(3)人の作業のバラツキに対する対策が必須であるとし、モノを取り扱うシステムとしてロボットマニピュレーションの研究を物体の拘束の概念から整理し、Closureの概念が重要であると指摘している。

一方、自動車の発展の歴史を分析し、ロボットに必要なスキームを『戦略的コンプライアンス』の概念で整理し、『規格化、補助・強化、誘導』という3つの基本機能を導出し、更にそれらのスキームが機械的なコンプライアンスと融合することにより、実際の性能を実現可能であることを述べている。

第2章「生活環境中で動作する物品搬送・収納ロボットシステム」ではまずクロージャについて、拘束及び受動・能動により分類を行い、そして完全拘束ではない形態受動拘束であるObject closure(Caging)に注目し、さらに機械設計の現場における幾何的な考察の重要性からGOC(Geometric Object Closure)を提案している。

続いて戦略的コンプライアンスについて検討を行い、生活環境の変化への対応のためにはロボットがタスク（計測、動作、他のロボットとの協調）に専念出来る環境を整備することが必要であり、物品の多様性を受容するためにロボットの作業対象単位を『1つのコンテナ』とし、さらにそのコンテナ及び搭載物がロボットにとって物理的・情動的に扱い易い構造・仕組みを有することが有効であり、人の作業のバラツキに関しては人の作業を機械的・情動的に誘導する仕組みを用意することが必要であると述べている。

最後に機械的コンプライアンスの検討として従来研究におけるコンプライアンス性能の実現をアクチュエータの有無と実装形態によって分類し、その中でも産業界での実績が多い、受動的な機構により実現される『受動機械的コンプライアンス』を活用する指針を示している。

第3章「家庭内物流支援ロボットシステムを構成するサブシステムの実現と基本性能評価」では、前章で整理した3つの技術要素（GOC、戦略的コンプライアンス、受動機械的コンプライアンス）を活用した家庭内物流支援ロボットシステムを実現している。具体的には、次の6つのサブシステムを実現している。

- (1)インテリジェントコンテナ（iコンテナ）：本システムにおいて人がロボットに望む物品搬送・収納支援、そしてロボットが人間に与えられる支援の間を埋める'接点'の役割を担う存在である。
  - (2)天井移動型コンテナ運搬ロボット：永久磁石誘導型天井吸着法により天井面を自由に動作可能であり、人や障害物と干渉することなく移動することが可能である。またコンテナを把持するマニピュレーション機構では、動力源が断絶された場合でもコンテナ把持を維持可能な偏芯連結ピン機構及びコンテナの水平及び傾斜誤差を吸収可能なコンプライアンス機構が実装されている。
  - (3)家庭用コンテナ自動収納庫：基本構造として市販の棚を利用でき、拡張フレームを実装することで自動収納庫が実現される。垂直・水平駆動を分離した自由度配置により生活空間への侵食を可能な限り低減し、水平運搬機構で実現されるコンテナのハンドリングにおいてはGOCを活用した拘束により、ロバストなコンテナのハンドリングが実現されている。
  - (4)コンテナ位置認識システム：コンテナ位置計測を2つのフェーズに分類し、最初のコンテナの発見及び大域的な位置計測では環境中に散在させた固定カメラでデータ取得を行い、続く2つ目のフェーズである局所的な位置計測ではコンテナ運搬ロボットに無線LANカメラを搭載し、ロボットとの正確な相対位置を計測しているところが特徴的である。
  - (5) iコンテナ用多機能ドック(iDock)：個別の部屋におけるシステムへの窓口の役割を担う要素である。
  - (6)家庭内物流情報管理システム：稼動しているサブシステム、そして管理している物品情報を統合的に管理する情報処理システムである。ユーザに物品の検索、登録などのインタフェースも提供する。
- 以上のサブシステムについて基本性能確認試験を実施し、十分な性能を有していることを確認している。

第4章「家庭内物流支援ロボットシステムの統合」では、システムで必要となる動作モード及びタスクについて整理し、タスクのうち複数のサブシステムの統合が必要なコンテナ把持・運搬タスクそして受渡しタスクについてシステム統合を行っている。コンテナ把持・運搬タスクにおいては受動機械的コンプライアンスを活用することによって、複雑なフィードバック制御が無くとも物体のハンドリングを実現可能なシステムが構成可能なことを確認している。一方のコンテナ受渡しタスクにおいては、GOC状態に物体を拘束しさらに受動機械的コンプライアンスを位置決め誤差受容及びロボットの相互干渉緩和機構として活用することにより、複数のロボットが複雑な協調動作を実装しなくても物体の受渡し動作を実現可能なことを確認している。

第5章「結論」では、本研究で実現されたシステム及び得られた知見についてまとめ、さらにシステムの実用化にあたって取り組むべき将来課題について整理している。

以上、これを要するに本論文は、生活環境中で物品を搬送・収納するロボットシステムにおいて、産業用ロボットと異なる家庭用ロボット特有の解決困難な課題に関して取り組み、まず戦略としての解決方策の提示、またその戦略と適合する柔軟な機構の設計論を整理し、その戦略及び設計論に基づき実際にシステムを構築しそれらの妥当性を明示した論文であり、この分野に少なくない貢献を果たしている。すなわち、本研究は情報理工学に関する研究的意義と共に、情報理工学における創造的実践に関し価値が認められる。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。