

内98-7

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

人間共存ロボットのための  
マニピュレータに関する研究

申請者

森田 寿郎

Toshio Morita

機械工学

精密工学

1998年7月  
(西暦)

ロボット研究の分野では、不足する人手を補うために人間と積極的にインタラクションを行いながら自律的に作業を行うことができる次世代ロボットの開発と実用化が急務とされている。このようなロボットは、人間と行動空間、作業空間、思考空間を共有する必要性から、人間共存ロボットと呼ばれている。ところが、人間共存ロボットは発想こそ古くから存在するものの、具体的な研究対象として意識されるようになったのは最近のことである。このため、その定義も「人と同時に多様な環境に存在し、人との物理的、情動的、情緒的などのインタラクションを重視したロボットシステム」という大枠でしか定まっていない。

また、定義や論点の曖昧さに加えて、人間共存ロボットの実現を困難としているもう一つの原因が、人間とインタラクションを行う上で必要不可欠となる安全性、協調作業性が、従来のロボット要素技術の単なる延長では実現できないという問題である。例えば、マニピュレータの安全性に関する研究は、すでに産業用を中心に数多く行われているが、そのほとんどはロボットと人間を空間的に分離する方法であるため、人間共存ロボットの設計・制御方法には適用できない。協調作業性に関しても、人間を含む複雑な拘束条件下での作業にはマニピュレータの柔軟性とその調節能力が必要となることが解析的に明らかにされているが、実際には十分な柔軟性を備えたマニピュレータが存在しないため、作業中の人間適応能力が実現されているとは言い難い。

これらの問題を实际的に解決するためには、人間共存という新しい設計コンセプトに基づいて安全性、協調作業性、ハードウェア構成の3つの視点からマニピュレータ技術を見直すことが有効であると考えられる。そこで、本論文では人間—ロボット共存システムを実現するためのプラットフォームとなり得る、新しいロボットマニピュレータの構成方法を確立することを目的とし、作業中に人間と衝突することを前提としたシステムの設計、制御パラメータの決定方法、それらの要求を実現可能なロボット関節機構の提案、および統合的なマニピュレータシステムの開発方法について論じる。本手法は、産業用ロボットの延長上に人間共存ロボットを捉えようとする一般的な研究方法とは大きく異なり、ハードウェア設計および制御則構築の段階から人間共存を意識した方法をとることにより、全体のパフォーマンスを向上させることを目指している。

本論文は、全6章で構成されている。以下に、各章ごとの概略を示す。

第1章は、序論である。ロボットマニピュレータに関しては、約30年に渡って膨大な数の研究が行われているが、それらを「人間共存ロボットマニピュレータ」を実現するためのポイントとなる、安全性、協調作業性、ハードウェア構成方法の3つのアプローチから分類・統括した。また、それらをもとに、人間共存ロボットマニピュレータの開発状況および問題

点を指摘し、本研究の位置づけ、意義、方法を示した。

第2章では、人間共存ロボットマニピュレータを実現するための前提となる、人間—ロボット間の衝突安全性に注目し、マニピュレータの設計・制御パラメータが衝突安全性に及ぼす影響の解析、および各パラメータの安全効果を考慮したマニピュレータ設計指針の提案を行った。具体的な設計・制御パラメータとしては、皮膚と反射行動による人間の衝撃吸収性を参考にして、マニピュレータの表面に付着する緩衝カバーの素材と構造（粘弾性特性）、制御モード（緊急停止、インピーダンス制御）、衝突状況（マニピュレータの質量、衝突速度）、および安全評価基準（頭部傷害基準値）を取り上げた。次に、これらのパラメータが衝撃吸収に及ぼす効果を検証するため、衝撃吸収素材の力学モデル化、特性評価実験、および衝突シミュレーションを行った。その結果、緩衝カバーについては、素材の厚さとマニピュレータの質量、速度の関係から安全性を満たすための指標が示された。また、動作制御については、衝突状況を分類し、緊急停止と関節柔軟性を状況に応じて使い分けることが有効であることが示された。以上をまとめ、人間との衝突時の作業内容、環境状況に応じた衝突安全性を確保するための、マニピュレータ設計・制御方法（機構と制御による2重構造安全対策方法）を導出した。

第3章では、衝突安全性と人間適応性を実現するための方法論として、ロボット関節に適用可能な新機構の開発と、それを用いたインピーダンス制御手法の構築を行った。本論文で開発した方法は、アクチュエーション、コンプライアンス・ダンピング調節に3つの独立したメカニズムとサーボ機構を利用することで、調節可能な受動的粘弾性を実現するものである。この方法をMIA(Mechanical Impedance Adjuster)によるロボット関節制御と呼ぶ。手法の提案に際しては、MIAの設計コンセプトの明確化と試作モデルによる実現可能性の吟味、機構自体のモジュール設計方法論の構築と関節メカニズムの開発、および基礎的な制御則の構築を行った。さらに、MIAを用いて多自由度マニピュレータを構成するための準備として、動力学モデルの構築および制御系安定性解析を行った。その結果、MIAが理想的な粘弾性特性、およびそれらの調節能力を実現可能であること、MIAを用いて構成した $n$ 自由度マニピュレータの位置制御は、粘性係数調節を用いることでリャプノフの意味で安定となることが理論的に確認された。

第4章では、人間共存ロボットマニピュレータの構成方法について論じた。このとき、マニピュレータ全体の機能をアームの大局的作業性とハンドの局所的作業性に分離し、各サブシステムの使用目的にもとづいて、自由度構成、形状・寸法、および位置・力制御系の構成方法などを決定する方法を示した。具体的には、複雑な作業をプログラミングする際に人間

の動作やスキルを直接教示でき、動作自体が人間に対する違和感や恐怖感を与えない形態として人間形を対象とした。実際に人間形マニピュレータを構成するにあたっては、アームに関しては広い動作空間を高速で動作することから安全性を最優先したうえで、理想的な力制御性、位置制御性を実現するための設計を行った。一方、狭い動作空間内で巧みに動作するハンドに関しては、形状・寸法を優先して設計を行った。

以上のコンセプトを満たすマニピュレータとして、第3章で提案したMIAを肩・肘・手首の関節に搭載した7自由度人間形アーム (Seven-D.O.F. MIA Arm)、および人間との物理・情報的インタラクション能力を前提とした人間形ハンド (Four-Fingered 13-D.O.F Hand)を開発した。最後にこれらを統合することで、人間共存ロボットマニピュレータのプラットフォームとなるWAM-10 (Waseda Automatic Manipulator #10)を構成するとともに、パーソナルコンピュータを用いて実時間でWAM-10の動作制御を行うためのソフトウェアの開発、実装を行った。WAM-10の設計仕様は、成人男子の身体的特徴および2重構造安全対策方法を参考に決定し、自由度数20、腕部全長540[mm]、腕部全幅約150[mm]、手部全長230[mm]、手部全幅107[mm]、重量25[kg]のハードウェアで、手先速度1[m/sec]、可搬重量1[kg]の性能を実現した。

第5章では、開発したマニピュレータシステムの評価について述べた。評価項目としては、特にMIAアームの協調作業性および衝突安全性を取り上げ、関節インピーダンス調節特性実験、位置・力制御実験、衝突実験を行った。その結果、理想的柔軟状態から剛体とほぼ同程度の剛性まで変化可能な関節特性設定能力、電磁ブレーキによる疑似ダンピング特性と緊急停止の両立、粘弾性特性に影響されない関節駆動特性、および関節制御の統合による手先空間内の軌道追従が実現できることを確認した。ハンドに関しては指先位置制御実験、物体の包絡把持実験を行い、良好な動作を確認した。以上の結果により、開発したシステムが、人間共存ロボットマニピュレータとして必要な性能を満足していることを示した。

第6章では、本論文で得られた成果をまとめ、さらに今後の研究の展望について述べた。