

氏 名	北 垣 高 成
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年3月24日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 精密工学専攻
学 位 論 文 題 目	ロボットマニピュレータの接触制御に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 箱守京次郎
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 箱守京次郎 東北大学教授 渡邊 眞 東北大学教授 江村 超 東北大学教授 中野 栄二 東北大学助教授 内山 勝

## 論 文 内 容 要 旨

### 第1章 序 論

近年、ロボットの制御に関する研究が盛んであり、産業用ロボットによる作業の自動化が進んでいるが、エンドエフェクタと対象物体との拘束運動を積極的に利用することにより遂行される組立やバリ取りなどの作業に対しては、多くのマニピュレータ制御方式が提案されているにもかかわらず、現在の段階ではロボットによる自動化が進んでいるとは言えない。その原因のひとつとして、拘束状態におけるマニピュレータ制御が場合によって不安定になることが指摘されており、力制御に関しても数多くの研究が行われている。しかし、力制御はエンドエフェクタと外部環境の接触状態に限り行われる制御策であるため、接触時に生じる衝撃力の抑制など接触動作に関連する問題に対しては、その適用範囲外である。

接触動作はマニピュレータを用いて行われる物体の移動、ハンドリング、部品組立などの作業において、必要不可欠な基本動作であり、そこには制御モードの切り換えや衝撃力の発生など無視できない重要な問題がある。したがって、それらの作業を成功させるためには、エンドエフェクタと外部環境との非接触状態から接触状態への移行段階を考慮した接触制御が必要となる。

本研究では、エンドエフェクタと外部環境との非接触状態から接触状態へのスムーズな遷移に必要な要素技術の確立を目的とし、とくに、動的接触検出と衝撃力抑制の2つの問題を取り上げ、こ

これらの問題を中心とした接触制御に関する研究を行った。また、本研究における実験を行うためにロボット制御システムを開発した。

## 第2章 研究用ロボット制御システムARS/A

本研究で目的とする運動制御や力制御のような下位レベルのマニピュレータ制御実験に適したロボット制御システムは、現在、市場にはなく、また、そのようなシステムに関する研究も少ない。本章では、運動制御や力制御のような下位レベルマニピュレータ制御用オープンアーキテクチャロボット制御システムARS/A (Aoba Robot System for A-HAND) について述べる。

本システムは、基本的には、A-HAND (Aoba-HAND) と呼ばれる産業用ロボットマニピュレータ、モータ駆動装置を持つサーボコンピュータ、およびホストコンピュータの3要素で構成されている。ロボットとサーボコンピュータは、ホストコンピュータとの間に標準インターフェースを持つ独立したロボットモジュールと見なされ、ホストコンピュータからリアルタイムコマンドを受け取りロボットを制御する。リアルタイムコマンドの設計は、ロボットシステムの能力や柔軟性を決定する重要な問題である。そこで、本研究では、下位レベルの制御実験に必要なリアルタイムコマンドのセットを提案した。このロボット制御コマンドはMOS/A (Motor Operating System for A-HAND) と呼ばれるリアルタイムモニタを、サーボコンピュータ上に構築した。また、本システムを用いた制御プログラムを効率よく開発するために、ARC/A (Aoba Robot C Language for A-HAND) と呼ばれるロボット制御用C言語を構築した。ARC/AはMOSコマンド関数に加えてグラフィックシミュレータ関数など、ロボット制御ユーティリティ関数を持つ。プログラム例により、下位レベル制御用として、効果的なプログラミングツールであることを示した。本研究における実験は、すべてARS/Aを用いて行われた。

## 第3章 高速マニピュレーションのための動的接触検出

一般に、ロボットコントローラ内部の環境モデルと実際の環境とが完全に一致することはないため、位置と力のハイブリッド制御など、エンドエフェクタと対象物体との接触によって制御モードを切り換える制御方法においては、接触検出が必要不可欠となる。従来、接触検出は静的な場合のみを扱っていたため、とくに問題とされていなかった。しかし、高速マニピュレーション時やペイロードが非常に大きい場合には、エンドエフェクタやペイロードなどの慣性力が、力覚センサにより観測される力信号に大きな割合で混入するために、接触検出ができなくなることがあり問題となる。本章では、動的力センシングを適用した高速マニピュレーションのための動的接触検出方法について述べる。

動的力センシングは、マニピュレーションの手首に取り付けられた力覚センサにより検出される力信号から慣性力などの動的ノイズを除去し、必要な外力情報を高感度、高精度で検出可能とするための手法である。具体的に言えば、動的な外力推定問題をカルマンフィルタを用いた状態推定問題として定式化し、その近似解法として拡張カルマンフィルタを用いることにより外力情報を推定する手法である。そのインプリメンテーションとして力信号処理システムを開発し、同システムを

用いて動的外力推定のシミュレーションおよび実機を用いた基礎実験を行った。その結果、力信号から動的ノイズを適切に分離し、手先外力を精度よく推定できることが確認され、動的力センシング手法の有効性が実証された。

次に、システムが線形である場合を考え、線形カルマンフィルタを導いた。そして、線形の3軸外力推定フィルタを用いて、エンドエフェクタとその運動軌道内に置かれた物体との接触検出実験を行った。その結果、力覚センサにより観測される力データそのものでは検出することのできない接触力を検出することができ、動的力センシング手法の動的な接触検出に対する有効性が実証された。

#### 第4章 外部環境に対するマニピュレータの最適接近速度

従来、対象物体に対する適切な接近速度は、単にエネルギー保存の法則により計算することができるとされており、接触後になされる力制御との関係は明らかにされていなかった。また、従来の衝撃力制御は衝突後のみ行われ、接触前における制御は考慮されていなかった。本章では、接触動作を分析することにより接触前を含めた制御が必要であることを示した上で、外部環境に対するマニピュレータの最適接近速度を提案する。

最適接近速度は以下のように定義される。外部環境とエンドエフェクタの接触状態におけるマニピュレータの制御系を含めたシステムの状態方程式を定式化し、それと平衡状態における状態方程式との差をとることにより、偏差方程式が得られる。この偏差方程式はオープンな自律システムを表すため、その初期状態によってシステムの挙動が一意に決定される。したがって、接触直後に発生する力の挙動は、初期状態、すなわち平衡点からみた接触位置および接近速度によって定まる。平衡点からみた接触位置を任意に設定することはできないが、接近速度を任意に設定することは容易である。ゆえに、接近速度を制御することにより、接触により発生する力を間接的に制御できることがわかる。次に、接触により発生する力を評価するために、平衡力と接触により発生する力の偏差の二乗面積を表す評価関数を定義し、これを最小とする接近速度を最適接近速度と定義した。

ばね・質量・ダンパの1自由度モデルにおける計算結果より、最適接近速度は目標接触力と比例関係にあることが明らかとなった。シミュレーション結果より、最適接近速度は、与えられたシステムに対して、接触により発生する必要以上の力を抑制し、かつ、接触力の立ち上がりを早める効果があることが示された。また、実機を用いてエンドエフェクタを3種の物体に対して一定の接近速度で接触される実験の結果、最適接近速度と目標接触力との比例関係の存在が確認され、本手法が有効であることが実証された。

#### 第5章 最適接近速度を考慮した速度と力のハイブリッド遠隔操作制御システム

バイラテラルマスタ・スレーブ制御において通信遅れがある場合、力制御が不安定になることが報告されている。本章では、接触制御の立場より開発された一種の知的機能を持つ遠隔操作制御システムを提案する。

はじめに、オペレータの操作力制御モデルを立てることにより、バイラテラルマスタ・スレーブ

制御においてシステムの時間遅れがある場合に力が不安定となる原因について考察した。そして、その解決策のひとつとして、オペレータへの力フィードバックなしの力の操作制御を提案し、力フィードバックがない場合にも力の遠隔操作が可能であることを示した。これをもとに、第4章で示したエンドエフェクタの外部環境に対する接触力と最適接近速度との関係を適用したマニピュレータの遠隔操作制御システムを構築した。本システムでは、オペレータはフィードバックされる視覚情報をもとに、操作量として対象物体への接触力を与えるのみで操作可能な、力感覚のあるジョイスティック型遠隔制御システムである。

本遠隔操作制御システムの特徴は、力制御をオペレータを介さずに行うこと、および、物体との接触時に接近速度を自動生成することである。これらにより、オペレータとマニピュレータ間の力情報の時間遅れがある場合にも下位レベルの力の不安定性が解消され、また、エンドエフェクタと物体が接触する際の予期せぬ衝撃力が発生しないため、オペレータの精神的疲労を減少させることができる。

本システムを用いた遠隔操作実験の結果、有効性が確認された。また、本システムはマニピュレータの位置と力の教示に応用できると考えられる。

## 第6章 結 論

本章では、本研究の目的ならびに成果を総括し、各章ごとにまとめて示した。

## 審査結果の要旨

ロボットマニピュレータの作業計画における重要課題の一つとしてハンドが作業対象を含む外部環境と接触しつつ行われる拘束された作業の制御の問題がある。本論文は、ロボット作業をハンドと外部環境との接触・非接触状態の交互遷移過程という新たな観点から把握し、とくに非接触から接触に移る基本動作としての接触制御の重要性を指摘し、動的接触検出と衝撃力抑制を骨子として上記の問題に取り組んだ研究の成果を纏めたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、本研究の実施対象となる研究用ロボットシステムの開発について述べている。ロボットモジュールは標準インタフェースを介してホストコンピュータから制御コマンドをリアルタイム転送して制御される。コマンド体系、ロボットOS、言語等を運動制御や力制御など下位レベル制御に適するよう構築している。

第3章では、高速マニピュレーション時の動的接触検出手法について述べている。手首部力センサ信号に対して、拡張カルマンフィルタを用いて慣性ノイズ等を分離し、高速高精度に接触検出を行うことを提案し、実験を通して有効性を実証し、さらに、実用上重要な場合に対してフィルタの線形化が可能なことを示すなど、重要な知見を得ている。

第4章では、接触以前の時期を含めた接触制御の重要性を指摘し、接触による力発生過程を定式化して、外部環境に対するハンドの最適接近速度の概念とその解析手法を提示し、それによって接触力の制御が可能であることを、シミュレーションと実験により明らかにし、接触制御への有用な指針を示している。

第5章では、マニピュレータの遠隔操作における接触制御の問題を論じている。オペレータの操作力制御モデルの検討に基づき、最適接近速度を考慮した速度と力のハイブリッド遠隔操作制御手法を提案して実験的に有効性を確認している。力制御をオペレータを介さずに行える点、注目すべき提案といえる。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、ロボットマニピュレータの作業計画に接触制御の概念を導入し、関連する諸問題の解明を試み、多くの重要な知見を与え、有用な提案をなしたもので、ロボット工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。