

	やまの みつひろ		
氏名	山野光裕		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成12年3月23日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4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) 航空宇宙工学専攻		
学位論文題目	双腕フレキシブルマニピュレータの協調制御に関する研究		
指導教官	東北大学教授 内山 勝		
論文審査委員	主査 東北大学教授 内山 勝	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 近野 敦	

## 論文内容要旨

宇宙開発の進展に伴い、宇宙飛行士の危険防止や省力化の観点から、宇宙での作業をロボットを用いて行うことが一層望まれるようになってきている。宇宙空間で利用する機器は、ロケット等による打ち上げコストが非常に高く、軌道上におけるエネルギーの制約も厳しい。また、微小重力下では自重を支えるために剛性を高める必要がない。構造部分の剛性を低くできるフレキシブルマニピュレータは大幅な軽量化とそれによる省エネルギー化が可能であるため、打ち上げコストの低い宇宙用のロボットとして、人工衛星の修理、回収等の作業に有用である。単腕で作業を行う場合、対象物とマニピュレータの手先を固定しなければ対象物を把持できないが、双腕を協調して利用できれば、双腕で対象物を挟みつけて把持できるため、広範な対象物に対応できる。以上のように、双腕フレキシブルマニピュレータは、低い打ち上げコストで、効率よく、広範な作業に対応できる宇宙ロボットとして期待できる。

本研究では、双腕フレキシブルマニピュレータを協調させ、搬送作業、捕獲作業を実現するための技術の開発を行った。具体的には、フレキシブルマニピュレータの機構的なコンプライアンスや閉リンク系の運動学、静力学、動力学を解析し、それらに基づき、対象物の搬送作業や捕獲作業について制御則および作業手順を開発した。さらに、開発した制御則を効率よく実現する分散型制御システムを構築し、それを用いた実験を行うことにより、提案している方法の有効性を検証した。本論文は、以上の研究成果についてまとめたもので、全編6章よりなる。各章の要約を以下に記す。

### 第1章 序論

本研究の背景および目的を述べた。

### 第2章 フレキシブルマニピュレータのコンプライアンス解析とその接触作業への応用

複数のリンクを有する3次元フレキシブルマニピュレータについて、リンクの柔軟性による手先のコンプライアンス特性について解析した。ならい作業を行なう際、解析したコンプライアンス特性をもとに拘束面の向きやならう方向を決めることにより、力覚センサを用いなくても接触作業を行えることを実験により示した。さらに、フレキシブルマニピュレータの機構的なコンプライアンスと、リンクの歪み情報を利用したソフトウェアによるコンプライアンスを組み合わせた制御則を提案し、ならい作業を行う実験により、コンプライアンスを制御できることを確かめた。

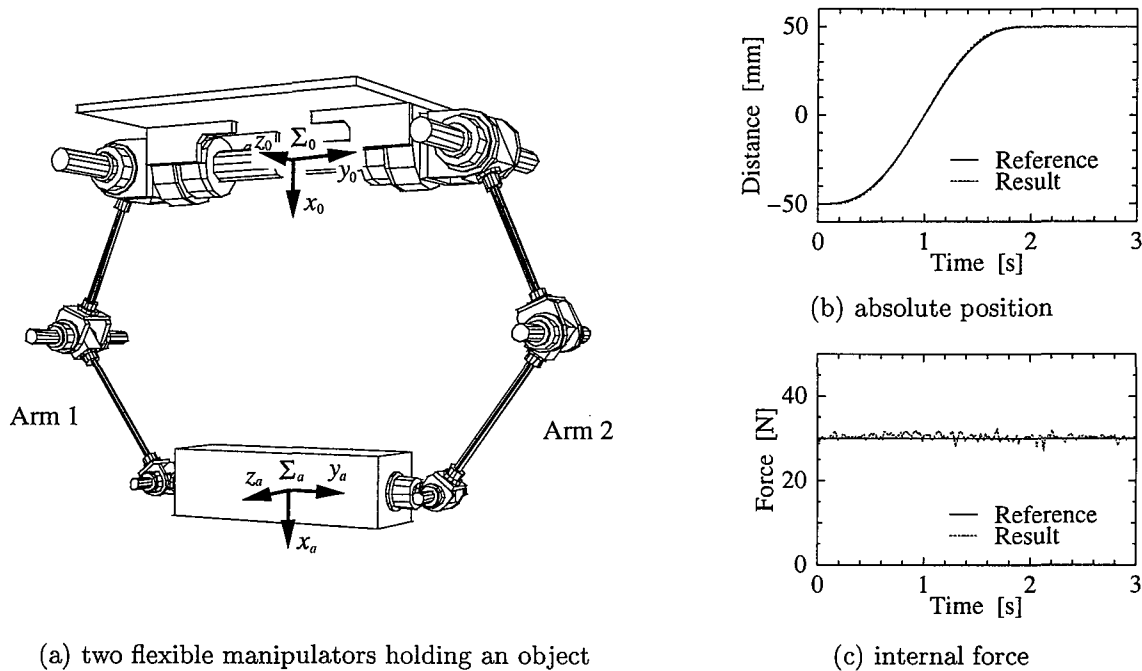


Fig. 1: Experiments on cooperative control.

### 第3章 双腕フレキシブルマニピュレータの協調制御

3次元双腕フレキシブルマニピュレータにより、質量や慣性モーメントが既知であるひとつの剛体を把持、搬送する際の制御について論じた。双腕フレキシブルマニピュレータを協調させて対象物を操作する場合、フレキシブルリンクと対象物により閉リンクが構成される。この閉リンク系に対して、絶対位置/相対位置、外力/内力からなる作業ベクトルを導入し、運動学的、静力学的な関係を記述した。これらの関係に基づき、対象物の絶対位置と対象物に加わる内力を制御する位置と力のハイブリッド制御を構築した。さらに、フレキシブルリンクの柔軟性による振動を抑制するため、閉リンクを構成する双腕のフレキシブルマニピュレータの運動方程式を簡潔な形で記述し、その運動方程式に基づく振動抑制制御を構築した。両者を統合し、リンクの振動抑制や対象物に加える内力の制御を行いながら、対象物を並進、回転させることを可能にする協調制御法を提案した。提案した方法は簡潔なモデルに基づくため、計算が煩雑となる3次元空間内の作業にも十分適用可能である。

Fig. 1 (a)のような3次元双腕フレキシブルマニピュレータを用いて、絶対位置、内力それぞれ6成分を制御する実験を行った。対象物の絶対位置の  $\Sigma_0$  の  $y$  方向成分、対象物に加わる内力の  $\Sigma_a$  の  $y$  方向成分を、それぞれ Fig. 1 (b), (c) に示す。実験結果より、対象物に過大な力を及ぼしたり、対象物と手先が離れたりすることなく、対象物を各方向に並進、回転させることができ、さらに、振動が生じてもすばやく減衰されることを示した。

### 第4章 分散型制御システムを用いた統合協調作業実験システム

ネットワークに接続された複数のコンピュータを並列に動作させる効率的な実験システムの構築について述べた。本研究の実験を確実に効率的に行うため、ロボットとコンピュータの間のデータ入出力やそれらに必要な計算が一定周期ごとに実行されること、複数の処理を優先度を考慮しながら平行、並列して行えること、複数のコンピュータに負荷を分散できること、MATLABのような汎用のアプリケーションソフトウェアが利用できるこ

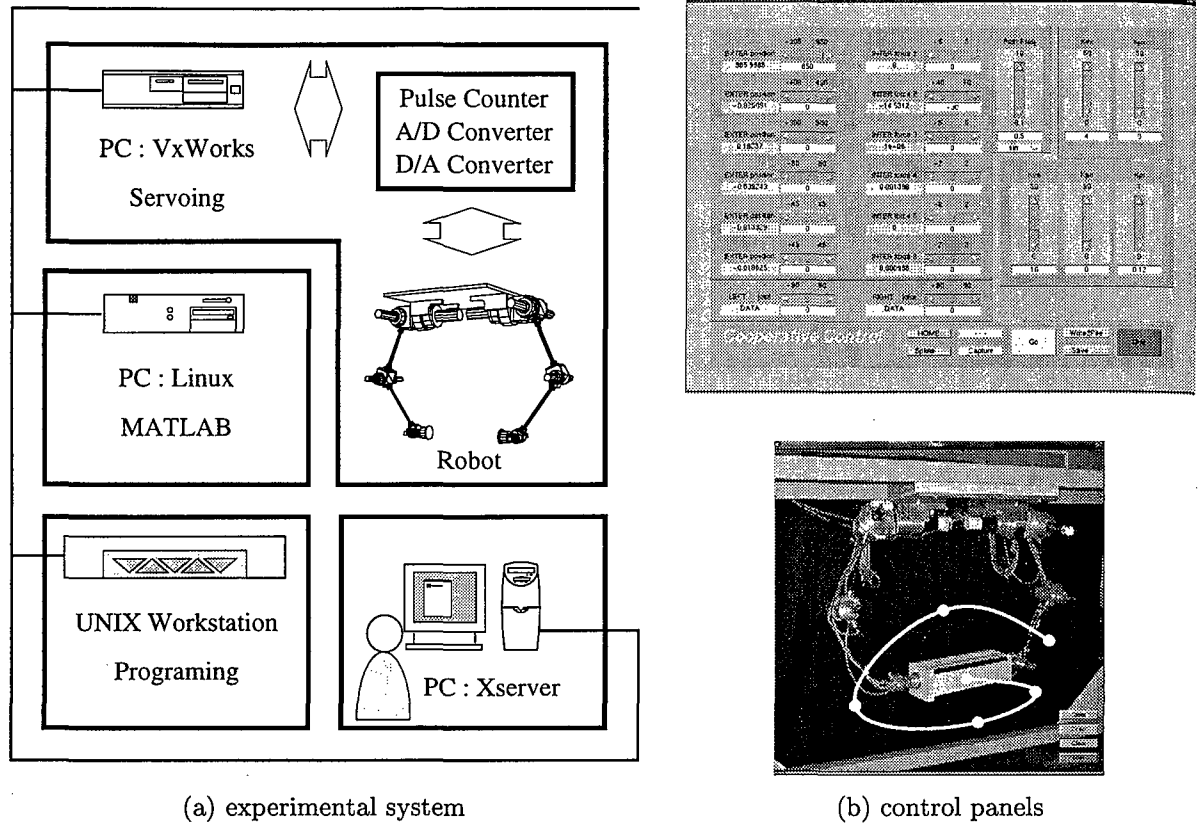


Fig. 2: Experimental system and control panels.

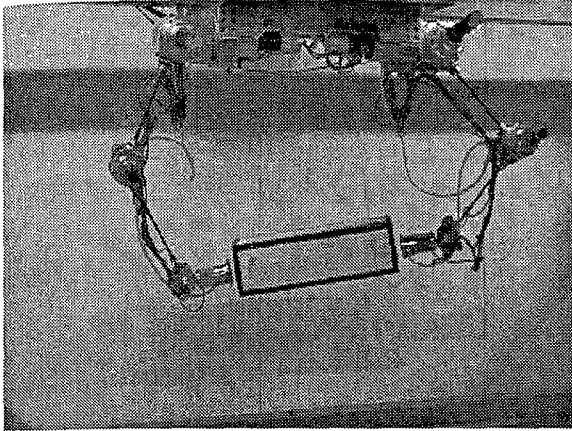
と等の条件を満たす実験システムを構築した。

構築した実験システムは、制御用のリアルタイム OS として VxWorks を搭載したコンピュータと、汎用のマルチタスク OS である Linux を搭載したコンピュータをネットワークで接続して、汎用のソフトウェアを利用しながら、双腕フレキシブルマニピュレータの制御を実時間で行うことができるものである。本章では、複数のコンピュータに負荷を分散して処理を行うために必要なコンピュータ間の通信やタスクのスケジューリング等を示した。さらに、構築した実験システムを用いて、Linux を搭載した PC で MATLAB を用いて GUI や起動生成の処理を行いながら、平行して VxWorks を搭載した PC でロボットを実時間で制御し、両者のデータを交換しながら、処理を行う例を示した。

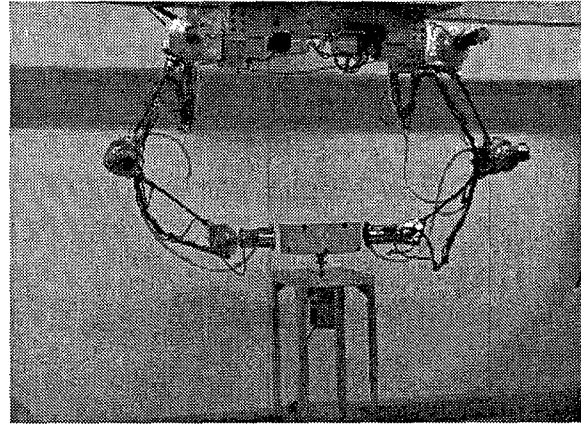
構築した実験システムの構成を Fig. 2 (a) に示し、Linux を搭載した PC 上で MATLAB の機能を利用して構築したコントロールパネルを Fig. 2 (b) に示す。

## 第5章 双腕フレキシブルマニピュレータによる対象物捕獲作業実験

前章までの成果を応用し、双腕フレキシブルマニピュレータによる対象物の捕獲作業に対して、作業手順と制御則を提案し、実験を行った。対象物を捕獲する過程として、任意の初期姿勢にあるマニピュレータの両手を対象物付近に配置する段階、対象物が両手の中心に来るように両手を移動する段階、両手を対象物に接近、接触させる段階、対象物に加わる内力を制御する段階、把持した対象物を目標の位置まで搬送する段階を考え、3次元空間内で対象物を自律的に捕獲できるように作業手順を構成した。



(a) capturing a stationary object



(b) capturing a spinning object

Fig. 3: Experiments on capturing an object.

両手が対象物から大きく離れた状態から、対象物の位置情報をもとに、両手を対象物に接近させ、対象物をはじくことなく、適切な内力で把持できるように、各段階ごとに制御則を構築した。両手を対象物に接近させる際の接近速度は、第2章に示した手先のコンプライアンスの解析をもとに決定し、対象物を把持した後、第3章で提案した制御則により、対象物の絶対位置と内力の制御を行った。さらに、第4章に示した実験システムを利用して、Fig. 3のように静止物体と回転物体を捕獲する実験を行い、捕獲作業を行えることを確かめた。

## 第6章 結論

本研究で得られた結果をまとめた。

## 審査結果の要旨

宇宙開発の進展に伴い、高度な作業を実現する軽量で柔軟なフレキシブルマニピュレータの開発が望まれるようになった。高度な作業を実現する方法として、双腕協調が注目されている。このような背景のもと、著者は、双腕フレキシブルマニピュレータの協調制御について研究し、各腕の機構的なコンプライアンス特性、ならびに双腕により形成される閉リンクシステムの運動学、静力学、動力学について解析し、その結果に基づき、対象物の搬送作業や捕獲作業の効果的な制御則および作業手順を開発した。本論文は、以上の研究成果についてまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、3次元フレキシブルマニピュレータについて、リンクの柔軟性に起因する手先のコンプライアンス特性を解析し、それが接触作業において有効であることを実証している。さらに、リンク歪みのフィードバックにより、手先のコンプライアンス特性を制御する方法を提案し、実験により、その効果を確かめている。

第3章では、協調作業する双腕フレキシブルマニピュレータにより形成される閉リンクシステムについて、運動学、静力学、動力学方程式を導き、リンクの振動を抑制しながら、対象物の位置、姿勢、および対象物に加わる力、モーメントを制御する方法を提案し、実験によりその有効性を確かめている。このような高度な制御の実現は、他に例を見ない。

第4章では、ネットワーク接続された複数コンピュータを並列動作させ、効率よく実験システムを構築する方法について述べている。複数のコンピュータに負荷を分散し、複雑な制御則を実時間で実行しつつ、高度なGUIやソフトウェアを駆使し、効率よく作業の生成処理を行うシステムを構築している。このシステムはロボットの作業プログラミングに極めて有効である。

第5章では、双腕フレキシブルマニピュレータによる対象物の捕獲作業について述べている。作業手順は、対象物を自律的に捕獲できるように構成され、各段階ごとに異なる制御則を使用している。対象物を捕獲するときの両手の接近速度は、第2章の解析結果に基づき決定し、対象物を把持したのちは第3章の制御則を適用する。これにより、静止物体と回転物体の自律的な捕獲作業を実現し、提案する方法の有効性を示している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、双腕フレキシブルマニピュレータの機構的な特性を解析し、その結果に基づいて、搬送作業や捕獲作業のための制御則および作業手順を提案し、さらに、これを実現する制御システムを構築し、提案する方法の有効性を実証したもので、その成果はロボット工学および航空宇宙工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。