

氏 名	近 野 敦
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 3 月 25 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	3次元フレキシブルマニピュレータの運動制 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	東北大学教授 内山 勝 東北大学教授 箱守京次郎 東北大学教授 江村 超 東北大学教授 谷 順二 東北大学教授 中野 栄二

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

ロボットマニピュレータの高速な動作を目指して、アームの軽量化の研究が行われてきた。また、宇宙用マニピュレータでは打ち上げコストなどの関係上、アームの軽量化が急務の課題であった。ところが、アームの軽量化に伴いその剛性が低下し、アームの弾性振動や弾性たわみが大きな問題となってきた。このようなアームはもはや剛体とはみなせず、弾性体として扱うのが自然である。このようなアームを持つマニピュレータはフレキシブルマニピュレータと呼ばれている。

宇宙用大型構造物は、太陽電池パドルやアンテナなど多数の柔軟構造物から構成されており、また、全体の構造物自体も柔軟なものになるため、柔軟構造物の制御の研究は、宇宙用大型構造物の研究の一環として系統的に行われてきた。このような背景から、初期のフレキシブルマニピュレータの研究では、これらの柔軟構造物に関する研究成果から大きく影響を受けることになった。そのため、従来のフレキシブルマニピュレータの研究は柔軟構造物に対する研究成果を適用しやすい、1リンクや2リンクの平面運動のみのマニピュレータを対象としたものが主流であった。しかし、フレキシブルマニピュレータをロボットアームとして捉える場合、3次元空間を運動する多自由度を持つマニピュレータを対象とした研究が必要である。このような観点から、最近はより実用的なマニピュレータを対象とした研究が多く見られるようになった。本研究はこの流れに属する。

本研究の究極の目的はフレキシブルマニピュレータを用いて剛体マニピュレータと同様の作業が

行えること、剛体マニピュレータにはない、そのアームのフレキシビリティをある場面では積極的に利用することにある。この目標の実現は、例えば宇宙ステーションの、宇宙ロボットによる建設などに非常に役にたつと信ずる。

本研究は、具体的には単腕マニピュレータによる物体の把持と移動などの簡単な作業を念頭におき、作業中のマニピュレータの運動によって励起されるアームの弾性振動を抑制する制御法を確立する。

第2章 実験装置

本研究では2種類の3次元フレキシブルマニピュレータを使用した。1つは当研究室で開発した2リンク3ジョイント型フレキシブルマニピュレータ FLEBOT IIで、もう1つは株式会社富士通研究所宇宙メカトロニクス研究部第一研究室と共同で開発した双腕2リンク7ジョイント型フレキシブルマニピュレータ ADAMである(図1)。本章ではこれらの実験装置の概要についてまとめた。

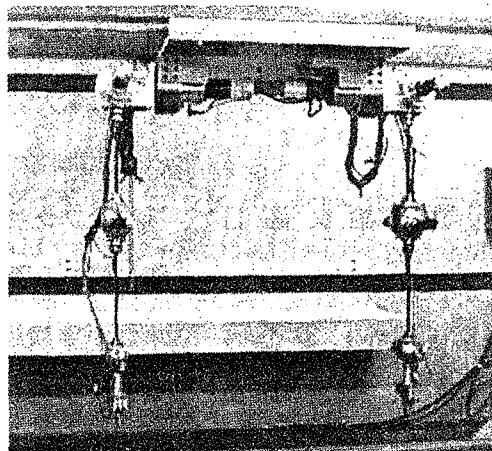


図1：実験用双腕フレキシブルマニピュレータ ADAM

第3章 フレキシブルマニピュレータのモデリング

フレキシブルマニピュレータの研究が始められた当初から、モデリングの研究は1つのテーマであった。フレキシブルロボットマニピュレータの研究が始まった頃は、大型宇宙構造物(LSS: Large Space Structure)への研究者の関心が高まりつつあった時期でもあり、LSSのモデリング手法から大きな影響を受けている。LSSは一般に動的な姿勢変化を伴わない場合が多いためモデル化誤差が極力小さくなるようなモデリングが求められた。このようなモデルは1リンク程度の簡単なマニピュレータ、あるいは柔軟構造物に対しては非常に有効であるが、3次元マニピュレータへの適用は、得られるモデルが複雑になりすぎ、制御への応用は現実的ではない。

本章では、より現実的なモデリング手法を確立することを主眼とし、ローターのねじり振動の固有振動数を決定する方法として機械振動学でよく知られたHolzer法をフレキシブルマニピュレータのモデリングに応用し、新しいモデリング手法を構築した。このモデリング手法を用いて得られたモデルは、剛体アームとの関連が理解しやすくフレキシブルマニピュレータの運動学の解析に役に立つものと期待される。

提案したモデルの妥当性を検証するために、第2章で解説した2リンク7ジョイントフレキシブルマニピュレータのモデルを、本章で提案したモデリング手法を用いて作成し、得られたモデルをもとにシミュレーションを行った。シミュレーション結果と実験結果を比較し、提案するモデルの妥当性を確認した。

第4章 弾性変位の測定

本章では、リンクの弾性によるたわみ変位を測定する方法について論じた。フレキシブルマニピュレータのアームの弾性振動を制御するにはなんらかの方法で振動を計測する必要がある。現在のところ、振動を計測するためのセンサとして、歪みゲージ、加速度センサ、CCDカメラ、半導体レーザ、フォトダイオード、トルクセンサなどが用いられている。

この章では、半導体レーザとPSD (Position Sensitive Device) を用いた光学式リンク先端たわみセンサと歪みゲージを利用してリンクの先端のたわみを計測する方法の2つの方法を提案した。歪みゲージを用いる方法は、実際の実験装置に実装し、第6章で示すフレキシブルマニピュレータのアームの振動抑制実験においてたわみセンサとして使用した。

第5章 可制御性

フレキシブルマニピュレータのアームの弾性振動の可制御性については数名の研究者によって定義が試みられているが、可制御性を深く取り扱った研究はこれまであまり行われていなかった。特に空間を運動をするフレキシブルマニピュレータでは、姿勢が変化すると、それに伴い様々なパラメータが変化するため、リンク弾性振動の可制御性も必然的に姿勢依存となるが、この問題を取り扱った研究は2～3報告されているのみである。

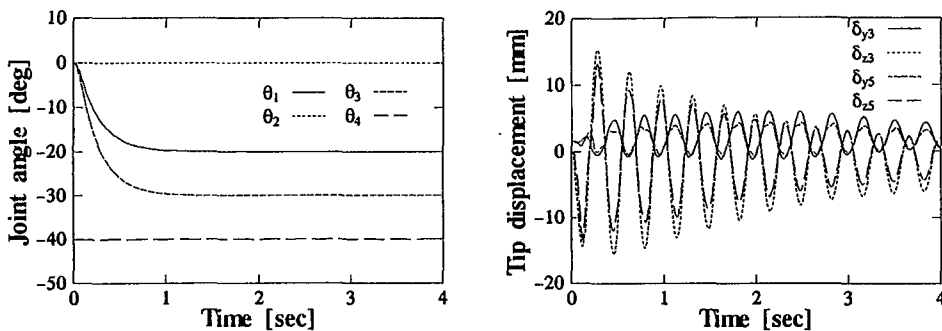
本章では、アームの弾性振動の可制御性を定義し、空間フレキシブルマニピュレータの姿勢変動と可制御性の関連について考察した。この結果、直感的に当然リンクの弾性振動が可制御であると思われる姿勢で不可制御になり得るという興味深い事実を発見した。この不可制御姿勢の物理的意味を把握するためにモード可到達性という概念を提案し、不可制御姿勢の解析を試みた。モード可到達性の議論で、フレキシブルマニピュレータにおいてリンクの弾性振動が不可制御である姿勢では、マニピュレータを駆動するアクチュエータがアームのある振動モードに作用することができていないことを示した。可制御性、あるいはモード可到達性の議論は、フレキシブルマニピュレータの設計、また制御にとって重要な問題となる。

第6章 振動抑制制御

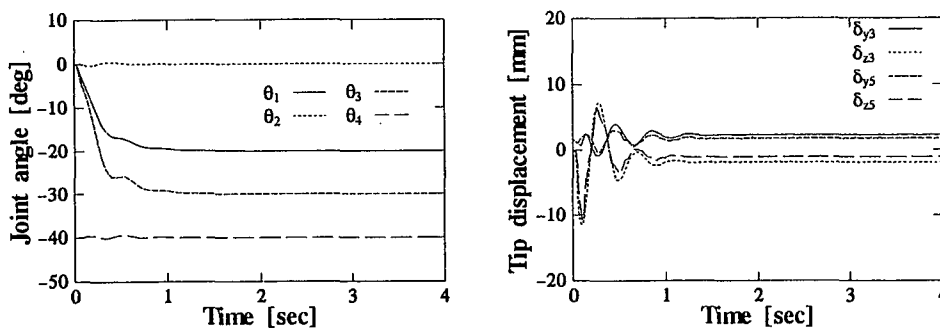
従来の、1リンクまたは2リンクの平面フレキシブルマニピュレータ用の振動抑制制御則をそのまま空間フレキシブルマニピュレータに適用すると、制御が不安定になる姿勢が存在することが複数の研究者によって報告されている。これは、アームの振動のフィードバックゲインを固定ゲインにしたことに起因する。第5章でも述べたとおり、空間フレキシブルマニピュレータは姿勢によって様々なパラメータが変化するために、アームの振動の可制御性はマニピュレータの姿勢に依存した。そのため、振動のフィードバックゲインを姿勢によって可変にすることが提案されてきた。しかし、各姿勢におけるゲインの決定は直感的なものによることが多く、統一的な理論の構築が期待されていた。

本章では空間フレキシブルマニピュレータの振動抑制制御則を幾つか提案した。提案した制御則はいずれも、姿勢に依存の振動フィードバックゲインを用いる。提案する制御則を用いて実験を行

い、この制御則の振動抑制効果を確認した。振動抑制制御を行わなかった場合と、提案する振動抑制制御を行った場合の、ジョイント角度のステップ入力に対するジョイント角度応答とアーム先端のたわみ変位応答を、それぞれ図 2、3 に示す。



(a) ジョイント角度応答 (b) アーム先端たわみ変位応答
図 2 : 実験結果 (振動抑制制御なし)



(a) ジョイント角度応答 (b) アーム先端たわみ変位応答
図 3 : 実験結果 (振動抑制制御あり)

第 7 章 振動・軌道同時制御系の安定性

第 6 章で種々の振動抑制制御法を提案した。これらの振動抑制制御の安定性の解析という課題が残されている。一般にフレキシブルマニピュレータの振動抑制制御はジョイント角の位置決め制御と同時に行われる。同じアクチュエータによってジョイント角と振動を同時に制御しなければならないところに安定性の解析の難しさがある。このような理由から、現実には第 6 章で提案した制御法の安定性の解析は困難であり、将来の課題となっている。

第 6 章のアプローチとは逆に、安定性の立場から振動制御則を構築しようというのが本章の目的である。本章では、トルクフィードバックを利用した振動抑制制御則を構築し、この制御則が安定になることをリアプノフの方法を用いて示した。

第 8 章 結 論

3次元空間内で動作するフレキシブルマニピュレータによる実際の作業を可能とすることをめざし、その第一歩として振動抑制制御の問題に取り組んだ。本章では、各章ごとにその要点をまとめた。

3次元フレキシブルマニピュレータの振動抑制制御でたわみ変位をフィードバックする場合はフィードバックゲインを可変にすることがキーポイントとなる。第6章、第7章で構築した振動抑制制御則はいずれも振動のフィードバックゲインが可変となる。逆にいえば第6章と第7章で構築した制御則は、可変フィードバックゲインという点で一致する。更なる研究により、これらの制御則が可変フィードバックゲインという点で統一的にまとめられるのではないかと期待される。

審査結果の要旨

フレキシブルマニピュレータは、リンクの弾性変形を許容した新しい構想によるマニピュレータで、産業用ロボットの軽量化、高速化、あるいは宇宙用マニピュレータなど広範囲の応用分野が期待されているが、その設計手法は未だ確立されていない。本論文は、フレキシブルマニピュレータの3次元空間運動を可能ならしめるための制御系設計法に関する研究成果をまとめたもので、全編8章より成る。

第1章は、序論である。

第2章では、本研究で使用した2リンク3ジョイント型3次元フレキシブルマニピュレータおよび2リンク7ジョイント型3次元フレキシブル双腕マニピュレータの構成と諸元について述べている。

第3章では、フレキシブルマニピュレータの集中ばね質量モデルを提案し、Lagrangeの方法により運動方程式を導くとともに、同モデルの妥当性をシミュレーション結果と実験結果を比較することにより検証している。

第4章では、リンク弾性変位の測定方法について論じ、半導体レーザとPSDを用いる方法およびひずみゲージを用いる方法を提案し、それぞれの方法についてリンク弾性変位を算出する基礎方程式を導いている。

第5章では、フレキシブルマニピュレータの可制御性について論じ、可制御性がマニピュレータの姿勢に依存すること、およびマニピュレータの自由度の構成によっては、作業領域の中心付近に不可制御の姿勢が存在することを明かにしている。これは重要な新知見である。

第6章では、フレキシブルマニピュレータの振動抑制制御について論じ、ジョイント角加速度を制御系への入力とみなす加速度指令型の制御系を提案し、この制御系の安定化のためには、リンク弾性変位の可変ゲインフィードバックが本質的に重要なことを指摘している。これらは有用な成果といえる。

第7章では、フレキシブルマニピュレータのジョイント角度の位置決め制御とそれに伴い発生するリンク弾性振動の同時安定化について理論的に論じ、安定な可変ゲインフィードバック則を導いている。

第8章は、結論である。

以上要するに、本論文は、3次元フレキシブルマニピュレータの力学と制御に関する基礎的問題について体系的に解明を試み、多くの有用な知見を加えたもので、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、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。