

平成21年5月15日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560250  
 研究課題名（和文）  
 宇宙での利用を目指した構造可変型多肢ロボットアームおよびその制御法の開発  
 研究課題名（英文）  
 Development of Structure-Varying Multi-Branch Robotic Arm and Its Control Scheme Aiming Practical Use in Space Environment  
 研究代表者  
 磯部 大吾郎（ISOBE DAIGORO）  
 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授  
 研究者番号：00262121

## 研究成果の概要：

宇宙空間での利用を目指し、単体でタスクに併せて構造を変化させる構造可変型多肢ロボットアームの開発が進んでいる。従来の制御法では、構造変化後に即ダイナミクスを考慮したフィードフォワード制御を実施することが困難であったが、本研究で開発した並列的逆動力学計算法に基づいたフィードフォワード制御システムは、入力データの書換えのみで柔軟にダイナミクスの変化に対処できる汎用性を持つ。これを自主開発した構造可変型多肢ロボットアーム等の制御実験により検証し、その実用性を確認した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス，フィードフォワード制御，多肢ロボットアーム，逆動力学，リンク系，宇宙ロボット

## 1. 研究開始当初の背景

2010年の完成を目指し、地上約400kmで国際宇宙ステーションの建設が進められている。この建設に現在はスペースシャトル搭載の6関節ロボットアームが活躍しているが、今後も宇宙空間での建設作業、修理作業などにロボットアームが不可欠な存在となることが予想される。JAXA（宇宙航空研究開発機構）は、宇宙空間で多様なタスクを実行可能

とするために、必要に応じて構造を変える再構成型宇宙用多肢マニピュレータの概念を打ち出し、連結部を中心として実機を製作した。このようなマニピュレータは、複数の異なるマニピュレータをペイロードとするよりもはるかに経済的であり、今後の宇宙空間、惑星上で使用するロボットアームの基本概念として注目されている。しかし、リンク系は構成が変わるとそのダイナミクスも変化

し、安定な制御を実現するためには、そのダイナミクス補償のための動力学方程式をモデルの数だけ用意する必要がある。また、宇宙のような極限空間では、関節のモータに不具合が生じた場合にはそれを修復することは容易ではなく、この場合にもリンク系の状態に合わせた動力学方程式を新しく導出する必要が出てくる。さらに、ペイロード削減の目的でアームの軽量化が望まれるため、リンク部材のたわみや振動を考慮した制御も必要となる。現段階では、上記のようなリンク系の再構成に応じる柔軟性、部材の剛性を考慮した汎用性を兼ね備えたダイナミクス補償システムは存在せず、実機のダイナミクスを補償した制御までは至っていないのが現状である。

系の構成や境界条件が変わるとダイナミクスが変化する問題は、時には通常のロボットの歩行、マニピュレータの協調動作にも影響を与えることが知られており、この問題を克服するために国内外で数々の研究が行われている。例えば、2足歩行ロボットが両足を接地した状態や協調マニピュレータが同時に物体を把持した場合などは、系が閉じた状態（閉ループ系）となり、その動力学方程式を導出することは困難とされていた。これに対し、東京大学の中村教授は、切断法により閉ループ系を仮想的な開ループ系に分け、動力学の算出を可能とした。さらに、東京工業大学の杉本教授は、世界に先駆けて閉ループ系の動力学方程式の導出に成功した。いずれの研究も、特にヒューマノイドロボットの歩行動作の速度向上に大きく寄与した。たわみを考慮する柔軟リンク系では、Bayo 教授、マサチューセッツ工科大学の浅田教授、大阪大学の土屋教授などの先駆的な研究が存在する。これらの研究では、柔軟リンク系の逆運動学および逆動力学方程式を適切な展開関数を与えることによって導出している。だが、いずれの研究でも使用する手法が各々別々となっており、汎用的なツールが確立されるには至っていない。

一方、研究代表者は、汎用的なダイナミクス補償システムを開発する目的で、有限要素法を基にした並列的逆動力学計算法の開発に着手してきた。この解法は、有限要素法で用いられる並列的な計算処理過程を適用しており、ハード構成の変化に対して中核のアルゴリズム（動力学方程式に相当する部分を含む）を一切変える必要はなく、入力データの変更のみで対処できるという大きな特長を有する。すなわち、ハード構成がいくら複雑になろうとも、関節数がいくら増えようと

も、入力データを変更するだけでそのダイナミクスを補償したトルク値を算出できるのである。さらに、有限要素でリンク系をモデル化するため、そのたわみや振動を考慮することも可能で、剛体リンク系の場合と全く同じプロセスでトルクを算出し、フィードフォワード制御に適用することができる。この力学上の特質を生かした解法は、開発初期に新聞で大きく取り上げられて話題を呼び、さらに、TLO を経由して知的所有権を申請した結果、公開特許として特許広報にも掲載された。これまで申請者は、各種リンク系を段階的に製作し、検証実験に適用してきた。その結果、それぞれの制御では解法の有効性が確認されたが、リンク系の形態が変化することに対する柔軟性を検証するまでには至らなかった。

## 2. 研究の目的

本申請課題では、複数の型のロボットアームに対して容易に手早く検証実験を行うことを可能とする、ユニット間の着脱を容易にした構造可変型多肢ロボットアームを製作することを第一の目的とした。次に、このアームに対し並列的逆動力学計算法を適用した制御を実施し、ダイナミクスを補償した制御が複数の型のアームに対し柔軟に、かつ汎用的に行えることを実証することを目的とした。さらに、宇宙空間での使用を想定したフェールセーフ機能検証試験、形態を変化させるロボットアームの機能検証試験、軽量柔軟リンクアームの制振実験などを行い、汎用的な制御法としての確立を目指した。

## 3. 研究の方法

本申請課題では、構造可変型多肢ロボットアームの製作を行い、その制御法として並列的逆動力学計算法を適用した。そして、従来の制御法では実現が困難であった、構造変化後に即ダイナミクスを考慮したフィードフォワード制御を実施するという、宇宙用多肢ロボットアームの実現性を高める研究を平成 19～20 年度の 2 年間に渡って行った。

平成 19 年度にはまず、並列的逆動力学計算法を適用した制御ソフトの汎用化を図り、統一的な制御システムの開発を実施した。これと並行し、ユニットの着脱により様々な形態に変化する構造可変型ロボットアームを製作した。平成 20 年度は、引き続き構造可変型ロボットアームを使用したフィードフォワード制御実験を行い、並列的逆動力学計算法を適用したシステムの柔軟性を検証した。これに加え、柔軟部材をリンクとして用

いたアームユニットを製作し、センサを用いないモデルベース制振実験を行い、宇宙での利用を視野に入れた検証を行った。さらにこれと並行し、不意の故障に対処するための劣駆動リンク系の制御、システムを搭載するための移動ロボットの製作、ロボットの高速度動作の際の動揺を抑制するトルクキャンセリングシステムの提案を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) フレキシブルリンク系のフィードフォワード制御系の構築

宇宙空間でのロボットアームの使用を考えると、その剛性の考慮は必要不可欠である。そこで、有限要素法を用いた軌道計算アルゴリズムを並列的逆動力学計算法に導入し、リンク部材の剛性を考慮したフィードフォワード制御系を構築した。柔軟リンクの軌道とトルクが正確に算出可能となるため、例えば図 1(a)に示すような剛性の異なる 2 本の部材を有するリンク系において、先端部の制振を目指したフィードフォワード制御も可能となる。図 1(b)が制振を考慮して算出された目標軌道、図 1(c)がトルク曲線、図 1(d)が制御の際の回転角推移である。図から確認できるように、実際の制御トルクとほぼ一致したフィードフォワードトルクが算出されているだけでなく、追従性も著しく向上している。

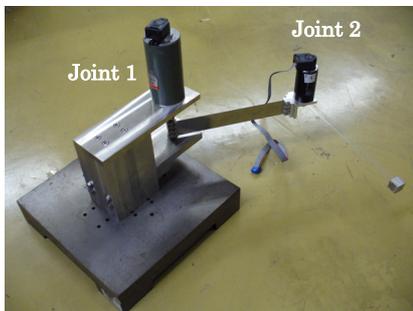


図 1(a) フレキシブルリンク系

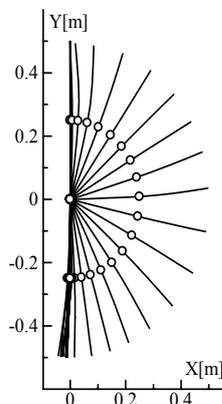


図 1(b) 制振を考慮した目標軌道

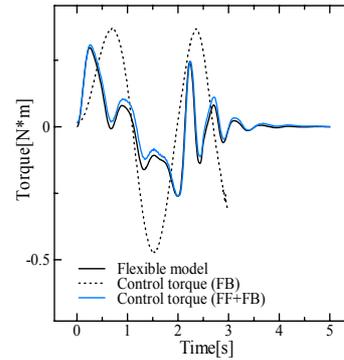


図 1(c) 制振を考慮したトルク曲線

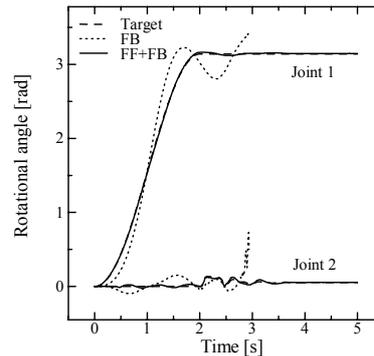


図 1(d) 回転角

##### (2) 劣駆動リンク系のフィードフォワード制御系の構築

宇宙空間でのロボットアームの使用を考えると、その軽量化は打ち上げコストを削減するためにも重要な課題である。また、アクチュエータの故障によるダイナミクスの変化にも柔軟に対処可能な制御系が必要となる。そこで、アクチュエータのフェールセーフ機能検証試験を実施する目的で、劣駆動リンク系の制御系を構築した。必要最小限のアクチュエータを用いたリンク系の制御を実現するため、有限要素法を用いた軌道作成アルゴリズムを並列的逆動力学計算法に導入し、フィードフォワードトルクを算出した。例えば図 2(a)に示すような劣駆動リンク系に対し、得られた目標軌道とトルク曲線を図 2(b), 図 2(c)に示す。部材の剛性を考慮したトルク曲線が得られ、解法の汎用性が確認された。今後は受動関節での摩擦を考慮したフィードフォワード制御を実現していく予定である。



図 2(a) 劣駆動リンク系

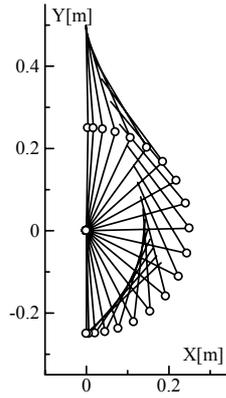


図 2(b) 劣駆動リンク系の目標軌道

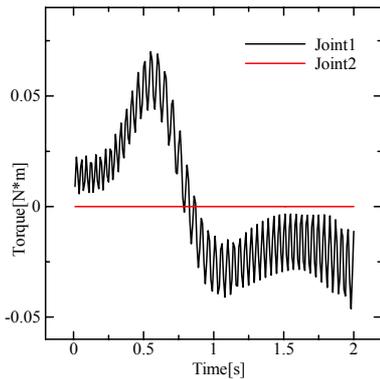


図 2(c) 劣駆動リンク系のトルク曲線

### (3) 構造可変型多肢ロボットアームの製作およびフィードフォワード制御実験

構成要素をリンクユニットとコネクタユニットにモジュール化し、構成の変化を容易にした構造可変型多肢ロボットアーム（図 3(a)参照）を製作した。

次に、並列的逆動力学計算法をフィードフォワード制御システムに導入し、上記ロボットアームを用いて制御システムの汎用性を検証する実験を行った。その結果、例えば図 3(b)に示すようなフレキシブルアームを有する枝分かれリンク系の動作において、高い追従性（図 3(c)参照）を得ることができた。また、その際のトルク曲線は図 3(d)に示す通りとなり、算出されたフィードフォワードトルクが制御トルクとほぼ一致していることが確認できた。これは、このような複雑なリンク系に対しても並列的逆動力学計算法の動力学補償能力が高いことを示している。



図 3(a) 構造可変型多肢ロボットアーム

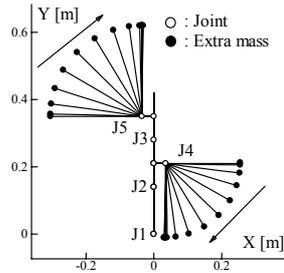


図 3(b) 枝分かれリンク系の目標軌道

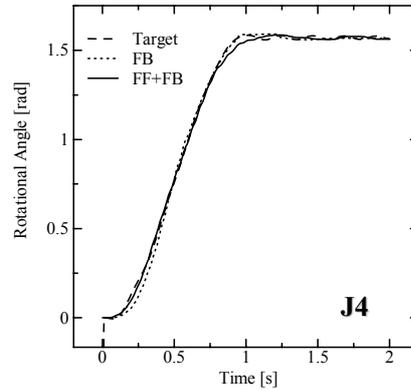


図 3(c) 回転角

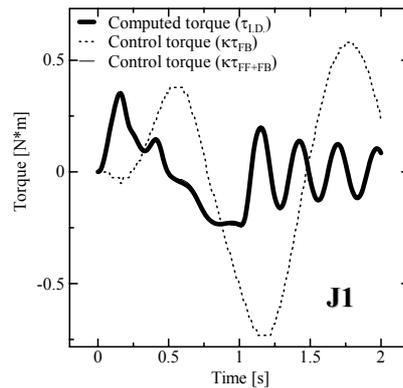


図 3(d) トルク曲線

### (4) 動力学補償実験用移動ロボットプラットフォームの製作

並列的逆動力学計算法を導入した動力学補償実験用移動ロボットとして、また、トルクキャンセリングシステムを搭載するプラットフォームとして、図 4(a)に示すような移動ロボットプラットフォームを製作した。アクチュエータ数の削減と電磁デバイス、ロー



図 4(a) 移動ロボットプラットフォーム

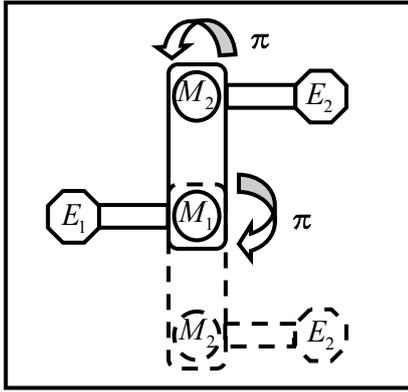


図 4(b) 移動ロボットプラットフォームの動作計画

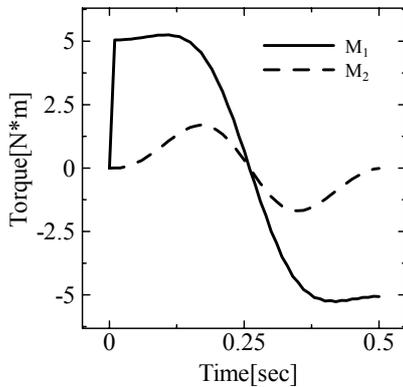


図 4(c) トルク曲線

ラーの装着による可動範囲の確保を図り、頑強さを備えつつも軽量化を実現した。図 4(b) の動作計画に基づいた高速動作を実現するが、それに必要なトルク曲線は図 4(c) に示す通り仕様範囲内である。

#### (5) トルクキャンセリングシステムの提案

ロボットが腕や脚、あるいは重量物を高速に振り回したりする場合に、機構全体に動揺が生じる場合が多い。高速動作をする際のような動揺を抑制するため、図 5(a) に示すトルクキャンセリングシステム (TCS) を提案した。これは、機構の任意の箇所を搭載した TCS にダイナミクスを考慮した反トルク

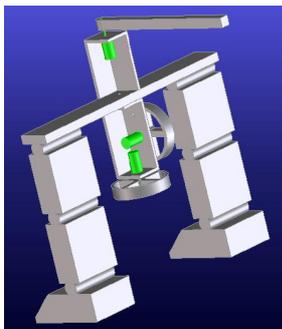


図 5(a) TCS を搭載した移動ロボットの概念図

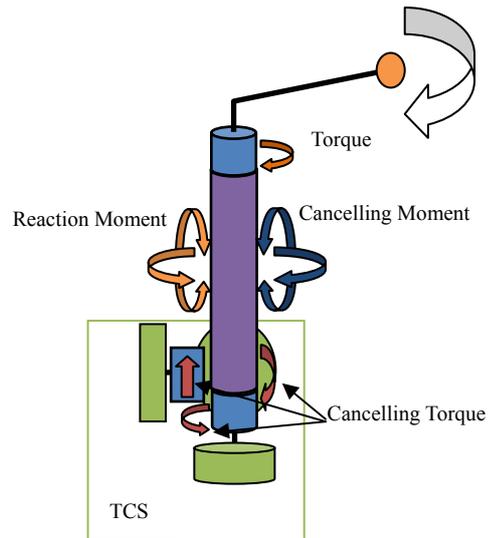


図 5(b) TCS の概要

を発生させる (図 5(b) 参照) ことにより、動揺を抑制するものである。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① D. Isobe and A. Kato: Feedforward Control of Flexible Link Systems using Parallel Solution Scheme, International Journal of Robotics and Automation, Vol.23, No.1, (2008), pp.31-39. 査読有.

② 磯部大吾郎, 加藤 昭博: フレキシブル・リンク系のモデルベースド・フィードフォワード制御, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.4, (2007), pp.625-631. 査読有.

[学会発表] (計 6 件)

① D. Isobe, K. Yamanaka and Y. Kitamura: Inverse Dynamics Calculation of Underactuated Link Systems Using Parallel Solution Scheme, Proceedings of the 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'08), 2008.11.13, pp.1632-1637, Orlando, Florida, USA.

② 上田浩正, 磯部大吾郎: 構造可変型多肢マニピュレータのフィードフォワード制御, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会論文集 CD-ROM, 2008.9.10, 神戸.

③ 北村 悠人, 磯部大吾郎: 弾性たわみを考慮した劣駆動リンク系の逆動力学計算, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会論文集 CD-ROM, 2008.9.10, 神戸.

④北村 悠人, 山中 浩司, 磯部大吾郎: 並列的解法による劣駆動リンク系の逆動力学計算, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'08 講演論文集 CD-ROM, No.08-4, 2008.6.6, 長野.

⑤D. Isobe and K. Yamanaka: Development of a Unified Feed-Forward Control System for Robotic Mechanisms using Finite Element Approach, CD-ROM Proceedings of APCOM'07-EPMESEC XI, 2007.12.3, Kyoto, Japan.

⑥山中 浩司, 上田 浩正, 磯部大吾郎: 並列的解法を用いたロボット機構のフィードフォワード制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'07 講演論文集 CD-ROM, No.07-2, 2007.5.11, 秋田.

[図書] (計1件)

①D. Isobe: Unified Solution Scheme for Inverse Dynamics of Robotic Systems, Progress in Autonomous Robot Research (Editor: F.N. Mortensen), Nova Science Publishers, ISBN: 978-1-60456-281-1, pp.125-173, 2008.

[その他]

①研究成果に関するwebページ:  
<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~isobe/link.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

磯部 大吾郎 (ISOBE DAIGORO)

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授

研究者番号: 00262121

### (2) 研究分担者 (2007年度のみ分担)

京藤 康正 (KYODO YASUMASA)

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授

研究者番号: 80282341