

# 軽量高速ヒューマノイドアームの振動抑制制御

人間らしい動きを実現するためのヒューマノイドを想定し、素早い動きと安全性を両立するための設計と制御について研究を行った。本研究により、軽量なロボットアームで新体操のリボン回しのような高速動作を行わせることができた。なお、本研究は東北大学大学院 工学研究科 内山・近野研究室（近野 敦助教授）との共同研究により実施した。

しょうじ みちひこ おおや ともゆき  
庄司 道彦 大矢 智之

## 1. まえがき

現在、自律型ヒューマノイドの研究がさかんに行われており、ワイヤレス通信機能を持ったロボットが家庭に普及する未来はそれほど遠くないと思われる。そこで、さらに一歩進んでこれらのロボットを、コミュニケーションを豊かにするツールとして利用する研究に取り組んでいる。

また、ロボットを一種のリアルメディアプレイヤーにする考え方もある[1]。これは、遠隔地のロボットを自分の分身として使い、身振りや感情表現を伝えるコミュニケーションを分身通信[2]で行うものである。このようなロボットは、双方向通信だけでなく、実体のあるコンテンツ再生装置としての利用も可能である。具体的には、頭部装着ディスプレイ（HMD：Head Mounted Display）を装着した体験者に、複合現実感の技術を用いてロボットに人物CGをオーバーレイ表示して見せることで、手で触れられる映像を実現する。

写真1に、時間とともに体験者に見える映像を示す。この場合のロボットは、体験者が手を伸ばして触れるためだけに存在し、映像に合わせてポーズを変える。

映像コンテンツとしては、動きの少ない会話中心のコンテンツから、音楽演奏やスポーツなどのロボットに高度な運動能力を必要とするものまで、ロボットの発展に応じてさまざまなバリエーションが考えられる。

上記のアプリケーションを実現するための技術課題は、ロボットの高い運動性能と安全性の両立である。そこで、軽量化によって安全性を確保しつつ運動性能の向上を図

り、構造材の剛性低下に伴う運動中の振動を抑制する制御系の開発を行う必要がある。

本稿では、軽量ロボットアームの振動抑制制御についての研究成果について述べる。

## 2. ロボットアームの制御方法と動作実験

### 2.1 ロボットアーム

宇宙用のロボットアームは長尺で、自重と比較してはるかに質量の大きい衛星などの運搬に使われるため、構造部材のたわみを考慮して制御する必要がある。写真2は、宇宙用ロボットアームの研究用に作られたもので、意図的に

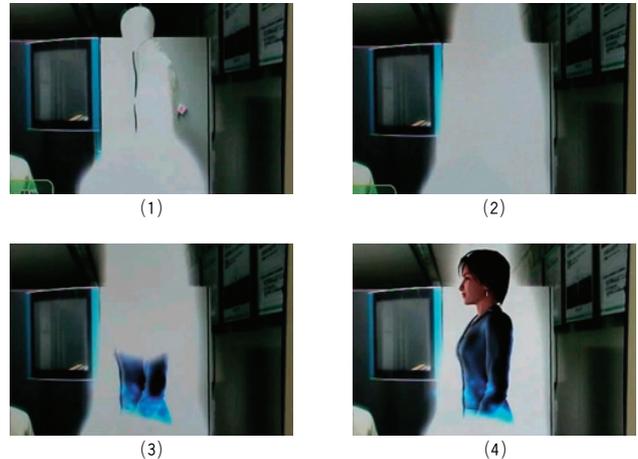


写真1 時間とともに体験者に見える映像

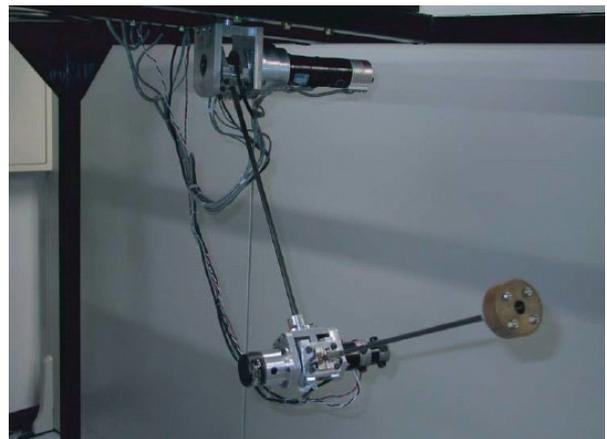


写真2 宇宙用ロボットアームの例

たわみやすい棒材を構造部材として使用している。この棒材にひずみゲージと呼ばれるたわみ量の計測センサを貼り、検出した棒材のたわみ量をフィードバック制御の変数として使用している。通常は剛体としてモデル化されるヒューマノイドロボット用のアームも高速で動かせば部材のたわみで振動が起るので、宇宙用のロボットと同様にフレキシブルアームとしてモデル化して制御する必要がある。

写真3に、本研究で使用したロボットアームを示す。円内の拡大図で細いワイヤ状に見えるのは、ひずみゲージの配線である。

## 2.2 人間の腕との比較

本研究に用いたロボットアームは、ロボットをリアルメディアプレイヤーとして使用するためのものであるため、人間の動作を正確に再現する必要がある。人間の腕は肩、肘、手首の3関節と、上腕、前腕の2腕よりなっている。これを模擬するうえで、困難となるのが関節部分である。人間の関節は柔軟性を増大させると、関節表面同士の接触域が狭くなり、脱臼の危険性もともに増大する。そのため、柔軟な関節は、骨同士をつなぐ腱や筋肉などで構成され、非常に複雑な機構をしている。

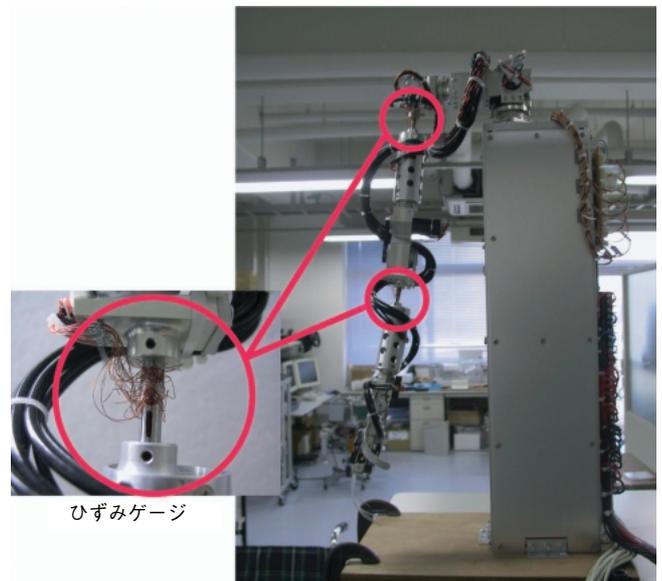
これが顕著に現れているのが肩の構造である。人間の肩甲骨は、体幹から分離されており回転中心自体が上下、前後方向に移動できるという自由度を持つ。

今回目標とするのは、人間の動作の再現と、安全性を両立させることである。そのためには、人間の複雑な腕の機構をできるだけ再現すると同時に軽量化する必要がある。そこで、通常のヒューマノイドロボットより独立駆動できる関節の数（自由度と呼ぶ）を多く備える設計とした。具体的には、図1に示すように、鎖骨の付け根に2自由度、肩3自由度、肘1自由度、手首3自由度、手に1自由度の合計10自由度を備えている。また、部材はできるだけ肉抜きを行って小型のモータで駆動できるようにした。

## 2.3 制御のためのモデリング

ロボットアームは通常、リンク（棒）を回転関節で接合して構成される。これを力学解析する場合、リンクはその中心に質量が集中した剛体（曲がらない物体）としてモデル化される。しかし、このようなモデルではリンクの柔軟性が無視され、高速運動に伴うリンクの振動の解析ができない。したがって、構造物にばね要素を含んだモデルで運動方程式を構築し、振動を解析することにする。

実用的な精度を保ちつつ簡素なモデリングを行う方法と



ひずみゲージ

写真3 研究に使用したロボットアーム

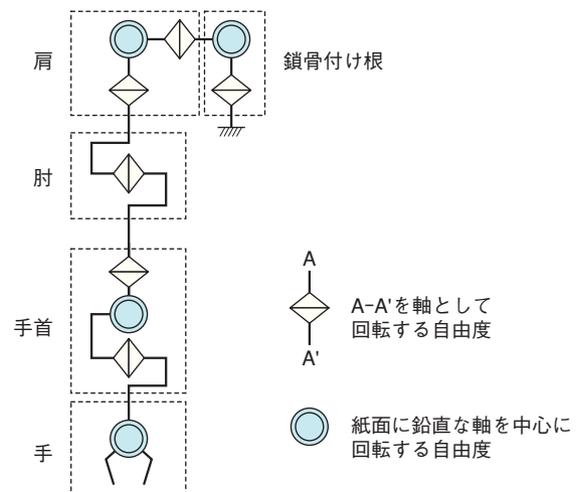


図1 ロボットアームの関節自由度構成

して、以前より提案されているのが集中ばね質量モデリングと呼ばれる手法である[3][4]。このモデリング手法では、アームを複数の区間に分割している。分割された各区間の質量は二分され、各区間の両端に集中して存在していると考え、そして、各集中質量（ステーション）の間は無質量のばね（フィールド）であると見なす。図2に概念図を示す。

## 2.4 制御手法

フレキシブルアームの制御の難しさは、本来のタスクである運動を実現する制御を行いながら、同時に運動中に発生した振動を抑制する制御も行わなければならない点にある。つまり、運動自体の可制御性と振動抑制の可制御性という、2つの問題を考慮する必要がある。

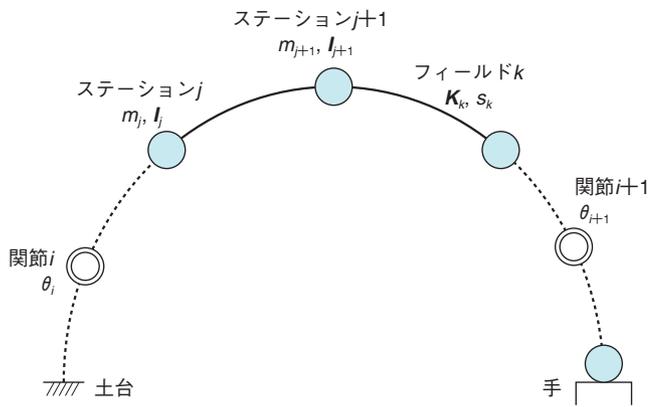


図2 フレキシブルアームの概念図[3]

また、3次元空間内で作業を行うフレキシブルアームには、剛性をはじめとする機械的な特性が、姿勢に依存して大きく変化するという特徴がある。特に、弾性振動の制御もアームの姿勢に依存しているため、構造的な弾性振動を抑制する制御則を開発する場合には、この姿勢依存性を考慮する必要がある。

そこで、Tosunogluの提案した可接性という概念を、各次の弾性振動モードに対して適用するモード可接性という概念が提案された[5]~[8]。この概念を導入することで、ロボットアームに組み込まれた各モータを、低次の振動モードに影響が大きいもの、高次の振動モードに影響が大きいもののように、各次の弾性振動モードに与える影響度合いの観点から定量的に評価することが可能となる。これにより、弾性振動の不可制御姿勢と不可接姿勢の関係が明らかとなり、システムの機械的な振動が不可制御となる姿勢について、物理的に理解できるようになった。

## 2.5 モーションキャプチャ

ロボットに行わせる動作の見本として、オリンピック出場経験のある新体操選手のリボン回し動作を計測した。この計測実験はマルチメディア研究所で行われ、カメラを10台使用して全身運動と同時に指の細かい動きを計測する難易度の高いものとなった。

## 2.6 実験

以上の解析・制御手法を踏まえ、2.1節で紹介したロボットアームで動作制御実験を行った。

運動中に急停止させる実験によって、振動抑制制御則が機能していることを確認したほか、動作速度が速いことを活かして、人間のモーションキャプチャデータを基に製作した新体操のリボン回しの動作を行わせることができた(写真4)。

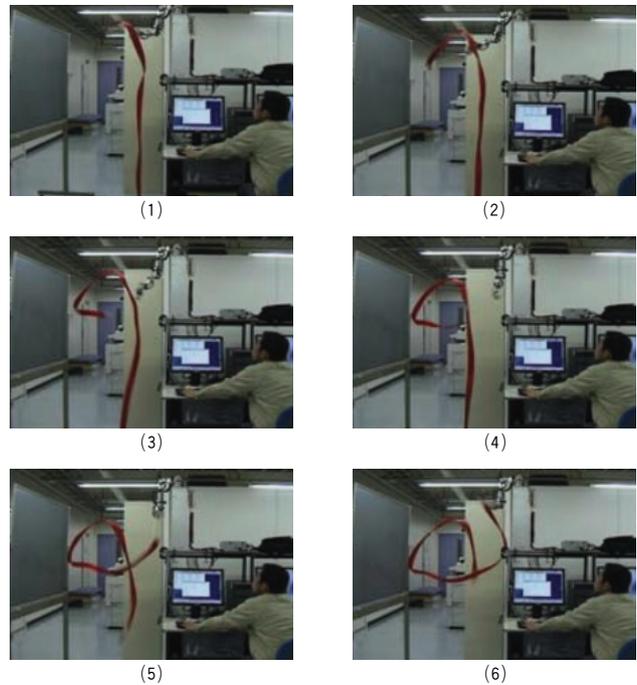


写真4 リボン回し動作の実現

## 3. あとがき

極限まで軽量化が図られる宇宙ロボットの設計思想とアームの柔軟性を考慮した制御手法を進展させ、軽量で動作が俊敏なヒューマノイドロボット用のアームを実現した。このアームは10自由度を備えているために、従来のロボットアームに比べ、より人間らしい滑らかな動作が可能であり、その俊敏に動作するという特長を活かし、動作コンテンツを再生して楽しむヒューマノイドロボットに応用することができる。今後、さらに高速で安定性の高い動作を目指す予定である。

### 文献

- [1] 庄司 道彦, 三浦 郁奈子, 大矢 智之: “リアルメディアプレイヤーとしてのヒューマノイドロボット: 全体コンセプト,” 第23回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, 2005.
- [2] 平岩, ほか: “新概念通信特集(3) 分身インタフェース技術—実体のあるロボット通信端末でコミュニケーションをリッチに—,” 本誌, Vol. 11, No. 1, pp. 24-34, Apr. 2003.
- [3] 近野 敦, 内山 勝: “ホルツァ法に基づくフレキシブルマニピュレータの動力学モデリング,” 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 7, pp. 1021-1028, 1994.
- [4] A. Konno and M. Uchiyama: “Modeling of Flexible Manipulator Dynamics Based upon Holzer’s Model,” Proc. 1996 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 223-229, 1996.
- [5] S. Tosunoglu, S. H. Lin and D. Tesar: “Complete Accessibility of Oscillations in Robot Systems by Orthogonal Projections,” Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, pp. 194-202, 1990.

- [6] S. Tosunoglu, S. H. Lin and D. Tesar: "Accessibility and Controllability of Flexible Robotic Manipulators," Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 114, pp. 50-58, 1992.
- [7] 近野 敦, 内山 勝, 貴答 豊, 村上 真人: "フレキシブルマニピュレータの姿勢依存振動可制御性," 計測自動制御学会論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 78-86, 1996.
- [8] A. Konno, M. Uchiyama, Y. Kito and M. Murakami: "Configuration-Dependent Vibration Controllability of Flexible-Link Manipulators," Int. J. of Robotics Research, Vol. 16, No. 4, pp. 567-576, 1997.

### 用語一覧

HMD : Head Mounted Display (頭部装着ディスプレイ)