

# 筋内カフィードフォワードとむだ時間を含むフィードバックの相補的組み合わせによる筋骨格アームの位置制御

松谷, 祐希

<https://doi.org/10.15017/1500726>

---

出版情報：九州大学, 2014, 博士（工学）, 課程博士  
バージョン：  
権利関係：全文ファイル公表済

氏 名 : 松谷 祐希

論 文 名 : 筋内力フィードフォワードとむだ時間を含むフィードバックの  
相補的組み合わせによる筋骨格アームの位置制御

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

人間の運動制御能力は、現存するロボットシステムと比較して、変動する外界への適応性や、外乱に対するロバスト性の面で優れている。一方で、視覚や触覚といった外界センシングに関しては、鍛錬されたアスリートでさえ、外界センシング情報に 150ms から 300ms のむだ時間が含まれていることが知られている。ロボットシステムの位置制御において、これら無視することができない大きなむだ時間を含む外界センシング情報を、直接的に感覚フィードバックとして用いた場合、その位置制御収束性に著しい影響を与えることが知られており、特に迅速な運動制御の場合、大きなむだ時間を有する感覚フィードバックのみでの位置制御は困難であると言われている。人間においては、外界センシング情報を直接用いた感覚フィードバック制御のみではなく、筋紡錘などの内界センシング情報と、学習などによる過去の情報を組み合わせたフィードフォワード制御を組み合わせることで運動制御を行っていると考えられている。

このような人間の運動知能の解明と、そのロボットシステムへの応用に関する研究がこれまで、様々な角度からのアプローチにより数多くなされてきた。特に学習などによるフィードフォワード制御に関する研究は、脳科学や運動生理学、ロボティクスの分野で積極的に行われている。しかし、外界センシング情報に含まれるむだ時間を考慮したフィードバックとの組み合わせに関する研究はほとんど行われておらず、それらのロボティクスへの応用についての報告も少ない。

一方、人間の身体構造の特徴である筋骨格構造を利用した制御手法もこれまでいくつか提案されている。特に、目標筋内力をフィードフォワード入力として与える手先位置制御手法が提案されている。この手法はセンシング情報を一切利用しないという点で優れている。しかし、目標位置への収束性や応答性は与えた筋内力によって作られるポテンシャル場の形状に左右され、その形状は筋内力、筋配置に強く依存する。筋配置は一旦決定すると変更が難しく、動作範囲内全ての目標位置で高い制御性能を得るためには、筋内力（制御入力）を過大に設定せざるを得ない。

本論文の目的は、筋骨格システム特有の構造を利用した、むだ時間を含むフィードバックと筋内力フィードフォワードの組み合わせによる、簡便でロバストな手先位置制御手法の確立と、筋内力フィードフォワード制御手法の性能向上を目的とした、筋モデルの導入および筋内力の決定手法の確立である。

まず、第 1 章で研究の背景と目的、本論文の構成について述べている。次に第 2 章で筋骨格構造

を模倣した 2 リンク 6 筋の平面筋骨格アームモデルの概要と運動学を示している。その後、第 3 章において、筋内力フィードフォワード制御手法の概要を述べ、最も基本的な構造である 1 リンク 2 筋の筋骨格システムを実際に製作し、実験的に有効性を検証している。そして 2 リンク 6 筋アームシステムを対象とした数値シミュレーションを行い、筋配置と収束性の関係について示している。本論文では、この筋内力フィードフォワード位置制御法をベースに考え、本章以降において、筋内力フィードフォワードとむだ時間を含むフィードバックの組み合わせた位置制御法の提案、拡張を行い、続いて筋内力フィードフォワード制御法の性能を向上させるため、筋骨格システムに筋モデルを導入し、不良設定問題である筋内力決定法を提案している。

第 4 章では、一般的なビデオフレームレート (33ms) を持つカメラなど、比較的遅いサンプリングレートを持つ視覚センシングシステムを用いた視覚サーボ系を考えている。視覚サーボ系では、低サンプリングレートや画像処理に必要な計算時間などにより、センサ情報にむだ時間が含まれる。このとき、センサ情報に含まれるむだ時間が大きいフィードバック系では、フィードバックゲインを高く設定すると不安定になりやすいことが知られている。一方、筋内力フィードフォワード位置制御手法では、前述の通り高い制御性能を得るためには大きな筋内力が必要である。そこで、むだ時間を含むフィードバック制御と筋内力フィードフォワード制御を組み合わせた複合制御法を提案する。提案手法は筋内力フィードフォワード制御のみの場合と比較して、より小さな筋力で同等の運動特性が得られ、また、センサ情報に大きなむだ時間を含んでいても不安定になり難く、ロバストな位置制御が実現可能であることを示している。

第 5 章では、第 4 章において提案した制御手法の制御性能向上を目的とした拡張を行っている。提案手法では、フィードバック入力とフィードフォワード入力を単純に線形結合していたが、拡張した制御手法では、各入力の比率を手先位置に応じて変化させることにより、単純に線形結合した制御手法よりも、滑らかな手先軌道を少ない制御入力で実現可能となることを示している。さらに、制御中の筋骨格アームの手先に運動を阻害する外力が生じた場合において、外力に従った柔軟動作と外力が除かれた後の迅速な復帰動作が実現可能であることを示している。

第 6 章では、筋内力フィードフォワード位置制御手法を用いた場合における、制御性能の向上を目的とした筋モデルの導入と、筋内力の決定法を提案している。筋内力フィードフォワード位置制御法は筋骨格アームの構造により、制御入力を一意に決定することができない不良設定問題を有している。筋内力フィードフォワード位置制御法では、筋内力が筋骨格システムの制御性能に影響を与えるため、筋内力をどのように決定するかが重要となる。そこで、システムの動特性を考慮して筋内力を決定するため、強化学習を利用して手先位置誤差の積分と筋内力のユークリッドノルムを評価する方法を提案している。最後に、第 7 章で本論文の結論について述べている。