

機関番号：37112

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560249

研究課題名（和文）運動生理仮説に基づく筋内力制御とロボティクスへの応用

研究課題名（英文）Control of muscular internal force based on physiological hypotheses and its application to robotics

研究代表者

木野 仁（KINO HITOSHI）

福岡工業大学・工学部・准教授

研究者番号：50293816

研究成果の概要（和文）：本研究では筋骨格システムに対し、筋肉の釣合情報のフィードフォワード位置制御について調査した。2008年度では、2リンクシステムのシミュレーションを用いて解析を行った。位置収束性は筋配置と筋内力が大きな影響を与えたため、2009年度ではGAによる筋配置法や非線形計画法による内力決定法の提案を行った。2010年度では内力ノルムを最小にする解析的決定法を提案した。更に実際にハードウェアを作成し、提案手法の有用性を実機により確かめた。

研究成果の概要（英文）：This research investigated feedforward positioning control using the balancing internal force for a musculoskeletal system. In 2008, we analyzed a two-link system through simulations. Because the motion convergence strongly depends on the muscular arrangement and the values of internal force, in 2009, we proposed a decision method for the muscular arrangement using GA, and also a decision method for the internal force using nonlinear programming. In 2010, we proposed an analytical method to detect the muscular internal force of which norm is minimized. Finally, the usefulness of this positioning method was demonstrated through experiments using mechanical prototypes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：機械力学・制御、制御工学、生物・生体工学、知能ロボティクス、生理学

## 1. 研究開始当初の背景

人間動作の器用さに着目すると、システムとして2つの特徴が考えられる。1つは構造的な特性。もう一つは脳からの信号処理の特徴である。前者に注目すると、人間の身体では骨格・関節の外側を筋肉が覆い、筋肉を伸縮させることで関節を駆動させる筋骨格モデルを有している。筋骨格モデルにおいて、極めて重要な役割を果たすのが筋肉間の内力である。人間は筋肉の内力を変化させ、関節角度だけでなく、柔らかさや硬さといったインピーダンスをコントロールすることができ、様々な環境に柔軟に適応できる運動が可能となっている。

運動生理学では、人間の運動生成原理についての様々な仮説が提案されている。Fel'dman等は、人間の筋肉特性をバネとみなし、バネの自然長を変化させることで、拮抗した筋肉が発揮する力の平衡点を移動し、それによって目標とする位置へ四肢を制御する“EP(Equilibrium Point)仮説”を提案した。その後、Hogan等によって“仮想軌道仮説”としてフィードフォワード制御への拡張が行われている。

一方、申請者らは先行研究において、ワイヤ駆動を使用したパラレルロボットにおける釣合内力が、システムにポテンシャル場を形成しており、目標位置での釣合内力をフィードフォワード入力として与えることで、センサレス位置決めが可能であることを示している。筋骨格モデルでは、筋張力によって生体部位を駆動させている。これは、筋肉とワイヤが張力しか発生できないことに注目すれば、筋骨格モデルとワイヤ駆動ロボットは2つとも、機械的には単一方向駆動システムに属すると考えられる。EP仮説では、目標点において筋内力が釣り合うという原理に基づいており、申請者らが提案しているワイヤ駆動ロボットにおけるセンサレス・フィードフォワード位置制御法と原理的に等価であり、非常に興味深い。

人間の熟練動作では、運動の多くはフィードフォワードにより行われていると言われている。従って、このよう運動生理仮説に基づく筋内力制御を解析することは、ロボットマニピュレータのより人間らしい運動制御に役立つ。例えば、ワイヤ駆動ロボットのワイヤに仮想的に筋ダイナミクスを与えるなど、より人間らしいマニピュレーションの可能性が唆される。このような運動生理学の知見によって得られた知識を、実際の機械システムに積極的に取り入れることにより、人間のような柔軟で器用な動作可能な機械システムの実現を目指す。

## 2. 研究の目的

先述したように、申請者らはワイヤ駆動パラレルロボットにおいて、釣合内力をフィードフォワード入力することで、センサレス位置決め制御が可能であることを示した。そこで、本研究ではこの論議を筋骨格モデルに拡張する。本研究ではロボット工学の観点からそれらの収束性について解析し、複雑な実時間計算を行うことなく、滑らかな動作が実現できることを明らかにする。結果として、運動生理学とロボット工学との間にある学問的な溝を埋めることにより、人間の運動生理の解明に近づくことができる。

人間の身体運動のリーチングメカニズムは、運動生理学などの分野からいくつかの仮説が提案されている。例えば、川人らは関節トルク情報を逆ダイナミクスを通じて取得する仮説を提案している。しかしながら、「単純な運動の際にも、人間が複雑な逆ダイナミクス計算を実時間でやっているか」という問題に対しては、疑問がある。これに対して有本らは、関節の粘弾性を適切に設定することで、単純なPDコントローラのみでリーチングが可能であることを示している。本手法はEP仮説を拡張した制御法であり、目標位置での釣合情報のみでフィードフォワードのリーチングが可能となる。従って、有本らの方法よりもさらにシンプルな手法と言える。

本研究では、人腕を研究対象とし、主にシミュレーションを通じて、筋骨格モデルにおいてセンサレス・フィードフォワード位置制御が可能となる条件について調査する。

更に、これらから得られた結果を、ワイヤ駆動ロボットに応用し、実際の機械システムが提案手法で位置決め制御可能であることを示す。

## 3. 研究の方法

本研究では、人間の腕を模したシステムとして図1に示すような、2リンクシステムを主な対象システムとした。このモデルでは、2つの関節、4つの単関節筋、2つの二関節筋から構成される。このモデルに、提案するフィードフォワード制御を与え、筋配置の変更が手先の収束にどのような影響を与えるかを調査した。

本研究では、目標位置での釣合い内力と各筋肉の変位からポテンシャルエネルギーを数値的に計算した。準静的な観点から、筋入力に対し、目標位置でのポテンシャルが最小になれば、システムが準静的に目標位置に収束することになる。はじめに、筋肉を剛体ケーブルで近似したシンプルなモデルを用い、その後より現実に即したモデルとして、粘弾

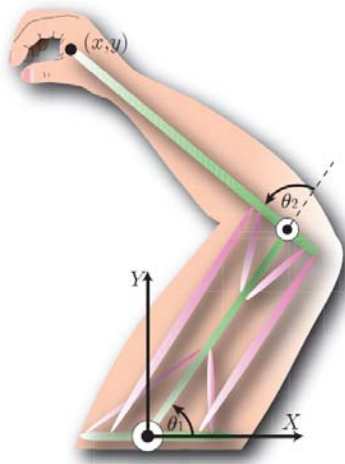


図1 6筋2リンクモデル性を有するモデルに拡張する。

また、筋骨格モデルの収束性では、筋配置のみならず、入力する筋内力にも依存する。しかしながら、筋内力は冗長性を有しており、目標姿勢に対して一意に決定できない。そこで、最適な目標内力を得るための手法として、解析的と数値的の両面からアプローチを行なう。

最後に、本手法を機械システムとして実装すべく、1リンクシステム、2リンクシステムを試作し、提案する位置決め手法が実際の機械システムに対して有効なことを実験により確かめる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 2リンクシステムのシミュレーション

はじめに、2リンクモデルの研究成果として、筋肉を剛体ワイヤで近似したシステムについて、提案する手法のポテンシャルを調査した。その際、筋配置を変化させて、ポテンシャルの変化を調べた。

ここでは例として、単関節筋と二関節筋の双方の接点に微小なオフセットを付加した場合とそうでない場合について紹介する。数値解析より、オフセットが存在する筋配置では、目標位置に収束するが、オフセットのないものでは、目標位置に収束しないことが分

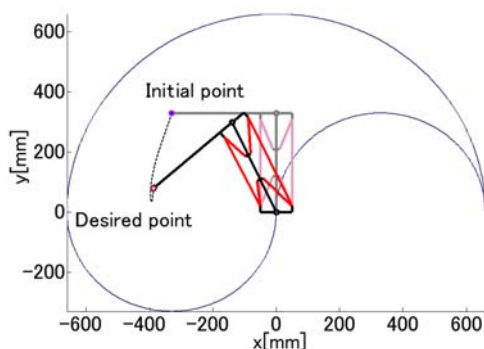


図2 2リンクシステムのフィードフォワード位置決め

かった。

また、目標位置に収束する運動のシミュレーション結果として、図2に運動を示す。センサ情報なしに目標位置に収束していることが分かる。

##### (2) 筋の粘弾性を考慮したモデル

更に、筋の粘弾性を考慮したシステムについて、同様の位置制御シミュレーションを行なった。詳細については省略するが、筋の内力を増加することで、粘性効果が増加し効果的に振動抑制が可能であることを確かめた。

##### (3) 内力の決定方法

内力の決定法としては、解析なアプローチとして、内力ベクトルのノルムを最小にする選定方法提案した。また、数値的アプローチとして、手先発生力を評価関数とし、発生力を最大とするものを非線形計画法より求める方法を提案し、それぞれの方法の有用性を検証した。

##### (4) 実験的検証

本研究では、シミュレーションによる数値計算だけでなく、実際にワイヤ駆動方式を用いた1リンクシステム、2リンクシステムの試作を行なった。アクチュエータとして、DCサーボモータを用いることで、機械的に筋骨格システムを再現した。

機械的な摩擦の影響で、位置決め精度は落ちるものの、実際の機械システムでも提案する位置決め手法が可能であることを確認した。

#### 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4件)

① H. Kino, D. Nakiri, Numerical Solution Framework of Kinematics for a Tendon-driven Manipulator equipped with Cylindrical elastic Elements, Advanced Robotics, Vol. 24, No. 11, pp. 1639 - 1660, 2010, 査読有

② K. Tahara, H. Kino, Reaching Movements of a Redundant Musculoskeletal Arm: Acquisition of an Adequate Internal Force by Iterative Learning and Its Evaluation through a Dynamic Damping Ellipsoid Reaching Movements of a Redundant Musculo-Skeletal Arm, Advanced Robotics, Vol. 24 No. 5-6, pp. 783 - 818, 2010, 査読有

③ H. Kino, T. Yahiro, S. Taniguchi, K. Tahara, Sensorless Position Control

Using Feedforward Internal Force for Completely Restrained Parallel-wire Driven Systems, IEEE Trans on Robotics, Vol. 25, No.2, pp.467 - 474, 2009, 査読有

- ④名切大, 中村豪, 木野仁, ベルト状プーリの近似モデルを用いた1リンク腱駆動ロボットの順運動学, 日本機械学会論文集(C編), 第74巻, 第743号, pp.1834-1840, 2008, 査読有

[学会発表] (計15件)

- ①H. Kino, Decision Method of Internal Force for Sensorless Positioning of Musculoskeletal System, 1st Int. Workshop on Robot Interaction, Control, Communication and Cooperation, Fukuoka Institute of Technology · Fukuoka, Japan, Nov.4-6, 2010.
- ②K. Tahara, Iterative Learning Scheme for a Redundant Musculoskeletal Arm: Task Space Learning with Joint and Muscle Redundancies, 1st Int. Workshop on Robot Interaction, Control, Communication and Cooperation, Fukuoka Institute of Technology · Fukuoka, Japan, Nov.4-6, 2010.
- ③K. Tahara, Iterative learning control for a redundant musculoskeletal arm: Acquisition of adequate internal force, Int. Conf. Intell. Robots, System, Taipei, Taiwan, Oct.18, 2010.
- ④松谷祐希, 筋の粘性を考慮した筋骨格システムにおけるフィードフォワード位置制御, 第28回日本ロボット学会学術講演会, 2010年9月22~24日, 名古屋工業大学 · 名古屋.
- ⑤木野仁, 筋骨格システムの内力フィードフォワード位置制御における内力と筋配置の決定法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2010年6月13~16日, 旭川大雪アリーナ · 北海道.
- ⑥菊池史朗, 筋骨格システムのフィードフォワード位置制御におけるGAを用いた内力決定法, 第27回日本ロボット学会学術講演会, 2009年9月18日, 横浜国立大学 · 横浜
- ⑦田原健二, 筋骨格システムにおける繰返し学習を用いた筋内力の獲得と動的な手先粘性楕円体による評価, 第27回日本ロボッ

ト学会学術講演会, 2009年9月18日, 横浜国立大学 · 横浜

- ⑧H. Kino, Torque Estimation System for Human Leg in Passive Motion Using Parallel-Wire Driven Mechanism and Iterative Learning Control, Int. Conf. on Rehabilitation Robotics, Kyoto International Conference Center · Kyoto, Japan, June 25, 2009.
- ⑨H. Kino, Basic Study of Biarticular Muscle's Effect on Muscular Internal Force Control Based on Physiological Hypotheses, Int. Conf. on Robotics and Automation, International Conference Center · Kobe, Japan, May 12-17, 2009
- ⑩D. Nakiri, Application of Cylindrical Elastic Elements for Stiffness Control of Tendon-Driven Manipulator and Inverse Kinematics Evaluation, Int. Conf. on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems, Fukuoka, Japan, Mar, 2009.
- ⑪田原健二, 筋骨格冗長アームの手先到達運動における手先粘性楕円体を用いた筋内力の評価, 第26回日本ロボット学会学術講演会, 2008年9月9日, 神戸大学 · 神戸
- ⑫木野仁, 運動生理仮説に基づく筋内力制御における二関節筋の影響 第一報: ポテンシャル場を用いた基礎的研究, 第26回日本ロボット学会学術講演会, 2008年9月9日, 神戸大学 · 神戸
- ⑬D. Nakiri, Approximative Approach of Forward-kinematics for One-link Manipulator using Belt-formed Pulleys, Int. Conf. on Mechatronics and Automation, FA1-2, Mastuyama, Japan, Aug, 2008.
- ⑭木野仁, パラレルワイヤ駆動メカニズムと繰返し学習制御を用いた脚トルク推定システムの開発, 第20回ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2008年6月, 長野
- ⑮名切大, 腱駆動ロボットの関節剛性調整に用いるベルト状プーリの形状解析 第4報: 近似モデルを用いた関節剛性の算出, 第20回ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2008年6月, 長野.

[その他]

ホームページ等

<http://www.fit.ac.jp/~kino/>

<http://www.ssp.isee.kyushu-u.ac.jp/~tahara/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

木野 仁 (KINO HITOSHI)

福岡工業大学・工学部・准教授

研究者番号：50293816

### (2) 研究分担者

田原 健二 (TAHARA KENJI)

九州大学大学院・システム情報科学研究  
院・特任准教授

研究者番号：80392033