

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330303

研究課題名(和文) 内骨格生物における筋肉配置の潜在的意義の解明とロボットの動作生成への応用

研究課題名(英文) Clarification of potential significance of endoskeleton's muscular arrangement and its appreciation for motion-generation of Robotics

研究代表者

木野 仁 (Hitoshi, Kino)

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：50293816

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：人間に代表される脊椎動物の構造的特徴として、内骨格構造がある。この構造では筋肉を動かすことで関節を駆動しており、筋肉間の内力を調整することで、関節の硬さなどを調節することが可能となる。

申請者はこれまで内骨格構造に対し、目標姿勢で釣り合う筋内力をステップ上に入力することで、センサや複雑な実時間計算が不要な位置制御が可能であることを示してきた。しかしながら、その収束性は筋肉の配置に依存しており、位置制御可能な数学的条件などが明らかにされていなかった。

そこで、本申請では一般的な内骨格構造に対し、筋内力制御の収束条件を数学的に明らかに、シミュレーションなどで検証した。

研究成果の概要(英文)：The one of the characteristic of a vertebrate animal, like a human, is the endoskeletal structure. This structure enables motion generation by moving muscles; adjusting internal force among the muscles, joint stiffness can be changed. In the previous research, it pointed out that motion control can be achieved without any sensory feedback and complicated real-time calculation, when muscular internal force balancing at a desired posture is given to the endoskeletal structure as step input.

However, the motion convergence strongly depends on the muscular arrangement; the mathematical condition to converge at a desired posture was not clarified.

This study has clarified the condition of the motion convergence, and assesses the conditions by simulation.

研究分野：ロボット工学

キーワード：筋内力制御 筋配置 収束条件 位置制御

## 1. 研究開始当初の背景

ロボットの人間らしい運動の実現には、脊椎動物の運動生成の解析が重要な意味を持つ。脊椎動物の運動原理については、“Equilibrium Point (EP) 仮説”(Feldmanら)や“仮軌道仮説”など、学習効果によるフィードフォワード動作の仮説が提案されている。また、動作学習について“フィードバック誤差学習”(川人ら)などが提案されている。しかし、脊椎動物が有する内骨格構造の特徴には、ほとんど着目していない。

一方、人間の原始反射では、新生児に特定の刺激を与えると、複雑な反射運動を誘発する(図1)。脳や神経系が未成熟な生まれたての新生児が、高度な学習や感覚フィードバックを行っているとは考えにくく、上述した運動生成仮説では説明が困難である。

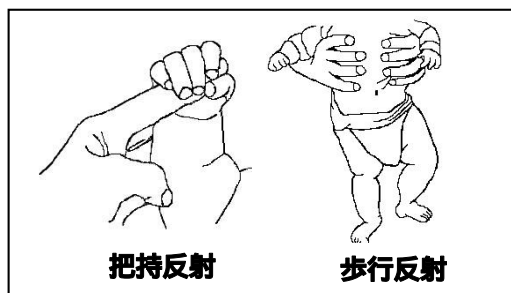


図1 原始反射の例

我々は、脊椎動物の運動原理が筋肉の配置などの特徴に強く関係していると考え、過去の研究において、図2の内骨格モデルに注目した。このモデルでは筋肉形状を直線の剛体ケーブルとして近似した。関節のモーメントアームが変化するため、筋肉の弾性を考慮しなくとも、筋肉の釣合い力が独自のポテンシャルを形成する。従って、筋肉に目標姿勢での釣合い内力をフィードフォワード入力することで、関節角などのフィードバック無しで、手先位置制御が可能となることを示した。

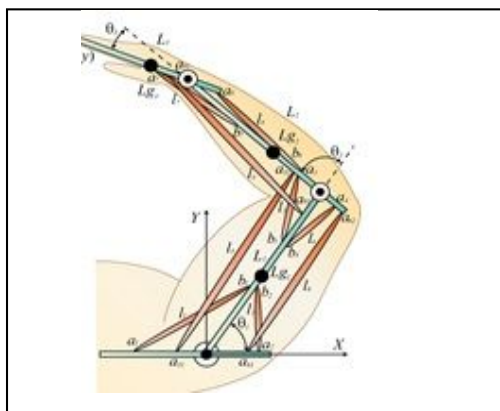


図2 人間の腕を模した2関節6筋システム

これは釣合い筋力を入力するだけの極めて単純な制御手法であり、複雑な実時間計算などは一切必要ないため、先述した原始反射との類似性を有することは興味深い。

また、筋肉配置の微小な変更に対し、ポテンシャルが大きく変化し、平衡点(釣合い姿勢)での安定性が大きく変化することを、いくつかの例について数値的に確かめた。筋肉の付着位置の情報が収束性に大きな影響を与えているのである。

## 2. 研究の目的

過去の研究では、研究対象を図2の2関節6筋の人腕モデルに限定し、筋肉を直線の剛体ケーブルで近似した。また、筋肉配置による安定性の変化も、幾つかのケース例について数値的な解析を行った。

本研究は更に発展させ、以下のことを研究目的とした。

- ヘッセ行列やリアプノフ法を用いた理論解析による数学的な収束条件の解明
- ロボット実機を製作し、センサフィードバック無しで、実験による位置制御の有効性の検証
- 自由度・関節数を増加した超冗長自由度を持つ脊椎などへの拡張と解析

## 3. 研究の方法

### (1) 筋肉配置の数学的条件の解析

過去の研究では、内骨格構造のフィードフォワード制御について、目標姿勢への収束性が筋肉配置に強く依存することを確認した。ただし、いくつかのケース例に限定した数値解析に基づくものであった。本研究課題では、リアプノフ法やヘッセ行列などの解析的な安定性を論議し、筋肉の配置情報における収束の数学的条件の解明を行う。

### (2) 多リンクを有する内骨格ロボットの設計・製作および実験

筋肉のモデル化や安定解析により得られた結果を基に、マニピュレータ実機を設計・製作する。その際、機械摩擦が少ないリニアアクチュエータを用いる。実際の多リンク構造体がセンサフィードバック無しで、位置制御可能であることを実験により確かめる。

### (3) 脊椎などの超自由度の内骨格構造への拡張

過去の研究では、研究対象を2関節6筋の人腕モデルに限定してきた。本研究では、自由度や筋肉数を増加させ、より複雑な筋肉配置を有する部位に拡張する。例えば、超冗長自由度を有する脊椎がその対象となる。このような部位のシミュレーションモデルを構築し、筋肉配置の変化による解析や特異点近傍での挙動などの解析を行う。また、このような超冗長自由度における釣合い内力の最適化による計算方法を確立する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 筋肉配置の数学的条件の解析

人間の腕を模した2関節6筋肉システムに対し、目標姿勢への収束性をリアプノフの安定解析に基づき、解析的に明らかにした。その際、筋長と関節角度の関係を2次のテラ展開で近似して解析を行い、入力された筋内力によって生成させるポテンシャル場に着目し、そのヘッセ行列を解析した。さらに、筋肉の配置が満たすべき幾何学条件を明らかにした。

上記の議論を拡張し、1関節に1自由度を有し、単関節筋と二関節筋を持つ一般的な筋骨格システムにおける収束条件を解析的に明らかにすることが出来た。

##### (2) 多リンクを有する内骨格ロボットの設計・製作および実験

実機に用いる機械摩擦が少ないリニアアクチュエータとして、形状記憶合金線を糸状に生成したアクチュエータの繰返し型の学習制御について、解析を行った。これまで、形状記憶合金アクチュエータの学習制御については実験によってその有用性が確認されていたが、本研究では数学的に安定性を証明することが出来た。

また、同様に機械摩擦が少ないリニアアクチュエータとして、液晶ナノシートを用いたゲル状アクチュエータに注目し、その製作法を確立した。また、制御手法に関しては、長さ制御法について提案し、その有用性を実験によって確認した。

##### (3) 脊髄などの超自由度の内骨格構造への拡張

超冗長システムにおける本手法の有用性をシミュレーションにより確認した。また、入力する釣合い内力の最適化による計算方法として、強化学習を用いた手法を提案し、シミュレーションにより有用性を検証した。

本研究の成果は、ロボット設計や運動生成に活かされるだけでなく、動物の運動生理学とロボット工学との間にある学問の溝を埋め、次世代・知能ロボットの間人らしい動作実現が期待できる。

#### 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9件)

H. Kino, N. Samrejsfuangfoo, K. Tsuda, T. Kato, H. Fujioka, Basic Study of Soft Actuator Using Anisotropic Gel Hybridized with Nanosheet Liquid Crystal: Analysis of Heat Characteristics and Length Control, J. Procedia Computer Science, 査読有, 105, 62-67, 2017.

H. Kino, Y. Matsutani, S. Katakabe, H. Ochi, Prototype of Tensegrity Robot with Nine Wires for Switching Locomotion and Its Calculation Method of Balancing Internal Force, J. Procedia Computer Science, 査読有, 105, 1-6, 2017.

H. Kino, N. Okubo, T. Ikeda, H. Ochi, Error Evaluation Method of Approximated Inverse Kinematics for Parallel-Wire Driven System: Basic study for three-wire planar system, J. Robotics and Mechatronics, 査読有, 28, 6, 808-818, 2016.

T. Morizono, K. Tahara, H. Kino, A study on effect of biarticular muscles in an antagonistically actuated robot arm through numerical simulations, J. Artificial Life and Robotics, 査読有, 22, 1, 74-82, 2017.

H. Kino, S. Kawamura, Mechanism and Control of Parallel-Wire Driven System, J. Robotics and Mechatronics, 査読有, 27, 6, 599-607, 2015.

越智裕章、木野仁、田原健二、松谷祐希、2リンク6筋を有する筋骨格システムにおけるフィードフォワード位置決めのための筋配置条件、日本ロボット学会誌、査読有、34、2、133-142、2016.

松谷祐希、田原健二、木野仁、越智裕章、山本元司、むだ時間を含む感覚フィードバックと筋内力フィードフォワードの相補的組み合わせによる筋骨格アームの位置制御、日本ロボット学会誌、査読有、34、2、143-152、2016.

松谷祐希、田原健二、木野仁、越智裕章、山本元司、筋骨格システムを対象にした筋内力フィードフォワード位置制御法における強化学習を用いた筋内力決定法、日本機械学会論文誌、査読有、81、822、14-00313、2015.

木野仁、越智裕章、田原健二、松谷祐希、石橋良太、筋骨格システムのフィードフォワード位置決め制御における筋長の近似を用いた準静的収束条件の解析、日本ロボット学会誌、査読有、32、4、56-63、2014.

[学会発表](計9件)

木野仁、今井拓郎、村上浩太郎、植村充典、可変剛性機構を有する受動歩行システムのロバスト性の検証、計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、pp. 182-184、札幌コンベンションセンター(北海道)

2016年12月15日.

坂上憲光、三好晃治、武村史朗、木野仁、  
パラレルワイヤ駆動システムを用いた水中  
高速エンドエフェクタの提案、計測自動制御  
学会システムインテグレーション部門講演  
会、pp.0578 - 0581、札幌コンベンションセ  
ンター(北海道) 2016年12月15日.

木野仁、大町直輝、越智裕章、移動ロボッ  
トによるワイヤ協調作業、計測自動制御学会  
システムインテグレーション部門講演会、  
pp.1563 - 1566、札幌コンベンションセンタ  
ー(北海道) 2016年12月16日.

越智裕章、木野仁、田原健二、松谷祐希、  
筋骨格システムの筋内力ポテンシャルに対  
する筋 - 骨格間の干渉による筋の形状変  
形が及ぼす影響、計測自動制御学会シス  
テムインテグレーション部門講演会、pp.2739 -  
2742、札幌コンベンションセンター(北海  
道) 2016年12月17日.

佐藤正昂、木野仁、田原健二、筋骨格ア  
ームによる筋内力のつり合いを利用した手  
先軌道追従制御、計測自動制御学会シス  
テムインテグレーション部門講演会、pp.2755 -  
2757、札幌コンベンションセンター(北海  
道) 2016年12月17日.

木野仁、村上浩太郎、今井拓郎、最短時  
間軸変換法に基づく書字動作の試み、計測  
自動制御学会システムインテグレーション  
部門講演会、pp.3116 - 3119、札幌コン  
ベンションセンター(北海道) 2016年12  
月17日.

木野仁、越智裕章、田原健二、松谷祐  
希、筋骨格構造の持つ特性を利用した位  
置制御に関する考察、ロボティクスシ  
ンポジア、445-450、やすらぎ伊王島(長  
崎県伊王島町) 2016年3月18日.

木野仁、大久保暢浩、吉武翼、池田明  
之、越智裕章、パラレルワイヤ駆動シ  
ステムの逆運動学近似における誤差評  
価法の検証、ロボティクスシンポジア、  
203-208、やすらぎ伊王島(長崎県伊  
王島町) 2016年3月18日.

木野仁、和田竜治、吉武翼、田原健二、  
越智裕章、アクティブバランスを用いた  
パラレルワイヤ駆動ロボット、ロボティ  
クスシンポジア、197-202、やすらぎ伊  
王島(長崎県伊王島町) 2016年3月18  
日.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.fit.ac.jp/~kino/>

#### 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・教授  
研究者番号: 50293816

##### (2) 研究分担者

田原健二 (TAHARA, Kenji)  
九州大学・工学研究院・准教授  
研究者番号: 80392033

##### (3) 連携研究者

なし

##### (4) 研究協力者

松谷祐希 (MATSUTANI, Yuki)  
熊本高等専門学校・  
機械知能システム工学科・助教

越智裕章 (OCHI, Hiroaki)  
山口東京理科大学・工学部・助教

