

令和元年6月21日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02882

研究課題名(和文) 感覚運動統合における感覚情報の遅れやノイズにロバストな運動戦略

研究課題名(英文) Motor control strategy robust to time-delay and noise of sensory information in sensorimotor integration

研究代表者

田原 健二 (Tahara, Kenji)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：80392033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：筋骨格アームのフィードバックとフィードフォワードが一体となった制御則を提案し、シミュレーション・実験により有効性を確認した。多指ハンドによる物体把持において、仮想物体位置を更新することによりロバスト性を向上させ、シミュレーション・実験により有用性を確認した。釣糸人工筋の時間遅れにロバストなセンサレス位置制御を実現した。また、繰返し学習制御を導入し、その有用性について実験により確認した。複数の誘電エラストマー人工筋を用いた切り替え・重ね合わせによる力制御手法を開発した。また温度推定手法を提案し、推定温度を用いた切替えアルゴリズムを開発し、その有効性をシミュレーション・実験により確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、センサ情報に含まれる時間遅れやノイズに頑健な制御手法を提案し、安価なセンサやアクチュエータを用いてもある程度の精度が担保される制御を実現した。人間の運動生成においては、時間遅れやノイズが含まれていたとしても頑健に巧みな制御を実現しており、本研究における成果は、それらを工学的に実現し得る手法の一つとして期待できる。

研究成果の概要(英文)：A control law of musculoskeletal arm, in which feedback and feedforward are integrated, was proposed and confirmed the effectiveness by simulation and experiment. The robustness was improved by updating the virtual object position in object grasping by a multi-fingered hand, and the usefulness was confirmed by simulation and experiment. Robust sensorless position control was realized for the time delay of the fishing line artificial muscle, and iterative learning control was introduced and confirmed the usefulness by experiments. A force control law by switching and superposition using multiple dielectric elastomer artificial muscles was proposed. Also, a temperature estimation method was proposed, and developed a switching algorithm using the estimated temperature and confirmed the effectiveness by simulation and experiment.

研究分野：ロボティクス

キーワード：時間遅れ ロバスト フィードバック フィードフォワード 人工筋肉

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人の巧みな身体運動を生み出すその運動戦略は、先天的に持つ身体情報や、学習により後天的に獲得した体性感覚情報を基にしたフィードフォワード制御と、視覚や触覚といった感覚器からの実時間情報を基にしたフィードバック制御の組み合わせにより生成されていると考えられている。センシング情報には、一般的に無視できないノイズや遅れが含まれており、特に遅れに関しては、感覚器から得られた情報を基に運動が生成されるまで、鍛え抜かれたアスリートでさえ100[ms]~200[ms]の遅れがあると言われており、よってフィードバックだけでは実現し得ない迅速な運動などは、フィードフォワードが重要な役割を果たしている。一方で、フィードフォワード制御は一般的に身体運動モデルを用いて生成されていると言われていたが、適切な身体モデルを獲得・推定できなければ、むしろ制御上において障害となり、また、環境変化に対して脆弱であるため、フィードフォワード単体で利用できる条件が限られており、特に未知環境内においてはフィードバックとの組み合わせは必須である。しかし、これらフィードフォワードとフィードバックの組み合わせによる複合制御において、具体的にどのようなフィードフォワード入力を構築し、また、感覚情報をどのようにフィードバックしているのかについては未だ明確で無く、さらに、これらをどのように組み合わせているのかについても、解はほとんど得られていない。ロボティクスや制御工学において、フィードフォワード入力の生成手法はこれまで、基本的に制御対象の逆モデルを如何にして獲得もしくは推定するか注力されてきた。適応・学習による獲得や、オブザーバやフィルタを用いた推定など、様々な手法が提案されている。しかし、逆モデルに頼った制御入力では、基本的に環境が変化するとそれまで獲得・推定したモデルは有効性を失い、むしろ障害となる。すなわち、環境が変わるたびに逆モデルの獲得・推定を行う必要があるため、再利用性が悪く煩雑であり、それらが有効に働く場面も限られている。一方で、フィードバック入力におけるセンシング情報のノイズや遅れについては、まずフィルタなどによりこれらを出来るだけ取り除き、かつフィードバックゲインを下げることで、系が不安定になることを避けるといった、対処療法的な手段が主である。

2. 研究の目的

本研究は、筋骨格構造を持つ身体運動戦略について、複合的な制御構造の観点から解析し、筋骨格構造を持つ多関節構造体の制御において、センシング情報が本質的に持つノイズや遅れに対してロバストな制御パラダイムの構築を目的とする。筋骨格構造を持つ多関節構造体の位置・力制御において、制御入力を体性感覚情報を基にしたフィードフォワード制御入力と、視覚や触覚などの感覚情報を用いたフィードバック制御入力に分解し、ロバストなフィードフォワード制御を基本として、センシング情報にノイズや遅れを含んだフィードバック制御を状況に応じて組み合わせることにより、ノイズや遅れに対してロバストかつ環境変化に柔軟に対応可能な制御戦略の基盤技術を確立する。

3. 研究の方法

本研究では、下記【課題1】~【課題4】について並行して進め、それらを2年間で段階的に統合し、最終年度において【課題5】の実装と実用性の確認を行う。

【課題1】筋内力フィードフォワード制御における要求筋力最適化

過去の研究において、筋内力フィードフォワード入力では、目標位置でつり合う筋内力ベクトルを、単位ベクトルの定数倍として一律に設定していた。しかし、筋内力ベクトルは基本的に筋冗長性のゼロ空間に属するベクトルであれば、任意で選択可能であり、また、その選択した値によって制御性能が変化する。そこで、各筋肉の役割をより明確化し、手先誤差最小や筋力最小などの最適化指標を導入することで、筋内力を重みを加えて各筋へ分配することにより、これまで一律筋内力によって生成されていたポテンシャル場の形状を人為的に変化させ、ポテンシャル場の形状により稼働範囲外であった領域へも手先が到達・収束できるようにする。また、到達可能範囲の拡大のみでなく、これまで以上に手先収束性・安定性の向上を行う。さらに、これまで筋最大発揮力について明示的に考慮しておらず、目標値や初期値によっては、非現実的な筋力が要求される場合が存在したが、実験機への実装を想定して、各筋肉が発揮できる最大筋力を明示的に設定し、その範囲内において目標位置へ到達可能な筋力を制御入力として設定することにより、運動中、筋力が部分的に飽和することによる制御性能の劣化(定常偏差や収束性の劣化)を防ぎ、それによって実装時の実用性を高める。

【課題2】提案制御手法に最適な筋骨格構造の設計基盤技術確立

研究代表者らは、これまで筋内力フィードフォワード入力に関する筋骨格構造の最適化について研究を行っている。ここでは、筋内力によって生成される人工ポテンシャル場に注目し、その形状について、目標位置で安定平衡点となるポテンシャル場を形成する為の条件について導出を行っている。しかし本研究では、筋内力フィードフォワード入力に加えて時間遅れを含むフィードバック入力が新たに加わるため、木野等が提案しているポテンシャル場の解析だけでは不十分であり、設定した初期位置や目標位置によっては、局所平衡点に陥って目標位置へ収束しない場合が存在する。そこで、時間遅れを含むフィードバック入力に加わった場合におけるポテンシャル場の解析を筋配置の観点から行い、可到達領域および制御性能がそれぞれ最適な値となる設計手法の確立を行う。具体的には、筋内力による人工ポテンシャル場と、時間遅れを含む人工ポテンシャル場を重ね合わせ、動的な影響を考慮するため、運動エネルギーも加えた全体の工

ネルギー場について解析を行い、筋配置との関係を解析的・数値的に明らかにする。それを基に設定自由度に応じた最適な筋配置を導出することにより、提案する制御手法に最適な筋骨格構造の設計手法を確立する。また、基本的な実験装置を製作し、実験的に設計手法の有用性について検証する。

【課題3】外力・重力への適応を考慮したフィードバックとフィードフォワードの組合せ最適化過去の研究[4]において、複合制御入力、筋内力フィードフォワード入力と時間遅れを含むフィードバック入力をそれぞれを単純に線形結合した入力として設計していた。しかし、状況によってフィードフォワードが主となる場合、もしくはフィードバックが主となる場合を選択できれば、例えば外力を柔軟に受け入れる応答（低剛性）と、そこからの迅速なリカバリ（高剛性）の両立実現が期待できる。また、重力の影響下においては、フィードバック入力に積分制御（I制御）や適応制御を加えると重力補償が可能であるが、これらを利用した場合において手先に外乱が加わると、オーバーシュートやワインドアップ現象が起こる可能性がある。そこで、フィードバック入力とフィードフォワード入力の比率を可変とすることで、オーバーシュート等の抑制を行う。具体的には、手先誤差や筋力に応じて連続的にフィードバックとフィードフォワードの比率を変える変数を導入し、提案する制御により形成される人工ポテンシャル場の形状を状況に応じて可変とすることで、制御性能の向上を実現する。また、手先と環境との接触を前提として、手先力センサおよび筋長力センサを実装を想定し、これらの情報を用いた可変比率変数の導入についても検討する。

【課題4】異なるノイズや時間遅れを持つ複数のセンシング情報の統合および最適化対象とするシステムでは、カメラを用いた手先位置センサ、ロードセル等を想定した手先力センサ、エンコーダ等を利用した筋長センサ、ひずみゲージ等を想定した筋力センサなどの利用が想定される。しかし、これらのセンシング情報には、それぞれセンサ特有の異なったノイズや時間遅れが含まれる。よって、これら複数のセンシング情報を同時にフィードバックに用いる際には、異なるノイズや時間遅れに対する情報の統合技術が必須となる。河村、田原はこれまで、視覚情報に遅れがある場合においても、安定に物体を把持・操作する手法を提案している[5]。これらは多指ハンドによる物体操作に用いる制御入力であったが、本研究で提案する制御手法と同様に運動学のみで構築可能なフィードフォワード入力と時間遅れのあるフィードバック情報を組み合わせた手法であるため、同様の手法を本研究で扱う筋骨格系へ展開することを試みる。また、視覚だけでなく、筋長や筋力、手先力の情報についてもノイズや時間遅れをそれぞれ考慮し、これらの情報をフィルタを用いて統合する。その際、状態量やセンサ情報を基にそれぞれの重みを可変として、より信頼性の高い情報を重視して統合する。

【課題5】実験機への実装および実用性の確認

各課題の統合結果として得られた複合制御手法、および最適設計基盤技術によるロボットアームモデルを基に、筋骨格構造を持つロボットアームの開発を行う。基本的には、回転型電動アクチュエータを動力源として利用するが、その他にも直動型アクチュエータや、人工筋肉アクチュエータの利用についても検討する。リンク構造部は3Dプリンタにより形成することで軽量化を行い、筋部分として利用するワイヤーには、ケブラー糸等、強度が高く軽量なものを利用する。カメラによって手先位置の実時間測定を行い、また、手先部分に力センサを搭載して接触力の計測を行う。提案する制御則の有効性について確認するため、自由空間でのリーチング動作、および壁などに押しつけながら位置制御を行うならい動作、そして、これら2つの運動中に外乱が加わった場合の応答について、位置誤差、力誤差、収束性および筋発揮力等、客観評価を行い、提案手法の有効性を実証する。主要研究者4名は、それぞれロボットシステムの設計・構築に十分な経験を有しており、また、河村は視覚センサを用いた位置検出について、木野および田原はロードセルやひずみゲージによる値から計測について、それぞれ十分な実績を有している。

4. 研究成果

- ・筋骨格構造を持つロボットアームを作成し、画像処理を用いた手先位置制御システムを構築した。また、制御則として、画像処理を用いた際に含まれる時間遅れやノイズに対してロバストな制御手法として、これまで別々に構築していた筋内力フィードフォワード制御と時間遅れを含む手先空間フィードバック制御において、制御則を大幅に見直し、フィードバックとフィードフォワードが渾然一体となった新しい制御則を提案し、シミュレーションおよび構築した試作機による実験によって、その有効性を確認した。提案手法では、これまで過大に必要であった残留筋内力を大幅に減らすことができ、それによって実機に組み込む際、過大な内力による静止摩擦の増加を抑えることができ、結果的に手先位置制御の精度が大幅に向上した。
- ・多指ハンドを用いた物体把持制御において、これまで利用していた仮想物体位置を物体の移動速度に合わせて更新することにより、物体に外乱が加わった際のロバスト性を大幅に向上させることができることを数値シミュレーションにより確認した。本手法では、外乱の大きさに応じてセンサレスで把持力を自動的に変更することが可能であり、把持した物体を用いた作業を行う際に有効である。
- ・ナイロン糸を用いた高分子人工筋肉アクチュエータを用いた筋骨格構造を持つマニピュレータを試作した。ナイロン糸高分子人工筋肉アクチュエータは、加熱することにより収縮や回転運動を取り出すことができる。しかし、温度を直接入力とすることは難しいため、ニクロム線などの導体を周囲に巻き付け、電流を流すことにより発生するジュール熱による駆動方法をと

る。しかし、熱が入力であるため、入力から出力（変位）までの時間遅れが大きい。そこで、これまで本研究で行ってきた時間遅れにロバストな制御手法を利用する事で、フィードバックとフィードフォワード入力を組み合わせた制御システムを構築した。まず、人工筋肉について、モデルベースフィードフォワード制御を構築するために利用可能な動的モデルを新たに構築した。その後、モデルを利用したフィードフォワード入力と、フィードバック入力を組み合わせることにより、温度センサを必要としない人工筋肉アクチュエータの高精度な位置制御を実現した。さらに、繰り返し学習制御を利用する事で、モデルを必要としないフィードフォワード入力の生成に成功した。一方、多指ハンドによるマニピュレーションにおいては、物体の仮想フレームを実時間更新する手法を既に提案しているが、これの安定領域を数理的に明確にした。

- ・ 誘電エラストマー人工筋肉アクチュエータは、大きな力と応答速度が出せる一方、その出力幅および寿命（絶縁破壊による故障）が問題となっている。そこで、出力幅拡大および寿命の延長を目的として、複数のアクチュエータを組合せ、状況に応じて切り替え・重ね合わせを行う力制御手法を開発した。本手法により、最大力と最小力の間を広げることができ、分解能も向上した。さらに、誘電体への過電圧印可による絶縁破壊をもたらす熱について、高電圧を印加するため熱電対などのセンサを利用する事が難しく、直接温度を計測することができないため、温度センサを利用せず、電圧と電流の関係から誘電エラストマー自体の温度を実時間で推定する手法を開発し、推定温度を利用した切り替えアルゴリズムを提案した。特に、本研究課題で取り扱ってきた、センシング情報に遅れやノイズが含まれている場合について、ロバストに温度推定が行える手法を提案し、推定温度によるフィードバック制御により、動作中に不安定になりにくいロバストな力制御手法を開発した。
- ・ ナイロン系人工筋肉アクチュエータの繰り返し学習による位置制御手法の有用性・実用性を確認することを目的として、6本の人工筋肉を組み合わせた姿勢3自由度制御モジュールを作製し、加速度センサを利用した姿勢計測を行い、それに学習制御を組み合わせることで、無音で稼働する3自由度姿勢制御システムを開発した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

1. K. Masuya, S. Ono, K. Takagi, and K. Tahara, “Modeling framework for macroscopic dynamics of twisted and coiled polymer actuator driven by Joule heating focusing on energy and convective heat transfer,” *Sensors and Actuators, A: Physical*, No. 267, pp. 443–454, 2017.
2. K. Masuya, S. Ono, K. Takagi, and K. Tahara, “Feedforward control of twisted and coiled polymer actuator based on a macroscopic nonlinear model focusing on energy,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, No. 3, pp. 1824–1831, 2018.
- 3.

[学会発表](計23件)

1. 佐藤正昂, 田原健二, 木野仁, “筋内力を利用した位置制御手法の提案と実験的検証”, ROBOMECH2016, June 2016.
2. 松谷祐希, 田原健二, 木野仁, 越智裕章, “リンク上に可変剛性機構を有する腱駆動ロボットの剛性評価”, ROBOMECH2016, June 2016.
3. K. Tahara, Y. Matsutani, D. Nakagawa, M. Sato, and H. Kino, “Variable Combination of Feed-forward and Feedback Manners for Set-Point Control of a Musculoskeletal Arm Considering the Maximum Exertable Muscular Force,” IECON2016, Oct. 2016.
4. 佐藤正昂, 田原健二, 木野仁, “筋骨格システムにおける筋内力位置制御のロバスト性評価”, 日本機械学会 2016 年次大会, Sep. 2016.
5. 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”, SI2016, Dec. 2016.
6. 佐藤正昂, 田原健二, 木野仁, “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”, SI2016, Dec. 2016.
7. Choi Seunghyun, 田原健二, “仮想物体位置情報の更新による外力に対してロバストな把持制御手法”, SI2016, Dec. 2016.
8. 大藤康平, 河村晃宏, 辻徳生, 田原健二, “外界センサ情報と仮想物体情報の組合せによる未知物体の把持・操作手法の実験的検証”, SI2016, Dec. 2016.
9. K. Takagi, T. Arakawa, J. Takeda, K. Masuya, K. Tahara, and K. Asaka, “Position control of twisted and coiled polymer actuator using a controlled fan for cooling,” *SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices*, Mar. 2017.
10. 小野秀, 舩屋賢, 高木賢太郎, 田原健二, “釣糸アクチュエータを複数本用いた1自由度マニピュレータの繰り返し学習による力軌道追従制御”, SI2017, Dec. 2017.
11. 大岩千隼, 舩屋賢, 田原健二, 入澤寿平, 安積欣志, 高木賢太郎, “ねじり型釣糸人工筋アクチュエータのグレーボックスモデリングについて”, SI2017, Dec. 2017.

12. 小野秀, 舩屋賢, 高木賢太郎, 田原健二, “ 繰り返し学習制御による釣糸アクチュエータを用いた2自由度マニピュレータの軌道追従制御 ”, RSJ2017, Sep. 2017.
13. 舩屋賢, 小野秀, 高木賢太郎, 田原健二, “ 温度の逆ダイナミクスをHammersteinモデルで近似した釣糸人工筋肉のフィードフォワード制御 ”, RSJ2017, Sep. 2017.
14. 大岩千隼, 荒川武士, 舩屋賢, 田原健二, 入澤寿平, 安積欣志, 高木賢太郎, “ ねじり型釣糸人工筋アクチュエータのトルク制御 ”, ROBOMECH2017, May 2017.
15. 小野秀, 舩屋賢, 高木賢太郎, 田原健二, “ 複数の釣糸アクチュエータを用いた2自由度マニピュレータの位置・剛性制御 ”, ROBOMECH2017, May 2017.
16. 舩屋賢, 小野秀, 高木賢太郎, 田原健二, “ 釣糸人工筋肉の束を利用したアクチュエータユニットの開発 ”, ROBOMECH2017, May 2017.
17. 舩屋賢, 小野秀, 高木賢太郎, 田原健二, “ 対流熱伝達の温度・速度依存性に基づく釣糸人工筋肉の変位モデリング ”, ROBOMECH2017, May 2017.
18. H. Kubota and K. Tahara, “ Two-types force controllers for a prismatic actuation module redundantly driven by multiple sheet-type dielectric elastomer actuators, ” IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mech. Jul. 2018.
19. S. Ono, K. Masuya, K. Takagi and K. Tahara, “ Trajectory tracking of a one-DOF manipulator using multiple fishing line actuators by iterative learning control, ” IEEE-RAS Int. Conf. Soft Robotics, Apr. 2018.
20. C. Oiwa, K. Masuya, K. Tahara, T. Irisawa, M. Shioya, T. Yamauchi, E. Tanaka, K. Asaka and K. Takagi, “ Gray-box modeling and control of torsional fishing-line artificial muscle actuators, ” SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices, Mar. 2018.
21. 小野秀, 田原健二, “ 釣糸人工筋肉アクチュエータを用いた姿勢3自由度プラットフォームの繰り返し学習による軌道追従制御 ”, 第24回ロボティクスシンポジウム, Mar. 2019.
22. 小野秀, 田原健二, “ 釣糸人工筋肉アクチュエータを用いた姿勢3自由度平行構造プラットフォーム ”, RSJ2018, Sep. 2018.
23. 久保田洋輝, 高木賢太郎, 田原健二, “ 誘電エラストマーアクチュエータの温度推定による力制御駆動アルゴリズム ”, SI2018, Dec. 2018.

〔図書〕(計2件)

1. K. Takagi, N. Kamamichi, K. Masuya, K. Tahara, T. Irisawa and K. Asaka, “ Chapter 26: Modeling and Control of Fishing-line/Sewing-thread Artificial Muscles (Twisted and Coiled Polymer Fibers, TCPFs), ” K. Asaka and H. Okuzaki (Eds.): Soft Actuators: Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives, 2nd Ed., Springer, p. 831, 2019.
2. K. Tahara and A. Kawamura, “ Chapter 9: A Grasping and Manipulation Scheme That is Robust Against Time Delays of Sensing Information: An Application of a Controller Based on Finger-Thumb Opposability, ” T. Watanabe, K. Harada and M. Tada (Eds.): Human Inspired Dexterity in Robotic Manipulation, 1st Ed., Academic Press, p. 200, 2018.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 木野 仁

ローマ字氏名: Kino Hitoshi

所属研究機関名: 福岡工業大学

部局名: 工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 50293816

研究分担者氏名: 松谷 祐希

ローマ字氏名: Matsutani Yuki

所属研究機関名: 熊本高等専門学校

部局名：機械知能システム工学科

職名：助教

研究者番号(8桁): 80757120

研究分担者氏名：河村 晃宏

ローマ字氏名：Kawamura Akihiro

所属研究機関名：九州大学

部局名：システム情報科学研究院

職名：助教

研究者番号(8桁): 60706555

研究分担者氏名：越智 裕章

ローマ字氏名：Ochi Hiroaki

所属研究機関名：山陽小野田市立山口東京理科大学

部局名：工学部

職名：助教

研究者番号(8桁): 50780128

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。