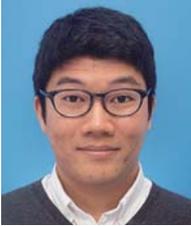


H ∞ 最適性に基づく筋骨格構造の筋力釣り合い制御法の開発

Development of control method for self-equilibrium forces in musculoskeletal structures based on H ∞ optimality

2167010



研究代表者 大阪大学大学院 工学研究科 助教 増田 容一
(助成金受領時：大阪大学大学院 工学研究科 博士課程)

[研究の目的]

高剛性、省自由度な身体をもつロボットは、転倒や衝突など突発的な外乱を吸収できず、人との接触時には大きな危険を伴う。これに対して本研究では、柔軟な身体をもつ筋骨格構造が、人と協働するロボットにとって重要であると考えられる。ワイヤ駆動などの筋骨格構造を用いると腕や脚の慣性が減少するほか、構造全体が柔軟になるため安全面で優れる。ところが、その代償として構造の内部で互いに釣り合う筋力（以下、自己釣り合い力と呼ぶ）の制御が複雑となる問題がある。

従来の筋骨格ロボットの研究では、筋力を制御する手法として、最低限の筋駆動により目標とする手先出力（ロボットアームの先端に発生する力）を実現する筋力二乗和最小化法が提案されている。ところが、筋骨格構造を所望の形状に収束させ、突発的な外乱に対しても構造を安定に保つことを考えると、手先力が零の場合（非荷重時）にも筋力を制御することが求められる。従来は、非荷重時の筋力を決定するための制御論的に妥当な指標がなく、また、手先以外の部位に加わる荷重を考慮出来ない問題があった。非荷重時の筋骨格構造を安定化するには、複数の筋を同時に駆動し、構造内部で互いに釣り合う筋力（自己釣り合い力と呼ぶ）を決定する必要がある。そこで本研究では、自己釣

り合い力を決定するために、制御論的な最適性を考慮し、数理的に妥当な筋力の制御手法を確立した。具体的には、筋力制御のための目的関数として接線剛性行列の最大固有値最小化（最大 ETSM 最小化と呼ぶ）を提案し、その妥当性を解析的・数値的に検証した。さらに、本目的を達成すべく、各筋に分散型の制御器を配置することで計算時間を削減、耐故障性を付与する分散型適応制御法を提案した。

[研究の内容、成果]

1. 筋力制御のための目的関数

H ∞ 最適性（位置偏差から制御入力までの H ∞ ノルム最小化）に基づく自己釣り合い力の設計を行った。具体的には、H ∞ ノルムと系の接線剛性行列の最大固有値（最大 ETSM と呼ぶ）が等価になる性質を示し、最大 ETSM を新たな目的関数として最小化することで間接的に H ∞ ノルムを最小化できる。

2. 筋力設計問題の定式化

本研究では、理論的な取り扱いのために、筋骨格構造を棒材（骨）とワイヤ（筋）が点接合するテンセグリティ構造としてモデル化し、各筋に制御器が備わるマルチエージェントシステムとして扱う（図1）。本制御系に対する最大 ETSM 最小化設計問題は、軸力密度法[9]と

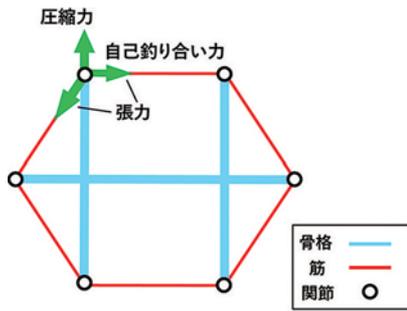


図1 対象モデルと構造内部の自己釣り合い力

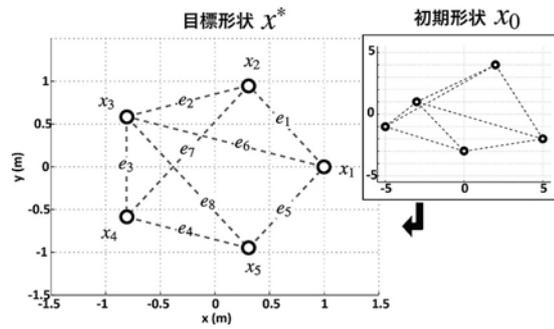


図2 初期形状と目標形状 (右図→左図)

呼ばれる変数変換法を用いることにより半正定値計画問題 (SDP: Semidefinite Programming) で定式化されるため、主双対内点法などを用いて数値的に安定に解を求めることができる。

3. 分散型制御法による最大 ETSM 最小化

多数の筋が複雑に連動する場合、集中的な制御は計算時間の増大を招き、突発的な外乱に対応できないことが判明した。また、筋の故障時など、システム構成の変化に対応できない問題もある。生体の筋制御では脊髄内の運動神経を介した分散型の制御器が用いられていることから、本研究においても各所の筋を分散的に制御する手法を考える。具体的には、構造内部で筋力が釣り合う制御系に対して H_∞ 最適性を考慮した分散型適応制御則を導出し、シミュレーションでその有効性を確認した [1]。

本アプローチによる制御系設計では、最大 ETSM を所望の固有値に導く必要がある。しかし、システムの大域的性質である接線剛性行列の固有値を分散的に取得することは難しく、また、目標平衡点における筋力が互いに釣り合うという拘束条件を考慮する必要がある。そこで本研究では、分散型固有値推定器、および、ラグランジュ緩和法を用いた制御系設計法を提案した。各筋に備わる制御則は、自身の周囲から計測できる局所情報を用いて接線剛性行列の最大・最小固有値を推定し、それぞれが持つ制御目的に従い自身の制御パラメータを調整する。

シミュレーションでは、各筋が各々の筋力を

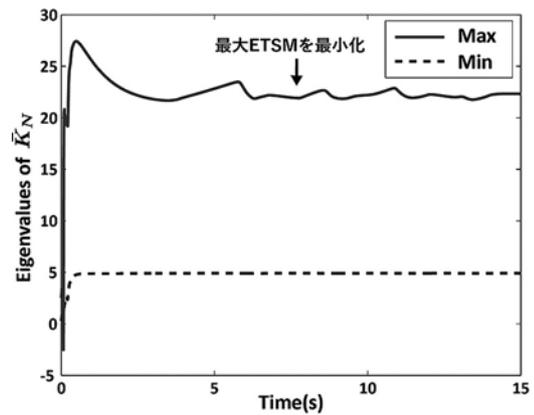


図3 制御性能の最適化

自律分散的に調整することで、制御目的 (最大 ETSM 最小化) を達成しつつも、構造が目標形状に収束することを確かめた (図 2)。各筋に分散した制御器が互いに協調し、系の制御性能をリアルタイムで最適に保つ (図 3) と同時に、各筋への応力集中の回避が可能となる。さらに一部の筋が断裂・故障した際にも残った筋が自律分散的に内力を調整して目標形状を維持することができる (図 4)。

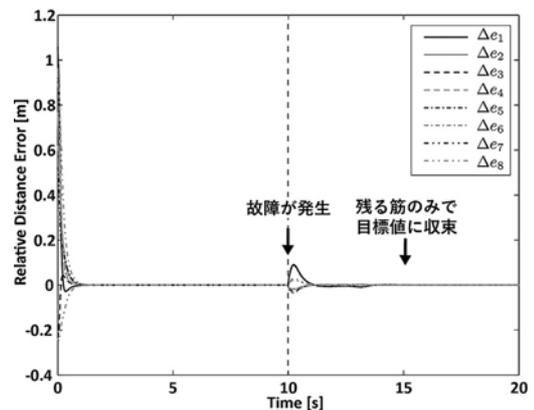


図4 故障耐性の検証

4. 目的関数の妥当性評価

筋力制御における最大 ETSM 最小化の妥当性を評価した。最大 ETSM を最小化するような筋力を設計することで、筋骨格系の平衡点近傍における 2 つの制御性能が最適化（許容可能遅延時間の最大化、入力エネルギーの最小化）されることを解析的に示し、最大 ETSM 最小化の妥当性に対する理論的な裏付けを行った。さらに、シミュレーションにより、最大 ETSM 最小化が系の制御性能に及ぼす数値的な影響評価を行った。具体的には、 H_∞ ノルムによる入出力間エネルギー比評価による省入力・外乱抑制への評価を行った。

最大 ETSM 最小化を利用する副次的な利点として、ロボットアームなどに見られる長大な構造物における筋力の低減効果が発見された。構造物を制御する場合、その形状によっては望まれない高ゲインが必要となり、収束特性や許容可能遅延時間などの制御性能が著しく低下する。最大 ETSM 最小化に基づき自己釣り合い力導入することで、長大構造であっても制御性能が保持されることを示した。(図 5)

5. 生理学的な知見に基づく制御法の検討

これまでの研究では、筋力の分散型適応制御法が得られ、複雑な筋間協調制御のための理論的な基礎を確立した。ところが、本手法を実際の筋骨格ロボットに適用するには、分散制御に

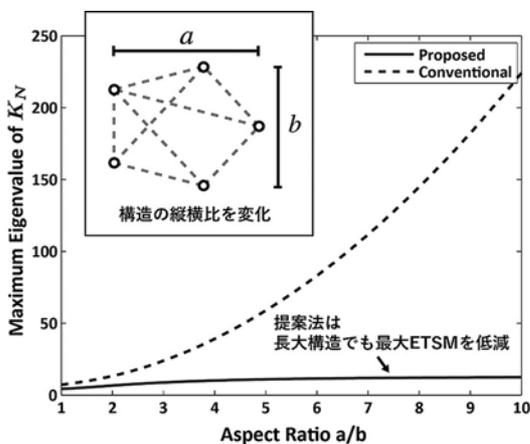


図 5 構造の長大化における制御性能の保持

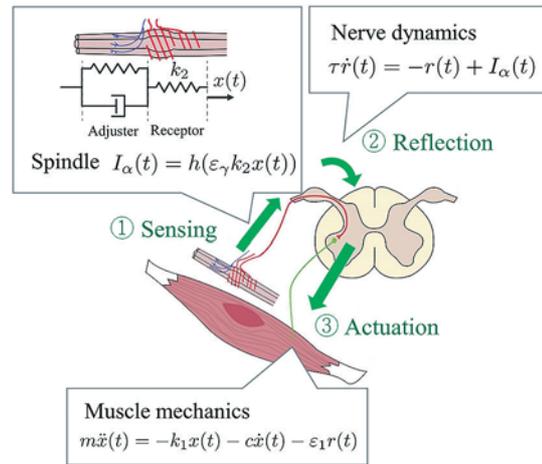


図 6 生理学の知見に基づく制御系の解析

必要な情報（それぞれの筋が観測し交換しあう状態量）が多くセンサ数が増加してしまう問題点が明らかになった。そこで、上記の問題（制御の複雑化による実装上の困難）を解決すべく制御法のシンプル化に焦点を当て、振動子に基づく手法 [2] や、実世界の動物を扱う生理学の知見に基づく手法 [3] を検討した。生理学に基づく手法では、生体筋に備わる分散型制御機構である伸長反射系をモデル化し、各筋を非線形振動子とみなして理論的な解析を行った(図 6)。本制御法の解析は始まったばかりであり、筋に備わる反射制御則の特性と、複数の筋の相互作用を通じた同期現象が確認されている。

6. 新たに発見した歩行現象

我々は振動子に基づく制御法を検討する中で思いがけない現象 [5] を発見した。本発見は「センサやコントローラ、マイクロプロセッサを一切もたない 4 脚ロボットが、自然界の動物にみられる運動パターンを能動的に生成し、そのパターンを走行速度に応じて適応的に調整する」という興味深いものであった(図 7)。本現象の鍵となるアイデアは、アクチュエータとロボット身体に備わるダイナミクスを一種の分散型制御則として活用することである。これはすなわち、これまで制御が担っていた計算処理の一部を、モータとロボット身体のパラダイ

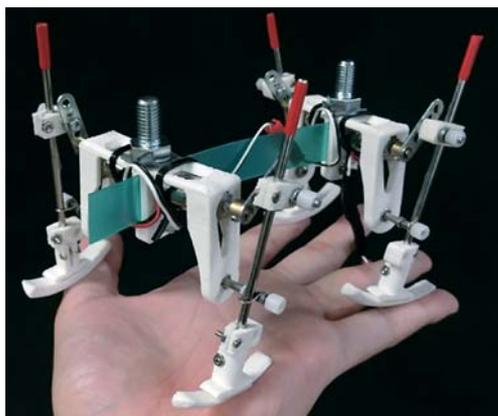


図7 制御なく適応的な能動歩行を生み出す無脳ロボット

ナミクスで代替できたことに相当する。さらに、ヘビ型ロボット [6], ミミズ型ロボット [7], 跳躍ロボット [8] など, 異なる形態をもつロボット (これを総称して無脳ロボット: Brainless Robot と呼んでいる) においても同様な運動パターン生成現象が確認された。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では, H_∞ 最適性に基づく分散型適応制御法を開発し, その有効性を示した。今後は提案した制御法の利点を損なわない制御則のシンプル化を行っていく。特に, 各筋の局所情報のみを用いて制御論的な最適性を確保することが課題である。課題の解決では, 本研究の後半で開発した, 制御における計算や最適性の確保を筋やロボット身体の物理ダイナミクスで代替

する制御法が重要な鍵になると考えている。

[成果の発表, 論文等]

- [1] Yoichi Masuda, Kenji Nagase: Adaptive formation control with self-equilibrium forces, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Banff, Canada, July, 2016.
- [2] Y. Masuda, Y. Minami, M. Ishikawa: Actuator Synchronization for Adaptive Motion Generation without Any Sensor or Microprocessor, Asian Control Conference (ASCC2017), Australia, Gold Coast, December 18, 2017.
- [3] Y. Masuda, Y. Sugimoto, M. Ishikawa: Muscles Excite and Synchronize Themselves through Body Dynamics, NOLTA Journal, Vol. E10-N, No. 2, 2019.
- [4] Y. Masuda, K. Naniwa, M. Ishikawa, K. Osuka: Weak actuators generate adaptive animal gaits without a brain, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2017), China, Macau SAR, 2017.
- [5] 増田, 石川, 石黒「コントローラをもたない無脳ヘビ型ロボットの適応的運動生成」, 第30回自律分散システムシンポジウム (DAS2018), 仙台, 2018.
- [6] Y. Masuda, M. Ishikawa, A. Ishiguro: Weak DC Motors Generate Earthworm Locomotion Without a Brain, in Proceedings of The 7th International Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems (Living Machine 2018), France, Paris, pp. 304-315, 2018.
- [7] 田中, 増田, 石川, 「アクチュエータの弱さによる跳躍安定化メカニズム」計測自動制御学会論文集, 55巻4号 pp. 305-312, 2019.