

令和元年6月21日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04386

研究課題名（和文）積分的モデリングに基づくフルスイング非線形制御とその大振幅ロコモーションへの応用

研究課題名（英文）On full-swing nonlinear control based on integral viewpoint modeling and its application to large amplitude locomotion

研究代表者

石川 将人 (Ishikawa, Masato)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：20323826

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,070,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、「微小入力による、状態の微小変化」に着目した従来の制御システムの捉え方（微分的モデル観）から脱却し、大振幅の入力を前提に「少し先まで」の状態変化を陽に捉えるモデル観（積分的モデル観）を提唱して、入力・状態ともに許容範囲の限界までフルスイングで扱おうとする非線形システムのモデリングと制御法を提案した。その実証として、機体を大振幅で振り、環境との接触を利用しながら移動する大振幅ロコモーションのモデリングと制御を実現する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、制御工学とくに非線形制御の理論面の観点と、ロボット制御などの実用面からの観点との間のギャップを埋めることである。理論面からの歩み寄りとしては第一原理から出発して差分方程式などの代数的関係へと帰着したこと、実用面からの歩み寄りとしては対象の可動範囲にとらわれずに扱える数理モデルを導出したことにある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed an integral viewpoint for modeling of nonlinear systems, as opposed to a conventional "differential viewpoint" focusing on infinitesimal change of states for given infinitesimal amount of control inputs. First, we derived some discrete or algebraic relationships between the control parameters and the resulting state changes. We also analyzed fundamental dynamic behavior of nonlinear actuators such as pneumatic actuators or built-in R/C servo motors, and realized large amplitude locomotion including walking, jumping and rolling locomotions.

研究分野：制御工学，ロボティクス

キーワード：制御工学 非線形制御 非線形アクチュエータ ロコモーション

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

非線形制御の研究においては、運動方程式などに基づく常微分方程式、すなわち非線形状態方程式を出発点とする。これは状態変数の微小変化量  $dx/dt$  を現在の状態  $x(t)$  と制御入力  $u(t)$  の関数  $f(\cdot, \cdot)$  として表し、それを時々刻々と積み上げて状態のふるまいを表すという微分的モデル観である（図 1）。「微分」という、さまざまな関係を微視的に捉えることによって線形化するという強力な道具により、このモデル観はある段階までは大変よく機能し、非線形制御理論の発展を牽引してきた。その最も顕著な効用として挙げられるのは以下の三点である。

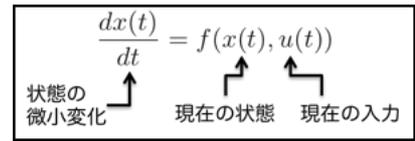


図 1 微分的モデル観

【効用1】 フィードバック変換によって特性  $f(\cdot, \cdot)$  を扱いやすいものを書き換える（厳密な線形化、計算トルク法、非干渉化などの考え方）

【効用2】 何らかの評価出力を選び、その時間微分を制御することによってゼロに導き、またゼロに押し付けて保持する（出力零化制御、制御リヤプノフ関数などの考え方）

【効用3】 関数  $f(\cdot, \cdot)$  の高階偏微分を用いた非線形可制御性の解析とその応用（Lie 代数による特徴づけ、Lie 括弧積運動による制御などの考え方）

研究代表者らも従来はこれらの方法を駆使し、また改良しながら多くの研究を行っていたが、同時にこれらの効用がそれぞれ限界にもなっていることが露呈してきた。

【限界1】 フィードバック変換ができるためには、システムが正確にわかったうえで、各瞬間で所望の入力、すなわち連続値の時間関数  $u(t)$  を正確に発生できなければならない。アクチュエータにそのような能力を求めることはしばしば現実的でなく、逆にアクチュエータの物理的長所を消してしまう。

【限界2】 目的に即した評価出力（零化出力関数やリヤプノフ関数）を選定できることが前提だが、そもそもそれ自体が難しい。また、しばしばシステムが本来もっている振る舞いを限定してしまうことになる。

【限界3】 微小入力に対する状態の微小変化の対応関係は近似的にわかっているが、入力を大きくすると対応がつきにくくなる。その乖離は Lie 括弧積の階数（偏微分の階数）が上がるほど顕著になる。

つまり、本来なら線形制御の有効範囲を広げるはずの非線形制御は、現状では非線形システムのもつ入力・状態の可動範囲を有効に活用することができておらず、いわば「フルスイング」の制御ができていなかった。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、上述した微分的モデル観から脱すべく、大振幅の入力・状態変化を前提として「少し先まで」の状態変化を陽に捉える視点に立った非線形制御を実現することを目指し、これを積分的モデリングと称することとする。本研究では大きく分けて以下の3つの目的を掲げる。

- ① 積分的モデリングとそれに基づく非線形制御
- ② 非線形アクチュエータの積分的モデリング
- ③ 大振幅ロコモーションの実現

### 3. 研究の方法

前項の目的を達成すべく、以下のような方法によって研究を遂行した。

#### ①-(a) 級数展開を用いた非ホロミックシステムの積分的モデリング

非線形システムに対し、振幅を制限しない制御入力のもとでの「少し先まで」の状態変化を、振幅をパラメータとして残した正弦波入力に対する状態方程式の解の級数展開の形で陽に求める。さらに、入力を規定するパラメータと状態変化の関係を代数方程式の形で整理し、級数展開を有限項で近似表現することの妥当性を検証する。

#### ①-(b) 離散力学に基づく非線形システムの積分的モデリング

システムのふるまいを連続時間に関する非線形微分方程式の解として捉えるのではなく、一定時間後の状態遷移を表す非線形写像として実現する。ここでの重要な特徴は、連続時間非線形システムに関して「離散化」して離散時間システムを導くのではなく、初めから離散時間を前提として第一原理を元にして離散時間システムを構築することである。もちろん、一般の非線形システムに対してそのような枠組みを構築することは現実的でないが、対象を Euler-Lagrange あるいは Hamilton の運動方程式で記述される力学系に規定することで、実用上十分な広さと深さで理論展開を行うことが可能となる。

#### ②-(a) 非線形アクチュエータの積分的モデリング

実際のロボット制御などでは、空気圧人工筋や R/C サーボモータのような、小型・高速・高出力のすぐれたアクチュエータを多用する。これらは位置・角度のレベルでの応答性は非常に良いが、力・トルクのレベルでの指令は直接にはできず、また入力のレンジによる非線形性が強いいため、運動方程式に基づいて入力やトルク入力を前提とするような従来の制御理論の枠組みにはなじみなかった。そこで本項目では、これらの非線形アクチュエータの動的モデリングを通して、「指令値を力として発生させる」のではなく「発生している力をモデル化する」という観点から活用する。

#### ②-(b) 大振幅ロコモーションの実現

以上を通して、設定値近傍での微小な運動ではなく、アクチュエータの可動範囲や衝突の効果を使い切って運動するロコモーション（移動ロボット）を実現する。

#### 4. 研究成果

本研究を通して得られた代表的な結果を以下に述べる。

##### ①-(a) 級数展開を用いた非ホロノミックシステムの積分的モデリング

- ・非ホロノミックシステムに対して、振幅・角周波数・位相差などを用いてパラメトライズされた正弦波入力を印加した際に、一定時間後に結果として生じる状態遷移を closed form で導出し、その解構造について解析を行った。入力に含まれる正弦波関数が、同じく三角関数を含む非ホロノミックシステムの非線形性を通して状態遷移を生じる（三角関数の引数に三角関数が含まれる形が多出する）ため、入力パラメータと一定時間後の状態遷移との台数的関係は Bessel 関数などの超幾何級数を用いた形で得られる。制御系設計においては、これを逆算することによって目標の状態遷移を達成する入力パラメータを求めることに帰着される。典型的な例に対して解析した結果、Bessel 関数の収束は十分に速く、実用上十分な低次元項までの有限項近似で精度良く表現できることが示された。
- ・なお、ここで得られた結果は、かつて低価格なシンセサイザによく用いられた FM 音源（周波数変調とフィードバック回路を組み合わせることにより、少数のパラメータで複雑な音色を創出する音源）の記述方程式と酷似していることが観察された。いわば、非ホロノミック系の振る舞いが「FM 音源の機械的な実現になっている」ともいえる例である。この類推については今後のさらなる発展が期待される。

##### ①-(b) 離散力学に基づく非線形システムの積分的モデリング

- ・時間・空間の双方について離散化を前提として成立する「離散版 Hamilton の原理」（すなわち離散を前提とした第一原理）を出発点として、その世界で consistent に成立する離散変分などの演算規則を用いて、離散力学においてもっとも重要な運動方程式である「離散 Euler-Lagrange 方程式」を導出した。さらに、外力に対して開かれた問題も取り扱うために「離散 Lagrange-d' Alembert の原理」を導出し、外力が存在する場合への拡張を行った。
- ・実際の例題として弦や梁などの 1 次元分布定数系をとりあげ、von Neumann の安定性条件を導出した。また様々な条件下で数値シミュレーションを行い、離散力学に基づくモデルの妥当性を示した。つづいて、この離散力学モデルを制御入力を含む形へと拡張し、目的関数や制約条件を設定することで非線形最適制御問題として定式化する枠組みを構築した。これは有限次元非線形最適化問題で記述されているため、逐次 2 次計画法などの数値計算法で解くことが可能である。例として境界入力による弦・梁の振動抑制問題へと応用し、その効果と有用性を数値シミュレーションによって検証した。
- ・さらに、これらの 1 次元非線形分布定数系に対する結果を、膜などを含む 2 次元系の場合へも拡張する試みを行い、空間 2 次元・時間 1 次元の超離散化による離散力学モデルを構築した。前項と同様に膜の振動抑制制御問題へと応用し、数値シミュレーションによって提案手法の有効性を確認した。

##### ②-(a) 非線形アクチュエータの積分的モデリング

- ・McKibben 型空気圧アクチュエータ（以下 MPA と略す）は、（空気圧源を別とすれば）軽量かつ高出力で、またアクチュエータ自身が柔軟であるため配置の自由度が高く、多自由度のロボットを実現する上できわめて有望なアクチュエータである。使い方の観点からみれば MPA の原理は単純で、「圧力をかけてチューブを膨張させれば縮む」というものである（通常は拮抗配置で運用するので、減圧して弛緩させると対の MPA によって伸長させられる）。しかしながらこの特性は非線形性が強く、特に収縮と伸長をフルレンジで繰り返すことで真価を発揮するアクチュエータであるため、set point control を前提とした制御理論とはなじみにくいと言わざるを得ない。そこで、本研究では MPA で実現される運動の理論解析を行うために、その特性を十分表現しつつも理論解析に適したモデル、すなわち MPA の「圧力、変形、発生張力」の関係をシンプルに表した動的数理モデルを構築した。特に粘弾性を線形和で表現した張力モデル、さらには繰り返し負荷による特性変化（劣化）などのモデルも構築し、いずれも実機検証によって有効性を検証した。
- ・R/C サーボモータもまた、小型軽量で高トルクながら扱いやすいインタフェースをもつため、小型ロボットに多用されるアクチュエータである。ただしその入力は「角度指令」の形で受け付けられるため、運動方程式に基づくトルク入力を前提とした制御理論とはそのままではなじみにくい。そこで、周波数領域でのシステム同定とパラメータに関する先見知識（複数のパラメータ間の代数拘束）を活用することにより角度指令値から実際の角度および発生しているトルクまでの動特性を求め、トルク推定器（virtual torque sensor）として実現した。

##### ②-(a') 非線形アクチュエータによる脚運動機構の解析

- ・MPA により駆動される脚型ロボットを作成し、足踏みや跳躍といったダイナミックな運動を実際に実現するとともに、その運動実現においてキーとなる腰部重量や入力周期などのパラメータについて、実験や数値シミュレーションを通じて解析を行った。
- ・2 自由度脚モデルの立位安定性解析  
MPA を用いて足首と膝に自由度を持つ 2 自由度脚モデルの基本的な安定性に関する解析を行い、立位姿勢が安定となるための条件を導出した。また拮抗筋は姿勢に対して圧力入力の選び方が一意に決まらない（同じ姿勢であっても力んでいるか、脱力しているかで関節剛性が異なる）ため、印加圧力の選び方によって安定条件が満たされる場合、満たされない場合があることを示した。すなわち、目標とする姿勢を実現するような圧力入力を設計する上で、必要最低限の「力み」具合を計算することができることを示した。数値解析および実機実験による検証からその妥当性を確認した。

- 拮抗筋配置による自律協調制御  
筋骨格系において筋肉は関節を挟んで拮抗配置されているため、関節自由度に対して倍数の入力(各空圧筋への圧力入力)自由度が存在する。自由度の高い筋骨格モデルを考えていく上で、この自由度をどのように制御するかは大きな課題である。これに対して従来のように圧力入力を予め計算するのではなく、拮抗筋が自律的に協調することで周期運動を生成するような一種の力覚FB制御則について研究を行った。この制御では、筋骨格系の基本的な駆動原理である拮抗筋に着目し、筋が自身にかかっている張力に応じて伸縮の様子を自律的に変化させるものであり、膨大な入力自由度をコンパクトにし、制御しやすくすることが狙いである。筋骨格系を模した1自由度2筋のモデルに対して提案した制御則を適用し、拮抗筋の協調および周期運動の自律的生成が行われることを、シミュレーションと実機の双方で確認した。

## ②-(b) 大振幅ロコモーションの実現

最後に、大振幅のロコモーション(移動ロボット)の実現例の主なものとして、脚ロボットおよび全身転動ロボットに関する成果について述べる。

- コンプライアンスの活用, および無脳ロボットの實現

大振幅ロコモーションの實現にあたって、本研究で得られた最も重要な知見は、環境との接触・衝突に際した身体のコンプライアンスとその活用である。その知見は大きく次の三つに集約される。第一に、複雑かつ不確実な環境からの反力をシンプルな「仮想反力モデル」で近似し制御系に組み込む方法で、微視的には必ずしも正確ではないにもかかわらず、マクロな挙動としては実際とよく一致することが確かめられたことである。第二に、受動要素を適切に用いることでアクチュエータと身体構造の剛性を下げ、環境からの反力に自然に従うコンプライアントな運動制御系を構築したことである。これにより、たとえば三又へび型移動体、三脚移動体、転がり移動体などの大振幅かつ適応的なロコモーションが實現された。第三は、受動要素ではなく能動要素であるDCモータを用いるものの、それに適切な「弱さ」をもたせたことである。低減速比のDCモータは、環境から加えられた反力に対して「押し負ける」ことにより挙動が影響を受ける。これを巧みなクラック機構によってロコモーションの維持に資するように設計することにより(たとえば図2)、センサや明示的なコントローラを用いずに安定な周期運動が生じること、印加電圧などのパラメータ変化に対して挙動が質的に変化する分岐現象がみられること、などを観察した。

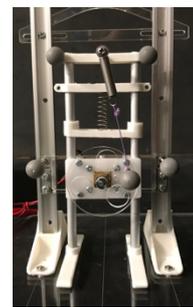


図2 無脳跳躍ロボット

- これまでは4脚ロボットのみで知られていた揺動励振による歩行實現が、6脚ロボットにおいても實現可能であることを実機で確認した。さらに4脚ロボットでの運動の理論的解析を参考に、入力の位相差とロボットの進行方向(ヨー方向)の角度に着目し6脚ロボットに対しても理論的な運動解析を行った(業績[8])。
- 全身転動ロボット  
状態の大振幅変化を効果的に使い切るロコモーションの典型的なものとして、図3に示す様々な全身転動ロボットの概念を提示し、制御アルゴリズムの設計、ならびにその大域的なふるまいについて非線形力学の観点からの特性解析を行った。

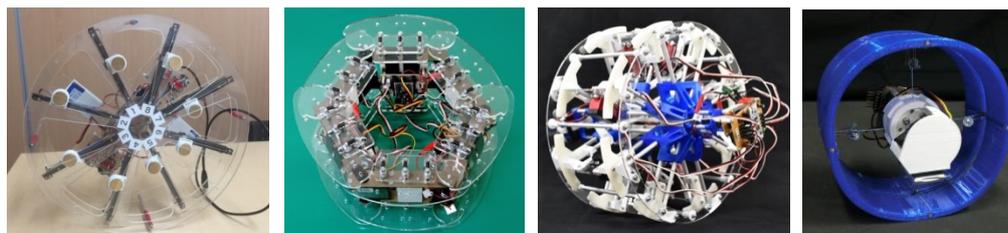


図3 全身転動ロボット  
(左から自律分散型, 多角形型, 多脚型, 柔軟型)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Y. Masuda, Y. Sugimoto, M. Ishikawa, Muscles excite and synchronize themselves through body dynamics, *Nonlinear Theory and Its Applications*, Vol.10, No. 2, pp.116-130, 2019. (査読有)
- ② 田中颯樹, 増田容一, 石川将人, 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*, Vol. 55, No. 4, pp. 305-312, 2019. (査読有)
- ③ Y. Masuda, M. Ishikawa, Simple Reflex Controller for Decentralized Motor Coordination Based on Resonant Oscillation, *Robotics*, Vol.7, No. 2, p. 23, 2018. (査読有)
- ④ Y. Hwang, Y. Minami, M. Ishikawa, Virtual Torque Sensor for Low-Cost RC Servo Motors based on dynamics system identification, *Sensors*, Vol. 18, p. 3856, 2018. (査読有)
- ⑤ Y. Masuda, M. Ishikawa, Simplified Triped Robot for Analysis of Three-dimensional Gait Generation, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 29, No. 4, pp. 528-535, 2017. (査読有)

- [1] T. Aoki, M. Ishikawa, Y. Minami, Dynamic feedback control of nonholonomic cross-chained systems using transverse function approach, 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp.468-471,2019.
- [2] 中亮介, 増田容一, 石川将人, 星形転がり移動ロボットの環境適応制御, 第 31 回自律分散システムシンポジウム, 2019.
- [3] 柳林裕, 増田容一, 石川将人, 弾性脊椎を活用した無脳四脚ロボットの歩容生成, 第 31 回自律分散システムシンポジウム, 2019.
- [4] 八住拓利, 甲斐健也, 離散力学と非線形最適化の融合による分布定数力学システムに対する軌道追従制御, 電子情報通信学会 回路とシステム研究会, pp.95-100, 2019.
- [5] 後藤貴滉, 吉田匠吾, 中西大輔, 浪花啓右, 杉本靖博, 大須賀公一, 拮抗配置した空気圧人工筋における自律的なアクチュエータ間協調の実現, 平成 30 年秋季フルードパワーシステム講演会, 2018.
- [6] 吉田匠吾, 中西大輔, 浪花啓右, 杉本靖博, 大須賀公一, 空気圧人工筋を用いた脚ロボットの跳躍運動入力設計, 平成 30 年秋季フルードパワーシステム講演会, 2018.
- [7] 中西大輔, 恩田和馬, 杉本靖博, 空圧筋を用いた二自由度脚ロボットの立位安定性に関する解析および実験検証, 平成 30 年秋季フルードパワーシステム講演会, 2018.
- [8] Y. Sugimoto, M. Sasaki, K. Osuka, Walking Analysis of Hexapedal Quasi-Passive Dynamic Walking Robot Focusing on Input Phase Difference and Yaw Angle, Proc. of 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2018), pp. 609-612, 2018.
- [9] T. Kai, K.Yamaki, A Discrete Mechanics Approach to Vibration Suppression Control of Free-fixed Euler-Bernoulli Beams, International Symposium of Nonlinear Theory and Its Application 2018 (NOLTA2018), pp. 423-426, 2018.
- [10] Y. Masuda, M. Ishikawa, Weak DC motors generate earthworm locomotion without a brain, The 7th International Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems (Living Machines 2018), 2018.
- [11] 杉本靖博, 花岡慧, 吉田匠吾, 中西大輔, 浪花啓右, 大須賀公一, 繰り返し負荷による McKibben 型空気圧アクチュエータの特性変化に関する実験的解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech2018), 2A2-I13, 2018.
- [12] 吉田匠吾, 中西大輔, 浪花啓右, 杉本靖博, 大須賀公一, McKibben 型空気圧アクチュエータの粘弾性を線形和で表現した張力モデルの実験検証, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech2018), 2A2-I14, 2018
- [13] 岡田輝之, 中西大輔, 杉本靖博, 空気圧人工筋を有する脚ロボットの立位安定性に膝構造が与える影響に関する解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech2018), 2018.
- [14] 増田容一, 石川将人, コントローラをもたない無脳三脚ロボットの適応的運動生成, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech2018), 2018.
- [15] 湯浅貴道, 石川将人, 簡易反力モデルに基づく水上三又へび型移動ロボットの解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech2018), 2018.
- [16] 廣川俊彦, 甲斐健也, 強化学習に基づいたヒューマノイドロボットの全身運動生成; 計測自動制御学会 第 5 回制御部門大会マルチシンポジウム, PS-22, 2018.
- [17] 泉幸佑, 甲斐健也, 奥平いずみ, 多モード 2 次元区分的アフィンシステムに対するリミットサイクル制御と 2 タンクシステムへの応用, 計測自動制御学会 第 5 回制御部門大会マルチシンポジウム, PS-52, 2018.
- [18] 八巻航平, 甲斐健也, 離散力学と非線形最適化の融合による分布定数力学システムのモデル予測制御, 計測自動制御学会 第 5 回制御部門大会マルチシンポジウム, PS-53, 2018.
- [19] 吉田匠吾, 中西大輔, 岡本有輝也, 浪花啓右, 杉本靖博, 大須賀公一, McKibben 型空気圧人工筋の動的特性を考慮した線形和モデルの検証, 第 18 回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, 2A1-17, 2017.
- [20] K. Naniwa, Y. Masuda, M. Ishikawa, K. Osuka, Weak actuators generate versatile locomotion patterns without a brain, IEEE Int'l. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO2017), 2017.
- [21] Y. Masuda, Y. Minami, M. Ishikawa, Actuator Synchronization for Adaptive Motion Generation without any Sensor or Microprocessor, Asian Control Conference (ASCC2017), 2017.
- [22] Y. Takagi, Y. Sueoka, M. Ishikawa, K. Osuka, Analysis and Control of a Snake-Like Robot with Controllable Side-Thrust Links, Asian Control Conference (ASCC2017), 2017.
- [23] T. Kai, K. Yamaki, Discrete Mechanics for 1-dimensional Distributed Parameter Mechanical Systems under Free Boundary Conditions and Its Application to Vibration Suppression Control of Free-fixed Strings; The SICE Annual Conference 2017 (SICE2017), Kanazawa (Japan), pp. 361-364, September 19-22, 2017
- [24] T. Kai, K. Izumi, An Analytic Solution to the Limit Cycle Control Problem for Multi-modal and 2-dimensional Piecewise Affine Systems; The SICE Annual Conference 2017 (SICE2017), Kanazawa (Japan), pp. 365-368, September 19-22, 2017
- [25] Y. Furuse, M. Ishikawa, Rolling Mobile Robot Using Decentralized Mass-Driver Units, IEEE Int'l. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2017), 2017.
- [26] Y. Masuda, M. Ishikawa, Development of a Deformation-Driven Rolling Robot with a Soft Outer Shell, IEEE Int'l. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2017), 2017.
- [27] M. Ishikawa, K. Shinohara, K. Goto, K. Naniwa, H. Aonuma, Analysis and modeling of high-speed running motion of ghost crabs, The 8th Int'l. Symp. on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2017),2017.
- [28] M. Ishikawa, N. Yasutani, R. Kuratani, On decentralized control of tripedal walking robot using reaction force feedback, The 20th Int'l. Conf. on Climbing and Walking Robots and Support Technologies (CLAWAR2017), 2017.
- [29] 甲斐健也, 八巻航平, 離散力学と非線形最適化の融合による片端固定 Euler-Bernoulli 梁の振動抑制制御, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2017.

- [30] 甲斐健也, 泉幸佑, 多モード2次元区分的アファインシステムに対するリミットサイクル制御問題における設計条件の緩和, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2017.
- [31] 佐々木基, 杉本靖博, 大須賀公一, 末岡裕一郎: 準受動歩行機”Hexapod-Duke”の歩行解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(ROBOMECH2017), 2017.
- [32] 甲斐健也, 八巻航平, 分布定数力学システムに対する自由境界条件下での離散力学の導出と片端固定弦の振動抑制制御への応用, 計測自動制御学会 第4回制御部門マルチシンポジウム, 岡山, Paper No.1A1-4, 2017.
- [33] 岡本有輝也, 中西大輔, 杉本靖博, 大須賀公一, 空気圧人工筋を搭載した二次元脚ロボットの跳躍運動に関する研究:腰部重量と入力周期が跳躍量に及ぼす影響についての実験的解析, 平成28年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会, pp. 169-171, 2017.
- [34] 吉田匠吾, 中西大輔, 杉本靖博, 大須賀公一, 空気圧人工筋を用いた二次元脚ロボットの足踏み運動の実現および解析, 第17回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 3J2-4, pp.2767-2770, 2016.
- [35] R. Kuratani, M. Ishikawa, Y. Sugimoto, On Rock-and-Roll Effect of Quadruped Locomotion: From Mechanical and Control-theoretical Viewpoints, Biomimetic and Biohybrid Systems (Living Machines 2016), pp. 503-510, 2016.
- [36] T. Kai, K. Yamaki, and S. Koike, Development of Discrete Mechanics for Distributed Parameter Mechanical Systems and Its Application to Vibration Suppression Control of a String, The 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO2016), pp. 492-498, 2016.
- [37] T. Kai, K. Yamaki, Vibration Suppression Control of an Euler-Bernoulli Beam via a New Blending Method of Discrete Mechanics and Nonlinear Optimization, The SICE Annual Conference 2016 (SICE2016), pp.1087-1090, 2016.
- [38] T. Kai and K. Yamaki, Development of Discrete Mechanics for 2-dimensional Distributed Parameter Mechanical Systems and Its Application to Vibration Suppression Control of a Film, International Symposium of Nonlinear Theory and Its Application 2016 (NOLTA2016), pp. 638-641, 2016.
- [39] 甲斐健也, 離散力学の基礎理論と制御工学への応用, 日本応用数理学会 研究集会「常微分方程式の数値解法とその周辺」, 2016.

〔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〕該当なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 杉本 靖博

ローマ字氏名: Yasuhiro SUGIMOTO

所属研究機関名: 大阪大学

部局名: 工学研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 70402972

研究分担者氏名: 甲斐 健也

ローマ字氏名: Tatsuya KAI

所属研究機関名: 東京理科大学

部局名: 基礎工学部 電子応用工学科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 60419471

研究分担者氏名: 中西 大輔

ローマ字氏名: Daisuke NAKANISHI

所属研究機関名: 松江工業高等専門学校

部局名: 電子制御工学科

職名: 助教

研究者番号(8桁): 00806086

### (2) 研究協力者 該当なし

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

※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。