

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14695

研究課題名(和文)「駆動・計測・制御」三位一体のメカニカル反射デバイスで実現する運動知能の超分散化

研究課題名(英文) Super-distribution of motor intelligence realized by mechanical reflex devices that integrate the three elements of "drive, measurement, and control"

研究代表者

増田 容一 (Yoichi, Masuda)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：70849760

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではセンサやマイコンを一切用いない機械式の反射デバイスをロボット各部に埋め込むことで、走行フォーム等の運動を創発する新たなロボット設計論の構築を行った。本研究の主要な成果の1つとして、従来までに開発した人工筋肉および人工受容器に加えて、人工神経デバイスと呼ぶ新たな反射デバイスを開発した。本デバイスは、ロボットが環境から受ける力刺激や、他の人工筋肉の活性化度合に応じて、ロボット内を流れる空気圧力を調整する機能をもつ。本デバイスを用いた新たな筋骨格ロボットでは、拮抗筋を含む両足8本の人工筋肉を協調的に動かすことに成功したほか、計算機を用いずに2次元平面上におけるバランス制御を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではセンサやマイコンを一切用いない機械式の反射デバイスをロボット各部に埋め込むことで、運動を創発する新たなロボット設計論の構築を行った。動物のもつ反射制御則を機械式のデバイスで再現することで、走行フォームの創発や簡易なバランス制御を達成した。これらの成果は、従来の計算機主体のロボット設計論を刷新し、環境および身体の動特性を活用する新たなロボット制御を確立していくための重要なマイルストーンになることが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a new robot design theory in which we embedded mechanical reflex devices in each part of the robot without using any sensors or microcontrollers to generate motion such as running. One of the main results of this research is the development of a new reflex device called an artificial neural device, in addition to the artificial muscles and receptors developed in the past. This device has the ability to adjust the pneumatic force flowing through the robot according to the force stimuli the robot receives from the environment and the degree of activation of other artificial muscles. The new musculoskeletal robot using this device has succeeded in moving eight artificial muscles of both legs, including antagonist muscles, in a coordinated manner and achieved balance control in a two-dimensional plane without a computer.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ロボット制御 反射 神経生理学 筋骨格ロボット 空気圧 人工筋肉

### 1. 研究開始当初の背景

動物は予測不能な環境変化に瞬時に対応する能力を持っている。動物の神経生理を紐解くと、彼らがいける制御戦略が見えてくる。例えば、人間がもつ 600 超の骨格筋のそれぞれには、100 ~ 5000 もの運動神経を介した反射ループが備わっている[2]。この反射ループはごくシンプルであるが、それゆえ応答は極めて速い。これら多数の反射が次々に連鎖することで動物の運動パターンを形成し、環境即応が実現している。しかしながら、これほど多数のアクチュエータと反射ループを従来ロボティクスで実装すれば、配線や周辺回路の増加に伴い工数と費用が膨大になることは明らかである。

そこで本課題では、以下のような学術的「問い」の解決を目指す。

【問い 1】 動物のもつ、超分散かつ即時即応の反射ループをどのように実現するべきか？

【問い 2】 全身に埋め込まれた反射ループをいかに統御して望みの運動を生み出すのか？

### 2. 研究の目的

申請者がこれまで開発した筋骨格ロボットでは、歩行中のネコにみられる反射回路を埋め込むことで平均 6.59km/h の高速走行が発現することを示した。本ロボットの特徴は、反射回路が電気的なセンサやマイコンを一切用いずに実装されている点にある。申請者は、四脚動物がもつ筋-センサ-神経フィードバックを再現すべく機械式の制御デバイスを開発した。本デバイスは感圧式バルブおよび空気圧人工筋で構成され、環境からの力を感知したバルブが筋に空気を送ることで反射的な収縮が生じる。換言すると、この反射デバイスには環境への適応に必要な駆動・計測・制御の全てが三位一体となって備わっている。

そこで本研究ではセンサやマイコンを一切用いない機械式の反射デバイスをロボット各部に埋め込むことで、走行フォーム等の運動を創発する新たなロボット設計論の構築を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、反射デバイスを用いた即時即応の下位反射ループと、それらを統御して望みの運動を励起する上位制御ループの設計論の構築を目指す。

#### (1) 下位の反射ループのみから創発する走行現象のメカニズム解明と設計原理の抽出

ここでは、申請者が新たに発見した走行現象から運動の創発原理を抽出し、超分散型ロボットの基礎となる低レイヤ制御系の設計論として昇華する。

本課題では、反射フィードバックの経路をいかに設計するか、すなわち空気圧回路の配線が肝要となる。前述の走行ロボットでは、ネコの歩行実験で観察される経路(股-膝間の交差性反射[3])を再現することで脚の周期運動および脚軌道が自律的に発現した。つまり、この走行現象の背後には「膝が床反力を支えるとき、股関節を駆動して推進力を生み出す」制御原理が内在すると考えられる。そこで、四脚を備える走行ロボットを製作し、その制御原理を数理モデルとして記述・理解することで、新たな自由度の追加や異なる形態の移動ロボットにも適用可能な普遍的設計原理として抽出する。

#### (2) 多数の下位ループをわずかな上位制御で束ねるロボット制御論の確立

1年目で構築する低レイヤ制御系は全ての運動制御を反射デバイスと身体ダイナミクスに委ねるため、走行など定常的な周期パターンしか生じ得ない。しかしながら、望みの運動を生み出すために各デバイスを集中的に制御すると系が複雑になり本末転倒である。そこで本課題では、多数の反射ルール(低レイヤ制御系)を上流からのわずかな指令により統御する高レイヤ制御系を構築する。

### 4. 研究成果

本研究における主要な成果の1つとして、従来までに開発した人工筋肉および人工受容器に加えて、人工神経デバイスと呼ぶ新たな反射デバイスを開発した。本デバイスは、ロボットが環境から受ける力刺激や、他の人工筋肉の活性化度合に応じて、ロボット内を流れる空気圧力を調整する機能をもつ。本デバイスを用いた新たな筋骨格ロボットでは、拮抗筋を含む両脚 8 本の人工筋肉を協調的に動かすことに成功した。本成果は、ロボット工学分野におけるトップジャーナルのひとつである IROS2020 に採択された[1]。さらに、両脚 18 本の筋肉を備えたネコ後脚型のロボットにおいても、歩行運動の自律生成達成した[2]。本人工神経デバイスを用いることで、上位からの空気圧指令によって下位の回路へ介入する回路設計が可能になった。

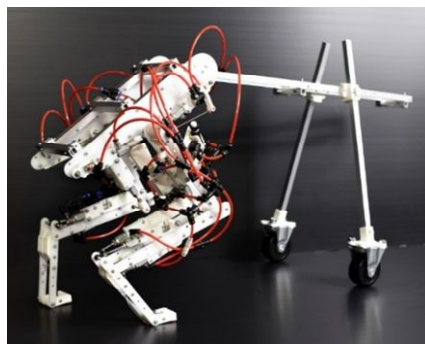


図 1 無脳ネコ後脚型ロボット

また、本現象のメカニズムを解析するために、筋肉および神経の特性を再現可能な電動の4脚ロボットを開発し、歩行運動を生み出す反射回路の候補を特定した。本成果は査読有国際誌に採択されている[3]。本回路の構造から、歩行運動の生成において、膝と腰の伸筋間の相互興奮性の反射が重要であることが示唆された。

2つめの成果は、連続的な力制御が可能な新たな受容器デバイスの開発である。従来の受容器デバイスは外力の有無に応じた離散的な空気圧力のON/OFFしかできなかったが、新たなデバイスを用いることで、連続的な外力の変化を連続的な空気圧力に変換することが可能になった[4]。本デバイスをよりコンパクトに再設計し、その特性を調査した成果は査読有国際誌に採択されている[5]。さらに現在は、人工筋肉の筋力に加えて、筋長をフィードバックできる反射デバイスの試作器を開発済である[6]。

3つめの成果として、前述の連続値型の反射フィードバックデバイスを活用することで、外力に抗って姿勢を維持する2脚ロボットのバランス制御[7][8]が達成された。現在は2次元平面内の姿勢制御に限定されてはいるものの、今後、3次元的な姿勢制御の反射回路が明らかになることで、上位系からの介入による静止から歩行への切り替え制御が達成できると期待している。

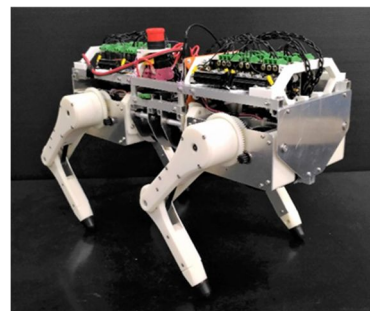


図 2 解析用ロボット



図 3 無脳バランス制御

[1] Y. Masuda, K. Miyashita, K. Yamagishi, M. Ishikawa, and K. Hosoda, "Brainless Running: A Quasi-quadruped Robot with Decentralized Spinal Reflexes by Solely Mechanical Devices." IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020.

[2] 若本 稜生, 増田 容一, 郡司 芽久, 福原 洸, 多田隈 建二郎, 石川 将人「マイコンレスで歩行運動を創発するネコ後肢型ロボットの開発」第 39 回日本ロボット学会学術講演会 2C4-06, 2021.

[3] T. Tanikawa, Y. Masuda, M. Ishikawa, "A Reciprocal Excitatory Reflex Between Extensors Reproduces the Prolongation of Stance Phase in Walking Cats: Analysis on a Robotic Platform." Frontiers in Neurorobotics, 2021.

[4] 増田 容一, 宮下 和大, 石川 将人「バルブでつくるロボットの神経基盤 第二報:連続的な外力フィードバックが可能な受容器デバイスの開発」33 回自律分散システムシンポジウム ,2B2-02, 32 回自律分散システムシンポジウム (DAS2021), 2B2-3, 2021.

[5] Y. Masuda, R. Wakamoto, I. Masato, "Development of Electronics-free Force Receptor for Pneumatic Actuators." Advanced Robotics, 2022, Accepted.

[6] 増田 容一, 石川 将人「バルブでつくるロボットの神経基盤 第三報:筋・腱受容器の機能を模倣した物理デバイスの開発」第 34 回自律分散システムシンポジウム (DAS2022), 1A2-2, 2022.

[7] Y. Masuda, R. Wakamoto, and M. Ishikawa, "Artificial Receptor for Brainless Balancing Control." Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2021), pp. 69-70, 2021.

[8] 石橋 昇, 増田 容一, 郡司 芽久, 福原 洸, 石川 将人「よろめきを活用した無脳二脚バランス制御」第 34 回自律分散システムシンポジウム (DAS2022), 1A2-4, 2022.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Masuda Yoichi, Minami Yuki, Ishikawa Masato	4. 巻 23
2. 論文標題 Vibration based motion generation without any sensor or microprocessor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Asian Journal of Control	6. 最初と最後の頁 2587 ~ 2596
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asjc.2374	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Masuda Yoichi	4. 巻 38
2. 論文標題 Brainless Walking: Motion Patterns Emerged form "Weak" Motors and Muscles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 920 ~ 925
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.38.920	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tanikawa Toyooki, Masuda Yoichi, Ishikawa Masato	4. 巻 15
2. 論文標題 A Reciprocal Excitatory Reflex Between Extensors Reproduces the Prolongation of Stance Phase in Walking Cats: Analysis on a Robotic Platform	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurorobotics	6. 最初と最後の頁 none
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnbot.2021.636864	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Masuda Yoichi, Naniwa Keisuke, Ishikawa Masato, Osuka Koichi	4. 巻 8
2. 論文標題 Brainless Walking: Animal Gaits Emerge From an Actuator Characteristic	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 none
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/frobt.2021.629679	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Y. Masuda, M. Ishikawa
2. 発表標題 On Brainless-Control Approach to Soft Bodies: A Novel Method to Generate Motion Patterns by Pneumatic Reflex Devices
3. 学会等名 IFAC world congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Fukuhara, M. Gunji, Y. Masuda, K. Tadakuma, and A. Ishiguro
2. 発表標題 Bio-inspired Quadruped Robot Exploiting Flexible Shoulder for Stable and Efficient Walking
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Miyashita, Y. Masuda, M. Gunji, A. Fukuhara, K. Tadakuma, and M. Ishikawa
2. 発表標題 Emergence of Swing-to-Stance Transition from Interlocking Mechanism in Horse Hindlimb
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Masuda, K. Miyashita, K. Yamagishi, M. Ishikawa, and K. Hosoda
2. 発表標題 Brainless Running: A Quasi-quadruped Robot with Decentralized Spinal Reflexes by Solely Mechanical Devices
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福原 洸, 郡司 芽久, 増田 容一, 多田隈 建二郎, 石黒 章夫
2. 発表標題 肩帯の柔軟なハンモック構造を活用可能な四脚ロボットの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮下 和夫, 増田 容一, 福原 洸, 郡司 芽久, 多田隈 建二郎, 石川 将人
2. 発表標題 ウマの脚内連動機構を活用可能な後半身ロボットの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷川 豊章, 増田 容一, 石川 将人
2. 発表標題 四脚歩行メカニズム探究のためのトルク出力型ロボットプラットフォームの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷川 豊章, 増田 容一, 石川 将人
2. 発表標題 反射・筋特性を再現した四脚ロボットの即時適応的な運動生成
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 天池 隼斗, 福原 洸, 郡司 芽久, 増田 容一, 多田隈 建二郎, 石黒 章夫
2. 発表標題 四脚動物の前肢に備わる不動化機構の検討
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮下 和夫, 増田 容一, 福原 洸, 郡司 芽久, 多田隈 建二郎, 石川 将人
2. 発表標題 ウマ後肢の筋・腱構造による支持/遊脚機能の即時転換
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福原 洸, 郡司 芽久, 増田 容一, 多田隈 建二郎, 石黒 章夫
2. 発表標題 柔軟な肩部ハンモック構造による四脚ロボットの歩行安定化
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤 俊介, 増田 容一, 石川 将人
2. 発表標題 群衆の手拍子を陰で操る隠密制御
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤 俊介, 増田 容一, 石川 将人
2. 発表標題 群衆の拍手における隠密エージェントの影響解析
3. 学会等名 33回自律分散システムシンポジウム (DAS2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 増田 容一, 宮下 和夫, 石川 将人
2. 発表標題 バルブでつくるロボットの神経基盤 第二報: 連続的な外力フィードバックが可能な受容器デバイスの開発
3. 学会等名 33回自律分散システムシンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関