

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 9 月 26 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02118

研究課題名（和文）テンセグリティロボットを用いた生物の射出運動生成機構の理解

研究課題名（英文）Research on Tensegrity Robots Generate of Instantaneous Motions

研究代表者

池本 有助（Ikemoto, Yusuke）

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：10377822

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：エビやダンゴムシは自身の身体を屈曲させることで瞬発的な逃避を行う。筋の付き方、表皮のしわ、骨格の違いや節の継がれ方など、生き物の身体には巧妙なからくりがあると考えられる。また瞬発的な動作には、軽さとエネルギー変換効率が重要であると考え、本研究では、テンセグリティ構造に着目した。

本研究では、双安定性を発揮し、安定点間を移動する際にポテンシャルを開放することで、主にエビなどの生物にみられるような瞬発的な屈曲運動を実現させるTensegrity Joint を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

数ある生き物の動作の中でも、我々は素早い運動に着目した。これまでの制御理論では、フィードバックにせよ、フィードフォワードにせよ、必ず入力を必要とし、運動はその結果生じる。しかし、俊敏な運動は、制御のため時間を限りなく小さくする必要がある。

これまで、エアコンプレッサを用いて、空気圧入力に対する応答として動作が実現された。しかしながら、エビやダンゴムシの逃避をはじめとする反射のような素早い運動は、制御入力に対する応答では実現が難しいほどに速い。故に我々は、制御系に依らない瞬発的な動作の実現を目指すこととした。瞬間的に大きな力を発生させる運動生成のメカニズムにより、制御理論の学問領域を広げる。

研究成果の概要（英文）：Animals often display skillful movements involving quick movements, such as the escape behavior of shrimp. Their motions are so fast that they might be difficult to realize as responses to control inputs. To address we develop a bistable tensegrity joint and propose to achieve instantaneous flexion movement. The spine model was chosen among the tensegrity structures because it mimics the spine of animals and because it can be connected to a series of homogeneous segments. By adjusting the angle and length of the rigid members of the basic tensegrity spine, removing a pair of soft members, and shifting the attachment position of one end of the soft members, the bistable tensegrity joint can be achieved. The development of a tensegrity joint consists of the members with weighing about 17 grams, which immediately performs rapid flexion movements against the slightest stimulus.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ロボティクス テンセグリティ 身体性 ネットワーク グラフ理論

## 1. 研究開始当初の背景

生物は逃避行動にて特出した俊敏な運動をみせる。例えば、ダンゴムシは、些細な物理的の刺激に対し瞬間的に身体を屈曲させて球形状に変態する。エビも同様な刺激応答を示すとともに逃避する。生態学的には、まずは防御に徹するという行動の結果であると考えられる。これをロボットで実現しようとした際、既存の運動制御理論が必ずしも適用できるとは限らない。その理由として、一つ目は物理的な刺激入力は大きさや指向性がなくとも擾乱が身体に伝わり、刺激知覚される点である。二つ目は刺激応答として屈曲運動といった極めて指向性の高い運動を瞬間的に生起することである(図1参照)。本研究では、この無指向な擾乱刺激に対する有指向な瞬間的応答のことを、自動車などのエンジン内で働く爆発力からピストン運動への瞬時変換をアナロジーとして、射出運動と定義した。

上記で定義した、瞬間的に生成される運動は、既存のロボット設計・制御理論で実現困難である。まず、ダンゴムシはどの部位をついても屈曲し球形状に変態する。これに対し、既存の制御システム設計は明確な方向と大きさ(ベクトル)をもつ入力信号、および固定配置された知覚器(センサ)を要求する。また、一般的な制御工学では、物理システムであるプラントを適切に動作させる設計論に立脚するが、擾乱信号を減少させることが設計指針であり、不確かな信号を積極的に活用する制御方法は、はっきりと体系化されていない現状がある。

仮に、高出力電動モータや、生物の筋肉細胞を搭載したロボットであっても、それ単独で瞬間的な屈曲運動を発揮することは難しい。たとえ、複数のアクチュエータが協調・連動したシナジー機構を組み込んだとしても、発揮される力はその和であり、また、複数の制御入力に対する調和された、より精密な制御系設計が必要となる。従って、瞬間的な屈曲運動の実現のためには、既存の制御理論を背景としたシステム応答とは別の原理が必須である。

つまり、明確な大きさ・方向・場所を規定できない入力情報を収斂させ知覚する機構、および一軸上の瞬間的な応答を実現する運動機構は、生物に観る射出運動に必要なにもかかわらず、それを見出す一般論は存在しない。

## 2. 研究の目的

本研究では、テンセグリティ設計原理を適用した、ダンゴムシなどの蛇腹状の多関節を有する生物の瞬間的な屈曲運動を実現する、ロボット設計の方法論を確立する。そして、数値シミュレーションのみならず、実ロボットの具現化や実験を通じて、エネルギーの貯蔵および解放メカニズムを力学的観点から解明し、生物の瞬発的運動の生成機構の理解を促進させることを目的とした。

## 3. 研究の方法

### 双安定力学系を用いた瞬発的な状態遷移

双安定力学系とは、力学システムが二つの安定点を持つことをいう。ジョイントは、二次元での最も少ない構成要素での双安定構造である。点線部分がばねになっており、二本の剛体棒がヒンジによって接続されている。この構造では、ばねの縮むことで、二つの安定点を持つ。本研究では、このような双安定系を三次元構造によって実現することを目指す。また、双安定構造によって瞬発的な運動の実現を目指す。

双安定では、縦軸が Mechanical Potential すなわち、ばね等に蓄えられるエネルギーを表し、横軸はジョイントの角度を表す。また、グラフ上の球が系の状態を表す。三角で示されるグラフの勾配は、ばねの復元力を高めることでより急になる。この勾配が急になればなるほど、より俊

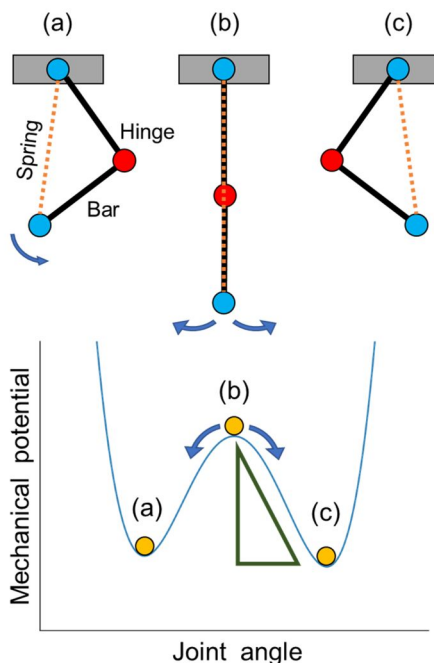


Fig.2 Minimal Bistable Hinge

図1 射出運動生成の概略

敏な動作が実現可能となった。

### Tensegrity Spine

テンセグリティ (Tensegrity) とは、「張力による (tensional) 統合 (integrity)」を縮めた造語であり、テンセグリティ構造はバックミンスター・フルー (Buckminster Fuller) によって提案された設計原理である。テンセグリティ構造は、硬い圧縮材同士を組み合わせる一般的な設計方法と異なり、連続した引張材と不連続な圧縮材を組み合わせることで成り立っている。そのため、少ない材料で軽量の安定構造を実現することができる[6]。また、弾性変形を利用して体内に蓄えたポテンシャルを運動エネルギーに変換するため、エネルギー損失を抑え、高効率な運動が可能となる。テンセグリティの基本構造の中でも、生き物の脊椎のような形状であり、連続して並べることができる同質のセグメントである Spine モデルに着目した (図 2)。本研究では、Tensegrity Spine のネットワーク構造に双安定力学の投影を期待し、Tensegrity Spine をベースとした Tensegrity joint の開発を行った。制作工程に係る、出願した特許の技術により、テンセグリティ構造体の設計を数分にまで縮めた。

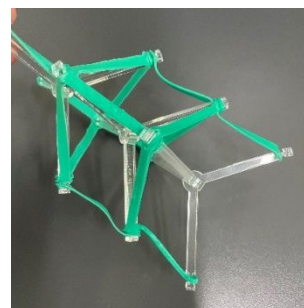


図 2 Tensegrity spine の例

### Tensegrity Spine Joint の開発

Spine モデルをはじめとする一般的な Tensegrity Structure はただ一つの安定点を持つ。本研究では、腱構造の移動によって、Tensegrity Spine を双安定構造へと変化させる。Tensegrity Spine から、双安定性を有する Tensegrity Joint へと変化する過程を Fig.4 に示す。Fig.4 (a) の Tensegrity Spine から、図に示す一対のソフトメンバ 2 本を取り除き、Rigid Members 間に可動性を持たせた。ソフトメンバの片端を内側へ移動させる。このように改変することで、側方のソフトメンバが最短となるジョイント角度が生じる。結果、Spine のホームポジションが不安定化するとともに、ジョイントが折れ曲がるようになる。さらに中心へ寄せると、下側の Spine Rigid Member がソフトメンバに吊られたような形になり、屈曲が顕著になった。

### 屈曲のための Rigid members の設計

Tensegrity Spine にてボディの干渉なく屈曲を実現するために、Basic tensegrity spine の構造を改変する。モジュール同士のアームの内の 1 本を、干渉を防ぐために 50mm から 20mm に変更する。また、1 組のアームのなす角を 60° に狭めることでポケットを深くし、隣り合うモジュールが干渉しないようにする。このような設計によって、改変前の約 45° に対して、構造改変により約 125° の曲がりを実現すること可能である。双安定力学系により、わずかな刺激に対して瞬発的な運動を実現するために、安定点を調節する。本モデルでは、2 つのアクリルパーツの結合角度を変更することで調節を行った。

## 4. 研究成果

### 数理モデルの提示

本研究で開発する Tensegrity Joint の数理モデルを提示する。マルチボディの運動方程式は、射影幾何学に基づき、リジッドメンバを制約条件として、微分代数方程式によって表した。ラグランジュの未定数乗数をそれぞれ表す。この運動方程式を基に、ソフトメンバの変位から構造内部に生成されるポテンシャルエネルギーを推定した。

### ばね定数の導出

数理解析に必要なソフトマテリアルのばね乗数を求める。引張試験機 (A&D 社製 MCT-2150) を用いて素材ごとに 5 回測定を行い、平均してばね乗数を算出する。QUICK SIL については長さ 40mm、Dragon Skin10 は 30mm が適当であると判断し、それぞれ 5mm、60mm の伸びを想定し引張試験を行い、弾性係数を同定した。

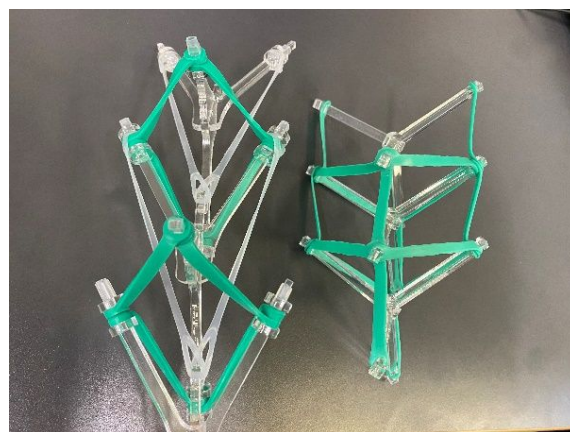


図 3 双安定を有するテンセグリティスパイン

### 射出運動実験

製作した Tensegrity Joint と、基本的な Spine Model との比較を図3に示す。Tensegrityの基

0.3 [s]



図4 射出運動実験

本構造の一つである，Tensegrity Spineの一对のソフトメンバの取り付け位置を中心に寄せ，アーム長さや角度を調節して干渉を防ぐことで，瞬発的な屈曲運動を行う Tensegrity Structure を実現した。

図4に本研究で製作した Tensegrity Jointの屈曲の様子を示す。1関節のモジュールで質量は16.9gであり，軽く指で触れることで変形を起こし，触れてから0.3秒で屈曲した。刺激が全身に波及するため，ボディのどの位置に触れても屈曲をした。

さらに測定により求めた，ジョイント角度とポテンシャルエネルギーの関係を図5に示す。ジョイント角度  $-10^\circ$  と  $125^\circ$  の辺りでそれぞれ安定領域を有していることを確認した。

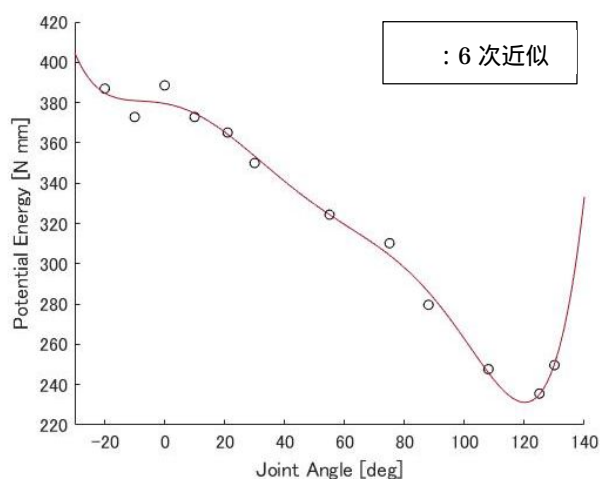


図5 双安定力学の理論解析結果



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 4件）

1. 著者名 Masaki Yurugi, Makoto Shimanokami, Toshiaki Nagai, Jun Shintake, Yusuke Ikemoto	4. 巻 11
2. 論文標題 Cartilage structure increases swimming efficiency of underwater robots	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-90926-9	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 Shuya Watanabe, Yusuke, Ikemoto, Jun Shintake	4. 巻 25
2. 論文標題 Modeling and Characterization of Tensegrity Structures Integrating Dielectric Elastomer Actuators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 1-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adem.202201471	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 Shuya Ishikawa, Yusuke Ikemoto	4. 巻 34
2. 論文標題 Effects of the Mechanical Closed-Loop Between the Body and the Ground on the Postural Balance of Gaits	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 808 ~ 816
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2022.p0808	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 Yusuke Ikemoto, Kenichiro Nishimura, Yuichiro Mizutama, Tohru Sasaki, Mitsuru Jindai	4. 巻 32
2. 論文標題 Network Connectivity Control of Mobile Robots by Fast Position Estimations and Laplacian Kernel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 422 ~ 436
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2020.p0422	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20件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 清水 麻佑, 池本有助
2. 発表標題 環境と接する圧電素子を搭載した発振回路の実現及び歩行ロボットへの適用
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第72期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉永隼, 林祐介, 池本有助
2. 発表標題 左右対称な筋骨格を有し非対称な運動を誘発する四脚ロボットの開発
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第72期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田将成, 新竹純, 池本有助
2. 発表標題 ジョイントの瞬発・双安定力学系を活用したテンセグリティ：機械的アクションポテンシャル運動生成
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 島ノ上諒, 万木将暉, 新竹純, 池本有助
2. 発表標題 環境に遍在するモノを活用したカモフラージュ水中ロボットの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林祐介, 大西功二, 新竹純, 池本有助
2. 発表標題 テンセグリティ・スパインを搭載した四脚ロボットの脊柱剛性と歩容パターンの関係調査
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊修也, 池本有助, 新竹純
2. 発表標題 誘電エラストマーテンセグリティアクチュエータ
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masanari Harada, Jun Shintake, Yusuke Ikemoto
2. 発表標題 Development of Tensegrity-Spine Joints Realizing Instantaneous Motions with a Mechanical-Action Potential
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Swarm Behavior and Bio-inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Hayashi, Koji Onishi, Jun Shintake, Yusuke Ikemoto
2. 発表標題 Investigation of a gait to body stiffness variations for tensegrity-spine quadruped robot.
3. 学会等名 International Conference on Advanced Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Shimanokami, Masaki Yurugi, Jun Shintake, Yusuke Ikemoto
2. 発表標題 Development of an Underwater Robot that Realizes Invisibility with Ubiquities Environmental Objects
3. 学会等名 International Conference on Advanced Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Harada, J. Shintake, and Y. Ikemoto
2. 発表標題 Development of Tensegrity-spine Joints Realizing Instantaneous Motions with a Mechanical-action Potential
3. 学会等名 THE 4TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SWARM BEHAVIOR AND BIO-INSPIRED ROBOTICS (SWARM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Hayashi, K. Onishi, J. Shintake, and Y. Ikemoto
2. 発表標題 Investigation of a gait to body stiffness variations for tensegrity-spine quadruped robot
3. 学会等名 The 7th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Shimanokami, M. Yurugi, J. Shintake, and Y. Ikemoto
2. 発表標題 Development of an Underwater Robot that Realizes Invisibility with Ubiquities Environmental Objects
3. 学会等名 The 7th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 花井澗, 大西功二, 新竹純, 池本有助
2. 発表標題 機械的アクションポテンシャルに基づくダンゴムシ型ロボットの俊敏逃避行動の実現
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会. 21A1-E08.
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 万木将暉, 三品博暉, 新竹純, 池本有助
2. 発表標題 柔らかさと硬さを両立するヒレを搭載したエイ型水中ロボットの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会. 1P1-C01.
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石川修也, 金純杞, 坂本悠, 藤岡楽人, 池本有助
2. 発表標題 腱駆動型脚ロボットにおける制御系・機構系環境間の力学情報を同時記録可能な計測システムの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会. 1A1-E04.
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸田将也, 万木将暉, 新竹純, 池本有助
2. 発表標題 Physical I.D.: 物理的に複製困難な人工スキンの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会. 1A1-C09.
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 万木将暉, 三品博暉, 新竹純, 池本有助
2. 発表標題 軟骨を活用したエイロボットの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊智哉, 大西功, 新竹純, 池本有助
2. 発表標題 テンセグリティ構造を用いた歩行ロボットの設計・開発
3. 学会等名 第25回創発システム・シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三品博暉, 万木将暉, 新竹純, 池本有助
2. 発表標題 インギンチャクロボットの研究開発
3. 学会等名 第25回創発システム・シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大西功二, 渡邊智哉, 新竹純, 池本有助
2. 発表標題 アンチフラジャイル特性に基づくテンセグリティ構造物の剛性設計手法の提案
3. 学会等名 第25回創発システム・シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 テンセグリティ構造物、及びテンセグリティ構造物の係止部	発明者 池本，原田，新竹	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-168720	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究 分 担 者	新竹 純  (Shintake Jun)  (10821746)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教   (12612)	

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
---------	---------