

平成 30 年 6 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12119

研究課題名(和文)カエル生体筋で駆動する遊泳ロボットの開発

研究課題名(英文)Development of Swimming Robot Driven by Frog Muscle

研究代表者

清水 正宏 (Shimizu, Masahiro)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：50447140

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：生体力学的評価と知能機械システムとしての高度化に基づき、空気中でも利用可能な生体筋アクチュエータのパッケージングを行った。さらに、カエル型遊泳ロボットのマイコンによる遠隔制御を可能とした。これにより、広いパラメータのばらつき下における、生体力学的検証が可能となる。ここまでで行った、流体力学的評価のためのDPV(可視化画像流速計測)システムによって、筋骨格構造の働きと流体力学的影響の関係をより深く検証することが可能となる。従来、生理学的溶液中のみで利用の可能だった生体筋アクチュエータをより広汎な環境で利用することが可能となり、生体融合機械システムの新展開につながると期待される。

研究成果の概要(英文)：We developed a packaged actuator consisting of a muscle tissue of a frog and physiological solution. We controlled the frog robot by micro controller. Based on this system, we can various biomechanical verification by utilizing our proposed system. Based on DPV analysis, we can deeply estimate the relationships between musculoskeletal structure and hydrodynamic effect.

研究分野：バイオロボティクス

キーワード：アフリカツメガエル 生体・機械ハイブリッドシステム 遊泳運動

### 1. 研究開始当初の背景

生体はさまざまな環境に適応して、歩行、飛行、遊泳などの運動を発現する。生体の運動は、脳、身体、環境の相互作用の中から生み出される。特に、筋肉は高い質量対出力比を有し、エネルギー効率が優れているという特性を持つ、生体の運動の駆動源であり、生体固有の骨格構造とともに働くことで生体独自の運動が発現する。そして、生体の発現した運動は環境に変化を及ぼす。また、筋肉は環境の変化に影響されることで、運動の様式を変化させるといふ、生体の運動に関して重要な役割を持つ。したがって、生体の運動機能の解明には、このような相互作用下での筋肉の機能を解明する必要がある。そのためには、この相互作用に介入し、筋肉の挙動を分析可能にしなければならない。しかし、生体内で起こる筋肉の挙動の分析は困難であるため、機能解明が難しい。よって、生体の身体を再現した、筋肉が生体内と同様の挙動を示すことのできる、生体・機械ハイブリッドシステムが必要である。

カエルは四肢を有する生物の中でも、遊泳能力に優れた生物である。アフリカツメガエルは水中でのみ生活し、主要な移動様式は遊泳であり、その筋骨格系は遊泳に有利な構造で、特に優れた遊泳能力を有する生物である。Herr et al. は、ヒョウモンガエルから採取した 2 本の筋肉を魚型ロボットの尾びれを駆動させる駆動源として用い、生体筋をロボットのアクチュエータとして採用した。Richards et al. は、アフリカツメガエルから排腹筋を摘出し、水中をかくひれ構造の駆動実験から、このカエルの遊泳中の流体の影響を調査している。しかし、Herr et al. はカエルの筋肉で、その筋肉が本来活動していた身体構造ではない魚型ロボットを駆動させているため、筋肉の機能を適切に引き出せていない。また、Richards et al. は、生体筋を用いて、生体の運動機能の解明を行っているが、生体筋を直接駆動源とするものではなく、筋肉の運動への寄与を解明することは困難であると思われる。そのため、生体の運動機能の解明のためには、生体の筋肉に着目し、その筋肉を駆動源とする生体の筋骨格系を再現している生体・機械ハイブリッドシステムを開発する必要がある。また、Richards et al. は遊泳において排腹筋が主に駆動される筋であることを示唆している。そこで、ロボットに遊泳能力を獲得させるためには、周囲の流体の抵抗を遊泳時の推進力に変え、筋の出力を遊泳に有利に用いる筋骨格系を再現する。さらに、運動の発現の大部分を担っている排腹筋を再現する必要があるとの着想に至った。

### 2. 研究の目的

本研究では、優れた遊泳能力を有するアフリカツメガエルに着目し、アフリカツメガエルの筋骨格系を再現したこのカエルの生体

筋で駆動されるロボットによる遊泳運動能力の実現を目的とする。ロボットは、カエルの後脚の筋骨格構造を再現し、この生体の遊泳時に主に駆動される排腹筋を駆動源とする。その結果、作製したロボットによる、生体の運動機能の実現を達成し、その遊泳能力に対する生体力学的評価を行うことを主な目的とする。また、この研究で培った技術を一般的なロボットにおける生体筋の利用のための布石にすることも大きな目的としている。

生体の脳などの神経系と身体、環境の相互作用の中での、筋肉の本来発揮する機能の解明のためには、筋肉が生体内と同様の挙動を示すことの可能な状態におき、この相互作用下で実験を行う必要がある。しかし、人為的に生体の身体構造に介入することは難しいため、実際の生体内に筋肉がある状況では、外部からの生体観察や EMG 等の、生体の外側に現れる情報しか読み取ることができない。そのため、筋肉にとって、生体と同様の環境を再現可能な生体・機械ハイブリッドシステムの開発を提案する。この相互作用下で、生体の身体構造を再現したロボットへの介入が可能であるため、構成論的手法を用いて、真に生体の運動機能の解明が期待される。

### 3. 研究の方法

研究期間を 2 年間に設定する。H27 年度に、アフリカツメガエルの筋骨格構造を再現する生体・機械ハイブリッドシステムを実現する。具体的には、坐骨神経-排腹筋の等尺性張力特性評価、生体筋を骨格構造に実装する遊泳ロボットの設計、生体筋の骨格構造への実装を行う。H28 年度においては、生体力学的評価と知能機械システムとしての高度化を目指す。具体的には、遊泳時における股関節、膝関節、足首関節軌道の評価、さまざまなロボットに実装可能とするための生体筋の工学的汎化を目標とする。以上によって、生体筋で駆動されるアフリカツメガエル型の生体・機械ハイブリッドシステムの実現を目指す。

アフリカツメガエルを生体力学的に再現する生体・機械ハイブリッドシステムを構築する。

#### 1. 坐骨神経-排腹筋の等尺性張力特性評価

筋肉を任意に駆動させる方法として電気刺激を採用する。筋肉に直接電極をさし込む方法は、筋肉への侵襲性が大きい。そのため、筋組織を傷つけ、筋肉の駆動特性を変化させる可能性がある。また、電極の挿入位置によっては筋肉の表面にのみ電気が通るため、正しく筋肉を駆動させられないことが考えられる。そのため、筋組織と坐骨神経を同時に取り出し、坐骨神経に電気刺激を印加する。筋肉への侵襲性は小さい。そして、坐骨神経の長さの分だけ電極を遠くに配置できることから、ロボットに実装する際に電

極の取り付け位置の自由度が向上する．ここでは、ロボットへの実装へ向けて

A) 電気刺激の周波数に依存する筋肉の動特性

B) 電圧の違いに依存する動特性

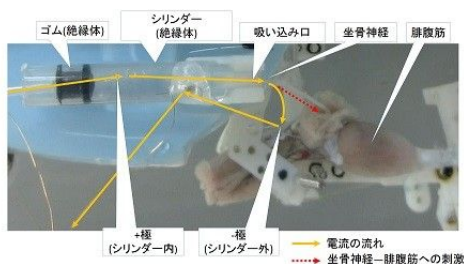
を評価し、実装時に安定して強縮として筋肉の活動を利用可能なパラメータを検討する．

2. 生体筋を骨格構造に実装する遊泳ロボットの設計

ロボットの後脚をアフリカツメガエルの生体力学的特徴と一致するように設計する．骨格は、足と胴体との接続部分である腸骨と坐骨を一体とみなした体幹、大腿骨、腔排骨、そして、距骨、中足骨、足指骨の3つを一体とみなした足ひれ部分を再現する．足ひれ部分は、距骨と中足骨と足指骨を一体とみなし、中足骨と足指骨の関節を再現する．この再現は、長さ、可動域、重量を合わせ込み、生体と同様に振る舞う筋骨格系を構成する．これにより、腓腹筋を生体と同じ場所にそのまま実装することができる．

3. 生体筋の骨格構造への実装

坐骨神経に電気刺激を印加するための電極として、サクシオン電極を採用する．下図に示すような構造を設計している．図に示すようにサクシオン電極は、シリンダー内部と外部が吸い込み口以外が絶縁されている．シリンダー内部にリンゲ液を吸い込んだ状態で、電流を送ると、+極から-極にこの口を通り、電流が流れる．そのため、この部分に坐骨神経を吸い込むことで、入り口をふさぐと、電流は+極から、神経を通り、-極に流れることとなり、電極が水中でも、坐骨神経に電気刺激を印加できる．既に、基本的に動作することを確認している．遊泳に実装するために、ロボット身体の内部にサクシオン電極を封入する．



図：サクシオン電極の実装

平成28年度、29年度（追加実施期間）：生体力学的評価と知能機械システムとしての高度化

前年度に完成させた生体・機械ハイブリッドシステムを様々な環境で評価し、改良することで、アフリカツメガエルの適応的遊泳のメカニズムを解明する．

4. 遊泳時における股関節、膝関節、足首関節軌道の評価

生体の遊泳時の運動学的データをハイスピードカメラで計測し、構築したロボットと比較する．また、流体力学的評価のために、DPIV（可視化画像流速計測）システムによって、筋骨格構造の働きと流体力学的影響の関係を明らかにする．

5. さまざまなロボットに実装可能とするための生体筋の工学的汎化

本研究における生体筋の制御技術は、カエル型ロボットのみならず、ロボットアーム機構など、他の一般的なロボットのための生体筋の制御技術としても利用できることが期待される．

4. 研究成果

本研究では、優れた遊泳能力を有するアフリカツメガエルに着目し、このカエルの生体筋で駆動されるロボットによる遊泳運動能力の実現を目的とする．ロボットは、カエルの後脚の筋骨格構造を再現し、この生体の遊泳時に主要に駆動される腓腹筋を駆動源とする．その結果、作製したロボットによる、生体の運動機能の実現を達成し、その遊泳能力に対する生体力学的評価を行うことを主な目的とする．また、この研究で培った技術を一般的なロボットにおける生体筋の利用のための布石にすることも大きな目的としている．通常、ロボット工学において、利用されてこなかった生体由来材料の利用を可能とすることから、ロボット技術のより広い社会還元にもつながり、重要である．

平成29年度には、昨年度の生体力学的評価と知能機械システムとしての高度化に基づき、空気中でも利用可能な生体筋アクチュエータのパッケージングを行った．さらに、カエル型遊泳ロボットのマイコンによる遠隔制御を可能とした．これにより、広いパラメータのばらつき下における、生体力学的検証が可能となる．ここまでで行った、流体力学的評価のためのDPIV（可視化画像流速計測）システムによって、筋骨格構造の働きと流体力学的影響の関係をより深く検証することが可能となる．従来、生理学的溶液のみで利用の可能だった生体筋アクチュエータをより広汎な環境で利用することが可能となり、生体融合機械システムの新展開につながるかと期待される．

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

Masahiro Shimizu

Bio-machine Hybrid Robot Based on Mechanobiology

Human Brain Project Symposium:  
Building Bodies for Brains & Brains for  
Bodies  
2017

清水 正宏  
生体 - 機械融合システム - 機械刺激で成長  
するサイボーグを目指して -  
混沌研究会  
2017

Masahiro Shimizu, Daisuke Ishii, Htoshi  
Aonuma and Koh Hosoda  
Frog Cyborg Driven by Biological Muscle  
Actuators That Packaged Physiological  
Solution  
AMAM2017  
2017

Masahiro Shimizu, Daisuke Ishii,  
Hitoshi Aonuma and Koh Hosoda  
Swimming Frog Cyborg Which  
Generates Efficient Hydrodynamic  
Propulsion with Webbed Foot  
ICBS2017  
2017

〔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〕

ホームページ等  
[http://www-arl.sys.es.osaka-u.ac.jp/index\\_ja.html](http://www-arl.sys.es.osaka-u.ac.jp/index_ja.html)

6. 研究組織

(1)研究代表者

清水 正宏 (SHIMIZU, Masahiro)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授  
研究者番号: 50447140