

令和 3 年 6 月 5 日現在

機関番号：17104  
研究種目：挑戦的研究（萌芽）  
研究期間：2019～2020  
課題番号：19K22875  
研究課題名（和文）深層学習を用いたカエル脚部のサイボーグ化  
  
研究課題名（英文）Cyborgization of Frog Legs Using Deep Learning  
  
研究代表者  
池本 周平（Ikemoto, Shuhei）  
  
九州工業大学・大学院生命体工学研究科・准教授  
  
研究者番号：00588353  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、カエルの脚を例に、生物の身体を制御対象と捉えて制御理論に則った制御・解析するための基礎技術の確立を目指している。この目的を達成するため、本研究では、NNに対象の状態方程式に相当する非線形関数を近似させる。このとき、NNの入力である現状態・現入力を表すベクトルが定められ、そのNNから等価な線形状態方程式を抽出することができ、制御理論に則った制御系設計ができる。カエルの脚に多電極アレイを設置し、電気刺激によって運動を観測することができれば、その制御理論に則った制御が行えると考えた。研究期間を通じ、手法の提案・成果報告は完了したが、コロナ禍により評価実験を完了するには至らなかった。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

生物の身体は、その運動のための優れた特性を持っている。しかし、生物の身体はあまりに複雑であるため、その特性を数式（状態方程式）で表現し、扱うことは現実的に不可能である。本研究は、何らかの方法で生物の身体の状態方程式を手に入れ、生物の身体を制御対象として扱うことができないか？という着目で実施された。具体的には、一旦NNによって状態方程式を近似した後、そこから等価な数式を抜き出すというアイデア・手法を提案し、その基礎技術の確立を行った。一方で、コロナ禍の影響により、評価実験までを完了することはできなかった。提案手法の一般性は高く、今後、多くの応用可能性を秘めていると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aim to develop a fundamental method to control and analyze biological systems in accordance with control theory, using frog legs as an example. To accomplish this goal, we approximate the nonlinear state equation by using NN. If the input of the NN, which is the vector representing the current state and the current input, is determined, the equivalent linear state equation can be extracted from the NN, and the control system can be designed in accordance with the control theory. If we can observe the motion of a frog by electrical stimulation with a multi-electrode array on its leg, we can design a control system based on the control theory. The evaluation experiment has not been accomplished due to COVID-19.

研究分野：生物規範ロボティクス

キーワード：生物規範 ニューラルネットワーク 学習制御

### 1. 研究開始当初の背景

生物の身体が、その運動の実現に優れた特性を持っているという考え方は、ロボティクスにおいて極一般的なものといえる。そのため、生物の身体、例えば筋骨格や神経回路の構造、アクチュエータである筋肉、センサである各種受容器を参考にし、それを規範としてロボット開発に取り組むことで、従来にない新しい知見を得るアプローチが注目を集めてきた。しかし、生物の身体は、一般的に、工学的なシステムに比べて構造やメカニズムが非常に複雑であるため、それらの生物規範ロボットは、解析的にモデル化することが非常に難しい場合が多い。つまり、生物規範ロボットは、その生物を規範・模倣する度合いが高まるほど、制御対象として運動の特性を状態方程式で解析的に表現することが難しく、結果的に制御が難しいロボットになる。そのため、これまで、生物規範ロボティクスの分野では、生物の持つ特徴を単純化したり、ある一部分に着目したりすることで、それを模倣したロボットやシミュレーションを通じて特性を評価するに留まってきた。しかし、単純化する、あるいは一部分を抜き出すという対処により、生物の身体が本来持つ機能が失われる可能性は否定できず、そこにはトレードオフが存在し続けてきた。

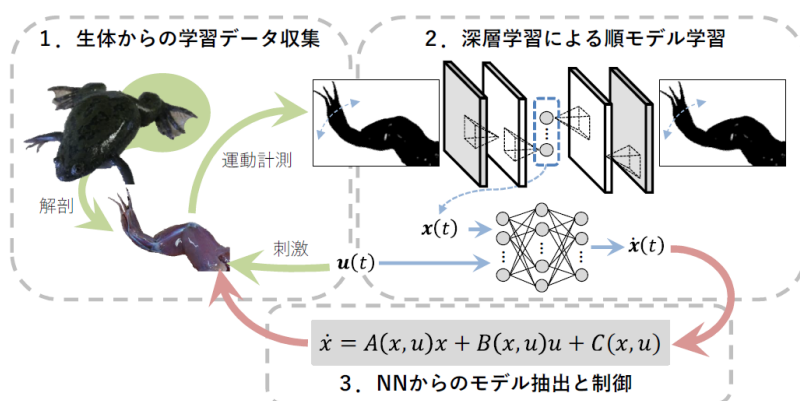
一方、生物を模倣したロボットの開発の究極は、明らかに、対象とする生物そのものをロボットとして思いのままに制御することである。つまり、もし、対象とする生物そのものをロボットとして、制御対象として、工学的なシステム論・制御理論の枠組みで扱うことができたなら、このトレードオフを打破することにもつながると言える。

### 2. 研究の目的

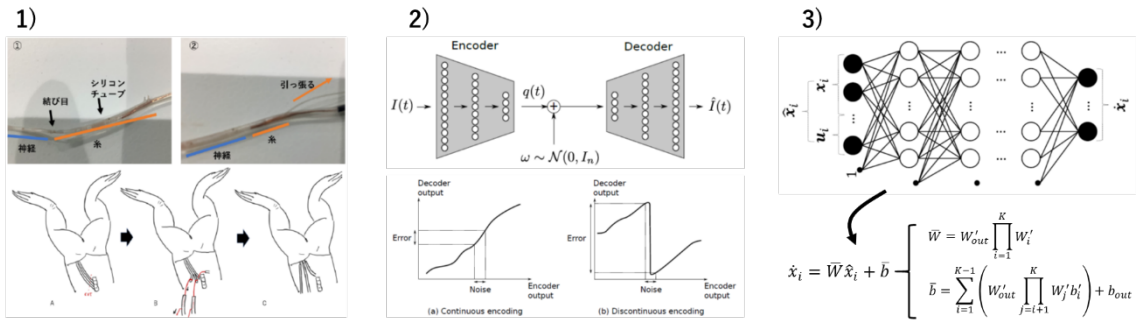
そこで本研究は、このような発想の転換に基づき、生体そのものを制御対象と捉えて制御・解析するための基礎技術を確立することで、生物が持つ知能・機能の工学的な理解・応用のための新しい方法論の構築を目指すこととした。具体的には、1) アフリカツメガエルの下肢を題材とし、電気刺激に対する運動を動画像で記録する、2) 深層学習を用い、状態ベクトルとして用いることができる動画像の潜在ベクトルを得る、3) ニューラルネットワークで状態方程式に相当する写像を近似し、その後、そのニューラルネットワークに等価な数式を抽出する手法により、解析的な状態方程式を得る、という工程による目標達成を目指した。よって、最終的な目的は、実際にアフリカツメガエルの下肢の制御系設計が可能であることを示すこととした。

これには、大きく2つの挑戦的研究としての意義がある。1つ目は、生物の身体を制御対象として捉えるという視点の創出である。生物の身体構造の合目的性は、もはや疑いを持たれることもない。しかし、同様の多関節システムの制御に着目し続けてきたロボットの制御論の視点からは、具体的にその合目的性が示されることはほとんどない。そのため、本研究計画の遂行により、生物の身体を制御対象として捉え、制御理論に基づく制御・解析を適用することが可能になれば、当該研究分野を革新する強烈なインパクトを与える可能性がある。2つ目は、NNから解析的なモデルを抽出するという方法論の確立である。生物の身体を制御対象として状態方程式で記述することが極めて難しい問題に対し、本研究では、近年長足の進歩を遂げた深層学習を使い、データ駆動な方法によって状態方程式に相当する非線形関数を近似し、その結果から等価な数式表現を得ることで制御理論を基盤とした制御器設計・解析を行うアプローチをとる。本来、複雑なロボットの制御・解析に用いることを主眼として提案された同アプローチではあるが、生物の身体に対しても適用可能となれば、今後、工学を用いた科学研究において、多くの挑戦的研究を先導する強力な方法論として応用が広がる可能性がある。

### 3. 研究の方法



左図に本研究で提案する方法の全体像を示す。前述の通り、本研究の提案は、大きく3つの要素からなる。これらの提案について、中心となる方法についてまとめた図を次頁上に示す。当該図は、左、中、右に分かれており、それぞれの上部に振られた番号で左図と結びついている。



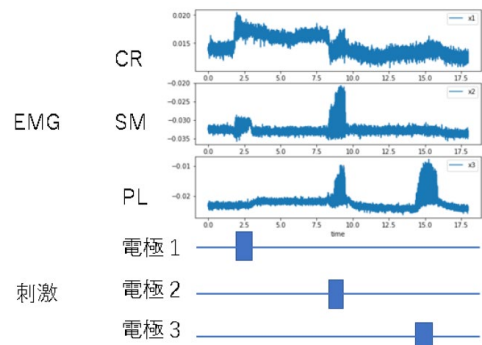
項目1では、アフリカツメガエルの下肢を電気刺激によって駆動し、データ収集を行った。ジエチルエーテルにより麻酔をかけたアフリカツメガエルの成体の頭部を切除し、脊髄から下肢までのみを残す。内臓を除去し、第7脊髄神経、第8脊髄神経、第9脊髄神経を糸で結紮する。これは、チューブ型電極（左上）を用いるための工程である。左下に当該手順の模式図を示す。神経を糸で結紮することで、分解酵素が神経に流入することを防ぎ、神経を保護することができる。

項目2では、畳み込みオートエンコーダを用いる。単に畳み込みオートエンコーダを用いる場合、潜在空間における近傍と実際の状態の近傍が一致しない問題が生じる。そのため、ノイズを利用し、潜在空間における急激な特徴の変化を抑えるように正規化項をコスト関数に加える手法を提案した。当該手法の模式図を上図中に示す。

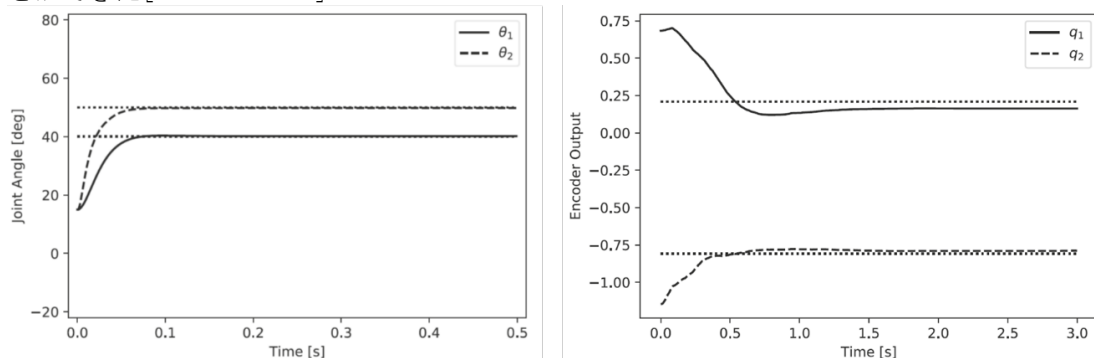
項目3では、ニューラルネットワークで用いる活性化関数を ReLU のような区分線形な関数に限定した場合、入力ベクトルが定まる度に、非常に簡単な手続きによって等価な線形回帰モデルが得られることを利用した手法を提案した。当該手法の模式図を上図右に示す。これにより、制御系設計に利用できる解析的なモデルを得ることが可能になる。

#### 4. 研究成果

研究代表者の池本は、2019年度より、大阪大学から九州工業大学へと異動し、また、2020年度からはコロナウイルス感染状況の悪化によって、項目1に関わる実験の実施が困難となった。そのため、実験が必要な項目1については、データ収集を行う工程・システムの確認に留まった。右図は、アフリカツメガエルの下肢に存在する主要な筋肉（大腿筋、半膜様筋、足底筋）について、電気刺激に応じた活動が実際に生じていることを確認した結果である。このように、今後、データ収集を行うことが可能であることが確認できたが、前述の事情により、研究期間内で具体的な成果発表に至ることはなかった。



項目2、項目3については、[Ikemoto et al. 2021]を中心として着実に成果報告を行うことができた。下図にニューラルネットワークから抽出された数式に基づく制御（2自由度ロボットアームのシミュレーション）の結果を示す。下図左は、関節角度を用いて通常通り状態空間を構成した場合の結果で、下図右は、畳み込みオートエンコーダを用い、動画像情報から状態空間を構成した場合の結果である。このようなシミュレーション結果から、項目2、項目3での提案の妥当性を示すことができた。また、加えて、現実のデータではノイズの影響が大きいことから、ノイズを利用したニューラルネットワークに関する研究にも着手し、成果報告に結び付けることができた[Ikemoto 2021]。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ikemoto Shuhei, Takahara Kazuma, Kumi Taiki, Hosoda Koh	4. 巻 2
2. 論文標題 Neural Model Extraction for Model-Based Control of a Neural Network Forward Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SN Computer Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s42979-021-00456-4	査読の有無 無
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 Ikemoto Shuhei	4. 巻 448
2. 論文標題 Noise-modulated neural networks for selectively functionalizing sub-networks by exploiting stochastic resonance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neurocomputing	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neucom.2020.05.125	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 池本 周平, 組 泰樹, 細田 耕
2. 発表標題 状態方程式を近似するNNからの数式モデル抽出に基づくモデル予測制御
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池本 周平
2. 発表標題 ノイズと創発：確率共鳴による生物規範型の情報処理
3. 学会等名 創発システムシンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019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
研究 分担 者	清水 正宏  (Shimizu Masahiro)  (50447140)	大阪大学・基礎工学研究科・准教授   (14401)	

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