

計算する人工筋肉

～物理リザーブ計算により分岐構造を含む多様なパターンを生成～

概要

今、安全にしなやかに人間と協働するために、生物のようにやわらかい素材でできたロボットが注目されています。また、実用化に向けて、やわらかさをいかしたロボット制御が課題とされています。

京都大学大学院情報学研究科 明石望洋助教と東京大学大学院情報理工学系研究科 中嶋浩平准教授ら、また、株式会社ブリヂストンの共同研究グループは、やわらかいロボットのアクチュエータとして利用される人工筋肉が生み出す豊かな動きをニューラルネットワークとして計算に活用することで、人工筋肉を様々なパターンに制御できることを報告しました。

本研究では、空気圧人工筋肉と呼ばれるやわらかい駆動部材に注目し、その豊かな動作を計算に利用することで、リズムカルなパターンやカオスと呼ばれる複雑で予測困難なパターンなどの様々な動作を、自律的に生成可能なことを示しました。このようなパターンは、ロコモーションや繰り返し運動に利用され、従来外付けの振動子によって生成されてきましたが、それら振動子をロボットから取り外せることを意味します。更に、分岐現象と呼ばれるパターンの変化構造もロボットの駆動部材に学習できることを世界で初めて報告しました。

この結果はある特定の動作パターンを学習することで、学習データに含まれていない質的に異なる様々なパターンの制御が可能になることを示唆しており、ロボットのハードウェア・ソフトウェアの両面での効率化と、より適応的でしなやかな動作を行うロボットの開発に貢献することが期待されます。

この研究成果は 2024 年 4 月 19 日に国際学術誌「Advanced Science」にオンライン掲載されました。



図1(左)人工筋肉により構成されるソフトロボットアームのイメージ。(右上)研究の全体像。ソフトロボットの部材である人工筋肉に着目し、ラバーの生成する複雑な応答をニューラルネットワークとして活用することで、人工筋肉自身の動作を制御する。(右下)本研究の成果はロボットの動作学習の効率化やハードウェアの単純化への貢献が期待される。(クレジット:MEDICAL FIG.)

1. 背景

やわらかい部材から成るロボットは、ソフトロボットと呼ばれ、安全性や柔軟性などの利点を備え、人と接触するウェアラブルデバイスや災害地などの不整地で運用する救助ロボットなどへの応用が期待されています。従来使われているマッキベン型空気圧人工筋肉は高出力・軽量で、幅広いソフトロボットに使われるやわらかい駆動部材です。マッキベン型空気圧人工筋肉はゴムチューブとそれを覆う編み紐からなり、チューブに空気圧を入力することで伸縮や屈曲の動作を実現します。しかし、このソフトロボットにやわらかな動きを与える空気圧人工筋肉には非線形性・履歴依存性があるため、固有の制御を必要とします。

近年、人工知能(AI)技術の発展により、様々な物理現象を計算に活用する物理リザバー計算(注 1)が提案されてきました。物理リザバー計算では、物理現象の時間発展をニューラルネットワーク代わりに活用することで、物理現象に現れる非線形性や履歴依存性を計算に活用します。本研究では固有の制御が必要とされていた、人工筋肉の複雑ダイナミクスを物理リザバー計算における計算資源として積極的に活用することで、従来は外部の装置が行ってきた人工筋肉の動作推定や制御を人工筋肉自身のダイナミクスによって行えることを示しました。更に、分岐構造(注 2)を人工筋肉に埋め込むことで、性質の異なる様々な制御パターンを同時に学習させられることを確認しました。これらの成果は、従来やわらかいロボットの外部に取り付けていたセンサー・制御器・スイッチング機構などが行っていた情報処理をロボットの身体自身が行えることを意味し、ロボットハードウェアの単純化によるソフトロボットの実用化と性能向上に貢献することが期待されます。

2. 研究手法・成果

初めに、人工筋肉のダイナミクスが計算に活用できるかを確認するために、計算能力の指標である情報処理容量(注 3)の解析を行いました。これによって、人工筋肉から測定した圧力・電気抵抗・長さ・加重といったセンサー値が、入力をどの程度非線形・履歴依存に変換しているかを定量的に示し、物理リザバー計算に用いることができることを示しました。

次にこれらのセンサー値によって実際に物理リザバー計算を行い、人工筋肉の長さセンサーの値を、圧力値・電気抵抗値・荷重値といった他のセンサー測定値によって、推定できることを示しました。従来人工筋肉の制御のためにはレーザーセンサーにより長さを測定することが必須でしたが、このセンサーは固い部材であり、人工筋肉の利点である柔軟性や軽量性を損なうものとされていました。本手法は物理リザバー計算によって、長さセンサーの行っていた情報処理を他のセンサーで代替できることを示しており、人工筋肉の利点を発揮するための重要な成果と言えます。

更に、人工筋肉の制御も物理リザバー計算によって行うことを試みました。周期的なパターンやカオス(注 4)と呼ばれる複雑で予測困難なパターンを外部の非線形性振動子や記憶装置を用いずに人工筋肉に埋め込むことができるかを確認しました。ここでは物理リザバー計算により生成した出力を入力に戻す閉ループの構成をとることにより、人工筋肉の自律的なパターンを制御しています。結果、従来シミュレーションでしか示されていなかった非線形振動子の埋込や、人工筋肉においては初となるカオスの実験による生成を確認しました。これらの基本的なパターンは Central pattern generator(CPG)として、ロボット制御においては、ロコモーションなどの繰り返し運動に活用されます。この意味で、この実験では、ロボットに外部的に取り付けていた CPG を人工筋肉へ内在化できることを示しています。

最後に上記の複数のパターンを同時に埋め込む分岐埋込(注5)の実験を行いました。ある条件を変化させたときに現れる、動作の急激な変化は分岐現象と呼ばれます。そして、この分岐現象を計算機上のニューラルネットワークに学習させる手法が分岐埋込として近年報告されています。ここでは、人工筋肉に与える荷重値を分岐条件として、特定の分岐現象を人工筋肉の動作に埋め込めることを確認しました。これによって周期的なパターンのみを学習させた際にカオスパターンを生成できることや、逆にカオスパターンを学習させた際に周期的なパターンを生成できることを示しました。これは、多数ある所望のパターンをロボットに学習させたいときに、ある特定のパターンを学習するだけで、それらを一挙に学習するといったような、ロボット制御にかかる学習の本質的な効率化の可能性を示唆しています。ソフトロボットはやわらかさゆえにその材料特性が比較的早く変化し得るため、少ないデータでの学習が実用上重要とされています。また、環境が変化したときに、自動的にパターンを切り替える自律的なスイッチング機構としての活用も期待されます。このような分岐埋込の物理機構での実証は世界初です。

3. 波及効果、今後の予定

本研究では、従来ロボットに取り付ける外部機器が行っていた動作推定や制御といった情報処理が、人工筋肉というロボットの身体に相当する部材で行えることを示しました。これによって、ロボットの外部装置・中央処理機・通信の負担を減らすことにつながり、ロボットのハード・ソフト両面でのよりスマートな設計に貢献することが期待されます。また、分岐埋込の実験では、特定のパターンを学習することで分岐に紐づいた様々なパターンも一挙に学習できることを示しました。今回の成果が示したように、制御器だけでなく身体を効果的に使って情報処理を行うロボットの研究・開発が進めば、生物のように脳と身体を巧みに扱う、しなやかな知能に対する構成論的理解につながることを期待されます。また物理リザーバー計算はソフトロボット以外でも光コンピュータや化学反応、自然現象などの様々な情報担体での活用が研究されています。今回得られた分岐埋込の成果は、従来計算機において困難であった情報処理であっても、その物理現象の計算特性に合致していれば、省計算能力で実行可能なことを示唆しています。これらの物理現象を用いた計算の研究に対しても、より高度な情報処理の実現や効果的な活用方法に対する知見を与えることが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学研究費助成事業（科研費）（課題番号：21KK0182, 22J01542, 22KJ1786, 23K18472）、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST（JPMJCR2014）の支援により実施されました。

<用語解説>

注1) 物理リザーバー計算 (physical reservoir computing)

リザーバー計算(reservoir computing)に基づく物理現象を機械学習に活用する手法。リザーバー計算は再帰型ニューラルネットワークの学習手法であり、ネットワークの全パラメータを最適化する典型的な誤差逆伝搬法に対して、中間層のパラメータは固定し、出力部のパラメータのみ最適化することが特徴である。中間層は固定されることから、ニューラルネットワークに限らない、様々な入出力応答を中間層として活用でき、物理現象によって代替した構成をとるものは物理リザーバー計算と呼ばれる。

注2) 分岐構造 (bifurcation structure)

力学系の質的な変化構造。力学系とは、ある決定論的な法則に従う時間発展システムのこと。力学系のパラメータを変化させたとき、あるパラメータ値で、システムのダイナミクスが周期ダイナミクスからカオスダイナミクスといったように、非連続的に、定性的に変化することを分岐と呼び、力学系は分岐構造を持つと呼ぶ。

注3) 情報処理容量 (information processing capacity)

力学系に対する情報処理能力の指標。力学系に独立同分布の入力を与えたとき、その力学系がどれだけ過去の入力を非線形に変換できるかを直交多項式に分解することにより定量化する。

注4) カオス

力学系の性質であり、システムが決定論的でありながら予測困難で複雑な挙動を呈すること。単純なモデル方程式をはじめ、大気、生物個体数、流体など幅広いモデル・現象で観測される。ロボティクスにおいても探索的な動作生成などに応用される。

注5) 分岐埋込

機械学習機による分岐構造の学習。機械学習機に力学系のダイナミクスと分岐パラメータの対を学習させることで、分岐によるダイナミクスの質的な変化を機械学習機に予測させる。ここでは、必ずしも質的な変化の両側を学習せずとも、片側のダイナミクスだけを学習させることで、両側のダイナミクスを生成することができる。

<研究者のコメント>

計算は脳だけで行われていると思われがちですが、身体も重要な役割を果たしています。近年の AI の急速な発展は、いわば計算機の脳の急速な進化ともいえます。この研究の成果が、生物のように実世界で身体をしなやかに操る知能の理解・開発の一助になれば幸いです。本研究は数学・物理の理論、最先端の機械学習の知見、そして人工筋肉の実機製造・実験に関する技術まで、大学と企業の基礎から応用までの力を結集することで得られた成果です。ご助力いただいたすべての人に感謝いたします。(明石望洋)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Embedding bifurcations into pneumatic artificial muscle (空気圧人工筋肉への分岐埋込)

著者：Nozomi Akashi, Yasuo Kuniyoshi, Taketomo Jo, Mitsuhiro Nishida, Ryo Sakurai, Yasumichi Wakao, and Kohei Nakajima

掲載誌：Advanced Science

DOI：10.1002/adv.202304402

< 参考図表 >

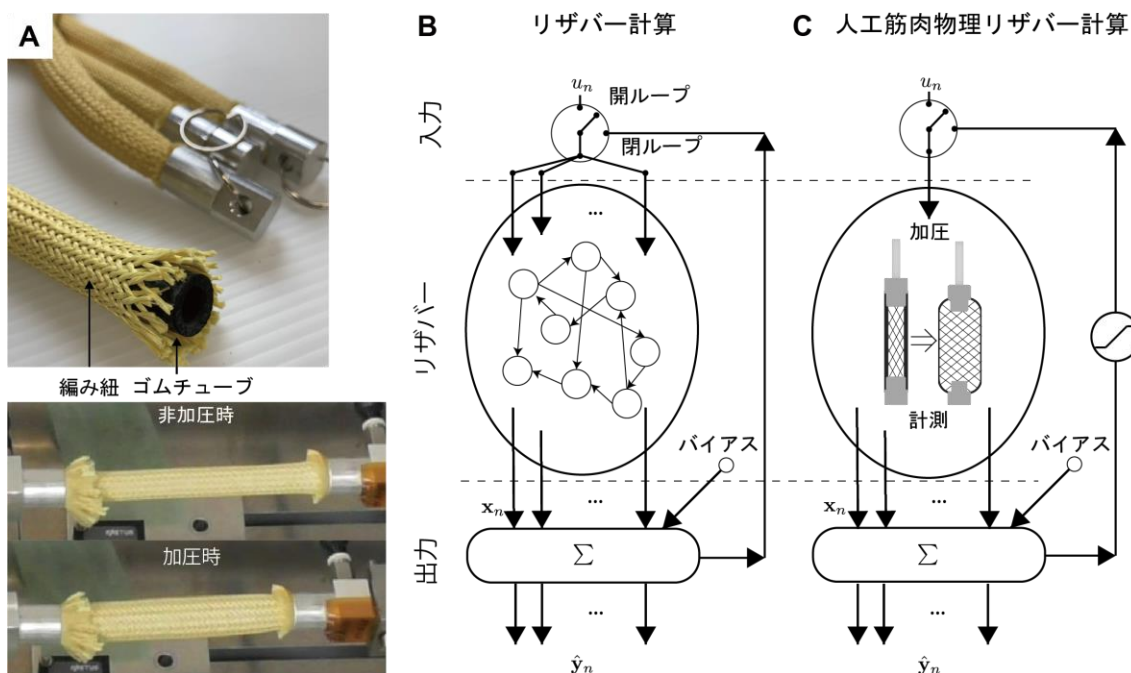


図2 A. (上)ゴムと編み紐から構成されるマッキベン型空気圧人工筋肉。(下)空気圧人工筋肉の空気圧による非加圧時(上)と加圧時(下)の応答。B. リザーバー計算の概観図。リザーバーは受け取った入力を非線形・履歴依存に変換し、最後に学習済の線形変換を行うことにより所望の出力を得る。C. 人工筋肉による物理リザーバー計算の概観図。人工筋肉に空気圧の形で入力を印可する。人工筋肉は非線形・履歴依存に空気圧に応答し、電気抵抗値などの状態をセンサーで計測し、学習済の線形変換を行うことで、所望の出力を得る。得られた出力を空気圧として人工筋肉に印可し直せば、閉ループの構成となり、人工筋肉の自律的なパターン制御が可能となる。

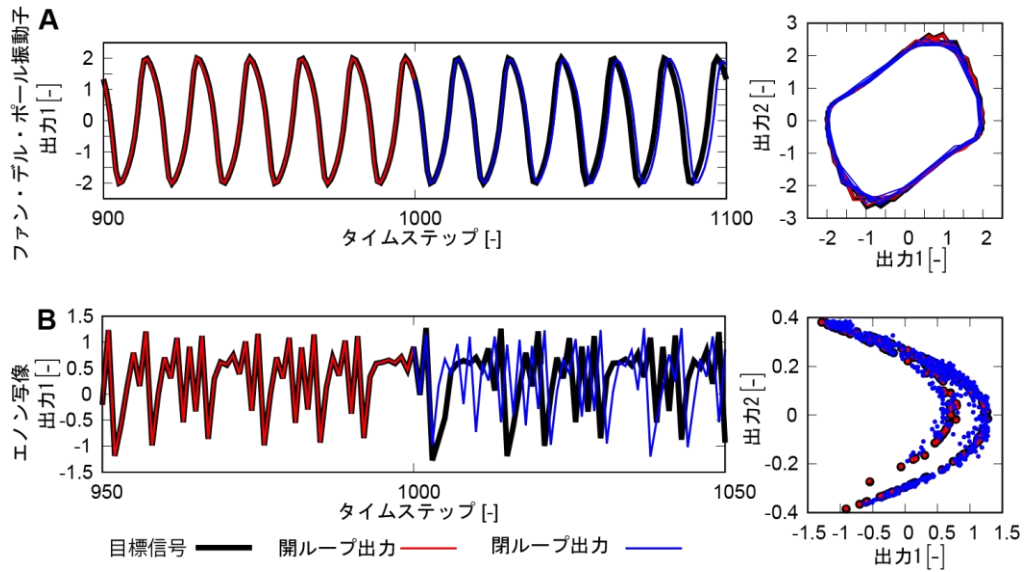


図3 物理リザーバ計算による人工筋肉のパターン制御。左は時系列のグラフ。右は軌道のグラフ。黒線がターゲット、赤線が開ループによる出力、青線が閉ループによる出力。A. 周期的なパターンであるファン・デル・ポール振動子の制御。B. カオス的なパターンであるエノン写像の制御。

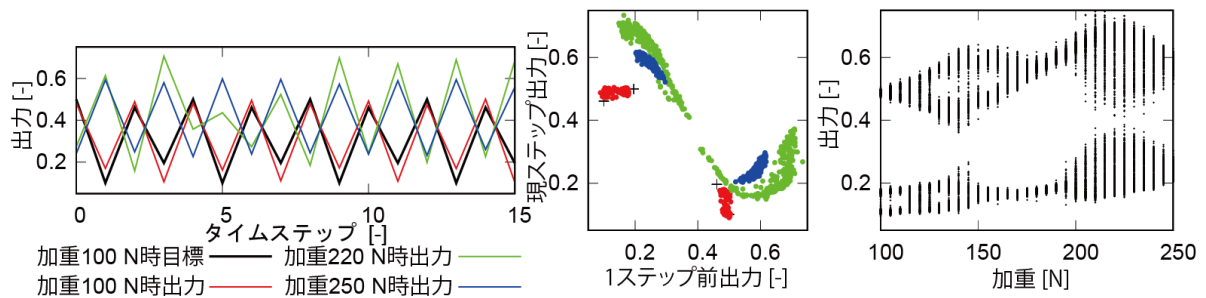


図4 物理リザーバ計算による人工筋肉への分岐埋込。左は時系列、中央は軌道、右は分岐図。黒線が加重100Nで学習した周期的なパターン。赤線、緑線、青線はそれぞれ加重100N, 220N, 250Nにおける人工筋肉の出力。220Nでは学習していないカオス的なパターンを生成することができる。