

## やわらかい人工筋肉のダイナミクスを用いた高精度センサーの生成

### 1. 発表者：

- 中嶋 浩平（東京大学 大学院情報理工学系研究科 情報理工学教育研究センター・  
連携研究機構 次世代知能科学研究センター 准教授）  
國吉 康夫（東京大学 大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 教授／  
連携研究機構 次世代知能科学研究センター センター長）  
南 友菜（東京大学 大学院情報理工学系研究科 先端人工知能学教育寄付講座  
学術支援専門職員）  
明石 望洋（東京大学 大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 博士課程2年生）

### 2. 発表のポイント：

- ◆空気圧アクチュエータに基づいた人工筋肉に関して、加圧駆動時にリアルタイムで高精度な長さ推定を実現しました。具体的には、人工筋肉のダイナミクスとリザバーコンピューティング（注1）と呼ばれる機械学習手法を組み合わせることで実現されました。
- ◆人工筋肉は、アクチュエートすると、一般に非線形ならびにヒステリシス（注2）を伴う応答を示し、固有の制御が必要な為、これまで人工筋肉の長さの推定には、外付けのレーザー変位計などを取り付け、計測するのが一般的でした。本研究では、人工筋肉に加える圧力とその結果として得られるゴム材質の抵抗値を用いることで、レーザー変位計の出力をリザバーコンピューティングに基づいた機械学習機にエミュレート（注3）させることが可能であることが示されました。
- ◆本研究で提案したスキームは、やわらかいデバイスから既存の堅いセンサーなどの装置を取り外すことができる可能性を示しており、やわらかいデバイスの柔軟性向上のための重要な一歩と考えられ、壊れやすいものならびに人体との接触が必要となる局面（医療デバイスやレスキューロボ等）等に於いて、効果的な威力を発揮するものと考えられます。

### 3. 発表概要：

近年、やわらかいデバイスの開発が世界的に進められています。デバイス自体がやわらかいため、人や物にダメージを与えないということから医療用デバイスやレスキューロボあるいはウェアラブルデバイスとしての応用に注目が集まっています。一方で、やわらかいデバイスをうまく制御するには、まだまだ既存の堅い機器に頼らざるを得ない部分があるのが現状です。

今回、東京大学次世代知能科学研究センター（AIセンター）の中嶋浩平准教授らと株式会社ブリヂストンのチームは、空気圧アクチュエータに基づいた人工筋肉に着目し、人工筋肉のやわらかさに起因するダイナミクスとリザバーコンピューティングと呼ばれる機械学習手法を組み合わせることで、人工筋肉を加圧駆動時にリアルタイムで高精度の長さ推定が実現できることを示しました。人工筋肉は、アクチュエートすると、一般に非線形ならびにヒステリシスを伴う応答を示し、固有の制御が必要な為、これまで人工筋肉の長さの推定には、レーザー変位計などを取り付け、計測するのが一般でした。本研究で提案したスキームは、やわらかいデバイスから既存の堅いセンサーなどの装置を取り外すことができる可能性を示しており、やわらかいデバイスの柔軟性向上のための重要な一歩と考えられます。

#### 4. 発表内容：

近年、やわらかいデバイスの開発が世界的に進められています。デバイス自体がやわらかいため、人や物にダメージを与えないということから医療用デバイスやレスキューロボあるいはウェアラブルデバイスとしての応用に注目が集まっています。一方で、やわらかいデバイスをうまく制御するには、まだまだ既存の堅い機器に頼らざるを得ない部分があるのが現状です。

例えば、マッキベン型人工筋肉（注4）は、ゴムチューブと繊維からなるシンプルな構造であり、チューブ内部を加圧することにより、径方向に膨張しながら軸方向に収縮します（図1）。やわらかい材料であるゴムと繊維からなるフレキシブルなソフトアクチュエータであることに加え、軽量で発生力の高い点も特徴です。重量対比で従来の電磁モーター、シリンダーと比較すると10分の1以下の軽さで同程度の力を得ることが可能であり、エネルギー的にも効率的なアクチュエータです。ただし、アクチュエートした際に、非線形ならびにヒステリシスを伴う応答を示し、固有の制御が必要であることが知られています（図2）。そのため、これまで人工筋肉の長さの推定には、レーザー変位計などを取り付け、その場その場で逐一計測するのが一般でした。こういった外付けのセンサーは多くの場合、堅い機器であるため、やわらかいデバイスを標榜していたとしてもシステム全体としてみる場合、やわらかさを損なう設計になってしまうという難点がありました。

本研究では、この人工筋肉に着目し、アクチュエートされた際の非線形性・ヒステリシスを伴うダイナミクスとリザーバーコンピューティングと呼ばれる機械学習手法を組み合わせることで、人工筋肉駆動時のリアルタイム高精度長さ推定が実現できることが示されました。具体的には、人工筋肉に加える圧力とその結果として得られるゴム材質の抵抗値を用いることで、レーザー変位計の出力をリザーバーコンピューティングに基づいたエコステートネットワーク（図3）と呼ばれるリカレントニューラルネットワークにエミュレートさせることが可能であることが示されました。また、学習の精度は、実際のレーザー変位計の観測誤差と同程度の精度ときわめて高く（図4）、人工筋肉にかかる負荷の条件を急激に変化させたとしても、この結果はある程度頑健に維持されました。

本研究で提案したスキームは、やわらかいデバイスから既存の堅いセンサーなどの装置を取り外すことができる可能性を示しており、やわらかいデバイスの柔軟性向上のための重要な一歩だと考えられます。今回は、一つのセンサーに着目してその機能を学習しましたが、もちろん複数のセンサーのエミュレーションにも容易に拡張可能です。リザーバーコンピューティングは学習が簡易でかつ追加学習の際に学習の干渉が起きないため、追加でセンサーの埋め込みを行いたい時にもその場で学習を安全に実装できます。特に、近年、人工筋肉を活用したウェアラブルデバイスが考案されており、歩行のアシストや災害現場などでの作業援助への有効性が期待されています。ウェアラブルデバイスは人間が装着することで機能を発揮するため、できる限り人体にダメージを与えないやわらかい構成が可能であることが望ましく、本研究のスキームは、将来的に、こういった応用にも効果的に威力を発揮するものと考えられます。

\*2020年5月22日 一部追記・修正しました（赤字部分）。

本研究成果は、東京大学、株式会社ブリヂストンの共同研究によるものであり、以下の助成・研究プロジェクトによって得られました。

- 日本学術振興会（JSPS）科研費 新学術領域研究「ソフトロボット学」JP18H05472
- 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）委託業務  
プロジェクト名：高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発プロジェクト／②次世代コンピューティング技術の開発【未来共生社会にむけたニューロモルフィックダイナミクスのポテンシャルの解明】

## 5. 発表学会：

学会名：IEEE Int'l Conference 「Robosoft2020」

論文タイトル：Emulating a sensor using soft material dynamics: A reservoir computing approach to pneumatic artificial muscle

著者：Ryo Sakurai, Mitsuhiro Nishida, Hideyuki Sakurai, Yasumichi Wakao, Nozomi Akashi, Yasuo Kuniyoshi, Yuna Minami, Kohei Nakajima\*

URL：http://robosoft2020.org/

本研究成果は、米国東部夏時間 5 月 15 日（金）00:00～7 月 15 日（水）12:50／日本時間 5 月 15 日（金）13:00～7 月 16 日（木）1:50 までオンライン公開されます。

## 6. 用語解説：

（注 1）：リザーバーコンピューティング（Reservoir Computing）

リカレントニューラルネットワークの学習・情報処理方式の一種。脳の情報処理を模倣する数学的なモデルを一般にニューラルネットワークという。リカレントニューラルネットワークは複数のニューロンが相互につながったニューラルネットワークである。従来のリカレントニューラルネットワークではネットワーク内の結合荷重をすべて調整することで学習を行っていた。それに比して、リザーバーコンピューティングでは、ネットワーク内部の重みは制御せず、リードアウト部のみの調整で学習を実装する。そのため、学習が極めて素早くかつ安定であり、マルチタスキングが容易であるという利点がある。

（注 2）：ヒステリシス（Hysteresis）

ヒステリシスとは、ある系の状態が、現在加えられている力だけでなく、過去に加わった力に依存して変化すること。履歴現象、履歴効果とも呼ぶ。

（注 3）：エミュレート（emulate）

異なるハードウェアやソフトウェア環境を模倣させる技術。

（注 4）：マッキベン（McKibben）型人工筋肉

マッキベン型人工筋肉はマッキベンが提案した人工筋肉で、ゴムチューブと繊維からなるシンプルな構造であり、チューブ内部を加圧することにより、径方向に膨張しながら軸方向に収縮する。ソフトな材料であるゴムと繊維からなるフレキシブルなソフトアクチュエータであることに加え、軽量で発生力の高い点も特徴である。重量対比で従来の電磁モーター、シリンダーと比較すると 10 分の 1 以下の軽さで同程度の力を得ることが可能であり、エネルギー的にも効率的なアクチュエータである。

7. 添付資料：



図1：マッキベン（McKibben）型人工筋肉の模式図

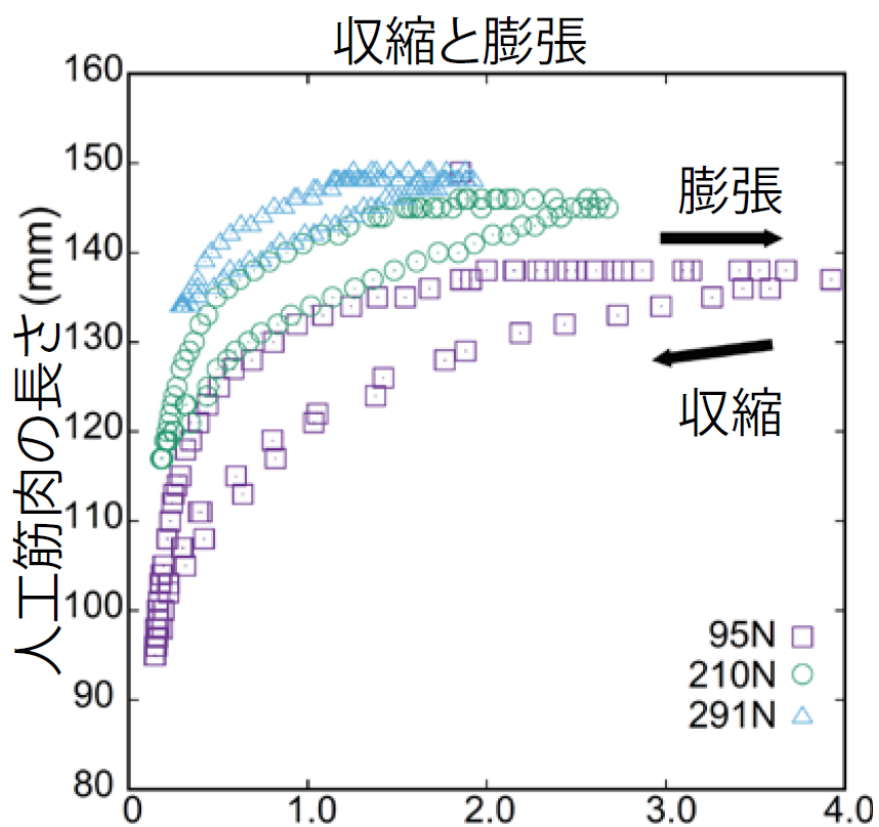


図2：ヒステリシスを伴う応答の例

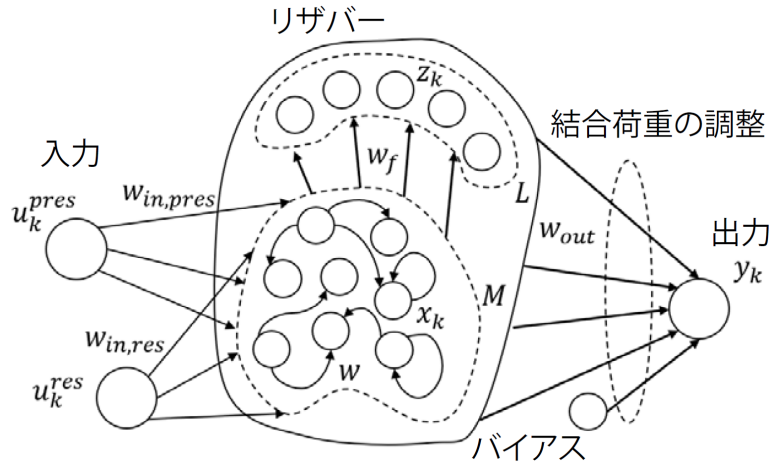


図 3 : 本研究で活用したエコーステートネットワーク (echo-state network) の構成。

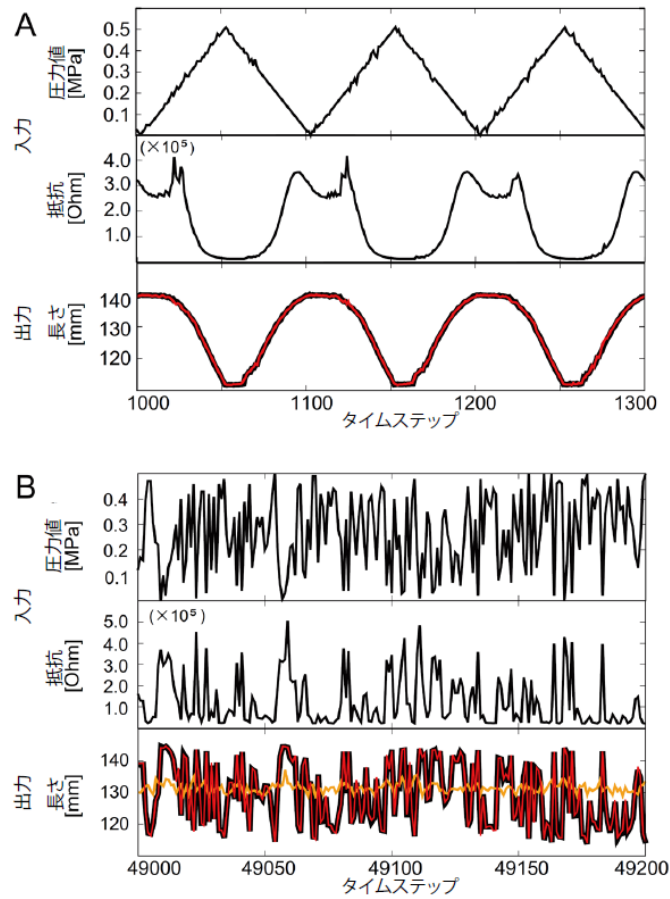


図 4 : エコーステートネットワーク (echo-state network) により長さ推定の例

A は周期的に加圧した際の長さ推定の例。B はランダムに加圧した際の長さ推定の例。黒い線がターゲットで、赤い線が推定結果。いずれのケースでも、ぴったりと予測が一致していることがわかる。オレンジ色の線は比較のために線形な予測機で同じタスクを実装したもの。