報告日： 2026 年 7 月 2 日

報告者： 東京大学 大学院 情報理工学系研究科 システム情報学専攻 講師
宮崎 哲郎

1． 研究概要

（和文）

(1) 課題名

把持状態を推定し柔軟物のハンドリングを実現する空気圧駆動ロボットハンド

(2) 研究者氏名、職名

宮崎 哲郎 東京大学 大学院 情報理工学系研究科 システム情報学専攻 講師

(3) 研究概要

本研究課題では，食品や生体組織などの柔軟物を，衛生性・保守性を損なわずに安全かつ安定に扱える空気圧駆動ロボットハンドを開発する．把持部への電気式センサの搭載を最小限に抑え，湾曲型空気圧人工筋の圧力・変形情報と物理モデルから，把持力などの状態を推定して制御に用いる．二つの空気室を備える複動湾曲型 PAM を複数配置し，各室圧を独立に制御することで，把持姿勢・把持力を維持したまま指先剛性を調整する．これにより，接触時は柔らかく対象を傷つけず，把持後は剛性を高めて確実に搬送するハンドリングを実現する．簡素でメンテナンス性の高い構成とし，先行研究で得た把持力推定およびヒステリシス補償制御の知見を基盤に，柔軟物把持の実用化を目指す．

(4) キーワード

ロボットハンド，空気圧駆動，湾曲型ゴム人工筋，把持状態推定

（英文）

(1) Research title

A Pneumatically Driven Robot Hand for Grasping State Estimation and Handling Flexible Objects

(2) Name of researcher with title of position

Tetsuro Miyazaki, Lecturer
Department of Information Physics and Computing
Graduate School of Information Science and Technology
The University of Tokyo

(3) Summary

This research project aims to develop a pneumatically driven robot hand capable of safely and stably handling soft objects, such as food and biological tissues, without compromising hygiene or maintainability. The installation of electrical sensors around the grasping section is minimized, and states such as grasping force are estimated from the pressure and deformation information of curved pneumatic artificial muscles and their physical model, and then used for control. Multiple dual-chamber curved PAMs are arranged, and the fingertip stiffness is adjusted while maintaining the grasping posture and grasping force by independently controlling the pressure in each chamber. This enables handling in which the object is contacted softly without damage and, after grasping, is transported reliably by increasing the stiffness. Based on a simple, highly maintainable configuration and prior knowledge of grasping-force estimation and hysteresis-compensation control, this study aims to realize the practical application of soft-object grasping.

(4) Key Words

Robot hand, Pneumatic actuation, Curved rubber artificial muscle, Grasping-state estimation

２． 本研究の意義、特色

食品や生体組織などの柔軟物をロボットで扱う際には，対象を損傷させない適切な把持力・姿勢の制御と，把持部の洗浄性および保守性の確保を両立する必要がある．しかし，指先に電気式の力覚・変形センサを配置する従来方式では，配線や部品の増加により，機構の複雑化や衛生性・メンテナンス性の低下を招くおそれがある．本研究は，空気圧人工筋が本来有する柔軟性，非線形性および圧力応答を活用し，アクチュエータ自体を駆動源であると同時にセンシングおよび情報処理の要素として利用する点に特色がある．

具体的には，複動湾曲型 PAM の受動側空気室の圧力情報から，アクチュエータの湾曲状態や把持力を推定する技術を開発した．さらに，受動側空気室を物理リザバーとして用い，ヒステリシス補償および状態推定に応用することで，外付けセンサや大規模な数値演算への依存を低減した．これにより，簡素で軽量，かつ保守性に優れるソフトロボットハンドを実現するための基盤技術を提示した．三指ハンドにおける柔軟物把持実験では，距離条件に応じた圧力ベースの推定モデルにより，把持状態を適切に推定できる可能性を示している．

３．実施した研究の具体的内容、結果
（“６．本研究に関連して発表した主な論文等”から一部主要な成果を抜粋）

３．１　ゲインスケジューリング型フィードフォワード制御と物理リザバーコンピューティングに基づく状態推定を統合した空気圧曲げアクチュエータ制御（雑誌論文(1)）

本研究では，空気圧湾曲型ソフトアクチュエータに内在するヒステリシスに起因する位置制御および状態推定の困難さを対象とし，ゲインスケジューリング型フィードフォワード制御と物理リザバー計算（Physical Reservoir Computing: PRC）に基づく状態推定を統合した手法を提案した．対象とする空気圧双方向湾曲型人工筋（Dual PAM）アクチュエータは，二つの空気圧人工筋から構成され，一方を駆動用の能動 PAM，他方を予圧を付与した密閉状態の受動 PAM として用いる．能動 PAM の加圧に伴う機械的相互作用により受動 PAM の内圧が変化することを利用し，受動 PAM を非線形性と記憶特性を有する物理リザバーとして機能させた．

状態推定では，受動 PAM の内圧をリザバー状態として計測し，その時間履歴から二次多項式モデルによりアクチュエータの湾曲角度を推定した．受動 PAM と圧力センサを接続するチューブ長を変化させた評価では，チューブ長 10 m 以下で推定 RMSE を 3° 未満に維持できることを確認した．また，能動 PAM の駆動圧力のみを入力とする 1,000 ニューロンの Echo State Network（ESN）と比較し，PRC モデルがより高い推定精度を示した．これにより，角度センサをアクチュエータ本体に設置せず，空気圧情報に基づいて自由運動時の湾曲状態を推定できる可能性を示した．

制御系には，PD フィードバック制御に加えて，ヒステリシスの折返し部においてフィードフォワードゲインを増加させる利得スケジューリング型フィードフォワード P 制御を導入した．本手法は，ヒステリシスの不感帯で生じる応答遅れを低減し，線形近似に基づくフィードフォワード制御よりも高い追従性能を実現した．正弦波および周波数が時間変化するチャープ信号に対する実験では，特に加圧・排気の切替点における位相遅れおよび追従誤差の低減が確認された．

さらに，PRC による推定角度を状態フィードバックに用いた制御実験では，角度センサを用いる場合と比較して制御誤差の差が小さく，自由運動時の位置制御における有効性が確認された．一方で，外力により実際の変形が変化した場合には，駆動入力に主として依存する PRC 推定の開ループ的性質から推定誤差が増大することも示された．ただし，外乱除去後には速やかに推定精度が回復した．また，本アクチュエータは比較的高い剛性を有し，軽微な外乱荷重による変形は限定的であった．これらの結果は，把持前の自由運動における位置・姿勢制御と，接触後の外力制御を組み合わせるソフトロボットハンドへの応用可能性を示すものである．

３．２　空気圧物理リザバーコンピューティングを用いたフィードフォワード・ヒステリシス補償による空気圧ソフト曲げアクチュエータの制御（雑誌論文(2)）

本研究では，空気圧駆動ソフトアクチュエータに内在するヒステリシスを補償し，高精度な湾曲動作制御を実現するため，空気圧物理リザバー計算（PRC）に基づくフィードフォワード補償手法を提案した．制御対象である空気圧湾曲型アクチュエータとは別に，二つの空気室を有する Dual PAM を物理リザバーとして用いた. 一方の空気室を能動 PAM として加圧し，他方を予圧を与えた密閉状態の受動 PAM とすることで，能動 PAM の駆動履歴に応じた受動 PAM 内圧の非線形かつ履歴依存的な変化を，リザバー状態として取得した.

提案手法では，受動 PAM の圧力履歴と目標湾曲角度の履歴を入力とし，Takagi-Sugeno（T-S）ファジィモデルにより，目標角度を実現するためのフィードフォワード圧力指令を算出する．すなわち，Dual PAM が有する非線形性および記憶特性を演算資源として活用し，ソフトアクチュエータのヒステリシス特性の逆写像をデータ駆動的に構成する．これにより，大規模な内部状態を数値計算する Echo State Network（ESN）と比較して，物理系そのものによる状態更新を利用した，実時間実装に適した補償器を実現した.

モデル評価では，提案するファジィ PRC（FPRC）モデルは ESN と同程度の学習性能を示しつつ, 未知データに対するテスト誤差を低減した. さらに, テスト時の実行時間は ESN と比較して 97.6%削減され，物理リザバーの活用による計算負荷低減の有効性が示された. 受動 PAM の圧力情報を含まない比較モデルよりも精度が向上したことから，物理リザバーがヒステリシス補償に必要な非線形・履歴情報を提供していることが確認された.

正弦波，周波数掃引信号および複合信号に対する追従実験では，FPRC 単独の開ループ制御でも目標軌道を良好に追従し，PD フィードバック制御を併用した FPRC＋PD 制御では, さらに追従誤差を低減した. 特に, PD 制御単独で顕著に現れるヒステリシスループが，FPRC によるフィードフォワード補償によって大幅に抑制された．また，物理リザバーに外乱を加えた場合にも受動 PAM の出力圧は安定しており，制御性能への影響が限定的であることを確認した.

３．３　空気圧湾曲型人工筋ハンドの圧力に基づく把持状態推定（国内会議(3)）

本研究では，空気圧双方向湾曲型人工筋（Dual PAM）を用いた三指ロボットハンド（図 1）を対象に，人工筋内部の圧力情報から把持状態を推定する手法を検討した．Dual PAM はスリーブ内部に板ばねおよび二つの空気室を備え，一方を駆動用の能動 PAM，もう一方を密閉空気室として利用する構造である. 能動 PAM の内圧制御により指を湾曲させるとともに，受動 PAM の圧力変化を計測することで，指先への電気式センサの搭載を最小限に抑えつつ，把持力や姿勢を推定するセンサ・アクチュエータ一体型のハンド機構を構成した.

把持力推定では，把持対象と PAM 先端との距離が推定精度に影響することに着目し，距

離条件ごとにリッジ回帰モデルを構築した（図 2）．学習時には，複数の距離条件および駆動周波数条件で PAM を動作させ，能動・受動 PAM の圧力情報と把持力を取得した．各モデルには過去 5 秒間の圧力履歴を入力し，把持開始直後のデータを用いて最も適切な距離条件のモデルを選択した後，そのモデルにより継続的に把持力を推定する方式とした．

正弦波状の駆動圧力を用いた評価では，4 種類の把持位置と 3 種類の駆動周波数からなる計 12 条件において，実際の距離条件に対応する回帰モデルが選択され，把持力を良好に推定できることを確認した．さらに，三指ハンド試作機を用いて，ゴムボール，スポンジボールおよび柔らかい洋生菓子の把持試験を実施し，柔軟物を傷つけずに適切な把持状態を実現できる可能性を示した（図 3）．

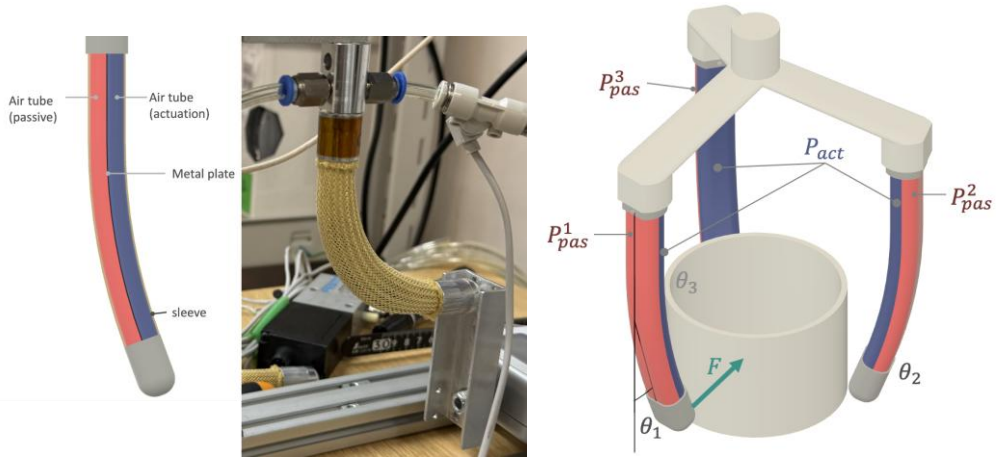


図 1　湾曲型空気圧 Dual PAM の構造と，三指ハンド試作機

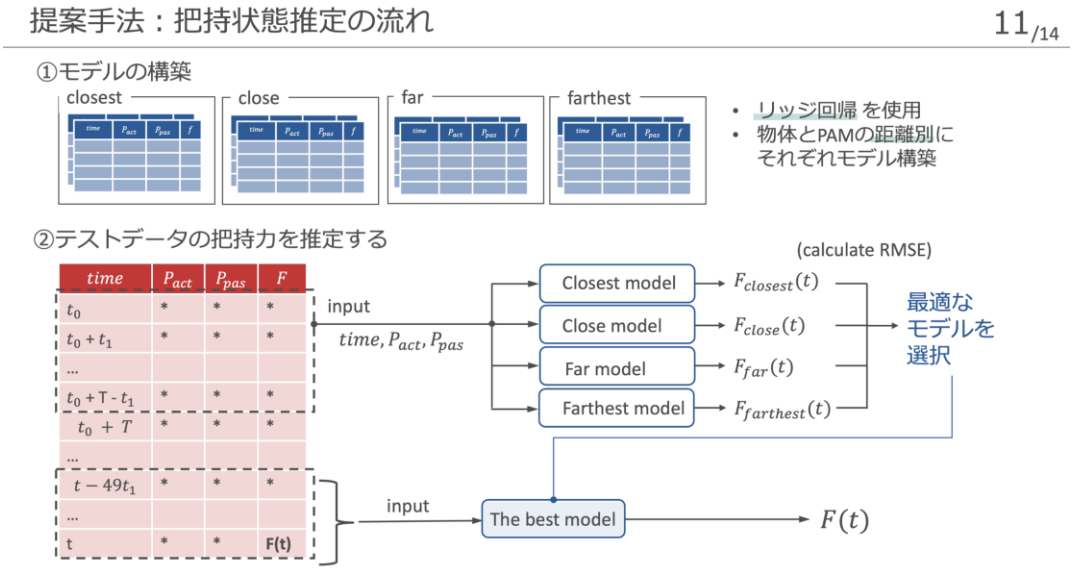


図 2　提案する把持状態推定の流れ

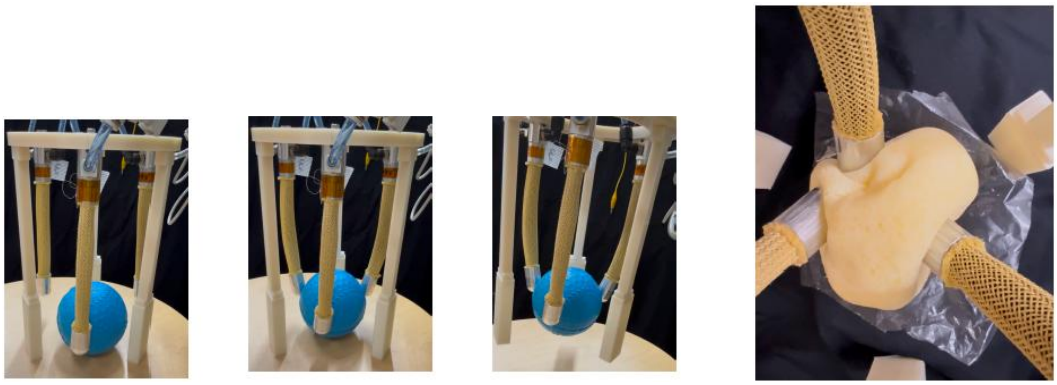


図 3　柔らかなゴムボールを 250 kPa で把持する様子，洋生菓子の把持

４．本研究を実施したグループに属する主な研究者の氏名、職名

氏名　　沈　君翊
所属　　東京大学 大学院 情報理工学系研究科 システム情報学専攻
役職　　修士課程 2 年生（実施当時）

氏名　　川嶋　健嗣
所属　　東京大学 大学院 情報理工学系研究科 システム情報学専攻
役職　　教授

５．研究実施時期

2024 年　4 月　1 日から　　2026 年　3 月　31 日まで

６．本研究に関連して発表した主な論文等

本研究の期間中，関連する成果として，雑誌論文 2 本，国際会議論文 4 本，国内会議論文 4 本を発表した．

（雑誌論文）

(1) Junyi Shen, Tetsuro Miyazaki, Kenji Kawashima, Controlling Pneumatic Bending Actuator With Gain-Scheduled Feedforward and Physical Reservoir Computing State Estimation, IEEE Robotics and Automation Letters, 10(3), 2120-2127, 2025 年 3 月

(2) Junyi Shen, Tetsuro Miyazaki, Kenji Kawashima, Control Pneumatic Soft Bending Actuator With Feedforward Hysteresis Compensation by Pneumatic Physical Reservoir Computing, IEEE Robotics and Automation Letters, 10(2), 1664-1671, 2025 年 2 月

（国際会議）

(1) Takuya Shirakawa, Tetsuro Miyazaki, Kenji Kawashima, Dart-Throwing Teaching Device Using Force Presentation Driven by Pneumatic Artificial Muscle, 2026 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2026), 657-662, 2026 年 1 月

(2) Sho Sugimoto, Tetsuro Miyazaki, Kenji Kawashima, Multimodal Estimation of 2-DOF Wrist Motion Using Pneumatic Reservoir Computing, New Trends in Medical and Service Robotics. MESROB 2025. Mechanisms and Machine Science, 186, 2025 年 7 月

(3) Junyi Shen, Tetsuro Miyazaki, Kenji Kawashima, Control Pneumatic Soft Bending Actuator with Online Learning Pneumatic Physical Reservoir Computing, 2025 IEEE 8th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), 1-8, 2025 年 4 月 22 日

(4) Junyi Shen, Tetsuro Miyazaki, Shingo Ohno, Kenji Kawashima, Sensorless State Estimation and Auto-Tuning Control of Pneumatic Bending Actuator, The 12th JFPS International Symposium on Fluid Power Hiroshima, 1A1-05, 2024 年 10 月

（国内会議）

(1) 高野誠, キムユヒョン, 曽我部舞奈, 宮嵜哲郎, 川嶋健嗣, 気液相変化を用いた 2 本指ソフトハンドの非接触状態推定, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2026, 2026 年 7 月 1 日

(2) 高野誠, キムユヒョン, 宮嵜哲郎, 川嶋健嗣, 曽我部舞奈, 周東博, 中島 義和, 気液相変化ソフトアクチュエータの光駆動制御および画像解析に基づく非接触状態推定, 2025 年度生体医歯工学共同研究拠点成果報告会, 2026 年 3 月 3 日

(3) 渡辺菜々香, 宮嵜哲郎, 川嶋健嗣, 周東博, 中島義和, 空気圧湾曲型人工筋ハン

ドの圧力に基づく把持状態推定，2024 年度生体医歯工学共同研究拠点成果報告会, 2025 年 3 月 3 日

(4) 白川 琢也，宮嵜 哲郎，川嶋 健嗣，ダーツスキル向上に向けた空気圧駆動型手首運動教示システムの開発，計測自動制御学会 2024 年度産業応用部門大会，2024 年 11 月 20 日

７．内外における関連研究の状況

食品，医療，農業分野などにおける柔軟物ハンドリングへの応用を背景として，柔軟な構造を有するソフトロボットハンドに関する研究が国内外で活発に進められている［1, 2］．とくに，把持対象の形状や硬さに適応する柔軟指機構，指先に力覚・触覚センサを統合した把持状態推定［3］，ならびに知覚機能を備えたソフトロボットの設計［4］が広く検討されている．一方で，把持部近傍に電気式センサや配線を配置する方式では，機構の複雑化に加え，洗浄性，耐環境性および保守性の低下が課題となり得る［4］．

空気圧人工筋は，高い出力重量比と柔軟性を有し，ロボットハンドや装着型支援機器への応用が進められている［5］．しかし，空気圧系に内在する非線形性やヒステリシスは，高精度な位置・力制御および状態推定を困難にする要因であり，数理モデルに基づく補償法や，学習型モデルを用いたデータ駆動型手法が提案されている［6，7］．また，柔軟体や空気圧系の非線形応答および記憶特性を計算資源として活用する物理リザバーコンピューティングは，複雑な動特性を比較的低い計算負荷で扱う手法として注目されている［8, 9］．

参考文献

［1］ D. Rus and M. T. Tolley，“Design，Fabrication and Control of Soft Robots，”Nature，vol. 521，pp. 467-475，2015.

［2］ J. Shintake，V. Cacucciolo，D. Floreano，and H. Shea，“Soft Robotic Grippers，”Advanced Materials，vol. 30，no. 29，Art. no. 1707035，2018.

［3］ J. Hughes，S. Li，and D. Rus，“Sensorization of a Continuum Body Gripper for High-Force and Delicate Object Grasping，” Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation，pp. 6913-6919，2020.

［4］ H. Wang，M. Totaro，and L. Beccai，“Toward Perceptive Soft Robots: Progress

and Challenges,” Advanced Science, vol. 5, no. 9, Art. no. 1800541, 2018.

［5］ C.-P. Chou and B. Hannaford, “Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 12, no. 1, pp. 90-102, 1996.

［6］ S. Xie, J. Mei, H. Liu, and Y. Wang, “Hysteresis Modeling and Trajectory Tracking Control of the Pneumatic Muscle Actuator Using Modified Prandtl-Ishlinskii Model,” Mechanism and Machine Theory, vol. 120, pp. 213-224, 2018.

［7］ W. Sun, N. Akashi, Y. Kuniyoshi, and K. Nakajima, “Physics-Informed Recurrent Neural Networks for Soft Pneumatic Actuators,” IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 7, no. 3, pp. 6862-6869, 2022.

［8］ K. Nakajima, H. Hauser, T. Li, and R. Pfeifer, “Information Processing via Physical Soft Body,” Scientific Reports, vol. 5, Art. no. 10487, 2015.

［9］ H. Hayashi, T. Kawase, T. Miyazaki, M. Sogabe, Y. Nakajima, and K. Kawashima, “Online Assistance Control of a Pneumatic Gait Assistive Suit Using Physical Reservoir Computing Exploiting Air Dynamics,” Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3245-3251, 2022.

８．今後の発展に対する希望

本研究課題では，空気圧 Dual PAM を物理リザバーとして活用し，ヒステリシス補償制御および状態推定に応用する手法を提案した（成果物：雑誌論文(1)，(2)）．本手法により，空気圧駆動ソフトアクチュエータに内在する非線形性およびヒステリシスの影響を低減し，動的な位置追従性能の向上と，空気圧情報に基づく自由運動時の状態推定を実現した．これらの成果は，把持部近傍に配置する電気式センサを最小限に抑えつつ，柔軟ロボットハンドの把持姿勢および把持力を推定・制御するための基盤技術となる．

さらに，Dual PAM を指として用いた三指ハンドを試作し，柔軟物把持実験を実施した．把持対象と PAM 先端との距離条件に応じて圧力情報に基づく推定モデルを選択することにより，把持力を適切に推定できる可能性を示した．この結果は，物理リザバー計算を用

いたアクチュエータの状態推定・制御技術を，実際のロボットハンドによる柔軟物ハンドリングへ展開するための重要な成果である．

今後は，把持状態を構成する位置および力を個別に推定するだけでなく，両者を同時に推定・制御する手法の確立に取り組む．具体的には，PAM の駆動に用いる制御バルブ電圧や圧力履歴などの情報を空気圧物理リザバー計算の入力に追加し，推定対象とする状態量を拡張する．これにより，把持姿勢と把持力を協調的に調整し，対象物の形状，硬さおよび接触状態に応じた安全かつ安定な柔軟物ハンドリングの実現を目指す．