

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04375

研究課題名（和文）空気圧リザーバーコンピューティングのロボット制御への展開

研究課題名（英文）Pneumatic reservoir computing and its application to robot control

研究代表者

川瀬 利弘（Kawase, Toshihiro）

東京電機大学・工学部・准教授

研究者番号：40633904

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ソフトロボットが自らの身体を計算に活用する新たな原理として、管路内の空気を用いた物理リザーバーコンピューティング（空気圧リザーバーコンピューティング）を提案し、実際にこれを用いて制御を行うソフトロボットを開発した。空気圧リザーバーコンピューティングの計算能力の検証、特性の解析のほか、応用として、空気圧ゴム人工筋アシストスーツの制御への適用、歩行アシストなどで使われる周期的波形の学習と生成を行うシステムの検証等を行い、空気圧リザーバーコンピューティングをロボット制御へ適用できることとその発展可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空気圧人工筋を使用したアシストスーツなどのソフトロボットに必要な計算の一部を、これまでの電子的なコンピュータによる計算から、空気のダイナミクスを利用した計算に置き換えることにより、ロボットに搭載する電子機器をより簡素なものにすることができる。これにより、ロボットの軽量化・耐久性の向上・省電力化が促進され、アシストスーツ使用者の負担軽減、ソフトロボットの水中など幅広い環境への適用につながる。

研究成果の概要（英文）：As a new principle for soft robots to utilize their own bodies for computation, we proposed physical reservoir computing using air in tubes, called as pneumatic reservoir computing, and developed a soft robot that can actually be controlled using this principle. In addition to verifying the computational capability and analyzing the characteristics of pneumatic reservoir computing, we applied it to the control of a pneumatic rubber artificial muscle assist suit and verified a system for learning and generating periodic waveform used in walking assist systems, etc. The results showed that pneumatic reservoir computing can be applied to robot control and that it has potential for further development.

研究分野：生体医工学，ロボティクス

キーワード：リザーバーコンピューティング 空気圧 人工筋 ソフトロボット 形態学的計算

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

通常硬い素材で作られるロボットを柔軟な素材により構成し、機械に対して生物の柔軟性を取り入れたソフトロボットが、2010年頃以降非常に盛んに研究されている。こうした研究では、特殊な形状のシリコンの内部に圧縮空気を入れることで指のような動きをさせるなど、柔軟なアクチュエーション機構を用いたロボットが多く開発されている。

一方で、ソフトロボットにおける柔らかさを、通常は計算機で行われる制御において活用する研究も行われている。特に Pfeifer らは「形態学的計算 (morphological computation)」というコンセプトのもと、柔軟な身体がある種の計算機としてロボットの制御や知覚に役立つことを示す研究を行っている (Pfeifer et al., 2006)。この研究では近年、物理リザバーコンピューティングという、複雑な物理システムに入力を与えたときに得られる多次元の反応の線形和で所望の出力を得る手法が用いられている。例えば Zhao らは、4足ロボットにシリコン製の背骨を設け、背骨に取り付けたセンサ情報の線形和でアクチュエータの制御信号を生成し、歩行を行わせることに成功した (Zhao et al., 2013)。また中嶋らは、多数のセンサを埋め込んだタコ足型のシリコンを問題の入力に合わせ揺らし、センサ値の線形和を求めることで、実際にいくつかの計算課題を行うことができることを示した (Nakajima et al., 2015)。

研究代表者らは、ソフトロボットの形態学的計算を実現する新たな手法として、空気を利用した物理リザバーコンピューティングが使えるのではないかという問いを持った。これまでの研究では主に、ソフトロボットの身体に使われるシリコンのような柔らかい物体の挙動が利用されてきたが、ソフトロボットにおいてはアクチュエーションに使われる空気も身体を構成する素材の一つであり、容易に使用可能だと思われる。また空気の流動性・圧縮性は、固体より複雑な挙動を生み出すことが期待され、高い計算能力を得るのに役立つと考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、ソフトロボットが自らの身体を計算に活用する新たな原理として、空気圧管路系による物理リザバーコンピューティング (空気圧リザバーコンピューティング) を提案し、実際にこれを用いて制御を行うソフトロボットを開発する。この手法では、管路で繋がれた空気室をロボットに組み込み、ロボットの変形に伴って起こる複雑な圧力変化を出力の計算に用いる。

テストベッドとして空気圧ゴム人工筋を用いた歩行アシストスーツを用い、このアシストスーツの動作検出・制御信号の計算を、人工筋と管路系を用いた物理リザバーコンピューティングにより行う。さらに、この計算原理を使用した自律ロボットの姿勢推定を行い、空気圧による自律ロボットの新たな構成法につなげる。

## 3. 研究の方法

本研究課題において、以下の方法による研究を行った。

①空気圧リザバーコンピューティングの基礎的な特性の調査として、空気圧管路系シミュレーションを実装し、非線形システムの出力推定を管路 1 本により行うシステムをシミュレートした上で、管路のパラメータと計算能力の関係を調査した。またこれによる人工筋アシストスーツ着用時の関節角度推定を行った。

②空気圧リザバーコンピューティングを用いた人工筋アシストスーツを実現するため、人工筋アシストスーツの人工筋同士を管路で接続し、管路内 8 か所の圧力から下肢複数関節の動作推定を空気圧リザバーコンピューティングにより行い、これをもとにアシストスーツの制御を行う方式を実装した。

③動作推定の推定精度を上げていくためには、管路ネットワークの形状の調整・複雑化が必要となる可能性がある。そのため、管路ネットワークの形状の検討に向け、管路ネットワークの流体力学的モデル化を行い、管路ネットワーク形状と人工筋に対する管路内の圧力応答の関係を調査した。

④アシストスーツや自律ロボットにおける自律的な歩行動作生成に向け、空気圧リザバーコンピューティング機構による周期的な波形の学習と生成について、空気圧管路系シミュレーションにより検討した。

## 4. 研究成果

上記の研究方法に対する結果を以下にまとめる。

①非線形システムの出力推定を管路 1 本により行うシステムの、複数のパラメータによるシミュレーションの結果、管路の径により推定精度は非線形に変化し、最適な径があることを示した。また管路が持つ記憶容量を定量的に評価した結果、管路の径や長さにより記憶容量が変化し、それが計算の精度に寄与していることが示唆された。シミュレーションの結果から示唆されるロボット応用での性能の差は、シミュレーションと類似の条件を使用した人工筋アシストスーツの姿勢推定においても確認された。これらの成果は原著論文として出版された(Kawase et al., 2021) (図 1)。

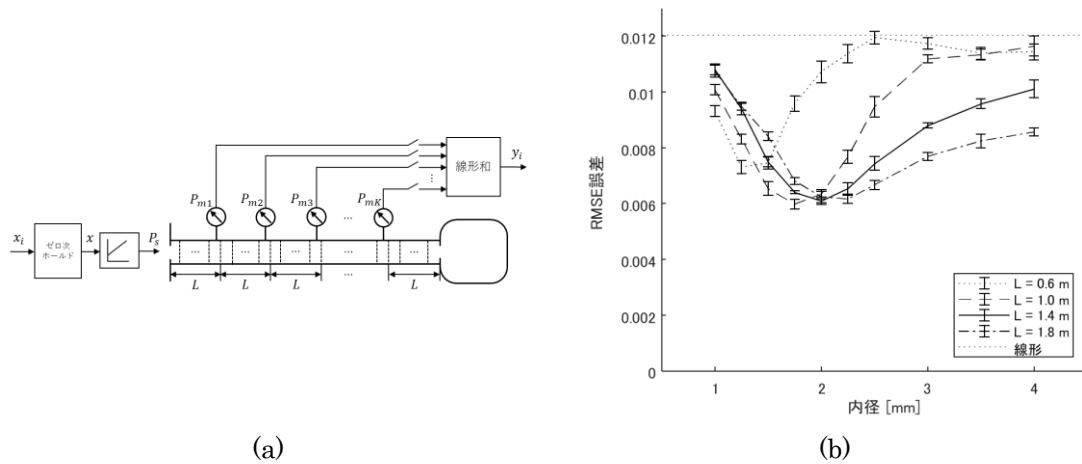


図 1 管路 1 本による空気圧リザーバーコンピューティングのシミュレーション。(a) シミュレーションされた系。(b) 管路内径・管路長を変えた時の非線形システムの出力推定計算の誤差。Kawase et al. (2021) より。

②人工筋アシストスーツに付与した空気圧ゴム人工筋により、従来行っていた人工筋アシストスーツ大腿部の角度および角速度の推定に加え、膝関節の角度および角速度の推定にも成功した。また関節角度・角速度だけでなく、管路内の圧力から歩行/走行の歩容モードの違いを推定することに成功した。さらに空気圧リザーバーコンピューティングによる関節角速度推定を用いて、実際に人工筋による歩行アシストのリアルタイム制御を行なうことに成功した。これらの成果は国内学会および国際会議にて発表された(林ら, 2020)(林ら, 2021)(Hayashi et al., 2022) (図 2)。

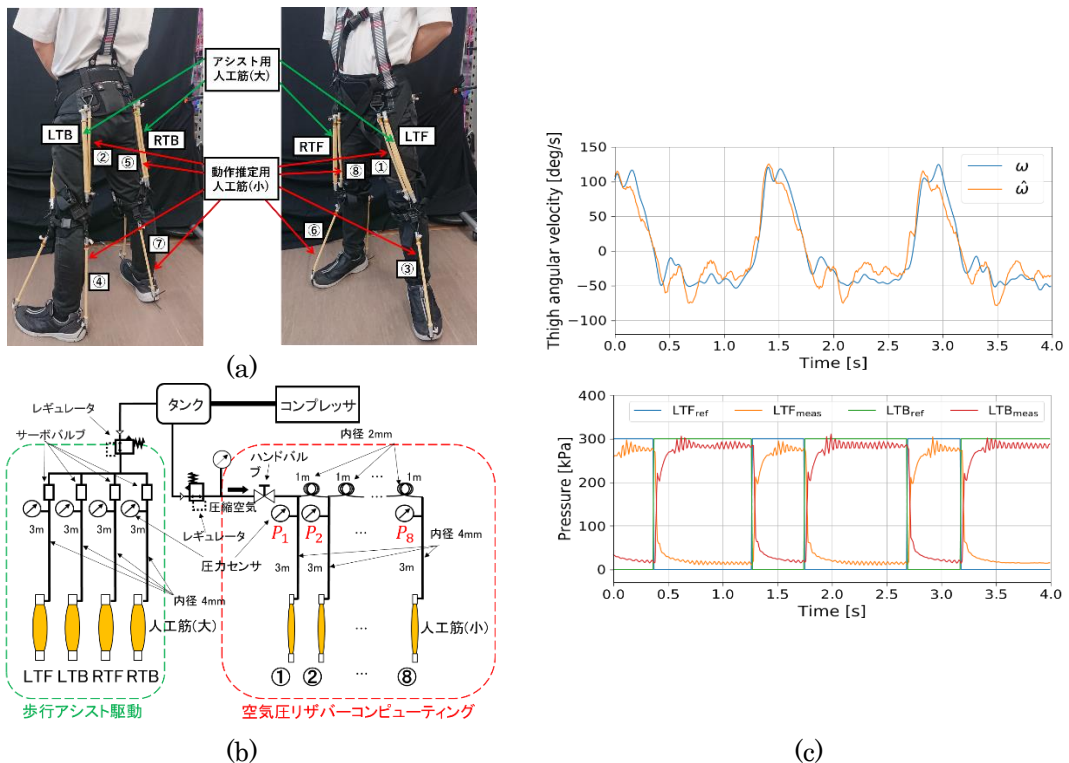


図 2 空気圧リザーバーコンピューティングによる歩行動作推定と歩行アシスト。(a) 空気圧ゴム人工筋を備えたアシストスーツ。(b)アシスト用および推定用人工筋の空気圧回路。(c) 左大腿部角速度 ( $\omega$ ) およびその推定値 ( $\hat{\omega}$ ), アシスト用人工筋の内圧。Hayashi et al. (2022) より。

③空気圧リザーバコンピューティングの特性を解析するために、Brown の管路モデルをベースとした、物理リザーバとなる管路ネットワークの解析的モデルを構築し、空気圧リザーバコンピューティングの物理リザーバの周波数特性を求める式を導出した。そして、これまでの実験の中で得られた人工筋アシストスーツの関節角度推定の精度とモデルから得られる周波数特性の間に関連性があることを見出した。ここで構築したモデルは、計算する対象に適合したりザーバ用の管路ネットワークの設計に役立つと考えられる。この成果は国内学会にて発表された(川瀬ら, 2021) (計測自動制御学会産業応用部門奨励賞受賞) (図 3)。

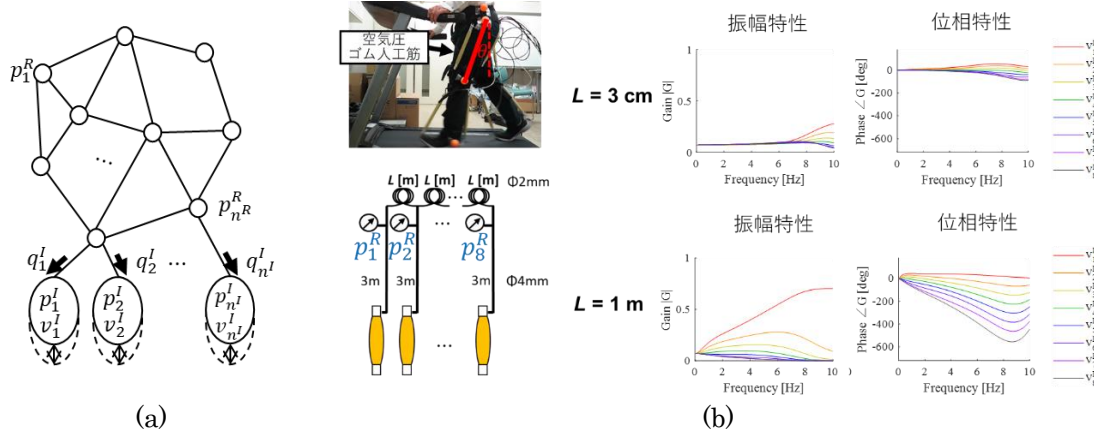


図 3 管路ネットワークの解析. (a) 管路ネットワークのモデル. (b) アシストスーツの関節角度推定に使われる管路ネットワークと、人工筋体積を入力とし管路内圧力を出力したときの周波数応答. 川瀬ら (2021) より.

④出力フィードバック付きの空気圧リザーバコンピューティング機構により、あらかじめ指定した周期的な波形を出力するよう学習させる手法を提案した。この手法はこれまでに開発した管路系シミュレーションモデルを拡張する形でシミュレーションによる検証を行い、典型的な周期的波形であるファン・デル・ポール振動子の出力を学習できること、さらに外乱により内部状態が変化したときにも学習した波形に出力を戻すことができることを確認した。この成果は国際会議にて発表された(Shinkawa et al., 2023) (図 4)。

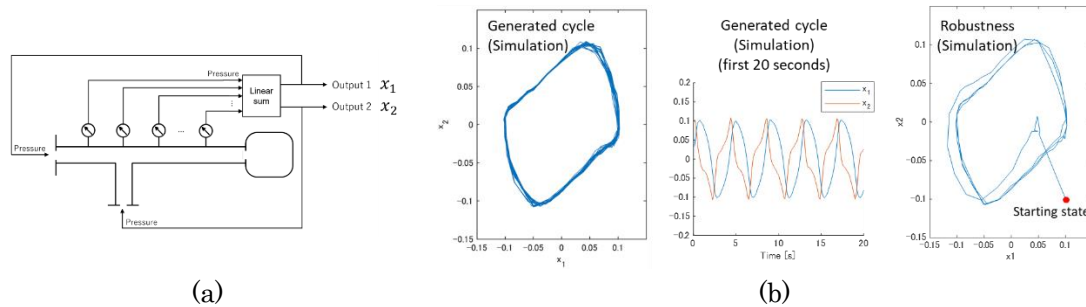


図 4 空気圧リザーバコンピューティングによる周期的波形の生成. (a) シミュレートされた出力フィードバック付きの空気圧リザーバコンピューティング機構. (b) 学習後に生成された周期的波形 (左・中), 外乱が加わった時の出力の変化 (右). Shinkawa et al. (2023) より.

そのほか、リザーバコンピューティング手法のロボット制御への適用可能性の検証として、エコー状態ネットワークによる表面筋電位からの関節角度推定を行い、推定およびロボット制御ができることを示す予備的な結果を得た。

引用文献 (下記以外は「5. 主な発表論文等」より)

R. Pfeifer, F. Iida, G. Gómez, International Congress Series, 1291, 22-29, 2006.

Q. Zhao, K. Nakajima, H. Sumioka, H. Hauser, R. Pfeifer, Proc. 2013 IEEE/RSJ IROS, 1445-1451.

K. Nakajima, H. Hauser, R. Pfeifer, Sci. Rep. 5, 10487, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kawase Toshihiro, Miyazaki Tetsuro, Kanno Takahiro, Tadano Kotaro, Nakajima Yoshikazu, Kawashima Kenji	4. 巻 33
2. 論文標題 Pneumatic Reservoir Computing for Sensing Soft Body: Computational Ability of Air in Tube and Its Application to Posture Estimation of Soft Exoskeleton	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 2803 ~ 2824
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2021.3345	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 林 滉之, 川瀬 利弘, 宮崎 哲郎, 曾我部 舞奈, 菅野 貴皓, 中島 義和, 川嶋 健嗣
2. 発表標題 空気圧リザーバコンピューティングを用いた人工筋アシストスーツの歩容推定
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川瀬 利弘, 宮崎 哲郎, 曾我部 舞奈, 菅野 貴皓, 中島 義和, 川嶋 健嗣
2. 発表標題 空気圧リザーバコンピューティングの性能向上に向けた管路ネットワークの周波数特性解析
3. 学会等名 計測自動制御学会 2021年度産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki Hayashi, Toshihiro Kawase, Tetsuro Miyazaki, Maina Sogabe, Yoshikazu Nakajima, Kenji Kawashima
2. 発表標題 Multi-Joint Motion Estimation of a Soft Gait Assistive Suit Using Pneumatic Reservoir Computing
3. 学会等名 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Hayashi, Toshihiro Kawase, Tetsuro Miyazaki, Maina Sogabe, Yoshikazu Nakajima, Kenji Kawashima
2. 発表標題 Online Assistance Control of a Pneumatic Gait Assistive Suit Using Physical Reservoir Computing Exploiting Air Dynamics
3. 学会等名 2022 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林滉之, 川瀬利弘, 宮寄哲郎, 菅野貴皓, 中島義和, 川嶋健嗣
2. 発表標題 空気圧リザーバコンピューティングを用いた人工筋アシストスーツの複数関節動作推定
3. 学会等名 計測自動制御学会2020年度産業応用部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroaki Shinkawa, Toshihiro Kawase, Tetsuro Miyazaki, Takahiro Kanno, Maina Sogabe, Kenji Kawashima
2. 発表標題 Limit Cycle Generation with Pneumatically Driven Physical Reservoir Computing
3. 学会等名 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (国際学会)
4. 発表年 2023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
研究協力者	川嶋 健嗣  (Kawashima Kenji)  (40300553)	東京大学・情報理工学系研究科・教授    (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	宮崎 哲郎  (Miyazaki Tetsuro)  (60734481)	東京大学・情報理工学系研究科・講師    (12601)	
研究協力者	曽我部 舞奈  (Sogabe Maina)  (80788951)	東京大学・情報理工学系研究科・助教    (12601)	
研究協力者	菅野 貴皓  (Kanno Takahiro)	株式会社リバーフィールド	
研究協力者	中島 義和  (Nakajima Yoshikazu)  (40343256)	東京医科歯科大学・生体材料工学研究所・教授    (12602)	
研究協力者	只野 耕太郎  (Tadano Kotaro)  (90523663)	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授    (12608)	

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