

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04012

研究課題名(和文)人工筋アクチュエータに適したモデルベース制御・管理の統合化技術の開発

研究課題名(英文) Model-based control and management technology for pneumatic artificial muscle actuators

研究代表者

小木曾 公尚 (Kogiso, Kiminao)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：30379549

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、柔軟アクチュエータを実現する空気圧ゴム人工筋のモデルベース制御・管理・セキュア化に関する4つの成果が得られた。具体的には、人工筋の精緻な数理モデルを導出し、所望の柔軟性(剛性)を実現するモデルベース制御やセンサレス制御、人工筋モデルのパラメータ変化に着目した人工筋の経年劣化・故障検知法、そして、暗号化制御を応用したセキュアな制御方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々が提案するMcKibben型空気圧ゴム人工筋に基づくアクチュエータの数理モデルは、回転角度を計測するエンコーダや剛性を導出するトルクセンサを代用できるほどの高い精度を有する。この成果は、ロボティクス分野の有名学術誌(IEEE TMECH)に採択されるなど、本研究の学術的意義は極めて大きい。たとえば、提案モデルに基づくアクチュエータの解析・設計アプローチが可能となり、人工筋アクチュエータの開発に様々なモデルベース制御を適用することができる。そして、このように多様な制御手法は、リハビリ機器やパワーアシスト装具を高性能化・軽量化を実現する。

研究成果の概要(英文)：This study has obtained four results related to model-based control, management, and securing of pneumatic artificial muscles (PAM) that realize flexible actuators. Specifically, we have identified a precise mathematical model of the PAM. We have developed model-based control and sensorless control to track the desired flexibility (stiffness), a method for detecting the failure of the PAM by focusing on changes in model parameters of the PAM model, and a secure control method by applying encrypted control.

研究分野：制御工学

キーワード：アクチュエータ 空気圧駆動 非線形システム モデリング カルマンフィルタ 制御工学

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

McKibben型空気圧人工筋は、非伸縮性カバーで覆われたゴム製チューブが空気圧により膨張し、筋全体の収縮により引張力を発生させるアクチュエータである。この人工筋は、人に対して柔軟かつ安全であり、駆動には圧縮空気を用いるため環境に優しい。さらに、軽量な割には電気モータより大きな出力(収縮力)を発生させられる。近年、パワーアシスト装具やリハビリ装置の社会的ニーズを背景に、人工筋の特徴を生かしたロボットの駆動部の軽量化だけでなく、高齢介護者の体力的負担軽減や高齢者自身の自立支援を目指したトップダウン型のシステム開発が盛んである。

このようなシステムでは、人の動き方に従うように、もしくは、人の動作を妨げるように的確かつ滑らかな位置/力制御を空気圧駆動により実現する制御技術が必要である。しかしながら、人工筋自体の非線形特性(ヒステリシス、圧縮流体やゴムチューブの力学特性など)が扱い難いため、現在でも人工筋アクチュエータに対して所望の動作仕様を遵守する系統的かつ有用な制御方式は確立されていない。さらに、人工筋の利点を生かした装具や機器を実用的なものにするためには、使用頻度やゴムの経年による特性変化(経年劣化)への対処や、複数の人工筋を分散制御するための無線化技術を実現しなければならない。

そこで本研究では、「人工筋アクチュエータの制御・管理技術にモデルベースアプローチは有用か?」との問いを提起する。そして、人工筋の数理モデルに基づくボトムアップ型のシステム開発でしか実現できない固有の機能実現を通し、この問いに対する答えを明らかにする。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人工筋アクチュエータに適したモデルベース制御・管理の統合化技術の開発と定める。具体的に解決すべき課題は、

- 柔軟性が調整可能な位置/力制御ロボットアームの開発、
- 経年劣化診断システムの開発、
- ネットワーク化による多配置駆動制御ユニットの開発

である。これらの課題解決により、人工筋の特性を最大限に生かしたリハビリ装置やパワーアシスト装具に有用な人工筋駆動制御技術を、制御工学に基づくボトムアップアプローチで開発し、高齢化社会における喫緊の課題解決に貢献する。

3. 研究の方法

本研究では、McKibben型空気圧ゴム人工筋を拮抗構造で配置した人工筋アクチュエータユニットを製作し、その数理モデルを活用した制御・管理技術を開発する。製作した人工筋アクチュエータユニットを図1に示す。同図の人工筋は、長さ20cm、直径0.6 inchの神田通信工業製のMcKibben型空気圧ゴム人工筋であり、両人工筋がジョイント部分で結合され、人工筋の内圧差からジョイント部分の回転トルクが発生する。この回転角度とトルクは、同左図にあるように、回転軸に取り付けたセンサ(UNIPULSE製)を用いて計測される。人工筋の圧力は、比例流量制御バルブ(FESTO製)を通して人工筋に流れ込んだ圧縮空気により発生し、圧力センサ(OMRON製)で計測する。

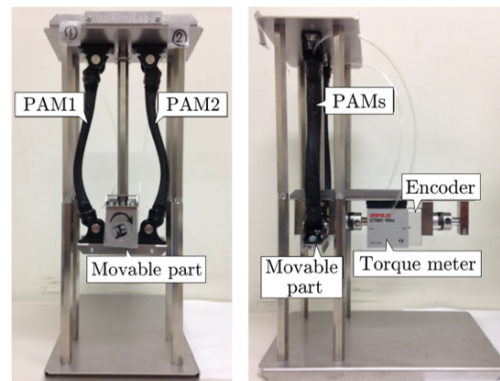


図1 拮抗構造の人工筋ユニット

人工筋アクチュエータユニットは、入力が比例制御バルブへの指令電圧、そして、出力がジョイント部の回転角度とトルクとなる非線形な制御対象として捉えることができる。この制御対象の数理モデル化を経て、モデルに基づいた制御工学的アプローチにより制御アルゴリズムおよび人工筋制御システムを構築した。この制御システムを用いて、所望の柔軟性(剛性)を実現する制御アルゴリズムや、それを応用した柔軟ロボットアームの開発、また、人工筋モデルのパラメータ変化に着目した人工筋の経年劣化・故障検知手法、そして、多配置人工筋ユニットの無線制御技術として暗号化制御を応用したセキュアな制御方式の開発をおこなった。次節にて、本研究により得られた成果を説明する。

4. 研究成果

(1) 拮抗構造を有する人工筋ユニットのモデル化および妥当性の検証[雑誌論文2, 学会発表5]

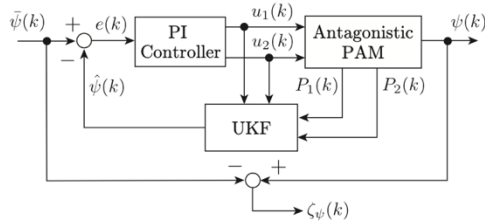
本研究で得られた人工筋ユニットの数理モデルは、ジョイントの回転角度、回転角速度、人工筋内圧力を状態変数とする非線形微分方程式で記述される。

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f_\sigma(x(t), u(t)) + v(t) \quad \text{if } x(t) \in \mathcal{X}_\sigma, \\ y(t) &= h(x(t)) + w(t),\end{aligned}$$

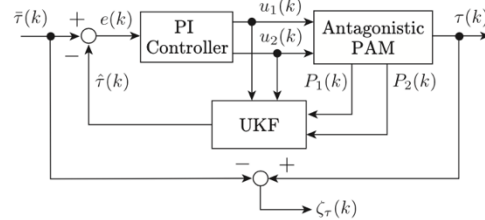
ここで、入力 u は、比例流量制御バルブへの指令電圧であり、出力 y は、ジョイント角度および角速度、各人工筋の内圧である。 v

および w は、システムノイズおよび計測ノイズである。関数 f_σ は、状態変数の値に応じて切替わる特性を有し、拮抗構造、圧縮空気、収縮力、制御バルブの動特性から求められる。このモデルには、26個のパラメータが存在し、内13個は、物理的に計測可能なパラメータであり、残り13個は推定が必要なパラメータである。実験データから各パラメータの値を推定することができる。

提案モデルの妥当性を調べるために、Unscented Kalman Filter (UKF) を用いたセンサレス制御系を構築した (図2参照)。同図上段は、ジョイント角度を計測するエンコーダを、提案モデルを採用した UKF に置き換えたセンサレス制御システムのブロック線図である。一方下段は、トルクセンサを UKF に置き換えたセンサレス制御システムのブロック線図である。両制御系により求まる角度およびトルクの推定値を、センサ値と比較して推定精度を評価した (図3参照)。その結果、角度およびトルクの最大推定誤差は、それぞれ、7.91% および 6.01% であった。また、センサの代わりに提案モデルを用いた位置・トルク制御系の定常偏差は、それぞれ、5.25% および 5.00% であった。これらの結果から、提案モデルが実際の人工筋ユニットの振る舞いを的確に捉えられており、センサの代わりに代用できるほど妥当であることが示された。

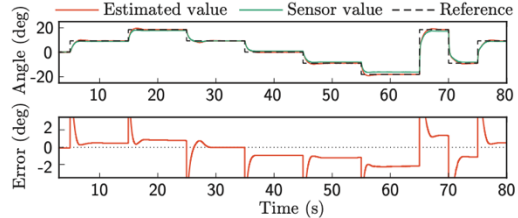


(a) An encoder-less control system.

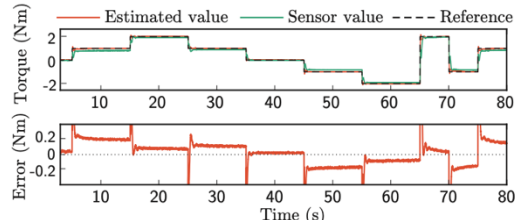


(b) A torque-sensor-less control system.

図 2 UKF を用いたセンサレス制御系



(a) Time responses of measured and estimated joint angles (upper) and tracking error ζ_ψ between the reference and the measured angle (lower).



(b) Time responses of measured and estimated torque (upper) and tracking error ζ_τ between the reference and the measured torque (lower).

図 3 センサレス制御系の実験結果

(2) 人工筋アクチュエータのジョイント角度・剛性の同時制御および柔軟ロボットアームの試作機開発 [学会発表 6, その他 11,12]

柔軟ロボットアームを開発するためには、柔軟性指標となる剛性を制御するだけでなく、関節角度も同時に制御することが重要である。本研究では、提案モデルを用いて人工筋の収縮力推定をおこなうことで、角度と剛性を同時に制御する入力量 (制御バルブへの指令電圧) を計算する制御アルゴリズムを開発し、実装した (図4参照)。ここで、剛性 K_p は、トルクを角度で偏微分した値として定義し、ジョイント部の回転のしやすさを表す。この剛性は、次式で計算することができる。なお、各変数は図5を参照のこと。

$$\begin{aligned}K_P(t) &= -\frac{\partial r(t)}{\partial \theta(t)} \\ &= r \sin \theta(t)(F_1(t) - F_2(t)) - r \cos \theta(t) \left(\frac{\partial F_1(t)}{\partial l_1(t)} \frac{\partial l_1(t)}{\partial \theta(t)} - \frac{\partial F_2(t)}{\partial \theta(t)} \frac{\partial l_2(t)}{\partial \theta(t)} \right) \\ &= r \sin \theta(t)(F_1(t) - F_2(t)) + r^2 \cos^2 \theta(t) \left(\frac{\partial F_1(t)}{\partial l_1(t)} + \frac{\partial F_2(t)}{\partial l_2(t)} \right)\end{aligned}$$

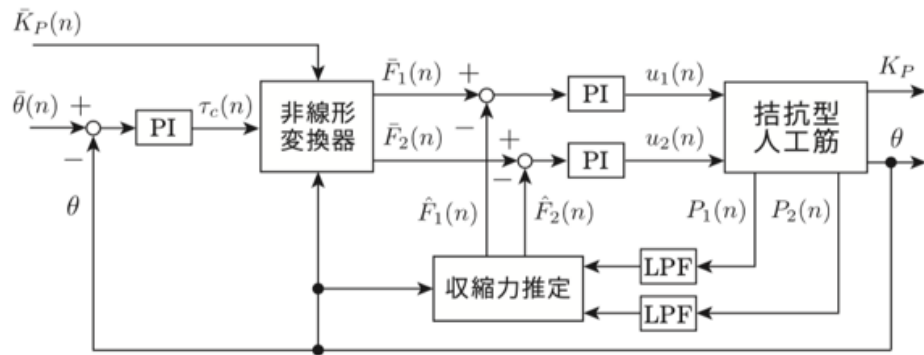


図 4 ジョイント角度と剛性の同時制御システムのブロック線図

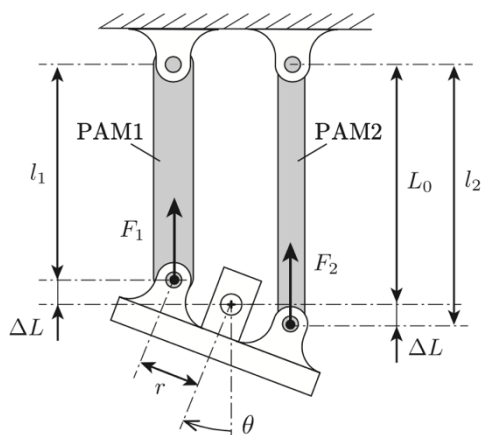
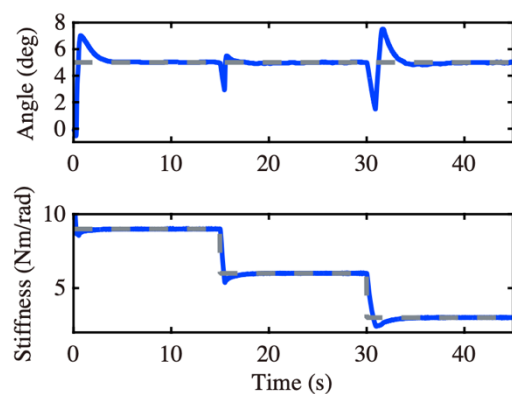


図 5 ジョイント部の構造と変数



(b) 関節角度および剛性.

図 6 ジョイント角度と剛性の同時制御結果

上述のモデルを用いた同時制御の結果を図6に示す. ジョイント角度を一定に保ちつつ, 剛性を段階的に柔軟な方に変更するように指定した. 同図から角度と剛性を同時に制御できている様子がわかる. 以上から, 提案モデルを活用することで, 2本の人工筋圧力を独立に操作し, ジョイント角度と剛性を同時に制御できるようになった. なお, 本研究成果は, リハビリ機器やパワーアシスト装具への展開可能であり, 医療機器分野の学術誌から寄稿依頼があるなど注目されている[その他 8].

つぎに, この同時制御システムを2リンクロボットアームに適用することで柔軟ロボットアームの開発をすすめている. いまのところ, 柔軟ロボットアームを試行錯誤的に設計し, 3D プリンタによる試作機の動作検証を重ねている (図7参照).



図 7 柔軟ロボットアーム試作機開発

(3) 人工筋モデルのパラメータ分類による経年劣化・故障判定[雑誌論文 1, 学会発表 3,4]

空気圧ゴム人工筋は, 内部のゴムチューブが収縮時に非伸縮性のメッシュ状のカバーに擦れ, 繰り返し利用することで, ゴムチューブに穿孔が発生する. 本研究では, このような経年劣化による故障を, 人工筋制御システムの観測データから推定・判定する仕組みを開発した. この故障

判定手法は、1本の人工筋モデルのパラメータ値(人工筋形状に関する補正係数 C_{q1} , C_{q2} , および、メッシュ角度 θ)に着目し、その値の変化を捉えることで、正常状態と穿孔(故障)状態をサポートベクターマシンで学習し、その2状態の境界(識別器)を特定することに成功した(図8参照).

また、他のメーカー製の McKibben 型空気圧ゴム人工筋に対しても識別器を構成することができ、調査の結果、22個のモデルパラメータのうち、故障時に大きく変動する支配的なパラメータ(特徴量)が3種類であることも特定することができた. この成果により、人工筋アクチュエータの経年劣化による故障が、観測データから検知できることを示し、拮抗配置人工筋アクチュエータへの展開が可能であることを示唆している.

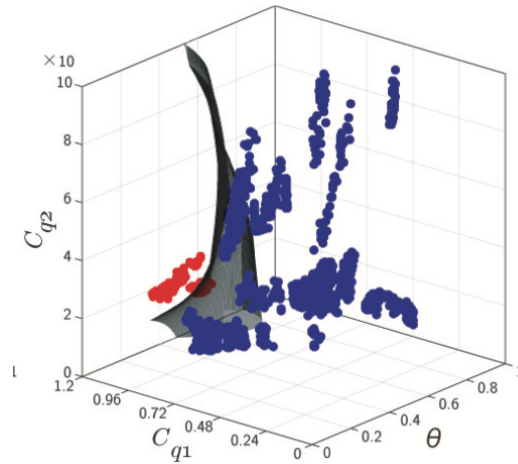


図 8 神田通信工業製人工筋のモデルパラメータの分類結果

(4) 暗号化制御を応用したセキュアな同時制御およびサイバー攻撃検知[学会発表 6, その他 11]

本研究では、人工筋アクチュエータのセキュア化を実現するために、暗号化制御を活用して角度と剛性の同時制御システムを秘匿化する. 暗号化制御は、乗法に対する準同型性を有する ElGamal 暗号を採用し、暗号化したまま乗算(秘密計算)が可能である. 一方で、加法に対する準同型性を持たないため、制御器を乗法部分と加法部分に分割することで暗号化制御を実現でき、線形制御則および多項式型の非線形制御則には適用可能である. 本研究で扱う制御器には、三角関数やクロスターム(変数同士の積)を含むため、単純には暗号化制御器を構築できない. そこで、この非線形変換器の多項式近似をおこない、角度-剛性制御器を多項式型の非線形制御則に落とし込むことで暗号化制御を実現した(図9参照). 暗号化同時制御器を実装した人工筋アクチュエータシステムの応答を図10に示す. 同図より、非暗号化制御システムの結果(図6)と比較し、暗号化制御による関節角度と剛性の同時制御が実現できた.

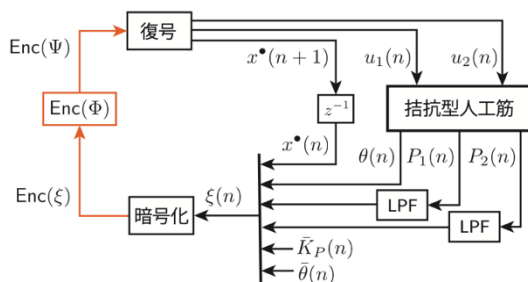
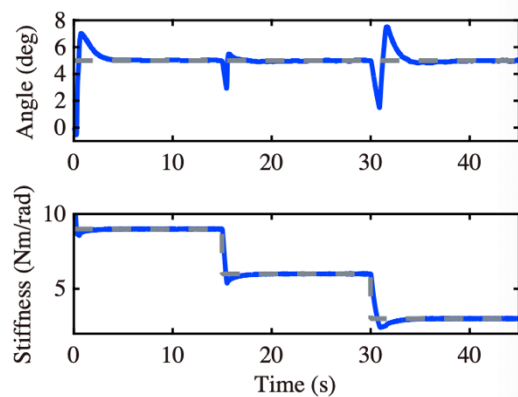


図 9 角度-剛性制御システムの暗号化実装



(b) 関節角度および剛性.

図 10 暗号化同時制御の実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Takahiro Ishikawa, Yu Nishiyama, Kiminao Kogiso	4. 巻 11
2. 論文標題 Characteristic extraction for model parameters of McKibben pneumatic artificial muscles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 357, 364
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/jcmsi.11.357	査読の有無 有
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 Takaya Shin, Takumi Ibayashi, Kiminao Kogiso	4. 巻 26
2. 論文標題 Detailed Dynamic Model of Antagonistic PAM System and its Experimental Validation: Sensor-less Angle and Torque Control with UKF	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1, 12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMECH.2021.3086218	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5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takahiro Ishikawa, Kiminao Kogiso, Kenichi Hamamoto
2. 発表標題 Fault analysis of aging McKibben pneumatic artificial muscle in terms of its model parameters
3. 学会等名 EEE Conference on Control Technology and Applications（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Okabe, Kiminao Kogiso
2. 発表標題 Efficient algorithm for constructing a load-dependent McKibben pneumatic artificial muscle model
3. 学会等名 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kouichiro Yokoyama, Kiminao Kogiso
2. 発表標題 PID position control of McKibben pneumatic artificial muscle using only pressure feedback
3. 学会等名 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新昂也, 寺西郁, 小木曾公尚
2. 発表標題 非線形コントローラが多項式近似による空気圧人工筋アクチュエータの関節角度と剛性の暗号化同時制御
3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新昂也, 小木曾公尚
2. 発表標題 拮抗構造を有する空気圧人工筋アクチュエータのモデル化およびセンサレス制御への応用
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>空気圧ゴム人工筋を用いた柔軟なアクチュエータの開発 https://www.kimilab.tokyo/contents/102</p> <p>・寄稿 8. 新昂也, 小木曾公尚: リハビリテーション医療を加速するソフトアクチュエータとセキュアな制御技術, Medical Science Digest, 株式会社ニューサイエンス社, Vol. 47, No. 5, pp. 162-163, 2021.</p> <p>・投稿中原稿 9. Takaya Shin, Kaoru Teranishi, and Kiminao Kogiso, "Cyber-Secure pneumatic actuator equipped with encrypted controller and attack detectors," submitted to Advanced Robotics, 2021 10. Takaya Shin and Kiminao Kogiso, "Sensor-Less angle and stiffness control of antagonistic PAM actuator using reference set," submitted to Advanced Robotics, 2021. 11. 新昂也, 小木曾公尚: 多項式近似による空気圧人工筋駆動系の関節角度-剛性の暗号化同時制御, 第39回日本ロボット学会学術講演会, 2021/9/8-9/11. 12. 新昂也, 小木曾公尚: 空気圧人工筋モデルに基づく実現可能な関節角度と剛性の目標値集合, 第39回日本ロボット学会学術講演会, 2021/9/8-9/11</p>
--

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	西山 悠 (Nishiyama Yu) (60586395)	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・准教授 (12612)	

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