

ロボットの反射機構のための圧力・変形量依存バネモデルによる 空気圧人工筋の動的長さ推定

Dynamic length estimation of pneumatic artificial muscles
using pressure and deformation dependent spring model for robot reflex mechanism

○学 吉田瑞希 (京都大) 正 細田耕 (京都大)

Mizuki YOSHIDA, Kyoto University, yoshida.mizuki.68s@st.kyoto-u.ac.jp

Koh HOSODA, Kyoto University, hosoda.koh.7p@kyoto-u.ac.jp

This paper proposes a method to estimate pneumatic artificial muscle (PAM) length from its pressure and tension for incorporating a reflex mechanism into musculoskeletal robots. Our suggested model treats a PAM as a non-linear spring with the spring constant dependent on pressure and deformation. The order of the model equation is determined based on the previous studies and the coefficients, which reflect individual differences in muscle characteristics, are determined experimentally using the least squares method. As a result, when the pressure was varied in the triangular waveform, the length estimations of the four PAMs with the different materials and shapes were achieved with the maximum error of 1.41% and the root mean squared percentage errors within 0.580%.

Key Words: Length Estimation, Pneumatic Artificial Muscle, Reflex, Musculoskeletal Robot

1 諸言

生物を模倣した柔らかいロボット、ソフトロボットは、生物のもつ適応性を実現できると考えられている。特に筋骨格ロボットのアクチュエータとして空気圧人工筋がしばしば使用されるが、その非線形性は中央制御系に大きな計算負荷をかける。この問題を解決するために、生物に見られる反射機構をロボットに搭載することが提案されている [1]。反射機構は、中央制御系を介さずに局所制御系が外乱を補償し、ロボット的环境への応答性を高める。脊髄反射の一種である伸長反射は、筋の長さの情報を必要とするが、長さセンサを使用して筋の全長を直接測定することは難しい。第一に、リニアエンコーダのワイヤの緩みやレーザセンサの光の遮蔽といった計測上の問題がある。第二に、長さセンサは筋の両端の位置情報を必要とするため、センサの配置がロボットの設計に成約を課す。第三に、センサの硬さが筋の柔らかさを損なう可能性がある。

本論文では、空気圧人工筋駆動のロボットに伸張反射を実装するために、筋の圧力と張力から長さを推定する方法を提案する。提案モデルでは、空気圧人工筋をバネ定数が圧力と自然長からの変形量に依存する非線形性バネとみなす。バネ定数の次数は先行のモデルを参考に決定し、その係数は実験により取得する。その後、圧力を三角関数的に変化させたときの長さ推定の誤差を計測し、実際の駆動方式においても提案モデルが有効であることを示す。提案モデルを適用すれば、空気圧人工筋の片端にセンサを集約させることができるので、筋骨格ロボットの構造が単純になる。また、空気圧人工筋の種々の理論的モデルは、スリーブ繊維の全長や編込みの角度といった、個体差の大きい各種パラメータを多く含むので、長さ推定時に正確に各筋の特性を反映させることは難しいが、提案モデルは実験的に推定パラメータを取得するので、あらゆる材料や形状の空気圧人工筋に対して包括的である。

2 長さ推定のためのモデル提案

人工筋全体の長さ L は、人工筋内の空気圧によって決まる自然長 L_u と、外力による自然長からの伸び L_s によって、

$$L = L_u + L_s \quad (1)$$

と表される。ただし、自然長 L_u は、圧力 P における人工筋の無負荷の長さとして定義される。自然長 L_u は、一定の圧力範囲では圧力 P の線形な関数であるとして、

$$L_u = mP + k \quad (2)$$

と表せると仮定する。(2) 式における定数 m , k は、人工筋に圧縮空気を供給して測定した長さのデータに最小二乗法を適用することで計算される。また、人工筋が非線形性のバネであると [2] して、張力 F が伸び L_s に非線形バネ定数をかけた

$$F = (a_3P^2 + a_2PL_s + a_1L_s^2 + a_0)L_s \quad (3)$$

のように表されると仮定する。ここで、非線形バネ定数の次数は、スリーブの幾何学的構造に基づく Chou らのモデル [3]、仮想仕事の原理から導出した Tondou らによるモデル [4] および材料内部の応力を評価した Ferraresi らによるモデル [5] のモデル式の次数を参考に定めた。(3) 式の定数 $a_0 \sim a_3$ を負荷実験により取得したデータに最小二乗法を適用することで決定することで、圧力 P 、張力 F から伸び L_s を推定することができる。

3 実験手法

3.1 推定パラメータ同定実験

図 1 は、長さ推定に必要なパラメータを取得するため実験の概略図である。表 1 に実験で使用した 4 種の空気圧人工筋の形状と囊構造の材料を示す。実験の手順は次の通りである。まず、コンプレッサから供給される空気の圧力 P を一定に調整した。囊構造の材料の強度を考慮し、PAM-A, PAM-B および PAM-C は 0.4MPa, 0.5MPa, 0.6MPa, 0.7MPa および 0.8MPa のいずれかに、PAM-D は 0.2MPa, 0.3MPa, 0.4MPa, 0.5MPa および 0.6MPa のいずれかに調整した。次に、それぞれの圧力における自然長 L_u をリニアエンコーダで測定した。そして、空気圧人工筋を自然長から約 2.5mm ずつ引き伸ばし、各自然長からの伸び L_s における張力 F と圧力 P の値を測定した。このとき、空気圧人工筋を引き伸ばして 2 秒以上経過してから測定することで、安定な状態における各値を得た。 L_s が各空気圧人工筋の強度に応じて定めた最大値に達したら、同様に約 2.5mm ずつ収縮させ、 L_u に達するまで L_s, P および F の値を測定した。最後に、各空気圧人工筋に対して、推定パラメータ m, k および a_i を最小二乗法により計算した。

3.2 動的測定実験

図 2 は、取得したパラメータを使用して動的に空気圧人工筋の長さを推定したときの誤差を測定し、提案モデルの有効性を検証する実化の概略図である。実験の手順は次の通りである。まず、5kg もしくは 10kg のウェイトをプーリーを介して空気圧人工筋に接続し、一定の張力をかけた。次に、材料の強度を考慮して、

Table 1 The Characteristics of the experimented PAMs

空気圧人工筋	長さ [cm]	直径 [mm]	囊構造の材料
PAM-A	21.6	19.9	天然ゴム
PAM-B	21.1	13.4	天然ゴム
PAM-C	14.1	13.4	天然ゴム
PAM-D	21.2	19.0	シリコン

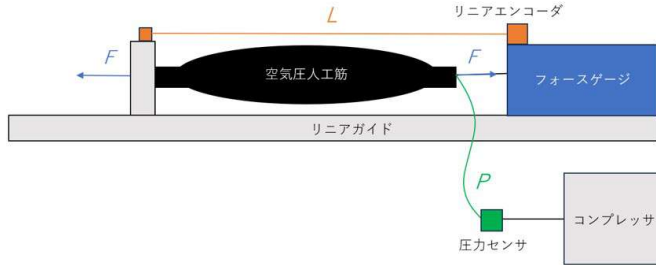


Fig.1 Outline diagram of the parameter identification experiment

比例制御弁により圧力 P [MPa] を, PAM-A, PAM-B, PAM-C に対しては,

$$P = 0.2 \sin\left(\frac{2\pi t}{5}\right) + 0.6 \quad (4)$$

と, PAM-D に対しては,

$$P = 0.2 \sin\left(\frac{2\pi t}{5}\right) + 0.4 \quad (5)$$

と時間 t [s] に対して動的に変化させ, 各時刻の空気圧人工筋の全長 L , 張力 F および圧力 P の値を測定した. 最後に, 全長 L の推定値と測定値から誤差を計算した.

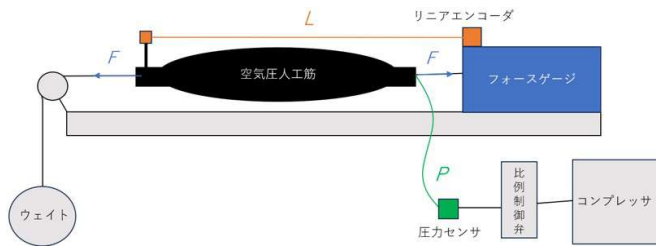


Fig.2 Outline diagram of the error measurement experiment

4 長さ推定結果

4.1 推定パラメータ同定

図 3 は, 4 種の空気圧人工筋の圧力 P と自然長 L_u の関係である. 仮定通り, 圧力 P に対して自然長 L_u が線形的に減少する傾向が見られる. 図中の点線は, 最小二乗法により各データ郡にフィッティングした (2) 式である.

一方, 図 4 は PAM-B に対する推定パラメータ同定実験の結果である. ただし, 赤色の点が膨張時のデータ, 青色の点が収縮時のデータ, 緑色の点線が取得した推定パラメータ a_i による推定値を表す. 一般に, 空気圧人工筋は摩擦によるヒステリシスを有するので, 膨張時と収縮時でデータが異なる. 本論文では, 紙幅上 PAM-B に対する実験結果のみ示すが, 他の空気圧人工筋に対しても同様の結果が得られた.

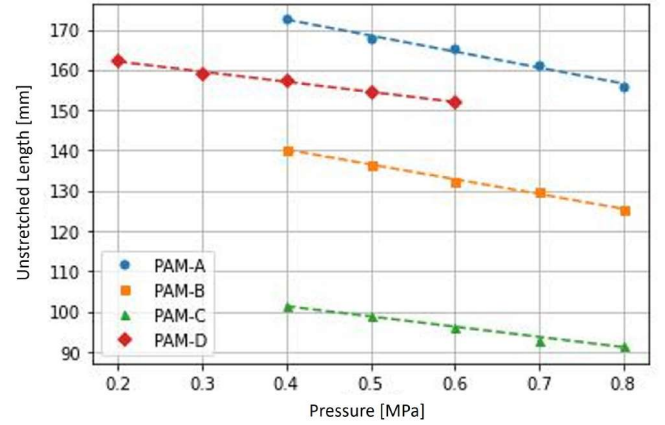


Fig.3 Relationship between pressure and unstretched length

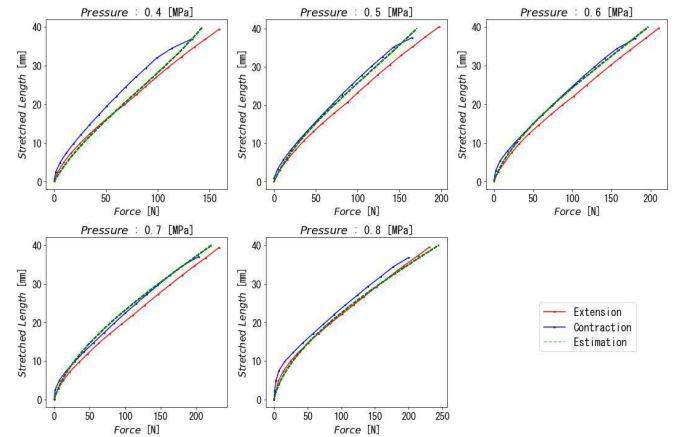


Fig.4 Relationship between force and stretched length at each pressure (PAM-B)

4.2 動的測定実験

図 5 は, PAM-B に対して取得した推定パラメータを用い, 動的に長さを推定した結果である. 提案手法では, 表 2 の第 2 列および第 3 列に示す最大誤差および平均平方二乗誤差率で, それぞれ動的に長さを推定できた.

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 23K18494 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Ryu Takahashi, Yanlin Wang, Junqi Wang, Yelin Jiang, and Koh Hosoda. Implementation of Basic Reflex Functions on Musculoskeletal Robots Driven by Pneumatic Artificial Muscles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 8, No. 4, pp. 1920–1926, 2023.
- [2] Kanchana Crishan Wickramatunge and Thananchai Leephakpreeda. Empirical modeling of dynamic behaviors of pneumatic artificial muscle actuators. *ISA Transactions*, Vol. 52, No. 6, pp. 825–834, 2013.
- [3] Ching-Ping 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.
- [4] B. Tondu and P. Lopez. Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators. *IEEE Control Systems*, Vol. 20, No. 2, pp. 15–38, 2000.
- [5] Walter Franco Carlo Ferraresi and Andrea Manuello. Flexible Pneumatic Actuators: A Comparison between The McKibben and the Straight Fibres Muscles. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 13, No. 1, pp. 56–63, 2001.

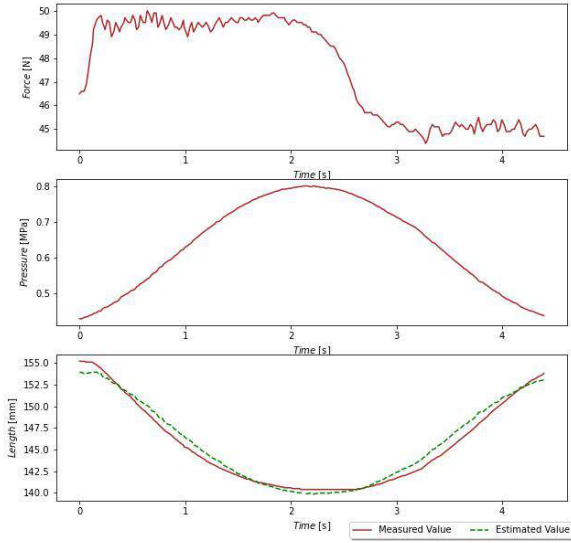


Fig.5 Result of dynamic length estimation (PAM-B)

Table 2 Maximum error and root mean squared percentage error of dynamic length estimation

空気圧人工筋	最大誤差 [%]	平均平方二乗誤差率 [%]	最大誤差 [%]	平均平方二乗誤差率 [%]
	(二次式)	(二次式)	(三次式)	(三次式)
PAM-A	0.975	0.510	1.22	0.516
PAM-B	0.955	0.510	1.41	0.484
PAM-C	1.07	0.580	0.951	0.500
PAM-D	1.41	0.475	1.99	0.606

5 議論

提案モデルによる長さ推定の誤差を低減しようと、(3) 式のバネ定数を

$$F = (a_4 P^3 + a_3 P^2 L_s + a_2 P L_s^2 + a_1 L_s^3 + a_0) L_s \quad (6)$$

のように、圧力 P と変形量 L_s の三次式にし、推定パラメータの数を増やした。その結果、表 2 の第 4 列および第 5 列に示すように、かえって誤差を増大させる場合があった。この原因として、過剰に推定パラメータを増やしたことで、誤差に対してオーバーフィッティングするようになったことが考えられる。誤差に対するオーバーフィッティングを防ぎつつ、長さ推定の精度を上げるには、(3) 式および (6) 式のバネ定数の各項のフィッティングへの寄与を一つずつ調査し、各項を削除もしくは追加するかを検証する必要がある。長さ推定時の各項の効果には、圧力センサや力センサの信頼性も影響する。例えば、圧力センサの誤差が非常に小さい場合、(3) 式のバネ定数に $a_4 P^3$ の項のみ追加すれば、長さ推定の誤差が低減される可能性がある。

6 結言

本論文では、筋骨格ロボットに反射機構を実装することを目的として、先行研究に基づきモデル式の次数を決定し、その係数を実験的に決定することで、空気圧人工筋の材料や形状の個体差を反映しながら、その長さを動的に推定することができる手法を提案した。今後、反射機構を搭載した筋骨格ロボットを開発し、実際の反射時にも提案手法による長さ推定が有効であるかを検証する。