

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	油圧駆動高出力マッキベン型人工筋の開発 第2報 動特性の検証
Title(English)	Development of Very High Force Oil Hydraulic McKibben Artificial Muscle 2nd Report: Verification of Dynamic Characteristics
著者(和文)	森田隆介, 鈴森康一, 難波江裕之, 遠藤玄, 櫻井良
Authors(English)	Ryusuke Morita, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Ryo Sakurai
出典(和文)	第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, Vol. , No. , pp. 2318-2322
Citation(English)	Proceedings of the 17th SICE System Integration Division Annual Conference, Vol. , No. , pp. 2318-2322
発行日 / Pub. date	2016, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2016 The Society of Instrument and Control Engineers

油圧駆動高出力マッキベン型人工筋の開発

第2報 動特性の検証

○森田 隆介（東京工業大学），鈴森 康一（東京工業大学），難波江 裕之（東京工業大学）
遠藤 玄（東京工業大学），櫻井 良（ブリヂストン(株)）

Development of Very High Force Oil Hydraulic McKibben Artificial Muscle

2nd Report: Verification of Dynamic Characteristics

○Ryusuke MORITA (Tokyo Tech), Koichi SUZUMORI (Tokyo Tech)
Hiroyuki NABAE (Tokyo Tech), Gen ENDO (Tokyo Tech)
and Ryo SAKURAI (BRIDGESTONE INC.)

Abstract : We have developed hydraulic McKibben artificial muscles as hydraulic actuators for robots. The artificial muscle is so flexible and light an actuator and generates very high force by oil hydraulic pressure. In our previous research, we have confirmed static characteristics of this actuator. In this paper, dynamic characteristics of the hydraulic McKibben artificial muscle driven by oil hydraulic of maximum pressure of 5 MPa are discussed.

1. 緒言

近年，東日本大震災を始めとする災害が多発しており，現場で実際に使用できる災害対応ロボットの需要が高まっている．このようなロボットへの要求として，瓦礫などに対応するための“パワー・タフさ”と，人を救助する，或いは同環境で作業するための“安全性・優しさ”がある．前者を実現するアクチュエータとして，油圧アクチュエータが注目を集めており，BostonDynamics の BigDog[1] や，IIT の HyQ[2]，立命館大学の RL-R1[3] は，アクチュエータとして主に油圧シリンダを採用し，不整地歩行などの災害対応に必要なタスクを達成している．一方で，これらのロボットはコンプライアンス性を制御により獲得しており，本質的安全を実現しているとは言えない．そこで，筆者らはロボット用の油圧アクチュエータとして，マッキベン型人工筋の作動流体を空気から油にした油圧駆動高出力マッキベン型人工筋（以下，油圧人工筋あるいはHAM）を開発した [5]．油圧人工筋は，シリンダーと比較して軽量かつ柔軟な素材で構成されており，油圧駆動による高いパワーを持ちながら，人工筋の特有のコンプライアンス性を有する，タフさと優しさの双方を実現できるアクチュエータであると考えられる．また，広く使われている油圧システムをそのまま使用でき，水圧人工筋 [4] のように新たな水圧システムを構築する必要がなく，また作動流体である水が腐敗するといった問題も生じない，シリンダーと比較して軽量であることから，軽くて強いロボットを実現できる，摺動部が無いため油漏れしないといった利点もある．同様の原理で動作するアクチュエータとして，横田ら

の FHA[6] があるが，2 MPa という油圧機器としては比較的低圧での動作に限られている．本研究では，この油圧人工筋の 5 MPa の圧力印加に対する動特性を，理論計算と実験の双方から検証したことを報告する．

2. 油圧人工筋の概要

記号表

Q	: バルブを通る油の流量 [m^3/s]
P	: 人工筋内部圧力 [Pa]
V	: 人工筋内部体積 [m^3]
ε	: 人工筋収縮率
F	: 人工筋収縮力 [N]
l_0	: 人工筋初期長さ [m]
D_0	: 人工筋内部ゴムチューブ初期外径
θ_0	: スリーブ初期編み角
P_0	: 元圧 (供給圧) [Pa]
P_1	: バルブオリフィス直後の圧力 [Pa]
Q_{rate}	: バルブ定格流量 [m^3]
M	: 負荷質量 [kg]
I	: プーリ慣性モーメント [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]
r	: プーリ半径 [m]
C	: 粘性減衰係数 [$(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}$]
ρ	: 作動油の質量密度 [kg/m^3]

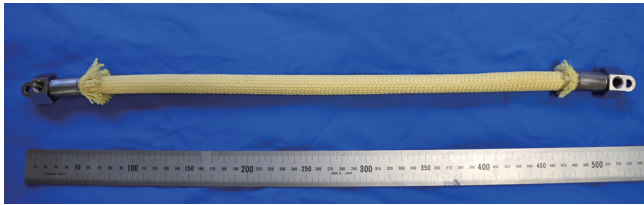


Fig. 1: Overview of HAM

Table. 1: Design parameters of HAM

HAM outer diameter	15 mm
HAM's rubber tube inner diameter	9.5 mm
HAM's rubber tube outer diameter	13.1 mm
Fiber material of sleeve	Aramid
Fiber braided angle	25 °

- λ : 管摩擦係数
 L : 配管の長さ [m]
 d : 配管内径 [m]
 V : 作動油流速 [m/s]
 g : 重力加速度 [m/s²]

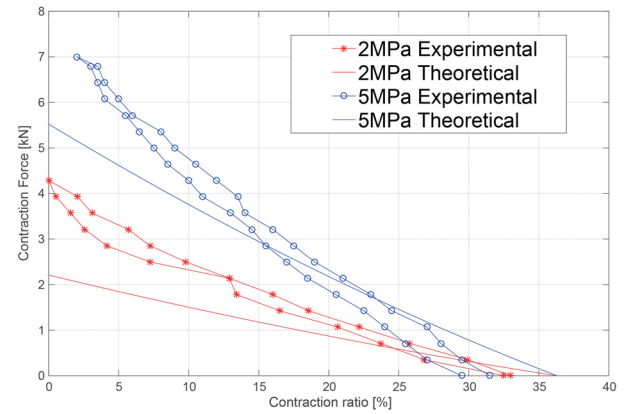


Fig. 2: HAM's contraction force - contraction ratio graph(input 2 MPa, 5 MPa)

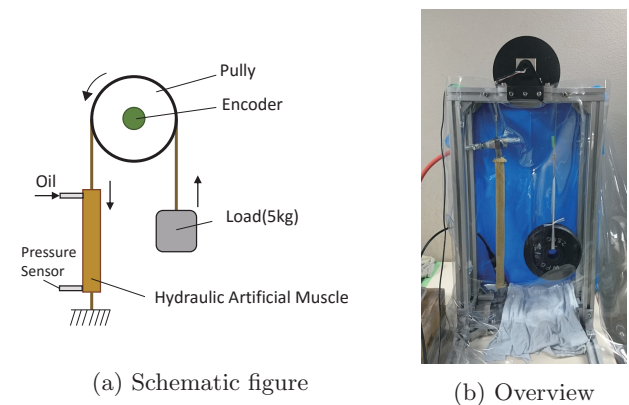


Fig. 3: Experiment system of dynamic characteristics

2.1 油圧人工筋の構成

Fig.1 に、油圧人工筋の概観を示す。油圧人工筋は、通常の空圧駆動マッキベン人工筋と同様の構造をしており、ゴムチューブとその外側の繊維で編まれたスリーブによって構成される。Table.1 に油圧人工筋の設計パラメータを示した。また、動作原理も同様で、ゴムチューブ内部に作動流体を流入させその圧力を変化させることで、軸方向に収縮しつつ収縮力を発生させるものである。

2.2 油圧人工筋の静特性

マッキベン型人工筋は、スリーブの幾何学的形状およびゴムチューブの厚み t を考慮した内部体積変化に関して立式することで、 F : 収縮力、 P : 印加ゲージ圧、 ε : 収縮率の静的な関係を、以下の式で表すことができる。

$$F = \frac{\pi D_0^2 P}{4} \frac{1}{\sin^2 \theta_0} \{3(1 - \varepsilon)^2 \cos^2 \theta_0 - 1\} \quad (1)$$

Fig.2 に、この理論式から算出される値と実験によって測定された値を載せる。静特性に関してはおおよそ理論計算値と実験値が一致していることがわかる。

3. 油圧人工筋の動特性の検証

3.1 実験システム

Fig.3a, 3b に示すように、フレーム、油圧人工筋、プーリ、負荷を用いて実験機を構成した。油圧人工筋に圧力を印加して収縮が始まると、同時にプーリが回転し、その回転量をエンコーダで計測することで油圧人工筋の収縮量の時間応答を算出するものである。なお、負荷質量として 5 kg の重りを吊るしてある。また、人工筋両端には油用のポートがあり、一方をバルブ側とし、もう一方に圧力センサを取り付けることで内圧制御を行うことができる。

3.2 理論式

3.2 で示した実験システムにおいて、以下の 5 つの理論式が成り立つ。

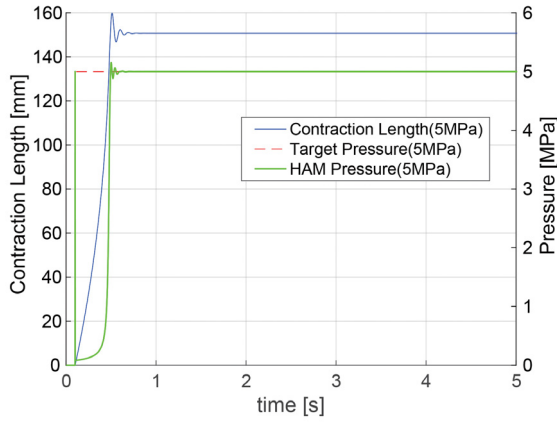


Fig. 4: calculation results of step response

流量の式

バルブにおける流量は、今回用いたリニアサーボバルブ LSVG-01EH-20([7]) の特性より、以下の式で与えられる。なお、 $Q_{rate} = 20\text{L/s}$ である。

$$Q = Q_{rate} \sqrt{\frac{P_0 - P_1}{7 \times 10^6}} \quad (2)$$

圧力損失

バルブオリフィス直後の圧力と油圧人工筋内部の圧力は、その間の配管類によって圧力損失を受ける。今回は管路を通る作動油による圧力損失のみを考慮し、以下の式で表す。なお、今回のシステムでは $d = 5\text{mm}$, $L = 4\text{m}$ である。

$$P_1 - P = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho V^2}{2} \quad (3)$$

油圧人工筋の体積-収縮率関係式 (時間微分形式)

油圧人工筋の体積と収縮率の関係式を時間微分したものが以下の式である。

$$Q = \frac{\pi D_0^2 l_0}{4} \frac{1}{\sin^2 \theta_0} \{3(1 - \varepsilon)^2 \cos^2 \theta_0 - 1\} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4)$$

油圧人工筋の収縮力-収縮率-印加圧関係式

油圧人工筋の収縮力と収縮率、印加圧の静的な関係式を示したものが式 (1) である。

負荷質量の運動方程式

負荷であるおもり及びプーリの慣性モーメントの影響を考慮した運動方程式は、以下の通りである。なお、今回のシステムでは $m = 5\text{kg}$, $I = 0.00212\text{kg} \cdot \text{m}^2$, $r = 75\text{mm}$ である。

$$\left(M + \frac{I}{r^2}\right) l_0 \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + Cl_0 \frac{d\varepsilon}{dt} = f \quad (5)$$

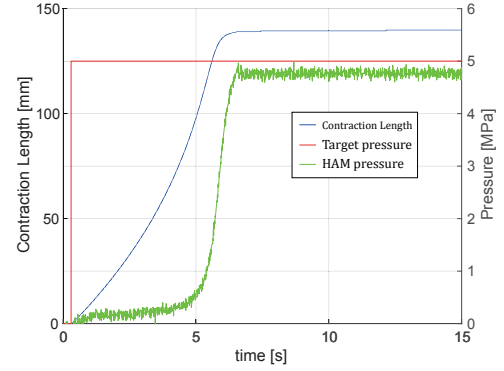


Fig. 5: Experimental results of 5 MPa step response

3.3 ステップ応答測定実験

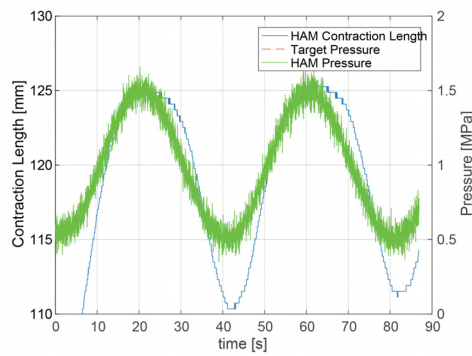
Fig.4 に、油圧人工筋に 5 MPa をステップ的に印加した際の応答の理論計算値を、Fig.5 に実験によって測定された値を示す。両者には非常に大きな乖離が見られる。この原因として挙げられるのが、理論式では配管や継手、絞り等による圧力損失・流量特性の変化や、油圧人工筋のゴム剛性の影響が十分に考慮されていないことである。Fig.5 に示した油圧人工筋内圧の測定値を見ると、圧が 5 s 付近で急激に上昇しており、この上昇の仕方は理論計算値に酷似している。逆に、5 s までの期間は圧力はほぼ横ばい状態である。この間に流れた油は、油圧人工筋の変形に寄与する部分が支配的であり、圧を上げるにまで至っていないと考えられる。すなわち目標圧に対して油圧人工筋内圧は時間遅れが生じていると推察される。

3.4 周波数応答測定実験

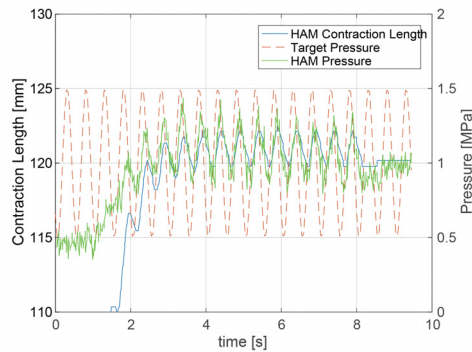
Fig.6 に、油圧人工筋内圧の目標値を 1 MPa を中心に振幅 0.5 MPa で周期的に変化させた時の、油圧人工筋の実際の内圧と収縮量を示した。0.025 Hz ではおよそ追従できていたのに対し、2.0 Hz では内圧、収縮量共に十分な応答が得られていないことが分かる。目標圧力の周波数を 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1, 2 Hz に変えて、それぞれ油圧人工筋の実際の内圧と収縮量の応答を測定しボード線図にしたものが Fig.7 である。この線図から、目標圧力に対して人工筋内圧に位相遅れが生じており、逆に内圧に対して収縮量が良い応答を示していることから、ステップ応答でも確認された通り、目標圧力と内圧との間に大きな遅れがあることがわかる。

4. 結言

油圧人工筋の動特性を理論と実験の双方から検証した。両者には乖離が見られるが、周波数応答の結果から、目標



(a) 0.025 Hz



(b) 2.0 Hz

Fig. 6: Experimental results of the frequency response

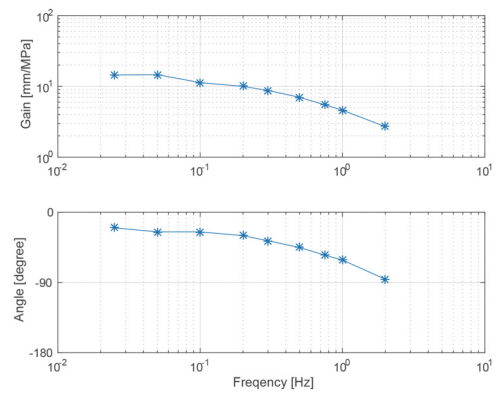
圧と内圧に大きな遅れが存在することが分かったため、素早い応答が必要な時には配管等による損失を十分に考慮した上で、バルブへの供給圧を十分に高圧にし遅れを補償するような制御をする必要がある。今後は、そのような油圧人工筋に適した油圧システムの構築とロボットへの適用を進めていく。

5. 謝辞

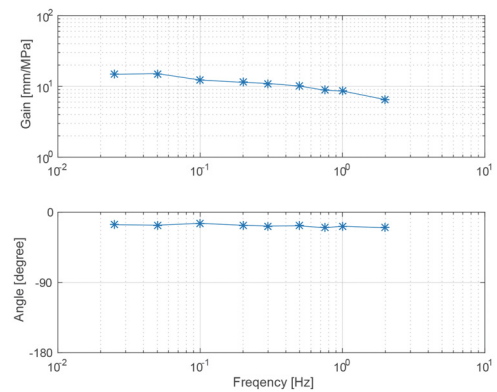
本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) 「タフ・ロボティクス・チャレンジ」により、科学技術振興機構を通して委託されたものです。

参考文献

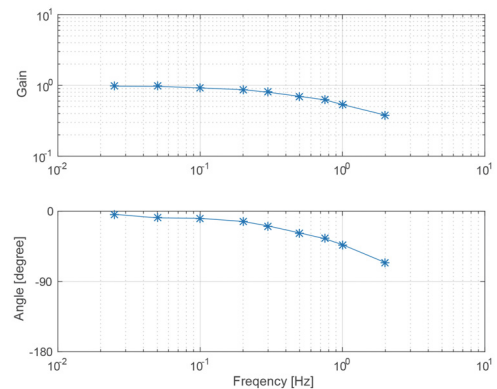
- [1] M.Raibert, K.Blankespoor, G.Nelson, R.Playter, the BigDogTeam: “BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot”:, Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, July 6 -11,2008, Korea.
- [2] C.Semini, N.G.Tsagarakis, E.Guglielmino, M.Focchi, F.Cannella, D.G.Caldwell, “Design of HyQ - a hydraulically and electrically actuated quadruped robot”:, Journal of Systems and Control Engineering, vol.225, no.6, pp.831-849, 2011.



(a) Input:Target pressure, Output:Contraction length



(b) Input:HAM's internal pressure, Output:Contraction length



(c) Input:Target pressure, Output:HAM's internal pressure

Fig. 7: Bode plots

- [3] 安井雄哉, 廣澤望, 黒瀬裕一郎, 玄相昊, “油圧式 4 脚ロボット RL-R1 の機構設計と脚部の試作”:, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 2P1-K09, 2015.
- [4] M.Mori, K.Suzumori, S.Seita, M.Takahashi, T.Hosoya, K.Kusumoto: “Development of Very High Force Hydraulic McKibben Artificial Muscle and Its Application to Shape-Adaptable Power Hand”, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, December 19 -23, 2009, Guilin, China.
- [5] 森田隆介, 難波江裕之, 鈴森康一, 遠藤玄, 山本明菜,

櫻井良: “油圧駆動高出力マッキベン型人工筋の開発”,
第 34 回日本ロボット学会学術講演会論文集, 3C3-01,
2016.

- [6] 横田真一, 小松健浩, “宇宙環境マニピュレータ用フレキシブル・ハイドロリック・アクチュエータ (FHA)”:,
日本機械学会論文集, 57 巻, 542 号, pp.110-115, 1991
- [7] 油研工業株式会社 リニアサーボ弁, “http://www.yuken.co.jp/catalog_pdf/JC-0612-3_LENEARSERVO.pdf”, 2016 年 9 月 11 日閲覧