

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題	細径マッキベン人工筋を用いた筋骨格ロボットの歩行動作実現
Title	Musculoskeletal Robot Walking with Thin McKibben Artificial Muscles
著者	森田隆介, 鈴森康一, 車谷駿一
Author	Ryusuke Morita, Suzumori Koichi, Shunichi Kurumaya
掲載誌/書名	ロボティクス・メカトロニクス講演会2016 予稿集, Vol. , No. , pp.
Journal/Book name	Proceedings of the 2016 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Vol. , No. , pp.
発行日 / Issue date	2016, 6
URL	<a href="http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html">http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html</a>
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本機械学会に帰属します。

# 細径マッキベン人工筋を用いた筋骨格ロボットの歩行動作実現

## Musculoskeletal Robot Walking with Thin McKibben Artificial Muscles

○学 森田隆介 (東工大) 正 鈴森康一 (東工大) 学 車谷駿一 (東工大)

Ryusuke MORITA, Tokyo Institute of Technology, morita.r.aa@m.titech.ac.jp

Koichi SUZUMORI, Tokyo Institute of Technology

Shunichi KURUMAYA, Tokyo Institute of Technology

In recent years, artificial muscles have attracted attention as a flexible and light powerful pneumatic actuator. We have developed very thin McKibben artificial muscle. In our previous researches on a musculoskeletal robot using multifilament pneumatic muscles, we have confirmed good movements of the knee, ankle, elbow, hip and shoulder joints. In this paper, we successfully realize the musculoskeletal robot walking with dynamic and cooperative joint control. Dynamic characteristics of multifilament pneumatic muscle, driving plan of multifilament pneumatic muscle with musculoskeletal simulator and implementation of walking movement by the musculoskeletal robot are discussed.

**Key Words:** Thin McKibben artificial muscle, Musculoskeletal robot, Dynamic characteristics

### 1 緒言

近年、人体模倣型の筋骨格ヒューマノイドロボットの研究が盛んに行われている。中でも、腱駆動方式による筋骨格ヒューマノイドロボットは筋肉収縮の機構を模倣しており、より生物に近い動きや力学特性の実現が期待されている [1] [2]。

この筋骨格ロボットの腱駆動に空圧人工筋を適用しようという試みがある。人工筋は、軽量かつ柔軟でありながら大きな発生力を有するアクチュエータである。筆者らはこの人工筋の一種として外径 1.8mm の細径マッキベン人工筋を開発している [3]。それを集積した多繊維構造マッキベン人工筋を用いて筋肉模倣を行った筋骨格ヒューマノイドロボット (図 1) では、既に人体の膝関節 [4]、足関節 [5]、肘関節 [6]、股関節 [7]、肩関節 [8] の良好な動作が確認されている。しかしながら、この筋骨格ロボットは 1 関節の単一動作のみしか実現していない。本研究では、この筋骨格ロボットの各関節の動的な協調動作を実現することを目指し、そのために多繊維構造マッキベン人工筋の動特性の解明、筋骨格シミュレータを使用した駆動計画の立て方の確立、及びそれらの実証実験として実機の歩行動作実験を行い、実際に歩行動作が実現したことを報告する。

### 2 多繊維構造マッキベン人工筋の動特性

#### 2.1 多繊維構造マッキベン人工筋

多繊維構造マッキベン人工筋は、細径マッキベン人工筋を集積したものである (図 2)。本研究で使用する外径 1.8mm の細径マッキベン人工筋は、外径 1.3mm-内径 0.86mm の硬度 40 シリコンゴムチューブに、スリーブとして直径 0.12mm のテトロンあるいは PBT 繊維を 32 本編みこんだものであり、0.35MPa 印加時の最大収縮率が約 24%、最大収縮力が約 11N である。また、多繊維構造マッキベン人工筋の収縮率は、1 本の時より約 30%、収縮力は集積本数倍されると計測されている [9]。

この多繊維構造マッキベン人工筋において、収縮率や収縮力の動特性は未だ解明されていない。次節以降では、この多繊維構造マッキベン人工筋の駆動をモデル化し、動特性の解析、測定を試みる。

#### 2.2 駆動モデル式

##### 記号表

$G$	: バルブを通る空気の流れ質量 [kg/s]
$P$	: 人工筋内部圧力 [Pa]
$V$	: 人工筋内部体積 [ $\text{m}^3$ ]
$\varepsilon$	: 人工筋収縮率
$F$	: 人工筋収縮力 [N]
$L$	: 人工筋初期長さ [m]
$\theta$	: 人工筋内部空気温度 [K]



**Fig.1** The musculoskeletal robot using multifilament pneumatic muscles



**Fig.2** Multifilament pneumatic muscle (Air pressure 0.25MPa)

$W$	: 人工筋内部空気質量 [kg]
$S_h$	: 人工筋と大気間の伝熱面積 [m <sup>2</sup> ]
$h$	: 人工筋と大気間の熱伝達率 [J/(m <sup>2</sup> ·K)]
$P_u$	: 元圧 (供給圧) [Pa]
$S$	: バルブ開口面積 [m <sup>2</sup> ]
$M$	: 負荷質量 [kg]
$\kappa$	: 空気の比熱比
$C_v$	: 空気の定積比熱 [J/(kg·K)]
$R$	: 空気の気体定数 [J/(kg·K)]
$\theta_a$	: 大気温度 [K]
$C$	: 粘性減衰係数 [(N·s)/m]
$F_{fr}$	: 摩擦力 [N]
$g$	: 重力加速度 [m/s <sup>2</sup> ]

#### 流量の式

バルブの ON-OFF にかかる時間は十分速いものとした時の質量流量  $G$  [kg/s] は, バルブ前後の圧力  $P_u, P$  の関係により, 以下のよう表せる.

$P/P_u \geq 0.528$  のとき

$$G = SP_u \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \frac{1}{R\theta} \left\{ \left( \frac{P}{P_u} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{P}{P_u} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right\}} \quad (1)$$

$P/P_u < 0.528$  のとき

$$G = SP_u \sqrt{\frac{\kappa}{R\theta} \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\kappa+1/\kappa-1}} \quad (2)$$

#### 状態方程式 (微分形式)

人工筋内部の気体の状態方程式を微分すると, 以下の式が得られる.

$$P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} = GR\theta + WR \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

#### 運動方程式

負荷質量の運動方程式である.  $C = 300$  (N·s)/m,  $F_{fr} = 10$  N とした.

$$ML \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + CL \frac{d\varepsilon}{dt} = F - Mg - F_{fr} \quad (4)$$

#### エネルギー収支の式

人工筋内部空気に注目した単位時間あたりのエネルギー収支の釣り合い式である. 供給空気の温度は大気に等しいとした.

$$\frac{d}{dt}(C_v W \theta) = G(C_v \theta_a + R \theta_a) - P \frac{dV}{dt} - h S_h (\theta - \theta_a) \quad (5)$$

#### 人工筋の収縮力-収縮率-内圧, 体積-収縮率関係式

香川らは人工筋の収縮力  $F$ , 内圧  $P$ , 収縮率  $\varepsilon$ , 体積  $V$  に関して以下の 2 つの実験式を提唱している [10]. なお  $\alpha, \beta, \gamma, D_1, D_2, D_3$  は人工筋の特性による定数である. 今回は細径マッキベン人工筋一本あたりの計測値から最小二乗法によるフィッティングを行い, 表 1 に示す値を得た.

$$F = \alpha(1 - \varepsilon)^2 P + \beta P + \gamma \quad (6)$$

$$V = D_1 \varepsilon^2 + D_2 \varepsilon + D_3 \quad (7)$$

**Table 1** Coefficients of the thin McKibben artificial muscle

$\alpha$	$6.70 \times 10^{-5}$ [m <sup>2</sup> ]
$\beta$	$-1.96 \times 10^{-5}$ [m <sup>2</sup> ]
$\gamma$	$-8.76$ [N]
$D_1$	$-3.25 \times 10^{-5}$ [m <sup>3</sup> ]
$D_2$	$1.88 \times 10^{-5}$ [m <sup>3</sup> ]
$D_3$	$4.73 \times 10^{-7}$ [m <sup>3</sup> ]

さらに, 多繊維構造マッキベン人工筋の収縮力  $F_n$ , 体積  $V_n$  は, 集積本数  $n$ , 及び式 (6)(7) を用いて, 以下のように表せる. ただし  $v$  は送気ポートやチューブなどの人工筋以外の体積である.

$$F_n = 0.8nF \quad (8)$$

$$V_n = nV + v \quad (9)$$

なお, 収縮力  $F_n$  の係数 0.8 は, 人工筋を多繊維化することで最大収縮力が 2 割ほど減少することが報告されており [9], その補正係数である.

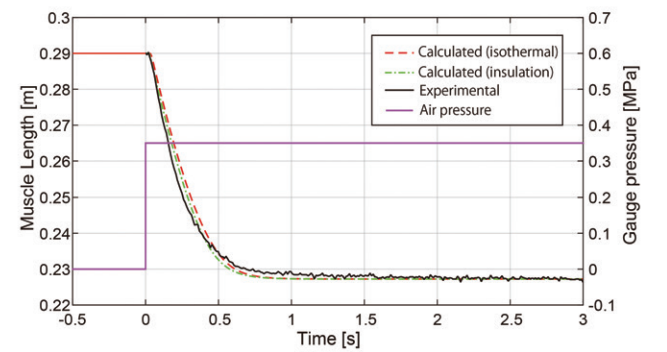
これらの式において, 以下の 3 つの条件が考えられる.

- 等温過程:  $\dot{\theta} = 0$
- 断熱過程:  $Q = -hS_h(\theta - \theta_a) = 0$
- エネルギーの流入・放出が起き, 等温でもない過程

次節で, このうち等温過程と断熱過程での計算値の比較を行う.

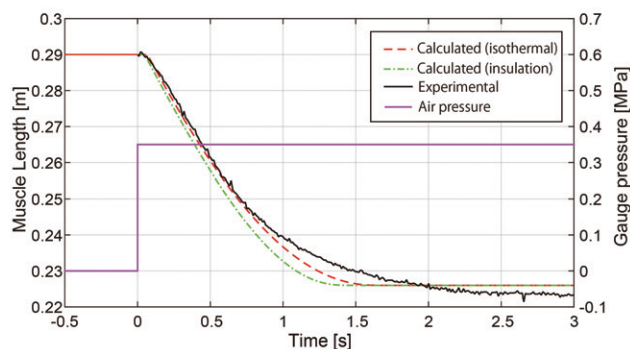
#### 2.3 モデルの妥当性検証

図 3 及び図 4 に各過程でのステップ応答の計算値, 及び実測値を示す. どの過程でも大きなグラフの変化は無いが, 断熱過程は等温過程に比べて実測値から離れている. これは, 多繊維構造マッキベン人工筋は, 多繊維化により放熱面積が大幅に大きくなっており, 等温変化に近い過程を経ていることが原因として考えられる. 従って, 多繊維構造マッキベン人工筋においては, 等温過程でのモデル化をして問題ないと言える. また, この結果より, 多繊維構造マッキベン人工筋の動特性を考慮した人工筋の駆動計画を立てることが可能となった.



**Fig.3** Calculated and experimental results of step response of a multifilament pneumatic muscle (bundled number 20)





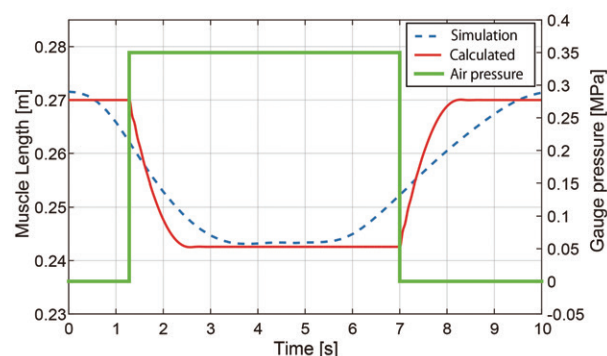
**Fig.4** Calculated and experimental results of step response of a multifilament pneumatic muscle (bundled number 60)

### 3 筋骨格ロボットの歩行動作実験

本章では、前章で述べた多繊維構造マッキベン人工筋の動特性を利用して、実際に筋骨格ロボットを動作させる方法について述べる。

#### 3.1 筋骨格シミュレータを用いた人工筋の駆動計画法

図 1 に示した筋骨格ロボットは、片足に 39 個の人工筋が取り付けられている。ロボットにある動作をさせる際に、この全ての人工筋の筋肉長目標軌道を定めることは、人工筋の多さや関節の複雑な動きを考慮すると非常に難しい。そこで、今回は筋骨格シミュレータ“OpenSim”で下肢筋骨格モデル“Gait2392” ([11]) の歩行動作を用いて、歩行 1 周期中の各筋肉の全長を算出し、それを人工筋の目標長さとした。図 5 に、大腰筋の駆動計画を示す。シミュレータで得た目標長さに対し、それを上回る時間と下回る時間が同程度になるように、人工筋への空圧印加・放出タイミングを決定した。この駆動計画法を、両足全ての筋肉に対して適用することで、シミュレータ上のモデルの歩行動作と同等の動作が、実機でも実現できる考えられる。



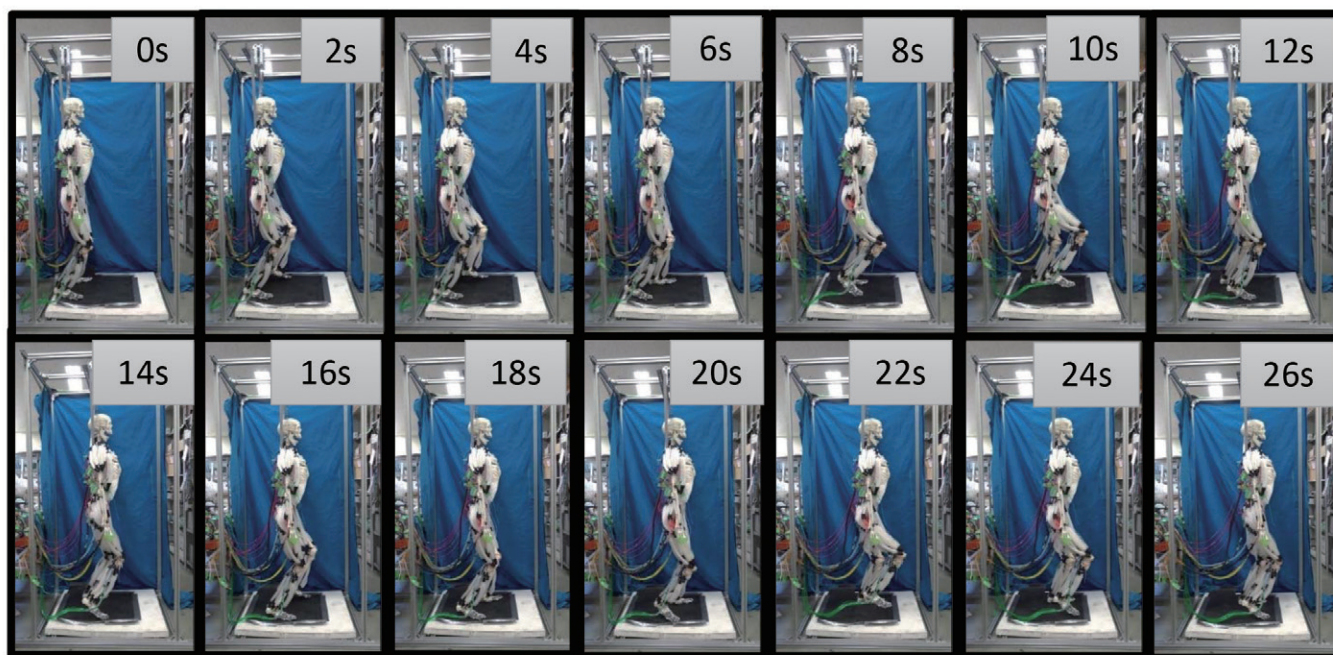
**Fig.5** Driving plan of pneumatic muscle with musculoskeletal simulator (Psoas major muscle)

#### 3.2 歩行動作実験

前節で決定した各人工筋の空圧印加・放出タイミングに従って、実際に筋骨格ロボットの歩行動作実験を行った。なお、人工筋の応答速度や骨格の剛性により、完全自立状態での歩行は困難であるため、歩行補助器を用いて、ロボット全質量 15kg 中 10kg の自重補償を行った。図 6 に実験の様子を示す。4 歩で約 350mm 進行しており、歩行動作が実現できたと言えるものの、シミュレーション時 (歩幅約 300mm) よりも大幅に歩幅が小さくなっている。これは、大殿筋の収縮力が不足しており、自重を支えつつ足を蹴り出すことが十分にできなかったことが原因として挙げられる。

### 4 結言

本研究では、多繊維構造マッキベン人工筋の駆動をモデル化し、動特性の計算値及び実際の測定実験の値からモデルの妥当性を示した。また、筋骨格シミュレータを用いて、人工筋の動特性を考慮した駆動計画を提案し、実際に両足 78 個の人工筋を駆動して歩行動作を実現した。今後は、筋骨格ロボットの脚先力を考慮して自立状態での歩行を実現する。



**Fig.6** Walking movement by the musculoskeletal robot at 2-second intervals

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 (基盤 (A), 26249028 「次世代マッキベン人工筋の実現」) の補助を受けて実施した。

## 参考文献

- [1] Yuto Nakanishi, Yuki Asano, Toyotaka Kozuki, Hironori Mizoguchi, Yotaro Motegi, Masahiko Osada, Takuma Shirai, Junichi Urata, Kei Okada, and Masayuki Inaba. “design concept of detail musculoskeletal humanoid “kenshiro” - toward a real human body musculoskeletal simulator -”. In *12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2012.
- [2] Alan Diamond, Rob Knight, David Devereux, and Owen Holland. “Anthropomorphic Robots: Concept, Construction and Modelling”. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 9, , 2012.
- [3] Masayuki Takaoka, Koichi Suzumori, Shuichi Wakimoto, Kazuo Iijima, and Takahiro Tokumiyu. “fabrication of thin mckibben artificial muscles with various design parameters and their experimental evaluations”. In *The 5th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology*, p. 82, 2013.
- [4] 鈴森康一, 車谷駿一, 脇元修一. “多繊維構造マッキベン人工筋の開発と筋骨格ロボットへの適用”. 第 32 回日本ロボット学会学術講演会. 2D1-06, 2014.
- [5] 車谷駿一, 鈴森康一, 福田雅俊, 脇元修一. “細径マッキベン人工筋を用いた筋骨格ロボット機構の研究 第 2 報 下肢骨格ロボット機構の試作”. 日本機械学会ロボティクス・メカニクス講演会. 1P1-W04, 2015.
- [6] 福田雅俊, 鈴森康一, 車谷駿一, 脇元修一. “細径マッキベン人工筋を用いた筋骨格ロボット機構の研究 第 3 報 上肢骨格ロボット機構の試作”. 日本機械学会ロボティクス・メカニクス講演会. 1P1-W03, 2015.
- [7] 車谷駿一, 鈴森康一, 森田隆介, 脇元修一. “細径マッキベン人工筋を用いた筋骨格ロボット機構の研究 第 4 報 股関節筋骨格ロボット機構の試作”. 第 33 回日本ロボット学会学術講演会. 1A1-03, 2015.
- [8] 森田隆介, 鈴森康一, 車谷駿一, 脇元修一. “細径マッキベン人工筋を用いた筋骨格ロボット機構の研究 第 5 報 筋骨格ロボット肩甲上腕関節への適用”. 第 33 回日本ロボット学会学術講演会. 3A3-04, 2015.
- [9] 土井俊幸, 脇元修一, 鈴森康一, 神田岳文. “細径 mckibben 型人工筋の集積化に関する研究”. 日本機械学会ロボティクス・メカニクス講演会. 1P1-B03, 2015.
- [10] 香川利春, 藤田壽憲, 山中孝司. “人工筋アクチュエータの非線形モデル”. 計測自動制御学会論文集, Vol. 29, No. 10, pp. 1241–1243, 1993.
- [11] Scott L. Delp, J. Peter Loan, Melissa G. Hoy, Felix E. Zajac, Eric L. Topp, and Joseph M. Rosen. “An interactive graphics-based model of the lower extremity to study orthopaedic surgical procedures”. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 37, pp. 757–767, 1990.