

令和元年8月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26249028

研究課題名(和文)次世代マッキベン人工筋の実現

研究課題名(英文)Development of Next-generation McKibben muscles

研究代表者

鈴森 康一 (Suzumori, Koichi)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：00333451

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 26,800,000円

研究成果の概要(和文)：しなやかに「生き物らしい」特性を持つロボットを実現するには、十分な収縮能力を持ち、集積して超多自由度機構を駆動できる「人工筋」の実現が不可欠となっていた。

本研究では、「電気駆動」と「多繊維構造」を特徴とする「次世代マッキベン人工筋」を実現し、「筋骨格ロボット機構」に適用してその可能性を実証した。具体的には、についてはMcKibben型人工筋に着目し、水の化学反応を利用した新駆動法と細径化により、人の筋肉に近い形態と特性を持つ人工筋を実現した。については、これを筋骨格ロボットとパワースーツに適用し、人と類似した運動/力特性の実現と、身体にフィットするパワーサポートの実現を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

しなやかに動く多繊維型的人工筋肉はこれまでに類似のものがなく、実現が難しかったしなやかに動く筋骨格ロボットやパワースーツを実現した。その生き物のような動きは専門家にも一般社会でも評価された。すなわち、筋骨格ロボットの論文は現在、掲載誌のwebアクセス数累計第2位となり、熱烈的ファンが多いSFアニメ「攻殻機動隊」Realize Projectからは、同アニメのイメージに最も近い技術としてthe Award 2016(ロボット部門)グランプリを頂いた。YouTubeに掲載した動画の再生数は1年間で70万回を超えた。一般社会にも、従来のモータ駆動とは異なるしなやかなロボットの実現可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：To realize robots with flexible and "living-like" characteristics, it is essential to realize an "artificial muscle" that has sufficient contracting capacity and can be accumulated to drive highly redundant mechanisms.

In this research, we realized 1) "next-generation McKibben artificial muscle" characterized by "electric drive" and "multi-fiber structure", and applied it to 2) "musculoskeletal robot mechanisms" to demonstrate its potential. Specifically, (1) we focused on the McKibben muscle and realized the artificial muscle with shape and characteristics similar to human muscles by the new driving method with chemical reaction of water and the diameter reduction. And (2) the muscles were applied to musculoskeletal robots and power suits to show that the realization of motion/force characteristics similar to humans and the realization of power support that fits the body.

研究分野：ソフトメカニクス

キーワード：人工筋肉 筋骨格ロボット マッキベン型人工筋

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来のヒト型ロボットと実際のヒトの身体の駆動機構は大きく異なっており、これが両者の運動特性に様々な違いを生んでいる。しなやかで「生き物らしい」運動特性を持ったロボットの実現を目指して、ヒトや動物の駆動機構を模倣したロボット機構の研究が近年盛んに進められているが、十分な収縮能力を持ち、集積して超多自由度機構を駆動できる「人工筋」が現在存在しないことが、その研究や実用化を進める上で最大のネックの一つとなっている。

2. 研究の目的

本研究では、①「電気駆動」と「多繊維構造」を特徴とする「次世代マッキベン人工筋」を実現し、②「筋骨格ロボット機構」に適用してその可能性を実証する。この2つを具体的な達成目的とし、「筋骨格ロボット」の本格な実証研究および実用化への扉を開く研究成果をあげる。

3. 研究の方法

本研究における「次世代」とは、「電気駆動」と「多繊維構造」を意味する。本研究では、①従来のマッキベン人工筋にこの2つの革新を導入することにより、集積度、しなやかさ、形態多様性の点で、従来に比べて格段に優れた特性を持つ人工筋を実現し、②「筋骨格ロボット機構」への適用試験を通してその可能性を実証する。

まず、「電気駆動」に取り組む。「電気駆動」の意義は、(1)コンプレッサからの自立化だけではなく、(2)筋弛緩動作時におけるエネルギー回生によるエネルギー効率化、(3)配管・バルブが不要になることによる高度な集積化、といった機能の実現にある。

次に、「多繊維構造」に取り組む。これまでに蓄積した「量産技術」を基にして、細径の電動マッキベン人工筋(以下、「人工筋線維」と呼ぶ)を数1000mといった単位で量産する。この「人工筋線維」を様々な形態に束ねることにより、多様な形態の筋構造を製作し、それぞれ対応する力学特性を再現する。

最後に、開発した多様な筋を、運動生理学の知見に基づいて「筋骨格ロボット機構」に適用し、「次世代マッキベン人工筋」の可能性を実証する。

4. 研究成果

4.1 細径人工筋と多繊維化

材料と製紐構成および製造法を工夫することにより、最小2mmの外径を持つしなやかなマッキベン型人工筋の開発に成功した。これを人工筋繊維と見立て、多繊維化することで、様々な形状や特性を持つ形状適応性に富んだ多繊維人工筋を実現した(図1)。



4.2 電気駆動

従来のマッキベン人工筋の弱点の一つは、空圧供給チューブやバルブ、コンプレッサが必要な点である。本研究では、イオン交換膜を通した水の気液化学変換を電流で行う方法を利用して電池で動作する人工筋を目指した。図2に示すように人工筋の内部に円筒状のイオン交換膜チューブを挿入し、その内外を水で満たす。このチューブの内外壁には薄い電極が形成され、ここに電流を通すと水電気分解が生じ、人工筋内部圧力が高まり人工筋が収縮する。一方、発生した気体はチューブ内外壁間で電圧差を起こす。これをショートすると発生した酸素と水素は水に戻り、人工筋内部圧力が下がり人工筋は弛緩する。このとき発生する電荷を回収するとエネルギー回生も行える。

図1 細径人工筋(左)と多繊維化(右)

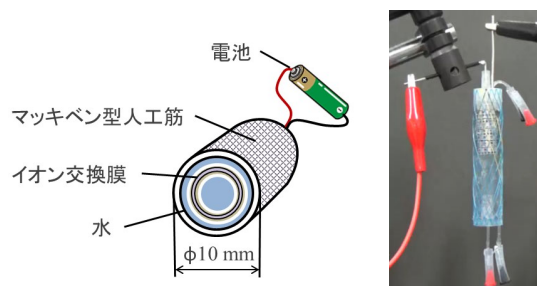


図2 電気駆動人工筋(左:原理, 右:試作品)

まだ、細径化、柔軟化には課題が残るが、平板状のモデルでは、速度(1~2次秒程度の時定数)、圧力(0.5MPa以上)とも良好に動作しており、電極形成の改良により今後実用化しうる可能性を実証した。

4.3 筋骨格ロボットへの応用

開発した細径人工筋はヒトの筋肉とよく似ている。径方向に太りながら軸方向に約25%縮む。ヒトの筋肉が多く筋繊維から構成されるように、細径人工筋を複数束ねることで、様々な形、太さ、筋繊維走行の筋肉が形成できる。

従来のロボット駆動系はヒトの身体の駆動系は、アクチュエータの「集積度」とそれに伴う「自由度」、「冗長度」の点で大きく違う。これが従来のロボットとヒトの運動学/力学特性の大きな違いを生んでいた。ヒトの身体と同じような駆動機構を従来モータで実現するのは難しいが、

細径人工筋を使えばできる。

図3は、解剖学的知見に基づき、試作した筋骨格ロボットの下肢である。特に下肢はヒトとほぼ同じ構成の筋肉束がこれを動かしている。人間っぽい、なんとも艶めかしい動きをする。膝関節の回転中心の動きなど、ヒトとよく似た特性を示すことを実証した。一般に、従来の高剛性のモータを冗長駆動系に適用すると、モータの動きが相互に邪魔しあい、協調動作させるのが難しいのだが、この人工筋ではお互いに力バランスが取りあい動作するので冗長駆動系の駆動に適している。



図3 筋骨格ロボット

多繊維型細径人工筋を用いることにより、従来に比べてヒトの身体に格段に近い駆動機構を実現し、「筋骨格ロボット」の本格な実証研究および実用化への扉を開くことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計18件)

〔雑誌論文(査読付き学術論文)〕

1. Akira Wada, Hidehiro Kametani, Koichi Suzumori, Shuichi Wakimoto. Development of a Hose-Free FMA Driven by a Built-In Gas/Liquid Chemical Reactor, International Journal of Automation Technology (IJAT), Vol. 10, No. 4, pp. 511-516, May. 2016.
 2. Akira Wada, Hiroyuki Nabae, Takaaki Kitamori, Koichi Suzumori. Energy regenerative hose-free pneumatic actuator, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 249, pp. 1-7, Oct. 2016.
 3. Shunichi Kurumaya, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, Shuichi Wakimoto. Musculoskeletal lower-limb robot driven by multifilament muscles, Robomech Journal, Springer Open, 3, 18, Sep. 2016.
 4. Shuichi Wakimoto, Junpei Misumi, Koichi Suzumori. New concept and fundamental experiments of a smart pneumatic artificial muscle with a conductive fiber, Sensors and Actuators: A. Physical, Vol. A250, pp. 48-54, Sep. 2016.
 5. Shunichi Kurumaya, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, Shuichi Wakimoto. Musculoskeletal lower-limb robot driven by multifilament muscles, Robomech Journal, Springer Open, 3, 18, Sep. 2016.
 6. Shunichi Kurumaya, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Koichi Suzumori. Design of thin McKibben muscle and multifilament structure, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 261, Page 66-74, Jul. 2017.
 7. Shunichi Kurumaya, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Koichi Suzumori. Design of thin McKibben muscle and multifilament structure, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 261, Page 66-74, Jul. 2017.
 8. Ahmad Athif Mohd Faudzi, Junichiro Ooga, Tatsuhiko Goto, Masashi Takeichi, Koichi Suzumori. Index Finger of a Human-like Robotic Hand using Thin Soft Muscles, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 3, No. 1, pp. 92-99, Jan. 2018.
 9. 平光立拓, 難波江裕之, 鈴森康一, 遠藤玄. 人工筋肉の三次元螺旋走行からなる円筒状多繊維筋構造メカニズムの試作, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 862, p. 18-00083, Jun. 2018.
 10. Shoichiro Koizumi, Shunichi Kurumaya, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Koichi Suzumori. Braiding Thin McKibben Muscles to Enhance their Contracting Abilities, IEEE Robotics and Automation Letters, Jun. 2018.
 11. 平光立拓, 鈴森康一, 難波江裕之, 遠藤玄. 細径人工筋肉からなる織布状ソフトメカニズムの試作と評価, 設計工学, Vol. 54, No. 4, pp. 245-252, Nov. 2018.
- 〔雑誌論文(解説等)〕
12. 鈴森康一. 身近なフルードパワー 細径人工筋肉を利用したパワーアシストスーツの研究, フルードパワー, Vol. 30, No. 3, pp. 59-63, Jul. 2016.
 13. 鈴森康一. 東京工業大学工学院鈴森・遠藤研究室, 日本フルードパワーシステム学会誌, 一般社団法人日本フルードパワーシステム学会, Vol. 46, No. 6, pp. 53-56, Nov. 2016.
 14. 鈴森 康一, 和田 晃. 気液可逆反応を利用したガス圧アクチュエータ, 日本フルードパワーシステム学会誌, Vol. 48, No. 1, pp. 21-25, Jan. 2017.

15. 鈴森康一. 空圧ラバーアクチュエータの応用展開 「力, 速度, 精度」から「適応, 安全, 軽量」へ, 油空圧技術, 日本工業出版, Vol. 56, No. 7, pp. 15-18, Jul. 2017.
16. 鈴森康一. いいかげんなロボット, 設計工学(日本設計工学会誌), Vol. 52, No. 10, pp. 585-589, Oct. 2017.
17. 車谷駿一, 鈴森康一. 細径人工筋が実現するヒト型超冗長筋骨格ロボット, 機械の研究, 株式会社養賢堂, Vol. 69, No. 12, pp. 991-1003, Dec. 2017.
18. 鈴森康一. フルードパワーが拓く新しいロボティクス, 計測と制御, Vol. 57, No. 11, pp. 759-764, Nov. 2018.

[学会発表] (計 29 件)

1. Akira Wada, Koichi Suzumori, Hidehiro Kametani, Takaaki Kitamori, Shuichi Wakimoto. New Gas Rubber Actuator Driven with Electrolysis/Synthesis of Water, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, No. 15-204, pp. 140-141, Apr. 2015.
2. Jumpei MISUMI, Shuichi WAKIMOTO, Koichi SUZUMORI. Experimental Investigation of Conductive Fibers for a Smart Pneumatic Artificial Muscle, The 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (IEEE-ROBIO 2015) , pp. 2335-2340, Dec. 2015.
3. Takaaki Kitamori, Akira Wada, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori. Untethered Three-Arm Pneumatic Robot using Hose-free Pneumatic Actuator, The 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2016), Oct. 2016.
4. Tatsuhiko Hiramitsu, Akira Wada, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, Gen Endo. Hose-Free Pneumatic Bags-Muscle Driven by Gas/Liquid Conversion, 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Proceedings of 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 616-621, Dec. 2016.
5. A.A.M.Faudzi, M. R. M. Razif, G. Endo, H. Nabae, K. Suzumori. Soft-Amphibious Robot using Thin and Soft McKibben Actuator, IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Proc. IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp. 981-986, Aug. 2017.
6. Ahmad Athif Mohd Faudzi, Junichiro Ooga, Tatsuhiko Goto, Masashi Takeichi, Koichi Suzumori. Index Finger of a Human-like Robotic Hand using Thin Soft Muscles, 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sep. 2017.
7. Arnau Garriga-Casanovas, Ahmad 'Athif Mohd Faudzi, Tatsuhiko Hiramitsu, Ferdinando Rodriguez y Baena, Koichi Suzumori. Multifilament Pneumatic Artificial Muscles to Mimic the Human Neck, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Dec. 2017.
8. Shunichi Kurumaya, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Koichi Suzumori. Exoskeleton Inflatable Robotic Arm with Thin McKibben Muscle, IEEE-RAS International Conference on Soft Robotics, 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), Jul. 2018.

[図書] (計 4 件)

1. 鈴森 康一. アクチュエータ工学入門, 講談社ブルーバックス, p189-195, Jul. 2014.
2. 鈴森康一, 大野晃寛. 今後の超高齢化社会に求められる生活支援 (医療・福祉・介護・リハビリ) ロボット技術, 今後の超高齢化社会に求められる生活支援 (医療・福祉・介護・リハビリ) ロボット技術, 情報機構, pp. 236-241, Oct. 2015.
3. 鈴森康一, 車谷駿一. 細径人工筋を用いた筋骨格ロボット, ソフトアクチュエータの材料・構成・応用技術, S&T 出版株式会社, pp. 327-334, Nov. 2016.
4. 鈴森康一. アクチュエータの新材料, 駆動制御, 最新応用技術 (第 2 ソフトアクチュエータと空圧人工筋肉), アクチュエータの新材料, 駆動制御, 最新応用技術, 株式会社 技術情報協会, Mar. 2017.

[産業財産権]

○出願状況 (計 5 件)

1. 名称：能動織布
発明者：鈴森康一，和田晃，大野晃寛，車谷駿一
権利者：東京工業大学，岡山大学，株式会社池田製作所
種類：特許 番号：特願 2015-172741 出願年：2016 国内外の別：国内
2. 名称：マッキベン人工筋
発明者：鈴森康一，和田晃，大野晃寛，車谷駿一
権利者：東京工業大学
種類：特許 番号：特願 2015-052462 出願年：2015 国内外の別：国内

○取得状況 (計 3 件)

1. 名称：アクチュエータ
発明者：鈴森康一，河野一俊
権利者：東京工業大学，株式会社コガネイ
種類：特許 番号：特許第 6292580 号 取得年：2018 国内外の別：国内
2. 名称：流体圧アクチュエータ
発明者：鈴森康一
権利者：東京工業大学
種類：特許 番号：特許第 6341569 号 取得年：2018 国内外の別：国内
3. 名称：複合流体圧アクチュエータ
発明者：鈴森康一，車谷俊一，脇元修一
権利者：東京工業大学，岡山大学
種類：特許 番号：特許第 6354052 号 取得年：2018 国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等:

東京工業大学 鈴森・遠藤研究室

<http://www.robotics.mech.e.titech.ac.jp/research/pamsoftrobo.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名： 脇元 修一
ローマ字氏名： Shuichi Wakimoto
所属研究機関名： 岡山大学
部局名： 自然科学研究科
職名： 准教授
研究者番号 (8桁)： 40452560

研究分担者氏名： 安積 欣志
ローマ字氏名： Kinji Asaka
所属研究機関名： 産業技術総合研究所
部局名： 材料・科学領域 無機機能材料研究部門
職名： 研究グループ長
研究者番号 (8桁)： 10184136

(2) 連携研究者

研究協力者氏名： 北脇 知己
ローマ字氏名： Tomoki Kitawaki