T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	柔軟繊毛アクチュエータによる自立走行
Title(English)	Wireless mobile robot with flexible ciliary actuator
著者(和文)	安井大貴, 篠嶋透, 池田隆史, 木村 仁, 伊能教夫
Authors(English)	Daiki Yasui, Toru Sasajima, Takashi Ikeda, Hitoshi Kimura, NORIO INOU
出典(和文)	電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集（CD版）, pp. 514-517
Citation(English)	, pp. 514-517
発行日 / Pub. date	2017, 9

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

TC12-2

柔軟繊毛アクチュエータによる自立走行

安井　大貴*　　篠嶋　透　　池田　隆史
木村　仁　　伊能　教夫（東京工業大学）

Wireless mobile robot with flexible ciliary actuator

Daiki Yasui*, Toru Sasajima, Takashi Ikeda
Hitoshi Kimura, Norio Inou, (Tokyo Institute of Technology)

Conventional mobile robots generally use wheel or crawler mechanism for the locomotion. However, these robots are often stuck at narrow spaces because of their stiffness. In order to solve this problem, this study proposes an innovative flexible ciliary mobile robot made of thin urethane rubber imitating hydraulic skeleton found in soft creatures such as earthworms and sea anemone. The proposed robot has multiple driving units and flexible active joints driven by pneumatic power. The robot is capable of adaptive body shape changing according to terrains with adjustment of active joint's volume. This report describes a wireless driving unit composed of flexible ciliary actuators and the actuator base. We developed a prototype robot which combines two driving units with all components for driving such as CPU, batteries and compressors. In a wireless driving experiment, the robot successfully ran at 2.3 mm/s and direction change whereas the robot length is 130 mm.

キーワード：水力学的骨格，柔軟移動ロボット，自立走行，ソフトアクチュエータ，繊毛アクチュエータ
(Keywords, Hydraulic skeleton, Flexible mobile robot, Wireless driving, Soft actuator, Ciliary actuator)

1.　緒言

人間が容易に進入できないような狭隘地形を探索するヘビ型やクローラ型の移動ロボットに関する研究は数多く報告されている[(1)(2)(3)]．しかし，これらのロボットの多くは金属や樹脂といった固い素材で構成されており，ロボット自体の大きさより狭い場所に進入しようとするとスタックを起こしてしまう（図 1）．

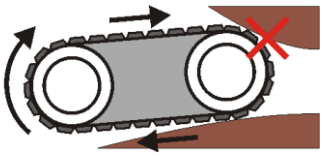

図 1　狭隘地形においてスタックするクローラ[(4)]

そこで本研究では，生物に見られる水力学的骨格を利用して，外力に対し適応的に変形可能な完全密閉型狭隘地形移動ロボット”MOLOOP”や，図 2 に示すように体幹部分を柔軟に適応変形しながら狭所を探索できる柔軟繊毛移動ロボットを提案してきた[(4)(5)]．水力学的骨格とは，ミミズやイソギンチャクなどの柔軟な生物に見られるメカニズムであり，袋状構造体の内圧を体液などの流体で変化させることでアクチュエータや構造部材として機能するものである．本研究では，ウレタンゴムシート製の袋状構造を空気により加減圧することでこの水力学的骨格を再現している．したがって，ロボットの殆どが空気により充填されるため，軽量であることも我々の提案するロボットの利点の一つである．

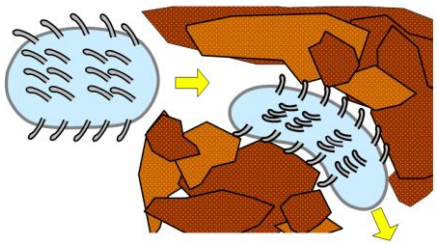

図 2　柔軟繊毛移動ロボット[(5)]

本稿では，図 2 の柔軟繊毛移動ロボットに搭載予定の Z 字型繊毛アクチュエータ[(5)]と，これを配置するアクチュエータ基部について述べる．そして，これらにより構成される駆動ユニットを 2 つ連結した試作ロボットによる，外部からの電源供給や圧縮空気を行わない状態での無線走行実験について議論する．

© 2017 IEE Japan

2. 柔軟繊毛移動ロボットの駆動ユニット

柔軟繊毛移動ロボットは，体表面に多数の繊毛アクチュエータを有しており，これらを協調的に駆動することにより移動する．このロボットが図 2 のような狭所探索を行うには，ロボットの体幹幅を地形に対し適応的に変化させ，なるべく多くの繊毛アクチュエータに適切な接地圧を与える必要がある．しかし，図 3 のような単純に体幹部分の袋状構造全体を伸展・縮小させる方法では，縮小時に体幹部がどのように変形するかが不定であり，繊毛アクチュエータの姿勢を一定に保てないため適切な接地圧での駆動が困難である．そこで本研究では，図 4 に示すような柔軟体節を提案した[6]．この柔軟体節は，駆動ユニットを能動関節により連結した構造となっており，能動関節の体積を安定した状態で変化させることで体幹幅の調整が可能である．

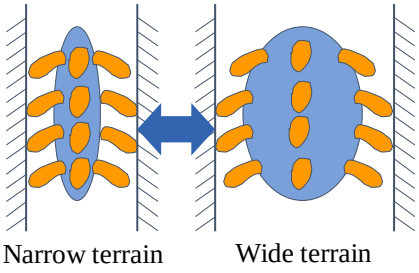

図 3　体幹部全体の形状変化

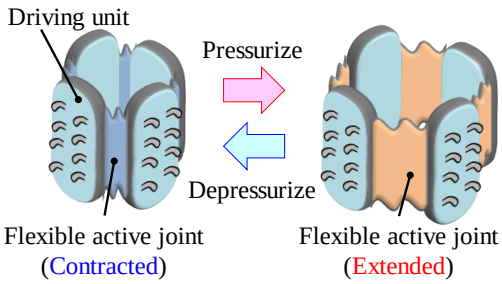

図 4　能動関節により伸展・縮小する柔軟体節[6]

柔軟体節における駆動ユニットの試作機の構成要素を図 5 に，概観を図 6 に示す．この試作機は，繊毛アクチュエータと基部からなる． Z 字型繊毛アクチュエータと基部はウレタンゴムシートによるベルト構造と柔軟性の高いマジックテープにより固定されており，組立や分解といったメンテナンスが容易な構造となっている．

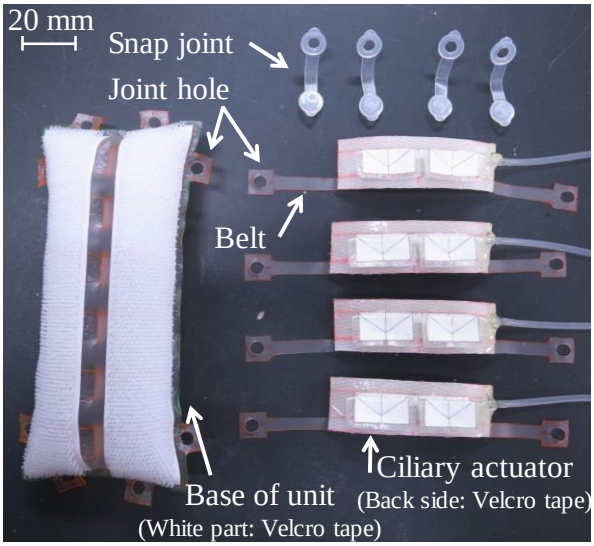

図 5　駆動ユニットの構成要素[6]

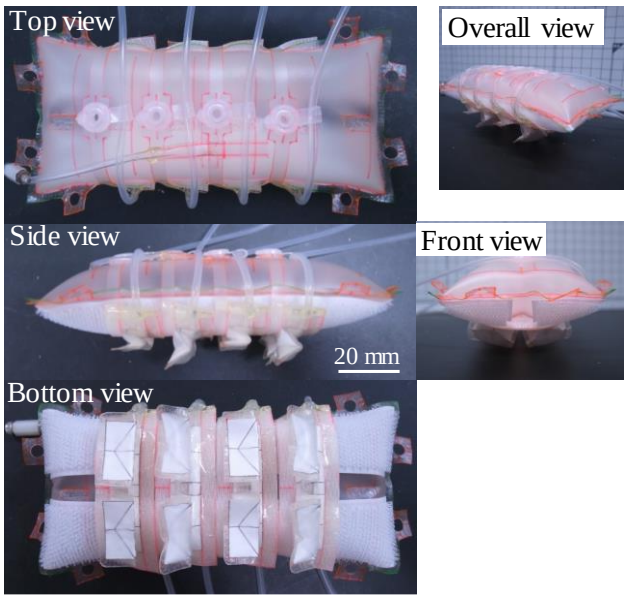

図 6　駆動ユニットの概観[6]

繊毛運動は駆動力を発生する有効打と，駆動力を発生せずに元の姿勢に戻る回復打という二つのシーケンスからなる[7]．この繊毛運動を行うアクチュエータとしては，西田らの“繊毛アクチュエータアレイ”や Hatazaki らの“繊毛振動駆動機構”といったものが挙げられるが[8][9]，これらは金属製であり柔軟な移動ロボットの開発を行う本研究とは趣旨が異なる．そこで本研究では，図 7 に示す Z 字型繊毛アクチュエータを開発した[5]．このアクチュエータは袋状構造 1 気室で駆動力を発生可能であるため，制御に必要なバルブ数が少なく，製作コストや重量の観点でも有利である．一般的な袋状構造 1 気室のアクチュエータは加圧時の伸展方向を一定とすることが出来ず，発生力の伝達方向を定めることが困難であるが，本アクチュエータでは Z 字

© 2017 IEE Japan

型の形状とすることで袋状構造 1 気室でも一定方向に進展することが可能である．さらに，折り畳まれた構造であるため縮小時には伸展時と全く反対の動作で縮小する．このようなメカニズムにより，Z 字型繊毛アクチュエータでは袋状構造 1 気室で安定した有効打と回復打による繰り返し動作が可能となっている．

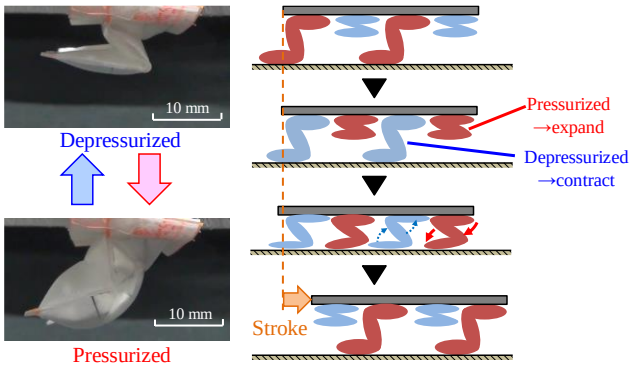

図 7　Z 字型繊毛アクチュエータとその動作[5]

Z 字型繊毛アクチュエータの配置先となる基部は内部に橋梁構造を持つ．このため加圧時にも上下面は平坦な形状を保ち，2 列配置された繊毛アクチュエータの伸展を同一方向に規定できる（図 8）．したがって，加圧時に円形断面となってしまう単純な袋状構造に比べ，効率的に Z 字型繊毛アクチュエータの駆動力を地形へと伝達できると考えられる．

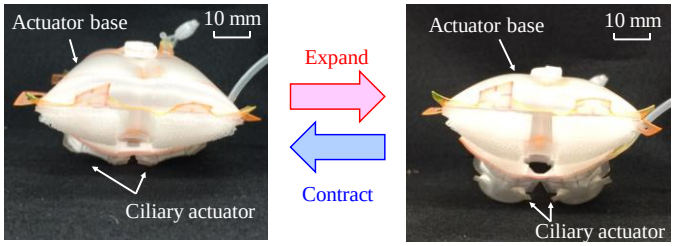

図 8　同一方向に伸展する繊毛アクチュエータ

3.　推進動作検証用ロボット

外部からの電源や空気の供給を行わない状態を想定し，駆動ユニットによる無線走行実験を行う．

駆動ユニット単体ではローリング方向への安定性が不十分であるため，駆動ユニットを横方向に 2 つ連結して走行実験用ユニットを試作した（図 9）．各ユニット同士はスナップジョイントにより連結されている．また，走行実験用ユニットに搭載する空圧回路・電気回路の構成要素を図 10 に示す．配管内の垂直登攀時における使用も考慮しているため，今回用いた繊毛アクチュエータは上下方向の運動成分が大きくなるよう設計してあり上下方向の揺動が大きくなる．そこで上下方向の揺動を抑えるために 500 [g]の重りを搭載した．

コンポーネントを全て搭載した自立駆動型の試作ロボットが図 11 である．この試作ロボットの重量は，走行実験用ユニット部 44 [g]，空圧回路・電気回路部 453 [g]，おもり 500 [g]の合計 997 [g]であった．

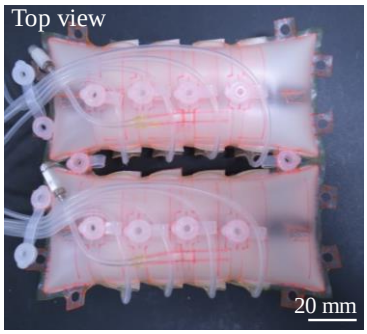

図 9　走行実験用ユニット[6]

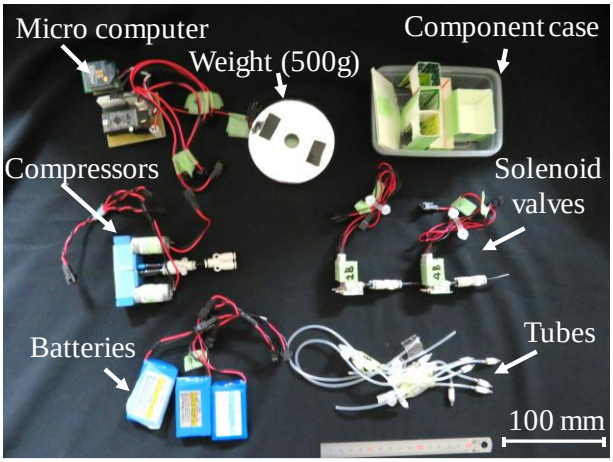

図 10　空圧回路・電気回路の構成要素

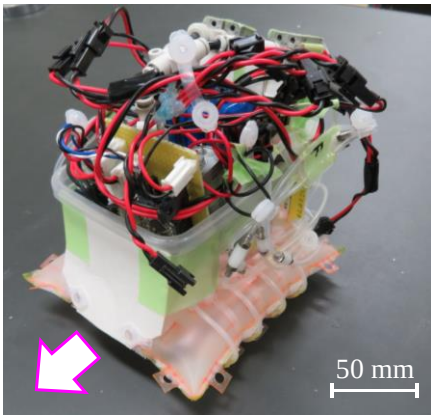

図 11　試作ロボット

基部内圧をゲージ圧で 0.01 [MPa]，Z 字型繊毛アクチュエータ駆動圧力をゲージ圧で 0.1 [MPa]として走行実験を行った．左右の駆動ユニットの繊毛アクチュエータを周期 1 [s]で駆動したところ，ロボットは前方へ約 2.3 [mm/s]で走行した．また，片側の駆動ユニットの繊毛アクチュエータの

© 2017 IEE Japan

みを周期 1 [s]で駆動したところ，駆動されているユニットとは反対側への方向転換を行うことが出来た．この方向転換の速度は約 1.5 [deg/s]である．

走行速度の向上にあたっては，駆動流体の流量増大が不可欠である．本研究ではこの目的のために，複数管路の同時制御を行う小型大流量機械式弁”MACS-Valve”の開発も並行して行ってきた(9)．今後は，この MACS-Valve を搭載し走行速度を向上させる予定である．

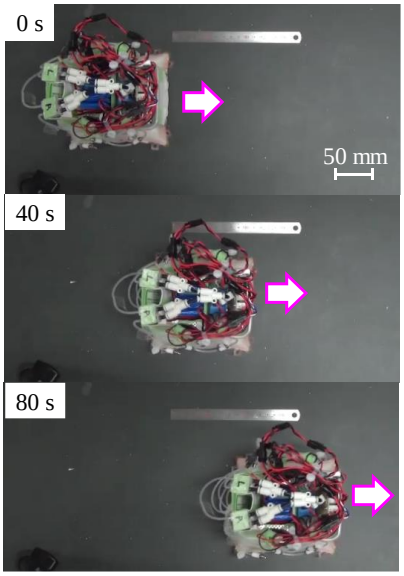

図 12　前方推進

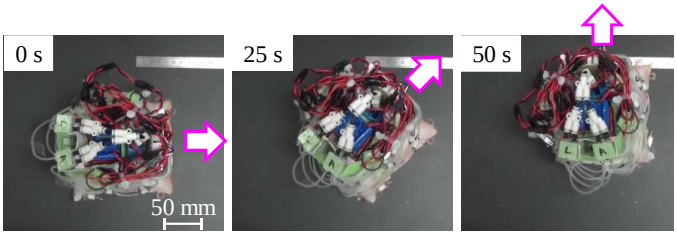

図 13　方向転換（左旋回）

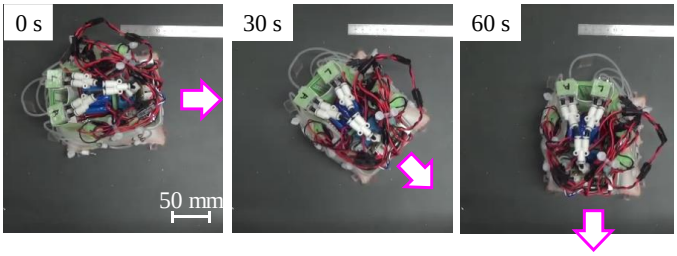

図 14　方向転換（右旋回）

5.　結言

本稿では，柔軟繊毛移動ロボットに搭載予定の Z 字型繊毛アクチュエータ，これらを配置する基部について述べた．また，Z 字型繊毛アクチュエータと基部からなる駆動ユニットを 2 つ連結し，コンプレッサやバッテリといったコンポーネントを全て搭載して無線走行実験を行った．この結果，外部から電源・空気の供給がない状態で，前方推進や左右への方向転換動作が可能であった．今後は，試作ロボットに複数管路の同時制御を行う小型大流量機械式弁”MACS-Valve”を搭載する予定である．

文　　献

（1） T. Takayama，S. Hirose: “Development of ‘Souru I & II’ - Connected Crawler Vehicle for Inspection of Narrow and Winding Space-”，International Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.15, No.1 pp.61-69, 2004

（2） B. Klaassen, K.L.Paap:“GMD-SNAKE2:A Snake-Like Robot Driven by Wheels and a Method for Motion Control”, Proceeding of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and System, pp.775-780, 2002

（3） K. Tadakuma, H. Ogata, R. Tadakuma, and J. Berengueres, “Torus Omnidirectional Driving Unit Mechanism Realized by Curved Crawler Belts”, 2014 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA2014), p.2567, 2014

（4） 木村仁，丸山大輔，梶村文裕，小関道彦，伊能教夫，“水力学的骨格を用いた完全密閉型柔軟移動ロボット-新型クローラの開発および試作ロボットの狭隘地形における動作実験-”，日本ロボット学会誌, Vol.25, No.7, pp.1092-1099, 2007

（5） H. Kimura, M. Kataoka, T. Higashi, N. Inou: "Development of flexible ciliary actuators and their application to mobile robots", Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, Vol.4, No.1, pp71-77, 2015

（6） 有田圭佑，片岡木太郎，木村仁，伊能教夫，"水力学的骨格を利用した体幹幅が可変な柔軟繊毛移動ロボットとその駆動ユニット",第 33 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集(DVD 版), 3A3-05, 2015

（7） Y. Wada, Y. Mogami and S. Baba, "Modification of ciliary beating in sea urchin larvae induced by neurotransmitters: beat-plane rotation and control of frequency fluctuation," The Journal of Experimental Biology 200, pp. 9-18, 1997.

（8） 西田吉人，岩附信行，森川広一, "マイクロ繊毛アクチュエータ群の開発:ニッケルめっき電極接合による繊毛アクチュエータアレイ・群の作成と駆動実験," 日本 AEM 学会誌, vol. 17, no. 1, pp. 2-7, 2009.

（9） K. Hatazaki, M. Konyo, K. Isaki, S. Tadokoro and F. Takemura, "Active Scope Camera for Urban Search and Rescue," IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2596-2602, 2007.

（10） 有田圭佑，片岡木太郎，木村仁，伊能教夫, "複数管路の同時制御を行う小型大流量機械式弁",第 15 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(SI2014)講演論文集(USB 版), 2I3-3, 2014

© 2017 IEE Japan