T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	袋状構造を利用した柔軟アクチュエータの開発
著者	安井大貴, 池田隆史, 木村仁, 伊能教夫
出典	第23回日本IFToMM会議シンポジウム前刷集, pp. 77-84
発行日	2017, 6

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

Proceedings of the 23rd Jc-IFToMM Symposium (2017)
9th June 2017, Tokyo

袋状構造を利用した柔軟アクチュエータの開発

○安井大貴，池田隆史，木村仁，伊能教夫
東京工業大学 工学院 機械系機械コース，yasui. d. aa@m.titech.ac.jp

DEVELOPMENT OF FLEXIBLE ACTUATOR WITH BAG-LIKE STRUCTURE

DAIKI YASUI, TAKASHI IKEDA, HITOSHI KIMURA, NORIO INOU
Department of Mechanical Engineering, Tokyo Institute of Technology, Japan,
yasui.d.aa@m.titech.ac.jp

ABSTRACT
This study proposes a new flexible robot which is driven by ciliary actuators using fluid power. The robot has a flexible active joint which is capable of changing the robot shape according to terrains. This paper describes the active joint, and proposes a new mechanical valve for automatic control of the active joint. With the proposed mechanical valve, the prototype robot succeeded in climbing a vertical composite pipe which combines 148 mm and 164 mm in diameter without manual control.

KEY WORDS: Hydraulic skeleton, Soft actuator, Body width control, Mechanical valve

1. 緒言

災害地における要救助者捜索や，人が入ることの出来ない狭所での保守点検を行うヘビ型やクローラ型の移動ロボットの研究は数多く報告されている[1][2]．しかし，それらの多くは金属や樹脂などの硬い素材で構成されており，地形の変化に対応しにくい．そのため狭所においてスタックを起こしたり，周囲の構造体を破損させたりしてしまう危険性を有している．そこで著者らは，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歪地形移動ロボット“MOLOOP”や図 1 に示すような体幹部分を柔軟に適応変形させながら狭所探索できる柔軟繊毛移動ロボットの提案を行ってきた[3][4]．水力学的骨格とは，ミミズやイソギンチャクなどの生物に見られる柔軟なメカニズムであり，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．

本稿では，図 1 の柔軟繊毛移動ロボットの試作機に搭載された体幹幅調整用能動関節について述べる．そして，能動関節の内圧を自動的に一定範囲内に維持することで，体幹幅を自動制御できる新しい機械式定圧維持弁を提案する．また，弁の機構・性能と，これをロボットに適用して行った動作実験結果について議論する．

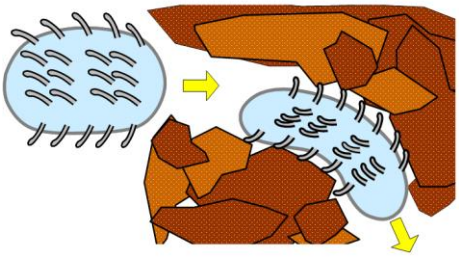


Fig. 1 Flexible ciliary mobile robot [4]

2. 能動関節による体幹幅調整機能

柔軟繊毛移動ロボットの試作機を図 2 に示す．これは，水力学的骨格を用いた繊毛アクチュエータ[5]，アクチュエータ基部，能動関節の全てが柔軟なロボットである．このロボットは，体表面に多数の柔軟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前方へと推進する．

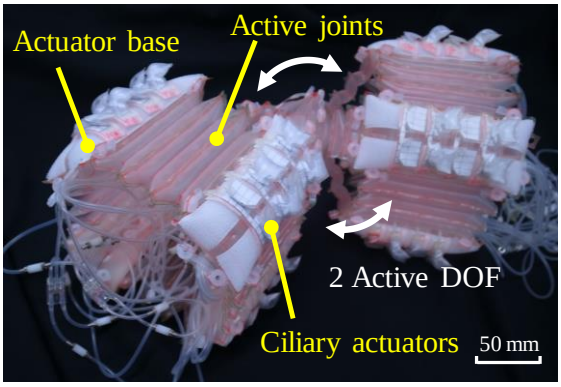
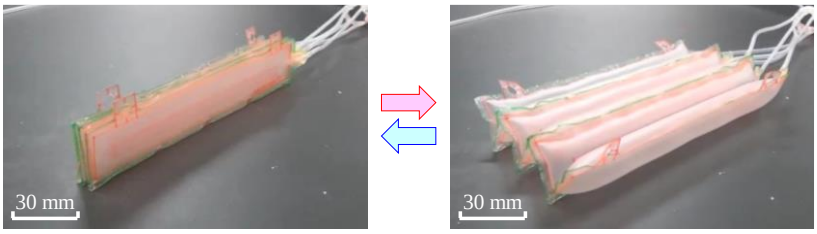


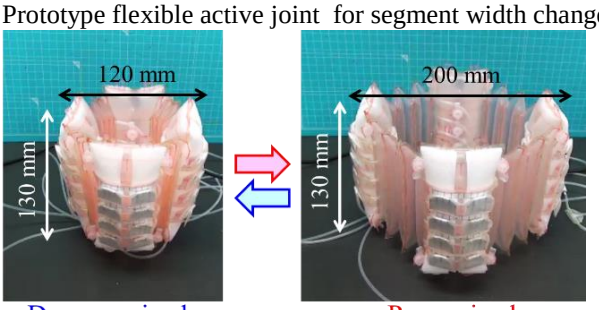
Fig. 2 Prototype robot with active joint for direction change

図 3 はロボットに搭載された能動関節である．この能動関節は，アクチュエータ基部同士を連結するジョイントとしての機能と，体幹幅を調整するアクチュエータとしての機能の両方を有する．この能動関節の内圧を変更することにより，ロボットは図 4 に示すような体幹幅の調整が可能である．図 4 における能動関節の内圧は，縮小時に大気開放，拡大時に 50kPa である．このときの体幹幅は縮小時に 120mm 程度，拡大時に 200mm 程度であり，約 60%の拡大を実現した．このような体幹幅の調整方法は，アクチュエータ基部の剛性を損なわずに地形への適応変形が可能である．一方，図 5 のようにアクチュエータ基部全体を柔軟変形させる方法は，体幹幅を小さくするために基部を減圧したとき，基部が柔らかくなりすぎる問題がある．これに対し提案方法は，アクチュエータの発生力を効率的に利用可能であると考えられる．



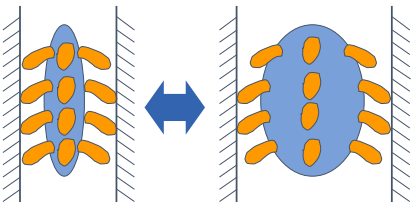
Depressurized　　Pressurized

Fig. 3 Prototype flexible active joint for segment width change



Depressurized　　Pressurized

Fig. 4 A body segment with active width change function



Depressurized　　Pressurized

Fig. 5 Change of whole body shape

続いて，この能動関節により，ロボットが地形に適応変形可能であるかを調査した．ロボットを推進させながら手動で能動関節の内圧を制御したところ，図 6 に示すように，管径 160mm の細いパイプから管径 200mm の太いパイプへの連続垂直登攀に成功した．また，上側ロボット体節の先端部を細いパイプに挿入した状態を初期状態とすることにより，太いパイプから細いパイプへの連続垂直登攀も可能であった．次節以降では，この体幹幅調整の自動化について議論する．

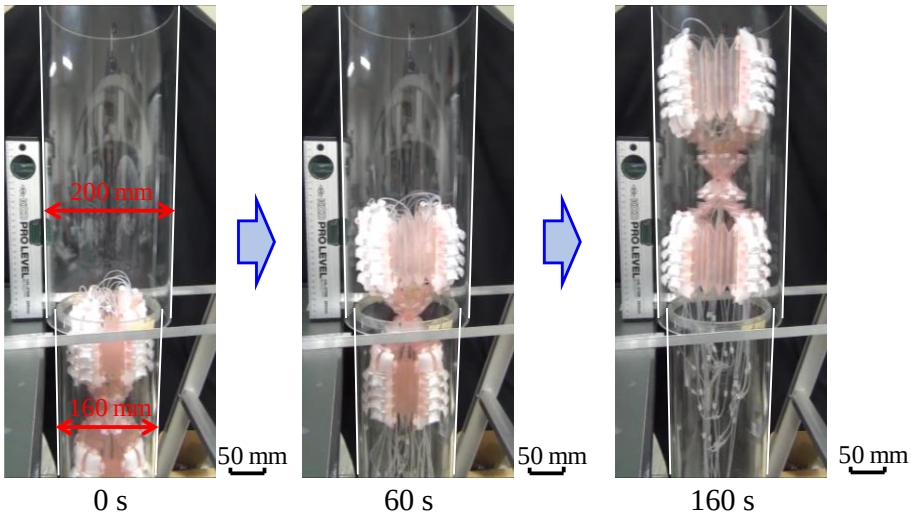


Fig. 6 Climbing motion (160mm to 200mm pipe)

3. 体幹幅を自動制御する機械式定圧維持弁

3・1　機械式定圧維持弁の概略

図 7 は，内圧制御を行わない場合の能動関節の内圧変化である．狭い地形の場合には周囲から外力が加わるため能動関節の内圧は高い状態となり，逆に広い地形の場合には能動関節の内圧は低い状態となる．このため，能動関節の内圧を一定に保つことができれば，地形に応じて体幹幅を適切に調整できると考えられる．

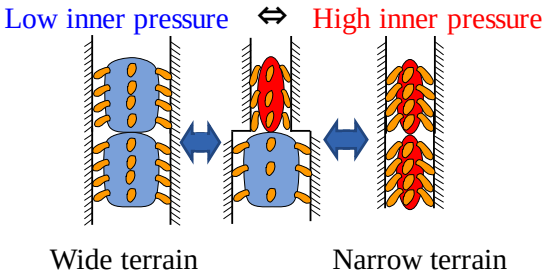


Fig. 7 Pressure change for various terrains

一般的な定圧維持方法は，センサーで内圧を監視しながらソレノイドバルブ等の制御弁を用いて加減圧を行うというものである．しかし，この方法ではバッテリー，センサー，制御弁と多数のコンポーネントが必要となるため重量の増加につながる．また電気的なシステムにより常に内圧をモニタリングし制御弁を駆動するため，消費電力の問題も無視できない．そこで本研究では，一定圧力を維持可能な新しい機械式弁を提案する．図 8 に示すように，この弁はポペット弁を 2 つ組み合わせた構造となっている．各ポペット弁の流路開閉機構にはゴムパッキンとバネを用いており，入口側の圧力が出口

側の圧力を一定値以上上回ると流路開放される仕組みとなっている．流路開放を行う差圧は，バネに取り付けられた開放圧力差の調整器の位置を変更することにより変更可能である．これを図 9 のように用い，給気側では入り口のコンプレッサ圧力と出口の袋状構造の目標圧力の差を設定差圧に，排気側では入り口の袋状構造の目標圧力と出口の大気圧の差を設定差圧とすることで，袋状構造を目標圧力に維持することが可能となる．このような自動の機械式弁の市販品は存在しないため，本研究で新たに開発を行った．

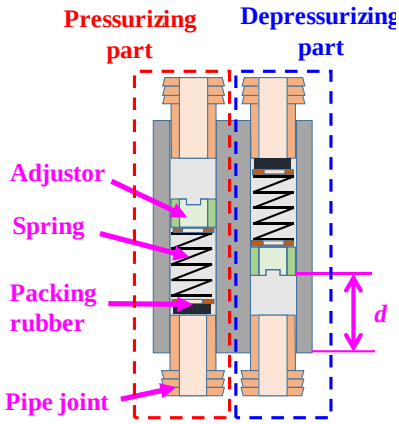


Fig. 8 Structure of valve

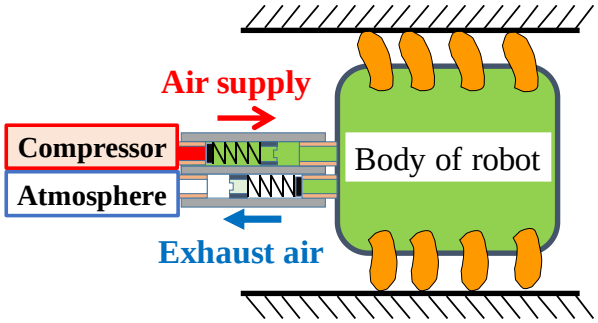


Fig. 9 Application example of the valve

3・2　性能評価

図 10 に試作機の概観を示す．試作機の全長は約 60mm であり，アクチュエータ基部の 130mm に対し半分以下と小型で．また重量も約 16g とロボットの重量 1kg に対し 2%未満と非常に軽量である．

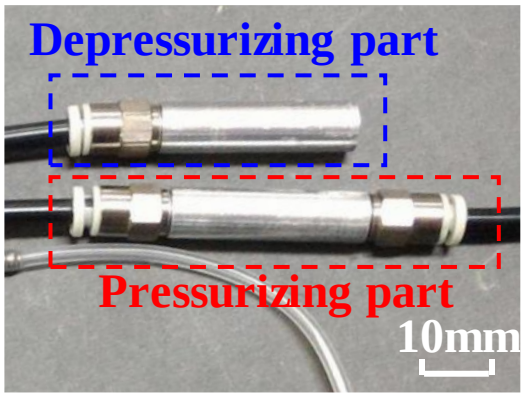


Fig. 10 Overview of prototype valve for constant pressure maintenance

図 8 に示すように開放圧力差の調整器の位置d[mm]を設定し，dと弁が開放し始める圧力P_1 [kPa]，弁が十分に開放され流量が急激に増加する圧力P_2 [kPa]，開放後，弁が閉じる圧力P_3 [kPa]との関係を図 11 に示す．P_1とP_3は傾きが約 34 [kPa/mm]のおおよそ線形関係で，互いにほとんど一致していた．したがって，簡便な操作により，流路開閉を行う

差圧を調整可能となっているといえる．一方で，P_2とP_1，P_3の間には 20%程度の差が生じていた．このため，試作機を用いた定圧維持には，設定差圧と実際の差圧の差が小さく，かつ袋状構造の内部容積が大きい場合は目標圧力に到達するのに大幅な時間がかかるという課題を有することが判明した．これは，バネとゴムパッキンの振動により，小さなバネ変位では十分な流路開放面積が得られていないことが原因と考えられる．今後，流路径を大きくしてバネにかかる力を大きくしたり，よりバネ定数の小さいバネを使用したりすることによってバネの変位を大きくすることで改善する予定である．

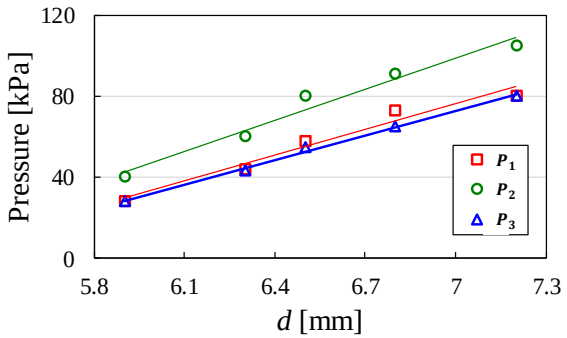


Fig. 11 Relationship between pressure difference and *d*

試作機に対し，目標圧力への調整が可能であるかも検証した．30 kPa を設定圧力として単純な袋状構造を内圧 0 kPa から加圧した結果が図 12 である．また，目標圧力を維持している状態から，質量 W [kg]（=1.0，1.5，2.0 [kg]）のおもりを袋状構造に載せたときの内圧挙動が図 13 である．どちらも誤差 5%未満の精度で目標圧力を追従・維持することが可能であった．

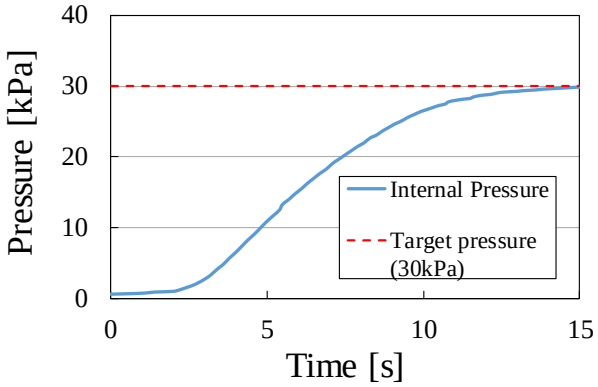


Fig. 12 Pressure change in low pressure

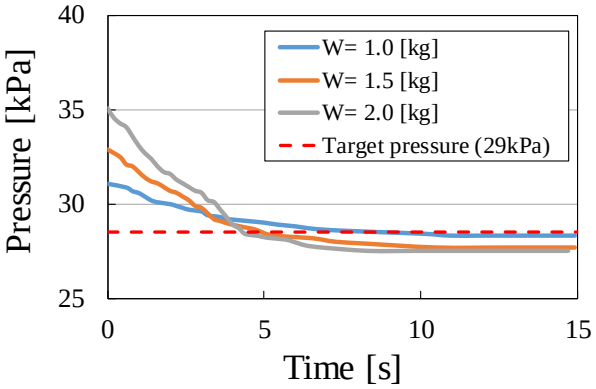


Fig. 13 Pressure change in high pressure

3・3　定圧維持弁を適用したロボットの動作実験

定圧維持弁を試作ロボットに適用し動作実験を行った．前述した流量の問題により，図 7 における管径よりも小さい，内径 148 mm のパイプと内径 164 mm のパイプの 2 本を用いて実験を行った．図 14 に示すように，体幹幅を自動で制御しながら細いパイプから太いパイプへの異径管連続登攀を実現した．また，パイプ同士の接合部にテーパのついた状態で，体幹幅を自動で制御しながら太いパイプから細いパイプへの異径管連続登攀動作も実現した（図 15）．

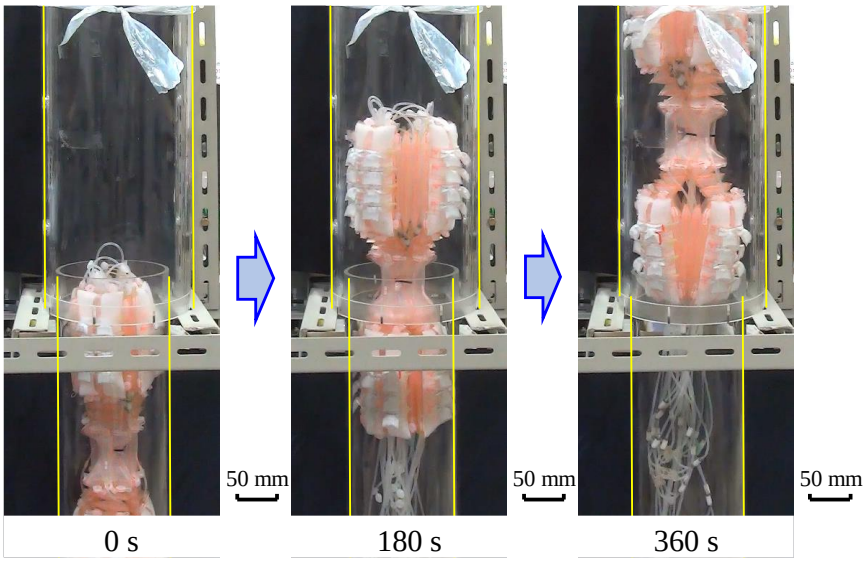
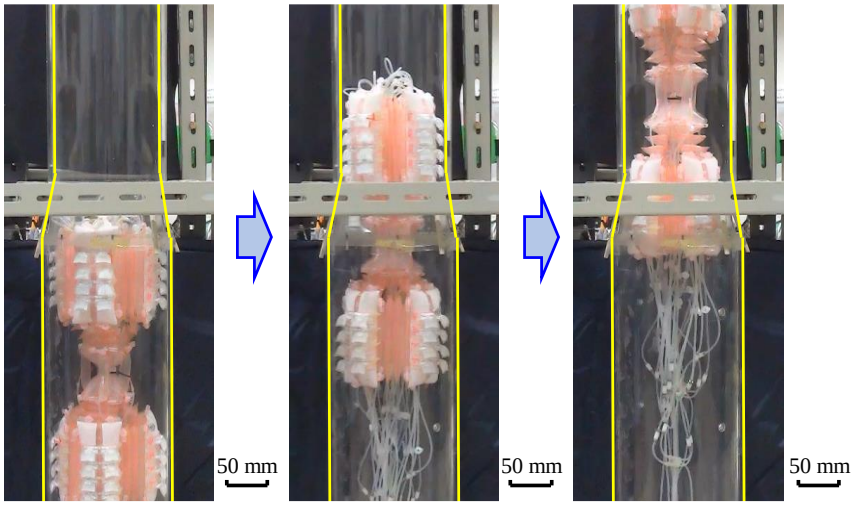


Fig. 14 Climbing motion with automatic body adjustment (148mm to 164mm pipe)



0 s　　250 s　　370 s

Fig. 15 Climbing motion with automatic body adjustment (148mm to 164mm pipe)

4. 結論と今後の課題

本稿では，柔軟繊毛移動ロボットに搭載する体幹幅調整用能動関節と，その制御に用いる弁について提案した．この弁は，袋状構造の内圧に応じて自動で動作する機械式の定圧維持弁である．実験により，この定圧維持弁の試作機が実際に袋状構造の内圧を一定に維持可能であることを確認した．さらに，定圧維持弁をロボットに内蔵して動作実験を行った．この結果，異なる径のパイプがつながった垂直な管路内を，自動で体幹幅を調整しながら登攀することに成功した．今後は適応可能な管径の変化幅をより大きくするために，体幹幅調整用能動関節や定圧維持弁の改良等を行っていく予定である．

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] 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)

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

[5] 木村仁, 東拓矢, 片岡木太郎, 伊能教夫: 柔軟な繊毛アクチュエータを利用した狭隘地形移動ロボット, 第32回日本ロボット学会学術講演会講演論文集(DVD) (2014), 1M2-02