

自励振動を誘発する柔軟小型バルブとその移動ロボットへの応用

Soft compact valve inducing self-excited vibration and its application for a mobile robot

○学 宮木 悠二 (東工大) 正 塚越 秀行 (東工大)

Yuji MIYAKI, Tokyo Institute of Technology, y.miyaki@cm.ctrl.titech.ac.jp
Hideyuki TSUKAGOSHI, Tokyo Institute of Technology

This paper describes the development of a new valve that switches the pressurized modes by self-excited vibration instead of using electricity. Recently pneumatic soft robots are developed actively which can move narrow environments by taking advantage of its flexibility. Generally, solenoid valves are used to drive pneumatic soft robots, but they are hard to be used in environments where explosion-proof performance is required such as a chemical plant. Therefore, we developed a new valve and checked its function by experiments. Then we show the effectiveness of our method by realizing the propulsion of a pneumatic mobile robot in which installed the valve.

Key Words: Soft robot, Pneumatic actuator, Valve mechanism

1. 緒言

近年、その柔軟性を活かして狭隘地形などを安全に推進、情報収集を行うことができるソフトロボットの研究が盛んに行われている。なかでも空気圧を駆動源としたソフトロボットは柔軟、軽量かつ出力密度が高いため数多く研究されている[1].

一般に、他自由度の運動を生成する空気圧ロボット制御するためには、自由度と同数の圧力供給チューブと制御弁が必要となる。しかし、長距離移動の際には複数の供給チューブがもたらす捻じれや摩擦などが運動を阻害する。

一方で、電磁弁をロボット本体に搭載することで供給チューブを減らすという手法をとると、ソフトロボット本来の柔軟性が損なわれるだけでなく、化学プラントのような防爆性能が要求される環境での使用が困難になる。

そこで本研究では、防爆性能が必要とされる環境下での使用を目指した、電力を使用せずに自動的に圧力切替を行うことのできる柔軟小型バルブを開発することとした(図1)。従来にも自励振動を生成する剛体構造の弁は存在した[2]。本研究で提案する弁はこれとは異なり、弁自体が柔軟なチューブ構造のためアクチュエータ内部に収納しやすく、システム全体として柔軟性を損ねる懸念がない。

本稿では、まず偏平チューブを用いた自励振動の生成原理を紹介し、検証実験を行う。次にバルブとしての利用法を述べ、実験によってその特性を示す。最後に、試作した移動ロボットに当該バルブを搭載し、推進実験によってその有効性を示す。

2. 偏平チューブを用いた自励振動現象

2.1 自励振動の基本原則

自動的に加圧モードの切り替えを行う手法として、偏平チューブを用いた自励振動現象を提案する。2本の偏平チューブを用いて流路を切り替える手法が、田圃らによって開発されている[3]。これを利用して、一定圧力で流体を供給することで自励振動を生成する原理を提案する。

本機構は図2に示すように、小さな排気穴を開けた2本の偏平チューブを拘束具によって束ねたものと3つのネオジウム磁石によって構成されている。自励振動を生成する基本原理を図3に示す。右側から一定圧力で空気圧を供給し、偏平チューブA、Bの内圧をそれぞれ p_A 、 p_B と表すこととする。最初に、中央の磁石が偏平チューブA側の排気穴を磁力によって塞ぐことで、 p_A が上昇する。 $p_A > p_B$ となることで、拘束部分で偏平チューブB側の流路が遮断される(図3(i))。それによ



Fig. 1 Soft compact valve

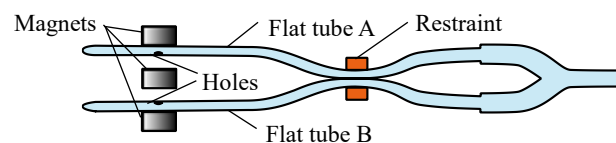


Fig. 2 Basic structure of the mechanism

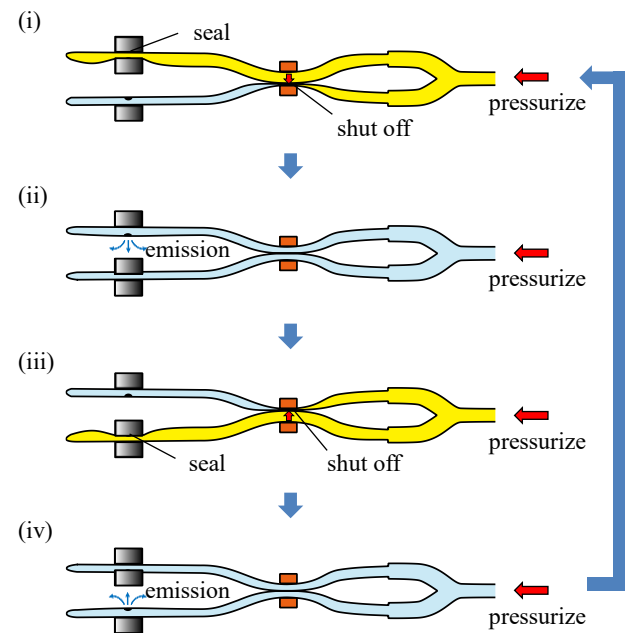


Fig. 3 Basic Principle of the Self-excited Vibration

て、 p_A はさらに上昇し、切替圧力に達すると排気とともに磁石が扁平チューブ B 側へ移動する(図 3(ii)). 同様に p_B は上昇し(図 3(iii)), 磁石は A 側へ移動する(図 3(iv)). この一連の動作を繰り返すことで一定圧力供給のみで中央の磁石が自動的に振動する.

2.2 自励振動生成実験

実験装置による自励振動生成の様子を図 4(a)に示す. 一定圧力 150 [kPa]を供給することで原理通り中央の磁石が自動的に振動した. また, 図 5 に示すように供給流量 q に比例して振動の周波数 f が上昇していくことが確認できた. 図 4(b)に高周波で磁石が振動している様子を示す. これによって圧力切替の周期は供給流量によって制御可能であると考えられる. しかしながら, 供給流量が 1.6 [L/min]以下では自励振動は生じなかった. これは拘束部分による流路の遮断が完全ではなく, 磁石によって閉じられていない側の排気穴から空気漏れが生じているためである. 今回は拘束具として 0.5 [mm]のスリットを設けたポリアセタール樹脂を用いたが, 今後空気漏れを低減する改善が必要である.

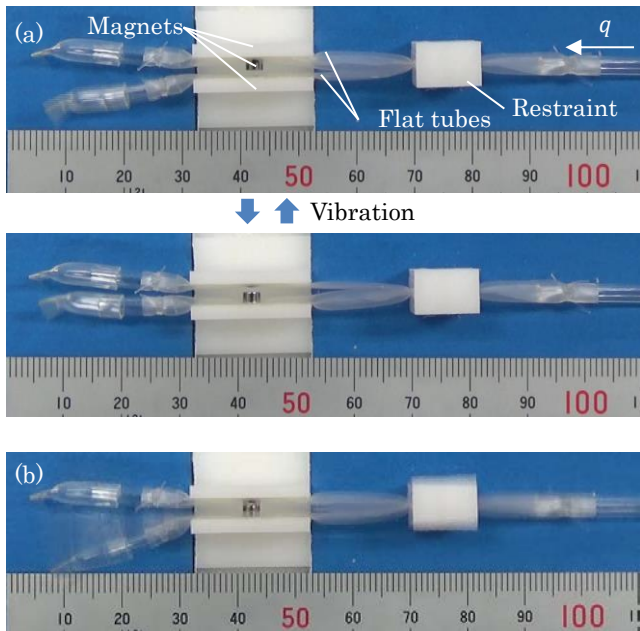


Fig. 4 Self-excited vibration

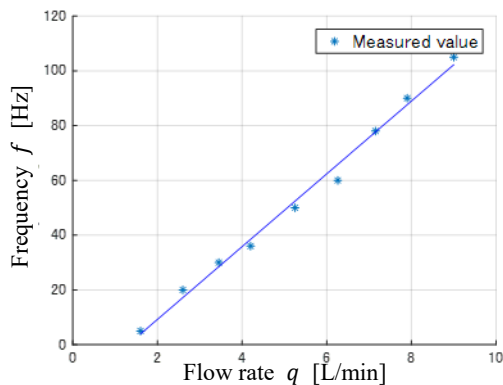


Fig. 5 Relationship between frequency and flow rate

3. 自励振動バルブの開発

3.1 切替圧力の設計

提案した自励振動現象を, 図 6 のように一定圧力供給のみで, 加圧するチャンバを自動的に切り替えるバルブとして利用する. この際, 各アクチュエータの駆動圧に対して適切な切替圧力の設計が必要となる.

切替圧力の設計手法について述べる. 図 7 のように扁平チューブの厚さ, 折径, 受圧部分の長さを t, φ, l とし, 両端の磁石間の距離, 磁石の高さを d, h_m とする. 距離 x 離れた磁石間の吸着力を $f_m(x)$ とすると, 磁石が移動する際の切替圧力 p_{switch} は図 7 の赤い部分の力のつり合いから, 式(1)のように求まる.

$$p_{switch} = \frac{f_m(t) - f_m(d - t - h_m)}{\varphi \cdot l} \quad (1)$$

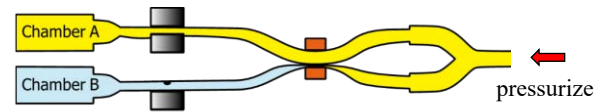


Fig. 6 Basic concept of the valve

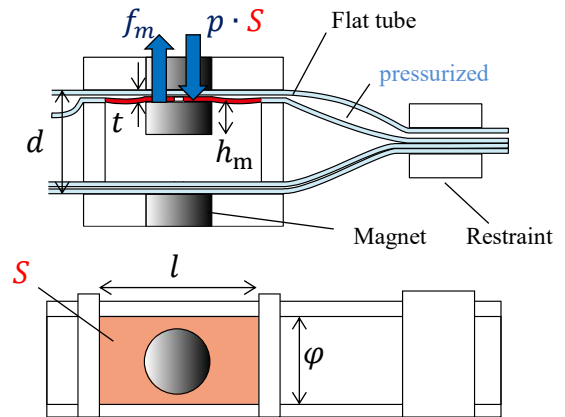


Fig. 7 Dynamical model

3.2 バルブの作製

図 8 に実際に作製したバルブを示す. 式(1)から切替圧力が 50 [kPa]となるように各パラメータを定めた. 寸法, 重量を表 1 に示す. 構成要素が少なく低コストで製作でき, 小型かつ軽量である.

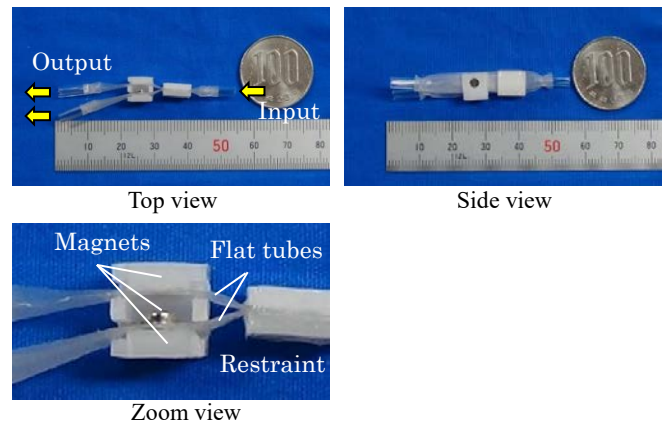


Fig. 8 Over view of the valve

Table 1 Specification of the valve

Weight	1.2 [g]
Size	55×7×8 [mm]

3.3 アクチュエータ駆動実験

図 8 に示したバルブを用いて空気圧アクチュエータの駆動実験を行った。アクチュエータとしては塚越らが開発した加圧によって伸長するような Wound tube actuator (以下 WTA と呼ぶこととする) を用いた[4]。駆動実験の様子を図 9 に示す。一定圧力 100 [kPa] を供給することで WTA が交互に加圧され伸長していることを確認した。

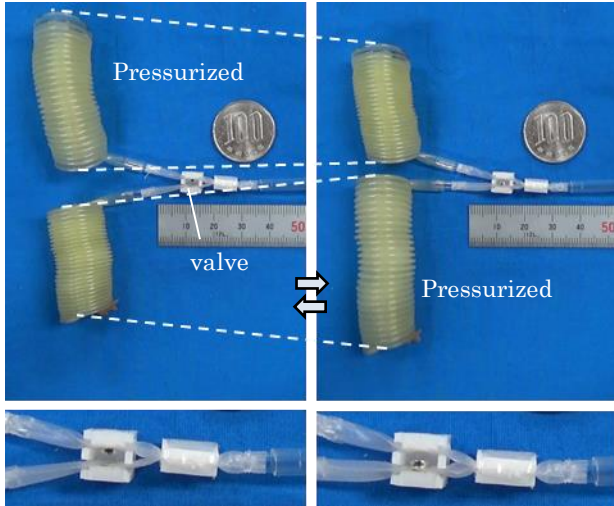


Fig. 9 The valve alternately pressurizing actuators

3.4 圧力測定実験

3.3 の実験に対して、供給圧力 p_s を変化させた際の、アクチュエータ A, B の内圧 p_A, p_B 、供給圧力、供給流量 p_s, q の時間推移を測定した結果を図 10 に示す。 p_s, q の波形にみられる振動は、切替に伴って急激に排気が行われることによるものである。供給圧力の変化に伴って供給流量も変化しているため、切

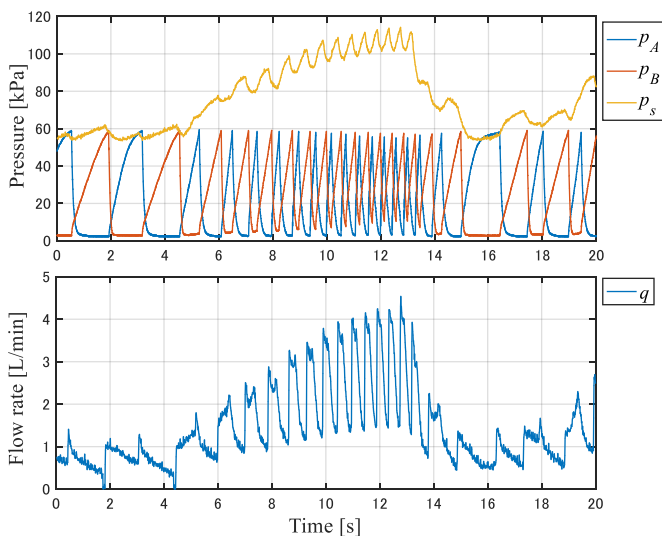


Fig. 10 Experimental results of measuring pressures and flow rate

替周波数は変化しているが、約 60 [kPa] を切替圧力として、一定の圧力帯でアクチュエータが駆動していることを確認した。また、移動ロボットをリモートで駆動させる際に、供給側の圧力か流量を測定することで、その波形の振動から、切り替わりの周期を確認でき、移動速度、移動距離の制御が可能であると考えられる。

切替圧力が設計した値より高くなっている原因として、チューブの固定具による影響が考えられる。固定具に近い部分ではチューブの膨張が阻害されるため、磁石を引き離す力が十分働かない。よって有効受圧面積は図 7 のモデルよりも小さいと考えられ、その分切り替えに要する圧力が高くなったと考えられる。

4. 移動ロボットへの応用

4.1 移動ロボット構成

試作した移動ロボットを図 11 に示す。直列に配置した 2 つの WTA と、ワイヤーを用いて摩擦性に異方性を持たせた 3 つの脚部分によって構成されている。2 つの WTA が交互に伸縮を繰り返すことで、図 12 に示すように 1 サイクルで δx 推進する。

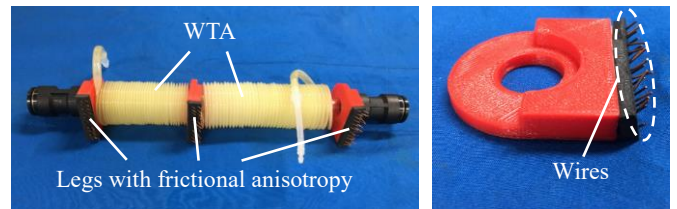


Fig. 11 Basic structure of the mobile robot

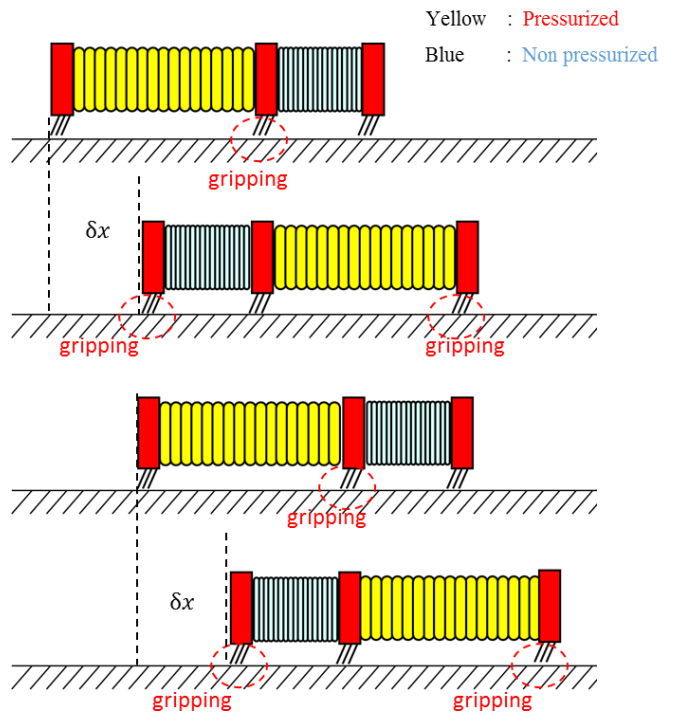


Fig. 12 Basic principle of the propulsion

4.2.1 本の供給ラインでの推進実験

図13に示すように試作した移動ロボットにバルブを搭載して推進実験を行った。供給圧力は100 [kPa]とした。推進実験の様子を図14に示す。バルブの切替周波数は約0.3 [Hz]であり、8 [mm/s]で安定した推進を行った。

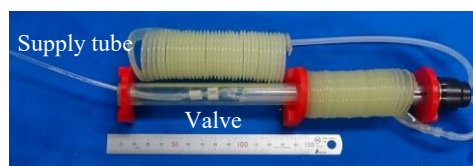


Fig. 13 The mobile robot

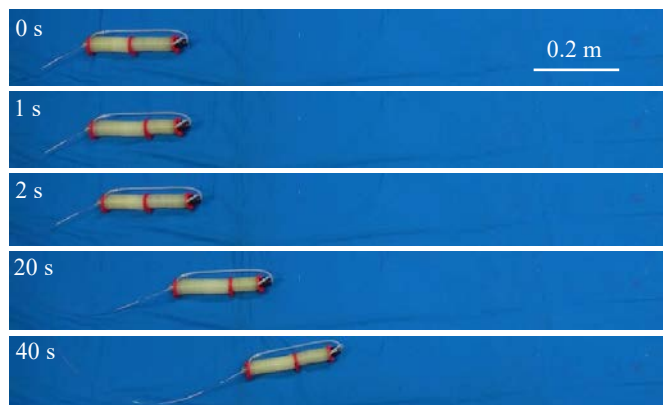


Fig. 14 Propulsion of the mobile robot

4.2 ドライアイスによる推進実験

個体のドライアイス常温で密閉すると、その一部が炭酸ガスとして昇華するために圧力が次第に上昇する。そこで、圧力源として約10 [g]のドライアイス移動ロボット本体に内蔵し、外部からのエネルギー供給を必要としないラインフリーでの推進実験を行った。推進実験の様子を図15に示す。ドライアイスは0.42 [MPa]以下では圧力が変動することが北川らによって研究されている[5]。しかし、自励振動バルブを用いることで、移動ロボットは一定の圧力帯域で駆動し、安定した推進を行った。しかしながら、推進から60秒程度経過すると、切替動作が正常に行われなかった。これは供給流量の低下と空気漏れにより、切替圧力までチューブの内圧が上昇しなかったことが原因と考えられる。

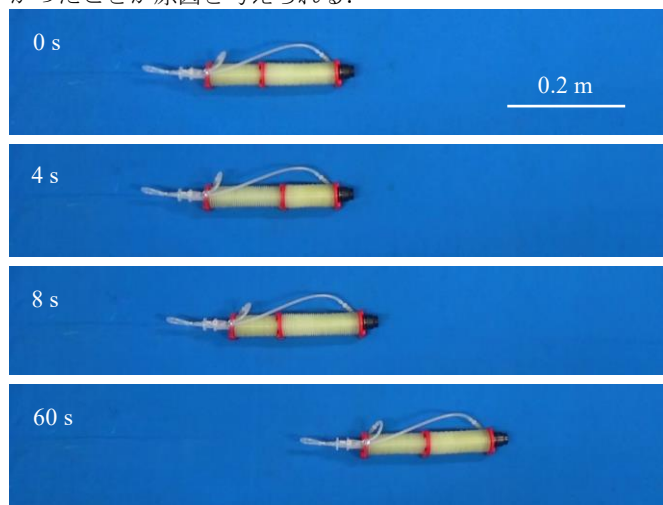


Fig. 15 Propulsion of the mobile robot by dry ice

5. 結言

電力を使用せずに目標の切替圧力で加減圧を行う柔軟小型バルブを開発した。当該バルブを用いて、1本の供給ラインおよびラインフリーでの移動ロボットの推進を実現し、その有効性を示した。今後はバルブを組み合わせることで3つ以上のチャンバの加減圧を行うことができる手法の検討や、より柔軟性を活かした移動ロボットの開発を行う予定である。

参考文献

- [1] Daniela Rus, Michael T. Tolley, "Design, fabrication and control of soft robots", Nature, vol 521, pp.467-474, 2015.
- [2] 高山俊男, 角悠介, "多重チューブ推進機構のための自励式空圧流路切り替え装置", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(2016), 2A2-08b2, Jun, 2016
- [3] 塚越秀行, 田圃圭祐, 北川能, "水道圧ステッピングモータとその高速駆動を促すフルイディックチューブの動作原理", 平成16年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp.161-163, 2004
- [4] H. Tsukagoshi, A. Kitagawa, Y. Kamata, "Wearable fluid power composed of transformed flat tube actuators", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 2, pp.1178-1183, 2002
- [5] H. WU, A. Kitagawa, H. Tsukagoshi, "Development of a portable pneumatic power source using phase transition at the triple point", 6th JFPS International Symposium on Fluid Power 2005, No. 6, pp. 310-315, 2005.