研究論文

柔軟扁平チューブに沿ってスライドする流体アクチュエータ*

(第1報, Λ -driveの提案とその動作解析)

森 庸太郎**, 塚 越 秀 行**, 北 川 能**

Fluid Powered Actuator Sliding Along A Flexible Flat Tube (1st Report: Proposal of Λ -drive and Its Driving Analysis)

Yotaro MORI, Hideyuki TSUKAGOSHI, Ato KITAGAWA

This paper proposes a novel fluid powered actuator sliding along a flexible tube. The actuator named Λ -drive is composed of a flat tube and a slider. In the slider, the tube is bent and then the buckling point occurs, which helps to cut off the fluid passage and to seal in order to provide the driving force to the slider without generating large friction. In this paper, after the conventional sliding actuators are compared, the design method of the proposed actuator for making stable drive possible, the classification of the driving mode, and the analysis of the output force are discussed. Moreover, the validity of the proposed analysis can be verified through the experiment of the linear and the spiral motion by the developed prototype. Finally, as one of the applications of the actuator, the active drive of the zipper is proposed and its feasibility is discussed.

Key words : Flexible actuator, Long stroke actuator, Fluid powered actuator

1. 緒 言

柔軟構造の流体アクチュエータは、チューブや袋など無加圧状態で柔軟に変形する構造体をチャンバーとし、その内部を流体で加圧して所定方向に力を生成するものである。このようなアクチュエータは、剛体構造のシリンダや電気モータと比較すると、人体への親和性や形状適応性に優れ、なおかつ出力／重量比を高く構成しやすい利点を備えている。それゆえ、介護・リハビリをはじめとする人間支援のための装着型ロボットや狭隘経路内を探索する移動ロボットの要素技術として重要な役割を担いつつあり、さらなる進化が望まれている。

一方、これまで提案された柔軟流体アクチュエータをチャンバー内の加圧方法から整理すると、以下の2種類に分類される。その1つは、チャンバー内の全域を同時に加圧し、チャンバー全体に変位をもたらす方式である。「全域同時駆動」とも呼べるこの方式は、複雑な機構を用いなくとも、伸縮・湾曲・ねじりなど多様な動作をチャンバーに直接生成することができる。たとえば、マッキベン人工筋¹⁾、Flexible Micro Actuator²⁾、Wound Tube Actuator³⁾、Zigzag Tube Actuator⁴⁾などが挙げられる。

これに対して、チャンバー内の流路の一部をなんらかの方法で遮断し、加圧しながらその遮断部を上流から下流にスライドさせる方式も存在する。この方式では、出力はチャンバーに対する遮断部の相対運動として取り出される。「遮断部スライド駆動」とも呼べるこの方式は、チャンバーとして長いチューブを用いたときにその有用性が高く、1) 装備したチューブの自然長とほぼ同等のストローク長を得られ、2) 湾曲経路に沿った運動も生成でき、3) 遮断部およびチューブのどちらでも出力ポートとして使用できる、などの特異な性質を備えている。そのため、これまでも複数の構成例が提案されてきたものの、摩擦の低減とシール機能の向上を同時に望める遮断方法が課題となっていた。

そこで本論文では、まず従来までの主要な遮断部スライド駆動を概観したうえで、課題解決のための新たな遮断方法として、チューブの座屈現象に着目する。そして、「 Λ -drive (ラムダドライブ)」と名付けた全く新しい遮断部スライド駆動を提案し、安定な駆動力を生成する構成の検討、および動作原理や駆動力の解析を行う。最後に、これらの妥当性を検証するための動作実験や能動ファスナーへの適用例を示し、それらの結果をもとに提案手法の有効性について論ずる。

2. 従来までの遮断部スライド駆動

これまで提案された主要な「遮断部スライド駆動」として以下の2種類が挙げられる。その1つはピンチローラー⁵⁾と呼ばれるFig. 1(a)に示す構成である。これは複数の受動

*平成21年12月31日 原稿受付

**東京工業大学大学院理工学研究科

(所在地：東京都目黒区大岡山2-12-1-S5-19)

(E-mail: yo-ta@cm.titech.ac.jp)

ローラーでチューブを挟んで流路を遮断する方法であり、遮断部を小型に構成しやすいため、直動運動⁶⁾や無限回転運動⁷⁾への適用が試みられてきた。その反面、チューブを挟む力の調整が煩雑になる傾向があった。力が強いとチューブの変形にともなう粘性抵抗が増し、逆に力が弱いと内部漏れによる損失が生じた。これらの損失を最小化するような挟む力の最適値は、内圧・チューブの弛み・湾曲具合などに応じて動作中に変化するため、ローラーを安定に駆動し続けることが困難だった。

一方、赤木らの柔軟ロッドレスシリンダ⁸⁾は、Fig. 1(b)に示すように、チューブ内をスライドするボールとスライダ内の複数のボールとでチューブを挟みながら流路を遮断し、マッキベン人工筋と融合して比較的高い出力を得る工夫が施されてきた。しかし、ボールがチューブの内壁に摺動しながら駆動するため、摩擦やチューブの摩耗を軽減する方策が模索されていた⁹⁾。

以上の駆動方法では、遮断部が過大な力でチューブを押しつけてシールし、なおかつチューブに対してスムーズにスライドするという、相反する設計要求を満たさねばならなかった。そこで本研究では、チューブを押しつけずに流路を遮断できる方法を検討することとした。

Fig. 1 Conventional method of the cutoff sliding drive

3. Λ -driveの提案

3.1 基本動作原理

提案するアクチュエータの基本形は、偏平チューブとスライダの要素から成る簡便な構造である。偏平チューブとは、無加圧状態では断面が偏平形状を形成し、加圧状態では断面周長をほぼ一定に保ちつつ断面が円形に近づくチューブである。スライダは、曲げた偏平チューブを貫通できる程度の穴を中央に設けた構造体を基本とする。Fig. 2のように偏平チューブの一箇所を偏平平面と垂直方向に曲げて座屈させ、座屈点を含む曲げ部をスライダに通す。この状態からチューブ内の一方を加圧すると、座屈点まで流体は流れるものの、座屈点より下流側は流路が遮断されるため流体は流れない。さらに加圧し続けると、座屈点を含む曲げ部とともにスライダも下流側に駆動される。曲げ部の形状とギリシャ文字 Λ との類似性から、この構成を Λ -driveと呼ぶことにする。 Λ -driveは、従来までの遮断部ス

ライド駆動と異なる以下2つの特徴を有している。

1) 本駆動方式は偏平チューブの座屈現象を利用してシールしており、従来方式のように他の要素でチューブを押しつけて流路を遮断する必要はない。そのため、摩擦による損失を低減しやすい構成となる。偏平チューブとスライダとの接触箇所に摩擦を回避する要素を設ければ、さらに効果的に損失を低減できると考えられる。

2) 偏平チューブを境に、チューブの曲げ部と反対側には移動要素が存在しないため、外部環境に対して摺動することなくスライダを推進させることができる。

なお、 Λ -driveにおいて偏平チューブの代用としてパイプ状チューブの使用は適さない。なぜなら、パイプ状チューブを曲げると座屈は生じるものの、座屈点を境に下流側のチューブを押し潰す力が抵抗として作用するため、座屈点がスムーズに移動しにくいからである。そこで、本論文でこれ以降述べるチューブは、すべて偏平チューブを意味するものとする。

Fig. 2 Basic principle of Λ -drive

3.2 安定駆動のためのスライダの構造

スライダに加わる負荷の増減や、重力方向に対する姿勢の変化などに対し、 Λ -driveを安定に駆動し続けるためのスライダの構造を検討する。ここで、 Λ -driveの安定駆動とは、偏平チューブを座屈させて流路の遮断状態を保持し、スライダをスムーズに動かすことを意味する。

まず流路の遮断状態を保持するには、スライダを貫通したチューブ曲げ部の長さが適切な範囲内に保たれる必要がある。曲げ部の長さが短すぎるとチューブがスライダから抜け出し、長すぎると自励振動¹⁰⁾が生じるためである。そこでスライダの中央にホルダーを設け、チューブの抜け出し防止用のストッパと、チューブのとび出し防止用のカバーをFig. 3のように各々ホルダーに付加する。

次にスライダをスムーズに動かすには、スライダに作用するクーロン摩擦と粘性抵抗を軽減させる必要がある。このうちクーロン摩擦は、チューブとスライダとの接触部に回転要素を付加することにより軽減できるため、スライダへの出入り口部分、およびスライダ内の中央に位置するストッパを受動回転できるローラーとした。一方、粘性抵抗はチューブの変形量を少なくすることにより軽減できる。

とりわけ、カバー内部の限られたスペースで接触するチューブとストッパは粘性抵抗の増減に大きく関与するため、チューブの膨らみ具合が変化しても、ストッパによるチューブの変形を抑制する構造を導入することとした。すなわち、ホルダー上のピボットを中心に受動的に揺動するアームを取り付け、そのアームの先端にストッパの機能を設けるという構造である。これにより、座屈点を境にいずれのチューブが上流側の役目を担う場合でも、ストッパが上流側から下流側に片寄る動作が自動的に生成される。このような構造は、スライダを双方向に駆動する場合に特に効果を発揮する。

Fig. 3 Structure of the slider to keep driving stably

3.3 スライダの設計パラメータ

前節で提案したスライダの構造のうち、安定駆動の生成や駆動力の向上を図るうえで特に考慮すべき設計パラメータとして、1) ストッパの径 D_s 、2) 2つのローラーの間隔 w_r 、3) カバーの幅 w_c 、4) ローラーの径 D_r に着目した。これらについて以下個別に説明する。

1) Fig. 4に座屈点近傍の拡大図を示す。座屈点での局所的な曲げ半径 r_b は、流路の遮断状態の保持に必要な最大曲げ半径 r_b^* より小さいことが必要条件となる。ストッパが座屈点に接触する場合でも $r_b \leq r_b^*$ を満たすために、 $D_s \leq 2r_b^*$ を満たすように設計する。

2) スライダの駆動力を高めるには、上流側チューブの中心線 C_u と、ストッパおよび下流側ローラーを結ぶチューブの中心線 C_m とを平行に近づけることが望ましく、その実現には w_r を狭くする必要がある。一方、チューブ間の接触を回避するためには、 w_r は、上流側チューブの径 D_i 、下流側チューブの厚み $2t$ 、およびストッパの径 D_s の和より小さく設定することはできない。したがって、 $w_r + D_i + 2t + D_s$ と設定することが望ましい。

3) w_c は2つのローラーの間隔 w_r と同値となるように設定する。

4) D_r はスライダを小型軽量に設計するためには小さい方が望ましいが、小さすぎると出入り口のローラー付近でもチューブが座屈し、所要の動作が生成されない。そのため、チューブが座屈しない範囲で必要最小限のローラー径を模

Fig. 4 Design parameters of the slider to be considered

索しなければならない。

4. 動作解析

Λ -driveで生成される駆動力について考察を行う。なお、本章以降で述べるチューブの上流側・下流側とは、座屈点を境に偏平チューブの加圧側・無加圧側を各々意味するものとする。

4.1 座屈点の推力

まず始めに、最も基本的な駆動原理として、偏平チューブの座屈点に生じる力を検討する。チューブの上流側端点を外部環境に固定し、チューブ内に圧力 p の流体を流量 ΔQ だけ流入したとき、座屈点が生じる力 F_b を生成しながら距離 Δl_b だけ移動したとする。入出力間におけるエネルギーの損失がない理想状態を想定すると、仮想仕事の原理より次式が成り立つ。

$$p \cdot \Delta Q = F_b \cdot \Delta l_b \quad (1)$$

このとき、Fig. 5(a)に示すようにチューブ曲げ部の形状は一定に保たれたまま、チューブが最も膨れた箇所、すなわち断面積 A を有する部分が距離 Δl_b だけ伸びたものと考え、次式が成り立つ。

$$\Delta Q = A \cdot \Delta l_b \quad (2)$$

式(1)、(2)より座屈点の推力 F_b は次式のように求まる。

$$F_b = p \cdot A \quad (3)$$

一方、座屈点が推力 F_b を生成しながら距離 Δl_b だけ移動する間に、下流側のチューブは $2\Delta l_b$ だけ牽引されるため、牽引力を F_t とすると式(4)が成り立つ。よって式(5)の関係が導出される。

$$F_b \cdot \Delta l_b = F_t \cdot (2\Delta l_b) \quad (4)$$

$$F_t = F_b/2 = (p \cdot A)/2 \quad (5)$$

この動作は、中心をシリンダで持ち上げられる動滑車と、その動滑車に巻かれたワイヤで構成されたモデル (Fig. 5(b))に置き換えて確かめることもできる。すなわち、座屈点の駆動力がシリンダの推力に、またチューブに作用する牽引力がワイヤの張力に相当するものと考え、動滑車における力学的関係より同様に式(5)が導出される。なお、厳密にはチューブの断面形状を変形するためにもエネルギーは消費されている。そのため、実際には F_b や F_t は式(3)、(5)より減少する可能性も予想されるが、本論文では十分柔軟に偏平チューブを使用することを前提に、近似的に式

(3), (5)を用いることとする.

(a) Model of the flat tube (b) Model using a pulley and a wire

Fig. 5 Model of the flat in left and its equivalent model in right

4.2 スライダの駆動原理の分類

Λ-driveの出力ポートとして, ①スライダ, ②スライダを介してチューブの上流側, ③チューブの下流側の合計3つの選択肢が存在する. 本研究では, スライダにカメラなどの探査機能やファスナーなどの結合機能を搭載する用途を想定しているため, 以下ではスライダを出力ポートとする場合を検討する.

スライダの駆動力は, チューブの座屈点で発生する力 F_b に基づいて定まるものの, 座屈点とスライダ間の接触状態に応じて力の伝達経路が変化するため, 生成される駆動力にも差異が生じる. その接触状態は, Table 1に示すように座屈点がスライダのいずれにも接触しない座屈モード, 座屈点がストップと接触するストップモード, 座屈点がカバーと接触するカバーモード, の3種類に分類される. これらの接触状態は, チューブ両端の固定状態や, 固定点間の距離に対するチューブの長さの相対的關係に応じて変化する. 以下では各接触状態が生じる条件を明らかにしたうえで, 各々の状態におけるスライダの駆動力 F_{out} を検討する.

Table 1 Classification of driving modes of the slider

Buckling Mode	Stopper Mode	Cover Mode

4.3 両端固定の場合

チューブの上流側および下流側の両端を外部環境に固定したとき, 座屈点とスライダとの接触状態は, 固定点間の距離 L とチューブの長さ l との大小関係により式(6)–(8)のように定められる.

座屈モード: $L + U_s < l < L + U_c$ (6)

ストップモード: $L + U_s > l$ (7)

カバーモード: $L + U_c < l$ (8)

ここで, U_s と U_c は, Fig. 6に示すようにチューブが弛みなく張られた状態で, 座屈点がストップまたはカバーと接触したとき, 距離 L より長く要するチューブの折り返し箇所の長さを示す.

Fig. 6 Definition of the turned tube length in the slider

このうち座屈モードでは, 座屈点Bがスライダに直接触れることなく, 以下の原理に基づいてスライダを駆動できる (Fig. 7). すなわち, 外部環境に固定された上流側チューブに対して点Bが下流側に押され, そのうえ下流側のチューブに張力が作用するため, 下流側ローラー (Roller-D) が牽引されながらスライダが駆動する, という原理である. ここでRoller-Dを推進方向に牽引する力 F_{out} は, 張力 F_t の合力であるため, 式(5)の関係より次式で表わされる.

$$F_{out} = 2F_t = p \cdot A \quad (9)$$

Fig. 7 Driving principle of the slider in the buckling mode

次にストップモードでは, 座屈点がストップと接触しストップ自体が座屈点での滑車要素となることにより, 座屈モードにない次の2種類の現象が生じる (Fig. 8). 1) 上流側のチューブが反るため, 上流側のローラー (Roller-U) が当該チューブから力 F_u で押し上げられる. ここで, F_u は上流側チューブにおける2本の中心線の二等分線上にある.

Fig. 8 Driving principle of the slider in the stopper mode

2) ストップとRoller-D間に作用する張力 F_t は、スライダ内で打ち消しあうためスライダの駆動力に寄与しなくなる。これらの現象は、座屈モードより $F_u \sin \theta_u + F_t$ だけ減少する損失として作用するため、ストップモードでのスライダの駆動力は式(10)のように表される。

$$F_{out} = F_t - F_u \sin \theta_u \quad (10)$$

式(10)は、式(7)の差が広がって、チューブの反り具合を示す θ_u が増した場合、スライダの駆動力が減少する割合も増すことを示唆している。

一方、カバーモードでは、Roller-Dに接するチューブの張力は0となるためRoller-Dに牽引力は作用せず、代わって、座屈点がカバーの内側を押すことによりスライダが駆動される (Fig. 9)。このときのスライダの駆動力は、座屈点の推力 F_b に比べ、1) 座屈点を境に上流側のチューブのたわみ、および2) 座屈点のカバー内側に摺動する際に生じる摩擦力 R 、などの損失により低減するため、式(11)のように表される。

$$F_{out} = F_b \cos \theta_c - R \sin \theta_c \quad (11)$$

$$R = \mu F_b \quad (12)$$

ここで、 θ_c は上流側チューブの中心線に対する座屈点の推進方向のたわみ角、 μ はカバーとチューブ間の摩擦係数を示す。

Fig. 9 Driving principle of the slider in the cover mode

実際には、式(9) - (11)の関係はチューブの弾性変形の影響により、チューブの長さ l に応じてFig. 10に示すように連続的に遷移する。したがって、駆動力を最大化した状態で使用するには、駆動中の接触状態を座屈モードに維持する必要がある。その実現には、チューブが自励振動を生じない範囲内で、Fig. 4に示すストップとカバー間の距離 W_h

Fig. 10 Image of output transition when the tube free play is changed

を大きく確保できるように設計し、座屈モードとなる範囲を広げることが有効となる。

4.4 下流側のみを固定した場合

下流側端点のみを外部環境に固定してからチューブ内を加圧すると、スライダはストップモードを保ちながら駆動する (Fig. 11)。なぜなら、上流側端点が外部環境に固定されていないため、座屈点がストップと接触しない状態ではスライダは駆動せず、加圧されたチューブが剛性を増しながら上流側に送り出されるからである。その後、座屈点がストップに接触すると、下流側のチューブに力が作用して、Roller-Dが牽引されながらスライダが駆動する。式(10)と異なり、この場合のRoller-Uには反力 F_u は作用しないため、スライダの駆動力は次式で表される。

$$F_{out} = F_t \quad (13)$$

Fig. 11 Driving principle when only the downstream side is fixed

4.5 上流側のみを固定した場合

チューブの上流側端点のみを外部環境に固定してからチューブ内を加圧すると、スライダはカバーモードを保ちながら駆動する (Fig. 12)。なぜなら、下流側端点が外部環境に固定されていないため、座屈点のカバーと接触しない状態ではスライダは駆動せず、カバーと接触後初めて上流側チューブに対して推力を生成できるからである。したがって、このときの駆動力は式(11)、(12)と同様に表される。

Fig. 12 Driving principle when only the upstream side is fixed

5. 実験

5.1 偏平チューブの断面積

座屈点の推力 F_b や張力 F_t は、式(3)、(5)のように偏平チューブの内圧 p と断面積 A により定まる。このうち、チューブの断面積は内圧に応じて変化し、その変化傾向は、チューブのサイズ・肉厚・偏平形状に戻る復元力などのパラメータ

によって差異がある。これらを考慮したチューブ断面積の変化傾向を予測するモデルは、別途論文で論ずることとし、本論文で用いるチューブに関しては、実測して求めることとした。

使用した偏平チューブは、肉厚0.6mm、無加圧状態で偏平時の横幅12.5mmを有する直線状のウレタンチューブである。チューブ内を空圧で加圧したときの断面形状を楕円とみなし、長軸と短軸を計測して断面積を求めた。そのときの計測結果をFig. 13に示す。圧力が0.1MPa以下では、短軸の増加率が支配的なためほぼ線形に断面積が増加した反面、0.1MPa以上では、短軸の増加率と長軸の減少率が均衡したためほぼ断面積の増加は横ばい傾向になった。

Fig. 13 Variation of the cross sectional area of the flat tube

5.2 座屈部で発生するチューブ牽引力の測定

4.1節で考察した座屈部にて発生するチューブの牽引力を検証する実験を行った。チューブのたわみによる影響を回避するため、上流側チューブの周部に剛性の高いパイプを被せた。力の計測にはデジタルフォースゲージを使用し、Fig. 14(a)に示すように外部環境に固定して計測を行った。偏平チューブは前節で測定したものを使用し、チューブ内を印加する空圧を変えながら測定した。

測定結果および式(5)より算出される牽引力の理論値をFig. 14(b)に示す。測定結果は理論値とほぼ一致し、これを式(5)から逆算することで座屈点の推力が断面積と圧力の積であることが確認できる。また、上流側と下流側のチューブのなす角 θ を 20° から 30° に変えても、チューブの張力は変わらなかった。この結果より、漏れがなく流路を遮断で

Fig. 14 Experimental setup to measure the tension on the tube and the tension of flat tube

きる範囲内であれば、チューブの開き具合は座屈点の推力に影響を及ぼさないことが確認できる。

5.3 スライダの駆動力の測定実験

試作したスライダをFig. 15に示す。このスライダを用いて、両端固定の場合の座屈モード、下流側のみを固定した場合のストッパモード、および上流側のみを固定した場合のカバーモードの実験を行った。そのときの圧力に対する駆動力の測定値および理論値をFig. 16に示す。

この結果より、座屈モードおよびストッパモードにおける測定値と理論値はほぼ一致していることがわかる。また、ここに示すカバーモードの理論値は、たわみ角 $\theta_c=30^\circ$ 、摩擦係数 $\mu=0.8$ とおいた場合である。圧力の増加とともに測定値が理論値より低下する理由は、たわみ角が増加するためと考えられる。

Fig. 15 Developed slider and the installed flat tube

Fig. 16 Input pressure and output force of the slider

5.4 動作実験

試作した Λ -driveの動作を検証するため、直線運動および螺旋運動による実験を行った。

まず、5.1節の偏平チューブを水平方向かつ直線上に配置し、両端固定の座屈モードとなるように固定点間のチュー

Fig. 17 Movement of the straight line

ブの長さを調整した。スライダが外部環境と接触しない状態を保ちつつ、空圧0.4MPaをチューブ内の左右から交互に周波数0.8Hzで加圧したとき、スライダは幅500mmの間をスムーズに往復した (Fig. 17)。このときの移動速度の最大値は約1.4m/sであった。なお、スライダの応答性は、流量、チューブのサイズ、負荷、姿勢などの諸条件に応じて変化した。詳細は、別報にて報告する。

次に、 $\phi 130\text{mm}$ の円筒に巻きつけるように偏平チューブを配置し、同様に両端固定の座屈モードとなるように駆動した。左右から交互に加圧することにより、螺旋上でもスライダのスムーズな往復動作が確認できた (Fig. 18左)。このとき、Fig. 18の右図に示すように、スライダは円筒面に接することなく移動可能なため、円筒に対し摩擦を生じずに推進することができている。

Fig. 18 Movement on the spiral line and its contact model

5.5 能動ファスナーへの適用

偏平なチューブを設置するだけで力を取り出すことが可能となる Λ -driveは様々な分野への応用が期待される。身近なものへの適用として、双方向に駆動する能動ファスナーを作成した。これは、 Λ -driveの特徴を生かして、身体と接する側には移動要素を設けずにファスナーを駆動するものである (Fig. 19(a))。

ファスナーは、左右を連結するエレメント部、エレメン

Fig. 19 Active drive of Zipper by Λ -drive

トと布を固定するテープ部、およびそれらを連結する連結部から構成されている。開発した能動ファスナーは、テープ部内に偏平チューブを内包し、連結部とスライダとをFig. 19(a)のように結合したものである。このような構成により、カバーを設けなくともテープ部がチューブのとび出しを防止できる。またファスナーの両端は柔軟な布でしか固定できないため座屈モードにはなりにくく、下流側のチューブに張力が作用した状態から駆動するストップモードとなる。

開動作時に3.5N、閉動作時に3.7Nの力を要するファスナーを用いて実験を行った。5.1節で述べたチューブに0.4MPaの空圧を印加したとき、試作した能動ファスナーは開閉双方とも約45mm/sの速度にてスムーズに駆動できることを確認した (Fig. 19(b))。このようなデバイスは、着脱を容易にする介護服等への応用が期待される。

6. 結 言

本論文では、装備したチューブの自然長と同等のストローク長を得られる遮断部スライド駆動に着目し、 Λ -driveと称する新たな駆動方式を提案した。この駆動方式は、チューブの座屈により流路を遮断できるため、従来方式と比べて摩擦の低減とシール機能の向上を望める構造となっている。その実現のため、安定な駆動力を生成する構成の検討、および動作原理や駆動力の解析を行った。また、それらの妥当性を検証するために、試作機により駆動力の測定、および直線運動や螺旋運動の実験を行い、提案手法の有効性を確かめた。さらに、導入したアクチュエータの適用例として能動ファスナーの提案も行いその有効性を検討した。今後は、速度制御手法についても検討したうえで、次報では災害救助活動を支援する装置への適用例も紹介する予定である。

参 考 文 献

- 1) Schulte, H.F.: The Characteristic of the McKibben Artificial Muscle, The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics, Publ. 874, p. 94-115 (1962)
- 2) Suzumori, K., Iikura, S., Tanaka, H.: Development of Flexible Microactuator and Its Applications to Robotic Mechanism, Proc 1991 IEEE, International Conference on Robotics and Automation, p. 1622-1627 (1991)
- 3) Tsukagoshi, H., Kitagawa, A., Kamata, Y.: Wearable Fluid Power Composed of Transformed Flat Tube Actuators, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 1178-1183 (2002)
- 4) 塚越秀行, 白土賢一, 北川能: 湾曲用 Z-tube Actuator による下肢の運動支援, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, '04, 2P2-H-59 (2004)
- 5) 広瀬茂男, 吉田亮: ピンチローラ型昇降機の開発, 第

- 14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p. 899-900 (1996)
- 6) 塚越秀行, 古川和明, 北川能: カメレオン形直動アクチュエータの駆動制御手法に関する考察, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, '00, P1-47-083 (2000)
- 7) 塚越秀行, 野崎誠一, 西澤晃一, 北川能: 水道圧でも駆動可能な内接ピンチローラー式流体圧モータの開発と動作解析, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 35, No. 6, p. 109-116 (2004)
- 8) Akagi, T., Dohta, S. et al.: Development of Flexible Pneumatic Actuator with a Flexible Tube, Proc INTERMAC2001 Joint Tech. Conf, F-1093, p. 1-10 (2001)
- 9) 伊原道典, 赤木徹也, 堂田周治郎: ロングストローク型空気圧ゴム人工筋の改良と応用, 平成20年春季フルードパワーシステム講演, p. 50-52 (2008)
- 10) 塚越秀行, 田圃圭祐, 北川能: 偏平チューブ固有の発振現象とその応用, 第4回システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2003), p. 1106-1107 (2003)