

Mckibben型空気圧人工筋を用いた 空気圧群アクチュエータの開発と制御

臼井 美和子, 三宅 巧馬, 平井 慎一

(立命館大 ロボティクス学科)

Motion Control of Pneumatic Group Actuator using Mckibben Rubber Actuators

Usui Miwako, Miyake Takuma, and Hirai Shinichi,
Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ.

We describe the Pneumatic Group Actuator (PGA) using Mckibben rubber actuators with a 1 DOF hand and 1 DOF wrist using Mckibben rubber actuators. First, we show a hand mechanism driven by Mckibben rubber actuators and demonstrate it can perform various manipulative operations. Second, we describe the motion control of a PGA. We will build a motion control law based on the measured motion of a PGA. Simulation and experiment will show the effectiveness of our approach.

Key word: Mckibben rubber actuator, Pneumatic Group Actuator, PGA, 1 DOF hand, 1 DOF wrist

1 はじめに

現在, 軽量で力が強く, エネルギー効率が良く, 親和性の高いアクチュエータが求められている. 軽量であるためには歯車などを用いることなく, 多様な運動が可能なアクチュエータが必要である. そこで, 我々は軽量かつ柔軟で, 様々な運動を実現させることの出来るアクチュエータとして, Mckibben 型空気圧人工筋を用いた空気圧群アクチュエータ (Pneumatic Group Actuator) を開発してきた^{1) 4)}.

しかし PGA の構造上, 軸まわりの回転機構は実現不可能である. そこで, 本報告では軸まわりの回転を実現するために, Mckibben 型空気圧人工筋を用いた手首機構を試作し, 発生トルクと可動範囲を計測する. 次に物体操作を行うために, 様々な形状の物体の把持が可能な, 空気圧 1 自由度ハンドを試作する. 次に, 多段 PGA の先に空気圧 1 自由度ハンドと手首機構を取り付けて行った物体操作について述べる. 空気圧 1 自由度ハンドと手首機構は空気圧を用いて駆動する方式をとり, PGA と同一の動力源を用いる. ハンドを用いることにより, 手先ですべての自由度を実現することができる. また, 制御側の構築のために 1 段組 PGA の圧力と位置, 角度を計測した結果を述べ, それらの間の関係を求め, 計測結果との比較を行う.

2 Mckibben 型空気圧人工筋を用いた PGA とハンド

本章では試作した PGA と空気圧 1 自由度ハンド, 手首機構に用いた Mckibben 型空気圧人工筋について述べる.

本研究に用いた Mckibben 型空気圧人工筋は, 外径 $\phi 16$, 内径 $\phi 14$ のシームレスシリコンゴムチューブに内径 $\phi 12$ の MT スリーブで覆ったものであり, 止め具間の長さは 115mm である.

空気圧 1 自由度ハンドと手首機構の要求仕様は, 1) 総重量が 1kg 以内, 2) 物体把持を行ったときにハンドが変形しない, 3) 様々な形状の物体把持が可能, 4) 手首機構の可能な回転角度が $\pm 90^\circ$ (左右で 180°) である. ハンドによる PGA の運動にかかる慣性力が小さくなるよう

に総重量を設定した. また物体を把持した状態で PGA の運動が可能であり, 様々な物体操作が可能であるように仕様を定めた. そして, 空気圧 1 自由度ハンドと手首機構を Mckibben 型空気圧人工筋を用いて試作した.

また, PGA の 1 段は, 2 枚のプレート間に Mckibben 型空気圧人工筋 4 本を固定したものである. プレート間の長さは 150mm である. 空気圧 1 自由度ハンドと手首機構を Fig. 1 に, 1 段組 PGA を Fig. 2 に示す.

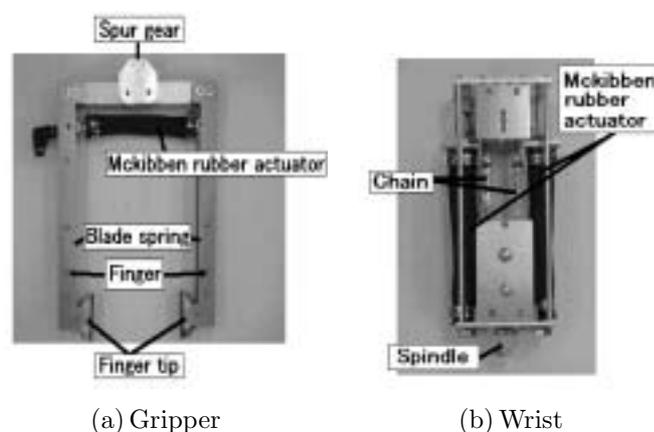


Fig. 1: Hand



Fig. 2: PGA (single stage)

2.1 空気圧 1 自由度ハンド

本節では、試作した空気圧 1 自由度ハンドの機構を示し、空気圧 1 自由度ハンドを用いた様々な物体の把持について述べる。

空気圧 1 自由度ハンドの機構は本体を軽量にするために 2 本の指で物体把持を行うピンチング機構を用いた。Mckibben 型空気圧人工筋の両端を左右の指に接続し、指どうしを平歯車で連結させることにより、左右の指の動きが同期し、ピンチングが可能となる。試作した空気圧 1 自由度ハンドは質量 338g、指の可動範囲 0mm ~ 75mm であった。

様々な形状の物体把持を可能とするために、ハンドの指先と指を別々に製作し、指先を可動にした、さらにハンドの指先と指の間に板バネをはさみ、グリップ力を増加させた。また、指先に溝を掘ることにより、物体が指先から受ける拘束を増やし、安定した物体把持を可能にした。

試作した空気圧 1 自由度ハンドを用いて、球（ゴルフボール:直径 43mm、質量 46g）、直方体（木片:縦 60mm × 横 60mm × 厚さ 25mm、質量 47g）、円柱（油性ペン:直径 21mm）の 3 種類の物体を把持した。物体を把持させた状態の画像を Fig. 3 に示す。

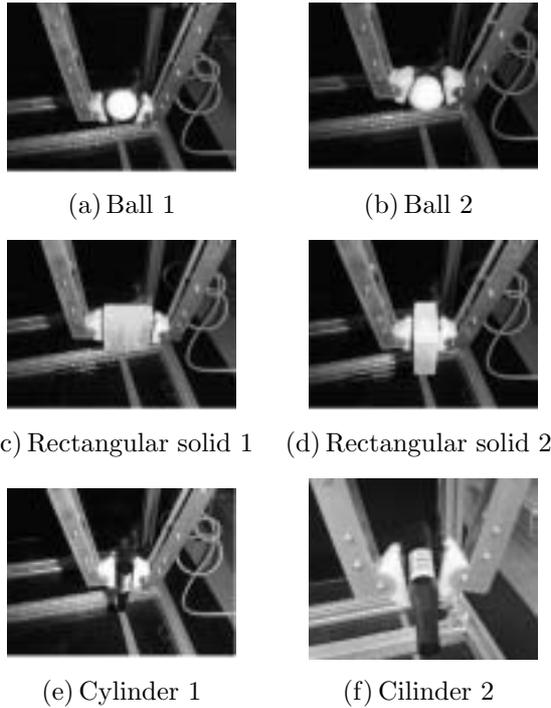


Fig. 3: Pcking of various objects

2.2 手首機構

本節では、手首機構について述べる。まず、手首機構の回転方法を述べ、手首機構の出力軸の回転角とトルクを測定した結果を示す。

手首機構の機構は 2 本の Mckibben 型空気圧人工筋の差圧駆動をさせ、連結したチェーンからスプロケットを経由して回転量を平歯車で増幅し、さらにマイタギアで回転軸方向を変換し出力する。Mckibben 型空気圧人工筋は、低圧のときには力が弱いので、差圧駆動を用いた。

Table 1: Rotation angle

	$\theta_1 [^\circ]$	$\theta_2 [^\circ]$	Total angle $\theta_1 + \theta_2 [^\circ]$
case 1	60	49	109
case 2	60	50	110
case 3	59	51	110
case 4	60	50	110

差圧駆動とは、Mckibben 型空気圧人工筋の変位の差により、常に高圧状態で駆動する方法である。試作した手首機構は質量 490g であった。

歯車およびスプロケットの仕様は可能な回転角度から求めることができる。Mckibben 型空気圧人工筋は 0.2MPa に加圧すると自然長から 15mm の変位を得ることができる。スプロケットの回転角を $\theta_s [\text{rad}]$ 、Mckibben 型空気圧人工筋の変位を $l [\text{mm}]$ 、スプロケットのピッチ円直径を $d' [\text{mm}]$ とし、Mckibben 型空気圧人工筋の変位が連結しているチェーンに 100% 伝わるとすると、スプロケットの回転角は式 (1) で表せる。

$$\theta_s = \frac{2l}{d'} \quad (1)$$

試作する際に使用したのは、協育歯車製のプッシュチェーン用ホイール SW1/4D 10-B（ピッチ円直径 $d'=20.5\text{mm}$ ）である。そのピッチ円直径から、スプロケットの回転角は $\theta_s=0.47\pi [\text{rad}]$ となる。出力軸の回転角を $\theta [\text{rad}]$ 、スプロケットの回転角を $\theta_s [\text{rad}]$ 、小平歯車の歯数を z_1 、大平歯車の歯数を z_2 とすると、出力軸の回転角は式 (2) で表すことができる。

$$\theta = \frac{z_2}{z_1} \theta_s \quad (2)$$

目標とする出力軸の回転角は $\theta=\pi [\text{rad}]$ である。スプロケットの回転角は計算より $\theta_s=0.47\pi [\text{rad}]$ となるので、平歯車で 2.13 倍以上の増幅をすればいいことがわかる。

次に Mckibben 型空気圧人工筋に最大圧力 (0.2MPa) を与えたときの手首機構の出力軸の回転角度を計測する。右側の Mckibben 型空気圧人工筋の内圧を 0.0MPa、左側の Mckibben 型空気圧人工筋の内圧を 0.2MPa としたときの角度 θ_1 と、右側の Mckibben 型空気圧人工筋の内圧を 0.2MPa、左側の Mckibben 型空気圧人工筋の内圧を 0.0MPa としたときの角度 θ_2 を計測した。手首機構の出力軸の回転角の計測結果を Table 1 に示す。Table 1 に示すように、 θ_1 と θ_2 に 10° の差が出ていることがわかる。また、回転角 ($\theta_1 + \theta_2$) が目標値である 180° ($\pm 90^\circ$) に達していない。そこで、手首機構の右側の Mckibben 型空気圧人工筋の変位と連結しているチェーンの変位を計測すると、Mckibben 型空気圧人工筋の変位が 12mm であり、チェーンの変位は 9mm であった。この結果から無負荷状態の Mckibben 型空気圧人工筋の変位 (15mm) よりも小さいことがわかる。

Mckibben 型空気圧人工筋の変位が 12mm であり、チェーンの変位は 9mm であった結果から出力軸の回転角は式 (1)、式 (2) から、出力軸の回転角は $0.63\pi [\text{rad}]=113.4$

Table 2: Torque

	Right rotation torque [kgf·cm]	Left rotation torque [kgf·cm]
case 1	8	9
case 2	8	9
case 3	7.5	8.5
case 4	8	9
case 5	7.5	9

°となり、平歯車とマイタギアの最大バックラッシュを考慮すると出力軸の回転角は $0.56\pi[\text{rad}]=100.7^\circ$ となる。Table 1 より、可能な回転角度 ($\theta_1 + \theta_2$) が 100.7° 以上 113.4° 以内であるためにスプロケット以降の力の伝達は正常に行われていることがわかる。よって出力軸の回転角が目標値に満たない原因は、手首機構に用いた Mckibben 型空気圧人工筋と連結しているチェーンにあることがわかる。

左側の Mckibben 型空気圧人工筋に加える圧力を 0.2MPa から 0.0MPa に、右側の Mckibben 型空気圧人工筋に加える圧力を 0.0MPa から 0.2MPa に変化させた時の回転トルクの計測結果と、左側の Mckibben 型空気圧人工筋に加える圧力を 0.0MPa から 0.2MPa に、右側の Mckibben 型空気圧人工筋に加える圧力を 0.2MPa から 0.0MPa に変化させた時 (左回転) の回転トルクの計測結果を Table 2 に示す。右回転のトルク平均は $7.8\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 、左回転のトルク平均は $9.1\text{kgf}\cdot\text{cm}$ となった。左回転のほうが $1.3\text{kgf}\cdot\text{cm}$ だけ大きく、均一でないのは、Mckibben 型空気圧人工筋の個々の特性のバラつきによると考えられる。

2.3 PGA とハンドを用いた物体操作

次に、2 段組 PGA に試作した空気圧 1 自由度ハンドと手首機構を取り付けた。試作システムを用いて、ピンのふたを回して外す操作や、直方体を持ち上げて回転させる操作を実現した。他にはボールを投げたり、字を書くという動作を実現した。

ピンのふたを回して外す操作の様子を Fig. 4 に、直方体を持ち上げて回転させる操作の様子を Fig. 5 に示す。図に示すように、両方の操作が実現される。

3 1 段組 PGA の位置と圧力のモデル

本章では、1 段組 PGA の 4 本の Mckibben 型空気圧人工筋にかけた圧力と位置の関係と、圧力と角度の関係を調べる。また Mckibben 型空気圧人工筋の圧力と位置、姿勢のモデルを立て、そのモデルに含まれる圧力と位置との比例定数を求める。

1 段組 PGA の下部プレートの中心位置と角度を計測するために、赤色 LED をプレートの中央に、青色・緑色 LED を 90° の角度をなすように取り付けた。

1 段組 PGA の下部プレートにおける、Mckibben 型空気圧人工筋と LED の位置を Fig. 6 に示す。PGA の下部プレートの中心位置の成分を x, y, z で、個々の Mckibben 型空気圧人工筋に与える圧力を P_1, P_2, P_3, P_4 で、XY



Fig. 4: Opening of bottle cap

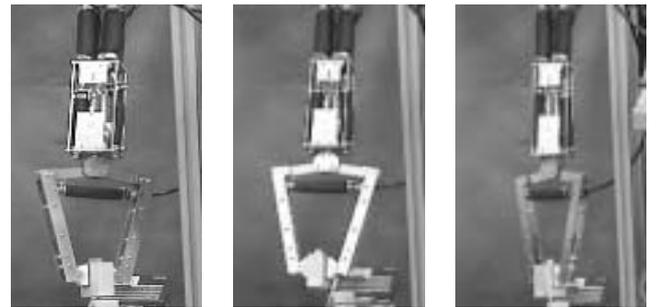


Fig. 5: Turning of rectangular wood

平面上の位置と圧力との比例定数を k で、Z 軸上の位置と圧力との比例定数を k_z とする。位置と圧力のモデルを式 (3) に示す。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k & -k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k & -k \\ k_z & k_z & k_z & k_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix} \quad (3)$$

次に、1 段組 PGA の Mckibben 型空気圧人工筋の圧力と PGA の XY 平面上の位置との関係を求める。Mckibben 型空気圧人工筋の P_1 の圧力を 0MPa から 0.2MPa 、 P_2 の圧力を 0MPa から 0.2MPa へと変化させる。そのときの PGA の XY 平面上位置を 3D ステレオビジョンシステムで計測する。計測結果を Fig. 7 に示す。また 1 段組 PGA の 4 本の Mckibben 型空気圧人工筋に同じように圧力を変化させたときの、Z 軸方向の位置と圧力の関係を測定した結果を Fig. 8 に示す。Fig. 7 により、XY 平面に対する比例定数 k を $165.4\text{mm}/\text{MPa}$ とする。Fig. 8 より、圧力 P と Z 方向成分の関係は比例関係では表せない

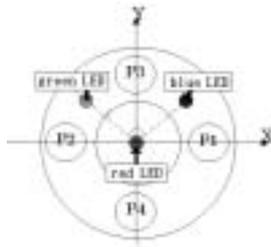


Fig. 6: LED position

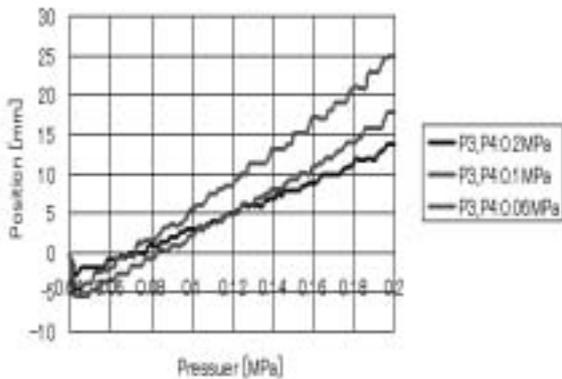


Fig. 7: Relationship between pressure and x,y-components

ことがわかる．そこで， P [MPa] と z [mm] の関係式を，

$$z = \begin{cases} 266.9P + 798.8 & (0\text{MPa} \leq P < 0.1\text{MPa}) \\ 59.3P + 818.7 & (0.1\text{MPa} \leq P \leq 0.2\text{MPa}) \end{cases}$$

とする．したがって，

$$k_z = \begin{cases} 266.9 & (0\text{MPa} \leq P < 0.1\text{MPa}) \\ 59.3 & (0.1\text{MPa} \leq P \leq 0.2\text{MPa}) \end{cases}$$

である．

次に，PGA の Mckibben 型空気圧人工筋の圧力を順に変えていくことで，円を描かせた．XY 平面上の運動を求めた比例定数を用いてシミュレーションした結果と，実際に動かした時の XY 平面上のプレートの中心位置の計測結果を Fig. 9 に示す．Fig. 9 から，初期位置のずれ方と，運動の軌跡のずれ方に同じ傾向が見られるので，求めた比例定数は制御する上で十分に有用であると考えられる．

4 まとめ

本稿では，Mckibben 型空気圧人工筋を用いて試作した 1 自由度空気圧ハンド，手首機構，PGA の Mckibben 型空気圧人工筋の内圧と位置，角度との関係，PGA にハンドを取り付け行った物体操作を示した．今後は，提案する制御則を用いて，PGA のより正確な位置と姿勢の制御と，PGA を多段とした時のより複雑な運動を実現する．

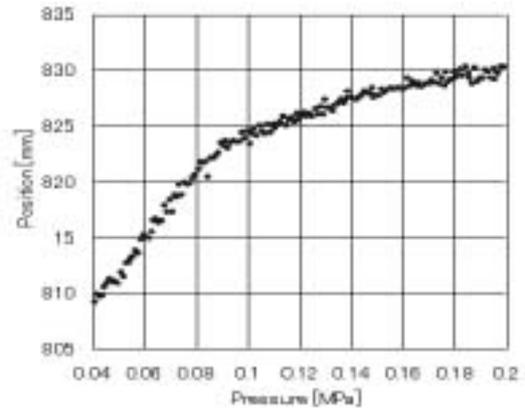


Fig. 8: Relationship between pressure and z-component

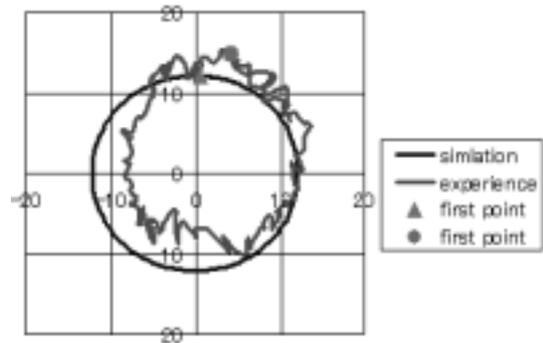


Fig. 9: Simulation and measurement results

参考文献

- 1) 平井慎一，升井友洋，川村貞夫:複数の単一チューブから構成される空気圧群アクチュエータの開発，日本ロボット学会誌 Vol.20,No.3,pp.299-306，2002.
- 2) Shinichi Hirai, Kiyoto Shimizu, and Sadao Kawamura, Vision based MotionControl of Pneumatic Group Actuators, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.3, pp.2842-2847, Wasington D.C., May, 2002.
- 3) 清水清人，白井美和子，平井慎一，川村貞夫，空気圧群アクチュエータの 3 次元運動制御，計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会予稿集，Vol.3, pp.73-74, 2002.
- 4) 白井美和子，清水清人，平井慎一，川村貞夫，Mckibben 型空気圧人工筋を用いた空気圧群アクチュエータの試作と運動制御，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 予稿集，2003.