

弾性チューブから構成される空気圧群アクチュエータの運動制御

平井 慎一，清水清人，川村 貞夫
立命館大学 ロボティクス学科

Vision-based Motion Control of Pneumatic Group Actuators

Shinichi Hirai, Kiyoto Shimizu, and Sadao Kawamura

Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.

Abstract – A vision-based approach to the motion control of pneumatic group actuators is presented. Sensing of plate locations consisting of the pneumatic group actuator is essential to cope with the variation of elastic tubes of the actuator. Plate locations are measured by a vision system and the motion of the actuator is controlled using a roughly identified relationship between air pressure imposed on individual tubes and the plate locations.

Keywords: actuator, pneumatic, vision, motion, control

1. はじめに

多様な運動が可能な空気圧アクチュエータとして、著者らは空気圧群アクチュエータ (pneumatic group actuator 略してPGA) を提案した [1]。空気圧群アクチュエータとは、プレート間に配置されている複数の単一運動チューブから構成されるアクチュエータである。個々のチューブに与える空気圧を制御することにより、複数の運動自由度を実現することができる。空気圧群アクチュエータの運動を制御するためには、空気圧の非線形性やヒステリシス、構成要素であるチューブの特性のばらつきに対応する必要がある。本報告では、視覚を用いて、空気圧群アクチュエータの運動を制御する手法を提案する。

2. 空気圧群アクチュエータ

空気圧群アクチュエータは、複数のプレートとプレート間を接続する複数の単一運動チューブから構成される。Fig.1に、プロトタイプを示す。Fig.1-(a)に示すプロトタイプは、固定プレート、運動プレートの二枚のプレートと、プレート間の三本のシリコンチューブから構成される。このプロトタイプを、一段空気圧群アクチュエータ (single-stage pneumatic group actuator) とよぶ。Fig.1-(b)に示すプロトタイプは、固定プレート、中間プレート、運動プレートの三枚のプレートと、六本のシリコンチューブから構成される。三本のチューブは固定プレートと中間プレートの間に、残り三本のチューブは中間プレートと固定プレートの間に配置されている。このプロトタイプを、二段空気圧群アクチュエータ (double-stage pneumatic group actuator) とよぶ。三段、五段のプロトタイプを、それぞれ Fig.1-(c), Fig.1-(d) に示す。

3. 二段空気圧群アクチュエータの運動学

Fig.2に示すように、二段群アクチュエータは、運動プレートの傾きを変化させることができる。また、Fig.3に示すように、運動プレートを水平に保ったまま、運動プレートの位置を変化させることができる。

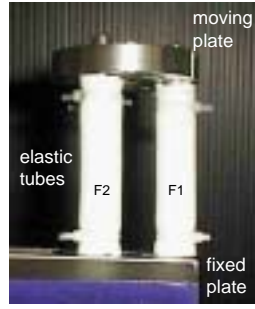
結局、二段群アクチュエータは、軸まわりの回転以外の運動自由度を実現することができる。三段以上の群アクチュエータも、同様の運動自由度を有する。したがって、二段群アクチュエータの運動制御が基本である。

二段群アクチュエータの運動制御を導くために、二段群アクチュエータの運動学を定式化する。Fig.4に示すように、二段群アクチュエータの固定プレートに座標系 $O_0 - x_0y_0z_0$ を、中間プレートに座標系 $O_1 - x_1y_1z_1$ と $O_2 - x_2y_2z_2$ を、運動プレートに座標系 $O_3 - x_3y_3z_3$ と $O_4 - x_4y_4z_4$ を設定する。チューブ F1, F2, F3 に加えられる圧力を、それぞれ p_1, p_2, p_3 で表す。座標系 $O_0 - x_0y_0z_0$ に対する原点 O_1 の位置ベクトルは、圧力 p_1, p_2, p_3 に依存する。そこで、原点 O_1 の位置ベクトルを、 $r(p_1, p_2, p_3)$ で表す。同様に、座標系 $O_0 - x_0y_0z_0$ に対する座標系 $O_1 - x_1y_1z_1$ の回転行列は、 $R(p_1, p_2, p_3)$ と表すことができる。したがって、座標系 $O_0 - x_0y_0z_0$ と座標系 $O_1 - x_1y_1z_1$ の座標変換は、次式で与えられる。

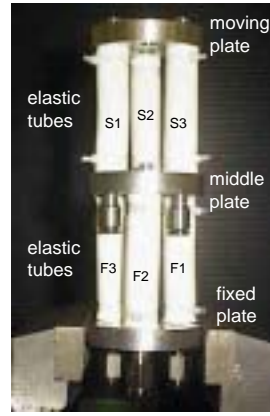
$$\begin{bmatrix} x_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(p_1, p_2, p_3) & r(p_1, p_2, p_3) \\ \mathbf{o}_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{o}_3 は3次の零ベクトルである。チューブ S1, S2, S3 に加えられる圧力を、それぞれ p_4, p_5, p_6 で表す。チューブ F1, F2, F3 と S1, S2, S3 を対応させると、座標系 $O_0 - x_0y_0z_0$ は $O_2 - x_2y_2z_2$ に、座標系 $O_1 - x_1y_1z_1$ は $O_3 - x_3y_3z_3$ に対応する。したがって、一段目の運動特性と二段目の運動特性が同一であると仮定すると、座標系 $O_2 - x_2y_2z_2$ と座標系 $O_3 - x_3y_3z_3$ の座標変換は、次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(p_4, p_5, p_6) & r(p_4, p_5, p_6) \\ \mathbf{o}_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$



(a) single-stage PGA



(b) double-stage PGA



(c) 3-stage PGA



(d) 5-stage PGA

Fig. 1: Prototypes of pneumatic group actuator

すなわち，一段目の運動特性を定める関数 $r(p_1, p_2, p_3)$ と $R(p_1, p_2, p_3)$ を用いて，二段目の運動特性を表すことができる．座標系 $O_1 - x_1 y_1 z_1$ と座標系 $O_2 - x_2 y_2 z_2$ の座標変換，ならびに座標系 $O_3 - x_3 y_3 z_3$ と座標系 $O_4 - x_4 y_4 z_4$ の座標変換は，それぞれ，

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \mathbf{o}_3 \\ \mathbf{o}_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \mathbf{o}_3 \\ \mathbf{o}_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_4 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

で与えられる．行列 A は， z 軸まわり角度 π の回転を表す行列であり， $A = \text{diag}(-1, -1, 1)$ で与えられる．(1)~(4) 式より，座標系 $O_0 - x_0 y_0 z_0$ と座標系 $O_4 - x_4 y_4 z_4$ の座標変換を求めることができる．この座標変換が，二段群アクチュエータの運動学を与える．

4. 二段空気圧群アクチュエータの運動制御

本節では，二段空気圧群アクチュエータの運動制御則を導く．ただし，鉛直平面内の平面運動のみを扱う．チューブ F2 と F3 に加えられる圧力が等しい，すなわち， $p_2 = p_3$ と仮定する．さらに，チューブ S2 と S3 に加えられる圧力が等しい，すなわち， $p_5 = p_6$ と仮定する．このとき，中間プレートと運動プレートは， $x_0 - z_0$ 平面内で運動する．座標系 $O_0 - x_0 y_0 z_0$ と座標系 $O_1 - x_1 y_1 z_1$ の座標変換は， y_0 軸まわり角度 θ_1 の回転と並進変位 $[r_{x1}, 0, r_{z1}]^T$ で与えられる．座標 r_{x1}, r_{z1} と角度 θ_1 は，圧力 p_1, p_2 の関数である．すなわち，

$$r_{x1} = r_{x1}(p_1, p_2), r_{z1} = r_{z1}(p_1, p_2), \theta_1 = \theta_1(p_1, p_2). \quad (5)$$



(a) 0.00MPa



(b) 0.05MPa



(c) 0.09MPa



(d) 0.12MPa

Fig. 2: Bend motion of double-stage PGA

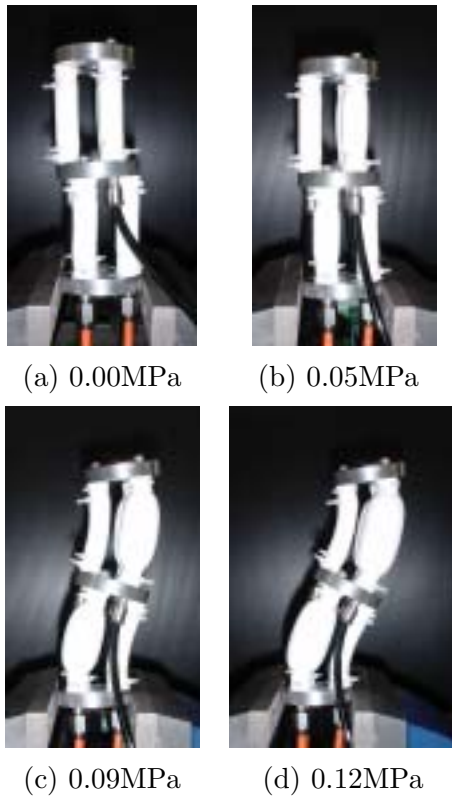


Fig. 3: Translational motion of double-stage PGA

同様に，座標系 $O_2 - x_2y_2z_2$ と座標系 $O_3 - x_3y_3z_3$ の座標変換は， y_2 軸まわり角度 θ_2 の回転と並進変位 $[r_{x2}, 0, r_{z2}]^T$ で与えられる．一段目の運動特性と二段目の運動特性が同一であると仮定すると，

$$r_{x2} = r_{x1}(p_4, p_5), r_{z2} = r_{z1}(p_4, p_5), \theta_2 = \theta_1(p_4, p_5). \quad (6)$$

座標系 $O_0 - x_0y_0z_0$ において表した運動プレートの位置を $[x, z]^T$ ，運動プレートの y_0 軸回りの回転角を θ とすると，

$$\begin{aligned} x &= r_{x1} - C_1 r_{x2} + S_1 r_{z2} \\ z &= r_{z1} + S_1 r_{x2} + C_1 r_{z2} \\ \theta &= \theta_1 - \theta_2 \end{aligned} \quad (7)$$

である．ここで，(5)(6)(7) 式を線形化し，まとめると，

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta z \\ \delta \theta \end{bmatrix} = A_{3 \times 6} B_{6 \times 4} \begin{bmatrix} \delta p_1 \\ \delta p_2 \\ \delta p_4 \\ \delta p_5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

が得られる．ただし，

$$A_{3 \times 6} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & S_1 r_{x2} + C_1 r_{z2} & -C_1 & S_1 & 0 \\ 0 & 1 & C_1 r_{x2} - S_1 r_{z2} & S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

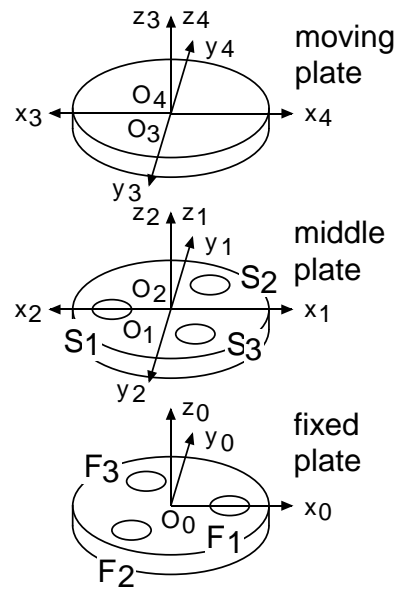


Fig. 4: Frames on double-stage PGA

$$B_{6 \times 4} = \begin{bmatrix} \partial r_{x1}/\partial p_1(p_1, p_2) & \partial r_{x1}/\partial p_2(p_1, p_2) & 0 & 0 \\ \partial r_{z1}/\partial p_1(p_1, p_2) & \partial r_{z1}/\partial p_2(p_1, p_2) & 0 & 0 \\ \partial \theta_1/\partial p_1(p_1, p_2) & \partial \theta_1/\partial p_2(p_1, p_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \partial r_{x1}/\partial p_1(p_4, p_5) & \partial r_{x1}/\partial p_2(p_4, p_5) \\ 0 & 0 & \partial r_{z1}/\partial p_1(p_4, p_5) & \partial r_{z1}/\partial p_2(p_4, p_5) \\ 0 & 0 & \partial \theta_1/\partial p_1(p_4, p_5) & \partial \theta_1/\partial p_2(p_4, p_5) \end{bmatrix}$$

行列 A は二段群空気圧アクチュエータのヤコビ行列，行列 B は圧力に対する各段の運動特性を表す．ここで， $C_{3 \times 4} = A_{3 \times 6} B_{6 \times 4}$ と定義し，粗いモデルに基づく運動制御則の考え方を適用すると，次式で表される繰り返し制御則が得られる．

$$p^{k+1} = p^k + \alpha C_{3 \times 4}^\# (q^d - q^k) \quad (9)$$

ただし， $p^k = [p_1^k, p_2^k, p_4^k, p_5^k]^T$ は，繰り返し回数 k における各チューブの空気圧， $q^k = [x^k, y^k, \theta^k]^T$ は，繰り返し回数 k における運動プレートの位置と姿勢， $q^d = [x^d, y^d, \theta^d]^T$ は，運動プレートの位置と姿勢の目標値を表す．また， $C_{3 \times 4}^\#$ は行列 $C_{3 \times 4}$ の疑似逆行列，スケーリング係数 α は正の定数である．運動プレートの位置と姿勢の現在値 q^k は，空気圧群アクチュエータを撮影した画像より計算する．したがって，(9) 式により，次の繰り返しにおけるチューブの圧力値 p^{k+1} を計算し，空気圧システムへの指令値とすることができる．

5. 実験結果

チューブの外径は 14[mm]，内径は 10[mm]，長さは 60[mm] である．チューブは，硬度 #28 のシリコンゴムから，鋳造により製作する．プレーンチューブの変形特性を，Fig.5 に示す．Fig.5-(a) にチューブの伸び率，すなわちチューブ両端の距離の増加率を，Fig.5-(b) にチューブの膨らみ率，すなわちチューブの最大

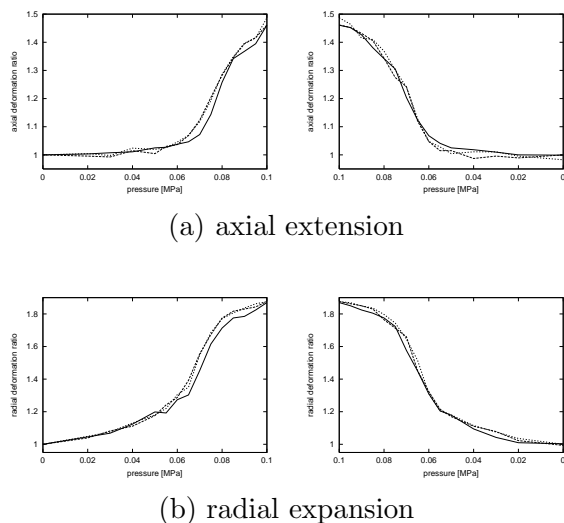


Fig. 5: Deformation of plain tube

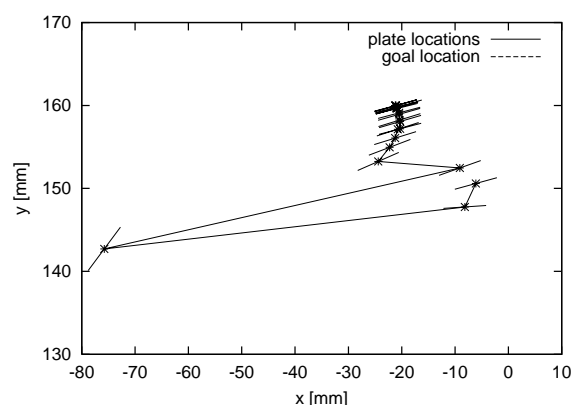


Fig. 6: Bend motion control of double-stage PGA

径の増加率を表す．左側のグラフは，印加圧力を増加させたときの特性，右側のグラフは，印加圧力を減少させたときの特性を表す．チューブの伸び率，膨らみ率ともに，0.2 弱のばらつきがあること，ヒステリシスがあることがわかる．

前節で述べた制御則を用いて，二段空気圧群アクチュエータの運動制御を行う．運動プレート中心の座標と水平面からの角度で，運動プレートの位置と姿勢を表す．運動プレートに二個のマーカーを貼り付け，撮影画像からマーカーの位置を検出する．二個のマーカーの位置から，運動プレートの位置と姿勢を計算する．

図 6 に，曲げ運動を制御した結果を示す．初期の位置・姿勢は $q = [-6.1, 150.6, -0.4]^T$ であり，目標の位置・姿勢を $q^d = [-20, 160, 10]^T$ で与える．スケール係数は $\alpha = 0.25$ ，制御系のサンプリングタイムを $1.0[\text{sec}]$ ，繰り返し回数を 20 回と設定し，運動制御を行ったところ，最終の位置・姿勢として $q = [-20.99, 159.77, 9.93]^T$ が得られた．この場合は，位置，姿勢ともに目標近くに到達していることがわかる．

図 7 に，並進運動を制御した結果を示す．初期の位置・姿勢は $q = [-6.1, 150.6, -0.4]^T$ であり，目標の

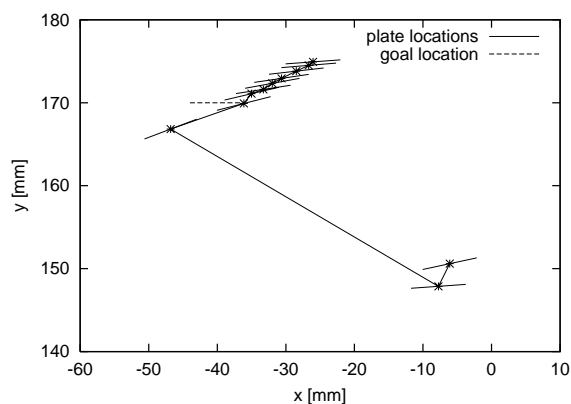


Fig. 7: Translational motion control of double-stage PGA

位置・姿勢を $q^d = [-40, 170, 0]^T$ で与える．スケール係数は $\alpha = 0.1$ ，制御系のサンプリングタイムを $1.0[\text{sec}]$ ，繰り返し回数を 10 回と設定し，運動制御を行ったところ，最終の位置・姿勢として $q = [-36.99, 160.25, 6.83]^T$ が得られた．位置，姿勢ともに誤差が大きいことがわかる．

6. おわりに

本報告では，視覚を用いて空気圧群アクチュエータの運動を制御する手法を提案した．提案した手法は，空気圧群アクチュエータの詳細なモデルを必要としない．最終位置と姿勢の誤差が大きい原因として，1) チューブの特性のばらつきが大きい，2) 一段目と二段目の運動特性が異なるという点が挙げられる．本報告では，シリコンゴムを鋳造することによりチューブを製作しているため，特性のばらつきが大きくなる．また，提案した制御則では，一段目と二段目の運動特性が同一であると仮定した．実際は，重力の影響により一段目と二段目の運動特性が異なる．今後の課題は，1) 運動特性のばらつきが小さいペローズチューブを導入する，2) チューブを線状物体でモデリングし，運動制御則を導くことである．

本研究は，日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業プロジェクト，理工領域「マイクロメカトロニクス・ソフトメカニクス」の一環として実施した．

【参考文献】

- [1] Hirai, S., Masui, T., and Kawamura, S., *Prototyping Pneumatic Group Actuators Composed of Multiple Single-motion Elastic Tubes*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 4, pp.3807–3812, Seoul, May, 2001