

平井 慎一, 升井 友洋, 川村 貞夫 (立命館大学)

Shinichi HIRAI, Tomohiro MASUI, and Sadao KAWAMURA

Ritsumeikan Univ., Kusatsu, Shiga 525-8577

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.

*Key Words:* actuator, pneumatic, vision, motion, control

## 1. はじめに

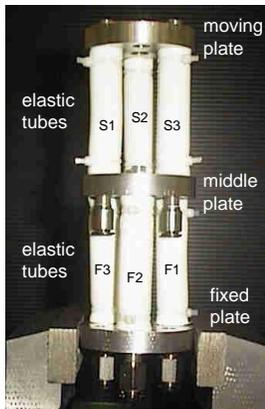
多様な運動が可能な空気圧アクチュエータとして、著者らは空気圧群アクチュエータを提案した<sup>(1)</sup>。空気圧群アクチュエータの運動を制御するためには、空気圧の非線形性やヒステリシス、構成要素であるチューブの特性のばらつきに対応する必要がある。本報告では、視覚を用いて、空気圧群アクチュエータの運動を制御する手法を提案する。

## 2. 空気圧群アクチュエータ

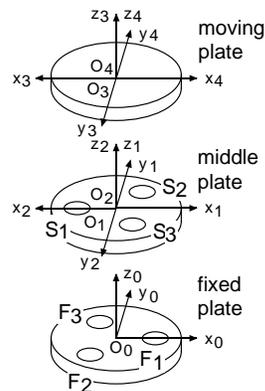
空気圧群アクチュエータは、複数のプレートとプレート間を接続する複数の単一運動チューブから構成される。Fig.1-(a) に示すプロトタイプは、固定プレート、中間プレート、運動プレートの三枚のプレートと、六本のシリコンチューブから構成される。三本のチューブは固定プレートと中間プレートの間に、残り三本のチューブは中間プレートと固定プレートの間に配置されている。このプロトタイプを、二段空気圧群アクチュエータ (double-stage pneumatic group actuator) とよぶ。

## 3. 二段空気圧群アクチュエータの運動学

二段群アクチュエータの運動学を定式化する。Fig.1-(b) 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



(a) double-stage actuator



(b) frames on plates

Fig.1 Prototype of pneumatic group actuator

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。

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

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  $O_1 - x_1y_1z_1$  と座標系  $O_2 - x_2y_2z_2$  の座標変換、ならびに座標系  $O_3 - x_3y_3z_3$  と座標系  $O_4 - x_4y_4z_4$  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  $\pi$  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  $O_0 - x_0y_0z_0$  と座標系  $O_4 - x_4y_4z_4$  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 $\theta_1$ 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 $\theta_1$ は,圧力 $p_1, p_2$ の関数である.すなわち,

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

同様に,座標系 $O_2 - x_2 y_2 z_2$ と座標系 $O_3 - x_3 y_3 z_3$ の座標変換は, $y_2$ 軸まわり角度 $\theta_2$ 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しているので,

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

座標系 $O_0 - x_0 y_0 z_0$ 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 $\theta$ 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,

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

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

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 $\alpha$ 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

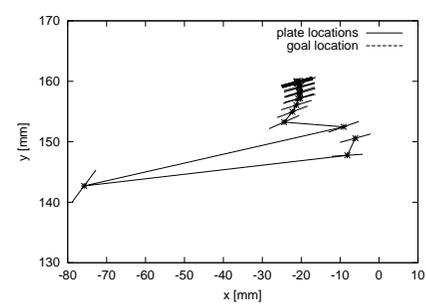


Fig.2 Bend motion control of double-stage PGA

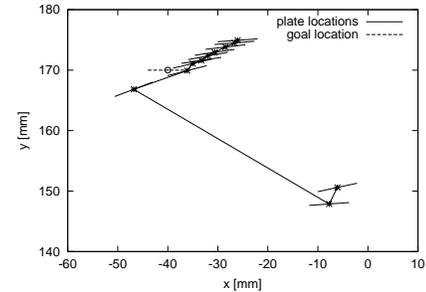


Fig.3 Translational motion control of double-stage PGA

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

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を貼り付け,撮影画像からマーカ位置を検出する.二個のマーカ位置から,運動プレートの位置と姿勢を計算する.

Fig.2に,曲げ運動を制御した結果を示す.初期の位置・姿勢は $q^0 = [-6.1, 150.6, -0.4]^T$ であり,目標の位置・姿勢を $q^d = [-20, 160, 10]^T$ で与える.スケーリング係数は $\alpha = 0.25$ ,制御系のサンプリングタイムを $1.0[sec]$ ,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 $q^{final} = [-20.99, 159.77, 9.93]^T$ 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.

Fig.3に,並進運動を制御した結果を示す.初期の位置・姿勢は $q^0 = [-6.1, 150.6, -0.4]^T$ であり,目標の位置・姿勢を $q^d = [-40, 170, 0]^T$ で与える.スケーリング係数は $\alpha = 0.1$ ,制御系のサンプリングタイムを $1.0[sec]$ ,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 $q^{final} = [-36.99, 160.25, 6.83]^T$ が得られた.この場合は,位置,姿勢ともに誤差が大きい.

## 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.運動精度の向上が,今後の課題である.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, to be presented, Seoul, April, 2001