複数の単一運動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

平井 慎一, 升井友洋, 川村貞夫 立命館大学 ロボティクス学科

Prototyping Pneumatic Group Actuators Composed of Multiple Single-motion Elastic Tubes

Shinichi Hirai, Tomohiro Masui, and Sadao Kawamura Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.

Abstract - In this article, we will develop pneumatic actuators composed of multiple elastic tubes. Elastic tubes with mechanical constraints have a capability of performing a single various motion while multiple motions cannot be performed. Actuators composed of single motion tubes can realize multiple motions by controlling air pressure imposed on individual tubes. We will present the concept of group actuators and will develop their prototypes. We will demonstrate the behavior of two prototypes; single-stage group actuator.

keywords: pneumatic, actuator, motion, deformation

1. はじめに

パワー重量比が高いアクチュエータは,様々な分野 で求められている.たとえば,リハビリテーションや スポーツトレーニングでは,人間の運動を支援する機 械システムの開発が進められている.このような機械 システムは,人間に装着して使用されるため,アクチュ エータのパワー重力比は高くなくてはならない.また, エンターテイメント用の機械システムは,複雑で滑ら かな運動を必要とする.このような機械システムには, パワー重量比が高いアクチュエータが不可欠である. 従来の機械システム設計では,アクチュエータは回

従来の機械システム設計では,アクチュエータは回 転運動か直動運動に代表される簡単な運動を生成し,ギ ア,カム,リンク機構等の伝達機構を通して,簡単な 運動を望みの運動に変換する.伝達機構の重量は一般 に大きく,アクチュエータと伝達機構を含むトータル システムのパワー重量比が小さくなる結果となってい た.したがって,伝達機構を用いることなく,望みの 運動を生成することが可能なアクチュエータシステム が望まれる.

様々な単一運動を生成する空気圧アクチュエータとして,braided actuator[1,2],Flexator[3],HRA[4], twister[5]が提案されている.これらのアクチュエー タは,弾性シェルとシェル上に張られている機械的な 拘束から成り,印加された空気圧を指定の運動に変換 する.したがって,空気圧で膨張する弾性シェルに,機 械的な拘束を埋め込むことにより,様々な運動を直接 生成することが可能になると考えられる.しかしなが ら,このような弾性シェルは,単一の運動を生成するこ とができるが,複数の運動や複雑な軌道を生成するこ とができない.曲げ二自由度を有する空気圧アクチュ エータとして,複数のチャンパーから構成されている, FMA が提案されている[6].FMA は小型のアクチュ エータであり,発生力の絶対値が小さく,また並進の 自由度は実現できない.

本報告では,複数の単一運動チューブから構成され る空気圧群アクチュエータを開発する.空気圧群アク チュエータは,各々のチューブに加えられる空気圧を 制御することにより,複数の運動や複雑な軌道を実現 することができる.まず,単一運動アクチュエータの







Fig.2: Examples of combined constraints

挙動を調べる.次に,空気圧群アクチュエータの概念 を述べ,二つのプロトタイプ,一段空気圧群アクチュ エータと二段空気圧群アクチュエータを試作する.最 後に,二つのプロトタイプの挙動を,実験的に調べる.

2. 単一運動チューブ

チューブの側面に線状物体を付加し,チューブに拘 束を付加する.このとき,弾性チューブ上の任意の線 拘束は,いくつかの基本的な拘束の組み合わせで記述 できる.これを,基本拘束とよぶ.弾性チューブ上の 基本拘束を,Fig.1に列挙する.基本拘束は,図に示す ように拘束位相を用いて記述できる[7].Fig.1に示す XF,YF,XmF,YmFは,軸に平行な線拘束を面の一部 に付加する場合,CFは,拘束を円周方向に付加する場合,





(a) constraints (

(c) 0.12MPa

Fig.3: Single motion actuator XF-CF



(a) constraints (b) 0.05MPa (c) 0.10MPa

Fig.4: Single motion actuator RF

RF, LF は, 拘束を螺旋方向に付加する場合, r180XF, 1180XF は, 一つの線拘束を螺旋状に付加する場合を表 す.Fig.2に, 組み合わせ拘束の例を示す.組合せ拘束 は,基本拘束の組で表すことができる.

機械的な拘束を付加した弾性チューブに空気圧を加 えると,様々な単一運動を直接実現することができる. たとえば,Fig.1に示す拘束 XFを付加した弾性チュー ブは,空気圧を加えると曲げ運動を生じる.このよう な弾性チューブを,単一運動チューブ(single-motion tubes)とよぶ.弾性チューブ上に適切な拘束を埋め込 むことにより,様々な単一運動,たとえば伸び運動,縮 運動,曲げ運動,ねじり運動を直接生成することがで きる.

単一運動チューブ XF-CF の運動を, Fig.3に示す.弾 性チューブはシリコンゴム製である.チューブの内径は 10mm,外径は18mm,厚みは4mmである.Fig.3-(a) に示すように,軸方向の線拘束が一本,円周方向の線拘 束が複数本,チューブに埋め込まれている.Fig.3-(b) に0.05MPaの空気圧を加えたときの運動を,Fig.3-(c) に0.12MPaの空気圧を加えたときの運動を示す.これ より,単一運動チューブ XF-CF は,曲げ運動を生成す ることがわかる.単一運動チューブ RF の運動を,Fig.4 に示す.Fig.4-(a)に示すように,複数の線拘束がらせ ん状に埋め込まれている.Fig.4-(b),(c)に,それぞれ 0.05MPa,0.10MPaの空気圧を加えたときの運動を示 す.これより,単一運動チューブ RF は,チューブの軸 まわりのねじり運動を生成することがわかる.

Fig.5に,偏心チューブの運動を示す.チューブの内 径は10mm,外径は18mmである.穴の中心と外側面 の中心はずれており,チューブの厚さは,図の左側で 6mm,右側で2mmである.線拘束は埋め込まれてい ない.図に示すように,偏心チューブは曲げ運動を生 成する.

次に,拘束を有する弾性チューブの運動を,FEM





(a) natural state

(b) 0.10MPa

Fig.5: Eccentric rubber tube





(a) XF–CF

(b) RF–LF



Fig.6: Results of FEM simulation

を用いて解析する.FEM においては,弾性チューブ を表す要素と,線拘束を表す要素を用いる.単一運動 チューブ XF-CF に対する計算結果を,Fig.6-(a) に示 す.拘束 XF は曲げ運動と直径方向の膨張を弾性チュー ブに生じさせ,拘束 CF は直径方向の膨張を弾制する ことがわかる.単一運動チューブ LF-RF に対する計算 結果を,Fig.6-(b) に示す.図に示すように,単一運動 チューブ LF-RF には,縮み運動が生じていることがわ かる.単一運動チューブ r180XF に対する計算結果を, Fig.6-(c) に示す.単一運動チューブ r180XF には,並 進運動が生じていることがわかる.単一運動チューブ r180XF-1180XF に対する計算結果を,Fig.6-(d) に示 す.このチューブには,二本の線拘束が,逆向きのら せん状に埋め込まれている.図に示すように,単一運 動チューブ r180XF-1180XF には,並進運動が生じるこ とがわかる.

上記の実験結果ならびにシミュレーション結果より, 弾性チューブに線拘束を埋め込むことにより,あるいは 弾性チューブの形状を適切に設計することにより,様々 な単一運動を実現することができる.

3. 空気圧群アクチュエータ

前節で述べたように,チューブ上の機械的拘束やチ ューブの形状を適切に設定することにより,様々な単一 運動を実現することができる.しかしながら,個々の チューブは,単一の運動を実現できるのみであり,複 数の運動や複雑な軌道を実現することはできない.複



Fig.7: Prototypes of pneumatic group actuator



(a) tubes on fixed plate (b) tubes on middle plate

Fig.8: Tube symbols

数の運動や複雑な軌道を実現する一つの手法は,可変 拘束[8]を導入することである.可変拘束は,その曲げ 剛性や伸び剛性を外部信号に従って変化させることが できる.したがって,チューブに埋め込まれた拘束の 剛性を制御することができ,各々の拘束の剛性を変化 させることで,複数の運動や複雑な軌道を実現するこ とができる.ただし,現状の可変拘束の剛性は,空気 圧で膨張する弾性チューブに適用できるほど大きくは ない.複数の運動や複雑な軌道を実現する別の手法は, 単一運動チューブを組み合わせ,個々のチューブの圧 力を制御することである.複数の単一運動チューブか ら構成されるこのようなアクチュエータを,空気圧群 アクチュエータ(pneumatic group actuators)とよ

空気圧群アクチュエータは , 複数のプレートとプレ-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.空気圧群アクチュエータのプロトタイプを Fig.7に 示す.Fig.7-(a) に示すプロトタイプは,固定プレート と運動プレートの二枚のプレートと,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.プレートはアルミニウム製で,直径 55mm である.シリコンチューブは,継ぎ手を介してプ レートに接続される.継ぎ手の直径は,10mm あるいは 12mm であり,前節で開発した単一運動チューブのいず れでもプレートに接続することができる . Fig.7-(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.

プロトタイプ上の単一運動チューブに、Fig.8に示す
記号を付ける.固定プレート上のチューブは、F1、F2、F3と表され、中間プレート上のチューブは、S1、S2、S3と表される.一段群アクチュエータは、チューブF1、F2、F3を含む.二段群アクチュエータは、チュープF1、



Fig.9: Topologically different pressure patterns of single-stage group actuator



Fig.10: Topologically different pressure patterns of double-stage group actuator

F2,F3,S1,S2,S3を含む.プロトタイプの運動は, これらのチューブに加えられる空気圧で与えられる.

-段群アクチュエータの運動を定性的に調べる.Fig.9 に,個々のチューブに加えられる空気圧のパターンを示 す.黒色のチューブに空気圧が加圧され,白色のチュー ブには加圧されない.チューブ配置の対称性を考慮す ると,図に示す4通りの加圧パターンがあることがわ かる.三本のチューブがいずれもプレインチューブ,す なわち,拘束を持たない一様なチューブである場合,パ ターンF1,F2-F3 は運動プレートの曲げ運動,パター ンF1-F2-F3 は伸び運動を生じる.

次に,二段群アクチュエータの運動を定性的に調べ る . Fig.10に , 個々のチューブに加えられる空気圧のパ ターンを示す.チューブ配置の対称性を考慮すると,図 に示す 20 通りの加圧パターンがあることがわかる.以 下,パターン F2-F3 を F23 と略記する.三本のチュー ブがいずれも線拘束を含まないプレインチューブであ る場合,パターンF1,F23,S1,S23は,運動プレート の曲げ運動を生じる.パターン F1-S23, F23-S1は,第 一段と第二段が同じ方向の曲げ運動を生じるため,さら に大きい曲げ変形を生じる.パターン F1-S1, F23-S23 においては,第一段の曲げ運動と第二段の曲げ運動が 打ち消し合い,結果として運動プレートに並進運動が 生じる . パターン F1-S2 , F1-S12 , F23-S2 , F23-F12 では,第一段が曲がる方向と第二段が曲がる方向が一 致しないので,ねじれを伴う曲げ運動が生じる.パター ン F123 , S123 , F123-S123 は , 伸び運動を生じる . パ ターン F1-S123, F23-S123, F123-S1, F123-S23 に おいては,一方の段で曲げ運動,他方の段で伸び運動 が生じるので,運動プレートには伸びを伴う曲げ運動 が生じる.以上の考察より,プレーンチューブから構 成される二段空気圧群アクチュエータは,運動プレー



Fig.11: Behavior of single-stage group actuator

トの曲げ運動,伸び運動,並進運動を生成することが できるが,縮み運動と軸まわりのねじり運動を実現で きないことがわかる.ただし,予圧を加えた状態を初 期状態とみなし,空気圧を減ずることにより,縮み運 動を実現できるとみなせる.

<u>4. 変形実験</u>

本節では,空気圧群アクチュエータのプロトタイプ の挙動を,実験的に評価する.まず,一段群アクチュ エータの挙動を調べる.固定プレートと運動プレート を,外径14mm,内径10mm,長さ60mmのプレーン チューブで接続する.プロトタイプの重量は,195gで ある.Fig.11に示すように各チューブに圧力を加える と,図に示す運動が得られた.これより,運動プレー トの中心が円弧に沿って運動することがわかる.運動 プレートはFig.11-(a)において最も傾き,そのときの 最大傾き角は20°である.

次に,二段群アクチュエータの挙動を調べる.プロ トタイプの重量は290gである.Fig.12-(a)に,二段群 アクチュエータの自然状態を示す.一部のチューブに 0.08MPaの空気圧を加え,他のチューブには空気圧を 加えない.チューブF2のみに0.08MPaの空気圧を加え たときの挙動を,Fig.12-(b)に示す.チューブS1,S2,, S3には空気圧が加えられていないので,運動プレー トと中間プレートは平行である.チューブS2のみに 0.08MPaの空気圧を加えたときの挙動を,Fig.12-(c) に示す.チューブF1,F2,,F3には空気圧が加えられ ていないので,中間プレートは自然状態のままである. 二本のチューブF2,S2に0.08MPaの空気圧を加えた ときの挙動を,Fig.12-(d)に示す.この空気圧パター ンは,Fig.10に示すF1-S1に一致する.以上,実験的 に示されたように,二段群アクチュエータは,運動プ レートの並進運動を生成することができる.

Fig.13に,二段群アクチュエータの曲げ運動の例を 示す.三本のチュープF1,F2,S3に,0.00MPaから 0.12MPaまでの空気圧を等しく加える.Fig.13-(a)~ (h)に示すように,曲げ運動が生じることがわかる. Fig.13-(h)において曲げ角が最大となり,その最大曲 げ角は80°である.

Fig.14に,二段群アクチュエータの並進運動の例を 示す.四本のチューブF1,F2,S1,S2に,0.00MPaか ら0.12MPaまでの空気圧を等しく加える.Fig.14-(a) ~(h)に示すように,並進運動が生じることがわかる. Fig.14-(h)における最大並進移動量は,プロトタイプ の高さの20%である.





(a) natural state

(b) F2





Fig.12: Behavior of double-stage group actuator



(a) 0.00MPa



(e) 0.09MPa



(b) 0.05MPa

(f) 0.10MPa



(c) $0.07 \mathrm{MPa}$



(g) $0.11\mathrm{MPa}$



(d) 0.08MPa



(h) 0.12MPa





Fig.14: Translational motion of double-stage group actuator

二段空気圧群アクチュエータは,曲げ運動と並進運動 を生成できることが示された.

<u>5. おわりに</u>

本報告では、空気圧群アクチュエータの概念を提案し、 そのプロトタイプを試作した.まず、単一運動チュー ブの挙動を、実験とFEMシミュレーションにより調 べた.チューブに埋め込む拘束を適切に与えることに より、曲げ運動、伸び運動、縮み運動、並進運動、ね じり運動を実現する単一運動チューブを実現できるこ とがわかった.次に、空気圧群アクチュエータのプロ トタイプを試作した.プレーンチューブから成る一段 群アクチュエータと二段群アクチュエータの挙動を定 性的に解析し、実験的に評価した.その結果、二段群 アクチュエータが、曲げ運動と並進運動の両方を実現 する能力を持つことが示された.

今後の課題として,(1)視覚フィードバックを用い た運動制御,(2)可動範囲の測定,(3)発生力の計測が 挙げられる.空気圧群アクチュエータの運動制御にお いては,チュープ特性のばらつきに対処して,個々の チューブに与える空気圧を設定する必要がある.そこ で,視覚フィードバックを導入し,粗いモデルを用い た位置決め制御則[9]の考え方を適用して,空気圧群ア クチュエータの運動を制御することを試みている.ま た,本報告では,群アクチュエータに線拘束を含まな いプレーンチューブを用いた.拘束を有するチューブ や偏心チューブも,群アクチュエータに使用すること ができる.これらのチュープを含む群アクチュエータ の開発し,その挙動を調べることも今後の課題である.

謝辞

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】

- Chou, C. P. and Hannaford, B., Static and Dynamic Characteristics of McKibben Pneumatic Artificial Muscles, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.1, pp.281–286, San Diego, May, 1994
- 2) Tsagarakis, N. and Caldwell, D. G., Improved Modelling and Assessment of pneumatic Muscle Actuators, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3641–3646, San Francisco, April, 2000
- Ouerfelli, M., Kumar, V., and Harwin, W., An Inexpensive Pneumatic Manipulator for Rehabilitation Robotics, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.1, pp.636–641, Atlanta, May, 1993
- 4) Shimizu, T., Hayakawa, Y., and Kawamura, S., Development of a Hexahedron Rubber Actuator, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2619–2624, Nagoya, May, 1995
- Paynter, H. M., Low-Cost Pneumatic Arthrobots Powered by Tug-and-Twist Polymer Actuators, Proc. Japan-U.S.A. Symp. on Flexible Automation, Vol.1, pp.107–110, Otsu, July, 1996
- 6) 鈴森, フレキシブルマイクロアクチュエータに関する研究(第1報3自由度アクチュエータの静特性), 日本機械学会論文集, Vol.55, No.518, pp.2547-2552, 1989

- ishi S., and Kawamura S., Qualitative Synthesis of Deformable Cylindrical Actuators through Constraint Topology, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol.1, pp.197-202, Takamatsu, October, 2000
- 8) Tabata, T., Konishi, S., Cusin, P., Ito, Y., Kawai, F., Hirai, S., and Kawamura, S., *Microfabricated Tunable Bending Stiffness Device*, IEEE MEMS 2000, January, Miyazaki, 2000
- 9) Hirai, S. and Wada, T., Indirect Simultaneous Positioning of Deformable Objects with Multi Pinching Fingers Based on Uncertain Model, Robotica, Millennium Issue on Grasping and Manipulation, Vol.18, pp.3–11, 2000