

# 拘束位相による ゴムチューブ型空気圧アクチュエータの系統的分類

平井 慎一，升井友洋，谷川博紀  
立命館大学 ロボティクス学科

Qualitative Analysis of Deformable Cylindrical Actuators through Constraint Topology  
Shinichi Hirai, Tomohiro Masui, and Hiroki Tanigagawa  
Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.

*Abstract – Behavior of deformable cylindrical actuators is qualitatively investigated with respect to constraint topology. Elastic shells expanded by air pressure have a capability of generating various motion directly by imposing mechanical constraints on the shells. In this paper, we will propose a qualitative analysis of the motion of deformable cylindrical actuators with mechanical constraints.*

*Keywords: pneumatic actuators, deformation, linear constraints, topology, qualitative reasoning*

## 1. はじめに

空気圧で膨張する弾性殻に，機械的な拘束を付加することにより，様々な運動を直接実現するアクチュエータが実現できると考えられる [1]．このようなアクチュエータを，変形アクチュエータとよぶ．本報告では，弾性殻に付加する拘束の位相と，実現する運動との関係を定性的に調べる手法を提案する．

## 2. 変形アクチュエータにおける機械的拘束

線状物体を弾性部に接着あるいは埋め込むことにより，変形アクチュエータに線拘束を与える．線状物体の変形は，a) 曲げ，b) 伸縮，c) ねじれ，から成る．線状物体のねじれ変形は，弾性部にねじれを引き起こし，線拘束と弾性体との接合が失われる可能性がある．したがって，ねじれ変形は，線拘束の変形として適当ではない．そこでねじれが生じない線状物体を線拘束として用いる．このような線状物体には，曲げと伸縮が生じるので，Table 1に挙げる三種類の線拘束が考えられる．ファイバは，曲げ変形が起こりやすく，伸縮変形が起こりにくい線状物体である．スライダは，伸縮変形が起こりやすく，曲げ変形が起こりにくい線状物体である．ワイヤは，曲げ変形，伸縮変形ともに起こりにくい線状物体である．ファイバ，スライダ，ワイヤを，Table 1に示す記号で表す．

Table 1: Linear constraints for deformable actuators

線拘束	曲げ	伸縮	記号
ファイバ (fiber)		×	.....
スライダ (slider)	×		_____
ワイヤ (wire)	×	×	_____

## 3. 拘束位相による平面変形の種類

本節では，線拘束を付加した弾性平面を対象とし，付加する線拘束と平面の変形特性との関係を調べる．弾性平面は，二方向の伸縮の自由度と，二方向の曲げの自由度を持つ．平面が有する四つの変形自由度に対して，変形しやすい自由度には記号  $\circ$  を，変形しにくい自由度には記号  $\times$  を付ける．すべての自由度が  $\circ$  の場合は，拘束が全くない弾性平面の変形特性を表す．すべての自由度が  $\times$  の場合は，剛体の特性を意味する．これらの変形特性を除くと，位相的に異なる変形特性は 8 種類ある．線拘束を付加することにより，これら 8 種類の変形特性を実現できるか否かを調べる．

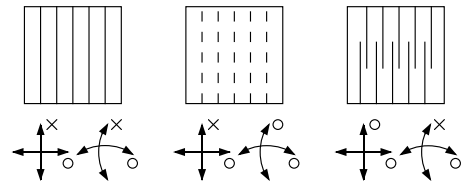


Fig. 1: Deformation of plane with one-directional constraints

一方向に線拘束を付加した場合の変形特性を，Fig.1に示す．たとえば，一方向にファイバを付加した場合，その方向の伸縮が  $\times$ ，それ以外の変形自由度は  $\circ$  である．

次に，二方向に線拘束を付加した場合の変形特性を調べる．系統的に変形特性を導くために，定性推論を適用する．たとえば，Fig.2に示すように，縦方向にワイヤ，横方向にファイバを付加した弾性平面の変形特性を求めよう．Fig.1に示すように，縦方向にワイヤを付加した弾性平面の変形特性は，縦方向の伸縮と曲げが  $\times$ ，横方向の伸縮と曲げが  $\circ$  である．また，横方向

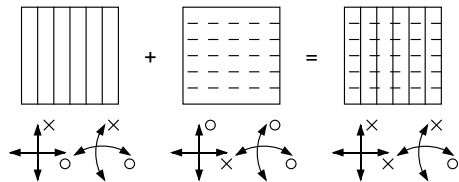


Fig. 2: Superposition of constraints

にファイバを付加した弾性平面の変形特性は、横方向の伸縮が  $x$ 、それ以外の変形自由度が  $\theta$  である。これら二つの線拘束を付加した弾性平面の変形特性は、次のように求めることができる。

- 両方の変形特性が  $\theta$  の場合、変形特性は  $\theta$  である。
- 一方の変形特性が  $x$  の場合、変形特性は  $x$  である。

たとえば、横方向の曲げは、縦方向にワイヤを付加した場合も、横方向にファイバを付加した場合も  $\theta$  である。したがって、これら二つの線拘束を付加した場合、横方向の曲げは  $\theta$  に対応する。縦方向の伸縮と曲げは、縦方向にワイヤを付加した場合  $x$ 、横方向の伸縮は、横方向にファイバを付加した場合  $x$  である。したがって、これら二つの線拘束を付加した場合、縦方向の伸縮と曲げ、横方向の伸縮は  $x$  に対応する。以上のように、一方向に拘束した弾性平面の変形特性を重ね合わせることで、二方向に拘束した弾性平面の変形特性を系統的に求めることができる。

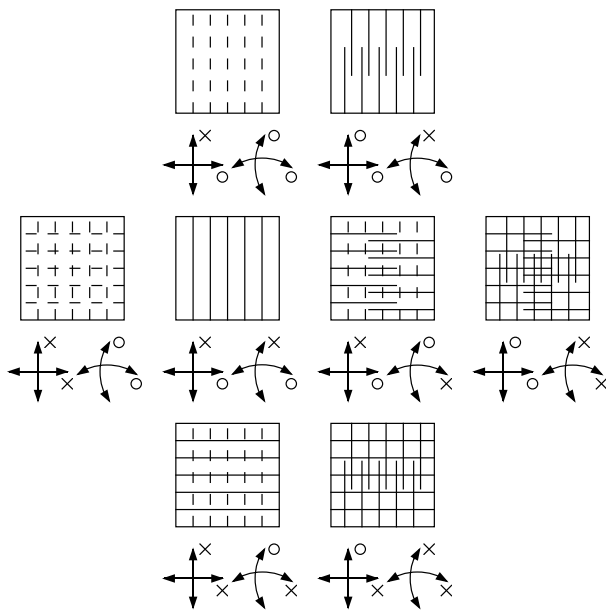


Fig. 3: Deformation of plane for topologically different constraints

一方向に線拘束を付加した弾性平面と二方向に線拘束を付加した弾性平面の変形特性を調べる。その結果、Fig.3に示すように、位相的に異なる8種類の変形特性をすべて実現できることがわかる。すなわち、3種類の線拘束、ワイヤ、ファイバ、スライダを組み合わせることにより、任意の変形特性を有する弾性平面を構成することができる。

#### 4. 変形円筒面の拘束位相

本節では、Fig.4に示す円筒形変形アクチュエータの特性を調べる手法を提案する。円筒形変形アクチュエータの円筒面は、線拘束を付加した弾性体から成る。また、上面と下面は剛体であり、下面は空間に固定されている。内部に空気圧を加えることにより、円筒面が変形し、結果として上面剛体に運動が生じる。そこで、円筒面に付加する線拘束と、上面剛体に生じる運動の自由度との関係を定性的に解析する。

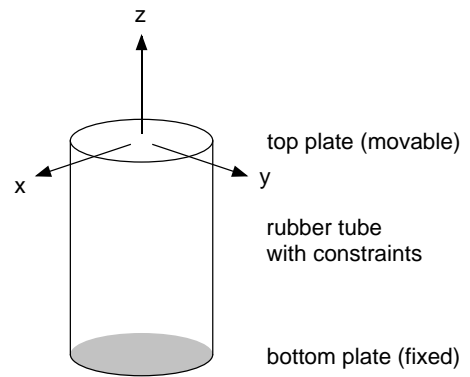


Fig. 4: Cylindrical deformable actuator

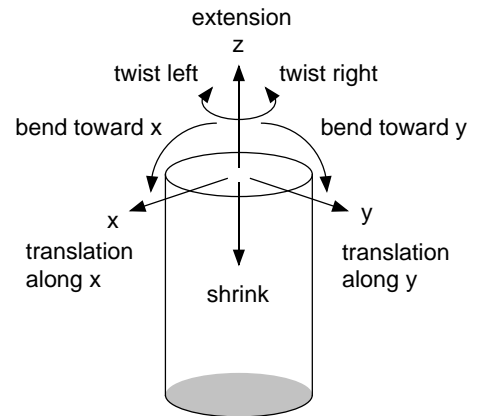


Fig. 5: Qualitative motion elements of cylindrical deformable actuators

まず、円筒形変形アクチュエータの運動を、定性的に表す。Fig.5に示すように、座標軸  $x, y, z$  を定める。このとき、円筒形アクチュエータの上面剛体の運動要素として、定性的に次の8種類が挙げられる。

extension	$z$ 軸正方向への並進運動
shrink	$z$ 軸負方向への並進運動
translation along x	$x$ 軸方向の並進運動
translation along y	$y$ 軸方向の並進運動
bend toward x	$x$ 軸方向への曲がり
bend toward y	$y$ 軸方向への曲がり
twist right	$z$ 軸回り右回りの回転運動
twist left	$z$ 軸回り左回りの回転運動

運動 extension と shrink は、 $z$ 軸方向の並進運動である。軸方向に伸びるか縮むかは、円筒形変形アクチュ

エータの運動を定性的に分析する上で重要であるので、二つの運動を区別する。運動 twist right と twist left は、 $z$ 軸回りの回転運動である。同様の理由で、 $z$ 軸右回りの運動と左回りの運動を区別する。運動 translation along  $x$  ならびに translation along  $y$  は、それぞれ  $x$  軸方向の並進運動、 $y$  軸方向の並進運動を表す。運動 bend toward  $x$  は、 $x$  軸方向への曲がり運動、すなわち  $y$  軸回りの回転運動を表す。運動 bend toward  $y$  は、 $y$  軸方向への曲がり運動、すなわち  $x$  軸回りの回転運動を表す。並進運動 translation along  $x$  ならびに translation along  $y$ 、曲げ運動 bend toward  $x$  ならびに bend toward  $y$  に関しては、円筒形変形アクチュエータの運動を定性的に分析する上で、運動の向きを区別する必要がない。以上の考察より、上面剛体の基本運動として、上述の 8 種類の定性運動を考える。運動パターン  $\times \times \times \times \times$  は、縮み運動が生じることを表す。また、運動パターン  $\times \times \times \times \times \times$  は、伸びと  $y$  軸方向への曲がりと同時に生じることを表す。

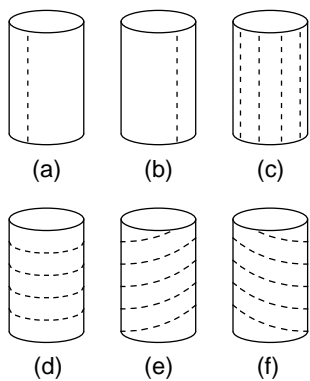


Fig. 6: One-directional fiber constraints on cylinder

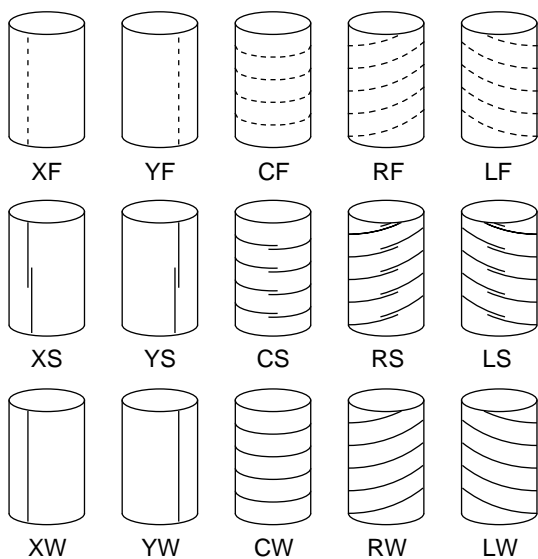


Fig. 7: Basic constraints on cylinder

次に、円筒面に付加する拘束を、定性的に表す。

円筒面の一方向に線拘束を付加する場合を考察しよう。このとき、Fig.6に示す 6 通りの拘束位相がある。Fig.6-(a),(b) は、軸方向拘束を面の一部に付加する場合、Fig.6-(c) は、軸方向拘束を面全体に付加する場合、Fig.6-(d) は、拘束を円周方向に付加する場合、Fig.6-(e)(f) は、拘束を斜め方向に付加する場合を表す。Fig.6-(c) に示す拘束は、Fig.6-(a) に示す拘束と Fig.6-(b) に示す拘束の重ね合わせとして表現できる。したがって、Fig.6-(a)(b)(d)(e)(f) に示す位相が、基本的な拘束位相である。それぞれの位相を、記号 X, Y, C, R, L で表す。拘束位相を表す記号に続いて、拘束の種類を表す記号 F, S, W を記述する。記号 F はファイバ、記号 S はスライダ、記号 W はワイヤを表す。したがって、Fig.7に示す、15 種類の基本拘束が得られる。

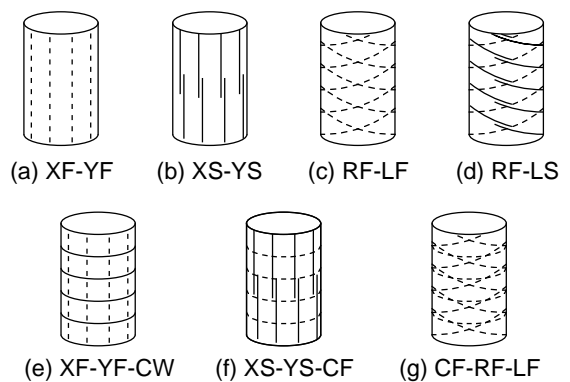


Fig. 8: Examples of combined constraints on cylinder

任意の拘束は、基本拘束の組み合わせとして表すことができる。たとえば、Fig.8-(a) に示すように、ファイバを軸方向全体に付加する拘束は、XF-YF と表すことができる。また、Fig.8-(d) に示すように、右回りにファイバ、左回りにスライダを付加する拘束は、RF-LS と表すことができる。Fig.8-(f) に示すように、スライダを軸方向全体に、ファイバを円周方向に付加する拘束は、XS-YS-CF と表すことができる。このように、拘束を構成する基本要素を列挙することにより、任意の拘束位相を記述することができる。

### 5. 円筒面変形の定性推論

本節では、円筒形変形アクチュエータの挙動を定性的に推論する手法について考察する。円筒面内に空気圧を加えると、円筒面の体積が増加する。付加する線拘束の自由度と体積の増加を考慮に入れて、上面の運動の自由度を定性的に導く。このとき、上面の運動を一意に決定できるとは限らない。たとえば、拘束位相 XF に対する上面の運動の例を、Fig.9に表す。ここでは、に対応する運動の自由度を表している。定性的には、Fig.9に示す二つの運動の可能性がある。Fig.9-(a) は、ファイバが内側に曲がり、円筒殻に曲げが生じる変形、すなわち  $\times \times \times \times \times \times \times$  を表す。Fig.9-(b) は、ファイバが外側に曲がり円筒殻が膨張する可能性、すなわち  $\times \times \times \times \times \times \times$  を表す。このように運動パ

ターンを一意に決定できない場合、起こりうる可能性をすべて列挙する。

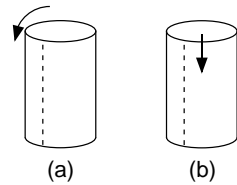


Fig. 9: Enumeration of behavior possibilities

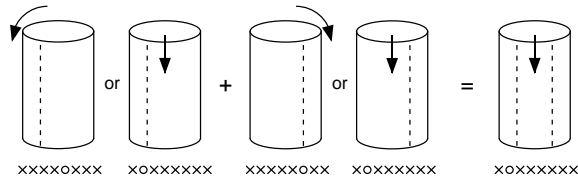


Fig. 10: Superposition of cylindrical constraints

二つの拘束位相  $CT_1$  と  $CT_2$  の重ね合わせを  $CT_{1+2}$  で表す。拘束位相  $CT_1$  において可能な運動パターンを  $P_{1i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n_1$ )、拘束位相  $CT_2$  において可能な運動パターンを  $P_{2j}$  ( $j = 1, 2, \dots, n_2$ ) とする。このとき、拘束位相  $CT_{1+2}$  において可能な運動パターンの集合は、1) 運動パターン  $P_{1i}$  と  $P_{2j}$  の重ね合わせ  $P$  を計算し、2) 重ね合わせ  $P$  が  $\times \times \times \times \times \times \times \times$  でないときには、 $CT_{1+2}$  の運動パターンとして登録する、という手続きにより計算することができる。Fig.10に、拘束位相 XF と YF の重ね合わせを計算した例を示す。拘束位相 XF の運動パターンは、Fig.10に示すように、 $P_{XF,1} = \times \times \times \times \times \times \times \times$  または  $P_{XF,2} = \times \times \times \times \times \times \times \times$  である。対称性を考慮すると、拘束位相 YF の運動パターンは、 $P_{YF,1} = \times \times \times \times \times \times \times \times$  または  $P_{YF,2} = \times \times \times \times \times \times \times \times$  であることがわかる。運動パターン  $P_{XF,i}$  と  $P_{YF,j}$  との重ね合わせを計算すると、 $P_{XF,2}$  と  $P_{YF,2}$  の重ね合わせが  $\times \times \times \times \times \times \times \times$ 、それ以外の重ね合わせは  $\times \times \times \times \times \times \times \times$  を与える。したがって、拘束位相 XF-YF の運動パターンとして、Fig.10に示すように、 $\times \times \times \times \times \times \times \times$  が得られる。拘束位相 XF を有するアクチュエータ、拘束位相 YF を有するアクチュエータとともに、実際には運動パターン  $\times \times \times \times \times \times \times \times$  を示さない。しかしながら、定性推論を通して Fig.10に示す結果を得るためには、定性的には可能であるが実際には生じない運動パターン  $P_{XF,2}$  ならびに  $P_{YF,2}$  を考慮しておかなければならない。以上に示すように、実際にその変形特性を示すか否かに関わらず、定性的に可能な変形をすべて列挙することが、定性推論を進める上で必要である。

対称性より、拘束位相 YF の挙動は、XF の挙動から導くことができる。同様に、拘束位相 LF の挙動は、RF の挙動から導くことができる。また、ワイヤは、ファイバとスライダの重ね合わせとみなすことができる。したがって、6種類の拘束位相 XF, CF, RF ならびに XS, CS, RS の挙動が与えられれば、Fig.7に示す基本拘束の挙動を導くことができ、結果としてすべての拘束位相に対する挙動を推論することが可能である。

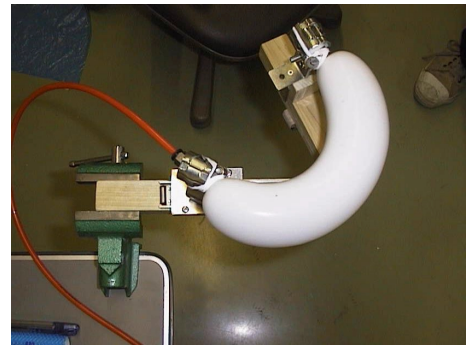


Fig. 11: Experiment on trial production

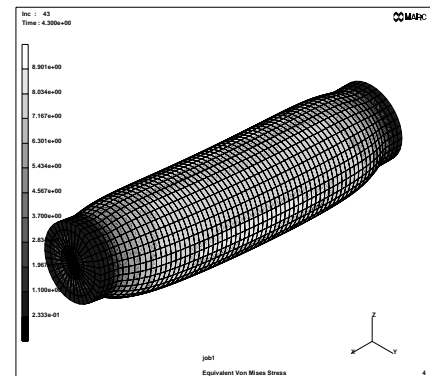


Fig. 12: FEM simulation of deformable actuator

## 6. おわりに

本報告では、円筒形の弾性殻に付加する線拘束と、実現しうる運動との関係を定性的に調べる手法を提案した。本手法を用いると、基本的な拘束位相における変形から、円筒面上のすべての拘束位相に対して運動を導くことができる。現在、Fig.11に示すように、変形アクチュエータの試作を行うとともに、Fig.12に示すように、有限要素解析ソフトウェアを用いて、変形アクチュエータの定量的な解析を進めている。実験結果やシミュレーション結果と定性推論の結果との比較を通して、定性的解析の妥当性を検証することが今後の課題である。なお、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「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] 川村, 平井, 変形を伴うアクチュエータの構造的分類, 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1049-1050, 1997