# 4 自由度インフレータブルロボットアームの手先剛性楕円体制御

〇竹中 孝太(九州大学),河村 晃宏(九州大学),倉爪 亮(九州大学)

# Stiffness Ellipsoid Control of a 4-DoF Inflatable Robotic Arm

○ Kota TAKENAKA (Kyushu University), Akihiro KAWAMURA (Kyushu University) , and Ryo KURAZUME (Kyushu University)

Abstract : Inflatable robots are flexible and lightweight. This kind of robots have an advantage in terms of safety on contact with humans and environments compared with conventional metal robots. In our previous work, we have proposed a method that controls both motion and joint stiffness of inflatable robotic arms. This paper proposes a stiffness ellipsoid control method for inflatable robots.

### 1. 緒言

インフレータブル構造とは、空気などを注入することに より膨らむ袋状の構造のことである.インフレータブルロ ボットは、この構造をリンクやアクチュエータに有してお り、従来の金属製のロボットに比べ、軽量で柔軟という特 徴を持つ.そのため、人や環境との接触時においても安全 性が高く、人の近傍で作業を行うサービスロボットとして の活用が期待されている.しかし、従来のロボットと構造、 動特性が大きく異なるため、それらを考慮した制御手法が 必要となる.我々の研究グループではこれまでに、拮抗型 アクチュエータを有する3自由度インフレータブルロボッ トアームを開発し、関節剛性を考慮した手先位置制御手法 を提案している [1].

本研究では、上述の制御手法を拡張し、4 自由度インフ レータブルロボットアームの手先剛性楕円体制御手法を提 案する.本制御手法では、関節剛性と手先剛性楕円体との 関係性を用いるだけでなく、各関節にかかる摩擦を考慮す ることで、精度の高い手先剛性楕円体制御を目指す.

# 2. 4 自由度インフレータブルロボットアーム

本研究で開発中の4自由度インフレータブルロボット アームを Fig.1 に示す.リンクやアクチュエータは厚さ 0.1 [mm] の低密度ポリエチレンシートを熱溶着することで 製作する.このロボットアームの各関節は,拮抗的に配置 されたインフレータブルアクチュエータに差圧を与えるこ とで関節トルクを出力する.本ロボットアームでは,各関 節にエンコーダが搭載されていないため,関節角を正確に 計測することができない.そのため,アームの手先に反射 マーカを取り付け,モーションキャプチャシステムによっ て計測した手先位置から逆運動学によって各関節角度を推 定する.



Fig. 1: 4-DoF inflatable robotic arm

#### 3. 制御手法

提案手法の制御フローを Fig.2 に示す.本研究で用いる 各アクチュエータは,拮抗駆動であり,目標トルクと目標 関節剛性を独立に与えることができる [1].関節トルクと関 節剛性を実現する制御手法は先行研究 [1] の手法を利用す るため,本稿では割愛する.本章では,目標とする手先剛 性楕円体から目標関節剛性への変換方法について述べる.

本研究で用いるロボットアームの構成を Fig.3 に示す. 手先座標系 Σ<sub>e</sub> における手先剛性行列を以下のように定義 する.

$$\boldsymbol{K_e} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}$$
(1)

これらの手先剛性行列の成分と剛性楕円体のパラメータの 関係は以下のようになる [3].

$$k_{xx} = A\sin^2\phi + B\cos^2\phi \tag{2}$$

$$k_{yy} = C \tag{3}$$

$$k_{zz} = A\cos^2\phi + B\sin^2\phi \tag{4}$$



Fig. 2: Control flow



(a)xz-plane

(b)xy-plane

Fig. 3: Parameters of stiffness ellipsoid



Fig. 4: Measurement environment for joint stiffness

$$k_{xz} = k_{zx} = (B - A)\sin\phi\cos\phi \qquad (5)$$

$$k_{yz} = k_{zy} = k_{xy} = k_{yx} = 0 (6)$$

本稿で対象とするロボットでは、 $k_{yy}$  に寄与する関節は 1 つのみであるため、 $k_{yy}$  の干渉項は 0 となる.手先座標系 における手先剛性行列  $K_e$  と関節剛性行列  $K_j$  の関係式 は、世界座標系から手先座標系への回転行列  $^wR_e$  を用い ると、以下のようになる [4].

$$\boldsymbol{K_j} = {}^{w}\boldsymbol{J}_{e}^{\top \ w}\boldsymbol{R}_{e} \ \boldsymbol{K_e} \ {}^{w}\boldsymbol{R}_{e}^{\top w}\boldsymbol{J}_{e} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$$
(7)

ただし, <sup>w</sup>*J*<sub>e</sub> は世界座標系における手先位置に関する関節 角のヤコビ行列である.ここで *K<sub>j</sub>* の対角成分を以下のよ うにおく.

$$\boldsymbol{k_j} = (k_{j1}, k_{j2}, k_{j3}, k_{j4})^\top \tag{8}$$



Fig. 5: Measurement environment for stiffness ellipsoid

 $k_j$ の要素  $k_{ji}$ を以下のように表す.

$$k_{ji} = -\frac{\partial(\tau_{ai} - \tau_{\mu i})}{\partial q_i}, \quad i = 1\dots 4$$
(9)

 $\tau_{ai}$  は関節 *i* における関節トルクであり,  $\tau_{\mu i}$  はリンクとア クチュエータの間にかかる摩擦由来のトルクである.この とき,  $\tau_{\mu i}$  を以下のように近似する.

$$\tau_{\mu i} = \alpha \tau_{si} + \beta q_i, \quad i = 1 \dots 4 \tag{10}$$

ただし, *τ<sub>si</sub>* はアクチュエータ間の拮抗するトルク, *q<sub>i</sub>* は関 節角度であり, *α* および *β* は予備実験により求められる定 数である. この予備実験では, Fig.4 のように水平面を駆 動する 1 自由度インフレータブルロボットにおいて, リン クをフォースゲージで押したときの力と角度変化から関節 剛性を算出し, 摩擦による誤差を求める. 式 (9), (10) よ り, 目標関節剛性 *k<sub>d</sub>* は以下のようになる.

$$\boldsymbol{k_d} = (k_{d1}, k_{d2}, k_{d3}, k_{d4})^\top$$
(11)

$$k_{di} = k_{ji} - \frac{\partial(\alpha \tau_{si} + \beta q_i)}{\partial q_i}, \quad i = 1 \dots 4$$
 (12)

この目標関節剛性 k<sub>d</sub> を先行研究の制御手法 [1] に適用する ことで,手先剛性楕円体制御を実現する.

### 4. 手先剛性楕円体測定実験

本章では,提案する制御手法を用いて手先剛性楕円体 制御を行う.このとき,より正確に測定を行うため,重力



Fig. 6: Stiffness ellipsoid at A = 100, B = 10, C = 25[N/m], $\phi = 5\pi/18$  [rad]



Fig. 7: Stiffness ellipsoid at A = 120, B = 20, C = 10[N/m], $\phi = \pi/3$  [rad]

補償トルクを除いた位置制御等の関節トルクの入力はゼロ とする. また、運動中ではなく、静的な状態において剛性 楕円体の計測を行う. 測定環境を Fig.5 に示す. アームの 手先をフォースゲージで押したときの力とモーションキャ プチャシステムにより計測される手先の変位から剛性を 算出する. Fig.6 は A = 100, B = 10, C = 25 [N/m],  $\phi = 5\pi/18$  [rad] とした場合, Fig.7 は A = 120, B = 20,C = 10 [N/m],  $\phi = \pi/3$  [rad] とした場合である. 測定 は、3軸の軸方向のみ行い、その値をもとに測定値の楕円 体を描画している. また本実験では、水平面において計測 した式 (10) 中の α および β を全ての関節角に適応してい る.いずれの目標値においても, x, z方向の剛性は, 目標 値に近い値を実現できていることが分かる.一方, y 方向 の剛性においては、測定値が目標値よりも大きくなってい る.これは、台座の回転機構における摩擦が、予備実験で 用いた関節構造における摩擦より大きいことが原因である と考えられる.

# 5. 結言

4 自由度インフレータブルロボットアームにおける手先 剛性楕円体制御手法を提案し,実際のロボットアームを用 いて剛性楕円体制御および計測を行った.この計測結果か ら,目標となる手先剛性楕円体が実現できていることが分 かった.y方向の剛性についても,他の自由度と同様に事 前に計測を行うことで精度の向上が見込める.

今後は、手先剛性楕円体の対角成分についても測定を行い、より高精度な制御の実現を目指す.また、本制御手法を用いたマニピュレーション等のタスクへの応用を行う.

## 参考文献

- [1] 竹中孝太,河村晃宏,倉爪亮,"極軽量インフレータ ブルロボットアームの関節剛性を考慮した手先位置 制御,"日本ロボット学会第 39 回学術講演会予稿集, 2J4-05, 2021.
- [2] 野間口 直樹,河村 晃宏,倉爪 亮,"拮抗型インフレー タブルアクチュエータの関節剛性を考慮した運動制 御,"計測自動制御学会 SI 部門講演会 SICE-SI2019 予稿集, pp.2884-2885, 2019.
- [3] 大島 徹, 熊本 水頼"二関節筋機能を有するロボット アーム", 日本機械学会論文集(C編), 61 巻 592 号,pp.4696-4703,1995.
- [4] J. K. Salisbury, "Active stiffness control of a manipulator in Cartesian coordinates," in Proc. Conf. Decis. Control Including Symp. Adaptive Process., pp. 95-100,1980.
- [5] R. Tatara, K. Ebisu, N. Nomaguchi, A. Kawamura, R. Kurazume, and S. Kawamura, "Inflatable Robotic Arm with Overlaid Plastic Sheet Structure," Proc. of the 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 689-694, Paris, 2019.