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

○竹中孝太(九州大学) 河村晃宏(九州大学) 倉爪亮(九州大学)

1. 緒言

少子高齢社会の進行により、福祉業界などにおける人材不足が問題となっている。そこで、ロボットの活用が期待されているが、従来のロボットの多くは金属素材のため高剛性で高重量であり、人や物に接触した際の危険性が高い。その解決策の一つとしてインフレータブル構造を有したロボット注目されている。インフレータブル構造は袋状の構造物で空気などを注入することで内圧を持たせて構造を支持する。インフレータブルロボットは、リンクやアクチュエータにインフレータブル構造を有したロボットであり、非常に柔軟で軽量なため従来のロボットに比べ接触時における危険性が低い。我々の研究グループではこれまでに、1自由度拮抗型インフレータブルアクチュエータの角度制御および関節剛性制御を実現している[1][2]。

本研究では、上述の制御則を拡張し、3自由度インフレータブルロボットアームの手先位置および手先剛性制御手法を提案する.これにより、マニピュレーション時の手先荷重の変化による振動の低減等、アプリケーション毎の最適な剛性を適用することを目指す.

2. 3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3自由度インフレータブルロボットアームを図1に示す.また,アームの自由度構成を図2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している.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.各アクチュエータの圧力は,電空レギュレータと圧力センサにより制御されており,アームの手先に取り付けられた反射マーカによって手先位置の計測が可能である.本ロボットアームでは,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,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.

3. 制御則

提案する制御手法の制御フローを図3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与えることができる.それぞれの導出方法について以下で説明する.

3.1 関節トルクと関節剛性の目標圧力変換

拮抗型アクチュエータの各アクチュエータの目標圧力 P_{d1} , P_{d2} を以下のようにおく.

$$P_{d1} = P_b - \frac{1}{2}P_{df} \tag{1}$$

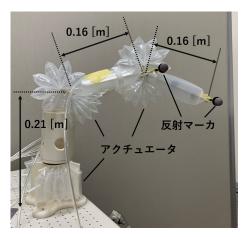


図1 3自由度インフレータブルロボットアーム

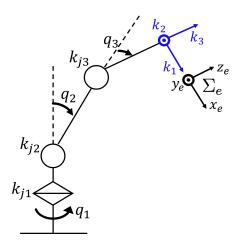


図2 インフレータブルロボットの自由度構成

$$P_{d2} = P_b + \frac{1}{2}P_{df} \tag{2}$$

アクチュエータ間の差圧は P_{df} であり、拮抗する圧力が P_{b} である.このとき,各関節の基準圧 P_{df} と差圧 P_{b} は,目標関節トルク τ_{d} と目標関節剛性 k_{d} を用いて下記のように表すことができる.

$$P_b = \frac{1}{2} (A_1 A_4 - A_2 A_3)^{-1} (A_3 k_d + A_1 \tau_d) \quad (3)$$

$$P_{d\!f} = -(A_1A_4 + A_2A_3)^{-1}(A_4k_d + A_2 au_d)$$
 (4) ただし、

$$A_{1} = (6c_{1}L + 2c_{2})Q$$

$$A_{2} = 3c_{1}Q^{2} + (3c_{1}L^{2} + 2c_{2}L + c_{3})I$$

$$A_{3} = (3c_{1}L + c_{2})Q + (c_{1}L^{3} + c_{2}L^{2} + c_{3}L + c_{4})I$$

$$A_{4} = c_{1}Q^{3} + (3c_{1}L^{2} + 2c_{2}L + c_{3})Q$$

$$Q = diag(q_{1}, q_{2}, q_{3})$$

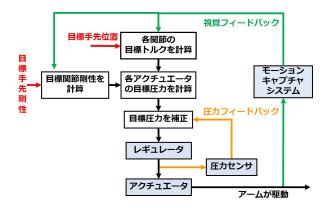


図3 制御フロー

である. c_1 , c_2 , c_3 , c_4 はアクチュエータのトルク特性による定数, L はリンクの膨張角度による定数, q_1 , q_2 , q_3 は関節角度, I は単位行列である.

3.2 目標関節トルクの導出

目標関節トルク τ_d は、視覚フィードバックによる手 先位置制御トルク τ_p と重力補償トルク τ_g からなる. 手先位置制御トルク τ_p を下記に示す.

$$\boldsymbol{\tau}_p = \boldsymbol{J}^{\top} \left(\boldsymbol{K}_{Pv} \boldsymbol{e}(t) + \boldsymbol{K}_{Iv} \int \boldsymbol{e}(t) dt \right)$$
 (5)

$$\boldsymbol{e}(t) = \boldsymbol{r}_d - \boldsymbol{r} \tag{6}$$

ただし、

J: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

 $au_p = (au_{p1}, au_{p2}, au_{p3})^{ op}$: 手先位置制御トルク $au_d = (x_d, y_d, z_d)^{ op}$: 目標手先位置 $au = (x, y, z)^{ op}$: 手先位置 au_{Pn}, au_{In} : 比例ゲイン、積分ゲイン

である. 重力補償トルク au_g を以下に示す.

$$\tau_{g1} = 0 \tag{7}$$

 $\tau_{g2} = -m_2 g l_{g2} \sin q_2$

$$-m_3gl_{g2}\sin q_2 - m_3gl_{g3}\sin (q_2 + q_3) \qquad (8)$$

$$\tau_{g3} = -m_3 g l_{g3} \sin(q_2 + q_3) \tag{9}$$

ただし,

 $\boldsymbol{\tau}_{q} = (\tau_{q1}, \tau_{q2}, \tau_{q3})^{\top}$

l_{a2}, l_{a3} : 関節位置と重心の距離

 m_2, m_3 : 各リンク,アクチュエータの重量の和

である. 目標関節トルク au_d は以下のようになる.

$$\tau_d = \tau_p + \tau_g \tag{10}$$

3.3 目標関節剛性の導出

図 2 において k_{j1} , k_{j2} , k_{j3} はそれぞれの関節における関節剛性である。また, k_1 , k_2 , k_3 は手先剛性の x,

y, z方向の成分である. このとき,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と手先座標系の関係を表す回転行列 $_e^w R$ を用いると,以下のようになる [3].

$$K_{J} = J^{\top} {}_{e}^{w} R K_{e} {}_{e}^{w} R^{\top} J$$
 (11)

ただし,

$$\mathbf{K}_{\mathbf{J}} = \operatorname{diag}(k_{j1}, k_{j2}, k_{j3}) \tag{12}$$

$$\mathbf{K_e} = \operatorname{diag}(k_1, k_2, k_3) \tag{13}$$

である.このとき目標関節剛性ベクトル k_d は以下のようになる.

$$\mathbf{k_d} = (k_{j1}, \ k_{j2}, \ k_{j3})^{\top}$$
 (14)

3.4 圧力フィードバック制御

電空レギュレータはゲインや感度などの個体差を高精度に揃えるのが難しく、定常応答に振動が生じたり、目標圧力に対して定常偏差が生じる場合がある。そこで本研究では各アクチュエータに圧力センサを接続し、目標圧力を補正する圧力フィードバック制御を行う[1].制御則は式(15)のように PID 制御を用いた式で表される.

$$P_{c} = P_{d} + K_{Pp}e_{p}(t) + K_{Ip} \int e_{p}(t)dt + K_{Dp}\frac{d}{dt}e_{p}(t)$$
(15)

$$\boldsymbol{e}_{p}(t) = \boldsymbol{P}_{d} - \boldsymbol{P} \tag{16}$$

ただし,

 P_c :補正目標圧力

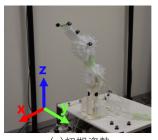
 P_d : 目標圧力

P: 現在の圧力

 K_{Pp},K_{Ip},K_{Dp} : 比例ゲイン,積分ゲイン,微分ゲインである.

4. 手先位置制御実験

提案する制御手法を用いて、手先位置制御実験を行った。初期姿勢および目標姿勢を図 4 に示す。目標手先位置は初期手先位置から見て x 軸方向に 0.075 [m], y 軸方向に 0.091 [m], z 軸方向に -0.085 [m] 離れた位置である。手先剛性が $k_1=7$, $k_2=10$, $k_3=3$ [N/m] の場合の偏差は図 5 のようになった。各軸の偏差は 5 [s] 以内に 0.01 [m] 以下となっている。同じ手先剛性、初期位置、目標位置において手先に 50 [g] の重りを吊り下げた場合の偏差は図 6 のようになった。各軸において振動が生じているのがわかる。このとき、手先剛性を $k_1=9$, $k_2=15$, $k_3=5$ [N/m] に大きくした場合の偏差は図 7 のようになった。振動は抑制され、各軸の偏差は 5 [s] 以内に 0.01 [m] 以下となっている。





(a)初期姿勢

(b)目標姿勢

図4 手先位置制御の実験環境

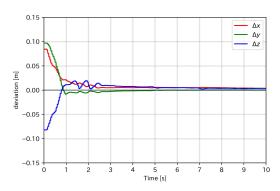


図 5 $k_1 = 7$, $k_2 = 10$, $k_3 = 3$ [N/m] の場合の 手先位置の偏差

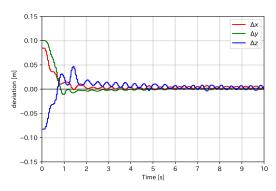


図 6 $k_1 = 7, k_2 = 10, k_3 = 3 [N/m]$ で重りを 吊り下げた場合の手先位置の偏差

5. 結言

本稿では、3自由度インフレータブルロボットの手先位置および手先剛性の制御手法を提案した。また、目標手先剛性を変化させることにより、手先位置制御時において振動の抑制の効果が得られることがわかった。今後は、実際の手先剛性の測定を行い、剛性制御精度の向上を目指す。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適用を行う。

謝辞

本研究の一部は,内閣府が進める「戦略的イノベーション 創造プログラム (SIP) 第2期/フィジカル空間デジタルデー タ処理基盤」(管理法人:NEDO)によって実施されました.

参考文献

[1] R. Tatara, K. Ebisu, N. Nomaguchi, A. Kawamura, R. Kurazume, and S. Kawamura, "Inflatable Robotic Arm with Overlaid Plastic Sheet Structure," Proc. of the

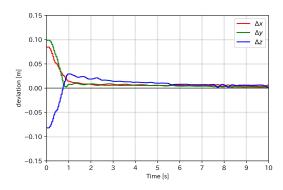


図 7 $k_1 = 9, k_2 = 15, k_3 = 5$ [N/m] で重りを 吊り下げた場合の手先位置の偏差

2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 689-694, Paris, 2019.

- [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] J. K. Salisbury, "Active stiffness control of a manipulator in Cartesian coordinates," in Proc. Conf. Decis. Control Including Symp. Adaptive Process., 1980, pp. 95-100.