

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

野間口 直樹 (九州大学), 河村 晃宏 (九州大学), 倉爪 亮 (九州大学)

Motion and Joint Stiffness Control of an Inflatable Antagonistic Actuator

Naoki NOMAGUCHI (Kyushu University), Akihiro KAWAMURA (Kyushu University),
and Ryo KURAZUME (Kyushu University)

Abstract : Inflatable robots, which are lightweight, soft, and compactable, are suitable for performing daily tasks near humans because of safe contact. We have developed inflatable robotic arms and also proposed motion control method of them so far. However, the joint stiffness of the arms has not been discussed deeply. Therefore, this paper proposes a control method of both motion and joint stiffness of inflatable robotic arms.

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で膨張する袋状の構造である。この構造を用いたロボットは従来の高剛性・高重量なロボットとは異なり、軽量性と柔軟性を持つ。この特性からインフレータブルロボットは宇宙、福祉、医療等の新しい分野での利用が期待されている。これに対し我々はこれまでに、インフレータブル構造を用いた軽量で柔軟な空気圧駆動ロボットアームの開発を行っている [1]。また、運動制御手法の提案も行っており、ロボットの手先の位置制御が可能となっている。このロボット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よって駆動しており、各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している。このとき、差圧を与えるためには一定の基準圧を両アクチュエータに与える必要がある。これまでの研究では、この基準圧が実験的に決定されており、その決定方法は議論されていない。そこで本研究では、任意の関節剛性を実現する基準圧の設定手法を提案する。更に運動制御実験を行い、関節剛性が運動制御時のロボットの挙動に与える影響について考察する。

2. 関節剛性制御則

本研究では、これまでに提案されている運動制御手法 [1] と両立可能な関節剛性決定手法を提案する。インフレータブルロボットアームは、拮抗型アクチュエータによって駆動しているため、冗長性を有している。この冗長性を利用することで、各関節トルクに加えて関節剛性を制御する。以下に関節剛性の導出方法を述べる。

まず、インフレータブルアクチュエータに関する従来研究 [2, 3] から、トルクと内圧、アクチュエータの膨張角度

の関係が下記のように近似される。

$$\begin{aligned}\tau &= (c_1\theta^3 + c_2\theta^2 + c_3\theta + c_4)P + c_5 \\ &= A(\theta)P + c_5,\end{aligned}\quad (1)$$

ただし、 τ と P はトルクと内圧、 c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 はそれぞれ定数を示しており、予備実験において解析済みである。 θ はアクチュエータの膨張によって得られる角度である。各アクチュエータによって発生するトルクを τ_1, τ_2 とおくと、拮抗型アクチュエータによって発生するトルク τ_a は、

$$\tau_a = \tau_2 - \tau_1,\quad (2)$$

であり、関節角が $q = 0$ 近傍で動作する場合には、 $A(\theta_1) \approx A(\theta_2)$ が成り立つため、

$$\tau_a = A(\theta_1)(P_2 - P_1),\quad (3)$$

となる。これはアクチュエータ同士の差圧によってトルクが発生することを示している。従来のインフレータブルアクチュエータの角度制御では、この性質を利用して運動制御のための目標トルクを実現している。つまり、目標トルクから目標の差圧の値 P_{df} を算出し、運動制御を行う。このとき、拮抗型アクチュエータの各目標圧力 P_{d1}, P_{d2} を以下のように与える。

$$P_{d1} = P_b - \frac{1}{2}P_{df}\quad (4)$$

$$P_{d2} = P_b + \frac{1}{2}P_{df},\quad (5)$$

ただし、 P_b は基準圧である。この基準圧は、差圧を与えるために予め両アクチュエータにかけている内圧のことである。従来研究では、出力トルクの範囲を考慮して、実験的に基準圧が決定されていた。本研究では、この基準圧を動的に制御することで、任意の関節剛性を実現する。

関節剛性 K は以下のように求められる。

$$K = -\frac{\partial \tau_a}{\partial q},\quad (6)$$

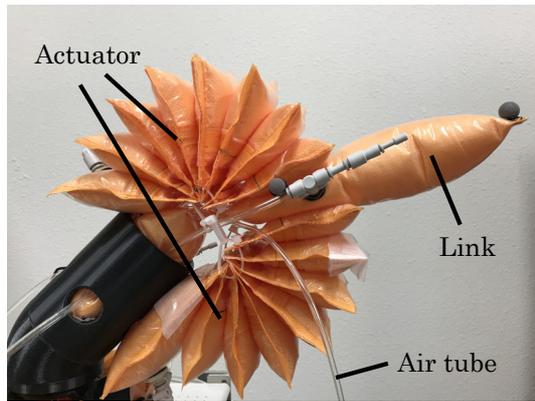


Fig. 1: 1 DOF inflatable arm

ただし, q は関節角である. 各アクチュエータの角度を θ_1 , θ_2 とすると, 関節角 q との関係は以下ようになる.

$$\theta_1 = \pi - \theta_L - q = L - q \quad (7)$$

$$\theta_2 = \pi - \theta_L + q = L + q, \quad (8)$$

ただし, θ_L はリンクが膨張することによって決まる角度である. 式 (6) に式 (1), (7), (8) を代入して計算すると, 関節剛性 K は以下ようになる.

$$\begin{aligned} K &= -\frac{\partial \tau_a}{\partial q} = -\frac{\partial (\tau_2 - \tau_1)}{\partial q} \\ &= (P_1 - P_2) (3c_1 q^2 + 3c_1 L^2 + 2c_2 L) \\ &\quad - (P_1 + P_2) \{ (6c_1 L + 2c_2) q + c_3 \}. \end{aligned} \quad (9)$$

これは, 本アクチュエータの関節剛性がアクチュエータの内圧の差, 和それぞれに影響を受けることが分かる. ここで, 式 (4) および (5) を代入すると,

$$\begin{aligned} K &= -P_{df} (3c_1 q^2 + 3c_1 L^2 + 2c_2 L) \\ &\quad - 2P_b \{ (6c_1 L + 2c_2) q + c_3 \}, \end{aligned} \quad (10)$$

となる. つまり, 基準圧 P_b を下記のように設定することで, 目標関節剛性 K_d を実現できる.

$$P_b = -\frac{P_{df} (3c_1 q^2 + 3c_1 L^2 + 2c_2 L) + K_d}{2 \{ (6c_1 L + 2c_2) q + c_3 \}}. \quad (11)$$

3. 関節剛性制御実験

本実験では, これまでに提案している運動制御則 [1] に加え, 関節剛性の制御を行う. Fig. 1 に示す 1 自由度ロボットアームを用いて角度制御実験を行った. インフレイタブルリンクは非常に軽量なため, 関節剛性の変化による影響が非常に小さい. そのため本実験では, 手先に 211[g] の重りを下げた状態で角度制御を行った. Fig. 2 に各関節

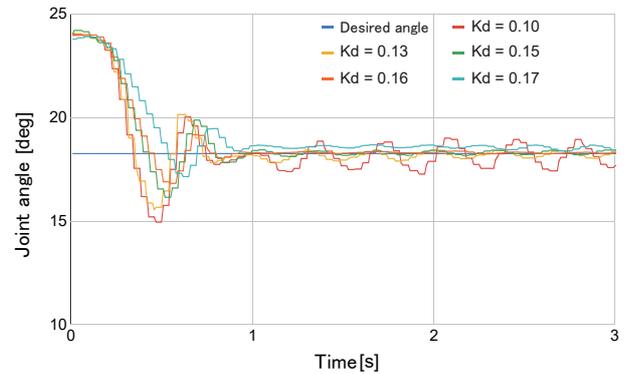


Fig. 2: Transient responses of the joint angles

剛性値 K_d を基準圧によって制御した際の角度制御の挙動を示す. この図から, 関節剛性値を変化させることで, 運動制御時の目標値への収束性の向上, および制振の効果が得られることがわかる.

4. 結言

本研究では, 拮抗型インフレイタブルアクチュエータの運動制御時における関節剛性の制御手法を提案した. 関節剛性の導出方法及び設定方法について述べ, 提案手法の有効性を 1 自由度インフレイタブルロボットを用いた実機実験によって確認した. 今後は運動制御時の最適な関節剛性値の導出及び, 関節剛性制御時の実際の関節剛性の値を実験によって確認する予定である.

謝辞

本研究は, 文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (A) (課題番号 JP18H03764) の支援を受けたものである.

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 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 689-694, Paris, 2019.
- [2] 野間口 直樹, 河村 晃宏, 江頭 飛鳥, 倉爪 亮, 川村, 貞夫, "空気圧駆動インフレイタブルアクチュエータの特性解析と数値シミュレーション," 計測自動制御学会 SI 部門講演会 SICE-SI2016 予稿集, pp. 2461-2463, 2017.
- [3] H. Kim, A. Kawamura, Y. Nishioka and S. Kawamura, "Mechanical design and control of inflatable robotic arms for high positioning accuracy," *Advanced Robotics*, Vol. 32, No. 2, pp. 89-104, 2018.