

1自由度インフレータブルロボットアームの インパクト駆動による高精度関節角度制御

○高原 拓巳 (九州大学), 河村 晃宏 (九州大学), 倉爪 亮 (九州大学)

Precise Joint Angle Control of 1-DoF Inflatable Robotic Arm using Impact-driven Control

○ Takumi TAKAHARA (Kyushu University), Akihiro KAWAMURA (Kyushu University),
Ryo KURAZUME (Kyushu University)

Abstract: The inflatable robotic arm's combination of lightweight design and flexibility provides safety, making it highly suitable for operation in proximity to humans. However, its inherent flexibility and static friction effects complicate precise control. Previous research by the authors has proposed an impact-driven control method for single-degree-of-freedom inflatable robotic arms. In this impact-driven control approach, high-precision motion control is achieved by providing unit input waveforms that specify target joint angle changes. While this method demonstrated reduced convergence time to target joint angles, it fell short of achieving the required precision in joint angle convergence. Therefore, this study conducts a detailed examination of the unit input waveform design methodology and aims to establish an optimal parameter derivation approach.

1. 緒言

インフレータブル構造とは、空気の注入によって膨張する袋状の構造のことである。この構造を用いたインフレータブルロボットは、従来の金属製ロボットと比較し、非常に軽量かつ柔軟であるという特長がある。そのため、接触時における安全性が高く、人の接触可能性が高い環境での活用が期待されている。これまでに様々なインフレータブルロボットが提案されており、その中でもリンクとアクチュエータの両方をインフレータブル構造によって実現した極軽量型インフレータブルロボットは、アーム全体が軽量かつ柔軟なため、安全性を担保しつつ物品受け渡しなどのタスクを行うことが可能である¹⁾²⁾。一方で、インフレータブルロボットでは一般的に、ロボット本体の柔軟性や静止摩擦の影響により、手先位置の高精度な制御が困難という問題があるが、この手先位置精度については十分な議論が行われていない。

この問題に対し著者らはこれまでに、インパクト駆動制御³⁾を導入することを提案している⁴⁾。インパクト駆動制御とは、関節の静止摩擦を超える単位入力波形を瞬間に与え、これを繰り返すことにより高精度な運動制御を行う手法である。これまでに、インパクト駆動を用いた手法をインフレータブルロボットに適用することで、目標関節角度への収束時間の短縮を確認している。しかし一方で、目標関節角度への収束精度については大きな改善はみられなかった。そこで本研究では、単位入力波形についてより詳細に調査し、適切なパラメータの導出手法について報告する。

2. 1自由度インフレータブルロボットアーム

本研究で用いる1自由度インフレータブルロボットアームをFig. 1に示す。リンクおよび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。加えて、アクチュエータは平織構造のポリエチレンシートを用いた二重構造にすることで耐圧を向上させている。関節部のインフレータブル

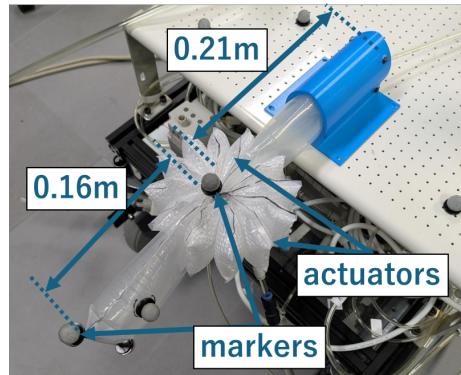


Fig. 1 1-DoF inflatable robotic arm

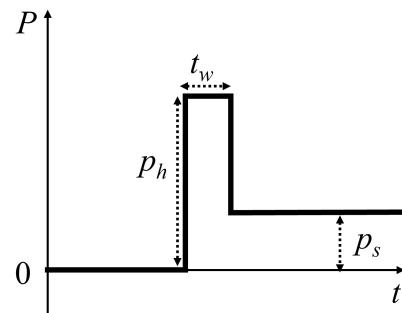


Fig. 2 Unit input waveform for impact-driven control

アクチュエータは拮抗的に配置しており、片側のアクチュエータを加圧、もう片側のアクチュエータを減圧し、差圧を与えることで関節トルクを出力する。また、本ロボットアームは、各関節にエンコーダが搭載されていないため、関節角度を正確に計測することができない。そのため、アームの手先リンクに反射マーカを取り付け、モーションキャプチャーシステムによって計測した手先位置から関節角度を推定する。

3. インパクト駆動制御

インパクト駆動制御とは、単位入力波形による極小の関節角度変化を、繰り返し与えることで高精度な制御を行う手法である。単位入力波形の波形を Fig. 2 に示す。従来の微小時間のパルス入力を行うだけでは、入力後に元の圧力に戻ってしまうため、関節角度変化を維持することができない。よって、パルス入力後に関節角度変化を維持するためにステップ入力を行う。これにより、パルス入力により高精度な関節角度変化を行い、その後のステップ入力によりそれを維持することが可能となる。また、制御対象は拮抗型アクチュエータによって駆動するため、構成する 2 つのアクチュエータには関節角の回転方向に応じて相反する正と負の入力をそれぞれ与える。実際の関節角度制御時には、この波形を繰り返し入力することで運動制御を行う。

3.1 パラメータの決定

単位入力波形のパラメータについては、予備実験により決定する。単位入力波形を決定する要素である、パルス時間幅 t_w 、パルス振幅 p_h 、ステップ振幅 p_s の 3 種のパラメータは、圧力制御を行うレギュレータの最小分解能、動作周波数を参考にした上で、実際のインフレータブルロボットアームの動作から決定する。

パルス時間幅 t_w は可能な限り小さい方が望ましい。モーションキャプチャシステムや制御用 PC のサンプリングレートから、制御の最小時間幅は 5[ms] となる。しかし、レギュレータの応答速度の関係上、最小時間幅での入力では圧力波形が正確に出力されない可能性がある。そのため、複数の時間幅で実験を行い、最適な時間幅を決定する。

続いて、パルス振幅 p_h を決定する。微小な関節角度変位を安定して実現する値が望ましい。レギュレータの空気圧制御による定常振動の振幅が、大きい場合で約 0.05[deg] であることから、目標関節角度変化量は 0.1[deg] とした。使用するレギュレータの最小分解能は 0.2[kPa] 以下であるため、その周辺の複数の値でパルス入力を行い、インフレータブルロボットアームの実際の関節角度変化から、実験的に決定する。

最後に、ステップ振幅 p_s を決定する。ステップ振幅に関しては、上記 2 種を用いたパルス入力による関節角度変位維持のために設計するため、上記 2 種のパラメータの決定後、追加の実験により最適な値を決定する。

4. 実験

4.1 単位入力波形決定実験

本節では、単位入力波形を決定する実験を行った。まず、パルス時間幅 t_w とパルス振幅 p_h の 2 種のパラメータを決定する。それぞれの値を変化させながら、30 回の入力を行い、関節角度変化量を記録した。得られた平均値と標準偏差を Fig. 3 および Fig. 4 に示す。目標関節角度変化量が 0.1[deg] であることから、パルス時間幅 $t_w = 0.010$ 、パルス振幅 $p_h = 0.3$ と決定した。ステップ振幅については、その後の追加実験から、 $p_s = 0.1$ と定めた。

4.2 インパクト駆動による関節角度制御

決定したパラメータを用いて、インパクト駆動による関節角度制御を行った。目標関節角度を 5[deg] と

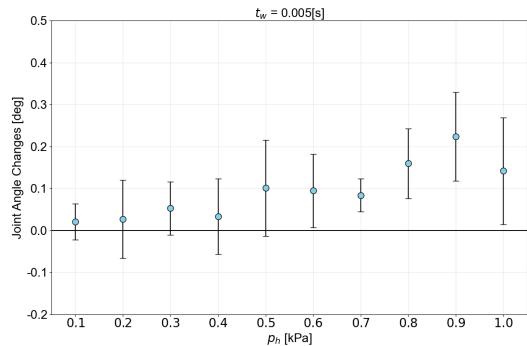


Fig. 3 Joint angle change comparison at $t_w = 0.005$

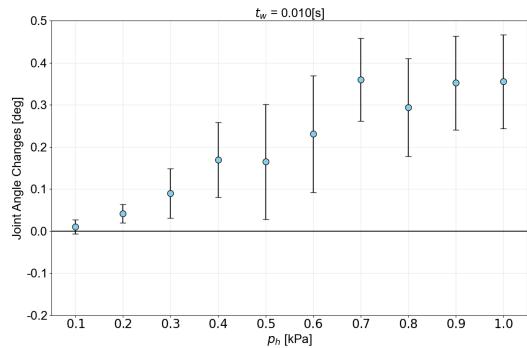


Fig. 4 Joint angle change comparison at $t_w = 0.010$

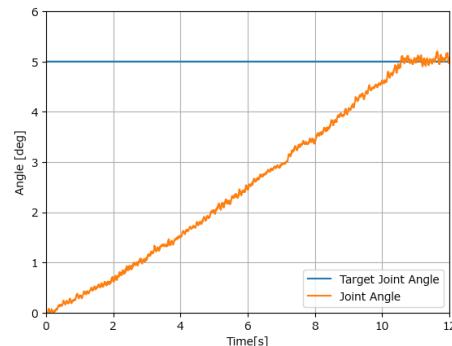


Fig. 5 Transient response of the joint angle under impact-driven control



Fig. 6 Enlarged view of the transient response of the joint angle under impact-driven control

30[deg] の 2 通り設定した結果、いずれの場合でも目標関節角度 ± 0.1 [deg] の範囲内に収束することを確認した。5[deg] の場合の関節角度遷移図を Fig. 5 に、その拡大図を Fig. 6 に示す。

5. 結言

本稿では、インパクト駆動における単位入力波形の決定方法を検討し、パラメータ導出の手法を提案した。さらに、決定した単位入力波形を用いた関節角度制御を行い、その有効性を検証した。今後は、インフレータブルロボットアームの多自由度化を進め、インパクト駆動制御の適用可能性を検証していく予定である。

参考文献

- [1] H. Kim, A. Kawamura, Y. Nishioka, and S. Kawamura: Mechanical design and control of inflatable robotic arms for high positioning accuracy, Advanced Robotics, 32.2, pp. 89–104 (2018).
- [2] 竹中孝太, 河村晃宏, 倉爪亮: 4自由度インフレータブルロボットアームの手先剛性梢円体制御, 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2022 (2022), 1P3–B05.
- [3] 立花京, 山手創一郎, 河村晃宏, 川村貞夫: インパクト駆動と視覚情報を用いた高精度ロボット運動制御, Japanese, 第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2013 (2013), 1G4–4.
- [4] 高原拓巳, 河村晃宏, 倉爪亮: 1自由度インフレータブルロボットのインパクト駆動による運動制御, 第42回日本ロボット学会学術講演会 (2024.9.3-6), pp. 2L1–04.