

1 自由度インフレーターブルロボットの インパクト駆動による運動制御

○高原 拓巳 河村 晃宏 倉爪 亮 (九州大学)

1. 緒言

インフレーターブル構造とは、空気を注入することで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ーブルロボットは、従来のロボットよりも非常に軽量で柔軟であるため、接触時における安全性が高く、人や物の近傍における作業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ー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ーブル構造によって実現したロボットアームがこれまでに提案されている [1, 2]。この制御手法として、アクチュエータが拮抗駆動であることを利用した、手先位置と手先剛性を同時に制御する手法が提案されている [2]。しかし、この手法では、ロボットアーム本体の柔軟性や、静止摩擦の影響、空気圧制御の時間遅れなどにより、手先位置の収束時間が長いという問題がある。

この問題に対し、本研究ではインパクト駆動制御 [3, 4] を導入することで、インフレーターブルアームの動作の収束時間の短縮を目指す。インパクト駆動制御は、金属製のリンク、モータを用いた3自由度ロボットアームに対し、静止摩擦を超える最小の入力を与えることで高精度な運動制御を行う手法である。しかし、本研究で用いるインフレーターブルロボットアームでは、高剛性なリンクを用いたロボットとは動特性が大きく異なる。また、リンクに加え、アクチュエータもインフレーターブル構造を用いており、モータに比べ動作周波数が低い。そのため、従来手法をそのまま適用することはできない。そこで本研究では、収束時間の短縮を目的とした入力波形と、角度制御精度の向上を目的とした入力波形の2種類の入力を利用することでインフレーターブルロボットの運動制御を行う。本制御手法を用いて1自由度インフレーターブルロボットアームの関節角度制御を行い、提案手法の有効性を示す。

2. 1 自由度インフレーター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ーブルロボットアームを図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。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ーブルアクチュエータは拮抗的に配置されており、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、アームの手先リンクに反射マークを取り付け、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関節角度を推定する。

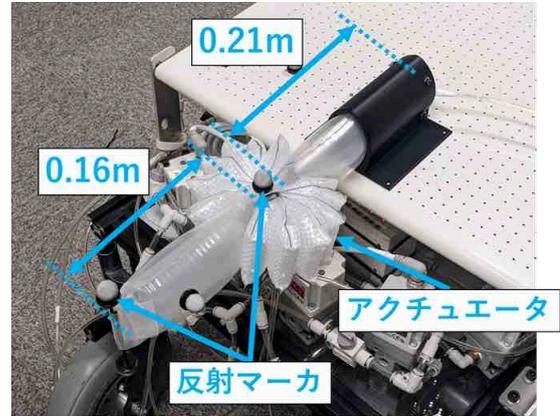


図1 1自由度インフレーターブルロボットアーム

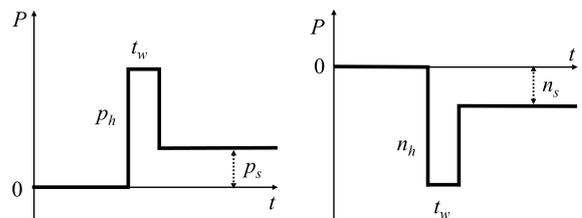


図2 単位入力波形

3. インパクト駆動による運動制御

インパクト駆動制御は、静止摩擦を超える最小の入力を与えることで高精度な運動制御を行う手法である。まず、インパクト駆動における単位入力波形の定義を行う。インパクト駆動はこの波形を繰り返し与えることで運動制御を行う。この入力波形を図2に示す。本研究における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、構成する二つのアクチュエータには関節角の回転方向によって相反する正と負の入力をそれぞれ与える。また、本研究では、収束時間の短縮を目的とした入力波形1と、角度制御精度の向上を目的とした入力波形2の2種類の入力を利用することで関節角度制御を行う。前者では、動作速度が最大となる圧力値を利用し、後者では、静止摩擦を超える最小の入力を設定する。また、拮抗型アクチュエータでは、矩形入力を与えた後、元の圧力へ戻ると角度変化を維持することができない。そのため、矩形入力後にステップ入力へと移行する組合せ型の入力を用いる。図2中の p_s および n_s は、精度向上のための波形では、一定値であるが、収束時間短縮のための波形では、現在の関節角度における関節トルクがゼロとなる圧力値を利用する。関節角度と目標角度の偏差がしきい値以下になった場合に、これら2つの入力波形を切り替える。

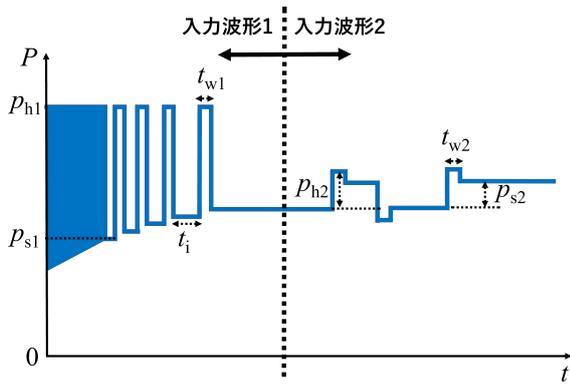


図3 想定している圧力入力波形

表1 入力波形のパラメータ

入力波形 1	
パルスの大きさ p_{h1}, n_{h1}	40[kPa]
パルス幅 t_{w1}	10[ms]
ステップの高さ p_{s1}, n_{s1}	トルクが 0 となる値
入力波形 2	
パルスの大きさ p_{h2}, n_{h2}	0.3[kPa]
パルス幅 t_{w2}	50[ms]
ステップの高さ p_{s2}, n_{s2}	0.2[kPa]

加えて、従来手法 [3] では各入力間のインターバルは一定なのに対して、本研究では以下の式に従って変化させる。

$$t_i = \frac{\alpha}{|q_d - q|} \quad (1)$$

これにより、偏差が大きい場合には高頻度で入力が行われ、連続的な入力を生み出し、逆に偏差が小さい場合には時間間隔が延びることで、離散的に微小な入力を行い、高精度な動作を実現する。以上の手法により想定される入力波形を図3に示す。青く塗りつぶされている部分は、計算された t_i がコンピュータのサンプリングタイムである最小入力間隔時間より短い状態であり、この場合は間隔時間を入力波形として反映することができないため、 $t_i = 0$ とする。図3中の点線は2つの入力波形の切り替えのタイミングを示す。

4. 実験

本実験では、提案手法を用いて図1に示した1自由度インフレーターロボットアームの関節角度制御を行う。このとき、目標関節角度は30[deg]であり、式(1)中のゲインは $\alpha = 0.1$ である。関節角度制御時の関節角度およびアクチュエータの圧力の時系列データを図4, 5に示す。このとき、関節角度が目標値に向かう際、膨張するアクチュエータの目標圧力を P_{d1} 、現在圧力を P_1 とし、収縮するアクチュエータの目標圧力を P_{d2} 、現在圧力を P_2 とする。2種類の入力波形のパラメータを表1に示す。図中の縦の点線は入力波形の切り替えのタイミングを示す。

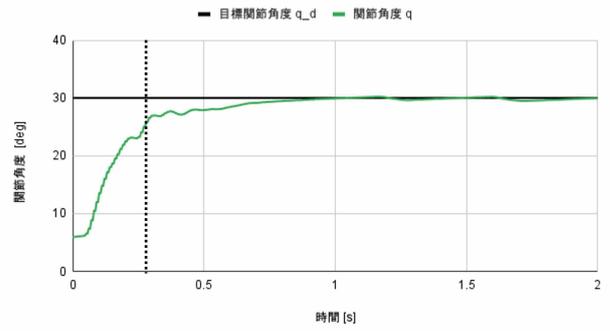


図4 関節角度遷移

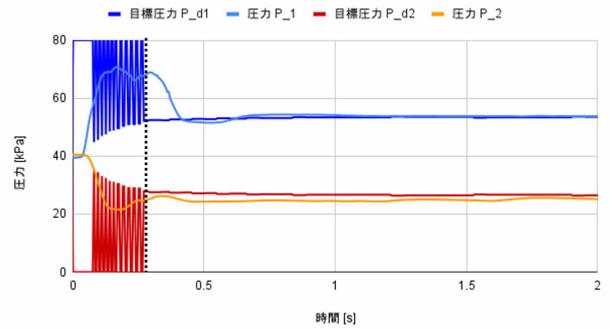


図5 アクチュエータの圧力遷移

提案手法を用いることで、1.0[s] で 0.5[deg] 以内に関節角度を収束させることができた。従来手法 [2] を用いた場合には、3.0[s] 収束に時間がかかっており、収束時間の短縮を確認した。

5. 結言

本研究では、インパクト駆動を利用した、インフレーターロボットアームの運動制御手法を提案した。本手法では、2種類の入力波形を用いて、関節角度制御を行った。本手法を用いて、実際の1自由度インフレーターロボットアームの関節角度制御を行い、提案手法により、従来の運動制御手法 [2] に比べ、収束時間が短くなることを確認した。しかし、関節角度の収束精度に関しては、想定通りの高精度化が実現できていないため、入力波形2の設定に改善の必要があると考えられる。

今後は、インフレーターロボットアームの自由度を増やし、手先位置制御への拡張を行う予定である。

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, Vol. 32, No. 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ーロボットアームの手先剛性楕円体制御", 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, 1P3-B05, 2022
- [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", 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, 1G4-4, 2013

- [4] A. Kawamura, Y. Mori, S. Yamate and S. Kawamura,
"Precise Motion Control of SCARA Robot using Com-
bination of PWM Signals and Visual Information",
Proc. IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent
Mechatronics, pp. 578-583, 2016.
- [5] 竹中孝太, 河村晃宏, 倉爪亮: "極軽量インフレイタブルロ
ボットアームの関節剛性を考慮した手先位置制御", 第 39
回日本ロボット学会学術講演会, 2J4-05, 2021