

生活支援サービスのための 移動型インフレータブルロボットアームの開発

○多田羅僚介 野間口直樹 河村晃宏 倉爪亮（九州大学） 川村貞夫（立命館大学）

1. 緒言

急速な高齢社会の進行に伴う、福祉・介護分野の人材不足問題の解決策として、サービスロボットの活用が期待されている。これらの分野では、人や物の近傍で行う作業が多く含まれ、安全性に優れたロボットが必要とされている。しかし、従来のロボットの多くは主に金属素材が用いられており、高出力・高精度を実現する一方で、高剛性・高重量となっており、万一の接触時における安全性を担保することが困難であった。そこで我々の研究グループでは、インフレータブル構造のソフトロボットに着目し、極軽量・柔軟なロボットアームの開発を進めてきた [1]。本ロボットは、リンク、アクチュエータ、ハンドの全てがプラスチック材料によって構成されており、各関節の内外に拮抗的に配置した膨張型空気圧アクチュエータの差圧によって関節トルクを発生することで駆動する。

これまでに筆者らは、圧力フィードバック制御と視覚フィードバック制御を組み合わせた位置制御手法を提案している [2]。しかし、従来の高密度ポリエチレン素材単一のロボットアームは、耐圧性能の低さに起因する可搬重量の低さや作業領域の狭さ、制御性能不良が問題となっていた。そこで本研究では、高密度ポリエチレンとポリラミネートを組み合わせた素材のロボットアームを提案し、可搬重量の増加、作業領域の拡張、制御性能の改善を試みる。さらに、本ロボットアームを移動台車へ搭載し経路・動作計画を行うことで、生活空間での物品取り寄せタスクを実現する。

2. 移動型インフレータブルロボット

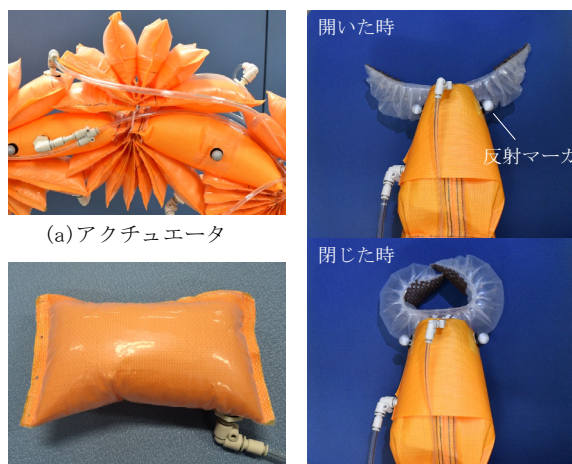
開発中の本ロボットの概観及び生活空間を図 1 に示す。ロボットアーム部は、膨張型空気圧アクチュエータ、インフレータブル構造リンク、プリーツ構造ロボットハンド、回転台座で構成され、全てがプラスチック材料を用いて製作されている。台座を除くアーム及びハンド部分の総重量は 340g であり、従来の金属製ロボットアームに比べて大幅な軽量化を達成している。アクチュエータ・リンクは、高密度ポリエチレンとポリラミネートを重ねたものを溶着し、高密度ポリエチレンの引張強度の弱さをポリラミネートで補う構成で作られる。これにより、従来と比較して約 5 倍の、約 300kPa の耐圧性能を実現している。リンクは内圧により円筒状に膨張することで一定の剛性を維持し、アクチュエータは溶着して作られた袋状構造物を 6~8 個重ねて構成し関節部に拮抗配置することで、ロボットアームの屈曲・伸展方向にトルクを発生している。各アクチュエータには圧力センサが搭載されており、圧力フィードバック制御によりハンチングや定常誤差を補正し、運動制御の高精度化を図っている。アクチュエータ及びリン



図 1 生活空間と移動型インフレータブルロボットアーム

クを図 2(a), (b) に示す。ロボットハンドには図 2(c) に示すように、プリーツ構造が用いられており、空気圧印加時、片面にのみ施された折り込み構造が膨張することで袋全体が屈曲し物体把持が可能になる。本ロボットハンドは約 700g の可搬性能を持ち、対象の形状に対して柔軟に変形する。

また、本ロボットアームを移動台車へ搭載することにより、生活環境において幅広いタスクを実行することができる。なお、ロボットの位置・姿勢は、第 4 リンク上と移動台車に取り付けた反射マーカを赤外線モーションキャプチャシステム (Vero, Vicon) により計測し算出している。



(a) アクチュエータ (b) リンク (c) プリーツ構造ロボットハンド
図 2 インフレータブルロボットアーム構成要素

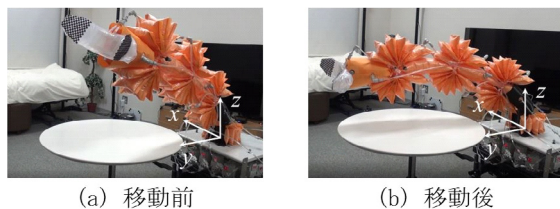


図3 手先位置制御の実験環境

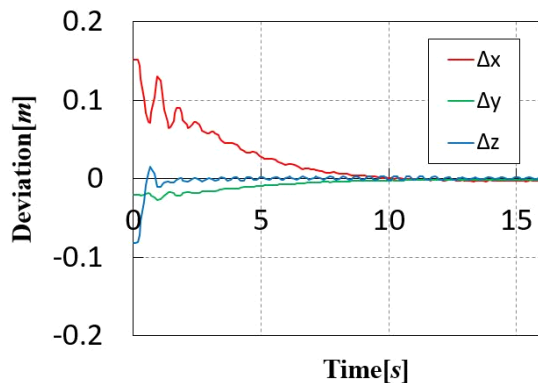


図4 視覚フィードバック制御の位置偏差の時間推移

3. 制御方法

本研究では、ロボットアーム部と移動台車部において異なる制御手法を用いている。本章ではそれぞれの制御手法について述べる。

3.1 視覚フィードバック制御

本ロボットアームにはエンコーダが搭載されておらず、関節角を正確に計測することができない。そのため、外部に配置したモーションキャプチャシステムから手先位置と各関節角度を推定し、視覚フィードバック制御により手先位置を制御している。ハンドの把持中心位置は、第4リンク上の4個の反射マーカから得られる位置・姿勢情報を元に計算している。制御則は下記の通り、PID制御を用いた式で表される。

$$\tau_d = J^T(\theta) \{ K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \} \quad (1)$$

ただし、手先位置の制御偏差 $e(t)$ は、次式で表される。

$$e(t) = r_d - r \quad (2)$$

$\tau_d = (\tau_{d1}, \tau_{d2}, \tau_{d3}, \tau_{d4})^T$: 各関節目標トルク

$J(\theta)$: 近似ヤコビ行列

$r_d = (x_d, y_d, z_d)^T$: 目標位置

$r = (x, y, z)^T$: 手先位置

K_p, K_i, K_d : 比例ゲイン, 積分ゲイン, 微分ゲイン

以上により求めた目標トルクを、実験から得たトルク-圧力特性曲線を用いて圧力値に変換し、レギュレータに入力している。

3.2 移動台車制御

移動台車は、Chairbot（サスティナブルロボティクス社）を用いている。自己位置情報は、部屋に設置した赤外線モーションキャプチャシステムで得たロボッ

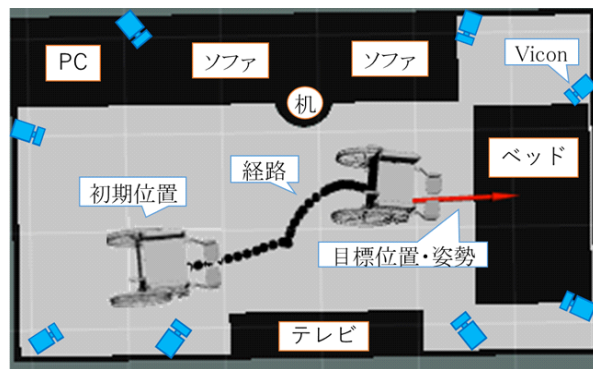


図5 実験環境と移動台車の経路

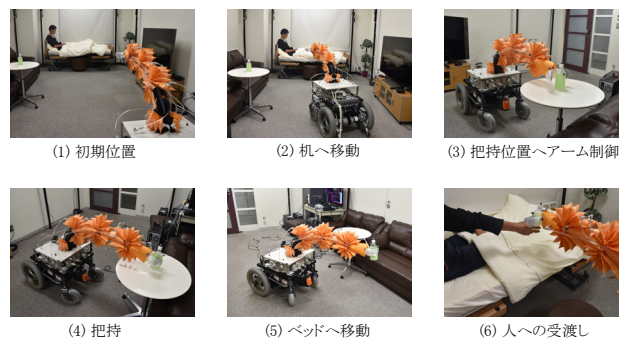


図6 物品取り寄せタスクの流れ

トの座標と、予め作製した環境地図を用いて取得している。本システムの経路計画では、まずダイクストラ法を用いて、移動台車の初期位置から環境地図上に与えられた目標位置までの目標軌道を生成する。走行時には、Dynamic Window Approach(DWA)を用いてリアルタイムでローカルパスを生成し、目標軌道への追従を行う。

4. 実機実験

4.1 ロボットアームの手先位置制御実験

手先の目標値をステップ状に変更したときの位置偏差の変化を計測した。実験環境を図3に、手先位置の偏差の時間推移を図4に示す。整定時間は約10s、定常応答時の手先位置の誤差は約5mm以内を実現した。また、少なくとも700gの物が可搬であることを確認した。

4.2 物品取り寄せタスク

ソファ横の机の上にある100gのペットボトルをベッドに座っている人に受け渡すタスクを行った。まず、ペットボトルの位置にロボットアームの作業領域の中心が来るように移動台車の目標位置・姿勢を設定する。移動台車の移動およびロボットアームの手先位置制御後、物体把持を行う。対象把持の終了後、ベッドの傍に移動台車の目標位置・姿勢を再設定し、人への受け渡しを行う。実験環境と実際に移動台車を走行させたときの経路をRvizで可視化した様子を図5に、物品取り寄せタスクの流れを図6に示す。

5. 結言

本稿では、ポリラミネートにより耐圧性能を向上させ、可搬重量の増加及び作業領域の拡張を実現した、新たな移動型インフレーターロボットアームを提案した。また、生活支援サービスの一例として、移動台車に搭載し、物品の取り寄せタスクを行った。今後は、ロボットアームの基準圧力と動特性の関係を明らかにし、制御性能の向上を目指す。

謝辞

本研究は、日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究(B)(課題研究 JP18H03764) の交付により行われたものである。

本ロボットアームの製作にあたり、立命館大学川村研究室の学生の皆様方に多大なお力添えを頂いた。ここに、深謝の意を表する。

参 考 文 献

- [1] Hye-Jong Kim, Akihiro Kawamura, Yasutaka Nishioka, Sadao Kawamura, “Mechanical design and control of inflatable robotic arms for high positioning accuracy”, *Advanced Robotics*, Volume 32, 2018 - Issue 2.
- [2] 多田羅僚介, 河村晃宏, 倉爪亮, 川村貞夫, “インフレーターロボットアームによるピックアンドプレイス作業の実現”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 1P1-H10, 2018.