

室内宅配ロボットののためのアーム機構の開発

Development of arm mechanism for indoor delivery robot

○学 康 益赫 (立命館大) 正 チャン ディン トゥアン (立命館大)
正 李 周浩 (立命館大)

Yihe KANG, Ritsumeikan University, kang.aislab@gmail.com

Dinh Tuan TRAN, Ritsumeikan University

Joo-Ho LEE, Ritsumeikan University

In recent years, the development of multifunctional mobile platforms has gained momentum with the aim of reducing transportation consumption. In the previous study, a mobile robot named UDO_n (Ubiquitous Delivery On-demand robot), with the ability to go up and down stairs, was developed. To further enhance the transportation capacity of the mobile robot, this study developed a robotic arm mechanism for UDO_n, allowing it to autonomously grab goods. To achieve the concept of reducing development costs, the robotic arm utilizes only four degrees of freedom and is structured to maximize the use of each degree of freedom for completing the required tasks. The presented method and experimental results in this paper demonstrate the feasibility of such a robotic arm.

Key Words: Robot arm, Manipulator, Work support, Delivery robot

1 緒言

物流では、商品を目的地まで運ぶだけでなく、モバイルロボットから商品を取り出し、ユーザにうまく引き渡す必要があるため、移動ロボットには物品を自律的に取得する能力が求められる。製造業の工場内であれば、外部のロボットアームなどを使って物品の引き取りができるが、物流・配送サービスの末端では、外部環境やコストなどを考えると、外部機器に頼ることが困難であるため、移動ロボットにアーム機構を取り付けることが最良の選択肢とも言える。

移動ロボットの分野においては、アーム機構の開発がトレンドになりつつある。ボストンダイナミクス社が開発した四足ロボット Spot[1] は、高い運動性能と環境適応力を有しており、6 自由度のロボットアーム SpotArm[2] を装着することで、障害物の移動やバルブの開閉などの複雑なタスクを実行でき、複雑な作業環境でも活躍が期待される。医療分野において、医療配送ロボット用のアーム機構を提案された文献 [3] では、7 自由度の冗長設計を採用し、ロボットアームの柔軟性を高めている。しかしながら、高い自由度と柔軟性は、高いコストと複雑な操作性という欠点を有している。

楊俊彦 [4] らは、建物内の異なるフロア間の移動と配達問題を解決するために、UDOn(Ubiquitous Delivery On-demand robot) という室内配送用移動ロボットを開発しており、階段を使用した移動ロボットによる室内配送タスクを実現した。UDOn の外観は Fig.1 の通りであり、駆動部には 4 つのサーボと、階段の昇降時に本体を持ち上げるための本体リフト用 2 つと荷台を平らにするための荷台リフト用 1 つの計 3 つの電動アクチュエータがある。このような移動ロボットは、確かに室内で荷物を運搬する作業が可能であるが、荷物の獲得や配置には依然として人間の介助が必要であり、その結果、作業する時の柔軟性が低く、効率が悪い。本研究では、UDOn に搭載可能なアーム機構を開発し、UDOn が自律的に物品を取得・配置する機能を持たせることで、作業時に人間の介助を減らし、ロボットの作業効率を向上させることを目的とする。また、多自由度によるコストや操作性の問題を考慮し、本研究のアーム機構の設計においては、自由度を減らすことにより開発コストを抑えることを試みる。

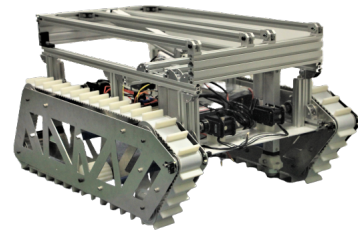


Fig.1 View of UDOn

2 提案機構

2.1 アームのモデルと構造パラメータ

UDOn ロボットアームの主な目的は荷物の把持と配置であり、それ以外の複雑な操作が必要ないことを考慮し、安価で開発することを目指す。本研究で設計された UDOn アームの物理的な構造モデルと運動学モデルを Fig.2 に示す。グripperを含むアーム全体の自由度は 4DoF である。そのうちの 1 つはグripperを制御し、残る 3 つの自由度はアームの姿勢を制御する。

一般的な運動学モデルとは異なり、本研究ではアーム第一関節の回転面は水平面との間に 30 度の角度を持つ。アームのモデル構造から、確立されたリンク座標系を Fig.2 の右側に示す。O₀ 座標系と O₁ 座標系の間の回転軸の角度は 30 度である。この構造により、ロボットアームは荷物をつかんだ後、1 つのアクチュエータだけで把持した荷物を後ろの荷台に配置することができる。人間の場合、後ろの荷台に荷物を乗せる際に、「回す」と「曲げる」2 つの動作が必要である。一般的にロボットとしても、これらの動作には 2 つ以上のアクチュエータが必要である。本研究で採用された構造は、このような作業を 1 つのアクチュエータで行うことができる。

2.2 運動学と逆運動学分析

隣接リンク座標系の変換行列は Table.1 の 4 つのリンク座標パラメータに関連している。

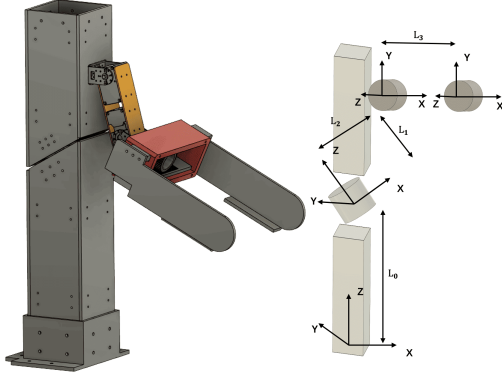


Fig.2 Physical model and kinematic model of UDOn arm

Table 1 Standard DH table

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	$\pi/6$	0	L_0	θ_1
2	$\pi/2$	L_2	L_1	θ_2
3	0	L_3	0	θ_3

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Table.1 のリンクパラメータを方程式 (1) に代入し、アームの各関節間の座標変換により隣接リンク間の同次座標変換行列 ${}^{i-1}_iT$ を求める。以下に方程式 (2),(3),(4) を示す。

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}s\theta_1}{2} & \frac{\sqrt{3}c\theta_1}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{L_0}{2} \\ \frac{s\theta_1}{2} & \frac{c\theta_1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}L_0}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & L_2 \\ 0 & 0 & -1 & -L_1 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & L_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

上記の隣接リンクの同次変換行列を順に乗算すると、マニピュレータ端の位置行列は方程式 (5) のように取得できる。

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

逆運動学に関しては、この自由度 3DoF の UDOn アームの場合、容易に解けられる。荷物を把持する場合、実際に把持動作に関わるのは第 2 と第 3 アクチュエーターだけであることを考慮すると、計算は 2 リンクロッド (Fig.3) の逆運動学に簡略化することができる。

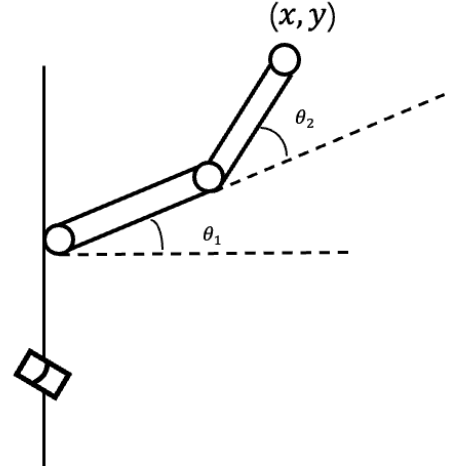


Fig.3 Simplified kinematic model

2.3 グリッパ機構

UDOn アームのグリッパ機構は 1 つのサーボで制御し、ギアとレールによる駆動を採用する。グリッパ機構全体の部品は 3D プリンタで製作する。荷物を把持する場合の摩擦を高めるために、グリッパの内壁にスポンジを貼り付ける。CAD モデルと実際の外観を図 4 に示す。

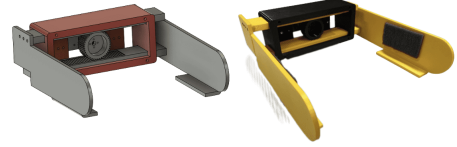


Fig.4 View of gripper

2.4 UDOn との合体状態

開発したアームを UDOn に合体させ、合体した状態を Fig.5 に示す。アームのハードウェア間の電力供給とデータ通信関係を Fig.6 に示す。青矢印は電力供給を示し、赤矢印はデータ通信を表している。LiPo バッテリーがコンピュータと駆動部に電力を提供する。また、マイコンボードは画像データや Laser データなど、各センサーからの観測データを処理することが可能である。地図作成、画像処理など使用され、UDOn のための追加機能開発に用いられる予定である。

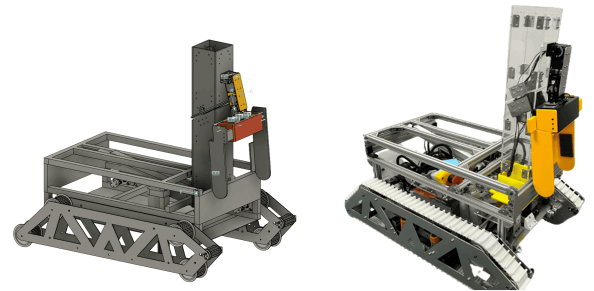


Fig.5 Combination of UDOn and arm

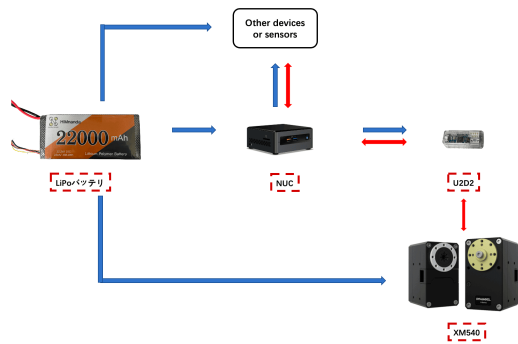


Fig.6 Power supply and data communication

3 アームの作業過程

3.1 荷物を把持して荷台に載せる過程

開発したアームを用いて荷物を把持し、UDOnの荷台に載せる過程を以下に示す。

- 1 荷物を把持して体を回す Fig.7(a) → (c)
図 7-(b) では、回転中に UDOn のフレームでブロックされるのを防ぐため、アームが回転する前に荷物を持ち上げる。
- 2 荷物の置く位置を調整する Fig.7(c) → (d)
可能な限り後ろに置くようにする。
- 3 荷物を下げて、グリッパを持ち上げる Fig.7(d) → (e)
後で、アームが回転する時、荷物とフレームを触らないため、グリッパが上げる場合、グリッパの間隔距離を縮める必要がある。
- 4 荷物の置くことを完了し、準備状態に戻る Fig.7(e) → (g)

3.2 荷台から荷物を取り出す過程

開発したアームを用いて荷台の荷物を把持し、取り出す過程を以下に示す。

- 1 体を回して、荷物を掴むことを準備する Fig.8(a) → (c)
図 8 では、前の同じように、フレームでブロックされるのを防ぐため、回転中にグリッパを持ち上げる。
- 2 荷台での荷物を把持する Fig.8(c) → (d)
- 3 荷物を持って、体を回し、荷物を取り出すことを完了する Fig.8(d) → (g)

4 実証実験

本研究で提案したアーム機構が、荷物を把持して UDOn の荷台に載せる作業動作が実行できることを実証するため、まず、シミュレーション環境でアームの作業動作を試して、適切な角度を見つけた後、ロボットアームと UDOn を合体させる状態での検証実験を行う。シミュレーション環境で動作する様子は Fig.7 と Fig.8 に示す。実際に動作中の様子は Fig.9, Fig.10 に示す。

4.1 結果

ロボットアーム自体の構造上、UDOn と組み合わせた後のアームの作業スペースは多少影響を受けるが、ロボットアームの動作プロセスはスムーズに行うことができ、実際の環境での実験結果によると、提案したアーム機構は、必要な把持作業を完了することができた。

4.2 考察

アームの特殊な設計により、把持する荷物を荷台に載せる又は荷台から引き取る場合、アーム自体の姿勢が重要である。回転面と水平面との傾斜角度により、アーム自体と UDOn フレームが衝突する危険状況が発生する可能性があるため、アームは回転する前にグリッパを安全な位置まで移動させることが必要である。

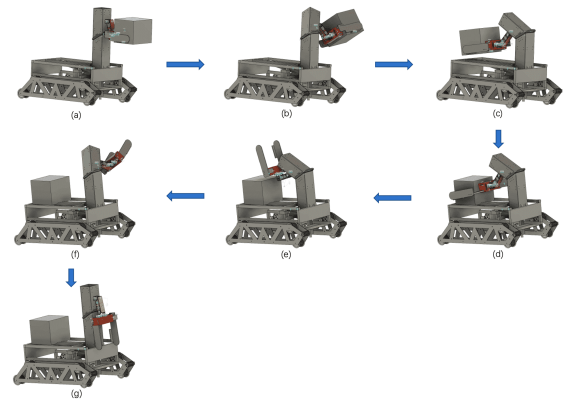


Fig.7 Grab item and place it on the carrier

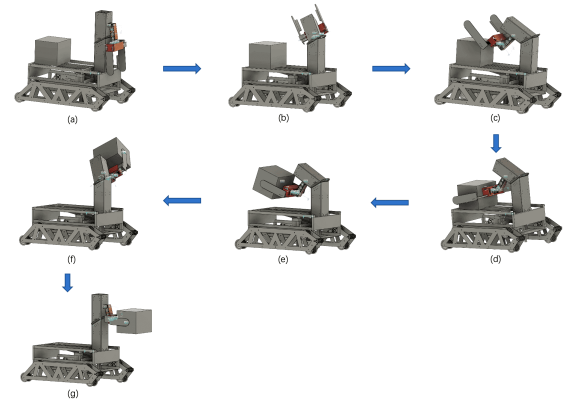


Fig.8 Grab item from the carrier and pass it out

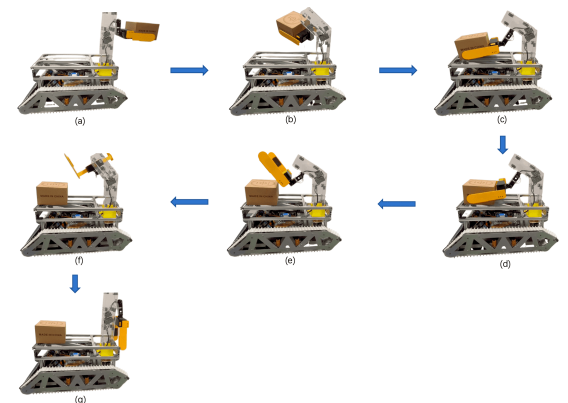


Fig.9 Place item on the carrier in real world

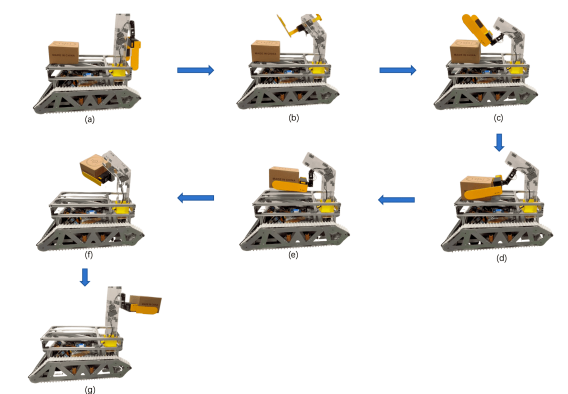


Fig.10 Grab item from the carrier in real world

(図7 b,e に示すように)。

移動搬送ロボットの場合、荷物を荷台に載せて搬送する方法と、ロボットアームで荷物を把持して搬送する方法がある。本研究では、前者を採用しており、一度に複数の荷物を搬送でき、室内宅配作業に適している利点がある。このような搬送方式では、荷台上置かれた複数の荷物の中から、ロボットアームが適切な荷物を取り出す必要があり、アーム機構の柔軟性と高い自由度が要求される。提案したアームは、物体を把持するタスクが可能であるが、自由度の制限により、複数の荷物の中から選択することが困難である。この問題に対して、今後の研究でロボットアームを改良することが必要である。

5 結言

本研究では、室内配送用移動ロボットである UDOn のための荷物を自力で引き取れるアームの設計・制作を行った。外界から1つの荷物を引き取って、荷台に載せる作業と荷台から荷物を引き取る作業が順調に行われることを検証した。今後は、アームの自由度を増やし、複数の荷物から適切な荷物を取り出す機能を持たせるように改良していく。また、移動ロボットとしての UDOn の認識・ナビゲーション能力もさらに向上させていく。

参考文献

- [1] BostonDynamics, “Spot - The Agile Mobile Robot | Boston Dynamics”, [https : //www.bostondynamics.com/products/spot](https://www.bostondynamics.com/products/spot).
- [2] BostonDynamics, “Spot Arm - Mobile Manipulation | Boston Dynamics”, [https : //www.bostondynamics.com/products/spot/arm](https://www.bostondynamics.com/products/spot/arm).
- [3] Wang W, Wang P, Zhao Y, et al. Kinematics and workspace analysis of a robotic arm for medical delivery robots[C]//E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021, 257: 01067.
- [4] 楊俊彦, 高橋邦光, 李周浩. 階段昇降が可能なコンパクトクローラ型移動ロボットの機構 [C]//ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2021. 一般社団法人 日本機械学会, 2021: 2A1-L09.