

# 屋内配送ロボットのための物体検出と荷物受け取り機能

○康 益赫, 藤井 康之, チャン ディン トゥアン, 李 周浩 (立命館大学)

## The Development of Object Detection and Package Receiving System for Indoor Delivery Robots

○ Yihe KANG, Yasuyuki FUJII, Dinh Tuan TRAN, and Joo-Ho LEE

**Abstract:** In recent years, due to advancements in robotics technology, mobile robots designed for indoor use have become more prevalent. However, most indoor mobile robots are not capable of navigating stairs to access other floors. In our previous study, we successfully developed a mobile robot named UDOn (Ubiquitous Delivery On-demand robot), which is capable of ascending and descending stairs and has a significant load-carrying capacity to transport objects between different floors. UDOn robot requires human assistance to load and unload objects due to the lack of tools for active interaction with the external environment. In this study, we developed a robot arm mechanism and vision-based object grasping system using deep neural network to enhance UDOn's autonomous operation capability. We conducted experiments in the real world and demonstrated the feasibility of the robotic arm mechanism and system.

### 1. 緒言

近年、人工知能の急速な発展に伴い、ロボット工学の分野も驚異的な進歩を遂げ、特に移動ロボットの発展により、さまざまなシナリオで使用される移動ロボットが増えている。ボストン・ダイナミクス社の四足歩行ロボット「スポット」<sup>[1]</sup>や、Unitree 社のロボット「Go」シリーズ<sup>[2]</sup>など、数多くのロボットが世間の注目を集めている。これらの製品は、印象的な運動能力と高度に協力的なロボットアームの構造の両方を示している。しかし、優れた運動能力を持っているだけでは、人々のニーズに応えるには不十分である。多くのシナリオでは、ロボットの周辺環境への適応能力と自律的な作業能力を高めるために、高度に協調的なロボットアーム機構を設置することを選択する。ロボットアームの柔軟性が、その自由度の数と密接に結びついていることは間違いなく。多くのロボットアームは、操作の柔軟性を高めるために、冗長性として知られる戦略である余剰自由度を意図的に設計している。医療リハビリテーション分野では、<sup>[3]</sup>や<sup>[4]</sup>が高自由度設計のロボットアームを利用し、作業プロセスにおける高い柔軟性を確保することで、環境や人間とのインタラクションを可能にしている。また、<sup>[5]</sup>や<sup>[6]</sup>のような多くのソフトロボットも、ロボットアームの柔軟性を高め、異なる作業環境への適応能力を向上させるように設計されている。しかし、高い自由度と卓越した柔軟性を持つロボットアームは、特にコストの上昇とより複雑な操作という点で、関連する課題が伴うことがよくある。

先行研究では、建物内の異なるフロア間の移動と配送できるロボットのニーズに応えるために、楊俊彦<sup>[7]</sup>らは、UDOn (Ubiquitous Delivery On-demand robot) という室内配送用移動ロボットを開発した。この UDOn は、階段を利用して異なるフロア間で物品を搬送することができる。クローラ構造を採用しており、段差でのスムーズな移動を容易にする。ロボットのベースに組み込まれた 2 本の伸縮シリンダアクチュエータの助けを借りて、水平面と階段の間をスムーズに移動できるようにする。基本的な移動能力があるが、荷物の積み下ろしのプロセスには依然として人間の介入が必要であ

る。ロボットは監視されていない状態でも動作できる能力が必要であることを考慮し、この研究では、UDOn のための低自由度ロボットアームを設計し、そして、ビジョンベースの目標検出および把持システムを開発した。

開発コストを抑えるというコンセプトのもと、ロボットアームの設計では、多自由度と言う冗長な設計ではなく、具体的な作業シーンと作業内容を考慮して自由度を減らす。最終的に、UDOn アームの姿勢制御に 3 自由度、グリップ制御に 1 自由度を使用する 4DoF 設計を採用した。ビジョンベースの目標検出システムに関しては、UDOn が搬送する荷物が箱型の物品を中心とした単一種類のものであることから、Yolo ディープニューラルネットワーク<sup>[8]</sup>を利用して目標物検出モデルをトレーニングした。RGB カメラからのデータを用いて、画面に現れる目標物をリアルタイムに検出することができ、目標物の検出からロボットアームの把持制御までの全体制御アルゴリズムをプログラミングすることで、UDOn の検出から把持までの自律作業の全プロセスを実現した。最後に、実際の把持実験を通して、浮かび上がった問題について考察した。



Fig.1 View of UDOn robot

## 2. アーム機構

このセクションでは、UDOn アームの構造モデルと運動モデルについて詳しく紹介する。

### 2.1 UDOn アームの構造と運動学モデル

UDOn アームの目標は、前方に検出した荷物を把持し、後ろの荷台に載せることである。他の多くの研究では、操作の柔軟性を考慮して 6 自由度、あるいは 7 自由度のロボットアームを使用することが選択されている。しかし、多自由度ロボットアームに伴う高い操作難易度と高コストは無視できない。そこで、自由度とコストを抑えつつスムーズな把持作業を実現するために、UDOn 専用のロボットアーム機構を設計した。この UDOn アームの 3D モデルと運動学モデルを Fig.2 に示す。また、アームを実際の UDOn 本体に取り付けた状態を Fig.1 に示す。

UDOn アーム全体の自由度は 4DoF であり、1 つの自由度はグリップを制御し、残る 3 つはアームの姿勢を制御する。従来の構造とは異なり、UDOn 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。一般的に、荷物を後方に置くとき、人体は旋回と屈曲の 2 つの動作が必要である。UDOn アームの設計では、このような作業を行うために人体が使用する関節の数を参照し、角度を傾斜させることで、本来 2 自由度を必要とする作業を 1 自由度に簡略化している。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。 $O_0$  座標系と  $O_1$  座標系と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で把持した荷物を後ろの荷台に配置することができる。把持機構は 1 つのアクチュエータで制御され、ギアとガイド構造を用いて物体を把持する。ロボットアームの構造材料には、筐体部分はアクリル製、グリップ部分は PLA 製、連結と固定部分は板金製である。

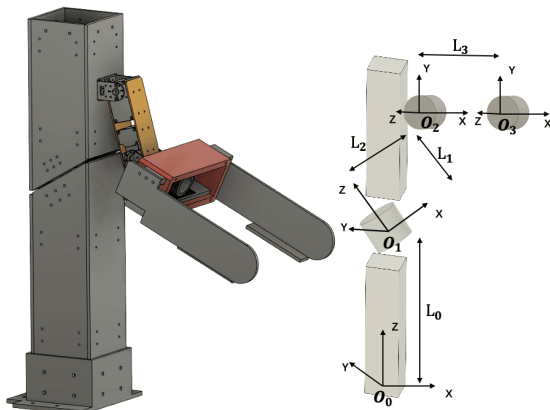


Fig.2 Physical and kinematic model of UDOn arm

Table 1 Standard DH table

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	$\pi/6$	0	$L_0$	$\theta_1$
2	$\pi/2$	$L_2$	$L_1$	$\theta_2$
3	0	$L_3$	0	$\theta_3$

### 2.2 UDOn アームのハードウェア構成

アームの電力供給とデータ通信を担うハードウェアシステムを、UDOn のハードウェアシステムに統合した。システム全体はリチウムポリマー電池で駆動され、Intel 社の NUC(Next Unit of Computing) を採用して、総重量を減少させるかつ様々なデータを処理する時の計算力を確保する。UDOn アームのハードウェア構成を Fig.4 に示す。

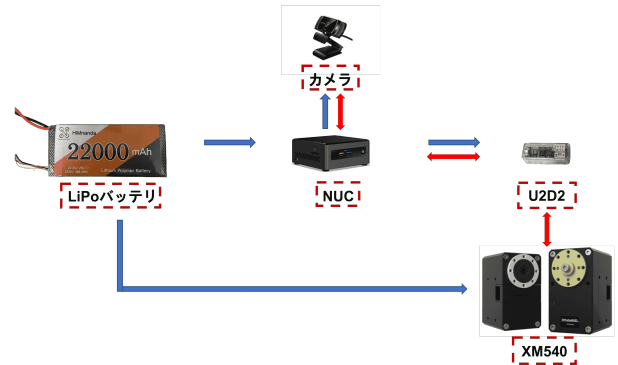


Fig.3 Hardware composition of UDOn robot

## 3. YOLO ベースの目標検出モデル

UDOn の作業シナリオを考慮すると、目標物の検出はリアルタイムで行われるため、検出アルゴリズムのリアルタイム性と計算速度には一定の要求がある。CNN などのディープラーニングネットワークの発展に伴い、YOLO<sup>[8]</sup>、Faster R-CNN<sup>[9]</sup>、SSD<sup>[10]</sup> など、多くのディープニューラルネットワークベースの目標物検出手法が提案された。YOLO は 2015 年に初めて提案され、継続的な開発を経て、現在では YOLOv8<sup>[11]</sup> バージョンまで反復されている。Juan R. Terven<sup>[12]</sup> らによる論文では、YOLO の開発経緯がレビューされている。YOLO アルゴリズムが、高速性能を維持しながら、その精度を向上させてきたことは明らかである。そのため、本研究では、目標検出モデルのトレーニングには、YOLOv5<sup>[13]</sup> バージョンのフレームワークを使用した。

### 3.1 データセット

具体的な作業シナリオを考慮すると、UDOn のタスクは、画面内での荷物を検出し、ロボットアームを起動させて、荷物を掴んで後ろの荷台に置くことである。タスク中に認識されるオブジェクトは比較的単一であり、主なターゲットは画面内の長方形の荷物である。UDOn の作業シナリオのデータセットとして約 300 枚の画像を収集し、ラベルツールを使用して画像内のオブジェクトにラベルを付けた。この実験で使用したラベルは、human, hand, box の 3 種類のみである。今後の研究では、データセットの画像数をさらに増やし、モデルの精度と安定性をさらに向上させる予定である。

### 3.2 モデル検証

このデータセットは、ultralytics が公開している YOLOv5 オープンソースフレームワークを用いて学習した。最後に、使用したモデルを検証セットで検証すると、Fig.5 と Fig.6 に示すような混同行列と PR 曲線が得られる。検証セットでのモデルの性能は満足のいくものであり、精度と想起の両方が高いままであることがわかる。UDOn の作業シナリオからランダムに画像

を選択し、モデルへの入力としたところ、Fig.7 に示すような予測結果が得られた。各画像には、識別された目標物体がうまくラベル付けされており、このような識別結果は、次の UDOn アーム把持アルゴリズムの実装に役立つ。

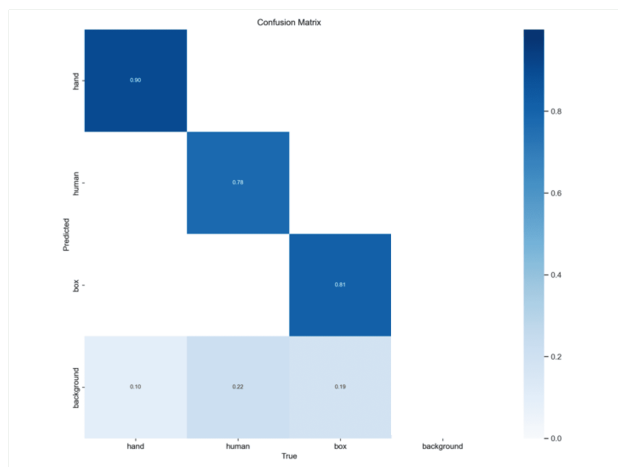


Fig.4 Confusion matrix of the trained model

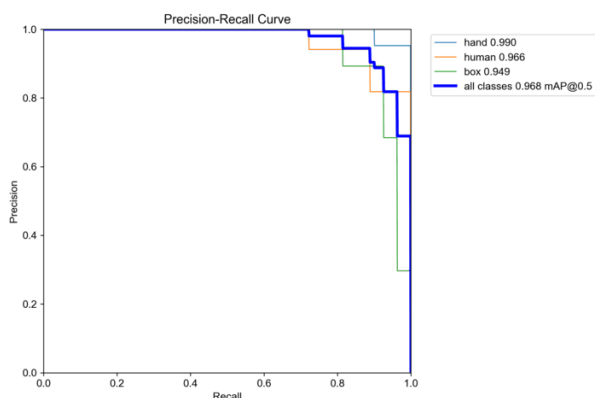


Fig.5 PR curve of the trained model

#### 4. 荷物取得アルゴリズム

ロボットアームの開発と視覚に基づく目標物検出モデルのトレーニングが実現したら、あとは目標検出とロボットアームの把持という 2 つのコンポーネントをつなげることで、UDOn が実世界で目標荷物を自律的に把持するというタスクを実行できるようになる。そこで、リアルタイムで目標荷物を検出し、UDOn アームが荷物の位置へ移動して、取得するアルゴリズムを作成する。アルゴリズムの概要を Fig.8 に示す。

対象物を把持するタスクを受け取ると、システムはまず UDOn アームの頭頂部にあるカメラセンサーを起動し、UDOn 前方の空間にある目標荷物の情報をスキャンする。視野内に目標物が検出されると、直ちに目標物の位置情報を計算し、目標物がロボットアームの把持可能範囲内にあるかどうかを判断し、そうでない場合は、まず UDOn の位置を補正してロボットを目標物にさらに近づける。目標物がロボットアームの把持可能範囲に入ると、ロボットアームの把持プログラムが作動し、目標物が把持される。把持手順の終了後、安全のため、画像情報に基づいて目標荷物の把

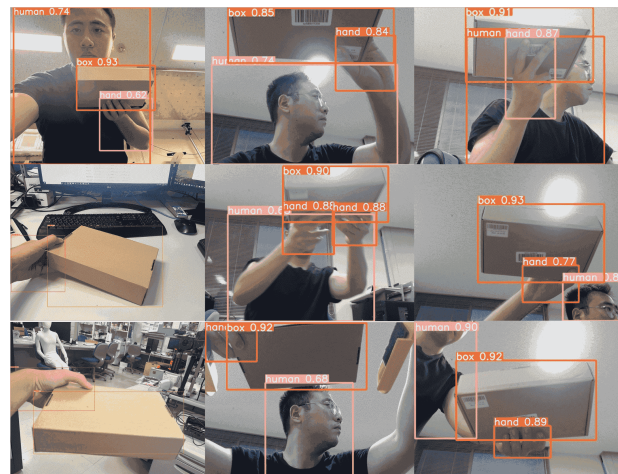


Fig.6 Real time detection results

持に成功したかどうかを判断し、成功した場合は、荷物を後ろの荷台に載せる動作手順を実行する。把持に成功しなかった場合は、まずロボットアームの姿勢を初期化し、その後、対象物の位置を計算する段階に移し、この前の操作を繰り返す。制御システム全体を ROS2 環境で作成し、Fig.4 に示す NUC で実行した。

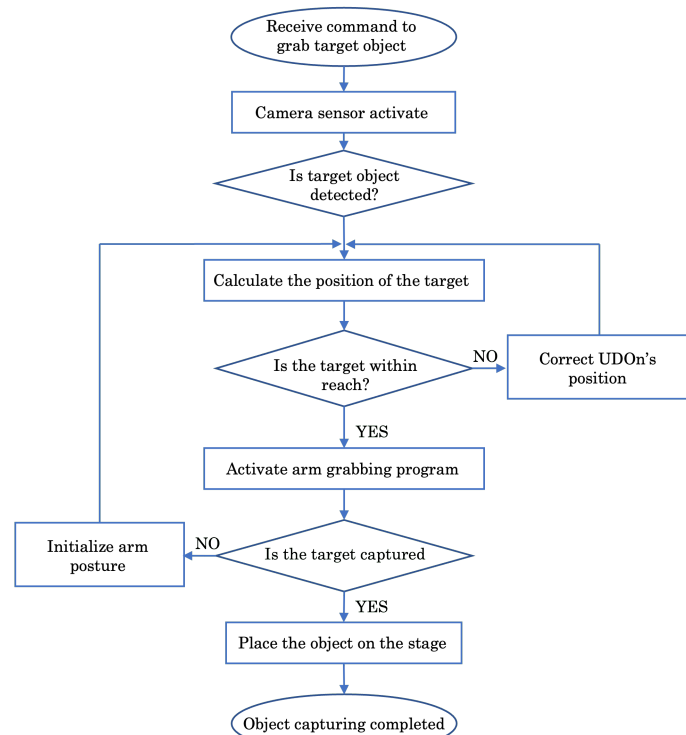


Fig.7 Algorithm overview

#### 5. 実験と考察

本実験では、前章で述べた荷物取得アルゴリズムを用いて、実際の環境で目標荷物を取得するタスクを行った。実際の作業状況は、アップロードしたビデオでご覧いただける。システムの安定性を検証するために、いくつかの把持実験を行った。目標荷物が UDOn の真正面にある理想的な場合では、アームは目標を掴



むというタスクを十分に完了した。しかし、理想的でない状況では、いくつかの問題が発生した。1) UDOn のクローラ構造により、目標が UDOn の真正面から大きくずれた場合、UDOn の位置修正に時間がかかり、作業効率に深刻な影響を与える。2) 自由度の制約により、アームの把持範囲に制限があり、一定の高さ範囲内の物品しか把持できないため、UDOn 用に用意されているワークテーブルを実際の作業環境に設置する必要があり、導入コストの増加につながる可能性がある。3) ロボットアームの構造上、荷物を載台に載せる過程で荷物が傾くことが避けられず、箱に収納されている物品に影響を与える可能性がある。これらの問題に対して、主にロボットアームの構造に関連するものであり、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と考えうる。

## 6. 結言

本研究では、UDOn に搭載されるロボットアーム機構を設計し、視覚情報に基づく目標物検出・把持システムを開発することで、屋内作業シーンにおける UDOn の自律的な荷物取得能力を実現した。開発コストを抑えるというコンセプトのもと、少ない自由度と特殊な構造設計でロボットアーム機構を開発させた。YOLOv5 フレームワークに基づいて、UDOn の自律的な荷物把持タスクのためのターゲット検出モデルを訓練し、画面内に現れる目標荷物を高速かつリアルタイムに検出できるようになった。最後に、目標荷物の検出から把持までのロボットアーム制御アルゴリズムを作成し、実際環境での展開とテストを通じて、現在のアルゴリズムの実現可能性を検証した。UDOn の自律動作の全プロセス（目標物の検出から把持まで）を実現することに成功した。

## 参考文献

- [1] ボストン・ダイナミクス公式ウェブサイト: *Boston Dynamics: Home*. (2023). URL: <https://bostondynamics.com/>.
- [2] Unitree 社の公式ウェブサイト: *Unitree Technology: Home*. (2023). URL: <https://m.unitree.com/>.
- [3] Wang W, Wang P, Zhao Y, et al.: “Kinematics and workspace analysis of a robotic arm for medical delivery robots”. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*, 257:01067, (2021).
- [4] K. Nishida, Z. Luo and A. Nagano: “Development of a robot system for rehabilitation of upper limbs cooperative movement functions”. *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 511–515, (2013).
- [5] Laschi C, Cianchetti M, Mazzolai B, et al.: “Soft robot arm inspired by the octopus”. *Advanced robotics*, pp. 709–727, (2012).
- [6] K. Honda, Y. Nakashima R. Matsuda, U. K. Mavinkurve, A. Kanada and M. Yamamoto: “Design of 3D-printed Flexible Robotic Arm with Bendable and Extendable Capacity”. *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 1–5, (2023).
- [7] 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”. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A1–L09, (2021).
- [8] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al: “You only look once: Unified, realtime object detection”. *IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 779–788, (2016).
- [9] Ren S, He K, Girshick R, et al.: “Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks”. *Advances in neural information processing systems*, p. 28, (2015).
- [10] Liu W, Anguelov D, Erhan D, et al.: “Ssd: Single shot multibox detector”. *Computer Vision–ECCV*, pp. 21–37, (2016).
- [11] G. Jocher, A. Chaurasia, and J. Qiu: *YOLO by Ultralytics*. Accessed: February 30, 2023. (2023). URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>.
- [12] Terven J, Cordova-Esparza D: “A comprehensive review of YOLO: From YOLOv1 to YOLOv8 and beyond”. *arXiv preprint*, arXiv:2304.00501, (2023).
- [13] G. Jocher: *YOLOv5 by Ultralytics*. Accessed: February 30, 2023. (2020). URL: <https://github.com/ultralytics/yolov5>.