

単眼深度推定とモデル予測制御に基づく小型ドローンの動的障害物回避 Dynamic Obstacle Avoidance for Micro-Drones via Monocular Depth Estimation and Model Predictive Control

藤本 涼†
Ryo Fujimoto

嶋田 知泰†
Tomoyasu Shimada

孔 祥博‡
Xiangbo Kong

富山 宏之†
Hiroyuki Tomiyama

1. はじめに

近年、物流、農業、災害対応など多様な分野でドローン技術の導入が急速に進んでいる。航空法の改正に伴って 100 g 以上の機体には登録が義務付けられたことで、小型ドローンは手軽に運用できる新たなプラットフォームとして注目されている。空間に人などの移動体が存在する状況下で安全に飛行するためには、動的障害物を検知・追跡し、リアルタイムに回避経路を生成する機能が不可欠である。従来は LiDAR などの高性能なセンサを用いる手法が主流であるが、これらは機体への搭載重量やコストの面で小型ドローンへの適用が難しいという課題がある。そこで本論文では、単眼深度推定と物体検出、モデル予測制御を融合し、軽量かつ低コストである単眼カメラのみを搭載した小型ドローンの動的障害物回避手法を提案する。

本論文の構成は以下のとおりである。2 章で提案手法の詳細を述べる。単眼深度推定と障害物検出、座標変換、物体追跡、モデル予測制御の各モジュール設計を順に述べる。3 章では、シミュレーション実験の設定と結果を示し、提案手法の有効性を定量的に評価する。4 章では、本論文のまとめと今後の展望を述べる。

2. 提案手法

本論文でのシステムは、図 1 に示すアルゴリズムによって構成される。まず初めに、ドローンシミュレータ AirSim[1] の仮想環境から RGB 画像を取得する。次に、単眼深度推定モデルと物体検出モデルを実行し、得られた絶対深度マップとセグメンテーションマスクを用いて各障害物の三次元位置をワールド座標系へ変換する。その後、SORT[2]により各対象に ID を付与して動的障害物を追跡し、カルマンフィルタ[3]で軌道を予測する。最後に、モデル予測制御[4]で予測ホライズン内の最適制御入力を算出し、ドローンへ速度指令を送る。

2.1 障害物の距離情報取得

動的障害物の三次元距離取得には、絶対深度推定モデル DepthAnythingV2[5]を採用し、屋外シーン向けに事前学習済みの重みを利用する。また、本論文では動的障害物として人物を想定し、YOLOv8n-seg モデル[6]を用いて人の検出及び人のピクセル単位のセグメンテーションを行う。推定モデルの最大深度は、この環境において人物を検出できた最大距離の 27 m と設定した。得られた深度マップの画素値は絶対距離を示すため、セグメンテーションマスク領域内の平均深度を算出することで、動的障害物である人物までの三次元距離を得る。

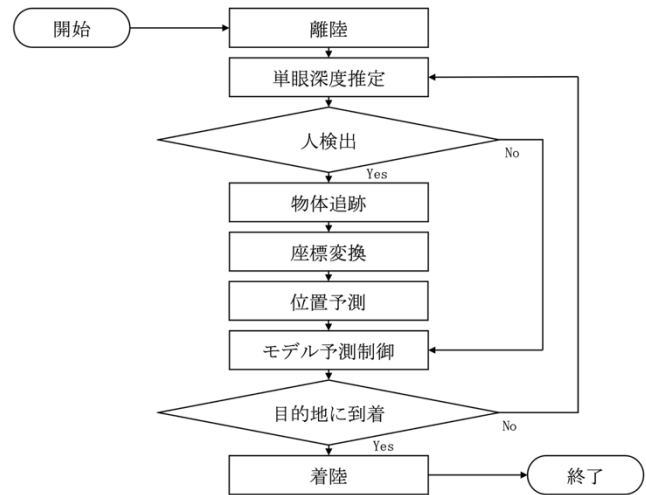


図 1 障害物回避アルゴリズムのフローチャート

2.2 ワールド座標変換

提案手法では、動的障害物回避をモデル予測制御による数値最適化問題として扱うため、人物とドローンの位置を飛行平面上のワールド座標系へ変換する。図 2 にワールド座標を得るための座標変換の概念図を示す。式 (1) より、RGB 画像上の人検出の重心位置 x_{pixel} 、画像幅の中心 x_{center} 、カメラの水平視野角 FOV_{rad} を用いて、飛行平面上におけるドローンから障害物の水平面角偏差 θ を算出する。次に、式 (2)、(3) よりドローンの座標 x_d (x_d, y_d) と平均深度 $depth$ を用いてワールド座標 x_{world} (x_{world}, y_{world}) を算出する。

$$\theta = \frac{x_{pixel} - x_{center}}{x_{center}} \times \frac{FOV_{rad}}{2} \quad (1)$$

$$x_{world} = x_d + depth \cdot \cos\theta \quad (2)$$

$$y_{world} = y_d + depth \cdot \sin\theta \quad (3)$$

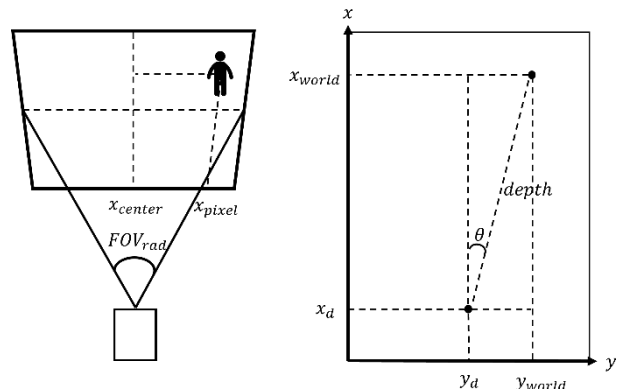


図 2 座標変換

† 立命館大学 Ritsumeikan University

‡ 富山県立大学 Toyama Prefectural University

2.3 障害物の追跡と予測

変換されたワールド座標において、検出された各障害物は SORT アルゴリズムに入力される。カルマンフィルタによる予測位置と新たに検出された障害物位置との対応付けを、Hungarian アルゴリズム (最小コストマッチング) により行う。また、障害物の動きを考慮するために、カルマンフィルタを用いて現在フレームの障害物の位置から次フレームの位置を予測し、その予測位置を障害物位置として回避制御に反映する。さらに、本手法では動的障害物回避の信頼性向上のため、ドローンと各障害物間のユークリッド距離に基づくフィルタリングを追加する。各障害物に対してドローン位置との距離を算出し、人物検出後カメラの画角外に外れた状態でも 5 m 以内は位置情報を保持する。この処理により、過去フレームにおける障害物の位置情報を維持し、動的障害物を継続的に考慮した回避が可能となる。

2.4 モデル予測制御

モデル予測制御を用いたドローンの最適制御を定式化する。最適化には SLSQP を採用している。

2.4.1 目的関数

モデル予測制御を制約付き数理最適化問題として定式化し、予測ホライズン内での目標到達性と動的障害物回避の両立を図る。式 (4) に示す目的関数は、予測軌道と目標位置の位置誤差と制御入力の大さを同時に最小化する二項から構成する。このとき、 N は予測ホライズン、 X_t は t ステップ先のドローンの座標、 X_{target} は目標位置、 u_t は加速度 a_x , a_y からなる制御入力である。

$$J = \sum_{t=0}^{N-1} \left(\|X_t - X_{target}\|^2 + \lambda \|u_t\|^2 \right) \quad (4)$$

$$u_t = [a_x, a_y]$$

2.4.2 制約条件

式 (5) に示す制約条件は、制御入力の範囲制約を示す。また、式 (6) は障害物回避制約を示す。障害物との衝突を防止するため、予測ホライズン内の各ステップおよび各障害物において、ドローン位置と障害物予測位置とのユークリッド距離が安全距離 d_{safe} 以上となるよう不等式制約を課す。本論文では安全距離に 2m を採用し、衝突回避領域を最適化解から排除することで、得られる制御入力が安全な飛行経路を維持することを保証する。

$$-a_{max} \leq a_x, a_y \leq a_{max} \quad (5)$$

$$\|X_t - X_{world}\| \geq d_{safe} \quad (6)$$

3. 実験

本節では、提案手法の有効性を検証するためのシミュレーション環境および評価指標、得られた実験結果を示す。

3.1 実験方法

本論文の評価には AirSim v1.8.1 上に構築した Blocks マップを用いた。PC 構成は Intel Core i7-10700, NVIDIA GeForce RTX 3050, メモリ 64 GB である。動的障害物として人物 1

名を設定し、ドローンの進行方向に対して、正面往復移動および横往復移動の 2 種類のシナリオを用意した。ドローンは離陸後、前方 30m の地点まで飛行する。このとき、モデル予測制御における予測ホライズンは $N = 10$ 、ドローンの最大加速度 $a_{max} = 8$ 、飛行高度は 1m に固定して左右への回避動作のみの実験を行った。各シナリオにつき 100 試行を実施し、衝突を伴わずに目標位置へ到達した試行数を回避成功率とし、それを性能指標とした。

3.2 実験結果

表 1 は動的環境での各シナリオにおけるドローンの回避成功率を示す。いずれの試行においてもドローンは目標位置に到達した。正面往復移動の主な衝突要因は、YOLO および DepthAnythingV2 の推論に遅延が生じることで、人物がドローンに向かって近づいた際に回避制御が間に合わない場合がある点にある。また、横往復移動の主な衝突要因は、カメラの画角外での人物の急な切り返しの動きがあった際に回避制御が取れないことである。

表 1 各シナリオにおける回避成功率

人物の移動パターン	回避成功率[%]
正面往復移動	94
横往復移動	82

4. おわりに

本論文では、小型ドローンへの搭載が容易な単眼カメラのみをセンサとして用い、単眼深度推定、SORT とカルマンフィルタを用いた物体追跡、およびモデル予測制御による最適制御を統合する新たな動的障害物回避手法を提案した。シミュレーション実験では、正面往復移動で 94%、横方向往復移動で 82% の回避成功率を達成した。今後の展望としては、複数の動的障害物を回避するアルゴリズムへの拡張、実機搭載による評価に取り組むことで、より安全かつ汎用性の高い小型ドローンの自律飛行システムの実現を目指す。

謝辞

本研究の一部は公益財団法人スズキ財団の科学技術研究助成、および NEDO の委託(JPNP22006)による。

参考文献

- [1] S. Shah, D. Dey, C. Lovett and A. Kapoor, "AirSim: High-Fidelity Visual and Physical Simulation for Autonomous Vehicles," Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning, pp. 621-635, 2017.
- [2] A. Bewley, Z. Ge, L. Ott, F. Ramos and B. Upcroft, "Simple Online and Realtime Tracking," IEEE International Conference on Image Processing, pp. 3464-3468, 2016.
- [3] R. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," Journal of Basic Engineering, vol. 82, no. 1, pp. 35-45, 1960.
- [4] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud and J. Papon, "Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes," Automatica, vol. 14, no. 5, pp. 413-428, 1978.
- [5] L. Yang, B. Kang, Z. Huang, Z. Zhao, X. Xu, J. Feng, and H. Zhao, "Depth Anything V2", arXiv preprint arXiv:2406.09414, 2024.
- [6] G. Jocher, A. Chaurasia, and J. Qiu, "Ultralytics YOLOv8," <https://github.com/ultralytics/ultralytics>, 2023.