

# 時空間ボクセル予約の階層管理による 複数ドローンの経路計画手法の提案

## Path Planning Method for Multiple Drones Using Hierarchical Spatio-temporal Voxel Reservation

梅田 寛斗† Onur Alparslan† 佐藤 健哉†  
Hiroto Umeda Onur Alparslan Kenya Sato

### 1 はじめに

近年、物流、3次元測量、インフラ点検などの分野でドローンの活用が進んでいる [1]。多数のドローンが同一エリアを飛行する環境では、飛行経路の交差により衝突が発生する。衝突回避手法として、センサやカメラを用いて周囲を認識する手法があるが、遠距離の障害物の検出が困難であることや、天候の影響で性能が低下するという課題がある。そこで、通信を用いてドローンの情報を集中制御システムに集約し、全てのドローンの経路を一括で計算することにより衝突を回避する手法が検討されている。しかし、全機の経路を一括で計算する方式では、ドローン数の増加に伴い計算量が膨大になるという問題がある。

現在、建造物や飛行体の情報を効率的に管理する手法として、4次元情報の活用が検討されている [2]。これは、3次元空間を直方体の格子状に分割した空間ボクセルに時間情報を統合して管理するシステムであり、時間と空間を一体として扱うことで、より正確な状況把握と制御が可能となる。さらに、空間ボクセルは階層構造で管理され、用途に応じて粒度の調整が可能である。

本研究では、空間ボクセルと時間情報を統合した時空間ボクセルを定義し、ドローンが通過予定の時空間ボクセルを事前に予約し、予約情報に基づいて飛行調停を行う手法を提案する。また、空間の状況に応じて参照する階層を動的に調整することで、経路計画時の計算時間短縮を目指す。

### 2 関連研究

木村らは、自動運転車両における走行調停手法として、時空間グリッド予約を提案している [3]。この手法では、道路上の空間を一定間隔で区切ったグリッド領域に、時間情報を組み合わせることで、ダイナミックマップ上で走行計画を管理する。車両は、事前に走行予定ルートに対応する時空間グリッドを予約し、その予約情報に基づいて他車両との走行調停を行う。本手法では、車両がダイナミックマップとのみ通信を行うため、車車間通信と比較して通信量を大幅に削減可能である。また、事前に走行調停を行うことで、急減速の発生を抑制し、安全性と走行効率の向上を示した。一方で、本手法をドローンに適用する場合、ドローンは3次元空間を飛行するため、空間を各軸方向に  $n$  分割した場合、生成されるボク

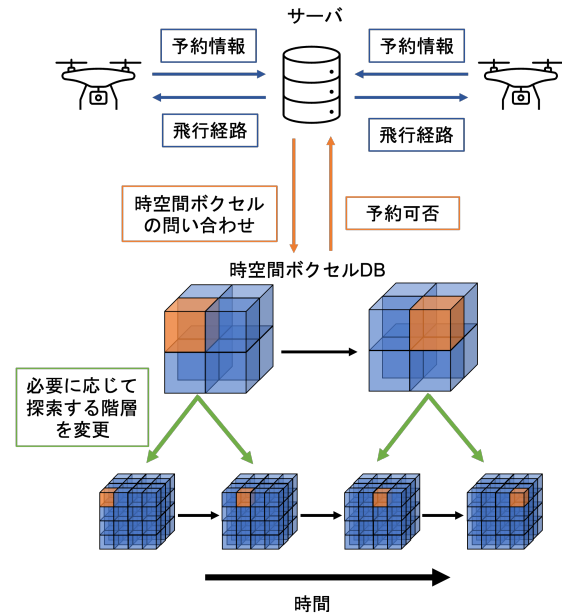


図1 提案手法の概要

セル数は  $n^3$  に達し、2次元空間における  $n^2$  に比べて探索空間が大幅に拡大し、経路探索に要する計算量が増加するという問題がある。

### 3 提案手法

#### 3.1 概要

本研究では、時空間ボクセル予約を用いた複数ドローンの効率的な経路計画を提案する。空間を一定の領域に分割し、時間軸と組み合わせた4次元のデータベースで領空間を階層ごとに粒度を変化させ管理する。これにより、衝突回避の精度を保ちつつ、経路計算にかかる処理負荷の軽減が可能となる。

提案手法の概要を図1に示す。まず、ドローンはID、出発希望時刻、出発地、目的地の情報をサーバに送信する。次に、サーバは経路計画アルゴリズムに基づき、対象となる時空間ボクセルの空き状況をデータベースに問い合わせながら、出発地から目的地までの経路を決定する。その後、サーバはデータベースに経路の予約を行う。その際に、生成された飛行経路に対応する、最下層から最上層までの時空間ボクセルを予約する。最後に、決定された飛行経路をドローンに送信する。

† 同志社大学大学院 理工学研究科 情報工学専攻 Information and Computer Science, Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University

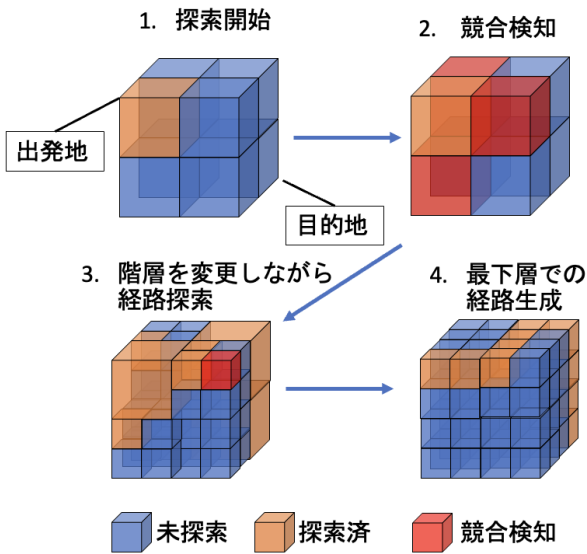


図2 階層管理による経路探索

### 3.2 経路計画アルゴリズム

ボクセルの階層構造を用いた経路計画アルゴリズムを図2に示し、以下に動作手順を示す。

1. 出発地から目的地まで、A\*アルゴリズムをもとに最上位の階層で経路を探索する。探索時には、隣接ボクセルの時空間占有状況をデータベースに問い合わせ、時空間的な衝突を回避する。
2. 上位の階層で経路が見つからない場合は、より詳細な下位の階層に遷移し、サイド探索を行う。
3. 上位の階層で未探索のボクセルに到達した場合、上位の階層での経路探索を再開する。
4. 目的地までの経路が決定すると、最終的な経路を最下層の時空間ボクセルで生成する。

## 4 評価

### 4.1 評価環境

本研究では、サーバをWebベースダイナミックプラットフォームを利用して実装し、クライアント側をUAV Toolboxを用いて実装する。データベースはMongoDBを用いる。最下層のボクセルのサイズは1mとし、空間の大きさに合わせて階層数を決定する。

### 4.2 評価項目とパラメータ

評価項目は以下の3点である。

- 経路を見つけるまでにかかる探索時間
- 展開ノード数
- 出発地から目的地までの経路長

これらの項目について、階層管理を行わない時空間ボクセル予約方式と比較し、ドローンの台数および空間の大きさを変化させながら評価を行う。

### 4.3 評価結果

飛行領域の1辺の長さを16m、階層数を2、障害物のない環境における経路探索時間を図3に、展開ノード数

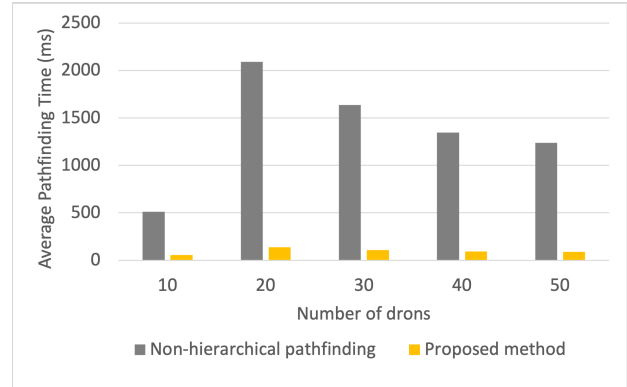


図3 平均経路探索時間の比較

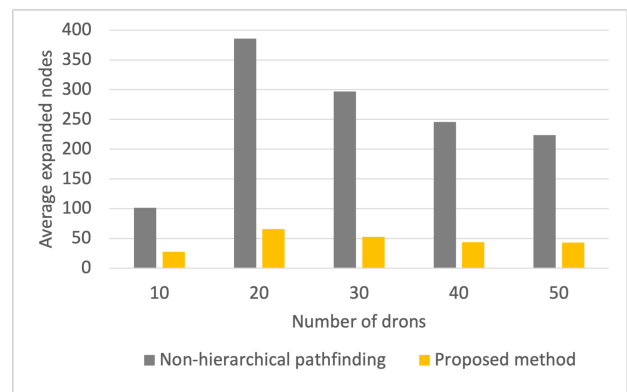


図4 展開ノード数の比較

を図4示す。時空間ボクセルを階層化することで、探索するボクセル数を削減し、経路探索時間が短縮することを示した。

## 5 まとめ

近年ドローンの経路計画に関する研究が行われているが、ドローンの台数増加に伴い計算量が膨大になるという課題がある。そこで本研究では、経路計画に要する計算時間を短縮することを目的とし、時空間ボクセル予約を用いた効率的な経路計画手法を提案した。空間を一定の領域に分割し階層構造で管理することで、衝突を回避しながら効率的な経路計画を実現する。シミュレーションの結果、階層管理を行うことで展開ノード数が減少し、経路探索時間の削減が可能であることを示した。

## 参考文献

- [1] Mohamed Emimi, Mohamed Khaleel, Abobakr Alkrash, "The Current Opportunities and Challenges in Drone Technology", International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJES), vol 1, no.3, pp.74-89 (2023).
- [2] 経済産業省, 国土交通省, 国土地理院, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 独立行政法人情報処理推進機構, "4次元時空間情報利活用のための空間IDガイドライン(1.0版)" (2025).
- [3] 木村健太, 佐藤健哉, "協調型自動運転に向けた時空間グリッド予約に基づく走行調停手法の検討", 第17回ITSシンポジウム2019, 1-A-05 (2019).