

# 有人地帯における歩行者や車両の位置情報を考慮した UAV の経路計画手法の検討

岩品 勇利<sup>1,a)</sup> 國部 匡志<sup>2,b)</sup> 加藤 翔<sup>2,c)</sup> 重野 寛<sup>1,d)</sup>

**概要：**本稿では有人地帯における歩行者や車両の位置情報を考慮した UAV の経路計画手法の検討を行う。本稿のアイデアは車両間通信にて共有される車両や歩行者の位置情報を UAV の安全な経路計画決定に活用する点である。特に市街地等の有人地帯では車両や歩行者が動的に移動しており、空を移動する UAV が落下した場合の安全性を考慮することは非常に重要である。UAV の落下時の安全性を考慮するために、UAV が落下する可能性のある危険範囲を車両や歩行者の位置情報を元に決定し、危険範囲を迂回するような経路を RRT\* (Rapidly exploring Random Tree) にて計算する。シミュレーション評価にて、最短経路を選択する手法、及び建物の上を積極的に通過することで安全性を考慮する手法、の2つの手法と比較を行い位置情報を活用する手法の有効性を検討する。

## 1. はじめに

近年、UAV の高い移動性を活用した様々なサービスが検討されている。例えばインフラ点検や交通監視等への UAV の活用が検討されており、近年では配送等の有人地帯における UAV の活用が注目されている。有人地帯における UAV の活用例として、ドローン配送会社である Wing は 2021 年に 14 万回の配送を行ったことを報告した [1]。一方で 2021 年において国内では UAV による事故が 86 件報告されている [2]。事故の原因には障害物への衝突や操作不能等が挙げられている。特に市街地等の有人地帯においては安全性のために、これらの原因による落下リスクを考慮した UAV の飛行経路を決定する必要がある。

Hu らはグラフベースアルゴリズムを用いた飛行経路決定手法を提案している [3]。Hu らは市街地を 1km 間隔の格子状に分割し、人口密度や交通量から格子点間の落下リスクを算出している。UAV は目的地点までのリスクが最小になるように格子点間を移動する。しかし市街地内の広範囲にて人口密度が高い場合 UAV の安全な飛行経路を決定することができない。Stefano らはサンプリングベースの手法である RRT\* アルゴリズム [4] を用いることで飛行

経路を決定している [5]。RRT\* アルゴリズムでは、UAV はランダムに決定された経路候補地点から最も落下リスクが低い経路地点を選択する。彼らの研究では道路や建物等に個別に落下リスクを計算している。結果、彼らは RRT\* アルゴリズムを用いて飛行経路を決定することで UAV が建物の上空を積極的に飛行することを確認している。しかし彼らの手法は人や車の動的な動きを考慮していない。結果、UAV が建物の間を移動する場合に人や車に落下する可能性がある。UAV の安全な飛行経路を実現するには人や車の動的な情報を考慮する必要がある。

本稿では、歩行者や車両の位置情報を考慮した UAV の経路計画手法の検討を行う。UAV が車両間通信にて共有される車両や歩行者の位置情報を利用することで、個々の車両や歩行者についてリスクを考慮し安全な経路を計画する。提案手法では UAV の飛行中に、落下範囲に歩行者や車両が存在するかどうか判定する。落下範囲内に車両や歩行者が存在する場合には、その地点を迂回する経路を再計算する。また迂回経路の計画には RRT\* アルゴリズムを使用する。シミュレーション評価により、既存手法との比較を行い提案手法の有効性を確認する。

第 2 章にて関連研究について述べる。第 3 章にて提案手法の説明を行う。第 4 章にてシミュレーション評価と考察を行う。第 5 章で結論を述べる。

## 2. 関連研究

UAV の飛行経路決定手法は主に、グラフベースアルゴリズムやサンプリングベースのアルゴリズムの 2 種類に分

<sup>1</sup> 慶應義塾大学理工学部情報工学科  
Faculty of Science and Technology, Keio University  
<sup>2</sup> 慶應義塾大学理工学研究科  
Graduate School of Science and Technology, Keio University  
a) iwashina@mos.ics.keio.ac.jp  
b) kunibe@mos.keio.ac.jp  
c) kato@mos.keio.ac.jp  
d) shigeno@mos.keio.ac.jp

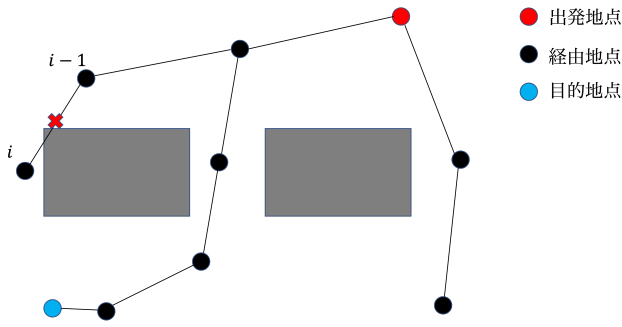


図 1: RRT\*アルゴリズム

類される。

Hu らはダイクストラアルゴリズム, A\*アルゴリズム, ACO (Ant Colony) アルゴリズムの3つを用いて, 飛行経路におけるリスクや計算時間を評価している [3]. 具体的には, 市街地を 1km 間隔の格子状に分割し, 格子点間のリスクを人口密度や交通密度に応じて算出している. しかし広範囲において人口密度が高い場合, 本手法は安全な経路を計算することが困難である. 格子点間隔を短くすることで飛行経路の候補数を増加させることが可能であるが, 一方で飛行経路を決定するために要する計算時間が増加してしまう. UAV の安全な飛行経路を決定するためにはグラフベースアルゴリズム以上に柔軟な飛行経路決定手法が必要である.

サンプリングベースアルゴリズムとして, Stefano らは RRT\*アルゴリズムを用いた飛行経路決定手法を提案している [5]. RRT\*アルゴリズムではランダムに配置された経由地点のうち落下リスクが最も小さくなる経由地点を選択する. 図 1 に RRT\*アルゴリズムの例を示す. RRT\*アルゴリズムでは経由候補地点をランダムに選択することで飛行経路を決定する. 飛行経路を決定する際, UAV は障害物と衝突するような経由地点や落下リスクが高い経由地点を除外する. 例えば図 1 にて, 経由地点  $i$  と経由地点  $i-1$  の間には障害物が存在するため, UAV は経由地点  $i$  を候補から除外する. Stefano らの研究においては, UAV は複数の飛行経路の中から最も落下リスクが小さい経路を選択する. 具体的には, 出発地点から経由地点  $n_i$  までの落下リスク  $c(n_i)$  は式 (1) によって決定される.

$$c(n_i) = c(n_{i-1}) + \frac{r(n_i) + r(n_{i-1})}{2} \Delta t(n_i, n_{i-1}), \quad (1)$$

ここで,  $c(n_{i-1})$  は出発地点から経由地点  $n_{i-1}$  までに移動する際の落下リスク,  $r(n_i)$  は経由地点  $n_i$  におけるリスク値,  $\Delta t$  は 2 地点間を移動する時間である. ここでリスク値  $r$  は式 (2) によって計算される [6].

$$r = A_{exp} \cdot D_p \cdot P(\text{fatality}|\text{failure}) \cdot f_{GIA}, \quad (2)$$

ここで,  $A_{exp}$  は衝突時の露出面積,  $D_p$  は人口密度,

$P(\text{fatality}|\text{failure})$  は UAV との衝突時に歩行者が死亡する確率,  $f_{GIA}$  は落下事故が起きる確率である. 式 (1), (2) に基づき UAV の飛行経路の決定を行った結果, Stefano らは UAV が建物の上空を積極的に飛行することを確認している.

Stefano らは RRT\*アルゴリズムを用いることで UAV の落下リスクを考慮した柔軟な飛行経路決定を行っている. しかし彼らは人や車の移動を考慮していない. 特に人や車が動くことで落下リスクは常に変化しているため UAV は人や車の動きを考慮した動的な飛行経路決定を行う必要がある.

### 3. 提案手法

提案手法では車両や歩行者の情報を考慮した UAV の経路計画を行う. 提案手法にて UAV は一定の飛行距離ごとにリスク判定を行う. リスク判定では UAV の落下範囲に人や車が存在すると判断した場合に UAV は飛行経路を再計算する. 本研究では UAV の落下範囲を風向を 360 度変化させながら実験的に求めている. また実験的に求めた UAV の落下範囲に基づき UAV の飛行経路を RRT\*アルゴリズムにて計算する.

3.1 節にて本研究のシステムモデルを説明する. 3.2 節にて UAV のリスク判定について説明する. 3.3 節にて UAV の落下範囲について説明する. 3.4 節にて UAV の落下範囲を用いた飛行経路決定手法について説明する.

#### 3.1 システムモデル

提案手法は UAV, 車両, 歩行者にて構成される. それぞれについて以下に説明する.

##### UAV

本研究では市街地に存在する車両全てから情報を受信できると想定している. UAV は与えられた飛行経路上を一定の速度で飛行する. 一定の飛行距離ごとにリスク判定を行い, UAV が落下した場合に危険であると判断した場合には飛行経路を再計算する.

##### 車両

すべての車両は通信機能を有しており, UAV に対して車両周辺の情報や走行状況を送信する. また車両は車載センサを有しており, センサによって取得した歩行者の情報も UAV に送信する.

##### 歩行者

歩行者は通信機能を持っておらず, UAV に対して自身の情報を送信しない.

#### 3.2 リスク判定

UAV は一定の飛行距離ごとに落下リスクの判定を行う. 図 2 にリスク判定の例を示す. 具体的には UAV の落下範囲に人や車が存在する可能性がある場合, UAV は飛行経路

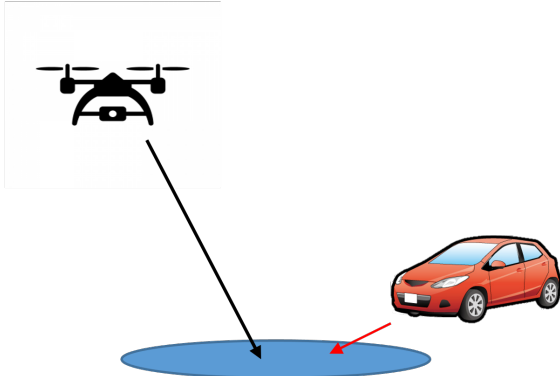


図 2: 危険な例

の再計算を行う。UAV が  $\Delta t$  秒で落下する時、位置  $(x, y)$  において速度  $v$ 、向き  $\theta$  で移動している車両や歩行者の位置  $(x', y')$  は、式 (3)、(4) にて計算される。

$$x' = x + v\Delta t \cos \theta, \quad (3)$$

$$y' = y + v\Delta t \sin \theta. \quad (4)$$

もし  $(x, y)$  が UAV の落下範囲に含まれる場合、UAV は飛行経路を再計算する。UAV の落下範囲は 3.3 節にて実験的に求めている。

### 3.3 UAV の落下範囲

本稿では、UAV の落下範囲を UAV の移動をシミュレーションする Airsim[7] にて実験的に求めた。図 3 に UAV の落下地点を示す。図 3 は高度 30m を  $x$  軸方向に 10m/s の速度で移動する UAV を  $x = 100m$  で落下させた際の落下地点を示す。UAV の落下範囲を評価する際に風速 5m/s にて風向を 360 度変化させながら評価している。図 3 の結果から UAV が高度 30m において速度 10m/s で飛行している際の落下範囲を、UAV の進行方向に対して 53.17m 進んだ地点を中心とした長径が 27.31m、短径が 2.58m の楕円として定めた。図 3 の結果から、本研究では UAV が  $(x_{uav}, y_{uav})$  に存在する場合の落下範囲を式 (5)、(6) にて定義している。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{temp} \\ y_{temp} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{uav} + 53.17 \cos \theta \\ y_{uav} + 53.17 \sin \theta \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\frac{x_{temp}^2}{(27.31)^2} + \frac{y_{temp}^2}{(2.58)^2} \leq 1, \quad (6)$$

ここで  $\theta$  は UAV の進行方向を表す。式 (6) は原点を中心とした長径 27.31m、短径 2.58m の楕円の内部を表しており、式 (5) にて式 (6) で定義された楕円を UAV の進行方向  $\theta$  だけ回転させた後に、中心を 53.17m 移動させている。 $(x, y)$  が式 (5)、(6) を満たすときに UAV の落下範囲となる。

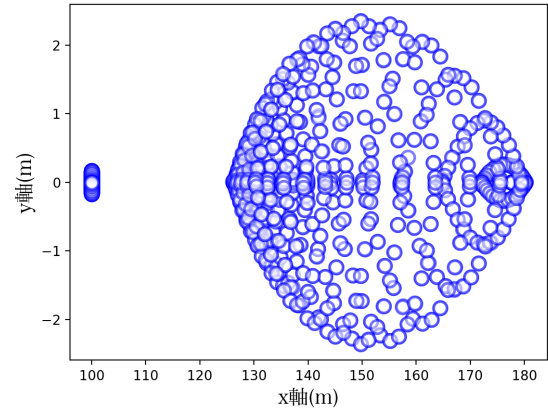


図 3: UAV の落下地点

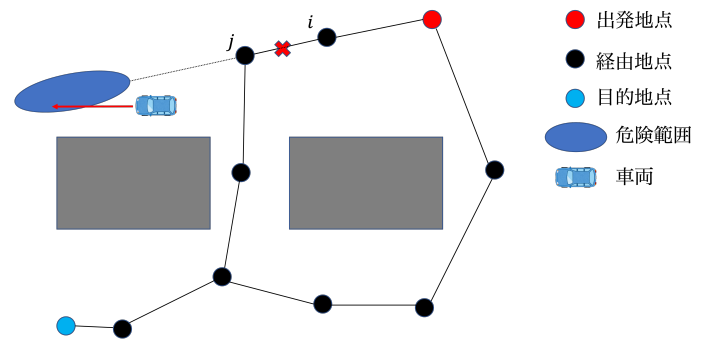


図 4: RRT\*アルゴリズムにおける判定基準

### 3.4 迂回経路の計画

リスク判定にて UAV が歩行者や車両に落下する可能性があるとして判定した場合、UAV は飛行経路を再計算する。本提案では飛行経路の決定に RRT\*アルゴリズムを用いる。RRT\*アルゴリズムの計算時間は出発地点、目的地点の距離や障害物の数に依存する。提案手法では実時間で飛行経路を決定するために、飛行経路の経由地点を一時的な出発地点と目的地点に使用することで計算時間を短縮している。図 4 に RRT\*アルゴリズムにおける判定基準を示す。図 4 において経由地点  $i$  から経由地点  $j$  に移動する場合に落下範囲に車両が存在することが予想される。この場合、経由地点  $j$  は候補から除外されることになる。最終的には落下範囲内に車両や歩行者が存在しない経由地点が得られるため、得られた経由地点を迂回経路として UAV は移動する。

## 4. シミュレーション評価と考察

シミュレーションにより提案手法が UAV の落下範囲内における車両数や歩行者数を低減することを確認する。シミュレーションには交通シミュレータである SUMO[8] と UAV のシミュレータである Airsimを用いた。比較対象には最短経路および、建物の上を積極的に飛行する手法である既存手法 [5] を用いる。シミュレーションのタイムステップは 0.1 秒とし、リスク判定は 20m ごとに一度行っ

表 1: 交通イベント

| 交通イベント | 車両数 (台) | 歩行者数 (人) |
|--------|---------|----------|
| A      | 50      | 100      |
| B      | 100     | 200      |
| C      | 200     | 400      |

表 2: UAV に関するパラメータ

| 項目   | 値       |
|------|---------|
| 重量   | 1kg     |
| 半径   | 0.2275m |
| 飛行速度 | 10m/s   |
| 飛行高度 | 30m     |

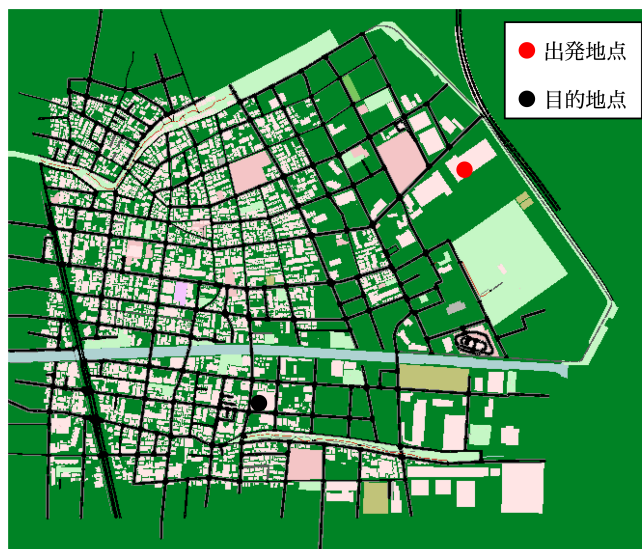


図 5: 使用したマップ

た. 本評価では, マップ内に存在する車両数ならびに歩行者数を変化させてシミュレーションを行った. 今回使用した交通イベントを表 1 に示す.

#### 4.1 想定環境

本稿では, 図 5 に示す 1km 四方の有人地帯における UAV の移動を想定する. Plateau で提供される東京都大田区のマップの一部を利用して建物の高さ情報を取得した [9]. また SUMO に対応した osm マップを取り込むことで, 道路情報を取得した [10]. マップ上には建物が存在し, また道路上を歩行者や車両が移動する. 図 5 に示す出発地点 (1100, 840) から目的地点 (580, 220) まで UAV は飛行する. UAV が持つ歩行者や車両の情報は 0.1 秒ごとに更新される. シミュレーションに用いた UAV のパラメータを表 2 に示す.

#### 4.2 飛行経路

交通イベント B における, 各手法において計画された経路を図 6 に示す. 図より提案手法は概ね既存手法と同じ

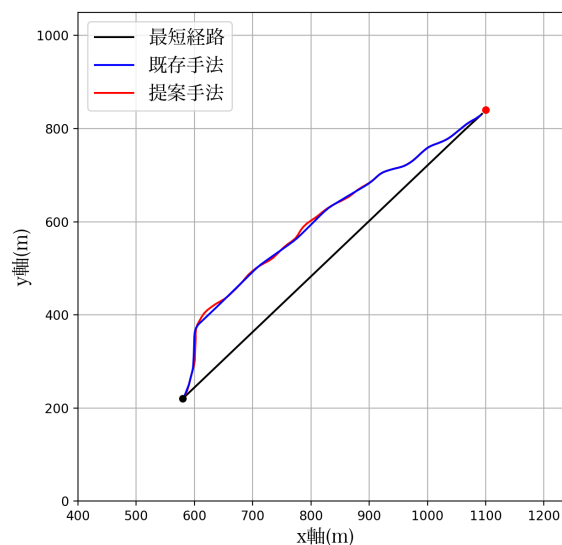


図 6: 交通イベント B における各手法の経路

表 3: 移動時間

| 経路              | 移動時間 [s] |
|-----------------|----------|
| 最短経路            | 85.406   |
| 既存手法            | 90.979   |
| 提案手法 (交通イベント A) | 90.544   |
| 提案手法 (交通イベント B) | 93.519   |
| 提案手法 (交通イベント C) | 109.467  |

経路を飛行している事が分かる. これは既存手法の経路をベースとしているためである. 一方既存手法の経路から外れる箇所が見られる. これは, 提案手法においてリスク判定を行うことで車両や歩行者を迂回する経路を再計算しているためである.

#### 4.3 移動時間

各手法における出発地点から目的地点までの移動時間を表 3 に示す. 最短経路や既存手法における経路は交通イベントの種類に依存しない. 表 3 から, マップ内に存在する車両数や歩行者数が増加するにつれて, 提案手法の移動時間は増加していることが分かる. これは歩行者や車両が UAV の落下範囲内に入る頻度が高くなり, より多く迂回経路を計画しているということが原因として考えられる. また交通イベント C のときには交通イベント A と比較して移動時間が 18.9 秒増加している. 交通イベント C の場合考慮すべき車両数や歩行者数が増え, 安全な経路が少なくなる. そのため迂回経路の計算に時間がかかり移動時間も長くなっていると考えられる.

#### 4.4 UAV の落下範囲内に存在する車両数, 歩行者数

UAV の落下範囲内に存在する車両数および歩行者の総

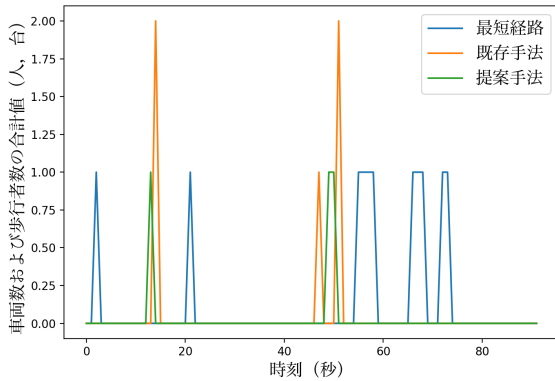


図 7: 交通イベント A における UAV 落下範囲内に存在する車両数および歩行者数

数について評価を行った。表 1 の通りに、マップ内の車両数および歩行者数を変化させ評価を行った。各交通イベントにおける評価結果を図 7～図 9 に示す。図は出発地点から目的地までの UAV の位置情報に基づき、各タイムステップにおいて 3.3 節で決定した落下範囲をもとに、その範囲内に存在した歩行者および車両数を表している。

図 7 に交通イベント A の結果、図 8 に交通イベント B の結果を示す。図より提案手法と既存手法では時間的に近い領域で落下範囲内に車両や歩行者が存在していることが読み取れる。これは提案手法で用いるベースとなる経路が既存手法の経路に依存していることが原因として考えられる。

提案手法の落下範囲内に存在する歩行者と車両の総数は、交通イベント A の場合、最短経路と比較して 72.7 % 減少、既存手法と比較して 40.0 % 減少した。交通イベント B の場合、最短経路と比較して 21.1 % 減少、既存手法と比較して 11.8 % 減少した。提案手法は既存手法と比較し、全体における落下範囲内に存在する車両数および歩行者数の総数を抑制することを確認した。マップ内に存在する車両数や歩行者数が少ない場合には、提案手法がより安全な経路を計画できることがわかった。

図 9 に交通イベント C の結果を示す。提案手法は既存手法と比較し落下範囲内に存在する車両や歩行者数の最大数を低減することが分かる。しかし、出発地点から目的地まで移動する間に落下範囲に存在した歩行者、車両の総数は最短経路や既存手法と比較して共に 38.5 % 増加した。これは道路上の歩行者や車両の密度が高くなることで、歩行者や車両が UAV 落下範囲内に存在する頻度が増え、迂回経路を飛行する距離、迂回経路を計算するのにかかる時間が増えてしまっていることが原因だと考えられる。移動時間の増加に伴い、落下範囲に車両や歩行者が存在するかどうか判定する時間が増えるため、総数が増加したと考えられる。

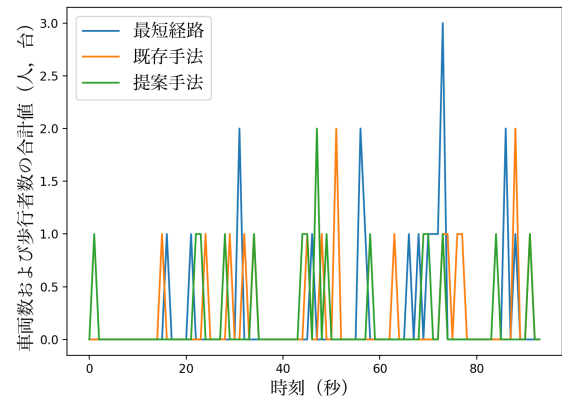


図 8: 交通イベント B における UAV 落下範囲内に存在する車両数および歩行者数

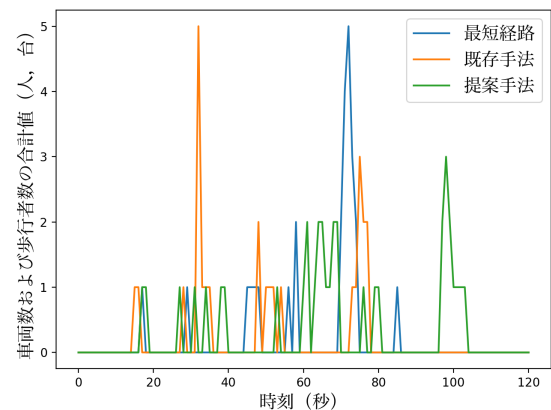


図 9: 交通イベント C における UAV 落下範囲内に存在する車両数および歩行者数

## 5. 結論

本稿では、有人地帯における歩行者や車両の位置情報を考慮した UAV の経路計画手法の検討を行った。提案手法では、歩行者や車両の位置情報や速度情報を取得することを想定して安全性の高い経路計画を行った。リアルタイムに位置情報や速度情報を取得することで、UAV の落下範囲内に存在する車両や歩行者の数を低減することを目指した。シミュレーション評価によりマップ内に存在する歩行者や車両の数が少ない場合に落下範囲内に存在する総数を低減することを確認した。

**謝辞** 本稿の一部は、東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究の支援により実施されたものである。

## 参考文献

- [1] Wing: 2021 The year that drone delivery took off, <https://blog.wing.com/2021/12/2021-year-that-drone->

- delivery-took-off.html.
- [2] 国土交通省：令和 3 年度 無人航空機に係る事故トラブル等の一覧，<https://www.mlit.go.jp/common/001408112.pdf>.
  - [3] Hu, X., Pang, B., Dai, F. and Low, K. H.: Risk Assessment Model for UAV Cost-Effective Path Planning in Urban Environments, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 150162–150173 (2020).
  - [4] Karaman, S. and Frazzoli, E.: Sampling-based algorithms for optimal motion planning, *The international journal of robotics research*, Vol. 30, No. 7, pp. 846–894 (2011).
  - [5] Primatesta, S., Cuomo, L. S., Guglieri, G. and Rizzo, A.: An innovative algorithm to estimate risk optimum path for unmanned aerial vehicles in urban environments, *Transportation research procedia*, Vol. 35, pp. 44–53 (2018).
  - [6] Dalamagkidis, K., Valavanis, K. P. and Piegler, L. A.: *On integrating unmanned aircraft systems into the national airspace system: issues, challenges, operational restrictions, certification, and recommendations*, Springer science & Business Media (2011).
  - [7] Shah, S., Dey, D., Lovett, C. and Kapoor, A.: Airsim: High-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles, *Field and service robotics*, Springer, pp. 621–635 (2018).
  - [8] Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M. and Bieker, L.: Recent Development and Applications of {SUMO - Simulation of Urban MObility}, *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, Vol. 5, No. 3, pp. 128–138 (2012).
  - [9] 国土交通省：Project PLATEAU ver1.0 をリリースー全国 56 都市の 3D 都市モデル整備とユースケース開発が完了ー，[https://www.mlit.go.jp/report/press/toshi03\\_hh\\_000074.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/toshi03_hh_000074.html).
  - [10] OpenStreetMap contributors: OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org>.