

推薦論文

狭小空間監視のためのドローンを利用した AR可視化方式の実装と評価

竹内 一真^{1,a)} 滕 睿² 佐藤 健哉^{1,2}

受付日 2020年0月0日, 採録日 2020年0月0日

概要: 近年, 小型ドローンは機体が小さいことから, 人間が入れないような狭小空間での利用が検討されている. しかし, 狭小空間では遮蔽物が多いため, 操縦者の死角領域内にてドローンを飛行させる必要がある. また小型ドローンは, 搭載可能なセンサの制約条件が大きく, 十分に周辺を監視することができないため, 衝突する恐れのある障害物が多く存在する狭小空間では, 安全なドローン操縦は困難である. そのため, 高い安全性が求められる点検現場や, 迅速な対応が求められる災害現場のような狭小空間では, 安全で迅速にドローンを飛行できる快適な操縦性が必要となる. そこで, 操縦者とドローンの間に遮蔽物が存在し, ドローンを視認できない狭小空間に対して AR を利用することで, 操縦を支援する方式を検討する. 本稿では, 三次元環境地図を事前に作成し, 遮蔽物により視認できない空間, ドローンを可視化した上で, AR を用いたドローン近傍の障害物を知覚する方式を提案し, 従来の操縦と AR を用いた方式を比較し, 評価した. その結果, AR ありの方式では一貫して平均操縦時間, 平均衝突警告回数が減少し, 操縦性の向上を示した.

キーワード: AR, 三次元環境認識, 可視化

Implementation and Evaluation of a Drone-Based AR Visualization Method for Narrow Space Surveillance

KAZUMA TAKEUCHI^{1,a)} RUI TENG² KENYA SATO^{1,2}

Received: xx 0, 2020, Accepted: xx 0, 2020

Abstract: In recent years, small drones have been examined to play an active role in narrow spaces where humans cannot enter due to the small size of the spaces. However, it is difficult to control the drone within the pilot's blind spot where there are many obstructions in a small space. In addition, small drones are limited in sensor installation, and it is difficult to autonomously avoid obstacle. Therefore, it is desired to enable the safe and quick maneuverability of drone in confined spaces, at inspection sites with high risk of collision, and at disaster sites where quick response is required. Augmented Reality can address these issues for the environments where the drone cannot be seen due to the presence of obstructions between the operator and the drone. In this paper, we propose a method of perceiving obstacles in the vicinity of a drone using AR by means of creating a three-dimensional map of the environment in advance and visualizing the space and drone that cannot be seen due to obstructions. As a result, the average maneuvering time and the average number of collision warnings were consistently reduced in the performance of the method with AR, indicating an improvement in maneuverability.

Keywords: augmented reality, 3D environment recognition, visualization

¹ 同志社大学大学院 理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto 6100321, Japan

² 同志社大学モビリティ研究センター
Mobility Research Center, Doshisha University, Kyotanabe,

Kyoto 6100321, Japan
^{a)} kazuma.takeuchi@nislabs.doshisha.ac.jp

1. はじめに

近年、多方面でのドローンを活用した事業が登場しており、インフラ点検や災害調査など、応用分野を拡大しながら、ドローン用途は急速に成長し、熟練された操縦者に限らず、より多くの人がドローンを使用する機会が増加している [1] [2]. 中でも小型ドローンの特徴である機体の大きさを活かして、人間が入れないような狭い空間での活躍の場も増加している [3] [4]. しかし、狭小空間での小型ドローン飛行は、遮蔽物が多く、操縦者は遮られた視点からの操縦を必要とする [5]. 本論文では、狭小空間により、操縦者と小型ドローンの間に遮蔽物があり、小型ドローンを視認できない環境を「死角領域」と定義する. 死角領域内の小型ドローン操縦では、小型ドローンを視認できない中、衝突することなく、安全に操縦する技術が求められる.

ドローンの操縦に関する技術の提案は複数あるが [6] [7] [8], ドローンを操縦する際の視点の呼び方について統一した定義がないため、本論文ではドローン操縦視点を次のように定義し、各操縦視点の概要を図 1 に示す.

- 一人称視点：ドローンを操縦する操縦者の視点. 操縦者の視点から視認できる範囲のみを頼りに操縦を行う.
- 二人称視点：ドローンに搭載されたオンボードカメラの視点. 操縦者はドローンから送られる空撮した映像を基に、ドローン中心の視点での操縦を行う. 本研究では死角領域内での操縦を前提としているため、操縦者はドローンから送られる空撮した映像のみを頼りに操縦を行う.
- 三人称視点：ドローンの視点でもなく、操縦者の視点でもなく、それ以外の環境に設置されたカメラの視点. ドローンのカメラ映像や、実物のドローンを視認することなく操縦を行う.

一人称視点操縦の場合では、操縦者はドローン周辺の状況を視認し、把握することができ、また、ドローンの実際の高さや位置を正確に把握することができる [9]. しかし、一人称視点による操縦では、操縦者から見えるドローンまでの距離感が掴めないため [7] [10], ドローン周辺の障害物へ衝突する恐れがある. 大型ドローンでは、自律飛行や障害物回避などの機能が実現されているが、センサ搭載制限のある小型ドローンでは、障害物回避の支援がないことが多く、衝突の危険性がある. また、障害物回避を搭載していても、狭小空間では障害物回避が行えない場面が多く存在する [11].

二人称視点操縦の場合では、操縦者はオンボードカメラ搭載ドローンを使用することで、ドローンから送られる空撮した映像を元に操縦が可能となる [12]. 実際の現実空間を映像として見ながら操縦できるため、現実のドローンを視認することなく、狭小空間を探索することができる [9].

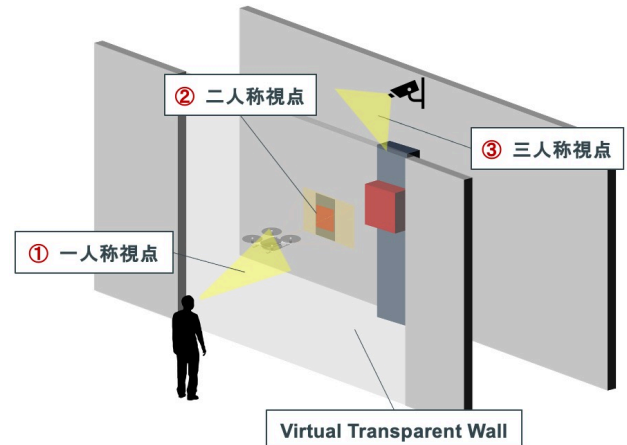


図 1 死角領域内の AR 可視化

Fig. 1 AR Visualization in the Blind Spot Area.

しかし、カメラが前方しか写さないことにより [13], カメラ映像のみを頼りに操縦する必要がある. カメラ映像だけでは、空間認識能力が低下し [14], 状況認識が不十分となるため [15] [16], 狭小空間のように狭く、障害物が多いような環境では、操縦は困難である.

三人称視点操縦の場合では、主に遠隔操作を行う必要がある環境下において検討され、Virtual Reality (VR) を利用することで、操縦者の物理的な視点とは独立した多視点を追加・移動させることにより、ドローン操縦性を向上することができる [17]. しかし、VR では仮想空間に没入した状態でドローン操縦を行うため [18], 操縦者が完全に仮想環境へ没入し、現実環境で起こった変化などを目視することができず危険である.

本研究では、狭小空間による死角領域内の小型ドローン (以下、ドローン) 飛行の危険性を軽減するため、Augmented Reality (AR) により操縦者の死角領域内を可視化した一人称視点によるドローン操縦を実現する. AR は現実の物体の上に、仮想情報を重ねて表示することができるため、この技術を応用する [19] [20]. また、狭小空間では手動によるドローン操縦が求められるため、操縦者にとって障害物回避に有効な情報を確かめるべく、ドローン近傍の障害物を検知する AR 方式を提案する. 評価実験は、ドローン操縦の危険性が高い既知の狭小空間探索で行い、狭小空間を素早く、安全に飛行できるか調査した. 探索完了までのドローンの平均操縦時間と、ドローン周辺に位置する障害物への平均衝突警告回数を評価した結果、AR を利用した方式では平均操縦時間、平均衝突警告回数が共に少なかったことから、狭小空間による死角領域内のドローン操縦性向上を示した.

本研究の主な貢献は以下の通りである.

- 狭小空間内による死角領域内のドローン操縦における、操縦者がドローンを視認できないことによる操縦性の低下、周辺の障害物への衝突危険性の増加の 2 点

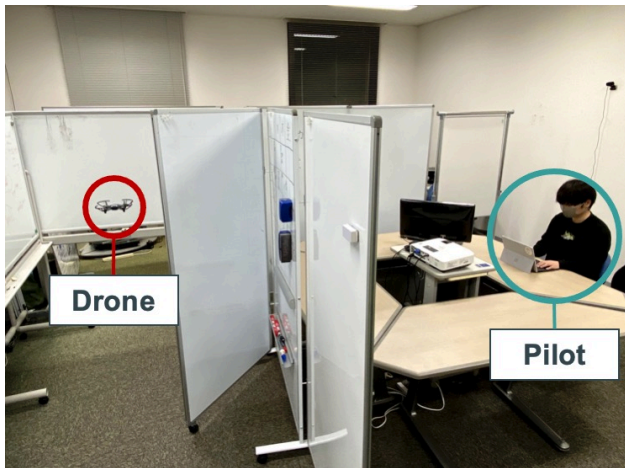


図 2 死角領域内におけるドローン操縦環境

Fig. 2 Drone Control Environment in the Blind Spot Area.

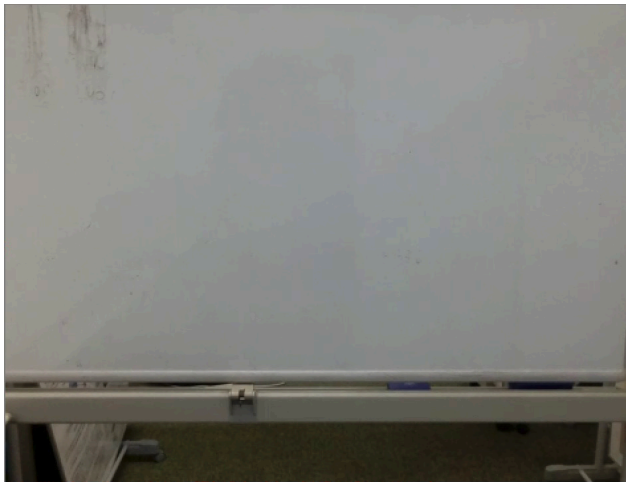


図 3 一人称視点方式による操縦画面

Fig. 3 First-Person View Control Screen.

の問題点を解決するため、AR と静的な三次元環境地図を利用し、ドローン周辺の障害物を知覚する二種類の AR 方式を実現した。

- 開発した AR 方式の性能を、従来のドローン操縦手法である二人称視点操縦と比較して分析し、狭小空間監視において、どのようなドローン操縦が操縦性、安全性を低減させるか調査した。
- 実現した各 AR 方式を比較して分析し、操縦者へ与える情報量と空間認識能力のトレードオフの調査を行うことで、狭小空間監視におけるドローン操縦にて、操縦者が必要とする情報を示した。

2. 関連研究

2.1 狭小空間監視での AR 利用の有意性

Walker らの研究 [21] では、人間と自律飛行するドローンの共同作業において、ドローンが今後行う予定である動作を同じ場所にいるユーザーに伝える AR インタフェー

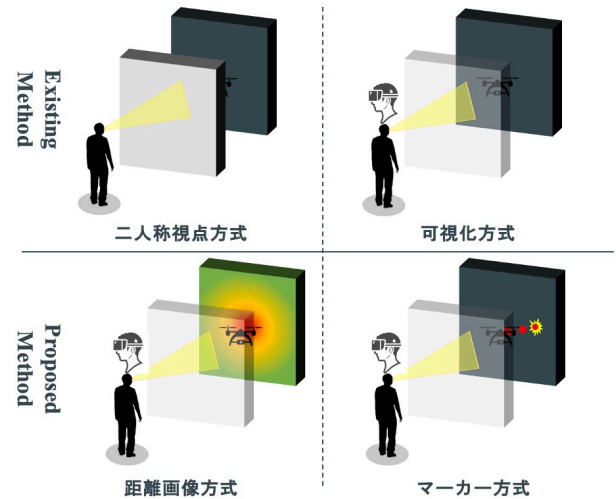


図 4 提案方式概要

Fig. 4 Outline of Proposed Method.

スを開発し、人間がドローンの動作意図を理解し、今後の行動を予測できるか検証した。その結果、ドローンに対し AR を用いたデザインは、AR なしと比べ、課されたタスク効率を大幅に向上させ、AR を用いることでドローンの操縦性を向上させるための、直感的で視覚的な合図を提供できることが示された。

Hedayati らの研究 [22] では、一人称視点のドローン操縦において、オンボードカメラ搭載ドローンの撮影した映像を、AR 可視化する手法を提案している。結果として、遠隔操作におけるドローン飛行の衝突回数を減少させた。

Kameda らの研究 [23] では、監視カメラが埋め込まれた場面において、カメラ付き handy subnotebook PC (HPC) を用いた新しい屋外型複合現実感システムを提案しており、建物や壁などの構造物に隠れて見えない不可視領域の状況を、リアルタイムで可視化できることを示した。

このように、ドローンや死角領域に対して AR を用いた関連研究があり、狭小空間による死角領域内のドローン飛行においても適合すると推測する。また、AR を用いて現実空間に仮想情報を重畳表示することが、効果的であったことを考慮すると、操縦者の見ている現実環境に作用する余地がある二人称視点でのドローン操縦が適していることを示唆している。

2.2 狭小空間におけるドローン操縦手法

Liu らの研究 [24] では、三人称視点のドローン操縦において、操縦者前方の床やテーブル上にドローン周辺の三次元環境を AR 表示することにより、自律飛行するドローンに適切な目的地を提供することを可能にする AR インタフェースを提案している。結果として、操縦者はドローン周辺の三次元環境に没入することができ、飛行空間の探索に成功することができた。しかし、自律飛行することのできない狭小空間では、操縦者の意図を伝えて飛行させるこ

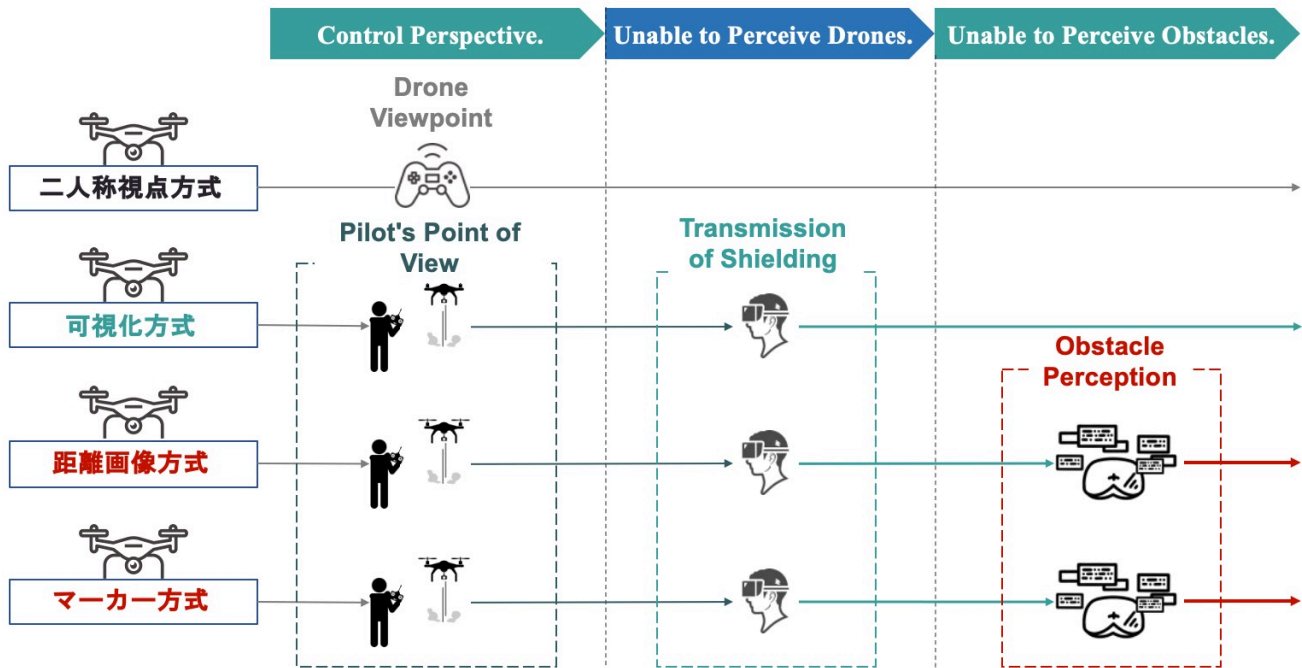


図 5 各方式がサポートする機能
Fig. 5 Functions Supported by Each Method.

とができない。また、デスクトップ PC インタフェースと比較評価した結果、AR インタフェースは操作精度を犠牲にしていた。そのため、タスク完了までに時間がかかる問題を抱えており、ドローン操縦性を低減する可能性が高い。

Erat らの研究 [25] では、狭小空間による死角領域内の、一人称視点でのドローン操縦手法を提案している。図 1 が示すように、事前に空間マッピングにて用意した三次元環境を用いて、閉鎖環境を AR 可視化している。結果として、ドローン視点での二人称視点操縦と比べ、一人称視点でのドローン操縦手法では、タスク完了までの操縦時間が半分以下となっている。

しかし、この関連研究では、ドローン飛行の際に、障害物に衝突しそうになると強制的に衝突しない経路を進むよう設定しているため、操縦者が死角領域内にてドローンを操縦しやすい環境となっている。また、二人称視点操縦では、ジョイパッドを用いて操縦していた一方で、一人称視点操縦では、ハンドジェスチャで操縦しており、タスク完了までの操縦時間への有意差が、AR による空間認識の提供により引き起こされたか明確に述べられていない。そのため、AR により狭小空間でのドローン操縦性向上が示せるかを確認するため、障害物への衝突の危険性を提示し、また、ドローン操縦の方法を統一する必要があると考える。

3. 提案方式

3.1 概要

本研究では、図 2 の環境におけるドローン操縦を想定し

ており、AR を用いて死角領域内の空間認識を提供し、ドローン周辺の障害物を知覚させることで、ドローン操縦性を向上させる。

先に述べた関連研究 [25] を元に、本研究では 2 つのドローン操縦手法を用意し、二人称視点方式、可視化方式と呼ぶものとする。図 3 に示す、ドローンが撮影する映像を頼りに操縦を行う従来のドローン操縦手法である二人称視点方式と、図 1 を参考に作成した AR を用いて死角領域内の空間認識を提供する可視化方式を比較することにより、関連研究の問題点である死角領域内への AR 適用の有用性を検討する。

また、本研究では可視化方式を元に、ドローン周辺の障害物知覚を支援する 2 つの方式を提案する。この 2 つの方式をここでは、距離画像方式、マーカー方式と呼ぶ。これら二人称視点方式、可視化方式、距離画像方式、マーカー方式の 4 つの方式を比較することで、どのような情報が死角領域内のドローン操縦に有効であり、操縦性の向上を示せるか評価する。各方式の概要を図 4、サポートしている機能を図 5 に示す。また図 6 に、可視化方式、距離画像方式、マーカー方式の 3 つの方式の操縦者目線を示す。

3.2 可視化方式

可視化方式では、ドローンと操縦者の間に遮蔽物が存在する場合、ドローンが飛行している場所が操縦者にとっての死角領域となる。死角領域が存在すると判断したとき、事前に空間マッピングした三次元環境地図における遮蔽物

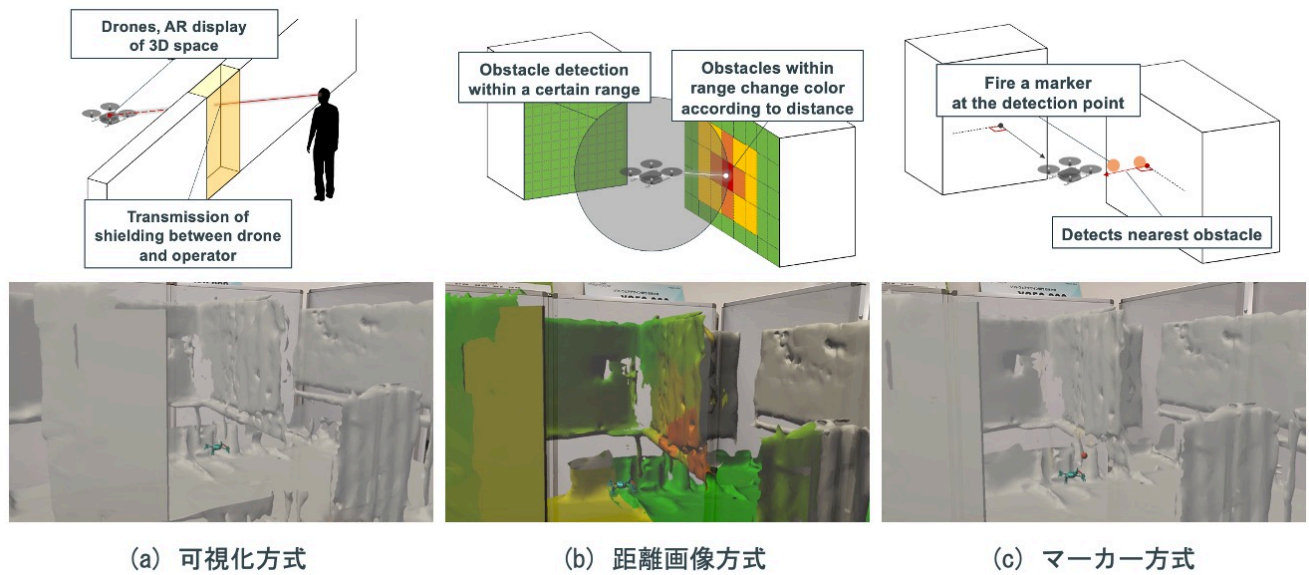


図 6 各方式の概要および操縦者目線
Fig. 6 Overview of Each Method and the Pilot's Perspective.

を透過した上で、現実環境に重畳表示することで、仮想的に死角領域の空間認識を提供する。操縦者は、死角領域内を飛行するドローンを視認することはできないが、ARによって仮想のドローンと、ドローン周辺の三次元環境を視認することができる。

関連研究 [25] とは異なり、ドローン搭載のカメラ映像は操縦者へ提供せず、他の方式と同様の操縦方法でドローンを飛行させる。関連研究を拡張した、評価における比較方式となっている。

図 6 左のように、遮蔽物によって視認できないドローンと、そのドローン周辺の環境を AR によって可視化している。障害物を知覚せず、可視化による空間認識の視覚支援のみを行っている。

3.3 距離画像方式

距離画像方式は、ステレオビジョンを参考にして、ドローンから障害物までの距離に応じて、障害物の色を分けている。障害物を 3 色に分類することで、近傍の障害物の危険性を警告する。距離画像方式は、全体的な環境の理解を提供しており、ドローン周辺の障害物に対する衝突の危険性を示す。

距離画像方式では、障害物までの危険な距離を閾値 a 、未だ猶予はあるが慎重に動くべき距離を閾値 b とする。常に周りの障害物までの距離を計測し、閾値を元に以下のいずれかの動作をする。

- (1) ドローンからの距離が閾値 a 未満の障害物を赤色に変更
- (2) ドローンからの距離が閾値 a 以上 ~ 閾値 b 未満の障害物を赤色から黄色に変更

- (3) ドローンからの距離が閾値 b 以上の障害物を緑色に変更

図 6 中央のように、ドローン本体ではなく、ドローン周辺の環境を拡張しており、ドローン周辺の障害物の危険度を理解できる、色彩の変化による視覚支援を行なっている。赤色に変化した障害物の方向には衝突の危険性、黄色になっている障害物の方向には慎重な操縦の必要性、一方で緑色の障害物の方向には進んでも衝突の危険性がないことを示し、操縦者への安心感を提供する障害物知覚を行っている。

3.4 マーカー方式

マーカー方式は、ドローンから見て最も近い障害物に対して、障害物までの距離に応じて、色分けを行なった目印を付けている。距離画像方式では障害物すべてが色分けされているため、操縦者を混乱させる可能性がある。マーカー方式では、選択的注意を参考に、最も危険な障害物のみを知覚させるため、距離画像方式に比べ簡易的なアプローチとなっている。

マーカー方式では、障害物までの危険な距離を閾値 a 、未だ猶予はあるが慎重に動くべき距離を閾値 b とする。常に周りの障害物までの距離を計測し、閾値を元に以下のいずれかの動作をする。

- (1) ドローンからの距離が閾値 a 未満の最も近傍の障害物に対して赤色の目印を示す
- (2) ドローンからの距離が閾値 a 以上 ~ 閾値 b 未満の最も近傍の障害物に対して黄色の目印を示す

図 6 右のように、ドローン自体を拡張しており、どの障害物が危険か一目で理解できる、直感的視覚支援を行なっ

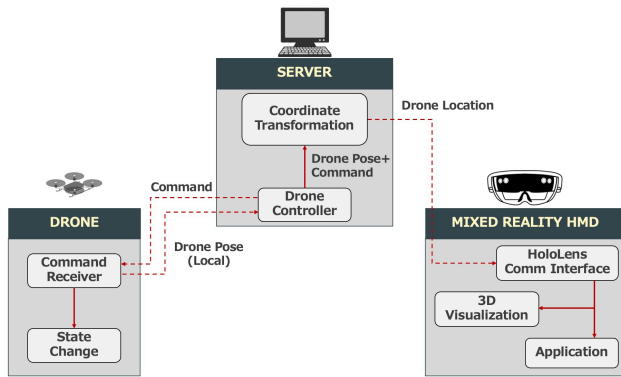


図 7 システム構成

Fig. 7 System Configuration.

ている。赤色の目印が向けられている障害物はこれ以上進むと衝突の危険性があり、黄色の目印が向けられている障害物は慎重な操縦を求め、操縦者への危機感を与える視覚的支援を行なっている。

4. 評価

4.1 実装環境

本研究で開発したシステム構成を図 7 に示す。実際に使用したドローンは Ryze Tech 社製 Tello EDU (以下、Tello) であり、操作端末は MacBookPro を用いる。Tello はプログラミングによってフライトコントロールを行うことができ、規定のコマンドを送信することで飛行制御することができる。

MacBookPro のキーボードと Tello のコマンドを結びつけ、キーボードを押下することによりコマンドを実行し、ドローン操縦を行なっている。そのため、ドローン移動のために押下されたキーボード情報より、ドローンに送信されたコマンドを特定し、Tello より受け取った IMU 情報を合わせて移動経路を予測することで、ドローンの位置情報を取得する。

ARHMD は Microsoft HoloLens2 (以下、HoloLens) を使用する。事前に、HoloLens の Spatial Mapping により空間マッピングを行うことで空間のメッシュデータを入手し、静的な三次元環境地図を作成する。作成した三次元環境地図を、ゲーム・アニメーションエンジンである Unity 内の 3D 仮想空間上に配置し、操縦者の位置情報と、Unity 内の三次元環境地図の位置合わせを行うことで、空間認識を提供する。また、実験を行う中で、実験協力者より AR による可視化の遅延を提示されたことはなく、実験で戸惑うこともなかったため、AR による可視化の遅延が操縦に影響を与えることはない。

サーバでは Tello, HoloLens と UDP 通信 [26] を行っており、常時、Tello の傾きや移動距離を HoloLens に送信する。Tello より受け取った値を Unity 座標系へ変換し、変換後の値を反映させることにより、仮想ドローンの位置

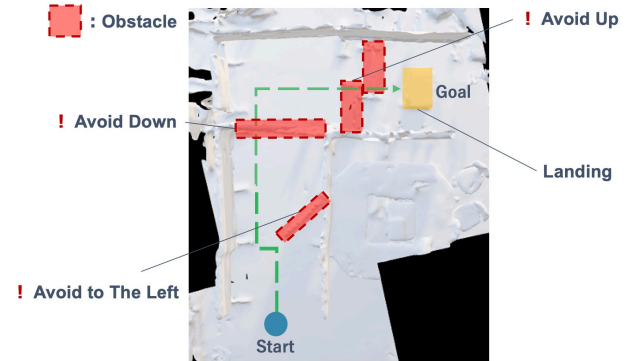


図 8 実験環境

Fig. 8 Experimental Environment.

合わせを行っている。ここで UDP を使用する理由として、Tello, サーバ, HoloLens 間の遅延低減を目的とする。

距離画像方式、マーカー方式では、共に障害物までの距離によって、危険度を色で示している。操縦者がドローンを操縦するとき、衝突する危険性がある距離を 0.3m とし [27], 距離画像方式では、障害物までの距離が 0.3m までを赤色、0.3m ~ 0.6m までを黄色、0.6m 以上を緑色で示す。マーカー方式では障害物までの距離が 0.3m までを赤色の目印、0.3m ~ 0.6m の際に黄色の目印を示す。これは、ドローンが決められた幅の枠を通過する際に、枠の幅が 0.3m の場合にドローンと枠が衝突する危険性が向上していたため [27], 本研究の実験環境の中でドローンを一定の枠の幅で動作させる際も、ドローンの位置と枠の距離が 0.3m 以内の場合には衝突危険性が増加すると判断し、衝突の危険性の距離を 0.3m としている。

4.2 タスク

実験環境は図 8 に示すように、スタート地点、障害物、ゴール地点で構成されており、実験参加者は、ドローンをスタート地点から目的地まで操縦し、目的地で着陸するタスクを行った。その間、上下左右に移動しなければ衝突の恐れがある障害物を設置した。図 8 に赤色の点線で示されている障害物を回避する必要がある、避けなければ通過が困難になるよう設定している。実際の狭小空間では、速さではなく、衝突のない安全飛行が必要であるため、参加者にはタスクの早期終了ではなく、障害物にぶつかることなく、慎重に通過することを要求した。

実験では二人称視点方式、可視化方式、距離画像方式、マーカー方式の計 4 つの方式を用いた。AR を用いた方式では、ドローンの進行方向を分かりやすくするため、ドローン前方を赤色で示している。

4.3 評価実験

死角領域内を飛行するドローンの操縦において、各方式

表 1 サーバの性能

Table 1 Server Performance.

OS	macOS 11.0.1
CPU	2.4 GHz Intel Core i4
メモリ	8 GB
使用言語	Python 2.7

表 2 ドローンへ送信するコマンドのパラメータ

Table 2 Parameters of the Command to Be Sent to the Drone.

命令コマンド	パラメータ
前進後退	0.3 m
左右移動	0.3 m
上昇下降	0.3 m
左右旋回	20 度
送信間隔	0.3 m

がどのような影響を与えるかを評価するため、10 人の実験協力者による実験を行なった。参加者の平均年齢は 22 歳であり、ドローン操縦経験はなかった。実験は約 60 分で行い、導入、各提案方式の練習、AR のキャリブレーション、タスク、アンケートの 5 つのフェーズから構成する。

まず、参加者は本研究の概要と、操縦方法の説明を受け、その後、各方式の練習を行う。予備実験で、操縦の慣れによる実験後半の操縦時間短縮や、AR の経験がないことによる操縦時間増加を引き起こすことがわかった。そのため、この効果を打ち消すために、ドローン操縦を 5~10 分ほど練習した後に、各方式で実験環境を 1 度飛行することで、練習量を増やし、慣れによる差異を無くした。

次に AR 方式では、HoloLens アプリケーションを起動し、現実空間とのキャリブレーションを行い、参加者は HoloLens を装着した。

その後、タスクを行い、各方式でタスクを完了する度に、実験を行なった方式についてアンケートを記入し、全方式を終了したら、どの方式が最も効果的であったかを選択し、その理由を記入してもらった。また、なぜ他の方式を選択しなかったのか、その理由も記入してもらった。

4.4 評価項目

提案方式の有効性を評価するにあたり、ドローン技術の熟練度による差を出さないために、Tello の速度、一度に進む距離、旋回角度は事前に設定している。またサーバのスペック、サーバより Tello へ送信するコマンドのパラメータの設定を表 1、表 2 に示す。

狭小空間監視では、衝突することのできない点検や、迅速な対応が求められる災害現場など、ドローンを素早く、安全に操縦することが求められる。そのため、各方式における、操縦者がタスクを完了するまでの操縦時間、障害物への衝突警告回数の 2 項目による客観的な評価と、参加者へのアンケート、自由回答による主観的な評価を記録した。

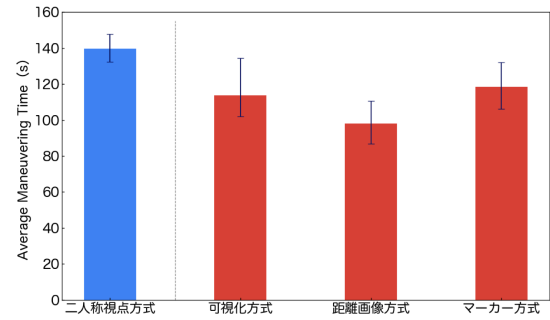


図 9 平均操縦時間

Fig. 9 Average Maneuvering Time.

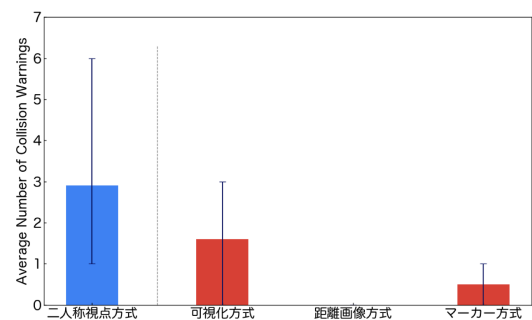


図 10 平均衝突警告回数

Fig. 10 Average Number of Collision Warnings.

本研究では、実際にドローンが障害物に衝突しないように、障害物へ衝突する直前に衝突警告を表示しており、衝突警告の回数を衝突警告回数としている。仮に操縦者がドローンに進行命令を出した場合、ドローンの進行方向に位置する障害物を特定し、障害物までの距離を計測する。表 2 に示すように、ドローンの進行距離を 0.3 m としているため、計測した距離が 0.3 m 以内の場合は障害物に衝突することが確定となるため、操縦者へ衝突警告を表示し、ドローンの進行命令を消している。

また参加者へのアンケートでは、主観的な認識と好みを測定するために、1 ~ 7 の 7 段階のリッカート尺度 (1 = 全く同意しない, 7 = 完全に同意する) のアンケートを実施した。アンケートでは二人称視点方式と AR を利用した 3 つの各方式を比較できるように実施し、また、AR 同士での比較が行えるように、AR を用いた方式のみ別途アンケートを実施した。

二人称視点方式と AR を用いた 3 つの各方式を比較するアンケートでは、操縦の安心度、危険な障害物を判断できたかの 2 項目を設けた。また、AR を用いた方式のみを比較するアンケートでは、状況把握の容易さ、操縦の自信度の 2 項目を設けた。実験の最後には、参加者にはどの方式が最も操縦性が良かったかを選択し、なぜその方式が良

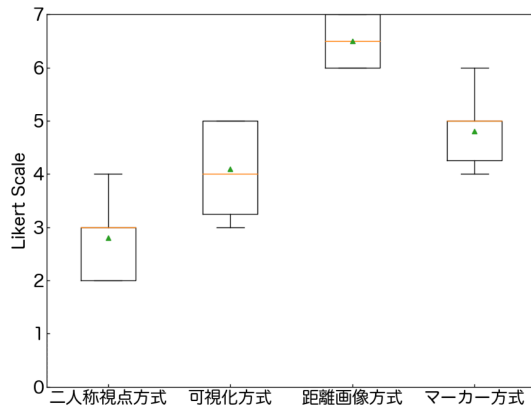


図 11 操縦の安心度

Fig. 11 Level of Security of Operation.

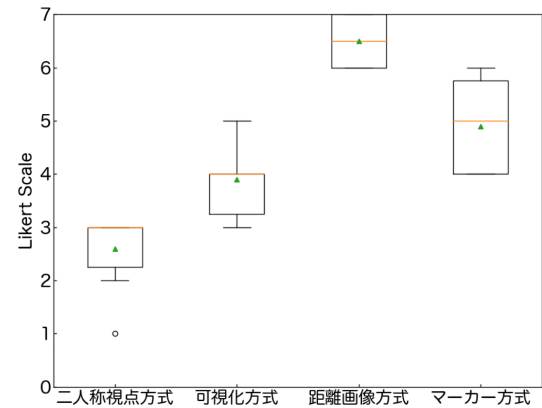


図 12 危険な障害物を判断できたか

Fig. 12 Dangerous Obstacle Perception.

かったのか、また、なぜ他の方式を選択しなかったかという項目を設けた。

タスク完了までの平均操縦時間には一元配置分散分析 (one-way analysis of variance: 以下, ANOVA) を用いて統計解析した。また, Post-hoc 検定では, Tukey's Honestly Significant Difference (Tukey HSD) 検定を行い, 各方式の比較を行なった。平均衝突警告回数, アンケート結果では, Friedman 検定を行い, Post-hoc 検定では Bonferroni 法を行い, 各方式の比較を行なった。

4.5 ドローン操縦の定量的評価

タスク完了までの平均操縦時間の評価結果を図 9 に示す。平均操縦時間では, ANOVA の結果, 4 方式の少なくともどれか一つに有意な差があった ($F(3,36) = 48.35, p < 0.001$)。Tukey HSD 検定を用いた多重比較 ($p < 0.05$) では, 二人称視点方式と AR を用いた各方式を比較した場合, 可視化方式 ($p < 0.001$), 距離画像方式 ($p < 0.001$), マーカー方式 ($p < 0.001$) は二人称視点方式より, 平均操縦時間は有意に減少することがわかった。距離画像方式では, 従来の操縦手法である二人称視点方式の平均操縦時間と比較して約 30% 減少しているため, AR 方式の中でも平均操縦時間を大いに削減している。

AR を用いた方式同士では, 距離画像方式と各方式を比較した場合, 可視化方式 ($p < 0.001$), マーカー方式 ($p < 0.001$) より有意に平均操縦時間が減少したことがわかった。しかし, マーカー方式は可視化方式と比較して, 有意に平均操縦時間が減少しないことがわかった ($p = 0.545$)。

次に, 障害物への平均衝突警告回数の結果を図 10 に示す。平均衝突警告回数では, Friedman 検定の結果, 4 方式の少なくともどれか一つに有意な差があった ($\chi^2(3) = 24.307, p < 0.001$)。Bonferroni 法の多重比較 ($p < 0.05$) では, 二人称視点方式と AR を用いた各方式

を比較した場合, 距離画像方式 ($p < 0.05$), マーカー方式 ($p < 0.05$) は二人称視点方式より, 平均衝突警告回数が有意に減少することがわかった。しかし, 可視化方式は二人称視点方式と比較して, 平均衝突警告回数が有意に減少しなかった ($p = 0.163$)。

AR を用いた方式同士では, 可視化方式と各方式を比較した場合, マーカー方式は可視化方式より平均衝突警告回数が有意に減少しなかったが ($p = 0.069$), 距離画像方式は可視化方式より平均衝突警告回数が有意に減少したことがわかった ($p < 0.05$)。しかし, 距離画像方式はマーカー方式より, 平均衝突警告回数が有意に減少しなかった ($p = 1.000$)。

4.6 ドローン操縦の定性的評価

二人称視点方式と AR を用いた 3 つの各方式を比較するアンケート結果を図 11, 図 12 に示す。二人称視点方式を含むアンケート結果では, 操縦の安心度 ($\chi^2(3) = 27.875, p < 0.001$), 危険な障害物知覚 ($\chi^2(3) = 28.372, p < 0.001$) の 2 項目に対して Friedman 検定を行ったところ, 4 方式の少なくともどれか一つに有意な差があった。それぞれの結果に対し Bonferroni 法の多重比較 ($p < 0.05$) を行ったところ, 操縦の安心度では, 距離画像方式, マーカー方式は二人称視点方式より, 有意に向上した ($p < 0.05$) が, 可視化方式は二人称視点方式より有意に向上しなかった ($p = 0.076$)。また, マーカー方式は可視化方式より有意に向上しなかった ($p = 0.251$) が, 距離画像方式は可視化方式, マーカー方式より有意に向上したことがわかった ($p < 0.05$)。

危険な障害物を判断できたかを確認する項目では, 距離画像方式, マーカー方式は二人称視点方式より有意に向上した ($p < 0.05$) が, 可視化方式は二人称視点方式より有意に向上しなかった ($p = 0.124$)。また, マーカー方式は可視化方式より有意に向上しなかった ($p = 0.107$) が, 距離画

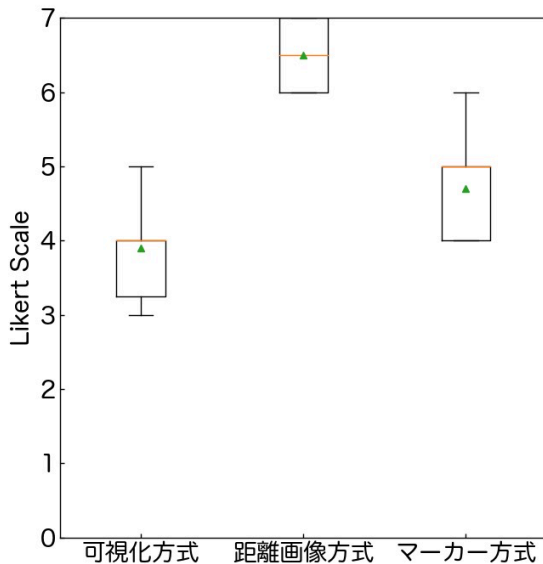


図 13 状況把握の容易さ

Fig. 13 Ease of Understanding the Situation.

像方式は可視化方式，マーカー方式より有意に向上したことがわかった ($p < 0.05$).

次に，AR を用いた方式のみを比較するアンケート結果を図 13，図 14 に示す．AR を用いた方式のみを比較するアンケート結果では，状況把握の容易さ ($\chi^2(2) = 18.667, p < 0.001$)，操縦の自信度 ($\chi^2(2) = 17.886, p < 0.001$) の 2 項目に対して Friedman 検定を行ったところ，3 方式の少なくともどれか一つに有意な差があった．それぞれの結果に対し Bonferroni 法の多重比較 ($p < 0.05$) を行ったところ，状況把握の容易さでは，マーカー方式は可視化方式と比較し有意に向上しなかった ($p = 0.091$) が，距離画像方式のみ可視化方式とマーカー方式と比較し有意に向上したことがわかった ($p < 0.05$).

操縦の自信度でも同じく，マーカー方式は可視化方式と比較し有意に向上しなかった ($p = 0.059$) が，距離画像方式のみ可視化方式とマーカー方式と比較し有意に向上したことがわかった ($p < 0.05$).

5. 考察

5.1 AR 方式の有用性

本節では，ドローンによる狭小空間監視において，AR を用いることでドローンの操縦性，安全性を向上できるのか考察する．

AR を用いた方式は，4.5 節で述べたように，二人称視点方式より有意に平均操縦時間を減少した．実験の様子から，二人称視点方式では周囲に何があるか分からず，確認する動作が他方式に比べ多くなるため，平均操縦時間が増大していた．本研究で想定しているようなドローンは最大飛行時間が短いことが問題点とされている中で [28] [29] [30]，二人称視点方式のドローン操縦性では作業効率の向上が見

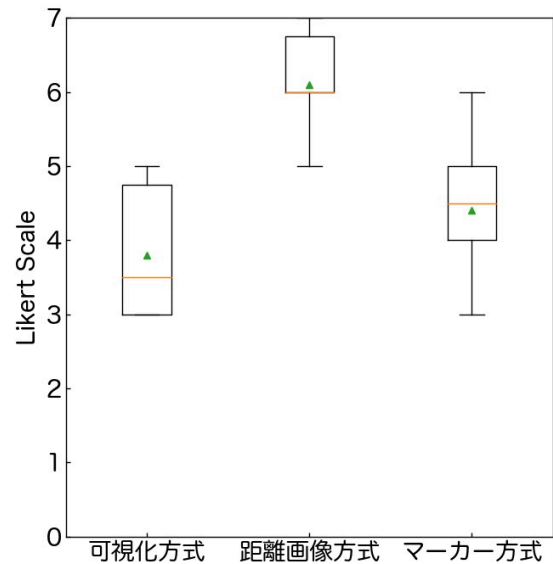


図 14 操縦の自信度

Fig. 14 Confidence in Piloting.

込めず，狭小空間監視を十分に行えない可能性がある．その一方で，距離画像方式は二人称視点方式と比較した場合，平均操縦時間を約 30% 減少しているため，作業効率の向上が見込めることを確認した．また二人称視点方式は，平均操縦時間と，平均衝突警告回数より，1 分間の間だけで約 1.25 回も衝突の可能性があり，実際の狭小空間における操縦手法として危険性が高いことを確認した．

しかし，障害物への平均衝突警告回数は，4.5 節で述べたように，可視化方式のみ二人称視点方式より有意に減少しなかった．また，4.6 節より，主観的結果における二人称視点方式と AR 方式の比較結果でも，可視化方式のみ二人称視点方式より有意に向上しなかった．これは，可視化方式では，どこの障害物が危険か判断できず，安心して操縦することができないことにより，障害物に衝突しそうな場面でも思い切って操縦するためだと推測される．

このことより，狭小空間による死角領域内を可視化するだけでは，一人称視点でドローン操縦を行なっても，障害物へ衝突する危険性や，操縦者に与える心理的負荷を低減することは困難である．そのため，AR を用いた死角領域内の可視化だけでなく，ドローン周辺の障害物に対する視覚的支援を行う本提案方式では，ドローン操縦性向上を示せることがわかった．

5.2 AR 方式の比較

5.2.1 定量的評価

4.5 節で述べた，客観的結果における AR 方式同士の有意差について考察し，距離画像方式，マーカー方式がドローンの操縦性，安全性へ与える影響を考察する．

タスク完了までの平均操縦時間は，マーカー方式のみ可視化方式より有意に減少しなかった．実験参加者の自由回

答では、可視化方式は操縦の際に思い切って進む傾向があり、マーカー方式は操縦の際に躊躇ってしまう傾向があった。これは、5.1 節で述べたように、マーカー方式では 1 箇所のみ危険な場所に目印を付けているため、その他の障害物までの距離感を掴む感覚が可視化方式と近似しているためだと考察できる。そのため、マーカー方式の視覚支援では、可視化方式より有意に平均操縦時間を減少できなかったと推測される。

障害物への平均衝突警告回数では、距離画像方式は可視化方式より有意に減少しているため、ドローン周辺の障害物との距離感が掴めない問題を緩和できていると推測される。その一方で、距離画像方式とマーカー方式の間では有意差を示さなかった。しかし、実際にドローン操縦を行う際にドローンの衝突は 0 に収めなければならないことを考えると、距離画像方式では平均衝突警告回数を 0 回に収めたことより、有意な結果であると考察できる。

5.2.2 定性的評価

4.6 節で述べた、主観的結果における AR 方式同士の有意差について考察し、距離画像方式、マーカー方式が操縦者へ与える影響を考察する。

図 13, 図 14 で示すアンケート結果では、マーカー方式は可視化方式と比較して、一貫して有意に向上しなかった。実験参加者の自由回答では、マーカー方式では、気になる障害物に対して目印を示さない傾向があった。このことから、ドローン周辺に衝突の可能性のある障害物が 2 つ以上ある際に、操縦者が気になる障害物が危険な位置にあるか提供しない可能性があるため、マーカー方式は可視化方式より有意に向上しなかったと考察できる。その一方で、距離画像方式はドローン周辺の障害物全ての危険度を提供するため、操縦者が気になる障害物が常に危険な位置にあるか把握することができていたと推測される。

5.3 統合的評価

実験の終了後にどの方式が最も効果的であったかを実験参加者に選択してもらった結果、9 名が距離画像方式を選択し、1 名がマーカー方式を選択した。距離画像方式を選択した理由として、障害物までの距離を色で示していることによって距離感を掴みやすかった点や、見える景色全体に色がついているため、どの範囲まで動かすことができるか分かりやすかった点が挙げられた。一方で、他の方式を選択しなかった理由として、二人称視点方式では、上下の障害物までの距離感が掴づかった点や、周囲の確認に不安があった点が挙げられた。可視化方式では、全体像は掴めたが状況認識が難しかった点や、距離感に自信を持ってない点が挙げられ、マーカー方式では、一方向でしか距離感が分からなかった点が挙げられた。一方でマーカー方式を選択した参加者は、最も近傍の障害物を示してくれる安心感がある点からマーカー方式を選択し、距離画像方式では

周囲が赤色になった際に困惑した点や、見えている情報が簡潔でない点から選択しなかった。

以上のことから、死角領域内を可視化するだけでは狭小空間のドローン操縦は不十分である。狭小空間でのドローン操縦では、死角領域内の可視化に加えて障害物知覚が必要であり、操縦者にとって重要な情報は、最も危ない位置を示すような直感的な情報ではなく、常に周囲の危険性を示す全体的な把握を促せる情報であることがわかった。周辺環境の全体的な理解と安心感を提供する距離画像方式では、図 9, 図 10 に示すように、他の方式と比べ平均操縦時間の減少、衝突回数の減少を可能にすることができたため、狭小空間による死角領域内の環境下において、ドローン操縦性向上に有効であることを確認した。

6. まとめ

小型ドローンは機体の大きさを活かして、インフラ点検や災害調査のような、人間が立ち入れない狭小空間での活躍が増えている。しかし、狭小空間でのドローン飛行では、遮蔽物により視点が遮られる、死角領域内での操縦を必要とする。また、従来の操縦手法では状況認識が不十分であるため、ドローン周辺に位置する障害物が多い狭小空間では、ドローン操縦は困難である。

遮蔽物、障害物が多い狭小空間では、死角領域内におけるドローン飛行の危険性を軽減する必要がある。そこで本研究では、AR により操縦者の死角領域内に存在するドローンと周辺環境を可視化し、ドローン周辺の障害物を知覚するための AR 方式を提案する。本提案方式について、死角領域内でのドローン操縦性を評価実験した。結果として、AR を利用した方式では実験環境での平均操縦時間が短く、平均衝突警告回数も少なかったことから、狭小空間による死角領域内のドローン操縦性向上を示した。また、障害物を知覚するための AR 方式では、ドローン周辺の障害物に対し、危険度を色で振り分けている方式が操縦者へ安心感を与え、操縦性が向上することを確認した。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP20H00589 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 野波健蔵：ドローン技術の現状と課題およびビジネス最前、情報管理, Vol. 59, No. 11, pp. 755-763 (2017).
- [2] Shakhathreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A. and Guizani, M.: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges, *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 48572-48634 (2019).
- [3] Kerle, N., Nex, F., Gerke, M., Duarte, D. and Vetrivel, A.: UAV-Based Structural Damage Mapping: A Review, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-21 (2019).
- [4] 二村憲太郎, 榎本敬大, 宮内博之, 山岸直樹：実大実験棟を活用したドローンによる点検の有効性の検証とドロー

- ンによる点検方法の確立のための実験の報告, 日本建築学会技術報告集, Vol. 25, No. 59, pp. 509–514 (2019).
- [5] Jordan, S., Moore, J., Hovet, S. E., jonny box, Perry, J., Kirsche, K., Lewis, D. and Tse, Z. T. H.: State-of-the-art technologies for UAV inspections, *IET Radar, Sonar & Navigation*, Vol. 12, pp. 151–164 (2018).
 - [6] Chen, J. Y. C., Haas, E. C. and Barnes, M. J.: Human Performance Issues and User Interface Design for Teleoperated Robots, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, Vol. 37, No. 6, pp. 1231–1245 (2007).
 - [7] Zollmann, S., Hoppe, C., Langlotz, T. and Reitmayr, G.: FlyAR: Augmented Reality Supported Micro Aerial Vehicle Navigation, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 560–568 (2014).
 - [8] Temma, R., Takashima, K., Fujita, K., Sueda, K. and Kitamura, Y.: Third-Person Piloting: Increasing Situational Awareness Using a Spatially Coupled Second Drone, *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, No. 13, pp. 507–519 (2019).
 - [9] Green, S. A., Chase, J. G., Chen, X. and Billingham, M.: Evaluating the Augmented Reality Human-Robot Collaboration System, *2008 15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, pp. 521–526 (2008).
 - [10] Kanduri, A. K., Thomas, G. W., Cabro, N. A. and Grin, E.: The (In)Accuracy of Novice Rover Operators Perception of Obstacle Height From Monoscopic Images, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 35, No. 4, pp. 505–512 (2005).
 - [11] 山越靖之, 木田哲夫, 湯浅弘章: 屋内空間におけるドローンの活用に関する検証 (平成 30 年度消防技術安全所の検証成果等) – (消防活動・隊員の安全管理に関する技術改良・検証), 消防技術安全所報, No. 56, pp. 26–37 (2019).
 - [12] Casper, J. and Murphy, R. R.: Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the World Trade Center, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, Vol. 33, No. 3, pp. 367–385 (2003).
 - [13] Woods, D. D., Tittle, J. S., Feil, M. and Roesler, A.: Envisioning human-robot coordination in future operations, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, Vol. 34, No. 2, pp. 210–218 (2004).
 - [14] Witmer, B. G. and Sadowski, W. J.: Nonvisually Guided Locomotion to a Previously Viewed Target in Real and Virtual Environments, *Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 40, pp. 478–488 (1998).
 - [15] Tittle, J. S., Roesler, A. and Woods, D. D.: The Remote Perception Problem, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 46, No. 3, pp. 260–264 (2002).
 - [16] Kempster, K. A., Darken, R. and Peterson, B.: Effects of streaming video quality of service on spatial comprehension in a reconnaissance task, *Proc. 23rd Army Sci. Conf*, pp. 391–400 (2001).
 - [17] Hitchcock, A. and Sung, K.: Multi-View Augmented Reality with a Drone, *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, No. 108, pp. 1–2 (2018).
 - [18] Thomason, J., Ratsamee, P., Orlosky, J., Kiyokawa, K., Mashita, T., Uranishi, Y. and Takemura, H.: A Comparison of Adaptive View Techniques for Exploratory 3D Drone Teleoperation, *The ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, Vol. 9, No. 17, pp. 1–19 (2019).
 - [19] Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo, P., Damiani, E. and Ivkovic, M.: Augmented reality technologies, systems and applications, *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 51, No. 1, pp. 341–377 (2010).
 - [20] Green, S. A., Billingham, M., Chen, X. and Chase, J. G.: Human-Robot Collaboration: A Literature Review and Augmented Reality Approach in Design, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 5, No. 1, pp. 1–18 (2008).
 - [21] Walker, M., Hedayati, H., Lee, J. and Szafir, D.: Communicating Robot Motion Intent with Augmented Reality, *2018 13th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 316–324 (2018).
 - [22] Hedayati, H., Walker, M. and Szafir, D.: Improving Collocated Robot Teleoperation with Augmented Reality, *2018 13th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 78–86 (2018).
 - [23] Kameda, Y., Takemasa, T. and Ohta, Y.: Outdoor see-through vision utilizing surveillance cameras, *Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 151–160 (2004).
 - [24] Liu, C. and Shen, S.: An Augmented Reality Interaction Interface for Autonomous Drone, *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 11419–11424 (2020).
 - [25] Erat, O., Isop, W. A., Kalkofen, D. and Schmalstieg, D.: Drone-Augmented Human Vision: Exocentric Control for Drones Exploring Hidden Areas, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 1437–1446 (2018).
 - [26] Postel, J.: User Datagram Protocol, RFC 768 (online), available from <https://www.rfc-editor.org/info/rfc768> (accessed 2022-06-13).
 - [27] 山田開斗, 薄羽大樹, 宮下芳明: ドローン操縦におけるクロッシングの評価, 技術報告 2, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) (2019).
 - [28] Erat, O., Isop, W. A., Kalkofen, D. and Schmalstieg, D.: Application of UAV imaging platform for vegetation analysis based on spectral-spatial methods, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 1437–1446 (2018).
 - [29] Gupta, L., Jain, R. and Vaszkun, G.: Survey of Important Issues in UAV Communication Networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 18, No. 2, pp. 1123–1152 (2016).
 - [30] Vergouw, B., Nagel, H., Bondt, G. and Custers, B.: Drone Technology: Types, Payloads, Applications, Frequency Spectrum Issues and Future Development, *The Future of Drone Use: Opportunities and Threats from Ethical and Legal Perspectives*, Vol. 27, pp. 21–45 (2016).



竹内 一真 （学生会員）

2021 年同志社大学理工学部情報システムデザイン学科卒業。同年同志社大学大学院理工学研究科情報工学専攻修士課程進学。



滕 睿

2006 年東京大学情報理工学系研究科博士後期課程修了。2021 年より同志社大学モビリティ研究センター。V2X ネットワーク，IoT 等の研究に従事。電子情報通信学会，IEEE 各会員。



佐藤 健哉 （正会員）

同志社大学大学院理工学研究科情報工学専攻教授。1986 年大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年住友電気工業情報電子研究所入社。1991～1994 年スタンフォード大学計算機科学科客員研究員。2000 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。米国 AMI-C,Inc. チーフテクノロジストを経て，2004 年より現職。同志社大学モビリティ研究センター長，および名古屋大学大学院情報学研究科附属組込みシステム研究センター特任教授兼務。博士（工学）。IEEE-CS，ACM，自動車技術会各会員。