

推薦論文

空間連動する2つのカメラ視点を用いた ドローン操縦インタフェースの拡張

天間 遼太郎^{1,a)} 高嶋 和毅¹ 藤田 和之¹ 末田 航² 北村 喜文¹

受付日 2019年10月15日, 採録日 2020年5月12日

概要: 本研究では, 空間的に連動する2台のドローンを利用して従来のドローン操縦インタフェースを拡張するインタフェースを提案する. 提案インタフェースでは, 主たる操縦対象のドローン (主ドローン) カメラによる一人称視点に加えて, 主ドローンに空間連動する副ドローンを用いて広域な三人称視点を提供することでパイロットのドローン周囲への理解 (Situational Awareness) を高め, ドローンの操縦や飛行経路計画をより簡単にする. 主・副ドローンの位置関係は, 座標系対連動法を応用して, パイロットの視点位置とコントローラ上に設置された主ドローンの模型との位置関係と同等になるように自動的に制御される. パイロットは, スティックコントローラで主ドローンを従来どおりの方法で操作することが可能で, そして, 必要に応じてその模型の姿勢を操作して副ドローンの位置 (三人称視点) を変更することができる. 我々は, この提案インタフェースのプロトタイプをプログラマブルなドローンを用いて実装し, ドローン操縦経験の異なる複数の参加者群による予備実験を実施した. その結果, 提案インタフェースは参加者から好意的に受け止められ, ドローン操縦時の周囲の理解を助けたことを確認した.

キーワード: 空撮, 一人称視点, 三人称視点, タンジブルユーザインタフェース

Enhancing Drone Interface Using Spatially Coupled Two Perspectives

RYOTARO TEMMA^{1,a)} KAZUKI TAKASHIMA¹ KAZUYUKI FUJITA¹
KOH SUEDA² YOSHIFUMI KITAMURA¹

Received: October 15, 2019, Accepted: May 12, 2020

Abstract: We propose Third-Person Piloting, a novel drone manipulation interface that increases situational awareness using an interactive third-person perspective from a second, spatially coupled drone. The pilot uses a controller with a manipulatable miniature drone. Our algorithm understands the relationship between the pilot's eye position and the miniature drone and ensures that the same spatial relationship is maintained between the two real drones in the sky. This allows the pilot to obtain various third-person perspectives by changing the orientation of the miniature drone while maintaining standard primary drone control using the conventional controller. We design and implement a working prototype with programmable drones and propose several representative operation scenarios. We gather user feedback to obtain the initial insights of our interface design from novices, advanced beginners, and experts. Our result suggests that our interface offers sufficient potential for increasing situational awareness and supporting drone operations.

Keywords: aerial photography, first-person view, third-person view, tangible interface

1. はじめに

近年, 一般向けの安価かつ小型で操縦に免許が不要なマ

本論文の内容は2019年3月のインタラクシオン2019にて報告され, 同プログラム委員長により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

© ACM 2019. This is a minor revision of the work published in Proc. UIST 2019 [26]. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347953>

¹ 東北大学電気通信研究所
Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

² シンガポール国立大学
National University of Singapore, 21 Lower Kent Ridge Rd, 119077, Singapore

^{a)} icd-office@ml.riec.tohoku.ac.jp

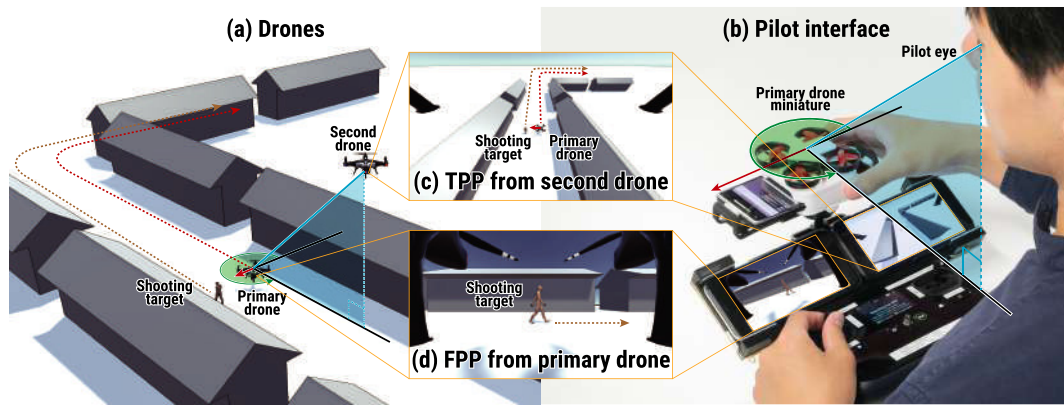


図 1 提案手法の概要

Fig. 1 Overview of our proposal.

ルチコプター（以下ドローンと呼ぶ）が急速に普及している。ドローンは空撮だけでなく、災害状況調査や災害救助、広大な農場のモニタリング、建築物の検査、荷物の運搬など様々な用途にも用いられつつあり、ドローンレースなどにも注目が集まっている。普及を続けるドローンではあるが、その操縦難易度は高く、自由自在に操縦できるようになるには相当量の練習が必要である。特に、ドローン機体を目視せずに、機体のカメラ映像だけを元に操縦する「目視外飛行」は、遠距離の飛行が可能でありドローンの運用可能性を大幅に広げる一方で、より熟練した操縦技術が求められる（目視外飛行は基本的には禁止であり、その許可申請には最低でも 10 時間以上の飛行実績が必要 [34]）。目視外飛行の難しさの主な要因は、ドローンカメラからの映像の視野が限定的でパイロットのドローン周囲の状況理解 (Situational Awareness, 以下 SA と呼ぶ) が乏しくなることである。空撮の場合、ドローンの進行方向とそのカメラの向きが異なることは多く、この場合には、パイロットは機体の進行方向の情報を把握できないことになる。進行方向の先を視認できないままドローンを動かすことは、パイロットの強い心理的不安を生みだし、積極的なカメラワークができなかったり、被写体に十分に接近できなかったりと、操縦の質が低下する恐れがある。

なお、ドローン操縦において安全性は最も優先される事項であり [31]、近年は、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) に基づく自動障害物回避機能を搭載したドローンも登場してきた [3]。しかし、これらは主に完全自律ドローン飛行に向けたものであり、パイロットにドローン周囲の情報をリアルタイムに伝えて SA を直接強化するものではない。SA を一時的に高める典型的な方法として、ドローン機体を上昇・回転させて周囲を見渡すことなどが考えられるが、これは飛行計画段階でのみ有効であり、本来の目的とは違う操縦を追加することになり無駄が多く、リアルタイムには SA を強化できない。全天球カメラをドローンに装着することなども考えられるが、カメラは機体

に固定されているために、広域な三人称視点を自由に生成することは難しい。

一方、この問題は、関連分野である遠隔ロボット操縦において古くから議論されてきた。そこでは、ロボットのカメラ視点に加えてその周囲環境の情報が多く含まれる三人称視点の提供が操作やタスクの達成にきわめて有効であることはよく知られている [16]。また、VR の分野においても、広大な仮想環境をウォークスルーする際に、一人称と三人称視点を連携したナビゲーション技術が提案されている [9], [17]。そのほか、ゲームなどにおいても、一人称と三人称視点の両方を利用することは一般的であり、三人称視点を併用する重要性と有用性はすでに明らかといえる。この基本的な知見に基づくと、ドローン操縦においても、操縦中に適切な三人称視点をリアルタイムで提供できれば、パイロットの SA を強化でき、操縦や飛行経路計画の質を大幅に改善することができる。しかし、これまでのドローンのカメラの研究においては、機体背後の棒の先端にカメラを取り付けた簡易的な三人称視点（機体の一部が含まれるオンボード映像）を検討するにとどまり、ドローン周囲の広域な三人称視点をインタラクティブに提供する技術は検討されていない。

そこで本研究では、2 台のドローンを空間的に連携させ、従来のドローン操縦インタフェースを拡張して、目視外飛行におけるパイロットの SA を高めて操縦の質の改善を試みる。主たる操縦対象のドローン（以下「主ドローン」という）は、一般的な操縦と同様に一人称視点のカメラ映像を提供する。そして、2 台目のドローン（副ドローン）は、図 1 (a) に示すように主ドローンより高く離れた十分に安全な位置を飛行し、より広域な三人称視点のカメラ映像を提供する。これら 2 つの視点（ドローン機体）の位置関係をインタラクティブにそして直感的に制御するために、座標系対連動法 [9], [17] に基づいたアルゴリズムを開発する。これにより、副ドローンは主ドローンを単に追従するだけでなく、主ドローン周囲の軌道上を自由に飛行し、様々

な角度からの三人称視点を提供可能になる。なお、2台のドローンを飛行させることで、ドローンどうしまたはドローンと障害物との衝突のリスクが増えることも考えられるが、本研究では、ドローンの衝突は、将来的な衝突回避機能で回避することとし、パイロットがより安心して思い切りのよい飛行や飛行計画が可能なユーザインタフェースの実現に注力する。

図1に、提案するインタフェースの概要を示す。基本的なアイデアとしては、パイロットの視点とコントローラ上に設置された主ドローンの模型との位置関係が、主ドローンと副ドローンの位置関係につねに反映される。図1で説明すると、同図(a)の主ドローンと副ドローンの位置関係を示す青の三角形と、同図(b)におけるコントローラ上の模型とパイロット視点の関係を示す青の三角形はつねに相似に保たれる。つまり、パイロットが模型の向きを変えると、その相似関係を保つように副ドローンの位置が自動的に制御される。このとき、同図(d)に示すように、主ドローンのカメラでは、被写体をとらえる一人称視点(FPP: First-person perspective)を、副ドローンは、同図(c)に示すように、主ドローン機体や周囲の建物を含む三人称視点(TPP: Third-person perspective)を提供する。同図(b)に示すように、パイロットはそれら2つの視点映像をコントローラ上で同時に確認することができる。主ドローンが操縦された場合も、副ドローンはその主ドローンに追従し、それを中心とする軌道上を飛行するよう自動で制御される。本研究では、上で示した2台のドローンの連携アルゴリズムを適切に稼働させるためのコントローラも設計する。そして、MAVLink [19]に対応するドローン2台を用いてプロトタイプを実装し、その有用性をユーザスタディにより検証する。

2. 関連研究

2.1 ドローン操縦インタフェースおよび自律飛行システム

現在主流のドローンコントローラの多くは、2本のスティックを用いたものである。これは飛行機の操縦桿をもとにして設計されたものであり、一方のスティックで上昇下降と水平方向の回転を制御し、もう一方のスティックで水平方向の前後左右の移動を制御する。一方、このスティックを用いた操縦方法を習得するにはかなりの時間が必要である。そのため、これをより直感的に簡単にするために、HCIやHRIの分野ではジェスチャによる操縦インタフェースがさかんに研究されている[6], [22]。たとえば、パイロットの頭部の回転や移動をドローンの動きに対応付けるもの[12]や、パイロットの腕のジェスチャでドローンを操縦するもの[14]がある。これらは、直感的な操縦によりドローンによるテレプレゼンスを高めることが目的であ

り、パイロットのSAについては検討していない。

モバイル端末を用いたARもドローン操縦に利用されつつある。たとえば、exTouchは、モバイルデバイスのカメラでドローンをとらえて、スクリーンをタッチしたりドラッグすることでそのドローンを制御するインタフェースである[15]。また、モバイルAR環境において仮想平面を定義しそこに軌跡を描くことでドローンを操縦するインタフェースなども提案されている[32]。これらは、従来のコントローラに頼らず、より直感的で直接的な操縦を可能にしているが、操作には手元のタブレット端末のカメラにドローンをとらえ続ける必要があり、ドローンの目視外飛行には向かない。

インタフェースの改善ではなく、人の介入を極力減らす自律飛行のためのアルゴリズムの開発もさかんである。ドローンのカメラ映像を元に障害物を認識しそれを避けるように自動飛行するもの[3]や、ユーザの操縦に介入し自動で回避行動をとるものがある[5]。また、映像中の被写体を認識し、それをとらえ続けるように自動飛行するものがある[5]。そのほか、自動で飛行経路を生成し効果的な空撮を可能とするシステムも登場してきた[10], [11], [30]。これらの研究は、運搬や空撮などを自動化することに主眼を置いており、パイロットがインタラクティブにドローンを操縦する場面を支援するものではない。

2.2 遠隔操作ロボット操縦におけるSAの向上

操縦対象の周囲の状況理解(Situation Awareness)は、刻々と周囲環境が変化する遠隔操作環境下においてきわめて重要な概念である。SAは、情報の知覚、理解、そして将来の状況の予測の段階があり、SAが高いほど、効果的なタスクの遂行が可能とされている[7]。そのため、遠隔ロボット操縦においてSAを強化することは必須である。Kellyらは、遠隔操作ロボットに複数のカメラとレーザスキャナを搭載し、これを元に周囲の地形の3Dモデルを生成し、任意の方向から三人称視点を生成できるシステムを提案した[16]。全天周カメラをロボットに配置して周囲状況を正確に把握しながらロボットを操縦する研究も多数ある(たとえば文献[24])。しかし、全天球カメラ映像は広域視野を獲得するが中心視点はロボットに固定されているため、三人称視点を含む自由視点映像を生成することは難しい。また、これらは光学センサデータをもとにするため、センサでとらえられない死角(障害物の先など)にある情報は得られない。Saakesらは遠隔操作車両の三人称視点映像を提供する方法として、車両に棒を取り付けて、その先端にカメラを取り付ける方法と、車両の上空にドローン(カメラ)を飛行させる方法を検討した[23]。この研究のアイデアは本研究と近いが、ドローン操縦のSAを高めようとしているものではなく、またドローン(カメラ)の位置をインタラクティブに制御できないため、ドローン操縦時の多彩

本研究に関連するYouTube動画：<https://bit.ly/2Mhfn6t>

な経路計画を支援する目的に利用することはできない。

2.3 ドローン操縦における SA の向上

Flying Frustum は、一人称視点と三人称視点を組み合わせたドローン操縦インタフェースである [18]。探索対象の地形のモデルがあり、そこに、GPS 情報に基づくドローンの位置とそのカメラ映像が重畳表示されている。これにより、パイロットは目視外を飛行するドローン周辺の地形全体を見渡しながらか (三人称視点)、ドローンの位置とそのカメラ映像 (一人称視点) を同時に把握でき、高い SA を得ることができる。この研究は、我々の研究と共通する点が多いが、3D プリントした地形のモデルを用いるために利用場面がかなり限定的である。

そのほか、様々なドローン操縦におけるカメラ映像を拡張する研究がある。たとえば、Okan らは室内でのドローン飛行において、AR グラスを用いて壁の先の死角にあるドローンを制御する方法を提案している [8]。また、Thomason らは、SLAM の点群データとドローンを VR 上で視覚化し、その中の任意の視点でドローンを操縦することができるインタフェースのシミュレータを開発した [27]。これらは SLAM の点群データを用いて三人称視点を生成するものであり、これによってドローン操縦の SA を高めることが示されている。一方、生成される三人称視点は SLAM の点群データに依存するため、移動体を点群データで表示すると、初期の点群と人が歩いたあとの点群が混じるため動的な環境下の正確な情報は得られない。

2.4 仮想環境での視点制御手法

仮想環境でのカメラ視点をインタラクティブに操作する研究は古くから行われてきた [25], [28]。研究例は多いが、複数のカメラを連携操作するものは少ない。本研究に深く関わるものとして、仮想環境内で一人称視点と三人称視点を連携操作する座標系対運動法がある [9], [17]。この研究では、ユーザは HMD を装着しコントローラを持つ。その HMD の映像には一人称視点と三人称視点が表示されており、それらの位置関係は、ユーザの頭部 (HMD) とコントローラの位置情報と同等になるように連携制御される。たとえば、頭を固定したままコントローラを右回りに回転すると、VR 空間内の三人称視点カメラは一人称視点カメラの右に回り込む。この研究では、ユーザスタディにより、インタラクティブな三人称視点により SA が高まることと、VR 空間内の探索効率が向上したことが示されている。

本研究では、仮想空間内での成功事例であるこの座標系対運動法を単純化して、2 台のドローンのカメラ視点の制御に応用する。

3. 提案インタフェース

3.1 概要

2 章で述べたように、遠隔操作ロボットや VR の業界で蓄積されてきた知見を考えると、目視外ドローン操縦においてもリアルタイムに広域の三人称視点を追加し、それをインタラクティブに操作できれば、パイロットの SA は劇的に改善され探索や操縦の質も向上すると期待できる。そこで本研究では、主ドローンに加えて、空間的に連動する副ドローンを利用してインタラクティブに操作可能な三人称視点を提供し、パイロットの SA の向上を図る。本研究では、非常に高度な操縦技術が求められる目視外飛行を想定するが、SA が限定的な目視内飛行にも応用可能である。いずれにおいても、ドローンが持つ飛行性能を安全にかつ最大限に活用するためには、パイロットが十分に高い SA を確保できるかどうか重要なポイントである。

我々は、提案インタフェースを次に示す 3 つの考え方を基に設計することとした。1 つ目は、一人称視点と三人称視点映像を提供する 2 台のドローンは同時に飛行するものとし、前者はパイロットが任意に操縦するが、後者は主ドローンと連携して安全な距離を保ちながら自動で飛行する。2 つ目は、パイロットが、副ドローンの位置を主ドローン周囲の軌道上の任意の位置にインタラクティブに制御可能とする。3 つ目は、既存のドローン操縦インタフェースと互換性を持ち、1 台のコントローラで 1 人のパイロットが 2 台のドローンを簡単に制御できるとする。以下では、これらの方針をすべて満たすための連携アルゴリズム、コントローラ、および実際の操作の詳細について述べる。

3.2 連携アルゴリズム

インタラクティブに 2 台のドローンを操縦するために、座標系対運動法 [9], [17] を単純化したアルゴリズムを用いる。先行研究では、コントローラの位置や回転量がユーザからの入力として扱われた。しかし、ドローンコントローラ自体を回転させたりすることは不自然な姿勢を生み出すため、本研究では、パイロットはドローンコントローラの筐体ではなく、その上部に設置した主ドローンの模型を操作する。

3.2.1 座標系の定義

コントローラに設置された主ドローンの模型の座標系とパイロット視点の座標系と、主ドローンの座標系と副ドローンの座標系の 2 つの座標系の対を考える。なお、パイロットの視点と副ドローンの位置は、それぞれ、主ドローンの模型と主ドローンを原点とした球面座標系により表す。

図 2 (a) は主ドローンの模型の座標系とパイロット視点の座標系の関係性を表す。同図において、模型の座標系を $x_{miniature}$, $y_{miniature}$, $z_{miniature}$ 軸で表し、パイロット視点の座標系を X_{pilot} , Y_{pilot} , Z_{pilot} 軸で表す。図 2 (a-1) は

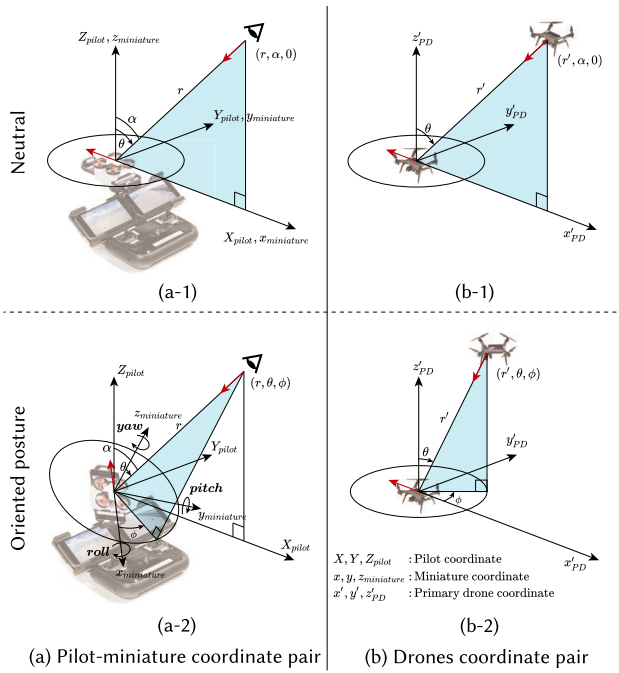


図 2 2つの座標系対とそれらの連動方法
Fig. 2 Two coordinate pairs and coupling algorithm overview.

模型が水平（初期）状態であり，この場合には， $x_{miniature}$, $y_{miniature}$, $z_{miniature}$ 軸と X_{pilot} , Y_{pilot} , Z_{pilot} 軸の原点と回転は同一である．パイロット視点の座標系でのパイロット視点の位置は $(r, \alpha, 0)$ で表される． r と α は変数ではあるが，後述する実際のプロトタイプング時においては，単純化のため， r は定数で α は 45 度とする．なお，パイロットの視点は，模型の座標系においては (r, θ, ϕ) で表される．図 2(a-2) に示すように，パイロットは模型を回転して，副ドローンの位置を制御する．模型が回転された場合，模型の座標軸である $x_{miniature}$, $y_{miniature}$, $z_{miniature}$ 軸も同様に回転し，その回転量は，それぞれの軸ごとに， $roll$, $pitch$, yaw で表す．これら回転量が副ドローンの位置を計算するための入力値となる．

図 2(b) は主ドローンの座標系と副ドローンの座標系の関係性を表す．図中および以降の説明にける PD は，主ドローン（Primary Drone）を意味する．図 2(b-1) に示すように，主ドローンの座標系は x'_{PD} , y'_{PD} , z'_{PD} 軸で表し，副ドローンの位置は極座標形式にて (r', θ, ϕ) で表される．なお，図 2(a) と図 2(b) の座標系は連動するため，この図 2(b) における θ と ϕ は図 2(a) における θ および ϕ と同一となる．つまり，図中，模型の座標系の $x_{miniature}$, $y_{miniature}$ 平面に対するパイロット視点の位置の射影が作る青の三角形と，主ドローンの座標系の x'_{PD} , y'_{PD} 平面に対する副ドローンの位置の射影が作る青の三角形はつねに相似になる．これが本アルゴリズムにおいて特徴的な点であり，座標系対連動法を簡略化して適用したものである．

3.2.2 模型姿勢から副ドローンの位置の計算

この連携アルゴリズムの目的は，副ドローンの位置

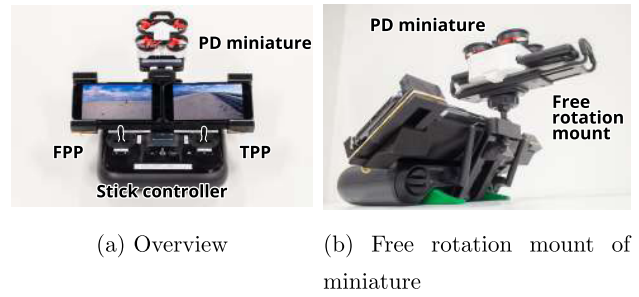


図 3 提案するドローン操縦コントローラ
Fig. 3 Controller design.

(r', θ, ϕ) を模型の回転量である $roll$, $pitch$, yaw から計算することであり，次に示す，式 (1) から (3) で与えられる．

$$r' = a \cdot r \tag{1}$$

$$\theta = \alpha - (roll \cdot \sin(yaw) - pitch \cdot \cos(yaw)) \tag{2}$$

$$\phi = yaw. \tag{3}$$

a は主・副ドローンの間の距離を定めるための定数である．本研究では r も定数として扱うため，ドローン間の距離は安全の範囲で固定することになる．式 (3) における ϕ は副ドローンの方位角を示すが，これは模型の水平方向の回転角度が直接用いられる．式 (2) における θ の計算は複雑に見えるが，場合分けをすると単純化できる．たとえば， $yaw = 0$ のとき（模型の機首がパイロットの体の正面と同じ方向を向いているとき）， $\theta = \alpha + pitch$ であり，模型の $pitch$ 方向の回転角度の変化のみが θ に反映され， $yaw = 90$ のとき（模型を時計回りに 90 度回転したとき）， $\theta = \alpha - roll$ であり， $roll$ 方向の回転角度の変化のみが θ に反映される．

3.3 ドローン操縦コントローラ

図 3 に，提案するアルゴリズムを運用するためのコントローラを示す．これは現在主流の 2 本のスティックを用いたコントローラを基にしているため，主ドローンを操縦するために特別な操作は不要である．図 3(b) に示すように，コントローラの上には自由雲台を設置し，主ドローンの模型（図中では PD Miniature）をスマートフォンとともに搭載する．スマートフォンは内蔵のセンサにより模型の傾きを計測しリアルタイムでシステムに送信することで，インタラクティブな副ドローンの制御を可能にする．また，図 3(a) に示すように，2 台のスマートフォンが模型とスティックの間に設置され，それぞれ一人称視点映像（FFP: First-person perspective）と三人称視点（TPP: Third-person perspective）映像を表示する．図中では一人称視点は左で，三人称視点は右である．混乱を防ぐために「一人称視点」と「三人称視点」と書かれたラベルをそれぞれのスマートフォンの下部に貼っている．すべてのデバイスは 3D プリンタにより出力したパーツでコントローラに

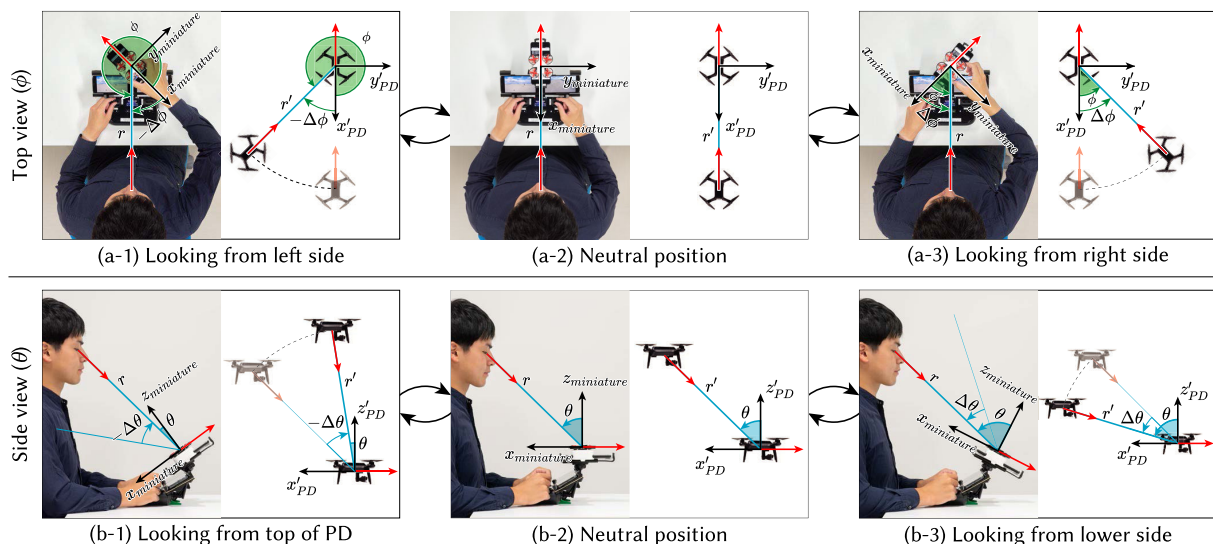


図 4 ミニチュアを使った基本的な操縦と遷移

Fig. 4 Design of drone control using our algorithm and miniature controller.

装着しており，必要に応じて瞬時に着脱可能な設計である。

3.4 操作方法の設計

主ドローン模型を回転させたときの基本的な副ドローンの動きを図 4 に状態遷移で示す。図 4(a) (上段) は模型とパイロット視点，および主ドローンと副ドローンを上から見た様子である。図 4(a-2) は模型が水平で回転していない初期状態であり，パイロットの視点は模型の真後ろにあるため副ドローンは主ドローンの真後ろに位置する。式 (1) に示すように，主ドローンと副ドローン間の距離 r' は模型とパイロットの視点間の距離 r を変数として計算される。たとえば，パイロットが模型をより近くで見ると r' は短くなり，ドローン間の距離も短くなる。ただし，今回は， r の距離によらず， r' を 10m に固定する。これは，パイロットの視点は手や頭部は揺れることも多く，信頼性が高い入力値ではないということと，ドローンどうしの接触を避けるために予備実験を経て決定した。

はじめに水平方向の位置を表す ϕ について述べる。図 4(a-1) は図 4(a-2) の初期状態から，パイロットが模型の左側面を見るように $-\Delta\phi$ だけ水平に回転したものである。このとき，模型座標系においてパイロットの視点は偏角 ϕ として表される。このとき，機首を主ドローンに向けたまま主ドローンを中心に $-\Delta\phi$ だけ水平に回転するよう移動する。これにより副ドローンからの三人称視点は主ドローンの右方向の広域な映像を提供する。同様に図 4(a-3) は図 4(a-2) の初期状態から，パイロットが模型を右から見るように $\Delta\phi$ だけ水平に回転したものである。この場合，副ドローンは主ドローンを中心に $\Delta\phi$ だけ水平に回転するよう右側に回り込み，主ドローンの左方向の広域な三人称視点映像を提供する。

次に垂直方向の位置を表す θ について述べる。図 4(b)

(下段) は主ドローンの模型とパイロット視点，および主ドローンと副ドローンを右側面から見た様子である。図 4(b-2) は模型が水平で回転していない初期状態である。なお，模型の座標系におけるパイロット視点位置の偏角は 45 度で固定のため， θ の初期状態も 45 度となる (パイロット頭部の移動を入力として使わないため)。また， r' については前述の ϕ と同様である。図 4(b-1) は図 4(b-2) の状態から，パイロットが模型の上面が見るよう手前に $-\Delta\theta$ だけ回転したものである。このとき θ は小さくなり，副ドローンは主ドローンを中心に $-\Delta\theta$ だけ回転するように移動する。これにより副ドローンは主ドローンの真上方向に移動し，主ドローンの上からの広域な三人称視点映像を提供する。同様に図 4(b-3) は図 4(b-2) の状態から模型を下側から見るように $\Delta\theta$ だけ奥へ回転したものであり，副ドローンは主ドローンを中心に $\Delta\theta$ だけ回転するよう下側に回り込み，主ドローンのほぼ同じ高さからの広域な三人称視点映像を提供する。

図 4 においては副ドローンの操作方法を上面と右側面から別々に説明した。しかし模型は自由雲台に搭載されており，前述の操作を組み合わせることで自由に回転し副ドローンを任意の地点に移動し飛行状況に最適な三人称視点を得ることが可能である。

4. プロトotyping

提案インタフェースを実稼働させて検証を進めるために，民生用プログラマブルドローンを用いてプロトタイプを実装した。システム構成とデバイス間のデータの流れおよびプロトコルを図 5 に示す。図中，点線と実線はそれぞれ無線と有線通信を示し，異なるデータの種類のプロトコルは異なる色で表される。矢印はデータの流れの向きを表し，角丸長方形のソフトウェアやプロセスで処理が行われ

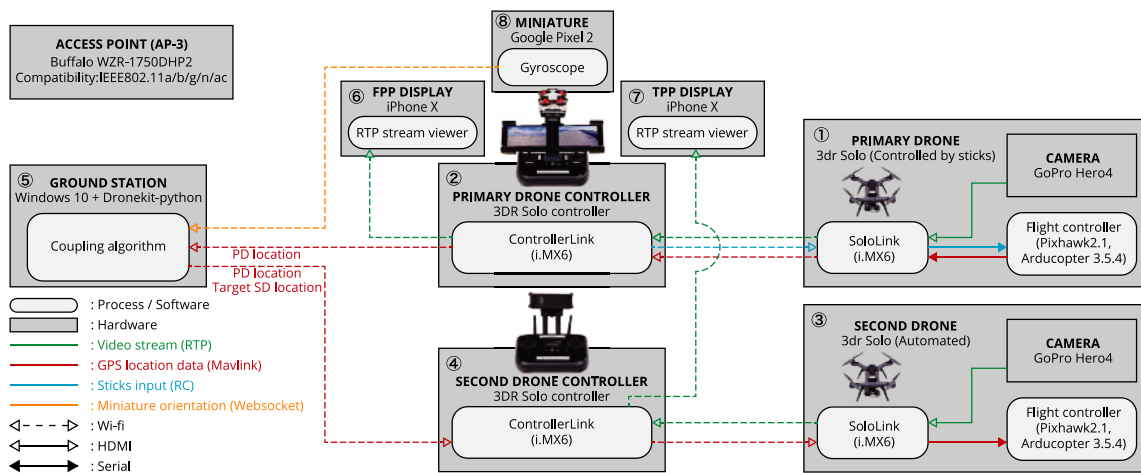


図 5 プロトタイプシステムの構造とワークフロー
 Fig. 5 Component and workflow of prototype.

る。長方形はハードウェアを表し、ソフトウェアやプロセスを内包する。長方形内の左上の番号は、次に述べる制御の流れの説明での番号と対応する。なお、本研究で実装したシステムは多数の API を利用しているが、本論文では、その細部は機種依存のことも多いために省略し、基本的な装置の構造、データやパイプラインなどの抽象的な設計を中心に報告する。

4.1 システム構造と基本的な制御の流れ

主ドローンである 3DR Solo ①は、その付属コントローラ ②により操縦される。3DR Solo は MAVLink プロトコルにより制御可能なため用いた [1]。主ドローンの GPS 座標データはコントローラ ②を経由して Windows PC 上の地上局 ⑤へ送信される。副ドローンの位置を決めるために必要な模型の回転角度データは、模型を搭載したスマートフォン ⑧により取得し、地上局 ⑤へ送られる。これら GPS 座標と模型の回転角度を元に副ドローンの位置が計算される。この計算結果は、GPS 座標データ形式で、副ドローン 3DR Solo ③へ付属コントローラ ④を経由して送信される。

4.2 2つのドローンカメラ視点映像の表示

コントローラ ②上に、主ドローンのカメラからの一人称視点映像を提示するスマートフォン ⑥と副ドローンのカメラからの三人称視点を提示するスマートフォン ⑦を搭載する。それぞれのドローンカメラは GoPro Hero4 を使い、これを 3 軸ジンバルでドローンに搭載する。スマートフォンは日向での視認性に長ける高輝度ディスプレイを持つ iPhone X を用いた。カメラの映像は Real-time Transport Protocol (RTP) によりスマートフォン ⑥と ⑦まで無線転送されアプリケーション上で表示される。

4.3 機器間の無線ネットワーク

コントローラ ②と ④はそれぞれ Wi-fi アクセスポイン

ト AP-1 と AP-2 を生成する。主ドローン ①と一人称視点映像提示用スマートフォン ⑥は AP-1 に、副ドローン ③と三人称視点映像提示用スマートフォン ⑦は AP-2 に接続される。それぞれのアクセスポイントは MAVLink と RTP の映像データをブリッジする。また、AP-3 を別に生成し、2つのコントローラ ②と ④を接続することで地上局からそれぞれのドローン ①と ③へ TCP/IP 通信を可能とする。

4.4 副ドローンの自動飛行

副ドローンの主な自動飛行の内容は、アルゴリズムにより計算された目的座標へ飛行し、主ドローンをカメラの中心にとらえるものである。前者は地上局のソフトウェアでアルゴリズムに基づき計算された GPS 座標を用いて、後者には主ドローンの GPS 座標を用いる。Pixhawk [20] 上で動作する Ardupilot [2] によりこれらの GPS 座標が処理され、副ドローンは目的座標へ移動し、カメラのジンバルの傾きを制御し主ドローンをカメラ映像の中心にとらえる。

4.5 機体性能デザイン

実際のドローンに連携アルゴリズムを適用するにあたり、機体の挙動を決めるパラメータをいくつか最適化する必要がある。最も大きく影響を与えるパラメータはそれぞれのドローンの最大速度である。副ドローンは自動制御されるがこれは主ドローンの GPS 座標データにより計算される。一方このデータは遅延が大きいことやその取得周期が遅いという課題がある。3DR Solo は GPS による位置補正を有効にした場合の最大速度は 15m/s であり、地上局が得る GPS 座標は 50 ms から 200 ms 程度の遅延があり、その更新周期は 10Hz である。主・副ドローンがそれぞれ最大速度で飛行した場合には、主ドローンの急激な方向転換などには副ドローンは追従できず、オーバーシュートが発生する。そこで、今回は、予備的な検討を経て、より安定した連携を実現するために、最大速度を主ドローンは 9m/s、

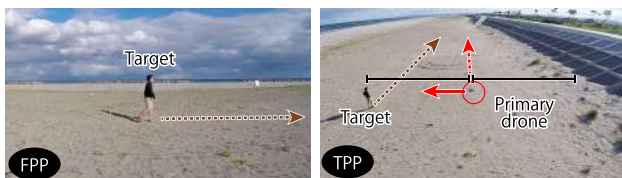
副ドローンは 12m/s に設定した。また、安全を考慮し、万が一オーバーシュートが大きく発生した場合に備えて 2 台のドローンの距離は余裕を持たせて 10m に設定した。これは将来的にセンサ性能が向上した場合に、短く設定することも考えられる。

5. 操縦シナリオ

空撮や検査など、パイロットが主体的にドローンを操縦する場面における提案インタフェースの利用シナリオについて述べる。

5.1 水平方向でのドローンの位置合わせ

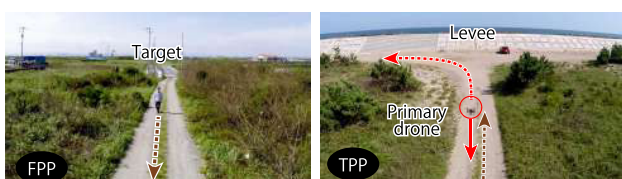
ドローンから得られる一人称視点映像のみを頼りにドローンを被写体と障害物の「間」に配置したり、あるいは、被写体建築物に「できるだけ近く」に配置することは難しい。なぜなら、ドローンからの一人称視点の映像の視野は狭く、ドローン背後などカメラがとらえられない領域の情報が分からないためである。図 6(a) 左は、歩行者を接写するためにドローンを接近させている。このシーンは、実際には、同図右に示すように、ドローン背後には堤防がある。もしパイロットがそれを知っている場合は、ドローンを後退させるときには大きな不安を覚えるはずである。パイロットが後ろにある堤防に気づかない場合は、衝突するリスクがより増加する。さらに、同図左を見ても分かるように、この一人称視点からだけでは、被写体に対してドローンがどの程度近づいているかが正確に把握しにくい。



(a) Horizontal positioning



(b) Vertical positioning



(c) Object following with real-time path planning

図 6 ドローン操縦シナリオ
Fig. 6 Operation techniques.

そこで、本提案インタフェースでは、図 6(a) 右に示すように、主ドローンを上方左側からとらえるように副ドローンを配置し、高い視点からの三人称視点を提供することで、パイロットは、ドローン、被写体、障害物（同図では堤防）に関する水平方向の距離感をほぼ正確に把握することができる。

5.2 垂直方向でのドローンの位置合わせ

垂直方向のドローンの位置合わせは、水平方向の位置合わせとは異なる空間理解が必要である。たとえば架橋の点検作業ではドローンは橋の下などを飛行することになるが、一人称視点の限られた視野からの映像では天井との距離を保つことが難しく、衝突の危険性が高い。図 6(b) 左に示すように、橋の下をドローンが通過したりホバリングする際、垂直平面において、どの程度橋に接近しているのかの距離感が正確に掴めない。なお、このような建築物の検査用のドローンに自由回転する外殻を搭載し、障害物と接触しても墜落しない（半ば接触させながら検査を行う）仕組みが研究されている [21]。しかしながら、周囲空間の理解を高めているわけではなく、さらには物理的な接触をとまなわない接近方法のほうが点検対象の保護のために望ましい。

提案インタフェースを用いた場合、図 6(b) に示すように主ドローンとほぼ同じ高さに副ドローンを配置すると、主ドローンの側面からの三人称視点が得られる。これにより、パイロットは天井とドローンの垂直方向の距離感を正確に得ることができる。

なお、図 6(b) の例は、障害物が立体的であり複雑なケースである。その場合、提案インタフェースでは、主ドローンと周囲との位置関係を適切にとらえられるが、副ドローンが障害物と接触する危険性を生み出していることは否認しない。そのため、インタフェースとしては、ドローンを移動しながら模型の操作（副ドローンの位置の変更）をさせないことや、ドローンが移動する際に、副ドローンのカメラが進行方向以外を向き続けることを避けるなどの工夫が必要である。

5.3 主ドローン周囲の確認

次の経路を探索する際に、単純に周囲の状況を確認したい場合には、提案インタフェースでは、コントローラ上の模型を一回り回転させることで、主ドローンの位置やカメラの向きを保ったまま副ドローンを主ドローン周囲の軌道上を周回させることができる。このような周囲のスキニングは、その後のドローン操縦方法や飛行経路を計画するために非常に有益である。

5.4 動線上の移動体の追従

動体を追従しながら空撮を行う場合、カメラの向きとド

ローンの進行方向が異なる場合が多い。単一ドローンを利用する場合、ドローンの進行方向にある障害物などの情報を得ることができず接触や墜落の危険性が高まる。また、図 6(c) 左に示すように、一人称視点の映像のみでは、移動する人とドローンとの距離感の把握が難しく、フレームに被写体を同サイズでとらえ続けるように距離を一定に保つことは難しい。なお、図 6(c) はカーブしている道を被写体が歩き、ドローンは被写体の前方から被写体をとらえながら後進するものである。このとき、被写体をとらえているドローンの映像からは進行方向の先の道の形状や道端の木などの障害物は見えないため、道の形状に沿った飛行を計画することは不可能であり、また危険もともなう。一方、提案手法を用いて、図 6(c) 右に示すように主ドローンの前方から、主ドローン、その進行方向、および被写体を含む三人称視点を提供すれば、その先にどのように道が続くのか（人が歩くのか）といった情報や人とドローンの距離間などを正確に把握することができるため、移動体を効果的に撮影するようなことが可能になる。主ドローンが後進しても副ドローンは相対位置を保ったまま追従するので、カーブに差しかかる直前やカーブを過ぎたあとも主ドローンの進行方向の情報を提供し続ける。これにより直近のドローンの操縦だけでなく、飛行全体を通した飛行経路の計画も容易にする。なお、この例も操縦難易度が高いものである。主ドローンの頭の向きと副ドローンの頭の向きが完全に逆になるために混乱が起きる可能性があるため、主ドローンと副ドローンの視点のどちらを重点的に利用するかを決めたくえで操作する工夫は必要である。

6. ユーザフィードバック

提案インタフェースに関するフィードバックを得るために、予備的実験を実施した。なお、実装したインタフェースの安定性は高いものの、依然として、バッテリーライフが短い研究プロトタイプであることと、我々に屋外実験における天候（主に風）などの外的要因を避けるノウハウが蓄積されていないため、本格的なユーザスタディを実施する段階には至っていない。そこで、今回は、ユーザ（パイロット）からフィードバックを得て、インタフェースのユーザビリティや将来の改良案などを検討することを目的とした実験を実施した。この実験は、ドローンの頻繁利用シーンを考慮して空撮タスクを用意した。なお、実験では、目視外飛行を対象とした。実験参加者は操縦技術の熟練度の異なる 8 名であり、未経験者、初心者、熟練者の 3 段階に分けた。未経験者はドローンのまったく操縦経験がない、もしくは 1 時間未満の操縦経験者（3 名）とし、初心者は約 10 時間程度の操縦経験を持つが、日常的には操縦を行わない者（2 名）とした。なお、10 時間の基準は国土交通省が定める「無人航空機の飛行に関する許可・承認」申請に最低限必要な飛行実績を元としている [34]。熟練者はド

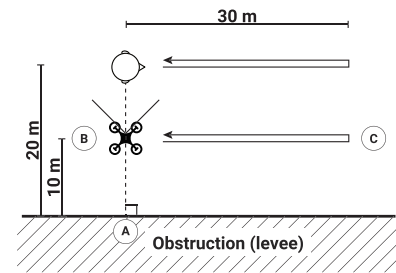


図 7 空撮タスクを上空から見た様子
Fig. 7 Top view of videography task.

ローンを日常的に業務で用いている者（3 名）とした。これらの異なる熟練度の参加者を選んだのは、提案手法の有効性の範囲や熟練度の違いを知ることは提案インタフェース設計や改良においてきわめて重要だからである。

実験は航空法の一部を改正する法律（平成 27 年法律第 67 号）および航空法および運輸安全委員会設置法の一部を改正する法律（令和元年法律第 38 号）に従い国土交通省により定められた無人航空機の飛行に関する基本的なルールに基づき、密集地（DID [35]）から十分に遠く周囲にも障害物の少ない砂浜で実施した。建物などの障害物を設定しづらくなるが、5 章で議論した操縦シナリオの多くは実践可能であり、初心者の（練習時の）不安定な操縦でも安全性の問題がまったく生じない最も現実的な環境である。

6.1 空撮タスク

タスクは今日のドローンの主な使用場面であり、かつ本提案手法の操縦シナリオを複数組み合わせさせた操縦が求められる空撮を設定した。歩行する被写体に並走し、被写体を映像の中心にとらえ続けながら撮影するものである。被写体とドローン、および障害物との位置関係を図 7(a) に示す。被写体は堤防から 20m 離れた地点に位置し、実験参加者は被写体と堤防の間にドローンを配置する。その後、被写体は堤防に沿うように一定速度で直進し、参加者はこれをとらえ続けるように主ドローンを操縦する。つまり、主ドローンの機首を被写体に向け右方向へ飛行する。被写体は 30m 直進したあと数秒停止し、反対方向へ直進する。同様に参加者は被写体をとらえるために主ドローンの機首を被写体に向けたまま左方向へ移動する。このとき、主ドローンの進行方向は変わるため、参加者は、進行方向を再びとらえるように適切に三人称視点を移動する必要がある。被写体が元の出発地点に戻ればタスクは終了である。タスクの説明を除き、離陸から着陸までおおよそ 5~10 分程度であった。なお、このタスクは水平および垂直位置合わせ、動体の追従などの操縦シナリオを組み合わせさせた操縦が求められる。

6.2 調査手順

参加者の操縦技術の熟練度に見合った調査手順を設定した。なお、実験日によって風の強さや日差しの強さが違うため、参加者間でも進め方に若干の違いは存在した。共通する手順として、実験者が提案手法について実機を用いて5～10分説明を行った後、参加者が同様に実機を用いて練習を行い、空撮タスクを実施した。すべてのタスクを終了したあと、インタビュー形式でフィードバックを得た。説明や練習時には、ドローンの連携やその挙動を理解しやすくするため目視を許可したが、タスク試行時は、テントなどを用いて参加者が飛行中のドローンを見えないようにした。

6.2.1 未経験者

未経験者へは他の参加者よりも長い練習時間を設けた。実験者による説明の後、最大15分の1台のドローンのみでの練習時間を与えた。次に提案手法の説明をし、その後、さらに練習時間を与えた。タスクの説明の際は、操縦例を示した動画を提示し、その例に従う必要はないことも伝えた。最初に、空撮タスクを2台のドローンで実施し、その後、同じタスクを1台のドローンのみで実施した。これは、未経験者に、1台での操縦と提案手法を比較してもらうためである。

6.2.2 初心者

初心者へは1台のドローンでの練習は省略し、提案手法を動画で説明した後、提案インタフェースでの練習を約5分行い、その後、空撮タスクを実施した。

6.2.3 熟練者

3名の熟練者を有給で招いた。全員、空撮を専門とし、うち1名は建造物の調査・検査を業務として行っている。提案手法を説明した後、5分程度の練習を行い、空撮タスクを実施した。

7. 調査結果と考察

調査実験を通し、実装したプロトタイプはつねに正常に動作した。実際の動作についてはデモビデオを参照されたい。

7.1 全体意見

はじめに、8人すべての参加者からの意見をまとめたものを次に示す。

- 提案インタフェースとその動きを容易に理解できた
- 主ドローンとその周囲の障害物や被写体との距離感を容易に把握できた (SAが向上した)
- 主ドローンを思いどおりの地点に容易に飛行させることができた
- 副ドローンからの三人称視点があることで大幅に不安は低減された
- 提案インタフェースの動作が好きだった

一方で、次のような指摘が得られた。

- 三人称視点映像に映る主ドローンが小さく、背景によっては視認しにくい
- 一人称視点映像を見たあとに三人称視点映像を見ると主ドローンの向きや進行方向を混乱しやすい

これらから、提案インタフェースは若干の改善の余地はあるものの、パイロットのSAを高め、操縦における不安を大きく軽減できることを確認した。依然として初期の検討結果であるが、目的に合致する結果であり、本研究のアプローチの妥当性は示されたといえる。次に各参加者からの詳細な意見について考察する (未経験者: N1, N2, N3, 初心者: B1, B2, 熟練者: E1, E2, E3)。

7.2 未経験者

参加者N1とN2は2人とも1台のドローン条件での目視外飛行に強い不安感を抱いていた。そして提案手法については、「模型インタフェースは理解できるが慣れるまで時間がかかる」と述べ、特にN2は「提案手法が林や森などの複雑な環境で有用である」と述べた。ただし、N2は一人称視点映像を見て操縦した後三人称視点を操縦した場合、スティックを倒す向きとドローンの進行方向を混乱することを指摘した。N3は提案手法が全体的に難しいと意見し、最後まで操縦に慣れることができなかった。なお、これはN3がドローン1台の条件で空撮タスクを行った際にも同様であり、ドローン操縦の難しさや本提案インタフェースがある程度の操縦スキルを持つパイロットにより機能すると考察される。

7.3 初心者

B1は素早く提案手法を理解した。しかし、改良点として、「主ドローンが地上付近を飛行している場合、三人称視点から視認しにくい」と述べた。B2も同様に素早く提案手法を理解し、模型インタフェースが手で触って動かせることに好意的であった。改良点としては、「主ドローンの向きを知るには三人称視点の映像からは分からず、一人称視点を見る必要があった」と述べた。ただし、これは練習により克服可能だろうとも述べた。

7.4 熟練者

熟練者3名は提案手法を肯定的に受け止め、他の2つの参加者グループと同じような意見も述べた。加えて、日常のドローン操縦業務経験に基づいた意見が得られた。E1は副ドローンが自動制御のため自身の完全制御下に置かれることで、その安全性に懸念を示した。一方、目視外飛行を行う際に提案手法は最も効果を発揮するという意見があった。E2は提案手法の操縦方法を理解するまで他の参加者と比較し長い時間を要したが、三人称視点の有用性について肯定的であった。なお、E2からは、スティックを持つ指を離さずに副ドローンを操作するような模型を使わな

い仕組みや、三人称視点は主ドローンを中心にとらえるだけでなく周囲を見渡せるよう向きを回転させられる仕組みなどについて提案があった。E3は提案手法を素早く理解したが、タスクの大部分を一人称視点のみを頼りに遂行することができた。これ自体は、後のインタビューからE3の日常のドローン操縦業務が強く反映されたものである。3人の熟度についてもかなり幅があり、より多くのフィードバックを集めることの重要性が示された。一方、ズーム可能なカメラを用いたり三人称視点に主ドローンの位置情報を付加表示したりすることで三人称視点に映る主ドローンの可視性を高めることや、E2同様、模型を用いず他の余った指で副ドローンを制御する仕組みがほしいといった提案があった。また、建造物の間隔が狭いなかで壁面を検査する場面や木が生い茂った貯水池の調査をする場面で有効的に使えるだろうとの意見があった。

8. 議論

8.1 三人称視点によるドローン操縦の向上

参加者全員が三人称視点映像を得られたことにより主ドローンとその周囲の障害物や被写体との位置関係が分かりやすくなったことを言及している。SAの向上は明らかであり、これにより操縦の質についても改良が見込まれる。特に、周囲状況を把握するための操縦や、事前の環境理解のための練習時間が減るため、飛行全体の効率化に向かうこともできると考える。操縦の質が向上したか否かについて、本実験ではデータを取得していない。しかし、観察からは、不安を持った場合のドローンの制御は離散的になりがちで、そうでない場合はドローンを滑らかに連続的に操縦しやすいことがうかがえた。これらの挙動について今後、定量的に検証していきたい。

8.2 連携アルゴリズムと制御インターフェース

ほとんどの参加者は提案インターフェースを理解していたが、数名からの意見として、スティック操作や模型の回転に混乱が見られたことについては考察と改良が必要である。ある参加者は、「一人称視点映像を見て操縦したあとに三人称視点映像を見て操縦すると予想した方向とは異なる向きに進むように感じる」と述べた。これは一人称視点映像中の主ドローンの機首の向きと、三人称視点映像に映る主ドローンの機首の向きが異なることにより発生するものとする。慣れで解決できる可能性もあるが、同一の空間を複数画面で表示した場合に、空間の一貫性は保たれにくく、画面間の遷移により精神的負荷やタスク完了時間が増えてしまうという課題が古くから指摘されている（たとえば、地図ビューワ [4], [13]）。本研究でもその課題が現れたといえ、どちらの視点を重点的に見るのかを強弱をつけられる仕組みが必要だと考える。

8.3 操縦技術の熟練度の違い

初心者は抵抗なく三人称視点を受け入れ、模型の操作についてもすぐに慣れた。未経験者も操縦の難しさを指摘する声が多かったものの、自由に設定できる三人称視点の利点は理解し、それを操縦に取り入れることができていた。一方で、熟練者は全員が、タスク遂行中にはもっぱら一人称視点を注視していた。日常で一人称のみで空撮をしているその経験として、飛行開始前に飛行場所の空間情報を頭の中で構築していることがインタビューにおいてうかがえた。タスクの飛行の難易度が低かったことが影響した可能性がある。また、副ドローンがパイロットの完全管理下にならないことによる（自動プログラムに対する）不安感があるという意見もあった。日本では目視外飛行はいかなる場合でも許可申請が必要であり、専門家といえども、目視外飛行そのものに抵抗があった可能性もある。現時点の結果からは、提案手法は、ドローン操縦経験が浅いほど、より高い適応性を持つことが示唆される。

8.4 副ドローンの安全性

本研究の第1の目的は、パイロットの積極的な飛行やなめらかな飛行を助けるためにSAを向上させることである。SAの向上は衝突の回避につながる可能性も十分にあるが、最終的な衝突の有無はそのパイロットの腕や飛行の状況やセンサの機能によるところが大きい。したがって、安全性や衝突などだけを考えれば、将来的にSLAMや近接センサを利用することのほうが現実的である。なお、現在、多くのSLAMの研究があり、自動での衝突回避はすでに高い水準であり、近い将来、ほぼすべてのドローンに搭載されるものと予想される [29]。本インターフェースにSLAMを導入すると、安全性を高められるだけでなく、周囲空間の構造を把握した上で最適な視点を導きそこからの三人称視点も提供可能になりさらに強力なインターフェースに発展する可能性もある。ただし、先にも述べたように、インターフェースデザインとして、模型とスティック操作を同時にさせないことや、三人称視点が長時間進行方向以外を向くことを避けるなど、ヒューマンエラーを防ぐための基本的な対策は実施すべきであると考えられ、今後の課題とする。

8.5 三人称視点映像中の主ドローンの視認性

参加者からは、三人称視点映像から主ドローンの向きや奥行き情報が分かりにくいといった意見が得られた。これは、ドローン間の距離を、余裕を持たせた10mにし設定していることも大きな要因である。しかし、背景色によってはドローンが埋もれてしまうこともあり、三人称視点において、ドローンの機首の向きとドローンそのものを強調表示することは必要と考える。ある研究例では、ARを用いドローンの影を地面に投影し奥行きを知覚する手がかりを提示している [33]。このような強調可視化か、ズームカ

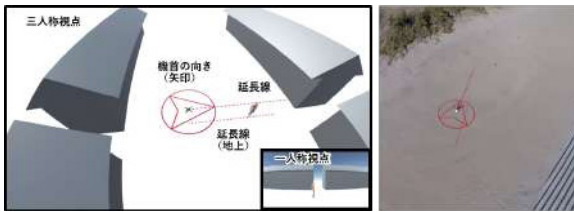


図 8 三人称視点における主ドローンの視認性強化の例

Fig. 8 An example of visual highlight of the primary drone in TPP.

メラを利用すること、などが対策として考えられる。

8.6 インタフェースの改良案：主ドローンの視認性向上と2視点映像提示の改良

本節では、上記で述べた課題のうち、ドローンの視認性と2画面表示による混乱を解決するインタフェースの改良案を提案する。これら2点は、提案インタフェースの中心的課題と考えられたため、試作を通してその改善可能性を示すこととした。

三人称視点における主ドローンが見えにくいという課題については、簡単な画像処理を導入し、図8左に示すように、主ドローンの向きと高さを強調表示する方法を試験的に実装した。矢印の向きが機首の向きを示しており、また、地上に延長線を投影することで、地面を基準に主ドローンの高さを簡単に把握することができる。ただし、実際にはGPSの誤差が生じるため、図8右に示した実機映像のように、強調描画が主ドローンに完全に重ならないことも多く、また更新頻度が十分でない場合は描画が遅れてしまうこともあった。依然として技術的な課題があるものの、このような強調表示のアイデアは本インタフェースの課題を解決するだけでなく、パイロットの認知的負担の軽減にもつながる可能性がある。なお、向きや高さなどの詳細ではなく、主ドローンの場所の視認性だけを向上させるには、主ドローン上部に昼間でも十分に視認できる光源を取り付けることも有効であった。

次に、コントローラ上で並べられた2画面表示では、一人称視点と三人称視点を混同してしまったり、どちらを見ればいいのか混乱してしまうという指摘があった。我々はこれを重く受け止め、パイロットがより重要と考える視点映像を選択することができ、重要度が高いものを大きく表示することができるように改良を施した。そのため、元のプロトタイプでは2台のスマートフォンを並べて配置していたが、デバイスをより画面が大きなタブレット端末とし、その中に一人称視点と三人称視点を表示させることとした。図9左の例では、スクリーンの大半に三人称視点映像を表示させ、右下の角に一人称視点映像を表示する窓を配置している。これらの大きさのバランスは別途調整することができる。また、同図右に示すように、右下の表示窓をタップすれば自動的に一人称と三人称視点映像を交換する



図 9 タブレットを利用した画面表示の改良案

Fig. 9 An example of improving visual display part.

ことができる。このタップ操作には議論の余地はあり、この操作を導入する場合に、パイロットは右手をスティックから離さなければならない。ただし、本研究から分かった点として、熟練者以外にとって、ドローンを操縦しながら視点切り替え操作をさせることは負荷が高く好ましくないため、複雑な操作を避けるためにも一時停止してからでしか視点交換ができない仕組みもありうると考える。タップ以外の入力候補としては、音声認識が最も現実的な方法だと考えられる。また、同図に示す新しいコントローラ的设计では、主ドローンのミニチュアの場所も元の設計から変更した。これはタブレット端末の導入にともなう変更でもあるが、これにより、元のインタフェースにおいてミニチュア操作時にパイロット自身の腕でスクリーンを隠してしまうという課題を解決することもできた。これらについて詳細なユーザ検証は実施していないが、元のコントローラより使い勝手や柔軟性は向上したため、今後詳細な客観データを取得できるユーザスタディを進めたい。

9. おわりに

本研究では、空間的に連動する2台のドローン用いてインタラクティブに操作可能な三人称視点を提供し、目視外ドローン飛行におけるパイロットの状況理解 (Situational Awareness) を高めるインタフェースを提案した。また、民生用プログラマブルドローンを用いてプロトタイプを実装した。ユーザフィードバックにより、より、提案インタフェースは概して好意的に受け止められ、三人称視点映像によりドローンとその周囲の障害物や被写体との位置関係が分かりやすくなったという意見が得られた。今後は三人称視点映像内の主ドローンの視認性向上や提案インタフェースの定量評価に取り組む。

参考文献

- [1] 3DR: 3DR Solo Drone, available from (<https://3dr.com/solo-drone/>) (accessed 2018-10-14).
- [2] ArduPilot: Open Source Autopilot, available from (<http://ardupilot.org/>) (accessed 2018-09-22).
- [3] Dang, C.-T., Pham, H.-T., Pham, T.-B. and Truong, N.-V.: Vision based ground object tracking using AR.Drone quadrotor, *International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*,

- pp.146–151 (2013).
- [4] Cockburn, A., Karlson, A. and Bederson, B.B.: A review of overview+detail, zooming, and focus+context interfaces, *ACM Computer Survey*, Vol.41, No.1, Article 2 (2009).
- [5] DJI: Mavic 2 - See the Bigger Picture, available from <https://www.dji.com/mavic-2>.
- [6] Jane, L.E., Ilene, L.E., Landay, J.A. and Cauchard, J.R.: Drone & Wo: Cultural influences on human-drone interaction techniques, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp.6794–6799 (2017).
- [7] Endsley, M.R.: Toward a theory of situation awareness in dynamic systems, *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol.37, No.1, pp.32–64 (1995).
- [8] Erat, O., Isop, W.A., Kalkofen, D. and Schmalstieg, D.: Drone-Augmented Human Vision: Exocentric control for drones exploring hidden areas, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.1437–1446 (2018).
- [9] Fukatsu, S., Kitamura, Y., Masaki, T. and Kishino, F.: Intuitive control of “bird’s eye” overview images for navigation in an enormous virtual environment, *Proc. Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST)*, pp.67–76 (1998).
- [10] Galvane, Q., Lino, C., Christie, M., Fleureau, J., Servant, F., Tariolle, F.-L. and Guillotel, P.: Directing cinematographic drones, *ACM Trans. Graphics*, Vol.37, No.3, pp.1–18 (2018).
- [11] Gebhardt, C., Stevšić, S. and Hilliges, O.: Optimizing for aesthetically pleasing quadrotor camera motion, *ACM Trans. Graphics*, Vol.37, No.4, pp.1–11 (2018).
- [12] Higuchi, K., Fujii, K. and Rekimoto, J.: Flying head: A head-synchronization mechanism for flying telepresence, *Proc. Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT)*, pp.28–34 (2013).
- [13] Hornbæk, K., Bederson, B.B. and Plaisant, C.: Navigation patterns and usability of zoomable user interfaces with and without an overview, *ACM Trans. Computer-Human Interaction*, Vol.9, No.4, pp.362–389 (2002).
- [14] Ikeuchi, K., Otsuka, T., Yoshii, A., Sakamoto, M. and Nakajima, T.: KinectDrone: Enhancing somatic sensation to fly in the sky with Kinect and AR.Drone, *Proc. Augmented Human International Conference (AH)*, pp.53:1–53:2 (2014).
- [15] Kasahara, S., Niiyama, R., Heun, V. and Ishii, H.: Ex-Touch: Spatially-aware embodied manipulation of actuated objects mediated by augmented reality, *Proc. Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI)*, pp.223–226 (2013).
- [16] Kelly, A., Chan, N., Herman, H., Huber, D., Meyers, R., Rander, P., Warner, R., Ziglar, J. and Capstick, E.: Real-time photorealistic virtualized reality interface for remote mobile robot control, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.30, No.3, pp.384–404 (2011).
- [17] Kitamura, Y., Kishino, F. and Fukatsu, S.: Manipulation of viewpoints in 3D environment using interlocked motion of coordinate pairs, *Proc. IFIP Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT)*, pp.327–334 (2003).
- [18] Li, N., Cartwright, S., Shekhar Nittala, A., Sharlin, E. and Costa Sousa, M.: Flying Frustum: A spatial interface for enhancing Human-UAV awareness, *Proc. Conference on Human-Agent Interaction (HAI)*, pp.27–31 (2015).
- [19] MAVLink: Introduction · MAVLink Developer Guide.
- [20] Meier, L., Tanskanen, P., Heng, L., Lee, G.H., Fraundorfer, F. and Pollefeys, M.: PIXHAWK: A micro aerial vehicle design for autonomous flight using onboard computer vision, *Autonomous Robots*, Vol.33, No.1-2, pp.21–39 (2012).
- [21] Mizutani, S., Okada, Y., Salaan, C.J., Ishii, T., Ohno, K. and Tadokoro, S.: Proposal and experimental validation of a design strategy for a UAV with a passive rotating spherical shell, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.1271–1278 (2015).
- [22] Naseer, T., Sturm, J. and Cremers, D.: FollowMe: Person following and gesture recognition with a quadcopter, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.624–630 (2013).
- [23] Saakes, D., Choudhary, V., Sakamoto, D., Inami, M. and Lgarashi, T.: A teleoperating interface for ground vehicles using autonomous flying cameras, *Proc. Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT)*, pp.13–19 (2013).
- [24] Saitoh, K., Machida, T., Kiyokawa, K. and Takemura, H.: A 2D-3D integrated interface for mobile robot control using omnidirectional images and 3D geometric models, *IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp.173–176 (2006).
- [25] Tara, R.Y. and Teng, W.-C.: A suitability evaluation of controlling 3D map viewpoint by gamepad orientation for remote navigation, *IEEE Access*, Vol.5, pp.10686–10693 (2017).
- [26] Temma, R., Takashima, K., Fujita, K., Sueda, K. and Kitamura, Y.: Third-Person Piloting: Increasing situational awareness using a spatially coupled second drone, *Proc. ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, pp.507–519 (2019).
- [27] Thomason, J., Ratsamee, P., Kiyokawa, K., Kriangkamol, P., Orlosky, J., Mashita, T., Uranishi, Y. and Takemura, H.: Adaptive view management for drone teleoperation in complex 3D structures, *Proc. Conference on Intelligent User Interfaces (IUI)*, pp.419–426 (2017).
- [28] Ware, C., Osborne, S., Ware, C. and Osborne, S.: Exploration and virtual camera control in virtual three dimensional environments, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol.24, No.2, pp.175–183 (1990).
- [29] Wendel, A., Maurer, M., Graber, G., Pock, T. and Bischof, H.: Dense reconstruction on-the-fly, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.1450–1457 (2012).
- [30] Xie, K., Yang, H., Huang, S., Lischinski, D., Christie, M., Xu, K., Gong, M., Cohen-Or, D. and Huang, H.: Creating and chaining camera moves for quadrotor videography, *ACM Trans. Graphics*, Vol.37, No.4, pp.1–13 (2018).
- [31] Yao, Y., Xia, H., Huang, Y. and Wang, Y.: Free to fly in public spaces: Drone controllers’ privacy perceptions and practices, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp.6789–6793 (2017).
- [32] Yonezawa, K. and Ogawa, T.: Flying robot manipulation system using a virtual plane, *IEEE Virtual Reality (VR)*, pp.313–314 (2015).
- [33] Zollmann, S., Hoppe, C., Langlotz, T. and Reitmayr, G.: FlyAR: Augmented reality supported micro aerial Vehicle Navigation, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.20, No.4, pp.560–568 (2014).

- [34] 国土交通省：航空：無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の飛行ルール，入手先 (http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html) (参照 2018-09-21).
- [35] 国土地理院：人口集中地区（DID）平成 27 年，入手先 (<http://www.gsi.go.jp/chizujoho/h27did.html>) (参照 2018-10-05).

推薦文

ドローンを直接視認できない場所では，ドローンに取り付けられたカメラで撮影した一人称視点の映像を見ながらパイロットはドローンを操縦するが，一人称視点の映像だけではドローン周辺の状況を理解することが困難である．本論文では，三人称視点の映像を撮影する副ドローンを飛行させ，2 台のドローンを連動して操作できる操縦インタフェースを提案し，この問題を解決している．ドローンの操縦や飛行経路計画を支援する方式は興味深く，習熟度の異なるユーザを対象とした評価実験も行っており，高く評価できる．総じてプログラム委員会において高い評価を受けたため，推薦論文として推薦する．

(インタラクシオン 2019 プログラム委員長 小川 剛史)



末田 航

2000 年武蔵野美術大学造形学部卒業，2003 年早稲田大学大学院国際情報通信研究科修了．株式会社ボルテージ，デジタルハリウッド株式会社を経て，2013 年東京大学大学院にて博士（学際情報学）取得．現在，シンガポール国立大学スマートシステム研究所シニアリサーチフェロー．



北村 喜文 (正会員)

1987 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了．同年キヤノン株式会社．1992 年 ATR 通信システム研究所．1997 年大阪大学大学院工学研究科/情報科学研究科助教授/准教授．2010 年東北大学電気通信研究所教授．博士（工学）．



天間 遼太郎

2019 年東北大学大学院情報科学研究科システム情報工学専攻博士前期課程修了．同年株式会社ビズリーチ．修士（情報科学）．



高嶋 和毅 (正会員)

2006 年大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程修了．2008 年同専攻博士後期課程修了．同年同大学院国際公共政策研究科（情報科学研究科兼任）助教．2011 年東北大学電気通信研究所助教，2018 年より同所准教授．博士（情報科学）．



藤田 和之

2010 年大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程修了．2013 年同研究科情報システム工学専攻博士後期課程修了，同年株式会社イトーキ．2018 年より東北大学電気通信研究所助教．博士（情報科学）．