

推薦研究論文

仮想平面を用いた飛行ロボット操作手法の提案と評価

米澤 和也^{1,a)} 小川 剛史^{1,b)}

受付日 2014年1月15日, 採録日 2015年5月29日

概要: AR.Droneのような飛行ロボットが容易に入手でき、人々にとって身近な存在となっている。しかし、ロボットを任意の位置へ自由に操作することは容易ではなく、特に飛行ロボットは平面のみを移動するロボットと比較しても操作はより困難である。そこで、飛行物体に重畳表示した仮想平面を用いた飛行物体の操作手法を提案する。提案手法では、仮想平面上に移動ルートを描くと、そのルートを飛行物体が移動する。ジョイスティックやラジコン操縦無線機のようなコントローラと比較して、レバーやボタンなどを用いた複数の操作を同時に行う必要がなく、飛行物体の向きと操作者の視点を考慮する必要もないため、提案手法では操作の簡易性と直感的な操作性が期待できる。本論文では提案手法と開発したプロトタイプの詳細および、操作性評価のために行った既存のジョイスティックコントローラとの比較実験について述べ、提案手法の特徴について考察する。

キーワード: 拡張現実感, ユーザインタフェース, ロボット操作

Proposal and Evaluation of Flying Robot Manipulation System Using a Virtual Plane

KAZUYA YONEZAWA^{1,a)} TAKEFUMI OGAWA^{1,b)}

Received: January 15, 2014, Accepted: May 29, 2015

Abstract: The flexible movements of flying robots make it difficult for novices to manipulate them precisely with controllers such as a joystick and a proportional radio system. Moreover, the mapping of instructions between a robot and its reactions is not necessarily intuitive for users. We propose manipulation methods for flying robots using augmented reality technologies. In the proposed system, a virtual plane is superimposed on a flying robot and users control the robot by manipulating the virtual plane and drawing a moving path on it. In this paper, we present the design and implementation of our system and describe experiments conducted to evaluate our methods. Also, we consider features of proposed methods.

Keywords: augmented reality, user interface, robot control

1. はじめに

人が立ち入ることのできない場所の調査や、遠隔コミュニケーションの実現など、テレプレゼンスに関する研究がさかんに行われている [1], [2], [3]. ロボット技術の発展によって、工場内のラインで部品を自動運搬するロボットか

ら一般家庭で利用される Roomba^{*1}や COCOROBO^{*2}などのお掃除ロボットまで、ロボットの活躍の場は着実に広がり、一般ユーザであってもロボットに接する機会が増加している。これまで軍事や探索などの目的で利用されてきた飛行ロボットも小型化と低価格化によって、容易に購入が可能となり、趣味として利用する場面も増えつつある。飛ばして単にラジコンとして遊ぶ用途にとどまらず、カメラやセンサなどの機器を搭載することで、様々な場面の応用が見込まれる。たとえば飛行ロボットに搭載したカメ

¹ 東京大学情報基盤センター
Information Technology Center, The University of Tokyo,
Bunkyo, Tokyo 113-8658, Japan

a) k.yonezawa@cml.t.u-tokyo.ac.jp

b) ogawa@nc.u-tokyo.ac.jp

^{*1} <http://www.irobot.com/us>

^{*2} <http://www.sharp.co.jp/cocorobo/>



図 1 提案システム

Fig. 1 Proposed system.

ラで撮影した映像を動画コンテンツとして YouTube などの動画配信に利用したり、深度センサなどと組み合わせ 3 次元モデルを生成したりでき、CGM や UGC などのコンテンツ制作に、飛行ロボットの操作手法は重要な要素の 1 つとなると考えられる。

しかし家庭用に普及しているロボットは、移動においてもそのロボット特有のタスクにおいても、あらかじめ決められたプログラムの動作しか行えず、ユーザの望む柔軟な操作を行うことは容易ではない。特に無線で制御できる小型の飛行ロボットは 3 次元空間を自由に移動できるため、床面に限定された掃除ロボットとは異なり、移動操作に限定しても複数の制御信号を同時にロボットに与えなければならない、その操作は困難である。たとえば、ジョイスティックタイプのコントローラを用いてロボットを操作するシステムでは、スティックを倒した方向とロボットの移動方向を対応させている場合が多く、水平な平面上であれば簡単な操作で任意の場所にロボットを移動させることができるが、3 次元空間内を移動させる際はさらに上下方向の操作も必要となり、同時に制御することは難しい。また、ロボットを三人称視点で操作する場合、ロボットにとっての方向と操作しているユーザの方向は一致しないことが多い。そのためつねに飛行ロボットの向きを考慮する必要があり、直感的な操作が困難となる。したがって、空間の移動操作に習熟するには相応の訓練が必要となる。本論文では、飛行ロボットの移動ルートを、仮想平面を用いて視覚的に提示することで、容易な操作を可能にする手法を提案し (図 1)、プロトタイプ [4] の実装および被験者実験による提案インタフェースの有効性について議論する。以下、2 章では関連研究について述べ、各手法の課題を議論する。3 章では提案手法について述べ、4 章ではタブレット PC に実装したプロトタイプについて述べる。5 章では操作性を評価するために行った、既存のジョイスティックコントローラとの比較実験について述べ、6 章で提案手法に関する考察を行う。最後に 7 章で本論文のまとめと課題を述べる。

2. 関連研究

3 次元空間を移動するロボットの操作手法として、ユーザの視線の動き [5] や脳波を利用した操作 [6]、身体全体のジェスチャに合わせて操作を行う手法 [7] など、ユーザの挙動から直接操作する手法が研究されている。しかし、視線や脳波の生体情報は安定した制御が困難であり、正確な操作は容易ではない。Flying Head [8] は無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) の遠隔操作において、操作者の頭部の動きと UAV の動きを同期させる操作方法を提案している。日常的に行われる身体操作を UAV の移動にマッピングすることで、直感的な操作が可能であることが報告されている。また UAV に搭載されているカメラの映像を、ユーザに装着した HMD に送ることで視点の同期も行っている。しかし、UAV を広い空間で移動させるには、ユーザの周囲にも同等の広さの空間が必要となる。垂直方向に関しては、頭部の動作範囲に制限を受けるため、操作者の身長を超える高さに UAV を移動させることは困難である。

ロボットの操作インタフェースとしてスクリーンに投影したロボットを擬似的にタッチして操作する手法が提案されている [9], [10]。スクリーンには操作対象となるロボットと周囲の状況が映し出されるため、移動を阻害する障害物の存在を把握しながら操作できる。しかし、ロボットの動作の自由度が多くなるほど 2 次元インタフェースで操作することは容易ではない。TouchMe [11] では、環境カメラで撮影したロボットの映像をタッチスクリーンに提示して、ユーザがスクリーン上のロボットを指で動かすことで、実際のロボットを操作する方式を提案している。ロボットにはアームが付いており、アームの操作や、ロボットの移動操作は 3 次元的操作となるが、ユーザはタッチスクリーンを用いて指示を出すため、2 次元的操作しか行えない。そこで、ロボットを操作するための補助レバーなどをロボットに重畳して、ユーザの操作を支援している。移動操作は現状で平面移動を想定しているため、前後移動と旋回を繰り返すことにより実現している。しかし 3 次元的操作を行うためには旋回の軸をもう 1 つ増やし、2 軸の旋回操作をタッチスクリーンで行う必要があり、煩雑かつ時間のかかる操作となってしまう。

ロボットの移動経路を特定の方法を用いて指示し、その指定経路をロボットが追従することで操作を行う手法は直感的であり、操作が容易である。Sketch and Run [12] は天井に設置されたカメラで床面にある掃除ロボットをとらえ、その映像をタブレット PC に投影し、画面上で移動経路をスタイラスペンを用いて記述することにより操作する。記述した経路は自由曲線で描くことができ、旋回と前進を繰り返しながら記述どおりの経路を移動することができる。Laser Gesture Interface [13] では、レーザーポインタで床平

表 1 提案手法と従来手法との比較

Table 1 Comparison of the proposed methods with previous methods.

	対象とするロボット	ロボットの周囲の把握	移動可能な空間	ロボット操作の可能範囲
Flying Head [8]	飛行型	前方のみ	3次元	操作者頭部の移動範囲内
TouchMe [11]	自走型	周囲全体	2次元	環境カメラ撮影範囲内
SR [12], LGI [13]	自走型	周囲全体	2次元	環境カメラ撮影範囲内
提案手法	飛行型	周囲全体	3次元	操作者カメラ撮影範囲内 (撮影範囲外も一部可)

面上に記述した軌跡を用いて、ロボットに対する操作コマンドを指定する方式を提案している。ユーザが指示したコマンドは、天井のプロジェクタから床面に投影され、その内容を確認できるようになっている。しかしこれらの研究において、ロボットの移動経路は床や壁などの平面にしか記述できないため、空中での移動といった操作は行えない。

上記の関連研究と提案手法について、特徴を比較し、表 1 に記す。提案手法では 3次元に移動する飛行ロボットを操作することが可能であり、ロボットの周囲全体を把握しながら操作を行う。また、操作範囲は操作インターフェースのカメラ撮影範囲内であり、屋内外を問わず使用することができる。詳細は 3章以降に述べる。

3. 仮想平面を用いた飛行ロボット操作手法

図 2(a-1) に示したように、3次元空間の対角線の位置にロボットを移動させたい場合、既存のコントローラでは直線的に目的地に向かわせることは容易ではないため、たとえば床と平行な平面移動をした後に上昇を行う、といった複数の行程に分割して実施することが考えられる。また飛行ロボットを三人称視点で操作する場合、ロボットの周囲環境が把握しやすい反面、移動方向の指示はロボットの視点で行われるため、たとえばロボットとユーザが対面している状態で操作を行う場合、ユーザが望む移動方向と実際のロボットの移動方向は前後左右が逆になる。ロボットとユーザの位置関係によっては、ユーザの想定した動作を行わせることが困難であり、移動により多くの時間を要してしまう。さらにロボットをカメラでとらえて操作する手法において、図 2(b-1) のように柱の間を通過してロボットを移動させたい場合、障害物に飛行ロボットが阻まれてしまい、操作を続けることは不可能になってしまう。

本論文では、3次元空間を移動する飛行ロボットに対して、直感的で自由に操作可能なインターフェースを実現するために、移動空間中に仮想的な平面を提示し、その仮想平面上に経路を描くことで飛行ロボットを操作する手法を提案する。図 3 に提案システムにおける操作方法を示す。

3.1 移動

ロボットが飛行状態のときに、仮想平面上にロボットの移動ルートを自由曲線で記述する。仮想平面は飛行ロボッ

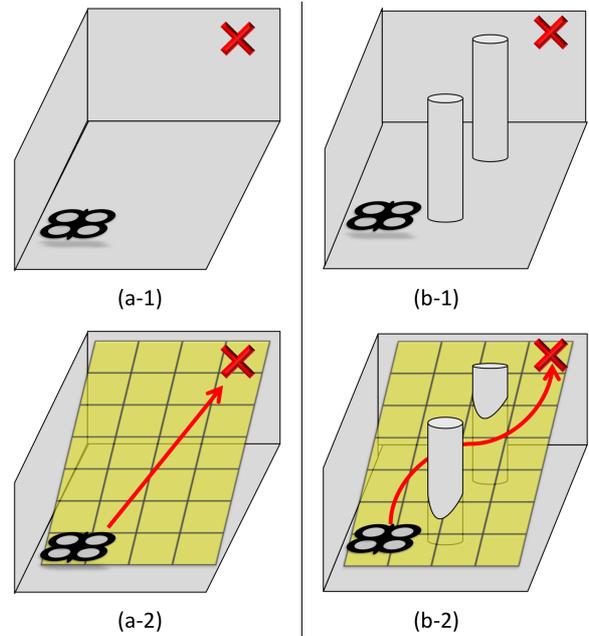


図 2 提案手法操作例

Fig. 2 Example of proposed method operation.

トを中心に回転でき、タッチスクリーン上のピンチイン/ピンチアウト操作で大きさを変更することで、広い範囲での移動指示も可能である。仮想平面を用いた移動ルート指定では、ロボットが障害物により一時的に視認できなくなるような状況でも、移動ルートの指示が可能である。また、飛行ロボットの移動速度は、操作者による移動ルートの記述スピードに対応させ、速く描いたルートは速いスピードで、遅く描いたルートは遅いスピードで移動させる。

3.2 離着陸、旋回、動作の中断

着地状態の飛行ロボットに重畳表示した仮想平面上へ上方向のルートを記述することで離陸を指示する。またロボットが飛行状態のときに床面との距離が閾値以下になるまで下方向のルートを記述することにより着陸を指示する。閾値の具体的な値に関しては、操作するロボットの仕様にも影響を受けるため任意に指定できるものとし、仮想平面上に閾値の境界を表示する。旋回はロボットが飛行状態のときに、2本指のドラッグで鉛直方向を軸に仮想平面を回転させることで指示する。また、飛行ロボットが移動している最中に、タッチスクリーンをダブルタップすることで

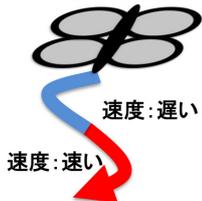
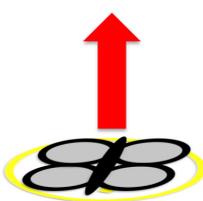
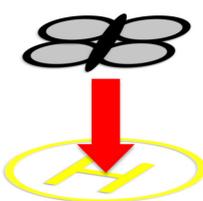
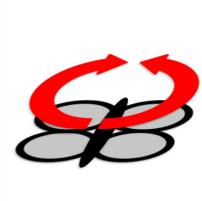
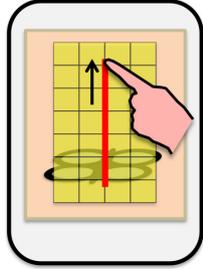
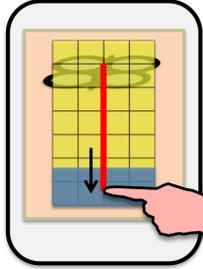
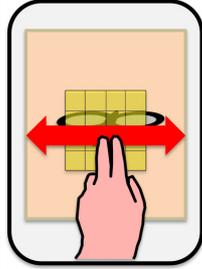
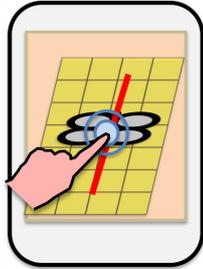
	移動	離陸	着陸	旋回	動作中断
ロボット動作					
画面操作					

図 3 提案システムにおける操作
Fig. 3 Operations in proposed system.

移動動作を中断し、その場でのホバリングを指示する。

4. プロトタイプ

4.1 開発環境

飛行ロボットには、Parrot 社製 AR.Drone 2.0 を採用し、タブレット端末として Apple 社製 iPad (iOS7) 上に、Objective-C を用いて実装した。仮想平面などを表示させる AR 環境として Qualcomm 社製のモバイル AR ライブラリである Vuforia を採用している。

4.2 操作インターフェース

AR.Drone の周囲 4 面に画像マーカを搭載し、それをタブレット端末搭載のカメラで検出、仮想平面を重畳する。仮想平面は、画像マーカの原点を通る平面となっており、自由に回転、拡大縮小が可能である。以下にタッチスクリーン上で行う操作方法を述べる。

4.2.1 仮想平面操作

飛行ロボットの移動はすべて仮想平面上で行われることを想定しているため、仮想平面の向きを任意に変更することで 3 次元空間の移動が可能となる。仮想平面の回転操作は、タッチスクリーンを 0.4 秒以上ロングタップした後に指をスクリーンから離さずドラッグすることで行う。0.4 秒という値は iOS のロングタップと認識されるデフォルトの値である。またタップは 1 本の指で行っているが、今後断らない限り、操作に使用する指は 1 本で行うこととする。回転操作を行う際、2 軸以上の同時回転をドラッグ操作で行うことが困難なため、現在は回転軸を鉛直方向の 1 軸に限定している。また、回転軸は任意に選択可能である。初期状態では、仮想平面はマーカと同じ大きさで表示されるが、AR.Drone を移動させたい目標位置まで平面の大きさ

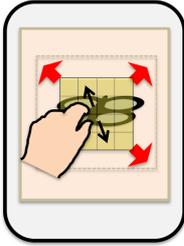
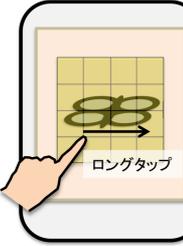
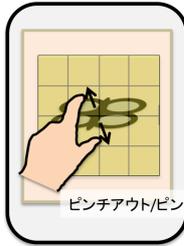
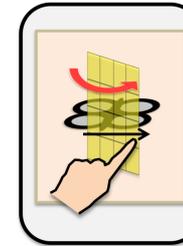
平面拡大/縮小	平面回転
	
	

図 4 仮想平面の操作方法
Fig. 4 Operation of the virtual plane.

が届いていない場合が考えられるため、ユーザが任意に平面の拡大縮小を行えるようにしている。操作はタッチスクリーンをピンチアウトすることで拡大、ピンチインすることで縮小を行う。仮想平面操作の様子を図 4 に示す。また、着陸する際の補助として床面との閾値以上の範囲は黄色く、閾値以下の範囲は青く仮想平面を表示することで、境界を視覚的に表示している。

4.2.2 操作指示

4.2.1 項で記した仮想平面操作によって、平面の大きさと向きを決定した後、平面上に移動させたい目標位置を指定する。移動指示は画面をドラッグすることで行う。画面を

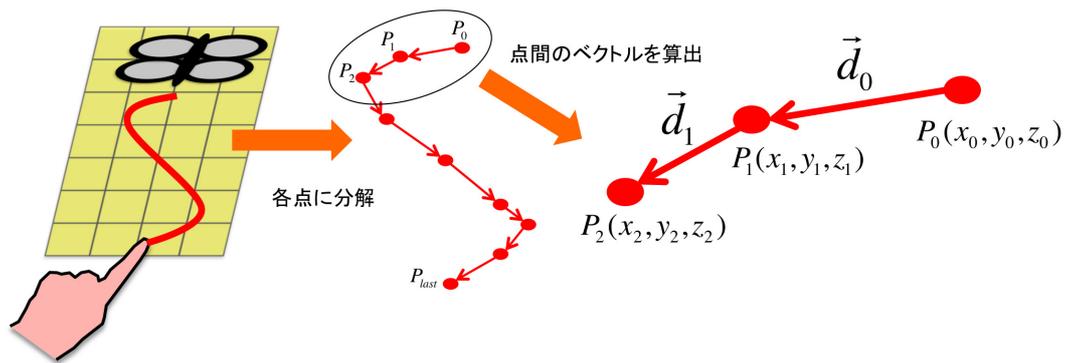


図 5 自由曲線配列
Fig. 5 Free curve array.

ドラッグしている間は AR.Drone の中心からタッチしている箇所に移動経路が表示され、画面から指を離すことにより AR.Drone は経路に従って移動を開始する。指定した経路に沿って AR.Drone が移動する様子をユーザにフィードバックするために、AR.Drone が移動している間、仮想平面はスクリーン上に固定される。そして AR.Drone の移動が完了した後、移動前の平面の傾きとサイズを保った仮想平面を画像マーカ上に再表示する。視線方向に対して平行に AR.Drone を移動させたい場合、仮想平面がスクリーンに対して垂直な位置関係になるため、経路の記述や仮想平面に対する操作が難しくなることが想定される。このような場合には、ユーザ自身が AR.Drone の側面方向に移動するなど、位置を適宜調節することでその問題を回避できる。

4.3 AR.Drone の制御

AR.Drone の移動経路は仮想平面上に自由曲線で記述できるが、AR.Drone に移動指示を与える際には曲線のある間隔で配置した点に分解している。図 5 に示すように、移動開始地点 P_0 から、次に移動する点 $P_1, P_2 \dots$ 移動終了地点 P_{last} の各地点の空間座標をマーカ座標系で求め、現在地から次の地点までの移動方向のベクトルを計算する。得られたベクトルを AR.Drone 機体の前後、左右、上下各軸の成分に分解し、それぞれの移動速度を決定して AR.Drone に P_n から P_{n+1} への移動命令を送る。移動中はベクトルの大きさとデッドレコニングで求めた移動距離を 1/30 秒おきに比較し、移動距離が上回った時点で P_{n+1} への移動が完了したと判定する。そして P_{n+1} を現在地とし、次の P_{n+2} に対して同様に計算をし、移動を行う。以上のプロセスを現在地点 P_0 から配列の終点 P_{last} まで繰り返し、擬似的な曲線移動を実現している。また各点は 1/30 秒間隔で記録されるため、各点の距離は記述速度によって変化する。点間の距離に応じて速度を変化するように制御を行うことで、経路の記述速度とロボットの移動速度を対応させている。

タッチスクリーンを 2 本の指でタッチし、画面右方向に

ドラッグすることで左旋回、左方向にドラッグすることで右旋回の命令を AR.Drone に送る。その際の旋回速度は現状 34.3 度/秒で一定であり、指をスクリーンから離れた時点で停止命令を送る。また、AR.Drone の移動中にスクリーンをダブルタップすることで同様に停止命令を送り、その場でホバリングする。

4.4 デッドレコニング

航行データから得られる前後方向と左右方向の速度データを逐次積分し、高度データと合わせることで現在位置を空間座標として算出するよう処理を行った。最初の離陸点を原点として得られた空間座標データは、csv 形式でアプリケーションの終了と同時に記録されるように設定し、後に航行軌跡を参照することが可能である。得られた座標は 4.3 節に述べたように移動方向の決定の際、部分的に利用しているため、デッドレコニングで問題となる累積誤差は小さく、システムに影響を与えない。

4.5 プロトタイプ実行のための必要条件

現在の実装において、利用する際の必要条件を、以下に述べる。操作端末は、一般的なタブレット端末のようにカメラと画面が搭載されている必要がある。その画面には飛行ロボットと仮想平面を重畳表示させるため、飛行ロボットがカメラの撮影範囲に入っていないといけない。また重畳表示の際に利用する飛行ロボットに搭載した画像マーカが、操作端末のカメラで認識できる必要がある。そして操作端末と飛行ロボット間で通信を行うため、互いが無線 LAN で接続できることが必要となる。

5. 評価実験

5.1 実験 1：目的と内容

提案手法では、ユーザとロボットの位置関係によらず直感的な操作を見込むことができる。通常よく利用されるジョイスティックタイプのコントローラと比較を行い、提案手法の効果を検証した。比較には、AR.Drone の公式操

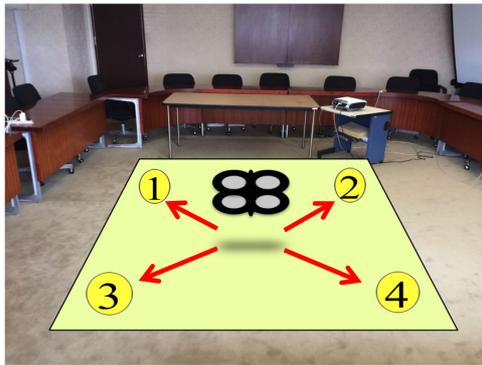


図 6 実験 1：状況設定

Fig. 6 Experiment 1: Configuration.

作アプリケーションである“AR.FreeFlight”を用いる。操作画面左右に仮想的なパッドが配置されており、左パッドで AR.Drone の前後左右移動を、右パッドで上下移動と旋回動作を行う。

本実験では図 6 に示すように、4つの移動箇所を設定し、初期位置として中心に飛行状態の AR.Drone を配置する。被験者にはランダムに 1~4 の番号を提示し、その番号の箇所へ AR.Drone を移動させるよう指示した。操作開始から、AR.Drone が指定ポイントの上空を通過するまでの時間を計測した。なお、被験者には AR.Drone の向きを変更しないよう指示している。ジョイスティックコントローラの操作では、AR.Drone の向きを被験者と相対的に一致する状態、左右それぞれ 90 度異なる状態、180 度異なる状態の合計 4 条件で計測した。一方、提案手法では AR.Drone の向きが変わっても操作に違いがないため、各方向に対して同様の結果となることが予想される。そのため、提案手法は網羅的に実施するのではなく、特定の 1 条件のみで計測を行った。ジョイスティック、提案手法の両操作において、被験者には飛行ロボットを飛ばすエリア手前側で操作するよう指示しており、左右方向へ若干の移動も許容している。しかしその際、操作感に大きく影響を与えないよう体の向きを変更しないよう指示している。本条件は実験 2 も同様である。被験者は各条件を 2 回ずつ行った。被験者は男性 7 名である、実験前に提案手法、ジョイスティック両操作の練習時間を設け、被験者が十分と感じた時点で練習を終えている。

5.2 実験 1：結果と考察

ジョイスティックコントローラおよび提案システムを用いた際の平均所要時間を図 7 に示す。ジョイスティックについては、被験者と AR.Drone の向きについて 4 条件の結果を示している。またエラーバーは標準誤差を表しており、ANOVA 検定 (有意水準 0.05) および Ryan 法による多重比較の結果もあわせて示している。本実験により、AR.Drone の向きが被験者と相対的に左右 90 度異なる状態、180 度

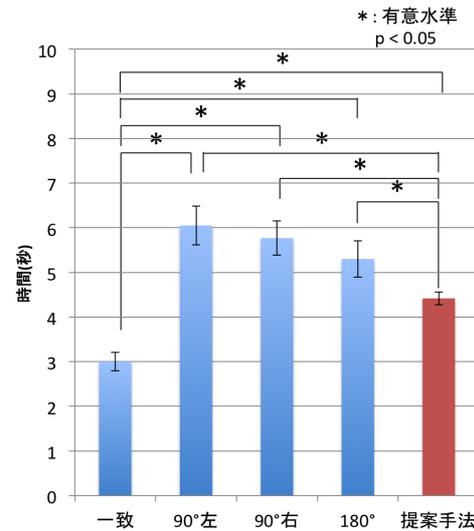


図 7 実験 1：所要時間

Fig. 7 Experiment 1: Average time.

異なる状態において、提案手法と有意差が生じ、提案手法の方が所要時間が短いという結果が得られた。ユーザと AR.Drone の相対方向が異なる場合、ジョイスティック操作においてはスティックの操作方向と AR.Drone の移動する方向が一致しないことから、操作に多くの時間を要してしまう一方、提案手法はその影響を受けず、最短距離で目的地に進んだためであると考えられる。またユーザと AR.Drone の向きが一致している際のジョイスティック操作との比較では、提案手法の方が多くの時間を要しており、検定の結果、有意差もあった。これは提案手法と比較して、ジョイスティックコントローラはゲームなどによる仮想的な物体の 3 次元操作において慣れ親しまれているためであると考えられる。本実験により、提案手法では方向関係によらず直感的な操作が可能であることが確認できる。

5.3 実験 2：目的と内容

実験 2 ではロボットの前後左右方向と上下方向の同時移動、つまり空間上の斜め移動について、検証する。今回使用するジョイスティックコントローラでは、上下軸と前後左右平面を同時に移動する斜め移動の際、両パッドを同時に操作する必要がある。両パッドを用いた操作は、習熟していないユーザには容易ではなく、斜め移動の際は片方のパッドを交互に操作することが予想される。しかし、提案手法においては平面上の記述によって 2 軸以上の斜め移動操作に差はなく、一直線に経路を指定し、移動を行うことが可能であり、容易に目的地に到達できる。本評価実験では斜め移動を行う状況設定においてその時間差を確認し、ジョイスティック操作と提案手法それぞれの操作を観察することで、その差を検証する。また、実験後のアンケートを通じて主観的に操作性を評価する。

図 8 に AR.Drone を移動させる地点の設定を示す。水

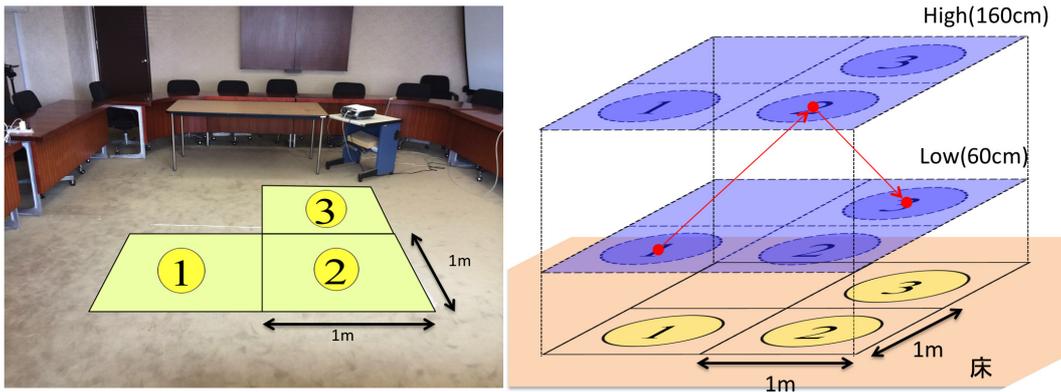


図 8 実験 2：状況設定

Fig. 8 Experiment 2: Configuration.

平方向に 1~3 の 3 地点，各地点において床面からの高さを変えた 2 地点を設定し，合計 6 地点とした．実際に行う移動パターンは，床面から約 160 センチメートルの高さを High，床より約 60 センチメートルの高さを Low として 1Low → 2High, 1High → 2Low, 2Low → 3High, 2High → 3Low, 3Low → 1High, 3High → 1Low の合計 6 パターンとした (図 8 には例として 1Low → 2High, 2High → 3Low の移動経路を示している)．移動の初期位置は各番号の真上とし，移動の完了は各番号を中心とした 1メートル四方の空間に AR.Drone がおさまっていることを条件とする．比較は提案手法とジョイスティックコントローラについて行うが，ジョイスティック操作ではユーザと AR.Drone の向いている方向が一致している場合と，一致していない場合 (ユーザに対して AR.Drone は左方向を向いている状態) の 2 条件で測定した．被験者にはジョイスティック操作を行う際，可能であれば斜め移動を行うように指示している．タスク終了後に主観評価としてユーザにアンケートを行い，7段階のリッカート尺度を用い評価する．アンケート項目を以下に記す．

- Q1 操作しやすいと感じた
- Q2 自信を持って操作できた
- Q3 斜め移動は容易であった
- Q4 あまり練習が必要ないと感じた
- Q5 効率良く目的地に移動できた
- Q6 ロボットを想像どおりに動かすことができた

被験者は男性 8 名，女性 1 名の計 9 名であり，実験 1 と同様に練習時間を設けている．

5.4 実験 2：結果と考察

各操作手法に対して 6 パターンそれぞれの移動に要した時間を図 9 に示す．具体的には，提案手法では仮想平面に対する操作 (向き変更，拡大縮小，経路記述) 時間と AR.Drone の移動時間の合計時間を，ジョイスティックコントローラでは AR.Drone の移動時間を記している．ま

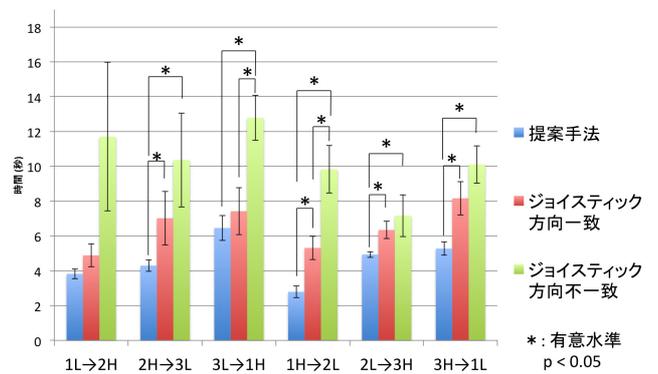


図 9 実験 2：所要時間

Fig. 9 Experiment 2: Average time for six paths.

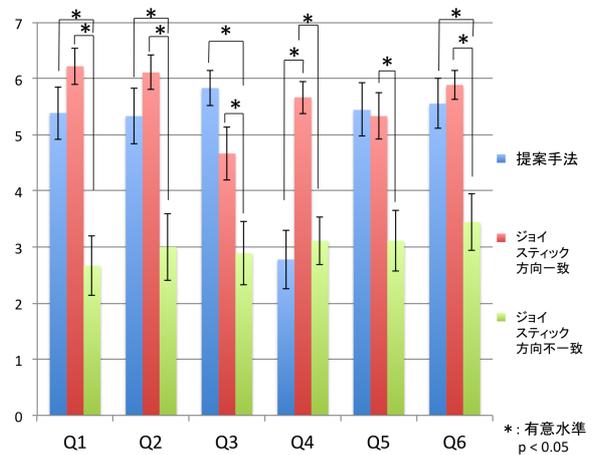


図 10 実験 2：アンケート結果

Fig. 10 Experiment 2: Questionnaire results.

た，アンケート結果を図 10 に示す．実験 1 と同様にエラーバーは標準誤差を表しており，ANOVA 検定 (有意水準 0.05) および Ryan 法による多重比較の結果もあわせて示している．提案手法における所要時間は，ジョイスティックの方向一致条件および不一致条件と多くの移動パターンで有意差が生じ，短い結果となった．ジョイスティック操作の際も待機時間は存在するが，方向一致条件では，実験

前に十分な練習を行っており、また方向感覚の齟齬がないため、ほぼ操作時間と考えられる。以上のことから提案手法では斜め移動を行う際、目的地にほぼ直線的に移動を行う一方、ジョイスティック操作では複数の操作を組み合わせた擬似的な斜め移動を行っており、提案手法ではより効率良く指定の位置に移動していると考えられる。

アンケートの評価は7段階で行われ、すべての項目においてポイントが高いほど操作性は良い評価となる。Q1, Q2, Q5, Q6の項目はほぼ同様の結果を示しており、提案手法操作に対してジョイスティックの方向一致条件とは有意差は生じず、方向不一致条件とは有意差が生じ、提案手法の方が優れている結果となった。このことから、ユーザとロボットの位置関係によらず直感的に、また容易に操作できることが見て取れる。またQ3の項目はジョイスティックの両条件ともに優れている方に有意差が生じ、前述の時間比較を行った結果とともに提案手法の特長が裏付けられる。しかしその反面Q4の項目に関してはジョイスティックの方向一致条件と有意差が生じ、提案手法の方が劣った結果となった。これは実験1と同様まったく新しい飛行ロボットの操作システムである提案手法に対し、仮想的であってもテレビゲームなどでジョイスティック操作には慣れ親しんでいることに起因すると考えられる。

6. 考察

本提案手法は、3次元空間を移動するロボットの操作を、2次元の操作に制限することで、比較的容易な操作を実現する操作手法である。評価実験によって、ユーザとロボットの方向関係に左右されず、直感的かつ容易に操作できることを示した。またロボットの前後左右方向と上下方向の同時移動、すなわち空間上の斜め移動において、ジョイスティックコントローラを用いた場合は複数の移動指示を同時に行う必要があり困難な操作になるが、提案手法では現在地と目的地を通るように仮想平面の向きを指定していれば、全方向に対して指示する操作は変わらず、経路の記述によって容易に目的地に移動できることを示した。本章では上記に加えて、提案手法の特徴について考察する。

6.1 操作視点

飛行ロボットに限らず、ロボット操作を行う場合は2種類の操作視点が考えられる。1つは車など操作する対象に直接乗り込む、もしくはロボットに搭載されたカメラの映像をユーザに投影することによる一人称視点の操作である。遠隔操作の場合は、ユーザから遠く離れた場所においてもロボット前面の映像を頼りに操作を行うことが可能であるが、視野角の問題から、ロボット周囲の状況を把握しにくく、障害物を感知しにくいという問題がある。もう1つは操作対象のロボットを俯瞰で見る三人称視点の操作である。一人称視点ではまったく見えない後方も含めて、ロ

ボット周囲の状況を把握することができる操作視点であり、その有効性が報告されている[14]。しかし、三人称視点において操作を行いたい方向と、実際に操作を指示する方向は一致しないことが多く、ロボットの現在向いている方向をつねに意識して操作を行わなければならない。また俯瞰映像は部屋に設置したカメラ、もしくはロボット本体に設置したパノラマカメラから得る状況が多く、固定されたカメラでは動的で広い環境の視点は得られない。本提案手法は三人称視点による操作であるが、操作インタフェースと俯瞰映像を撮影するカメラが一体となっており、動的に視点を変化させながら、ロボットの周囲を把握し操作することが可能である。

6.2 移動経路の指定

移動経路を指定する操作はユーザとロボットの方向関係によらず直感的に操作できるという利点がある。そして一般的な移動方向を指示するコントローラは、指示した命令に対し、実際に移動した量をつねに目で見確認し続ける必要があるが、移動経路を指定する操作は移動の始点と経路、終点が視覚的にフィードバックされるため、ロボットの移動量を見積もることが可能である。本提案手法では、経路を描く平面を仮想的に用意することで、何もない空中であっても経路を指定することが可能となった。これにより3次元空間を移動する飛行ロボットであっても、仮想平面の向きを任意に決定することで、直感的かつ自由に操作を行うことができる。3次元的な操作は従来複数のレバーやボタンなどを組み合わせることで実現されており、2次元平面を移動するロボットの操作に比べて複雑なものであった。しかし提案手法では2次元平面の移動操作の簡易さを保ちつつ、3次元空間に移動を行うロボットを操作できるという点が大きな特徴である。また、提案手法では移動ルートの指定が完了すれば、現在位置や目標位置の情報はデッドレコングによって映像情報を用いず算出しているため、障害物によって一時的にロボットをカメラでとらえられなかったとしても移動が可能である。

6.3 適用例

提案手法の適用可能な場面として、たとえば大きな壁画の詳細を順に撮影するような状況があげられる。提案手法では一度移動経路を描けば、飛行ロボットがその経路に沿って移動するため、飛行ロボットの向きや考慮など、その場の状況に応じた操作が不要となる。また、飛行ロボットに搭載したカメラで移動するオブジェクトを撮影している状況でも、提案手法は有用であり、ユーザはオブジェクトの動いた方向に移動経路を描くだけで、飛行ロボットを移動させることが可能である。また、その移動距離も描いた経路長そのものとなるため、移動が足りなかったり、行き過ぎたりする心配もない。一方、撮影対象の動きが複雑

な場合は、現在の実装では適用することは難しいが、たとえば移動経路の描画中に飛行ロボットの移動を開始する動作モードを実装することで、飛行ロボットを仮想平面上をタッチしている指の位置に追従させ、移動する撮影対象に追従させる操作も可能となると考えられる。操作者と一定距離を保つ操作は、仮想平面上のタッチ位置に飛行ロボットを移動させるだけでは実現できず、さらなる検討が必要である。

7. おわりに

本研究では、3次元空間を自由に移動できる無線で制御可能な小型の飛行ロボットの直感的な操作を目指し、新たに仮想平面を用いた操作手法を提案した。提案手法では、飛行ロボットの移動ルートを視覚的に提示することで、ユーザは飛行ロボットとの位置関係を考慮する必要がなく、容易な指示を可能としている。また、提案手法を実現するプロトタイプを構築し、手法の評価として飛行ロボットの一般的なコントローラであるジョイスティックコントローラとの比較実験を行った。

実験1によってジョイスティックコントローラと比較して、提案手法はユーザとロボットの方向関係によらず操作可能であることが示された。またロボットの前後左右方向と上下方向を同時に行う斜め移動を指示する際、ジョイスティックコントローラでは同時に複数の操作を必要とするため、習熟していないユーザは独立した操作を複数回繰り返すことによって、移動を行う。一方、提案手法においては平面上の記述によって斜め移動操作に差はなく、一直線に経路を指定し、移動を行うことが可能であり、容易に目的地に到達できる。以上より、2つの操作には移動を完遂するまでに要する時間に差が生じると考えられた。実験2によってその考えは裏付けられ、空間上の斜め移動を行う際、提案手法は優位であることが客観的に示された。また、実験後のアンケートによって斜め移動が容易であることに加え、操作が直感的であること、容易であることが主観的に示された。

今後の展望として、より操作性を向上させるためのシステム改善が考えられる。また、現状では仮想平面を利用するために、ロボットに搭載したマーカを用いていることから、その認識精度に依存して、操作範囲が大きく限られてしまう。それらを解決し、提案手法に対して評価実験を重ね、特定のアプリケーションへの適用を目指したい。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)(25330227)の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

[1] Michaud, F., Boissy, P., Labonte, D., Corriveau, H., Grant, A., Lauria, M., Cloutier, R., Roux, M.-A.,

Iannuzzi, D. and Royer, M.-P.: Telepresence Robot for Home Care Assistance, *AAAI Spring Symposium: Multidisciplinary Collaboration for Socially Assistive Robotics*, pp.50-55 (2007).

[2] Tonin, L., Carlson, T., Leeb, R. and del Millan, J.: Brain-controlled telepresence robot by motor-disabled people, *Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE*, pp.4227-4230, IEEE (2011).

[3] Tanaka, F., Takahashi, T., Matsuzoe, S., Tazawa, N. and Morita, M.: Telepresence robot helps children in communicating with teachers who speak a different language, *Proc. 2014 ACM/IEEE International Conference on Human-robot Interaction*, pp.399-406, ACM (2014).

[4] 米澤和也, 小川剛史: 仮想平面を利用した飛行ロボット操作システム, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2014) 論文集, pp.1904-1909 (2014).

[5] Alapetite, A., Hansen, J.P. and MacKenzie, I.S.: Demo of gaze controlled flying, *Proc. 7th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Making Sense Through Design*, pp.773-774, ACM (2012).

[6] LaFleur, K., Cassady, K., Doud, A., Shades, K., Rogin, E. and He, B.: Quadcopter control in three-dimensional space using a noninvasive motor imagery-based brain-computer interface, *Journal of Neural Engineering*, Vol.10, No.4, p.046003 (2013).

[7] 吉田成朗, 鳴海拓志, 橋本直, 谷川智洋, 稲見昌彦, 五十嵐健夫, 廣瀬通孝: ジェスチャ操作型飛行ロボットによる身体性の拡張, インタラクション, pp.403-408 (2012).

[8] Higuchi, K. and Rekimoto, J.: Flying Head: Head-synchronized unmanned aerial vehicle control for flying telepresence, *SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies*, p.12, ACM (2012).

[9] Seifried, T., Haller, M., Scott, S.D., Perteneder, F., Rendl, C., Sakamoto, D. and Inami, M.: CRISTAL: A collaborative home media and device controller based on a multi-touch display, *Proc. ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp.33-40, ACM (2009).

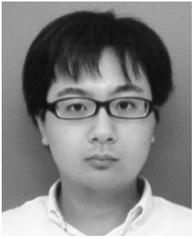
[10] Kasahara, S., Niiyama, R., Heun, V. and Ishii, H.: ex-Touch: Spatially-aware embodied manipulation of actuated objects mediated by augmented reality, *Proc. 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, pp.223-228, ACM (2013).

[11] Hashimoto, S., Ishida, A., Inami, M. and Igarashi, T.: Touchme: An augmented reality based remote robot manipulation, *The 21st International Conference on Artificial Reality and Telexistence, Proc. ICAT2011* (2011).

[12] Sakamoto, D., Honda, K., Inami, M. and Igarashi, T.: Sketch and run: A stroke-based interface for home robots, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.197-200, ACM (2009).

[13] Ishii, K., Zhao, S., Inami, M., Igarashi, T. and Imai, M.: Designing laser gesture interface for robot control, *Human-Computer Interaction-INTERACT 2009*, pp.479-492, Springer (2009).

[14] Shiroma, N., Sato, N., Chiu, Y.-H. and Matsuno, F.: Study on effective camera images for mobile robot teleoperation, *13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2004, RO-MAN 2004*, pp.107-112, IEEE (2004).



米澤 和也

2012年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業。2014年東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻修了。現在、東京大学情報基盤センター協力研究補助員。拡張現実感を利用したヒューマンインタフェースに関する研

究に従事。



小川 剛史 (正会員)

1997年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1999年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2000年同研究科後期課程中退後、同大学サイバーメディアセンター助手。2007年東京大学情報基盤センター講師、2010

年同准教授となり、現在に至る。拡張現実感、ヒューマンインタフェース、グループウェア等に関する研究に従事、博士(情報科学)。