



AI との共同操縦における感覚共有の影響の検討

Study on Perception Sharing in Co-operation with Automated Control Systems

谷地卓¹⁾, 橋浦 健太²⁾, 堀内 俊治¹⁾, 南澤 孝太²⁾, 小林 達也¹⁾

Taku TANICHI, Kenta HASHIURA, Toshiharu HORIUCHI, Kouta MINAMIZAWA, and Tatsuya

KOBAYASHI

1) 株式会社 KDDI 総合研究所 (〒 356-8502 埼玉県ふじみ野市大原 2-1-15, ta-tanichi@kddi.com)

2) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 (〒 223-8526 神奈川県横浜市港北区日吉 4-1-1)

概要: AI やロボティクス技術の進歩に伴い、身体動作を伴うタスクにおいても AI と人の協働が進みつつある。ドローンにおいて完全な自動操縦は難しく、人の操縦による介入が必要となる。しかし、人の身体動作には身体感覚情報も用いられるため、共同操縦時に人単独での操縦と同等の操縦を行うことは難しい。本研究ではドローンの AI との共同操縦を想定し、力覚提示可能なジョイスティックを用いたドローン操縦を行い、AI の操縦感覚共有が操縦技術に与える影響について検討を行う。

キーワード: 力覚提示, 共同操縦, ジョイスティック

1. はじめに

大規模なマルチモーダル AI は、テキストや画像、音声などの様々な情報を扱うことができ、複雑なタスクに対する処理が可能である。これらの技術はロボティクス技術などとの組み合わせによって、ロボットによるタスクや自動車の運転など、実空間でのタスクへの自動制御の適用が期待されている。

自動制御技術は、人間による操作が不要な完全な自動制御の実現のほかに、人間が操作を行う場合に支援を行うことで、正確な操作や操作者の負荷軽減等への応用も可能である。このような自動制御システムと人間が共同操作を行う際には、自動制御システムから人間への情報提示が重要であり、視覚情報 [1] や聴覚情報 [2] を用いたものなどが検討されている。

Haptic Shared Control [3] は、自動制御システムとの共同作業を行う際に、自動制御システムから人間に対して操作入力デバイスを経た触覚情報提示を行う手法である。この手法では、人間は触覚フィードバックを受け取りながら操作することが可能である。主に、自動車の自動運転でのユースケースが想定され、ステアリングホイールに対してトルクを提示を行った場合での、自動制御の関与度合いによるパフォーマンス [4] や快適性などの主観的な指標 [5] について検討が行われている。

今後、自動制御技術の普及には、より多くの場面における人間との共同作業を可能とする方法が必要であり、ステアリングホイール以外でのインタフェースに対する力覚フィードバック手法の検討が必要となる。

そこで本研究では、システムによる自動制御との共同操縦における操作技術の高度化を目的とし、操作者が扱う入

力デバイスに対して自動制御システムから力覚提示を行うシステムの提案を行う。また、このシステムを用いた評価実験として、シミュレータ環境でのドローンの操縦を行い、システムとの共同操縦における感覚共有が操縦技術に与える影響の検討を行う。

2. システムの構築

2.1 操作感覚共有コントローラ

ドローン操縦を行う入力装置として、橋浦らが開発した操作感覚共有コントローラ [6] を用いた。このコントローラはジョイスティックのレバーを傾けることで X-Y 方向へ操作入力が可能である。また、内蔵された各方向に対応したモータを駆動させることによって、操作者によるレバーの動きとは独立した任意の方向へのトルクを出力することができる。システムから出力するトルクの方向が操作者が入力する方向と同一の場合、操作者は小さい力でレバーを操作することが可能であり、一方でシステムから出力する方向と操作者が入力する方向が異なる場合、操作にはより大きな力が必要であり、操作者に対して抵抗感を与えることができる (図 1)。

2.2 ドローン操縦シミュレータの設計

ドローンを操縦する環境として、Unity 上にてドローンの飛行シミュレータを開発した (図 2)。このシミュレータでは、2 台のコントローラを左右の手によって 1 台ずつ操作し、ドローンの操縦を行うことができる。それぞれのコントローラは実際のドローン操縦に用いられる送信機を参考に、左ジョイスティックの X 方向にヨー操作、Y 方向にスロットル操作、また、右ジョイスティックの X 方向にロール操作、Y 方向にはピッチ操作を割り当てた。

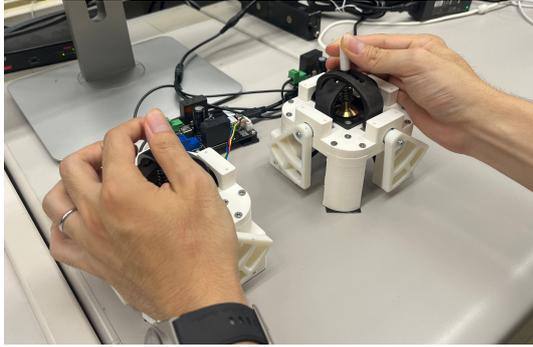


図 1: コントローラにて操作を行っている様子

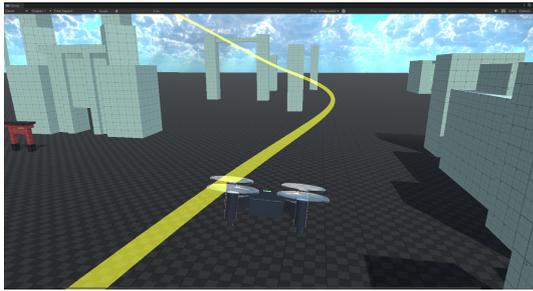


図 2: ドローン操縦シミュレータ画面

ドローンに対しては重力を想定した鉛直方向への加速度、空気抵抗を想定した移動方向に対する負の加速度を毎フレーム与える。シミュレータ内の視点はドローンに連動させ、常に後方から機体を確認可能な位置に配置した。

また、シミュレータに現在のドローンの状態における任意の操作入力による数フレーム後のドローンの座標予測機能を実装した。この機能をリアルタイムに実行することでドローンの飛行状態に応じ、目標座標との差を求めることが可能である。

2.3 力覚フィードバックの設計

力覚フィードバックの設計にあたり、レバー角度に応じた力覚フィードバックと、シミュレータ内のドローンの状態に応じた力覚フィードバックを開発した。

一般的なジョイスティックにはばねが内蔵されており、レバーが操作された場合には、中央に向かって機械的にトルクが加えられ、レバーが復帰するように作用する。本研究にて使用した操作感覚共有コントローラについても、内部のジョイスティックにはばねが内蔵されており、操作者からの入力やモータによるトルクが加えられていない場合にはレバーは中央に復帰する。しかし内蔵されたばねによって加えられるトルクはレバーの角度に対して非線形であり、モータから与えられるトルクと合成され、レバーから出力されるトルクの制御は困難である。そこで物理的なばねに加工を施し、このばねによるレバー復帰機構を無効化し、レバー角度に応じてモータによって力覚フィードバック機能を実装した。この機能では、レバーが操作された角度に応じて、レバーが中心に戻る方向へトルクが出力される。本手法に

よって与えるトルクは以下の (1) 式で求める。

$$\tau = K\theta_{input} \quad (1)$$

ここで、 K はばね定数であり、 θ_{input} はジョイスティックのレバー各軸に入力された角度である。

また、シミュレータ内のドローンの状態に応じた力覚フィードバック方法では、シミュレータ内で予測された数フレーム後のドローン座標と目標座標の差分に応じて、ドローンがより目標座標へ近づくジョイスティック操作へとトルクを出力する。この手法によって与えるトルクは以下の (2),(3) 式で求める。

$$\tau_{Left,X} = K_{yaw}(\theta_{target} - \theta_{current}) \quad (2)$$

$$\tau_{Left,Y} = K_{throttle}(Y_{target} - Y_{predict}) \quad (3)$$

(2) 式で求められるトルクは、左ジョイスティックのレバー X 軸方向へ加えるトルクであり、ドローンの動作ではヨー操作に対応する。このとき K_{yaw} はばね定数、 θ_{target} は目標軌道の鉛直方向を軸とした絶対角度であり $\theta_{current}$ は現在のドローンの鉛直方向を軸とした絶対角度である。(3) 式で求められるトルクは、左ジョイスティックのレバー Y 軸方向へ加えるトルクであり、ドローンの動作ではスロットル操作に対応する。このとき $K_{throttle}$ はばね定数、 Y_{target} は目標軌道の高度であり $Y_{predict}$ はドローンの予測座標の高度である。また、進行方向に対してドローンを前進させるピッチ操作のために右ジョイスティックのレバーに Y 軸方向への一定のトルクを常時与える。

3. 力覚提示手法によるドローン操縦の評価実験

本研究にて設計したレバー角度に応じた力覚フィードバックとドローン状態に応じた力覚フィードバックによるそれぞれのトルクを合成し提示することで、操作時にレバーが中央に復帰する機構を有したジョイスティックでのシミュレータ内のドローンの状態に応じた力覚フィードバック操作を行うことが可能である。この方法では一般的なジョイスティックに近い操作感でドローン操作が行えると考えられる。一方で、操作者に対してドローンの状態に応じた力覚フィードバックを単体で与えた場合には、システムからの情報提示を正確に与えることができる可能性が考えられる。そこで操作者に与える力覚フィードバックの条件によってドローン操縦のパフォーマンスや、操縦に関する主観評価に対する影響を明らかにするために評価実験を行った。

3.1 被験者

評価実験の参加者は成人男性 4 名（平均年齢：35.25 ± 5.4 歳、利き手は全員右手）にて実施した。ドローンの操縦経験はいずれの被験者も数回程度であった。

3.2 実験条件

ドローン操縦シミュレータ内にて、設定された飛行ルートに従ってドローンを操縦するタスクを実施した。評価実験にて飛行するコースを図 3 に示す。飛行ルートは障害物を

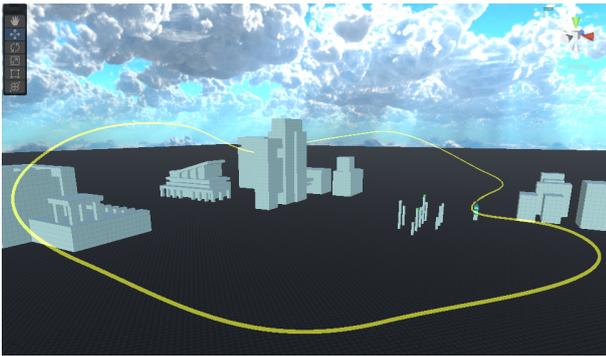


図 3: 評価実験にて飛行するコース

避けるように設定され、スタートからゴール地点までコース内を1周する。飛行ルートは、シミュレータ内にて緑色のラインにて表示した。ドローン状態によるフィードバックにおける目標座標は機体前方の飛行ルート座標から最短のものを毎フレーム選択し、ドローンの座標予測には現在のフレームから20フレーム後（シミュレータのフレームレートは毎秒60フレーム）の座標を用いた。

以下に各実験条件における力覚フィードバック方法を示す。

- 条件 A：レバー角度による力覚フィードバック
- 条件 B：レバー角度による力覚フィードバック及びドローン状態による力覚フィードバック
- 条件 C：ドローン状態によるフィードバック
- 条件 D：力覚フィードバックなし

条件 D においてはいずれの方法でも力覚フィードバックを行わず、被験者によってジョイスティックが操作されると、中央に戻す操作が行われるまでそのレバー角度での操作が入力され続ける。

3.3 実験手順

実験は左右に操作感覚共有コントローラが固定され、正面にモニタ（24インチ）が設置された机にて、被験者は椅子に座った状態で行った。被験者ははじめに、実験の概要について説明を受けた。次に左右のジョイスティックによるドローンの操縦方法、前進方法、旋回方法についての説明を行った。また、実験中いくつかの条件ではジョイスティックを介した力覚提示が行われる説明を行い、レバーの握り方および操縦時はレバーから可能な限り手を離さないよう説明した。

説明後、ドローン操縦シミュレータの習熟を目的としたドローンの操縦練習を行った。フィードバックの条件はレバー角度による力覚フィードバックであった。実験の開始は被験者からの申告とし、いずれの被験者も操縦練習時間は10分程度であった。

実験は各条件2回ずつ実施し、計8回飛行ルートに従った操縦を行い、ドローンの飛行座標を毎フレーム記録した。実験条件の実施順は順序効果を考慮し、被験者間にて入れ替えて行った。

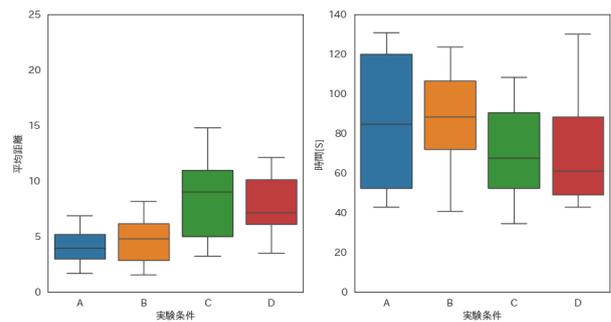


図 4: 各試行の飛行ルートとの平均距離（左）および試行時間（右）

また、力覚提示時にモータドライブ回路内の機械式リレーの作動音があるため、被験者は各条件の試行中にホワイトノイズを再生したヘッドホンを装着しながら実験を行った。

被験者は各条件の試行後に再度各条件下でドローンを操縦し主観評価に対して回答を行った。

3.4 主観評価

主観評価の指標として9段階のリッカート尺度を用い以下の項目について質問した。

- 自己の関与度：自分がドローンを操縦していると感じたか
- システムの関与度：システムがドローンを操縦していると感じたか
- 操作の快適度：操作がしやすいと感じたか

4. 結果

ドローンの操縦技術の評価として、飛行ルートに対するドローンの距離と試行にかかった時間によって評価を行った。図4に計測を行った各試行について、各サンプルにおけるドローンと最短の飛行ルートとの距離の平均値および試行時間を示す。

試行ごとの飛行ルートとの平均距離および試行時間について、Two-way ANOVA 分析を行った。有意水準は $\alpha < .05$ とした。試行ごとの飛行ルートとの平均距離については、レバー角度による力覚フィードバックを行う条件は有意に低かった ($p = .001$)。ドローン状態による力覚フィードバック ($p = .55$) 及び相互作用 ($p = .91$) については有意ではなかった。試行時間については、レバー角度による力覚フィードバック条件 ($p = .17$)、ドローン状態による力覚フィードバック条件 ($p = .93$) 及び相互作用 ($p = .92$) のいずれの主効果も有意ではなかった。

主観評価の結果について図5に示す。各評価について、有意水準 $\alpha < .05$ にて Two-way ANOVA 分析を行ったところ、自己の関与度については、ドローン状態による力覚フィードバックを行う条件は有意に高かった ($p = .02$)。レバー角度による力覚フィードバック ($p = .40$) 及び相互作用 ($p = .67$) については有意ではなかった。システムの関与度についてもドローン状態による力覚フィードバックを行う条件は有意に低かった ($p = .02$)、レバー角度による力覚フィー

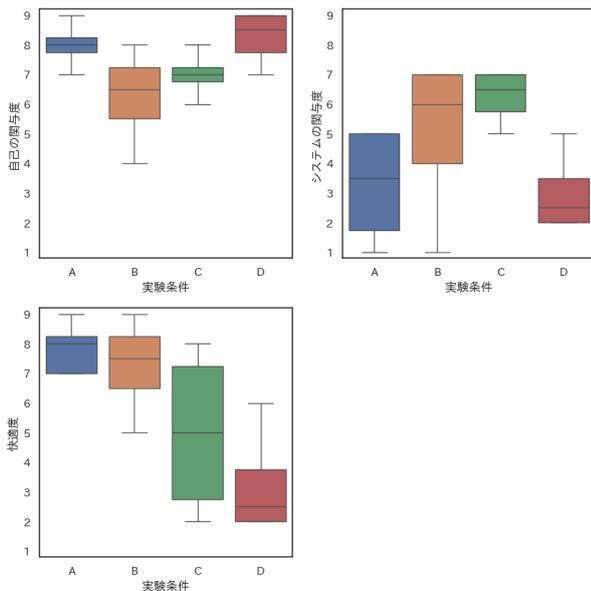


図 5: 主観評価結果

ドバック ($p = .62$) 及び相互作用 ($p = .46$) については有意でなかった。操作の快適度についてはレバー角度による力覚フィードバックを行う条件は有意に高かった ($p = .02$)、ドローン状態による力覚フィードバック ($p = .45$) 及び相互作用 ($p = .45$) については有意でなかった。

5. 考察

飛行ルートとの平均距離がレバー角度による力覚フィードバックを行う条件で有意に低かった結果から、レバー角度に応じた力覚フィードバックを行うことで、規定の飛行ルートに対して正確なドローン操縦が行えることが明らかになった。この条件では主観評価指標の快適度も高く、被験者から力加減がわかりやすく調整し易いというコメントがあったことから、細かな微調整が行いやすいためであると考えられる。

また、レバー角度に応じた力覚フィードバックを行う条件においてドローンの状態による力覚フィードバックを追加した場合、ドローンの操縦軌道の正確さは改善しなかった。この点については、今回実装した自動制御システムによって導出された操作について、妥当性の検証が今後の課題となる。

また、主観評価において、ドローン状態による力覚フィードバックによって自己の関与度の主観評価が低下し、システムの関与度が増加した。このことから、自己操作以外の力覚提示があった場合、操縦者は外部からの関与を認知できていることが分かる。更に、実験条件 B においても快適度が高い点から、レバー角度に応じたフィードバックを行うことで、システムからの関与を行う場合においても操作の快適度に影響を及ぼさないことが分かる。

一方、操作の快適度が低かった条件に対してどのような点が快適度を下げたかコメントを求めたところ、C および D の条件についてはレバーの傾きに対する力覚フィードバ

クがなかったため、想定していた傾きを超えて操作を入力してしまったとのコメントが得られた。更に、C の条件についてはシステムから与えられるドローンの操縦感覚が操縦者の意図に反していたというコメントもあり、操縦者の思い通りの操作が出来なかった点が快適度を下げる一因になったと考えられる。David らは自動車の運転をはじめとした人間と自動制御システムとのインタラクションにおける共通の課題として、人間と自動制御システムが相互に理解していない点を挙げており [3]、本実験においても人間の操縦意図と自動制御システムに乖離があったため操作の相反が発生したと推測できる。限られた情報から人間の操縦意図を推測することは容易ではないが、今後の自動制御システム開発における解決すべき課題であると考えられる。

6. まとめ

本研究では、自動制御システムとの共同操縦を想定し、操縦者が扱うジョイスティックに対して自動制御システムから感覚共有を行うシステムを提案した。感覚共有方法として、力覚フィードバック機能をもったジョイスティックを用い、シミュレータ環境でのドローン操縦を行い、操縦パフォーマンスの評価を行った。今後は、力覚提示手法のデザインや、操縦者がより快適と感じられる自動操縦アルゴリズムの実現が課題となると考えられる。

謝辞 本研究成果は国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究 (JPJ012368C06801) により得られたものです。

参考文献

- [1] C. Olaverri-Monreal, et al. "In-vehicle displays: Driving information prioritization and visualization", IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp.660-665, 2013
- [2] David B, et al. "What's around the corner? enhancing driver awareness in autonomous vehicles via in-vehicle spatial auditory displays", NordiCHI '14, pp.189-198, 2014
- [3] David A, et al. "Haptic shared control: smoothly shifting control authority?", Cognition, Technology & Work, Vol.14, pp.19-28, 2012
- [4] Mars Franck, et al. "Analysis of human-machine cooperation when driving with different degrees of haptic shared control", IEEE transactions on haptics, Vol.7, Num.3, pp.324-333, 2014
- [5] 倉持拓明, 内海章, 池田徹志, 加藤弓子, 長澤勇, 高橋和彦. "高度自動運転における力覚フィードバックを用いた操舵の共有に関する快適性の評価", 情報処理学会インタラクション 2019, pp.648-653, 2019
- [6] 橋浦健太, 飯田和也, 赤塚翔太, 趙勇氣, 神山洋一, 渡邊恵太. "複数プレイヤーの操作感覚同期によるビデオゲーム体験への影響", エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2023 論文集, pp.38-41, 2023