

# 遠隔操縦建設ロボット身体化のためのドローンを用いた視覚フィードバックシステム

Visual feedback system using drones for physicalization of teleoperated construction robots

岐阜大学 助教 池田貴公

## （研究計画ないし研究手法の概略）

建設業において建設機械の遠隔操縦化が労働環境の改善や就業者不足の解決に寄与すると考えられる。建設機械に遠隔操縦技術が導入され初めて実用されたのは平成2年雲仙・普賢岳の災害復旧作業であった。この時に採用された遠隔操縦システムではジョイスティックを用いて建設機械をフィードフォワード制御し、操縦者は立体視カメラを用いた視覚フィードバックに基づいて操縦を行った。この時の作業効率は機側操縦の30-50%であったと報告されている。建設機械の遠隔操縦に関する研究では現在まで視覚フィードバックや触力覚フィードバックの提示方法の提案や通信遅延の解決に取り組まれているが、その多くでは機側操縦席を遠隔地に再現するという方針が取られている。我々の先行研究では機側操縦席にカメラを設置し主視点とし、さらにカメラを搭載したドローンが作業エリア周辺を飛行して副視点を提供するシステムを研究開発した。その結果、ドローンの操作自由度が高い（すなわち副視点の位置の自由度が高い）ほど得られる情報が増加し作業精度が向上するが、ドローン进行操作することによる精神的負担が増加し、視点の自由度による作業精度の向上と精神的負担の間にトレードオフが存在することが示唆された。

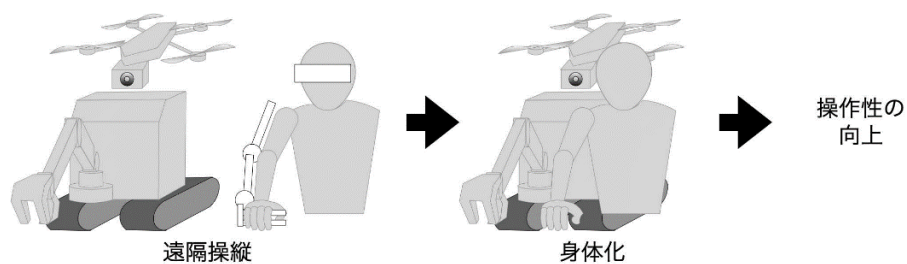


図1 遠隔操縦建設機械の身体化イメージ

そこで本研究では、作業精度の向上と精神的負担を軽減する遠隔操縦システムの研究開発に取り組んだ。遠隔操縦システムの従来研究が取っていた、機側操縦席を遠隔地に再現するという方針では作業精度と精神的負担のトレードオフが発生すると考え、本研究では建設機械の身体化という観点から遠隔操縦システムの研究開発に取り組んだ(図1)。身体化とは操縦するロボットを操縦者自身の身体と感じることを指す。提案システムでは視覚フィードバックを行うためにカメラを搭載したドローンを用い、作業環境の映像を操縦者が装着したヘッドマウントディスプレイに提示する。なお使用したヘッドマウントディスプレイは装着者の頭部動作を計測可能である。本システムではヘッドマウントディスプレイで計測した操縦者の頭部動作をドローンの位置制御指令として使用する。これによりドローンによって撮影した映像は操縦者の頭部動作を反映するため、自身の視野が移動しているように感じさせる

ことが可能になると考えられる．本申請期間では対象としていないが，操縦者の腕の動作と建設機械の動作が連動するインタフェースを開発することで，自身の腕の動作と提示された映像内での建設機械の動作が一致し，身体化が可能となると考える．

本申請期間で，ヘッドマウントディスプレイとドローンを連動し映像提示するシステムを開発したが，実験の際にドローンの動揺による映像酔いが発生し実験を中断するが多かった．ドローンの動揺による影響を排除して身体化の実現性を評価するために，ドローンの代替となるカメラを搭載したロボットアームを製作し，頭部動作と連動する映像フィードバックの実現を目指している．

**（実験調査によって得られた新しい知見）**

● 視覚フィードバックシステムの評価実験結果

本研究ではヘッドマウントディスプレイとドローンを用いた建設機械身体化のための視覚フィードバックシステムを研究開発した．ヘッドマウントディスプレイで計測した頭部の位置情報をドローンの位置目標とした．ドローンは搭載したカメラで環境に設置した AR マーカーを捉えてこれを基準に位置制御を行った．ドローンの現在位置姿勢 $P_c$ をフィードバックし，目標姿勢・推力 $A_d$

$$A_d = \left( G_p + G_i \int + G_d \frac{d}{dt} \right) (P_d - P_c)$$

$$P_d = G_h P_h$$

を算出した．ここで $G_p$ ， $G_i$ ， $G_d$ はフィードバックゲイン， $P_d$ はドローンの目標位置， $G_h$ は頭部動作をドローン動作に反映する際のゲイン， $P_h$ は頭部の位置姿勢を示す．ドローンの姿勢はドローンに搭載されたフライトコントローラにより実行した．これにより操縦者の頭部動作とドローンの動作を連動した．

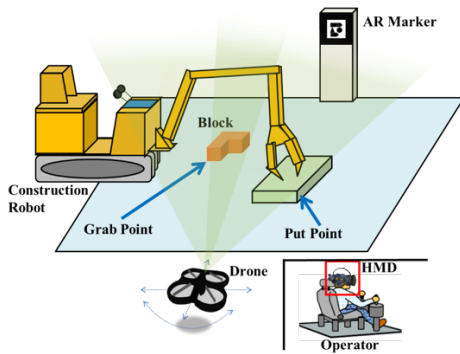


図 2 実験環境

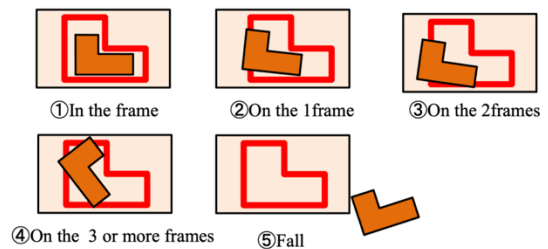


図 3 作業得点

本システムを使用することで建設機械の遠隔操縦に与える影響を作業精度と精神的負担の観点から評価した．本実験ではドローンは建設機械の横側で作業環境をカメラで捉えるように飛行した（図 2）．操縦者はヘッドマウントディスプレイを装着し，遠隔側操縦席に設置されたジョイスティックを操作することで建設機械のアーム部分を操縦した．なお，予備実験を通してドローンの動作が大きいと動画酔いが発生する可能性が高いことが分かったことから，動画酔いを防ぐために $G_h = 1$ とした．操縦者は建設機械で図に示すようにブロックを把持し設置場所に置く．設置場所にはブロックと同じ形状の枠が描かれており，ブロック

を設置した際に枠の中にどれだけ収まっているかを点数化し(図 3), 作業精度とした。また, 精神的負担を NASA-TLX という評価指標を用いて評価した。比較対象として, 従来研究手法 (ボタン操作によりドローンの飛行位置を建設機械右側面-正面に移動), 一般的な固定カメラを複数台用いた手法を使用した。

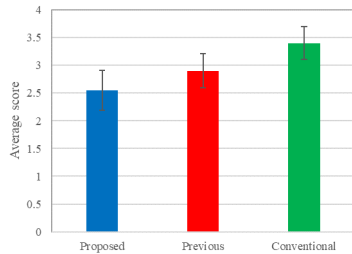


図 4 作業得点

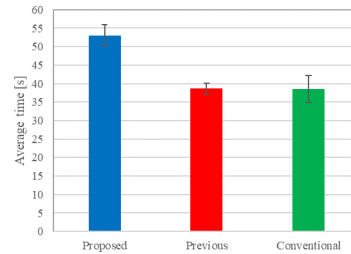


図 5 作業時間

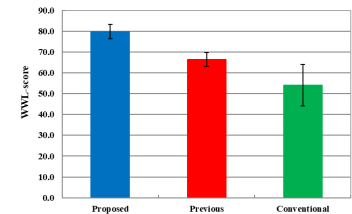


図 6 精神的負担

図 4, 5, 6 に作業得点, 作業時間, 精神的負担の結果を順に示す。作業得点と作業時間について有意差はなかったが, 提案手法の作業得点が最も低く作業時間が最も長い結果となった。また, 精神的負担についても提案手法が最も大きい結果となった。3つの評価指標に加えて記述式のアンケートをとった結果, 映像酔いが発生するという意見が見られた。一方で, 顔を向けた方向にドローンの向きが追従する点は便利だった, という意見があり, 画像良いを改善することによって, 期待する効果が得られると考えられる。

実験を通して, 動画酔いが発生することによる身体的・精神的負担が発生することが課題であることが明らかになった。動画酔いの主要な原因として, ドローンが位置制御のために動揺することが挙げられる。ドローンの動揺を抑え動画酔いを抑制することが1つの課題であるが, 本手法により身体化が可能であることを確認するためにドローンの動揺を排除した実験システムの構築を検討した。そこでドローンの代わりにロボットアームを使用して視覚フィードバック用カメラの位置を制御し頭部動作を再現する。本申請期間ではロボットアームのハードウェアの製作まで行った。本ロボットアームを使用して身体化の可能性を示すことが今後の課題である。

#### ●インタフェースの比較評価実験結果

また, 本研究の手法を決定する際に根拠となる, 視覚フィードバックをドローンで行う場合のドローンの操作インタフェースを比較検討した研究成果を発表した。本発表内容では機側操縦席にメインカメラを設置し, カメラを搭載したドローンをサブカメラとして使用した。ドローンを移動させて視点を調整するためのインタフェースとして,

- ・スライダインタフェース (建設機械操縦用ジョイスティックのスライダボタンを使用, 閾値を超えると定速で上昇/下降),
- ・頭部動作インタフェース (ヘルメットに傾斜センサを搭載し頭部姿勢を計測して使用, 頭部ピッチ角が閾値を超えると定速で上昇/下降),
- ・音声インタフェース (up, down, stop を認識, 音声認識すると定速で上昇/下降, または高度維持)

を提案し比較検証した。従来研究においてドローンはホバリング位置を建設機械の把持状態をもとに運搬対象が予め置いてある把持エリアと設置エリアに自動で切り替え, 高度を提案

した3つのインタフェースでそれぞれ調整するものであった。評価実験での建設機械による作業は前述のブロック運搬作業であった。各インタフェースを、作業得点（上述）、作業時間、精神的負担（NASA-TLX）の観点から評価した。

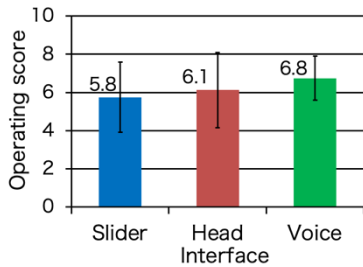


図7 作業得点

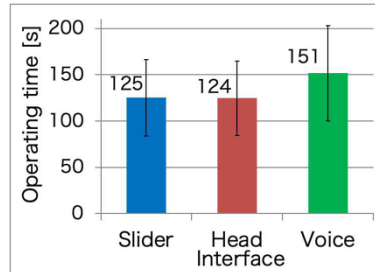


図8 作業時間

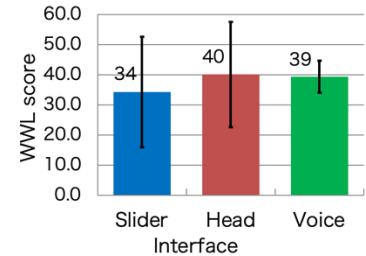


図9 精神的負担

図7, 8, 9に作業得点, 作業時間, 精神的負担の結果を順に示す。作業得点に有意差はなかったが, 建設機械の操縦に用いるジョイスティックのスライダを使用したインタフェースで最も成績が悪く, 操縦に関わらない音声インタフェースで最も良かった。一方で作業時間はドローンの操作に音声を認識する時間が必要な音声インタフェースが有意に長かった。精神的負担ではドローンの操作に時間を要する音声インタフェースで有意に負担が大きく, 頭部動作インタフェースで最も負担が少なかった。本結果を総括すると, サブカメラの操作インタフェースに求められる要件として, 建設機械の操縦と分かれていること, 操作内容が直ちに反映されること, 直感的であることが挙げられた。

## ( 発表論文 )

国際会議発表

1. Takahiro Ikeda, Satoshi Ueki, and Hironao Yamada, “Comparison of User Interfaces for Semi-Automatic Visual Support System Using Drone for Teleoperated Construction Robot,” Proc. of The 34th 2023 International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (MHS2023), MP1-1-1, 2023.