

論文の要旨

題目 マルチモーダルフィードバックを用いた遠隔操作ショベルのクロスプラットフォーム
コックピットシステム
(A Cross-Platform Cockpit System for Teleoperated Excavators Using Multi-Modal Feedback)

氏名 伊藤 卓

現在日本では、少子高齢化に伴う労働力不足が問題となっている。そのため、今後経済を維持または発展させていくには、一人ひとりの生産性を高めることと、働き手のすそ野を広げることが必須である。このような背景から、働き方改革が推進されており、とりわけテレワークのような ICT(情報通信技術)を活用した新しい働き方は、人々が多様で柔軟な働き方を選択することを可能にし、このような課題の解決に寄与すると期待されている。

働き方改革が特に必要な職種のひとつが建設業である。建設業は他産業に比べ高齢化が著しく、少子高齢化に加え、いわゆる 3K(きつい, 危険, きたない) といったイメージの定着などによる若い入職者の減少が顕著である。とりわけ建機オペレータについては不足が慢性化しており、労働者の減少を上回る生産性の向上が必要であるとともに、就業環境の改善による入職促進と定着が必須である。このような背景から、国土交通省は「i-Construction」を推進しており、ICT 建機等を活用することで建設現場における作業の自動化や省人化を図り、作業員一人当たりの生産性を最大化させることを目指している。しかし、ICT 建機を活用し生産性が向上したとしても、建設機械に搭乗して操作する必要がある限り依然として就業環境の問題は残る。一方、建設機械の自動化についても研究が進められているが、その全てを自動化することは困難であり、従来通り人が判断し操作を行う必要がある状況が続くと考えられる。

このような問題のソリューションとして、遠隔操作建設機械を導入することが考えられる。建設機械を遠隔で操作することができれば、移動コストの削減による生産性の向上と就業環境の改善が期待できる。しかし、現在主流の遠隔操作建設機械は、一般のオペレータでは作業時間が 2 倍以上要するケースがあることが課題となっており、災害復旧等にしか用いられておらず、復旧作業に継続して従事しているオペレータが主に対応している状況にある。よって、遠隔操作における作業効率を改善するとともに、一般的な土木工事等に従事するオペレータでも搭乗操作と比較して違和感なく操縦可能な遠隔操作システムが必要である。また、そのような遠隔操作システムが実現できた場合でも、建設機械を効率よく安全に操作するための技能習得ならびに維持には多くの操縦時間が必要であるため、建設業への入職促進と定着のためには効率的に操作教育・練習が可能なシステムが必要である。

本論文では、油圧ショベルを対象に、オペレータの知覚特性に合ったインターフェースと、人間に理解しやすいように機械情報を変換してフィードバックする情報提示システムとを備えた、マルチモーダルで、かつ遠隔操作油圧ショベルを操作できるだけでなく、シミュレータによる訓練が可能なクロスプラットフォームコックピットシステムを提案する。さらに提案したシステムを実際に構築し、その有用性を評価・検証する。

第 1 章では、建設業界における現在の問題点、遠隔操作油圧ショベルに関する取り組みについての先行

研究をまとめ、遠隔操作油圧ショベルにおけるインターフェースの重要性について述べる。さらに、本論文の主題であるマルチモーダルな油圧ショベル遠隔操作コックピットシステムのコンセプトを明確にする。

第2章では、人間の知覚特性に合ったインターフェースについて、視覚系に着目し、旋回操作における難易度モデル構築について述べる。旋回操作により目標位置へバケットを停止させる動作をポインティング動作とみなし、旋回操作難易度モデルの構築を試みた。従来のポインティング動作の難易度モデルとして広く用いられている Fitts の法則では、油圧ショベルまたは遠隔操作油圧ショベルにおいて操作性に影響すると考えられる視野角と動特性は考慮されていない。よって、それぞれを考慮した新たな難易度モデルを検討した。視野角については、まず旋回動作を模擬したシミュレータを構築し、それを用いて、被験者による旋回課題試験を行った。その結果、視野角が狭くなるほど、課題完了までにかかる時間が長くなることが確認された。この結果より、従来の難易度モデルに対し、視野角を追加した新たな難易度モデルを提案した。試験結果を評価したところ、従来モデルと比較し、提案モデルの決定係数が高く、より正確に旋回操作難易度を表していることが確認された。さらに、実際の油圧ショベルを用いた被験者試験を行い、シミュレーションで得られた結果と同様の結果を得た。また、動特性については、油圧ショベルの旋回動作を一次遅れ+むだ時間系であると仮定し、シミュレータを用いた被験者による旋回課題試験を行った。その結果、時定数、むだ時間が大きくなるほど、課題完了までにかかる時間が長くなることが確認された。この結果より、従来の難易度モデルに対し、時定数とむだ時間を追加した新たな難易度モデルを提案した。試験結果を評価したところ、従来モデルと比較し、提案モデルの決定係数が高く、より正確に旋回操作難易度を表していることが確認された。

第3章では、人間に理解しやすいように機械情報を変換してフィードバックする情報提示システムとして、機体不安定度フィードバックについて述べる。掘削作業時に着目し、機体側が動き出すまでに掘削反力にどの程度余裕があるかの指標である機体不安定度を提案し、また、機体不安定度をオペレータへフィードバックする手法として、直感的に把握できるメータによる視覚的な提示手法を提案した。遠隔操作ショベルにおいては、機械姿勢に関する情報を得ることが難しく、バケットにかかる負荷を推測することが困難である。そのため、転倒や転落のリスクが高い状態となっていると考えられ、提案した手法により、そのリスクが低減されることが期待された。提案した機体不安定度を操作者に提示した場合の効果を検証するため、掘削動作シミュレータを作成し、被験者試験を実施した。その結果、機体不安定度を提示することで生産性を保ったまま、より機体の傾きと前方向への移動を発生させることなく作業を行え、また機体不安定度が100%を超えている時間の比が減少していることを確認した。これにより、機体姿勢の把握が難しい遠隔操縦ショベルにおいて、高価で大出力なアクチュエータを用いることなく、より安全な作業ができる可能性が示唆された。力覚やハプティックフィードバックを用いた場合は、普段通常の搭乗操作を行っているオペレータにとっては、操作感が変わってしまう可能性がある。提案した手法は、これらとは違い、普段通常の搭乗操作を行っているオペレータでも違和感なく操作できることが期待される。

第4章では、ステレオ動画像とHMDによる3次元視覚情報提示システムと、油圧ショベル搭乗席の傾きをフィードバックするモーションシミュレータシートと、実際の油圧ショベルに用いられているジョイスティックを用いた、より実機搭乗に近いフィードバックとインターフェースを備えた遠隔操作コックピットを用いて、油圧ショベルを遠隔操作できるだけでなく、油圧ショベル操作シミュレータの操作も可能なクロスプラットフォームシステムを提案し、実際に構築した。これには、第2章で提案した旋回

操作難易度モデルに基づくモニタシステムと、第3章で提案した機体不安定度フィードバックが搭載されている。構築したシステムについてそれぞれのシステムごとに動作検証を実施し、提案したコックピットを用いて遠隔操作油圧ショベルとシミュレータが操作できることを確認した。また、構築した遠隔操作システムを用いて、掘削積込み作業を模擬した試験を実施した。その結果、実機搭乗に近い作業効率となることが確認された。さらに、第3章で提案した機体不安定度フィードバックを、実際の遠隔操作ショベルにおいて操作者に提示した場合の効果を検証した。その結果、生産性を保ったまま、より機体傾きを発生させることなく作業が行えることを確認した。これにより、機体姿勢の把握が難しい遠隔操縦ショベルにおいて、高価で大出力なアクチュエータを用いることなく、より安全な作業を行うことが可能となることが確認された。

第5章では、本研究の総括として、遠隔操作油圧ショベルシステムに対して、オペレータの知覚特性に合ったインターフェースと、人間に理解しやすいように機械情報を変換してフィードバックする情報提示システムとを備えた、マルチモーダルで、かつ遠隔操作油圧ショベルを操作できるだけでなく、シミュレータによる訓練が可能なクロスプラットフォームコックピットにより、実機搭乗に近い作業効率で、一般的な土木工事等に従事するオペレータでも搭乗操作と比較して違和感なく操縦可能な遠隔操作システムが実現可能であることを示した。また、作業効率については特定の作業のみで実施したものであることから、操作性の評価も含め、さらなる検証を行うとともに、聴覚情報や機械情報等のフィードバックやアシスト機能等を加えることで、さらに実機搭乗操作に近い生産性を確保できる遠隔操作ショベルシステムへ拡張させていくことを今後の取り組みとして述べている。