

# 論文の要旨

題目 人間の認知プロセスに着目した遠隔操作油圧ショベルにおける乗り換えの影響を軽減するインターフェースに関する研究

(Research on Methods to Reduce the Effect of Switching on Teleoperated Hydraulic Excavators Focusing on Human Cognitive Processes)

氏名 永井 政樹

現在の日本では、少子高齢化に伴う労働力不足が問題となっており、日本の労働生産性の向上が必要である。この人材不足がより顕著なのが建設業である。その理由として、建設業では3Kと呼ばれる「きつい」「汚い」「危険」というイメージが定着しており、新規入職者が参入しづらくなっていることが挙げられる。そのような現状の中、社会インフラの老朽化が今後急速化する懸念や、インフラニーズの高度化から、今まで以上の生産性が求められている。このことから、現場の働き方改革による若手入職者の確保、そしてそれによる生産性向上が必要となる。こうしたことを受けて国土交通省では、建設現場の生産性の向上に加え、業務や働き方を変革することを目的とした i-Construction やインフラ分野の DX 化といった取り組みを推し進めている。これら施策により、多様な人材呼び込みや工事日数削減および省人化の実現による高い現場生産性が達成されることが期待できる。具体的な取り組みの一つとして遠隔操作油圧ショベルの開発が進められている。遠隔操作油圧ショベルはカメラ映像を介してラジコン装置を用いた操作が一般的であったが、実搭乗による作業と比較し作業時間が2倍以上要するケースが報告されており、一般土木現場での利用が困難であるといった課題があった。そこで、近年の遠隔操作油圧ショベルの作業効率向上に向けた取り組みがなされており、従来型の油圧ショベルと同様の操作システムを有した操縦席型の遠隔装置の開発や、操作と同時に触力覚を提示可能なハプティックデバイスの適用などが行われている。

将来はこのような遠隔操作システムを用いて、オペレータが複数台の油圧ショベルを逐一乗り換えながら作業する働き方が想定される。このような働き方の中で現場生産性を最大限高めるためには、オペレータが様々な油圧ショベルに乗り換えながら、最大限自身のスキルを発揮可能な遠隔操作システムが必要となる。ここで油圧ショベルは一般的に、機体質量が6t未満の小型クラスから40t以上の大型クラスまであり、オペレータが異なるクラスの機体に乗り換えて作業する場面が想定される。ここで人間は認知プロセスによって遠隔操作油圧ショベルの乗り換えにおける環境の変化を認知するが、オペレータが誤った解釈をし、その後の操作に影響し作業効率の低下を引き起こす可能性が考えられる。そのためオペレータが乗り換えによる環境の変化を正しく認知するためには、人間の認知プロセスを考慮したうえで情報を最適に処理し、オペレータに提示する必要があると考える。そこで本論文では、遠隔操作油圧ショベルシステムに対して、人間の認知プロセスに着目し、遠隔ショベルの乗り換えが作業効率に与える影響を軽減するインターフェースシステムを提案した。具体的には、視覚情報の変化の影響を軽減するための手法として、オペレータの内部モデルの切り替えを支援するための動特性提示インターフェースを提案し評価した。また、クラス差の影響を考慮しつつ遠隔操作ショベルにおいては受け取りにくい情報をフィードバックすることを目的とし、アタッチメント関節負荷率という指標を提案し評価した。

第2章では、内部モデルの切り替えを支援するための動特性提示インターフェースを提案し評価した。油圧ショベルはクラス毎に動特性が異なり、オペレータは乗り換えの度に個々のクラスの動特性に応じた操作を行う必要がある。オペレータはクラスに対応した内部モデルを構築し、乗り換えの度にそれらを切り替えることで効率的な作業が可能になるが、遠隔操作油圧ショベルは内部モデルを直ちに切り替えることが困難である。速やかな内部モデルの切り替えのためには操作する対象の動作を意識的に理解している必要があることから、機体乗り換えの際に、乗り換え先の動特性情報を事前にオペレータに提示する手法を提案した。具体的には、運転席視点で次に操作する機械がフルレバー操作で稼働する様子をオペレータに動画提示することを提案した。提案手法の有効性を検証するため、実機を用いた検証を実施した。実験の結果、何も提示をせず直ちに乗り換える場合、乗り換えない場合と比較し旋回操作時間が有意に増加し、作業効率が低下することを確認した。一方で、提案手法では乗り換えの有無にかかわらず、旋回操作時間に有意な差異は確認されなかった。また、動特性変化の影響を抑制する効果を条件間で比較した結果、提案手法では旋回操作時間変化量が有意に減少することを確認し、動特性の変化が作業効率へ与える影響を抑制する効果があることが確認された。このことは、被験者が動特性の変化に伴い適切な内部モデルの切り替えを行うことができないことが示唆されたと同時に、提案手法では被験者は乗り換え先の動特性を理解でき、適切な内部モデルに切り替えることができたことが示唆された。

次に、機体乗り換えをする前に情報を提示することによる作業時間への影響を考慮すると、可能な限り短時間でオペレータが乗り換え先の機体の動特性を把握できることが望ましいと考え、静止画により動特性をオペレータに提示するインターフェースを提案した。静止画では動特性のような時間応答を提示することは困難であるため、本研究では機体サイズの変化をオペレータに提示すれば、オペレータはそこから旋回動特性を推測できると考え、現在操作している機体及び次に操作する機体の側面図を並べて表示することを提案した。提案手法の効果を確認するため、シミュレータを用いた被験者実験を実施した。実験の結果、何も提示をせず直ちに乗り換える場合、乗り換えない場合と比較し旋回操作時間が有意に増加し、作業効率が低下することを確認した。また、画像提示、動画提示条件にて乗り換えの有無による作業時間の増加は確認されず、提案手法の有効性が確認された。次に、動特性変化の影響を抑制する効果を条件間で比較した結果、動画提示条件が、何も提示をせず直ちに乗り換える場合と比較し旋回操作時間変化量が有意に減少することを確認した。一方で、画像提示条件では何も提示をせず直ちに乗り換える場合と比較して旋回操作時間変化量に際しは確認されず、以上から画像提示手法は動画提示条件と比較し、機体切り替えによる作業時間の増加を抑制する効果が小さいことが明らかとなった。以上の結果から、本章では機体が動作する様子を視覚提示することで、オペレータは乗り換え先の動特性を理解でき、内部モデルの切り替えが可能であるとともに、機体サイズ差は動特性の理解には作用せず、内部モデル切り替えのためには動特性情報を直接視覚提示する必要があることが明らかとなった。

第3章では、クラス毎の最大発揮力を考慮した負荷指標のフィードバック手法を提案した。オペレータにフィードバックする機体情報として、効率的な作業のためにオペレータは掘削反力を意識していることから、掘削反力によりアタッチメントに掛かる負荷に着目した。遠隔操作油圧ショベルは、運転席に設置されたカメラ映像を介した視覚情報により操作を行うものであり、オペレータは視覚情報のみではアタッチメントの負荷を推測することが困難である。また、アタッチメントの移動速度は、アタッチメントの最大発揮力に近づくに従って低下することから、効率的に土を掘削するために、オ

オペレータはアタッチメントの最大発揮力に対する負荷の程度を意識する必要がある。しかし、遠隔操作油圧ショベルでは、アタッチメントやアクチュエータのサイズといった情報が把握しづらく、そこからアタッチメントの最大発揮力を測ることは困難である。そのため、機体の乗り換えによる作業効率の低下を抑制するために、最大発揮力を考慮した負荷情報をオペレータにフィードバックする方法として、「アタッチメント関節負荷率」という最大発揮力を考慮した負荷指標を定義し、これをオペレータにフィードバックすることを提案した。またフィードバックの手法として力覚によるフィードバック手法を提案した。提案手法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。一般的な操作レバー特性および最大発揮力を考慮しない従来の負荷フィードバック手法で実験を行った結果、一般的な操作レバー特性、および従来の負荷フィードバック手法において、異なるクラスに乗り換える場合、乗り換えを行わない場合と比較し、単位時間辺りの掘削土量が減少し、作業効率が低下することを確認した。一方で提案手法では乗り換えによる作業効率の低下は確認されなかった。また、提案手法における機体乗り換えの作業効率への影響を抑制する効果を確認した結果、一般的な操作レバー特性、従来の負荷フィードバック手法と比較し、提案手法で掘削土量の変化量が有意に小さくなることを確認し、提案手法が乗り換えの影響を抑制可能であることが確認された。これは、アタッチメント関節負荷率が、最大発揮力を考慮した指標であり、被験者が負荷の程度を正確に認識できたためであることが示唆された。

第4章では、本研究の総括と、オペレータの認知に与える影響を軽減するインターフェースにより遠隔操縦パフォーマンスの向上に寄与することを確認できた。しかし、本研究では特定の作業における効果までしか確認はされておらず、他の作業や複合動作における乗り換えの影響を軽減する手法の検討および効果検証は今後の課題である。最後に、建設業における少子高齢化の課題から現場生産性の向上が必須となっている現状において、作業効率を落とすことなく作業現場の機械を乗り換えて作業することで、建設現場の働き方改革を大きく推進できる可能性について述べている。