

# 論文の要旨

## 題目 Development of Operation Training System and Improvement of Operation Interface for Improving Operators' Skills of Hydraulic Excavators

(油圧ショベルのオペレータの操作スキル向上を目的とした  
操作トレーニングシステムの開発と操作インターフェースの改善)

氏名 関塚 良太

近年、AI や IoT の技術の発展により、様々な機械の自動化が進んでいる。しかし、手術用ロボットや建設機械など、その作業の複雑さや多様性から人が主体となって操作する場面も未だに残っている。これらの機械は操作が特殊であることが多く、意のままに操作するには熟練したスキルが要求される。例えば、代表的な建設機械であり、使用される機会の多い油圧ショベルにおいては、2つのレバーを使って4つの関節動作を同時に操作する必要があるため、操作が非常に難しくなっている。オペレータの操作スキル向上の手段として、機械の操作訓練と機械の操作性向上が挙げられる。実機を用いて操作訓練を行う場合、コストや安全性の面で問題が生じる場合がある。そのため、シミュレータ等の低コストで安全な訓練が行える環境が有効である。また操作訓練をする上で操作スキルの定量評価も重要である。操作スキルを数値化し、オペレータの習熟度を可視化することで、習熟度に応じた最適な訓練が可能となる。一方、機械の操作性が悪い場合、操作の習熟に余計な時間がかかるため、機械の操作性を向上させることも重要である。操作性の向上の方法として、機械制御の最適化や操作の部分的なアシスト、操作インターフェースの改善などがある。これらの手法を取り入れることで操作に要求されるスキルを軽減することができる。

本研究では、このような人が主体となって操作する機械の中でも特に使用される機会の多い油圧ショベルに着目し、トレーニング環境の構築と操作性の向上を目指す。油圧ショベルは代表的な建設機械であり、日本においては建設機械市場の約半数を油圧ショベルが占める。建設業界における労働力不足に起因する生産性低下への対策として、油圧ショベルのオペレータを低コストで効率的に育成できるトレーニング環境の構築や操作性の改善は重要である。低コストで効率的な機械操作のトレーニング環境として、シミュレータが利用される。しかし、油圧ショベルにおいては、計算コストの都合により掘削時の土の挙動の再現が難しいといった問題がある。

一方、油圧ショベルの操作性の改善に向けた取り組みとしては、操作の一部自動化や機体情報のフィードバックなどが挙げられる。油圧ショベルは2つのレバーを用いて4つの動作を同時に操作する必要があるが、その操作の一部を自動化することでオペレータの負担を軽減することができる。また機体情報のフィードバックに関しては、油圧ショベルの主な用途である掘削作業などにおいて重要となる外部との接触力の提示手法として、力覚フィードバックが注目されている。しかしながら、レバーを操作する時に人が感じる力の特性は未だ十分に解明されておらず、機体情報をそのままレバーの反力の大きさを提示することが人にとって最適であるかは定かではない。

本論文では、実際の土を掘削可能なラジコンショベルを用いて、低コストで効率的な油圧ショベルの操作トレーニング環境を構築し、また、人の力感覚を考慮したレバー反力を設計することで操作性を改善し、オペレータの操作スキルの向上を目指す。また開発したトレーニングシステムと実際の油圧ショベルを用いて検証した操作スキル評価指標と操作性に関する主観評価指標を用いて改善したレバーの操作性を評価する。本論文は、以下に示す5章から構成される。

第1章では、油圧ショベルの操作トレーニング環境の構築と操作性改善の重要性について述べる。そして、本論文で提案する油圧ショベルの操作トレーニングシステムと操作スキル評価法、及び人の力知覚特性を考慮した

レバー反力設計の概要を述べる。さらに、本論文で提案するトレーニングシステムに用いる VR 技術による視界提示、及び反力設計手法で扱う人の力知覚特性についての関連研究を紹介する。

第 2 章では、油圧ショベルの操作トレーニングシステムについて述べる。まず実際の油圧ショベルと同様の視点及び操作方法でラジコンショベルを操作できるトレーニングシステムを開発する。次に、提案システムの動特性と操作性、視界の没入感を検証する。

第 3 章では、第 2 章で提案するシステムと実際の油圧ショベルを用いて、油圧ショベル操作の熟練者と非熟練者のスキル評価実験を行う。実験結果は、提案システムを用いることで実際の油圧ショベルの操作スキルを部分的に評価できることを示唆している。

第 4 章では、油圧ショベルの操作性向上のための人の力知覚特性を考慮したレバー反力設計について述べる。まずレバー操作時の力知覚特性推定モデルを構築し、その推定精度を評価する。次に、提案モデルを用いて力知覚特性を考慮したレバー反力を設計し、設計した反力特性を実装したレバーの操作性の評価実験を行う。操作性の評価には第 3 章で検証する操作スキル評価指標と操作性に関する主観評価指標を用いる。実験結果は、人の力知覚特性を考慮したレバー反力設計によって、油圧ショベルの操作性が向上することを示唆している。

第 5 章では、本論文の総括と、関連する課題、今後の研究展望について述べる。