

## 論文の要旨

### 題目 制御工学的視点に基づく油圧ショベルの 動作評価と操作技量評価に関する研究

(A Study on Evaluations of the Behavior and Operational Skills  
for an Excavator Based on the Control Engineering Approach)

氏名 小岩井 一茂

建設現場での労働者は、55歳を超える年齢が3割を超え、29歳以下の若年者層が約1割程度となっている現状がある。このような現状から、今後、建設業の労働者が不足していくことが予想される。一方で、建設業はインフラ整備には必要不可欠であり、その需要は減少する可能性はない。このように、必要とする作業量に対して、労働者が不足するため、労働者一人当たりの生産性を増やし、建設現場全体の生産能力を確保する必要がある。このような課題を解決するために、建設現場では、国土交通省主導のもと「i-Construction」と呼ばれる労働者一人当たりの生産性向上を目的とした取り組みが行われている。この取り組みは、「ICT（情報通信技術）の全面的な活用」により建設生産システム全体の生産性向上を図り、魅力ある建設現場を目指すことである。

建設現場の生産性を向上させるためには、油圧ショベル等の建設機械が欠かせない。ここで、建設機械でも比較的作業が複雑な油圧ショベルは、一部の作業を自動化できたとしても、判断が必要な現場における施工は人間の操作が必要である。すなわち、油圧ショベルを使用した建設現場の生産性を向上させるためには、操縦者を含んだ系で考える必要がある。まず、人間が操作する油圧ショベルで生産性を最大化させるためには、省エネ化と安定した駆動の両立が必要となる。これらの両立には、機体の制御性が重要となる。次に、操縦者が思い通りに油圧ショベルを操作し、作業することで高い生産性を得ることができる。思い通りの操作には、操縦者の機体に対する評価を明確にすることが重要である。さらに、作業現場の生産性は、操縦者の操作技量に依存する。人間の操作により生産性の高い作業現場を実現するためには、より効率的な技量を抽出することが必要となる。

すなわち、建設現場で高い生産性を確保するためには、以下の項目が重要となり、それらに基づく機体設計が必要となる。

- (1) 機体の制御性
- (2) 操作性評価の指標
- (3) 操作技量の評価

一方で、人間がコントローラの代わりとして作用することができるため、人間をコントローラ、制御対象を人間が操作するものとして捉え、フィードバック制御を実施していることはよく知られている。本研究では、この考えに基づき、上記3つの油圧ショベルの生産性向上の課題に対して、制御・評価・分析を実施する。

第1章では、上記で述べた研究背景を具体的に説明する。さらに、人の操作を必要とする建設機械と制御工学の関係性について説明し、本研究の主軸である「制御工学的な観点」の必要性について述べる。

第2章では、油圧ショベルのデータ指向型トルク制御について述べる。油圧ショベルに対して、生産性を最大化させるためには、省エネ性能と作業量を最大化させる必要がある。しかしながら、その両者はトレードオフの関係にある。そこで、機体の制御性を向上させる手法を構築することで、その両立を考える。まず、制御対象を油圧ショベルの旋回動作として、入力を油圧ポンプの指令流量、出力を油圧ポンプの出力トルクとして、旋回体の回転を含んだ系の伝達特性を明らかとする。さらに、その伝達特性に基づき必要なコントローラ構造を設計する。ここで、油圧ショベルのシステムは、一般的に非線形であり、油圧回路によってシステムが切り替わるような特性をもつ。そのため、システムの切り替わりに対応した複数のコントローラ構造を選定する。また、PID制御則を基本としてコントローラの構造を構築し、制御則にコントローラ構造の共通性をもたせることにより、切り替えを容易にする。なお、これらのコントローラに使用されている制御ゲインは、1回の駆動データを用いて調整可能なGMVCに基づく直接調整法によりオフラインで算出される。さらに、制御対象のシステム変動が内部状態である圧力に応じて変化することに着目し、圧力の変化を検出してコントローラを切り替えるイベント駆動型制御と圧力の変化量に応じてコントローラゲインを変更するゲインスケジューリング制御則を組み合わせ、駆動中のゲインを変化させる。なお、上記で述べたようにPID制御則を基本としてコントローラ構造を決定することで、ゲインを変化させるだけでコントローラの切り替えを可能とした。この提案手法について、シミュレーションと実機により有効性検証を実施し、省エネ最大化した機体における安定駆動を確認した。

第3章では、制御工学的視点に基づく油圧ショベルの操作性指標の構築について述べる。油圧ショベルのような操作を必要とする機械は、操作しやすいことが生産性を向上させることに直接つながる。すなわち、人間が操作する機械に対して、操作しやすさを評価する必要がある。しかしながら、製造メーカーで操作しやすさを評価する場合、特定の評価者によって官能評価が行われることが一般的である。このような特定の評価者は、固有の評価指標を有しており、不可欠な存在であるものの、評価に時間を有すること、その育成に長期間が必要なこと、環境条件や評価者の状態が影響することなどが課題としてあがられる。そのため、操作しやすさの定量的な評価指標が必要となる。ここで、制御工学の視点では、制御のしやすさの評価として、制御対象を低次のシステムで捉え、そのシステムパラメータで制御のしやすさを評価する。この制御工学的な視点により、操作が必要な機器が高次のシステムであったとしても、操縦者をコントローラと考え、操作される機体をシステムとして捉えることで、低次システムでコントローラに対する評価を実施できると考える。すなわち、近似された低次システムのシステムパラメータで、操作のしやすさを評価する指標を構築する。なお、人間が認知的制御を行う際には高々3つや4つのワーキングメモリで処理していることが知られていることから、コントローラとして作用する操縦者は、低次のシステムで操作対象をとらえているといえる。ここでは、対象操作を油圧ショベルのブーム上げの加速操作として、上記の認知心理学のワーキングメモリと制御工学のモデル化の考え方にに基づき、操縦者が評価対象である油圧ショベルの動作を低次システムで表現していると仮定して、一次遅れ系で

表現する。さらに、一次遅れ系で近似した実機の簡易シミュレータを作成する。このシミュレータと実機を用いて、複数名の被験者により、いくつかの加速感を変えた条件でブーム上げ操作を実施し、それぞれの加速応答性に対する官能評価を実施する。また、実機の動作を一次遅れ系で近似するために、遺伝的アルゴリズムを用いたパラメータ推定手法を提案して実機の動きについてシステムパラメータを近似する。これらのシステムパラメータと操作者により評価された加速応答性の官能評価値の関係性について調査を行う。その結果、一次遅れ系で近似したモデルのむだ時間と時定数の和に対して、加速応答性の官能評価値が対数で表される関係性があることが判明した。これにより、近似された一次遅れ系のむだ時間と時定数の和が加速時の操作性指標として活用できることが示唆された。

第4章では、制御工学的視点に基づく油圧ショベルの旋回操作の特徴抽出について述べる。建設機械が稼働する建設現場の生産性は、その操縦者の操作技量に依存する。生産性の高い作業現場には、熟練作業による効率的な作業が行われている。そのため、そのような熟練者が操作する効率的な作業を抽出することで、技術継承や支援につながれるとともに、自動化や操作補助による作業効率向上にもつながられ、建設現場の生産性向上が可能となる。そこで、操縦者をコントローラとして表現することで、建設機械の操作技量評価を行う。ここでは、油圧ショベルの操作データを使用し、操作する人をコントローラとして表現することで、操縦時のPIDゲインを調整則に学習させることができる。なお、調整則としては、ニューラルネットワークの一種である小脳演算モデル(CMAC)を活用する。CMACは学習したPIDゲインを出力することができ、そのPIDゲインの変化量を考察することで人間の技量を抽出することが可能となる。操作対象として、油圧ショベルの旋回操作を対象とする。非熟練者と熟練者に停止目標を決めた旋回操作を実施させ、各操作データを用いてPIDゲインをCMACに学習させる。さらに、PIDゲインの変化量について、熟練者と非熟練者のデータを比較する。その結果、PIDゲインの物理的意味に基づき、その変化傾向を考察すると、熟練者は停止時に先の情報を予見するゲイン(微分ゲイン)と過去の状態を考慮するゲイン(積分ゲイン)が上昇することが判明した。一方で、非熟練者は、熟練者と反対の傾向が観察され、現在の状態を判断するゲイン(比例ゲイン)の上昇がみられた。このように、PIDゲインの物理的意味から定性的に技量を評価することが可能となった。また、PIDゲインの変化量に着目すると、熟練者のPIDゲインの変化量は小さく、緩やかに変化させており、非熟練者のPIDゲインは急激に変化させていることが分かった。このように、PIDゲインの変化を考察することで、技量を抽出することが可能となった。

第5章では、制御工学の重要性を述べるとともに、制御工学的な視点を油圧ショベルの操作性や技量評価に応用することで、機体の制御性の改善はもちろんのこと、操作性評価指標の構築、操作技量の評価ができることを示し、本論文の総括とした。なお、本論文では、操作対象が限定されていたことから、今後の研究として、本論文の手法を他の操作対象等に拡張するとともに、このような制御工学的な視点を油圧ショベルの研究・開発に取り込んでいくことを今後の取り組みとして挙げている。