

論文の要旨

題目 油圧ショベルのアタッチメント重心挙動に基づく操作技量評価と掘削支援制御に関する研究

(A Study on Operation Skill Evaluation and Digging Assist Control based on the Center-of-Mass Behavior of a Hydraulic Excavator)

氏名 洪水 雅俊

昨今、わが国では少子高齢化の進行に伴い、生産年齢人口が徐々に減少し、経済成長を支える多くの産業で生産性の低下を引き起こしつつある。特に、建設業においてこの傾向は著しく、熟練と呼ばれる団塊世代の作業員たちが徐々に離職していく一方で、3K（きつい、汚い、危険）のイメージが定着している建設業への若い世代の入職は減少の一途であり、労働者不足に陥っている。このような問題を受け、国土交通省によって「i-Construction」と呼ばれる施策が2016年より本格的に推進されている。この施策は、ICT（情報通信技術）の全面的な活用によって、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。なかでも、ICT建機は技量の伴わない作業員でも優れた作業を実現でき、生産性向上に大きく寄与しており、建設業を新3K（給与、休暇、希望）へと変貌させ、魅力あふれる職種へと変えることを可能とする技術の一つである。しかしながら、現場作業の非定常さや、追加機器のコスト、環境整備などの問題から、このような技術の適用は一部の現場、施工にのみ適用されており、今後もその状況は長く続く見込みである。したがって、人が判断し、操作を行う現場は依然多く、従来通りの有人操作の油圧ショベルでも、技量の伴わない作業員の搭乗で高い生産性を実現する施策が早急に必要である。

従来の油圧ショベルの現状課題として、“非熟練者に対して支援的な制御ができていない”、“技量が伴わず油圧ショベルの非線形性に対応できない”、“作業条件が大きく変わった際に機体に搭載されている制御で十分な性能を得られない”、といった課題が挙げられる。したがって、これらの課題を解決し、非熟練者でも生産性の高い作業を可能とするには、以下に示す項目に取り組む必要がある。

- (1) 操作技量が表現される動的指標の特定
- (2) 作業の支援制御系の構築
- (3) 制御系の環境変化対応

本論文では、これらの項目に対して、非熟練なオペレータにおいて人の操作も含めた特性をコントローラを用いて作業に適した特性へと変化させ、生産性を向上させる Human-in-the-loop 系を考える。この系において、オペレータの技量を制御工学的に評価できる指標を特定し、その指標に基づき人の操作を支援する制御系を構築する。さらに、その有効性を実機実験を通して評価する。

第1章では、本論文における研究の背景を社会的な課題を踏まえ、具体的に説明する。また、制御工学的な視点による油圧ショベルの課題およびその解決手段に関する考えを述べる。

第2章では、油圧ショベルのアタッチメント合成重心の挙動に基づく操作技量の評価指標について述べる。油圧ショベルのアタッチメントは複数のリンクで構成され、それらを複合的に操作することで作業を行う。そのため、各リンクの動きがそれぞれ優れていたとしても、それが作業として優れているかを判断することは難しい。そこで、アタッチメントの動きを統合的に表現する手段として、それらの動きを合成重心で表現するシステムとして扱い、動作時のシステムパラメータから操作オペレータの技量を評価する指標を考える。まず、各リンクの重心座標から合成重心を算出する。次に、対象動作をブーム上げとして、入力をオペレータの操作に基づくブーム駆動トルク、出力をアタッチメント合成重心の角速度とした低次の回転系の運動方程式で表現する。ここで、人が低次のシステムとして扱っているという仮定に基づき、この運動方程式を2次遅れ+むだ時間システムとして近似する。実機検証の結果、システムパラメータから現象に即した物理パラメータが得られ、熟練者と非熟練者との比較において、躍度とむだ時間に明確な差が表れることを確認した。さらに、得られたシステムパラメータを基にシステム減衰係数 ζ 、固有角周波数 ω_n を算出し、操作特徴との相関を考察した。その結果、 ζ には目標値への収束性が、 ω_n には速応性が操作オペレータの技量として定量的に表現されることが明らかとなった。熟練者の場合、目標への収束性が高く、速応性が高いシステムとなるように操作していることが確認された。また、これらを指標とすることで、非熟練者のブーム上げ動作を改善可能であることが確認され、アタッチメント合成重心が作業を効率化のための指標として有用であることを明らかにした。

第3章では、アタッチメント合成重心の速度に基づいて油圧ショベルの掘削作業操作を支援する制御系について述べる。油圧ショベルは作業負荷に起因してシステム特性が非線形となる。そのため、効率的な掘削作業を実現するには、土砂から受ける抵抗をブーム上げ操作の調整によって低減する必要がある。非熟練者の場合、操作技量が伴わないため、この調整操作を適切に行えず、効率的な掘削作業とすることが難しい。一方、熟練者は滑らかな掘削作業であり、このとき、アタッチメント合成重心速度が一定となることが分析により明らかとなっている。そこで、人の操作が介在する油圧ショベルに対して、アタッチメント合成重心速度に基づき掘削中のブーム上げ操作が調整される支援制御系を構築する。なお、制御にはPIコントローラを用い、コントローラゲインは試行錯誤的に決定する。この提案手法を実機に適用し、有効性を検証した。その結果、非熟練者に見られる掘削時の過剰なブーム上げ操作は抑制され、熟練者のような滑らかな掘削動作となることが明らかとなった。さらに、掘削初期の応答性を改善するため、データ駆動型制御則に基づきコントローラを設計した。ここでコントローラ設計には、非線形性の比較的小さい掘削条件に限定することでシステムを線形と見なし、Fictitious Reference Iterative Tuning(FRIT)法を用いる。所望の動特性に設計した参照モデルに基づき、初期入出力データからコントローラゲインを設計する。その結果、非熟練者によるマニュアル操作と比較して約0.5secの掘削時間短縮、約5%の消費動力低減を確認した。アタッチメント合成重心速度に基づいた操作支援制御を適用することで、非熟練者でも優れた作業動作を実現し、生産性と省エネの両立が可能となった。

第4章では、アタッチメント合成重心速度に基づく掘削支援制御において、油圧ショベルの非線形特性に対応した制御系について述べる。作業中の油圧ショベルの特性は非線形となるため、線形コントローラでは十分な制御性能を得ることが難しい場合が多い。そこで、非線

形条件においても滑らかな掘削作業を実現するために、これに対応する2つのコントローラ設計アプローチを適用した制御系について説明する。1つは、疑似外生信号を用いたデータ駆動型のコントローラ設計アプローチである。これは、掘削中のシステム変動を2つのシステムの切り替わりと捉え、その切り替わりに起因する出力変動を仮想的な外乱（疑似外生信号）の入力によるものと見なす。この疑似外生信号による出力影響が抑制されるように参照モデルを設計し、データ駆動型制御則に基づきコントローラを設計する。設計したコントローラはシステムの切り替わりと同時に適用される。システムの切り替わりは、アタッチメントの合成重心速度と予め設定した閾値との比較によって判定する。実機適用の結果、土砂から受ける負荷の増加によって掘削速度が低下した際、負荷低減操作であるブーム上げが応答良く入力され、固定ゲインの線形コントローラの結果と比較して、掘削速度の低下は約20%、目標速度への復帰時間は約0.8sec改善された。これにより、変動後のシステム特性が想定と大きく変わらない条件においては、有効な手法であることが分かった。

もう1つは、データベース駆動型のコントローラ設計アプローチである。これは、データベース内に格納されているデータセットと、現在の動作点に基づいて逐次コントローラゲインを更新し、局所線形コントローラを構築することで、非線形システムに対応する手法である。まず、線形コントローラによる実験で取得した掘削データを基に初期データベースを構築する。次に、所望の動特性とした参照モデルに基づきデータベースを学習させる。ここで、データベースの学習は、学習前データの取捨選択によって想定しない制御特性となること防ぐことができ、実装時の計算負荷を低減できるという理由から、FRIT法に基づいたオフライン学習を行う。実機適用の結果、FRIT法を用いた線形コントローラの結果と比較して、掘削時の負荷変動によるシステム特性の変化に対して、動作点に応じてコントローラゲインが更新され、ブーム上げ操作が適応的に調整された。そして、アタッチメント合成重心速度の立ち上がり、目標値への追従性が著しく向上し、所望の出力に追従することが確認された。さらに、実作業で想定される掘削深さ違いによるシステム特性の変化にも対応し、所望の制御性能を得られることが明らかとなった。これらより、システム特性の変化に対応した制御系が構築され、非熟練者であっても所望の掘削作業が可能となった。

第5章では、本論文の総括として、油圧ショベルを対象に、アタッチメントをそれらの合成重心で表現するシステムとして扱うことで、合成重心には技量が定量的に表現され、作業改善が可能な指標であること、さらに非線形システムに対しても合成重心の速度に基づいて効率的な掘削を可能とする支援制御系が構築されたことを示した。また、適用した条件が限定的であることから、提案手法を軸に、他の作業に対しても支援可能な制御系へと拡張していくと共に、人の要素に着目した制御系へと昇華させていくことを今後の取り組みとして述べている。