

論文の要旨

題目 油圧ショベルとオペレータの適応協調制御に関する研究
(A Study on Adaptive Shared Control for a Hydraulic Excavator and Operators)

氏名 平岡 京

近年、人類は貧困や飢餓、エネルギー問題や気候変動問題など、数多くの課題に直面している。これらの問題を解決するため、2030年を達成年限とし、「誰一人取り残さない」持続可能な世界の実現に向けた国際目標として Sustainable Development Goals (SDGs) が掲げられており、これを達成するために様々な取り組みが行われている。日本においては SDGs を実現する柱として Society5.0 が提唱されており、これはサイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会課題の解決を両立する、人間中心の社会であると述べられている。このような社会の実現には、Internet of Things (IoT) や Information and Communication Technology (ICT) といった通信ネットワーク、ビッグデータや人工知能のような新たな科学技術が必要である。これらの技術は、社会に大きな影響を及ぼすものであり、その活用は成長戦略に基づきモビリティ、金融、農林水産業等の様々な分野で検討されている。なかでも、建設業界ではデータとデジタル技術を活用した ICT 施工による施策“i-Construction”が、社会課題となっている労働人口減少への対策として推進されている。現在、建設機械においては、データを活用することで人の操作を自動化、または半自動化することで作業を簡易化し、建設現場の生産性を高めている。これにより、作業効率が人に依存せず、初心者でも作業を正確に行うことが可能となり、作業現場がスマートになることで魅力ある建設現場が実現することができる。その結果、建設業界に対する認識を変えることで就業者の増加、定着を狙っている。

しかし、現状ではこのような ICT 建機を活用し、すべての建設現場において作業の簡易化を行うことは困難である。これは油圧ショベルの作業は多岐にわたり、その工程も複雑であるため、全ての作業を自動化、半自動化することが難しいためである。また、作業によりシステム特性も変化するため、この場合にも効率よく作業が行える技術が必要である。さらに、これらの自動化、半自動化機能はコントローラによる介入が常に一定であり、人に応じた調整がなされていないことから、自身の操作で作業しているという自己効力感が損なわれる可能性がある。内発的動機であるモチベーションの維持には、人が有能感や効力感を体験するだけでなく、自分の行動が自己決定的であることを体験しなければならないとされており、モチベーションがある人と、単に外部からコントロールされている人とを比較すると、前者の方が高いパフォーマンス、持続性、創造性の向上、活力の高まり、自尊心、幸福感としてその効果が現れるとされている。Society 5.0 として目指す社会は、「直面する脅威や先の見えない不確実な状況に対し、持続可能性と強靱性を備え、国民の安全と安心を確保するとともに、一人ひとりが多様な幸せ (well-being) を実現できる社会」であることが科学技術・イノベーション基本計画で宣言されており、建設機械の作業効率向上だけでなく、人にも着目しなければならない。したがって、仕事に対するモチベーション維持に繋げるためにも、また、誰一人取り残さない建設現場を実現するためにも、自身の判断に基づき操作し、優れた作業を行える、人と機械が協調する操作支援システムが必要と考える。

本論文では、人が操作する油圧ショベルにおいて、人が主体的に操作を行いながらも操作する人によらず作業の生産性を向上させるために、人に応じてコントローラによる操作支援を調整する方法について提案する。具体的には、作業データを活用し、人や機械の特性変化に対応する制御器設計を行い、その制御器を用いて、人と機械が協調し、生産性を高める制御系の構築を目的とした。

第1章では、人間中心の新しい社会に向けた取り組みとして、建設現場における施策と油圧ショベルの操作支援制御に関する先行研究について述べる。さらに、本論文の主題である人とコントローラの協調制御系の必要性について述べる。

第2章では、応答予測手法を用いた未知むだ時間に対する制御系を提案する。油圧ショベルは作業により操作入力に変化し、システム特性の一つであるむだ時間も変動することが知られているため、このようなむだ時間の変動に対応した制御系を設計する必要がある。まず、入出力データを取得、参照モデルのむだ時間を複数設定し、それぞれのむだ時間に応じて制御パラメータを学習させたデータベースを構築する。また、それらのデータベースを実機に適用した場合の応答を予測、その結果を評価することで適切なデータベースを選択する。この手法により、従来法で対応できなかったむだ時間に対応したデータベースの構築ができ、さらに必要となっていた設計パラメータの試行錯誤的な決定も不要とした。次に、データ駆動型の応答予測手法を用いて、これら制御パラメータを更新したデータベースを用いた場合の応答を検証することで、むだ時間の推定と推定したむだ時間に適したデータベースの選択を可能とした。ここで、実システムを考慮すると、調整したコントローラによる応答を事前に把握することは安全確保の観点から重要となり、その点についても提案法の有効性が確認された。数値シミュレーションによる検証において、Nelder-Mead法により大域的な探索を行うことで、むだ時間の推定とそれに対応したデータベースを構築し、非線形性を有するシステムにおいて各動作点に応じたPIDゲインに調整されていることを確認した。一方、従来法の勾配法ではむだ時間が既知であったとしても局所解の探索となることで、むだ時間に対応したデータベースを構築することができず出力が発散する結果となった。さらに、油圧ショベルによる検証も実施し、その有効性を確認した。

第3章では、油圧ショベルにおける人の操作を考慮した操作支援制御系の設計について提案する。油圧ショベルは限られた作動油をそれぞれのアタッチメントに分配するため、油圧干渉と呼ばれる作動油の取り合いが生じ、動作に干渉が生じる。そこで、ここではこの出力干渉に対応した制御系設計を行う。具体的には、まず事前に設定した固定の制御パラメータにより実験を行い、このデータを基に初期データベースを構築する。つぎに、人の操作とそれに起因する観測可能なシステムの内部状態量もデータベースに格納することで、人の操作情報を陽に制御器設計に反映する。実機による検証では、人の操作情報を用いない場合と比較すると、人の操作入力の変動した場合の目標値への追従性が向上していることが確認された。また、制御パラメータの変化を考察すると、人の操作情報に対応してパラメータが調整されていることが確認され、人の操作と協調した作業が実現できるコントローラ設計が可能となった。このように、人の操作情報にも基づいた操作支援制御を適用することで、人が主体的に操作しながらも誰でも支援を受けられ、作業ができる人間機械制御系の実現に繋がることが確認された。

第4章では、油圧ショベルの協調制御系における操作支援度の設計について提案する。人に応じて操作支援度を調整するには人のモデル化が必要と考えられるが、人の行動は複雑であり、モデルを用いて表現することは容易ではない。そこで、人の特性に応じて操作支援度を変更する機能を Shared Management と呼び、作業データを用いて人とコントローラの協調制御系から導出される一般化出力を定義、算出し、これが油圧ショベルの出力と等価になるように調整することで、操作支援度を自動

算出する。これにより、人をモデル化することなく、操作支援度を人の特性に合わせて自動調整できることが期待された。実機による検証では、まずマニュアル操作における検証を行い、被験者によって作業精度が異なることが確認された。また、提案法を用いて作業を行った場合、マニュアル操作において作業精度が高かった被験者は操作支援度が低く、作業精度が低かった被験者は操作支援度が高くなる傾向を示されることを確認した。さらに、提案法により調整された操作支援度による協調制御を行った結果、いずれの被験者に対してもマニュアル操作と比較して作業精度が向上していることが確認された。加えて、各作業毎で作業精度と算出された操作支援度の検証を行い、参照モデルとの誤差を評価することで提案法による操作支援度の算出に対する妥当性についても確認した。第 2 章、第 3 章で提案した手法を適用することで、油圧ショベルが有する非線形性や人操作に対する動作への干渉に対応し、制御性能がさらに向上することも確認した。これらの結果より、人の操作特性の変化に対してコントローラによる操作支援度が自動調整され、誰でも生産性の高い作業を実現できることを明らかにした。

第 5 章では、本研究の総括と、作業データを活用し、人や機械の特性変化に対応する制御器設計を行い、その制御器を用いて人と機械が協調し、生産性を高める制御系の構築できたことを示した。しかし、誰でも働ける現場とするためには操作支援による生産性の向上だけでなく、成長促進によるモチベーションの維持など、人に着目し、心身共に健康で働き続けることができる建設機械が求められる。そのため、今後は提案法の活用だけでなく、人間工学等の他分野の考えを取り込みながら研究を行っていくことを述べている。