

## 論文の要旨

題目 モデルとデータを活用した自動運転ショベルのオンライン環境適応に関する研究  
(A Study on Online Adaptation of Autonomous Excavators  
to Environmental Conditions Utilizing Model and Data)

氏名 岡田 共史

日本が目指すべき未来社会として、Society5.0 が内閣府より提唱されている。この社会の実現に向けてデジタル技術の活用が推進されており、行政や産業界においては、IoT、ICT 技術、およびデータ活用によるデジタル化や DX に向けた取組みが行われている。インフラ分野においても DX に向けた取組みが開始されており、建設現場においては、「i-Construction」によって推進されている生産性や安全性向上に加えて、ワークライフバランスの推進や働き方改革も求められている。これらの要求を満たし、安全で快適、効率的な作業が可能な建設現場を実現するためには、データやデジタル技術の活用によるイノベーション創出が必要となる。

また、インフラ分野の DX では建設機械の自動化、自律化に関する研究開発も行われている。とくに、自動運転ショベルにおいては、作業する現場は一品一様であり作業環境や作業内容が多岐に渡るといった、実現に向けた特有の難しさがある。そのような多種多様な建設現場で高い生産性を発揮する自動運転ショベルの実現には、その時々現場状況に対応して作業を実行可能にする判断機能の開発が必要になる。なかでも、土壌掘削に着目すると、油圧ショベルの掘削動作は土壌特性の影響を受けるといった特徴があり、掘削動作において高い制御性能を発揮するためには、土壌特性に応じた制御パラメータを設定する必要がある。その特性は、建設現場によって異なり、土層変化や天候変化によって作業中にも変化する場合があるため、自動運転ショベルにおいて効率的な作業を実現する場合、作業中にその特性変化を捉えて、自動的に動作を特性に適応させる必要がある。しかし、現状の自動運転ショベルでは、特定の現場に合わせた制御器のチューニングが行われることが多く、特定の土壌特性のみに適した制御器となってしまう、土壌特性の変化への対応が難しい場合がある。したがって、自動運転ショベルの掘削動作における制御系では、土壌などの作業対象の特性とその変化を考慮した設計をすること、機械の判断により自動的に現在の作業対象の特性に適した掘削動作を実行可能なことが必要であると考えられる。

一方、国土交通データプラットフォームのように、様々な建設現場のデータ収集やモデル活用の仕組みが構築されつつある現状において、自動運転ショベルの判断機能や制御系の構築にあたりモデルやデータを活用することは得策であると考えられる。とくに、様々な建設現場の土壌特性のデータや建設現場を表すモデルなどの活用、さらには作業中にリアルタイムに得られる建設現場や建設機械のデータ等を活用することで、自動的に現在の土壌特性に適応して所望の掘削動作が実行可能になると考えられる。

本論文では、モデルとデータを活用した判断によって、作業中に環境条件に適応可能な自

自動運転ショベルの実現を目指した制御系を設計する。ここでは、自動運転ショベルの掘削動作を対象としたとき、環境条件の変化を扱うために用いるモデル、データを用いて環境条件の変化を捉える手法、モデルを制御に用いる手法について検討する。さらに、動作中の環境条件に対する制御系の有効性と制御性能について評価する。

第1章では、建設現場の課題とDXに関する取り組み、自動運転ショベルに関する研究開発と課題、それらの課題解決におけるモデルとデータ活用の重要性について述べる。さらに、モデルとデータの活用による環境条件へのオンライン適応を目的とした自動運転ショベルの制御系についての考え方を示す。

第2章では、油圧ショベルアタッチメントと作業対象との相互作用のモデル化と、データを活用したモデリング手法について述べる。まず、自動運転ショベルの作業対象の特性を扱う制御系とするために、掘削作業におけるアタッチメントと作業対象との相互作用を制御対象とみなし、そのモデル化を行う。ここで、その相互作用を局所的に見たとき、掘削距離と掘削力の関係性を質点、ばね、およびダンパ要素による抵抗が発生する系と仮定してモデル化する。次に、相互作用特性の変化を捉えるために、データベース駆動型モデリングを提案する。この手法により、事前に得られたデータを活用することで、自動運転ショベルの作業中に特性変化する相互作用をオンラインでモデリングすること、加えて操業条件に影響のない方法でモデルのパラメータ算出ができることを確認した。さらに、相互作用特性の変化をモデル化誤差に基づき検出し、検出に応じてモデリングを実行する、アラームマネジメントに基づくデータベース駆動型モデリングを提案する。この手法により、モデリング実行回数の削減による制御系の計算コスト低減や、モデルの振動的な変化の抑制が可能になり、必要に応じてモデリングが実行される合理的な手法にすることができた。さらに、実機の自動掘削において上記の効果があることを確認した。

第3章では、自動運転ショベルの掘削を所望の動作にするためのデータベース駆動型モデル予測制御系について述べる。まず、作業対象の特性を考慮した制御系とするために、第2章で提案した油圧ショベルー環境相互作用を制御対象と設定し、そのモデルを制御系に用いる。さらに、作業対象の特性変化をデータベース駆動型モデリングで捉え、そのモデルを用いて制御を行うことで、現在の特性に応じた制御入力を算出する。加えて、制御対象の制約条件を陽に扱った制御入力の算出が可能なモデル予測制御を用いることで、油圧ショベルのようなハードウェアの出力等に制約がある対象に有効な制御系とする。数値例において他のモデルに基づく制御系との制御性能を比較し、データベース駆動型モデル予測制御が従来のモデル固定の場合のモデル予測制御や、データベース駆動型モデリングに基づく内部モデル制御よりも良好な制御性能が得られる手法であることを確認した。さらに、ラジコンショベルを用いたアーム単動掘削に限定した条件の実験で、提案法が自動運転ショベルの掘削動作に対して有効な制御手法であることを確認した。

第4章では、自動運転ショベル掘削動作における、油圧ショベルアタッチメントと作業対象との相互作用特性に応じた目標掘削軌跡のオンライン修正方法について述べる。自動運転ショベルで効率的な掘削作業を行うには、目標とする掘削軌跡の設定が重要となる。自動施工では、事前の施工計画により設定された掘削軌跡を目標として作業することが考えられる。施工計画では事前に計測した土壌パラメータ等を用いて、その現場に適した軌跡の設定が行われるが、事前に計測できないような作業中の土壌特性の変化や、地中に想定していなかつ

た障害物が出現する等の事態を考慮した計画を立てることは難しい。そのような事態において設定通りの軌跡で掘削する場合、自動運転ショベルが所望の作業速度で掘削できない、あるいは障害物によって掘削動作が途中で停止するなど、指示通りの動作ができないことが想定される。したがって、建設現場の作業環境に適応して指示通り動作可能な自動運転ショベルには、状況に応じた判断と、その判断結果に応じた対応を機械で行う機能が必要である。その一例として、あらかじめ設定された目標掘削軌跡を状況に合わせて修正する判断機能が必要だと考えられ、その機能により指示通りの動作を実行できると考えられる。まず、データベース駆動型モデル予測制御によるバケット先端動作の予測に基づき、作業対象特性に適した目標掘削軌跡に修正する手法を提案する。数値例では、事前に与えられた目標掘削軌跡を現在の作業対象の特性を考慮した軌跡に修正することができ、掘削中に停止することなく指示通りの動作が実行可能なことを確認した。さらに、自動運転ショベルの実機を用いた実験検証において、提案法によりバケット先端の動作予測から掘削停止の判断を行い、オンラインで軌跡修正することで、掘削中に停止することなくあらかじめ設定された軌跡終点まで到達でき、さらに指示された掘削時間通りに動作できることを確認した。

第5章では、第2章のデータベース駆動型モデリング、第3章のデータベース駆動型モデル予測制御、第4章の掘削軌跡オンライン修正を統合した、自動運転ショベルが環境条件にオンライン適応するための制御系について述べる。まず、ブームとアームを用いた掘削を対象に制御系を構築する。ここで、アタッチメント複合動作を実現するために、制御器から算出された掘削力をブームとアームのトルクに変換する。さらに、そのトルクをブームとアームに指令することで、バケット先端が目標軌跡に追従するような動作を可能とする。加えて、データベース駆動型モデル予測制御により、現在の作業対象の特性に応じた掘削力の算出と目標掘削軌跡の修正を行う。ラジコンショベルを用いた実験検証で、ブームとアームの複合動作により目標軌跡に追従した掘削ができ、地中に障害物がある場合にも提案制御系によりあらかじめ設定された掘削軌跡の終点まで到達できることを確認した。本検証より、提案制御系が、環境条件にオンライン適応し指示通りに作業を実行可能な自動運転ショベルに対して有効であることが示された。

第6章では、本研究の総括と、環境条件にオンライン適応し指示通りに作業を実行可能な自動運転ショベルに対して有効な制御系が構築できたことを示した。一方で、適用や検証条件が限定的であること、モデリングに用いるデータの信頼性についての考慮が必要なことから、提案制御系のさらなる発展について言及した。さらに、本論文の提案手法が実装された自動運転ショベルの活用方法、および今後の研究展望として建設現場のサイバーフィジカルシステムへの発展と、そのシステムを活用した将来の建設現場の展望について述べている。