

博士学位論文審査要旨

2020年7月15日

論文題目： 油圧ショベルにおける自動掘削アルゴリズムの有効性検証

学位申請者： 平野 貴司

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 伊藤 彰人

要旨：

建設機械は自動車に比べ、燃料を大量に消費するため、地球温暖化対策の面でも省エネルギー化が重要である。また、近年、少子高齢化による建設業就業者の減少、技能労働者の不足もあって、国土交通省は、情報化施工を促し、総コスト削減を目指している。本論文では建設機械の油圧ショベルに注目し、自動化のための自動掘削アルゴリズムを提案し、検証することで、それらの諸問題を解決することを目的としている。このとき、コンピュータシミュレーションや実機を模擬した縮小モデル実験機を用いることで、安全かつ低コストでの検証を可能にしている。

本論文は全5章で構成される。第1章では本研究の背景、油圧ショベルの歴史、目的について述べている。第2章では個別要素法に基づく土壌モデルと油圧ショベルの動力学モデルを組み合わせたシミュレーションモデルについて述べている。さらに、あらかじめ地形に対して軌道を作成しない、効率的な自動掘削アルゴリズムを提案し、有効性を検証している。第3章ではシミュレーションにより第2章で述べた自動掘削アルゴリズムのパラメータスタディを行い、効率の良いパラメータの検証をしている。さらに、様々な地形に対して、自動掘削をさせることで汎用性の検証を行っている。第4章では油圧駆動の油圧ショベル模型を用いて、縮小モデル実験機を構築し、制御方策の検討を行い、所望の自動掘削アルゴリズムを再現できるようにしている。その後、その実験機を用いて第2章、第3章においてシミュレーションにより検証した自動掘削アルゴリズムの再現実験を行い、シミュレーションの再現性と自動掘削アルゴリズムの有効性の検証を行っている。第5章では本研究によって得られた知見を総括し、今後の展望について述べている。

これらの成果は油圧ショベルの自動掘削において、有効な自動掘削アルゴリズムと検証手法を確立しており、本論文は工学的に極めて価値のあるものと評価できる。よって、本論文は博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2020年7月15日

論文題目： 油圧ショベルにおける自動掘削アルゴリズムの有効性検証

学位申請者： 平野 貴司

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 伊藤 彰人

要 旨：

本論文の提出者は、本大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を2017年3月に修了し、2017年4月に同博士課程（後期課程）に入学し現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、*Vibration Engineering for a Sustainable Future* に2編，設計工学，DOI:10.14953/jjsde.2015.2662 に掲載され，十分な評価を受けている。

2020年6月13日午後13時より約2時間にわたり，提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ，種々の質疑応答が行われたが，提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後，審査委員により，論文に関する諸問題につき口頭試験を実施した結果，本人の十分な学力を確認することができた。なお，提出者は，英語による論文発表や語学試験にも合格しており，十分な語学能力を有すると認められる。以上により，本論文提出者の専門分野に関する学力及び語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目：油圧ショベルにおける自動掘削アルゴリズムの有効性検証

氏名：平野 貴司

要旨：

日本では建設機械に対し、1996年から現在まで排出ガス規制が段階的に強化されている。建設機械は自動車に比べ、燃料を大量に消費するため、地球温暖化対策の面でも省エネルギー化が重要である。さらに、近年、建設機械にもICT (Information and Communication Technology)を導入する流れがあり、情報化施工の技術開発も進んでいる。少子高齢化による建設業就業者の減少、技能労働者の不足もあり、国土交通省は2015年にi-Constructionを掲げ、情報化施工を促している。これは3Dデータの活用や、IoT (Internet of Things), AI (Artificial Intelligence)などの技術を建設現場に導入し、総コスト削減を目指すものである。情報化施工において油圧ショベルの自動化は大きな課題である。

油圧ショベルの自動化は、ダンプトラックのような建設機械とは異なり、目標地点での掘削作業が自動化の際の主な焦点となる。そのため、高効率な自動掘削を実現するための掘削制御手法の開発が重要である。制御方策について、過去に様々な研究が行われている。例えば、ロボットマニピュレータの制御と同様に、バケットの軌道をあらかじめ設定し、その軌道に追従させる軌道追従型の自動化の方法が提案されている。更にロボ制御や外乱オブザーバなど、現代制御理論を用いることで、良好な軌道追従性能が得られることが示されている。このような油圧ショベルをロボットマニピュレータの制御と同様に、バケットの軌道を追従させる手法は、特定の地形形状に掘削する場合には有利である。しかし、生産性の面に重きを置いた手法ではない。生産性は掘削軌道によって変化するため、掘削軌道とバケット形状の関係から生産性を向上させる軌道を実験的に特定した研究があるが、実際の掘削作業は現場の状況により異なるため、最適な軌道で掘削を行うためには、ショベルの仕様や掘削環境に応じた目標軌道を予め作成しなくてはならない。そのため、目標軌道作成に多くの時間を必要とし、他の現場へ適用しづらいため、時間的なコストが非常に無駄となる。最近では、深層学習 (ディープラーニング) によるAIの学習方法が注目されており、AIによる掘削操作の解析や自動掘削技術も企業で開発されつつあるが、学習に時間がかかり、実装の難易度はまだ高い。

現在、実用化されている様々なICT油圧ショベルは、オペレータが設計面を指示し、その指示通りに動くショベルである。地形データを測定し、施工計画に基づいてオペレータが半自動的な操作を行う。また、企業によって自律制御が開発され実機適用試験中である。しかし、これは熟練オペレータの掘削を模擬した軌道追従制御によるものである。このようにICT搭載の油圧ショベルは遠隔操縦や操作アシストが主であり、完全な自動化にはまだ遠いのが現状である。

本論文ではその自動化への一歩として、あらかじめ地形に対して軌道を作成しない、効率的な自動掘削アルゴリズムを提案し、その自動掘削アルゴリズムをシミュレーションによって検証する。自動掘削では土壌の状態により、掘削性能が大きく変化するため、様々な土壌の状態における掘削性能を検証する必要がある。また、実機を用いて実験的に検証するには安全性やそのための空間、人員の確保、燃料や時間などの問題がある。そこで、実機の特徴である油圧によるフロントリンクエッジの駆動機構を持ち、十分な軌道追従性能を有する縮小モデル実験機を構築し、実機検証実験を行う。これにより、安全面やコスト面での制約を解消し、シミュレーションによって検証した自動掘削アルゴリズムの実機検証実験を行うことができる。

シミュレーションモデルでは個別要素法 (Distinct Element Method, DEM) と呼ばれる手法を用いて土壌の離散的な解析を行う。土壌を離散的に扱うことでバケットと土壌間の相互作用力と掘削量を定量的に評価できる。更に油圧ショベルの動力学モデルを構築し、個別要素法の土壌モデルと組みわせることで掘削作業に必要なエネルギーを解析できる。ここから得た掘削に必要なエネルギーあたりの掘削量を生産性の指標として用いて、掘削作業の生産性を評価する。一般的に作業時間あたりの掘削量、もしくは消費エネルギーあたりの掘削量が増加することが望ましい。一方で、旋回に必要なエネルギー等を考慮するとより少ない回数で掘削が終了した方が生産性は良い。そのため、一定の掘削量を有する掘削を評価対象とし、消費エネルギーあたりの掘削量の増加をもって、生産性が向上したと見なすことで評価する。

縮小モデル実験として油圧で駆動するショベルの模型は RC4WD 製の “ 1/14 Scale RTR Earth Digger 360L ” を改良して使用する。実験機は元々ラジオコントロールにより走行、旋回、フロントリンケージを操作する模型である。フロントリンケージはサーボモータによりコントロールバルブが制御され、作動油が分配されることで駆動する。そこで、パソコンから制御できるように組み込みコントローラを用いる。また、シリンダの伸縮量を計測するために油圧シリンダには直線変位センサを装着し、各シリンダ内の各圧力を計測するために圧力センサを取り付ける。この実験機を用いて、自動掘削アルゴリズムの実機検証実験を行う。

本論文は全5章で構成される。第1章においては本研究の背景および目的について述べる。第2章では土壌モデルと油圧ショベルの動力学モデルを組み合わせたシミュレーションモデルと自動掘削アルゴリズムについて述べる。第3章では第2章で述べた自動掘削アルゴリズムのパラメータスタディを行い、有効性を検証する。第4章では縮小モデル実験の制御方策の検討とそれを用いた自動掘削アルゴリズムの再現実験について述べる。最後に第5章にて本研究で得られた知見をまとめる。以下に各章の概要を記す。

第1章では本研究の背景、油圧ショベルの歴史、目的について述べた。

第2章では個別要素法に基づく土壌モデルと油圧ショベルの動力学モデルについて述べた。加えて、地形に対してあらかじめ軌道を作成しない自動掘削アルゴリズムを提案した。その自動掘削アルゴリズムの有効性を土壌モデルと油圧ショベルの動力学モデルを組み合わせたシミュレーションにより検証した。その結果、提案した自動掘削アルゴリズムは反力を抑えながら、掘削できることがわかった。

第3章では第2章で述べた自動掘削アルゴリズムの有効性を検証した。自動掘削アルゴリズムは複数の設計パラメータによって掘削軌道が変化する。そこで、それらのパラメータが掘削効率に与える影響をシミュレーションによって評価した。その結果、自動掘削アルゴリズムの設計パラメータが掘削効率に与える影響がわかった。次に、掘削対象の土壌パラメータを変更して、シミュレーションにより掘削効率へ与える影響を検証した。変更する土壌パラメータは粒子密度、粒径である。加えて、掘削対象が斜面であった場合の生産性への影響を評価した。掘削対象が斜面の場合、同一の自動掘削アルゴリズムで高い掘削効率を得られた場合、それは自動掘削アルゴリズムの汎用性が高いといえる。そのため、自動掘削アルゴリズムにおけるパラメータを変更し、高い生産性が得られるパターンを検証した。これらにより第2章で提案した自動掘削アルゴリズムの有効性を検証し、様々な地形に対応した自動掘削ができることを確認した。その結果、提案した自動掘削アルゴリズムは汎用性が高いことがわかった。

第4章では油圧駆動の油圧ショベル模型を用いて、縮小モデル実験機による自動掘削アルゴリズムの検証を行った。この油圧ショベル模型は1つのポンプによりブームシリンダ、スティックシリンダ、バケットシリンダの3つの油圧シリンダを動作させるため、実機のショベルと比べて、フロントリンケージの複合動作性や応答性が悪い。そこで、サーボバルブの制御を工夫することにより、複合動作性や応答性が改善した。その後、その制御方策により、第2章、第3章においてシミュレーションにより検証した自動掘削アルゴリズムを、縮小モデル実験機

によって再現実験を行い、シミュレーションの再現性と自動掘削アルゴリズムの有効性の検証を行った。その結果、シミュレーションは実験機の挙動を再現できていることと、提案した自動掘削アルゴリズムは実験機において有効であることがわかった。

第5章では本研究によって得られた知見を総括し、今後の展望について示した。

本研究では、土壌モデルと油圧ショベルの機構の力学モデルを組み合わせたシミュレーションを用いて、提案した自動掘削アルゴリズムが高い汎用性を持つことがわかった。その自動掘削アルゴリズムのパラメータスタディを行い、自動掘削アルゴリズムの汎用性を検証した。さらに、縮小モデル実験機を構築し、提案した自動掘削アルゴリズムによる自動掘削の再現実験を行った。以上によって、実機における自動掘削アルゴリズムの有効性が示された。