

博士學位論文審査要旨

2013年12月17日

論文題目： シミュレーションによる油圧ショベルの自動化に関する研究

学位申請者： 吉田 達哉

審査委員：

主 査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 小泉 孝之

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 辻内 伸好

要 旨：

省エネルギー化，省労力化，無人化を目的として油圧ショベルの自動化に関する様々な研究が行われてきたが，生産性の観点からみると，さらなる改善の余地がある．掘削軌道・土質・地盤形状など様々な要因が生産性に影響を及ぼすため，生産性の向上を目的とした自動化を実現するためには，自動化の手法を様々な土壌の状態において検証を行う必要がある．本論文では生産性の向上を目的とした自動化のための制御方策の検討をシミュレーションによって行うことを目的としている．また，シミュレーションを用いた油圧ショベルの制御方策を検討する手法の有効性を確立している．

本論文は全6章で構成され，第1章において本研究の背景および目的について述べている．第2章では油圧ショベルの掘削の生産性を解析するための2次元個別要素法に基づく解析モデルについて述べている．土を粒子群とみなし接触した粒子の相互作用から粒子の運動を記述している．油圧ショベルの掘削を再現する掘削試験機を用いてこのモデルの妥当性を検証している．第3章では油圧ショベルの運動学および動力学モデルについて述べている．逆運動学問題を解くことで油圧ショベルを動作させるために必要なエネルギーを算出している．さらに，土壌解析モデルと組み合わせて掘削力によるシリンダ発生力について解析を行った結果を示している．第4章では軌道追従制御のための掘削軌道の生成について述べている．4つのパラメータによって軌道を生成する手法を提案し，その軌道を用いて掘削シミュレーションを実施し，生産性の評価を行うことで熟練オペレータに匹敵する生産性の高い掘削軌道を特定している．第5章では掘削作業時の地面形状の変化に対応し，掘削反力の増加を抑制するために，熟練作業者が行う操作を取り入れた自動掘削アルゴリズムを提案している．シミュレーションを実施し掘削の生産性を評価することで，掘削アルゴリズムの有効性を確認している．第6章では本研究において得られた知見を総括し，今後の展望について述記している．機械と土壌間の相互作用を詳細に解析することで掘削の生産性評価手法および自動制御の方策の確立を数値シミュレーションによって実現しており，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

2013年12月17日

論文題目： シミュレーションによる油圧ショベルの自動化に関する研究

学位申請者： 吉田 達哉

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 小泉 孝之

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 辻内 伸好

要 旨：

本論文の提出者は、本大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を2011年3月に終了し、2011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、Journal of System Design and Dynamics Vol.5 No.5 pp.1005-1016, 日本機械学会論文集 C 編 Vol.78 No.789 pp.1596-1606, Journal of System Design and Dynamics Vol. 7 No.1 pp.66-78, SAE International Journal of Commercial Vehicles Vol.6 No.2 pp.419-428, SAE International Journal of Commercial Vehicles Vol.6 No.2 pp.429-440 に掲載され、すでに十分な評価を受けている。

2013年12月7日午後1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、英語に関しては本学工学研究科博士課程（後期課程）在籍中に語学試験に合格しており、十分な語学力を有しているものと認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力並びに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： シミュレーションによる油圧ショベルの自動化に関する研究
氏名： 吉田 達哉

要 旨：

油圧ショベルの省エネルギー化、省労力化を目的として様々な研究が行われてきた。油圧ショベルの特有の操作の難しさから、非熟練者でも容易に作業できるオペレータ支援または操作の簡易化による有人作業のための研究が行われている。また、人が介在しない自律型の制御手法が考案されている。従来のマニピュレータの制御のように予め設定したバケットの軌道に追従する軌道追従型の自動化の方法が提案されている。さらにロバスト制御をはじめ現代制御理論を適用す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。地中に障害物が存在する場合に障害物を回避する方法として、ポテンシャル法を用いたロボットなどの障害物回避の手法を応用して地中の障害物を回避する軌道を生成する方法が提案されている。これらの手法によって操縦者が不在でも掘削が可能となるが、生産性の観点からみると、必ずしも生産性を改善するといったものに重きを置いたものではない。一般的に作業時間あたりの掘削量あるいは投入エネルギーあたりの掘削量が増加することが望ましく、これによって生産性が向上したとみなせる。生産性は掘削軌道によって変化するため、実験的に掘削軌道とバケット形状の関係から生産性を高めるための軌跡を求めた研究があるが、実際の掘削作業の現場を考慮に入れ常に最適な軌跡で掘削を行うためには、ショベルの仕様と環境に応じて複数の軌跡を予め作成する必要がある。そのため、掘削性能はバケット形状・土質・地盤形状など様々な要因によって生産性に影響するため、掘削の条件は無数に存在することになる。

油圧ショベル以外の建設機械と土壌間の相互作用の解析を研究した例として、ホイールローダによるすくい取り作業時のバケット反力の理論解析が行われている。土を連続体とみなしクーロンの土圧理論に基づきバケットが土に貫入した時のバケットの抵抗力を理論的に求めている。この解析手法では土を連続体として扱っているため、離散的な土壌の解析はできない。そのため、バケットでどれだけ土をすくえたかという解析ができず、生産性の評価ができない。土壌の離散的な解析手法として個別要素法 (Distinct Element Method) または離散要素法 (Discrete Element Method) と呼ばれる手法がある。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を定量的に評価できることに加えて、掘削量を定量的に評価できる。

以上より、生産性の向上のための自動化を実現するためには、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。さらに、実験的に検証するには非常に手間と時間を必要とし、効率的な制御系設計を行うことができない。シミュレーションにより解析することで自動化の方策とその生産性を効率的に検証できると考えられる。

本研究では生産性の向上を目的とした自動化のための制御方策の確立をシミュレーションモデルによって行い、有効性を検証することを目的とする。土壌を個別要素法に基づき土壌を離散的に解析することで、生産性を評価できるモデルを作成し、妥当性を確認する。さらに油圧ショベルの動力学モデルを構築することで掘削作業に必要なエネルギーを解析し、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生産性を評価する。このシミュレーションを用いて生産性の高い掘削軌道の生成を行う。また、従来の軌道追従方式の自動制御とは異なる方策として、予め作成した軌道を必要としない手法を確立する。

本論文は全6章で構成される。第1章において本研究の背景および目的について述べる。第2章では掘削シミュレーションのための土壌解析モデルについて述べる。第3章では油圧ショベル

の力学モデルについて述べる。第4章では生産性の向上のための掘削軌道について述べる。第5章では自動掘削のための掘削アルゴリズムについて述べる。最後に第6章において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章において本研究の背景および目的について述べた。

第2章では油圧ショベルの掘削の生産性を解析するための2次元個別要素法に基づく土壌解析モデルおよびシミュレーションについて示した。個別要素法に基づき土壌を粒子群とみなし粒子の運動を記述することで土壌の挙動を表現した。また、本シミュレーションは2次元モデルであるため、現実の土の挙動を表現するための粒子パラメータを同定した。そして、油圧ショベルの掘削を模擬する掘削試験機を用いて掘削実験を行いシミュレーション結果と比較することで土壌モデルの妥当性およびパラメータの同定手法の有効性を検証した。異なる3種類の掘削軌道で実験を行い、シミュレーション結果と実験結果は定性的に一致し、構築した掘削シミュレーションにより掘削軌道の違いによる掘削性能の変化を定量的に評価することができることがわかった。このことから、パラメータの同定法については、土壌の挙動が一致するようにパラメータを決定することで、2次元モデルにおいても実際の掘削作業を定性的に評価できることが明らかになった。さらに、掘削の軌道が異なることで掘削の生産性が異なることを実験およびシミュレーションで確認した。

第3章では油圧ショベルのフロント構造物の運動学および動力学モデルを示した。また、第2章で示した土壌モデルとの連成シミュレーションについても示した。本モデルでは油圧ショベルを閉ループ機構を含むマニピュレータとみなし、2つの方法でシリンダ発生力を求める逆動力学問題を解き、油圧ショベルのフロント構造物を動作させるために必要なエネルギーを算出できることを示した。さらに、実際の熟練オペータによる掘削作業を再現し、結果を実測値と比較することで連成シミュレーションモデルの妥当性が確認できた。さらに、前述の土壌解析モデルと組み合わせることで、ショベルの機体と土壌の連成解析を実施し、土壌からの掘削反力に対するシリンダ発生力の影響を評価できることを示した。さらに、掘削量の評価により、油圧ショベルによる掘削の生産性の評価をシミュレーションで実施できることを示した。

第4章では典型的な制御方策の一つである軌道追従制御のための掘削軌道生成について示した。掘削量および掘削に必要なエネルギーは掘削軌道の形状に依存する。生産性を高めるためには、適切なバケット軌道で掘削を行う必要がある。そこで、4つの幾何学パラメータによって軌道を生成する手法を提案し、この手法により生成した軌道を用いて掘削シミュレーションを実施することで、掘削軌道の生産性を評価し生産性の高い最適掘削軌道を特定した。この軌道は熟練オペータによる掘削と比較して掘削エネルギーが小さくなることを示した。また、土壌粒子の特性を部分的に変化させ、土質が変化した場合の生産性への影響をシミュレーションにより評価した。これにより土質が変化した場合に対する生成した軌道の生産性のロバスト性についても評価した。その結果、生成した軌道は掘削を行う土壌の特性が部分的に変化した場合でも、熟練者の掘削軌道と同様の掘削エネルギーの変化があり、熟練者の掘削より低い掘削エネルギーで掘削できることに変わりがなかった。

第5章では予め生成した掘削軌道を用いない自動掘削の方策について示した。掘削作業時の土質および地面形状は時々刻々と変化し、上述の軌道追従制御による掘削によって必ずしも高い生産性を実現できるわけではない。そのため、熟練作業者が行う操作を取り入れた自動掘削アルゴリズムを提案し、それを示した。熟練者は掘削抵抗が過大にならないようにバケットを操作しており、本アルゴリズムにおいても掘削抵抗の増加を抑制するようにバケット動作を行う。はじめに、掘削試験機により実験を実施することで、掘削アルゴリズムの有効性を実験的に証明した。その結果、提案した掘削アルゴリズムによって掘削抵抗の増加を抑制できた。さらにシミュレーションによって詳細な解析を行った結果、バケットの姿勢と掘削エネルギーの関係が明らかとなった。これより、油圧ショベルの運動学を考慮した掘削アルゴリズムを構築した。また、バケット

動作を実現するためのシリンダ速度の算出を行う逆運動学について示した。第3章に示した土壌モデルと機体モデルの連成シミュレーションを実施し、掘削アルゴリズムの有効性を確認した。提案した自動掘削リズムで掘削面の傾きが変化した場合でも、バケット容積を超える土を掘削できることがシミュレーションによって確認でき、掘削アルゴリズムの有効性であることを示した。

第6章において本研究で得られた知見をまとめた。

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、油圧ショベルの自動化のための方策を確立した。従来の掘削軌道に追従する方式の自動化手法において、生産性の向上するために最適な掘削軌道を生成した。また、軌道を用いない自動化の方策として熟練作業者の行う動作を取り入れた掘削手法を提案し、その有効性を証明した。