

学位論文題名

ホイールローダによる鉱石堆積物のすくい取り

作業計画に関する研究

学位論文内容の要旨

本研究の目的は、露天掘鉱山においてホイールローダ（以下、ローダと略記）とダンプトラックの組み合わせによる鉱石積み込み運搬作業を自律的に行うシステム開発の中で、ローダを対象とした作業計画の基本的方式を開発することである。

作業自動化の観点から見た場合、鉱山の作業環境は作業の進展に伴って形状が変化する「不定形重量物環境」であり、自動作業システムは環境に応じて動作を決定することのできる「知能システム」であることが要求される。開発に当たっては、知能システムの構成として「モデルベースシステム」を想定した。すなわち、作業システム内部に作業場の形状や作業対象物の配置などの幾何形状情報を集積した作業環境モデルを与え、それらの情報を処理することによってシステムの行動が決定される。この開発は作業計画作成とその実行という2つの段階に分かれるのが特徴であり、本研究はその第1段階である作業計画の作成に関するものである。

作業計画は、作業レベルの指定から作業機器の動作レベルの指定への変換であり、与えられた初期状態から望ましい最終状態に到達するための作業機器の動作目標値系列を作成することである。実際のすくい取り作業では、堆積物の量に比較してバケット容量は小さいので、すべての堆積物をすくい取るためにはローダは何回かのすくい取りを繰り返す。したがって、作業計画では、堆積の初期状態から望ましい最終状態までに全ての堆積物がすくい取られ、平滑な下盤が露出している状態に到るための連続したすくい取り動作系列の作成が目標となる。

本研究では、まず、作業計画に必要な作業環境モデルおよびローダの動作モデルを作成した。ついで、それらのモデルを用い、堆積の形状に基づいてすくい取り位置及び方向を決定する方法を開発した。この方法により、与えられた堆積の初期状態から望ましい最終状態に到る連続したすくい取り作業の動作系列を構成することができた。構成された作業計画は、鉱石堆積物をすくい取るために繰り返されるローダによるすくい取り動作の列として表現された。

本論文は7章から構成されている。以下、各章の概略を示す。

第1章は、序論であり、本研究の背景と関連する研究の概観、本研究の目的および論文の構成について述べた。

第2章では、作業場と作業対象物である鉱石堆積の形状と挙動を表現する堆積物モデルについて説明した。堆積の形状を表現する際、個別の鉱石に着目したモデル化は事実上不可能なので、作業上に区画を設定し各区画での堆積高さを柱状要素高さによって表現する

柱状要素モデルを作成した。また、このモデルでは鉱石のすくい取りやそれに伴う崩落等による堆積形状の変化や挙動は柱状要素間の高さ単位の移動によって表現した。また、比較的簡単な構造でありながら形状や挙動を十分な精度で表現できることを小規模模型実験によって確認した。

第3章では、計測結果から堆積物モデルを作成する方法について説明した。実際の堆積に対する柱状要素モデルを得るため、光投影法による堆積の3次元形状計測を行い、その結果から柱状要素モデルを作成した。光投影法では死角等の未計測領域の存在が避けられないが、計測領域の形状から未計測領域の形状を推定することにより、すくい取り作業計画の判定情報である堆積の裾野形状を推定する方法を開発した。

第4章では、ローダの主要な機能であるバケット操作目標の軌道構成に必要なバケット経路モデルについて述べた。実機によるすくい取り動作計測結果と運動学的解析に基づき、バケット先端経路が3つの直線区間から構成されるバケット経路モデルを作成した。この経路モデルは、堆積斜面の傾斜やバケット容量等のパラメータを設定することにより、堆積形状に応じた適切なバケット経路を構成することができる。

第5章では、ローダがすくい取り位置とダンプへの積み込み位置との間を往復する走行計画のための走行経路モデルであるVシェープ経路モデルについて説明した。ローダの走行系機構の解析に基づき、経路要素として直線とクロソイド曲線を組み合わせて経路を形成するモデルを作成した。始点と終点におけるローダの位置と方向を与えると、経路要素によって始点と終点の間を結ぶVシェープ走行経路を形成することができる。また、形成された経路上を走行するための速度目標値の決定方法を示した。

第6章では、上述の堆積物モデルとローダの動作モデルであるバケット経路モデルおよび走行経路モデルを用いて堆積全体をすくい取るための連続したすくい取り系列を構成する方法について述べた。すくい取り位置と方向が与えられれば、これらの動作モデルによってバケット経路と走行経路が構成されるが、連続したすくい取り作業を達成するためには、柱状要素モデルで表現された堆積形状に基づいてすくい取り位置と方向を決定する必要がある。すくい取り方向は、堆積斜面に正対する方向でのすくい取りを行うよう、バケットに発生するすくい取り荷重による垂直軸回りモーメントが最小となる方向とした。また、すくい取り位置の決定は、まず堆積の裾野を構成する点をすくい取り開始位置の候補点とし、それらの中から前回のすくい取り位置と隣接する点で、かつ、すくい取り後の堆積周辺長が最短となる点を選択する方法を採用した。この結果、与えられた堆積の初期状態から望ましい最終状態である、全ての堆積物がすくい取られ平滑な下盤が露出している状態に到るための連続したすくい取り動作系列を構成することに成功した。

第7章は結論であり、本研究の成果のまとめについて述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 中 島 巖
副 査 教 授 恒 川 昌 美
副 査 教 授 嘉 数 侑 昇
副 査 教 授 鷗 飼 隆 好

学位論文題名

ホイールローダによる鉱石堆積物のすくい取り 作業計画に関する研究

本研究の目的は、露天掘鉱山においてホイールローダ（以下、ローダと略記）とダンプトラックの組み合わせによる鉱石積み込み運搬作業を自律的に行うシステム開発の中で、ローダを対象とした作業計画の基本的方式を開発することである。

作業自動化の観点から見た場合、鉱山の作業環境は作業の進展に伴って形状が変化する「不定形重量物環境」であり、自動作業システムは環境に応じて動作を決定することのできる「知能システム」であることが要求される。開発に当たっては、知能システムの構成として「モデルベースシステム」を想定した。すなわち、作業システム内部に作業場の形状や作業対象物の配置などの幾何形状情報を集積した作業環境モデルを与え、それらの情報を処理することによってシステムの行動が決定される。この開発は作業計画作成とその実行という2つの段階に分かれるのが特徴であり、本研究はその第1段階である作業計画の作成に関するものである。

作業計画は、作業レベルの指定から作業機器の動作レベルの指定への変換であり、与えられた初期状態から望ましい最終状態に到達するための作業機器の動作目標値系列を作成することである。実際のすくい取り作業では、堆積物の量に比較してバケット容量は小さいので、すべての堆積物をすくい取るためにはローダは何回かのすくい取りを繰り返す。したがって、作業計画では、堆積の初期状態から望ましい最終状態までに全ての堆積物がすくい取られ、平滑な下盤が露出している状態に到るための連続したすくい取り動作系列の作成が目標となる。

本研究では、まず、作業計画に必要な作業環境モデルおよびローダの動作モデルを作成した。ついで、それらのモデルを用い、堆積の形状に基づいてすくい取り位置及び方向を決定する方法を開発した。この方法により、与えられた堆積の初期状態から望ましい最終状態に到る連続したすくい取り作業の動作系列を構成することに成功している。構成された作業計画は、鉱石堆積物をすくい取るために繰り返されるローダによるすくい取り動作の列として与えている。

本論文は7章から構成されている。以下、各章の概略を示す。

第1章は、序論であり、本研究の背景と関連する研究の概観、本研究の目的および論文の構成について述べている。

第2章では、作業場と作業対象物である鉱石堆積の形状と挙動を表現する堆積物モデルについて説明している。堆積の形状を表現する際、個別の鉱石に着目したモデル化は事実上不可能なので、作業上に区画を設定し各区画での堆積高さを柱状要素高さによって表現する柱状要素モデルを作成した。また、このモデルでは鉱石のすくい取りやそれに伴う崩落等による堆積形状の変化や挙動は柱状要素間の高さ単位の移動によって表現した。また、比較的簡単な構造でありながら形状や挙動を十分な精度で表現できることを小規模模型実験によって確認している。

第3章では、計測結果から堆積物モデルを作成する方法について説明している。実際の堆積に対する柱状要素モデルを得るため、光投影法による堆積の3次元形状計測を行い、その結果から柱状要素モデルを作成した。光投影法では死角等の未計測領域の存在が避けられないが、計測領域の形状から未計測領域の形状を推定することにより、すくい取り作業計画の判定情報である堆積の裾野形状を推定する方法を開発している。

第4章では、ローダの主要な機能であるバケット操作目標の軌道構成に必要なバケット経路モデルについて述べている。実機によるすくい取り動作計測結果と運動学的解析に基づき、バケット先端経路が3つの直線区間から構成されるバケット経路モデルを作成した。この経路モデルは、堆積斜面の傾斜やバケット容量等のパラメータを設定することにより、堆積形状に応じた適切なバケット経路を構成することに成功している。

第5章では、ローダがすくい取り位置とダンプへの積み込み位置との間を往復する走行計画のための走行経路モデルであるVシェープ経路モデルについて説明している。ローダの走行系機構の解析に基づき、経路要素として直線とクロソイド曲線を組み合わせて経路を形成するモデルを作成した。始点と終点におけるローダの位置と方向を与えることによって、経路要素によって始点と終点の間を結ぶVシェープ走行経路を形成している。また、形成された経路上を走行するための速度目標値の決定方法を示している。

第6章では、上述の堆積物モデルとローダの動作モデルであるバケット経路モデルおよび走行経路モデルを用いて堆積全体をすくい取るための連続したすくい取り系列を構成する方法について述べている。すくい取り位置と方向が与えられれば、これらの動作モデルによってバケット経路と走行経路が構成されるが、連続したすくい取り作業を達成するためには、柱状要素モデルで表現された堆積形状に基づいてすくい取り位置と方向を決定する必要がある。すくい取り方向は、堆積斜面に正対する方向でのすくい取りを行うよう、バケットに発生するすくい取り荷重による垂直軸回りモーメントが最小となる方向とした。また、すくい取り位置の決定は、まず堆積の裾野を構成する点をすくい取り開始位置の候補点とし、それらの中から前回のすくい取り位置と隣接する点で、かつ、すくい取り後の堆積周辺長が最短となる点を選択する方法を採用した。この結果、与えられた堆積の初期状態から望ましい最終状態である、全ての堆積物がすくい取られ平滑な下盤が露出している状態に到るための連続したすくい取り動作系列を構成することに成功している。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果と知見を総括し、鉱石積み込み作業の自動化計画の問題点を示している。

これを要するに、著者は、鉱石運搬作業の無人化を目的に、鉱石堆積物のすくい取り作業計画を研究し、ホイールローダによる自動すくい取りシステムの開発に成功しており、資源開発工学の発展に寄与すること大である。よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。