

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：11101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K18046

研究課題名（和文）積み降ろし点と掬いとり点及び走行経路の同時最適化によるホイールローダの作業連携

研究課題名（英文）Work cooperation with wheel loader through simultaneous optimization of loading and unloading points, scooping points, and travel routes

研究代表者

竹囲 年延 (Takei, Toshinobu)

弘前大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60517712

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究により、土砂の掬い取り点、ホイールローダの走行経路（その切り返し点を含む）、そして、その土砂を積み下ろすトラックの位置、をホイールローダの走行距離を最適にするという観点から、同時に決定することができるようになった。また、本研究で提案した手法は静的な障害物を回避するための条件を簡単に考慮することができる。

加えて、全体の掬い取り最適化の問題を部分的な最適化問題として最適化し、その部分的な最適化問題の解の組み合わせと、それを強化学習の手法を適用することにより、土砂全体の掬い取りという膨大な組み合わせが存在する解に対して、最適な経路を算出することができるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでは2点間のノードの経路を最適にする手法や、それら複数のノードの場所と距離は事前に決まっている中で、全体を最適化する手法（巡回セールスマン問題等）は多く提案されていた。一方で、本研究によって、全ての土砂を掬いとるという大域的な最適化問題を解決するために、複数のノードに相当する、積み下ろし点や切り返し点、そして、トラックの位置・姿勢の決定を、作業プロセスの中で最適化し、また、ノード間の距離も同時に最適化して算出する方法を開発した。これにより、作業によって対象が変化する場合についても、全ての作業が終わるまでの全工程に対して最適化することができる解法とその有効性が示された。

研究成果の概要（英文）：Through this research, scooping points of the sediment, traveling routes of the wheel loader (including its turning points), and the positions of the truck for unloading the sediment are determined simultaneously from the viewpoint of optimizing the traveling distance of the wheel loader. In addition, by optimizing the problem scooping whole sediment as a partial optimization problem and applying the combination of solutions of the partial optimization problem and the method of reinforcement learning for it, we are possible to decide the optimum routes for the problems with many solutions.

研究分野：ロボティクス

キーワード：経路計画

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土木建設機械の自動化は日本において重要な課題となっている。資源採掘や震災復興支援のために、土木建設作業の必要性は、今後、特に高まる中、少子高齢化の日本では人材不足が心配される。そして、世界的に土木建築作業は自動化の流れにある。効率的な自動作業システムにより、鉱山資源の採掘において、大きな経済的効果をもたらす。

ホイールローダは、自律的な作業が実用化された例は世界的に見ても殆ど無い。この掬う・移動・積む作業(図1)は、土木・建設分野の基本的な作業であるため、自動化の需要は高いが、作業対象物と環境の形状が複雑で変化するため技術的課題が多く難しい。

ホイールローダによる掬う・移動・降ろすの複数回の繰り返し作業の自動化は、これまでの研究において実現できていない。それは、上記の一連の作業の自動においては、掬い取り点と積み降ろし点、及び、その移動経路が全て事前に固定されており、作業の進展に伴い土砂の形状や作業環境が変化していくことに、対応できないためである。

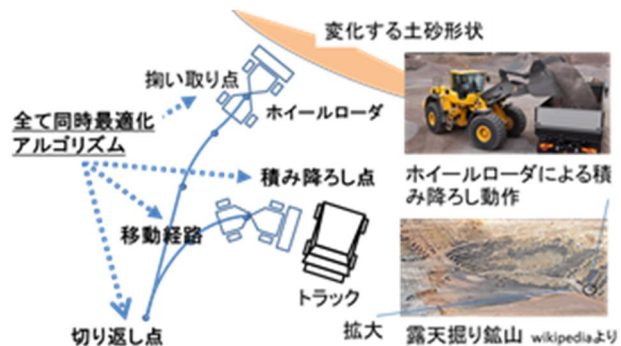


図1. 露天掘り鉱山におけるホイールローダの掬い取り・移動・積み下ろし作業軌跡。

2. 研究の目的

この問題を解決するために、土砂形状によって生じる複数の掬い取り点の変化に応じて、移動経路を短くする積み降ろし点と、その2点間を結ぶ複数の経路を、同時に決定する最適化アルゴリズムを提案している。掬い取り点を自動的に決定する研究、及び、走行経路やバケット動作の制御は、同プロジェクトでも幾つか報告されているが、これらの作業を繋げる積み降ろし点の最適化に関する研究は殆ど報告されていない。本研究は、掬いとり点と積み降ろし点そして経路までも同時に最適化を計るため、新規性が高いと考える。

本研究の最終目的は、ホイールローダ(図1右上)による土砂の掬い取り・移動・積み降ろしの繰り返し作業の自動化システムの構築である。その中で、土砂山の形状変化に対応しながら、それぞれの作業をどのように適切に連携させるかが課題である。そこで、移動距離を短くするという観点から、作業の進展に伴い変化する最適な複数の掬い取り位置・姿勢と、積み降ろし位置・姿勢を決定し、同時に、その間の複数の最適な移動経路も生成するアルゴリズムを提案する(図1)。

本研究期間内に大きく分けて次の3つを明らかにする。

- (1) 前述のアルゴリズムに、次の拘束条件を考慮する方法を明らかにする。その条件とは、複数回の掬い取り動作に対して、トラックの荷台が満杯になるまで積み降ろし動作を行う。また、トラックの形状や土砂、及び、環境の形状を反映させ、環境に走行経路が衝突しない。
- (2) 計算機シミュレーションによる土砂形状の変化予測を、前述のアルゴリズムの中で行う。そして、実際に土砂形状をレーザでも測定しながら変化予測を修正していく方法を提案する。
- (3) 掬いとり点も同時に決定する方法を提案する。基本的には、このスコアマップを用いた掬いとり点の全探索となるため、計算時間を実際の作業時間に収まるために、膨大な計算量を減らす方法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 複数の掬い取り点に対応した積み降ろし点の決定と種々の拘束条件の考慮

複数の掬い取り点に対する積み降ろし点ホイールローダは、同じ位置・姿勢にあるトラックに対して、トラックの荷台が満杯になるまで積み降ろし動作を複数回行う。これには、複数の積み降ろし点に対する“合算”「スコアマップ」を生成することで対応する。複数の掬い取り点(位置・姿勢)に、“基本”「スコアマップ」を移動し重ね合わせ、重なる各ボクセルの距離のスコア値を合算し、新しいスコアマップを生成する。すると、この“合算”「スコアマップ」は、各ボクセルから、全ての掬い取り点までの、それぞれの距離を合算した値を各ボクセルにもつ(図2)。この中から最小値のボクセルを探索すれば、複数の積み降ろし点に対する最適な積み降ろし点と経路が求まる。

トラックや土砂・環境への衝突回避

生成した経路を走行中のホイールローダと、待機しているトラック、また、土砂山が衝突するのを回避する必要がある。これには、基本”及び“合算”スコアマップから、衝突が起きる経路を含む終点の位置・姿勢のボクセルを、取り除くことによって対処する。衝突のチェック判定は、経路と障害物の形状を用いて幾何学的に衝突を判断する。もし、衝突がおきれば、そのボクセルは、スコアを持たない。

(2) 計算機シミュレーションによる土砂形状の変化予測の適用と実測データの反映

本研究の経路計画アルゴリズムに、土砂形状の変化予測を適用するためには、掬いとりの後の安定した土砂領域の形状が分かり、かつ、計算処理時間が短いことが重要である。そこで、これまでに提案されている柱状要素モデルを用いる。この方法は、土砂の大きさに対して、様々な形状から変化した後の土砂の三次元形状がボクセルで表現され、計算時間も短いため、本アルゴリズムに適している。また、この手法の提案者が同じ研究グループにいるため、細かな技術連携が可能である。一方で、詳細な土砂のシミュレーションを行うためにDEMによるシミュレーションも行う。

実際の土砂の形状変化とシミュレーションによる形状予測の差は、ステレオカメラやレーザーレンジセンサを用いて、実際の土砂形状を計測し、定期的にシミュレーションに反映させれば、両者に生じる形状の誤差はリセットされ積算されずに、シミュレーション予測が有効である。

(3) 複数の掬いとりの点の決定と積み降ろし点及び経路の同時決定を利用した、土砂の塊全てを掬い取るための大域的な動作経路の最適化手法を提案する。

基本的には、土砂形状の輪郭に沿って、位置と姿勢について、全探索をすればよい。しかし、くみ合わせの数は沢山あるため計算処理時間が膨大になる問題がある。そこで、トラックの荷台が1回満杯になるまでの複数の掬いとりの点の決定と積み降ろし点及び経路については、上記に提案した(1)の手法を適用する。そして、(1)の手法を1セットとして、それを繰り返し適用することで、土砂全体を掬い取るのに必要な経路を最適化する、という問題設定にする。それでも、1セットを適用する候補は、単純な土砂の輪郭形状について多くの選択肢があるため、土砂の裾野が大きくなる場合や、形状が複雑になる場合は探索時間が増大する。そこで、強化学習を利用して最適化しつつ、計算時間を減らす。

4. 研究成果

上記の研究の(1) - (3)の目標に対する成果を記す。

(1) 前述のアルゴリズムに、次の拘束条件を考慮する方法を明らかにする。

上記に提案した「スコアマップ」に条件を付加することで、幾つかの条件を考慮しながら、シミュレーション上で最適な経路・掬い取り点・積み下ろしを同時に決定できることを確認した。この成果は下記の文献1にて発表を行った。

(2) 計算機シミュレーションによる土砂形状の変化予測を、前述のアルゴリズムの中で行う。

掬い取る度に土砂の形状が変化する予測シミュレーションを、上記の最適化アルゴリズムに組み込むことができた。これらの成果は下記の文献1にて発表を行った。また、詳細な土砂のシミュレーションを行うためにDEMによるシミュレーションも行った。これらの成果は、下記の文献2にて発表を行った。

(3) 掬いとりの点も同時に決定する方法を提案する。

複数の掬いとりの点の決定と積み降ろし点及び経路の同時決定を利用した、土砂の塊全てを掬い取るための大域的な動作経路の最適化手法を提案した。囲碁や将棋で用いられる盤の画像を入力とする方法を取り入れ、土砂の形状を画像として入力することで、最適な経路を出力するアルゴリズムを構築し、シミュレーションで有効性を確認した。この成果は、文献3にて発表を行った。

文献1:竹田年延

鉱山作業におけるホイールローダのための掬い取り点と積み下ろし点の決定
日本機械学会ロボティクスメカトロニク講演会 2016th, 2P2-09a5

文献2:天内 流星, 竹田 年延, 今西 悦二郎

土砂の挙動を考慮したホイールローダまき出し作業の解析
Dynamics and Design Conference 2019, 503

文献3:川辺知人, 竹田年延, 今西悦二郎

強化学習によるホイールローダのための全土砂の掬い取り作業経路の準最適化
日本機械学会ロボティクスメカトロニク講演会 2020th, 2A2-A09

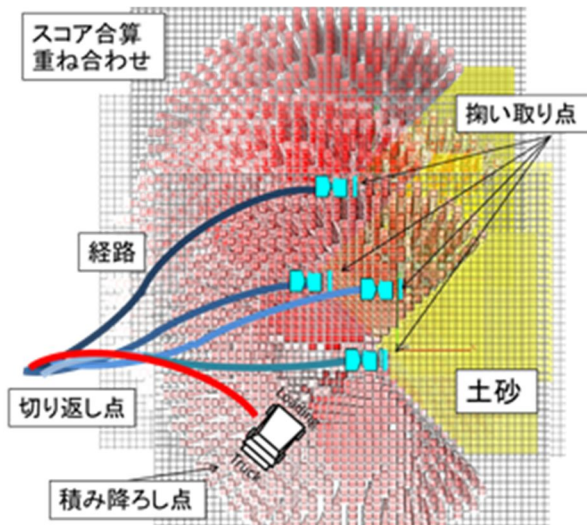


図2.“合算”「スコアマップ」のイメージ図。重なったボクセルのスコアを合算する。この図では4つの“基本”「スコアマップ」を重ね

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 天内 流星, 竹田 年延, 今西 悦二郎
2. 発表標題 土砂の挙動を考慮したホイールローダまき出し作業の解析
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川辺知人, 竹田年延, 今西悦二郎
2. 発表標題 強化学習によるホイールローダのための全土砂の掬い取り作業経路の準最適化
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuga yamauchi, Toshiobu takei, Etsujiro Imanishi
2. 発表標題 Routing instruction for autonomous mobile robot by using Float solution of RTK-GNSS using L1 signal
3. 学会等名 The IEEE International Conference on Industrial Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山内悠雅, 竹田年延
2. 発表標題 ROS を利用した小型除雪機の自律ナビゲーション
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹田年延
2. 発表標題 鉱山作業におけるホイールローダのための掬い取り点と積み下ろし点の決定
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 竹田年延
2. 発表標題 移動ロボット技術の実践例
3. 学会等名 弘前大学 ひろさき産学官連携フォーラム，第24回イブニングフォーラム（招待講演）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 竹田年延
2. 発表標題 自律除雪ロボットについて
3. 学会等名 東北経済産業局 “企業と大学経営者の橋渡しワークショップ”（招待講演）
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----