

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560302

研究課題名(和文)ホイールローダによる堆積土砂形状の制御

研究課題名(英文)Shape control of a rock heap by wheel loader

研究代表者

大隅 久(Osumi, Hisashi)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：00203779

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ホイールローダにより土砂をダンプトラックの荷台に積み込む際の堆積土砂山形状を、ホイールローダの制御により所望の形状とするためのバケット制御手法を開発した。まず、バケットから落下する土砂のバケット内挙動を画像計測により解析し、崩落が間欠的に発生すること、及び、その崩落の発生メカニズムを明らかにした。一方、土砂山形状をシミュレーションするために柱状要素モデルを適用し、これに崩落土砂の特性を組み込むことで、バケットから地上に落下した土砂の形作る土砂山形状のシミュレータを開発した。これを基に、土砂山を所望の形状とするためのバケット制御方法を提案し、その有効性をミニチュアの実験機により検証した。

研究成果の概要(英文)：A method of making desired rock sediment shapes on a truck bed is developed by designing target motion trajectories of the bucket of a wheel loader. As a first step the behavior of rocks in the bucket of a wheel loader during the tilting motion of the bucket was observed by a video camera. From the obtained image, it was revealed that the rocks on the slope collapse at intervals, and two values of repose angle exist. From the result, physical mechanism of forming the slope angles in the bucket is analyzed. On the other hand, the behavior of fallen rocks on the ground is simulated by using column element model and the stable shape of the rock pile is obtained. By combining the rock behaviors in the bucket and the column element model, an algorithm for designing the bucket motion to make desired rock sediment shapes is proposed, and its effectiveness is verified by fundamental experiments.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ホイールローダ 安息角 堆積土砂形状 積み込み

1. 研究開始当初の背景

建設機械のロボット化に向けた取り組みとして、無人化施工における遠隔操縦や、無人ダンプトラックの自律走行システムが実用化されている。ただし、土砂を直接扱う建設機械の自律運転は未だ実現されていない。その理由は、ハンドリング対象となる土砂の適切なモデルが無いからである。例えば、バックホーやホイールローダといった土砂を扱う作業では、これら機械を制御する際の土砂からの反力の推定や、あるいは土砂をダンプトラックに積み込んだ際の土砂山形状の予測ができないと、機械を適切に動かすことができない。申請者らはこれまで、ホイールローダによる土砂のダンプトラックへの自律積み込みシステムの開発に取り組んできた。その一連の動作の中で、土砂を対象とした、土砂の掬い取り、及び土砂のトラック荷台への積み込みのプロセスには、それぞれに適した土砂モデルが必要となる。土砂反力モデルの研究はこれまでも数例行われているが、積み込みプロセスを対象としたモデルに関する研究は、申請者らの基礎的な先行研究があるのみである。この堆積土砂の山の形状を所望の形状にすることのできる技術が確立されれば、土砂山からの土砂のダンプトラックへの積み込みのみならず、その適用対象は数多い。

2. 研究の目的

本研究は、建設機械の一種であるホイールローダにより土砂をダンプトラックに積み込む際、積み込まれた堆積土砂を所望の形状とするためのホイールローダの制御法の確立を目的とする。更に、その研究過程において、堆積土砂形状を制御するための粒子群のバケット内モデルを提案すると共に、その粒子群が容器に落下した際の形状を制御するための逆問題の解法を提案する(図1)。この成果により、建設における土砂だけでなく、微小粒子群、粉体といった、ハンドリング手法の確立していない物体のマスとしての形状制御に対しても、指針を得ることが期待できる。なお、ここでは積み込みによる堆積形状を横から見た2次元形状のみを対象とし、バケットの両側に広がる部分の形状は対象とはしない。

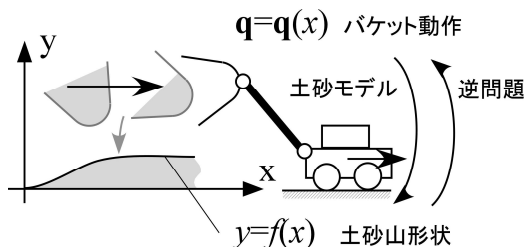


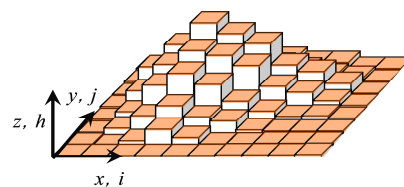
図1 土砂山形状の制御手法

3. 研究の方法

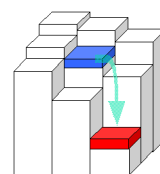
研究は、地面に崩落した土砂が形作る土砂山形状を模擬するシミュレータ、崩落する土砂の動的挙動を計測するためのシステムの構築、計測結果を基にした崩落土砂挙動のモデル化、及び所望の形状を得るためのバケット動作生成法の提案よりなる。なお、動作生成法は解析結果より得られる特性を考慮して提案を行うので、4. 研究成果の部分に詳細を記す。

(1) 土砂山形状のシミュレータ

地面に落下した土砂が形作る土砂山形状のシミュレーションには、先行研究で利用してきた柱状要素モデルを利用した。これは土砂山形状の表現のために、水平面を小さなサイズの正方形メッシュに分割し、それぞれのメッシュに高さを持たせることで3次元形状を表現するモデルである(図2(a))。また、それぞれのメッシュの土砂要素が、隣り合うメッシュとの高さの差を計算し、これが土砂の安息角による差よりも大きければ、メッシュ間で高い方から低い方に要素を移動させる、という操作を繰り返し、全ての隣り合う要素間の高さの差が安息角以下となるようにするもので、得られた最終の形状が崩落で得られる土砂山形状になる、というものである。このモデルを積み込みに適用するため、バケット内土砂、及び地上に落下した土砂のそれぞれを柱状要素で表現する。バケット内土砂の要素に関しては、まず適当に定められた最小単位のバケットの回転に対して落下する要素を求める(図3参照)。これらの要素を用いて、地上に落下した土砂の柱状要素の初期状態を生成する。その際、バケット斜面上部にあった要素はバケット下端から落下する際の水平方向速度成分が大きくなるので、バケット先端から離れた位置に落下する。一方、もともと斜面下部にあった要素はバケット下端の近くに落下することから、これらを考慮して、地上部の柱状要素モデルの初期状態を設定する。そして、次に崩落挙動のシミュレーションを行うことで、崩落土砂の堆積形状を得る。



(a) 土砂山形状の表現



隣接する要素間の高さの差が安息角より大きい場合に1要素を移動

(b)要素移動の様子

図2 柱状要素モデル

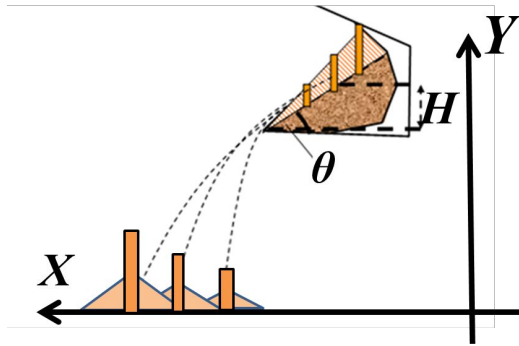


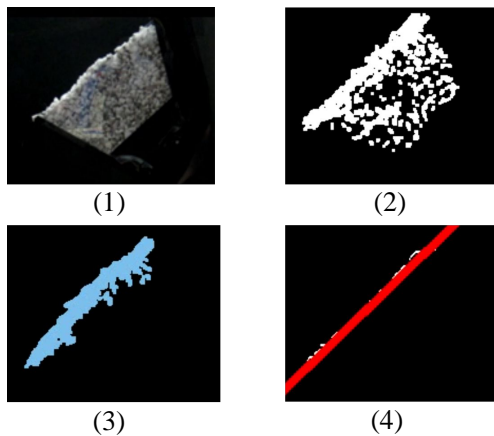
図3 崩落土砂挙動のモデル化の概要

(2) 崩落土砂挙動計測システムの開発

崩落土砂挙動を調べるために、高速度カメラを利用し、バケット内から崩落する土砂の様子を、画像処理を利用して計測した。崩落の様子を観察するため、バケット側面をアクリルの板とし、バケットを傾けながらバケット内の土砂の傾斜角度をリアルタイムで計測し続けることができる。その様子を図4に示す。まず(1)バケット側面の画像を取得し、(2)取得画像を二値化し、次に(3)最大領域を取り出すことで斜面近傍の要素を抽出する。最後に、(4)取り出した点群の主成分分析により、斜面を割り出している。



(a) 崩落実験の様子



(b) 画像処理による傾斜角計測

図4 バケット内土砂崩落時の傾斜角計測

4. 研究成果

(1) 崩落土砂挙動の解析

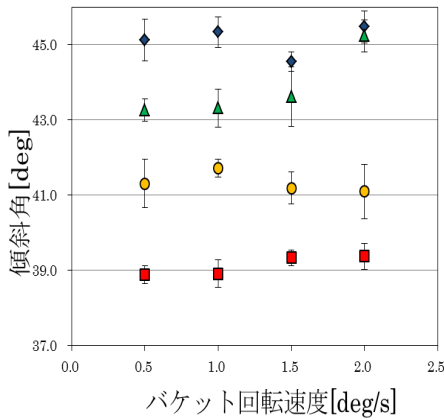
土砂の満載されたホイールローダを徐々に傾けながら、バケット内部からの土砂の崩落挙動を観察すると、崩落が間欠的に発生することがわかる。そこで、崩落が開始する時の傾斜角度(限界安息角)と、崩落が一旦終了する時の傾斜角(停止安息角)を、画像処理を用いて計測した。利用した土砂は粒径が約3~8mmの花崗岩と、粒径が0.15~0.3mmの珪砂で、バケットを等角速度で傾けている。また、バケット内の内力の影響を調べるため、図5のようにバケット側面を外した状態の崩落角度の計測も行った。

まず、花崗岩を利用した場合の結果を図6(a)に示す。横軸はバケット回転速度で、 $0.5^{\circ}/s$ から $2.0^{\circ}/s$ まで4条件で実験を行っている。縦軸は計測された限界安息角、停止安息角で、側面有りの場合と無しの場合の計4つが縦に示されている。なお、それぞれの印は図6中に示してある。結果より、バケット側面のある場合と無い場合では、ある場合の方が限界安息角、停止安息角共に $2^{\circ}$ 程度大きくなっていること、また、側面無しの場合の停止安息角は、花崗岩のもともとの安息角である $38^{\circ}$ に近くなっていることがわかる。理由としては、側面があることにより、バケット内に発生する内力成分が大きくなり、それに伴って土砂間に働く摩擦力も大きくなったことが考えられる。つまり、崩落開始時には静止摩擦の増加が崩落角度の増加に直接影響し、崩落終了時には、斜面を動いている土砂が斜面表面の土砂を巻き込む際の斜面側土砂の動きやすさに影響を及ぼしているものと考えられる。一方、バケット回転速度変化については、どちらの角にも系統だった変化は見られず、粘性項は小さいと判断できる。なお、バケット回転速度 $2^{\circ}/s$ における側面無しの場合の限界安息角のみ、大きく突出している。この理由は、バケットへの花崗岩の詰め込み方によるものとも思われるが、更なる考察が必要である。

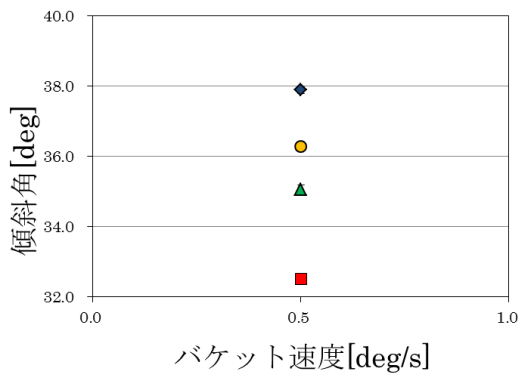
図6(b)の珪砂の結果は、バケット回転角速度 $0.5^{\circ}$ の場合のものである。花崗岩の結果と同様の傾向を示しているが、側面による影響がより大きく出ていることがわかる。また、側面無しの場合の停止安息角は珪砂の安息角である $32^{\circ}$ に近い。また、珪砂のばらつきは非常に小さいこともわかる。



図5 側面条件を変えた崩落実験



(a) 花崗岩の実験結果



(b) 珪砂の実験結果



図6 土砂傾斜角度の計測結果

(2) 落下土砂の挙動解析

バケットから離れた粒子の自由落下の挙動を調べるため、計測システムで撮影された動画より、バケット前後方向(図7)の落下土砂の分布領域を調べた。結果からは、崩落土砂が斜面上を落下する際に摩擦で失われる運動エネルギーが理論値よりも若干大きいことがわかったが、それによる影響は小さく無視できると判断した。

(3) 堆積土砂形状の生成

これまでの解析結果より、崩落土砂により所望の堆積形状を生成する手法を提案する。バケット内土砂は間欠的に崩落を繰り返すため、一定量を崩落させ続けるという方法を実際の建設機械で実現することは困難と言え、間欠的な崩落を前提とした形状生成手法が実用的である。また、崩落開始角度にはある程度のばらつきがあるのに対して、崩落終了の角度はばらつきが小さいという特性がわかっている。これより、所望の量だけ土砂

を落としたければ、その土砂量と現在の斜面角度から目標の角度を求め(図8)、崩落終了時にその目標角度が丁度停止安息角と一致するよう、崩落開始から終了の間にバケットを回転させれば良い。ただしその際、目標とする落下土砂量が限界安息角と停止安息角で囲まれた土砂量よりも小さいと、非常に短時間でバケット回転方向を変える必要があり、ホイールロードの応答性を考えるとリアルタイムでの制御が困難と思われる。この点は所望の形状を生成する過程で考慮する必要がある。同様に、崩落途中に斜面が停止安息角になり一旦崩落が止まってしまうと、目標の停止安息角から上の土砂を全て崩落させることができなくなる可能性が生じるため、短時間での目標停止安息角の実現が必要となる。

以上より、まずは基礎実験として、目標とする崩落土砂のみを落下させることができるかを確認した。実験結果を表1に示す。この結果からは200gの場合で約5%のかたより誤差と、10%ほどのバラつきが見られるが、ほぼ目標量の土砂を崩落させることができていることが確認できる。この誤差はホイールロードの姿勢誤差、花崗岩サイズの粒径のばらつきなどを考慮すると十分である。

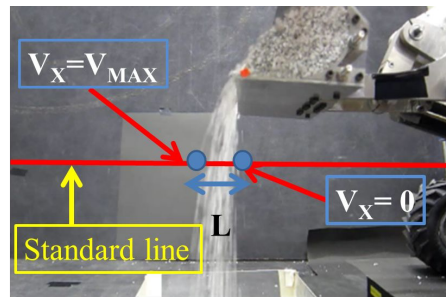


図7 水平方向の崩落速度の計測

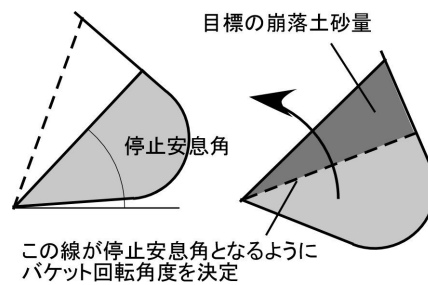


図8 目標土砂量を崩落させる方法

表1 目標土砂量と崩落土砂量

目標土砂量	崩落土砂量	誤差
200 g	188.3 ± 18.8 g	-11.7 g
400 g	389.6 ± 18.5 g	-10.4 g
600 g	613.6 ± 13.5 g	13.6 g

次に目標とする土砂山形状を生成するためのアルゴリズムを提案する。なお、目標とする形状の傾斜は物理的に安息角以下であることを前提とする。これまで示したように、形状の生成には、ある一定量ずつを落下させることと、土砂の跳ね返り等の影響ができるだけ小さくなるような工夫が必要である。図9は目標とする形状を、堆積土砂で実現するための方法である。図は左から右に目標の形状を構成していく様子を示している。既に構成された左側の土砂に一定量の土砂をかぶせる形で次々に重ね合わせていく。その際、目標形状と次のかぶせた部分の土砂のピークが同じとなるよう土砂量を予め計算しておく。柱状要素モデルのアルゴリズムに従えば、これだけで図のような目標関数への追従が実現できる。ただし、表面には凹凸ができるので、これを小さくするには目標崩落点間の距離もできるだけ小さくする必要がある。この下限は停止安息角と限界安息角で囲まれた部分の土砂量となる。図中で一番右の土砂追加は崩落土砂量を少なくした例を示している。

#### (4) 土砂形状生成実験

このアルゴリズムの有効性を調べるため、土砂山の上面が平らな形状を実現するための実験を行った。まず、一番左に1kgの土砂で三角形形状を生成する。次に、200gの土砂を4回、2cm間隔で堆積させていく。

実験結果を図11、表2に示す。図11より上面はほぼ平らな形状となっている。一方、上面の幅は目標の80mmに対して95mmと15mmほど大きな値となっている。これは、花崗岩の粒径が3~8mm程度とばらつきがあること、計測の際の目視誤差等の影響と思われる、精度としては妥当と判断できる。

#### (5) 研究成果のまとめ

本研究課題の成果は下記の通りである。

- ・バケツをゆっくり回転させた場合にバツトから崩落する土砂挙動は間欠的に発生し、2種類の安息角の間で発生する。
- ・2つの安息角はバケツ内の内力の影響を受ける。ただし、間欠動作の見られる範囲のバケツ回転速度においては、回転速度による影響は小さい。
- ・間欠的な崩落を前提とし、所望の堆積土砂山形状を実現するための土砂崩落方法のアルゴリズムを提案し、その有効性を検証した。

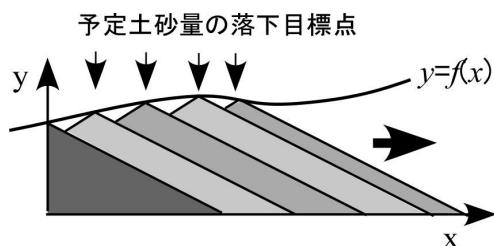


図9 所望の形状を得るための方法

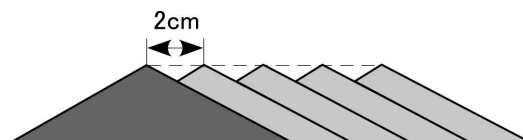


図10 目標の土砂山形状と崩落手順



図11 実験結果

表2 理論値と実験値の比較

	理論値	実験値
高さ [mm]	49.1	45.6
幅 [mm]	205.7	213.0
上面幅 [mm]	80.0	95.0

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計3件)

大隅久, ホイールローダの自動化に向けたバケツ内土砂の挙動解析, 第14回建設ロボットシンポジウム, 2014年8月28日(東京都・文京区).

大隅久, ホイールローダによる積み込み作業の自律化に向けたバケツ内土砂の挙動解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会 ROBOMECH2014, 2014年5月26日(富山県・富山市).

大隅久, ホイールローダによる積み込み作業における堆積土砂形状のシミュレーション, 第13回建設ロボットシンポジウム, 2012年9月11日(東京都・新宿区).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大隅 久 (OSUMI, Hisashi)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号: 00203779