

論 文

画像と力覚を用いた碎石堆積量の推定と堆積物の
3次元形状に基づくすくい取り作業計画

高橋 弘,* 山崎 勝幸**

Estimation of The Amount of Rock Pile by Using The Image Processing and Force
Sensors and Task Planning of Shoveling based on The Three Dimensional Shape of Rock Pile

by

Hiroshi TAKAHASHI† and Katsuyuki YAMAZAKI††

Abstract

In the previous paper, we proposed the method to recognize the existence of the rock pile by use of the image and laser slit light. In this study, we propose the method to estimate the amount of the rock pile by use of the image and force sensors. In order to estimate the amount of the rock pile, three dimensional measurement of the rock pile was carried out. Furthermore, in order to detect the contour of the rock pile, the force sensors were used. In this experiment, two strain gauges were used as force sensors.

Several kinds of rock piles were made and the experiments to estimate the amount of the rock pile were conducted. By comparing the estimated values and the actual ones, it was confirmed that the method proposed here works well. Furthermore, the shoveling task was planned based on the three dimensional shape of the rock pile.

Key Words : Image Processing, Force Sensors, Task Planning of Shoveling, Rock Pile

平成9年8月6日受付

* 東北大学大学院工学研究科地球工学専攻
〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉** 東北大学大学院工学研究科資源工学専攻
〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 (現 日本道路公団)† Department of Geoscience and Technology, Graduate
School of Engineering, Tohoku University, Aramaki,
Aoba-ku, Sendai 980-77†† Department of Resources Engineering, Graduate School
of Engineering, Tohoku University, Aramaki, Aoba-ku,
Sendai 980-77

1. はじめに

資源開発の現場、特に地下資源開発の現場では過酷な作業環境からの作業員の解放および安全確保の面から作業ロボットの導入に多くの期待が寄せられている。製造業の分野では既に多くの産業ロボットが導入されているが、上述の現場では作業環境が作業の進展とともに変化することから、これらの現場に導入される作業ロボットは、この作業環境の変化に柔軟に対応できるような機能を具備していることが望ましい。

一般に資源開発現場における採鉱作業は、掘削、土砂・鉱石のすくい取り、積み込みおよび運搬・排出の工程に大別できる。これらの作業において、特にホイールローダあるいはロードホールダンプ（以下、LHDと記す）などの積み込み機械を用いて行う「すくい取り・積み込み工程（以下、すくい取り作業と記す）」および「運搬・排出工程」に関して言えば、LHDの自動走行は視覚センサ²⁾、超音波距離計³⁾、電磁誘導線⁴⁾などを用いることにより既に実用化の域にある。しかし、土砂・鉱石のすくい取り作業は、一部にバケットに作用する抵抗力の検討などの例⁵⁾が見られるものの、ほとんど検討されていないのが現状である。このすくい取り作業の自動化に対して最も大きな障害となっている要因は、破碎堆積物（以下、ずり山と記す）の堆積形状が不定形であり、かつ作業の進展にともなわずり山の堆積状態が常に変化することである。そのためすくい取り作業は、ティーチングプレイバックのような事前に定型化されたすくい取り動作の繰り返しだけでは達成することは困難である⁶⁾。このため、現在のすくい取り作業工程は、熟練オペレータによる作業、あるいは遠隔操作により行われている⁷⁾。しかし、上述したように、これらの現場は作業員にとって過酷であることから、このような環境下における開発機械の無人化およびロボット化の早急な実現が期待されている。

著者らは前報⁸⁾において、レーザースリット光と画像を用いてずり山存在の有無判断および堆積状態の認識手法を提案した。本研究では、次のステップとしてレーザースリット光をスキャンさせることによりずり山を含む周囲の環境の3次元情報を取得し、さらに力覚を組み合わせることによりずり山の堆積量を推定する手法を提案する。さらにずり山の3次元情報を基にバケットの貫入点および貫入方向を決定する手法について考察し、すくい取り作業工程の自動化に資することを目的とする。

2. ずり山の堆積量推定の原理

2.1 ずり山の3次元形状計測

土砂・鉱石をバケットによりすくい取る場合、コンピュータがバケットの移動軌跡を決定し、その軌跡に沿ってバケットが移動するようにアクチュエータである油圧シリンダを制御することになる。決定された軌

跡が不適切で土砂・鉱石が十分にすくい取れない場合には作業効率が極端に悪くなる。すなわち、土砂・鉱石がバケットに十分に取り込まれ、効率の良いすくい取りを自動的に行うためには作業対象物全体の形状および堆積量を推定し、この結果を基にした最適な作業計画を構築することが重要である。

前報では、レーザースリット光が照射された1ライン上の点の3次元情報を取得した。しかし、ずり山全体の情報を取得するには1ラインのみでは不十分である。そこで、図1に示すように、このレーザースリット光をずり山全体に対してスキャンさせ、ずり山全体の3次元情報を取得する。レーザースリット光をスキャンさせて対象物の3次元情報を取得する方法は従来から提案されており⁹⁾、特に新しい手法ではない。しかし、レーザースリット光を用いた3次元情報の取得では、ずり山を含む周囲全体に対して距離計測を行うことになる。従って、ずり山全体の輪郭および堆積量を認識するためには、計測された3次元情報からずり山のみを抽出しなければならない。このずり山の抽出には、ずり山全体をCCDカメラなどで撮影し、その画像を処理して、例えばエッジ検出などにより、ずり山の輪郭を抽出する方法が考えられる。しかし、ずり山などの自然界の対象物に対してエッジ検出により対象物のエッジが連続して得られることは極めて稀である。つまりこの方法でずり山のみを検出するには未解決の問題が多々残されているのが現状である。そこで、本

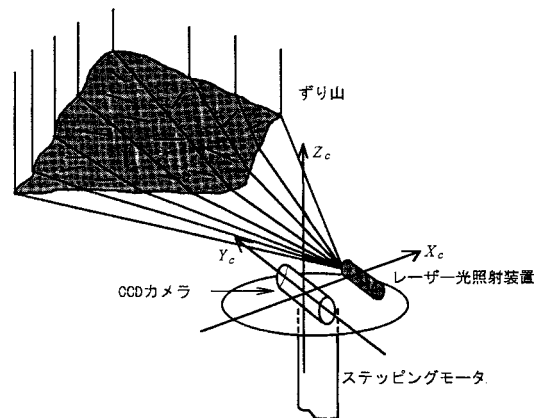


Fig. 1 Schematic diagram of three dimensional shape measurement by using the laser slit light and CCD camera

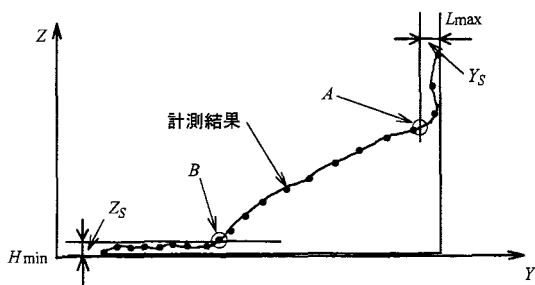


Fig. 2 Determination of the boundary point between Face and Rock Pile and the one between Rock Pile and Floor

研究では、ずり山全体の輪郭および堆積量を認識するために、さらに力覚情報を用いることにする。

ところで、前報で、視覚センサによりサンプリングされた「ずり山を含む画像」では、その堆積パターンは、1) 壁面-ずり山-地面、2) ずり山-地面、3) 壁面-ずり山および4) ずり山のみ、の4パターンの内のいずれかであり、このパターンを認識する手法について述べた。これらの画像の内、全体のずり山の堆積量が推定できるのは1)のパターンの時である。つまりこの画像から壁面とずり山および地面とずり山の境界点を見出さなければならない。

本研究では、壁面とずり山および地面とずり山の境界点の取得を図2のように、それぞれのレーザースリット光のラインにおける距離計測結果から求めるものとする。まず壁面とずり山の境界点であるA点の取得は、Y方向の距離計測結果の最大値である L_{max} に対して、しきい値 Y_s を設定し、このしきい値と距離計測結果との交点をA点とする。

地面とずり山の境界点であるB点に対しても、上述したA点と同様の方法で取得する。すなわち、Z方向の距離計測結果の最小値である H_{min} に対して、しきい値 Z_s を設定し、このしきい値と距離計測結果との交点をB点とする。しかし、このB点周辺はずり山から崩れ落ちた土砂などが散在しているなどの理由からしきい値は環境に依存する度合いが強く、常に一定のしきい値 Z_s を設定することは望ましくない。このB点はずり山の裾野部分の点であり、積み込み機械がずり山をすくい取る際にバケットを貫入させる目標となる点であるため、非常に重要な点であると考えられる。従って、本研究では、このB点の取得に関

し、実際にバケットで裾野近辺を触り、その力覚からずり山と地面との判別を行い、B点を取得する方法を提案する。ただし、多数のラインに対して、この方法によりB点を取得するのは、長時間を要し非効率的であることから、ずり山の中央付近の1ラインを選択し、このラインに対してのみ力覚を用いてしきい値である Z_s を求め、その値を用いてB点を得るとともに、この Z_s の値を他のラインに適用するものとする。

なおしきい値 Y_s については、実際にバケットが壁面の所までは届かないことおよび壁面には凹凸があるものの、破碎された岩石は落下してずり山を形成しており、裾野付近と比べて環境の依存度はさほど大きくないと仮定できることから、一定値を仮定し、試行錯誤により決定することにする。

2.2 力覚情報の適用

本研究では、バケットのアームに歪みゲージを付け、バケットに作用する抵抗力からずり山と地面を判別し、ずり山と地面の境界である裾野の点を認識する。図3に裾野点を認識する際のバケットの動きの模式図を示す。このように手前の地面側からY方向に、ある一定の間隔でバケットを対象物に貫入させて、それぞれの位置で抵抗力を測り、相手が地面かずり山かの判別を行う。本研究では地面と判断された点からずり山と判断された点に推移した時、その2点の中点を裾野点と認識する。すなわち、B点の座標(X_B, Y_B, Z_B)は、次式により得られるものとする。

$$X_B = (X_2 + X_3) / 2 \quad (1)$$

$$Y_B = (Y_2 + Y_3) / 2 \quad (2)$$

$$Z_B = (Z_2 + Z_3) / 2 \quad (3)$$

ここに、(X_2, Y_2, Z_2) および (X_3, Y_3, Z_3) は図3

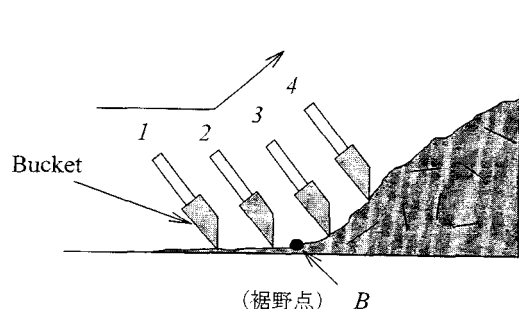


Fig. 3 Schematic diagram of the bucket movement to determine the boundary point between Rock Pile and Floor

の2および3の位置にバケットがある時、バケットの先端がずり山の表面に触れた時の位置である。なお、(3)式で得られる Z_0 が境界点取得におけるしきい値 Z_0 となる。

ずり山と地面の判別は、バケットがずり山と地面のそれぞれへ触れた際にバケットに作用する抵抗力が、ずり山の場合と地面の場合とでは異なることを利用するが、ここで問題となるのは、両者の場合の抵抗力を区別するためのしきい値の設定である。本研究では、このしきい値決定は、実験により試行錯誤的に決定するものとする。

2.3 破碎堆積物の輪郭情報および堆積量推定法

図4にずり山の量を取得する方法の概念図を示した。ずり山の輪郭情報の推定は、それぞれのラインの「壁面とずり山の境界点」および「地面とずり山の境界点」、すなわちA点およびB点を、それぞれ順に直線で結んだものをずり山の輪郭であると近似する(図中の太線)。図4中の○で示した点は、三次元情報として認識している点である。

次にずり山の堆積量の取得は、以下のようにして行う。図4に示すように、それぞれのライン上の計測点において、ある計測点1点の近隣の2点からなる三角形に着目する。この三角形をずり山の表面と近似し、

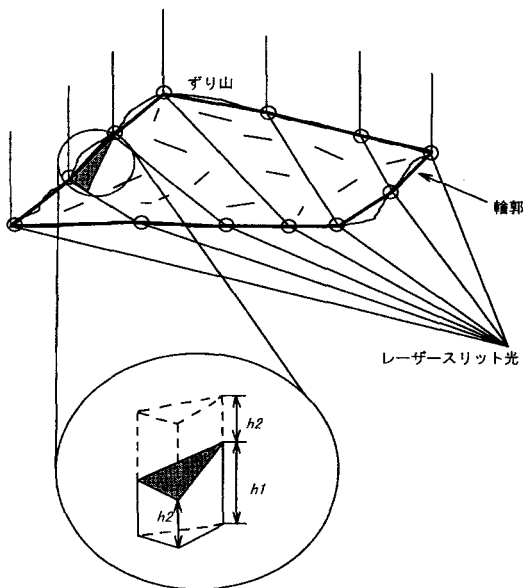


Fig. 4 Calculation method of the Rock Pile volume

その表面の下部にあるずり山の体積を(4)式により求める。

$$v = \text{底面積} \times (h_1 + h_2) / 2 \quad (4)$$

この微小体積 v をずり山全体について求めて合計すれば、ずり山の堆積量が求められる。

2.4 すくい取り作業計画の構築

効率的なすくい取り作業を自動的に遂行するためには、1回のすくい取り作業で土砂・鉱石がバケットに満載されるようにバケットを制御することが必要であり、そのためには対象物であるずり山に対して、どの点からどの方向にバケットを貫入させ、どのようにバケットを移動させればよいかをコンピュータが自動的に決定する必要がある。ここでは、貫入点、貫入方向および移動軌跡の生成を作業計画の構築と定義する。なお、すくい取り作業の際にはずり山の上部から掘削するのではなく、一般にバケットの先端、すなわちカッティングエッジを地面のレベルの高さでずり山に貫入させることから、貫入点をずり山の裾野上に決定することとする。

1) 貫入点および貫入方向の決定

バケットの貫入点および貫入方向は、厳密には作業ロボットとずり山との相対位置関係を基に、作業ロボットの移動時の機構上の制限などを考慮して決定されるべきであると考えられる。しかし、本研究では作業ロボットの移動機構については検討していないため、移動機構をも含めた最終決定法は今後の課題とし、ここでは作業ロボットとずり山との相対位置関係に基づく貫入点および貫入方向の決定について考察する。

図5に示すように、2.1および2.2の方法により求められたそれぞれのラインの裾野点、いわゆるB点を貫入候補点として(図中の●印)、この中から貫入点を決定する。すくい取り時の作業ロボットの動き等を考えると、貫入点は作業ロボットにより近い方が効率的と考えられる。よって、作業ロボット(作業前には静止していると仮定する)の原点(本研究では、CCDカメラのレンズ中心から鉛直方向に下ろした線が地面とあたる点とする)から最も近い点を貫入点の候補とする。また貫入方向は、作業ロボットの原点と貫入候補点を結んだ方向をまず仮定する。次にバケットの移動軌跡については、図6(1)に示すように、従来の研究に従って、2次曲線を仮定し、次式で与えることにする。

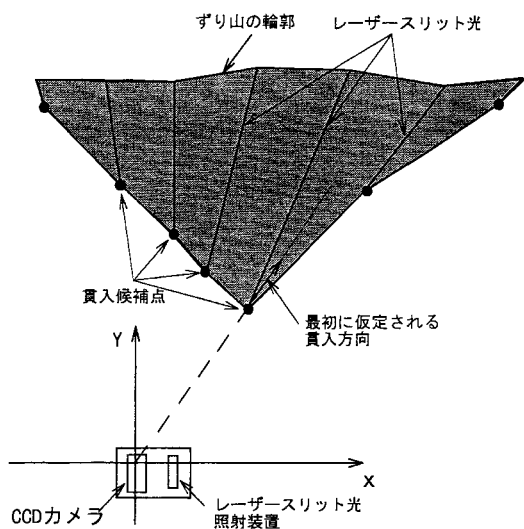
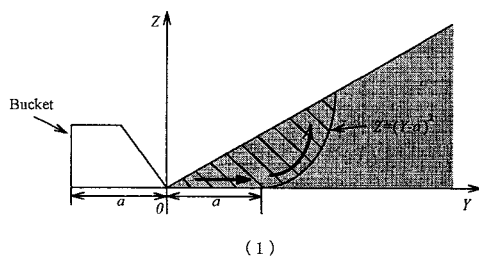
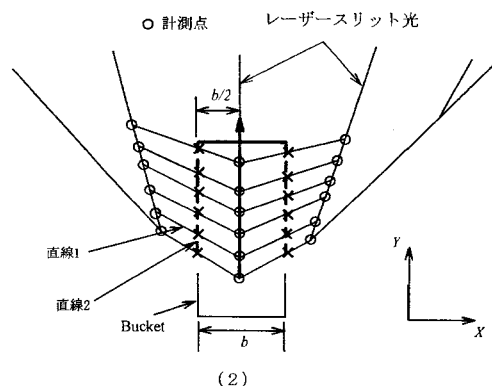


Fig. 5 Schematic diagram of the determination for the penetration point and penetration direction

-46-



(1)



(2)

Fig. 6 Estimation method of scooping volume by the bucket

$$Z = (Y - a)^2 \quad (5)$$

すなわち、裾野点を原点とし、その裾野点から一定の距離 a だけ直進し、その後は(5)式で与えられる軌跡に従うようにバケットを制御する。

2) すくい取り体積の推定

1) で求められた貫入点および貫入方向にバケットを貫入させ、さらに(5)式に従ってバケットを上昇させた時にすくい取られる鉱石の量を3次元計測結果から推定し、この値がバケット容量に対して十分でない場合は、貫入方向を見直す。

バケットを上昇させた時にすくい取られる土砂・鉱石の量は以下のようにして推定する。図6(2)は、図6(1)をZ方向から見た図であるが、太線はバケットが貫入し、すくい取る際のバケットの外側の軌跡である。よって、これらで囲まれた体積、すなわち図7で示した白色の部分の体積がバケットを貫入した際のすくい取り可能な量と考えることができる。なお、本研究ではこの体積を“すくい取り体積”と呼ぶことにする。このすくい取り体積を求める場合、ずり山表面上の各点すなわち図6(2)における×印の点の三次元座標を求め、それを基にすくい取り体積を求める必要がある。しかし、この×印の点は計測されていないため、図6(2)のように左右の計測点から推定することにする。すなわち、×印の点の三次元座標のうちXおよびY座標は直線1と直線2の交点として求めることができる。またZ座標は、直線1で切断したずり山の断面を図8のように近似すれば、図に示すように相似条件から推定することができる。すなわち、求めるZ座標を z_T とした時、 z_T を(6)式のように近似し、A点およびC

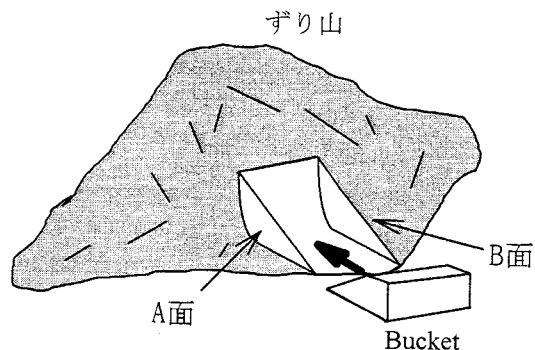


Fig. 7 Schematic diagram of scooping volume by the bucket

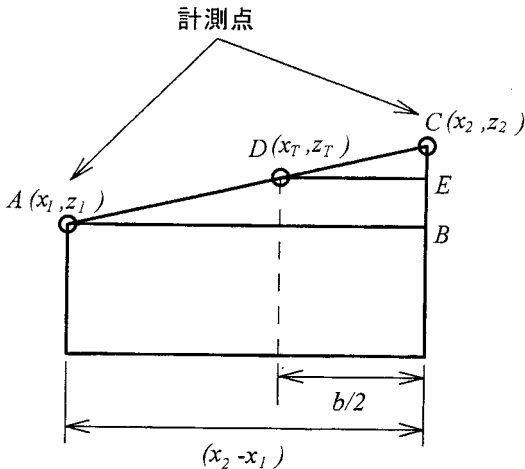


Fig. 8 Cross section of the vertical plane containing Line 1

点を計測点として、 D 点は、三角形 ABC および三角形 DEC の相似条件で求めることができる。

$$z_T = z_2 - \frac{b}{2} \times \frac{(z_2 - z_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (6)$$

このようにして求められた \times 印の三次元座標を用いて、図7で示す A 面および B 面の面積を求める。

図9は A 面あるいは B 面を模式的に示したものであるが、この面積を以下の計算法により求める。すなわち、 P の領域では(7)式を、 Q の領域では(8)式をそれぞれ用いる。なお、 $(\alpha y + \beta)$ はそれぞれの傾斜面上における直線の式である。

$$S_P = \Sigma \int (\alpha y + \beta) dy \quad (7)$$

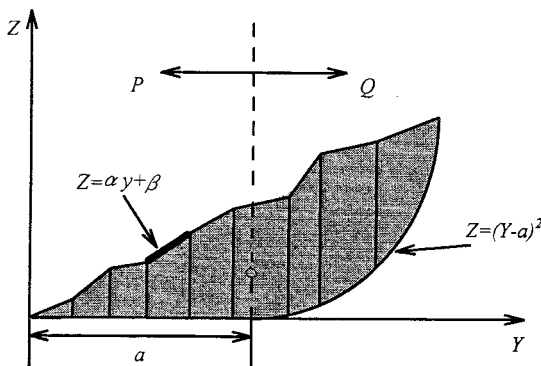


Fig. 9 Calculation method of side area of scooped volume by the bucket

$$S_Q = \Sigma \int [(\alpha y + \beta) - (y - a)^2] dy \quad (8)$$

(7)式および(8)式より A 面と B 面の面積を求め、すくい取り体積は、その2面を底面とする角錐台と近似する。すなわち、次式ですくい取り体積 V_T を求める。

$$V_T = \frac{b}{3} (S_A + S_B + \sqrt{S_A S_B}) \quad (9)$$

(9)式ですくい取り体積を推定した結果、十分なすくい取り量を得ることができないと判断された場合には貫入方向を見直す。この際には貫入方向を数度ずつ変化させてすくい取り体積量を推定する。いずれの方向でも十分なすくい取り体積が得られない場合は、その貫入候補点をキャンセルし、貫入点を作業ロボットから2番目に近い点に設定し直し、すくい取り量の推定を行う。なお、すくい取り体積が十分であるか否かの判断は、ここでは便宜上、推定されたすくい取り体積がバケット容量より大きくなるかどうかとした。

3. 実験装置および実験方法

本実験に用いた装置の概略を図10に示した。この図に示されるように、実験装置は CCD カメラとレーザー照射装置から構成されるユニットとこれを回転させるステッピングモータ、マニピュレータ、画像処理装置、動歪計、パーソナルコンピュータから構成されている。装置は1) 画像処理部と2) 抵抗力検出部の2つに大別される。

1) 画像処理部：概略は前報で示したものと同一である。CCD カメラの光軸は水平方向から10度下向きにセットし、カメラとレーザー照射装置との間隔は

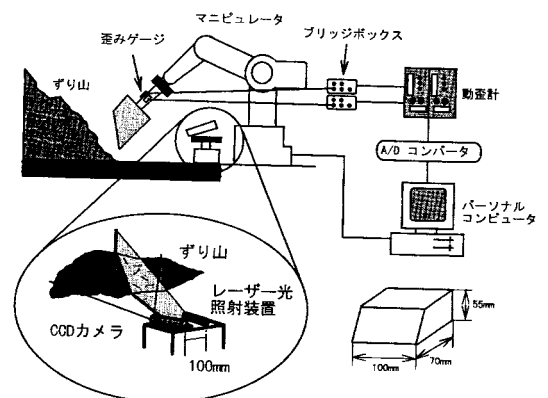


Fig. 10 Schematic diagram of the experimental apparatus

100mmである。本実験では、このユニットの下にステッピングモータをセットし、ユニット全体が回転できるようにした。ステッピングモータはパーソナルコンピュータから信号をモータドライバーに送ることにより制御した。CCDカメラは前報と同様にSONY社製CCM-MC1を用いた。なお、アナログ画像は本実験装置により512×512画素に標本化され、それぞれの画素に対して256階調に量子化され、デジタル画像に変換される。

実験では、ユニットを45度ずつ回転させて撮影を行い、前報で示した方法によりずり山の有無判断を行う。「ずり山無し」と判断された場合には、ユニットを45度回転させて再び撮影を行い、有無判断を行う。「ずり山有り」と判断された場合には、その地点（初期位置と記す）からずり山に対して左方向に10度ずつユニットを回転させてずり山の有無判断および3次元距離計測を行う。スリット光がずり山からはずれて「ずり山無し」の状態になった場合は、初期位置まで戻り、次に上述と同じ計測をずり山に対して右方向に行う。

2) 抵抗力検出部：抵抗力検出部はマニピュレータ、バケット、動歪計、A/Dコンバータおよびパーソナルコンピュータより構成される。バケットのサイズは図10に示す通りであり、このバケットをマニピュレータの手首部分に設置した。なお、マニピュレータの手首部分とバケットとの間にはアクリル製の円筒を設置し、円筒の上部および側面に歪みゲージを1枚ずつ張り付け、バケットがずり山に貫入する際の抵抗力を計測した。なお、歪みゲージを上部および側面の2個所に貼り付けたのは、バケットの上下および左右の曲げモーメントを同時に計測するためである。歪みゲージからの信号は動歪計およびA/Dコンバータを介してパーソナルコンピュータに取り込んだ。実験に先立ち、重量に既知の重りをバケットに吊下げ、曲げモーメントを計測し、荷重と曲げモーメントの関係を示す校正曲線を得た。実際の実験では、この校正曲線を基にバケットに作用する力を逆算した。

4. 実験結果および考察

4.1 抵抗力

図11にバケットをずり山および地面へ押し込んだときの抵抗力を示す。なお縦軸の値は歪みゲージ1および2の平均値を示している。この結果から、本研究で

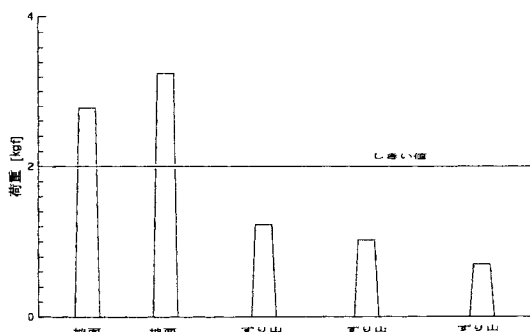


Fig. 11 Resistive forces acting on the bucket

はしきい値を2kgfとしてずり山と地面を判別するものとする。判別実験では、ずり山および地面に対してバケットを20回押しつけ、相手が地面であるかそれともずり山であるかを判断させた。その結果、19回は正しい判断を示した。唯一の誤判断は、堆積層の薄いずり山に対して生じたが、この場合は層が薄いためすぐ下の地面に触れてしまったためであると推測される。しかしながら、バケットへ作用する抵抗力によるずり山と地面との判別は、ほぼ有効であると考えられるゆえ、本研究では、この力覚情報によるずり山と地面との判別法を用いることにした。

4.2 破碎堆積物の輪郭および堆積量の推定

実験では、ずり山を構成する粒子の量を一定にして、ずり山の形を表1に示すように変化させて堆積量の推定を行った。図中の矢印の方向は撮影の方向を示しており、1～5では切羽面の前にあるずり山を切羽面に対して垂直な方向から撮影していることを示す。なお、ずり山全体の体積は19000cm³である。

図12にレーザをスキャンさせてずり山全体の形状を計測した結果の一例を、また表2にずり山堆積量の推

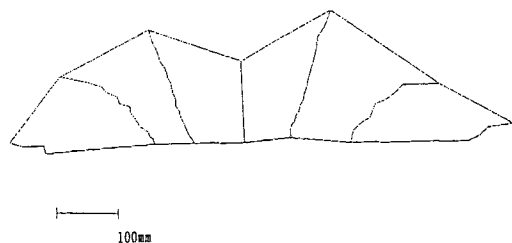


Fig. 12 An example of three dimensional measurements (No.3 Rock Pile in Table 1)

Table 1 The shape of the rock pile used in this experiment

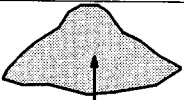
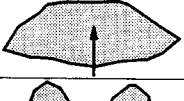


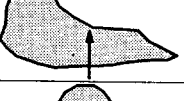
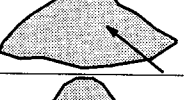

番号	堆積形状	形状の模式図 (矢印は撮影の 方向を示す)
1	一般的なずり山	
2	上部が平坦な ずり山	
3	2つのずり山が左右 に並んで存在	
4	ずり山が右側に偏っ て存在	
5	ずり山が左側に偏っ て存在	
6	1のずり山を向かっ て右側から撮影	
7	1のずり山を向かっ て左側から撮影	

Table 2 Comparison between the estimated volumes of the Rock Pile and actual values

番号	推定した堆積量 [cm ³]	推定値/実際の値 [-]
1	18300	0.96
2	19500	1.02
3	15800	0.83
4	18100	0.95
5	16200	0.85
6	23000	1.21
7	21100	1.11

定結果を示した。実際の画像と比較してみると、ほぼ正しく3次元形状が計測されていると考えることができる。また、堆積量の推定結果も実際の堆積量とほぼ同じ値を示しており、堆積量の推定法はほぼ妥当なも

のであると考えることができる。しかし、(6)および(7)の堆積量が実際の値よりも多少大きくなっているが、この場合は切羽面に対して斜めの方向からずり山を撮影しており、本手法では、撮影の方向に対してずり山の裏側に見えない空間部分が存在すると、この部分もずり山として計算してしまうためである。なお、ユニットを回転させて画像のサンプリングを行い、ずり山全体の堆積量を推定するまでに、平均して約40秒を要した。

4.3 すくい取り作業計画の構築

計測されたずり山の3次元情報を基に、上述した方法により貫入点および貫入方向を決定し、その位置にマニピュレータによりバケットを移動させ、すくい取り作業を実行させた。実際のすくい取り作業ではバケットに作用する抵抗力を計測し、この値をコンピュータに取り込んで、作業の状態、すなわちバケットが大きな岩に衝突していないか、作業は順調に進行し、バケットに十分に土砂・鉱石が入っているかどうかといった判断を行い、適切でないとは判断された場合にはバケットの軌跡を修正するなどといった制御が必要になってくると思われる。本実験では抵抗力の計測は可能であるが、現時点では作業が順調であるか否かの判断に関する研究はほとんど行われていないことから、適切な判断ができなかったため、移動軌跡を修正する制御は行っていない。つまり、バケットがずり山に貫入してからは、作業の状態に関わらず、(5)式で示された軌跡にバケット先端が沿うようにマニピュレータを制御している。実験によってはバケットが所定の距離まで貫入できないことなどが生じ、すくい取り量は常にバケット容量に等しいという結果は得られなかったが、平均して常にバケット容量の約9割をすくい取るといった結果が得られた。

5. むすび

本研究では、レーザースリット光をスキャンさせることにより、ずり山を含む周囲の環境の3次元情報を取得し、さらに力覚を組み合わせるによりずり山の堆積量を推定する手法を提案するとともに、ずり山の3次元情報を基にバケットの貫入点および貫入方向を決定する手法について考察した。その結果、撮影方向によっては、ずり山の裏側に見えない空間部分が存在するような場合には、ずり山全体の堆積量を大きく

推定することもあるが、概ね堆積量の推定値と実際の値とは一致し、ずり山全体の堆積量を比較的短時間にほぼ推定し得ることが分かった。またずり山の3次元情報を基にしたすくい取り作業計画の構築を試みた結果、常にバケットの容量に近いすくい取り作業を行うことが確かめられた。

今後は、すくい取り時におけるバケットに作用する抵抗力および作業ロボットの移動機構をも含めたすくい取り作業計画の構築の検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) M.St-Amant, et al., Proc. of the 1st Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, pp.6.1-6.10, 1991
- 2) R.H.King et al., Proc. of the 1st Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, pp.6.31-6.44, 1991
- 3) T.Gocho et al., Proc. of the 9th Int. Symposium on Automation and Robotics in Construction, Vol.2, pp.803-812, 1992
- 4) A.Hemami, Proc. of the 2nd Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, pp.415-424, 1993
- 5) 高橋 弘, 塚本 佳明, 中野 栄二, 日本機械学会論文集 (C), Vol.63, No.609, pp.85-91, 1997
- 6) 鎌田 博之, 高橋 弘, 第5回建設ロボットシンポジウム論文集, pp.27-36, 1995
- 7) 絹笠 真也, 浜田 展男, 種子田 定博, 第5回建設ロボットシンポジウム論文集, pp.5-10, 1995
- 8) 高橋 弘, 山崎勝幸, 素材物性学会誌, Vol.9, No.2, pp.79-86, 1996
- 9) 例えば画像処理ハンドブック編集委員会編, 画像処理ハンドブック, pp.394-395, 1987