力覚と画像処理を用いた大岩小割作業の 自動化に関する研究*

高橋 弘¹ 門 傳 孝² 金子勝比古³

Study on the Automation of Boulder Breakage by Use of Force Sensors and Image Processing

by Hiroshi TAKAHASHI^a, Takashi MONDEN^a and Katsuhiko KANEKO^b

a. Dept. of Geoscience and Technology, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan

b. Div. of Environment and Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060-8628, Japan

In this study, the automatic system for boulder breakage by use of force sensors and image processing was investigated. In order to carry out the full automation of the boulder breakage, the following three subtasks have to be automated: 1) detection of the boulder, 2) control of the chisel to move to the boulder and 3) carrying out the boulder breakage. In this paper, two algorithms to automate the 3) task were proposed by use of force sensors and image processing. One is the algorithm to detect the chisel sliding while pressing the boulder by the chisel. This algorithm is based on the rate of strain change measured by strain gauges which were attached beside the chisel. The other one is the algorithm to detect the boulder breakage by use of the features from the signals of strain gauges and ones from image processing. It was confirmed through the experiments that these algorithms proposed here worked well.

KEY WORDS : Boulder Breakage, Force Sensor, Image Processing, Automation

1. はじめに

石灰石は我が国で自給できる貴重な資源であり、現在数多くの鉱山が操業中である。そのほとんどの鉱山では、採掘された鉱石は一般に立坑を介して、クラッシャへ導かれているが、クラッシャを破損させる危険性がある大岩はグリズリーバーで受け止め、小割室と呼ばれる部屋でブレーカにより小割作業を行っている。しかしながら、小割作業は粉塵が多量に舞うなどオペレータにとって決して快適な環境とは言えないことから、一部の鉱山では小割室にカメラを設置し、オペレータがそのモニター画面を見ながらブレーカを遠隔操作して小割作業を実施している。このシステムは、オペレータが快適な作業環境で小割作業を行うことを可能にした点で評価されているが、ブレーカの操作には熟練が必要であるとともに、長時間の作業となるため、オペレータの大幅な負担削減にはいまだ至っておらず、作業の自動化が望まれているのが現状である。

以上のことから、著者らは破砕堆積物中に存在する大岩破砕作業の自動化を目指して2, 3の検討を重ねてきた¹⁾⁻³⁾。すなわち、大岩の自動検出・破砕システムを実現するためには「1) 画像処理による大岩の自動検出」、「2) 大岩の3次元位置計測およびブレーカの移動制御」、「3) 破砕作業の実行および自動停止」の3つのサブシステムについて検討する必要があると考え、すでに画像処理を用いて小岩石中の大岩を検出する一手法を提案し¹⁾、さらにCCDカメラとレーザスポットを用いて大岩の3次元位置情報を取

得して、ブレーカの「のみ」の先端を大岩の位置まで移動させるアルゴリズムを提案した²⁾。また「3) 破砕作業の実行および自動停止」の実現には、大岩の破砕が終了したならば直ちに打撃を停止する機能を確認することが必要不可欠であることから、油圧ブレーカの鉄柱部分である「のみ」の側面に歪ゲージを貼り付けて力覚センサとし、力覚を用いた大岩破砕判断アルゴリズムを提案した³⁾。しかしながら、大岩破砕判断の成功率は80%程度に留まっていたことから、他のセンサ情報とを融合させて成功率を向上させる必要があることを前報にて指摘した³⁾。また、打撃を開始する前に「のみ」を大岩に押し付ける際の「のみ」の滑りの検知も今後の課題とされていた。

そこで、本研究では、力覚情報および視覚情報を用いて、「のみ」の滑りを認識するアルゴリズムを提案するとともに、成功率の高い大岩破砕判断アルゴリズムについて検討することを目的としている。

2. 本研究で提案する大岩の自動検出・破砕システム

本研究で提案する大岩の自動検出・破砕システムの概略をFig.1に示す。

① 小割室にCCDカメラを設置し、カメラからの画像を処理して大岩存在の有無を判断する。

② 大岩が存在すると判断された場合には、複眼視あるいはレーザスポット等を利用して大岩の3次元位置情報を取得する。その後、コントローラにより、ブレーカの「のみ」の先端を、画像処理により得られた大岩の3次元位置に移動させ、「のみ」の先端を大岩に押し付ける。

③ 「のみ」の滑りが生じず、安定した押し付けができた後、大岩に打撃を加え小割作業を実行する。打撃開始と同時に「のみ」の部分に設置した力覚センサからの信号をコンピュータに取り込

* 2002年1月9日受付 4月9日受理

1. 普通会員 工博 東北大学助教授 大学院工学研究科地球工学専攻

2. 東北大学大学院生 工学研究科地球工学専攻 博士前期課程

3. 普通会員 工博 北海道大学教授 大学院工学研究科環境資源工学専攻

[著者連絡先] FAX 022-217-7395 (東北大・地球工学)

キーワード: 大岩破砕, 力覚, 画像処理, 自動化

む。また油圧ブレーカの脇に設置した視覚センサより画像を取得し、これらの情報を基に大岩が破碎されたか否かを判断する。大岩が破碎された場合には、直ちに打撃を停止して、ブレーカを元の位置に戻す。

ところで、③のサブシステムを実行する際、すでに報告したように²⁾②の処理により得られた大岩の位置座標は、画像処理により得られた大岩の重心座標を基にしている。しかし、この位置は「のみ」の先端を押し付ける際に最適な位置であるとは必ずしも限らず、場合によっては安定した押し付けができずに「のみ」の先端が大岩表面に沿って滑り落ちることがある。この場合は、「のみ」の滑りを認識し、「のみ」の先端を押し付ける別の候補点を大岩上に自動的に見出す処理が必要になる。本研究では、1)「のみ」

の滑りを認識するアルゴリズム、2) 新たな打撃点の決定方法および3) 成功率の高い大岩破碎判断アルゴリズムについて検討する。

3. 実験装置および岩石試料

Fig.2 に本実験で用いた装置の概略を示した。本実験では、大岩破碎判断の成功率を高めるために、先の実験で用いた力覚情報の他に視覚情報を用いることにした。そこで、視覚センサとして2つの CCD カメラを使用した。CCD カメラ 1 は、装置のフレームに固定されている。すなわち、これは小割室に設置された CCD カメラに相当する。CCD カメラ 1 からの画像を処理することにより、大岩の存在の有無および大岩の位置を認識するが、この処理法については、すでに報告されているので割愛する。CCD カメラ 2 はブレーカに固定されており、ブレーカの移動とともに移動する。「のみ」が大岩上方の位置まで移動した後は、CCD カメラ 2 からの画像を処理し、大岩破碎状況を判断する。CCD カメラ 2 を用いた理由は、押し付け時に「のみ」が大岩表面上を滑った場合における新たな打撃点の決定および破碎の有無判断のためには、大岩が画像上に大きく写し出されている必要があるためである。

ブレーカとしては、実機の小型油圧ブレーカ ((株) 泉精器製作所製, HH100) を用いた。この油圧ブレーカは後述する油圧モジュールにより打撃を行うが、コンピュータからの入力電圧によりブレーカに送る油量を調節することによって、打撃数を変化させることが可能である。本実験では、後述する大岩試料の大きさを考慮し、打撃数は毎秒 10 回とした。ブレーカの重量は約 75 kg であるので、油圧シリンダを用いて 3 次元空間内を移動させるようにした。油圧ブレーカを X および Y 方向に移動させる油圧シリンダにはポテンショメータを取り付け、さらに油圧ブレーカを Z 方向に移動させる油圧シリンダには変位計を設置し、それぞれの油圧シリンダの長さを計測することにより、「のみ」の先端の位置を制御した。「のみ」の直径は 40 mm であり、先端は平坦形状となっている。油圧ブレーカの可動範囲は、水平面内では 1,000 mm × 1,000 mm であり、鉛直方向には 600 mm である。

Fig.3 に本実験で用いた測定系の概略を示した。本実験では、前報³⁾と同様に「のみ」の側面に歪ゲージを貼り付けて力覚センサとし、歪ゲージからの信号は、ブリッジボックス、動歪計および AD コンバータを介してパソコンに取り込んだ。CCD カメラからの画像はパソコン内の ISA スロットに挿入された画像処理ボード ((株) 日立製作所製, IP-2000) によりメモリ内に取り込まれ、512 × 512 画素 (有効画素 512 × 420) に標本化され、それぞれ 256 階調に

Fig.1 Automatic breakage system of the boulder proposed in this study.

Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus.

Fig.3 Schematic diagram of measuring system.

量子化され、デジタル画像に変換される。油圧ブレーカの移動制御、歪の計測および画像処理は、すべて1台のパソコンで実行した。なお、歪計測の際のサンプリング周波数 f は200 Hzとしたが、その理由については4.で述べる。

本実験では、岩石試料として安山岩砕石および石灰岩を用いた。岩石試料の大きさはおよそ40～50 cm程度である。岩石試料の物性値をTable 1に示した。また本実験では、主として2.で述べた③のサブシステムについて検討することを目的としているので、画像処理による大岩の検出を容易にするため、コンクリートの地面上に1個の大岩を設置し、破碎実験を行った。実験に際して、大岩の設置位置は、パソコン内で乱数を発生させ、ブレーカの可動範囲内でランダムに決定した。

4. 「のみ」の滑り認識アルゴリズムおよび実験結果

「のみ」を大岩に押し付けた際の歪計測結果の一例をFig.4およびFig.5に示す。Fig.4は押し付けに成功した場合の歪の挙動を示しており、またFig.5は、「のみ」の滑りが生じた場合の歪の挙動を示している。Fig.4より、安定した押し付けに成功した場合には、Z方向シリンダが下降するにつれて歪が0付近から徐々に増加し、100～120付近で一定になることが分かる。本研究では、この状態のときにおける歪量を最大歪と定義する。図中の○印で示されている歪の変化は、本実験で用いた油圧ブレーカの機械的特性によるものであり、「のみ」の滑りによるものではない。本実験で用いた油圧ブレーカでは、「のみ」が若干の自由度を持っているため、押し付けられたときにある程度の荷重を超えると、ブレーカ

内部のピストンを押し上げてしまうために生じるものであると考えられる。

一方、Fig.5より「のみ」の滑りが生じるときは、「のみ」が滑る瞬間に急激な伸び歪が生じていることが分かる。油圧ブレーカによる大岩の破碎作業では、油圧ブレーカ本体内部の油圧ハンマが往復運動し、本体に接続されている「のみ」の端面を打撃し、その打撃力が大岩に伝達されて大岩が破碎される。したがって、実際に打撃を行う際には、「のみ」に曲げ方向の力が発生しないように油圧ハンマの運動方向、すなわち油圧ブレーカ本体の方向と「のみ」の軸方向を一致させる必要がある。しかし、油圧ブレーカ本体と「のみ」との間には、構造上若干のあそびが存在するため、油圧ブレーカ本体の方向と「のみ」の軸方向がずれることがある。このような状態で打撃を行うと、「のみ」に曲げ方向の力が働くことになり、油圧ブレーカを破損する危険性が大きい。Fig.5は、数回の滑りが生じた後、最大歪に達した例であるが、この状態では、「のみ」と油圧ブレーカの本体部分が、ある角度を持って安定している状態であり、上述のように、このような状態で打撃を行うとブレーカを破損する危険性が大きい。したがって、「のみ」の滑りが生じた場合、押し付けをいったん中断させるアルゴリズムを構築する必要がある。このアルゴリズムを構築するためには、歪データから「のみ」の滑りを検出する特徴量を抽出しなければならない。そこで、本研究では、次式で示す歪の変化量に着目した。

$$\Delta S = \text{Strain}_i - \text{Strain}_{i-1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

Strain_i および Strain_{i-1} はサンプリング時間 i および $i-1$ における歪量である。

Fig.4に示されている値を用いて求められた ΔS の時刻歴をFig.6に示す。Fig.6より、「のみ」に荷重を加えていくときの歪の変化量は非常に小さな一定値であることが分かる。また、本実験装置の機械的特性によりいったん伸び歪が生じている時間帯 (Fig.4における4～5秒付近)においても、歪の変化量に大きな変化が見られない。つまり、安定した押し付けが実行できる場合には、歪の変化量に急激な変化が現れず、ほぼ一定の変化量で推移していくことが分かる。これに対して、Fig.5に示されている値を用いて求められた ΔS の時刻歴をFig.7に示す。数か所でピークが見られるが、このピークは「のみ」の滑りに対応している。そこで、本研究では ΔS に対して、しきい値 ε_s を設定し、 ΔS の絶対値がそのしきい値よりも大きくなったとき、「のみ」の滑りが発生していると判断することにする。

ところで、この滑り認識アルゴリズムは2つのパラメータを有する。1つはしきい値 ε_s であり、2つ目は、歪を計測する際のサンプリング周波数 f である。まずサンプリング周波数 f については、 $f=10, 100, 200, 400$ Hzの4種類で歪データを計測し、 ΔS の時間変化を調べた結果、10および100 Hzでは、「のみ」を押し付ける際に必ず見られる「機械的特性」が生じる際にピークが現れてし

Table 1 Physical properties of rock sample.

Rock Sample	Density [Kg/m ³]	Uniaxial Compressive Strength [MPa]	Young's Modulus [GPa]	Poisson's Ratio [-]
Shiroishi Andesite	2690	181.3	10.59	0.339
Ofunato Limestone	2681	161.2	89.6	0.297

Fig.4 An example of the measured strain data (Successful Pressing).

Fig.5 An example of the measured strain data (Unsuccessful Pressing).

Fig.6 An example of the time history of Δ strain (Successful Pressing).

Fig.7 An example of the time history of Δ strain (Unsuccessful Pressing). Fig.8 An example of the image data obtained by CCD camera 2:
The case when the chisel slides over the boulder's surface.

まうことが分かった。これに対して、 $f=200$ Hz の場合は、Fig.6 に示されるように「機械的特性」が生じる時間帯にもピークは見られないことが分かる。 $f=400$ Hz の場合も同様であった。そこで、本実験ではなるべく低いサンプリング周波数を選択することとし、サンプリング周波数は 200 Hz とした。またしきい値 ε_s については、数回の計測データから試行錯誤により 8.5 とした。このしきい値 ε_s を用いて 50 回の押し付けを行った結果、本実験の範囲内では 100% の確率で「のみ」の滑りを認識できることが確かめられた。

5. 「のみ」の滑りが生じた場合の新打撃点の決定方法 および実験結果

先に述べたように、「のみ」の滑りが生じた場合の新たな打撃点の決定には、CCD カメラ 2 からの画像を用いる。Fig.8(a) および (b) は、それぞれ「のみ」が大岩表面に接したときの画像および「押し付けを行った際に「のみ」が滑った後の画像」を示している。Fig.8(a) と Fig.8(b) を比較すると、明らかに滑りにより「のみ」の位置が移動していることが分かる。本研究では、Fig.8(a), (b) より「のみ」の滑り量を検出し、新たな打撃点を決定する方法を以下のように提案する。

小製作業において、打撃点は「のみ」を大岩に安定して押し付けることができ、かつ岩石が割れやすい場所に選定されるべきである。しかしながら、大岩の形状は不定形であり大岩の存在状態も常に一定であるとは限らないため、視覚情報のみで最適な打撃点を決定することは困難であると考えられる。そこで、すでに報告したように、画像処理により得られた大岩領域の重心を基に算出された大岩表面上の点を最初の打撃点とし、まずこの位置で押し付けを行う。押し付けの際に「のみ」の滑りが生じた場合には、次に押し付けを行う候補点（以後、新打撃点と記す）は、その前の打撃点よりも、滑る確率が減少すると判断されるような点を選択することにする。

ところで、「のみ」は大岩表面の傾斜角のきつい方向に滑り落ち

Fig.9 Schematic diagram of positioning the chisel in the base frame when the chisel sliding occurs.

る可能性が大きいと考えられる。したがって、「のみ」の滑りが生じた場合、Fig.9 に示すように、その滑りの方向と大きさを画像から認識し、その逆の方向に新打撃点を設定することで、「のみ」の滑りが発生する確率を減少させることができると考えられる。この図で○印は「のみ」の位置であり、点線が滑りの方向、実線が新打撃点への移動方向を示している。つまり点 A から点 A' に「のみ」の滑りが生じたとすると、次式で示される点 B を新打撃点とする。

$$\overrightarrow{AB} = -\overrightarrow{AA'} \quad \text{..... (2)}$$

点 B の座標は以下のようにして認識した。Fig.10 に CCD カメラ 2 の画像を用いた新打撃点の決定方法についての概略を示す。初めに CCD カメラ 1 からの情報に基づき、大岩上方までブレーカを移動させる。このアルゴリズムについては、すでに報告済みなのでここでは省略する。ブレーカが大岩上方に来たならば、CCD カメラ 2 からの画像を取得する。本実験装置では、カメラ 2 は、「のみ」の先端がカメラ 2 の画像の中心に一致するように固定されている。この画像には、「のみ」の部分が大きく重なっているが、2 値化を行い、縮退を数回繰り返すと、「のみ」の部分が消去される。その後、縮退の回数と同じ回数だけ膨張を繰り返すと、大岩領域の概略だけが残るので、ここでまず大岩領域の重心を検出し、その重心と「のみ」の先端が一致するように油圧ブレーカを制御する (Fig.10(a) 参照)。重心と「のみ」の先端が一致した後、油圧ブレーカを「のみ」が大岩に接触するまで下降させると、(b) の状態になる。ここで、上述の画像処理を再度実行し、このときの大岩領域の重心を検出し、 (x_i, y_i) とする。次に、押し付けを行い、滑りが生じると、(c) のような状態になる。ここで、再び上述の画像処理を行い、大岩領域の重心を検出し、 (x'_i, y'_i) とする。本研究では、新打撃点の座標 (Xh_i, Yh_i) を次式で与えることにした。

$$\begin{bmatrix} Xh_i \\ Yh_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xh_{i-1} - (x_{i-1}' - x_{i-1}) \\ Yh_{i-1} - (y_{i-1}' - y_{i-1}) \end{bmatrix} \quad \text{..... (3)}$$

ただし、 (Xh_{i-1}, Yh_{i-1}) は、 $(i-1)$ 回目の打撃点の座標、 (x_{i-1}, y_{i-1}) および (x'_{i-1}, y'_{i-1}) はそれぞれ、 $(i-1)$ 回目の押し付けにおける滑り前および滑り後の大岩の重心座標である。

以上の手法を用いて、「のみ」の押し付け実験を 47 回行い、その結果を Table 2 に示した。この表では、Run1 の押し付けは初期打撃点での「のみ」の押し付けを意味しており、47 回の実験のうち 21 回は初期打撃点で押し付けに成功している。「のみ」の滑りが生じた場合には、上述した手法で新打撃点を決定し、再び「のみ」の押し付けを行う。Run2 は 2 回目の押し付けで安定した押し付けができたことを意味し、下段の値は全実験のうち、2 回までの押し付けで成功した割合を示している。この作業を、「のみ」の

Fig.10 Schematic diagram of positioning the chisel to the new hitting point.

Table 2 Results of the experiment for stable pressing.

	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5	Fault of pressing
Number of successful pressing	21	11	6	4	3	2
Rate of successful pressing	21/47	32/47	38/47	42/47	45/47	2/47

押し付けが成功するまで繰り返し行った。ただし、本実験においては、5回の押し付けを行っても押し付けに成功しない場合には、安定した押し付けが不可能であると判断し、作業を中断している。

本実験では、押し付けの成功率は95.7%であり、全実験のうち80%は3回までに押し付けに成功している。また、押し付けに失敗した回数は、47回の実験中2回あった。この2回の失敗は、コンクリート地面と大岩との接地状態が非常に不安定であるために、繰り返し「のみ」の押し付けを行っても、安定した押し付け

Fig.11 An example of measured strain data (Unsuccessful Breakage).

Fig.12 An example of measured strain data (Successful Breakage).

が行えないために生じた。しかしながら、実際の作業環境では大岩が周囲の岩石により拘束されている状態が多々みられるため、大岩の接地状態が極めて不安定である確率は小さいと思われる。

以上より、本研究で提案する新打撃点の決定アルゴリズムは、ほぼ妥当であると考えられる。

6. 力覚および画像による大岩破碎判断アルゴリズムと実験結果

油圧ブレーカによる打撃時における歪の計測結果の一例を Fig.11 および Fig.12 に示す。Fig.11 は大岩が破碎されなかった場合の結果であり、Fig.12 は大岩が破碎された場合の結果である。本実験では、安定した押し付けに成功したと判断された後、歪量を0にセットし、10秒間の打撃を加えるようにしている。大岩が破碎されなかった場合では、打撃開始から打撃終了まで、ほぼ連続的に打撃によるピークが生じている。Fig.12 では計測開始から約8秒で大きく伸び歪が生じ、歪量が約-100まで減少し、その後は-100周辺で一定値を示している。このような歪の挙動は、前報で示した結果と一致している。前報では、破碎が生じる際の大きな伸び歪を検出し、ニューラルネットワークを用いた破碎判断アルゴリズムを提案した。しかし、破碎判断の成功率は80%程度であったため、本研究では、さらに画像処理による判断アルゴリズムを加える。

サンプリングした画像の一例を Fig.13 および Fig.14 に示す。(a) は打撃開始前の画像を、また (b) は打撃終了後の画像を示している。Fig.13 は大岩が破碎されなかった場合の結果であり、打撃開始前と打撃開始後で、「のみ」の位置が多少変化しているものの、「のみ」および大岩の状態に大きな変化は見受けられない。一方、Fig.14 は大岩が破碎された場合の結果であり、図の (a) と (b) を比較すると、大岩が破碎されているため、2つの画像は大きく異なっている。つまり、(a) と (b) の画像を比較することにより、大岩破碎の有無を判断するアルゴリズムを構築することができると考えられる。そこで、本研究では2枚の画像の相違を表す特徴量として、テンプレートマッチングで一般的に用いられる相関法を用いることにした⁴⁾。

$$\sigma(x, y) = \frac{\sum_i \sum_j \{F(i, j) \cdot A(i - x, j - y)\}}{\sqrt{\sum_i \sum_j F^2(i, j)} \cdot \sqrt{\sum_i \sum_j A^2(i - x, j - y)}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $F(i, j)$ はテンプレートの画像強度値であり、 $A(i, j)$ はマッチングを行う対象画像の強度値である。正規化相互相関値 $\sigma(x, y)$ は、テンプレート画像と対象画像中の位置 (x, y) との間の整合の

Fig.13 An example of the image before and after hitting in the case of unsuccessful breakage.

Fig.14 An example of the image before and after hitting in the case of successful breakage.

測度となる⁵⁾。通常のテンプレートマッチングでは、テンプレートを対象画像上で (x, y) だけ移動させ、 $\sigma(x, y)$ があるしきい値よりも大きいとき、テンプレートと対象画像の (x, y) 部分が一致されたと認識される。完全に一致する場合には $\sigma=1$ となる。

本研究では、打撃開始前と打撃終了後の画像の変化を認識するために、打撃開始前の画像からテンプレートとなる領域を選出し、打撃終了後に得られた画像中の同じ領域の画像部分との σ を計算することで、正規化相互相関値を求めることにした。その際、本研究では、Fig.15に示すように画像を16の領域に分割し、それぞれをテンプレートとした。これは、後述するように、このような分割を行うことにより、特徴抽出後に行う判別システムをより柔軟に構築することができるためである。ここでは、 512×420 画素の打撃前の画像から 128×105 画素の画像を16枚のテンプレート $A_{pq}(p, q=1 \sim 4)$ として抽出し、それぞれのテンプレートと、打撃終了後に得られた画像中の同じ領域 F_{pq} の相関値 $\sigma_{pq}(p, q=1 \sim 4)$ を求める。つまり、打撃開始前の画像中のある領域と打撃終了後の画像中の同じ領域の整合度を計算するため、式(4)は次式のように簡単化され、その結果、計算時間も大幅に短縮できる。

Fig.15 An example of template image and target image.

$$\sigma_{pq} = \frac{\sum_i \sum_j \{F_{pq}(i, j) \cdot A_{pq}(i, j)\}}{\sqrt{\sum_i \sum_j F_{pq}^2(i, j)} \cdot \sqrt{\sum_i \sum_j A_{pq}^2(i, j)}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

さて、16個の σ_{pq} から、画像全体の整合度を示す値 σ_{all} を得る手段としては、16個の平均を取るなど、幾つかの手法が考えられるが、「大岩の破碎」が生じたときと生じないときの画像の変化が顕著に現れるような値であることが望ましい。

ところで、Fig.14に示すように「大岩の破碎」が生じないような場合には、画像全体に大きな変化は見られない。これに対し、「大岩の破碎」が生じた場合、破碎された岩石片は周囲に広がるので、画像周辺部の変化が大きい。したがって、16個の σ_{pq} から画像全体の整合度を示す値を求める際、この特徴を考慮した方法を用いることが望ましい。そこで、本研究では、16に分割された画像の周辺部の領域では、 σ_{pq} に重みを置き、まず、次式により σ_{pq} の重み付き総和を求める。ここで、 w_b は各領域の重みである。

$$\begin{aligned} \sigma_{all} = & w_b (\sigma_{11} + \sigma_{12} + \sigma_{13} + \sigma_{14}) + w_b \sigma_{21} + \sigma_{22} + \sigma_{23} + w_b \sigma_{24} \\ & + w_b \sigma_{31} + \sigma_{32} + \sigma_{33} + w_b \sigma_{34} + w_b (\sigma_{41} + \sigma_{42} + \sigma_{43} + \sigma_{44}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

さらに、次式により重み付き総和の正規化を行う。

$$\sigma_{all} = \frac{\sigma_{all}}{12w_b + 4} \quad \dots\dots\dots (7)$$

本研究ではしきい値 σ_b を導入し、この相関値としきい値とを比較して、相関値がしきい値よりも小さいときは、画像が大きく変化している、すなわち「大岩が破碎されている」と判断する。この大岩破碎認識アルゴリズムには、重み w_b としきい値 σ_b の2つのパラメータがある。これらは、試行錯誤により $w_b=3$ 、 $\sigma_b=0.5$ と決定した。

ところで、力覚情報は、その処理が比較的簡便なため、判断がほぼリアルタイムで実行できるという特徴があるが、力覚情報のみでは約20%の確率で誤判断を生じる。一方、画像処理は若干の処理時間を要し、かつ打撃中の画像は、油圧ブレーカの振動によりぶれてしまい、大岩破碎の有無を認識する画像としては適切ではない。前報でも述べたが、大岩破碎の誤判断は、そのほとんどが、Fig.16に示すように破碎された岩石片が「のみ」の下部に残り、明確な伸び歪が検出できないために生じる。つまり誤判断は、大岩が破碎されているにもかかわらず、「破碎されていない」と判断するものがほとんどで、大岩が破碎されていないにも拘わらず、「破碎された」と誤判断することは、ほとんど見受けられなかった。そこで、力覚情報の特徴を考慮し、本研究では、以下に示す大岩破碎判断アルゴリズムを提案する。

① 初めに前報で提案したように、まず力覚情報を用いた破碎判断アルゴリズムにより大岩破碎の判断を行う。

Fig.16 A photograph of boulder breakage in case of the existence of rock fragments under the chisel.

Table 3 Results of the experiment of detecting the boulder breakage.

○: Successful breakage, ×: Unsuccessful breakage,
▲: Boulder was shifted while impacting

Run No.	Exp.	Judgment by Force Sensor	Judgment by Vision Sensor σ		Result of judgment by the algorithm	Remarks
01	○	○			○	Success
02	○	○			○	Success
03	○	×	○	0.387	○	Success
04	○	○			○	Success
05	○	○			○	Success
06	○	○			○	Success
07	○	○			○	Success
08	×	×	×	0.739	×	Success
09	○	○			○	Success
10	○	○			○	Success
11	○	○			○	Success
12	○	○			○	Success
13	○	○			○	Success
14	○	○			○	Success
15	○	○			○	Success
16	○	○			○	Success
17	○	○			○	Success
18	○	○			○	Success
19	×	×	×	0.769	×	Success
20	○	○			○	Success
21	○	×	○	0.451	○	Success
22	○	○			○	Success
23	○	○			○	Success
24	○	○			○	Success
25	×	×	×	0.78	×	Success
26	▲	○			○	Failure
27	×	×	×	0.554	×	Success
28	○	×	○	0.411	○	Success
29	○	○			○	Success
30	×	×	×	0.645	×	Success
31	○	○			○	Success
32	×	×	×	0.738	×	Success
33	○	○			○	Success
34	×	×	×	0.752	×	Success
35	×	×	×	0.545	×	Success
36	○	○			○	Success
37	×	×	×	0.605	×	Success
38	×	×	×	0.747	×	Success
39	×	×	×	0.847	×	Success
40	×	×	×	0.749	×	Success
41	○	○			○	Success
42	○	○			○	Success
43	○	×	○	0.422	○	Success
44	○	○			○	Success
45	○	○			○	Success

② 上述のアルゴリズムにより、「大岩が破碎された」と判断された場合、実際に破碎されている確率が極めて高いため、「最終的に大岩が破碎された」と判断し、打撃を停止する。

③ 上述のアルゴリズムにより、「大岩は破碎されていない」と

判断された場合、カメラ 2 からの画像を処理し、破碎の有無を確認する。視覚情報を用いた判断アルゴリズムが、「大岩は破碎されている」と判断した場合は、油圧ブレーカを元の位置に戻す。「大岩は破碎されていない」と判断された場合は、さらに 10 秒間の打撃を加える。

以上の大岩判断アルゴリズムを用いて、45 回の大岩破碎制御実験を行った。その結果を Table 3 に示す。本実験では画像処理に要する時間は、約 3 秒程度であった。誤判断は 1 回のみで、判断成功率は 98 % であった。唯一の誤判断は、打撃開始前に安定した押し付けに成功したが、打撃中に大岩が「のみ」の下部から横にずれてしまい、その結果、急激な伸び歪が計測されて、上述の①のアルゴリズムにより「大岩は破碎された」と判断してしまったものである。実際の現場では、大岩下部にはグリズリーバーがあり、また、大岩周辺には他の岩石が存在するため、大岩の移動が生じる確率は小さいと考えられるが、この点については今後の課題である。また「のみ」の滑りを少なくした効率的な破碎を行うためには、大岩の 3 次元形状を計測し、大岩の打撃面の傾斜等を認識して打撃点を決定するなどの方法が必要と考えられる。この点についても今後の検討課題としたい。

7. む す び

本研究では、力覚と画像処理を用いた「のみ」の滑り認識アルゴリズムおよび大岩破碎判断アルゴリズムを提案した。さらに提案されたアルゴリズムを用いて大岩破碎制御実験を行った。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 「のみ」の滑りの認識に関しては、「のみ」の側面に貼り付けた歪ゲージからの信号を一定間隔でサンプリングし、その変化量を用いることにより、滑りを認識するアルゴリズムを提案した。本実験の範囲内では、本アルゴリズムは、100 % の成功率で「のみ」の滑りを認識できることが分かった。

(2) 大岩破碎判断に関しては、初めに力覚を用いて大岩破碎の有無を判断し、さらに画像処理を用いて力覚の判断を確認するというアルゴリズムを提案した。その結果、大岩破碎判断の成功率は、98 % まで向上され、本アルゴリズムの妥当性が確認された。

今後は、本実験で示された誤判断の原因をさらに追求し、本アルゴリズムの信頼性向上について検討する予定である。

本研究を遂行するに当たり、東北大学教授齋藤清次先生に貴重なご助言を頂いた。ここに謝意を表する。

引 用 文 献

- 1) 高橋 弘・佐野克己：資源と素材，Vol. 113, No. 3, p. 169-174, 1997
- 2) 高橋 弘・佐野克己・中野栄二：資源と素材，Vol. 114, No. 8, p. 543-548, 1998
- 3) 高橋 弘・門傳 孝：資源と素材，Vol. 115, No. 10, p. 725-730, 1999
- 4) 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，昭晃堂，p. 303-308, 1990
- 5) 山崎弘郎・石川正俊：センサフュージョン，コロナ社，p. 6-35, 1992