

画像処理による大岩の自動検出・破砕システムに関する研究

東北大・工・地球 高橋 弘（正会員）
東北大・工・地球 佐野 克己（学生会員）
東北大・情報科学 中野 栄二

1. はじめに

石灰石鉱山では、採掘された鉱石は一般に立坑を介して、クラッシャーへ導かれるが、クラッシャーを破損させる危険性がある大岩について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ーにより小割作業を行っている。しかし、小割作業は粉塵が多く舞うなど作業員にとって決して快適な作業とは言えないことから、遠隔操作による小割作業などが試みられているが、作業員の大幅な負担軽減には至っておらず、作業の自動化が望まれている。

本研究は石灰石鉱山あるいは、トンネル掘削現場などにおける堆積物中の大岩の破砕作業の自動化を目指すものであり、本報では画像処理により堆積物中の大岩を検出し、絶対座標系における大岩の重心位置の3次元座標を計測し、その位置にブレーカーに見立てたマニピュレータの先端を移動させるアルゴリズムおよび実験結果について述べる。

2. 大岩の自動検出破砕に関する理論的研究

2.1 大岩の検出原理

本研究で提案する画像処理法は、堆積物を撮影し、この画像より2値画像を生成した後、画像中の多数の領域から、大岩の領域だけを検出するというものである。図1に画像処理の流れを示す。

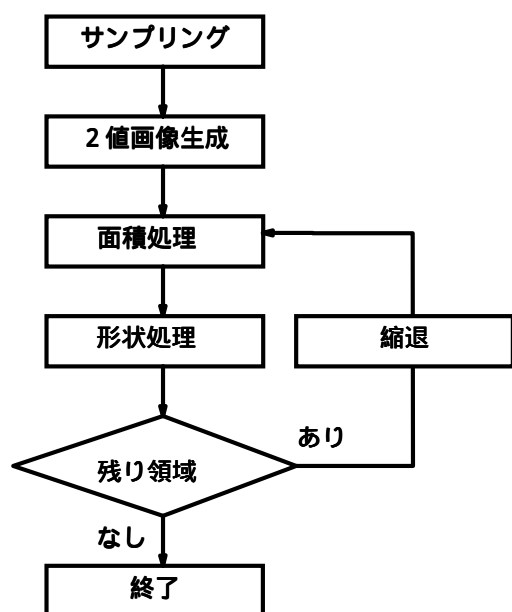


図1 画像処理のフローチャート

2値画像の生成には輝度値の標準偏差を用いる。これは堆積物の画像において、小岩石の部分では輝度値の変化が大きいが、一方、大岩の部分では輝度値の分布が比較的一様であることから、標準偏差の小さい部分が大岩であると予想されるためである。そこで画像を小さなウィンドウに区切り、ウィンドウ内の標準偏差を計算し、標準偏差がしきい値以下なら、0（黒）、しきい値以上なら1（白）をウィンドウ全体に出力する。ウィンドウの大きさは16[H] × 11[V]画素とし、標準偏差のしきい値は試行錯誤の結果から、次式で求めた。

$$n = 0.63 \times SD \quad (1)$$

n は2値化のためのしきい値で、 SD は画像全体の標準偏差である。

以上の処理により生成した2値画像中には大岩以外にも白色の領域が多数存在する。そこで、面積が小さく、大岩でないと推測される領域を消去する（面積処理）。続いて、形状係数が小さく大岩と推測される領域を検出し、他の画像ページへ転送する（形状処理）。形状係数は次式で計算される。

$$k = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{L^2} \quad (2)$$

A は領域の面積、 L は領域の周囲長であり形状係数は領域の形状が複雑であるほど大きくなる。そこで本研究では $k < 2$ である領域を大岩として検出する。

残された領域は大岩と小岩石、あるいは小岩石同士が融合して生じたものと推測されるので、縮退処理を行いこれらを互いに分離させ、再び面積処理、形状処理を行う。このプロセスを画像中の全ての領域が検出又は消去されるまで繰り返す。

最後に、検出された大岩領域の重心座標を検出する（重心検出）。

2.2 大岩の位置計測の原理

画像処理により検出される重心は画像上の2次元座標にすぎず、大岩の厚み、すなわち高さの情報を得るためには他に何らかの処理を施す必要がある。ブレーカーにより大岩を破砕するためには、大岩重心の絶対座標系における3次元座標を計測する必要がある。

位置計測に関し、カメラを大岩の上方および側方の二カ所に設置すれば、大岩の厚みの情報

は取得できるが、この方法はカメラが小割り室壁面に固定されるため、小割り室にしか適用できない。本研究では、切羽およびトンネル掘削現場などでの適用も考慮し、図2に示すようにレーザーと画像による位置計測法を提案する。この方法であれば、全ての装置をプレーカーと一体にでき、装置全体を他の現場へ搬入、運用することも可能となる。

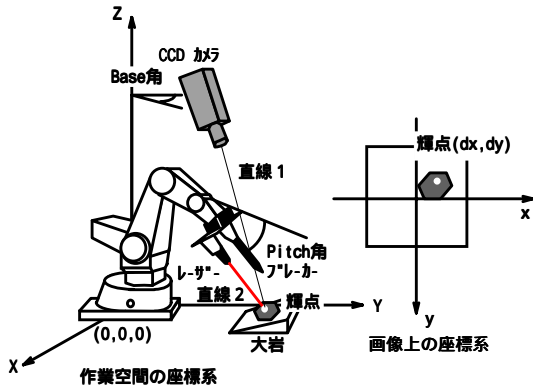


図2 位置計測

位置計測法は、まずレーザーを大岩に向けて照射し、大岩表面にスポット光（輝点）を生じさせる。この輝点初期位置としては、大岩の高さが0であるとして計算した大岩重心の3次元座標を入力する。さらにレーザーの向きを操作し画像処理で求めた画像上の大岩の重心とレーザーの輝点を一致させる。カメラ-重心間を結ぶ直線を直線1、レーザー先端-重心間を結ぶ直線を直線2とし、これらの交点を大岩重心の3次元座標とする。なお、座標系は図3に示すように定義し、絶対座標系の原点はコンピュータの中心とする。2つの直線を求める方法について以下に詳述する。

まず、画像処理により得られた画像座標系における大岩の重心座標を (dx, dy) とすると、直線1は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} x &= k \cdot dx \cdot \frac{w}{f} \cdot \cos \theta + k \cdot dy \cdot \frac{w}{f} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta \\ &\quad + w \cdot \cos \varphi \cdot \sin \theta - XC \\ y &= -k \cdot dx \cdot \frac{w}{f} \cdot \sin \theta - k \cdot dy \cdot \frac{w}{f} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta \\ &\quad + w \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta - YC \\ z &= -k \cdot dy \cdot \frac{w}{f} \cdot \cos \varphi - w \cdot \sin \varphi - ZC \end{aligned} \quad (3)$$

ここに (XC, YC, ZC) は、絶対座標系におけるカメラのレンズの中心、 f は焦点距離、 k は撮像系に固有の値で、 φ は光軸の垂直偏角、 θ はカメラの水平偏角である（図3）。

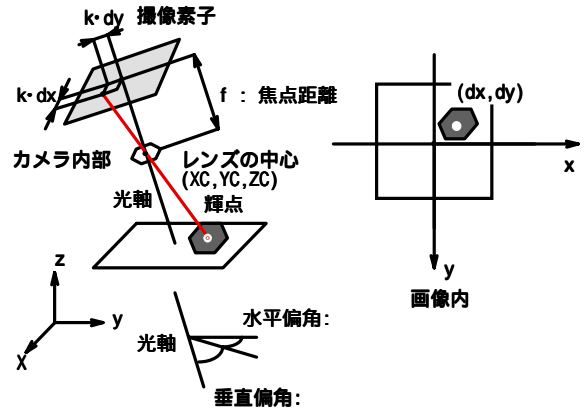


図3 座標系の定義

次に、直線2を求めるが、図4に示すように、輝点と重心が画像上で一致したときのベース角およびピッチ角をそれぞれ $base$ および $pitch$ とすると、プレーカー先端の座標 (xb, yb, zb) は、次式で表される。

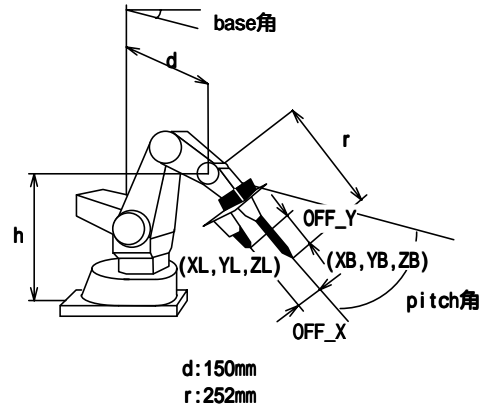


図4 ベース角およびピッチ角の定義

$$\begin{aligned} xb &= (d + r \cdot \cos(pitch)) \cdot \sin(base) \\ yb &= (d + r \cdot \cos(pitch)) \cdot \cos(base) \\ zb &= h - r \cdot \sin(pitch) \end{aligned} \quad (4)$$

h, r, d は図4に示す距離である。この時のレーザー先端の座標 (xl, yl, zl) は、プレーカー先端座標にオフセットによるずれを加え次式で与えられる。

$$\begin{aligned} xl &= xb + OFF_X \cdot \cos(pitch) \cdot \cos(base) \\ &\quad - OFF_Y \cdot \cos(pitch) \cdot \sin(base) \\ yl &= yb - OFF_X \cdot \cos(pitch) \cdot \sin(base) \\ &\quad - OFF_Y \cdot \cos(pitch) \cdot \cos(base) \\ zl &= zb + OFF_Y \cdot \sin(pitch) \end{aligned} \quad (5)$$

一方、方向ベクトル (a, b, c) は次式で与えられる。

$$a = \cos(\text{pitch}) \cdot \sin(\text{base})$$

$$b = \cos(\text{pitch}) \cdot \cos(\text{base})$$

$$c = \sin(\text{pitch})$$

(6)

直線 2 の方向と通過する点が決定されたので、直線 2 は次式のように表される。

$$\frac{x - x_l}{a} = \frac{y - y_l}{b} = \frac{z - z_l}{c} \quad (7)$$

大岩の重心位置は数学的には(3)式と(7)式で示される 2 つの直線の交点として求められる。しかし、実際には直線方向などに誤差が含まれるため、2 つの直線が交差することはきわめて希である。すなわち、これらの直線の方程式を数学的に解いて交点を求めることはほとんど不可能である。そこで、z 座標を 0mm から 100mm まで 0.1mm きざみで変化させて、各 z 座標における 2 直線の xy 座標を (3) 式および (7) 式より計算し、その 2 点間の距離が最も近くなる時の z 座標を探す。本研究では、その z 座標を大岩の高さとし、この時の 2 直線上のそれぞれの点 (x, y 座標) の中点を求め、大岩の重心位置とする。

3. 実験装置および実験方法

図 5 に実験装置の概略を示す。

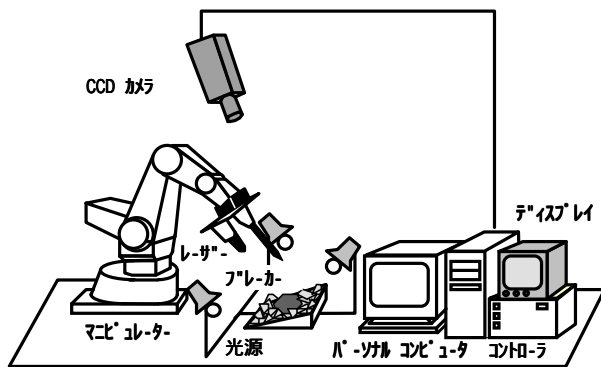


図 5 実験装置

実験装置は、CCDカメラ、画像処理ボード、パーソナルコンピュータ、レーザースポット照射装置、プレーカーに見立てたマニピュレータおよび光源で構成されている。画像処理ボードとしては日立製作所製の IPX 画像処理ボードを用いた。

本実験では、本研究で提案する画像処理による大岩検出の検出確率と、レーザーと画像による位置計測法の精度を評価する。

大岩検出では、まず堆積物のモデルを作成し、これを撮影した後、本研究で提案する画像処理法の大岩検出確率を調べた。スケールを実際の

小割室の 20 分の 1 とし、試料として 4 種類の石灰石 (秋芳鉱業 (株)、秩父小野田 (株) 藤原鉱業所、武甲鉱業 (株)、住友大阪セメント (株) 唐沢鉱業所) と碎石の計 5 種類の岩石を用いた。実験では直径 2 センチ以下の小岩石を敷いた上に直径 5 ~ 7 センチ程の岩石を大岩として配置し、堆積物のモデルを作った。なお、本研究で提案する画像処理法では、大岩同士が接触したり、小石に埋もれたりする場合、これを検出することは困難であるため、このような配置については考慮していない。大岩の個数、位置は乱数で決定し、5 つの岩種について各 10 通りの配置を行い、合計 50 枚の画像を撮影、大岩検出を行った。さらに、秋芳鉱業 (株) の鉱石で作ったモデルを撮影した 10 枚の画像について、原画像の大岩部分の輪郭をマウスでなぞることで、肉眼による重心検出を行い、画像処理の結果と比較した。

次に、秋芳鉱業 (株)、秩父小野田 (株) 藤原鉱業所の、プレーカーの遠隔操作に使われるモニタ映像のビデオテープから、画像をサンプリングし、この画像について大岩検出を行った。さらに、武甲鉱業 (株) の小割現場に光源、CCDカメラ、画像処理装置を設置し、現場にて大岩検出を行った。

一方、位置計測については、まず計測精度の評価が重要となるので、対象物としては大岩ではなく、図 6 に示されるような形状の対象物を用いた。

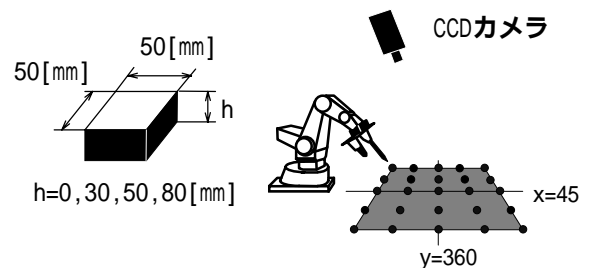


図 6 位置計測

対象物の高さは 0, 30, 50, 80 [mm] の 4 段階とし、図 6 の様な水平面上の均等な 25ヶ所の位置について位置計測を行った。また、対象物の検出には前述の画像処理法でなく単なる 2 値化を用い、対象物の側面が画像に写って画像処理の際の重心検出の結果に影響することを防ぐため、対象物側面を黒く塗りつぶし、水平面上に黒いフィルムを張って実験した。

4. 実験結果

堆積物モデルに対する大岩検出結果については、画像中のすべての大岩を検出した場合を成功としてカウントし、10 回の実験における成功率を検出確率とする。各岩種における検出確

率を表1に示す。また、画像処理と肉眼による大岩の重心検出果の差を評価するため、2つの方法で得られた重心座標間の距離と大岩領域の等価円直径比を計算した。秋芳鉱業の10枚の画像でのこの値の平均値は6.6%となった。図7に検出結果の1例を示す。

表1 検出結果

岩種	検出確率[%]
秋芳鉱業(株)	100
秩父小野田(株) 藤原鉱業所	100
武甲鉱業(株)	100
住友小坂セメント (株)唐沢鉱業所	100
碎石	80

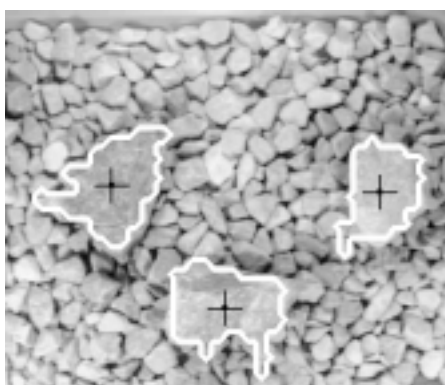


図7 大岩検出結果
(秋芳鉱業(株)産の鉱石を用いたモデル実験)

図7の画像は、検出された大岩領域の輪郭を原画像に重ねたもので、+マークは画像処理により得られた大岩領域の重心を示している。

また、小割室のモニタ映像からサンプリングした画像についても、大岩が検出できることが確かめられた。

また、武甲鉱業(株)における小割り現場での大岩検出については、照明の強度、位置を自由に調節できたので、モニタ映像の画像よりも比較的容易に大岩を検出できた。図8に検出結果の1例を示す。現場では大量の粉塵が舞っていたが、大量の粉塵や大岩同士の接触、大岩の埋没などの条件下でも、本研究で提案する画像処理法により大岩検出が可能であることが確かめられた。

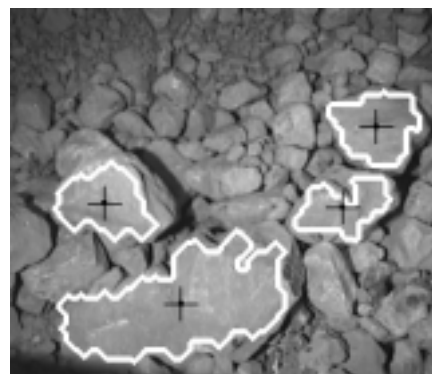


図8 検出結果
(武甲鉱業(株)の小割室における実験)

次に位置計測の結果は表2に示す通りであった。

表2 位置計測結果[単位:mm]

高さ	EX	EY	EZ	EXYZ
0	1.00	1.92	4.52	5.22
30	0.94	2.23	4.35	5.18
50	0.87	2.17	4.42	5.15
80	1.63	3.49	3.16	5.51

EX, EY, EZはそれぞれXYZ方向の誤差, EXYZはEX, EY, EZの2乗の合計の平方根である。x, y方向の誤差は最大で約5mm, z方向の誤差は最大で約9mm程度であった。また、誤差の平均は対象物の高さにあまり影響されないことが分かった。なお、堆積物中の3個の大岩を配置し、大岩検出、位置計測を行ったところ、要した時間は約60秒程度であった。

5. むすび

本研究ではブレーカーによる大岩の破碎作業の自動化を目指し、作業現場における堆積物の画像から大岩を検出し、その絶対座標系における重心位置を計測する手法を提案した。実験では、5種類の岩石についての堆積物のモデルを作りこれを撮影した画像について、画像処理による大岩検出を行い、アルゴリズムの妥当性を確認した。また、位置計測の精度もほぼ妥当であることが確かめられた。このことより、本研究で提案する対象物の位置計測手法は、小割室における作業あるいはトンネル掘削現場などにも十分に適用可能と考えられる。

最後に、石灰石鉱業協会研究奨励金によったことを付記し、謝意を表す。また、小割室での撮影にご協力いただいた武甲鉱業(株)に謝意を表す。