

両眼視差を用いた高精度な3次元画像復元方法と 金属粉末への応用*

川崎製鉄技報
24 (1992) 1, 38-44

An Accurate 3-D Morphology Recovering Technique Using Binocular Parallax and Its Application for Metal Powders Morphology Analysis



宮嶋 明
Akira Miyajima
技術研究本部 加工・制
御研究センター 主任
研究員(課長)



古君 修
Osamu Furukimi
ハイテック研究所 新素
材研究センター 主任
研究員(課長)・工博



斎藤 文夫
Fumio Saito
川鉄システム開発部
FA 開発部



植本 与七
Yoshichi Uemoto
川鉄システム開発部
FA 開発部

1 緒 言

人間が両眼視差を利用して物体の奥行きを知覚すると同様に、異なった角度から撮像した1対の画像を用いて、もとの物体の立体形状を再現することができる。すなわち、1対の2次元平面上に投影された3次元表面画像は物体の表面形状情報を含んでおり、視差による位置のずれを検出することによって立体形状を復元できる。

この方法は、航空写真からの地形図の作成などで有用性が評価され、さまざまな研究により発展してきた。最近ではロボットビジョン分野での情景認識などへの応用¹⁾が多数報告されている。

両眼視差を用いた3次元復元方法は、直接形状を測定する他の方法に比べ簡便であること、すなわち処理の容易性、高速性、特別な装置を必要としない経済性などの面で優れているが、立体形状の再

要旨

素材の微細構造の評価を行うため、両眼視差を用いた新しい立体形状復元手法を開発した。本手法の主な特徴は、領域ベース法による対応点探索時に動的に領域の大きさを最適化することおよび探索領域内の対応する領域の大きさを可変にすることである。数値シミュレーションによる検討で、視差による変形への追従性が優れ、また相対高さ算出時の分解能を従来法に比べ2倍向上できることを示した。本手法による水アトマイズ鉄粉の形状解析では、未球状化処理粉末のような複雑な形状においても実用的な精度で形状の復元が行え、また特徴量としてフラクタル次元を用いると画像の倍率などの観察条件によらず球状化処理の有無を判別できることがわかった。

Synopsis:

A new three-dimensional morphology recovery technique was developed for the analysis of material microstructures. The principal concepts embodied in the technique are dynamic optimization of the size of matching areas using area-based stereo matching and adjustment of the size of corresponding areas within the search area. Numeric analysis demonstrated that this parallax-based technique makes it possible to maintain phase with geometric distortions; moreover, the resolution achieved with this method in relative height computations is twice that of other methods. Morphology analysis of water-atomized iron powders indicated that the technique recovers three-dimensional morphologies with a level of precision suitable for practical application even with complex forms such as non-spheroidized powders. In addition, use of the fractal dimension as a feature parameter makes it possible to determine whether a powder is spheroidized or not, regardless of differences in observation conditions such as the degree of magnification.

現精度はまだ十分とはいえない。両眼視差による立体形状の復元には、1対の画像間の対応を算出するマッチング過程、すなわち対応点探索が必須であり、精度を落す主な要因はこの探索過程にある。画像間の対応を用いない立体構造の復元方法²⁾も存在するが、この場合は物体全体を記述する特徴の表現が必要であり、形状特徴の定まらない対象物には適用できない。

一般に用いる対応点探索時のマッチング手法は、領域ベース法と特徴ベース法に大別でき、画像に既知の明確な特徴があれば特徴ベース法の方が高速性や精度の点で優位である。ロボットビジョンでは物体の境界が比較的鮮明な画像を扱うことが多く、エッジ情報の

* 平成3年10月9日原稿受付

抽出を基盤にして三角幾何学を用いる³⁾などの特徴ベース法の利用が有力である。

これに対し、素材産業における素材表面あるいは断面の電子顕微鏡観察などでは、テクスチャの存在や不定形性あるいは滑らかさのため、エッジ情報では立体復元精度が逆に悪化し、特徴ベース法ではなく領域ベース法またはその混在法を採用する必要がある。

素材産業での両眼視差を用いた3次元画像復元技術の応用は、鉄鋼材料のファセット破面、ディンプル破面、腐食ピット、ストレッチゾーンの測定⁴⁾やセラミックスのき裂伝播幾何形状の解析など、破断面の解析を中心とした立体微細構造の定量測定が報告されている。これらの応用例における立体形状復元手法は試行段階にあり、汎用的に使用するには精度面でまだ不十分である。

本報では、領域ベース法による対応点探索時に、探索する領域サイズや視差による画像の変形を考慮することにより、高精度で汎用性の高い立体形状復元が可能なることを、数値シミュレーションと画像処理実験で示す。また素材の形状解析に用いるため、上記の両眼視差による3次元形状復元処理アルゴリズムを含むプログラムを開発し、金属粉末の形状解析に応用した結果について述べる。

2 両眼視差を用いた3次元形状復元方法

一般的な3次元形状復元処理の流れを Fig. 1 に示す。前処理部は画像入力方法に依存し、カメラ入力の場合には対になる画像の位置合せ、濃淡度の補正、ノイズの除去などの画像処理を行う。

対応点探索部では、基準画像上の2次元濃淡パターンと傾斜画像上の濃淡パターンを照合し、傾斜による位置のずれを検出する。エッジなどの画像のもつ特徴を抽出して1対の画像間の対応を求める特徴ベース法と異なり、領域ベース法では、基準画像を小領域に分割して、その小領域ごとに対になる傾斜画像上の対応する小領域を探索する。

小領域の位置のずれがわかれば、既知の傾斜角から相対高さを算出することができ、基準画像の全面にわたって傾斜画像とのずれを検出すれば、もとの形状を復元することができる。

対応点探索の際、形状が急激に変化する部位では、基準画像と傾斜画像に対応する部位が存在しない場合があり、「アンマッチング」と呼ぶ。また対応する部位はあるが、濃淡パターンのゆがみなどで

本来の部位と異なる部位を対応点とみなす場合があり、「ミスマッチング」と呼ぶ。アンマッチング、ミスマッチングが発生すると、相対高さに異常部位が出現し、復元した形状の誤差となる。ともに、両眼視差を用いた復元方法には必然的に発生する誤差要因であり、ミスマッチングには処理アルゴリズムの工夫による対応点探索精度の向上を、また発生したミスマッチング、アンマッチングには、なんらかの補正処理を必要とする。

算出した相対高さは、厳密には表面形状の離散的な3次元座標点列であり、可視化するには鳥瞰図や等高線図などへの変換処理、立体形状解析には面張りによる表面積の算出などの立体特徴量抽出処理を行う。

最近では、両眼視差を用いた3次元形状復元処理は、処理の柔軟性と簡便性からデジタル画像処理で行うことが一般的であり、離散的に画像情報を扱うことに起因する誤差が処理の各段階で発生する。

3 数値シミュレーションによる検討

3.1 形状モデル

アンマッチングは対応点が存在しないため、避けることができない誤差要因であり、後処理として平滑化などの工程を加えて対処する。ここでは、従来法に比べ対応点探索精度と相対高さ算出精度を向上させる手法を検討し、ミスマッチングを大幅に減少させることで、より精度の高い立体形状の復元を図ることを目的とする。

数値シミュレーションでは、ラインプロファイル、すなわち立体形状の1断面の表面形状を用いて精度改善効果を検証した。Fig. 2 は模擬的に作成した表面形状のプロフィールAとそれを8°だけ時計方向に回転させたプロフィールBである。プロフィールは正弦曲線であり、この回転ではアンマッチング部位は発生しない。

対応点探索に用いる濃淡パターンは、形状を直接に表現するものではなく、主に立体表面の地模様であると考えられる。シミュレーションでは、プロフィールAの表面の各点は、濃淡パターンCで表される濃度を持つとモデル化した。Fig. 2 の濃度パターンCは、三角関数と乱数により模擬的に発生させた数値を用いている。プロフィールAを時計回りに8°回転させると、表面濃淡パターンCは式

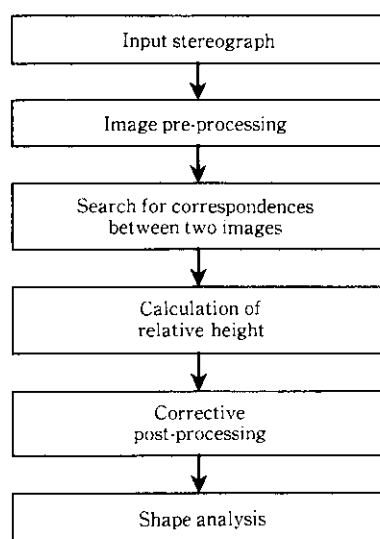


Fig. 1 Image processing flow for three-dimensional (3-D) analysis using binocular parallax

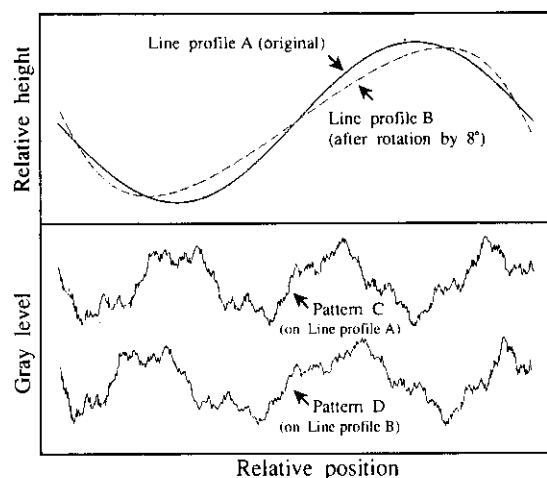


Fig. 2 Deformation of gray level pattern by line profile rotation

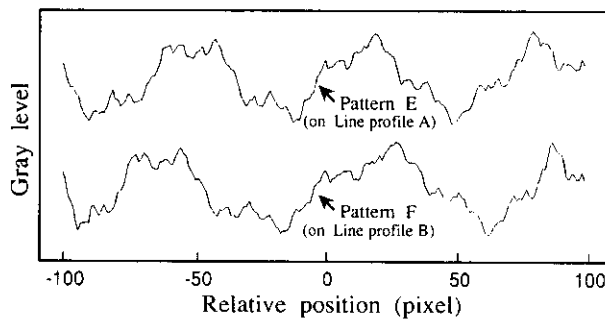


Fig. 3 Effect of quantization and discretization of gray level pattern

(1)に基づいてパターンDに変化する。

$$\left. \begin{aligned} x_d &= x_c \cos \theta - y_c \sin \theta \\ G_d &= G_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 x_d 、 G_d は表面濃淡パターンDのx座標、濃度であり、 x_c 、 y_c はプロフィールAのx、y座標、 G_c は座標 (x_c, y_c) における表面濃淡パターンCの濃度である。 θ は傾斜角であり、ここでは -8° である。回転による濃淡パターンの変形は、プロフィールA上の位置と形状に依存し、濃度は保存される。

また画像入力時点のデジタル画像化に相当する誤差を取り込むため、表面濃淡パターンC、Dの間引き、量子化およびCの離散化したx座標値と一致させるためのDの補間処理を行った。この処理により、表面濃淡パターンC、Dは各々Fig. 3に示すE、Fになる。ここでE、Fはx軸方向に等間隔に並ぶ200点で構成し、各点はy軸方向の濃度値をもつ画素に相当する。

両眼視差による3次元形状復元法は、表面濃度パターンEとFおよび傾斜角 θ が既知であり、これらを用いてプロフィールAを求める手法である。

3.2 対応点探索

領域ベース法では、基準画像上に小領域を設定し傾斜画像上の探索領域内を走査して、もっとも一致度のよい濃淡パターンをもつ傾斜画像上の小領域を対応する部位とする。いわゆるテンプレートマッチングであり、一致度の評価には残差逐次検定法(SSDA法)、修正SSDA法³⁾、相互相関法などがある。濃淡パターン変化の少ない画像から対応点を探索するには、一般に簡便かつ比較的精度のよい相互相関法(相関係数法)⁶⁾が用いられている。探索領域内のn番目の小領域における相関係数 R_n は、(2)式で定義される。

$$R_n = \frac{\sum_{i,j} (G_{ij} - \bar{G})(g_{nij} - \bar{g}_n)}{\sqrt{\sum_{i,j} (G_{ij} - \bar{G})^2 \sum_{i,j} (g_{nij} - \bar{g}_n)^2}} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 G_{ij} : 基準となる小領域の各画素の濃度値

$\bar{G}$: 基準となる小領域の平均濃度値

g_{nij} : 探索領域のi番目の小領域の各画素の濃度値

$\bar{g}_n$: 探索領域のi番目の小領域の平均濃度値

Σ は、対応する各画素(i, j)間に関する総和

Fig. 4は、一般に用いられている相互相関法を用いて小領域サイズ(シミュレーションでは小領域長さ)を15画素、探索領域サイズを47画素とした場合の復元されたプロフィールGともののプロフィールAである。高さの算出には(3)式を用いている。

$$h_i = (x_i \cos \theta - x_i - d_i) / \sin \theta \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 h_i はプロフィールAの x_i における高さであり、 d_i は、対応点探索で得られた x_i における濃淡パターンEとFのx軸方向

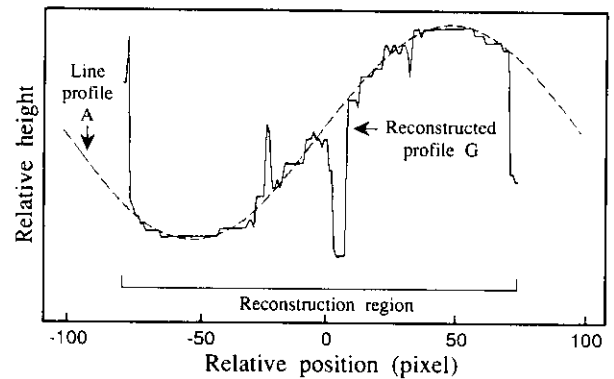


Fig. 4 Profile reconstruction by conventional method

での位置のずれである。

Fig. 3のEとFは形状はよく似ているが、x軸方向の位置のずれだけでなく、部分的にx軸方向に拡大、縮小されているのがわかる。このため、基準画像と傾斜画像で同じ大きさの領域で一致度を評価した場合には、相互相関法であっても誤差が大きくなる。

特に、Fig. 4のプロフィールGの両端で大きく誤差が発生しているのは、(1)式から導かれるとおり、回転中心から遠くかつ大きな高さをもつため、プロフィールの変形や縮小度が大きいためである。プロフィールGの両端部の対応点探索時の探索領域内の相関係数分布を解析すると、ピークが複数存在して他の類似した部位の方が相関係数が高くなったり、走査による相関係数分布が平坦化して誤認が発生する状況が確認できる。

また、復元されたプロフィールGは階段状のプロフィールをもち、高さ方向の誤差を生じている。これは、対応点探索時の位置ずれは1画素を最小単位とする離散値になるためであり、 θ が -8° の場合には、(3)式から d_i の1単位の変化は高さ h_i に対して約7.2画素分の影響を与えることによる。すなわち、高さ方向の最小分解能は約7.2画素である。

3.3 対応点探索時の精度向上手法

領域ベース法で、基準画像上の小領域と傾斜画像上の探索領域内の小領域の大きさを同一で行う従来の対応点探索方法は、傾斜による画像の変形を考慮していないため、Fig. 4のようなミスマッチングが発生する。変形が相似の場合には、不変量として正規化された重心まわりのセントラルモーメントを用いて対応形状を抽出する方法⁷⁾がある。しかし、傾斜による変形の場合は相似形ではなく、x軸方向のみの拡大、縮小変形になる。

一般に小領域サイズは、高周波成分を含む場合には小さい方がマッチング精度は上がり、低周波成分の場合には大きい方が精度は向上する。また処理速度は、小領域サイズが大きいくほど高速になる。このため、領域内の濃度変化率に応じてダイナミックに小領域サイズを決定する動的領域分割法を開発し、対応点探索精度の向上と処理時間の短縮にきわめて有効であることを確認した⁸⁾。本手法では、小領域サイズの決定に動的領域分割法を用いた。濃度変化 e は次式により評価した。

$$e = \frac{1}{N} \sum_{i,j} (g_{ij} - \bar{g})^2 \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 g_{ij} : 基準画像上の小領域の各画素の濃度値

$\bar{g}$: 基準画像上の小領域内の平均濃度値

N : 基準画像上の小領域内の画素数

さらに、傾斜による対応点探索領域内の濃淡パターンの拡大、縮小に対応するため、探索する傾斜画像上の小領域のサイズを変化さ

せる方法を開発した。すなわち設定した基準画像上の小領域に対し、傾斜画像上の小領域をより小さいサイズからより大きいサイズまで順次変化させ、おのおの小領域サイズで探索領域を走査して一致度を算出する。その中で最も一致度の高い傾斜画像上の小領域サイズで決定された部位を対応点とする方法である。

探索領域内の小領域のサイズ可変化にともない、基準画像上の小領域サイズと異なる場合には、基準画像の離散的な x 方向位置に合わせて、傾斜画像上の小領域の濃度を補間することにした。一致度の評価には、高速性を考慮して修正SSDA法を用いた。拡大、縮小に対応したアルゴリズムのため、修正SSDA法でも十分な精度を得ることができる。

Fig. 5は今回開発された本手法により復元されたプロフィールHとものプロフィールAであり、基準画像と傾斜画像の小領域サイズを同一とした従来の相互相関法による復元プロフィールGに比べ、形状復元精度が格段に向上していることがわかる。高さ方向の誤差は最大高さに対して2.4%以内の範囲である。これは、本手法では濃淡パターンの拡大、縮小に対応しているだけでなく、(3)式的位置ずれ d_i の単位を1/2画素にできるため、高さ h_i の変化単位は約3.6画素に収まるからである。

なお、Fig. 5では対応点探索時点での探索領域内の小領域サイズの拡大、縮小による効果を観察するため、動的領域分割法は用いておらず、基準画像上の小領域サイズを15画素、傾斜画像上の探索領域サイズを47画素に固定した。

Fig. 5の場合、数値シミュレーションによれば、一致度の最も高い傾斜画像上の小領域サイズは、 x 軸方向の位置の変化に対し、10画素から22画素の間で滑らかに変化している。プロフィールAのように滑らかに変化する形状では、投影による濃淡パターンの変

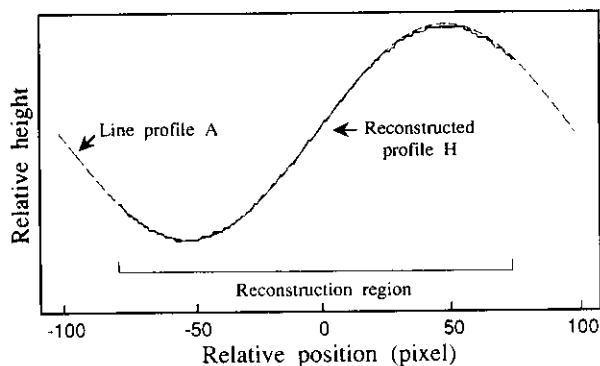


Fig. 5 Profile reconstruction by newly developed method in the case of "smooth" reference profile

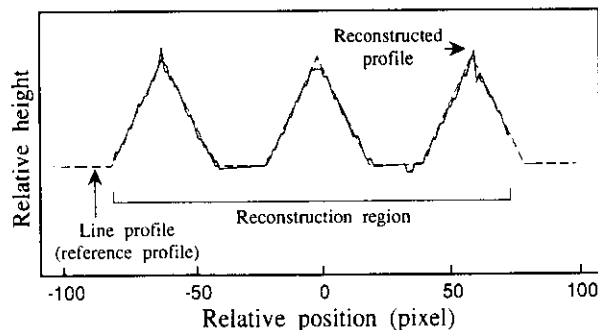


Fig. 6 Profile reconstruction by newly developed method in the case of "sharp" reference profile

形、部分的な拡大、縮小は滑らかであり、対応点探索時の傾斜画像上の小領域サイズの選択範囲は前回の最適小領域サイズの近傍にあることになる。よって、小領域サイズの選択範囲を絞り込め、処理速度の向上を図ることができる。

Fig. 6では、鋭角的に形状が変化するプロフィールに本手法を適用した。基準画像上の小領域サイズを9画素、探索領域サイズを41画素に固定し、Fig. 5の場合と同一の処理アルゴリズムを用いている。高さの平均誤差は3.2%であり、従来の相互相関法に比べて十分優れているが、鋭角の部分で比較的大きい誤差が発生している。これは、鋭角部の近傍では傾斜による変形の変化度が大きく、小領域の中に拡大部位と縮小部位が共存し、領域としての一致度の評価が不正確になるからである。対処方法として小領域サイズを小さくすれば形状の大きな変化に追従できるが、低周波成分の場合にはミスマッチングが発生する可能性が高くなる。

Fig. 6の場合、基準画像の小領域サイズ9画素に対して、一致度の最も高い傾斜画像上の小領域サイズの変化は5画素から15画素までの範囲であったが、形状の鋭角部で最適小領域サイズは急激に変化した。このため狭い領域で形状が大きく変化する部位では、前回の最適小領域サイズは無関係であり、傾斜画像上の小領域サイズの選択範囲を大きく設定しておく必要がある。ただし、形状の大きな変化に追従するため、小領域サイズは比較的小さく設定するので、小領域サイズが大きい場合ほど選択範囲は広くならない。

以上から、傾斜画像上の小領域サイズを可変にする方法は、形状が比較的滑らかな場合は形状の復元精度は非常に高く、また高速化を図ることができる。一方、鋭角的な形状変化がある場合は、鋭角部でミスマッチングが発生する可能性があるが、小領域サイズを小さく設定することで誤差を最小に抑えることができる。

実際の画像では、動的領域分割法で濃度変化率を評価しながら基準画像上の適正小領域サイズを決定し、その小領域サイズに対応して傾斜画像上の探索領域内のマッチング小領域サイズを変化させるので、従来法に比較しミスマッチングを大幅に減少させることができる。ミスマッチングが発生しやすい鋭角的形状の場合でも、傾斜画像上の最適小領域サイズの変化に注目すれば、変化の大きい部位が鋭角部に相当するため、基準画像上の小領域サイズの部分的縮小などの精度向上策がとりやすい。

また、本手法は従来法に比べ、相対高さ算出時の分解能を2倍にする特長をもち、総合的に高精度な立体形状の復元を可能にする。

なお、アンマッチング部位を対応点探索の際に回避したり、濃度が等質で特徴が少ない領域の誤差影響を抑えて精度を向上させる手法⁹⁾や、画像のピラミッド構造化により大域的な一致度の評価と下層での精密評価を行うことで、演算時間の短縮を図る手法¹⁰⁾などがある。今回の処理アルゴリズムには付加していないが、ともに本手法と矛盾しないので組み合わせて使用することが可能である。

4 金属粉末粒子の形状解析

4.1 形状解析の目的

金属粉末の形状は、粉末特性、成形性、焼結性などと密接な関係がある。従来の2次元での形状の定量化にかわり、より直接的かつ高精度な立体形状での定量化が要請されている。測定方法は両眼視差を用いた立体形状復元法以外にも、レーザ顕微鏡で直接プロフィールを観察する方法などがあるが、デジタル化された情報を処理する際の問題や、材料特性と結びつく立体形状特徴量の選定などは共通的な課題である。

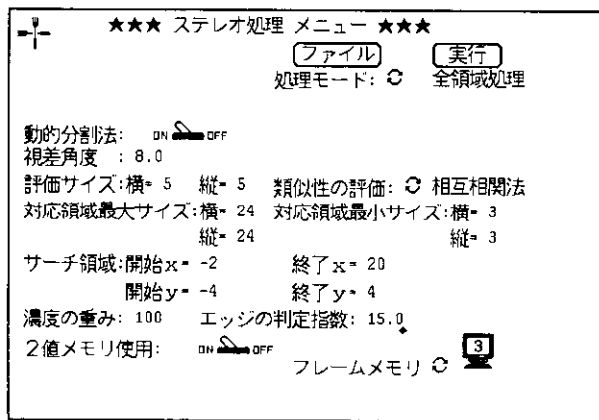


Fig. 7 Prototype menu of stereo vision programs on "Sun workstation"

本実験では、水アトマイズ鉄粉の球状化および無球状化粉末を対象に、開発した立体形状復元アルゴリズムの実用性を評価するとともに、電子顕微鏡の倍率などの観察条件の差異に影響を受けない球状化の度合を示す立体形状特徴量を求めることを目的とする。

4.2 形状解析のための画像処理環境

画像処理システムは、川崎製鉄製の「画像博士®」を使用した。画像博士は走査型電子顕微鏡 (SEM) 像を直接またはリムーバブルディスクを介してデジタル画像入力可能であるが、ここでは一般性を検証するため、写真撮影した上、マクロスタンドに設置された CCD カメラから画像入力する方法を採用した。

両眼視差による3次元形状復元アルゴリズムは、画像博士のワークステーション部でC言語および画像博士の画像処理ライブラリを用いてプログラム化し、画像博士のイメージコントローラ部と連係して、高速に処理できるようにした。画像博士のユーザ定義アプリケーション機能を使用して、画像博士のメニュー上に、開発したプログラムを作動する試作操作メニューを作成した。Fig. 7は実験に用いる処理条件の設定を行う試作メニューの例である。

プログラムは画像博士のワークステーション部、イメージコントローラ部で実行され、途中経過および形状プロフィールはカラーモニタ上に表示する。処理の過程で得られた数値データは画像博士の解析ファイルに、画像データは磁気ディスク装置上の画像ファイルおよび光ディスク装置に保存し、比較評価や実験記録の作成に再利用する。

4.3 画像入力と画像前処理

画像入力用試料は、球状化処理を行った水アトマイズ鉄粉と球状化処理を行わない水アトマイズ鉄粉とし、SEM によるおのの1粒子の基準画像と、それを8°回転させた傾斜画像の写真の組を複数用意した。

1対のSEM写真を1枚ずつTVカメラ入力する場合、対応点探索を精度よく行うには、基準画像と傾斜画像の正確な位置合わせが必要である。本実験ではマニュアル位置合わせ方法を採用し、画像博士のカラー入力機能を使用して、前もって記録した画像を赤として表示し、カメラから入力中の対になる画像を青で表示するよう工夫した。これをモニタ上に重ねて表示して、左右が赤、青の眼鏡で観察することにより、立体視しながら入力中の画像を微小に移動、回転させて、適切な立体視が得られる位置を求めた。

CCD カメラから画像博士に入力した画像は、基準画像と傾斜画

像がおのの縦512画素、横432画素にデジタル化され、1画素はおのの256階調の濃度をもつ。デジタル化により各々の画像は量子化された濃淡パターン精度になり、また実用的な範囲ではあるが、おのの画像間の厳密な意味での測定位置の一致性は失われる。

前章の数値シミュレーションモデルでは、傾斜を行っても濃度レベルは保存するが、写真によるカメラ入力の場合には一般に濃度レベルは変化する。変化要因は写真の焼き付け時の黒化度の違い、カメラ入力時の照明の変化など多数考えられる。また写真焼き付け時のごみなどもノイズとして入力画像上に乗り、ミスマッチングの原因になる。このため、基準画像と傾斜画像を入力した後、両画像の濃度のレベル合せと正規化を行った。

次に、対応点探索に要する処理時間を短縮するため、画像全体の中から測定対象領域だけを抽出する処理を行った。ここでは、測定対象部と背景部の濃度のレベルの相違や平滑性の相違に着目して、画像博士の2値化機能、モホロジ機能、画像間演算機能などを用いて必要領域を抽出した。

4.4 対応点探索と高さ算出

対応点探索は、抽出した測定対象画像の全面にわたり形状を復元する方法と、測定対象画像のラインプロフィールを復元する方法の両方を実施した。ラインプロフィールの場合には、測定対象画像を等間隔で切断する機能、任意の位置で切断する機能を付加した。

ラインプロフィールの対応点探索では、理想的には基準画像と傾

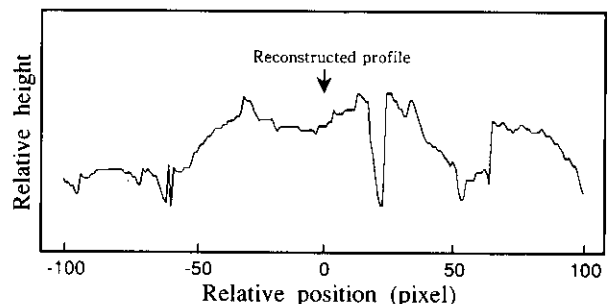


Fig. 8 Profile reconstruction of water-atomized iron powder

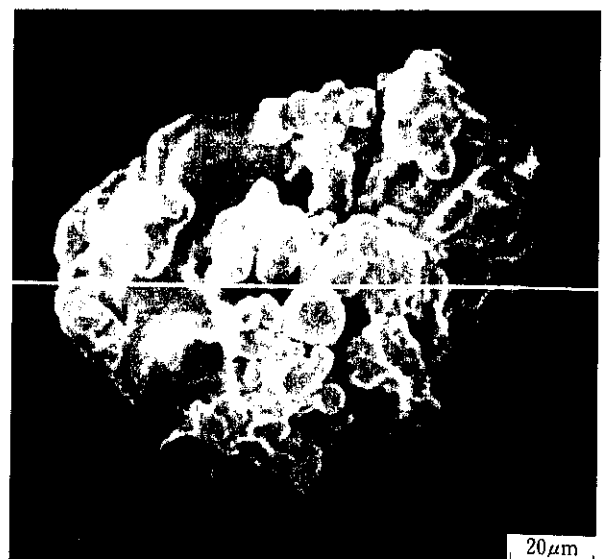


Photo 1 Water-atomized iron powder and "line profile" position (white line)

斜画像の対応する1画素ラインだけを対象にすればよいはずだが、画像入力時の両画像間の位置の移動、回転を考慮して、面積をもつ小領域および探索領域で一致度の評価を行った。このため、全面にわたる面プロフィールの復元とラインプロフィールの復元には、基本的には同一の処理アルゴリズムを採用した。

処理時間は主に対点探索に要し、面プロフィールよりラインプロフィール復元の方が短時間で終了するので、求める立体特徴量に応じて面プロフィールとラインプロフィールを使いわけた。

対応点探索時の基準画像上の小領域サイズの決定には動的領域分割法を用い、初期領域サイズを24×24画素として、領域内の濃度変化率に応じて段階的に3×3画素まで小さくなるよう設定した。

Fig. 8は、Photo 1の試料を写真上で示すラインで切断した時の補正前のラインプロフィールである。立体眼鏡による目視プロフィールとよく一致していることを確認した。Fig. 8で大きくプロフィールが落ち込んでいる部位は、立体眼鏡による観察でも形状が急峻であり、アンマッチングを起していると考えられる。

4.5 誤差の補正と表示

実画像では、写真の焼き付けむらなどのさまざまな誤差要因でミスマッチングが発生する。形状の角度変化が大きく、8°の回転で2次元投影面から見えなくなる部位、あるいは新たに見えるようになる部位があれば、Fig. 8のようにアンマッチングが生じる。

これらのミスマッチング、アンマッチングの補正には、補正部位の周囲の高さを平均し、補正高さとする方法を採用した。この際、周囲に他の補正部位がある場合には、平均処理する対象から外している。

相互相関法による一致度評価の場合には、相関係数値があらかじめ設定したしきい値以下の部位を補正対象とするといった、補正箇所の自動決定法がある。SSDA法の場合も同様な自動決定のためのしきい値を設けることができる。しかし、数値シミュレーションモデルによれば、傾斜による濃淡パターンの変形度が大きい場合、正しいマッチング部位であっても相関係数値やSSDA値は悪くなるので、既存の自動補正法では逆に復元形状が悪化することがある。このため本実験では、自動補正の範囲を絞り、効率化したマニュアル修正法との組合せで対処した。マニュアル操作による修正は、大局的な人間の視覚による判断とデジタル画像処理によるコンピュータの局所的な視覚を組み合わせることにより、演算処理時間を短縮し、信頼性を向上させる¹¹⁾ことができる。

補正後の離散的な相対高さ情報から形状特徴量を求めるには、表

面の抽出が必要である。厳密には表面マップの作成、平面パッチ、2次曲面パッチの整合などの処理¹²⁾を行い、表面情報を確立した後形状特徴量を算出する。

本実験では、採用する形状特徴量を勘案して、表面の抽出にはより簡便な三角要素による面生成手法をとった。Photo 2は、Photo 1の測定対象部全面の処理により得られた離散的な相対高さ群に、三角要素で面を張った上、陰面処理を施して鳥瞰図表示した面プロフィールである。鳥瞰図の表示角度は自由に変更できる。また、シェーディング表示、レイトレーシング表示も可能である。

4.6 立体形状解析結果と考察

粒子の形状解析では、単なるアスペクト比の算出から、より高度なフーリエ解析、デルタ解析およびフラクタル解析などを用いた特徴量の抽出法¹³⁾がある。異なる粉砕機によって作られた鉱物資源粒子の形状特徴抽出¹⁴⁾やパラメータ法、フーリエ変換による線形法を用いたセラミックス粉末の形状特徴抽出¹⁵⁾などが報告されている。ここでは、水アトマイズ鉄粉の球状化処理の度合を定量的に表現できる簡便な形状特徴量を求めることが目的であり、処理時間の短いラインプロフィール法で求まる特徴量が好ましい。

ラインプロフィールの曲線長さ l と投影長さ l_0 の比 l/l_0 は形状変化の割合を表し、粉末粒子を切断していることを考慮すると複雑度に相当する量を示している。球状処理した粉末と処理しない粉末では、前者の方が形状が滑らかであり、 l/l_0 の値は小さいはずである。

まず、球状化処理を行った粉末の画像と行わない粉末の画像から復元した各ラインプロフィールグループ間で l/l_0 を比較した。しかし、電子顕微鏡倍率の異なる球状処理、無球状粉末粒子の間では、 l/l_0 値の有意な差異は認められなかった。これは、対応点探索アルゴリズムによる誤差および倍率の異なる試料を限られた離散的数値で扱うデジタル処理による誤差に起因するものと考えられる。

次に、電子顕微鏡の倍率の差異やデジタル処理による離散化の影響の少ない、同一画像内でのデータサンプリング間隔と l/l_0 の関係を検討した。ここではx軸方向に離散化された量である画素を単位として、サンプリングする画素間隔の相違による l/l_0 値の変化に着目した。Photo 3(a)は、球状化処理を行った粉末であり、そのサンプリング間隔と l/l_0 値の関係をFig. 9(a)に示す。各点は、異なる5箇所のラインプロフィールから算出した l/l_0 の平均値であり、Fig. 9ではステップサイズ、すなわちサンプリング間隔を長さに換算した量でx軸を表している。変化を評価する量として、(5)式に示すフラクタル次元を用いると、 $1-D$ はFig. 9(a)における

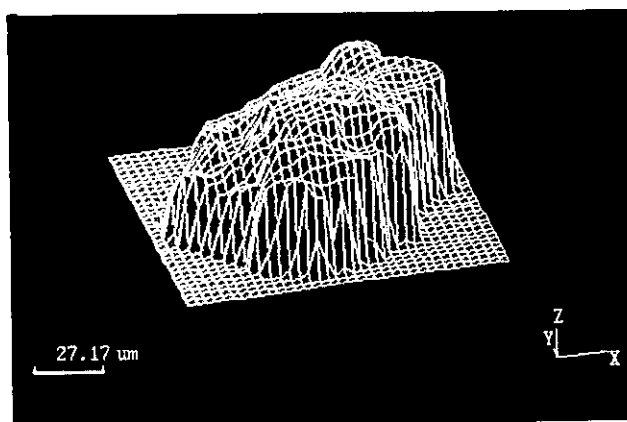


Photo 2 Birds-eye view of iron powder shown in Photo 1

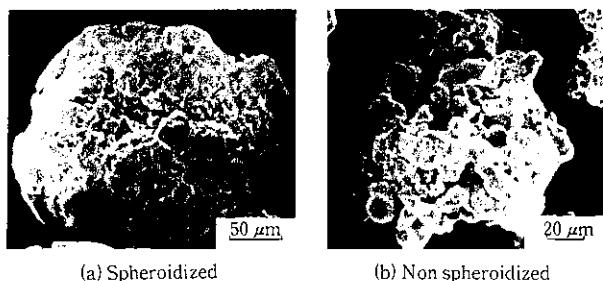


Photo 3 Water-atomized iron powders (digital images from SEM micrographs)

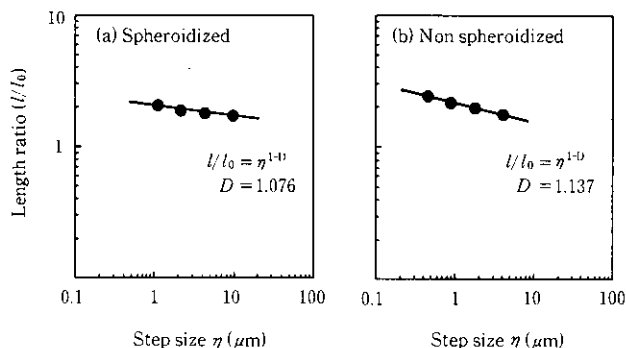


Fig. 9 Relation between length ratio and step size of water-atomized iron powders

1次近似式の傾きに相当し、 D 値は 1.076 となる。

$$l/l_0 = \eta^{-D} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 η : ステップサイズ (μm)

D : フラクタル次元

同様に、球状化処理を行わない Photo 3 (b) の試料のラインプロフィールでは、Fig. 9 (b) で示すグラフから D 値は 1.137 となり、球状化処理しない粉末に比べ D 値が大きくなっている。

ステップサイズが大きくなると高周波成分の影響が減少するため l/l_0 は減少するが、ラインプロフィールの複雑度が大きいほど、その減少の程度は大きい。 D 値はラインプロフィールの複雑度を表す量で、 D 値が大きいほどプロフィールは複雑であることを示して

いる。

測定粉末数を増やして同一の解析を行うと、球状化処理粉末の D 値は 1.076 から 1.103 の範囲にあり、無球状粉末の D 値は 1.105 から 1.142 の範囲にあった。よって今回の実験の場合、1.103 から 1.105 の間にしきい値を設定すれば、球状化処理粉末と無球状粉末を判別することができる。 D 値は同一画像内で算出できる形状の複雑度に対応した特徴量であり、画像入力時の倍率の差異やその他の観察条件の違いの影響は受けないため、さらに測定試料数を増やしても D 値によるしきい値は不変量であると推定できる。

また、 D 値の変化は立体視による複雑度の変化と定性的に一致しており、球状化処理の有無を判別できるだけでなく、 D 値により球状化の度合を定量的に表現できる可能性がある。

5 結 言

1 対の両眼視差画像の領域ベース法によるマッチング過程で、傾斜による変化や領域内濃度変化率に着目して領域サイズを変化させるアルゴリズムを考案し、数値シミュレーションと画像処理実験で検証を行うことにより、以下の結論を得た。

- (1) 基準画像と傾斜画像の対応点探索において、探索領域内の小領域サイズを変化させる方法は、同一の小領域サイズで一致度を評価する従来の方法に比べ、傾斜による変形への追従性が優れるため立体形状の復元精度が高い。
- (2) 探索領域内の小領域サイズを変化させる方法は、また対応点探索の際に探索方向の離散的な画素の中央部まで一致度を算出できるため、従来法に比べて相対高さ算出時の分解能が 2 倍になる。
- (3) 球状化処理および無球状化水アトマイズ鉄粉の形状解析に本手法を適用することにより、以下の結果を得た。
 - (a) 粉末の球状化処理の有無は、フラクタル次元を用いることで、倍率などの観察条件の差異によらず判別することができる。また球状化処理の度合を定量的に表現できる可能性がある。
 - (b) 開発した手法は、従来法に比べ高精度なため、球状化処理を行っていない粉末のような比較的凹凸度の激しい形状に対しても、実用的な精度で立体形状を復元できる。

参 考 文 献

- 1) T. Tsukiyama and T. S. Huang: *Pattern Recognition*, **20** (1987) 2, 105-113
- 2) J. Aloimonos and J.-Y. Herve: *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, **12** (1990) 5, 504-510
- 3) X.-W. Tu and B. Dubuisson: *Pattern Recognition*, **23** (1990) 3/4, 223-235
- 4) 日本鉄鋼協会: 「金属材料の新しい画像解析技術」, (1989), 82-120, [日本鉄鋼協会]
- 5) 尾上守夫, 前田紀彦, 斎藤 俊: 情報処理, **17** (1976) 7, 634-640
- 6) 森 忠次, 服部 進, 内田 修: 写真測量とリモートセンシング, **24** (1985) 1, 13-22
- 7) R. Y. Wong and E. L. Hall: *CGIP*, **8** (1978), 16-24
- 8) 宮崎 明, 古君 修, 柳澤 満, 斎藤文夫: 川崎製鉄技報, **21** (1989) 4, 362-367
- 9) A. Goshtasby: "A Refined Technique for Stereo Depth Perception", Proc. Workshop Comput. Vis. Represent Control, (1984), 125-129
- 10) 尾上守夫, 曾根光男: 電子通信学会論文誌 (D), J70-D (1987) 1, 139-147
- 11) Y. Nishimoto, S. Imaoka, and H. Yasukuni: "A PC-based Interactive Image Processing System for 3-D Analysis of SEM Stereo Images", Proc. IAPR Workshop Comput. Vis., (1988), 383-387
- 12) W. Hoff and N. Ahuja: "Extracting Surfaces from Stereo Images: An Integrated Approach", Proc. 1st. Int. Conf. Comput. Vis., (1987), 284-294
- 13) B. V. Miller and R. W. Lines: *CRC Crit. Rev. Anal. Chem.*, **20** (1988) 2, 75-116
- 14) G. T. Adel, R. H. Yoon, and R. W. Ehrlich: "Image Analysis Applications in Mineral Processing", Proc. Artif. Intell. Miner. Mater. Tech., National Science Foundation, Tuscaloosa (USA), October (1987)
- 15) J.-L. Chermant: *Ceram. Int.*, **12** (1986), 67-80