
材料評価における画像処理技術

Image Processing Technology for Material Evaluation

宮 寛 明(Akira Miyazima) 古 君 修(Osamu Furukimi) 柳 澤 満(Mitsuru Yanagisawa) 斉 藤 文夫(Fumio Saito)

要旨：

画像処理技術の材料評価への応用は、材料の形状的特徴量の把握に有効である。著者らは、材料評価に適用する画像処理手法として、粒子解析、テクスチャ解析および3次元の画像処理手法を開発した。この適用により以下の知見が得られた。(1)腐食ピットの認識にパターンマッチング手法を適用することにより、不鮮明な腐食ピット像から精度よく定量データを抽出することができる。(2)テクスチャ解析を用いて脆性破面と延性破面を弁別することにより、シャルピー破面率の測定が行える。(3)立体視手法を適用することにより、SEM両眼視差像から金属粉末粒子の立体形状を構築することができる。また、当社が開発したリアルタイム画像処理システム「画像博士」は、350種を超える豊富な画像処理機能をメニュープログラムと画像処理コマンドにより容易に操作することのできる技術者、研究者向きシステムである。

Synopsis：

Application of image processing technology to material evaluation is useful determining the shape features of a material. A summary of image processing techniques applied to material evaluation and the examples of application of these techniques are introduced. In association with our practical application to material evaluation, the following three findings have been obtained: (1) By applying a pattern matching technique to the recognition of etch pits, the accurate quantitative data can be extracted from indistinct picture images of etch pits (2) Through discrimination between brittle fracture surfaces and ductile fracture ones using a texture analysis technique, it is possible to measure the crystallinity of Charpy fracture appearance and (3) By applying a stereovision technique, the three-dimensional shape of metal powders can be reconstructed by using the SEM stereograph. The outline of a real-time general purpose image processing system which the authors have developed is also reported.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

Image Processing Technology for Material Evaluation



宮島 明
Akira Miyajima
技術研究本部 計測・物
性研究センター 主任
研究員(課長)



古君 修
Osamu Furukimi
ハイテク研究所 新素
材研究センター金属粉
末グループ 主任研究
員(課長補)・工博



柳澤 満
Mitsuru Yanagisawa
川鉄システム開発(株)
FA 開発部



斉藤 文夫
Fumio Saito
川鉄システム開発(株)
FA 開発部

1 結 言

画像処理技術とは、画像をデータとして扱い、さまざまな目的に応じて画質を改善したり、画像の特徴を定量化する技術である。広義には、画像認識、画像蓄積、画像生成、画像通信などを含む画像情報処理技術全体を意味する。生産ラインにおいては、寸法、形状の計測、各種非破壊検査、材料分析などに実用的に用いられるようになっており^{1,2)}、研究活動においても、材料研究の強力な道具として日常的に使用されている。

画像処理技術の材料評価への応用は、各種材料評価実験におけるデータ解析の効率化、高精度化と大量データ処理による統計的評価に有効である³⁾。また、画像処理によって抽出・定量化された特徴量を材料の物理的、化学的現象と結びつけ、材料特生の定量的な解明の手段とする⁴⁾ことができる。

鉄鋼材料研究における画像処理技術の適用の歴史は古く⁵⁾、金属組織の観察や各種実験データの解析に広範に利用されてきた。技術

要旨

画像処理技術の材料評価への応用は、材料の形状的特徴量の把握に有効である。著者らは、材料評価に適用する画像処理手法として、粒子解析、テクスチャ解析および3次元の画像処理手法を開発した。この適用により以下の知見が得られた。

- (1) 腐食ピットの認識にパターンマッチング手法を適用することにより、不鮮明な腐食ピット像から精度よく定量データを抽出することができる。
- (2) テクスチャ解析を用いて脆性破面と延性破面を弁別することにより、シャルピー破面率の測定が行える。
- (3) 立体視手法を適用することにより、SEM 両眼視差像から金属粉末粒子の立体形状を構築することができる。

また、当社が開発したリアルタイム画像処理システム「画像博士」は、350種を超える豊富な画像処理機能をメニュープログラムと画像処理コマンドにより容易に操作することのできる技術者、研究者向きシステムである。

Synopsis:

Application of image processing technology to material evaluation is useful in determining the shape features of a material. A summary of image processing techniques applied to material evaluation and the examples of application of these techniques are introduced. In association with our practical application to material evaluation, the following three findings have been obtained: (1) By applying a pattern matching technique to the recognition of etch pits, the accurate quantitative data can be extracted from indistinct picture images of etch pits (2) Through discrimination between brittle fracture surfaces and ductile fracture ones using a texture analysis technique, it is possible to measure the crystallinity of Charpy fracture appearance and (3) By applying a stereovision technique, the three-dimensional shape of metal powders can be reconstructed by using the SEM stereograph.

The outline of a real-time general purpose image processing system which the authors have developed is also reported.

研究本部における新素材の研究開発においても、鉄鋼分野の画像処理技術はそのまま適用できることが多く、材料評価方法の1つとして急速に適用範囲を広げている。

本稿では、技術研究本部において開発した粒子解析、テクスチャ解析および3次元解析の各画像処理手法を用いた材料評価への応用事例を報告する。また、技術研究本部で蓄積された画像処理技術をもとに、当社で開発した汎用画像処理システム「画像博士」についても概要を述べる。

* 平成元年7月10日原稿受付

2 画像処理による材料評価

2.1 画像処理技術の概要

材料評価への画像処理の応用は、金属組織の定量化を中心に発展してきた。金属材料のミクロ的な組織と機械的性質は密接に関連すると考えられており、金属組織を定量的に把握する手法としての画像処理技術の有効性が認識されている。この金属組織の定量化に用いる画像処理技術は普遍的なものであり、材料評価のさまざまな領域に応用することができる。

材料評価においては、主に画像の計測と形状特徴の抽出が画像処理技術に期待されている。画像処理技術の適用には、各々の材料評価目的に応じて専用の画像処理装置を用いる方法もあるが、研究開発のように測定対象がさまざまに変わり、試行錯誤処理の多い分野では、広範な画像処理機能を容易に活用できる汎用画像処理システムが有利である。後述の「画像博士」のような汎用画像処理システムを用いることにより、画像中の多数の対象物の長さ、面積、周囲長、フィレ径などの計測を行うとともに、長さ分布、面積分布のような統計的計測を行うことができる。また形態学的な特徴である対象物の円度、複雑度、オイラー数あるいはモーメントなどを求めることが可能である。

最近の画像処理では、局所的な画像パターンの違いを定量化するテクスチャ解析、2次元の画像パターンの繰り返しを定量化するフーリエ解析、そして破壊面のような複雑な凹凸形状から立体的な特徴量を求める3次元解析などの応用が進んでいる。プログラムで高速な処理能力を持つ汎用画像処理システムであれば、材料評価にこれらの画像処理手法を適用することができる。

2.2 粒子解析

粒状対象物の計数や形状特徴の定量化は、一般に粒子解析と呼ばれ、材料や製品の評価に日常的に使用されている。多数の粒状あるいは島状の対象物の個数、面積、面積分布、円相当径などの情報が容易かつ再現性よく得られることから、広く鉄鋼、新素材の実験データ解析に用いることができる。

鉄鋼材料では、結晶粒度測定や金属微粉の粒度分布測定などに用いるほか、同様のアルゴリズムが適用できる腐食試験の発錆状況測定、焼結体の気孔率分布測定、ほうろく層内気泡測定、ロール表面摩耗量測定、塗装鋼板の剝離試験結果解析など多数の領域に応用されている。

セラミック、磁性材、超電導材、超微粉、特殊金属などの新素材では、材料を粒状に製造することが多く、画像処理による粒子解析の適用領域は広い。金属系粉末粒度分布、セラミック基板の粒径測定、金属系材料の発錆状況測定、多孔質体の空隙測定など多岐にわたる解析を行っている。

多くの対象物では、比較的単純な画像処理アルゴリズムで処理できるが、画像中の濃淡情報を処理の対象とする画像処理では、入力条件によっては処理方法に工夫が必要である。

Photo 1 は、オーステナイト系ステンレス鋼板の腐食ピットの測定例である。(a)の原画像は、試料の写真をTVカメラで入力したものであるが、写真撮影時の照明むらがあるので、そのまま2値化しただけでは(b)で示すように、照明むらと腐食ピットの識別ができない。また、腐食ピット内の反射した部分が除去され、本来円形であるべきピットが歪んでいる。これに対し、**Fig. 1**で示す画像処理アルゴリズムを適用すると、(c)のとおり腐食ピットの部

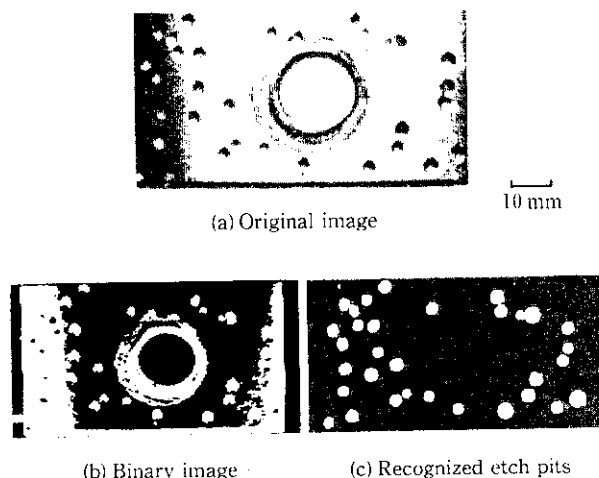


Photo 1 Recognition of etch pits using gray level pattern matching technique

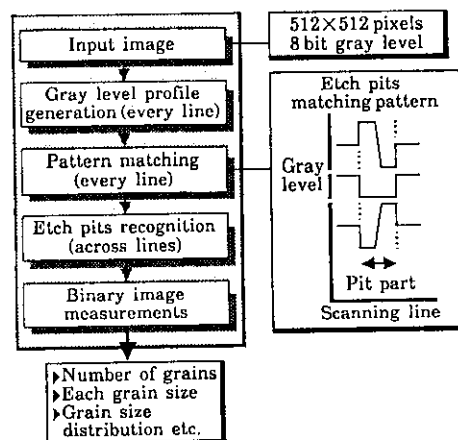


Fig. 1 Image processing flow by gray level pattern matching technique applied to recognition of etch pits

分だけを正確に抽出することができる。ここでは、Photo 1の(a)で垂直方向の線分ごとに濃度プロファイルを取り、Fig. 1の腐食ピットパターンと一致する傾向を持つ部分を腐食ピット候補として抽出する。得られた腐食ピット候補を複数の垂直線上で評価し、一定の面積を持てば腐食ピットと認識する。この段階で、通常の画像処理での2値化に相当する測定対象物の抽出処理が行われたことになり、続いて通常の2値画像解析を行えば、ピット数、面積、面積率などの必要とする数値を求めることができる。

2.2 テクスチャ解析

テクスチャとは、画像の局所的な濃淡変化の繰り返しによって構成される2次元模様と定義できる。テクスチャ解析では、このテクスチャの特徴を定量化し、テクスチャの分類を行うことができる。

テクスチャ解析は、例えば材料の靱性を評価するために使用されるシャルピー衝撃試験での破面率の測定に利用できる⁹⁾。**Photo 2**の(a)は、調質80 kgf/mm²級鋼 (HT-80) から採取したJIS Z2202 4号試験片のシャルピー衝撃試験後の破壊面である。シャルピー破面では、延性部が繊維状の微細構造を持ち滑らかに見えるのに対

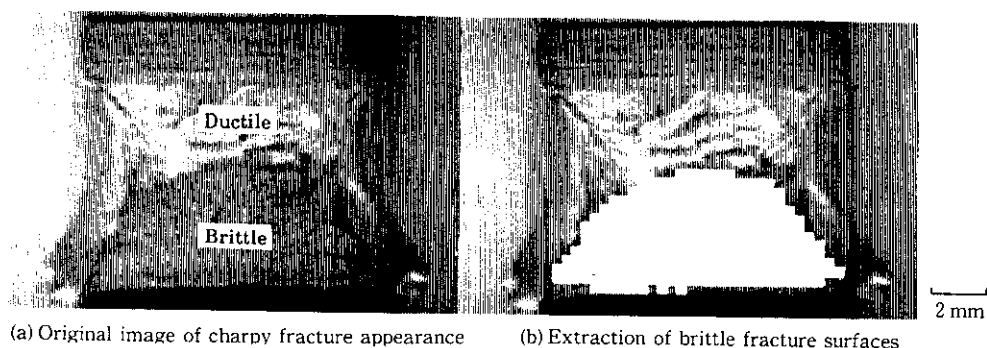


Photo 2 Measurement of charpy fracture appearance using texture analysis technique

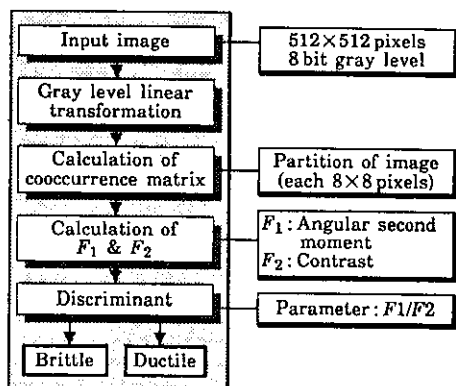


Fig. 2 Image processing flow by texture analysis technique applied to measurement of charpy fracture appearance

し、脆性部では粗い粒状の外観を持つ。この破面パターンの相違を画像処理により自動的に識別する。Photo 2 の (b) は、テクスチャ解析により脆性部のみを抽出して原画像と重ね合わせたものであり、白色部分が抽出された脆性部を示している。

Fig. 2 のテクスチャ解析アルゴリズムでは、 8×8 画素ごとの小領域に画面を分割し、小領域ごとに Haralick が提案した共起行列 (Cooccurrence matrix) を用いる方法⁷⁾を適用することにより脆性部、延性部を分離した。共起行列は、画像を分割した小領域内の隣接する画素の濃淡レベルが i から j に変化する確率をすべての濃淡レベル変化の組み合わせについて求めたものである。小領域内の「細かい」、「密である」、「帯状」、「突起性」などで表現されるテクスチャの規則性は、この共起行列から定義される各種の式により定量化できる。Fig. 2 では分離に用いる判別分析に、共起行列から求められる Angular second moment (F_1) と Contrast parameter (F_2) の比を採用した。ここで共起行列 $P(i, j)$ について、 F_1 および F_2 は以下のとおり定義される。

(1) Angular second moment

$$F_1 = \sum_{i=1}^{LVL} \sum_{j=1}^{LVL} [P(i, j)]^2$$

ここで、LVL は画像の濃淡レベルを示す。本実験では、入力時点の 256 レベルを再量子化して各画素 8 レベルの濃淡情報を持たせている。 $P(i, j)$ は、濃淡レベルが i である画素に隣接する画素の濃淡レベルが j である確率である。

(2) Contrast

$$F_2 = \sum_{k=0}^{LVL-1} k^2 \left[\sum_{i=1}^{LVL} \sum_{\substack{j=1 \\ |i-j|=k}}^{LVL} P(i, j) \right]$$

ここで、 k は隣接した画素間の濃淡レベル差である。

Angular second moment では、隣接する画素の濃淡変化の組み合

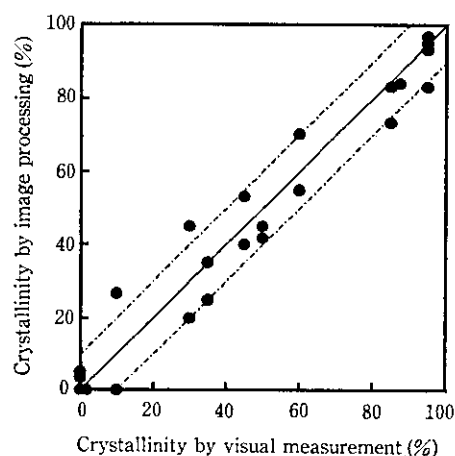


Fig. 3 Comparison of crystallinity by visual measurement with that by measurement using image processing technique

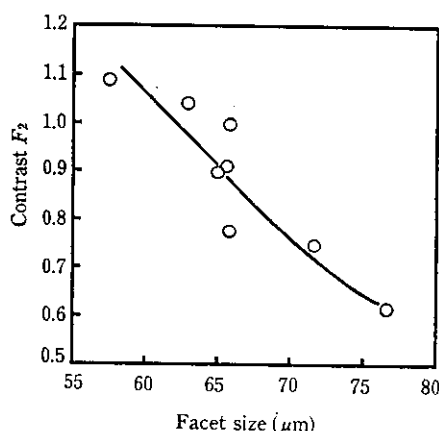


Fig. 4 Relationship between contrast & facet size in HT-80 steels

わせについて、その出現確率の 2 乗和を求めることにより、近傍領域内における濃淡パターンの統一性を評価できる。また Contrast は、近傍領域内で特定の位置関係にある画素間の濃淡変化量の 2 乗の期待値を求める特徴量であり、対象領域内で濃淡が頻繁かつ強く変化する場合に大きい値を持つ。

シャルピー破面の脆性破面率は、脆性部として認識した小領域の合計数を破面全体の小領域数で割れば求めることができる。本方法による破面率測定結果は、Fig. 3 のとおり熟練者の目視による測定とはほぼ $\pm 10\%$ 以内の誤差範囲に収まり、十分実用的である。

脆性破面上のファセット破面単位についても、Fig. 4 に示すとおり、共起行列から算出される Contrast とファセットサイズの間により相関関係が認められ、テクスチャ解析をファセットサイズの定量化に用いることができる⁹⁾。

2.4 3次元画像解析

両眼視差を利用した3次元画像解析は、特別な設備を必要とせず、容易にマイクロ構造の立体視化が行えることから、適用領域が急速に広がっている。シャルピー破面におけるファセット破面、ディンプル破面、腐食ピット、ストレッチゾーンなどの立体的な測定では、従来2次元でしか議論されていなかった形状特徴と材料特性との関係が、より精度よく把握できるようになった。Photo 3 は、HT-80 のディンプル破面と3次元解析で求めたその鳥瞰図である。

3次元画像解析は、金属粉末粒子の立体形状特徴の定量化にも有効である。金属粉末の立体的な形状特徴は、焼成時の材料特性と関連があると考えられる。金属粉末の画像処理による3次元形状構築アルゴリズムを Fig. 5 に示す。立体視を行うため、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて基準画像および8°傾けた傾斜画像を別々に入力した。入力画像は縦横512×512画素で構成し、各画素は256階調の濃淡情報を持つ。基準画像と傾斜画像の対応点の探索には動

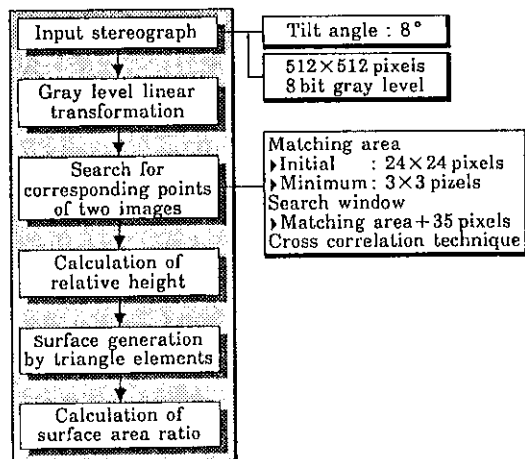
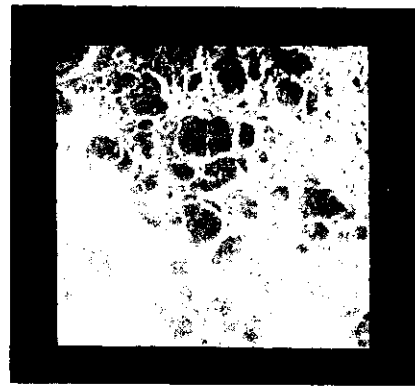
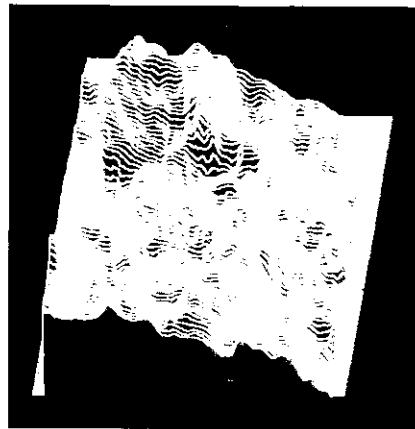


Fig. 5 Image processing flow of 3D shape reconstruction of metal powders



(a) Original image of dimples



(b) Birds-eye view of dimples

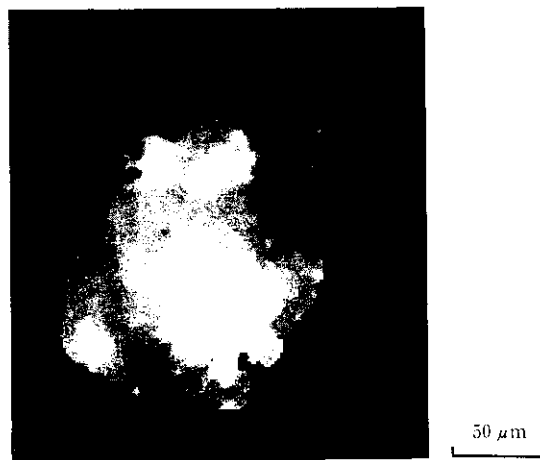
Photo 3 3D analysis of dimples on charpy fracture appearance

的領域分割法を用い、一致度の評価には相互相関法を使用した。動的領域分割法は、画像の濃淡レベルの変化量を評価して動的にマッチング対象領域の大きさを変え、処理画像の各部分で対応点探索に最適な領域設定を行う手法⁹⁾である。ここでは、初期の領域サイズを24×24画素とし、分割される最小領域を3×3画素に設定した。傾斜画像上での対応点の探索領域はマッチング対象領域のX, Y方向にそれぞれ35画素を加えた大きさとした。

SEM写真像を入力した金属粉末粒子の原画像をPhoto 4の(a)



(a) Original image of metal powder



(b) High-gray level transformation view

Photo 4 3D shape reconstruction technique applied to SEM picture image of metal powders

に示し、Fig. 5 のアルゴリズムによる3次元形状構築後の高さ濃度変換図を(b)に示す。高さ濃度変換図は、最も高い部分を白色、最も低い部分を黒色にし、中間の高さを濃淡度で表現して相対高さを表している。この場合、白色と黒色の距離は約 $180\text{ }\mu\text{m}$ に相当し、傾斜角から算出される誤差は土約 $5\text{ }\mu\text{m}$ である。(b)では、弛緩法によるアンマッチ、ミスマッチ部の除去と三角形要素による面張り処理を行っている。面張りにより、3次元座標列は面情報を持つサーフェスモデルとなり、3次元形状での表面形状の把握、表面積の算出が行える。材料特性との関連づけでは、例えば表面積と投影面積の比により、簡易的に形状の複雑度を評価する¹⁰⁾ ことができる。

3 画像処理システム「画像博士」

研究活動では、画像処理の要求が多岐にわたるため、豊富な機能と高い処理能力を持った汎用画像処理システムが必要である。技術研究本部では、長年にわたり蓄積した画像処理技術をもとに、リアルタイム汎用画像処理システム「画像博士」を開発した。「画像博士」の標準構成を Fig. 6 に示し、ハードウェア仕様を Table 1 に示す。

Table 1 Hardware specification of "GAZOUHAKASE"

I M A G E P R O C E S S O R	NTSC interlace input	▶RGB color-camera ▶Monochrome-camera ▶VTR (with TBC & decoder)
	Analog non-interlace output	▶RGB monitor ▶Image hardcopy unit
	Image memory	▶512×512pixels×8bit×8units
	Image processing size	▶512×432pixels×8bit
	Processor	▶Partially parallel pipe-line processor ▶Characteristics extraction processor ▶Graphic processor (TMC43010)
W O R K S T A T I O N	Others	▶Image input accumulator (1-256 times)
	Workstation	▶Sun 3/100, 200, 400 series ▶Sun 4/100, 200 series
	Main memory	▶4 MB or more
	Display	▶19" color/monochrome ▶1152×900 bit-map
	Operation	▶Mouse (3 buttons) ▶Keyboard

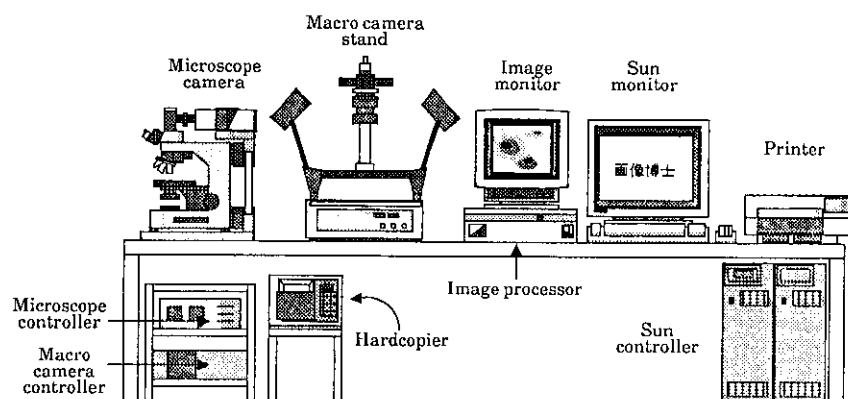


Fig. 6 Standard system configuration of "GAZOUHAKASE"

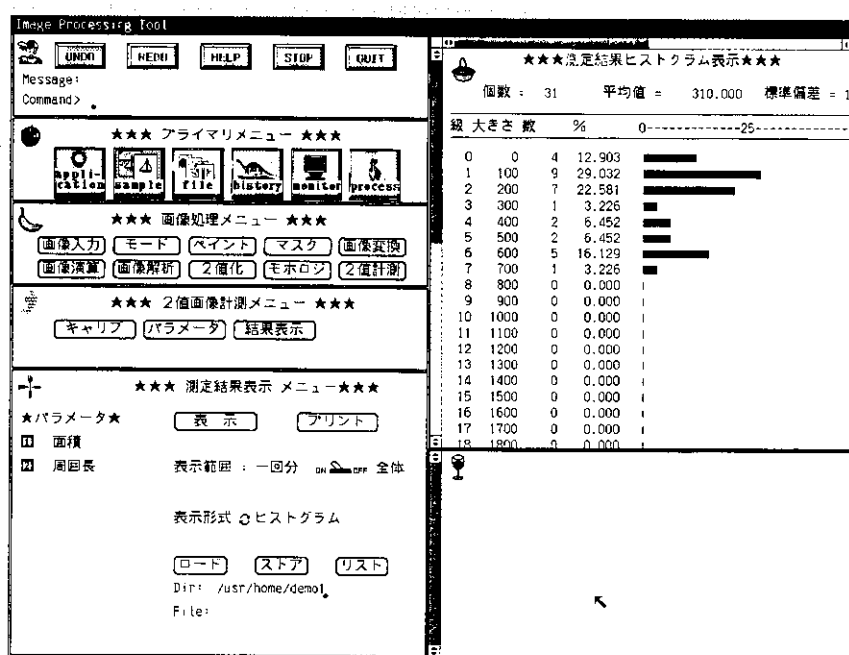


Fig. 7 Example of operation menu displayed on Sun workstation monitor

「画像博士」は、高速、高機能なプログラマブル・イメージプロセッサと Sun ワークステーションを VME バスで接続し、Sun 上のメニュープログラム、画像処理コマンドにより容易に画像処理が行える技術者、研究者向けのシステムである。Fig. 7 は、「画像博士」のメニュー画面例であり、粒子解析結果の面積分布を表示している。メニュー操作では、マウスを用いてアイテムを選択することにより、必要な画像処理を逐次実施することができる。自動ロギング機能を持ち、メニュー操作を記憶、編集、再実行できるため、定形的画像処理作業にも容易に対応可能である。

「画像博士」は、以下の特長を持つ。

- (1) 350 種を超える豊富な画像処理機能
- (2) 操作性のよい日本語メニュー
- (3) 最高 30 画面/秒の高速画像処理
- (4) 標準ワークステーション使用による高い汎用性
- (5) 試行錯誤性を支える便利な機能群
- (6) ビジュアルな画像ファイリング機能

4 結 言

画像処理技術の材料評価への応用として、腐食ビットの測定、シャルピー破面率の測定、および金属粉末の立体像構築を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 単純な 2 値化では計数できない腐食ビットの測定について、

ラインごとのパターンマッチングを行うことにより、ビット部分だけを抽出し、計数化することができる。

- (2) 共起行列から求まる Angular second moment および Contrast の各パラメータの比を判別分析に用いることにより、シャルピー破面の脆性部と延性部は分離でき、破面率を算出することができる。
- (3) 基準画像と傾斜画像の対応点探索において動的領域分割法を用いる 3 次元画像構築手法により、金属粉末粒子の形状を立体として表現することができる。

その他、技術研究本部で行った画像処理による各種材料評価例とこれらの処理に用いているリアルタイム汎用画像処理システム「画像博士」について報告した。

近年、技術研究本部における画像処理の利用は新素材、鉄鋼材料とも急速に増加している。また、確立した画像処理手法は生産ラインに組み入れて、定常的な材料検査、製品検査に使用している。

材料研究には材料の持つ形態学的特徴の解明が深く関係しており、画像処理技術の有効な利用が、材料研究の発展につながるものと考えられる。特に、材料用途開発、半製品、最終製品化が必要な新素材研究開発では、従来の鉄鋼材料開発以上に画像処理技術が貢献できる領域は大きい。近年、「画像博士」などで代表される汎用画像処理システムの進歩と画像処理アルゴリズムの進展は著しく、鉄鋼、新素材を問わず、画像処理技術の応用はさらに高度かつ広範な領域に展開していくと考える。

参 考 文 献

- 1) 奥水大和: *PIXEL*, 66 (1988), 127
- 2) 市川文彦, 浅野一哉: 計装, 30 (1987) 8, 38
- 3) 川路憲一, 古君 修: 金属臨時増刊号, (1984) 5, 46
- 4) 深町正利: 金属材料技術研究所研究発表会概要集, (1983), 1
- 5) 中田栄一: 81/10 金属臨時増刊号, (1981), 41
- 6) 柳沢 満, 古君 修: 「画像処理による材料組織解析の現状」, (1986), 109, [日本鉄鋼協会]
- 7) R. M. Haralick: 「Documentation of procedures for textural/spatial pattern recognition techniques」, NASA, Lyndon B. Johnson Space Center, (1976)
- 8) 古君 修, 今中 誠, 伊藤 庸, 柳沢 満: 鉄と鋼, 71 (1985) 14, 1655
- 9) 齊藤文男: 「両眼視差を利用した三次元画像処理による金属粉末の形状解析」, 第 3 回産業における画像センシング技術シンポジウム, (1988)
- 10) 齊藤文男, 柳沢 満, 宮島 明, 古君 修: 映像情報, 20 (1988) 21, 41