

画像処理によるきさげ加工面の認識*

三井公之^{*1}, 大熊健史^{*2}, 野村和正^{*3}
新井正雄^{*4}, 長谷川幸雄^{*4}

Automatic Recognition for the Bearing of Scraped Surfaces by Image Processing Techniques

KimiYuki MITSUI, Takeshi OHKUMA, Kazumasa NOMURA,
Masao ARAI and Sachio HASEGAWA

An automatic image recognition system that comprises a CCD camera, frame memory and computer, has been built to recognize the bearing of scraped surfaces. Elimination of the influence due to uneven lighting by computer software, and reduction of the noise component contained in image data by introducing the mathematical morphology method were attempted. The results were successful. Furthermore, comparison of unevenness of the scraped surface measured by coordinate measuring machine with the results obtained by the image processing system, has been made. Introduction of image processing techniques enables us to count the number of bearing spots per unit area on the scraped surface automatically, and the possibility of quantitative evaluation of flatness has also been shown.

Key Words: Machine Tool, Scraping, Image Processing, Mathematical Morphology, CCD Camera

1. はじめに

近年、機械加工分野における自動化の進展には目を見張るものがある。しかし、工作機械の製造工程には、きさげ、ラップ、組立調整など高度の技術が要求される工程が含まれ、依然として技能者による手作業で仕上げが行われていることが多い。近年、熟練作業者の不足が顕著となっていることから、これら熟練作業を自動化し、高精度工作機械を低コストで提供できるようにすることが必要となろう。

従来よりきさげ加工面は、工作機械しゅう動面、各種接合部分に多用されてきた。きさげ面特有のピットにおける潤滑油の保持など、きさげ加工を施したしゅう動面の評価について、学術的検討を加えることはきわめて興味深い。一方、きさげ加工のもう一つの重要な側面は、平面の創成技術としての位置づけである⁽¹⁾。研削などの機械加工により高精度平面を実現することは、現状では困難である。これは、加工面の平面

度などの計測技術が完成されていないことによる。高精度に加工された基準定盤とすり合せを行い、いわゆる‘あたり’をとることにより、高精度平面を得ることが、現状では唯一の高精度平面創成技術とってきしかたないであろう。このような観点から、すり合せ技術と、きさげあるいはラップ技術を組み合わせた加工技術を自動化することの意義は大きいと考えられる。

これまであたり面の認識に関しては、CCDラインセンサによりあたりを模倣した格子状のグリッドパターンを認識する試み⁽²⁾や、きさげロボット⁽³⁾の視覚システムとしての、CCDカメラを用いた画像処理システム⁽⁴⁾の開発など、先駆的な研究が行われているが、システムとして完成するためには、今後種々の課題を解決しなければならない。

以上のような観点から、本研究ではきさげ作業を自動化するために必要な基礎的技術の一つとして画像処理によるきさげ加工面の認識を取り上げ、以下の項目について研究した。

- (1) 照明むらおよび画像のノイズの除去
- (2) きさげにより削り取るべき部分の自動認識
- (3) 単位面積についてのあたりの数の算出
- (4) すり合せ面の画像処理結果と三次元測定機による平面度の測定結果との比較検討

* 原稿受付 平成3年7月16日。

^{*1} 正員、慶應義塾大学理工学部 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

^{*2} (株)三菱銀行 大阪支店 (〒530 大阪市北区堂島浜1-1-5)。

^{*3} 学生員、慶應義塾大学大学院。

^{*4} (株)岡本工作機械製作所 技術本部技術部技術課 (〒243 厚木市上依知3009)。

2. 画像処理によるきさげ面の認識

2.1 画像処理装置 本実験で用いた画像処理システムの構成を図1に示す。ここで、フレームメモリの仕様は512×512画素、256階調、CCDカメラの解像度は水平484本、垂直512本である。CCDカメラにはオレンジ色の光学フィルタを取付けた。きさげ加工面の画像をCCDカメラを用いてパーソナルコンピュータ上のフレームメモリに取込み、ビデオモニターでその画像を確認しながら、画像処理を施した。

照明は、27 Wの蛍光灯スタンドによるスポット照明とし、きさげ加工面の斜め上方約50 cmの距離から照明している。

CCDカメラにより撮像された画像には、照明むらの影響が含まれる。この照明むらを除去する方法として、きさげ加工面の撮影の前に白紙を撮影し、照明の分布をあらかじめ求め、このデータにより補正する方法⁽⁴⁾が報告されているが、本研究では、画像の縦および横1列の平均濃度を求め、その結果をもとに、原画像を補正することにより、ソフトウェア的に照明むらを除去する方法を用いている。

2.2 測定面 きさげ加工の手順は次のとおりである。まず、基準となる面に顔料を塗り、加工面とすり合わせると、工作物の高い部分に塗料が付着する。これを赤あたりと呼ぶ。この部分をきさげ工具により削り取り、加工面全体に一樣なあたりが得られるようにする。この作業により、ある程度の平面度に仕上げる。

次の工程では、逆に加工面側に顔料を薄く塗って、基準面とすり合わせる。すると加工面の凸部の顔料が除去されて、金属面が現れる。これを黒あたりと呼ぶ。作業者は黒あたり部分をきさげ工具で除去する。この作業を繰り返すことにより、黒あたりの数が次第に増加し、かつ1点あたりの面積が次第に小さくなっていく。黒あたりの数が多く、その大きさがほぼ同じで、一樣に分布している面が良い仕上げ面、すなわち平面度の高い面である。

本研究では、黒あたりの生じた面を測定対象とした。使用した顔料は一般によく用いられている光明丹

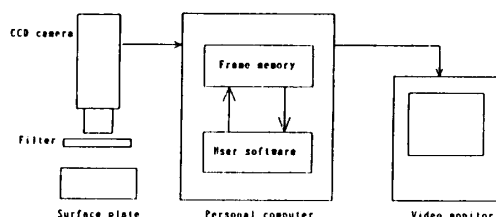


図1 システム構成図

である。また、測定対象面は、工作機械メーカーの熟練作業者がきさげにより仕上げた平面度が異なるもの3枚（低精度、中精度、高精度）で、寸法は、100 mm四方、厚さ30 mmである。すり合せ用の基準定盤の寸法は、130 mm×130 mm、厚さ30 mmである。材質は両者とも鋳鉄である。

2.3 本研究で用いた画像処理技術⁽⁵⁾

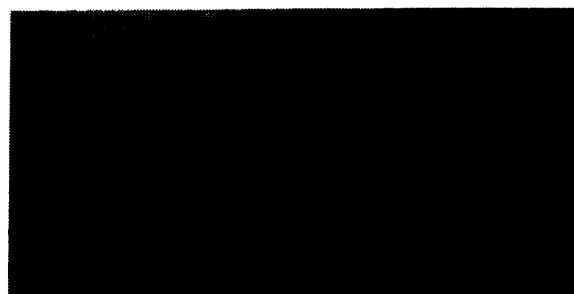
(a) 二値化処理 フレームメモリに取り込まれた濃淡画像の各点の濃度値を、適当な基準値に対する大小関係に基づいて0と1に分けることによって濃淡画像を二値画像に変える処理を、二値化処理あるいはしきい値処理という。本研究においては、黒あたりとそうでない部分とに分ける際に、二値化処理を用いた。

(b) ヒストグラムの拡大 画像中のあたりとそうでない部分との間の照度差が小さいと、画像が見にくいものになる。そこで本研究では二値化処理の前に、画像の最も明るい部分と最も暗い部分の差を、フレームメモリの階調の最大値である255とし、その間の濃度を比例的に決めるヒストグラムの拡大操作を行った。ヒストグラム拡大前後の例を図2に示す。この処理により、あたりとそうでない部分との画面による確認が容易になる。

(c) 拡張と侵食 処理対象の画像データには必ずノイズや不必要な裂けめなどが含まれる。数学的形態学 (mathematical morphology) の手法⁽⁶⁾を用いることにより、必要な形状の特徴は保存したまま、ノイズなどを除去することが可能となる。

拡張 (dilation) は、まばらな集合の特徴を表すのに用いられ、二値画像に含まれる連結成分の境界を拡張する処理である。侵食 (erosion) は、正反対の処理で、境界を縮小する処理である。拡張と侵食は実際には、拡張の後侵食 (closing)、侵食の後拡張 (opening) のように対で使われる。

closing の概念を図3に示す。画像を円盤状の構成



(a) 拡大前 (b) 拡大後

図2 ヒストグラムの拡大

要素で closing すると、輪郭を滑らかにして、小さな割れめや細く長い裂けめを融合させ、小さな穴を取り除き、輪郭の途切れたところを埋めることができる。また、opening することにより、小さな割れめをはつきりさせ、小さな孤立点や突起を除去することができる。なお $\oplus$ 、 $\cdot$ の記号などについては参考文献(6)を参照のこと。

(d) ラベリング処理 画像のなかで同じ輝度をもつ画素が互いに連結して一つの塊を形成しているものを連結成分と呼ぶ。二値画像ではこのような図形が、画像中に点在している。おのおのの連結成分に対して異なった名称のラベルを割り当てる処理をラベリングと呼ぶ。

本研究では CCD カメラによって取り込んだ画像データに対し、ラベル付けを行い、そのラベルの数をきさげ面のあたりの数としている。

2.4 測定結果 2.1節で述べた装置により得られた画像に対し、まず画像の照明むらを除去し、ヒストグラムを拡大し、しきい値を決め、二値化し、拡張と侵食を組合せた処理を行ってノイズを除去した後、黒あたりの単位面積あたりの数の分布の計算などを行った。

CCD カメラで撮像する際に、オレンジ色の光学フィルタを用いた。フィルタの有無と測定結果との比較を図4に示す。ここでは黒い部分があたりの箇所に対応する。光明丹はオレンジ色のため、光明丹が除去されたあたり部分と、付着しているあたりでない部分からの反射光のフィルタを透過する比率が拡大され、オレンジ色のフィルタを用いたほうがあたりをより認識しやすくなる。

照明むらの影響の除去に関しては、すでに述べているようにソフトウェアによりこれを行っている。その処理前後の画像を図5に、さらにそれぞれを二値化し

た画像を図6に示す。

次に、ノイズ処理の効果を図7に示す。openingにより、孤立点などの小さな点の除去が行われていること、closingにより、不必要な割れめを除去できることがわかる。なお opening や closing の際に用いる作用要素は、消去したいノイズよりも大きなものであり、かつあたりの特徴を消してしまわないような適当な大きさのものを選ぶ必要がある。

図8、図9に3種類のきさげ加工面を CCD カメラで撮影した原画像と、以上のさまざまな画像処理を行ってきさげ加工面のあたりのみを抽出した画像を示す。黒い部分があたりの箇所である。



(a) 光学フィルタを使用しない場合 (b) オレンジフィルタを使用した場合

図4 光学フィルタの効果



(a) 照明むら除去前 (b) 照明むら除去後

図5 照明むらの影響の除去(原画像)

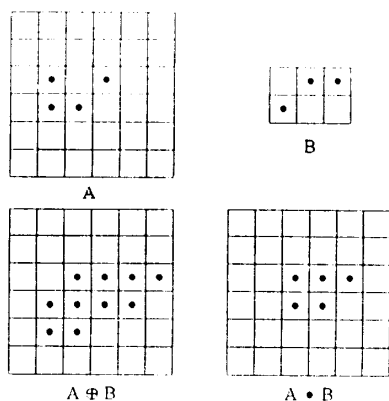


図3 closing の例



(a) 照明むら除去前 (b) 照明むら除去後

図6 照明むらの影響の除去(二値画像)

図8より明らかなように、加工面の平面度が高くなるとあたり部分の鮮明度が低くなっている。これは、平面度が高くなるにつれて、付着する光明丹の層の厚さが薄くなるためである。

ラベリング処理により、加工面の単位面積のあたりの数を数えた結果を表1に示す。画面全体を4分割あ

るいは16分割した場合の、各部分における値も併せて示している。4分割の欄の中央の値は、16分割の際の中央の4区画分に相当する部分の値となっている。

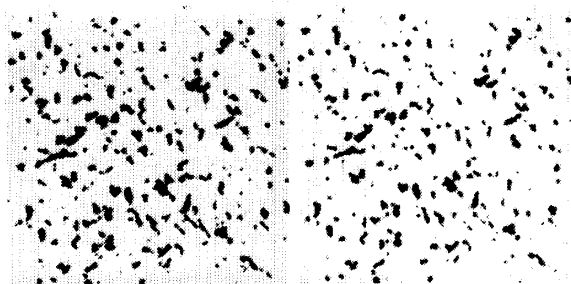
以上の結果より、平面度が高くなるにつれて単位面積のあたりの数が増加していることが理解できる。また、画像処理によれば局所的なあたりの数も容易に計算できるので、次にどの部分に重点をおいてきさげ作業を行うべきかを自動的に判断することができる。なお、現状ではこの結果は、二値化の際のしきい値、あるいは、opening, closing 処理での構成要素の与え方に依存するので、これらの最適値を自動的に与えるようにすることが今後の研究課題である。

3. 三次元測定機による平面度測定結果とあたりとの比較

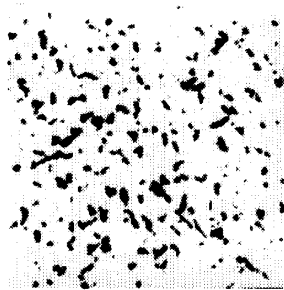
3・1 三次元測定機による平面度の測定 三次元測定機を用いて測定対象面の平面度を求め、すり合せ面のパターンと比較することを試みた。

三次元測定機のプローブ取付部に電気マイクロメータヘッドを固定し、三次元測定機を操作することにより、測定面の凹凸を求めた。各測定面における測定点数は 121×140 点である。

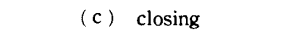
データをパーソナルコンピュータに取り込んだ後、測定面の凹凸を256階調の濃淡画像に変換し、フレームメモリを介してビデオモニタ上に表示する。その際、原データには測定面自体の傾斜の影響が含まれている



(a) 処理前

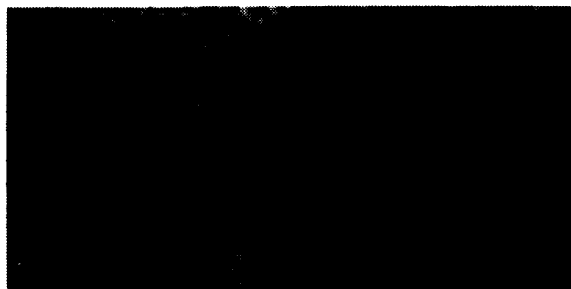


(b) opening



(c) closing

図7 ノイズ処理の効果



(a) 低精度

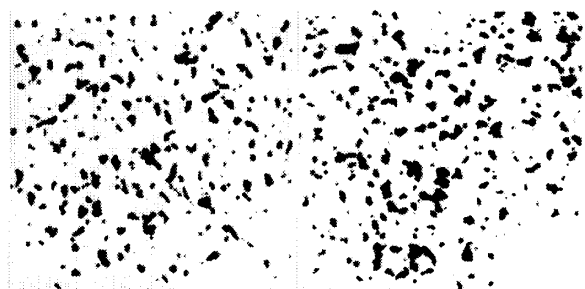


(b) 中精度

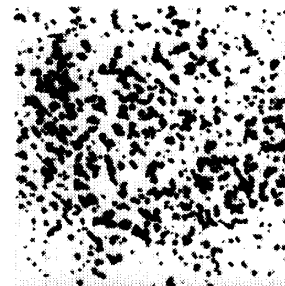


(c) 高精度

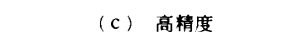
図8 きさげ加工面(原画像)



(a) 低精度



(b) 中精度



(c) 高精度

図9 きさげ加工面(二値化後 opening, closing 処理)

ので、最小二乗法により補正を行った。

このようにして求めたきさげ加工面の凹凸画像を図10に、また、それらを二値化したものを図11～図13に示す。ここでも、画像の暗い部分が凸の部分である。

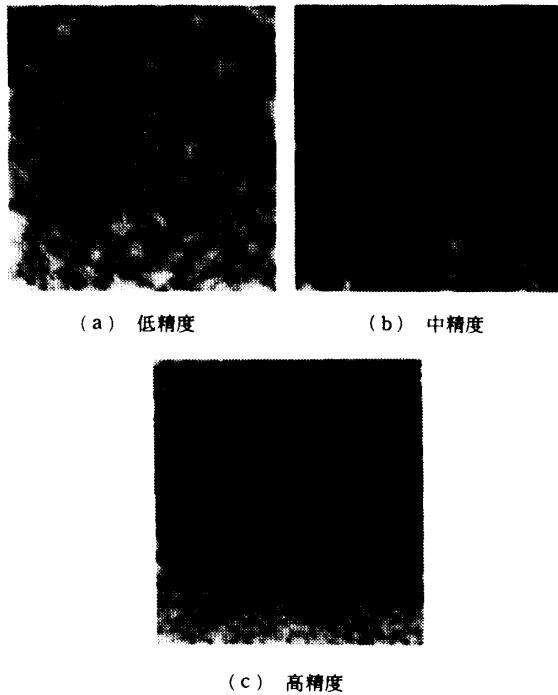


図10 表面凹凸の濃淡表示

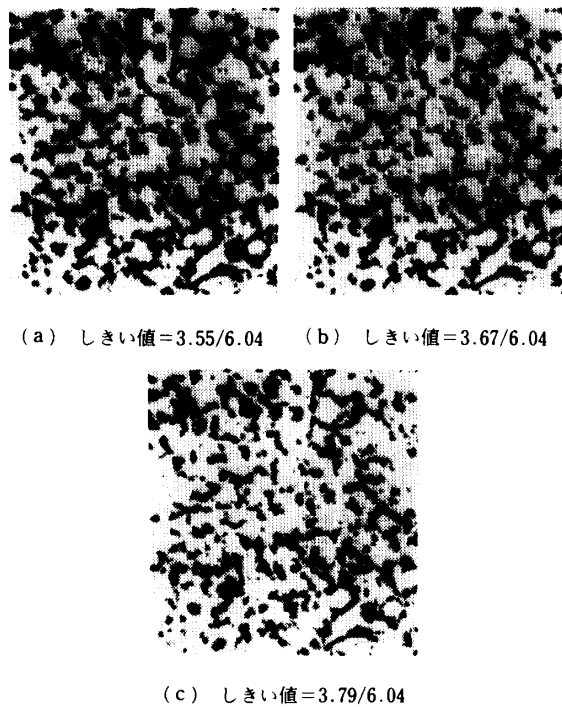


図11 図10(a)の二値画像

$$\text{しきい値} = \frac{\text{凹部からの高さ}(\mu\text{m})}{\text{平面度}(\mu\text{m})}$$

図11～図13各図の(a)～(c)の違いは二値化の際のしきい値が異なることで、一つの測定面に対して3種類のしきい値を用いている。

なお、三次元測定機により求めた平面度は低, 中, 高精度それぞれの面に対しおよそ6.0 μm , 2.4 μm ,

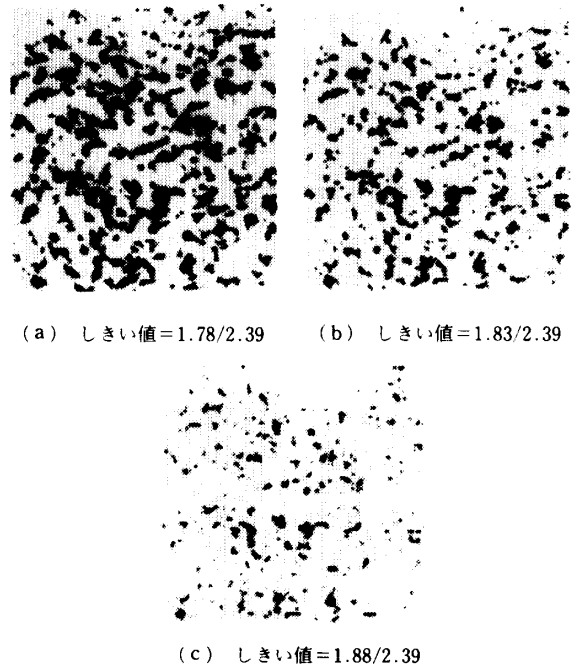


図12 図10(b)の二値画像

$$\text{しきい値} = \frac{\text{凹部からの高さ}(\mu\text{m})}{\text{平面度}(\mu\text{m})}$$

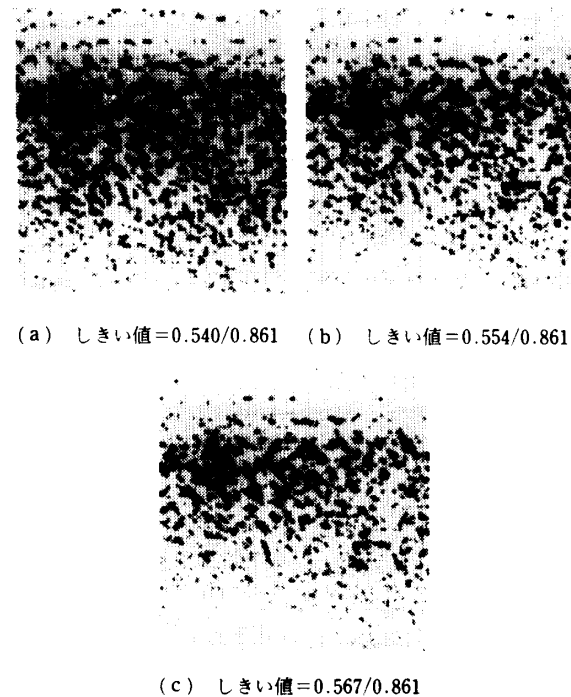


図13 図10(c)の二値画像

$$\text{しきい値} = \frac{\text{凹部からの高さ}(\mu\text{m})}{\text{平面度}(\mu\text{m})}$$

0.86 μm となった。

3・2 きさげ面のパターンとの比較 図 11～図 13 に示す三次元測定機による測定結果と、図 9 に示す画像処理により求めた結果とを比較すると、部分的には非常に似たパターンとなっている反面、完全に一致しているわけではない。これは、三次元測定機により平面度を測定する際に誤差が生じること、測定点数が 121×140 であり、離散値的な測定となっていることにより、凸部を完全にはとらえられないことなどが原因となっているものと考えられる。

ラベリング処理により、測定面の単位面積あたりの凸部の数を数えた結果を表 2～表 4 に示す。これらは表 1 と比較すべきものである。この際、opening により鋭利な凸部を取り除くノイズ処理を施している。

三次元測定機による測定結果においては、当然しきい値の選び方によりこの値は変わるが、これらの表を比較すると、単位面積についてのあたりの数やその分布の傾向は良く一致しており、三次元測定機により求めた平面の凹凸と、画像処理による平面の評価との間になんらかの相関関係があるものと理解してさしつか

えないであろう。また、高精度の面ほど、単位面積あたりの凸部の数が多いという実験結果は、熟練作業者がきさげ加工の際に、加工面全体にあたりが均一に分布すること、かつ単位面積のあたりの数を増やすことを目標に作業を行っていることとも一致する。

4. お わ り に

本研究では、熟練作業を自動化するための第一歩として、画像処理によるきさげ加工面の認識について取り上げた。すり合せ面のパターンと平面度の関係や、きさげにより削り取る部分の自動認識について種々の実験を行った。

主な結果をまとめると次のとおりである。

(1) 画像処理によるすり合せ面の認識の際に問題となる照明むらの影響を、計算機ソフトウェアにより解決することが可能である。

(2) 数学的形態学の手法により、きさげ加工面の画像ノイズの除去が有効に行えることを明らかにした。

表 3 三次元測定機により求めた単位面積の凸部の数

(中精度きさげ加工面,

$$\text{しきい値} = \frac{\text{凹部からの高さ}(\mu\text{m})}{\text{平面度}(\mu\text{m})}$$

Spots/inch²

表 1 画像処理技術により求めた単位面積のあたりの数

Spots/inch²

	Low accuracy				Middle accuracy				High accuracy			
Whole surface	20.00				27.04				36.00			
Divide into 4	22.40	19.84		29.76		30.40		34.24		40.00		
	20.80			25.92			34.24					
	19.84		17.92		26.24		21.76		37.44		32.32	
Divide into 16	24.32	19.20	16.64	20.48	28.16	32.00	30.72	34.56	49.92	26.88	35.84	43.52
	25.60	20.48	16.64	25.60	32.00	26.88	23.04	33.28	30.72	29.44	43.52	37.12
	23.04	20.48	25.60	21.76	32.00	30.72	23.04	33.28	44.80	32.00	32.00	28.16
	16.64	19.20	14.08	10.24	20.48	21.76	17.92	12.80	46.08	26.88	30.72	38.40

表 2 三次元測定機により求めた単位面積の凸部の数

(低精度きさげ加工面,

$$\text{しきい値} = \frac{\text{凹部からの高さ}(\mu\text{m})}{\text{平面度}(\mu\text{m})}$$

Spots/inch²

Threshold	3.55/6.04				3.67/6.04				3.79/6.04			
Whole surface	16.24				19.04				23.04			
Divide into 4	17.68		17.68		19.52		18.88		25.16		22.44	
	19.38				19.84				21.76			
	19.04		10.54		20.48		17.28		22.78		21.76	
Divide into 16	13.60	16.32	13.60	16.32	16.64	20.48	19.20	19.20	21.76	29.92	21.76	23.12
	17.68	23.12	21.76	19.04	16.64	24.32	19.20	17.92	19.04	29.92	21.76	23.12
	21.76	23.12	9.52	10.88	24.32	20.48	15.36	17.92	32.64	17.68	17.68	24.48
	19.04	12.24	6.80	14.96	25.60	11.52	12.80	23.04	25.84	14.96	17.68	27.20

表 4 三次元測定機により求めた単位面積の凸部の数

(高精度きさげ加工面,

$$\text{しきい値} = \frac{\text{凹部からの高さ}(\mu\text{m})}{\text{平面度}(\mu\text{m})}$$

Spots/inch²

Threshold	0.540/0.061				0.554/0.061				0.567/0.061			
Whole surface	29.16				35.62				41.23			
Divide into 4	24.48		19.38		23.12		27.54		19.04		27.88	
	21.76				34.00				45.56			
	43.18		29.58		48.62		43.18		58.14		59.84	
Divide into 16	27.20	25.84	12.24	14.96	16.32	20.40	9.52	10.88	12.24	9.52	6.80	4.08
	29.92	14.96	19.04	31.28	35.36	20.40	32.64	57.12	29.92	24.48	43.52	57.12
	34.00	28.56	24.48	20.40	48.96	36.72	46.24	35.36	74.80	47.60	66.64	62.56
	57.12	53.04	31.28	42.16	66.64	42.16	44.88	46.24	59.84	50.32	65.28	44.88

(3) 三次元測定機による平面度の測定結果と、単位面積についてのあたりの数との間に関連のあることを示し、画像処理技術によるすり合せ面の認識により、きさげ加工面の平面度を定量的に評価することの可能性を示した。

おわりに、本研究を推進する上で多大なご協力をいただいた(株)岡本工作機械製作所の由井明紀、上田詔一氏に深く感謝する。また、本研究の内容について、たびたびご討論いただいた慶應義塾大学理工学部 稲崎一郎教授、青山藤詞郎助教授、ならびに実験設備を見学させていただいた広島大学工学部 山根八州男助教授にお礼申し上げる。

文 献

- (1) Moore, W. R., 超精密機械の基礎, 25, 国際工機(株).
- (2) 竹内・ほか3名, CCDラインセンサによる当たりの認識ときさげ作業の自動化, 精密工学会誌, 52-12(1986), 93.
- (3) 山根・ほか5名, 定盤のきさげ加工への多関節型ロボットの応用, 精密工学会誌, 55-10(1989), 55.
- (4) 岡本・山田・米沢, 自動きさげ作業用画像処理, 計測自動制御学会論文集, 26-6(1990), 620.
- (5) 例えば, 鳥脇, 画像理解のためのデジタル画像処理, (1988), 昭晃堂.
- (6) Haralick, R. M., Sternberg, S. R. and Xinhua Zhuang, Image Analysis Using Mathematical Morphology, *IEEE Trans. of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-9-4 (1987) 532.