当たり面認識装置を含む自動きさげ盤の開発 (第1報)*

— CCD カメラを用いた黒当たり面の認識 —

堤 博 貴** 久曾 神 煌*** 中 村 輝 幸†

Development of an Automatic Scraping Machine with Recognition for Bearing
of Scraped Surfaces (1st Report)
- Recognition of Black Bearing by CCD Camera -

Hiroataka TSUTSUMI, Akira KYUSOJIN and Teruyuki NAKAMURA

This study deals with an automatic scraping machine, namely a bearing recognition mechanism of scraped surfaces and a specially designed scraping mechanism. Authors tried to make a recognition system of the bearing in the scraped surface, comprised of a CCD camera, lighting unit and data processing unit. A photoflood lamp was used as a lighting unit, because of its sufficient brightness and uniform distribution in front direction. That was enable to eliminate other optical disturbance, so it was enough to recognize bearings of workpiece surface. The good contrast images were detected by photographs of the workpiece surface. Computer software was used to eliminate the influence due to uneven lighting, by means of the "P-TYLE" thresholding method. As the result, the high accuracy scraped surface with 16 bearing spots/in² in 140 mm × 140 mm was enable to be recognized. Then the spot that must be scraped was identified, using a transformation system from image to space position.

Key words : CCD camera, automatic scraping machine, black bearing, image recognition, uneven illumination correction

1. はじめに

きさげ作業はいわゆる“3K”であること、作業に熟練を要することから現在技能者が不足しており緊急課題として自動化が望まれている。本研究の目的は自動きさげ盤を開発することである。自動的なきさげ作業は、すりあわせで当たりを出した加工面をCCDカメラで撮影して得られた映像を画像処理し、きさげすべき位置を求める“認識システム”と、その情報をもとに加工を行う“加工システム”を有機的に結合させることで実現可能となる。これまでもこのような形式の自動きさげ作業は報告²⁾⁵⁾⁶⁾されてきた。しかしながら、実用的なシステムを構築するためには“認識”および“加工”の各部門において更なる洗練を重ねる必要がある。そのなかでも本論第1報では“黒当たり面画像認識システムの開発”をとりあげ、これまでの研究では問題とされなかった以下のことについて重点的に検討を試みた。

- (1) 室内照明灯などの影響を受けにくい測定系の構築
- (2) CCD 画像濃淡値と表面凹凸の深さの関係の定量化
- (3) 画像計測を用いた工具位置決め精度の定量化

2. 黒当たり面認識システムの開発

2.1 実験装置および実験方法

黒当たり面認識システムの概略を図1に示す。あらかじめ光明丹を塗布して当たりを出した加工面を斜め上方から写真撮

影用のリフレクタランプ（東芝フォトリフレクタランプ、フラッド型、500W、径 130mm、全長 173mm）で照明し、鉛直上方よりCCDカメラ（NEC TI-23A、画素数H512×V492、解像度水平380本、垂直350本、モノクロ）で撮影する。得られた画像情報はパソコン内部のフレームメモリー（フォトロン FR M2-512、512×512×8bit、2画面）に送り画像処理する。ランプは正面方向への配光が一樣でかつ高出力であるため、加工面上において比較的均一な照度分布を得ること、そして室内用照明灯など他の照明器具の影響を受けにくくすることができる。斜方照明⁷⁾による散乱光を撮影することでコントラストの良い画像を得た。NDフィルタを介して撮影することで入射する光の強さは加減され、高出力照明によるCCD輝度がレンジから飽和するのを抑制した。また、画像上で光明丹色を強調する目的²⁾⁵⁾でオレンジ色の光学フィルタを介した。CCDカメラには広角レンズ（Canon FD-17mm、レンズ収差 < 0.3%）が取り付けられ一度に 140 mm × 140 mm の範囲を撮影した。被測定物の下には白紙を敷き、当たり面の端部分を

Fig. 1 Recognition system for workpiece surface

* 原稿受付 平成7年4月6日

** 学生会員 長岡技術科学大学大学院（長岡市上富岡町 1603-1）

*** 正 会 員 長岡技術科学大学工学部

† 協和工業（株）（小千谷市船岡 2-5-19）

認識する際にはこの白紙を目安として加工面か否かを識別した。測定は 18 本の蛍光灯が並ぶ恒温室にて行った。

2.2 画像処理の流れ

画像処理の流れを図 2 に示す。CCD カメラで取得された当たり面の画像はまず、当たり面部分と白紙の部分とに分けられ、続いて照明むら補正、二値化、膨張縮退、ラベリングがなされ複数の当たりが別々に認識される。これら一連の処理で得られた各々の当たりの重心位置がきさげ位置となる。

2.3 照明むら補正

リフレクタランプを用いることで加工面上での照度の均一性は向上するものの、完全に均一な照度分布を得ることは極めて難しい。このような照明むらを除去する目的で、三井ら³⁾が提案した手法をもとに画像補正を行った。その原理を図3に示す。これは各行、および列の平均濃度値が一定になるように各画素の濃度値を操作するもので、補正の対象となる画素の濃度値を P 、それを含む行および列の画素の濃度平均値を、それぞれ Q_c 、 Q_r 、さらに全画素の濃度平均値を Q_a とすれば、補正濃度値 P' は式(1)で表される。

$$P' = \frac{Q_a}{Q_r} \frac{Q_a}{Q_c} P \quad (1)$$

この操作を全画素に対して行う。原理が極めて単純であり、フーリエ変換やオペレータを用いて画像にハイパス処理を施す手法に比べて処理が高速で、また、加工面上に白紙をおいて撮影し、その照度分布をもとに照明むらを補正する手法¹⁾²⁾に比べても工程数が少なく実用的である。

本測定装置で取得した黒当たり面（当たり数 = 9 個 / in²）の無補正の画像に二値化処理を加えたものを図4に示す。この

Fig. 2 Flow of image processing

Fig. 3 Principle of correction

場合は照明装置に近い画像上部分で輝度値が高くなり、本来画面上で均一に分布すべき当たりは局所に集中して認識されてしまう。同じ画像に補正を施しさらに二値化したものを図5に示す。当たりが画面上で均一に分布しており、照明むらが除去されたのが確認できる。

2.4 二値化処理法

二値化のためのしきい値決定は自動的に行う必要がある。自動的なしきい値決定法としては判別分析法や微分ヒストグラム法、モード法などがよく用いられる⁷⁾。しかしながら、これらの手法は画像の対象部分と背景部分の明暗差、すなわち濃度ヒストグラムの双峰性に基いてしきい値決定がなされる。そのため、対象部分と背景部分の明暗差が小さく、さらに照明むらの影響によって双峰性が不明りようとなった画像を扱う、本測定系には適さない。対象部分と背景部分の明暗差に左右されない自動二値化処理法として、ここでは P-TILE 法⁷⁾を用いた。ここでは画面中に占めるきさげ部分の比率を示す P は経験的に 20% と定めた。

2.5 CCD画像濃淡値と実際の表面形状

図6(a)(b)は加工面（当たり数 = 9 個 / in²）画像の任意の 1 ラインの濃淡プロファイルと、それと同じ場所での加工面の断面形状を粗さ計で測定したものである。照明むらによって (a) の中心付近の輝度値が少し高くなっているものの、両者の形状がよく一致しているのが確認できる。このような一致において光明丹の役割は極めて重要である。光明丹は凹の深い部分では厚く、浅い部分では薄くなるといったように、きさげ加工面の谷の深さに応じて厚みを変化させる訳であるが、上の結果は、いかに、光明丹が加工面形状に応じて巧みにその厚みを変化させ、それを視覚情報に反映させているかを説明している。光明丹は直径数百 nm ～ 数 μ m 程度の極めて細かい粒子で、表面の細かい凹凸に対応できる。

図6(c)は(a)(b)をもとに画像濃淡値と表面の深さとの関係を示したものである。データをもとに両者の関係を線形近似した結果、相関係数 0.8 で傾斜勾配（単位濃度値あたりの深さ分解能に等しい）は 0.24 μ m であり、その横方向および縦方向の標準偏差は 4.66, 15.38であった。光明丹では非常に細かい傷が表現できず、また濃度プロファイルと粗さ測定のプロファイルの傾きを補正していないために完全な一致を得るには至らなかったが比較的良好な近似がなされた。これは CCDカメラと光明丹の組合せが、非常に高い分解能で凹凸の深さを視覚的に取り出せることを意味する。きさげ加工痕の最大深さが 6 ～ 13 μ m であることを考えれば、これは十分な測定精度といえる。

Fig. 4 Non-corrected image

Fig. 5 Corrected image

2. 6 耐環境性

室内の蛍光灯を点灯した状態と点灯していない状態（撮影用照明のみ点灯）で撮影した当たり面（当たり数＝9個／in²）の二値化画像をそれぞれ図7(a)(b)に示す。両者には大きな違いは見られず、高出力のリフレクタランプが蛍光灯の影響を除去していることがわかる。また、点灯時、非点灯時の画像上での当たりの重心位置を図8に示す。画面の横方向を X、縦方向を Y として座標を設定した。両者において大多数の当たり位置は 1 pixel 程度（加工面上で 0.27mm）の小さな誤差で収まっていることが確認でき、室内用照明程度の影響下では問題なく測定が行えると考えられる。いくつかの当りには室内照明の影響により複数に分裂し、新たに小さな当りを排出する。この現象は測定誤差につながるが、面積が非常に小さい当りを無視することで回避できる。また、きさは何度も表面を削り込む繰返し加工であるため、この程度の誤報があったとしても最終的にでき上がる製品に大きな影響を与えないと考えられる。

Fig. 6 Comparison between image profile and surface roughness, Middle precision scraping, A vertical line near image center

Fig. 7 Surface form (Binary expression)

2. 7 低, 中, 高精度加工面の自動認識

図9(a)(b)(c)はそれぞれ、低精度（当たり数＝8個／in²）、中精度（当たり数＝13個／in²）、高精度（当たり数＝16個／in²）加工面の二値化画像である。照明むら補正および二値化処理は自動的に行なった。いずれの場合も照明むら補正および二値化処理は良好に行われており、本測定系が種々の精度の加工面に幅広く対応できることが推察される。

3. 画像から空間へのきさげ位置の投影変換

ここではカメラの空間位置やレンズ、画像の評定などのキャリブレーションを含め、画像上でのきさげ位置（画像上における当たりの重心位置）を空間座標へ変換するシステムの開発を行い、それをもとにきさげ工具を位置決めしたときの精度について検討する。

3. 1 実験装置および実験方法

測定系の概略を図10に示す。3自由度で角度調節可能な固定装置を用いてCCDカメラを三次元測定機（ミットヨ FN503, 移動範囲500H×300V×300D, 精度[(4+5L/1000) μm])の測定ヘッドに取り付ける。このときカメラ撮像面が測定平面と平行になるようにする。同様にレンズ中心から半径方向に約150 mm, 下方向に 150 mm 離れた所に刃先がくるようにきさげ工具を取り付ける。次に図11のように円形部分（以後ターゲットと呼ぶ）を残して方眼紙を黒く塗り、当たり面に見立てた測定モデルを用意し、方眼紙の座標軸がそれぞれ三次元測定

Fig. 8 Robustness for Environmental change

Fig. 9 Surface form (Binary expression)

機の X, Y 軸に平行になるようにテーブルに固定する。そして、モデルを撮影し画像上でのターゲット位置をもとに実際の空間座標位置を求める。ある座標系におけるターゲットの絶対位置を求めるのは困難であることから、ここでは基準となる参照ターゲットを設け、これと各測定ターゲットまでの相対位置（相対距離）を求めて実際の方眼紙上の位置（距離）と比較することで測定精度を評価する。ターゲット形状が既知であることから、それらの相対位置もまた既知であり、これらは十分に評価基準となり得る。さらに、上記の手順で得たターゲットの空間座標位置（ターゲットの中心位置の）へ工具位置決めを行い、そのときの X 方向および Y 方向へのずれを方眼紙から読み取って位置決め精度を評価する。

図11中の No. 3 のターゲットを参照ターゲットとし、その他を測定ターゲットとして空間座標位置の測定および工具位置決めを行った。測定に先立って以下のようなパラメータをキャリブレーションにより求めた。

- ・カメラ座標系原点の位置 T
カメラ光軸と当たり面の交わる点 O_k の絶対位置
- ・カメラ座標系の原点まわりの回転角 α
ワールド座標系（もしくは第2カメラ座標系）に対するカメラの Z 軸回りの回転角
- ・相対座標位置変換パラメータ S
きさげ工具とカメラの相対位置変換パラメータ
- ・距離換算係数 C
カメラ座標値 (pixel) を空間座標値 (mm) に換算する係数である。

3. 2 基本原理⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾

図12にシステムの概略を示す。未熟練者でも簡単に測定やキャリブレーションができることを前提とし、求めるべきパ

Fig. 10 Composing of instrument

No. 1, No. 2, No. 4, No. 5 : Measurement target
No. 3 : Reference target

Fig. 11 Measurement target

ラメータ数や作業工程を必要最小限にとどめた。また、カメラレンズシステムはピンホールモデル⁹⁾と透視変換⁹⁾を用いて簡略化した。システムはカメラ座標系とワールド座標系から成る。カメラ座標系は画像平面の横方向を U 座標、縦方向を V 座標とする二次元座標系で、画像中心を原点とする。ワールド座標系は三次元測定機の座標をそのまま使い、システムを簡単にする目的から、三次元測定機上に置かれた加工面はワールド座標系の X, Y 平面に平行（当たり面と CCD 撮像面とが平行）であると仮定する。ここで Z_c はレンズ中心を通り、撮像面と垂直に交わる軸で光軸と呼ばれる。一連のプロセスは以下に示す 3 つの座標変換から成る。

3. 2. 1 遠近変換

カメラ撮像面上に映った点をきさげ加工面上での長さ距離に変換する。カメラ座標系において、撮像面上のきさげ位置 $p(U_p, V_p, f)$ から加工面上の任意のきさげ位置 $P(U_p, V_p, W_p)$ への変換は焦点距離 f と当たり面と撮像平面までの距離 bf を利用して以下の式で表される。

$$P(U_p, V_p, W_p) = \begin{bmatrix} U_p \\ V_p \\ bf \end{bmatrix} = \frac{bf}{f} \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ f \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ f \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで C は画面上の長さ (pixel) を空間上の長さ (mm) に変換する距離換算係数である。

3. 2. 2 回転変換

第1カメラ座標系 U, V 座標とワールド座標系の X, Y 座標への回転変換を行う。もとのカメラ座標系を第1カメラ座標系とし、これと α だけ傾いてワールド座標系の X, Y 座標があるとすると、これと同様に第1カメラ座標系を Z_c 軸回りに α だけ回転させた座標系を第2カメラ座標系と定義する。したがって、ワールド座標系の X, Y 座標と第2カメラ座標系 U', V' 座標はそれぞれ平行である。第1カメラ座標系の U, V 平面上の点 $P(U_p, V_p, W_p)$ から第2カメラ座標系 U', V' 平面上の点の座標系の点 $P(U'_p, V'_p, W'_p)$ への二次元回転変換は、以下の式で示される。

Fig. 12 Coordinate system for image geometric transformation

$$P(U'P, V'P, W'P) = \begin{bmatrix} U'P \\ V'P \\ W'P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} UP \\ VP \\ f \end{bmatrix} \quad (3)$$

3. 2. 3 並進座標変換

ここではカメラ座標値からきさげ工具位置への並進変換を行う。カメラ光軸と当たり面の交差点 0_k ときさげ工具との相対的位置関係をベクトル $S(X_S, Y_S, Z_S)$ で表す。カメラときさげ工具が三次元測定機の測定ヘッドに取り付けられ、両者の相対的位置関係が不変であるとすれば、ベクトル S も不変である。きさげ工具位置 $S(X_S, Y_S, Z_S)$ ときさげ位置 $P(X_P, Y_P, Z_P)$ の差が求めるべき移動量である。これを $R(X_R, Y_R, Z_R)$ で表すと、

$$R = S - P$$

$$\begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} \quad (4)$$

これが認識したきさげ位置へのきさげ工具の移動量となる。絶対位置を与える場合は、カメラ光軸がきさげ面と交わる点 $T(X_T, Y_T, Z_T)$ のワールド座標を与えて、これに S を加えるだけで良い。結局、カメラ光軸ときさげ工具の相対位置は以下の式で示される。

$$\begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} - C \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} UP \\ VP \\ f \end{bmatrix} \quad (5)$$

3. 3 実験結果および考察

各ターゲットの空間上の位置を測定したときの、参照（キャリブレーション）ターゲットからの X, Y 方向への誤差および、この位置データをもとに工具を位置決めしたときの方眼紙上の誤差を表1に示す（No.3 は参照ターゲットである）。参照ターゲットからの位置測定誤差は $\pm 0.6 \text{ mm}$ の範囲内であった。方眼紙での目測では厳密な測定を行うことはできなかったが、すべての点が位置決め誤差 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 程度で収まっているのが確認された。この程度の誤差であれば、実用において差し支えないものと考えられる。

Table 1 Measurement error in the image transformation system

Point number	Measurement error based on reference target mm		Positioning error mm	
	X	Y	X	Y
No.1	-0.345	-0.140	-0.4	-0.3
No.2	0.306	0.143	0.4	0.1
No.3	0.000	0.000	0.0	0.0
No.4	-0.314	0.013	-0.3	0.1
No.5	0.516	-0.008	0.5	-0.1

4. む す び

自動きさげ盤の開発において重要な役割を担う、“黒当たり面認識システム”について詳細な検討を行ない、以下の結論を得た。

- (1) 画像補正により加工面撮影時に問題となる照明むらは除去でき、これとP-TYPE二値化処理法の組み合わせにより、 1 in^2 につき当たりが 8 個の低精度な加工面から、16 個の高精度な加工面に至る自動認識が可能となった。
- (2) 光明丹とCCDカメラの組み合わせにより当たり面の凹凸情報は非常に高い分解能で、視覚情報として取り出すことができた。画像濃淡値と表面の深さとの関係を線形近似した結果、相関係数 0.8 で傾斜勾配（単位濃度値あたりの深さ分解能）は $0.24 \mu\text{m}$ であった。
- (3) 高出力な写真撮影用リフレクタランプを用いることで、室内蛍光灯などの影響を受けにくい測定系を構築することができた。室内用蛍光灯点灯時と非点灯時で、画像上における多くの当たり位置の違いは 1 pixel（加工面上で 0.27 mm 程度）以内であった。
- (4) 参照点を基準とした実空間上での当たり位置測定、さらには工具位置決め時の精度について検討した、結果は以下に示すとおりである。

・参照ターゲットを基準としたときの相対位置測定精度 $\pm 0.6 \text{ mm}$

・工具位置決め精度 $\pm 0.5 \text{ mm}$

この程度の誤差であれば、実用において差し支えないものと考えられる。

以上により、自動的な当たり面認識において実用化の可能性を見出すに至った。今後は“加工”部門において検討していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 黒沢正明, 後藤啓一, 高木敏幸, 中西洋八郎: ファジ理論を用いたシェーディング補正, 第9回ファジシステムシンポジウム講演論文集, FCI, 2(1993) 713.
- 2) 岡本裕幸, 山田勝紀, 米澤 洋: 自動キサゲ作業用画像処理, 計測自動制御学会論文集, 26, 6(1990) 16.
- 3) 三井公之ほか: 画像処理によるきさげ加工面の認識, 日本機械学会論文集 (C編), 58, 546(1992) 310.
- 4) 電気学会編: 照明工学, オーム社, (1993) 65.
- 5) 山根八洲男ほか: 定盤キサゲ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.
- 6) 竹内芳美ほか: 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, 55, 10(1989) 2087.
- 7) たとえば, 丸谷洋二: 画像処理装置とその使い方, 日刊工業新聞社, (1989) 63.
- 8) たとえば, 小林和夫, 上野郁夫: ポケコンプログラムによる測量計算法, 山海堂, (1994) 137.
- 9) たとえば, 金谷健一: カメラキャリブレーションの数理, 数理科学, 364, (1993) 59.