当たり面認識装置を含む自動きさげ盤の開発（第3報）*

—自動きさげ盤の構成—

堤 博貴** 山田隆太** 久曾神 煌*** 中村輝幸†

Development of an Automatic Scraping Machine with Recognition for Bearing of Scraped Surfaces (3rd report)

- Construction of Automatic Scraping Machine -

Hirohisa TSUTSUMI, Ryuta YAMADA, Akira KYUSOJIN and Teruyuki NAKAMURA

This paper deals with an automatic scraping machine with image recognition system for bearings of surface plate. The automatic scraping machine consists of a large size XYZ stage for machining, a scraper and a CCD camera. The scraper attached on the large size stage just like skilled worker. After manually painting the bearings with red rouge, the image processing system with a colored CCD camera recognizes the bearings from the surface image. By image measurement including the calibration method, black bearings position detecting and tool positioning became possible high-precisely. The scraping level was decided by the area of measured black bearings, and as a result, efficiency improvement of the scraper work and reduction in the scraping error were attempted. For the surface plate finish, the process of automatic scraper work from the pattern scraper work to the recognition scraper work was examined. The positioning accuracy of the scraper using image recognition was 0.3mm. As a result, the surface flatness of the surface plane finished by this scraping machine was 11.6 μ m which is the same precision of general slide surface.

Key words: scraping, automation, skilled worker, CCD camera, image processing

1. 緒 言

高荷重下において、高速、高精度な動作が求められる工作機械において、案内部の性能はきわめて重要であるといえる。きさげ作業は工作機械案内面を仕上げる加工法として古くから用いられてきた熟練加工技術のひとつである。きさげ作業とは、光明丹を塗布しながら、ワークと基準となる定盤をすり合わせて当たりをとり、当たりの強い部分をノミ型の工具で削って平らにしていく手仕上げ加工法である。別々に作られた2つの案内面の接触不良を解消するほか、高精度、高潤滑、耐久性に優れた案内面が得られることから、現在においても必要不可欠な加工法といえる。しかし、その技術習得には長年にわたる鍛錬が必要であり、また、作業には根気と体力を必要とするため、わが国における熟練技能者数は減少の傾向にある。

こうした諸問題を解決する方策として、きさげ作業の自動化が試みられてきた。その多くは、きさげ面上の加工すべき位置を CCD カメラで検出して^{3)~5)8)}、そこに工具を正確に位置決めし、研削加工³⁾、スクレーパ加工^{4)~6)}、電解応用加工⁹⁾などの除去加工を施す手法である。しかしながら、人間ならではの勘や経験を必要とする熟練技術を機械に移植するのは難しく、認識システムおよび加工システムの両部門で今なお多くの課題を抱えているのが現状である。

これまでに筆者らは CCD カメラを用いた黒当たり面認識システムの開発を試み¹⁾ きさげ面認識において実用化の可能性を見出すに至った。また、機械によるきさげ加工を実験的に検証し、人間と比較しても良好な加工ができることを実証した²⁾。以上の結果を踏まえ、認識技術と加工技術を有機的に結合した

自動きさげ盤の開発を試みた。直動3自由度の大型ステージにスクレーパ形式の工具を取り付けたきさげ盤を試作した。そして、キャリブレーション法を含む画像測定により高精度な黒当たり位置の検出と工具位置決めおよび加工を可能にした。測定された黒当たりの面積により加工レベルは決定され、結果として、きさげ作業の効率化と加工ミスの低減が図られた。さらに、定盤仕上げを対象として、模様きさげ作業から認識きさげ作業までの自動きさげ作業のプロセスを検討したので報告する。

2. 自動きさげ盤の構成

2.1 試作機の概要

本研究で試作した自動きさげ盤の外観写真を図1に示す。本機は XYZ 方向に直動位置決め可能な加工装置（大型位置決めステージ）本体とその末端部に取り付けられた CCD カメラ、およびスクレーパ型きさげ工具で構成される。光明丹を塗布して他の定盤で擦り合わせて当たりを出したきさげ面を CCD カメラで撮影し、光明丹色と金属光沢色の違いから加工面の凹凸を認識する。そして、凸とみなされた位置に工具を位置決めし、きさげ加工を施す。この作業をワーク全面にわたって繰り返せば、一枚のきさげ面を仕上げることができる。きさげ作業における当たり出しの方法には赤当たりと黒当たりの2種類があるが³⁾、加工や認識の容易さから黒当たり面を対象とした。

2.2 きさげ盤本体の構成

加工装置本体は3自由度直交座標型の大型ステージで、高精度なボールねじとサーボモータから構成された直動機構を XYZ の3方向に組み合わせたものである。片持ち構造にすることで、大型定盤表面も加工可能な 1000×1000mm のワーキングエリアを確保した。直動機構のスライダ部はローラベアリングによって支持され、高荷重下でも所定の精度を維持できる。工

* 原稿受付 平成 16 年 7 月 30 日

** 正 会 員 東京工業高等専門学校（東京都八王子市梶田町 1220-2）

*** 学生会員 長岡技術科学大学（新潟県長岡市上富岡町 1603-1）

† 協和工業（株）（新潟県小千谷市船岡 2-5-19）

具の位置決め精度は、X、Zの各方向へ $3\mu\text{m}$ 、Y方向で $10\mu\text{m}$ である。各軸方向に最高 100mm/sec の速度で駆動することが可能である。竹内³⁾や山根⁴⁾らは、それ単体できさげ加工可能なユニットづくり、ステージの末端部に取り付けたが、本研究では加工モーションを正確に行う目的から、簡単な工具のみをステージにとりつけ、ステージ自体のモーションにより加工を行った。サーボモータの制御にはモータドライブインターフェイスを用い、プログラムにより高精度な位置決めを行った。

2.3 画像処理装置の構成

画像処理系はCCDカメラ(40万画素、有効画素: 816×496 pixel, 最低照度: 0.8Lux)、フレームグラバ(フォトロン製 FDM-PCI, 640×480 , 8bit, RGB)、撮影用照明装置(林時計工業製 LA-150UE, 光温度 3100K)とこれらを制御するコンピュータからなる。CCDカメラはフレームグラバによって制御され、画像の取得や各種画像処理がなされる。照明装置としては加工機工具部に取り付け可能なライン状照明を用いた。ワークに対して斜め方向から照射することで、照明ムラを少なくして黒当たり面の表面凹凸を鮮明にした。

Fig. 1 Scheme of automatic scraping machine

Fig. 2 Scheme of scraper

Table 1 The specification for the scraper

Scraper tip	TUNGALOY Super steel
Scraping speed	100mm/sec
Spring stiffness	8 N/mm
Scraping force	50-150 N (Vertical direction)

2.4 きさげ工具形状と加工方法

きさげ工具形状を図2に示す。熟練作業者が手仕上げで用いているきさげ工具を支持フレームで固定したもので、加工時にはスプリングとともに工具自身が弾性的に変形し、被削物に適度な切削力(ばね力)を加える。切刃としてはきさげ加工用超鋼チップを用いた。本工具の仕様を表1に示す。

加工時の工具の動きを図3に示した。工具は斜め下方方向に押さえつけた後、上方に逃れるように三角形の運動をする。押し付け量 d を変化させることで、作用切削力ときさげ痕のサイズを変えることができる。加工速度は 100mm/sec 、1回のモーションに要する時間は約 0.45 秒である。工具のばね定数は約 8N/mm で、加工時の鉛直下向きに作用する最大切削力は切り込み高さにもよるが $50\sim 150\text{N}$ 程度である。図4はきさげ加工痕で、押し付け量 d はそれぞれ、(a) 5.1mm 、(b) 5.8mm 、(c) 6.4mm である。

3. 画像処理による黒当たり位置の測定と工具の位置決め

3.1 画像処理法の流れ

画像処理による黒当たり位置測定の流れを図5に示す。(a)画像取得 → (b)青色成分の除去 → (c)二値化処理、照明ムラの除去 → (d)膨張、縮退処理によるノイズ除去 → (e)ラベリング

Fig. 3 The movement of the scraper

Fig. 4 Overview of scraped mark

Fig. 5 The flow of the image processing

と黒当たり位置の計算, の順で処理がなされる. このようにして認識された個々の黒当たり画像の重心位置をそれぞれ求め, 座標変換を施して加工位置とした. 筆者の経験から, 実験条件にもよるが, 二次元画像計測において測定範囲の 1/5000 程度の測定精度を得ることは可能であり¹⁰⁾, このことから, 測定範囲を 100mm とすれば, 本画像処理系の測定精度は 0.02mm と推定される. 一般的な当たりのサイズが 5~10mm であることを考えれば, 十分な測定精度といえる.

3.2 距離換算係数のキャリブレーション

黒当たり位置の計測精度や, きさげ工具の位置決め精度を高めるには, 光学系の未知パラメータをキャリブレーションで正確に導出しておく必要がある. ここでは第 1 報¹⁾の理論を応用し, 距離換算係数とレンズ中心—工具刃先間距離を求めた.

カメラ座標系の pixel 長さを空間座標系の mm 長さに変換する係数を距離換算係数¹⁾と呼んでいる. ここでは, 黒当たり面上にマーカーを置き, 三軸ステージを X, Y 方向にそれぞれ 10mm 動かしたときに, マーカーがカメラ上で何 pixel 移動するかを測定することで距離換算係数を求めた. マーカーとしては白紙に黒い $\phi 2.0\text{mm}$ の円を描いたものを用いた.

表 2 には, 実験で得られた距離換算係数を示した. カメラの CCD 素子は縦横で長さが異なるため, カメラの横方向と縦方向で 2 つの距離換算係数を求めた. 比較のため, レンズ焦点距離と黒当たり面—撮像平面間距離から求めた距離換算係数も示し

Table 2 Calculation results of perspective coefficient mm/pixel

Experimental result		Calculation result for reference
(a) Horizontal	(b) Vertical	
0.127	0.130	0.126

Table 3 Length between tool edge and lens center mm

Experimental result	Calculation result for reference
L=71.097 (Lx = 27.026, Ly = 65.760)	70.0

Fig. 6 Positioning error between scraping mark and target circle

Fig. 7 Relationship between scraping mark area and tool deflection

た. 両者はよく一致しており, 計算結果は妥当といえる.

3.3 レンズ中心—工具刃先間距離のキャリブレーション

きさげ加工を施す際, 工具刃の取り付け方によっては, ちょうど工具刃の真中ではなく, 左右どちらかに数 mm ほどずれたところが切刃となることがある. こういった切れ刃位置のずれを考慮して正確にレンズ中心—工具刃先間距離の校正を行った.

まず, 前節で用いたマーカー用紙をきさげ面上に置き, ステージを動かしてそのマーカー上に工具切刃を位置決めする. 次に, そのマーカーが撮影範囲に入るようにカメラを移動させ, 画像処理によりマーカーの空間座標を計算する. そして, この空間座標とカメラの移動量から幾何学的にレンズ中心—工具刃先間距離を計算した. 表 3 はレンズ中心—工具刃先間距離を示したものである. 比較のため, 見た目のレンズ中心—工具刃先間距離 (ノギス測定による) も示した. 両者の差が約 1.0mm でよく一致していることから, 計算結果は妥当といえる.

3.4 画像処理による工具位置決め精度の検証

CCD カメラで検出された任意のターゲットへ位置決めおよび加工を行い, そのときの位置決め誤差から位置計測システムの精度を評価した. 図 6 は研削加工を施した金属表面に直径 2.0mm の黒いマーカーを描き, その後, 画像処理によりマーカーの空間座標を算出して位置決めおよび加工を施したものである. 各マーカーの中央に走る白いラインが加工痕である. この画像からマーカーと加工位置のずれを測定したところ平均で 0.3mm であった. 一般的なきさげ痕サイズが 5~10mm であることを考えれば, 実用上十分な位置決め精度であり, 画像計測およびキャリブレーションが良好になされていることがわかる.

4. 黒当たり面の認識と加工レベルの決定

4.1 加工レベルの決定

効率良く, 高精度にきさげ面を仕上げるには, 黒当たりの強弱に応じて加工痕サイズ, ひいては加工時の工具押し付け量を制御する必要がある. 筆者は第 1 報¹⁾において, 黒当たり面の画像濃度と実際の凹凸形状との間に強い相関があることを示した. この関係を利用して加工レベルを推定することも検討したが, 表面凹凸を校正するための測定装置が必要となり, システム構成, および校正作業が複雑になってしまう.

ところで, 熟練作業者の加工では, 黒当たりのサイズが大きければ強い加工力で, 小さければ弱い加工力で, というように黒当たりサイズに応じて加工力を変化させ, ひいては黒当たりの部分だけを取り除くように加工を施す. そこで, 本研究では画像処理で黒当たりの面積を求め, その面積をもとに加工レベルを決定することとした.

Fig.8 Markers (before scraping) and scraping marks (after scraping).

4.2 黒当たりの面積と加工レベルについて

本きさげ盤の加工において、きさげモーションはきさげ盤本体の動作で行なうが、工作面からの加工開始高さ(工具押し付け量) d を変えることで、加工力、ひいては加工痕サイズを制御することができる。そこで、まず、加工開始位置と加工痕面積の関係について調べた。その結果を図7に示す。両者は直線の関係にあり、このことから加工開始高さによって加工痕サイズを容易に制御できると推察される。

次に、本手法の妥当性を示すために、加工面上に面積の異なる任意形状の3つのマーカー(白いペイントを使用)を用意し、画像計測でマーカー面積を測定し、面積に応じて加工痕サイズを制御しつつ加工を施した。結果画像を図8に示す。(a)は加工前のマーカー画像、(b)は加工後の画像を示している。なお、(a)、(b)は同じ位置で撮影したものである。マーカー面積に応じて加工痕サイズが変化しているのがわかる。図9は、加工前のマーカーと加工後の加工痕の面積を各サンプルで比較したものである。両者の面積誤差は平均で11.7%であり、良好な一致がみられた。

さらに、マーカー位置と加工痕位置の誤差を画像計測から求めたものを図10に示した。画像の横方向(U軸)および縦方向(V軸)のそれぞれについて示した。最大誤差は0.58mm、平均誤差は0.22mmであり、加工痕サイズが異なっても比較的良好な位置決めがなされているのがわかる。

5. 自動きさげ作業

5.1 自動きさげ作業方法と作業の流れ

図11に自動きさげ作業の流れを示した。まず、光明丹をなじみやすくするために、基盤目状にきさげ(以後、模様きさげと呼ぶ)を施す。模様きさげでは、加工痕どうしが縦横に1mm重なるように加工を施した。なお、加工痕の縦横サイズは画像処理で求めた。その後、黒当たりの認識から加工までの作業を自動的に行った(以後、認識きさげと呼ぶ)。熟練作業者のきさ

げにおいては、加工方向を変えつつ作業を行なうが、ここでは、模様きさげの方向を 0° とし、 45° 、 90° というように一回ごとに加工方向を変えつつ認識きさげを行った。

試験片としてはサイズが $100 \times 100 \times 30 \text{ mm}^3$ で、表面に研削加工を施した FC250 材を用いた。1回の撮影範囲は $77 \times 58 \text{ mm}$ とした。

5.2 黒当たり面の認識と加工

きさげ面の認識と加工が適切に行なわれているかを調べてみた。図12は、(a) 当たり出しをした模様きさげ面と、(b) (a)に第1回目の認識きさげを施した写真である。加工痕の周りではワークが削れずに光明丹のみが取り除かれるため、黒当たりのサイズに比べて加工痕サイズがひとまわり大きく見える。黒い部分が黒当たりであり、その他の部分は光明丹である。(a)、(b)を比べてみると、黒当たりと加工痕の位置はおおむねよく一致していることがわかる。認識した黒当たりの横長さおよび縦長さは平均でそれぞれ3.2mm、2.3mmであった。このことから、認識条件が良好であれば、最小で一辺3~4mm程度の黒当たりをきさげ加工することが可能であると推測される。一方で、(b)のABC部などでは複数の黒当たりを一つのものとして誤認しているのが確認できる。黒当たり数106に対して、著しい誤認は約5個であった。

図13は、5度目の認識きさげを施す前後の黒当たり面の写真である。黒当たりの位置と加工痕の位置がよく一致しているように見えるものの、平面度の向上と、加工痕の鏡面反射の発生により、画像認識が困難になってくる。実験で確かめた限りでは、約7回までの認識きさげであれば、誤認の影響は少ないと考えられる。なお、模様きさげ1回の加工時間は5分22秒(加工箇所380)で、認識きさげは3分15秒(加工箇所106)、であ

Fig. 11 The process of the automatic scraper work

Fig. 9 The comparison of scraped mark area and marker area

Fig.10 The error between marker position and scraping mark position.

Fig. 12 Bearing plane which applied the red rouge (1-st time scraping)

Fig. 13 Bearing plane which applied the red rouge (5-th time scraping)

った。

5.3 きさげ仕上げ面の表面性状

一般的にきさげ仕上げ面の評価基準としては、1) 平面度、2) 表面凹凸の分布、3) 潤滑特性などが考えられる。これらのうち JIS 規格 (JIS B 7513 -1992) においては、平面度のみが規定されていることから、ここでは平面度を用いてきさげ面の表面性状を評価することとした。さらに表面粗さ測定機できさげ面の表面性状を測定することで、模様きさげから認識きさげに至るまでの面精度の向上を評価した。

図 14 は自動きさげ盤で仕上げた模様きさげ面の (a) 外観写真と、(b) 表面凹凸を示したものである。表面凹凸は、 $\pm 10 \mu\text{m}$ の高さを 16 色カラーで表現した。図 15 には、6 回の認識きさげを施したきさげ面について示した。これら 2 つのきさげ面の表面粗さを表 4 に示す。

図 14 より模様きさげにおいて、加工痕形状は一定サイズで規則正しく分布していることが確認できる。表面粗さは最大高さで $25.42 \mu\text{m}$ であった (表 4 より)。図 15(a) より、認識きさげにおいて、光沢のあるきさげ痕が無数に点在し、きさげ特有のまだら模様になっていることが確認できる。また、図 15(b) より、認識きさげでは山が小さく、山がランダムに分布している。最大高さは $12.65 \mu\text{m}$ であり、模様きさげに比べて約半分の値であった。また、表 4 より、認識きさげでは中心面平均値、二乗平均値、最大高さ、十点平均値のいずれの粗さパラメータにおい

ても値が小さく、きさげ加工により高精度化したことがわかる。

さらに、高精度定盤と電気マイクロメータを用いて、図 15(a) のきさげ面の平面度を測定した。測定面と電気マイクロメータのプロープの間にはブロックゲージを介し、 $80 \times 80 \text{mm}$ の範囲で $4 \times 4 = 16$ 点の測定を行った。その結果、きさげ面の平面度は $11.6 \mu\text{m}$ であり、これは 2 級精密定盤に相当するものと考えられる。

6. 結 言

大型位置決めステージ、CCD カメラ、スクレーパ型きさげ工具からなる自動きさげ盤の試作を行い、以下の結論を得た。

- (1) 画像処理を用いたきさげ工具の位置決め精度は、最大誤差で 0.58mm 、平均誤差で 0.22mm であった。
- (2) 黒当たりの面積から加工レベル決定するシステムを構築した、黒当たりと加工痕の面積誤差は平均で 11.7% であり、よく一致していた。
- (3) きさげ仕上げされた面の表面粗さ (最大高さ) は、模様きさげで $25.42 \mu\text{m}$ 、認識きさげで $12.65 \mu\text{m}$ で、きさげ加工により精度向上がなされた。
- (4) きさげ盤によって加工されたきさげ面の平面度は $11.6 \mu\text{m}$ (2 級精密定盤に相当) であった。

今後は知的認識や効率的なきさげ工具の開発などにより、作業の高速化、高精度化、効率化が必要と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 堤 博貴, 久曾神煌, 中村輝幸: 当たり面認識装置を含む自動きさげ盤の開発 (第1報), 精密工学会誌 **62**, 2 (1996) 219.
- 2) 堤 博貴, 久曾神煌, 中村輝幸: 当たり面認識装置を含む自動きさげ盤の開発 (第2報), 精密工学会誌 **62**, 4 (1996) 554.
- 3) 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 **52**, 12 (1986) 2087.
- 4) 山根八洲男ほか: 定盤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.
- 5) 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) 620.
- 6) 熊谷浩樹, 青山藤詞朗: 自動きさげ加工装置の開発, 日本機械学会第71期通常総会講演論文集(IV) **3**(1994) 646.
- 7) 藤井 洋ほか: きさげ工具に作用する力と工具の動き, 日本機械学会東海支部第41期総会講演論文集 **3**(1992) 37.
- 8) 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.
- 9) 大本康雄ほか: 人工知能と数値制御による生産システムの高度自動化に関する研究, 大阪工業大学紀要 **32**, 2 (1988) 113.
- 10) 堤博貴, 久曾神他, 長屋正孝, 軒原和明: 2 台の CCD カメラを用いた物体の三次元空間位置測定, 精密工学会誌 **64**, 12 (1998) 1752.

Fig. 14 Scraped plane (Pattern scraping).

Fig. 15 Scraped plane (Recognizing and scraping)

Table 4 Surface roughness of the scraped surface μm

Evaluation parameter		Pattern scraping	Recognizing and scraping
Arithmetic average	Spa	1.61	0.96
Root-mean-square average	Spq	2.00	1.23
Maximum height	SRmax	25.42	12.65
Ten point height of irregularities	SRz	16.70	10.43