当たり面認識システムを有する自動きさげ盤の開発（第4報）*

—複雑形状の当たり面認識と三面すり合わせによる高精度平面仕上げ—

堤 博 貴** 羽 田 千 晶*** 小 池 大 地†

Development of an Automatic Scraping Machine with Recognition for Black Bearings (4th report)
- The Recognition for Intricately Shaped Black Bearings Image and High Precise Scraping Work with 3 Surface Plates by Whitworth Method -

Hiroataka TSUTSUMI, Chiaki HADA and Daichi KOIKE

This research deals with the high precision flat surface finishing method by automatic scraping machine. By Whitworth method, high-precision surface plates were finished without using a reference surface automatically, and it was certainly the work process from the pattern scraping (rough scraping) up to fine scraping. Scraper direction was changed every time to make scraping pattern on the surface. The method of dividing some image matrix that is one of image processing technique was able to take high precious image. Finally, surface flatness and scraped marks per square inch was measured to estimate the scraping performance of automatic scraping machine.

Key words: scraping, automatic scraping machine, expert skill, image recognition, whitworth method

1. 結 言

きさげ作業は高精度な平面仕上げを可能とする熟練技能の一つである。ワーク面に光明丹と呼ばれる顔料を薄く一様に塗り、基準となる模範面と擦り合わせると、山部の光明丹ははぎ取られて金属面が露出する。この部分を「当たり」と呼び、当たりを一つ一つ丹念にスクレーパーで削っていけば、最終的には全面にわたってフラットな面を仕上げることができる^{1)~3)}。その技能習得には長い年月と経験を必要とされ、近年、わが国におけるベテラン世代の引退や少子化の急速な拡大に伴い、技能継承が難しくなりつつある。以上のことから、きさげ作業の自動化は緊急課題であり、これまでに様々な取り組みが報告されてきた。きさげ作業の熟練技能を分析するもの⁴⁾⁵⁾、CCDカメラと画像処理により当たり面を自動認識するもの^{6)~8)}、さらに近年では、画像濃淡と表面性状を比較しつつ高精度な三次元形状を測定する事例⁹⁾がある。CCDカメラと加工機械を複合した自動加工機の事例としては竹内ら¹⁰⁾や山根ら¹¹⁾による先駆的な事例が知られている。

筆者らも、これまでに画像認識システムと三軸ステージを用いたきさげ盤を開発し¹²⁾¹³⁾、平面度 JIS2 級相当の加工精度を実現した¹⁴⁾。しかしながら、さらに高精度な平面仕上げを実現する上では、次に示す2つの課題解決が急務と考えられた。

- (1) 当たり形状が大きい場合や複雑な場合には、画像認識ミスが生じ、加工精度や加工効率を悪化させる。
- (2) あらかじめ用意した模範面とすり合わせながら加工するため、模範面以上の精度を得ることが難しい。

以上を踏まえ本報は、画像処理を有する自動きさげ加工機に

より高精度平面仕上げを試みた。当たりを精密に認識する方法としてマトリクス分割法を取り入れた。さらに三面すり合わせ（ウィットワース法）により模範平面を用いずに高精度な定盤製作を試みた。本装置の加工性能を総合的に評価するために、最終的に仕上げられた3枚の定盤面の平面度、坪当たりを調べたので報告する。

2. 自動きさげ盤および実験装置

2.1 自動きさげ加工機の構成

自動きさげ加工機の外観を図1に示す。本加工機は三軸直動ステージの本体にスクレーパ型きさげ工具(図2)と CCD カメラを取り付けたものである。各軸はボールねじとサーボモータで精密に位置決め制御可能である。工具を Z 軸周りに回転させるために Y 軸を有した。各軸の送り量は一回転あたり 10mm、位置決め分解能は 10μm であり、最高 100mm/sec の速度で加工可能である。

Fig.1 Automatic scraping machine with CCD camera to detect high spots from work surface

* 原稿受付 平成 28 年 9 月 5 日

掲載決定 平成 29 年 2 月 2 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）

*** 東京工業高等専門学校（現、(株)フジテック）

† 東京工業高等専門学校（現、泰興物産(株)）

2.2 きさげ工具と加工モーション

自動きさげ加工機はステージ自体のモーションによりきさげ加工を行うことができる。図3に加工方向に対して横からみたきさげ加工モーションを示す。このモーションは熟練技能者の加工モーションをもとに考案した。工具を押し付けて、前に押し出すように加工する。工具のワークへの押し付け量 d を変えれば、板バネとコイルスプリングによる加工力、ひいては加工痕のサイズを変化させることができる。加工痕サイズと工具の押し付け量(刃先の変位量)との関係を図4に示す。この関係に

Fig.2 Scraper tool that can change the working force and the chip displacement by the spring

Fig.3 Scraper motion to make a scraping marks on work surface

Fig.4 Relation between scraping mark area and tool edge displacement

もとづき、加工面積から工具押し付け量を求めた。

図5は加工痕の断面形状を示したものである。加工痕が大きいほど加工深さが大きくなることからわかる。1回の加工深さは10~25 μ m、加工痕の大きさは最大約5mm、加工モーション時間は約0.5秒である。なお、工具刃先の変位量と加工深さの関係は前報14を参照されたい。

2.3 当たりへのきさげ工具の位置決め

図6に当たりにきさげ工具を位置決めするための座標システムを示す。カメラ座標(UVW)と加工機の座標(XYZ)と角度 α だけ傾いて存在する。カメラ光軸から空間上の当たりまでの距離を $P(X_P, Y_P, Z_P)$ 、工具とカメラ光軸までの距離を $S(X_S, Y_S, Z_S)$ とする。これらの差分、 $R(X_R, Y_R, Z_R) = S(X_S, Y_S, Z_S) - P(X_P, Y_P, Z_P)$ は当たりまでの工具移動量であり、以下の式で求めた。

$$\begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} - C \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ f \end{bmatrix} \quad (1)$$

(a) Deep scraping($d=7.0$ mm)

(b) Shallow scraping($d=5.0$ mm)

Fig.5 Relation between scraper edge displacement and surface profile of scraping mark

Fig.6 Image coordinate transformation to place a scraper

ここで、 $p=[p_x, p_y, f]$ はカメラ座標上の当たりの位置、は空間座標上の工具移動量、 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。なお、位置決めは平面移動のみとしZ方向の工具移動はないものとした。

Fig.7 Image processing flow to find the high spots painted red rouge

Fig.8 2 kind of red rouge was painted on surface plate to recognition the high spots

Fig.9 Brightness distribution of image of painted work surface with two color of paste

Fig.10 Problems in the finding high spot image center (scraping position)

3. 当たり面の自動認識の高精度化

3.1 撮影環境と画像処理の流れ

撮影装置として、きさげ加工機本体のコラム部には CCD カメラと線状光源を搭載した。加工面の真上から CCD カメラで撮影し、コンピュータ上では 640×480pixel の画像を取得した。ワークに対して斜め上二方向から線状光を当て照明ムラを最小限に抑えた。1 回で撮影できる範囲は約 80×80mm とした。

画像処理の流れを図 7 に示す。図 7 (a)の青い部分が画像認識対象となる当たりである。画像処理はあらかじめ光明丹を手作業で塗布し CCD カメラで撮影する。そして、得られた原画像に 2 値化処理、膨張縮退処理、ラベリング処理、当たりの重心位置の算出を施した。

3.2 光明丹と塗布方法の検討

きさげ作業では、高精度な平面の当たりを識別する場合に 2 色の光明丹（たとえば、青とオレンジ）を塗布し、コントラストを大きくして当たりと背景を識別しやすくする方法がある。

図 8 はきさげ面に光明丹を塗布したモデル図で、凹凸の高い部分に青、低い部分にオレンジを塗った場合である。塗り分けの手法は以下のとおりである。いずれも手作業にて行った。

- 1) まず、加工面に光明丹を塗布して模範面とすり合わせ、表面の谷部に光明丹を塗る。
- 2) 次に、今度は模範面に別色の顔料（別色の光明丹、青竹、ブルーペーストなど）を塗り、加工面にすり合わせて表面の山部に付着させる。

上記の 1)は黒当たり、2)は赤当たりと呼ばれる手法であり、本手法はこれらを併用するものである。

青、オレンジ、白赤の 3 色の光明丹によりコントラストが大きくなる塗布方法を検討した。図 9 に示す。画像認識すべき当たり（高い部分）をターゲット画像、それ以外を背景画像とした。ターゲット色および背景色はそれぞれ、(a)青とオレンジ、(b)オレンジと白、(c)青と白である。(c)の青と白が最も画像濃淡のコントラストが大きいことがわかる。以上より、(c)を採用した。

3.3 工具たわみ量と加工面積の関係

精密な面を仕上げるためには、画像認識で検出された当たりの面積に応じた加工する必要がある。そのために、刃先の変位量に応じて加工痕のサイズを制御した。従来の研究¹⁴⁾では、加工面積と切り込み深さを 1 次近似としたが、ここでは 2 次近似とした。これにより、工具押し付け量が小さい場合に、前者と比べて面積誤差を少なくし、良好に加工することができる。前述の図 4 はキャリブレーションで得た加工痕面積と刃先の変位量の関係を示したものである。両者の関係は 2 次近似でよく一致していることがわかる。特に、刃先の変位量が 1mm 付近では良く一致していることがわかる。

4. マトリクス分割法による当たりの自動認識

4.1 従来の当たり画像認識の問題点

従来の方法で当たりを画像認識してその重心位置（きさげ加工位置）を求めるときの問題点を図 10 に示す。当たりが複雑な形状の場合、当たり位置に対して実際の加工位置がずれたり、面積の誤認識をして深く削りすぎることがある。きさげ加工では一か所でも深く削りすぎると、全面を削り直さなければならないため多大な作業時間を要してしまう。また、加工痕サイズよりもはるかに大きな当たりでもターゲット画像の重心は 1 つ

しかなく、加工は1回しか行われない。このため、認識範囲に対して加工回数が少なくなり作業効率が悪くなってしまう。以上のことから、複雑形状の当たりを適切に認識すること、また、大きな当たりに対して効率よく加工する方法が必要不可欠と考えられた。

4.2 マトリクス分割法と当たりの自動認識結果

前述のような問題に対処するために、画像全体を格子状に分割し、当たりを複数のマトリクスに分割し、そのマトリクス内で当たりを認識する方法を開発した。図11にはその画

Fig.11 Image processing flow of matrix dividing method to find scraping position all over a large high spot

Fig.12 Result of matrix dividing method to scraping position all over a long high spot

Fig.13 Flow of automatic scraping with Whitworth method

像処理の流れを示す。それぞれ、(a)原画像、(b)二値化画像、(c)マトリクス分割した画像、(d)ラベリング画像、(e)実際にきさげ加工した表面の画像である。本手法は2値化した当たり画像にマトリクス状に黒い線を引き、当たりを複数に分割したのちに、ラベリング・重心計算を行うものである。マトリクスごとに重心計算するために、大きな当たりの全面にわたって加工することができるだけでなく、複雑形状の当たりを分割して単純形状にすることができるため、加工が容易になる。本手法は原理が単純であり、計算にほとんど時間を要さないため、コンピュータにほとんど負荷をかけない。分割マトリクスサイズは後述する模様きさげの格子間隔と同じ約7×7mmとした。

図12に本手法を実行した結果を示す。長い当たりを分割して加工されていることが確認できる。

5. 三面すり合わせによる高精度定盤仕上げ

5.1 きさげ加工プロセスと三面すり合わせの方法

きさげ加工のプロセスを図13に示す。加工は(a)模様きさげ、(b)すり合わせ、(c)画像認識、(d)きさげ加工の順番で行った。加工初期に光明丹が付着しやすいように表面に模様をつける作業を模様きさげと呼ぶ。模様きさげは7mmピッチで等間隔に格子状に加工した。きさげはX方向、およびX方向から45°傾いた方向の2種類とし、合計2回の模様きさげを施した。

その後、三面すり合わせ作業を行った。その方法を図14に示す。すり合わせは、(a)まず、A、B面を相互にすり合わせる(ともすり)。 (b)次にそのうちのA面を模範面としてC面を仕上げる。この段階で、A、B、C面はすべて1度きさげ(1次きさ

Fig.14 Whitworth method for automatic scraping

Fig.15 Surface profile of scraped surface in 3 scraping grade

げと呼ぶ)される。(c)さらにB, C面をともずりする(2次きさげと呼ぶ)。(d)仕上がったB面を模範面としてA面を仕上げる。この作業を繰り返せば, A, B, C面を精密な平面に仕上げるができる。

試験片としてはFC250 板材 (100×100×30mm, 平面度 15.2 μm , 表面粗さ 0.5 μm) 3 枚を用いた。各面に対して, 3 つの加工方向(x 方向に対して 0, 45, 90°)への1次きさげを各2回で, 合計6回, 2次きさげも同じく6回施した。

5.2 表面形状の変化

各加工プロセスにおける加工面の表面形状を図15に示す。すり合わせで当たりをとり, 画像認識をして自動加工する作業を認識きさげと呼ぶ¹⁴⁾。それぞれ, (a)模様きさげ, (b)1次きさげ(認識きさげ3回), (c)2次きさげ(認識きさげ6回)である。加工の進捗につれて表面の凹凸が取れて平らになることがわかる。2次きさげにおいて凹凸は10 μm 以下まで高精度に仕上げられたことがわかる。

きさげ仕上げ面の表面の振幅分布を図16に示す。振幅分布は表面の凹凸を度数分布でみたもので, 正規分布に従って振幅分布を表示することができる。測定長は150mmである。山形

Fig.16 Amplitude distribution of scraped surface

Fig.17 Automatically scraped surface by Whitworth method (100×100mm)

状は加工の進行とともに鋭くなり, 表面の凹凸分布が密になることがわかる。

6. きさげ仕上げ面の評価

6.1 仕上げ面と平面度の評価

三面すり合わせ法を用いてきさげ加工装置が仕上げた三枚の定盤を図17に示す。3枚とも同じサイズの加工痕が点在しており, まだら模様の定盤に仕上げられたことがわかる。いずれの定盤も金属光沢があり, 表面がなめらかである。それぞれ, A面は0°, 90°方向の加工痕が, B面は45°方向の加工痕が多くみられる。C面は他の面に比べて加工痕が明瞭であった。これらは各々の面に適した画像認識及び, きさげ加工が施されることによって得ることが出来たと考えられる。

JIS規格(B 7513-1992)を参考とし, 90×90mmの範囲にて3×3=計9点の測定を行った。実際に加工を行った3枚の定盤の平面度の測定結果を図18に示す。模様きさげ面, 1次きさげ面, 2次きさげ面の3つの面を測定した。模様きさげでは平面度20 μm 以上であったが, 最終的には, おおむね10 μm 以内に仕上げる事ができた。すべての2次きさげ面をJIS2級相当の平面度に仕上げることができた。B面の2次きさげのみ1次きさげよりも平面度が大きくなっている。これはきさげ工具自身の傾

Fig.18 Surface flatness of each scraping stage

Fig.19 Surface with blue paste and white paste (100×100mm)

Fig.20 Measurement result of number of high spots / in²

きや画像認識位置と工具位置のずれにより、深く削りすぎたことによる。加工痕深さが浅くなるにつれて画像認識が難しくなる。さらに、ワークとステージ軸とのアライメント調整の限界から、現状では上述の平面度までが限界であったと考えられる。

6.2 当たり面と坪当たりの評価

図 19 は図 17 の各面に光明丹を塗布し、当たりを取ったものである。A 面は小さな当たりが散布している。B, C 面は一箇所に集中している。いずれも、当たりの分布に偏りがあることがわかる。図 20 は A, B, C 各面の一インチ四方における当たり数を示したものである。文献 15) を参考に当たり数がどの等級に相当するかを記述した。いずれも C 級に相当することがわかる。

本研究では、当たりの大きさに応じて加工深さひいては加工サイズを調整しているが、仕上げ段階では、できるだけ加工痕サイズを均一化する必要があると考えられる。

上の偏りの原因として次のことが考えられる。(1)照明ムラの影響により高精度な仕上げ段階では良好な画像の取得が難しい、(2)すり合わせは手作業で行っており技能が要求される。

7. 結 言

画像処理を有する自動きさげ加工機により高精度平面仕上げを試み、以下の結論を得た。

- (1) 従来の画像処理システムを改善し、さらに、マトリクス分割法を適用することで、大型・複雑形状の当たり認識およ

びきさげ加工を可能とした。

- (2) 三面すり合わせを用いて模範平面なしで JIS 2 級相当の高精度な定盤を仕上げる事ができた。また、坪当たりにおいては C 級相当の加工がなされた。しかし、当たり面には偏りがあることから、さらなる高精度化の工夫が必要と思われる。

加工面に対するきさげ工具のアライメントやきさげ工具の初期位置などの調整が難しく、そのため表面を深く削ってしまい平面度を低下させることがたびたびあった。このような調整方法の再検討に加え、すり合わせ回数を増やすこと、精密な当たり面画像のコントラストをとる工夫により、今後さらなる高精度化につなげたい。

参 考 文 献

- 1) Devitt, A. J., Sliding-Way Design Primer, Manufacturing Engineering, 120, 2, (1998), 68.
- 2) きさげ技術者の養成講座, 村上精機株式会社,
<http://murakamiseiki.co.jp/example/index.html>
- 3) 長島善之, 機械に製作担当者の銘を打つ, 日本機械学会誌, 101, 958 (1998), 692.
- 4) 青山藤詞郎, きさげ加工の自動化技術, 機械と工具, 40, 9 (1996), 28.
- 5) 小野里雅彦, きさげ作業における技能の分析とそのモデル化, 計測と制御, 37, 7 (1998), 495.
- 6) 三井公之他, 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, 58, 546 (1992), 626.
- 7) 杉野直規他, きさげ作業のデジタル化とその知能化(第 1 報), 精密工学会誌, 69, 7 (2003), 949.
- 8) 杉野直規他, きさげ作業のデジタル化とその知能化(第 2 報), 精密工学会誌, 69, 8 (2003), 1104.
- 9) Fan, K.C., Tomgb, J., Jywec, W., Chou, R. C. and Yea, J. K., 3-D measurement and evaluation of surface texture produced by scraping process, Measurement, 45, 3 (2012), 384.
- 10) 竹内芳美他, 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.
- 11) 山根八洲男他, 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), 1787.
- 12) 堤博貴他, 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.
- 13) 堤博貴他, 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.
- 14) 堤博貴他, 当たり面認識装置を含む自動きさげ盤の開発(第 3 報), 精密工学会誌, 71, 3 (2005), 358.
- 15) きさげ技術者の養成講座, 村上精機株式会社,
<http://www.murakamiseiki.co.jp>