きさげ作業のデジタル化とその知能化（第2報）*

—きさげ作業シミュレータの開発—

杉野直規** 山根八洲男** 住元 恵*** 鳴瀧則彦**

Digitalization and Intellectualization of Scraping Operation (2nd Report)

— Development of a Scraping Operation Simulator —

Tadanori SUGINO, Yasuo YAMANE, Kei SUMIMOTO and Norihiko NARUTAKI

Scraping operation is indispensable to make high accuracy machine tools and measuring instruments. Scraping however needs not only highly professional skills but also the ability to make a scraping strategy, such as where and how far to be scraped. In general, it takes long time to master these abilities, and skillful workers are decreasing year by year. Digitalization of the operation and its transplantation into a computer must be a way to conserve the skill. The digitalization has been described a previous paper. This paper deals with the transplantation of scraping into a computer as a scraping simulator which can scrape a surface in a virtual space made in a computer. In this simulator, a series of scraping operation, such as Marking up, Recognizing black bearing and Scraping, can be performed just like a scraping operator. The simulator can be used not only to verify a strategy of scraping but also to train a beginner of scraping operation.

Key words: scraping, marking up, black bearing, simulation, surface plate, skilful worker

1. はじめに

きさげ加工とは、精密に平面または曲面を仕上げることである加工法で加工面に浅いミゾが分布し潤滑効果が期待できるなど¹⁾²⁾の利点を有する人手による熟練作業である。このきさげ加工の機械化、自動化について様々な試みがこれまで行われている^{3)~7)}。

前報⁸⁾では、自動きさげシステムの高精度化、高効率化を図るためには、実際に行われているきさげ作業にもう一度立ち回り、熟練作業者のいわば“知能的な戦略”を取り入れる必要があるという立場で、きさげ作業の一連の作業過程を調査しデジタル化した。デジタル化したデータをもとに知能化のための方策を検討することによってきさげ作業における戦略が得られるが、その戦略の有効性を確認するためには実際にきさげシステムなどで実験するしかなく、仮にその戦略に基づいて行われた実験の結果が良好でない場合には、再度戦略を立て直し、同様の検討を行わなければならない。本研究ではそれらの多大なエネルギーを損失する試行錯誤をなくし、効率よく最良の戦略を検討できるようにすることを目的とし、きさげ作業シミュレータの開発に取り組んだのでこれを報告する。

きさげ作業シミュレータでは、実際に行われている手順と同様のきさげ作業が再現される必要がある。そこで基本的な作業の進め方は熟練者によるきさげ作業に習い、コンピュータ内に構築した“きさげ作業空間”で、実際のきさげ作業と同様の手順ですべてのきさげ作業過程を再現している。

なお、現在の技術レベルではきさげ作業システムを知能化したとしても、人間の手作業には及ばない部分がやはり存在し、仕上げ段階などでは人間によるきさげ作業の余地はかなり残っていると考えられる。しかし近年、熟練作業者は減少してきて

Fig.1 Scheme of scraping simulation

おり、その育成が重要な問題となっている。本研究で開発したきさげ作業シミュレータは、知能化のための検討に用いるだけでなく熟練作業者を育成するための初心者の教育に利用できると考えている。

2. きさげ作業シミュレーション

図1に開発したシミュレータによるきさげ作業シミュレーションの概要を示す。シミュレーションでは加工対象の3次元形状データ空間内ですべてのきさげ作業が進行する。その進行は実際のきさげ作業と同様に大きく分けて3つのパートに分かれている。

- (1)「当たり取り部」では加工対象の形状データを用いて、実作業での基準定盤を想定した平面が凹凸を持つ加工対象面に対して凸部で接触する様子をシミュレートすることで黒当たりデータを作成する。
- (2)「きさげ加工位置決定部」では(1)で得られた黒当たりデータの黒当たりを認識し、あるルールに沿ってきさげ加工点を決定する。この加工点を決定するルールが知能化のための検討項目である。

* 原稿受付 平成14年11月11日

** 正会員 広島大学大学院工学研究科 (東広島市鏡山1-4-1)

*** 学生会員 広島大学大学院工学研究科 (現、光洋精工(株); 大阪市中央区南船場3-5-8)

(a) Steps of marking up

(c) 2-D marking up model

(b) Judgement of end of rotation of virtual plane

(d) Comparing black bearing of simulation with real black bearing

Fig.2 Marking up on simulation

(3)「きさげ加工部」では(2)で決定した加工位置において加工対象の形状データと加工痕の形状データとの演算により、きさげ加工をコンピュータ内で再現する。

以上の手順を何度か繰り返して精密な平面に近づけていく。この際、(1)～(3)の1サイクルの処理で加工面の状態が1ステップ進行すると定義する。ステップが進行する度に、平面の仕上がり具合を黒当たりデータの統計的処理や形状データの高さ情報のヒストグラムによって評価する。

・シミュレーションでは、実際の加工対象（未加工の定盤）の形状データを初期状態として用いる。形状データは前報⁸⁾と同様に工作機械上のレーザ変位計（アンリツ社製：KL131A）によって計測され、250mm角サイズであれば約 $x:2300 \times y:500$ の点群データとなる。xに対してyのデータ間隔が粗であるが、これは計測中の工作機械の熱変形などの環境の変化が計測結果に影響を与えることを避けるため、1回の計測が1時間程度で終わるように設定したためである。また、開発したシミュレータではディスプレイでの確認の際、x方向のデータ量に対してy方向のデータ量が少ないことを感じさせないようにデータの補間、間引き処理を施し表示している。

2.1 当たり取り部

当たり取りはどの位置をきさげ加工するかを判断するための材料を作る重要な作業である。シミュレータにおける当たり取りでは、形状データが存在する3次元空間内に仮想平面を設定し、仮想平面と形状データの接触部を黒当たりとして再現する。

平面は3点以上で決定されることより仮想平面と形状データ

は3点で接触するものとした。図2(a)に黒当たりデータ作成手順を示す。

- (I) 加工対象形状データにおいて、最高点を第一接触点P1とし、単位法線ベクトル nvp で表される仮想平面 vp を設定する。ところで、実際の当たり取りでは、質量を持つ基準定盤が加工対象に接触するため、単に高い点で接触するのではなく加工対象の凸部が基準定盤の質量を支えるように均衡して3点で接触すると考えた。そこで質量を表すために vp に対して重心 gvp を設定し以降の処理でこれを用いる。
 - (II) P1と gvp とを結ぶ線分と vp 内で直角をなす線分をL1とし、重心方向に平面が傾く様子をL1周りに nvp を微小角づつ回転させることで再現し、回転動作中に次に vp と接触する第二接触点P2を決定する。
 - (III) P1とP2を結ぶ線分をL2とし、IIと同様にL2周りに vp を回転させ、回転動作中に第三接触点P3を決定する。
 - (IV) 決定された3点P1、P2、P3によって加工対象と仮想平面が接触していることになり、これが当たりの状態となる。
- 以上の処理で接触3点が求まるが、仮想平面が質量を持つと仮定しているため接触3点が偏って存在した場合、 vp が接触点でバランスするようにさらに傾くと考えられる。そこで接触3点がバランスよく存在しているか判定を行い、条件を満たせば接触点の探索を終了し、満たさない場合は新たな接触点を探す動作を繰り返す。

判定では図2(b)に示すようにP1、P2、P3で構成される三角形内に gvp が存在することを条件としている。図に示すようにベクトルを考え、それらの外積の方向によりすべての組合せで外

積の方向が等しくなった場合が三角形内にgvpが存在する状態である。異なる外積方向が存在する場合は、その外積を求めた接触点の組合せ以外の点（図2(b)右側ではP2）を接触点候補からはずし、残りの2点を用いて再度vpの回転運動で第三接触点を求める。

実際の加工対象と基準定盤の接触では、変形などにより両者が完全に点接触することはない、また面同士を接触させた後、基準定盤を擦るように動かすことではじめて黒当たりが生成されることから、シミュレーションにおいても3点のみで接触した状態で黒当たりは再現できない。そこで得られた接触平面(vp)に対してz軸マイナス方向に任意の幅だけシフトさせたしきい値平面を設定し、そのしきい値平面より上方を接触領域とする。形状データにおいてこの領域と重なる部分を黒当たり部と定義し、形状データを構成するすべての要素に対して、接触判定を行い黒当たりデータを作成する。ここでシフト量について、本報では前報⁸⁾で取得した熟練者によるきさげ作業の黒当たりデータと形状データの重なる部分を検討した結果2 μm とした。

図2(c)にシミュレーションで用いる形状データの1ラインプロファイルと接触平面およびしきい値平面の2次元モデルを示す。初期状態面として実際の形状データを用いるため、形状データには機械加工による微小な凹凸が表面に存在する。これらの微小な凹凸は加工対象と仮想平面との接触においてはノイズとなり、形状データをそのまま接触平面を求める処理に適用すると適切な接触平面は得られない。そこで微小な凹凸の影響を除くため形状データに対してローパスフィルタをかける。波長としては1回のきさげ加工で加工痕の外形が残る程度と考え、加工痕幅の2/3波長程度とした。フィルタリング後の値を用いて接触平面およびしきい値平面（つまり接触領域）を求め、得られた空間幾何情報を基にオリジナルの形状データに対して接触領域との交差判定を行い黒当たりデータを作成する。

図2(d)に200mm角鋳鉄製定盤の実際の黒当たり（前報⁸⁾で示した方法で認識）と本シミュレーションにより得られた黒当たりデータを示す。両者はほとんど同一でシミュレーションにおいても黒当たりが的確に得られていることがわかる。

2.2 きさげ加工位置決定部

きさげ加工位置決定部では「当たり取り部」で得られた黒当たりデータよりきさげ加工を行う位置を決定する。きさげ加工位置とは対象面を削り取る際の加工位置のことで、これは黒当たりの状況より決定される。

効率的なきさげ作業を行うためにはこの加工位置の決定を何らかの戦略にもとづいて行う必要がある、これがシミュレータを用い検討する課題である。本シミュレータではまず単純なルールに沿って加工点を決定し、それを基に効率的に面を仕上げることでできる加工位置を再決定する。単純なルールに沿って決定した加工位置を初期加工位置と呼び、以下に示す方法で得られる。

きさげ加工位置の決定を行うためには、まず黒当たりデータより黒当たり部分を認識する必要がある。人間が行う認識では、きさげ工具で加工する面積を考慮に入れ、ある程度の大きさの黒当たり分布を一塊として認識している。そこでシミュレータにおいても、きさげ加工部で使用する加工痕の大きさを考慮しつつ黒当たりを認識する。

シミュレータの開発当初は図3(a)に示すように、黒当たりデータを格子分割し、その格子内での黒当たりの割合が一定以

Fig.3 Recognizing black print and deciding scraping points

上であればそれを一塊の黒当たりとし、その分布重心を初期加工位置としていた。しかし同図のように、実際には一塊の黒当たりであるものを格子分割してしまい、必要以上に同じ場所を加工するような場合や、格子Aのように1つの格子に対して、複数の黒当たりがまたがって存在し、これによって黒当たり以外の位置を分布の重心としてしまう場合が生じた。そこで、連続する点群を一塊として認識できる画像処理で用いられるラベリング⁹⁾の手法を取り入れた図3(b)に示す方法を開発した。

シミュレーションによる黒当たりデータは形状データより派生したものであるため、x方向は密で、y方向は粗である。そのためディスプレイに表示した際には一塊に見えてもデータを要素レベルで見るとラベリングするには不適当な飛び飛びなデータであることもある。そこで、データに対する補間、間引き処理によって得られるディスプレイ表示用の画像に対してラベリング処理を施して初期加工位置を決定し、その結果を形状データの座標系に変換する手法を用いた。

図3(c)に格子分割法とラベリング法による初期加工位置を黒当たりデータ上にプロットした例を示す。これを見ると格子分割法では加工位置が外れている分布が存在するのに対し、ラベリング法では加工位置は黒当たりの分布中心付近を示しており的確に認識が行われていることがわかる。

しかしこのラベリング法にも欠点があり、黒当たりが大きな分布となった際に1つのラベルとして認識してしまい、初期加工位置は1箇所になってしまう。そこでラベリングした黒当たり分布が1回のきさげ動作で加工する面積より大きくなる場合には、その黒当たり分布に対して格子分割法を部分的に適用して初期加工位置決定を行う方法を採用した。

2.3 きさげ加工部

きさげ加工部では「きさげ加工位置決定部」で決定した各加工位置におけるきさげ加工を、加工対象の形状データときさげ加工痕の形状データとの演算で再現する。

きさげ加工痕の形状データは熟練作業者または自動きさげシステム⁴⁾⁷⁾で平面をきさげた加工痕を計測したものを使用する。一般的に実際のきさげ作業では、加工対象が定盤のように方形であれば対角線方向にきさげ加工が行われる。また、1サイクル終わるごとに加工対象を90°回転するため加工方向の対角線が交互に入れ替わる。そこでシミュレーションでは、加工

Fig.4 Shape data and the one profile of a scraping mark

Fig.5 Scraping on virtual space of shape data

痕を斜めに傾けて計測した形状データを用い、一回のサイクルでの加工方向はすべて同一とし、次のサイクルではy軸対称に反転させた形状データを用いてきさげ加工を再現している。図4に、熟練作業者の加工痕の形状データ例を示す。図中のグラフは最も深く加工している部分のx方向のプロファイルを表しておりこの作業者は最深部で3 μm 程度加工していることがわかる。実際のきさげ作業では作業者はコンスタントに同程度の大きさ、深さで加工をすることが可能であり、それが熟練者と言われる所以である。

図5はきさげ加工時の形状断面を模式的に表しており、加工演算の概略を示している。まず、きさげ加工位置決定部で決定されたきさげ加工位置に加工痕形状のx-y平面上の中心がくるようにシミュレーション空間内で設定する。加工対象の形状データにおいて、これから加工される加工痕と重なる領域で高さ平均Aを求める。求めた高さ平均Aより大きな値を持つ部分の高さの平均Bを再度算出し、その平均と加工痕の最上部を合わせる。この処理は形状データの微小な凸部やノイズの影響を低減するために行っている。その後、加工対象と加工痕の形状データの低い方を選択することによって、あたかもきさげ工具で加工したかのような断面形状が得られる。これをすべての加工位置で行うことで1サイクルのきさげ加工が終了する。

2.4 加工面の評価

シミュレーションの各サイクルにおける加工面の評価は、黒当たりデータと形状データを評価する二通りの方法で行う。

黒当たりデータによって評価する場合、定量的には熟練作業者のきさげ作業で「坪当たり」と呼ばれる、単位面積（1坪：25.4mm×25.4mm）あたりにしめる黒当たりの存在数（率）で評価する。各坪の評価値の全体に対する平均や標準偏差を計算することで各ステップ間の黒当たり分布の違いが定量的に判断できる¹⁰⁾。しかし、「坪当たり」に対して用いた加工痕が大き過ぎる場合はほとんど当たりが出ない場合もあり、加工痕のサイズに対する適切な単位面積の大きさを検討する必要がある。

形状データの高さ情報のヒストグラムを用いる評価は、（その統計的な解釈が十分になされてないのが現状であるが、）その分布の様子で加工の進行具合が定性的に判断できる。図6は

Fig.6 3-D shape data of workpiece worked by a skilful worker

Fig.7 Histograms of shape data of workpiece worked by a skilful worker

熟練作業者が250mm角の鋳鉄製定盤をJIS00級（平面度公差2 μm 以内）に仕上げる作業過程で、加工対象を初期段階（1次きさげ）、概略仕上げ（2次きさげ）、最終仕上げ（3次きさげ）の3回に分け計測した形状データである。中凹形状が平面に仕上がっている様子がうかがえる。この形状データの高さ情報のヒストグラムが図7である。加工が進行するに従って、分布は狭い範囲に正規分布的に集中してきていることがわかる。これはきさげされた表面が油溜としての適度な凹凸を有する平面であり、凹凸のバランスが取れて平面に仕上がっているためであると考えられる。なお、平面の仕上がった状態の3回目のヒストグラムで若干、低い部分に分布が見られるのは加工対象の周辺が過加工され低くなったままの部分である。この加工対象では、この部分は定盤としての機能に影響しないのでそのまま残されている。

3. シミュレーション例

本章ではシミュレータによるシミュレーション例を示す。

一般的にきさげ加工では加工の進行に合わせて、荒仕上げ、中仕上げ、仕上げと何段階かで加工痕の大きさや深さを変えられているが、加工の進行を早めるためにシミュレーション例では、図4に示す比較的面積の大きな加工痕を最後まで用いた。

図8に初期形状データ（高低差：約25 μm ）と加工方向を示す。2.3節で触れたように、偶数回目では加工痕形状データを反転して用いている。シミュレーションは1サイクルを1ステップとし、各ステップごとに黒当たりデータと高さのヒストグラムで評価し、ある程度の平面が仕上がるまで行った。加工位置は「きさげ加工決定部」で決定される初期加工位置で行っている。つまり戦略的な手法は適用されていない。

図9(a)にシミュレーションの進行に伴う各ステップの黒当たりデータと各ステップ間に加工された加工点数を示す。この図より初期の四隅の高い状況より加工が進行し、徐々に当たりが全面に広がっていることがわかる。

図9(b)は各ステップでの形状データの同一1ラインプロファイルと比較した結果である。初期ステップでは両端が高い形状であったが加工の進行とともに全体的に平面が仕上がっている様子が見て取れ、6th stepでの表面の凹凸が数 μm の幅に収まっていることがわかる。

図9(c)は各ステップ後の形状データのヒストグラムを示している。加工の進行とともに図7のヒストグラムと同様に狭い範囲に正規分布的に分布してきていることがわかり、平面が仕上

Fig.8 Initial shape data and scraping direction on a simulation

(a) A series of black bearing data

(b) A profile of each step

(c) Histogram of shape data of each step

Fig.9 Simulation results

がっていることを示している。

ところで、図9(c)のヒストグラムにおいて5th stepと6th stepではほとんど差が見られない。しかし両者の形状データや黒当たりの状況を詳細に比較すると明らかに5th stepの方が局所的に凹んでいる。これは高さのヒストグラムが統計的なデータであるため、凹凸の状況に偏りがあっても確率的に同じ分布のヒストグラムが得られる可能性があるからである。しかし、図10に示すように形状データをいくつかの領域に分割し、ヒストグラムを求め直すと5th stepの領域I、IIIでは頻度のピークが若干低く、また広く分布していることより面の状態が均一でないことが分かり、6th stepの方がより良い面であると判断できる。

(a) Histograms of segmented regions (5th step)

(b) Histograms of segmented regions (6th step)

Fig.10 Comparison of histograms of segmented regions between the 5th and the 6th step

4. まとめ

きさげ作業の知能化を検討するためにきさげ作業シミュレータの開発に取り組み以下に示す結果が得られた。

- (1) きさげ作業をコンピュータ内で再現し、効率化、知能化のための検討が行えるシミュレータを開発した。
- (2) シミュレーションは大きく分けて、「当たり取り部」「きさげ加工位置決定部」「きさげ加工部」の3つのパートにわかれ、1サイクルできさげ作業が再現できる。
- (3) 開発したシミュレータによる一連のきさげ作業のシミュレーション例を示した。

今後は本シミュレータを用い知能化の検討および作業教育への利用の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 大西久治：よくわかる仕上げ作業法，理工学社，(1963)
- 2) Wayne R. Moore: Foundations of Mechanical Accuracy, The Moore Special Company, (1970)
- 3) 竹内芳美，坂本正史，吉田哲也，長木正博：CCD ラインセンサによる当たり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，尹 栄生，岡本裕幸，山田勝紀，米沢 洋，鳴瀧則彦：定盤のきさげ加工への多関節ロボットの応用，精密工学会誌，55，10 (1989) 1787.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Y. Yamane, T. Sugino, N. Narutaki: Smart Scraping Using Machining Center, Proc. of 4th ICPCG, (1998) 371.
- 8) 杉野直規，山根八洲男，佐久間 到，鳴瀧則彦：きさげ作業のデジタル化（第1報）—熟練作業員によるきさげ作業過程の調査—，精密工学会誌，69，7 (2003) 949.
- 9) 例えば，谷尻豊寿：パソコンによる最新画像処理入門，技術評論社，(1996)
- 10) 杉野直規，山根八洲男，鳴瀧則彦，佐久間 到：きさげ加工の知能化—きさげ加工のシミュレーション—，2001年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2001) 309.
- 11) 加藤 仁，丸井悦男，小林明彦，松林恒雄：きさげ仕上げ案内面の静摩擦特性について，日本機械学会論文集(C編)，45，489 (1979) 208.