ロボットによるバリ取り作業の自動化*

— 自由曲面上の湯口の場合 —

浅川 直紀** 伊藤 謙一*** 竹内 芳美**

Automatic Deburring with Industrial Robot
- Removal of Projection on a Convex Sculptured Surface -

Naoki ASAKAWA, Ken'ichi ITOH and Yoshimi TAKEUCHI

The study deals with automatic deburring on the basis of CAD technology. The recognition of a workpiece location is required much for the automatic deburring operation. The comparison of the CAD data of the workpiece and the image data enables the robot to know the workpiece location and the burr shape, which results in the generation of deburring tool path. As a deburring tool, a pneumatic grinder is mounted to the arm of the robot having 6-DOF in order to give an arbitrary position and attitude to the tool. The robot control data converted from the deburring path is transmitted directly to the robot. From experimental results, the system is found effective to remove a projection-shaped burr on a cast iron workpiece.

Key words: deburring, robot control commands, offline-teaching, CAD, sculptured surface

1. はじめに

鋳物工場におけるバリ取り作業は、粉塵・騒音・振動を伴う典型的な3K作業で、慢性的な労働者不足や作業者の高齢化といった問題を抱えており、自動化への要求は高い。バリの形状は様々で、単純な構造の専用機だけでは対処しきれず、バリ取り作業の自動化に産業用ロボットが適用されてきた。

予測のできないバリの形状に対し、ロボット先端に形状計測用の光センサを取り付けた例¹⁾やレーザスキャナによってバリ形状の計測を行い、その形状に従ってバリ取り工具の経路を生成する研究が行われた²⁾。また、バリ取り工具を工作物に接触させてから反力を検知し、その大きさを一定に保つことによりバリ取り条件を一定に保つもの³⁾⁴⁾や、さらにその情報に基づいて材料の削りすぎを防ぐもの⁵⁾⁶⁾もある。センサによって得られた情報に加えて、人間がバリ取り作業を行う際のノウハウをロボットの制御に応用しようとする試みも行われている⁶⁾⁷⁾。

しかし、実際のロボットの動作は、工作物やバリの位置をロボットに対して人間が教示するティーチングプレイバック方式と呼ばれるものがほとんどで、バリの位置、形状の認識からロボット動作プログラムの生成までを自動的に行うシステムの研究は少ない。

一方、現在は生産の統合化が進み、製品をCAD/CAMシステムによって生産することが一般的になっており、製品の多くは設計時のCADデータを利用することが容易な状況になりつつある。バリ取り作業についても、製品のCADデータを利用することにより、その形状入力に関する手順の省力化を見込むことができる。

本研究は自由曲面上に生成した湯口の部分が残ってできる突起状のバリの除去を対象とし、画像データとCADデータを併用して、工作物の位置とバリ形状の認識を自動的に行い、ティー

チングを行うことなくバリ取り経路を自動生成するシステムを開発することを目的としている。

2. システム構成

システムの概略を図1に示す。ワークステーションで工作物のCADデータを生成し、画像処理、工作物位置検出用タッチセンサのデータの取込み、ロボットの動作プログラムの作成・転送をパソコンで行う。

使用したロボットの外観を図2に示す。垂直多関節形の同時6軸制御産業用ロボット（ファナック（株）Robot S700）で、全長2600mm、可搬重量30kg、RS-232Cによってパソコンから動作プログラムを転送することができる。バリ取り工具としては図3に示すような空圧グラインダに砥石（レジノイド研削砥石、直径100mm、厚さ6mm）を取り付けて用いる。この空圧グラインダは空圧シリンダを内蔵のホルダを介してロボットアームに取り付けられ、作業時には工具の工作物への押付け力を一定に保つことができる。また、このホルダには変位センサも内蔵されており、空圧シリンダの変位量をA/Dコンバータを通してパ

Fig. 1 Configuration of the system

* 原稿受付 平成9年9月22日

** 正会員 電気通信大学（東京都調布市調布ヶ丘1-5-1）

*** アイワ（株）（宇都宮市徳次郎町2620）

Fig. 2 Whole view of 6-DOF robot

Fig. 3 Deburring tool used in the study

Fig. 4 CCD camera and touch sensor used in the study

ソコンで監視することができる。工作物の撮影は図4に示すようにロボットアームにCCDカメラを取り付けて行い、画像処理装置（ビマス（株）LA-535）によって画像データを取り込み、パソコンで画像処理を施す。また、工作物の位置認識には図4に示すような電氣的に接触を検知するタッチセンサを使用する。

これらをツールチェンジャにより必要に応じて交換して作業を行う。

3. 工具経路の生成

3.1 工具経路生成の概要

バリ取り工具が工作物表面に突出したバリをとるために移動する経路をバリ取り工具経路（以下、工具経路）と呼び、その生成は以下のような手順で行う。

- 1) まず、工具の幅を考慮してバリ表面に格子状に点列を生成する。これをバリ取り対象点と呼ぶ。
- 2) バリ表面の端から端までバリ取り対象点を補間してできる曲線に沿ってロボットがバリ取りを行いながら移動する。この曲線とそれを構成するバリ取り対象点列をバリ取り工具経路要素（以下、工具経路要素）と呼ぶ。
- 3) 工具がバリ表面を離れ、別の工具経路要素の始点まで移動し、再びバリ取りを行いながら工具経路要素の終点まで移動する。
- 4) 一つ一つの工具経路要素に対するバリ取りをバリ表面全域に対して行う。すべてのバリ取り対象点を工具が通過することを1面分のバリ取り作業と呼び、それを行うための工具経路要素の集合体を1面分の工具経路と呼ぶ。
- 5) まだバリが残っていれば、2面目、3面目の工具経路を生成し、バリ取り作業を行う。

通常の切削加工等とバリ取り作業の大きな差は、加工しようとする工作物の形状があらかじめ分かっていないということである。バリの生成過程は様々であり、その形状を細部にわたって予測することは困難であるからである。たとえば、本報で対象としている凸面自由曲面形状の場合、湯口はその最高部に設けることが多く、突起状のバリが工作物最高部に残ることになる。設計段階では、湯口の位置や直径等は知ることができるが、そこに生じるバリの高さとその除去断面の形状は不明であり、あらかじめそれらを計測しなければ、空圧シリンダの緩衝能力

Fig. 5 Outline of automatic deburring

を越えた切込み量によって工具の破損を生じたり、バリ以外の部分まで除去してしまうといった問題が起こる。もっとも望ましいのはマッチングの場合と同様に接触型のセンサを暫時的に移動させて形状を計測することだが、概すすら得られていない場合には計測動作の開始点の決定は難しい。また、バリ全面に対する加工を何回か繰り返すので、そのたびに計測を繰り返すのは効率が悪い。そこで本システムでは図5に示すように、まずバリの高さと形状を画像処理を用いて取り込んで、それに基づいて生成された工具経路によりバリ取りを行う。その際の工具の変位を計測し、後述のように工作物の形状を求めている。この方法によって得られた形状データはロボットの位置決め精度である0.01mmオーダに準じたものであり、信頼性は高い。よって、画像処理によって得られたバリ取り経路に対し、インプロセスで計測された工作物形状にしたがって工具経路を動的に補正・作成しながら作業を進めてゆく。

3.2 バリ形状の抽出

まず、工作物の湯口近傍のCADデータより撮影位置を特定し、撮影用ロボットプログラムを生成する。すなわち、バリの側面に相当する撮影場所を計算してそこへカメラを移動し、工作物を x 軸方向と y 軸方向から撮影する。これら2つの撮影画像に2値化処理及び雑音成分除去を行う。続いて、これらの画像に対応するCADデータの yz 平面及び xz 平面への投影データ、換言すれば、バリのない工作物を側面から撮影した画像に相当す

Fig. 6 Extraction of burr image

Fig. 7 Generation of deburring points based on the images

るデータを作成する。それぞれの方向からの2値画像と投影データを比較し、図6のようにしてバリ形状のみを抽出する。

3.3 バリ取り対象点の生成

バ리를柱状要素の集合体と考え、前項で抽出されたそれぞれの方向から見た画像データの最高部の値をバリが xz , yz 平面に投影されたものとして考える。図7に示すように2つのデータを合わせて考えると、3次的にバリの形状に合わせたバリ取り対象点を生成することができる。この場合、

ア) バリ断面が円形であるにもかかわらずデータの的には四角柱となってしまう。

イ) それぞれの方向から見たデータに基づいて考えると、実際の1点につき、かならず2つの z 値が存在する。

という問題が生じるが、ア)に関しては、実際にバリが存在しない空間を工具が通過しても特に問題は起こらないので考慮の必要はなく、イ)に関しては、空圧シリンダの緩衝能力を越えた切込み量を生じないということに主眼を置いて、大きい方の z 値を採用する、といったことにより対処する。

以上の手順により、画像データからバリ形状を推定し、バリ取り対象点を生成する。ここで、画像処理装置の画面上の画素数は 512×512 であり、CADデータの持つ μm オーダの精度には及ばないが、実際には画素の密度でバリ取り対象点をそのまま生成してもバリ取り工具の幅の方が大きいので意味がない。そのため、工具の幅に合わせた間隔に間引きしてからバリ取り対象点を生成するため十分な精度と言える。

Fig. 8 In-process measurement of burr height

3.4 動的な工具経路の生成

前節によって生成されたバリ取り対象点に基づいて、工具経路を生成するが、「大きな突起部をなるべく早くなくす」という方針に基づいて、各工具経路要素の最高点から工具の材料除去能力の分を切込み量とし、その高さに合わせた経路を初期工具経路要素として生成する。その結果、高い突起部から除去されはじめ、より早くバリ断面は平面に近づく。工具の押付け力は空圧シリンダにより一定になっているため、工具はその条件における決まった材料除去量のみだけニアガイドの動きにそって工作物に切り込む。その際の変位は工具ホルダに内蔵された変位センサによってインプロセスで計測され、パソコン上に記録される。図8に示すように、このデータとその時にロボットに与えられていた指令位置を照合すると、工具の実際の位置が計算でき、そのデータと工具寸法から、バリ取り作業後の工作物の形状を求めることができる。工具の材料除去量をあらかじめ基礎実験によって求めておき、認識された形状に対しそれを考慮して動的に次の工具経路を計算する。こうして工具に負担がかかるのを防ぎながら、同時に定量的に材料除去量をコントロールすることを可能としている。

3.5 CADデータによる工具経路の生成

前節のような方法によりバリの形状が整えられ、バリの形状がシステムによって把握された後は、工作物の形状に合わせたバリの除去を行う必要がある。その際、画像処理により生成された加工経路はz軸方向の高低差により形状を表現していたが、CADデータに基づく加工経路は、工作物表面の法線ベクトルから生成されるため、ロボットは6軸制御で動作する必要がある。あらかじめ工作物のCADデータと、バリを模した円柱の湯口の位置に

Fig. 10 Robot under matching operation

おける集合演算により、図9に示すようなバリの湯口部分の工作物形状のCADデータを生成しておき、そのデータからバリ取り工程での最終工具経路を生成しておく。この例では自由曲面と円筒の集合演算になるため、円筒の上面の自由曲面に対してバリ取り経路を生成することになる。バリ取り作業の進行に伴い、バリ高さが仕上げ代の範囲内になったら、そのバリ取り経路によってバリ取りを行う。この部分の経路は完成製品形状から生成されるので、手作業による場合のように目分量に頼ることなく、製品形状に忠実に、正確に仕上げ代を残して加工を行うことが可能である。

4. 座標系のマッチング

4.1 マッチングの概要

工具経路は、工作物形状を定義した工作物座標系上で生成されるが、ロボット動作プログラムを生成するには、これらのデータをロボット座標系上における値に変換する作業、すなわちマッチングを行う必要がある。バリ取り作業に必要とされる精度でのマッチングのためのデータの取得には最終的にはタッチセンサを使用するが、最終の精度でロボットの全作業空間を走査したのでは、作業効率が極端に悪化してしまう。そこで、まずはじめに画像処理を利用して大局的に工作物姿勢を把握し、その情報からタッチセンサが工作物にアプローチするロボットの動作プログラムを自動生成し、その情報に基づいてマッチングを行う。なお、本システムでは工作物座標系xy平面はロボット座標系xy平面と十分平行であるとしているので、両座標系間の変換は、並進移動量とz軸回りの回転角度によって表現される。

4.2 工作物姿勢の把握

工作物を上方（ロボットz軸方向）から撮影し、その画像データから工作物に該当する図形の抽出を行い、抽出した画像に対して2値化処理、雑音成分除去を施す。一方、工作物形状のCADデータについて、上方から見た場合の工作物の画像に相当するxy平面への投影データを作成する。2つのデータに対し、画像処理を行い、両者を比較してロボット座標系における工作物座標系のz軸回りの回転角度と並進移動量を計算する。

4.3 タッチセンサによるマッチング

前項の処理により画像の分解能程度での工作物の位置や姿勢を得ることができたので、タッチセンサにより、バリ取り作業に必要な精度でのマッチングを行う。タッチセンサによる測定の様子を図10に示す。まず、CADデータ上に定義した工作物表

Fig. 9 CAD data of projection-shaped burr

Fig. 11 Expression of tool attitude

面上の測定目標点の測定を行うロボットプログラムを自動生成する。このときのセンサの測定経路は前項でのデータを利用してロボット座標系表現に変換される。タッチセンサにより得られた接触点座標値を用いて、工作物座標系とロボット座標系のマッチングを行う。

5. ロボット動作プログラムの生成

本システムにおけるベクトルによる工具姿勢の表現は、図11に示すように工作物に対して作用させる砥石端部の方向を工具軸ベクトル T 、砥石の回転中心軸に平行な方向を工具方向ベクトル D としている。ロボットにはアームの姿勢を決定するためのロボット固有の表現があり、工具経路データにそってバリ取り工具を動作させるために、固有の姿勢表現に変換した後、ロボットの移動速度や動作モードなどを含んだロボットの動作プログラムを作成する。

本システムに用いたロボット固有の姿勢表現はロボット座標系の x 軸、 y 軸、 z 軸回りに対する回転角 W, P, R で定義される。前項で計算された座標に T, D を加え、工具の位置と姿勢は完全に表現されることになるが、経路生成プログラムでは T, D といったベクトル表現であるので、これをロボットに適用するためには図11のように T, D を W, P, R による表現に変換する。

また、計算された工具経路は、工具経路要素の端部で次の工具経路要素に移動するための経路を含んでいないので、その部分に関しても経路を生成する必要がある。その際に、バリ取り作業中と移動中では運行のスピードや補間の形式が異なるので、それらも考慮した上で動作プログラムを生成する。

Fig. 12 Workpiece before deburring

Fig. 13 Robot under deburring

Fig. 14 Workpiece after deburring

Fig. 15 Profile of workpiece after deburring

6. 実験

以上のシステムに基づいて実際にバリ取り経路を生成し、バリ取り実験を行った。対象とする工作物を図12に示す。材質は鋳鉄で、寸法は $90\text{mm} \times 90\text{mm} \times 100\text{mm}$ 、上面が自由曲面の立方体に近い形状である。想定したバリは上面中央部にある $\phi 30\text{mm}$ の柱状のバリで、その高さは最大 4.98mm であり、湯口をハンマで除去したものを模してある。この工作物に対して工作物座標系とロボット座標系のマッチング、及びバリ形状の自動認識を行った。バリの高さを測定したところ 5.04mm となり、実測値とはほぼ等しい測定値が得られた。この結果を用いてバリ取り経路を作成し、作業を行った。作業中の様子を図13に示す。なお、バリ取り後の後工程のための取り代は 0.3mm に設定した。

バリ取り作業終了後の工作物の様子を図14に示す。また、工

作物の表面を形状測定機で計測したところ、図15のようになった。バリ部分の工作物の表面は定義形状と同様の自由曲面となっており、その頂点の位置が左右にずれていないことからバリ取り作業及び工作物座標系とロボット座標系のマッチングが、正確に行われていることが分かる。

7. お わ り に

画像処理技術とCADシステムを併用した、ロボットを用いたバリの自動認識を行うシステムを開発し、以下のような結論を得た。

- (1) 工作物座標系とロボット座標系のマッチングを自動的に行うことができた。
- (2) バリ形状の自動認識ができた。
- (3) 取得したバリ形状と工作物のCADデータに基づき、ティーチングを行うことなく、バリ取り経路の自動生成を行うことができた。
- (4) 開発したシステムによる自由曲面上のバリ取り作業を行い、製品形状に忠実である良好な面を得ることができた。

本研究を行うにあたり、実験に努力いただいた大学院生の永井靖久氏に感謝の意を表す。また、本研究の一部は平成9年度科学研究費(09750135)のもとに行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 五百井俊宏, 松永正久, 河瀬秀俊: 鋳バリのセンシングシステムについて, 精密工学会誌, 55, 3 (1989) 563.
- 2) G. Seliger, L. -H. Hsieh and G. Spur: Sensor-Aided Programming and Movement Adaptation for Robot-Guided Deburring of Castings, Ann. CIRP, Vol.40/1 (1991) 487.
- 3) M. A. Elbestawi, K. M. Yuen, A. K. Srivastava and H. Dai: Adaptive Force Control for Robotic Disk Grinding, Ann. CIRP, Vol.40/1 (1991) 391.
- 4) Y. Nonaka, S. Sakaue, Y. Yanagihara and K. Yokoshima: Development of an Impeller Grinding Robot System and a Gyro-moment Compensated Compliance Control, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Nagoya, (1995) 2084.
- 5) S. Nagatani, M. Takahashi, M. Kanda, Y. Tamada, M. Jinno, F. Ozaki, T. Yoshimi and K. Tatsuno: Development of Force Controlled Finishing Robot System and Its Applications, Proc. Japan/USA Symp. Flexible Automation, ASME, (1996) 217.
- 6) 下倉健一朗, 浅田春比古, 劉申: バリ取り作業におけるヒューマンスキルの教示方法に関する検討, 日本ロボット学会誌, 14, 1 (1996) 144.
- 7) 黒田敏裕, 那須康雄, 甲田信裕, 水戸部和久: ファジィ推論に基づくベルトサンダを用いたGFRP部品のバリ取りロボット, 先端加工, 15, 1 (1996) 56.

編 集 後 記

「振動」と「騒音」、この望まないが生じてしまう厄介なシロモノをいかに抑制すべきか? 機械屋の発想では、振動しにくい構造すなわち剛な構造を追求することになりそうですが、エネルギー問題/環境問題を背景とした、機器の小型化・軽量化の要求には相容れません。対して、発展著しいコンピュータ制御に立脚したアクティブ制御が有力な対策であると思われます。また、磁気軸受のように制御が必然という対象もあります。そこで今回の特集では、「最先端のアクティブ振動・騒音制御」と題して、専門家9氏から実例紹介を踏まえた解説をご寄稿いただきました。

アクティブ振動制御(AVC)は、現代制御理論～ロバスト制御理論への勃興から発展の時期に、デジタルシグナルプロセッサ(DSP)に代表されるコンピュータ制御機器の進歩が合致し、飛躍的に発展しました。新しい制御理論の実証の場という側面も強く、さまざまな制御手法がまさに、百花繚乱という状態で、本特集の執筆の方々のように、研究者が一人で精力的に多くの手法を試されているのも特徴的です。このためか、この分野の我が国の研究と実

用化技術が世界をリードしているということはたいへん心強く感じられます。

アクティブ騒音制御(ANC)のほうが身近に感じられるかもしれませんが、15年ほど前に発表された自動車の運転席の消音化は人に優しい技術の代表として注目されました。実際、騒音はエネルギー自体は小さくとも、人間には強い不快感を与えます。それを構造の変更などにより完全消音化することは難しく、ANCが有効でしょう。現段階では、まだコスト高が克服されないためか、価格競争の激しい製品への採用が躊躇される場合もあるとのことですが、感性に基づいて音の改質を行う制御など、魅力的な将来がひらけているように思います。

AVCは将来も超精密工業を支える重要な技術であることは間違いありません。また、さらなる電子工学技術の発展により、DSPなどはさらに小型化、低価格化が進み、一般の民生用の機器にさえ、AVC, ANCが標準的に用いられるようになるものと予想されます。本特集が読者諸賢のご参考になれば幸いです。

最後に、お忙しい中、本特集の趣旨をご理解いただき、玉稿をお寄せいただいた執筆者諸氏に心より厚く御礼申し上げます。

(岩附信行)