産業用ロボットによる面取り作業の自動化*
(円筒面形状への穴加工の場合)戸田 健司*¹, 浅川 直紀*², 竹内 芳美*²Automatic Chamfering by an Industrial Robot
(For the Case of a Hole on a Cylindrical Workpiece)

Kenji TODA, Naoki ASAKAWA and Yoshimi TAKEUCHI

The study deals with the automatic chamfering for the case of a machined hole on a cylinder on the basis of CAD data, using an industrial robot. As a chamfering tool, a rotary-bar driven by an electric motor is mounted to the arm of the robot having six degrees of freedom in order to give an arbitrary position and attitude to the tool. The chamfering path based on the CAD data is generated by our own CAM system. The CAM system considers not only the tool attitude but also the robot attitude to avoid deviation of the robot movement range. The robot control command converted from the chamfering path is transmitted directly to the robot. From the experimental results, the system is found effective to remove a burr along the edge of a hole on a cylindrical metallic workpiece.

Key Words: Chamfering, Matching, Robot Control Command, CAD/CAM, Offline-Teaching

1. は じ め に

産業用ロボットは、近年深刻化する人手不足や作業者の高齢化などの問題を解消し、作業環境を改善し、生産工程の省人・省力化および生産性を向上させる有力な手段として広く使われるようになった。その代表的な応用例としてバリ取り作業を挙げることができる。

予測のできないバリの形状に対し、レーザスキャナによりバリの形状の計測を行い、その形状をもとに工具経路を生成するもの⁽¹⁾⁽²⁾や、力制御・コンプライアンス制御・速度情報などを利用することにより設置誤差を吸収したり、接触点を検出した研究^{(3)~(8)}が報告されている。また、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もの⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾もある。

しかし、これらのロボットの動作プログラムの生成の多くはティーチングプレイバック方式によるものであり、動作の教示には多大な時間や労力がかかるとい

う問題がある。この問題を解決する手段の一つに CAD システムを使ったオフラインティーチングがある。現在の工業製品の多くは CAD システムを用いて設計され、加工された製品のほとんどはその幾何形状や製品特徴の情報を CAD データとしてもっているため、この CAD データを用いれば大幅な省略化が期待できる。実際に CAD データを用いた動作プログラムの自動生成を試み、成果を上げている研究もある⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

ここで、穴加工を行った際に生成されるバリに対象を絞ってみると、バリは面取りによって除去されることが多い。平面上にけられた穴に対する面取りは、傘形工具などを決まった角度で押付けることにより除去できるので、自動化は比較的簡単である。しかし、曲面上の穴の場合、複雑な加工になるため、やすりや超硬バーを使った作業による手仕上げが多い。

本研究は中実丸棒を穴加工した際の端部の面取りを対象とする。CAD データを利用し、工具の姿勢だけでなく、多関節ロボットの動作範囲を考える上で重要なロボットアームそのものの姿勢を考慮した工具経路の自動生成と、それに基づく面取り作業の自動化システムを開発する。

* 原稿受付 1997 年 12 月 15 日。

*¹ 学生員, 電気通信大学大学院 (〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1)。*² 正員, 電気通信大学。

E-mail: takeuchi@mce.uec.ac.jp

Fig. 1 Configuration of the system

Fig. 2 Whole view of the robot used in the system

2. システム構成

システムの概略を図1に示す。本システムは、ワークステーション上のCADシステム[(株)リコー Design Base]を用いて工作物形状を定義し、自作のCAMシステムにより工具経路を生成する。工作物位置の認識のために電氣的に接触を検知するタッチセンサからのデータ取込みと、生成された工具経路に基づくロボット動作プログラム生成はパーソナルコンピュータで行う。

使用したロボットの外観を図2に示す。ロボットは、全長2600mm、可搬重量30kgの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、RS-232-Cによってパーソナルコンピュータから動作プログラムを転送することができる。面取り工具は、電動式ブラシレスモータ[(株)ナカニシ EM-401]、スピンドル[(株)ナカニシ NR-401E]を、図3に示すようなジグで、ロボットのアーム先端部に取付けて用いる。工具は、超硬バー[(株)ナカニシ GX 486 G/023]を使用する。

Fig. 3 Chamfering tool used in the system

Fig. 4 Workpiece surface data on a basic chamfering model

Fig. 5 Vectors for tool attitude

3. 工具経路の生成

3.1 面取り作業のモデル 工具が面取りを行うために移動する経路を面取り工具経路(以下、工具経路)と呼ぶ。工具経路の生成とは、工作物の表面における情報を工具の位置と姿勢に対応づけることである。面取り作業の基本的な例として、直交する2平面A, Bにより構成される稜線を超硬バーの側面を用いて45°で面取りを行う図4のような場合について考える。

図4中、手前から奥へ面取りを行うとき、稜線上の面取り対象点Pを考え、その集合を面取り経路と考える。各面取り対象点Pにおける工作物表面の属性は、次の点に向かう方向の送り方向ベクトル F 、面取り面に対し垂直な方向の法線ベクトル N 、工具回転軸

方向を表す工具軸ベクトル D の3本のベクトルにより表現される。これらを工作物表面情報と呼ぶ。

3・2 工具姿勢のベクトル表現 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5のように工具の中心線方向を工具軸ベクトル D 、工具の先端部の超硬バーの側面に対し垂直でロボットの工具取付面の法線ベクトル N_{arm} に平行な方向を工具ベクトル T としている。基本的には3・1節で生成された工作物表面情報のうち工具軸ベクトル D は工具軸ベクトル D 、工具ベクトル T は法線ベクトルの逆ベクトル $-N$ と対応することになる。

3・3 本システムにおける工具経路生成の概要

本システムで対象としているのは、円筒面を穴加工してできた曲面により構成される稜線における面取りである。ロボットは指定された姿勢をとりながら、稜線上の面取り対象点を補間してできる曲線に沿って移動しながら面取り作業を行う。稜線上を1周し、始点に戻るまでを工具経路の最小単位とするが、始点に移動する際の工作物との干渉を防ぐため、始点への進入点、離脱点、動作開始・終了点も合わせて生成し、それに含める。また、工作物に発生するバリの高さは不均

一であるため、開始時は除去量を少なめに設定した工具経路を使用し、徐々に除去量を多く設定した工具経路を使用する。これによって超硬バーの除去能力を越えた切込み量による工具の破損を防いでいる。工具経路に沿ってロボットを運行して面取り作業を繰返し、指定した除去量を得て作業は終了となる。

3・4 工作物表面情報の生成 対象となる形状をCADシステムを用いて定義したものを図6に示す。これは円筒を穴加工することにより生成される形状で、図7に示す二つの円筒の集合演算によって得られる稜線 a が面取りの対象となる。

まず、稜線 a を等分割することにより面取り対象点 P を生成する。次に、図7(a)のように各面取り対象点から次の点に向かう方向にベクトルを生成し、これを送り方向ベクトル F とする。また、各面取り対象点から穴の中心軸に向かうベクトルを中心方向ベクトル C とする。図7(b)のように送り方向ベクトル F を軸として $C, C \times F$ の2本のベクトルをおのおの

Fig. 6 CAD model of a workpiece

Fig. 8 Workpiece surface information

Fig. 7 Generation of chamfering path

Fig. 9 Tool path based on the simple method

Fig. 10 Change in the robot attitude by the simple method

Fig. 11 Concept of a new method to generate the vector T

45°回転することにより工具軸ベクトル D 、法線ベクトル N に相当するものを求めることができる。

図8はこのような方法で生成した工作物表面情報である。

3.5 工具経路の生成 3.4節のように生成された工作物表面情報の D 、 $-N$ をそのまま工具姿勢を示すベクトル D 、 T に対応させて工具経路を生成すると図9に示すようになる。これをロボットに転送し動作させると、図10のように工具は稜線上をなぞりながら360°回転するため、ロボットは姿勢を大きく変え、各軸の可動範囲を逸脱してしまう。しかし、本研究で使用した超硬バーは回転体の側面を用いるため、面取り作業を行うには工具の側面ならばどこを用いても加工が可能である。この特徴を利用してロボットアームの姿勢を考慮した工具姿勢を計算する。すなわち、工具軸ベクトル D を中心として $-N$ ベクトルを回転させたベクトルのうち、超硬バーの側面で加工を行えて、しかもロボットが直前の面取り対象点における姿勢に近い姿勢を保ちながら移動できるようなものに T ベクトルを対応させ、工具経路を生成する。

具体的には、図11に示すように、面取り開始点から θ 回転した点に対応する面取り対象 P においては、

Fig. 12 Change in the robot attitude by the new method

Fig. 13 Tool path by the new method

$-N$ のベクトルを D を中心として $-\theta$ 回転させたものを T に対応させることであり、これによりロボットは、図12のように直前の点の姿勢に近い姿勢を保ちながら動作することが可能となる。このようにして生成した工具経路を図13に示す。図9と比べて T の変化が少なくなっていることがわかる。

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。座標系の変換は、 x, y, z 軸方向の並進移動量とその各軸周りの回転角度を求めることにより行うことができる。並進移動量は、タッチセンサを工作物の表面に接触させ、その座標値から原点を計算することにより求め、回転角は、センサを穴の内面に接触させることにより求める。なお、本システムでは工作物を固定した作業台はロボットの xy 平面と十分平行であるとし、回転は z 軸回り

Fig. 14 Determination of the amount of translational movement

Fig. 15 Determination of the rotational angle

に限定した。また、工作物は作業者により数 mm オーダで粗位置決めされているものとした。

4・2 並進移動量の計測 図 14 のように、タッチセンサを用い、任意の xy 平面上の円筒の側面を 3 点計測し P_1, P_2, P_3 とする。O を円筒をこの xy 平面で切った時の円の中心とする。 l_1 を P_1, P_2 を通る直線、 l_2 を P_1, P_3 を通る直線とし、 P_1, P_2 の中点を M_1 、 P_1, P_3 の中点を M_2 とする。 M_1 を通り l_1 に直交する直線を l_3 、 M_2 を通り l_2 に直交する直線を l_4 とすると、 M_1 の座標値と l_1 の式から l_3 を、 M_2 の座標値と l_2 の式から l_4 をそれぞれ求めることができる。この 2 直線 l_3, l_4 の交点を求めることにより円の中心 O を求めることができる。ロボット座標系におけるこの O の座標値を用いて並進移動量を求めている。

4・3 回転角度の計測 4・2 節で求められた並進移動量に基づき、図 15 のように、CAD データを利用して任意の xy 平面内の直線上の 2 点 P_4, P_5 を計測する。この 2 点の座標値からベクトル a を生成し、このベクトルとロボット座標系の y 軸上の単位ベクトル j とのなす角 ϕ を計算する。

Fig. 16 Expression of tool attitude with angle

Fig. 17 Workpiece before chamfering

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{(a, j)}{|a| \cdot |j|} \right) \dots\dots\dots (1)$$

この ϕ が工作物の回転角度となる。

4・4 座標変換 以上のようにして求めた並進移動量である O の座標 (O_x, O_y, O_z)、回転角度である ϕ の値を用いて、工作物座標系上の値をロボット座標系上の値に変換する。

5. ロボット動作プログラムの生成

生成された工具経路からロボットに作業をさせる動作プログラムを生成しなければならない。その際、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、ベクトル表現の工具経路をロボット固有の姿勢表現に変換する必要がある。本システムに用いたロボット固有の姿勢表現は、図 16 のようにロボット座標系の x 軸、 y 軸、 z 軸回りに対する回転角度 W, P, R で定義される。生成された工具経路をロボットに適用するためには T, D のベクトルを W, P, R による表現に変換する必要がある。これに移動速度などの情報を付加することによりロボットの動作プログラムを生成する。また、面取り作業中と移動中では運行速度や補間の形式が異なるので、この動作方式に関する情報も付加する。

Fig. 18 Robot performing the chamfering operation

Fig. 19 Workpiece after chamfering

6. 実 験

以上のようなシステムに基づいて実際に面取り工具経路を生成し、面取り実験を行った。対象とする工作物を図 17 に示す。材質は S45C で、 $\phi 60$ の中実丸棒に $\phi 30$ の穴をあけた形状である。バリの高さは 2 mm 程度である。

作業中のようすを図 18 に示す。実験条件として、工具回転数 35 000 rpm、送り速度 1.0 mm/s、1 回当たりの除去量は 0.1 mm である。加工は C1 相当で面取りすることとした。面取り作業終了後の工作物のようすを図 19 に示す。穴の稜線が面取りされ、良好な面が得られていることがわかる。また、工作物の断面形状のレプリカを図 20 に示す。2 mm 程度あったバリが除去され指定どおりに面取りされていることがわかる。

7. お わ り に

CAD データに基づき、産業用ロボットを用いた面取り作業の自動化システムを開発し、以下のような結論を得た。

(1) 円筒形状工作物の穴加工端部に対して、ティ

(a) Before chamfering

(b) After chamfering

Fig. 20 Workpiece profile before and after chamfering

ーチングを行うことなく、動作プログラムを自動生成することができた。

(2) ロボットの姿勢を考慮した動作プログラムにより、広い動作範囲を得ることができた。

(3) 実験を行った結果、指定した面取り量を得ることができ、本システムの有効性を確認することができた。

本研究の一部は平成 9 年度科学研究費（奨励研究 09750135）のもとに行われたことを付記する。

文 献

- (1) 岩城敏・松尾哲・岡田尚・水川真, センサベーストロボットによるバリ仕上げ研削, 日本ロボット学会誌, **15**-6(1997), 893-900.
- (2) Selinger, G., Hsieh, L. H. and Spur, G., Sensor-Aided Programming and Movement Adaptation for Robot-Guided Deburring of Castings, *Annals of the CIRP*, **40**-1(1991), 487-489.
- (3) Elbestawi, M. A., Yuen, K. M., Srivastava, A. K. and Dai, H., Adaptive Force Control for Robot Disk Grinding, *Annals of the CIRP*, **40**-1(1991), 391-394.
- (4) 柏木邦雄, バリ取り・グラインダがけ, 日本ロボット学会誌, **9**-3(1991), 354-358.
- (5) Kazerooni, H., Bausch, J. J. and Kramer, B. M., An Approach to Automated Deburring by Robot Manipulator, *ASME J. Dynamic Systems, Measurement Control*, **108**(1986), 354-359.
- (6) Her, M. G. and Kazerooni, H., Automated Robotic Deburring of Parts Using Compliance Control, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, **113**(1991), 60-66.
- (7) Ling, H. C. and Li, C. F., Nonlinear Adaptive Control of a Flexible Manipulator for Automated Deburring, *Proc. 1997 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1997), 2844-2849.
- (8) 武藤伸洋・下倉健一郎, 接触情報センシングを用いた倣

- い作業の教示と制御, 日本ロボット学会誌, **15**-5(1997), 744-751.
- (9) 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), 144-149.
- (10) 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ペルトサンダを用いた GFRP 部品のバリ取りロボット, 先端加工学会誌, **15**-1(1996), 56-63.
- (11) Gary, M. B. and Mohamed, A. E., Sensing and Control for Automated Robotic Edge Deburring, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, **41**-2(1994), 137-146.
- (12) Nonaka, Y., Sakaue, S., Yanagihara, Y. and Yokoshima, K., Development of an Impeller Grinding Robot System and a Gyro-Moment Compensated Compliance Control, *Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1995), 2084-2090.
-