産業用ロボットによる面取り品質のコントロール*
(安全性を重視した面取りの場合)浅川 直紀^{*1}, 瀬戸 敬^{*2}
平尾 政利^{*1}, 竹内 芳美^{*3}Chamfering Quality Control by an Industrial Robot
(For the Case of Chamfering for Safety)Naoki ASAKAWA^{*4}, Takashi SETO,
Masatoshi HIRAO and Yoshimi TAKEUCHI^{**} Kanazawa University, Faculty of Engineering, Dept. of Human and Mechanical Systems Engineering,
2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-8667 Japan

The study deals with the chamfering quality control by an industrial robot. In the study, the "chamfering quality" means the property of the chamfered edge shape for various functions. Especially, a chamfering for safety is discussed in the article. In order to perform chamfering by a robot, a chamfering width control system is developed to compensate positioning errors and to control the width of chamfering part. A tool path is generated on the basis of CAD data followed by conversion to a robot control command. The depth of cut at each point calculated based on the CAD data is given to chamfering width control unit attached to the robot to realize designated shape of chamfering. From the experimental result, the system is found to have an ability of chamfering for safety.

Key Words: CAD, CAM, Industrial Robot, Chamfering, Non-Rotational Cutting Tool

1. 緒 論

加工後の工作物のエッジ形状を決定する加工法の一つに面取り加工がある。一般に工作物の面取りは、安全のためにバリ取りが行われているだけで重要視されていないのが現状である。しかし、製品の形状が複雑化していく中で1つ1つの加工が持つ意味は増大しており、面取り加工についても、設計者の意図を正確に伝えるための情報、すなわち、面取り品質が重要になってきつつある。

工作物のエッジ形状を定義し、生産技術として設計段階からエッジ品質を考慮する提案がされているが⁽¹⁾⁽²⁾、面取り加工そのものに注目し、その加工法を含めた具体的議論に及んでいるものは少ない⁽³⁾。単純な形状をした工作物の面取りは専用工具や専用機械を用いて行われているが、近年複雑な形状をした製品が増加しており、手作業に頼っているのが現状である。

生産現場においては面取りは製品の外見や品質を決める重要な要素であるにもかかわらず、手作業による

不均一なものが多いのが現状であり、面取り作業を機械化して品質を均一化する事が望まれている。しかしながら実際のラインにおいて面取り加工に対し多軸の専用機械やマシニングセンタ等を適用することは経済的とは言えない。一般的に人間の腕に近い自由度を持つ産業用ロボットは比較的安価であり、またラインへの配置も自由度が高いため、これを用いて様々な作業を自動化する研究が多岐にわたって試みられ成果を上げている。^{(4)~(7)}

産業用ロボットは一般にティーチングプレイバックと呼ばれる教示によって動作するが、教示作業は工作物形状が複雑な場合は特に煩雑であり、作業者の熟練を必要とする。教示作業を簡略化するシステムも考案されている⁽⁸⁾が、完全なティーチングレス化は難しい。また、剛性を要求される作業に対しては、一般的な産業用ロボットは片持ち梁に近い構造のため、一般の工作機械に比べて剛性が小さく⁽⁹⁾、位置決め精度も悪い⁽¹⁰⁾ため、位置決め誤差を補正する研究も行われている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

本報では、これまで設計段階であり注目されていなかった機能に対しての面取り形状について、面取り品質として簡単な分類を試み、その中で最も基本的な

* 原稿受付 2001年8月13日。

^{*1} 正員, 金沢大学工学部(☎920-8667 金沢市小立野2-40-20)。^{*2} マキノJ(株)(☎243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津4007)。^{*3} 正員, 電気通信大学電気通信学部(☎182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)。

E-mail: nasakawa@t.kanazawa-u.ac.jp

Fig. 1 Type of chamfering

安全性を重視した面取りについて、CAD データを用いてティーチングレスでロボット動作プログラムの生成を自動化するシステムを構築した。また、ロボットハンド先端以降でローカルに位置決め誤差を補正する面取り幅制御装置を開発し、簡便な制御装置のみで面取り幅の指定の面取り品質のコントロールに必要な性能を得られるシステムを考案したので報告する。

2. 面取り品質

2.1 面取り品質 一般に工作物の面取り作業とは、安全のためのバリ取り作業と同一のものとしてとらえられている。しかし、機能の面から面取り作業を見た場合、次節に述べるように幾つかの目的に分類できる。本研究では、要求される機能を分類し、設計段階から面取り後の工作物の形状を定義し、それを面取り品質として提案する。

2.2 分類

a) 安全性 切削加工後のエッジ部分はバリ等によって非常に危険である。工作物が有するあらゆるエッジを対象とし、図 1(a) に示すように、面取り後にできる 2つのエッジ角度が同一かつ面取り幅が一定となるように面取りを行う。

b) 挿入性 部品の組立て時において挿入を容易にするのが目的である。組立て時に挿入が要求される部分が対象であり、図 1(b) に示すように挿入方向に対し指定した角度で面取りを行う。

c) 意匠性 上記以外の意匠形状を得る目的である。図 1(c) に示すように面取り幅と面取り角度は任意である。

2.3 本報での対象 本報では一般的に最も要求の高い安全性を重視した面取りを対象とし、面取りを行う工作物のエッジが様々なエッジ角度を有することを前提として、面取り作業を自動化できるシステムを構築する。

3. システム構成

システムの概略を図 2 に示す。EWS((株)PFU GP400S model5) 上の CAD システム ((株)リコー DESIGNBASE) により工作物の形状定義を行い、同

Fig. 2 Configuration of the system

Fig. 3 Basic chamfering model

カーネルを用いた自作の CAM システムにより工作物表面情報、工具経路、指令面取り幅に対応した切込み量の生成を行う。また、FreeBSD⁽¹³⁾をインストールした PC(AT 互換機, Pentium 150MHz) 上ではロボット関節角度の計算、ロボット動作プログラムの生成、切込み量の計算、モータ駆動データの計算、ロボットへのデータ転送を行う。

使用したロボットは垂直多関節型 6 軸産業用ロボット (松下電器産業 (株) AW8060) で、全長 2840mm、最大許容可搬重量 60kg、RS-232-C により PC と接続され、ロボット動作プログラムの送受信が可能である。また、面取り幅制御装置は PC とデジタル I/O により接続され、モータ駆動データの受信が可能である。

開発した面取り幅制御装置は位置決め誤差補正機構と、切込み量制御機構の独立した 2つのデバイスで構成され、工具は高速度鋼製の切れ刃をもつ非回転工具を用いる。

4. ロボット動作プログラムの生成

4.1 面取り基本モデル 本研究で定義する面取りの基本モデルを図 3 に示す。面取り後の工作物の面取り面を想定し、その上に一定間隔で生成した面取り対象点を P、面取り面に対し垂直な方向を表すベクト

Fig. 4 Tool model

Fig. 5 Generation of tool path

ルを法線ベクトル N 、次の面取り対象点に向かう方向を表すベクトルを進行方向ベクトル F とする。ただし、ベクトルは全て単位ベクトルとする。全ての面取り対象点における P 、 N 、 F の集合体を工作物表面情報と呼ぶ。面取り対象点の間隔はロボットの精度とコントローラの性能を考慮し 0.3mm 程度が適当である。本報における面取り作業は、この基本モデルにより表現される。

4.2 工具モデル 面取りを行う際の工具を簡略に表したものを図 4 に示す。工具の切削中心点 P 、工具の適用方向を表すベクトルを工具ベクトル T 、工具の進行方向を表すベクトルを工具方向ベクトル D と定義し、工具の位置・姿勢は P 、 T 、 D で表される。

4.3 工具経路の生成 定義した工作物に対応する面取り時の工具の位置・姿勢は、面取り基本モデルと工具モデルを対応させることにより求めることができる。そこで、面取り基本モデルにおける $-N$ 、 F を、工具モデルにおける T 、 D とそれぞれ対応させ、面取り対象点 P は同一とすることで、工具の位置・姿勢を決定する。すなわち、工作物表面情報を構成する各ベクトルから、図 4 に示すように工具モデルに対応する P 、 T 、 D を生成する。全ての面取り対象点における P 、 T 、 D の集合体を工具経路と呼ぶ。

4.4 安全型面取りの原理 本報では前述したように、安全型の面取り作業を前提としているため、図 5 に示すように各平面の P における法線ベクトル N_1 、 N_2 を生成し、その和を基本モデルにおける法線ベクトル N とした。このように面取り対象稜線を含む 2 平面に対してそれぞれ法線ベクトルを生成することで、エッジ角に左右されない平均的な角度の安全型面取り

Fig. 6 Workpiece surface data on chamfering for safety

Fig. 7 Chamfering width

の工具経路を生成できる。

4.5 ロボット動作プログラムの生成 上記の手順に従い図 2 に示すように工作物の CAD データから工具経路を生成する。それをヤコビ行列を用いた逆運動学により、本報で用いたロボット固有の姿勢表現である各 6 軸の関節角度に変換し、さらにロボット動作プログラムに変換してロボットに転送する。

4.6 切込み量の計算 工具経路の P は実際には面取り対象稜線上に生成し、面取り幅制御装置に与える指定面取り幅に対する工具の切込み量を、稜線の頂点を基準に与える。

各面取り対象点におけるエッジ角度が異なる場合、異なる切込み量を必要とする。そのため、CAD データより図 7 に示すように各加工対象点 P における切込み量 d を、エッジ角度 θ 、指令面取り幅 w としたとき、式 (1) により求める。算出された切込み量 d は後述する切り込み量制御機構により制御される。

$$d = \frac{w}{2 \tan(\frac{\theta}{2})} \quad (1)$$

5. 面取り幅制御装置

5.1 非回転工具 ロータリーバーなどの回転工具では、複数の切れ刃が回転することによって切削を行うため切削痕が多数残るが、単一の切れ刃を持つ非回転工具では、切削痕が残らず良好な加工面が短時間で得られるため、本報では工具に非回転工具を採用した。基礎実験により非回転工具による切削加工の切削状態を調べたところ、すくい角が小さい時は上向きの背分力により工具にびびりが生じ、すくい角が大きい時は下向きの背分力により工具が工作物に過剰に食い込み続けることがわかった。いずれの場合も良好な切削状態は維持できないが、ロボットアームの剛性不足

Fig. 8 Appearance of the chamfering width control unit

Fig. 9 Structure of the chamfering width control unit

が原因と思われる。そこで、背分力が下向きの場合に注目し工具が工作物に過剰に食い込み続けることを防ぐ手段があれば、安定した切削が行なえと考え、すくい角 35° 、逃げ角 5° の非回転工具を用いることとした。

5.2 原理 図8に示すように面取り幅制御装置は、カム、非回転工具、ストップ、リニアガイド、モータで構成されており、これらは特徴的な2つの機構を有している。1つはストップによって下向きの背分力

Fig. 10 Compensation of positioning error

Fig. 11 Control of depth of cut

を抑え過剰な切込みを防ぎ、ロボットの位置決め誤差を補うことができる位置決め誤差補正機構、もう1つはストップを基準に切り込み量を制御する切り込み量制御機構である。以下に面取り幅制御装置を構成する各機構について述べる。

5.3 位置決め誤差補正機構 図9に示すように、位置決め誤差補正機構を構成する2つのリニアガイドは工具適用方向とそれに垂直な方向の2自由度を有し、ストップは非回転工具の切れ刃と同一線上に 90° の角度を成すように10mm 間隔に位置している。図10に示すようにロボットによる位置決め誤差がある場合、それぞれのリニアガイドがスライドし、スプリングが伸張して、ストップが工作物表面に密着する。そのため工具の切り込みを与える座標系がロボット基準からストップを介した工作物基準に変わり、ロボットの位置決め誤差の影響を受けない機構となっている。ただし、工作物の材質によっては数 μm 程度の圧痕が残ることがある。

5.4 切り込み量制御機構 切り込み量制御機構は、カム、非回転工具、リニアガイドで構成されており、切り込み量制御機構とロボットコントローラはデジタル I/O を介して PC と接続され、ソフトウェア的に切り込み量の制御が可能である。ロボットコントローラ内のロボット動作プログラムで各加工対象点の

Fig. 12 Matching operation

通過を示すタイミング信号を発生し、工具経路内の順番と照合して、各面取り対象点における切り込み量を制御する。切り込み量制御機構は図 11 に示すように工具適用方向に 1 自由度を有し、スプリングにより工具ホルダをカムに密着させ、カムの動作に追従させて工具の位置決めを行なう。

CAD データから式 (1) で算出した切り込み量 d はストップ基準とした切り込み量に変換され、それに対応するカムの回転量 γ はカムの形状を表す関数より求められ、回転量に相当する駆動データとしてモータに与えられることにより、切り込み量が制御され指令面取り幅が得られる。

6. マッチングシステム

工作物はロボットの可動作範囲内に任意に設置されるため、ロボットにロボット座標系における工作物の位置を認識させる必要がある。しかし、工作物の原点の測定は非常に煩雑な作業である。本報では、ロボット座標系と工作物座標系の対応づけを自動化し面取り幅制御装置の可動作範囲内に収める目的で、タッチセンサとロボットを用いて工作物座標系の原点を測定するマッチングシステムを開発した。

図 12 に示すように直径 0.5mm のプローブを面取り幅制御装置に取り付けた。測定用ブロックゲージを用い面取り加工時に近い姿勢でロボットを測定プログラムにより動作させ、電氣的に工作物との接触を検知し、接触時のロボット座標系における座標値を用いて工作物の原点を自動的に算出する。補正は原点座標値のシフト量と Z 軸周りの回転量について前述のロボット動作プログラム生成時に行う。マッチングの結果、誤差は位置決め誤差補正機構の補正範囲の $\pm 1.0\text{mm}$ 以内収めることができた。

7. 実験

7.1 エッジ角度が異なる工作物 以上のシステムにより面取り実験を行った。最初に、寸法が約

Fig. 13 Profile of chamfered part of straight workpiece

30×100×200、材質が Al2017 の工作物の直線部分面取りを行った。対象となるエッジ角度は 85° 、 95° で、共に指令面取り幅 0.50mm、送り速度 5mm/s、面取り対象点 P の間隔は 0.3mm である。面取り後、形状測定装置 ((株) 小坂研究所 サーフコーダ SEF-30D) を用いて断面形状測定の結果、切削開始点から 20mm、40mm、60mm の点において面取り幅は、 85° の場合、0.48mm、0.46mm、0.48mm、 95° の場合、0.48mm、0.48mm、0.5mm であり、一般的な面取りの許容範囲とされる $\pm 0.1\text{mm}$ に納めることができた。また、断面形状を図 13 に示す。面取り角度は誤差 $\pm 1^\circ$ 以内に収まっており、安全性を重視した面取りとして十分に機能するといえる。

7.2 自由曲面を含む工作物 次に、自由曲面を含む工作物について実験を行った。まず、CAD システム上で工作物の形状定義を行い、CAD データを基に図 14 に示す工具経路を生成した。工作物は CAD データに基づき自作の CAM によりマシニングセンタで切削加工したもので、材料は Al2017、寸法は約 50×100×100mm、指令面取り幅 0.50mm、送り速度 20mm/s、面取り対象点 P の間隔は 0.3mm である。加工前の工作物の外観を図 15 に示す。対象形状は、従来手作業で行わなければ面取りが困難とされている自由曲面を含んでいる。データ生成時間 1min、加工時間 42s であり、加工中の様子を図 16 に示す。図 17 に示すように、1 回の加工で良好な面を得た。また、切削開始点から 70mm 地点の断面形状測定を行った結果を図 18 に示す。面取り角度は誤差 $\pm 1^\circ$ 以内に収まっており、面取り幅 0.48mm と安全性を重視した面取りとしての機能を達成できた。

8. 結 言

産業用ロボットを用いた面取り作業を自動化するシステムを開発し、以下のような結論を得た。

1. 面取り品質として機能に応じた面取り作業の分類を試みた。
2. CAD データに基づき安全性を重視した面取り作業の

Fig. 14 Tool path on CAD data

Fig. 15 Workpiece with free-curved surface

Fig. 16 Robot under chamfering

Fig. 17 Chamfered workpiece

ロボット動作プログラムを自動生成できた。

3. ロボットの位置決め誤差の影響を受けない面取り幅制御装置を開発し、安定した安全性を重視した面取りを行うことができた。

今後はストッパによる工作物へのダメージを改善するために、ストッパの形状や取り付け位置の変更等の改良、より一般的な工作物への対応等を進めていきたい。

謝 辞

最後に、本研究を行うにあたり協力して頂いた、浅野久志技官、菊地栄治氏、鈴木毅典氏、田中秀岳氏に

Fig. 18 Profile of chamfered part with free curved surface

深く感謝する。

また、本研究の一部は平成 12 年度科学研究費 (11750097) のもとに行われたことを付記する。

文 献

- (1) 北嶋弘一, バリ取りとエッジ仕上げは製品設計の段階から考慮しても早くはない!, 機械技術, 6 月号, (1999), 76-80.
- (2) 加藤泰雄, 機械部品に要求されるエッジ品質とは?, 機械技術, 7 月号, (1999), 74-80.
- (3) 米山猛, 機械設計の基礎知識, 日刊工業新聞社, (1996), 137-138.
- (4) Her.G.M., Kazerooni.H., Automated Robotic Debarring of Parts Using Compliance Control, Transaction of ASME, March(1991), 60-66.
- (5) Ling-Hui.Chang., Li-Chen.Fu., Nonlinear Adaptive Control Of A Flexible Manipulator For Automated Debarring, Proc. IEEE Int., April(1997), 2844-2849.
- (6) 白瀬敬一・田辺直久・平尾政利・安井武司, 産業用ロボットによる切削加工に関する研究 (第 3 報ロボットキャリブレーションによる加工精度の改善), 機論, 61-581, C(1995), 259-265.
- (7) 水本善雄・浅川直紀・竹内芳美, 産業用ロボットによる面取り作業の自動化 (工具適用方向を参照した位置誤差補正システムの開発), 機論, 66-650, C(2000), 280-285.
- (8) 植之原道宏, 位置不確定性存在下でのオフライン教示システムの一構成法, 日本ロボット学会誌, 14-7, (1996), 139-147.
- (9) 島田明, ロボットの低剛性を考慮したサーボ系の設計, 精密工学会誌, 61-9, (1996), 139-147.
- (10) 青柳誠司・神谷好承・岡部左規一・佐々木健・高野政晴, 超音波によるロボットの 3 次元位置・姿勢計測 (第 3 報) - 3 次元位置計測精度の検討 -, 精密工学会誌, 61-7, (1995), 964-968.
- (11) 黒田敏裕・那須康雄・甲田信裕・水戸部和久, ファイジ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, 先端加工学会誌, 15-1, (1996), 56-63.
- (12) 中村尚範・吹田和嗣・板谷敏郎, ロボットのオフラインプログラミングシステムのための簡便なロボット機械誤差補正法 (第 2 報), 精密工学会誌, 62-1, (1996), 135-139.
- (13) <http://www.FreeBSD.org/>