産業用ロボットによる面取り作業の自動化*

(インテリジェントホルダの改良と適用)

水本 善雄^{*1}, 浅川 直紀^{*2}, 竹内 芳美^{*3}

Automation of Chamfering with Industrial Robot

(Improvement and Application of Intelligent Holder)

Yoshio MIZUMOTO, Naoki ASAKAWA and Yoshimi TAKEUCHI^{*4}^{**}Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, University of Electro-Communications,
1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

The study deals with the automatic chamfering for the workpiece with complex shape on the basis of CAD data, using an industrial robot. We have already developed a system named TADRPECS-tool path, pushing direction and force at the each chamfering point are calculated from CAD data both to keep chamfering conditions stable and to keep a larger range in space for workpieces with complex shape. As a chamfering tool, a rotary-bar type tool is attached with "intelligent holder". The holder consists of a force sensor and two linear actuators to realize smart force control. In the article, improvements of the holder to increase a controllability and to expand workspace of the robot are reported. From results of experiment to chamfer curved edges of intersected throughholes, the system is found to be effective to chamfer edges of a workpieces with complex shape.

Key Words: Industrial Robot, CAD, CAM, Deburring, Chamfering, Force Control, Tool Path

1. はじめに

産業用ロボットは、危険・汚い・きついといういわゆる3K作業において、熟練作業者の高齢化や人手不足の問題を解消し、生産工程の省人・省力化や生産性の向上のための有力な手段として現在では広く導入されている^{(1)~(4)}。作業者は過酷な作業から解放されたが、ロボットの動作プログラムの生成方法の多くは、ティーチングプレイバック方式であるため、現実には動作の教示に多大な時間と労力を必要とする。この問題を解決する手段として、CADシステムを利用したオフラインティーチングがあげられる。すでに、我々は加工物のCADデータを利用して、多関節産業用ロボットを用いた磨き、塗装、バリ取り作業の自動化に取り組み、ティーチング作業の大幅な削減を実現してきた。

しかし、やはり3K作業の1つとされる面取り作業に多関節産業用ロボットを適用しようとした場合、元来は切削加工に用いるように設計されていないため、位置決め精度の不足が生じたり、工作物座標系とロボット座標系の対応付けの際に生じる誤差が仕上げ精度に大きな影響を与えるなどの問題があり、切込み不足や面取り幅が一定にならない、また逆に、過大な切込みによる過負荷が工具にかかるという問題があった。さら

に、切込み量を考慮した工具経路を、それぞれの切込み量が変わるたびに生成しなければならないため、工具の負担を考えながら工具経路を生成する必要があった。

一般に産業用ロボットの位置決め精度を向上させようという試みは広く行われており、例えばセンサフィードバックによる教示方式を適用し、誤差を測定しながら補正する方法なども研究されている^{(5)~(10)}。しかし、それらの方法の多くはロボットそのものの精度を追求するため、大規模な改造を必要とするものや、複雑な形状に対応させるのが難しいものが多く、簡易な方法で複雑な形状に対応できるものは少ない。

これらを解消するために、我々はソフト、ハードの両面から位置決め誤差を修正するTADRPECS(Tool Application Direction Referenced Position Error Compensation System)と名づけられたシステムを開発し、すでに報告した⁽¹¹⁾。TADRPECSは単なる倣い機構ではなく、工作物のCADデータから個々の加工点ごとに工具の押し付け方向を算出して、"インテリジェントホルダ"と呼ばれる押付け力制御機構を持つ工具ホルダを制御し、常に適切な方向に工具を適用するものである。前報では、このシステムが、比較的単純な形状の面取り作業の自動化に有効であることを示すことができたが、その後いくつかの機構上の問題点が明らかになり、さらに複雑な形状に対応させるためには改良が必要であることが判明した。

本報では、主にTADRPECSにおけるインテリジェントホルダを改良し、その問題点である動作速度の改善と、作業時のロボットの姿勢の変化を抑え、動作範囲

* 原稿受付 2001年3月26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、金沢大学工学部(〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)。^{*3} 正員、電気通信大学電気通信学部。

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

Fig.1 System configuration

空間を拡大することにより、システムの性能向上を図ることを目的としている。

2. システム構成

2.1 システム構成 TADRPECSの構成を図1に示す。前報⁽¹⁾とはほぼ同じように、3次元CADで定義した形状データを基に工具経路を自動生成し、それをロボット制御用PCとインテリジェントホルダ制御用PCに送る。ロボット制御用PCはロボット動作プログラムを生成・制御し、インテリジェントホルダ制御用PCは、面取り作業開始と同時に工具にかかる力を、インテリジェントホルダ内の6軸力覚センサから読み込む。次に、その力の測定値と面取り対象点における工具押付け力の計算値とを比較し、工具の力制御を行う。

このように、本システムの特徴は、各面取り対象点に関連付けられた工具の適用方向をホルダ自身がかつとともに、ホルダをロボット動作プログラムと関係付けているところにある。使用するロボットは、空間内において任意の姿勢をとることができる垂直多関節型の同時6軸制御産業用ロボット(ファナック(株), S700)で、各軸動作・直線動作・円弧動作を利用してロボット制御指令を作る。

2.2 インテリジェントホルダ インテリジェントホルダには、ロボットアーム先端の工具にかかる力の大きさと方向を読み取るために、6軸力覚センサが取り付けられている。また、アクチュエータとしては、図2に示すように、直動案内と駆動用ボールねじから構成される2つの直動位置決め機構を交差させ、ステッピングモータでこの機構を駆動することにより2自由度を実現した。直動位置決め機構には近接スイッチを用い、

Fig.2 Intelligent holder

テーブルの可動範囲を逸脱しないように動作範囲を制御している。工具として、電動式ブラシレスモータスピンドルに超硬バー、ダイヤモンドバー、軸付砥石、フレックスホイールを取り付けて使用した。

3. 面取り工具経路の生成と制御

3.1 工具経路生成 面取り用の工具経路生成ソフトウェアはメインプロセッサとポストプロセッサの2つから構成されている。メインプロセッサはロボットの構造や指令形式に関係なく、一般化された処理を行うソフトウェアで、CADデータから作業に必要な工具姿勢や経路を生成する。一方、ポストプロセッサはメインプロセッサで生成された工具経路をロボット構造に固有な座標系と制御指令形式に変換する役割をもち、ロボットの動作プログラムを生成する。

メインプロセッサでは、まず面取り対象点座標 P における面取り生成面の法線ベクトル N 、および F を生成する。 N の逆方向は工具押付け方向に一致する。このとき、3次元空間上における工具姿勢は、図3に示すように、 P において工具の軸方向を表す工具軸ベクトル T と、工具の側面に垂直な方向の一つ(ここでは工具進行方向ベクトル F と同じ方向)である工具方向ベクトル D により指定する。 D と T の外積ベクトルが工具押付け方向

Fig.3 Tool attitude for chamfering and tool path

3-4 座標系のマッチング

工作物表面情報や工具経路における座標系やベクトルは、CAD上の工作物座標系の値である。ロボット座標系でのロボットの位置と姿勢は、空間上の直交座標系の原点に対する工具先端点の座標値とそれぞれの軸に対する回転角で定義される。ここでは、直交座標系にモデル座標系をマッチングする方法として、モデル座標系に平行な x 軸の始点、 x 軸方向の1点、 xy 平面上の1点、モデル座標系の原点、の計4点を教示する方法を用いた。

駆動源であるステッピングモータと直動位置決め機構のボールねじの制約から、ロボットの動作速度が制限されていた。そこで、ステッピングモータとボール

	Original device	Improved device
Distance (Robot arm-Tool)	367 mm	162 mm
Distance (Force sensor-Tool)	327 mm	57 mm
Stepping motor (step number)	100(3.6/degree)	200(1.8/degree)
Ball screw (lead)	1 mm	5 mm

ねじを変更した。従来型インテリジェントホルダが1パルスで0.01 mm 切り込むのに対し、改良型インテリジェントホルダは1パルスで0.025mmにしたことで動作速度を速めた。表1に改良前後のインテリジェントホルダの形状の数値比較を示す。

4.2 改良型インテリジェントホルダの性能検証

図4のような、全長100mmで振幅を7mm, 6mm, 5mm, 4mmと変化する波形稜線を性能検証用に準備した。工具を45°に傾け、アームを加工物に対して振幅7mmの部分から4mmの部分に向かって平行に直動させ、インテリジェントホルダだけを波形に沿うようにH1モードで制御する。そのときの工具にかかる力を測定した。ロボットを送り速度2mm/sと4mm/sで動作させ、速度を上げた場合の追従性を検証した。なお、工具押付け力の目標値は4Nとした。

従来型インテリジェントホルダ(以下 従来型)の測定結果を図5(a)、また、改良型インテリジェントホルダ

(以下 改良型)の測定結果を図5(b)に示す。送り速度が2mm/sの場合について比較すると、改良型は追従性向上のための制御パラメータの変更により、従来型に比べて変動範囲が若干大きくなっているが、基礎実験により求めた面取り作業のために必要な許容値以内には収まっていおり、目視でも過度な工具の押付けや離脱はなく、力制御が実用上十分であることが確認できた。

注目すべきはロボット動作速度を4mm/sに上げた場合で、従来型では対象形状の変化の大きな部分(振幅7,6mm; 0~50mmの部分)では追従できず、許容範囲を超えた力の変動が見られるが、改良型では2mm/sの場合と同様、ほぼ許容範囲内の変動で追従していることがわかる。すなわち改良型では、作業速度が高速になり、形状がより急激に変化する場合でも安定した力制御が可能であることを確認できた。

次に、図6に示す波形稜線形状の面取りを対象とし、

Fig.5 Force control of intelligent holder

Fig.6 Tool path on CAD data

Fig.7 Joints of the robot

Fig.8 Comparison of sum of rotational angle among six joints

同じ工具経路を従来型と改良型で作動させた場合に生じるロボットの各関節の回転変位量の違いを比較することにより、ロボットの姿勢変位量の減少を検証した。ロボットの関節の配置を図7に、各関節ごとの回転変位量の総和を図8に示す。J4、J6各では微増、その他の関節では減少しているのがわかる。

本研究で用いたようなシリアルなメカニズムをベースとするロボットの場合、ロボット全体の姿勢はベースに近い関節、すなわちJ1、J2、J3によって大きく影響される。改良型により、その3軸、とりわけJ2の回転変位量が半減していることから、作業空間におけるロボットの姿勢の変化を減少させるという効果が得られたことを確認できた。

以上によって、改良型の作業速度追従性向上と姿勢変位量の減少を確認できた。

4.3 交差穴の面取り 金型冷却穴やスプール弁などに見られる、穴と穴が交差している形状の穴の内側の面取りを行った。穴の内側という特殊な部分のため、汎用面取り機はもちろん、従来型のインテリジェントホルダを用いても、常に工具姿勢が大きく変化するので加工は困難である。図9に示すように、素材A5052に $\phi 80\text{mm}$ の穴をあけ、そこに $\phi 40\text{mm}$ の穴を交差させ、 $\phi 40\text{mm}$ の穴の内側を穴に対して 30° の角度で幅 1.5mm を目標とした面取りを行う。

従来型では、面取りの加工条件に合わせてロボットの動作速度を高速にした場合、追従性が不足していた

Fig.11 Control manner of intelligent holder

ためH2モードを使用することができず、作業速度を下げるか、H1SないしH1モードのみを使用せざるを得なかったが、前述のように追従性が向上したため、H2モードの使用が可能となった。

工具経路を図10に示す。図11のように、工具押し付け方向が x, y 軸方向($0^\circ, 90^\circ$ 付近等)近傍で姿勢変化が単純な場合は、H1Sモードを用い、それ以外の工具押し付け方向が必要で姿勢変化が複雑(45° 付近等)な場合は、H2モードを使用することにした。また、工具の押し付け方向に対する誤差を減少させるために、H1Sモードの場合は非制御軸を原点復帰させている。このとき、力覚センサの値は1軸のみの値を制御に用いることとした。

面取り後の工作物を図12に示す。非制御軸の原点復帰を行った部分で多少の加工痕が見られるものの、全体的に良好な加工面を得ることができた。また、面取り

Fig.9 Curved edge of intersected throughhole

Fig.10 Tool path on CAD data

(a) Whole view

(b) Enlarged view

Fig.12 Chamfered edge of intersected throughhole

Fig.13 Profile of chamfered part

部のプロファイルの例を図13に示す。工作物の加工対象稜線は3次元的な曲線なので、面取り角度は参考としての値だが、幅に関しては1.4mmと通常の面取り作業で要求される程度の誤差範囲内の面取り幅を得ることができた。

5. おわりに

産業用ロボットによる面取り作業の位置決め誤差修正のためのシステム、TADRPECSにおける制御機構であるインテリジェントホルダを改良し、その性能向上を試みた結果、以下のような結論を得た。

- (1) 制御速度が向上し、複雑な形状に対しても良好な加工条件で面取りが可能となった。
- (2) より少ない姿勢変化で作業が可能になり、複雑な形状に対しても動作範囲を逸脱することなく作業を行うことが可能となった。

文 献

- (1) 山根八洲男, 熟練作業のメカトロニクスシステムによる自動化, 精密工学会誌, 61-7(1995), 923-926.
- (2) 宮脇国男・定家康浩, NC塗装ロボットの軌道精度評価法, 日本ロボット学会誌, 16-7(1998), 1017-1025.
- (3) 岩城敏・松尾哲・岡田尚・水川真, センサベースと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.
- (4) 岡田尚・岩城敏・水川真・松尾哲・金山和則・奥平雅士, 高精度バリ研削のためのバリ付近形状計測方式とその評価, 日本ロボット学会誌, 15-6(1997), 901-910.
- (5) 白瀬敬一・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1報, 加工誤差のポストプロセス補正による加工精度の改善), 機論, 60-571, C(1994), 1071-1076.
- (6) 白瀬敬一・水原延幸・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2報, センサフィードバックティーチングプログラムによる微加工), 機論, 60-571, C(1994), 1077-1083.
- (7) 望月宣宏・松井隆, インピーダンス制御を応用したハイブリッド制御の直接教示法, 日本ロボット学会誌, 12-2(1994), 328-334.
- (8) 桂川敬史・五月井清・久保田伸幸・野呂治, 産業用ロボットにおけるハイブリッド・コンプライアンス/力制御の適用, 日本ロボット学会誌, 12-6(1994), 893-898.
- (9) 成清辰生, 非干渉化された位置と力のハイブリッド制御による研磨加工, 日本ロボット学会誌, 14-4(1996), 586-592.
- (10) 神野誠・尾崎文夫・吉見卓・辰野恭市・高橋幹男・神田真三・玉田保彦・永滝真太郎, タスク指向のロボット言語を有する力制御仕上げロボットの開発, 日本ロボット学会誌, 14-8(1996), 1178-1185.
- (11) 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.