

ロボットアームによる精密仕上げ自動化技術の開発

Development of Automation Technology for Precision Finishing Works Employing a Robot Arm

曾根原 光 治 技術開発本部総合開発センター制御技術開発部 課長
林 浩一郎 技術開発本部プロジェクトセンター開発部
西 嶋 和 之 技術開発本部総合開発センター制御技術開発部
村 上 弘 記 技術開発本部総合開発センター機械技術開発部 部長

複雑形状をもつ部品のエッジ部の面取りや、曲面などの表面の磨きなど、熟練技能を要する仕上げ作業の自動化が求められている。そこでロボットアームによる力倣い制御ベースのシステムを開発した。磨き加工に対しては、力倣い制御を適用し、また面取り加工に対しては、同制御だけでは十分な精度・速度を両立できなかったことから、力倣い制御による形状計測と、位置制御による加工を分けて行う新たな手法を提案し、試験で有効性を確認した。本稿では開発したシステム、加工手法、試験結果を紹介する。

There is demand for the automation of finishing processes that require technical skills in the manufacturing of metal parts with a complex shape. Such processes can be categorized into two major types of processes: polishing the surface and chamfering the edges. In this paper, a robot system with model following force control is applied to a polishing process and the method proposed in this paper is applied to a chamfering process. The proposed method consists of two steps: the edge of a part is measured by a tool with model following force control and then the edge is chamfered using position feedback control along the measured path. The validity of these methods has been confirmed by experiments involving actual polishing and chamfering.

1. 緒 言

我が国の製造業における大きな課題として、グローバル化するなかでの、①コスト競争激化とリードタイム短縮②市場ニーズによる製品多様化に伴う多品種変量生産③労働（生産年齢）人口の減少などによる熟練技能者の減少への対応、などが求められている。これらの課題に対する技術的な対応の一つとして、自動化の推進があり、①コストダウン②生産の効率化③品質の安定化④製品トレーサビリティの向上⑤製造ノウハウの数値化・パッケージ化（再現性、秘匿性の向上）、などが期待されている。部品加工の作業では、当社のような少中量生産でも、マシニングセンタやNC加工機などの導入が進み、多くの作業工程で自動化が推進されている。

一方、組立・仕上げなどの作業では自動化があまり進んでいない。自動化を妨げる壁として、内部で工程が多岐に別れていることや、作業者の経験・工夫から得た熟練技能を数値化し繊細な作業を再現できる機械がないことが挙げられる。このような熟練技能作業の自動化では専用装置開発などによって個別に進められることはあるが、体系的には進んでいない。

このような問題に対して、従来のような事前に教えた軌

道・作業を繰り返して行う位置制御型のティーチングプレイバックロボットから、対象・環境・状況などを人間の目や肌に代わるセンサによって計測し、その情報をロボットにフィードバックすることで、人間の微妙な力加減を再現するなど、人間のように作業する知能化ロボット技術の開発を進めてきた⁽¹⁾。

このような知能化ロボットに、熟練作業者のノウハウを数値化して加えることで、これまで自動化が困難であった作業を自動化することを目指しており、車両過給機などのセル生産組立工程の自動化を進めている⁽²⁾、⁽³⁾。

本稿では、組立と同様に多くの作業を人手に頼る、部品の仕上げ作業、そのなかでも熟練技能が要求される精密部品などの、一般的な加工機では対応できない複雑形状のエッジ部の面取りや、曲面などの表面を磨く仕上げ作業の自動化を対象に開発した技術・システム⁽⁴⁾を紹介する。

2. 仕上げ作業と自動化

仕上げ作業とは、部品などの製造工程において、最終的に部品を完成させる作業で、部品によって多種多様な作業がある。一般的には casting や機械加工後に部品のエッジ・表面などを処理し、所定寸法・表面粗さに仕上げる作業を指し、具体的には、① ばり取り② エッジ部の面取り③ R

付け④表面の磨き，作業などである。

仕上げ処理をする従来装置としては，バレルと呼ばれる浴槽内に部品とメディア（研磨材）を入れて，回転や振動を与えることで，部品のばり取り，エッジ・表面磨きなどを行うバレル研磨機がある。そのほかにもバレルとは異なる仕組みで砥粒を部品に接触させる方式や，超音波や，電解・焼却処理などでばりやエッジを取る装置もある。これらの方式は大中量を同時処理でき，比較的 low コストで実現できる反面，全体的に研磨するため，複雑な形状をもつ部品では除去・仕上げむらが生じる大型部品には対応が難しいといった問題があった。

このような問題に対応するため，可動範囲が広く，複雑動作が可能なロボットアームを利用する方法が提案されている^{(5)~(9)}。しかし，一般的なロボットアームは回転関節が直列接続した構造であり，回転関節のわずかな誤差がアーム長によって先端で拡大され，直列接続によって誤差が累積される。また，直列接続であるため剛性が低く，たわみなども発生し，広い可動範囲をもつ利点の反面，絶対位置決め精度が低い欠点（工作機械の 1/10 ~ 1/100）をもつ。このため単純にロボットを使い，マシニングセンタや NC 加工機のような精度の高い加工の実現は困難であることから，仕上げロボットの先行事例では，主に以下のような方式が採られている。

- (1) ロボットアーム先端に設けた加工工具で，実際の部品を使って精密な位置を教示し，位置を再生して加工
- (2) CAD 情報などから自動生成された軌道を再生し，ロボットアーム先端と加工工具の間に設けた受動装置が位置誤差を吸収しつつ，工具を部品に押付けながら加工^{(5), (6)}
- (3) CAD 情報などから自動生成された軌道を再生し，一定力で工具を部品に押付ける力制御によって位置誤差を吸収しつつ，工具を部品に押付けながら加工^{(7)~(9)}

(1) の方式では，ロボットの繰返し位置決め精度は高いため，ロボットと実際の部品で直接教示を行うことで，精度の高い加工が可能である。しかし部品とロボットの相対位置を，工具たわみなども考慮しつつ，工具が接触した状態で精密に教示する必要があるため，教示そのものに高い熟練技能を要し，作業時間も膨大である。

これらの問題に対応した(2)の方式では，ロボットに CAD 情報などから自動生成する軌道を与える⁽⁷⁾ことで，

教示作業を大幅に省力化している。ロボットは絶対位置決め精度が低く，また部品の設置位置も CAD 情報とは誤差をもつことから，CAD 情報から生成した軌道を再生すると，部品とは若干ずれた軌道を描くことになる。そこで受動機構を設け，軌道を切込み側にシフトして再生することで，工具を部品に押付けつつ誤差を吸収する，つまり，部品に倣いつつ加工することができる。しかし，受動機構は一般的にバネなどで構成され，姿勢が重力方向から傾くと，自重などの影響で押付力が変化する。この結果，加工精度が悪化することから，工具姿勢変化が大きくなる複雑な形状をもつ部品では精密な加工ができない。

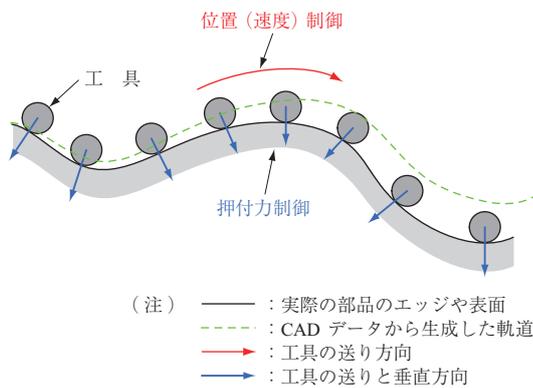
これらの問題に対応した(3)の方式では，力計測結果から重力影響を排除できるため，重力影響を受けずに押付力を一定に制御することができ，また工具近傍に受動装置もないため，狭隘部の加工も可能になる。しかし，力制御ロボットによる加工でも以下のような問題がある。

- ・大きなばりが残る加工（例：ブランク加工・ブローチ加工など）後の仕上げでは，工具がばりに倣ってしまい，加工寸法がばらつく。
- ・倣う形状の変化率などによって，押付力の追従精度が影響を受けるため，送り速度を抑える必要があるが，速度を抑えると生産タクトタイムが悪化する。
- ・高速・高精度追従の実現には，市販品がないため，新たな装置開発が必要で装置コストが高くなる。
- ・工具種類と加工条件（押付力・送り速度・工具回転数など）から寸法を制御するため，工具・寸法ごとに実際に加工して条件を調整する必要があり，時間・手間を要する。

そこでこれらの問題を解決するため，市販の産業用ロボットをベースとした力倣い制御システムを開発し，① 部品に工具を倣わせて形状計測 ② 計測によって補正した目標軌道に基づいて位置制御で高速加工する，という 2 段階からなる加工方法を新たに提案した。この方法は(1)の教示作業を(3)の装置で自動化したものであり，(1)の長所である高速・高精度化が期待できる。

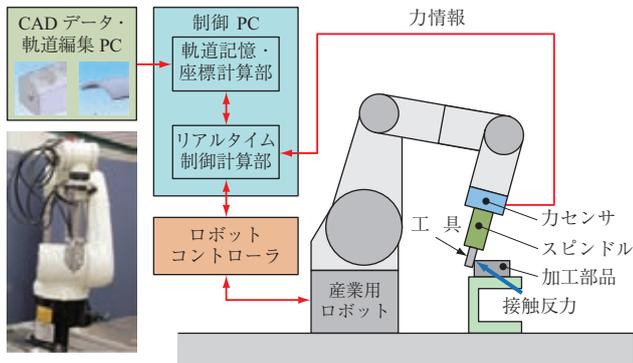
3. 産業用ロボットによる力倣い制御

ロボットが部品形状に倣う動作の概念を第 1 図に示す。事前軌道としてロボットには CAD データから生成した軌道を与える。実際には，先に示したロボットの絶対位置決め誤差や部品の設置誤差の影響から，生成軌道と実際の部品のエッジや表面には位置ずれがある。そこで，部品の設



第 1 図 力倣い制御
 Fig. 1 Model following force control

位置誤差に関しては、事前に校正を行い、また工具の送り方向と垂直方向には押付力を制御し、工具の送り方向には位置制御して、部品のエッジや表面形状を倣う動作をさせる。これらを実装するシステムとして、第 2 図に示す試験



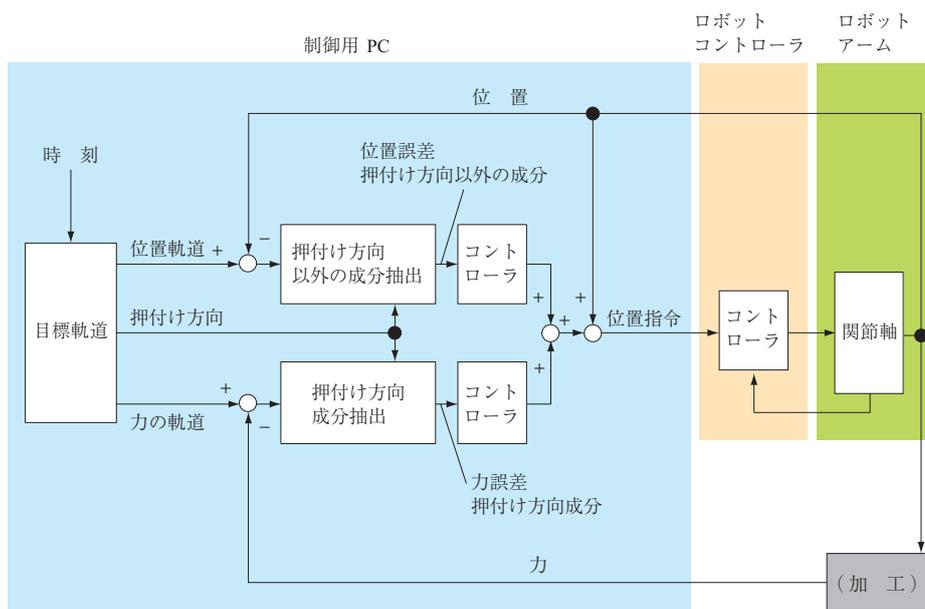
第 2 図 試験システム構成
 Fig. 2 Testing system configuration

システムを開発した。ロボットアームとしては、最終的な導入時のコストやメンテナンス性を考慮し、汎用の産業用ロボットを利用した。制御 PC が部品の CAD データから変換されたロボット軌道データを事前に受け取り、ロボット手先に設置された力センサからの情報をリアルタイムに受け取ることで、計画された方向に合わせた力制御・位置制御計算を行い、ロボットコントローラとの通信によって、位置指令を与える構成になっている。ロボットコントローラ仕様によって、制御周期は 12 ms になっている。

実際に力倣い動作を実現する制御手法として、位置と力のハイブリッド制御⁽¹⁰⁾、⁽¹¹⁾が一般的である。この制御方法は、押付け方向・位置軌道・力の軌道からなる目標軌道に対して、力については目標値と計測値の差から押付け方向の成分を抽出して制御し、位置については目標値と計測値の差から押付け方向以外の成分を抽出して制御する。本システムの制御ブロックを第 3 図に示す。

同システムを用いて、力倣い制御による面取り加工を行った。センサ精度から押付力精度の限界があるため、押付力に対して比較的切削力の小さい、電着砥石を選定した。

大きなバリなどが無い試験片を使用し、実際に要求される面取り加工を例に、条件出しを行うことで、第 4 図に示すような一定の面取り面を形成できた。しかし、先に示したように寸法制御には試行錯誤的な加工条件設定が必要かつ、市販コントローラの制御周期や遅延などに起因する



第 3 図 制御ブロック
 Fig. 3 Control block



(注) 加工条件
 ・工 具：ダイヤモンド電着砥石
 ・砥石粒度：320 番
 ・工具外径：φ2 mm
 ・送り速度：0.5 mm/s

第 4 図 面取りエッジ外観（長穴）
 Fig. 4 Overview of chamfered edge : slot

押付力制御の低応答性から、高速に加工すると寸法が安定しない、つまり速度を上げると押付力が変化し、その結果寸法精度が悪化するというトレードオフの関係にあることが確認できた。寸法精度を満足する送り速度での作業時間は、最低要求時間や人間の作業時間と比較すると約 2～4 倍かかることも確認できた。

参考に、仕上げ作業で自動化ニーズの高い磨き作業として、研削盤などでは困難な、曲面を対象に力倣い制御による加工を実施した。面取りと同様に実際に要求される磨き加工を例に、条件出しを行い、第 5 図に示すような所定粗さの磨きを実現した（粗さ計測結果：Ra 0.2～0.3）。

磨きは、所定寸法に成形する作業ではないため、比較的容易に条件出しができ、また、送り速度も面取り加工に比



(注) 加工条件
 ・工 具：フラップホイール
 ・粒 度：240～400 番
 ・送り速度：6 mm/s

第 5 図 磨き面外観（円筒）
 Fig. 5 Overview of polished surface : cylinder

べて高くでき、力倣い制御による加工の有効性を確認した。

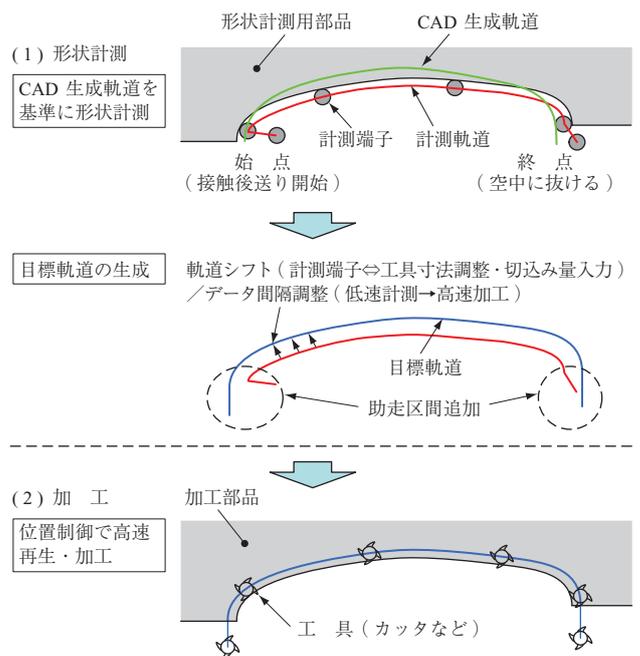
4. ロボットアームによる高精度エッジ加工手法

今回対象とするような高精度のエッジ加工は機械加工後の最終仕上げなどが想定され、部品ごとの形状・寸法のばらつきは非常に小さいと考えられる。そこで力倣い制御のもつ機能をロボットの絶対位置決め誤差を吸収する機能だけに限定し、力倣い制御を使った形状計測と位置制御による加工の二つのプロセスに分けて加工する方法を提案する。

まず、実際の部品を使って力倣い制御によって形状を計測する。これによってロボットがもつ絶対位置決め誤差などを吸収した軌道を取得することができる。次に実際に加工する際は、計測から得られた軌道を編集した目標軌道を位置制御で高速に再生して加工する。部品形状のばらつきが小さいため、形状計測は最初に 1 度だけしか行わないことから、生産タクトタイムには影響を与えない。以下に具体的なプロセスと概念を示す（第 6 図）。

(1) 形状計測（事前に 1 回実施）

- ①部品 CAD データから、ロボットの形状計測目標軌道を自動生成
- ②形状計測用部品（ばりなどをあらかじめ除去した実際の部品）を設置し、ロボットと部品の



第 6 図 面取りプロセス
 Fig. 6 Chamfering process

相対位置・姿勢をタッチセンシングなどで校正
(CAD データと実際の設置位置・姿勢の校正)

- ③ロボットによって計測目標軌道を使って計測端子
もしくは工具で部品を削い、形状(計測結果軌
道)を取得
- ④計測結果軌道を調整し、加工のための目標軌道を
作成
- ⑤目標軌道追従精度を改善するため、繰返し学習を
利用して目標軌道を補正(後述)

(2) 加工(加工ごとに実施)

ロボットと部品の相対位置・姿勢をタッチセン
シングなどで校正(設置再現性が低い場合のみ実施)
し、校正した目標軌道を、位置制御で高速再生して
加工する。

提案手法は、従来に比べて以下のような特長がある。

- ①位置制御で加工するため、ばりの影響を受けにくく、
ばり除去と同時に所定寸法の面取り加工が可能であ
る。
- ②位置制御追従性の制約があるが、高速化が可能であ
る。
- ③目標軌道の編集によって、切込み量などが容易に調
整可能である。
- ④ロボットが接触を伴う形状計測を力削いによって自
ら行うため、熟練技能を要しない。

5. 位置制御加工の問題点と繰返し学習

提案手法では、形状計測時には高精度に計測するため十分
に低速で送り、加工時には生産タクトタイムを満足する
ため高速で送ることになる。今回は力削い制御加工の予備
試験結果から、加工時の送り速度の目標を人間と同様の作
業時間を達成し得る 1~2 mm/s に設定し、提案手法を実
装し、確認することにした。

しかし実際の加工を行った結果、送り速度を速くすると
目標軌道に対する追従誤差(オーバーシュートや振動な
ど)が大きくなり、加工寸法に影響することが判明した。

今回使用したような産業用ロボットは手先でかなりの高
速動作が可能であり、高い繰返し位置精度をもっている。
しかし、停止位置における位置精度は高いが、移動中の軌
道追従精度については基本的には補償されていない。実際
には、外乱などに対して安定的に稼働させるため、ロボッ
トコントローラ内の信号処理にフィルタなどの大きな遅延
要素が存在していることなどが判明した。

今回は、設定した目標軌道へ正確に追従することが要求
されることから、力削い制御による形状計測後に、繰返
し学習(P型学習)⁽¹²⁾を適用して、目標軌道への追従精
度を改善することにした。繰返し学習制御ブロックを第7
図に示す。

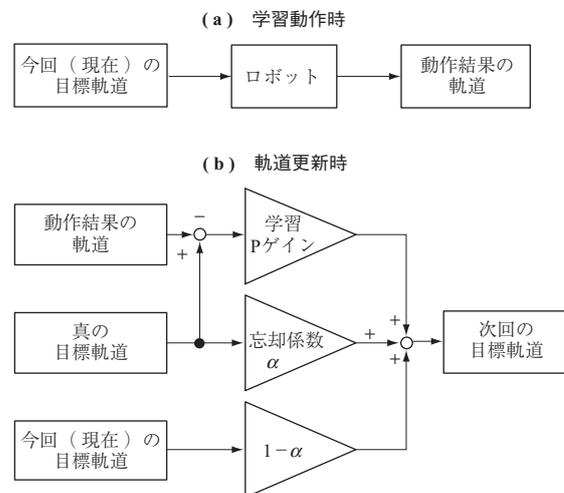
同方式では第7図-(a)に示すように、今回(現在)
の目標軌道を位置指令としてロボットを動作させて、その
結果実際に動く軌道を取得し、-(b)に示すように、動作
結果の軌道と真の目標軌道(形状計測した際の動作軌道)
と今回の目標軌道から学習を行い、次回の目標軌道を更新
する。第7図-(a)、-(b)を繰り返すことで、真の目標
軌道に対して動作軌道の結果が一定の誤差に入るまで目標
軌道を更新する。忘却係数は0~1の値をとり、一般的
に忘却係数が小さい程、忘却機能が強く働き、学習速度が
速くなるが、雑音に弱く収束性が損なわれる。

適当な忘却係数 α および学習Pゲインを設定し、繰返
し学習制御の効果を確認したところ、10回弱の繰返し学
習で、オーバーシュートや振動などの追従誤差が低減でき
ることを確認した。第8図に繰返し学習制御の効果を示
す。

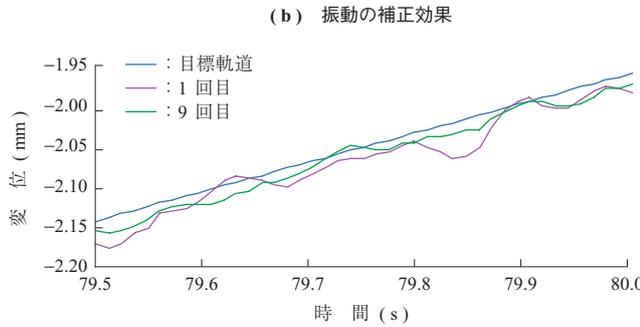
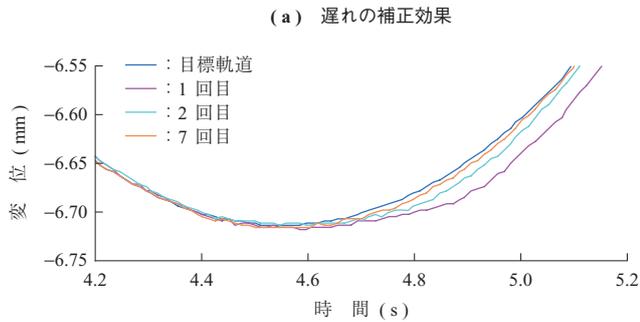
6. 加工試験

6.1 加工評価試験

構築した試験システムで、試験片を使った加工試験を
実施した。対象は平面上の $\phi 15$ mm 穴のエッジに対し
て30度の面取りとし、実作業の情報から目標加工幅を
0.46 mm、目標粗さを中仕上げ相当の Ra 3.2 μ m 以下に
設定した。



第7図 繰返し学習制御ブロック
Fig. 7 Iterative learning control block

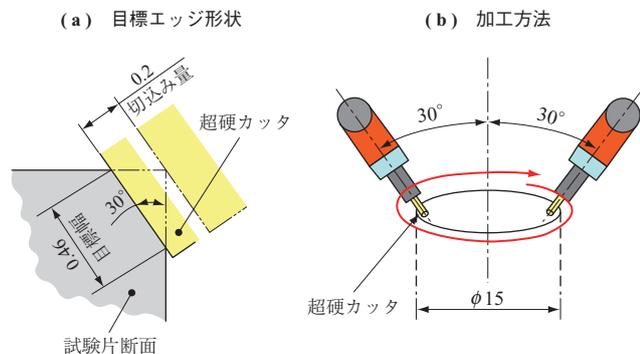


第 8 図 繰返し学習制御の効果
Fig. 8 Effects of iterative learning control

本加工では円錐型カッタを使うと、平面動作のみで加工可能であるが、ロボットの三次元動作による成立性を検証するため、円柱型超硬カッタ ($\phi 3 \text{ mm}$) を使用した。第 9 図に目標エッジ形状と加工方法 (平面の穴) を示す。また送り速度は 2 mm/s に設定した。

加工後の試験片の面取りエッジ外観を第 10 図に示す。参考に、力強い制御による形状計測を行わず CAD 生成軌道に対して位置制御のみで加工した例を第 10 図 - (b) に示す。力強い制御による形状計測を行うことで、安定した加工が実現できた。

また、学習あり/なしの場合の加工幅・面粗さの結果を第 1 表に示す。学習あり/なしとも加工幅は目標値に比べ、平均で 0.1 mm 程度小さくなった。加工幅 0.1 mm



第 9 図 目標エッジ形状と加工方法 (平面の穴) (単位: mm)
Fig. 9 Target shape of edge and chamfering method : Hole on a flat surface (unit : mm)

(a) 力強い制御による計測あり (b) 力強い制御による計測なし



第 10 図 面取りエッジ外観 (平面の穴)
Fig. 10 Overview of chamfered edge : Hole on a flat surface

第 1 表 面取り結果 (平面の穴)
Table 1 Results of chamfering : Hole on a flat surface

評価項目	単位	学習あり	学習なし
最大加工幅	mm	0.430	0.461
最小加工幅	mm	0.296	0.259
平均加工幅	mm	0.358	0.348
標準偏差	-	0.049 6	0.074 6
分散	-	0.002 46	0.005 56
算術平均粗さ Ra	μm	1.82	2.51
十点平均粗さにおける最大粗さ Rz	μm	7.95	11.5

(注) 各加工幅の値は円周上の 12 か所の計測結果を示す。

のずれは、切込み量換算で約 0.04 mm に相当する。原因としては、ロボット繰返し位置誤差、角度ずれ、がたなどの影響による工具の逃げ、各種誤差の累積などが考えられる。しかし、 0.04 mm は現状使用するロボットのもつ繰返し位置精度に相当する量で、現状の装置での精度限界に近い値が出ているといえる、また、面取り加工で求められる寸法精度に対しても、十分小さな誤差と考えられる。

幅のばらつきについては、学習あり/なしで比較すると学習ありの方が少ない結果になった。また加工面粗さでは学習あり/なしとも目標を満たしたが、学習ありの方が、粗さが小さく、学習制御による補正効果が出ていると考えられる。

6.2 各種形状への適用性確認試験

構築した試験システムで、実際の仕上げ作業例を参考に各種形状への適用性を確認するための試験を実施した。

一つ目の例として、第 11 図に示すような円筒上の穴 (長穴) エッジを模擬した試験片で加工を行った。加工後の試験片の面取りエッジ外観を第 12 図に、幅・面粗さの結果を第 2 表に示す。

加工の結果、加工幅は円弧加工時と同様に目標値より若干小さめになり、粗さは目標値を満たした。

もう一つの例として、ギアやスプラインなどの V 字溝を模擬した試験片で加工を行った。加工後の試験片のエッジ外観を第 13 図に示す。加工結果はこれまでと同様の傾向を示し、十分に加工できることを確認した。

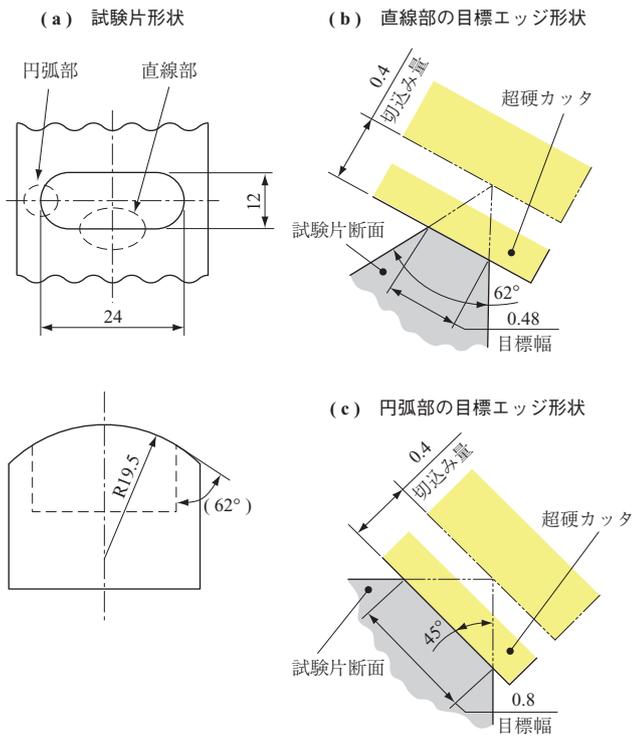
7. 結 言

熟練技能を要する複雑形状をもつ部品のエッジ部の面取りや、曲面などの表面を磨く仕上げ作業などを自動化するため、ロボットによる力制御システムを構築した。また、寸法制御と作業速度を両立させる手法を提案し、加工試験によって有効性を確認した。

今後は、実際の手仕上げ作業の自動化に向け、本技術の適用・システム化を進める。実部品はさまざまな形状をもち、ばりの発生状況なども多様である。このため実適用と平行して、各種形状に対応するための技術やロボスタ性向上手法の開発なども進めていく。

参 考 文 献

- (1) 小野一也, 林 俊寛, 藤井正和, 柴崎暢宏, 曾根原光治: 産業用ロボットの新しい展開 IHI 技報 第 49 巻 第 1 号 2009 年 3 月 pp. 33 - 37
- (2) 柴崎暢宏: 精密組立ロボットシステムの最新事例 ロボット 第 205 号 2012 年 3 月 pp. 11 - 14
- (3) 人の手感をロボットで実現!! 目で距離を掴み, 手感覚で作業する, 次世代産業ロボットの開発 IHI 技報 第 52 巻 第 1 号 2012 年 3 月 pp. 12 - 15
- (4) 林浩一郎, 西嶋和之, 曾根原光治, 村上弘記: ロボットアームによる精密仕上げ加工技術の研究 第 29 回日本ロボット学会学術講演会論文集 3G1-1 2011 年 9 月
- (5) ヤマハファインテック株式会社 (オンライン) 入手先 <<http://www.yamaha.co.jp/finetech/index.html>> (参照 2012-02-17)
- (6) 株式会社 KREUZ (オンライン) 入手先 <<http://kreuz.jp/>> (参照 2012-02-17)
- (7) 真鍋隆夫, 亀谷昭彦, 岩本雅弘, 檀上耕一, 菱田裕三, 二宮 敬: 航空機用エンジン-部品仕上げロボットの開発 川崎重工技報 第 143 号 2000 年 4 月 pp. 62 - 67
- (8) 戸田健司, 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 (円筒面形状の穴加工の場合) 日本機械学会論文集 C 編 第 65 巻 第 631 号 1999 年 3 月 pp. 1 288 - 1 294
- (9) 武藤伸洋, 下倉健一郎: 接触情報センシングを用いた力制御の教示と制御 日本ロボット学会誌 第 15 巻 第 5 号 1997 年 7 月 pp. 744 - 751



第 11 図 目標エッジ形状 (円筒上の長穴) (単位: mm)
Fig. 11 Target shape of edge : Slot on a cylinder (unit : mm)



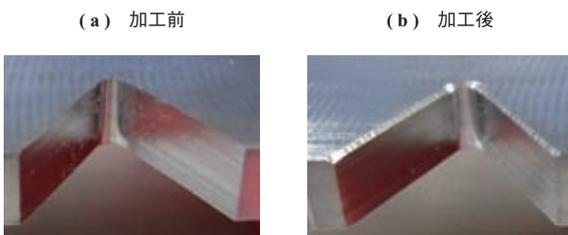
第 12 図 面取りエッジ外観 (円筒上の長穴)
Fig. 12 Overview of chamfered edge : Slot on a cylinder

第 2 表 面取り結果 (円筒上の長穴)

Table 2 Results of chamfering : Slot on a cylinder

評価項目	単位	円弧部	直線部
最大加工幅	mm	0.335	0.571
最小加工幅	mm	0.284	0.517
平均加工幅	mm	0.310	0.546
算術平均粗さ Ra	μm	1.2 ~ 1.8	

(注) 加工幅の値は円弧上の 7 か所, 直線上の 9 か所の計測結果を示す。



第 13 図 加工エッジ外観 (V 字溝)
Fig. 13 Overview of chamfered edge : V-shaped groove

- (10) 永田寅臣, 渡辺桂吾, 楠本幸裕, 安田仁徳, 津田邦博, 塚本 治, 尾本正明, 芳賀善九, 長谷哲男: 位置フィードバックループと力フィードバックループの弱干渉を用いたハイブリッド制御法(金型磨きロボットへの適用) 日本機械学会論文集 C 編 第 71 巻 第 701 号 2005 年 1 月 pp. 178 - 184
- (11) 吉川恒夫: ロボット制御基礎論 初版 コロナ社 1988 年 pp. 190 - 195
- (12) 南條義人, 有本 卓: ロボット軌道追従のための学習制御系の設計指針 日本ロボット学会誌 第 11 巻 第 7 号 1993 年 10 月 pp. 115 - 123