

原著論文

バリ取りロボットへの圧電アクチュエータの応用

Robotic deburring by Using Piezo Electric Actuator

学	甲田	信裕	(山形大学)	正	那須	康雄	(山形大学)
非	水戸部	和久	(山形大学)	非	若林	健太郎	(山形大学)
非	本田	靖	(山形大学)	非	佐藤	卓哉	(山形大学)

Nobuhiro KOUDA, Yamagata University, Jonan 4-3-16, Yonezawa-shi, Yamagata
 Yasuo NASU, Yamagata University
 Kazuhisa MITOBE, Yamagata University
 Kentarou WAKABAYASHI, Yamagata University
 Yasushi HONDA, Yamagata University
 Takuya SATO, Yamagata University

Robotic deburring of grass fiber reinforced plastic (GSRP) parts was investigated experimentally. In this task, the robot moves the grinding wheel at a constant speed. The task involves significant force interaction between the grinding wheel and the GFRP part. When the grinding wheel encounters a large burr, the normal force increases and the grinding wheel separates from the part. An active tool-holder system was developed for precise and rapid deburring by using a force control technique in order to guarantee stable GFRP deburring process and to get a 45 degree chamfer of $C0.5 \pm 0.2\text{mm}$. In this deburring strategy, the active tool-holder pushes the grinding wheel to the part according to the normal force, so the separation of the wheel from the part stays small. Experimental results were given to the effectiveness of the ATH system for robotic deburring of GFRP parts.

Key Words : GFRP, Robotic Deburring, Grinding Wheel, Active Tool-Holder, Piezo Electric Actuator, Force Control Technique

1 緒言

ロボットによるグラインダかけ作業は、溶接ビードの除去 [1]、機械加工バリ取り [2]、プレス型仕上げ等の作業の自動化の一環として研究が盛んに行われている。ここで加工対象として取り扱うガラス繊維強化樹脂 (GFRP) プレス成形品は型の設計条件によりパーティングラインからの樹脂及びガラス繊維の流出による形状、寸法の不規則なバリが発生する。現状では、NC工作機械により大きいバリを除去した後、手作業により仕上げられているが、粉塵が多く 3K 作業の一つとして自動化が強く望まれている。

ロボットによるバリ取り作業では、ロボット系のコンプライアンスが問題となる。バリの有無、バリサイズの不規則さのため研削面が変動し、一様な規定量のチャンファ品位を得ることができなくなる。そこで金属のバリ取りでは、ソフト的に仮想パラメータを設定しロボットを動作させる仮想コンプライアンス制御法 [3, 4] が提案されている。この方法は複数パスの繰り返しによるバリ取り作業を行う必要がある点と仮想パラメータの設定が難しい欠点がある。また、研削抵抗に

応じて工具送り速度を制御する方法もある [5]。これは法線研削抵抗を一定に制御し、材料除去速度 MRR (Material Removal Rate) を一定にするよう送り速度を制御するものである。この場合は、バリによる接線研削抵抗の急激な増減に応じて送り速度を変化させるので、ロボット系の振動を誘起し加工面が荒れる。また、減速時にスパークアウトを起こす可能性もある。他にも種々研究が行われているが実用化が難しい。

一方、小型、高速応答、微小変位、大出力の特性を有する積層型圧電アクチュエータを利用してダイヤモンド工具先端を位置制御し超精密切削が行われている [6, 7]。

そこで、本研究ではバリ取り時の作用力に応じて工具を工作物に適切に作用させてバリの有無やバリサイズの変化に伴い砥石切込み量を変化させ、一様なチャンファを得るためのツールホルダシステム (アクティブツールホルダ (ATH)) を積層型圧電アクチュエータを用い開発した。これを用いて、5 軸垂直多関節形ロボットによる GFRP プレス成形品の面取り (目標品位 $C0.5 \pm 0.2[\text{mm}]$) を 1 パスにて実現するための A

THの駆動法を検討するとともに、工具送り速度制御方式と比較し、バリ取りロボットでのATHの有効性を確かめた。

2 バリ取りロボットシステム

GFRPバリ取りロボットシステムに5軸垂直多関節形ロボットを使用している。このロボットは腰、肘、手首の関節にコンカルギアを使用している。コンカルギアは、バックラッシュを調整し高精度の伝達ができるため、ロボットは $\pm 5[\mu\text{m}]$ の高精度の位置決めが可能である。また、ロボットとツールホルダとの間に6軸クロスビーム型力センサが取り付けられている。センサ出力はストレインアンプ、ローパスフィルタを通り、12bitのA/DコンバータからDMA転送でサブコンピュータへ送られる。演算して得られた研削抵抗をもとにロボットの動作または、ツールホルダの制御をする。Fig. 1にGFRPのバリ取りシステムのダイアグラムを示す。

ロボットによる研削では、リアルタイム制御が必要となり、CPUには、高速なものが求められる。ホストコンピュータ(R3000+R3010, 25MHz)、サブコンピュータ(i80286+i80287, 12MHz)があり、それぞれのデータ通信には、デュアルポートRAMを通して行っている。力の演算、ロボットの補間動作の演算などは、ホストコンピュータで行い、サブコンピュータでは、時間管理、各関節のパルスジェネレータへの指令、圧電アクチュエータ制御を行っている。

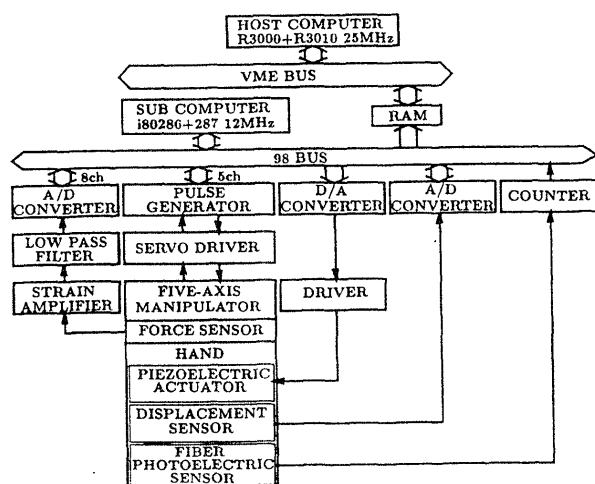


Fig.1 Schematic of the Robot Control System

3 アクティブツールホルダ (ATH)

開発したATHは積層型圧電アクチュエータの高速応答性と大発生力を利用して、グラインダ先端の砥石の位置補正が可能である。

Fig. 2にATHを示す。エアグラインダ(エア圧 $3[\text{kgf}/\text{cm}^2]$ $30000[\text{rpm}]$)、積層型圧電アクチュエータ、渦電流式変位センサ、コイルスプリング、オイルダンパ、ファイバー式光電スイッチにより構成されている。研削砥石には、WA砥粒、粒度#80、先端角 45° の円錐型砥石を使用している。

圧電アクチュエータの最大変位量は、 $100[\text{V}]$ 印加時に $15[\mu\text{m}]$ である。グラインダ先端の変位を大きくするために、圧電アクチュエータを二個直列に接続し、さらに「てこ」の原理で拡大している。砥石先端の最大変位は $0.28[\text{mm}]$ である。Table 1に圧電アクチュエータの規格を示す[8]。ヒステリシス特性、残留変位は個々の圧電アクチュエータにある渦電流式変

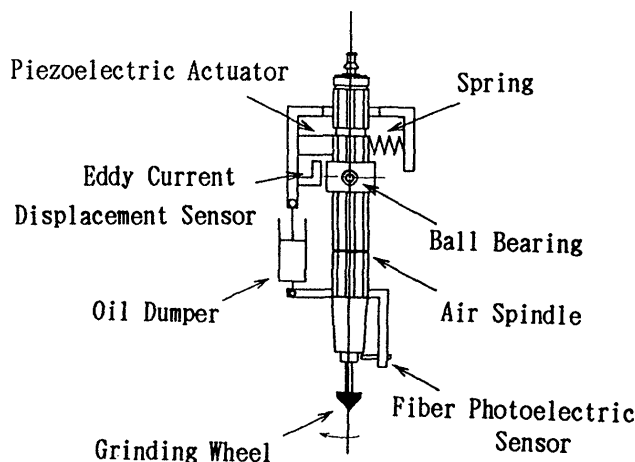


Fig.2 The Active Tool-Holder

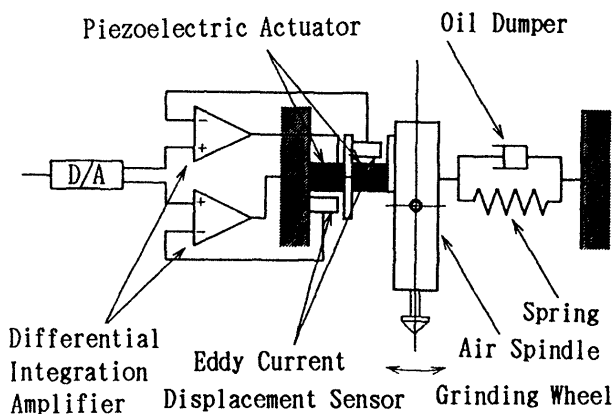


Fig.3 The Control System of the Active Tool-Holder

Table 1 Physical Property of the Actuator[8]

Relative Dielectric Constant	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	5440
Electro-Mechanical Coupling Coefficient	K_{33}	0.68
Young's Modulus	Y_{11}^E Y_{33}^E	$6.8 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ $5.5 \times 10^{10} \text{N/m}^2$
Piezoelectric Constant	d_{31} d_{33}	$-287 \times 10^{-12} \text{m/V}$ $635 \times 10^{-12} \text{m/V}$
Curie Temperature	T_c	145 °C

位センサの位置信号をフィードバックし、差動積分器で圧電アクチュエータの印加電圧を決定することで補償している。Fig. 4にヒステリシス特性、Fig. 5に圧電アクチュエータとグラインダ先端におけるステップ応答を示す。この結果、高速応答で、正確な位置決めが可能な、ATHを開発した。なお、このATHでは圧電アクチュエータは「てこ」に固着されていない。したがって、アクチュエータが収縮時に「てこ」から遊離することがある。ATHの周波数特性をFig. 6に示す。したがって、ATHを高周波で振動的に駆動させることはできない。

4 GFRPの材料除去速度と研削抵抗

Fig. 7に円錐型砥石による研削概観、研削抵抗座標系を示す。一般に、研削抵抗の法線分力 F_n [N]は接線分力 F_t [N]の約2倍と知られている。また、工作物のGFRPの面取りでは発生抵抗が1 [N]前後と小さいことから、本バリ取り研削システムにおいても法線分力 F_n を制御に用いた。ここで、作業座標系に関する研削抵抗成分 F_n 、 F_t と基本座標系に関する研削抵抗成分 F_x 、 F_y との関係は

$$\begin{bmatrix} F_t \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

とした。

GFRPのMRR Q [mm^3/s]と研削抵抗 F_n [N]の関係求めた。

Fig. 8にATH無駆動時の法線研削抵抗とMRRの関係を示す。これより次式が求められた。

$$F_n = K_1 \cdot Q + K_2 \quad (2)$$

$$K_1 = 0.472 [\text{Ns/mm}^3], \quad K_2 = 0.254 [\text{N}]$$

この式を検証するためにArchard[9]の摩耗係数 K [-]を求め研削状態を判断する。一般的に良好な研削状態における摩耗係数 K は $10^{-2} < K < 10^{-1}$ となる。ATH無駆動時の摩耗係数 K は

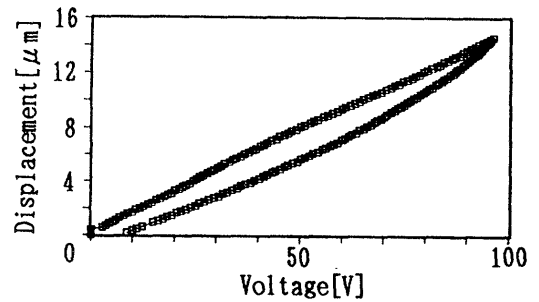


Fig. 4 Hysteretic Behavior of the Piezoelectric Actuator

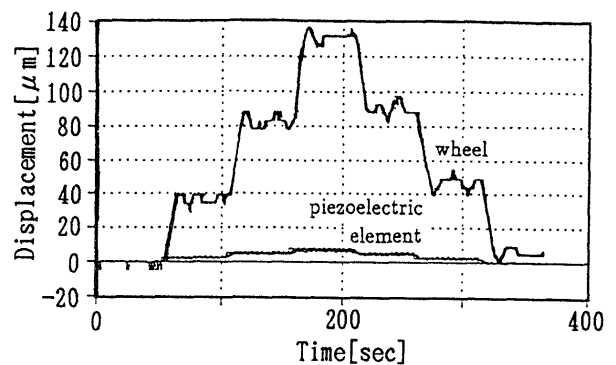


Fig. 5 Response of the Active Tool-Holder

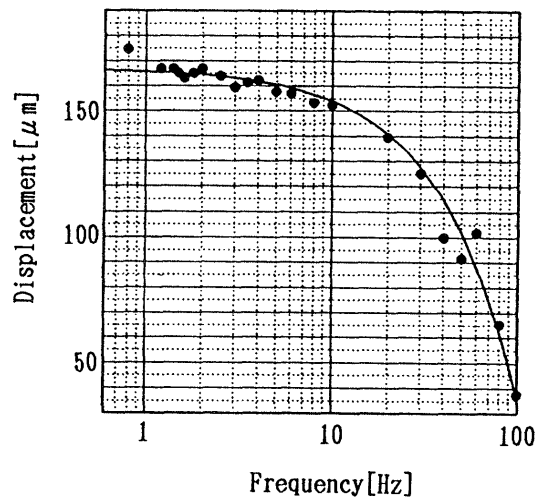


Fig. 6 Frequency Characteristics

$$K = 3.59 \times 10^{-3} \quad (3)$$

となった。この K はおおむね良好研削状態に近い。摩耗係数 K が低い値となったのは、樹脂の砥石への移着が原因と考えられる。

5 研削法

本研究は、1回のバリ取り作業で目標の研削面を得る事を目的としている。そのための研削法を提案し実験を行った。

5. 1 砥石先端位置補正方式

一定速度での研削中、バリが存在する部分では、バリの研削抵抗により、砥石先端が基準位置から逃げる。そのため、研削面に凹凸が残ってしまいチャンファ品位の許容範囲を越えることがある。そこで、バリの量に応じて砥石先端位置の補正を行う制御について考える。ここでは、研削抵抗の法線分力 F_n からバリ部の研削分力 F_b を算出することにより、砥石先端位置補正量を決定する。正規の位置から砥石を押し込むときは、力覚センサより観測される研削抵抗の法線分力 F_n は、チャンファ部の研削分力 F_c とバリ部の研削分力 F_b 、押し込みによって発生する力 F_p の合力と考えられる。砥石先端変位 x [μm] と F_p の関係は実験より、

$$F_p = K_n \cdot x \quad (4)$$

$$K_n = 1.28 \times 10^{-3} \text{ [N}/\mu\text{m}]$$

であり、この式より F_p を求める。バリ部の研削分力 F_b は

$$F_b = F_n - F_c - F_p \quad (5)$$

となる。

砥石先端位置補正量 d_p をバリ部の研削分力 F_b に比例して与えることにより、砥石先端の位置補正を行う。そのブロック線図を Fig. 9 に示す。

5. 2 送り速度制御方式

グラインダの送り速度はMRRを一定に保つ様に制御され、MRRと研削抵抗が比例すると仮定して、研

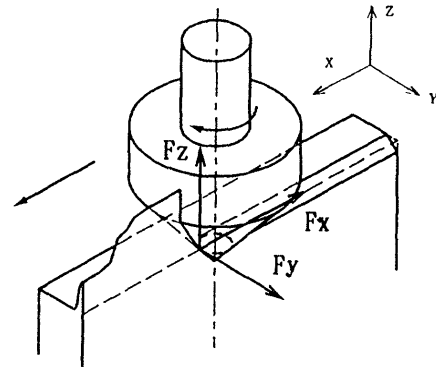


Fig. 7 Appearance of Deburring an Edge

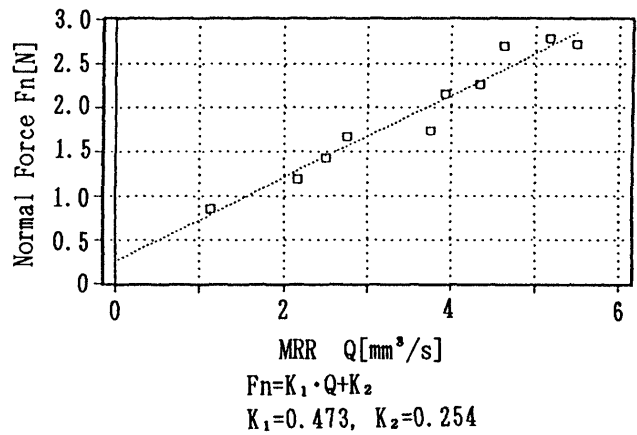


Fig. 8 The Relation Between the Normal Force and the Material Removal Rate(MRR)

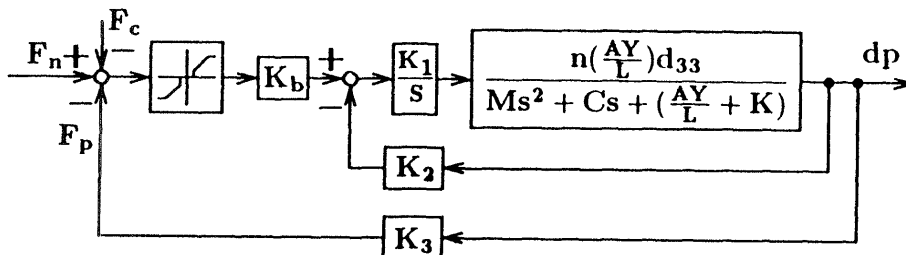


Fig. 9 The Controller of the Piezoelectric Actuator

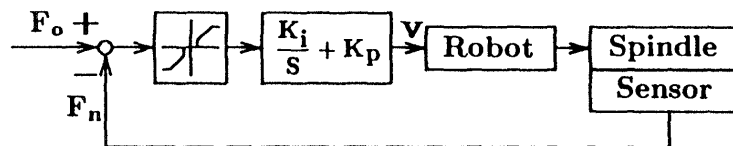


Fig. 10 The Controller of the Robot Velocity

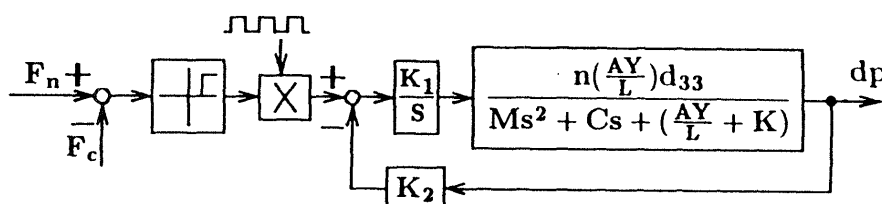


Fig. 11 The Controller of the Piezoelectric Actuator(with Vibration)

削抵抗を送り速度にフィードバックすることが行われる。

今回行った実験では、Fig. 10のブロック線図の様に送り速度の制御を行った。Fig. 10において、 F_0 は目標研削抵抗でチャンファ部の研削抵抗に等しい、 F_n はセンサより測定される研削抵抗の法線分力 F_n である。実験において、センサノイズの影響を除去するために不感帯を挿入している。また、補償要素として比例積分要素を用いている。良好な研削面を得るためには、設計ゲイン K_i 及び K_p をバリの状況により適宜選択する必要があるものと考えられる。

5. 3 振動的押し付け制御方式

MRRと研削抵抗法線分力の関係から求めたチャンファ部の目標研削抵抗 F_c を越える法線分力 F_n が測定された場合に、圧電アクチュエータを振動させて砥石を研削面に作用させる方式である。振動はデューティ比50%、周波数17.8[Hz]で与える。Fig. 11にそのブロック線図を示す。

6 実験結果

GFRPプレス成形品に生じるバリは直線部分にガラス繊維を多く含んだ平均根元厚さ0.2[mm]、平均バリ高さ2.5[mm]、の大きいバリと、ガラス繊維を余り含まない、平均バリ高さ6[mm]の小さいバリが存在する。

直線領域での大きいバ리를想定して、バリのモデルとしてGFRPプレート(厚さ2.5[mm])に高さ1.0[mm]及び0.5[mm]、長さ10[mm]の2種類のステップ状のバリを作った。これらのテストピースを用いてそれぞれの研削方法の有効性を検討した。

このテストピースは、X-Yテーブル上のベンチバイスに固定する。Fig. 12に研削時の外観を示す。研削はダウンカットで行われ、研削長さは100[mm]である。研削後の実切入み深さの変化をレーザ変位計で測定した。ここで実切入み深さとはバリのない部分でのエッジからの切入み深さである。

6. 1 プレイバック動作のみによるバリ取り

ロボットに直線補間動作させ、ATHの位置補正や研削抵抗に応じて送り速度制御を行わない方式でGFRPモデルバリの研削を行った。バリ高さ1.0[mm]、グラインダの送り速度5.0[mm/s]での研削中の研削抵抗 F_x 、 F_y 、 F_z と実切入み深さ D_{act} をFig. 13に示す。チャンファ量は0.66~0.09[mm]である。Cの最小値(C0.09)側がバリ部の値であり、バリ部での削り残しが大きくなる事が判る。これよりバリ高さ又は送り速度を

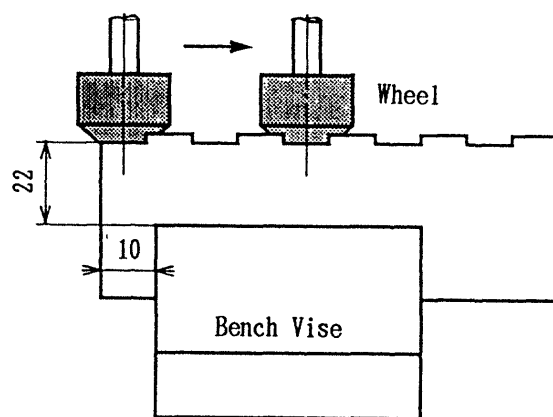
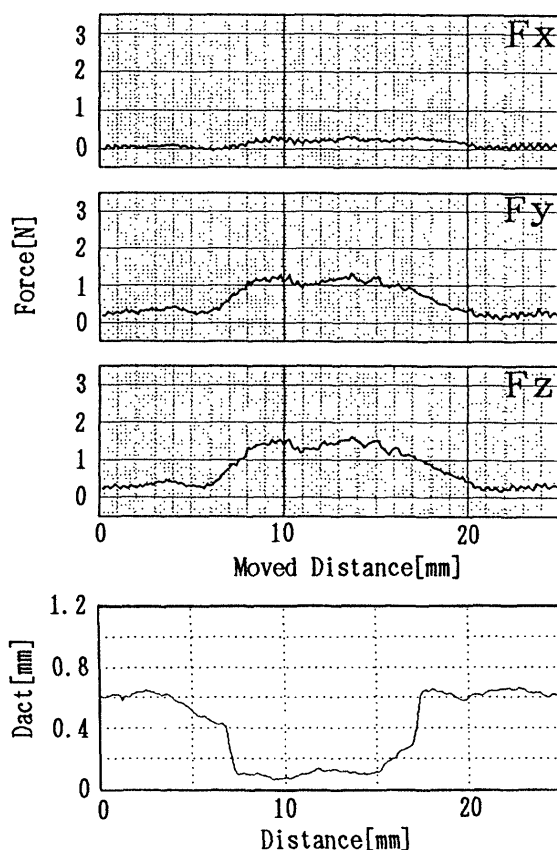


Fig. 12 Set-up of Test Piece



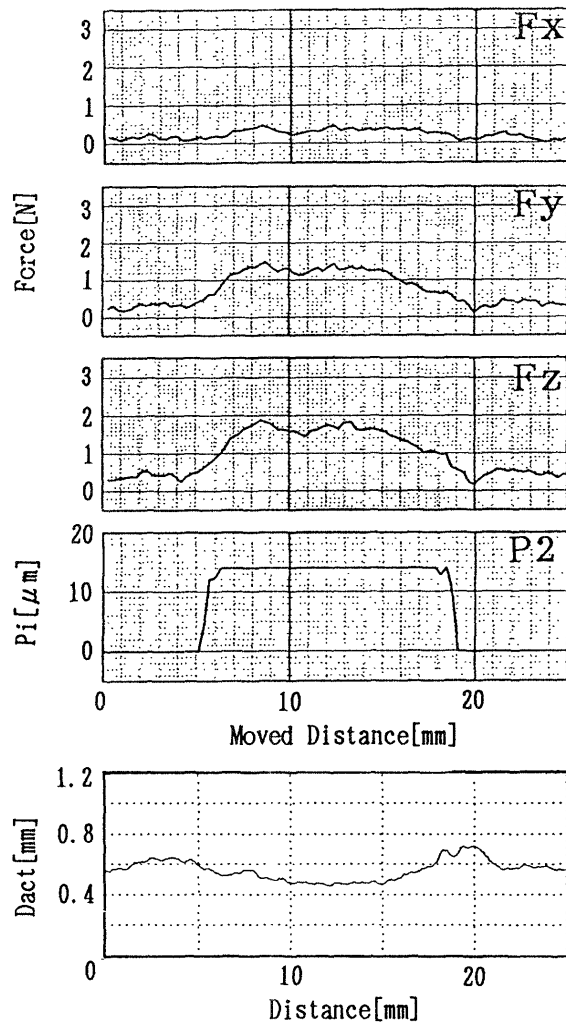
Finished Chamfer : C0.66~0.09
 Height of Burr : $h_b = 1.0$ [mm]
 Tool Feed Speed : $V = 5.0$ [mm/s]

Fig. 13 Typical Deburring Test with no Compensation

大きくした場合規定のチャンファ品位を満足できなくなる。

6. 2 砥石先端位置補正制御

5. 1の補正方式に従いATHを用いて研削抵抗に応じて砥石先端の位置補正を行った場合の研削抵抗



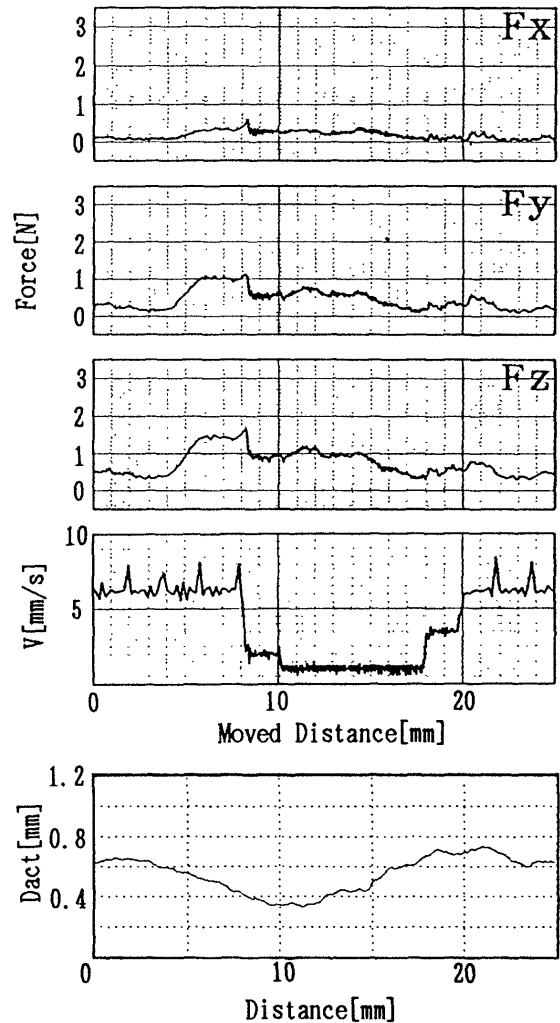
Finished Chamfer : $C0.65 \sim 0.47$
 Height of Burr : $h_b = 0.5[\text{mm}]$
 Tool Feed Speed : $V = 10.0[\text{mm/s}]$

Fig. 14 ATH Deburring Test (without Vibration)

圧電アクチュエータの変位量 P_i [μm] 及び実切込み深さをFig. 14に示す。バリ高さ $0.5[\text{mm}]$ 、グラインダ送り速度 $10.0[\text{mm/s}]$ の場合である。研削抵抗に応じて圧電アクチュエータを駆動し、砥石先端位置を補正していることが確認できる。また、バリ部の終端で過剰な切込みが生じたが、チャンファ量 $0.65 \sim 0.47[\text{mm}]$ と切り残しも少ない。ATHを用いることで、先のプレイバック動作のみの場合の2倍の加工速度を達成可能であった。

6. 3 グラインダ送り速度制御方式

5. 2の方式に従い、バリ高さ $0.5[\text{mm}]$ 、グラインダ送り速度を $1.0 \sim 6.0[\text{mm/s}]$ の間で制御することによるバリ取り研削結果をFig. 15に示す。バリの有無に



Finished Chamfer : $C0.65 \sim 0.35$
 Height of Burr : $h_b = 0.5[\text{mm}]$
 Tool Feed Speed : $V = 1.0 \sim 6.0[\text{mm/s}]$

Fig. 15 Typical Deburring Test

with Controlling the Robot Velocity

かかわらず研削抵抗はほぼ一定値を保ち、チャンファ量も $0.65 \sim 0.35[\text{mm}]$ と許容範囲内におさまった。しかし、GFRPのバリ取り研削では研削抵抗が送り速度の変化より研削断面積の変化に敏感であり、送り速度制御はGFRPバリ取りでは効果的でなかった。かえって、送り速度変化による加工能率の低下とロボット系の振動による加工面品位の低下をもたらす。

6. 4 振動的押し付け制御方式

5. 3の方式に従い、ATHを振動的に駆動して砥石先端を工作物に作用させた結果をFig. 16に示す。これはバリ高さ $1.0[\text{mm}]$ 及びグラインダ送り速度 $5.0[\text{mm/s}]$ と他の制御法より過酷な条件に於いて研削したものである。チャンファ量 $0.62 \sim 0.39[\text{mm}]$ と良好な結果を

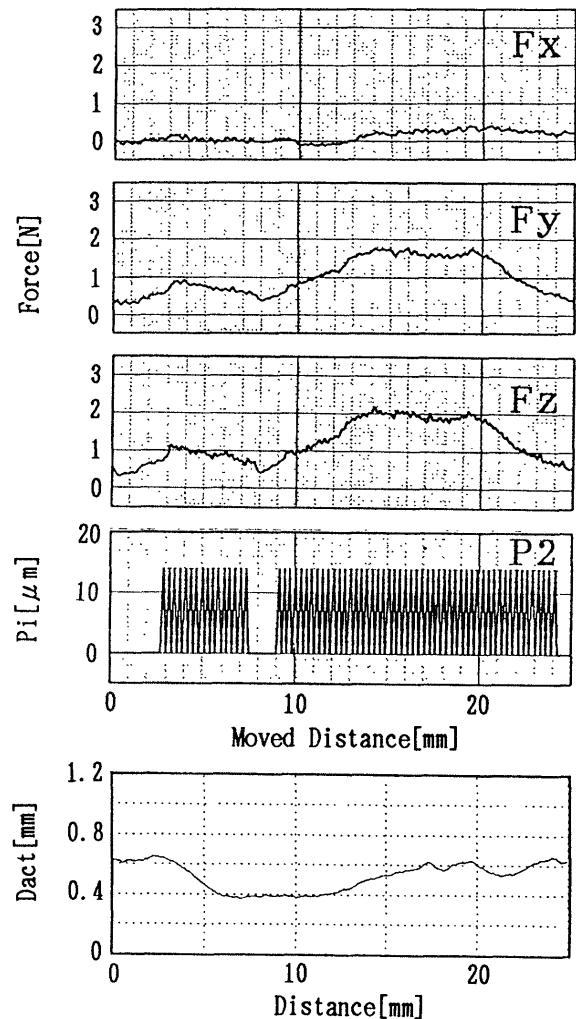
得た。この振動的押し付け方式が何故良好なバリ取り研削結果をもたらすのかは検討中である。振動的ATH駆動時のMRRと研削抵抗 F_n との関係を測定したところ、(2)式における係数 $K_1=0.204$ [Ns/mm³], $K_2=0.070$ [N]を得た。これより摩耗係数 K を求めると $K=5.93 \times 10^{-2}$ となり、振動により摩耗係数 K の向上がみられ良好な研削の領域にある。これは、振動研削法の例[10]もあるとおり、GFRPで生じ易い樹脂の砥石面へ移着が、振動により抑制されたと判断され、GFRPのバリ取りでの削り残しを少なくしたと言える。

7 結言

ロボットによるバリ取りでは、ロボット系のコンプライアンスによる削り残しが問題になる。そこで、バリの有無やバリサイズによる研削抵抗をもとに砥石先端位置をリアルタイムに制御して、バリ部では切込み量を増加させることで、一様なチャンファを得るためのツールホルダ(ATH)を積層型圧電アクチュエータを用いて開発した。また、そのATHの制御には研削抵抗の法線分力成分を用いて行う方式を示した。ATHを5軸垂直多関節形ロボットに装着してGFRPのモデルバリ試料についてバリ取り作業を行ったところ、プレイバック方式及びグラインダ送り速度制御方式に較べてATHが、バリ部でも削り残しの少ない良好なチャンファを得るのに有効であることが判った。特に、振動的に駆動し砥石先端を工作物に作用させると、一段上のチャンファ品位を高能率で得ることの可能性が明らかになった。(1993年6月9日受付)

参考文献

- [1] D. E. Whitney, A. C. Edsall, A. B. Todtenkopf, T. R. Kurfess and A. R. Tate, Development and Control of an Automated Robotic Weld Bead Grinding System, ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol. 112, (1990), pp. 166-176.
- [2] M. G. Her, H. Kazerooni, Automated Robotic Deburring of Parts Using Compliance Control, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, (1991), pp. 60-66.
- [3] 平林・杉本・荒井・坂上, 多自由度ロボットの仮想コンプライアンス制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 22, No. 3, (1986), pp. 343-350.
- [4] 柏木, バリ取りグラインダがけ, 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 3, (1991), pp. 354-358.
- [5] 野田・鶴瀬, 鋳バリ取りロボットの計測制御, システム制御情報学会論文誌, Vol. 1, NO. 5, (1988), pp. 153-159.
- [6] 清水・吉川・竹内・稲田・佐田, 積層圧電素子を用いた工具微動装置の開発, 昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 439-440.
- [7] 本西・原・吉田, 微小切り込み装置の開発, 精密工学会誌, Vol. 57, NO. 12, (1991), pp. 59-64.
- [8] Catalog of Ceramics, TOKIN Co. (Japan).
- [9] I. F. Arachard, W. Hirst, Proc. Roy. Soc., 236, A, (1956), 397.
- [10] 隈部, 超音波縦振動といしによる内面研削に関する研究, 日本機械学会論文集(第3部), Vol. 27, No. 181, (1961), pp. 14042-1411.



Finished Chamfer : $C0.62 \sim 0.39$
 Height of Burr : $h_b = 1.0$ [mm]
 Tool Feed Speed : $V = 5.0$ [mm/s]

Fig. 16 ATH Deburring Test (with Vibration)