自由曲面を目標形状とする溶接ビード仕上げロボットの開発

谷 本 圭 司^{*1} 則 次 俊 郎^{*2}

Development of a Grinding Robot for Weld Beads to Create a Free-Form Surface

Keiji Tanimoto^{*1} and Toshiro Noritsugu^{*2}

Weld beads, which exist on the corner of an automobile doorframe, must be grinded as if there are no weld beads on it. Grinding task is usually done by skilled workers. This weld bead has joint bumps and welding distortions around the joint area. These bumps and distortions have made it difficult to develop a practicable grinding robot system. We think that grinding task should create a smooth Free-Form surface around the weld bead area, not grinding off the weld beads only. In this paper, we propose a new grinding method, which consists of four distinctive techniques. The first technique is to measure the shape of the weld bead area using a high speed CMM (Coordinate Measuring Machine). The second technique is to estimate a target Bezier surface based on the measurement data. The third technique focuses on calculating an optimum robot trajectory based on the grinding volume and the grinding belt properties. Finally, with the fourth technique, the robot will be precisely controlled to trace the calculated trajectory. This paper also presents the experimental results of grinding accuracy using this newly developed robot system.

Key Words: Bezier Surface, Weld Bead, CMM, Grinding Robot

1. は じ め に

自動車のドアフレームには、コーナ部を TIG 溶接 (Tungsten Inert Gas) などにより接合しているものがある。この溶接により生じる溶接ビードは熟練作業者の手作業により、あたかも溶接されていないように仕上げられている。この溶接ビード仕上げ作業は、典型的な 3K 作業であるため、長年ロボットによる自動化が望まれているが、実用的なシステムはいまだ開発されていないのが現状である。

この溶接ビード仕上げ作業をロボットにより自動化することが難しい要因は主に 2 点ある。第 1 点として、この溶接は約 0.8 [mm] の薄い鉄板を突き合わせた状態で溶接するため、接合部に Fig. 1 のような接合部段差を ± 0.2 [mm] 程度生じることがある。また溶接歪により溶接ビード周辺部が変形する。これらの接合部段差と溶接歪は溶接ビードごとに異なり予測もできないため、ティーチング・プレイバックによるロボット制御では、自動仕上げを実現することができない。第 2 点は、人に溶接した痕跡を認識させないためには、溶接ビード周辺部を滑らかな自由曲面形状に仕上げることが必要だが、産業用ロボットによる自由曲面加工は難しいのが現状である。よって、溶接ビ-

ード仕上げ作業を自動化するには、ワークごとに異なる三次元形状を測定・認識し、仕上げ動作をするロボットシステムが必要になる。

仕上げ作業の自動化に関するこれまでの研究には、岩代・岡田らが提案するレーザレンジファインダを利用したセンサベーストロボットによるバリ仕上げ研削方法がある [1] [2]。この方法は、溶接ビードの凸部のみを除去するだけならば応用可能だが、接合部段差がある溶接ビード周辺部に滑らかな自由曲面を創成することはできない。また、永田らが提案する CL (Cutter

Fig. 1 Joint bump of doorframe

原稿受付 2004 年 8 月 10 日

^{*1}コアテック株式会社

^{*2}岡山大学工学部

^{*1}CORETEC INC.

^{*2}Faculty of Engineering, Okayama University

Location) データに基づく力制御ロボットサンダ [3] や、井上らが開発したマスタスレーブ方式ティーチングによる仕上げロボット [4] では自由曲面加工は可能だが、溶接ビードごとに異なる接合部段差・溶接歪に対応することはできない。

一方、仕上げ作業の現場においては、パウダプラズマ溶接により、溶接歪を少なくしたり、溶接までの各工程を解析し、接合部段差を最小化する工夫などがされている。しかし、これらの方法は、仕上げ作業を軽減することに成功しているものの、仕上げ作業自体をなくすることはできていない。また、プレスドアのように溶接自体がないものもあるが、コスト的に有利なコナ部を溶接したドアフレームは、大衆車を中心に数多く生産されているのが現状である。そのため、仕上げ作業は熟練作業者に頼っており、溶接ビード自動仕上げ装置へのニーズは強い。

2. 溶接ビード周辺形状測定装置の開発

筆者らは、溶接ビード自動仕上げ装置の開発には溶接ビード周辺形状の解析が重要と考え、溶接ビード周辺形状を測定する装置として、レンジファインダと1軸スキャンニングユニットから構成される Fig. 2 のような測定装置 (CMM, Coordinate Measuring Machine) を開発した [5]。この装置は溶接ビード周辺部 75×75 [mm] の範囲を 1.0×0.5 [mm] の格子状に約 5 秒で測定することができる。測定精度は格子点あたり $\pm 50 [\mu\text{m} (3\sigma)]$ である。この装置による自動車ドアフレーム測定結果の例を Fig. 3 に示す。この測定結果は分かりやすいように高さ方向に 10 倍拡大し 3D 表示してある。

Fig. 2 CMM for weld bead

Fig. 3 Example of measurement data ($\times 10$)

この装置を利用して、接合段差を測定した結果について、接合部段差が小さい断面線の例を Fig. 4 に、接合部段差が大きい断面線の例を Fig. 5 に示す (断面位置は Fig. 1 図示部)。Fig. 4 のように接合部の段差が小さい場合は、溶接ビードを除去するだけで、滑らかな曲面を得ることが可能である (ただしこのような接合部段差が小さいワークは稀にしかない)。Fig. 5 のように接合部の段差が大きい場合は、溶接ビードを除去する以上に、接合部段差が滑らかになるような曲面に仕上げる必要がある。このような調査・解析により、溶接ビードの仕上げとは、「溶接ビードを除去」するのではなく、「溶接ビード周辺に滑らかな自由曲面を作る」ということが分かり、自由曲面処理技術を利用した溶接ビード自動仕上げ方法を提案するに至った。

3. 提案する溶接ビード仕上げ方法

3.1 自由曲面を応用した仕上げ方法

本論文では、ワークごとに異なる接合部段差、溶接歪に対応した溶接ビード仕上げ方法として、Fig. 6 に示すような方法を提案する。この方法は、第 1 に三次元測定機を用いて溶接ビード周辺形状を高速に測定する。第 2 に測定結果の点群データから、ベジエ曲面を利用して仕上げ目標形状を計算する。第 3 に測定結果と仕上げ目標形状の差分から研削量を計算し、研削量に応じたロボット動作軌道を計算する。最後に計算されたロボット動作軌道をトレースするようにロボットを制御し、溶接ビード部を滑らかな自由曲面に仕上げる方法である。他の方法として、ドアフレーム設計時の CAD データを利用する方法も考えられるが、ドアフレームの現実的な製作精度や、母材厚さが約 0.8 [mm] と薄いことを考慮すると、CAD 形状に合わせたのでは削り込みが深くなり、穴空きや強度不足が生じるため、実用的な方法ではないと考えている。

3.2 システムの構成

この仕上げフローを実現するために、Fig. 7 に示すようなシステムを開発した。このシステムは、三次元形状の測定から

Fig. 4 Example of small joint bump

Fig. 5 Example of large joint bump

Fig. 6 Flowchart of proposed grinding

Fig. 7 Structure of proposed system

ロボット動作軌道計算までをする測定機コントローラ (CMM Controller) と、計算された動作軌道に基づきロボットを制御するロボットコントローラから構成されている。測定機コントローラは、レンジファインダとスキャンニングユニットを制御し溶接ビード周辺の三次元形状を測定するとともに、仕上げ目標形状の計算、研削目標体積の計算、ロボット動作軌道の計算を行っている。計算されたロボット動作軌道データは約 1 [MB] と大きいため、制御盤内の 100 M-LAN を経由してロボットコントローラへ送られる。ロボットコントローラは送られた軌道データを忠実にトレースするように軌道追従制御をしている。ロボットは溶接ビード仕上げ用に開発されたものであり、直交 3 自由度、回転 3 自由度、溶接ビード仕上げ用グラインダなどから構成されている。

4. 仕上げ目標形状計算

4.1 仕上げ目標形状の数値表現

この溶接ビード仕上げ方法では、まず仕上げ目標形状を三次元空間内の曲面として数値表現する必要がある。そこで熟練作業者が仕上げた曲面を測定し、ベジエ曲面の近似曲面を計算したところ、 ± 50 [mm] の精度で近似することができたため、仕上げ目標形状の数値表現方法にベジエ曲面を選定した。次にこの仕上げ目標形状計算は、次の 3 要件を満たす必要がある。第 1 に研削部と非研削部の境界領域を滑らかに接続すること。第 2 に削り込み量が規定値以上にならないこと (約 0.3 [mm] 以上削り込むと強度低下、穴空きの原因になる)。第 3 に測定点より下側に仕上げ目標形状を作ることである。これらの要件を満たした滑らかな自由曲面を表現するため、双 3 次または双 4 次ベジエ曲面を利用した仕上げ目標形状の計算方法について研究を進めた。双 3 次ベジエ曲面は、Fig. 8 のように、16 点の制御点で定義され、曲面上の点は媒介変数 s, t を利用して式 (1) のように表される。なお式 (1) で使われている B_i^n は Bernstein 多項式で式 (2) のようになる。

$$\begin{bmatrix} B_0^3(s) & B_1^3(s) & B_2^3(s) & B_3^3(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02} & C_{03} \\ C_{10} & C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{20} & C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{30} & C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_0^3(t) \\ B_1^3(t) \\ B_2^3(t) \\ B_3^3(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$B_i^n(t) = \frac{n!}{(n-1)!i!} t^i (1-t)^{n-1} \quad (2)$$

Fig. 8 Control points of Bezier surface

4.2 仕上げ目標形状の計算方法

開発した仕上げ目標形状の計算フローを **Fig. 9** に示す。測定結果である溶接ビード周辺形状データは 0.5~2.0 [mm] の格子状データになっており、**Fig. 10** のようにワーク表面側が Z 軸+方向になるように座標変換している。仕上げ目標形状の計算はまずこの測定結果点群データから目標形状計算に不要となる溶接ビード部、ワーク端面部のデータを捨てる (trimming)。次に残された有効測定点およそ 7,000 点から最小二乗法を利用し近似ベジエ曲面を計算する。

測定結果から双 3 次の近似ベジエ曲面を計算するには、求めるベジエ曲面パッチの範囲を決めるコーナ部の 4 制御点 (C_{00} , C_{03} , C_{30} , C_{33}) の x , y 座標値を定義し、 z 座標値は最小二乗法で求める。残りの 12 制御点については、式 (3) の双 1 次線織面 (ruled surface [6]) を用い等分割 (媒介変数 s , t を 0, $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$, 1 に設定) した値とする。このように制御点の x , y 座標値を等分割に設定することにより、近似ベジエ曲面の計算に必要な媒介変数 s , t の値を測定結果の x , y 座標値から容易に求めることが可能になる。双 1 次線織面を利用すると、媒介変数は 2 次式の解となるため高速に計算することができる。ベジエ曲面制御点の x , y 座標値を、**Fig. 10** のように

Fig. 9 Flowchart of calculating target Bezier surface

Fig. 10 Deforming area and fixed area

事前に決めておき、 z の値を最小二乗法で求め近似ベジエ曲面を求めることになる。この計算を約 7,000 点の有効測定点に対して行うことにより、測定結果が真値に対し正規分布する場合、測定数の平方根に応じた精度向上が期待できるため、測定精度 $\pm 50 [\mu\text{m}(3\sigma)]$ の CMM でも、 $\pm 5 [\mu\text{m}]$ 以上の精度で近似ベジエ曲面を求めることが可能となる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-s & s \\ s & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{00} & C_{03} \\ C_{30} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-t \\ t \end{bmatrix} \quad (3)$$

次に、求めた近似ベジエ曲面から、仕上げ目標形状に変形させる計算を行う。この変形計算は、式 (4) のように最小二乗和 (SSE, Sum of Squared Errors) の重み付けを調整することで行う。この式で $\hat{Z}_i$ は目標形状のベジエ曲面、 Z_i は測定結果の Z 軸座標値、 w_i は重みを示している。この式に式 (1) のベジエ曲面の式を代入し最小二乗値となる Z 軸の値を求めている。双 3 次ベジエ曲面の場合、制御点は 16 点となり、求める制御点の Z 軸座標値は、式 (5) のように整理され、 16×16 の行列計算をすれば求めることができる。式 (5) の $[C_{00z}, C_{01z}, \dots, C_{33z}]$ が求める z 軸座標値である。 L_{abcd} は、測定結果の x , y から求めた s , t から計算され、 M_{ab} は s , t と測定結果の z 座標値から計算される。

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (\hat{Z}_i - Z_i)^2 \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} C_{00z} \\ C_{01z} \\ \vdots \\ C_{33z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{0000} & L_{0001} & \dots & L_{0033} \\ L_{0100} & L_{0101} & \dots & L_{0133} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{3300} & L_{3301} & \dots & L_{3333} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} M_{00} \\ M_{01} \\ \vdots \\ M_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$L_{abcd} = \sum_{i=1}^n w_i (B_a^3(s_i) B_b^3(t_i) B_c^3(s_i) B_d^3(t_i))$$

$$M_{ab} = \sum_{i=1}^n w_i (B_a^3(s_i) B_b^3(t_i) Z_i)$$

二乗和の重み w_i は、測定データを **Fig. 10** のように変形を最小限にする固定領域 (Fixed area) と変形させる変形領域 (Deforming area) に分けて設定している。固定領域は、研削部と非研削部の境界領域で、最小二乗和の重み付けを 1.0 に固定し、滑らかな曲面の接続を実現している。変動領域は、基準となる近似ベジエ曲面に対して、下側にある測定点の重み付けを重く、上側にある測定点の重み付けを軽くすることにより、曲面を下げる変形処理を実現している。その後、変形したベジエ曲面に対し研削できない部分 (測定結果が変形後ベジエ曲面より下にある部分) の総体積を求める。この研削できない部分の総体積が規定値を上回った場合は再度変形処理を行う。下回った場合、研削可能と判断し、仕上げ目標形状としている。この計算の過程で削り込み深さが規定値 (約 0.3 [mm]) 以上になった場合は、ワークの強度低下、穴空きの原因になるため、NG ワークとして装置外に出すように使用者に促すようにしている。

このような計算により、研削開始部と非研削部を滑らかに接続するとともに、研削可能な溶接ビード仕上げ目標形状を求めている。

5. ロボットの動作軌道生成と制御

5.1 研削目標体積の計算

溶接ビード仕上げ目標形状が決まると、測定結果と目標形状との差分から研削目標体積を求めることができる。5本のワークに対して研削目標体積とワーク内側の接合部段差を計算した例を **Table 1** に示す。研削目標体積は、接合部段差などにより、2倍以上異なることが分かる。

溶接ビード周辺部を目標形状に仕上げるには、計算された研削目標体積を研削するロボットの動きを実現すればよい。このロボットの動きは、砥石ベルトの単位時間当たり研削量を定量的に把握し、目標とする研削体積に応じてグラインダ送り速度を加減速するものとなる。つまり、研削体積が多い部分はゆっくりとグラインダを送り、研削体積が少ない部分は早くグラインダを送る。このようなロボットの動きを作るには、砥石の単位時間研削量の定量化が重要となる。なお、砥石は磨耗や変形の少ないベルトタイプ（砥石ベルト）を利用した。

5.2 砥石ベルト単位時間研削量の定量化

砥石ベルトの単位時間研削量は、砥石押し付け力、砥石周速度、砥粒材質（酸化アルミ、ジルコニアなど）、粒度に加え、砥石の製法、寿命などの各種要因によっても異なる。しかし、利用する砥石ベルトを決めれば、砥石押し付け力と砥石周速度を管理することにより、単位時間研削量を把握することが可能になる。そこで、**Fig. 11** のような装置を準備し、単位時間研削量について調べた。このグラインダの砥石押し付け力は、エアフローティング機構により任意の値に設定可能である（砥石押し付け力を力制御する研究 [3] [7] もあるが、このグラインダではエアフローティング機構で代用している）。また、砥石ベルトの周速度は、高周波モータにより任意周速度が設定可能である。試験片には断面 8.0×8.0 [mm] の鉄棒を使っている。単位時間研削量は、研削中に試験片の高さ変化を変位センサで測定することにより求めている。**Fig. 12** は試験片を研削している時の変位センサの出力である。この測定では、砥石が試験片に接触してから 1.0～2.5 秒のデータを収集し、時間に対する変位の傾きを最小二乗法で求めることにより、単位時間研削量を求めている。1.5 秒間で 0.2 [mm] の変位があることから、単位時間研削量が 8.5 [mm^3/s] であることが分かる。この砥石ベルトの単位時間研削量を測定する機能は、砥石ベルトの自動校正ユニットとして装置に組込まれており、10～20 本のワークを研削するごとに、砥石の単位時間研削量の校正を行っている。

Table 1 Sample of grinding volume and bump

Work no.	Volume[mm^3]	Bump[mm]
1	108	0.02
2	131	0.03
3	164	0.09
4	229	0.12
5	252	0.15

Fig. 13 は砥粒材質ジルコニア、粒度 # 60 の砥石ベルトを利用し、砥石周速度が 14.5 [m/s] のときの、砥石押し付け力と単位時間研削量の関係を調べた結果で、**Fig. 14** は、同じ砥石ベルトで押し付け力が 20 [N] 時の、砥石周速度と単位時間研削量の関係を調べた例である。このように、砥石の単位時間研削量は、砥石押し付け力、砥石周速度にほぼ比例の関係にあることが確認できる。

砥石寿命を測定した結果を **Fig. 15** に示す。この測定は、砥粒ジルコニア、粒度 # 100、砥石押し付け力 16 [N]、周速度 14.5 [m/s] の条件下で、試験片を繰り返し研削し、総研削体積に対する単位時間研削量の変化を求めたものである。この図から単位時間研削量が徐々に減少し、総研削体積が約 $6,000$ [mm^3/s] 弱のところで単位時間研削量がほぼ 0 [mm^3/s] となり寿命に達していることが分かる。研削開始から寿命に達するまでの間は、単位時間研削量の変化が小さいため、定期的に単位時間研削量を測定することにより、ロボット動作軌道に必要な単位時間研削量を求めることが可能である。以上のように、砥石ベルトの単位時間研削量を定量化し、ロボット動作軌道計算に利用している。

5.3 ロボット動作軌道生成

溶接ビード仕上げのロボット動作軌道を生成するためには、グラインダの位置と送り速度を正確に定義することが重要になる。

Fig. 11 Testing equipment

Fig. 12 Grinding test piece

Fig. 13 Contact force

Fig. 14 Belt velocity

Fig. 15 Life time of grinding belt

Fig. 16 Template of robot trajectory

そこで Fig. 16 のような研削パターンを仕上げ目標形状に投影することにより、三次元空間上の自由曲線データとして経路を求めている。次に経路上の研削目標体積と砥石の単位時間研削量からグラインダ送り速度を設定し、ロボットの動作軌道を求めている。ただしこの段階でロボットとして動作可能なように、最大加減速度、最大最小速度を制限している。ロボットの動作軌道が決まった後、一定時間間隔 (3~10 [ms]) のグラインダ位置と姿勢を求め、ロボットの各軸位置データに幾何学的な解法で逆運動学変換している。なお、逆運動学変換時の特異点対策は、仕上げ動作中の姿勢変化が少ないこともあり、機械的に特異点処理が不要となる軸構成にしている。

また、目標位置を計算する時間間隔は、位置サーボ周期である 1 [ms] が理想だが、多くの計算時間と通信時間を必要とする。そのため、計算時間間隔を 3~10 [ms] に間引き、ロボットの動作軌道計算時間 2 秒以下、通信時間 0.5 秒以下を実現している。時間的に間引かれた目標位置データは、ロボットコントローラ側で、3 次の多項式を利用し、位置サーボ周期ごとの目標位置に補間されている。

このように、CAM でいう CL 的な点群データに時間的な意味を付与し、位置と送り速度を正確に設定すると同時にポストプロセスまで行うことによりロボットの動作を定義している。筆者らは、この位置と送り速度情報をもった点群データを Time Base CL と呼んでいる。今回開発した溶接ビード仕上げ用ロボットコントローラには、この Time Base CL データを LAN 経由で受信し、軌道追従制御できる機能が開発されている。

5.4 軌道追従ロボット制御

この溶接ビード仕上げ用ロボットは並進 3 軸 (XYZ)、回転 3 軸 (ABC) から構成されており、各軸ごとに Fig. 17 のような位置制御を行っている。このコントローラは位置サーボをベースに、速度フィードフォワード制御を入れ、軌道追従性を向上させている。並進軸の制御パラメータを Table 2、回転軸の制御パラメータを Table 3 に示す。これらのパラメータのうち、 $\hat{J}$ 、 $\hat{D}$ 、 $\hat{\tau}$ については、入力からトルク出力に変換する実際に使われている値を記載している。また、 $\hat{J}$ 、 $\hat{D}$ 、 $\hat{\tau}$ については、ステップ応答、一定速度駆動時のトルク値から求めた。 K_p 、 K_v については、実験的にロボットの動作が振動的にならない値に設定した。結果的に K_p 、 K_v は全軸共通の値となっている。

このコントローラは、特殊用途 [8] [9] ロボットのコントローラとして筆者らが継続的に開発しているもので、現在はリアルタイム制御が可能な LINUX 上に構築されている。今回開発した Time Base CL データによる軌道追従性について、Fig. 18

Fig. 17 Controller of robot

Table 2 Parameters of linear motion actuator

Axis	K_p [1/s]	K_v [1/s]	$\hat{J}$ [Ns ²]	$\hat{D}$ [Ns]	$\hat{\tau}$ [Nm]
X	100	50	0.255	2.13	0.0509
Y	100	50	0.427	1.37	0.0771
Z	100	50	0.214	1.78	0.134

Table 3 Parameters of rotary motion actuator

Axis	K_p [1/s]	K_v [1/s]	$\hat{J}$ [Nms ² /deg]	$\hat{D}$ [Nms/deg]	$\hat{\tau}$ [Nm]
A	100	50	0.433	2.35	4.91
B	100	50	0.0898	0.460	4.17
C	100	50	0.0654	0.417	5.40

Fig. 18 Target velocity and position error

に、待機・研削・退避の一連動作の動作目標速度と位置制御エラーを示す。このグラフでは、0.0~0.7 秒までが待機位置からワークに接触する動作で、0.7~2.6 秒までが研削動作である。この研削動作の目標速度は、研削体積に応じて変化させている。研削動作中の位置制御エラーは $\pm 25 [\mu\text{m}]$ に入っており、軌道追従性が確保されていることが確認できる。位置制御エラーが $\pm 200 [\mu\text{m}]$ を超えると仕上げ面に喰い込み傷が発生し品質不良になる。

6. 溶接ビード仕上げ実験

本研究では、提案する溶接ビード仕上げ方法を検証するため、Fig. 19 のような装置を開発した。この装置は、溶接ビード仕上げ用に開発したグラインダと並進 3 軸、回転 3 軸の 6 自由度ロボットから構成されるロボットユニットと、レンジファインダと単軸スキャンニングユニットから構成される計測ユニットから構成されている。並進アクチュエータは XYZ の 3 軸共通で定格出力 400 [W] のサーボモータと、リード 10 [mm] のボールネジを利用し構成している。回転軸は A 軸に最大トルク 260 [Nm]、BC 軸に最大トルク 64 [Nm] の回転アクチュエータを利用している。

この開発した装置を利用して、溶接ビード仕上げ実験を行っ

Fig. 19 Developed weld bead grinding system

Fig. 21 Difference color map

7. おわりに

本論文では、測定結果から仕上げ目標形状を計算し、研削目標体積に応じたロボット動作軌道を制御することにより、熟練作業レベルの仕上げ品質を達成可能なことを示した。この溶接ビード仕上げ装置は、ワークのセット・三次元形状測定・ロボットによる仕上げ・ワークの取り出しまでの一連動作を30～50秒内で行っている。熟練作業も同等の時間で一連の作業を行っているため、十分実用的なシステムになっていると考えている。仕上げ品質についても、この仕上げ装置を用いた数十本単位の自動仕上げ実験を行い、熟練作業から品質が十分であると確認された。ただし、このような熟練者による評価は感覚的なものであるため、今後は人が自然に感じられる滑らかな曲面とはどのような曲面なのか、定量的に扱えるように研究を進めていきたい。また、この三次元形状測定、自由曲面処理、ロボット制御技術を、金型磨きなどの仕上げ作業や、三次元空間におけるレジストレーションが課題となる医療用ロボット[10]などへも応用して行きたい。

謝 辞 本研究は、課題対応新技術研究開発事業の一環として、中小企業総合事業団（現：独立行政法人中小企業基盤整備機構）から委託を受け実施しました。また、研究開発を進めるに当たり、仕上げ品質に関する貴重なアドバイスや評価をシロキ工業株式会社の諸氏から頂きました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- [1] 岩城, 松尾, 岡田, 水川: “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, vol.15, no.6, pp.893-900, 1997.
- [2] 岡田, 岩城, 水川, 松尾, 金山, 奥平: “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, vol.15, no.6, pp.901-910, 1997.
- [3] 永田, 渡邊, 津田, 川口, 藤本, 村瀬: “多軸制御用 CL データに基づく強い制御器を用いた力制御ロボットサンダーの開発とその評価実験”, 日本精密工学会誌, vol.68, no.7, pp.953-957, 2002.
- [4] 井上 昭史: “仕上げロボット”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.6, pp.752-755, 1995.
- [5] 谷本, 則次: “3次元形状認識による溶接ビード自動仕上げシステムの開発 溶接ビード3次元形状測定装置の開発”, 第19回日本ロボッ

た。仕上げ前と後の測定結果を Fig. 20 に示す。このワークには、接合部段差が約 0.1 [mm]、溶接ビードが約 0.2 [mm]（いずれも最大値）あったが、図の仕上げ後ワークのように熟練作業に近い仕上げ品質を得ることができた。

また、測定結果から計算された仕上げ目標形状と、仕上げ後ワーク測定結果の差を Fig. 21 に示す。このように仕上げ目標形状に対して 0.04～0.06 [mm] の精度で研削できていることが確認できる。他のワークに対しても同様の評価を行ったところ、 ± 0.1 [mm] 以内の精度で研削できていることが確認できた。この仕上げ目標形状と測定結果に誤差が生じた原因について調べたところ、グラインダ動作速度が速度上限に達し、研削体積から得られるグラインダ送り速度より遅くなったため、過剰研削が発生していることが分かった。このことから、ロボットの運動性能を向上（高い加減速）させることにより、さらに研削精度を向上できるものと考えている。

- ト学会学術講演会講演論文集, pp.123-124, 2001.
- [6] G. Frain: CAGD のための曲線・曲面理論. p.180, 共立出版, 1991.
- [7] 神野, 栗田: “機械加工バリ取り作業を対象とした力制御の追従性向上”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.1, pp.147-155, 1999.
- [8] 則次, 谷本, 安原, 馬島: “ニューラルネットワークを用いた大型液晶基板搬送ロボットの学習制御”, 日本機械学会論文集, vol.67, no.664, C 編, 2001.
- [9] 谷本, 光石, 割澤, 蔵本, 鈴木, 田島: “人工膝関節置換術支援ロボットの開発”, 日本機械学会松山地方講演会論文集, 2002.
- [10] M. Mitsuishi, S. Warisawa, F. Tajima, M. Suzuki, K. Tanimoto and K. Kuramoto: “Development of a 9 Axes Machine Tool for Bone Cutting,” CIRP ANNALS 2003 Manufacturing Technology, p.327, 2003.

谷本圭司 (Keiji Tanimoto)

1965 年 1 月 11 日生. 1988 年早稲田大学理工学部卒業. 同年トヨタ自動車株式会社入社. 1994 年コアテック株式会社入社. 溶接ビード自動仕上げロボット, 人工膝関節手術支援ロボットの研究開発に従事. (日本ロボット学会正会員)

則次俊郎 (Toshiro Noritsugu)

1949 年 10 月 19 日生. 1974 年岡山大学大学院工学研究科修士課程修了. 津山工業高等専門学校を経て, 1986 年岡山大学工学部助教授, 1991 年同機械工学科教授, 1996 年同システム工学科教授, 現在に至る. 1982 年工学博士 (京都大学). 空気圧アクチュエータ, ウェアラブルロボット, 機械システムの高機能化制御に関する研究に従事. (日本ロボット学会正会員)