

AIアプローチによる3次元設計と加工工程自動化に関する研究(2)

- ジョイスティック支援による力制御教示システムの開発 -

永田寅臣*1 小藁正樹*2 渡辺桂吾*3

Automation of 3D Design and Manufacturing Process Using AI Techniques

- Force Controlled Teaching System Using a 2-DOF Joystick -

Fusaomi Nagata, Masaki Komino, Keigo Watanabe

本稿では、研磨ロボットによる自動研磨を実現するために不可欠となるスキルフルな目標軌道を簡易操作で安全に作成できるジョイスティック支援による力制御教示システムを提案する。教示中、研磨工具とワーク間の接触力および並進移動の径路が自動制御されるため、作業者は研磨工具が曲面を有するワークの表面上を望ましい姿勢を維持しながら移動するようにジョイスティックで姿勢を操作するだけでよい。この場合、力制御により接触力が一定に保たれるため、研磨工具の過負荷や非接触状態を気にすることなく安全に作業を進めることができる。提案手法の有用性については、単純曲面を有する家具部材と自由曲面を有する家具部材を用い、教示実験および教示データを用いた木地研磨実験を行い検証した。

1 はじめに

研磨ロボットで用いられる微制御は、研磨工具の位置・姿勢制御およびワークとの接触力制御を同時に行うハイブリッド制御法のことを指し、研磨ロボットの基本制御戦略として位置付けられている。良好な仕上げ面を得るためには、安定的な微制御を実現しなければならない。しかしながら、家具部材の木地研磨では、異方性を有する木質系材料を対象とするため、微動作時における力制御系の動特性が変化してしまう。また、商品としての意匠性を高めるためにNC加工後の家具部材には自由曲面が使用されている。このため、良好な仕上げ面を得るためには、これらに起因する力偏差を如何に抑制できるかが重要となってくる。これまでも、産業用ロボットをベースとした研磨ロボットの開発に関する論文がいくつか報告されているが、熟練者の代替と成り得るためには今後さらに改善されなければならない二つの課題がまだ残っている。一つは、熟練者が研磨作業時に発揮している柔らかく安定した力の調節機能をロボットに持たせることである。もう一つは、ロボットアーム先端に取り付けられた研磨工具のスキルフルな軌道データを簡易かつ迅速に獲得するための教示システムの開発である。

研磨ロボットを用いて高精度かつ高効率な自動研磨

を実現するために必要となる目標軌道とは、教示作業中において、研磨工具と材料との間に発生する接触力が望ましい値で一定に保たれ、かつ、作業者の意思に基づいて工具姿勢が操作された場合にのみ獲得できる。重要なことは、同じ形状の材料であっても使用する研磨工具に応じて異なる目標軌道が必要になるという点である。さらに、ロボット本体、研磨工具、力覚センサなどには測定困難な機構上のガタ、歪みが多分に含まれているため、材料に関して事前に精度の高い形状情報があったとしても、スキルフルな目標軌道を算出することは容易ではない。このため、最適な目標軌道を獲得するための教示作業は、実際に使用する研磨ロボットシステムそのものを用いることが望ましい。

これまでも、ロボットの位置・姿勢制御に不可欠な目標軌道を獲得するために、幾つかの教示方法¹⁻⁴⁾が提案されている。産業用ロボットでは、作業者が教示ペンダントを用いて多数の教示点(動作通過点)を入力していく方法が最も一般的に用いられているが、入力作業が煩わしいだけでなく、望ましい接触力を維持させるための連続的な目標軌道を得ることができないという欠点がある。教示ペンダントの操作性の悪さを改善するために提案されているジョイスティック教示を用いても、接触力を一定に維持しながら教示を行うことは難しい。また、最近登場してきたダイレクト教示法は作業者がロボット先端の研磨工具を直接手で

*1 インテリア研究所技術開発課

*2 株式会社エーエスエー・システムズ

*3 佐賀大学大学院工学系研究科

操作できるため、操作自由度は増すものの、最適な軌道データを獲得するためには、作業員自身が位置制御、姿勢制御、および力制御を全て同時にかつ繊細に行う必要があり、非常に困難な作業となってしまう。

本研究では、このような従来法が抱える問題点を解決し、研磨ロボットによる自動研磨を実現するために不可欠となるスキルフルな目標軌道を簡易操作で安全に作成できるジョイスティック支援による力制御教示システムを提案する。教示中、研磨工具の接触力と並進移動の径路は自動制御されるため、作業員は研磨工具がワークの表面上を望ましい姿勢を維持しながら做うようにジョイスティックで姿勢を操作するだけでよい。この場合、力制御により接触力が一定に保たれるため、過負荷および非接触状態を気にすることなく作業を進めることができる。提案手法の有用性については、オープンアーキテクチャ型の産業用ロボット FS-20 を用いた教示実験により検証する。

2 研磨工具のスキルフルな目標軌道の獲得

2-1 ジョイスティック支援による教示法

研磨しようとするワークが CAD/CAM システムで設計され、多軸 NC 工作機械で加工されている場合には、ワークの形状情報としてカッターロケーションデータ (CLデータ) を参照することができる⁵⁾。本章では、CAD/CAM システムで設計されていない任意形状のワークに対して、研磨ロボットシステムを適用できるようにジョイスティック支援によるユーザフレンドリな教示システムを提案する。この教示システムを用いることで、研磨ロボットシステムで任意形状の材料を高速・高精度に研磨するために不可欠となるスキルフルな目標軌道を容易にかつ安全に生成できるように

なる。教示中、接触力制御と工具経路制御は自動制御されるため、作業員はジョイスティックにより研磨工具の姿勢が各研磨作業に適した状態となるように操作すればよい。すなわち、ジョイスティックは、作業員の意思に従って研磨工具の姿勢を制御することのみに用いられる。これにより、研磨ロボットシステムにおける系全体の機構上のガタなどを吸収した軌道を容易に獲得することができる。教示モードにおける研磨ロボットシステムのブロック線図を図-1に示す。まず、位置制御を行う方向では、指定された基本パターン (ジグザグパターンや渦巻きパターンなど) と做い速度 $v(k) = [v_x(k) \ v_y(k) \ v_z(k) \ 0 \ 0 \ 0]$ に基づき、径路生成器が離散時刻 k での目標位置 $x_p(k) = [x_p(k) \ y_p(k) \ z_p(k) \ 0 \ 0 \ 0]$ を生成する。 $x_p(k)$ と制御量 $x(k)$ との誤差に速度への変換ゲイン行列 $K_v = \text{diag}(K_{v1}, \dots, K_{v6})$ を乗じることで速度指令 $v_p(k)$ を生成させる。ただし、 $v_p(k)$ は次式で定義する。

$$x_p(k) = x_p(k-1) + \Delta t v(k) \quad (1)$$

通常、オープンアーキテクチャ型の産業用ロボットに接続されているコントローラへの速度指令値は、一定のサンプリング間隔ごとに入力される。このため、力制御則は速度指令型で記述される必要がある。本システムでは、次式に示す速度指令型の力制御法を用いて接触力を制御する⁶⁾。

$$\begin{aligned} \dot{x}(k) = & \exp(-M_d^{-1} B_d \Delta t) \dot{x}(k-1) \\ & - \left\{ \exp(-M_d^{-1} B_d \Delta t) - E \right\} B_d^{-1} K_f \{ F(k) - F_d \} \\ & + K_i \sum_{n=1}^k \{ F(n) - F_d \} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで $\dot{x}(k) \in \mathfrak{R}^6$ はロボットアーム先端に取付けた研磨

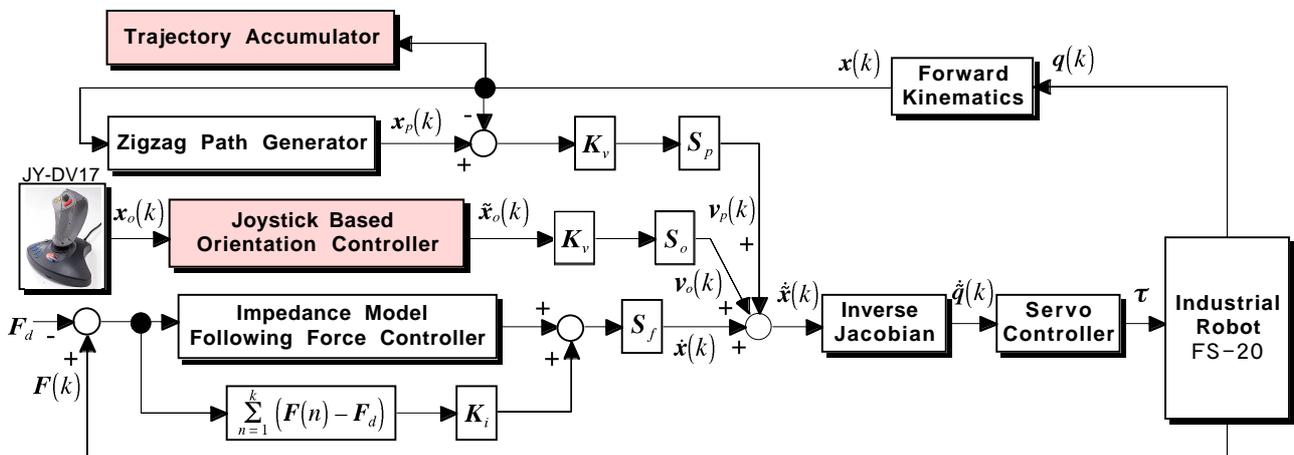


図-1 ジョイスティック教示モードにおける制御系のブロック線図

工具の離散時刻 k における速度ベクトルを表す。 $M_d \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, $B_d \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, $K_d \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ はそれぞれ目標慣性行列, 目標粘性行列, 目標剛性行列であり, これらをインピーダンスパラメータと呼ぶ。 $F \in \mathbb{R}^6$ は $F^T = [f^T \ n^T]$ で定義される工具と材料間に作用する接触力ベクトル $f \in \mathbb{R}^3$ とモーメントベクトル $n \in \mathbb{R}^3$ である。 $K_f \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は力フィードバックゲイン行列である。 $F_d^T = [f_d^T \ n_d^T]$ は, 力/モーメントベクトルである。 $K_i = \text{diag}(K_{i1}, \dots, K_{i6})$ と E はそれぞれ, 積分制御ゲインおよび単位行列である。ただし, M_d , B_d , K_d 及び K_f は正定対角行列に設定する。

つぎに, 姿勢制御を行う方向は, ジョイスティックからの生データである $x_o(k) = [0 \ 0 \ 0 \ x_{o4}(k) \ x_{o5}(k) \ x_{o6}(k)]$ を補正した $\hat{x}_o(k)$ に速度への変換ゲイン行列 $K_v = \text{diag}(K_{v1}, \dots, K_{v6})$ を乗じることで速度指令値 $v_o(k)$ を生成させる。なお, ジョイスティックの生データの補正方法については次章で述べることにする。

最後に, 各方向の速度指令値はそれぞれ, 位置制御系, 姿勢制御系, 力制御系の各スイッチ行列 S_p , S_o , S_f を乗じた後に加算され, $\dot{x}(k)$ となる。さらに $\dot{x}(k)$ は, 逆ヤコビアンにより各関節の角速度成分 $\dot{q}(k)$ に変換された後, サーボコントローラへの入力となる。各スイッチ行列は次式のように定義し,

$$S_p = \text{diag}(S_{p1}, S_{p2}, S_{p3}, 0, 0, 0) \quad (3)$$

$$S_o = \text{diag}(0, 0, 0, S_{o1}, S_{o2}, S_{o3}) \quad (4)$$

$$S_f = \text{diag}(S_{f1}, S_{f2}, S_{f3}, S_{f4}, S_{f5}, S_{f6}) \quad (5)$$

各要素が 1 を持つときに対応する制御系が有効となることを意味し, 各スイッチ行列は次式のような関係を持つものとする。

$$S_p \cup S_o \cup S_f = E \quad (6)$$

提案する教示プロセスは, つぎのとおりである。まず, 経路生成器から生成された目標経路 (例えば, ジグザグパス) に沿って研磨工具を移動させる。工具とワーク間の接触力は, 式(2)によって望ましい値を維持するように制御される。この場合, 作業者は各ワークに対して研磨工具の姿勢が望ましい状態となるようにジョイスティックで操作するだけでよい。もちろん, インピーダンスモデル追従型の力制御器が接触力を一定に保つように働くため, 作業者は不意に発生する過

負荷および非接触状態に対して神経質になる必要はない。教示中は, サンプリング間隔毎の位置・姿勢ベクトル $x(k)$ が 図-1 に示す軌道蓄積器に時系列で保存されていく。このような教示プロセスを経て, 研磨ロボットのためのスキルフルな軌道データを容易に獲得することができる。

2-2 ジョイスティック出力の補正

実験で使用したジョイスティックは, 図-2 に示すサンワサプライ社製の JY-DV17 で, 自由度は 3 である。このタイプのジョイスティックは, サウンドカードが組み込まれたパソコンであれば容易に接続できる。また, Visual C++ の環境下では, マルチメディアサービスの関数をコールすることで, ジョイスティックからの操作入力 $x_o(k)$ を容易に参照できる。しかしながら, $x_o(k)$ の各成分のうち $x_{oi}(k)$ ($i=4, 5, 6$) は, -32768 から 32768 の範囲のデジタル値として出力されるため, フィードフォワード制御の入力として直接用いると満足な操作性が得られない。例えば, 姿勢を大きく変化させるためにジョイスティックに力が加え続けてられている場合には, より大きな操作量を発生させるように, また力が抜かれた場合 ($x_{oi}(k)$ が 0 へと急速に減少するとき) には, 姿勢速度を徐々に小さくする工夫が必要となる。そこで本研究では, 次式によりジョイスティックからの出力を補正することで滑らかな操作性を実現した。

$$\hat{x}_o(k) = K_p x_o(k) + \hat{K}_p \hat{x}_o(k) \quad (7)$$

ただし,

$$\hat{x}_o(k) = \frac{\hat{x}_o(k-1)}{L} \quad \text{if } x_o(k) = 0 \quad (8)$$

$$\hat{x}_o(k) = \hat{x}_o(k-1) + x_o(k) \quad \text{if } x_o(k) \neq 0 \quad (9)$$



図-2 開発したジョイスティック支援による教示システム

とする。 $K_p = \text{diag}(0, 0, 0, K_{p4}, K_{p5}, K_{p6})$ と $\hat{K}_p = \text{diag}(0, 0, 0, \hat{K}_{p4}, \hat{K}_{p5}, \hat{K}_{p6})$ はそれぞれ、生データおよび積分データに対する補正ゲイン行列である。なお、 L ($L > 1$) はダウンスケラである。

3 実験

3-1 実験システム

オープンアーキテクチャ型産業用ロボット FS-20 では、キネマティクスや速度指令によるサーボコントロールなどの Windows API をユーザ側に公開しているため、式(2)の速度指令による力制御法を容易に適用できる。さて、実際の家具の製造現場における曲面ワークの研磨工程では、図-3に示すようなハンディタイプのエアー駆動式のベルト研磨工具やオービタル運動式の研磨工具が多用されている。実験では、ニッタ社製の6軸力・トルクセンサを介して同タイプのオービタルサンダーをロボットアーム先端に取付けた。使用した研磨工具の直径は50 mm、研磨紙の番手は #220 である。

3-2 単純曲面を有するワークを用いた教示実験

図-1の提案手法をオープンアーキテクチャ型の産業用ロボットに適用し、教示実験を行った。図-4には、基本径路に使用したジグザグパスを示す。X方向の長さ x とY方向の送り幅 y はそれぞれ、520 mm、20 mm である。教示実行時に作業者は、研磨工具がワーク表面の法線方向から接触するように研磨工具の姿勢のみをジョイスティックで操作した。工具先端の移動速度は10 mm/sで行った。また、材料と研磨工具との目標接触力は、手加工による研磨の場合に25~50 g/cm²の力で行われていることを考慮し⁷⁾、研磨工具の面積からつぎのように算出した。

$$\pi \times 2.5^2 \times 0.05 \approx 1.0 \text{ [kgf]} \quad (10)$$



図-3 エアー駆動のベルト式研磨工具

実験で使用したその他の制御パラメータを表-1に示す。図-5には、断面形状がどこでも等しい単純な曲面に提案手法を適用した場合の教示風景を示す。図-6、図7及び図-8には、教示によって獲得された最適軌道データ(図-1の軌道蓄積器に保存されている)のうち、ロボットベース座標系における工具の傾斜ベクトルのX方向成分、Z方向成分と工具先端のZ座標値の変化をそれぞれ示す。

3-3 教示データを用いた研磨実験

つぎに、教示により得られた軌道データに基づく位置・姿勢補償器を用いて木材の研磨実験を行った。図-9には、プレイバックモードにおける研磨ロボットシステムのブロック線図を示す。プレイバックモードでは、次式を力制御則として用いる^{8,9)}。

$$\begin{aligned} \dot{x}(k) = & \exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t) \dot{x}(k-1) \\ & - \left\{ \exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t) - E \right\} B_d^{-1}K_f \{F(k) - F_d\} \\ & + K_i \sum_{n=1}^k \{F(n) - F_d\} + \frac{x_a(k) - x_a(k-1)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (11)$$

ただし、 $x_a(k)$ は位置・姿勢補償器が離散時刻 k に生成する補償値であり、教示データ (***.tch) 内の k 行目の位置・姿勢ベクトルを表す。また、位置・姿勢制御を行う方向では $x_a(k)$ を目標軌道として用い、 $x_a(k)$

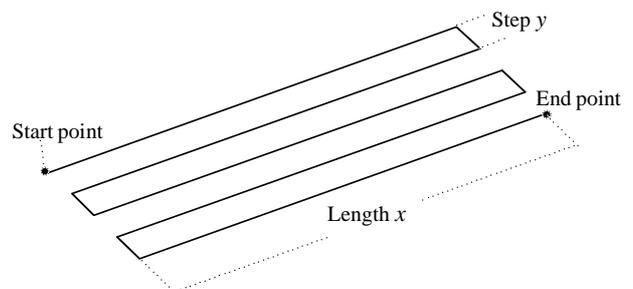


図-4 教示実験で使用したジグザグパス

表-1 教示実験で使用した制御パラメータ

Desired contact force $\sqrt{(f_{dx})^2 + (f_{dy})^2}$	1 [kgf]
Profiling velocity $\sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2}$	10 [mm/s]
Desired inertia coefficient M_{d1}, M_{d3}	0.01 [kgf · s ² /mm]
Desired damping coefficient B_{d1}, B_{d3}	20 [kgf · s/mm]
Force feedback gain K_{f1}, K_{f3}	1
Integral control gain K_{i1}, K_{i3}	0.0001
Velocity transformation gain K_{v1}, K_{v2}, K_{v3}	0.8
Velocity transformation gain K_{v5}	0.2
Gain for joystick control K_{p5}	1
Gain for joystick control \hat{K}_{p5}	0.003
Down scaler L	1.2
Sampling width Δt	10 [msec]

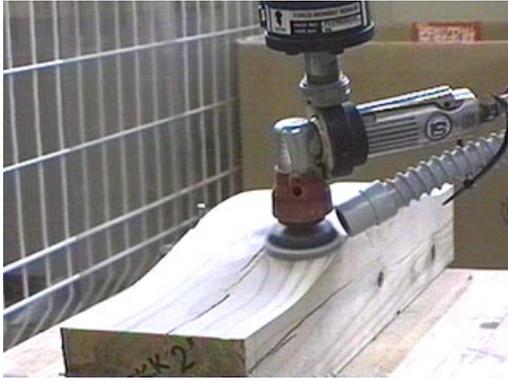


図-5 単純な曲面ワークを用いた教示実験風景

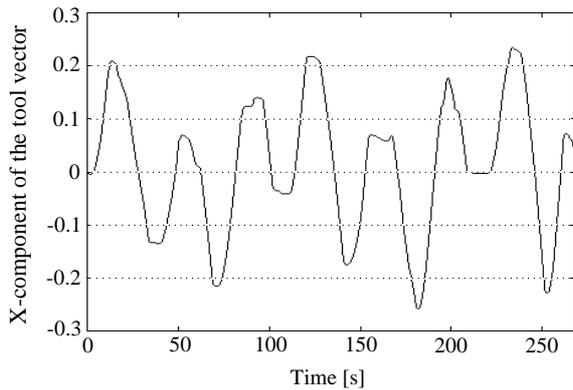


図-6 教示により得られた工具ベクトルのX成分

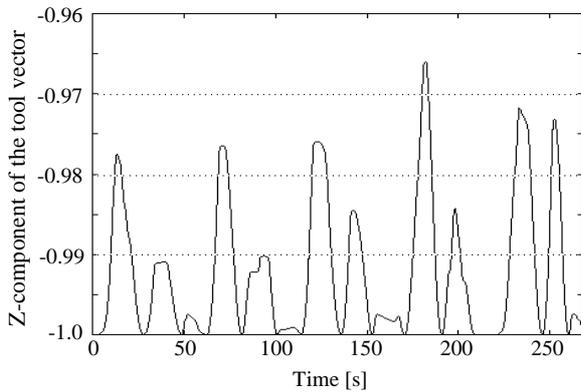


図-7 教示により得られた工具ベクトルのZ成分

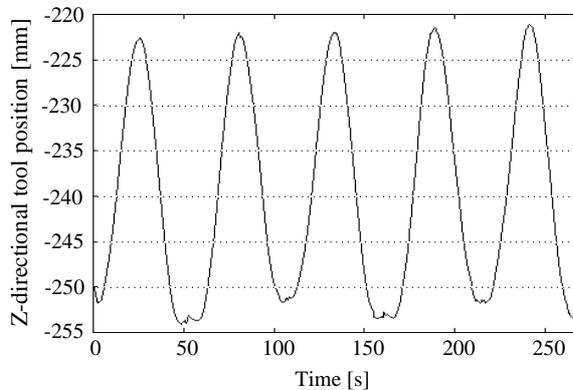


図-8 教示により得られた工具先端座標のZ成分

と制御量 $x(k)$ との誤差に K_v を乗じることで速度指令値 $v_a(k)$ を生成させる。各方向の速度指令値を加算する

ことで得られる $\dot{x}(k)$ は、逆ヤコビアンにより各関節の角速度 $\dot{q}(k)$ に変換された後、サーボコントローラへの入力となる。図-10には、研磨実験中の工具座標系におけるZ方向の接触力の変化を示す。この図から、倣い制御の方向が X 方向から Y 方向に変化したときにスパイクが発生しているものの、目標値まわりでの良好な応答が得られていることがわかる。また、研磨後のワーク表面の性状を触覚により検査した結果、非常に良好な仕上げ面を確認することができた。

3-4 自由曲面への対応

図-11には、椅子の座面や背板に多用されている自由曲面を示す。これは、異なる曲線間に面を構成した形状で、従来のベルトサンダーやプロフィールサンダーではほとんど対応することができない形状であった。このため、熟練者が3点固定式のベルトサンダーやハンディタイプのオービタルサンダーを用いるなどして手作業で研磨が行われていた。図-12のように提案システムを用いることで、このような自由曲面を有する家具部材の研磨も可能であることが確認できた。

4 おわりに

本稿では、家具の研磨工程で実際に作業者が使用しているハンディタイプの研磨工具がアーム先端に取付けられたオープンアーキテクチャ型産業用ロボットを制御対象とし、この研磨ロボットを任意形状を有する家具部材の研磨作業に適用するために必要となる研磨工具の軌道データの獲得方法について論じた。作業者の意思に基づいて獲得されたスキルフルな研磨工具の軌道データを安全操作で簡易に獲得するためにジョイスティック支援による力制御教示システムを提案し、産業用ロボットFS-20を用いた教示実験および木地の研磨実験を行うことで以下のような結論を得た。

- (1) 従来の教示システムでは獲得することが困難であった研磨ロボットのためのスキルフルな目標軌道を簡易・迅速に生成できるようになった。
- (2) インピーダンスモデル追従型力制御法と、教示データに基づく位置・姿勢補償器を併用することで、自由曲面を有する家具部材の研磨作業に対応可能な研磨ロボットシステムを構成することができた。

(3) 従来の自動化機械では対応が困難であった自由曲面を有する家具部材の木地研磨実験の結果、非常に良好な仕上げ面を得ることができた。

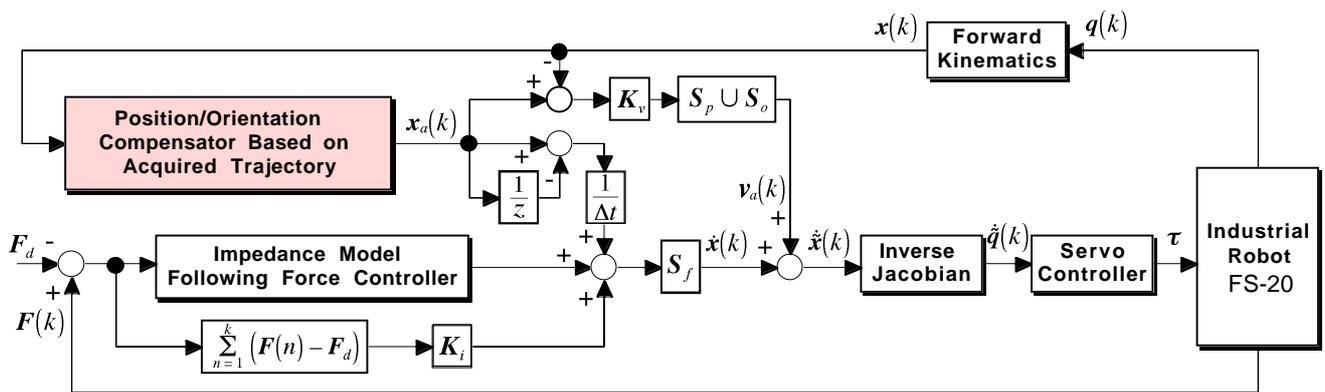


図-9 プレイバックモードにおける研磨ロボットシステムの制御系のブロック線図

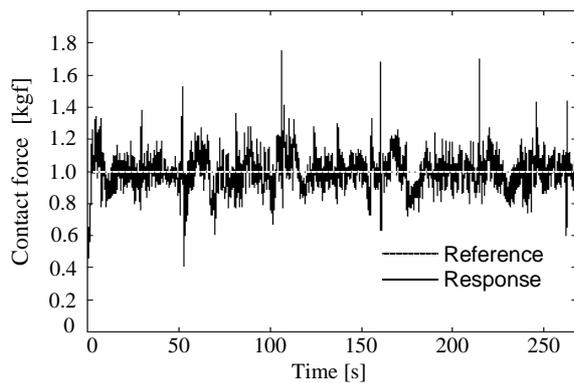


図-10 教示データを用いた微い制御結果

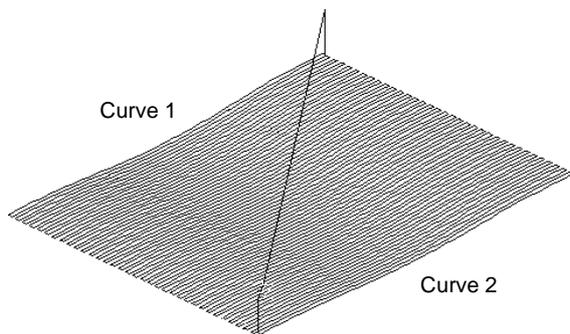


図-11 自由曲面を有するモデル



図-12 自由曲面を有する家具部材の研磨風景

謝辞

本研究の一部は、ベンチャー企業支援型地域コンソーシアム研究開発事業（中核的産業創造型）の一環とし

て、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）から委託を受けた（株）北九州テクノセンターから再委託された研究開発業務として実施したものである。

5 参考文献

- 1) 松元：ロボットの作業教示とプログラミング，日本ロボット学会誌，Vol. 17, No. 2, p. 158-161 (1999).
- 2) 水川，小山：産業用ロボットの教示方法の現状と展望，日本ロボット学会誌，Vol. 17, No. 2, p. 180-185 (1999).
- 3) 長尾，尾上：産業用ロボットの作業教示とオープン化，日本ロボット学会誌，Vol. 18, No. 4, p. 486-490 (2000).
- 4) 長谷川：作業教示と計画，日本ロボット学会誌，Vol. 16, No. 7, p. 918-920 (1998).
- 5) 永田，渡辺，泉：多軸制御用CLデータに基づく位置補償器を用いた産業用ロボットの微い制御，精密工学会誌，Vol. 66, No. 3, p. 473-477 (2000).
- 6) F. Nagata and K. Watanabe: An Experiment on Sanding task Using Impedance Controlled Manipulator with Vibrational Type Tool, *The 3rd Asian Control Conference*, pp. 2989-2994, Shanghai Worldfield Convention Hotel, July (2000).
- 7) 実務のための新しい研磨技術，研磨布紙加工技術研究会編，オーム社，(1992).
- 8) F. Nagata and K. Watanabe: Human Friendly Mechatronics - Selected Papers of the International Conference on Machine Automation ICMA2000 -, pp. 327-332, Elsevier, (2001)
- 9) F. Nagata and K. Watanabe: Teaching System for a Polishing Robot Using a Game Joystick, *CD-ROM Procs. of The 39th SICE Annual Conference (SICE'2000), International Sessions*, pp. 1-6, Iizuka, Fukuoka, (2000).