

ロボットの力制御による木質材料の研磨工程自動化に関する研究 (3)

- インピーダンスモデル追従型力制御法を用いた研磨ロボットシステムの開発 -

永田寅臣*1 渡辺桂吾*2

Development of Impedance Controlled Polishing Robot with Rotational Type Tools (3)

- Polishing Robot System with Impedance Model Following Force Controller -

Fusaomi Nagata, Keigo Watanabe

本稿は、平成9年度から平成11年度にかけて取り組んだ新技術研究開発特別事業「ロボットの力制御による木質材料の研磨工程自動化に関する研究」により得られた、インピーダンスモデル追従型の力制御法をベースとした研磨ロボットの基本システムに関する報告である。提案する研磨ロボットシステムの特徴としては、(1) 教示作業中及び研磨作業中に材料を傷つけないように柔らかい力制御機能を有していること、(2) CAD/CAMシステムが生成するカットロケーションデータを直接読み込んで目標軌道に変換できるため、煩わしい教示作業を行うことなく研磨ロボットを利用できること、(3) ユーザが簡易にかつ安全に操作するためのユーザインタフェースを備えていること、などが挙げられる。回転式の研磨工具を搭載したオープンアーキテクチャ型の産業用ロボットを用いた研磨実験により提案システムの有用性を検証したので報告する。

1 はじめに

これまでに、(1) オープンアーキテクチャ型の産業用ロボットに容易に適用できる位置指令型インピーダンス制御法、(2) CAD/CAMシステムが算出したカットロケーションデータから研磨ロボットの軌道データを直接生成させることで、煩わしい教示作業を行うことなく曲面材料を研磨するための目標軌道を獲得する位置補償器^{1, 2)}、(3) 材料の動特性変化及び材料形状の大域的変化に起因する力偏差を抑制するためのファジィ補償器³⁾などを提案してきた。本開発研究ではこれらの要素技術を統合し、回転式の研磨工具を搭載したオープンアーキテクチャ型の産業用ロボットJS-10にインプリメントすることで、木質材料の自動研磨のための基本ロボットシステムを試作した⁴⁾。本稿では、提案する研磨ロボットを実際に木材の研磨作業に適用し、その制御性能について評価したので報告する。

2 インピーダンスモデル追従型力制御法の導出

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位置指令値は、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。本章では、研磨ロボットシステムで用いるインピーダンスモデル追従型の力制御法を速度指令型で導出する。ま

ず、デカルト座標系における目標とするインピーダンス特性を次式で定義する。

$$M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + B_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + SK_d(x - x_d) = SF + (E - S)K_f(F - F_d) \quad (1)$$

ここで $x \in \mathbb{R}^6$, $\dot{x} \in \mathbb{R}^6$, $\ddot{x} \in \mathbb{R}^6$ はそれぞれロボットアーム先端に取付けた研磨工具の位置、速度、加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。 $K_f \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ はカフィードバックゲイン行列である。 $x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d$ と $F_d = [f_d^T \ n_d^T]$ は、目標とする位置、速度、加速度ベクトル及び力/モーメントベクトルである。 S と E はスイッチ行列、単位行列である。ただし、 M_d, B_d, K_d 及び K_f は正定の対角行列である。式(1)は、 $S = E$ のとき全方向インピーダンス制御系、 $S = \mathbf{0}$ のとき全方向力制御系となる。全方向力制御系するとき、式(1)において $X = \dot{x} - \dot{x}_d$ とおくと次式が得られる。

$$\dot{X} = -M_d^{-1}B_d X + M_d^{-1}K_f(F - F_d) \quad (2)$$

*1 インテリア研究所技術開発課システム研究室

*2 佐賀大学大学院工学系研究科

式(2)を解くと次式が得られる。

$$X = \exp(-M_d^{-1}B_d t) X(0) + \int_0^t \exp\{-M_d^{-1}B_d(t-\tau)\} M_d^{-1}K_f (F-F_d)d\tau \quad (3)$$

ここで、サンプリング幅 Δt を用いた離散時間 k を考える。まず、 $\Delta t(k-1) \leq t < \Delta tk$ の時間において M_d , B_d , K_f , F 及び F_d が全て一定であると仮定し、 $X(k) = X(t)|_{t=\Delta tk}$ とすると、次式のような離散時刻 k での解が得られる。

$$X(k) = \exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t) X(k-1) - \left\{ \exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t) - E \right\} B_d^{-1}K_f \{F(k) - F_d\} \quad (4)$$

前定義により $X = \dot{x} - \dot{x}_d$ であり、また力制御を行う方向における目標の速度は零 ($\dot{x}_d = \mathbf{0}$) であることから次式に示すデカルト座標系における解が得られる。

$$\dot{x}(k) = \exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t) \dot{x}(k-1) - \left\{ \exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t) - E \right\} B_d^{-1}K_f \{F(k) - F_d\} \quad (5)$$

ここで、 $x(k)$ は位置ベクトル $[x(k) \ y(k) \ z(k)]^T$ と Y-Z オイラー角で表される姿勢ベクトル $[\phi(k) \ \theta(k) \ \psi(k)]^T$ から構成される。さて、研磨作業のための基本的な制御戦略が力制御であるが、未知の材料特性を有する、あるいは材料形状に関する情報がない場合、接触力を一定に制御することは非常に難しい。結果として、望ましくない力偏差が発生しやすくなる。そこで、このような力偏差を抑制するために式(5)に積分制御を加えることで次式を導出した。

$$\dot{x}(k) = \exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t) \dot{x}(k-1) - \left\{ \exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t) - E \right\} B_d^{-1}K_f \{F(k) - F_d\} + K_i \sum_{n=1}^k \{F(n) - F_d\} \quad (6)$$

ここで、 $K_i = \text{diag}(K_{i1}, \dots, K_{i6})$ は積分制御ゲインである

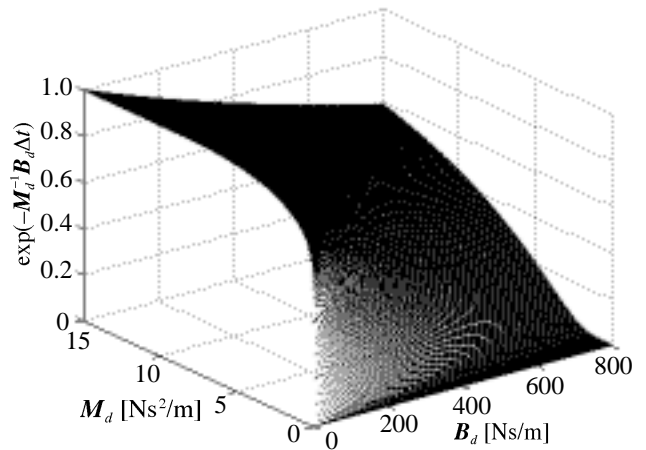


図-1 M_d と B_d の組み合わせによる $\exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t)$ の変化

る。式(6)で得られる速度指令値 $\dot{x}(k)$ をサンプリング時間ごとにサーボ系の目標値として与えることで、接触力 F を目標値 F_d に追従させることができる。式(6)からつぎのことが予想される。インピーダンスパラメータ中の目標粘性 B_d は、力フィードバックゲインと同様に力制御特性に大きな影響を持つ。 B_d が大きくなればなるほど力フィードバックの効果は小さくなる。図-1には、サンプリング時間 Δt が 0.01 [s] の場合の M_d , B_d に対する遷移行列 $\exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t)$ の対角成分の変化を示す。図-1より、例えば、1~200 の範囲で B_d を設定する場合、 M_d の値が 15 以上に設定されると $\exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t)$ はほとんど 1 で飽和してしまう。このように、望ましいフィードバック量に応じて B_d が選択されると、設定できる有効な M_d の値が制限されることがわかる。さて、実際の研磨作業時には、接触力と同時に研磨工具の軌道(位置と姿勢)を制御しなければならない。そこで、既に提案している位置補償器からの出力を式(6)に加えると次式が得られる。

$$\dot{x}(k) = \exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t) \dot{x}(k-1) - \left\{ \exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t) - E \right\} B_d^{-1}K_f \{F(k) - F_d\}$$

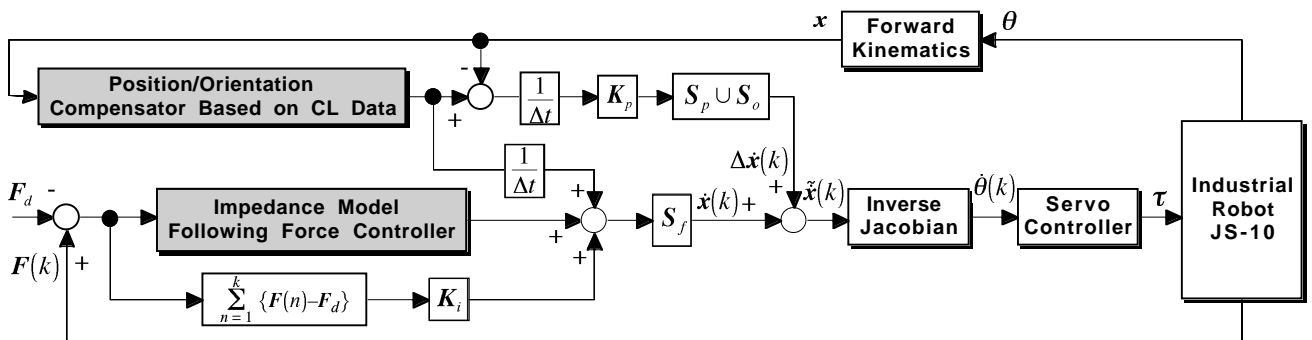


図-2 開発した研磨ロボットシステムの制御系のブロック線図

$$+ K_i \sum_{n=1}^k \{F(n) - F_d\} + \frac{\Delta x(k)}{\Delta t} \quad (7)$$

ここで、 $\Delta x(k)$ は位置補償器がサンプリング間隔に出力する位置・姿勢の変化量ベクトルである。図-2には、積分制御器、位置補償器及びインピーダンスモデル追従型力制御器を搭載した研磨ロボットシステムの制御系のブロック線図を示す。ここで、つぎのようなスイッチ行列を定義する。

$$S_p = \text{diag}(S_{p1}, S_{p2}, S_{p3}, 0, 0, 0) \quad (8)$$

$$S_o = \text{diag}(0, 0, 0, S_{o1}, S_{o2}, S_{o3}) \quad (9)$$

$$S_f = \text{diag}(S_{f1}, S_{f2}, S_{f3}, S_{f4}, S_{f5}, S_{f6}) \quad (10)$$

S_p 、 S_o 、 S_f はそれぞれ各方向における位置制御、姿勢制御、力制御のスイッチをオン/オフする。対角行列の成分が1の場合、そのコントローラはオンとなり、0の場合はオフとなる。なお、各スイッチ行列間には次

式の関係があることを注記しておく。

$$S_p \cup S_o \cup S_f = E \quad (11)$$

ここで、図-2に示したブロック線図の説明を行う。まず、力制御を行う方向では式(6)により生成された速度指令値 $\dot{x}(k)$ に位置補償器からの補償値 $\Delta \dot{x}(k)$ が加えられる。つぎに、位置・姿勢制御を行う方向では速度誤差に位置・姿勢フィードバックゲイン K_p を乗じて、もう一つの速度指令値 $\Delta \dot{x}(k)$ を生成する。各方向の速度指令値 $\dot{x}(k)$ 、 $\Delta \dot{x}(k)$ が加えられ $\ddot{x}(k)$ が生成される。さらに、 $\ddot{x}(k)$ に逆ヤコビアンを乗じることで関節座標空間での速度指令値 $\dot{\theta}(k)$ が算出される。最終的に $\dot{\theta}(k)$ は、オープンアーキテクチャ型コントローラ内のサーボ系への目標値として入力される。

3 ユーザインタフェースの開発

実際に研磨ロボットが動作している時には、前章の

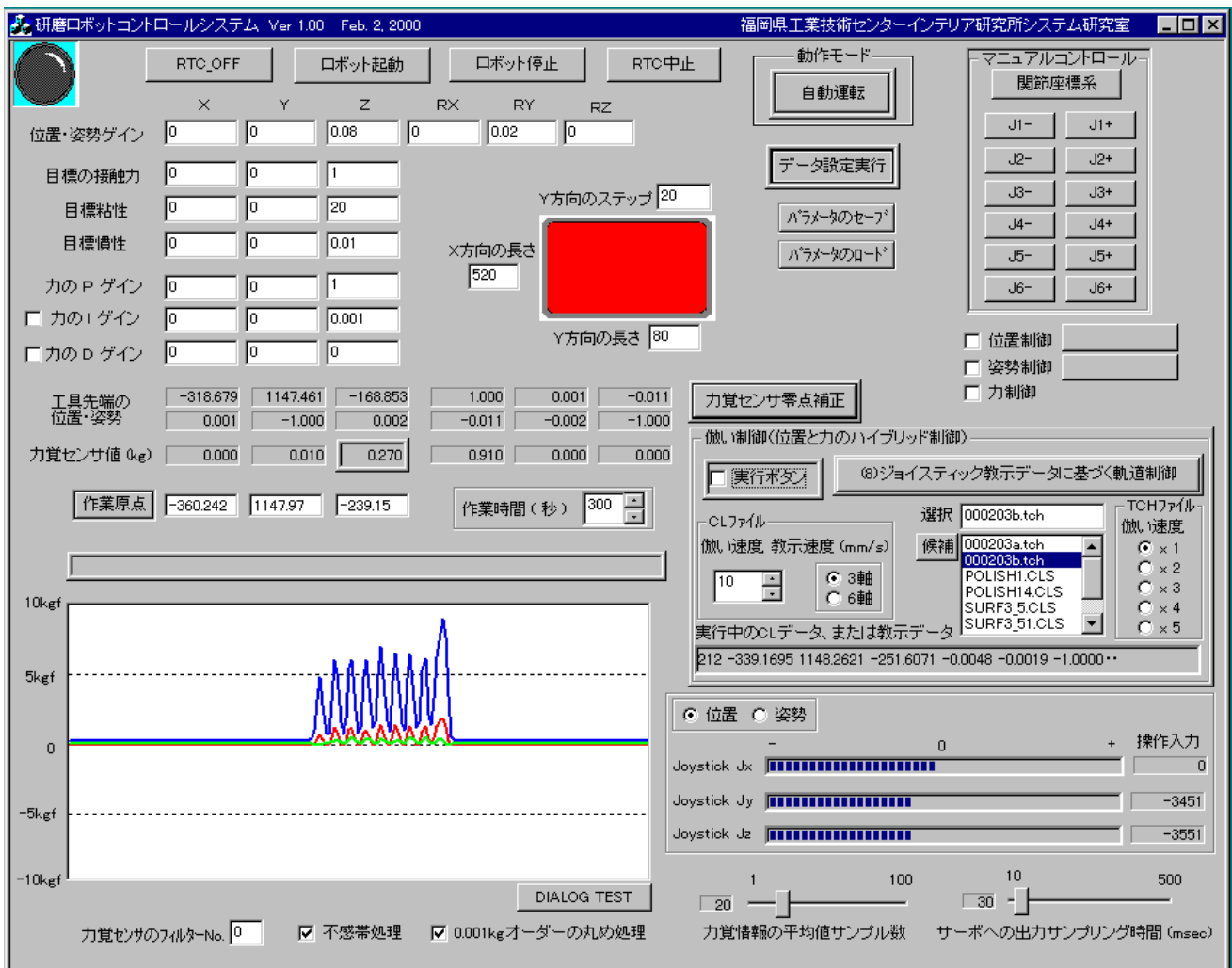


図-3 Windows上で開発した研磨ロボットのためのユーザインタフェース

ようなしくみにより制御されていることになる。本章ではユーザが簡易操作で研磨ロボットを操作できるように開発したユーザインタフェースについて若干述べることにする。基本的な研磨は、X-Y 平面をジグザグパターンで做わせながら、これと同時に曲面に応じて研磨工具の姿勢を最適に（例えば曲面の法線方向から）保ちながら進める。操作方法はつぎのとおりである。

Step 1：NC 加工された材料を固定し，ワーク座標原点を入力後，加工範囲と研磨工具に応じた送りの幅を設定する。

Step 2：倣い速度，インピーダンスパラメータなどの各ゲイン，目標の接触力，力覚データの不感帯処理及び丸め処理のオン/オフ，サーボへの出力用サンプリング時間などを設定する。設定したパラメータは，パラメータファイル（****.prm）として保存することができる。

Step 3：材料形状に応じた目標軌道データをファイル名指定により選択する。目標軌道は，CAD/CAM システムが生成した多軸制御用 CL データ（****.cls）あるいはジョイスティック教示⁵⁾により得られた軌道データ（****.tch）を直接利用することができる。

Step 4：前述のパラメータを設定後，実行ボタンをクリックすることでロボットによる研磨作業が開始される。また，研磨作業中は，モニター上にリアルタイムで研磨工具の位置・姿勢，接触力などが表示される。なお，研磨作業中，事前に設定した最大過負荷（例えば 3 kgf）以上の外力を検出した場合には作業を即時中止し，工具を材料から離す方向へ退避させるようにしている。図-3 には Windows のダイアログをベースに開発したユーザインタフェースを示す。

4 研磨実験

本章では，回転式の研磨工具を搭載したオープンアーキテクチャ型の産業用ロボット JS-10 を用いた研磨実験により，提案手法の有効性について検証した。図-4 と 図-5 には，研磨ロボットの全体図とロボットアーム先端に取付けた研磨工具部分の拡大図をそれぞれ示す。実際の研磨作業の現場では，用途に応じて図-5 のような回転式をはじめ図-6 のような振動式の研磨工具が多用されている。駆動方法はエア駆動式であり，質量は数 kg 程度である。研磨工具先端には，マ

ジックテープにより #80～#1000 程度の研磨紙を簡単に取付けることができる。本実験では，ニッタ社製の力覚センサを介して専用アタッチメントにて研磨工具を固定した。使用した研磨工具の直径は 5 cm，研磨紙の番手は #220 である。このタイプの研磨工具は動作時に高周波成分を持つ振動を発生するため，次式に示す簡単なスムーサで平滑処理した信号をフィードバック処理に用いた。

$$\frac{\sum_{n=k-m}^k \{F(n)\}}{m} \quad (12)$$

ここで m はサンプル数である。図-7 と 図-8 にはそれぞれ，NC 加工後の曲面を持った家具部材の研磨風景とジグザグパターンを示す。実験では，NC 加工後の表

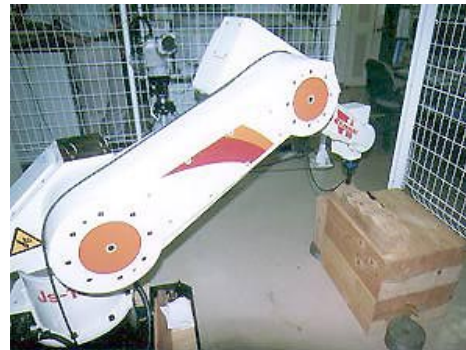


図-4 研磨ロボットシステムの全体図



図-5 回転式の研磨工具



図-6 振動式の研磨工具



図-7 回転式研磨工具を用いた研磨実験風景

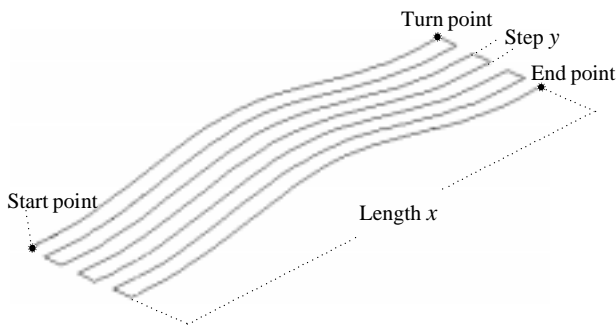


図-8 実験で使用したジグザグパターン

表-1 使用した制御パラメータ

Desired contact force $\sqrt{(f_{dx})^2 + (f_{dz})^2}$	1 [kgf]
X-directional profiling velocity $x_d(k)/\Delta t$	5 [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
Position feedback gain K_{p1}, K_{p3}	0.008
Orientation feedback gain K_{p5}	0.002
Sampling width Δt	10 [msec]
Sampled force sensor data m	20

面がざらざらした木質材料に研磨工具を低速で衝突させた後、目標の力 1 kgf で接触させたまま Start 点から Turn 点まで表面を做わせることで研磨作業を行い、Case 1: 式(5)を用いた場合、Case 2: 式(6)を用いた場合、Case 3: 式(7)を用いた場合の3とおりで制御性能を比較した。設定した接触力については、手加工による研磨の場合に 25 ~ 50 gf/cm² の力で稼働している⁶⁾ことを考慮し、研磨工具の面積から次式のような算出した。

$$\pi \times 2.5^2 \times 0.05 \approx 1.0 \text{ [kgf]} \quad (13)$$

なお、材料の X 方向の長さは 520 mm である。また、実験で使用した制御パラメータを表-1 に示す。

4-1 Case:1 制御則として式(5)を用いた場合

最初の実験は、インピーダンスモデル追従型の力制御のみを用いて行った。この場合工具の姿勢制御はできないため工具が常にベース座標系において -Z 方向を向くように、姿勢ベクトルである Z-Y-Z オイラー角を $[0 \pi 0]$ に固定した。図-9 には、研磨実験時の工具方向における力の応答を示す。材料形状に起因した力偏差が発生していることがわかる。このような大域的緩やかな振動は、その仕上がりにおいても緩やかな凹凸を発生させる原因となるので、除去しなければならない。

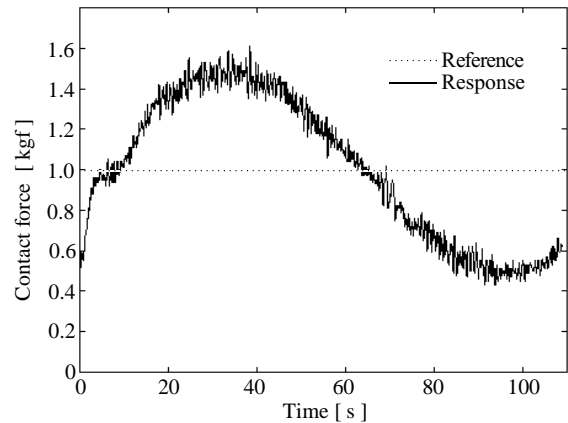


図-9 式(5)を用いた場合の力制御結果

4-2 Case:2 制御則として式(6)を用いた場合

式(6)で表される制御則は、式(5)の制御則に積分制御を加えたものである。一般的に積分制御には定常偏差を減らす効果があることが知られており、図-10の実験結果から期待どおりの効果が表れていることがわかる。

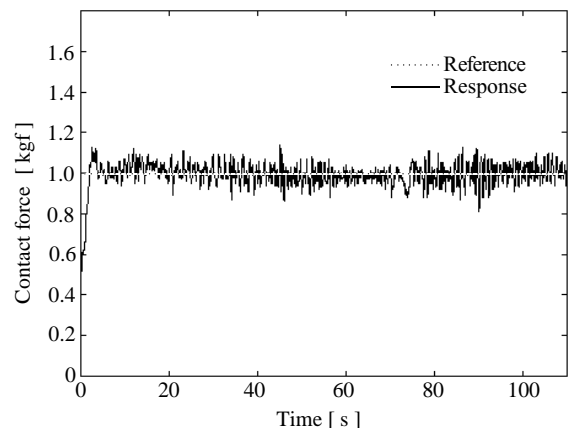


図-10 式(6)を用いた場合の力制御結果

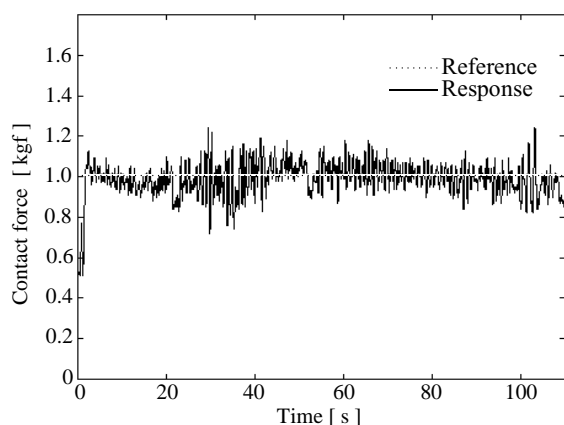


図-11 式(9)を用いた場合の力の応答

4-3 Case:3 制御則として式(9)を用いた場合

制御則式(9)では、さらに位置補償器からの出力を力制御を行う方向のフィードフォワード量として、また、位置・姿勢制御を行う方向の目標軌道として用いることで、速い速度の高速化及び研磨工具の姿勢制御が可能となる。図-10は、位置補償器からの出力により研磨工具が常に材料表面の法線方向から接触するように制御した場合の力の応答である。このように提案手法を用いることで、研磨工具を目標の力で接触させたまま、材料表面を望ましい姿勢で做わせることが可能になった。また、研磨後の表面性状についても手作業による場合と同程度の非常に良好な仕上げ面を得ることができた。

5 結言

本研究では、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、これにインピーダンスモデル追従型の力制御法をインプリメントすることで、材料と研磨工具間に発生する接触力を調節できる研磨ロボットシステムを提案した。また、NC加工後の曲面を有する材料を用いた研磨実験により、提案するシステムの有用性を確認した。特に、種々の研磨作業に対しては、それらに適切な研磨工具と研磨紙の番手を選択し、力制御と軌道制御を併用することで、フレキシブルな研磨戦略を立てることが可能となった。今後は、CAD/CAMシステムで設計されていない任意形状を有する材料に対しても研磨ロボットシステムを容易にかつ安全に適用できるように、ジョイスティック支援によるヒューマンフレンドリなティーチング機能^{7, 8)}を開発

する予定である。

謝辞

ここまでの研究は、平成9年度から平成11年度にかけて福岡県商工部新技術研究開発特別事業により実施したものであり、関係方々に対して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 永田寅臣, 渡辺桂吾, ほか1名: 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).
- 2) F. Nagata, K. Watanabe, et al.: An Experiment on Profiling Task with Impedance Controlled Manipulator Using Cutter Location Data, *Procs. of the IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics (SMC'99)*, Tokyo International Forum, p. 848-853 (1999).
- 3) F. Nagata, K. Watanabe, et al.: Position-Based Impedance Control Using a Fuzzy Compensator, *Procs. of the 3rd International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems (KES'99)*, Adelaide, Australia, p. 125-128 (1999).
- 4) F. Nagata and K. Watanabe: An Experiment on Sanding task Using Impedance Controlled Manipulator with Vibrational Type Tool, *The 3rd Asian Control Conference*, Shanghai Worldfield Convention Hotel, p. 2989-2994 (2000).
- 5) F. Nagata and K. Watanabe: Teaching System for a Polishing Robot Using a Game Joystick, *The 39th SICE Annual Conference (SICE'2000), International Sessions*, Iizuka, Fukuoka, (accepted).
- 6) 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).
- 7) F. Nagata and K. Watanabe: Polishing Robot with Human Friendly Joystick Teaching System, *International Conference on Machine Automation (ICMA2000)*, (accepted).
- 8) F. Nagata, K. Watanabe, et al.: Polishing Robot Using a Joystick Controlled Teaching system, *IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, Nagoya Congress Center, (accepted).