

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(1)

—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力制御—

永田寅臣*1 渡辺桂吾*2 泉 清高*2

Development of Damping Controlled Polishing Robot with Rotational Type Tools (1)

- Profiling Control for Industrial Robots Using a Position Compensator Based on Cutter Location Data -

Fusaomi Nagata, Keigo Watanabe, Kiyotaka Izumi

力制御ロボットを研磨作業に適用する場合に基本となる制御戦略が力制御である。この力制御は、力制御で研磨工具を材料表面に目標とする力で接触させながら、研磨工具が材料表面の法線方向から常に接触するように位置・姿勢制御を行うことで実現できる。材料表面における局所的な研磨の仕上げ精度は、使用する研磨紙の番手を適切に選択することで望みの仕上げ面を得ることができる。これに対して、材料表面のゆるやかなうねりなど大域的に見た場合の微小凹凸は、接触力を安定的に制御することで抑制することができる。本研究では、(1)研磨工具が法線方向から材料表面に接触するように位置・姿勢制御を行う、また、(2)材料の形状変化に起因して発生する力偏差を抑える、二つの機能を有する位置補償器を提案した。これにより、従来のCAD/CAMシステムとの連携が可能になっただけでなく、煩わしい教示作業を行うことなく目標軌道を獲得できるようになった。

1 緒言

木製家具の製造分野では、CAD/CAM システムとNC 工作機械の普及により、設計および加工工程の自動化が積極的に進められてきた。最近では、より付加価値の高いデザインを有する商品開発のために、スピンドルチルト型の 5 軸制御 NC 工作機械も利用され始めている¹⁾。一方、研磨工程には、NC 加工後の木地研磨と塗装後の塗膜研磨があるが、現状ではどちらの場合も典型的な 3K 作業となっており、作業者は粉塵が舞う悪環境下での単調な作業を余儀なくされている。これは、家具部材の研磨作業では、その仕上がりが具合が商品の外観や品質に直接影響するため、繊細で丁寧な作業が必要とされ、自動化がより困難なものとなっているからである。このような背景から、研磨工程は家具の製造工程の中で最も自動化が望まれている工程となっている。本研究では、対象とする自動化機械として、作業者の肩・腕・手首に近い自由度を有していること、既に自動車や各種機械の生産現場では多数導入されており技術情報を入手しやすいこと、コスト的に中小企業でも導入可能であること等の理由から、汎用の産業用ロボットをベースとすることとした。

さて、産業用ロボットを用いて研磨作業を自動化していくための基本的な制御戦略としては、アーム先端

に取り付けた研磨装置を材料表面に目標の力で接触させながら表面を移動させる力制御が一般的となっている。この場合、材料形状に応じて位置制御と力制御をハイブリッドに行うことで、いかに振動を抑えた力制御を実現できるかが重要となる。しかしながら、材料の形状に関する情報が未知の場合には教示により目標軌道を生成しなければならないだけでなく、力制御速度を遅くする等の対策をしなければ接触力を安定的に制御することが難しい。このため、法線検出装置を用いる教示作業の簡略化法²⁾、CAD システムで設計した形状データを用いて教示作業を省略する方法^{3~5)}、さらに形状データと画像処理技術を併用した方法⁶⁾などが提案されている。しかしながら、ユーザ側から見るとシステムが複雑なだけでなく、材料形状の不均一さや材料の固定位置の不確かさを吸収した安定的な研磨作業を実現することが難しく、家具部材の研磨には適用されていない。

ところで、CAD/CAM システムで設計され NC 工作機械で加工された材料であれば、その形状情報として CL (Cutter Location) データを参照することができる。そこで、本稿では、多軸制御用の CL データを

(1) 力制御を行う方向のフィードフォワード量を求める。

(2) 位置・姿勢制御を行う方向の目標軌道を発生させる。

*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

二つの目的に使用する位置補償器を提案する⁷⁾。さらに、この位置補償器と既に提案している位置指令型インピーダンス制御法^{8)~10)}を組み合わせることで、容易に倣い制御系を構成する方法を示す。これにより、NC加工後の家具部材に対して教示作業を行うことなく倣い制御を実行できるだけでなく、CLデータのみを参照するため、使用するCAD/CAMシステムに依存しない汎用的な研磨ロボットシステムを構築できる。さらに、インピーダンスパラメータのダンパー要素だけを制御対象とするダンピング制御法で接触力を制御するため、材料形状の不均一さや材料の固定位置の不確かさを吸収した倣い制御が可能となる。オープンアーキテクチャ型の産業用ロボットを用いた倣い制御実験で提案手法の有効性を検証したので報告する。

2 位置指令型ダンピング制御法

倣い制御を行うためには、エンドエフェクタの位置・姿勢を制御する位置制御系と、エンドエフェクタと対象物との間に発生する接触力を制御する力制御系を同時に実現しなければならない¹¹⁾。そこで本章では、力制御に用いる位置指令型のダンピング制御法について述べる。まず、6自由度産業用ロボットのアーム先端の望ましいインピーダンス特性として次式を考える¹²⁾。

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

ここで $x \in \mathbb{R}^6$, $\dot{x} \in \mathbb{R}^6$, $\ddot{x} \in \mathbb{R}^6$ は作業座標系でのアーム先端の位置、速度、加速度ベクトル、 $M_x(\theta) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は実慣性行列、 F は $F^T = [f^T \ n^T]$ で定義されるアーム先端に作用する力ベクトル $f^T = [f_x \ f_y \ f_z]$ とモーメントベクトル $n^T = [n_x \ n_y \ n_z]$ からなる力・モーメントベクトル、 $K_f = \text{diag}(K_{f1}, \dots, K_{f6})$ はカフィードバックゲイン行列である。また、 $x_d, \dot{x}_d, F_d^T = [f_d^T \ n_d^T]$ は目標とする位置、速度、力・モーメントベクトルであり、 $B_d = \text{diag}(B_{d1}, \dots, B_{d6})$, $K_d = \text{diag}(K_{d1}, \dots, K_{d6})$ は目標の粘性係数行列と剛性係数行列である。 S, E はスイッチ行列 $\text{diag}(S_1, \dots, S_6)$ および単位行列である。なお K_f, B_d, K_d は正定対角行列とする。式(1)は、 $S = E$ のとき全方向コンプライアンス制御系となり、 $S = \mathbf{0}$ のとき全方向力制御系となる。つぎに、式(1)の望まし

い応答において、加速度は制御の対象としないものとし、実慣性項を無視する。このとき、サンプリング幅 Δt を用いて離散時刻 k での解を求めると次式の位置指令型操作量の再帰式が得られる¹³⁾。

$$\begin{aligned} x(k) = B_d^{-1}K_f(F - F_d)\Delta t \\ + x(k-1) + x_d(k) - x_d(k-1) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $x(k)$ は位置ベクトル $[x(k) \ y(k) \ z(k)]^T$ と姿勢ベ



図-1 5軸制御NC工作機械による加工風景

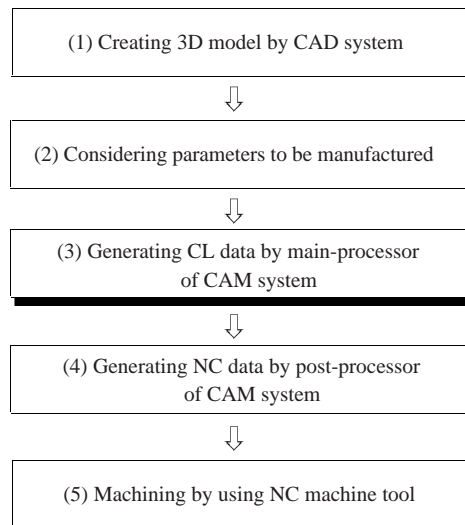


図-2 CAD/CAMシステムによる設計・加工工程

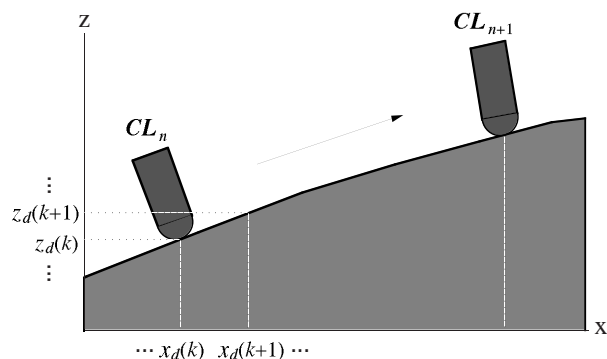


図-3 CLデータと目標軌道 $x_d(k)$ との関係

クトルである Z-Y-Z オイラー角 $[\phi(k) \theta(k) \psi(k)]^T$ で構成する。式 (2) から得られる作業座標系での操作量 $\mathbf{x}(k)$ を逆キネマティクスにより各関節角度 $\theta(k)$ に変換し、この $\theta(k)$ をサンプリング間隔ごとにサーボ系への目標値として与えることで、エンドエフェクタと材料間に作用する接触力 \mathbf{F} を目標値 \mathbf{F}_d に追従させることができる。さて、本研究では、エンドエフェクタを法線方向から目標の力で対象物に接触させて表面を移動させる倣い制御を研磨作業のための基本制御戦略として位置付ける。そこで、次章では、式 (2) を用いてどのように倣い制御を実現するかについて述べる。

3 多軸制御用 CL データに基づく位置補償器

一般に産業用ロボットは頑健で高い剛性を持っているため、エンドエフェクタ部に弾性を持たせるなどの対策をしなければ、硬い環境に対して安定的な倣い制御を行うことが難しい¹⁴⁾。その他にも倣い制御系を不安定にする要因としては、環境の形状、環境表面の粗さ、接触に伴う摩擦、倣い速度などがある。さて、幸いにも倣い制御の対象となる材料が CAD/CAM システムで設計され、NC 工作機械で加工されている場合には、材料の形状に関する情報として CL データを参照することができる¹⁴⁾。例えば、図-1 はティルティングヘッドを持った 5 軸制御 NC 工作機械による木製洗面台の底部の加工風景であり、この場合の設計から加工までの工程を図-2 に示す。CL データは、図-2 の工程 (3) においてメインプロセッサから生成される。その n ステップ成分 ($\mathbf{CL}_n \in \mathbb{R}^6$) は位置ベクトル $[x_n \ y_n \ z_n]^T$ とその点における法線ベクトル $[vx_n \ vy_n \ vz_n]^T$ から構成され、次式のように与えられる。

$$\mathbf{CL}_n^T = [x_n \ y_n \ z_n \ vx_n \ vy_n \ vz_n] \quad (vx_n^2 + vy_n^2 + vz_n^2 = 1) \quad (3)$$

本章では、式 (3) で与えられる位置・姿勢情報をもとにサンプリング間隔ごとの目標とする軌道を生成可能な位置補償器を提案する。ロボットの制御系では、それを、① 力制御を行う方向のフィードフォワード量として、また、② 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、教示作業を必要としない倣い制御を実現できる。

3-1 ロボット制御用の目標軌道の生成

提案する位置補償器は、ロボットのエンドエフェクタを対象物表面に法線方向から目標の力で接触させたまま移動させるために、CL データを用いて目標軌道を算出する。 n ステップ \mathbf{CL}_n^T と $n+1$ ステップ \mathbf{CL}_{n+1}^T における材料と工具の関係を示す例題を図-3 に示す。ただし、この場合 y 方向への工具の傾斜はなく ($vy = 0$)、 y 方向における位置は一定 ($y = \text{constant}$) であると仮定する。さて、サーボ系への操作量 $\mathbf{x}(k)$ は倣い速度やサンプリング間隔に応じて作成する必要があるが、一般的には CL データの刻みに比べて非常に微小である。このため、 x 方向の移動速度を基準とし、直線近似により求めることとした。例えば、 z 方向の目標の位置 $z_d(k)$ は次式から求めることができる。

$$z_d(k) = \frac{z_{n+1} - z_n}{x_{n+1} - x_n} x_d(k) + \frac{x_{n+1} z_n - x_n z_{n+1}}{x_{n+1} - x_n} \quad (4)$$

目標とする姿勢ベクトル $[vx_d(k) \ vy_d(k) \ vz_d(k)]^T$ も同様に求めることができる。この姿勢ベクトルは、逆キネマティクスへ入力するために Z-Y-Z オイラー角 $[\phi(k) \theta(k) \psi(k)]^T$ に変換する。図-4 には、目標とする軌道 $\mathbf{x}_d(k)$ の生成過程を示す。

3-2 位置補償器を用いた倣い制御

図-5 には提案する位置補償器を用いた制御系のブロック線図を示す。ここでは、倣い制御を行うためにスイッチ行列 $\mathbf{S}^i = \text{diag}(S^i_1, \dots, S^i_{s_i})$ を用いて位置・姿勢制御系と力制御系をハイブリッドに制御する。対角成分

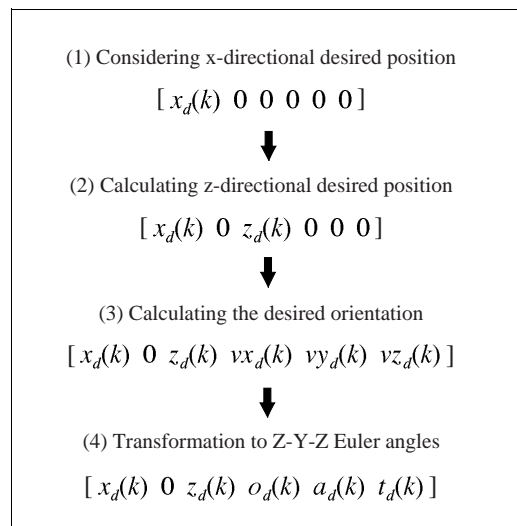


図-4 目標軌道 $\mathbf{x}_d(k)$ の生成工程

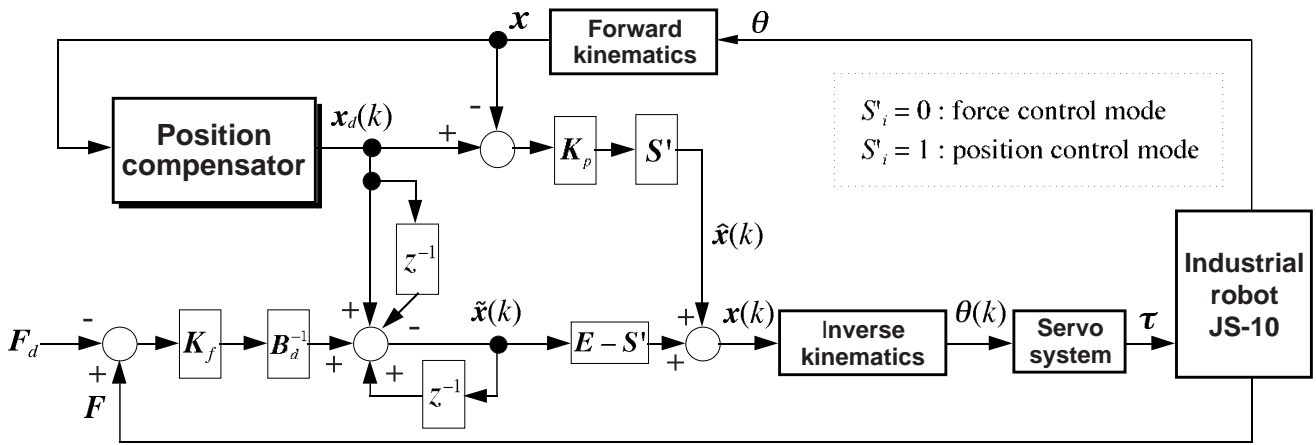


図-5 位置補償器を用いた位置指令型ダンピング制御コントローラのブロック線図

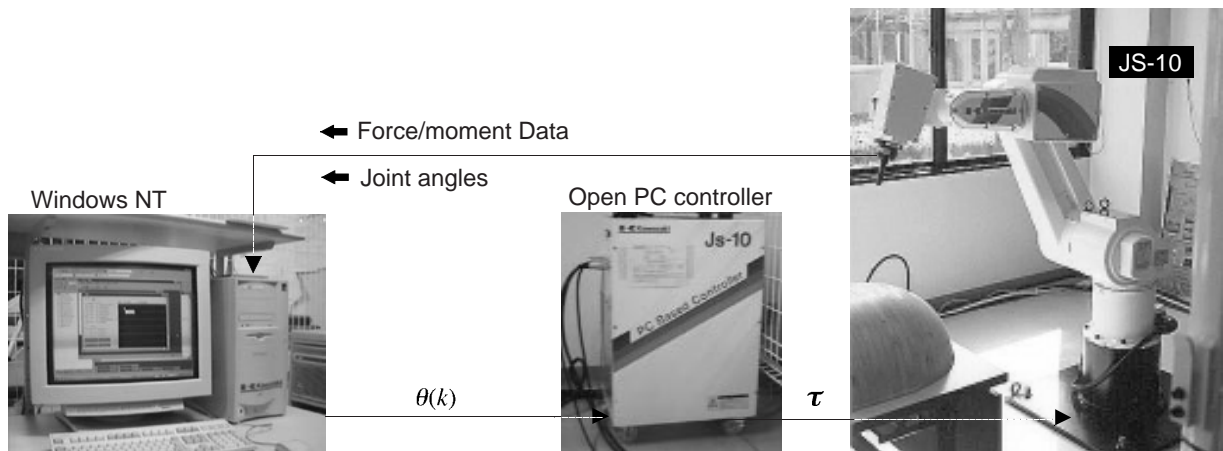


図-6 オープンアーキテクチャ型の産業用ロボット JS-10 を用いた実験システム

が 0 の方向は力制御系となり、1 の方向は位置・姿勢制御系となる。さて、図-5 において力制御を行う方向の位置指令値を $\tilde{x}(k)$ とすると、 $\tilde{x}(k)$ は力偏差 $(F - F_d)$ に力フィードバックゲイン K_f と目標粘性の逆行列 B_d^{-1} を乗じ、それに位置補償器からの補正量 $[x_d(k) - x_d(k-1)]$ と $\tilde{x}(k-1)$ を加えることで生成させる。また、位置・姿勢制御を行う方向の指令値 $\hat{x}(k)$ は、位置補償器からの目標軌道との位置偏差 $[x_d(k) - x]$ に位置フィードバックゲイン $K_p = \text{diag}(K_{p1}, \dots, K_{p6})$ を乗じることで生成させる。それぞれの方向の指令値を加えた $x(k)$ は、逆キネマティクスにより各関節の角度ベクトル $\theta(k)$ に変換され、サーボへの目標値として入力される。このように、対象物が NC 工作機械で加工されていれば、CL データをその形状情報として用いることができるため、教示を行うことなく倣い制御系を容易に構成することができる。さらに、提案手法は位置指令型であるので、オープンアーキテクチャ型の産業用ロボットであれば容易に適用できることを特徴とする。

4 位置補償器を用いた研磨実験

本章では、図-5 に示した提案手法を実際にオープンアーキテクチャ型の産業用ロボット JS-10 に適用し、NC 加工後の木質系材料との研磨実験を行うことでその有効性について検証する。実験で使用する産業用ロボットは、川崎重工業製の PUMA 型マニピュレータ JS-10 であり、ロボットのアーム先端とエンドエフェクタ間には、ニッタ社製の 6 軸力・トルクセンサを搭載している。図-6 に示すように、実験システムはロボット本体、サーボコントローラ、制御用コンピュータ (PC FMV-6266T6: 富士通製) から構成される。プログラム開発は、Windows NT 上で川崎重工業が

表-1 API ファンクション

| |
|---|
| Servo control with joint angles θ |
| Setting sampling width (minimum 4 ms) |
| Forward kinematics ($\theta \rightarrow x$) |
| Inverse kinematics ($x \rightarrow \theta$) |
| Getting inertia matrix M_x in Cartesian space |
| Getting Jacobian matrix |

提供する Visual C++ 用の API (Application Programming Interface) を用いて行った。この API を用いれば、サーボコントローラには最短 4 ms ごとに関節角度指令で操作量を与えることができ、カフィードバック制御系を構成できる。表-1 には、使用した API の一覧を示す。

4-1 倣い制御問題

図-7 のような曲面を持つ NC 加工後の木材を実験用のワークとして用いる。ただし、NC 加工後のワークには逆目が発生しており、指で触るとかなりざらざらした粗い表面となっている。また、ロボット座標系におけるワークの位置決めは、特殊なセンサなどを用いず、手作業で行うものとする。これにより、ある程度の位置決め誤差を意図的に発生させることとした。さ

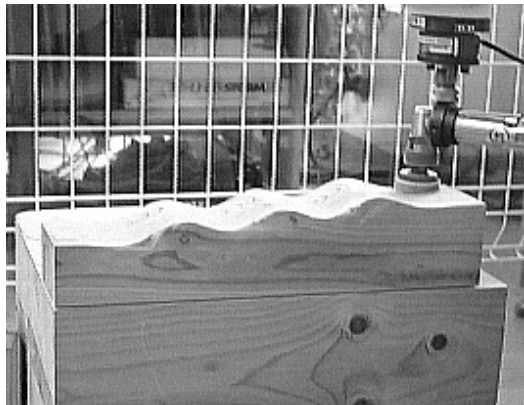


図-7 提案手法を用いた倣い制御の実験風景

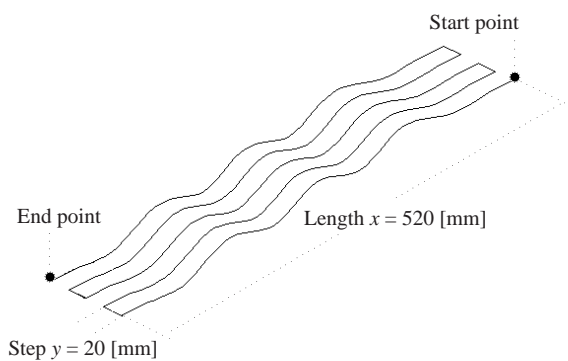


図-8 実験で使用したジグザグパス

表-2 実験で使用した制御パラメータ

| | |
|---|----------------|
| Desired contact force f_{dz} | 0.7 [kgf] |
| x-directional profiling velocity \dot{x}_d | 10 [mm/s] |
| Desired damping coefficient B_{d3} | 0.1 [kgf s/mm] |
| Force feedback gain K_{f3} | 0.35 or 1.5 |
| Position feedback gain K_{p1} | 1 |
| Position feedback gain K_{p4}, K_{p5}, K_{p6} | 0.001 |
| Sampling width Δt | 10 [ms] |

て、実験では、実際に作業者が使用しているハンディタイプのエア駆動式の研磨工具を用いた。この研磨工具は回転式で、回転部分にはマジックテープを介して #220 の研磨紙を取付けている。図-8 には、実験で使用した CL データの並進移動成分を示す。研磨実験は、研磨工具をワークに接触させた後、力制御で目標の接触力 0.7 kgf を維持したまま、研磨工具が常にワーク表面の法線方向から接触するように位置・姿勢を制御しながら始点から終点に移動させる倣い制御を行うことで実施した。倣いの基準となる x 方向の速度は、10 mm/s とした。また、力制御は目標粘性を 0.1 kgf s/mm、カフィードバックゲインを 0.35 とし、式 (2) を用いて行う。ただし、サンプリング幅は 10 ms とした。表-2 には、実験で使用した制御パラメータを示す。

4-2 倣い制御結果

図-9 には、工具座標系における z 方向の接触力の変化を示す。エア駆動の研磨工具が高周波振動を発生するため、それに伴う振動成分が残っているものの、目標値まわりでの良好な応答が確認できる。この場合、CL データ ($CL_n^T = [x_n y_n z_n vx_n vy_n vz_n]$) に基づく位置補償器により、研磨工具の姿勢は図-10 のように制御されている。以上の実験結果から、提案する位置補償器を用いることで、良好な力の応答が得られただけでなく、従来法では課題となっていた煩わしい教示作業を行うことなく倣い制御が実現できることを確認した。さらに、研磨後のワーク表面についても、触覚検査により非常に良好な仕上げ面が確認された。

今後は、積分制御器の追加や力覚信号の平滑化処理について検討する予定である。

5 結 言

本稿では、オープンアーキテクチャ型の産業用ロボットに対して、多軸制御用 CL データに基づく位置補償器を提案し、位置指令型のダンピング制御法と併用することで容易に倣い制御系を構成する方法を示した。また、提案手法を曲面を有する材料との研磨作業に適用することで以下のような結論を得た。

- (1) 教示作業を行うことなく産業用ロボットの倣い制御が可能になった。
- (2) 材料形状の不均一さや固定位置の不確かさを吸収

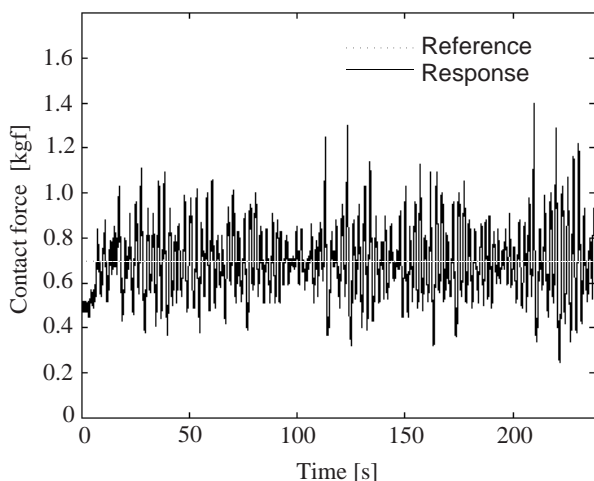


図-9 工具方向の接触力の応答

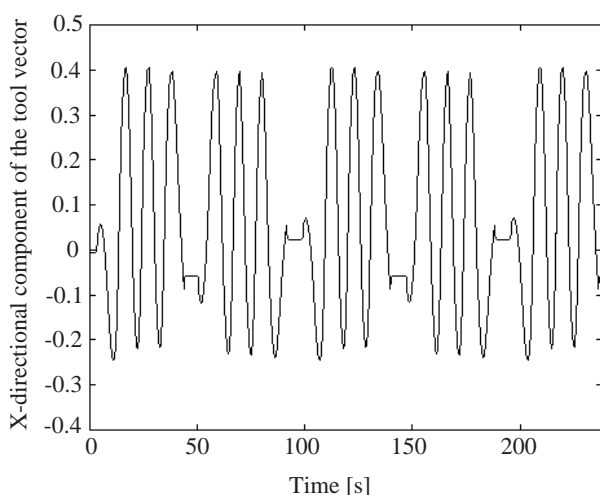


図-10 工具姿勢ベクトルのX方向成分の変化

することが可能となり、エンドエフェクタに弾性機構を持たせることなく倣い制御を実現できた。

最後に、本報告は精密工学会誌 66 巻 3 号 p. 473-477 への掲載内容をもとに再構成したものである。

6 参考文献

- 1) 永田寅臣, 渡辺桂吾: 木工用スピンドルチルト型5軸制御NC工作機械のためのポストプロセサの開発, 精密工学会誌, Vol. 62, No. 8, p. 1203-1207 (1996).
- 2) 樫村幸辰, ほか1名: 研磨ロボットのティーチング方法の簡略化に関する研究, 精密工学会誌, Vol. 59, No. 9, p. 1489-1494 (1993).
- 3) 竹内芳美, ほか2名: ロボットによる磨き作業の自動

化(第1報)ー磨きロボットシステムの構成ー, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 58, No. 545, p. 289-294 (1992).

- 4) 葛 東方, ほか2名: ロボットによる磨き作業の自動化(第2報)ー干渉回避した磨き経路の自動生成ー, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 59, No. 561, p. 1574-1580.
- 5) Y. Takeuchi, et al.: Automated Polishing Process with a Human-like Dexterous Robot, *Procs. IEEE International Conference Robotics and Automation*, p. 950-956 (1993).
- 6) 浅川直紀, ほか2名: ロボットによるバリ取り作業の自動化ー自由曲面上の湯口の場合ー, 精密工学会誌, Vol. 64, No. 5, p. 773-777 (1998).
- 7) 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*, p. 848-853 (1999).
- 8) 永田寅臣, 渡辺桂吾, ほか3名: オープンアーキテクチャ型の産業用ロボットのための位置指令型インピーダンス制御, 精密工学会誌, Vol. 64, No. 4, p. 541-545 (1998).
- 9) 永田寅臣, 渡辺桂吾, ほか2名: 学習型ファジィ環境モデルを用いた位置指令インピーダンス制御, 日本機械学会論文集(C), Vol. 64, No. 628, p. 4679-4686 (1998).
- 10) 永田寅臣, 渡辺桂吾, ほか2名: 多軸制御用CLデータを用いた産業用ロボットの倣い制御, 1999年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p. 630 (1999).
- 11) M. H. Raibert, et al.: Hybrid Position/Force Control of Manipulators, *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Cont.*, Vol. 102, p. 126-133 (1981).
- 12) 桂川敬史, ほか3名: 産業用ロボットにおけるハイブリッド・コンプライアンス/力制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, p. 893-898 (1994).
- 13) 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倣い制御, 精密工学会誌, Vol. 66, No. 3, p. 473-477 (2000).
- 14) K. Takahashi, et al.: Study on a Fast Profiling Task of a Robot with Force Control Using Feedforward of Predicted Contact Position Data, *Procs. 4th Japan-France Congress & 2nd Asia-Europe Congress on Mechatronics*, Vol. 1, p. 398-401 (1998).