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*

永田 寅臣** 渡辺 桂吾*** 泉 清高†

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

Fusaomi NAGATA, Keigo WATANABE and Kiyotaka IZUMI

We have already proposed a position-based impedance control for industrial robots with an open architecture controller. In this paper, it is described on how to easily apply the impedance controlled robot to a profiling task along the object with curved surface and to improve the performance using a position compensator based on the cutter location (CL) data. The CL data generated by CAD/CAM system have information of points along the curved surface and their normal vectors. If the object is manufactured with multi-axis numerical control (NC) machine tool, the CL data can be used as the prior information of object shape. The compensator using the CL data generates not only desired trajectory in the direction of position control but also feedforward information in the direction of force control. This technique allows us to obtain the desired trajectory without complicated teaching, and to improve the performance for profiling control. Some profiling control experiments using an industrial robot JS-10 are shown to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: 5-axis NC machine tool, cutter location data, industrial robot, open architecture controller, impedance control, feedback control, feedforward control, profiling task

1. 結 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倣い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倣い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、倣い速度

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

二つの目的に使用する位置補償器を提案する。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^{7~9)}を組み合わせることで、容易に倣い制御系を実現する方法を示す。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. 位置指令型インピーダンス制御法

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

* 原稿受付 平成 11 年 8 月 12 日

** 正 会 員 福岡県工業技術センター (大川市上巻 405-3)

*** 正 会 員 佐賀大学大学院 (佐賀市本庄町 1 番地)

† 正 会 員 佐賀大学理工学部

ばならない¹⁰⁾。そこで本章では、力制御に用いる位置指令型インピーダンス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¹¹⁾。

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

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、 $K_f = \text{diag}(K_{f1}, \dots, K_{f6})$ は力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、 $S = 0$ 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⁹⁾。

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

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 $x(k)$ 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 F を目標値 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に対象物に接触させて表面を移動させる微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微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微い制御を行うことが難しい¹²⁾。その他にも微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、微い速度などがある。さて、幸いにも微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。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 ($CL_n \in \mathbb{R}^6$) 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。

$$CL_n^T = [x_n \ y_n \ z_n \ vx_n \ vy_n \ vz_n] \quad (vx_n^2 + vy_n^2 + vz_n^2 = 1) \quad (3)$$

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

Fig. 1 Machining scene using 5-axis NC machine tool

Fig. 2 General process of design and manufacturing

Fig. 3 Relation between CL data and desired trajectory $x_d(k)$

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扱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

Fig. 4 Generating procedure of desired position $x_d(k)$

ステップ CL_n^T と $n+1$ ステップ 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 $x(k)$ は扱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 $x_d(k)$ の生成過程を示す。

3.2 位置補償器を用いた扱い制御

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、扱い制御を行うためにスイッチ行列 $S' = \text{diag}(S'_1, \dots, S'_6)$ 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

Fig. 5 Block diagram of position-based impedance control using a position compensator

Fig. 6 Experimental system using an industrial robot JS-10

いて力制御を行う方向の位置指令値を $\hat{x}(k)$ とすると、 $\hat{x}(k)$ 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 $\hat{x}(k-1)$ 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. 倣い制御実験

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に適用し、木質系の材料との倣い制御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) からなる。プログラム開発は、Windows NT 上で川崎重工業が提供する 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る。

Table 1 API functions

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

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 加工後の木材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、特殊なセンサなどは用いず、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。さて、実験では、金属製のエンドエフェクタをワークに衝突させた後、目標の接触力 2 kgf で接触させたまま P 点から Q 点に移動させる倣い制御を行う。倣いの基準となる x 方向の速度は、4 mm/s とした。また、力制御は目標粘性を 0.1 kgf·s/mm、力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。

Fig. 7 An experimental work with curved surface

Table 2 Parameters used in experiments

Desired contact force f_{dz}	2 kgf
x-directional profiling velocity $\dot{x}_d$	4 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

Fig. 8 A profiling scene using proposed method

実験は、つぎに示す 3 とおりで行った。図8 には、実験風景を示す。

- Case 1: 位置補償器を用いない場合
- Case 2: 位置補償器を用いる場合 (ただし、エンドエフェクタの姿勢は図7のように z 軸方向で固定する)
- Case 3: 位置補償器を用いる場合 (ただし、エンドエフェクタが材料表面に法線方向から接触するように姿勢も制御する)

4.2 倣い制御結果

図9 には、Case 1 における力の応答を示す。このとき、姿勢を表す Z-Y-Z オイラー角は $(0 \pi 0)$ に固定し、力のフィードバックのみで制御を行った。図9 より、材料の表面形状に起因した力の偏差が発生していることがわかる。つぎに、図10 には Case 2 における力の応答を示す。このとき、Case 1 と同様に姿勢は固定されたままであるが、CLデータ ($CL_n^T = [x_n \ y_n \ z_n]$) に基づく位置補償器を用いた。明らかに応答が改善されていることが確認できる。さらに、図11 には、Case 3 における力の応答を示す。この場合は、CL デー

Fig. 9 Force control result without position compensator

Fig. 10 Force control result with position compensator

Fig. 11 Force control result with position compensator

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を用いており、エンドエフェクタの姿勢も制御している。また、工具座標系における z 方向の力フィードバックゲインを $K_{f3}=1.5$ と大きくすることで、より目標値まわりでの良好な追従特性が得られていることが確認できる。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、力の応答を改善できるだ

けでなく、煩わしい教示作業を行うことなく倣い制御を実現できることを確認した。

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、位置指令型インピーダンス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、倣い制御実験を行う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) 倣い制御時の力制御性能を改善することができた。
- (3) 材料形状の不均一さや固定位置の不確かさを吸収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。

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ッサの開発, 精密工学会誌, **62**, 8 (1996) 1203.
- 2) 櫻村幸辰, 八島 昇: 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, **59**, 9 (1993) 1489.
- 3) 竹内芳美, 浅川直紀, 葛 東方: ロボットによる磨き作業の自動化 (第1報) - 磨きロボットシステムの構成 -, 日本機械学会論文集 (C編), **58**, 545 (1992) 289.
- 4) 葛 東方, 竹内芳美, 浅川直紀: ロボットによる磨き作業の自動化 (第2報) - 干渉回避した磨き経路の自動生成 -, 日本機械学会論文集 (C編), **59**, 561 (1993) 244.
- 5) Y. Takeuchi, D. Ge and N. Asakawa: Automated Polishing Process with a Human-like Dexterous Robot, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, (1993) 950.
- 6) 浅川直紀, 伊藤謙一, 竹内芳美: ロボットによるバリ取り作業の自動化 - 自由曲面上の湯口の場合 -, 精密工学会誌, **64**, 5 (1998) 773.
- 7) 永田寅臣, 渡辺桂吾, 佐藤和也, 泉 清高, 末廣利範: 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, **64**, 4 (1998) 541.
- 8) 永田寅臣, 渡辺桂吾, 佐藤和也, 泉 清高: 学習型ファジ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), **64**, 628 (1998) 4679.
- 9) 永田寅臣, 渡辺桂吾, 佐藤和也, 泉 清高: 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, (1999) 630.
- 10) M. H. Raibert and J. J. Craig: Hybrid Position/Force Control of Manipulators, Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Cont., **102**, (1981) 126.
- 11) 桂川敬史, 五百井 清, 久保田伸幸, 野呂 治: 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, **12**, 6 (1994) 893.
- 12) K. Takahashi, S. Aoyagi and M. Takano: Study on a Fast Profiling Task of a Robot with Force Control Using Feedforward of Predicted Contact Position Data, Proc. 4th Japan-France Congress & 2nd Asia-Europe Congress on Mechatronics, Vol. 1, (1998) 398.