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*

永田寅臣** 渡辺桂吾*** 佐藤和也*** 泉 清高*** 末廣利範†

A Position-Based Impedance Control for Industrial Robots
with Open Architecture Controller

Fusaomi NAGATA, Keigo WATANABE, Kazuya SATO, Kiyotaka IZUMI and Toshinori SUEHIRO

This paper presents a new position-based impedance control that can take account of a desired position in the force control, and gives a transformation technique from the position command to the torque command in order to apply the control to industrial robots with open architecture controller, or to implement it in computer simulations. Next, to determine a suitable compliance without trial and error, this paper introduces a new method that produces the desired time-varying compliance, giving the critical damping in contact with an object, by using informations on inertia and Jacobian matrices. Simulation results have shown that the proposed methods are very effective for realizing it in industrial robots and for deciding the desired compliance without any complicated tuning.

Key words : industrial robot, open architecture controller, compliance, impedance control, force control, critically damped response, 6 degree-of-freedom

1. 緒 言

産業用ロボットの発展は目覚ましく、塗装、溶接、シーリングなど様々な作業に適用されている。このような作業では、アーム先端の軌跡をいかに高精度に制御するかということが問題となる。しかし、例えば産業用ロボットを木質系材料の研磨に適用するには、熟練作業が行っている材料を傷つけない「柔らかい力制御」が必要になる。家具部材の研磨には、NC加工後の材料に対して行う研磨と、塗装後の部材に対して行う仕上げ研磨がある。どちらの場合も材料を傷つけないような作業が求められるが、特に塗装後の仕上げ研磨には、それが商品の品質や外観の美しさに直接影響するため、繊細で丁寧な作業が必要とされる。

さて、これまでに力覚情報を利用する代表的な力制御法¹⁾として、作業対象への押付け力そのものを制御する位置と力のハイブリッド制御法²⁾、対象物体に対する接触抵抗を制御するインピーダンス制御法³⁾などが提案されている。前者は主として対象物体への倣い動作、後者は柔軟な動作が必要とされる仕事に向いているといわれている。しかし、実際にこのような力制御法を産業用ロボットに適用した報告は少ない。この理由として、市販されている産業用ロボットのほとんどが教示方式でしか利用できず、ユーザが新たに開発した制御法を適用しにくいことが挙げられる。今後さらに、産業用ロボットが様々な分野のアプリケーションに応用されていくには、システムのオープン化が不可欠である^{4)~8)}。最近メーカから、このようなニーズに対応するために運動制御系やサーボ制御系が公開されたオープンアーキテクチャ型の産業用ロボットが登場している⁹⁾。これまで産業用ロボットにコンプライアンス制御を

適用した例として杉本の仮想コンプライアンス機構¹⁰⁾がある。この手法は、はめ合い作業や倣い動作に応用されているが、力制御には対応できていない。また、産業用ロボットの各関節軸PIDサーボ系を用いてコンプライアンス制御と力制御を同時に適用した例として、桂川らのHCC (Hybrid Compliance/Force Control) がある¹¹⁾。しかし、この中では望ましい応答式からその解が示されているものの、サーボ系をどのように用いてHCCを実現しているかが具体的に述べられていない。今後は、ユーザが開発した制御法とメーカが提供するサーボ系をどのように組み合わせて、いかに汎用的に利用することができるかが重要になってくると思われる。さらに、HCCでは作業内容や環境（接触する対象物）に応じて安定的な接触条件を見出す際に、シミュレーションを繰り返すことで目標コンプライアンスを絞り込んでおり、実用性を考慮すると調整に時間のかからない理論的な導出法や作業内容に応じた調整法が必要不可欠である。

そこで本稿ではまず、力制御時にも目標位置を入力できる位置指令型のインピーダンス制御法を提案し、サーボ系が公開された産業用ロボットへの適用方法について述べる。さらに、作業内容や環境に応じた安定的な接触条件を求めるために、材料の物理情報を用いて常に臨界減衰応答となるように目標コンプライアンスを変化させる方法を提案する。垂直多関節型6自由度の産業用ロボットであるPUMA560マニピュレータの運動学、動力学パラメータを用いたシミュレーション実験により提案手法の有効性を示す。

2. 位置指令型インピーダンス制御法

2.1 位置指令型インピーダンス制御法の導出

6自由度マニピュレータ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。

* 原稿受付 平成9年8月11日

** 正 会 員 福岡県工業技術センター インテリア研究所 (大川市上巻 405-3)

*** 佐賀大学理工学部 (佐賀市本庄町 1番地)

† 福岡県工業技術センター 機械電子研究所 (北九州市八幡西区則松 3-6-1)

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

ここで、 $x, \dot{x}, \ddot{x}$ 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、 $M_x(\theta)$ は実慣性行列、 F はアーム先端に作用する力ベクトル、 K_f は力フィードバックゲイン行列である。また、 $x_d, \dot{x}_d, F_d, B_d, K_d$ は目標の位置、速度、力ベクトルと粘性係数行列、剛性係数行列であり、 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 は正定な対角行列とする。式(1)は、HCCの望ましいインピーダンス特性¹¹⁾の目標剛性 K_d にかかるスイッチ行列 S を省いた形となっている。対象物の特性が既知である場合には、目標位置も考慮することで応答を改善することができることから、力制御を行っている方向への位置制御も扱うものとする。ただし、目標位置に現在の位置を入力すれば、この項の影響は相殺できることに注意されたい。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、作業座標系でのマニピュレータの運動方程式を次式とする。

$$M_x(\theta)\ddot{x} + H_x(\theta, \dot{\theta}) + G_x(\theta) = J^T(\theta)\tau + F \quad (2)$$

ここで、 $\theta, \dot{\theta}$ は関節角度と関節角速度、 $H_x(\theta, \dot{\theta})$ と $G_x(\theta)$ は作業座標系での遠心力・コリオリ力項と重力項、 $J(\theta)$ はヤコビアン、 τ は関節駆動トルクである。式(1)の望ましい応答において、加速度が安定性に影響しないとすることで、実慣性項を無視できるものとする¹¹⁾。 $X := x - x_d$ とおき、システム行列を A 、制御行列を B 、制御入力を u とすると、式(3)に示す状態方程式が得られる。

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (3)$$

ただし、

$$\begin{aligned} A &:= -B_d^{-1}K_d \quad , \quad B := B_d^{-1} \\ u &:= \{SF + (E - S)K_f(F - F_d)\} \end{aligned}$$

とする。この式の解は、周知のように次式となる。

$$X = e^{At}X(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)}Bu(\tau)d\tau \quad (4)$$

このとき、サンプリング幅 Δt を用いて式(4)の離散時刻 k での解を求める。まず、 $X(k) = X(t)|_{t=\Delta t k}$ ($k = 0, 1, \dots$) とお

き、 $\Delta t(k-1) \leq t < \Delta t k$ の区間で入力 u が定数ベクトルであり、システム行列 A と制御行列 B も定数行列とみなせるものとする。式(4)で $t = \Delta t k$ において積分区間を分けると次式のようになる¹²⁾。

$$\begin{aligned} X(k) &= e^{A\Delta t k} \left(X(0) + \int_0^{\Delta t k} e^{-A\tau} B u(\tau) d\tau \right) \\ &= e^{A\Delta t} X(k-1) + e^{A\Delta t} \int_{\Delta t(k-1)}^{\Delta t k} e^{-A\tau} d\tau B u(k) \\ &= e^{A\Delta t} X(k-1) + (e^{A\Delta t} - E)A^{-1}Bu(k) \end{aligned} \quad (5)$$

よって、 $X(k) = x(k) - x_d(k)$ とするとつぎの離散時間の位置指令型操作量の再帰式が得られる。

$$\begin{aligned} x(k) &= x_d(k) + e^{-B_d^{-1}K_d\Delta t} \{x(k-1) - x_d(k-1)\} \\ &\quad - \left\{ e^{-B_d^{-1}K_d\Delta t} - E \right\} K_d^{-1} \{SF + (E - S)K_f(F - F_d)\} \end{aligned} \quad (6)$$

また、 $\Delta t(k-1) \leq t < \Delta t k$ でヤコビアン J も定数行列とすると、 $x(k) = J\theta(k)$ の関係が成立し、したがって式(6)の両辺に J^{-1} を乗じるとつぎのような関節座標系での離散時間の関係式が得られる。

$$\begin{aligned} \theta(k) &= \theta_d(k) + J^{-1} e^{-B_d^{-1}K_d\Delta t} J \{ \theta(k-1) - \theta_d(k-1) \} \\ &\quad - J^{-1} \left\{ e^{-B_d^{-1}K_d\Delta t} - E \right\} K_d^{-1} \{SF + (E - S)K_f(F - F_d)\} \end{aligned} \quad (7)$$

なお、式(6)および式(7)の $x_d(k)$ や $\theta_d(k)$ は、位置制御時とコンプライアンス制御時にはあらかじめ用意した目標軌道を設定し、力制御時には釣合いの位置を設定する。

2.2 オープン化されたサーボ系への適用法

上述の位置指令型インピーダンス制御法をオープンシステムな産業用ロボットに適用するためには、式(6)あるいは式(7)から得られる位置の操作量をマニピュレータの関節駆動トルクに変換しなければならない。そこで、この位置の操作量を各関節軸ごとに独立なサーボ系への目標値として用いることで、関節トルクに変換する方法を提案する。まず、 Δt で決まる離散時間 $\Delta t k$ を用いて、式(6)の作業座標 $x(\Delta t k)$ から次式のように速度と加速度を発生させる。

$$\dot{x}(\Delta t k) \approx \{x(\Delta t k) - x(\Delta t(k-1))\} / \Delta t \quad (8)$$

Fig. 1 Transformation from the position-based impedance control in the Cartesian space to the resolved acceleration control

$$\dot{x}(\Delta t k) \approx \{ \dot{x}(\Delta t k) - \dot{x}(\Delta t (k-1)) \} / \Delta t \quad (9)$$

つぎに、たとえばサーボ系として分解加速度制御法が用いられている場合には、式(6)、式(8)、式(9)から得られる $x(\Delta t k)$, $\dot{x}(\Delta t k)$, $\ddot{x}(\Delta t k)$ をサーボ系への目標値 x_d , $\dot{x}_d$, $\ddot{x}_d$ とすればその制御則から関節トルクを得ることができる。

図1には、そのブロック線図を示す。さらに式(7)から同様に得られる関節座標系での $\theta(\Delta t k)$, $\dot{\theta}(\Delta t k)$, $\ddot{\theta}(\Delta t k)$ をトルク計算制御法などへの目標値とすることも可能である。

この提案手法により、位置指令型インピーダンス制御法のコンピュータシミュレーションが可能になるだけでなく、サーボ系が公開されたオープンアーキテクチャ型の産業用ロボットであれば直ちに実機に適用することも可能である。

3. シミュレーションによる特性評価

3.1 コンプライアンス特性

前章で提案した位置指令型インピーダンス制御法のコンプライアンス特性について性能評価を行う。全方向ともコンプライアンス制御時、つまり $S=E$ のとき、提案手法の望ましい応答は次式となる。

$$M_x \ddot{x} + B_d (\dot{x} - \dot{x}_d) + K_d (x - x_d) = F \quad (10)$$

また、離散時間の位置操作量の関係は式(6)より次式のようにになる。

$$x(k) = x_d(k) + e^{-(B_d^{-1} K_d) \Delta t} \{ x(k-1) - x_d(k-1) \} - \{ e^{-(B_d^{-1} K_d) \Delta t} - E \} K_d^{-1} F \quad (11)$$

図2のような姿勢で静止している状態で、アーム先端に x 軸の負の方向へステップ状の外力 $f_x = -5 \text{ N}$ を加え、その応答を観察した。ただし、 $x_d = 0.6636 \text{ m}$ とした。シミュレーションは、PUMA560 マニピュレータの運動学パラメータと動力学パラメータを用い¹³⁾、ルンゲ・クッタ・ジル法により行った。シミュレーション時間は 6.0 s 、サンプリング間隔は 10 ms である。図3には、サーボ系に分解加速度制御法を用いた場合の作業座標系での位置指令型インピーダンス制御法によるシミュレーション結果を示す。

Fig. 2 Side view of a manipulator in compliance control

目標粘性係数には、つぎの7とおりの値を設定した。

- (1) $B_d = \text{diag} (20, 20, 20, 20, 20, 20) [\text{Ns/m}]$
- (2) $B_d = \text{diag} (40, 20, 20, 20, 20, 20) [\text{Ns/m}]$
- (3) $B_d = \text{diag} (60, 20, 20, 20, 20, 20) [\text{Ns/m}]$
- (4) $B_d = \text{diag} (100, 20, 20, 20, 20, 20) [\text{Ns/m}]$
- (5) $B_d = \text{diag} (200, 20, 20, 20, 20, 20) [\text{Ns/m}]$
- (6) $B_d = \text{diag} (300, 20, 20, 20, 20, 20) [\text{Ns/m}]$
- (7) $B_d = \text{diag} (500, 20, 20, 20, 20, 20) [\text{Ns/m}]$

また、目標剛性係数にはつぎの値を設定した。

$$K_d = \text{diag} (400, 400, 400, 400, 400, 400) [\text{N/m}]$$

なお、分解加速度制御法で用いた速度フィードバックゲイン K_v と位置フィードバックゲイン K_p はつぎのとおりである。

$$K_v = \text{diag} (20, 20, 20, 20, 20, 20)$$

$$K_p = \text{diag} (400, 400, 400, 400, 400, 400)$$

Fig. 3 Simulation results of position x with several damping coefficients

図3より、位置指令型インピーダンス制御法は優れたコンプライアンス特性を有していることが確認できた。 x 軸方向の目標のコンプライアンスを変化させるとそれに応じてアーム先端に現れるコンプライアンスが、オーバシュートや振動を伴わず良好に変化していることがわかる。

3.2 力制御特性

次に、位置指令型インピーダンス制御法による力制御について述べる。さらに、マニピュレータの姿勢の変化に対して環境との臨界減衰条件を考慮して目標粘性係数 B_d を変化させる制御則を提案し、その有効性についても検討する。

図4に示すようにアーム先端を粘性係数行列 B_m と剛性係数行列 K_m が、それぞれ

$$B_m = \text{diag} (10, 0, 0, 0, 0, 0) [\text{Ns/m}]$$

$$K_m = \text{diag} (1000, 0, 0, 0, 0, 0) [\text{N/m}]$$

である壁に x 軸の負の方向から衝突させて、目標の接触力 $F_d = [-1000000] [\text{N}]$ で安定させる x 軸方向のみの力 f_x の制御を試みた。アーム先端は、壁から 0.02 m 離れた地点から 0.0184 m/s の等速度で接近してきて衝突し、このとき

Fig. 4 Side view of a manipulator in force control

アーム先端には式(12)のような力 F が作用するものとする。 x_m は壁のある位置である。

$$F = -B_m \dot{x} - K_m (x - x_m), \quad x \geq x_m \quad (12)$$

作業座標系での位置指令型インピーダンス制御法の操作量の関係式は式(6)で与えられる。アーム先端を壁に衝突させて一定の力で押付け作業を行う場合には、まずスイッチ行列 S を単位行列 E として軌道追従制御を行う。壁と接触後は、コンプライアンス制御で衝突に伴う衝撃を吸収し、最後に力制御に切り替えて目標の力で安定させる。

壁と衝突するまでは、あらかじめ用意した目標軌道を目標位置 x_d に設定し、軌道追従制御を行なった。目標軌道は、静止状態から 1 s で速度 0.0184 m/s に達するように 4-1-4 次多項式を用いて生成した。壁と衝突後は、目標の接触力の 80% に達するまでコンプライアンス制御で衝撃を吸収した後、釣合いの位置 $x_m - K_m^{-1} F_d$ を目標位置 $x_d(k)$ に設定し、力制御を行った

3.2.1 目標粘性係数が一定のときの応答

図5には、目標粘性係数と目標剛性係数がつぎの値で制御則として式(6)を用いた場合のシミュレーション結果を示す。

$$B_d = \text{diag} (20, 20, 20, 20, 20, 20) [\text{Ns/m}]$$

$$K_d = \text{diag} (400, 400, 400, 400, 400, 400) [\text{N/m}]$$

衝突時にオーバシュートと振動が発生しているが、目標コンプライアンスを調整することで応答を改善できると思われる。

3.2.2 臨界減衰の条件を考慮した目標粘性係数の調整

環境の特性が既知の場合、外力 F が式(12)で与えられるとすると、式(1)より位置指令型インピーダンス制御法の力制御時における望ましいインピーダンス特性は次式で与えられる。

$$M_x \ddot{x} + B_d (\dot{x} - \dot{x}_d) + K_d (x - x_d) = S \{ -B_m \dot{x} - K_m (x - x_m) \} + (E - S) K_f \{ -B_m \dot{x} - K_m (x - x_m) - F_d \} \quad (13)$$

各係数行列 B_d, K_d, B_m, K_m, K_f は対角行列であるから、 M_x の対角要素 M_{x_i} ($i=1, \dots, 6$) が非対角要素に比べて十分に大きいと仮定すると、式(13)の各微分方程式は非干渉化

Fig. 5 Simulation result of force f_x with constant B_d

Fig. 6 Simulation result of force f_x with varying B_d

Fig. 7 Simulation result of desired damping coefficient in the direction of x-axis

される。式(13)の臨界減衰の条件を求めると目標粘性は次式のようなになる。

$$\tilde{B}_{d_i} = 2 \sqrt{(J^T M J^{-1})_i \left\{ K_{d_i} + \left\{ S_i K_{m_i} + (E - S)_i K_{f_i} K_{m_i} \right\} - \left\{ S_i B_{m_i} + (E - S)_i K_{f_i} B_{m_i} \right\} \right\}} \quad (14)$$

式(14)から構成された $\tilde{B}_d$ を用いた位置操作量の関係は次式のようなになる。

$$x(k) = x_d(k) + e^{-B_d^{-1} K_d \Delta t} \{x(k-1) - x_d(k-1)\} - \{e^{-B_d^{-1} K_d \Delta t} - E\} K_d^{-1} \{SF + (E - S)K_f(F - F_d)\} \quad (15)$$

3.2.3 目標粘性係数を変化させたときの応答

図6には、式(15)を用いた場合のシミュレーション結果を示す。衝突時のオーバシュートや振動がなくなり、安定的な接触応答が得られた。図7には衝突後の x 軸方向の $\ddot{B}_{d1}$ の変化を示す。このように壁の物理特性が既知の場合は、提案手法が非常に有効であることが確認できた。

4. 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ののための位置指令型インピーダンス制御法を提案した。そして、シミュレーション実験によりその特性を調べた結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 望ましいインピーダンス特性の式から得られる離散時間の操作量をオープン化されたサーボ系への目標値として用いる位置指令型インピーダンス制御法について述べた。
- (2) 提案手法は、オーバシュートや振動のない優れたコンプライアンス特性を有していることが確認できた。
- (3) 環境との臨界減衰条件を考慮しながら指針となる目標コンプライアンスを変化させることで、力制御特性を飛躍的に改善することができた。

今後は、環境の物理特性が未知の場合にも対応できるようにファジィ環境モデルについて検討するとともに、オープンコントローラを搭載した実機ロボットへの適用実験を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 小菅一弘：力制御法の分類と制御システムの設計法，日本ロボット学会誌，**9**, 6 (1991) 751.
- 2) M. H. Raibert and J. J. Craig : Hybrid Position/Force Control of Manipulators, Trans. ASME J. Dyn. Syst. Meas. Cont., **102**, (1981) 126.
- 3) N. Hogan : Impedance control - An Approach to Manipulation - Part I - Part III, Trans. ASME J. Dyn. Syst. Meas. Cont., **107**, (1985) 1.
- 4) 高田祥三：FA制御装置のオープン化，精密工学会誌，**63**, 5 (1997) 621.
- 5) 鈴木利忠：センサ・制御装置のオープン化，精密工学会誌，**63**, 5 (1997) 643.
- 6) 川辺満徳，新井民夫：ロボットコントローラの現状と動向，日本ロボット学会誌，**14**, 6 (1996) 764.
- 7) 大道武生，川内直人：オープンロボットコントローラ，日本ロボット学会誌，**14**, 6 (1996) 768.
- 8) 三宅徳久：ロボット言語と制御ソフトウェア，日本ロボット学会誌，**14**, 6 (1996) 772.
- 9) 大西典子，大西 献：可搬式汎用知能アーム登場ーオープンロボットの提案ー，日本ロボット学会誌，**12**, 8 (1994) 1137.
- 10) 杉本浩一：ロボットアームのカフィードバック制御，計測と制御，**25**, 1 (1986) 45.
- 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) 例えば，小郷 寛，美多 勉：システム制御理論入門，実教出版株式会社，(1995) 67 - 69.
- 13) P. Corke : A Robotics Toolbox for MATLAB, IEEE R&A, March (1996) 24.