予測制御に基づく対象物の動特性を考慮したダンピング制御*

和田 洋^{*1}, 福田 敏男^{*2}, 小菅 一弘^{*2}
渡辺 桂吾^{*3}, 新井 史人^{*2}, 松浦 英雄^{*2}Damping Control with Consideration of Dynamics
of Objects Based on Predictive ControlHiroshi WADA, Toshio FUKUDA, Kazuhiro KOSUGE,
Keigo WATANABE, Fumihito ARAI and Hideo MATSUURA

This paper presents damping control with consideration of the dynamics of objects based on predictive control in a 1-D.O.F. manipulator system. As one of the problems in force control of robotic manipulators, the collision between the endpoint of a manipulator and the object is given. As the force control scheme in the case involving such collision, damping control is the most suitable. Because such control does not require switching of control rules in the transition from free space to constrained space, and since, in general, the position of objects cannot be measured, the method, based on the velocity, is effective. However, in conventional damping control, the dynamics of objects is not considered. Therefore, in the case of soft objects, this control scheme cannot be applied. We propose damping control with consideration of the dynamics of objects based on predictive control, and simulation and experimental results illustrate the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Robotics, Manipulator, Force Control, Damping Control, Predictive Control

1. はじめに

物体の把持, および部品の組立, 分解といった作業の自動化のためには, ロボットの力制御は必要不可欠なものであり, 盛んに研究されている分野である. この力制御において, 問題点の一つとなるのが, マニピュレータが自由空間から拘束空間に移行する際に生じる衝突現象である. これは, 高速タスクの場合, より顕著にいえることであり, 作業効率の点から見ても, 衝突を考慮に入れたマニピュレータの制御の研究^{(1)~(3)}は必要不可欠なものであると思われる.

従来より, マニピュレータの力制御には, 位置と力のハイブリッド制御法⁽⁴⁾のような, マニピュレータと環境との間に生じる力が目標値と等しいように, 力を直接制御する方法と, スティフネス制御⁽⁵⁾, ダンピング制御⁽⁶⁾, インピーダンス制御⁽⁷⁾などのような, マニピュレータに加わる力とマニピュレータの運動との関係を制御することで, 間接的に, マニピュレータと環境との間に生じる干渉力を制御する方法がある⁽⁸⁾. こ

れらの方法は, 互いに長所, 短所を持っており, どちらの方法が優れているかは, 各研究者によって, 意見の異なるところであるが, 衝突を含む系における力制御という観点から考察すると, 衝突が非常に速い現象であることから, 自由空間から拘束空間に移行する際に, 制御則を切替える必要のないスティフネス制御, ダンピング制御, インピーダンス制御といった制御法が有効な方法であると考えられる. また, 一般に, 対象物の位置は正確には測定することができないことを考慮にいと, それらの方法の中でも, 速度をベースとしたダンピング制御法は有効であると考えられ, 本研究ではダンピング制御による力制御に着目した.

しかし, 従来のダンピング制御は対象物が剛体の場合においてのみを扱ったものであり, 対象物の動特性を考慮に入れてはいないので, 対象物が柔軟体の場合には成立しない. そこで, 本研究では, 対象物の動特性を考慮したダンピング制御系を構成し, 予測制御⁽⁹⁾により, 目標の速度を生成していく制御法を提案する. ただし, 本研究においては, 衝突後の問題, すなわち力制御に関してのみ扱うものとする. 従来, 予測制御をロボットに適用したもの⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾の多くは, マニピュレータの位置制御に関するもので, 力制御においては, ワーク面の傾きを予測することで, ワークの形状に伴

* 原稿受付 平成4年7月20日.

^{*1} 正員, (株)豊田自動織機製作所(☎474 大府市共和町茶屋8).^{*2} 正員, 名古屋大学工学部(☎464-01 名古屋市千種区不老町1).^{*3} 正員, 佐賀大学理工学部(☎840 佐賀市本庄町1).

う力の偏差をなくす方法⁽¹²⁾が提案されているが、本研究で提案する予測制御は、系の状態を予測して、与えられた評価関数を最小にするもので、この方法とは異なっている。本研究では、提案した予測制御に基づいた対象物の動特性を考慮したダンピング制御則の妥当性を示すために、シミュレーションおよび実験を行い、その結果を報告する。

2. 対象物の動特性を考慮したダンピング制御

まず、図1に示すような従来のダンピング制御について説明する。図1において、 x , $\dot{x}$ は、作業座標系におけるエンドエフェクタの変位、速度、 $\dot{x}_d$ はその目標速度、 x_e は環境の変位、 θ , $\dot{\theta}$ はマニピュレータの間接の変位、速度、 J はヤコビ行列、 f はマニピュレータ先端に作用する力を示している。そこで、ダンピング制御の基本式は、次式のように表される。

$$\dot{x} = \dot{x}_d + K_f f \quad (1)$$

ここで、 K_f はアドミッタンス行列である。マニピュレータが自由空間内にある場合、式(2)に示すように、マニピュレータは目標速度 $\dot{x}_d$ に従って、運動する。

$$\dot{x} = \dot{x}_d \quad (2)$$

マニピュレータが拘束空間内にある場合は、対象物を剛体と考えると

$$\dot{x} = 0 \quad (3)$$

となり、式(1)より、

$$f = -K_f^{-1} \cdot \dot{x}_d \quad (4)$$

が導かれ、目標速度 $\dot{x}_d$ によって、マニピュレータ先端に作用する力 f が制御できることが示される。

しかし、この従来のダンピング制御則では、対象物が剛体でない、柔軟体のようなものの場合、

$$\dot{x} \neq 0 \quad (5)$$

となり、式(4)が成立しなくなる。したがって、対象物の動特性を考慮したダンピング制御系が必要となる。

図2はマニピュレータ先端のエンドエフェクタと対象物を表したモデルである。ここで、 M は望ましい質量、 D は望ましい粘性係数、 K_e は対象物のばね定数、 D_e は対象物の粘性定数を示す。このモデルより、次式

図1 従来のダンピング制御

に示すような対象物の動特性を考慮したダンピング制御系を提案する。

$$M\ddot{x} + D(\dot{x} - \dot{x}_d) = f \quad (6)$$

式(6)に対して、マニピュレータが自由空間にある場合を考えると、 $f=0$ より、

$$M\ddot{x} + D(\dot{x} - \dot{x}_d) = 0 \quad (7)$$

となる。この式は、式(2)に示すように、マニピュレータが目標速度 $\dot{x}_d$ で運動する時、 $\ddot{x}=0$ となり、成立することがわかる。また、マニピュレータが拘束空間内にある場合は、

$$f = -K_e x - D_e \dot{x} \quad (8)$$

より、式(9)が導かれる。

$$M\ddot{x} + (D + D_e)\dot{x} - K_e x = D\dot{x}_d \quad (9)$$

ここで、 $\dot{x}_d$ を目標速度とする。この式を、状態変数を $X = [x, \dot{x}]^T$, $\dot{x}_d$ を入力 u , f を出力 y として、状態空間モデルに変換すると、

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu \\ y &= CX \end{aligned} \quad (10)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K_e/M & -(D + D_e)/M \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \ D/M]^T, C = [-K_e \ -D_e] \quad (11)$$

この状態空間モデルをもとにして、次章で示す予測制御則式(28)を用いることで、式(6)で示したような対象物の特性を考慮したダンピング制御系を構成する。

3. 予測制御則

本研究で用いる予測制御則は、離散時間システムに基づいて設計されたものである。式(10)に示す連続系の状態空間モデルを、式(12)に示すような離散系の状態空間モデルに変換する。

$$\begin{aligned} X(k+1) &= FX(k) + Gu(k) \\ y(k) &= HX(k) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、

$$\begin{aligned} F &= \exp(AT) \\ G &= \left(\int_0^T \exp(A\eta) d\eta \right) B \end{aligned}$$

図2 エンドエフェクタと対象物のモデル

$$H = C \dots \dots \dots (13)$$

である。また、 T はサンプリングタイムである。ここで、

$$\begin{aligned} \Delta X(k+1) &\triangleq X(k+1) - X(k) \\ \Delta y(k+1) &\triangleq y(k+1) - y(k) \\ \Delta u(k) &\triangleq u(k) - u(k-1) \dots \dots \dots (14) \end{aligned}$$

と定義し、次のような偏差モデルを導出する。

$$\begin{aligned} \Delta X(k+1) &= F \Delta X(k) + G \Delta u(k) \\ \Delta y(k) &= H \Delta X(k) \dots \dots \dots (15) \end{aligned}$$

式(5)より、 j 段先の $\Delta X(k+j)$ 、 $\Delta y(k+j)$ は式(16)、(17)のように導かれる。

$$\begin{aligned} \Delta X(k+j) &= F^j \Delta X(k) \\ &+ \sum_{i=0}^{j-1} F^{j-1-i} G \Delta u(k+i) \dots \dots \dots (16) \end{aligned}$$

$$\Delta y(k+j) = H \Delta X(k+j) \dots \dots \dots (17)$$

そこで、式(14)～式(17)より、 j 段先の状態変数、および j 段先の出力が得られる。

$$\begin{aligned} X(k+j) &= \left[\sum_{i=0}^{j-1} F^{j-1-i} \right] F \Delta X(k) \\ &+ \sum_{i=0}^{j-1} \left[\sum_{l=i}^{j-1} F^{j-1-l} \right] G \Delta u(k+i) + X(k) \dots \dots \dots (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y(k+j) &= \left[\sum_{i=0}^{j-1} H F^{j-1-i} \right] F \Delta X(k) \\ &+ \sum_{i=0}^{j-1} \left[\sum_{l=i}^{j-1} H F^{j-1-l} \right] G \Delta u(k+i) + H X(k) \dots \dots \dots (19) \end{aligned}$$

次に予測制御アルゴリズムについて考える。まず、次のように制御評価関数を表す。

$$\begin{aligned} J &= \|y - r\|_r^2 + \|u\|_u^2 \dots \dots \dots (20) \\ y &\triangleq [y(k+1), \dots, y(k+N)]^T \\ r &\triangleq [r(k+1), \dots, r(k+N)]^T \\ \Gamma &\triangleq \text{diag}\{\gamma(1), \dots, \gamma(N)\} \\ \Lambda &\triangleq \text{diag}\{\lambda(1), \dots, \lambda(N)\} \\ u &\triangleq [\Delta u(k), \dots, \Delta u(k+N-1)]^T \dots \dots \dots (21) \end{aligned}$$

ここで、 N は予測区間の大きさを示し、 y 、 r は、予測区間内における出力と目標値であり、 u は、式(15)で示すような入力の差分を表すものである。また、 Γ 、 Λ

は重み行列で、 $\mathcal{R}^{N \times N}$ の対角行列である。そこで、式(20)を $j=N$ として、書き直すと、式(23)のようになる。

$$y = L^* u + M^* F \Delta X(k) + H^* X(k) \dots \dots \dots (22)$$

ここで、

$$L^* = \begin{bmatrix} HF & 0 \\ HFG + HF & \\ \vdots & \ddots \\ HF^{N-1}G + \dots + HF & HF \end{bmatrix} \dots \dots \dots (23)$$

$$M^* = \begin{bmatrix} H \\ HF + H \\ \vdots \\ HF^{N-1} + \dots + HF \end{bmatrix} \dots \dots \dots (24)$$

$$H^* = [H^T, \dots, H^T]^T \dots \dots \dots (25)$$

である。そこで、式(22)を式(20)に代入して、 u に関して最小化するために、微分すると、次式のようにになる。

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{du} &= 2(L^{*T} \Gamma L^* + \Lambda) u \\ &+ 2L^{*T} \Gamma [M^* F \Delta X(k) + H^* X(k) - r] \dots \dots \dots (26) \end{aligned}$$

そこで、右辺=0 として解くと、

$$\begin{aligned} u &= [L^{*T} \Gamma L^* + \Lambda]^{-1} L^{*T} \Gamma \\ &\times [r - M^* F \Delta X(k) - H^* X(k)] \dots \dots \dots (27) \end{aligned}$$

のようになり、制御入力 $u(k)$ は、次式のように示される。

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) \\ &+ \tilde{L} [r - M^* F \Delta X(k) - H^* X(k)] \dots \dots \dots (28) \end{aligned}$$

ここで、 $\tilde{L}$ は $[L^{*T} \Gamma L^* + \Lambda]^{-1} L^{*T} \Gamma$ の 1 行目の要素である。図 3 は、予測制御に基づく対象物の動特性を考

表 1 マニピュレータの各パラメータの値

l	0.285 (m)
l_g	0.143 (m)
m	1.083 (kg)
I	0.01535 (kg · m ²)

図 3 予測制御に基づく対象物の動特性を考慮したダンピング制御系の構造

図 4 力学モデル

慮したダンピング制御の構造を示したものである。予測制御則により、エンドエフェクタに作用する力 f に対する目標速度 $\dot{x}_d$ が生成され、式(6)に示すようなダンピング制御則によって、マニピュレータを作動するものである。

ここで、点線で囲まれた部分は、マニピュレータの

動特性の線形化を示す部分で、 I は慣性行列、 h はコリオリ力、求心力、重力、粘性摩擦力などから成る非線形項、 τ は入力トルクを示す。

4. シミュレーション

4.1 力学モデル 図4に示すように、本研究に

図5 従来のダンピング制御（硬い対象物の場合）

図6 対象物の動特性を考慮したダンピング制御（硬い対象物の場合）($N=10$)

図7 従来のダンピング制御（軟らかい対象物の場合）

図8 対象物の動特性を考慮したダンピング制御（軟らかい対象物の場合）($N=10$)

において、シミュレーションで用いた力学モデルは、1リンク型マニピュレータである。ここで、 l はマニピュレータの長さ、 l_0 は質量中心までの長さ、 m はマニピュレータの質量、 I は質量中心回りの慣性モーメントである。マニピュレータの各パラメータの値は表1に示す。

4.2 シミュレーション結果 まず、対象物が比較的硬い場合 ($K_e=100.0$, $D_e=0.1$) のシミュレーション結果を示す。図5は、力の目標値を正弦波と直線の合成関数として、対象物の動特性を考慮しない従来のダンピング制御則、すなわち、式(1)に従って、ダンピング制御を行った場合のシミュレーション結果である。図6は、対象物の動特性を考慮したダンピング制御則、すなわち、式(6)を用いた場合のシミュレーション

結果であり、予測区間の大きさが $N=10$ の場合の結果である。次に、対象物が軟らかい場合 ($K_e=3.0$, $D_e=0.1$) のシミュレーション結果を示す。図7が従来のダンピング制御、図8が対象物の動特性を考慮したダンピング制御の場合の結果であり、予測区間の大きさは $N=10$ である。

4.3 考察 図5、6に示すように、対象物が硬い場合は、従来のダンピング制御、対象物の動特性を考慮したダンピング制御の双方とも、目標値に追従しているのがわかる。これは、対象物が硬いために、作業座標系におけるエンドエフェクタの速度が0に近くなり、従来のダンピング制御でも適用できるためであると思われる。しかし、対象物が軟らかい場合は、図7に示すように、従来のダンピング制御では、目標の力に追従していないのがわかる。これは、対象物が軟らかいために、エンドエフェクタの速度が0ではなくなったためであると推測できる。それに対して、対象物の動特性を考慮したダンピング制御を用いた結果は、図8に示すように、目標の力に追従することが示された。

5. 実験

5.1 実験装置 本研前で用いた実験装置を図9に示す。この図に示すようにスカル型1自由度マニピュレータを用い、アクチュエータには、D. D. Motor

図9 実験装置

図10 従来のダンピング制御

図11 対象物の動特性を考慮したダンピング制御 ($N=10$)

[(株)ヤマハ発動機製, ROBUST YRS-150] を使用した。対象物には, 平板に引きばねをつないだ, ばね系のシステムを用いた。マニピュレータの各パラメータは, シミュレーションで用いたものと同値とし, 対象物のばね定数, 粘性定数をそれぞれ $139.0(\text{N/m})$, $0(\text{N}\cdot\text{s/m})$ とした。

5・2 実験方法および実験結果 本研究では, 上記に示すように, 実験装置として, スカラ型 1 自由度マニピュレータを用い, 実験を行った。図 10 が, 従来のダンピング制御を用いた場合の結果であり, 図 11 が本研究で提案した対象物の動特性を考慮したダンピング制御の場合の結果である。図 10 からわかるように, 目標の力に対して対象物が軟らかいために, 作業座標系におけるエンドエフェクタの速度が 0 でなくなり, 目標の力に追従することができないことが示されている。一方, 図 11 では, エンドエフェクタの速度が存在しても, 目標の力に追従していることが示されている。これらの結果はシミュレーションで得られた結果と同様なものであり, シミュレーション結果の妥当性が実証することができたといえる。

6. 結 論

本研究では, 1 自由度マニピュレータを用いた予測制御に基づく対象物の動特性を考慮したダンピング制御系を提案し, シミュレーションにより, 従来のダンピング制御系と比較して, 柔軟な対象物に対しても, 提案した制御系が有効であることを示した。また, 実機による実験を行い, シミュレーション結果の妥当性を確認した。今後の課題として, 本研究では, 1 自由度マニピュレータを用いた制御系を構成したが, より一般的な作業に適応するために, この制御系を多自由度系に拡張することが必要であると思われる。

最後に, 本研究を遂行するにあたり, 御協力を頂い

た(株)ヤマハ発動機の大塚賢一氏, 田中晋氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 正司・稲葉・福田・細貝, 衝突を含むロボットマニピュレータの安定制御 (第 1 報, 1 本のマニプレータの押付け制御の安定性), 機論, 56-527, C (1990), 1847-1853.
- (2) 福田・和田・松浦・新井・渡辺・正司, 衝突を含むロボットマニピュレータの安定制御 (第 3 報, 重み付き最小 2 乗法を用いた学習制御による衝突を含む力制御実験), 機論, 57-541, C (1991), 2953-2958.
- (3) 和田・福田・小菅・松浦・新井・渡辺, 衝突を含むロボットマニピュレータの安定制御 (第 5 報, 学習制御による衝突音に関するオーディオ・フィードバック制御), 機論, 58-546, C (1992), 520-525.
- (4) Raibert, M. H. and Craig, J. J., Hybrid Position and Force Control of Robot Manipulators, *Trans. of ASME, Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, 102, (1981), 126-133.
- (5) Salisbury, J. K., Active stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates, *Proc. of the 19th IEEE Conference on Decision and Control*, (1980), 95-100.
- (6) Whitney, D. E., Force Feedback control of Manipulator Fine Motions, *Trans. of ASME, Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, (1977), 91-97.
- (7) Hogan, N., Impedance Control Part I -Part III, *Trans. of ASME, Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, 107, (1985), 1-24.
- (8) 小菅, 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, 19-6, (1991), 751-758.
- (9) 渡辺, 状態空間手法による CARIMA 系の一般化予測制御, システム制御情報学会誌, 4-9, (1991), 360-368.
- (10) 橋本・畔柳・原島, DSP を用いたサーボシステムの予測制御-位置サーボ系による軌道追従制御実験-, 電気学会論文集, 110-D, (1990), 990-996.
- (11) Richaret, J., Abu El Ata-Doss, S., Arber, C., Kuntze, H. B., Jacobasch, A., Schill, W., Predictive Functional Control, Application to Fast and Accurate Robots, *Proc. of 10th IFAC World Congress*, (1987), 261-268.
- (12) 山田・柏木・樽沼・筒井, 力制御における強い制御の向上, ロボット・メカトロニクス講演会 '89 講演予稿集, (1989), 214-215.