ロボットマニピュレータのための2自由度力制御器の提案

准 員 菅 井 賢 (東京大)
准 員 志 村 康 治 (東京大)
正 員 堀 洋 一 (東京大)

Proposal of Two Degrees of Freedom Force Controller for Robot Manipulators
Masaru Sugai, Associate, Koji Shimura, Associate, Yoichi Hori, Member (University of Tokyo)

キーワード：2自由度制御，力制御，ロバスト制御，環境変動，ロボットマニピュレータ

1. まえがき

ロボットマニピュレータを用いて，バリ取りやはめ込み，更に対象物の把握といった接触を伴う動作を行うためには，高精度の安定な力制御が必要である。しかし実際には，対象物の機械パラメータの非線形性や変動によって，従来の力の制御誤差のみを用いる単純なフィードバック制御では，制御対象によって応答性能が大きく変化する。従って，何らかの適応的な手法を用いて力制御器のパラメータを調整せざるを得ない⁽¹⁾。ここで提案する力制御器は，2自由度ロバストサーボ系の考え方⁽²⁾を応用することにより，固定の制御器を用いながらも，対象物の大きなパラメータ変動によらず，常に希望どおりの力応答特性を得ることができる。本報告ではその有効性を，1軸のサーボモータを用いた実験によって示す。

2. 2自由度力制御系の構成

ここで扱う力制御系は，既に提案したロボットマニピュレータの軌道制御系⁽³⁾を内側に含む。これは，従来のトルク計算をベースとする手法⁽⁴⁾と異なり，多軸マニピュレータへの展開，特に位置と力のハイブリッド制御への適用を著しく容易にするためである。

(1) 1自由度力制御系 最も簡単な力制御系は，力の制御偏差に対して，積分と一次遅れからなる力制御器を用いる図1のものである。力を加える対象(以下，環境と略記) P がばね k およびダンパ d で表されるとすれば，力の制御特性は，

$$\frac{F}{F_d} = \frac{k + ds}{k + (d + D)s + Ms^2} \dots\dots\dots (1)$$

図1 1自由度力制御系
Fig. 1. One degree of freedom force controller.

図2 2自由度力制御系
Fig. 2. Two degrees of freedom force controller.

で与えられる。ただし，位置制御系の伝達特性は1とみなしている。大きく変動する k や d に対して，(1)式が振動的にならないようにするには D を大きくするしかなく⁽¹⁾，一般に応答速度の低下をまねく。これは，この制御系が1自由度構造であることによる。

(2) 2自由度力制御系 提案する2自由度力制御系を図2に示す。コントローラ $C_A(s)$, $C_B(s)$ は

$$C_A(s) = \frac{1}{P_n(s)} \frac{Q(s)}{1 - Q(s)} \dots\dots\dots (2)$$

$$C_B(s) = \frac{G_f(s)}{1 - G_f(s)} \frac{1}{P_n(s)} \frac{1}{1 - Q(s)} \dots\dots\dots (3)$$

とパラメータ表現される。ここに， $G_f(s)$ は力応答特性の指定値， $Q(s)$ は閉ループ特性を決定する重要なパラメータであり，両者は独立に選ぶことができ⁽²⁾，

$$G_f(s) = 1/(1 + \tau_c s) \dots\dots\dots (4)$$

図 3 1 自由度力制御系のステップ応答
Fig. 3. Step response of one degree of freedom force controller.

$$Q(s) = \frac{1 + 2\tau_q s}{1 + 2\tau_q s + (\tau_q s)^2} \quad (5)$$

とした($\tau_c \gg \tau_q$ である)。力の制御特性は、位置制御系の伝達特性を1とみなすと

$$\frac{F}{F_d} = \frac{G_f(s)}{1 + S(s)\Delta P} \quad (6)$$

となる。 ΔP は、環境 P の変動を表し、

$$\Delta P = \{P_n(s) - P\}/P \quad (7)$$

で定義している。 $P_n(s)$ は環境のノミナルモデルであり、ばね k_n 、ダンパ d_n で構成されるものとする。 $S(s)$ は感度関数

$$S(s) = [1 - G_f(s)][1 - Q(s)] \quad (8)$$

であり、 $G_f(s)$ 、 $Q(s)$ はローパス特性を有するように設計するから、 $S(s)$ はハイパス特性を有する。(6)式は、環境のパラメータ変動に起因する制御誤差が、低い周波数側から $S(s)$ の遮断周波数付近まで抑圧できることを示している。

3. 実 験

500 W の DC サーボモータにロバスト位置制御を施し、その外側に1自由度および2自由度の力制御器を構成して、ステップ状の力指令に対する応答を測定した。プロセッサは80286(80287付)、言語はC(浮動小数点演算)で、制御周期は約1.5 msである。以下、硬い対象物として、厚さ1 cmのゴム($k=20,000 \sim 60,000$ N/m, $d=50 \sim 100$ Ns/m)、柔らかい対象物としてトイレットペーパーのロール($k=5,000 \sim 20,000$ N/m, $d=20 \sim 50$ Ns/m)を用いている。

(1) 1 自由度力制御系 (図3) 柔らかい対象物に対して良好な応答となるように調整した制御器を用いると、硬い対象物ではオーバーシュートが生じてしまうことがわかる。

(2) 2 自由度力制御系 (図4) 力の応答は環境パラメータの大きな変化にもかかわらず $G_f(s)$ で指定した希望どおりのものとなっている。

4. む す び

従来の力制御の問題点であった環境変動に対するロ

図 4 2 自由度力制御系のステップ応答
Fig. 4. Step response of two degrees of freedom force controller.

バスト性の低さが、2 自由度制御の適用によって簡単に解決できることを示した。この力制御系は位置サーボ系を基本としているため、多軸マニピュレータへの拡張がきわめて容易である。

本研究の遂行にあたり、本学大学院生 梅野孝治、金子智朗両氏の多大の助力に深く感謝したい。

(平成3年4月10日受付)

文 献

- (1) 加登・大西：電気学会産業計測制御研資，IIC-90-42 (平2)
- (2) 梅野・堀：電学論 D, 110, 1163 (平2-11)
- (3) 金子・梅野・堀：電気学会産業計測制御研資，IIC-90-51 (平2)
- (4) R. P. Paul (吉川訳)：ロボットマニピュレータ (昭63) コロナ社

菅 井 賢 (准員)

平成3年東京大学工学部電子工学科卒業。現在、同大学大学院修士課程在学中。モーションコントロールの研究に従事。

志 村 康 治 (准員)

平成2年京都大学工学部電気工学第2学科卒業。現在、東京大学大学院修士課程在学中。モーションコントロールの研究に従事。

堀 洋 一 (正員)

昭和58年東京大学大学院博士課程修了。現在、同大学電気工学科助教授。制御理論の応用、メカトロニクスなどの研究に従事。計測自動制御学会、IEEE 会員。