メカトロサーボ系の2次モデルを用いた従軸追従形の主軸位置同期制御法†

中 村 政 俊*・冷 水 大 作*

中 村 光 児*・久 良 修 郭**

A Method for Synchronous Position Control of Mechatronic Servo System with Master-Slave Axis by Use of Second Order Model

Masatoshi NAKAMURA*, Daisaku HIYAMIZU*,

Kouji NAKAMURA* and Nobuhiro KYURA**

A method for synchronous position control of mechatronic servo system using the first order model was extended to the method by use of the second order model. The proposed extended method was effective in the operation of higher speed conditions. The robustness of the method for the modelling error was analysed and proved. The proposed method can be effectively applicable in an industrial mechatronic servo systems.

Key Words: mechatronic servo system, inverse dynamics, synchronous position control, second order model, modelling error

1. ま え が き

産業界におけるメカトロサーボ機器では、複数のサーボ系の高速高精度の位置同期が要求されている。従来は位置の同期を図るためにメカトロサーボ機器をごく低速¹⁾²⁾で動作させていた。しかし近年では、高精度ばかりでなく、作業時間短縮などの理由により、高速性が要求されている。先に筆者らの一部は、従軸逆ダイナミクスを用いた主軸位置同期制御法³⁾を提案し、そこにおいて制御系の1次近似モデルを採用した。その方法では速度変化がそれほど大きくならない中速動作時に良好な位置同期性能をもたらした。

本稿では、先の方法を速度変化が大きな高速動作時にまで適用できることを目指し、これまで定数とみなしていた速度制御の特性を含めてサーボ系を2次モデルで表し、この2次モデルを用いて従軸の補償を行う主軸位置同期制御手法を提案する。先の1次モデルを用いた場合に比べて、より速度変化が大きな動作時においても高精度の位置同期が図れることを確認した。

2. 2次モデルに基づく補償を用いた主軸位置同期制御法

X方向およびY方向に移動可能な2軸から構成されているメカトロサーボ系を制御対象として、従軸の特性を2次モデルで表現し、従軸を補償する主軸位置同期制御法のブロック線図をFig. 1に示す。図中の点線で囲まれた部分が、速度

応答を考慮した箇所ので、先に提案した1次モデルに基づく主軸位置同期制御法³⁾と異なる。以下2軸からなるサーボ系を対象とするが、各2軸ずつの成分に分解することにより、3軸以上からなるサーボ系においても以下の方法は利用可能となる。

Fig. 1においてX軸が主軸、Y軸が従軸であり、それぞれの位置出力を $X(s)$ 、 $Y(s)$ で表す。主軸に対する入力信号として、速度入力 $V_x(s)$ を加えると位置出力 $X(s)$ が得られ、その位置出力を、比例定数 k と後述する補償要素 $F(s)$ を介して従軸側に加える。これが従軸の補償を伴う主軸位置同期制御法である。位置同期が図られると、それぞれの2つの軸の位置出力には比例関係が成立する。補償要素 $F(s)$ は、従軸の特性よりその逆ダイナミクスを用いて

$$F(s) = \frac{s^2 + K_{vy}s + K_{py}K_{vy}}{K_{py}K_{vy}} \quad (1)$$

と表される。ここで、 K_{px} 、 K_{py} は主軸と従軸それぞれの位置ループの比例ゲインを、 K_{vx} 、 K_{vy} は主軸と従軸それぞれの速度ループの比例ゲインを表す。つぎに外乱について考えると、タップ加工などのような深さ方向と回転方向に動作するものでは、回転方向に外乱が混入する場合に比べて、深さ方向に混入する外乱は無視できる。さらに主軸に混入するト

Fig. 1 Block diagram of the proposed method

† 第15回電気関係九州支部学術講演で一部発表(1996・11)

* 佐賀大学理工学部 佐賀市本庄町1

** (株)安川電機 北九州市八幡西区黒崎城石2-1

* Faculty of Science and Engineering, Saga University, Saga

** Yaskawa Electric Co., Research and Development Lab., Yahata-nishi-ku, Kita-Kyushu

(Received August 22, 1996)

(Revised June 9, 1997)

ルク外乱は、速度ループがPI制御で組まれており1次モデルで近似可能なため、トルク外乱と等価な速度外乱がFig.1中の $D_x(s)$ として加わるものと表現する。

主軸位置同期を図ったときの各軸の伝達関数は

$$X(s) = \frac{K_{px}K_{vx}}{s^2 + K_{vx}s + K_{px}K_{vx}} \frac{V_x(s)}{s} + \frac{K_{vx}}{s^2 + K_{vx}s + K_{px}K_{vx}} D_x(s) \quad (2)$$

$$Y(s) = \frac{K_{py}K_{vy}}{s^2 + K_{vy}s + K_{py}K_{vy}} kF(s)X(s) = kX(s) \quad (3)$$

と表される。位置同期の評価を、軌跡誤差 $e(s) = kX(s) - Y(s)$ によって行くと、(2),(3)式より、常に軌跡誤差が0となる。

この提案法の実現性について検討すると、修正要素 $F(s)$ は2階微分を含むため、発散する恐れがないことを確認する必要がある。そこで、Y軸への位置入力信号 $F(s)X(s)$ を計算すると

$$F(s)X(s) = \frac{K_{px}K_{vx}(s^2 + K_{vy}s + K_{py}K_{vy})}{K_{py}K_{vy}(s^2 + K_{vx}s + K_{px}K_{vx})} \frac{V_x(s)}{s} + \frac{K_{vx}(s^2 + K_{vy}s + K_{py}K_{vy})}{K_{py}K_{vy}(s^2 + K_{vx}s + K_{px}K_{vx})} D_x(s) \quad (4)$$

となり、X軸の速度入力 $V_x(s)$ およびX軸に入る外乱 $D_x(s)$ に対する $F(s)X(s)$ への伝達関数は、ともにプロパーな伝達関数であるため、連続な入力に対して連続な出力となり、Y軸の位置入力信号が発散する恐れはない。よって修正要素 $F(s)$ を(1)式として用いることに実行上の問題は無く、本方法の有効性が理論的に確認された。

3. 実験による主軸位置同期制御法の検証

主軸位置同期制御法をXYテーブルの実機(約70[cm]四方のテーブルが定格200[W]のサーボモータに取り付けられたボールネジによりX方向、Y方向各約40[cm]動作)を用いた実験によって検証する。XYテーブルのパラメータは $K_{px}=5[1/\text{sec}]$, $K_{vx}=125[1/\text{sec}]$, $K_{py}=20[1/\text{sec}]$, $K_{vy}=143[1/\text{sec}]$ であり、これらの値を用いて(1)式の補償

要素を構成し、主軸位置同期制御を行った。X軸の目標速度 $V_x(s)$ は台形波

$$v_x(t) = \begin{cases} 90t & (0 \leq t \leq 0.6) \\ 54 & (0.6 < t \leq 1.2) \\ -90t + 162 & (1.2 < t \leq 1.8) \\ 0 & (1.8 < t \leq 2.0) \\ -90t + 180 & (2.0 < t \leq 2.6) \\ -54 & (2.6 < t \leq 3.2) \\ 90t - 342 & (3.2 < t \leq 3.8) \\ 0 & (3.8 < t \leq 4.0) \end{cases} \quad (5)$$

で与え、比例定数 k は1とした。サンプリング時間は $\Delta t=10[\text{msec}]$ とした⁴⁾。また、等価速度外乱として

$$d_x(t) = \begin{cases} 0 & (0 \leq t < 0.5) \\ -5 & (0.5 \leq t \leq 2.0) \\ 0 & (2.0 < t \leq 4.0) \end{cases} \quad (6)$$

を与えた。本提案法の有効性を示すための比較として、1次モデルを用いて補償要素を構成した位置同期制御法³⁾と、位置同期を図らずに各軸を独立に制御する従来法の実験も行った。

以上の実験の結果をFig.2に示す。(a)が提案法、(b)が1次モデル採用、(c)が従来法の位置出力誤差の時間推移を表す。(a)の2次モデルを用いた提案法の場合、X軸とY軸は外乱印加にもかかわらず位置の同期が図られて、軌跡は直線で位置出力誤差は0に近い。また、図をみると外乱が加わる際に瞬時的にインパルス状の誤差が生じているが、それ以外の時点では誤差はほとんど0である。インパルス状の誤差は、補償信号の計算において、オイラー法による差分近似を用いているためと思われる。この性能は、(b)の1次モデルを用いて位置同期を図った場合の最大0.05[mm]程度の軌跡誤差と比して、きわめて小さい。また(c)の従来法では2次モデルや1次モデルで行うよりも、大きな誤差が生じている。この結果から、今回提案した2次モデルで補償した位置同期が高速高精度であることがわかる。2次モデル採用の優位性は、産業界における主軸位置同期制御で通常動作させる領域である速度領域においては、メカトロサーボ系の動作速度 $V_x(s)$ が速くなるほど顕著である。

主軸と従軸の特性は、それぞれ動作する範囲などによっ

Fig. 2 Experimental result of the XY-table equipment : (a)proposed method by use of the the second order model, (b)previous method by use of the first order model, (c)conventional method

Fig. 3 Relationship between the modelling error ratio and the position error

て変化するため、本方法で用いる逆ダイナミクス特性と、従軸側の特性に誤差が生じ、それが制御性能に影響を及ぼす恐れがある。そこで制御対象のモデル化誤差に関するロバスト性の理論解析を行う。補償要素 $F(s)$ の K_{py} , K_{vy} が $K_{py} + \Delta K_{py}$, $K_{vy} + \Delta K_{vy}$ に変化した場合、すなわち補償要素 $F(s)$ を設計する際に、従軸の比例ゲイン K_{py} , K_{vy} にモデル化誤差 ΔK_{py} , ΔK_{vy} を含んだ場合に ΔK_{py} , ΔK_{vy} が制御性能に与える影響を調べる。真値と誤差の加わった値の比率 $r_p = (K_{py} + \Delta K_{py})/K_{py}$, $r_v = (K_{vy} + \Delta K_{vy})/K_{vy}$ を用いて、 ΔK_{py} , ΔK_{vy} がどれくらいの大きさの値までならば位置同期を図る方が、図らない場合より有効であるかを評価したものを Fig. 3 に示す。図からもわかるよう、 ΔK_{py} , ΔK_{vy} はどのように大であっても本方法は有効で、現実的な数% の ΔK_{py} , ΔK_{vy} の誤差では、軌跡誤差は 0.1[mm] 以下になる結果を得た。したがって現実のモデル化誤差に対しては、本方法は十分にロバストであるといえる。

4. ま と め

メカトロサーボ系を2次モデルで表現して、従軸の補償要素を導いて、主軸位置同期を図る制御法を提案した。この方法は、サーボ系のハードウェアの変更を必要とせず、既存の装置の位置フィードバックの計算部分のソフトウェアに補償要素のアルゴリズムを組み込むだけで実現できる。本提案法は先の1次モデルを介した主軸位置同期制御法³⁾の2次モデルへの拡張であり、また本研究では新たにモデル化誤差に対する本方法のロバスト性に関する結果も示し、本方法は産業界のメカトロサーボ系の制御方法として広く有効に利用可能である。

参 考 文 献

- 1) 安川電機製作所編：メカトロニクスのためのサーボ技術入門，22/23，日刊工業出版社（1986）
- 2) 堀，久良，川端：アドバンスド・モーションコントロール（運動の高性能制御）の理論と応用，電気学会論文誌 D，110-11，1110/1118（1990）
- 3) 後藤，中村，岡，久良：動特性の異なる2自由度サーボ系に対する位置同期制御法，計測自動制御学会論文集，30-6，669/679（1994）
- 4) 中村，香田，久良：サーボ系による連続経路制御のサンプル値制御における適性サンプル周波数の決定法，計測自動制御学会論文集，28-5，649/651（1992）