面積評価項を用いた経路制御系に対する仮想軸の導入*

伊藤 浩 司^{*1}, 土谷 武 士^{*2}Introducing Virtual Axis to Path Control System
Using Superficial Evaluation Term

Hiroshi ITOH and Takeshi TSUCHIYA

Presently, tracking control with high speed and high accuracy is seriously required in the field of robotics and machine tools. For the control problem, we previously proposed a preview control system which has a superficial evaluation term in its performance index, and we showed that the preview system is not effective for applying the problem in two cases. The first is when the tracking position is on the velocity vector of the desired signal. The second is when the desired signal does not change. In both cases, the term becomes zero, then the path error becomes large. To overcome the problem caused by the first case, we proposed introducing an auxiliary superficial term into the performance index of the preview control system. In this paper, to overcome the problem caused by the second case, we propose the introduction of a virtual axis to the system. The synthesis method for the new path control system is presented. To evaluate the effectiveness of the proposed control system, simulation studies are carried out. The simulation results show that the path tracking ability is markedly improved.

Key Words: Optimal Control, Mechatronics and Robotics, Servomechanism, Preview Control, Path Control, Superficial Evaluation Term, Virtual Axis

1. 緒 言

ロボット, 工作機械等のメカニカルシステムの経路制御系を実現するために予見制御系を摘要する試みがいくつか行なわれている^{(1)~(5)}. 著者らは経路制御を高速かつ高精度に行うことを目的として最適逐次予見制御系に対し, 従来より用いられている距離評価項に加え面積評価項という新しい項を導入した予見制御系の構成法を提案した⁽⁴⁾. 本制御系は本来独立な複数の制御対象を干渉化して制御することにより, 従来の各制御対象を独立に制御する方式より優れた経路制御性能が得られることを示した. また前回の報告⁽⁵⁾では面積評価項の物理的な意味から面積評価項を用いた経路制御方式の問題点を明らかにした. その結果2つの問題点が明らかになった. 位置誤差と目標経路が同一直線上に並ぶとき, 目標経路の終端部では面積評価項が有効に機能せず, 経路誤差が大きくなり易いことである. このうち第1の欠点を改善するために面積評価補

助項の導入を提案し制御系を構成し, 良好な経路制御性能を得た. しかし補助項の導入によっても第2の目標経路の終端部で面積誤差が零になる場合の問題点は解決できない. 本稿では, 新たに仮想軸という概念を導入することにより, この第2の問題に対するひとつの解決策を示す.

本稿では, 提案してきた面積評価経路制御系の構成および問題点を簡単に説明し, 目標経路の終端部での誤差を減少させるため, 新たに仮想軸という概念を導入する. 次に仮想軸を用いた経路制御系の構成方法を示す. 最後に提案した系に対するシミュレーションにより仮想軸の有効性を示す.

2. 経路制御系の構成

今後の議論の準備として, 前回まで提案した面積評価項および面積評価予見制御系による経路制御系の構成方法を簡単に示す.

2・1 経路制御と面積評価 軌道制御では指定された時刻に指定された位置にあることが要求される. 一方, 経路制御においては, 基本的には時刻に対する制約はなく, 最終的に得られた軌跡が目標の軌跡と一

* 原稿受付 平成5年12月16日.

^{*1} 正員, キヤノン(株) (〒321-32 宇都宮市清原工業団地20-2).^{*2} 北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目).

致することが目的である。各制御時刻における位置誤差を評価する距離評価は、軌道制御に対しては適切な評価基準である。しかし、目標軌跡と最終的に得られた軌跡との誤差を評価する場合、制御途中の位置誤差は意味がない。そこで2本の曲線の一致の度合いを測る一つの方法として、2曲線のつくる面積の大きさを基準とすることを考える。得られた軌跡の目標軌跡と目標軌跡の一致の度合いは、この面積で評価できるであろう。即ち2本の曲線の囲む閉領域の面積が小さいほど、この2本の曲線はよく一致していると言える。面積評価はこのような考えのもとに導入したものである。

図1を用いて本制御方式の目的を説明する。面積評価とは目標経路Rと追従経路Cの2曲線が囲む閉領域の面積を経路誤差の評価基準とすることである。そして、この面積を最小化するような制御を行う。本来は曲線の始点から終点までの全区間の面積を評価すべきである。しかし、ここでは現時点より現時点から有限時間先の期間につくる閉領域の面積を最小化することを考える。図1の斜線部は微小区間の面積要素である。面積要素は $S1_k$, $S2_k$ の合成要素であり、面積要素 $S1_k$ は位置誤差 e_k と目標位置の変動分(目標速度成分) ΔR_k のなす面積成分であり、面積要素 $S2_k$ は位置誤差 e_{k-1} と追従位置の変動分(実速度成分) ΔC_k のなす面積成分である。面積要素 $S1_k$ は次の式(1)、または、これを2次形式で表した式(2)で求められる。式(2)の重み係数は式(3)に示される。ここで I は単位行列である。また、面積要素 $S2_k$ は式(1)、式(3)で ΔR_k を ΔC_k に置き換えたものに等しい。

$$S1_k = \frac{1}{2} |e_k \times \Delta R_k| \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$S1_k = \frac{1}{2} e_k^T Q_1 e_k \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$Q_1 = \frac{1}{4} (\Delta R_k^T \Delta R_k I_0 - \Delta R_k \Delta R_k^T) \quad \dots\dots\dots (3)$$

2・2 経路制御系の構成方法 次に上記の面積要素を評価関数に取り込み、経路制御系を構成する。まず制御対象は次のように離散時間系で表されているものとする。

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= \Phi X_k + G U_k \\ Y_k &= C X_k \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

次に、評価関数は次のように時変の重み係数を有する2次形式評価関数とする。

$$J_k = \sum_{j=k}^{j=k+M} [(R_j - C X_j)^T Q_j (R_j - C X_j) + U_{j-1}^T H_{j-1} U_{j-1}] \quad \dots\dots (5)$$

ここで、評価関数は一般的な2次形式で表されているが、この中には前記の面積評価項以外に距離評価項、制御入力評価項、あるいは必要に応じて加速度評価項、速度評価項等を付加する。ここで距離評価項と

図1 面積誤差要素

は位置誤差の2乗項である。これらの項を導入するのは、距離評価項を付加しないで面積評価項だけ評価すると、制御入力为零の場合が最適になる。また制御入力項がないと制御入力が過大になる。など良好な制御が行えないからである。従って、式(5)の重み係数 Q_j は面積評価項を表す式(3)の重み係数と、その他の評価項の重みを加味して決定される。また面積評価項は本来 $S1_k$, $S2_k$ の2成分を用いるべきであるが、制御系実現に際しては $S1_k$ のみ用いている。それは $S2_k$ を評価関数に取り込み最適制御入力を求めるためには、非線形問題を解かねばならず困難だからである。式(4)で表わされる制御対象に対し式(5)で表される評価関数を最小化するような最適制御入力はいかに求められる⁽⁶⁾。制御系はこの式を計算することにより構成できる。ここで P_{M-j} は閉ループ系を表わす。またMは予見期間である。

$$\begin{aligned} U_k &= F_0 X_k + F_1 R_{k+1} + \sum_{i=2}^M F_i R_{k+i} \\ F_0 &= -B_M G^T S_{M-1} \Phi \\ F_1 &= B_M G^T C^T Q_{k+1} \\ F_i &= B_M G^T P_{M+1-i}^T \dots P_{M-1}^T C^T Q_{k+i} \\ B_{M-j} &= [G^T S_{M-j-1} G + H_{k+j}]^{-1} \\ P_{M-j} &= [I - G B_{M-j} G^T S_{M-j-1}] \Phi \quad \dots\dots\dots (6) \\ S_{M-j} &= \Phi^T S_{M-j-1} P_{M-j} + C^T Q_{k+j} C \\ S_0 &= C^T Q_{k+M} C \end{aligned}$$

3. 面積評価項の問題点と

補助項の導入

本章では、前記制御系で経路誤差を評価するために用いている面積評価項が抱える問題点を説明する。また、この問題に対するひとつの解決策として前回提案した補助項の導入について説明する。

3・1 面積評価項の問題点 本制御系で用いている面積評価項は図1の $S1_k$ であり、この要素は式(1)で表された。式(1)をベクトルの大きさと角度で表すと式(7)になる。物理的な意味は式(7)の方が明瞭なので以下、式(7)をもとに話を進める。ここで θ はベクトル e_k と ΔR_k のなす角である。

$$S1_k = \frac{1}{4} e_k^2 \cdot |\Delta R_k|^2 \sin^2 \theta \quad (7)$$

本制御系は式(7)を評価項として含む2次形式評価関数である式(5)を、最小化する逐次最適化予見制御系により構成されている。最適制御系は評価関数を最小化するように制御入力を決定するから、評価関数を構成する各項が最小値零にできるだけ近づくように制御される。従って、この項が零になる場合が重要である。式(7)より面積評価項が零になるのは、次の3つの場合である。

- (1) $e_k=0$ 位置誤差が零になるとき
- (2) $\Delta R_k=0$ 目標値が停止するとき
- (3) $\theta=0$ または π

目標移動速度と位置誤差が同一直線上に並ぶときここで問題となるのは、実際には経路誤差が発生しているのに、それが面積項に反映されない場合である。このような状況はどのような場合に起きるか調べてみる。

(1)は目標値と追従値が一致することを意味するから、面積誤差=0ならば経路誤差=0となり、面積項は経路誤差を反映しており問題はない。

(2)は経路の停止端で発生する。図2の(k+2)時点以降はこのような状態を示す一例である。サンプリング時点(k+1)までは目標値は変化しているので経路誤差が存在すれば面積誤差を生じる。しかしサンプリング時点(k+2)以降は目標値は変化せず、経路誤差が存在しても面積誤差は生じない。この場合、もし $S2_k$ も面積評価項として用いれば面積誤差項を生ずる。例えば図2では $S2_k = \frac{1}{4} e_k^2 \times \Delta C_k^2 \neq 0$ である。これは $S2_k$ を無視し、式(7)で経路誤差を代表させることの根本的な問題である。

(3)図2のk時点、(k+1)時点は目標移動速度と位置誤差が同一直線上に並ぶ場合を示す一例である。例えばk時点では追従位置 C_k が丁度、目標値変化分(目標

図2 追従誤差と面積誤差

値速度成分) ΔR_k の線分を延長した直線上の点ならば、どの位置であっても面積誤差が生じない。追従位置が目標経路である線分 ΔR_k の上にある場合は、経路誤差はないから面積誤差を生じないのは望ましいことである。しかし線分上を外れた直線上にある場合は、実際は経路誤差を発生しているので、この場合は面積項は誤差を発生すべきである。しかし実際には面積項は零になり経路誤差を反映できない。この場合、もし $S2_k$ を用いれば面積誤差項を生ずる場合と、 $S2_k$ を用いても面積誤差項を生じない場合、の2つの場合がある。面積誤差項を生ずるのは図2のように、ある曲率をもった目標経路に追従している場合である。この場合は、 $S2_k = \frac{1}{4} e_k^2 \times \Delta C_k^2 \neq 0$ を用いれば面積誤差項を生ずる。従って、この場合は $S2_k$ を省略したことにより生ずる問題である。一方 $S2_k$ を用いても面積誤差項を生じない場合は追従位置の速度 ΔC_k が方向を変えない場合、つまり直線上を移動する場合である。このときには e_k と ΔC_k は同一直線上に並ぶため面積誤差を生じない。この場合は $S2_k$ を用いても面積誤差項を生じないから、これは面積項で経路誤差を表すことができない根本的な問題である。

以上の考察から、面積評価項の本質的な問題点は次の2点である。

(問題1)目標経路が線分の場合、追従位置がその線分を延長した直線上の点ならば、目標経路上になくても経路誤差が生じないこと。

(問題2)目標経路が停止した場合は、追従位置がどの位置であっても経路誤差が生じないこと。

3・2 補助項の導入 前節の考察で $S1_k$ で経路誤差を表した場合には、目標経路が線分であり、追従位置がその線分を延長した直線上にある場合、面積誤差が小さな値になり経路誤差を表わせなくなるために、経路誤差を生じることを示した。従って、このような状況でも、大きな面積誤差を発生するような項を評価関数に導入できれば、経路誤差をより小さく制御できるはずである。そこで図3(a)の斜線部で示されるような面積評価補助項 $S0_k$ を導入し、この項を $S1_k$ とともに面積項として用いることを提案する。前回の方式では面積評価項として $S1_k$ を用いているが、補助項は更に $S0_k$ 項を加えることになり、 S_k は新たに次のように表わされる。

$$S_k = S1_k + S0_k \quad \dots\dots\dots (8)$$

この項は図3(a)のように補助項を導入しなかった場合の値 $S1_k$ に比べ大きな面積誤差を発生させることができる。特に図3(b)のように補助項を用いない方式では面積誤差 $S1_k$ が零になる場合でも、補助項を用いる方式では目標経路が曲率を持つ場合には、 $S0_k$ により面積誤差を発生させることができる。従って、この補助項 $S0_k$ を評価関数に加えることにより、前記の(問題1)の場合でも経路誤差を減少させることができると考えられる。

制御系の構成方法は第2章と同様であるが、重み関数が次式で表わされる点が異なる。ここで $q1$ は $S1_k$ に対する重み係数、 $q0$ は $S0_k$ に対する重み係数であり、この係数により各々の荷重配分を変えられるようにする。また q_k は(3)式で与えられる。

$$q_k = q1 \cdot q_k + q0 \cdot q_{k+1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

(a) 面積誤差補助項 $S0_k$

(b) $S1_k$ が零の時

図3 面積誤差補助項

4. 仮想軸の導入

これまで提案してきた面積評価項では目標指令値が変化しなくなると、その値は零になり経路誤差が表せなくなるため、経路制御性能が劣化するという問題点があることを指摘した(問題2)。今回提案する仮想軸はこの問題に対するひとつの解決策である。実軸によりつくられる実空間に仮想軸を付加することにより、実空間より高次元の仮想空間を作る。この仮想軸に目標指令値を与えることで、実軸に対する目標指令値の変化がないときでも面積誤差を作り出すことができる。即ち、この仮想空間上で経路制御を行なうことになる。実空間上での経路制御は仮想空間から実空間への射影として表される。以下、仮想軸の考えを詳しく説明する。

4・1 仮想軸の数学的意味 離散時間系での面積評価項は式(2)および式(3)で表された。この式より明らかなように、目標指令値が変化しなくなると面積評価項の値は零である。ここで目標指令値の次元を増やし $\tilde{R}$ という拡大目標指令値を考える。すると式(2)は式(10)になる。式(10)の重み成分は(11)式で求められる。ここで $\tilde{R}$ は式(12)で表される。

$$\tilde{S1}_k = \frac{1}{4} e_k^T \tilde{q}_k e_k \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\tilde{q}_k = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} \Delta \tilde{R}_k^T \Delta \tilde{R}_k I - \Delta \tilde{R}_k \Delta \tilde{R}_k^T \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\tilde{R}^T = \begin{bmatrix} R^T & R_w^T \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (12)$$

(11)式に式(12)を代入すると式(13)が得られる。ここで、 I_0 と I_w とは各々 R 、 R_w と同じ次数の単位行列である。

$$\tilde{q}_k = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} \Delta R_w^T \Delta R_w I_0 & -\Delta R \Delta R_w^T \\ -\Delta R_w \Delta R^T & \Delta R^T \Delta R I_w \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (13)$$

従って ΔR が零になり式(2)の値が零でも、拡大した目標指令値 $\tilde{R}$ の仮想軸成分 R_w を変化させることができる。よって、 $\Delta R_w \neq 0$ であるから式(10)は零にならず面積評価項は零にならず経路誤差を生ずる。目標指令値が増加した分、それに対応する制御量および、その制御量を出力する制御対象が必要である。この新たな制御対象が仮想軸である。仮想軸は実際の制御対象として存在する必要はなく計算上存在すればよい。

3・2 仮想軸の物理的意味 単純な例で仮想軸の概念を説明する。実空間としてXY平面を考える。通常はX軸、Y軸に対する目標経路を指令しXY平面上で経路制御を行なう。ここで仮想軸としてXY平面と垂直方向にW軸を考える。ここで提案する方式ではX軸、Y軸、W軸に目標経路を与えXYWの3次元仮想空間での経路を描く。実空間であるXY平面での経路は、このXYW空間での経路のXY平面への射像とし

て与えられる。図4はこのような例を示したものである。目的はXY平面で円経路を描くことである。仮想軸をW軸として、円の終点でW軸方向に移動を開始する目標指令値をW軸に与える。図4(a)はこのときの3次元仮想空間XYWでの軌跡である。また図4(b)はこの軌跡のXY実平面への射像を示す。ここで終端でW軸の効果が数式的にどのように表われているか調べる。式(13)より終端では ΔR が零になり、また $\Delta R_w \neq 0$ である。従って、重み関数の実軸の位置誤差成分にかかる重みが大きくなる。即ち整定時には位置誤差にかかる重みを大きくする制御が行われる。これは極めて常識的な発想である。このように仮想軸を導入することにより、直感的に合理的と考えられる処理が行われることは仮想軸導入の妥当性を示している。

X軸、Y軸、W軸が各々独立であれば、このような制御を行なうことは無意味である。W軸の動きはX軸、Y軸に何の影響も与えない。しかし、X軸、Y軸、W軸が互いに干渉し合いながら動作するとすれば、W軸の動きを適当に調整することによりX軸、Y軸の動きをより制御目的に叶ったものにすることが可能であろう。我々の提案してきた面積評価項を用いる予見制御系の特徴は、複数の独立な制御対象を干渉化して制御することにより、各制御対象を独立に制御する場合に比べ、より制御目的にかなった制御を行なうことである。従って、前記のような仮想軸を含めた仮想空間上で経路制御を行ない、W軸を適切に制御することによりX軸、Y軸の動きを、より制御目的に叶ったものにすることが期待できる。ここで問題となるのは次の2点である。これらの問題への答えは制御目的がどのようなものであるかにより異なる。5章ではこの問題に対する例を示す。

- (1) 仮想軸をどのように設定するか。
- (2) 仮想軸に与える目標値はどのような値にするか。

5. 仮想軸を用いた経路制御系

次に仮想軸を用いた効果をシミュレーションにより調べる。経路制御性能を調べるために、目標円経路に対する本制御系の追従性を調べる。また仮想軸を用いない制御系、面積項を用いない制御系の特性も同時に示し、本制御方式の有効性を示す。

5・1 制御系の構成 制御対象は図5のような単純な2次慣性系とする。電流マイナー・ループを設け適切な設計をされたアクチュエータの低周波特性は、ほぼこのモデルで表現できる。この実在の制御対象をX軸、Y軸とする。また、仮想軸としてX軸と同じ特性のW軸を考える。このとき離散時間系で表したX軸、Y軸、W軸を合わせた制御対象の特性は式(14)で表される。

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bx(t) \\
 y(t) &= Cx(t) \\
 x(t) &= [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6] \\
 u(t) &= [u_1 \ u_2 \ u_3]
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad
 B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (14)
 \end{aligned}$$

ここで

x_1 ; X軸位置	x_2 ; X軸速度
x_3 ; Y軸位置	x_4 ; Y軸速度
x_5 ; W軸位置	x_6 ; W軸速度
u_1 ; X軸電流指令	u_2 ; Y軸電流指令
u_3 ; W軸電流指令	
$K = K_T / J$	
K_T ; トルク定数,	J ; 慣性モーメント

図4(a) 仮想空間XYW

図4(b) 実平面XY

図4 仮想軸

図5 制御対象

式(14)を離散時間系の表現に変換すると式(15)になる。

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= \Phi X_k + GU_k \\ Y_k &= CX_k \\ X_k^T &= [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4 \ X_5 \ X_6] \\ U_k^T &= [U_1 \ U_2 \ U_3] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (15)$$

制御系を構成するため、評価関数を式(16)のように定める。ここで q^d は位置誤差 e_j に対する重み係数である。また q_k^a は面積項を表す重み関数であり式(9)に、式(3)を代入する代わりに式(11)を代入したものである。すなわち面積評価補助項と仮想軸を用いている。

$$J_k = \sum_{j=k}^{j=k+M} [e_j^T q^d e_j + e_j^T q_k^a e_j + U_{j-1}^T H U_{j-1}] \quad \dots\dots\dots (16)$$

式(16)の第1項は距離評価項、第2項は面積評価項、第3項は制御入力の評価項である。このモデルでは第3項は加速度評価項に相当する。制御入力に対する重み係数はX軸、Y軸、W軸ともに同じ定数とする。式(16)は式(5)の形で表される。また式(14)は式(4)と同等である。従って制御入力式(6)より求められる。

5・2 シミュレーション ここでX軸、Y軸に与える目標指令値はX-Y平面上で円を描くものとする。W軸に対する目標指令値は、X軸、Y軸への目標指令

値が停止した後、W軸の正方向に一定速度で移動するランプ入力とする。以下で用いるシステムA、B、Cは各々、次のような逐次最適化予見制御系である。

システムA) 面積評価項を用いない系

システムB) 面積評価項を用い仮想軸を用いない系

システムC) 面積評価項を用い仮想軸を用いた系

図6は半径10[mm]、送り速度200[mm/sec]の円を目標経路として前記の各系に与えたときの応答である。図より明らかに仮想軸を用いたシステムCが最も経路誤差が小さく良好な経路制御を行なっていることが分かる。仮想軸導入の目的は停止端での経路誤差を減少させることにある。図6の(b)、(c)を比較すると、この目的が達成できたことを示しており、特にX軸方向へのオーバーシュートは顕著に減少している。また、このとき各システムが要する最大加速度はシステムA、B、Cの順に各々5284 [mm/sec²]、4222 [mm/sec²]、4222 [mm/sec²]でありシステムB、Cの加速度はともに小さく制御上望ましい特性を示している。

次に仮想軸の効果を面積項の時間的な変化を調べるにより確認する。第7図は前記の応答時の各システムの実面積項および評価面積項の時間的な変化を示したものである。ここで実面積項(Real)は第1図の Sl_k

図6 目標円経路と追従経路

図7 面積項の時間変化

と $S2_k$ との和であり実面積を表わす, また評価面積項 (Evaluate) は第3図の $S1_k$ と $S0_k$ との和であり本制御系が面積成分として評価に用いている面積成分である. この2つの成分が一致するほど本来評価したい量と, 制御系が実際に評価している量が一致しており, 制御目的が合理的に表現されていることを示す. システムA, BとシステムCを比較するとシステムA, Bでは目標経路が終端になる時刻 $T1$ 以降は, 実際には経路誤差があるため実面積項は零にならない. それにもかかわらず評価面積項は零になっている. 一方, システムCでは目標経路が終端を越えても評価面積項は零にならず, 実面積とよく一致している. 従ってシステムBでは終端で実際には経路誤差があるにもかかわらず, 評価関数には経路誤差として現れないため, 終端での経路誤差が大きくなる. 一方, システムCでは目標経路が終端を越えても評価面積項は零にならないため, この経路誤差を小さくするように制御されるため経路誤差が小さくなる. このように仮想軸を用いた面積評価方式は, 終端部での経路誤差を減少させるのに有効である.

6. 結 言

本論では面積評価を用いた予見制御系に仮想軸という新たな概念を導入することにより, 本来実空間では面積誤差を生じないときにでも仮想軸を付加した仮想空間上で面積誤差を生じさせることにより, 実空間で良好な経路制御性能が得られることを示した. 仮想軸の効果は経路終端で特に大きいことを示した. また本来評価したい実面積と, 評価に用いている面積評価項の値を比較することにより, 仮想軸を導入した制御方式は経路終端でも経路誤差の評価が良好に行われることを示した. 仮想軸を導入できるのは, 面積項が本来独立な制御対象を干渉化する効果があるためである. 従来, 相互干渉のある制御対象を非干渉化して制御を行なうことはよく行なわれているが, 逆に相互干渉のない制御対象を干渉化して制御することで効果の高い

制御性を得ることは少なかったように思う⁽⁷⁾. 本論はこのような干渉化制御の有効な例であると考えられる.

これまでは, 目標経路に対する追従性をテーマに研究を進めてきた. 今後の課題はロバスト性の検討と, 実対象への応用である. 面積評価項を用いた経路制御系のロバスト性に関しては, 既に著者らによって報告されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾. また, 面積評価に限らなければ, 予見制御系のロバスト性に関しては, いくつか報告されている^{(10)~(13)}. 従って, 今後はこれらのロバスト性に関する手法と追従性に関する研究結果を, 実対象に適用していく上での問題点を明らかにする必要がある.

文 献

- (1) T.Tomizuka and et al: Experimental Evaluation of the Preview Servo Scheme for a Two-Axis Positioning System, Trans. of the ASME, Jour of Dyn. Sys. Meas. and Contr., 106, March, 1/5 (1984)
- (2) 吉本堅一: ロボットアームの予見制御, コンピュータロール, 9, 56/62 (1985)
- (3) 杉内・吉本: 低剛性ロボットアームの予見追従制御, 日本機械学会論文集C, 54-506, 2491/2497, (1988)
- (4) 伊藤・土谷: 面積評価項を含む予見制御系の経路制御への応用, 計測自動制御学会論文集, 25-7, 771/778 (1989)
- (5) 伊藤・土谷: 経路制御における面積評価項の問題点と補助項の導入, 日本機械学会論文集C, 59-565, 2718/2725 (1993)
- (6) 富塚誠義: 離散型最適有限予見制御問題, 計測自動制御学会論文集, 11-6, 663 (1975)
- (7) 鎌野・鈴木・井内・富塚: アダプティブフィードフォワード制御を用いた2軸位置同期システム, 計測自動制御学会論文集, 29-7, 785/791 (1993)
- (8) 伊藤・土谷: 面積評価予見制御の外乱抑圧方法および外乱特性, 第36回自動制御連合講演会予稿集, 217/218 (1993)
- (9) 堀・土谷: ロバスト性を考慮した面積誤差評価予見制御によるメカニカルシステム経路制御, システム制御学会論文集, 6-7, 340/346 (1993)
- (10) T.Tomizuka and D.E.Rosenthal: On the Optimal Digital State Vector Feedback Controller with Integral and Preview Actions, Trans. of the ASME, Jour of Dyn. Sys. Meas. and Contr., 101, June, 172/178 (1979)
- (11) 愛田・北森: 最適予見サーボ系の設計, 計測自動制御学会論文集, 22-5, 527/534 (1986)
- (12) 土谷・江上: デジタル予見制御, 産業図書 (1992)
- (13) 愛田・横瀬ほか: あらかじめ設計されたロバストサーボ系に対する予見制御の一設計法, 計測自動制御学会論文集, 24-11, 1129/1136 (1988)