計測自動制御学会東北支部　第 260 回研究集会（2010.10.29）
資料番号 260-21

誤差学習を用いた終端状態制御による ロボットアームの各種動作の発現

Appearance of Various Motions from the Robot Arm by Means of Final-State Control with Error Learning

○坂井秀行，有我祐一，遠藤茂

○Hideyuki.Sakai, Yuichi.Ariga , Shigeru.Endo

山形大学

Yamagata University

キーワード：終端状態制御(Final-state control)，誤差学習(Error Learning)，
ロボットアーム(Robot Arm)，生物的動作(Bio-Mimetic)

連絡先：〒992-0037　米沢市城南 4-3-16　山形大学工学部応用生命システム工学科　有我研究室
坂井秀行, E-mail: hybouz@yahoo.co.jp

1. 諸言

1.1 背景

現在, ロボットは工業, 医療, 福祉, 宇宙など場所を問わず多種多様に広がり, 生活に溶け込むように表情や動作をヒトに近づけつつある.

従来, ロボットにヒトに近い動きをさせるにはあらかじめ設計者が軌道を設計し, それにならうようにフィードバック制御を用いて逆運動学による軌道設計をすることで動作をさせていた.

それに対して誤差学習を用いた終端状態制御[1]によって動作を獲得させると, 軌道設計することなく初期と終端の状態量とその間の目標時間の条件を満たすフィードフォワード制御入力を得ることができる.

先行研究から誤差学習を用いた終端状態制御から動作を得る仕組みと生物の学習による動作獲得の仕組みが酷似していると報告されている.[2]

実際, ヒトが物を投げる動作を獲得する過程では関節角度, 手先の軌道を逐一求めているわけではない. 物を投げる目標位置を定め, その飛距離に対して腕の初期状態と終端状態, また終端状態での手先の速度を調整することによって動作を獲得している. このことから従来のフィードバック制御より終端状態制御を用いることが適当であると考えられる.

先行研究[3]において, この理論を適用し水平３リンクロボットアームによる投てき動作のシミュレーションを行った結果, ヒトの投球動作を模倣して腕を一度振りかぶって投げる動作を獲得することができた. 上記から最少制御入力を獲得するために発現した動作であると考えられる.

しかし水平３リンクロボットアームでは制御対象の構造が複雑で動作発現の解析が困難である. そこで垂直１リンクロボットアームによって動作を検証した.

その結果, 条件を利用できる場合は有利になるように使用し, 悪影響を及ぼす条件は影響を減らす動作を獲得した[4].

1.2 目的

本研究では先行研究とは異なる終端状態の条件でシミュレーションを行い, 垂直１リンクロボットアームに誤差学習を用いた終端状態制御を適用し, 非線形性を活用した生物的動作を獲得できるか検証する.

2.リンクモデル

2.1 運動方程式と状態方程式

Fig.1に1リンクロボットアームのモデルを示した.

そのパラメータの定義をTable.1に示す.

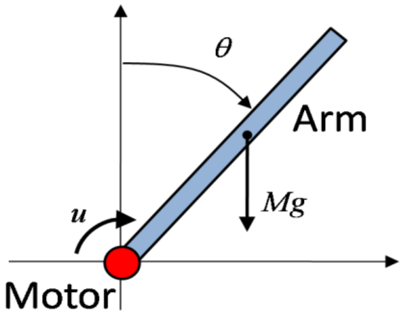

Fig. 1 Robot arm

Table.1 Specification of parameter

Weight	M	0.10	[kg]
Length	L	0.15	[m]
A ceter of gravity position	r	0.075	[m]
Torque	K	1.00	[N/A]
Moment of inertia about the axis of rotation	I	0.00075	[kgm^2]
Coefficient of friction	D	0.002	[N/(m/s^2)]
Gravitational acceleration	g	9.81	[m/s^2]
Sampling time	⊿t	0.001	[sec]

Fig.1 に示したモデルの運動方程式をリンクの角変位 θ を一般化座標として導出すると次式となる.

$$I\ddot{\theta} - Mgl \times \frac{\sin\theta}{\theta}\theta = ku \tag{1}$$

本研究では近似を行わずに非線形項を状態方程式の係数行列に取り込むために次の式変形を施した.

$$p \times \sin\theta = \left(p \times \frac{\sin\theta}{\theta}\right) \times \theta \tag{2}$$

ただしpは多項式を表し$\theta = 0$のとき

$$\frac{\sin\theta}{\theta} = 1$$

とする.

これにより状態方程式は以下のように表される.

$$\dot{x}_0 = A_0(\theta)x + Bu \tag{3}$$

$$A_0(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{Mgl}{I} \times \frac{\sin\theta}{\theta} & \frac{-D}{I} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ K/I \end{bmatrix} \qquad x = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

3. 終端状態制御

本研究では参考文献(1)~(4)で提案されている誤差学習を用いた終端状態制御を用いる. 概略を以下に述べる.

3.1 終端状態制御と誤差学習

本研究では非線形である実システムを時変系として扱い誤差学習を取り入れた終端状態制御によってフィードフォワード入力を求める.

式(3)の制御対象の状態方程式をオイラー法によって刻み時間Δtで離散化した離散システムは以下のように表される.

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k \tag{4}$$

ただし

$$A_k = A(\theta_k, \dot{\theta}_k)\Delta t + I \qquad B_k = B(\theta_k)\Delta t$$

である. このシステムの拡大系は

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{k+1} &= \tilde{A}_k \tilde{x}_k + \tilde{B}_k w_k \\ w_k &= -K\tilde{x}_k + \tilde{u}_k \end{aligned} \tag{5}$$

ただし

$$\tilde{A}_k = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ 0_{3\times 6} & I_{3\times 3} \end{bmatrix} \tilde{B}_k = \begin{bmatrix} 0_{6\times 3} \\ I_{3\times 3} \end{bmatrix} \tilde{x}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ u_k \end{bmatrix}$$

と表されさらに

$$F = \tilde{A}_k - \tilde{B}_k K \tag{6}$$

とすれば式(4)は以下のように表される.

$$\tilde{x}_{k+1} = F\tilde{x}_k + \tilde{B}\tilde{u}_k \tag{7}$$

そして鉛直上向きの近傍で線形化した線形時不変の状態方程式を対象として求めた制御入力 $\hat{\tilde{V}}_L = [\tilde{u}_0, \tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \cdots, \tilde{u}_{N-1},]^T$ を式(7)に順次与えたときの状態遷移行列 $F_0, F_1, \cdots, F_{N-1}$ は次式で求められる.

$$\begin{aligned}\tilde{x}_1 &= F_0\tilde{x}_0 + \tilde{B}\tilde{u}_0 \\ \tilde{x}_2 &= F_1\tilde{x}_1 + \tilde{B}\tilde{u}_1 \\ &\vdots \\ \tilde{x}_N &= F_{N-1}\tilde{x}_{N-1} + \tilde{B}\tilde{u}_{N-1}\end{aligned} \tag{8}$$

$\tilde{x}_N$ は以下のように表される。

$$\tilde{x}_N = F_{N-1}F_{N-2}\cdots F_0\tilde{x}_0 + \tilde{U}_V\tilde{V} \tag{9}$$

$$\tilde{U}_V = \left[F_{N-1}F_{N-2}\cdots F_1\tilde{B}, F_{N-1}F_{N-2}\cdots F_2\tilde{B}, \cdots, F_{N-1}\tilde{B}, \tilde{B}\right]$$

$$\tilde{V} = [\tilde{u}_0, \tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \cdots, \tilde{u}_{N-1}]^{\mathrm{T}}$$

目標状態を $\tilde{x}^0$ とすると式(9)の $\tilde{x}_N$ が $\tilde{x}_N = \tilde{x}^0$ となるとき終端状態制御が実現する．式(8)から得られる状態遷移行列 $F_{0,}F_{1,\cdots,}F_{N-1}$ と、式(9)によって実システムが初期状態 $\tilde{x}_0$ から目標状態 $\tilde{x}^0$ に到達するための制御入力 $\hat{\tilde{V}}$ は次式となる．

$$\hat{\tilde{V}} = \tilde{U}_V{}^{\mathrm{T}}(\tilde{U}_V\tilde{U}_V{}^{\mathrm{T}})^{-1}\left(\tilde{x}^0 - F_{N-1}F_{N-2}\cdots F_0\tilde{x}_0\right) \tag{10}$$

となる．

以上で求めた制御入力 $\hat{\tilde{V}} = [\tilde{u}_0, \tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \cdots, \tilde{u}_{N-1}]^T$ を拡大システム(6)式に与えると拡大システムの状態ベクトル $\tilde{x}_k = [x_k \ \ u_k]^{\mathrm{T}}$ が求められその要素から実システムへのフィードフォワード入力 u_k が得られる．しかし式(10)で求めた $\hat{\tilde{V}}$ を与えたシステム式(6)に与えた結果終端状態は

$$\tilde{x}'_N = F'_{N-1}F'_{N-2}\cdots F'_0\tilde{x}_0 + \tilde{U}'_V\hat{\tilde{V}} \tag{11}$$

となって目標状態 $\tilde{x}^0$ とは異なり結局 $\hat{\tilde{V}}$ は

$$\hat{\tilde{V}} = \tilde{U}'_V{}^{\mathrm{T}}\left(\tilde{U}'_V\tilde{U}'_V{}^{\mathrm{T}}\right)\left(\tilde{x}'_N - F'_{N-1}F'_{N-2}\cdots F_0\tilde{x}_0\right) \tag{12}$$

と表される．ここで上付きの’は状態遷移の変化に伴うベクトルおよび行列の変化を表す．

このときの終端誤差ベクトル e を

$$e = \tilde{x}^0 - \tilde{x}'_N \tag{13}$$

とし入力 ΔV 以下のようにする．

$$\Delta V = \tilde{U}'_V{}^{\mathrm{T}}\left(\tilde{U}'_V\tilde{U}'_V{}^{\mathrm{T}}\right)^{-1}e \tag{14}$$

そして式(12)の $\hat{\tilde{V}}$ に式(14)の ΔV を加えて

$$\begin{aligned}&\hat{\tilde{V}} + \Delta V = \\ &\tilde{U}'_V{}^{\mathrm{T}}\left(\tilde{U}'_V\tilde{U}'_V{}^{\mathrm{T}}\right)^{-1}\left(\tilde{x}^0 - F'_{N-1}F'_{N-2}\cdots F'_0\tilde{x}_0\right)\end{aligned} \tag{15}$$

となる．式(15)はシステムが目標状態 $\tilde{x}^0$ に到達するための入力である式(12)と同じ形になる．式(15)を式(11)の $\hat{\tilde{V}}$ に与えたとき状態遷移が変わらなければ目標状態に到達する．ところが入力の変化が大きいと状態遷移の変化が大きくなり ΔV による誤差補償は収束しない．

そこで学習係数 $\gamma(0\langle\gamma \le 1)$ を ΔV にかけて入力の変化を小さく抑える．そのため以下のように入力の更新を行う．

$$\hat{\tilde{V}} \leftarrow \hat{\tilde{V}} + \gamma\Delta V \tag{16}$$

式(16)で求められた $\hat{\tilde{V}} = [\tilde{u}_0, \tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \cdots, \tilde{u}_{N-1}]^T$ を式(7)に与えると $\tilde{x}_k = [x_k \ \ u_k]^{\mathrm{T}}$ が求められその要素から実システムへのフィードフォワード入力 u_k が得られる．

この一連の流れをフローチャートとして Fig. 2 に示す．

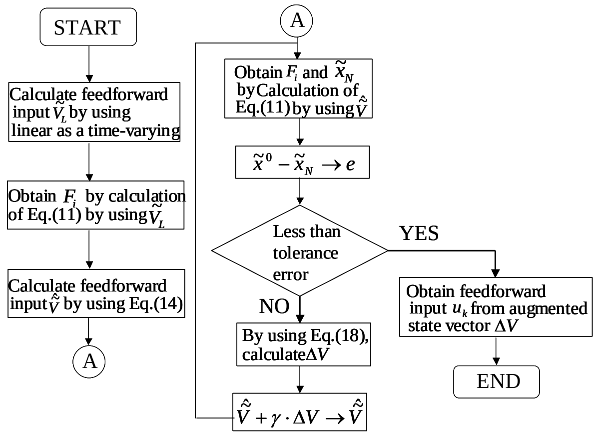

Fig.2 Flow chart of design of feedforward input

4. シミュレーション

先行研究 [4] と同じ条件下で制御対象であるアームのパラメータを本研究の設定にして再計算を行う．

4.1 終端速度ありのときの動作の獲得

はじめに誤差学習を用いた終端状態制御により導出されたフィードフォワード制御入力から先行研究で得た動作を獲得できるか検証する．

検証するために以下の条件でシミュレーション方法を行った．

条件 1

初期状態: $x_0 = \begin{bmatrix}\theta & \dot{\theta}\end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix}\pi/6 & 0\end{bmatrix}^T$

終端状態: $x_N = \begin{bmatrix}\theta & \dot{\theta}\end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix}\pi & V_1\end{bmatrix}^T$

学習係数: $\gamma=0.2$

誤差範囲: $e=10^{-3}$

終端状態速度: $V_1=14.488$ [rad/sec]

(V_1 はあらかじめ自由落下時の最下点の速度)

(T_N は 0.15[sec]～1.0[sec]の間で変化)

まず始めに，この条件のもとで自由落下にかかる時間 T_f を調べる．この T_f を中心に目標到達時間 T_N を 0.15[sec]～1.0[sec]の間で変化させてシミュレーションを行った．サンプリング周期 T＝0.001[sec]とした．動作の概略を Fig.3 に示す．

Fig.4($T_N=T_f=0.316$[sec]),Fig.5($T_N=0.15$[sec]),および Fig.6（$T_N=1.0$[sec]）にシミュレーション結果を示す．

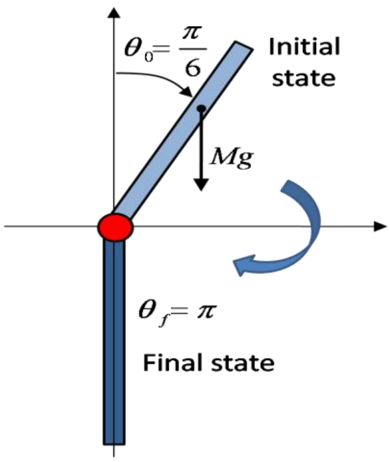

Fig.3 Outline of movement

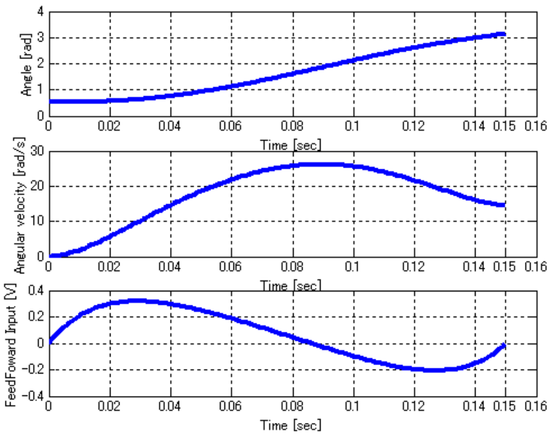

Fig.4 Simulation results($T_N=0.15$[sec])

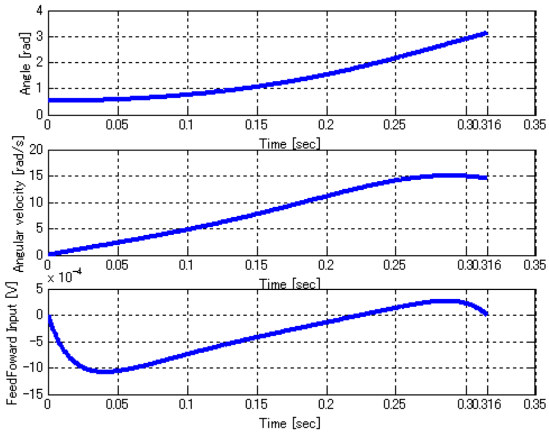

Fig.5 Simulation results
($T_N=T_f=0.316$[sec])

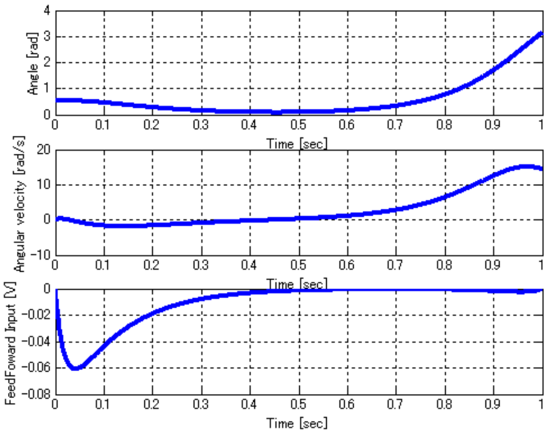

Fig.6 Simulation results($T_N=1.0$[sec])

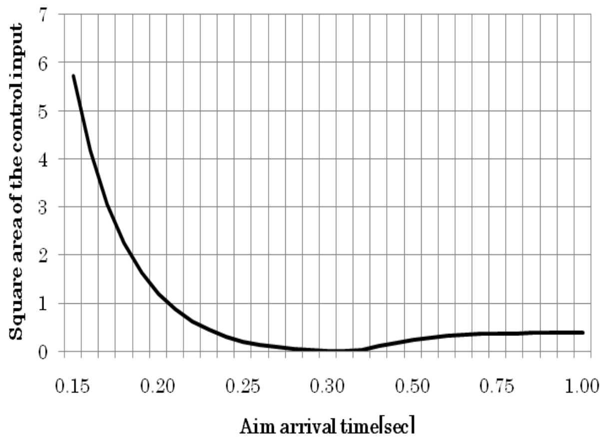

Fig.7 Aim arrival time and Square area
of the control input

これらの結果からどの場合も目標状態に正確に達している．Fig.4 と Fig.5 の軌道は相似であるが，Fig.4 は自由落下時間より早く目標状態に到達しなければいけないので，加速するために制御入力の消費が増大する．

Fig.5 では自由落下時間で目標状態に到達すればよいので重力を利用し制御入力の消費をほぼ 0 に抑えられている．

Fig.6 は $\theta=0$[rad]方向へ一度移動させるためだけに制御入力が使われている．その後，目標到達時間が近づくと重力を利用し自由落下によって目標状態に到達している．

Fig.7 に示した制御入力の二乗面積と目標到達時間のグラフを見ると，T_f より短い時間では制御入力が増大し，$T_N=T_f$ の場合にはほぼ制御入力は 0 である．$T_N \gg T_f$ の場合は，供給される制御入力が一定に抑えられている．それは $\theta=0$[rad]方向へ一度移動させるためだけに制御入力が使われているからである．これは T_N が 0.50[sec]より長い場合にも同様に起こる．

以上の結果から誤差学習を用いた終端状態制御から導出された動作は条件を利用できるときは有利になるような動作を獲得し，悪影響を及ぼす条件では影響を減らすような動作を獲得していることがわかる．

4.2 終端速度 0 のときの動作の獲得

本節では前節の終端速度を 0[rad/sec]に変更して再びシミュレーションを行った．終端速度を 0[rad/sec]に変更することで，真下に移動してから摩擦を活用した振り子運動を行い終端状態に到達する場合が考えられる．

これを確かめるために，次に示す条件でシミュレーションを行った．

条件 2

初期状態：　$x_0=\begin{bmatrix}\theta & \dot{\theta}\end{bmatrix}^T=\begin{bmatrix}\pi/6 & 0\end{bmatrix}^T$

終端状態：　$x_N=\begin{bmatrix}\theta & \dot{\theta}\end{bmatrix}^T=\begin{bmatrix}\pi & 0\end{bmatrix}^T$

学習係数：　$\gamma=0.2$

誤差範囲：　$e=10^{-3}$

（T_N は 0.2[sec]～2.0[sec]の間で変化）

前節の結果では T_N が T_f より長くなる場合，一度 $\theta=0$[rad]のほうへアームを移動させれば重力による転倒モーメントの影響が少なくなるため，エネルギを消費せずに時間を稼ぎ目標状態に到達した．

しかし条件 2 では終端状態速度を 0[rad/sec]と設定しているため目標到達時間が長くなった場合，$\theta=\pi$[rad]の方向へ移動してから摩擦を利用した振り子運動によって角速度を減少させつつ目標状態に到達することが容易に想像できる．上記を検証するためのシミュレーション方法を以下に示す．

サンプリング周期を 0.001[sec]として，目標到達時間 T_N を 0.2[sec]～2.0[sec]の間で変化させてシミュレーションを行った．Fig.8(T_N =0.2sec)， Fig.9(T_N =0.9sec)， Fig.10(T_N =1.2sec)， Fig.11(T_N =1.5sec)， Fig.12(T_N =1.8sec)，Fig.13(T_N =2.0sec)にシミュレーション結果を示す．

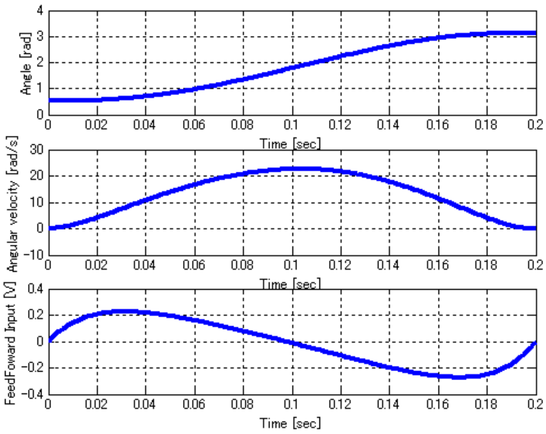

Fig.8 Simulation results (T_N =0.2[sec])

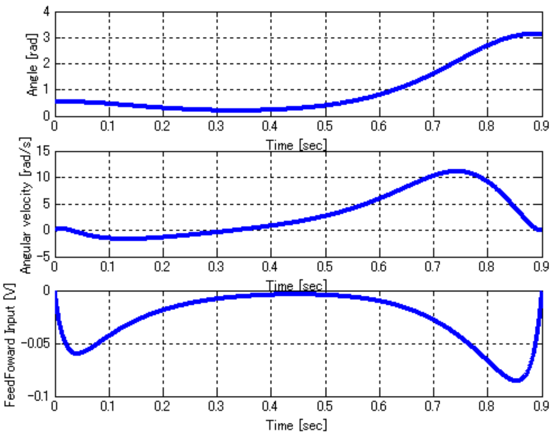

Fig.9 Simulation results (T_N =0.9[sec])

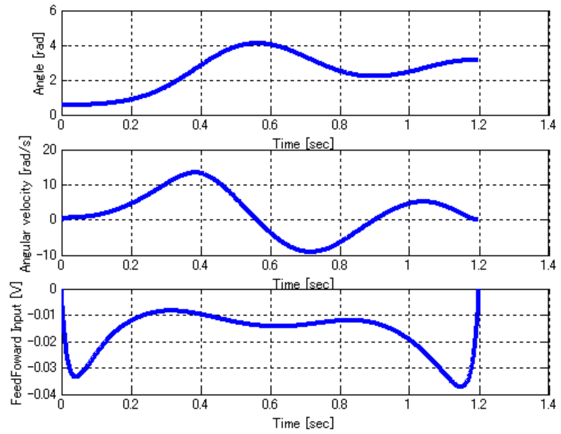

Fig.10 Simulation results (T_N =1.2[sec])

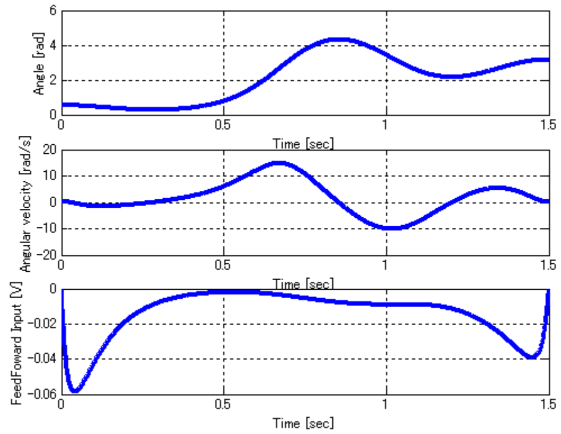

Fig.11 Simulation results (T_N =1.5[sec])

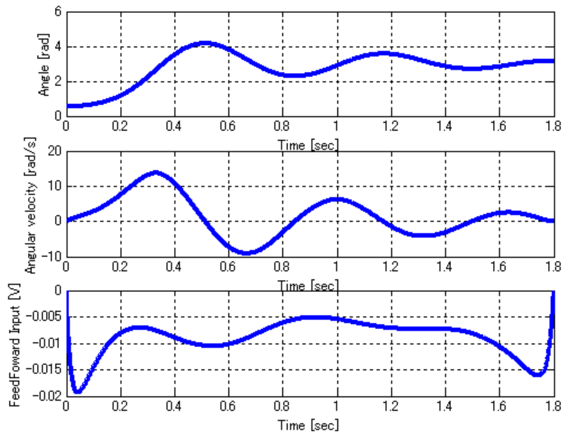

Fig.12 Simulation results (T_N =1.8[sec])

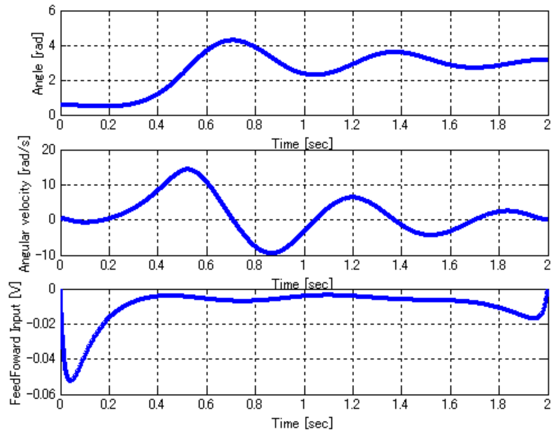

Fig.13 Simulation results (T_N =2.0[sec])

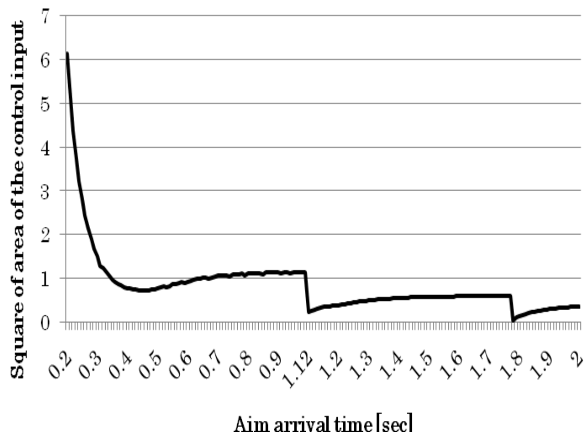

Fig.14 Aim arrival time and Square area of the control input

どの場合もT_N後に目標状態に正確に達していることが分かるが軌道および制御入力は異なる．

Fig.8 では目標状態に早く到達しなければならないので加速するために制御入力が増大する．

Fig.9 の場合，一度θ=0[rad]のほうへアームを移動させてから自由落下によって目標状態に到達した．Fig.8 と Fig.9 は前節と同様の結果である．

Fig.10 から Fig13 は$\theta = \pi$[rad]付近に移動し目標到達時間に近づくまで振り子運動を行い，摩擦を利用して角速度を減少させつつ目標状態に到達している．

しかし Fig.10 と Fig.11 は目標角度に到達するまでπ[rad]を 2 回通過しているのに対し Fig.12 と Fig.13 は 4 回通過している.こ

れは目標到達時間が長くなるにつれて振り子運動の回数を増やし摩擦により効率的に角速度の減少を行っていると考えられる．

さらに Fig.11 と Fig.13 は振り子運動に加えて θ =0[rad]の方向へ移動して制御入力を抑える動作も獲得している．

Fig.14 に制御入力の二乗面積と目標到達時間のグラフを示した． $T_N \ll T_f$ の場合，早く目標状態に到達しなければならないので制御入力は増大する． $T_N = T_f$ の場合，前節では制御入力はほぼ 0 であった. しかし終端速度を 0[rad/sec]に条件を変更したために，重力を利用した自由落下で目標状態に到達しようとすると終端速度が 0[rad/sec]にはならないので, 角速度を減少させるための制御入力が必要である. よって制御入力が 0 にはならない.

0.6～1.12[sec]付近まで制御入力がほぼ一定に抑えられている．これは Fig.9 と同様の理由で一度 θ =0[rad]のほうへアームを移動させるためだけに使用される制御入力である．1.2～1.8[sec]付近での現象も同様である.

ここで 1.12[sec]付近と 1.8[sec]付近で制御入力が突然減少する箇所がある. これは θ =0[rad]の方向へ移動して制御入力を抑える動作から $\theta=\pi$ [rad]付近で振り子運動に切り替えたことで制御入力を抑えることができたことを表している.

以上の結果から仮説で考えていたことより複雑なシミュレーション結果を得た.

この現象が起きた要因として, 状態線形化により非線形項を取り込んだ式(３)を用いることで誤差学習が重力および摩擦の影響を陽に利用できたためと考えられる.

5.結 言

本研究では，１リンクロボットアームに誤差学習を用いた終端状態制御を適用し各種動作を獲得させた. その結果を以下の結論に示す.

① 目標到達時間が自由落下時間より短い場合，目標状態に早く到達する必要があるので軌道は最短となるが，消費する制御入力は増大となる.

② 目標到達時間が自由落下時間より長い場合，条件によって θ =0[rad]の方向へ移動してから自由落下によって目標状態に到達する動作と $\theta=\pi$ [rad]へ移動してから振り子運動によって摩擦を有効に利用して角速度を減少させつつ目標状態に到達する動作の発現を獲得した.

以上より, 条件を利用できる場合は有利に働くような動作を獲得し, 悪影響を及ぼすような条件は影響を抑えるような動作の発現を得た.

今後の課題として多リンクロボットアームの検証が挙げられる.

参考文献

1. 西村秀和,高崎賢治,舟木厚司,戸谷隆美,「誤差学習による終端状態制御を用いたブラキエーションロボットの運動制御」, 日本機械学会論文集（Ｃ編）Vol.63,No.605C,182/189,(1997)
2. 中務秀郎,有我祐一,遠藤茂,坂井秀行,「単脚ロボットの誤差学習を用いた終端状態制御」計測自動制御学会東北支部第 252 回研究集会(2009)
3. 前田卓也,渡部慶二,村松鋭一,有我祐一,遠藤茂,「終端状態制御による３リンクロボットアームの制御」計測自動制御学会東北支部第 245 研究集会（2008）
4. 坂井秀行,有我祐一,遠藤茂,「誤差学習による終端状態制御を用いたリンク型ロボットの生物模倣的運動」, 第 52 回自動制御連合講演会講演論文集(2009)
5. 戸谷隆美,甫立昌弥,「線形最適トラッキングの反復学習とそのロボットアームの軌道制御への応用」,計測自動制御学会論文集 Vol.26,No.4,382/388, (1990)
6. 戸谷隆美,野波健蔵,岡村整,「補償入力を用いる線形最適制御の実現」計測自動制御学会論文集 Vol.22,No.2 ,1/6,(昭和 61 年 2 月)
7. 戸谷隆美,小川裕之,「学習による終点制御の実現」計測自動制御学会論文集 Vol.23,No.2,(昭和 62 年 2 月),42/47
8. 戸谷隆美,野波健蔵,岡村整,「定係数フィードバックと補償入力による線形最適制御実現法」計測自動制御学会論文集,Vol20,No3,1/3,(昭和 59 年 3 月)
9. 戸谷隆美,「マニピュレータの端点運動の軌道設計」計測自動制御学会論文集,Vol.20,No.3,74/79,(昭和 59 年 3 月)