計測自動制御学会東北支部第252 回研究集会(2010.10.30)

資料番号 252-18

単脚ロボットの誤差学習を用いた終端状態制御

Final-State Control with Error Leaning of One-Leg Robot.

○中務秀郎* 有我祐一* 遠藤茂* 坂井秀行*

○ H.Nakatsukasa* and Y.Ariga* and S.Endo* and H.Sakai*

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),単脚ロボット(One-Leg Robot)

連絡先：〒992-8510 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

中務 秀郎，tell 0238-26-3764, E-mail : nakamu_cha@yahoo.co.jp

1 緒言

従来から，ロボットの運動制御に関する研究が多くなされている．それらの多くでは，フィードバック制御が用いられているため，逆運動学による軌道の生成と，それへの追従制御が一般的に行われている[1]．しかしながら，人間や動物の運動制御では必ずしもフィードバック制御のみで行われているのではなく，反復学習動作や反射的動作はむしろフィードフォワード制御で行われているのではないかという指摘もある．

その反復学習動作の一つとして，川人らの研究[2]のフィードバック誤差学習が挙げられる．このフィードバック誤差学習は，学習初期はフィードバック制御で行われるが，反復学習するとフィードフォワード制御のみで動作できるようになる．しかし，このフィードバック誤差学習では，逆運動学で求める軌道が必要になってくる．

また，反射的動作の一つとして，翁らの研究[3]では猫ひねりの動作を逆運動学の軌道生成なしにフィードフォワード制御のみで運動制御が行えることを立証している．

そこで，本研究室では，逆運動学による軌道生成なしにロボットアームをフィードフォワード制御するための手法として，西村らが提案している誤差学習を用いた終端状態制御[4][5]を採用した．

先行研究において３リンクロボットアームの水平投てき動作を獲得させたところ[6]，腕を折りたたみながらバックスイングをし，その後投てき動作をするというヒトと同様のものを獲得した．また，垂直面内を動く１リンクロボットの動作を獲得させたところ，動作条件次第で，ヒトが楽な姿勢で立つのと同様に重力の影響を極力減らすような動作が発現した．
これらの先行研究の結果から，誤差学習を用いた終端状態制御は，

・動作条件のもとで，最小の制御入力となる動作を獲得する．

・上記を実現するために，重力などの外力を利用することもある．

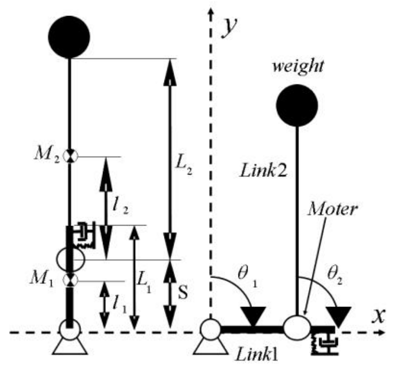
以上のことがわかった．このため，我々は本制御法は生物の学習による動作獲得と酷似していると考えている．

本研究では，２リンクの単脚ロボットの動作を誤差学習を用いた終端状態制御により獲得することを目的とする．駆動関節はかかとに相当する部分のみとし，つま先部分は回転自由端とする．このロボットに獲得させる動作は，床に直立に立っている状態から，重力を利用してつま先回りに倒れこむ動作とする．制御対象は重力と床反力の影響を受けるため，先行研究よりも非線形性が強いシステムになっている．この力学的に難しい条件下でも動作を獲得できるかを検証する．

2　制御対象の力学モデル

2.1 制御対象の概略

制御対象である2リンク単脚ロボットのモデルとパラメータをFig.1に示す．Table.1に示すバネ定数と減衰係数は，リンク1が地面と設置している状態での最高値である．単脚ロボットはリンク１の付け根をつま先とし，モータはリンク１とリンク2の結合部分にのみ設置する．



$M_i[kg]$ ：各リンクの質量 $(i=1,2)$
$L_i[m]$ ：各リンクの長さ $(i=1,2)$
$l_i[m]$ ：関節からリンクの重心距離 $(i=1,2)$
$s[m]$ ：リンク１付け根からリンク２までの距離
$u[N\cdot m]$ ：モータへの入力
$d_i[kgm^2/s]$ ：各関節の減衰係数 $(i=1,2)$

Fig.1 Dynamic model of One-Leg Robot

Table.1 Parameter of model

$M_1[kg]$	1	$l_2[m]$	0.4558
$M_2[kg]$	10.1085	$S[m]$	0.2
$M[kg]$	20.8915	$d_1[kgm^2/s]$	0
$L_1[m]$	0.26144	$d_2[kgm^2/s]$	2
$L_2[m]$	0.9116	$k\_sp[N/m]$	17800
$l_1[m]$	0.13072	$c\_dm[Ns/m]$	17800

2.2 基本的な２リンクロボットの運動方程式

Fig.1に示したモデルの運動方程式を，リンクの角変位θ_1，θ_2を一般化座標として，ラグランジュの運動方程式を解くことにより導出する．導出された運動方程式は次式で表される．

$$M(\theta)\ddot{\theta}+D\dot{\theta}+K(\theta,\dot{\theta})=Fu \tag{1}$$

$M(\theta)$ ：慣性行列，　D ：減衰係数
$K(\theta,\dot{\theta})$ ：非線形項，　F ：トルク係数
u ：制御入力，$\theta=[\theta_1 \quad \theta_2]^{\mathrm{T}}$

この式(1)の非線形項$K(\theta,\dot{\theta})$はこのままでは状態方程式に組み込むことはできない．そこで，非線形項を三角関数ごとにまとめ，さらに三角関数の加法定理を用いて$\sin\theta$の項に整理して，以下のような式変形を施す．

$$p\times\sin\theta=p\times\frac{\sin\theta}{\theta}\times\theta \tag{2}$$

ただし，pは多項式を表し，$\theta=0$の時$\sin\theta/\theta=1$とする．これより以下の式を満たす行列K(θ($\dot{\theta}$)が求まる．

$$K(\theta,\dot{\theta})=G(\theta,\dot{\theta})\theta \tag{3}$$

これより，式(1)を以下とすることができる．

$$M(\theta)\ddot{\theta}+D\dot{\theta}+G(\theta,\dot{\theta})\theta=Fu \tag{4}$$

2.3 床反力の表現と 状態方程式への組み込み

本研究では，床反力を非線形バネ・ダンパ系で近似表現し，それを前述の運動方程式と組み合わせて線形時変系の状態方程式を構成した．床反力を表現するためのバネとダンパの係数はθ 1 が床に着地する角度$\theta_1=\pi/2$以上になった時に力を発生するように tanh 関数を用いて次式のように定めた．

$$k\_sp=ksp\tanh(200\theta_1-\frac{\pi}{2})+ksp \tag{5}$$

$$c\_dm=cdm\tanh(200\dot{\theta}_1-\frac{\pi}{2})+cdm \tag{6}$$

発生するバネ力は Fig.2 のようになる．

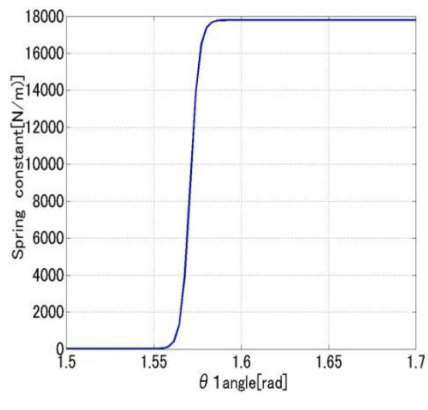


Fig.2 Spring constant ksp=8900

2.1 節の式(4)より実システムの状態方程式は次式とする．

$$\dot{x}=A(\theta,\dot{\theta})x+B(\theta)u \tag{7}$$

ただし，

$$A(\theta,\dot{\theta})=\begin{bmatrix} 0_{2\times2} & I_{2\times2} \\ -M(\theta)^{-1}G(\theta,\dot{\theta})-M^{-1}K\_sp & -M(\theta)^{-1}D-M^{-1}C\_d \end{bmatrix}$$

$$B(\theta)=\begin{bmatrix}0_{2\times1}\\ M(\theta)^{-1}F\end{bmatrix}\qquad x=\begin{bmatrix}\theta\\ \dot{\theta}\end{bmatrix}$$

$$K\_sp=\begin{bmatrix}k\_spL_1^2 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$C\_d=\begin{bmatrix}c\_dmL_1^2 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}$$

である．

2.4 獲得させる動作

獲得させる動作を Fig.3 に，その時の初期状態と終端状態のパラメータを Table.2 に示す．学習係数$\gamma=0.01$，動作時間は 0.59［sec］とする．初期状態を直立状態とし，終端状態をリンク 2 が-15.5[deg]移動した地点とする．終端状態は制御対象に対してつま先周りの転倒モーメントが発生する地点となっている．

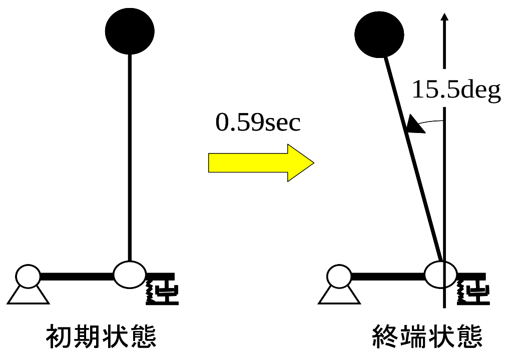


Fig.3 Movement from initial state to final state

Table.2 Values of initial and final states

	Initial state	Final state
θ_1 [rad]	1.523	1.5632
θ_2 [rad]	-1.5632	-1.8337
$\dot{\theta}_1$ [rad/sec]	0	0
$\dot{\theta}_2$ [rad/sec]	0	0

3　終端状態制御

本研究では，参考文献(1)の手法により，終端状態制御を実現する．この概略を以下で述べる．

3.1 線形時変系に対する誤差学習による終端状態制御

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．

制御対象の状態方程式式(7)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．

$$x_{k+1}=A_kx_k+B_ku_k \tag{8}$$

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

$$\begin{aligned}\tilde{x}_{k+1}&=\tilde{A}_k\tilde{x}_k+\tilde{B}_kw_k\\ w_k&=-K\tilde{x}_k+\tilde{u}_k\end{aligned} \tag{9}$$

ただし，

$$\tilde{A}_k=\begin{bmatrix}A_k & B_k\\ 0_{1\times4} & I_{1\times1}-Kv\end{bmatrix},\ \tilde{B}_k=\begin{bmatrix}0_{4\times1}\\ I_{1\times1}\end{bmatrix},\ \tilde{x}_k=\begin{bmatrix}x_k\\ u_k\end{bmatrix}$$

と表され，さらに

$$F=\tilde{A}_k-\tilde{B}_kK \tag{10}$$

とすれば，式(8)は以下のように表される．

$$\tilde{x}_{k+1}=F\tilde{x}_k+\tilde{B}\tilde{u}_k \tag{11}$$

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(11)に順次与えたときの状態遷移行列$F_0,F_1,\ldots,F_{N-1}$は次式で求められる．

$$\begin{aligned}\tilde{x}_1&=F_0\tilde{x}_0+\tilde{B}\tilde{u}_0\\ \tilde{x}_2&=F_1\tilde{x}_1+\tilde{B}\tilde{u}_1\\ &\ \vdots\qquad\quad \vdots\\ \tilde{x}_N&=F_{N-1}\tilde{x}_{N-1}+\tilde{B}\tilde{u}_{N-1}\end{aligned} \tag{12}$$

$\tilde{x}_N$は以下のように表される．

$$\tilde{x}_N=F_{N-1}F_{N-2}\cdots F_0\tilde{x}_0+\tilde{U}_V\tilde{V} \tag{13}$$

$$\tilde{U}_V=\left[F_{N-1}F_{N-2}\cdots F_1\tilde{B},F_{N-1}F_{N-2}\cdots F_2\tilde{B},\cdots,F_{N-1}\tilde{B},\tilde{B}\right]$$
$$\tilde{V}=[\tilde{u}_0,\tilde{u}_1,\tilde{u}_2,\cdots,\tilde{u}_{N-1}]^{\mathrm{T}}$$

目標状態を$\tilde{x}^0$とすると式(13)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(12)から得られる状態遷移行列$F_0,F_1,\ldots,F_{N-1}$と，式(13)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．

$$\hat{\tilde{V}}=\tilde{U}_V^{\mathrm{T}}(\tilde{U}_V\tilde{U}_V^{\mathrm{T}})^{-1}\left(\tilde{x}^0-F_{N-1}F_{N-2}\cdots F_0\tilde{x}_0\right) \tag{14}$$

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(11)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(14)で求めた$\hat{\tilde{V}}$を与えたシステム式(11)に与えた結果，終端状態は

$$\tilde{x}'_N = F'_{N-1}F'_{N-2}\cdots F'_0\tilde{x}_0 + \tilde{U}'_V\hat{\tilde{V}} \tag{15}$$

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

$$\hat{\tilde{V}} = \tilde{U}_V'^{\mathrm{T}}\left(\tilde{U}'_V\tilde{U}_V'^{\mathrm{T}}\right)\left(\tilde{x}'_N - F'_{N-1}F'_{N-2}\cdots F_0\tilde{x}_0\right) \tag{16}$$

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

$$e = \tilde{x}^0 - \tilde{x}'_N \tag{17}$$

とし，入力 ΔV 以下のようにする．

$$\Delta V = \tilde{U}_V'^{\mathrm{T}}\left(\tilde{U}'_V\tilde{U}_V'^{\mathrm{T}}\right)^{-1} e \tag{18}$$

そして，式(16)の $\hat{\tilde{V}}$ に式(18)の ΔV を加えて

$$\hat{\tilde{V}} + \Delta V = \tilde{U}_V'^{\mathrm{T}}\left(\tilde{U}'_V\tilde{U}_V'^{\mathrm{T}}\right)^{-1}\left(\tilde{x}^0 - F'_{N-1}F'_{N-2}\cdots F'_0\tilde{x}_0\right) \tag{19}$$

となる．式(19)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(14)と同じ形になる．式(19)を式(15)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 $\gamma(0 < \gamma \le 1)$ 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．

$$\hat{\tilde{V}} \leftarrow \hat{\tilde{V}} + \gamma\Delta V \tag{20}$$

式(20)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(11)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.4 に示す．

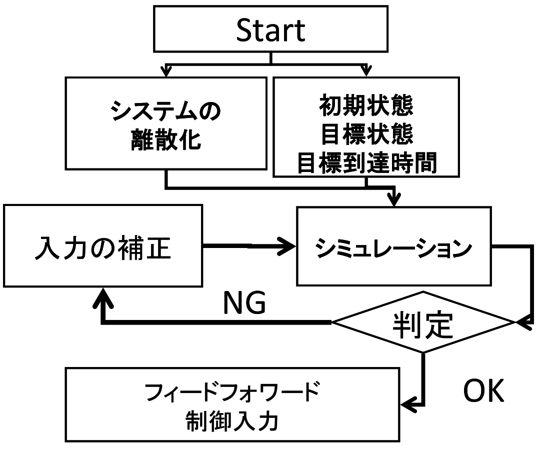


Fig.4 Flow chart of design of feedforward input

4 シミュレーション

2.4 で述べた動作を獲得させるべく，誤差学習を行った．式(19)の誤差を指標とし学習結果を評価したところ, Fig.5 に示したように学習が収束しておらず，終端状態の姿勢に達していないことがわかった．誤差学習が収束しなかった原因を調べるために，学習の初期段階での獲得動作の比較を行った．

誤差学習1回目の各関節の動きと，フィードフォワード入力をFig.6に示す. Fig.6(c)より誤差学習1回目では，初期入力に大きな制御入力を入力していることが分かる．これは，Fig.5(a)の0.1sec付近で見られるリンク1の浮き上がりを抑えるために，リンク2を急激に動作させたためであると考えられる．

次に，誤差学習2回目の結果をFig.7に示す. Fig.7(c)より，誤差学習2回目では，1回目の時と比べてフィードフォワード入力の初期値が小さくなっている．また，Fig.7(a)より，同時にリンク1の浮き上がりも小さくなっていることが確認できる．

さらに，誤差学習3回目の結果をFig.8に示す. Fig8(c)より，誤差学習3回目では，2回目の時と比べて，さらにフィードフォワード入力の初期値が小さくなり，リンク1の浮き上がり動作も小さくなっていることが確認できた．しかし，リンク1の浮き上がりを抑えた後，リンク2を目標値に向かわせる途中で状態の切り替わりが起きてしまい，制御対象全体がつま先側に倒れ込んでしまっている．

今回の誤差学習の結果で一番誤差の少なかった，学習85回目の結果をFig.9に示す．Fig.6～Fig.8と比べてFig.9(c)の結果ではフィードフォワード入力の初期入力はさらには小さくなり，制御開始直後のリンク1の浮き上がり動作も小さくなったことがわかる．

以上の結果から動作開始時に，不必要に大きなフィードフォワード制御入力が印加されることで，脚全体が大きく動いてしまい，終端状態に到達できなくなってしまっていると考えられる．学習を進めることでこの初期の誤動作を小さくするようなフィードフォワード入力にはなるが，誤動作を抑えることに時間を要した結果，終端状態まで動作する時間がなくなってしまっていると考える．

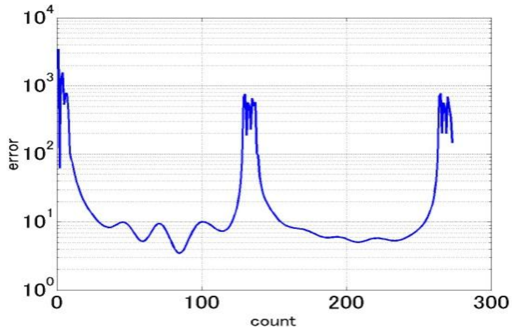
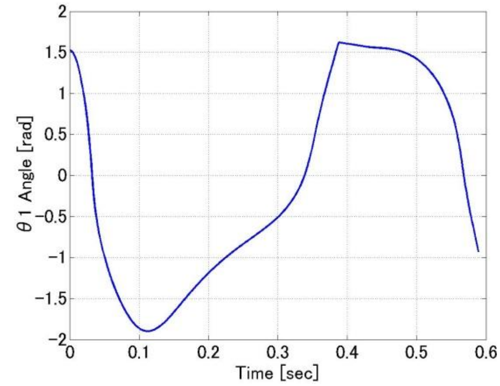
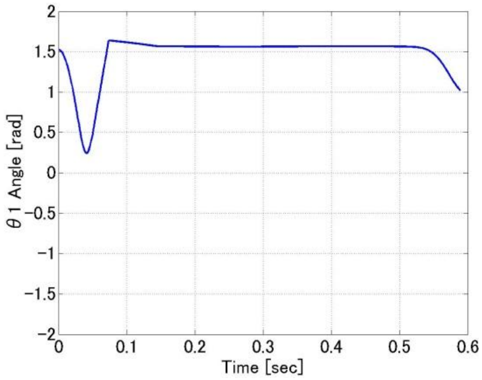


Fig.5 Change of error.

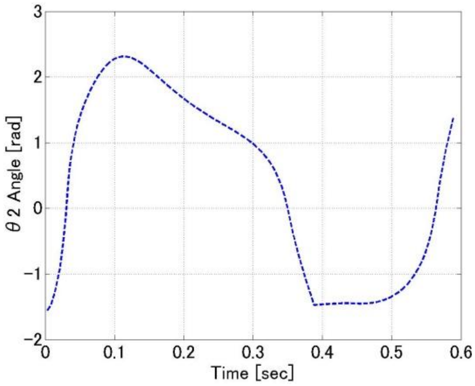


(a) θ_1 angle

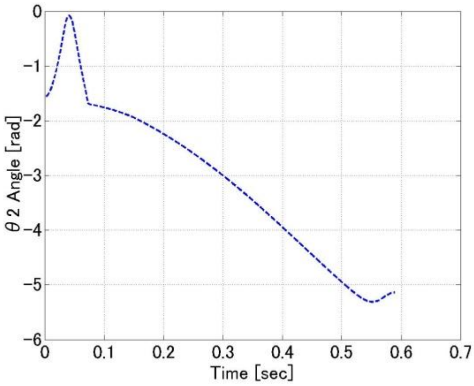


(a)

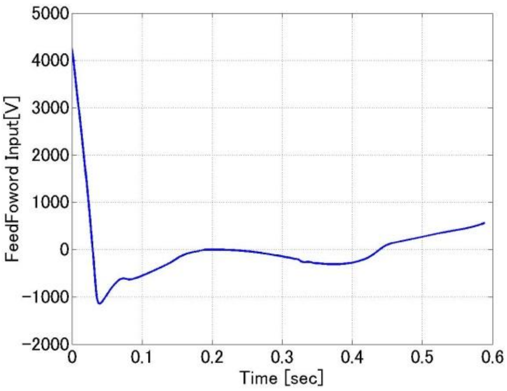
θ_1 angle



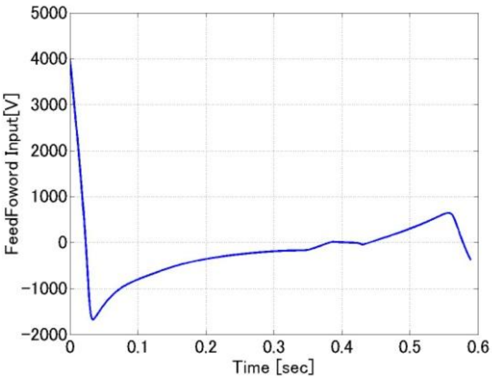
(b) θ_2 angle



(b) θ_2 angle



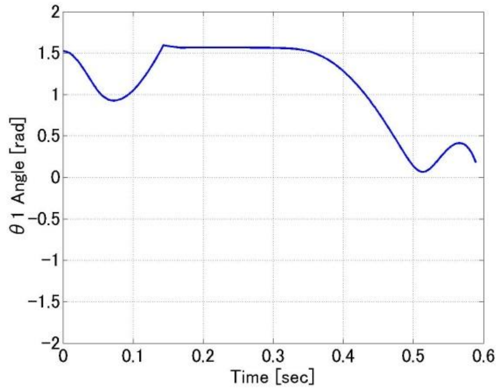
(c)Feedfowerd input



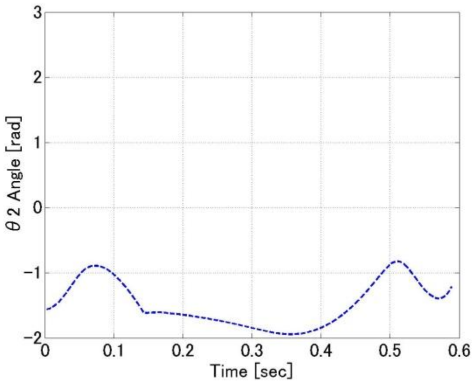
(c)Feedfowerd input

Fig.6 Simulation result after 1st leaning

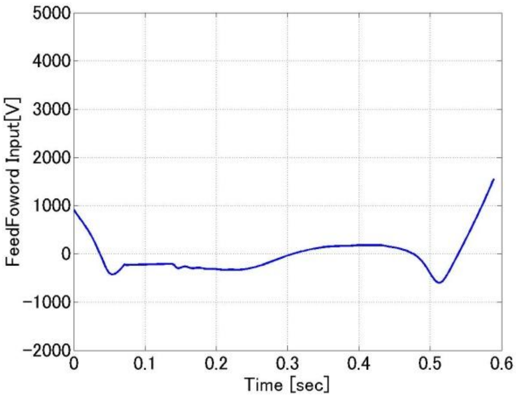
Fig.7 Simulation result after 2nd leaning



(a) θ_1 angle

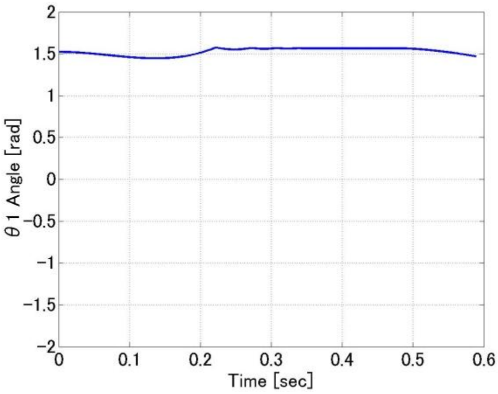


(b) θ_2 angle

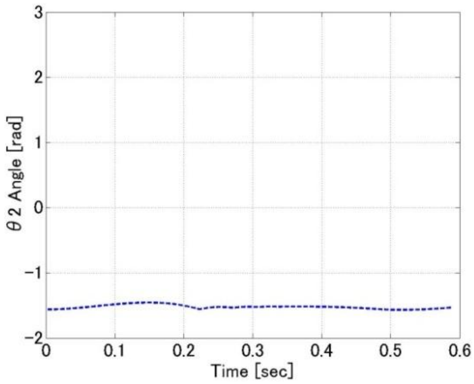


(c) Feedfowerd input

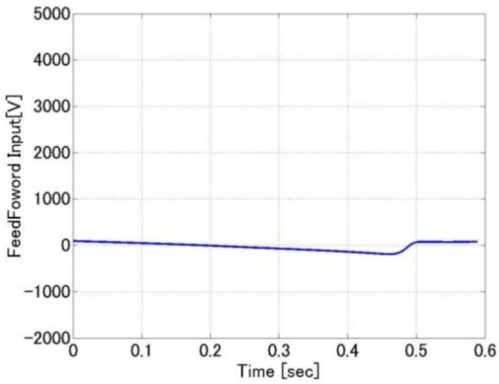
Fig.8 Simulation result after 3rd leaning



(a) θ_1 angle

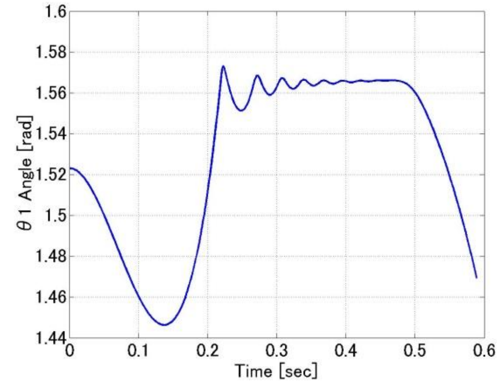


(b) θ_2 angle

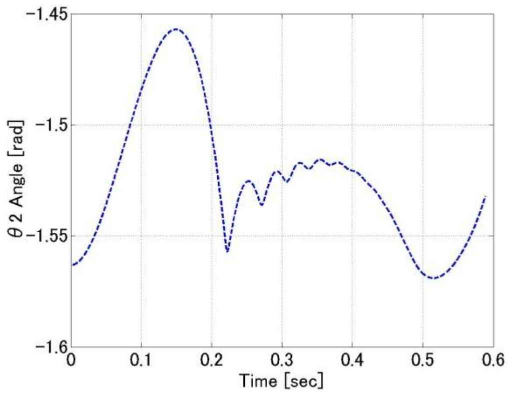


(c) Feedfowerd input

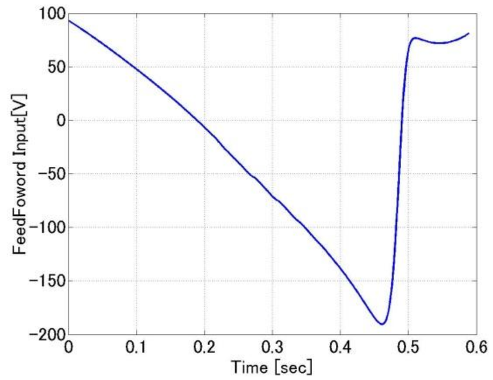
Fig.9 Simulation result after 85th leaning



(a)　θ_1 angle



(b)　θ_2 angle



(c) Feedfowerd input

Fig.10 Magnification of simulation result after 85th leaning

5　結言

本論文では2リンク単脚ロボットによる倒れ込み動作を導出するために誤差学習を用いた終端状態制御を用い，シミュレーションによって検証した．その結果，以下の結論を得た．

- 動作開始時の大きなフィードフォワード入力は誤差を大きくする．
- 動作開始時に脚全体が大きく動いて時間内に終端状態に到達できない．

今後は拡大系を用いることで制御入力の初期状態と終端状態を最適な値に設定できるようにする．また，重力と拘束力を利用してより複雑な動作を獲得することが今後の目標である．

参考文献

(1). 島田　明,「モーションコントロール」, オーム社 p177-178

(2). 川人　光男,「脳の運動学習」,日本ロボット学会誌, Vol.13,No.1,(1995),11-19

(3). 翁　志強, 西村　秀和, 「フィードフォワードのトルク入力による 2 リンク猫ひねりロボットの終端状態制御」 日本機械学会論文集(C 編), Vol.66,No.643,C,(2007-3),857-863

(4). 西村　秀和, 高崎　堅治, 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）, Vol63,No605,C,(1997-1),182-189

(5). 西村　秀和, 舟木　厚司,　戸田　隆美, 「フィードフォワード入力を用いた終端状態制御のパラメータ変動に対するロバスト性能」（走行振り子の位置決め制御による検証）, 日本機械学会論(C 編) Vol.61,No.587,C,(1995-7),2938-2944

(6)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 1 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 回研究集会