

ニューラルネットによる倒立振子の学習制御

北 城 勝 栄

Learning Control of an Inverted Pendulum by Neural Network

Syouei KITAJO

1. まえがき

倒立振子は台車に加える力を制御して振子を安定に倒立させる装置であるが、その力の制御にニューラルネットワークの学習能力を利用し、試行を繰り返して力の制御器を構築する方法が提案された。^[1]これはニューロ同定器を必要とせず、倒立振子を安定化する良い方法であるが、倒立を可能にする初期角度の拡大法、さらに位置や角度などによって決まる教師信号を作る関数のパラメータが振子の安定化にどのように影響を及ぼすか明確になっていない。

本文は教師信号としてニューロ制御器の出力に、振子の角度、角速度、台車の位置、速度による力の修正分を加えたものを用い、この修正分が零になるようにニューロ制御器を学習させ、ニューロ制御器を構成する場合、倒立を可能にする初期角度の拡大法と、台車に加える力の修正量を決定する関数のパラメータ変更が振子の安定化に及ぼす影響をシミュレーションにより検討した結果を示す。

2. 倒立振子制御システムブロック図

図1にニューラルネットを用いた倒立振子制御システムのブロック図を示す。

台車への制御入力を生じさせる部分に階層型のニューラルネットを用い、入力層に4個（入力としては角度、角速度、位置、速度）、中間層に15個、出力層に1個（台車への制御入力）のニューロンを使用する。

倒立振子システムの振る舞いは振子および台車の運動を表す非線形の微分方程式を解くことで得る。

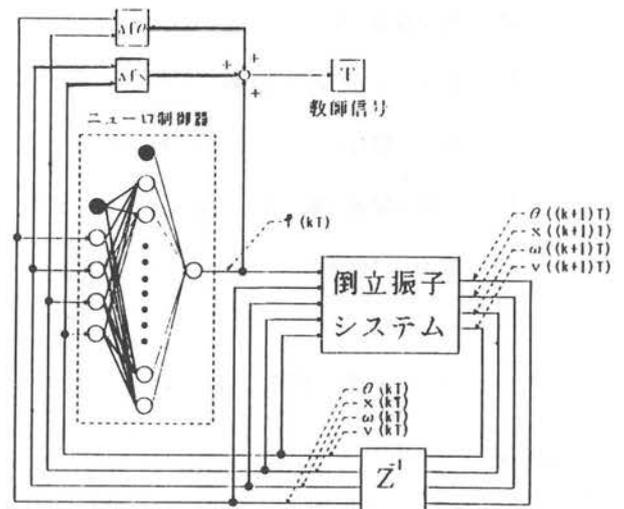
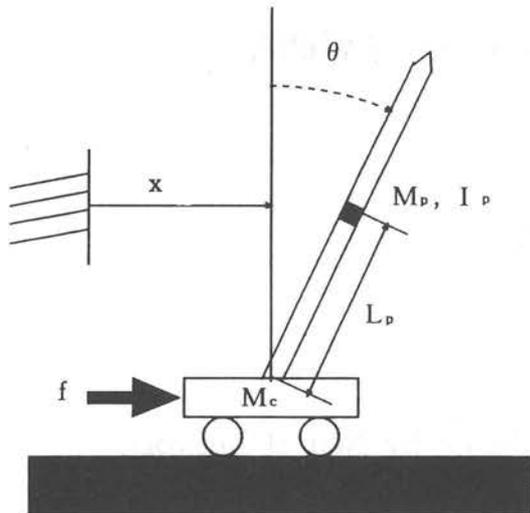


図1 倒立振子制御システムブロック図

図2に倒立振子モデルの形状および各部のパラメータを示す。また、式(1)、(2)に振子システムの運動方程式を示す。

$$(M_p + M_c)v + M_p L_p \cdot \cos \theta \cdot \omega = F \cdot v + M_p L_p \cdot \sin \theta \cdot \omega + f \quad (1)$$

$$M_p L_p \cdot \cos \theta \cdot v + (L_p^2 + M_p L_p^2) \omega \cdot \sin \theta \cdot g = -C \cdot \omega \quad (2)$$



- θ : 振り角度 [rad]
- x : 台車位置 [m]
- ω : 振り角速度 [rad/sec]
- v : 台車速度 [m/sec]
- M_p : 振り質量 0.48[kg]
- M_c : 台車質量 0.16[kg]
- L_p : 振子の支点・重心間距離 0.25[m]
- I_p : 振子の慣性モーメント 0.043[kg・m²]
- F_c : 台車の摩擦係数 3.82[kg/sec]
- C : 振子の摩擦係数 0.0022[kg・m²/sec]
- g : 重力加速度 9.8[m/sec²]

図2 倒立振りシステム

3. 教師信号の作成

教師信号は台車への制御入力と振子の角度、角速度、台車の位置、速度の状態によって決まる修正量との和として決める。それぞれの修正量は角度成分と位置成分に分けて (3), (4) 式で計算する

$$\Delta f_\theta = f_1 \cdot \tanh \{ (\theta + a_1 \omega) / b_1 \} \quad (3)$$

$$\Delta f_x = f_2 \cdot \tanh \{ (x + a_2 v) / b_2 \} \quad (4)$$

$f_1, f_2, a_1, a_2, b_1, b_2$ は制御器設計者が任意に設定できる定数である。

f_1, f_2 は関数の最大値を、 a_1, a_2 は位置あるいは角度に対する比率を、 b_1, b_2 は関数の傾きを決定する係

数である。

またシグモイド関数を用いた理由は、角度、角速度、位置、速度が大きくなった場合でも修正量が一定値以上に大きくならないようにするためである。

結局、サンプリング周期 T 毎に教師信号は (5) 式とする。

$$T(kT) = f(kT) + \Delta f_\theta + \Delta f_x \quad (5)$$

指定した場所で振子が安定に倒立した場合には $T(kT) = f(kT) = \Delta f_\theta = \Delta f_x$ (6) となる。

4. ニューロ制御器の学習

まず、試行を行うに先立ってニューロ制御器がある程度望ましい値を出力するようにこれを事前に学習させる。学習の方法は振子の角度のみを考え、振子を倒立させるためには振子の傾いている方向に台車を動かす力を発生させるように学習させる。次にこの事前学習によって得た重みを用いて倒立振子の初期値を $[\theta \ x \ \omega \ v] = [0.05 \ 0 \ 0 \ 0]$ 、サンプリング周期は0.05[sec]とし、10 [sec] の間試行を行う。また、1サンプリング時間当たり100回学習し、教師信号と実際のニューロ制御器の出力との誤差が 10^{-9} 以下になったら次のサンプリングに移る。

さらに、振り角度が $\pm \pi/2$ [rad] を越えるか、台車位置が基準位置より ± 2 [m] 離れると、試行を中止し、次の試行に移る。そして振子が安定に倒立するようになったら学習を中止し、そのときの重みを固定する。

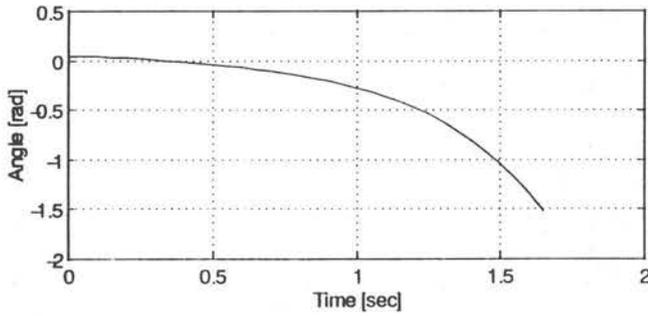
なおこのとき用いた力の修正関数パラメータは表1である。

表1 修正関数パラメータ

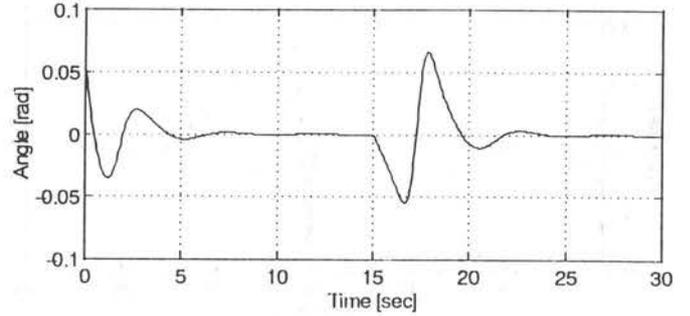
$f_1 : 0.05$	$f_2 : 0.01$
$a_1 : 2.0$	$a_2 : 8.0$
$b_1 : 5.0$	$b_2 : 9.0$

5. シミュレーション結果

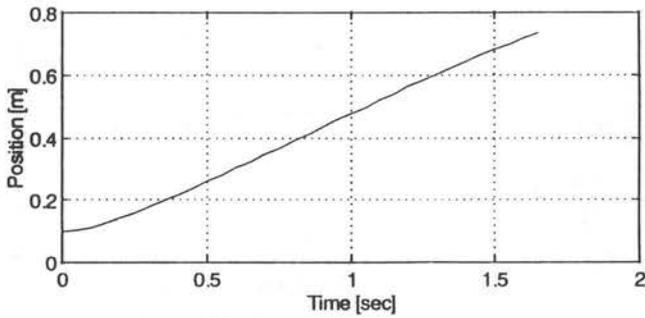
図3に倒立振子の初期値を $[\theta \ x \ \omega \ v] = [0.05 \ 0.1 \ 0 \ 0]$ とし、ニューロ制御器の重みを乱数で与えた場合の振りシステムの応答を示す。台車への制御入力が適切でないため振子は倒れてしまうことが読みとれる。



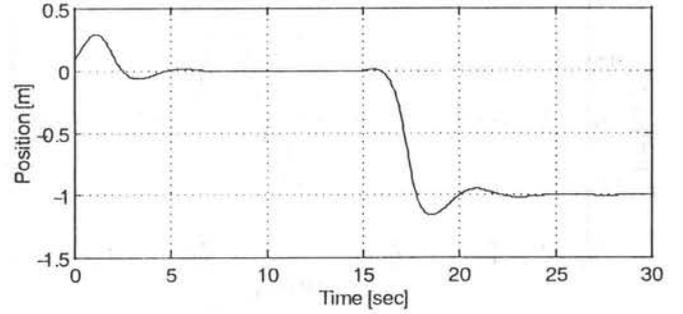
(a) 角度 (初期角度: 0.05[rad])



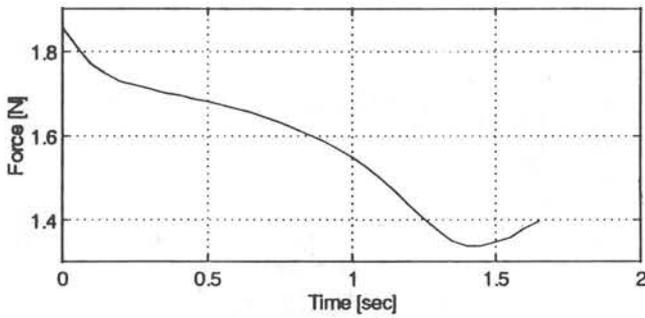
(a) 角度



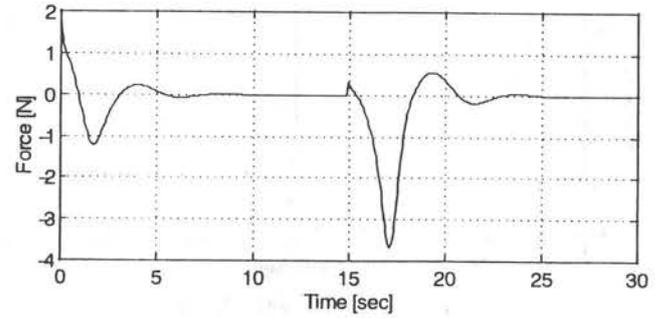
(b) 位置 (初期位置: 0.1[m])



(b) 位置



(c) 制御入力



(c) 制御入力

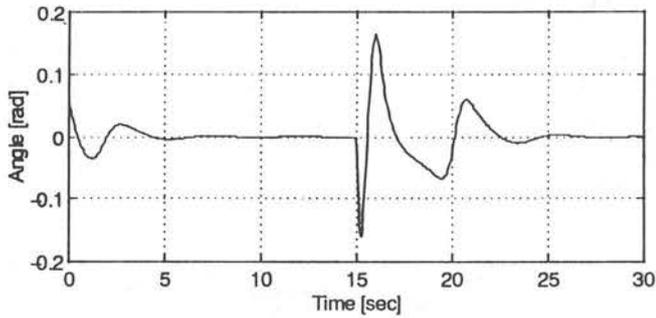
図3 制御器重み(乱数)使用時の振子応答

図4 制御器重み(学習後の値)使用時の振子応答

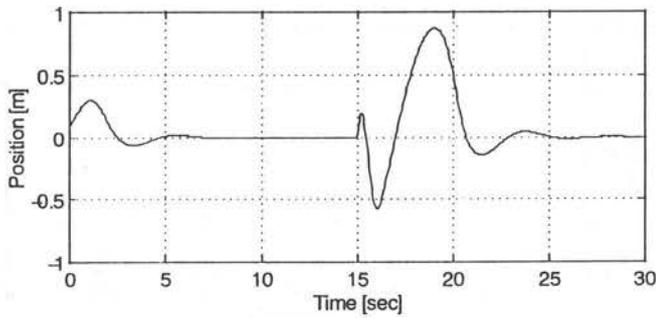
図4に振子が安定に倒立するようになった121試行後の学習された重みを用いた場合の台車、振子の応答を示す。制御を始めてから約8[sec]で振子は安定に倒立することが読みとれる。

図5に振子が安定に倒立した後、外乱を加えた場合の応答を示す。外乱は15.0[sec]から15.1[sec]の間13[N]を加えた。このときの応答は振子の角度、台車の位置が大きく変化するが外乱を加えてから約12[sec]で安定に倒立することが読みとれる。

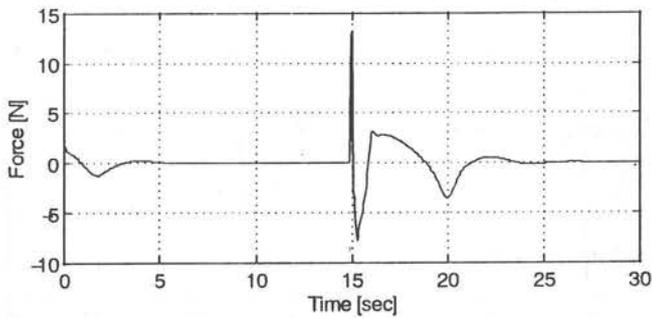
また、15[sec]後に倒立目標位置を-1.0[m]に変更した場合、位置変更命令を出してから約8[sec]で安定に倒立し、位置も-1.0[m]に到達していることが読みとれる。



(a) 角度

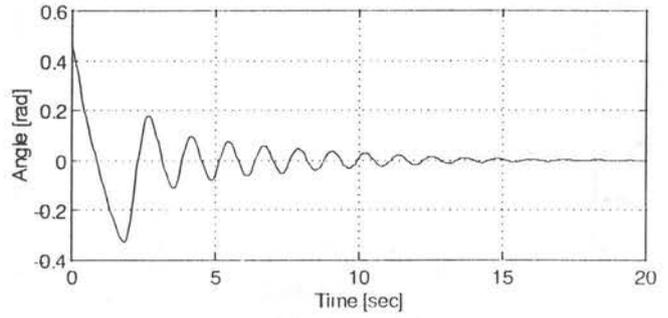


(b) 位置

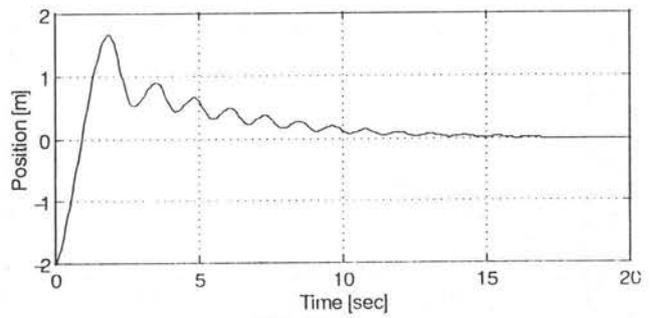


(c) 制御入力

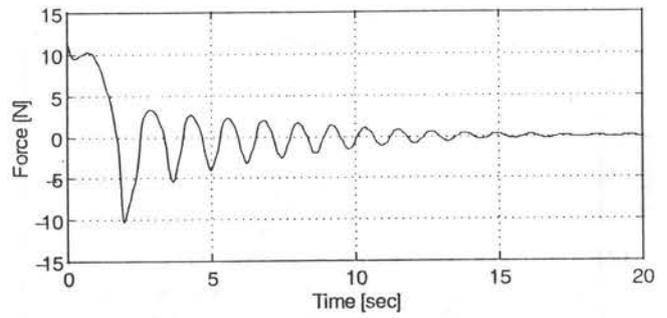
図5 外乱を加えた場合の振子応答



(a) 角度



(b) 位置



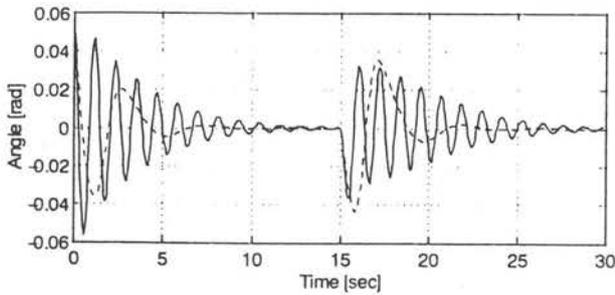
(c) 制御入力

図6 倒立可能な初期角度での振子の応答

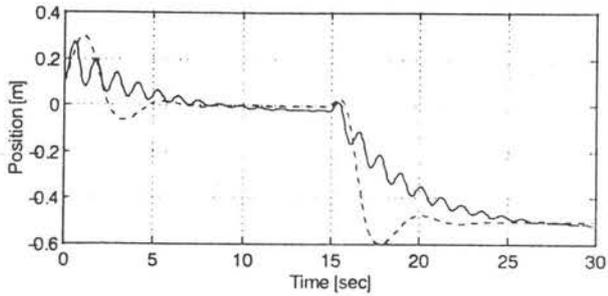
6. 安定に倒立させ得る初期角度の拡大

初期角度を $0.05[\text{rad}]$ 以上で倒立可能にするためには、初期角度 $0.05[\text{rad}]$ で学習した重みを用い、初期角度 $0.2[\text{rad}]$ での学習を行い、この初期値で安定に倒立するようになったらさらに初期角度を徐々に大きくして学習させて安定化に導いていく。初期角度 $0.45[\text{rad}]$ とした振子の応答を図6に示す。

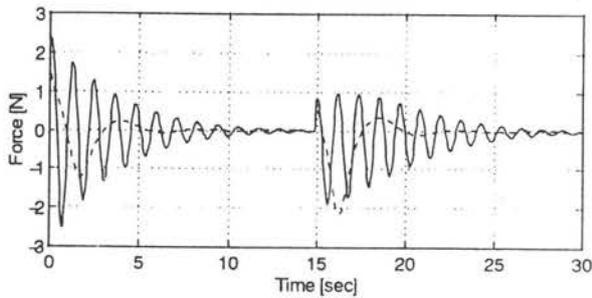
図7には初期角度を $0.05[\text{rad}]$ で学習した重みと、初期角度 $0.45[\text{rad}]$ で学習した重みを用いて初期角度 $0.05[\text{rad}]$ とした場合の応答を示す。初期角度 $0.45[\text{rad}]$ で学習した制御器を用いた方が振動の周期が短く、振動が収まるまでの時間が長いことがわかる。この違いは、制御入力が初期値 $0.05[\text{rad}]$ で学習した制御器は最小限の制御入力を加えているのに対し、初期値 $0.45[\text{rad}]$ で学習した制御器は余分な制御入力を加えているからである。



(a) 角度



(b) 位置



(c) 制御入力

----- 0.05[rad]の重みを使用した場合
 ———— 0.45[rad]の重みを使用した場合

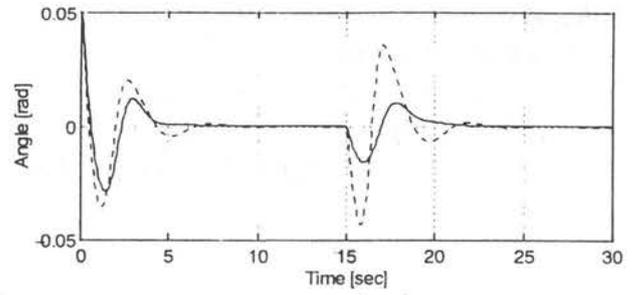
図7 制御器重みの違いによる振子応答の比較

さらに図8に教師信号修正関数のパラメータを表2のように変化させた場合の応答を示す。

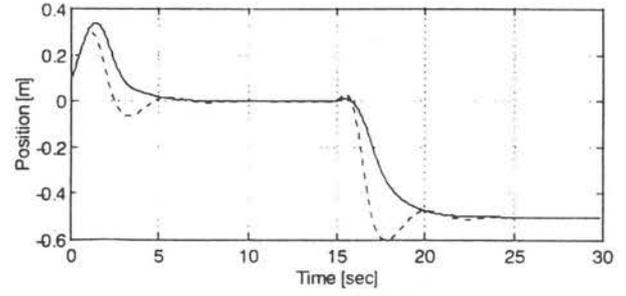
表2 変更した修正関数パラメータ

$f_1 : 0.08$	$f_2 : 0.02$
$a_1 : 2.0$	$a_2 : 4.0$
$b_1 : 6.0$	$b_2 : 10.0$

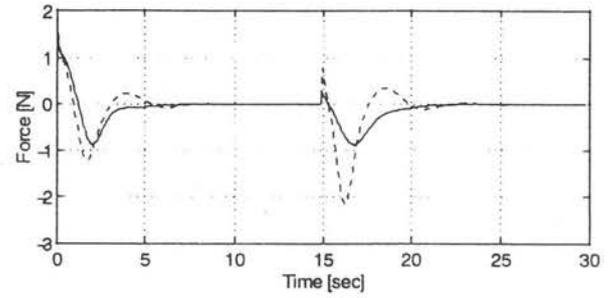
表2のパラメータは修正量のピーク値を大きくし、角速度、速度の角度、位置に対する割合を小さく見積もるものである。表2のパラメータを使用した方が余計な制御入力を加えないで安定化できることが読みとれる。



(a) 角度



(b) 位置



(c) 制御入力

----- 表(a)を使用した場合
 ———— 表(b)を使用した場合

図8 修正関数パラメータの違いによる振子応答の比較

6. むすび

倒立振子の安定化が、ニューロ制御器の教師信号を制御器出力と角度、角速度による修正分と位置、速度による修正分の和として試行を繰り返して学習させることで実現できることを確認できた。

また安定化でき得る初期角度の拡大法により、最大初期角度0.45 [rad] まで拡大できることが確認できた。さらに制御量を修正するシグモイド関数はピーク値を大きく見積もり、角度、位置に対して角速度、速度を小さく見積もった方が適切な制御入力を発生することがわかった。

参考文献

[1] 船曳繁之, 東影秀樹

「ニューラルネットによる倒立振子制御」 JIEE

JAPAN, Vol114-D, No.6, '94

(受理年月日 1996年 9月20日)