

ニューラルネットワークを使った制御系の設計

Controler Designing with Neural Network

○木原直人*, 大久保重範**, 及川一美†, 高橋達也‡

○Naoto Kihara*, Sigenori Okubo**, Kazumi Oikawa†, Tatsuya Takahashi‡

山形大学

Yamagata University

キーワード： バックプロパゲーション (Back propagation), ニューラルネットワーク (Neural network),
非線形系 (Nonlinear system),

連絡先： 〒992 山形県米沢市城南4-3-16 山形大学 理工学研究科 機械システム工学専攻 大久保研究室
木原直人, Tel: (0238)26-3245

1. 緒論

非線形である制御対象に対し、バックプロパゲーションによるニューラルネットワークをオンラインで適応的に学習させることを考える。評価関数を状態変数の2次形式で与えこれを最小にするように教師信号なしで学習を行う。さらにアルゴリズムを連続時間に変換し、その有効性を検証する。また倒立振子の実器を製作し実用性を検証していく予定なのでその構成を示す。

図1のような非線形に対して3層ニューラルネットワークを使い、系を安定にする制御系を設計する。

ここで、重みと各層の入出力関係はつぎのように与えられる。

$$U(t) = W(t)x(t) + \theta(t) \quad (1)$$

$$H(t) = \text{diag}[f]U(t) \quad (2)$$

$$S(t) = V(t)H(t) + \gamma(t) \quad (3)$$

$$u(t) = \text{diag}[f]S(t) \quad (4)$$

2. NNの構成

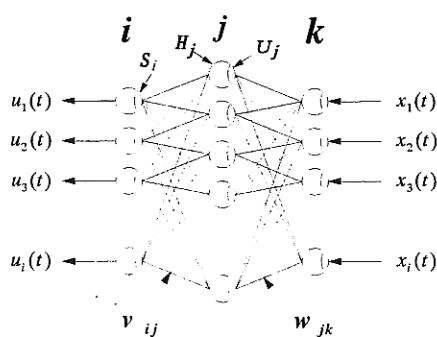


図1 NNの構造

ニューロンの入出力特性を、(5)式のようなシグモイド関数とする。また、その微分形は(6)式のようなになる。

$$f(x) = L \tanh\left(\frac{x}{u_o}\right) \quad (5)$$

$$f'(x) = \frac{1}{Lu_o} (L^2 - f(x)^2) \quad (6)$$

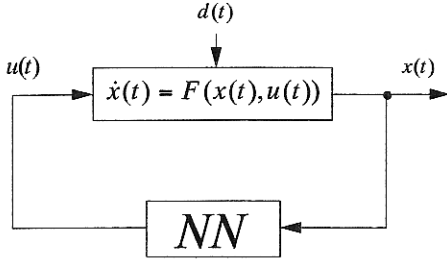


図2 NNシステム構成

$$\dot{x}(t) = F(x(t), u(t)) + d(t) \quad (7)$$

$h > 0$ を微小にとれば、(7)式は次のようになる。

$$x(t+h) = x(t) + \int_t^{t+h} \{F(x(\tau), u(\tau)) + d(\tau)\} d\tau \quad (8)$$

平均値の定理より、($0 < \theta_a < 1$)

$$x(t+h) = x(t) + hF(x(t+\theta_a h), u(t+\theta_a h)) + hd(t+\theta_a h) \quad (9)$$

評価関数を(10)式のようにおき、 $E(t)$ を最小にする制御則を求める。ただし、 $Q = Q^T > 0$ とする。

$$E(t+h) = \frac{1}{2} x^T(t+h) Q x(t+h) \quad (10)$$

各重み、オフセットの更新量は、最急降下法を用いて次のように表わせる。 $(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2)$ は学習係数)

$$\begin{aligned} \Delta W(t) &= W(t+h) - W(t) \\ &= -\alpha_1 \left(\frac{\partial E(t)}{\partial W(t)} \right) \\ &= -\alpha_1 \left\{ \frac{\partial E(t+h)}{\partial x(t+h)} \right. \\ &\quad \times \frac{\partial x^T(t+h)}{\partial u(t+\theta_a h)} \frac{\partial u^T(t+\theta_a h)}{\partial u(t)} \frac{\partial u^T(t)}{\partial S(t)} \\ &\quad \left. \times \frac{\partial S^T(t)}{\partial H(t)} \frac{\partial H^T(t)}{\partial U(t)} \frac{\partial U^T(t)}{\partial W(t)} \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta V(t) &= -\alpha_2 \left(\frac{\partial E(t)}{\partial V(t)} \right) \\ &= -\alpha_2 \left\{ \frac{\partial E(t+h)}{\partial x(t+h)} \frac{\partial x^T(t+h)}{\partial u(t+\theta_a h)} \right. \\ &\quad \left. \times \frac{\partial u^T(t+\theta_a h)}{\partial u(t)} \frac{\partial u^T(t)}{\partial S(t)} \frac{\partial S^T(t)}{\partial V(t)} \right\} \quad (12) \end{aligned}$$

$$\Delta \theta(t) = -\beta_1 \left(\frac{\partial E(t)}{\partial \theta(t)} \right) \quad (13)$$

$$\Delta \gamma(t) = -\beta_2 \left(\frac{\partial E(t)}{\partial \gamma(t)} \right) \quad (14)$$

ここで、(11)式の両辺の極限をとると、更新値 $\dot{W}(t)$ が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{W}(t) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{W(t+h) - W(t)}{h} \\ &= -\frac{\alpha_1}{u_0^2 L^2} \text{diag}[L^2 - H^2(t)] V^T(t) \\ &\quad \times \text{diag}[L^2 - u^2(t)] \frac{\partial F^T(x(t), u(t))}{\partial u(t)} \\ &\quad \times Q x(t) x^T(t) \quad (15) \end{aligned}$$

同様に、 $\dot{V}(t)$ 、 $\dot{\theta}(t)$ 、 $\dot{\gamma}(t)$ を求める。

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= -\frac{\alpha_2}{u_0 L} \text{diag}[L^2 - u^2(t)] \\ &\quad \times \frac{\partial F^T(x(t), u(t))}{\partial u(t)} Q x(t) H^T(t) \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta}(t) &= -\frac{\beta_1}{u_0^2 L^2} \text{diag}[L^2 - H^2(t)] V^T(t) \\ &\quad \times \text{diag}[L^2 - u^2(t)] \frac{\partial F^T(x(t), u(t))}{\partial u(t)} \\ &\quad \times Q x(t) \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}(t) &= -\frac{\beta_2}{u_0 L} \text{diag}[L^2 - u^2(t)] \\ &\quad \times \frac{\partial F^T(x(t), u(t))}{\partial u(t)} Q x(t) \quad (18) \end{aligned}$$

3. 単倒立振り子への適用

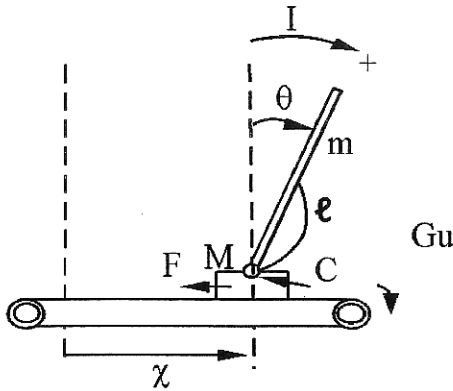


図3 単倒立振り子モデル

各パラメータを以下のように示す。

表1 各種パラメータ1	
M [kg]	台車の質量
m [kg]	振り子の質量
l [m]	振り子の重心までの距離
F [kg/s]	台車の等価摩擦係数
C [kg m/s]	軸の粘性摩擦係数
G [Nm/V]	トルク/電圧変換係数
g [m/s ²]	重力加速度
J [kgm ²]	振り子の慣性モーメント

倒立振り子の運動方程式は式(19)のようになるので、

$$\begin{aligned} (M+m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta}\cos\theta + F\dot{x} - ml\dot{\theta}^2\sin\theta &= Gu \\ ml\ddot{\theta}\cos\theta + (J+ml^2)\ddot{\theta} + C\dot{\theta} - mgl\sin\theta &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ \theta \\ \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (20)$$

式(20)のように $x_1 = x$, $x_2 = \theta$, $x_3 = \dot{x}$, $x_4 = \dot{\theta}$ とおくと、倒立振り子の状態方程式は式(21)～式(24)となる。 $d=(M+m)(J+ml^2) - (ml\cos x_2)^2$ とすると、

$$\dot{x}_1(t) = x_3(t) \quad (21)$$

$$\dot{x}_2(t) = x_4(t) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_3(t) &= (J+ml^2)(Gu - Fx_3(t) + mlx_4(t)^2\sin x_2(t))/d \\ &\quad + (-ml\cos x_2(t))(-Cx_4(t) + mgl\sin x_2(t))/d \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4(t) &= (-ml\cos x_2(t))(Gu - Fx_3(t) + mlx_4(t)^2\sin x_2(t))/d \\ &\quad + (M+m)(-Cx_4(t) + mgl\sin x_2(t))/d \end{aligned} \quad (24)$$

システムをまとめると

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3(t) \\ x_4(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(x_1(t), u_1(t)) + d_1(t) \\ F_2(x_2(t), u_2(t)) + d_2(t) \\ F_3(x_3(t), u_3(t)) + d_3(t) \\ F_4(x_4(t), u_4(t)) + d_4(t) \end{bmatrix} \quad (25)$$

また、 $\frac{\partial F(x(t), u(t))}{\partial u(t)}$ は式(6.55)となる。

$$\frac{\partial F(x(t), u(t))}{\partial u(t)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G(J+ml^2)/d \\ G(-ml\cos x_2)/d \end{bmatrix} \quad (26)$$

今回行うNNの特徴として制御対象を線形化せず非線形のまま用いることが出来る事が挙げられる。以下のような条件でシミュレーションをおこなった。

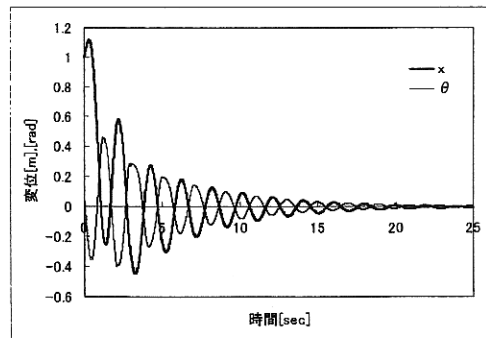


図4 NN出力応答1

初期位置 $x = 1.0$ [m]
 初期角度 $\theta = 5.0$ [deg]
 外乱なし

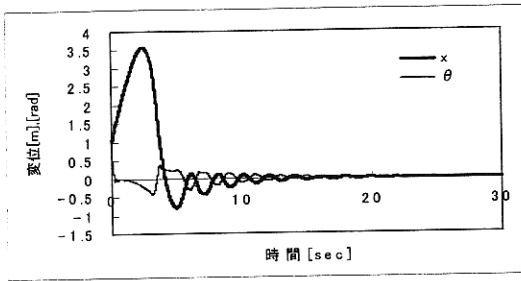


図5 NN出力応答2

初期位置 $x = 1.0$ [m]
 初期角度 $\theta = 36.0$ [deg]
 外乱なし

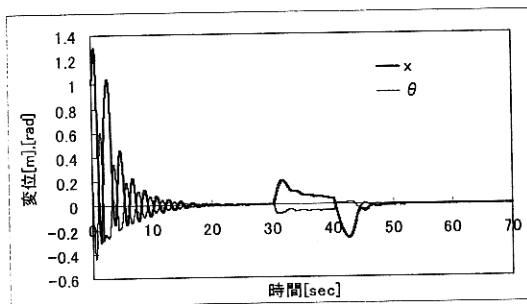


図6 NN出力応答3

初期位置 $x = 1.0$ [m]
 初期角度 $\theta = 15.0$ [deg]
 外乱あり $d_3(t) = 0.5$ 10秒間

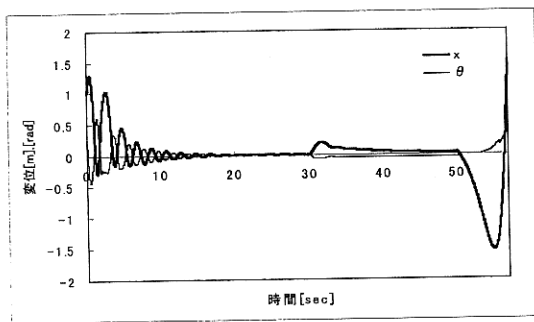


図7 NN出力応答4

初期位置 $x = 1.0$ [m]
 初期角度 $\theta = 15.0$ [deg]
 外乱あり $d_3(t) = 0.5$ 20秒間

この度用いたNNのシステムは、すでに単倒立振子への適用からも有効であると考えられる。しかし状態変数が多い制御対象においてはQの値が特定が困難で、その値により学習が途中で停止し、学習が状態の変化に対応出来ない。学習係数 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$, 応答関数の L, u_0 により、改善を計ることも可能だが、その値を決めるにはある程度、経験をつんでその経験則の中で値を調整する事になる。Qも同様である。GAなどによる最適化や、評価関数を換えることでの改善が図れるのかも視野に入れて考える必要がある。

4. 倒立振子実器製作

以上、PCのシミュレーションで有効性を示してきたが、今後は実器への適応を試みる。本体製作にあたり可能な限り経費を押さえることを目指し安価な実験器を考える。現段階での一部構成を示す。主要部として倒立振子本体、伝達駆動部、計測制御部として3構成にする。

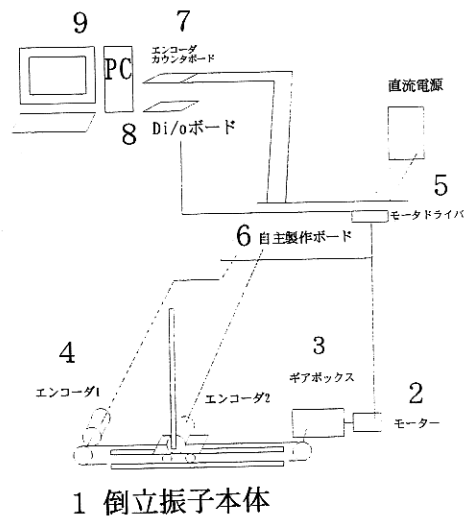


図8 単倒立振子システム構成図

4.1 倒立振子本体

レールと車輪によるスライダ機構を製作する。

4.1.1 台車

構造・仕様：スチール単板に溝付車輪を3つ取り付け、並列レールの上を走行させる。

部品	仕様
単板	スチール30mm×80mm×1mm
車輪	樹脂製、谷径φ15mm 山径φ18mm、幅6mm 取付け用ボルト穴M2
レール	L字型アルミ全長600mm 山高20mm

表1 台車系材料

4.1.2 振り

構造・仕様：全長220mm、φ7～φ10、エンコーダ取付けのため円柱の一端を凸型に加工

材質	比重
アルミニウム	2.7
鉄	7.87
銅	8.93
真鍮	

表2 振り材料

4.1.3 メインフレーム

構造・仕様：レールを配置するためのフレームと駆動伝達用のプーリの軸受けフレームを一体化したもの。

軸受け（ベアリング）：内径5mm、外形19mm、厚さ6mm

レール配置フレーム：スチール単板75×850×5mm

軸受けフレーム：アルミ単板70×40×10mm

4.2 伝達駆動部

DCモータを用いプーリを回転させタイミングベルトにボルト固定された台車を走行させる。トルク確保のため減速器をプーリとモータの間に設ける。

4.2.1 モータ

DCモータ（マブチ製RS-380PH）…永久磁石界磁型ブラシ付モータ

特徴：入力電流とトルクが正比例し、トルクと回転数が反比例する。永久磁石で界磁を作るため巻線界磁型モータのように界磁を作るための電力が必要でない。ローターに鉄心を使用して磁束密度を上げているので、比較的効率が低い。仕組みがシンプルである。

欠点：整流子とブラシの磨耗、騒音、電氣的ノイズ、コギング

仕様	値
限界電圧	12V
適正電圧	7.2V
適正負荷	100g-cm
回転数	14,200rpm
消費電流	2.9A
シャフト径	2.3mm
重量	75g
概観寸法	37.8×27.7mm

表3 モーター仕様

4.2.2 減速器

3Vモーター用4速クランクギヤボックスセット（TAMIYA製）の流用を考える。当面モーター取付け部の加工とモーター出力軸径にウォームギヤの軸径を拡張することを考えている。なお最終出力軸はカップラーを介して台車位置検出用のエンコーダに接続される。

ギヤ比1：1 2 6：4 4 1：1 5 4 3：5 4 0 2

4.2.3 タイミングベルト・プーリ

プーリ（軸一体型）：歯数15、歯高1.25mm、ピッチ円直径21mm、軸長52mm、軸径5mm

タイミングベルト：BAND 564LX -UK HG（株式会社カルト産業）

4.2.4 モータドライバ

AD変換ボード、専用ドライバは高価であるため元来ステップモータ用のモータドライバであるが1tipに両方の機能を搭載した東芝製TA7289Pを使用する。次にその特徴仕様を述べる。

- 動作電源電圧範囲：6～27V
- 正転、逆転、ストップの3モード選択可能
- 4bitD/Aコンバータ内蔵
- ドライブ能力：1.5A(max)
- 外付け部品点数が少ない。

4.3 計測制御部

二つのエンコーダにより台車位置、振り角度を計測、その信号はパルスとしてエンコーダカウンタボードを介してPCへと取り込まれる。パルスがカウントできれば台車位置、振り角度が割り出せその情報とPC上(DIOボード)のタイマカウンタを使って台車速度、振り角速度を割り出す。この情報を元に制御プログラムを実行し出力信号をDIOボードを介してモータドライバへ送りモータを駆動させ台車位置、振り角度を制御する。

4.3.1 メインコンピュータ

PC名	mipad
メーカー	advantage
cpu	pentium(R)100～120MHz
メモリ	80MB
OS	windows98

表4 PC仕様

4.3.2 Enco Counter ボード

2ch入力が可能なエンコーダ専用カウンタボード。仕様上出力ピン数が96点と非常に多く、ケーブル等が高価である。

メーカー	Interface
入力点数	2点
入力信号	位相差入力(A、B、Z相)
入力仕様	
	高速フォトカプラ絶縁入力 DC+5V またはDC+12V～DC+24V
カウントモード	1,2,4 逓倍
カウンタ長	32ビット
最大入力周波数	最高1MHz
割り込み機能	
	各種6点(汎用入力2点 外部信号カウンタラッチ、 プリセット一致検出 キャリー/ポロー 異常入力検出) インターバルタイマ

表5 エンコーダカウンタボード仕様

4.3.3 Digital I/O ボード

単純な8点入出力用の物を準備、ラッチ機能が使えないためパルスカウンタとしての利用は難しいがPC周りのインターフェースとしては非常に安価である。今回はPC信号をモータドライバへ出力するのに使用。

メーカー	Interface
入出力点数	各8点
入力仕様	
最大定格電圧	DC+24V
入力信号電圧	DC+12V
入力信号電流	5mA/点
応答時間	45 μs
出力仕様	
最大定格電圧	DC+50V
推奨動作電圧	DC+5V～DC+24V
最大出力電流	+100mA
応答時間	65 μs
データ入出力用制御信号 接続 コネクタ	なし PCIバス 50pin フラットケーブル用
タイマカウンタ機能	あり
ドライバソフト	付属

表6 Di/oボード仕様

4.3.4 センサ

システム構成を安価に抑えるためパルス出力のロータリエンコーダを採用。

2相出力で分解能300のもので、汎用としては中堅クラススペックのものを用いる。

ポテンショメータよりは高価だが、比較的安価のものを準備した。

メーカー	日本サーボ
機種名	MXE30 300
分解度	300P/R
電源電圧	DC+5 ± 5%
出力相	A,B相
出力波形	TTL or OPEN COLLECTOR
応答周波数	50kHz(max)
最高回転数	5000rpm
消費電流	30 mA(max)
始動トルク	1mN · m
慣性モーメント	2.0 gf · cm ²

表7 ロータリエンコーダ仕様

4.3.5 自作ボード

DIO ボードと50pinフラットケーブルコネクタ(CAB-6901 Interface製メス)、50pin基盤接続汎用コネクタ(オス)を介してデータ交換する場となるボードを作成する。搭載機能として、エンコーダ情報のバイパス(5pinコネクタ接続)、モータドライバ、各種電源供給(5pinコネクタ接続)の3点をボード上で構成する。エンコーダカウンタボードへの入力は、96pinフラットケーブルコネクタ(CAB-6405)を介して行う。

4.3.6 制御ソフト

C,C++により以下のプログラムを製作する。

1. DIO ボード制御
2. Enco Counter ボード制御
3. 位置(角度)、速度(角速度)計算
4. 制御プログラム(単純FB、教師有りNN、

教師なしNN、その他)

以上4点より構成する。

5. 結論

- 1) 本研究ではNNを用いた一般的な非線形系の連続時間制御での有効性を示した。
- 2) 連続的な外乱中では、定常誤差が残り、学習が完了しない場合その後の動作不安を起こす恐れがある外乱中の学習動作の解析が必要である。
- 3) NN単独のとき、状態数が多い場合、学習係数、評価関数などの調整は困難だが今後、GAなどを用いての最適化などの検討をする。
- 4) 実器への適応を進め、その有効性がどの程度のものか検討する。

6. 参考文献

- 1) 中野、飯沼、ニューロンネットグループ、桐谷:入門と実習 ニューロコンピューター、株式会社技術評論社(1989)
- 2) 船橋誠壽:ニューロコンピューティング入門、オーム社(1992)
- 3) 上坂吉則:ニューロコンピューティングの数学的基礎(1993)
- 4) 杉坂正典:入門システム理論と制御(1997)
- 5) J.ハーツ、A.クロー、R.Gパルマ 著 笹川辰弥、呉 勇 訳: ニューラルコンピューター 統計物理学からのアプローチ