

進化的制御方式による特性が変化する倒立振子の制御 Evolutionary Control Method for the Inverted Pendulum with Characteristic Change

山崎 博昭 安信 誠二
Hiroaki Yamasaki Seiji Yasunobu

筑波大学 機能工学系

Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

Abstract: The control of a system which the characteristics are changed in real time is difficult. In order to control the system, it is need to always grasp the systems characteristic and controls by using its grasp. In this paper, the evolutionary control method that can cope with the real-time characteristic change is applied to the control of inverted pendulum with characteristic change. The effectiveness of this control method has been confirmed by the experiment.

キーワード: 遺伝的アルゴリズム, ファジィ制御, 進化型計算

Keywords: Genetic algorithm, Fuzzy control, Evolutionary calculation

1 はじめに

外的要因などにより、制御実行中に特性が変化するシステムの制御は困難である。このようなシステムをうまく制御するためには、常に対象システムの特性を把握し、リアルタイムな特性変化に対応して、最適な制御指令を決定していく必要がある。

これまで、ニューラルネットワーク [1]などを用いて、システム状態に応じて適切な制御指令を学習していく制御手法は、数多く提案されている。しかし、これらの制御手法では、学習のために試行を何回か繰り返す必要があり、制御実行中での特性の変化に対応することが難しい。そのため、制御実行中の特性変化に対応できる、新しい制御手法の開発が大きな課題である。

本論文では、モデルを常に学習し、そのモデルを用いて制御を行いながら、制御系を進化させていく進化的制御方式 [2]を、倒立振子の振り上げ、安定化制御に適用する。そして、制御実行中に特性（レールの傾斜角）を変化させる実験を行い、この制御方式の有効性を確認する。

2 進化的制御方式

制御部、制御則進化部、モデル進化部より構成する進化的制御方式の概要を図 1 に示す。

この制御方式では、

- (1) その時の制御則と対象システムモデルに基づき、制御部によって制御指令を決定する。
- (2) システム状態の測定値とシステム状態の予見値の誤差を用いて、モデル進化部により対象システムモデルを進化させる。
- (3) 制御則を制御則進化部により進化させる。

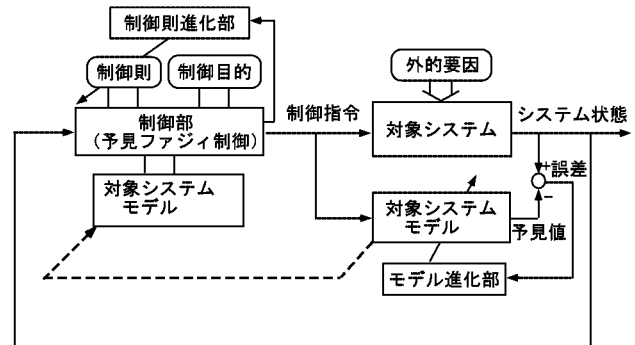


図1: 進化的制御方式の概要

を独立に行い、それらを組み合わせ、制御を実行していく。これにより、制御実行中に外的要因により対象システムの特性が変化した場合においても、その変化にリアルタイムに対応した適切な制御を実行することができる。

2.1 モデル進化部

GAによりモデルを進化させる進化的モデリング手法により、オンライン（制御実行中）でモデリングを行う。このため、制御実行中に特性が変化した場合でも、その変化に対応したモデリングを行うことができる。

2.2 制御部

制御部では、予見ファジィ制御[3]により、制御指令を決定する。予見ファジィ制御は、複数の制御入力候補を仮定し、各制御入力候補に対してモデルを用いて予見を行い、その結果を多目的ファジィ評価し、制御入力を決定する制御手法である。ここで、制御則進化部で進化させた制御則と、モデル進化部で進化させた対象システムモデルを用いる。

2.3 制御則進化部

GAを用いて、予見ファジィ制御部の制御則をオンラインで進化させる。これにより、対象システムの特性が変化した場合においても、予見ファジィ制御部により最適な制御指令を決定することができる。

3 倒立振り子

3.1 倒立振り子の特性

本研究で対象システムとして用いる倒立振り子のモデルを図2に、パラメータを表1に示す。

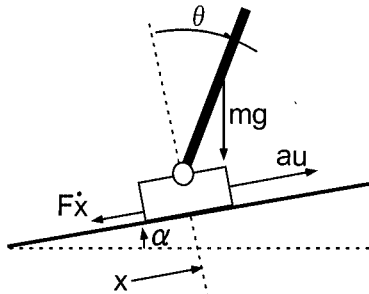


図2：倒立振り子のモデル

表1：倒立振り子のパラメータ

$x[m]$:	台車の位置
$M[Kg]$:	台車の質量
$F[Kg/s]$:	等価粘性摩擦係数
$u[V]$:	アンプの入力電圧
$a[N/V]$:	u から台車に働くトルクのゲイン
$l[m]$:	軸から振り子の重心までの距離
$\theta[rad]$:	振り子のレールの垂直軸からの角度
$m[Kg]$:	振り子の質量
$J[Kg \cdot m^2]$:	振り子の重心まわりのモーメント
$c[Kg \cdot m^2/s]$:	軸の粘性摩擦係数
$g[m/s^2]$:	重力加速度
$\alpha[rad]$:	傾斜角

運動方程式は、以下のように表せる。

$$(M + m) \frac{d^2 x}{dt^2} + ml \cos \theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} - ml \sin \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + F \frac{dx}{dt} + (M + m)g \sin \alpha = au \quad (1)$$

$$(J + ml^2) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + c \frac{d\theta}{dt} - mgl \sin(\theta - \alpha) + ml \cos \theta \frac{d^2 x}{dt^2} = 0 \quad (2)$$

これらの運動方程式からも、傾斜角 (α) が変化した場合、倒立振り子の特性が変化することは明らかである。

3.2 制御方針

倒立振り子の振り上げ、倒立安定化に対して用いた制御方針を以下に示す。なお、最下点 ($\theta = \pi$)、倒立点 ($\theta = 0$) は、左右の振れ具合により検知する。

3.2.1 振り上げ

倒立点近傍への振り子の振り上げを目的として行う。振り子が最下点を通過時に、制御指令を決定する。様々な制御指令に対する振り子の振り上がり量を、実際の制御結果から進化的にモデリングし、そのモデルを基に、適切な制御指令を決定する。

3.2.2 倒立安定化

振り子が倒立状態のとき、振り子の倒立を維持することを目的として行う。様々な振り子の状態において、制御指令に対する振り子の動きを、実際の制御結果から進化的にモデリングする。そして、そのモデルにより振り子の動きを予見し、倒立点に角速度が0で倒立できる制御指令を決定する。

4 制御システムの構築

進化的制御方式を倒立振り子の制御システムに適用した。本論文では、制御則の進化は行っていない。振り上げ制御部、倒立安定化制御部、状態判断部、モデル進化部から構成する制御システムの全体を図3に示す。ここでは、振り上げモデル、モデル進化部、振り上げ制御部について述べる。

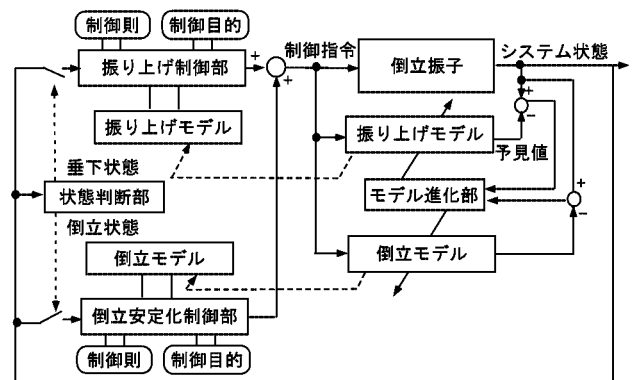


図3：制御システムの概要

4.1 振り上げモデル

振り上げモデルは、最下点で角速度 (ω) の倒立振り子に、制御入力量 (u) を与えたときの、振り子の最大振り上がり角度 ($\hat{\theta}_{max}$) をモデリングしたものである。この振り上げモデルを If-then ルールに基づくファジィモデルで記述する。

- If u is NB and ω is NB
then $\hat{\theta}_{max}$ is 0.1

- If u is PB and ω is PB
then $\hat{\theta}_{max}$ is 2.1

これらのルールをまとめて表2に示す。

表2： 振子の振り上げモデル

$\hat{\theta}_{max}(rad)$	$\omega(rad/sec)$							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
u (V * s)	NB	0.1	2.8	3.0	0.3	2.3	-0.9	-2.0
	NM	0.0	-1.3	0.3	2.4	3.1	0.5	1.0
	NS	0.1	-0.7	-0.4	2.5	-0.9	-1.5	-0.6
	ZO	0.4	1.5	-0.1	1.1	-3.1	1.5	-2.8
	PS	0.4	-1.1	-0.9	-0.5	1.7	0.5	-1.8
	PM	1.4	-0.1	2.5	-2.4	-0.4	1.3	-0.7
	PB	0	1.1	-0.9	-0.2	0.1	0.0	2.1

4.2 モデル進化部

モデル進化部では、オンラインでGAにより、振り上げ制御部、倒立安定化制御部で使用するモデルを進化させる。進化は、モデルの進化に必要な対象システムの入出力データを取得したときから、倒立点近傍までの振り上げ、そして倒立点での倒立安定化が達成されるまで、制御実行中、常に行われる。

<振り上げモデルの進化>

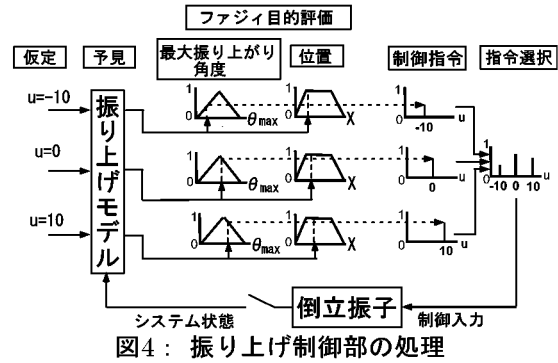
振り上げモデル (If-then ルールで記述された 49 のルール) を一個体とみなし、個体中の一つ一つのルールの後件部を遺伝子として進化を行う。初期状態はランダム値である。

個体の評価は、測定値 ($\tilde{\theta}_{max}$) と予見値 ($\hat{\theta}_{max}$) の誤差の総和により行う。測定値 ($\tilde{\theta}_{max}$) は、実際の振子の最大振り上がり角度である。この測定値は最大 20 まで蓄積する。予見値 ($\hat{\theta}_{max}$) は、各個体 (振り上げモデル) を用いて、測定値と同じ入力値 (角速度 (ω))、及び制御入力 (u) によって最大振り上がり角度を計算した値である。最も誤差の総和の少ない個体 (振り上げモデル) が、実際の振子に最も近い特性を持つ。GA による学習を制御実行中に常に行い、最も評価の良い個体を振り上げモデルとする。これを、振り上げ制御部が制御入力を決定する時に使用する。

4.3 振り上げ制御部

振り上げ制御部では、モデル進化部により進化した振り上げモデルを用いて、予見ファジィ制御によって、台車への制御入力量 (u) を決定する。この制御入力量は、($u = \pm 10[V] \times inputtime[s]$) と定義する。

まず、制御則に基づき、複数の制御入力量候補を振り上げモデルに入力し、各々について最大振り上がり角度の予見を行う。そして、ファジィ目的評価を、振子の最大振り上がり角度、及び台車の位置により行い、もっとも評価値が高い制御入力量候補が適切であると判断し、制御指令として選択する (図 4)。



5 実験による検証

5.1 実験システムの概要

本研究で使用した実験システムの概略を図 5 に示す。

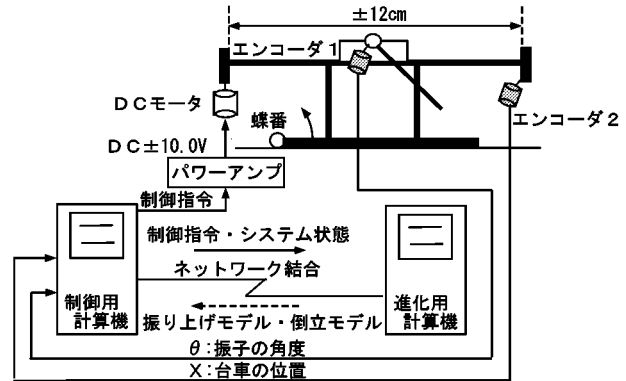


図5： 実験システムの概略

制御用計算機は制御指令を決定し、台車の位置、振子の角度をエンコーダを用いて取り込む。進化用計算機は制御実行中、常にモデルの進化を行う。

倒立振り子のレールを支えている土台の片方を蝶番で固定し、土台を傾け、レールの傾斜角を変化させる。

制御周期は 10ms、DCモータの制御入力は $\pm 10V$ 、台車の可動範囲は $\pm 12cm$ である。

5.2 実験結果

振り上げモデルはランダムなモデル、倒立モデルはシミュレーション [2] ですでに進化済みのモデルを用いる。初期条件として、倒立振り子をレール中央で垂下状態、レールを水平状態 ($\alpha = 0[rad]$) とする。

実験結果を図 6 に示す。初め、振り上げモデルが未進化であるために、振り上げ制御部により、振子の振れを小さくしてしまう制御指令を選択される場合がある。

しかし、失敗からも、振り上げモデルの進化に用いるデータが取り込め、モデル進化部による振り上げモデルの進化が繰り返し行われる。その結果、約 13 秒 ([12-22] 秒付近を図 7 に示す) において、倒立点 (角度

$2\pi[\text{rad}]$ へのうまい振り上げを実現している。

およそ 20 秒で、レールを傾け ($\alpha = -0.05[\text{rad}]$)、倒立振子の特性を変化させた。その結果、倒立安定化を維持できず振り上げ制御を行う状態に戻っている。

その後、レールが傾いた状態での、振子の振り上げ制御、振り上げモデルの進化が繰り返し行われる。その結果、約 30 秒 ([29-40] 秒付近を図 8 に示す)において、レールが傾いた状態での倒立点 (角度 $2\pi - 0.05[\text{rad}]$) へのうまい振り上げを実現している。

振子の位相面 (図 9) から、レールが水平の状態の時 $2\pi[\text{rad}]$ で、その後、レールが傾いた状態で $2\pi - 0.05[\text{rad}]$ で再び安定化していることが確認できる。また、図 10 より、台車の位置はおよそ $\pm 10\text{cm}$ で収まっており、台車の可動範囲内 ($\pm 12\text{cm}$) での制御を実現している。

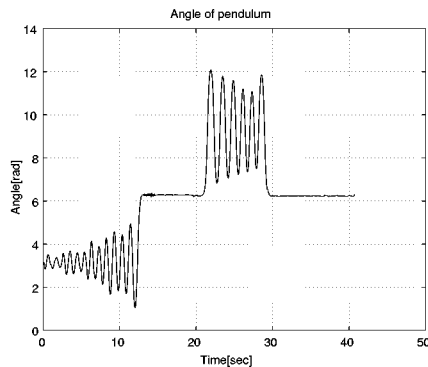


図6： 振子の角度

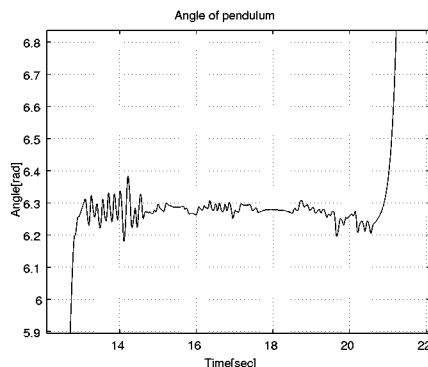


図7： 振子の角度 (水平状態で倒立)[12-22s]

6 おわりに

本論文では、進化的制御方式を、特性が変化する倒立振子の制御に適用した。そして、制御実行中に台車のレールの傾斜角を変化させる実験によって、進化的制御方式は、制御実行中に特性が変化するシステムに対して有効であることを実証した。

参考文献

- [1] 池田, 斎藤, 北村, 多層ネットワークによる倒立振子の安定化学習制御, システム制御情報学会論文

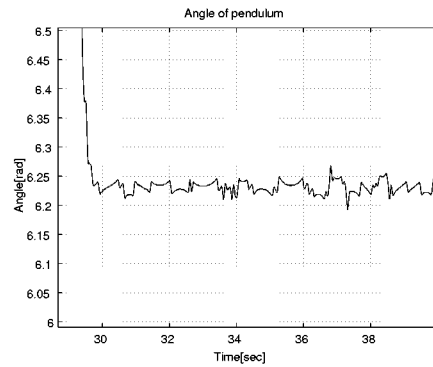


図8： 振子の角度 (傾斜状態で倒立)[29-40s]

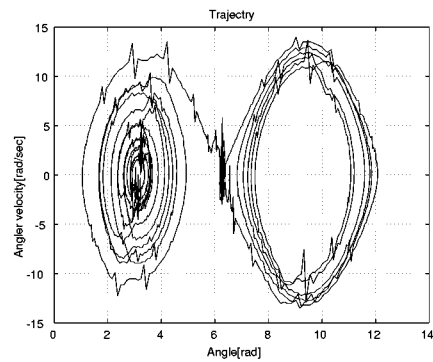


図9： 振子の位相面

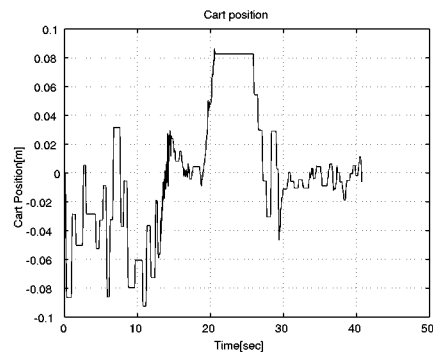


図10： 台車の位置

誌, Vol.3, No.12, pp.405-413, 1990.

- [2] S.Yasunobu, H.Yamasaki, Evolutionary Control Method and Swing Up and Stabilization Control of Inverted Pendulum, 9th IFSA World Congress, pp.2078-2083, 2001.
- [3] 安信, ファジィ工学, 昭晃堂, 1991.

論文受付番号 i 0 4 1

問い合わせ先

〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学機能工学系安信研究室
山崎 博昭
TEL (0298)53-6186
E-mail: yamasaki@esys.tsukuba.ac.jp