

人間の操作知識に基づく二重振子の振上げ倒立知的制御

Swing Up and Stabilization Intelligent Control of Double Inverted Pendulum

Based on Human Operating Knowledge

岩崎 峰之 安信 誠二

Takayuki Iwasaki Seiji Yasunobu

筑波大学 システム情報工学研究科

Gragnate School of Systems and Information

Engineering, University of Tsukuba

Abstract: A control based on human operating knowledge is flexible and good for the nonlinear system. However, it is difficult to incorporate human control into controller. In this paper, we acquire operating knowledge by constructing a model on computer and operating at extended simulation-time and develop an intelligent controller based on human operating knowledge. This development method is applied to the double pendulum which is an unstable nonlinear system. The effectiveness of this method was confirmed by experiments.

1. はじめに

実システムの多くは非線形性をもち、制御が困難である。しかし人間は操作の難しいシステムに対しても、経験により上手に操作を行うことができる。人間の操作知識を組み込んだ制御は柔軟で、操作が難しいシステムに対しても有効である。

倒立振子系は不安定な非線形システムの代表例として、線形制御の実験や研究に広く用いられている。なかでも二重倒立振子は特に非線形性が強いいため制御が困難である。これまで、現代制御理論 [1]、ニューラルネットワーク [2]、スライディングモード制御 [3] など様々な手法で制御系が構築されてきた。しかし、これらは振子の正確な数式モデルを必要としたり、制御方法が観察者にとって理解しにくいという問題がある。

本研究では、人間の操作知識に基づく制御を用いた二重振子の倒立安定化を目的としている。人間の操作知識を基にすることで、正確な数式や複雑な計算をすることなく、かつ観察者に理解しやすい制御が可能になる。過去に、ファジィ理論を用いることで人間の操作知識を制御に組み込み、単振子の振り上げ倒立が成功している [4]。単振子に加え、我々は操作知識を組み込んだ制御を二重振子の制御にも適用してきた [5]。

人間の操作知識を組み込んだ制御には操作知識の抽出が必要であるが、実時間で操作の難しいシステムも多い。二重振子も実時間で操作しながら知識を抽出することが難しい。そこで、本研究では、計算機上にモデルを構築し時間を引き延ばすことで、実時間で操作が難しいシステムの操作知識を抽出し制御器に組み込んだ。そして、シミュレーションで制御器の検証を行った

後、実機実験を行った。

2. 人間の操作知識に基づく制御系の構築方法

本研究における制御系の構築方法の概要を図1に示す。人間の操作知識に基づく制御器を構築するには、まずその操作知識を抽出しなければならない。しかし実際の制御対象は実時間での操作が困難なものも多い。

本研究では以下のような方法で、実時間での操作が困難な二重振子にも有効な知的制御系を構築する。まず、計算機上にモデルを構築し、時間を引き延ばし様々な状況で操作する。そうすることで、制御に有効な操作知識を抽出する (Step1)。そして獲得した操作知識を基に制御器を構築する (Step2)。その後シミュレーション上で制御器の性能を確かめ (Step3)、最後に実システムを制御し制御器の有効性を検証する (Step4)。

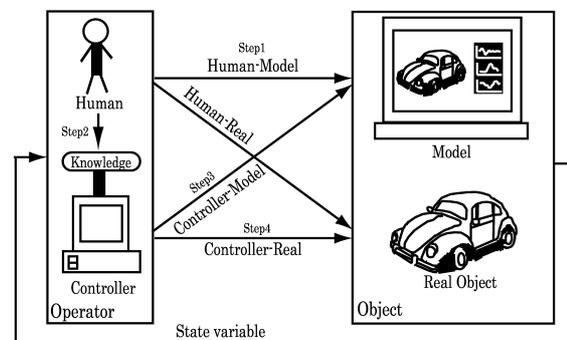


Fig. 1: 制御系の構築方法の概要

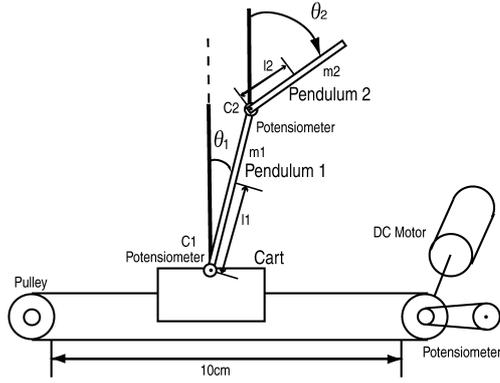


Fig. 2: 二重振子の概観

表 1: パラメータ

$x[m]$	台車の位置
$\theta_1[rad]$	第一振子の垂直軸からの角度
$\theta_2[rad]$	第二振子の垂直軸からの角度
$M[Kg]$	台車の質量
$m_1[Kg]$	第一振子の質量
$m_2[Kg]$	第二振子の質量
$l_1[m]$	軸 1 から第一振子の重心までの距離
$l_2[m]$	軸 2 から第二振子の重心までの距離
$J_1[Kg * m^2]$	第一振子の重心まわりのモーメント
$J_2[Kg * m^2]$	第二振子の重心まわりのモーメント
$F[Kg/s]$	等価粘性摩擦係数
$u[V]$	アンプの入力電圧
$a[N/V]$	u から台車に働く力のゲイン
$C_1[Kg * m^2/s]$	軸の粘性摩擦係数
$C_2[Kg * m^2/s]$	軸 2 の粘性摩擦係数
$x_{g,i}[m] (i = 0, 1, 2)$	台車と振子の重心の x 座標

3. 二重振子

本研究で扱う二重振子は、台車に第一振子が、第一振子に第二振子が、それぞれ接続されている直列型二重振子である。レール、台車、振子、DC モータ、プーリー、ベルト、ポテンシオメータで構成されており、台車は可動範囲内で水平なレール上を移動できる。振子はそれぞれ自由に回転でき、台車を直線的に左右に移動させることによって振子を振上げることができる。二重振子の概観を図 2 に、パラメータを表 1 に示す。

ここでの制御の目標は、状況に適した操作制御を行い振子を垂下状態から倒立状態にすることである。

4. 知識獲得

制御対象である二重振子のモデルを計算機上につくり、ジョイスティックによる入力でも様々な状況で何度も操作を行なうことで操作知識を獲得した。本研究で用いた二重振子に対しては、第一振子の振上げ、第二振子の

振上げ、倒立安定化の順に操作する順次振上げ方式が最も効率的だった。上手く振り上げ倒立を実現できる操作を以下に示す。

s00 下記以外するとき、台車を現在位置に維持

s10 第一振子が最下点を通るとき、第一振子振り上げ制御

s20 第一振子が倒立点近傍のとき第一振子の倒立制御

s21 第一振子が倒立点近傍で、かつ第二振子が最下点を通るとき第二振子振り上げ制御

s22 第一、第二振子共に倒立点近傍のとき、第一、第二振子の姿勢制御

s30 第一、第二振子が共に倒立点近傍でほぼ同じ角度になったら位置制御

5. 制御器の構築

上記の操作知識に基づき構築した制御器を図 3 に示す。この制御器は、第一振子振上げ制御部、第一振子倒立第二振子振上げ制御部、倒立安定化制御部、台車位置保持部、状況判断部で構成されている。状況に応じて制御部を切り換えることにより、台車を動かし二重振子を目標位置に倒立させる。

5.1. 状況判断部

システム状態に応じて以下のように状況を判断する。

S10 第一振子が最下点通過

$$\theta_1 \simeq \pi.$$

S20 第一振子が倒立近傍

$$-0.5 \leq \theta_1 \leq 0.5 \quad \& \quad -20 \leq \dot{\theta}_1 \leq 20.$$

S21 かつ第二振子が最下点通過

$$-0.5 \leq \theta_1 \leq 0.5 \quad \& \quad -20 \leq \dot{\theta}_1 \leq 20 \\ \& \quad \theta_2 \simeq \pi.$$

S22 第一、第二振子共に倒立近傍

$$-0.5 \leq \theta_1 \leq 0.5 \quad \& \quad -20 \leq \dot{\theta}_1 \leq 20 \\ \& \quad -0.5 \leq \theta_2 - \theta_1 \leq 0.5 \quad \& \quad -20 \leq \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1 \leq 20.$$

S30 第一、第二振子共に倒立近傍でほぼ同じ角度

$$-0.08 \leq \theta_1, \theta_2 \leq 0.08 \quad \& \quad -1.0 \leq \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2 \leq 1.0 \\ \& \quad \theta_1 \simeq \theta_2.$$

S00 上記以外の状態

上記の状況において、それぞれに適した制御部に切り替える。

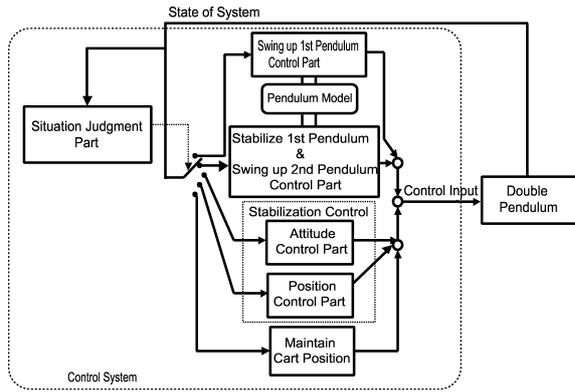


Fig. 3: 制御器の概要

5.2. 第一振り上げ制御部

第一振子が最下点を通過するとき (S10), 第一振り上げ制御を行う。台車を左右に動かすことで, 第一振子が倒立状態になるようエネルギーを加える。振り上げ制御では, 台車は一定電圧で動かし, 操作知識から獲得したモデルを用いて予見ファジィ制御 [6] によって, 台車への制御入力時間を決定する。制御入力時間とは, 台車をモータで制御する際, 一定電圧をモータに与える時間の長さであり, 制御入力量は ($input = \pm 10[V] \times inputtime[s]$) と定義する。制御入力時間の符号は台車の移動方向を示す。

まず, 複数の制御入力時間候補を振り上げモデルに入力し, 各々について振り上がり後のエネルギーの予見を行う。予見は, 操作知識から獲得したモデルと振子の最下点でのエネルギー (E) を用いて, エネルギーの増加 (ΔE) を計算することにより行われる。また, ここではモデルを以下の If-then ルールに基づくファジィモデルで記述する。

- If $inputtime$ is NB and E is NB
 \vdots then ΔE is 0.05
- If $inputtime$ is PB and E is PB
 \vdots then ΔE is 0.40

これらのルールをまとめて表 2 に示す。第一振子が反時計回りの速度をもつときには, 表 2 中の数字にマイナスをつけたものがルールとなる。

このモデルを用いて最下点でのエネルギーと制御入力時間に対応する制御後の予測エネルギー ($E + \Delta E$) を算出する。

次に, 予見される振子のエネルギーと台車の位置に対してファジィ目的評価を行う。振り上げ後に台車が可動範囲内にあり, エネルギーが第一振り倒立時のエネルギーに近いほど評価は高くなる。そして, 最も評価の高

表 2: エネルギーモデル

$\Delta Energy (\times 10^{-1})$		EnergyNow						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
input time	NB	0.5	-0.2	-1.0	-1.0	-2.0	-3.0	-3.0
	NM	0.5	-0.2	-0.2	-0.5	-1.0	-1.0	-2.0
	NS	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	ZO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	PS	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	PM	0.5	0.5	1.3	1.4	2.0	2.0	3.0
	PB	0.5	0.7	2.5	2.5	3.5	4.0	4.0

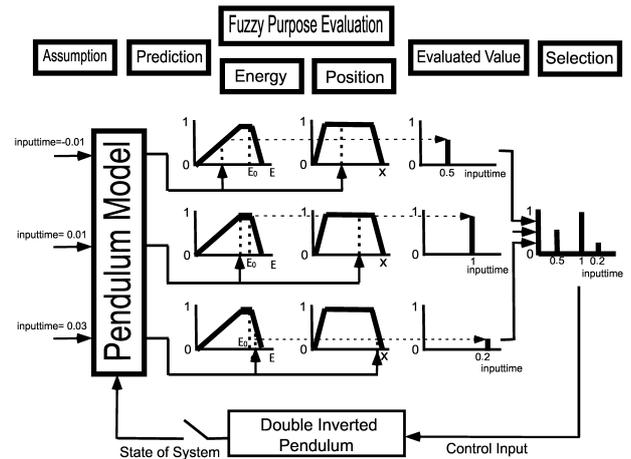


Fig. 4: 予見ファジィ制御の推論過程

い 制御入力時間候補を制御入力時間として選択する (図 4)。

5.3. 第一振り倒立, 第二振り上げ制御部

第一振子が倒立近傍のとき (S20), 第一振子の倒立制御を行い, かつ第二振子が最下点を通過するとき (S21), 第二振り上げ制御を行う。第一振子の位置制御における目標位置 (x_T) を変えることにより, 第二振子を振り上げる。目標位置は, 第二振子の最大振り上がり角度 (θ_{2max}) と台車の現在の位置 (x), 操作知識から獲得したファジィモデルから決定する。ファジィモデルは, 以下の If-then ルールに基づき記述する。

- If θ_{2max} is NB and x is NB
 \vdots then x_T is 0.3
- If θ_{2max} is PB and x is PB
 \vdots then x_T is -0.3

これらのルールをまとめて表 3 に示す。

表 3: 第二振り上げモデル

x_T		Cart Position						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
θ_{2max}	NB	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.20	0
	NM	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.35	0
	NS	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.40	0
	ZO	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0
	PS	0	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
	PM	0	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
	PB	0	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3

表 4: 二重振子の仕様

$M[Kg]$:	3.117
$m_1[Kg]$:	0.080
$m_2[Kg]$:	0.020
$l_1[m]$:	0.200
$l_2[m]$:	0.060
$J_1[Kg * m^2]$:	1.2×10^{-3}
$J_2[Kg * m^2]$:	4.2×10^{-5}
$F[Kg/s]$:	23.04666
$a[N/V]$:	11.1
$C_1[Kg * m^2/s]$:	8.111×10^{-4}
$C_2[Kg * m^2/s]$:	1.5×10^{-4}

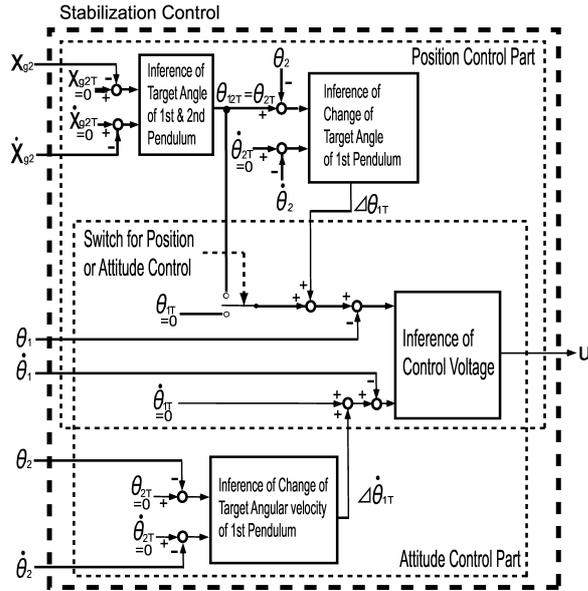


Fig. 5: 倒立安定化制御部

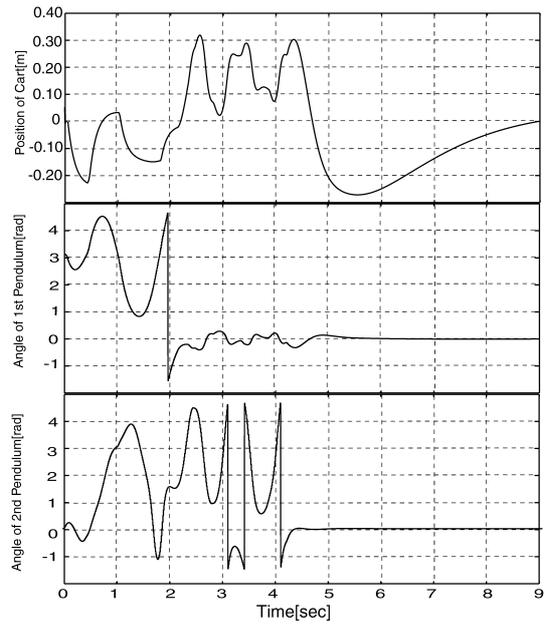


Fig. 6: シミュレーション結果 (順次振上げ方式)

5.4. 倒立安定化制御部

倒立安定化制御部は、二重振子の状態に応じて (S22,S30) 姿勢制御と位置制御を行う。

5.4.1 姿勢制御部

第一、第二振り共に倒立近傍のとき (S22)、姿勢制御に切り替わる。この制御部の目的は、第一、第二振りを共に鉛直上向きの姿勢にすることである。

まず、第二振り子の角度 (θ_2)、第二振り子の角速度 ($\dot{\theta}_2$) の状態についてファジィ推論を行い、第二振り子を鉛直上向きにするために必要な量 ($\Delta\theta_{1T}$) だけ第一振り子の目標角速度を $\theta_{1T} = 0$ から変更する。次に第一振り子の目標角度との差 ($\theta_{1T} - \theta_1$)、角速度差 ($\theta_{1T} + \Delta\theta_{1T} - \dot{\theta}_1$) についてファジィ推論を行い、制御指令電圧 (u) を決定する。

5.4.2 位置制御部

第一、第二振り共に鉛直上向きするとき (S30)、位置制御に切り替わる。この制御部の目的は、倒立状態を保ったまま目標位置へ振り子を移動させることである。

第二振り子の重心の位置 (x_{g2})、 x 軸方向の速度 (\dot{x}_{g2}) についてファジィ推論を行い、第二振り子の目標角度 (θ_{2T}) を設定する。次に第二振り子の目標角度との角度差 ($\theta_{2T} - \theta_2$) と目標角速度との差 ($\theta_{2T} - \dot{\theta}_2$) についてファジィ推論を行い、第二振り子を目標角度にするための第一振り子の目標角度 (θ_{1T}) からの変更量 ($\Delta\theta_{1T}$) を設定する。得られた目標角度との角度差 ($\theta_{1T} + \Delta\theta_{1T} - \theta_1$)、目標角速度との角速度差 ($\theta_{1T} - \dot{\theta}_1$) についてファジィ推論を行い制御指令電圧 (u) を決定する。

6. シミュレーションによる検証

構築した制御器の有効性を検証するため、まず制御系設計支援ツール SIMULINK, SimMechanics (MathWorks 社製) を用いてシミュレーションを行った。用いたパラメータを表 4 に示す。

$t = 0$ で垂下状態 ($r = 0, \dot{r} = 0, \theta_1 = \pi, \dot{\theta}_1 = 0, \theta_2 = \pi, \dot{\theta}_2 = 0$) の条件で開始し、サンプル時間を 10ms とした。その結果を図 6 に示す。

制御器は約 2.5[sec] まで第一振子を振り上げているその後、約 4.5[sec] まで第一振子の倒立維持と第二振子の振り上げを行い、倒立安定化を達成している。また、制御器は第一、第二振子の振り上げや、倒立安定化の際、台車の可動範囲内 ($\pm 0.5[m]$) を考慮しつつ制御を行っているので、 $-0.25[m]$ から $0.2[m]$ の範囲で移動している。

7. 実機実験による検証

次に、構築した制御器を用いて、実機実験を行った。実験装置の概観を図 7 に実験結果を図 8 に示す。

シミュレーションと同様に、制御器は第一振子の振り上げ、第二振子の振り上げ、倒立の順に達成している。また、台車の移動が可動範囲内 ($\pm 0.5[m]$) で収まっている。

以上のことから、構築した制御器が二重振子の制御に有効なことを確認した。

8. 同時振上げ方式の検討

順次振上げ方式のほかに、第一、第二振子をまとめて振上げる同時振上げ方式の操作知識の抽出も試みた。

8.1. 知識獲得

以下のように人間が操作すれば、同時振上げ、倒立安定化を実現することができる。

- 両振子が最下点付近のとき振り上げ制御
- 両振子が倒立点近傍、水平付近以外のとき姿勢制御
- 第一、第二振子共に倒立点近傍のとき、第一、第二振子の姿勢制御
- 第一、第二振子が共に倒立点近傍でほぼ同じ角度になったら位置制御

8.2. 制御器の構築

上記の操作を制御器に組み込んだ。姿勢制御は第二振子の相対角度と角速度から制御入力をファジィ推論し、

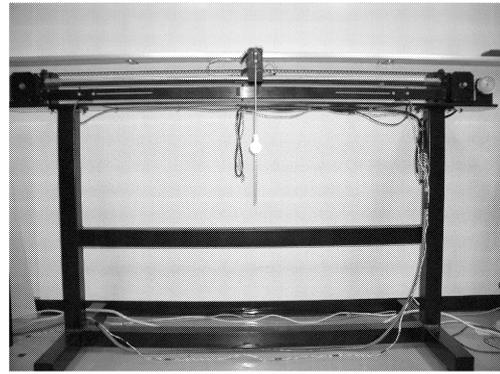


Fig. 7: 実験装置の概観

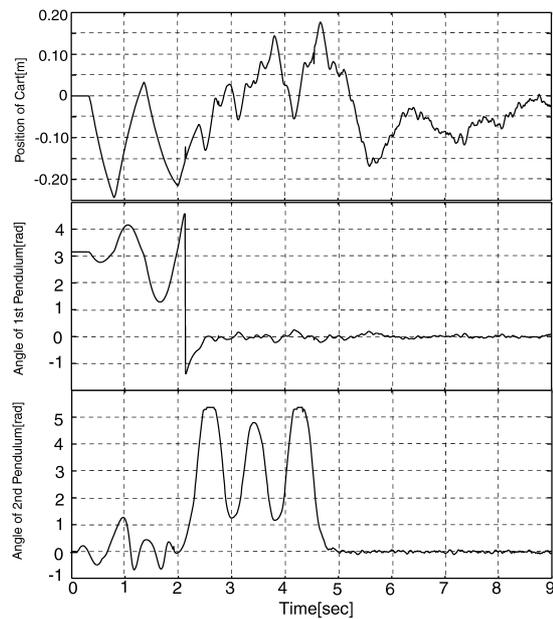


Fig. 8: 実験結果 (順次振上げ方式)

倒立安定化制御は第一、第二振子を順に振上げたときと同じ制御を適用している。

8.3. シミュレーションによる検証

構築した制御器をシミュレーションで検証した。その結果を図 9 に示す。

制御器は第一振子、第二振子を同時に振り上げ、約 5[sec] で倒立を達成している。

この振上げ方式は、順次振上げ方式のように第一振子倒立後、第二振子振上げといった段階を踏まずに、一度に両方振上げることができる。両振子の姿勢制御が主で、いかに効率よく倒立近傍点に振上げるかの考慮が不十分であるが、倒立安定化は実現できた。

人間が計算機上で時間を引き延ばし操作できた方法なら制御器が構築できることを確認した。

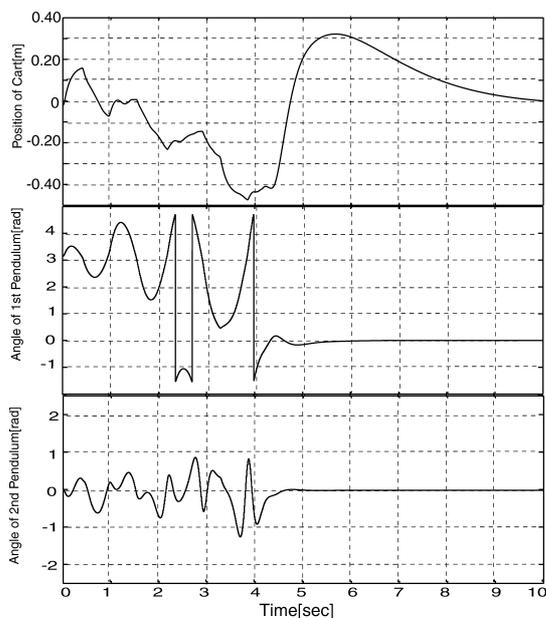


Fig. 9: シミュレーション結果 (同時振上げ方式)

8. おわりに

本研究では、直列二重倒立振子を制御対象とし、人間の操作知識に基づく制御器を構築し制御を行なった。二重振子のように実時間で人間が操作することが難しい対象であっても、計算機上にモデルを構築し時間を引き延ばすことで操作知識を獲得することができた。シミュレーション、実機実験によって、人間の操作知識に基づき設計した制御器が非線形性の強い二重振子に有効であることを確認した。

参考文献

- [1] M. Yamakita, K. Nonaka and K. Furuta: "Swing up Control of a Double Pendulum," *Proc. of the American Control Conference*, pp. 2229-2233, 1993.
- [2] N. Ikeda, A. Saito and S. Kitajima: "Intelligent Control Using Cubic Neural Network for Swinging up and Stabilizing Double Pendulum," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, Vol. 68, No. 676, pp. 178-185, 2002.
- [3] T. Henmi, M. Deng, A. Inoue, N. Ueki and Y. Hirashima: "Swing-Up Control of a Serial Cart -Type Double Inverted Pendulum System," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, Vol. 71, No. 704, pp. 157-163, 2005.
- [4] S. Yasunobu, T. Kitajima: "The Swing up Control Based on Human Experiences," *Proc. of SICE Annual Conference 1998*, pp. 97-98, 1998.
- [5] S. Yasunobu and T. Iwasaki: "Swing Up Intelligent Control of Double Inverted Pendulum Based on Human Knowledge," *Proc. of SICE Annual Conference 2004 in Sapporo*, pp. 1869-1873, 2004.

[6] S. Yasunobu: *Fuzzy Engineering*, Syokodo Press, Japan, 1991.

連絡先

〒 305-8573

茨城県つくば市天王台 1-1-1

筑波大学大学院 システム情報工学研究科

知能機能システム専攻 知的制御システム研究室

岩崎 峰之

電話: 029-853-6186

E-mail: t_iwa@edu.esys.tsukuba.ac.jp