

知的複合制御系の構築方法と二重振り子への適用

Method of Constructing Intelligent Compound Control System and Application to Double Pendulum

筑波大学 システム情報工学研究科

Takayuki Iwasaki and Seiji Yasunobu,

岩崎 峰之 安信 誠二

University of Tsukuba

Abstract: Some systems have a lot of state variables and characteristic which is different according to the state. It is difficult to control these systems. However, human can operate such systems by operating knowledge. In this paper, we propose a construction method of intelligent compound control system based on the operating knowledge of human. This method was applied to swing up and stabilization control of double pendulum. The effectiveness of this method was confirmed by experiments.

1 はじめに

実システムの中には、状態変数が多く、状態に応じて特性が異なるシステムがある。状態変数が多い場合はすべての変数を同時に制御することが難しく、状態によって特性が異なる場合は単一の制御器では制御が難しい。

人間はこのようなシステムに対しても、経験により良好な制御を実現している。状態変数が多い場合でも、一度にすべての変数を制御するのではなく、いくつかの変数を選択し、他の変数を後まわしにすることで段階的に制御し最終的に制御目的を達成している。状態によって特性が異なる場合でも、状態ごとに適切な操作を行なうことで対応している。

人間の操作に基づき構築した知的制御系は制御の難しいシステムに対しても良好な制御を実現できる[?]。しかし、状態によって特性が異なるシステムの場合、単一の知的制御では制御できず、異なる特性ごとに対応した知的制御を行なう必要がある。このようなシステムを制御するには、状態ごとに対応した操作に基づく知的制御部を持ち、状態に応じて複数の知的制御部からの出力を切り替える制御系が有効である。人間の操作から獲得した、どのような段階を経て変数を順に制御するかを示す制御戦略、ある状態での操作に関する知識に基づくことで、状態変数が多く、状態に応じて特性が異なるシステムに対して有効な、知的制御を複合する制御系が構築できる。この知的複合制御系は、操作知識に基づいた制御部が制御対象の異なる状態で適切な制御を行ない、制御戦略に従い複数の制御部を切り替えることで、状態変数が多いシステムを段階的に制御する。

本論文では、知的複合制御系の構築方法を提案する。この構築方法を、状態変数が多く、状態に応じて特性が異なる二重振り子に適用し、実機実験により、提案した構築方法の有効性を検証する。

2 知的複合制御系の構築方法

人間の操作から獲得した制御戦略、操作知識に基づくことで、状態に応じて特性が異なるシステムにも有効な知的複合制御系を構築する。

本研究では以下のような方法で、知的複合制御系を構築する。まず、(Step1) 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ことで、制御戦略、操作知識を獲得する。この獲得方法は、実時間での動きが速く、操作が困難な制御対象に有効である。

次に、(Step2) 獲得した制御戦略、操作知識を基に知的複合制御系を構築する。知的複合制御系の概要を図1に示す。この制御系にはファジィ理論[1]を用いることで、制御戦略、操作知識が知識として組み込まれており、制御対象の異なる特性に対応した複数の制御部と、制御部からの出力を統合する統合部から成る。統合部は、人間の操作から獲得した、どのような段階を経て変数を順に制御するかを示す制御戦略に基づき構築され、制御部は、ある状態での操作に関する知識に基づき構築されている。それぞれの制御部は人間の操作から獲得した操作知識がファジィルール、ファジィメンバシップとして組み込まれており、対応する状態で適切な制御を行なう。操作知識に基づいた複数の制御部からの出力を、制御戦略に基づいた統合部が統合し、制御対象の状態変数を段階的に制御する。

その後 (Step3) シミュレーション上で構築した制御系の性能を確かめ、最後に (Step4) 実機実験により制御系の有効性を検証する。

知的複合制御系の構築方法の概観を図2に示す。

3 二重振り子

本研究で制御対象として用いる二重振り子は、台車に第一振り子が、第一振り子に第二振り子が、それぞれ接続されている直列型二重振り子である。振り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り子を加振することができる。

二重振り子の概観を図12に示す。この二重振り子は、ジャ

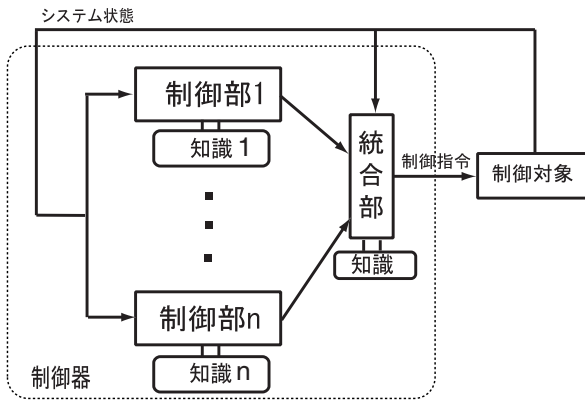


Fig.1 知的複合制御系の概要

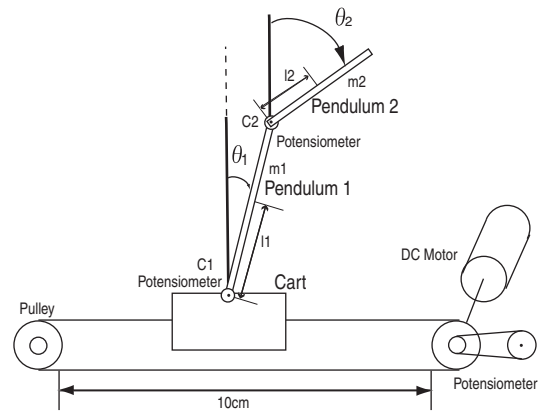


Fig.4 二重振子の概観

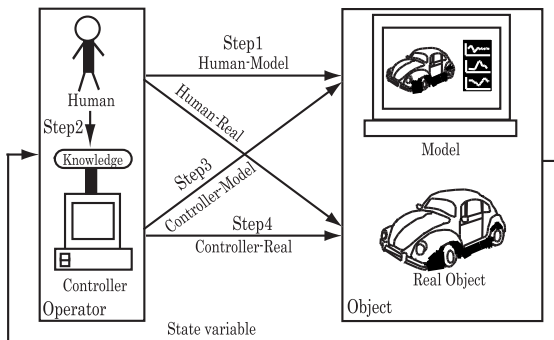


Fig.2 知的複合制御系の構築方法の概観

Table1 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
$l1 [m]$	軸 1 から第一振子の重心までの距離
$l2 [m]$	軸 2 から第二振子の重心までの距離
$J1 [Kg * m^2]$	第一振子の重心まわりのモーメント
$J2 [Kg * m^2]$	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
$C1 [Kg * m^2/s]$	軸の粘性摩擦係数
$C2 [Kg * m^2/s]$	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

パン・イー・エム社製の倒立振り実験装置に、第二振子をポテンシオメータを介して接続した。この実験の制御目的は、第一、第二振子が垂れ下がり静止している状態から台車を左右に移動させることで振上げ、目標位置で両振子を倒立安定化させることである。二重振子の概観を図 3 に、パラメータを表 1 に、パラメータの実測値を表 4 に示す。

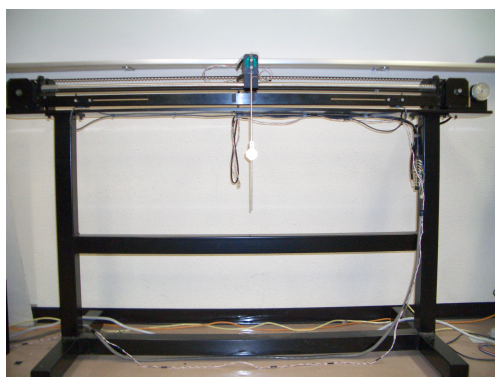


Fig.3 実験装置の概観

二重振子は、状態により特性が変わり、倒立近傍まわりや最下点まわりなどでは必要な制御が変わる。また、状態変数が第一、第二振子の角度、角速度、台車の位置、速度の 6 変数あり、これらの変数を一度に制御するのは困難である。

Table2 二重振子の仕様

$M [Kg]$:	3.117
$m_1 [Kg]$:	0.080
$m_2 [Kg]$:	0.020
$l1 [m]$:	0.200
$l2 [m]$:	0.060
$J1 [Kg * m^2]$:	1.2×10^{-3}
$J2 [Kg * m^2]$:	4.2×10^{-5}
$F [Kg/s]$:	23.04666
$a [N/V]$:	11.1
$C1 [Kg * m^2/s]$:	8.111×10^{-4}
$C2 [Kg * m^2/s]$:	1.5×10^{-4}

これまで、現代制御理論 [2][3]、ニューラルネットワーク [4]、スライディングモード制御 [5] 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を必要としたり、制御手法が観察者にとって理解しにくいという問題がある。

過去に、ファジィ理論を用いることで人間の制御戦略、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 [6]。この制御は、複雑な計算を用いず、人に理解されやすいといった利点がある。単振子よりも状態変数が多く、動きが複雑で制御が難しい二重振子に対しても、人間の制御戦略、操作知識を基にした制御は有効である [7]。

4 構築方法の二重振り子への適用

構築した知的制御システムの有効性を、実際の車両を想定したコンピュータシミュレーションにより検証する。

4.1 制御戦略, 操作知識の獲得

制御対象である二重振り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様々な状況で何度も操作(図4)を行なうことで制御戦略, 操作知識を獲得した。二重振り子の状態を複数に分割し, 状態に応じて異なる操作を行うことによって二重振り子を上手く制御できた。

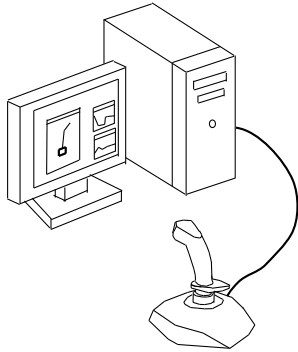


Fig.5 ジョイスティックによる二重振り子モデルの操作

獲得した制御戦略について説明する。レール中央で第一, 第二振り子共に垂下状態 ($x = 0[m], \theta_1 = 0[rad], \theta_2 = 0[rad]$) から, 第二振り子を考慮せず第一振り子, 台車の位置に着目し第一振り子を振上げ倒立状態 ($\theta_1 = 0[rad]$) にする。次に, 第一振り子を倒立させたまま第二振り子を振上げることで, 両振り子を倒立状態 ($\theta_1 = 0, \theta_2 = 0[rad]$) にする。最後に, 両振り子を倒立させたまま台車の位置をレール中央 ($x = 0[m]$) へ移動させる。このように, 段階的に変数を制御することで, 6変数からなる二重振り子の制御目的を達成できた。

4.2 制御系の構築

制御戦略, 操作知識に基づいて制御器を構築した。制御系の構成を図5に示す。制御器は, 第一振り子振上げ制御部, 第二振り子振上げ制御部, 倒立安定化制御部, 台車位置保持部, 統合部で構成されている。個々の制御部は, 人間の操作から獲得した知識に従い出力を決定している。制御器内の知識は, ファジールール, ファジィメンバシップで記述されている。それぞれの制御部からは常に出力がでているが, 統合部により制御対象の状態に応じた適切な制御出力に切り替えている。制御器は, 制御戦略に従い状況に応じて適切な制御を行い, 二重振り子を目標位置に倒立させる。

4.2.1 第一振り子振上げ制御部

第一振り子が最下点を通過するとき, 第一振り子振上げ制御を行なう。台車を左右に動かすことで, 第一振り子が倒立状

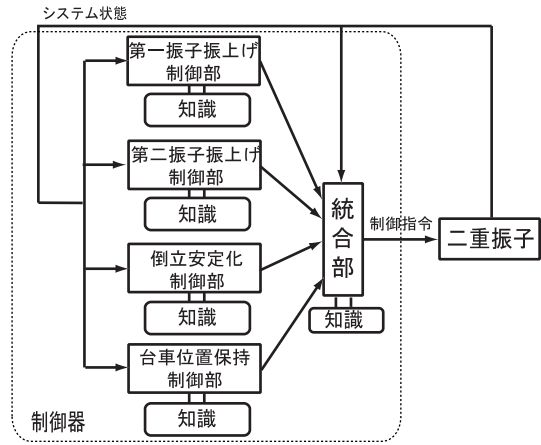


Fig.6 制御系の構成

態になるようエネルギーを加える。予見ファジィ制御によって振れ上がり後の状態を予見し, 台車への制御指令を決定する(図6)。

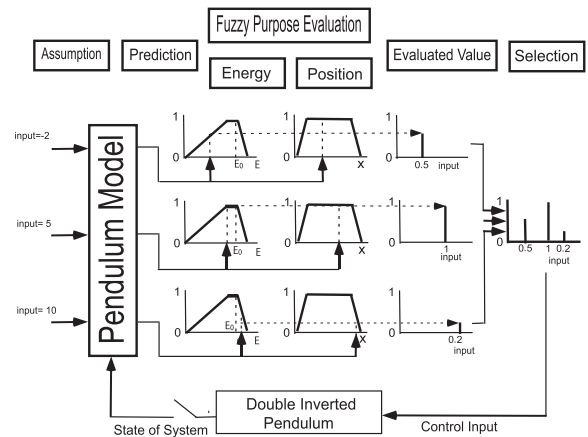


Fig.7 予見ファジィ制御の推論過程

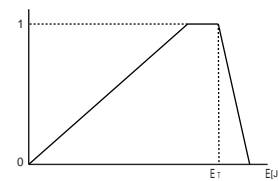


Fig.8 エネルギー評価用のメンバシップ関数

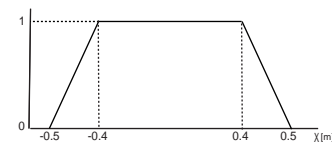


Fig.9 台車位置評価用のメンバシップ関数

まず, 複数の制御指令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なう。

予見は、操作知識から構築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 $input$ is NB and E is NB then ΔE is 0.05
- ⋮
- If $input$ is PB and E is PB then ΔE is 0.40

Table3 エネルギーモデル

$\Delta Energy(\times 10^{-1})$		EnergyNow						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
input	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

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指令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なう。エネルギー評価用にメンバシップ関数を図??に、台車位置評価用のメンバシップ関数を図??に示す。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子倒立時のエネルギーに近いほど評価は高くなる。そして、最も評価の高い制御指令候補を制御指令として選択する。

4.2.2 第二振子振り上げ制御部

第一振子が倒立近傍のとき、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、第二振子振り上げ制御を行なう。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) から、以下のような If-then ルールに従い決定する。

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

これらのルールをまとめて表 3 に示し、メンバシップ関数を図 7 に示す。

4.2.3 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姿勢制御と位置制御を行なう。倒立安定化制御部の構成を図 8 に示す。

Table4 第二振子振り上げルール

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

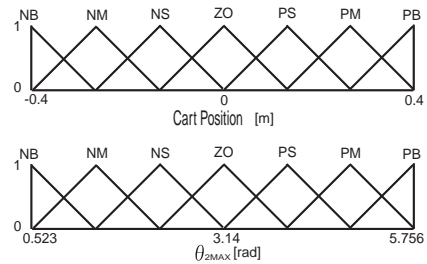


Fig.10 第二振子振り上げルールにおけるメンバシップ関数

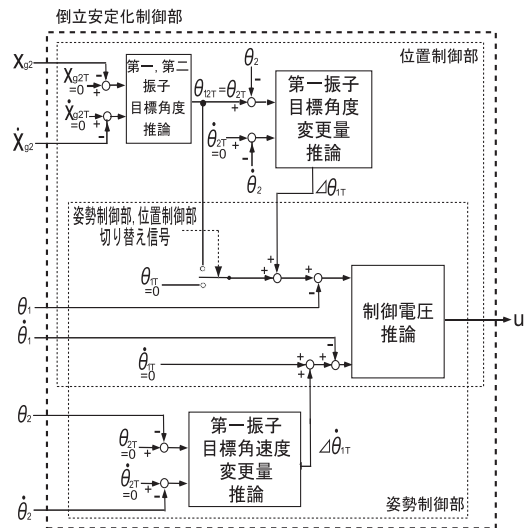


Fig.11 倒立安定化制御部の構成

4.2.4 姿勢制御部

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

まず、第二振子の角度 (θ_2)、第二振子の角速度 ($\dot{\theta}_2$) 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 ($\Delta\theta_{1T}$) だけ第一振子の目標角速度を $\dot{\theta}_{1T} = 0$ から変更する。次に第一振子の目標角度との差 ($\theta_{1T} - \theta_1$)、角速度差 ($\dot{\theta}_{1T} + \Delta\dot{\theta}_{1T} - \dot{\theta}_1$) 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。

4.2.5 位置制御部

第一、第二振り共に鉛直上向きするとき、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子を移動させることである。

第二振子の重心の位置 (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、第二振子の目標角度 (θ_{2T}) を設定する。次に第二振子の目標角度との角度差 $(\theta_{2T} - \theta_2)$ と目標角速度との差 $(\dot{\theta}_{2T} - \dot{\theta}_2)$ についてファジィ推論を行い、第二振子を目標角度にするための第一振子の目標角度 (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 $(\dot{\theta}_{1T} - \dot{\theta}_1)$ 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。

4.2.6 台車位置保持部

台車位置保持制御部は、台車の位置を現在位置から大きく動かないように制御を行なう。

4.2.7 統合部

統合部では、状態に応じた適切な制御指令を決定するために、複数の制御部の制御出力の統合を行なう。二重振子の状態をファジィメンバシップで定義することにより、状態が変化したときの制御入力の急激な変化を防ぐ。統合部で用いる状態メンバシップを図9に示す。統合部は、第一振子の角度から状態を判断し対応する制御部の制御指令を出力する。適合する状態メンバシップがひとつの

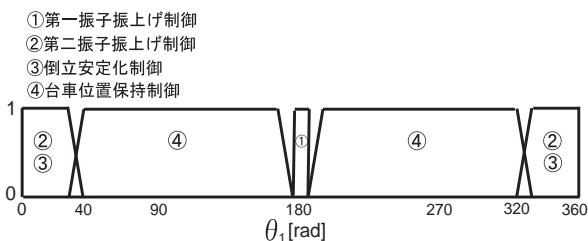


Fig.12 統合部で用いる状態メンバシップ

き、対応する制御部の制御指令をそのまま出力する。複数の状態メンバシップが適合する状態のとき、統合部では、制御器内の複数の制御部の出力から簡略推論法により制御入力 u を決定する。統合部での制御入力の推論過程を図10に示す。第一振子の角度が θ_1^* で制御部1の出力が u_1 , 制御部2の出力 u_2 のときの、制御部1の状態適合度は w_1 , 制御部2の状態適合度は w_2 とし、推論結果の制御指令 u は、次式で計算される。

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

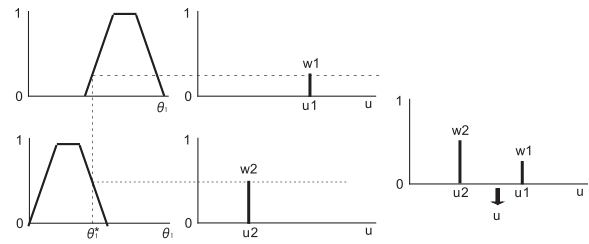


Fig.13 制御指令の推論過程

4.3 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、制御器をC言語で記述し、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。

$t = 0$ で垂下状態 $(x = 0, \dot{x} = 0[m], \theta_1 = \pi, \dot{\theta}_1 = 0, \theta_2 = 0, \dot{\theta}_2 = 0[rad])$ の条件で開始し、サンプル時間は $10ms$ である。

第一振子の角度を図??に、第二振子の角度を図??に、台車位置を図??に示す。

制御器は、制御戦略に従い、第一振子の振上げ、第二振子の振上げ、倒立安定化の順に制御を行なっている。まず、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、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、台車を $-0.4[m]$ から $0.3[m]$ の範囲で動かす、第一、第二振子の振上げや、倒立安定化を実現している。

以上結果から、構築した制御器は獲得した制御戦略に従い二重振子を制御できることを確認した。

4.4 実機実験による検証

シミュレーションで良好な制御を実現した制御器がC言語で実装されている計算機を、AD, DA ボードを通して実機とつなぎ、実時間で実機実験を行なった。

ポテンショメータを用いて、台車の位置、第一、第二振子の角度を取り込み、計算機により制御指令を決定する。制御周期は $10ms$, DC モータの制御入力範囲は $\pm 10V$, 台車の可動範囲は $\pm 0.5m$ である。初期条件として、倒立振子をレール中央で垂下状態とし、実機実験を行なった。実験結果を図12に示す。

第一振子の角度を図??に、第二振子の角度を図??に、台車位置を図??に示す。

シミュレーションと同様に、構築した制御器は、第一振子の振り上げ、第二振子の振り上げ、倒立安定化の順に制御を行なっている。まず、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 $6[sec]$ 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

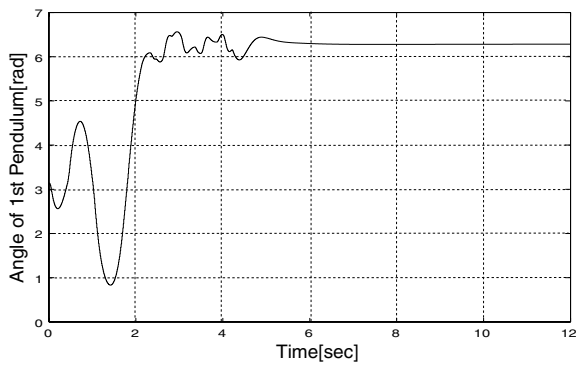


Fig.14 第一振子の角度 (シミュレーション結果)

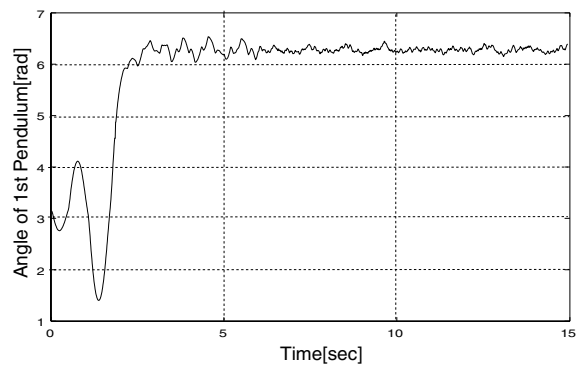


Fig.17 第一振子の角度 (実機実験結果)

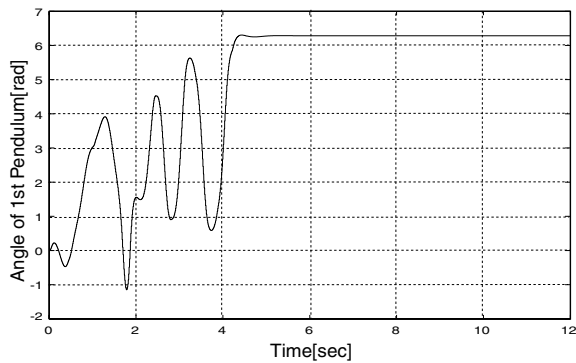


Fig.15 第二振子の角度 (シミュレーション結果)

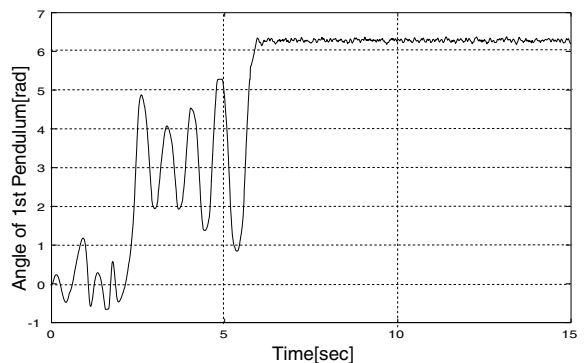


Fig.18 第二振子の角度 (実機実験結果)

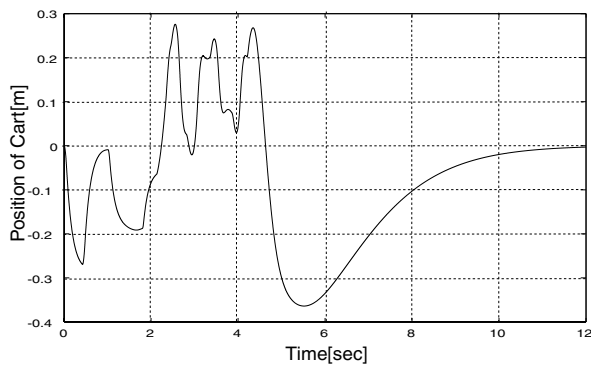


Fig.16 台車の位置 (シミュレーション結果)

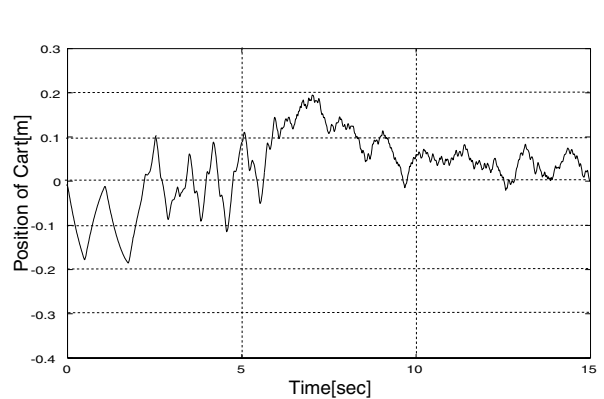


Fig.19 台車の位置 (実機実験結果)

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。なお、初期条件により倒立安定化までの時間を要する場合もあるが、統合部が現在の状態に適した制御指令を出力しており、着実に倒立安定化を実現できる。

以上のことから、提案した構築方法を用いて、状態変数が多く制御が難しい二重振子に対して有効な制御系を構築できることを確認した。

5 おわりに

本論文では、状態変数が多く、状態によって特性が異なるシステムに対して有効な、知的複合制御系の構築方法を提案した。

提案した構築方法では、まず、計算機上にモデルを構築し時間を引き延ばして人間が操作することで、実時間での

操作が難しいシステムから、制御戦略、操作知識を獲得した。次に、獲得した制御戦略、操作知識に基づき、操作知識を組み込んだ複数の制御部を統合部が制御戦略に従い適切に切り替える知的複合制御系を構築した。その後、構築した制御系の有効性をシミュレーション、実時間の実機実験で検証した。

二重振子を制御対象として、提案した構築方法を適用した。人間の操作から獲得した制御戦略、操作知識を基に、制御器を構築し、シミュレーション、実機実験で制御器の有効性を検証した。実機実験で、構築した制御器は、制御戦略に従い状態変数を段階的に制御し、二重振子の異なる特性に対応して適切な制御を行っており、提案した構築方法は、状態変数が多く、状態によって特性が異なるシス

テムに対して有効であることを確認した.

参考文献

- [1] S. Yasunobu, S. Miyamoto: Automatic Train Operation System by Predictive Fuzzy Control, Industrial Applications of Fuzzy Control (M.Sugeno ed.), North-Holland, pp. 1/18, (1985)
- [2] 安信 誠二: ファジィ工学, 昭晃堂 (1991)
- [3] M. Yamakita, K. Nonaka and K. Furuta: Swing up Control of a Double Pendulum, Proc. of the American Control Conference, pp. 2229/2233, (1993)
- [4] 梶原 宏之, 小菅 一弘, 古田 勝久: 傾斜されたレール上の二重倒立振子の位置制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 15, No. 17, pp. 873/879, (1979)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] S. Yasunobu, T. Kitajima: The Swing up Control Based on Human Experiences, Proc. of SICE Annual Conference 1998, pp. 97/98, (1998)
- [8] S. Yasunobu and T. Iwasaki: Intelligent Control of Double Pendulum Based on Human Knowledge, IFSA2005, Vol. 2, pp. 702/707, (2005)