

知的階層制御による倒立振子の振り上げと安定化

Swing-up and Stabilization Control of Inverted Pendulum by Intelligent Hierarchical Controller

上田 徹 安信 誠二
Toru Ueda Seiji Yasunobu
筑波大学 システム情報工学研究科

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

Abstract: The inverted pendulum is a SIMO(Single-Input Multiple-Output) system. In the SIMO system, it is difficult to construct by conventional controller which considering multi parameters at the same time. On the other hand, it is easy to construct by conventional controller that considering one parameter. Moreover, human can judge the state operated by priority each situation of the inverted pendulum. In this study, we propose intelligent hierarchical controller. This intelligent hierarchical controller consists of two parts. One is the controller group which has controllers of each parameter. Another is the judgment part where human knowledge was built in. The proposed controller is applied to swing-up and stabilizing control of the inverted pendulum. The effectiveness of the proposed controller was confirmed experimentally.

1 序論

倒立振子は簡単な構造をしているが、非線形を有する代表的な SIMO(Single-Input Multiple-Output) システムである。倒立振子で確立された制御法はロボットの二足歩行制御や運搬カートなどへ応用されている [1][2]。このような SIMO システムに対する制御系の構築は同時に複数の状態を制御すると共に、状況によって異なる特性に対応する必要があるため困難であることが知られている。

一方で、人間はこのようなシステムに対しても上手い操作が可能である [3]。人間は状態が多い場合は一度にすべての状態を制御するのではなく、状況に応じていくつかの状態を選択し、これらの状態に対する目標を設定し操作を行っている。

そこで本研究では SIMO システムに対して、人間の機器操作に基づいた制御系の構築方法の提案する。また提案する制御系の構築方法を倒立振子に対して適用し、実験によって有効性を検証する。

2 知的階層制御系の構築方法

本章では人間の SIMO 対象における操作を考察する。その後、考察に基づく知的階層制御系の構成、構築手順について述べる。

2.1 人間の SIMO 対象における機器操作

人間は SIMO 対象を操作する際に、最終目標を達成するために全体的な操作方針である制御戦略を考える。この制御戦略を基に人間は状況に応じて操作する状態を考え、その目標値を設定する。そして設定した目標値を追従するための各操作量を求め、それらを選択、統合して最終的な操作量とする。

このように人間は戦略的に目標を考える部分(上位層)と戦術的に目標を守るよう操作する部分(下位層)とい

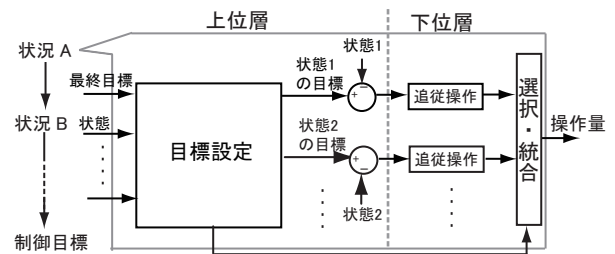


図 1: SIMO 対象における人間の機器操作

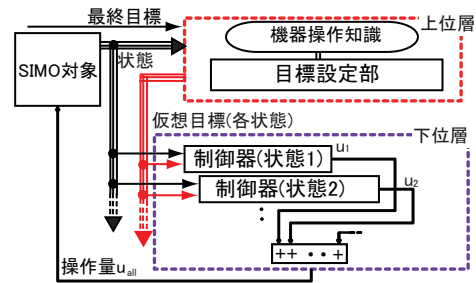


図 2: 知的階層制御系の構成

う階層的な構造を持っていると見なせる。この階層構造が SIMO システムに対して有効的に働いていると考えた。この人間の機器操作を図 1 に纏める。

2.2 知的階層制御系の構成

前節の考察を基に、知的階層制御系を構築する。図 2 は構築する知的階層制御系の全体像である。

この知的階層制御系は対象の状態を、上位層で人間の機器操作知識に基づき現在の状況で操作すべき状態を考え、それらの状態に仮想目標を設定する。上位層で設定された仮想目標を下位層の状態毎の制御器からの操作量を求め、これらの和をとった値を最終的な制御指令として対象を制御する。

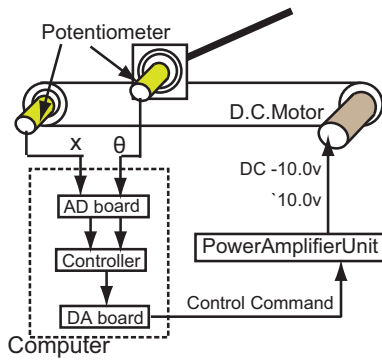


図 3: 実験装置の機器構成

2.3 構築手順

ここでは構築手順について説明する。構築手順は以下の3ステップになる。

STEP1 下位層 (状態毎の制御器) の構築

STEP2 上位層 (目標設定部) の構築

STEP3 実機実験による検証実験

3 倒立振り子への適用

本章では提案手法を倒立振り子へ適用し、構築を行う。次節で倒立振り子と制御課題を示し、以降各ステップの適用を行う。

3.1 倒立振り子

今回対象とする倒立振り子はジャパン・イー・エム社製の倒立振り子実験装置である。ポテンショメータにより振り子の角度とベルトの歯車の回転を取得し制御用 PC の A/D ボードへ送る。PC 内でベルトの移動量から台車位置を算出する。PC からの操作量は D/A ボードからアンプを通しモータへ入力する。A/D, D/A ボードは入出力レンジ $\pm 10(V)$ 、分解能 12(bit)、サンプリングタイム 10(msec) である。この実験装置を図 3 に示す。

この倒立振り子の状態は台車の位置、振り子の角度の 2つとそれらの時間変化の 4 状態である。台車の位置は中心から右向きを正とした距離、振り子の角度は鉛直上方から時計回り方向を正とした傾きとする。実験装置のパラメータを表 1 にとると、システム状態の運動方程式は次のように表される。

$$(M + m)\ddot{x} + ml \cos \theta \cdot \ddot{\theta} + F\dot{x} - ml \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2 = au \quad (1)$$

$$ml \cos \theta \cdot \ddot{x} + (J + ml^2)\ddot{\theta} + C\dot{\theta} - mgl \sin \theta = 0 \quad (2)$$

今回の制御課題は、垂下停止状態である初期状態 $(x, v, \theta, \omega) = (0, \pi, 0, 0)$ から、最終制御目標 $(x, v, \theta, \omega) = (x_{target}, 0, 0, 0)$ へ制御することである。

表 1: 実験装置のパラメータ

台車質量	$M(Kg)$
台車移動可能範囲	$L(m)$
台車位置	$x(m)$
台車速度	$v(m/sec)$
振り子質量	$m(Kg)$
振り子長さ	$l(m)$
振り子の角度	$\theta(rad)$
振り子の角速度	$\omega(rad/sec)$
慣性モーメント	$J(Kg * m^2)$
モータへの入力電圧	$u(V)$
電圧から台車に働くゲイン	$a(N/V)$
等価粘性摩擦係数	$F(Kg/sec)$
軸の粘性摩擦係数	$C(Kg * m^2/sec)$

3.2 STEP 1: 下位層の構築

本節では下位層の状態毎の制御器を構築する。今回構築する制御器にはフィードバック制御の一つである PD 制御法を用いた。

台車に対しては比例ゲイン-30.0、微分ゲイン-8.0 とした。この時の台車制御を実機実験にて行った結果を図 4 に示す。振り子に対しては比例ゲイン-20.0、微分ゲイン-4.0 とした。図 5 は目標角度を垂下状態から $\pi/10(rad)$ ずらした角度を目標としたときのシミュレーション結果である。

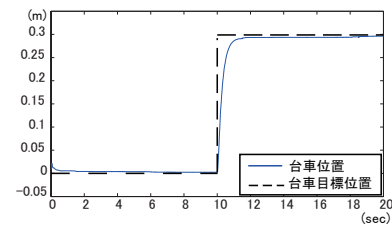


図 4: 実機実験による台車制御器の検証

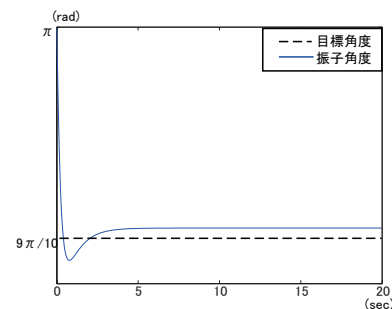


図 5: シミュレーションによる振り子制御器の検証

3.3 STEP 2:上位層の構築

本節では上位層に組み込む人間の制御戦略と目標の設定法について述べる。

3.3.1 倒立振子の制御戦略

上記の振り上げ倒立制御課題を達成させる際の人間の制御戦略は、「振子を倒立近傍まで振り上げ、倒立を維持しつつ目標となる位置まで移動させる」というものになる。つまり、大きく分けて2つの状況からなる。1つは垂下状況であり、もう1つは倒立状況である。以下から各状況の判別の方法と各状況の仮想目標の設定法について述べる。

3.3.2 状況の判別

状況の判別は振子の角度と角速度によって判断する。これらの自乗和に平方根をとったものを ϵ とすると、 $\epsilon < 0.3$ を倒立状況、それ以外を垂下状況とする。

3.3.3 垂下状況

垂下状況では振子を倒立近傍まで振り上げることを目的とする。振子を最も効率良く振り上げるためには、振子の先端が台車の下を通過する時に加振する方向に台車を操作し、それ以外では台車位置を保持することで振子のエネルギーを維持することが知られている [5]。

この操作を実現するために振子の角度が $\frac{17\pi}{18} < \theta < \frac{19\pi}{18}$ である時を振子が台車下を通過していると判断し、振子の角速度に応じた台車位置の仮想目標を設定する。振子の角速度と台車位置の仮想目標の関係 $f(\omega)$ は図6のように設した。台車速度に対する仮想目標は台車位置保持のために0とした。振子角度、角速度に対する仮想目標は現在状態と同じとすることで、振子制御器の操作量 u_1 を0にさせるように設定した。これらより台車位置、台車速度、振子角度、振子角速度の仮想目標を $(\tilde{x}_{target}, \tilde{v}_{target}, \tilde{\theta}_{target}, \tilde{\omega}_{target})$ 、加振終了時の台車位置を x_{hold} とすると、垂下状況での仮想目標設定は式(3)~(7)のようになる。

$$\tilde{v}_{target} = 0 \quad (3)$$

$$\tilde{\theta}_{target} = \theta \quad (4)$$

$$\tilde{\omega}_{target} = \omega \quad (5)$$

$$\text{if } \frac{17\pi}{18} < \theta < \frac{19\pi}{18} \quad \tilde{x}_{target} = f(\omega) \quad (6)$$

$$\text{else} \quad \tilde{x}_{target} = x_{hold} \quad (7)$$

3.3.4 倒立状況

倒立状況の特性として不安定な平衡点近傍となっている。この状況では台車の最終目標位置へ移動する機能と、倒立を安定化させる機能の2つを実行する必要がある。

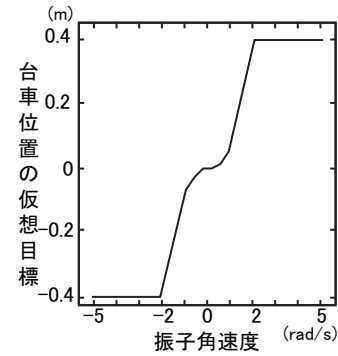


図6: 角速度応じた台車位置の仮想目標

る。この2つの機能を全ての状態から同時に実現することは困難であるが、人間は別々に考慮することで上手く倒立維持をしつつ台車を目標位置に近づけている。

位置制御機能は台車を最終目標位置へ近づけるよう働く。そのために振子の角度を台車位置の最終目標側へ傾ける。これを実現するために台車位置とその制御目標との差とその変化から振子を最大 $\frac{\pi}{10}$ (rad) 傾けるように仮想目標角度を設定する。台車制御器の出力である操作量 u_1 は台車の位置と速度に対する仮想目標を現在状態と同じとすることで0とさせる。

倒立安定化機能は振子の角度を設定した仮想目標に保つような操作を行わせる。この操作を実現するために振子の状態と振子の仮想目標との差とその変化からPD制御により振子制御器の出力である操作量 u_2 を求めさせる。これらより倒立状況での仮想目標設定は式(8)~(11)のようになる。ここで $R_{pp} = 0.34, R_{dp} = 1.4$ とする。

$$\tilde{x}_{target} = x \quad (8)$$

$$\tilde{v}_{target} = v \quad (9)$$

$$\tilde{\theta}_{target} = R_{pp} * \{(x_{target} - x) + R_{dp} * (0 - v)\} + (0 - \theta) \quad (10)$$

$$\tilde{\omega}_{target} = 0 \quad (11)$$

3.4 STEP3 実機実験による検証

今回の検証実験は倒立振子の実機を用いて行った。実機実験における倒立振子の仕様を表2に纏める。今回の検証実験条件として制御目標である台車位置を制御開始から10secまでは中心から-0.15(m)、その後は中心から0.06(m)の点に変動させた。図7~12に実験結果を示す。また、下位層における振子に対する制御器のPDゲインを、比例ゲインは-15.0、微分ゲインは-4.0へ設定した。これらから5.1(sec)間の振り上げ状況を経て、時刻9.5(sec)に制御目標を達成した。また時刻10.0(sec)での倒立目標位置変更後は5.4(sec)間の倒立状況における操作によって目標を達成した。

表 2: 実験装置の仕様

$M(Kg)$	3.117
$L(m)$	± 0.50
$m(Kg)$	0.080
$l(m)$	0.40
$J(Kg * m^2)$	$1.28 * 10^{-6}$
$a(N/V)$	11.1
$F(Kg/sec)$	23.04666
$C(Kg * m^2/sec)$	$8.111 * 10^{-4}$

3.5 考察

検証実験から垂下状況での台車に対する仮想目標の設定は、台車の移動による加振と、台車位置の保持による振子の運動エネルギーの保持を交互に繰り返すことで効率の良い振り上げを実現している。また倒立状況に遷移した後は、倒立安定化と位置制御の2つの機能によって目標位置での倒立安定化を行っている。また時刻10.0(sec)での目標の変化時には位置制御の機能が働き、倒立状況における戦略を実現している。

4 結論

本研究では、倒立振子のようなSIMOシステムに対する知的階層制御系の構築方法を提案した。提案した制御系では上位層と下位層から構成される。上位層は人間の機器操作知識を組み込み、現在状態から操作すべき状態

とそれらに対する仮想目標を設定する方法を構築した。下位層は上位層で設定した仮想目標への具体的な操作量を決定する制御器群にて構築した。提案した構築方法を倒立振子に対して適用した。検証実験からSIMOシステムの1つである倒立振子に対して、提案する知的階層制御系の構築法の有効性を確認した。

参考文献

- [1] 本城豊之, 長野明紀, 羅志偉:倒立振子のパラメータ励振原理による動歩行制御, 第26回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 103-03, pp.1-4, 2008
- [2] 戸井田直行, 古川修:倒立振子制御を応用した超コンパクト荷物運搬支援カートの研究, 交通・物流部門大会講演論文集, pp.51-52, 2004
- [3] S.Yasunobu,T.Iwasak:Siwing Up Intelligent Control of Double Inveted Pendulum Based on Human Knowledge, Proc. of SICE Annual Conference, pp.1869-1873, 2004
- [4] 山田功, 湯澤宏介, 新田浩二:近似線形化を用いた倒立振子の倒立制御, 日本 AEM 学界誌, Vol 12, No.1, pp.62-72, 2004
- [5] K. J. Åström and K. Furuta:Swinging up a pendulum by energy control, Proc. IFCA 13th Triennial World Congress, pp.37-42, 1996

連絡先

上田 徹

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

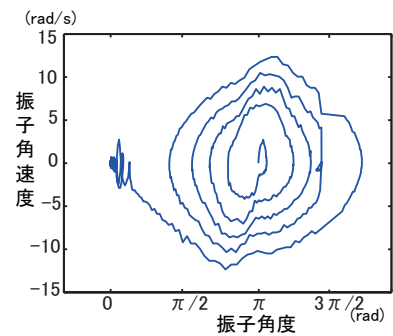
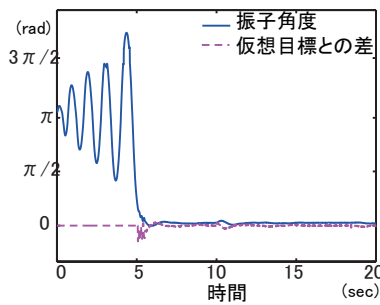
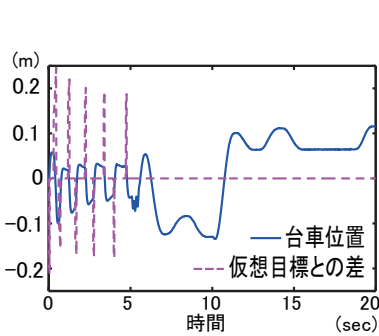


図 7: 台車位置及び仮想目標値との差 図 8: 振り角度及び仮想目標値との差

図 9: 振り:位相平面

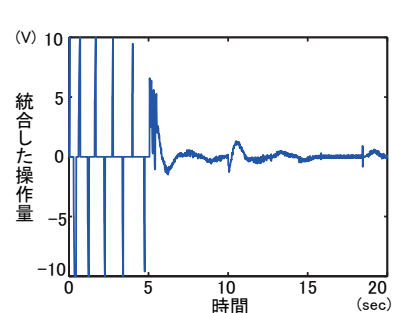
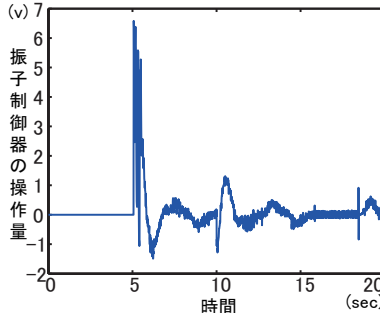
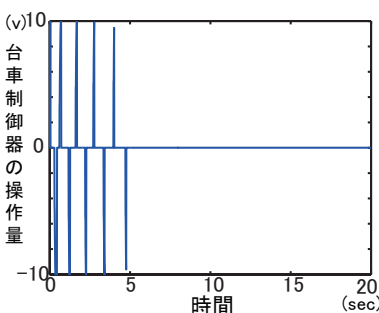


図 10: 台車制御器の操作量 u_1

図 11: 振り制御器の操作量 u_2

図 12: 統合した操作量 u_{all}