

倒立棒制御：人間と機械

外崎幸徳¹, 大平徹², 田島茂²

¹ 東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学² (株)ソニーコンピュータサイエンス研究所

概要

本論文では倒立棒の制御について人間と機械での比較を行う。人間においては物理的のみならず心理的な適度な揺らぎがより良い制御をもたらす可能性がある。機械においてはPID制御に時間遅れを取り込んだシステムの性質を報告する。

Stick Balancing: Human and Machine

Yukinori Tonosaki¹, Toru Ohira², Shigeru Tajima²

¹ Department of Computational Intelligence and Systems Science, Tokyo Institute of Technology. ² Sony Computer Science Laboratories, Inc.

Abstract

We compare the task of a stick balancing both by a human and a machine. It is found that an appropriate level of physical and/or psychological noise may lead to better balancing by humans. We also report the architecture and behavior of a PID balancing system with delay.

1 はじめに

倒立棒の制御は工学制御 [1] としては多くの研究が積み重ねられているトピックである [2]。しかし、人間が指先や手のひらで倒立棒を制御しようとするとき、必ずしも工学的な立場や知見からはとらえきれないような、要素が絡み合っている。人間の反応時間は遅く、また予測も積極的に使われているが、制御の精度は機械のように高くはない。本論文ではこの単純なタスクにおいても人間と機械の制御の間に類似や相違点について、それぞれにおける実験の試行を紹介することで考察する。どちらの実験もまだ完了はしていないが、人間と機械の制御の関係についての問題意識のひとつの起点として現状報告をおこなう。

2 人間の倒立棒制御

人間の倒立棒の制御においては反応遅れや予測などさまざまな要素が関与していると考えられる [3]。また、既に報告したように棒のバランスをとる手と反対の手で物をふってもらおうとより良い制御ができ

る可能性が示された [4]。この方向で追試をおこなった結果、制御中に足をゆらしてもらったりしても同様の効果があることがわかってきた。一つの仮説としては適切な揺らぎやノイズをもたらすことが制御に有効に働くと考えられる。それでは、この揺らぎやノイズは物理的なものであるのかどうかという問題がある。そこで、今度は被験者に実際にはバランスをとりながら足は揺らさないが、そうしていると想像してもらった実験をおこなった。すると、結果は実際に揺らした場合と似たような効果が得られる場合があることがわかった [5]。(図1) すなわち揺らぎは意識の上でおいても有効であるという可能性である。ここでの仮説は制御動作に対して適度なノイズをくわえることで遅れが存在する、フィードバックに頼りすぎることやそれをさけることがよりよい制御につながるのではないかと構築できる。この方向の実験については現在継続中であるが、人間においてはこのような単純な制御においても様々な要因が複雑に関連していることを示している。

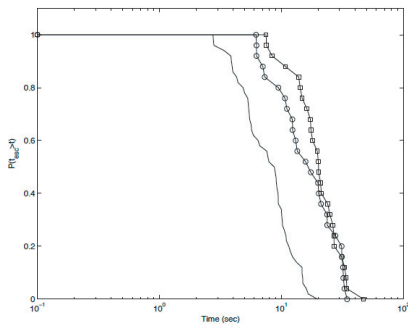


図 1: 人間による倒立棒の制御. 棒が倒れるまでの時間の累積確率分布を示した. 足を揺らした場合(丸)と想像した場合(四角)でそうしない場合(実線)より長い時間制御ができていないことを示す実験結果.

3 工学的再現実験

人間が手のひらを使ってスティックバランスを実施する場合, 手は 3 次元的自由度を有するが, これを工学的に再現するためには次元を制限してしまうのが容易である. そこで, この実験のため, よく知られている倒立振り子を製作した. この実験では, 倒立振り子は一次元の自由度のみをもち, 従って制御系もこれに対応すればよい. 図 2 にこのシステムのブロック図と実際の装置の写真を示す. 倒立振り子が移動

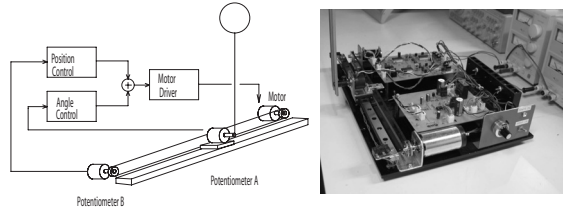


図 2: 倒立棒制御システムのブロック図 と写真

するレールの有効長は 280 mm, 倒立振り子の長さは 390 mmとした. 振り子の支点にはポテンショメータを取り付け, 振り子の鉛直線からの角度を検出する. また, レール上のスライダの移動には DC サーボモータとタイミングベルトを用い, スライダの位置検出のために, 多回転ポテンショメータを用いた. これは当初, 倒立振り子の倒立制御と, その倒立点の制御の両方を実現しようと目論見たためである. 従って, 制御回路も二系統用意され, 角度および位置の誤差信号は最終的には加算され, DC サーボモータのドライバに加えられる. モータドライバを始め,

すべての制御回路は OP アンプを使用したアナログ回路で設計した.

3.1 実験装置の制御

初期実験では, スライダの位置の制御(この目標値は調整可能な別のポテンショメータで与える)と, 振り子の倒立制御を別々に行い, それぞれ制御系の定数等が確定したところで, 両方を動作させる予定で進め, どちらも極く一般的な PID 制御である. システムの制御系のブロック図を図 3 に示す. 図より,

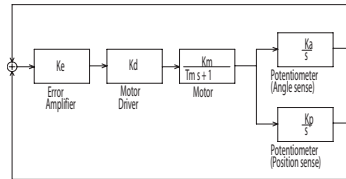


図 3: PID 制御系のブロック図

伝達関数は 2 次系となり, 本来ならば, 各要素の物理特性(ゲイン, 位相特性およびこれらを決める要素となる質量, 慣性質量)を細かく測定し, 伝達特性を計算しながら目標とする制御特性となるように設計すべきであるが, 今回は比例制御ループによる動作を実験的に決め, それに対して積分ループによる動作を序序に加算, さらに微分ループを加えるというように実験的に決定していった. これは, 比例制御ループのみによる制御ループではシステムは一次系になり, この場合オープンループのゲインに関わらずシステムは安定であることが分かっており(これについては OP アンプのオープン特性とボルテージフォロワ - の関係と同じ)実設計上容易だからである. この状態に位置制御を加えていくことでシステムは 2 次系の特性をもち始め, 漸近安定にすることもハンチングを発生させることも, 設定定数および補償回路次第である.

3.2 実験装置の動作

倒立振り子の倒立には, 積分ループが不可欠で, これは倒立点(および, 通常振り子のように錘が中心点の鉛直下方)においてのみ左右への誤差の平均値がゼロになるからであり, 逆に, これがゼロになるように制御すれば振り子は倒立する.(微分ループは伝達関数の観点からは位相補償と理解されるが, 動作的には積分ループで遅くなった応答のある部分の最高速化と考えられる.)一方, 倒立点の制御(つまり

スライダの位置)に関しては、倒立振り子を倒立させた状態で、極くわずか加え、いわば倒立振り子をだましなが、所定の位置に倒立させようと考えていた。これがレールの有効長を 280mm 程度と短くした理由であるが、実際には、スライダのを安定させる負帰還ループは、倒立振り子にとっては正帰還ループとなってしまう良好な動作が得られないことが分かった。つまり、スライダの位置制御が効果的になる程度に誤差信号を増やしていくと、倒立振り子はハンチングを始めてしまい、安定にならない。従って、実験ではスライダの位置制御は切っしてしまい、倒立振り子の角度制御のみとした。このため倒立位置は特定できず、280mm では実用的には不足である。この解決のためには十分長いレールとするか、回転可能な腕木の先端で振り子を倒立させるようなシステムが適当である。このことより、人間によるスティックバランスも(高さ方向の制御を制限されると)ある特定の位置を漸近安定的に維持したまま実現するのは不可能と考えられる。

3.3 デイレイによる影響

制御系にデイレイを導入すると不安定になることは原理的に容易に理解され、実用的な制御回路で意識的に制御信号にデイレイを導入することは通常行わない。しかし、スティックバランスや倒立振り子の場合、漸近安定のみを安定と考えると問題を把握しきれない。漸近安定を目標とする制御回路の身近なものとしてはビデオテープレコーダのヘッドドラムシリンダの制御があるが、この場合モータが特定角速度で回転させ、ある外部信号に位相同期させて回転するのが必須条件である。一方、人間のスティックバランスでは、漸近安定が原理的に不可能と考えられるだけでなく、もし漸近安定が実現してしまったならば、見ていて面白くない。(工学的な見地からするとある一点で漸近安定となるスティックバランスを実現する名人がいるならば、非常に大きな興味があるだろう。)即ちスティックバランスのようなものに対しては“倒れなければよし”と考えるように安定性を広く捕らえるべきで、デイレイを導入しハンチングが始まったとしても、それが適当な範囲内であればよしとする立場である[6]。また不安定になったシステムを再度、広義安定にできないかという興味ある問題もある。

3.4 デイレイ制御装置

このようなデイレイを発生させるために図4のような構成の装置を製作した。原理的にはいたって簡

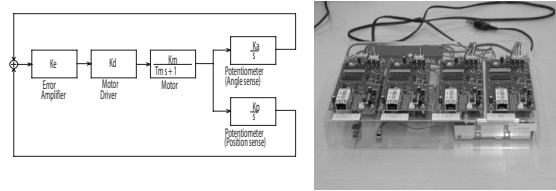


図4: デイレイ制御システムのブロック図と写真

単で、入力信号を AD 変換し、これをメモリーに蓄え、一定デイレイ後にこの内容を読み出し DA 変換して出力するというものである。現在のサンプリング周期は 1 msec で、最大約 4 秒までのデイレイを加えることができる。デイレイ値は外部の PC よりイーサネットを使用して設定するようにした。制御回路にデイレイを加える場所としては、すべての誤差情報が加算された、サーボモータドライバの直前以外に、比例ループ部分や積分、微分ループもあり得るので、全く同一のものを 4 系統製作した。サンプリング周期は、システムの制御帯域が高々十数ヘルツと予想されたので、これより十分速くするというで決定した。最大デイレイ時間は入手可能なメモリーの容量で決まってしまったがこれで十分である。

3.5 デイレイによる効果

今回試作した倒立振り子の制御系にデイレイを導入し、その時の振り子の動作をデイレイのない時と比較した。この測定ではシステムに正弦波を重畳し、固有周波数(ハンチング周波数)付近での応答を観測した。図5はデイレイが 0, 1, 5, 10 msec としたときの、特性¹と位相差とで、遅れが無い場合は、9.5Hz 付近に 3 db 程度、遅れを入れた場合は 5.5Hz 付近で 10 db 程度のピークが認められる。後者ではピーク値の増加が見られるが、システム自体はハンチング(発振)には至っていない。

また、図6ではデイレイが 5 msec でハンチングが起きていない時と、15 msec で発振とした時の入力周波数 2Hz の時の入力と応答周波数を比較し示したもので、発振の場合には入力周波数とは異なる発振が開始したことが分かる。発振をしている 15 msec

¹通常の応答特性関数とはピークの存在の意味で関連するが、まったく同じ関数の計測ではない。

のディレイ値のまま、入力周波数を高くしてゆくと、システムの発振周波数 4Hz 程度において入力にロックされ、この状態は概略 10Hz 程度まで保持されている。これは信号ディレイが（ウィーンブリッジ等の発振回路と同様）発振のために位相遅れを作り出し、固有周波数による発振を誘起したことを表す。また、ある範囲にわたり、システムの発振周波数が応答特性測定の入力信号にロックするのは、一般的な LC 発振器の周波数ロック動作に相当する。

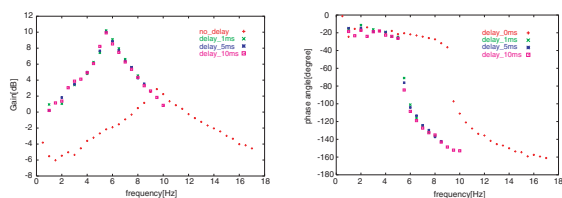


図 5: ディレイを変化させた時のシステムのゲイン特性と位相差の図。

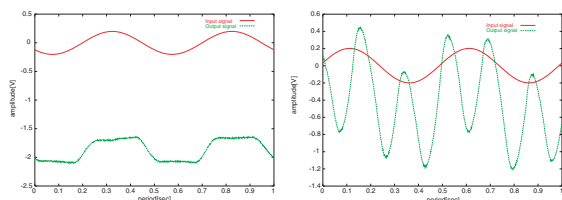


図 6: 入力周波数が 2Hz の時の入力と応答周波数をディレイが 5 msec (左) と 15 msec (右) で比較示した図。

今回の実験では、ハンチングの平均レベルを検出し、これを使用してシステムのゲインに対して負帰還をかけ、システムの発振レベルをある値以下に押さえ込むということまで至らなかった。しかし全く同様の動作はウィーンブリッジにおいて実現されており、ディレイが存在し、システムがハンチングを始める状況においても振り子を倒さずに保つことが可能と考えられる。これを人間のスティックバランスと比較すると、人間の制御系に存在するディレイが発振誘起要素となっており、一方人間の手の動作範囲が手の実際の長さに対して十分短い範囲にとどまっているのは、ゲインに対する負帰還ループの存在を想起させる。

4 まとめ

倒壊しなければ安定という風に考えると、ハンチングが発生しても、それを一時的にせよ小さくすることができればいいであろう。このためにハンチングが発生したら（ハンチング周期はあらかじめ分かっている - 実験で測定してある）ので、これと同周期の外部信号をハンチングが減少するまで加えて見ようというのがアイデアである。同周期の誤差信号を加えるためには、ハンチングの種となる誤差を検出せねばならず、ハンチング半周期もしくは一周期の操作遅れが発生する。従って、ハンチング発生 - ハンチング抑制 - ハンチング発生 という状況が予想されるが、それでもハンチングが増加しつづけ、制御不能にならなければ安定と考える訳である。人間による制御の実験などからもこのようなプロセスは起きているのではないかと考える。しかし、人間で見られたように適切なノイズを加えることで機械においてもより良い倒立棒制御のつながるのかはまだ探求をしておらず、今後の重要な課題である。

参考文献

- [1] J. J. D'Azzo, *Feedback Control System Analysis and Synthesis* (McGraw-Hill, New York, 1966).
- [2] 藪野浩司: 『工学のための非線形解析入門』(サイエンス社, 2004) .
- [3] J. L. Cabrera and J. G. Milton, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 158702 (2002).
- [4] T. Hosaka and T. Ohira, "Delayed Random Walks and Control," in *Flow Dynamics: The second international conference on flow dynamics*, edited by M. Tokuyama and S. Maruyama, AIP Conference Proceedings 832, American Institute of Physics, New York, 2006, pp. 487-491.
- [5] J. G. Milton, et.al., *Bull. of the APS* (March Meeting 2006) **51**, 1529 (2006).
- [6] J. La Salle, and S. Lefschetz, *Stability by Liapunov's Direct method with applications* (Academic press, London, 1961).