

# 振り子の手動制御の学習過程

## A Learning Process on the Manual Control of Pendulum

陸翔杰\*, 猪岡 光\*, 国分 振\*

Xiangjie Lu \*, Hikaru Inooka\*, Osamu Kokubun \*

\*東北大学大学院情報科学研究科

\*Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

キーワード : 振り子 (Pendulum), 手動制御 (Manual Control), 学習過程 (Learning Process),  
振り上げ (Swing up), 位置制御 (Position Control)

連絡先 : 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院 情報科学研究科 猪岡研究室  
陸翔杰, Tel.: (022)217-7021, Fax.: (022)217-7019, E-mail: lu@control.is.tohoku.ac.jp

### 1. 緒言

最近,自動車の組み立てなどの分野においてシステムの自動化が行われている。しかし,複雑な制御が要求される場合には,熟練した人間オペレータによる手動制御が必要となっている。これは,人間オペレータのもつ認識,識別,判断及び適応などの高度な制御能力を機械に組み込むことが困難なためである。

そこで,システムの自動化をさらに進めるためには,人間オペレータの高度な制御能力を解明することが必要である。従来手動制御系における人間オペレータの学習特性に関する研究が数多く行われている。これらは,大別して,試行時間や成功率などの学習曲線の形状<sup>1)</sup>,人間伝達関数のモデル推移<sup>2)</sup>などの面から解析されてきた。

しかし,従来の手動制御系における人間の学習特性の解析においては,人間に提示する情報を変えた場合,制御対象をどのように把握し,また制御対象のどの情報を優先的に取りこむか,といっ

た解析はまだ殆ど行われていないと思われる。そこで本研究では,人間の制御特性は,制御対象に対する認識,判断から操作量を決定し操作するという応答過程を繰り返して学習することにより形成されると仮定し,人間に提示する情報が分かった場合,人間の学習に影響があるか,そして人間は提示される情報のどの部分を優先に利用しているかについて,試行を繰り返して学習する学習過程において分析する。

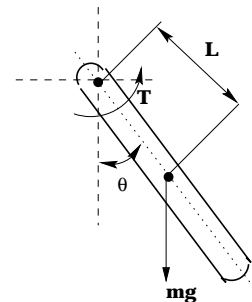


Fig. 1 垂直面振り子のモデル

## 2. 運動方程式

ここでは、Fig 1で示すような振り子に外部より加振トルクが作用する場合の運動方程式を考える。この場合の振り子に対するモーメントについての運動方程式は以下ようになる。

$$\ddot{\theta} + \frac{C}{I}\dot{\theta} + \frac{mgl}{I}\sin\theta = \frac{T}{I} \quad (1)$$

ここで $I$ は振り子の慣性モーメント、 $\theta$ は振り子の回転角、 $m$ は振り子の質量、 $l$ は回転中心から重心までの長さ、 $T$ は外部加振トルク、 $C$ は角速度に比例する粘性減衰係数である。また

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

である。ここで、

$$\frac{g}{l} = \omega^2$$

$$\tau = \omega t$$

で置き換え、さらに次の諸量を導入すると

$$\alpha = \frac{T}{\omega^2 I}$$

$$2\zeta = \frac{C}{\omega I} = \frac{C}{\sqrt{mglI}}$$

方程式(1)式は以下のように無次元化された運動方程式となる。

$$\ddot{\theta}_\tau + 2\zeta\dot{\theta}_\tau + \sin\theta_\tau = \alpha \quad (2)$$

但し

- $\tau$  : 無次元化時間
- $\omega$  : 角振動数
- $\zeta$  : 粘性係数
- $\alpha$  : 加振トルク,

である。

## 3. 実験装置と方法

### 3.1 装置

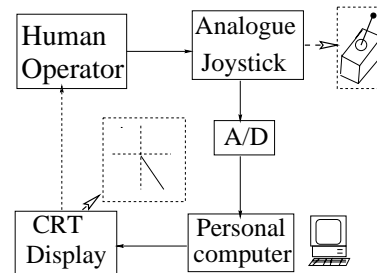


Fig. 2 シミュレータの構成

本報告で行った実験で使用した手動制御系の実験装置の概略図をFig 2に示す。被験者はポテンシオメータを用いたアナログジョイスティックを操作して、振り子に加振トルク $\alpha$ を発生させ、振り子を倒立させる制御を行う。その操作量は12ビットの分解能を持つA/Dコンバータを経て、パーソナルコンピュータに取り入れられる。そして、ジョイスティックの操作量に対応するトルクを運動方程式(2)式に代入し、ルンゲンクッタ法を用いて実時間で数値計算を行う。数値計算の刻み幅は0.01とした。計算された振り子の位置はCRTディスプレイ上に表される。

被験者はディスプレイ上の振り子の動きを観察しながらジョイスティックを操作し、振り子を振り上げて、倒立点で静止させる位置制御を試みる。倒立制御成功の条件は以下のように設定した。

$$\begin{cases} 178 \leq \theta \leq 182 \text{ [deg]} \\ -2 \leq \dot{\theta} \leq 2 \text{ [deg/s]} \end{cases}$$

### 3.2 実験方法

全くの初心者である被験者を対象に、角振動数は0.3である垂直面振り子が、初期角度 $\theta=0$ [rad]まで静止している状態から、目標角度 $\pi$ [rad]まで振り子を振り上げて静止させる操作を繰り返し練習を行った。ここで、振り子は、(2)式の運動方程式

に、パラメータとして角振動数 $\omega = 0.3$ 、粘性係数 $\zeta = 0$ として、運動方程式が解かれる。振り子に加えられる加振トルクの最大値は10としている、この値のトルクは一回で振り子を倒立点まで振り上げることができる。被験者にはできるだけ短時間で制御を行うように指示した。一回の試行の制限時間は60秒とした。また試行中に集中してもらうため、疲労や飽きを考慮して、4回の試行を1セットとして、1セット毎に1分の休憩時間を設けた。被験者は上記のセットを4回、計16回の試行を行う。

ここで、本実験は振り子の倒立操作における人間の手動制御の学習過程の中で、制御対象のどのような特徴を把握しているかを調べるため、Fig. 3で示すようにCRTで被験者に表示する振り子を

A:振り子全体を表示

B:振り子の二分の一を表示

C:振り子の四分の一を表示

D:振り子の先端と目標位置との差 $d$ だけを表示

の4つの場合に分けて、A、B、C、Dの順で4人の被験者に実験を行ってもらった(実験1)。

また表示順番が違う時、同じ結果が得られるかどうかを調べるために、他に3人の被験者を対象にしてそれぞれ以下のような順番で実験を行った(実験2)。

被験者1: B → A

被験者2: C → A

被験者3: D → A

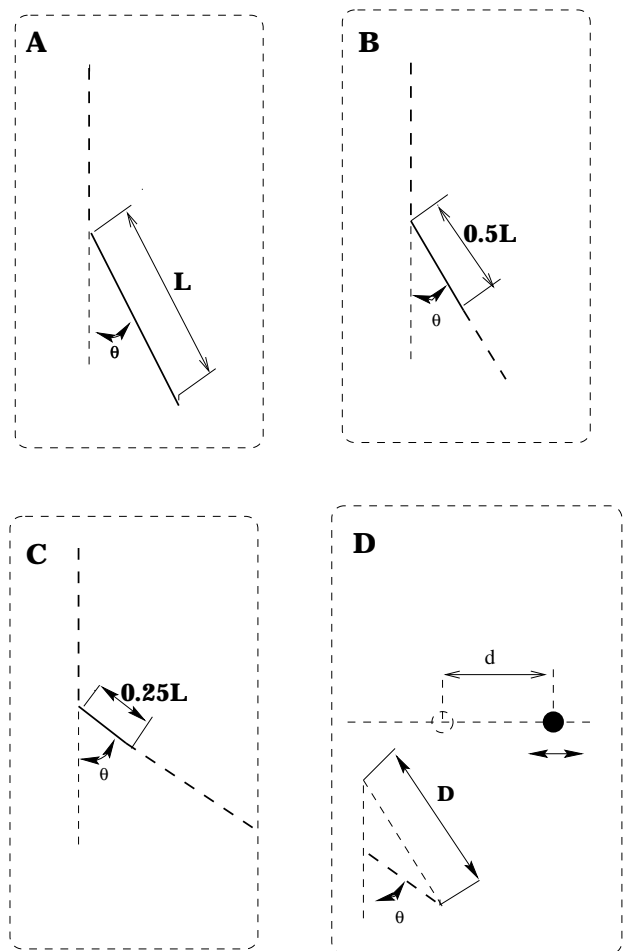


Fig. 3 被験者に提示する振り子

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 学習過程

ここでは、実験1を行ったある被験者の学習過程を説明する。Fig. 4~Fig. 6は被験者aを対象に行った倒立制御の実験結果の、成功例である(提示法はA)。Fig. 4は実験の初期段階の成功例、Fig. 5は実験の中期段階の成功例、Fig. 6は実験の後期段階で短い所要時間で成功した一例である。

Fig. 4~Fig. 6より、本実験で扱ったシステムの場合、最短時間で振り子を倒立点まで振り上げて、静止させるには、オペレータは $\theta = 0$ で静止している振り子にトルクを加え、一気に振り子を倒立点近傍まで振り子を制御し、その後逆方向に

トルクを切り替えて、振り子の角速度速度を減少させる必要があることはわかる。そのトルクの切り替え点は試行を短くするための重要なポイントになっていることが分かった。このことは小林ら<sup>3)</sup>が行った振り子の運動に対する理論的な分析結果、即ちある加振トルクで振り子を倒立点で最短時間で振り上げる時には最短経路が存在するということと一致していると考えられる。

## 4.2 提示する情報の違いによる影響

Fig. 7~Fig. 10はある被験者が実験1を行った結果より得られた成功までの時間、一回目のトルク切り替える点の振り子の角度、及び角速度と、試行回数との関係図である。

Fig. 7は提示法Aの時の実験結果である。その結果図から分かるように、この被験者は最初、振り子の運動特徴を把握していないため、振り子を目標位置まで振り上げて静止させるのに約40秒かかっているが、試行回数が増えると振り子の特徴を徐々に把握していき、成功までに要する時間は短くなっている。同様に一回目のトルク切り替え時の振り子の角度と角速度についても、最初の時は大きなバラツキが見られたが、試行回数が増えるに従ってこれらの値はあまり変化しなくなった。

Fig. 8は提示法Bの実験結果である。この被験者は提示法Aの実験を行った時点ですでに振り子の特性を学習しているため、提示される振り子の長さが半分になっても、試行回数1回目から短時間で振り子を倒立点に振り上げ、静止させることが可能であった。一回目のトルク切り替えポイントにおける振り子の振り上げ角度と振り上げ角速度もある一定の値となっている。

Fig. 9は提示法Cの実験結果である。Fig. 8と比べて、試行回数が1~5回までの試行時間はある程度長くなったが、それは提示された振り子の長さ

が四分の一になったため角度と角速度の情報が分かりにくくなっていったためと思われる。しかし提示法A、提示法Bでの学習効果があるため、最終的に提示法Cで得られた最短試行時間は提示法Aや提示法Bで得られた最短時間とほぼ同じ値となった。

Fig. 10は提示法Dの実験結果である。提示法Dは今までの提示法とは大きく異なっているが、提示法A、B、Cで得られた制御特性と比較して大きな違いは見られなかった。

Fig. 7~Fig. 10のいずれの図も試行時間と試行回数との関係は右下がりの傾向となっている、この被験者は試行回数を増やすごとに学習の効果が現れ、振り子の運動の特徴を把握できるようになっていることがわかる。また試行時間にバラツキがあるが、これは被験者が出来るだけ試行時間を短くなるようなトルク切り替え点を試行錯誤で探索しているためであると考えられる。

4人の被験者に対して、実験1より得られたトルクの切り替え点での角度及び角速度の平均を、Table 1、Table 2に示す。これらの表より、トルクの切り替え点での角度及び角速度は、提示法が変わっても被験者毎にほぼ一定の値となっていることがわかる。

またこれらの表より、一回目のトルク切り替え時の振り子の角度の標準偏差は角速度の標準偏差より大きいことから、一回目のトルクの切り替え点の振り子の角度の変動は、角速度の変動より大きいであると思われる。それは人間が最短時間で目的状態が達成できるよう、最適なトルクの切り替え角度を積極的にさがしていることを意味していると思われる。つまり、人間は最短時間で目的の制御を成功するように最短経路を探す時に、振り子の振り上げ速度より、振り子の振り上げ角度を優先的に考慮していることが予測される。

### 4.3 提示法の順番の影響

学習を行う過程が異なる場合にも同じことが見られるかどうかを調べるために、3人の被験者に実験2を行った。結果をFig. 11～Fig. 13に示す。Fig. 11は被験者1に先に振り子の半分の長さ提示して実験を行った後に、振り子の全長を提示して実験を行った結果である。先に振り子の半分の長さを提示した実験は、1, 2回目は制限時間を超過してしまい試行が失敗したが、その後は振り子を倒立点まで振り上げ、静止させることが出来た。Fig. 12は被験者2に振り子の四分の一の長さを提示して実験を行った後に、振り子の全長を提示し、実験を行った結果である。Fig. 13は被験者3に振り子の先端と目標位置との差を提示し、実験を行った後に、振り子の全長を提示して、実験を行った結果である。Fig. 11～Fig. 13より、提示法の順番は変わったが、得られた実験結果はFig. 7～Fig. 10と同じ傾向を示している。それは学習過程が異なっても、実験結果には大きい影響は表れないことを示されている。

## 5. 結言

本研究では、手動制御で振り子を倒立点で静止させる実験を行い、人間が最短時間で目的の手動制御を成功させるためのトルクの切り替え点について検討した。その結果、人間に提示する情報が変わっても、人間にリアルタイムで振り子の振り上げ角度が提示されていれば、最短時間で目的の制御を行う最適な切り替え点が探索されることが確認された。また本報告で取り上げた垂直面内の振り子の位置制御において、リアルタイムで振り子の位置情報と速度情報を与えられた場合には、人間は優先的に振り子の位置情報を利用して、制御動作を行っていると思われる。

今後の課題としては、振り子が目標位置近傍に来た際に、人間が振り子を静止させるための微小動作の解析を課題にしたい。

Table 1 4人の被験者の一回目のトルク切り替え点における振り上げ角度[deg]の平均(標準偏差)

	A	B	C	D
被験者a	132.37 (14.89)	138.08 (6.78)	137.50 (8.57)	135.27 (8.1)
被験者b	103.99 (28.15)	99.87 (16.04)	107.16 (11.79)	95.11 (15.99)
被験者c	141.47 (6.20)	139.96 (5.75)	145.06 (6.03)	143.26 (5.71)
被験者d	119.93 (14.17)	132.16 (9.08)	137.19 (10.65)	141.87 (6.83)

Table 2 4人の被験者の一回目のトルク切り替え点における振り上げ角速度[rad/s]の平均(標準偏差)

	A	B	C	D
被験者a	0.1284 (0.0064)	0.1297 (0.0038)	0.1300 (0.0051)	0.1287 (0.0043)
被験者b	0.1196 (0.0097)	0.1200 (0.0015)	0.1206 (0.0015)	0.1195 (0.0013)
被験者c	0.1320 (0.0037)	0.1312 (0.0044)	0.1343 (0.0041)	0.1331 (0.0038)
被験者d	0.1237 (0.0039)	0.1273 (0.0039)	0.1301 (0.0052)	0.1323 (0.0044)

## 参考文献

- 1) 明石 一, 橋本 寛:機械系における制御者の学習特性, 人間工学, 8(6), 285/292, (1972)
- 2) 橋本 孝之, 明石 一, 原 敬:学習記憶過程及び学習過程における制御者のモデルパラメータの推移に関する考察, 人間工学, 10(2), 49/54 (1974)
- 3) 小林 博巳:振り子の振り上げ運動と制御, 東北大学工学部機械学科卒業論文, (1983)
- 4) 山本隆司: 位置決め制御動作の習熟過程, 東北大学修士論文, (1997)

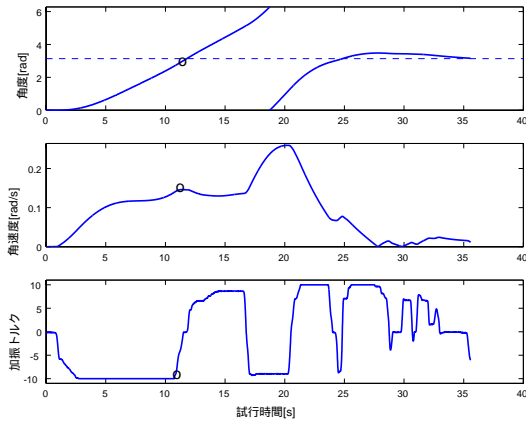


Fig. 4 実験の初期段階( 印トルク切り替え点)

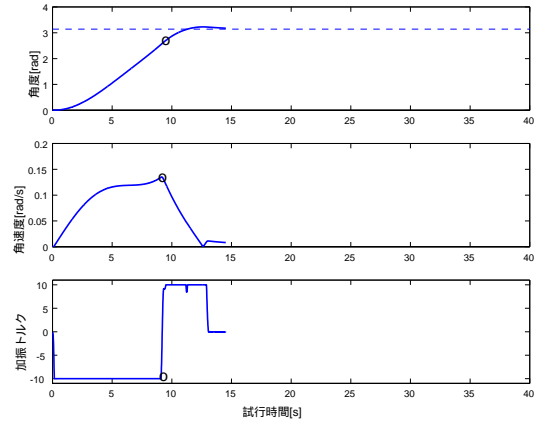


Fig. 6 実験の後期段階( 印トルク切り替え点)

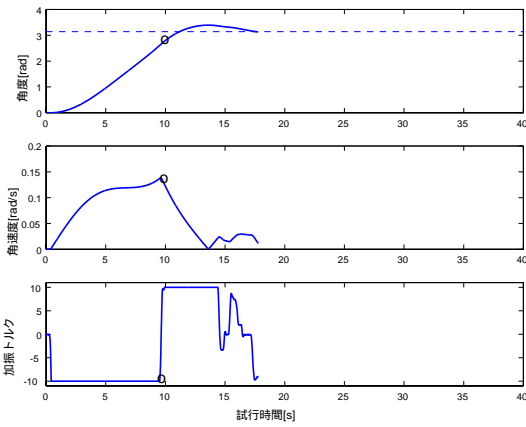


Fig. 5 実験の中期段階( 印トルク切り替え点)

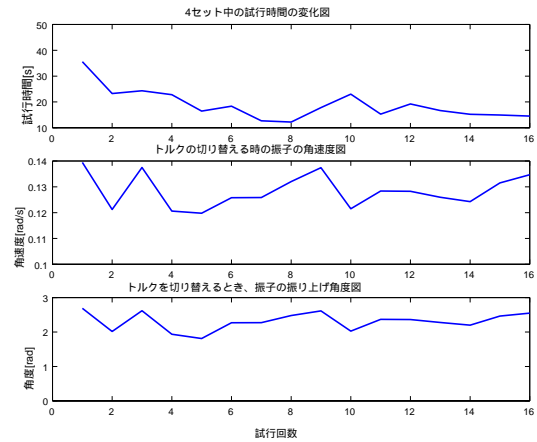


Fig. 7 振り子の全長を提示した時(提示法A)

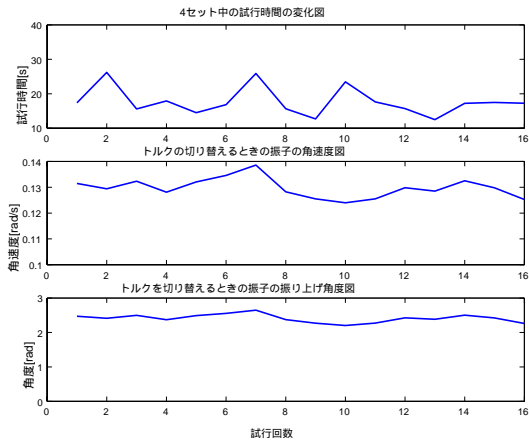


Fig. 8 振り子の $\frac{1}{2}$ の長さを提示した時(提示法B)

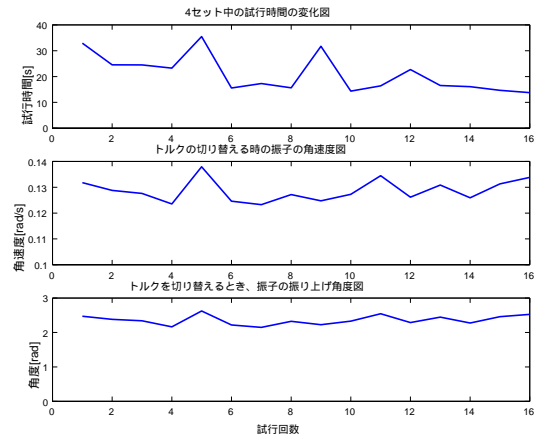


Fig. 10 振り子の先端と目標位置までとの差を提示した時(提示法D)

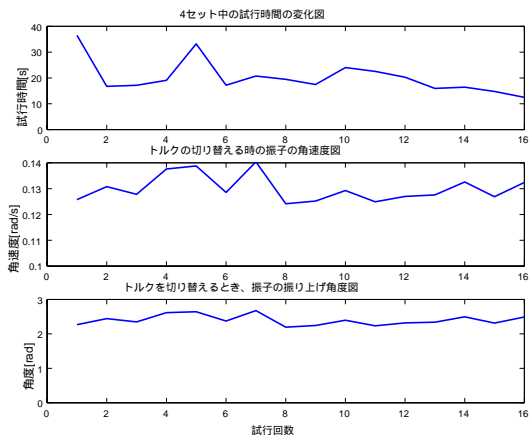


Fig. 9 振り子の $\frac{1}{4}$ の長さを提示した時(提示法C)

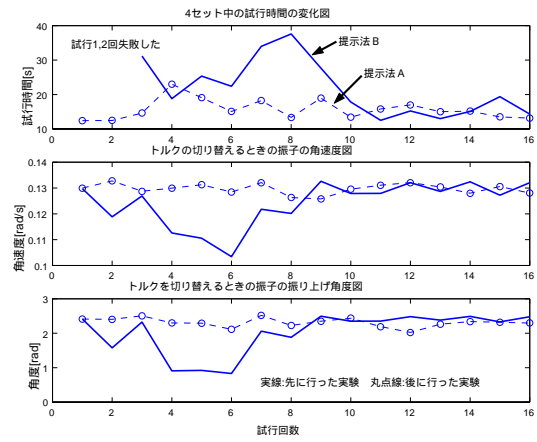


Fig. 11 被験者1の実験結果

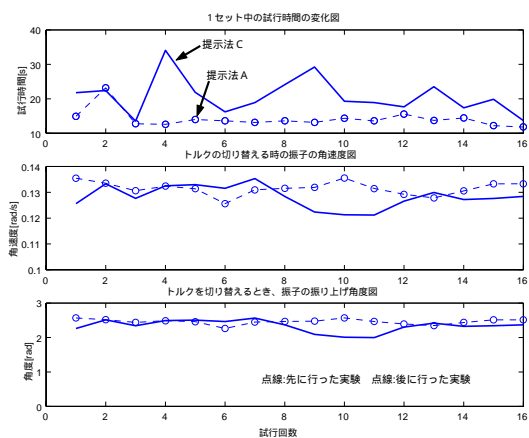


Fig. 12 被験者2の実験結果

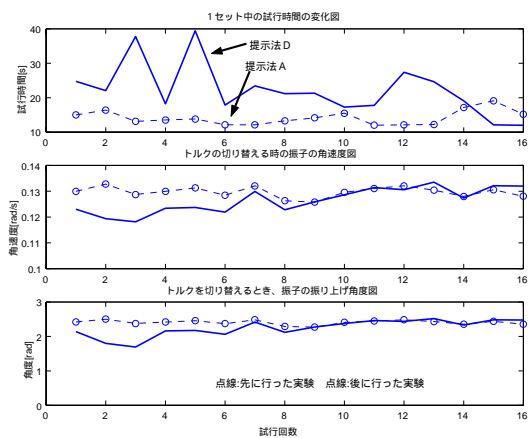


Fig. 13 被験者3の実験結果