

# 性格に依存したヒトの運動制御モデルの開発

青木優<sup>1)</sup>・山田悟史<sup>1)</sup>

## Development of a Human Motion Control Model depending on characters

Masaru Aoki, Satoshi Yamada

### Abstract

We have developed a simple human motion control model to investigate how human characters are related to the motion control. So far the model had been built based on the control theory, assuming that the human characters are able to be classified in bold type and careful type, we have developed the model based on the mass-spring-damper model for each of the characters. As a result, the model for the bold type was represented by damped oscillation model and the model for the careful type was represented by overdamped model.

**Keywords:** human motion control, mass-spring-damper model

### 1. 緒言

輪投げ遊びを例にとると、最初は目標の棒に輪が入らなくても、学習をしながらトライしていくうちに棒に輪が入ようになることは誰もが経験することである。このようなヒトの運動制御機能は、性格によって熟練していく様子、つまり、性格による運動制御特性が異なると考えられる。

1940年代より制御工学の分野が発展するにしたがって、ヒトの運動制御特性を解析する為、ヒトをブラックボックスと捉え、その入力と出力とからヒトの運動制御特性を制御工学の観点から解析しようとする試みが、1947年のTustin<sup>1)</sup>による研究を皮切りに、複数の研究者によって行われてきた<sup>2-6)</sup>。しかし、ヒトの性格と運動制御特性の関連については、これまでに研究されて来なかった。本研究では、運動制御モデルをバネ・ダンパ・モデルを基に開発を試みる。

バネ・ダンパ・モデルは、図1のように質量 $m$ の重り、バネ定数 $k$ のバネ、減衰係数 $c$ のダンパによって構成される。重りを左右どちらかに移動してから離すと、バネ定数 $k$ と減

衰係数 $c$ の大小関係により、原点を中心に左右に振動しながら静止する減衰振動、左右に振動せずに原点に向かって徐々に速度を落としていく過減衰など、場合分けが可能である。この原点に向かって収束運動する様子は、ヒトの運動制御においても似たような様相を見かけることがある。輪投げで、一投目の輪が手前に外れた場合を例にとってみる。輪が入るまでの様子を見ると、手前から徐々に棒に近づきついには棒に入るタイプ、思い切った棒に寄せようと棒の向こう側に行き過ぎたり手前に戻ったりを繰り返しながら徐々に棒に近づきついには棒に入るタイプとがあり、ここでは前者を「慎重なタイプ」、後者を「大胆なタイプ」と呼ぶことにする。この大胆なタ

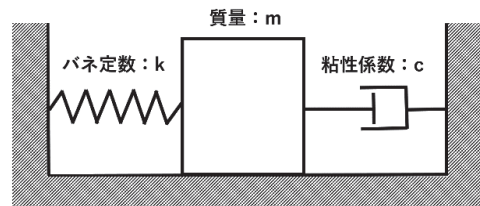


図1. バネ・ダンパ・モデル

<sup>1)</sup> 静岡産業大学経営学部  
〒438-0043 静岡県磐田市大原1572-1

<sup>1)</sup> School of Management, Shizuoka Sangyo University  
1572-1, Owara, Iwata-shi, Shizuoka

イブはバネ-ダンパ・モデルの減衰振動モデル、慎重なタイプは過減衰モデルが示す様子によく似ている。

今回の研究の目的は、ヒトの運動制御特性に「大胆なタイプ」と「慎重なタイプ」の2つがあると仮定し、最適化アルゴリズムにより作成した大胆なタイプと慎重なタイプの仮想データを用いて、ヒトの運動制御特性をバネ-ダンパ・モデルにより説明する方法の開発を試みることである。

## II. 研究方法

本研究では、ヒトの性格の違いによる運動制御の様子の違いを調べる為、バネ-ダンパ・モデルを基にヒトの運動制御モデルを作成し、その違いを解析する。そこで本章では、最初にバネ-ダンパ・モデルとその解について解説する。次にそのモデルの作成方法をチェックする為の仮想運動制御データの作成方法について解説する。仮想運動制御データの作成には最適化アルゴリズムを用いるものとし、具体的には、大胆なタイプについては改良二分法を、そして慎重なタイプについては最急降下法を用いる。

### 1. バネ-ダンパ・モデル

図1に示すように、質量 $m$ の重りが、バネ定数 $k$ のバネと減衰係数 $c$ のダンパに繋がっている。時間 $t$ に於ける重りの位置を $x(t)$ と表す時、 $x(t)$ の満たす運動方程式は次のような定数係数2階線形同次微分方程式となる。

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -kx(t) - c \frac{dx(t)}{dt} \quad (1)$$

ここで、 $\gamma = c/2m$ ,  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ とおくと、次のような微分方程式を得る。

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(t) = 0 \quad (2)$$

$x(t) = \exp(\lambda t)$ と置いて、(2)式に代入すると、次の特性方程式を得る。

$$\lambda^2 + 2\gamma\lambda + \omega_0^2 = 0 \quad (3)$$

この特性方程式の判別式 $D$ は、 $D/4 = \gamma^2 - \omega_0^2$ であり、その場合分けにより、(2)式の解は、 $\gamma=0$ の場合も含めて、次の4種類に分類できる。

ただし、 $A, B$ は初期条件により決定される係数であり、本研究では、初期位置 $x(0)=x_0$ 、初速度 $v(0)=0$ として、係数 $A, B$ を定めている。

(a)  $\gamma=0$  (ダンパ無し) の場合：単振動

$$x(t) = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t,$$

$$A = x_0, \quad B = x_0 \quad (4)$$

(b)  $0 < \gamma < \omega_0$  : 減衰振動

$$x(t) = \exp(-\gamma t) (A \cos \omega t + B \sin \omega t),$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2},$$

$$A = x_0, \quad B = x_0 \gamma / \omega \quad (5)$$

(c)  $\gamma = \omega_0$  : 臨界減衰

$$x(t) = \exp(-\gamma t) (A + Bt),$$

$$A = x_0, \quad B = x_0 \gamma / \omega \quad (6)$$

(d)  $\gamma > \omega_0$  : 過減衰

$$x(t) = A \exp \left\{ \left( -\gamma + \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \right) t \right\} \\ + B \exp \left\{ \left( -\gamma - \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \right) t \right\},$$

$$A = \left( 1 + \gamma / \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \right) x_0 / 2,$$

$$B = \left( 1 - \gamma / \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \right) x_0 / 2 \quad (7)$$

これら4種類の解 $x(t)$ をグラフにすると、図2のようになる。係数 $\gamma$ はダンパの強さを、係数 $\omega_0$ はバネの強さを表し、それぞれの係数の大小関係により、減衰と振動の様子が異なっている。

### 2. 最適化アルゴリズム

#### (1) 改良二分法

大胆なタイプの運動制御データ作成の為、最適化アルゴリズムの二分法の改良型を考案した。本稿ではこれを「改良二分法」と呼ぶ。

本来の二分法は目的関数 $f(x)$ が連続関数である場合に、中間値の定理を用いて $f(x)=0$ を満たす変数 $x$ 、つまり、 $f(x)$ の解を求める為の方法である。

#### 二分法のアルゴリズム

①  $f(a)f(b) < 0$ を満たす適当な変数 $a, b$ を見つける。

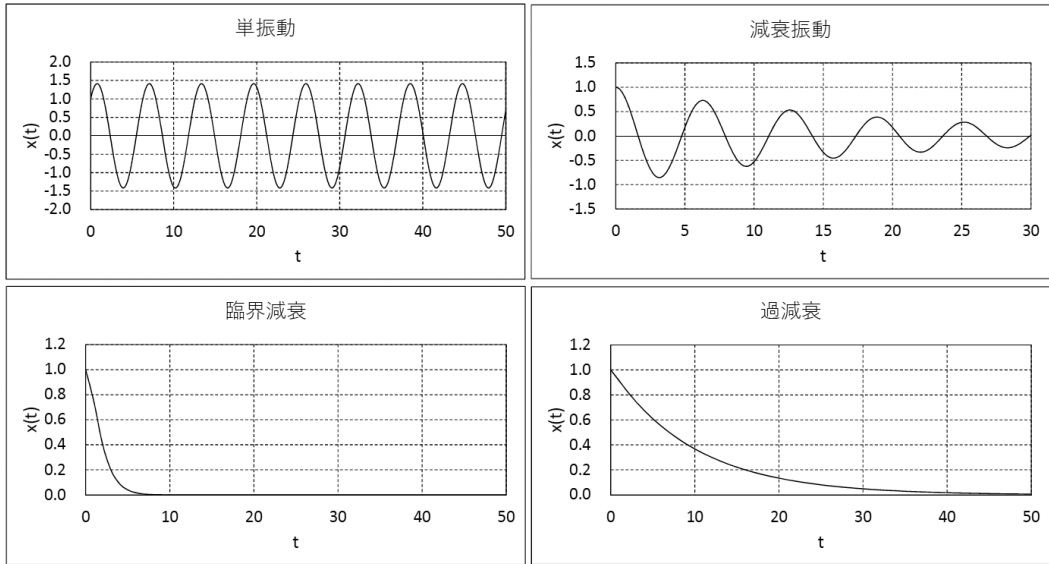


図 2. バネダンパ・モデルの解の分類

- ② 区間 $[a, b]$ の中点 $c=(a+b)/2$ を求める。
- ③  $f(a)f(c)<0$ ならば、変数 $b$ に変数 $c$ を代入する。逆に、 $f(a)f(c)>0$ ならば、変数 $a$ に変数 $c$ を代入する。
- ④  $|a-b|<\varepsilon$ ならば $c$ を近似解とし、そうでなければ②へ戻る。ここで、 $\varepsilon$ は収束判定の為のパラメータである。

これに対して「改良二分法」とは、目的関数 $f(x)$ が区間 $[a, b]$ に最小値を一つだけ持つ下に凸の連続関数であり、かつ $f(x)$ がその最小値を通る縦軸に対して左右対称である場合に、 $f(x)$ が最小値となる変数 $x$ を求める為の方法である。このような関数の最小値は、手計算によって簡単に求めることが可能だが、今回はデータ作りの為に、このようなアルゴリズムを提案する。

#### 改良二分法のアルゴリズム

- ① 区間 $[a, b]$ 及びその中点 $c$ に対し、 $f(c)<f(a)<f(b)$ または $f(c)<f(b)<f(a)$ を満たす適当な変数 $a, b$ を見つける。
- ② 区間 $[a, b]$ の中点 $c$ を求める。
- ③  $f(a)<f(b)$ ならば変数 $b$ に変数 $a$ を代入し、変数 $a$ に変数 $c$ を代入する。逆に、 $f(b)<f(a)$ ならば変数 $a$ に変数 $b$ を代入し、変数 $b$ に変数 $c$ を代入する。
- ④  $|a-b|<\varepsilon$ ならば $c$ を近似解とし、そうでなければ②へ戻る。ここで、 $\varepsilon$ は収束判定の為のパラメータである。

れば②へ戻る。ここで、 $\varepsilon$ は収束判定の為のパラメータである。

#### (2) 最急降下法

慎重なタイプの運動制御データ作成の為、最適化アルゴリズムの最急降下法を用いる。最急降下法は、目的関数 $f(x)$ が微分可能な連続関数である場合に、 $f(x)$ の最小値を求める為の方法である。

#### 最急降下法のアルゴリズム

- ① 変数 $x$ の初期値 $x_1, x_2$ を決める。
- ② 勾配を次の数値微分で求める。
$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{f(x_{i+2}) - f(x_{i+1})}{(x_{i+2} - x_{i+1})}$$
- ③ 次式によって、次の $x_{i+1}$ を求める。ただし、収束パラメータ $\alpha$ は、正の小さな数である。
$$x_{i+1} = x_i - \alpha \left( \frac{df(x)}{dx} \right)$$
- ④  $|x_{i+1} - x_i| < \varepsilon$ ならばの $x_{i+1}$ を近似解とし、そうでなければ②へ戻る。ここで、 $\varepsilon$ は収束判定の為のパラメータである。

係数 $\alpha$ は収束の速さを決める係数であり、 $\alpha$ が大きいと収束は早い、最小値を飛び越えてしまう可能性がある。一方、 $\alpha$ が小さいと収束は遅いが、確実に一番近い極小値に向かう。

### Ⅲ. 結果と考察

前章で述べた最適化のアルゴリズムを用いて、大胆なタイプと慎重なタイプの運動制御データを作成し、それぞれについてパネーダン・モデルを基に運動制御モデルを作成した。

#### 1. 大胆なタイプの運動制御モデル

大胆なタイプの運動制御データは、改良二分法によって、 $f(x)=x^2$ の最小値の探索で作成した。この時、第Ⅱ章の改良二分法のアルゴリズムの解説に於ける初期値を $a=-3, b=6$ とし、10回の探索によって $x=1.465 \times 10^{-3}, f(x)=2.146 \times 10^{-6}$ まで収束した。その様子が図3であり、黒丸(●)は初期値と探索によって得られた中点の値である。そして、図3の $x$ 座標と探索回数 $t$ をグラフにプロットしたのが図4の黒丸(●)である。ただし、初期値 $x(0)$ が1となるようにスケーリングを行っている。

これでデータが作成できたので、次にExcelのソルバーを使って、非線形最小二乗法により最適な $\gamma, \omega_0$ を求めたところ、 $\gamma=1.000, \omega_0=3.451$ となった。また残差分散は、 $4.900 \times 10^{-3}$ であった。この結果から $0 < \gamma < \omega_0$ となり、大胆なタイプの運動制御モデルには、減衰振動モデルが当てはまることがわかった。

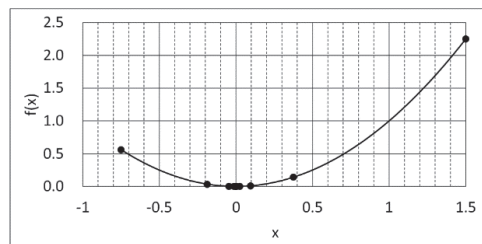


図3. 改良二分法による最小値の探索

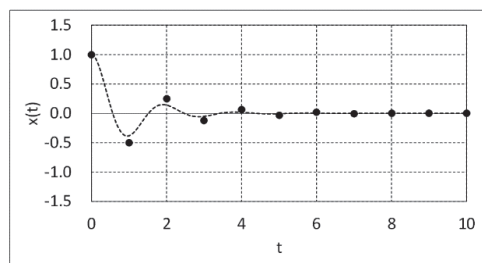


図4. 大胆なタイプの運動制御モデル

#### 2. 慎重なタイプの運動制御モデル

慎重なタイプの運動制御データは、最急降下法によって、 $f(x)=x^2$ の最小値の探索で作成した。この時、第Ⅱ章の最急降下法のアルゴリズムの解説に於ける初期値を $x_1=5, x_2=4.9$ 、収束パラメータを $\alpha=0.1$ とした。その結果、10回の探索で $x=0.48738, f(x)=0.23754$ まで収束した。その様子が図5であり、黒丸(●)は初期値と探索によって得られた値である。そして、図5の $x$ 座標と探索回数 $t$ をグラフにプロットしたのが図6の黒丸(●)である。ただし、初期値 $x(0)$ が1となるようにスケーリングを行っている。

これでデータが作成できたので、次にExcelのソルバーを使って、非線形最小二乗法により最適な $\gamma, \omega_0$ を求めたところ、 $\gamma=1.000, \omega_0=0.6355$ であった。また残差分散は、 $2.076 \times 10^{-3}$ であった。この結果から $\gamma > \omega_0$ となり、慎重なタイプの運動制御モデルには、過減衰モデルが当てはまることがわかった。

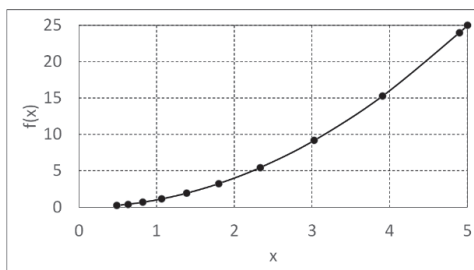


図5. 最急降下法による最小値の探索

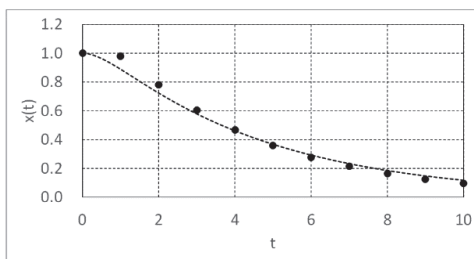


図6. 慎重なタイプの運動制御モデル

#### IV. 結語

ヒトの性格が運動制御にどのように関係するかを調べる為の運動制御モデルを開発した。今までヒトの運動制御モデルは、制御理論を基に構築されてきたが、本研究ではバネーダンパ・モデルを基にヒトの運動制御モデルを開発した。ヒトの性格を大胆なタイプと慎重なタイプに分けられると仮定し、それぞれの性格の仮想運動制御データを作成し、非線形最小二乗法を用いてバネーダンパ・モデルにフィッティングしたところ、大胆なタイプは減衰振動モデルに、慎重なタイプは過減衰モデルに当てはめることができた。今後は実際のヒトの運動制御データをこのモデルに当てはめて、ヒトの性格による運動制御特性について調べていく予定である。

#### 【参考・引用文献】

- 1) A. Tustin, “The nature of the operator’s response in manual control and its implications for controller design”, *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol.94, 1947, pp.190-202.
- 2) 林喜男, 「制御作業における人間特性」, 『人間工学』 第3巻4号, 1967年, pp.266-274.
- 3) 明石 一, 「人間・機械系における人間の制御特性に関する研究の動向」, 『人間工学』, 第9巻2号, 1973年, pp.41-48.
- 4) 林喜男, 「人間の制御行動」, IATSS review, 第3巻4号, 1977年, pp.5-12.
- 5) 高島典子, 吉沢修治, 南雲仁一, 「制御行動における人間のダイナミックス」, 『行動計量学』, 6巻2号, 1979年, pp.63 ~ 69.
- 6) 末長 修, 井原 素三, 「人間の制御機能からみた制御特性における個人差の解析」, 『人間工学』, 第23巻6号, 1987年, pp.355-365.

