

手動制御系における操作者のフィードフォワード特性の解析

Feedforward characteristics of the human operator in manual control systems

○山上 勸司, 長井 力, 佐川 貢一

○Kanji Yamagami, Chikara Nagai, Koichi Sagawa

弘前大学

Hirosaki University

キーワード : 手動制御(manual control), フィードバック誤差学習(feedback error learning)
システム同定(system identification), 軌道追従(trajecory tracking)

連絡先 : 〒036-8561 青森県弘前市文京町 3

弘前大学大学院 理工学研究科 理工学専攻

山上勸司, Email : h17ms627@hirosaki-u.ac.jp

1. 緒言

工事現場のような, 人と機械が密接に関わる場所では, 人間のわずかな機械操作ミスによって, 大事故につながる可能性がある。操作ミスの一因として, 操作者にとって使いにくいインターフェースの存在があげられる。そこで, 機械が操作者の特性に合わせて動作すれば, 操作者の負担軽減, 作業効率の向上や怪我の防止につながり, 人間の機械操作ミスを防ぐことが可能になる。しかし, 人が機械を操作するスキルには個人差が存在する。したがって, 操作者の特性に合わせた機械の動作を実現するためには, 人間側の機械操作スキルの個人差を知ることが必要である。

人間の操作特性解析の手法の一つとして, 手動制御系のモデル化があげられる。しかし, 手動制御系の閉ループ同定に関する研究^{1,2)}に対して, 開ループ同定に関する研究は少ない。一方で, 人間の運動制御のモデルとして, 川人ら³⁾によるフィードバック誤差学習モデル(Feedback Error Learning)が広く用いられている。機械操作スキルの個人差は, フィードバック誤差学習モデル中の制御器の特性を推定することで評価することができると考えられる。そこで本研究では, 軌道追従実験によって人間の手動制御動作を計測し, フィードバック誤差学習モデルのフィードフォワード制御器について 2 種類の方法で推定することを試みる。そして,

実験値と推定値を比較し、モデルの精度を確認する。

2. 原理

フィードバック誤差学習モデルのブロック線図の概要を Fig.1 に示す。フィードバック誤差学習とは、人間の運動制御が、フィードバック制御とフィードフォワード制御の 2 自由度から成り立つと仮定している。操作者が、軌道追従実験において、目標値 x と操作した結果 y を認識できる時、操作者は x と y との誤差 e を小さくするために、操作量の予測、修正を行いながら、操作量の加え方を学習する。その後、操作者を y が認識できない状態におくと、操作者は学習した操作方法を元に、誤差 e を小さくするような操作を行う。この時、操作者は操作した結果 y だけでなく、誤差 e も認識できないため、フィードバック誤差学習モデルのフィードバック制御器は働かない。このとき、操作者はフィードフォワード制御を行っていると考える。

本研究では、人間の筋運動の特性を $G_p = 1$ とし、実験で用いる制御対象の特性を $G_c = 1$ とした。この時のフィードフォワード制御器 G_f を以下の 2 種類の方法で推定する。

方法 1: 入力 x と出力 y が線形の関係である

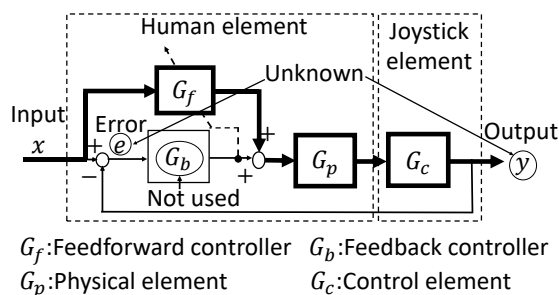


Fig.1 Feedback error learning model

と仮定し、 G_f を定数で推定する。

方法 2: 入出力間に動特性が存在する可能性を考慮し、ARX (Auto Regressive eXogenous) モデルでモデル化して、 G_f を推定する。なお、ARX モデルは一般に以下の式で表される。

$$y(t) = b_1x(t-1) + \dots + b_{n_b}x(t-n_b) - \{a_1y(t-1) + \dots + a_{n_a}y(t-n_a)\} + w(t) \quad (1)$$

式(1)で n_a, n_b はそれぞれ入力、出力に対する次数であり、 $w(t)$ は入出力間に生ずる外乱である。ARX モデルの評価には AIC 規範⁴⁾ (Akaike's Information Criterion: 赤池情報量規範) を使う。一般に、AIC 規範が小さいほど良いモデルとされているため、本研究では $n_a, n_b = 1 \sim 4$ の範囲から AIC 規範が小さく、かつ ARX モデルによる推定値が発散しない次数を用いた。

3. 実験

3. 1 実験装置

実験装置の概略を Fig.2 に示す。実験装置はジョイスティック (50JAK-ZZ-R3G), A/D コンバータ (USB-6218, NI), PC, モ

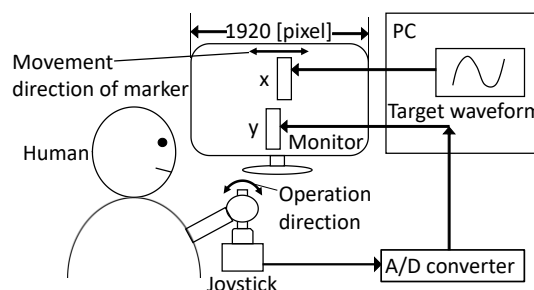


Fig.2 Experimental setup

モニタ(解像度：1960×1200 [pixel])から構成される。ジョイスティックは操作角度に応じて、0~5[V]の電圧を出力する。出力される電圧は、A/D コンバータを用いてサンプリング周波数 1000[Hz]で PC に記録される。モニタの画面上には、目標マーカ(上)と制御マーカ(下)の2つの白い長方形が表示する。目標マーカは、予め作成しておいた目標波形により、自動で画面上を左右に動く。制御マーカは、ジョイスティックの操作角度に応じて画面上を左右に動く。なお、本実験の目標マーカの目標波形は、以下の式から求められる。

$$x = \sum_{i=1}^5 A_i \sin \omega_i t \quad (2)$$

目標マーカがモニタの表示範囲外に移動することがないように、式(2)の振幅 A_i には $A_i = 170, 180, 200, 210, 220$ [pixel]を用い、周波数 ω_i は $\omega_i = -1.75 \sim 1.75$ [rad/s]からランダムに選んだ。目標マーカと制御マーカの水平方向の座標は、ピクセル単位でサンプリング周波数 1000[Hz]として、エクセル型式で記録した。なお、電圧計測、マーカ表示、座標記録は NI LabVIEW2013 を用いて作成したプログラム

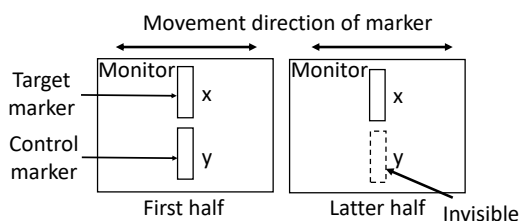


Fig.3 Monitor layout during experiment

で行った。

3. 2 実験方法

実験は、1人の被験者に対し、40秒間の軌道追従実験と20秒間の休憩を1セットとして、計15回行った。実験中のモニタ画面のレイアウトを Fig.3 に示す。40秒間の軌道追従実験のうち前半の20秒間は、モニタに目標マーカと制御マーカを表示する。被験者は、目標マーカと制御マーカの位置を一致させるようにジョイスティックの操作を行う。これにより、ジョイスティックの操作量と、制御マーカの移動量との関係を学習する。後半の20秒間は制御マーカの表示を消し、モニタには目標マーカのみを表示する。被験者は、前半に学習した操作方法を元に、制御マーカが見えていない状態でも目標マーカと制御マーカの位置を一致させるようにジョイスティックの操作を行う。なお、目標マーカの軌道波形には15回とも同一の波形を用い、目標マーカの水平座標を入力 x_t 、制御マーカの水平座標を出力 y_c として G_f を同定した。

4. 実験結果と考察

40秒間の軌道追従実験の入出力の結果を Fig.4 に示す。前半の20秒間は y_c が被験者に見えるため、入力と出力がほぼ一致していることがわかる。後半の20秒間は y_c が被験者に見えていないため、前半と比較して、出力の移動量が入力の移動量を超える傾向が見られる。Fig.4 で示す入出力を、横軸 x_t を、縦軸 y_c をとしてプロットし、直線近似を行ったグラフを Fig.5 に示す。方法1で推定した G_f の値

は, 1.0971であった。 G_f の値が 1 を超えていることから, 出力の移動量が入力
の移動量を超えていることを示唆しており,
これは Fig.4 の結果と一致する。

また, 実際に実験で得られた出力 y_c , 方
法 1 で求めた G_f と x_t との積として推定し
た出力を y'_c , 方法 2 による推定出力を y''_c
とし, 3 種類の出力値を比較した。実験後

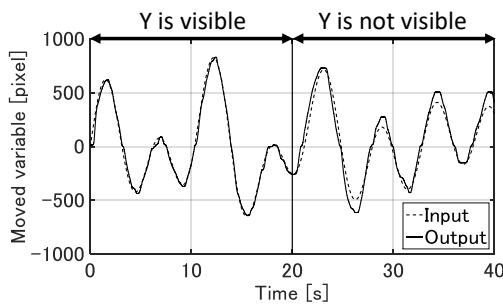


Fig.4 Input/output comparison

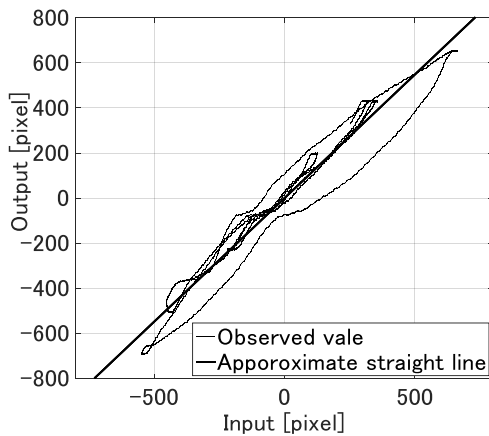


Fig.5 Line approximation between
input and output

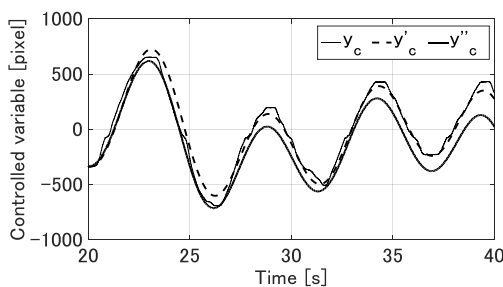


Fig.6 Output and estimated output

半の 20 秒の結果を Fig.6 に示す。Fig.6
で示す出力値の場合, y と y'_c の誤差率は
17.32[%]であり, y_c と y''_c の誤差率は
37.05[%]であった。また, y_c と y'_c の 15 回
の誤差率の平均は 20.21 ± 4.42 [%]であり,
 y_c と y_2 の 15 回の誤差率の平均は $22.25 \pm$
 6.44 [%]であった。 y''_c より y'_c の方が y に対
する誤差が小さいことから, 方法 1 で作
成したモデルが, G_f を同定する上でより
適したモデルであったと考えられる。ま
た, 実測した入出力の誤差が, Fig.4 のよ
うに正負のどちらかに偏って現れる時, y
と y''_c の誤差率が大きくなることを確認し
た。すなわち, この時の入出力間を ARX
モデルでモデル化することは困難だと考
えられる。

実験結果から, 本研究の軌道追従実験
で推定した G_f が, 定数に近い特性を持っ
ていることを確認した。なお, 目標値の周
波数が高くなると, 熟練した操作者は, 目
標値の動きを予測して位相を進める制御
を行う場合もあると予想する。この時, G_f
の特性は定数ではないと考えられるので,
今後確認する必要がある。

5. 結言

本研究では, フィードバック誤差学習
モデル中の人間のフィードフォワード特
性を, 2 種類の異なる方法で推定するこ
とを試みた。実験結果から, 本研究の軌道追
従実験で推定したフィードフォワード制
御器が, 定数に近い特性を持っている事
を確認した。今後は, より高精度にフィ
ードフォワード制御器を同定するモデルの
作成や, 目標値の周波数が高い場合の, 人
間のフィードフォワード制御器の特性解

析を目指す。

参考文献

- 1) M. Kawato, K. Furukawa & R. Suzuki : A Hierarchical Neural-Network Model for Control and Learning of Voluntary Movement; Biol. Cybern.57, pp. 169-185 (1987)
- 2) 末長修, 井原素三, 野飼亮, 手動制御系における人間の個人差の解析, 日本機械学会文集(C編), 49巻, 447号, pp.1991-1998 (1983)
- 3) 辻敏夫, 加藤荘子, 金子真, 人間-ロボット系の追従制御特性, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2, pp.285-291 (2000)
- 4) 足立修一, MATLAB による制御のためのシステム同定, 東京電機大学出版局 (2002)