

(504) 基礎 その他

上肢運動における順ダイナミクスモデルの学習

Learning of the Forward Dynamics Model in Motor Control

難波 裕昌[†]

大山 剛史[†]

伊藤 照明[†]

Hiromasa Namba[†]

Takashi Oyama[†]

Teruaki Ito[†]

[†]岡山県立大学 情報工学部

1 はじめに

ヒトが早く正確な運動を生成するためには制御対象たる身体に関する逆ダイナミクスモデルを用いたフィードフォワード制御が不可欠であると予想されている[1][2]. その大きな理由の一つには、ヒトの視覚によるフィードバック信号には大きな遅れ時間があるため、フィードバック制御だけでは十分な制御が極めて困難である、ということがある。

逆ダイナミクスモデルとは、所望な運動が与えられたときに、それを実現できる力を計算するモデルである。反対に、力を発揮したときにそれによってどのような運動が生成されるかを計算するモデルを順モデルという。通常、運動生成においては逆モデルに焦点が当てられる。なぜなら、運動タスクにおいては目標を達成し得る運動が先に存在しており、それを実現できる力が未知だからである。

では、順モデルは運動制御において役に立つことがないのかというところではなく、運動予測に使われると考えられている。前述したように、ヒトの視覚によるフィードバック信号には大きな遅れ時間があるため、実際の視覚情報を待ってフィードバック制御による修正を行ってはいまよく制御できない。そこで、運動制御においては発揮した力が遠力性コピーとして制御システムが有する順モデルへ送られて、発揮した力によってどのような運動が行われるであろうかを予測して修正が加えられると考えられている[3]. 逆モデルと順モデルの両方が存在することで、ヒトは巧みな運動制御を実現できている。

実際のヒトの運動を対象とした逆モデルの学習に関してはさまざまな実験結果が報告されているが、順モデルに関する報告は著者らの知る限りではほとんど存在していない。本研究はヒトがどのようにして順モデルの学習を行っており、また、順モデルの性能を評価できるような計測実験について考察し、その結果を報告する。

本研究は岡山県立大学倫理委員会の承認を得て実施された。

2 順・逆ダイナミクスモデル

順ダイナミクスモデルと逆ダイナミクスモデルの関係を式で表すと式(1), (2)のようになる。

・順ダイナミクスモデル f

$$x = f(\tau) \dots (1)$$

・逆ダイナミクスモデル f^{-1}

$$\tau = f^{-1}(x) \dots (2)$$

ここで、 x は運動軌道、 τ は身体が発揮する力を表す。順ダイナミクスモデルは力を入力として与えるとそれによって実現されるであろう運動軌道を計算するモデルであり、反対に、逆ダイナミクスモデルは運動軌道を入力として与えるとそれを実現するための力を計算するモデルである。順・逆ダイナミクスモデルは力 \leftrightarrow 運動軌道の変換を行う関数・逆関数の関係にある。ただし、注意しなければならないことは、理論的な順・逆ダイナミクスモデルは関数・逆関数の関係にあるが、生体がそのような対応を備えた順・逆ダイナミクスモデルを実際に獲得しているかについてはなんの保証もない。

本研究では順モデルを用いた運動課題として、実際の運動は伴わず、力の発揮のみで課題を達成するような条件を設定した。この条件において被験者は課題の達成のために運動の誤差というよりも、力の誤差を修正する必要がある、結果として順モデルに相当するモデルを学習すると仮定した。

3 実験

3.1 被験者

健康な右利きの男性4名が被験者として実験に参加した。

3.2 実験方法

1. 反力デバイス Touch X (3D Systems 社製) を実験装置として使用した。
2. 装置のスタイラスを定位置に固定して、スタイラスに力を加えるとディスプレイ上のカーソルが加えた力に応じて移動するような条件を設定した。右手及び左手で計測した。
3. 被験者にディスプレイ上のカーソルを始点から目標に移動させるように指示した。右手

の計測では、始点の位置は被験者の正中線から左に 10 cm、目標の位置は被験者の正中線から右に 10 cm に設定した。左手の計測では、配置を左右反転した。

4. カーソルは x 軸方向にのみ動くように設定された。
5. 始点から終点にカーソルを動かすことを 1 試行として 50 試行を課した。
6. スタイラスに加えた力、カーソルの位置を計測・解析した。

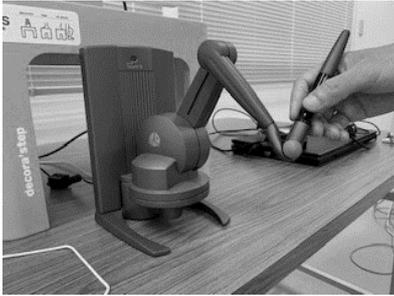


図 1 実験装置

4 結果

被験者の正中線位置を x 軸における原点として、始点を -10 cm、目標を 10 cm と定義したときのカーソルの終点の位置ならびにカーソルの速度の最大を左右で比較した。結果を表 1 に示す。

表 1 終点及び速度の最大の平均±標準偏差

	Left	Right
End [cm]	10.60±1.74	10.32±1.19
Vmax [cm/s]	18.58±6.84	13.80±3.54

左右のデータの差を t-検定で調べたところ、終点は統計的傾向があり ($p < .1$)、速度の最大は有意差があった ($p < .001$)。

左右ごとに各軌道を加算平均して求めた平均軌道の速度の波形を図 2 に示す。

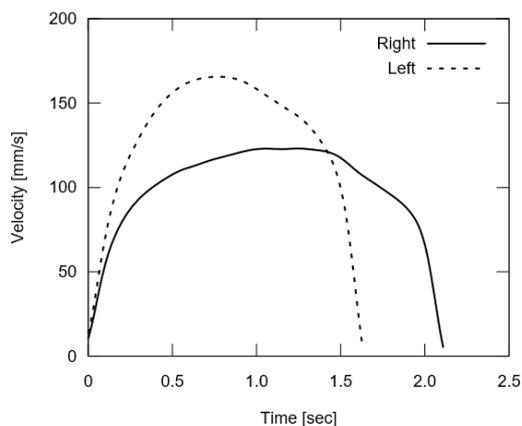


図 2 平均軌道の速度波形

5 考察

始点から目標に手先を動かす上肢の 2 点間到達運動において、速度の波形はベル型の波形となることが知られている[4]。また、指先の力の大きさそのものを制御する条件における力の変化も同様なベル型の波形となることが報告されている[5]。同様に、クランク運動における手先の力の変化がなるべく小さくなるような運動が生成されることが報告されている[6]。

それに対して、本研究の条件におけるカーソルの速度の波形はベル型というよりも台形に近い形となっており、先行研究と比較してなんらかの運動戦略の違いが示唆される。

6 おわりに

今後の課題として、実験の被験者を増やし、その実験データをもとに定量的に考察すること、順モデルの性能を評価できる実験パラダイムを考察すること、二次元運動での実験を行うことを考えている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 18K12018 の支援を受けて実施された。

参考文献

- [1] Wolpert, D.M., Ghahramani, Z., and Jordan, M.I., "An internal model for sensorimotor integration," *Science*, Vol.269, No.5232, pp.1880-1882, 1995.
- [2] Wolpert, D.M., Miall, R.C., and Kawato, M., "Internal models in the cerebellum," *Trends in Cogn Sci*, Vol.2, No.9, pp.338-347, 1998.
- [3] Wolpert, D.M., Ghahramani, Z., and Jordan, M.I., "Forward dynamics models in human motor control: Psychophysical evidence," *NIPS*, 1994.
- [4] Flash, T., and Hogan, N., "The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model," *J Neurosci*, Vol.5, No.7, pp.1688-1703, 1985.
- [5] 辻敏夫, 三木義民, 伊藤宏司, "拘束動作における人間の指先力パターンと仮想軌道仮説," *計測自動制御学会論文集*, Vol.28, No.3, 1992.
- [6] Ohta, K., Sivinin, M.M., Luo, Z., Hosoe, S., and Laboissière, R., "Optimal trajectory formation of constrained human arm reaching movements," *Biol Cybern*, Vol.91, No.1, pp.23-36, 2004.