

相互追従実験におけるヒトと機械の力学的コミュニケーションの研究  
Study of Man-machine Communication dynamics in mutual hand tracking experiment

○ 高地康宏\*, 沢田康次\*, 大里司\*  
○ Yasuhiro Takachi\*, Yasuji Sawada\*, Tsukasa Osato\*

\*東北工業大学  
\*Tohoku Institute of Technology

キーワード：力学的コミュニケーション (Communication dynamics), 相互追従実験 (Mutual hand tracking experiment), ヒトと機械の協調 (Man-machine cooperation), 視覚-運動制御 (visual-motor control), 相互相関 (Cross correlation)

連絡先：〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町 35-1 東北工業大学情報通信工学科 沢田研究室 高地康宏, Tel.: 022-229-1151 (内) 503, E-mail: takachi@tohotech.ac.jp

## 1. はじめに

我々人間の脳の高次情報処理機構は、刻々と変化する環境への適応をいとも簡単に行っているように見える。一体どのようにしてそのような動的適応が実現されているのかという疑問は、脳科学やロボット工学の分野においても大きな問題である。

外部環境は視覚を通して把握されることが一般的であるが、その視覚情報が脳へと伝わるには時間遅れが存在する[1]。それゆえ、もし得られる視覚情報に対し逐次的な反応を行っていると、環境変化に必ず遅れてしまうことになる。

しかし、ヒトは環境変化を予測し、その変化に先んじて行動可能である。我々はこれまで手

動追従実験を通じて、規則的に運動する視覚刺激を手で追従するとき、追従位相が刺激の運動位相よりも有意に先行する現象を報告してきた[2,3]。さらに、この先行位相量は、刺激の運動が突然変化したときに生じる手と刺激との過渡誤差を最小にする特質を持っていることがわかった[2,3]。

このように目で見えたものを追いかけるという単純な運動制御においても動的適応性を含んだ運動制御機構が垣間見える。もしそうした動的適応能力を持ったもの同士、つまりヒト同士による相互追従運動を行った場合、どういった振る舞いが見られるのであろうか？

相互追従運動は、我々人間が日常行っているコミュニケーションを非常に抽象化したものと捉えることができる。普通、コミュニケーション

ンは言葉を使ったものが一般的であるが、スポーツやダンス、協奏といった場面において非言語コミュニケーションの重要性も実感できる。

本研究では、コミュニケーションにおける運動とそのタイミングというコンテンツに着目し、相互追従実験を通じてヒト同士の協調運動パターンを導出した。さらに、ヒトの視覚-運動系制御モデルを構築し、そのモデルを用いてヒトと機械の協調可能性を検討した。

## 2. ヒトの視覚-運動系制御モデル

### 2-1. フィードバック+フィードフォワード

規則的に運動する視覚刺激（ターゲット）を手で追従する際、ヒトの脳内では手とターゲットの位置誤差を修正する働きに加え、ターゲットの運動を予測するメカニズムが存在する[4,5]。

図1はスクリーン上を1次元的に単振動するターゲットに対する手の追従運動の平均位相差がターゲット周波数によって変化する様子を示したものである[2]。

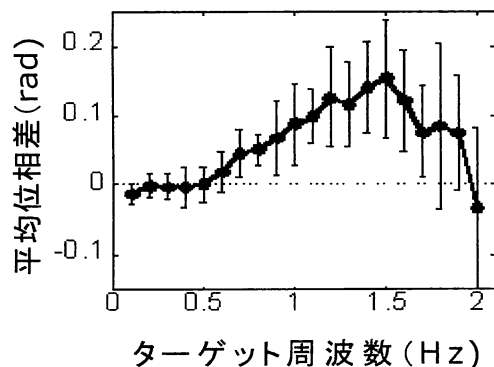


図1 被験者 10 名による平均位相差

周波数域 0.7-1.7Hz において手の運動が刺

激に対して有意に先行していることがわかるように、ヒトの持つ予測メカニズムは外部環境の変化に先んじる一面を持つ。

我々が先に報告した結果から、ターゲット運動が1次元単振動を行う場合、この予測メカニズムを非常に簡略化し、以下のような微分方程式にモデル化 (DFF モデル) することができる[2,3]。

$$\frac{dX_H}{dt} = \frac{1}{\tau} (X(t-\delta) - X_H(t-\delta)) + \gamma \frac{dX(t-\delta)}{dt} \quad (1)$$

このモデルはターゲットと手の位置誤差を修正するフィードバック項とターゲット速度に依存するフィードフォワード項から成り立っている。ここで、 $X$ 、 $X_H$ はそれぞれ手とターゲットの座標。腕の筋肉時定数を  $\tau$ 、神経信号伝達にかかる時間遅れを  $\delta$ 、フィードフォワード項のカップリングパラメータを  $\gamma$  としている。それぞれの値は、 $\tau = \delta = 100\text{ms}$  [1-3]、 $\gamma \sim 1$  [2,3] で1次元追従運動をうまく説明できる。

この DFF モデルはヒトの追従運動を時間平均で見た場合、非常にうまくその振る舞いを記述する。しかし、追従運動のすべての時間についてその細かな振る舞いまでも説明できるのだろうか？ターゲット運動が規則的であっても、刻々の時間ごとに手とターゲットの位置誤差は変化するため、式1によって計算される手の追従速度は変化するはずである。このモデルによって計算された理論値と実際の実験データで得られる人間の追従速度との間に開きがなければ、DFF モデルの有効性が確かめられる。

そこで以下のような手順で実験、解析を行い、DFF モデル有効性をテストした。

- 1) 一定周波数 (0.6-1.2Hz で円運動を行

うターゲットを追従する。

- 2) サンプリング時間 (20m s) ごとに追従速度を測定、それに対応する理論値と比較する。
- 3) この際、DFF モデルは2次元追従運動用として次のように書き換えられたものを適用した。

$$\frac{d\theta_1(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} (\theta_2(t-\delta) - \theta_1(t-\delta)) + \gamma \frac{d\theta_2(t-\delta)}{dt} \quad (2)$$

ただし、 $\theta_1, \theta_2$ はそれぞれ手とターゲットの位相。

図2は被験者5名に上記追従実験を行ってもらったときの被験者のサンプリング時間ごとの実際の追従速度と、理論的追従速度をプロットしたものである。

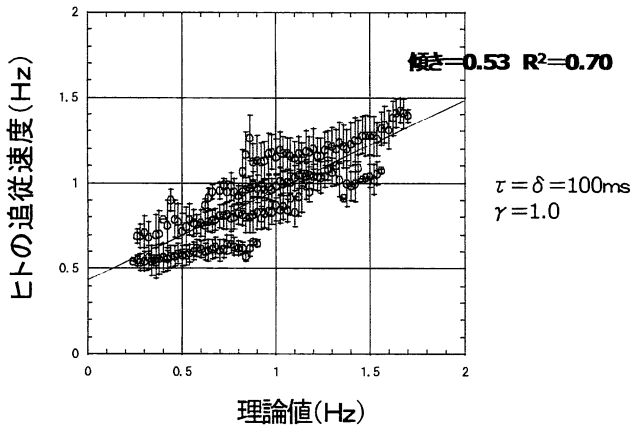


図2 DFFモデルによる理論的追従速度に対するヒトの実際の追従速度

もし、モデルが追従運動の時間平均のみならず細かな振る舞いまでも記述できるのであれば、全体の分布は  $Y=X$  の傾き1の直線上に乗るはずである。図2においては、傾き 0.53 ( $R^2 = 0.70$ ) となっており、モデルの不十分性を示している。

## 2-2. モデル拡張

位置誤差に関するフィードバック項とターゲット速度に依存するフィードフォワード項のみで構成される DFF モデルでは、各時間ごとの追従速度をうまく説明できない。

ヒトの追従運動を詳しく調べてみると、ターゲット周波数は一定にもかかわらず角速度にリズムミク成分が存在する (図3)。

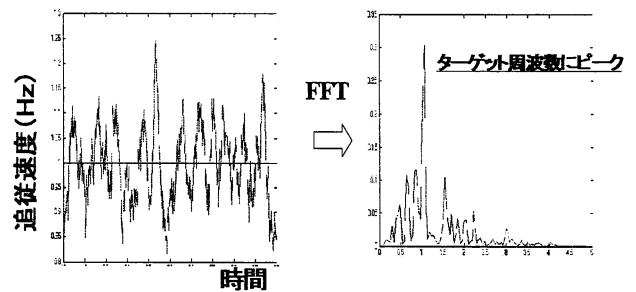


図3 追従運動に含まれるリズムミク成分

この追従運動に含まれるリズムミクな成分は、腕の筋骨格系の非対称性に因るものではないかと考えているが、詳しくは後に議論する。我々はこの結果を受け、DFFモデルを以下の模式図 (図4) のように拡張し、追従運動にリズムミク成分を持たせることにした。

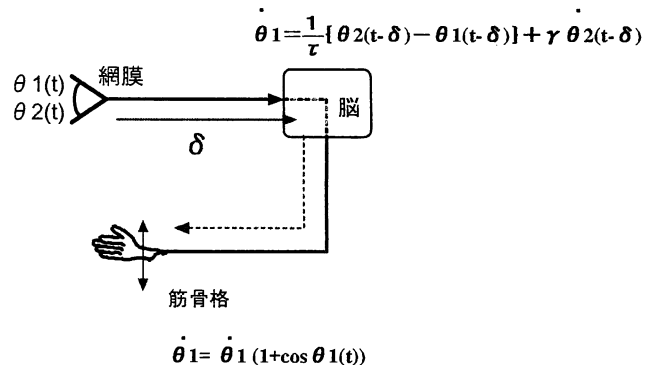


図4 拡張 DFF モデル

この拡張 DFF モデルによる理論的追従速度と実際のヒトの以下のように非常に強い相関があり、これをもって拡張 DFF モデルを有用性が確認された。

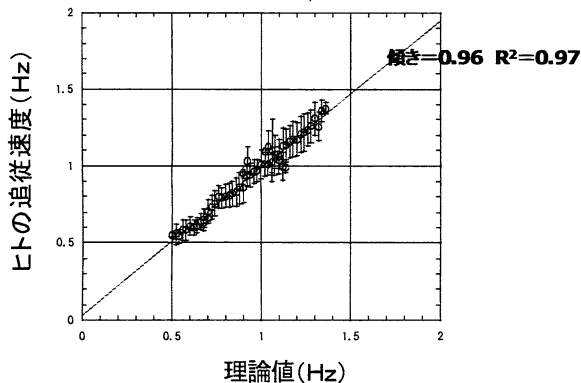


図5 拡張 DFF モデルによる理論的追従速度に対するヒトの実際の追従速度

### 3. ヒト同士による相互追従実験

#### 3-1. 被験者

被験者は6名。21歳–32歳の健康な男性。規則的な運動を行うターゲット追従実験を経験しており、本実験に参加するにおいてインフォームドコンセントを得た。

#### 3-2. 実験方法

被験者は2人1組がペアとなり、2台のPCを使用して行われた。各PCの画面上には自分の手の位置を示すカーソル（直径1cmの青色中塗り円）が表示されている。各被験者は、PC画面上の目標物（画面上直径1cmの中空円で表示）を追従しなければならないが、実験開始2秒間は一定周波数1Hzで円運動（半径6.5cm）を行うターゲットがその目標物となる。その後、目標物は相手（ペアとなる被験者）の

運動に切り替わり、相互追従が開始される。

実験終了まで30秒間被験者には

- 1) できるだけ相手と離れないように
- 2) ターゲット周波数にできるだけ従って円運動を継続してもらった。

試行回数は同ペアにつき10回。互いのPC画面上の手の座標を60msでサンプリングし、追従速度時系列に関する解析を行った。

#### 3-3. 実験結果

図3はこの相互追従運動を行ったときに得られる被験者ペアの追従速度の時系列例である。これを見ると追従速度は一定ではなく、リズム的な動きをしている。また速度がピークをとるタイミングはほぼ一致しており、2人の動きがうまく協調がとれていることがわかる。

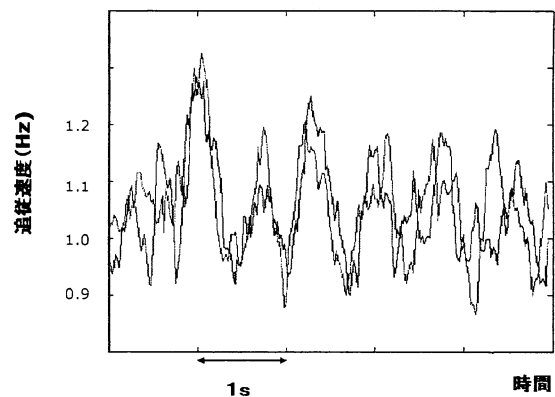


図6 ヒト同士による協調運動

相互追従時の追従速度に対し、相互相関を求めることで2人の協調パターンを分類することができる。

相関係数がピークをとるときのずれ幅 $\Delta t$ がゼロ近辺にあるとき、2人の運動は同相的であるが、 $\Delta t$ がどちらかに偏っている場合には一方の被験者が他方に対し定常的に先行していることがわかる。相互追従時の2人の関係を相互

相関を使いパターン分けすると、以下のように主に3種類であることがわかった(図7)。

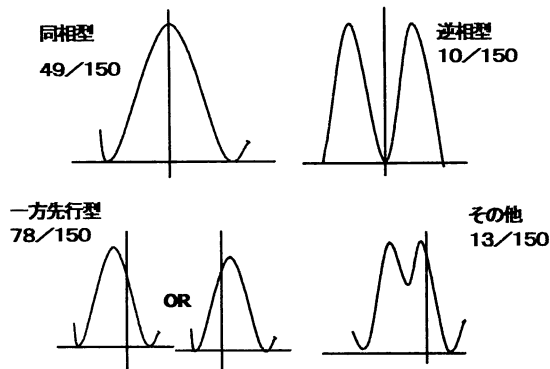


図7 相互相関のパターン分けとその出現回数

多く見られた協調パターンは「同相型」と「一方先行型」で、「逆相型」のように2人の動きが揃わない結果は少なかった。また、協調パターンには同じ被験者ペアにおいても多様性が存在した。

#### 4. ヒトとモデルによる協調運動

前章においてヒト同士によって行われた相互追従実験を今度はヒトとモデルによって行う。被験者は、前章の実験に参加した被験者6名のうち2名と本実験に新たに参加する被験者2名(22歳男性)、計4名で行われた。なお、追従相手となるモデルは図4で表されるアルゴリズムによって制御される。

図8はこの実験を行ったときのヒトとモデルの追従速度時系列の1例である。図6に上げたヒト同士による相互追従結果と非常によく似た特徴を示しており、ヒトと機械が協調的な振る舞いを見せていることがわかる。

さらに図4で表されるアルゴリズムにノイズを加えた場合、そのノイズ量によってヒトとモ

デルの協調パターンは、同相型や一方先行型が出現することが確認された。ちなみにリズム成分を導入する前のモデル(式2)とヒトの相互追従実験も行ったが、見られる相互相関のパターンはヒト先行パターンのみであり、ヒト同士において見られるパターンとは乖離があった。

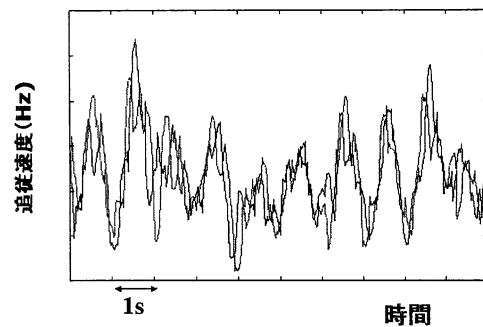


図8 ヒトと機械の協調運動

#### 5. 結論と考察

ヒト同士による相互追従実験、ならびにヒトとモデルによる相互追従実験の結果をまとめると以下ようになる。

- 1) ヒト同士による相互追従実験において、追従速度の相互相関を調べることでわかる協調パターンは同相型か一方先行型を多い。
- 2) ヒト同士による協調パターンをヒトとモデルの相互追従実験で再現するためには、DFFモデル(フィードバック+フィードフォワード)に加え、リズム成分が必要である。

モデルに導入したリズムは、筋骨格系に因る追従滑らかさを保つための人間特有の運動である可能性が高い[6]。このようなリズム成分が必要な運動は到達運動課題[7]や手書き課題[8]など様々

な場面において確認されており、本実験で得られたリズム運動も追従滑らかさを実現するため、脳内情報処理とは別レベルの運動調整と考えられる。

## 6. まとめと展望

本研究で行った相互追従実験は、決められたペースを守りつつ相手との距離をできるだけ最小にすることが課題である。このような条件下での協調運動は、日常において例えば協奏のようなものを抽象化したものと見なすことができる。2人の人間が互いの呼吸を合わせながら1つの音楽を奏でる行為はまぎれもなくコミュニケーションと言えよう。本実験ではそうした協調運動において2人の呼吸が平均的にどのような関係にあるかということをも明らかにしたと言える。

これと同様に、今ら[9]は協調タッピング課題を通じて、非定常的な2人の関係に介在する相互作用を明らかにしており、力学的コミュニケーションという視点から人間と機械の協調運動に対する研究は高まりを見せている。本研究は、ヒトとモデルの滑らかな協調運動に必要な条件を探る研究である。これは脳内の高度情報処理過程を再考するための実験パラダイムとしても興味深く、今後本研究を基礎とした人と機械のインターフェース開発への展開も期待できる。

## 参考文献

- [1] J. R. Carl and R. S. Gellman: Human smooth pursuit: stimulus-dependent responses, *Journal of Neurophysiology*, 57, 1446/1463 (1987)
- [2] 石田文彦, 沢田康次: 人の感覚運動システ

ムにおける先行位相の定量的研究,” 計測自動制御学会論文集, 39, 59/66 (2003)

- [3] F. Ishida and Y. Sawada: Human hand moves proactively to the external stimulus: An evolutionary strategy for minimizing transient error, *Physical Review Letter*, 93, 168105 (2004)
- [4] R. C. Miall, D. J. Weir and J. F. Stein: Intermittency in human manual tracking tasks, *Journal of Motor Behavior*, 25, 53/63 (1993)
- [5] R. C. Miall, D. J. Weir and J. F. Stein: Manual tracking of visual targets by trained monkeys, *Behavioral Brain Research*, 20, 185/201 (1986)
- [6] T. Flash and N. Hogan: The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model, *Journal of Neuroscience*, 5, 1688/1703 (1985)
- [7] P. Morasso: Spatial control of arm movements, *Experimental Brain Research*, 42, 223/227 (1981)
- [8] P. Viviani and C. A. Terzuolo: Trajectory determines movement dynamics, *Neuroscience*, 7, 431/437 (1982)
- [9] 今誉, 三宅美博: 協調タッピングにおける相互同調過程の解析とモデル化, *ヒューマンインターフェース学会誌・論文誌*, 7, 477/486 (2005)