

タスク制約下におけるリーチング軌道の冗長性

松本 一輝 伊藤 精英

公立はこだて未来大学 システム情報科学部

概要

計算論的神経科学において、ヒトの日常的な行為であるリーチングを対象に、いくつかの最適化規範が提案されてきた。それらのモデルでは、行為主体への刺激入力から出力が一意的に決定される。一方で、ヒトの行為には決定論的な最適規範では説明のつかない「行為の淀み」が、マイクロスリップという現象として報告されている。筆者は、行為主体と環境との関係性により、タスクの推移にあらゆる制約が課され、行為主体の行為ユニットの選択がなされることで、マイクロスリップが生起すると考える。本研究では、行為の淀みがタスク制約に起因するという仮説を定量的に調査するため、本論文で定義する「冗長性」という指標を用いて、異なるタスク制約化でのリーチング軌道の比較を行った。結果として、異なるタスク制約下で冗長性の変化が観察された。このことから筆者は、リーチングが運動の最適化規範にみられる入出力の図式では説明できず、行為ユニットの柔軟な選択によって説明されるべきであることを指摘する。

1 はじめに

1.1 リーチングの運動モデル

リーチングとは、ヒトがある目標に対して手を伸ばす行動のことであり、日常的に見られる振る舞いのひとつである。ヒトはリーチングによって、机の上の林檎を掴んだり、飛んでくるボールをキャッチするなど、多様な行為を可能にしている。リーチングのような普段の何気ない行為であっても、そのメカニズムについて科学的に説明を試みると様々な困難が付きまとう。例えば、ヒトには200以上もの関節があり、それらの関節が取り得る状態は無数にある。その中から目的に合わせた関節角の組み合わせを選ぶのは数学的に非常に難しい問題である。

計算論的神経科学の分野では、ヒトのリーチング運動を生成するための様々な計算モデルがいくつか提案されてきた(例えば、Flash and Hogan, 1985; Uno et al., 1989; Harris and Wolpert, 1998)。ヒトは、ある最適化規範で定義されるコストを最も小さくするよう、脳内に最適なモデルを設計し、フィードフォワード的に腕などの効果器を制御するのが、計算モデルの一般的な考え方である。例えばUno et al. (1989)のトルク変化最小モデルでは、肘などの関節のトルクの変化を最小にすることを規範としている。実際、それぞれの計算モデルは、ヒトのリーチングの緩やかな速度変化や軌道の滑らかな変化をうまく再現している。

上記のリーチングの計算モデルで一致しているのは、ある目標に対する身体ダイナミクスの問題を解くというものである。しかし、あらゆる最適化規範が、多様に変化する環境において常に最適解を得ることが本当に可能かという疑問がある。筆者が本論文で主張するのは、リーチングという行動が、様々な環境下でまとまりのあるタスクを遂行するとき、ヒトは一見して最適ではない振る舞いを生起するという点である。その一例として

次の節で説明するマイクロスリップという現象が近年複数の研究者によって研究されている。

1.2 マイクロスリップ

マイクロスリップとは、ヒトの行動に見られる過渡的な探索過程のことである(Reed and Schoenherr, 1992, 鈴木・佐々木, 2001)。Reedは、被験者に「一杯のコーヒーを入れる」というタスクを課するという実験を行い、被験者の動作をビデオでモニタリングして、動作の詳細なコーディングを行った。その結果、動作途中に「躊躇」や「停滞」などの微小な錯誤行動が、一分間に一度の割合で観察されたと報告している。このことは、タスク遂行としての行動が環境の探索と分離することなく進行していることの証拠となる(Reed and Schoenherr, 1992)。

Reedと同様の条件で、鈴木ら(1997)は、被験者がコーヒーを作る環境を複雑な条件と単純な条件とで比較すると、複雑な条件でマイクロスリップの生起頻度が増加したことを報告している。また、被験者自らが自由に机上のレイアウトを変更してよい条件と、そうでない条件を設定すると、自由にレイアウトしてよい条件の方がマイクロスリップの生起が有意に低いことも述べている。さらに鈴木・佐々木(2001)は、行為タスクの入れ子構造に着目し、「コーヒーを入れる」「ミルクを入れる」などの上位ユニットと、「コーヒー容器のふたを取る」「スプーンで中身をすくう」などの下位ユニットを分類し、マイクロスリップの生起との関係を調べたところ、上位ユニットの分岐点にマイクロスリップの生起が増加することを確認した。つまり、マイクロスリップは上位タスクの分岐時に行為の制約が解放されることで生起すると解釈できる。

ある行為がマイクロスリップであるという判断を、観察者に委ねることなく定量的に評価するという研究が、複数の研究者によって試みられている。長島・茂木(2003)

は、Reed と同じ条件下で、被験者にデータグローブと 3 次元位置計測装置を装着し、マイクロスリップの動作とそうでない動作との手の軌道を解析し比較したところ、マイクロスリップ時の手先軌道の曲率が急激に変化することを報告している。また Mishima et al. (2007) は、Lee (1998) の τ 仮説によるマイクロスリップの特徴化を試みており、マイクロスリップが生起するとき、手先と目標対象との τ カップリングが線形性を失うと報告している。しかし、ここで示した二つの例は、あらかじめマイクロスリップであると観察者が判断した動作を解析対象としているため、マイクロスリップの定量的な特徴を抽出することはできても、マイクロスリップを含む行為そのものの定量的な評価をすることは困難であると考えられる。

マイクロスリップ研究の以上のような経緯から、本研究では、マイクロスリップの動力学的な特徴を、手先軌道の始動から到達までの最短軌道と実際に被験者が描いた手先軌道との比、これを手先軌道の冗長率として定義した。

$$\text{手先軌道の冗長率} = \frac{\text{手先軌道の距離}}{\text{最短軌道の距離}}$$

この定義によれば、マイクロスリップの生起するリーチング動作は、マイクロスリップを生起しない動作に比べ、冗長率が高いと考える。手先軌道の冗長性をもとにして、マイクロスリップの生起がタスク制約によってどのように変化するかを示す実験を計画した。

2 実験

2.1 実験 1：静止対象へのリーチング

一つの静止した対象におけるリーチングにおいて、どのような要因が手先軌道の冗長率に影響を与えるのかを明らかにする実験を行った。本実験では変動する要因として、対象の大きさとその位置を用いた。

2.1.1 方法

提示刺激 実験のセッティングの模式図を図 1 に示す。被験者のリーチングの目標となる対象は、暗室内のプロジェクターからスクリーンに背面透過式で投影された、スクリーン上を提示刺激平面として定義し、提示刺激平面上にリーチング対象を表示した。リーチング対象の表示範囲は、提示刺激平面の中心を点 O とし、点 O から半径 60cm の円内とした (図 2)。なお、点 O の高さは、被験者の身長に応じて、胸から首元までの間の高さに調節した。

提示刺激の描画、及び運動の測定と保存を制御する計算機は、東芝製 Dynabook CX1/212CE PACX1212CMH (256KB メモリ、プロセッサ 1.2GHz) を使用した。提示刺激を映写するプロジェクターは、Sony 製 VPL-CX21 を使用した。光出力は標準で 1,600 ルーメン、解像度は 1,024×768 ドット、リフレッシュレートは 60Hz である。

スクリーンの投影には背面透過式を使用するため、投影モードを左右反転モードに設定した。プロジェクターの映像を投影するスクリーンは、素材が白地のナイロン性で、透過性が高く、光が拡散しにくい薄地のものを使用した。

運動の測定 運動の測定には、磁気性三次元位置測定器 (Polhemus 社 *Fastrak*) を用いた。サンプリングレートは、2 個のレーザーを使用するため 60Hz であった。提示刺激の表示と同時に測定を開始し、リーチングが成功 (あるいは失敗) と判定された時刻を測定の終了時刻とした。測定データは一試行の測定の終了後にファイルに書き出された。

2 個のレーザーは、それぞれ被験者の右手人差し指 (第一関節及び第二関節の中間位置、手の甲側) と、右腕の肘頭の位置に装着した。それぞれのレーザーは皮膚に密着した状態でテープを巻いて固定し、さらにその上からサポータを着用した。2 個のレーザーを固定した状態で手先の運動に支障がないことを、被験者本人から口答で確認した。

リーチングの成否の判定 リーチングの成否の判定は、右手人差し指の先端の位置と、リーチング対象の位置の距離が半径 3cm 以内まで接近した場合と定義した。

実験前の被験者への教示 被験者にレーザーを装着したのち、以下の点を教示した。

- 右腕を伸ばし、スクリーンに右手の手の平がぴったりつく場所で直立すること。
- 画面上に対象が現れるまで、右手の力を抜いて直立した姿勢でいること。
- 画面上に対象が現れたのを確認したのち、無理のない姿勢で右手人差し指で触れること。

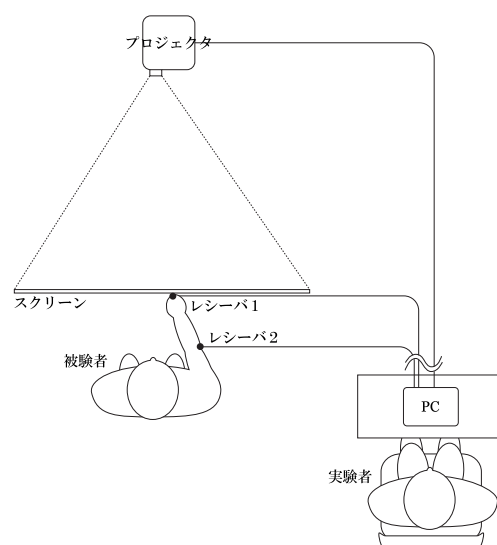


図 1: 実験環境の模式図

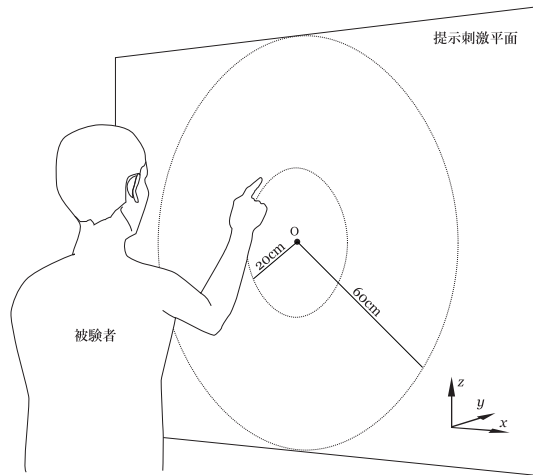


図 2: 実験の状況

- 画面上に指を触れたまま、指を静止、あるいは移動させないこと。

測定される時系列データ 1 個のレーザーによって測定される時系列データは、そのレーザーの三次元位置 (x, y, z) とオイラー角 (ψ, θ, ϕ) である。手先、肘のそれぞれの時系列データ、及びリーチングの対象となる n 個の提示刺激の位置を各試行毎に測定した。

データの前処理 取得された三次元データは平滑化するため、フィルタリングに単純移動平均を用い、移動平均の範囲は時系列データの近傍前後 4 点とした。

条件 リーチング対象の半径が一試行毎に 1cm から 4cm の区間でランダムに変動するよう設定した。また、リーチング対象の提示位置は、提示刺激平面の中心から半径 20cm の円内に、ランダムな位置で描画されるよう設定した。

被験者 実験 1 の被験者には大学生 5 名（健常成人男性 2 名、健常成人女性 3 名）に協力を要請し、快諾された上で実験を行った。被験者のうち、2 名が右利き、3 名が左利きであった。

手続き 被験者 1 名につき、実験は 5 分間実施された。被験者には提示刺激平面の黒い丸の対象に対して右手で触れるよう教示した。教示の後、何試行かの練習を行った。

2.1.2 結果

全被験者の実験データから、手先の運動開始時の位置から到達位置までの距離、及び対象の大きさを独立変数とし、軌道の冗長率を従属変数として重回帰分析を行った。その結果、回帰式に有意差が認められた ($F(2, 298) = 10.575, p < .0001$)。また、回帰式の回帰係数は、手先の初期位置と対象との距離が有意であった ($t = 4.546, p <$

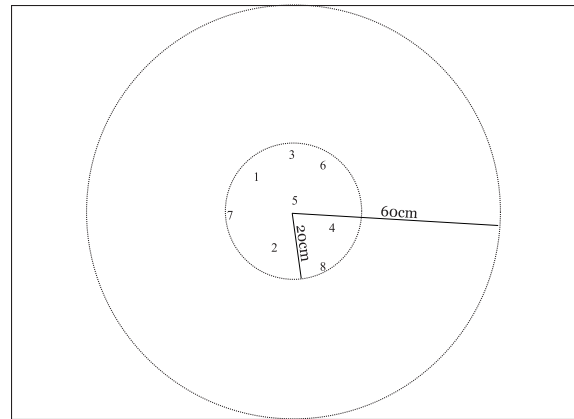


図 3: 実験 2 の提示刺激の例（順列あり、対象個数 8 個）

.0001), 対象の大きさの回帰係数には有意差は認められなかった。

2.1.3 実験 1 の考察

この結果から、リーチング開始時における手先位置と、対象位置がタスク制約として、軌道の冗長性をもたらしていることが示唆された。手先位置との距離が大きいほど、対象位置までの手先軌道の選択の幅が広がり、その選択の幅によって軌道の冗長性も増大したと考えられる。しかし、リーチングに伴う筋骨格系のダイナミクスが手先軌道を大きく曲げた可能性は否定できない。

2.2 実験 2: 順列を持つ対象群におけるリーチング

複数の対象へのリーチングの中で、順列というタスク制約によって、手先軌道の冗長率をどのように増減させるかを明らかにするため実験を行った。

2.2.1 方法

実験 2 の方法の多くは実験 1 の方法と同様である。実験 1 と異なる実験条件、被験者、手続きに関して説明する。

条件 複数のリーチング対象の提示位置は、提示刺激平面の中心から半径 20cm の円内に、また、他の対象からは 10cm 以上離れた位置で、ランダムな位置で配置されるよう設定した。対象の個数は一試行毎に 1 個から 8 個までランダムに設定した。提示する対象は、順列なしの条件では黒い円を、順列ありの条件では数字を半径 1.5cm の円内に描画した (図 3)。なお、対象にリーチングを行うと、瞬時に画面上から消えるよう設定した。

被験者 実験 2 の被験者には、実験 1 の被験者に 1 名を新たに加え、大学生 6 名（健常成人男性 3 名、健常成人女性 3 名）に協力を要請し、快諾の上で実験を行った。被験者のうち、3 名が右利き、3 名が左利きであった。

手続き 被験者1名につき、実験は順列あり、順列なしの条件を各10分間実施した。順列なしの実験では、被験者には提示刺激平面の複数の黒い丸の対象に対して、右手で触れるよう教示した。順列ありの実験では、被験者には提示刺激平面の複数の数字の対象に対して、1から昇順に右手で触れるよう教示した。教示の後、何試行かの練習を行った。

2.2.2 結果

全被験者の試行を2(順列あり・なし)×8(対象の個数1~8)の2要因とも被験者内計画による反復測定分散分析を行った。順列と対象個数の交互作用のグラフを図4に示す。順列なしよりも順列ありの方が冗長率の平均は高いことが確認されたが、有意差は見られなかった。対象個数が増加すると、手先軌道の冗長率もまた増加する傾向には有意差が見られた($F(7, 35) = 6.142, p < .0001$)。順列と対象個数の交互作用には有意傾向が見られた($F(7, 35) = 2.202, p < .01$)。

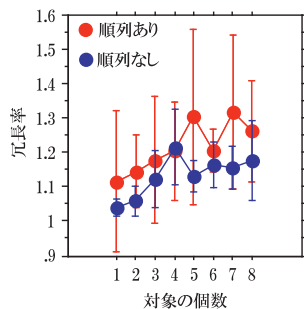


図4: 順列と対象個数の交互作用

2.2.3 実験2の考察

以上の結果から、順列と対象の個数というタスク制約が手先軌道の冗長性に影響を与えていることが示唆された。計算論的に見れば、複数の対象にリーチングするというタスクは、対象の個数が増加するほど、軌道計画が困難になると考えるであろう。しかし、軌道計画の困難さが軌道の冗長性として観察されるということに、計算モデルはどのような最適化規範によって説明すべきだろうか。

3 考察

動物の運動に関するあらゆるモデルの前提にあるのは、タスクの遂行のために、身体ダイナミクスの生成メカニズムを内部モデルとして神経系に保存しているということである。しかし、タスク制約によって運動の冗長性が観察されることと、運動の計画が常に運動に先行して決定され実行されるという仮定とは相容れるものではない。行為は遂行的であり、探索的でもあるという知覚-行為循環の観点に立てば、変化する状況に対する適切な運動の

選択が、行為に潜在的に含まれており、その選択が微小な探索行動として観察されると考えることが可能である。

動物が棲息する環境には注意(無視)する対象が無数にあり、その中から生存に不可欠な情報を探索し、ピックアップした情報を利用して行為を調整する。本研究で観察したヒトのリーチングにも同様に、情報の探索過程とタスクの遂行過程が行為に埋め込まれており、手先軌道の冗長性として観察されたと結論づけられる。

文献

- Flash, T. and N. Hogan (1985). "The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model". *J Neurosci*, **7** pp.1688-1703.
- Harris, C. M. and D. M. Wolpert (1998). "Signal-dependent noise determines motor planning". *Nature*, **394**(20) pp.780-784.
- Lee, D. N. (1998). "Guiding Movement by Coupling Taus". *Ecological Psychology*, **10**(3-4) pp.221-250.
- Mishima, H., N. Furuyama, K. Suzuki, and M. Takiyama (2007). "An Attempt to Quantitatively Characterize Microslips from the Viewpoint of General τ Theory". *Studies in Perception & Action IX*, pp. 99-102.
- Reed, E. S. and D. Schoenherr (1992). "The Neuropathology of Everyday Life: On the Nature and Significance of Microslips in Everyday Activities". *Unpublished manuscript*.
- Uno, Y., M. Kawato, and R. Suzuki (1989). "Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement - minimum torque-change model". *Biological Cybernetics*, **61**(2) pp.89-101.
- 鈴木健太郎・三嶋博之・佐々木正人 (1997). 「アフォーダンスと行為の多様性—マイクロスリップをめぐる—」. *日本ファジイ学会誌*, **9**(6) pp.826-837.
- 鈴木健太郎・佐々木正人 (2001). 「行為の潜在的なユニット選択に働くタスク制約: 日常タスクに観察されるマイクロスリップの分析」. *認知科学*, **8**(2).
- 長島久幸・茂木健一郎 (2003). 「Microslipsに見られる、視覚情報の統合と運動」. *電子情報通信学会技術研究報告. NC, ニューロコンピューティング*, **102**(627) pp.13-18.