

経由点を含む二点間到達運動に関する運動制御モデルの提案 Motor Control Model for Reaching Movements with Via-Points.

神原 裕行 (PY)^{†,‡}, 金 敬植 ^{†,‡}, 小池 康晴 ^{†,‡}

Hiroyuki Kambara(PY), Kyoungsik Kim, and Yasuharu Koike

[†] 東京工業大学精密工学研究所, [‡]JST CREST

hkambara@hi.pi.titech.ac.jp

Abstract— We have proposed a computational model that enables goal-directed control of arm reaching task and shown that the model generates human-like smooth motions in point-to-point reaching movements just by specifying target points. Here, we apply the model to more complex task such as reaching movements in which a via-point exists between initial and target points.

Keywords— Reaching Movement, Motor Primitive, Motor Planning

1 はじめに

腕の随意運動に関する研究が古くから行われてきたが、脳がどのようなメカニズムで腕を制御しているのかは未だ解明されていない。到達運動に関しても、運動前の詳細な運動計画の有無などが議論されている [1, 2]。我々はこれまでに、軌道計画を行わずに腕の二点間到達運動を実現する運動制御モデル (図 1) を提案してきた [3]。また、このモデルを用いて人間やサル の二点間到達運動の特徴を目標軌道を計画することなく再現できることを確かめてきた [3, 4]。

一方、脳の制御メカニズムに関して、「脳は単純で要素的な運動単位 (運動プリミティブ) を組み合わせ、複雑な運動を実現している」という考え方が存在する。現在までも、人間の運動の軌跡や筋活動データから運動プリミティブを抽出する研究が行われてきている [5, 6]。本研究では、ある点とある点を結ぶ二点間到達運動を運動プリミティブとして組み合わせ、より複雑な運動を実現する制御システムの構築を目指す。具体的には、図 1 の制御モデルを用いて生成される二点間到達運動を組み合わせ、経由点の存在する到達運動を実現し、計算機上で得られたシミュレーション結果と人間の実際の運動結果を比較する。

2 制御システムの概要

ここでは、我々が提案してきた二点間到達運動制御モデルの概略を説明した後、そのモデルを用いて経由点が存在する到達運動を実現する方法を示す。

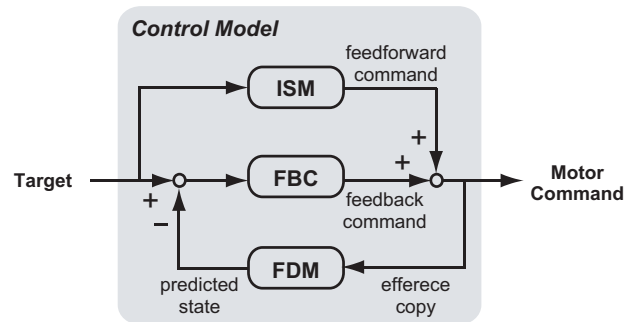


図 1: 二点間到達運動制御モデル。

2.1 二点間到達運動制御モデル

図 1 に示された制御モデルの構成要素は、ISM (inverse statics model), FDM (forward dynamics model), および FBC (feedback controller) の三つである。ISM はターゲットとして入力された到達運動の終点を受け取り、その終点が腕の平衡状態となるような運動指令を常に出力する。一方、FDM は運動指令の遠心性コピーを用いて一定時間先の将来の腕の状態を毎時刻予測する。さらに、予測された将来の状態と終点における腕の状態との誤差が FBC へと送られ、この誤差を少なくするための運動指令を FBC が出力する。そして、ISM と FBC の出力は足し合わされて腕の各筋肉へ運動指令として送られる。ここで、制御モデルへ入力されるターゲットは到達運動の終点における腕の状態だけである。つまり、我々のモデルは始点と終点をどのように結ぶかを指定する目標軌道を与えられることなく、腕を終点に到達させるための運動指令を生成する。

2.2 経由点が存在する運動の実現

図 2 に、始点 (SP) と終点 (EP) の間の経由点 (VP) を通過する到達運動を、二つの運動プリミティブ (二点間到達運動) を組み合わせ、実現する方法の概念図を示す。この方法に基づいて滑らかに経由点を通る運動を生成するには、二つのパラメータを調節する必要がある。一つ目は二つの運動プリミティブ (第 1, 第 2 プリミティブ) を切り替えるタイミングであり、二つ目は第 1 プリミティブへ与えるターゲット (第 1 ターゲット) の位置である。腕が第 1 ターゲットで停止することなく終点まで到達するには、第 1 プリミティブが終了す

る前に第2プリミティブを開始する必要がある。一方、第2プリミティブの開始を早めた状況で正確に経由点を通るためには、第1ターゲットを実際の経由点とは異なる位置に設定する必要がある。ここで、切り替えのタイミングを決定する方法としては、時間情報を用いて決定する方法と、腕の位置情報から決定する方法が考えられる。本研究では、FDMが予測する将来の手先位置が第1ターゲットにある一定の距離以上近づいた場合にプリミティブを切り替える。つまり、切り替えのタイミングを何ミリ秒という時間に関するパラメータではなく、ターゲットと手先の距離に関するパラメータで決定する。

3 実験結果

シミュレーションにおける腕のモデルとして、肩を含む矢状面内で動作する二関節六筋のモデルを用いる [3]。また、制御モデルを構成する FDM は三層のニューラルネットワーク、一方、ISM と FBC は NRBF (normalized gaussian radial basis function) ネットワークを用いて実装する。また、それらの学習は矢上面内の様々なパターンの二点間到達運動を実行させながら行わせる [3]。

図3に経由点のある到達運動のデータを示す。図中、左側が被験者、右側がシミュレーションのデータである。ここで、経由点のある到達運動を実現するための二つのパラメータ(2.2節)は、被験者の運動軌道を参考に決定した。また、経由点は半径 2.5cm の円としてある。図3には、始点と終点を結ぶ線分に対して対称に配置された経由点を通る二種類の到達運動のデータが示されている。被験者のデータより、経由点がたとえ対称的に配置されている運動でもそれらの軌道は対称的にならないことが確かめられる。体に近い経由点を通る運動では速度波形に二つのピークが現れる。逆に体から遠い経由点に対する運動では速度波形のピークは一つである。一方、運動時間や速度の大きさに違いはあるものの、被験者の速度波形の特徴をシミュレーションでも再現できていることがわかる。

4 まとめ

本研究では、二点間到達運動を運動の要素的単位(運動プリミティブ)として組み合わせて、経由点が存在する到達運動を実現するシステムを提案した。さらに、計算機上で人間の運動の特徴を再現できる可能性を示した。今後の課題の一つとして、経由点が複数ある運動に提案モデルを適用することが挙げられる。また今回は、プリミティブの組み合わせ方を決定するパラメータを被験者のデータを参考に調節したが、それらのパラメータを自律的に学習する運動計画モデルを構築することも今後の課題である。その際、運動の評価関数とともに最適化アルゴリズムを設計する必要がある。経由点が存在する運動の評価関数はこれまでもいくつかのもの

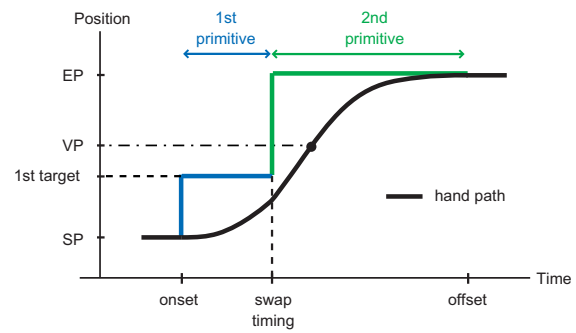


図2: 二つのプリミティブを組み合わせた運動の概念図。

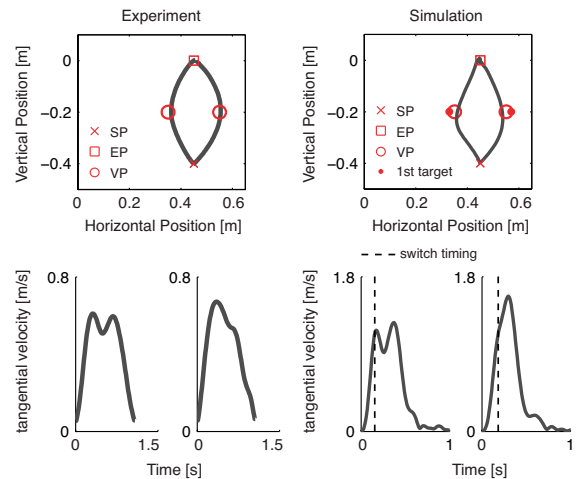


図3: 経由点のある到達運動。上段: 手先の軌跡(肩の位置が原点)、下段: 手先の速度波形。

が提案されているが、それらの評価関数を脳がどのようにして最適化しているのかは、ほとんど示されていない。始点、経由点、終点を結ぶ詳細な目標軌道を計画するためには多数のパラメータが必要となるため、一般的に複雑な最適化計算が必要となる。本研究で提案した手法では、二点間の運動をプリミティブとして組み合わせることにより、パラメータの数を少なくすることができるため、人間が行っているような瞬時の運動計画を実現できる可能性がある。

謝辞: 本研究は科研費(Start-up 19860031)、および JST CREST の助成によるものであり、ここに改めて敬意を表する。

参考文献

- [1] E. Todorov and M. I. Jordan (2002) "Optimal feedback control as a theory of motor coordination." *Nature Neuroscience.*, **5**, 1226-1235.
- [2] 森重健一、宮本弘之、大須理英子、川人光男 (2004) "経由点到達運動の位置分散は軌道計画・実行の逐次モデルを支持する." *電子情報通信学会論文誌*, **J87-D-II**, **2**, 716-725.
- [3] H. Kambara, K. S. Kim, D. Shin, M. Sato and Y. Koike (2006) "Motor control-learning model for reaching movements." *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks* 2006, 555-562.
- [4] 神原 裕行、金 載然、佐藤 誠、小池 康晴 (2006) "強化学習とフィードバック誤差学習を用いた腕の姿勢制御." *電子情報通信学会論文誌*, **J89-D**, **5**, 1036-1048.
- [5] Y. Wada, Y. Koike, E. Vatikiotis-Bateson and M. Kawato (2006) "A computational theory for movement pattern recognition based on optimal movement pattern generation." *Biological Cybernetics*, **73**, **1**, 15-25.
- [6] 李 鍾昊, 市屋 剛, 金 載然, 佐藤 誠, 和田 安弘, 小池 康晴 (2005) "HMMを用いた筋電信号からの運動プリミティブ抽出." *電子情報通信学会論文誌*, **J89-D-II**, **2**, 188-199.