

# 運動指令の疎表現と運動計画

数理・推論研究系 学習推論グループ

准教授 池田 思朗

## 1 はじめに

我々が日常的に困難なく行なっている運動を脳がどのように実現しているのかは、未解決な問題である。例えば腕を伸ばし物を取る運動を考えてみる。一般に手の通る軌道はゆるやかに外にふくらむ曲線を描き、速さは時間とともにベル型に変化する。しかし、目的を達成する手の軌道は無限に存在し、腕を制御するための筋は関節の数に対して冗長である。このような状況の下、適切な運動指令を脳が素早く生成する仕組みを明らかにすることは、計算論的神経科学における興味深い問題のひとつである。当初、この問題に対しては jerk の最小化や (Flash & Hogan, 1985) やトルク変化最小 (Uno et al., 1989) といった物理的な規範を用いた説明が行なわれた。その後脳からの信号に対する筋のノイズを仮定し、正確な運動と素早い達成のバランスから運動制御の性質を説明できることを示された (Harris & Wolpert, 1998)。

ここでは新たな視点からこの問題を考える。腕の筋は冗長に配置されているため、ひとつの軌道を実現する全ての筋への運動指令パターンは無数に存在する。したがって、ひとつの運動指令を選ぶことは、軌道を選ぶだけでなく、特定の筋の活動パターンを選ぶことである。我々は、脳内における運動指令の表現が、何らかの関数系で表現されていると仮定し、目的を達成するものうち「疎」な運動指令の表現を求める問題として運動計画を定式化した (Ikeda & Sakaguchi, 2009; Sakaguchi & Ikeda, 2007)。

## 2 運動指令表現の最適化

運動指令は脳から筋に送られる時系列信号であるが、どうやって時系列信号を生成するかについては、未だに完全には理解されていない。ここでは運動指令が以下のように決められた基底の線形関数として表現できると仮定する。

$$u_i(t) = \sum_j w_{ij} \phi_j(t), \quad w_{ij} \geq 0.$$

$u_i$  は  $i$  番目の筋への運動指令であり、 $\{\phi_j\}$  が基底である。係数  $W = (w_{ij})$  が運動指令を定めることからこの  $W$  が具体的な「運動指令表現」である。この仮定の下、運動計画は適当な運動指令表現  $W$  を求めることと同値である。しかし、筋は冗長性をもつため目的の運動を実現する  $W$  は無数に存在し、 $W$  を求める問題は不良設定問題である。ここでは運動の達成度を示す Error 項と  $W$  が疎となるように罰則項を用いることで問題を解く。具体的には以下の関数を用いる。

$$\text{Cost} = \text{Error}(W) + \lambda_1 \sum_{ij} w_{ij} + \lambda_2 \sum_{ij} w_{ij}^2.$$

水平面の制約された6筋2関節(肩と肘)腕モデルを用いて実験を行なった(図1) 図2に結果の一部を示す。手の軌道は図2(a)のようにゆるやかに湾曲した軌跡となった。これは人間の到達運動における典型的な特徴と類似している。速さの時間変化は図2(b)に示した通りベル型となった。こ

の結果も人間の到達運動と類似している．図 2(c) は 6 筋へ送られた運動指令である．多くの筋の運動指令は 0 となっており，筋の冗長性は取り去ることができている．

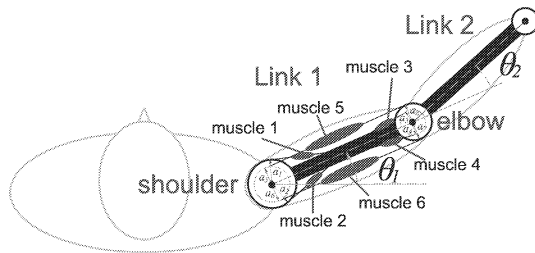
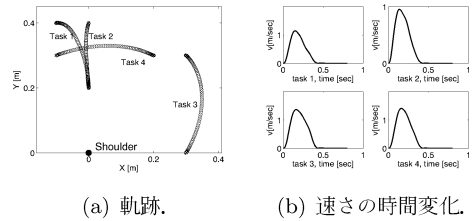
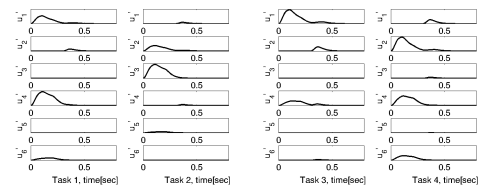


図 1: 6 筋 2 関節腕モデル: (Oyama & Uno, 2006)



(a) 軌跡. (b) 速さの時間変化.



(c) 6 筋へ送られた運動指令.

図 2: 数値実験の結果

### 3 まとめ

運動指令表現に関する簡単な仮定に基づく運動計画の方法を提案した．運動指令を基底の線形関数として定義し，その表現が「疎」となる運動指令を求めることによって筋の冗長性を吸収し，最適な運動指令を求めた．例として腕の到達運動を考え，数値実験を行なった．実験の結果，人間の動作を良く説明する運動が再現でき，筋シナジーの再現も観測できた．この考え方は，人間のような運動を実現するロボットなどの制御にも応用できるだろう．

### 参考文献

- Flash, T., & Hogan, N. (1985). The co-ordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model. *J. Neurosci.*, 5, 1688–1703.
- Harris, C. M., & Wolpert, D. M. (1998). Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, 394, 780–784.
- Ikeda, S., & Sakaguchi, Y. (2009). Motor planning as an optimization of command representation. *Proceedings of 48th IEEE Conf. on Decision and Control* (pp. 4499–4504). Shanghai, China.
- Oyama, T., & Uno, Y. (2006). Estimation of a human planned trajectory from a measured trajectory. *Systems and Computers in Japan*, 37, 1–11.
- Sakaguchi, Y., & Ikeda, S. (2007). Motor planning and sparse motor command representation. *Neurocomputing*, 70, 1748–1752.
- Uno, Y., Kawato, M., & Suzuki, R. (1989). Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement. minimum torque-change model. *Biol. Cyber.*, 62, 275–288.