

体性感覚情報に基づく到達運動制御の軌道生成能力の考察

渡邊 伊織 西井 淳
 山口大学大学院創成科学研究科

1 はじめに

人の上肢到達運動の運動計画が視覚座標系と身体座標系のいずれでなされているかについて長年論争が続いている。Nishii&Uchida (2016) は冗長アームの学習制御モデルを用いたシミュレーション実験により、視覚座標系に基づく運動制御は関節角空間での制御に比べてロバスト性及び汎化性能に優れた制御を実現しやすいと報告した。本研究では感覚運動変換の基本である筋長-筋指令変換における基本特徴量を用いた場合に、ロバスト性の高い到達運動を実現しうることを検証することを目的とした。

2 実験手法

各層の細胞数が順に 6,20,3,20,6 個の砂時計型ニューラルネットワークをコントローラとする運動制御モデルを構築した(図1)。制御対象は3リンク3関節6筋のアームモデルである。コントローラはアームから筋長 $l = (l_1, \dots, l_6)$ を取得し、その筋長での姿勢を維持する筋指令 $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_6)$ を出力できるよう事前学習を行う。コントローラの第3層には入出力層に比べて少数の細胞を配置しているので、その細胞活性度には、感覚運動変換に重要な情報(基本特徴量)が抽出される。運動制御を行う場合、例えば手先位置の y 座標を目標値 $y = y^d$ に近づける場合には、手先位置の誤差に応じたフィードバック信号を次式のように中間層の細胞の出力 $f_i (i = 1, 2, 3)$ に加算する。

$$f_i \leftarrow f_i + \left\{ \frac{y^d - y}{|y^d - y|} \beta + (y^d - y) \right\} \gamma \alpha_{yi}$$

ここで、 α_{yi} は手先 y 座標の $f_i (i = 1, 2, 3)$ による偏回帰係数、 β と γ は定数である。これにより第3層及び出力層の出力は $y = y^d$ となる筋長に対応する値に近づく。

アームモデルに用いた筋モデルは、各筋で発生する筋張

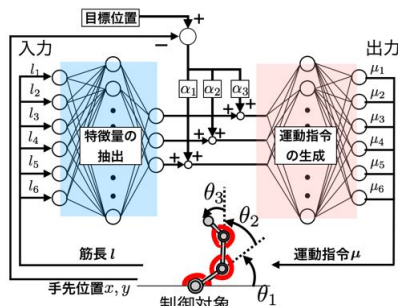


図1. 運動制御モデル。制御対象である3関節アームモデルの各リンクの質量及び長さは肩側から順に 3.0, 3.0, 1.5 kg 及び、0.3, 0.3, 0.15 m である。

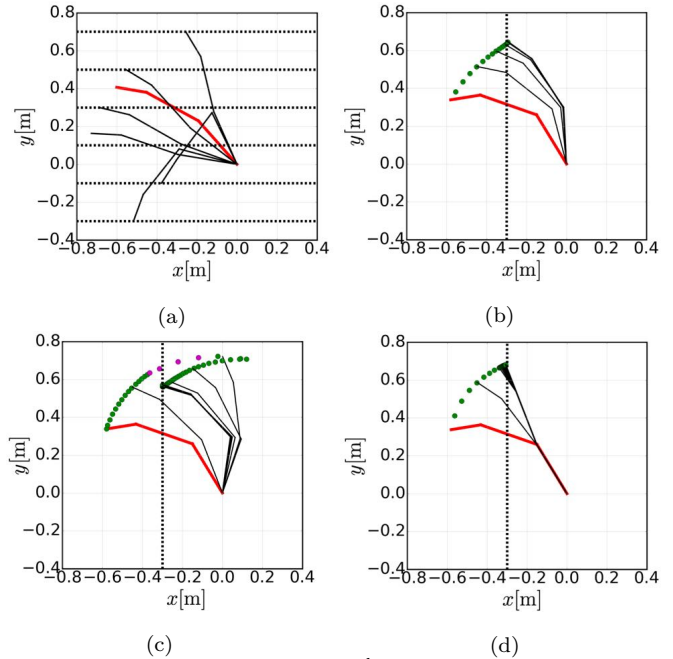


図2. (a) 様々な手先 y 座標目標値 ($y^d = -0.3, -0.1, \dots, 0.7$ m) への到達運動結果, (b) 運動中の手先位置の軌道, (c) 肩関節の外乱への対応, (d) 肩関節固定時の手先位置の軌道. (b)(c)(d)における目標値は $x^d = -0.3$ m である。赤線は初期姿勢、黒線は運動中のアームの姿勢、破線は目標位置、緑点は手先軌道を示す。初期姿勢は全て $\theta = (\frac{2}{3}\pi, \frac{2}{9}\pi, \frac{\pi}{6})$ である。

力を筋の粘弾性の合力で説明する Kelvin-Voigt モデルを用いた。コントローラからの筋指令により発生する筋張力及び関節における粘性力に基づいて各関節トルクを決定し、動力学計算によりアームの運動軌道を計算した。

3 結果・考察

制御モデルは手先の y 座標の様々な目標値に対する到達運動を実現し(図2(a))、直線性が高い軌道形状を示した(図2(b))。また運動中の目標位置を越える肩関節への外乱に対しても新たに軌道を生成し(図2(c))、関節を一部固定しても他の関節により運動タスクを達成できた(図2(d))。このように筋長-筋指令変換の基本特徴量を用いた制御でも冗長アームに対してロバスト性の高い軌道形状を生成できることから、人も同様の特徴量空間で運動計画や制御を行っている可能性がある。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 25282183, 26280101 の助成を受けたものです。