

ヒトの上肢運動の制御規範と軌道計画

苫小牧工業高等専門学校 ○小笠原紘樹, 岩瀬谷正男, 加島正

Abstract

We, human beings, select a specific trajectory among infinite number of ones when we move our hand from a point to another point. In this paper, human arm trajectories have been investigated from the theoretical and the experimental aspects, the planning strategy and the performance criterion have been proposed.

Key words : human arm movement, planning strategy, performance criterion.

1. 緒言

ヒトは手を2点間で移動するとき、無限の経路があるなかで特定の軌道を選択し、しかも特定の速度パターンで運動している。このようなヒトの運動軌道の特性を解析することはヒトの優れた運動機能をロボットなどの工学的な機械に応用するための重要な課題である。

ヒトの運動の軌道計画は多くの観点から研究が進められている。ヒトが幾何学空間で軌道を計画していると考えてFlashとHoganは作業座標空間における躍度最小モデルを報告している¹⁾。このモデルは運動時間および運動の始点と終点を作業座標で与えると、軌道が時間の多項式で一意に決まるというものである。この軌道は常に直線の経路で、曲線を描くことはない。また、Unoらによって、力学的な観点から関節トルク変化最小モデルが報告されている²⁾。このモデルでは、軌道がダイナミクスで決定されるというものである。しかし、このモデルは手に質量を保持した場合、軌道に変化が生じてしまう。ヒトの軌道は運動によっては曲線を描き、また、質量を保持しても軌道に変化は無いと報告されており、この二つのモデルは、いずれも完全にはその条件を満たしていない。

本研究ではヒトは関節座標空間での躍度を制御規範とし、さらに手先の速度が動作の midpoint で最大になるように肩関節の運動に対する肘関節の動作時間を調節して軌道を計画していると考え、このようにして生成した軌道と計測軌道を比較検討して、本研究で提案する軌道計画の妥当性を検証する。

2. 軌道解析システム

本研究では、ヒトの最も自然な動作である垂直平面内での運動を解析する。上肢の運動軌道をビデオカメラ (Victor GR-X5) を用いて60枚/秒で撮影し、各コマを静止画としてコンピュータに送り解析する。Fig.1に計測装置の概要を示す。ここではカメラで撮影した画像と作業座標とを関連付けるためカメラと被験者の間に、基準線を描いたアクリル板を設置した計測画像と作業座標の間には、

$$\begin{pmatrix} x_r \\ y_r \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix}$$

の関係がある。ここで、 $(x_r, y_r)^T$ と $(x_p, y_p)^T$ はそれぞれ、作業座標の点とパソコン上の計測画像の点

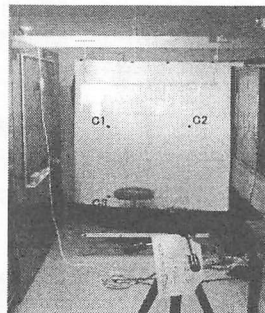


Fig.1 Experimental system

であり、座標変換行列 A は図1の基準点 (c_1, c_2, c_3) を用いて算出する。

本研究で開発した計測システムのソフトウェアはビデオカメラで計測した画像データを読み込み、簡単なマウス操作を実行することで肩を原点とした肘と手先の座標および肩と肘の関節角を出力する。さらに肩と肘の角度を3次のB-Spline曲線で近似し、これらを微分して角速度を求めることにより手先の速度を算出することができる。

このB-Splineは測定点を $Q_i, i=1 \dots n$ (計測点数) とすると、

$$P(t) = \sum_{i=0}^{n-1} B_{i,k}(t) Q_i \quad (1)$$

と近似する。ここで、 k は階数であり、 $k \geq 2$ (1次以上) の場合は、

$$B_{i,k}(t) = \frac{t-t_i}{t_{i+k}-t_i} B_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+1}-t}{t_{i+1}-t_{i+k}} B_{i+1,k-1}(t) \quad (2)$$

と定義される。今回は3次曲線で近似するので $k=4$ である。次に $s = t - t_i / \Delta t$ とおき、(2)式を $k=4$ まで解くことで、3次のB-Spline関数を求めることができる。また、測定点 Q_i の速度はこの関数を微分することにより、

$$\frac{dP(s)}{dt} = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{dB_{i,k}}{dt}(s) Q_i \quad (3)$$

と導くことができる。

3. 軌道計画

3.1 躍度最小軌道

本研究では、関節座標空間の躍度最小モデルにより運動軌道の計画を行った。ヒトの運動を平面に限定すると、躍度最少の評価関数は t_f を動作時間として、

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (\ddot{\theta}_1(t)^2 + \ddot{\theta}_2(t)^2) dt \quad (4)$$

と定義できる。ここで、 θ_1 と θ_2 はそれぞれ、Fig.2に示すように肩と肘の関節角である。(4)式を最小とする条件は、

$$\begin{cases} \theta_1^{(6)} = 0 \\ \theta_2^{(6)} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

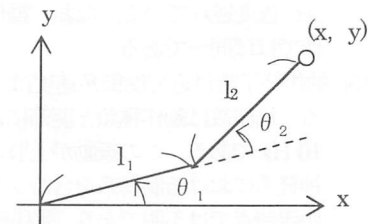


Fig.2 Arm model

であり、動作の開始と終了時点での初期条件は、

$$\begin{cases} \theta_i(0) = \theta_{is}, \dot{\theta}_i(0) = 0, \ddot{\theta}_i(0) = 0 \\ \theta_i(t_f) = \theta_{if}, \dot{\theta}_i(t_f) = 0, \ddot{\theta}_i(t_f) = 0 \end{cases}, i=1,2 \quad (6)$$

となる。ここで θ_{is} と θ_{if} はそれぞれ、動作開始時と動作終了時の関節角である。(5)式を(6)式の条件で解くと、

$$\theta_i(s) = \theta_{is} + (\theta_{if} - \theta_{is})(15s^4 - 6s^5 - 10s^3), i=1,2 \quad (7)$$

を得る。ここで $s=t/t_f$ である。また、手先の速度は、

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (8)$$

となる。次に、 $(\dot{x}, \dot{y})^T$ と $(\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2)^T$ の関係は上腕と前腕の長さをそれぞれ l_1 と l_2 とすると、

$$\begin{cases} \dot{x} = -l_1\dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \dot{y} = l_1\dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (9)$$

となり、速度の関係を得る。

3. 2 動作時間の調節

本研究では、ヒトは基本的には関節角の躍度を最小にする様に軌道を計画していると考えられる。ただし、この条件に加えて、手先の速度が動作の midpoint ($s = 0.5$) で速度が最大になるように肩関節に対する肘関節の動作時間を調節していると考えられる。まず、肘に関節角の軌道は(7)式と同様に、

$$\theta_2(s) = \theta_{2s} + (\theta_{2f} - \theta_{2s})(15p^4 - 6p^5 - 10p^3) \quad (10)$$

となる。ただし、 $p, 0 \leq p \leq 1$ は肘関節が停止している時間を除いた、運動中の時間である。肩関節に対する肘関節の動作時間のずれを d とすると肩に対しての肘の動作開始が遅れる場合の s と p の関係は、

$$p = \frac{s-d}{1-d} \quad (11)$$

ただし、 $0 \leq s < d$ では $p=0$ である。また、肩に対して肘の動作が早期に終了する場合は、

$$p = \frac{s}{1-d} \quad (12)$$

ただし、 $d \leq s \leq 1$ では $p=0$ である。ここで(8)式を微分すると、

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)/dt}{2\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \quad (13)$$

なので、 $s = 0.5$ で最大速度となる条件は、

$$\begin{aligned} \left. \frac{d(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)}{dt} \right|_{s=0.5} &= \left[2l_1^2 \dot{\theta}_1 \ddot{\theta}_1 + 2l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \right. \\ &+ 2l_1 l_2 (\cos \theta_2 (2\dot{\theta}_1 \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \ddot{\theta}_2) - \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2) \left. \right]_{s=0.5} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

となる。(14)式は d の関数となるので、これを満足する d の値を2分割法により決定した。

4. 結果と考察

ヒトの上肢の代表的な動作と考えられる2種類の腕の振り上げ動作と1種類の腕の突き出し動作の計3種類の動作について解析・検討を行った。Fig. 3に解析結果の一例を示す。

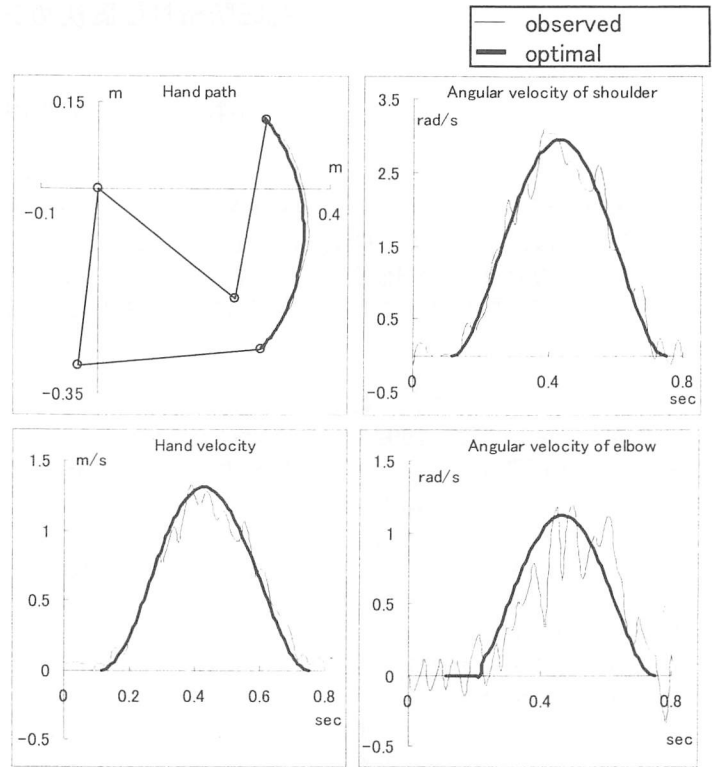


Fig. 3 Trajectory

これは、腕を垂直に垂らし肘を曲げた状態から、手先を目線の高さ程度まで振り上げる動作の解析結果である。

手の経路の図からわかるように、躍度最小モデルの経路は極めて計測結果に類似しており、手の振り上げ動作の運動軌道の特徴として指摘されている身体の外に膨らむ曲線経路を生成している。また、肘と肩の角速度及び、手先の速度についても計測結果に類似している。さらに、肘と肩の角速度の図の計測結果を見比べると本研究で想定したように、肩に比べ肘が0.1s程遅れて運動を開始していることがわかる。同様の結果は他の2動作にも確認できた。これらの結果からヒトは関節座標空間で躍度を最小にするように軌道を計画しており、手先の速度が動作の midpoint で最大となるように肩関節に対して肘関節の動作時間を調節していると推察できる。

5. 結言

関節角の躍度最小モデルのもとで、手先の速度が動作の midpoint で速度が最大になるように肩関節に対する肘関節の動作時間を調節しているという条件で軌道を生成した。その結果、作業座標空間における躍度最小軌道や関節トルク変化最小軌道で計画した軌道に比べ、ヒトの上肢の運動軌道の特性を満たした軌道を生成することができた。ただし、今回対象としたのは基本的な限られた動作である。今後より多くの動作を解析するとともに多くの被験者の軌道を解析して、ヒトの軌道計画に対する知見を深めたい。

参考文献

- 1) T.Flash, N.Hogan : The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model, J Neurosci (1985), 5:1688-1703.
- 2) Y.Uno et al: Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multijoint Arm Movement, Biol. Cybern.(1989) 61, 89-101.