

ジャイロセンサと画像情報を用いたヒトの運動軌道特性の解析

苫小牧工業高等専門学校 ○笹田大輔, 岩瀬谷正男, 加島正

Abstract

In this study, we have investigated human arm trajectories under unrestricted movement conditions. First, trajectory analysis system has been developed, in which image information from a video camera and angular velocity signals from gyro sensors are processed. Second, various information from the system precisely examined, and the newly discovered properties as well as previously reported ones have been presented.

Key words: human arm trajectory, angular velocity, gyro sensor

1. 緒 言

ヒトは高度な運動制御機能を持っており、これを工学的に解析することは、優れた機械システムの開発を実現するための重要な検討課題である。ヒトの運動制御機能を解明するための最も基本的な研究は、ヒトの上肢の運動中における手先の軌道を計測してその特性を解析することである。運動軌道の特性に関して、1) 手先の速度は1つのピークを持つベル型である、2) 手先の軌道は直線あるいは肩を中心とした凸状の簡単な曲線である。といった作業座標空間での特性が解明されている¹²⁾。さらに、Atkeson と Hollerbach³⁾は関節座標空間での直線的な関係をもとに肘関節の動作開始速度を調整することでヒトの軌道が再現できることを報告している。これらの研究で用いられたのは、水平面の手先の軌道を計測する2個のリンク機構を用いたシステム、あるいは赤外線マーカを必要箇所に取り付けてその位置を追従することで垂直面での軌道を計測するシステム、などである。これらの計測システムは非常に大型になり、しかも基本的には作業座標空間での軌道を計測していた。しかし、このような作業座標空間での検討に加えて、ヒトの運動軌道の特性を関節座標空間で厳密に解析するには関節角自体を計測することが重要になる。

本研究では、ヒトの上腕が拘束されない状態で、しかも肩と肘関節の純粋な2自由度の運動が可能な垂直面内での運動を対象とする。また、画像をもとにした作業座標空間での情報に加えて、ジャイロセンサを上腕と前腕に取り付けて関節角度の変化を直接計測できるシステムを開発した。さらに、この計測結果から関節座標空間での運動軌道を解析することでヒトの運動軌道の特性を明らかにした。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概要を Fig.1 に示す。被験者は椅子に座り、被験者に対して右側に設置されているアクリル板と平行に上肢を動作させる。アクリル板は、キャリブレーションを行うために地面に対して垂直に設置され、600 mm 四方の正方形が描かれている。運動中の腕の軌道をビデオカメラの収録し、この動画を毎秒60フレーム(60 Hz)の静止画に分割して、動作の開始と終了位置での手先位置および関節角度を算出する。次に肩と肘関節の角速度を検出するためにジャイロセンサ(株)村田製作所製)を被験者の前腕と上腕に固定し、1000 Hz の周波数で角速度信号をパソコンに取り込んで軌道を求める。さらに、画像情報から求めた関節角度を初期値として、

この角速度信号を積分することで各時間の関節角を求め、これらの計測結果をもとに手先位置や手先速度を算出する。なお、このように求めた動作終了時点での手先位置と画像から求めた手先位置を比較したところ誤差は手先の移動量に対して5%以内であり、この関節角速度を基にした解析が十分に信頼できることを確認している。

2.2 動作条件

本研究で設定した上肢の動作は、鉛直平面内における垂直および斜め方向の振り上げ動作2種類と、被験者の前方または斜め上方に突き出す動作2種類の計4種類である。各動作の詳細は以下の通りである。

- 動作 1 上肢に力を入れずに下方に垂らした状態から、手先を目線の高さ程度まで振り上げる動作
- 動作 2 前腕を地面に対して水平の状態維持し、そこから動作1と同じ高さ程度まで振り上げる動作
- 動作 3 動作2と同じ状態から被験者の斜め上方に手先を突き出す動作
- 動作 4 手先の高さを肩の高さに維持し、上肢を折り曲げた状態から、前方に手先を突き出す動作

なお、各動作について、自然な動作を行うために動作開始と終了時の姿勢は詳細な指定をせず、動作中は上肢に不必要な力を入れないように指示した。

3. 軌道の解析

Fig.1 に示すように、上腕の長さを l_1 、肘から手先までの長さを l_2 、水平方向を基準にした肩の関節角度を θ_1 、上腕の角度を基準にしたときの前腕の角度を θ_2 とする。この時作業座標空間 (x, y) と関節座標空間 (θ_1, θ_2) の間には、

$$\begin{cases} x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (1)$$

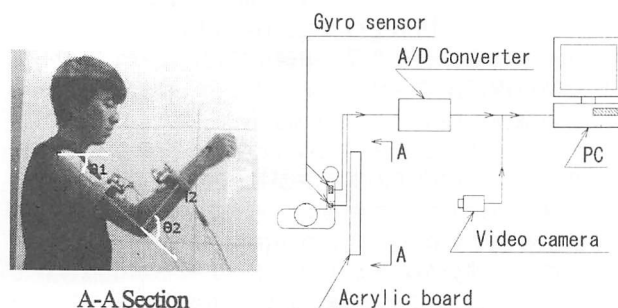


Fig.1 Experimental schematic view

の関係がある。また、動作開始からジャイロセンサの i 番目の出力電圧を V_i V, センサが定常状態で出力する電圧を V_{st} V, サンプリング周期は $f=0.001$ sec, センサの感度 $S=6.70$ mV/(deg./sec.) とすると、角度の変化量 $d\theta_i$ は

$$d\theta_i = \frac{(V_i - V_{st}) \times f}{S} = \frac{(V_i - V_{st}) \times 0.001}{6.70} \quad (2)$$

である。ここで、 $i-1$ 番目の角度を θ_{i-1} , i 番目の角度を θ_i とすると

$$\theta_i = \theta_{i-1} + d\theta_i \quad (3)$$

である。この式を用いて、初期角度を与えることにより、センサの出力電圧から各時間での角度を算出できる。

次に、(1)式を微分して整理すると

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。(4)式より算出した \dot{x} と \dot{y} を用いて、

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (5)$$

から、手先の接線方向の速度を求める。

4. 結果と考察

各動作の手先位置、関節角度、手先速度および関節角速度を求めた。Fig.2 と 3 に代表的な動作である動作 1 と 4 の結果を示す。全ての動作を解析した結果を次のようにまとめることができる。

- (1) 手先の速度パターンは動作時間の中央でピークを持つベル状になる。
- (2) 手先の軌道は手先の動作距離が短い運動(例えば動作 4)では直線になるが長い運動(例えば動作 1)では肩を中心とする凸状の曲線になる。
- (3) 関節角度空間における肩と肘の関節角度の関係は、直線性を確認できる動作も存在するが、必ずしも直線とは認められない動作が存在する。

以上は、従来の研究でも指摘されている特性である。本研究ではこれらに加えて、

- (4) 肩と肘の動作開始時刻は動作によってずれが認められる。例えば、動作 4 では動作の開始時間が 2 つの関節でほぼ同一であるが、動作 1 では肘関節の動作開始時間が 0.1 sec 程度遅れている。なお、動作の終了時間は全ての動作でほぼ同一である。
- (5) 動作終了時付近で関節角速度は一定の周期で振動している。周波数は動作種類と関節によって異なるがほぼ 2~10 Hz である。この振動が上肢の固有振動であるのか、神経系における制御系を含むシステムとしての振動なのか現時点では不明であり、原因追求は今後の課題である。

5. 結 言

本研究では、ジャイロセンサと画像情報を用いてヒトの運

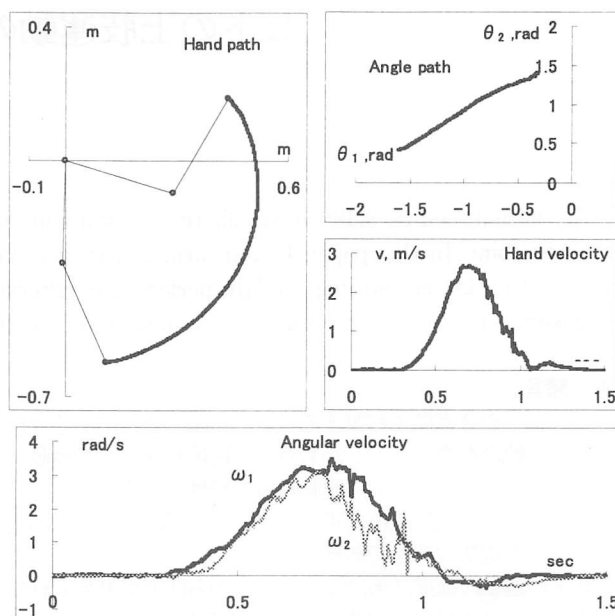


Fig.2 Movement 1

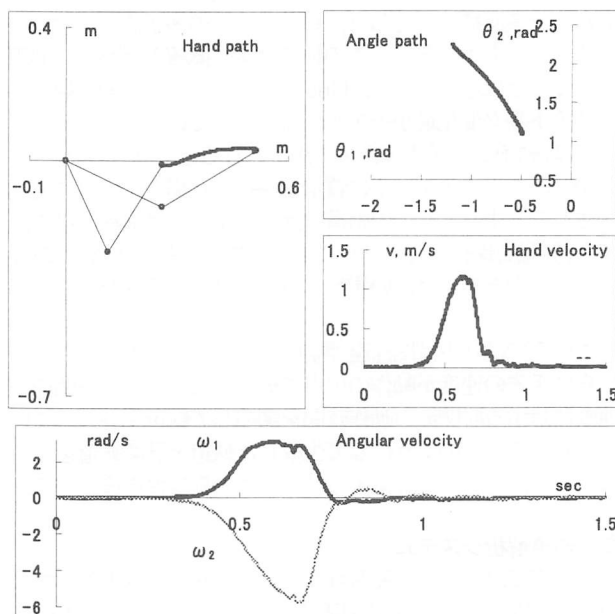


Fig.3 Movement 4

動軌道を解析した。その結果、従来から指摘されている特性を確認するとともに関節角空間で顕著な特性があることを確認できた。ただし、関節間での動作開始時間の相違や動作終了時点での振動などの点に関しては今後検討の必要がある。

謝 辞

本研究の全動作の被験者を引き受けて頂いた同校専攻科生の齋藤資親さんに心よりお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) W.ABEND, E.BIZZI and P.MORASSO : HUMAN ARM TRAJECTORY FORMATION, *Brain* (1982), 105, 311-348.
- 2) 川人光男 : 脳の計算理論, 産業図書(1996)
- 3) C.G.Atkeson and J.M.Hollerbach : Kinematic Features of Unrestrained Vertical Arm Movements, *The Journal of Neuroscience* Vol. 5, No. 9, pp. 2318-2330