

3次元ヒト腕運動の計測と解析

Measurement and analysis of three-dimensional human arm movements

○苫小牧工業高等専門学校専攻科 吉田 翔一, 苫小牧工業高等専門学校専攻科 柳原 圭佑,
 苫小牧工業高等専門学校機械工学科 加島 正, 苫小牧工業高等専門学校機械工学科 岩瀬谷 正男
 要 項

ヒトは手を2点間で移動するとき, 特定の軌道を選択し運動している. この運動軌道を解析するために, 従来までの研究で多く用いられてきた2次元平面内での軌道計測を発展させ, 2台のデジタルビデオカメラを用いて軌道を計測するための理論検討およびシステムの開発を行った. さらに, ヒトの動作実験を行ってこのシステムの精度を検証した結果から, この計測システムが十分に実用に耐えうるものであることを示す.

1. 諸言

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動力義手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. また, これは高度で複雑なヒトの運動制御機能の再現を目指した研究でもあり, 機械の高性能化に向けた新たな方向を示している[1].

本研究では, ヒトの運動制御機能を研究するための最も基本的な課題である運動軌道を計測する. そのためにまず, 上肢の運動軌道を市販の2台のデジタルビデオカメラで撮影し, 動画を静止画に分割する. その静止画に対して簡単なマウス操作を行い, 数学的な処理を施し, 運動中の肩, 肘および手先の3点の3次元座標を出力するためのシステムを開発した.

2. 座標計測システムの開発

本研究で開発した計測システムは, ビデオカメラ(victor GZ-HM1)で撮影した画像から肩を原点とした肘と手先の3次元座標を出力し, 結果を表計算ソフト(Excel)に保存する.

まず, 3次元空間内の任意の位置にある物体の座標を計測するには, 図1に示す Visual lineA と Visual lineB のように視点が交差するように設置した2台のカメラを使用する. 次に, 図1で計測対象(Obstacle)の3次元での座標を求めるために, それぞれのカメラで物体が planeA または planeB 上に存在したと仮定したときの座標を算出する.

図1に示したキャリブレーション用立方体の, PlaneA について注目したのが図2である. 点1, 点2 および点3はアクリル板上に定めた基準点で, 点は0.3m 間隔で配置している. 基準点1の現実空間での座標を原点(0, 0)とすると, 点2と3の座標はそれぞれ(0.3, 0)および(0, -0.3)となる. また, これらの基準点のパソコン上での点1, 2および3の座標をそれぞれ $(x_1, z_1), (x_2, z_2)$ および (x_3, z_3) とするとパソコン上の座標と現実座標の関係は

$$\begin{bmatrix} 0.3 \\ 0 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

および

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -0.3 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_3 - x_1 \\ z_3 - z_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

で表すことができる. ここで, A は 2×2 の座標変換行列で, (1)式と(2)式から,

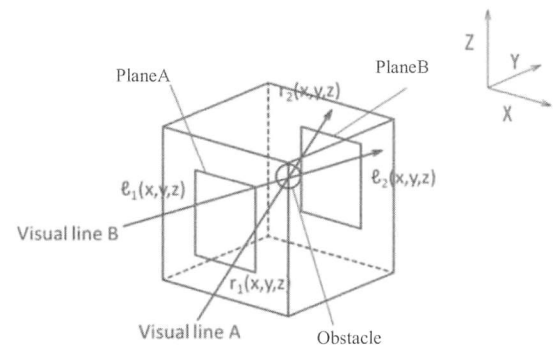


図1 キャリブレーション用立方体

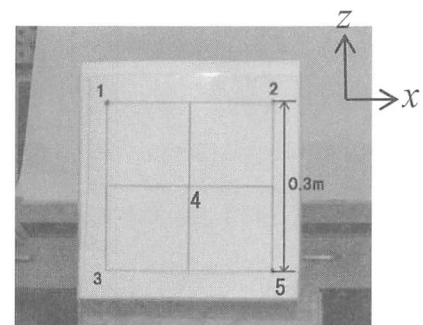


図2 x-z 平面

$$A = \begin{bmatrix} 0.3 & 0 \\ 0 & -0.3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ z_2 - z_1 & z_3 - z_1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3)$$

となる. この座標変換行列を用いればパソコン上の画像の任意の点の PlaneA と PlaneB それぞれの面における2次元座標を求めることができる. いま, パソコン画面上にある任意の点の座標を (X_{pic}, Z_{pic}) そしてそれぞれの面を基準にした実空間上の座標を (X_{real}, Z_{real}) とすると, これらの関係は座標変換行列 A を用いて

$$\begin{bmatrix} X_{real} \\ Z_{real} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X_{pic} \\ Z_{pic} \end{bmatrix} \quad (4)$$

と表すことができる.

以上の方法で得た Visual lineA と Visual lineB の2台のカメラで planeA と planeB の2つの面, 計4つの座標を用いて, 3次元空間での座標を求める. planeA と planeB 間の距離は0.4mと既知であり, Visual lineA のカメラから得られたそれぞれの面での座標を $r_1 = [r_{1x} \ r_{1y} \ r_{1z}]^T$ および $r_2 = [r_{2x} \ r_{2y} \ r_{2z}]^T$ とすると,

2点を通る直線上の任意の位置 $r = [r_x \ r_y \ r_z]^T$ は定数 α を用いて

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1x} \\ r_{1y} \\ r_{1z} \end{bmatrix} + \alpha \begin{bmatrix} r_{2x} - r_{1x} \\ r_{2y} - r_{1y} \\ r_{2z} - r_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1x} \\ r_{1y} \\ r_{1z} \end{bmatrix} + \alpha \begin{bmatrix} r_{21x} \\ r_{21y} \\ r_{21z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

と表現できる. 同様にこの考えを Visual lineB のカメラにも適応すると, Visual lineB 上の任意の点は, 定数 β を用いて

$$\begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{1x} \\ l_{1y} \\ l_{1z} \end{bmatrix} + \beta \begin{bmatrix} l_{2x} - l_{1x} \\ l_{2y} - l_{1y} \\ l_{2z} - l_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{1x} \\ l_{1y} \\ l_{1z} \end{bmatrix} + \beta \begin{bmatrix} l_{21x} \\ l_{21y} \\ l_{21z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる. 物体はこの2つの視点の交点に存在するが, 計測には誤差があり常にこれらの直線が交点を持つ保証はない. そこで2つの直線の距離を最小とする α と β を求める. 2点間の距離 d は

$$d = \sqrt{(r_x - l_x)^2 + (r_y - l_y)^2 + (r_z - l_z)^2} \quad (7)$$

であり, 平方根の中は α と β の関数である. 従って, これを最小とする条件は

$$\begin{aligned} & [\alpha \ \beta]^T \\ & = \begin{bmatrix} r_{21x}^2 + r_{21y}^2 + r_{21z}^2 & -(l_{21x}r_{21x} + l_{21y}r_{21y} + l_{21z}r_{21z}) \\ -(r_{21x}l_{21x} + r_{21y}l_{21y} + r_{21z}l_{21z}) & l_{21x}^2 + l_{21y}^2 + l_{21z}^2 \end{bmatrix}^{-1} \\ & \cdot \begin{bmatrix} (l_{1x} - r_{1x})r_{21x} + (l_{1y} - r_{1y})r_{21y} + (l_{1z} - r_{1z})r_{21z} \\ (r_{1x} - l_{1x})l_{21x} + (r_{1y} - l_{1y})l_{21y} + (r_{1z} - l_{1z})l_{21z} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

と求めることができる. この α と β を(5)式と(6)式に代入して求めた座標の中点を Obstacle の位置とする.

3. 結果と考察

3.1 計測の精度

このシステムの精度を検証するため, 図1の planeA, planeB 上の図2に示す4と5点を計測し, その結果を表1にまとめた. なお planeA, planeB 間の距離は0.4mであり, 原点は planeA の点1である. 表1から, 最大誤差は0.01m以下であり, 精度は十分であると判断できる.

表1 システムの精度検証

PlaneA	点4			点5		
	x(m)	y(m)	z(m)	x(m)	y(m)	z(m)
実際の値	0.150	0.000	-0.150	0.300	0.000	-0.300
計測値	0.149	-0.009	-0.150	0.296	-0.005	-0.302

PlaneB	点4			点5		
	x(m)	y(m)	z(m)	x(m)	y(m)	z(m)
実際の値	0.150	0.400	-0.150	0.300	0.400	-0.300
計測値	0.148	0.399	-0.151	0.297	0.401	-0.301

3.2 腕軌道の計測

腕の振り上げ運動の動作実験を行って, 運動軌道を計測した. 図3に示すように被験者の肩, 肘および手先にマーカーを付け, 運動中のこれらの位置を計測した. この結果から, 3次元空間における肩を原点とした肘と手先の位置を求めた. さらに, 肩のマーカーが回転中心を捉えていない場合, 肘や手先の座標の誤差の原因となるので, 回転中心と考えられる肩の位置を算出して, 肘と手先の位置を補正した.

腕の振り上げ動作の計測結果に以上の処理を行った結果

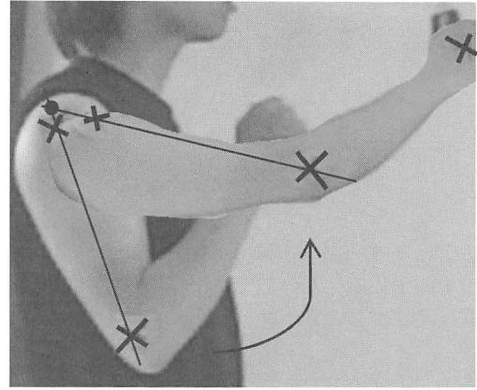
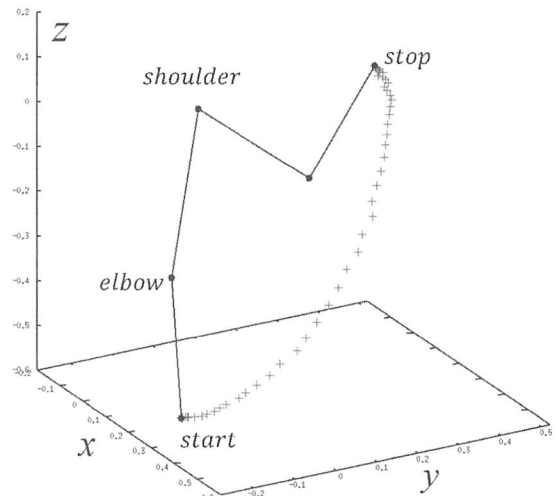
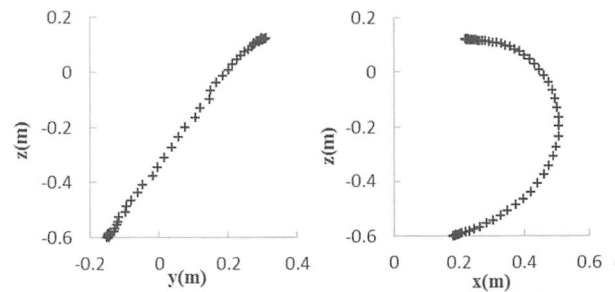


図3 マーカーと回転中心



(a) 3D 空間軌道



(b) y-z plane

(c) x-z plane

図4 ヒトの3D軌道

を図4に示す. 図で, aは3次元(以降3Dと呼ぶ)で表現した軌道, そしてbおよびcはそれぞれy-z平面およびx-z平面に投影した軌道である. 図より3Dの軌道は肩を中心とする滑らかな凸状の曲線を描いている. また, y-z平面の投影軌道は直線, そのx-z平面では曲線軌道であり, それぞれがヒトの運動軌道の特性を示していることが分かる. この結果から, 本研究で開発した計測システムは3D空間での腕運動軌道の座標を正確にとらえることに成功していることが分かる.

参考文献

- [1] 川人光男: 脳の計算理論, 産業図書, 1996