



Title	3次元空間での反復リーチング軌道の正規化・平均化の一方法
Author(s)	吉田, 直樹; 山中, 雅智
Citation	北海道大学医療技術短期大学部紀要, 9, 47-56
Issue Date	1997-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/37607
Type	departmental bulletin paper
File Information	9_47-56.pdf



原 著

3次元空間での反復リーチング軌道の正規化・平均化の一方法

吉田 直樹・山中 雅智*

A Method of Normalizing and Averaging Repeated Reaching Trajectories in Three Dimensional Space

Naoki Yoshida and Masanori Yamanaka*

Abstract

The purpose of this study was to propose a method of normalizing and averaging repeated reaching trajectories in three dimensional space. Three parameters of the trajectory were normalized as follows. (1) Position: an end point of each reaching stroke was shifted to the origin. (2) Direction: each stroke projected on XY-plane was rotated on Z-axis to overlap edges of the stroke on the Y-axis. (3) Size: each stroke size was changed as the distance between edges of stroke on XY-plane equals to the unit length. Each stroke was divided into small parts so that length should be same each other. Then the coordinates of center points of corresponding parts on the strokes was calculated to make one average trajectory. We showed the examples of normalizing and averaging with reaching data.

Key Words : Reaching, Normalize, Averaging, Motor control

要 旨

3次元空間で計測された反復リーチング軌道の各ストロークを、位置・方向・サイズにおいて正規化し、そこから平均軌道を算出する方法を提示した。正規化操作では、各ストロークの近位端点を座標の原点に一致させ、Z軸周りの回転によりX-Y平面上での端点間の方向をY軸に一致させ、始点終点間のX-Y平面上での大きさを1としてサイズを揃えた。これにより、

各ストロークの特徴を位置・方向・サイズによらず直接比較できる。平均軌道は、得られたデータのサンプリング周期が一定していない場合にも適用できるように、次のような手順で算出した。まず、各ストロークにおいて、ストロークの長さを均等に分割する点を算出する。次に各ストローク間の対応する各点の中心を求める。こうして得られた中心点を結び、平均軌道とした。これにより、複数の反復リーチングデータ間の比較を各ストロークの代表値としての平

北海道大学医療技術短期大学部 作業療法学科

*北海道大学医療技術短期大学部 理学療法学科

Department of Occupational Therapy

*Department of Physical Therapy

均軌道を用いて行うことができる。サンプルデータをもとに、この正規化・平均化処理の例を示した。

I. はじめに

手先をある点から別の点にすばやく移動させる運動はリーチングと呼ばれる。リーチングは上肢運動の中でも非常に単純な運動であり、運動制御の研究によく用いられる。リーチングは生理学的な面からの研究が進んでいるのみでなく、その運動を説明するいくつかの数学的なモデルが提案されており¹⁾²⁾、この運動の制御メカニズムが多方面から少しずつ明らかになりつつある。リハビリテーションの観点から見ると、これまで研究が進んできた健常者のリーチングと、障害者(特に中枢神経系に障害を持つ患者)のリーチングを比較・検討することにより将来的に障害の程度やパターンの分類、回復の評価などに応用できる可能性を秘めているものと考えられる。

リーチングにおいては位置の精度が厳しく要求される場合(ペグを穴にいれる場合など)と、厳しい精度が要求されない場合がある。精度が厳しく要求される場合はフィードバック制御が用いられるが精度があまり要求されない急速運動では主にフィードフォワードが用いられていると考えられ³⁾、運動制御の研究には主に後者が利用される。この場合、何度もリーチング運動を行わせてその重ね書きされた軌道を評価する方法が多く用いられる。運動が単純な2点間のリーチングの場合には、動作ごとのばらつきが少ないのでこの方法でも特徴をとらえることは可能であるが、たとえば経由点を指定されるような場合²⁾など、条件によっては急速運動では動作ごとのばらつきが大きくなり、この方法では動作の違いが見にくくなる。まして、障害者に応用しようとするような場合には健常者以上にばらつきが大きくなることが予想されるので、何らかの方法で計測された軌道の特徴を抽

出する手段があれば有用であろう。さらに、得られた軌道を代表する平均軌道を算出することができれば、平均軌道同士の特徴を比較したり、平均軌道と軌道生成モデルとの適合を調べるといった今までにない解析方法が可能になる。この点はばらつきの少ないデータにおいても利用価値がある。

また、リーチング軌道の解析においては、運動の大きさや速さ、あるいは位置や方向によらない特徴の抽出が重要なので、計測された軌道の正規化も必要になる。これまでの研究においては、ばらつきを少なくするために事前に充分練習させるといった方法がとられるばかりで、代表軌道の抽出やそれを前提とした正規化に着目した研究はほとんど行われていない。

そこで、本研究では、数学的な処理によって3次元空間でのリーチング軌道の正規化・平均化の一方法を提案し、それを実現するプログラムを作成し、実際のリーチングデータを用いた解析例を提示した。

II. 理 論

1. 想定するリーチング・データの種類

空間内の2点(被験者から向かって前後方向)を目標点(ターゲット)として往復運動を繰り返す反復急速リーチング動作の3次元軌道を想定する。一般的な例として、被験者には目標点への到達は一応の目安として指示され正確さは要求されておらず、そのためリーチング動作の各ストロークの位置・サイズ・方向などにはズレがあるものとする。

反復リーチング軌道は m 個の点でサンプリング(サンプリング時間間隔は必ずしも一定でない)されたとして、それぞれの点を $P_1, P_2, \dots, P_m$ とする。 P_1 は座標を表現する3次元ベクトルで、座標の原点は空間内の任意の位置にあるものとし、軸は被験者から向かって左右方向がX(右が正)、前後方向がY(前が正)、上下方向がZ(上が正)とする。軌道は必ずしも

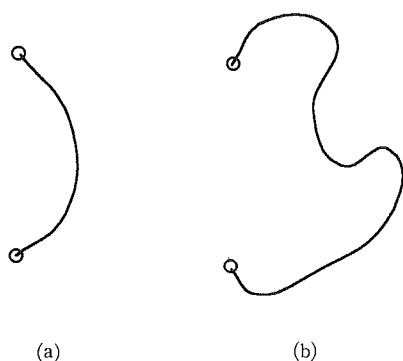


図1 単純な軌道 (a) と一般的な軌道 (b)

図1 (a) の様な単純なタイプ (ターゲット間のY座標を指定すれば軌道のX, Z座標は一意に求められる) ではなく, (b) のように, Y座標を指定しても一般的にX, Z座標が一意に決定できず, また, Y座標の範囲もターゲット間に限定されていないものを想定する。(もし, 軌道が(a)のタイプに限られるなら, Y軸を時間軸に読み換えて各種の時系列データの処理方法がそのまま利用できるが, (b) のタイプにはそういった方法が利用できない。)

2. ストロークの始点・終点の検出

各ストロークの始点・終点の位置は, 観測者が目測で決定する場合はほぼ間違いなく決定できるものと思われるが, 多量のデータを解析する際には実用的ではない。何らかの自動認識手段が必要とされる。ここでは各ストロークの始

点・終点では運動の方向が急激に変化する事を利用し, 運動方向の変化のピークを検出することで始点・終点を検出する。運動方向の変化については, i 番目のサンプリング点 P_i における運動方向の変化角度を θ_i とすると

$$\cos \theta_i = \frac{(P_{i+1} - P_i)(P_i - P_{i-1})}{|P_{i+1} - P_i| \cdot |P_i - P_{i-1}|}$$

となるので, この方法で計算された $\cos \theta_i$ のピークを検出する。実際のリーチングデータにおける $\cos \theta_i$ の変化を図2に示す。このように, 明らかなピークが現れるので, 端点の検出が可能である。

3. ストロークの正規化

ここでは, 躍度最小モデル¹⁾に代表されるような位置・方向・サイズによらない特徴抽出を前提とする。各ストロークは, 一般的に始点・終点の位置, 方向, サイズが異なるので, 平均化の前にこれらの正規化が必要である。また, 仮に平均化せずとも正規化する事により, 異なる運動間の比較が容易になる。

ストロークの正規化は以下の手順で行う。

- ① [位置の正規化] 近位エッジ (始点・終点のうち被験者の近位に位置するもの) が座標の原点に位置するように各点を平行移動。
- ② [方向の正規化] Z軸を軸として座標を回転させ, X-Y平面上に投影した遠位エッジ (始点・終点のうち被験者の遠位に位置するもの)

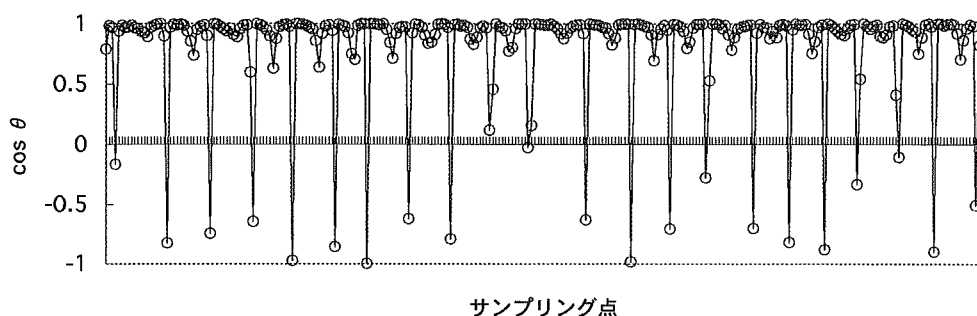


図2 運動の方向の変化

がY軸上にのるようにする。これによって、正規化軌道をX-Y平面に投影した場合、軌道上のある点のX座標は始点・終点間を結ぶ直線からの距離に相当することになる。

- ③ [サイズの正規化]①および②操作後の軌道をX-Y平面に投影し、その面上での始点・終点間の距離を1として正規化。これによって、各ストロークの遠位エッジのY座標は1になる。

ここではX軸を中心に座標を回転させるなどして終点のZ座標位置を揃える操作を行っていない。それは、Z軸の方向は運動の解析に重要な重力方向に一致させてあるので、正規化によって重力方向の情報が失われるのを避けるためである。

ここで、正規化されたリーチング軌道上の点で P_i に対応する点を P_i^n とし、この点が属するj番目のストロークの近位エッジを E_j^0 、遠位エッジを E_j^1 、 E_j^0, E_j^1 をX-Y平面上に投影した点間を結ぶ線分の距離を L_j 、この線分とY軸のなす角度を θ とすると、

$$P_i^n = \frac{1}{L_j} \left\{ \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (P_i - E_j^0) \right\}$$

となる。ここで E_j^0 から E_j^1 に向かうベクトルを $E_j = (x_j, y_j, z_j)$ とおけば、

$$L = \sqrt{x_j^2 + y_j^2},$$

$$\cos \theta = \frac{y_j}{\sqrt{x_j^2 + y_j^2}},$$

$$\sin \theta = \frac{x_j}{\sqrt{x_j^2 + y_j^2}},$$

なので、結局

$$P_i^n = \begin{bmatrix} \frac{y_j}{x_j^2 + y_j^2} - \frac{x_j}{x_j^2 + y_j^2} & 0 \\ \frac{x_j}{x_j^2 + y_j^2} & \frac{y_j}{x_j^2 + y_j^2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{x_j^2 + y_j^2}} \end{bmatrix} (P_i - E_j^0)$$

となる。

4. ストロークの平均化

軌道が図1(a)のタイプであれば、あるY座標に対応する各ストロークのX座標を平均して、平均軌道のX座標とするような手法が利用できるが、(b)のような一般的な軌道ではこの方法は利用できない。そこで、各ストロークをそのストローク長をn等分する点で分割し、対応する点の平均位置を計算することで平均化する。(ストローク長の計算においては、正規化された観測点の間を補間する必要がある。各種の多項式等を当てはめる方法が考えられるが、以下の解析例では単純に観測点の間を線形補間した。)すなわち、j番目のストロークをn等分し、近位エッジから数えてi番目の点を P_i^j ($i=1, 2, \dots, n+1$)とし、平均化された軌道 $P_i^m, P_i^m, \dots, P_i^m$ のi番目の点を P_i^m 、kを平均化するストロークの数として、

$$P_i^m = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k P_i^j$$

と定める。

III. 解析例

実際のヒトのリーチング軌道データの正規化・平均化処理の例を以下に示す。はじめはあるリーチング実験のデータ(比較的ばらつきの少ないもの)を用い、次にばらつきが大きいデータの例を示す。

1. ばらつきの少ないデータの解析例

(1) 解析に利用したデータ

a. 対象

被験者は上肢機能に障害のない大学生2名、被験者A(男性, 26歳, 右利き, 身長178cm)と被験者B(女性, 19歳, 右利き, 身長158cm)である。

b. 測定装置

リーチング軌道の計測には、磁気式3次元位

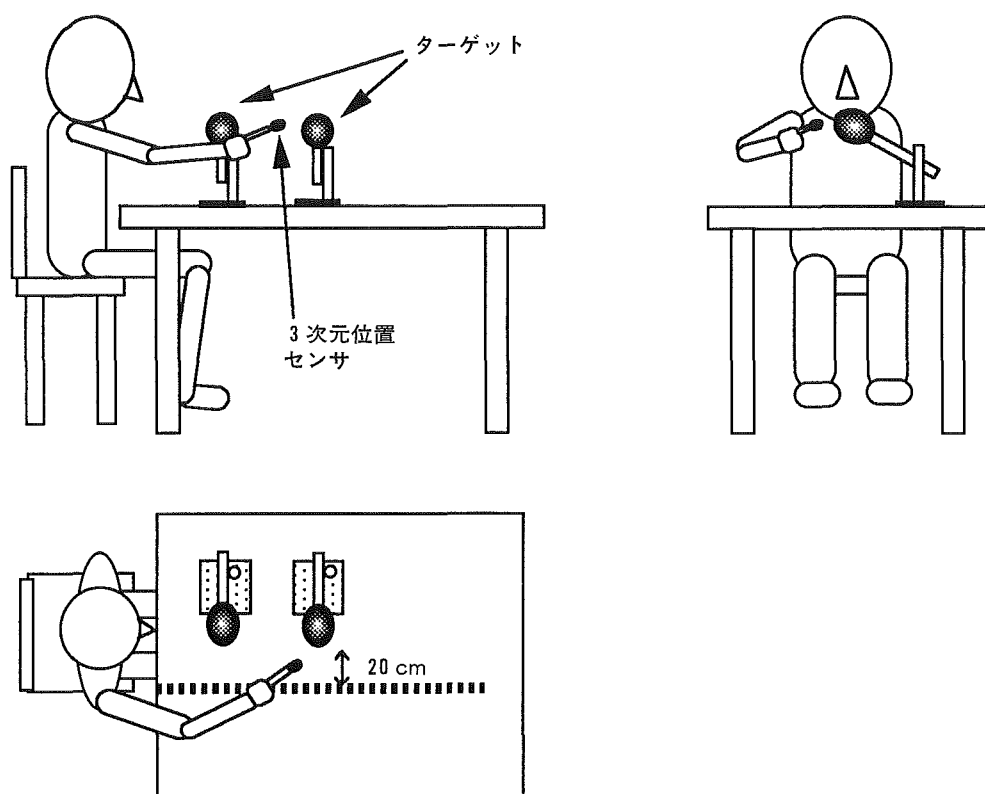


図3 実験配置の模式図

置測定装置 (POLHEMUS 社 FASTRACK II) およびパーソナルコンピュータ (NEC, PC-9821 Nd) を用いた。解析には同パーソナルコンピュータを用い、解析プログラムはC言語 (Borland 社, Turbo C++) を用いて自作した。

c. 方法

被験者は椅子座位とし、机上の正中前方に肩峰の高さで2点のターゲットを定めた (図3)。ターゲットは丈夫で柔らかなゴム球であり、押されるとへこみ、離すと戻る弾性に富んでいる。ターゲット間距離は被験者Aでは約30 cm, 被験者Bでは約26 cm とした。この比率は被験者の身長比 (1.13:1) にほぼ対応している。被験者は先端に磁気センサを取り付けた軽量の棒を把持し、その先端で2点のターゲット間を往復するように要求された。この際、両ターゲットの右方20 cm の位置を結んだ直線を机上に提

示し、往復運動時になるべくこの線の右方領域を通るように指示した。棒の先端に取り付けた磁気センサがその直線の右方領域を通るときにビープ音が鳴るようにした。課題の前にその動作に十分に慣れるまで練習したのち、11 往復のリーチング軌道の三次元位置を記録した。このうち、はじめの1ストロークは静止状態から運動が開始されているという点で他のストロークと異なるのでこれを除き、以後の10 往復 (20 ストローク) を解析対象とした。ここでは動作の正確さは要求せず、上記の条件以外にリーチング軌道、速度は規定せず被験者の自由としたが、上肢のみの運動とするために体幹運動を極力避けるよう指示した。

(2) 解析結果

図4 (a) に原軌道, (b) に正規化軌道, (c) に正規平均軌道を示す。この例の場合は各スト

ロークの位置・方向・サイズが比較的揃っているの、(a)と(b)のあいだにはスケールが変わっている他に大きな違いはない。(a)または(b)でも両被験者の軌道の違いを比較する事は可能ではあるが、図5のように正規平均軌道を

比較する事により、例えば「被験者Aの軌道のピークは $y=0.6$ 付近にあるのに対し被験者Bでは $y=0.4$ の付近にある。しかし、 x 方向のズレは平均で0.9程度であり両者にほとんど差がない。被験者Aの軌道は平均して被験者Bの軌

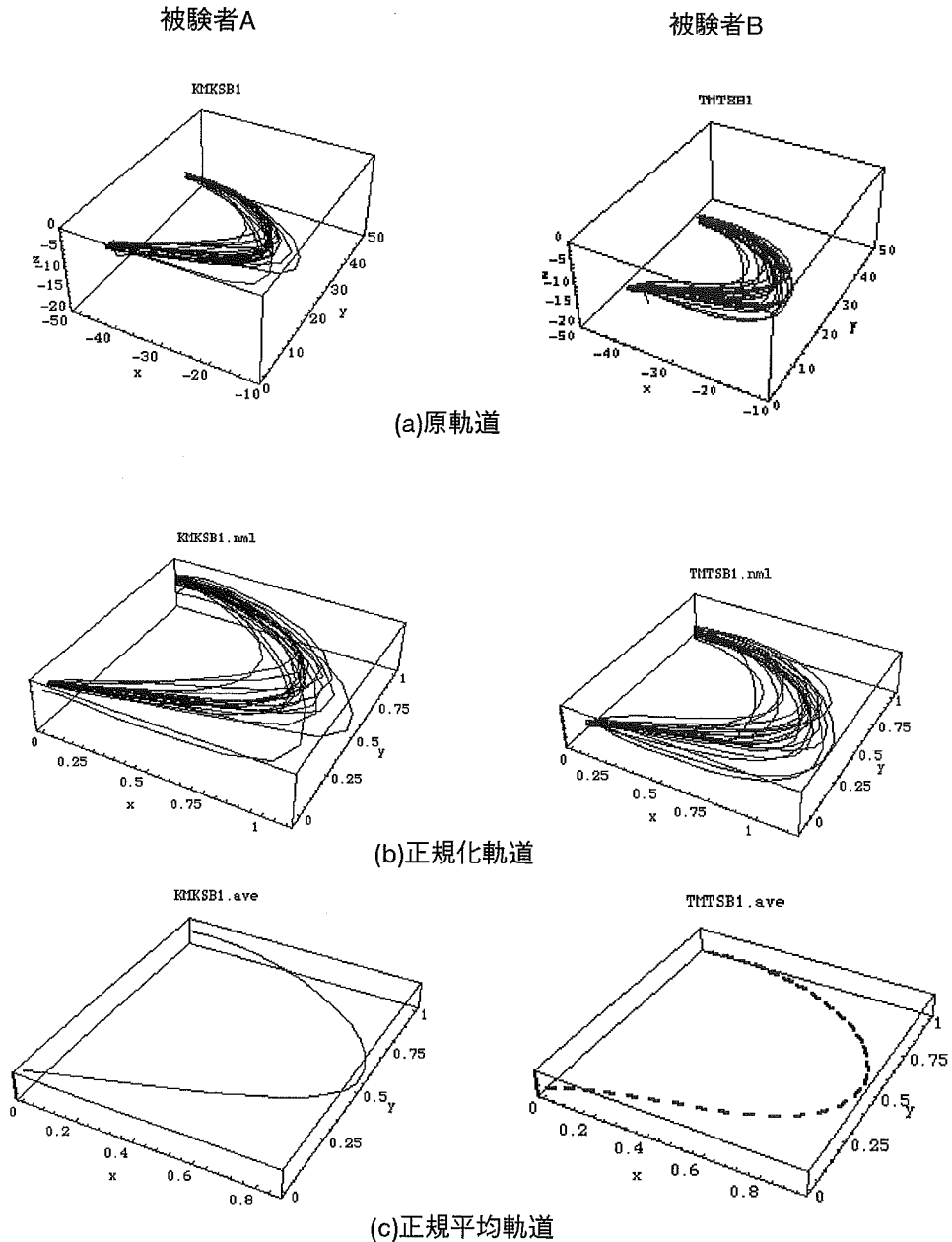


図4 ばらつきの少ない軌道の正規化・平均化例

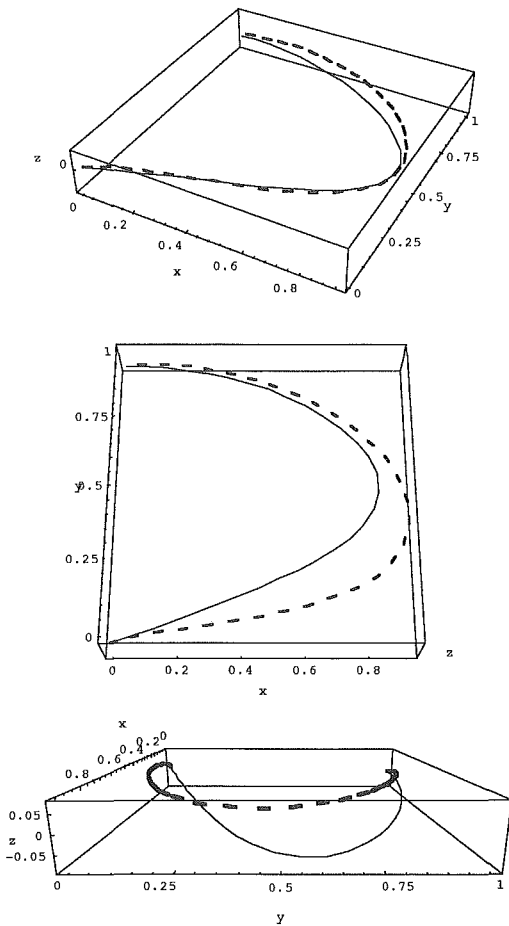


図5 正規平均軌道の比較 — ばらつきの少ない例 —
(実線：被験者A, 破線：被験者B)

道より下を通っており、その差は0.1程度である。」といった議論が可能になる。

2. ばらつきの大きいデータの解析例

(1) 解析に利用したデータ

ここでは、ばらつきの大きいデータ例を得るために、上記の実験と同様の装置・肢位において、筆者が恣意的にばらつきが大きくなるように腕を動かした。右手と左手の動きで2組のデータを得た。

(2) 解析結果

図6 (a) に原軌道, (b) に正規化軌道, (c) に正規平均軌道を示す。この例では各ストロー

クの位置・方向・サイズにばらつきが大きく、(a) の原軌道から左手例・右手例の軌道の特徴を読みとるのはむずかしい。これに対して (b) の正規化軌道では位置・方向・サイズが揃っているので「右手例のなかにはx方向に大きく飛び出ているストロークがいくつかあり、左手例では逆にx方向の飛び出しが非常に小さいストロークがある。また右手例ではピークの位置が遠方(y方向で正の方向)に位置するストロークがある。」といった特徴が見やすい。さらに図7のように正規平均軌道を比較すると「右手例はピークの大きさがx軸上で平均で0.1程度大きく、y軸上で0.4程度遠方にある。左手例では始点と終点はほぼ水平位置にあるが、右手例では遠方の端が0.1程度高い位置にある。」といった特徴をみることができる。

IV. 考 察

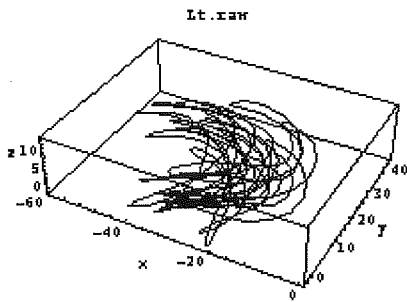
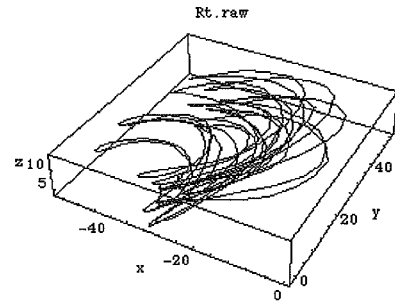
重ね書きされた軌道は「生データ」として重要であるが、そこから特徴を読みとる際には読みとる側の特徴抽出能力に頼ることになる。本研究で目的とした位置・方向・サイズによらない特徴を読みとるような場合には、実例で示したように、特にばらつきの大きなデータからの特徴抽出は容易ではない。今回提案した方法では、読みとる側の特徴抽出能力とは無関係に、客観的な方法で特徴を抽出することが可能になる。

このようにして抽出された正規平均軌道を用いることによって、例えば、正規平均軌道を軌道生成の数学モデルに当てはめてそのモデルの妥当性を検証するとか、あるいは逆に健常者によって得られた数学モデルや正規平均軌道と運動障害を持つ患者の正規平均軌道と比較することに運動障害の程度の評価を試みるといった応用の可能性が考えられる。

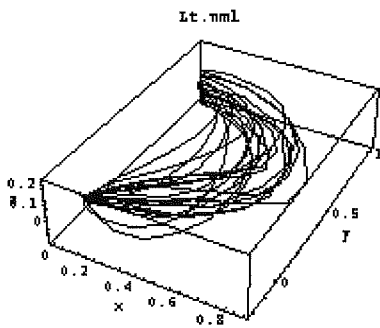
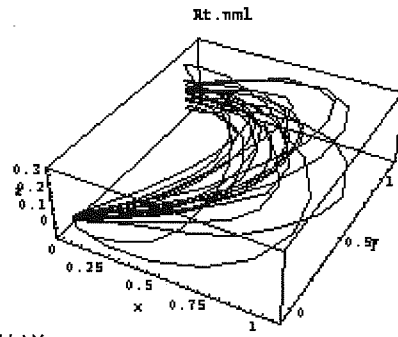
ただし、正規化においては原波形の情報をある意味でゆがませることになり、平均化では情報のある部分を切り捨てることになるので、使

左手例

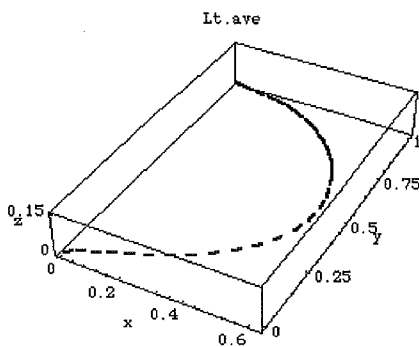
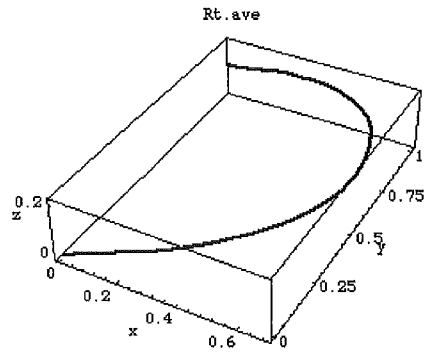
右手例



(a)原軌道



(b)正規化軌道



(c)正規平均軌道

図6 ばらつきの大きいリーチング軌道の正規化・平均化例

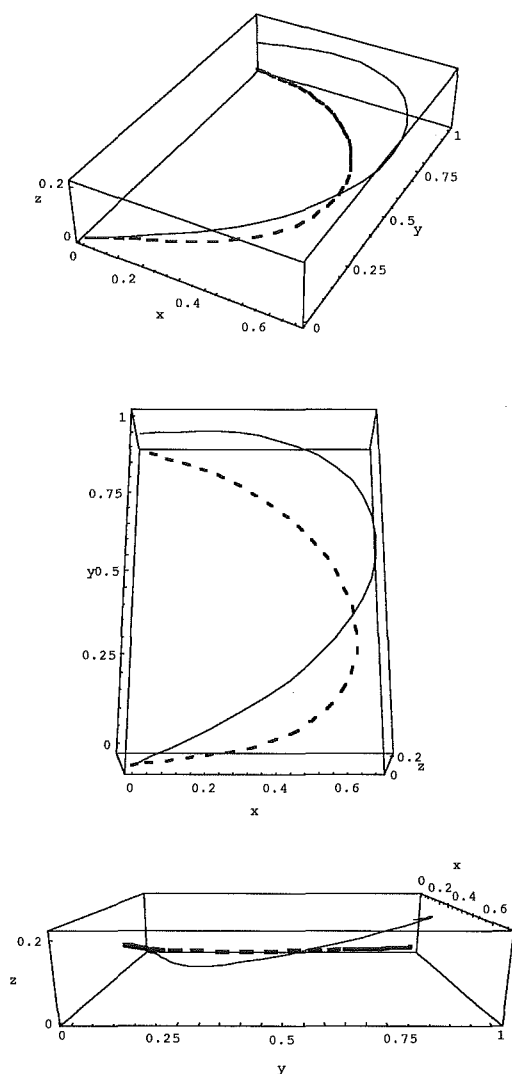


図7 正規平均軌道の比較 — ばらつきの大きい例 —
(実線：右手例，破線：左手例)

用に際してはその点に注意すべきである。

正規化・平均化の方法はここで提案したもののほかにも考えられるだろう。ここでは位置・方向・サイズによらない特徴の抽出を前提としているので，その前提に合致しない解析が必要な場合は異なる方法の正規化・平均化が要求される。

今回の方法は解析例にあげたような位置・方向・サイズのばらつきが大きなデータの解析に

特に有効と考えられる。このようなデータは例えば「もぐら叩き」のようにターゲットの位置が変化する課題や，被験者の視覚情報をゆがませたり無くしたりする課題⁴⁾⁵⁾，あるいは上肢機能になんらかの障害をもつ被験者の運動などで得られるだろう。一般的にリーチングを用いた実験の場合，各ストロークを揃えるために実験に先立ち被験者に適当な練習を行わせる。しかしこの方法で得られるデータは「ある程度練習済みの運動」という条件がつくことになる。今回提案した方法ではばらつきのあるデータの解析が可能なので，あらかじめ練習を行わせたくない場合のデータ解析にも有効であると考えられる。

今回はサンプリングの間隔が必ずしも一定していないという一般的な仮定において，軌道の位置情報を集約する事を考えた。もし，サンプリング間隔が一定で，各サンプリング点が時間の情報も含んでいる場合は時間情報を無くさない解析方法がより適しているだろう。具体的には，平均化の際に今回は各ストローク距離を等分する点の位置を平均したが，各ストロークの時間を等分する点の位置を平均するといった方法が考えられる。

今回，軌道の情報を代表させるものとして「平均」の軌道を算出する方法を提案したが，軌道のばらつきを表現する「分散」に相当する値があれば原軌道の情報をより豊かに表現できると考えられるので，今後の課題としたい。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり測定装置に関して協力頂いた北海道大学電子科学研究所の奈良博之氏ならびに実験に協力頂いた同研究所の佐藤満氏に感謝する。

本研究の一部は平成7年度北海道大学医療技術短期大学部研究助成金により行われた。

引用文献

- 1) Flash, T., and Hogan, N.: The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model. *The Journal of Neuroscience*, 5: 1688-1703, 1985.
- 2) Uno, Y., Kawato, M. and Suzuki, R.: Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement -minimum torque-change model. *Biological Cybernetics*, 61: 89-101. 1989.
- 3) 川人光男：脳の計算理論. pp.88-92, 産業図書, 1996, 東京.
- 4) Wolpert, D. M., Ghahramani, Z. and Jordan, M.I.: Are arm trajectories planned in kinematic or dynamic coordinates? An adaptation study. *Experimental Brain Research*, 103: 460-470. 1995.
- 5) Miall, R. C. and Haggard, P. N.: The curvature of human arm movements in the absence of visual experience. *Experimental Brain Research*, 103: 421-428. 1995.