論　文

到達運動のばらつきに関する軌道の類似性保持に基づく解析

大山　剛史[†a)]　　宇野　洋二[††b)]

Analysis of Variability of Human Reaching Movements Based on the Similarity Preservation of Trajectories

Takashi OYAMA[†a)] and Yoji UNO[††b)]

あらまし　ヒトの運動にはばらつきがある．十分な訓練の後でさえ，試行ごとに実現される軌道は異なるものである．ばらつきの要因として運動指令に加わる信号依存の生体ノイズが提案されている．ノイズによって運動がばらつくという想定では，計画軌道は試行ごとに同一のものである．しかし，いくつかの要因から，同一のタスクを繰り返すときにおいても，ヒトは試行ごとに同一の軌道を計画することができないかもしれない．我々は無作為に与えられるノイズでは再現できないばらつきの傾向として軌道の類似性保持を示し，運動のばらつきが計画の時点で生じる妥当性について検討する．

キーワード　ばらつき，運動制御，到達運動，運動計画，位置知覚

1. まえがき

同じ条件のもとで同じタスクを繰り返しても，実現されるヒトの運動は試行ごとに異なるものとなることが知られている．つまり，ヒトの運動にはばらつき（ここでは軌道の位置の分散または標準偏差を意味する）がある．このような運動のばらつきの要因として，これまでいくつかの説が提案されてきている．

Harris & Wolpert [1] は運動のばらつきの原因として信号依存の生体ノイズ（signal dependent noise）を提案した．これは運動指令に加わることが想定されたノイズであり，運動指令の信号の振幅が大きくなるほどその信号に加わるノイズの度合が大きくなり，結果として実行される運動のばらつきも大きくなるというものである．van Beers ら [2] は様々な方向の上肢到達運動について，実際に計測した軌道の終点のばらつきは，信号依存ノイズ [1] を仮定することでよく再現されると報告した．更に，van Beers らは同じ方向で異なる距離の目標をねらう到達運動の解析も行い，初期位置からより遠方にある目標をねらったときほど軌道の終点のばらつきは大きく，そしてこのばらつきは信号依存ノイズでよく再現されると報告した．

運動のばらつきが専ら信号依存ノイズのみによって引き起こされているとすれば，ヒトが計画して実行しようとしている軌道は，同一のタスクを繰り返している間，試行間でほぼ等しいものであるとされる．ヒトが計画する運動は滑らかさに関する規範などでよく再現できることが知られている．例えば，ジャーク最小規範 [3]，トルク変化最小規範 [4]，指令トルク変化最小規範 [5] などは始点と目標が与えられればそれを結ぶ唯一つの軌道を求めることができる．もし運動計画においてヒトが知覚している（手先が到達していない）目標位置の腕姿勢が確かなものであるならば，ヒトが計画する軌道は同一のタスクの間中はほぼ一定であるとみなせるだろう．

しかし，阪本ら [6] は到達運動のばらつきに関して，ヒトが知覚している目標位置のばらつきの可能性を示唆した．これは，北川ら [7] が報告した腕と手先を見ることができない状況において，視覚的な目標位置が正確に与えられたとしても，被験者はその目標位置を精度良くねらうことができないという結果と関連する．北川らの結果を言い換えれば，ヒトの位置知覚に関して視覚と体性感覚との間には明らかな齟齬があるとい

† 豊橋技術科学大学情報工学系，豊橋市
Department of Information and Computer Sciences, Toyohashi University of Technology, 1–1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi-shi, 441–8580 Japan
†† 名古屋大学大学院工学研究科，名古屋市
Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464–8601 Japan
a) E-mail: ooyama@system.tutics.tut.ac.jp
b) E-mail: uno@nuem.nagoya-u.ac.jp

 © (社)電子情報通信学会 2007

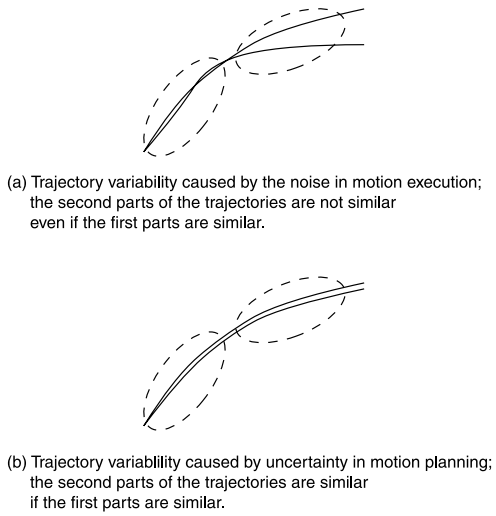

図 1　ばらつきの要因による軌道の類似性の違い
Fig. 1　Difference of trajectory similarity depending on the factor of variability.

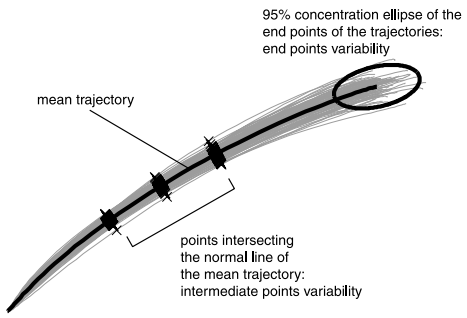

図 2　軌道の終点のばらつき（終点の 95%等確率楕円）と中途のばらつき（平均軌道の法線上を通過する位置のばらつき）
Fig. 2　The variability of end points (the 95% concentration ellipse of the end points) and intermediate points (the variability of the points intersecting the normal line of the mean trajectory).

える．これから敷衍すれば，始点と目標が視覚的に与えられる 2 点間の到達運動を実行しようとするときに，目標位置が明らかに視覚によって知覚できる状況においても，ヒトは目標位置を正確に捕そくできる手先姿勢を安定して求められていないことが予想される．すなわち，被験者に対して始点と目標が視覚的に全く自然な状態で与えられたとしても，被験者が計画する手先の軌道は必ずしも正確に目標に到達するものではないといえる．試行ごとに軌道は常に同じものであるとは限らず，軌道は運動計画の段階で既にばらついていることが考えられる．

もし軌道が運動中に運動指令に加わるランダムなノイズでばらつくのであれば，ある区間で互いに似ている軌道があったとしても，それらがもっと後の時刻の区間においても似ているか（すなわち，類似性を保持できるか）どうかはノイズのランダムな作用による（図 1 (a)）．一方，運動中のランダムな影響が少なく，運動のばらつきの要因に占める計画軌道のばらつきの影響が大きければ，ある区間で互いに似ている軌道はそれより後の時刻の区間においても類似性をよく保持することが予想される（図 1 (b)）．本論文はヒトの運動がばらつく要因として，運動実行中に運動指令に加わる生体依存のノイズ以外に，タスクの試行ごとに運動計画段階において生成される計画軌道が唯一ではなくばらついている可能性について検討する．そのために，軌道の類似性を評価するための尺度を示し，そして，実際に計測した水平面内 2 関節 2 点間到達運動の計測軌道と，それらの計測軌道の平均軌道に信号依存ノイズを加えて生成したばらついた軌道 [2] について，軌道の類似性がどのように保持されるかに着目して解析，考察を行う．

2.　軌道のばらつき

van Beers ら [2] は計測軌道について，終点のばらつき及び運動開始直後の軌道の方向のばらつきの傾向の解析を行っている．これは，運動指令に加わるノイズのもとで軌道の終点誤差のばらつきが最も小さくなるような軌道をヒトは生成するという Harris & Wolpert が提案した終点誤差分散最小モデル [1] と関連する．しかし，実際に計測される手先の軌道は終点だけでなくその中途の通過位置もばらついている．本論文では軌道の終点のばらつきと中途のばらつきの両方について調べた．終点のばらつきの評価として軌道終点座標の 95%等確率楕円を用いた．そして，中途のばらつきの評価として平均軌道の法線上を通過する位置のばらつき（法線上を通過する位置の法線上での標準偏差）を用いた（図 2）．

3.　類似性の保持を比較する軌道の生成

3.1　計測軌道

健康な 5 人の被験者（うち，後に示す被験者 E は実験者と同一）が実験に参加した．実験者を除く 4 人の被験者は実験の目的などに関する詳しい内容は事前に知らされなかった．タスクにはヒトの熟練した運動

として，着席した状態での水平面上における肩と肘の駆動のみによる 2 点間の到達運動が用いられた．被験者の作業空間の座標について，以下に述べるすべての解析において肩位置を座標原点，被験者から見て右方向を x 座標の正の方向，前方向を y 座標の正の方向と定めた．タスクにおける始点及び目標の位置は，始点が (−0.3 m, 0.2 m)，目標が (0 m, 0.5 m) を基本として，被験者が運動しやすい位置に若干の微調整がなされた．被験者の手首は拘束具で固定され，また，身体の平行，回転移動を防ぐためにベルトによって被験者は椅子に縛着された．運動前と運動終了後には自然な状態での視覚が与えられたが，視覚によるフィードバック制御の影響を少なくするために，被験者は運動中に視覚が与えられなかった．10 試行程度の訓練の後に，100 試行の軌道を計測した．三次元位置計測装置 OPTOTRAK によってサンプリング周波数 100 Hz（このため，後述の計算機シミュレーションも含めて運動時間の最小単位及び数値計算の刻み幅は 10 ms とした）で被験者の手先の位置が計測された．計測した位置のデータはすべての処理に先立ってカットオフ周波数 10 Hz の低域ディジタルフィルタがかけられた．運動の開始と終了は手先の接線速度で定められ，このしきい値は 0.01 m/s とした．被験者には 120 bpm で鳴るメトロノームに合わせることで，運動時間がおおよそ 500 ms 程度になるように指示が与えられたが，運動時間を合わせることを強く意識する必要はないとも伝えられた．被験者の運動時間の平均及び標準偏差（括弧内）は，それぞれ 700 (44.3)，650 (59.7)，530 (58.5)，670 (57.2)，540 (53.2) ms だった．なお，タスク全体の前半と後半でいずれの被験者でも運動のばらつきに有意な差はなく(注1)，計測した 100 試行の間における熟練効果は少ないと考えられる．

3.2 ノイズによる軌道

ノイズによってばらついた 100 個の軌道を図 3 に示すような手順 [2] で生成した．平均軌道は被験者ごとに計測軌道の運動時間を正規化して，座標を平均することで求められた．加えるノイズは運動指令に依存したノイズで，van Beers らの研究 [2] に従って式 (1) のように表される．

$$\sigma(t) = N(0,1)\sqrt{k_{SDN}^2 u^2(t) + k_{CONST}^2} \qquad (1)$$

ここで，$N(0,1)$ は平均ゼロ，標準偏差 1 のガウス分布に従う乱数を返す関数，k_{SDN} は運動指令に依存したノイズの大きさを決めるための係数，k_{CONST} は

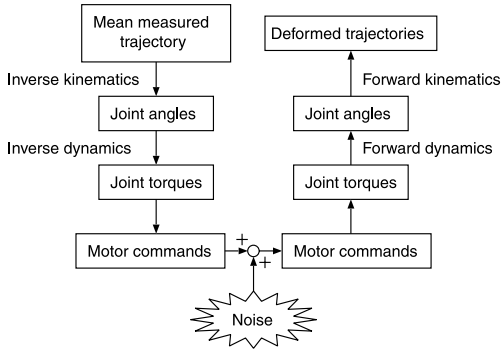

図 3 ノイズによるばらついた軌道の計算手順
Fig. 3 Procedure to compute trajectories deformed by noise.

運動指令に依存しない一定のノイズの大きさを決めるための係数である．$u(t)$ は運動指令で，Helm & Rozendaal [8] に従ってトルクを $\tau(t)$ とするときに式 (2) で与えた．

$$u(t) = t_e t_a \ddot{\tau}(t) + (t_e + t_a)\dot{\tau}(t) + \tau(t) \qquad (2)$$

ここで，t_e，t_a は時定数でそれぞれ 30，40 ms である．

更に，ノイズによってばらつきが与えられる軌道の運動時間にもばらつきが与えられた．計測軌道の運動時間（接線速度をしきい値として定めた）の平均を M とするときに，ノイズによる軌道の運動時間は平均 M，標準偏差 k_{TIME} のガウス分布に従うように設定した．運動時間が cM の軌道を求めるとき，データの刻み幅 Δt は $c\Delta t$ とした．そして，運動時間によって運動指令の大きさが異なる（例えば，同じ距離の運動ではより長い運動時間ほど運動指令は小さくなる）ため，運動時間によって運動指令の大きさは拡大，縮小された．すなわち，Hollerbach & Flash [9] に従って運動時間の平均を M，生成する軌道の運動時間を cM とするときに，生成する軌道の運動指令はノイズを加える前に $1/c^2$ 倍した．

(注1)：試行の繰返しによる影響を見るために，終点の座標のばらつき（$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$）及び中途のばらつき（タスクで設定した始点と目標の x 座標での中間地点を通過する y 座標の分散）の試行全体の前半 50 試行の軌道と後半 50 試行の軌道の間の分散比の検定を行った．その結果，ほとんどの被験者で前半 50 試行と後半 50 試行との間に有意な差はなく，計測した 100 試行の間における熟練の効果は少ないと考えられた（終点のばらつきについては第一自由度 198，第二自由度 198 で，被験者 A，B，C，D，E の p 値はそれぞれ $p_A = 0.152$，$p_B = 0.148$，$p_C = 0.261$，$p_D = 0.086$，$p_E < 0.001$（後半 50 試行の方が有意に小さい），中途のばらつきについては第一自由度 99，第二自由度 99 で，被験者 A，B，C，D，E の p 値はそれぞれ $p_A = 0.379$，$p_B = 0.062$，$p_C = 0.197$，$p_D < 0.001$（後半 50 試行の方が有意に小さい），$p_E = 0.466$）．

表 1　計測軌道の終点のばらつきを近似するノイズの係数 k_{SDN}，k_{CONST}，k_{TIME}

Table 1　The values of noise parameters k_{SDN}, k_{CONST} and k_{TIME} that reproduce the variability of the end points of measured trajectories.

Subject	k_{SDN}	k_{CONST}	k_{TIME}
A	0.018	0.589	0.909
B	0.162	0.568	1.195
C	0.061	0.943	1.365
D	0.069	0.605	1.260
E	0.042	0.353	1.045

ノイズの特性を決める係数 k_{SDN}，k_{CONST}，k_{TIME} の値は，前述の 100 個の計測軌道のばらつきを近似するように調節した．**2.** で述べたように，終点のばらつき（終点位置の 95%等確率楕円）並びに中途のばらつき（平均軌道の法線上を通過する位置の法線上での標準偏差）のいずれかを近似する軌道を生成するように係数 k_{SDN}，k_{CONST}，k_{TIME} を調節した．係数の調節にはモンテカルロ法と摂動によるこう配法を用いた．こう配法における誤差は，終点のばらつきを近似する場合は終点の 95%等確率楕円の四つの端点の位置について計測軌道とノイズによる軌道との距離（誤差）の総和とし，中途のばらつきを近似する場合は平均軌道の法線上を通過する位置の法線上での標準偏差について計測軌道とノイズによる軌道との差の 2 乗和とした．運動の終了付近においてフィードバック制御の成分が加わる可能性を考慮して，中途のばらつきの評価には軌道の全体は用いずに，軌道のおおよそ中間までのデータを用いた．中途のばらつきを評価する時刻は被験者ごとの運動時間に応じて細かく設定した方がより適切であるかもしれないが，中途のばらつきは図 5，図 7 に示すように時間に対して連続で変化するために，ばらつきについて評価する時刻が多少前後しても結果にはほとんど違いは出なかった．そのため，計算の簡便化のために運動時間が近い被験者では同じ時刻（被験者 A，B，D の組と C，E の組）を設定した．すなわち，中途のばらつきについて評価する時刻は被験者の運動時間に応じて被験者 A，B，D は $100, 150, \ldots, 400$ ms，被験者 C，E は $100, 150, \ldots, 300$ ms と設定した．

［終点のばらつきを近似するノイズによる軌道］　被験者ごとに，計測軌道の終点の 95%等確率楕円を近似するように，パラメータを調節したノイズによってばらつかせた軌道を生成した．表 1 にノイズの係数 k_{SDN}，k_{CONST}，k_{TIME} を，図 4 に被験者ごとの計測軌道（実線）及びノイズによる軌道（点線）の終点の 95%等確率楕円を，図 5 に平均軌道の法線上を通過する位置の標準偏差をそれぞれ示す．

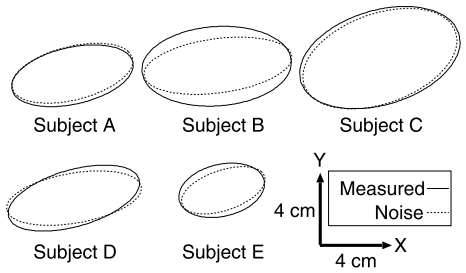

図 4　計測軌道（実線）の終点のばらつきを近似するノイズによる軌道（点線）の終点の 95%等確率楕円

Fig. 4　The 95% concentration ellipses of the end points of measured trajectories (solid lines) and simulated trajectories with noise (dashed lines) that reproduces the variability of the end points of measured trajectories.

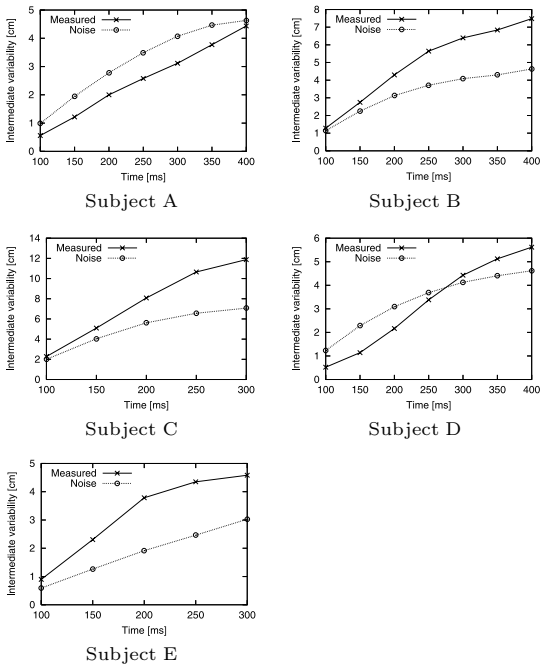

図 5　計測軌道（実線）の終点のばらつきを近似するノイズによる軌道（点線）の平均軌道の法線上を通過する位置の標準偏差

Fig. 5　The standard deviations of the points intersecting the normal line of the mean trajectory of measured trajectories (solid lines) and simulated trajectories with noise (dashed lines) that reproduce the variability of the end points of measured trajectories.

軌道の終点の位置について分散共分散行列の差の検定を行った結果，被験者 B 以外では計測軌道と終

表 2　計測軌道の中途のばらつきを近似するノイズの係数 k_{SDN}，k_{CONST}，k_{TIME}

Table 2　The values of noise parameters k_{SDN}, k_{CONST} and k_{TIME} that reproduce the variability of the intermediate points of measured trajectories.

Subject	k_{SDN}	k_{CONST}	k_{TIME}
A	0.292	0.100	0.909
B	0.586	0.567	1.195
C	0.608	0.566	1.365
D	0.547	0.271	1.260
E	0.307	0.100	1.045

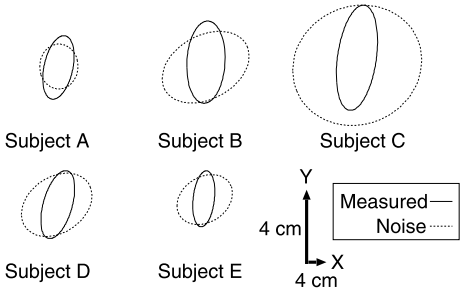

図 6　計測軌道（実線）の中途のばらつきを近似するノイズによる軌道（点線）の終点の 95%等確率楕円

Fig. 6　The 95% concentration ellipses of the end points of measured trajectories (solid lines) and simulated trajectories with noise (dashed lines) that reproduces the variability of the intermediate points of measured trajectories.

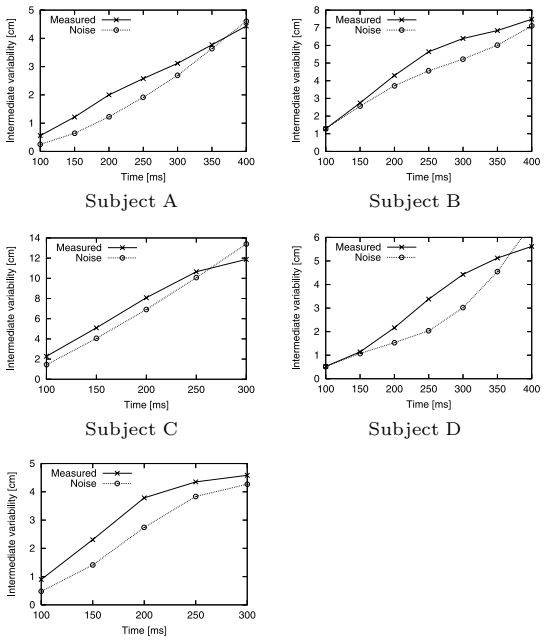

図 7　計測軌道（実線）の中途のばらつきを近似するノイズによる軌道（点線）の平均軌道の法線上を通過する位置の標準偏差

Fig. 7　The standard deviations of the points intersecting the normal line of the mean trajectory of measured trajectories (solid lines) and simulated trajectories with noise (dashed lines) that reproduce the variability of the intermediate points of measured trajectories.

点のばらつきを近似するノイズによる軌道との間に有意な差があるとはいえなかった（被験者 A，B，C，D，E の p 値はそれぞれ $p_A = 0.923$，$p_B < 0.005$，$p_C = 0.914$，$p_D = 0.235$，$p_E = 0.070$）．また，法線を通過する位置について各被験者の各時刻における第一自由度 99，第二自由度 99 の分散比の差の検定の結果，（有意な差がある（$p < 0.05$）時刻の数）/（評価する時刻の数）と表すと，被験者 A (5/7)，被験者 B (6/7)，被験者 C (4/5)，被験者 D (4/7)，被験者 E (7/7) であり，全体の半分以上で有意な差があった．以上より，表 1 のようにノイズパラメータを選ぶと，計測軌道の終点のばらつきはよく近似されるが，中途のばらつきはかなり異なった．

［中途のばらつきを近似するノイズによる軌道］　被験者ごとに，計測軌道の平均軌道の法線上を通過する位置の標準偏差を近似するように，パラメータを調節したノイズによってばらつかせた軌道を生成した．表 2 にノイズの係数 k_{SDN}，k_{CONST}，k_{TIME} を，図 6 に被験者ごとの計測軌道（実線）及びノイズによる軌道（点線）の終点の 95%等確率楕円を，図 7 に平均軌道の法線上を通過する位置の標準偏差をそれぞれ示す．なお，運動時間のばらつきは中途のばらつきにほとんど影響を与えなかったため，計算の簡便化のために中途のばらつきを近似するノイズでは係数 k_{TIME} は表 1 の終点のばらつきを近似するノイズでの係数 k_{TIME} の値をそのまま用いた．

軌道の終点の位置について分散共分散行列の差の検定を行った結果，すべての被験者で計測軌道と中途のばらつきを近似するノイズによる軌道との間に有意な差があった（$p < 0.001$）．また，法線を通過する位置について各被験者の各時刻における第一自由度 99，第二自由度 99 の分散比の差の検定の結果，（有意な差がある（$p < 0.05$）時刻の数）/（評価する時刻の数）は，被験者 A (1/7)，被験者 B (5/7)，被験者 C (2/5)，被験者 D (3/7)，被験者 E (3/7) であった．以上より，表 2 のようにパラメータを選ぶと，ノイズによる軌道と計測軌道とで，終点のばらつきは全く異な

るが，中途のばらつきも似ているとはいえない．

ところで，ノイズのパラメータをよりよく調節することで計測軌道の終点のばらつきと中途のばらつきを同時に再現できるようになるかもしれない．しかし，いずれかのばらつきを近似するように調節したノイズの係数の値はそれぞれ表 1，表 2 に示されるようなものとなっており，終点のばらつきを近似するノイズの係数の値と，中途のばらつきを近似するノイズの係数の値は，互いに離れた数値である．そのため，被験者 A 以外の被験者については終点と中途のばらつきを同時に再現するようなノイズを求めることは困難であると考えられる．**4.** の実験では軌道の類似性がどのように保持されるかについて調べるが，ノイズによる軌道は，終点のばらつきを近似するノイズによる軌道と，中途のばらつきを近似するノイズによる軌道の両方について解析した．

3.3 軌道ごとに異なる終点を設定した指令トルク変化最小軌道

運動中に加わるノイズによって運動がばらつくとするとき，試行ごとに同じ計画軌道を想定している．しかし，同一のタスクを繰り返すときでも計画軌道は必ずしも試行ごとに同一ではないかもしれない．例えば，北川ら [7] が述べたように位置知覚について視覚と体性感覚との間には誤差がある．そのため，運動開始前に目標が視覚で与えられても，運動計画において目標に手先が到達するような腕姿勢を常に正確に求めることはできないかもしれない．それによって，計画軌道は試行ごとにばらついたものとなり，結果として実行される運動もばらついたものとなり得る．

このような計画軌道の終点がタスクで与えられた目標に正確に到達していないような状況に近い傾向を示すために，ヒトの計画軌道は指令トルク変化最小軌道として求められると仮定し，終点が設定された目標の付近で軌道ごとに毎回異なる（これによって，軌道はばらついたものとなる）2 点間を結ぶ 100 個の指令トルク変化最小軌道を生成した．この 100 個の指令トルク変化最小軌道の終点の確率分布は，被験者ごとに計測軌道の終点の 95%等確率楕円を近似するように設定された（100 個の計測軌道の終点をそのまま与えるわけではなく，計測軌道の終点の 95%等確率楕円で表される分布に従うような終点が軌道ごとに設定される）．また，運動時間にもばらつきが与えられた．計測軌道の運動時間の平均を M，標準偏差を sd_{md} とするときに，生成される指令トルク変化最小軌道の運動時間は平均 M，標準偏差 sd_{md} のガウス分布に従った．

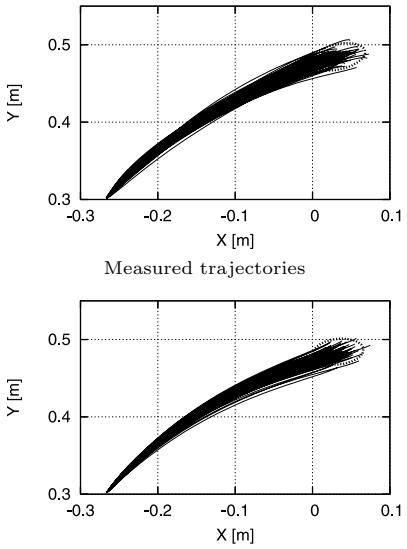

図 8　計測軌道（上段）の終点の 95%等確率楕円の分布に従うようなばらついた終点が設定された指令トルク変化最小軌道（下段）

Fig. 8　Measured trajectories (upper) and minimum commanded torque change trajectories (lower). The 95% concentration ellipse of end points in the latter is the same as that in the former.

図 8 に被験者 A についての計測軌道並びに軌道ごとに異なる終点が設定された 2 点間の指令トルク変化最小軌道を示す．更に，図 9 に計測軌道（実線）と指令トルク変化最小軌道（点線，以下図中の凡例では MCTC と表す）の平均軌道の法線上を通過する位置の標準偏差を示す．

計測軌道の終点のばらつきの分布（終点の 95%等確率楕円）に従うような軌道ごとに異なるばらついた終点が設定された 100 個の 2 点間の指令トルク変化最小軌道では，終点のばらつきはもともと再現できるように指定したために図 8 に示すように計測軌道とほぼ一致している．中途のばらつきを図 9 に示す．各被験者の各時刻における分散比の検定の結果,（有意な差がある（$p < 0.05$）時刻の数）/（評価する時刻の数）は被験者 A (1/7)，被験者 B (4/7)，被験者 C (5/5)，被験者 D (1/7)，被験者 E (2/5) であった．上記の指令トルク変化最小軌道群を計算で求めるときに，終点のばらつきを指定するだけで中途のばらつきについて全く考慮していないにもかかわらず，被験者 C を除いた被験者で計測軌道と似たばらつきが得られた．これは，

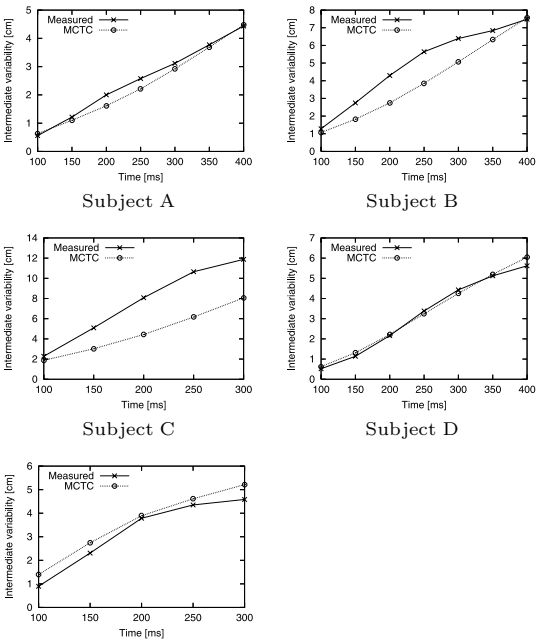

図 9　計測軌道（実線）の終点のばらつきの分布に従う軌道ごとに異なる終点が設定された 2 点間の指令トルク変化最小軌道（点線）の平均軌道の法線上を通過する位置の標準偏差

Fig. 9　The standard deviations of the points intersecting the normal line of mean trajectory of measured trajectories (solid lines) and minimum commanded torque change trajectories between two points (dashed lines) of which end points follow the distribution of the end points of measured trajectories.

運動のばらつきの要因として計画軌道のばらつきの可能性を示唆している．

4.　軌道の類似性保持の比較

運動のばらつきの要因が運動中に加わるランダムなノイズによるためか，あるいは計画軌道が既にばらついているためであるかを見極めるために，時間経過に伴って軌道の類似性がどのように保持されるか（図 1）を調べた．類似性を比較するデータとして，運動指令のレベルにより近く，信号依存ノイズの影響を強く受ける関節トルク（肩関節トルク及び肘関節トルク）プロファイルを用いた．ある軌道群（ここでは，計測軌道，終点のばらつきを近似するノイズによる軌道，中途のばらつきを近似するノイズによる軌道，終点が異なる指令トルク変化最小軌道の 4 群）についての，軌道の類似性保持を評価する手順を以下に示す．

(1)　評価したい軌道群から順に一つの軌道を選んでいく(注2)．

(2)　選んだ軌道を基準として，時刻区間 A にわたるトルクの差の 2 乗和（肩関節トルクの差の 2 乗和と，肘関節トルクの差の 2 乗和の総和）を他のすべての軌道との組合せで求める．

(3)　(2) の操作で差が小さかった（言い換えれば，類似の傾向を示した）順位で N 個の軌道を求める．

(4)　時刻区間 A よりも後の時刻区間 B について，(2)，(3) の操作を行う．

(5)　A において求められた N 個の軌道群と，B において求められた N 個の軌道群とを比較して，そのいずれにも含まれている軌道の数 M を求める．

(6)　すべての軌道（ここでは 100 個）について，各軌道を基準として (1)〜(5) の操作を行う．

(7)　(6) で数えられ各軌道を基準としたときの類似性を保持する軌道の数 M について，すべての軌道での平均を，評価している軌道群の類似性保持の尺度とみなす．

図 10 は上記手順をある被験者に適用したときの結果の一部である．無作為に抽出した被験者 E のある軌道について，時刻 110〜210 ms（上段）及び 270〜370 ms（下段）のそれぞれの区間について，残りの 99 個の軌道とのトルクの差の 2 乗和を昇順に並べている．図中の黒丸は時刻 110〜210 ms においてトルクの差の 2 乗和の小さい順位での上位 20 個の軌道であり，上段並びに下段で対応している．つまり，下段（時刻 270〜370 ms）におけるトルクの差の 2 乗和の小さい順位での上位 20 位までに黒丸がどれだけ含まれているかというのが軌道の類似性保持の尺度 M である．図 10 に示した軌道の場合 $M = 8$ である．

3. に示した四つの軌道（計測軌道，計測軌道の終点のばらつきを近似するノイズによる軌道，計測軌道の中途のばらつきを近似するノイズによる軌道，計測軌道の終点の分布に従う終点が指定された 2 点間の指令トルク変化最小軌道）について，軌道の類似性がどのように保持されているかについて調べた．軌道の類似性を比較するためには，前述の手順において時刻区間 A，B と上位何個までの軌道で比較するかを決める N の値を定めなければならない．時刻区間 A，B については，運動時間の平均を M としたときに，$0.2M$〜$0.4M$ を区間 A，$0.5M$〜$0.7M$ を区間 B と定めた．なお，時刻区間の値は **3. 1** で述べたように，

(注2)：最終的には軌道群からすべての軌道が基準として選ばれる．

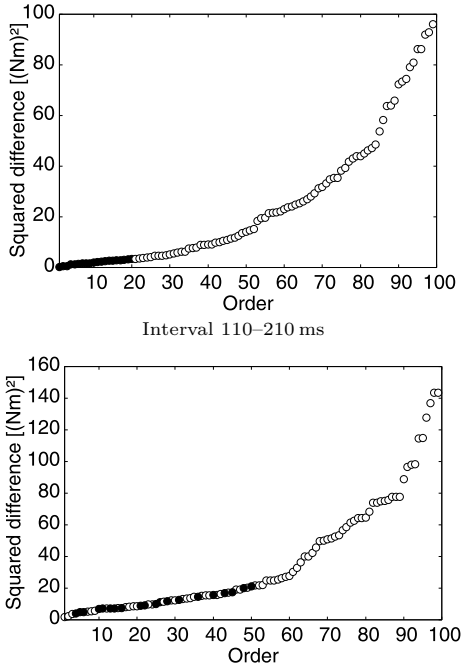

図 10　軌道の類似性保持の評価の例．黒丸は時刻 110〜210 ms（上段）においてトルクの差の 2 乗和が小さかった上位 20 個の軌道を意味する．時刻 270〜370 ms（下段）において上位 20 位以内に含まれる黒丸の数が軌道の類似性保持の尺度となる．

Fig. 10　Example of trajectory similarity evaluation. Black circles represent trajectories in which the squared difference of torque is small during the interval of 110–210 ms (upper). The number of black circles comprising the top 20 ranks during the interval of 270–370 ms (lower) indicates the measure of trajectory similarity.

表 3　軌道の類似性保持を評価するための手順における時刻区間のパラメータ A，B

Table 3　Parameters of time intervals A and B in a procedure to evaluate the similarity preservation of a trajectory.

Subject	A [ms]	B [ms]
A	140–280	350–490
B	130–260	330–460
C	110–210	270–370
D	130–270	340–480
E	110–210	270–370

サンプリング周波数が 100 Hz で運動時間の最小単位を 10 ms としたため，時間区間の値は一の位を四捨五入した．具体的な値については表 3 に示す．**3. 2** では，軌道の中途のばらつきが，評価に用いた範囲において単調に増加するため，時刻区間の多少の前後が結果にほとんど影響を及ぼさないという理由から，運動時間の値が近い被験者では中途のばらつきを評価する時刻に同じ値を用いた．これに対して，類似性の保持を評価するための手順においては，範囲を指定して関節トルクプロファイルを比較する．このとき，平均軌道の法線の同じような位置を通過する軌道が必ずしも同じような関節トルクプロファイルになるとは限らない（例えば，同じ軌跡でも運動時間が異なるなどするため）．したがって，軌道の類似性保持を評価するための手順においては，中途のばらつきを評価したときよりも，評価に用いる時刻の影響が大きく出ることが危惧される．このため，軌道の類似性保持を評価する手順においては，関節トルクプロファイルを比較するための時刻区間は被験者ごとに個別の値を設定した．N は 20 とした．図 11 に示すのはこれらの値をパラメータとして軌道の類似性がどのように保持されるかを調べた結果であるが，パラメータを変えた結果についても後で述べる．

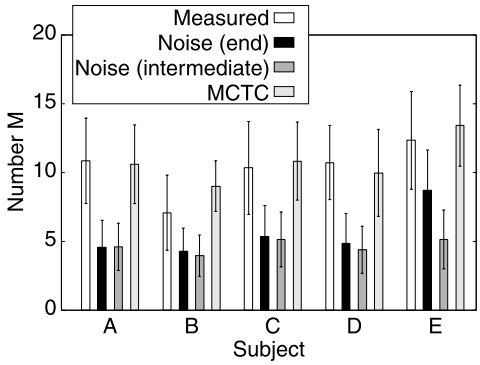

図 11　類似性を保持する軌道の数 M（塗りつぶしなし：計測軌道，塗りつぶし：計測軌道の終点のばらつきを近似するノイズを計測軌道の平均軌道に加えた軌道，濃網：計測軌道の中途のばらつきを近似するノイズを計測軌道の平均軌道に加えた軌道，淡網：計測軌道の終点の分布に従う終点が指定された 2 点間の指令トルク変化最小軌道，誤差棒は標準偏差）

Fig. 11　The number of trajectories preserving similarity M (not filled: measured trajectory; light mesh: simulated trajectory with noise that reproduces the variability of the end points of measured trajectories; thick mesh: simulated trajectory with noise that reproduces the variability of intermediated points of measured trajectories; filled: minimum commanded torque change trajectory of which end points follow the distribution of the end points of measured trajectories; errorbar means standard deviation).

図 11 に示した類似性を保持する軌道の数 M につ

表 4　図 11 に示した類似性を保持する軌道の数 M の計測軌道と差の t-検定（$df = 198$, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.001$, n.s.: no significant difference）

Table 4　The result of t-test for the difference of the number of trajectories preserving similarity between measured trajectories and other trajectories shown in Fig. 11 ($df = 198$, *: $p < 0.05$; **: $p < 0.001$; and n.s.: no significant difference).

Subject	Measured and noise (end)	Measured and noise (intermediate)	Measured and MCTC
A	**	**	n.s. ($p = 0.480$)
B	**	**	**
C	**	**	n.s. ($p = 0.194$)
D	**	**	*
E	**	**	*

いて，各被験者の軌道による違いの t-検定の結果を表 4 に示す．すべての被験者において，類似性を保持する軌道の数 M は計測軌道の方が終点のばらつきを近似するノイズによる軌道よりも有意に大きかった（$p < 0.001$）．更に，すべての被験者において，類似性を保持する軌道の数 M は計測軌道の方が中途のばらつきを近似するノイズによる軌道よりも有意に大きかった（$p < 0.001$）．最後に，計測軌道の類似性を保持する軌道の数 M は，異なる終点を与えてばらつかせた指令トルク変化最小軌道の M と，大変よく似た値であった．被験者 A，C では有意な差があるとはいえなかったが，被験者 D では計測軌道の方が有意に大きく（$p < 0.05$），被験者 B，E では終点をばらつかせた指令トルク変化最小軌道の方が有意に大きかった（被験者 B は $p < 0.001$，被験者 E は $p < 0.05$）．

類似性による関節トルクプロファイルの違い　軌道の類似性が実際にどのように保持されているかを見るために，図 12 に被験者 A（前述の軌道の類似性保持の評価の手順におけるパラメータについて，時刻区間 $A = 140$〜280 ms，$B = 350$〜490 ms）の計測軌道（上段左），計測軌道の終点のばらつきを近似するノイズによる軌道（上段右），計測軌道の中途のばらつきを近似するノイズによる軌道（下段左），計測軌道の終点の分布に従うような軌道ごとに異なる終点が指定された 2 点間の指令トルク変化最小軌道（下段右）の関節トルクプロファイルのを示す．また，図 12 に示した軌道は，基準とした軌道（実線），時刻区間 A でも B でも互いに類似した（差の 2 乗和が小さかった）軌道（破線），時刻区間 A では類似していたが B では類似していなかった軌道（点線）を示している．なお，

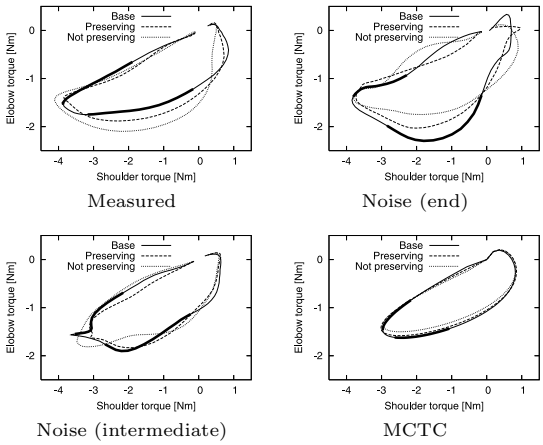

図 12　計測軌道（上段左），計測軌道の終点のばらつきを近似するノイズによる軌道（上段右），計測軌道の中途のばらつきを近似するノイズによる軌道（下段左），計測軌道の終点の分布に従う終点が指定された 2 点間の指令トルク変化最小軌道（下段右）の関節トルクプロファイル

Fig. 12　The joint torque profiles of measured trajectories (upper left), simulated trajectories with noise that reproduces the variability of the end points of measured trajectories (upper right), simulated trajectories with noise that reproduces the variability of the intermediate points of measured trajectories (lower left), and minimum commanded torque change trajectories between two points of which end points follow the distribution of the end points of measured trajectories (lower right).

関節トルクの時系列はほぼ原点の位置から反時計回りに 1 周するように変化しており，図 12 の基準とした軌道（実線）の線が太くなっている区間は関節トルクの差の 2 乗和を比較する時刻区間である前述の軌道の類似性保持を評価するための手順における時刻区間 A（140〜280 ms），B（350〜490 ms）を表している．

計測軌道（図 12 上段左）では，基準とした軌道（実線）に対して類似性を保持する軌道（破線）の関節トルクについて，基準とした軌道との差の 2 乗の軌道全体にわたる平均は，類似性を保持する軌道で $0.021\,(\mathrm{Nm})^2$，類似性を保持しない軌道で $0.151\,(\mathrm{Nm})^2$ であった．

軌道ごとに異なる終点を与えた 2 点間の指令トルク変化最小軌道（下段右）では軌道の類似性保持の性質が更に顕著であり，類似性を保持していなかった軌道（点線）でも差の小さいトルクプロファイルが見られた．関節トルクの差の 2 乗の平均は，類似性を保持する軌道で $0.006\,(\mathrm{Nm})^2$，保持しない軌道で $0.008\,(\mathrm{Nm})^2$ となっており，誤差の順位から類似性を保持していない

と判定されてはいるが，軌道の一部が似ている軌道は全体もよく類似していた．

一方，計測軌道のばらつきを近似するノイズによる軌道について，終点のばらつきを近似するノイズによる軌道（上段右）では，関節トルクの差の 2 乗の平均は類似性を保持する軌道で $0.102\,(\mathrm{Nm})^2$，類似性を保持しない軌道で $0.152\,(\mathrm{Nm})^2$ であり，中途のばらつきを近似するノイズによる軌道（下段左）では，類似性を保持する軌道で $0.039\,(\mathrm{Nm})^2$，類似性を保持しない軌道では $0.028\,(\mathrm{Nm})^2$ であった．計測軌道のばらつきを近似するノイズによる軌道では，終点のばらつきを近似するノイズによる軌道でも，中途のばらつきを近似するノイズによる軌道でも，各時刻において生じるばらつきがランダムな要素によって引き起こされるため，ある時刻で似ている軌道が軌道全体では差が大きくなったり（計測軌道の終点のばらつきを近似するノイズによる軌道について，類似性を保持すると判定された軌道），逆に，ある時刻で似ていない軌道が軌道全体では差が小さくなる（計測軌道の中途のばらつきを近似するノイズによる軌道について，類似性を保持しないと判定された軌道）ような傾向が見られた．これらの結果より，実際のヒトの運動では，ある時刻で類似する軌道群は他の時刻でもよく類似しており，運動指令の各時刻に式 (1) で示すようなランダムなノイズを加えることではその傾向をよく再現できないと考えられる．

類似性保持を評価する手順におけるパラメータ　軌道の類似性保持を評価する手順におけるパラメータである時刻区間 A，時刻区間 B，上位何個までの軌道を見るかを決める N を図 11，表 3 に示した場合とは異なる値に変更しても同様な結果が得られるかについて以下のような条件を試した．

- N の値を 10，30 に変更する．
- 時刻区間 A を $0.3M$〜$0.5M$，時刻区間 B を $0.6M$〜$0.8M$ のように，時刻区間の時刻をより後の時刻に設定する．
- 時刻区間 A を $0.2M$〜$0.5M$，時刻区間 B を $0.5M$〜$0.8M$ のように，時刻区間の範囲を広げて設定する．

上記のいずれのパラメータの条件においても，すべての被験者で図 11，表 3 に示した場合と同様な結果（すなわち，終点のばらつきを近似するノイズによる軌道及び中途のばらつきを近似するノイズによる軌道は，計測軌道ほど軌道の類似性を保持することができないが，軌道ごとに異なる終点が設定された 2 点間の指令トルク変化最小軌道は計測軌道と同程度に軌道の類似性が保持される）が得られた．

平均軌道ではなく指令トルク変化最小軌道にノイズを加えた場合　図 11 に示した，軌道ごとに異なる終点が設定された 2 点間の指令トルク変化最小軌道の方が平均軌道にノイズを加えた軌道よりも，軌道の類似性について計測軌道に近い傾向を示すことができるという結果は，指令トルク変化最小軌道の性質によるものであるかもしれない（言い換えれば，指令トルク変化最小軌道は類似性を保持しやすい性質をもっているかもしれない）．このことを確かめるために，図 11 に示した実験において，平均軌道に代わって 2 点間（平均軌道の始点と終点）の指令トルク変化軌道にノイズを加えた場合についても軌道の類似性がどのように保持されるかを調べた．ノイズの係数には表 1，表 2 に示した値を用いた．また，類似性保持を評価するための手順におけるパラメータについては，時刻区間は表 3 の値，$N = 20$ を用いた．図 13 は計測軌道（塗りつぶしなし），計測軌道の終点のばらつきを近似するノイズを 2 点間の指令トルク変化最小軌道に加えることでばらつかせた軌道（塗りつぶし），計測軌道の中途のばらつきを近似するノイズを 2 点間の指令トルク変化最小軌道に加えることでばらつかせた軌道（濃網），軌道ごとに異なる終点が指定された 2 点間の指令トルク変化最小軌道（淡網）についての，類似性を保持する軌道の数 M である．その結果，計測軌道の代わりに 2 点間の指令トルク変化最小軌道を用いた場合でも，やはりノイズによって軌道をばらつかせた軌道は，計測軌道ほど軌道の類似性を保持しなかった．このことより，軌道ごとに異なる終点が指定された 2 点間の指令トルク変化最小軌道（淡網）が計測軌道に近い軌道の類似性を再現できたのは，運動中にランダムなノイズによって軌道をばらつかせたのではなく，試行ごとに異なる終点を与えて軌道をばらつかせたためであると考えられる．

5. 考　　察

本研究は運動のばらつきの要因が “運動中のノイズ” によるものか，“運動計画における知覚のばらつき” によるものかを調べるために，トルクプロファイルの比較による時間経過に伴う軌道の類似性の保持を調べた．また，運動タスクには学習のための試行錯誤の影響 [10] を抑えるために，ヒトの熟練した運動として

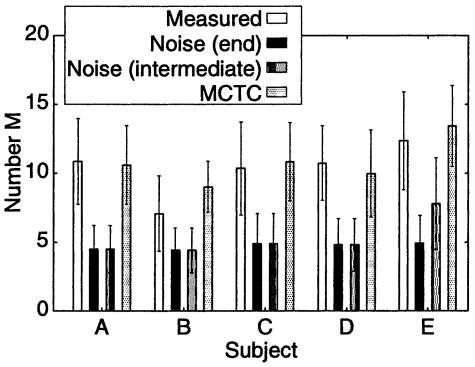

図 13 類似性を保持する軌道の数 M（塗りつぶしなし：計測軌道，塗りつぶし：計測軌道の終点のばらつきを近似するノイズを 2 点間の指令トルク変化最小軌道に加えた軌道，濃網：計測軌道の中途のばらつきを近似するノイズを 2 点間の指令トルク変化最小軌道に加えた軌道，淡網：計測軌道の終点の分布に従う終点が指定された 2 点間の指令トルク変化最小軌道，誤差棒は標準偏差）

Fig. 13 The number of trajectories preserving similarity M (not filled: measured trajectory; light mesh: simulated trajectory with noise that reproduces the variability of the end points of measured trajectories; thick mesh: simulated trajectory with noise that reproduces the variability of intermediated points of measured trajectories; filled: minimum commanded torque change trajectory of which end points follow the distribution of the end points of measured trajectories; errorbar means standard deviation).

2 点間の到達運動を用いた．タスクの開始直後のトライアルと，終了間際のトライアルで比較したときに，被験者の運動のばらつきはほとんど差がなかった．今回の実験では運動開始時の腕の姿勢をなるべく同じにしたが，運動の開始時における筋張力のばらつきなどが運動全体のばらつきにどの程度の影響があるかについては今後検討していく必要がある．

軌道が運動中に加えられる無作為なノイズによってばらつくのであれば，ある時刻で類似する軌道群があったとしても，それよりも後の時刻でもその類似性が保たれているかどうかは，単なるノイズの確率分布に従うだろう．しかし，そのような無作為なノイズの影響が少なく，ヒトの運動が何らかの規範に従って計画され，そしておおむね計画どおりに実行されているのであれば，ある時刻で類似の性質をもつ軌道群は，後の時刻までその類似性をよく保ち続けると予想される．トルクの時系列データによる評価と比較を行った結果，ノイズによってばらつきを与えた軌道よりも，実際に計測された軌道は類似性をよく保っていた．したがって，ヒトの運動のばらつきの要因は運動中の無作為なノイズだけでは十分に説明できないのではないかと考えられる．

Schmidt ら [11] は運動時間が短いほど，あるいは運動距離が長いほど到達運動の終点のばらつきは増大すると報告した．また，van Beers ら [2] はノイズによって運動距離が長い運動ほど終点のばらつきが大きくなることを示した．運動のばらつきの要因がノイズによるものであるとする場合，運動時間が短かったり，運動距離が長い運動では手先の速度が大きくなり，それに伴って発揮される運動指令も大きくなる．その結果として信号依存ノイズの影響が強くなり，運動のばらつきが増大すると主張されている．一方，運動のばらつきが運動計画の段階で生じていると考えたとき，これらの結果はどのように説明されるだろうか．

速い運動では運動終了付近における視覚や体性感覚などを用いたフィードバック制御を実行しにくくなるということが考えられる．典型的な 2 点間の到達運動では，始点と終点では正確に手先が停止していることが要求される．そのため，たとえ運動中に体性感覚しか使用することができずに手先の位置に関するフィードバック信号の信頼性が低く，位置に関するフィードバック制御による修正をそれほど行わないとしても，被験者は運動の終了では厳密に手先を停止しなければならない．このような速度に関するフィードバック制御の困難さが終点のばらつきを増大させる可能性が考えられる．筆者ら [12] は運動中に視覚が与えられない到達運動について，非常に遅い運動と比較的速い運動とで比較すると，軌道の中点の奥行方向のばらつきは遅い運動の方が大きくなり，それは運動時間が長くなることによって計画軌道として求めなければならないデータの数量が増大し，それが計画軌道生成の困難さを招くためだろうと報告した．計画軌道生成のための計算が脳内においてどのように行われているかということも，ヒトの運動のばらつきには関連してくると考えられる．

運動のばらつきには，位置に関するばらつきだけでなく時間軸の伸縮によってデータが前後するために起こるばらつき [13], [14] も考えられている．森重ら [14] はこのような時間軸のばらつきの理由として運動計画段階のノイズを述べた．運動計画における目標位置のばらつきによって計画軌道が異なるという我々の説では時間軸のばらつきについてはよく説明されないが，恐らく運動計画におけるノイズの影響や計画軌道の計

算過程において起こるのではないかと推測する．先に述べた筆者らの結果 [12] と併せて，我々は計画軌道そのものの大きなばらつきを予想する．

6. む す び

ヒトの運動をばらつかせる要因として，新たに運動計画段階における目標位置知覚の不確からしさによるばらつきを提案した．その結果，従来考えられていたように，ヒトの計画軌道は計測軌道の平均軌道として表されるような同一のタスクの間中で唯一のものではなく，試行ごとにかなりのばらつきを伴っている可能性が示唆される．計画軌道がばらつく要因としては，計画軌道を計算する過程における何らかの外乱や目標位置の体性感覚による知覚の誤差 [7] などが考えられる．生体において計画軌道がどのように求められているのか，またそのために必要な感覚情報はどのように知覚され，表現されているかということについて，心理物理実験や数理モデルなどから調査していく．その際，筆者らの計測軌道の一部から計画軌道を推定する方法 [15] を用いることで，ばらついた計画軌道がどのようなものであったかを知る手助けとなり得るだろう．

謝辞　研究について多くの御助言を賜わりました豊橋技術科学大学情報工学系福村直博助教授，福田浩士助手に感謝致します．本研究は文部科学省 21 世紀 COE プログラム「インテリジェントヒューマンセンシング」の援助により行われた．

文　　献

[1] C.M. Harris and D.M. Wolpert, “Signal-dependent noise determines motor planning,” Nature, vol.394, pp.780–784, 1998.

[2] R.J. van Beers, P. Haggard, and D.M. Wolpert, “The role of execution noise in movement variability,” J. Neurophysiol, vol.91, pp.1050–1063, 2004.

[3] T. Flash and N. Hogan, “The coordination of arm movements,” J. Neuroscience, vol.5, pp.1688–1703, 1985.

[4] Y. Uno, M. Kawato, and R. Suzuki, “Formation and control of optimal trajectory in human multi-joint arm movement,” Biological Cybernetics, vol.61, pp.89–101, 1989.

[5] E. Nakano, H. Imamizu, R. Osu, Y. Uno, H. Gomi, T. Yoshioka, and M. Kawato, “Quantitative examinations of internal representations for arm trajectory planning: Minimum commanded torque change model,” J. Neurophysiol, vol.81, pp.2140–2155, 1999.

[6] 阪本忠明，福村直博，宇野洋二，“ヒト腕での到達運動におけるばらつきはターゲットの知覚に依存する，” 信学技報，NC2002-175, 2003.

[7] 北川哲生，福田浩士，福村直博，宇野洋二，“ヒトの運動における手先の位置知覚の誤差，” 信学論（D），vol.J89-D, no.6, pp.1429–1439, June 2006.

[8] F.C.T. van der Helm and L.A. Rozendaal, “Musculoskeletal systems with intrinsic and proprioceptive feedback,” in Biomechanics and Neural Control of Posture and Movement, ed. J.M. Winters and P.E. Crag, pp.164–174, 2000.

[9] J.M. Hollerbach and T. Flash, “Dynamic interaction between limb segments during planar arm movement,” Biological Cybernetics, vol.44, pp.67–77, 1982.

[10] 阪口　豊，高野光雄，“強化学習と教師あり学習を組み合わせたプリズム適応のモデル，” 信学技報，NC2000-169, 2001.

[11] R.A. Schmidt, H. Zelaznik, B. Hawkins, J.S. Frank, and J.T. Quinn, Jr., “Motor-output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts,” Psychological Review, vol.86, pp.415–451, 1979.

[12] 大山剛史，宇野洋二，“ヒト腕の到達運動のばらつきは運動計画で生じる，” 第 20 回生体生理工学シンポジウム論文集，pp.149–152, 2005.

[13] 森重建一，宮本弘之，大須理英子，川人光男，“経由点到達運動の位置分散は軌道計画・実行の逐次モデルを支持する，” 信学論（D-II），vol.J87-D-II, no.2, pp.716–725, Feb. 2004.

[14] 森重建一，上村直樹，岩崎裕志，宮本弘之，和田安弘，大須理英子，川人光男，“熟練到達運動において目標軌道は存在するか，” 信学論（D-II），vol.J88-D-II, no.12, pp.2358–2367, Dec. 2005.

[15] 大山剛史，宇野洋二，“ヒトの運動の計測軌道から計画軌道を推定する方法，” 信学論（D-II），vol.J88-D-II, no.4, pp.800–809, April 2005.

（平成 18 年 7 月 31 日受付，10 月 17 日再受付）

大山　剛史　（学生員）

平 14 豊橋技科大・工・情報卒．平 16 同大大学院工学研究科修士課程了．現在，同大学院工学研究科博士後期課程在学中．

宇野　洋二　（正員）

昭 63 阪大大学院基礎工学研究科博士課程了．工博．同年東大・工・計数助手．平 3 同講師．平 4 ATR 人間情報通信研究所主任研究員．平 8 豊橋技科大情報工学系教授．平 18 名古屋大学大学院工学研究科教授．生体の運動機能の研究に従事．日本神経回路学会，計測自動制御学会各会員．