

熟練到達運動において目標軌道は存在するか

森重 健一<sup>†</sup>      上村 直樹<sup>††</sup>      岩崎 裕志<sup>††</sup>      宮本 弘之<sup>†</sup>  
 和田 安弘<sup>††</sup>      大須理英子<sup>†††</sup>      川人 光男<sup>†††</sup>

Is There Desired Trajectory for Skilled Reaching Movements?

Ken-ichi MORISHIGE<sup>†</sup>, Naoki KAMIMURA<sup>††</sup>, Hiroshi IWASAKI<sup>††</sup>,  
 Hiroyuki MIYAMOTO<sup>†</sup>, Yasuhiro WADA<sup>††</sup>, Rieko OSU<sup>†††</sup>,  
 and Mitsuo KAWATO<sup>†††</sup>

あらまし これまで目標軌道を仮定した様々な運動制御モデルが提案されてきた。しかし Todorov らによって最適フィードバック制御に基づくモデルが提案されて以来、目標軌道が存在するのか、あるいはフィードバックに基づいて運動を行っているのか、signal-dependent noise (加法的雑音) に起因する位置分散をもとに議論され始めた。位置分散の時間波形を接線方向成分と法線方向成分に分けたとき、接線方向成分は時間軸の伸縮に起因する項と加法的雑音に起因する項の二つの成分でよく回帰できる。一方、法線方向成分は時間軸の伸縮の影響は消え去り、加法的雑音に起因する項だけでよく表すことができる。このような二つの方向の成分の違いを本論文で提案する目標軌道を仮定した階層的なモデルではよく説明できる。これらの結果は、目標軌道の存在を示唆するものである。

キーワード signal-dependent noise, ばらつき, 2 点間到達運動

1. ま え が き

ヒトは素早く協調的な腕の運動を行うことができる。しかし生物学的なフィードバックループは遅くゲインが小さいため、フィードバック制御だけではそのような運動を実現できない。そこでフィードフォワード制御が中心的な役割を果たしていると考えられてきた [1]。具体的には、事前に目標軌道を計画し、内部モデルを用いて運動軌道を制御する方略が考えられる。このような目標軌道を仮定した様々なモデルが提案され、実際のヒトの運動軌道の特徴をよく再現できることが示されてきた [2] ~ [7]。

しかし Todorov らは、目標軌道の存在を仮定せず、ヒトはフィードバック情報を積極的に利用して制御している可能性を示した。例えば、多数の経由点を通る運動を行うとき、手先の位置分散 (以下、ばらつきの大きさを評価する数学的な値の意味で「位置分散」と記述することにする) の時間波形は、経由点付近で小さくなり、それ以外の場所で大きくなるように見える。この観察から、Todorov らは動作のばらつきはそれがタスクのパフォーマンスを低下させるときだけ圧縮され、タスクに影響を与えない位置では大きくなっていると考え、最適フィードバック制御に基づくモデルを提案した [8], [9]。オンラインのフィードバックを利用する彼らのモデルでは位置分散の特徴を説明できるが、従来提案されてきた目標軌道を仮定したモデルでは説明できないと彼らは主張している。この仕事をきっかけに、手先のばらつき、特に運動指令に対して加法的に働く雑音 (signal-dependent noise) が位置分散の時間変化にどう影響を及ぼしているのか、議論され始めた。

Todorov らが提案したモデルに対して、我々は目標軌道を仮定したモデルの方が、より妥当だということ

<sup>†</sup> 九州工業大学生命体工学研究科脳情報専攻, 北九州市  
 Graduate School of Life Science and Systems Engineering,  
 Kyushu Institute of Technology, 2-4 Hibikino, Wakamatsu-  
 ku, Kitakyushu-shi, 808-0196 Japan

<sup>††</sup> 長岡技術科学大学電気系, 長岡市  
 Department of Electrical Engineering, Nagaoka University of  
 Technology, 1603-1 Kamitomiokamachi, Nagaoka-shi, 940-  
 2188 Japan

<sup>†††</sup> 国際電気通信基礎技術研究所脳情報研究所, 京都府  
 ATR, Computational Neuroscience Laboratories, 2-2-2  
 Hikaridai, "Keihanna Science City" (Seika-cho, Soraku-gun),  
 Kyoto-fu, 619-0288 Japan

を示した [10] . 計測された位置分散の時間波形は二つの構成要素を仮定したモデルでよく再現できる . 一つは signal-dependent noise によって運動指令に加法的に働けばらつき ( 加法的雑音に起因する分散 ) である . signal-dependent noise に起因する位置分散は蓄積され時間とともに増加することから , 時間の単調増加関数で近似できる . もう一つはタイミングのずれによって生じるばらつき ( 時間軸の伸縮に起因する分散 ) である . これは , 軌跡は同一だが出来事の起きるタイミングが多少前後に ( しかし順序は保たれて ) ずれる効果であり , 速度の 2 乗に比例する性質を示す . この時間軸の伸縮が原因で , 位置分散の時間波形は増加減少を繰り返す特徴を示す . これは軌道計画レベルにおける時間軸方向のノイズを反映すると考えられる . したがって , 位置分散のモデルを検討するには , この二つの要素を分けて議論する必要がある . Todorov らのモデルでは , 加法的雑音のみが仮定されている . 彼らは時間軸の伸縮の影響を取り除いて加法的雑音成分のみを抽出するため軌跡の長さを基準として時間軸のひずみを細かく修正した ( まず , 計測されたデータを軌道に沿って距離で等分割し , リサンプリングを行う . そのデータから平均の軌跡を求め , それぞれの平均点から最も近い各試行上のポイントを見つける . そしてそれぞれの場所での分散を計算している ) [8] . しかしこの正規化方法は , 軌道に曲がりが多い箇所では平均軌道から最も近い点を探すときにタイミングのずれを取り除くことができず , 時間軸の伸縮を取り除くという意味での正確な正規化ができない ( 図 1 B の P1 と P2 ) . したがって , この正規化方法は加法的雑音に起因する位置分散を議論するためには最適でなく , より良い方法を考える必要がある . 我々は速度が極小となる時刻 ( 図 1 B の P1 と P3 ) をそろえることで時間軸の局所的なひずみを小さくし , 加法的雑音に起因する位置分散が単調増加関数になることを示した [10] . しかし , 時間軸の伸縮を完全に取り除くことはできなかった .

我々の位置分散の理論モデルが正しいと仮定したとき , 位置分散を運動の接線方向と法線方向に分けて考えると , 分散の接線方向成分は時間軸の伸縮に起因する分散と加法的雑音に起因する分散の和で表されると予想される . ここで , 法線方向の速度は 0 なので , 時間軸の伸縮の影響はなく , 加法的雑音に起因する分散のみで表されると予想できる . つまり , 位置分散を二つの方向成分に分けることによって , 加法的雑音に起

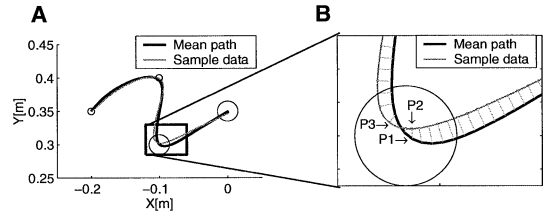


図 1 A : 軌道の曲がりが多いタスクの例 . B : 軌道が曲がっている箇所での正規化方法の図 . Todorov らの方法は , 平均軌道上の点 P1 とそこから最も距離が近い試行上の点 P2 が同じタイミングとして正規化する . しかし , 我々が文献 [10] で行ったように P1 と P3 を同じタイミングにした方が , 時間軸の伸縮を取り除くという意味ではより正確な正規化ができる .

Fig. 1 A : An example of curved task. B : An illustration of normalize methods at curved points. Todorov's method make an average point P1 correspond to the nearest point P2 to align the timing. It is more appropriate for removing positional variance arising from time-jitter to make P1 correspond to P3.

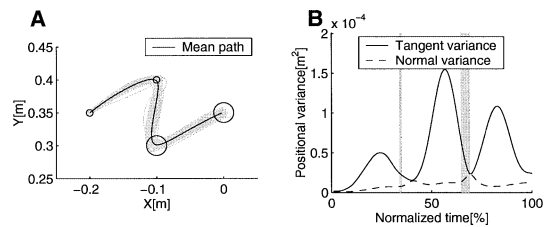


図 2 A : 軌道に曲がりが多いタスクでの手先の全軌道と平均軌道 . B : A の計測データにおいて , 計測された位置分散を接線方向成分と法線方向成分に分けたときの時間波形 . 灰色の領域は , 手先が経由点上を通過している時刻を示す . 軌道が曲がっている箇所では位置分散の二つの成分を明確に分離するのは難しい .

Fig. 2 A : Hand paths and mean path on a curved task. B : Tangent and normal components of trajectory variabilities on the task A. Gray areas indicate the time when the hand is passing through via-points. It is difficult to separate the two elements of positional variance at curved parts.

因する分散のみを抽出でき , 時間的にどのように変化するのが議論できるようになると期待される . しかし , 軌道に曲がりが多い箇所では , 分散の接線方向成分と法線方向成分が交ざってしまい , 二つの成分を明確に分離することは難しい ( 図 2 B ) . それに対して , 単純な 2 点間到達運動であれば軌道の曲がりはいくらか一定である ( 図 3 ) . そこで本論文では , より軌道の曲がりの少ない 2 点間到達運動で実験を行った .

本論文では , 2 点間到達運動において , 位置分散の

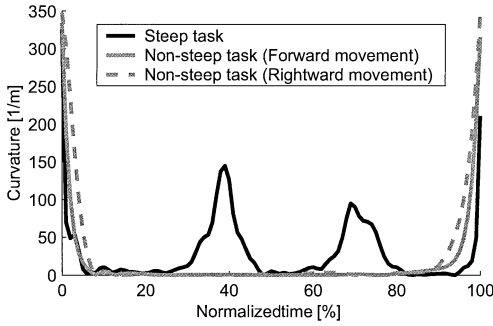


図3 軌道に曲がりが多いタスク（図1、図2のジグザグ型タスク）と少ないタスク（図3の前後と左右の2点間到達運動タスク）での曲率の大きさの比較を比較した模式図．黒の実線、灰色の実線、灰色の破線はそれぞれ、ジグザグ型タスク、前後運動、左右運動の曲率の時間波形を示す．比較には、それぞれのタスクから任意の軌道データをサンプルとして選び、そのデータから計算した曲率を用いた．運動の開始時刻と終了時刻は曲率のしきい値  $350 \text{ [m}^{-1}\text{]}$  を用いて決定した [18]．

Fig. 3 Comparison of trajectory curvatures between tasks with steep (zigzag task as Fig.1 and Fig.2 show) and non-steep (point-to-point movements as Fig.3 shows) curvature. Black solid, gray solid and gray dashed line indicated the curvature profiles of zigzag, forward movement and rightward movement tasks respectively. Arbitrary trajectories were selected from each task. The start and end-points of each movement were determined using the curvature threshold of  $350 \text{ [m}^{-1}\text{]}$ .

時間波形を接線方向と法線方向成分に分けて調べた．実験結果から、以前提案したモデル [10] をより精密にしたモデルで、接線方向と法線方向の位置分散の特徴の変化をよく説明できることを示す．

## 2. 位置分散の理論予測

まず、運動計画・実行を逐次的に行うモデルに基づいて、到達運動の位置分散の理論予測を行う．軌道計画の過程で決定された目標軌道を  $x^*(t)$  とする．この目標軌道に基づいてヒトの腕が制御されるとき、2種類の雑音が入ると考える．第1は時間軸の伸縮である．このずれは平均0、標準偏差  $a(t)$  の正規分布で表されるとする．それ以外に、加法的雑音に起因するずれが平均0、標準偏差  $b(t)$  の正規分布で表されるとする．これらの仮定のもとで、 $k$  試行目の実現軌道  $x^k(t)$  の位置分散は次のように表される [10]．

$$\text{Var}(x^k(t)) \cong \left\{ \frac{dx^*(t)}{dt} \right\}^2 a(t)^2 + b(t)^2 \quad (1)$$

式 (1) から分かるように、分散は、速度の2乗に比例する項と、加法的雑音に起因する項の和となる．加法的雑音が入る運動指令の大きさに比例する signal-dependent noise にその原因があるとすると、加法的雑音に起因する位置の分散は、運動指令を少なくとも2回、時間積分しているものになっている．したがって、加法的雑音に起因する位置分散は時間とともに大きくなると考えられるので、我々は  $b(t)$  を時間の単調増加関数で近似した回帰式を用いた [10]．

$$\text{Var}(t) = \beta_1 \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \beta_2 t + E$$

しかし、これは非常に粗い近似である．一般に運動指令の大きさはトルク大きさと相関関係にあるので [11]、加法的雑音に起因する位置分散はトルクの二乗和の2回積分と対応関係があると考えられる．したがって、式 (2) の方がより妥当だと考えられる．

$$\text{Var}(t) = \beta_1 \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \beta_2 \int \tau^2(t) dt + E \quad (2)$$

位置分散を接線方向と法線方向に分けた場合、接線方向は式 (2) で近似できると予想できる．それに対して、法線方向は速度が0だから、時間軸の伸縮の影響は無視できるほど小さいと考えられる．したがって、式 (3) でよく再現できると予想される．

$$\text{Var}(t) = \beta_2 \int \tau^2(t) dt + E \quad (3)$$

2点間到達運動の位置分散を接線方向成分と法線方向成分の二つに分けて考え、それぞれの成分の構成要素について3.以降で実験的に検討する．

## 3. 実験方法

### 3.1 実験装置と手続き

被験者は22～26歳の男性10名で、すべての試行は右手で行われた．被験者は前後左右と高さが調節可能な椅子に座り、手首はブレースで固定した．腕を乗せる作業台は肩の高さに合わせ、水平面上で運動を行った．式 (1) で表した位置分散の理論式では摩擦の影響を考慮していない．理論式に実験環境を合わせるため、今回の実験では作業台と腕の間の摩擦が少ないエアースレッドを用いた．赤外線LEDマーカを取り付けた手先の位置は、三次元位置計測装置 (OPTOTRAK 3020) を用いてサンプリング周波数500 Hzで計測した．計測された手先位置はカーソルとしてCRTモニ

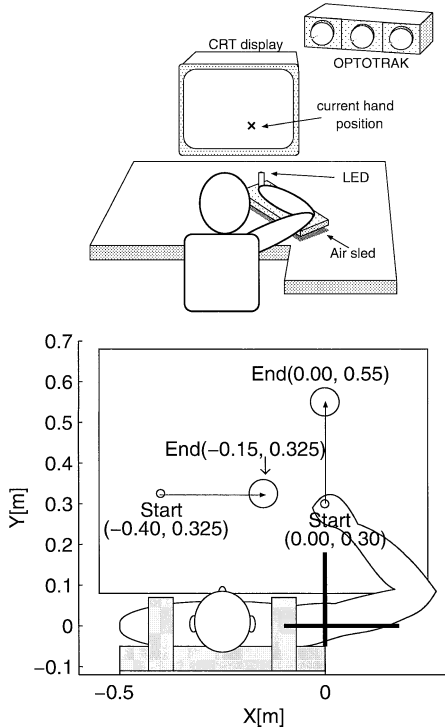


図 4 実験環境設定  
Fig. 4 Experimental setup.

タに表示した。被験者は正面に置かれた CRT モニタの画面を見ながら課題を遂行した (図 4)。

被験者が実験課題に集中できるようにするために部屋の照明を暗くし、周りの雑音を遮断することのできるヘッドホン (BOSE QuietComfort Acoustic Noise Cancelling headphones) を着用して実験を行った。

### 3.2 タスク設定

タスク設定は図 4 のように行い (始点: 半径 0.01 [m], 終点: 半径 0.035 [m], 運動時間: 350 [ms]), 前後運動 (Forward movement) と左右運動 (Rightward movement) の 2 種類で 2 点間到達運動を行った。始点の半径はカーソルを難なく停止できる最低限の大きさとし、終点の半径はどの被験者でも繰り返しうまく停止できる大きさに設定した。被験者には、Beep 音の合図で始点を出発し終点に到達するよう指示した。

実験は 2 日に分けて行った。1 日目は十分に成功できるまで (前後方向, 左右方向それぞれ 50 回成功するまで) 練習を行った。2 日目はそれぞれの方向で 40 回ずつ成功するまで試行を行った。

表 1 標準的な被験者の腕のパラメータ

Table 1 Values of physical parameters of the arm.

	Parameters	Values
Arm length	$L_1$ [m]	0.275
	$L_2$ [m]	0.357
Mass	$M_1$ [kg]	1.495
	$M_2$ [kg]	1.060
Center of mass	$S_1$ [m]	0.113
	$S_2$ [m]	0.160
Moment of inertia	$I_1$ [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]	0.0294
	$I_2$ [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]	0.0405

### 3.3 解析方法

計測した位置データはカットオフ周波数 15 Hz の三次バターワースフィルタで平滑化した。3 点微分を用いて計算した速度データから曲率を求め、運動の開始時刻と終了時刻を検出した [18]。このとき曲率のしきい値は  $350 \text{ m}^{-1}$  とした。検出した運動の開始時刻と終了時刻の間が 100 等分になるようサンプリングを行い、すべての軌道データを正規化した。肩と肘のトルクは、計測された位置データ (肩, 肘, 手先) と推定された腕のパラメータ (腕の質量, 慣性モーメント, 粘性) をもとに 2 関節腕の運動方程式から算出した。腕の質量は、標準的な値 (表 1) を被験者の腕の長さに比例して変化させることで被験者ごとに設定した。腕の慣性モーメントは標準的な値を被験者の腕の長さの 3 乗に比例して変化させることで設定した。粘性係数は Gomi and Osu [12] の方法を用いて、各試行ごとのトルクの絶対値の平均値から推定した。

解析には 2 日目の成功試行のみを用いた。ただし、平均軌道から大きく (接線方向速度が標準偏差の 3 倍以上) 外れている軌道は除外したので、全体で約 96% の成功試行が解析に用いられた。1 人の被験者は、タスクをうまく達成することができなかった (運動時間の許容誤差内で終点に止まらない) ため、今回の解析からは除外した。

## 4. 実験結果

典型的な被験者 (KY) の実験結果を図 5 に示す。前後運動の実験結果を図 5 左側 (A, C, E, G), 左右運動の実験結果を図 5 右側 (B, D, F, H) に示す。手先の平均軌道を図 5 A, B, 接線方向成分の位置分散の時間波形と平均二乗速度の波形を図 5 C, D, 法

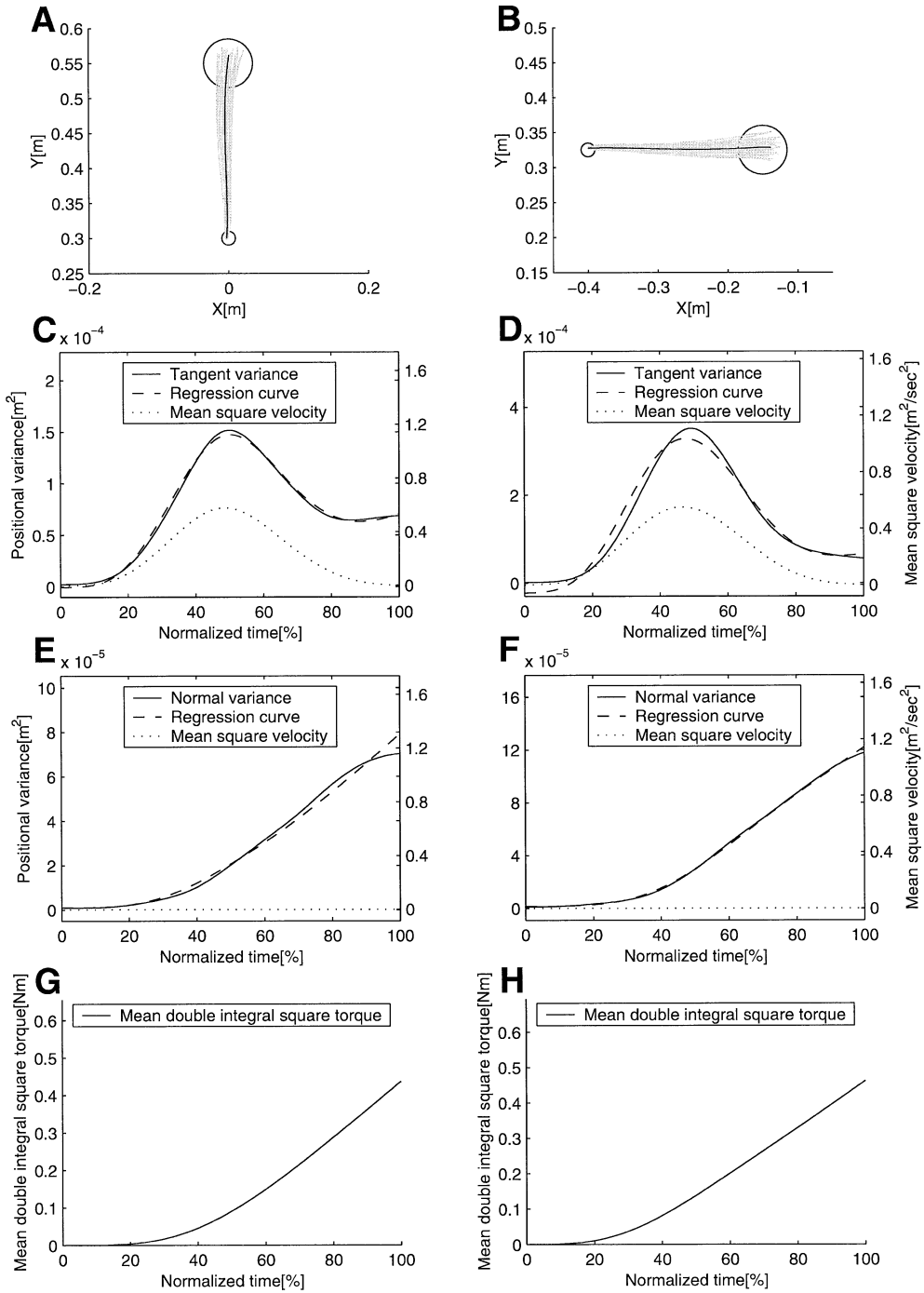


図 5 典型的な被験者 (KY) の手先位置の軌跡と位置分散の時間波形  
 Fig. 5 Hand path and time course of variance of subject KY.

表 2 式 (2), (3) を用いた重回帰分析の結果 (各被験者ごとに重回帰分析を行い, タスクごとに全体の平均を算出した)

Table 2 The results of multiple regression with equation (2) and (3). *t* values are shown below the regression coefficients.

	R-square	<i>F</i>	$\beta_1$	$\beta_2$
<u>Forward movement</u>				
Tangent variance	0.95 ± 0.05	5572.41*	2.63 ± 1.14(×10 <sup>-4</sup> )*	1.39 ± 0.60(×10 <sup>-4</sup> )*
			80.42	31.98
Normal variance	0.93 ± 0.08	3997.17*	—	1.68 ± 0.79(×10 <sup>-4</sup> )*
			—	56.01
<u>Rightward movement</u>				
Tangent variance	0.96 ± 0.06	2605.06*	3.50 ± 1.42(×10 <sup>-4</sup> )*	1.64 ± 0.54(×10 <sup>-4</sup> )*
			63.55	23.81
Normal variance	0.90 ± 0.15	6330.28*	—	2.04 ± 0.86(×10 <sup>-4</sup> )*
			—	63.77

\**p* < .001, *df* = 97 upper: coefficients ± *SD* lower: *t* values

線方向成分の位置分散の時間波形と平均二乗速度の波形を図 5 E, F に示す。実線は計測された位置分散, 破線は回帰曲線, 点線は平均二乗速度をそれぞれ表す。また, 前後運動と左右運動のトルク二乗和の 2 回積分の時間波形を図 5 G, H にそれぞれ示す。

位置分散の接線方向成分は速度の増減に応じて変化し, 平均二乗速度の波形に非常によく似た特徴を示した (図 5 C, D)。式 (2) を用いて重回帰分析を行うと, 回帰は有意 (前後運動: *p* < .001, 左右運動: *p* < .001) で, 二つの偏回帰係数も有意に正 [前後運動:  $\beta_1$  (*p* < .001),  $\beta_2$  (*p* < .001), 左右運動:  $\beta_1$  (*p* < .001),  $\beta_2$  (*p* < .001)] だった (表 2)。

一方, 位置分散の法線方向成分は, 単調に増加する時間波形を示した (図 5 E, F)。式 (3) を用いて重回帰分析を行うと, 回帰は有意 (*p* < .001) であり (表 2),  $\beta_2$  だけでよく回帰できる (前後運動: *p* < .001, 左右運動: *p* < .001)。

つまり, 位置分散の接線方向成分は, 時間軸の伸縮に起因する項と加法的雑音に起因する項の二つから成り立っているが, 法線方向成分は加法的雑音に起因する項のみから成り立っていると考えられる。位置分散は接線方向成分と法線方向成分で異なる特徴を示し, 我々のモデルではその違いをよく説明できる。

## 5. 考 察

### 5.1 中枢神経系は目標軌道を必要としているか

Todorov らは経由点通過運動において位置分散の時間変化を調べ, 正確さが要求される個所では分散が圧縮され, そうでない個所では位置分散が増加すると考え, 最適フィードバック制御に基づく運動制御モデル

を示した [8], [9]。従来主流であった運動計画・実行を逐次的に行うモデルでは, 事前に目標軌道を計画し, 逆モデルを用いて運動指令を計算し, 実現軌道を生成する。それに対し彼らのモデルは, オンラインのフィードバックに依存するため, 目標軌道を必要としない点が従来のモデルと大きく異なる。

しかし生物のフィードバックループは遅いため, 体性感覚や視覚のフィードバック情報を用いるだけでは素早い運動を実現できない。もしフィードバックを中心とした制御が行われているならば, 何らかの方略を用いてフィードバックの時間遅れを補っているはずである。その方略の例として, 制御対象のダイナミクスや過去の運動指令の遠心性コピーに関する情報を用いることで現在の状態を予測し, 時間遅れの問題を解決していると考えられる [8]。また Miall らも順モデルとフィードバック制御器を組み合わせる等価的に逆モデルを作り, 時間遅れを解消する考え方を示した [13]。しかしこれらの考え方では, たとえ時間遅れが小さくても, 不安定なシステムを安定に制御することはできない [14]。実際には, 直立姿勢制御や 2 足歩行, 不安定力場での腕の到達運動など, 中枢神経系は不安定な制御対象を安定化して制御することができる。このことから, 中枢神経系がフィードバックのみを中心とした制御を行っているとは考えにくい。

また位置分散の時間波形においても, 目標軌道を仮定したモデルの方が Todorov らのモデルよりも計測された位置分散の特徴をよく再現できる [10]。本論文では更に, 位置分散を接線方向と法線方向に分け, その特徴の変化を観察した場合, 接線方向成分ははっきりとした増加減少を示すが (図 5 C, D), 法線方向成

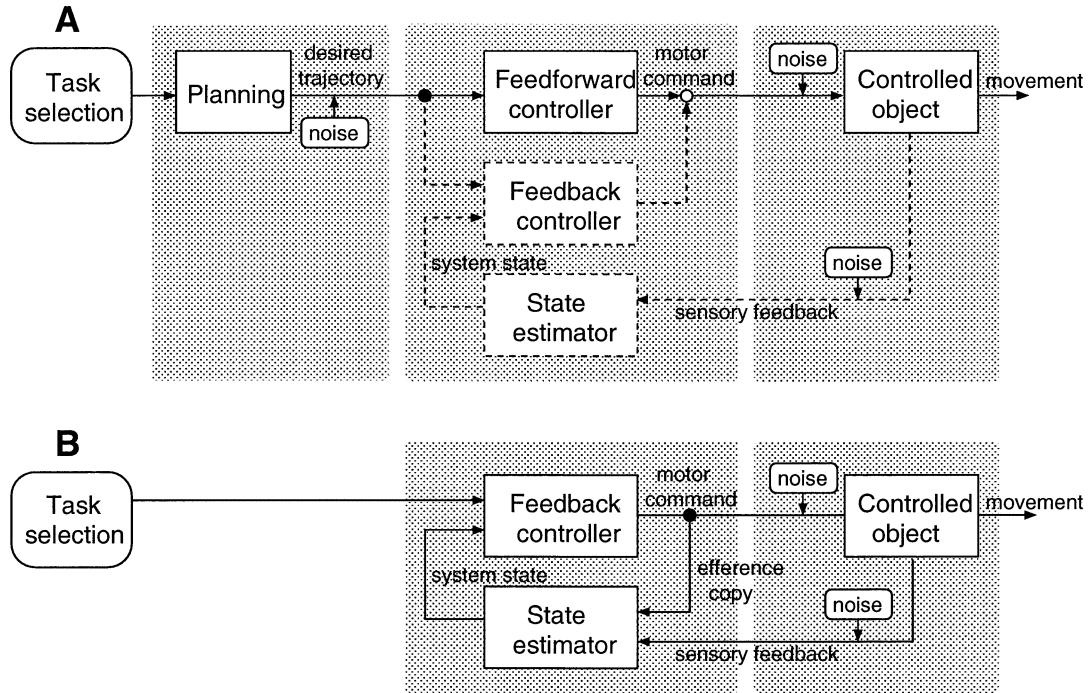


図 6 ヒト腕の随意運動に関する運動制御機構の考え方 (A: 軌道計画・実行の逐次モデル. B: 最適フィードバック制御に基づく Todorov らのモデル)

Fig. 6 Motor control theories. A: Sequential trajectory planning and execution model. B: Todorov et al.'s model based on the optimal feedback control.

分は単調増加関数となり (図 5 E, F), それぞれ特徴が異なることを示した. そしてこの特徴も目標軌道を仮定したモデルでよく説明できる. これらの結果は, 文献 [10] 同様, ヒトがフィードフォワード制御を行っている可能性を示唆している.

### 5.2 なぜ時間軸伸縮が生じるのか

これまで行われてきた, ヒトの運動制御メカニズムの研究は運動計画・実行を逐次的に行うモデルで説明されてきた. このような目標軌道を仮定したモデルの特徴は, 三つのモジュールから構成されていて, それらが直列に配置されている点である (図 6). 第 1 のモジュール (Planning) は運動計画を行う役割を果たしていて, 理想的な軌道を計画し第 2 番目のモジュールに出力する. 我々は, 目標軌道情報を読み出すときにそれが時間の関数になっているために時間軸方向にノイズが乗ると考える. この時間軸方向のノイズによって, それがそのまま位置のずれとして現れる. この意味で, 時間軸伸縮に起因する位置分散は蓄積されることはなく, 式 (2) 第 1 項にも積分が入らない. 更にいえば, 神経系の中で起きている表現上のノイズなので,

腕のダイナミクスの積分とは無関係である. さて第 2 のモジュール (Feedforward controller, Feedback controller, State estimator) は制御モジュールで, 逆ダイナミクス, インピーダンス制御, フィードバック制御など可能な (そして使われている) 制御則をすべて含んでいる. ここでは, 第 1 のモジュールが出力した目標軌道を実現するために必要な運動指令を計算する. 筋肉や末梢神経系の反射ループはばね的性質があり, 外乱に対する復元力を生成することで関節を平衡位置まで引き戻している. つまり腕の粘弾性を変えることは末梢のフィードバックゲインを変えることと同等であり, 関係する筋肉の収縮レベルや反射ゲインを調節することによって, 粘弾性を調整することが可能である. 何らかの影響 (例えば signal-dependent noise や外乱など) で実際の腕の状態が目標軌道からずれていても, フィードバックゲインを上げることで状態は目標軌道近くに戻ることができる. 特に筋肉の粘弾性による負のフィードバックには時間遅れがなく瞬間的に運動軌道に影響を及ぼす. したがって, ここでも誤差の時間積分を考える必要はない. 第 3 のモ

ジュール (Controlled object) は、下位の制御系を含んだ制御対象のダイナミクスである。入力には 2 番目のモジュールの出力である運動指令だが、この運動指令には大きさに比例したノイズが入ると考えられる [5]。運動指令から位置分散を計算するためには、運動指令を 2 回積分する必要があるので、結果として誤差も積分され、単調に増加する特徴を示すと考えられる。

しかし、Todorov らのモデルではこのような三つのモジュールは存在しない。特に目標軌道の表現が必要ないというのが彼らのモデルの特徴なので、彼らのモデルでは時間軸伸縮が起こることを合理的に説明するのは難しい。我々のモデルでは運動指令にノイズが乗るだけでなく、目標軌道を読み出すときにノイズが乗ると仮定することで時間軸が伸縮することを説明できる。

最近、Churchland らはサルに遅延到達運動課題を行わせ、背側運動前野 (PMd) のニューロンの活動と運動軌道を調べた [16], [17]。PMd のニューロンの発火頻度は運動軌道のピーク速度と有意な相関があることから、運動のばらつきは運動が開始される前に決定されている可能性を示した。また、ニューロンの発火頻度の分散と終端位置の分散の間に有意な相関が見られないことから、この運動計画段階のノイズは signal-dependent noise といった制御レベルでのノイズとは独立に軌道の分散に影響を与えていることを示した。本論文では、運動計画段階でノイズが乗ると仮定したが、Churchland らの結果から考えて、決して不自然な仮定ではない。

### 5.3 タスク設定が実験結果に及ぼす影響

本論文では、練習を十分行った後の定型的な運動における位置分散の時間波形の検討を行った。その理由は、ヒトの熟練運動の軌道生成が、目標軌道の存在を仮定したフィードフォワード制御に基づくのか、それとも目標軌道を必要としない最適フィードバック制御に基づくのかの検討が本論文の議論の中心だからである。

また、終点の大きさが非常に小さい場合、腕のインピーダンスが増加し、その結果、終端位置で位置分散が減少することが知られている [19], [20]。この場合、本論文のモデルだけでは位置分散の時間波形を十分に説明できない可能性が考えられる。ターゲットの大きさやタスクの拘束の変化がどのような影響を及ぼすかということについて更なる実験と理論モデルの検証が

必要である。しかし、今回の 2 点間到達運動のような単純な運動ばかりでなく、文献 [10] で示したような比較的複雑な経由点通過タスクでも同様のモデルで統一的に説明できる点を考慮すると、2 点間の運動を含めて複数の経由点を許す視覚性到達運動について、目標軌道の存在を仮定することは妥当だと考えられる。

## 6. む す び

本論文では、位置分散の時間波形の様々な特徴を目標軌道を仮定したモデルで説明できるか検証した。4. では、位置分散の時間波形を接線方向と法線方向の二つに分け、その特徴の違いについて論じてきた。分散波形の接線方向成分は時間軸伸縮に起因する項と加法的雑音に起因する項の二つの成分でよく回帰できる。一方、法線方向成分では時間軸の伸縮の影響は消え去り、加法的雑音に起因する項だけでよく表すことができた。このような二つの方向の成分の違いを目標軌道を仮定したモデルではよく説明できる。

今後は様々な実験タスクでデータを積み上げ、より詳しく調べる必要がある。また、スティフネスの異方性、筋肉の定量的なモデルなどを考慮し、モデルをより精密にしていく必要がある。更に理論モデルの計算機シミュレーションによってこれらの結果が再現できるか確認していくことが重要な課題である。

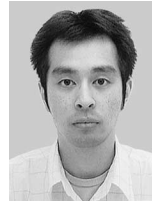
## 文 献

- [1] M. Kawato, "Internal models for motor control and trajectory planning," *Current Opinion in Neurobiology*, vol.9, pp.718-727, 1999.
- [2] T. Flash and N. Hogan, "The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model," *J. Neuroscience*, vol.5, pp.1688-1703, 1985.
- [3] Y. Uno, M. Kawato, and R. Suzuki, "Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement - minimum torque-change model," *Biol. Cybern.*, vol.61, pp.89-101, 1989.
- [4] E. Nakano, H. Imamizu, R. Osu, Y. Uno, H. Gomi, T. Yoshioka, and M. Kawato, "Quantitative examination of internal representations for arm trajectory planning: Minimum commanded torque change model," *J. Neurophysiol.*, vol.81, pp.2140-2155, 1999.
- [5] C.M. Harris and D.M. Wolpert, "Signal-dependent noise determines motor planning," *Nature*, vol.394, pp.780-784, 1998.
- [6] H. Miyamoto, D.M. Wolpert, and M. Kawato, "Computing the optimal trajectory of arm movement: The TOPS (Task Optimization in the Presence of Signal-dependent noise) model," in *Studies in Fuzziness and*



- Soft Computing, ed. R.J. Duro, J. Santos, and M. Grana, vol.109, pp.395-415, Springer-Verlag, 2002.
- [7] 宮本弘之, 中野恵理, ダニエル M. ウォルバート, 川人光男, “運動指令の大きさに依存した雑音のもとでの最大タスク達成度軌道生成モデル,” 信学論 (D-II), vol.J85-D-II, no.5, pp.940-949, May 2002.
- [8] E. Todorov and M. Jordan, “Optimal feedback control as a theory of motor coordination,” Nature Neuroscience, vol.5, pp.1226-1235, 2002.
- [9] E. Todorov, Studies of goal-directed movements, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [10] 森重健一, 宮本弘之, 大須理英子, 川人光男, “経路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.
- [11] J.M. Winters and L. Stark, “Analysis of fundamental human movement patterns through the use of in-depth antagonistic muscle models,” IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.32, no.10, pp.826-839, 1985.
- [12] H. Gomi and R. Osu, “Task-dependent viscoelasticity of human multijoint arm and its spatial characteristics for interaction with environment,” J. Neuroscience, vol.18, pp.8965-8978, 1998.
- [13] R.C. Miall, D.J. Weir, D.M. Wolpert, and J.F. Stein, “Is the cerebellum a smith predictor?,” J. Motor Behavior, vol.25, no.3, pp.203-216, 1993.
- [14] B. Mehta and S. Schaal, “Forward models in visuomotor control,” J. Neurophysiol., vol.88, pp.942-953, 2002.
- [15] E. Burdet, R. Osu, D. Franklin, T. Milner, and M. Kawato, “The central nervous system stabilizes unstable dynamics by learning optimal impedance,” Nature, vol.414, pp.446-449, 2001.
- [16] M.M. Churchland and K.V. Shenoy, “Behavioral variability predicted from recorded plan activity,” Neural Control of Movement (NCM) Annual Meeting, 246.122001, 2004.
- [17] M.M. Churchland, B.M. Yu, S.I. Ryu, G. Santhanam, A. Afshar, and K.Y. Shenoy, “Role of movement preparation in movement generation,” Advances in Computational Motor Control III, Symposium at the Society for Neuroscience Meeting, 2004.
- [18] F.E. Pollock and G. Ishimura, “The three-dimensional curvature of straightahead movements,” J. Motor Behavior, vol.28, pp.271-279, 1996.
- [19] P.L. Gribble, L.I. Mullin, N. Cothros, and A. Mattar, “Role of cocontraction in arm movement accuracy,” J. Neurophysiol., vol.89, pp.2396-2405, 2003.
- [20] R. Osu, N. Kamimura, H. Iwasaki, E. Nakano, C.M. Harris, Y. Wada, and M. Kawato, “Optimal impedance control for task achievement in the presence of signal-dependent noise,” J. Neurophysiol., vol.92, pp.1199-1215, 2004.

(平成 17 年 1 月 31 日受付, 6 月 20 日再受付)



森重 健一 (学生員)

平 13 九工大・情報工・機械システム卒。  
平 15 同大学院・生命体工学研究科・脳情報専攻博士前期課程卒。現在、同博士後期課程在学中。



上村 直樹 (正員)

平 14 長岡技科大・工・電気・電子システム工学卒。平 16 同大学院修士課程了。同年(株)日立製作所入社。



岩崎 裕志

平 15 長岡技科大・工・電気・電子システム工学卒。平 17 同大学院修士課程了。同年(株)東芝テック入社。



宮本 弘之 (正員)

昭 60 阪大・基礎工・生物工学卒。平 6 阪大・大学院博士課程中退。同年(株)ATR 人間情報通信研究所滞在研究員。平 8~13 科学技術振興事業団川人学習動態脳プロジェクト研究員。平 13 より九州工業大学大学院生命体工学研究科。



和田 安弘 (正員)

昭 55 東工大・工・制御卒。昭 57 同大学院総合理工・システム科学専攻修士課程了。同年川崎製鉄(株)入社。平元 ATR 視覚機構研究所に外向。平 4 ATR 人間情報通信研究所に外向。平 9 より長岡技術科学大学助教授。博士(工学)。運動制御及び神経回路網の研究に従事。日本神経回路学会総務理事。神経回路学会, 計測自動制御学会等各会員。



大須理英子

平 8 京大文学研究科博士後期課程研究指導認定退学・平 8 ATR 人間情報通信研究所研修研究員・博士(文学)・平 8~13 科学技術振興事業団川人学習動態脳プロジェクト研究員・平 13 より ATR 人間情報科学研究所客員研究員・平 15 より ATR 脳情報研究所主任研究員・平 16 より ATR 脳情報研究所上級主任研究員・生体の運動機能の研究に従事。



川人 光男 (正員:フェロー)

昭 51 東大・理・物理卒・昭 56 阪大博士課程了・同年助手,昭 62 同講師・昭 63 (株)ATR に移る・平 15 より ATR 脳情報研究所所長,平 16 より,ATR フェロー,及び JST 国際共同研究『計算脳プロジェクト』研究総括兼任・平 8~13 『川人学習動態脳プロジェクト』総括責任者兼任・平 6, 12, 14, 16 より金沢工業大学,奈良先端大連携講座,阪大生命機能研究科,生理学研究所の客員教授・計算論的神経科学の研究に従事・米澤賞,大阪科学賞,科学技術長官賞,塚原賞,時実賞,中日文化賞,志田林三郎賞などを受賞・著書に「脳の仕組み」,「脳の計算理論」など・Neural Networks 誌編集長,日本神経回路学会・日本神経科学会理事。