

軌道追従タスクにおける多関節腕の協調制御

東郷 俊太^{†,‡} 香川 高弘[†] 宇野 洋二[†]

[†] 名古屋大学大学院工学研究科 〒466-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

[‡] 日本学術振興会特別研究員 (DC2)

E-mail: s.togo@nuem.nagoya-u.ac.jp

あらまし 本研究では、人間が一次元の手先の目標軌道を追従する、一次元軌道追従タスクを行う動作を計測し、解析を行った。このタスクにおいて、追従方向と直交する方向はタスクの達成とは関係の無い方向である。計測結果として、終端姿勢において被験者の手先はタスク達成と関係の無い方向に大きくばらついた。また、接線速度の概形はベル型であり、小さなピークが多く含まれていた。UCM 解析を用いて関節間協調を定量的に評価した結果、タスクの達成に影響を与えないばらつきが時間と共に増加した。これらの運動学的な特徴や関節間協調の特徴は、我々が提案した UCM 参照フィードバック制御法によってよく再現された。UCM 参照フィードバック制御法は、時々刻々と目標 UCM 空間を生成し、UCM 空間上から最適な一点を選び続ける制御方策である。これらの結果は、人間は UCM 空間を参照することによって、タスク達成に関係の無いばらつきを許容しながら、多関節を協調的に制御していることを示唆している。また、人間の視覚運動制御系において UCM 空間の神経表現が存在している可能性があることを示唆している。

キーワード 関節間協調, UCM 解析, シナジー, フィードバック制御, 冗長腕

Joint coordination of a multi-joint arm for target tracking task

Shunta TOGO^{†,‡}, Takahiro KAGAWA[†], and Yoji UNO[†]

[†] Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan

[‡] JSPS Research Fellow (DC2)

E-mail: s.togo@nuem.nagoya-u.ac.jp

Abstract In this paper, we measured and analyzed a one-dimensional target tracking task in which human subjects tracked one-dimensional target trajectory of the hand. In this task, the direction orthogonal to the movement direction is task-irrelevant. As a result, the hand position at the movement end was more varied in the task-irrelevant direction. Moreover, the profile of tangential hand velocity was roughly bell-shaped but they also had small peaks. Results of UCM analysis which is used to quantify the joint coordination showed that the task-irrelevant variance increased with time. These characteristics of kinematics and joint coordination were well reproduced by our UCM reference feedback control. UCM reference feedback control generates a target UCM space each time step and selects one point in UCM space. These results suggest that the human refers to UCM space step by step to control a multi-joint arm allowing the task-irrelevant variability. Moreover, it is suggested that the human would represent UCM space in visuomotor control system.

Key words Joint coordination, Uncontrolled manifold analysis, Synergy, Feedback control, Redundant arm

1. はじめに

人間の身体は多くの冗長性が階層的に存在している。例えば、単純な二点間到達運動を例にとっても、手先軌道の冗長性、関節角の冗長性、筋張力の冗長性がある [1]。これらの冗長性問題は全て不良設定問題であり、一般的には容易に解くことができ

ない。しかしながら、人間は何らかの方法でこの冗長性問題を解き、巧みな随意運動を遂行している。本研究ではその中でも、関節角の冗長性問題に着目する。

この冗長性問題を解決するために、我々は関節間協調という観点からアプローチを試みる。関節間協調とは具体的には、タスクを達成させるために制御しなければならない変数（性

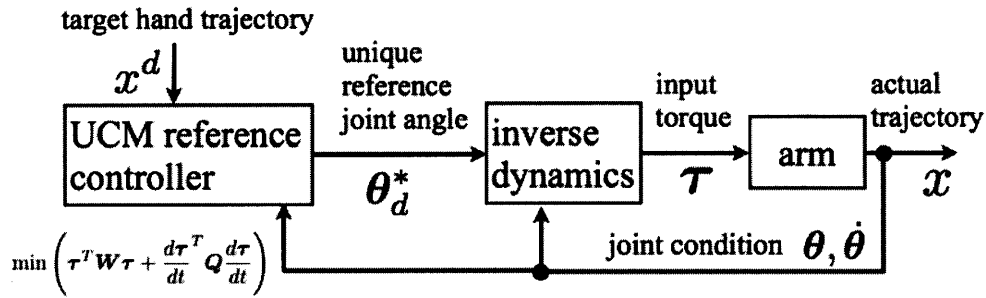


図1 UCM 参照フィードバック制御法のブロック線図. x^d が手先の目標軌道, θ_d^* が評価関数 $\tau^T W \tau + \dot{\tau}^T Q \dot{\tau}$ を最小とする目標関節角度, τ が実際の入力をそれぞれ示している.

能変数)に影響を与えないような冗長性を持った要素(運動要素)のばらつきを許容するような柔軟な制御方策のことである. この関節間協調を定量的に評価するための方法として UCM(Uncontrolled manifold) 解析が提案された[2]. UCM 解析は運動要素のばらつきを二つの直交する成分に分割する. 一つは UCM 成分であり, これは性能変数に影響を与えない分散成分である. もう一つは ORT(orthogonal) 成分であり, これは性能変数に直接影響を与える分散成分である. 特定の性能変数が運動要素によって協調的に制御されている場合, UCM 成分は ORT 成分よりも高い値となる. UCM 解析は様々なタスクに対して用いられてきており, 人間の運動制御における協調構造を示唆してきた[3]~[5].

我々は先行研究において, UCM 解析における UCM 空間の概念を直接利用した, UCM 参照フィードバック制御法を提案した[6]. UCM 参照フィードバック制御法は, 与えられた性能変数の目標から, 時々刻々と UCM 空間を生成し, UCM 空間上からトルクとトルク変化が最小になるような一点(一意な姿勢)を選び, 腕の逆ダイナミクスを用いて入力トルクを決定する制御モデルである. そのブロック線図を図1に示す. この制御モデルは, タスク達成に関係の無い, すなわち性能変数に影響を与えないばらつきは許容し, 影響を与えるばらつきのみを補償する協調的な制御モデルである. 本論文では, UCM 参照フィードバック制御法が, 人間の多関節の協調制御モデルとして妥当かどうかを検証する. タスクとして一次元軌道追従タスクを考え, このタスクを行う被験者の腕運動を計測する. そして, その運動学的な特徴や UCM 解析によって定量化される関節間協調の特徴を UCM 参照フィードバック制御法が再現できるかどうかを調べる. 一次元軌道追従タスクとは, 一次元の手先の目標軌道が与えられ, それを視覚フィードバックにより軌道追従を行うタスクである. このタスクにおいて, 追従を行う方向と直交する方向は, タスクの達成に関係の無い方向となる. よって, もし人間の視覚フィードバックによる制御系が, 前述した協調的な制御構造をもっているとすれば, タスク達成には関係の無い, 追従方向と直交する方向に手先は大きくばらつきと予想される.

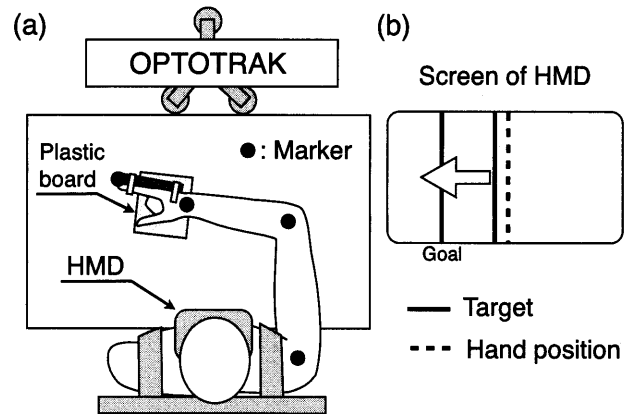


図2 a: 実験の概略図. 被験者は椅子に座り, シートベルトで固定された状態で一次元軌道追従タスクを行った. また, 被験者はヘッドマウントディスプレイを装着し, 黒い丸印の箇所に位置計測用のマーカーを取り付けた. b: ヘッドマウントディスプレイに表示される画面. 一次元の目標軌道, 終端位置, 被験者の手先位置が提示される.

2. 計測実験

2.1 被験者

被験者は健康な成人男性8名であり, 全員が右利きであった. 本実験は名古屋大学安全厚生委員会倫理部会の承認を受けて, 行われた. また, 実験前に全ての被験者は実験手順の説明を受け, 書面にて同意した.

2.2 実験装置

身体各部位の位置データを取得するために3次元位置計測システム(OPTOTRAK CERTUS, Northern Digital Inc. 製)を用いた(サンプリング周波数120 [Hz]). 直径7 [mm]の赤外線マーカーを図2.aに示すように4箇所に取り付けられた. 取り付けられた箇所はそれぞれ肩の回転中心, 肘の回転中心, 手首の回転中心, 人差し指の先端とした. リンク長を十分に確保するために, 人差し指は伸展した状態で固定された. 手先の滑りを良くするために, 滑り易いプラスチック板を手の下に敷いた. 被験者はヘッドマウントディスプレイ(HMZ-T1, SONY 製)を装着し, 一次元の目標軌道, 終端位置, 手先位置を視覚情報により取得した(図2.b). 画面のリフレッシュレートは60 [Hz]で

あった。

2.3 実験タスク

被験者はシートベルト付きの椅子に座り、一次元軌道追従タスクを行った。初期姿勢は $\theta_s = \pi/3, \theta_e = \pi/3, \theta_w = \pi/6$ とした。一次元軌道追従タスクは、一次元で表示される目標手先位置を、一次元で表示される自身の手先位置の情報を用いて軌道追従を行うタスクである。手先の目標軌道は被験者の左右方向に 0.3 [m] を 5 [s] で移動した。手先の目標軌道は、始点と終点の速度が 0 [m/s] である躍度最小軌道 [7] を用いて作成した。よって前後方向の手先位置はどのような位置をとってもよいタスクである。被験者はこの一次元軌道追従タスクを 100 回行った。トライアル間で初期姿勢を統一するために、被験者はヘッドマウントディスプレイに表示される位置情報を用いて、肘、手首、手先の位置を目標の初期姿勢に ± 2 [mm] の精度で位置合わせした。この初期姿勢調節フェイズでは、リアルタイムで計測データから被験者の各リンク長を計算し、目標初期位置を順キネマティクスの式から計算した。初期姿勢調節フェイズの後、3 [s] のカウントダウンがヘッドマウントディスプレイに表示された。カウントダウンの後、図 2.b に示すように、ヘッドマウントディスプレイに表示される一次元の目標軌道、終端位置、被験者の手先位置のみの視覚情報を用いて、被験者は軌道追従を行った。軌道追従後、追従誤差の運動時間分の総和がフィードバックされた。被験者は目標を追従し、提示される誤差を小さくするよう指示された。また、机との接触を避けるため、運動中は肘を水平に保つことも指示された。被験者が疲労を感じた場合、初期姿勢調節フェイズに短時間の休憩を任意に取った。追従に失敗したデータを取り除くために、解析には追従誤差の低い順に上位の 50 データを使用した。

2.4 データ解析

取得した位置データにはカットオフ周波数 10 [Hz]、2 次のバターワースローパスフィルタをかけた。これらの位置データから、運動開始、終了時の腕姿勢、手先の接線速度、全関節トルクの二乗和を計算した。接線速度は手先位置を微分し、カットオフ周波数 10 [Hz]、2 次のバターワースローパスフィルタをかけることで求めた。同様の方法で関節角度、角速度、角加速度を計算し、後述するシミュレーション実験と同様の粘性パラメータ (表 2) を用いた逆ダイナミクスの式から関節トルクを求めた。

2.5 UCM 解析

関節間協調を定量的に評価するために UCM 解析を用いた。UCM 空間は、X 方向の手先速度と関節角速度のヤコビアン J の零空間によって定義される。時刻 t の零空間の基底ベクトル $\epsilon_{i,t}$ は、 $0 = J \cdot \epsilon_{i,t}$ を解くことで得られる。 n 次元の運動要素 ($n = 3$) と d 次元の性能変数 ($d = 1$) に対して、零空間の基底ベクトルの数は $i = n - d = 2$ となる。よって、UCM 空間に沿った関節角度の偏差は以下ようになる。

$$\theta_{\parallel,t} = \sum_{i=1}^{n-d} \epsilon_{i,t}^T \cdot (\theta_t - \bar{\theta}_t) \cdot \epsilon_{i,t} \quad (1)$$

ここで $\bar{\theta}_t$ は時刻 t における平均の関節角度である。UCM 空間と直交する成分は以下ようになる。

表 1 アームのパラメータ

	上腕	前腕	手
質量 [kg]	1.88	1.07	0.40
リンク長 [m]	0.24	0.25	0.17
質量中心位置 [m]	0.10	0.11	0.13
慣性モーメント [kgm ²]	3.05×10^{-2}	1.88×10^{-2}	0.88×10^{-2}

表 2 シミュレーションで用いた粘性行列。対角成分は肩 (s)、肘 (e)、手首 (w) 関節の粘性値であり、非対角成分は二関節筋による粘性値を示している。

Joint viscosity D [Nms/rad]					
D_s	1.5	D_{se}	0.5	D_{sw}	0
D_{se}	0.5	D_e	1.0	D_{ew}	0
D_{sw}	0	D_{ew}	0	D_w	0.4

$$\theta_{\perp,t} = (\theta_t - \bar{\theta}_t) - \theta_{\parallel,t} \quad (2)$$

時刻 t における UCM 成分 ($V_{UCM,t}$) と ORT 成分 ($V_{ORT,t}$) は次元の数で正規化し、以下ようになる。

$$V_{UCM,t} = \frac{\theta_{\parallel,t}^2}{n-d} \quad (3)$$

$$V_{ORT,t} = \frac{\theta_{\perp,t}^2}{d} \quad (4)$$

関節間協調の度合いを評価するために、協調度 σ_t^* を以下のよう定義する [8]。

$$\sigma_t^* = \log \left(\frac{\sigma_t + n/d}{n/(n-d) - \sigma_t} \right) \quad (5)$$

$$\sigma_t = \frac{V_{UCM,t} - V_{ORT,t}}{V_{TOT,t}} \quad (6)$$

ここで $V_{TOT,t}$ は正規化された全分散である。

$$V_{TOT,t} = \frac{(n-d) \cdot V_{UCM,t} + d \cdot V_{ORT,t}}{n} \quad (7)$$

$V_{UCM,t} = V_{ORT,t}$ は関節間が協調していないことを示す。よって、 $\sigma_t^* > \log((n/d)/(n/(n-d))) = 0.69$ ならば、関節角のばらつきが UCM 空間に沿った形でばらついていることを示し、関節間の協調によって手先が制御されていることを意味している [4]。

3. シミュレーション実験

我々が先行研究で提案した、UCM 参照フィードバック制御法を一次元軌道追従タスクに適用する [6]。制御対象は、肩、肘、手首の関節を持つ 3 リンクアームとした。3 リンクアームの物理パラメータは、代表的な被験者のデータから、平均の割合を用いて表 1 のように算出した [9]。また関節の粘性パラメータは表 2 の値を用いた。初期姿勢として、計測実験における代表的な被験者の 50 試行分の初期姿勢のデータを与え、50 回のシミュレーションを行った。目標の手先軌道は、計測実験と同様の、5 [s] で 30 [cm] 動く躍度最小軌道とした。シミュレーションのサンプリング時間は 100 [Hz] であり、運動方程式の積分には 4 次のルンゲクッタ法を用いた。人間の腕運動のばらつきを再現するために、以下の 3 つのパラメータにノイズを与えた

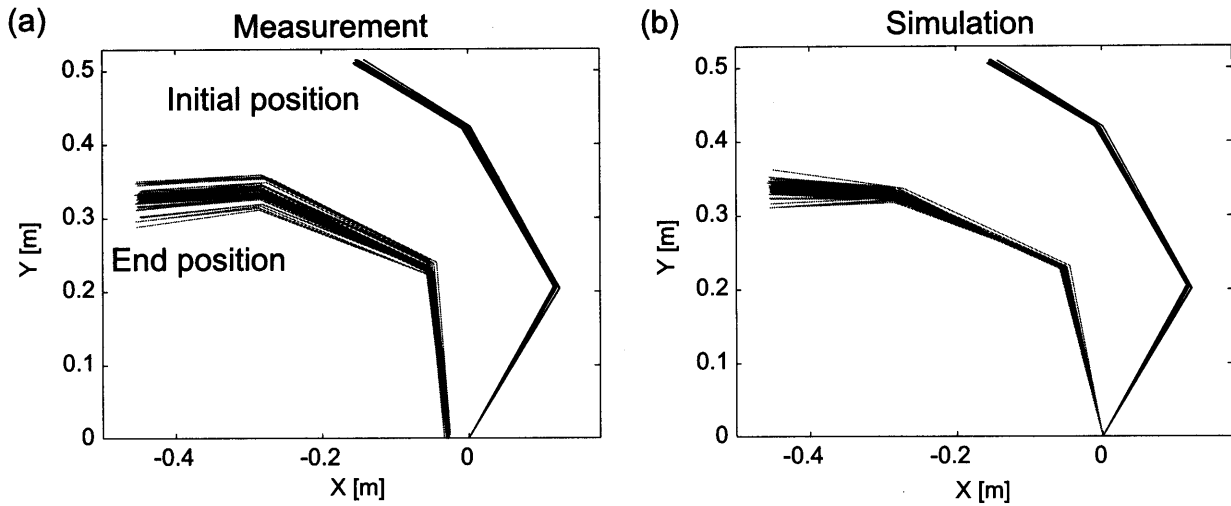


図3 計測実験 (a) とシミュレーション実験 (b) における 50 試行分の腕の初期位置と終端位置。横軸が左右方向、縦軸が前後方向の位置を示している。黒い実線が腕の初期姿勢であり、灰色の実線が終端姿勢である。

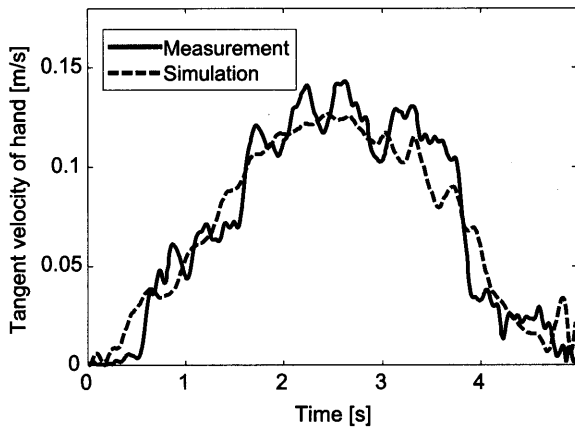


図4 計測実験 (実線) とシミュレーション実験 (点線) における手先の接線速度の時系列。

(図1参照)。一つ目は手先の目標軌道 x^d である。これは視覚における定位と時間遅れの補償が原因である不確かさを表現している。二つ目は目標の UCM 空間上の一点である目標関節角度 θ_a^* である。これは神経系における UCM 空間の獲得や計算の不確かさを仮定し、それを表現している。三つ目は入力トルク τ である。これは筋肉における信号依存ノイズの特性を表現している [10]。それぞれのパラメータに対するノイズの強度は、計測データにフィットするように決定した。

4. 結果

全ての被験者において同様の傾向が見られたため、以下では代表的な被験者のデータを示す。

図3に50試行分の運動開始時と終了時の腕姿勢を示す。左が計測実験の結果であり、右がシミュレーション実験の結果である。計測、シミュレーションの両実験において、手先位置は運動終了時にタスク達成に関係の無い方向 (Y 軸方向) により

大きくばらついた。図4に手先の接線速度の時系列を示す。実線が計測実験の結果、点線がシミュレーション実験の結果である。計測実験の結果は、軌道追従誤差の最も小さかった試行の結果であり、シミュレーション実験の結果は代表的な試行の結果である。一次元軌道追従タスクにおいて追従する手先軌道は、躍度最小軌道であるので運動時間の半分 (2.5 [s]) に速度ピークを持つ、ベル型の波形である。計測、シミュレーションの両実験において、手先の接線速度の概形はベル型であったが小さなピークを多く含んでいた。また両実験においてピークの値は同程度であった。図5に全関節トルクの二乗和の時系列を示す。左が計測実験の結果であり、右がシミュレーション実験の結果である。計測、シミュレーションの両実験において、運動時間の半分におけるピークの値は同程度であった。

図6にUCM解析の結果を示す。上段が分散成分、下段が協調度、左側が計測実験、右側がシミュレーション実験の結果である。計測とシミュレーションの両実験において、UCM成分は全運動時間に渡ってORT成分よりも大きかった。これは関節角度のばらつきがUCM空間により多くばらついたことを示している。また、UCM成分は時間とともに増加する傾向があった。協調度に関しては、全運動時間に渡り0.69よりも大きかったことから、計測実験において被験者は、関節角度をよく協調させ手先位置を制御していたことがわかり、シミュレーション実験においては、この特徴を再現できていることがわかった。

5. 考察

本研究では、人間の関節間協調の制御方を調べるために、一次元軌道追従タスクを行う被験者の腕運動を計測した。計測結果として、終端位置で被験者の手先はタスク達成と関係の無い方向に大きくばらついた (図3.a)。また、手先の接線速度の概形はベル型であり、小さなピークを多く含んでいた (図4.a)。関節トルクの二乗和は、運動時間の半分でピークをとった (図5.a)。UCM解析の結果、UCM成分はORT成分よりも大きく、

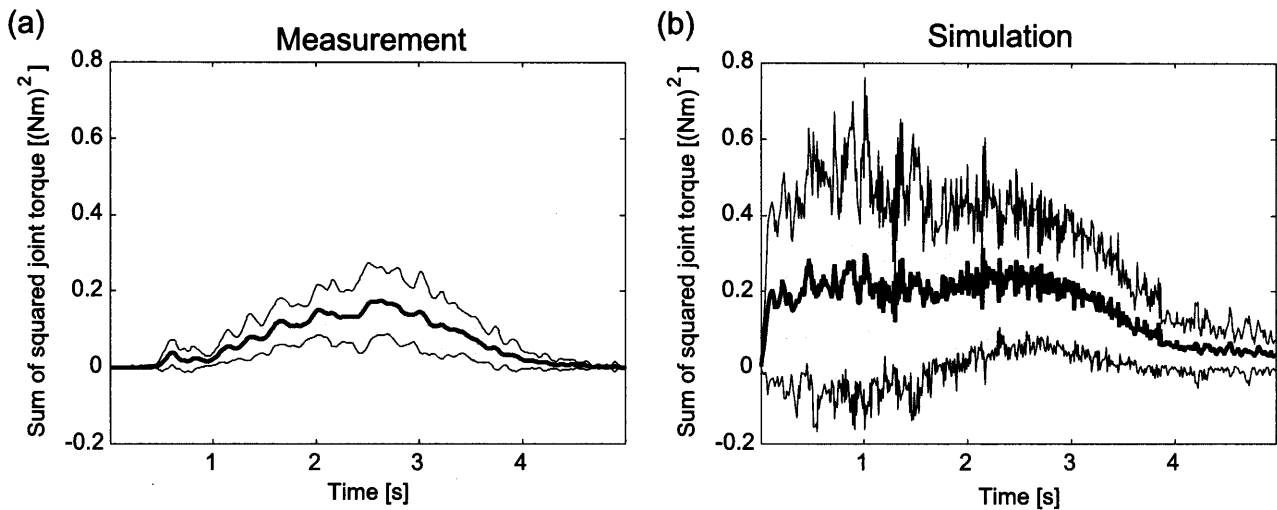


図 5 計測実験 (a) とシミュレーション実験 (b) における全関節トルク (肩, 肘, 手首) の二乗和の時系列. 黒い実線が関節トルク二乗和の平均値を示しており, 灰色の面積は標準偏差を示している.

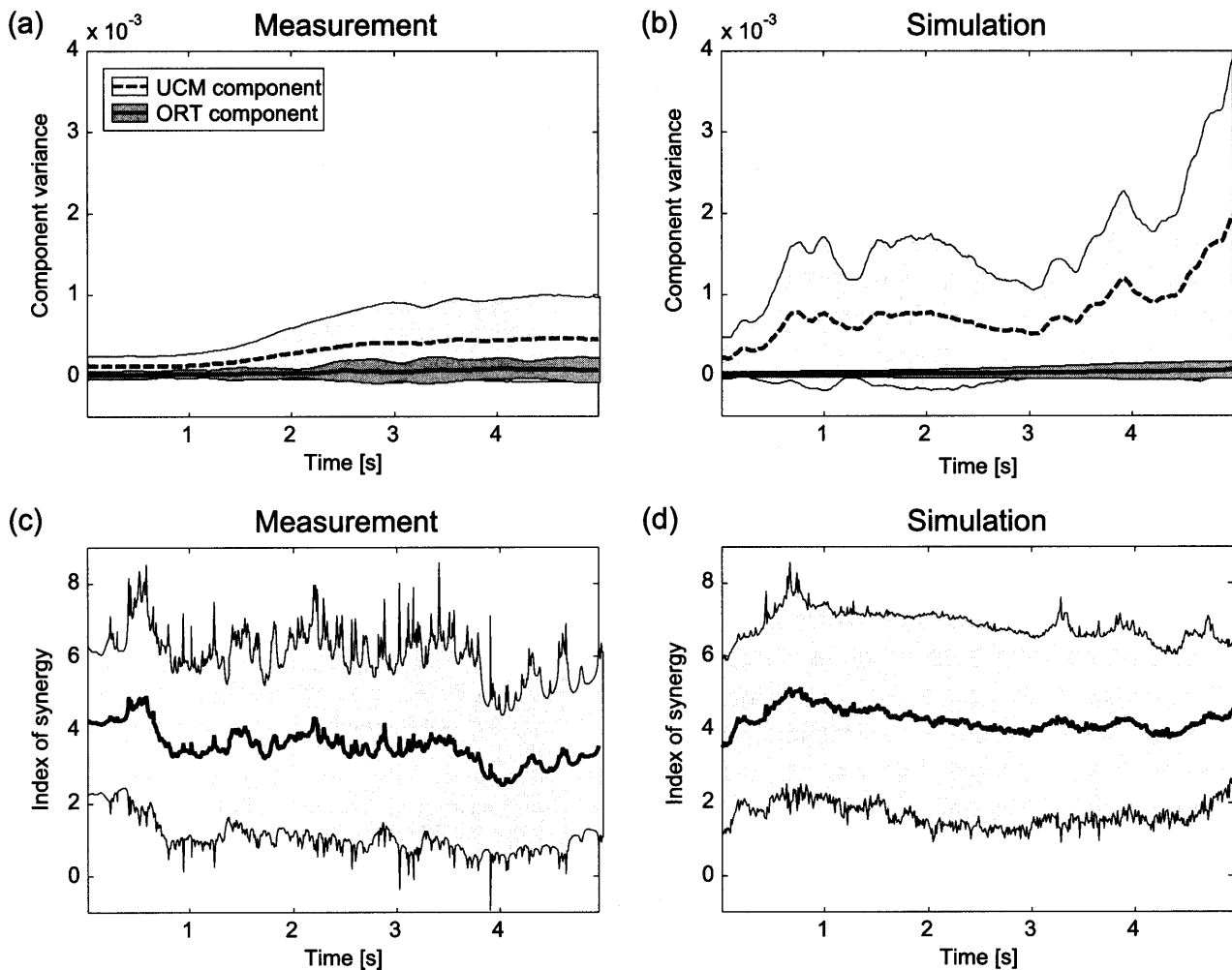


図 6 計測実験 (a, c) とシミュレーション実験 (b, d) における UCM 解析の結果. 上段が各分散成分, 下段が協調度の時系列をそれぞれ示している. 上段図の点線が UCM 成分の平均値, 実線が ORT 成分の平均値を示しており, 灰色の面積が標準偏差を示している. 下段図の実線が協調度の平均値, 灰色の面積が標準偏差を示している.

UCM 成分は時間と共に増加した (図 6.a). 協調度は 0.69 よりも高い値をとり, これは関節間が協調することで, 手先を制御していることを示した (図 3.c). また, これらの結果は UCM 参照フィードバック制御法を用いたシミュレーション実験によりよく再現された (図 3.b, 4.b, 5.b, 6.b, d). 次元軌道追従タスクにおいて, 被験者は関節間協調によって手先を制御していることが UCM 解析によって定量的に示された. このタスクでは視覚により追従目標と自身の手先位置を認識し, 多関節を動かす必要がある. よってこのことは, 人間の視覚運動制御系において, タスクの達成に関係の無いばらつきを許容するような協調的な制御系が存在していることを示唆している.

本研究で行った計測実験の結果は, 従来の一意な軌道を決定してしまうような制御方策では説明することが出来ない. 特にロボティクスにおいては, 冗長な多関節を制御するために, 疑似逆行列を用いて事前に全運動時間に渡る一意な関節角軌道を生成し, 各関節がそれを追従するという方法がよく用いられる [11]. もし人間が次元軌道追従タスクを行うために, そのような方策を用いているとすると, 同じ目標軌道と同じ初期姿勢が与えられているので, トライアル間に渡り同じ関節角軌道を生成するはずである. このとき, 関節がノイズや外乱で変動させられると, 一意な関節角軌道に収束するものと考えられる. 上記の方策を人間が用いているとすると, 図 6.a に示すように ORT 成分を小さく保ったまま, UCM 成分が時間増加することはない. 従って, 少なくとも次元軌道追従タスクにおいては, 人間は一意な関節角軌道を事前に決めるような方策というよりも, UCM 参照フィードバック制御のようなタスク達成に関係の無いばらつきを許容するような方策をとっていることが示唆される. UCM 参照フィードバック制御法は, オンラインで関節角のばらつきがタスク達成に影響を与えるかどうかを判断する. よって, 中枢神経系は図 1 における UCM 参照制御器を獲得している可能性がある. 言い換えれば, 人間は脳内に UCM 空間を表現している可能性がある. 図 1 において, 目標手先位置 x^d を UCM 参照制御器に与える経路が人間の視覚フィードバック部分を表現しており, 関節の状態 $\theta, \dot{\theta}$ を腕の逆ダイナミクスと UCM 参照制御器に与える経路が人間の体性感覚フィードバック部分を表現している. 従って, 人間の視覚運動制御系における, 視覚のフィードバックループと体性感覚のフィードバックループのどちらか, またはその両方において, UCM 空間の神経表現が存在している可能性が示唆される.

6. ま と め

本研究では, 人間が行う次元軌道追従タスクを計測・解析し, UCM 参照フィードバック制御法によるシミュレーション実験の結果と比較した. 計測実験の結果, 終端姿勢における被験者の手先位置はタスクの達成に関係のない方向に大きくばらついた. 手先の接線速度の概形はベル型であり, 小さなピークを多く含んでいた. 関節トルクの二乗和は運動時間の半分ピークをもつ形であった. また, タスクの達成に関係のない関節角のばらつきが運動時間と共に増加し, 関節間の協調によって手先が制御されていた. これらの被験者が示した腕運動の運

動的な特徴, また UCM 解析によって定量化された関節間協調の特徴は, UCM 参照フィードバック制御法によってよく再現された. これらの結果は, 被験者が次元軌道追従タスクを達成するために, UCM 空間を時々刻々参照している可能性があることを示唆した. さらに, 人間の視覚運動制御系における視覚フィードバックループと体性感覚フィードバックループのどちらか, またはその両方において, UCM 空間の神経表現がなされている可能性があることが示唆された. 今後の課題は, 神経系において UCM 空間がどのように表現されているのか, またどのような学習過程によって獲得されているのかを明らかにすることである.

謝 辞

本研究は科学研究費補助金 (特別研究員奨励費) No.24・3758, 基盤型研究 (B)No.21300092 及び (C)No.23560526 により行われた.

文 献

- [1] 川人光男, 脳の計算理論, 産業図書, 1996.
- [2] J. P. Scholz, G. Schöner, "The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task," *Exp Brain Res*, Vol. 126, pp. 289–306, 1999.
- [3] M. L. Latash, J. P. Scholz, G. Schöner, "Toward a new theory of motor synergies," *Motor Control*, Vol. 11, pp. 276–308, 2007.
- [4] M. L. Latash, "Stages in learning motor synergies: A view based on the equilibrium-point hypothesis," *Human Movement Science*, Vol. 29, pp. 642–654, 2010.
- [5] S. Togo, T. Kagawa, and Y. Uno, "Motor synergies for dampening hand vibration during human walking," *Exp Brain Res*, Vol. 216, pp. 81–90, 2012.
- [6] 東郷俊太, 香川高弘, 宇野洋二, "冗長関節アームの協調動作のための ucm 参照フィードバック制御法," *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol. J96-D, No. 2, pp. 346–356, 2013.
- [7] T. Flash and N. Hogan, "The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model," *The Journal of Neuroscience*, Vol. 5, No. 7, pp. 1688–1703, 1985.
- [8] J. Verrel, "Distributional properties and variance-stabilizing transformations for measures of uncontrolled manifold effects," *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 191, pp. 166–170, 2010.
- [9] D. A. Winter, "Biomechanics and motor control of human movement," John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [10] C. M. Harris and D. M. Wolpert, "Signal-dependent noise determines motor planning," *Nature*, Vol. 394, pp. 780–784, 1998.
- [11] D.E. Whitney, "Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses," *IEEE Trans. Man-Machine System*, Vol. MMS-10, No. 2, pp. 47–53, 1969.