

# 座位姿勢での平衡運動学習の解析・評価と 付随する主観的直立姿勢変化の関連性について

熊谷 敏\*・森田 亮介\*\*・伊藤 聡\*\*

Analysis and Evaluation of Equilibrium Motor Learning in Seated State  
and Its Relation to Accompanying Perceptual Changes in Subjective Upright Posture

Satoshi KUMAGAI\*, Ryosuke MORITA\*\* and Satoshi ITO\*\*

Our previous works revealed that the equilibrium perception detected by the subjective upright posture is affected from the motor-learning of the balancing task even in the seated posture. However, the same motor learning sometimes evoked the different perceptual change, the shift of the subjective upright posture in the opposite direction. Investigating this reason, this paper analyzes the motor-learning that contains two kinds of disturbance: inertial disturbance caused by the lateral slides of the whole stool, and rotating disturbance featured by the shift of the virtual rotation axis of the stool roll direction. As the results, three factors, the relative phase of CoP with respect to the motion of the virtual rotation axis and the sign and the magnitude of the mean horizontal deviation of the trunk, specify two kinds of posture during the motor learning. At one posture, the trunk inclines at the basis near the pelvis to the same direction of the disturbance and shows a large horizontal deviation measured at the neck. On the other hand, at the other posture, the trunk bends first to the same direction of the disturbance at the base and bends again to the opposite direction near the waist, indicating a small horizontal deviation. The posture of the balancing task during the motor learning seems to determine the direction of the perceptual change for the participants that have reduced the relative phase, i.e., the delay, of CoP movement from the disturbance implying the progression of the motor learning.

**Key Words:** equilibrium perception, balancing task, motor learning evaluation, CoP, trunk motion

## 1. はじめに

ヒトの運動制御メカニズムの解明は、ロボットへの応用ばかりでなく、リハビリテーションなどの医療技術への貢献<sup>1)</sup>にも期待がよせられる。ヒトとロボットの大きな違いは、環境に合わせて運動を変化させる適応・学習機能にある。ヒトの運動学習については、腕のリーチング運動の実験プロトコルをとおして研究がなされてきた<sup>2),3)</sup>。そのなかで、リーチング運動における運動学習に伴い感覚系、すなわち体性感覚も影響をうけることが報告された<sup>4)</sup>。工学の分野では、運動精度を向上するために、最初に正確に実施するセンサ系のキャリブレーション値を維持し続けるのが通常であるが、上記の研究は運動の学習を行ないながらセンサの再キャリブレーションを行なっていることを示唆している。これはヒトの運動制

御の理解やヒトに似た振舞いをするロボットの実現に必要となってくる見解と考える。

そのような考えのもと、われわれは体性感覚に限らず、ほかの感覚系でも運動学習に付随した補正が起きているのではと推察し、いくつかの感覚系の中でも姿勢の維持や歩行などに重要な平衡をとりあげることにした。

平衡に関しては筋の固有覚、前庭、視覚、聴覚などさまざまな感覚入力があり、その制御メカニズムが古くから研究されている<sup>5),6)</sup>。それらは足関節固有覚と視覚というマルチモーダルな感覚情報間の重み付け<sup>7)</sup>や、床面の硬さや揺らぎに応じたフィードフォワード/フィードバックの制御戦略変化<sup>8)</sup>、平衡制御の間欠性という観点からの計測とモデル解析<sup>9)</sup>など「制御」にかかわる内容が主である。中には立位だけでなく、座位状態での平衡測定も行なわれている<sup>10)</sup>が、いずれも平衡の「感覚」の適応に関しては十分な報告がなされていない。

本研究での最終的な目的は、運動系の学習と同時に進む感覚系の学習を平衡において検出し、平衡の制御メカニズムを数理的に説明することに設定している。そこでわれわれは座面のロール回転と平行移動が可能な椅子に着座させた状態で、平衡の運動学習と知覚変化の計測実験を行なってきた<sup>11)~13)</sup>。これらの研究において、座位状態でも運動学習に付随した平

\* 岐阜大学大学院工学研究科 岐阜市柳戸 1-1

\*\* 岐阜大学工学部 岐阜市柳戸 1-1

\* Graduate School of Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu

\*\* Faculty of Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu

(Received March 28, 2017)

(Revised August 8, 2017)

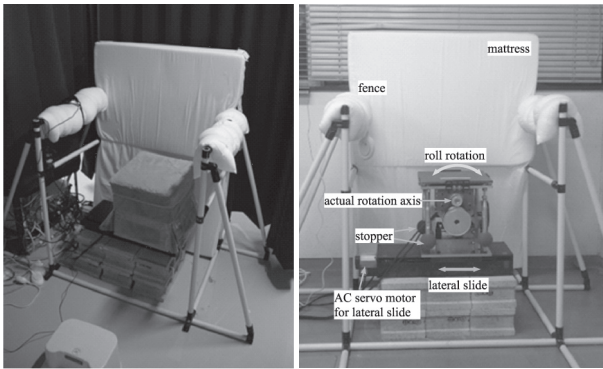


Fig. 1 Experimental setups

平衡知覚の変化を発見し、それを検出する実験プロトコルを提案してきた。しかし、いくつかの実験では平衡知覚の変化が予想とは一致せず、そのメカニズムの説明がうまくいかないケースが出てきた。そこで本稿ではこれまでの実験を整理し、運動学習時の振舞いを確認しながら知覚変化との関係性を再考してみることにした。本稿の目的は、平衡の知覚変化の条件と結果を分析し直すことで、再現性のある実験条件を確立することとともに、前報告間で結果が必ずしも合致しない点に説明を与え注意を促すことにある。第 2 章では、過去の研究の整理を行ない問題を明確化する。一連の実験では仮説「本実験前後の知覚変化は、その前に行なわれる対照実験の影響を受ける」の実証を試みるが、結果的にこの仮説は肯定されないこととなる。そこで、その原因は本実験で行なう運動学習過程そのものにあるのではと考えを改め、第 3 章で運動学習時のデータの解析方法を、第 4 章でその結果を示し、それに基づいた運動学習の評価項目の定義と知覚変化との対応性を第 5 章で考察する。第 6 章で実験上の問題点・注意点などを吟味し、第 7 章で本稿のまとめを述べる。

## 2. 実験結果の整理

### 2.1 実験内容

#### 2.1.1 実験装置

実験時の転倒防止および転倒が起きた場合の安全性を考慮し、着座状態で実験を行なう。被験者の着座する椅子は、平衡に対し外乱を与えられるように傾斜 2 自由度平行移動 1 自由度を有するように設計した。制作した椅子を Fig. 1 に示す。着座状態での CoP (Center of Pressure) 位置が検出できるように座面下の 4 隅にロードセルを取り付けた。また、被験者の上体変位を測定できるようにモーションキャプチャシステムを導入している。マーカを被験者の胸部、椅子の回転中心、および作業空間内の固定点として右の安全柵上に取り付けた。実験中に被験者の視覚的な情報をシャットアウトし、かつ実験時の情報提示を行なうため、被験者にはヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着させた。

#### 2.1.2 運動学習 1

椅子の運動自由度を利用して、側方向への平行移動による

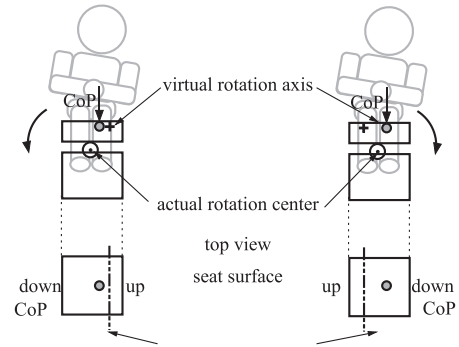


Fig. 2 Virtual rotation axis

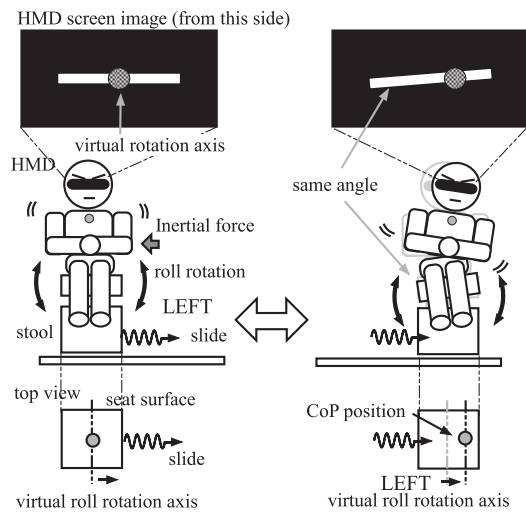


Fig. 3 A sketch of motor learning 1

慣性力外乱および仮想回転軸移動によるロール回転外乱を与える。このとき座面のピッチ回転は水平に固定しておく。

仮想回転軸とは、椅子のもつ実際の物理的回転軸とは異なり、制御によって達成される回転軸である。座面回転のモーメントは、仮想回転軸からの CoP の方向と距離によって決定される。すなわち、Fig. 2 左のように仮想回転軸よりも CoP が左側であれば、たとえそれが実際の回転軸に対して右側であったとしても、座面はゆっくりと左回転するように制御する。そのときの回転モーメントは仮想回転軸と CoP との距離に比例させて大きくする。運動学習 1 では、この仮想回転軸を左右に移動させることで回転外乱を与える。

仮想回転軸の移動方向により、外乱に方向性を設定することができる。LEFT 条件の場合、Fig. 3 のように中央付近から被験者からみて左側に大きく仮想回転軸を移動させ元に戻す。これに椅子全体の平行移動による慣性力外乱を、仮想回転軸移動の効果を打ち消さず増長させるように同期させる。2 つの外乱に周期性すなわち常性をもたせることで、被験者は与えられた環境条件にあった運動のパターンを学習していく。被験者には座面を水平にして平衡を保つように指示をあたえるので、LEFT 条件の場合には仮想回転軸の移動に被験者の CoP が追従するように、上体を左方向に傾けて戻すとい

う周期的動作が学習されると期待できる。

実際の運動学習 1 では、椅子全体の平行移動は 8 秒周期で左右に 30 cm と設定した。一方、仮想回転軸の移動は平行移動に同期させ、周期 8 秒、振幅 25 cm で与えた。具体的には、中央から 5 cm の地点から逆側面方向へ 20 cm 三角波状に往復移動させた。LEFT 条件では、椅子および仮想回転軸と左側移動から始まる。運動学習中、被験者には外界からの視覚情報を遮断するために HMD を装着してもらう。その HMD のスクリーン上には座面傾斜と CoP 位置を図示する。座面角度が  $\pm 8 \text{ deg}$  以内で座面角度を図示するバーが黄色に変化する。被験者にはバーの色を黄色に保つように指示する。運動学習 1 では、1 周期 8 秒の試行を 100 試行繰り返す。

### 2.1.3 平衡知覚テスト

静座した被験者の HMD の中央に被験者胸部に取り付けたマーカーと同期して左右に移動する太い縦方向のバーを表示する。被験者には、バーが中央に表示した縦細線上にくるように上体を側方向に傾斜させ、その位置で上体がどちらに傾斜していると感じるかを右か左かで回答してもらった。

縦細線上での姿勢がちょうど直立と感じるようなバー表示の初期値を探索するため、PEST<sup>14)</sup>を用いた。PEST (Parameter Estimation by Sequential Testing) は探索アルゴリズムの 1 つで、たとえば縦細線時の姿勢での回答が「左」であった場合、探索対象の初期値を探索幅分右に変更してつぎのテストを行なう。つぎのテストでも回答が「左」と前回と同様の場合、再度初期値を探索幅分右に変更するが、前回と同様の回答が 4 回以上続く場合は、その探索幅を倍にして右方向を探索する (3 回連続するときは条件付きで倍とする)。一方、つぎの回答が「右」と前回の回答と逆方向となった場合は、探索幅を半分にすると同時に探索方向を左に反転して探索を続ける。探索幅が半減を繰り返しあらかじめ設定した値以下に到達した場合に 1 回の探索が終了する。

6 回の PEST により HMD 上へのバーの初期表示位置を変化させ、さまざまな側方向傾斜姿勢における傾斜感覚の回答を 50 個ほど得る。各姿勢に対する「左」回答率をロジスティック関数で近似し、その回答率が 50% となる姿勢を主観的直立姿勢として検出した。これは物理的な直立状態とは必ずしも一致しないことに注意する。

### 2.1.4 実験手順

すべての実験は、Fig. 4 に示す手順に従い、途中で休憩をはさまず連続して行なわれた。平衡知覚テスト 0, 1, 2 および運動学習 1 はすべて同一条件で行なった。

運動学習 1 により平衡に関する知覚が影響を受け、その前後において主観的直立姿勢が変化することを明らかにしてきた。

ところが、実験では側方向の平衡を対象としているため知覚変化の方向は左右のどちらかとなるのだが、その方向が同一の実験後であるにもかかわらず運動学習 0 で行なう対照実験によって変化しているようであった。各実験内容を、その設定理由および結果とともに以降にまとめた。

なおすべての実験は岐阜大学大学院医学研究科医学研究等

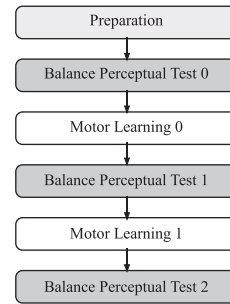


Fig. 4 Flow chart of all the experiments

倫理委員会の承諾を得た後、書面により被験者の同意を得て実施している。

## 2.2 対照実験による平衡知覚変化の違い

### 2.2.1 実験 1: 静座

最初の実験では、対照実験として、運動学習が起きないことが予想され、かつ運動学習 1 との違いが明白となる静座状態を選んだ。運動学習 1 の LEFT 条件では仮想回転軸が左方向に移動し、被験者は姿勢を平均的に左に傾けていなければならない。恒常的に傾いている方向を直立と判断するように知覚が変化すると予想し、何もしない静座では主観的直立姿勢に変化は生じず、運動学習 1 の LEFT 条件では左、RIGHT 条件では右に主観的直立姿勢が変化すると考えた。

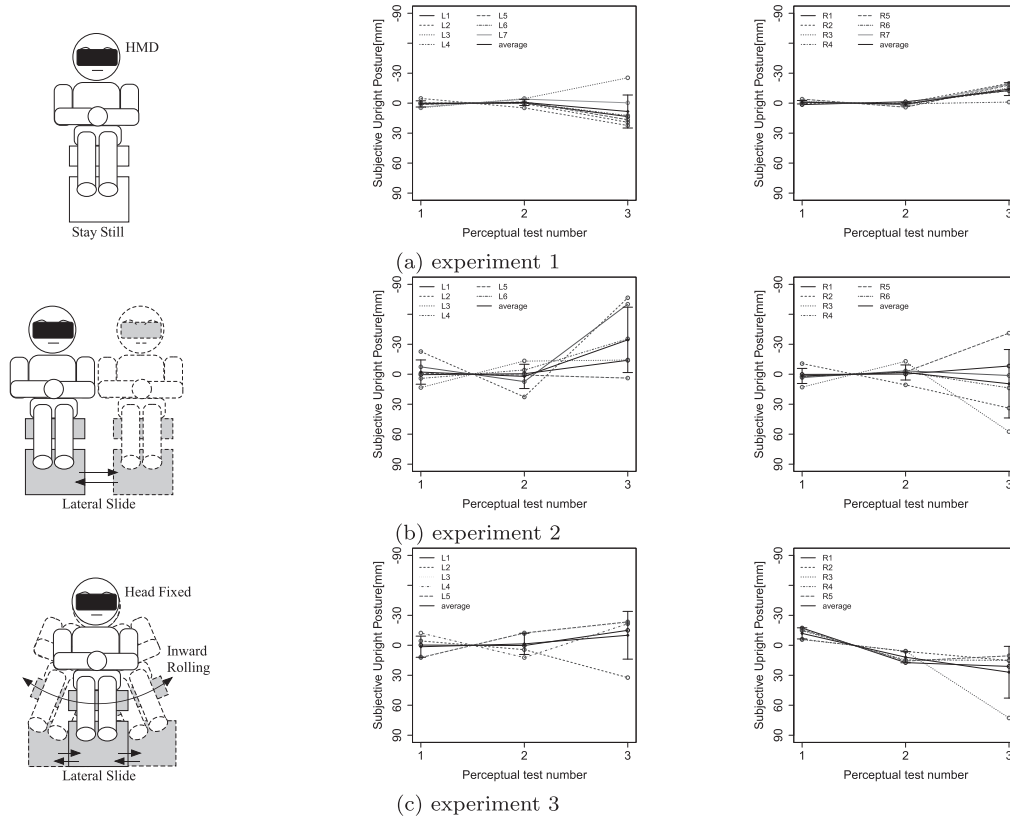
3 つの平衡知覚テストでの主観的直立姿勢の変化を Fig. 5 (a) に示す。被験者は LEFT 条件 7 名、RIGHT 条件 7 名である。以降の知覚テストの結果を表わすグラフではすべて、平衡知覚テスト 0 と 1 では主観的直立姿勢が変化しないと仮定し、2 つのテストの平均が各被験者で 0 となるよう規格化して表示している。濃い黒丸は規格化した各データの平均、誤差棒は標準誤差を表わす。縦軸の増加 (下方への変化) は、主観的直立姿勢の変化が右方向であることを意味する。したがって、主観的直立姿勢の変化は当初の予想とは逆に、LEFT 条件では右、RIGHT 条件では左であった。

分散分析によると LEFT 条件および RIGHT 条件それぞれの平衡知覚テスト計 6 つの平均値の間に有意差が認められた ( $F(2, 24) = 10.138, p = 0.001$ )<sup>11)</sup>。事後分析により全組み合わせについて Tukey 法により多重比較した。以降、LEFT 条件および RIGHT 条件の平衡テスト 0, 1, 2 をそれぞれ記号 L0, L1, L2, R0, R1, R2 で表わすとすると、(L0, L1, L2, R0, R1)-R2 の 5 つの間の差が有意 ( $p < 0.05$ ) となった。

### 2.2.2 実験 2: 平行移動のみ

最初に実験により、運動学習 1 が主観的直立姿勢を変化させること、またその変化が外乱とは逆方向であることがわかった。運動学習 1 では、椅子全体の平行移動と仮想回転軸の移動の 2 種類の外乱をあてていた。平行移動は動き始める方向以外は左右対称である。よって左右非対称な仮想回転軸の移動が平衡知覚変化の主要因であると考えた。

その実証を行なうため、平行移動外乱のみを与える状態を対照実験として運動学習 0 に設定した。主観的直立姿勢は、



**Fig. 5** Summary of each experiment: sketch of the motor learning 0 (left) and the result of perceptual tests on the LEFT condition (middle) and the RIGHT condition (right)

運動学習 1 では変化せず、運動学習 2 では、実験 1 と同じ方向に変化すると予想した。3つの平衡知覚テストの結果を Fig. 5 (b) に示す。被験者は LEFT 条件 6 名、RIGHT 条件 6 名である。規格化データの平均で評価すると、運動学習 1 前後での主観的直立姿勢の変化は予想とは逆に、LEFT 条件では左、RIGHT 条件では右となった。また、この変化を示したものはそれぞれの条件で 4 名ずつと多数派であった。分散分析では 6 つの平衡知覚テスト間に交互作用が認められた ( $F(2, 20) = 4.145, p = 0.031$ )。また Tukey 法による多重比較では R2-L2 間 ( $p = 0.013$ ) で差が有意となった<sup>12)</sup>。全く動きのない静止状態の前後で評価した実験 1 に比べ、実験 2 での運動学習 0 前後での主観的直立姿勢の変化のばらつきは大きい。静止状態に比べ、動きのある平行移動の方が主観的直立姿勢に影響を与えやすいこと、しかし被験者全体で評価すると方向性は相殺され、ばらつきは大きいが平均値は大きく変化しないことが示唆される。

### 2.2.3 実験 3：平行移動+内回転

同一の運動学習 1 に対して、実験 1 と実験 2 ではなぜ異なった知覚変化が観察されたのであろうか。両者の違いは対照実験のみである。そこで、以下のように推察してみた。

直立維持は直立姿勢を目標値とし、そこから誤差を補償するフィードバック制御で達成されていると考える<sup>15)</sup>。実験 1 では静座であったため、その終了後において直立状態が正確

に定位でき、たとえば左方向の外乱をうけると左方向に傾くことが検知できる。左への傾斜を補償するにはフィードバック制御の目標値を反対の右方向に変位させなければならない。この目標値は感覚器を通して判断するものとなるため、主観的なもの、すなわち主観的直立姿勢と考える。運動学習中は直立と思う姿勢を常に右にシフトさせている影響で、その終了後は主観的直立姿勢は外乱と逆方向に変化する。一方、実験 2 では、平行移動により平衡感覚が擾乱を受ける。首を何回も回転させると目が回るが、ずっと軽微ではあるがそれと同じような平衡感覚が乱された状態が再現され、直立状態が正確に定位できなくなる。そのような状態で左方向の外乱を受けると、左に傾いている姿勢が続くこととなり、その姿勢を目標値すなわち直立状態として記憶してしまう。したがって、左方向外乱に対し主観的直立姿勢が左方向に変化する。

この推察によると、対照実験において平衡感覚が乱されない状態を維持できれば、運動学習 1 により実験 1 と同様に外乱と逆方向に主観的直立姿勢が変化すると予想できる。そこで Fig. 5 (c) 左のように、平行移動を伴いながらも平衡感覚器官のある頭部の空間的変位が小さくなるように座面を側方向に内回転させる実験を対照実験として設定した。

3つの平衡知覚テストの結果を Fig. 5 (c) に示す。被験者は LEFT 条件 5 名、RIGHT 条件 5 名である。主観的直立姿勢の変化は当初の予想とは逆に、実験 2 と同様、外乱と同

じ方向, すなわち LEFT 条件では左, RIGHT 条件では右であった。

分散分析では 6 つの平衡知覚テスト間に交互作用が認められた ( $F(2, 16) = 5.694, p = 0.014$ )。また Tukey 法による多重比較では R2-L2 ( $p = 0.014$ ) および R2-R0 ( $p = 0.009$ ) の 2 つ間の差が有意となった<sup>13)</sup>。R0-R1 間に変化の傾向がそろうているが, 今回の解析では有意差はなかった ( $p = 0.209$ )。

### 2.3 運動学習解析への取り組み

前節でまとめたこれまでの平衡知覚テストの結果では, 運動学習による主観的直立姿勢の変化が予想どおりとはならず, 結果全体を統一的な仮説に基づき説明することが難しい。そこで, 運動学習がこちらの意図したとおりに十分に行なわれているのか疑問をもった。また, 平衡知覚の補正が運動学習に付随して起こるものであるのならば, 運動学習がどれだけ進行しているか評価することも, 平衡知覚補正の定量的解析に必要となる。このような理由により, 運動学習 1 について詳しい解析を行ない, その進行・状況について評価する方法について考察することとした。

## 3. 平衡運動学習の解析

### 3.1 解析データ

運動学習時には, 座面ロール回転角度, 座面上の CoP 位置およびモーション・キャプチャ・システムによるマーカの 3 次元位置を計測している。これらデータにより運動学習が評価・分類ができることとなる。

### 3.2 座面ロール回転角度

被験者には座面を水平に保って平衡を維持するように指示している。したがって座面ロール回転角度を各試行で平均し, その変化を評価する。

### 3.3 CoP 軌道

主観的直立姿勢は運動学習の習熟により変化すると考える。そのため, 習熟度を何らかの形で評価したい。運動学習 1 では平行移動の慣性力と仮想回転軸の移動により被験者に外乱を与えている。被験者が座面を水平に保つためのポイントは, 後者の仮想回転軸移動に対し, 被験者が重心位置すなわち CoP を仮想回転軸に追従させて動かすことである。そこで仮想回転軸と実際の CoP 軌道の位相を評価し, CoP の位相遅れが小さくなれば運動学習の習熟度は向上し, さらに位相が進めば予測を行なっていると判断できると考えた。

したがって仮想回転軸に対する CoP の位相差を算出し, 運動習熟度の目安とする。位相差は, 1 試行ごとに取り出した CoP 軌道を第 1 フーリエ係数まで正弦近似し, 仮想回転軸軌道と比較することで計算した。位相差が 0 から  $+\pi/2$  のとき, データ分布がもっとも開いている区間を基準にそれより大きいものは  $2\pi$  を減じて位相が遅れていると解釈した。

### 3.4 上体の側方向変位

直感的には運動学習時の上体傾斜量が大きいほど, 平衡の感覚変化が大きいと考えられる。そこで, 胸骨上部に取り付けたマーカの側方向変位の平均を上体傾斜角の代わりに解析

する。実際には, モーション・キャプチャで取得した被験者の水平方向の位置座標を用いて, 上体が座面の中心からどれだけ変位していたかを算出し, 運動学習の 1 周期 8 秒間ごとの平均値を計算する。

## 4. 解析結果

### 4.1 解析データ

第 2 章の実験 3 で計測した被験者 10 名の運動学習 1 のデータを解析した(注 1)。解析には, 統計処理ソフト R を用いた。

### 4.2 座面角度

水平状態を 0 deg としたときの各試行における座面ロール回転変位の二乗平均の平方根を Fig. 6 に示す。記号 EX3-L3 は, 実験 3 の LEFT 条件 3 番目の被検者を表わしている。実線は分布を指数関数  $Y = \beta_{\infty} + (\beta_{seat} - \beta_{\infty}) \exp(c_{seat} X)$  で回帰した曲線である。各パラメータ  $c_{seat}$ ,  $\beta_{seat}$ ,  $\beta_{\infty}$  の推定結果および残差を Table 1 にまとめた。なお, Table 1 のすべての residue は, 残差の二乗和平均の平方根である。多くの場合, Fig. 6 (a) (b) に示すように減少傾向を示す。そのほかに, (c) のようにいつまでもばらつきで収束する傾向がなく大きな残差が残るもの, Fig. 6 (d) のように微小な  $c_{seat}$  値をもち最初からばらつきが少ない状態で変化しないものが観察された。

### 4.3 CoP 位相差

RIGHT 条件での仮想回転軸に対する CoP の位相差を Fig. 7 に示す。丸印は各試行における位相差を表わし, 直線はそれらを  $Y = \alpha_{cop} X + \beta_{cop}$  で最小二乗近似したものである。 $\alpha_{cop}$ ,  $\beta_{cop}$  の推定値と残差の二乗和平均の平方根を Table 1 に示す。線形近似が Fig. 7 (a) (b) のように増加するものと, Fig. 7 (c) (d) のように減少するものの 2 種類が観察された。ばらつきは (a) (c) のように比較的大きいままのもの, (b) のように収束していきそうなものなど被験者によりさまざまであった。これは LEFT 条件に対しても同様であった。

すべての被験者において位相差は大部分の試行において負であり, 正となるものがあったも連続することはなかった。位相差は必ずしも 0 に漸近しているわけでもなく, Fig. 7 (a), (c), (d) のようにばらつきながら変化しているものがほとんどであった。

### 4.4 上体の平均側方向変位

1 試行あたりの上体の平均側方向変位を Fig. 8 に示す。Fig. 8 (a), (b), (c) は RIGHT 条件, Fig. 8 (d) は LEFT 条件である。Table 1 に  $Y = \alpha_{sway} X + \beta_{sway}$  で線形近似したときの  $\alpha_{sway}$ ,  $\beta_{sway}$  の推定値, 残差の二乗和平均平方根および平均値を示す。

同じ RIGHT 条件であっても, 平均が Fig. 8 (c) のように正值のものと, Fig. 8 (a), (b) のように負値のものが観察できる。同じ負値のものでも, 試行に対して Fig. 8 (a) のよう

(注 1) 実験 1 と実験 2 では, その当時, 実験中の上体位置データを上書きしてしまっており, データが残されていなかった。

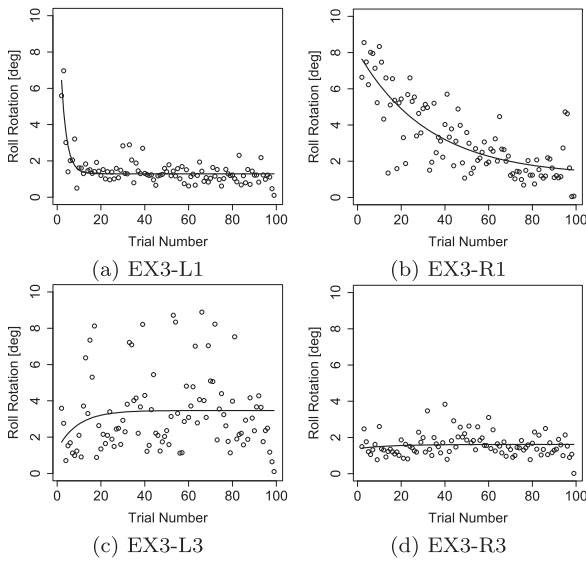


Fig. 6 Roll angle of the seat for the RIGHT condition

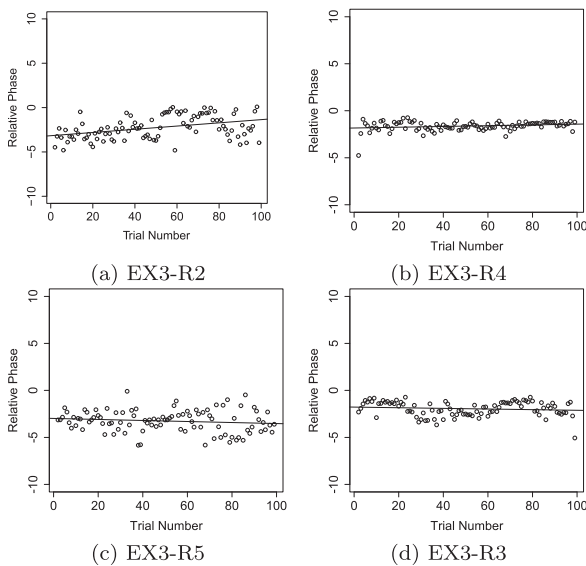


Fig. 7 Relative phase of CoP with respect to the virtual rotation axis motion at each trial for the RIGHT condition

にその値が増加して零に近づく場合と Fig. 8 (b) のように減少して零から離れていく場合がある。正值のものでは、その値が増加していくのは見うけられなかった。

同じようなことが LEFT 条件でも観察できた。Fig. 8 (d) は Fig. 8 (a) のちょうど対称となるものである。

また、変位の大きさという観点では、Fig. 8 (a), (b), (d) は Fig. 8 (c) に比較して大きくなっている。

## 5. 考 察

### 5.1 運動学習時の姿勢

上体の平均側方向変位に正負があったことから、これに関して被験者の話を聞いてみると、Fig. 9 に示すように運動学習 2 を達成する方法が 2 種類あることがわかった。

仮想回転軸が左方向に移動している場合、Fig. 9 (a) の方法

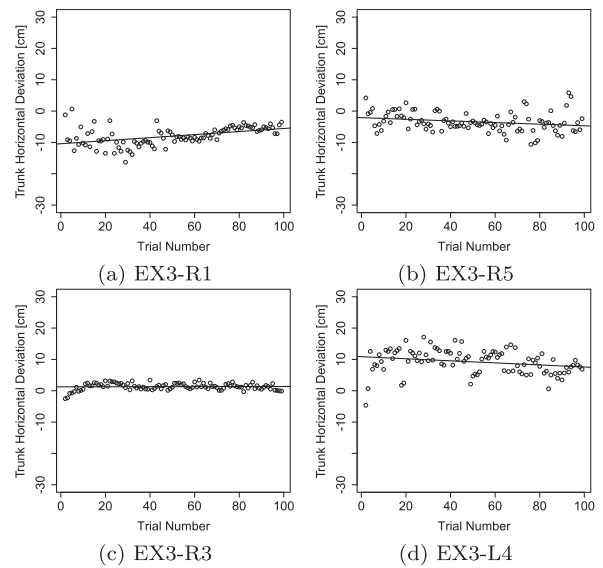


Fig. 8 Horizontal deviation of the upper body part from the center of the seat

では上体を根元の骨盤付近から左に傾ける。われわれはこちらを想定して実験を行っていた。

しかし、ある被験者は Fig. 9 (b) のように、上体を根元で左に大きく傾けるが、その後上体を腰あたりで逆の右方向に「く」の字に折り曲げて、体の重量を座面の左方に押し付けていたと発言していた。

両者では腰部より上部の姿勢、とくに平衡感覚器を有する頭部の傾きが異なってくることから、これらを区別する必要があるかもしれないと考えた。

Fig. 9 (a) と (b) での姿勢の差は上体の変位に表われ、(a) では大きく (b) では小さくなる考えられる。そこで、CoP 位相差の増減、上体の平均側方向変位の方向とその大きさの 3 つを運動学習の評価量として定義し、その分析を行なう。

### 5.2 3 つの評価量による運動学習の分類

合計 10 人の被験者の運動学習の結果について考察を行なう。考察にあたり、これまでの結果を Table 2 にまとめた。最初の Disturbance は LEFT 条件か RIGHT 条件かの区別、つぎの Subjective Upright Posture の Direction は運動学習 1 で主観的直立姿勢が変化した方向、Relative Direction はそれが外乱と同方向 (+) か逆方向 (-) を表わしている。

つぎに運動学習 1 の評価として、Motor learning 1 に CoP 位相差の増減 (+: 増加, -: 減少)、上体の平均側方向変位の外乱に対する向き (Direction) 大きさ (Amount) を被験者 10 名について評価した。変位の大きさでは全体の中央値 (3.480) を基準に大小を識別した。

CoP 位相差は 7 名が減少を示したのに対し、3 名で増加がみられた。CoP 位相差が減少していなかった被験者 3 名 (Table 2 グレー) は、運動の習熟度が向上していないと判断し、この後の解析から除外する。

残り 7 名に対し、仮想回転軸変位による外乱方向に対する上体の平均側方向変位の向きを調べてみた。すると、外乱と

Table 1 Regression parameters of experimental results

Ex	No	seat roll angle [deg]				CoP phase [rad]			upper body deviation [cm]			
		$c_{seat}$	$\beta_{seat}$	$\beta_{\infty}$	residue	$\alpha_{cop}$	$\beta_{cop}$	residue	$\alpha_{sway}$	$\beta_{sway}$	residue	average
Ex3	L1	-0.403	12.789	1.293	0.560	<b>0.002</b>	-1.219	0.817	-0.026	4.403	1.665	<b>3.071</b>
	L2	-0.023	5.328	1.500	1.339	<b>0.016</b>	-2.505	1.149	0.136	-8.785	8.368	<b>-1.903</b>
	L3	-0.106	1.314	3.468	2.051	-0.009	-3.150	1.719	0.031	1.935	2.427	<b>3.494</b>
	L4	-0.429	10.014	3.683	1.753	<b>0.008</b>	-2.573	1.440	-0.033	10.859	3.711	9.201
	L5	-0.149	9.313	1.704	1.032	<b>0.004</b>	-2.262	0.987	0.015	7.019	2.141	7.777
	R1	-0.031	8.052	1.191	1.238	<b>0.003</b>	-2.083	0.963	0.049	-10.424	2.659	-7.965
	R2	-0.026	5.394	2.111	1.650	<b>0.018</b>	-3.169	1.188	0.013	-5.957	4.398	-5.278
	R3	-0.066	1.388	1.616	0.599	-0.003	-1.777	0.764	0.001	1.253	1.095	<b>1.309</b>
	R4	-1.535	45.632	1.589	0.380	<b>0.004</b>	-1.838	0.500	0.020	2.471	0.663	<b>3.466</b>
	R5	-0.301	12.619	3.490	2.191	-0.005	-2.981	1.156	-0.026	-2.094	3.038	<b>-3.409</b>

Table 2 Classification/re-evaluation of motor learning 1

Ex	No	Disturbance Direction	Subjective Upright Posture		Motor Learning 1			Pattern	Note
			Direction	Relative direction	CoP	Trunk Deviation			
						Direction	Amount		
Ex3	L1	Left	Left	+	-	Same	Small	A <sub>small</sub>	N/A
	L2	Left	Right	-	-	Opposite	Small	B	
	L3	Left	Left	+	+	Same	Large		Remove
	L4	Left	Left	+	-	Same	Large	A	
	L5	Left	Left	+	-	Same	Large	A	
	R1	Right	Right	+	-	Same	Large	A	
	R2	Right	Right	+	-	Same	Large	A	
	R3	Right	Right	+	+	Opposite	Small		Remove
	R4	Right	O	0	-	Opposite	Small	B <sub>0</sub>	N/A
	R5	Right	Left	-	+	Same	Small		Remove

同方向 (Same) に変位したものが5名に対し、2名が逆方向 (Opposite) であった。主観的直立姿勢は、前者5名全員が外乱と同方向 (Relative direction: +) に変化している (分類 A および A<sub>small</sub>)。一方、後者2名のうち1名は外乱と逆方向 (B)、1名は変化なし (B<sub>0</sub>) となった。A と分類された4名は上体の平均変位量の大きさも大きく (Large)、Fig. 9 (a) の方法で運動学習を行っていたと考えられる。また、B と分類された1名はそれが小さく (Small)、Fig. 9 (b) の方法で運動学習を行っていたと考えられる。

以上をまとめると、CoPの位相遅れが小さくなる被検者に対し、習熟度が向上したと判断した場合、

- 上体の平均側方向変位が外乱方向と同一である場合はその変位量は大きく、運動学習時の姿勢は Fig. 9 (a) のようであると考える。この場合、主観的直立姿勢は外乱と同方向に変化する。
- 上体の平均側方向変位が外乱方向と逆である場合はその変位量は小さく、運動学習時の姿勢は Fig. 9 (b) のようであると考える。この場合、主観的直立姿勢は外乱と逆方向に変化する。

と結論づけられる。ただし、これに当てはまらない被験者 (N/A) も7名中2名存在する。

## 6. 討 論

運動の習熟度向上の判断として、CoP位相差を評価した。一方、運動学習1での指示には座面を水平とすることが含ま

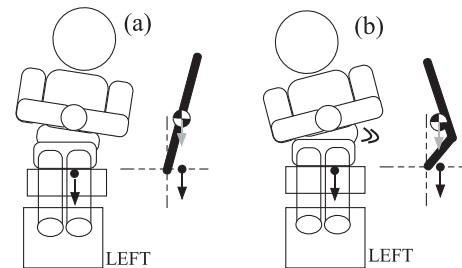


Fig. 9 Two possible postures in motor learning 1

れているため、座面角度も評価すべきかもしれない。そこで、CoP位相差と座面角度の結果の関連性について調べてみた。座面の平均角度変位が減少しているように見えないものは、Table 1で  $\beta_{seat} < \beta_{\infty}$  となっており、EX3-L3とEX3-R3の2名が該当する。それらはともにCoP位相差も減少していない。逆に、CoP位相差が減少する被験者はすべて座面の平均角度変位も減少し  $\beta_{seat} > \beta_{\infty}$  となっている。座面平均角度変位が減少しているのにCoP位相差が減少していないのは、座面を水平に保つことはできるようになったが、その手法は試行ごとに異なっており、再現性のあるパターン化した動作として実行されていないと推察される。もしパターン化した運動としての学習が進めば、位相が安定しさらには次第に進んでいくと予想され、CoP位相差で運動習熟度が推し量れると考えている。すなわち、座面角度は平衡外乱を打ち消せるかの判断はできるが、規則性をみつけて平衡を保つ手法

を学習したかの判断は CoP 位相差のほうが適している。このとき CoP 位相の進み・遅れの判定に今回は分布間隔が最大の区間を境界としたが、学習とともに分布が変わっていくことも考えられ、今後の検討事項に挙げられる。

実験3では椅子の動きを工夫して、頭部の空間的変位を小さくした。しかし、座面を内側に回転するため、実験時に頭部が動かないように指示を与えたが、頭部の回転の影響は除去できていない。実験の行なわれる空間内で頭部が固定されるように条件設定すべきだったが、結果的に運動学習0の前後で主観的直立姿勢に多重比較による統計的有意差がなかったことから、この影響は小さかったとも判断できる。再実験を行なう場合は、空間的な固定を試みるつもりである。

運動学習1の解析により、運動学習時の姿勢に2種類あり、その姿勢により主観的直立姿勢の変化の方向が区別できる可能性を示したことが本研究の主となる成果である。そこでの解析には、運動学習1に先立って行なわれた運動学習0の影響がないことが前提となっている。実験3では運動学習0の影響で運動学習1の結果が変わると仮説をたてていたため、その前提は当初と矛盾するものである。しかし、第2章の実験結果が十分に説明できないこと、多重比較では運動学習0前後での主観的直立姿勢に有意差がないことから、当初の仮説は成り立たないと考えるほうが自然であり、運動学習0の運動学習1の効果への影響は小さいと判断した。しかし、全く影響がないと切り切れるのか、どのくらい影響が小さいのかを評価するには、さらなる実験が必要である。

本稿では、胸骨付近のマーカの位置計測により運動学習時に2種類の姿勢があると推測した。しかし、前庭入力に影響する頭部の自由度を考慮するとさらなる姿勢が含まれている可能性もある。本稿の当初の目的は、運動学習時の運動解析ではなく、実験2の目的となっている平衡の知覚変化を引き起こすのに十分な外乱を明らかにすることであった。したがって、マーカ数は必要最小限の上体1箇所としてしまったため、頭部自由度を考慮できる解析データを取得していなかったことが反省すべき点である。今後の検証実験では、頭部などマーカ数を増加させたさらなる解析が必要である。

## 7. おわりに

平衡における運動学習に付随して、主観的直立姿勢として検出される平衡の知覚が変化を受ける。座位で行なったこれまでの実験結果により、運動学習前に行なう対照実験の影響で、平衡知覚への運動学習の効果、具体的には主観的直立姿勢の変位方向が異なってくると考えていた。しかし、運動学習データの解析により、運動学習時の平衡維持姿勢の影響であるという結論を得た。

すなわち、片側に傾けて平衡を保つ必要がある場合、骨盤付近の根元から上体全体を片側に傾ける姿勢をとる場合には、主観的直立姿勢は傾けた方向に、一方、最初に骨盤付近から折り曲げた後腰付近で反対方向に折り返し「く」の字の姿勢をとるような場合には、腰付近で反転させた方向に変位する

傾向が高いことがわかった。運動学習時には周期的な外乱を繰り返し受けて平衡を維持するが、一周期当たりの上体の水平方向平均変位は、胸骨部で位置計測を行なった場合、前者ではその変位は外乱と同方向でその量は大きく、後者では外乱と逆方向の小さな変位となることも実験的に明らかとなったが、これも被験者の姿勢の機構的解釈と矛盾しない。

この結果により、被験者がどのような手法をとって平衡維持をしているかは、上体の水平方向の平均変位を算出すれば、実験後でも判定できることがわかった。注意すべき点は、その判定は外乱に対する CoP 軌道の位相遅れが減少し、運動が習熟していくと判断される被験者のみに有効であるという点である。これは知覚の変化が運動学習に付随していることを強く示唆しているのかもしれない。

また、今後実験を行なう場合、運動学習の姿勢を統一しないと、異なる知覚変化を検出する可能性があることがわかった。たとえば、上体を真直ぐな状態で大きく傾けるように事前に指示をあたえれば、当初の予想どおり外力方向への主観的直立姿勢の有意な変化が観察できると期待できる。また、実験結果を評価する前に運動学習中のデータから習熟度や上体位置を確認し、習熟度が向上していない場合や上体変位が外乱と同方向の場合は、解析から除外する必要がある。以上のような実験時の被験者への指示などに注意しながら、主観的直立姿勢変化と運動学習の定量的な解析を進め、ヒトと運動制御メカニズムの解明に貢献したい。

謝辞 本研究は日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究 B (16H02879) の補助を受けた。

## 参考文献

- 1) 井上康介 (編): 特集「身体性システム科学の展開」, 計測と制御, **56-3**, 161/211 (2017)
- 2) R. Shadmehr and F.A. Mussa-Ivaldi: Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task, *Journal of Neuroscience*, **14-5**, 3208/3224 (1994)
- 3) 川人光男: 脳の計算理論, 産業図書 (1996)
- 4) D.J. Ostry, M. Darainy, A.A.G. Mattar, J. Wong and P.L. Gribble: Somatosensory plasticity and motor learning, *The Journal of Neuroscience*, **30-15**, 5384/5393 (2010)
- 5) F.B. Horak and L.M. Nashner: Central programming of postural movements: Adaptation to altered support-surface configurations, *Journal of Neurophysiology*, **55-6**, 1369/1381 (1986)
- 6) A. Deveze, L. Bernard-Demanze, F. Xavier, J.P. Lavielle and M. Elziere: Vestibular compensation and vestibular rehabilitation, *Current concepts and new trends*, *Neurophysiologie Clinique Clinical Neurophysiology*, **44-1**, 49/57 (2014)
- 7) R. Kabbaligere, B.-C. Lee and C.S. Layne: Balancing sensory inputs: Sensory reweighting of ankle proprioception and vision during a bipedal posture task, *Gait & Posture* **52**, 244/250 (2017)
- 8) S. Mohapatra, K.K. Kukkar and A.S. Aruin: Support surface related changes in feedforward and feedback control of standing posture, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, **24-1**, 144/152 (2014)
- 9) Y. Suzuki, H. Morimoto, K. Kiyono, P.G. Morasso and T. Nomura: Dynamic determinants of the uncontrolled



- manifold during human quiet stance, *Frontiers in Human Neuroscience*, **10**-618, 1/20 (2016)
- 10) D. Barbado, J. Moereside and F.J. Vera-Garcia: Reliability and repetition effect of the center of pressure and kinematics parameters that characterize trunk postural control during unstable sitting test, *American Academy of Physiological medicine & Rehabilitation*, **9**-3, 219/230 (2016)
  - 11) 伊藤, 石川, 佐々木: 運動学習に伴う座位姿勢での平衡知覚変化に関する計測実験, *計測自動制御学会論文集*, **50**-12, 852/860 (2014)
  - 12) S. Kumagai, S. Ito, K. Matsushita and M. Sasaki: The balance perception changes by motor learning with active trunk movements, *Proceedings of 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2015)*, 936/941 (2015)
  - 13) S. Kumagai, R. Morita and S. Ito: An experiment on perceptual adjustments of the upright sitting posture according to balancing motions, *Proceedings of Life Engineering Symposium 2016 (LE 2016)*, 183/186 (2016)
  - 14) M.M. Taylor and C.D. Creelman: PEST: Efficient estimates on probability functions, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **41**-4A, 782/787 (2005)
  - 15) L.M. Nashner: Analysis of Stance Posture in Humans, *Motor coordination*, A.L. Towe and E.S. Luschei (Eds.), 527/565 Springer (1981)

=====

[著者紹介]

熊谷 敏

2015年岐阜大学工学部人間情報システム工学科卒業。2017年岐阜大学大学院工学研究科人間情報システム工学専攻修了。現在、(株)フジキカイ勤務。

森田 亮介 (正会員)

2013年京都大学大学院情報学研究所博士後期課程修了。2013年大阪大学大学院情報科学研究科特任研究員。2014年青山学院大学理工学部助教。2016年岐阜大学工学部助教となり、現在に至る。量子化制御などの研究に従事。博士(情報学)。IEEE, システム制御情報学会などの会員。

伊藤 聡 (正会員)

1991年名古屋大学工学部情報工学科卒業。93年同大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程前期課程修了。94年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター・テクニカル・スタッフ。97年同研究所フロンティア研究員。99年より岐阜大学工学部助手, 2004年助教授, 2007年准教授, 2015年教授, 現在に至る。運動制御, ロボット工学などの研究に従事。博士(工学)。

=====