

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

伊藤 聡*・石川 靖明*・佐々木 実*

Experiments on Perceptual Change Accompanying Motor Learning in Seated Balance

Satoshi ITO*, Yasuaki ISHIKAWA* and Minoru SASAKI*

This study examines perceptual changes that accompany motor learning for a balancing task. Perceptual changes in an upright state were demonstrated using an experimental method that involves the use of a specially designed but unstable stool capable of a lateral slide as well as roll rotation of the seat surface. Subjects were asked to keep the seat surface horizontal during the motor learning phase, in which the lateral slide occurred in synchronization with shifts in virtual roll about the rotatory axis. Perceptual changes were evaluated from a measure of the psychologically upright postures of each subject. Significant results from statistical analyses showed that psychologically upright postures were inversely affected by the direction of seat movement and roll rotation during the motor learning phase.

Key Words: balancing task, perceptual change, motor learning, human measurement, upright posture

1. はじめに

ロボットをはじめとする機械系の運動制御では、高速性や正確性・再現性で機械がもはや人の能力を超える性能を発揮できるタスクがある。しかし、作業現場での移動・探索や作業内容の変更など、環境の変化や未知な条件が存在する状況で適応的に振舞うことにおいては、機械はまだ人には及ばない。人が優位性を保っている要因の一つは学習能力である。この過去の経験に応じて自らの行動を修正していく機能に関して、機械では人に勝るような能力をまだ十分に実現できていない。とはいえ人が実際に達成している学習は多種広範囲に渡り、そのすべてに対して適用できるような機械の学習方法は、なかなか考案するのが難しい。応用範囲は狭まるが、実現が可能な領域から一つずつその特性を明らかにし、それを実現していくボトムアップ的なやり方は、制御技術を進歩させる一つのアプローチであると考えられる。

ヒトの運動の研究領域は脳科学から制御理論・ロボット工学など多領域に及んでいる。実際、運動特性の解明や数値モデル化、ロボットでの実現などの研究^{1),2)}は、腕のリーチング運動など対象を狭めて行なわれてきている。近年、そのリーチング運動において、粘性場での運動学習によりヒトの体性感覚に基づく知覚が変化することが報告された³⁾。これはロボットでいうと運動の繰り返しによりセンサー特性が変化することに対応し、このような性質はロボット制御には通常は

組み込まれてはいない。しかし、ヒトに代わり、またヒトに似た振る舞いをするロボットを実現するには、このような特徴を明らかにし、制御に採用していくことが必要となってくる。

リーチング運動で報告された運動学習に付随する知覚の変化は、リーチング運動に限らずヒトの運動学習において一般的に起こりうるものと予想する。新しい環境に適応した運動を獲得する際、変化した環境条件を何らかの形でセンシングして運動を行なう。そのセンシングした情報を自分自身で設定している何らかの基準、制御でいうと目標値に対応する内部情報と参照して運動とその学習が行なわれるわけであるが、その基準すなわち感覚情報の判読の「ものさし」が不変ではないことを、リーチング運動の実験が暗に示したと解釈する。そして、この種の知覚変化が、腕の位置感覚ばかりでなく、全身の位置姿勢すなわち平衡という知覚でも起こりうるのではなからうかというのが、本稿のモチベーションの一つとなっている。われわれの研究グループでは、これまでにほかの動物と異なるヒトの特徴である2足歩行・立位平衡に着目し、その制御法の提案⁴⁾とロボットでの実現⁵⁾に取り組んでいた研究的背景もあり、リーチング運動で得られた知見の汎用化の意味も含め、本稿では平衡維持における運動学習と知覚の変化について考察してみる。

平衡では感覚情報の一つである視覚の影響が大きく、実験では開眼か閉眼かは重要な条件となりうる。実際に視覚の影響で平衡が乱される現象についての研究も行なわれてきている^{6),7)}。このような研究は、運動を変化させる力の作用を実際に与えるのではなく、単に感覚情報を操作すれば運動系に影響が及ぶことを示した点で興味深い。運動を繰り返すことで感覚系に変化が起きることを示しているわけではない。

* 岐阜大学工学部 岐阜市柳戸 1-1

* Faculty of Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu
(Received April 27, 2014)
(Revised August 28, 2014)

立位時の姿勢により視覚に基づく知覚が影響を受けるという報告⁸⁾もあるが、本研究では視覚ではなく姿勢そのものの知覚変化が運動の学習により生じるかを観点とする。姿勢の感覚が影響を受けるような日常的な例として「陸揺れ」のような症状が考えられる。このような平衡に関する知覚の適応的变化を研究室レベルで再現性高く発現させ、それを定量的に評価していくことは、ヒトの運動・知覚処理の解明とヒトの運動制御系の仕組みの理解を促進させ、ロボットなどの制御への実装を通して技術の工学的応用に貢献すると考える。

そこで本稿では、「平衡に関する運動学習に伴い姿勢の知覚変化が起きる」という仮説を立て、これを実現できる平衡の運動学習に関する実験を提案すること、知覚変化を定量化できる平衡テストを考案すること、および実際に実験を行ないその仮説を実証することを目的とする。

2. 実験方法の検討

「陸揺れ」は船を降りた後でも地面が揺れているように感じる症状で、平衡の知覚変化の一種と解釈できる。このような知覚変化が起きる過程に必要な条件を以下のように考える。

- (1) 周期性あるいは規則性をもった環境条件が与えられる。平衡の場合、周期的な外乱ともみなせる。
- (2) 環境条件に適応し、それに合った運動が生成される。平衡では規則性をもった外乱を補償するように重心の移動が繰り返される。
- (3) 上記の状況が継続する。このとき、運動にかかわる感覚情報を常に検知し続ける。

本研究においては、以上3項目を満たす環境を被験者に提示し知覚に変化が生じるかを、平衡に関する運動学習と知覚テストの実験により調査する。

立位の維持はヒトの特徴的動作の一つである。よって、この特徴を探究する場合、平衡に関する実験は立位姿勢で行なうことが理想である。しかし、実験という特殊な条件では立位では転倒を起こす可能性が大きくなり、被験者に危害が及ぶことが想定される。そこで平衡に関する運動学習、知覚テストは着座した座位状態で行なうこととする。また計測や解析、考察を簡単にするため、実験は2次元平面内の運動に限定する。安全性を考え、万が一の転倒時に手を利用した受身が取りやすい前額面内の平衡を考える。

周期性・規則性をもつ環境として、不安定な座面を準備し、その回転軸を規則的に移動させる状況を設定する。つまり、被験者は移動する回転軸とともに重心位置を規則的に動かさなければ、座面が回転を起こしてしまう。さらにその状況で座面全体を平行移動させ、慣性力による外乱を与える。この平行移動と回転軸移動は同期させ、両者をあわせて周期的な外乱環境とみなす。なお、平衡に関する知覚・運動は前額面内に限定したため、座面の移動は被験者の側方向、座面の回転軸はロール回転となる。これらの動作を達成しうる椅子について第3.1節で製作する。

一方、平衡における知覚として、どちらの方向にも傾斜し

ていないという意味で「直立」と感じる姿勢に着目する。被験者には座位状態で上体を左右方向に傾斜してもらい、ちょうど直立状態であると感じる姿勢を検出する。以降、この姿勢を「心理的直立姿勢」と呼ぶことにする。

心理的直立姿勢は「右にも左にも傾いていない」と感じるような位置と解釈できる。いい換えると「右に傾いている」感覚と「左に傾いている」感覚が半々となる姿勢である。そこで、被験者にさまざまな傾斜角度の姿勢をそれぞれ何回か取ってもらい、各姿勢でどちらに傾いていると感じるかを回答してもらい、そして「右」と「左」の回答確率が共に50%となるような姿勢を求め、これを心理的直立姿勢と定義し、平衡に関する知覚の評価量として定量化する。運動学習の前後での心理的直立姿勢の変動により、平衡に関する知覚変化を評価する。

3. 実験

3.1 実験装置

実験のため、全体が水平移動しかつ座面がピッチとロールの2軸周りに回転する椅子を作製した。回転2軸は同一平面内で直交するが、その交点は構造上座面の下8cmに位置する。座面の4隅にはロードセルを取り付け、座面のどの位置に重心がかかっているか、その圧力中心(CoP: Center of Pressure)が測定できるようになっている。座面角度はACサーボモータで制御され、その角度はモータに取り付けられたエンコーダにより検出される。また、座面の水平移動にはボールねじを利用したスライダを利用し、ボールねじを駆動するACモータにより水平位置を制御する。水平位置はモータに取り付けたエンコーダから算出できる。椅子の周囲には、転倒時の安全を考えて転倒防止柵とクッションを設置した。1自由度平行移動と2自由度座面回転をもつ椅子を含めた実験環境をFig. 1に示す。

被験者の上体がどのくらい傾いているのか、その姿勢を計測するために3次元リアルタイム・モーションキャプチャ・システムを導入する。カメラは実験の邪魔にならないよう、椅子の正面上方に2台設置する。

椅子の制御には、AD変換ボード、DA変換ボード、エンコーダ・カウンタ・ボードを搭載したART-LINUXで作動するパーソナル・コンピュータ(PC)を利用する。椅子の駆動モータに取り付けたエンコーダからの信号はエンコーダ・カウンタ・ボードへ入力され、そこから椅子の傾斜角度および椅子の水平移動距離を検出する。また、椅子に取り付けたロードセルからの信号は、シグナル・コンデショナで増幅された後AD変換ボードに入力され、その情報に基づきCoPの位置が算出される。これらの情報をもとにモータの駆動力が計算され、対応する制御信号がDA変換ボードを通してモータ・ドライバに与えられる。モータ・ドライバはAC電源から必要な電力を取り出しモータを駆動する。この制御周期は1msである。

モーションキャプチャ・システムからの計測データは、計測

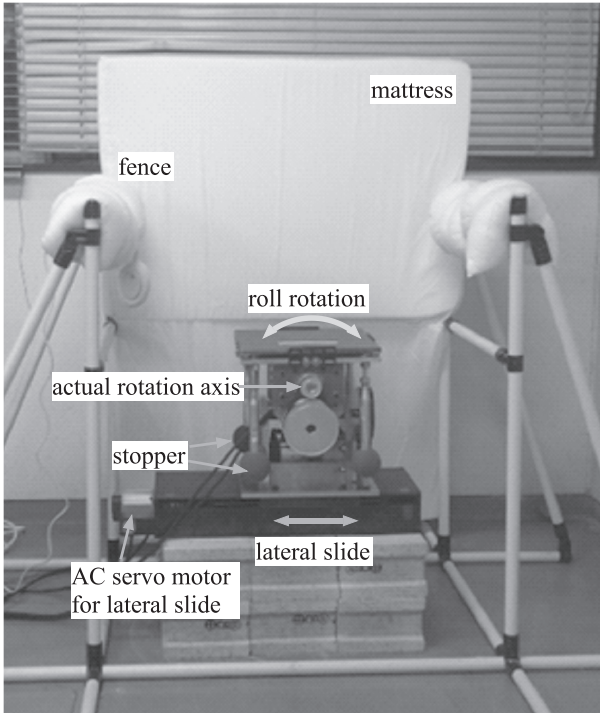


Fig. 1 A stool with a sliding movement and seat surface rotations

用 PC から通信サーバ用 PC を経由後、7.5 Hz ごとに制御用 PC に UDP 通信で送付される。計算量の分散のため、HMD 画面の表示用に ART-LINUX で作動する PC をもう 1 台用意し、制御用 PC と必要な情報を 20 ms ごとに TCP 通信で交換する。この表示用 PC は実験の操作パネルとなる GUI インタフェースも提供する。

3.2 運動学習

側方向に平行移動が起きる向きで被験者を製作した椅子に座らせる。座面の 2 軸の回転のうち被験者に対してピッチ軸方向は、初期状態で座面が水平となるようにその角度を固定する。この状態で被験者に対し、平行移動による慣性力および座面のロール回転軸の変位という 2 種類の外乱を与える。被験者には上体を左右に動かすことで座面を水平にし、後述する HMD (Head Mounted Display) に表示されたバーの色を座面傾斜が設定値未満を示す黄色に保つよう指示を与える。これを達成するには水平移動の加速時に生じる慣性力を補償するため進行方向に上体を傾げるのに加え、変化する回転軸に追従するよう CoP を進行方向に移動させる動作が必要となる。

後者の外乱生成に関しては、座面のロール軸を、被験者の CoP 位置と仮想的に設定するロール回転軸間の側方向距離に応じた大きさで、CoP の変位方向にゆっくりと駆動する。すなわち、CoP が仮想回転軸より右方向にずれた場合には徐々に右回転が生じ、座面は傾斜が増大するという意味で不安定化する。座面の水平は、シーソーの要領で座面が傾いた方向とは逆方向に CoP を移動させた後、回転軸上に CoP の位置を保つことで維持される。なお仮想回転軸については付録に

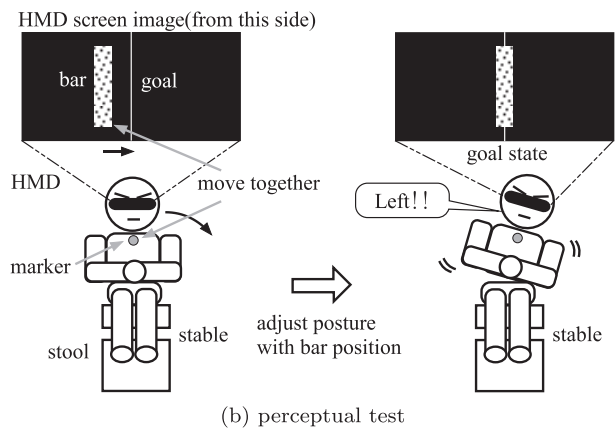
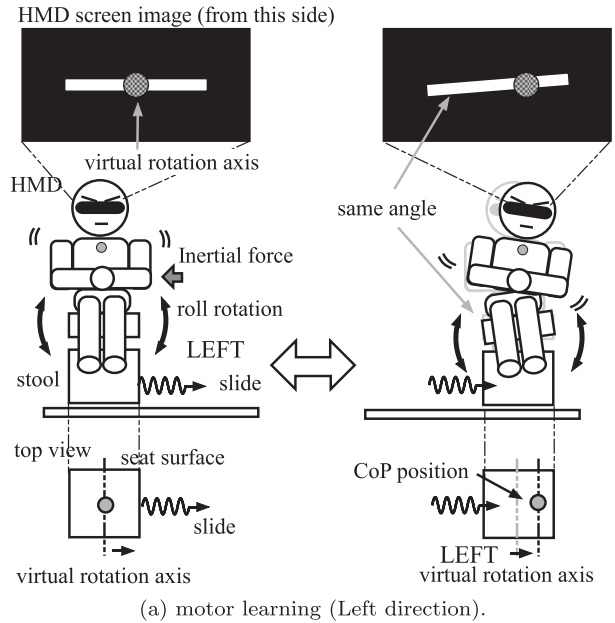


Fig. 2 Illustrations of the motor learning and perceptual test performed in our experimental procedure

補足説明する。実際の実験では、仮想回転軸は中心より 5 mm の地点から反対方向に 20 mm の位置へ水平移動と同じ方向に 4 s かけて 25 mm 移動させた。

予備実験では被験者には正面を向き開眼で実験を行なってもらったが、その条件では座面が現在どのような状態であるかよく認識できないようであった。そこで、コンピュータ・グラフィックス (CG) により、座面の傾斜状況を図示することとした。具体的には Fig. 2 (a) 上部のような画像を HMD に同期表示させた。バーの傾きは座面の傾斜角度、丸印で座面に対する仮想回転軸の位置を表わす。座面がある程度 (実験では 8 deg に設定) 傾斜すると、バーは黄色から灰色に変化する。

一方、前者に関しては、Fig. 2 (a) に示すように座面の仮想回転軸を側方向に移動させるとともに、椅子全体も同方向に連動して水平移動させる。実際には椅子の水平移動は距離 20 cm、移動時間は仮想回転軸の移動と同期した 4 s と設定した。

この椅子の移動が終わると、ちょうど逆の要領で椅子は最初の位置に戻される。すなわち水平移動、仮想回転軸移動は、往路とはちょうど対称となる。

これにより運動学習での1回の試行が終了する。各運動学習ではこの試行を何回も繰り返すことで、与えられた環境下での平衡に関する運動パターンを被験者に学習させる。以降の実験では、100試行を1回の運動学習とした。1試行の時間は8sであるので運動学習にはおよそ800s必要とする。なお、各試行間には休息時間は設定していない。

3.3 知覚テスト

知覚テストは椅子に取り付けたモータの角度を一定値に固定し、実験装置をすべて静止させた状態で行なう。被験者を運動学習時に引き続き同じ場所に着座させたまま、Fig. 2 (b)に表示されたように、画像に基づいて上体を左右に傾斜させた目標姿勢を取らせる。

被験者の姿勢を計測するため、胸骨上部あたりにモーションキャプチャ・システムのマーカーを取り付ける。Fig. 2 (b)上図に描かれたHMD画像において、縦方向のバーは被験者に取り付けたマーカーの水平方向の動きに同期して同方向に動く。バーの幅は20pixelで、画面中央にある幅1pixelの細線が目標位置となる。バーの中心が線付近になると、目標姿勢に近いことを示すためバーは黄色から赤色に変わる。実験では、バーと細線との距離が10pixel以内でバーの色を赤に変化させた。被験者にはバーの中央がちょうど目標位置にくる姿勢を維持するように指示する。

画面のスケールは予備実験に基づき40pixel/cm (0.25mm/pixel)と設定した。バーの表示はこのスケールに従いマーカーと同期して動くが、その表示位置の基準点をテストごとに変化させる。すなわち知覚テスト開始時におおよそ直立姿勢でバーが中央にくるよう設定するが、各テストでバーをその開始時の設定から意図的にずらして表示する。表示位置が平行移動する結果、被験者が取る目標姿勢が表示のずれとは反対方向に変位する。

このバー表示の変位量、すなわち右方向に何pixel変位させるかをテストごとに決定する。この決定アルゴリズムとしてPEST (Parameter Estimation by Sequential Testing)⁹⁾を用いる。PESTでは探索範囲が被験者の回答に応じて適応的に変更されるため、心理的直立状態が効率的に検知されると期待できる。PESTではステップ・サイズの初期値80pixel (20mm)、最小ステップ・サイズ20pixel (5mm)と設定し、初期値 ± 160 pixel (± 40 mm)のペアを3セット、計6回行なう。

PESTで決定される基準点に基づき被験者が維持している目標姿勢は、直立姿勢とは限らない。そこで被験者に「現在、左右のどちらに傾いていると感じますか」という質問に「右」か「左」かの二者択一で回答してもらう。

回答が終わると、椅子を水平移動させて揺らすことで、被験者もつ現在の姿勢の感覚をリセットさせる。この水平移動は、左・右・左もしくは右・左・右のどちらかの方向をラ

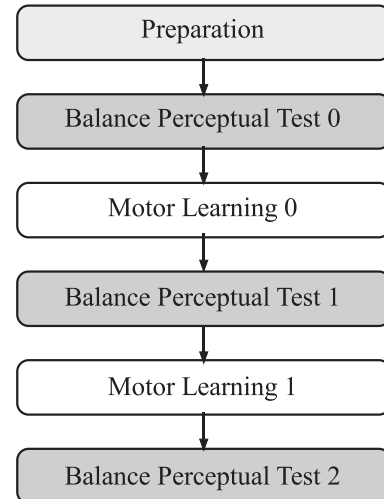


Fig. 3 Experimental procedure.

ンダムに選び、振幅1cmでおおよそ3秒かけて行なう。この間、バーは画面中央に固定しておく。その後、バー表示の変位量を新たに決定し、つぎのテストを同じ手順で繰り返す。

3.4 実験の実施

実験を始めるにあたり、被験者には、座面の中央に腰掛けること、柵には緊急時以外は触れないことを周知させる。

実験の開始時にモーションキャプチャ・システムのキャリブレーションを行ない、被験者が直立姿勢と感ずる姿勢とHMDの画面中央をおおよそ対応付けておく。つぎに、最初の知覚テスト0を行ない、運動学習0の後、2回目の知覚テスト1を行なう。そして運動学習1の後、最後の知覚テスト2を行なう。Fig. 3に実験の手順をまとめた。

三つの知覚テストはすべて同じ実験条件で同じ内容のテストを行なう。知覚テストでは同じ条件下で評価するため、被験者が着座位置を変更しないよう十分に注意する。

運動学習0では、実質的には運動学習を行なわない条件を課し、運動学習1に対する対照実験とする。運動学習0の時間を5分とし、被験者には5分後に再度知覚テストを行なうことを告げた後、着座しながらリラックスした状態で待機してもらう。このときにも被験者には着座位置を変更しないよう注意を与える。

運動学習1では、第3.2節に示したように、移動する椅子の上で座面を水平に保つタスクを行なってもらおう。

運動学習においては仮想回転軸の移動方向、すなわち椅子の平行移動を左右2方向設定し、それぞれに対して被験者を7名ずつ募って計測を行なった。本実験の実施にあたり岐阜大学医学研究等倫理審査委員会の承認(25-234)を得た。また、実験内容の説明後、実験に協力する被験者には同意書にサインをしてもらった。

3.5 解析

知覚テストの結果、さまざまな姿勢において被験者が左右どちらに傾いているかの回答を得る。そのデータには同じ目標姿勢での回答結果もいくつか含まれており、そのすべてに

Table 1 Answers from a subject of the left directional condition

pixel	TEST0			TEST1			TEST2		
	<i>N</i>	<i>L</i>	<i>L/N</i>	<i>N</i>	<i>L</i>	<i>L/N</i>	<i>N</i>	<i>L</i>	<i>L/N</i>
-160	3	0	0.00	3	0	0.00	3	0	0.00
-100	-	-	-	-	-	-	1	0	0.00
-80	3	0	0.00	3	0	0.00	3	0	0.00
-60	-	-	-	-	-	-	3	0	0.00
-40	-	-	-	-	-	-	4	0	0.00
-20	8	0	0.00	9	0	0.00	12	6	0.50
20	10	7	0.70	11	10	0.91	7	7	1.00
40	2	2	1.00	1	1	1.00	-	-	-
60	1	1	1.00	1	1	1.00	-	-	-
80	3	3	1.00	3	3	1.00	3	3	1.00
160	3	3	1.00	3	3	1.00	3	3	1.00

対して被験者が必ずしも同じ回答をするとは限らない。大きく傾いている場合はその方向の検知は容易であるが、傾きが小さい場合、判断が難しくなるためである。

われわれが評価量として用いる心理的直立姿勢を、左に傾いていると感じる確率と右に傾いていると感じる確率が50%ずつの姿勢と定義した。そこで、各姿勢に対して傾いている方向が「左」と回答する確率をもとめ、それをロジスティック関数で近似する。その近似曲線の値が0.5となる点を、回答確率が左と右で同じになる姿勢と判断し、心理的直立姿勢として検出する。

各被験者から得られる三つの知覚テストで得られた値を統計処理し、平均値に有意な差があるのかを分析する。計算には統計ソフトウェアのR言語を用いる。

なお、計算はHMDにおける右方向へのバー表示変位量(pixel)を用いて行なう。バー表示が右方向に変位している場合、バーを中央にもってくるには実際の姿勢を左方向に傾斜させなければならない。つまり、バー表示変位量に -0.25 mm/pixel をかけることで、初期設定を基準とした右方向への姿勢変位量(mm)が計算できる。

4. 結 果

4.1 平衡知覚テストでの被験者の回答

左方向に運動学習させたある被験者の回答データを **Table 1** に示す。左側の列は、バー表示変位量(pixel)、*N*はその変位量でのテストの回数、*L*はその変位量のテストにおいて「左」と回答した回数であり、したがって、*L/N*は「左」と回答した確率となる。

バー表示変位量を横軸、「左」と回答する確率を縦軸としたグラフに **Table 1** のデータをプロットし、ロジスティック曲線で近似した曲線(サイコメトリック関数)を **Fig. 4** に示す。実線は平衡テスト0、破線は平衡テスト1、点線は平衡テスト2を表す。

この被験者では、グラフの形・位置とも運動学習0の前後で変化していない。しかし、運動学習1の前後では、グラフの位置が左方向に移動している。心理的直立姿勢はこの近似曲線が0.5をとるときの変位として定量化するので、運動学

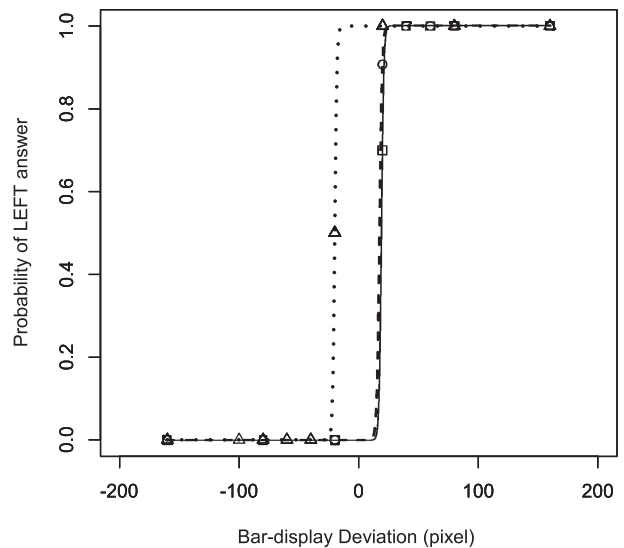


Fig. 4 Psychometric function approximating the data in **Table 1** with logistic function

習0は心理的直立姿勢に影響を与えないが、運動学習1は心理学的平衡位置を右方向、グラフではマイナス方向に移動したといえる。つまり、この被験者は運動学習1の後、より右に傾いた姿勢を直立姿勢と判断していることを意味する。

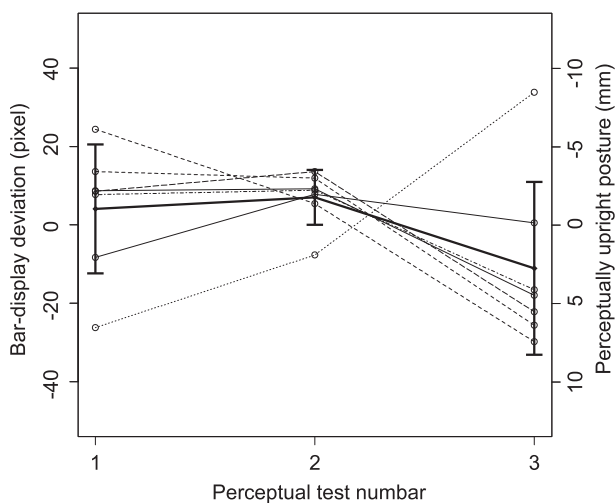
4.2 心理的直立姿勢とその変化

前節での計算を被験者14名に対して行ない、心理的直立姿勢の変化をバー表示変位量により数値化した。結果を **Table 2** に示す。

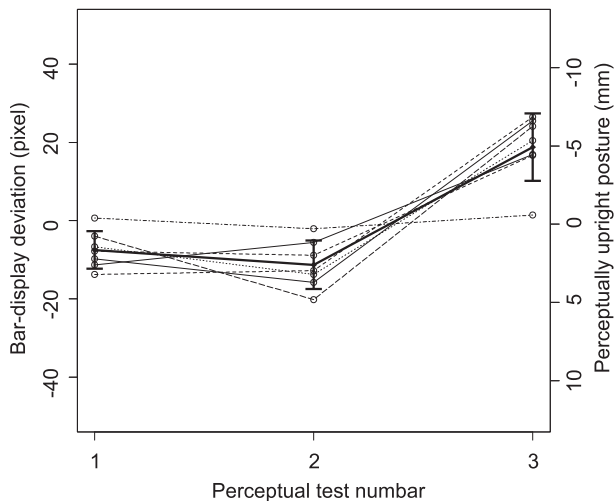
被験者ごとのバイアスを取り除くため、3回の平衡テストの平均が0となるように補正し、それらをプロットしたグラフを **Fig. 5** に示す。運動方向が(a)は左方向、(b)は右方向の被験者群であり。黒丸が平均値で標準誤差をバーで表示した。左側の縦軸には右方向へのバー表示変位量(pixel)、右側にはそれに等価な右方向への姿勢変位量(mm)を目盛りにとった。(a)と(b)をみると共に運動学習0前後では心理的直立姿勢の変化は小さいが、運動学習1前後ではそれは大きく変化していることがわかる。また、運動学習1前後での変化の方向は、運動学習の方向が逆になると反対方向に変位することがわかる。

Table 2 Quantified perceptually upright postures

	TEST0	TEST1	TEST2
L1	19.62	20.16	-6.99
L2	19.19	17.51	-20.0
L3	0.08	18.58	60.06
L4	28.35	29.49	4.06
L5	52.00	57.02	21.26
L6	-14.06	1.98	-5.31
L7	40.40	21.41	-13.79
R1	14.17	19.93	42.35
R2	18.58	17.51	43.02
R3	-10.48	-17.51	16.65
R4	19.35	16.65	20.16
R5	-2.57	-18.77	25.49
R6	-2.45	-8.47	32.83
R7	-20.16	-19.19	20.00



(a) Left directional condition.



(b) Right directional condition

Fig. 5 Transition of the perceptually upright posture, rearranged by zero average for each subject

4.3 統計解析

最初に補正のない Table 2 のデータに対し、2 要因対応ありの分散分析を行なった。運動方向の右 (R) と左 (L) の二つの水準に対して、平衡テストには 0 (TEST0), 1 (TEST1),

2 (TEST2) の三つの水準が存在し、この二つの要因に対して交互作用が認められた ($p = 0.000643 < 0.01$)。

そこで、どの群間に有意な平均値の差があるか、テューキー法により多重比較を行なった。その結果を Table 3 に示す。

運動学習 1 を行なう前の 4 群 L-TEST0, L-TEST1, R-TEST0, R-TEST1 の間にはいずれも有意差はみられない。運動学習 0 は運動学習が起きない条件であること、左右の運動方向それぞれの実験においてこの時点では条件に全く違いがないことから、これは妥当な結果である。ところが運動学習 1 を行なった後では、R-TEST2 と L-TEST2 間、すなわち運動方向の違いにより有意差が生じるようになった ($p = 0.00100 < 0.01$)。つまり、運動学習 1 が心理的直立姿勢に有意に影響を与えていること、その変化の方向が運動学習の方向により逆向きとなることがわかる。さらに右方向の運動学習に限ってみると、R-TEST0 と R-TEST2 および R-TEST1 と R-TEST2 の間にはいずれも有意差が認められる ($p < 0.01$)。一方、左方向の運動学習では、3 群間に有意差は今回の実験では認められていない。

5. 討 論

平衡には、前庭・三半規管からの平衡感覚、体幹の角度などの固有感覚のほか、視覚も影響を与えている。当初、CG による座面状態の提示は、実験室の机に設置したモニタ画面で行なっていた。しかし、知覚テストにおいて、モニタ画面の水平な上面などが、上体の傾き検知の視覚的な手がかりとなることを危惧した。つまり静止しているモニタ画面の方向が環境におけるランドマークとなり、直立座位姿勢の検知のための視覚的補正として働く可能性である。そこで、視覚情報の遮断と座面状態の提示を目的に HMD を導入し、頭部の傾きや動きにかかわらず視界の一定位置に CG 画面がみえるよう工夫した。本実験での知覚変化は、視覚の影響は取り除かれていると考えられる。しかし、前庭・三半規管からの平衡感覚に関しては、本稿で採用した平行移動と座面回転の外乱では両方が関与してくる可能性がある。付録に示した実験結果をみると、幸いにも座面の回転はゆっくりであり、この事実より三半規管からの角加速度情報の影響は少ないように判断できる。いずれにせよ、現状の計測では平衡感覚の影響について議論するには不十分な点があり、今後実験系を工夫・改善していく必要がある。

知覚テストにおいて被験者は能動的に姿勢を変化させ、その姿勢についての判断を行なっている。本研究の元となっている腕のリーチング運動での知覚テストが、手先の受動的な位置指定の後に手先の左右位置を問うているのと比較すると、運動の能動性という観点で違いがある。類似性から実験系を構築してきた流れからすると、受動的な姿勢変化を与えるのが妥当である。そこで予備実験として、被験者の動きが能動的とならないよう椅子の傾斜角度を変化させどちらに傾いているかを回答させるテストを最初に試みた。静止した状態から座面を傾けるとその動きによって判断されてしまうと考え、

Table 3 Tukey's test among six groups

	L-TEST1	L-TEST2	R-TEST0	R-TEST1	R-TEST2
L-TEST0	0.99776	0.23307	0.52024	0.22291	0.26419
L-TEST1	-	0.09829	0.27559	0.09314	0.50466
L-TEST2	-	-	0.99425	1.00000	0.00100**
R-TEST0	-	-	-	0.99290	0.00462**
R-TEST1	-	-	-	-	0.00093**

このテストでは運動学習と同様に椅子全体を水平方向にスライドさせ、その間に座面を傾ける方法を取った。椅子の水平移動を運動学習時と同じ設定にして学習時の環境を再現することで、運動学習の成果が反映されやすいのではとの期待もあったが、条件の違いにより座面傾斜の知覚に対する有意差は観察されなかった。

上体を能動的に動かす場合、初期状態から動き出す方向の影響を受けやすいと考え、本実験ではそれをリセットするよう椅子を水平方向に動かす動作を付け加えた。また、最初にどちら方向に体を動かさなければならなかったかという記憶がどちらに傾いているかの判断に影響することもあると予想できるが、実験により知覚の変化が観測できた点では、本稿での実験系が結果的には悪くない設定であったと判断する。ただし、今後の展開を考慮するうえでは、姿勢変化が能動的か受動的かということは注意すべき項目であると考えている。同様に、運動学習の能動性、たとえば CoP を積極的に目標位置に移動させて平衡をとるか、もしくは転倒を防ぐ目的でただ漠然と平衡をとってもらうかによっても、知覚変化のようすが異なってくる可能性は大いにある。これが明らかになるよう、運動学習中の周期的外乱を含めた実験条件を検討する必要もある。

計測データ処理では各被験者に対し、Table 1 のような実験結果を Fig. 4 に示すロジスティック関数で近似後、それに基づいて心理的直立姿勢を算出している。この手法では心理的直立姿勢付近の回答によりロジスティック関数での近似が変化することがあり、十分な回数のテストを行なう必要がある。PEST は探索区間を適応的に変化させるアルゴリズムであり、この付近でテスト回数値 (N) が大きくなっていることが観察できる。この付近でのテストは理想的には多く行なうほどよいが、1 回の被験者に対して同じ知覚テストを 3 セット行なうこと、運動学習を含めた被験者の負担を考慮し、この実験設定で知覚テストを行なった。心理的直立姿勢付近では 10 回程程度の質問を行ない、1 回の重みが約 10% 以下になっている。

さて最終結果により、平衡の運動学習が直立と感じる姿勢に影響を与え、その姿勢が運動学習とは逆方向に変動することが示された。知覚変化の方向について、本研究の動機付けとしているリーチング運動学習に付随した体性感覚変化³⁾の場合には、運動中に受ける粘性場外乱とは逆方向であると報告されている。われわれはこの理由について、粘性場外乱を補償するには受ける外力とは逆向きにリーチングの目標軌道を曲げる必要があり、その目標軌道に引っ張られるように体性

感覚が変化するためであると考えた。実際、その考えのもとでモデル化したシミュレーションでは実験データが定量的に再現できている¹⁰⁾。知覚変化の向きが外力とは逆であるという見方をすると、本稿での結果はそれに矛盾していない。本稿で行なった平衡運動の学習方向が左の場合、被験者は左方向に傾斜を繰り返す反復運動を運動学習中に強いられることになる。すなわち、運動学習中、平均してみると左方向にバイアスした外力すなわち重力効果を受けることとなる。リーチング運動と同様に考えると、そのバイアスに抗して直立を維持するため直立制御の目標値がこの外力とは反対側に変動する。その目標値変動の影響を受けて直立と感じる方向がそれと同じ方向、すなわち外力と逆方向にずれていく、という筋書きがこの知覚変化を説明する一つの可能性として考えられる。

6. おわりに

本稿では、平衡に関し運動学習に伴う知覚変化の実証を研究室環境で試みてきた。座面がピッチ・ロールの 2 軸回転し平行移動が可能な椅子を製作し、座位の平衡状態に外乱が与えられる環境を整備した。

新しく運動学習が行なわれるためには規則的・周期的な外乱が継続的にかけられる必要があると考え、座面の仮想ロール回転軸および椅子全体の側方向平行移動を、製作した椅子を用い同期させて被験者に与えた。椅子および仮想ロール回転軸の平行移動を左右両方向に対して行なった結果、被験者が直立と感じる姿勢が運動学習の方向と逆方向に変化することを実験的に示した。同時に知覚変化を起こす平衡の運動学習の一つを提案できたこととなる。

運動学習に関しては、予備実験において最初のほうと最後のほうの試行において CoP の軌道を比較したところ、仮想的回転軸への追従性が後者のほうで高まっていたことをもって、運動学習が行なわれる実験課題であると判断した。だが本稿においては、運動学習のパフォーマンスについての評価は行なっていない。われわれは運動学習の進み具合が知覚変化の大きさに影響を与えると予想している。今後は、学習の度合いを何らかの形で定量的に評価し、知覚変化の大きさとの関係性について調査すること、運動と知覚の学習についてモデル化することを目指していく。同時に、平衡時の学習でのどのような動作が知覚の変化に大きな影響を与えるかが明らかになればと考えている。

謝辞 本研究では中島悠貴氏、伊藤佑樹氏、熊谷 敏氏の協力を受けた。本研究は JSPS 科研費 70291911 の助成を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) R. Shadmehr and F.A. Mussa-Ivaldi: Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task, *The Journal of Neuroscience*, **14**-5, 3208/3224 (1994)
- 2) 川人光男: 脳の計算理論, 産業図書 (1996)
- 3) D.J. Ostry, M. Darainy, A.A. Mattar, J. Wong and P.L. Gribble: Somatosensory plasticity and motor learning, *The Journal of Neuroscience*, **30**-15, 5384/5393 (2010)
- 4) 伊藤, 西垣, 川崎: 床反力に基づいた一定外力場での起立姿勢に対する制御法, 計測自動制御学会論文集, **38**-1, 79/86 (2002)
- 5) S. Ito, A. Nakazawa, T. Onozawa, S. Nishio and M. Sasaki: A hip joint structure for biped robot with reduced dof's of motion, Proc. of the 16th International Conference on Climbing and Walking Robots, 529/536 (2013)
- 6) B. Isableu, T. Ohlmann, J. Cremieux and B. Amblard: Differential approach to strategies of segmental stabilisation in postural control, *Experimental Brain Research*, **150**, 208/221 (2003)
- 7) B. Tia, C. Paizis, F. Mourey and T. Pozzo: Do equilibrium constraints modulate postural reaction when viewing imbalance?, *Brain and Cognition*, **79**-2, 89/95 (2012)
- 8) J. Barra, D. Perennou, K.V. Thilo, M.A. Gresty and A.M. Bronstein: The awareness of body orientation modulates the perception of visual vertical, *Neuropsychologia*, **50**-10, 2492/2498 (2012)
- 9) 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)
- 10) S. Ito, M. Darainy, M. Sasaki and D.J. Ostry: Computational model of motor learning and perceptual change, *Biological Cybernetics*, **107**-6, 653/667 (2013)

《付 録》

A. 運動学習における椅子の動きについて

A.1 仮想回転軸とその移動

Fig. A.1 に示すように, ロール回転中心を原点とし被験者の側方向に座標軸 y をとる. 運動学習時には, 座面下に取り付けた四つの力センサーより, 圧力中心位置 y_{CoP} が検出できる.

座面の回転は重力によるモーメントにより生じ, その大きさは重力の作用点と回転中心との水平距離に比例する. したがって, 通常の状態 Fig. A.1 (a) では, 右周りに $Mg \cdot y_{CoP}$ の大きさのモーメントが働く. ここで, Mg は被験者の与え

る重力である.

本稿では, 回転軸を実際の回転軸とは違う位置 y_o に仮想的に設定し, その回転軸を規則的に移動させる. この仮想回転軸が右側に設定されている状態を Fig. A.1 (b) から (d) に示す. Fig. A.1 (b) では, 仮想回転軸の変位が少なく, y_{CoP} よりも原点寄りの状態である. この場合, 被験者重力による回転モーメントは, 通常の Fig. A.1 (a) の場合と同じとなるが, その大きさは (a) よりも小さくなる. 一方 Fig. A.1 (c) のように, 仮想回転軸に重力が作用する場合, 回転モーメントは生じない. そして, Fig. A.1 (d) のように仮想回転軸が大きく変位し y_{CoP} よりも遠方となると, 座面の回転を生じさせるモーメントは反転する. したがって, たとえ被験者の重心が座面の右側にかかっていたとしても座面は左周りに回転を起こす.

Fig. A.1 (b) から (d) のすべての場合, 座面を回転させるモーメントは y_o と y_{CoP} の差 $\Delta y = y_{CoP} - y_o$ に符号も含めて比例することとなる. この現象を擬似的に表現するために, 実験では座面の角度を保つ位置制御の目標値 θ_d を以下のように修正した.

$$\theta_d = K \int \Delta y dt = K \int (y_{CoP} - y_o) dt \quad (\text{A.1})$$

$K > 0$ は CoP のずれに対する回転の速さを調節する定数である. Δy が零のとき, 目標値が変化しなくなるため座面角度は一定に保たれ, また Δy が非零の場合は目標値変化により座面が回転する. すなわち, Fig. A.1 の実験条件が擬似的に達成できる. なお, 回転軸が座面の位置から後方にずれていることを本来考慮する必要があるが, 実験ではそこまでの厳密な補正は行なわなかった.

A.2 実験時のデータ

運動学習時の動きを示すグラフを Fig. A.2 に示す. ただし, これらは追加実験による結果であり, 第 3.4 節で募集した被験者のものではない. しかし, 実験装置の動きは両者で同じである.

運動学習時において Fig. A.2 (a) は 20~21 回目の試行 (約 156 s から 172 s), Fig. A.2 (b) は 93~94 回目の試行 (約 740 s から 756 s) 時の仮想回転軸の位置と椅子に取り付けたロー

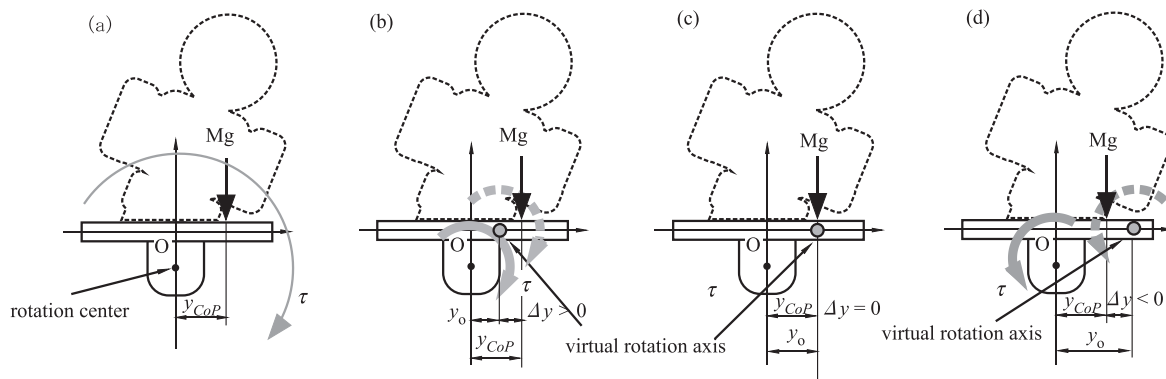
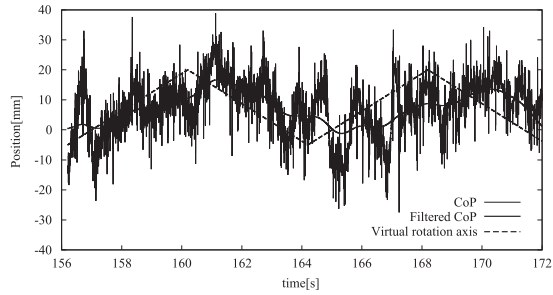
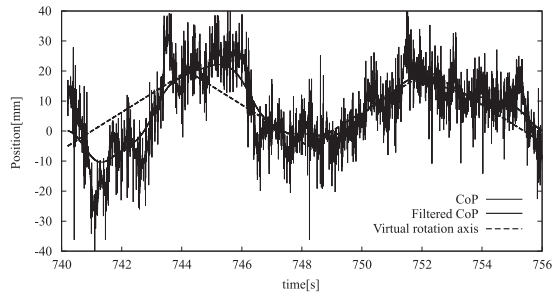


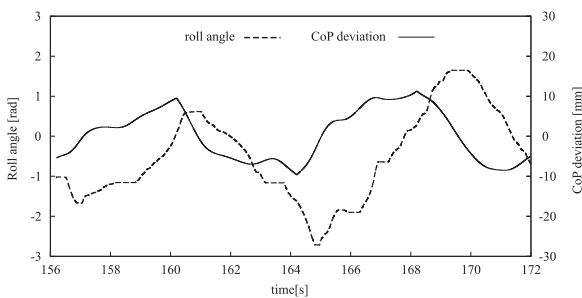
Fig. A.1 The virtual rotation axis and the seat surface movement



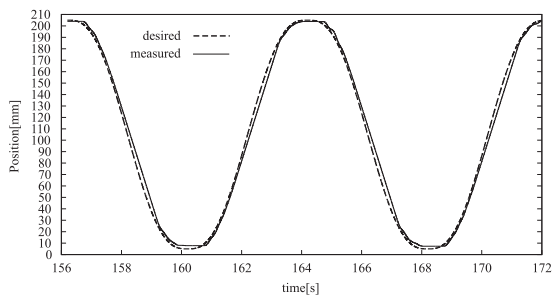
(a) CoP and virtual rotation axis in the 20-21st trial.



(b) CoP and virtual rotation axis in the 93-94th trial.



(c) surface tilt angle (roll direction).



(d) Lateral movement of the stool.

Fig. A.2 The movement of the virtual rotation axis and the seat surface movement

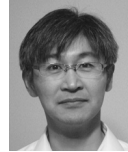
ドセルの値より計算した被験者の CoP の位置の変位である。仮想回転軸上に CoP があれば座面は回転しないが、実際にはモータの減速ギアの影響や実験の安全性を考えて制御ゲインを低めに設定しているため CoP の変位に対する回転の感度は高くなく、座面の回転はゆっくりである。CoP 位置は高周波ノイズが多く含まれているため、遮断周波数 0.5 Hz、2 次のバターフィルタを用いたゼロ位相フィルタ処理した結果を同時に記載した。Fig. A. 2 (a) では仮想回転軸に対し

フィルタ処理後の変位は位相が少し遅れてはいるが、学習するにつれ Fig. A. 2 (b) の後半のように CoP は小さい位相遅れで仮想回転軸に合わせて移動するようになる。

Fig. A. 2 (c) には座面の角度を、Fig. A. 2 (a) のフィルタ処理後の CoP 位置と共に示した。区間は Fig. A. 2 (a) と同じである。座面角度が ± 3 deg 以内とほぼ水平に保たれていることがわかる。また、(A. 1) 式が示すように CoP 位置変位の積分が角度変位と対応していることが観察できる。すなわち、CoP 位置がゼロとなる位置で角度変位がおおよそ極値をとっている。また、同様の区間での椅子の水平方向位置の目標値と実際の変位を Fig. A. 2 (d) に示す。加速度までの連続性を考慮し、目標軌道は 5 次多項式で与えている。これより加速度の大きさの最大値を計算すると 1.15 m/s^2 となる。

[著者紹介]

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、現在に至る。運動制御、ロボット工学などの研究に従事。工学博士。

石川 靖 明



2014 年岐阜大学工学部人間情報システム工学科卒業。同年、(株)デンソーウェーブ勤務、現在に至る。

佐々木 実 (正会員・フェロー)



1985 年東北大学工学部機械工学科博士課程修了。同年東北大学工学部助手。88 年宮城工業高等専門学校講師。90 年カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員教授。91 年岐阜大学工学部助教授、2003 年同教授。現在に至る。分布定数系の制御、柔軟系のインテリジェント運動制御に関する研究に従事。工学博士。