

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500237

研究課題名(和文) 平衡における運動学習と知覚補正に関する研究

研究課題名(英文) A study on balancing perception adjustment accompanying motor learning

研究代表者

伊藤 聡 (ITO, Satoshi)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：70291911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では平衡の運動学習に伴い平衡に関する知覚が変化することを実証した。座位状態での平衡実験用に、座面が不安定化するように回転し同時に全体が平行移動する椅子を製作した。運動学習では、側方向座面回転軸が仮想的に移動すると同時に平行移動で慣性力外乱を受ける状況を被験者に繰り返し提示した。平衡テストでは、被験者に側方向に傾斜した何通りかの姿勢を複数回とらせ、傾斜している方向の回答より、直立状態と感じる心理的直立姿勢を検出した。14名の被験者に対して実験を行った結果、運動学習後に心理的直立姿勢が運動学習を行う方向によって有意に異なった。これにより運動学習により平衡の知覚に変化が起きることが示された。

研究成果の概要(英文)：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.

研究分野：知能ロボット

キーワード：運動と知覚の学習 平衡制御 平衡感覚 知能ロボット

1. 研究開始当初の背景

運動におけるヒトの主な特徴は、「直立歩行」(平衡維持)が可能であること、そのおかげで移動に使わなくなった「手・腕を自在に操り」道具を使用することである。ヒトたる運動の研究はヒトの運動の理解とヒトに代わるロボットへ開発への一つの糸口となることは想像に難くない。

後者の範疇にある腕のリーチング運動に関しては、軌道生成やインピーダンスの研究の他に、運動学習という観点から研究が進められ、Force Field (粘性場外乱) 学習という手法が確立されてきた。近年、運動学習に付随して体性感覚が変化することが示された。

一方、前者の平衡維持では、軌道生成・制御、インピーダンス、運動学習の研究は行われているが、運動学習と知覚補正に関する研究についてはまだ報告がない。

申請者はこれまで立位平衡に対し、外乱下での適応的姿勢変化、規則的外乱下での姿勢変化の軌道学習、静的な平衡制御を利用した移動機構と制御に関する研究を行ってきた。これらは主に制御・学習という観点からの研究であった。リーチング運動に関しても軌道計画や学習・制御の研究がたくさん行われてきたが、運動学習が知覚に影響を与える事実の発見は、運動・感覚の統合的な学習がヒトの運動制御系で行われていることを示唆しており、これまで運動系に限定して行われた学習の枠組みの拡大を迫られるかもしれない画期的なことであると申請者は考える。

そこで、申請者らが行ってきた平衡維持においても同じような知覚の補正が運動学習に伴って観察されるのではと期待し、本研究テーマの着想に至った。

2. 研究の目的

(1) 平衡制御の運動学習では、リーチング運動での Force Field 学習に対応する決定的な実験手法が提案されていない。したがって、平衡の運動学習において、再現性が高く学習効果がしばらく維持されるような実験手法を新しく確立できるまでを目標とする。

(2) 被験者の安全性確保のため、本研究では立位ではなく、椅子上での座位姿勢に対する計測を計画している。座位姿勢での平衡において、被験者が「直立である」と感じる心理学的な姿勢を計測・表現する方法を確立するまでを目標とする。

(3) (1) および (2) を利用して、多くの被験者の Behavior level の計測をおこない、統計的に有意な平衡での運動学習に伴う知覚の補正を検出することを目標とする。

3. 研究の方法

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

子を作製した。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。

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図1に示す。被験者の上半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・システムを導入した。

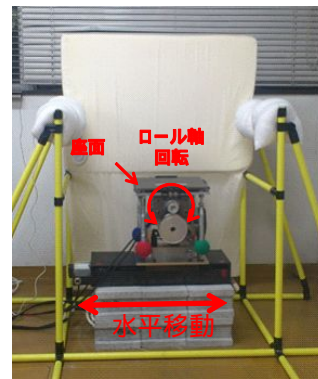


図1. 実験環境

実験手順は図2に示すように、平衡に関する運動学習と平衡知覚テストを交互に行い、運動学習による平衡知覚の変化が比較検出できるように計画した。



図2. 実験の手順

運動学習では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。この状態で被験者に対し、平行移動による慣性力および仮想的な座面ロール回転軸の変位という2種類の外乱を与える。後者の仮想的なロール回転軸とは、そこから被験者の CoP までの距離に比例した大きさで座面をシーソーのように回転させ不安定化させるための基準となる仮想的な線である。実験ではこのシーソーの中心に相当する回転軸の移動を制御により実現させる。実際には、仮想回転軸は中心より 5mm の地点から反対方向に 20mm の位置へ水平移動と同じ方向に 4s かけて 25mm 移動させた。これと同期して椅子全体を 20cm の幅で側方向に往復運動させた。この往復運動が前者の慣性力外乱を被験者

に与える。運動学習の様子を図3に図示する。被験者には上体を左右に動かすことで座面を水平を保つよう指示を与える。このとき、被験者に座面の傾斜状況を認知させるため、図3上のようなコンピュータ・グラフィックス(CG)画像をヘッドマウントディスプレイ(HMD)に同期表示させる。座面の水平を維持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けるのに加え、変位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。

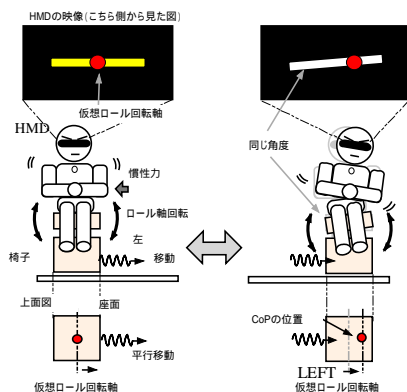


図3 運動学習

各運動学習ではこの試行を100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。

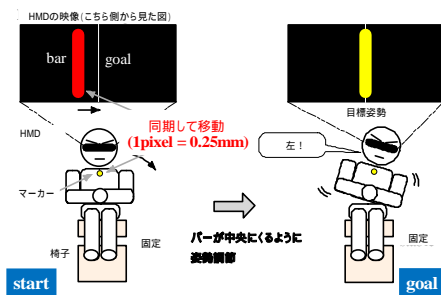


図4 平衡知覚テスト

一方、平衡知覚テストでは、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、図4に示すようにHMD画像に基づいて上体を左右に傾斜させ、目標姿勢を取らせる。このとき椅子の座面および位置は固定しておく。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。図4上に描かれた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。バーの画面中央にある細線が目標位置となる。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。

バーは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。この表示位置変位の結果、被験者がとる目標姿勢は、表示の変位とは反対方向に傾斜する。

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。したがって、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。その目標姿勢を維持した被験者に対して、「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。このテストを同じ手順で繰り返して得られた回答より、被験者が直立と感じる心理的な直立姿勢を推定する。

4. 研究成果

岐阜大学医学研究科倫理委員会の承認(25-234)のもと被験者を募り実験を行った。被験者は男女14名で、運動学習の方向による平衡感覚の違いを比較するため、7名ずつの2グループに分けて実験を実施した。「3. 研究の方法」で示した運動学習の効果であることを確認するため、敢えて何もせずに着座姿勢を5分間維持する状態を「運動学習1」として、通常の運動学習を行う「運動学習2」を開始する前に設定した。各運動学習の直前直後に設定されている3回の平衡知覚テストは3回とも同一の条件で行い、被験者の感覚変化を比較検知した。

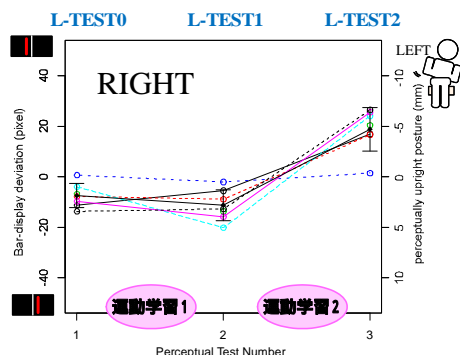
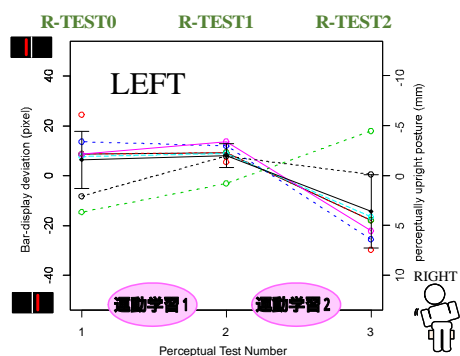


図5 平衡知覚テストの結果

3回の平衡知覚テストの結果を運動学習の方向ごとにまとめたグラフを図5に示す。上側のグラフは、運動学習が左方向の被験者の結果、下側のグラフは右方向の結果である。グラフの縦軸は、平衡知覚テストで検出した心理的直立姿勢を、各試行の開始時に設定するHMD上のバー表示の右方向変位量で数値化したものである。これをバーがHMD画面中央に到達したときの右方向へのマーカー位置変位に変換したものを、グラフの右側縦軸に目盛り付けしてある。横軸の1, 2, 3は平衡知覚テストの順番である。

グラフは各被験者の結果を線で結んで表示してあるが、その中で太い黒実線は平均値、バーは標準誤差を表している。グラフより運動学習の方向によらず運動学習1の前後では心理的直立姿勢に変化が起きないこと、一方運動学習2の前後ではその姿勢が変化していること、また、その変化の方向が運動学習の方向によって変わっていることが観察できる。

これらの変化に統計的な有意差があるのかを、運動方向における右(R)と左(L)の2水準と平衡知覚テストでのテスト0 (TEST0)、テスト1 (TEST1)、テスト2 (TEST2)の3水準に分類した計6群に対する統計分析を行った。最初に6群に対し2要因対応あり分散分析を行った。その結果、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った。運動学習1を行う前の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かった。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変化することがわかった。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た($p<0.01$)。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なかった。

これらの結果により、運動学習の効果により、それに関わる知覚が影響を受けることが、ヒトの平衡感覚に対しても見出されたと結論付けられる。これはすなわち、本研究の目的であった、平衡の運動学習に対する実験手法の確立、心理学的な姿勢を計測・表現する方法の確立、および、統計的に有意となるような平衡での運動学習に伴う知覚の補正の検出が達成できたことを意味する。

従来の研究では、学習については、運動なら運動、知覚なら知覚と閉じた範疇でしか研

究がなされてこなかった。その2つの間の作用に関し、知覚の変化によって運動が変化することは、機械系ではセンサ特性の変動で運動が変化することに対応し、ごく当然のことである。しかし、運動の学習によりセンサ特性が補正されることは「運動学習」の観点からは論じられてこなかった。本研究は、平衡維持という二足歩行を行うヒトにとっては本質的で基本的な動作に対して、運動学習の知覚への影響を実験レベルで検出できた点にインパクトがあると考ええる。

本研究では座位での平衡について取り扱った。実際、乗用車や電車などでヒトは動的状況下で座わる場面が多く存在する。また、高齢社会で車椅子上の座位での生活が必要な状況も増加する。ヒトの計測・制御特性を理解し、ヒトの知覚変化も統合して安定化させる技術は今後重要性が高まると考える。また工学的観点から、この知見をロボットの制御への応用することを考えた場合、ヒトと同じような知覚変化を実装したロボットは、ヒトとの共同作業やヒトの代役として働く状況でヒトと同じような振る舞いや、ヒトからの行動予測が立ちやすく点で有利である。本研究は、このような成果応用の礎となるものとして期待できる。

今後の展望としては、この研究で見出された平衡の運動学習による平衡知覚への影響の定量的評価と、それが実現されるメカニズムについて明らかにし、ヒトの動作生成のしくみを理解すると共にヒトと相性のよい実用機械・ロボット製作へと応用していくことが挙げられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

伊藤 聡, 石川 靖明, 佐々木 実: 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, 査読あり, Vol. 50, pp. 852-860, 2014, DOI:10.9746/sicetr.50.852

〔学会発表〕(計1件)

Satoshi Ito, Yasuaki Ishikawa, Minoru Sasaki: An Experiment to Detect Changes in Balance Perception Accompanying Balancing Task, SICE Annual Conference 2014, 2014 Sep. 9th, Hokkaido University (Sapporo, Hokkaido) DOI:10.1109/SICE.2014.6935192

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 聡 (ITO, Satoshi)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号: 70291911

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし