

令和 3 年 5 月 15 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2020

課題番号：16H02879

研究課題名（和文）運動系と知覚系の共学習を含むヒトの平衡制御原理の工学的理解

研究課題名（英文）Engineering understanding of control principle on human balance including simultaneous learning in motor and sensory systems

研究代表者

伊藤 聡 (Ito, Satoshi)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：70291911

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 7,100,000 円

研究成果の概要（和文）：ヒトの運動学習においては、環境変化に対し運動パターンを変化させる運動系の学習が注目される。ところが、同時に使用される感覚系の一部にも学習が起こり得ることがヒトの腕の到達運動で報告されていた。本研究では、このような運動系と感覚系の共学習がヒトの平衡制御にも起こると仮説を立て、それを発現しうる実験方法を確立した。さらに平衡制御時のヒトの振舞いを説明しうる制御モデルを構築し、ロボットにより再現させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通常われわれがセンサを利用するとき、最初に所定の物理量が正しく出力できるように初期設定/キャリブレーションを行い、その設定を維持したまま利用し続ける。しかし、本研究で取り扱うヒトの振舞いは、運動を学習しながらセンサ系も微調節を行っていることを示唆している。この発見は、今後ヒトに似た振舞いをする親しみやすいロボットの実現に貢献するだけでなく、ヒトの運動系・感覚系がどのような仕組みで機能しているのかを理解する上で重要な情報を提供する。

研究成果の概要（英文）：Human motor learning is featured as the variation of motor patterns with respect to the environmental changes. Recently, a study of human arm reaching movement reported that, in addition to such a learning on motor system, a part of the sensory system that is utilized in the current motor control can be affected by a kind of learning. Then, this study set a hypothesis that this simultaneous learning of the motor and sensory systems can take place in human balance control, and established an experimental method for simultaneous learning to emerge. Furthermore, a theoretical model was constructed to explain the human behaviors in the balance control, which was replayed using a robot we manufactured.

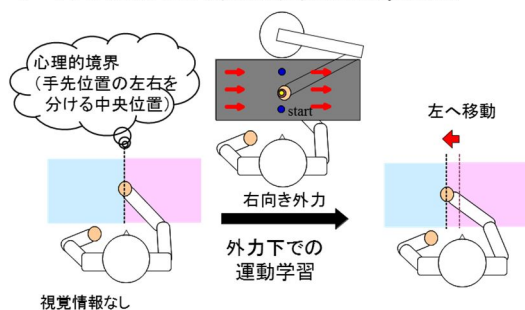
研究分野：知能ロボティクス

キーワード：知能ロボット 平衡制御 運動計測 運動学習 知覚変化

1. 研究開始当初の背景

ヒトの運動の特徴は、環境に合わせてそのパターンを変えていく適応・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を中心に、軌道計画や制御戦略、インピーダンス調節などの研究が行われてきた。近年、環境変化に対応するための運動学習が運動パターンだけでなくヒトの体性感覚（例えば手先の位置感覚）にも影響を与えることが明らかになった(Ostry ら, 2010, J. Neuroscience)。その研究では、Force Field(粘性場外乱)という学習パラダイムの前後で、左右を分ける(中央と感じる)手先位置(体性感覚)が、受けた力と逆方向に移動することが示された(上図)。

リーチング運動における体性感覚変化(Ostryら2010)



しかし、運動学習の影響を受けるのは、体性感覚に限定されるものであろうか。そのような問いかけのもと、これまで研究対象としてきた平衡制御においても同様の現象が起こると予想し、先行研究(基盤研究(C):H24-H26)においてその実証を試みた。そこでは被験者の安全性を考慮し平衡制御実験を座位状態で行うため、平行移動と座面回転が可能な椅子を製作した。上体を左右どちらかに傾斜させるような周期外乱下での運動学習後、直立と感じる姿勢が、外乱方向により有意に変化することを発見した(伊藤, 石川, 佐々木:2014)。

運動に伴い知覚すなわちセンサ系も同時に適応的变化を起こす現象の報告はまだ数が少なく、報告されたとしても視覚に関連したものが多かった(Brown ら(2007), Malfait ら(2008), Cressman ら(2009))。本研究が対象とする平衡制御に関しては、視覚と姿勢変化に関する研究(Isableu ら(2003), Tia ら(2012), Barra ら(2012))はあるが、運動の「学習」と関連して実際のヒトの平衡知覚がどのように変化しているかを対象とした研究ではなかった。

2. 研究の目的

上述の先行研究での成果は現象の発見に留まる定性的なものがあった。そこで本研究では、実験時の計測情報をより詳しく分析し、知覚変化と運動学習を定量評価することで研究の質を深める。そして、ヒトの平衡における運動制御・感覚情報処理を解明し、平衡に関する制御機構の数理モデルの構築を目指した。具体的には目標を以下に設定した。

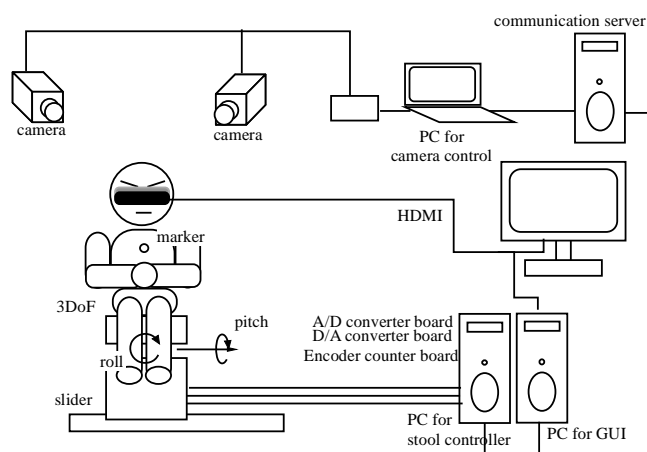
平衡制御におけるヒトの行動の特徴を定量評価し、数値化する。

数値化されたヒトの行動の特徴を説明する数理モデルを構築する。

ロボットによる実世界での実現により、妥当性の検証を行う。

3. 研究の方法

平衡の運動と知覚に関するヒトの行動を、実験時の安全を考え、座位状態で計測する。平衡の運動学習と知覚変化を計測するには、被験者に平常時の「直立」とは異なる状態を維持させるような環境条件をあたえ続ける必要があると考え、右のような実験装置を構築した。この実験装置には側方向への平行移動とロール軸周りの座面回転が可能な椅子を取り入れている。この2つの自由度を同時に利用し、状態を側方向に倒していなければ平衡を維持できない状況を被験者に提供する。

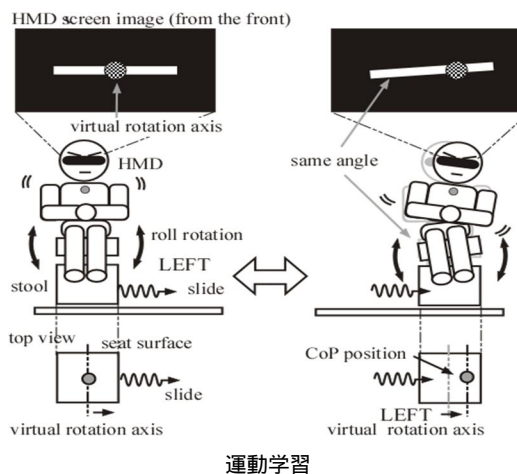


具体的には、ロール軸回転に「仮想回転軸」を導入する。実験装置での物理的なロール回転軸は座面中央の真下に存在する。しかし、実際の回転は仮想回転軸と椅子にかかる重心すなわち CoP (Center of Pressure: 圧力中心) の位置関係に依存して起こるように制御する。例えば仮想回転軸が右側にあれば、被験者の重心が中央にある場合でも左側に回転を起こすことになる。この仮想回転軸を椅子の平行移動と同期させ、左右のどちらかに片寄せでゆっくりと振動させる。被験者には座面を水平に維持するように指示すると、被験者は平衡を維持するために上体を仮想回転軸に合わせて動かす必要が出てくる。仮想回転軸を右側に動かし、被験者が右側に傾ける必要がある外乱を右方向外乱と定義す

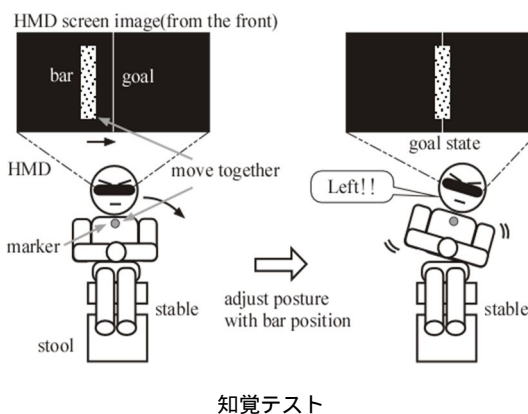
る。各被験者には、仮想回転軸による回転外乱がない対照実験と左右どちら方向かの外乱のある本実験を、椅子の左右平行移動振動1往復を1試行としてそれぞれ100試行「運動学習」として行う。

この運動学習の前後に、被験者が垂直と感じる姿勢を「知覚テスト」として測定する。この姿勢は物理的な直立姿勢とは異なる認知的なものであり「主観的直立姿勢」と呼ぶことにする。本研究ではこの主観的直立姿勢を平衡感覚の評価基準として用いる。その計測のため、被験者には水平の固定した座面の上で上体を真っすぐ伸ばした状態で左右様々な角度に傾けた姿勢をとってもらふ。その姿勢は、被験者に装着したヘッドマウントディスプレイ(HMD: head-mounted display)により指示する。すなわち、HMDに被験者の左右の動きに同期して動く縦棒を表示し、被験者にはその棒がHMDの中央にくるように姿勢をとってもらふ。この表示の初期位置を変えることで被験者の取る姿勢を操作できる。被験者にはその姿勢において左右のどちらに傾いているか、左右の二択で回答してもらふ。この回答を統計処理することで、主観的直立姿勢を推定する。

この実験において、知覚テストを対照実験の前と本実験前後の計3回行う。その変化の様子を定量的に評価して、それを再現するような数理モデルを構築する。シミュレーションによりそのモデルの妥当性が検証できた場合、ロボット実験により、同じような主観的直立姿勢変位が現実世界で再現可能であることを実証し、ヒトの平衡制御/学習の制御モデルとしての可能性を主張する。



運動学習



知覚テスト

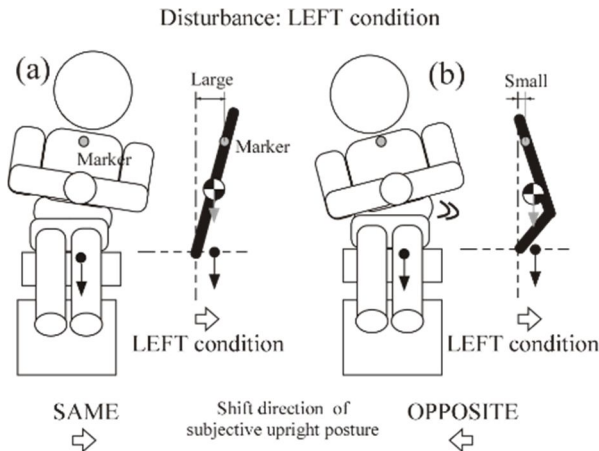
4. 研究成果

(1) 平衡における知覚変化の定量評価

これまでの研究成果として、対照実験に静止した座面にただ座っている状態を設定し、本実験と比較したところ、主観的直立姿勢は対照実験では変化せず、本実験では外乱とは逆方向に変化するという結果を得ていた。この場合、本実験と対照実験を比較すると、平衡移動と仮想回転軸移動の2つの外乱が加わっている。主観的直立姿勢の変化に重要な条件を限定するため、対照実験に仮想回転軸移動は与えずロール軸を固定したまま椅子を平行移動させる条件を設定し、仮想回転軸移動が主観的直立姿勢変化の重要な要因であることを実証する実験を最初に行った。

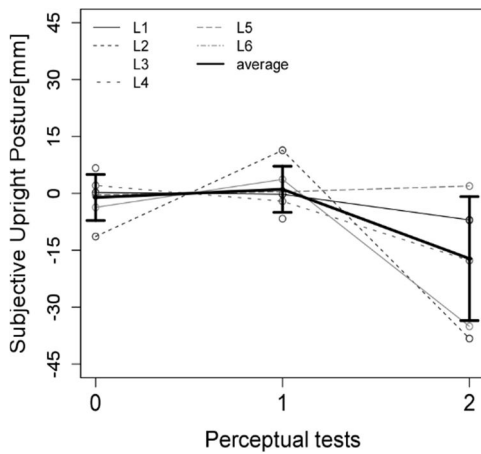
予想通り、主観的直立姿勢は対照実験では変化せず、本実験でのみ変化を起こした(Kumagai et al, 2015)。ところがその変化の方向が前回の実験とは逆で、外乱と同方向であった。この予想とは異なる事態に対し、今回と前回の差異が対照実験のみであることを鑑み、対照実験に平行移動で頭部の動きが少なくなるよう工夫したり、静止状態で視覚的外乱を与えたり、条件を変えてその理由を突き止めようとした。しかし、予想した方向への主観的直立姿勢の変化は観察されなかった。

そこで、主観的直立姿勢の変化の方向は、対照実験ではなく、運動学習の方法にあるのではと考えるようになり、運動学習時の被験者の姿勢を解析することにした。その結果、左方向外乱に対し、図(a)のように運動学習時に上体を真っすぐにした状態で平衡維持した被験者は、外乱と同方向に主観的直立姿勢が変化する傾向があることが分かった(Kumagai, Morita, Ito, 2017, 熊谷, 森田, 伊藤, 2017)。これについて実験での検証を試みてはいるが、上体を真っすぐにしたまま平衡を維持するように被験者に指示を与えるとタスクの難易度が上昇するのか学習が十分進んだデータが数多く取得できず、まだ検証できていない。

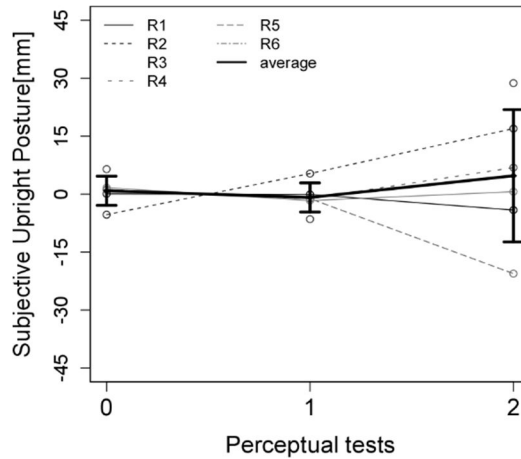


(2)数理モデルの構築

対照実験がロール回転軸固定での平行移動の場合の主観的直立姿勢の変化を、左右それぞれの外乱に対して6人の被験者に対して計測した結果を図に示す。左図が左方向外乱、右図が右方向外乱の場合であり、知覚テスト(perceptual test)0が対照実験前、1が本実験前、2が本実験後である。グラフは、各被験者で知覚テスト0と1の平均が0となるように並べ替えている。左右2方向×知覚テスト3つの6データ群の平均に対して分散分析を行った結果 $p=0.0312<0.05$ となり有意差を検出し、また Tukey 法により、知覚テスト2の左右方向間で有意差($p=0.0125$)があることが分かった。

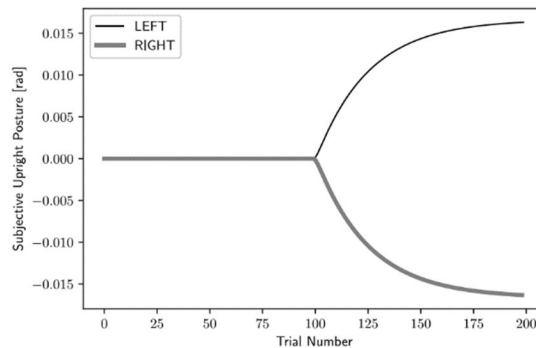


(左方向外乱)



(右方向外乱)

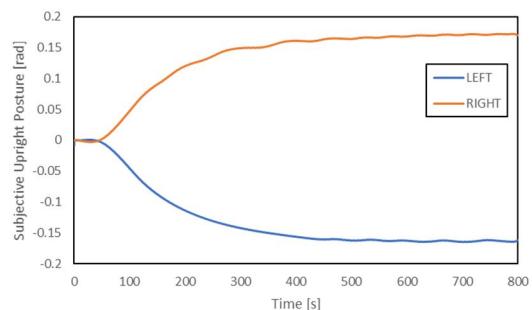
(1)の考察により、これは運動学習時の姿勢が(a)のようであるとして、得られた主観的直立姿勢変化を定量的に再現する数理モデルを構築した (Ito, Tomabechi, Morita, 2019, 2021)。そのモデル化にあたり、「主観的直立姿勢は現在平衡を維持している運動の平均的な姿勢を直立と解釈するように変化する」と仮説をたて、その仮説に従った学習を数式化した。座位状態の被験者はベースを含めた3リンク系でモデル化し、平衡維持は反力中心点のフィードバック制御を導入した。数値シミュレーションにより、得られた結果を図に示す。グラフでは主観的直立姿勢の変化が角度(rad)で示されているが、実験時のマーカが根元の関節から50cm上方についていると仮定するとその変位は8mmとなり、ヒトの測定結果と同じくらいのオーダーとなる。



(3)ロボットによる実験



提案した数理モデルをロボットに実装し、実空間でも同じような現象を再現できることを示した。作成したロボットを左図に示す。数理モデルと同じ3リンクであり重量1.6kg、全高0.46m、ベースリンクの全幅0.15m、CoPを計測できるようベースリンクの4隅にはロードセルを取り付けた。これを実際に被験者に対して実験を行っている椅子に載せ、同じような条件で動作させたときの、ロボットの主観的直立姿勢の変化を下図に示す。ヒトに比べてロボットは小型であるため、変位による評価はできないが、数理モデルと定性的に同じ変化が再現されている。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 KUMAGAI Satoshi、MORITA Ryosuke、ITO Satoshi	4. 巻 53
2. 論文標題 Analysis and Evaluation of Equilibrium Motor Learning in Seated State and Its Relation to Accompanying Perceptual Changes in Subjective Upright Posture	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 654 ~ 662
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.53.654	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ito Satoshi、Tomabechi Kazuya、Morita Ryosuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Perceptual adaptation during a balancing task in the seated posture and its theoretical model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biological Cybernetics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00422-021-00873-x	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tomabechi Kazuya、Morita、Ryosuke、Ito、Satoshi
2. 発表標題 Computer Simulation of Human Perceptual Changes During Balancing Task on the Laterally Sliding Stool with Unstable Surface
3. 学会等名 Proc. of SICE Anual Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 苔米地、森田亮介、伊藤聡
2. 発表標題 側方向に移動する不安定座面上でのバランス維持動作とそれに付随するヒトの知覚変化の数理モデルの提案
3. 学会等名 第40回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Kumagai, Ryosuke Morita, Satoshi Ito
2. 発表標題 An Evaluation of Equilibrium Motor Learning in the Seated Posture Based on the CoP and the Trunk Motion
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Satoshi Kumagai, Ryosuke Morita, Satoshi Ito
2. 発表標題 An experiment on perceptual adjustments of the upright sitting posture according to balancing motions
3. 学会等名 Life Engineering Symposium 2016 (LE 2016)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------