

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：10107

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K04191

研究課題名(和文) 数値モデルによる姿勢制御における表面体性感覚の付与の効果の解析

研究課題名(英文) Analysis of the effect of stimulating surface somatosensation on postural control with mathematical model

研究代表者

千葉 龍介 (Chiba, Ryosuke)

旭川医科大学・医学部・准教授

研究者番号：80396936

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は立位姿勢維持における感覚、特に表面体性感覚の刺激(ライトタッチ)の効果を実験的に考察した。被験者には視覚(閉眼)・前庭感覚(直流前庭刺激)を行った状態で表面体性感覚を刺激することでその効果を計測した。新型コロナウイルス感染症の影響で十分な被験者実験ができず、被験者は3名となった。各感覚入力条件における被験者の足圧の移動量は、どの感覚条件でも有意に重心動揺が減少することにはなかった。しかしながら、表面体性感覚の刺激の効果には個人差があることを結果は示しており、より多くの被験者実験をするとともに被験者のスクリーニングが必要であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

前庭感覚の直流刺激がある条件では、表面体性感覚の刺激による姿勢の分散の減少は見られず、重みの変化もほぼなかった。この結果から従来信頼度に基づく線形の重みづけ和であると考えられていた姿勢制御における感覚統合が、非線形もしくは相互作用のある系での統合である可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：This study quantitatively examined the effects of sensory, especially superficial somatosensory stimulation (light touch), on the maintenance of upright posture. The effects were measured by stimulating superficial somatosensory sensations in subjects with visual (closed eyes) and vestibular (Galvanic vestibular stimulation) sensations. The number of subjects was limited to three, as the COVID-19 prevented sufficient subjects from participating in the experiment. The amount of foot pressure movement of the subjects in each sensory input condition did not significantly reduce the centre of gravity sway in any of the sensory conditions. However, the results showed that there were individual differences in the effects of surface somatosensory stimulation, indicating the need for more subject experiments and subject screening.

研究分野：生体医工学

キーワード：姿勢制御

1. 研究開始当初の背景

ヒトの日常生活において最も基本的かつ重要な運動の一つに姿勢制御が挙げられる。特に立位を維持することは生活の質(Quality of Life: QoL)を向上するためにも重要であるが、高齢者や障害者には容易でないことも多い。それゆえ、リハビリテーションや日々の体操の第一歩ともなっている。この姿勢制御においても「感覚」は非常に重要である。一般的に運動性制御において、感覚情報から自己身体の状態や環境に対する相対的位置を知覚し、適切な運動を生成している。ヒトの姿勢制御で用いられる感覚は複数存在し、視覚・前庭感覚・深部体性感覚(固有感覚)・表面体性感覚(皮膚感覚)と言われている。視覚は外部環境と自身の頭部との相対的位置・速度・加速度を得ている。前庭感覚は頭部の加速度を得ている。固有感覚は筋や腱の長さなどから足首などの関節角度・角速度を感知し自身の身体状態の情報を得る。また、皮膚感覚は足底の圧力を感知し自身の身体状態の情報を得ている。これらの感覚情報は独立に運動に用いられているのではなく、統合されて用いられていると言われている。すなわち、感覚情報の低減は姿勢制御に重大な影響を及ぼすと共に、ある感覚が低減されるとしても他の感覚を適切に用いることで回復可能であると言える。

しかしながら、姿勢制御における感覚の統合方法やそれぞれの感覚の使われ方は詳しくわかっていない。加齢や障害による感覚の低減に対し、如何なるトレーニング、補助器、アドバイスによって姿勢制御の回復をもたらすかを知ることは重要な課題であると言える。その課題に対し、本研究課題では表面体性感覚(皮膚感覚)に着目する。なぜなら、他の感覚に比べ研究が少なく、その使われ方が不明な部分が多いからである。その一方、杖や手摺りへの接触、介助者からの軽い接触などにより障害者などの重心動揺が減少した報告がいくつかある。すなわち、表面体性感覚による姿勢変化の機序を知ることでリハビリテーションやトレーニングにおいて適切な補助が可能となる。

2. 研究の目的

上記の学術的背景に基づき、本研究課題では「数値モデルによる姿勢制御における表面体性感覚の付与の効果の解析」を目的とする。数値モデルを用いることにより定量的な効果を示すことが可能となると考える。

表面体性感覚の付与を数値モデルの観点から考えると次の2種の仮説が考えられる。それは、接触によって「身体の揺れ(動揺)を感覚情報として付与している」、「感覚統合における表面体性感覚の重みを増加させている」である。これに関し、接触では垂直に大きな力を付与しないことから身体を支える効果は非常に小さい。しかし、身体が揺れた時、水平方向に力が働き接触点(接触面)において摩擦が生じる。この摩擦が自身の身体の動揺を検知する効果があるのではないかと、という仮説である。これに関し、現在感覚統合の研究では、各感覚はその信頼度に基づいて重み付けをされて用いられているという考え方が主流である。ヒトは発達や訓練によってこの重みを適切に変更することによって、その時の運動に必要な感覚を使っており、例えば滑る床の上を歩くときには足底部の感覚を重視する。すなわち、接触によって表面体性感覚の重みが増加することで足底部などの情報が強化され、効果を発揮するという仮説である。本研究課題では、これらの仮説の検証を行うとともに数値モデルにより接触の効果を定量化する。

本研究課題は、脳神経科学とシステム工学の融合により、感覚統合と姿勢制御への影響の理解に対する新たな理論構築を行うという意味で学術的独自性が高い。すなわち、既存の学問分野の枠に収まらない融合領域の研究課題である。また、感覚統合の数値モデルを用いることによって、表面体性感覚の影響を定量的に明確化するという点において、極めて重要かつ斬新な研究である。

更に得られたモデルとその効果から、感覚がどのように脳神経系で処理されているかを解明するための仮説を与えることになると同時に、リハビリテーションへの貢献という意味でも医学的意義は大きい。リハビリテーションにおいては、その障害の大きさに応じて表面体性感覚の影響も変化することが予想されることから、障害者の感覚状態を推定するマーカにもなり得る。また、感覚付与による感覚障害の代償可能性を論じる重要なモデルとなり得ることから、社会的意義や注目も極めて大きいと言える。

3. 研究の方法

上記の仮説を検証し、表面体性感覚を定量化するため、以下の課題遂行プロセスを行う。

● 感覚変容実験系の構築

障害者は多様性が大きすぎることから、健常者による静止立位を維持する姿勢制御実験を行う。表面体性感覚を付与する方法として次の3種を提案する。i)被験者自身による外部環境接触(Active Light Touch; ALT), ii)被験者に対する外部の人からの接触(Passive Light Touch; PLT), iii)被験者に装着した機器からの振動(Mechanical Light Touch; MLT)。様々な感覚状態での姿勢制御において、これらの接触を行う。具体的には、視覚・前庭感覚・深部体性感覚に対し、それぞれ開閉眼、前庭直流刺激、腱振動を加えることにより、横方向(左)への姿勢の変化

を促すことができる。ii), iii)の接触の場所は横方向に移動量の大きい背中与移動量の少ない足首とする。すなわち、接触方法3種、感覚状態8種類、接触点2種の組み合わせで実験を行う。この時、足圧中心、主な姿勢筋の筋活動、接触点の3軸方向の力を計測する。

以上の実験により以下の結果が予想される。表面体性感覚の付与による身体の移動量の補正量から、その接触の効果が定量化できる。また、接触方向および摩擦方向の力と補正量の関係に正の相関があれば仮説1、なければ仮説2が有力となると考えられる。同様に接触箇所による補正量の差異がない場合、これも仮説2が有力となる。

更に、得られた結果から感覚と姿勢・筋活動という入出力関係を明らかにする。これは脳神経科学の観点から「感覚の付与・喪失と筋緊張制御の関係」に対する仮説と洞察をもたらす可能性がある。小脳から脳幹網様体に投射する筋緊張制御が姿勢制御に及ぼす影響は大きく、小脳が感覚入力を処理していることもあり、脳神経科学にとって非常に興味深いと言える。

● 数理モデルによる表面体性感覚の定量化

感覚付与による姿勢の変容を数理モデルによって説明する。ここでは、従来研究から各感覚の信頼度から来る重み(w_i)とそれらの感覚が与える推定姿勢(c_i)の積が線形和されたものが自身の推定姿勢(C)となると考える。すなわち、自身の推定姿勢は $C = \sum w_i c_i$ となる。ここで仮説1では、接触により新たな c_i が加わることとなり、他の c_i が減少する。仮説2では接触により表面体性感覚の w_i が増加し、他の感覚の w_i が減少することになる。上記の各感覚を変化させた姿勢制御実験を行い、これらのパラメータを最適化手法によって推定する。

以上をまとめると、本研究課題では表面体性感覚付与の機序の仮説を調査し、その仮説に基づいた数理モデルを用いて、各接触方法を定量的な評価により明らかにする。

4. 研究成果

新型コロナウイルス感染症の影響で十分な被験者実験ができず、被験者は3名となった。各感覚入力条件における被験者の足圧の移動量の平均を図1に示す。表面体性感覚を刺激するライトタッチに着目すると、どの感覚条件でも有意に重心動揺が減少することはなかった。しかしながら、個人に着目すると被験者1,2は重心動揺が減少したのに対し、被験者3は重心動揺が増加していた。これは表面体性感覚の刺激の効果に個人差があることを示しており、より多くの被験者実験をするとも被験者のスクリーニングが必要であることがわかった。

また、図2に各感覚状態における重心位置の変化を示す。この結果から表面体性感覚を付与したことにより姿勢が後傾していることがわかる。しかしながら、閉眼やGVSによって傾いた姿勢を補正する効果は見られなかった。特にMTLは後傾および左右傾斜補正のどちらの効果もほとんど見られず、無接触と変化がなかった。更にALT・PLTともに接触点の摩擦力と左右傾斜補正に相関が見られなかった。

以上の結果から本研究では仮説1である「感覚統合における表面体性感覚の重みを増加させている」を支持した結果と言える。ただし、繰り返しになるが被験者数の不十分さが招いた結果である可能性は否めない。

筋活動の計測結果ではGVSによる全身の筋緊張の亢進が観察された。全身の筋活動の平均値はおよそ1.4倍になっており、かつまた、どのライトタッチによっても筋緊張の低下は観察されなかった。これは過去の研究・実験と同じ傾向にあり妥当であると考えられる。

数理モデルによる解析を行った結果、GVSによる前庭刺激なしの条件ではライトタッチによる総経路長の分散減少が観察され、重み w_i が増加する結果となった。これに基づき、仮説2の考慮を踏まえると、ライトタッチによる姿勢の後傾が重心の安定を与えることになったことが表面体性感覚の効果であると言える。しかしながらGVSによる前庭感覚の刺激がある

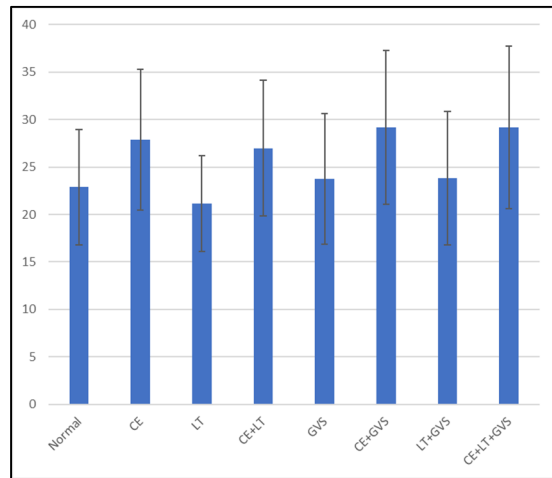


図1 各感覚状態における足圧中心の軌跡長：CEは閉眼、LTは表面体性感覚刺激、GVSは前庭直流刺激を表す。

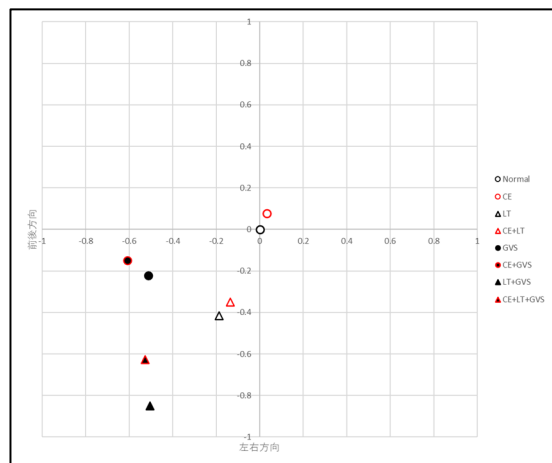


図2 各感覚状態における足圧中心の平均位置：CEは閉眼、LTは表面体性感覚刺激、GVSは前庭直流刺激を表す。

条件では、ライトタッチによる姿勢の分散の減少は見られず、重みの変化もほぼ無かった。この結果から従来信頼度に基づく線形の重みづけ和であると考えられてる姿勢制御における感覚統合が、非線形もしくは相互作用のある系での統合である可能性が示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kaminishi Kohei, Chiba Ryosuke, Takakusaki Kaoru, Ota Jun	4. 巻 76
2. 論文標題 Investigation of the effect of tonus on the change in postural control strategy using musculoskeletal simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Gait & Posture	6. 最初と最後の頁 298 ~ 304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gaitpost.2019.12.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kaminishi Kohei, Jiang Ping, Chiba Ryosuke, Takakusaki Kaoru, Ota Jun	4. 巻 14
2. 論文標題 Postural control of a musculoskeletal model against multidirectional support surface translations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0212613
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0212613	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Kazunori, An Qi, Yozu Arito, Chiba Ryosuke, Takakusaki Kaoru, Yamakawa Hiroshi, Tamura Yusuke, Yamashita Atsushi, Asama Hajime	4. 巻 12
2. 論文標題 Visual and Vestibular Inputs Affect Muscle Synergies Responsible for Body Extension and Stabilization in Sit-to-Stand Motion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnins.2018.01042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ryosuke Chiba
2. 発表標題 Postural Control Modelling on Dual Task for Elder and Parkinson's Disease to Insight Hyper-Adaptation
3. 学会等名 the 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千葉龍介
2. 発表標題 システム設計における生理学的理解と生理学的理解のためのシステム同定
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千葉龍介， 上西康平， 高草木薫， 太田順
2. 発表標題 ヒトの姿勢制御解明を目指す構成論的アプローチによるシステム同定
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kaminishi, P. Jiang, R. Chiba, K. Takakusaki, J. Ota
2. 発表標題 Musculoskeletal Simulation for Determining Influences of the Magnitude of Sensory Noise and Stiffness on the Selection of Hip or Ankle Movement Strategies
3. 学会等名 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------	---------