

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：34449

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26870746

研究課題名(和文) 周期的床振動時の立位姿勢制御に対する外乱視覚刺激の影響

研究課題名(英文) Effects of perturbed visual stimulation on postural control during periodic floor oscillation

研究代表者

伊禮 まり子 (Irei, Mariko)

大阪保健医療大学・大阪保健医療大学 保健医療学部・講師

研究者番号：30711311

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：立位姿勢に対する外乱として有効な視覚刺激方法を確立し、周期的床振動時における視覚刺激の提示が、姿勢制御様式および感覚情報処理に及ぼす影響について検討した。視覚刺激の回転角度が大きいほど、また、回転速度が遅いほど、自己運動錯覚が生じ、姿勢応答が生じるものと考えられた。床振動時に視運動刺激を提示した場合、若年者では顕著な変化が見られなかったのに対し、高齢者では姿勢動揺の増大が観察された。加えて、高齢者では、視覚刺激時点の事象関連電位の振幅が大きく、視運動刺激に対する注意が増大する傾向がみられた。これらの結果は、高齢者における多感覚再重みづけ能力の低下を表すものと推察された。

研究成果の概要(英文)：We established an effective visual stimulation method that causes disturbance to the standing posture and examined the effects of visual stimulation on postural control and sensory information processing during periodic floor oscillation. As the rotational angle of the visual stimulation increases and the rotational speed becomes slower, the self-motion illusion occurs, and it was considered that the postural response more occurs. When the visual-motion stimulation was presented during the floor oscillation, young subject did not show remarkable changes in postural stability, whereas elderly showed increased postural fluctuation. In addition, in the elderly, the amplitude of the event related potential at the time of visual stimulation was large, suggesting that the attention to the visual stimulation tended to increase. These results presumably represent a decrease in the ability of multi-sensory re-weighting in the elderly.

研究分野：複合領域

キーワード：姿勢制御 視覚 事象関連電位 外乱

1. 研究開始当初の背景

立位姿勢制御において、視覚器、固有受容器および前庭器からの感覚入力、周囲の環境に対する自己の位置および身体分節間の位置関係に関する情報をもたらす。変化する環境の中で、感覚情報の信頼性に応じて感覚入力の重み(感覚入力の重要度)を調節する能力は、姿勢制御を最適化するために極めて重要である(Horak and Macpherson, 1996)。多くの研究者が、感覚の重みづけの証拠を得るために、各種の外乱刺激を負荷したり、感覚情報を変化させた場合の姿勢応答をもとに検討を行ってきた(Nashner et al., 1982; Oie et al., 2002; De Nunzio et al., 2005; De Nunzio and Schieppati, 2007; Sozzi et al., 2011)。健常高齢者および転倒傾向のある高齢者では、動的な視覚環境に対する姿勢動揺の増加が認められ、多感覚再重みづけ能力の低下が示唆されている(Haibach et al., 2009; Eikema et al., 2012)。一方、Jeka et al.(2006, 2012)は、転倒傾向のある高齢者においても、時間をかければ感覚情報を適切に再重み付けすることができることを報告している。これらの研究では、感覚重みづけの評価方法として身体動揺の振幅や定量モデルを用いており、脳内活動を直接とらえた証拠は得られていない。

動的姿勢制御における感覚情報の寄与について検討するために、前後方向への周期的な床移動外乱(以下、床振動)を負荷する方法が多く用いられてきた(Dietz et al. 1993; De Nunzio and Schieppati, 2007; Fujiwara et al., 2012)。視覚情報の寄与については、開眼時と閉眼時を比較することで検討されており、開眼時には頭部や体幹を空間中に安定させるために視覚情報が積極的に用いられることが示唆されている(Fujiwara et al., 1988; Buchanan and Horak, 1999; Corna et al., 1999)。我々は、周波数0.5Hz、振幅2.5cmでの周期的床振動課題において、感覚情報への注意および運動準備状態を、脳電位を用いて評価することを試みてきた(Fujiwara et al., 2012; Irei and Fujiwara, 2013)。Fujiwara et al. (2012)は、閉眼での床振動課題中に事象関連電位を測定し、適応後にはすべての被験者において床の前方変曲点付近での姿勢制御に焦点が当てられ、特に前方変曲点付近で生じる体性感覚(筋感覚)情報に注意が強く向けられていることを明らかにした。Irei and Fujiwara (2013)は、視覚誘発電位を指標として、床振動時の視覚情報処理の様相を捉えることを試みた。姿勢制御に有効な垂直縦縞模様(Amblard et al., 1980; Isableu et al., 1997)を、振動周期の特定の時点で40ms間のみ提示したところ、視覚情報処理は頭部動揺が最大となる時点で最も活発になされることが示唆された。このように、周期的床振動課題では、信頼できる感覚情報に適切に重みづけがなされているものと推察される。

一方、床振動課題中に外乱となるような感覚刺激を負荷した研究は、極めて少ない。De Nunzio et al. (2005)は、0.6Hzでの床振動中に種々の姿勢筋へ90Hzの振動刺激を持続的に負荷したが、開眼・閉眼のいずれにおいても姿勢動揺の顕著な増加は認められなかった。彼らは、周期的に得られる筋感覚情報により固有感覚への外乱刺激の効果が減衰すると推察し、バランスの保持に重要な時点で外乱刺激を負荷することが姿勢の不安定化に効果的である可能性を述べている。我々は、予備実験において、上述した床振動課題中に斜めの縞模様を1周期に500ms間のみ提示した場合に、10度以下の傾斜では姿勢外乱とならず、20度~30度の傾斜縞が姿勢外乱となることを観察した。また、傾斜視覚刺激を1周期毎に提示しているにもかかわらず、大きな姿勢動揺が生じるのは2~3周期に1回であった。加えて、時間的分解能および空間分解能が比較的高く、簡易に大脳皮質における血行動態を評価できる近赤外線分光法(Obrig and Villinger, 2003; Fujiwara et al., 2012)による局所脳血流量を測定したところ、外乱となる視覚刺激の提示に伴い視覚野の血流量が減少する者が認められた。これについては、視覚刺激が有用でなく、むしろ侵害刺激である場合に、その視覚情報処理を抑制した結果であると考えられた。この予備実験において、傾斜縞刺激により動揺の増加を示したのはごく少数の被験者のみであった。その要因として、傾斜縞の視覚刺激が姿勢外乱を誘発するのに不十分であったことが考えられた。静止している被験者の周りの視覚環境が回転するような場合には、身体が左右へ傾斜するような自己運動錯覚が生じ身体動揺を引き起こされるが、その刺激としては連続的に変化する刺激が一般的に用いられている(Dichgans et al., 1972; Previc et al., 1993)。床振動時にも、連続的に変化する視覚刺激を用いることで、多くの被験者で姿勢動揺を誘発できるものとする。その際の視覚への重みづけの変化は、事象関連電位、視覚誘発電位、および局所脳血流量を指標として評価できるものとする。

2. 研究の目的

本研究では、外乱として有効な視覚刺激方法を確立すること、および、周期的床振動時における外乱視覚刺激の提示が、姿勢制御様式および感覚情報処理に及ぼす影響について検討することを目的とする。

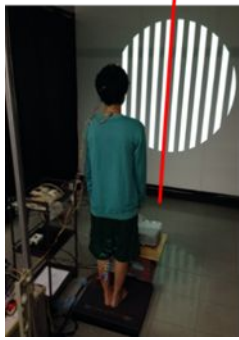
3. 研究の方法

本研究は、2つの実験からなる。

【実験1】

視運動刺激の回転角度と回転速度の変化が姿勢応答に及ぼす影響

(1) 対象者選出のための予備実験



安静立位持



視覚刺激持

図1 実験風景(実験1)

無作為に選出した健康若年成人 37 名を対象に、開眼、閉脚立位にて視覚刺激を与えた。視覚刺激は、直径 160cm の円形で、幅 7cm の白黒縦縞模様とし、被験者の 2m 前方の白い壁にプロジェクターを用いて投影した。視覚刺激は、Microsoft PowerPoint 2013 にて作成した。暗室にし、周辺視野を遮るために暗幕をかけた所で実験を実施した。視覚刺激として、この縦縞を 5deg/s の速さで、左右方向へ 20° 回転させた(図 1)。これらの刺激により、目視にて明確な姿勢応答が確認された 12 名(男性 4 名、女性 8 名)が本実験に参加した。

(2) 対象者

予備実験で動揺が見られた 12 名(男性 4 名、女性 8 名、平均年齢 20.3±1.1 歳)が測定に参加した。すべての被験者は、神経学的および整形外科的障害を有していなかった。実験プロトコルについての説明の後に、ヘルシンキ宣言に従って、すべての被験者からインフォームドコンセントを得た。

(3) 装置とデータ記録

前後および左右方向の足圧中心(それぞれ CoPap および CoPml)の動揺を検出するために、3 つのロードセルから成る床反力計を用いた。視覚刺激の開始時点は、フォトセンサーでとらえた。後の分析のために、すべての電気信号は A/D コンバーターを介し、分解能 16bit、サンプリング周波数 1000Hz にて、コンピュータに取り込まれた。さらに、CoPap および CoPml の信号は、安静立位位置の±1 cm の範囲を被験者に提示するためのブザー発生器にも送られた。

(4) 実験手順

全ての測定は、裸足にて閉足で踵の位置をラインに合わせ、かつ腕を体側に垂らして実施した。初めに、開眼で安静立位姿勢における CoPap と CoPml の位置を測定した。安静立位を 10 秒間保持する試行を 5 回行い、その平均値を安静立位位置とした。

被験者は、縦縞を見たまま、ブザー音を手掛かりに CoPap と CoPml を安静立位±1 cm の範囲に保ち、立位姿勢を 5 秒間保持した。続いて、2~4 秒後に視覚刺激を負荷した。この一連の刺激を、縦縞の回転角度(5°、10°、15°、20°)と視覚刺激の回転速度(5°/s、10°/s、15°/s、20°/s、25°/s)と変えた各条件をそれぞれ 6 試行ずつ繰り返した。いずれの条件においても、刺激を左右ランダムに提示した。回転終了後も縦縞模様の画像は傾斜させた状態とし、5 秒後に 0° に戻した。条件の順番はランダムとした。すべての被験者は、5~6 条件毎に、座位で 3~5 分程度の休憩をとった。

(5) データ分析

安静立位の平均位置±3SD を超える CoPml の偏倚を姿勢応答とみなし、縦縞の傾斜と同方向への応答を「同側応答」、反対方向への応答を「対側応答」とした。各条件において、全被験者の総試行数に対する各応答の出現率を算出した。

【実験 2】

周期的床振動時における視覚刺激の提示が姿勢制御および感覚情報処理に及ぼす影響

(1) 被験者

被験者は、健康若年成人 11 名(男性 6 名、女性 5 名、平均年齢 21.5±2.1 歳) および健康高齢者 6 名(男性 3 名、女性 3 名、平均年齢 67.3±6.5 歳)であった。すべての被験者は、神経学的および整形外科的障害を有していなかった。実験プロトコルについての説明の後に、ヘルシンキ宣言に従って、すべての被験者からインフォームドコンセントを得た。

(2) 装置とデータ記録

実験 1 と同様に、CoPap および CoPml を測定するために床反力計を用いた。その床反力計は、前後方向へ正弦波状に、振幅 2.5cm、周波数 0.5Hz にて振動する振動台の上に設置された(図 2)。振動台に取り付けられたポテンシオメーターを用いて台の位置を記録し、周波数測定器を用いて周波数を測定した。

シャッターゴーグルを用いて、両眼視にて全視野刺激を行った。シャッターゴーグルの液晶パネルは、通電時には透明になり外界の視覚情報が提示され、非通電時には乳白色となり視覚情報が遮断される。シャッターの開閉の制御は、信号発生器を用いて行った。シャッターは、床の位置をトリガとして 500ms 間開放した。視覚刺激となる視角 2 度の白黒縦縞模様が、被験者の 1.5 m 前方の白い壁に、プロジェクターを用いて投影された。シャッターが開放したときに提示される画像は、静止した縦縞模様、ないし 10°/s で左右へ回転する画像(視運動刺激)とした。

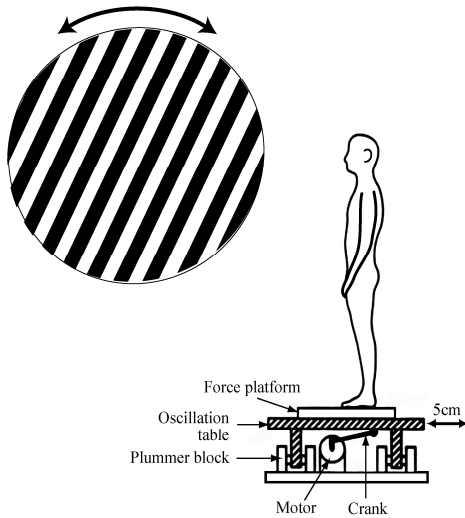


図2 床振動装置と視覚刺激（実験2）

脳波を記録するため、銀 - 塩化銀電極（直径 8mm）を、国際 10-20 法に基づく頭皮上の Fz、Cz、Pz、Oz、O1、O2 部位に取り付けた。参照電極は両耳朶に取り付けた電極を連結したものとし、接地電極を Fpz に取り付けた。電極の入力抵抗は 5 k 未満とした。眼球運動に伴うアーチファクトをモニターするために、眼電図を左眼の上下に取り付けた電極から導出した。

すべての電気信号は A/D 変換器を介して、サンプリング周波数 1000Hz、分解能 16 ビットにてコンピュータへ送られた。これとは別に、CoPap の信号は、A/D 変換器を介してサンプリング周波数 20Hz、分解能 12 ビットにて別のコンピュータへ送られた。

(3) 実験手順

すべての課題において、被験者は床反力計上で裸足にて足の内側を 10cm 離れた状態で課題を遂行した。被験者は、床振動時には両上肢を体側で下垂して立位を保持し、意図的に膝関節および股関節を屈曲せず、足の位置を変えずにリラックスした立位姿勢を保持するよう指示を受けた。また、眼球運動に関連したアーチファクトが脳波へ混入するのを防ぐために、意図的な眼球運動を最小にするよう、被験者に指示した。初めに、床振動刺激への適応の影響を除外するために、閉眼での 60 秒間の床振動試行が、各被験者において少なくとも 5 試行実施された (Fujiwara et al., 2012)。次に、視覚刺激条件下での床振動試行が行われた。視覚刺激は、床の前方ないし後方変曲時点（前方、後方）を挟んで 500ms 間とし、静止画像または視運動刺激が提示された。視覚刺激条件は、すべて 2 試行ずつ行われた。

(4) データ分析

各試行について、床振動開始に伴う外乱の

影響を除くために、振動開始の 10 秒後から 50 秒間のデータを分析対象とした (Fujiwara et al., 2012)。床振動試行中の CoPap 動揺の平均速度 (CoPap 速度) が、オンラインにて、5 点の重みづけ移動平均を用いて算出された (Fujiwara et al., 2007)。

閉眼条件については、適応後の試行を分析に用いた。視覚刺激条件については、2 試行を合わせて加算した。閉眼条件では、前方変曲時点の 1500ms 前から 500ms 後までの 2000ms (1 周期) ずつが、視覚刺激条件では、シャッター開放時点の 1500ms 前から 500ms 後までの 2000ms (1 周期) ずつが、重複なく抽出された。脳波と眼電図については、1 周期の平均値をベースラインとした。それらの 1 周期内の変動が $\pm 100 \mu V$ を越えた場合、その周期における全てのデータを加算対象から除外した。Cz 電極より記録された波形を ERP の分析に用いた。ERP の陰性ピーク時点、陽性・陰性ピーク間振幅、およびシャッター開放時点（視覚刺激時点）の振幅を求めた。

4. 研究成果

【実験 1】

(1) 結果

各条件における姿勢応答の出現率を図 3 に示す。同側応答出現率は、 $5^\circ/s \sim 15^\circ/s$ 条件において、回転角 20° で 90% 以上と極めて高い値であった。回転角 20° では、どの速度においても同側応答が 70% 以上であり、他の回転角に比べて有意に高かった。また、 $5^\circ/s$ 条件において、いずれの回転角においても同側応答が 60% 以上であり、他の速度条件よりも比較的高い値であった。

(2) 考察

視運動刺激によって誘発された自己運動感覚は、刺激の運動方向と逆方向に回転する錯覚を引き起こす (Dichgan et al., 1972)。それに対する補償応答として、視覚運動パターンと同じ方向に身体動揺が生じることが報告されている (Previc et al., 1993)。本研究においても、視運動刺激と同側への姿勢応答の出現率が最も高く、先行研究と同様の現象が観察された。

視運動刺激中の姿勢動揺は、被験者が自己運動感覚を知覚しているときに大きかったと報告されている (Tanahashi et al., 2007)。本研究では、同側応答の出現率が回転角 20° で最も高かったことから、回転角 20° では自己運動感覚が大きく生じていたと推察される。Bringoux et al. (2016) の研究において、The Rod-and-Frame Test を実施した際に、フレームが $18^\circ \sim 28^\circ$ 傾いた場合に自覚的垂直軸のずれが最も大きく生じると報告されている。また、國弘ら (2004) は、自覚的垂直軸の変化が、視運動刺激によって生じる自己運動感覚ときわめて密接な関係を有していると述べている。これらのことから、本研究で用いた回転角 20° の視運動刺激は、姿

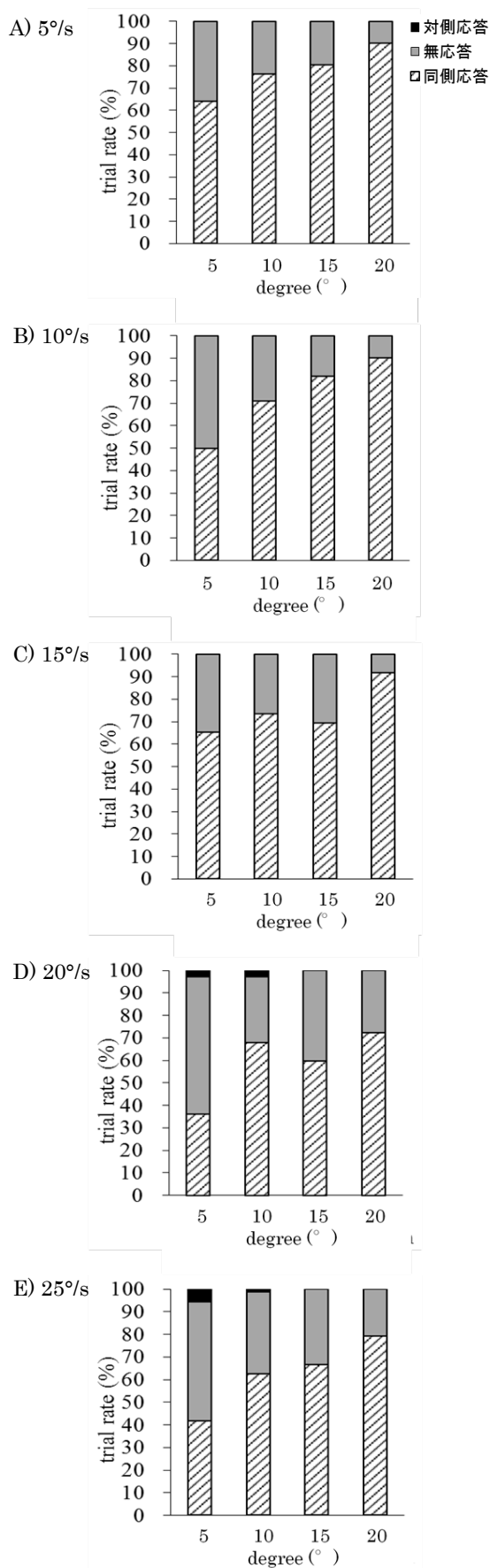


図3 姿勢応答の試行割合

勢応答を引き起こしやすい刺激であったと考えられる。

同側応答の出現頻度は、どの回転角においても 5°/s 条件で高い傾向が認められた。Dichgan et al. (1972) によると、視運動刺激時間が 0~3 秒間で指標の運動、1~10 秒間では自己と指標両者の運動、5~10 秒以上では自己の運動と認識されると報告されている。5°/s 条件における刺激時間は、いずれも自己と指標の両者の運動と認識される時間である。一方、25°/s 条件における刺激時間は、いずれも 1 秒未満である。それゆえ、視覚刺激が指標の運動として認識され、自己運動感覚が生じなかったと推察される。

本研究結果より、視運動刺激による姿勢応答には、刺激の回転角度と回転速度の両方が影響していることが明らかとなった。視覚刺激の回転角度が大きいほど、また、回転速度が遅いほど、自己運動錯覚が生じ、姿勢応答が生じるものと考えられた。

【実験 2】

実験 1 の結果をもとに、床振動時に 500ms 間の視覚刺激で姿勢動揺を引き起こしうる視運動刺激を採用し、視覚刺激が床振動時の姿勢制御と感覚情報処理に及ぼす影響について検討を行った。

(1) 結果

閉眼条件における CoPap 速度は、若年者および高齢者において、試行の反復に伴い有意に減少した。適応に要した試行数は、若年者で 5~10 試行、高齢者で 5~8 試行であった。CoPap 速度は、若年者および高齢者において、閉眼時に比べて垂直線を提示した場合に顕著に減少した。一方、視運動刺激の提示では、若年者では垂直線の場合とほぼ同等の値を示したのに対し、高齢者では垂直線の場合よりも顕著に増大し、閉眼時とほぼ同等の値となった。

閉眼時の ERP の陰性ピークは、若年者では、床の前方変曲点または後方変曲点付近に多く認められた。高齢者では、ピークの位置にばらつきが認められた。ERP ピーク振幅は、閉眼時と視覚刺激時とで顕著な違いが認められなかった。視覚刺激時点の ERP 振幅は、若年者では、提示する視覚刺激の種類によらず、閉眼時のピーク振幅よりも顕著に小さい値であった。一方、高齢者では、多くの被験者において視運動刺激の提示時に大きな値を示し、その値は閉眼時のピーク振幅とほぼ同等であった。

(2) 考察

本研究で用いた視運動刺激は、0.5Hz の床振動時に周期的に付加することから、500ms 間という短時間の刺激であった。加えて、閉眼にて床振動に十分適応したのちに視覚刺激を行ったため、若年者にとっては視運動刺激が外乱になりにくかったものと考えられ

る。一方、高齢者では、短時間の視運動刺激でも姿勢動揺が増大したことから、若年者に比べてより視覚に依存していることが推察された。

ERP 振幅の結果より、若年者では、提示する視覚刺激の種類によらず、視覚提示時点にはそれほど注意が向けられていないことが示された。注意が向けられる対象を本研究では明らかにすることができないが、先行研究 (Fujiwara et al., 2012) より、注意は床振動外乱に伴い生じる筋感覚情報に向けられている可能性が考えられる。一方、高齢者では、視運動刺激に対して強く注意が向けられていることが示された。視運動刺激は姿勢外乱を引き起こしうるため、姿勢の安定性のためには、視覚への注意はむしろ抑制されるべきであろう。高齢者におけるこのような脳活動の様相は、多感覚再重みづけ能力の低下に関係しているのかもしれない。今後は、高齢者における姿勢制御と脳活動の適応的变化について検討を重ねることで、多感覚再重みづけ能力についてより明らかにすることができると考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

伊禮まり子, 藤原勝夫, 矢口知恵, 清田直恵: 感覚誘発電位および事象関連電位の記録方法. Health and Behavior Sciences 15(2): 75-81, 2017, 査読あり

〔学会発表〕(計1件)

伊禮まり子, 藤原勝夫, 外山 寛: 視運動刺激が立位姿勢制御に及ぼす影響. 日本健康行動科学会第14回学術大会, 2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊禮 まり子 (IREI, Mariko)

大阪保健医療大学・保健医療学部・講師

研究者番号: 30711311