

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K09847

研究課題名(和文) 仮想現実と前庭感覚代行技術を用いた次世代ハイブリッド前庭リハビリテーションの開発

研究課題名(英文) Development of the next-generation hybrid vestibular rehabilitation using virtual reality and vestibular substitution device

研究代表者

佐藤 豪 (SATO, Go)

徳島大学・病院・講師

研究者番号：30464358

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、一側前庭機能障害患者はメニエール病患者や健常人より速度ロンベルグ率が有意に高く、姿勢制御に対する視覚依存性が亢進していることを明らかとした。また我々は健常人に対して仮想現実による視覚外乱を行い、姿勢制御の視覚依存性を低下させて感覚再重み付けを誘導する至適条件を明らかとした。さらに、下顎振動刺激装置を併用することで、視覚外乱に対する装用効果を明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一側前庭障害患者は、姿勢制御に対する視覚依存性が亢進しているため視覚外乱により転倒しやすい。本研究により、仮想現実による視覚外乱を反復刺激することで、姿勢制御に対する視覚依存性が低下し、感覚再重み付けが誘導されることが明らかとなった。さらに、このリハビリテーションに感覚代行できる下顎振動刺激装置を併用することで、めまい患者の姿勢を安定化できる可能性がある。仮想現実と感覚代行技術を融合した前庭リハビリテーションは、難治性めまい患者の姿勢制御を改善させる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：We confirmed that the Romberg's ratio of patients with unilateral vestibular function disorder were significantly higher than that with healthy subjects and Meniere's disease, resulting in the increased visual dependence for posture control. Healthy subjects were given visual vestibular conflict using virtual reality. So, we determined the optimum condition that induced the sensory reweighting by decreased visual dependence for posture control. Furthermore, we demonstrated that the wearing effect of TPAD for posture control during visual conflict.

研究分野：めまい平衡

キーワード：前庭リハビリテーション 感覚代行 仮想現実 感覚再重み付け 平衡障害 視覚依存 体性感覚依存 ウェアラブルデバイス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

一側性前庭障害に対して前庭代償を促進する前庭リハビリテーションが有効であるとのエビデンスが示されている。これまでの前庭リハビリテーションは、主に順応と慣れを利用するものであったが、経験に基づいて行われており、理論的根拠が乏しく標準化されていなかった。さらに、前庭リハビリテーションの効果が乏しい難治例の存在が問題であった。

ヒトの姿勢制御は、視覚・前庭感覚・体性感覚からの情報が中枢神経系で統合処理されることで行われる。姿勢制御に関わるこれらの感覚情報の重み付けは、環境、身体活動、疾患により変化し、sensory reweighting (感覚再重み付け) と呼ばれる。これまで、前庭障害患者は姿勢制御に対する視覚依存性が亢進しているとされているが、疾患によって姿勢制御に対する sensory reweighting の進行が異なる可能性がある。

我々は、これまで HMD (ヘッドマウントディスプレイ) 法や CAVE (投影スクリーン) 法によるバーチャルリアリティー (VR) により、仮想空間で視覚・前庭情報不一致刺激 (visual vestibular conflict: VVC) 刺激を負荷したタスクを行わせると、静的姿勢制御の視覚依存性が低下することを明らかとした。しかし、これまでの HMD 法や CAVE 法では没入感に乏しく、動揺病の一つである VR 酔いを引き起こす問題点があった 1)。

さらに我々は、躯幹の傾斜度を振動情報に変換して口角部にフィードバックする下顎振動刺激装置を開発した。下顎振動刺激装置は、前庭情報のひとつである頭部の傾斜情報を、下顎の振動によって感覚代行し、中枢神経系へ伝えることによって平衡障害を改善させることができる 2)。

VR と前庭感覚代行技術を融合した前庭リハビリテーションにより、姿勢制御における視覚、前庭覚、体性感覚依存の再構築を行い、視覚外乱に対して安定した姿勢制御を獲得できると考えられる。

2. 研究の目的

- (1) 前庭疾患の種類によって、姿勢制御の sensory reweighting の特徴を明らかとする。
- (2) 次に新しい HMD を用いた VR 刺激を開発し、VR 酔いを発症しない VVC 刺激の至適条件を明らかとする。
- (3) さらに、健常人に対する HMD を用いた VR と下顎振動刺激装置を用いた前庭感覚代行技術を融合した前庭リハビリテーションの安全性の確認と視覚依存性と体性感覚依存性に対する効果を明らかとする。

3. 研究の方法

- (1) 慢性の一側性前庭機能障害 (28 例) メニエール病 (23 例) 健常人 (30 例) に対してラバー負荷重心動揺検査を行い、姿勢制御に対する視覚依存性と体性感覚依存性について Dizziness Handicap Inventory (DHI) とともに比較検討した。
- (2) 次に、VR を用いた VVC 刺激が、姿勢制御に与える効果と動揺病 (VR 酔い) への影響を検討するために、ハードウェアとして最新の HMD と VVC 刺激を負荷できるソフトウェアの開発を行った (図 1)。被験者は、HMD の仮想空間内に現れるボールを手でつかみ、箱に入れる動作を繰り返す。その際、実際の手や頭部の動きと HMD に映る手と空間の動きに遅延を生じさせた。健常人 10 名を対象とした。刺激条件は、遅延 0.2 秒、0.3 秒、0.4 秒をそれぞれ 4 分間刺激し、3 日間連続で行った。刺激前後で重心動揺検査および動揺病の指標である Graybiel score を検査前後で調べた。

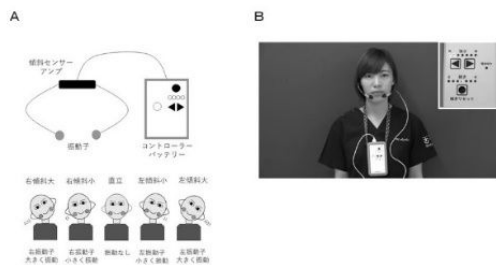
図 1

HMDを用いたVRによるVVC刺激



(3) さらに頭部の傾斜情報を下顎の振動刺激としてフィードバックする装置を用いた(図2)。後頭部に設置された頭部傾斜センサー部には加速度計が搭載され、コントローラーの中にあるプロセッサとUSBで連結されている。頭部傾斜センサーで感知された重力加速度ベクトルから得られた体の偏倚・傾き情報は、プロセッサへ送られ、同部位で記号・符号化されて、口角部とインターフェイスする左右の2個の振動子へ電気信号として送られるように設計されている。振動子は頭部の傾斜角度に応じて下顎に振動を与え、正確な頭部傾斜情報を身体にフィードバックする。

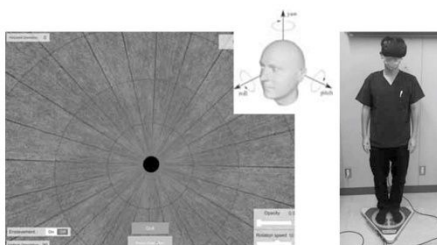
図 2



健常人 23 名を対象とし、ラバーフォームによって体性感覚入力を遮断した状態で、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を装着 VR による optokinetic 刺激(OKS)を行い、視覚外乱による軀幹の左右への動揺を引き起こす負荷を与える(図3)。同時に被験者には、前庭情報を振動覚に変換する下顎振動刺激装置を装着させ、前庭感覚を代行させる。健常人を対象に OKS を与えて左右方向に動揺させ、かつ VR 酔いが少ない最適な条件を設定した。次に我々が開発した下顎振動刺激装置を用いて、健常人に対して上記条件で OKS を 5 回反復刺激した。

図 3

VRによるOptokinetic stimulation (OKS)下の重心動揺検査

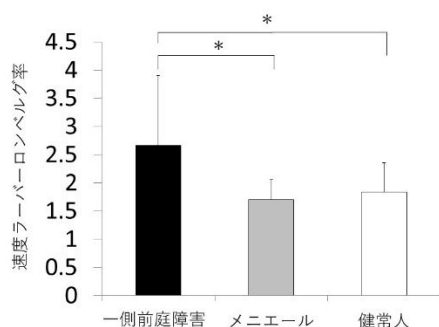


本研究は徳島大学病院生命科学・医学系研究倫理審査委員会の承認を得た。

4. 研究成果

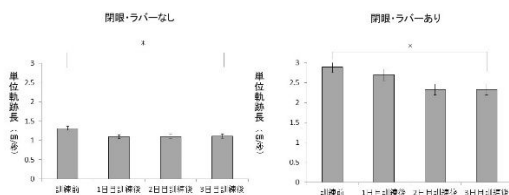
(1) 一側性前庭機能障害患者とメニエール病患者は健常人と比較して開眼、閉眼時の重心動揺面積は有意に大きかった。一側性前庭機能障害患者のラバーロンベルグ率(視覚依存性)はメニエール病患者や健常人と比較して有意に大きかったが(図4) 閉眼ラバー比(体性感覚依存性)は3群間で有意差はなかった。視覚・体性感覚依存性がともに高い症例は、ともに低い症例と比較してDHIと重心動揺検査が有意に小さかった。慢性の一側性前庭機能障害患者では視覚依存性を高くして姿勢を安定化させるように sensory reweighting が誘導されている可能性が考えられた。さらに、一側性前庭機能障害患者の中でも、視覚・体性感覚依存度がともに高まると、めまいのQOLが改善することが示唆された。一側性前庭機能障害では体性感覚依存度を高める平衡訓練を行うことでめまいの自覚症状をさらに改善できるのではないかと考えられた。

図4



(2) 健常人に VVC 刺激を3日間連続で行うと、重心動揺検査の閉眼時の単位軌跡長が有意に低下した(図5)。3日間連続で刺激するとラバーロンベルグ率が徐々に低下した。一方、全例がVR刺激を完遂し、VR酔いのために中止した症例はなかった。遅延時間が長いほど Graybiel score が大きくなる傾向を認めた。HMD法によるVVC刺激による平衡訓練は、静的姿勢制御の視覚依存性を低下させ、感覚再重み付けを誘導することで姿勢を安定化させると考えられた。遅延時間を徐々に延ばしたVVC刺激を反復することでVR酔いの発症を予防できる可能性がある。

図5



(3) ラバーフォームによって体性感覚入力を遮断した状態で、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を装着VRによる optokinetic 刺激(OKS)を行い、視覚外乱による躯幹の左右への動揺を引き起こす負荷を与えた結果、速度 20°/秒、反転時間 10 秒が左右方向の重心動揺を最も誘導し、VR酔いの視標である Simulator Sickness Questionnaire が低値であった。次に我々が開発した下顎振動刺激装置を用いて、健常人に対して上記条件で OKS を5回反復刺激した。下顎振動刺激装置を装着した状態で重心動揺検査を行ったところ、重心動揺の左右方向の速度が有意に低下した。一方、訓練前後の姿勢制御に対する感覚依存性には変化を認めなかった。以上から、

視覚外乱による動揺に対して下顎振動刺激装置を装用すると姿勢制御が安定することが明らかとなり、臨床応用できる可能性がある。一方、HMDによるOKS反復刺激に下顎振動刺激装置を融合した平衡訓練が、姿勢制御に対する感覚再重み付けを誘導するかどうかさらなる検討が必要と考えられた。

引用文献

1. S. Nishiike, N. Takeda., et al.: The effect of visual-vestibulosomatosensory conflict induced by virtual reality on postural stability in humans. *J. Med. Invest.*60: 236-239, 2013.

佐藤 豪: 両側性前庭障害に対するTPADによる感覚代行を用いた平衡訓練. *Equilibrium Res.* 80: 210-215, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐藤 豪
2. 発表標題 Sensory substitution therapy using tilt perception adjustment device (TPAD) for the patients with bilateral vestibulopathy
3. 学会等名 第79回日本めまい平衡医学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松岡百世、佐藤豪、福田潤弥、松田和徳、武田憲昭
2. 発表標題 Virtual realityによるvisual vestibular conflict刺激の反復刺激が姿勢制御に与える影響
3. 学会等名 第79回日本めまい平衡医学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 豪、松田和徳、福田潤弥、和田佳郎、山中敏彰、北原紘、武田憲昭
2. 発表標題 難治性めまい症例の歩行に対する傾斜感覚適正化装置による平衡訓練効果—光学式3次元動作分析による評価—
3. 学会等名 第78回日本めまい平衡医学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石谷えみ、佐藤豪、松田和徳、福田潤弥、戸村美紀、武田憲昭
2. 発表標題 一側性前庭障害患者の姿勢制御に対する視覚依存と体性感覚依存の検討—健常人、メニエール病患者との比較—
3. 学会等名 第78回日本めまい平衡医学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤豪、松田和徳、福田潤弥、和田佳郎、山中敏彰、北原紘、武田憲昭
2. 発表標題 難治性平衡障害に対する前庭感覚代行技術を用いた平衡訓練の効果
3. 学会等名 第120回日本耳鼻咽喉科学会総会
4. 発表年 2019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
研究分担者	武田 憲昭 (TAKEDA Noriaki) (30206982)	徳島大学・大学院医歯薬学研究部(医学域)・教授 (16101)	
研究分担者	松田 和徳 (MATSUDA Kazunori) (60721785)	徳島大学・大学院医歯薬学研究部(医学域)・徳島大学専門 研究員 (16101)	

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
---------	---------