

[研究助成 (C)]

脊椎圧迫骨折高齢者の立位バランスを向上させる 視覚フィードバックシステムの開発

2237003



研究代表者
(助成金受領者)

京都橋大学 大学院健康科学研究科 博士後期課程／日本学術振興会特別研究員DC2

澤 井 舜

共同研究者

京都橋大学 健康科学部／京都橋大学 大学院健康科学研究科

准教授 中 野 英 樹

京都橋大学 大学院健康科学研究科

博士後期課程大学院生

藤 川 翔 也

京都橋大学 大学院健康科学研究科

博士後期課程大学院生

山 本 涼 介

[研究の目的]

脊椎圧迫骨折は高齢者に頻発する脆弱性骨折の1つであり、その多くはバランス能力低下に起因する転倒によって生じている。現在までに、脊椎圧迫骨折高齢者の立位バランスに対する介入として、バランス機能訓練、下肢機能訓練などの運動療法の効果が検証されてきた [1]。しかしながら、高齢者の転倒は予防できておらず、さらなる効果的な介入方法が求められている。これに対して、特に近年様々な感覚情報を使用したフィードバックトレーニングの効果が検証されている。しかし、高齢者は脳機能や注意機能が低下し、意識的な運動の制御が困難になるため、表在感覚や固有感覚のフィードバックは効果が小さいことが示唆されている [2]。そのため、本研究は高齢者でも理解しやすい視覚情報を用いた重心動揺即時フィードバックシステムを開発し、その効果を検証する。

本研究は検証1から検証3で構成された。まず検証1では、開発した視覚フィードバックシステムを使用し、視覚フィードバックが健常若年者の立位バランスに及ぼす影響を検証した。次に検証2では、視覚フィードバックを付与した条件と付与しない条件の脳波を比較し、視覚

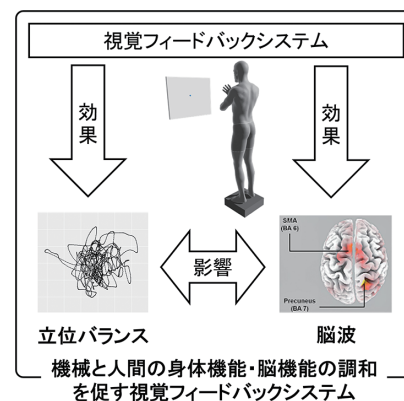


図1 本研究課題の概要

フィードバックが立位バランス時の神経活動に及ぼす影響を検証した。そして検証3では、健常高齢者と脊椎圧迫骨折高齢者を対象として、視覚フィードバックが立位バランスに及ぼす影響を比較した。これらの検証1から検証3を実施し、重心動揺即時視覚フィードバックを用いることで、機械と人間の身体機能・脳機能を調和させた転倒予防を構築することを目的とした(図1)。

[研究の内容, 成果]

検証1：視覚フィードバックシステムが健常若年者の立位バランスに及ぼす影響

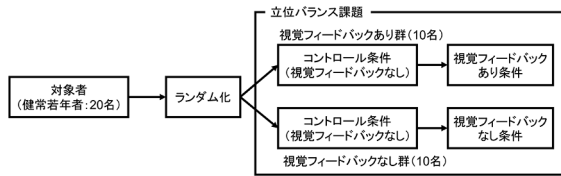


図2 研究デザイン（検証1, 2）

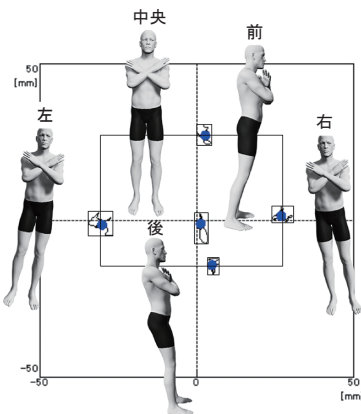


図3 IPSの測定方法

本検証は、健常若年者20名を対象とした。全ての対象者に立位バランス課題を実施させ、それに対する視覚フィードバックの効果を検証した。

研究デザインはランダム化比較試験とし、全ての対象者に視覚フィードバックを付与しないコントロール条件での立位バランス課題を実施させた後、ランダムに視覚フィードバックなし群と視覚フィードバックあり群に群分けした。そして、各群に対応した条件で再度立位バランス課題を実施した（図2）。

立位バランス課題には、軟性フォームラバーを敷いた重心動揺計上で実施する姿勢安定度評価指標（Index of postural stability ; IPS）を採用した。IPSは、静止立位での重心動揺を測定した後、前、後、右、左に最大に重心を移動させた姿勢での重心動揺をそれぞれ10秒ずつ測定する [3]（図3）。

そして、各方向の重心動揺データから、重心位置を保持する能力を反映する重心動揺面積と、重心を前後左右へ安定して移動させる能力を反映する安定性限界面積を算出し、以下の式

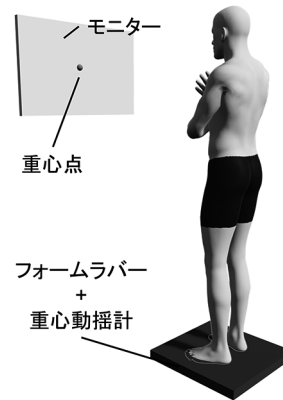


図4 IPSの測定環境と視覚フィードバックシステム

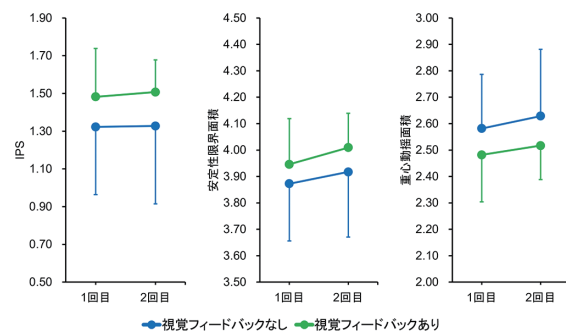


図5 健常若年者における重心動揺の比較

でIPSを算出した。IPSは値が高いほど、立位バランス能力が高いことを示す指標である。

$$IPS = \log \frac{\text{安定性限界面積} + \text{重心動揺面積}}{\text{重心動揺面積}}$$

この時、対象者の前にはモニターを設置し、視覚フィードバックあり条件では重心動揺計で測定した重心位置をリアルタイムに即時的に表示した（図4）。一方で、コントロール条件と視覚フィードバックなし条件では、モニターはホワイトアウトした状態で、重心位置は表示しなかった。

統計解析では、群（視覚フィードバックなし群、視覚フィードバックあり群）と時間（1回目、2回目）による2要因反復測定分散分析を実施し、IPS、安定性限界面積、重心動揺面積を比較した。統計解析にはSPSSバージョン30を使用した。

解析の結果、視覚フィードバックなし群は1

回目から2回目（視覚フィードバックなし条件）でIPSが0.4%上昇した。一方で、視覚フィードバックあり群は1回目から2回目（視覚フィードバックあり条件）でIPSが1.7%上昇した。しかし、有意な交互作用や主効果は認めなかった（ $p > 0.05$ ）。

先行研究ではバランス能力が高い対象者では、視覚フィードバックの効果が顕在化されないことが報告されている[4]。そのため、本検証の対象者である健常若年者は立位バランス能力が高かったことでパフォーマンスの条件間差異を生じなかった可能性がある。

検証2：視覚フィードバックが脳波に及ぼす影響

本検証では、検証1の立位バランス課題実施時に測定した脳波を視覚フィードバックなし群と視覚フィードバックあり群で比較し、視覚フィードバックを付与することによる脳波活動への影響を明らかにすることを目的とした。

比較する脳波は、各群の2回目の条件時とし、視覚フィードバックなし群の視覚フィードバックなし条件、視覚フィードバックあり群の視覚フィードバックあり条件とした（図2）。脳波は脳波計（Polymate Pro, ミユキ技研社）とアクティブドライ電極システムを使用して記録した。また、脳波は国際10-20法に則った19チャンネル（Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2）で記録し、サンプリングレートは1,000 Hzとした。基準電極とアース電極は左耳朶に装着した。記録した脳波は、EEGLABを使用してバンドパスフィルター（0.5～50 Hz）、512 Hzへのダウンサンプリングを適用した。また、独立成分分析を実施し、瞬きや筋活動などのノイズを除去した。そして、exact low-resolution brain electromagnetic tomography（eLORETA）を使用して、三次元電流密度分布を推定した。統計解析では、各ボクセルの θ 周波数帯域（6.5～8.0 Hz）と α 周波数帯域（8.5～12 Hz）の活動を対応のないF検定

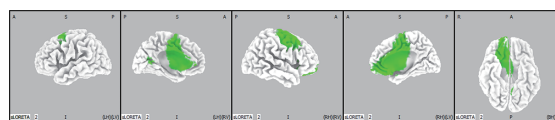


図6 θ 波活動の群間比較
（緑の領域：視覚フィードバックあり群で低活動）

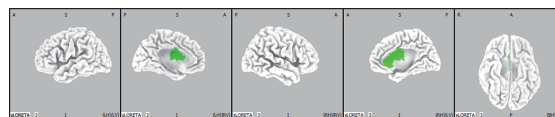


図7 α 波活動の群間比較
（緑の領域：視覚フィードバックあり群で低活動）

で比較した。

その結果、視覚フィードバックなし群と比較して視覚フィードバックあり群では、前頭中央領域、運動関連領域の θ 波活動が低値を示す傾向にあった（ $p < 0.10$ ）（図6）。また、視覚フィードバックなし群と比較して視覚フィードバックあり群では、前帯状回の α 波活動が低値を示す傾向にあった（ $p < 0.10$ ）（図7）。

前頭葉の θ 波活動は認知的制御や注意制御[5,6]との関連が報告されている。また、 θ 周波数帯域の前頭・頭頂ネットワークは人の姿勢制御に関与することが明らかになっている[7]。以上のことから、視覚フィードバックを与えることで、重心位置やその動揺が視覚化されるため、身体を意識的に制御する必要がなくなった可能性がある。これにより、バランスや認知制御に関連する脳領域の活動が抑制され、効率的な神経活動が促された可能性が示唆された。

前帯状回の α 波活動は困難な姿勢制御課題ほど活性化されることが明らかになっている[8]。視覚フィードバックなし条件と比較して視覚フィードバックあり条件では、重心位置やその動揺が提示されることにより課題難易度が低く、バランスに関連する脳領域の活動が低値を示した可能性がある。

これらの結果から、視覚フィードバックを付与することで立位バランスに関連する脳領域の活動が低値を示すことが明らかになった。視覚フィードバックは立位バランスに関連する神経

活動を効率化する可能性が示唆された。

検証3：視覚フィードバックが脊椎圧迫骨折高齢者の立位バランスに及ぼす影響

本検証は、健常高齢者と脊椎圧迫骨折高齢者の立位バランスにおいて、視覚フィードバックを付与する効果を検証した。これにより、健常高齢者と比較した脊椎圧迫骨折高齢者の視覚フィードバックに対する立位バランスの応答を明らかにすることを目的とした。

研究デザインは検証1及び2と同様に、ランダム化比較試験とし、健常高齢者30名と脊椎圧迫骨折高齢者2名を対象とした。対象者を16名ずつ視覚フィードバックなし群と視覚フィードバックあり群に群分けした。また、視覚フィードバックあり群には2名の脊椎圧迫骨折高齢者を含んだ(図8)。

全ての対象者に重心動揺計上でのIPSを測定した(図4)。この時、健常若年者では軟性フォームラバー上でIPSを測定したが、高齢者に対しては課題難易度が高すぎるため、軟性フォームラバーは使用しなかった。

統計解析では、群(視覚フィードバックなし群、視覚フィードバックあり群)と時間(1回目、2回目)による2要因反復測定分散分析を実施し、IPS、安定性限界面積、重心動揺面積を比較した。さらに、Crawford-Howell検定を使用して、視覚フィードバックあり群の中で、健常高齢者の集団データと脊椎圧迫骨折高齢者2名の個人データを比較した。Crawford-Howell検定にはRバージョン4.5.0を使用した。

その結果、IPS、安定性限界面積、重心動揺面積には、有意な交互作用と主効果を認めな

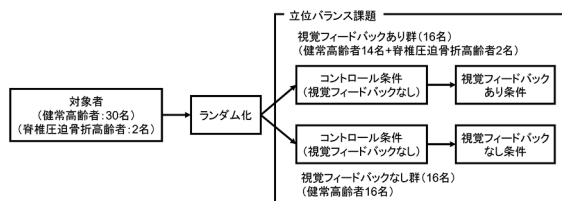


図8 研究デザイン (検証3)

かった ($p > 0.05$)。また、健常高齢者と脊椎圧迫骨折高齢者の集団—個人間比較では、脊椎圧迫骨折高齢者Aの視覚フィードバックありでのIPSと安定性限界面積は健常高齢者と有意な差を認めなかった ($p > 0.05$)。一方で、視覚フィードバックありでの重心動揺面積は健常高齢者と比較して有意に低値を示した ($p < 0.05$)。脊椎圧迫骨折高齢者Bの視覚フィードバックありでのIPS、安定性限界面積、重心動揺面積はいずれも健常高齢者と有意な差を認めなかった ($p > 0.05$) (図9)。

バランス能力が高い対象者では、視覚フィードバックの効果が顕在化されないことが明らかになっている[4]。本検証で対象とした高齢者は、地域に在住する日常生活が自立した高齢者であった。そのため、比較的立位バランス能力が高く、視覚フィードバックを付与する効果が顕在化されなかった可能性がある。

一方で、脊椎圧迫骨折高齢者の筋力と感覚統合能力低下によって立位バランス能力が低下することが報告されている[9]。また、脊椎圧迫骨折高齢者では、視覚情報や上肢支持条件を操作することで姿勢制御戦略が変化することが明らかになっているが[10]、その一方で、姿勢制御時の感覚情報量を変化させると、姿勢制御における感覚再重みづけが変化し、姿勢制御能力が低下する可能性があることが示されている[11]。以上のことから、脊椎圧迫骨折高齢者に対する視覚フィードバックの付与は、感覚情報

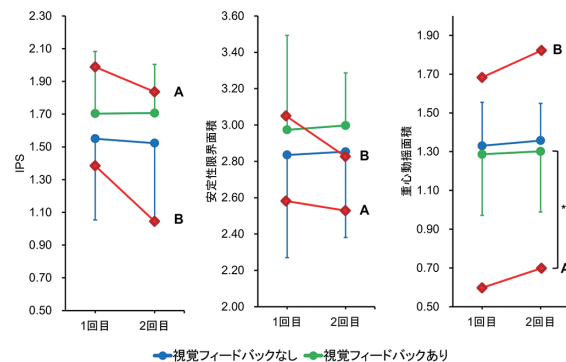


図9 健常高齢者と脊椎圧迫骨折高齢者における重心動揺の比較 (*: $p < 0.05$)

量を変化させることで立位バランス能力を低下させる可能性がある。しかしながら、本検証は2名での検証であり、そのうち1名のみで立位バランス能力が低下したことから、その効果には個人差がある可能性が示唆された。このように、脊椎圧迫骨折高齢者では、個人差はあるものの、視覚フィードバックを付与することで立位バランスが低下することが明らかになった。そのため、視覚フィードバックに対する影響・反応によって、脊椎圧迫骨折高齢者の感覚運動統合の特性や姿勢制御能力の脆弱性を顕在化させる評価ツールとして機能する可能性が示唆された。

[参考文献]

1. Riccio I, et al. Rehabilitative approach in patients with vertebral fragility fracture. *Aging Clin Exp Res*. 2013; 25 Suppl 1:S109-111.
2. Kasuga S, et al. Integration of proprioceptive and visual feedback during online control of reaching. *J Neurophysiol*. 2022;127(2):354-372.
3. 望月久・他. 重心動揺計を用いた姿勢安定度評価指標の信頼性および妥当性. *理学療法学*. 2000;27(6):199-203.
4. Dault MC, et al. Effects of visual center of pressure feedback on postural control in young and elderly healthy adults and in stroke patients. *Hum Mov Sci*. 2003;22(3):221-236.
5. Cavanagh JF, et al. Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends Cogn Sci*. 2014;18(8):414-421.
6. Miller J, et al. Anodal transcranial direct current stimulation (tDCS) increases frontal-midline theta activity in the human EEG: a preliminary investigation of non-invasive stimulation. *Neurosci Lett*. 2015;588:114-119.
7. Mierau A, et al. Cortical Correlates of Human Balance Control. *Brain Topogr*. 2017;30(4):434-446.
8. Hülsmüller T, et al. Higher Balance Task Demands are Associated with an Increase in Individual Alpha Peak Frequency. *Front Hum Neurosci*. 2016;9:695.
9. Kuo FC, et al. Center of Pressure Trace and Sensory Components of the Limits of Stability Test in Older Adults With Vertebral Compression Fractures. *J Geriatr Phys Ther*. 2020;43(1):24-31.
10. Błażkiewicz M, et al. The Impact of Visual Input and Support Area Manipulation on Postural Control in Subjects after Osteoporotic Vertebral Fracture. *Entropy (Basel)*. 2021;23(3):375.
11. Assländer L, et al. Sensory reweighting dynamics in human postural control. *J Neurophysiol*. 2014;111(9):1852-1864.