

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：32301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H03982

研究課題名(和文)人工現実における環境-心理-姿勢の機能的連結の解析：姿勢性恐怖と馴化について

研究課題名(英文)Functional coupling of environment-mind-posture in virtual reality: postural threat and habituation

研究代表者

井田 博史 (Ida, Hirofumi)

上武大学・ビジネス情報学部・教授

研究者番号：20392194

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：仮想現実(VR)における姿勢性恐怖と立位バランスの関係について、物理現実(PR)との比較により神経生理学的解明を試みた。片脚振り上げ動作では、VRはPRより大きな前脛骨筋の予測性姿勢調節(APAs)の筋活動を誘発することを示し、姿勢内乱応答への環境効果を明らかにした。また静止立位での経頭蓋磁気刺激(TMS)による前脛骨筋の運動誘発電位を調べ、VRで動員曲線最大傾斜が小さくなる皮質脊髄路興奮性の変調効果を指摘した。後方牽引解放外乱に反応する代償性姿勢調節(CPAs)においては、VRの環境効果は検出されなかったものの、低所と比べて高所で内側腓腹筋活動が大きくなる高さ効果を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、筋運動生理学的測定(APAs-CPAs)や電気生理学的測定(TMS)を導入し、VR環境とそれと相同させたPR環境との比較をとおして、仮想現実の環境効果を解明しようとするところに意義がある。発展的には、VRにおける環境-心理-姿勢の機能的連結について、より多くの神経生理学的議論の契機となることが見込まれる。また、TMSを利用したVR環境効果の検証はほぼ未開拓といえ、この学術領域で世界をリードする研究成果の公開につながる。一方社会的な意義としては、次世代のVRトレーニング開発に向けて客観的な機能情報を提供することにより、臨床応用的なインパクトが期待される。

研究成果の概要(英文)：The project was aimed to elucidate the neurophysiological relationship between postural threat and standing balance in virtual reality (VR) by comparing it with physical reality (PR). It was shown that VR elicited greater activation of tibialis anterior for anticipatory postural adjustments (APAs) than PR during a single-leg swing task, revealing the environmental effect of postural internal perturbation. In the response of tibialis anterior to transcranial magnetic stimulation (TMS) during a quiet stance, the maximum slope of the recruitment curve of motor evoked potentials was smaller in VR than PR, suggesting a modulation effect in corticospinal excitability. As for compensatory postural adjustments (CPAs) in response to a releasing postural perturbation, although environmental effects of VR were not detected, there was a height effect, in which the activity of medial gastrocnemius was greater at the high condition than the low one.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：立位バランス ヴァーチャルリアリティ 予測性・代償性姿勢調節 経頭蓋磁気刺激 姿勢性恐怖

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 日常生活でのよろめきやつまずきは、転倒・転落による死亡など重大事故につながる。臨床場面では、転倒リスクを下げるためにバランス・運動機能トレーニングが処方されるが、近年この目的でもヴァーチャルリアリティ (VR) 技術の応用が期待されている (Tarr & Warren. Nat Neurosci 2002)。

(2) しかしながら、コンピュータ擬似空間である VR において、ヒトの中枢神経系は実世界の「物理的重力環境」にいながらにして、実世界と異なる「生理的・心理的視覚環境」に晒されていることになる。仮想現実の VR 環境において立位バランスを保持するためには、実世界の物理現実 (PR) 環境とは異なる入出力処理を実行しながら、神経-筋活動を (再) 最適化していることが推察される。

### 2. 研究の目的

本研究では、高所環境における「姿勢性恐怖 (postural threat)」の心理的効果を導入し (Cleworth et al. Gait Posture 2012)、VR における立位・歩行バランス制御の機序について、高所環境への適応効果 (馴化) の検証も含めて、神経生理学的評価にもとづいて解明することを目的とした。主となる神経生理指標として、姿勢の崩れ (外乱/内乱) に応答する予測性 (APAs)・代償性 (CPAs) 姿勢筋活動、および経頭蓋磁気刺激 (TMS) 応答として求められる皮質脊髄路入出力特性を採用する。

### 3. 研究の方法

(1) 「VR 高所での立位バランス」を理解する：対象を若年健常者とし (以下同)、運動課題は両脚静止立位保持とした。条件設定は、視覚呈示 (VR, PR) と床面高 (高所, 低所) であった。VR 刺激は、PR 条件と同一視点から 360° カメラ画像で実験室空間を撮影し、それをヘッドマウントディスプレイ (HMD) に投影することにより呈示した。姿勢外乱応答実験では、外力印加後の CPAs 姿勢筋活動 (筋電図積分値、筋活動オンセットなど) の評価を行った。また TMS 応答実験では、皮質脊髄路入出力特性 (運動誘発電位振幅など) を調べた。

(2) 「高所での歩行バランス」を理解する：運動課題を静止立位からの一歩踏み出し動作もしくは片脚振り上げ動作とする姿勢内乱応答実験を行った。条件設定 (視覚呈示と床面高) および VR 刺激の作成方法は方法 (1) に準ずる。主動作 (遊脚足部挙上) 発生前の APAs 相姿勢筋活動 (筋電図積分値、筋活動オンセットなど) を主な評価項目とした。

(3) 「VR 曝露による高所馴化」を検証する：両脚静止立位保持および片脚振り上げ動作を運動課題とする評価テストを実施し、それぞれ足底圧中心 (COP) 変位および APAs 相姿勢筋活動の評価を行った。事前テストを実施した後、実験参加者は 10 分間の VR 曝露を受け、続いて事後テストを行った。保持テストはその 1 週間後に設定した。

### 4. 研究成果

(1) PR 環境における一歩踏み出し動作において、APAs 相の前脛骨筋活動がステップ長とともに増大し、一方で平地踏み出しより障害物踏み越えの方がこの筋活動が減少することが示された。また鉛直床半力と COP 変位についても、障害物の有無により顕著な差異が生じることが示された。これらの結果から、平地踏み出しと障害物踏み越えでは、ステップ開始前の姿勢調節方略が大きく異なることが確認できた。

(2) PR 環境における平地踏み出しおよび障害物踏み越えのいずれの運動課題においても、ステップ動作開始前の COP 前後変位量と APAs 相姿勢筋活動との間に有意な相関関係があることが示された。この傾向は、特に前脛骨筋において顕著であった。しかしながら、COP 前後変位の時間成分については、障害物回避動作をとまなう場合、顕著な姿勢筋活動との相関は観測されなかった。

(3) 両脚静止立位からの片脚振り上げ動作について、PR 環境と比べて VR 環境ではより大きな下肢筋の姿勢調節筋活動が観測された。特に前脛骨筋では、APAs 相からこの現象が確認された。一方で、高さの効果（高低差 50 cm）は CPAs 相の大腿直筋のみで観測されるにとどまった。これらの結果は VR が支持脚の姿勢調節筋活動を変調させることを示唆しており、立位バランスに対するその環境効果は無視できないものと解釈される。

(4) 両脚静止立位中の TMS 印加による前脛骨筋の運動誘発電位（MEP）を調べたところ、VR 環境における動員曲線（recruitment curve）の最大傾斜が、物理現実と比べて小さくなる傾向であった（図 1）。これは、VR の環境呈示が静止立位中の皮質脊髄路興奮性を変調させ、閾下縁サイズが小さくなった可能性を示唆している。

(5) 後方から牽引された両脚立位において後背側姿勢筋活動を調べたところ、牽引力解放直後の CPAs 相筋活動に VR と PR の環境差はみとめられなかった。一方、50 cm 台上（高所）における内側腓腹筋の CPAs 相筋活動が、床面上（低所）より増大することが分かった（図 2）。この結果は高所由来の姿勢性恐怖を反映したものと考えられ、先行研究の運動課題や評価指標ではほとんど検出されなかった傾向であることが特筆できる。

(6) 片脚挙上による障害物回避動作を調べた先行研究（Ida et al. Exp Brain Res 2017）で収集したデータの再解析により、足部挙上速度を統制しても、VR 環境における支持側下腿の APAs・CPAs 筋活動が PR 環境より低くなることを追証した。また、これら姿勢調節における VR 環境効果を説明するものとして、呈示したヴァーチャル環境の空間サイズに対する「知覚的ひずみ（perceptual distortion）」が関係している可能性を議論した。

< 引用文献 >

Tarr MJ, Warren WH (2002). Virtual reality in behavioral neuroscience and beyond. Nature Neuroscience, 5(Suppl), 1089-1092.

Cleworth TW, Horslen BC, Carpenter MG (2012). Influence of real and virtual heights on standing balance. Gait & posture, 36(2), 172-176.

Ida H, Mohapatra S, Aruin A (2017). Control of vertical posture while elevating one foot to avoid a real or virtual obstacle. Experimental Brain Research, 235, 1677-1687.

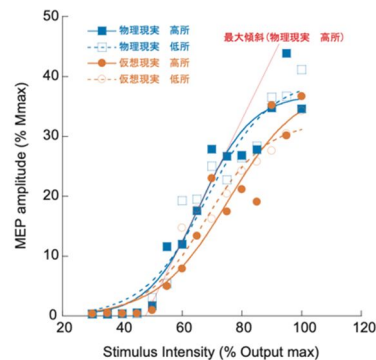


図 1 TMS による前脛骨筋 MEP の動員曲線

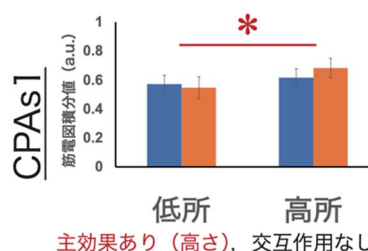


図 2 後方牽引解放外乱による内側腓腹筋の CPAs 相活動

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ida Hirofumi, Fukuhara Kazunobu, Ogata Takahiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Virtual reality modulates the control of upper limb motion in one-handed ball catching	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Sports and Active Living	6. 最初と最後の頁 926542
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fspor.2022.926542	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 Ida Hirofumi, Fukuhara Kazunobu, Mohapatra Sambit, Sekiguchi Hirofumi	4. 巻 5
2. 論文標題 Editorial: Perceptual Motor Control in the Virtual Environment and Its Implications in the Real World	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Sports and Active Living	6. 最初と最後の頁 1138516
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fspor.2023.1138516	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 該当する
1. 著者名 Ida Hirofumi, Mohapatra Sambit, Aruin Alexander S.	4. 巻 92
2. 論文標題 Perceptual distortion in virtual reality and its impact on dynamic postural control	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Gait & Posture	6. 最初と最後の頁 123-128
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.gaitpost.2021.11.017	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 該当する
1. 著者名 Ida Hirofumi, Fukuhara Kazunobu, Ishii Motonobu, Inoue Tetsuri	4. 巻 72
2. 論文標題 Anticipatory judgements associated with vision of an opponent's end-effector: An approach by motion perturbation and spatial occlusion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Quarterly Journal of Experimental Psychology	6. 最初と最後の頁 1131-1140
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/1747021818782419	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 井田博史
2. 発表標題 片手捕球の運動学習：反応時間の評価とボール速度の効果
3. 学会等名 第76回日本体力医学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小倉彩音, 宮崎輝光, 井田博史, 柴田聡, 竹村雅裕
2. 発表標題 膝前十字靭帯再建後のアスリートにおける片脚着地動作時の姿勢調節への影響
3. 学会等名 第76回日本体力医学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井田博史, 関口浩文, 竹内成生
2. 発表標題 仮想現実における片脚振り上げ動作中の予測性・代償性姿勢調節
3. 学会等名 第48回日本臨床バイオメカニクス学会学術集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井田博史, 関口浩文, 竹内成生
2. 発表標題 仮想現実における立位姿勢制御：経頭蓋磁気刺激法による検討
3. 学会等名 第51回日本臨床神経生理学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井田博史, 福原和伸, 緒方貴浩, 井上哲理
2. 発表標題 ヴァーチャル環境における擬似捕球動作: 反応時間による検討
3. 学会等名 第50回日本臨床神経生理学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ida H
2. 発表標題 Control of postural muscles during gait initiation: normal stepping and obstacle clearance
3. 学会等名 Progress in Motor Control XII (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ida H
2. 発表標題 Anticipatory postural adjustments while initiating a step on a flat surface or over an obstacle
3. 学会等名 ISPGR World Congress 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinohara H, Kawakami K, Takahashi K, Ogura A, Takahashi K, Ida H
2. 発表標題 Posture of lunge motion during a shuttle sprint test in soft tennis elite players
3. 学会等名 ISPGR World Congress 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井田博史, 小倉彩音
2. 発表標題 踏み出し動作において足底圧中心と連動する予測性姿勢筋活動
3. 学会等名 第74回日本体力医学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井田博史, 関口浩文, 竹内成生
2. 発表標題 牽引解放外乱に応答する代償性姿勢調節：物理現実と仮想現実における検討
3. 学会等名 第52回日本臨床神経生理学会学術大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Ida Lab. JOBU UNIV   Index <a href="http://idalab.org">http://idalab.org</a> ResearchGate <a href="https://www.researchgate.net/profile/Hiروفumi-Ida">https://www.researchgate.net/profile/Hiروفumi-Ida</a>
--

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	竹内 成生  (Takeuchi Shigeki)  (10329162)	上武大学・ビジネス情報学部・教授    (32301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	関口 浩文 (Sekiguchi Hirofumi)  (20392201)	山梨大学・大学院総合研究部・教授  (13501)	

	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
研究協力者	アルイン アレキサンダー (Aruin Alexander S)		
研究協力者	モハパトラ サムビット (Mohapatra Sambit)		
研究協力者	福原 和伸 (Fukuhara Kazunobu)		
研究協力者	小幡 博基 (Obata Hiroki)		
研究協力者	永野 康治 (Nagano Yasuharu)		

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