

平成 30 年 6 月 24 日現在

機関番号：32301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01474

研究課題名(和文) 障害物回避動作におけるバランス保持機構：姿勢調節の3位相から

研究課題名(英文) Function of maintaining balance in obstacle avoidance motion: three phases of postural adjustments

研究代表者

井田 博史 (IDA, HIROFUMI)

上武大学・ビジネス情報学部・准教授

研究者番号：20392194

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：「つまずき」は転倒の主因子である。本研究課題では、実環境とヴァーチャル環境での実験から、障害物の踏み越え動作における立位バランス保持の姿勢調節機能を検証した。踏み越え動作では脚の単純な振り上げや踏み出しの動作とは異なる姿勢調節がなされ、またヴァーチャル環境では実環境と比べて支持脚の筋活動が低下することが示された。これらの結果は、運動・バランス機能トレーニングの開発など、リハビリテーション分野での貢献が期待される。

研究成果の概要(英文)：Stumbling is the main factor of falling. This research project explored the postural adjustment function of maintaining standing balance while stepping over an obstacle by performing experimental tests in real and virtual environments. The results indicated that the step-over motion evoked a different postural adjustment strategy from simple leg swinging motion or stepping motion, and that the muscle activities of the supporting leg decreased in a virtual condition as compared to real one. These findings are expected to contribute to the field of rehabilitation, for example, developing motor and balance functional trainings.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：姿勢制御 立位バランス 予測性姿勢調節 代償性姿勢調節 障害物回避 クリアランス 転倒予防  
ヴァーチャルリアリティ

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 障害物回避動作は、衝突や転倒を予防するための日常的な行動様式である。路上に段差がある場合には、足を持ち上げるにより障害物との間隔(クリアランス)が確保される。平成22年厚生労働省人口動態統計年報によると、家庭内における死因の13.0%が転倒であり、転倒の主因子は歩行中の「つまずき」と考えられている。回避動作を成功させるためには、中枢神経系がクリアランス確保のための主動作と、バランス保持のための姿勢調節の両者を適切に実行する必要がある。

(2) 安定した立位姿勢に乱れが生じるとき、その発生後に出現する代償性姿勢調節(CPAs)に加えて、発生前にも姿勢筋放電が観察される(Belen'kii et al., 1967)。近年、これらの予備的な姿勢筋活動が外乱刺激の400~500 ms前におこる初期姿勢調節(EPAs)と100~150 ms前におこる予測性姿勢調節(APAs)の2つに機能的意味で分類できることが指摘された(Krishnan et al., 2012)。その後、随意的な上肢運動(内乱刺激)においてもこれらの調節活動が発現することが報告されている(Lee & Aruin, 2013)。本研究課題の研究代表者らは、片脚挙上による床上障害物の回避動作を対象とした試験的実験を行い、視覚的環境が姿勢調節の各位相に影響を及ぼす可能性を示唆する結果を得た。

## 2. 研究の目的

(1) 障害物回避動作について、立位外乱応答の分析手法を導入することにより、初期・予測性・代償性姿勢調節(EPAs-APAs-CPAs)それぞれの機能的役割を明らかにする。特に、対象を片脚挙上の回避動作から踏み越え動作に拡張することで、より実際的な歩行場面におけるバランス保持機序の議論を進める。

(2) 障害物の量的・質的な視覚情報特性とそれに応答する姿勢調節との関係を検討する。視覚情報に計算的な操作を導入するため、コンピュータグラフィクス(CG)によるモデリングとヴァーチャルリアリティ(VR)の呈示環境を利用した。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究課題に着手するにあたり、研究代表者が試験的実験を行った Aruin 研究室(University of Illinois at Chicago)を参考にし、現所属機関(上武大学)研究室内に姿勢実験環境を整備した。研究組織は、学内2名と学外2名の連携研究者、および学外3名(国外2名含む)の研究協力者により構成した。

(2) 基本的な計測系は筋電計(SX230-1000, Biometrics Inc.)、床反力計(ECG-1500A, 共和電業社)、加速度計(MA3, マイクロストーン社)により構成し、必要に応じて3次元

自動動作解析装置(Osprey 6-camera system, Motion Analysis Inc.)も含めた。視覚刺激のVR呈示にはヘッドマウントディスプレイ(iWear VR920, Vuzix Inc.)を用い、VR映像の作成にはCGモデリングソフトウェア(3ds Max, Autodesk Inc.)と専用VR構築ソフトウェア(VR4MAX, Tree C Inc.)を利用した。姿勢調節変量のデータ解析には、主に汎用数値解析ソフトウェア(MATLAB, MathWorks Inc.)を使用した。

(3) 単純片脚挙上動作、片脚挙上による床上障害物の回避動作、床上障害物の踏み越え動作を主たる運動課題とする被験者実験を行った。あわせて、実環境での障害物回避動作を模擬するVR環境実験も実施した。姿勢調節の位相は、足部挙上(主動作)の開始を時間原点( $T=0$ )として、EPAsは $T=-550\sim-150$  ms、APAsは $T=-150\sim+50$  ms、CPAsは $T=+50\sim+250$  msと定義した。

## 4. 研究成果

(1) 健常成人9人を実験参加者として、立位における片脚挙上高とEPAs-APAs-CPAsの姿勢調節活動との関係を調べた。運動課題は、右脚を支持脚(立位保持)、左脚を挙上脚(主動作)とする障害物回避を課さない単純片脚挙上動作であった。挙上高は10 cm, 20 cm, 30 cmの3段階に設定した。課題遂行中の両側下肢筋の表面筋電図と挙上側の足部加速度を計測し、EPAs-APAs-CPAs各位相の筋電図積分値を求めた。

支持脚について、筋活動オンセットの最小値は大腿直筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、内側腓腹筋それぞれで-288, -460, -282, -103 msであった。また筋電図積分値については、大腿直筋で位相の主効果、大腿二頭筋で位相と挙上高の交互作用、前脛骨筋で位相と挙上高の交互作用および位相と挙上高それぞれの主効果、内側腓腹筋で位相の主効果が検出された。この結果は、単純片脚挙上動作における姿勢筋活動がEPAs相から発揮され、また位相と挙上高相互の影響を受けることを示唆するものであった。しかしながら、障害物回避を含む片脚挙上動作と比べると、筋活動オンセットが総じて遅くなる傾向があり、その理由の1つとして障害物の有無による運動計画の処理負荷の多寡による影響が挙げられる。

得られた成果はEPAsを含めた静止立位外乱応答の解析アプローチを、脚挙上の随意運動に応用した点において新規性がある。また、障害物踏み越え動作など衝突回避を含む運動課題の特性を論じるうえで、参照となる基本データに位置づけられる。

(2) 健常成人10人を実験参加者として、VR呈示が障害物回避動作中の姿勢調節に与える視環境効果を、実環境との比較から検証した。運動課題は、右脚を支持脚とする、接近

障害物に対する片脚挙上の回避動作とした。ヴァーチャル障害物の大きさおよび移動速度のモデリングは、実環境で使用された障害物の実測値にもとづいてなされた。課題遂行中の下肢および体幹の表面筋電図、挙上側の足部加速度、床反力を計測し、EPAs-APAs-CPAs 各位相の筋電図積分値などを算出した。ただし環境条件間の比較のため、足部挙上最大加速度が実環境と VR 環境とで同等となる障害物高さ条件をそれぞれ抽出した。

EPAs 相では支持側の内側腓腹筋において、また APAs 相においては支持側の内側腓腹筋および挙上側の前脛骨筋と脊柱起立筋において、すべて実環境の方で VR 環境より有意に大きな筋活動が発揮された。また CPAs 相においては、支持側の前脛骨筋、内側腓腹筋、腹直筋、また挙上側の前脛骨筋、大腿直筋、外腹斜筋、腹直筋それぞれの筋活動が、実環境と VR 環境とで有意に異なることが示された。これらの結果は、障害物を回避するための足部の挙上運動が同等であっても、姿勢調節のための筋活動は実環境と VR 環境とで異なることを示唆する。

得られた成果は、研究代表者らが先行研究で提起した「VR 環境で発揮される姿勢調節は実環境と異なる」という主張を補強するものである。将来的に VR システムをリハビリテーションの立位バランストレーニングに応用する場合には、このような視環境効果は考慮されるべきであろう。

(3) 健常成人 10 人を実験参加者として、VR における 3 次元的視覚情報が障害物回避動作中の姿勢調節に及ぼす影響を調べた。運動課題は、右脚を支持脚とする、接近ヴァーチャル障害物に対する模擬片脚挙上回避動作とした。VR の呈示視環境として両眼視差がない場合 (2D) とある場合 (3D)、また障害物運動として上下動がない場合 (不変高) とある場合 (変動高) がそれぞれ設定された。課題遂行中の下肢および体幹の表面筋電図、挙上側の足部加速度、床反力を計測し、EPAs-APAs-CPAs 各位相の筋電図積分値などを算出した。

挙上動作開始前については、EPAs 相で前脛骨筋の筋活動に呈示環境と障害物運動の交互作用がみられたが、つづく APAs 相では有意な効果が検出された筋活動はなかった。一方、挙上動作開始後の CPAs 相では、支持側の内側腓腹筋と大腿二頭筋、挙上側の大腿二頭筋と外腹斜筋それぞれの筋活動において呈示環境もしくは障害物運動による有意な効果が検出された。呈示環境の 2D 条件より 3D 条件で、また障害物運動の変動高条件より不変高条件でそれぞれ筋活動が大きくなる傾向があり、これらの視覚情報が衝突回避のための主動作遂行と姿勢調節に影響を及ぼすことが示唆された。

得られた成果は、障害物の 3 次元的視覚情

報が 2 次元的視環境下とは異なる姿勢調節を誘発する可能性を示唆するものであったが、一方で VR 環境と実環境の比較で観察されたような顕著な相違はみられなかった。VR を利用した認知運動トレーニングを考案する場合には、その目的と意図によって 3D 呈示の要否が異なると考えられる。

(4) 健常成人 24 人を実験参加者として、障害物の踏み越え動作における立位バランス保持の制御方略を検証した。運動課題は、右脚を支持脚とする片脚振り上げ動作、平地踏み出し動作、障害物踏み越え動作とした。課題遂行中の表面筋電図、身体 3 次元座標、床反力を計測し、EPAs-APAs-CPAs 各位相の筋電図積分値などを算出した。

障害物踏み越え動作における支持側姿勢筋活動について、前脛骨筋の EPAs 相では片脚振り上げ動作より有意に大きく、また同筋の APAs 相では平地踏み出し動作より有意に小さい値が得られた。同様に脊柱起立筋では、EPAs と APAs の両相で、障害物踏み越え動作中の筋活動が平地踏み出し動作中より有意に大きくなった。この結果は、踏み出し運動開始前の姿勢調節活動について、障害物回避をとまなうことにより、単純な脚振り上げや平地での踏み出しとは異なる制御方略が用いられていることを示唆するものであった。

得られた成果は、これまで研究代表者らが行ってきた片脚挙上による障害物回避動作の検討を、より実際の歩行動作に展開する点において意義がある。今後、他の歩行様式や VR における心理的効果などに議論を拡大することにより、リハビリテーションに関わる運動・バランス機能トレーニングに有益な知見を提供することが期待される。

#### < 引用文献 >

Belen'kii V, Gurfinkel V, Pal'tsev E (1967) On the control elements of voluntary movements. *Biofizika*, 12, 135-141.

Krishnan V, Latash ML, Aruin AS (2012) Early and late components of feed-forward postural adjustments to predictable perturbations. *Clinical Neurophysiology*, 123, 1016-1026.

Lee YJ, Aruin AS (2013) Three components of postural control associated with pushing in symmetrical and asymmetrical stance. *Experimental Brain Research*, 228, 341-351.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

井田博史 (2018): 運動制御能力を高めるヴァーチャル環境を利用したトレーニング. *体育の科学* 1 月号, 68 巻 1 号,

26-31 . 東京 : 杏林書院 . 査読なし .  
<https://ci.nii.ac.jp/naid/40021431796>

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(6), 1677-1687. 査読あり .  
doi:10.1007/s00221-017-4929-0

〔学会発表〕(計 8 件)

Ida H, Mohapatra S, Aruin AS (2017): How does three-dimensional information affect postural control in stepping over an obstacle? *Movement 2017*, Oxford, UK.

井田博史 (2017): 障害物回避をとまなう踏み出し運動における姿勢調節方略 . 第 72 回日本体力医学学会大会 , 愛媛県松山市 .

Higashihara A, Nagano Y, Ida H, Nakazawa K (2017): Neuromuscular responses of the hamstring muscles during unanticipated trunk perturbations. *IOC World Conference on Prevention of Injury and Illness In Sport*, Monaco.

Ida H, Mohapatra S, Aruin AS (2016): Standing postural control while stepping over randomly moving virtual obstacles. *Neuroscience 2016*, San Diego, CA, USA.

井田博史 (2016): ヴァーチャル環境における姿勢調節 : 実環境との比較から . 第 71 回日本体力医学学会大会 , 岩手県盛岡市 .

井田博史 (2016): ヴァーチャル障害物の視覚情報による姿勢制御への影響 . 第 24 回日本バイオメカニクス学会大会 , 滋賀県草津市 .

Ida H, Mohapatra S, Aruin AS (2015): Three phases of postural adjustments during obstacle avoidance in a real and virtual environment. *Neuroscience 2015*, Chicago, IL, USA.

井田博史 (2015): 片脚挙上動作における姿勢調節の 3 位相 . 第 70 回日本体力医学学会大会 , 和歌山県和歌山市 .

〔図書〕(計 1 件)

Ida H (2015): Visuomotor behavior in computer-simulated display. In Heinen T (Ed.), *Advances in Visual Perception Research* (Chapter 12, pp. 233-267). Hauppauge, NY: Nova Science Publishers.

〔その他〕

緒方貴浩, 井田博史, 福原和伸 (2016): 運動と知覚の関係を考える—速さを構成する要素として . 月刊トレーニング・ジャーナル 11 月号, 38 巻 11 号, 18-23 . 東京 : ブックハウス・エイチディ .

井田博史 (2015): ”脳イメージングと 3 次元ヴァーチャル空間を使い新しい予測判断トレーニングを開発する”その研究が描く未来図 Part II ~ ヴァーチャル・リアリティーからのアプローチ ~ ヴァーチャル・リアリティー上でトレーニングを積む . *スポーツサイエンス・マガジン*, 1 巻, 56-57 . 東京 : ベースボール・マガジン社 .

研究室ウェブサイト

<http://idalab.org/>

上武大学ウェブサイト

<http://www.jobu.ac.jp/gakubu/kyouin/sports/index.html#link11>

科学技術振興機構データベース (researchmap)

<https://researchmap.jp/hiroida/>

研究者 SNS (ResearchGate)

[https://www.researchgate.net/profile/Hirofumi\\_Ida](https://www.researchgate.net/profile/Hirofumi_Ida)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

井田 博史 (IDA, Hirofumi)

上武大学・ビジネス情報学部・准教授

研究者番号 : 20392194

(2) 連携研究者

関口 浩文 (SEKIGUCHI, Hirofumi)

上武大学・ビジネス情報学部・教授

研究者番号 : 20392201

竹内 成生 (TAKEUCHI, Shigeki)

上武大学・ビジネス情報学部・准教授

研究者番号 : 10329162

永野 康治 (NAGANO, Yasuharu)

日本女子体育大学・体育学部・准教授

研究者番号 : 00548282

福原 和伸 (FUKUHARA, Kazunobu)

首都大学東京・人間健康科学研究科・助教

研究者番号 : 10589823

(3) 研究協力者

緒方 貴浩 (OGATA, Takahiro)

ARUIN, Alexander S.

MOHAPATRA, Sambit