

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02273

研究課題名（和文）視覚誘導性姿勢反射に基づく歩様誘導機序のモデル化による人流制御基盤技術

研究課題名（英文）Modeling of Gait Induction Mechanism Based on Visually Induced Postural Reflexes as a Fundamental Technology for Human Flow Control

研究代表者

古川 正紘（FURUKAWA, MASAHIRO）

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：40621652

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：前庭電気刺激の刺激開始前後において、人の歩行位相と身体応答との間に強い相関が観察された。また下肢・上肢という二重倒立振り子制御系として理解可能な応答が観察された。ただし、頭部、胸部、腰部の3つのRoll角から得られる曲率が実際に歩いた軌跡から得られた曲率よりも大きいことから、身体の傾きであるキャンバー角だけが要因で曲率歩行を行っているとは言えないこともまた示された。歩行者の観察始点における上下動固定という振幅変調は、歩行挙動の客観観察結果としての「すり足」は再現しなかった。一方で障害物に対する回避距離が増大し、軌跡が2群化した。これは回避対象物までの距離信頼性が低減した結果であると解釈できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本成果は、人混みの混雑を緩和させることを目的とした群衆流動の制御のための歩行誘導技術に関するものである。人混みが発生する原因が向かい合う人通しの回避行動がうまくいかず、お互いが常に避け合い続けられるような流れが形成される前の段階が発生してしまうことが原因とされている。そこで本研究では歩行者の歩行誘導を効果的に実現するための歩行者の感覚刺激手法を提案することを目的としている。先行研究では、床に光学素子を敷設することで交通整理を実現することを狙っていたが、本成果はさらに実験室実験を実施することで単一の歩行者の歩行誘導効果を解析し、より誘導効果を高めるための指針を得た。

研究成果の概要（英文）：A strong correlation was observed between the gait phase and the body response before and after the onset of vestibular electrical stimulation. The responses of the lower and upper limbs were understandable as a double inverted pendulum control system. However, the curvature obtained from the three roll angles of the head, chest, and hips was larger than that obtained from the actual walking trajectory, indicating that the camber angle, which is the body tilt, is not the only factor in curvature walking. The amplitude modulation of the fixed vertical motion at the starting point of the pedestrian observation did not reproduce the "slipping" as a result of objective observation of walking behavior. On the other hand, the avoidance distance to the obstacle increased, and the trajectory became bigrouped. This was interpreted as a result of a reduction in the reliability of the distance to the object to be avoided.

研究分野：人間情報工学

キーワード：歩行誘導 視覚誘導性姿勢反射 群衆流動

1. 研究開始当初の背景

都心駅周辺では、急速な都市開発により、駅構内の混雑が問題となっている。混雑原因の分析は人流モデルによる解析や駅施設内の実態調査などが進められた上、都市開発の観点から動線設計に関する様々な提言がなされている。一方で、交通インフラの再構築には莫大な資金と開発期間が必要となり、短中期的な観点からは、設備投資費と開発期間を圧縮できる交通インフラ整備のあり方が切望されている。そこで本研究では、混雑発生の要因の一つである、二方向対向流などで生じるスタッキング状態を研究対象とし、シート状光学素子の敷設による無電源で実現可能な交通整理効果が期待できる歩行誘導技術のための感覚刺激設計手法の確立を目標とした。

(1) 視覚誘導性姿勢反射は、視覚誘導性刺激が身体機構学的応答を生じさせる前駆刺激として機能し、歩行誘導効果として観測されると位置づける。そこで視覚誘導効果と身体機構学的要素を分離するために、閉眼条件を設定した。また、歩行誘導は前庭電気刺激(Galvanic Vestibular Stimulation: GVS)により惹起される姿勢反射の結果、歩行の軌跡が曲がることによるものと位置づけ、GVSが身体機構学的応答を直接誘発させる要因とみなした。軌跡が一定の曲率を描く歩行は曲率歩行と呼ばれ、歩行中のGVSによる姿勢反射応答としては身体が陽極側に傾くことで曲率歩行が観察されてきた。一方で、人は機構学的に多関節リンク系であり、身体を単一剛体として扱うことはできない。先行研究において立位、座位といった静的な条件下におけるGVS提示は姿勢反射応答として主に上半身の関節である腰や首周りの運動を惹起することが示唆されてきた。これは歩行という動的かつ周期的な運動においても起こりうるが、体性感覚と前庭感覚の相互作用に着目した、曲率歩行の生起機序が説明されてこなかった。

(2) VR空間内での歩行を実現する技術として、現実空間内での歩行の進行方位を錯覚させることにより狭小な物理空間内で広大なVR空間内の方向を実現しようとするRedirected Walking (RDW)手法が提案されている。当該手法は、歩行者の実空間内での身体運動と、その運動に付随したオプティカルフロー量の錯誤を実現する。これに関連して、オムニホイールを搭載した全方向に追従移動可能なアバタロボットを介した遠隔歩行技術において、ロボットの操縦者となる被験者がHead Mounted Display (HMD)を装着し、操縦者の視線の高さと等しい位置になるようロボットに設置された全天球カメラの映像を観測すると、歩行者は「すり足」歩行に歩様変容が観察されること示された。つまり、頭部上下動におけるRDW手法と等価な視覚刺激として機能したと考えられるが歩様変容の要因が不明であった。そこで二方向流対交流が形成される初期状態と類似する境界条件として、障害物回避行動下における歩様変容の再現性に着目した。

2. 研究の目的

人流制御の機序理解とともに歩行誘導を誘発する感覚刺激設計法の確立を研究目的とする。人流制御においてはレーン形成による群衆流速の増大現象が知られており、本研究ではレーンに寄与し、交通量、密度、流速変動などの人流制御という観点から誘導効果を計測することで、また歩行誘導のための感覚刺激設計のための基礎的知見を得る。そこで、視覚誘導性歩行反射と前庭電気刺激を併用し、研究室内で統制された条件下実験を実施することで、歩行誘導現象の理解を進める。研究計画当初は実空間での社会実験を計画していたが、研究実施期間の大半がコロナ禍であったことから研究実施方法を研究室実験に切り替えている。さらに同実験を、数理モデル化を進めるための研究手段の主軸と位置づけた。

(1) 人の歩行方位誘導の刺激設計論を確立させるために、歩行時の運動学的挙動解析から、誘導効果の最大化を図るための基礎研究を実施した。前庭電気刺激を採用し、群衆流ではなく単独歩行状態を想定した。さらに閉眼条件とすることで、前庭感覚・体性感覚を視覚刺激と要因分離をした上で挙動解析を行うことを目的とした。

(2) 歩行の立脚期・遊脚期による視点位置高さの変動に伴い、視点位置の揺動が生じる。しかし遠隔歩行技術としての歩行トレイグジスタンスシステムなどの、操縦者の歩行時に鉛直方向の視点移動が再現されないという体性感覚・視覚不一致条件が満たされると、歩行に伴う頭部上下動に伴うオプティカルフローが再現されない。歩行者がお互いをよけあうという対向回避行動でよく「すり足」歩行に漸近するという主訴が得られることが先行研究から得られていた。そこで歩行者の頭部の上下動に伴うオプティカルフローの有無を実験条件とした障害物回避歩行実験を行い、視覚誘導時の歩容変動とその効果を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 身体の機構学的要因により曲率歩行を説明するために、下肢関節の順応を利用した歩行実験を実施した。足首、膝が床の傾斜に順応し、その結果水平面歩行の際に曲率歩行が再現するかを実験的に明らかにした。足首、膝に対しての順応を促せると考えられる床状態である傾斜床上

での足踏みを行い、その後水平面を歩いた際の頭頂部軌跡を観察した。本実験では歩行時の前庭電気刺激(GVS)による姿勢反射応答を詳しく観察するため、頭部、胸部、腰部の位置を計測し、その位置情報をもとに歩行中の前庭電気刺激によって歩行軌跡が曲がる際の上体の Roll 角, Yaw 角の傾きの変化を観察することで、GVS によって歩行軌跡が曲がる身体応答の機序を明らかにした。また前庭電気刺激による上体の身体動揺は足幅が広がるにつれ、小さくなることが知られており、その再現性についても評価した。

(2) 先行研究において、接近する歩行者がお互いに回避する行動においてすり足現象が再現していたことを踏まえ、本実験でも障害物回避行動を実験条件として設定した。障害物回避実験は VR 環境内で構築した。VR 空間の中で障害物 (3 本の柱) を避けながら歩くよう指示をし、HMD 装着者の頭部位置の挙動を計測した。これは歩行時における視覚流動に対する歩行反射計測として実施し、頭部の上下動がもたらす視覚流動の姿勢反射応答ゲインを定量的に測定した。説明変数として、デカルト座標系内での歩行時の頭部上下動の視覚流動量への反映有無を設定し、その条件下における歩行時の歩行軌跡並びに頭部動揺量を計測した。3 点の障害物を設け、回避行動を含む歩行運動を計測した。

4. 研究成果

(1) まず曲率歩行を引き起こすのは下半身の関節である足首や膝の屈曲に起因するののかについて調べた。その結果、足首や膝は曲率歩行を引き起こす要因ではないことが確認された。そのため歩行時の GVS 提示により曲率歩行を行うのは上半身の屈曲によるものと考えられる。よって計測関節部位を腰と首に限定した。そして腰と首の関節周りにおける運動を観察すると直立時同様、腰から肩にかけて大きく屈曲し、肩から頭にかけて少し曲がることが確認された。また曲率歩行を開始するのは身体左右方向に周期運動を伴う身体傾斜角の時間平均が直立ではない必要があり、この身体傾斜角の時間平均を直立でなくす(発散)方向に偏らせる際、自重を活用していると考えることが妥当である。この場合、自重を活用できる歩行位相は限定的であり、歩行位相中に頭部が矢状面に向かって運動する方向に極性を持つ場合にのみ GVS による曲率歩行が観測されると考えられる。これは直進歩行から曲率歩行への過渡状態であり、曲率歩行中は、上半身の傾きによる、重力の身体側方成分が求心力となり、曲率歩行することで平衡状態を保つ。これが GVS による曲率歩行の基本的な機序である。

曲率歩行を行うには身体左右方向に周期運動を伴う身体傾斜角の時間平均が直立ではない必要があり、この身体傾斜角の時間平均を直立でなくす(発散)方向に偏らせる際、自重を活用していると考えることが妥当である。これは GVS を提示した場合も例外ではなく、GVS により加速度感覚が生じ、上半身の姿勢反射応答によって加速度感覚を打ち消そうと陽極側に屈曲する。曲率歩行を開始するのは歩行位相中に頭部が矢状面に向かって運動する方向に GVS の極性を持つ場合にのみであり、逆位相中に GVS を提示すると感じられる加速度感覚が相対的なものとなり、感じられる加速度感覚が小さくなると考えられる。よって求心力が小さくなり曲率が大きな歩行をする、又は曲率歩行を行わないと可能性がある。姿勢反射応答により上半身が陽極側に傾くことでそちら側に重力による側方性の求心力が生じ、その結果曲率歩行を開始する。曲率歩行を開始してからは、身体の傾きを重力方向と平行に戻しながら、上半身の傾きが世界座標系において 0 となり、また求心力の働いていた歩行と逆向きに傾くまで曲率歩行を続けると考えられる。GVS を提示して曲率歩行の開始時に踏み出す再度ステップや、千鳥足などは GVS による加速度感覚を即座に打ち消すようにするための過渡状態であると考えられる。

前庭電気刺激の刺激開始前後において、人の歩行位相と身体応答との間に強い相関が観察された。また下肢・上肢という二重倒立振子制御系として理解可能な応答が観察されただけでなく、歩行中の前庭電気刺激に対する身体反射として運動学的に知見を得ることができた。ただし、頭部、胸部、腰部の 3 つの Roll 角から得られる曲率が実際に歩いた軌跡から得られた曲率よりも大きいことから、身体の傾きであるキャンバー角だけが要因で曲率歩行を行っているとは言えないこともまた示された。

(2) 歩行者の観察始点における上下動固定という振幅変調は、歩行挙動の客観観察結果としての「すり足」は再現されなかった。一方で障害物に対する回避距離が増大し、軌跡が 2 群化した。これは回避対象物までの距離信頼性が低減した結果であると解釈できた。デカルト座標系における頭部の上下動に相対運動として世界座標系に固定されたオプティカルフローを呈する条件下において、より障害物近傍に接近した回避行動が観測された。逆に、頭部上下動に起因するオプティカルフローが選択的に自己運動に追従する条件下において、より障害物との距離を長く維持した回避行動が観測された。すなわち、実験参加者は世界座標系内での頭部上下に起因する成分を、障害物との回避行動戦略における回避距離の決定要素としていることが示され、結果的に歩行の「方位角」の変調効果として観測されたと考えられる。したがって、デカルト座標系表現としての世界座標系において、頭部上下動成分の錯覚を生じせしめることはすなわち、障害物への回避行動戦略の変容に貢献する視覚刺激を設計可能であることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 経頭蓋電気刺激装置	発明者 前田 太郎、古川 正 紘、原 彰良、松田 一武輝	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2023/10300	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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