

研究報告書

「歩行の感覚統合過程モデルの構築と誘導手法への応用」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2015年10月～2019年3月

研究者: 古川 正紘

1. 研究のねらい

本研究では、意識させることなく「いま、ここで」歩行者を助けるための情報基盤技術の開発を行った。将来的には、歩行者が特段意識を払わなくても公共空間での歩行者の混雑が緩和され、また道に迷っていることにも気づかないうちに目的地に知らないうちに到着してしまう、という未来の移動手段の創造につながることを期待している。

そこで本研究では具体的な課題として次の二つを対象とした。一つ目は多くの歩行者が集まる公共空間で生じている課題である。公共空間の中でも都心部の駅やホームでは非常に多くの歩行者が集中し、混雑するだけでなく歩行者の渋滞や衝突が発生しがちである。またホームからの転落事故、駆け込み乗車、さらには歩きスマホ中などに歩行者間の衝突事故などが問題となっている。二つ目は、一人の歩行者が初めて訪れる場所で生じている課題である。今までは地図をあらかじめ印刷して持ち歩いたが、現在では多くの人がスマートフォンの地図アプリや道案内アプリに頼るようになってきている。本研究では、これらの課題を解決するために、歩行者に錯覚を生じさせるための感覚提示技術を構築した。

歩行は、普段特に意識しなくても自然に行える動作である。しかし歩行をよく観察すると、様々な感覚に頼って運動が作り出されていることに気づく。これを利用し、本研究では歩行のために使われている感覚に錯覚を生じさせ、歩く方向を誘導する手法の提案を行った。そこでまず公共空間向けの錯覚誘導技術として、シート状のレンズに床が動いて見えるようなパターンを印刷することで、このシートの上を歩いた歩行者がみかけの床の流れの方向に誘導される方法を構築した実際の公共空間の一例として、科学館でシートを敷いて多くの来場者に歩いてもらう歩行実験を行い、交通整理効果の実証と今後の課題点を明らかにした。さらに、誘導効果をもたらす図案の設計法を構築した。

従来から知られていた課題の一つとして、錯覚を生じさせることで歩行者の歩いていく方向を誘導する場合、感覚を提示した瞬間から2歩程度効果が生じないことが知られていた。そこで本研究では、歩行状態の2歩先を予測するための予測技術として機械学習を用いた手法を構築し効果を実証した。これにより歩行方向の2歩先の予測が実現したため、錯覚を用いた歩行誘導において遅延なく歩行誘導を行うための技術基盤を構築した。

2. 研究成果

(1) 概要

人は視覚的手掛かりにも頼ることで安定した歩行が実現され、視覚誘導性姿勢反射と呼ばれる。本研究で用いる錯覚提示技術はこの反射を活用しており、歩行者は床面が移動していくかのように錯覚した結果、歩行誘導効果が生じる。

しかし従来研究では概念実証のみで誘導効果量の定量的設計法が明らかでなかった。そこで、この効果が歩行者の左右方向の床の移動速度・濃淡の周期に起因すると仮定し、VR環境を用いた心理物理実験の結果、視覚刺激の濃淡周期の通過速度に対する誘導効果量が累積正規分布関数で近似可能であることがわかった。これにより期待される歩行誘導効果を得るための視覚刺激設計法を構築することに成功した。本知見を拡張し、1点に集中した誘導を実現するための光学素子設計法を提案し、概念実証に成功した。視差バリア方式を用い、歩行者の進行方向に依存した刺激の移動方向の逆転を実現した。

錯覚刺激を行なっても歩行誘導効果が認められない時間(潜時)が2歩程度であるという知見から、実時間歩行誘導には歩行状態の予測が不可欠である。そこで、機械学習により歩行運動の予測技術を構築した。全身の各点の運動速度から頭頂部にある観測点の未来予測の結果、2歩分に相当する1秒先行した運動予測に成功した。これは、3層パーセプトロンに歩行運動の時系列データを未来過去に渡り与え学習させることで実現しており、機械学習による未来予測に足る特徴量が歩行運動から計測可能であるという強い証拠であるとともに、実時間歩行誘導の実現のための重要な成果を得た。

敷設光学系による歩行誘導手法が実社会に与える影響について明らかにするために、科学館で一般来場者を対象とした社会実装実験を行なった。敷設した環境内での予備知識を持たない来場者の行動を定点カメラで撮影するとともに、体験者からの内観報告を収集した。行動と内観報告を敷設の有無と対比させながら解析した結果、敷設されていることに気づかずに誘導され対向して接近する歩行者が回避する方向へ寄与したと考えられる場面が認められた一方で、視覚刺激が目眩などの不快感を生じさせたという内観や、物珍しさが反対に注意を引きつけ足を留まらせる場面が少なくないなど、社会実装上の課題を明らかにすることができた。

(2) 詳細

研究テーマ A「視覚誘導性姿勢反射を用いた歩行誘導基盤技術の確立」

歩行誘導基盤の要素技術として、(a)誘導効果量の定量的設計法の解明と(b)光学設計法の拡張を挙げた。視覚誘導性姿勢反射による歩行誘導効果の定量的効果測定のため、歩行者の進行方向と直行する左右方向に黒白ストライプ柄を並進運動させ、床面上から観察される視覚流動(Optical flow)をストライプの移動速度・空間周波数として制御し、直進歩行の左右方向への移動距離を誘導量と定義しVR環境内で測定した。誘導量はストライプの移動速度・空間周波数いずれにも依存したことから、単位時間あたりの濃淡周期通過数という正規化単位[cycle/s]を用いて結果を整理した。その結果、視覚刺激の濃淡周期の通過速度 V に対する誘導量は累積正規分布関数で近似可能であり、誘導量は $0 \sim 2$ [cycle/s] までは概ね線形に増加し、それ以上の域値では誘導効果が飽和することが明らかになった[図 1 左]。過度な通

過速度 V は、誘導効果の低下要因になるという予測に反し、誘導量は飽和値に留まり低下しなかった。これは飽和値付近の誘導量を実現する場合は V の設計制約は約 $2[\text{cycle/s}]$ より高い域値であれば V の域値は広範囲に選択可能であることを意味する。

誘導方向の拡張のために、一例として特定の 1 地点への誘導刺激を表出可能な光学素子設計法を提案した。従来のレンチキュラ光学系では 1 レンズあたりの見込角が狭いことが原因となるレンズピッチ間のクロストークの影響があり、観察位置による誘導方向の切り替え制御が困難であったため視差バリア方式を用いた[図 2]。視差バリア方式では、開口部であるスリットから表出する図案により誘導効果を期待するものであり、スリット間の間隔を広く取ることで、ピッチ間で生じる図案のクロストークを防ぐことができた。これによりシートに鉛直な面を境に、観察角度に応じた誘導方向の切り替えを実現した。図 2 は、対向者が同一地点に誘導されることを目的とした光学素子の図案設計例である。この図案もまた、前述の誘導量設計値を基盤とした設計が可能であることから、刺激設計法のモデル化という目標を達成できた。

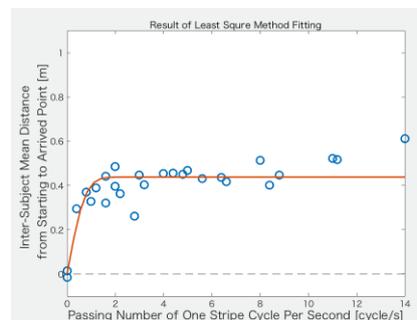


図 1 視覚刺激の歩行方向に直交したストライプの濃淡周期の移動速度[cycle/s]に対する左右方向の誘導量[m]

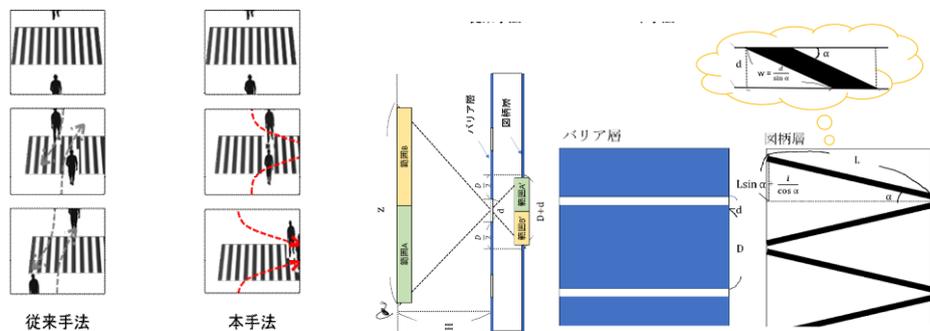


図 2 特定の 1 点に集中する誘導力を期待する誘導手法の概念図(左)。観察角度に応じて誘導方向が異なる視差バリア設計法(右)

研究テーマ B「歩行運動の予測基盤技術の開発と実証」

歩行速度の予測技術は、自動運転車が歩行者との衝突を回避するための歩行者の経路予測や、都市設計の観点での歩行者の流量予測モデルなどが挙げられる。これらの研究は、群制御や定速歩行を前提としており、本研究で目指す歩行誘導技術で目指す実時間経路予測が行われていない。そこで、機械学習を用いた歩行運動の予測技術の開発を行なった。

将来的にはウェアラブル装置で計測可能な身体運動を特徴量として用いることを考えるが、本実験では ground truth として計測室内に設置した運動計測カメラで計測された運動デ

一タを用いた[図3左]。11名の被験者を対象に歩行運動計測を実施し、10名分の有効サンプルを取得した。当該データは観測点25点の並進速度3自由度の時系列データであり、これを3層全結合型ニューラルネットの入出力教師データとして用いて機械学習を実施した。2歩先は歩行周期から考えると予測先行時間は1秒であるため、これを予測対象時刻とした。その結果を一部図3右に示す。灰色で描画された観測軌跡に対し、黒色で描画された予測軌跡を比較すると、1,2歩先までは両者が比較的一致している一方で、3歩先の予測は困難であることがわかった。この制度を達成するために要した時系列データ点数は300Hzサンプリングで1秒分の時間幅があり比較的数据点数が膨大であるが、データの間引きを経て推定精度に再現性があることが認められたことから、歩行の予測技術の構築という目標を達成できた。

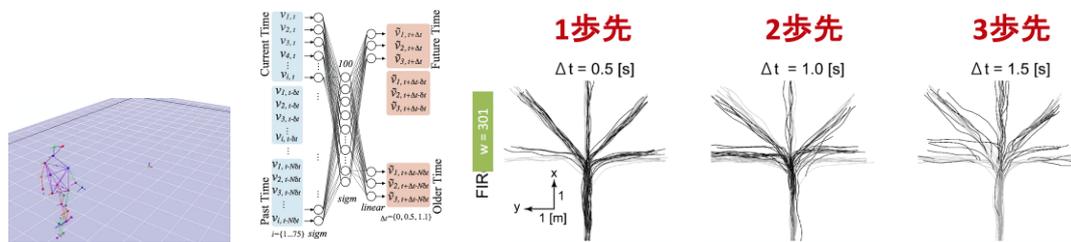


図3 歩行運動の観測点(左)。歩行運動を学習する3層全結合型ニューラルネット(中)。実軌跡(灰)と予測軌跡(黒)の対比、2歩先の予測に成功(右)。

研究テーマC「歩行誘導技術の社会実装実験による効果検証と課題抽出」

日本科学未来館で3日間、事前知識がない状態の一般来場者を対象に敷設型光学系を用いた歩行誘導手法の実証実験を行った[図4]。交通整理という観点から、概ね直線上の歩行動線が期待できる廊下区画と、対向者の挙動を観察可能なパーティションで区切られた閉鎖区画との両区画で歩行現象への寄与を観測した。閉鎖区画内では参加者の正面・背面からビデオ撮影を行なったため、撮影に対する同意書を取得した。実験参加者は同意書取得数から約400名と見積もられた。廊下区画では、実験日ごとにシートの敷設有無を切り替え、両条件を対比した。閉鎖区画では、同区画内の片側だけに敷設し、敷設した区画へ進入する方向と離脱する方向とで誘導効果を対比した。また両区画に共通して、対向者が進行方向のどちら向きにお互いを避けるのかを評価した。その結果、単独歩行の場合は設計時に期待した歩行誘導効果が認められる場合があった。特に、閉鎖区間を体験した歩行者からは内観報告を収集したが、敷設物の存在に気づかなかった参加者が少なくなかった。また、対向歩行の場合は、設計した誘導方向に回避したとみなせる例はわずかではあるが認められた。敷設物に足を踏み入れない参加者も認められ、内観報告によるとめまいを訴えていた。刺激強度の設計も含めた設計改善の方向性が明らかとなり、社会実装実験の実施という目標を達成できた。



図4 日本科学未来館での社会実装実験。左2枚目が廊下区画、右1枚目が閉鎖区画。

3. 今後の展開

公共空間の交通整理を目的とした実証実験と継続して実施することで、視覚誘導性姿勢反射を用いた歩行誘導効果の実証と、当該方法論の社会的受容性を促していく。特に公共交通インフラへの適用を強く推進し、実際にユーザの目に触れる環境下での実証実験を繰り返し、同時に啓蒙効果を期待する。さらに個人を目的地へ誘導するための意識させない誘導手法というシナリオの有用性を社会に問いかけていくために、より実用段階に近い前提で実証実験を行う。特に本研究最大の課題は、歩行運動の予測に基づいた錯覚刺激の制御であるため、並行してこの効果を実証していく。さらに公共空間での歩行者の歩行運動予測から、当人の要求を事前に予測することで「今、ここで」求められる潜在的な要求を発見した上で先行して応えられる歩行誘導基盤技術への発展を持続させていく。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

当初の研究目的である歩行者の感覚統合モデルという観点では、VR 空間内での歩行実験を通じた心理物理実験によって、視覚刺激設計のためのモデル化を達成することができた。感覚統合の機序を陽に説明するための解析的モデルを立てる方針を当初は打ち出していた。しかし、機械学習の性能が飛躍的に向上していく現状を鑑み、機序の説明には向かないが工学的には歩行の予測目的の達成を優先し、機械学習を採用した。結果的に、当初の目標である 2 歩先の歩行の予測に成功することができた。敷設型光学系の社会実装に関してもまた、日本科学未来館の協力を得ることができ、実社会に比較的近い環境下で効果を実証することができたことから、最終的に社会実装には至っていないものの、研究期間内の実証という目標は達成できた。総じて研究当初の計画から手法は異なるものの、目的を達成することができたと考えている。

研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

研究実施体制としては、研究補助員を 3 年次より採用したことで進捗を加速することができた。具体的には、データの整理や解析プログラムの開発補助、歩行運動計測実験の実施、光学素子設計補助と多岐にわたり協力を得ることができた点は、妥当な研究実施体制を継続できたことによるものと考えている。研究費執行状況については、1 年次に歩行運動計測に必要な機材を十分に揃えることができたことから、以降持続的に解析や実験の繰り返しを行えるようになった点は、妥当な研究費執行状況であったと考える。また 110 平米の実験室を借り上げることができ、歩行運動計測には理想的な環境構築を 1 年次から行うことができた。また当初の計画通り、多数回の光学素子の試作を実施することができた点は、早い段階から現象の理解とノウハウの蓄積に貢献しており、知財の出願に至る主要因であった。また機械学習設備の構築にも 2 年次より着手し、早い段階から機械学習に取り組めた点は、目標の達成に大きく寄与したと言える。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果)

歩行運動予測については、他分野でも身体運動予測に注目が集まるきっかけとなるさきがけ的研究であったと自負している。社会・経済への波及効果は、視覚誘導性姿勢反射や前庭感覚刺激などの錯覚刺激を用いた歩行誘導手法に対する社会の理解を得ることが不可欠である。日本科学未来館で収集した内観報告によれば、実現を期待する声が少なくなかった点は、社会・経済への波及効果の大きさを示唆するものである。また民間企業との議論を通して、現場からの要望は強く、研究推進の意欲につながっている、これは、さきがけへの応募を志した頃に目指した研究者像である、数理解に根ざした工学的設計と、社会実装の実現ができる研究者という像に、さきがけ期間を経て大いに近づけたという実感があるからである。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

- | |
|---------------------------|
| 1. Augmented Human 投稿準備中 |
| 2. 日本バーチャルリアリティ学会投稿準備中 2件 |

(2)特許出願

研究期間累積件数:2件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

1.
発明者: 古川 正紘、坂本 伸仁、前田 太郎
発明の名称: 模様変動シート、歩行誘導方法及び歩行誘導システム
出願人: 大阪大学
出願日: 2017/5/12
出願番号: 特願 2017-095606
国際出願番号:PCT/JP2018/018082(予備審査請求中)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

学会発表

1. Kohei Matsumoto, Masahiro Furukawa, Kosuke Wada, Masataka Kurokawa, Hiroki Miyamoto, and Taro Maeda, Verification of necessity of equivalent gravity in telexistence with scale conversion for utilization of humanoid small robot, the 28th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2018) and the 23rd Eurographics Symposium on Virtual Environments (EGVE 2018), (Nov. 2018)

著作物

1. (編)暦本 純一,(第8節)前田 太郎,古川 正紘, (株)エヌ・ティー・エス, オグメンテッド・ヒューマン Augmented Human—AIと人体科学の融合による人機一体,究極のIFが創る未来,第8節 感覚の伝送・拡張・共有技術(pp.293-302), (2018年1月)

メディア報道

1. NHK 総合「サキどり↑」2016/6/19(日) 歩行誘導シート, (2016年6月)

アウトリーチ

1. 古川正紘,サイエンティスト・クエスト—あなたと考えるあたらしい科学とくらし「気づかずに、変えられている、歩き方」,日本科学未来館 (2016年8月)

2. 古川正紘,敷くだけで片側通行を実現する完全無電源の歩行誘導シート,イノベーション・ジャパン 2017 (2017 年 8 月)

招待講演

1. 古川正紘,テレイドジスタンスによる小型人型ロボットの歩行,第 117 回ロボット工学セミナー 身体機能の拡張技術がもたらす人類の未来 (2018 年 11 月)

以上