

FollowSelect: 直観的なナビゲーションが可能な 経路追従型のメニュー選択手法

榮井 優介^{1,a)} 石黒 祥生^{2,3,b)} 大谷 健登¹ 西野 隆典⁴ 武田 一哉^{2,3}

受付日 2021年1月6日, 採録日 2021年7月7日

概要: 本論文では, ユーザに対してその場所で利用可能な機能の情報とそれが提供される場所への経路をプロジェクタにより床面に投影してメニューの提示を行い, ユーザが希望の経路に追従して歩くことでメニューを選択しながら, 同時にユーザを目的地までナビゲーションできるインタラクション手法である *FollowSelect* を提案する. これにより, ユーザは機能を見逃さず目的地に簡単にたどり着くことができ, 一方でシステムはユーザの選択をもとに機能を提供するための準備時間を確保できることが期待できる. 事前実験において, 床に経路を投影することによりユーザの歩行を誘導できることを確認した. さらに死角のある環境において *FollowSelect* の有効性を確認する実験を行い, 標識によるナビゲーション手法と比較してユーザが有意に簡単に目的地までたどり着くことができることを示した.

キーワード: プロジェクション型 AR, 屋内ナビゲーション, メニューインタラクション

FollowSelect: Path-based Menu Interaction for Intuitive Navigation

YUSUKE SAKAI^{1,a)} YOSHIO ISHIGURO^{2,3,b)} KENTO OHTANI¹ TAKANORI NISHINO⁴ KAZUYA TAKEDA^{2,3}

Received: January 6, 2021, Accepted: July 7, 2021

Abstract: In this paper, we propose a menu interaction that we call *FollowSelect*, which visualizes locally available services for the user and provides “paths” from the user to each of those services, by projecting this information onto the floor. The user can select a service/destination by simply walking along the path that leads to it. We expect that this interaction allows the user to easily reach the destination without missing any function. Additionally, the system can quickly identify the user’s selected service, providing additional time for preparing the service. In a preliminary experiment, we confirmed that the system can guide the user’s walking by projecting the path on the floor. In addition, we conducted an experiment to verify the effectiveness of *FollowSelect* in an environment with blind spots, and showed that the user can reach the destination significantly easier than the navigation method using signages.

Keywords: projector-based augmented reality, menu interaction, indoor navigation

¹ 名古屋大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Nagoya University, Nagoya,
Aichi 464–8601, Japan

² 名古屋大学未来社会創造機構
Institutes of Innovation for Future Society, Nagoya Univer-
sity, Nagoya, Aichi 464–8601, Japan

³ 株式会社ティアフォー
Tier IV, Inc., Nagoya, Aichi 450–6627, Japan

⁴ 名城大学都市情報学部
Faculty of Urban Science, Meijo University, Nagoya, Aichi
461–8534, Japan

a) yusukesakai@acm.org

b) ishiy@acm.org

1. はじめに

大きな空港や病院, ショッピングモールなど, ユーザがふだん頻繁に利用しない場所や多様な目的が集約された場所を利用するとき, どこに行けば目的が果たせるのかすぐに分からないという問題がある. その場所に存在する地図や標識をもとに目的地にたどり着くのが一般的であるが, 地図を読むのは難しいタスクであり, フロアの構造が複雑になるほど標識があっても正確にたどり着くのが難しいことが確認されている [1]. また, 静的な地図や標識ではそれ

それぞれのユーザに適応した表示ができず非効率的である。スマートフォンやインタラクティブなデジタルサイネージなどでユーザの現在位置や目的地に応じた地図表示をすることも可能だが、それでも地図を読むという相対的な位置関係から目的地への道のりを把握する必要があることに変わりはない。一方で、Augmented Reality (AR) グラスやスマートフォンの画面を通して実際の視覚情報に直接ナビゲーション情報を付与する手法 [2] も存在する。しかし、ユーザの目的地が1つに定まっていることが前提であり、どのように複数の選択肢を提示し選択させるかについては検討されていない。ユーザの目的地として考えられる候補が複数存在する場合や、そもそもどのような機能が提供されているかをユーザが把握していない場合は、まずどういった機能がその場所で提供されているかをユーザが把握したうえで、ユーザが求める機能を決定するステップが必要である。また、ふとした際にユーザの意図をシステムが先読みして情報提示を行うには、AR グラスの場合は正確な頭部位置推定が可能なデバイスをつねに身につけておく必要があったり、スマートフォンを用いたARの場合は、たとえばユーザに通知を行いスマートフォンを取り出して画面を確認させるという動作が必要になったりする。居住空間やオフィスなどユーザがふだん利用している場所において、ユーザの位置やその行動から次にどのような行動をとろうとしているかという意図を学習し、統計的にユーザの意図を推定する方法が提案されている [3] が、意図を正確に認識することは難しい問題であるうえ、ユーザが頻繁に利用せず、行動に迷いが表れるような環境の場合は検討されていない。ユーザによる入力を用いて意図の決定を行う場合、ユーザの持つスマートフォンや据え置き型のインタラクティブなデジタルサイネージなどを通じてユーザが希望する機能を入力したのちに、ナビゲーション情報をもとに目的地まで歩いて向かうという行動が必要になる。

そこで本論文では、ある場所のユーザが利用可能な機能の情報とそれが提供される場所への経路を床面に投影し、ユーザは希望の経路に追従して歩くことで機能を選択し目的地まで移動するインタラクティブ手法、*FollowSelect* を提案する。床面に投影することで、つねにARグラスを装着したり、スマートフォンを取り出してナビゲーション機能を起動したりすることなく、その場所においてユーザに提供可能な機能をユーザが把握でき、さらに経路を追従して歩行するという自然な動作でメニュー選択を行いながら目的地により早く簡単にたどり着くことが期待できる。また、このときユーザが床に投影された経路に誘導されて歩くのであれば、よりユーザの選択を認識しやすいように各経路どうしが十分離れるように設計することもできる。そして、システム側はユーザに選択させることでユーザの希望する機能を事前に決定することができ、それによって機能の提供のために準備動作が必要な場合でもユーザが向

かっている間に準備動作を行い、目的地到着後すぐにユーザに機能を提供することも可能になる。

本論文では *FollowSelect* を提案するとともに、床に経路を投影することでユーザの歩行がどのように変化するかを定量的に評価し、ユーザの歩行を誘導しメニュー選択として利用できるかを検証する。また、*FollowSelect* の利点としてあげた、より早く簡単に目的地にたどり着くことができること、ユーザの選択を正しく認識することができることについても検証する。さらに、考えられる応用例や現在の課題についても検討する。

2. 関連研究

2.1 メニュー提示・選択手法

これまでコンピュータやスマートフォンの Graphical User Interface (GUI) におけるメニューインタラクションとして、タッチした指の数をを用いる手法 [4] やジェスチャを用いる手法 [5] など、様々な手法が提案されている [6]。しかし現実空間におけるメニューインタラクションでは、スマートフォンやスマートウォッチなど操作のための機器を持ち歩き、それを取り出し操作するという動作が必要である。

身体によるジェスチャを利用した操作対象機器の選択およびインタラクション手法も提案されている。Kolleeら [7] や塚田ら [8] はそれぞれ手のジェスチャにより直観的に部屋のライトやテレビなどをコントロールするインタラクションを提案している。しかし、ユーザが頻繁に利用しない場所では機器ごとのジェスチャを覚えておくか新たに学ぶ必要があり、機能が増えていくにつれて必要なジェスチャの種類も増え、ユーザの負担が大きくなる。

他にも、床にプロジェクタで映像を投影し足や靴によりメニュー選択などのインタラクションを可能にするシステムが研究されており、床に分布させた圧力センサを通じて数 cm という小さなキーを通じたキーボード入力も可能になる高精度なシステム *Multitoe* [9] や、床に置いてある物を足で蹴ることでタンジブルなウィジェット操作を実現する *Kickables* [10] が提案されている。これらの足を使って押す、蹴るといった動作によるインタラクション手法に対して、本研究が提案する *FollowSelect* は歩行という自然なインタラクションによるメニュー選択を可能にする。

2.2 Augmented Reality (AR) によるユーザの誘導およびナビゲーション

AR グラスとビデオベースのチェックポイントを用いた屋内のナビゲーション手法が提案されている。Royらによる *Follow-My-Lead* [11] では、先導者があらかじめ目的地までのチェックポイントを動画で撮影してナビゲーションのためのガイドを作成し、ユーザはARグラスを装着してガイドを確認しながら移動する。これにより、屋内にお

いて難しい正確な位置推定を必要とせず、ユーザが簡単に目的地までたどり着くことができる。しかしこの手法の場合、動画によるガイドと実際の風景を見比べて経路を見出すことが必要である。また、ユーザの目的地が1つに定まっていることを前提としたナビゲーション手法であり、複数の選択肢が存在する場合どのようにユーザに情報提示し、ユーザの目的を決定するかは検討されていない。一方で我々は、複数の選択肢を床面に直接投影することでユーザにメニューの情報を提示し、ユーザはそれに沿って歩行することで選択するというメニュー選択と、それと同時に目的地までのナビゲーションを可能にする手法を提案する。

移動ロボットがユーザに近づきプロジェクタにより床や壁に情報を投影することで、掲示板や地図を見ているユーザに対して付加的な情報を提示したり、歩くユーザに対して道案内を行ったりするといったシステムが提案されている。たとえば Lee は移動ロボットが床や壁などに情報を投影することで視覚的情報支援を行うことのできる *Ubiquitous Display* (UD) を提案している [12]。塩谷らは、この UD を搭載する自律型の移動ロボットを用いることでショッピングモールのような人が動的に存在する環境で情報支援を行うための移動ロボットの行動モデルを設計している [13]。Knierim らにより、ユーザに追従するドローンから進路を示す矢印（右に曲がる、左に曲がるなど）を地面に投影することでナビゲーションを行うシステムも提案されている [14]。ユーザスタディにより、スマートフォンの画面にナビゲーションの情報を表示した場合と比較してより周囲の環境を覚えられていた、つまり現実空間に対してより注意を寄せられていたことを示した。

環境ディスプレイを用いて人々の行動を誘導することを目的とした研究がある。Rogers らによる *Ambient Influence* は人々の“選択”の行動、特に建物内で階段とエスカレータのどちらを使うかの選択を誘導することを試みた [15]。そのための環境ディスプレイの1つとして、階段に向かう道のように複数の小さなライトを床に埋め込んだところ、多くの人々がそれに誘導されて沿って歩くようになったことが報告されている。そこで我々は、ユーザの位置から目的地までの経路を床に投影することで、ユーザを経路に沿って歩くように誘導しつつナビゲーションできるのではないかと考えた。しかし、Rogers らは経路を表示することでユーザの歩行経路がどのように変化するかを定量的に評価していないため、本論文ではまず事前実験によってユーザが投影された経路に誘導されるかどうかの検証を行う。

2.3 ユーザの行動の誘導・変容

行動経済学や心理学の分野において、ユーザの行動を誘導したり変容させたりする手法に関する研究が多く存在する。たとえば Thaler らは、それらの分野における知見に基づき、公共利益の増進を目的として人の行動変容を促し

たり選択に影響を与えたりする情報提示手法をナッジと定義している [16]。ナッジを活用した有名な例として、オランダのスキポール空港の例があげられ、同空港では男性用の小便器の中央に小バエを描くことにより、大幅な清掃費削減に成功している。他にも新型コロナウイルス感染症の対策の一環で、施設利用者の消毒液の利用を促進するために消毒液を設置した場所に向けてテープで床に矢印を表示するというナッジを活用した取り組みが存在する*1。Matsumura らは、特に人の遊び心に着目して魅力的な行動の選択肢を増やすことで行動変容を促す仕掛けを提案し、例として米国のハリウッドに存在する、階段にピアノの鍵盤を描き踏むと音を鳴らす仕掛けによりエスカレータよりも階段の利用を促進する *Piano Stairs* をあげている [17]。同文献ではユーザが状態を理解したりインタラクティブなプロセスを楽しんだりするためにはフィードバックが重要であると主張していることから、本研究においてもシステムの状態の理解を容易にし、インタラクティブ性を持たせるために、ユーザの歩行に応じたフィードバックを活用する。これらの研究は主に公共利益の増進のために人々の行動をより望ましいものに変化させることを目的としているのに対して、本研究では経路を提示してナビゲーションを行いながらユーザの歩行経路を変化させることで意図を認識し、よりスムーズに機能を提供することを目的とする。また、ナッジの分野では環境設計を工夫することで人々の行動変容を促すのに対して、本研究ではその行動の変容を活用してユーザの選択を早期に把握したうえで、その情報を活用したインタラクティブなメニュー選択を提案し、定量的な評価を行う。

3. FollowSelect のデザイン

3.1 経路投影型のメニューインタフェース

ユーザにとって、どのような機能がどこで提供されているかが分からないという問題に対して、本研究では、ユーザの現在位置から各目的地への経路を示す線と、目的地を表現するシンプルなアイコンと単語を床に投影してメニューの提示を行うインタフェースを設計する。これによりユーザはその場所においてどのような機能が存在し、どこに行けばそれが得られるかを把握し、機能を見逃さなくなるのが期待できる。

3.2 メニュー選択

ユーザは複数提示された経路の中から目的の機能に対応する経路に沿って歩くことでメニューを選択する。これにより、ユーザの意図認識結果が曖昧な場合でもユーザに選択肢を提示して歩行しながら選択させることで、意図認識が難しい場合においてもユーザの意図する機能を認識でき

*1 <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/nudge/16.html>
(参照 2021-07-12)

ることが期待できる。

床投影型のパブリックディスプレイにおいて、ユーザの継続的な利用には反動的なフィードバックが重要であると考えられている [18]。また、1 人に対して複数のメニューを経路により提示するが、全経路を表示したままと同じ場所で複数人がシステムを利用する場合に経路数が人数とメニュー数に応じて増加し、分かりにくくなることが予想される。そこで、スマートフォンのジェスチャ操作におけるメニューの増加に対応するシステムである *OctoPocus* [5] を参考にして、図 1 に示すような、ユーザ選択の認識の確信度に応じて選択されていない経路の透明度を徐々に高くすることで消すフィードバックを用いる。開始時には図 1(a) のようにすべての経路が表示され、ユーザが歩行し始めると図 1(b) のように選択されていない経路の透明度が高くなり、さらに歩行すると、図 1(c) のように選択した経路のみが残り他の経路は透明になる。ユーザが表示されているメニュー以外の機能を所望している可能性があることから、何も選ばれなかった場合はすべての経路を透明にして消す。

フィードバックにおける経路ごとの透明度を決定する際の具体的な手法について述べる。メニューを最初に表示した際には全経路の透明度を 0 とし、ユーザの歩行が進むにつれて選択されていない経路の透明度を高くすることを実現するため、経路 i の透明度 α_i を歩行の進捗度合い s_{progress} と経路 i への沿い度合い $s_{\text{selected},i}$ を用いて

$$\alpha_i = 1 - s_{\text{progress}} s_{\text{selected},i} \quad (1)$$

と計算する。歩行の進捗度合い s_{progress} は、スタート地点からアイコン位置までの直線距離 d_{icon} に対する、スタート地点からその時点でのユーザ位置への直線距離 d_{walked} を用いて

$$s_{\text{progress}} = \min\left(\frac{d_{\text{walked}}}{d_{\text{icon}}}, 1\right) \quad (2)$$

と計算する。そして経路 i への沿い度合い $s_{\text{selected},i}$ は、その時点でのユーザ位置から経路 i との最短距離 h_i と、しき

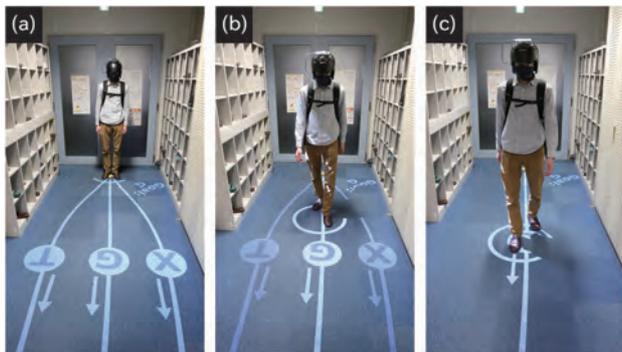


図 1 実装したフィードバックの例

Fig. 1 An example of implemented feedback.

い値 h_{thresh} を用いて

$$s_{\text{selected},i} = \max\left(0, \frac{h_{\text{thresh}} - h_i}{h_{\text{thresh}}}\right) \quad (3)$$

と計算する。ここで、2つの隣り合った経路の間隔が h_{thresh} に対して小さい場合、それら 2つの経路の間を歩行したとしても経路は完全に消えず、どちらも表示される。経路の間隔が h_{thresh} に対して大きくなるほど、経路の間を歩行した際にそれぞれの経路が透明になり消えるようになる。

4. 死角のない投影環境での事前実験

我々はまず、床に経路を投影することによってユーザがそれに誘導され沿って歩くようになるかどうか、その歩行の軌跡がどのように変化するかを検証する事前実験を行う。そもそもユーザが投影された線に沿って歩かなければ、システムがユーザの選択を認識することが難しいことから *FollowSelect* のインタフェースは有効ではないことになる。また、投影した経路が目的地に対して最短距離の経路でなかった場合にもユーザが経路に沿って歩くかどうかを検証する。もしそうであれば、システムにとってよりユーザの選択を認識しやすいように隣り合った経路どうしを十分離すといったことも可能になる。まとめると、本章では以下の 2つの仮説を立て、実験により検証した結果を述べる。

- H1 床に経路を投影するとユーザがそれに沿って少ないばらつきで歩行するようになる。
- H2 目的地に対して最短距離ではなくより長い経路を投影してもユーザがそれに沿って歩行する。

4.1 実験環境

図 2 に示すように、オフィス環境の室内における死角のない部屋部分に 1 台のプロジェクタを下向きに設置し、約 1.5m × 2.5m の範囲に映像を床に投影できる実験環境を構築した。参加者にとってスタート地点からゴール地点が見える環境で実験を行うことで、最短距離でゴール地点に向かう経路が参加者にとって明らかな状態においても床に投影された経路に沿って歩くかどうかを検証する。図 3 に示すように、スタート地点、2つの静的な障害物、1つのゴール地点で構成される実験環境を作成した。それぞれ

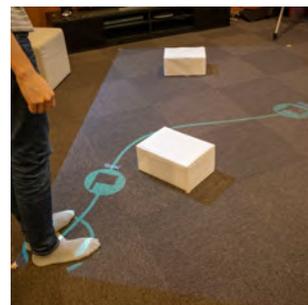


図 2 実際の実験環境

Fig. 2 Actual experimental setup.

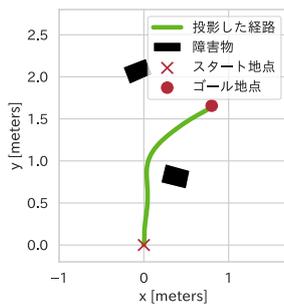


図 3 実験環境の概観図

Fig. 3 Overview of experimental setup.



図 4 参加者が装着した VIVE Tracker

Fig. 4 A participant with a VIVE Tracker.

のゴール地点について、Manns らが提案した A*アルゴリズムにより最短経路を算出したのちに B-spline カーブによりスムージングする手法 [19] を用いて経路を作成した。さらに、最短の経路が通る点を障害物として再度同様の手法を用いることで、最短距離ではないより長い経路も作成した。実際のシステムでは、ユーザがデバイスを装着することなく位置取得を行いシステムに反映させることが必要であるが、本実験においてはユーザの正確な歩行経路を記録し解析するために、HTC VIVE Tracker *2 と 2 つのベースステーションを用いてユーザ位置をトラッキングした。VIVE Tracker は図 4 に示すように実験参加者が腰の周りに身に付けたベルトの中心に装着した。

4.2 実験手順

参加者には、障害物である箱を踏んだり乗り越えたりせずに、旗のアイコンが描かれたゴール地点に向かってできるだけふだんどおりに歩き、到着したらゴール地点の上で立ち止まるように指示する。まずスタート地点を投影し、参加者がスタート地点に立ったのちに試行を開始し、経路とゴール地点を投影する。参加者がゴール地点に到着したタイミングで試行を終了し、投影を停止する。

2カ所のゴール地点を設定した。各参加者は、経路投影なし、最短経路、長い経路の 3 条件と 2 つのゴール地点それぞれで 2 条件の計 6 条件を 1 回ずつ、参加者ごとにランダムな順序で体験する。

*2 <https://www.vive.com/us/vive-tracker/> (参照 2020-12-30)

4.3 評価方法

床に経路を投影することで参加者の歩行経路のばらつきが有意に小さくなるかどうかを評価する。歩行経路の参加者間のばらつきは、参加者 n 人の歩行経路から 2 つ取り出した組合せ $(n C_2)$ の各ペア間で式 (5) によりハウスドルフ距離を計算し、その平均値により定量化する。 X と Y を参加者の歩行した 2 つの経路の点の集合、 x と y をそれぞれの経路における点、そして $d(x, y)$ を点 x と点 y 間のユークリッド距離とすると、経路 X と経路 Y 間のハウスドルフ距離 $H(X, Y)$ は次の式で計算する：

$$h(X, Y) = \max_{x \in X} \left\{ \min_{y \in Y} \{d(x, y)\} \right\}, \quad (4)$$

$$H(X, Y) = \max \{h(X, Y), h(Y, X)\}. \quad (5)$$

スティーラの多重比較検定 [20] を用いて、対照群（経路投影なし）と 2 つの処理群（最短経路、長い経路）間のハウスドルフ距離の平均値に有意な差があるかを検定する。

4.4 結果

20 代の男性 10 名が実験に参加した。図 5 に参加者の歩行した経路の計測結果を示す。経路投影がない場合は各参加者はそれぞれ様々な経路を歩行したのに対して、経路を投影した場合はほとんどの参加者が投影された経路に沿って歩行した。1 人の参加者 (P1) のみがゴール地点 2 に対して最短の経路が投影された際に投影された経路とは異なる経路を歩行した。参加者 P1 は“反時計回りの方向に歩くのが自分にとって好ましいと感じたため、投影された時計回りの経路を通らなかった”とコメントした。

図 6 にそれぞれのゴール地点、経路投影の条件に対する実際の歩行経路のハウスドルフ距離の箱ひげ図を示す。スティーラの多重比較検定の結果、2 つの処理群（最短経路、長い経路）におけるハウスドルフ距離の平均値が対照群（経路投影なし）の場合よりも有意に小さかった ($P < 0.05$)。

4.5 考察

床に経路を投影することで参加者の歩行経路のばらつきが経路を投影しなかった場合よりも有意に小さくなった。このことから、スタート地点からゴールが見えるという参加者にとってゴール地点への最短距離である経路が明らかの場合でも、ユーザは投影された経路に誘導され沿って歩く傾向があることが確認できた。この結果によって本実験の 2 つの仮説 H1：“床に経路を投影するとユーザがそれに沿って少ないばらつきで歩行するようになる”および H2：“目的地に対して最短距離ではなくより長い経路を投影してもユーザがそれに沿って歩行する”が支持された。

1 人の参加者が 1 度だけ、反時計回りに歩くことを好んで投影された時計回りの経路を無視して歩行した例があった。時計回りと反時計回りのどちらの向きに歩くかのバイ

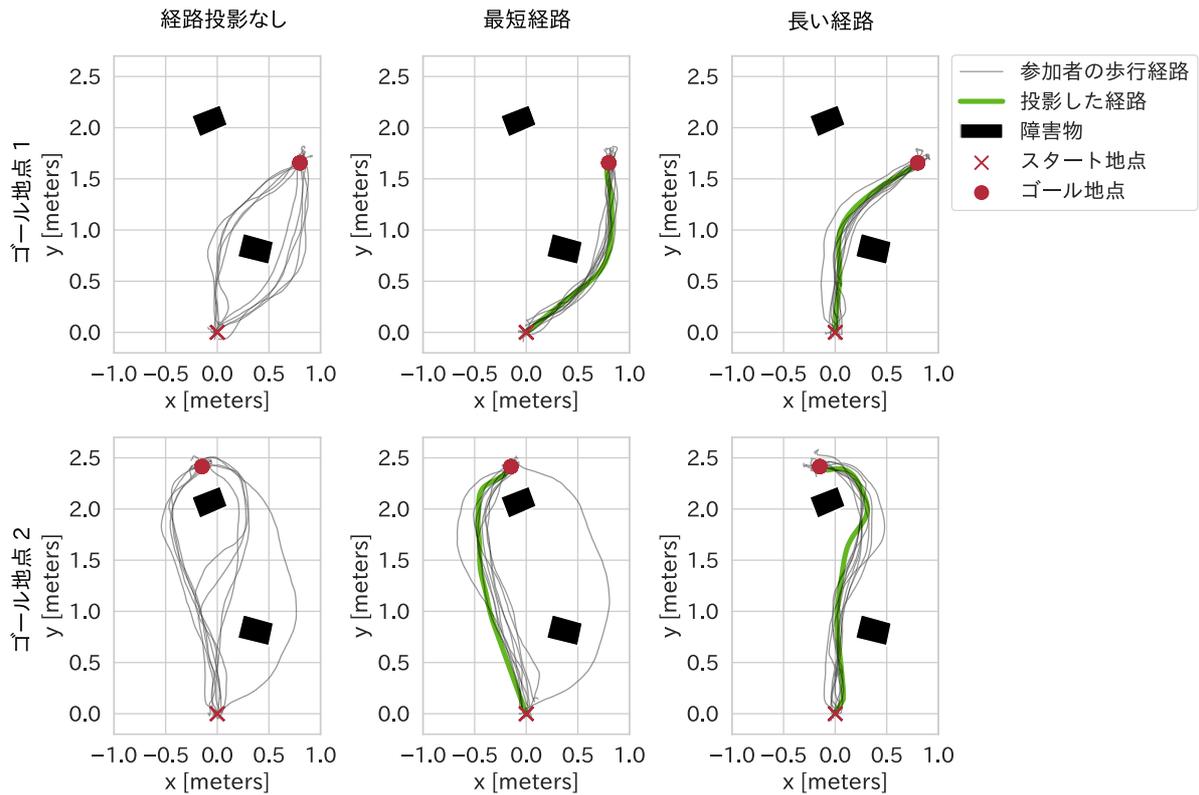


図 5 各条件下における参加者の歩行経路の概観図

Fig. 5 Visualization of trajectories of the participants to each of two goals, under three path conditions.

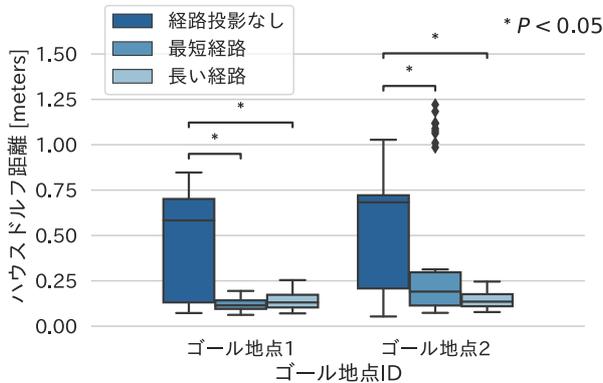


図 6 各条件下における歩行経路間のハウスドルフ距離の箱ひげ図

Fig. 6 A box plot of Hausdorff distances among the walking trajectories under three path conditions for each goal.

アスについては検証されている [21] ものの、どちらが一般的に好ましいのか明確な答えはまだ出ていない。どのような経路がユーザにとってより好ましく歩きやすいかについてはまだ検討の余地が残っており、こういった好みを考慮して経路を生成することでユーザがより自然にたどって歩行でき使いやすいシステムが実現できると考えられる。

5. 死角のある投影環境での評価実験

FollowSelect の投影した経路によるメニュー選択手法を用いることで、本研究の目的である「ユーザはより早く簡



図 7 実験環境の概観図

Fig. 7 Overview of experimental setup.

単に目的地にたどり着くことができ、システムはユーザの選択を早い段階で正確に認識できる」ことについて実験により検証した。

5.1 実験環境

図 7 に示すように、オフィス環境の室内における死角のある通路部分に 5 台のプロジェクタを床向きに設置し、約 4.5m × 6.5m の範囲において映像を床に投影できる実験環境を構築した。投影する映像の作成には Derivative 社



図 8 RealSense T265 を装着した参加者の様子
Fig. 8 A user wearing RealSense T265.

のソフトウェア TouchDesigner^{*3}を利用した。2枚のグラフィックカード (NVIDIA 社の GeForce GTX 750 Ti および GeForce GTX 770) を搭載したタワー型のコンピュータ上で TouchDesigner を動作させ、5台のプロジェクタに画面を出力した。プロジェクタで投影する映像のキャリブレーションは、まずそれぞれのプロジェクタの投影範囲の四角形の角4点を実空間での座標で計測し、TouchDesigner に付属しているプロジェクションマッピング用のツールキットである KantanMapper^{*4}を用いた。

実際のシステムではユーザがデバイスを装着することなく位置取得を行う方法が望ましいが、参加者の歩行を分析することを目的として正確に位置取得を行うため、4章の実験と同様に装着型のデバイスを用いる。しかし、本実験では6.5mの範囲でユーザが移動し死角も存在することから、4章の事前実験で使用した VIVE Tracker によりユーザ位置を正確に推定することは難しい。そこで本実験においてはユーザの位置を推定するため、カメラで撮影された映像からカメラの開始位置からの相対的な位置と姿勢を推定できる Intel 社の RealSense T265 を利用した。RealSense T265 を用いることで、屋内・屋外にかかわらずカメラ画角内に静的な視覚的特徴が十分存在する環境であれば位置計測が可能となる^{*5}。図 8 に示すように実験参加者は T265 が取り付けられたヘルメットを被り、T265 をバッテリー駆動のノート PC (Windows 8.1) に接続した状態でバックパックに収納した。実験中は T265 により推定された位置情報が TouchDesigner を立ち上げた PC に UDP 通信で送信され、投影映像への反映およびデータの記録を行った。

5.2 作成した投影映像

本実験では、図 9 に示す提案手法である FollowSelect の

^{*3} <https://derivative.ca/product> (参照 2020-12-30)

^{*4} <https://docs.derivative.ca/Palette:kantanMapper> (参照 2020-12-30)

^{*5} <https://www.intelrealsense.com/tracking-camera-t265/> (参照 2021-07-12)



図 9 FollowSelect によるナビゲーション手法
Fig. 9 Cues using FollowSelect.



図 10 矢印によるナビゲーション手法
Fig. 10 Cues using arrows.

経路を用いたナビゲーション手法と、図 10 に示すベースラインとして矢印を用いたナビゲーション手法の2種類それぞれの投影映像を作成した。以下、投影により参加者に提示するナビゲーションの情報 (矢印および経路) を手がかりと呼ぶ。ここでベースラインとして用いた矢印による手がかりは、従来から駅や空港などの施設の中で広く用いられている標識や、関連研究 [14] で用いられているような、ある場所から目的地への方向を矢印により示すナビゲーションの手がかりを模したものである。ユーザの初期位置から死角になっている3カ所に固定のゴール地点を設定し、ゴール地点のID (ランダムに選択したアルファベット) を描画した。FollowSelect の経路を用いた手がかりについては、各ゴール地点ごとに手で経路を作成し、ユーザの初期位置から2mの位置に行き先のゴール地点のIDを表すアイコンを描画した。また、3.2節で述べた方法でユーザの位置に応じて各経路の透明度を計算し、図1に示したフィードバックを用いた。スタート地点からアイコンまでの距離 d_{icon} は2m、経路への沿い度合いを計算する際のしきい値 h_{thresh} は約1.55mの幅の廊下に3つの経路を表示する必要があることから廊下幅の約3分の1である

0.5m に設定した。矢印を用いた手かかりについては、2つに分岐する場所（計3カ所）に矢印を配置し、あわせて行き先のゴール地点のIDを表示した。手かかりの条件にかかわらず、いずれの条件下においても参加者の移動に応じて足元に直径60cm、太さ4cmの円を投影した。

5.3 実験手順

実験の試行の前に、床に貼ったテープによって示される固定のスタート地点に立つよう参加者に依頼する。試行ごとにランダムに3つ重複がないように選択したアルファベットを3つのゴール地点それぞれに割り当てる。試行を開始した直後、参加者の初期位置の足元に行き先のゴール地点を示すアルファベットを表示する。参加者にはタスクとしてそのアルファベットが表示されたゴール地点を探して歩いて向かい、到着したらそのゴール地点の上に立ち止まり、その後実験者が合図を出した際に再度スタート地点に戻るよう依頼する。

提示する手かかりは、FollowSelectの経路による手かかりに加えて、ベースラインとして矢印による手かかり、手かかりなしの3条件とする。ゴール地点は3つそれぞれについて行い3条件とする。それぞれの条件について2回試行し、参加者ごとに合計18回試行する。各試行の順序は参加者ごとにランダムに設定する。

すべての試行が終了した後に、参加者に主観評価のためのアンケートへの回答を依頼する。提示した手かかりの各条件に対して、手かかりなしの場合は以下のQ1とQ2、矢印による手かかりと経路による手かかりを提示した場合はQ1からQ3までをリッカート尺度（1：“まったくそう思わない”から5：“強くそう思う”）で回答させる。

- Q1** ゴール地点の位置の特定が簡単だった。
- Q2** ゴール地点にたどり着くのが容易だった。
- Q3** 床に投影された画像の意味をすぐに理解できた。

さらにコメントがある場合はシステムのインタフェースやインタラクションに対する自由記述欄にさせる。

5.4 評価方法

FollowSelectによりユーザがより早く簡単に目的地に到着することができることを検証するための評価指標として、アンケートのQ1とQ2へのスコアと参加者がゴール地点に到着するまでに要する時間を利用し、各ベースライン（手かかりなしおよび矢印による手かかり）と比較することで評価する。到着するまでに要した時間は、スタート地点から0.2m歩行した際の時刻からゴール地点までの残りの距離が0.2mとなった際の時刻の差をとることで算出する。

また、FollowSelectによりシステムがユーザの選択を早い段階で正確に認識できることを検証するため、経路の手かかりを用いた場合についてユーザの選択を正しく認識

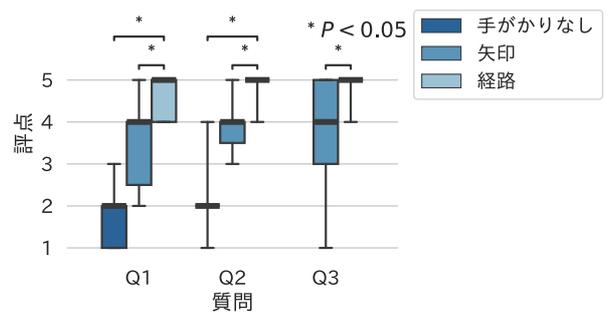


図 11 アンケートの各質問に対するスコアの箱ひげ図
Fig. 11 A box plot of the score for each question.

できた割合を計算する。ユーザ選択の認識は、参加者がスタート地点から直線距離2m歩行した地点における、式(3)によって計算した経路*i*への沿い度合い $s_{selected}$ が最も高い経路を選択することで行った。

5.5 結果

20代男性15名が実験に参加した。矢印による手かかりの場合で1試行、経路の場合で1試行の計2試行において参加者が間違ったゴール地点に歩行したため、それらのデータは以下に示す結果からは除外した。

5.5.1 アンケートの結果

アンケートの各質問に対する条件ごとの箱ひげ図を図11に示す。各質問に対して条件ごとのスコアに有意な差があるかを検証するため、Bonferroniの方法によるp値の補正とともにマン-ホイットニーのU検定を行った。

Q1：“ゴール地点の位置の特定が簡単だった”に対するスコアは経路 ($M = 4.67$)、矢印 ($M = 3.53$)、手かかりなし ($M = 1.67$) の順に高かった。また検定の結果、経路手かかりの場合のスコアの中央値は矢印と手かかりなしそれぞれの条件での中央値に対して有意に高かった（統計量はそれぞれ $U = 40.0$, $U = 0.00$, また $p < 0.05$ ）。

Q2：“ゴール地点にたどり着くのが容易だった”に対するスコアは経路 ($M = 4.87$)、矢印 ($M = 3.93$)、手かかりなし ($M = 2.20$) の順に高かった。また検定の結果、経路手かかりの場合のスコアの中央値は矢印と手かかりなしそれぞれの条件での中央値に対して有意に高かった（統計量はそれぞれ $U = 33.5$, $U = 1.00$, また $p < 0.05$ ）。

Q3：“床に投影された画像の意味をすぐに理解できた”に対するスコアは経路 ($M = 4.87$)、矢印 ($M = 3.73$) の順に高かった。また検定の結果、経路手かかりの場合のスコアの中央値は矢印手かかりでの中央値に対して有意に高かった ($U = 46.5$, $p < 0.05$)。

5.5.2 到着までに要した時間

スタートしてからゴール地点に到着するまでに要した時間の、提示した手かかりの条件ごとの箱ひげ図を図12に示す。スタートしてからゴール地点に到着するまでに要した時間は、提示した手かかりの条件ごとに経路 ($M = 6.06$ s),

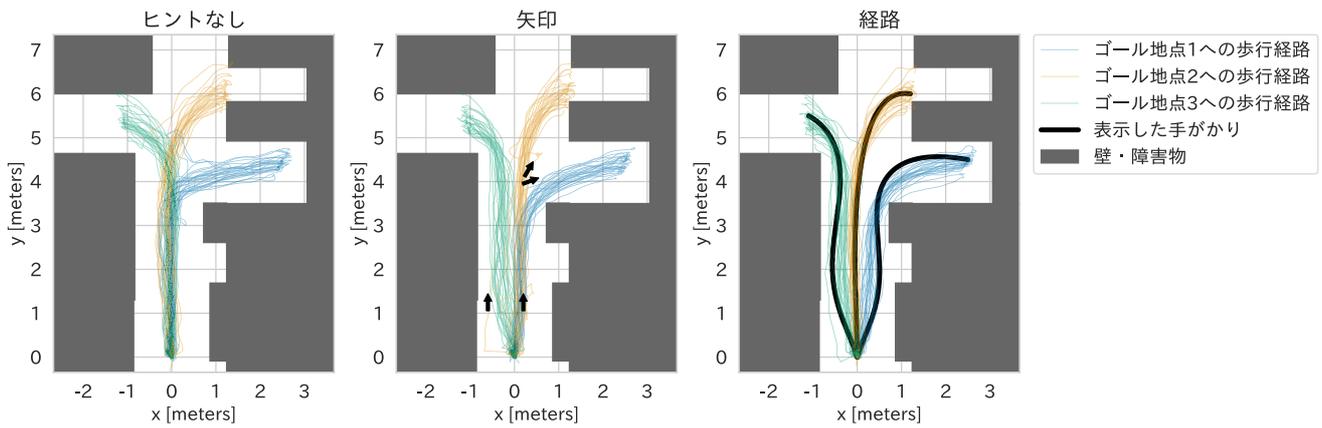


図 13 手がかりの条件ごとの各ゴール地点に対する各参加者の歩行経路の概観図

Fig. 13 Visualization of trajectories of the participants to each of three goals, under three cue conditions.

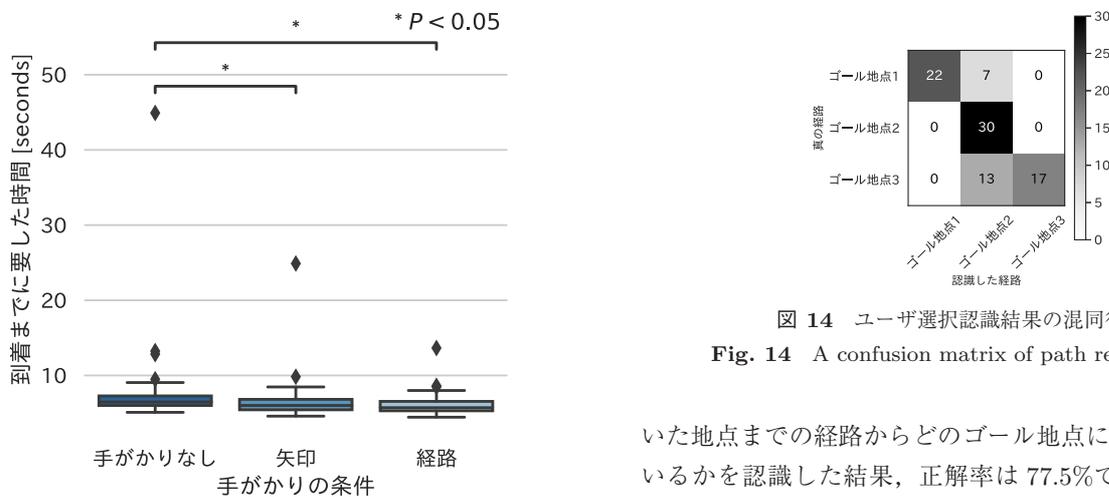


図 14 ユーザ選択認識結果の混同行列

Fig. 14 A confusion matrix of path recognition.

図 12 スタートしてからゴール地点に到着するまでに要した時間の箱ひげ図

Fig. 12 A box plot of the time required to arrive at the destination for each cue condition.

矢印 ($M = 6.37s$), 手がかりなし ($M = 7.15s$) の順で短かった。

それぞれの手がかり条件の3つの群間で到着に要した時間の中央値に有意な差があるかを検証するため、アンケート結果と同様に Bonferroni の方法による p 値の補正とともにマン-ホイットニーの U 検定を行った。検定の結果、手がかりなしと矢印群間 ($U = 2,775.0, p < 0.05$), 手がかりなしと経路群間 ($U = 2,413.0, p < 0.05$) のみにおいて有意な差があった。

5.5.3 ユーザ選択の認識性能

各ゴール地点に対する各参加者の歩行経路を手がかり条件ごとに可視化したものを図 13 に示す。T265 から得られた試行開始時の座標と試行終了時の座標をもとに、T265 の実験環境の座標系における初期位置と角度を算出し、各歩行経路のキャリブレーションを行った。提案手法の経路による手がかりを提示した場合において、参加者が 2m 歩

いた地点までの経路からどのゴール地点に向かおうとしているかを認識した結果、正解率は 77.5%であった。また、その混同行列を図 14 に示す。

5.6 考察

アンケートによる主観評価の結果から、提案手法の経路を用いた手がかりを用いることで、矢印によるある地点から目的地への方向を示すような手がかりよりもユーザにとってより簡単に目的の場所を発見したどり着けるようになることが確認された。到着までに要する時間については、手がかりがない場合に比べて手がかりを表示することで有意に短くなった。しかし、ベースラインの矢印による手がかりと提案手法の経路による手がかりの間では、平均値としては短い傾向はあるものの有意な差はみられなかった。参加者によるコメントに、「ゴール地点が試行ごとに固定だったため、数回の試行の後にはタスクを簡単にこなせるようになった」というものがあった。本実験の環境では、矢印による手がかりの場合でも手がかりの内容と位置から各ゴール地点がどこにあるかを正確に導くことは可能であるため、参加者が実験のタスクに慣れることでこれを理解し、到着に要する時間には大きな差が出なかったことを示唆している。「もしさらに広い場所や入り組んだ場所なら、経路が示されればより助かる」といったコメントも

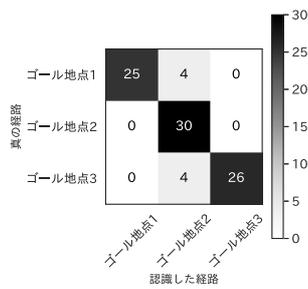


図 15 補正後のユーザ選択認識結果の混同行列

Fig. 15 A confusion matrix of corrected recognition.

あり、建物のフロア全体や駅の構内といったより広く複雑な環境で実験を行うことで、到着に要する時間が提案手法によって短くなるかどうかを検証することができる可能性がある。

経路に沿って 2m 歩いたユーザの選択を認識した際の正解率は 77.8%であった。メニュー選択手法として使うためには、理想的には 100%の正解率であることが望ましいが、認識誤りが発生していた。図 14 に示した混同行列を見ると、ゴール地点 2 については 30 例あった試行すべての場合で正確に認識できているのに対して、ゴール地点 1 と 3、特にゴール地点 3 について、隣り合っているゴール地点 2 への経路と誤って認識する場合が多い。ゴール地点 1, 3 への経路は、特に 2m 地点において通路の壁や家具に近い位置を通過している。人間が快適に歩行するためには男性の場合 80cm 前後の幅が必要であること [22] が報告されており、それに対して今回実験に利用した場所の通路幅が 1.55m と狭かったことから、参加者は快適に歩行するために投影された経路よりも中央寄りを歩行する 경우가多く、選択の認識性能が低下した可能性がある。経路が壁から少なくとも、男性が快適に歩行できるとされる幅 80cm の半分、つまり 40cm 離れるように修正した新たな経路を作成し、それをもとに本実験と同様の手法で経路認識を行った結果、正解率が 91.0%となった。その際の混同行列を図 15 に示す。このように壁が近くにあるなどによりユーザの歩行経路に影響がある場合でも、経路表示は変化させずに経路選択の認識を行う際のみ経路に補正を行い、認識の精度を向上させる工夫も可能であると考えられる。また、よりユーザ選択の精度を向上させるために、ユーザがより自然に沿って歩ける、もしくは歩きたくなるような経路の形状やフィードバックについても今後検討したい。

6. 応用例

6.1 ユーザにとってなじみのない場所への応用

5 章で述べた実験の主観評価において、従来の矢印によるナビゲーションと比べて FollowSelect によるナビゲーションの方が理解しやすく目的地にたどり着くのが簡単であったという結果が得られたことから、何がどこにあるかをユーザが把握していない、ユーザにとってなじみのない

場所におけるメニュー選択およびナビゲーションに有用である。たとえば空港において、地図の前で立ち止まっている人や道で立ち止まって周りを見回しているような人に対して、レストランやチケットカウンタ、トイレなどへの経路を提示することで、ユーザはタッチディスプレイに触れるなどの操作なしでメニューを選択し、迷わずに目的地の場所までたどり着くことができる。また、ユーザの行き先であるレストランやチケットカウンタに対して、ユーザが向かっていることを通知して準備を行うといったことも可能になる。

6.2 準備動作が必要な場合への応用

ユーザにとってなじみのない場所だけではなくオフィスやリビングなどユーザが知っている場所においても、ユーザに対して機能を提供する際に準備動作が必要な場合に有用であると考えられる。オフィスなどによく置かれているコーヒーマシンは起動に時間がかかるため、ユーザは 1 度マシンを起動してコーヒーを抽出できるようになるまで待っている必要がある。もしユーザがデスクからコップを持って歩き出したことを認識した場合、FollowSelect メニューによりコーヒーマシンへの経路を投影し、もし経路をたどって移動し選択すればその間に電源を入れておき準備動作を行うことで、ユーザが到着したらすぐにコーヒーを抽出することが可能になる。

7. 課題

7.1 投影する環境における課題

広い範囲において FollowSelect を利用するためには多くのプロジェクタの設置が必要であるが、現在の一般的なプロジェクタの場合十分な光量が得られるものはサイズや消費電力が大きいため、多くのプロジェクタを設置することは難しい。今後プロジェクタがより小型化し、照明をつける感覚で設置できるようになると FollowSelect を導入することが容易になる可能性がある。本論文では、スタート地点からゴール地点まですべてに経路を表示した状態で評価実験を行ったが、空港などの広い施設内の床すべてに投影を行えるような環境を構築することは困難である。必ずしもゴール地点まですべての経路を表示する必要はなく、最初のメニュー選択の部分と途中までの経路を表示し、それ以降は従来の案内表示や矢印によるナビゲーション手法と組み合わせることも可能であると考えられる。さらに、ドローンや自律移動ロボットと組み合わせる手法も考えられ、今後このような手法の提案および評価も行いたい。

屋外での利用を考えると、昼の時間帯で明るい環境の場合は現在のプロジェクタでは十分に視認できる光量が得られないと考えられる。そのため、現時点での屋外での利用は夕方や夜間の暗い時間帯に限られる。Mercedes-Benz 社が車両からレーザープロジェクタで歩行者の足元に横断歩道

を提示して横断を補助するプロトタイプ^{*6}を提案しており、このような未来のプロジェクトによりこの課題が解決される可能性はある。

7.2 経路表示方法に関する課題

複数人が同時に利用する際の経路の表示方法についての課題も存在する。ユーザの数が増加するほど、表示される経路の数も増加するため、複数のユーザが同時に利用すると各ユーザの経路の識別が難しくなるという問題が考えられる。ユーザごとに経路の色や線種（実線、破線、波線など）で分けることで各経路を識別しやすくする方法や、各経路が重ならないような経路生成を行うといった方法で解決できる可能性がある。

7.3 実際のシステムにおけるユーザのトラッキング方法

本論文における評価実験では、ユーザ装着型のトラッキングデバイスを用いてユーザの位置を取得したが、実際のシステムにおいては非装着型の方法で位置を取得するのが望ましい。たとえば画像および深度センサを搭載する Intel 社の RealSense D455^{*7}を空間内に設置し、人物の姿勢推定およびトラッキングが可能な Skeleton Tracking SDK^{*8}を用いることで、デバイスを装着しないユーザの位置をトラッキングでき、本論文で提案する手法が実現できると考えられる。また、画像の特徴点と画像内に存在する加速度センサのデータをもとに画像中の加速度センサの位置を推定するシステムが提案されており [23]、これにより個人を識別し、ユーザにとってより適した情報提示が可能になると考えられる。

8. 結論

本論文では、ユーザが床に投影された経路に追従して歩くことによるメニュー選択と目的地への直観的なナビゲーションを可能にするインタラクション手法として、FollowSelect を提案した。FollowSelect により、どこでどのような機能が提供されているかをユーザが理解して、経路に沿って歩くことで機能を選択し、目的地まで簡単に移動することができる。また、ユーザに選択肢を提示して歩行しながら選択させることで、意図認識が難しい場合においてもユーザの意図する機能を認識することや、早い段階でユーザの意図を決定できることからユーザに機能を提供するために必要な準備動作の時間を確保することも期待できる。実験による評価を行い、床に経路を投影することで

ユーザがそれに沿って歩行するようになることや、ユーザから見て死角となっている場所にある目的地により簡単にたどり着けることを確認した。

今後の課題として、周囲の人物などの動的な障害物が現れた場合は避けるために経路から外れて歩行する場合が考えられることから、それらに対応した経路生成方法を検討することがあげられる。さらに、大学構内などの実際の公共施設内に FollowSelect を設置してユーザスタディを実施することで、初めて FollowSelect を使うユーザがどのように反応し行動するか、何度か体験することによってそれがどのように変容するかを検証も行いたい。

参考文献

- [1] O'Neill, M.J.: Effects of Signage and Floor Plan Configuration on Wayfinding Accuracy, *Environment and Behavior*, Vol.23, No.5, pp.553–574 (1991).
- [2] Noreikis, M., Xiao, Y. and Ylä-Jääski, A.: SeeNav: Seamless and Energy-Efficient Indoor Navigation Using Augmented Reality, *Proc. on Thematic Workshops of ACM Multimedia 2017*, pp.186–193 (2017).
- [3] Rhinehart, N. and Kitani, K.M.: First-Person Activity Forecasting from Video with Online Inverse Reinforcement Learning, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.42, No.2, pp.304–317 (2020).
- [4] Bailly, G., Müller, J. and Lecolinet, E.: Design and evaluation of finger-count interaction: Combining multitouch gestures and menus, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol.70, No.10, pp.673–689 (2012).
- [5] Bau, O. and Mackay, W.E.: OctoPocus: A Dynamic Guide for Learning Gesture-Based Command Sets, *Proc. 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.37–46 (2008).
- [6] Bailly, G., Lecolinet, E. and Nigay, L.: Visual Menu Techniques, *ACM Comput. Surv.*, Vol.49, No.4, Article No.60 (2016).
- [7] Kollee, B., Kratz, S. and Dunnigan, A.: Exploring Gestural Interaction in Smart Spaces Using Head Mounted Devices with Ego-centric Sensing, *Proc. 2nd ACM Symposium on Spatial User Interaction, SUI '14*, pp.40–49, ACM (2014).
- [8] 塚田浩二, 安村通晃: Ubi-finger: モバイル指向ジェスチャ入力デバイスの研究, *情報処理学会論文誌*, Vol.43, No.12, pp.3675–3684 (2002).
- [9] Augsten, T., Kaefer, K., Meusel, R., Fetzer, C., Kanitz, D., Stoff, T., Becker, T., Holz, C. and Baudisch, P.: Multitoe: High-precision interaction with back-projected floors based on high-resolution multi-touch input, *UIST 2010–23rd ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.209–218 (2010).
- [10] Schmidt, D., Ramakers, R., Pedersen, E.W., Jasper, J., Köhler, S., Poh, A., Rantzsch, H., Rau, A., Schmidt, P., Sterz, C., Yurchenko, Y. and Baudisch, P.: Kickables: Tangibles for feet, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.3143–3152 (2014).
- [11] Roy, Q., Perrault, S.T., Zhao, S., Davis, R.C., Pattana Vaniyar, A., Vechev, V., Lee, Y. and Misra, A.: Follow-My-Lead: Intuitive Indoor Path Creation and Navigation Using Interactive Videos, *Proc. 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*,

^{*6} <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Overview-Mercedes-Benz-F-015-Luxury-in-Motion.xhtml?oid=9904624> (参照 2020-12-30)

^{*7} <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d455/> (参照 2021-04-10)

^{*8} <https://www.intelrealsense.com/skeleton-tracking/> (参照 2021-04-10)

- pp.5703–5715 (2017).
- [12] Lee, J.: Human Centered Ubiquitous Display in Intelligent Space, *IECON 2007–33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.22–27 (2007).
 - [13] 塩谷朋之, 前川晃祐, 岩本健児, 李 周浩: 大型公共施設においてサービス提供を行う Ubiquitous Display のための行動モデルの構築, *日本ロボット学会学術講演会*, Vol.30, 2N2-4 (2012).
 - [14] Knierim, P., Maurer, S., Wolf, K. and Funk, M.: Quadcopter-Projected In-Situ Navigation Cues for Improved Location Awareness, *Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.433:1–433:6 (2018).
 - [15] Rogers, Y., Hazlewood, W.R., Marshall, P., Dalton, N. and Hertrich, S.: Ambient Influence: Can Twinkly Lights Lure and Abstract Representations Trigger Behavioral Change?, *Proc. 12th ACM International Conference on Ubiquitous Computing*, pp.261–270 (2010).
 - [16] Thaler, R.H. and Sunstein, C.R.: *Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth and Happiness*, Penguin (2009), 遠藤真美 (訳): 実践 行動経済学, 日経BP (2009).
 - [17] Matsumura, N., Fruchter, R. and Leifer, L.: Shikakeology: Designing Triggers for Behavior Change, *AI Soc.*, Vol.30, No.4, pp.419–429 (2015).
 - [18] Monastero, B. and McGookin, D.K.: Traces: Studying a Public Reactive Floor-Projection of Walking Trajectories to Support Social Awareness, *Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18*, pp.1–13 (2018).
 - [19] Manns, M. and Martin, N.A.A.: Improving A* walk trajectories with B-splines and motion capture for manual assembly verification, *Procedia CIRP*, Vol.33, pp.364–369 (2015).
 - [20] Steel, R.G.D.: A Multiple Comparison Rank Sum Test: Treatments versus Control, *Biometrics*, Vol.15, No.4, pp.560–572 (1959).
 - [21] Karim, A.R., Proulx, M.J. and Likova, L.T.: Anticlockwise or clockwise? A dynamic Perception-Action-Laterality model for directionality bias in visuospatial functioning, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, Vol.68, pp.669–693 (2016).
 - [22] 松下信禎, 若井正一: 室内通路幅と歩行者の身体周囲に必要なアキ寸法の関係, *日本建築学会計画系論文集*, Vol.76, No.667, pp.1569–1576 (2011).
 - [23] 槇 優一, 鏡 慎吾, 橋本浩一: 画像特徴点運動に基づくカメラ視野内の加速度センサの位置推定と追跡, *計測自動制御学会東北支部第 264 回研究集会*, No.264-4 (2011).



榮井 優介

2017 年名古屋大学工学部電気電子工学科卒業。2019 年同大学大学院博士前期課程修了。同年より同大学院博士後期課程に在学中。AR を用いたインタフェースに関する研究に従事。



石黒 祥生 (正会員)

2012 年東京大学学際情報学府博士課程修了。博士 (学際情報学)。米国 Walt Disney Imagineering 研究員を経て、現在、名古屋大学未来社会創造機構特任准教授および株式会社ティアフォーシニアリサーチャ。Mixed reality, augmented reality, human-computer integration 等に関する研究に従事。



大谷 健登

2015 年名古屋大学大学院情報科学研究科博士課程前期課程修了。2018 年同研究科博士課程後期課程修了。博士 (情報科学)。現在、同大学院情報科学研究科特任助教。音楽信号処理に関する研究に従事。



西野 隆典 (正会員)

2000 年名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程単位取得退学。博士 (工学)。名城大学都市情報学部助手、名古屋大学情報メディア教育センター助手、同助教、三重大学大学院工学研究科准教授を経て、現在、名城大学都市情報学部教授。立体音響に関する研究に従事。



武田 一哉 (正会員)

1985 年名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了。博士 (工学)。国際電信電話株式会社、ATR 自動翻訳電話研究所、マサチューセッツ工科大学滞任研究員、名古屋大学助教授を経て、現在、名古屋大学大学院情報科学研究科教授。行動信号処理に関する研究に従事。