

仮想空間を利用した空間認識能力の計測手法の提案

嶋田 光佑^{1,a)} 廣井 慧^{2,b)} 梶 克彦³ 河口 信夫^{1,2}

受付日 2017年4月11日, 採録日 2017年10月3日

概要: モバイル端末を用いて歩行者にルートガイダンスを行うサービスは広く普及しているものの, このようなサービスを利用しながらも道に迷う人が存在する. これは方向感覚や距離感覚, 地図の読み解きなどの空間認識能力の個人差による, 案内理解の程度の差が一因としてあげられる. 本論文では, 将来的に個人の空間認識能力を考慮したルートガイダンスを提示するナビゲーションシステムの実現を目指し, 空間認識能力として移動中の行動, 移動軌跡から個人ごとの特徴を定量的に計測する手法を提案する. はじめに, 仮想空間上に都市環境を再現し, ルートガイダンスなど様々な提示情報, および情報提示手法を設定できる計測システムを開発する. 次に, 計測システムを利用し, 道に迷う人と迷わない人の特徴の差を検討したうえで, 計測手法を設計する. 本論文では, (1) 地図上での自己位置把握, (2) 目的地の方向把握, (3) 音声案内の記憶の定着の3つの計測手法について設計し, 計測実験を行った. 実験データを取得, 分析したところ, (1) と (2) については, 把握の正確さや早さ, (3) については, 音声案内を聞き直す回数や聞き直すまでの時間を評価基準として, 被験者ごとの行動に特徴的な差が確認できた. 最後に, 本計測手法の有用性を分析する目的で, 自己評定との違い, 実空間との違い, 再現性のための再実験の3つの項目について, 計測システムを用いた実験を行い, それぞれ75%, 60%, 71%の被験者が, 本システムでの計測と自己評定, 実空間での計測, 再実験での計測に大きな差はみられないことを確認した.

キーワード: 仮想空間, 空間認識, 能力計測

Measurement Methods of Spatial Ability Using a Virtual Reality System

KOSUKE SHIMADA^{1,a)} KEI HIROI^{2,b)} KATSUHIKO KAJI³ NOBUO KAWAGUCHI^{1,2}

Received: April 11, 2017, Accepted: October 3, 2017

Abstract: Although pedestrian navigation services using mobile devices become popular, some people get lost on the way to their destinations. The cause is considered to be a difference in comprehension of route guidance instruction due to individual differences in spatial ability such as sense of direction/distance and reading of maps. This paper proposes measurement methods for spatial ability using a virtual reality system to realize a navigation system that presents route guidance considering individual's spatial ability. We develop a measurement system that simulates the urban environment on the virtual space and sets various information such as route guidance. Then, we design measuring methods with the system based on differences in features between those who get lost and who do not. Using this system, we carried out experiments measuring three abilities: (1) recognizing the subject's location, (2) recognizing the direction of the destination, (3) efficient remembrance of navigation guidance. As a result, the experiments made clear individual differences in accuracy and speed of (1), (2) and sound reproduction intervals about (3). The experiments about self-assessment, measurement method in real environment, and a result of re-experiments was shown to be no significant differences with 75%, 60%, 71%, respectively.

Keywords: virtual reality, spatial ability, measurement method

¹ 名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya,
Aichi, 464-8603, Japan

² 名古屋大学未来社会創造機構
Institutes of Innovation for Future Society, Nagoya University,
Nagoya, Aichi, 464-8603, Japan

³ 愛知工業大学情報科学部
Faculty of Information Science, Aichi Institute of Technology,
Toyota, Aichi 470-0392, Japan

a) kosuke@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp

b) k.hiroi@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

方向音痴という言葉が示すように、人間が地図を見て目的地へ移動する能力には個人差がある。地図を使って目的地に向かう場合、どのような地図でも容易に読み解き、どこでも自由に移動できる人もいれば、地図と実空間の対応を十分に行うことができなかつたり、1つ1つの角を曲がるたびに地図を回転させないと自分の向きを把握できず、結果的に自分の方向を見失ってしまったりする人がある [3]。ナビゲーションシステムは目的地に向かう際に、電子地図を用いてルートガイダンスを自動的に生成するシステムとして 1980 年代から開発され、現在では歩行者にも広く利用されている。20 年以上の研究開発により、ナビゲーションシステムは十分に高度になっており、地図を読むのが得意な人にとっては大変便利に利用可能になっている。一方、地図を読むのが苦手な人にとっては、まだまだ十分に使いやすいものとなっているとはいえない。

ナビゲーション機能を持つ地図は様々なサービスとして開発提供されており、移動の際は、スマートフォンで地図やナビゲーションアプリを利用することが一般的になっている。しかし、2014 年に ZENRIN 社^{*1}が 18~69 歳の就業している男女に行った地図利用実態調査（インターネット調査、被験者 30,145 名が対象）[4] では、1 年以内に首都圏に行ったことがある人のうち、18.0%が「迷った経験がある」と回答した。さらに、地図を見ているながら迷った理由として、「看板（案内板）の指示に従ったつもりが途中で違う看板を見ていた」、「地図と目の前の風景とがどうしてもマッチせずどっちに進んだらいいのかさっぱり分からなかった」といった自由回答が得られた。

これは、既存のナビゲーションシステムにおいて、生成するルートガイダンスは地図を見たり、地図上の情報から生成された音声案内を利用したりすることを前提で作られており、地図が苦手な人にとっては、地図を前提としたルートガイダンスの利用が難しいためであろう。これはつまり、能力の個人差を考慮したシステム開発がなされていないことに起因する。

本論文では、地図を見て、実空間との対応付けを行うことを「空間認識」と呼ぶ。人の空間認識の能力には個人差があり、これを前提としたルートガイダンスの実現を目標とする。すなわち、空間認識の個人差を克服し、誰でも迷うことなく目的地に到達できるようなユニバーサルデザインのナビゲーションシステム構築を目指す。そのために、まず空間認識が人によってどの程度違い、どのような課題があるのか、また、どのように空間認識を行う力を判断するのか、計測する手法についての検討が必要であると考えた。

本論文では、仮想空間を利用した空間認識能力の計測手法を提案する。はじめに、仮想空間上に、被験者が地図を見ながら、目的地まで移動できる環境を実現する計測システムを構築する。このシステムでは、仮想空間内での被験者の位置や進行方向などのデータを取得できる。次に、人が道に迷った際、どのような行動をとりどのような移動軌跡をたどるのか、被験者実験を行い調査する。実験データをもとに、3つの計測手法 (1) 地図上での自己位置把握、(2) 目的地の方向把握、(3) 音声案内の記憶定着を設計し、計測システムを用いて被験者実験を行う。さらに、本手法の有用性を分析する目的で、自己評定との違い、実空間との違い、再現性の3つの項目について、計測システムを用いた実験を行い、得られた計測データをもとに分析する。

2. 関連研究

2.1 歩行者向けナビゲーション

提案する空間認識の計測手法は、利用者が自らの空間認識に対する能力を定量的に計測するものである。これまで、目的地までの経路を様々な形式で提示する歩行者向けナビゲーション手法が数多く提案されてきた。最も一般的な提示方式として、モバイル端末の画面に表示されている2次元や3次元の地図上に、利用者の現在位置や向いている方向、目的地、目的地までの経路を表示し、利用者を目的地へと案内するものがあげられる。たとえば、Google Maps^{*2}やYahoo!地図^{*3}では、地図上への経路表示とともに、「50m 先を右折です」のように進行方向の表示や音声案内を利用することができる。インクリメント・ピー社が提供している MapFan^{*4}では、モバイル端末に内蔵されているカメラを用いて実空間の映像に、AR でリアルタイムに経路を表示する。この手法を用いれば利用者は、表示されている道に沿って進むだけで良く、感覚的に目的地までたどり着くことができる。しかしこれらは、地図の閲覧を前提とした提示方法であり、「右折すべき 50m 先の分岐点」や、地図上での進行方向と実空間での分岐点など、表示された地図と実空間上の分岐点を利用者に対応付けしなければならない。

地図と実空間の対応付けを必要としない歩行者向けナビゲーションとして、Watanabe ら [5] は、ランドマークを利用し、空間構造に着目した地図の閲覧が不要な音声による案内手法を提案している。方痴民社が提供する Waaaaay!^{*5}では、目的地を設定すると、現在地から目的地がある方向と距離を表示する。利用者は、表示されている方向に向かって移動を行えばよい。地図が読めない利用者でも案内を容易に理解できる。Tsukada ら [6] は、Active Belt と呼

^{*2} Google Maps, <https://www.google.co.jp/maps>

^{*3} Yahoo!地図, <https://map.yahoo.co.jp/>

^{*4} MapFan, <https://mapfan.com/>

^{*5} Waaaaay!, <http://waaaaay.com/>

^{*1} ZENRIN 社, <http://www.zenrin.co.jp/>

ばれる，方位センサ，GPSと複数のアクチュエータからなるデバイスを腰に装着し，方位情報を触覚刺激によって提示する案内手法を提案した。

これらの方向を提示するナビゲーション手法は，地図と実空間の対応付けが苦手な利用者にとって使用しやすいものではあるが，センサやGPSの誤差により現在位置が正確でないとき，目的地の方向も誤って表示してしまう可能性がある。そのため，GPSの誤差が生じやすい場所で利用した場合，表示される方向は，誤差を含んだ地点からの方向であり，誤差がどの程度生じ，本当はどの地点が現在位置であるか，利用者が自ら考え，ナビゲーションと現在位置との対応付けをしなければならない。

効率的に目的地へ向かうためのナビゲーション手法は様々なものが研究されている。利用者は自分にあつたナビゲーション手法を選択し，利用すれば迷うことなく効率的に目的地へ到達できると考えられる。しかし，実際の利用を考慮したとき，最も効率的に目的地への到着を支援し，道に迷わないナビゲーション手法は，それぞれの利用者にとって固有ではなく，GPS誤差の生じやすさや，ランドマークの種類や道の構成といった都市環境など，様々な条件によって変化すると考えられる。地図と実空間の対応付けがある程度できる人であれば，地上の駅から目的地へ向かう際には，迷うことなく目的地方向が分かるが，対応付けが苦手な人が，初めて訪れる場所で地下鉄の駅から地上へ出てきた場合，どの出口にいてどの方向を向いているのか，把握することが難しく，道に迷ってしまう可能性がある。本論文では，様々な条件，環境で，それぞれの利用者の空間認識の特徴に最も適したナビゲーションを提示する，ナビゲーションシステムのユニバーサルデザインを目指すため，空間認識能力の計測手法を検討する。

2.2 空間認識能力の計測

空間認識能力に関する研究は，心理学の分野において広く研究されてきた。1980年代から1990年代に行われた研究では，人が移動する際の思考の観点から，人の空間認識能力を分析している。Hunt [7]は，経路探索についてイメージマップが予測因子の1つであると提言し，Lawton [8]は，屋内における経路探索のための思考について提言した。

一方，人の空間認識能力を計測する空間課題も提案されており，実験が行われている。竹内 [9]は方向音痴に関する事柄などの質問項目を含む，「道に迷いやすいか」などの項目を含む，51項目の質問紙を作成し，5段階評定で人の方向感覚の定性的な評価を行った。この評価をもとに作成された，方向感覚質問紙を用いたアンケートにより，人の方向感覚の定性的な評価が可能となる。

客観的かつ定量的な計測手法として，Bryant [15]やMurakoshiら [16]は，イメージポイントング課題を提案した。これは，被験者に特定の場所や方角を指で示しても

らい，正しい方向と回答方向との角度差を評価基準とする課題である。この課題を被験者1人あたり数回行い，各試行の角度差の平均や標準偏差を算出することで，人の空間認識能力の定量化を試みている。

2.3 空間認識能力の計測に関する課題

これまでの心理学的アプローチは，自己評定や限られた条件での実験分析が主であり，歩行者向けナビゲーションシステムを用いて目的地まで移動する利用者に対しての，適用を前提としていない。また，客観的かつ定量的なアプローチであっても，実験条件に見合う環境を選定し，その場所まで被験者を移動させ，さらには被験者の回答方向や回答時間などを手動で記録する作業が必要となる。これら従来の計測手法には以下の3つの課題があると考えられる。

主観的かつ定性的な計測データ 心理学の分野においては，被験者の観察や質問紙を用いてデータを取得し分析を行っていた。そのため，取得できるデータは被験者の自己評定に基づいた定性的なデータである。定性的な被験者実験では，目的地までの移動についての思考を分析する観点からは優れているが，被験者が気がついていない，潜在的な空間認識能力の特徴を計測することは難しい（たとえば，自らを道に迷いやすいと感じているが，他者と比べると迷うことが少ない人などがある）。

高い実験コスト 客観的かつ定量的なアプローチであっても，実験の実施には実験条件に見合う環境を選定し，その場所まで被験者を移動させる必要がある。実空間での計測実験では，実験環境として指定した場所まで移動しなければならないため，試行回数が増えるにつれて拘束時間が膨大になってしまう。これは時間のコストも被験者の体力的コストも大きく，数多くの被験者の確保や試行回数を増やすには大きな障壁となる。さらには被験者の回答方向や回答時間などを手動で記録しており，データ取得のコストが大きく，数多くの被験者に対し効率的な実験を行うことが難しい。

実験条件の制約 ランドマークの有無や道の複雑さなど，環境的な要因が，空間認識能力に与える影響は大きい。実空間で行う計測では，これらの環境要因を操作することは難しく，限られた環境条件での計測を行わなければならない。これは，計測する項目や計測の実験条件を決定するうえで大きな制約となる。

3. 空間認識能力計測手法の提案

3.1 提案手法の概要

本論文では，ナビゲーションのユニバーサルデザインを目指して，歩行者向けナビゲーションを利用している状態で，目的地まで到着するために，利用者それぞれがどのような特徴を示すのか，定量的なデータとして計測すること

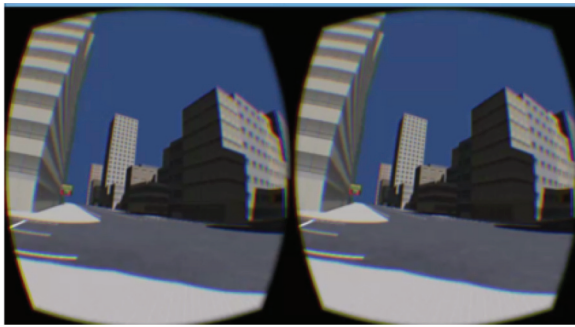


図 1 VR スコープで両眼立体視可能な形で可視化された仮想空間
Fig. 1 Binocular stereoscopic vision by Virtual Reality Scope.

を目指している。そのためには、2.3 節であげた課題を解決し、効率良く客観的かつ定量的に利用者の行動や移動軌跡の特徴を計測する手法が必要である。そこで本論文では、仮想空間上に空間認識能力の計測実験を行うための環境を構築し、個人ごとの特徴をデータとして取得するための計測手法を提案する。

本計測手法は、目的地に向かう利用者の行動や歩行軌跡のデータを収集し、データを解析することで、利用者の個人ごとの空間認識能力の特徴を明らかにすることを目的とする。本論文は、仮想空間上に実際の都市の建物や道路を再現し、目的地まで移動する過程での利用者の行動や移動軌跡をデータとして収集する。図 1 は、VR スコープを装着し、仮想空間を移動する利用者の視点である（図の右側を右目で、左側を左目で見ることで、仮想空間を立体視する）。仮想空間を利用した計測手法には以下に述べる 3 つの利点がある。

定量的かつ客観的なデータ計測 本手法では、実験の経過時間、被験者の仮想空間内での頭の向き、被験者の仮想空間内での身体の向き、被験者の仮想空間内での位置など、利用者の行動や移動軌跡について正確なデータを取得できるため、より客観的かつ定量的な計測が行える。

自由な実験設定 仮想空間上に実験環境を構築することで、実験者は仮想空間内で、実験で用いるルートガイダンス手法、現在位置や方向の表示、実験を行う環境（都市の種類やランドマークの有無）を自由に設定でき、様々な環境、条件で実験を行うことができる。また、実空間に存在しないような環境や案内手法に関しても仮想空間内で実装し、仮想的な実験を行うことができる。

実験コストの削減 仮想空間を用いることで、PC 環境さえ整っていれば、移動する必要もなく国内や海外の様々な街並みでの実験を行うことができるようになる。このことは、効率的な実験の実施につながり、より多くの利用者に対して、能力計測を行える可能性を示している。

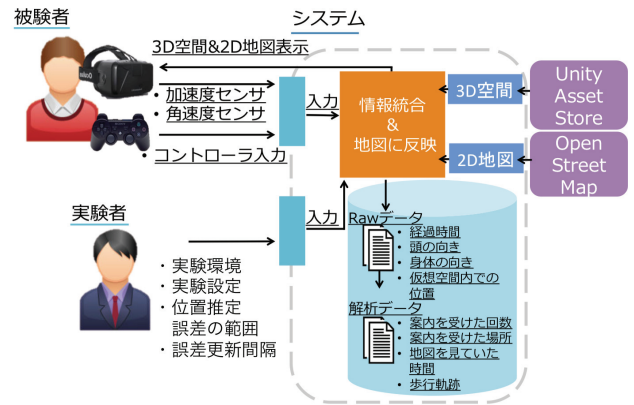


図 2 仮想空間システムの構成
Fig. 2 Virtual reality system overview.

3.2 計測システムの構築

3.2.1 システム構成

構築したシステムの概要を図 2 に示す。本システムは、移動を行うための 3 次元仮想空間、仮想空間内で目的地を示した地図、提示情報の 3 つから構成される。3 次元の仮想空間は実際の都市を再現しており、その内部を VR スコープを装着した利用者が自由に移動できる。利用者には、目的地を示した地図が提示されており、自由なタイミングで閲覧できる。実験者は、利用者に対し、実験で用いるルートガイダンスの提示手法や、現在位置や方向の表示、実験を行う環境（都市の種類やランドマークの有無）など提示する様々な情報を自由に設定でき、利用者の位置や移動などのデータを収集、解析できる。本論文では、ルートガイダンスの提示手法として i) 地図上への目的地までの経路表示、ii) 音声の 2 種類の経路案内を用意した。計測データについては 3.2.3 項に詳述する。

3 次元空間については Unity Asset Store^{*6}から、地図については Open Street Map^{*7}からデータを取得し利用した。なお本論文の地図は 2 次元のものを使い解析、評価実験を行うが、本システムでは 3 次元の地図に関しても、自由に作成および設定ができるものとした。仮想空間システムの開発環境として、ゲームエンジンである Unity^{*8}を利用し、VR スコープとして、Oculus^{*9}を用いている。また、本システムは文献 [1], [2] で開発したシステムを改良したものである。

3.2.2 仮想空間での移動

システム利用中の様子を図 3 に示す。利用者は手に持ったコントローラを用いて入力を行い、仮想空間内での操作を行う。仮想空間内では、地図の閲覧、移動の 2 つが主な利用者の操作となる。利用者はコントローラを用いて、仮想空間内での移動、方向転換を行う。

*6 Unity Asset Store, <https://www.assetstore.unity3d.com>

*7 Open Street Map, <https://openstreetmap.jp/>

*8 Unity, <http://japan.unity3d.com/>

*9 Oculus, <https://www.oculus.com/>



図 3 システム利用の様子

Fig. 3 Subject using proposed system through the HMD.

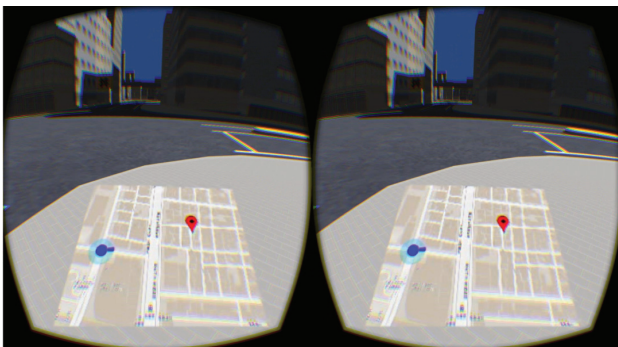


図 4 手元の地図閲覧時の仮想空間

Fig. 4 Virtual reality space on reading a map.

利用者は VR スコープを装着したまま下を向くことで、仮想空間内にて地図を閲覧できる。地図閲覧時の視点を、図 4 に示す。地図には、自分の位置と向いている方向を表すマークが表示される。円形の濃い青色のマークが利用者の位置、マークの突起のある方向が利用者の仮想空間内の体の向きを示している。なお、地図の拡大縮小について、仮想空間内で利用者が自由に行えるものとした。

利用者の用いるナビゲーション機能は、実験者があらかじめ、設定した提示情報を利用することができる。ルートガイダンスについては、i) 地図への経路表示の場合、地図上に利用者の現在位置とともに表示される。ii) 音声の場合、利用者がコントローラのボタンを押すことで任意のタイミングで音声ナビゲーションを再生可能としている。

なお、本システムでは被験者が下を向いて 2 次元地図を見ているときは、移動ができないものとした。実空間では車が走っていたり他の歩行者がいるため、つねに地図を凝視しながら歩くことは、現実的ではない。また、地図をつねに閲覧しながら移動できると、計測データの数値に影響があると考えたため、このような制限を行っている。

3.2.3 取得データ

実験者は、仮想空間内にいる利用者に対し、仮想空間内での表示や目的地などの提示情報を実験条件として設定し、利用者の行動や、移動軌跡などから、空間認識能力を計測する。具体的な実験条件は、仮想空間内で再現する都



図 5 Raw データおよび解析データの例

Fig. 5 Example of raw data and analysis data.

市、実験開始地点および目的地、利用者の用いる地図への表示項目の有無や値（現在位置、経路、目的地など）、利用するルートガイダンスの提示手法（地図上への経路表示または音声）などの条件を変更することで様々な実験を設定可能としている。

本システムで得られるデータは、利用者の位置や頭の向きといった Raw データと解析のために収集する解析データの 2 種類とした（図 2）。はじめに、Raw データとして本システムは、3.2.2 項の利用者の操作および、VR スコープに内蔵された加速度センサ、角速度センサの値をもとに、実験中に自動的に被験者の仮想空間内での状態を取得し、以下の項目を記録する。

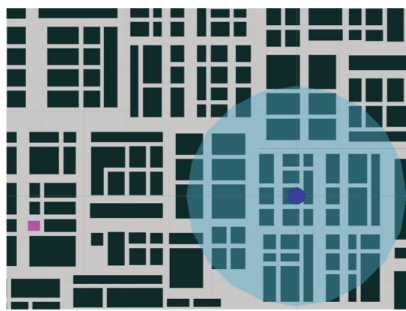
- 実験開始からの経過時刻
- 仮想空間内での頭の向き
- 仮想空間内での体の向き
- 仮想空間内での被験者の位置

実験者は、これらの Raw データおよび Raw データを組み合わせて生成した解析データを空間認識能力の分析に使用できる。実験者が取得する、Raw データおよび解析データの例を図 5 に示す。解析データの例として、歩行軌跡や地図を見た/案内を受けた場所、地図を見た/案内を受けた時間、コントローラのボタンを押下した際の体の向きなどがあげられる。

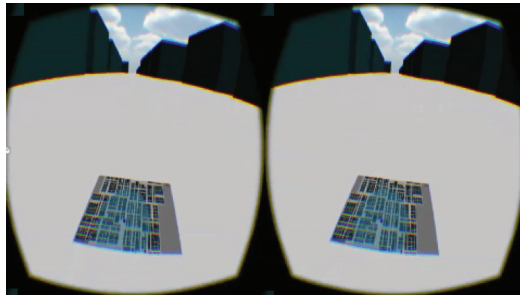
3.3 計測手法の設計検討

3.3.1 設計の目的

本システムは、空間認識能力の計測として、仮想空間で目的地までの移動実験を行い、そのデータを用いた分析により、個人ごとの特徴を分析、明らかにすることを目的としている。個人ごとの特徴はどのように生じるかを知り、どのような計測手法を設計すべきか考えるにあたり、本論文では、あえて迷いやすい環境を構築し、迷う人と迷わない人の差を明らかにすることとした。そのため、迷う人と迷わない人の両者の行動や移動軌跡を調べるため、複雑な迷いやすい経路で、迷いやすい実験条件として不正確な現在位置が表示された地図を見ながら目的地までの移動を行う、という予備実験を行った。これは、GPS 誤差により地図上の現在位置が実際の位置と異なって表示される状況を再現したものであり、実空間でも起こりうる状況である。



(a) 出発地点（青丸）と目的地（ピンク点）の例



(b) 地図閲覧時の被験者の視界

図 6 予備実験で被験者が移動する仮想空間の例

Fig. 6 Example of virtual reality space for preliminary experiment.

この予備実験のデータから、どのような状況、環境で人が迷うのか、また迷う人と迷わない人で移動や行動にどのような違いがあるのかを検証する。つまり、予備実験は迷う人と迷わない人の両者が生じる状況で、どのような要素が目的地への移動に影響を与えるのか調べることが目的である。

3.3.2 予備実験

地図を利用しているにもかかわらず迷いやすい状況として経験的に、地下鉄の出口から地上に出た際や、進行方向と地図の向きが一致していない際があげられることから、本論文では、A. 初期位置が不明確な状態で目的地まで到達する、B. 地図に示される進行方向と、仮想空間内で実際に被験者が向いている方向が一致しない状態で目的地まで到達するという2種類の実験を、8名の被験者（すべて20代男性）に対し行った。出発地点（初期位置）から目的地までは、図 6(a) に示すような複雑な経路とした。目的地はピンクの点で示されている。水色の円は位置推定誤差の範囲であり、この円のどこかに被験者がいることを示している。中心に青い点があるが、この場所にいるとは限らない。不正確な現在位置が表示された地図を見ながら目的地までの移動を行う状況を再現するため、一定時間ごとに正しい位置と誤った位置を交互に表示する形で位置推定誤差を導入した。あらかじめ位置推定の誤差の最大値と位置推定の誤差の更新間隔の2つをシステムに設定し、位置推定の誤差の最大値以内の誤差をランダムに発生させる。被験者に

表 1 予備実験 A の設定（位置）

Table 1 Set-Up of preliminary experiment A (Location).

予備実験	位置推定誤差	初期方向の通知
A1	半径 10 m 以内	通知
A2	半径 10 m 以内	非通知
A3	半径 50 m 以内	通知
A4	半径 50 m 以内	非通知

表 2 予備実験 B の設定（方向）

Table 2 Set-Up of preliminary experiment B (Direction).

予備実験	位置表示	方向表示	地図表示
B1	初期位置のみ	なし	ノースアップ
B2	初期と現在位置	なし	ノースアップ
B3	初期と現在位置	あり	ノースアップ
B4	初期と現在位置	あり	ヘッドアップ

対しては、更新間隔を 20 秒として設定し、誤差を含んだ位置と、正しい位置を 20 秒ごとに交互に表示した。なお、被験者には「このシステムの位置表示は誤差を含んでいる可能性があり、つねに正しい位置にいるとは限りません。」としか伝えないため、被験者は位置表示に誤差を含んでいることは知っているが、20 秒ごとに正しい位置と誤った位置を交互に表示する形で位置推定誤差を導入していることは知らない状況で実験を行う。なお、環境からの影響を排除するため、ランドマークとなるような建物や、弧線状の道路、鋭角や鈍角の分岐点、行き止まりを含む道はあえて含んでいない。すべての建物は黒色であり、迷いやすい地図となっている。

予備実験 A に関しては被験者の現在位置表示として、位置推定誤差をあえて悪くし、初期方向の通知/非通知による被験者の移動軌跡を調べる。なお、初期方向を通知しない場合は、初期位置で、北（上向き）とは異なる向きを提示した。つまり、自分の現在位置が不明確かつ自分の向いている方向が分からない状態で移動を始める、といった状況を再現している。A は表 1 に示す 4 パターンとした。

予備実験 B に関しては、位置推定誤差は与えないが、方向表示を操作して実験を行った。方向を通知しない場合は、初期位置で、ランダムな向きを提示することとした。これにより、自分の向いている方向が分からない状態で移動を始める、といった状況を再現できると考えている。さらに、被験者の進行方向を地図の上部とするヘッドアップ、北を地図の上部とするノースアップの2種類の表示手法を用い、表 2 に示す 4 パターンの実験を行っている。

実験の制限時間は各被験者、各実験で 180 秒とし、被験者が目的地に到着した時点で実験終了とした。また、180 秒を超えた場合、不着として実験を終了した。なお、180 秒を超えた場合でも目的地付近まで到達し、確実に目的地へ到着可能な場合は実験者の判断で実験時間を延長している。

3.3.3 予備実験の結果と考察

予備実験 A, B の結果を表 3, 表 4 に示す. 予備実験 A, B ともに目的地まで不着となった被験者がおり, 8 名

表 3 予備実験 A の結果 (位置) (○:迷わず到着, △:迷って到着, ×:迷って不着, 数字は到着までの時間, 括弧内は地図閲覧回数)

Table 3 Result of preliminary experiment A (Location).

予備実験	被験者 1	被験者 2	被験者 3	被験者 4	被験者 5	被験者 6	被験者 7	被験者 8
A1	○ 85.6 (10)	○ 117.9 (7)	○ 100.4 (13)	○ 114.1 (12)	○ 135.5 (22)	△ 186.2 (16)	△ 165.5 (19)	○ 111.8 (8)
A2	× - (20)	× - (22)	○ 119.6 (19)	× - (34)	× - (37)	△ 180.6 (15)	× - (19)	× - (22)
A3	○ 127.0 (14)	○ 127.4 (16)	△ 180.2 (26)	× - (23)	× - (25)	× - (20)	○ 180.0 (13)	○ 158.2 (10)
A4	× - (32)	× - (28)	○ 121.8 (9)	× - (38)	× - (17)	× - (17)	× - (17)	× - (23)

表 4 予備実験 B の結果 (方向) (○:迷わず到着, △:迷って到着, ×:迷って不着, 数字は到着までの時間, 括弧内は地図閲覧回数)

Table 4 Result of preliminary experiment B (Direction).

予備実験	被験者 1	被験者 2	被験者 3	被験者 4	被験者 5	被験者 6	被験者 7	被験者 8
B1	× - (12)	× - (23)	× - (22)	× - (21)	× - (18)	× - (17)	× - (15)	× - (18)
B2	○ 123.2 (17)	△ 185.0 (25)	○ 121.1 (21)	○ 162.5 (19)	× - (20)	× - (28)	○ 170.2 (20)	△ 171.5 (15)
B3	○ 119.9 (10)	○ 153.8 (18)	○ 137.1 (11)	× - (31)	× - (24)	○ 154.1 (20)	× - (29)	○ 153.7 (12)
B4	○ 127.7 (13)	△ 162.9 (8)	○ 122.9 (10)	× - (13)	○ 154.5 (9)	△ 180.0 (18)	○ 179.5 (16)	○ 130.7 (13)

の被験者が行った合計 64 回の試行中, 26 回の試行で迷う人が, 38 回の試行で迷わなかった人が確認できた. これは, 予備実験の環境や条件設定で, 迷う/迷わないという差が生じる実験ができたことを示している. また, 予備実験 A では, 位置推定誤差が小さいほど, また初期方向を通知した方が, 目的地まで到着できる人が多く, 予備実験 B では, 初期位置と現在位置を両方提示し, さらに地図がヘッドアップである方が目的地まで到着できる人が多かった. また, 迷って不着となったケースの地図の閲覧回数が 12 回から 38 回 (平均 22.8 回), 迷って到着できたケースの地図の閲覧回数が 8 回から 26 回 (平均 17.8 回) であったのに対し, 迷わず到着したケースの地図の閲覧回数は 7 回から 22 回 (平均 13.9 回) と少ない傾向にあった.

次に, 被験者の移動軌跡を地図上にプロットし, 被験者ごとに特徴があるか調べた. 例として, 被験者 1, 6 の移動軌跡を図 7 に示す. 被験者 1 は, 8 回の実験中 3 回不着であったが, いずれも目的地への付近で 180 秒の実験時間を超え, 不着となっていた. 到着できた 5 回の実験では, 地図上での自分の位置を正しく認識し, 一度も道を誤ることなく目的地へ到着している (例: 図 7(b)). 不着となった 3 回は, 進行方向はあっていたが, 最後に曲がる道を間違え, 180 秒をすぎて不着となったケース, 最初に進む方向を間違え, 比較的広い道に出てから, 正しい道へ進路を変えたケース (図 7(a)) であった.

一方で, 被験者 6 は, 8 回の実験で, 迷わず目的地に到着できたのは, B3 の 1 回のみであった. B3 は初期位置と現在位置および方向を提示する比較的難易度の低い実験となっている. 被験者 6 は, 出発時に目的地の方向へ向かった実験は 3 回のみであり, そのうち 1 回は目的地へ迷わず到着, ほか 2 回は途中で進路を誤り, 目的地へ到着することができなかった. また, 出発地点から目的地と反対の方向へ進路をとった場合でも, 初期位置や初期方向を通知した最も難易度の低い実験 A1 では, 正しい道へ進路をとり直し, 目的地へ到達することができている (図 7(c)). しかし, 初期位置と現在位置, 方向を提示した実験 B1 では, 出発地点からの進路をとり間違え, 出発地点周辺を左右に移動し続け, 正しい最短ルートへ戻ることなく実験終了時

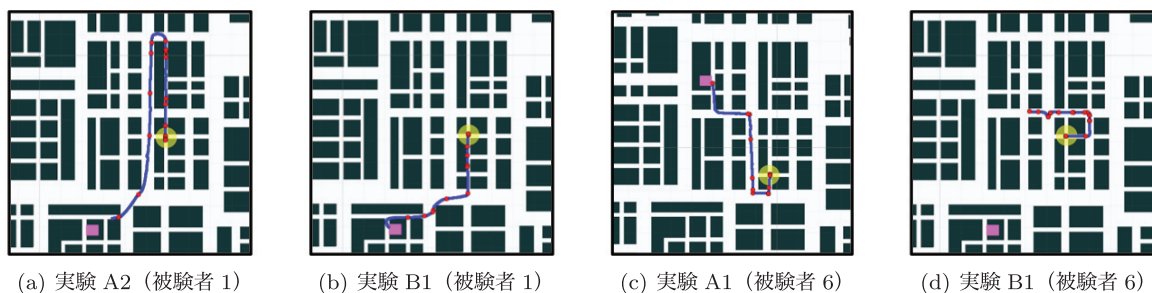


図 7 予備実験 A, B における被験者の移動軌跡 (黄丸: 出発地点, ピンク点: 目的地, 赤丸: 地図閲覧地点, 青線: 移動軌跡)

Fig. 7 Subject's trajectory of preliminary experiment A & B.

間を迎えた (図 7(d)).

以上の予備実験での被験者の移動軌跡から、地図と被験者の存在する空間との対応付けという観点で考察した、人がどのようにして迷うのか、その要因を以下にあげる。

I) 静止時 (出発時など) における地図と空間との対応付け

I-1) 現在位置が分からない

I-2) 現在の方向が分からない

II) 移動中における地図と空間との対応付け

II-1) 左右に曲がったときに、対応付けができない

II-2) 前進した際の距離間隔が対応付けできない

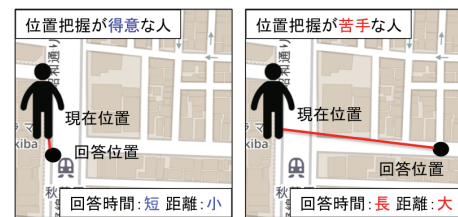
なお、ここであげる要因は一例であり、ほかにも、複雑な小路や弧線状の道、行き止まりを含む道で構成された場所など環境要因でも道に迷うという現象は生じると考えている。

3.4 計測手法の提案

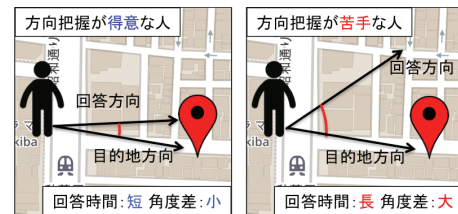
3.4.1 計測の目的

本論文では、人の空間認識能力として、特に地図と実空間の対応付けに着目をし、個人ごとの特徴の差を測定するための計測手法を提案する。前節で被験者に対し迷いやすい環境での計測を行い、地図と実空間の対応付けが困難となる要因として、迷った人、迷わなかった人の行動、移動軌跡の差を分析したところ、I-1) 現在位置が分からない、I-2) 現在の方向が分からないなどがあがった。そのため、本論文では計測手法として、この2点に着目し、I-1) 現在位置が分からない、に関して、(1) 地図上での自己位置を計測する計測手法を、I-2) 現在の方向が分からない、に関して(2) 目的地の方向把握を計測する計測手法を設計し、被験者に対して実験を行ったのち、計測データから個人ごとの差を明らかにするための分析を述べる。

さらに前節の予備実験では、到着できたケースの地図閲覧回数は少ない傾向にあり、迷っているほど多い傾向にあることが分かった。地図の閲覧には、現在地を探すため実空間と地図との対応付けを行ったり、目的地へ向かうための次の進行方向 (曲がり角など) を確認したりという目的が考えられる。本研究が目指す、ナビゲーションのユニバーサルデザインでは、この対応付けや次の進行方向を確認するための地図の閲覧を人の空間認識能力に合わせて、適宜回数やタイミングを変えることで、効率的な目的地への到着を支援できると考えた。そのため、計測手法(1)、(2)に加え、本システムで地図の確認回数について、被験者ごとの個人差がデータとして得られるか計測する。また、進行方向の把握について計測することとし、音声ナビゲーションの機能を用い、進行方向をアナウンスする音声をどのようなタイミングでどの程度聞き直すか計測する、(3) 音声案内の記憶定着の計測手法を設計した。以下から、計測手法(1) 地図上での自己位置把握、計測手法(2) 目的地の方向把握、計測手法(3) 音声案内の記憶定着について、詳細



(a) (1) 地図上での自己位置把握



(b) (2) 目的地の方向把握

図 8 計測手法 (1), (2)

Fig. 8 Measurement method (1), (2).

を述べる。

3.4.2 (1) 地図上での自己位置把握

計測手法(1)は仮想空間上での利用者の位置と、地図上での位置について、対応付けにかかる時間と正確さという観点で、地図上での自己位置把握についての特徴を計測する手法である。利用者には、地図を見て、現在位置の表示を確認し、自分が地図上のどこにいると考えられるか、地図上の点を回答してもらう。このとき、地図には、GPS誤差を含ませた不正確な現在位置が表示されており、利用者は仮想空間と地図を見比べて、対応付けを考えなくてはならない。地図上の現在位置と、利用者が回答する位置との距離の視覚的な説明を図8(a)に示す。円形の黒色のマークは被験者の回答位置、人型のマークは利用者の仮想空間上での位置を表しており、赤線が評価基準となる、回答位置と仮想空間上での位置との距離を表している。距離差が小さいほど、地図上での自己位置を正確に把握できるといえ、反対に距離差が大きいほど、地図上での自己位置の把握が苦手であるといえる。また、回答時間が短いほど、地図上での自己位置を素早く把握できるといえ、反対に回答時間が長いほど、地図上での自己位置の把握に時間がかかるといえる。

3.4.3 (2) 目的地の方向把握

計測手法(2)は仮想空間上での目的地の方向と、地図上に示された目的地方向について、対応付けにかかる時間と正確さという観点で、目的地の方向把握についての特徴を計測する手法である。利用者には、地図を見て目的地の方向を考えたいうえで、目的地はどちらの方向にあるか、仮想空間上で回答してもらう。回答方向と目的地の方向との角度差の視覚的な説明を図8(b)に示す。人型のマークは利用者の現在位置を表しており、2つの矢印は回答方向と目的地の方向を赤色の線が評価基準となる距離を表している。



図 9 (3) 音声案内の記憶定着

Fig. 9 (3) Remembrance of the voice guidance.

赤線で示された2つの矢印によってできた角度は、評価基準となる回答方向と目的地方向の角度差を表している。回答方向と目的地方向との角度差が小さいほど、目的地の方向を正確に把握できるといえ、反対に回答方向と目的地の方向との角度差が大きいほど、目的地の方向の把握が苦手であるといえる。また、回答時間が短いほど、目的地の方向の把握を素早く把握できるといえ、反対に回答時間が長いほど、目的地の方向の把握に時間がかかるといえる。

3.4.4 (3) 音声案内の記憶定着

計測手法(3)は、音声案内の確認回数、つまり進行方向の確認回数について、利用者ごとの特徴的な差を計測する。利用者にはあらかじめ目的地となる地点を伝え、ランドマークをベースとした音声による案内を聞きながら、できるだけ早く目的地まで移動してもらおう。図9のようなランドマークがある環境で、利用者は、①の位置から実験を開始し、②、③の地点に行くと、音声案内が自動で流れる。利用者が音声案内を再度聞きたいときは、コントローラのボタンを押すことで、いつでも直前の音声案内を聞き直すことができる。

音声案内を聞き直した回数が多いほど、音声案内の内容を正確に記憶しにくい傾向にある、反対に回数が少ないと、音声案内の内容の記憶定着に優れている傾向にあるといえる。また直前の音声案内から聞き直すまでの時間が短いほど、音声案内の内容の記憶が定着しにくい傾向にあるといえ、反対に長いほど音声案内の内容の記憶が定着しやすい傾向にあると考える。

3.4.5 計測データの評価基準

これまでに述べた各計測手法の評価基準を表5にまとめる。計測手法(1),(2)では、利用者に誤差を含んだ位置および方向が提示された地図を与え、地図上での自分の位

表 5 空間課題と分析の評価基準

Table 5 Evaluation criterion of spatial task and analysis.

計測手法	評価基準
(1) 地図上での自己位置	回答時間 回答位置と現在位置との距離
(2) 目的地の方向把握	回答時間 回答方向と目的地方向との角度差
(3) 音声案内の記憶定着	音声案内を聞き直した回数 直前の音声案内から聞き直すまでの時間

置、仮想空間内での目的地の方向を回答してもらおう。本システムにおいては、利用者が仮想空間での自己位置と地図上の位置、地図上での目的地方向と仮想空間内での目的地方向を正しく解釈し回答できるか、自己位置および目的地の方向の把握の正確さとともに、解釈、回答までの早さも計測した。なお、実験を行う際には、地図上に表示された位置と方向には誤差が含まれていることを伝え、できるだけ早く回答するよう依頼している。(3)音声案内の記憶定着については、音声アナウンスの確認回数について、被験者ごとの個人差がデータとして得られるか計測する実験である。そのため、どれだけ少ない回数で、また一度聞いたらどれだけ長く覚えていられるかを計測する。

4. 計測手法の評価実験

4.1 実験内容

ここでは、計測システムの仮想空間内で被験者実験を実施し、本計測手法を用いて得られた計測データから、個人ごとの特徴の差がみられるか評価実験を行う。実験を行う仮想環境として、実在する都市の3次元空間を利用した。今回用いた3次元空間の都市は、秋葉原、天神、札幌の3都市を用いた(ZENRIN社の3次元地図を利用)。実験は、被験者1人あたり、3都市で各3回ずつ計9回試行した。また、実験に用いた都市は、被験者にとって土地勘のない環境であることを確認している。その際、地図の記憶を最小限にするため、同じ都市で連続して実験を行わないようにした。

計測手法(1),(2)ともに、表1に示す数値を位置推定誤差として与えた。(1),(2)については、実験開始前に、被験者にはできるだけ早く回答するように伝えている。(3)の実験においては音声案内記憶の定着能力の計測を行うため、地図の読み取りの能力の差による結果の違いを排除する必要がある。そのため、VRスコープを装着した被験者が下を向いても、地図が見られないこととした。なお、いずれの実験においても、仮想空間内での行動の操作のためコントローラを用いたが、実験を行う前にコントローラの操作に慣れてもらうため、十分な練習を行った。

(1) 地図上での自己位置把握

本実験では、自らの位置を地図上で示してもらおう実験

を行う。計測手法および評価基準については 3.4.2 項で述べたとおりである。被験者は仮想空間内で、地図を参照し自分がいると思う位置にカーソルを動かし、コントローラの回答ボタンを押す。被験者は自己位置を把握するにあたり、周囲の環境確認を行うため、回答するまでに仮想空間内での移動を行うことは許可した。被験者は男性 19 名、女性 15 名の計 34 名であり、すべて 20 代であった。

(2) 目的地の方向把握

本実験では、目的地の方向を答えてもらう実験を行う。計測手法および評価基準については 3.4.3 項で述べたとおりである。被験者は、仮想環境内で目的地があると思う方向を向き、回答ボタンを押す。被験者には目的地の方向を把握するにあたり、周囲の環境確認を行うため、回答するまでに仮想空間内での移動を行うことを許可した。被験者は男性 18 名、女性 17 名の計 35 名であり、すべて 20 代であった。

(3) 音声案内の記憶定着

本実験では、ランドマークをベースとした音声による案内記憶の定着について実験を行う。計測手法および評価基準については 3.4.4 項で述べたとおりである。図 9 の環境において、被験者にはあらかじめ目的地となるランドマーク（本屋）を伝え、音声案内を聞いてできるだけ早く目的地まで移動してもらう。緑色の円は被験者の実験開始地点を示している。番号が示されている地点では一度だけ自動的に音声案内が流れ、被験者は移動を行う。被験者は手元のコントローラのボタンを押すことで、歩行中にも再度音声案内を聞くことができる。被験者は男性 9 名、女性 11 名の計 20 名であり、すべて 20 代であった。

4.2 実験結果と考察

4.2.1 (1) 地図上での自己位置把握

計測手法 (1) について、結果を表 6 に示す。回答時間の

算術平均について、男性は、56.4 秒から 61.6 秒であるのに対し、女性は 70.0 秒から 89.6 秒となった。男性の最小値は 27.4 秒、最大値は 117.1 秒、女性の最小値は 48.3 秒、最大値は 136.7 秒であり、女性の方が若干ではあるが時間をかける傾向にある。変動係数について男性は 0.4 もしくは 0.5 であり、女性は 0.3 もしくは 0.4 であり、分布に大きな差はみられなかった。

回答位置と現在位置の距離（距離差）の算術平均について、男性は、9.6m から 10.1m であるが、女性は、15.6m から 20.6m であり、2 倍近くの差が見られた。このときの、男性の最小値は 5.8m、最大値は 13.3m、女性の最小値は 8.8m、最大値は 34.7m となった。変動係数は、男性が 0.3 と 0.5 であることにに対し、女性は 0.2 であり、男性が 2 倍近くの値となった。

回答時間および距離差について、9 回分の試行の平均値を図 10(a) に示す。青色のプロットは男性、赤色のプロットは女性を表す。縦軸、横軸ともに、原点に近いほど現在位置を正確に/早く回答することができ、原点から遠いほど、位置を間違える/時間がかかることを示している。図 10(a)

表 6 計測手法 (1) の結果
Table 6 Result of measurement method (1).

評価基準	性別	都市	算術平均	標準偏差	変動係数
回答時間	男性	秋葉原	61.6	26.4	0.4
		博多	61.3	28.3	0.5
		札幌	56.4	28.1	0.5
	女性	秋葉原	84.8	33.1	0.4
		博多	89.6	26.5	0.3
		札幌	70.0	28.8	0.4
距離差	男性	秋葉原	9.6	4.5	0.5
		博多	10.1	3.1	0.3
		札幌	7.7	4.2	0.5
	女性	秋葉原	20.6	3.6	0.2
		博多	18.1	3.2	0.2
		札幌	15.6	2.8	0.2

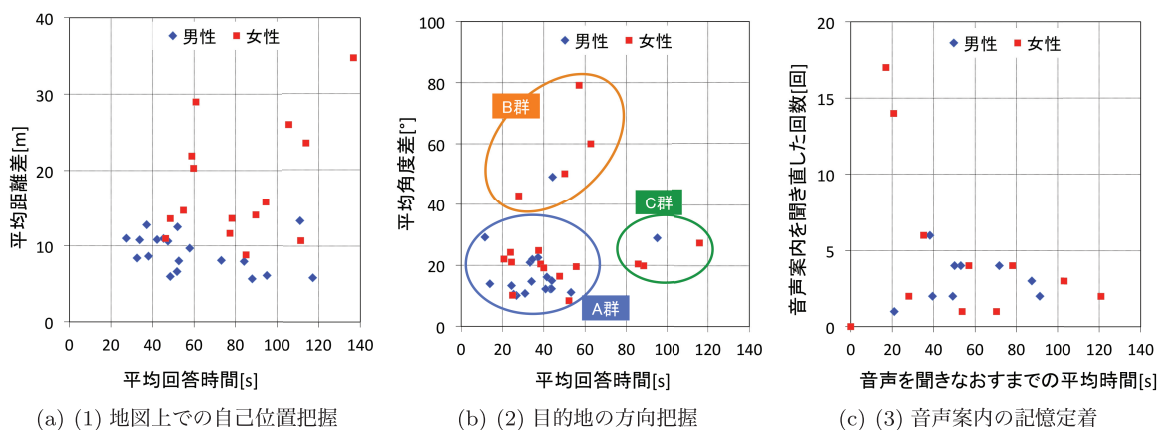


図 10 計測手法 (1), (2), (3) の評価実験結果
Fig. 10 Result of measurement method (1), (2), (3).

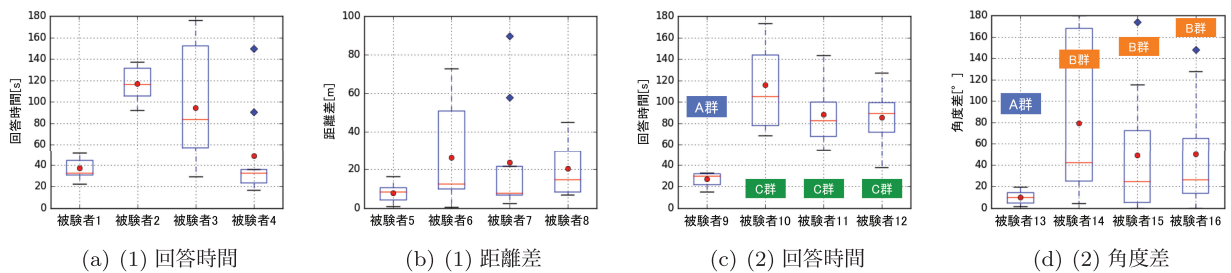


図 11 計測手法 (1), (2) における被験者ごとの回答時間および距離差, 角度差

Fig. 11 Length of time, path difference, angular difference of measurement method (1), (2) in each subject.

から, どちらの評価軸に関しても被験者によって値が異なることが分かった. 男性の距離差は, 男性は 15.0m 以内であるが, 女性では, 15.0m 以上の距離差となった被験者が約半数みられた. 心理学の分野においても空間認識能力について男性と女性に違いがある傾向にあることが知られている [14]. 図 10(a) の結果は, 男性よりも女性の方が個人差が大きくなる傾向を示しており, 女性の中には自己位置の把握が苦手な人がいる, という傾向を定量的に示している. また, 男性の中には特に短い時間で正確に自己位置を把握できる被験者がいることが分かった.

回答時間について, 傾向の異なる被験者 4 名 (被験者 1, 被験者 2, 被験者 3, 被験者 4) の結果を図 11(a) に示す. ここでは, 赤い点が平均値, 青い点が外れ値, 青い長方形の下辺が第 1 四分位数, 上辺が第 3 四分位数を示している. 被験者 1 は, 中央値, 第 1 四分位数, 第 3 四分位数すべてが小さな値となっており, すべての試行で安定して早く位置を把握できている. 反対に被験者 2 は, 中央値, 第 1 四分位数, 第 3 四分位数すべてが大きくなっており, 自己位置を把握する際には, 時間をかけて丁寧に把握する傾向にあることが考えられる. 被験者 3 は, 平均値は 94.7 秒と大きな値となっているが, 第 1 四分位数は特別に大きな値を取っているとはいえず, 環境によっては, 素早く位置を把握できる被験者であると考えられる. 被験者 4 は, 平均値は 48.5 秒となっているが, 図 11(a) を見ると 9 回の試行のうち 7 回以上, 40 秒未満で回答できていることが分かる. これより, 被験者 4 は基本的に素早く位置を把握する傾向にあるが, 環境によっては位置の把握に時間がかかる場合がある.

距離差について, 傾向の異なる被験者 4 名 (被験者 5, 被験者 6, 被験者 7, 被験者 8) を図 11(b) に示す. 被験者 5 は, 中央値, 第 1 四分位数, 第 3 四分位数すべてが小さな値となっており, すべての試行で安定して正しく位置を把握できている. 被験者 6 は, 平均値は 26.0m となっているが, 第 1 四分位数は特別に大きな値を取っているとはいえず, 環境によっては, 正しく位置を把握できる被験者であると考えられる. 被験者 7 と被験者 8 は, 平均値はそれぞれ 20.3m, 23.5m となっているが, 第 3 四分位数や

表 7 計測手法 (2) の結果

Table 7 Result of measurement method (2).

評価基準	性別	都市	算術平均	標準偏差	変動係数
回答時間	男性	秋葉原	40.7	20.5	0.5
		博多	39.7	20.5	0.5
		札幌	42.7	22.0	0.5
	女性	秋葉原	48.6	27.2	0.5
		博多	49.9	25.7	0.6
		札幌	46.4	29.4	0.7
角度差	男性	秋葉原	19.2	13.4	0.7
		博多	19.5	14.1	0.7
		札幌	15.8	9.2	0.6
	女性	秋葉原	37.0	39.0	1.1
		博多	30.9	19.8	0.6
		札幌	19.3	9.8	0.5

Upper Fence の値は, 被験者 7 の方が明らかに大きい. これは, 被験者 7 は 20m 程度の位置の間違が多いこと, また被験者 8 はほぼすべての試行で位置を正しく把握できる (10m 程度の距離差) が, 数回大きく間違えることあった. そのため, 平均は同じような値がみられるが, 被験者 7 は 20m 程度の位置の間違が多く, 被験者 8 は基本的に位置の間違はないが, 稀に大きく間違ってしまうという個人差があることがデータから確認できた.

4.2.2 (2) 目的地の方向把握

計測手法 (2) について, 結果を表 7 に示す. 回答時間の算術平均について, 男性は, 39.7 秒から 42.7 秒であるのに対し, 女性は 46.4 秒から 49.9 秒となった. 男性の最小値は 11.5 秒, 最大値は 95 秒, 女性の最小値は 20.7 秒, 最大値は 115.9 秒であり, 女性の方が方向把握にかかる時間が長くなった. 変動係数について男性は 0.5 であり, 女性は 0.5, 0.6, 0.7 であり, 女性の方が若干分布が広い結果となった.

回答方向と目的地方向の角度差 (角度差) の算術平均について, 男性は, 15.8° から 19.5° であるが, 女性は, 19.3° から 37.0° であり, 2 倍近くの差がみられた. これは, 男性の最低値は 10.1°, 最高値は 49.1°, 女性の最低値は 8.4°, 最高値は 79.2° であり, 最低値はほぼ変わらないが, 最高

値に大きな差が出たことによる。変動係数は、男性が0.6と0.7であることに対し、女性は0.5, 0.6, 1.1であり、女性の方が実験を行った都市による差が大きく出た。

回答時間と角度差について、9回分の試行の平均を、図10(b)に示す。縦軸、横軸ともに、値が原点に近いほど目的方向を正確に/早く回答することができ、原点から遠いほど、位置を間違える/時間がかかることを示している。方向把握では、ほとんどの被験者が正しくかつ素早く目的地の方向を回答できていることが分かる。また、男女間としての大きな違いはみられず、特定の被験者が大きく角度を間違えることで、女性の角度差に関する変動係数が大きくなったと考えられる。プロットした値について、k-meansを用いてクラスタリングを行い、3群へ分類した。グラフの特性から、各群を、A群：正確かつ素早く方向把握が可能、B群：回答は早い正しい方向の把握が苦手、C群：正確であるが方向把握に時間がかかる、とした。

回答時間について、特徴的な傾向を示した被験者4名(被験者9(A群), 被験者10, 11, 12(C群))の結果を図11(c)に示す。被験者9は、中央値, 第1四分位数, 第3四分位数すべてが他被験者と比較して小さな値となっており、すべての試行について安定して早く回答できている。被験者10は、C群の被験者11, 12と比べ、中央値, 第1四分位数, 第3四分位のすべてが大きな値となっており、いかなる場合でも方向を把握する際は時間をかける傾向にあると考えられる。

角度差について、特徴的な傾向を示した被験者4名(被験者13(A群), 被験者14, 15, 16(B群))を図11(d)に示す。被験者9は、回答時間と同様に中央値, 第1四分位数, 第3四分位数すべてが他被験者と比較して小さな値となっており、すべての試行について安定して正確に回答できている。被験者13は他の被験者と比べ、第3四分位数が大きな値となっており、方向を大きく間違える可能性が他の被験者より高い傾向にあると考えられる。被験者14, 15はB群であるが、被験者13と比べて第3四分位数の値は小さく、目的方向を間違えることもあるが大きく方向を間違えることはないという傾向がみられる。被験者13, 14, 15の3名とも、第1四分位数は特別に大きな値を取っているとはいえ、環境によっては、正しく方向を把握できる被験者であると考えられる。

4.2.3 (3) 音声案内の記憶定着能力

計測手法(3)の結果を図10(c)に示す。本実験では、被験者が音声案内再生ボタンを押した場所や時間の情報を用いて、音声案内を聞き直した回数や直前の音声案内から聞き直すまでの平均時間を計算した。縦軸に関しては原点に近いほど音声案内の聞き直しが少ないため、音声案内の記憶が定着しやすく、横軸に関しては、原点から遠いほど長い間音声案内を覚えているため、音声の記憶が定着しやすいことを示している。

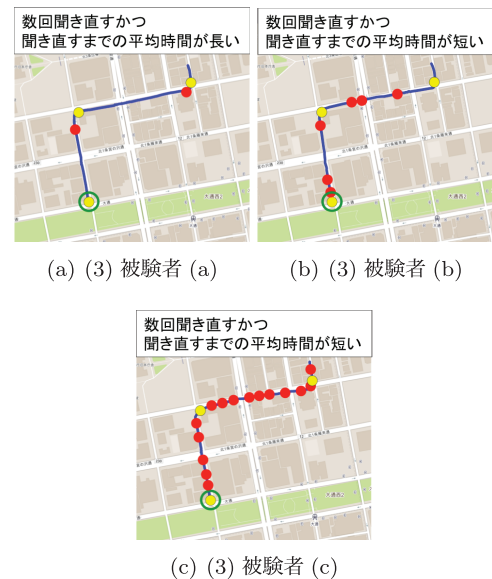


図12 計測手法(3)の歩行軌跡
Fig. 12 Subject's trajectory of measurement method (3).

その結果、音声案内を複数回聞き直す被験者と、あまり聞き直さない被験者がみられることが分かった。また、音声案内をあまり聞き直さない被験者にも、音声案内を聞き直すまでの平均時間が短い被験者と長い被験者がみられる。また20名の被験者のうち1名は自動的に流れる音声のみで移動を行った。つまり一度も音声案内を聞き直さなかったため、どちらの値も0となっている。音声案内を数回しか聞き直さず、聞き直すまでの時間が長い被験者は、「音声案内記憶の定着」能力に長けており、分岐点にて曲がる直前で確認のために音声を再生していると考えられる。音声案内を数回しか聞き直さず聞き直すまでの時間が短い被験者は、音声内容の確認、または道中で実空間と音声内容との対応付けを行うために聞き返していたと考えられる。音声案内を複数回聞き直す被験者は「音声案内記憶の定着」能力に長けておらず、何度も音声案内を聞き返していたと考えられる。

図12に被験者3名の歩行軌跡を示す。3名の内訳は、(a)音声案内を数回しか聞き直さないかつ聞き直すまでの平均時間が長い被験者(回数:2回, 時間:121秒), (b)音声案内を数回しか聞き直さないかつ聞き直すまでの平均時間が短い被験者(回数:6回, 時間:35秒), (c)複数回聞き直す被験者(回数:17回, 時間:17秒)である。緑色の円は実験開始地点、青色の線は歩行軌跡、黄色の点は自動的に音声 flowed 地点、赤色の点は被験者が音声再生ボタンを押して聞き直した地点を示す。(a)の被験者は、音声案内が自動で流れる、分岐点に到着する前に音声再生し、3名のうち最も効率的に音声案内を利用している。(b)の被験者は分岐点の周辺で音声再生し、進行方向を確認している様子が見られた。(c)の被験者は、(a), (b)と比べ道中何度も音声案内を聞き、確認していることが分かる。

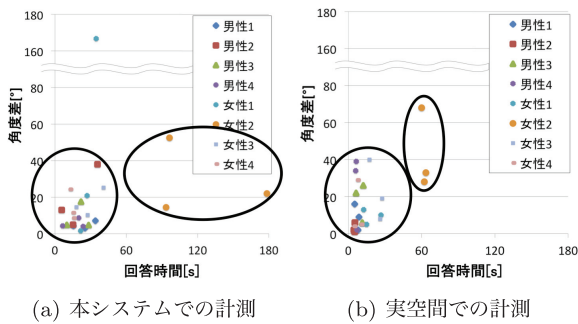


図 14 本システムでの計測と実空間における計測

Fig. 14 Measurement result in virtual space and real space.

ことが必要だと考える。

5.2 本計測手法と実空間における計測実験

本計測手法のうち、(2) 目的地の方向把握について、実空間と仮想空間で同様の実験を行い、計測データについて分析考察を行う。本手法は仮想空間で実験を行えるため、実空間での実験に比べ、実験のコストを大幅に削減できる利点がある。しかし、得られる計測データが、実空間での被験者の空間認識と大幅に異なっていた場合、本研究で目的とするナビゲーションのユニバーサルデザインを目指した計測手法としての利用は難しい。そのため、仮想空間における計測実験と、実空間における計測実験の比較のため、両空間において、3.4.3 項で述べた目的地の方向を把握する能力の計測を行い、結果の差異について考察する。

実空間における目的地の方向把握能力の計測実験について説明する。まず被験者とともに実験開始地点へ移動する。移動後、スマートフォンで Google Maps を起動し、目的地となる箇所にピンを立て、画面の中心に現在位置（実験開始地点）が来るよう設定する。被験者には画面が見えないよう、画面を下向きにした状態で手渡す。実験者による実験開始の合図で、被験者はスマートフォンを見て目的地の方向を把握し、できるだけ早くその方向を指差す。実験者はストップウォッチで実験開始から指差すまでの時間を計り、被験者が指を差した方向を手持ちの紙地図に記録する。被験者が指を差した方向と目的地の方向の角度差を計算する。

仮想空間における計測実験については、3 種類の仮想空間モデルにて、3 回試行した。実空間における計測実験については、名古屋大学構内のある 3 地点から、それぞれ別の目的地の方向を回答してもらう実験を行った。また、実空間における計測実験については、被験者として名古屋大学構内に詳しくない人物（他大学学生など）を選定し、20 代の男女 4 名ずつ、合計 8 名の被験者に対して、実験を行った。

図 14 に被験者ごとの実験の結果を示す。それぞれ各被験者の実験結果を示しており、各被験者が 3 回ずつ行った試行の結果をプロットしてある。図 14(a) は仮想空間シ

テムを用いた実験結果、図 14(b) は実空間における実験結果を示している。横軸は回答するまでの時間を、縦軸は回答方向と目的地の正しい方向との角度差を示している。全体的に見ると、実空間における実験と比べて、仮想空間における実験の方が回答時間が長くなっている被験者が多くみられる。要因として、実空間における実験での被験者の回答手順は、地図を見て目的地を把握しその方向を指差すのみであったが、仮想空間における実験での被験者の回答手順は、地図の操作や回答の際の操作も必要であったため、実空間における実験よりも時間がかかったと考えられる。しかし、多くの被験者（被験者：男性 1-4、女性 1, 3, 4）は仮想空間における計測実験においても、実空間における計測実験においても早く正しく方向を把握しており、同じ傾向になっていることが分かる。

被験者：女性 2 は、仮想空間、実空間ともに、目的地の方向の把握の角度差は同じような分布が得られた。しかし目的地の方向の把握にかかる時間は、仮想空間における実験の方が長くかかる結果となった。この要因としては、仮想空間のモデルにおける実験が難しく時間がかかってしまったことと考えられる。また被験者：女性 1 について述べると、仮想空間における計測実験において、角度差が 160° 程度大きくなっている試行が 1 回あり、仮想空間における計測実験と実空間における計測実験に差がみられた。

以上のことから、仮想空間を利用した本手法と実空間では、本計測手法の方が、目的地の方向把握に若干の時間を要するものの、ほとんどの被験者でほぼ同様の計測結果が得られた。ただし、実空間で他の被験者と比べ、方向把握の回答時間が長い被験者に関しては、本システムを使用した計測の方がより多くの回答時間となった。また、被験者：女性 1 では、2 回の試行では角度差、回答時間ともに、早く正確に回答することができているが、1 回の試行で大幅に目的地方向を誤る結果となった。これは本システムの仮想空間を用いたことが原因であるのか、実空間でも大幅に角度差を誤ることがあるのか、原因を明らかにするとともに、間違えやすい都市の特徴や正確な計測に必要な試行回数の調査などが今後必要と考える。

5.3 本計測手法の再現性の調査

本節では、本計測手法 (1), (2) を 2 度実施し、得られたデータの再現性および課題について考察する。ここでは、秋葉原、博多、札幌の 3 都市についてそれぞれ 3 種類（合計 9 つ）の実験を用意し、4.1 節の (1), (2) の被験者のうちランダムに選択した被験者各 5 名、合計 10 名に実施してもらった。これを 1 回目の試行とし、1 カ月以上の期間をあけたうえで同じ条件で 2 回目の試行を行った。再現性確認実験の結果として、算術平均、標準偏差、変動係数を表 8 に示す。計測手法 (1) 回答時間の 1 回目と 2 回目の算術平均は、それぞれ 60.3 から 69.8、45.0 から 67.1 となり

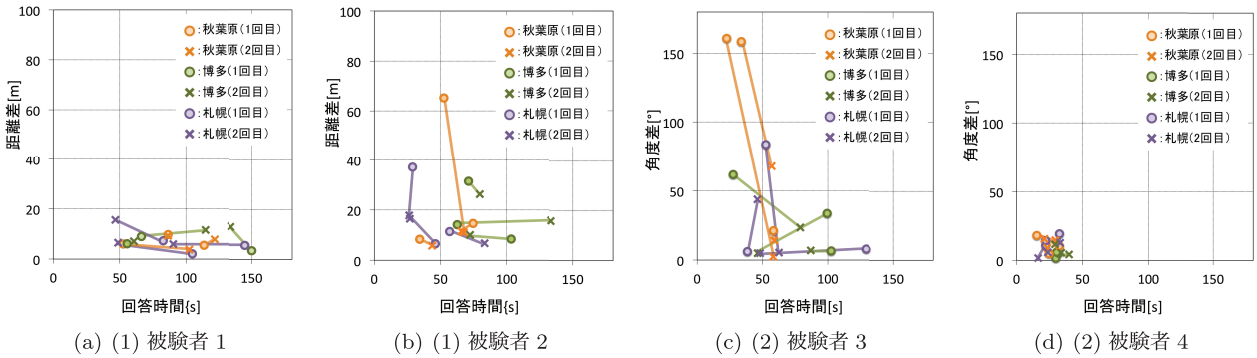


図 15 計測手法の再現性実験の被験者ごとの結果
 Fig. 15 Repeatability result in each subject.

表 8 計測手法 (1), (2) の再現性実験の結果

Table 8 Experimental repeatability of measurement method (1), (2).

評価基準	試行	都市	算術平均	標準偏差	変動係数
(1) 回答時間	1 回目	秋葉原	69.8	20.6	0.3
		博多	66.7	22.9	0.3
		札幌	60.3	27.9	0.5
	2 回目	秋葉原	55.0	26.0	0.5
		博多	67.1	26.7	0.4
		札幌	45.0	14.0	0.3
(1) 距離差	1 回目	秋葉原	12.4	9.1	0.7
		博多	10.5	4.4	0.4
		札幌	10.8	7.9	0.7
	2 回目	秋葉原	11.4	5.6	0.5
		博多	11.4	5.0	0.4
		札幌	8.0	3.2	0.4
(2) 回答時間	1 回目	秋葉原	39.4	14.7	0.4
		博多	55.9	27.9	0.5
		札幌	50.7	26.7	0.5
	2 回目	秋葉原	37.9	19.8	0.5
		博多	42.0	18.1	0.4
		札幌	42.0	18.1	0.4
(2) 角度差	1 回目	秋葉原	34.8	41.5	1.2
		博多	15.3	10.1	0.7
		札幌	18.4	8.7	0.5
	2 回目	秋葉原	18.7	8.1	0.4
		博多	13.7	5.4	0.4
		札幌	10.4	4.5	0.4

違いが見られたが、変動係数は 0.3 から 0.5 となり、1 回目と 2 回目の試行ではほぼ同じ分布となった。また、計測手法 (1) 距離差については、1 回目の試行の変動係数が 0.7, 0.4, 0.7 であることにに対し、2 回目の試行では 0.4 から 0.5 となり、1 回目と 2 回目で異なる分布を示している。さらに計測手法 (2) 角度差については、1 回目と 2 回目の変動係数の差が大きく、1 回目では 1.2, 0.7, 0.5 であるのに対し、2 回目ではすべての都市で 0.4 となった。

計測手法 (1) 距離差, (2) 角度差について 1 回目と 2 回目の試行の差について考察する。今回の実験においては計測

手法 (1), (2) ともに、1 回目と 2 回目の試行で同様の結果となった被験者と、1 回目と 2 回目の試行に差がでた被験者が確認された。計測手法 (1) については、被験者 5 名のうち、4 名の試行で回答時間に 30 秒以上の差がみられた。この 4 名の被験者は札幌の試行で 2 回目の回答時間が 1 回目より小さくなる傾向にあり、このうち、1 名の秋葉原の試行では 2 回目の方が 1 回目より 143 秒以上回答時間が短くなった。このことで、計測手法 (1) 回答時間の算術平均について表 8 の札幌, 秋葉原の 2 回目の算術平均が 1 回目より小さな値をとったと考えられる。また、5 名の被験者の距離差については、被験者 5 名のうち 2 名がすべての都市で、同程度の距離差 (ここでは 1 回目, 2 回目の試行の差を 30 m 以内とした) を回答した。残り 3 名の被験者はそれぞれ 9 つの試行中、1 つずつ 30 m 以上の大きな差を出していた (都市は秋葉原と札幌であった)。そのため、距離差について 1 回目と 2 回目でつねに大きな違いがみられる被験者はみられなかったが、被験者によっては時折 (この場合、9 つ中 1 つ)、1 回目と 2 回目の距離差が大きく異なる被験者がおり、このことで表 8 (1) 距離差の変動係数に差がでたと考えられる。

回答差 30 秒以上の差がみられた被験者 2 名を例にとり、各被験者のすべての試行について考察する (図 15 (a), 図 15 (b))。被験者 1 では、5 つの試行で 1 回目と 2 回目に 30 秒以上の差があった。そのうち、3 つの試行で 2 回目の方が回答時間が小さく、2 つの試行で大きかった。しかし、距離差については 1 回目と 2 回目で 10 m 以上の差は出ていない。そのため、被験者 1 の再現性については、回答時間は大きく異なる可能性があるものの、距離差については大きな差がでない傾向にあると考えられる。次に、被験者 2 では、2 つの試行で 1 回目と 2 回目に 30 秒以上の差が、1 つで 30 m 以上の差が出た。被験者 2 は、回答時間, 距離差ともに大きく異なる可能性がある被験者であると考えられる。

計測手法 (2) については、被験者 5 名のうち、3 名の試行で回答時間に 30 秒以上の差がみられた。この 3 名のうち、1 名は 1 つのみ差がみられたが、残り 2 名は博多, 札

幌で 37.2 秒から 81.3 秒程度 2 回目の方が回答時間が小さくなっており、表 8 (2) 回答時間の算術平均に差が生じた。角度差については、5 名中 3 名が 30° 以上の差が出ており、そのうち 3 名のうち 1 名は 1 つのみの差であったが、残り 2 名のうち 1 名は 1 回目、2 回目で 158.4° 異なっていた。そのために (2) 角度差 (秋葉原) の 1 回目の算術平均、変動係数が大幅に大きくなっている。

計測手法 (2) では 2 名が回答時間、角度差ともに 1, 2 回目の試行で大幅な違いを示し、3 名が軽微な違いにとどまった。前者についてを被験者 3、後者についてを被験者 4 とし、それぞれ図 15 (c), 図 15 (d) に示す。被験者 3 は 9 つ中、7 つで回答時間もしくは角度差に大きな違いが出ており、再現性はほぼ確認できなかった。しかし被験者 4 は 1 回目と 2 回目でほぼ同程度の回答時間、角度差となり再現性が確認できた。そのため、被験者 3 のような被験者 2 名の再現性については、回答時間、角度差ともに大きく異なる可能性がある。また、被験者 4 のような被験者 3 名では、時折 (9 つ中 0~1 つ) 大きく回答時間もしくは角度差が異なる可能性があるものの、ほぼすべての試行で再現性が確認できたといえる。

以上の再現性の実験から、計測手法 (1) 回答時間については、ほとんどの被験者に大きな差が表れ、距離差についてはすべての被験者のほとんどの試行で大きな差はみられなかった。しかし、9 つのうち 1 つ程度、距離差を大きく誤る被験者がいることが分かった。計測手法 (2) 回答時間、角度差については、ほとんどの試行で距離差や角度差が異なる被験者と、9 つのうち 1 つ程度、大きく異なるときがあるがほぼすべての試行においてつねに同程度の角度差、回答時間で把握できる被験者がいると分かった。つまり、距離差については再現性が得られやすいが、角度差とその回答時間については再現性が得られた被験者と得られなかった被験者に分かれた。実空間でも道に迷うことの少ない人と、目的地まで迷わず到着できるときや、迷ってしまうとき両方を経験している人がある。今回の再現性実験では、このようなつねに迷うわけではないがときどき迷ってしまう、という被験者を定量的に確認することができた。このような距離差や角度差、その回答時間が人によってどのような確率で生じ、どのような条件で発生するのか、環境のほか、感情や体調などのパラメータについて調査を行う必要がある。

6. まとめ

本論文では、空間認識の個人差を克服し、誰でも迷うことなく目的地に到達できるユニバーサルデザインの歩行者向けナビゲーション構築を目的とし、空間認識能力の個人ごとの特徴の差について仮想空間上で計測する手法を提案した。はじめに、仮想空間上に、被験者が地図を見ながら、目的地まで移動できる環境を実現する計測システムを

構築した。計測システムを仮想空間上に構築することで、従来の心理学的アプローチに比べ、客観的かつ定量的な計測データを取得できるとともに、実験コストの削減、自由な実験設定という利点がある。次に、人が歩行者向けナビゲーション使用時に迷った際、どのような行動をとりどのような移動軌跡をたどるのか、被験者実験を行い調査した。調査結果をもとに、3 つの計測手法 (1) 地図上での自己位置把握, (2) 目的地の方向把握, (3) 音声案内の記憶定着を設計し、計測手法を用いて被験者実験を行った。計測データを取得、分析したところ、被験者間で、自己位置と目的地方向の把握の正確さや早さ、音声案内を聞き直す回数や聞き直すまでの時間について個人差が出たことを確認した。特に、自己位置は性別、方向把握は 3 群で、それぞれの分布に特徴があることが分かった。

さらに、本システムの有用性を分析する目的で、自己評定との違い、実空間との違い、再現性の 3 つの項目について、計測手法を用いた実験を行い、得られた計測データをもとに分析を行った。分析の結果、本システムでの計測と自己評定については、ほとんどの被験者には強い関係がみられ、本システムと実空間では、本システムでの計測の方が、目的地の方向把握に若干の時間を要するものの、ほとんどの被験者でほぼ同様の計測結果が得られた。再現性について、1 回目の試行と 1 カ月後に実施した 2 回目の試行では、距離差については再現性が得られやすいが、角度差とその回答時間については再現性が得られた被験者と得られなかった被験者に分かれた。以上のことから、本論文で提案した空間認識能力の計測手法では、仮想空間上で、目的地へ移動する被験者ごとの特徴の差を確認することができた。

今後の課題として、以下に述べる 3 つがあげられる。本論文では 3 つの能力の計測実験において男女 10 名ずつ以上を目標に、実験を行い結果を分析し、個人差が得られることを確認したが、個人差の計測手法として確立するためには、被験者を増やし、統計的な分析が必要である。また、今回の被験者はすべて 20 代を対象に行い、個人差を確認できたものの、年齢による空間認識能力の差を確認することが次の課題と考える。

次に、より実空間に近い計測システムの実現があげられる。本論文では、計測システムに GPS 誤差を導入し、被験者の空間認識能力の計測を行った。この GPS 誤差は、周囲の建物の状況などで精度や更新可能な頻度に特徴があると考えられる。そのため、GPS 誤差の発生する特徴を調査し、計測システムに取り入れることで、被験者の空間認識能力をより精緻に計測できると考えられる。また、被験者は仮想空間を移動する際に、コントローラを操作し、移動を行っていた。実空間と仮想空間での比較実験では、ほとんどの被験者に大きな差はみられなかったものの、仮想空間内の移動を、実空間の移動のように足を動かして移動す

ることで、より実空間での実験に近づけることができると考えられる。今後、歩行型バーチャルリアリティデバイスや歩数計を用いて仮想空間を移動する手法 [19] を利用することで、ユーザ体験を向上させ実空間での計測に近づける効果が期待できる。

最後に、本論文では地図を用いた案内、音声案内を用いる際の自己位置、目的地の方向把握、音声案内の記憶定着について、3つの計測手法を設計し、個人差を確認した。目的地までたどり着くための能力において、弧線状の道路や行き止まりを含む複雑な道路構造、ランドマークの有無なども重要な要因であると考えられる。そのため、今後は計測手法を拡充し、様々な都市や幅広く数多くの被験者に対して計測実験を行い、計測手法(1)~(3)と実際に目的地に到着できるかどうかの関連性や、どのような環境要因で迷いやすいかなどについて個人の性格や特徴を考慮に入れた計測分析方法を設計していくことで、ナビゲーションシステムのユニバーサルデザインを目指した計測手法の確立を目指す。

謝辞 本研究はJSPS 科研費 JP17H01762 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 嶋田光佑, 廣井 慧, 梶 克彦, 河口信夫: 仮想空間システムを用いた空間認識能力計測手法の提案, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2016), pp.789-797 (2016).
- [2] Shimada, K. Hiroi, K., Kawaguchi, N. and Kaji, K.: Measurement Methods of Spatial Ability using a Virtual Reality System, *Proc. 9th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2016)*, pp.116-121 (2016).
- [3] 新垣紀子: 方向オンチの科学—迷いやすい人・迷いにくい人はどこが違う? (2001).
- [4] 地図利用実態調査: ZENRIN, 入手先 (<http://www.zenrin.co.jp/dl/map/15-1.html>).
- [5] Watanabe, S. Kaji, K. and Kawaguchi, N.: A Proposal of Landmark-Conscious Voice Navigation, *Proc. 6th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2012)*, pp.56-61 (2012).
- [6] Tsukada, K. and Yasumura, M.: ActiveBelt: Belt-Type Wearable Tactile Display for Directional Navigation, *Ubiquitous Computing*, Vol.3205, pp.384-399 (2004).
- [7] Hunt, M.E.: Environmental Learning without Being There, *Environment and Behavior*, Vol.16, pp.307-334 (1984).
- [8] Lawton, C.A.: Strategies for Indoor Wayfinding: The Role of Orientation, *Journal of Environmental Psychology*, Vol.16, pp.137-145 (1996).
- [9] 竹内謙彰: 「方向感覚質問紙」作成の試み(1)—質問項目の収集及び因子分析結果の検討, 愛知教育大学研究報告, 教育科学, Vol.39, pp.127-140 (1990).
- [10] 新垣紀子: ナビゲーションにおける内的資源と外的資源, 成城大学社会イノベーション研究, Vol.1, No.1, pp.61-78 (2005).
- [11] 新垣紀子: なぜ人は道に迷うのか?: 一度訪れた目的地に再度訪れる場面での認知プロセスの特徴, 認知科学, Vol.5, No.4, pp.108-121 (1998).
- [12] 新垣紀子, 野島久雄: 空間移動における人の情報処理過程とgis, 電子情報通信学会技術研究報告, HIP, ヒューマン情報処理, Vol.102, No.44, pp.35-40 (2002).
- [13] 竹内謙彰: 方向感覚と方位評定, 人格特性及び知的能力との関連, 教育心理学研究, Vol.40, No.1, pp.47-53 (1992).
- [14] Miller, L.K. and Santoni, V.: Sex Differences in Spatial Abilities: Strategic and Experiential Correlates, *Acta Psychologica*, Vol.62, No.3, pp.225-235 (1986).
- [15] Bryant, K.J.: Personality Correlates of Sense of Direction and Geographic Orientation, *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol.43, No.6, pp.1318-1324 (1982).
- [16] Murakoshi, S. and Kawai, M.: Use of Knowledge and Heuristics for Wayfinding in an Artificial Environment, *Environment and Behavior*, Vol.32, No.6, pp.756-774 (2000).
- [17] 増井幸恵: 「自らの空間認知能力が悪いと感じる」意識の測定, 人文論究, Vol.47, No.1, pp.164-182 (1997).
- [18] 浅村亮彦: 方向感覚質問紙構成の試み, 北海道心理学研究/北海道心理学, Vol.21, pp.1-14 (1998).
- [19] Tregillus, S. and Folmer, E.: VR-STEP: Walking-in-Place using Inertial Sensing for Hands Free Navigation in Mobile VR Environments, *Proc. 2016 CHI Conference on Human Factor in Computing System (CHI)*, pp.1250-1255 (2016).



嶋田 光佑

2015年名古屋大学工学部電気電子・情報工学科卒業。2017年同大学大学院修士課程修了。



廣井 慧 (正会員)

2004年東北大学工学部電子工学専攻卒業。同年東日本電信電話株式会社入社。2011年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科修士課程修了。2014年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科博士課程修了。博士(メディアデザイン学)。同年名古屋大学未来社会創造機構特任助教。災害情報通信、センサネットワークの研究に従事。



梶 克彦 (正会員)

2002年名古屋大学工学部電気電子工学科卒業。2007年同大学大学院情報科学研究科博士課程修了。博士(情報科学)。NTTコミュニケーション科学基礎研究所リサーチアソシエイト、名古屋大学大学院工学研究科助教を経て、2015年より愛知工業大学情報科学部准教授。日本ソフトウェア科学会会員。屋内位置推定、遠隔コミュニケーション支援の研究に従事。



河口 信夫 (正会員)

1990年名古屋大学工学部電気電子工学科卒業。1995年同大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程満了。同年同大学工学部助手。同大学講師、准教授を経て、2009年より同大学大学院工学研究科教授。NPO位置情報サービス研究機構 Lisra 代表理事。モバイルコミュニケーション、ユビキタスコンピューティング、行動センシングの研究に従事。博士(工学)。ACM, IEEE, 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, 日本音響学会各会員。