

位置情報探索における SLAM を用いた 屋内向け AR ナビゲーションシステムの提案

常友 琉成¹ 後藤 佑介¹

概要: 近年, 移動端末の計算能力が向上し, より正確で詳細な画像認識が可能となった. 特に, 端末に搭載されているカメラで撮影して構築した Augmented Reality (AR) 空間を利用して, 屋内でユーザを目的地に誘導するナビゲーション技術への応用が進められている. 屋内向けの AR ナビゲーションシステムは, 屋外向けのシステムと異なり, 多くの場合で Global Positioning System (GPS) を利用できない. このため, AR マーカや特徴的な図形といった物理情報の利用, および屋内で端末の自己位置推定と移動経路周辺の地図情報である環境マップの作成を同時に行う Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) による AR ナビゲーションシステムが提案されてきた. しかし, これらのシステムにおける問題点として, 大量の AR マーカを適切に配置する必要がある点, および移動距離の増加にともない自己位置推定で誤差が発生する点が挙げられる. 本研究では, SLAM と AR マーカの両方を用いて複数の環境マップを利用可能な屋内向け AR ナビゲーションシステムを提案する. 提案システムでは, SLAM を用いて作成した環境マップを適用してナビゲーションが可能な領域を認識し, 屋内移動時に障害物となるオブジェクト領域を除外した経路を AR 上に提示することで, ユーザは障害物を避けて目的地に移動できる. 提案システムのプロトタイプを設計, 実装し, 性能を評価した結果, 提案システムは環境マップに含まれる特徴点をもとに自己位置推定を行うことで, AR マーカを利用した複数の部屋を識別できることを確認した.

1. はじめに

近年, 移動端末の計算能力が向上し, より正確で詳細な画像認識が可能となった. 特に, 端末に搭載されているカメラで撮影して構築した Augmented Reality (AR) 空間を利用して, 屋内でユーザを目的地に誘導するナビゲーション技術への応用が進められている.

屋内向け AR ナビゲーションでは, 移動端末の計算能力の向上と深層学習を利用した画像認識技術の発展により, 端末の自己位置推定, および移動経路周辺の特徴点やセンサデータで構成される地図情報 (以下, 環境マップ) の作成を同時に行う Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) [1] を用いたシステムが提案されている. 例えば, 2016 年に Niantic 社が発表した Pokémon GO [2] では, SLAM を用いた AR 機能を利用することで, 仮想現実と現実の融合性を高めている. SLAM を用いた AR 機能では, ゲームによる利用の他に, 端末に搭載されたカメラおよびジャイロスコープといった内蔵センサを利用することで, ユーザに対して物体の位置情報を直感的に提示できる. こ

のため, ユーザは自身が認識する現実環境を容易に理解でき, 広告, ナビゲーション, および医療現場といった幅広い分野でユーザの行動を支援できる.

屋内向け AR ナビゲーションシステムは, 障害物が多く電波の到達範囲が狭い環境で使用するため, 多くの場合で Global Positioning System (GPS) を利用できない. このため, AR マーカや特徴的な図形といった物理情報, もしくは SLAM を利用してユーザの現在位置を認識する必要がある.

本研究では, SLAM と AR マーカの両方を用いて複数の環境マップを利用可能な屋内向け AR ナビゲーションシステムを提案する. 提案システムでは, SLAM を用いて作成した環境マップを適用してナビゲーションが可能な領域を認識し, 屋内移動時に障害物となるオブジェクト領域を除外した経路を AR 上に提示することで, ユーザは障害物を避けて目的地に移動できる.

2. AR 技術

2.1 AR ナビゲーション

近年では, 多くの AR アプリケーションが普及している. 例えば, Pokémon Go [2] は, ユーザのモバイル端末上に表示されるモンスターの捕捉画面において AR 技術が利

¹ 岡山大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Natural Science and Technology,
Okayama University

用されている。一般的に、VRは、仮想世界の映像をユーザに提示する視覚的な技術である。一方で、ARは、現実世界の映像に付加情報を重ねて表示する視覚的な技術であり、現実世界を詳細かつ容易に理解できる。

スマートフォンの普及にともない、AR機能は多くのデバイスにおいて、リアルタイムによる動画配信やゲームだけでなく、ビジネスや日常生活で利用されている。また、第5世代移動通信システム(5G)を利用することで、映像や3DによるCG画像といった大容量のコンテンツを高速な通信でユーザに提供できる。

ARナビゲーションでは、ユーザは端末を用いてGPSやARマーカで自身の位置情報を取得した後、目的地までの案内経路や観光情報を検索することで、端末上で表示できる。ARナビゲーションの利用場所は、屋内と屋外の2種類に分類される。以降の節で、順番に説明する。

2.2 屋外向けARナビゲーション

屋外向けARアプリケーションでは、端末に内蔵されているセンサやGPSを利用して現在位置の情報を取得するロケーションベース型が主に利用されており、位置情報に応じたデータや画像を端末の画面上に表示する。2019年にリリースされたDRAGON QUEST WALK [3]は、GPSを用いて位置情報を取得するロケーションベース型であり、位置情報に応じてモンスターが出現する。屋外向けARナビゲーションシステムも同様に、端末に内蔵されているセンサやGPSから取得できる位置情報を利用して、カメラで撮影した現実世界の映像に目的地までの経路情報を重ねて表示する。

ARナビゲーションシステムの例として、PinnAR [4]が挙げられる。PinnARでは、出発地から目的地までの間でデバイスの位置情報をリアルタイムで取得し、ユーザを目的地に誘導する。

2.3 屋内向けARナビゲーション

屋内向けARアプリケーションでは、カメラで取得した現実世界の映像を画像認識および空間認識の技術により認識し、解析することで現在位置の情報を取得するビジョンベース型が利用される。ビジョンベース型は、ARマーカを利用するマーカ型、およびマーカではなく実在する物体や空間を認識するマーカレス型の2種類で構成される。2017年にリリースされたIKEA Place [5]は、端末に搭載されたカメラとセンサを利用して部屋の広さや物体を認識し、家具のオブジェクトをAR空間上に配置するマーカレス型である。

2.4 屋内向けARナビゲーションの課題

屋内向けARナビゲーションを利用したシステムは、屋外向けARナビゲーションシステムに比べて道幅が狭く、

移動経路が複雑な環境で利用されるため、高い精度が要求される。しかし、従来のGPS技術は、屋内におけるGPS信号の受信レベルが低く、位置情報の誤差が大きいため、屋内向けARナビゲーションシステムとして利用することは難しい。そこで、ユーザの位置情報を取得する技術として、ARマーカやPedestrian Dead Reckoning (PDR)が提案されている。

2.4.1 ARマーカ

ARマーカは、ARアプリケーションの使用時にカメラで撮影する特定の画像や写真であり、3Dモデルの配置、音声や映像の再生、および目的地までの案内情報の提示において利用される。ARナビゲーションでは、ARマーカを用いてID認識を行い、カメラの位置と姿勢を計算することで、ARマーカに対応する案内情報をユーザに提示する。

屋内向けARナビゲーションでは、案内経路の精度を高くする場合、多くのARマーカを設置する必要がある、周囲の景観を損なう。一方で、周囲の景観に配慮したARマーカは、案内経路以外の情報を追加する必要があり、認識精度が低下する。また、多数のARマーカを適切な位置に設置する必要があり、管理者の負担は大きい。

2.4.2 PDR

Pedestrian Dead Reckoning (PDR)は、移動端末の加速度、磁気、および角速度といったセンサを利用し、歩行者の姿勢、動き、方向、および移動幅を検出して1歩ごとの移動量を積算することで、現在位置を推定できる。PDRを利用可能なセンサを搭載したスマートフォンを用いる場合、移動量の積算による累積誤差が生じる。このため、長距離の移動では、疎な位置情報 [6] を利用して累積誤差を補正する必要がある。

3. SLAM

3.1 概要

自律移動ロボットや自動運転技術の発展にともない、Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) [1] 技術が広く利用されている。SLAMはドローンや掃除ロボットで利用される技術であり、ユーザはSLAMを用いることで自動掃除や自動充電といった機能を利用できる。

SLAMでは、レーザスキャナやカメラを用いて物体までの距離と方向を計測することで、環境マップの作成と自己位置推定を同時に行う。自己位置推定の精度を向上させる場合、画像処理や点群処理を短い周期で実行するため計算量が増加し、端末に対する負荷は大きくなる。1台の携帯端末でSLAMを利用する場合、自己位置推定の誤差が大きくなると、障害物が無い場所を障害物と判断する可能性がある。このため、文献 [7] の手法では、2台の携帯端末でSLAMを利用することで、障害物の検出精度が向上する。また、広い場所でSLAMを利用する場合、自己位置推定による累積誤差が生じる。このため、長距離



図 1 特徴点検出を行う環境

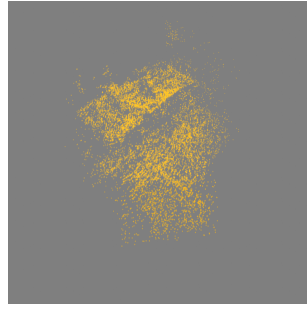


図 2 Visual-SLAM による
特徴点検出

の移動では、ループ閉じ込みと呼ばれる処理で累積誤差を補正する必要がある。

図 1 および図 2 に、SLAM を用いた計測の例を示す。図 1 は特徴点検出を行う環境であり、図 2 は図 1 に対して Visual-SLAM により特徴点を検出した。図 1 および図 2 より、特徴点検出では、視認できる色の違いだけでなく、表面の凹凸による形状の違いも検出できる。SLAM では、ユーザはレーザスキャナ、超音波センサ、およびカメラといった機器と Wi-Fi による無線環境を用いて、周りの障害物までの距離を測り、周囲の環境マップを作成しながら自己位置を推定する。

SLAM は、自動運転を実現するための技術として広く普及している。特に、一般家庭で利用される掃除ロボットの自動掃除や自動充電では、障害物を回避する機能が利用される。

3.2 SLAM の利用例

Visual-SLAM [1] は、主に低速時の自律ロボットの行動や AR による認識において、カメラで撮影した映像に対してフレームごとに OpenCV といったコンピュータビジョンライブラリを介して特徴点を検出し、座標を変換した後、環境マップの作成と自己位置推定を同時に行う。しかし、センサデータには多くの誤差が含まれており、これらの誤差は正規分布に従う。このため、正規分布を利用したカルマンフィルタ [8] により、複数のセンサデータを融合することで、自己位置推定の誤差を小さくしてデータに対応付けし、点で表現された目印となる物体を環境マップ上に作成する。また、作成した環境マップを用いて、カメラの姿勢や移動距離を推測する。

4. 関連研究

屋内における位置情報探索において、GPS は発信源である衛星からの電波が端末まで届きにくい場合が多く、ユーザの現在位置を推定することは困難である。この問題を解決するため、屋内における位置情報の探索技術に関する研究、およびこれらの技術を利用した屋内向け AR ナビゲーションに関する研究が行われている。

4.1 屋内における位置推定手法

文献 [9] の手法では、屋内における位置情報探索において、Wi-Fi アクセスポイント (AP) を利用した Wi-Fi Round Trip Time (Wi-Fi RTT) を用いる。Wi-Fi RTT は、障害物の有無、AP の設置位置、および周波数帯の違いで変化する。このため、AP を十分な高さに設置して障害物がない環境では、ユーザは高い精度で自己位置を推定できる。しかし、AP からの距離が長くなると推定誤差が大きくなるため、一定間隔で多くの AP を設置する必要がある、コストが高い。また、屋内における位置情報を取得する場合、ユーザはすべての AP の設置場所を把握する必要がある、本手法を利用できる空間は限られる。

文献 [10] の自己位置推定手法では、事前に撮影した映像を一定間隔で分割し、フレームごとに検出した特徴点をもとに、データベースを作成する。本手法を利用する場合、1 台の計算機上で実際にカメラから取得した映像の特徴点を検出し、データベースに含まれる特徴点のデータと比較する。また、別の 1 台の計算機上で SLAM による自己位置推定を同時に行うことで、高精度な自己位置推定を行う。この場合、2 種類の処理を同一計算機上で行うことができないため、2 台の計算機を利用する必要がある。

AR マーカの位置情報を登録した位置情報サーバを用いる手法 [11] では、AR マーカの位置を変更する場合に位置情報サーバの設定を変更することで、ユーザは高い精度で位置推定を利用できる。しかし、すべての AR マーカの位置情報を位置情報サーバで事前に同期させる必要があるため、ユーザの負担は大きい。

文献 [12] では、AP を用いた位置情報探索において、GPS で位置情報を利用可能な屋外観測データによる建物壁面上の仮想 AP、および屋内観測データによる相対的な AP の 2 種類で構成された位置マップを用いる。仮想 AP の位置をもとに、相対的な AP の位置マップをグローバル座標系に変換することで、屋内におけるユーザの現在位置を推定する。このとき、屋内に設置されている Wi-Fi を利用することで、屋内の観測位置情報や位置の基準となるアンカーを利用せずに屋内 AP の位置を推定できる。このため、マーカの設置や環境マップの作成が不要であり、ユーザの負担は小さい。しかし、屋内の観測位置情報を用いないため、自己位置推定の誤差は平均で 8.4 m と大きく、屋内 AR ナビゲーションにおいて本手法の利用は難しい。

4.2 屋内向け AR ナビゲーション

文献 [13] の手法では、部屋の間取り図を作成した後、部屋の配置、壁の位置、案内経路、目印となる地点、および目的地の情報を付加して MapBox APIs を更新することで、タイルに関するデータ資源である tileset を作成する。この tileset を利用して目的地まで誘導することで、ユーザを正確に案内できる。しかし、マップの作成は Unity 上で行

うため、マップの作成処理で発生する負荷は大きくなる。

文献 [14] の手法では、建物の平面図面に対して height map 技術を利用することで、凹凸をもつ 3D モデルに変換して、マップを作成する。このとき、平面図面と 3D モデルで建物の特徴点を比較することで、ユーザの自己位置を推定する。しかし、本手法では、建物の平面図面に対して、height map 技術を適用するための事前処理が必要となる。

AR ナビゲーションによる経路表示において、多くの AR ナビゲーションアプリではユーザの現在位置から目的地までの最短経路を表示するため、ユーザに対して死角となる範囲に経路が表示される場合がある。そこで、文献 [15] の手法では、ユーザの視野内で経路を表示する。しかし、AR ナビゲーションで必要となるマップはベクトル化された平面図面に基づいて作成するため、この図面情報が無い場合は本手法を利用できない。

文献 [16] に示す屋内向け AR ナビゲーション手法では、一般的に AR マーカとして利用される QR コードや特徴的な図形ではなく、現実世界に存在するオブジェクトの一部を事前に画像化し、AR マーカとして利用する。このため、観光地や建物内で周囲の景観を損なわない。

文献 [17] の手法では、屋内における位置情報探索において、磁場、Wi-Fi 信号、および慣性センサを用いる。また、Ant Colony Optimization (ACO) アルゴリズムを用いることで、経路探索の精度を向上する。

文献 [18] の手法では、文献 [16] と同様に、看板などの現実世界に存在するオブジェクトの一部を AR マーカとして利用し、AR マーカを認識した後に、モーションセンサによる自己位置推定を行う。モーションセンサは、移動距離が長くなると畳み込み誤差が大きくなる。このため、畳み込み誤差が大きくなると、ユーザは AR マーカをもう一度認識して位置を補正する必要がある。

文献 [19] で提案する AR ナビゲーションシステムでは、ユーザを誘導可能な領域を認識した上で、屋内移動時に障害物となるオブジェクト領域を除外して、AR 経路をユーザに提示する。本研究では、文献 [19] にもとづくシステムを構成する。

5. 設計

5.1 想定環境

本研究では、屋内 AR ナビゲーションにおいて、Visual-SLAM と AR マーカを用いた位置情報探索による屋内向け AR ナビゲーションシステムを提案する。提案システムでは、iPad 端末と Unity ゲームエンジンを利用し、Visual-SLAM を用いて現実世界の映像と仮想世界の情報を融合した AR 環境を構築する。端末上で環境マップを作成することで、ショッピングモールや地下街といった場所で利用できる。また、AR マーカを用いて環境マップを切り替えることで、複数の部屋や複数の階層で構成される建

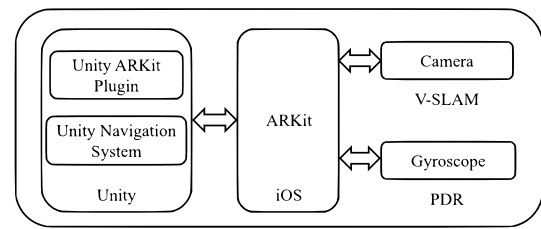


図 3 従来システム [19] の構成図

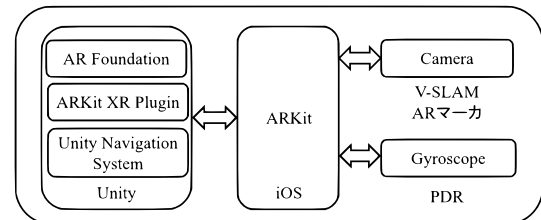


図 4 提案システムの構成図

物でシステムを利用できる。

5.2 システム構成

提案システムでは、AR Foundation [20] と Unity Navigation System [21] を用いて AR ナビゲーションを構成する。はじめに、AR Foundation で空間認識を行い、平面と判断した領域を確保する。ユーザは、モバイル端末の画面上で平面領域の一部を押下することで、平面情報を取得し、環境マップを作成する。また、AR マーカの検出では、AR Foundation における Image Tracking 機能 [22] を利用する。経路案内では、作成した環境マップを利用することで、SLAM を用いた自己位置推定を行い、現在位置の情報を取得し、Unity Navigation System 上で目的地（以下、LandMark）までの案内経路を探索し、提示する。

従来システム [19] における構成を図 3、提案システムにおける構成を図 4 にそれぞれ示す。図 3 について、従来システムでは、Visual-SLAM と PDR を利用できる ARKit を用いている。また、ナビゲーション機能を実装するため、Unity Navigation System を用いている。一方、図 4 について、提案システムでは、ARKit の代わりに AR Foundation を用いる。AR Foundation は ARKit の機能をすべて含んでおり、従来システムと同様に使用できる。ナビゲーション機能の実装には、従来システムと同様に、Unity Navigation System を用いる。また、AR マーカを利用することで、環境マップの切り替えを行う。

5.2.1 AR Foundation

AR ナビゲーションの基本機能を実現するため、SLAM を利用可能な AR Foundation を用いて、AR 空間を作成した。ARToolKit、ARCore、ARKit、および Vuforia といった AR 空間を作成するためのツールと比較して、AR Foundation は、開発環境の構築、および複数種類のデバイスに対応した AR 空間を作成するシステムの開発が容

表 1 計算機環境

計算機	OS	Windows 10 Pro macOS Catalina Version 10.15.7
	IDE	Unity 2019.4.11f1 Personal Visual Studio Community 2019 Version 16.6.1 Xcode Version 12.1
	Plugin	AR Foundation Version 2.1.10 ARKit XR Plugin Version 2.1.10 NavMesh Extension
デバイス	iPad Air (第 3 世代)	iPadOS 13.1.1

易である。また、Unity はクロスプラットフォームであるため、Vuforia や iOS 系の ARKit だけでなく、Android 系の ARCore のプラグインに対応しており、iOS 系から Android 系へのプラットフォームの変更が容易である。さらに、AR Foundation は ARKit および ARCore の機能をすべて含むため、一部の機能を除いて iOS 系と Android 系の両方で利用できる。提案システムでは、Unity におけるプラグインである AR Foundation と ARKit XR Plugin を利用して、AR Foundation による平面認識、特徴点検出、および画像認識を行う。

5.2.2 Unity Navigation System

Unity Navigation System は、Unity で開発されたゲーム向けのナビゲーションシステムである。ナビゲーションにおいてユーザが歩行可能な平面（以下、NavMesh）の表面部分をポリゴンとして格納する。ユーザをナビゲーションする場合、出発地と LandMark のそれぞれにもっとも近いポリゴンを利用し、出発地点のポリゴンから LandMark のポリゴンに到達するまでの間で隣接するポリゴンを順番に進む。近傍探索には A* アルゴリズム [23] を用いる。本研究では、事前に作成した静的な環境マップを用いて経路探索を行う。

6. 実装

6.1 概要

5 章で述べた設計に基づき、提案システムを実装する。提案システムの計算機環境を表 1 に示す。また、提案システムで実現した機能について、以降の節で順番に述べる。

6.2 環境マップの保存機能

図 5 に、環境マップの保存機能の利用例を示す。ユーザは、モバイル端末の画面上で領域を選択することで、NavMesh の頂点や LandMark を追加し、環境マップを作成する。作成した環境マップは、NavMesh や LandMark の座標を保存するファイル、および検出した特徴点データを保存するファイルの 2 種類に分割して、それぞれ保存する。

6.3 環境マップのロード

図 6 に、環境マップのロード機能の利用例を示す。AR



図 5 環境マップの保存

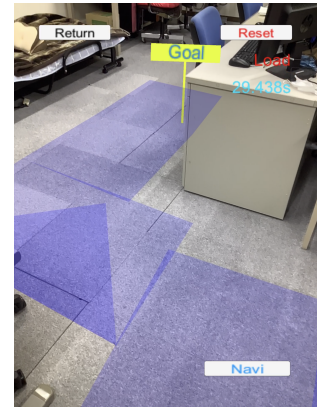


図 6 環境マップのロード

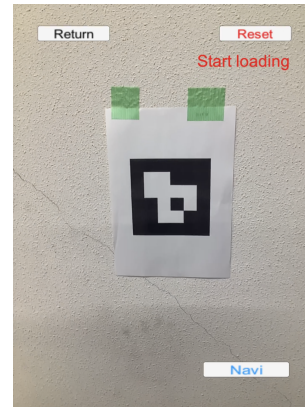


図 7 AR マーカの認識例

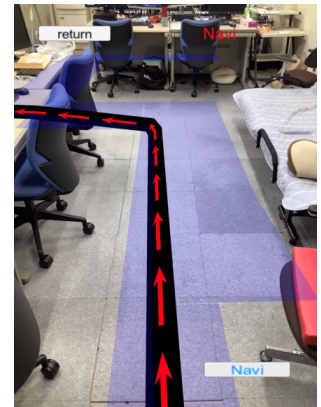


図 8 AR 案内経路の提示例

マーカの認識機能で指定した環境マップをロードする場合、NavMesh と LandMark を作成し、探索環境を構築する。次に、特徴点を検出し、環境マップに含まれる特徴点データと比較し、自己位置推定を行う。

6.4 AR マーカの認識

図 7 に、AR マーカの認識機能の利用例を示す。ユーザがモバイル端末のカメラで特定の AR マーカを認識した場合、AR Foundation における Image Tracking 機能を利用することで、AR マーカに対応する環境マップを指定する。また、複数種類の AR マーカを用いることで、複数の環境マップを切り替えでき、複数の部屋や複数階層の建物で利用できる。

6.5 案内経路の提示

図 8 に、AR による案内経路の提示例を示す。AR マーカの認識後、画面右下の AR 経路提示ボタンを押下することで、ユーザの現在位置から LandMark までの経路を提示する。

7. 評価

7.1 評価環境

岡山大学工学部 4 号館にある学生居室である 712 室（以

表 2 評価環境

部屋	面積 (m^2)	検出した特徴点 (個)
712 室	約 45 m^2	40,547
第 11 講義室	約 123 m^2	171,736
第 14 講義室	約 123 m^2	20,489

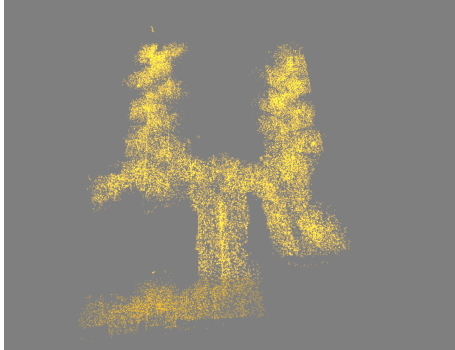


図 9 712 室

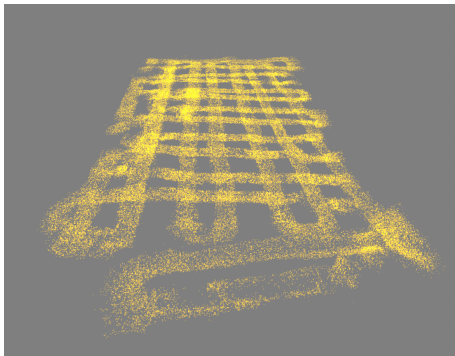


図 10 第 11 講義室

下, 712 室), 第 11 講義室, および第 14 講義室の 3 部屋で提案システムを評価する. はじめに, 提案システムを利用して, 3 部屋それぞれで環境マップを作成する. 事前に用意した AR マーカを認識した後, 環境マップをロードし, 目的地までの経路を案内する.

評価環境を表 2 に示す. それぞれの部屋の大きさについて, 712 室は $5.45 m \times 8.3 m$ の長方形, 第 11 講義室および第 14 講義室は $14.85 m \times 8.3 m$ の長方形である. また, 各部屋で検出した特徴点のデータを図 9, 図 10, 図 11 にそれぞれ示す. 検出した特徴点は, 各部屋の床のみを対象とする.

7.2 評価項目

評価項目は, 以下の 3 項目である.

(1) 環境マップのロードに要する時間

AR マーカを認識した後, 環境マップのロードに要する時間を提案システム上で計測する. 3 種類の部屋の広さや特徴点データの違いが環境マップのロードに要する時間にどの程度影響するかを評価する.

(2) 自己位置推定に要する時間

環境マップのロード後に自己位置推定で要する時間に

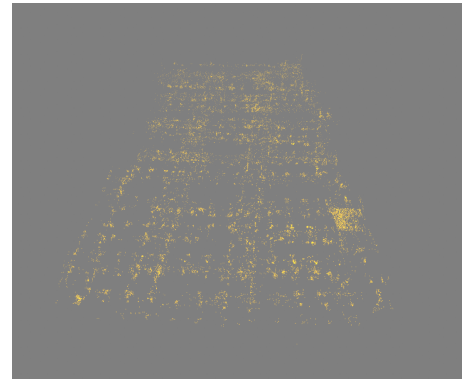


図 11 第 14 講義室

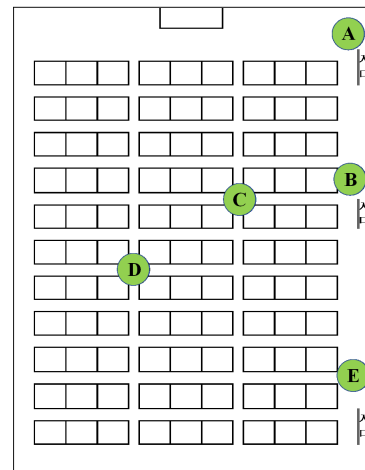


図 12 第 14 講義室の間取り図および計測地点

ついて, ストップウォッチで 5 回測定した平均値を計測する. 3 種類の部屋における特徴点データの違いが自己位置推定にどの程度影響するかを評価する.

(3) AR マーカを用いた複数の環境マップの切り替えにおける影響

AR マーカに対応した環境マップを正しくロードできているか, および環境マップを連続して正しくロードできているかをそれぞれ評価する.

7.3 評価手順

検出した特徴点が最も少ない第 14 講義室の間取り図および計測地点を図 12 に示す. 事前に設定した 5 種類の地点 A, B, C, D, E の特徴点数と各地点で行う自己位置推定に要する時間を計測する. 計測は, 以下に示す手順で行い, 自己位置推定が完了した時点で計測を終了する.

1. 環境マップのロードが完了した時点で, 計測を開始する.
2. ユーザは, 携帯端末に搭載されたカメラで自身の正面の床を 5 秒間映して, 自己位置推定を行う. 推定できた場合は, 手順 5. へ. できなかった場合は, 手順 3. へ.
3. ユーザは, 初期位置で体の向きを変えながら撮影し,

表 3 環境マップのロードに要する時間

	712 室	第 11 講義室	第 14 講義室
時間 (sec.)	21.61	42.45	15.94

表 4 自己位置推定に要する時間

	712 室	第 11 講義室	第 14 講義室
推定時間 (sec.)	4.90	5.48	21.68

自身の周囲の床を 360 度すべて映して自己位置推定を行うことを繰り返す。計測開始から 30 秒以内に推定できた場合は、手順 5. へ。できなかった場合は、手順 4. へ

4. ユーザは、初期位置の周辺を歩き、自己位置推定が完了するまで計測を続ける。
5. 規定回数分の計測が終了した場合、評価を終了する。そうでなければ、次の計測を行うため手順 1. へ戻る。

7.4 評価結果

7.4.1 環境マップのロードに要する時間

3 種類の部屋それぞれにおいて、環境マップのロードに要した時間を表 3 に示す。表 3 より、第 14 講義室のロード時間がもっとも短く、第 11 講義室がもっとも長かった。712 室は、第 14 講義室と比べて面積が小さい一方で、ロード時間は第 14 講義室に比べて長かった。また、第 11 講義室と第 14 講義室の面積は同じであるが、ロード時間の差は約 26.5 秒の差であった。このため、部屋の広さに比べて、特徴点データの数が環境マップのロード時間に大きく影響を与える。具体的には、環境マップのロードは、NavMesh や LandMark を用いた処理に比べて、特徴点データの抽出における処理時間が長くなる。

7.4.2 自己位置推定に要する時間

3 種類の部屋それぞれにおいて、自己位置推定に要した時間を表 4 に示す。表 4 より、ユーザが移動可能な経路上で特徴点データが一定数以上ある場合、自己位置推定にかかる時間はすべての部屋でほぼ同じである。しかし、特徴点データの数が少ない場合、AR マーカを認識した位置で自己位置推定を行うことは困難である。また、AR マーカの周辺に特徴点が集中する場合、自己位置推定に要する時間は長大化しない。

次に、第 14 講義室の A ～ E 地点の特徴点数と自己位置推定に要した時間を表 5 に示す。表 5 より、特徴点数が最も多い E 地点では、712 室や第 11 講義室に比べて推定時間は短く、環境マップのロード直後に自己位置推定が完了した。また、E 地点に続いて特徴点数が多い C 地点と D 地点について、D 地点の特徴点数は C 地点に比べて少ない一方で、自己位置推定に要する時間は短い。このため、D 地点周辺の特徴点数をもつ位置では、ユーザは初期位置から移動せずに自己位置を推定できる。A 地点と B 地点では、いずれも初期位置における自己位置推定は困難であ

表 5 A ～ E 地点の特徴点数と自己位置推定に要する時間

	A	B	C	D	E
特徴点数 (個)	134	70	372	262	1137
推定時間 (sec.)	38.10	36.22	21.24	14.93	2.58

り、ユーザは周辺を歩いて計測した。以上より、AR ナビゲーションにおいて、ユーザが初期位置で自己位置推定を行うため、この計測結果をもとに開始位置を決定できる。

7.4.3 AR マーカを用いた複数の環境マップの切り替えにおける影響

提案システムの評価では、AR マーカに対応した環境マップを正確にロードできた。複数階層の建物の場合、各階の環境マップを用意することで、屋内 AR ナビゲーションが可能である。また、環境マップをロードした後に、別の環境マップを正しくロードできたことを確認した。

8. 考察

8.1 環境マップの広さによる制限

複数階層の建物で屋内 AR ナビゲーションを行う場合、すべての階を 1 個の環境マップとして用いる方法、および各階の環境マップを用いる方法の 2 種類が挙げられる。すべての階を 1 個の環境マップとする場合、特徴点データの数は多くなる。本研究における評価結果より、特徴点のデータが一定数以上ある場合、環境マップのロードにかかる時間は長大化する。このため、環境マップを用いた屋内 AR ナビゲーションを利用せずに探索する方が探索時間は短くなる。

各階の環境マップを用いる方法では、出発地と LandMark が異なる階となる場合、環境マップのロードはそれぞれ必要となり、合計で 2 回発生する。このため、今後はすべての階を含む環境マップをロードする時間、および環境マップを 2 回ロードする時間をそれぞれ測定する必要がある。

8.2 蔵書探索への応用

従来研究 [19] では、岡山大学附属図書館 1 階の蔵書探索において、SLAM を用いた屋内 AR ナビゲーションシステムを実現している。本研究の提案システムと従来研究の蔵書探索システムを組み合わせることで、ユーザはシステム上で検索した本の所蔵情報をもとに案内経路を導出でき、図書館内で効率的に蔵書を探索できる。また、文献 [24] では、Visual-SLAM を利用した目的地までの誘導とともに、目的地で行う作業を支援するため、手による誘導を行う。従来研究 [19] では、本棚までの案内は可能である一方で、本一冊ごとの特定はできない。このため、文献 [24] の手法を利用することで本の特定が可能になると考えられる。

9. おわりに

本研究では、SLAM と AR マーカの両方を用いて複数

の環境マップを利用可能な屋内向け AR ナビゲーションシステムを提案した。提案システムでは、SLAM を用いて作成した環境マップを適用してナビゲーションが可能な領域を認識し、屋内移動時に障害物となるオブジェクト領域を除外した経路を AR 上に提示することで、ユーザは障害物を避けて目的地まで移動できる。

提案システムの性能評価は、岡山大学工学部 4 号館にある第 11 講義室、第 14 講義室、および後藤研究室の学生居室である 712 室の 3 種類の部屋で行った。環境マップのロード時間に関する評価では、部屋の広さに比べて特徴点データの数のほうが環境マップのロード時間に大きく影響を与える。自己位置推定に要する時間に関する評価では、特徴点データが一定数以上ある場合、自己位置推定にかかる時間はすべての部屋でほぼ同じとなる。また、AR マーカに対応した環境マップのロード処理、および複数階層の建物を想定した複数の環境マップの切り替え処理について、正常に動作していることを確認した。

今後の予定として、複数階層の建物による屋内 AR ナビゲーションシステムを設計、実装し、評価する。

謝辞 本研究は、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（C））（課題番号：18K11265）の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 友納正裕：SLAM 入門 ロボットの自己位置推定と地図構築の技術，オーム社（2018）。
- [2] Pokémon GO 公式サイト（online），available from < <https://www.pokemongo.jp> >（accessed 2021-4-9）。
- [3] ドラゴンクエストウォーク 公式プロモーションサイト（online），available from < <https://www.dragonquest.jp/walk/> >（accessed 2021-4-9）。
- [4] PinnAR（online），available from < <https://www.pinnar.net> >（accessed 2021-4-9）。
- [5] IKEA アプリ - IKEA（online），available from < <https://www.ikea.com/jp/ja/customer-service/mobile-apps/> >（accessed 2021-4-9）。
- [6] 野崎惇登，廣井慧，梶谷彦，河口信夫：疎な位置情報と誤差モデルを用いた PDR の補正手法，情報処理学会マルチメディア，分散協調とモバイルシンポジウム 2017 論文集，Vol.2017，pp.29-37（2017）。
- [7] K. Nihonyanagi, R. Katsuma, K. Yasumoto: Reducing Falsely-detected Feature Points of SLAM by Estimating Obstacle-free Area for RCMSS, Adjunct Proceedings of the 2021 International Conference on Distributed Computing and Networking, pp.80-85（2021）。
- [8] 友納正裕：移動ロボットのための確率的な自己位置推定と地図構築，日本ロボット学会誌，Vol.29，No.5，pp.423-426（2011）。
- [9] 平山裕介，小嶋直希，鈴木太智，間邊哲也：Wi-Fi RTT を用いた位置特定手法の屋内環境での性能評価，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.61，pp.25-30（2020）。
- [10] 山崎康平，穴戸英彦，北原格，亀田能成：類似画像検索と SLAM による協調的位置推定システムの性能評価，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.119，No.222，pp.89-94（2019）。
- [11] 栗原和也，佐藤文明：位置情報サーバを用いた屋内 AR ナビゲーションシステム，情報処理学会第 76 回全国大会講演論文集，pp.223-224（2014）。
- [12] 天野辰哉，山口弘純，東野輝夫，高井峰生：クラウドセンシングによる屋内 Wi-Fi AP の 3 次元位置推定手法，情報処理学会マルチメディア，分散協調とモバイルシンポジウム 2019 論文集，Vol.2019，pp.1637-1647（2019）。
- [13] T. Rustagi, K. Yoo: Indoor AR navigation using tilesets, Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, No.54，pp.1-2（2018）。
- [14] P. Verma, K. Agrawal, V. Sarasvathi: Indoor Navigation Using Augmented Reality, Proceedings of the 2020 4th International Conference on Virtual and Augmented Reality Simulations, pp.58-63（2020）。
- [15] G. Gerstweiler, K. Platzer, H. Kaufmann: DARGs: Dynamic AR Guiding System for Indoor Environments, Computers, Vol.7，No.5，pp.1-19（2018）。
- [16] R. Romli, A. F. Razali, N. H. Ghazali, N. A. Hanin, S. Z. Ibrahim: Mobile Augmented Reality (AR) Marker-based for Indoor Library Navigation, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol.767，pp.012062（2020）。
- [17] X. H. Ng, W. N. Lim: Design of a Mobile Augmented Reality-based Indoor Navigation System, 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, pp.1-6（2020）。
- [18] 伊東慎平，三浦健，梅川孔平，高橋秋典，有川正俊：高精度インドア・ポジショニングを利用した博物館を対象にした AR ナビゲーションの構築，情報処理学会第 82 回全国大会講演論文集，pp.673-674（2020）。
- [19] 李奇傑，後藤佑介：SLAM を用いた屋内向け AR 経路提示におけるオブジェクト領域の認識手法の提案，情報処理学会第 80 回全国大会講演論文集，pp.333-334（2018）。
- [20] About AR Foundation — AR Foundation — 3.1.6（online），available from < <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.arfoundation@3.1/manual/index.html> >（accessed 2021-4-9）。
- [21] Unity のナビゲーションシステム - Unity マニュアル（online），available from < <https://docs.unity3d.com/ja/2019.4/Manual/nav-NavigationSystem.html> >（accessed 2021-4-9）。
- [22] AR tracked image manager — AR Foundation — 3.1.6（online），available from < <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.arfoundation@3.1/manual/tracked-image-manager.html> >（accessed 2021-4-9）。
- [23] Unity - Manual: ナビゲーションシステムの内部的なしくみ - Unity マニュアル（online），available from < <https://docs.unity3d.com/ja/2019.4/Manual/nav-InnerWorkings.html> >（accessed 2021-4-9）。
- [24] 梁梓龍，穴戸英彦，北原格，亀田能成：Visual SLAM に基づく室内での移動と手の誘導への支援，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.119，No.457，pp.209-213（2020）。