擬人化エージェントを用いた MR屋内ナビゲーションシステムの開発

古田 雄大[1]　打矢 隆弘[1]　内匠 逸[1]

概要：近年，モバイル端末の高機能化に伴い，スマートフォンやタブレット端末の GPS 機能を用いてユーザの位置を推定し，AR(Augmented Reality) 機能によりユーザに目的地までの経路を提示するシステムが登場している．しかし，その多くは進行方向や標識を AR で示すだけにとどまり，人から見た親和性に欠けるほか，屋内では GPS を正確に測位できない地点が存在する．そこで本研究では，任意の屋内において，GPS に依存せずに自由にナビゲーションを設定でき，かつ直観的な経路提示が可能な身体性を付与された人型の CG キャラクタ (擬人化エージェント) による MR(Mixed Reality) ナビゲーションシステムの開発を行った．本研究では，システムの設計・開発後に動作検証実験を行い，ナビゲーションの事前準備であるノード設置モードの有用性，及び，ユーザの屋内経路案内を行うナビゲーションモードの有用性を確認した．

キーワード：擬人化エージェント，屋内ナビゲーション，複合現実，MR, SLAM

1. はじめに

近年モバイル端末の高機能化に伴い，スマートフォンやタブレット端末の機能である GPS を用いて位置情報を検出し，Google Maps のように地図を利用してユーザに経路を提示するシステムが登場している．しかし，地図を用いたシステムでは，提示された地図と目の前の現実空間の情報を対応付ける行為による認知的負荷が発生することから，より直観的なシステムの開発が求められている．いままでに，より直観的かつ認知的負荷が少ないナビゲーションを目的として，身体性を付与された人型の CG キャラクタ (以後，擬人化エージェント) を用いたシステムが提案されている．擬人化エージェントは音声言語やジェスチャ，視線や姿勢による身体的な表現によって，人間が自然に理解できる情報の提示が可能であることから，その発展が期待されている．特に現実空間上に擬人化エージェントを表示できる AR(Augmented Reality) と相性がよく，先行研究では，スマート端末による AR 機能によって現実空間上に擬人化エージェントを表示させて，ユーザを先導させることでナビゲーションを行い，評価を行っていた．しかし，ナビゲーション中に擬人化エージェントが通路でない場所を通る事態が発生し，被験者のアンケート結果では全体の約 80%がシステムに不安を感じたと回答していた．そこで本研究では，AR よりも現実世界の情報とデジタルの情報をより密接に結びつけた空間である MR(Mixed Reality) をシステムに組み込むこと，また擬人化エージェントの先導の精度の向上を目的とした複数のノード設置と歩行経路の作成を行う手法を提案し，提案手法によるシステムの開発を行う．開発にあたり，ナビゲーションを提供する設計者側とナビゲーションを提供されるユーザ側の二つの視点からそれぞれがシステムを使用できるようにシステムの設計や UI の作成を行った．

2. MR:複合現実

Mixed Reality(MR) とは，現実世界の情報とデジタル情報をリアルタイムに相互作用させる技術のことを指す．AR と混同されやすいが，本質的には VR と類似しており，仮想世界に現実世界の情報を当てはめることになる．実際に AR を使用したアプリの多くは床や壁など 1 平面を認識して動作するものであるが，MR を使用したアプリは床，壁，天井の 3 平面を必ず認識して動作しているという違いがある．また，MR を用いた例として，現実世界に存在する机の上に仮想物体であるボールを上から落とし，机とバーチャルのボールを衝突させ，バウンドさせるといったことや現実空間に投影した仮想物体であるピアノをユーザが鍵盤を指でたたくことで演奏するといったことも可能で

[1] 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

©2021 Information Processing Society of Japan

ある．また MR はデジタルの情報を現実にどれだけ反映するかという度合いが設計者に委ねられており，その度合いによって VR や AR に類似した動作を設計することも可能である．

3. 提案システム

3.1 概要

本研究では，仮想空間と現実空間が両方視認可能であるシースルー型 HMD(Head Mounted Display) を使用したシステムを提案する．HMD として，Microsoft 製 HoloLens を用いる．そして，ナビゲーションする屋内空間に対して，HMD に搭載されたセンサを用いて空間を周回することで SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)[1] を行い，現実空間と仮想空間をマッピングする．その時に認識した床に対して周辺環境の特徴点と結び付けたノードとなるオブジェクトを自動的に等間隔で複数個配置する．その後，ノード間の距離を重みとする重み付きグラフを作成し，ダイクストラ法 [2] によって現在位置に最も近いノードから目的地のノードまでの最短経路を計算する．最後に計算した最短経路に従い，動的にノード間のナビゲーション経路を生成し，エージェントが経路上をたどる形でユーザを先導する．図 1 にシステムの流れを示す．システムはグラフィカルエンジン Unity 上のアプリケーションとして動作する．また，システムは設計者がナビゲーションの設定を行う設置モードとユーザにナビゲーションを提供するナビゲーションモードに分類される．

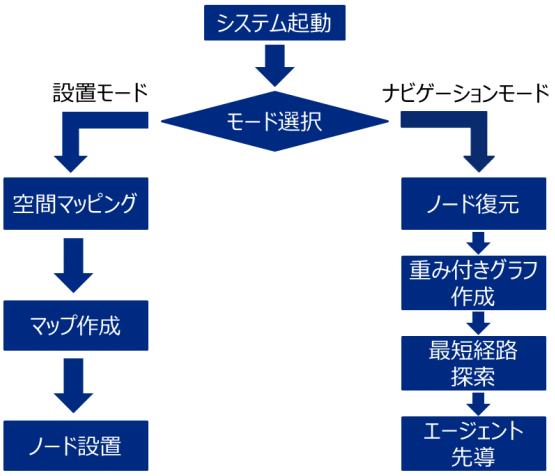


図 1 システムワークフロー

3.2 SLAM の応用

案内の際に利用する屋内環境の学習には SLAM を用いる．HMD に搭載されているセンサを使用することで周辺の環境をマッピングし，リアルタイムに自己位置推定と周辺環境の情報を取得する．周辺環境をマッピングすることを空間マッピングといい，空間マッピングに最適な環境として，十分な照明と広さのある空間が最もよく，表面が暗い色のもの，光沢のあるもの，半透明なものはマッピングされにくいため注意する必要がある．空間マッピングにより得られた周辺環境の情報を図 2 に示す．白いメッシュは周辺の環境の凹凸情報を判別した結果であり，これを Spatialmap という．本システムでは Spatialmap を用いることで経路を生成することや三次元遮蔽関係の表現が可能となる．また，本システムではあらかじめ案内する経路をマッピングして学習しておくことで，案内を行う際にマッピングの速度が速くなるように工夫している．案内の最終地点となる目標地点についてはあらかじめ任意の地点を定めておく必要がある．空間マッピングを行っているとき，空間上の特徴点を見つけ出し，3D オブジェクトを固定することが可能であるためこの World Anchor 機能を利用する．本システムでは World Anchor を用いて目標地点をあらかじめ任意の地点に定めておき，目標地点まで擬人化エージェントが先行することで案内を行う．また空間マッピングによりスキャンされた空間は obj ファイルとして取り出し，利用することが可能である (図 3)．

図 2 空間マッピングの様子

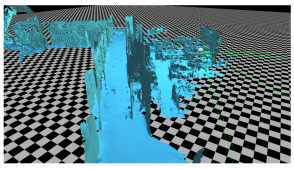


図 3 マッピングデータの表示

また，マッピングの一例として図 4 に現実空間である研究室部屋の写真を，図 5 に同じ視点からマッピングによってデータ化した環境マップを表示させたものを示す．2 つの図を比較して，非常に細かな凹凸情報もマッピングできていることがわかる．しかし，それぞれの物体が何であるかなどのラベルは付与されていないため，システムに床や壁，天井以外の物体の認識には空間マッピングだけではなく，画像認識や人手のラベル付けを行う必要がある．今回の提案システムでは環境マップの凹凸情報のみを使用している．

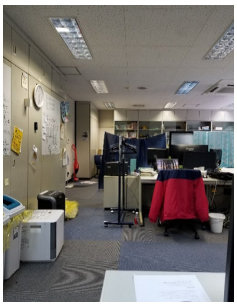


図 4 現実空間

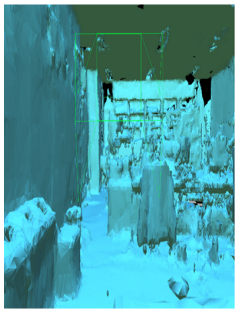


図 5 環境マップ

©2021 Information Processing Society of Japan

3.3 ノードの自動設置

目的地の候補かつ歩行経路の経由地点の役割を担うノードは設置モードでナビゲーション環境を周回することで自動的に設置される．設置の条件として，ノードがエージェントの歩行が可能な地点である床に設置されること，重み付きグラフの作成時に隣接したノードが結合されるように等間隔に設置されることが挙げられる．そのために以下のようにしてノードの設置を行えるシステムを作成した．

カメラ座標を (X_c, Y_c, Z_c) とする．ノードの座標は (X_n, Y_n, Z_n) とする．また，この 2 点間の三次元距離を D とすると，$(X_c - X_n)^2 + (Y_c - Y_n)^2 + (Z_c - Z_n)^2 = D^2$ で表すことができる．システムの一定の経過時間ごとに，距離 D を出力し，D が一定幅を超えたとき，周辺にノードが存在しないとして，カメラ座標にノードを自動的に配置する．提案システムでは推奨されている空間マッピングの適正距離から計算し，$D = 3.5m$ に設定した．

また，HoloLens の座標系は，Unity 内の座標系と異なる．Unity 内の座標系は原点座標や座標軸が動くことはないが，HoloLens における座標軸ではアプリ起動時における HoloLens の位置や向きで異なる．原点座標は HoloLens の起動位置となる．また X 軸は起動時の右手方向 (地面に水平)，Y 軸はジャイロセンサで計測した天井方向，Z 軸は起動時の視線方向 (地面に水平) となる．これを踏まえたうえで HoloLens(カメラ座標) からノードまでの三次元距離を計算する必要がある．同時に，起動時の位置によって設置したノードの位置がずれてしまう問題があった．そのため，静止座標系でノードの位置を設定するのではなく，前述した WorldAnchor をノードの属性として付与することで，周辺の特徴点にノードを固定することができ，アプリの起動によるノードの位置ずれの発生を防止した．また，設置したノードに対して目的地となるノードをジェスチャによって選択して設置モードを終了する．このとき通常のノードが水色の蛍光色に対して，目的地に設定されたノードは緑色の蛍光色に変化する．設置したノードは，設置時は可視化されているが，UI から目的地に設定したノード以外を不可視化することができ，同様に可視化も UI から切り替えが可能である．

3.4 ノードの復元

ノードの復元とはアプリの再起動やモード変更によってモードが切り替わった際に，現在位置とノードの位置を推定して，ノードの再設置を行うことである．前述の通り，HoloLens の座標系は起動ごとに異なるため，凹凸情報に紐づけたノード位置の復帰が必要になる．ナビゲーションモード開始時，以下のような流れで設置モードで生成された環境マップから自己位置の推定とそれに紐づけられたノードの位置復元を行う．システムは自動で特徴点を抽出することができる．

(1) 空間マッピング実行
(2) 目の前の空間の特徴点を抽出
(3) 設置モードで生成された環境マップと照合
(4) 環境マップの中の現在位置を推定
(5) 現実空間に紐づけられたノード位置の復元

3.5 重み付きグラフ作成

グラフの辺に重み（コスト）が付いているグラフを重み付きグラフという．今回は案内場所である廊下にノードを設置し，距離を重みとして連結させた無向グラフを重み付きグラフとして扱い，最適化問題として解く．ここで記す最適化問題とは重み付きグラフの任意の 2 つのノード間を結ぶ経路の中でコストが最小の経路を求める問題のことを指す．

本システム内ではコストを距離に設定し，隣接したノード間をエッジとして結合する．隣接したノードの定義として，ここでは候補となるノード同士が 5m 範囲内にあること，かつ環境マップから歩行経路が形成できるかの二つの条件を満たしているものとする．

3.6 最短経路探索

最短経路の探索にはダイクストラ法を用いる．ダイクストラ法とは，ネットワーク上のある始点から各点への最短経路を求める手法の一つである．スタートノードは現在のカメラ座標から最も近い座標を距離を計算することで算出し，ゴールノードは設置モードで指定した目標地点のノードとなる．本システムでは距離を重みとしたノード群で構成されるネットワークにダイクストラ法を適用し，スタートノードからゴールノードまでの経路情報を配列で出力している．実際のアルゴリズムの流れとしてスタートノードの周辺から 1 つずつ確定し，徐々に範囲を広げていき，最終的にはすべてのノードへの最短経路を求める．下記にアルゴリズムの流れを示す．

(1) スタートノードを決め，スタートノードのノード値を 0 にする．その他のノード値を無限大にする．ノード値はスタートノードからの最短距離を表す．
(2) スタートノードにつながっているノードの，始点からノード間の距離を求め，ノード値を更新する．また，最小のノード値を持つノードに印をつけて最短距離を確定する．
(3) 印を付けたノードにつながる他のノードまでの距離を求め，ノード値を更新する．また，印の付いていない未確定ノードの中で最小の値を持つノードに印を付けて最短距離を確定する．
(4) 全てのノードに印がつくまで 3 を繰り返す．
(5) 全てのノードに対して始点からの最短距離 (ノード値) が求められる．

©2021 Information Processing Society of Japan

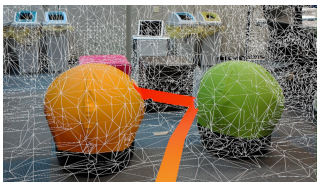


図 6　障害物の認識

図 7　ルートの作成

3.7　エージェントによる先導

エージェントの歩行経路の作成は，空間マッピングにより認識した周辺環境の凹凸情報から経路の作成を行っている．また静的な障害物に対しては障害物を考慮した経路の生成が可能になっており (図 6)，その経路上を擬人化エージェントが移動することで被験者に対してナビゲーションを行う．図 7 は実験環境で実際に動的に作成した経路を可視化した図である．

また，本研究では擬人化エージェントとして，本学の正門でデジタルサイネージを通して学内案内をしているメイちゃんを使用する．その理由として 2 点あげられる．1 つ目はメイちゃんが多数の擬人化エージェントの研究に使用されているためである [3]．2 つ目はメイちゃんが不気味の谷と呼ばれる効果を抑制する手法が導入されているからである．不気味の谷効果とはエージェントの姿やしぐさをどんどん人間に似せていく場合，ある程度までは親近感が増すが，人間にかなり近づいたところで急に不気味さや嫌悪感が出てくる現象である．この 2 点から今回の実験では擬人化エージェントとしてメイちゃんを使用する．本研究で実装する擬人化エージェントの機能の概要は以下のとおりである．

- ユーザの位置や方向によって，自律的に行動する．
- 複合現実空間において身体を持ち，関節を動かすことで動作を表現できる．
- 目標地点までの経路上を先行する (図 8)．
- 一定の距離が離れた場合，ユーザの接近を待つ (図 9)．

図 8　エージェントの歩行

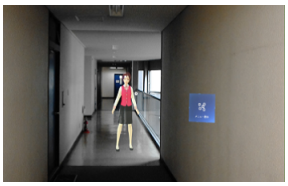


図 9　エージェントの待機

また，擬人化エージェントの歩行経路の作成には Unity のナビゲーションシステムを使用した [4]．これを使用することで自動で移動できる擬人化エージェントの作成や障害物の自動回避ができる．概要図を図 10 に示す．図中の青い面を NavMesh と呼び，歩行可能な面を描写するデータ構造である．また図中の白い円柱状のオブジェクトのように移動させたい物体を NavMeshAgent といい，NavMesh を認識して移動や障害物回避を可能にする．また Off-Mesh Link とは NavMesh を使って表現することのできないナビゲーションやショートカットの構築に使用される．また図中の白い立方体のように障害物に設定したオブジェクトを NavMeshObstacle といい，この属性を付与されたオブジェクトは避けるべき障害物としてシステムに認識され，歩行経路の作成はこのオブジェクトを避けて作成される．提案システムでは，現実空間をマッピングしたデータである環境マップに NavMesh，擬人化エージェントを NavMeshAgent に設定した．また障害物では，高さが 0.3m 以上で経路線の角度が 45 度以上となるような物体を障害物として NavMeshObstacle に設定した．設定の基準としては，階段を使用する場合でも経路が探索できるように，標準的な蹴上（1 段ごとの高さ）である 0.2m を考慮して設定した．また，今回の提案システムでは Off-Mesh Link を用いることはなかったが，今後のシステムの改善としてエレベータの移動を考慮した場合，マッピングが中断される問題があるため，その解決策として Off-Mesh Link を用いてエレベータ間の移動をショートカットとして結び，経路探索に組み込むことができる．

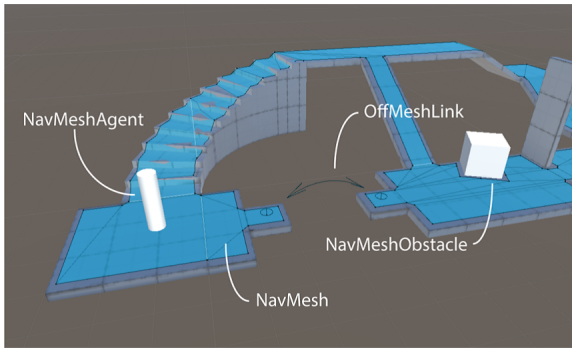


図 10　Unity 上のナビゲーション表現

3.8　実装環境

提案システムを実装するにあたって，使用したソフトウェアについて表 1 に示す．

表 1　使用したソフトウェア

ソフトウェア	バージョン
Unity	Unity 2017.4.40f1
OS	Windows 10 Pro 64bit
Visual Studio	Visual Studio 2017
MixedRealityToolkit	HoloToolkit-Unity-2017.4.3.0

なお，実装にはプログラミング言語である C#を用いて開発を行った．

©2021 Information Processing Society of Japan

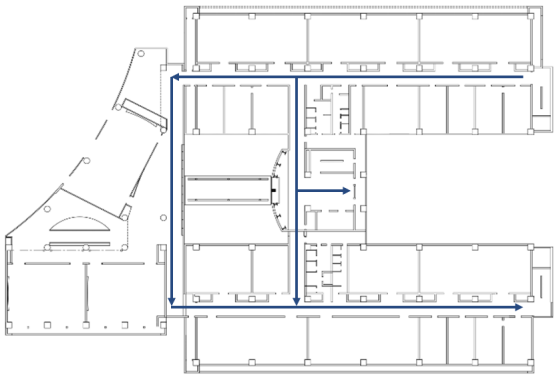


図 11 実験環境:2 号館 2 階平面図

4. 評価実験

4.1 目的

本実験の目的はナビゲーションシステムとしての有用性の検証である．システムによって提示された経路が最短経路であるか，また擬人化エージェントが算出した経路に対して歩行し目的地まで先導できるか確認する．具体的には，設置モードとナビゲーションモードのそれぞれの有用性を検証するために，以下 2 つの実験を行った．

- システム実験 1⟶ 設置モードの有用性の検証
- システム実験 2⟶ ナビゲーションモードの有用性の検証

なお，実験は本学 2 号館 2 階の屋内空間を用いて行う (図 11)．その理由として本学 2 号館 2 階の構造は曲がり角が多数あり，1 つの目的地までに複数の経路が存在するといった複雑な構造であるといった点や階段やエレベーター以外のランドマークが少ないといった点から妥当だと判断した．

4.2 システム実験 1

システム実験 1 では，本学 2 号館 2 階において HMD を装着し，提案システムを起動して，設置モードでナビゲーション環境を周回した．設置モードで周回した経路を図 11 上に青矢印線で示す．これによって，重み付きグラフを構成するノードがシステムであらかじめ設定した 3.5m 間隔で現実空間上に自動設置ができているか，また，周回した環境全域にノード設置ができているか検証した．この実験では特にシミュレーション環境上ではできない現実空間の特徴点に紐づけてノードが設置できるか，また，位置測位の誤差によるノードの位置ずれが経路探索にどの程度影響を及ぼすのか確認するために行った．

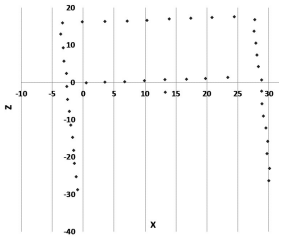
4.3 結果と考察

システムを起動し，屋内の全域を周回し，その経路上に一定間隔でノードが設置できているか確認した．システムによって自動設置されたノードは合計 45 個になった．また，実験環境における隣接ノード間の関係をまとめたものを表 2 に示す．表 2 より隣接間のノード距離の平均が約 3.4m であり，標準偏差が約 0.35m であることからシステムが意図した 3.5m 間隔のノード設置という条件を満たしていることがわかる．しかし，一か所ノード間隔が開いたものが存在した．この原因としては一秒おきに周辺にノードが設置されているか探索を行うのだが，この一秒間のタイミングで 3.5m を大きく超えたためであると考えられる．また，位置推定の誤差による設置したノードの位置ずれが発生することがあったが，マッピングが進むにつれて補正されることで，その後の経路作成に影響を及ぼすほどの誤差は発生しなかった．

表 2 隣接ノード間距離の関係

平均	3.429801
分散	0.136466
標準偏差	0.369412

次に自動設置されたノードの平面座標を表す x 座標と z 座標をプロットしたノード設置グラフを図 12 に示す．またこの図と 2 号館 2 階平面図を一致させた図を図 13 に示す．これらの図より周回した 2 号館 2 階全域にノードが設置できていることがわかる．



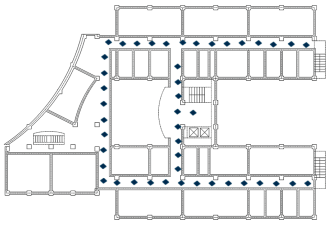


図 12 ノード設置グラフ　**図 13** グラフと平面図を一致させた図

以上の結果より，提案システムの設置モードが正しく動作し，ナビゲーション環境に一定間隔かつ全域に現実空間に紐づけたノードが設置できることを証明した．

4.4 システム実験 2

システム実験 2 ではシステム実験 1 で設置されたノード 45 個に対して，ナビゲーションモードを適用し，隣接ノード間を結合した距離を重みとする重み付きグラフを作成する．その後，ダイクストラ法によって最短経路が出力されるか，また擬人化エージェントが現実空間の壁や床などの環境に沿ってナビゲーションができるかどうか，2 つのルートによって検証した．2 つのルートを図 14 と図 15

©2021 Information Processing Society of Japan

に示す．ルート 1 の経路長は 44.75m，ルート 2 の経路長は 60.54m である．

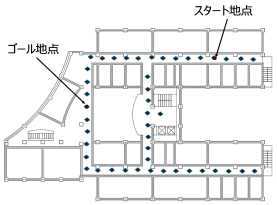


図 14 ルート 1

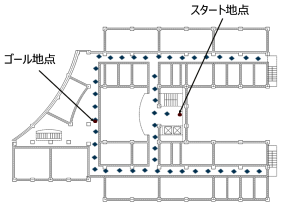


図 15 ルート 2

4.5 結果と考察

図 14 と図 15 のルート設定に対して，擬人化エージェントが実際に経由したノードの座標をプロットしたものを図 16 と図 17 に示す．またこれらのルートと 2 号館 2 階平面図を重ねたものを図 18 と図 19 に示す．図 18 と図 19 からスタート地点からゴール地点に対して適切な最短経路を形成し，エージェントがその最短経路に従って移動できていることがわかる．ルート 2 ではスタートからゴール地点に行くために北から行くルートと南から行くルートの経路長がほぼ等しい 2 つのルートが存在するが，システムは適切に最短のルートである南からのルートを出力することができていた．また候補となる 2 つのルートの差はノード一個分の 3.5m 程度の差であった．擬人化エージェントの移動に関しては，壁や障害物を動的に避けて適切な移動をすることに成功していた．また，ノード増加による計算量の増加が経路探索の計算時間に影響を及ぼすことはなかった．

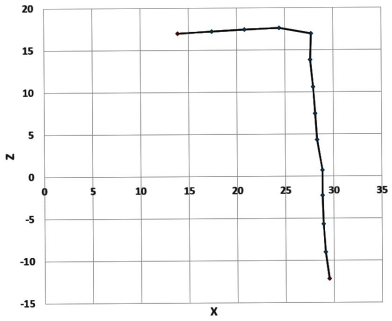


図 16 出力されたルート 1

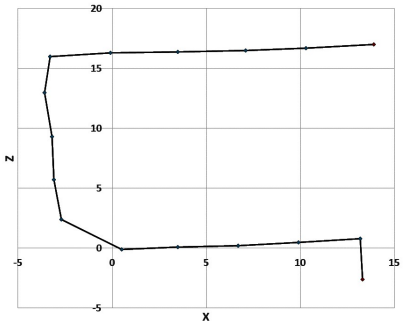


図 17 出力されたルート 2

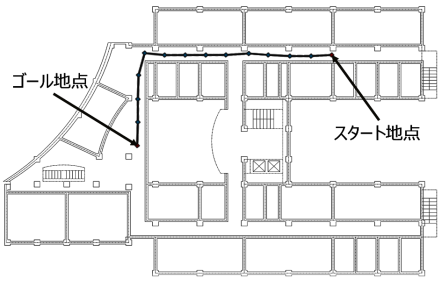


図 18 エージェントが移動した経路 1

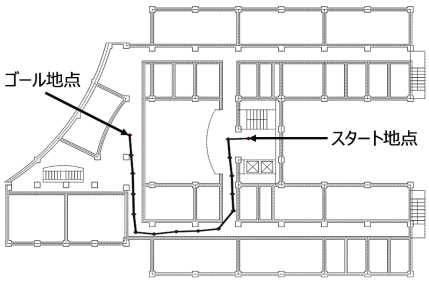


図 19 エージェントが移動した経路 2

©2021 Information Processing Society of Japan

以上の結果より，提案システムのナビゲーションモードが正しく動作し，ナビゲーション環境に対してリアルタイムにノード間の歩行経路を出力し，実空間の環境に沿って擬人化エージェントが先導できることを証明した．

5. まとめ

本研究では，屋内でのナビゲーションシステムの問題点を解決するために，GPS の位置情報に依存せずに自由にナビゲーションを設定でき，既存の AR による方向指示よりも，直観的でわかりやすいナビゲーション手法として MR 空間内での擬人化エージェントによる先導によってナビゲーションを実現した．本研究で導入した独自技術は，SLAM の MR 応用，ノード自動設置・復元，エージェント先導によるナビゲーション手法など多岐に渡る．また，検証実験を行い，提案システムは設置したノード間ごとに歩行経路を作成することで擬人化エージェントがより正確に目的地までナビゲーションを行うことができることを確認した．

今後は，複数フロアを移動するナビゲーションの実現や，屋内・屋外のシームレスなナビゲーションの実現に取り組む．

参考文献

[1] Dissanayake, M.W.M.G., ”Solution to the Simultaneous Localization and Map Building (SLAM) Problem”, IEEE Transactions on Robotic and Automation 17(3), pp.229-241, 2001.
[2] E.W.Dikstra, ”A Note on Two Problems in Connection with Graphs”, Numer.Math., Vol.1, pp.269-271, 1959.
[3] メイ&タクミ公式ウェブサイト，“メイ&タクミとは”，http://mei.web.nitech.ac.jp/?page_id=12649，(2021/7/21 アクセス可)
[4] Unity，“Unity のナビゲーションシステム-Unity マニュアル”，https://docs.unity3d.com/ja/current/Manual/nav-NavigationSystem.html，(2021/7/21 アクセス可)

©2021 Information Processing Society of Japan