

建物データを活用したロボットナビゲーションシステムに関する研究

建築学専攻
生産システム研究

MJ23082 高添 祥太郎
指導教員 志手 一哉

1. 研究目的

近年、建設業における労働力人口の減少が深刻な問題となっている。国土交通省は「i-Construction」を推進し、労働力人口の減少を上回る生産性向上を試みている¹⁾。そのひとつの手段の1つとしてロボットの活用が挙げられる。これらを活用することで、単純作業の自動化が期待されているものの、事前に地図作成や経路設定を行う必要があり、十分な業務省力化ができていない。先行研究では、局所的経路計画における強化学習の有効性を実証し、研究室内でドローンの自律飛行を実現した²⁾。しかし、大局的経路計画に関する詳細な洞察には欠けていた。

そこで本研究では、建設現場の業務省力化を目的とし、BIMデータおよびデジタルツインの動的データを活用した最適経路計画手法を提案する。本手法により、より安全で効率的な大局的経路計画の実現を目指す。

2. 先行研究

従来の屋内経路計画では、2次元地図上でA*などの古典的アルゴリズムを用いて最短経路を求めている。しかし、近年はBIMを活用する手法が注目されており、その地図表現はグリッド地図、グラフ地図、およびそれらの複合型に大別される。Karimiらは、IFCデータからBIMセマンティクスを抽出し、意味情報付きグラフ地図に変換する手法を提案した³⁾。この手法では、各部屋を頂点、ドアを辺としたグラフ構造の地図を作成し、距離だけでなく経路上の各部屋の状態も考慮して2点間の最適経路を探索している。この手法は経路計算コストが小さいため、リアルタイム性が求められるロボットの経路計画に適している。Zhouらは、グリッド地図とグラフ地図を作成し、組み合わせて用いる手法を提案した⁴⁾。この手法では、まずグリッド地図上で最も近い頂点を見つけ、次にグラフ地図上で最短パスを求めている。

本研究では、上記の手法を発展させ、各建物の地図と都市の地図を統合し、地図の大規模化を行う。また、単純無向グラフではなく多重有効グラフを使用することで、任意の2点間の経路を複数表現できるようにする。これにより、様々な条件下での最適な経路選択が可能となる。

3. システム開発

本研究は、ロボットがより速く安全に移動可能な経路を探索することを目的としている。そのために、ロボット用の地図を作成するサービスと、屋内環境をモニタリングするサービス、それらの情報を用いて経路探索を行うサービスを開発する。また、経路探索サービスの指示に従って目的地へ自律移動する搬送ロボットを開発する。システム概要を図1に示す。

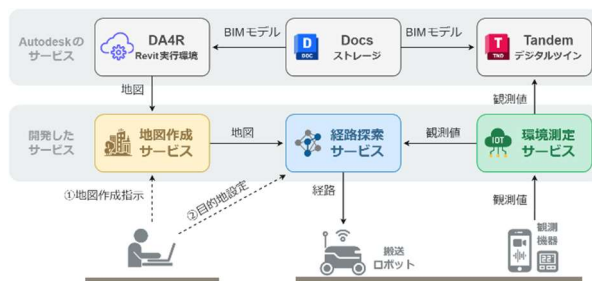


図1 システム概要図

3.1 地図作成サービスの開発

BIMモデルおよび都市モデルを入力として、グリッド地図とグラフ地図を作成し、経路探索サービスへ送信するWEBサービスを開発する。グラフ地図は屋内外の移動経路をグラフ構造で表現した地図であり、経路探索サービスでの大局的な経路探索に用いる。グリッド地図は建物の各フロアを2次元格子で表現した地図であり、ロボットの自己位置推定に用いる。

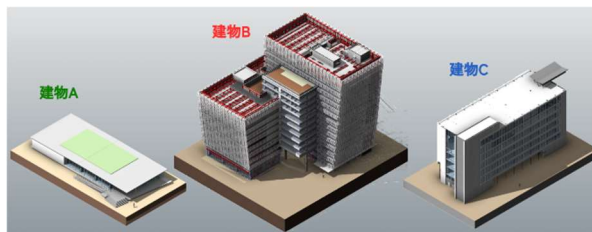


図2 記念館・本部棟・交流棟のBIMモデル

3.2 環境測定サービスの開発

屋内の様々な情報をロボットナビゲーションに利用するために、人流や温湿度などの環境情報をモニタリングし、データベースに蓄積するとともにデジタルツインへ反映するシステムを開発する。観測機器は、コストや調達容易性を考慮してモバイル端末とBluetooth接続の温湿度計を採用した。また、データを可視化するためのデジタルツインプラットフォームとしてAutodesk Tandemを採用した(図3)。

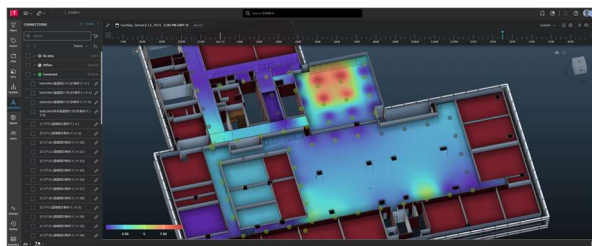


図3 Tandemで本部棟8階の人流を可視化の様子

3.3 経路探索サービスの開発

地図作成サービスから送信された地図を保持し、グラフ地図を用いてロボットタイプに応じて経路探索を行うWEBサービスを開発する。本サービスでは、

まず地図作成サービスから送信された複数の建物のグラフ地図を統合し、1つの大規模な地図を形成する。次に、エリアごとの混雑度データを用いて経路の重みを更新する。具体的には、過去30分間の混雑度データから10分後までの混雑度を予測し、混雑度に応じて制限速度を設定する。そして、エッジが各エリアを通過する距離を制限速度で除した値をエッジの移動時間とし、それを重みとして設定する。これにより、経路の混雑度を考慮した経路探索が可能となる。経路探索においては、車輪移動ロボット、ヒト型ロボット、ドローンの3種類のロボットタイプを想定し、それぞれの移動特性に応じた経路を求める。例えば、車輪移動ロボットは手動ドアや階段を通過できないが、ヒト型ロボットはそれらを通過可能である。また、ドローンは花壇や不整地も通過可能である。経路探索の手法として、2地点間の最短経路を求める場合はDijkstraアルゴリズム、複数地点を巡回する場合は焼きなまし法を用いる。また、人混みなどで経路が塞がれている場合に備えて、ノードやエッジのステータスを更新し、それらを避けた迂回路を探索する機能も実装した。この機能により、ロボットはリアルタイムの環境変化に応じて柔軟に経路を変更することが可能となる。

3.4 搬送ロボットの開発

実機検証用に、教育用ロボット「iRobot Create3」をベースとして、RGBDカメラと制御用PCを搭載した搬送ロボットを開発する。搬送ロボットの自己位置推定には、主にCreate3に搭載されている車輪エンコーダー・IMU・赤外線センサーのデータを用い、その累積誤差をAMCLによって補正する。大局的経路は経路探索サービスから取得し、局所的な障害物回避は古典的なルールベースのアルゴリズムであるDWAを用いる。これにより、人などの動的障害物を回避しつつ大局的経路に追従する。また、人混みなどで通路が塞がれている場合は、無理に大局的経路に追従するのではなく、サーバー側で大局的経路を再計算して障害物を大きく迂回する。さらに、万が一障害物と接触した場合に備えて、機体前方のバンパーで接触検知し停止する安全機構も実装した。



図3 Create3ベースの搬送ロボット

4. 実験

まず、目的地D1～D4を設定して、車輪移動ロボット、人型ロボット、ドローンそれぞれに最適な巡回路が求められるか検証した(図4)。結果から、ドロー

ンはエスカレーター上空を飛行するため両方向に移動できるが人型ロボットはエスカレーターを片方向にしか移動できない制約があるため、より距離の長い経路を選んでいることが分かる。また、車輪移動ロボットは巡回路を求めることができなかった。D3およびD4へアクセスするには、必ず階段かエスカレーターを利用する必要があるためである。

次に、本部棟8階において目的地D5・D6を設定し、デジタルツインの動的データを用いてより人が少ない安全な経路を計画できるか検証した(図5)。結果から、人通りの多い最短経路ではなく、少し遠回りだが人通りのない経路を選択できていることが分かる。

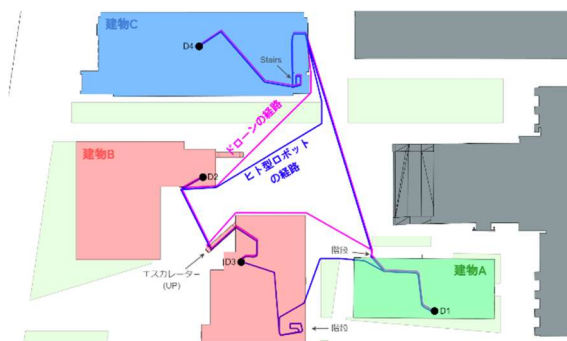


図4 D1～4を巡る最単巡回路

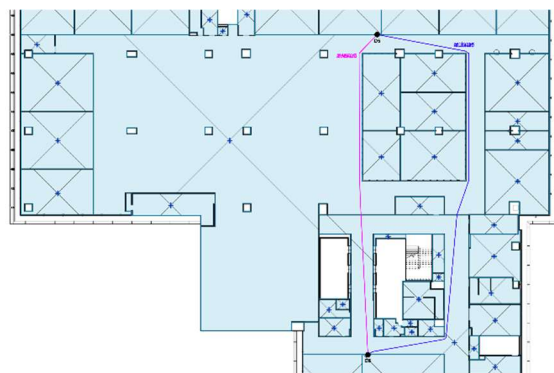


図5 D5からD6への搬送ロボットの最適経路

5. まとめ

本研究では、建設現場の生産性向上を目指し、BIMとデジタルツインを活用したロボットの経路計画手法を提案した。BIMから計算コストの小さい意味情報付きグラフ地図を作成し、それに動的データを組み合わせることでより速く安全な最適経路を高速に探索可能であることを示した。

6. 参考文献

1. 国土交通省, “i-CONSTRUCTION の推進”, 2022
2. 高添祥太朗, 志手一哉, “BIMと強化学習を用いたドローンナビゲーションに関する基礎的研究”, 第45回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 2023
3. SINA KARIMI, RAFAEL GOMES BRAGA, IVANKA IORDANOVA, DAVID ST-ONGE, “SEMANTIC NAVIGATION USING BUILDING INFORMATION ON CONSTRUCTION SITE”, 38TH PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION, 2021
4. ZHOU X., XIE Q., GUO M., ZHAO J., WANG J., “ACCURATE AND EFFICIENT INDOOR PATHFINDING BASED ON BUILDING INFORMATION MODELING DATA”, IEEE TRANS. IND. INFORMAT., VOL. 16, NO. 12, PP. 7459-7468, 2020