

屋内外で併用可能なナビゲーション手法

実証実験レポート

2021.3.31 1.0版

TIS株式会社
会津大学
イームズロボティクス株式会社



目次

1. 研究概要

- 研究開発の目的
- 実施体制と役割
- 自律移動ロボットの概要
- 自律移動ロボットの使用機器一覧

2. 実証結果

- 実施概要
- 検証環境
- 検証結果
 - ① 屋内測位用と屋外測位用の地図切り替えの検証
 - ② 自律移動ロボットによる屋外の公道走行時のナビゲーション機能の検証

3. まとめ

付録

- メディア掲載
- 実証の様子

研究概要

研究開発の目的

背景

自律移動可能なサービスロボットを配送業務などに活用することで、労働力不足や高齢化問題などの社会課題の解決が期待できる。既存の自律移動ロボットでは、屋外ではQZSS¹⁾やネットワーク型RTK-GNSS²⁾等の衛星測位を中心とした手法が、屋内ではLiDAR³⁾やステレオカメラ等の測距センサを用いた手法が良く用いられている。しかしこれら外界センサーは一長一短あり、周辺環境に応じてセンサーやアルゴリズムを変更する必要がある。

- ネットワーク型RTK-GNSS：衛星電波が届きやすい屋外での使用を得意とするが、基準局からの補正情報を受け取る必要があるためネットワークへの接続が必須
- LiDAR：特徴的な凹凸情報のある環境での使用を得意とするが、高精度な自己位置推定のために事前の地図作成が必要

目的

① 屋内測位用と屋外測位用の地図切り替えの検証

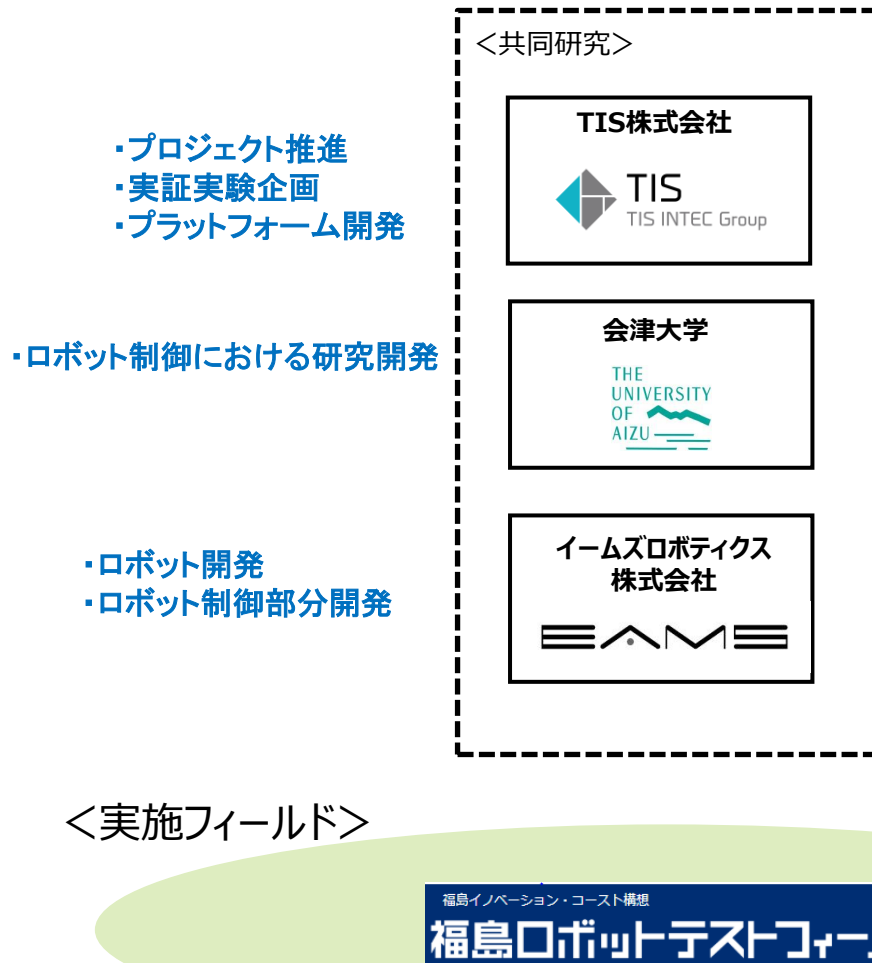
異なる外界センサで得られた異なる地図をズレなく張り合わせてシームレスに切り替えることを検証

② 自律移動ロボットによる屋外の公道走行時のナビゲーション機能の検証

自律移動ロボットに車道または歩道を走行させ、経路に対して誤差なく自律走行できることを検証

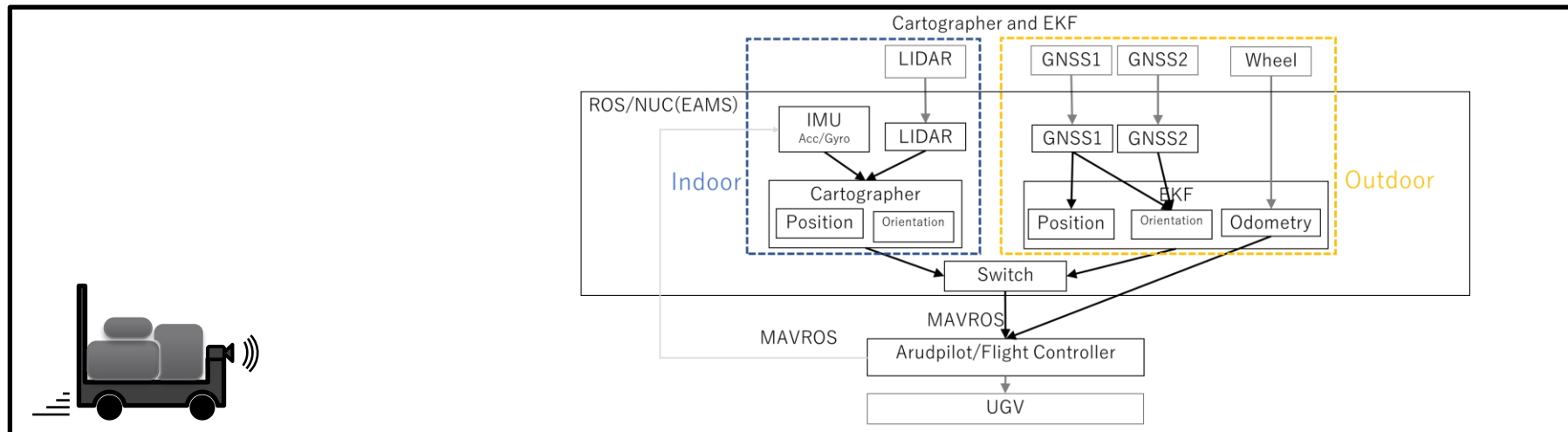
- 1) QZSS: 準天頂衛星システム。日本の天頂付近に常に1つ以上の衛星があるように配備されており、ビル等の影響が少なく電波の受信が可能
- 2) ネットワーク型RTK-GNSS: 測位衛星からの電波の受信状況だけでなく、基準局からネットワークを介して補正情報を受け取り、地理座標上の位置を推定
- 3) LiDAR: レーザー光の物体反射を基に周辺環境を認識、周辺物体との位置関係を推定

実施体制と役割

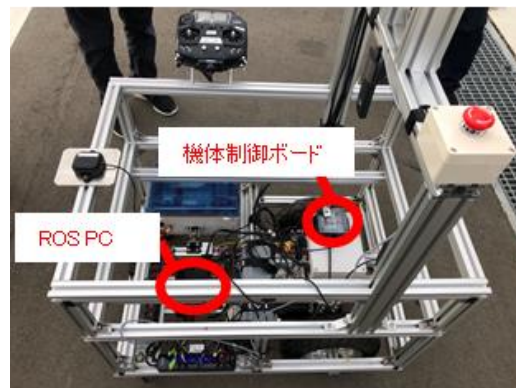


自律移動ロボットの概要

- 屋内の位置と姿勢の推定として、LiDARによる点群とIMUの加速度情報からCartographerを用いてグラフベースSLAMで地図を作成しておき、その地図内でスキャンマッチングを行って自己の位置と姿勢を推定
- 屋外の位置推定として、ネットワーク型RTK-GNSSによる位置測位とホイールオドメトリの運動情報を基に世界測地系における位置と姿勢を推定
 - ネットワーク型RTK-GNSSの商用サービスのうち、今回はSoftbank ichimill⁴⁾を使用
- 屋外の姿勢推定として、機体の正確に計測した箇所に2台のネットワーク型RTK-GNSSアンテナを設置し、それらの位置差分から方向を推定
- 屋内測位用の地図（Cartographerが生成した占有格子地図）と屋外測位用の地図（世界測地系）をズレなく張り合わせるために、屋内測位用の地図の座標系と世界測地系を相互変換する仕組みを実装
 1. 屋内測位と屋外測位の双方で測定が可能な領域内のある点にて、内部座標系における姿勢（位置と向き）と世界測地系における姿勢（緯度・経度と方角）を同時に観測、屋内測位用地図と屋外測位用地図の異なる座標系間を相互変換する行列を生成
 2. 上記2点の相互変換行列を生成し、屋内/屋外どちらも世界測地系で経路指定が可能



自律移動ロボットの使用機器一覧



機器カテゴリ	機器名称
フライトコントローラ	CubeBlack
送信機	FMR-02
GNSS	LC01 (SoftBank ichimill) 2セット
ROS用コンピュータ	Intel NUC NUC7i7DNBE
Wi-Fi 無線LAN 子機	I-O DATA WN-G300UA
ホイールオドメトリ	infenion TLE5012BE3005XUMA1
LiDAR	Velodyne VLP-16

実証結果

実施概要

実証実験場所

■ 福島ロボットテストフィールド（市街地フィールド）

実証実験日

■ 実施：2021年 01月 14、15日

※1/15 PM：ふくしまロボットシティ推進協議会としてのイベント実施

実証実験シナリオ

- 屋内外での自律移動配送ロボットを用いたラストワンマイルの自動化
 - ・ ロボットは屋内の配送元へ移動し、荷物を受け取る
 - ・ 屋外の道路を使用して配送先へ移動後、荷物を受け渡す
 - ・ 配送元へ帰還後、受け渡したことを確認し、ロボットは待機位置へ帰還

検証内容

- 屋内測位用と屋外測位用の地図切り替えの検証
- 自律移動ロボットによる屋外の公道走行時のナビゲーション機能の検証



検証環境

ロボットテストフィールド：市街地エリア



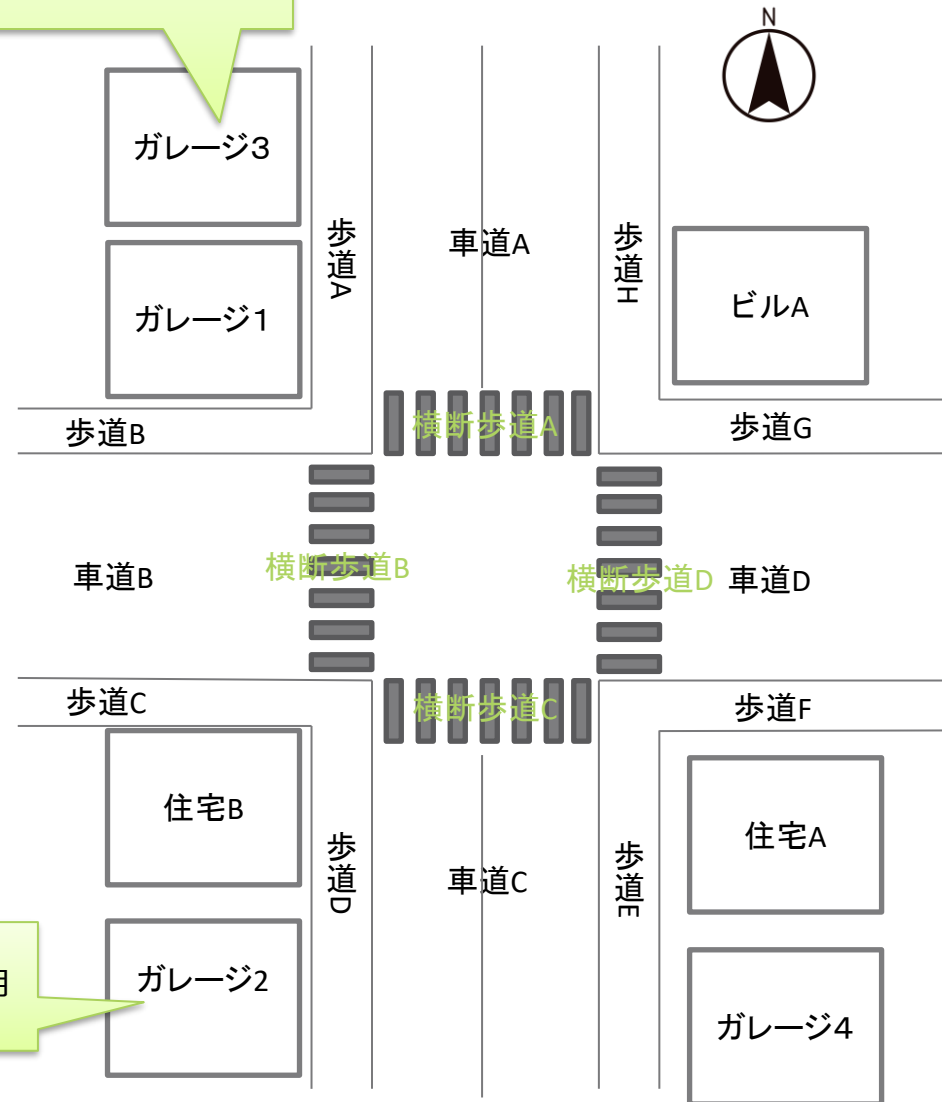
4 市街地フィールド

道路

南北方向	長さ 75m 幅 12m(歩道含む)
東西方向	長さ 96m 幅 7.5m(歩道含む)

配送先として使用

配送元として使用

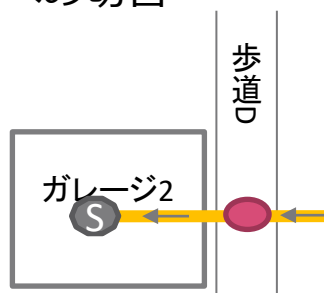


① 屋内測位用と屋外測位用の地図切り替えの検証

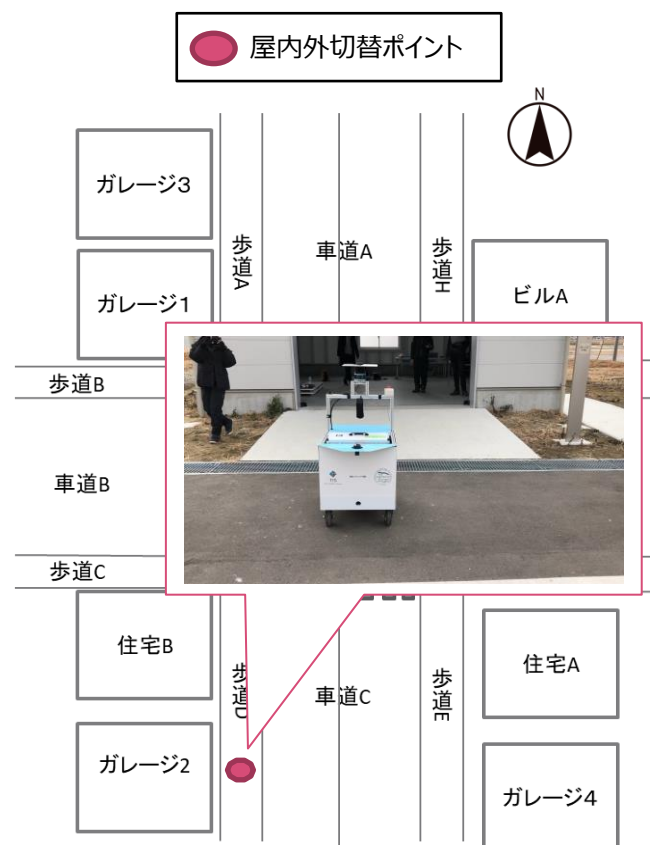
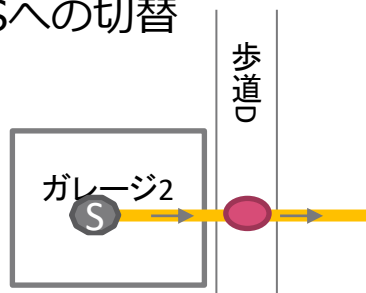
検証方法

ガレージ2 前に切替ポイントを設置、以下パターンでのセンサー切替を検証する

1. 屋外から屋内移動時のネットワーク型RTK-GNSSからLiDARへの切替



2. 屋内から屋外移動時のLiDARからネットワーク型RTK-GNSSへの切替



① 屋内測位用と屋外測位用の地図切り替えの検証

結果

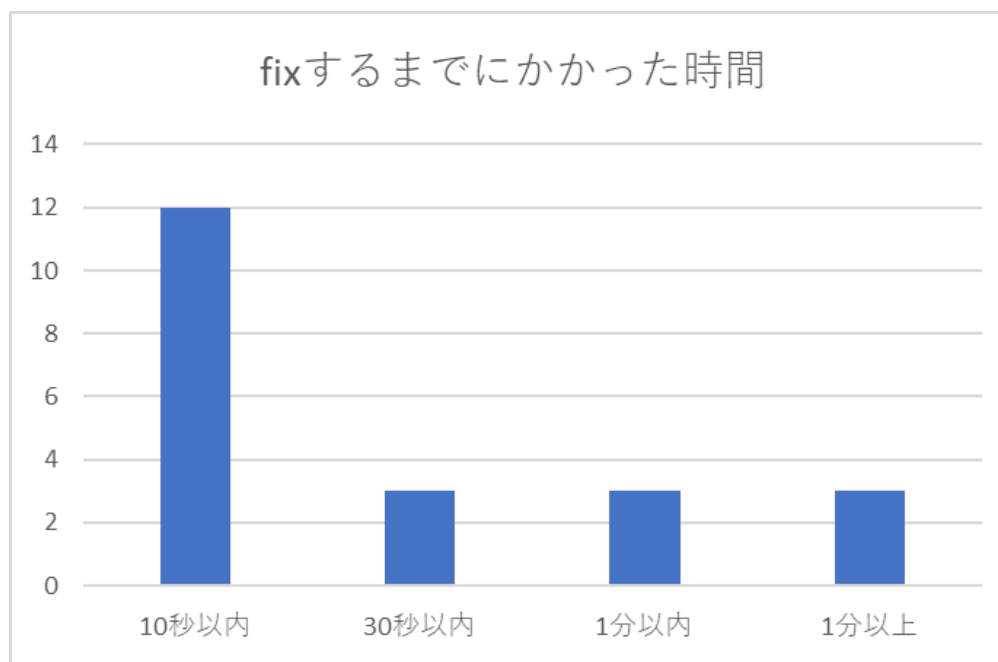
屋内測位用のセンサーと屋外測位用のセンサー切り替えによって、下記いずれの切替ともロボットの姿勢が急激に変化することなく、滑らかでシームレスな屋内外移動が可能であることが確認された

1. 屋外から屋内 … ネットワーク型RTK-GNSSからLiDARへの切替
2. 屋内から屋外 … LiDARからネットワーク型RTK-GNSSへの切替

① 屋内測位用と屋外測位用の地図切り替えの検証

問題点

- LiDARからネットワーク型RTK-GNSSへの切替に1分以上の時間を要する場合がある
 - 切替にかかる時間を21回計測した結果を以下に示す



① 屋内測位用と屋外測位用の地図切り替えの検証

考察1

- ロボット走行に影響を与えることなくセンサーの切り替えを実施することが可能
 - 切替後の走行にふらつき等が見られなかった
- 屋内から屋外（LiDARからネットワーク型RTK-GNSS）への切替時に時間がかかる場合とそうでない場合のGNSSデバイスの受信状況を調査、以下の傾向があることが判明
 - 切替が早い場合
 - 屋外にいるときに衛星からの受信強度(CN値)の高い衛星が複数見えている
 - 屋内でもCN値が下がらない
 - 屋外の滞在時間が短い(長い場合でもCN値が高い値で維持できていれば切替は早い)
 - 切替が遅い場合
 - 屋外にいるときのCN値の値が不安定
 - 屋内でのCN値が低い
 - 建物内の滞在時間が長い

① 屋内測位用と屋外測位用の地図切り替えの検証

考察2

- 屋内から屋外（ LiDARからネットワーク型RTK-GNSS ） への切り替え時間の問題は衛星測位の本質的問題のため、状況によって切り替えに時間がかかるのは許容せざるを得ない
- 切替に時間がかかる場合を想定したサービス品質を維持する工夫が必要となる
例）屋内測位と屋外測位が双方可能な『のりしろ部分』を走行しながら切り替えることで切り替えに要する時間を削減

① 屋内測位用と屋外測位用の地図切り替えの検証

まとめ

- 屋内測位用地図と屋外測位用地図をズレなく張り合わせてセンサーを切り替えることを確認
 - センサー切り替えによる姿勢の急激な変化がないため、走行時のふらつき等の影響がない
 - LiDARからネットワーク型RTK-GNSSへの切り替え時に時間がかかる場合がある
⇒ 『のりしろ部分』 走行中にセンサーを切り替え、待ち時間を削減する必要がある

検証結果

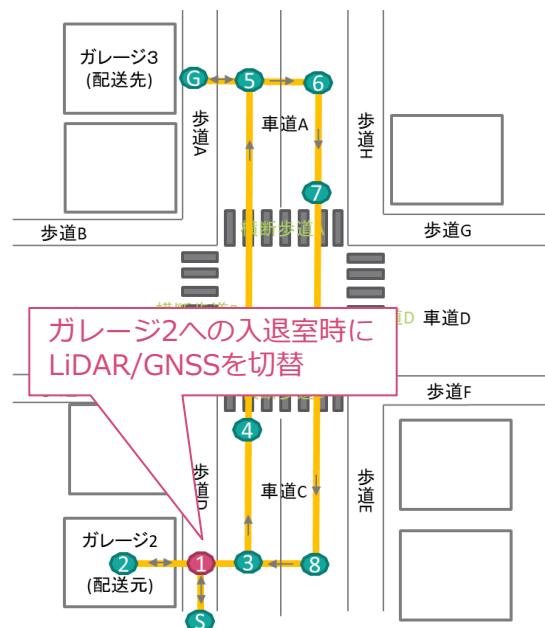
② 自律移動ロボットによる屋外の公道走行時のナビゲーション機能の検証

検証方法

以下ルート上でのロボット走行過程で、検証項目の確認を行う

S 待機位置 G 目的地 ● 屋内外切替ポイント

車線中央ルート



ウェイポイント列(往)

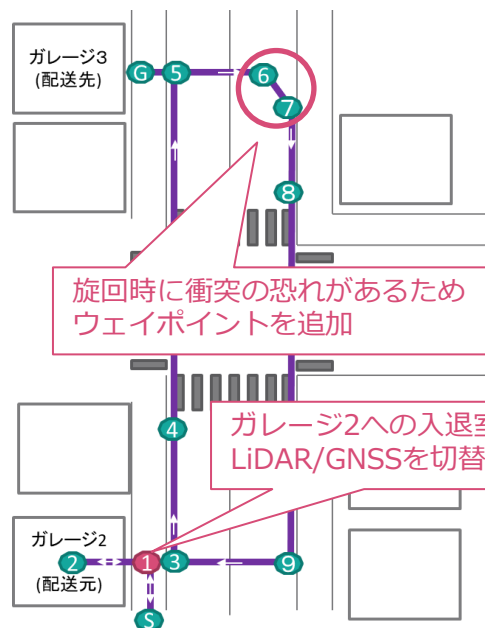
S⇒①⇒②⇒①⇒③⇒④⇒⑤⇒G

ウェイポイント列(復)

G⇒⑤⇒⑥⇒⑦⇒⑧⇒③⇒①⇒②⇒

①⇒S

車線端ルート



ウェイポイント列(往)

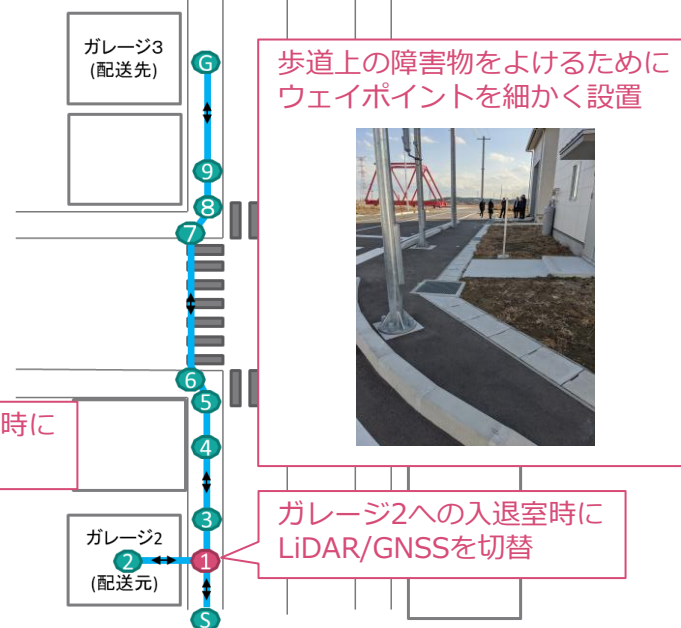
S⇒①⇒②⇒①⇒③⇒④⇒⑤⇒G

ウェイポイント列(復)

G⇒⑤⇒⑥⇒⑦⇒⑧⇒⑨⇒③⇒①⇒②⇒

②⇒①⇒S

歩道ルート



ウェイポイント列(往)

S⇒①⇒②⇒①⇒③⇒④⇒⑤⇒⑥⇒⑦⇒⑧⇒

⇒⑨⇒G

ウェイポイント列(復)

G⇒⑨⇒⑧⇒⑦⇒⑥⇒⑤⇒④⇒③⇒①⇒②⇒

⇒①⇒S

※LiDAR/GNSSを使用して移動

② 自律移動ロボットによる屋外の公道走行時のナビゲーション機能の検証

ルート走行の様子

車線中央ルート



車線端ルート



歩道ルート



② 自律移動ロボットによる屋外の公道走行時のナビゲーション機能の検証

結果 1

- 実証実験中にウェイポイントを変更し、衝突せずに動作することを確認

No.	日付	時間帯	走行経路	走行結果	備考
1	1/14	10:20	車線中央	○	
2	1/14	10:50	車線中央	○	
3	1/14	13:00	車線中央	○	
4	1/14	13:10	車線端	○	
5	1/14	15:10	車線中央	○	
6	1/14	15:30	歩道	×	帰還時に柱にぶつかる経路を選択
7	1/14	15:20	車線端	○	
8	1/14	15:40	歩道	○	No.6のウェイポイントを修正して実施
9	1/15	09:50	歩道	○	No.6のウェイポイントを修正して実施
10	1/15	10:00	車線端	○	
11	1/15	11:00	車線中央	○	
12	1/15	11:30	歩道	○	No.6のウェイポイントを修正して実施
13	1/15	15:00	歩道	○	No.6のウェイポイントを修正して実施

検証結果

② 自律移動ロボットによる屋外の公道走行時のナビゲーション機能の検証

問題点1

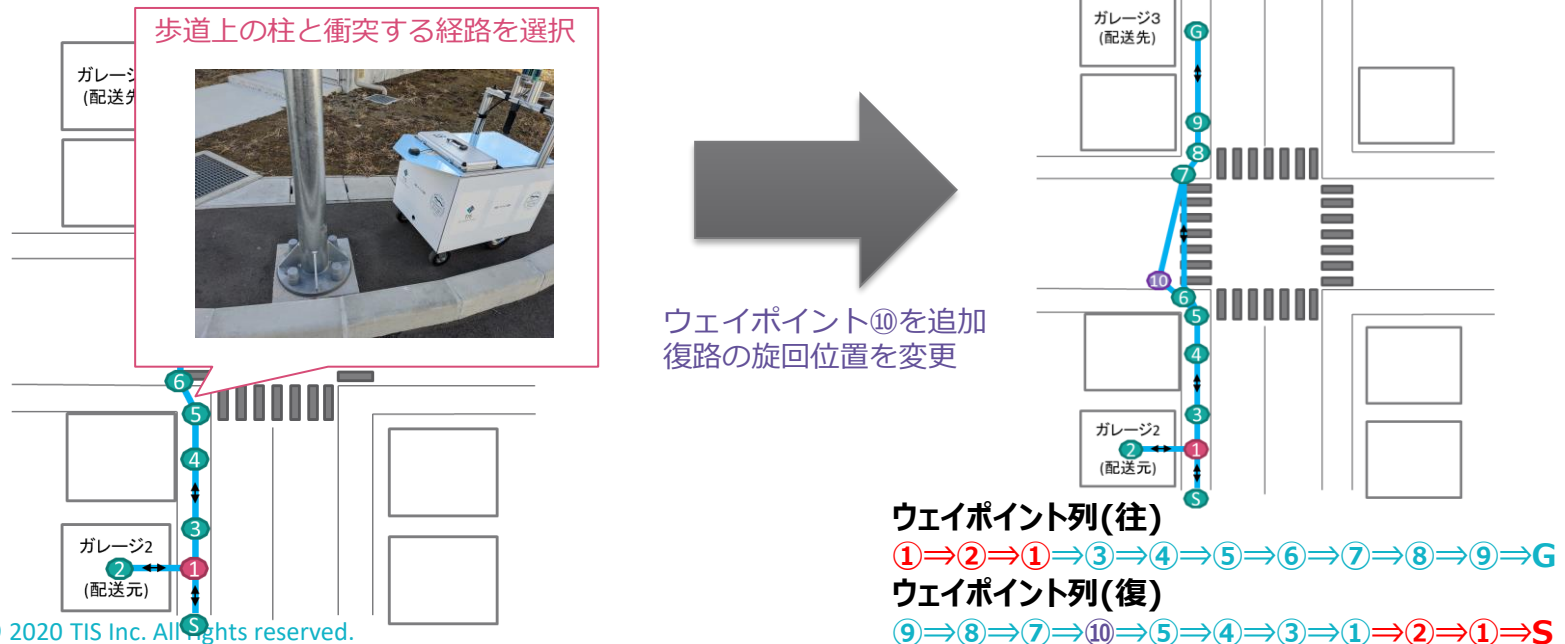
歩道ルート走行中にロボットが想定外の動きをし、障害物と衝突する経路を移動

- 場所：横断歩道横断後の歩道

解決方法1

- 傾いた歩道上で旋回したことで、前輪のキャスターが想定と違う動きをしたことが原因と考えられる

⇒ 斜面上での旋回を避け、平地での旋回するように復路のウェイポイントを修正

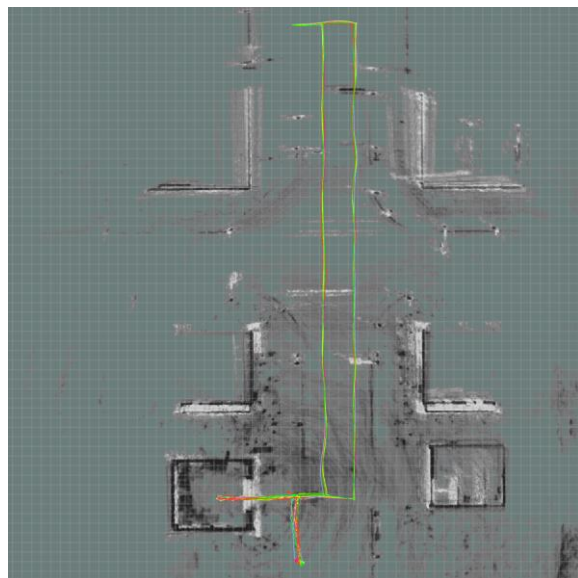


② 自律移動ロボットによる屋外の公道走行時のナビゲーション機能の検証

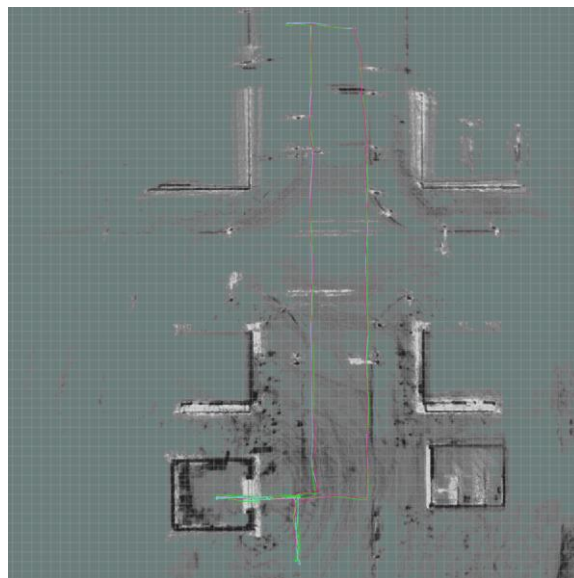
結果2

- ロボットの走行軌跡を目算で比較
 - 車線中央：約50cm以内のズレで走行し、検証時の衝突も起きなかった
 - 車線端：約50cm以内のズレで走行し、検証時の衝突も起きなかった
車道端の傾斜が大きい箇所では機体が低いほうに流される傾向があり、路面状況に応じたウェポイントの設定が必要
 - 歩道：車道に傾斜があったため目的地付近では1m以上のズレが発生
他のルート軌跡と比較して誤差が大きい

車線中央ルート



車線端ルート



歩道ルート



② 自律移動ロボットによる屋外の公道走行時のナビゲーション機能の検証

まとめ

- 車道及び歩道を用いた各ルートで周辺物体と衝突することなく目的地まで移動することを確認
 - 車線中央ルート：走行を妨げる障害物が少なく走行が容易
 - 車線端ルート：路肩傍を走行するため、少しの誤差でぶつかる可能性があったが実際には安定した走行を見せた
 - 歩道ルート：走行の完了は確認できたが、障害物が多く点在、道幅も狭いため詳細なウェイポイントが必要。左右方向への歩道の傾きによってロボットのキャストが流されてしまう
 - ⇒ 前輪のキャストなど機体の特性を考慮して、機体が左右に傾く角度をなるべく緩やかにするなど適切な経路を与えれば、自律移動が可能と評価できる

まとめ

まとめ

① RTK-GNSS/LiDAR切り替えによるロボットナビゲーション

【結果】

- ・センサー切り替えによって、屋内外の走行に問題ないことを確認

【問題点1. LiDARからネットワークRTK-GNSSへの切替に1分以上の時間を要する場合がある】

- 考察: 衛星配置および衛星からの受信状況(CN値)によって切り替え時間変動
 - 屋外にいるときの測位状態がよく、屋内の滞在時間が短い方がCN切替にかかる時間が短い
 - ※ichimillの位置推定ロジックが、衛星のCN値が低くなった状態が継続するとその推定精度に影響を受けるため
 - 屋内にいるときのCN値の減少が少ない場合は切替が早いため、建造物によって結果は変動すると考えられる
- 今後の展望: 屋内測位と屋外測位が双方可能なのりしろ部分を走行しながらネットワーク型RTK-GNSSによる測位精度向上を待つことによって、ロボット全体として切り替えに要する待ち時間を削減する

【問題点2. 各ウェイポイントにロボットを移動させ、緯度経度を計測しているため地図作成に手間がかかる】

- 今後の展望1: 手持ち用計測用のGNSSデバイスを用意
- 今後の展望2: GNSSデバイスの地図GUIから緯度経度を取得、補正して使用(実証実験時にはRTFが地図上に無かったため不使用)

【問題点3. LiDAR地図の生成にGNSSを用いたノウハウが必要】

- 考察: LiDAR地図作成する際の最適化処理時に方位がずれ、そのためLiDAR地図の方位もGNSSから算出していた
- 今後の展望: 地図生成時の手順を明文化

まとめ

② ロボットによる公道走行時の最適経路の調査

【結果】

- ・ウェイポイントを調整することで、全経路パターンの走行に問題ないことを確認

【問題点1. 歩道の走行にはウェイポイントの細かな調整が必要】

- 考察: 障害物や歩道の傾きによる影響を抑制するための機能や設計が必要
- 今後の展望1: ウェイポイント指定による障害物回避ではなく、センサーからの障害物情報を基に回避する機能を実装
- 今後の展望2: 段差や道路の傾きの影響が少ないハードウェアの設計

【問題点2. フィールドの状況に応じたキャストの最適な設置場所や角度の調査が必要】

- 考察
 - 後輪に設置した場合: キャスターの向きにロボットが影響を受けやすく直進性が悪い
 - 前輪に設置した場合: 通路の傾きや段差による影響が大きい
- 今後の展望1: モータのギア比を変更することで後輪のキャストの影響を低減
- 今後の展望2: キャスターの影響が少ない設置箇所の調査

【問題点3. RTK-GNSSの受信状況が悪い場合の対処方法】

- 考察: 受信精度に応じたセンサー切り替えロジックが必要
- 今後の展望: RTK-GNSSの精度が高まるまでLiDARで走行させ、切り替えに要する時間を全体として影響無いようにする

補足：事前の検証で生じた課題について

【問題点1. GNSSデバイスによっては十分な位置推定精度が得られなかった】

- 考察：
 - マゼランシステムズジャパン社のデバイス⁵⁾を用意していたが、実証フィールドでは基地局との受信精度が低いことがわかった
- 解決方法：実証実験では上記デバイスではなくichimillを採用した

【問題点2. 屋外走行時の方位推定に磁気コンパスを使用した場合、走行に乱れが生じた】

- 考察：機体本体及び環境上の磁性体の残留磁場の影響を受けていると考えられる
- 解決方法：実証実験ではGNSSデバイスを2台使用し、その差異から方位を推定した
- 問題点：センサー切り替えにかかる時間の増加と、GNSSデバイスを2台使用することによる1台当たりのコスト増加
- 今後の展望：異なるGNSSデバイスでの検証

5) <https://www.magellan.jp/products/option/receiving-antenna>

付録（メディア掲載）

2021/1/15に当実証実験の内容を、ふくしまロボットシティ推進協議会のご協力のもと、以下シナリオにて公開イベントを実施しメディアに掲載されました

【予防医療サービスやサービス提供拠点と連携した配送サービスシナリオ】

- ①予防医療サービスにより作成された栄養指導弁当をサービス拠点から配送指示
- ②屋内外配送ロボットが配送先まで自律移動にて配送
- ③ロボットが運んできた栄養指導弁当を高齢者は受け取り



福島民報



福島民友

トップ > 福島のニュース > 主要 > 栄養管理弁当をロボット配送へ 南相馬 数年後に事業開始

主要

栄養管理弁当をロボット配送へ 南相馬 数年後に事業開始

2021/01/16 08:55



南相馬市と市内のロボット製造会社などをつくる「ふくしまロボットシティ推進協議会」は、地元の医療機関や弁当製造会社などと連携し、市民に栄養管理した弁当を自動運転のロボットで配送する事業に乗り出す。市内原町区の福島ロボットテストフィールドで十五日、数年後の事業開始に向けた実験に取り組んだ。

事業では、市民に病院やクリニックなどの医療機関で健康診断や血液検査を受けてもらい、結果をコンピューターで管理分析する。健康状態に合わせた弁当を製造会社に発注し、ロボットが自宅や事業所に届ける。

ロボットはシステム開発「TIS」(本社・東京都新宿区)、会津大、小型無人機(ドローン)製造「イムズロボティクス」(同・福島市)が共同開発している。大きさは幅七十センチ、奥行き百センチ、高さ百二十センチ。衛星利用測位システム(GPS)などで周辺情報を取得しながら公道を走行する。



ロボットから弁当を受け取る関係者

実験ではロボットに弁当を載せて約四十メートルの閉鎖路を走らせ、不自由なく移動できるかを確かめた。

福島民報(WEB版)

ニュース > 地域 > オバントウ、オマタセシマシタ... 南相馬で配達ロボット実証実験

オバントウ、オマタセシマシタ... 南相馬で配達ロボット実証実験

2021/01/16 09:00

復興とロボットを活用したまちづくりを目指す「ふくしまロボットシティ推進協議会」は15日、南相馬市原町区の福島ロボットテストフィールドで、自律走行する搬送ロボットの実証実験を行った。

同協議会は県内外の企業や法人が連携し、ロボットを活用した生活の質向上を目指している。この日は、人手不足解消や搬送作業の効率化に向け、TIS(東京都)と会津大、イムズロボティクス(福島市)が開発した屋内外自動走行ロボットの試験を行った。

実験は弁当を高齢者宅に届けることを想定。タブレット端末で弁当配達指示を出す、ロボットが弁当の用意されている場所へ移動。弁当を受け取ると、衛星利用測位システム(GPS)を活用し、事前に設定されたルートで目的地に向かった。将来的にはロボットが人や障害物をよけながら自動走行できるように研究が進められている。

また、ロボットが取得した健康データを基に、栄養を考慮した弁当を高齢者宅に配達することなども検討されている。TISの担当者は「外出が難しい高齢者向けや中山間地での活用を目指している。南相馬から新技術を生み出せるよう改良していく」と語った。



実証実験が行われた搬送ロボット (みんゆうNET)

福島民友(WEB版)

付録

実証の様子



THANK YOU

