

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
総合研究報告書

自動走行可能な自律制御運搬台車の機能安全の実証手順開発（19JA1005）

研究代表者

澤田 浩之（株式会社アラキ製作所（営業統括部企画開発G）：主査）

研究分担者

黒川 功太郎（株式会社アラキ製作所（技術統括部機械設計課）：担当部長）

酒井 英希（株式会社アラキ製作所（技術統括部電気設計課）：課長）

研究要旨：

センシング技術、人工知能やGPS技術の急速な能力向上により、近い将来において、工場、建設現場、農作業等の産業現場において、自動走行可能な自律制御産業機械等の導入が進むと見込まれ、こうした技術革新を見越した上で、人と機械との安全な協働作業にあたっての安全基準を定める必要があると考えられた。このため、自動走行可能な自律制御産業機械等に関する国際規格等における安全関係の現状の規定を調査し、今後必要となる安全対策を検討する必要があるとあり、本研究では、自動走行可能な自律制御産業機械と人との安全な協働作業にあたっての社会実装前のリスクアセスメント手法、実証試験プロトコルの開発を行った。自動走行可能な自律制御産業機械は「走行経路を自己判断し障害物を避けながら指定された目的地へ移動する装置」と定義し、仕様定義・開発・設計段階から現場導入までの一連の流れを通してリスクアセスメントを実施し、リスクアセスメント手法を検証しながら、実際に製作した試験装置にて安全機能の要求水準を満たしているかの試験を行い、実証試験プロトコルの開発を行った。

・ **国際規格**

ISO/IEC GUIDE 51 及び IEC GUIDE 104 の国際規格の各グループ規格と EN 規格に代表される地域規格、JIS を始めとした各国規格及び UL 規格等の業界規格から該当と思われる内容を、精査範囲が広大な為、主には弊社が設備を多くの納入させて頂いている自動車製造・組立工場向けを意識して精査。必要な認証プロセスの確認と国内規格と対比、研究にも発行が進められた「ISO3691-4:Industrial trucks -Safety requirements and verification - Part 4:Driverless industrial trucks and their systems」及び「JIS D 6802:無人搬送車及び無人搬送車システム—安全要求事項及び検証」までを考慮。

但し、ソフトウェアに関しては開発期間の短さから ROS (Robot Operating System) を使用した開発を軸としている事や、既に市販化されている製品のソフトウェアに関する情報の入手は困難な為、今回の実証試験では対象外としている。

・ **リスクアセスメント**

基本的な JIS B 9700 (ISO 12100) 及び、JIS B 9705-1 (ISO 13849-1) の組み合わせによるリスクアセスメント手順及びリスク低減のための方法論と ISO 3691-4:2020 の危険源リストからリスクアセスメント時に要求安全度水準の決定が出来る様に「危険源」の同定時に「測定ポイント」や「目標値」の設定。実証試験装置の仕様定義、基本設計、詳細設計、制御設計、製作、動作確認、導入検討、運用の各ステップで弊社内の設計、営業、製造の各セクションを製作メーカーとエンドユーザーに見立て実際にリスクアセスメントを実践。

・自動走行可能な自律制御産業機械の定義

研究計画申請時から、「自律」についての定義に指摘を受け、協力頂いていた有識者とも協議し、「走行経路を自己判断し障害物を避けながら指定された目的地へ移動する装置」と定義。従来から有るAGV (Automated Guided Vehicle) が、JIS D6801 に定義されている「一定の領域において、自動で走行し、荷物など人以外の物品の搬送を行う機能をもつ車両で、道路交通法に定められた道路では使用しない搬送台車」であり、且つ「搬送台車が走行する際、経路を示す誘導体に沿って移動するため、誘導体（電磁誘導式、光学誘導式、画像誘導式など固定の誘導要素）の設置が必須なシステム」であるのに対し、今回研究対象となる、AMR (Autonomous Mobile Robot) は、ISO3691-4:Industrial trucks -Safety requirements and verification - Part 4:Driverless industrial trucks and their systems の定義を基に、固定された誘導体が不要で搭載されたセンサーで走行し、周囲の環境に合わせて自動算出したルートを走行、走行ルート上に人や障害物がある場合は回避動作で対処が可能なシステムと定義。

《試験装置》



A. 研究目的

近年、センシング技術や人工知能（AI）、GPS（Global Positioning System）技術のめざましい能力向上、機械安全の国際規格の定着と共に安全規格に準拠した安全用機器の普及や様々なガイドライン等の情報により、急速に製造・組立工場、物流倉庫、建設現場、農作業等の様々な産業現場などに、AMR（Autonomous Mobile Robot）と言われる、固定された軌道経路を持たない自動走行可能な自律制御された運搬台車等が、特にLRF（Laser rangefinder）やデプスカメラ（Depth Sensing Camera）などのセンシング機器とROS（Robot Operating System）を初めとしたソフトウェアプラットフォームの普及により開発・導入が進んでいる。

これらは、人と隔離されずに同じ作業空間（主に歩行通路）で使用される事が前提とされた物が多く、人と機械の協働作業にあたり協働ロボット導入時と同様に安全基準を改めて確認する必要があると考えられた。本研究では、自動走行可能な自律制御運搬台車を、「走行経路を自己判断し障害物を避けながら指定された目的地へ移動する装置」と定義し、開発・設計段階から現場導入までの一連の流れを通してリスクアセスメントを実施し、リスクアセスメント手法を検証。実際に製作した試験装置にて安全機能の要求水準を満たしているかの試験を行い、実証試験プロトコルの開発を目的とした。

本研究の背景として、高齢化・労働人口減少問題や更なる生産効率の向上を目的とした作業・物流の支援（省力化・省人化）のための自動化・自律化への必要性及びニーズが高まり、また様々な技術の急速な能力向上により協働ロボットをはじめとした人と機械の協調を前提とした機械・装置・システムの開発・導入が進むと見込まれる。また、平行して労働安全を目的とした機械安全実務を活用した機械設備の安全対策やその妥当性確認への取り組み、国際規格に基づいた導入要点のまとめ等が推進されて来ました。（参考文献：厚生労働省HP掲載、機能安全活用テキスト）

しかしながら、それらは固定された装置や機械構成が前提となっている事が多く、本研究が対象とする自動走行可能な自律制御機械に対しての具体的な指針は発展の途上にあった。

本研究では、Safety2.0の概念（Safety2.0とは、基本的に協調安全の事で、人・モノ・環境が、情報を共有することで協調して安全を構築する安全の概念）に基づき、リスクアセスメントを実践し保護方策を織り込んだ実証試験機にて自律制御時の各種データを収集した。このデータに基づき、自律制御機械が機能安全の要求水準を満たすことを実証する手順を開発する。

B. 研究方法

1) 試験装置の概要

初年度に、現在の国内外規格を、自律(AI)制御装置の導入を前提に精査(ハード・ソフト両面の安全機能の要求水準を確認)し、最新技術や環境、客先ニーズに照らし合わせてリスクアセスメントを実践。ここまでの作業を繰り返し試験装置の構想を検討。

現在導入が進められている各メーカーの装置・システムには様々な開発が織り込まれているが、試験装置は最低限自律制御が可能な、LRF（Laser rangefinder）を使用したSLAM（Simultaneous Localization and Mapping）制御と、デプスカメラによる画像処理を使ったシステムを採用。安全機能については、身近な自動車産業の生産ラインに実装可能なレベルを目標とし、弊社工場内通路にて実証試験を行う事を計画。

次年度、実際に試験装置を製作し実証試験を開始した。初年度に行った作業も実証試験や装置の動作確認と並行して継続、随時リスク及び評価を見直した。収集データの内容については、専門家・有識者にアドバイスを頂きながら妥当性を都度確認しセンサの検出精度や自律制御(AI)の算出結果と人の認識の違いを、どう実証手順に織込むか協議して来た。

実証手順の入り口として、リスクアセスメントの実践事例の提示を行い導入時の負担を減らしながら想定すべき様々な条件を解り易くした。続いて、リスクアセスメント結果を踏まえて、リスクの抽出及び規格対応の漏れを防ぐため単純な手法だがチェックシートを作成する準備を同時に進めた。（未だ見直し作業継続中、データベース化は未着手）

最終年度では、機能安全の要求水準の達成度、残留リスクについての理解度を調査しながら、自律制御時の経路計画・障害物回避運動・停止の各動作のバラつきに着目し収集データから実証試験の判断基準を検討した。



Fig.B-1-1: 製作した実証試験装置

製作した実証試験装置（以下、本機）にて動作データを収集する。工場内の荷役に使用されることを想定し、弊社工場内通路に試験コースを設定した。

本機は、後述する SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 機能により、静止物体（および移動速度が遅い物体も）を走行区域内の構造物として認識・回避する一方、移動物体については、物体認識の認識対象に設定することで回避対象になるが、今回は人間のみ対象とした。

実証試験装置が機能安全の要求水準を満足することは、人と接触した場合に危害が生じないことにより実証されるが、本研究では、実証試験装置が移動している状況下での実証に着目し、停止した状態でぶつかってくる状況は除外する。

安全機能として、SLAM 用デプスカメラ画像を用いて物体を認識し、特定の障害物との衝突を回避する機能を実装した。これは、装置動作環境における建物のような静的に配置された構造物と、作業者のように危険源から保護する対象とすべき動的な障害物を明確に区分し、それぞれにふさわしい保護動作をおこなう機構とすることを意図している。

2) 実証試験装置の構成

本機は、駆動指令を算出するためのコントローラと、モータドライバを駆動する PLC、及び LRF センサ 2 台を搭載し、それらの間を 1Gbit の Ethernet で結び、データを送受信する。（Fig.B-2.1）

深度画像を撮影する Depth Camera は、USB3.0 にてコントローラと接続される。

動的障害物の検知、および目的地の設定は、Ethernet-Hub を介して Wifi で接続し、物理的に離れた場所に設置した PC でおこなう。カメラで撮影された画像データは、Ethernet/Wifi を経由して物体認識用 PC に送信され、認識処理が行われる。



Fig.B-2.1：試験装置の構成

3) 実証試験装置の機能

本機の機能構成を【付録】Fig.1に示す。本機を構成する機能群は、ROS (Robot Operating System) と呼ばれるロボット開発に用いられる基本的なソフトウェアをはじめ、誰もが利用できるよう公開されたソフトウェアパッケージを利用して構成した。

本機の自律走行に係る機能についても、特定の機能を実現する多種のソフトウェアパッケージを複数組み合わせ合わせて実現しており、それぞれ自由利用のために公開されているもの、及び独自に作成したものがある。本項では、特に自社として新たに開発した機能について記載し、公開されているソフトウェアに関する情報は後述する。以下の機能は、後述する公開パッケージの機能を利用しつつ、新たな処理を加えて実現している。

3-1) AR タグによる位置補正機能

AR タグを用いて、自己位置を修正する機能を作成した。(multiple_marker_matching パッケージ)

本機能では、あらかじめ走行の始点に対する AR タグ設置位置の座標情報を持たせた AR タグを複数設置し、走行中に撮影した複数タグの位置関係から算出される自己位置と、SLAM が認識している自己位置とのズレ量をもとに、自己位置を補正する。本機能により、連続走行による誤差の累積を解消する。

本機能の開発過程で、従来の AR タグによる座標認識が用いる AR タグの姿勢情報に取得時の誤差が大きく、自己位置の補正誤差を増大させることが分かった。

そこで本機能は姿勢情報を利用せず、タグとの距離情報のみを用いて補正を行うことを特徴とする。

3-2) 動的障害物回避機能

本機能は、試験装置前面に設置されたデプスカメラの映像をもとに、回避対象とする物体を検出し、衝突を避ける動作をおこなう。なお、搭載カメラ数に起因してカメラの死角が存在する。車体から 0.95[m]先までの床面、及びカメラ中心より $\pm 52.7^\circ$ の外側が死角となり、死角内の障害物は検出できない。計算上、2.5[m]先において左右 0.8[m]の範囲内における障害物検知が可能である。

本機能に使用する物体の認識手法には、YOLOv3 を用いた。YOLOv3 (You Only Look Once、バージョン3) は、Joseph Redmon、Ali Farhadi らによって開発された、ビデオ等の画像内に存在する特定のオブジェクトを識別するリアルタイムのオブジェクト検出アルゴリズムである。

本アルゴリズムは、学習手法の一つである DNN (Deep convolutional Neural Network) を用いて学習された特徴を用いて対象物を識別する。本実証実験に用いる学習された特徴のデータは、人間や自動車等を識別するために公開された既学習済みのものであり、実証環境に特化した学習データは用いていない。

この汎用的な学習データにおいて「人間」として検出される物体が、機体の進路上に進行するベクトルを持って移動する(衝突する可能性がある)場合、機体の走行速度帯と障害物との距離に基づいて回避行動を行う。回避行動と設定パラメータを、Tbl. B-3-2.1 に示す。

本機の回避行動として、以下の3種を設定する。

1. 停止 : ROS 指令速度を 0 に上書きし、停止させる。
2. 減速 : ROS 指令速度を、衝突しても衝撃の小さい安全な速度に上書きし、減速させる。
3. 警告 : 衝突の危険があることを通知する。ROS 指令速度に影響なし。

本機の走行速度帯は、以下のように定義した。

1. 低速：時速 2.0[km/h]未満
2. 中速：時速 2.0[km/h]以上 4.5[km/h]未満
3. 高速：時速 4.5[km/h]以上

実証試験機が走行する速度帯と、検知された障害物との距離に応じて、3種の回避行動の中から適切なものを選択する。

Tbl. B-3-2.1：機体速度と回避行動の距離しきい値

機体速度[km/h]	停止距離[m]	減速距離[m]	警告距離[m]
低速 2.0 未満	0.50	1.00	2.00
中速 2.0-4.5	1.00	2.50	3.00
高速 4.5 以上	2.00	3.00	5.00

4) 実証手順

実証試験装置の機能より、以下2点の実証手順を開発する。

実証手順①：

目的：静的障害物回避機能に対する
機能安全の実証

内容：実証試験装置の移動・停止位置の精度を測定。移動中に障害物との衝突が発生しないことを確認するために必要な試験内容、経路やゴール地点周辺に必要なクリアランスの評価方法を考察する。

対象：SLAM 機能

実証手順②：

目的：動的障害物回避機能に対する
機能安全の実証

内容：動的障害物の接近の仕方・速度のパターンを変化させた場合の停止位置の精度を測定し、動的障害物との衝突が発生しないことを確認するために必要な試験内容を考察する。

対象：安全機能

C. 研究結果

本項では、まず静的障害物に対する機能安全の実証手順、次に動的障害物に対する機能安全の実証手順について説明する。最後に、実証に必要な機材及び調整の手順等、付帯的な事項について説明する。

1) 静的障害物の回避機能に対する機能安全の実証

本項では、静的障害物の回避回避機能に対する機能安全の実証手順、実証試験の環境と条件、試験結果について記載する。

1-1) 実証手順

静的障害物の回避機能に対する機能安全の実証方法として開発した手順は、以下の通りである。

- ① 本機のSLAM機能によって生成される地図上に、直線/右折/左折の走行によって到達する目的地を設定する。
- ② 本機が自律走行し、停止した座標を計測する。
- ③ 現実の世界での本機の目的地座標と、停止位置座標の誤差を算出する。
- ④ 複数回の試行による停止位置の誤差のばらつきに基づき、自律走行機能の経路算出パラメータを設定する。
- ⑤ 設定したパラメータに基づいて自律走行を行い、静的障害物との衝突が発生しないことを確認する。

1-2) 実証試験の環境と条件

本装置が自律走行する場合、障害物の状況に応じて柔軟に走行経路を決定する。本装置の走行指令は、前後方向の速度指令値と、本体Z軸回りの回転速度指令の組み合わせで表現される。即ち、微小時間の前進・後退・右折・左折を組み合わせる柔軟な経路を生成しており、左右の車輪回転数は原点と目標地点の位置関係に完全に比例するものとはならない。

そこで、実証試験（以下、本試験）の走行パターンを、直線・右折・左折の3種に単純化し、左右輪の回転数比が右=左・右>左・右<左という条件を確実に満たした走行となるゴール地点の設定を以って、評価することとした。また、経路を見失った際のリカバリ動作により、その場回転が発生するなどの例外は除外する。

本機は、工場内を荷役のため走行することを想定しており、実環境では走行するコースは複雑に入り組んだものとなるが、本試験では単純化し、上記3パターンのコースを別個に設定し、それぞれで走行検証を行うこととした。試験コースを設置した建屋の略図と、コースの範囲をFig. C-1-2.1に示す。

図中の赤色背景部に、直線/右折/左折の条件に応じてコース壁とARタグを配置した幅2.0[m]の走行コースを設けた。（Fig. C-1-2.2, Fig. C-1-2.3）

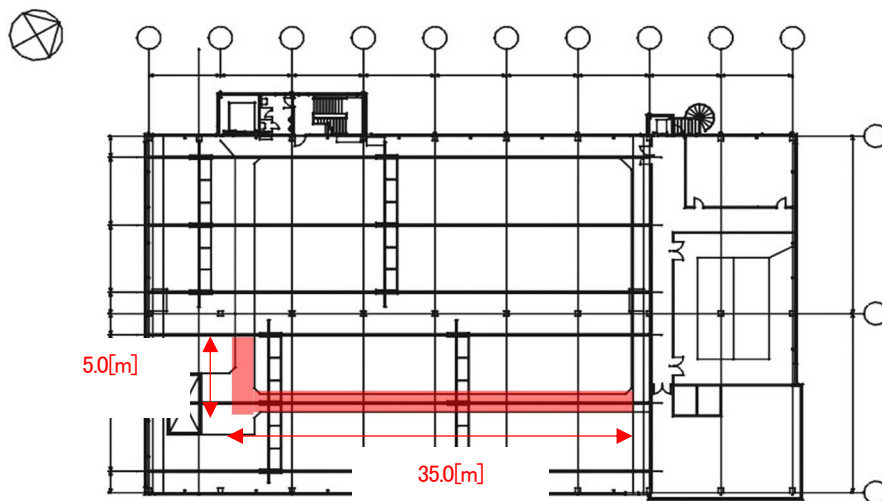


Fig. C-1-2.1 : 建屋略図

Fig. C-1-2.2 のA～E 設定値を Tbl. C-1-2.2 に示す。表中の数値は設定例であり、機能の向上に合わせて条件を変更し、最適値を検討した。

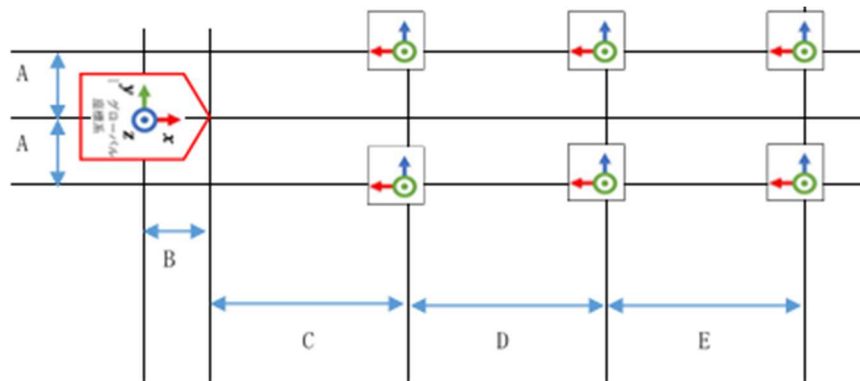


Fig. C-1-2.2 : AR タグ配置 (直線)

Tbl. C-1-2.2 : AR タグ配置 (直線) 設定値例

設定箇所	距離[m]
A	0.60
B	0.45
C	5.00
D	10.00
E	15.00

左折コースのARタグ配置についても、一例を Tbl. C-1-2.3 に示す。右左折時は、カメラ特性によりタグの認識が難しい場合があり、設置数を減数しての検討も行っている。なお、図表は省略するが、右折も同様の配置パターンを設定した。

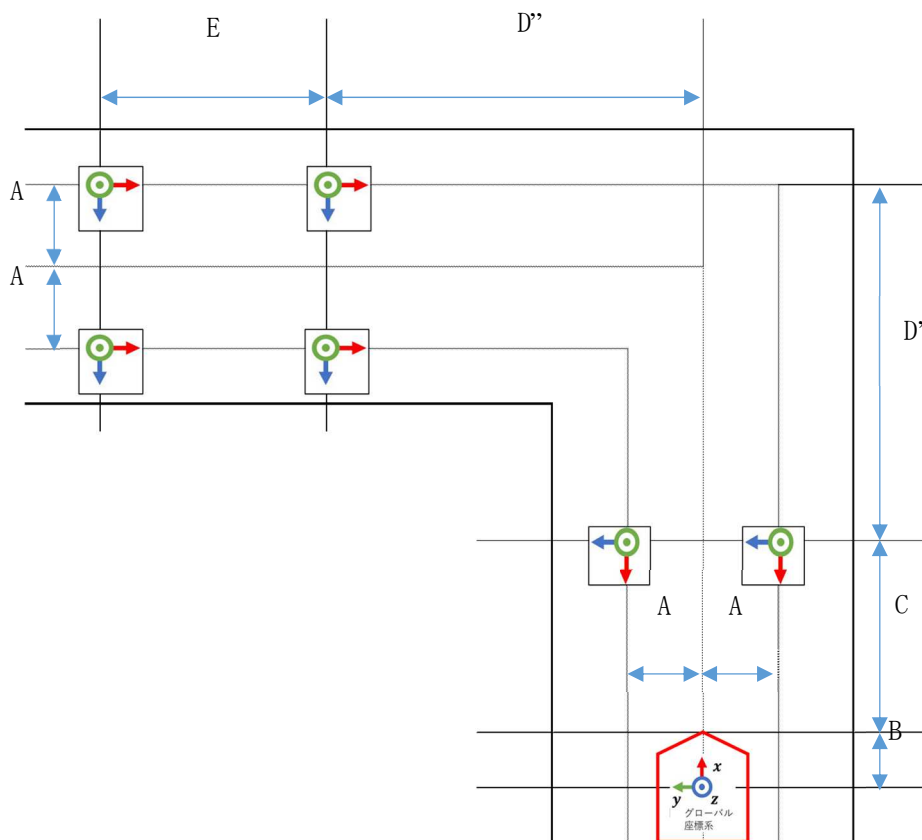


Fig. C-1-2.3 : AR タグ配置 (左折)

Tbl. C-1-2.3 : AR タグ配置 (右折) 設定値例

設定箇所	距離[m]
A	0.60
B	0.45
C	2.00
D'	2.10
D''	2.00
E	2.00

1-3) 誤差データの計測

本項では、静的障害物回避機能の実証に向け、パラメータ設定に必要な誤差データの計測について記載する。
誤差データは、本機が作成するSLAMの地図上に目的地を設定して自律走行させ、現実空間の移動量がどのような分布となるかを計測する。

1-3-1) 目的地の指定

本機の自律走行機能は、ROSシステムのNavigationスタックと呼ばれるパッケージ群によって実現されており、特に走行管理をmove_baseと呼ばれるパッケージで行っている。

目的地の指定は、このmove_baseに対して特定の形式を持つ電文の送信でおこなう。本試験では、電文を「Rqt」というアプリケーションを介して通知した。目的地が設定されると、本機の現在座標から目的地座標に向かう経路が算出され、自律走行を開始する

1-3-2) 停止位置の計測手順

目的地に到着すると本機は停止する。
この停止した時の座標データについて、以下のように測定を行った。

- ① 車体前端の中央部の位置と、車体中心に向かう角度を記録する
- ② ①の x, y 座標と角度から、車体中心の座標を算出する
- ③ 車体中心座標と目的地座標の差分を誤差とする

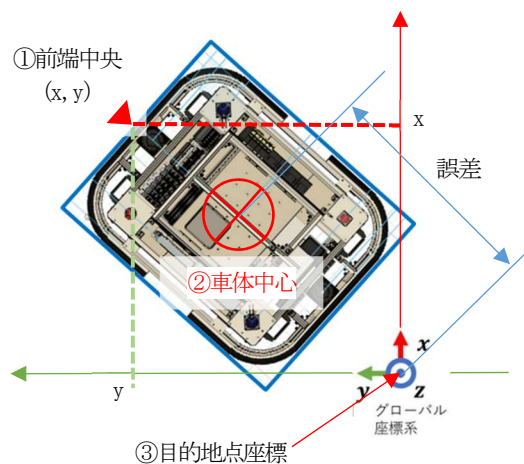


Fig. C-1-3-2. 1: 誤差の計測

1-3-3) 誤差データ計測結果

誤差データの計測結果を Tbl. C-1-3-3. 1~Tbl. C-1-3-3. 3 に示す。Tbl. C-1-3-3. 2 の昼間 TAG 補正有という条件下での誤差が最も大きく、停止位置のズレ量平均は 300. 3、バラつき (3σ) は±538. 5[mm]となった。位置ズレ要因についてはさらに検討が必要であるが、環境光の影響を強く受けることが示唆される結果であった。

この結果をもとに、静的障害物との間隙を 850[mm]以上確保するよう設定することとした。

Tbl. C-1-3-3. 1:停止精度 (直線)

環境光	TAG 補正	試行回数	誤差平均[mm]	3σ [mm]
昼間	無	3	276. 0	52. 1
昼間	有	5	353. 1	347. 4
夜間	無	未計測	-	-
夜間	有	未計測	-	-
昼夜	区別なし	-	-	-

Tbl. C-1-3-3. 2:停止精度 (左折)

環境光	TAG 補正	試行回数	誤差平均[mm]	3σ [mm]
昼間	無	未計測	-	-
昼間	有	4	300. 3	538. 5
夜間	無	8	334. 9	229. 6
夜間	有	5	314. 1	37. 4
昼夜	区別なし	17	320. 6	314. 0

Tbl. C-1-3-3. 3:停止精度 (右折)

環境光	TAG 補正	試行回数	誤差平均[mm]	3σ [mm]
昼間	無	未計測	-	-
昼間	有	4	387. 9	199. 8
夜間	無	8	317. 7	133. 7
夜間	有	3	551. 4	29. 3
昼夜	区別なし	15	383. 2	168. 2

本試験の詳細データは、【付録】 Tbl. 1、【付録】 Tbl. 2 に示す。

1-4) 実証試験

本項では、誤差データの計測により求めたパラメータを用いて自律走行を行い、衝突が発生しないことを実証する。本機がSLAM機能の経路算出に用いるパラメータのうち、静的障害物の認識に関与するパラメータは、本機体の半径値 (robot_radius)、および経路計算時に用いる障害物のコスト係数 (障害物の占有空間として、障害物を膨張させる半径、inflation_radius) がある。

本機の実半径が約600[mm]であり、試験データから算出した安全な半径値は600[mm]+850[mm]=1450[mm]であるが、この設定は環境のコース幅に制約があり、困難である。そこで、robot_radiusを600[mm]+300[mm]=900 [mm]、inflation_radiusを600[mm]+850[mm]=1450[mm]とし、衝突が発生しないことを確認した。

試験の結果をTbl. C-1-4.1に示す。いずれの走行パターンにおいても衝突は発生せず、パラメータの有効性を確認できた。

Tbl. C-1-4.1 : 実証試験結果

走行パターン	環境光	TAG 補正	試行回数	衝突回数
直線	夜間	無	3	0
直線	夜間	有	3	0
右折	夜間	無	3	0
右折	夜間	有	3	0
左折	夜間	無	3	0
左折	夜間	有	3	0

2) 動的障害物回避機能に対する機能安全の実証

本項では、動的障害物回避機能に対する機能安全の実証手順、実証試験の環境と条件、試験結果について記載する。

2-1) 実証手順

動的障害物回避機能に対する機能安全の実証方法として開発した手順を以下に示す。

- ① 本機が自律走行を行うコースを設定する
- ② 目的地へ自律走行する本機に対し、模擬障害物と経路途中で衝突するコースで一定速度接近させる
- ③ 障害物を検知し停止した時の、本機と障害物の間隙距離を複数回測定し、間隙のばらつきの程度を計測する
- ④ 測定したばらつきの程度を反映した動的障害物回避/自律走行機能の経路算出パラメータを設定する
- ⑤ 設定したパラメータに基づく自律走行を行い、動的障害物との衝突が発生しないことを確認する

2-2) 実証試験の環境と条件

試験コースを設置した建屋は、静的障害物回避機能の実証試験時と同様のため図面は省略する。

本機カメラの映像をもとに、物体認識と障害物の移動方向を算出して回避指令を算出するため、本機カメラに対する障害物の接近方向のみに着目し、走行パターンは直線走行時のみに簡略化して検討した。

AR タグ配置と、障害物接近方向を Fig. C-2-2.1 に示す。障害物の接近方向は、角度による傾向の変化を判断するため、図中の赤矢印で示す 0° 、 45° 、 90° の3パターンを設定した。

Fig. C-2-2.1 中の A~F 設定値の設定例は、Tb1. C-2-2.1 に示す。

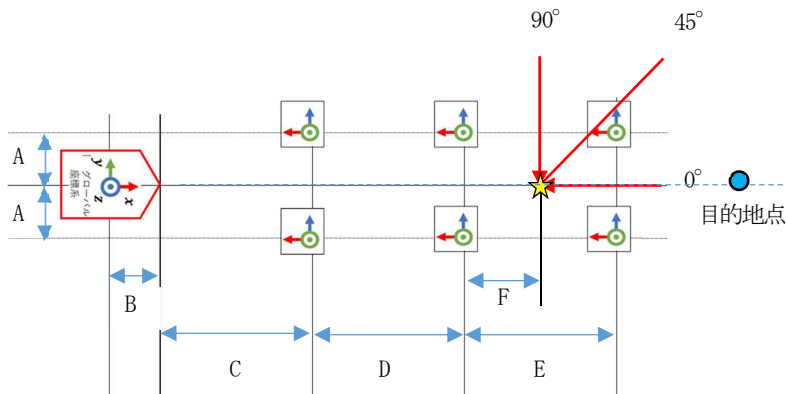


Fig. C-2-2.1 : 動的障害物の接近パターンと AR タグ配置

Tb1. C-2-2.1:AR タグ配置 (動的障害物)

設定箇所	距離[m]
A	0.60
B	0.45
C	5.00
D	2.00
E	2.00
F	1.00

2-3) 誤差データの計測

本機の構造および動的障害物検知機能の仕様により、障害物がカメラ画角に確実に検知される領域は、約1.0[m]以遠である。従って、本体の前方1.0[m]地点で動線が交差するように障害物を定速走行させ、本機が停止した際の本体前面中心と、障害物前面中心との残存間隙を計測した。

2-1) 実証手順①～③を実施し、間隙のばらつきを計測した結果をFig. C-2-3.1, Fig. C-2-3.2に示す。本データを誤差データとする。計測値より、障害物の移動速度が大きいほど、また接近角度が大きくなるほど残存距離が短くなる傾向がみられた。また、計測値の詳細データは【付録】Tb1.3に示す。

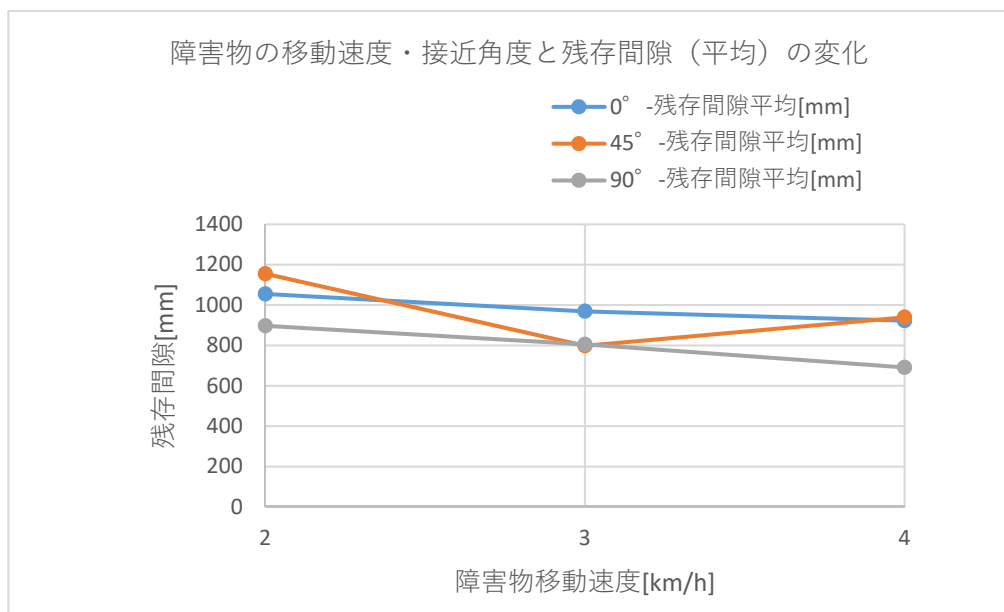


Fig. C-2-3.1: 障害物移動速度・接近角度と残存間隙平均値の変化

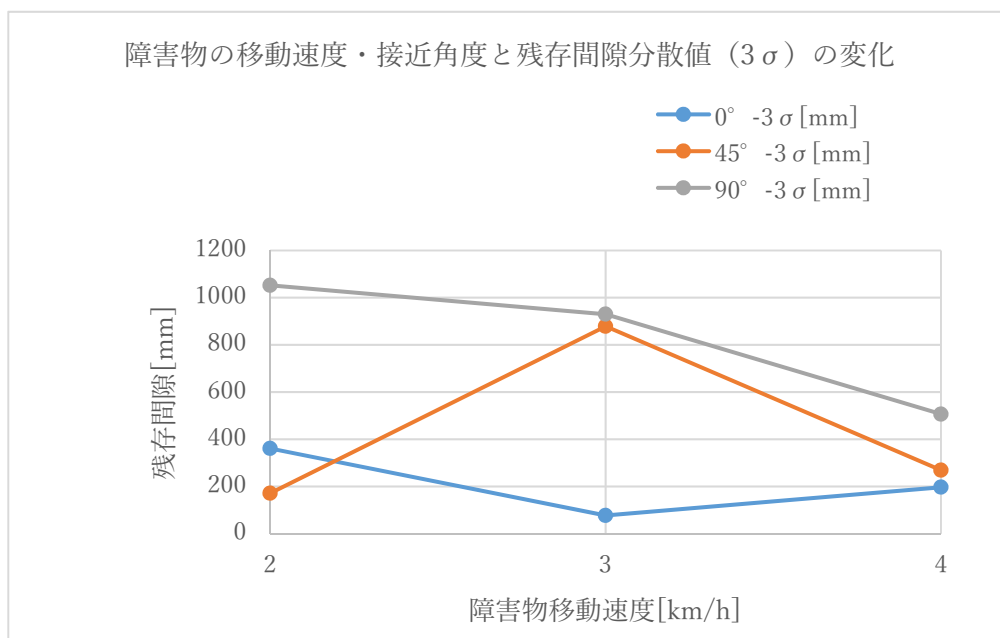


Fig. C-2-3.2: 障害物移動速度・接近角度と残存間隙分散値 (3σ) の変化

誤差データの計測の結果、障害物の接近速度と接近角度ごとに停止時の間隙のばらつきを考慮し、残存間隙の予測最小値（残存間隙平均値-残存間隙 3σ 値）を整理した結果をTb1. C-2-3. 1に示す。

本表の負値が、現在の検知パラメータを用いた場合に衝突を回避するために不足する可能性のある距離と考え、最悪値が-155[mm]であったため、停止距離を+200[mm]に設定することとした。

Tb1. C-2-3. 1 : 動的障害物の検知と停止に要する距離のばらつき (3σ) を考慮した間隙の最小予測値

障害物接近角度	障害物移動速度 2.0[km/h]	障害物移動速度 3.0[km/h]	障害物移動速度 4.0[km/h]
0° 残存間隙平均- 3σ [mm]	693.5	891.6	725.3
45° 残存間隙平均- 3σ [mm]	983.2	-80.6	670.4
90° 残存間隙平均- 3σ [mm]	-155.1	-124.8	184.2

2-4) 実証試験

誤差データの計測時に用いた動的障害物回避機能のパラメータは、Tb1. B-3-2. 1に示す値であった。このパラメータに対し、2-1) 実証手順④によって求めたバラつきを反映させた新たなパラメータを、Tb1. C-2-4. 1に示す。

Tb1. C-2-4. 1 : 実証試験の設定値

機体速度[km/h]	停止距離[m]	減速距離[m]	警告距離[m]
2.0 未満	0.70	1.00	2.00
2.0 以上-4.5 未満	1.20	2.50	3.00
4.5 以上	2.20	3.00	5.00

2-1) 実証手順⑤では、動的障害物の回避パラメータにTb1. C-2-4. 1の値を設定し、障害物との衝突の有無を確認した。確認結果をTb1. C-2-4. 2に示す。試行回数が少ないことが残課題ではあるが、いずれの条件でも衝突は発生せず、パラメータが有効に機能することを示した。

Tb1. C-2-4. 2 : 動的障害物との衝突発生回数

障害物接近角度	障害物移動速度 2.0[km/h]	障害物移動速度 3.0[km/h]	障害物移動速度 4.0[km/h]
0°	0/2	0/1	0/2
45°	0/1	0/1	0/1
90°	0/2	0/1	0/2

3) 実証用機材の開発

本項では、試験を行うための環境の構築方法、および特別に製作した機材および調整方法について記載する。

3-1) 走行コース

本試験走行コースを製作するにあたり、以下の要件を考慮して素材を検討し、ホームセンターで容易に入手可能な定型長アルミフレームとジョイント部品、梱包用資材を利用して構成した。(Fig. C-3-1.1)

- ・ LRF によって壁面を検出することから、レーザ光を反射すること
- ・ VisualSLAM による自己位置推定のため、走行中に周囲環境の特徴を得やすいこと
- ・ 機体の衝突での破損などを考慮し、製作や補修が容易であること

直線部は 1.9[m]×1.0[m]の長方形、コーナー部は 0.6[m]×1.0[m]または 0.3[m]×1.0[m]の長方形を 90° に直交させた平面で構成し、走行パターンに応じて配置する。



Fig. C-3-1.1 : コース壁

3-2) AR タグ

本機の AR タグによる位置補正機能が利用する AR タグ (Fig. C-3-2. 1) は、以下のように作成した。

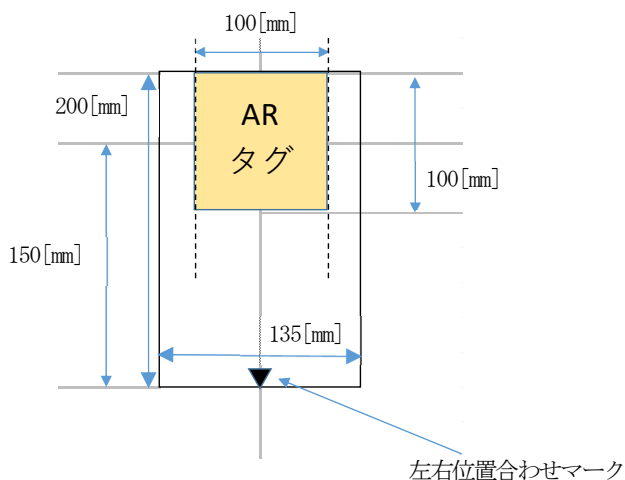


Fig. C-3-2. 1: AR タグ構造

100 [mm] × 100 [mm] に印刷した AR タグを、幅 135 [mm] × 奥行 100 [mm] × 高さ 200 [mm] のブックエンド（無地の汎用品）に貼付し、床面に対し垂直に設置した。

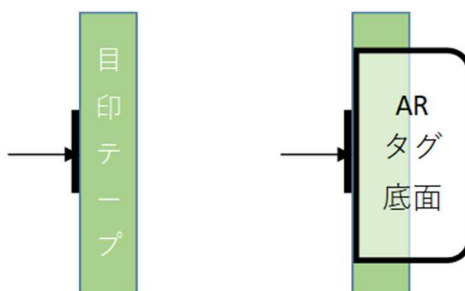


Fig. C-3-2. 2 : 地上側マーキングによる設置位置決め

コースへの設置は、あらかじめ、コース上の規定位置に地上マーキングを施し (Fig. C-3-2. 2 左)、タグの前端と左右位置合わせマークをその位置に合わせて設置する

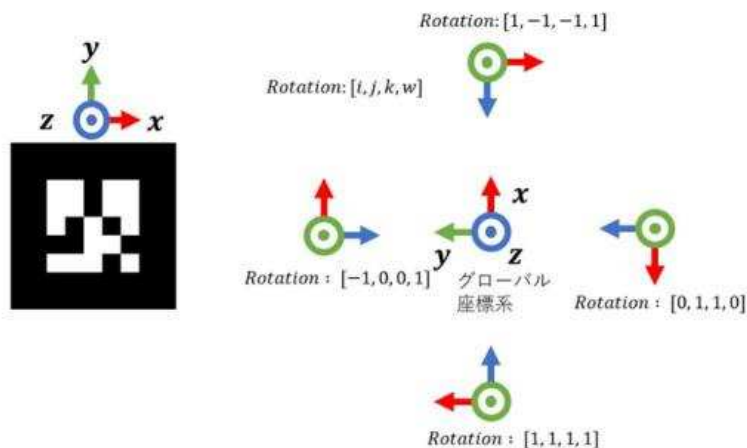


Fig. C-3-2. 3 : AR タグ座標

AR タグは、Fig. C-3-2. 3 左側に示す座標系を持ち、SLAM で作成する地図座標系（グローバル座標系）に対して回転した状態で設置される。後述のコース設置図内の表記は、Fig. C-3-2. 3 右側の座標回転例に従う。

3-3) 動的な障害物の模擬装置

実証試験では、動的障害物に再現性のある動作をさせるため、Fig. C-3-3.1 左上に示す走行台を作成した。この走行台は、アルミレール上を滑走するスライダに0.3[m]四方のMDF合板を載せ、人型画像を固定したものであり、一定速度で本装置の動線と交差させる。



Fig. C-3-3.1 : 動的障害物の模擬装置

模擬装置は、アルミレール両端に固定されたプーリーを $\phi 5[\text{mm}]$ のゴム製環状バンドによって接続し、一端を直流電圧駆動のモータによって駆動することで、電圧により走行速度を一定に保って走行する。

走行台部は2層になっており、下段にバンドガイドとバンド固定部を設けた。ゴム製環状バンドの片側をMDF合板中央部に固定、反対側はガイドを介して滑走させ、往復ともスムーズな滑走を可能とした。

3-4) 動的な障害物の動作調整方法

動的障害物が再現性のある動作をするためには、本模擬装置との相対位置（特にそれぞれの動線交差点に対する前後をX軸、左右をY軸とする座標におけるX軸の距離。Y軸は走行都度の環境条件により変化しますが、経験的に許容できる範囲と考えた）が重要な要素となる。Fig. C-3-4.1 に示すように、本装置と動的障害物が動線交差点に同時到達することが調整目標となる。

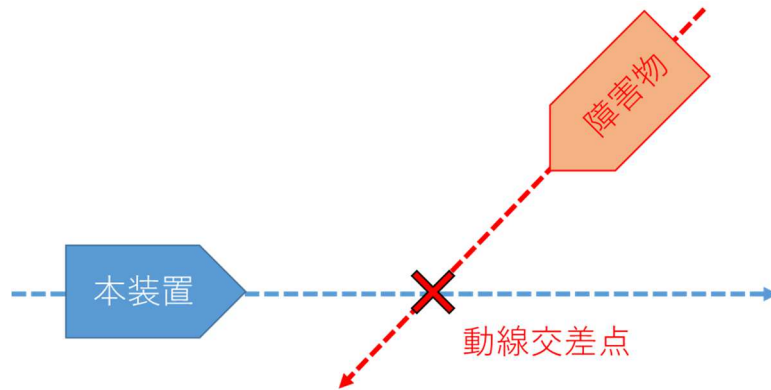


Fig. C-3-4.1 : 調整目標

そこで、障害物の先端を Fig. C-3-4.2 の①地点、本装置先端を②に置き、障害物の移動開始と同時に本装置を後退させる。

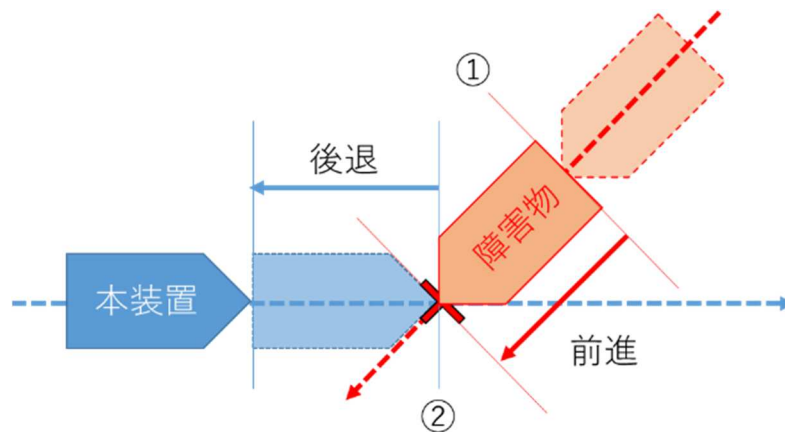


Fig. C-3-4.2 : 最大移動距離の決定

障害物が動線交差点に到達した時点の本装置の先端位置が、本装置通過時に障害物の移動を開始させるべき目標地点となる。障害物の移動操作は手動であるため、本装置がこの目標地点に到達したことを明示する手段として、Fig. C-3-4.3 に示す発光信号の送出機構を追加した。

この機構は、マグネットを張り付けたバーと、ドア開閉検知などに用いられる汎用のマグネットスイッチ、LED による発光器より構成される。

試験コースに直交する角度で目標地点の上空にバーを設置し、本装置がバー直下を通過することで車上に取り付けられたマグネットスイッチをONし、発行信号を送出する。発光信号の視認と同時に障害物の移動操作を行うことで、両者が同時に動線交差点に到達する。

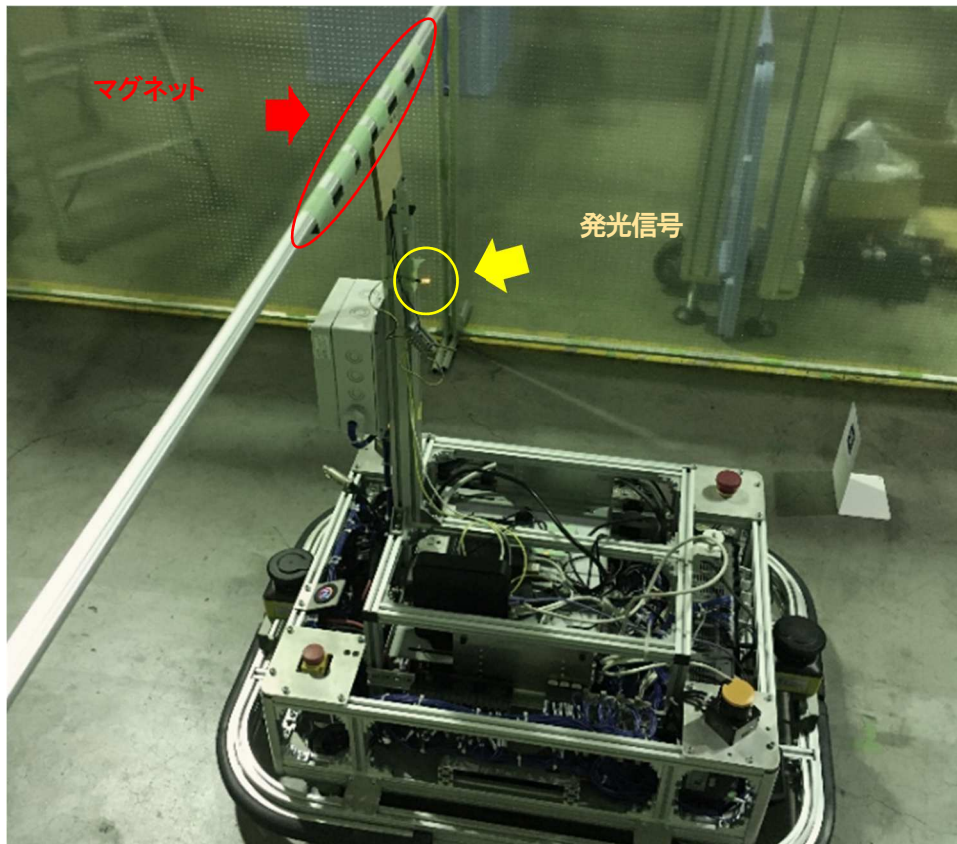


Fig. C-3-4.3 : 発光信号によるタイミング調整機構

D. 考察

1) 研究結果より

AMR の使用環境や目的は様々であることから、保護の対象物も様々であり、センサ等の情報を入力として各保護手段が駆動指令を制約する。しかし、単一の保護手段が有効性を発揮できる範囲には、何等かの制約が生じる。

従って、通常その保護手段は多層的に構成され、複数の手段を用いて保護の範囲を重ね合わせることで対象を保護する (Fig. D-1.1)。本機の場合、保護対象を静的障害物と動的障害物に分け、それぞれの保護手段を重ねて正常系の保護手段とした。

なお、本機はセンサ等の入力として深度カメラ及びLiDAR センサを、出力としてドライバやサーボモータを利用している。しかし、これらの機器についての検討を行っていないことから、機器類の性能等条件の指定は実証手順の対象外とする。

同様に、自律走行機能を構成するアルゴリズムや、各保護手段に用いられるアルゴリズム、それらが持つ設定パラメータは多種多様であり、実証手順に定めることが困難なので実証手順の対象外とする。

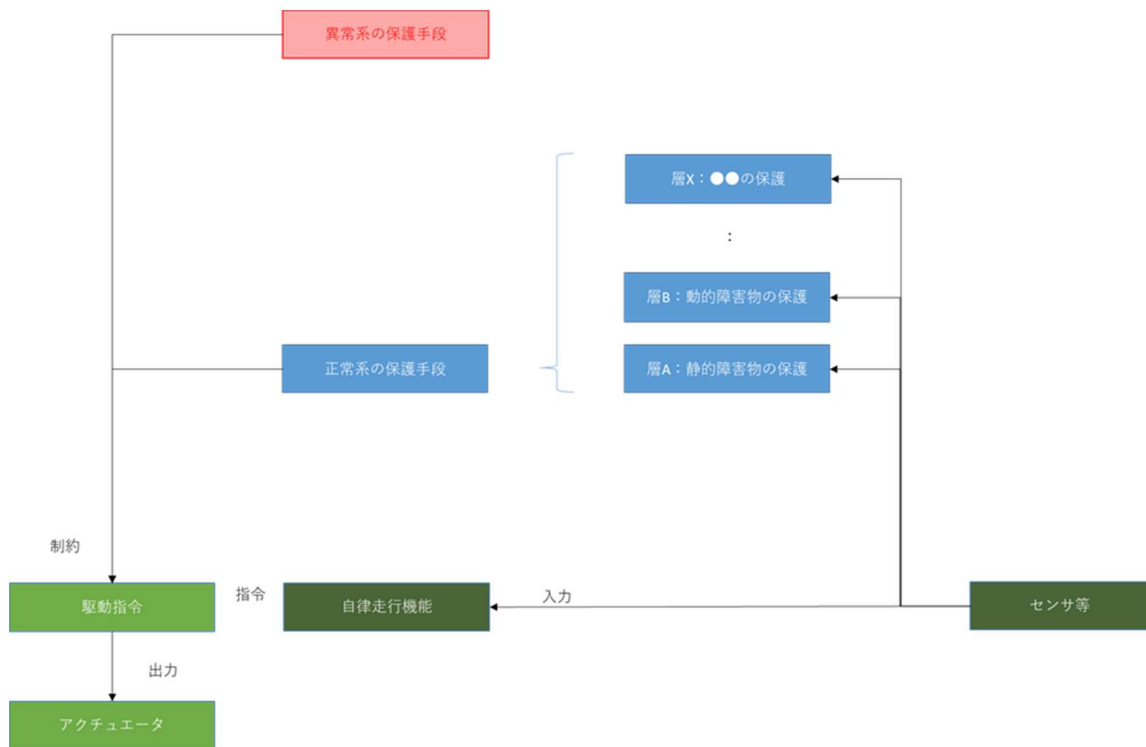


Fig. D-1.1 : 保護手段の構成例

単一の保護手段について、その手段が対象とする評価単位軸 (例えば距離) 上での変動範囲を計測によって求め、複数の保護手段で多層的に構成した場合は、同一の評価単位軸上に全てを投射し、重なり合う変動範囲内に保護対象範囲が存在することを示すことを提案する。(Fig. D-1.2)

本試験では未実施だが、これら正常系の保護範囲は異常系の保護範囲を包含し、かつ異常系の保護範囲により保護対象範囲が網羅されることを示す必要があると考える。(Fig. D-1.3)

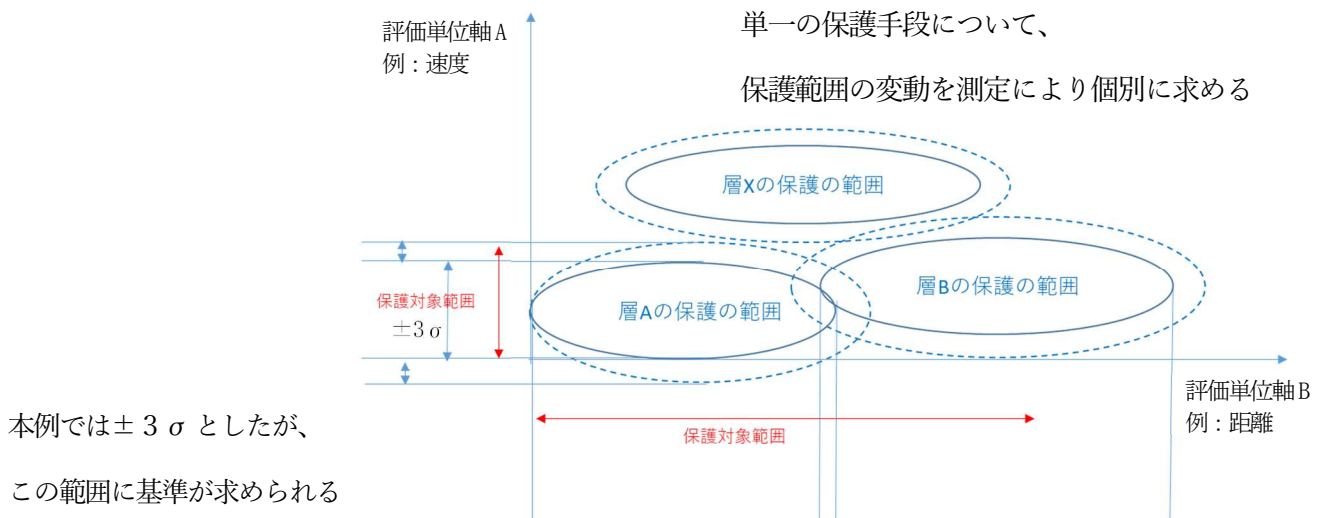


Fig. D-1.2 : 多層的な保護範囲の重なり

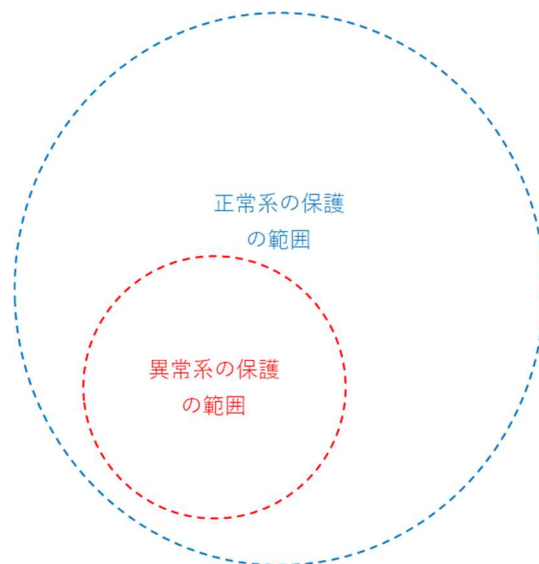


Fig. D-1.3 : 正常系と異常系の保護範囲の位置付け

2) 未実施項目と技術動向を含めた今後の課題

C. 研究結果では、静的障害物及び動的障害物に対する機能安全の実証手順について報告した。
本項では、以降の各項目についての未実施項目と課題について記載する。

2-1) 静的障害物の回避機能

2-1-1) 誤差データ計測回数

本報告では、時間的制約により誤差データ計測回数が非常に少ないため、さらに試行回数を増やす必要がある。

2-1-2) 環境要件

本報告では、コース幅は一定とし、変動を考慮していない。幅の変化をつけた場合の誤差測定も必要と考える。

また、自己位置推定はLRFを優先にしているものの、画像も併用することから、光量の変化等、映像の影響も確認する必要がある。

2-1-3) AR タグ位置補正の機能向上

AR タグによる位置補正機能について、機能追加によりタグの誤認や逆光等への耐性が向上したが、本報告の誤差データ計測と実証試験には未反映である。最新機能での計測値を用いた評価が望まれる。

また、QR コードなど代替となる技術が存在するため、それらへの置き換えも検討の余地がある。

補正の手段については、IMU など慣性センサの利用や、屋外利用の場合はGPS やGNSS も候補となる

2-2) 動的障害物の回避機能

2-2-1) 誤差データ計測回数

こちらについても、誤差データ取得の試行回数が少ないため、さらに回数を増やす必要がある。

2-2-2) 環境要件

走行台速度の制約により、障害物の移動速度は比較的低速なものとなった。現実には人が走行する速度範囲はもう少し広いため、さらに高速での誤差データ取得が必要だと考える。

さらに、対象者の服装や身体的特徴などを変化させることも必要ではないか。

また、検出対象を人間に絞ったが、車両等の複数種類の対象物を検出する場合、それぞれについての条件設定が必要となる。

2-2-3) 認識アルゴリズムの評価

今回は対象にしていないが、検証手順にこの物体認識アルゴリズム自体の物体認識精度をどのように折り込むかについて、検討が必要である。

また、物体認識のアルゴリズムとして、Yolov3 を用いているが、これは既に最新ではなく、さらに精度や処理速度の向上したものが出てきている。また、検出対象ごとに検出を得意とするアルゴリズムが異なることにも留意が必要である。

3) 構成要素と精度の関連性に関する所感

本機の停止精度に影響を与える要素として、カメラやLRF、モータ、ドライバ等のハードウェア要因のほか、自律走行機能を構成するソフトウェア群がある。

ハードウェア要因のカメラやLRF は、機器のパラメータ設定の影響を受ける。これらについては、メーカーの指定ツールを用いて最適値設定を行った。

ソフトウェア群には、構成する個別機能の一つ一つに多数の調整パラメータが存在する。個別の項目の影響を評価することが現実的に困難なので推奨初期値を利用するものが大半である。装置の停止精度に与える影響としては、ソフトウェア要因の比重が大きく、とりわけナビゲーション機能がもつパラメータの影響が大きいと感じた。

中でも、目的地点への到達判断を行うパラメータと、振動動作に陥ったことを判定するためのパラメータ、及び経路を見失った際のリカバリ動作に関するパラメータの影響が大きくかつトレードオフの関係にある。現状では、経験的最良値を利用しているが、さらなる探求が必要である。

E. 結論

本研究において、自律走行する実証試験機を製作し、機能安全の要求水準を満たすこと示す手順を開発し、一連の手順の実証は完了した。

自律走行機能のように多数のアルゴリズムやパラメータによって構成される手段が、一定水準の安全性を満たすことを評価する手順において、個別のアルゴリズムやパラメータそのものを手順として決めることはできない

しかし、それらが動作した結果について、要求水準が設定された評価単位の軸上にそのばらつきの範囲を（複数の手段が存在する場合にはそれら全てのばらつきの範囲を）投射し、要求範囲に収まることを示すことにより評価する手順を提案した。この要求範囲をどのように定めるのが妥当であるかについてはさらに検討の必要がある。

今後も機器性能の向上や新技術に追従し新たな評価単位軸の設定に対応していくため、さらなる研究の継続が望まれる。

F. 健康危険情報

報告事項無し

G. 研究発表

1. 論文発表

同様の資料の公表を予定する

2. 学会発表

該当無し

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許出願

該当無し・予定なし

2. 実用新案登録

該当無し・予定なし

3. その他

該当無し

I. 公開ソフトウェア等の利用について

1) 公開パッケージ

本機の自律走行機能を実現するにあたり、使用している公開パッケージについて記載する。

1-1) 基本システム

最低限必要とされる機能群であり、システム OS (Ubuntu18.04LTS) に対応するものを選択した。本機では、ROS の安定版パッケージである ROS melodic[1]を導入した。

1-2) SLAM パッケージ

本機は、LRF (Laser rangefinder) およびデプスカメラを併用した SLAM 制御を行う。SLAM は、機体の自己位置を推定する機能と、機体が走行する環境の地図作成を同時に行う手法であり、著名なものでは gmapping や Cartographer があり、それ以外にも多種多様な手法が提案されている。

本機では、それらの手法の中から RTAB-Map (Real-Time Appearance-Based Mapping) [2]を選択した。

RTAB-Map は、Mathieu Labbé, François Michaud らにより開発され、オープンソースラオープンソースライブラリとして配布されている。

本ライブラリは、LRF による SLAM だけでなく、2D カメラや 3D カメラによる視覚的 SLAM に対応し、それらを比較検討することを想定した設計が特徴である。本機に搭載された LRF とカメラの併用が可能であり、より汎用性が高く、精度の向上の検討をしやすいと考え選択した。

1-3) LRF パッケージ

本機は LRF を 2 台搭載し、全周をカバーする距離情報を収集する。

まず、各 LRF より Ethernet 経由で情報を取得後、2 つの LRF 情報を統合し、仮想的に 1 台の LRF から取得した 360° 分の距離情報に変換する必要がある。

LRF より情報を取得するため、urg_node パッケージを利用した。[3]

センサ情報を統合する機能は、Augusto Luis Ballardini, Simone Fontana, Axel Furlan, Domenico G. Sorrenti らの開発した ira_laser_tools パッケージを利用した。[4]

1-4) AR タグパッケージ

また、自己位置補正の精度向上のため、SLAM 用 3 次元カメラ画像より、深度情報を除く 2 次元のカラー画像を抽出し、AR タグにより自己位置を補正する手段を持つ。

AR タグを認識する機能は、ar_track_alvar[5]を利用した。本機能は、画像内にタグ固有の識別情報を持ち、Fig. I-1-3.1 に例示する画像を撮影することで、AR タグまでの距離・姿勢情報が取得できる。

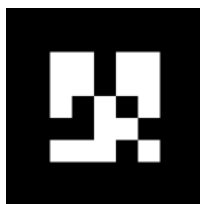


Fig. I-1-4.1 : AR タグ画像例

1-5) darknet_ros パッケージ

darknet_ros[6]は、画像から物体認識を行うためのオープンソースのニューラルネットワークフレームワークである。CPU または GPU を利用して認識処理を実行する。後述する動的障害物回避機能にて利用した。

1-6) PyModbus

PyModbus[7]は、Python による Modbus 通信を行うためのフレームワークであり、ROS パッケージではない。

本機における PLC とコントローラ間の ModbusTCP 通信を行うために利用している。

J. 参考文献・資料等

本機を開発するにあたり、参考にした文献、公開パッケージ入手先 URL を以下に示す。

[1] <http://wiki.ros.org/melodic>

[2] Mathieu Labbé and François Michaud, RTAB - Map as an open - source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large - scale and long - term online operation, Journal of Field Robotics, 2018

[3] http://wiki.ros.org/urg_node

[4] Augusto Luis Ballardini; Simone Fontana; Axel Furlan; Domenico G. Sorrenti, ira_laser_tools: a ROS LaserScan manipulation toolbox, 2014

[5] http://wiki.ros.org/ar_track_alvar

[6] http://wiki.ros.org/darknet_ros

[7] <https://pymodbus.readthedocs.io/en/latest/index.html>

K. 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご協力頂いた下記の方々に深謝致します。

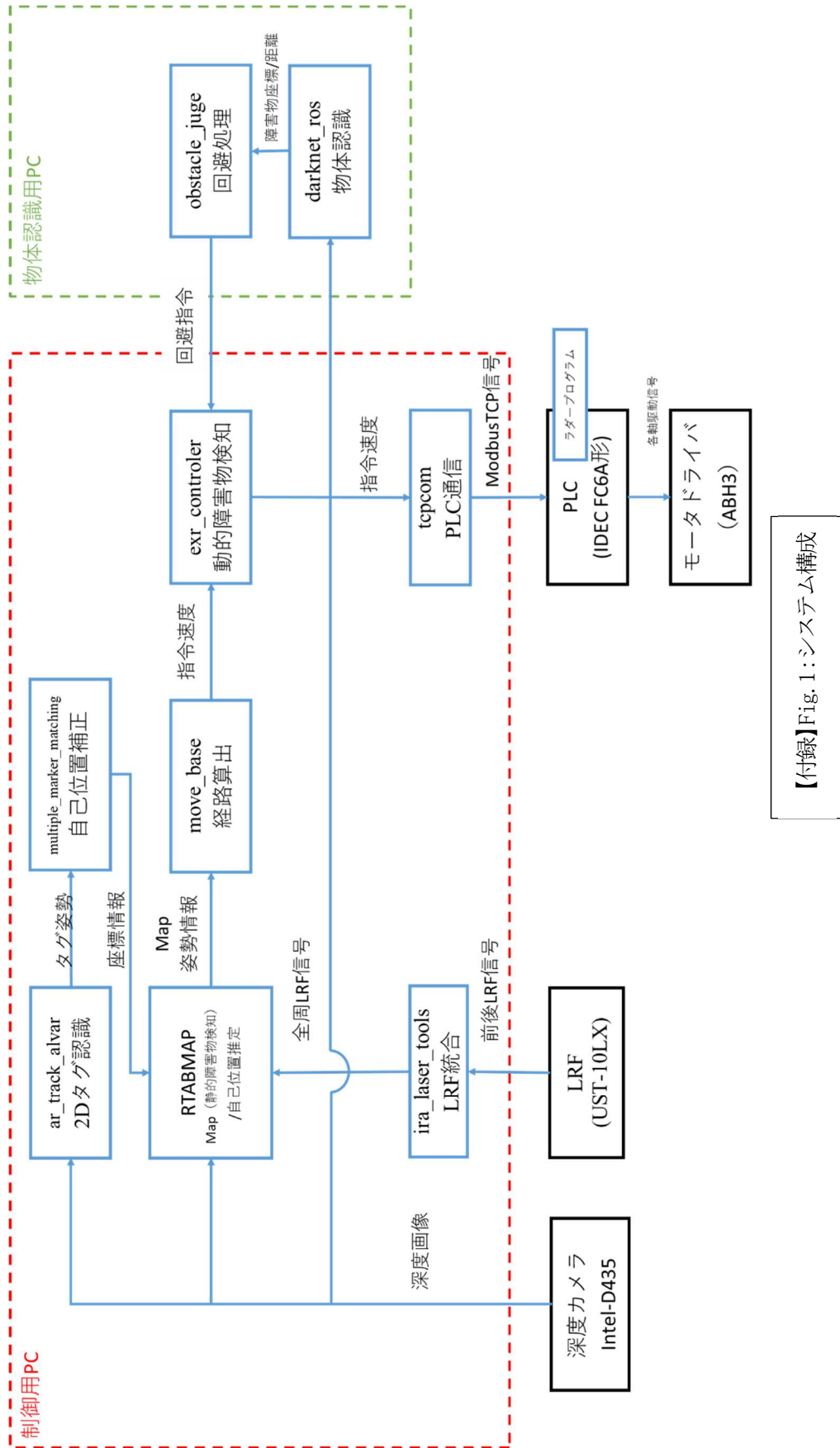
本研究の全般において、国立大学法人 名古屋大学大学院工学研究科教授 山田陽滋先生にご助言を頂きました。

AR タグによる自己位置補正機能の開発において、国立大学法人 名古屋工業大学大学院工学研究科助教 佐藤徳孝先生にご協力頂きました。

動的障害物の回避機能開発において、イクスアール株式会社 蟹江 真様にご協力頂きました。

L. 付録

本文中より参照される図表を添付する。



【付録】Fig. 1:システム構成

【付録】Tbl. 1 : 停止精度 (直線) 詳細

番号	ラベル	照度	TAG数	RTABMAPモード	ARタグ補正	停止角度(反時計回り)[deg]	位置ずれ量 (直線) [mm]	平均A[mm]	分散 $< 3\sigma >$ [mm]	A+3 σ
1	12/17 No.07 10.0m①	昼間	0	SLAM	無効	71	284.9	284.9	-	284.9
2	12/17 No.08 10.0m②	昼間	6	SLAM	有効 (12/17版)	67	246.9			
3	12/17 No.09 10.0m③	昼間	6	SLAM	有効 (12/17版)	286	264.8	315.0	292.2	607.2
4	12/17 No.13 10.0m④	昼間	6	SLAM	有効 (12/17版)	59	265.1			
5	12/17 No.14 10.0m⑤	昼間	6	SLAM	有効 (12/17版)	275	483.2			
6	12/17 No.15 12.0m①	昼間	6	SLAM	有効 (12/17版)	294	505.7	505.7	-	505.7
7	12/17 No.16 12.0m②	昼間	0	SLAM	無効	69	291.2	271.5	59.4	330.8
8	12/17 No.17 12.0m③	昼間	0	SLAM	無効	65	251.7			

【付録】 Tb1.2：停止精度（曲線）詳細

番号	ラベル	照度	TAG数	RTABMAPモード	ARタグ補正	停止角度(反時計回り)[deg]	位置ずれ量(虚線)[mm]	平均A[mm]	分散<3σ>[mm]	A+3σ
1	1/31 L-Curve Notag 3.5m①	夜間	0 SLAM		無効	5	386.9			
2	21/31 L-Curve Notag 3.5m②	夜間	0 SLAM		無効	5	422.8	426.8	103.1	529.9
3	31/31 L-Curve Notag 3.5m③	夜間	0 SLAM		無効	5	470.8			
4	41/31 L-Curve Notag 4.0m①	夜間	0 SLAM		無効	10	288.3			
5	51/31 L-Curve Notag 4.0m②	夜間	0 SLAM		無効	10	258.7			
6	61/31 L-Curve Notag 4.0m③	夜間	0 SLAM		無効	10	251.6			
7	71/31 L-Curve Notag 4.0m④	夜間	0 SLAM		無効	10	317.1	279.7	69.8	349.5
8	81/31 L-Curve Notag 4.0m⑤	夜間	0 SLAM		無効	10	282.7			
9	92/1 L-Curve 4tag 3.5m①	夜間	4 SLAM		有効(12/28版)	15	305.5			
10	102/1 L-Curve 4tag 3.5m②	夜間	4 SLAM		有効(12/28版)	15	353.4			
11	112/1 L-Curve 4tag 3.5m③	夜間	4 SLAM		有効(12/28版)	15	266.5	314.1	112.2	426.3
12	122/1 L-Curve 4tag 3.5m④	夜間	4 SLAM		有効(12/28版)	15	361.0			
13	132/1 L-Curve 4tag 3.5m⑤	夜間	4 SLAM		有効(12/28版)	65	284.1			
14	142/1 L-Curve 6tag 4.0m①	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	10	265.1			
15	152/1 L-Curve 6tag 4.0m②	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	120	571.4			
16	162/1 L-Curve 6tag 4.0m③	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	10	67.7			
17	172/1 L-Curve 6tag 4.0m④	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	×	×	300.3	538.5	838.8
18	182/1 L-Curve 6tag 4.0m⑤	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	×	×			
19	192/1 L-Curve 6tag 4.0m⑥	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	10	297.1			
20	201/31 R-Curve Notag 3.5m①	夜間	0 SLAM		無効	355	527.6			
21	211/31 R-Curve Notag 3.5m②	夜間	0 SLAM		無効	355	437.8	484.2	110.2	594.3
22	221/31 R-Curve Notag 3.5m③	夜間	0 SLAM		無効	355	487.0			
23	231/31 R-Curve Notag 4.0m①	夜間	0 SLAM		無効	348	206.2			
24	241/31 R-Curve Notag 4.0m②	夜間	0 SLAM		無効	350	172.3			
25	251/31 R-Curve Notag 4.0m③	夜間	0 SLAM		無効	350	275.4	217.8	102.9	320.7
26	261/31 R-Curve Notag 4.0m④	夜間	0 SLAM		無効	350	204.4			
27	271/31 R-Curve Notag 4.0m⑤	夜間	0 SLAM		無効	350	230.9			
28	282/1 R-Curve 4tag 3.5m①	夜間	4 SLAM		有効(12/28版)	355	513.4			
29	292/1 R-Curve 4tag 3.5m②	夜間	4 SLAM		有効(12/28版)	×	×			
30	302/1 R-Curve 4tag 3.5m③	夜間	4 SLAM		有効(12/28版)	357	556.1	551.4	88.0	639.5
31	312/1 R-Curve 4tag 3.5m④	夜間	4 SLAM		有効(12/28版)	×	×			
32	322/1 R-Curve 4tag 3.5m⑤	夜間	4 SLAM		有効(12/28版)	359	584.8			
33	332/1 R-Curve 6tag 4.0m①	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	355	542.8			
34	342/1 R-Curve 6tag 4.0m②	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	350	627.8			
35	352/1 R-Curve 6tag 4.0m③	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	×	×			
36	362/1 R-Curve 6tag 4.0m④	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	×	×			
37	372/1 R-Curve 6tag 4.1m⑤	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	×	×			
38	382/1 R-Curve 6tag 4.2m⑥	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	350	183.8	387.9	599.3	987.2
39	392/1 R-Curve 6tag 4.3m⑦	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	×	×			
40	402/1 R-Curve 6tag 4.4m⑧	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	×	×			
41	412/1 R-Curve 6tag 4.5m⑨	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	355	197.0			
42	422/1 R-Curve 6tag 4.5m⑩	昼間	6 SLAM		有効(12/28版)	×	×			

【付録】 Tbl. 3 : 障害物試験 (詳細)

試験		台車			障害物			残存間隙 (車体前端中心から走行台前端中心までの直線距離) [mm]	失敗事由
試験番号	日時	ゴール座標	モード	ARタグ補正	移動速度[km/h]	相対角度[deg]	移動タイミング		
1	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	90	1m手前	1133.1	
2	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	90	1m手前	262.8	
3	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	90	1m手前	1178.3	
4	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	90	1m手前	767.4	
5	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	90	1m手前	1144.6	
6	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	90	1m手前	969.7	
7	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	90	1m手前	979.6	
8	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	90	1m手前	854.4	
9	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	90	1m手前	1027.0	
10	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	90	1m手前	195.7	
11	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	90	1m手前	710.1	
12	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	90	1m手前	400.8	
13	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	90	1m手前	830.4	
14	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	90	1m手前	343.1	
15	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	90	1m手前	812.4	
16	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	90	1m手前	790.7	
17	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	90	1m手前	773.8	
18	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	90	1m手前	772.4	
19	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	90	1m手前	643.7	
20	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	90	1m手前	832.0	
21	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	0	1m手前	862.9	
22	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	0	1m手前	1120.0	
23	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	0	1m手前	1089.0	
24	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	0	1m手前	987.0	
25	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	0	1m手前	1215.1	
26	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	0	1m手前	940.6	
27	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	0	1m手前	×	コース誤認で進行不可
28	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	0	1m手前	1011.0	
29	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	0	1m手前	963.5	
30	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	0	1m手前	961.0	
31	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	0	1m手前	883.2	
32	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	0	1m手前	848.3	
33	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	0	1m手前	985.5	
34	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	0	1m手前	1015.6	
35	2022/1/21	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	0	1m手前	879.0	
36	2022/1/24	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	45	1m手前	1094.3	
37	2022/1/24	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	45	1m手前	1238.8	
38	2022/1/24	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	45	1m手前	×	不明
39	2022/1/24	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	45	1m手前	1257.6	
40	2022/1/24	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	45	1m手前	1131.8	
41	2022/1/24	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	45	1m手前	1168.9	
42	2022/1/24	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	45	1m手前	×	不明
43	2022/1/24	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	45	1m手前	1127.9	
44	2022/1/24	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	45	1m手前	1119.8	
45	2022/1/24	(10.0,0.0)	SLAM	あり	2.0	45	1m手前	1102.7	
46	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	45	1m手前	903.6	
47	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	45	1m手前	1028.6	
48	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	45	1m手前	1048.0	
49	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	45	1m手前	915.5	
50	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	45	1m手前	879.5	
51	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	45	1m手前	263.4	
52	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	45	1m手前	953.4	
53	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	45	1m手前	×	衝突 (障害物未検出)
54	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	45	1m手前	937.0	
55	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	3.0	45	1m手前	254.2	
56	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	45	1m手前	960.0	
57	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	45	1m手前	926.6	
58	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	45	1m手前	936.2	
59	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	45	1m手前	951.1	
60	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	45	1m手前	943.2	
61	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	45	1m手前	993.5	
62	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	45	1m手前	947.5	
63	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	45	1m手前	1025.9	
64	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	45	1m手前	689.4	
65	2022/1/26	(10.0,0.0)	SLAM	あり	4.0	45	1m手前	1021.8	

厚生労働科学研究費補助金
労働安全衛生総合研究事業

自動走行可能な自律制御運搬台車の機能安全の実証手順開発

(19JA1005)

自律走行台車
機能安全
実証実験プロトコル

令和4（2022）年

株式会社アラキ製作所

目次

1) 本書の目的	3
2) 前提	3
3) 試験	4
3-1) 外観検査	4
3-2) 指令優先権の確認試験	5
3-3) 自律走行試験	6
3-3-1) 静止障害物試験	7
3-3-2) 動的障害物試験	8
3-4) 最大荷重時の走行確認試験	9
3-5) 非常停止機能の確認	10
4) 付録図	12
5) 構造物作成例	15
6) 参考文献	20

1) 本書の目的

本書では、自社で作成した自律走行台車（AMR）の自律走行機能について、機能安全を実証する試験プロトコルの策定を目的とする。

なお、作成する試験プロトコルは、「自律走行台車（AMR）の安全化と実証試験プロトコル」（技術革新に対応した機械設備の安全対策の推進事業 報告書,中央労働災害防止協会,2021）[1]を参考にした。参考文献[1] 第 5 章内では、以下 4 種の項目が例示されているが、試験対象の AMR には追従走行機能は存在しないため、2～4 の項目についての試験プロトコルを作成する。

試験項目：1. 追従走行、2. From-To 走行、3. 死角、4. 制御不具合

2) 前提

機体スペックおよび環境条件を以下に抜粋する。

表 1：環境条件

項目	条件
寸法[mm]	全長:940×全幅:740×全高:900
最大積載重量	100kg
最高移動速度	7km/h
駆動方式	差動 2 輪
使用環境	屋内
照度	水銀灯点灯下（100lx 以上）※
床面状態	平滑コンクリート床（砂塵、水滴なし）
使用形態	荷物を積載し、2 点間を移動する
最大段差	1mm 以下
荷役装置	設置・搭載なし（手積）
最大積載高	500mm 未満(全高以下)
L R F 反射素材	グリーンポリエチレン

※照度はスマートフォンアプリケーションによる計測のため、参考値とする。

3) 試験

3-1) 外観検査

AMRの外観により、不具合がないことを確認できる項目を下記に示す。

- 合否判定基準：
 - ・搭載された装置に所定の異常表示がなければ正常とする。
 - ・AMRの機体、固定具や保護部材に破損等が認められない場合は正常とする。

表2：外観確認項目

確認項目	異常の有無（目視）
ランプ点灯状態	無し
制御装置	無し
通信装置	無し
車輪の接地状態・破損	無し
荷固定部の緩み	無し
車体周囲の鋭利な端部・保護部材欠損	無し

3-2) 指令優先権の確認試験

- 想定
AMR の自律走行中に、手動操作の走行指令を送出する
- 危険状態（原因）/危険事象（結果）
自律／手動で背反する指令が入力されたとき、手動操作が優先されない。／回避操作ができず、障害物に衝突する。
- 合否判定基準
手動操作が優先されれば正常とする。

表 3：指令優先権の確認試験

試験項目	優先された指令	合否
自律：前進 手動：後退	手動	正常
自律：後退 手動：前進	手動	正常
自律：右回転 手動：左回転	手動	正常
自律：左回転 手動：右回転	手動	正常

3-3) 自律走行試験

自律走行台車は、障害物を建造物のような固定物（静的障害物）と、人などの動く物（動的障害物）に分類しており、それぞれの検知・回避手段を持つ。従って、各障害物に対する検知・回避の試験を別に行う。

※後退方向の移動を行う場合には、後退方向も同様の試験を行う。

本項目は、参考文献[1]の第 5 章 2.From-To 走行および 3.死角に対応する。

- 想定
AMR が SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）モードで自律走行する。
- 危険状態（原因）/危険事象（結果）
AMR が周囲の障害物（人）を見落とす。／AMR が減速・停止せず、衝突して打撲を負わせる。
- 合否判定基準
障害物との衝突が発生しなければ正常とする。
- 実証試験プロトコル
AMR を積載 0kg で自律走行させ、障害物と衝突せずに走行／停止することを確認する。障害物の種別に応じて以下 2 項目に示すの試験を実施する。
※本来であれば最大積載量、最高速で走行させるが、AMR の荷役機能は非搭載のため上記の条件とした。

3-3-1) 静止障害物試験

自律走行台車が障害物に衝突せず、安全に走行することを確認する。

➤ 試験条件

走行速度：可変（自律走行機能に依存）

走行パターン：直進・右折・左折（表 4）

コース幅：2.0[m]（コース壁の作例は図 5 に示す）

位置補正機能：有効

表 4：静止障害物に対する安全性の確認

走行パターン	側壁への衝突	前面衝突・不停止
直進	なし (0/6)	なし (0/6)
右折	なし (0/6)	なし (0/6)
左折	なし (0/6)	なし (0/6)

➤ 試験動作

①付録図 1,2 に示すコースを設け、AMR をスタート地点(S)に配置する。

②AMR にゴール指令距離により到達目標座標(G)を入力し、自律走行させる。

③ゴール到達時の AMR 停止座標(G')を記録する。

④走行中の側壁との衝突の有無と、ゴール座標(G)と AMR 停止座標(G')のズレ量が規定値以下であることを確認する。

➤ 使用上の注意

障害物の検知条件を取扱説明書に記載する。

3-3-2) 動的障害物試験

自律走行台車に対し、障害物の接近角度と接近速度を変化させた場合に安全に停止することを確認する。

➤ 試験条件

障害物がAMRに対して接近する角度と速度の条件を表5に示す。

これらの範囲と粒度は、障害物の検出仕様に基づいて適切に設定する。

AMRと接近する障害物の動線の交点に、両者が同時に到達するタイミングを計って計測する。障害物の検出仕様に基づき、模擬人型のサイズ・配置・動作のタイミングを適切に調整する。

位置補正機能：有効

表5：動的障害物に対する安全性の確認

接近角度	障害物の移動速度	障害物との衝突
0°（正対して接近）	2.0[km/h]	なし（0/2）
45°（斜行して接近）	2.0[km/h]	なし（0/1）
90°（真横から接近）	2.0[km/h]	なし（0/2）
0°（正対して接近）	3.0[km/h]	なし（0/1）
45°（斜行して接近）	3.0[km/h]	なし（0/1）
90°（真横から接近）	3.0[km/h]	なし（0/1）
0°（正対して接近）	4.0[km/h]	なし（0/2）
45°（斜行して接近）	4.0[km/h]	なし（0/1）
90°（真横から接近）	4.0[km/h]	なし（0/2）

➤ 試験動作

- ①付録図3に示す配置により、AMRと模擬人型を走行させる。
- ②所定の位置にて障害物を定速走行させ、AMRに接近させる。
- ③AMRと障害物の残存間隙を測定する。

➤ 使用上の注意

動的障害物に対する検知条件が取扱説明書に記載されていること

3-4)最大荷重時の走行確認試験

使用環境の最悪条件下（斜度・路面段差等）で、AMR を最大速度で動作させた場合の安全性を確認する。機体を最大積載荷重、最大速度で走行させて確認する。

AMR は、限界走行を実現するため、非自律走行モードで走行させてもよい。

本項目は、参考文献[1]の第 5 章 4.制御不具合に対応する。

- 想定
AMR が SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）モードで自律走行する。
- 危険状態（原因）/危険事象（結果）
AMR が周囲の障害物回避のため、停止・転回・後退をおこなう。／AMR に積載した荷物に慣性力が生じ、積み荷が転落して打撲を負わせる。
- 合否判定基準
AMR 機体の転倒や荷崩れが発生しなければ正常とする。
- 実証試験プロトコル
 - 試験条件
 - ・最小半径の旋回（右→左、左→右）
 - ・最大速度の走行（前進→後退、後退→前進）上記を組み合わせた走行条件(付録図 4 を参照)とする。
 - 試験動作
 - ①AMR が定速に到達するまで直進走行させる
 - ②試験条件に従ったパターンで、転回操作を行う。
 - ③転倒・荷崩れの有無を確認する。
 - 使用上の注意
使用環境の最悪条件（床面の最大斜度・許容される段差）が取扱説明書に記載されていること。
積荷に関する最悪条件（最大重量・積載範囲・重心位置※特に液体・固定方法）が取扱説明書に記載されていること。

3-5)非常停止機能の確認

各種の非常停止装置の作動を確認する。

機体を積載 0kg、最高速で走行させ、停止することを確認する。

※本来であれば最大積載量、最高速で走行させるが、今回は積載台部分が未完成のため上記の条件とした。

本項目は、参考文献[1]の第 5 章 4.制御不具合に対応する。

- 想定
手動操作および自律制御による走行中
 - 危険状態（原因）/危険事象（結果）
故障による急加速や急旋回が発生する。／周囲の人や物に衝突し、打撲を負わせる。
 - 合否判定基準
非常停止操作により、AMR が停止すれば正常とする。
 - 実証試験プロトコル
 - 試験条件
 - ・ AMR が搭載する緊急停止手段を表 6 に示す。
 - ・ バンパースイッチには、検知可能な重量と高さの障害物を設定する。
- 例) 10kg 以上の 18L ペール缶を使用。
- ・ AMR は最大積載量、最高速度でテストする。

表 6：非常停止手段

非常停止手段	制動距離[mm]	停止の有無
バンパースイッチ（右前）	**.*以下	有
バンパースイッチ（右後）	**.*以下	有
バンパースイッチ（左前）	**.*以下	有
バンパースイッチ（左後）	**.*以下	有
非常停止ボタン（前）/ リモコン操作ボタン（1）	**.*以下	有
非常停止ボタン（後）/ リモコン操作ボタン（2）	**.*以下	有
LRF（前）	—	未実施
LRF（後）	—	未実施

※非常停止ボタンはリモコン操作ボタンと連動する

- 試験動作
 - ①AMR を定速走行させる。
 - ②所定の位置に到達したタイミングで、表 6 の非常停止手段により非常停止する。
 - ③停止の有無および制動開始から停止までの距離を計測する。

- 使用上の注意
 - 異常系保護の検知条件が取扱説明書に記載されていること。

4) 付録図

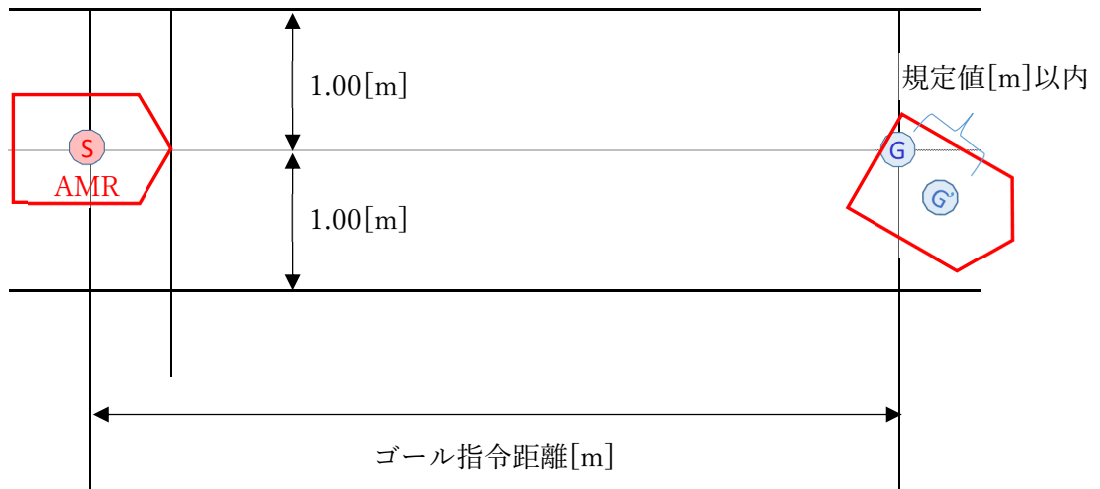


図 1：静的障害物試験（直線）

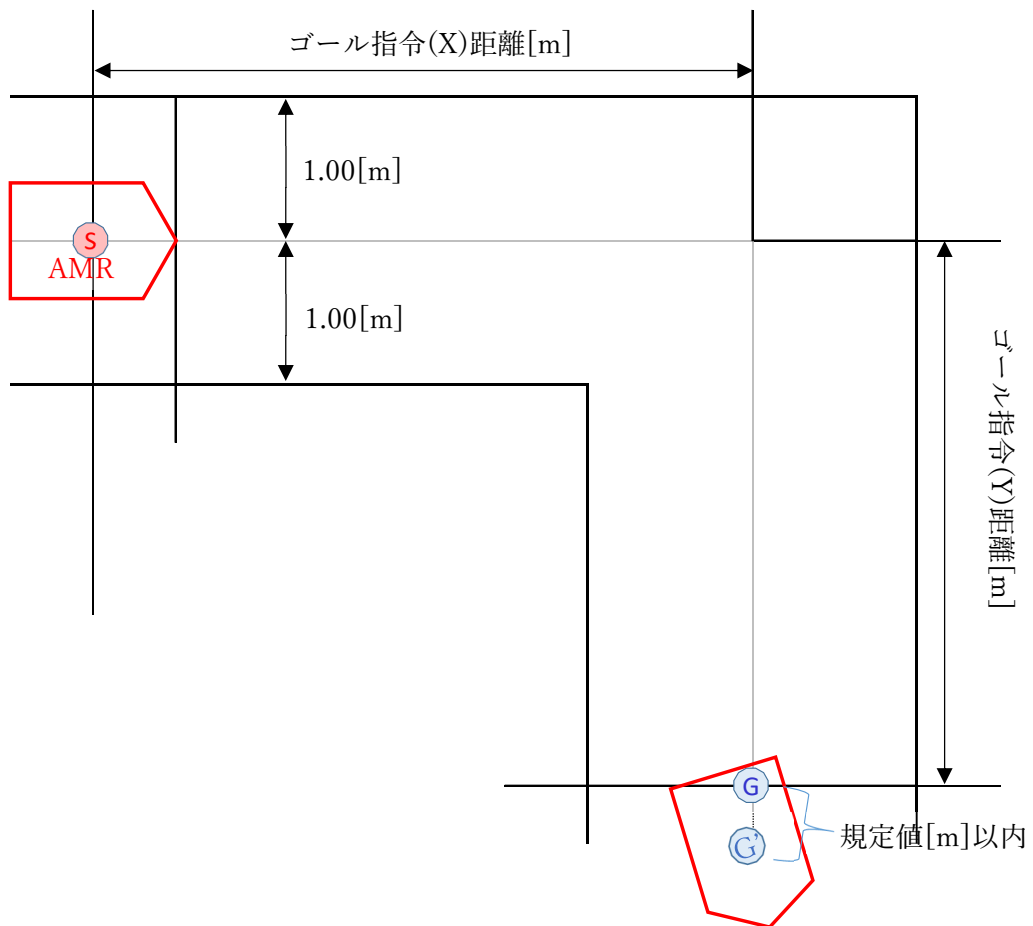


図 2：静的障害物試験（右折）

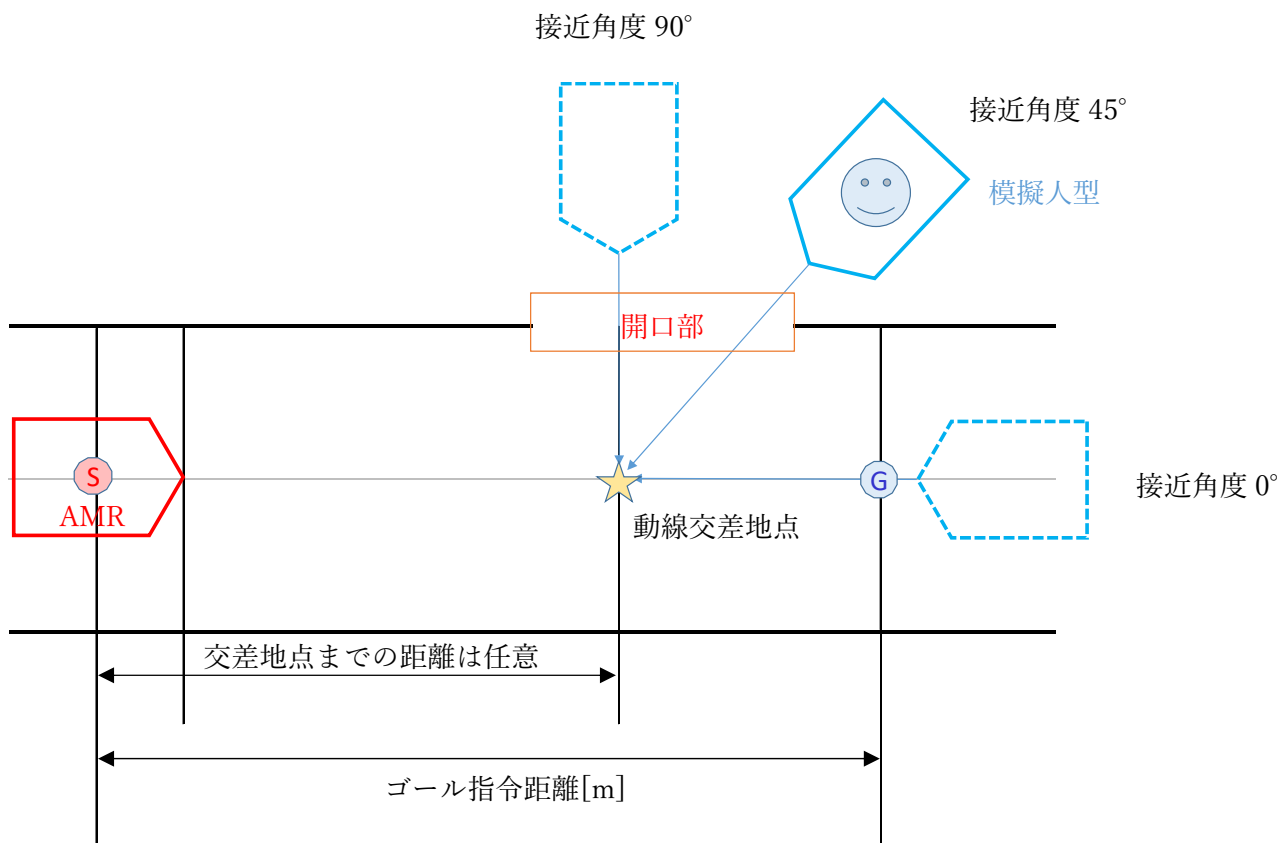


図3：動的障害物試験

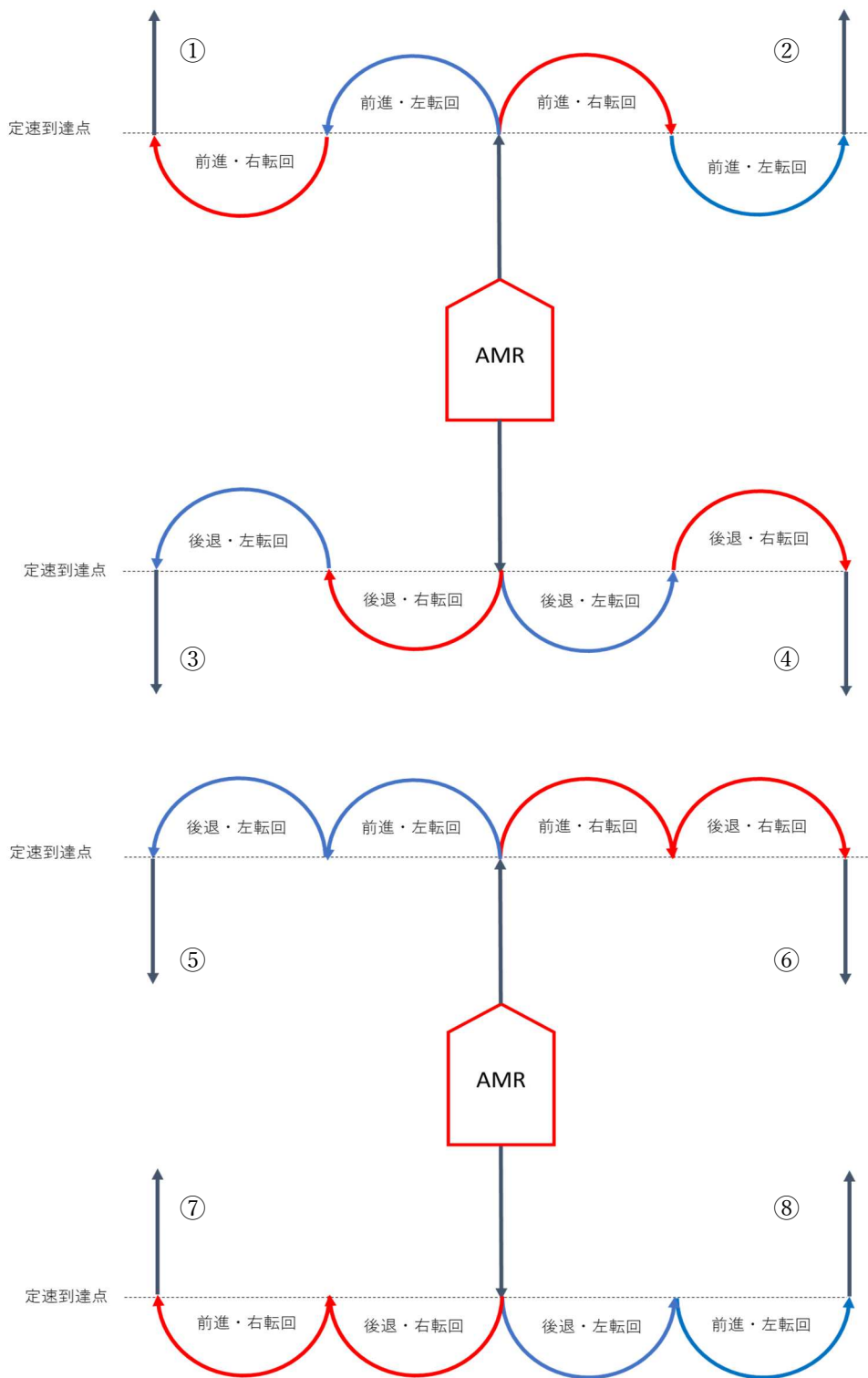


図 4:最大荷重試験の走行パターン

5) 構造物作成例

実証試験に用いる構造物の作例を以下に示す。

- コース壁

ポリエチレン製梱包材、梱包用テープ、アルミ製フレーム・ジョイント部品により構成。

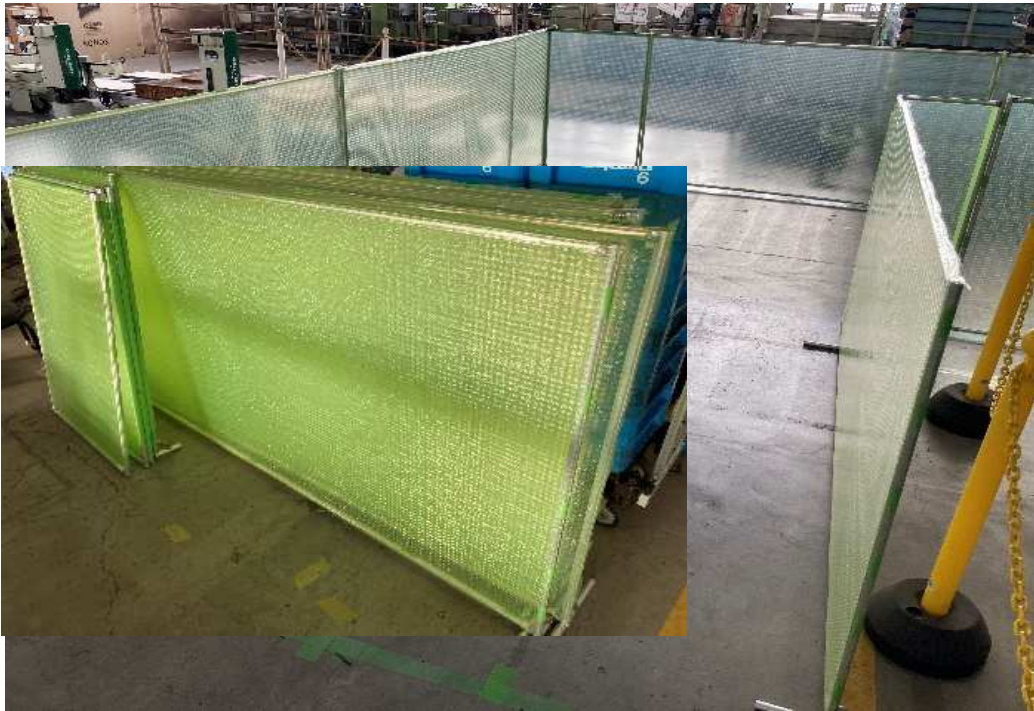


図5：コース壁

- 定速走行台

人型模型を走行台に乗せ、定速で移動させる。図6～8に人型の配置およびサイズを示す。また、駆動部の配線図を図9、外観を図10に示す。

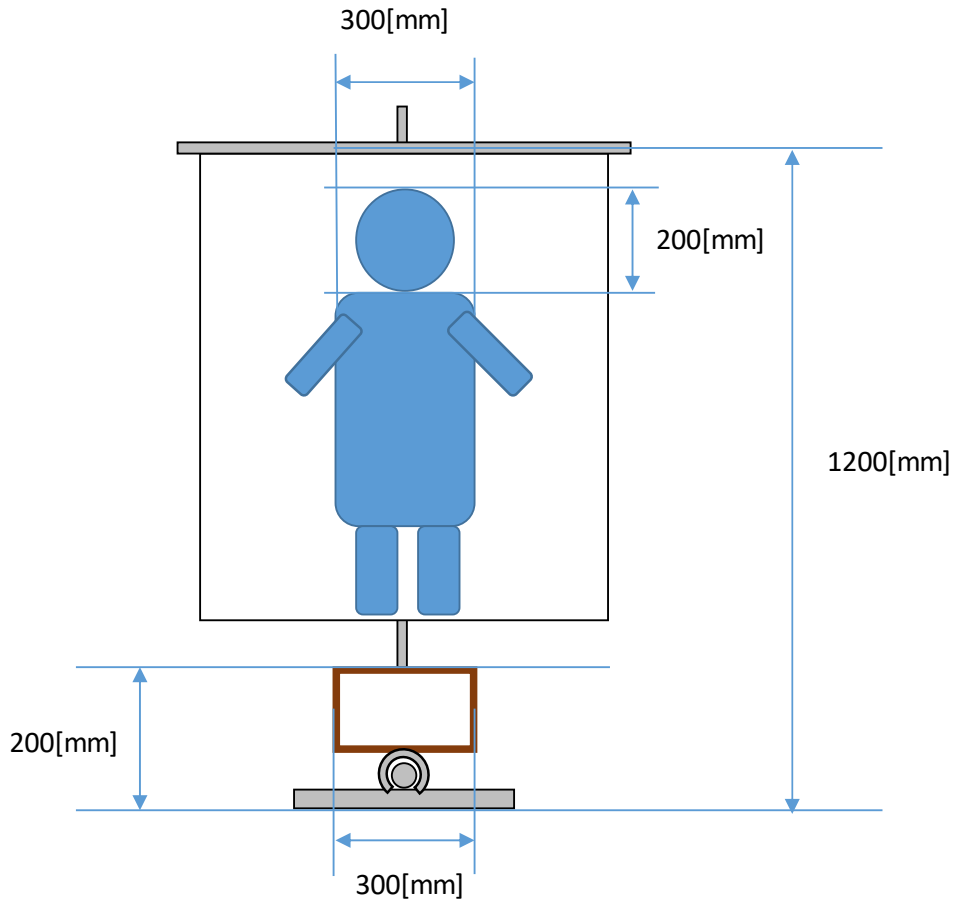


図6：走行台正面図

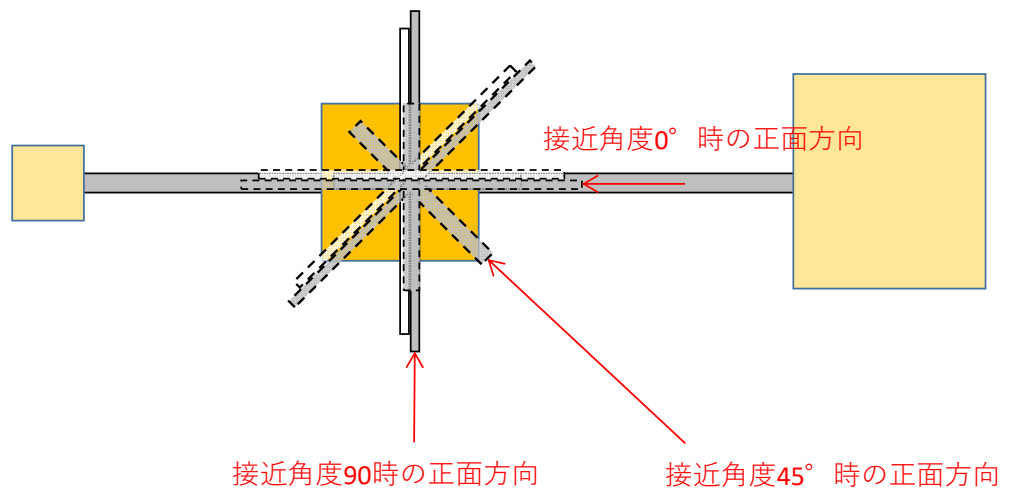


図7：模擬人型の配置例

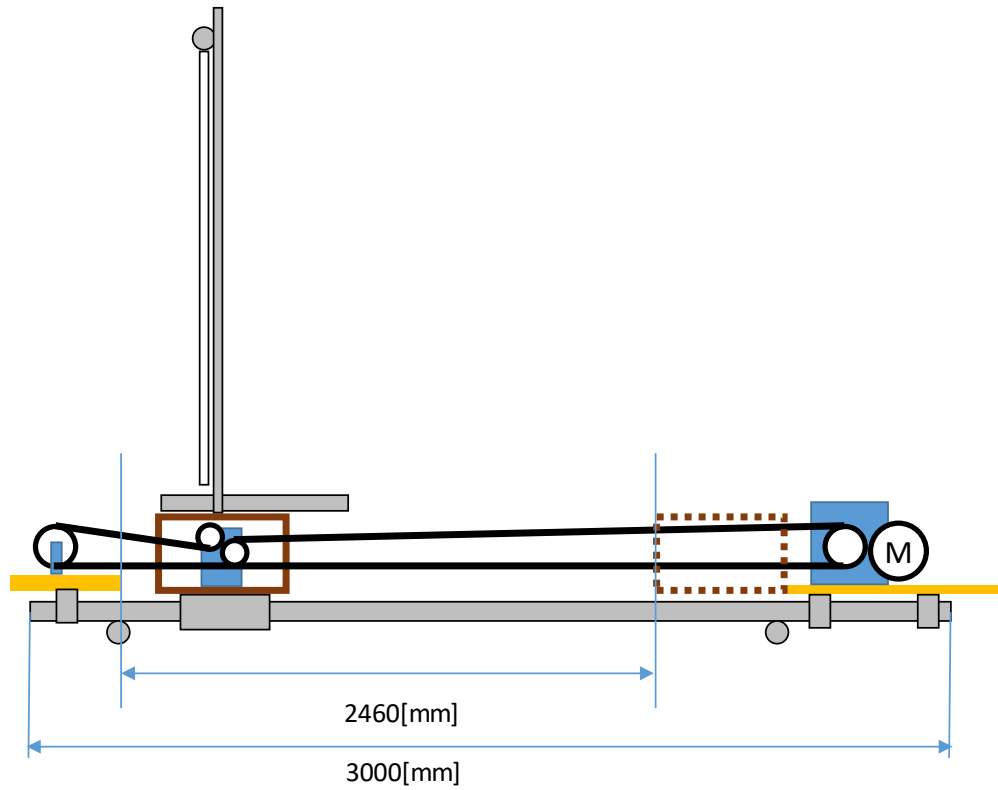


図8：走行台横面

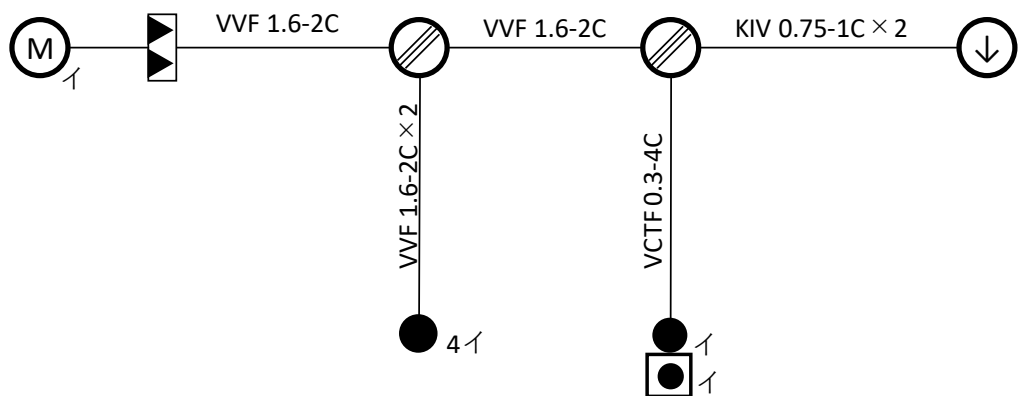


図9：駆動部の配線

走行台は、MDF合板、木材、アルミフレーム、ジョイント部品、4路スイッチ、片切スイッチ、プッシュスイッチ、端子台、金折、模型用直流モータ、ギアセット、プーリセット、ブックエンド、直流電源、スイッチボックスで構成した。



图 10：定速走行台

● タイミング調整機構

MDF 合板(10cm 角)、マグネットテープ(30cm)、マグネット式開閉検知センサ、LED(5V)にて構成。

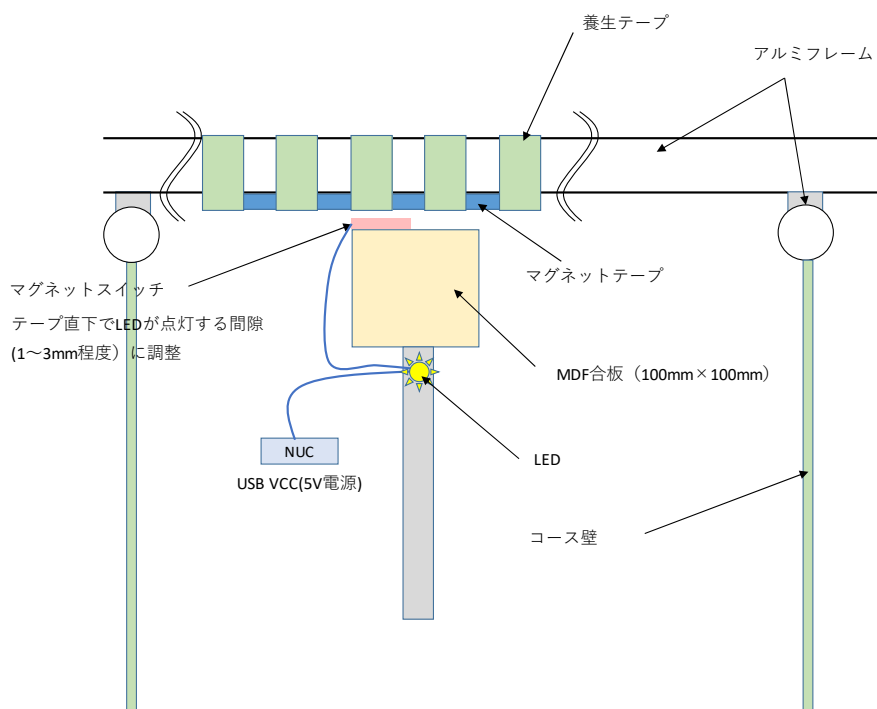


図 11：タイミング調整機構の構成

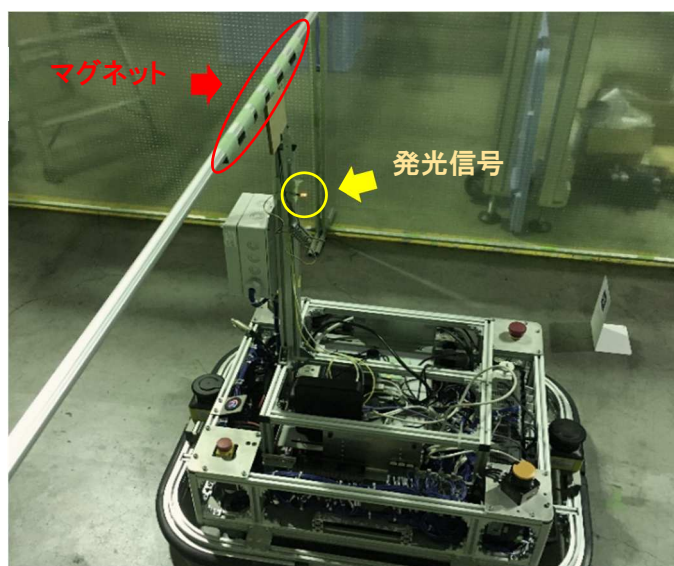


図 12：タイミング調整機構の外観

6) 参考文献

- [1] 技術革新に対応した機械設備の安全対策の推進事業 報告書,中央労働災害防止協会,2021.03