厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）

総括研究報告書

# 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

研究代表者
澤田　浩之　（　株式会社アラキ製作所（企画開発グループ　：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：**
今後益々の導入が見込まれる自動走行可能な自律制御産業機械、主に特定の軌道（磁気テープ等）を持たずセンサにより走行経路を自己判断し障害物を避けながら移動し指定された目的地へ到達する装置に於いて、安全機能の要求水準を満たしているかの実証手順開発を目的とし研究を開始。
初年度、内外の規格・規定を調査し、リスクアセスメントを実践、保護方策を織り込んだ試験装置の構想検討を行った。
次年度（本報告）、実際に試験機を製作し実証試験を開始した。

## A．研究目的

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、特に自動走行可能な自律制御機械に対しての、開発・導入に向けた要点や、リスクアセスメント事例、安全確保についての安全機能の要求水準を満たす具体的な指針は不足していると言えます。

本研究では、Safety2.0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、それを元に機能安全の要求水準を満たす実証手順の開発を目的としています。

## B．研究方法

令和元年度（初年度）では、初め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とした。

令和２年度（本報告）に於いて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ました。

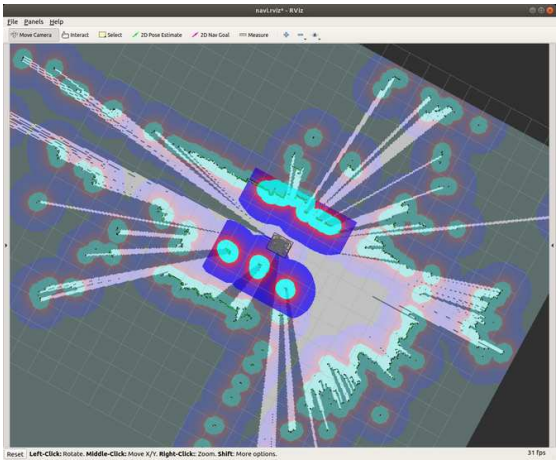
実証手順の入り口として、リスクアセスメントの実

践事例集（簡単なデータベース）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。（Fig.4,5 未だ製作中）

最終年度では、これらを実際に運用し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する。

実証試験は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て実施している。最終年度にて、収集データから実証試験の判断基準を検討する。

Fig1：製作した実証試験装置



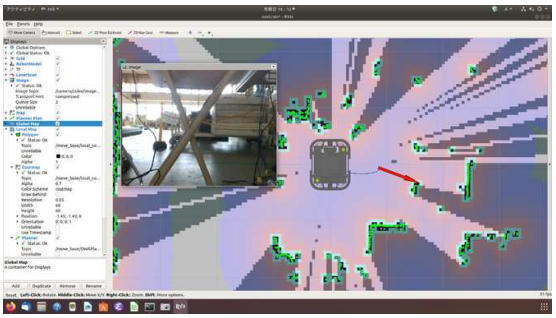


Fig.2, Fig3：
試験場でのセンシング状態

| 危険源No. | 作業No. | 危険源・危険状態・危険事象<br>測定ポイント・目標値 | 評価 | | 保護方策 | 安全防護物 | 対応機種及びその選び | 方策後の評価 | | 制御カテゴリ判定 | 残留リスク | 使用上の確認事項 | 使用上の追加事項 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ひざき | 重 | | | | ひざき | 軽 | | | | |
| | | | 暴露状況 | 頻 | | | | 暴露状況 | 頻 | | | | |
| | | | 回避の可能性 | 不 | | | | 回避の可能性 | 不 | | | | |
| | | | 発生頻度 | 頻 | | | | 発生頻度 | 頻 | | | | |
| | | | リスクレベル | | | | | リスクレベル | | | | | |
| | | | 2 | | | | | 1 | | | | | |
| | | | ひざき | 重 | | | | ひざき | 軽 | | | | |
| | | | 暴露状況 | 頻 | | | | 暴露状況 | 頻 | | | | |
| | | | 回避の可能性 | 不 | | | | 回避の可能性 | 不 | | | | |
| | | | 発生頻度 | 頻 | | | | 発生頻度 | 頻 | | | | |
| | | | リスクレベル | | | | | リスクレベル | | | | | |
| | | | 2 | | | | | 1 | | | | | |
| | | | ひざき | 重 | | | | ひざき | 軽 | | | | |
| | | | 暴露状況 | 頻 | | | | 暴露状況 | 頻 | | | | |

Fig.4：RA シート雛形

**自律移動装置：安全機能チェックシート**

取扱説明書又は仕様書内の「安全機能」、CE適合宣言書、第三者認証機関の認証書から確認すること
PL：Performance Level、Cat：Category（ISO13849-1より）
SIL：Safety Integrity Level（IEC62061 / IEC61508より）

・リスクアセスメント上でチェック不要と判断された項目には×印選択
・適合又は許容範囲内と判断される項目には○印選択
・判断が出来ない項目は未選択（空白）とする
・
・

| × | ○ | △ | 総合判定 |
|---|---|---|---|
| | | | |
| 総合判定が《 》以下の場合<br>リスクアセスメントを再実施 | | | |

**1. 安全関連機能**

**1-1. 安全関連制御システム性能（ハードウェア及びソフトウェア）**

《説明文》《対応規格文へのリンク》

| 《判定欄》 | 《判定基準》 |
|---|---|
| | |
| | |

**1-2. 保護停止機能**

《説明文》《対応規格文へのリンク》

| 《判定欄》 | 《判定基準》 |
|---|---|
| | |
| | |

**2. 協働運転に必要な機能**

**2-1. 協働作業空間内で人作業中に一時停止（停止カテゴリ2）で停止させたい場合に必要な機能**

Fig.5：チェックシート雛形

Fif.6：試験風景

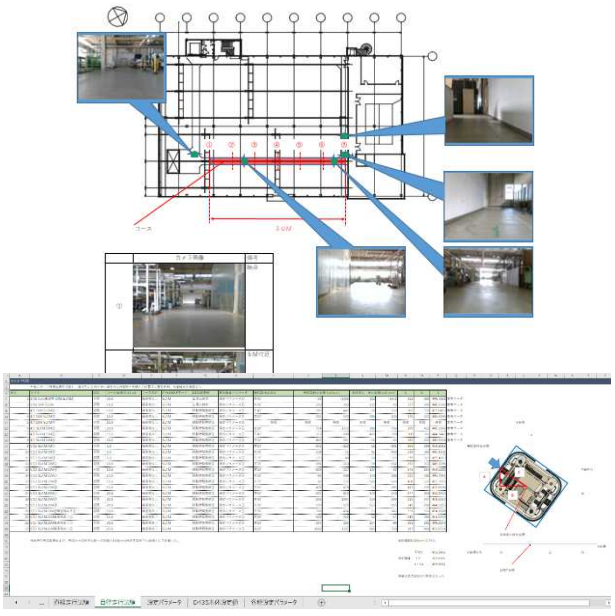


Fig.7：測定領域定義とデータ

（倫理面への配慮）

初年度同様に、基本的に被験（試験実施）者は弊社メンバーにて実施。作業時には各自が必要な保護具等の着用を徹底。（通常でも、工場内では「ヘルメット着用」「安全靴着用」「長袖／長ズボン」、作業内容に応じた「保護具の着用」のドレスコード有り）また、作業内容については「作業指示書」にて作業内容と目的を（作業責任者（今回の場合は、研究代表者が兼任）が把握し各メンバーへ）通達します。この時に危険ポイントや注意すべきポイントを「作業指示書」に織り込み、これに留意しつつ作業責任者は「作業指示書」を元に「作業計画書」を作成。実際の作業直前に「作業計画書」を元に作業安全リスクアセスメントを作業者全員で実施し情報を共有します。また、試験エリアの隔離対策を徹底し、第三者の侵入を防止します。これらは、通常業務でも徹底して実施されている事項なので特段の配慮は不要と考えます。　本研究では、試験装置という事もあり、不測の事態に備え、遠隔操作式の非常停止アシストシステムを搭載。試験開始前の始業点検を徹底し、遠隔非常停止デバイスを被験者及び作業指揮者が装備します。

また、コロナ禍の状況を踏まえ、作業時に密にならない環境に配慮。外部研究協力者や有識者との打ち合わせ等は遠隔にて実施。実証試験以外のプログラム作成や遠隔で可能な作業については、セキュリティ面に配慮しつつ実証試験機に遠隔で接続できるようにしました。

## C．研究結果

以下の１）～３）については本年度も同様に実施。

１） 規格の精査

「ISO 12100:機械類の安全性」、「IEC 61508:機能安全」及び関係するグループ規格より自律(AI)制御装置の製作を前提に精査。前述した通り機能安全面では保護方策の数値規定は固定された装置に対する例が殆どで、研究開始時点では、他の規格でも具体的な安全機能の水準を数値化しているものは少なかった。

「ISO 10218」、「prRIA 15：08」、「prUL 3100」などの安全関連規格については国内では必ずしも遵守する必要が無い事から、山田先生との議論により装置全体ではなく安全機器や構成の規格準拠に留め、其々の機能に於いて安全関連の制御システムを評価するために作成された「 ISO13849-1: PL(Performance Level)、Cat.(Category)」及び「 IEC62061 / IEC61508: SIL(Safety Integrity Level)」による評価をリスクアセスメントの実践及び試験装置の検討へ展開。

２）リスクアセスメントの実践

手法は「厚生労働省ＨＰ、機能安全活用テキスト」に掲載のフローに沿って実践。

・機械類の制限の決定
・危険源・危険状態・危険事象の同定
・リスクの見積り
・リスクの評価

これを基に、製作する試験装置の構成検討のため、下記３ステップメソッドによりリスク低減検討を実施。

・STEP1：本質的安全設計方策によるリスク低減
・STEP2：安全防護によるリスク低減
　　付加保護方策の実施
・STEP3：使用上の情報によるリスク低減

リスクアセスメントの実践時には下記資料を準備。

① 装置構成要素と作業工程リスト
(危険源の種類とライフサイクル毎に工程分類)
② 安全機能チェックシート
(関連規格と必要な認証プロセスをピックアップ)
③ 危険源リスト
④ リスク見積りマトリクスシート
(③、④はJIS B 9700(ISO 12100)より)
⑤ リスクアセスメントシート
⑥ 評価に必要な測定ポイントリスト

これらを１式のセットとして運用。

①を事前に作成する事で、機械類の制限を明確にし漏危険源の同定漏れ防止を図った。②には規格の精査でピックアップしたPL、Cat.、SILに基づいて想定している機器・機能の安全機能評価及び織り込まれるべきレベルを明記、安全機能が付加された条件でリスクアセスメントが実施出来るため、その時点での調査等の手間を省き、後工程での手戻りや、２重手間の防止を図った。⑤には保護方策に対する保護機器とその制御カテゴリの記載欄を設け（②の情報を転記）、リスクアセスメントシート上での評価基準を明確にした。最終的に⑥を作成する事でリスク低減の評価の妥当性を確認（実証）するべき内容が装置の構想検討時に反映出来た。

３）実証試験の手順とデータ収集の目標値の決定

リスクアセスメントにて作成した「⑥評価に必要な測定ポイントリスト」より試験項目と試験内容を決定しチェックシートを作成。基本的に機械類の制限に沿って、各モード・状況時にあるべき状態と目標数値にある事をチェックして行く。

４）実証試験機の構想検討と製作

様々な検討を重ね、ようやく試験装置の製作を開始した。本研究は３ヵ年計画であり、試験装置の完成は初年度から次年度にかけて実施。コロナ禍の影響も少なからずあり、部品の調達から関係先との計画に大きく変更をきたし遅れが生じる事となった。しかしなが

ら、こうした状況下になって更に働き方に様々な改革の必要性が高まり、自律制御装置のニーズも増加すると思われ、安全確保に向けての取り組みが急務と感じられた。

リスクアセスメント結果を基に試験装置の構想検討を実施。試験装置と言えリスクアセスメント結果に基づき評価が許容範囲に入らない部分については当初計画から変更した。主な変更部分としては、全方向移動を前提にしていたが、前進・後退・旋回動作に変更。これは、駆動方式の影響で位置のズレや再現性が確保出来ず、正確な実証試験が困難と思われた事と現在社会実装が進められている各メーカーの装置に最も多い駆動方式と思われるため。LRF（Laser rangefinder)によるSLAM（Simultaneous Localization and Mapping）制御では、走行経路の自己判断や障害物回避機能について実証試験は可能だが、安全機器として要求水準を満たす事が困難なため、安全規格準拠品を併用。簡易的なマイコン部分も産業用PLCに置き換え自律(AI)制御と安全回路を分離、自律(AI)制御部分の状態に関わらず安全機能が作動する様に変更。また、試験動作時の安全確保手段として遠隔非常停止システムを導入（IDEC製：非常停止アシストシステム、Safety2.0 適合審査登録制度における適合品 （レベル１：コンポーネント認証））、また手動操作を有線ゲームパッドから無線化し装置との距離を確保。

主な研究申請時からの変更・追加点は

・安全バンパーの全周化及び安全信号の２重化
・試験時事故防止の為、安全停止用LRF追加
　及び安全信号の２重化
・試験時事故防止の為、非常停止アシストによる
　遠隔停止機能追加（ハード安全信号は２重化）
・試験時安全確保の為、状態モニタ及びモード切替や
　手動操作に遠隔操作及びモニタ機能追加

構想検討による事前想定の変更箇所

・本体重量：５０ｋｇ→約６５ｋｇ↑
・可搬重量：１００ｋｇ→１３５ｋｇ↑
　※最大重量想定１００ｋｇ→２００ｋｇに変更

Fig.8：実証試験装置イメージ図

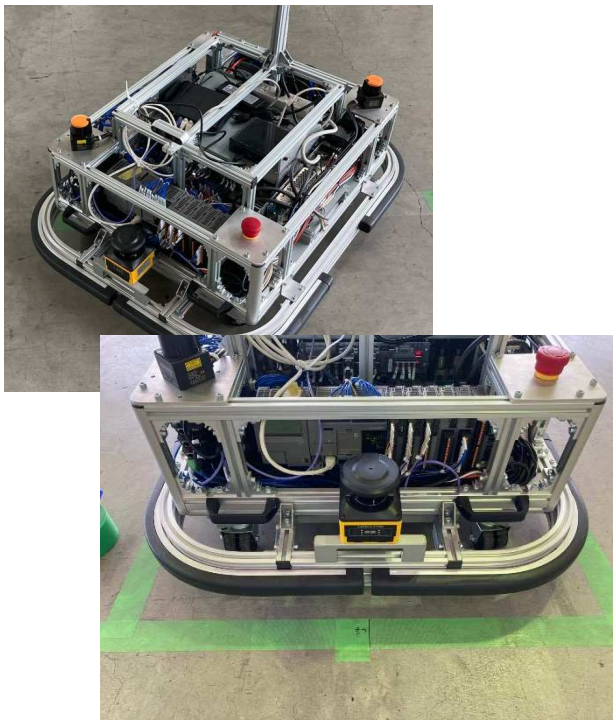


Fig.9：実際に製作した試験装置

## D．考察

初年度と同様に安全機能の実証手順開発には、先ずは適切なリスクアセスメントの実践が不可欠であると考えます。しかし、従来のリスクアセスメントでは専門家や経験豊富な人材の支援が無ければリスク低減の妥当性を検証する事は困難で、危険源の同定漏れや保護方策に対するリスク低減の評価が不適切になりがちと考えられました。前提条件や様々な情報をリスクアセスメント時点に準備する事で後の３ステップメソッドによる保護方策検討からの反復的なリスク低減プロセスを短縮出来たと共にリスクアセスメントを実践する者の能力差の影響を少なく出来たと考えられます。また、リスクアセスメント段階で評価に必要な測定ポイントをリストアップする事で装置の構想・設計段階でリスク低減方策の基準が明確になり安全機能の要求水準に対するバラつきや対策の漏れ・抜け防止に繋がると考えます。

## E．結論

初年度にも同じ結論にしていますが、実際に実証試験を開始すると、尚更に事前の資料準備や前提条件の整理の重要性を感じました。後工程（我々の業界では社内の部署間からエンドユーザーまで含めて言います）へ必要な情報を展開する事で、適切なリスクアセスメントを実践するための様々な効果が得られます。また、規格・規定を確認する事で機能安全の要求水準が明確になり評価ポイントを絞り込む事が出来、妥当

性の評価の正確性が向上する。評価の内容、結果についてのまとめは最終年度に実施しますが、特定の装置に限定し必要資料をセット化する事は有効な手段と考えます。

但し、リスクアセスメント実施段階での問題点も同時に浮き彫りになり、全て改善するには至らない。これは、通常の他の装置でも同じ事ですが、今回の取り組みでも、メーカーに相当する技術部門とシステム・インテグレータに相当する営業部門（多少語弊は有るが、通常業務でユーザー（客先）と一番密接関係にある事から、この位置付けとした）、エンドユーザーにあたる製造部門（実証試験を行う場所に一番関与するため）では、評価に対する印象が異なり特にエンドユーザー目線では、どうしても安全面に対する各方策への疑いが晴れない部分も残った。計測・確認が可能と思われる部分については前述したリスクアセスメントセット中の「⑥評価に必要な測定ポイントリスト」に記載され、実証試験の対象として扱う事となったが、本研究では実証（精査）の対象外としている、最終的に「使用上の情報提供によるリスク低減」となった部分については議論が収まらなかった。確認すべきガイドラインが明確になっていないためだ。これについては、リスクアセスメントとリスク低減の手順とは別に其々の立場の者が協力して安全を確保するためのガイドラインなどの策定が望まれる。また、リスクアセスメントは各部門独立での実施と共同での実施の場を別に設けたが、各部門によるリスクアセスメント実施後の意見で、前述した準備資料記載の内容について、結局高い専門性や知識を必要とされ、場合によっては危険源の同定漏れや誤認識による保護方策実施の評価に妥当性を損なう結果となるのではという懸念が示された。また、適切な機能安全を確保するための機器や構成を有すれば自ずと装置のコストは上昇するため、社会実装を考えた場合に現実的かどうかという声も上がった。勿論、安全はコストに優先されるべき事は各位十分に理解しているが、法的な制約が無い以上、コストを抑えた方策を優先したいという意見が根強かった。結局、様々な前提条件や資料を準備しても、各規格の内容は勿論、SIL に関連して「FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) 」や「HFT (Hardware Failure Tolerance)」、「SFF (Safe Failure Fraction)」といった知識も必要になって来る。また、制御設計者以外には「この機器やシステム構成はPLd、Cat.3、SIL3 だから安全」と言っても直ぐに疑念が解消される訳ではなかった。私自身や研究分担者、一部のメンバーは本研究計画以前から機械安全実務に対して日本認証株式会社が提唱する「セーフティアセッサ資格」取得に向け一定の知識習得は進めているが、リスクアセスメントに参加する者、設備導入を決定する経営陣についても一定の知識習得を推進して頂く必要性は高いと感じた。結論としては、メーカー、システム・インテグレータ、ユーザーの協力・協調無くして安全は担保出来ず、その為には装置自体に関する規格・規定及び法令の整備やガイドラインの策定については勿論だが、各レベル、各立場において適切な資格制度や特別教育などの整備も必要と考えます。

今回の研究目的では無いが、リスクアセスメントシートの標準化も重要な手段と考えます。また、産業用の設備を工場へ導入する際に、一部の業界ではリスクアセスメントシートをユーザーから提示され、方策や規格適用状況をメーカーが記入し提出が必須化されて来ています。当然、方策の内容はコストにも反映されるため、見積り段階で許容できるレベルが協議されます。実証手順を更に機械的に且つ数学的に実施出来ればとも考えますが、様々な業態・エンドユーザーの知見差等を考えると、市販レベルの装置についても共通化されたリスクアセスメントシートや機能安全チェックシート等の、取扱説明書への添付等が望ましいのではと考えます。

## F．健康危険情報

報告事項無し

## G．研究発表

1．論文発表

該当無し

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