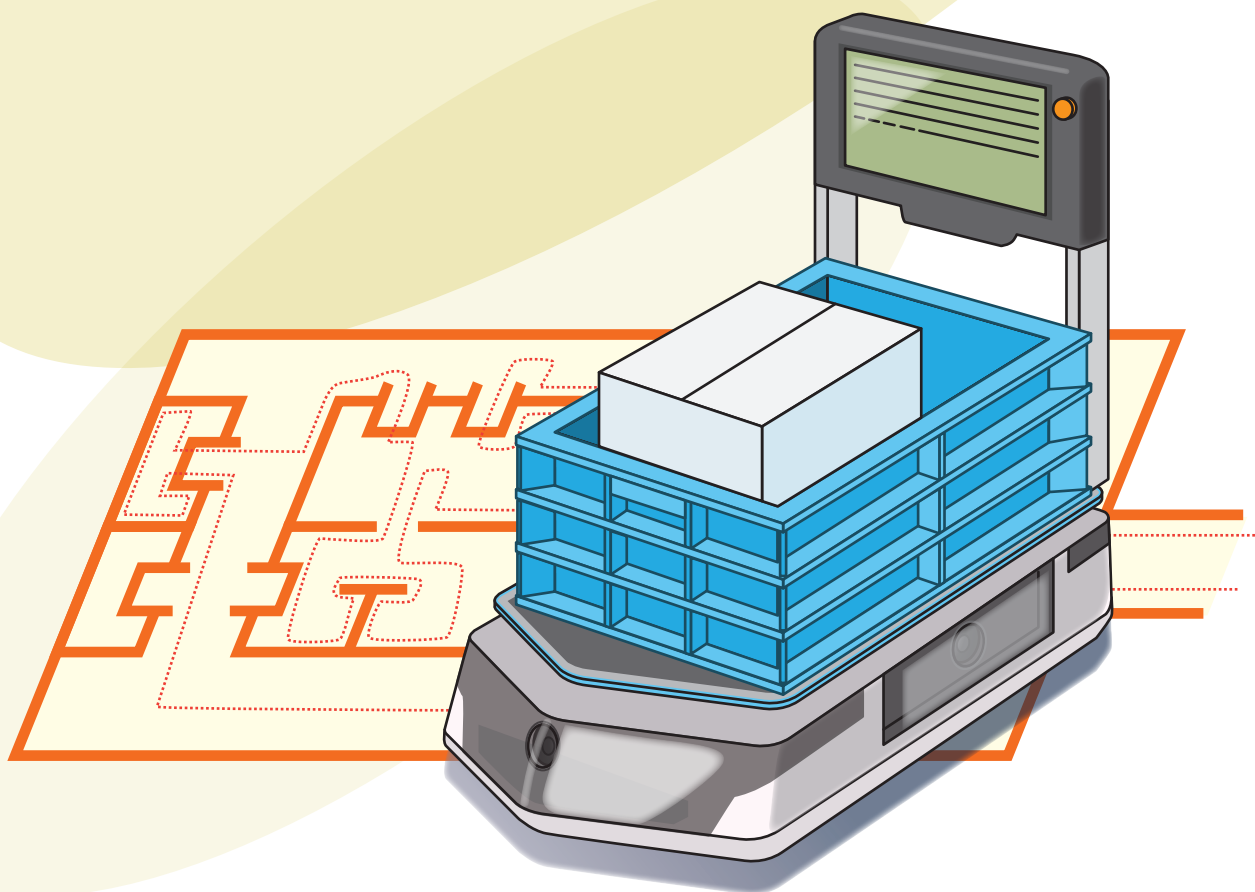


自律走行台車(AMR)の安全化と 実証試験プロトコル

—関係者が知っておくべきAMRの安全確保の手順—



中央労働災害防止協会

令和2年度厚生労働省委託

技術革新に対応した機械設備の安全対策の推進事業

自走自律制御機械の 安全方策の確立に向けて

近年、自動走行など自律的に作業を行う機械（以下「自走自律制御機械」といいます。）の産業現場への導入に向けた開発が進んでいます。

自走自律制御機械の一つに自律走行台車があります。従来の無人搬送車が床面等に埋め込まれた電線等により誘導されるのに対し、LiDAR (Light Detection and Ranging)、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 等の新たな技術により、自己位置を把握したり、周辺の地図を生成したりして、目的地まで自律的に移動することができる機械です。そのため、従来の無人搬送車がAGV (Automatic Guided Vehicle) と呼ばれるのに対し、自律走行台車は AMR (Autonomous Mobile Robot) とも呼ばれます。

LiDAR : Light Detection and Ranging

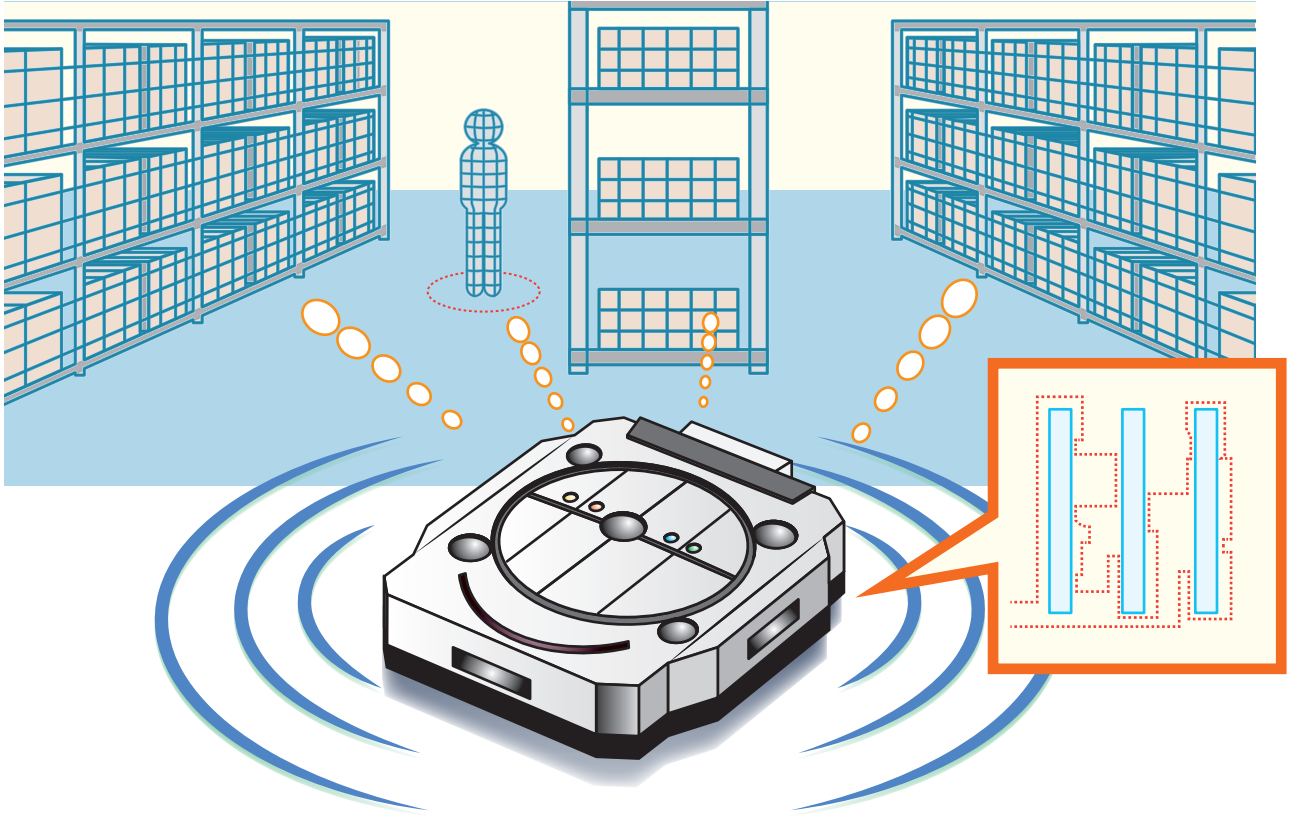
レーザーを、方向を変えながら、パルス状に照射し、物体に反射されて返ってくるまでの時間から対象物までの距離、方向などを測定するセンサ。Laser Range Finder と呼ばれる。
(JIS D6801:2019「無人搬送車システムに関する用語」参照)

SLAM : Simultaneous Localization and Mapping

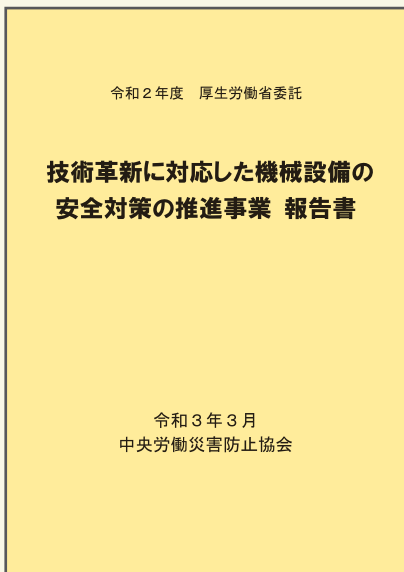
自己位置確定方法の一つ。壁や柱などの表面までの距離を LiDAR やカメラで計測し、周辺の環境地図を作成するとともに、環境地図上の自己位置を推定するシステム。
(JIS D6801:2019「無人搬送車システムに関する用語」参照)

AMR では、前後、左右、斜めなど自由に走行できる「メカナムホイール」や「オムニホイール」などの車輪を採用しているのもあるのが特徴の一つです。

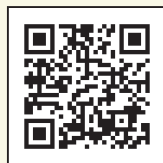
自律走行台車においては、走行経路に障害物を発見したときにその障害物を避けて通る、又はその場で停止する、などの機能があります。従来の機械の安全化では、機械の本来機能のための制御と安全のための制御機能を分離することが原則ですが、自律走行台車の障害物を避けて通る等の機能は、機械の本来機能であるとともに安全のための機能であることを考えると、その原則が適用できない場合があることを考慮する必要があります。



本リーフレットでは、自律走行台車を例に、自走自律制御機械の設計・製造事業者や使用事業者が、その安全機能についての実証試験のプロトコルを作成する際に参照していただけるよう、その留意点を示しています。



なお、本リーフレットは、あくまで概要のみ示すものであり、詳細については厚生労働省の Web サイト (<https://www.mhlw.go.jp/index.html>) に掲載予定の「令和2年度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」を参照して下さい。報告書に関するお問合せは、中央労働災害防止協会技術支援部までご連絡ください。(連絡先は最終ページを参照ください)



◀ 厚生労働省 Web サイト
<https://www.mhlw.go.jp/index.html>

自律走行台車の安全化と 実証試験プロトコル

自律走行台車 (AMR) の安全性を確保するには、リスクアセスメントに基づいた安全方策の検討とその妥当性の確認とからなる検証が必要です。

この検証の一環として行う実証試験の手続き（として試験方法を順序立てたもの）が、実証試験プロトコルです。

実証試験プロトコルの作成手順は以下のとおりです。

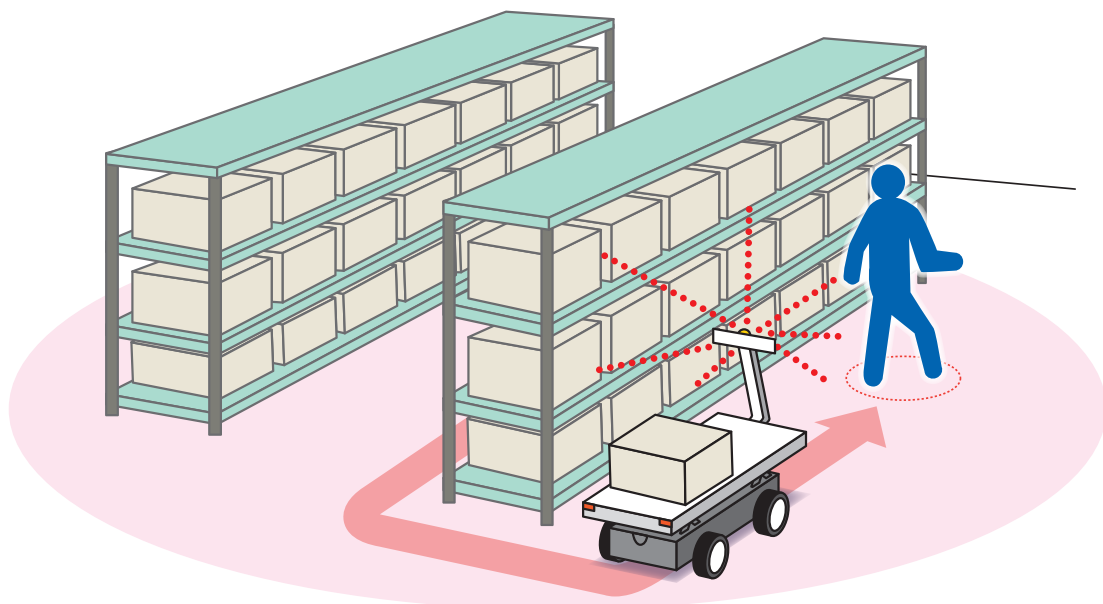
実証試験プロトコルの作成手順

1. 対象とするシステムの仕様及び使用環境を正確に記述する。
2. システムに対してリスクアセスメントを行う。
3. 危険源に対する保護方策（安全対策 *1）を策定する。
4. 保護方策の安全機能が正しく働くかを検証するための実証試験プロトコルを作成する。

*1：いわゆる安全装置の設置など

本リーフレットでは実証試験プロトコルを例示しますが、これは、AMR（を含むシステム）の仕様及び使用環境を想定するとともに、対象とする危険源も限定して作成したものです。例示した結果が唯一ではなく、また完全な事例でもないことに注意して下さい。

今回例示するのは、AMR を含む、薬品のロジスティックセンターでのピッキングシステムです（下図参照）。



以下に示すリスクアセスメント及び保護方策の例は、ISO 3691-4「無人搬送車及びシステム—安全要求事項及び検証」 附属書 B の危険源リストに基づき実施されたものの一部となります。

リスクアセスメント及び保護方策の例

危険源のひどさ(F)	ひどさの程度	保護方策の確実性のレベル	保護方策の確実性のレベル									リスク	評価基準	リスク対応方針	
			K1			K2			K3						
S1	軽微 (応急処置のみ、業務影響わずか)	F1	月に1回未満	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	I	甚微	適切に保護されたレベルであり、新たな保護方策は不要
S2	軽微 (治療を要す、不本、業務影響軽微)	F2	月に1回以上、月に1回未満	I	I	I	II	II	II	III	III	III	II	軽微	再発防止では許容可能なレベルとして、ユーザーに管理的方法の実施等の、機械危険情報を提供する
S3	軽微 (休業、いつか業務停業)	F3	毎日	II	II	II	III	III	III	IV	IV	IV	III	中程度	許容可能なレベル。残存の技術レベルで減り可能な危険源のリスクを減らして、更に必要な場合は、ユーザーと協議して使用する機会もある
S4	重大 (死亡、重い後遺症、業務停業不能)	F3	毎日	III	III	III	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	重大	許容可能なレベル。このままではユーザーには保護できない

識別番号	危険源 (項目番号はISO 3691-4 附属書Bの表B.1による) ただし、表B.1には記載がない	危険源が発生する状況/危険状態/起こりうる状況 (初期)	危険源/起こりうる状況 (結果)	補正事項/発生する状況など	危険源のひどさ (S1-S4)	発生頻度 (F1-F3)	保護方策の確実性のレベル (K1-K3)	リスクレベル (1-7)	方策の要否	方策		方策実証		方策実証の検証	方策の適否の判断法	残存リスク	留意 (伊用適合性・安全確保の留意など)	
										保護方策	安全機能	保護方策	リスクレベル (1-7)					
1	運転エネルギー一喪失	遠征運転時に先導車が立ち止まる	前方先導者に追突する		S2	F3	K3	Ⅲ	要	遠征用センサとは独立した遠征方向を監視する安全動作のレーザーキャパを取り付ける	50m以内に近づいたら停止動作を開始する。人の30m以内に接近しない	S2	F3	K1	Ⅱ	ユーザに注意情報を提供する。 機能情報をユーザーに提供する	マニピュレータを引く距離等で2m/秒で移動し、自走時には遠征走行させる。 * 機能異常は最大減速による。 * フロア状況は基本仕様による。 * 遠征用マニピュレータの距離30cm以上で停止する。ばいばい。 先導者を離れたダメージ人形を用い、最大減速速度での遠征運転中に立ち止まった状態を監視し、停車位置とダメージ人形の距離が安全マージンとして定めた値以上であることを示す	ISO 4196-3適合センサを使用すればほぼ保証可能。 * センサの検知できない障害物 (水平2Dセンサが探さずばいばい) による危険は許容可能なレベルで減らして使用する機会もある
2	運転エネルギー一喪失	遠征運転時に先導車が立ち止まる	前方先導者に追突する	前方から太陽光が差し込んでいる	S2	F3	K3	Ⅲ	要	* 太陽光の直射に影響されない障害物検知センサにより障害物を検知し、遠征進行制御にかかわらず衝突の恐れがある場合は停止するが、極めて低減率しかついで発生する	障害物検知センサ(レーザーセンサ)などおよびこれを用いた制御制動系を機能安全に準じて構築する。	S2	F3	K1	Ⅱ	機能情報をユーザーに提供する	上記試験を、全面に白色光源を照射して行う 前方から太陽光が差し込んでいる状態で、先導者を離れたダメージ人形を用い、最大減速速度での遠征運転中に立ち止まった状態を監視し、停車位置とダメージ人形の距離が安全マージンとして定めた値以上であることを示す	
3	運転エネルギー一喪失	遠征運転時に先導車が立ち止まる	前方先導者に追突する		S2	F3	K3	Ⅲ	要	遠征用センサとは独立した遠征方向を監視する安全動作のレーザーキャパを取り付ける	50m以内に近づいたら停止動作を開始する。人の30m以内に接近しない	S2	F3	K1	Ⅱ	ユーザに注意情報を提供する。 機能情報をユーザーに提供する	マニピュレータを引く距離等で2m/秒で移動し、自走時には遠征走行させる。 * 遠征用マニピュレータの距離30cm以上で停止する。ばいばい。 先導者を離れたダメージ人形を用い、最大減速速度での遠征運転中に立ち止まった状態を監視し、停車位置とダメージ人形の距離が安全マージンとして定めた値以上であることを示す	センサの検知できない障害物 (水平2Dセンサが探さずばいばい) による危険は許容可能なレベルで減らして使用する機会もある
4	運転エネルギー一喪失	遠征運転時に先導車が急に進行方向を変える	先導者を見失い、急な方向転換を行い、周囲の人に衝突する		S2	F3	K3	Ⅲ	要	(遠征用センサとは独立した)遠征方向を監視し、車失した(距離が危険に達した)ら一旦停止するよう設計する。	遠征目標を見失ったら、一旦停止する。	S2	F3	K1	Ⅱ	ユーザに注意情報を提供する。	* マニピュレータを引く距離等で2m/秒で移動し、自走時には遠征走行させる。 * 走行が一定になった後、マニピュレータを自走制御距離(一定)に近づいたら、マニピュレータを急に遠征方向で移動させる。 * 機能異常は最大減速による。 * 自走中はその場で停止する。 周囲の人を離れたダメージ人形を衝突可能な距離に近づけ、最小減速速度で進行中に停止可能な距離で先導者の遠征進行方向を停止させる。ダメージ人形との衝突を予防し、マニピュレータを引く距離等で2m/秒で移動し、自走時には遠征走行させる。	センサの検知できない障害物 (水平2Dセンサが探さずばいばい) による危険は許容可能なレベルで減らして使用する機会もある



自走自律制御機械の安全機能についての実証試験プロトコルの作成例

リスクアセスメントの結果に基づき策定した保護方策について、その適否を判定するための検証の一環として行う実証試験プロトコルの例を以下に示します。

これは、AMR が追従走行（作業者の後ろを追従して走行している場合）の例となりますが、その詳細及びほかの例については、報告書を参照して下さい。報告書では、AMR の動作機能の観点から、追従走行のほか、From-To 走行、死角、制御不具合を取り上げています。

追従走行での例

(1) 想定

薬品のロジスティックセンターの中で作業者の後ろを追従して走行している。この通常走行時の危険状態（原因）／危険事象（結果）の例として「目標となる棚が間近になるなどで追従走行時に先導者する作業者が立ち止まる、あるいは歩行速度が遅くなる。／前方先導者に追突する。」が考えられる。

(2) 実証試験プロトコルの例

以下の例は、(1) の想定の下でのものである。

試験1 書類確認 PLr*2 の選定

リスクアセスメントに対応して JIS B 9705-1 (ISO 13849-1) 附属書 A のリスクグラフ法あるいは適切な方法により PLr を選定していることを、関係書類（リスクアセスメント結果、要求パフォーマンス選定書）で確認する。適用規格がある場合には、規定の PLr を満たしていることを確認する。

試験2 書類確認 制御システムの安全関連部（例：レーザーキャナーとコンタクタ）の設計と PL の妥当性

次の事項などを書類（回路図、機能ブロック図、計算書など）で確認する。その際、JIS B 9705-2 (ISO 13849-2) を参照する。

- 安全関連部が機能制御部から独立している。
- 適切なカテゴリーを選定している。
- カテゴリーに対応する指定アーキテクチャーとなっている。
- 計算で使用する数値、ポイントなどは適切である。
- 計算結果から、設計した制御システムの安全関連部の PL が PLr 以上となっている。

試験3 停止試験

周囲には固定物（棚、壁など）がない状況で行う。

マネキン（通常使われる色の作業服を着用させる。）を 2m/s で移動させ（ひもで牽く等）、台車を追従走行で追従させる。

定常走行状態になったら、マネキンを停止させる。

マネキンにぶつからず停止すればよい。

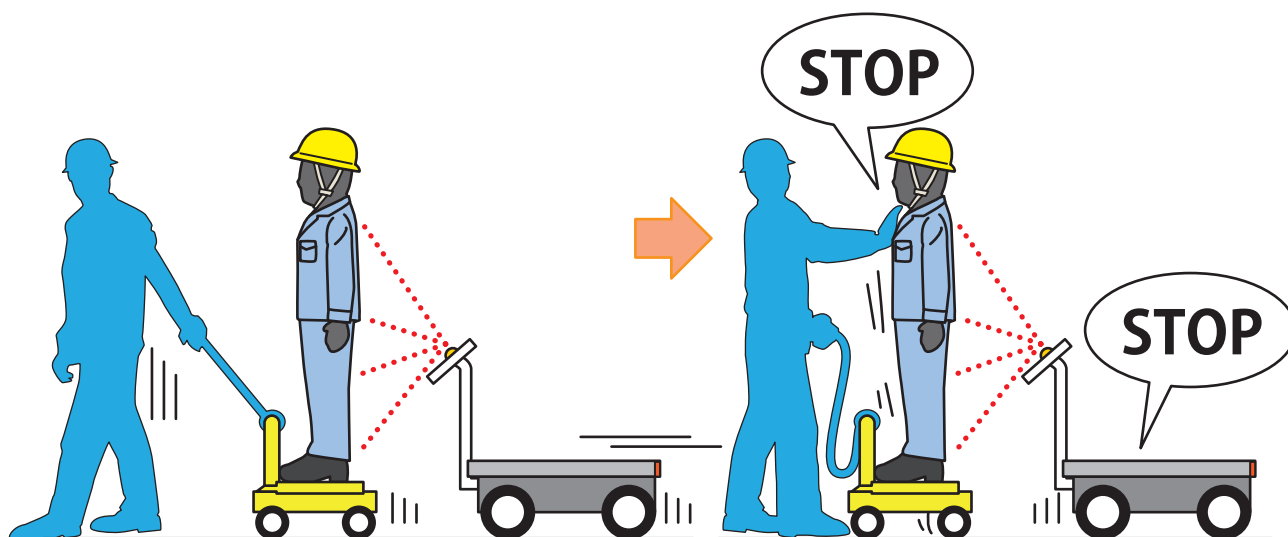
停止後にマネキンと台車の距離を計測し 30cm 以上あれば適とする。

*2：制御システムの安全関連部が有すべき信頼性

実証試験プロトコル作成に当たっての留意点

左記の実証試験プロトコルの作成例は、AMR（を含むシステム）の仕様及び使用環境（薬品のロジスティックセンターでのピッキングシステムとしての使用）を想定するとともに、対象とする危険源も限定するなど、一定の条件の下でのケーススタディーですが、このケーススタディーも踏まえ、実証試験プロトコル作成に当たっては、以下の留意が必要です。

- 実証試験プロトコルでは、試験の手順だけではなく、具体的な判断基準を提示します。
- 左記ケーススタディーは一定条件下でのものであり、条件が異なれば、リスクアセスメントの結果及び保護方策も異なります。保護方策が異なれば、対応する実証試験プロトコルも異なります。
- 機能を果たすための設計、制限の決定、リスクアセスメント、保護方策の策定、実証試験プロトコルの決定、妥当性確認（実証試験の実施）は一連の流れですが、各段階において再評価等の必要が生じた場合には、前の段階に戻ります。
- 汎用品として製造された AMR を使用する場合には、ユーザー（及びシステムインテグレータ）において、リスクアセスメントから実証試験プロトコル作成、妥当性確認までを行います。



参考文献

自律走行台車の安全化に関連し以下のような文献が参考になります。JIS 規格や ISO 規格については、一般財団法人日本規格協会から入手することが可能です。

- 1) ISO 3691-4 : 2020 “Industrial trucks - Safety requirements and verification - Part 4: Driverless industrial trucks and their systems”（一般社団法人日本産業車両協会が中心となって令和3年度に JIS 化の作業が始まる予定です。JIS 化ののちは、下記 3）の規格から差し替えられる予定です。）
- 2) JIS D 6801 : 2019 “無人搬送車システムに関する用語”
- 3) JIS D 6802 : 1997 “無人搬送車システム-安全通則”
- 4) JIS B 8433-1 : 2015 “ロボット及びロボティックデバイス-産業用ロボットのための安全要求事項-第 1 部：ロボット”
- 5) JIS B 8433-2 : 2015 “ロボット及びロボティックデバイス-産業用ロボットのための安全要求事項-第 2 部：ロボットシステム及びインテグレーション” 附属書 E（協働ロボットの用途の概念）
- 6) JIS B 8446-1 : 2016 “生活支援ロボットの安全要求事項-第 1 部：マニピュレータを備えない静的安定移動動作業型ロボット”
- 7) JIS B 9700 : 2013 “機械類の安全性-設計のための一般原則-リスクアセスメント及びリスク低減”
- 8) JIS B 9705-1 : 2019 “機械類の安全性-制御システムの安全関連部-第 1 部：設計のための一般原則”
- 9) JIS B 9705-2 : 2019 “機械類の安全性-制御システムの安全関連部-第 2 部：妥当性確認”
- 10) JIS B 9961 : 2008 “機械類の安全性-安全関連の電気・電子・プログラマブル電子制御システムの機能安全”

令和2年度 厚生労働省委託

技術革新に対応した機械設備の安全対策の推進事業

中央労働災害防止協会技術支援部

TEL

03-3452-6375

（直通）

Email

sidouka@jisha.or.jp