

全方向移動自律走行ロボットの安全速度監視モジュール

Safety Speed Monitor Module for Omni-directional Autonomous Mobile Robot

○正 貞本 敦史 (東芝) 正 山本 大介 (東芝)
高橋 宏昌 (東芝)

Atsushi SADAMOTO, Daisuke YAMAMOTO, Hiromasa TAKAHASHI
TOSHIBA CORPORATION, atsushi.sadamoto@toshiba.co.jp

The safety measures of the omni-directional autonomous mobile robots for work support have been subjects. Authors developed the speed monitor module which can reduce a collision risk with human and other safety-related objects by adding to a robot's control system. The developed speed monitor module calculates a robot's running speed by detecting the number of rotations of four wheels of the omni-directional mobile robots, and outputs the signal for protection area selection of a safety laser scanner according to speed. The performance level of the module according to ISO 13849-1 was evaluated, and also the improvement of a performance level was considered.

Key Words: Safety, Autonomous Mobile Robot, Service Robot, Speed Monitor, Omni-directional

1. 緒言

労働力不足を背景に、物流や製造の現場でロボット活用が始まっている。全自動倉庫などロボットが稼働することを前提に設計された空間と異なり、人が作業するために設計された空間でのロボット導入には、多くの課題がある。その一つが安全性である。柵で囲われて稼働する産業用ロボットとは異なり、人と共存する環境で使用されるロボットの安全性をその利便性を損なわずに確保することが技術課題となっている。筆者らは全方向移動自律走行ロボットの搬送対象物や周囲物体への近接動作と、人との衝突リスク低減を両立させるべく、セーフティレーザスキャナの防護エリアを速度に応じて切り替えるための速度監視モジュールを開発した。

しい課題が残ることが分かった。作業の効率化の観点で、ロボットの走行速度は高速化が求められる。そのため、実用性を阻害しない安全対策が必要となっている。

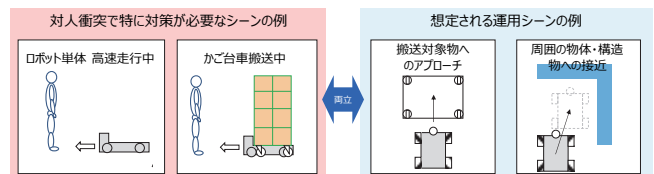


Fig 2 Collision Avoidance and Approach to Objects

2. 人共存環境で自律走行ロボット

自律走行ロボットの実例として、東芝が開発中の物流台車搬送ロボット[1]を例にあげる。このロボットは物流倉庫内でのカゴ台車を自動搬送するもので、その機構および制御系には次のような特徴がある。

- ・ 4輪メカナムホイールを使用した全方向移動機構
- ・ SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)による自律移動制御
- ・ 制御系に ROS など OSS (オープンソースソフトウェア)を活用

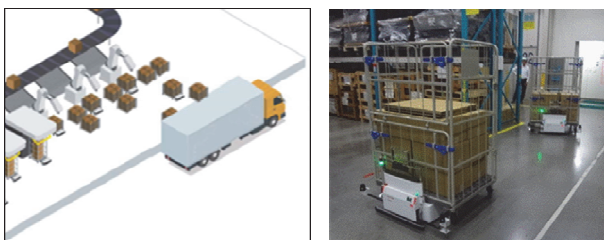


Fig 1 Autonomous Mobile Robots in the Warehouse

3. 物流かご台車搬送ロボットのリスク低減

3.1 リスクアセスメント

使用される環境でのロボットの立ち上げ、稼働、立ち下げ、メンテナンスについて文献[2]を参考にしてリスクアセスメントを行い、約 180 件のリスクをリストアップした。そのうち、挟まれや鋭利角部での怪我の防止などの機械安全や感電や電気火災の防止などの電気安全など一般的な対策の他に、走行中のロボットと人の衝突防止については図 2 に示す難

3.2 衝突リスク低減方針

衝突リスクの大小がロボットの走行速度に依存することに着目し、具体的な速度の基準値について検討した。製造ライン等で使用される無人搬送車の安全基準について、中央労働災害防止協会が 1990 年に発行した無人搬送車安全対策ガイドラインの解説に、走行速度は 60m/min を最高速度とすることが書かれ、産業用無人搬送車 (AGV) の業界団体によってこれを規制として守られてきた。一方、国際規格では、2012 年に発行された無人搬送車に関する米国規格 ANSI/ITSDF B56.5、さらに 2018 年に発行された ISO 規格原案 ISO/DIS 3691-4:2018[3]は、非接触障害物検知機能の有効/無効の速度条件に 0.3 m/s という速度が採用されている。このことは、速度 0.3 m/s を境にして、対人リスクに有意差の存在を公的に示していると解釈できる。

そこで、この走行速度 0.3 m/s を一つの閾値として図 3 のリスク低減方針を提示する。

①移動速度が0.3 m/s未満の場合 ・安全速度と考えられる (運動エネルギー、人の回避行動) ・警告音、光、接触バンパー、鋭利な角なし、クッション 取扱い説明、運用管理策 でリスク低減	速度監視 による裏づけ
②移動速度が0.3 m/s以上の場合 ・セーフティレーザスキャナ による非接触障害物検知 ・防護エリアで障害物を検知したら電源遮断による停止	速度監視 による裏づけ
③移動速度が1.2 m/s以上の場合 上記②に加え、走行エリアへの人の立ち入りを制限する技術的対策が必要 (柵で囲う、可動式ガード、RFIDエリア進入管理 etc)	

Fig.3 Collision Risk Reduction Policy

4. 速度監視モジュール

4.1 安全関連部の設計

図3のリスク低減方針に従って、速度に応じてセーフティレーザスキャナの保護機能を切り替えるシステムを想定し、その状態遷移を図4に記す。

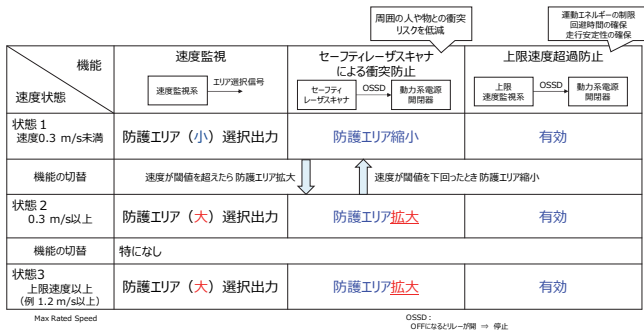


Fig.4 State Diagram of Safety Related Parts

前述のリスク低減方針と状態遷移を実現するため、搬送ロボットの通常制御系に対して、速度監視モジュール、セーフティレーザスキャナを主な構成要素とする安全関連部を追加する。そのシステムの構成図を図5に示す。ロボットの主機能を制御する通常制御系(非安全系)の制御ソフトは主にROSを使用している。これに対して図中の黄色枠部分が追加する安全関連部である。安全関連部の主要素である速度監視モジュールは、4つの車輪に取り付けられているエンコーダからの信号を受けて、車輪回転数からロボット走行速度を計算し、速度に応じた防護エリア選択信号をセーフティレーザスキャナに対して出力する。

セーフティレーザスキャナは、あらかじめ設定した防護エリア内に物体を検出するとリレーを遮断する信号(図中OSSD)をOFFとする機能を有しており、安全認証取得済みで、防護エリア切り替え機能があるものを使用する。

車輪回転を検出するエンコーダは、安全機能の信頼性の観点から、モータ制御に用いるものとは別のものを設けることが望ましい。しかし、コスト増加の要因になり、取り付け方法や実装スペース上も難しい問題があるため、本研究では、モータ制御に用いるエンコーダからの信号を分岐して取得することとする。

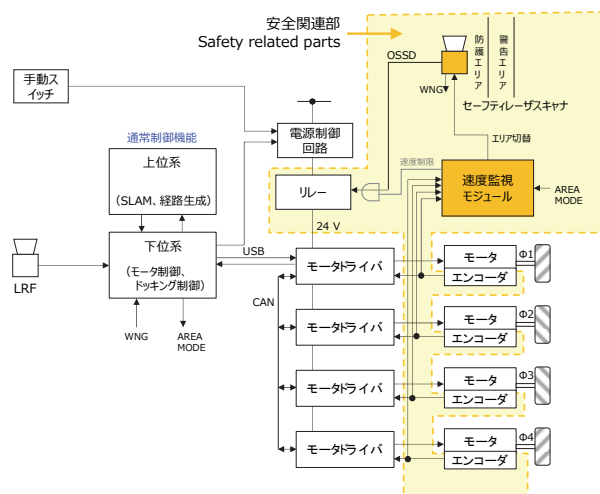


Fig.5 Block Diagram of Robot Control System

4.2 パフォーマンスレベルPLの算定

安全関連部は、安全認証を取得していない一般部品を多用するが、一定の安全性能を有することを示すため、安全関連

部のパフォーマンスレベル(PL) [4]を算定する。

構成要素をInput(入力)、Logic(論理部)、Output(出力部)に整理すると図6ようになる。



Fig.6 Architecture of Safety Related I-L-O Channel

図6の系には、まずは故障検知等の試験機器は設けず、そのため障害に対する耐性を表すカテゴリはカテゴリB(基本カテゴリ)となる。カテゴリBでは、PLの算定に必要な数値は平均危険側故障時間MTTFdである。各構成要素の故障率から系のMTTFdを計算したところ、14.5年となった。このMTTFd値から、ISO 13849-1 表K.1を参照してPLはbと求まった。

JIS B 9705-1:2011 (ISO 13849-1:2006) 表K.1 からの抜粋

各チャンネルのMTTFd [年]	危険側故障の平均確率(1/h)及び対応の パフォーマンスレベル PL	
	カテゴリ B	DCavg="なし"
中略		
10	1.14×10 ⁻⁵	a
11	1.04×10 ⁻⁵	a
12	9.51×10 ⁻⁶	b
13	8.78×10 ⁻⁶	b
14.5年	7.61×10 ⁻⁶	b
16	7.13×10 ⁻⁶	b
18	6.34×10 ⁻⁶	b

Fig.7 Extract from ISO 13849-1 Table K.1

4.2 速度監視モジュールの製作

次の1)から5)を主機能として速度監視モジュールを製作した。

- 1) 4個のエンコーダの回転速度を検出する
 - 2) ロボットの運動学計算をする
 - 3) 速度閾値に対する条件判定をする
 - 4) セーフティレーザスキャナに対してエリア切り替え信号を出力する
 - 5) 3)で上限速度に達した場合は停止信号を出す。
- さらに、これらの機能を実現する手段に求められる要件に、
- 6) 接続可能なエンコーダは複数の出力タイプに対応する
 - 7) 小型、低コスト

を加えた。上記2)の運動学計算は図8の座標系において式(1)にて行う。

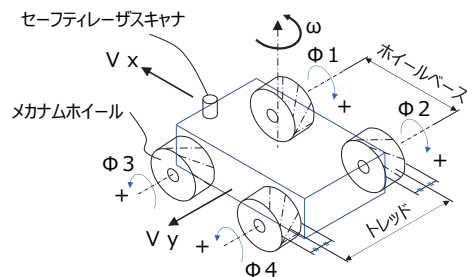


Fig.8 Coordinate system of the Omni-directional Robot

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega \end{pmatrix} = R_w \cdot A \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $\phi_1 \sim \phi_4$ は車輪の回転速度、 V_x, V_y, ω はそれぞれ

ロボットの前進方向並進速度、横方向並進速度、旋回角速度、 R_w は車輪半径、 A は車輪配置間隔（ホイールベースとトレッド）から決まる 3×4 行列である。

汎用 32bit マイコンと信号レベル変換回路を組み合わせ、主機能の動作はマイコンにプログラムを書き込むことによって実現した。

試作した速度監視モジュールを図 9 に、主な仕様を表 1 に示す。



Fig.9 Safety Speed Monitor Module

Table 1 Specification of Speed Monitor Module

項目	仕様	備考
対応ロータリーエンコーダ	RS-422 ラインドライバ出力タイプ NPNオープンコレクタ出力タイプ NPN電圧出力タイプ トータムホール(プッシュプル)出力 上記のいずれかを4個接続可能	エンコーダへの電源供給可能 (5V, 12V, 24V選択)
安全系出力	セーフティレーザスキャナエリア切替用出力(最大32通り) ミューティング出力 OSSD(リレー駆動出力)2系統	セーフティレーザスキャナと組み合わせた使用を想定
汎用入出力	汎用デジタル入力 4 bit 汎用デジタル出力 4 bit シリアル(UART)出力	通常制御(非安全)系とのインターフェースを想定
速度判定運動学	4輪メカナムホイール順運動学	パラメータはファームウェアとしてマイコン書き込み
寸法	95 mm × 60 mm × 25 mm	突起含まず
質量	120 g	
電源	DC 24 V 0.2 A	

製作した速度監視モジュールをロボットに搭載し、走行速度に応じてセーフティレーザスキャナの防護エリアが切り替わる機能を確認した。動作のイメージ図を図 10 に示す。

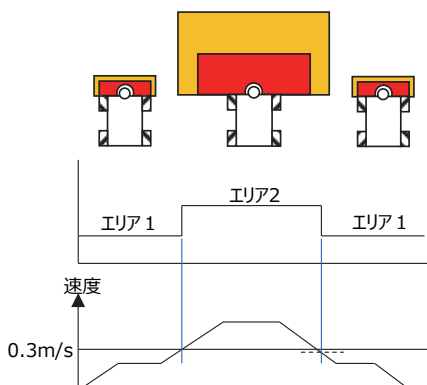


Fig.10 Behavior Image

5. パフォーマンスレベル(PL)の改善

上述した設計では、アーキテクチャの障害に対する耐性を表すカテゴリが B であるので、故障率を最大限改善しても

PL は b が上限となる。対象とする危険事象が後遺症を残すものの以上の重篤な危害を生じさせるものの場合、PL は c 以上が求められる。そこでアーキテクチャの改善のため、マイコンウォッチドッグの追加と、車輪回転数検出異常検知を実装した。ここでは後者の回転数異常検知について説明する。

メカナムホイール 4 輪駆動の全方向移動機構で、4 輪の車輪回転数 $\phi 1 \sim \phi 4$ に式(10)に示す関係がある。(座標系は図 8 を参照)

$$\phi 1 - \phi 2 - \phi 3 + \phi 4 = 0 \quad (10)$$

すなわち、検出した速度 $\phi 1 \sim \phi 4$ の値を用いて、

$$|\phi 1 - \phi 2 - \phi 3 + \phi 4| < \xi \quad (11)$$

ある値 ξ を閾値として、式(11)を条件判定式に加えることで、4 つの車輪のうち 1 軸のエンコーダ故障、駆動系の異常動作を検出することができる。

マイコンウォッチドッグとエンコーダ異常検知を実装することで、カテゴリ 2、PL c が達成できる見込みを得ている。

6. 結言

人共存環境で走行する全方向移動自律走行ロボットの衝突リスク低減のため、走行速度に応じてセーフティレーザスキャナの防護エリアを拡大する機能を有する安全関連部を設計した。設計した安全関連部の主要素となる速度監視モジュールを製作し、物流かご台車搬送ロボット試作機に搭載して、速度に応じた防護エリア切り替え動作を確認した。今後は、製品開発フェイズへの移行に向けてソフトウェアを含めた開発工程の機能安全対応が課題である。

謝辞

本内容の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業:ロボット活用型市場化適用技術開発プロジェクト「汎用自律走行ロボットプラットフォームの研究開発(東芝)」の結果、得られたものです。

同プロジェクトソフトウェア P F コンソーシアムの(一財)日本品質保証機構、(国研)産業技術総合研究所との連携活動にて助言をいただきました。

ロボット革命イニシアティブ協議会(RRI) WG3 ロボット安全設計開発調査検討委員会委員各位からご意見をいただきました。

参考文献

- [1] 東芝レビュー, No.4 (2019)
- [2] JIS B 8445-1 (ISO 13482) ロボット及びロボティックデバイス—生活支援ロボットの安全要求事項
- [3] ISO/DIS 3691-4:2018 Industrial trucks-Safety requirements and verification- Part 4: Driverless industrial trucks and their systems
- [4] JIS B 9705-1 (ISO 13849-1) 機械類の安全性—制御システムの安全関連部