

ミリ波センサによる可搬型安全支援インタフェースの開発： 協調安全／Safety2.0 への展望

滝 将太^{*1} 川添 大介^{*2} 榎本 直之^{*3} 角田 輝明^{*3} 稲田 宏治^{*3}

Development of a Portable Safety Support Interface Using Rader Sensors: Perspectives on Collaborative Safety / Safety 2.0

Shota Taki^{*1}, Daisuke Kawazoe^{*2}, Naoyuki Enomoto^{*3}, Teruaki Sumita^{*3} and Koji Inada^{*3}

Abstract - In recent years, the integration of ICT into mobile machinery such as aerial work platforms and forklifts has advanced rapidly, enhancing safety and operational efficiency. However, retrofitting existing machines with ICT devices poses challenges, including complex wiring, control system modifications, and power supply issues. To address these, we developed a compact, battery-powered sensing system and a wireless interface for integrated monitoring. This paper outlines the system and its applications and explores its potential in advancing collaborative safety under the Safety 2.0 framework.

Keywords: Radar sensors, Wireless monitoring, Safety system, Safety 2.0 and ANSHIN

1. はじめに

近年、製造業や建設業をはじめとする様々な現場において、高所作業車やフォークリフトなどの移動性を備えた機械の ICT（情報通信技術）化が急速に進展している^[1]。これらの機械に ICT を導入することで、稼働状況のリアルタイム監視や遠隔制御、安全管理の高度化が可能となり、現場の効率化や作業者の安全向上に寄与している。加えて、そうした現場においては、新たな安全思想である「協調安全／Safety2.0」^{[2][3][4][5]}の導入も進みつつある。

しかしながら、既存の機械設備に ICT 機器を後付け（レトロフィット）で導入する際には、多くの技術的課題が存在する。特に、既存機械の内部制御システムとの連携において、センサや通信機器の設置に伴う大規模な配線工事や制御系統の改造が必要となることが多い。このため、導入コストが増大し、適用をためらうケースが散見される。また、電源確保の困難さも課題の一つであり、電源の引き回しが困難な機械や場所では ICT 機器の

安定稼働が阻害される場合も少なくない。

以上の課題を踏まえ、我々は蓄電機能を備えた小型のセンシング機器を開発するとともに、複数のセンシング情報をワイヤレスで統合的にモニタリング可能なインタフェースを構築した。本稿では、開発したシステムの概要を示し、本システムが実現する安全／安心化の特性について期待される適用例とともに明らかにする。さらに、協調安全の観点から Safety 2.0 の適用可能性について検討する。

2. システム構成

図 1 に開発したシステム構成を示す。本システムは、物体の有無および距離を検知するセンシング部、蓄電機能と警告用ブザーを備えた電源／警告出力部、センサからの検知情報をワイヤレスに受信してディスプレイに表示するモニタ部の三要素から構成される。

センシング部と電源／警告出力部はケーブルで接続され、それぞれに付属する磁石によって機械のフレームやカバー等の金属部に固定可能な設計となっている（図 2）。これにより、工具を用いることなく迅速かつ容易に取り付け／取り外しが可能となり、設置場所や用途の変更にも柔軟に対応できる利便性を備えている。さらに、蓄電機能によって電源供給の制約を解消し、ワイヤレス通信を活用することで煩雑な配線作業を不要とするなど、既存の機械装置に対する後付け導入の簡便性と拡張性を重視している。

各部の詳細を次に述べる。

*1: IDEC(株) 国際標準化・協調安全 4 次元推進部

*2: IDEC ALPS Technologies (株) 製品戦略部

*3: IDEC(株) Wireless & Sensing 技術部

*1: International Standardization & Collaborative Safety Department, IDEC Corporation

*2: ALPS Technologies Product Strategy, IDEC ALPS Technologies Corporation

*3: Wireless & Sensing Technology Group, IDEC Corporation



図1 システム構成
Fig.1 System Configuration.



図2 磁石による取り付け
Fig.2 Mounting with Magnets.

2.1 センシング部

本システムのセンシング部には、ミリ波レーダーセンサを採用している（図3）。本センサは粉塵や水滴の影響を受けにくく、屋外における厳しい環境下でも安定した動作が可能である。レーダー方式は電波を用いるため、測定対象との間に軽微な障害物が存在しても安定的に距離を測定できるという特性を持ち、光学式のセンサ方式と比較して優れた耐環境性能を発揮する。

特に、建設現場や資材置場などでは、粉塵、降雨、さらには直射日光といった要因が測定精度に深刻な影響を及ぼすことが多い。レーザー距離センサや ToF (Time-of-Flight) カメラなどの光学式センサは、これらの環境下において測距精度が著しく低下しやすく、誤検出や検出不能といった課題が生じやすい。近年普及が進む AI カメラにおいても、可視光条件に強く依存するため、逆光、暗所、高輝度といった環境では認識精度の低下が避けられない。

これに対し、ミリ波レーダーセンサは高周波電波を使用することで、雨滴や粉塵による散乱の影響を抑制しつつ、対象物までの距離を安定して測定可能である。さらに、本センサは専用に開発された特殊な電波レンズによる一次元測距に特化しており、最小分解能 1 mm、最短測定周期 15 ms という高精度かつ高速なセンシング性能を実現している。これにより、屋外の過酷な環境下においても誤検出が少なく、堅牢で信頼性の高い距離計測が可能となり、建設機械などの可動機器に適した特性を備え



図3 センシング部詳細
Fig.3 Details of Sensing Part.

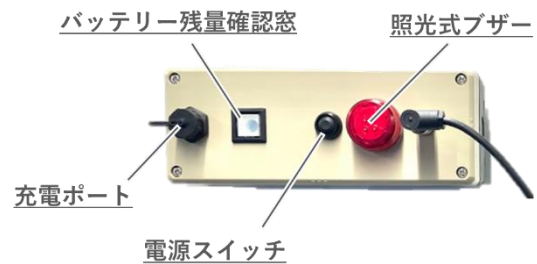


図4 電源/警告出力部詳細
Fig.4 Details of Power Supply and Warning Output.

ている。

加えて、本センサは送信アンテナおよび受信アンテナがそれぞれ 1 つずつのシンプルな構成を採用しており、三次元測位を行う多アンテナ方式のレーダーと比較して回路構成が簡素である。また、測定データの処理においても複雑な演算処理を必要としないため、全体として消費電力が小さく抑えられている。このような特性は、限られた電力資源での長時間稼働を可能にし、可搬性や省電力性が求められる現場用途において特に有用である。

2.2 電源/警告出力部

センシング部に安定した電力を供給するための電源装置として、バッテリーを内蔵した防水性の電源ボックスを開発した。本ボックスは、屋外や粉塵/湿気の多い環境下でも安全かつ安定して使用できる堅牢な筐体構造を採用しており、過酷な現場環境でも十分な耐候性と耐久性を備えている。

ボックスの外装面には、センサへの電源供給を個別に制御可能な電源スイッチ、センシング結果に応じて音と光による警告通知が可能な照光式ブザー、バッテリー残量の確認が容易な覗き窓、そして外部からの充電を可能とする充電ポートを搭載している（図4）。これらのインターフェースはすべて操作性に配慮して配置されており、手袋を着用した状態でも直感的な操作が可能である。

また、低消費電力のミリ波レーダーセンサに対し、十分な電力容量を持つバッテリーを搭載することで、長時間の連続稼働を可能としている。これにより、充電頻度



図5 測距情報による警告出力例

Fig.5 Example of Warning Output by Distance Measurement.

を大幅に低減し、安定的かつ継続的なシステム運用が実現される。

2.3 モニタ部

モニタ部は、センシングデータの可視化および警告出力を担う要素であり、本システムではこれを専用に開発したタブレット端末用アプリケーションによって実現している。ミリ波レーダーセンサとタブレット端末は無線接続されており、煩雑な配線作業を必要としないため、機器の設置に対する自由度と可搬性を高め、作業現場における運用の柔軟性向上に寄与している。

アプリケーションは、接続対象のセンサをユーザーが容易に選択／ペアリングできるインタフェースを備えており、選択されたセンサから送信される距離情報をリアルタイムに受信／表示することが可能である。表示インタフェースは視認性に配慮された設計となっており、作業員が即座に機械との距離を把握できるよう工夫されている。

さらに、アプリケーション内で設定できる距離の閾値に基づき、対象物が設定値に接近または離隔した際に、画面表示の色変化と警告音による通知を自動的に行う機能を備えている（図5）。これにより、作業員は視覚／聴覚の両面から即時に距離変化を認識でき、現場における注意喚起を確実に実施できる。

本アプリケーションは、最大4台までのセンサと同時に接続可能であり、複数箇所または複数機器に対する並列的なモニタリングに対応している（図6）。これにより、単一の端末で多面的な状況把握が可能となり、現場における省人化や業務効率の向上にも貢献する。

3. 期待される適用例

開発したシステムの代表的な適用例を図7に示し、各現場環境における課題に対して本システムがどのように寄与するかを明らかにする。

3.1 高所作業車の挟まれ事故防止／転倒防止

高所作業車は、建築、電気、通信分野をはじめとする多様な現場において広く使用されており、作業員は地上数



図6 4台接続表示例

Fig.6 Example of display with four Sensors.

メートルから十数メートルの高所で作業を行う。このような環境下では、作業バスケットと上部構造物との接触による挟まれ事故や、走行中に段差を乗り越えることによる転倒事故が重大なリスクとなっている。

従来、挟まれ事故の防止には、バスケット内部に単管パイプを垂直に設置する物理的なガード構造や、単管パイプの上端に接触式センサを取り付け、障害物との接触時に警報を発する方式が用いられてきた。しかしこの方法では、接触が起きた後にしか危険を検知できないうえ、物理的構造物の存在により作業空間が制限され、作業効率の低下を招くとともに、接触時には建物や機器の損傷、センサの破損、機械構造への負荷といった二次的な問題が生じる可能性も高い。また、転倒防止に関しては、車両の傾きを角度センサで検出する方法が採用されてきたが、この手法はすでに車両が傾斜した後に危険を検知する仕組みであるため、転倒の予兆段階での早期対応が困難という課題があった。

これらの課題に対し、本システムでは、作業バスケットの上部および下部にミリ波レーダーセンサを配置し、障害物や段差の接近を非接触／リアルタイムで検知する構成を提供できる。これにより、接触前の段階で早期警告が可能となり、作業空間を妨げることなく、機器の損傷や構造物への影響を回避することができる。また、段差の検知においても、走行前に地形変化を捉え、走行ルート安全性を可視化することで転倒リスクの未然防止に寄与する。

以上より、従来の物理的／接触型の安全対策では実現が困難であった予防的かつ実用的な安全支援機能の実装を可能とするものであり、高所作業現場における安全性と作業効率の両立に大きく貢献することが期待される。

3.2 フォークリフトの安全運用支援

フォークリフトは構内搬送や資材運搬に欠かせない機械であり、国内の稼働台数も多いため、関連する労働災害が絶えない。とりわけ、フォークの揚降動作中における荷物の接触事故、あるいは左右／後方など死角からの

)))))) センシングイメージ

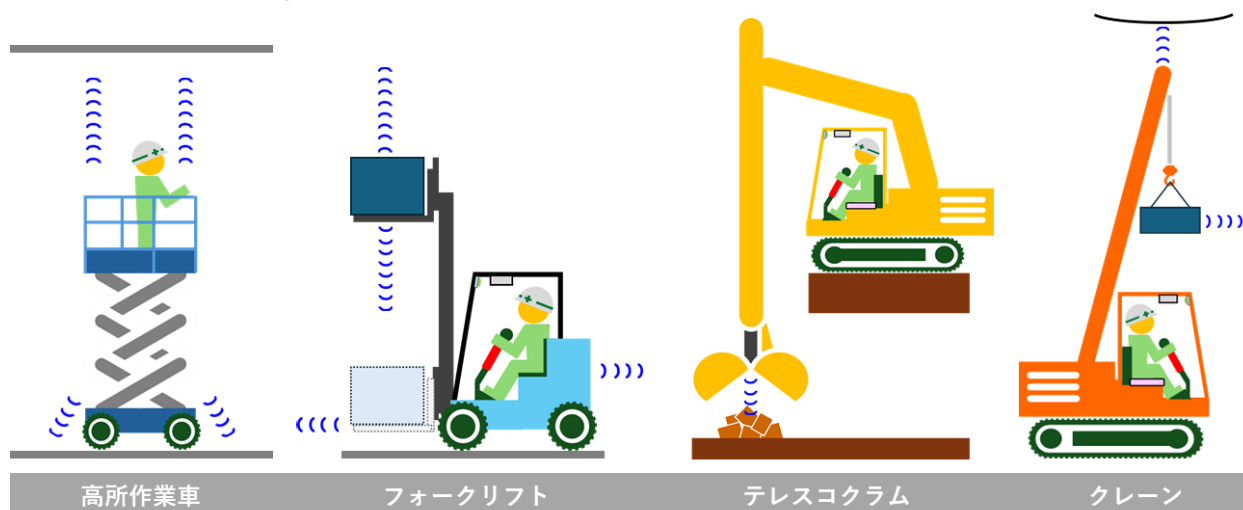


図7 期待される適用例

Fig.7 Expected Applications.

人や物体の接近に起因する衝突事故が頻発しており、安全性の確保が喫緊の課題となっている。

揚降時の視認支援の一つに車載カメラがあるが、カメラ映像からは奥行き方向の距離感が直感的に把握しづらく、フォーク先端と荷物の距離を定量的に認識することが困難であった。そのため、荷物の破損や接触による事故が発生するリスクが常に存在していた。また、死角領域の検知手段としては、AIカメラや多アンテナ方式のミリ波レーダーの導入が進められているものの、AIカメラは周囲の照度や天候など環境条件の影響を受けやすく、多アンテナ方式のレーダーは高度な演算処理を要するため、特定方向の物体検知や距離把握において不正確となるケースもあるなど、依然として実用面での課題が残されている。

こうした状況に対して、本システムでは、フォーク先端部や車体外周にミリ波レーダーセンサを配置し、接近物体との距離を高精度かつ高速に測定する構成としている。これにより、安全に接近可能な距離をリアルタイムで可視化することが可能となり、荷物への接触を未然に防ぐとともに、荷積み／荷降ろしの精度と安全性の向上が期待される。さらに、死角領域に対しては、複数のレーダーセンサから得られる距離情報を統合／表示することで、操作者の視野外にある人や障害物の存在を把握しやすくなり、作業空間におけるリスクの低減に寄与する。

以上より、従来手法に内在していた検知の不確実性を排除し、定量的かつ即時的な距離情報に基づいた安全支援を実現する点において大きな特長を有しており、人と機械が共存する作業現場における事故の未然防止に大きく貢献することが期待される。

3.3 クレーン／テレスコラムの接触リスク低減

クレーンやテレスコラムは、荷の吊り下げや先端の突出によって高所／狭隘空間での作業を可能にする機械であり、建設現場や保守作業等で幅広く使用されている。これらの機械に共通する課題として、操作者から機械先端の状況が直接確認できないという構造的な制約がある。そのため、架線や構造物との接触事故、また狭い空間における周辺物との干渉リスクが常に存在している。特にテレスコラムのように地中に伸びる先端を操作する場合には、地下の障害物や作業者の動きを事前に把握することが困難である。

従来、これらのリスクに対しては、操作者の経験や補助作業者による目視確認などが行われてきたが、人の注意力に依存しているため、信頼性の維持に課題が残る。

本システムでは、クレーンやテレスコラムの先端や周辺構造物、あるいは吊り荷にミリ波レーダーセンサを配置し、周辺物との距離や地下の地形情報を非接触かつリアルタイムで取得することで、操作者の死角領域における安全性を高められる。これにより、架線や障害物との接触リスクを低減するとともに、地下構造物の存在検知や狭隘空間での精密な位置制御を実現し、従来の視認依存型作業に代わる定量的な安全管理が期待できる。

4. 現場環境の安全／安心化

本システムは、視認困難な死角や過酷な作業環境において、障害物や人の存在、地形変化を非接触かつリアルタイムに検出し、その距離情報を定量的に可視化するのである。これにより、従来のように接触後に危険を認識する物理的センサや、距離感を把握しづらいカメラ映像に依存することなく、作業前の早期段階で危険を察知

することが可能となる。

このような技術の特長は、安全性の向上に直結するだけでなく、作業者が感じる「安心感」の醸成にも寄与する。とりわけ注目すべきは、本システムが作業者に対して心理的な安心感を与える効果が期待できる点である。これまでのように「見えない」「わからない」ことへの不安や、「誤って接触するかもしれない」という緊張を常に抱えながら作業を行うのではなく、定量的かつリアルタイムに距離情報を可視化することで、作業者は自身の周囲状況を明確に把握できるようになる。これは単に事故を未然に回避するという機能的な効果にとどまらず、作業者の判断や動作に対する自信を支え、精神的な余裕をもって作業を行うことを可能にするという点で、極めて重要な意義を持つ。

また、センサ情報はタブレット端末に統合的に表示され、複数領域を同時に監視可能であることから、作業効率の向上にも寄与する。結果として、安全性／安心感／作業効率の三要素が相乗的に高まることで、現場全体の生産性と信頼性が向上し、持続可能な作業環境の構築が期待される。

5. Safety2.0 の適用可能性

Safety2.0 は、人／機械／環境の情報を相互に共有し、それぞれが最適な行動、制御、調整を行うことで、安全、安心、ウェルビーイングを実現する技術方策である。具体的には、人の安全に関する資格情報や作業経験、位置情報や健康状態、さらには作業中の動作情報など多様な人の情報を機械に与え、それを基に機械の速度制御や動作制御をより安全かつ効率的に実施する。また、機械の動作状態や動作予告情報を人に伝達することで、作業者は機械の動作を予測し、より安全で効率的な作業や行動を可能とする。このように人／機械／環境の情報を包括的に連携させることにより、人と機械が共生し最適環境を形成することを目指している。

本システムは、高精度レーダーセンサを用いたリアルタイム距離検知と、無線による距離情報の即時モニタリング機能を有しており、これにより人と機械の接近状況を正確に把握できる。特に、作業や管理者がリアルタイムで機械と周囲環境の距離情報を取得し、作業の安全判断に活用できる点は、Safety2.0 における「人の情報に基づく機械制御」と「機械の情報に基づく人の行動促進」という双方向情報共有の原則に適合している。

さらに、本システムの警告機能は、あらかじめ設定した距離に応じて視覚的および聴覚的なフィードバックを提供し、作業者に即時の行動喚起を促す。このことは、機械の動作予告情報を人に伝達し、人が機械の挙動を予測可能とする Safety2.0 の思想とも一致しており、より安全で効率的な作業環境の実現に寄与する。また、設置の容易さと長寿命バッテリーによる安定稼働により、多様

な現場環境に柔軟に対応可能であることも、環境情報の適切な管理と連携を必要とする Safety2.0 の実践に適している。

これらを総合すると、本システムは Safety2.0 の技術方策を具現化する有力なプラットフォームとして、高度な安全管理と作業性向上を同時に達成しうると考えられる。今後は、作業者の動的な生体情報や行動データとシステム情報をさらに連携させることで、Safety2.0 に基づくより高度で包括的な安全支援システムの構築が期待される。

6. おわりに

本稿では、ミリ波レーダーを活用した安全支援システムの開発と、その高所作業車、フォークリフト、各種クレーンへの適用事例を通じて、現場での安全性向上および作業者の安心感の実現に寄与する可能性を示した。本システムは特に、定量的かつリアルタイムに周囲環境の距離情報を可視化し、作業者が自身の周囲状況を正確に把握することで、心理的な安心感をもたらし、安全かつ効率的な作業遂行を支援する点に大きな特長がある。

また、本システムは設置の容易さや直感的な操作性に加え、マルチセンサ対応による拡張性を備えているため、過酷で変化の激しい作業現場においても高い柔軟性と即応性を発揮する。これにより、安全性の向上だけでなく、現場での実用的な支援インタフェースとしての有効性も期待される。

今後は、これらの特長を活かしながら、更なる現場ニーズへの適応や ICT 技術との連携を深化させることで、Safety2.0 の理念に基づく人／機械／環境の協調的安全構築に一層貢献していくことが求められる。

参考文献

- [1] 森 他：協調安全を用いた高所作業の安全・安心化による作業者のウェルビーイングの向上：ヒューマンマシンインタフェースシンポジウム(2022)
- [2] 福井 他：人-機械共存環境における安全性と生産性の両立を実現する協調安全システム：ヒューマンインタフェースシンポジウム (2018)
- [3] Dohi M., et al.: Proposal of Collaboration Safety in a Coexistence Environment of Human and Robots; IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 1924-1930, Australia (2018).
- [4] Shimizu T., et al.: New Collaborative Safety Concept in Various Coexistence Areas for Human and Machinery; 9th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems (SIAS), France (2018).
- [5] IEC White paper “Safety in the Future”: International Electrotechnical Commission (2020).