

23. 湯気や土埃が発生する実施工現場において安全性を向上させる 高精度検知システムを搭載した緊急ブレーキ装置の開発

酒井重工業株式会社

○ 遠藤 涼平

1. はじめに

近年、建設現場における安全性の向上がますます重要視されている。特に、ロードローラを用いた締固め作業では、オペレータが進路方向の安全確認やロール・タイヤへのアスファルト合材の付着防止、締固め路面の品質確認など、多岐にわたる項目を同時に行う必要がある。さらに、アスファルト合材の温度が下がる前に転圧作業を完了させる必要があり、オペレータには常に高い注意力と迅速な対応が求められる。このような作業環境下では、事故やトラブルのリスクが高まる。令和5年の統計によれば、締固め用機械に関連する死傷災害(休業4日以上)の件数は77件¹⁾に達し、そのうち57件¹⁾(74%)が激突や巻き込まれによる事故である。このため、締固め作業中の安全性を向上させるためのさらなる対策が求められている。

安全対策の強化には、以下の3つのアプローチが挙げられる。第一に、作業者や障害物との接触を回避、または被害を軽減するための緊急ブレーキシステムなどの安全装置の普及促進である。これにより作業時の事故リスクの低減が期待される。第二に、安全装置の機能精度をさらに向上させる必要がある。車両に安全装置が搭載されていても、実際の施工環境において十分に機能しない場合や、安全装置の導入が作業性を著しく悪化させ、その結果、現場で使用されない状況が生じる場合には、死傷災害の減少は困難となる。第三に、現場作業者の安全意識をさらに向上させていくことが重要である。これは安全装置によって従来わからなかった危険な状況をリアルタイムに注意喚起することで、作業者にさらなる危険予知(KY)活動へと結び付けることが期待できる。

安全対策に用いられる安全装置の一つである緊急ブレーキシステムは、以下の3つの要素で構成される。まず、進路上の障害物を検知する「検知部」、次に、車両の速度や周囲の状況に応じて検知した物体の危険度を判断する「判定部」、最後に判定された危険度に応じて警報や緊急ブレーキを動作させて車両を停止させる「実行部」である。

本稿では、安全装置の機能精度、特に検知部の検

知精度に焦点を当て、検知センサとして使用される3D-LiDARが抱える2つの課題に対し、ソフトウェアとハードウェア(以下、ソフト、ハードと称する)の両側面からアプローチし、改善を図った。その結果、実施工現場を想定した湯気や土埃が発生する環境下でも従来よりも高い検知精度を実現することができた。その成果について報告する。

2. 3D-LiDARの特性と2つの課題

安全装置の機能精度を向上させるためには、センサの検知精度の向上が必要不可欠である。自動車や建設機械に使用される検知センサには、光学系センサとしてLiDARやToFカメラ、電波を使用するミリ波レーダ、さらに光学系のカメラなど、多くの種類が存在し、目的、環境、コストなどに応じて選定される。表-1には、当社の試験によって比較した各センサの特徴を示す。当社では車両ごとの使用環境²⁾に合わせて大型車両のロードローラには3D-LiDARを、小型車両のロードローラには79GHz帯ミリ波レーダを搭載している。

舗装施工現場には、プレートコンパクタやランマ、ハンドガイドローラに加え他の転圧機械も進捗に応じて一時的に置かれ、障害物となる場合や、壁やガードレールなどにギリギリに寄せて施工することが多い。このような状況下では、オペレータが施工路面の品質に集中しすぎるあまり、障害物に気づかず接触してしまう可能性がある。この場合、オペレータは何に接触したかを瞬時に正しく認識することは難しく、軽度のパニック状態に陥

表-1 各種センサの比較結果(当社試験による)

各項目	3D-LiDAR	3D-ToF カメラ	79GHz帯 ミリ波レーダ	カメラ
距離精度が高い	◎	○	△	×
画素数が多い (形状認識しやすい)	○	○	×	◎
直射日光に強い	◎	△	◎	△
夜間でも使用できる	◎	◎	◎	△
湯気の影響を受けない	△	×	◎	△
低コスト	×	×	△	△

り回避行動を取ることで二次被害が発生する恐れがある。そのため、緊急ブレーキシステムによって進路上の障害物をオペレータに確実に認識させることが重要である。また、警報によって、現場全体のKY活動にも繋げられ、万が一接触の危険がある場合には、緊急ブレーキの作動によって、安全性の向上にも寄与し、その後、施工作业を続けて行うことができる。そのため、現状のシステムでは、作業員だけでなく壁などの他の対象物も検知できるセンサと検知アルゴリズムを採用している。

こうした要求を解決する上で、表-1に示すように3D-LiDARは高い距離精度と解像度を有するため、非常に有効な検知手段である。一方で、一般的に検知精度は感度を上げると誤検知が増え、感度を下げると誤検知が減るトレードオフの関係がある。ロードローラの転圧作業では、湯気や土埃が発生するため、この影響による誤検知を抑制しつつ、感度を上げて検知精度を向上させる必要があった。

2.1 課題①: 検知対象物の反射強度による影響

3D-LiDARを含む光学系センサでは、一般的に赤外線のパルス光を照射し、物体に当たって戻ってくる時間とその反射強度を測定して、照射や受光の角度と時間から物体までの距離を算出する。また、原理的に建設現場で多く発生する湯気や土埃も測距するため、ソフトによって湯気や土埃を除去し、誤検知を抑制するためのフィルタ処理が行われることが多い。一般的には、湯気や土埃の反射強度はその先にある物体の反射強度と比べて同等もしくは低い傾向にあるため、一定の閾値以上の反射強度を持つデータを採用することで、つまり感度を下げることで誤検知を抑制していることが多い。特に、作業員が着用する再帰性反射チョッキ(以下、反射チョッキと称する)のように非常に高い反射強度のみに反応させるフィルタを設定することもある。

従来の検知アルゴリズムでは、路面や外乱状況に応じてリアルタイムにフィルタを自動制御し、誤検知の抑制を行っていた。例えば、舗装施工時のホットアスファルトのような反射強度が低い黒色系の路面では、フィルタの閾値が下がり感度が上がっても、発生する湯気の反射強度も低い傾向にあるため、誤検知を抑制し、高い精度で障害物の検

知が可能となる。一方で、コンクリートなどの白色系の反射強度が高い路面では、フィルタの閾値が高く設定されることにより感度が低下する。その結果、誤検知の抑制効果は高まるものの、検知精度が低下してしまう。

また、検知したい対象物の色や素材、表面性状などによっても反射強度は変化するため、フィルタの強さと検知対象物の反射強度のバランスによって検知精度は変化する。そのため、安全性を向上させるためには、図-1に示すように反射チョッキや明色系の作業着を着用することが有効であった。しかしながら、建設現場においては、汚れが目立ちにくい暗色系の作業着が多く着用される傾向があり、また、反射チョッキも着用されないことが多い。着用されても、反射面積が小さく認識しにくいこともあった。そのため、これらの状況に対応した検知精度の向上が求められていた。

2.2 課題②: 濃い湯気や土埃による影響

ロードローラの舗装転圧作業では、ローラのタイヤやロール表面に散水してアスファルト合材の付着を防止する。また、道路を早期に解放するため、転圧後にアスファルト合材の温度を下げる目的で路面に散水することがある。このような作業環境下では、特に冬季に白く濃い湯気が大量に発生する。また、路盤などの転圧作業では、乾燥している路面でロールを振動させて転圧を行うと、土が巻き上げられて土埃が発生する。特に土埃は発生すると空中に長時間滞留し、消失するまでに時間がかかることが多い。

従来搭載していた3D-LiDARとその検知アルゴリズム(以下、従来型と称する)では、湯気や土埃を透過した先に障害物がない路面であれば、前述したようにフィルタが機能し、誤検知の抑制が可能である。しかし、湯気や土埃の先に比較的高い反射強度を持つ障害物(例えば作業員など)が存在する場合、障害物よりも手前の湯気や土埃を検知した位置で誤検知することがある。さらに、濃い湯気や土埃が発生する環境下では、フィルタの閾値が上がるため、正確な位置での検知や誤検知もされず、反応できない状態になることがある。このため、このような環境下でも正確な位置で検知できるセンサと検知精度の向上が求められていた。



図-1 従来型 3D-LiDAR における課題

3. 改善手法と改善結果について

従来型の検知センサが抱えていた2つの課題に対し、ソフトとハードの両面から改善を図った。ソフトでは検知アルゴリズムを見直し、ハードでは3D-LiDARにマルチエコー機能を搭載した。これにより、従来型に比べて検知精度を大幅に向上させることに成功した。以下に、これら2つの課題に対する改善手法とその試験結果について示す。

3.1 課題①:ソフトウェアの改善と試験結果

従来型の検知アルゴリズムでは、路面の反射強度からフィルタの閾値を決定していた。これにより、湯気や土埃による誤検知の抑制を図っていたが、検知対象物の反射強度の大半が路面の反射強度よりも低い場合、フィルタによって除去されてしまう。その結果、本来検知したい暗色系の作業着を着た作業員などが検知できない場合があった。

ソフトとハードを改善した3D-LiDAR(以下、改善型と称する)の検知アルゴリズムでは、ラベリング技術によって検知物体を分類し、従来型のフィルタを基に各物体を構成する点群のレベルを決定した。次に、その分布に基づいて、検知対象物が実像であるか、誤検知である虚像であるかの判断を行った。その結果、従来では除去していた測距データも考慮することが可能となり、暗色系の作業着を着用した作業員など、反射強度の低い検知対象物においても高い検知精度を維持することができた。これにより、改善型は従来型に比べて検知精度を大幅に向上させることができた。また、これらの検知アルゴリズムは特許出願した独自技術である。

改善型と従来型の2種において、同時に測定した試験結果を図-2に、検知対象物と試験の様子を写真-1に示す。試験条件として、検知対象物には、青色作業着と反射チョッキを着用したマネキン(高さ約1.7m)を使用し、測定路面には反射強度がやや高い既設アスファルトを選定した。測定は、5m以上離れた位置から検知対象物に向かって近づき、約0.5mまで接近した時点で停止させ、その後再び5m以上まで離れる動的な挙動で行った。

図は、縦軸に検知対象物までの検知距離、横軸に経過時間を5秒分ずらして示しており、下軸に改善型の、上軸に従来型の経過時間を表示している。この試験結果から改善型が従来型に比べて検知開始距離が向上し、さらに途切れることなく検知していることが確認できる。

同様の測定条件において、作業着を濃紺、青、薄灰色の4種類に変更し、検知対象物の反射強度の違いによる検知精度を比較した。その結果を表-2に示す。表における「検知開始距離」は、接近時の対象物が最初に検知された距離を示しており、「検知率」は、3D-LiDARの搭載位置から算出した仕様上の最大検知距離4.5mから、接近して停止するまでの衝突の可能性が高い状況における検知性能を評価したものである。具体的には、3D-LiDARの測距周期から算出される理論上の最大検知数に対する実際の検知数を基に算出した。結果として、従来型では、作業着の色によって検知開始距離と検知率が大きく変化することがわかる。特に、暗色系の作業着において検知開始距離が短く、検知率が低下する傾向が見られた。一方で、改善型では、

作業着の色に依存せず、常に長い検知開始距離と高い検知率を維持できることが確認された。改善型は従来型に比べて、検知開始距離が最大77%、検知率が最大40%向上しており、検知精度が大幅に改善されたことがわかった。

3.2 課題②:ハードウェアの改善と試験結果

改善型は、湯気や土埃などの透明や半透明な物体を透過してその先にある物体を測距できるマルチエコー機能を搭載した。従来型では1st-Echoで湯気や土埃を測距してしまい、その先にいる本来検知したい作業員が測距できない状況があったが、

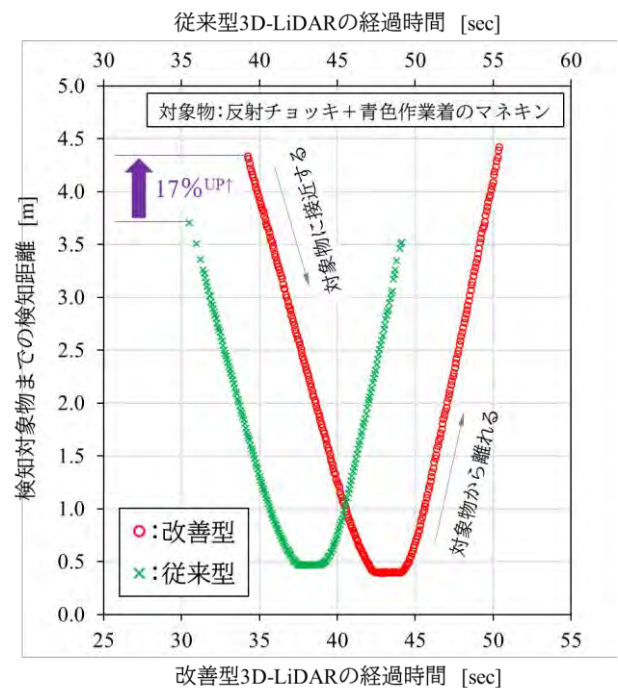


図-2 対象物に近づく際の動的な挙動による検知結果



写真-1 3D-LiDARの搭載位置から見た試験の様子

表-2 作業着の色の違いによる検知精度の比較結果

作業着の色	反射チョッキ + 青(ブルー)	濃紺	青	橙	薄灰	
		(ネイビー)	(ブルー)	(オレンジ)	(ライトグレー)	
検知開始距離	改良型	4.3 m	4.6 m	4.7 m	4.3 m	4.4 m
	従来型	3.7 m	2.6 m	3.4 m	4.4 m	4.0 m
	UP率	17%↑	77%↑	35%↑	-2%↓	10%↑
検知率	改良型	95.0 %	99.5 %	99.3 %	95.6 %	93.8 %
	従来型	71.4 %	59.2 %	80.3 %	96.0 %	86.0 %
	UP率	24%↑	40%↑	19%↑	-0.4%↓	8%↑

改善型では、システム的な制限があるものの、1st-Echoで湯気や土埃を測距しても、2nd-Echoによってこれらを透過した先にある作業者を測距することが可能になった。改善型のマルチエコーの効果を示した検知結果を図-3に示す。なお、試験は実現場における湯気や土埃を定量的に発生させることが難しいため、スモークマシンを使用して、実際の舗装現場で発生するよりも濃く、先が見通せないレベルの湯気を疑似的に発生させて行った。図に示された1st-Echoおよび2nd-Echo、検知結果の各データは、白いほど測定距離が近く、黒いほど遠いことを示している。図より、湯気がない状態では、1st-Echoによって検知対象物が検知されているのが確認できる。一方で、湯気を発生させた場合、1st-Echoが湯気を測距し、2nd-Echoによって濃い湯気を透過して検知対象物が検知されていることが確認できた。また、土埃では湯気と比べて粒子径が大きく、2nd-Echo以降のデータは測距し難い傾向であったが、肉眼で先を見通せるレベルの土埃であれば同じように測距できることを確認している。

図-3の試験において、検知対象物を2.5, 3, 4mの距離に設置した条件と、検知対象物がない状態で、湯気を発生させた場合の検知精度を比較した。その結果を図-4に示す。測定は30秒間行い、「検知率」は3D-LiDARの測距周期から算出される理論上の最大検知数に対する実際の検知数から算出した。また、設置距離から±0.25m以上離れた測定値を「誤検知」と定義し、その数から「誤検知率」を算出した。湯気は風などの外乱条件により濃度が

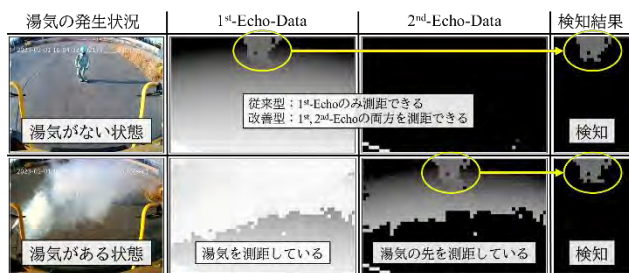


図-3 濃い湯気の存在下でのマルチエコーの効果

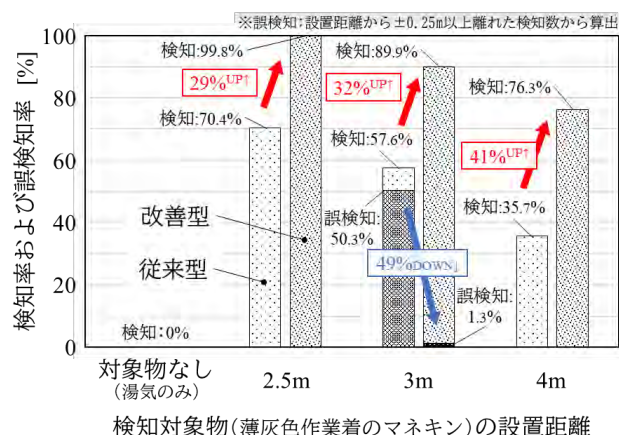


図-4 濃い湯気が発生する条件下での検知精度の比較

変化するため、同時に測定した従来型と改善型の増減割合に着目して評価した。その結果、検知対象物がない状態で湯気のみ発生させた場合、従来型と改善型のいずれも検知がなく、誤検知が抑制されていることがわかった。次に、設置距離を変化させた場合、改善型の検知率が従来型に比べて最大41%向上しており、また、すべての設置距離において改善が見られた。特に、3mの設置距離では、従来型の検知率に対し87% (誤検知率/検知率) が誤検知となっているが、これは、検知対象物が手前の近い位置にある湯気の反射強度に強く影響を及ぼしたためと考えられる。一方で、同じ設置距離における改善型は、誤検知率が1.3%と大幅に低下しており、正確な位置での検知が可能となった。このため、改善型は湯気のある環境下においても検知精度が大幅に改善されたことがわかった。

4. まとめ

ロードローラの実施工現場において安全性を向上させるためには、安全装置の普及促進、機能精度の向上、作業者の安全意識のさらなる向上という3つのアプローチが挙げられる。本稿では、安全装置の一つである緊急ブレーキ装置について、機能精度の向上に着目し、障害物を検知するセンサである3D-LiDARが有する2つの課題について、ソフトウェアとハードウェアの両側面から検知精度の改善を図った。その結果、検知が困難であった反射強度の低い対象物に対しても高い検知精度を維持することが可能になった。また、濃い湯気や薄い土埃が発生する環境下においても、その先にある危険な障害物をより正確に検知することが可能になった。これより、従来では非常に困難であった検知感度の向上と誤検知の抑制を両立させる新たな検知アルゴリズムを開発することに成功した。

しかしながら、周囲環境や検知対象物の状況によっては、必ずしも正確に検知できず、安全装置が十分に機能しない場合がある。そのため、安全装置を過信せず、危険予知(KY)活動を通じて各作業者が自身の安全意識を高めるよう心掛けていただきたい。その結果、安全性を向上させる一助となれば幸いである。また、i-Constructionで推進される自動運転車両などへの応用を進めることで、現場全体の安全性と作業性の向上を図り、建設現場での事故撲滅を目指していきたい。

参考文献

- 1) 厚生労働省：職場のあんぜんサイト、労働災害統計、令和5年死傷災害統計確定値
- 2) 遠藤涼平・森岡則雄：緊急ブレーキ装置搭載コンバインド型振動ローラの開発、建設機械施工, Vol.73, pp.50~55, 2021