

作業員と建設重機との接触を防止する安全装置の開発

人とヘルメットを選択的に検知して重機を止めるシステム

「クアトロアイズ[®]」

上 條 宏 明・小 林 只 和・西 脇 也 寸 男

重機と作業員との接触による死傷者数は、建設業に限っても毎年800人前後を推移し、重機と作業員との接触災害の根絶には程遠い状況である。また、従来からこの型の災害を低減すべく赤外線や電磁波などを利用して、人や物を検知し警報を出す安全装置は存在していたが、それぞれに一長一短があり広く現場で使用されている状況とは言えなかった。

筆者らは、この状況を改善すべく、AIを利用した重機と作業員との接触災害に対する安全装置「クアトロアイズ」(以下、本装置という)を開発した。本報では、本装置の開発概要と現場への適用事例について報告する。

キーワード：油圧ショベル、ディープラーニング、AI、画像認識、重機接触災害

1. はじめに

建設業において、重機と作業員の接触災害(激突され)は長年深刻な安全上の問題である。厚生労働省の労働災害統計によると、この型の災害による死傷者数は毎年800人程度、そのうちの死亡者数は20人を下らない。接触災害については、これまで数多くの分析や研究¹⁾がなされ、さまざまなタイプの災害を防止するための安全製品が発売されてきたが、広範に導入が進んでいるものはバックモニターと近接センサ程度である。ただし、これらは後述する理由で必ずしも接触災害を根絶に導くための要件を満たしておらず、事実、毎年多くの作業員が不幸にも命を落としている。

また、少子高齢化の影響もあり建設業における人手不足の深刻化が指摘される中、国土交通省ではi-Constructionによる生産性向上を推進しているが、同時に建設現場のいわゆる3Kのイメージを払拭することも建設業界全体の重要な課題である。

筆者らは、重機により挟まれ亡くなるような不幸を一つでも減らし、最終的には根絶すると言う困難な課題に挑戦することとした。本報では新しい接触防止装置を最新のAI技術を取り入れ開発し、建設現場へ導入するまでの一連の開発概要と現場への適用事例および成果について記す。

2. 開発の背景

重機と人あるいは物との接触防止技術には、大きく以下のような基準で分類ができる。

- ①人と物を区別できるか
- ②検知対象に何かを装備する必要があるか
- ③検知対象を検知した際の動作

筆者らは、開発にあたり既存の接触防止技術として入手できた各種の製品を現場に導入しオペレータ、相番作業員および管理者側の意見を聞き上記①～③の基準について下記の通り考察した。

- ①まず、接触防止装置が人と物を区別できることは、重機、特に油圧ショベルの接触防止装置としては極めて重要な能力である。油圧ショベルでは旋回の繰り返し動作が前提であるため、人と物を区別できない近接センサ等の接触防止装置では、狭隘な現場で旋回を行うたびに、万能塀や建築物そのものに反応し、警報などを発してしまう。このためオペレータは、そのような接触防止装置を直ちに無視する、あるいは電源を落とすことになる。これはいわゆる「オオカミ少年効果」であり、人と物を区別できることは重機との接触防止装置の開発を始めるにあたり最重要要素と位置付けた。
- ②次に、現場の管理者側としては、検知対象に何らかの機器やシールなどを装備させることは管理の煩雑さからできるだけ避けたい。特に、電池を必要とする機器の継続的な動作管理は数百あるいは1000人

以上が従事する現場において、その導入と管理は現実的ではないと考えた。

③最後に、検知対象を検知した場合、モニタに警告表示するだけ、あるいは警報を発報するなどの選択肢があるが、モニタを見ながらバックホウを操作することは逆に危険性を上げる結果となり、最低限警報を発報する必要があることは明白であった。特に、油圧ショベルの作業では旋回動作時に挟まれる頻度と同等あるいはそれ以上に移動時、とりわけ後進時の接触災害が多いことは研究結果^{2),3)}や経験からよく知られている。このことは、バックモニタを装着した油圧ショベルであってもオペレータは常にバックモニタを視認しながら後進しているわけではないことを示唆している。また、検知後に重機を止めることには、重機を止めることで危険性が増す可能性を研究⁴⁾や筆者らのヒアリング結果も示していたが、重機との接触による死亡災害を根絶するためには、この重機の自動停止はあえて踏み込まなければならない領域と考えた。以上の検討結果から、筆者らは開発する接触防止装置に求める要件を、①人と物を確実に区別し、②検知対象には機器を装備する必要がなく、危険性が高まった時には③自動的に重機を止めることができることとした。その上で再度既存技術について検証した結果、既存技術はこれらの要件のどれか一つ以上が欠けていることがわかった。

3. システムの概要

(1) 本装置の仕様

本装置の仕様を表一に示す。本装置はカメラにより検出された人物が、任意に設定する距離より近づいた場合に警報、さらに近づいた場合、重機を強制的に停止させる機能を有する。本装置の水平視野角はこれまでのバックモニタや人物を認識するカメラなど類似機器（以下、従来機）にはない180度を達成しており、動作を保証する最低照度はトンネル工事における最暗部と定められている20lxである。

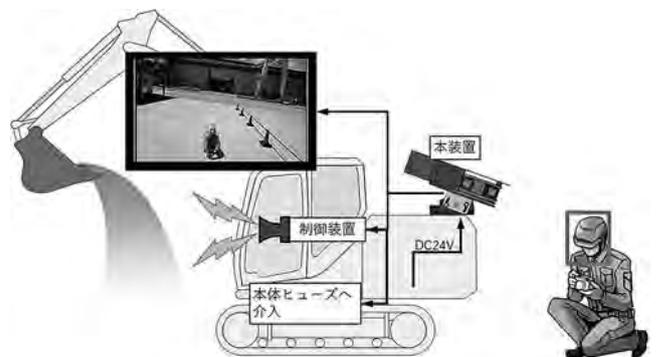
表一 本装置の仕様

検知範囲	10 m 以下
水平視野角	180 度
垂直視野角	70 度
距離精度	± 20 cm
耐水耐塵性能	IP65 (屋外仕様)
動作温度範囲	-10 ~ 45 °C
動作最低照度	20 lx

(2) 油圧ショベルへの設置イメージ

本装置の油圧ショベルへの設置イメージを図一に示す。本装置本体をマグネットで油圧ショベルに取り付け、電源は油圧ショベルのDC24V電源を用いる。次に、運転室内に置く警報付き制御装置に本装置からの検知出力を接続し、制御装置を油圧ショベルのエンジンを動作させるヒューズに介入するように接続するだけで本装置の油圧ショベルへの設置は完了する。

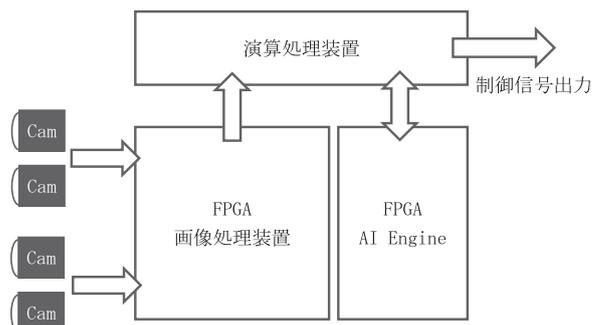
エンジンを強制的に停止させるためには、キースイッチの電気回路に介入する手法やソレノイドバルブなどの油圧回路に介入する手法などが他に想定されるが、時間やコストを最低限にするためにヒューズを差し替えるだけで重機の回路に介入ができるこの手法を選択した。



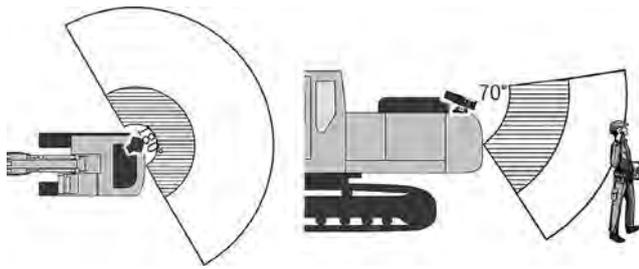
図一 本装置の油圧ショベルへの設置例 (NTS)

(3) 本装置の本体のシステム

本装置本体のシステム概要図を図二に示す。本装置は、対象物との距離を測定するために、カメラ2台からなるステレオカメラシステムを2組、すなわち合計4台のカメラを用いて周辺の画像を撮影する。それぞれのステレオカメラから得られた画像は、明るさ、コントラスト、ホワイトバランスなどを瞬時に画像処理装置にて補正され演算処理装置へと送られる。演算処理装置は、すでに別のシステムにおいて人物の特徴をディープラーニングの手法を用いて学習した



図二 本装置本体のシステム概要図



図—3 本装置の検知範囲（設置の向きは一例）

AIが人物を検出する。

上述の通り、本装置の視野角は従来機より極めて広い、半径10m、角度180度の半円でありこの範囲から人物を検出するため、演算処理装置に大きな負荷がかかる（図—3）。詳細は割愛するが、この問題を解決するため、画像処理装置や演算処理装置などはFPGAと呼ばれるタイプの集積回路を採用することなどにより、演算処理速度の向上と小型化を実現した。現状は周辺画像の撮影から画像処理、人物の検出とその距離の算出、制御信号の出力までの一連の動作を6fps（一秒間に6回）で行っている。

（4）ディープラーニングの手法を用いた学習効果

人と物を区別して作業員を検出するタイプの従来機は、屈んで作業をしている作業員や、大きな荷物を運ぶ作業員など、通常の人間のシルエットと大きく異なる場合は見逃してしまうなど、認識能力において改善の必要性があった。そこで筆者らは、ディープラーニングにより様々な姿勢で作業する作業員の画像をAIに学習させ従来機より飛躍的に人物の認識率を向上させた。表—2に一般的な人物画像のデータセットを用いた学習による検出率と、追加で当社の建設現場における様々な作業姿勢の画像を含めた学習後の検出率の比較を示す。このように、一般的な人物画像による学習による人物の検出率は人物が立っている状態では十分であるが、屈んで作業している人物やケースとしては稀であるが転倒などで地面に倒れている人物の検出率は低い。これらの検出率が低い姿勢の検出に対して、追加で様々な作業姿勢の画像を学習させた後の検出率は1.7～4.4倍向上した。

さらに、大きな荷物を運んでいても歩いている以上は頭部が露出している可能性が高いことと、国内の建



図—4 合板を運搬中の作業員の検出

設現場においてはヘルメットの着用率はほぼ100%であることから、ヘルメットを被った頭部まわりの画像を重点的に追加学習することで、頭部さえ荷物や物陰から露出していれば人物として検出することが可能となった。図—4に合板を運ぶ作業員の頭部のみを検出した事例を示す。

4. 性能の検証結果と現場適用事例

本装置を当社機械工場といくつかの当社が施工中の建設現場の油圧ショベルに適用し、その性能の確認と管理者側とオペレータ側の意見を聴取した。

（1）性能検証結果

本装置を複数箇所の現場における掘削作業を行っている油圧ショベルに適用し、管理者側とオペレータの意見聴取を行った。第一に、建設現場において想定される雨天、粉じん、逆光などの環境においても人物の認識に支障は見られず良好な性能を発揮した。また、距離精度を検証したところ、例えば6m離れた位置の人物の測定誤差は20cm、3%であり、警報や重機の停止信号を出す目安としては十分な精度であることが確認された。

（2）建設現場における適用と意見聴取結果

管理者側の意見は概ね好意的であり、むしろオペレータが勝手に本装置の電源を落とせないようにして欲しいなど常時使用を推進したい意見が顕著であった。

表—2 人物の検出率の比較

	立位	屈んだ姿勢	寝た姿勢
一般的な人物画像の用いた学習の結果	97%	60%	17%
建設作業中の画像を追加学習させた結果	99%	99%	69%

オペレータ側は、比較的広い土木現場においては、災害リスクの低減に資すると思うなどの意見であったが、狭隘な都市土木現場や建築現場においては、油圧ショベル近傍を作業員が背後を通るたびに警報や重機の停止が動作するために、業務の効率が低下するなど否定的な意見もみられた。

これは当然予測した結果であり、極めて狭隘な現場では重機の停止動作をする距離を縮小する、安全通路の設置位置を再検討するなど全体的な安全対策を検討して対応したいと考えている。

また、管理者とオペレータが本装置を使い続け、周囲の作業員がうっかり油圧ショベルに近づき油圧ショベルを停止させることで、その危険なエリアを再認識し、無意識に油圧ショベルに近づくことを忌避するようになることを考える。

5. おわりに

本報では、AIを用いた人物検出機能とステレオカメラによる距離測定機能を用いた重機と作業員の接触防止装置について、その機能の検証結果と現場での適用事例について報告した。AIを用いた人物検出には、建設現場の作業姿勢に特化した画像とヘルメットを含む頭部に集中した画像の追加学習を適用した。その結果、

- ①一般的な人物画像のデータセットによる学習と比較して、建設現場に特化した作業姿勢を追加学習することで1.7～4.4倍の認識率の向上が確認された。
- ②ステレオカメラによる人物の距離測定精度は、6mにおいて20cm、3%であった。
- ③現場への適用では、仕様通り雨天、照度20lxおよび逆光などの悪条件下にあっても良好な人物認識能力を発揮した。
- ④狭隘な現場に適用した結果、オペレータへの意見では、警報や重機の停止動作が頻発することもあり

り作業効率の低下が懸念され否定的な意見もみられた。極めて狭隘な現場では重機の停止動作をする距離を縮小する、安全通路の設置位置を再検討するなど全体的な安全対策を検討して対応する必要がある。

今後、さらに多くの現場に本装置クアトロアイズを適用するとともに、油圧ショベルだけでなく移動式クレーン、フォークリフト、ロードローラなどの重機への適用を試み重機との接触災害の撲滅に挑戦し続けたい。

JCMA

《参考文献》

- 1) 玉手聡, 吉川直孝, 堀智仁, 清水尚憲, 梅崎重夫, 濱島京子, 建設機械の転倒及び接触災害の防止に関する研究, 労働安全衛生総合研究所特別研究報告 No.46, 2016年
- 2) 高木元也, 高橋明子, 頻発する死亡災害に対するリスク低減対策の評価に関する研究, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.70, No.4, I_53-I-60, 2014年
- 3) 高木元也, 土木工事におけるドラッグショベル作業の安全を考える, 建設の施工企画, 2012年7月
- 4) 清水尚憲, 濱島京子, 梅崎重夫, 吉川直孝, 建設機械と人間の接触等を防止するための保護装置に関する研究, 労働安全衛生総合研究所特別研究報告 No.46, 2016年

【筆者紹介】

上條 宏明 (かみじょう ひろあき)
 (株)大林組
 東京機械工場技術開発課
 課長



小林 只和 (こばやし ただかず)
 (株)大林組
 大阪機械工場電機課
 副課長



西脇 也寸男 (にしわき やすお)
 (株)大林組
 東京機械工場技術開発課
 副課長

