

様々な施工環境における建設機械に搭載された AI 人体検知システム「T-iFinder[®]」の実証

田村 道生^{*1}・青木 浩章^{*1}・田村 創^{*2}・大橋 智仁^{*2}・清水 堅^{*2}

Keywords :AI, construction machinery, improved safety, unmanned construction, automated construction

AI, 建設機械, 安全性向上, 無人化施工, 自動化施工

1. はじめに

建設業における死亡災害発生件数は近年減少傾向にあるが、死亡者数は全産業中で最も多く¹⁾、建設関係各社はより有効な災害防止対策を模索している。

ここで死亡災害の原因として「墜落・転落」に次いで多いのが、「激突され」や「はさまれ・巻き込まれ」といった重機との接触である。¹⁾

一方、建設業では現在、生産性向上などを目的とした無人化施工^{注1)}や自動化建機の実用化開発が加速しているが、遠隔操作するオペレータの視界は主に遠隔地のカメラに頼ることとなり、従来の建機搭乗型よりも死角や見落とし発生の危険が増大する。このため建設現場の重機と人との接触に対する安全対策は今後更に重要な課題となる。

接触災害は、動作中の重機付近に人が存在しなければ発生しないため、これまでは作業員が身に着けた ID タグ等により接近を電磁波で検知したり、超音波・レーザー光等による距離検知を行い、警報出力や重機の停止を行う方式が主流であった。しかし、ID タグ方式は全員が身に着ける必要がある上に、周囲環境によって検知距離が変化する。更に障害検知方式では人と人以外を判別することができない。

また、警報等を行うシステムでは、検知率の高さが求められることは言うまでもない。しかし、検知率を重視するあまりに誤検知が増加すると、正常に検知した際にも誤検知と勘違いされたり、最悪の場合には煩わしさの挙句にシステムの電源を切られてしまうこと

もあるため、誤検知を減らすことも非常に重要である。

筆者らはこれら諸問題を解決するため、昨今発展が目覚ましい AI 技術を用いて、カメラ画像から「人」と人の居る「場所」を判定して発報や重機の減速・停止を行うシステム「T-iFinder」を開発した。^{2),3)}

2. T-iFinder の概要

2.1 開発概要

T-iFinder は、建設現場の各種重機に搭載することを前提として、人が接近するとこれら重機が停止するよう開発したシステムである。そのためカメラ視野角や耐環境性といった観点からのハードウェアと、建設現場の人検知用 AI モデルの開発が必要であった。

ここで、AI モデルの開発に際しては、昨今公開されている AI の学習素材の利用を目論んだが、その多くは市街地のものであり、建設現場の人物や背景とは特徴が異なっていたため人体検知性能が向上せず、新たに建設現場での学習素材を準備する必要があり、実際に建設現場に赴いて収集・学習・評価を繰り返しながら学習素材の改良を行った。³⁾

2.2 機器概要

図-1 に T-iFinder のシステム構成機器を示す。概して検知用カメラから取得した画像を元に、AI 搭載 PC により人検知を行うものである。

検知した人の位置が設定されたエリア内であれば、警報機による注意喚起に加え、エリアに応じた減速や停止などの接点出力を行う。

* 1 技術センター 生産技術開発部 スマート技術開発室

* 2 パナソニックアドバンステクノロジー (株)

また、モニターを接続し、カメラ画像・警報区域・停止区域・人検知状態を表示することも可能である。

人を検知して、停止状態となった際のモニタ表示例を写真-1 に示す。検知した人を示す緑の枠線が赤い線が示す停止エリアに入っているため、停止信号を出力している状態である。

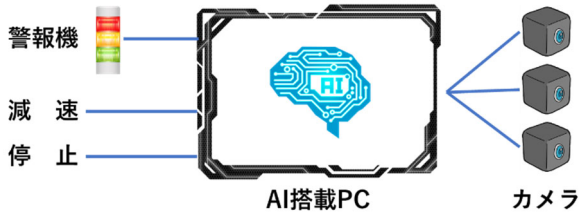


図-1 T-iFinder の機器構成
Fig.1 Device configuration of T-iFinder

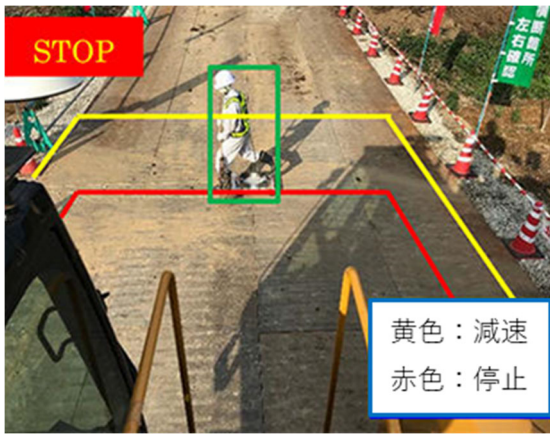


写真-1 モニタ表示例
Photo.1 Monitor display example

3. 実証の事例

既報³⁾では自動車用人物検知開発時の知見から、図-2 に示すようにコントラスト（明暗の差）と鮮鋭度（明瞭さ）の2軸4象限の画像特徴を持つといった建設現場特有の環境データを収集する取り組みについて報告した。今回は現場で収集したデータの事例と、T-iFinderの実証結果について、以下の図-2 に示す分類（象限）毎に報告する。

3.1 実証事例1：第1象限

固定設置したカメラで撮影した場合と、人が撮影した場合の第1象限部のデータ例を写真-2 に示す。本例の場合、日当たりのよい太陽光下で明暗差があり、背景に細かい資材等があるため、縦軸は高コントラスト、横軸は複雑で第1象限に分類される。

写真-3 に T-iFinder のバックホウへの適応事例を示す。オペレータの死角となる後方を監視可能とするように

カメラを設置した。

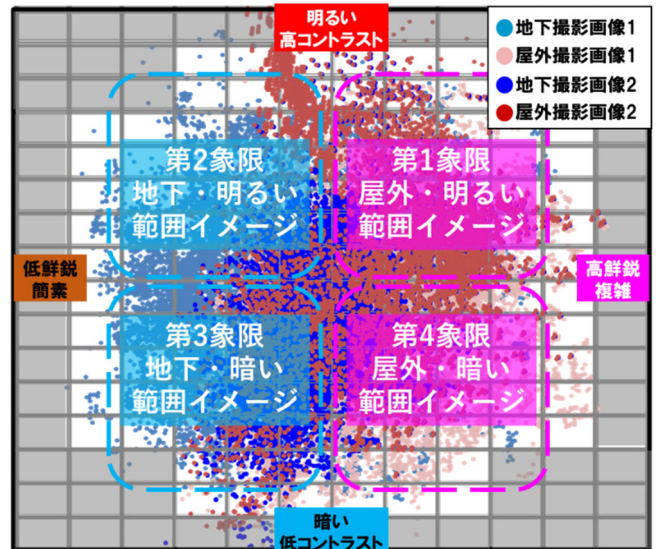


図-2 土木工事における画像特徴
Fig.2 Image features in civil engineering work

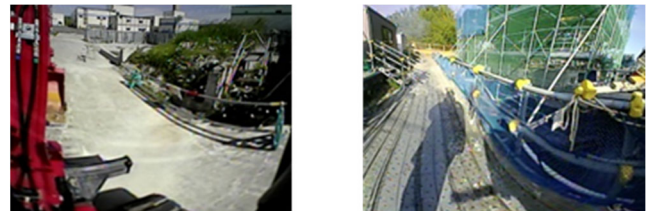


写真-2 第1象限のデータ例
固定カメラ(左) 人撮影(右)
Photo.2 Imaging data in the 1st classification
Fixed camera shot (left) Filming by person (right)



写真-3 バックホウへの適応事例
Photo.3 Application example to backhoe

また、本事例で実施した実証試験の方法を図-3 に、試験状況を写真-4 に示す。

図-3 に示すように、奥行6m、横幅6mの緊急停止エリアを設けてバックホウを移動させ、そのバックホウを追いかけるように人が緊急停止エリアに侵入し、緊急停止制御が発動するかについて検証した。

その結果、安定して緊急停止が発動することを確認した。停止時の機械と人との平均距離も3.5mと、目標としていた3m以上を達成することができた。しかしながら試験時は雨天で比較的検知し難かったことや、緊急停止後も人は多少接近してしまうこと等から、エリア奥行に対して平均停止距離は短めとなった。なおバックホウを人から離れる方向に移動させたのは、万が一の場合の安全面を考慮したためである。

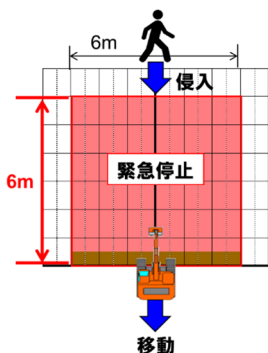


図-3 バックホウ適応の実証試験方法

Fig.3 Verification test method for backhoe adaptation



写真-4 バックホウ適応の実証試験状況(左)と検知状況(右) ^{注2)}

Photo.4 Verification test(L) and detection(R) situation for backhoe adaptation

3.2 実証事例2：第2象限

重機に固定設置したカメラで撮影した第2象限部のデータ例を写真-5に示す。本例はダム工事現場であり、図-2の地下との記載とは異なるが、太陽光下で明暗差があり、背景に細かい資材がないため、縦軸は高コントラスト、横軸は簡素で第2象限に分類される。



写真-5 第2象限の撮影データ
固定カメラ (左右両方)

Photo.5 Imaging data in the 2nd classification
Fixed camera shot (left and right)



写真-6 バイバックへの適応事例
Photo.6 Application example to viback

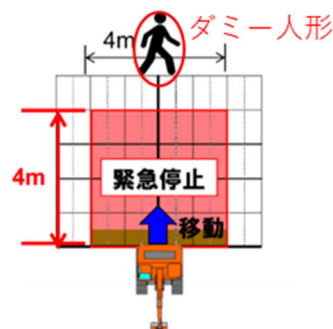


図-4 バイバック適応の実証試験方法

Fig.4 Verification test method for viback adaptation



写真-7 バイバック適応の実証試験状況(左)と検知状況(右) ^{注2)}

Photo.7 Verification test(L) and detection(R) situation for viback adaptation

写真-6に第2象限に分類された現場でのバイバックへの適応事例を示す。オペレータの死角となる後方を監視可能とするようにカメラを設置した。

また、本事例における実証試験の方法を図-4に、試験状況を写真-7に示す。

実証試験は、図-4に示すように奥行4m、横幅4mの緊急停止エリアを設けてバイバックを移動させ、ダミー人形を使用して実施した。そしてダミー人形が緊急停止エリアに入った際に緊急停止制御が発動するかについて検証した。

その結果、安定して緊急停止が発動することが確認でき、停止時の機械と人との平均距離も3.9mと、目標としていた3m以上を達成することができた。

加えてバイバックの事例とは別の現場であるが、第2

象限に分類された現場での適応事例を以下に示す。

写真-8 と写真-9 は、振動ローラーとブルドーザへの適応事例である。どちらも進行方向である前方と後方を監視可能となるように、カメラを設置した。

本事例では、振動ローラーは前進時の制動距離が長いいため、前方は遠距離用カメラを使用する構成とした。



写真-8 振動ローラーへの適応事例
(左：前方，右：後方)

Photo.8 Application example to vibration roller(L:front,



写真-9 ブルドーザへの適応事例(左：前方，右：後方)
Photo.9 Application example to bulldozer(L:front, R:rear)

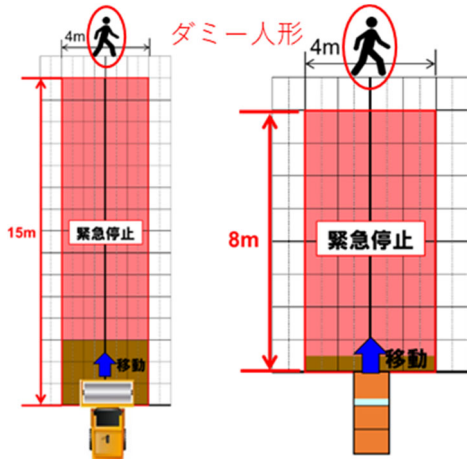


図-5 振動ローラー(左右)とブルドーザ(右)の適応の実証試験方法

Fig.5 Verification test method for vibration roller(LR) and bulldozer(R) adaptation

また、本事例における実証試験の方法を図-5に、試験状況を写真-10に、その試験結果を表-1に示す。

実証試験は図-5に示すように、振動ローラーの前方では奥行き15m、横幅4mの緊急停止エリアを、振動ロー

ラーの後方およびブルドーザの前後方では奥行き8m、横幅4mの緊急停止エリアを設けて実施した。

そして設置したダミー人形に向かって重機を移動させ(振動ローラー：3~4km/h、ブルドーザ：3~4km/h)、ダミー人形が緊急停止エリアに入った際の、緊急停止制御の発動有無を検証した。

その結果、安定して緊急停止が発動することを確認した。更に停止時の機械と人との平均距離も、表-1に示すように、目標としていた3m以上を達成することができた。

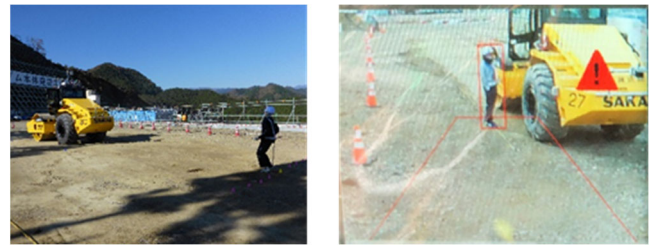


写真-10 振動ローラー適応の実証試験状況(左)と検知状況(右) 注2)

Photo.10 Verification test(L) and detection(R) situation for vibration roller adaptation

表-1 振動ローラーとブルドーザ適応の実証試験結果
Table 1 Verification test result for vibration roller and bulldozer adaptation

機械(移動方向)	平均停止距離[m]	成功率[%]
振動ローラー(前進)	9.9	100
振動ローラー(後進)	5.8	100
ブルドーザ(前進)	8.0	100
ブルドーザ(後進)	5.1	100

3.3 実証事例3：第3象限

第3象限部の撮影データ例を写真-11に示す。どちらもバッテリーロコに設置したカメラによるものである。山岳トンネル工事現場では比較的明暗差が小さく、細かい資材等もないことから、縦軸は低コントラスト、横軸は簡素の第3象限に分類される。

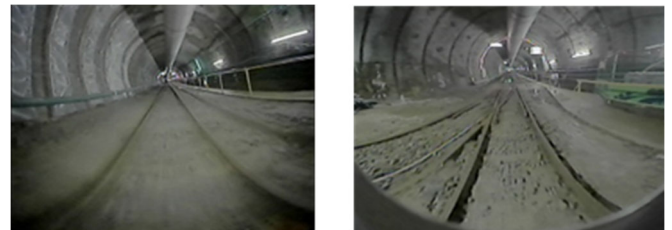


写真-11 第3象限の撮影データ
(左：前方，右：後方)

Photo.11 Imaging data in the 3rd classification
(L:front, R:rear)



写真-12 バッテリーロコへの適応事例①
(左：前方，右：後方)

Photo.12 Application example to battery loco①
(L:front, R:rear)

写真-12に本現場における T-iFinder のバッテリーロコへの適応事例を示す。前方後方どちらも監視可能となるよう、カメラを設置している。

また、本事例における実証試験方法を図-6 に、試験状況と検知状況を写真-13,14 に示す。

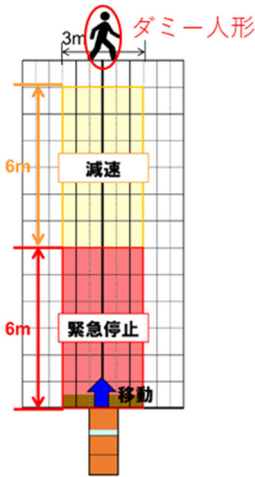


図-6 バッテリーロコ適応の実証試験方法

Fig.6 Verification test method for battery loco adaptation

実証試験は、図-6 に示すように奥行 6m，横幅 6m の緊急停止エリアと、同じ横幅で奥行 6m～12m の減速エリアを設けて実施した。



写真-13 バッテリーロコ適応の実証試験状況①
(左：前進，右：後進)

Photo.13 Verification test situation for battery loco adaptation①(L:move ahead, R:move backward)

そして設置したダミー人形に向かって、バッテリーロコを 3~4km/h で移動させ、ダミー人形が減速エリアに入った際の減速制御と、緊急停止エリアに入った際の緊急停止制御を検証した。

その結果、いずれも安定して制御が行えることを確認した。

更に、停止時の機械と人との平均距離も 5.1m と、目標としていた 3m 以上を達成することができた。



写真-14 バッテリーロコ適応の検知状況① 注2)

Photo.14 Detection situation for battery loco adaptation①

3.4 実証事例 4：第 4 象限

バッテリーロコ固定カメラによる第 4 象限部の撮影例を写真-15 に示す。本データ例はシールドトンネル工事現場であり、照明が多いために明るい、暗い場所が少ないため、明暗差は小さい。また、資材等は少ないが地面に細かい模様が多いことから、縦軸は低コントラスト、横軸は複雑の第 4 象限に分類される。



写真-15 第 4 象限の撮影データ(左：前方，右：後方)

Photo.15 Imaging data in the 4th classification
(L:front, R:rear)

写真-16に第 4 象限における T-iFinder のバッテリーロコへの適応事例を示す。

また、本事例における実証試験の状況を写真-17 に示す。

なお実証試験方法は、実証事例 3(図-6)と同様とした。その結果、本事例においても安定して減速と緊急停止が発動することが確認できた。更に停止時の機械と

人との平均距離も目標としていた 3m 以上を達成することができた。



写真-16 バッテリーロコへの適応事例②
(左：前方，右：後方)
Photo.16 Application example to battery loco②
(L:front, R:rear)

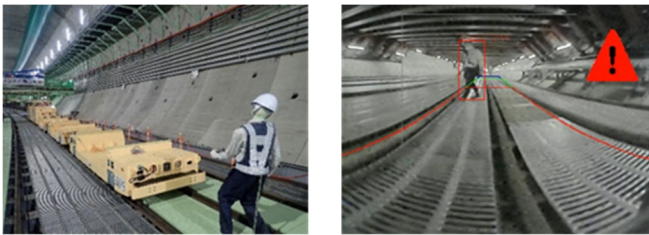


写真-17 バッテリーロコ適応の実証試験状況(左)と検知状況(右)② 注2)
Photo.17 Verification test(L) and detection(R) situation for battery loco adaptation②

写真-18 に第 4 象限における T-iFinder の特殊車両(40t)への適応可能性検証事例を示す。本事例においては制動距離が長い為、遠距離用カメラと近距離用カメラを併用し、遠近両方に対応可能な構成とした。



写真-18 特殊運搬車両(40t)への適応可能性検証事例
Photo.18 Example of applicability verification to transporter

また、本事例における実証試験の方法を図-7 に、試験状況を写真-19 に、その試験結果を表-2 に示す。

実証試験は図-7 に示すように奥行 15m、横幅 4m の緊急停止エリアを設け、設置したダミー一人形に向かって特殊運搬車両を移動させて実施した。更にダミー一人形が緊急停止エリアに入った際の、緊急停止制御の発動

を検証した。

その結果、安定して緊急停止が発動することを確認した。加えて、停止時の機械と人との平均距離も表-2 のとおり、目標としていた 3m 以上を達成することができた。

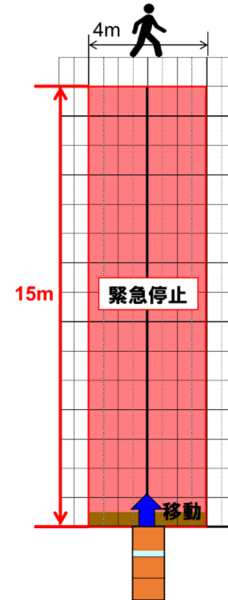


図-7 特殊車両(40t)適応の実証試験方法
Fig.7 Verification test method for transporter(40t) adaptation

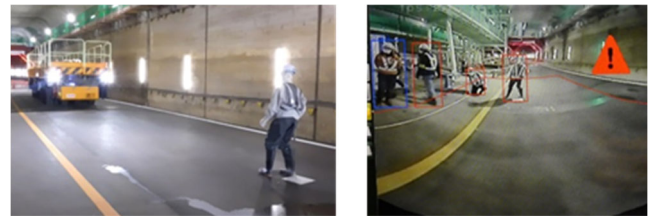


写真-19 特殊車両(40t)適応の実証試験状況(左)と検知状況(右) 注2)
Photo.19 Verification test(L) and detection(R) situation for transporter(40t) adaptation

表-2 特殊車両(40t)の実証試験結果
Table 2 Verification test result for transporter(40t) adaptation

速度[km/h]	平均停止距離[m]	成功率[%]
3	13.1	100
15	5.9	100

4. おわりに

国土交通省は 2022 年 3 月に「建設機械施工の自動化・自律化協議会」を設立した。自動・自律施工普及に向けて設立された協議会の資料⁴⁾では、「自動・自律施工の導入促進するための最重要事項は施工における安全確保である。」という意味の一文とともに、図-8 が

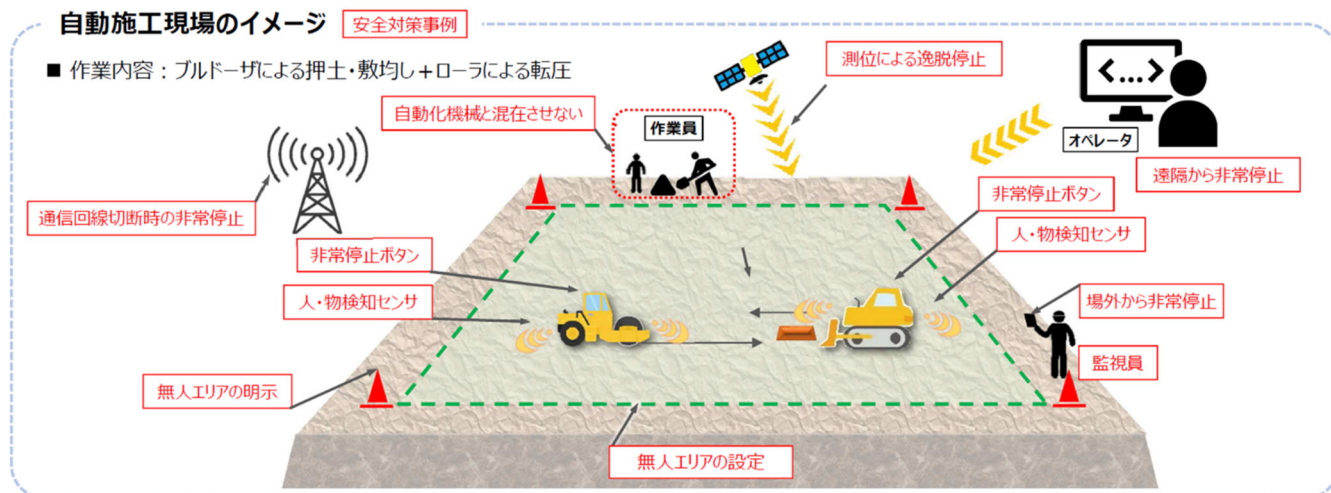


図-8 自動施工現場のイメージ⁴⁾
 Fig.8 Image of automatic construction site⁴⁾

示された。この中で人・物検知センサは、自動施工現場における安全対策事例で、構成要素の一つに挙げられている。

個々の機器に必要な性能など詳細は今後議論されていくものと思われるが、T-iFinder は冒頭に述べた通り、無人化・自動化建機でのニーズも視野に入れて開発したものであり、これまでの実証を通じて改良したシステムや、そこで得た実績や導入のノウハウは、自動施工においても同様に活用可能である。

今後、新規の現場で使用する際には、使用場所での撮像後に、本報で報告した 2 軸 4 象限の画像分析手法が適用可能で、分析に基づいた画像特徴の近い現場データを用いて、その場所に特化した AI を速やかに構成することが可能となる。また、警報出力を 3 段階（注意・減速・停止）用意しており、段階毎に別々の検知エリアを設定する方式のため、現場環境や建設機械の特性、カメラ設置個所の違いなどにも柔軟な対応が可能である。

一方、ハードウェア面では建設機械への搭載が可能な 12cm×24cm×34cm 程度の筐体にコンパクトに収納し、消費電流は 12V 電源で最大 3A 程度に抑えた。加えてバッテリー上がりや電源スイッチの ON/OFF し忘れへの対策として、建設機械のキー操作に連動した起動/シャットダウン機能も備えている。

更に、遠隔での監視や設定を可能とするため、ネットワーク対応機能の追加も考えていく。

今後は、T-iFinder の改良による重機との接触災害対策は元より、その他の災害要因となり得る事象についても対策を検討し、継続的な安全性向上へと繋げていきたい。

謝辞

本実証にあたり、全国の作業所職員の皆様、協力会社の皆様に多大なるご協力と貴重なご意見を頂きました。ここに感謝の意を表します。

注

- 注1) 無人化は、遠隔手動操作を示す。
- 注2) 検知状況の確認は、停止確認とは別に、安全のため重機停止状態で行った。

参考文献

- 1) 令和 2 年における労働災害発生状況（確定）、厚生労働省労働基準局安全衛生部安全課、令和 3 年 4 月
- 2) 遠藤亮雄，青木浩章，稲葉誠一，安田勇介：AI 人体検知搭載の後付け可能なバックホウ自動停止システムの開発 土木学会全国大会第 75 回年次講演会，VI-1131，2020
- 3) 青木浩章，石井喬之，田村創，大橋智仁：人工知能(AI)による人物検知システム用のデータベース構築，大成建設技術センター報，第 52 号，2019
- 4) 国土交通省：建設機械施工の自動化・自律化について，建設機械施工の自動化・自律化協議会，第 1 回 資料 - 2，令和 4 年 3 月