

AIを取り入れた軌道装置接近警報システムの開発

宮 川 克 己

近年では、労働災害の低減のため建設機械作業範囲内への人の立ち入りに対して警報装置や停止装置等が装備されているが、多くは土工事や舗装工事用機械への装備が一般的である。そこでシールド工事において資機材を搬送する軌道装置を対象として、軌条（レール）内に立ち入った人を検知して機関車運転手に警報を発する軌道装置接近警報システム（以下「本システム」という）を開発した。人物検知はカメラ画像を用いて軌条内にいる人だけを認識してシグナル警報を発するものである。本システムは試験運用を経て現場での本格運用を開始したので報告する。

キーワード：接近警報システム，軌道装置安全対策，AI 人物検知，脱着可能カメラ，無線ハイビジョンカメラ，長距離無線 LAN

1. はじめに

厚生労働省発表の令和5年の労働災害発生状況では、死亡者数は過去最少となったものの業種別では建設業の発生件数が最も多く¹⁾、また、業種や状況は不明だが事故の起因物が軌道装置のはさまれ・巻き込まれの労働災害件数は14件となっている²⁾（図—1）。そこでシールド工事では必要不可欠な軌道装置の安全対策を講じることとし、本システムを開発した。

2. 開発の目的

はさまれ・巻き込まれ等機械との接触に対する安全策は各種センサー技術が進み、最近ではカメラによる

測距技術も一般的になっておりエリア検知にも多数利用されている。そこで、脱着可能なカメラと警報出力をユニット化させ、建設機械の機種やサイズに関わらず使用できる汎用的な警報装置の開発を目的とする。

本システムでは、レール工法で使用する軌道装置を対象とし、軌道装置の運転席より高い被牽引車（ずり鋼車など）により前方視界が遮られた場合の安全性の向上を図り、編成長の増減に影響することなく運用を可能とする警報システムとした。

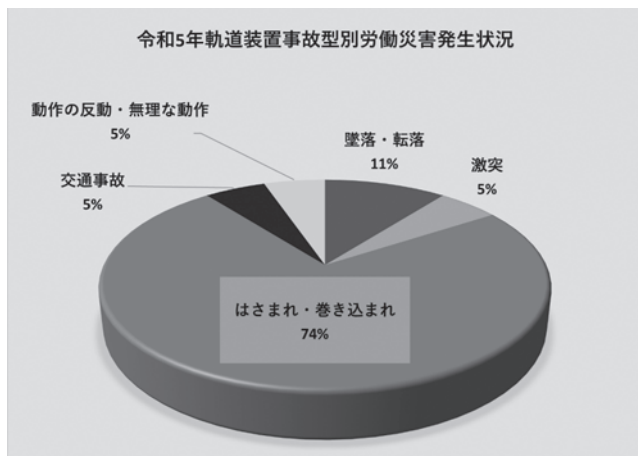
3. 本システムの特徴

(1) システム概要

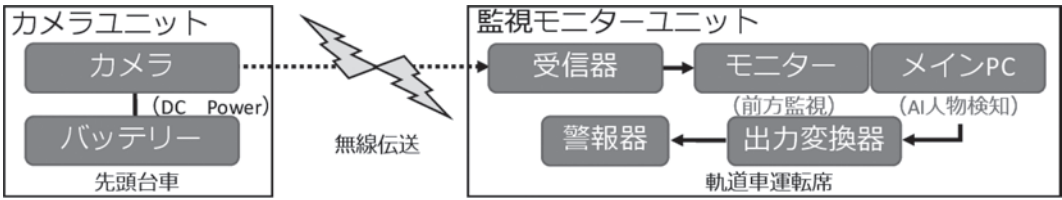
本システムは、シールド坑内の軌条内に立ち入った人物を検知させ、検知した際には警報を発令させるもので、視認部のカメラユニットと運転席の監視ユニットで構成する。両ユニット間は、無線伝送とし、ユニット間の離隔や軌道装置編成数を任意にできる特徴を持つ。人物検知は、監視ユニット側で受信したハイビジョン映像で前方監視を行いながら、その映像を基にAI人物検知を行う。さらに、AI処理結果から出力変換を行って警報器を働かせオペレーターに知らせるものである（図—2）。

(2) システム構成

視認部のカメラユニットは、軌道装置の先端部に専用架台を設けマグネットで取り付ける着脱可能方式と



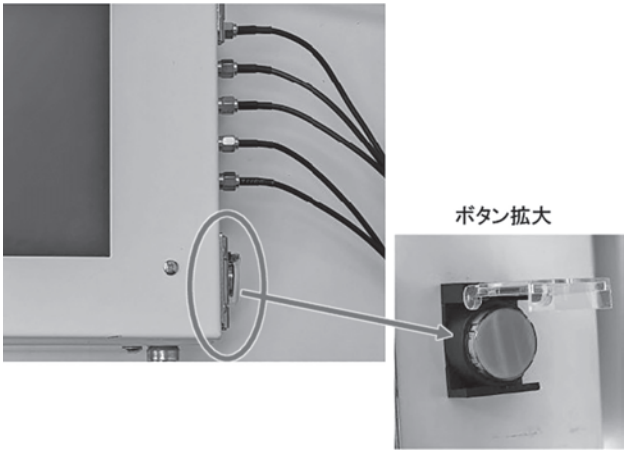
図—1 軌道装置の事故型別グラフ



図ー2 システム構成図

表ー1 ユニット仕様

カメラユニット	型式	英 TERADEK 社の CONNEX OUTDOOR	
		カメラ トランスミッター	レシーバー
	入力	視野角：105 度	5 GHz (RF)
	出力	5 GHz (RF)	720P60
	サイズ	95 mm×56 mm×85 mm	126 mm×93 mm×19 mm
	重量	405 g	331 g
	耐候性	防滴仕様	
	伝送距離	300 m (見通し)	
	入力電源	7-17 V DC	
	消費電力	5 W	
監視ユニット	主 PC	Intel Core i7	
	メモリ	8 GB	
	外部メモリ	1 TB SSD	
	サイズ	117 mm×51 mm×112 mm	
	モニター	9 インチ	
	解像度	1,024 × 600	
	警告表示	2 色積層シグナルタワー	



写真ー1 起動スイッチ

しており、軌道装置の編成に柔軟に対応できる。ユニットには無線カメラと電源用バッテリーを収納し、箱外に専用の送受信アンテナを取り出してある。

監視ユニットは、監視モニターを兼ねたメイン PC と無線カメラ用受信器、警報出力用出力変換器、警報用シグナルタワーを搭載する。また、監視ユニット側も箱外に専用アンテナを取り出して無線伝送を円滑にさせている。

(3) システム仕様

本システムの主な仕様は表ー1 の通り。

(a) カメラユニット

無線カメラは、HDR (High Dynamic Range) カメラで、ユニットにはカメラ専用バッテリーを内蔵する。バッテリー容量は約 7 時間で、監視ユニット側でバッテリー電圧表示を行い規定値以下に電圧が低下すると動作を停止する。

(b) 監視ユニット

機関車本体電源が投入されるとシステムと OS が自動起動する。OS シャットダウンは箱外に専用ボタンを設けている (写真ー1)。また、USB ハブ経由で 1 TB の SSD にカメラ映像を録画、保存機能を持つ。

保存は、撮り込み動画と AI 検知処理した動画の両方としている。

撮り込み動画は、以降の精度向上用に学習データの意味合いで保存している。カメラ受信機には HDMI 出力を備える。機関車本体が直流なので、ユニット内蔵機器は全て直流電源としている。

(c) 警報表示器

警報表示として 2 色の積層タイプのシグナル灯を設けブザー音と点滅で警報する。シグナル色は通常時「緑」で人物検知時「赤」としている。

(4) アプリケーション

人物検知アプリケーションは、安全通路等の軌条より外にいる人物には反応せず、軌条内にいる人物のみを検知する。検知エリアの範囲は任意に設定可能で、検知機能のオン・オフ設定を設けることで、単なる前方監視用カメラとしての運用も可能である。使用する人物検知 AI は、現場から取得した画像データを用いて深層学習技術を活用し、シールド坑内専用の AI モデルを学習させる。アプリケーションはまず、この AI を用いて画面全体の人物有無の分析を行う (写真ー2)。その後、エリアを限定したマスク処理 (写真ー3) を用いて検知エリアを軌条内だけに設定することで、設定エリア外の人物検知を除外し、軌条内にいる人物のみを検知するようにする (写真ー4)。また、検知精度は AI の判別閾値を変更することで精度の緩和や



写真—2 人物検知



写真—3 マスク画像処理



写真—4 軌条内人物検知

引き締めを行うことも可能としている。留意点としては、学習データとの画像が異なると識別が困難となるため、カメラの設置位置を、学習データ取得時と同じ高さにする必要がある。

4. 要素実験

機器選定に先立ちシールド坑内での要素実験を行った。開発の主目的である軌道装置の編成増減に対応させるため有線伝送はまず除外して、カメラ画像の伝送方法を決めるために、2通りの方法を選定し通信距離の比較を行った。

- ・WEBカメラ用長距離無線LAN伝送
- ・無線ハイビジョンカメラでの直接伝送

実験場所は、セグメント内径 $\phi 2,550$ mm、覆工は基本コンクリートと曲線部のみ鋼製セグメントで、急曲線 R25 m を含み、切羽には 14 台の後続台車が延長

約 74 m あるシールド坑内である（図—3）。

実験は、障害物（後続台車）のある切羽付近、見通しのきかない R25 m 曲線長 32 m の鋼製セグメント区間、コンクリートセグメントの直線区間の 3 箇所距離の計測を行った。

（a）切羽付近の測定

長距離無線LANは後続台車終端部（NO.14 台車）に受信機とモニターを固定し、アンテナを切羽前方に移動させ、無線ハイビジョンカメラは、カメラを後続台車先端部（NO.1 台車）に固定し、受信器とモニターを後方へ移動させ通信画像が乱れるところの距離を測定した（図—4）。

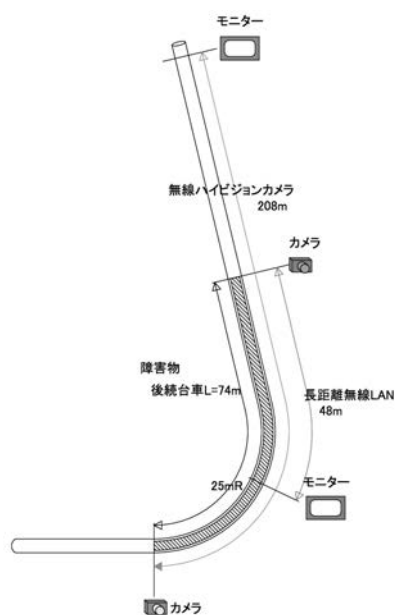
（b）曲線部の測定

曲線端部に受信機とモニターを固定し、全く見通せない状態でアンテナを移動させた。

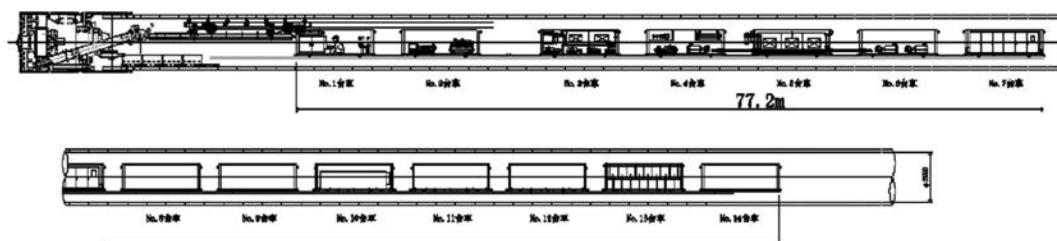
（c）直線部の測定

直線部では、受信機固定部前方に取って障害物（バッテリー機関車）を置いた状態で計測した。

実験に使用した長距離無線LANは、NETIS登録のマルチポプルータ MR300 を使用した（写真—5）³⁾。当仕様概要は屋外対応（IP66）で、周波数帯は免許不



図—4 測定箇所図



図—3 後続台車編成図



写真—5 マルチポプルーター MR300



写真—6 CONNEX Outdoor カメラとレシーバー

表—2 伝送可能距離

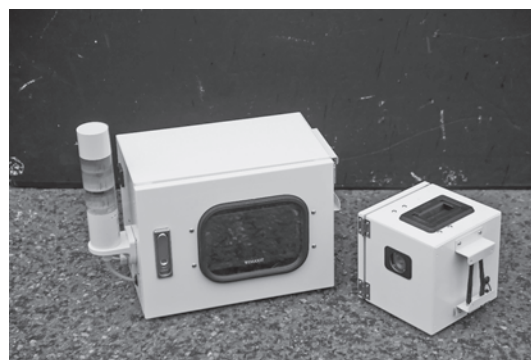
	長距離無線 LAN	無線ハイビジョンカメラ
切羽付近	48 m	208 m
曲線部	84 m	186 m
直線部	80 m	182 m

要の 5.470-5.725 GHz (W56), アンテナの指向性能が 13 dBi (23°) を取って上向き状態で実験した。一方の無線ハイビジョンカメラは, CONNEX OUTDOOR を使用した (写真—6)⁴⁾。各測定結果は表—2 の通りであった。

実験結果より, 無線ハイビジョンカメラの性能が非常に優れ, 坑内の悪条件でも通信距離が長いことが確認されたため, 使用機器は無線カメラでの直接伝送方式を採用することとした。

5. 試作機の製作と試験運用

画像伝送方式が決まり, 使用機器も決定したので, 機器類を収納できる各ユニットを製作した。ケースは金属製とし, 専用アンテナを函外に外出しさせ, 監視



写真—7 本システム試作機



写真—8 カメラユニット (試作機)



写真—9 監視ユニット (試作機)

ユニットにはシグナルタワーも取り付けした(写真—7)。

完成した試作機ユニットを用いて画像処理のための教師データの取得を目的としてシールド坑内にて画像録画を行った。撮影は, カメラユニットを走行させながら, カメラ前方で立位, 座位, しゃがみ込み, 前向き, 後ろ向きのみならず枕木から頭部のみ飛び出した状態等様々な体位撮影と, 異なる服装や複数人の重なり状態など出来る限りの画像撮影を行った。

取得した画像データを基に監視ユニット内 PC にディープラーニングで画像認識を AI 学習させ, マスク処理を行った後, 学習終了した本システムで実際の軌道装置に各ユニットを搭載し試験走行を行った (写真—8, 9)。試験結果は坑内照度や対象人物の体勢など状況によっては認識精度が弱い部分があったもの



写真—10 人物検知画像

の、目的である安全通路上の人物の非検知、軌条内の人物の検知という結果を得ることができた（写真—10）。この試験運用結果より、本システムは機能を満たすと判断でき、現場実装することとした。

6. 現場実装

(1) 実装に向けた改良

試験運用を経て現場実装に向け実験用プロトタイプモデルから実装用モデルに改良・再製作を行った。最も大きな改良点は、ユニットの小型化で特に軌道編成の最前部に設置するカメラユニットは資機材の積み込み、荷下ろしの際に接触損傷をさせないように可能な限り小型にした。監視ユニットも狭い運転席スペースを考慮してモニターを基盤の状態でケースに直に取り付け等ユニットの小型化を図った（図—5、写真—11）。

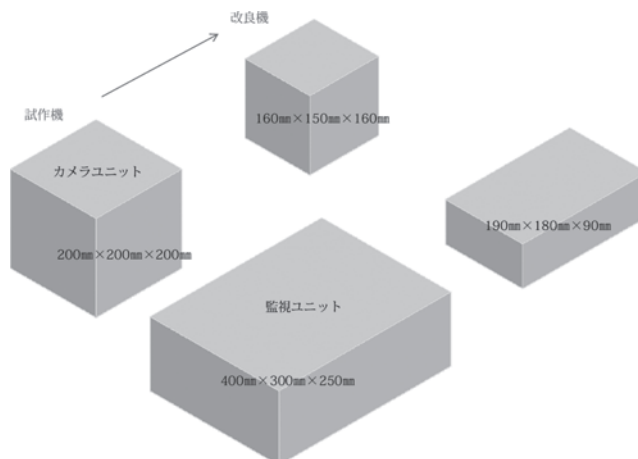
また、試験運用時の人物検知ですり抜けが見られたため、更に AI の追加学習及び AI 検出の閾値調整を行い精度の向上を図った。

(2) 現場実装

現場実装は、セグメント内径φ3,500 mm で、掘削土砂はズリ鋼車搬送方式の現場で運用開始した。使用前の懸念事項として、試験運用時のセグメント内径に比べ直径で約 500 mm 大きい坑内断面であるため試験運用検知モデルではカメラ画像が異なり人物検知が不能となる心配があったが、現場試運転では問題無く人物検知ができることが確認でき運用可能と判断した。

カメラユニットには専用の台座を複数作成し、ユニット本体にマグネットを取り付けることで1基のカメラユニットで軌道編成が変わっても本体を付け替えることで対応できるようにした。

実際に本システムを搭載、運用して約3ヶ月経過し



図—5 システム改良図



写真—11 本システム実装機



写真—12 使用状況

た使用状況の確認をしたところ、当初から懸念していた通りカメラユニットの衝突損傷が見られた。その他掘削土砂こぼれによる水洗浄水等のカメラユニット内への水混入、監視ユニットの汚損等劣悪な状態（写真—12）で機能不全な状態であったため、一時撤収し対策を講じている最中である。

(3) 現場実装の途中経過

使用環境に対してのハード対策が実作業現場では想定以上に苛酷であったのでシステム全体を激しい使用に耐えうる頑強な物に対処する必要が生じた。特に浸水対策は必須である。また、カメラユニット内に収納しているバッテリーの充電手間が、ユニットを小型化したため煩雑でやりづらいことも判明したため、もっと簡易に充電できる機能が必要と思われる。

7. おわりに

要素実験、試験運用を経て本システムの信頼性と有用性は確認できたが、誤検知や検知不足等が完全には排除されておらず、あくまでも安全運行を補完するシステムと認識している。現場実装においては、実際に現場運用して判明する種々の問題点が生じ、これらをフィードバックしている現状ではある。今後改良を重ね本システムが有効に活用できるように注力しているところである。

また次のステップとして、検知精度の更なる向上を図り、軌道装置の自動走行システムの安全装置の一環として本システム導入も視野に入れており、本システムで自動走行時の前方監視を行い軌条内の人物や物体を検知した際は、監視ユニットの出力信号を利用して機関車側に制御指令を出すことで自動走行制御に反映させることを考えている。

最後に本システム開発に当たり、(株)アクティオに多大な協力をいただき感謝する。

J C M A

《参考文献》

- 1) 令和5年の労働災害発生状況を公表
厚生労働省労働基準局安全衛生部安全課
令和6年5月27日付報道発表資料
- 2) 令和5年事故型別起因物別労働災害発生状況（12月末累計） 職場のあんぜんサイト労働災害統計「労働者私傷業報告」による死傷災害発生状況（令和5年確定値） 死傷災害統計確定値
- 3) NETIS 新技術概要説明情報より写真借用
- 4) CONNEX Outdoor カタログより写真借用

【筆者紹介】

宮川 克己（みやがわ かつみ）
(株)熊谷組
土木事業本部 土木技術統括部 機材部
技術部長

