

(22) トンネル内外における車両位置検知システムの開発

桑島 奨¹・森本 直樹¹・女賀 崇司²・藤原 大輔²

¹正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部（〒107-8348 東京都港区赤坂六丁目 5-11）

E-mail: kuwajims@kajima.com, naoki-morimoto@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 四国支店日下川新規放水路（呑口側）工事事務所（〒781-2151 高知県高岡郡日高村下分 3298-1）

トンネル工事では、複数の大型車両が坑内で稼働しており、安全の観点からクラクションを使った状況伝達など様々な対策がとられている。このような環境でお互いの位置関係を把握することは重要であるが、非 GNSS 環境下において、互いの位置関係を精度よくリアルタイムで把握する技術は確立できていなかった。また、坑内外を行き来する車両も多く、これらの車両の管理には坑内外で別々のシステムを用いる必要があるという課題もあった。今般、坑内外における車両位置をシームレスに測位して運行状況の一元管理を行うシステムを開発し、トンネル現場での運用試験を実施し、その有効性を確認した。

Key Words: tunnel, indoor positioning, measure location, Wi-Fi, beacon, operation management

1. 背景および目的

山岳トンネル工事において、坑内ではダンプトラックやアジテータ車といった大型車両が常に複数台稼働しており、これらがすれ違う際は決められた位置（離合箇所）で待機するなどの安全対策がとられている。しかし、ドライバーが他車両の位置を確認する場合には、他車両のクラクション音や一部で設置されている信号機を頼りにするなどの対応が一般的であり、互いの位置関係の把握は限定的である。そのため、安全性と効率性の観点から、多くのトンネル現場では互いの位置関係を精度よくリアルタイムで把握するためのシステムが求められている。

しかしながら、非 GNSS 環境下の測位については、Wi-Fi の電波強度や PDR（歩行者自律航法）を活用し、人や移動速度が遅い機械の測位は実現していたものの、ダンプトラックのような高速な移動体への対応は容易ではなかった。また、坑内と坑外の双方を行き来する車両の位置情報においては、それぞれの測位方式の違いにより、別々のシステムを別々の画面で操作するなど、現場運用が煩雑になるといった課題もあった。

そこで、坑内外における車両の位置情報をシームレスに測位し、車両運行状況の一元管理を行うためのシステムを開発した（図-1）。

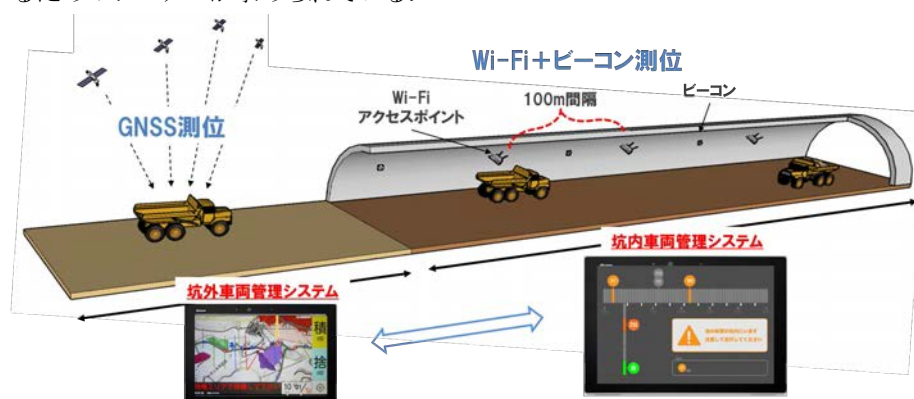


図-1 トンネル内外シームレス位置検知のイメージ

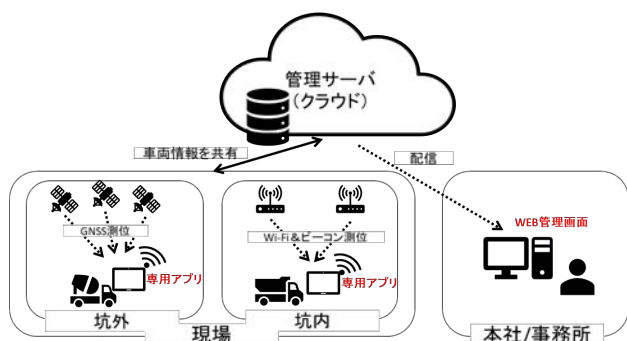


図-2 システム構成

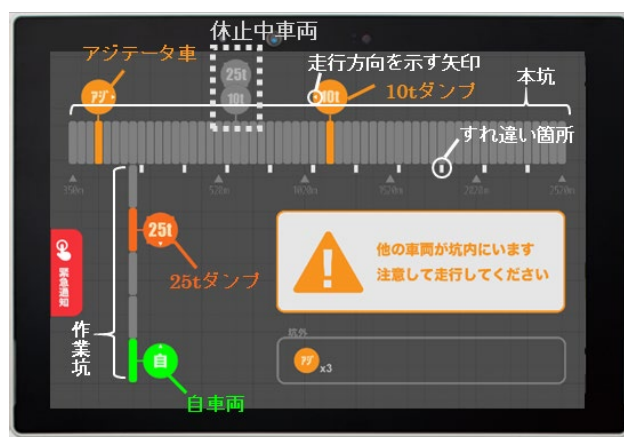


図-3 車載端末の専用アプリケーション画面

2. システム概要

本システムは、専用のアプリケーション（以下、専用アプリ）をインストールした Android タブレット端末（以下、車載端末）を各車両の運転席に設置し、クラウド上に構築した管理サーバで各車両の運行状況を一元管理する（図-2）。ドライバーは、車載端末の専用アプリから自車両と他車両の位置関係をデフォルトしたマップ上で確認する（図-3）。また、現場事務所や本社など施工現場から離れた拠点において、現場状況を確認できるようにするため、WEB ブラウザで閲覧できる管理画面（以下、WEB 管理画面）を構築した（図-4）。

各車両の車載端末は、管理サーバに車両情報（自己位置、端末 ID、進行方向の情報）を定期的送信し、管理サーバで各車両情報を一元的に管理する。車載端末はこの送信処理と同時に、管理サーバに他車の車両情報の問合せを行い、専用アプリ上で自車と他車の位置関係を確認できるようにした。Web 管理画面では、現場図面を反映した地図上に、管理サーバへ蓄積される各車両情報を重畳表示することで、現場全体の車両情報を俯瞰的に管理できる。



図-4 WEB 管理画面

本システムは以下の特徴を有する。

(1) トンネル内における位置検知

トンネル現場では坑内で IP 電話やデータ通信を利用することを目的として 100~200m おきに Wi-Fi アクセスポイント（以下、AP）が敷設されており、専用アプリはこれらの AP の電波を検知して自己位置の測位を行う。専用アプリは、検知した電波情報（電波強度および AP の固有識別情報）と各 AP の設置位置情報をもとに、電波強度を按分し自己位置を算出する。

AP 間の中間地点にはビーコンを設置することで絶対位置の補正を行う。AP の電波強度は距離が離れるにつれて強度が減衰するため、最も電波強度が低くなる AP 間の中間地点では精度が低下しやすい。そこで、この地点にビーコンを設置することで精度の低下を防ぐ。また、図面情報をもとにカーナビゲーションシステムに用いられるマップマッチングを適用することで、車両位置がトンネルの線形から外れないよう位置情報を修正する。

また、専用アプリでは車載端末に搭載される地磁気センサーを利用して、各車両の進行方向を判定可能にした。

(2) トンネル内外のシームレス測位

トンネルの坑外と坑内でドライバーが求める要件が異なるため、本システムでは 2 つのアプリケーションを活用する。専用アプリは坑内外を自動判定することでそれぞれのアプリケーションを状況に応じて自動で切替る。

坑内では、他車両とのすれ違いや U ターンを行うことができる場所（離合箇所）が決められているため、坑内で稼働している他車両と自車両の位置関係や進行方向の把握が重要となる。そのため、坑内に車両が侵入すると前節で述べた専用アプリが自動起動し、ドライバーは車載端末に表示された専用アプリ画面から坑内の状況確認をできるようにした。

坑外では、アジテータ車など施工現場外でも稼働する車両に対して、一般道における通行ルートのご案内や区間ごとの速度制限およびすれ違い待機エリア指示などが必

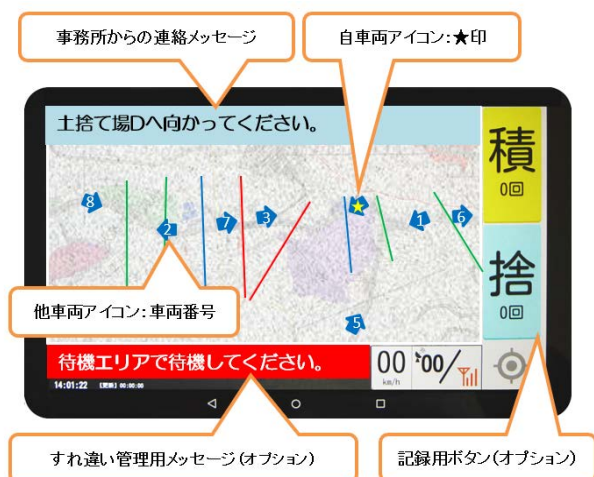


図-5 既存の坑外車両管理システム

要となるため、トンネル外へ車両が出た際に既存の車両運行管理アプリ²⁾が自動で立ち上がり、ドライバーの運行管理をできるようにした(図-5)。

坑外ではGNSSによる単独測位を用いて車両の運行管理を行う。既存の坑外位置検知アプリが起動中でも専用アプリがバックグラウンド実行しており、坑外での位置情報を管理サーバに送信する。これにより、管理サーバでは坑内外の全車両の車両情報が管理できるため、各遠隔拠点ではWEB管理画面から現場全域の運行状況をリアルタイムに把握できる。

(3) 切羽到達回数の自動カウント

WEB管理画面では各車両の運行状況表示に加え、車種ごとに切羽へ到達した回数を自動的にカウントする機能を実装した(図-4)。切羽付近に切羽到達を検知するための専用ビーコンを設置し、車両がこのビーコンに接近すると、車種に応じて「ずり出し」時における土砂運搬回数もしくは「吹付け」時における生コン運搬回数を自動カウントし、WEB管理画面に表示する。これにより、トンネル掘削サイクルの進捗状況をリアルタイムに把握できる。

(4) 安全管理機能の強化

安全性の向上と作業効率化を目的として、専用アプリとWEB管理画面の双方向コミュニケーションを実現するための機能を実装した。専用アプリには緊急通知ボタンを搭載し、坑内作業中に異常が発生した際にただちにWEB管理画面をモニタリングしている拠点へ警報を発信することができる。WEB管理画面からは全車両に対する緊急警報の発信機能や特定の車両へ任意の作業指示を通知するためのメッセージング機能を搭載させた。

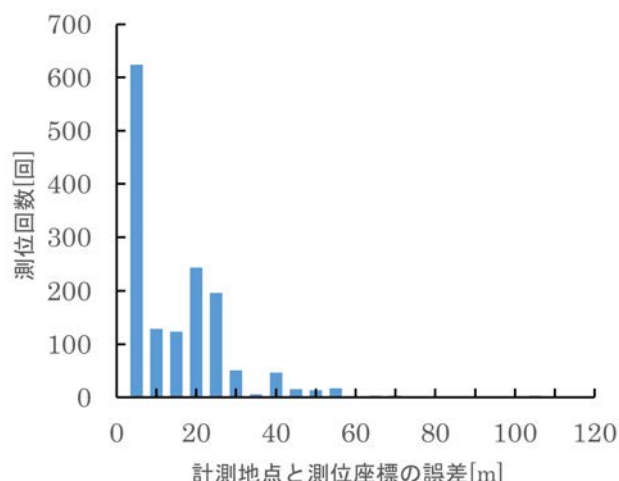


図-6 精度検証試験における測位誤差のヒストグラム

表-1 計測地点と測位座標の誤差

最大値[m]	最小値[m]	平均値[m]	標準偏差
117.5	0	12.6	14.8

3. 実証試験

本システムについて「平成 29-32 年度 日下川新規放水路工事」にてトンネル内での測位精度を評価するための実証試験および実運用試験を実施した。なお、本現場は既設の AP が 100m おきに敷設されており、各 AP の中間地点(各 AP から 50m 地点)に測位ビーコンを配置した。車載端末は、ドライバーの視認性や AP・ビーコンの電波の受信性を考慮し、ダッシュボードの上に設置した。

(1) 精度確認試験

検証方法は、100m 間隔に設置されている AP 設置地点、ビーコン設置地点、および AP-ビーコン間の中間地点の計 30 ヶ所において、専用アプリを搭載した Android タブレット端末を持った測定者が 50 秒間測位を行い、計測地点との測位誤差を計測した。なお、専用アプリの測位回数は 1 秒間に 1 回とした。

実証試験の結果、トンネル内における測位誤差が最大で 100m 以上となるケースがあったものの、平均誤差は 12.6m となり、測位誤差の値はサンプルの 88.5% で 25m 以内に収まることがわかった(図-6 および表-1)。これにより、非 GNSS 環境下においても車両運行管理に必要な精度を満たすことが確認できた。なお、誤差が大きくなる箇所については、AP およびビーコンの設置地点に大型車両が一時的に停車しており、これに電波が遮断されたことが原因であると考えられる。



図-7 ずり出し時のダンプトラックの位置履歴



図-8 大型車両同士のすれ違い時の様子

(2) 実運用試験

掘削作業において本システムの有効性を検証するための適用試験をおこなった。

ずり出し時におけるダンプトラックの測位結果より、トンネル線形に合わせて細かく測位できていることが確認でき、非 GNSS 環境下においても時速 30km で走行する車両に対して本測位方式が有効であることが確認できた(図-7)。なお、一部の区間では、前節で述べた大型車両の停車による電波強度低下などの原因で測位結果がずれる箇所を確認したが、現場運用において大きな影響を与えるものではなかった。

また、地磁気センサを用いた進行方向判定や切羽到達カウント機能、坑内外のシームレス測位などについても、現場環境で正常に動作することが確認できた。

4. 本システムの効果

本システムにより、ドライバーは手動でアプリケーションを切替える動作なく現場全域の運行管理を実現でき、本来の作業に集中しつつ、他車や離合箇所との位置関係および他車の進行方向をリアルタイムで把握できる。これにより、離合箇所が限られた環境においても効率的に作業を進めることができた。また、車両の切羽到達回数の自動カウント機能を使って、掘削作業の進捗をリアルタイムに把握することで、掘削の1サイクルタイムあたりの車両待機時間を10%程度削減できた。

さらに、坑内における測位精度の向上により、狭隘部におけるすれ違い防止(図-8)や、見通しの悪い作業坑と本坑の交差部においても、最適な進入管理を実現することができ、安全性の向上にも繋がった。この他、メッセージング機能による双方向コミュニケーションを実現することで、安全性および生産性を向上させた。



図-9 現場事務所におけるモニタリングの様子

5. まとめ

本システムは、トンネル内における移動車両の位置のリアルタイム把握を可能とし、これまで実現が容易でなかった坑内外の全車両の運行管理をシームレスに実現した。そして、ドライバー同士の相互位置把握だけでなく遠隔拠点からの常時モニタリング(図-9)を実現することで、安全性だけでなく生産性の向上にも効果があることを確認した。

今後は、坑内における測位精度の向上に加え、現場の運用負荷を低減するための機能追加や他現場展開を見据えた汎用性の向上など、開発を進めていく。

参考文献

- 1) 森本直樹ら：スマートフォンを活用したトンネル坑内位置検知システムの開発・適用、土木学会第71回年次学術講演会，VI-896，p1791-1792，2016。
- 2) 藤本健治郎：GPS 車両運行管理システムについて、電気設備学会誌，37巻10号，p720-723，2017。