自動運転バスの運行を補助する路車協調システムの有用性の検証

大谷育樹[1]・富田洋史[2]

[1]大日本ダイヤコンサルタント（株）関東支社（〒330-6011 埼玉県さいたま市中央区新都心11-2）
[2]大日本ダイヤコンサルタント（株）インフラ技術研究所（〒102-0075 東京都千代田区三番町6-3）

鳥取市では，バスドライバーの高齢化や人員不足が深刻化し，バス路線の維持が困難となる中，自動運転バスの社会実装に向けた検討を行っている．本業務では，鳥取市が実施する自動運転実証調査事業と連携し，自動運転バスの車載センサでは把握困難な進路前方の道路交通状況について，道路上に設置した路側センサから自動運転バスへ情報提供を行う路車協調システム実証実験を実施し，路車協調システムに求められる機能や情報提供が必要な情報等について技術検証を行った．検証の結果，物標の位置や種別等について，必要な鮮度で，十分な精度・信頼度をもって路車協調システムから自動運転バスへ情報提供できていることを確認できた．

Key Words ： *自動運転，路車協調システム，ITS（高度道路交通システム），実証実験*

１．背景・目的

我が国では，特に地方都市において過度な自家用車依存が進行しており，バス等の公共交通利用者数の減少に歯止めがかからない中，高齢者等の日常的な移動を支える地域公共交通の維持・確保は喫緊の課題となっている．また，公共交通の運行を担うドライバーの高齢化や人員不足も深刻な問題となっており，このような状況に対して，自動運転バスの導入に向けた検討が全国各地で行われている．

一方で，一般車や歩行者等が混在する複雑な道路環境である市街地の交差点等では，自動運転バスの車載センサのみでは周辺交通の状況把握が困難な場合があり，自動運転を行う際の課題となっている．

このような課題に対し，車載センサでは状況把握が困難な交差点等において，自動運転バス等へ情報提供を行う路車協調システムの活用が期待されており，路車協調システムが備えるべき機能や情報提供すべき内容等について，今まさに技術検証が進められている．

本業務は，鳥取市が実施する自動運転実証調査事業と連携した路車協調システム実証実験を実施し，レベル4自動運転移動サービス実現に向け，路車協調システムに求められる機能や必要とされる情報，提供した情報の有用性等に関する技術検証を行うことを目的に実施した．

２．路車協調システム実証実験の概要

(1) 自動運転実証調査事業の概要

鳥取市では，バス路線の維持が困難となる中，令和3年度に，行政と交通関係事業者で構成する「鳥取市次世代モビリティ推進会議」を設置し，自動運転バスの社会実装に向けた検討を行っており，今回で3回目の自動運転バスの実証運行となる．

既存の電気バスに自動運転機能を搭載したティアフォー製のMinibusを用いて約4.5kmの技術検証ルート（同時に実施された試乗ルートとは異なるルート）を走行するものであり，自動走行時の最高速度は時速35kmとなっている．なお，自動運転技術的にはレベル4相当であるものの，実証運行は有人運転のためレベル2にて運行（原則自動運転にて走行）し，必要に応じてドライバーが手動介入を行った．

(2) 路車協調システムの概要

路車協調システムとは，自動運転バスの手動介入が発生しやすい道路環境において，道路インフラのセンサ等によって道路状況（自動運転バスの死角から接近する車両の情報等）を検知し，自動運転バスへ情報提供を行うシステムのことである（図-1）．

本実証で使用した路車協調システムは，既設柱へ4Kカメラ等の機器（路側センサ）を設置し，高解像度な4Kカメラを用いた物体認識AIにより，交差点へ接近する車両情報をデジタル化した上で4G-LTEを用

いて自動運転バスの車載システムへ直接伝送し，車載モニタ上で車載センサ検知範囲外の情報を可視化するものである．

これにより，自動運転バスの車載センサのみでは検知が困難な，死角や遠方から接近する車両の情報等を路側センサで補完し，自動運転バスへと情報提供を行うことで，自動運転バスの安全・円滑な運行を支援するものである．

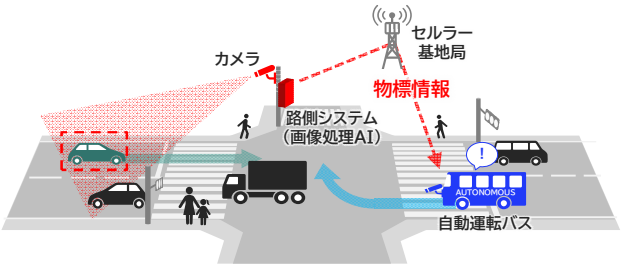

図-1　路車協調システムのイメージ

(3) 実証実験の内容

a) 実証実験箇所の選定

自動運転バスの運行ルート上の交差点を対象に，信号機の有無や交通量，横断歩道の有無，交差点の見通し，車線数等の観点から現地状況を確認した．

加えて，自動運転バスの車載センサのみでは検知困難な範囲を検証するため，ハンディLiDARを車載センサと見立て，ハンディLiDARにて運行ルートを計測し，検知可能な範囲を検証した（図-2）．

以上を踏まえ，運行上のリスクがあり，かつ，自動運転バスの車載センサのみでは状況把握が困難と想定される箇所として，「国道53号左折合流部」及び「特殊形状交差点」の2箇所を実証実験箇所（路車協調システムの設置箇所）として選定した．

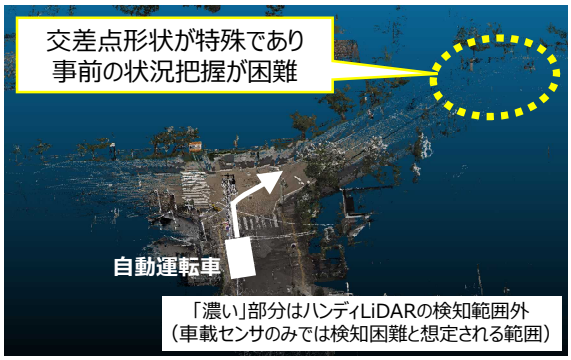

図-2　ハンディLiDARによる計測結果

b) 実験ユースケースの設定

「国道53号左折合流部」は，合流先となる国道53号（本線）上を速度の速い車両が途切れなく走行している状況であり，本線へ左折合流する手前の一時停止線からは，進行方向右手から高速で接近する本線車両を車載センサのみで検知することは困難であった．そのため，本線へ左折合流するタイミングで，高速で接近する本線車両を初めて認識した際に急ブレーキが発生し，運行の安全性・円滑性を阻害することが懸念された．

そこで，車載センサの検知範囲外の遠方から高速で接近する車両（交差点までの到達時間が短い車両）の有無を事前に検知・情報提供を行う「遠方車両の捕捉による左折合流支援」をユースケースとして設定した（図-3）．

図-3　国道53号左折合流部におけるユースケース

「特殊形状交差点」は，交差点（丁字路）の形状が特殊であり，進路前方が死角となるため進行方向右手から接近する車両を車載センサのみで検知することは困難であった．そのため，交差点進入のタイミングで，進行方向右手から接近する車両を初めて認識した際に急ブレーキが発生し，運行の安全性・円滑性を阻害することが懸念された．

そこで，車載センサの検知範囲外の死角となる進路前方から接近する車両の有無を事前に検知・情報提供を行う「車載センサの死角情報捕捉による右折合流支援」をユースケースとして設定した（図-4）．

図-4　特殊形状交差点におけるユースケース

なお，両ユースケースともに，交通状況を俯瞰的に把握できる箇所に路車協調システム（路側カメラ等の機器）を設置（図-5）した上で，取得した物標の位置（経緯度），種別（自動車，二輪車），方向を自動運転バスの車載システムへ直接伝送し，車載センサによる検知状況と合わせて路車協調システムで検知した情報を車載モニタ上に可視化した．

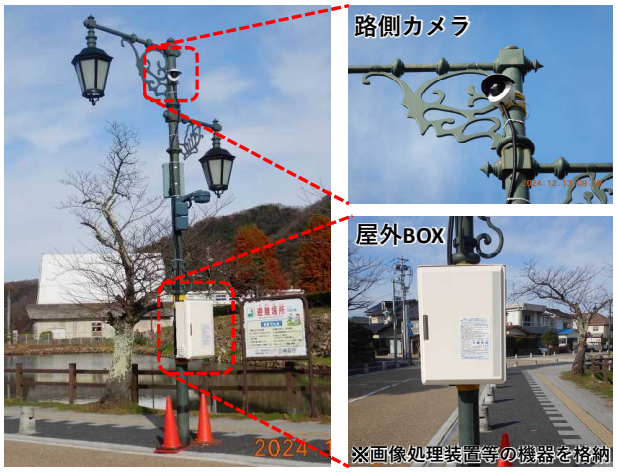

図-5　路車協調システムの設置状況

３．効果検証

(1) 運行結果

自動運転バスによる技術検証ルートの運行は，令和7年12月の平日6日間（午前中の時間帯）に31便行われ，この間，路車協調システムにて実証実験箇所の交通状況等の検証用データ100サンプル（各ユースケース50サンプルずつ）を取得した．

なお，運行期間中は曇または晴の天候が多く，時折小雨や降雪がみられることもあったほか，前日夜に堆雪した雪が残る状況で走行を行うこともあった．

(2) 路車協調システムに求められる機能の検証

路車協調システムに求められる機能として，路車協調システムそのものの精度（検知率）や取得したデータの鮮度（情報提供時間），提供した情報の信頼度（識別率）について効果検証を実施した．

a) 路車協調システムの精度（検知率）

実際に走行していた車両を物体認識AIが漏れなく検知できていたか，撮影した映像データ等をもとに検証を行った．具体には，路車協調システムで検知していた秒数を，路側カメラに実際に写っていた秒数で除し，路車協調システムが物標を検知できていた割合について検証を行った（図-6）．

検証の結果，いずれのユースケースにおいても検知率100%が大半を占め、高精度で物標を検知していたと言える（表-1）．

一方で「国道53号左折合流部」のユースケースでは，検知率が90%未満となる事象が1件確認された．この事象について，路車協調システムによる検知状況を確認したところ，後続車と重なる複数の車両を1台の車両として検知していたことが原因であることがわかった（図-7）．このような事象への対応として，類似の状況の機械学習により，物体認識AIの検知精度向上につながるものと考えられる．

表-1 路車協調システムの精度（検知率）

	100%	90～99%	90%未満	最低値	中央値	最大値
国道53号左折合流部	47	2	1	57.5%	100%	100%
特殊形状交差点	47	3	0	96.0%	100%	100%

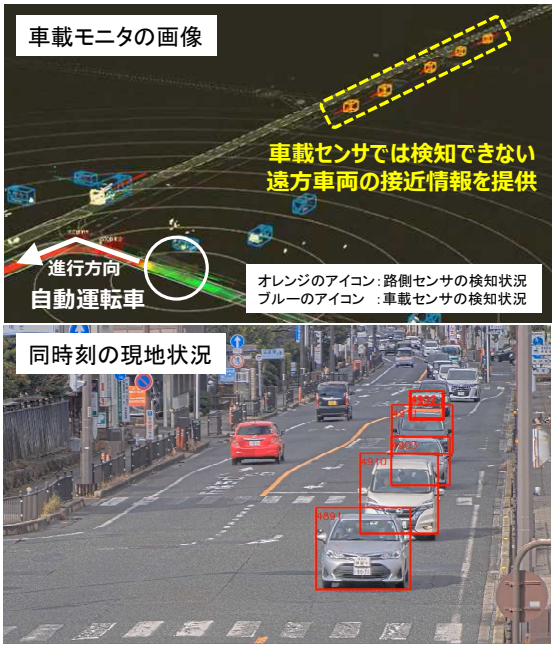

図-6　路車協調システムによる検知状況

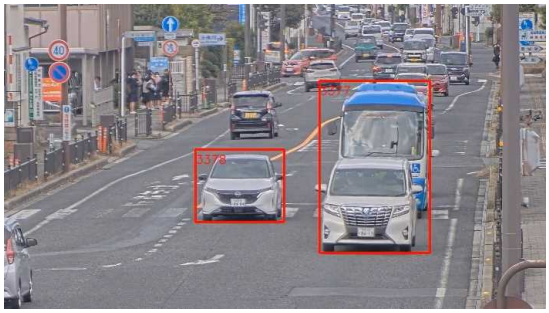

図-7　検知率が低下した際の状況

b) 取得したデータの鮮度（情報提供時間）

路車協調システムが物標を検知してから，自動運転バス内の車載モニタに可視化するまでの時間について，路車協調システムのログデータをもとに，車載モニタで情報を受信した時刻と路車協調システムが情報を発信した時刻の差分により集計・分析した．

中川らの研究成果[1)]によると，ドライバーが危険事象に遭遇した際にブレーキ操作を行うまでに要する時間（認知反応時間）の平均は0.75～0.8秒であり，今回使用したシステムの情報提供時間はこれよりも速い結果となった．人間のドライバーの反応時間よりも速く，1秒未満のほぼリアルタイムで情報提供できていたことから，路車協調システムは十分な鮮度で情報提供できていたと言える．

加えて，参考までに，過年度実施されたローカル5Gによる通信を行った際の情報提供時間との比較検証を行った．機器の設置箇所や環境が同一ではない

ため一概に比較はできないが，ローカル5G を用いた場合の情報提供時間は，4G-LTEを用いた場合の半分以下であった（**図-8**）．本実証実験の結果からは，自動運転バスへ情報提供を行う際の通信方式として、4G-LTEによる通信でも支障がないことが確認されたが，通信方式の採用にあたっては，歩行者の飛び出しへの対応等，より短時間での情報提供が必要な場合にはローカル5Gを採用するといったように，情報提供を行うユースケースも踏まえて選定する必要があると言える．

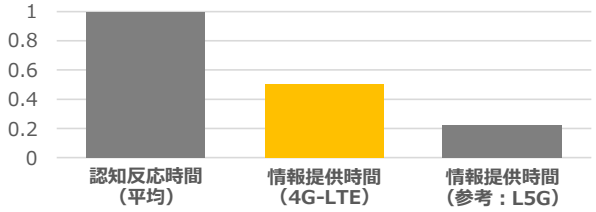

図-8　認知反応時間と情報提供時間の比較（対認知反応時間比）

c）提供した情報の信頼度（識別率）

識別率は，実際に走行していた物標種別と物体認識AIが識別した物標種別に誤識別や未識別がないか検証を行った．

誤識別は，撮影した映像データ等をもとに，路車協調システムで検知した物標が，実際とは異なる物標として判断（自動車を二輪車として判断する等）された割合について，検知対象物を誤って他の種別として識別していた時間を，検知対象物を正しく識別していた時間で除して算出した．

未識別は，ログデータをもとに，実際に物標が存在する状況下において，路車協調システムで検知できている物標が，何らかの原因で処理の段階において物標ではないと判断された割合について，検知した物標のうち識別できなかった物標数を，検知した物標数で除して算出した．

検証の結果，本実証では誤識別や未識別は発生しなかった（識別率100%）ことから，十分に信頼度の高い情報提供を行えていたと言える．

(3) 検証結果の取りまとめ整理

以上の検証結果より，本実証においては必要な精度で，十分な鮮度・信頼度をもって自動運転バスへと有益な情報を提供できていることが確認できた．

これらのことから，路車協調システムの活用により，車載センサでは検知が難しい遠方や死角の交通状況について捕捉し，自動運転バスまで大きな欠損なく伝送できていることを確認でき，急停車防止（ヒヤリハット回避）等に活用できる見込みがあることを確認できた．

加えて，検証結果を踏まえ，路車協調システムを今後社会実装していく際に備えるべき機能や要件，運営上の課題と解決策について整理を行った（**表-2,3**）．

表-2 路車協調システムが備えるべき機能・要件

機能	システムが備えるべき要件
検知機能	・物標を正確に検知できること（種別、位置、速度、方向） ・一定の間隔で物標を検知できること ・システムの正常可動条件を逸脱した場合に車載システム等へ伝達できること
情報生成機能	・誤差なく情報生成できること（種別、方向） ・誤差が一定以内であること（位置、速度） ・一定の時間内で情報生成できること
情報提供機能	・誤差なく情報提供できること（種別、方向） ・誤差が一定以内であること（位置、速度） ・一定の時間内で安定して情報提供できること ・適切なタイミングで情報提供できること

表-3 運営上の課題と解決策（一部抜粋）

想定される運営上の課題	解決策（案）
路車協調システムの動作確認・維持管理	・監視体制の確立（日々の遠隔監視と定期的な目視点検など） ・点検項目・内容、点検方法等の指針策定や管理台帳の作成
路上工事や路駐車両等、システム設置時の想定と異なる道路交通環境	・JARTIC等との連携による路上工事に対するシステム調整 ・社会受容性の醸成により、システム運用区間における路上駐車の削減
電波干渉等による通信障害の発生	・情報支援ができないことに対するアラートする機能（緊急時の予備回線の使用等）
大雨や降雪・堆雪等の環境条件への対応	・悪天候・災害時における運用方法（運行可否の判断基準）の確立 ・積雪の影響を受けない高さへの機器（路側カメラ以外の関連機器）設置

５．今後の展開等

本業務は，鳥取市における積雪等の地域特性や過年度実証を踏まえた通信方式の違い，全国的にも事例のない特殊な交差点形状を踏まえたデータ取得と効果検証を行い，路車協調システムに求められる機能や要件，社会実装に向けた運営上の課題と解決策について整理を行った．本業務で得られた成果は，今後の路車協調システムの技術基準策定，レベル4自動運転移動サービスの早期実現に向けて有意義なものであると考えている．

なお，本実証では路車協調システムの伝送情報を活用して自動運転システムでの判断・制御は行っていないが，レベル4自動運転移動サービスの実現に向けてはシステム連携による直接制御が必要である．今後，路側センサで得た情報をどこまで活用し，判断・制御につなげるか，路車協調の役割・性能要件等の具体化や責任分界の検討が引き続き必要である．

謝辞：本業務は，発注者である鳥取河川国道事務所をはじめ，自動運転実証調査事業の実施主体である鳥取市ほか，多様な関係者や地域の皆様の協力を経て完遂することができました．本稿の執筆にあたり，全ての関係者の皆様へ心より御礼申し上げます。

参考文献

1) 中川正夫，杉本岳史：実交通環境下におけるドライバの認知反応時間に関する研究，学会誌『設計工学』，Vol.58，No.6 2023