

大型バスにおける正着制御システムの開発

Development of a Precise Docking System for Large City Buses

岡田光太郎 K. OKADA 仲 正美 M. NAKA 川原禎弘 S. KAWAHARA

We developed a precise docking control technology for large city buses as projects promoted by Japan's Cabinet Office. Precise docking technology is a technology to minimize the gap between the step of the bus and the platform at a bus stop, and is necessary for smooth boarding/alighting and on-time performance. We installed steering and braking control systems, and developed control strategy. First, we constructed a steering and braking algorithm. This report introduces precise docking technology and evaluation in traffic environment.

Key Words: steering control, autonomous driving, precise docking, path following control, large vehicle

1. はじめに

近年、自動走行に関連する技術開発が積極的に推進されている。国内では、内閣府が関係省庁などと連携し「戦略的イノベーション創造プログラム・自動走行システム (SIP-adus : the Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program – Automated Driving for Universal Services)」を推進しており、自動走行システムの実用化に向けさまざまな事業が実施されている¹⁾。

自動走行に期待される項目のひとつに公共交通への活用が挙げられる。少子高齢化にともない高齢者の移動手段として公共交通の需要が高まると推測される一方で、高齢化によるバスの運転手不足が大きな課題となっている。本状況の解決を目指し、バスへの自動走行の活用を見据えた開発がさまざまな機関で進められている。SIP-adus の内、上記課題の解決につながるバスの自動走行に関する事業、「次世代都市交通システム正着制御に係るアクチュエータおよび制御技術に関する調査」²⁾、「次世代都市交通システム正着制御に係るセンシング技術や制御技術の実用化」^{3) 4)}、「沖縄におけるバス自動運転に係る調査」⁵⁾ を当社で受託し研究開発を行ってきた。本報では、当社受託実施項目の中から、大型バスにおける自動走行技術について報告する。本報は、上記事業の報告書の内容を基に作成した。

2. 受託プロジェクトについて

大型バスの自動走行に関して、「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)・自動走行システム／大規模実証実験／次世代都市交通／次世代都市交通システム正着制御に係るセンシング技術や制御技術の実用化」と「沖縄におけるバス自動運転に係る調査」を当社が受託し研究開発を進めてきた。

本プログラムにおいては、自動走行技術を活用し、高齢者など交通制約者を含む幅広い利用者にとって利用しやすい次世代都市交通システム「ART (Advanced Rapid Transit)」の実現を目指した開発が実施されている。ARTにおいて、車いすなどの利用者であっても介助なしにスムーズにバスを乗降すること、またそれによってバスの定時運行も実現することを目指しており、その実現に必要な技術として、バスの乗降口と停留所とのすきまを小さくかつ正確に停車する、正着制御技術がある。「正着制御に係るセンシング技術や制御技術の実用化」では、大型バスでの正着制御技術の技術開発を行った。本事業では、東京臨海地域にて大規模実証実験を行い、正着制御の技術検証を行った。図1に実証実験での走行ルートを示す。図中の丸印で示す4箇所正着制御を実施した。

また ART で開発した要素技術の実装に向けて、さまざまな環境・条件下での実証実験を通じて技術検証を進めると同時に、その利便性を広く訴求することが重要である。そのような取り組みの一環として、内閣府では交

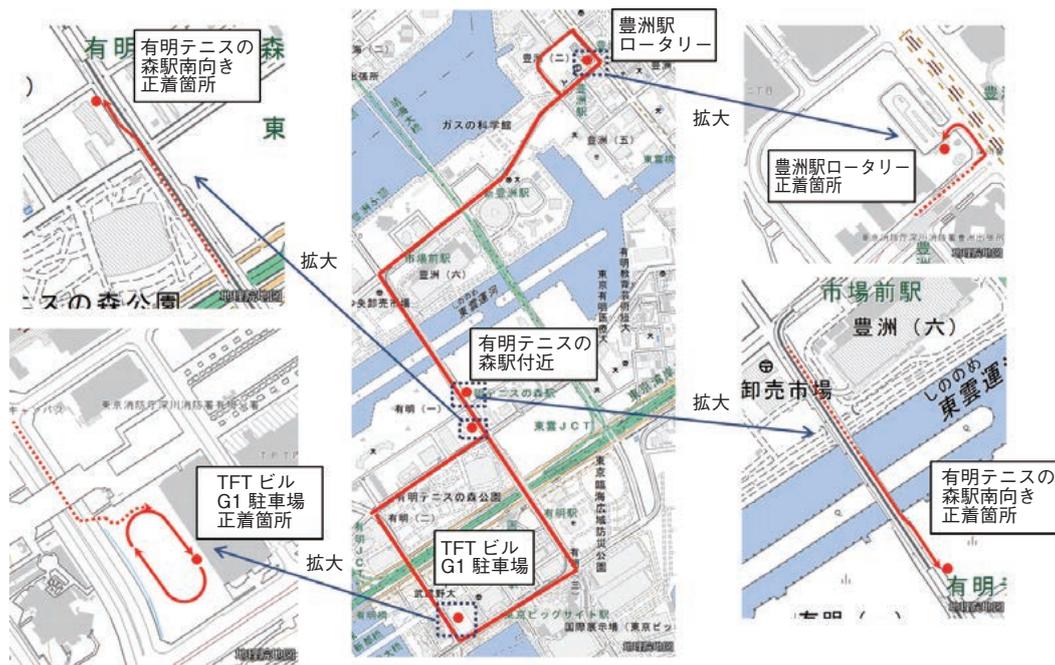


図1 実証実験ルート（東京臨海地域）

※「地理院地図」（国土地理院）をもとに当社作成
Experiment course (Tokyo Bay area)

※This map is created by JTEKT Corporation based on "GSI maps" published by the Geospatial Information Authority of Japan.

通集中による渋滞や過疎地における交通機関のぜい弱性など多様な交通課題を抱える沖縄県において、自動走行技術を活用したバスの実証実験を実施してきた。「沖縄におけるバス自動運転に係る調査」では、現地の交通環境下における自動走行技術の活用可能性を検証するため、大型バスでの自動走行技術を開発し、バス事業者や一般利用者を対象とした社会受容性の検証を実施した。図2に、沖縄実証実験における走行ルートを示す。那覇空港と豊見城市のアウトレットモール、道の駅豊崎を結ぶ、交通量の多い基幹道路を含むルートで実施した。また、図中に正着制御、減速制御と表示している箇所では操舵・制動の自動制御を行い、それ以外のルートでは一部を除き操舵の自動制御を行った。一般利用者による試乗では、14日間で約1,200名に試乗いただいた。



図2 実証実験ルート（沖縄）
Experiment route (Okinawa)

本報では、受託事業において開発した、自動走行の制御技術（正着制御技術）について報告する。受託事業では、自動走行技術以外にも、カメラ、LiDAR (Light Detection And Ranging) による周辺認識技術、運転者との協調技術、準天頂衛星測位精度の評価について実施したが、本報では割愛する。詳細は、内閣府のホームページで確認できる^{4) 5)}。

3. システム構成

3.1 実験車両システム構成

図3に本開発で使用した実験車両の外観、表1に車両諸元を示す。重量は、運転者1名乗車時の実測値である。本車両には、自車位置や周辺環境を認識するためのセンシングシステムや操舵・制動を制御可能とする制御システムを搭載した。図4に制御システムの全体構成を示す。制御演算は上位制御部で実施する。自車位置検出にはGNSS (Global Navigation Satellite System) 受信機を用いる。なお、カメラにより取得した白線との距離情報を用いた制御も可能である。またGNSS受信機内蔵のジャイロセンサから取得した車両角度、角速度も制御に使用する。上位制御部で算出した目標操舵角、目標減速度をそれぞれ操舵制御 ECU、制動制御 ECU に指示する。

表1 実験車両 (大型バス) 主要諸元
Major specifications of experimental vehicle

項目	単位	値
全長/全幅/全高	mm	10 555 / 2 485 / 3 105
ホイールベース	mm	5 300
トレッド	mm	前: 2 065, 後: 1 820
重量 (軸荷重)	kg	前: 3 163, 後: 6 607

3.2 操舵・制動制御システム

図5に操舵制御システムの構成概念図を示す。ステアリング機構はボールねじ式油圧パワーステアリングであり、その機能は残した状態で、ステアリングコラムに操舵アクチュエータを搭載した。本開発では、操舵アクチュエータに目標操舵角を与えることで自動操舵を実現した。

図6に制動制御システムの構成概念図を示す。電子制御ブレーキシステムを搭載し、外部から制御可能な状態とした。制動制御 ECU は、上位制御部からの減速度指示を受け、フロント車軸、リア車軸に必要なエア圧を算出し、制動制御ユニットに指示することで、必要な減速度を実現した。



図3 実験車両 (大型バス) 外観
Appearance of experimental vehicle

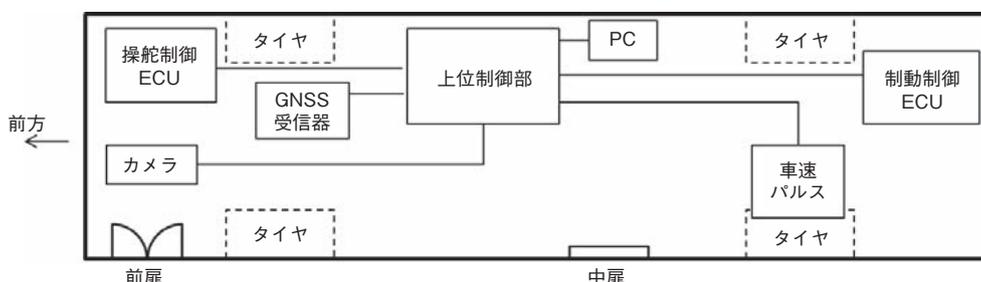


図4 制御システム構成
Control system configuration

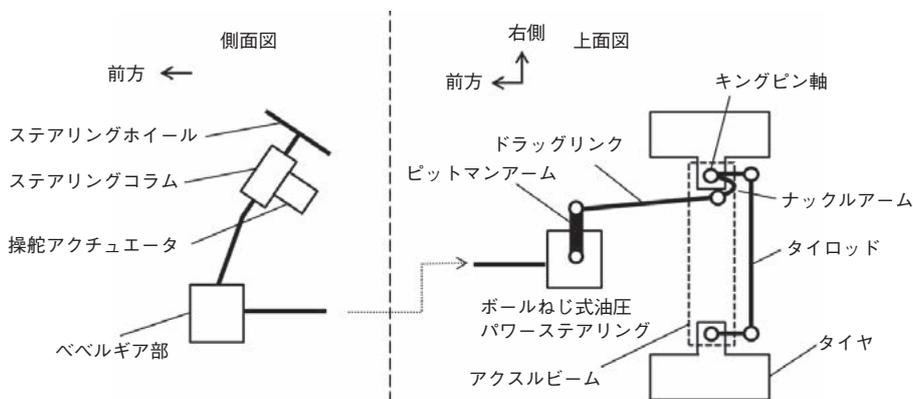


図5 操舵系構成概念図
Concept of steering system configuration

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \sin e_3 \\ \omega - \omega_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで K_2, K_3 を正数として式(5)で表現されるコントローラを導入する。ただし、 $\omega_r = \dot{\theta}_r + \dot{\beta}_r$ である。

また、実際の制御運用では K_2, K_3 は速度、走行環境に応じて適切な値を採用している。

$$\omega_c = \omega_r - K_2 e_2 V - K_3 \sin e_3 \quad (5)$$

実車両に対して目標ヨーレート ω_c を直接入力できないため、式(1)を用いて舵角入力へと変換し、制御入力とする。

$$\delta_c = \frac{MV}{2K_f} \left[\frac{2(K_f l_f - K_r l_r)}{MV^2} \gamma + \frac{2(K_f + K_r)}{MV} \beta + \omega_r - K_2 e_2 V - K_3 \sin e_3 \right] \quad (6)$$

実環境での走行ではさまざまな走行環境が想定され、前提とした等価二輪モデルでカバーできない領域では式(6)で表す制御入力は常に適切であるとは限らない。その例としては、交差点左折などの極低速で大舵角を必要とする場合がある。対策として、たとえば K_2, K_3 を走行環境に応じた値とすることが考えられるが、さまざまな走行環境に応じて K_2, K_3 を持つことは適した制御ではないと考え、本開発ではあらかじめ走行位置に応じて舵角をフィードフォワード項として与え、式(6)をフィードバック項として加算する制御入力とした。図9に目標ステアリングモータトルク算出までの演算の構成を示す。 θ_{TFB} は式(6)の δ_c を操舵角の次元にした値であり、その値にフィードフォワード項 θ_{TFF} を加算した θ_T を目標操舵角とする。目標操舵角 θ_T と実操舵角 θ の偏差 $\Delta\theta$ に対し角度制御を行い、目標ステアリングモータトルク T_m を算出する。

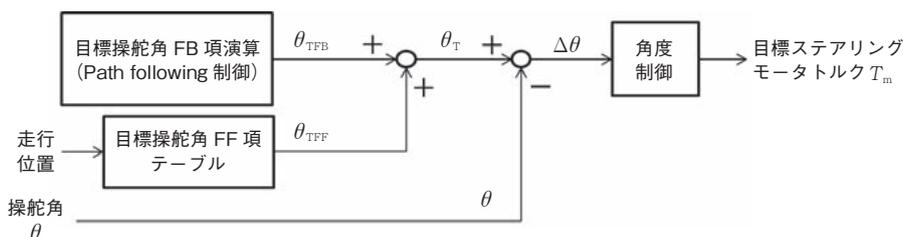


図9 操舵制御演算
Steering control calculation

実証実験では、主に RTK-GNSS (Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System) 受信信号に基づき自己位置を認識し、操舵制御を実施した。GNSS 受信信号からの、目標操舵角 FB 項演算 (Path following 制御、式(6)) に使用する横方向偏差 e_2 、傾き角偏差 e_3 の算出方法については、内閣府平成 30 年度報告書⁴⁾ に記載しており、本報では割愛する。

4.1.1 操舵系あそびを考慮した制御

操舵系 (操舵角からタイヤ転舵角まで) にはあそび (不感帯) が存在する。特に大型車両では、ボールねじ部のかみあいやリンケージの複雑さなどの影響で、乗用車に比べあそびが大きいと考えられる。図10に、図3と類似の大型バスにおける操舵角変化に対するタイヤ転舵角変化を示す³⁾。ただし、タイヤ転舵角はタイロッド変位から推定したタイヤ転舵角にステアリングギア比を乗算して操舵角と比較しやすくした換算値である。操舵角に対するタイヤ転舵角の応答はバックラッシュモデルで表すことができ、図10の車両では操舵角 11deg 相当のあそびがあった³⁾。

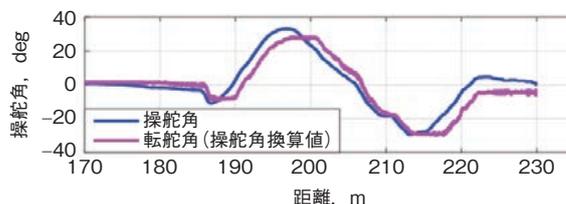


図10 操舵角とタイヤ転舵角の関係
Tire angle response to steer angle

操舵系のあそびの影響で、制御性が悪化することが懸念される。特に、直進に近い緩やかな旋回走行では、図9の目標操舵角 FB 項 (式(6)) が比較的小さい値となり、操舵に対するタイヤ転舵の応答が遅れ、目標とする車両挙動が実現できないことがあった。本問題の解決をめざし、タイヤ転舵角を用いた制御を実装した。

図11 にタイヤ転舵角を用いた制御（以下、タイヤ転舵角制御）のブロック図を示す。図9の操舵制御演算（以下、操舵角演算）との差異を青色で表現する。本制御では、操舵角をタイヤ転舵角に変更し、目標タイヤ転舵角と実タイヤ転舵角の偏差を基に角度制御しモータトルクを算出する。以下では、操舵角制御と比較し詳細を述べる。

①目標タイヤ転舵角FB項演算（Path Following 制御）
操舵角制御の目標操舵角フィードバック項 θ_{TFB} と同一の演算を実施し、目標タイヤ転舵角フィードバック項 δ_{TFB} とする。

②目標タイヤ転舵角FF項テーブル
操舵角制御では、事前にルートを走行した際の操舵角データを基に目標操舵角FF項テーブルを決定した。本制御では、事前走行でのデータ取得時にバックラッシモデルを用いてタイヤ転舵角推定値を算出し、その値を基に目標タイヤ転舵角FF項テーブルを作成した。制御時は、本テーブルからの出力を目標タイヤ転舵角フィードフォワード項 δ_{TFF} とする。

③実タイヤ転舵角演算、角度偏差演算
制御時、タイヤ転舵角推定と同一のバックラッシモデルを用いて、操舵角からタイヤ転舵角を推定する。その値がタイヤ転舵角推定値 δ である。目標タイヤ転舵角 δ_T と実タイヤ転舵角 δ の偏差 $\Delta\delta$ に対する角度制御により目標ステアリングモータトルク T_m を算出する。本演算は操舵角制御と同一の演算であり、制御入力が操舵角偏差 $\Delta\theta$ からタイヤ転舵角偏差 $\Delta\delta$ に変わる。

以下ではタイヤ転舵角制御の効果が顕著に見られた、直進走行時の安定性について述べる。表2の走行条件で、操舵角制御とタイヤ転舵角制御を比較した。ルートは北西方向への進行から右旋回し北北東方向に直進するルートであった。図12 に操舵角制御、タイヤ転舵角制御時の横偏差、操舵角の結果の一例を示す。(d) では操舵角

に加えタイヤ転舵角換算値を示す。(a), (c) は操舵角制御で同一走行の結果、(b), (d) はタイヤ転舵角制御で同一走行の結果である。参考として(a), (c) では風向:西, 風速:3m, (b), (d) では風向:北西, 風速:6mであった。風速風向情報は試験実施箇所の最寄りの観測地点(約4km北)における1時間ごとの風速値である⁷⁾。両制御のロバスト性を比較するため、表3の項目を比較する。目標軌跡に対する横偏差は走行距離0.1mごとに算出し、その値を基に平均値、標準偏差、 3σ を算出する。また、各走行における風速風向情報を表4に示す⁷⁾。

表2 実験条件

Experimental condition

道路形状 【方角】	緩い右旋回 (R : 1 500m 以上)~直進 【北西方向~(右旋回)~北北東方向】	
車速, km/h	40 - 60	
操作	操舵	自動制御
	アクセル	運転手
	ブレーキ	未操作

表3 評価項目

Evaluation items

評価項目	目標軌跡に対する横偏差の 平均値, 標準偏差, 3σ
実験回数	各5回 ※1回あたり1 500m 計7 500m

表4 風速風向情報

Wind information

操舵角制御			タイヤ転舵角制御		
No.	風向	風速, m/s	No.	風向	風速, m/s
1	北	2	1	南西南	7
2	西	3	2	南西南	5
3	東	2	3	西	3
4	東	3	4	西北西	5
5	北東	2	5	北西	6

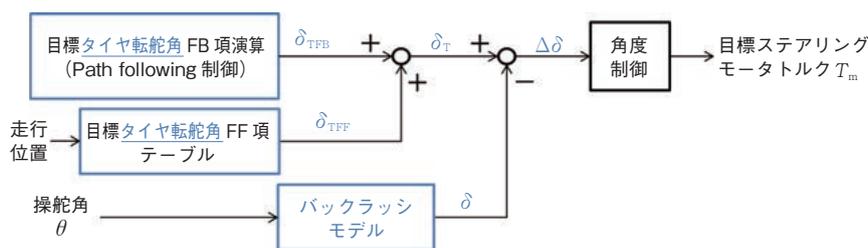


図11 タイヤ転舵角を用いた制御
Tire angle control

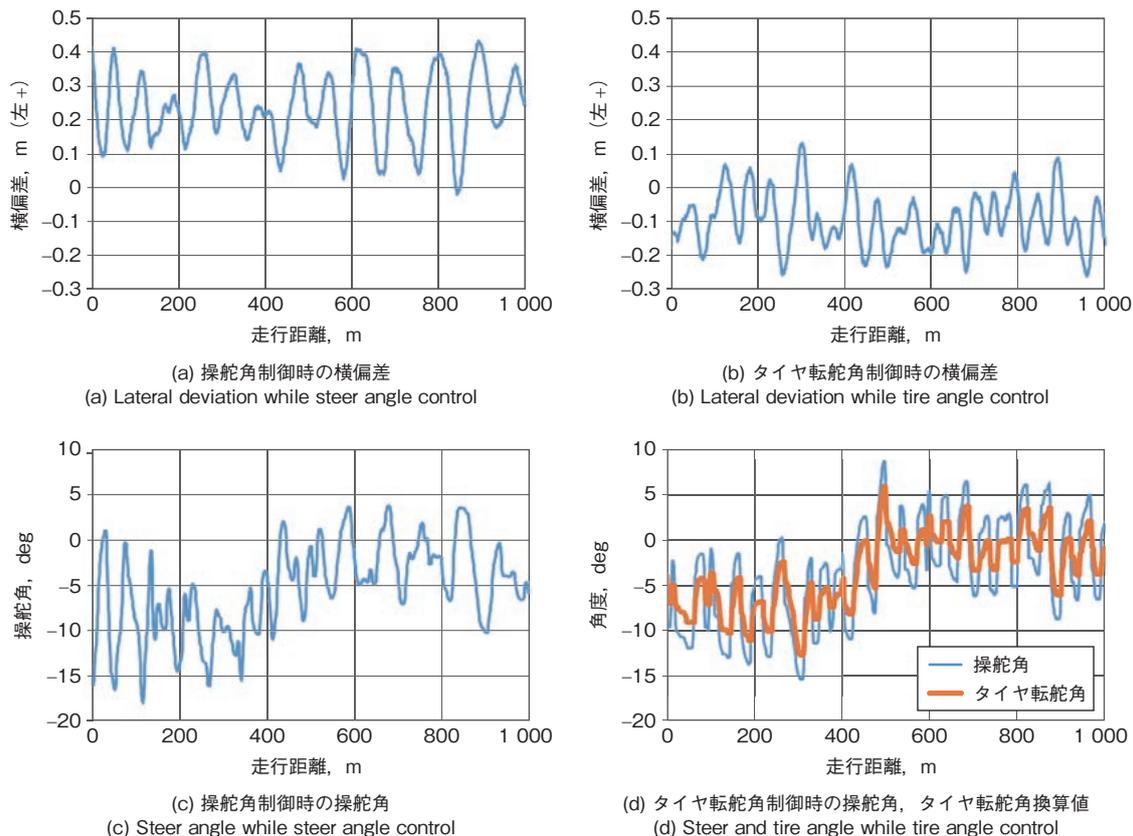


図12 横偏差, 操舵角
Lateral deviation and steer angle

図13に横偏差の度数分布を示す。また、表5に目標軌跡に対する横偏差の平均値, 標準偏差, 3σ の結果を示す。

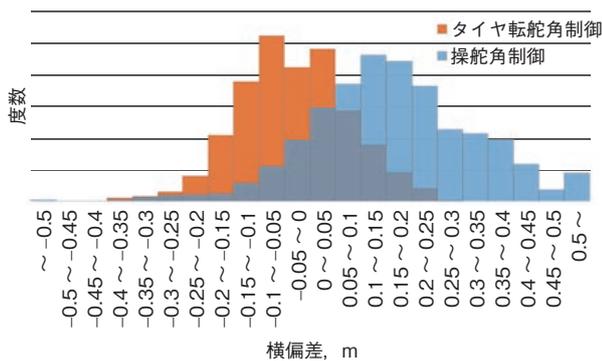


図13 横偏差の度数分布
Distribution of lateral deviation

表5 横偏差の結果
Results of lateral deviation

項目	単位	操舵角制御	タイヤ転舵角制御
平均値	m	0.16	0.03
標準偏差	m	0.17	0.11
3σ	m	0.51	0.33

表5より, タイヤ転舵角制御によって横偏差の平均値, 標準偏差, 3σ が改善した。また図13において, 操舵角制御に比べタイヤ転舵角制御時の横偏差分布がゼロ付近に多く分布し, 目標値付近に制御されていることが分かる。表4の風速風向情報から, タイヤ転舵角制御時は操舵角制御時より風速が高い状況での走行と想定される。外乱が大きい状況にもかかわらず, タイヤ転舵角制御が操舵角制御より高い制御性を示し, ロバスト性が向上した。

実験車両(図3)は全幅2.49mである。一般的な車線幅員を3.25mとすると, 車線内を走行するには横偏差を $\pm 0.38\text{m}$ 以内に収める必要がある。表5の平均値, 3σ より, 操舵角制御では車線内を維持出来ない可能性があるのに対し, タイヤ転舵角制御では車線内を維持した走行を実現可能であることを確認できた。

4.2 制動制御

制動制御 ECU は上位制御部からの減速度指示を受けて作動する。制動システムの特長として目標減速度に対する実減速度にばらつきがあること, また実交通環境での走行にあたり制動開始のタイミングでの車速がばらつ

くことに対処する必要がある。そのような条件下で高い停止位置精度を実現するため、目標減速度 a を目標停止位置と走行位置の情報から、式(7)のように求める。

$$a = \frac{v^2}{2\Delta S} \tag{7}$$

ただし、 a ：目標減速度、 ΔS ：停止想定距離、 v ：車速

停止想定距離 ΔS は、図14のように目標停止位置と実位置の2点間距離を算出し、その距離に応じて補正距離テーブルから算出される距離を加算して求める。具体的には、目標停止位置から遠く、弱い制動をかける際は補正距離を大きい値とし、停止位置近傍では補正距離はゼロとする。



図14 停止想定距離算出
Calculation of estimated stop distance

本手法では、車速を目標値として与えず、目標減速度を実車速と走行位置から算出するため、常に走行状況に適した値となる。また目標減速度は連続した値となるため躍度（加加速度）の変動は少ないと考える。

4.3 実証実験における正着制御

東京臨海地域での大規模実証実験における正着制御の一例（図1 有明テニスの森駅付近）を示す。図15に有明テニスの森駅付近北向きの正着箇所、走行軌跡を示す。第二通行帯から路肩縁石へ約3.8mの幅寄せ後、40m程度直線走行する目標軌跡である。

図16に実走行における走行軌跡の一例を示す。図17にその時の時系列データを示す。図17の開始時間で自動操舵に切り替え走行、44秒付近から自動制動を行っている。また、図16、図17に記載の①、②は各々同一のタイミングを示している。停止直前までは前後・横加速度は低く抑えられているが、停止時の減速度がやや大きい。

本走行条件における停止時の横方向の目標位置は、車両の扉が路肩縁石から300mmの位置と設定した。正着

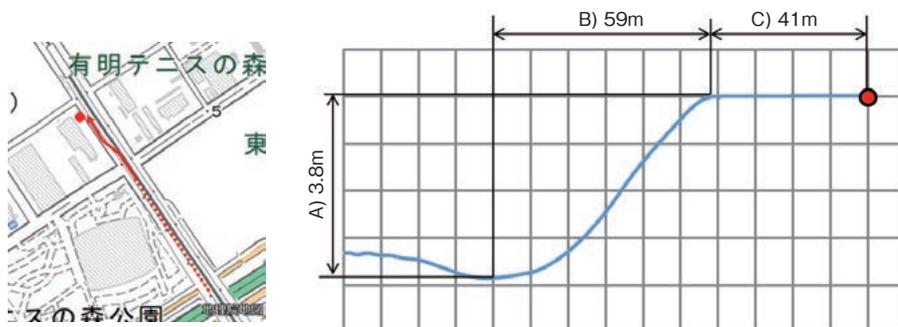


図15 有明テニスの森駅付近 北向き正着箇所
※「地理院地図」（国土院）をもとに当社作成
Docking point near Ariake-tennis-no-mori station

※This map is created by JTEKT Corporation based on "GSI maps" published by the Geospatial Information Authority of Japan.

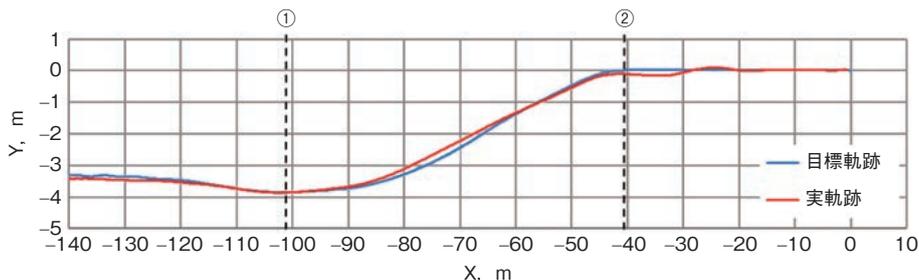


図16 走行軌跡
Docking trajectory

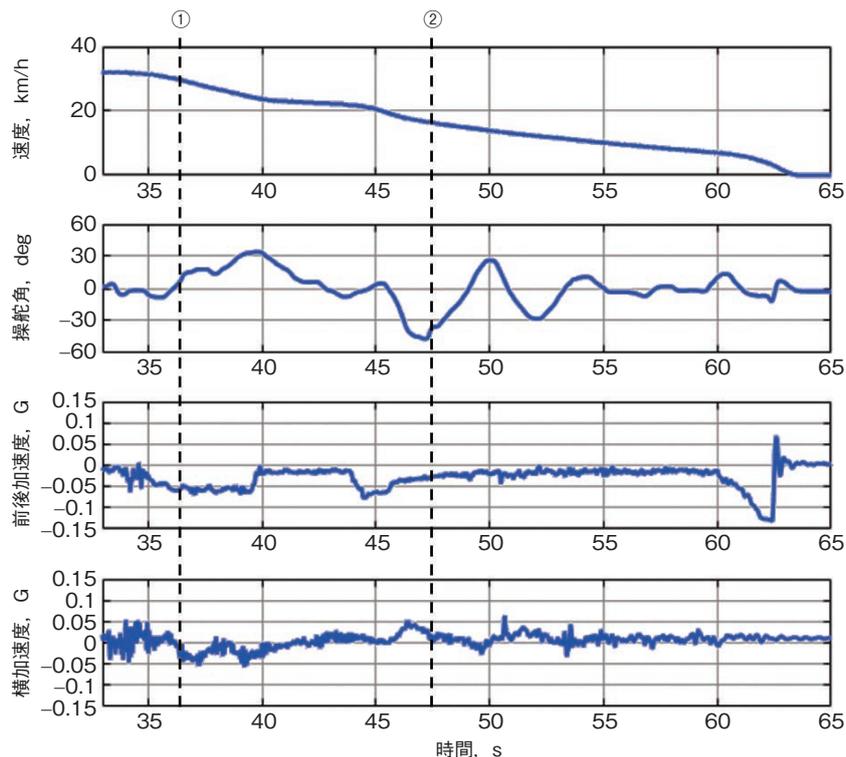


図17 正着時のバス挙動データ
Vehicle behavior while docking

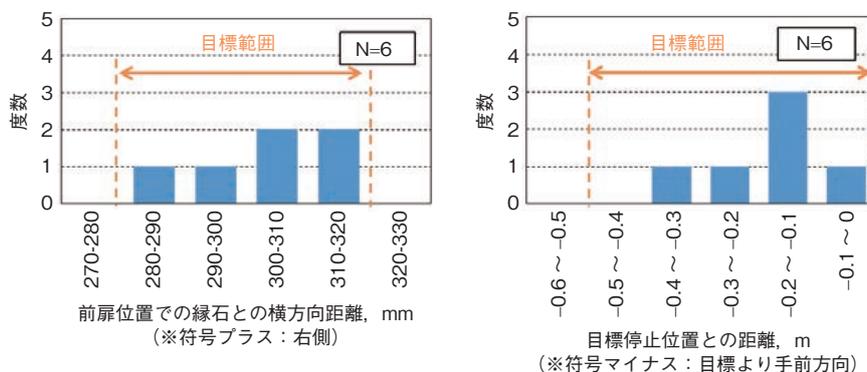


図18 正着結果 度数分布
Distribution of precise docking

制御における横方向偏差（目標位置に対する実位置の横方向偏差）のねらいを±20mm以内としているので、本走行条件では280mmから320mmの範囲が許容範囲である。図18に正着制御結果の度数分布を示す。横方向偏差に関して、許容範囲を満足した。また前後方向に関して、停止位置も制御目標（±0.5m範囲内）を満足した。

有明テニスの森駅付近北向き以外の正着箇所でも、おおむね目標通りの制御性を示すことが出来た。

5. おわりに

本報では、内閣府SIP「自動走行システム」として開発した、大型バスにおける自動走行制御技術（正着制御技術）について報告した。操舵・制動制御を構築し、自動操舵・制動での正着制御を実現した。また操舵系のあそびを考慮した制御を構築し、さまざまな環境下において、高いロバスト性を実現した。今後はさらなる制御性の向上、およびカメラやLiDARなどのGNSS以外のセンサを活用し環境に対するロバスト性をさらに高めることなどで、早期の実用化に貢献していきたい。

参考文献

- 1) SIP「自動走行システム」平成29年度施策一覧(ver.31), http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/iinkai/jidousoukou_33/siryos33-1-1.pdf
- 2) 内閣府 SIP「自動走行システム」平成28年度, <http://www.sip-adus.go.jp/rd/h28/cabinet.html>
: 次世代都市交通システム正着制御に係るアクチュエータおよび制御技術に関する調査_成果報告書,
http://www.sip-adus.go.jp/wp/wp-content/uploads/cao_2016_cao1-04_01.pdf
- 3) 内閣府 SIP「自動走行システム」平成29年度, <http://www.sip-adus.go.jp/rd/>
: 「次世代都市交通システム正着制御に係るセンシング技術や制御技術の実用化」報告書,
http://www.sip-adus.go.jp/file/151_s.pdf
- 4) 内閣府 SIP「自動走行システム」平成30年度, <http://www.sip-adus.go.jp/rd/>
: 「次世代都市交通システム正着制御に係るセンシング技術や制御技術の実用化」報告書
※ 「次世代都市交通システム正着制御に係るセンシング技術や制御技術の実用化」は, SIP「自動走行システム」の管理法人である国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けた事業です.
- 5) 内閣府 SIP「自動走行システム」, <http://www.sip-adus.go.jp/rd/>
: 「沖縄におけるバス自動運転に係る調査」報告書
- 6) 杉町敏之, 李昇勇, 粉山富士男, 須田義大: Path Following 制御に基づく正着制御に関する基礎検討, 自動車技術会, 2015年春季大会学術講演会講演予稿集, pp. 419-424(2015)
- 7) 株式会社ウェザーニューズ <http://weathernews.jp/observation/>

筆者



岡田光太郎*
K. OKADA



仲 正美*
M. NAKA



川原禎弘**
S. KAWAHARA

* ステアリング事業本部 AD システム開発室

** 研究開発本部 研究企画部