



「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」

沖縄の交通環境下における公共バスの
より高度な自動運転制御の実現に向けた調査

平成30年3月16日
沖縄自動走行バスコンソーシアム

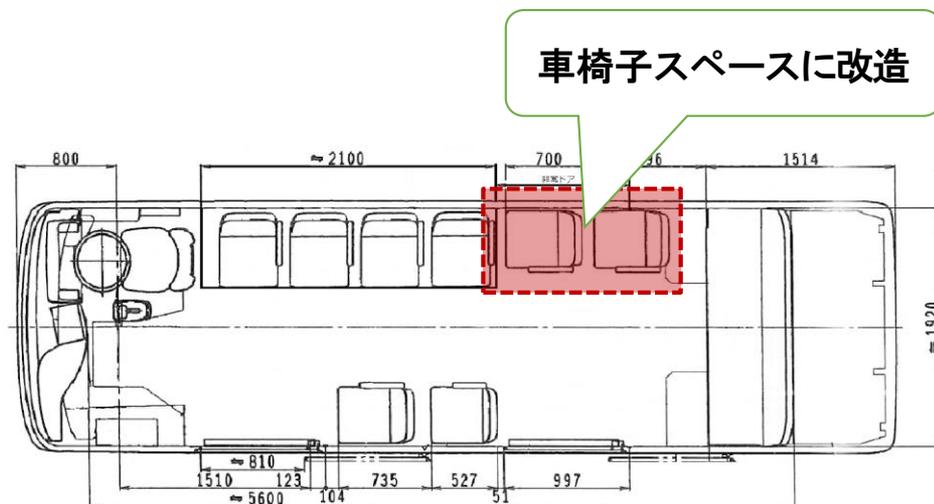
実験車ベース車両諸元

- 車種: 小型バス「日野ポンチョ」
- 定員: 22人
- 全長: 699×全幅: 208cm
- 乗降扉数: 2
- 床高さ: 低床ノンステップ



主な搭載機器

- 自動操舵装置
- 自動ブレーキ制御装置
- 準天頂衛星受信機
- ライダー: 7個(前方、側方、後方)
- 走行制御ECU



実証実験における走行実績

区間	イオンモール沖縄ライカム ～ 宜野湾港マリーナ
距離(往復)	約 20 km
最高速度	40km/h(最高)
試乗会運行回数	22 回
走行距離	約 440 km
試乗会乗車人数	140名
ステアリングオーバーライド	平均2.3回(車線変更以外)
ブレーキオーバーライド	平均4回(信号、右折以外)



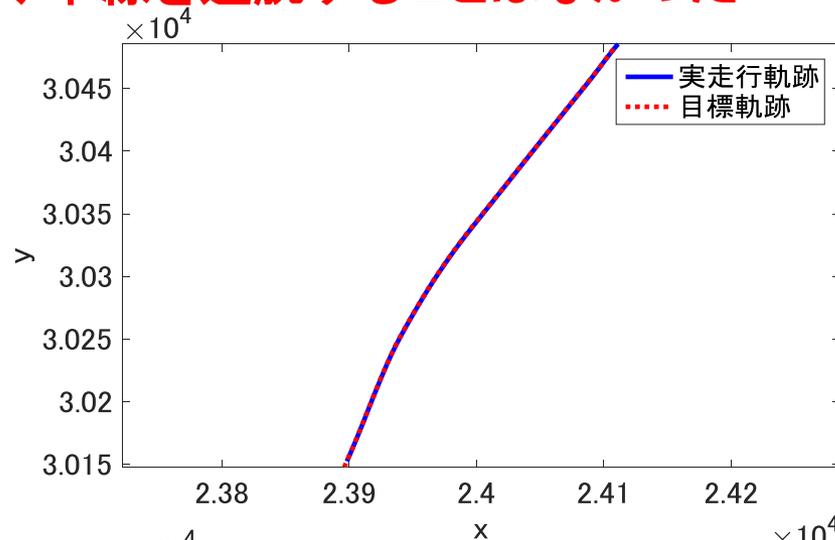
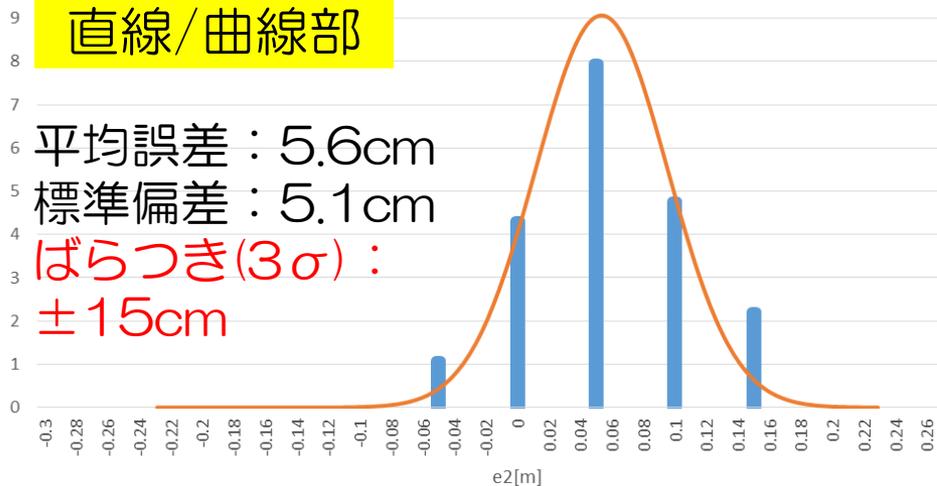
3.

3.1 走行制御性能評価(操舵制御性能)

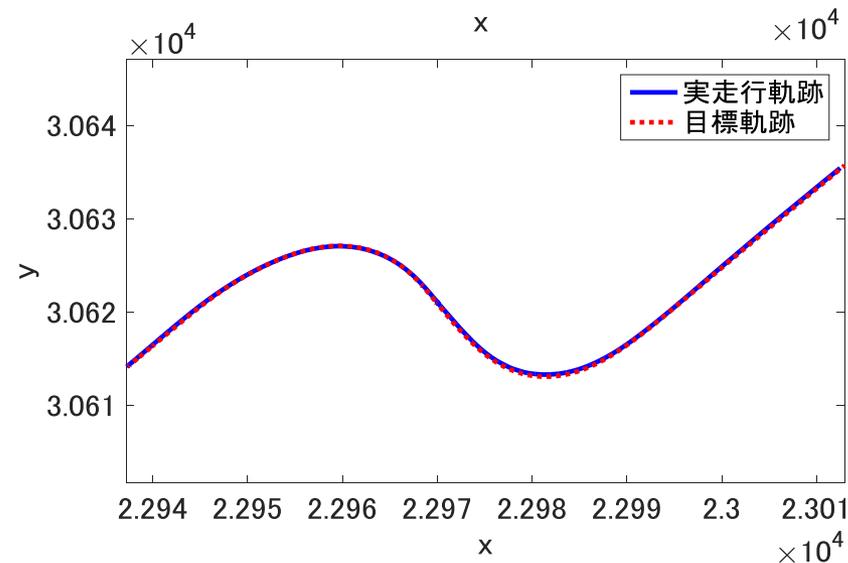
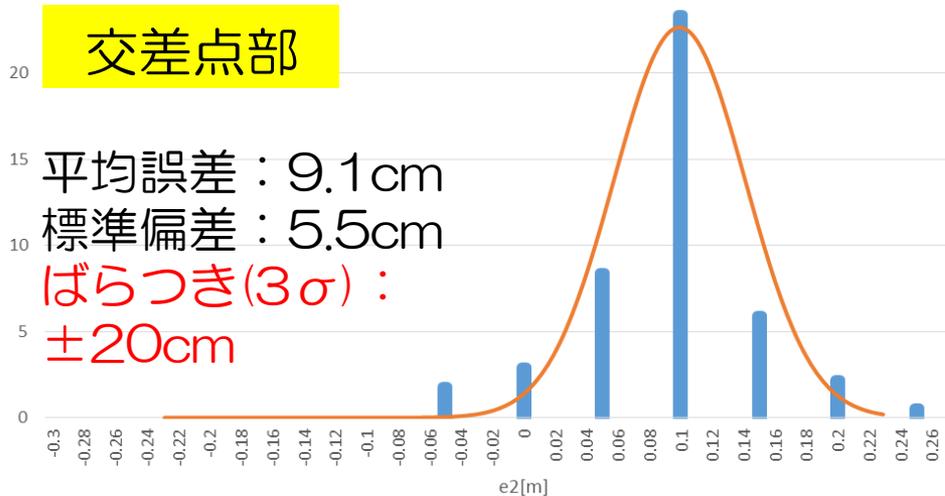
目標軌跡からの誤差(e_2)を、直線/曲線部と交差点部で分けて評価

→ ばらつきは最大でも±20cm以内であり、車線を逸脱することはなかった

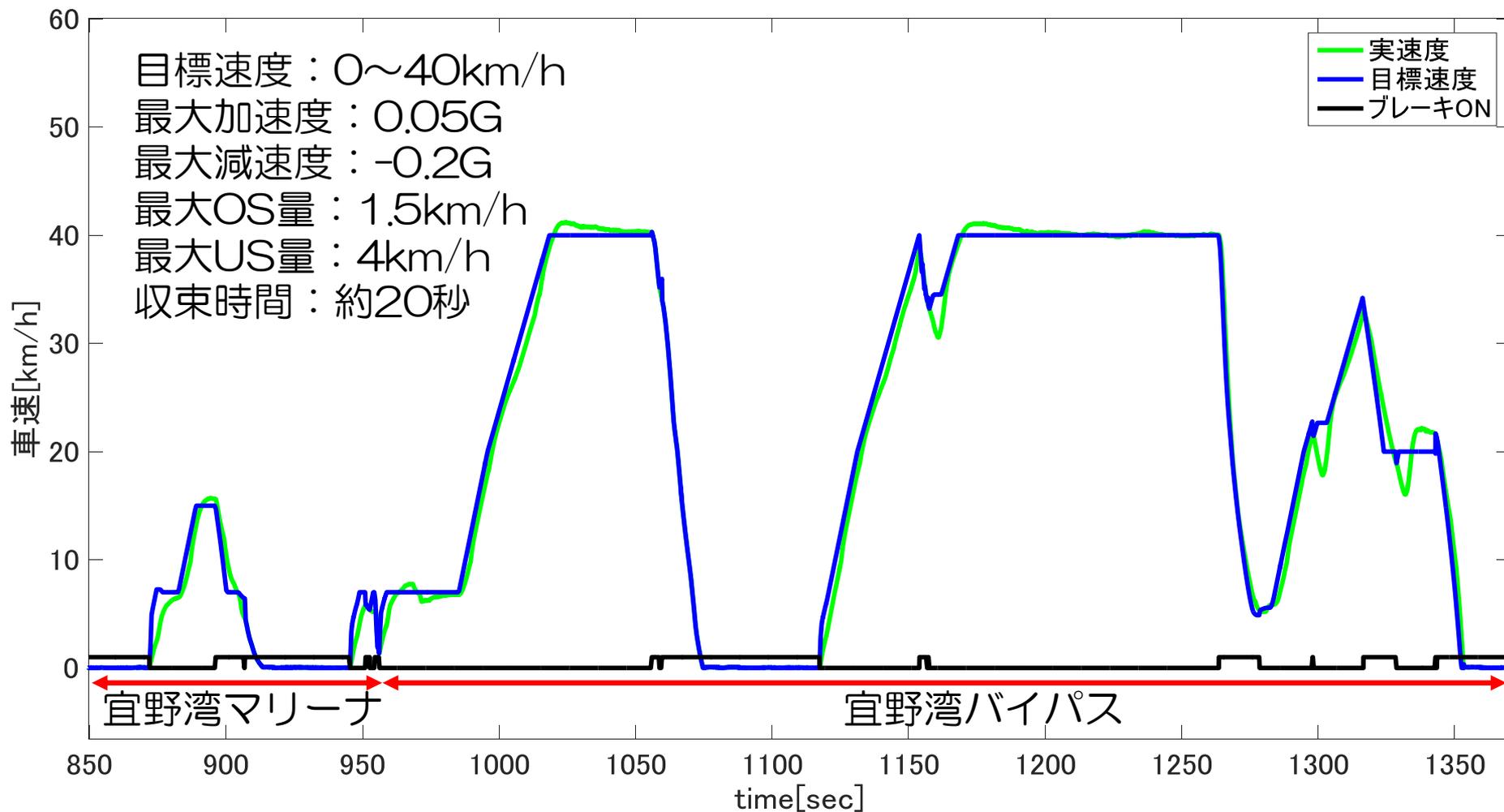
直線/曲線部



交差点部

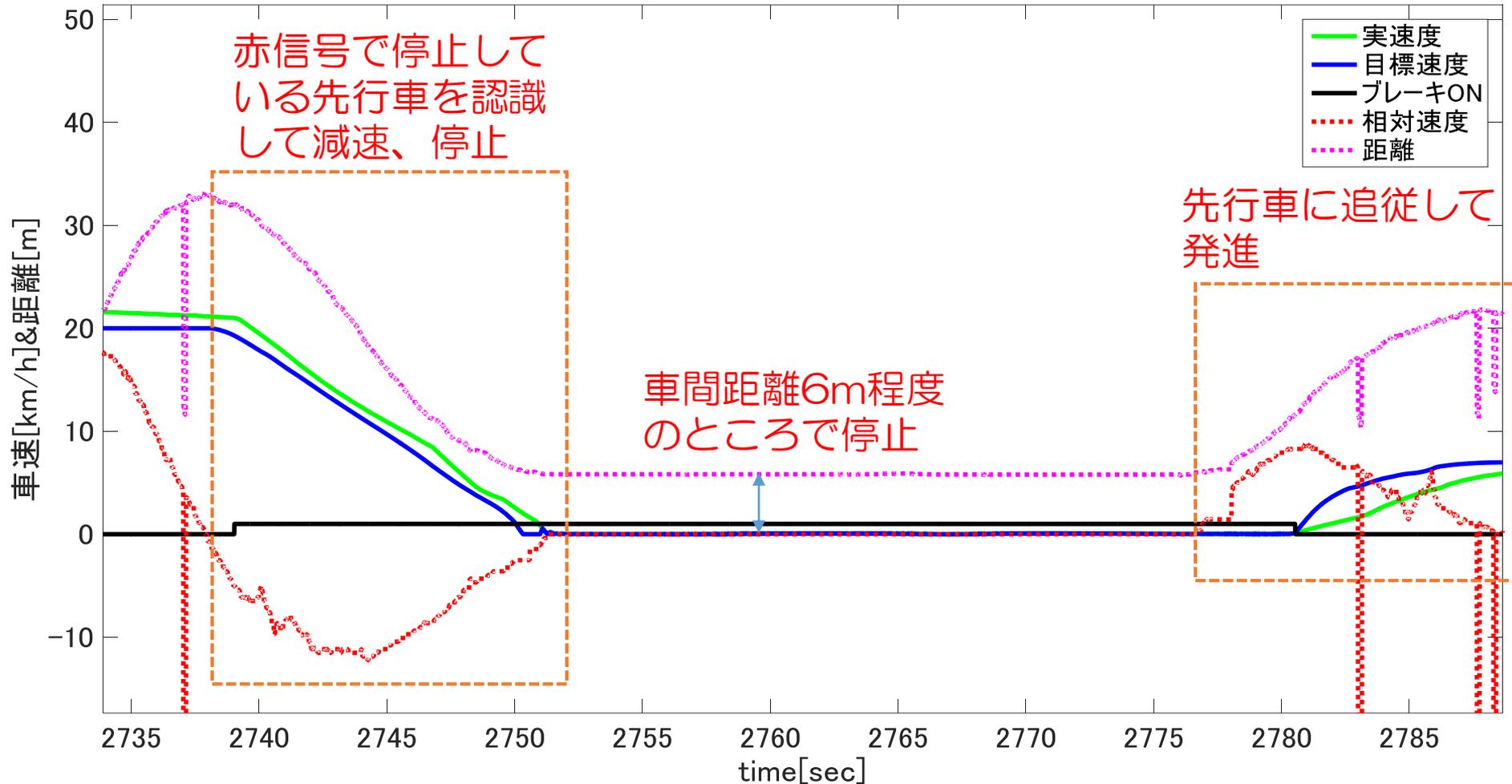


目標速度に対して加速時のオーバーシュート(OS)や減速時のアンダーシュート(US)が発生しているが、概ね目標を実現できている

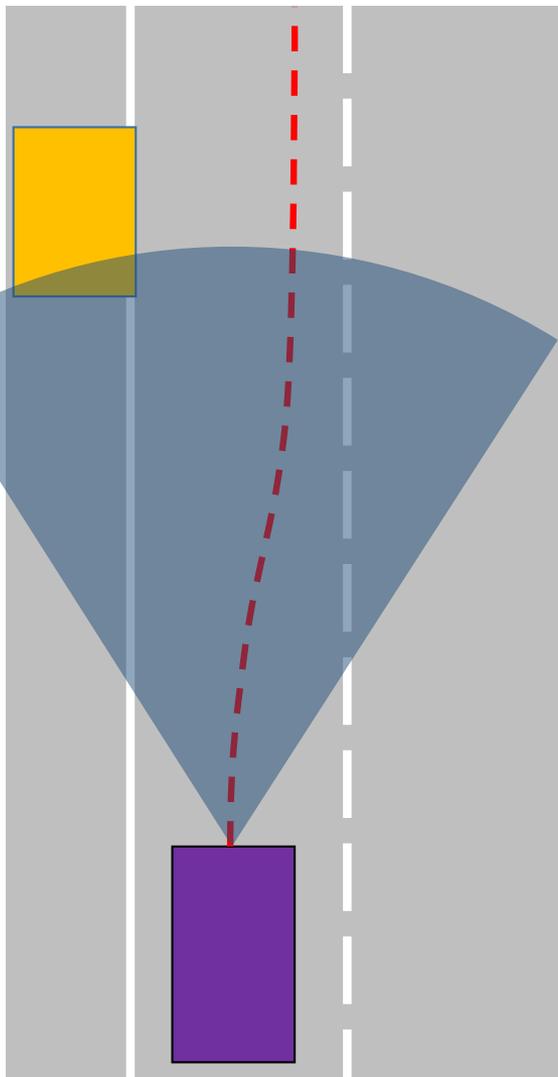


3. 3.3 走行制御性能評価 (ACC制御)

- ・ 自車より先行車の速度が低いとき、減速度が一定になるように減速
- ・ 誤検知による急ブレーキを防ぐため、先行車は複数のセンサで認識



障害物回避制御

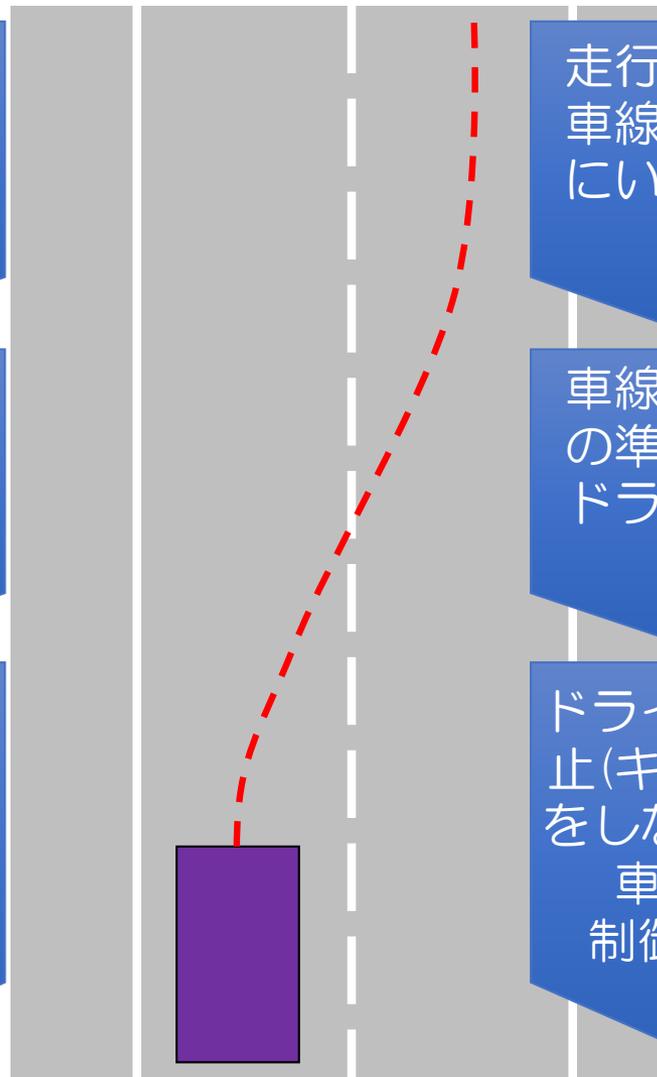


前方センサにより路肩にいる車両を検知

障害物回避制御の準備完了をドライバーに告知

ドライバーが抑止(キャンセル)をしなければ、障害物回避制御を開始

車線変更制御

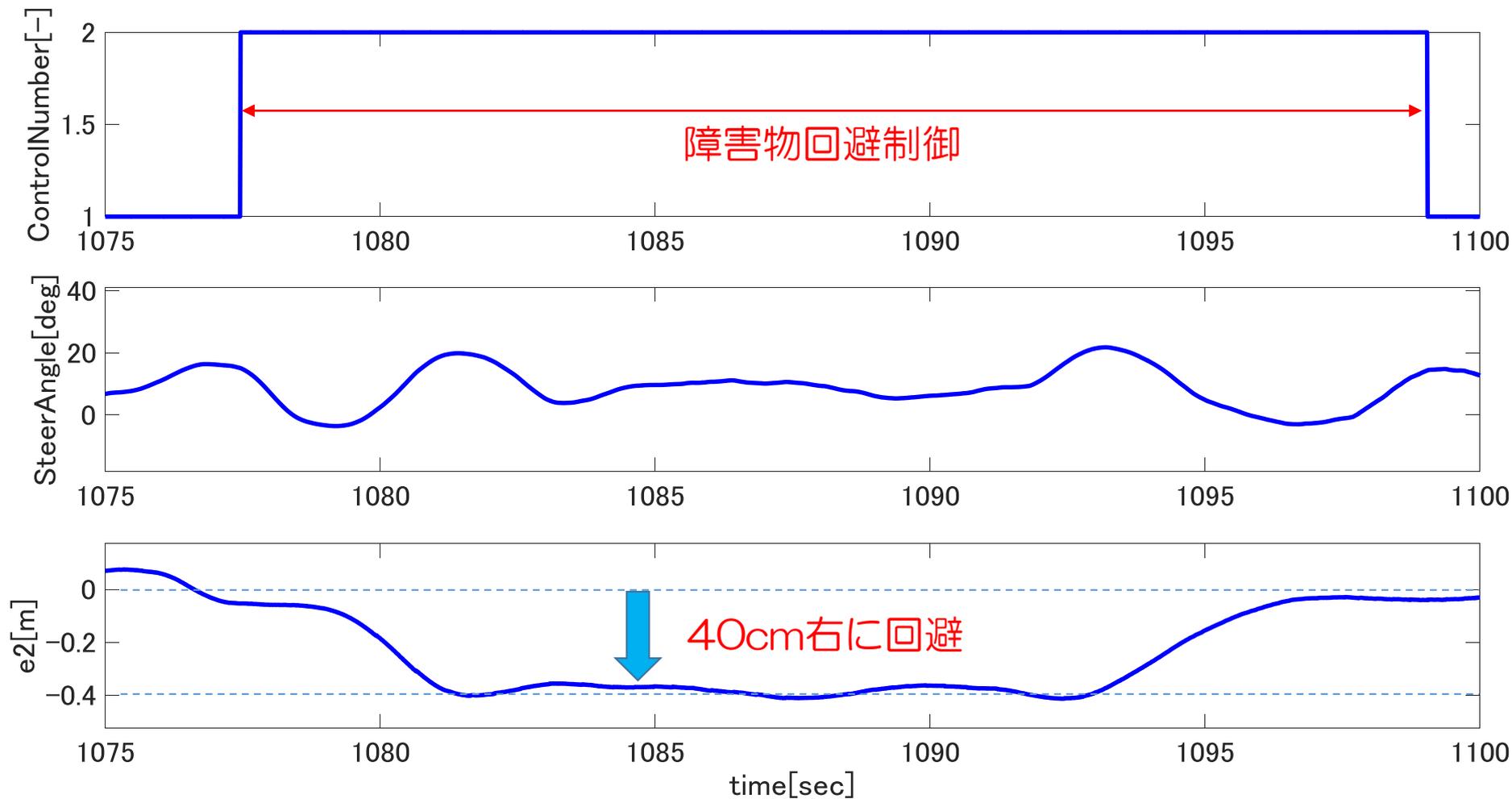


走行位置から車線変更区間にいることを判断

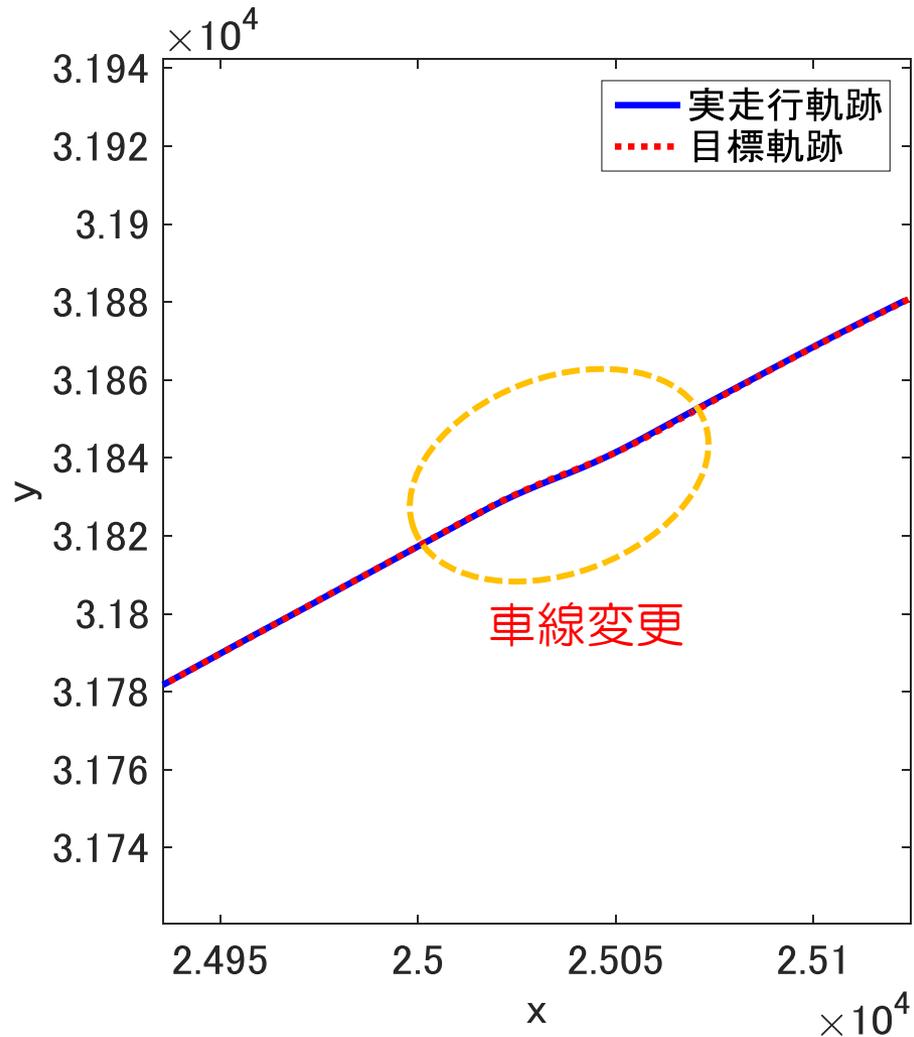
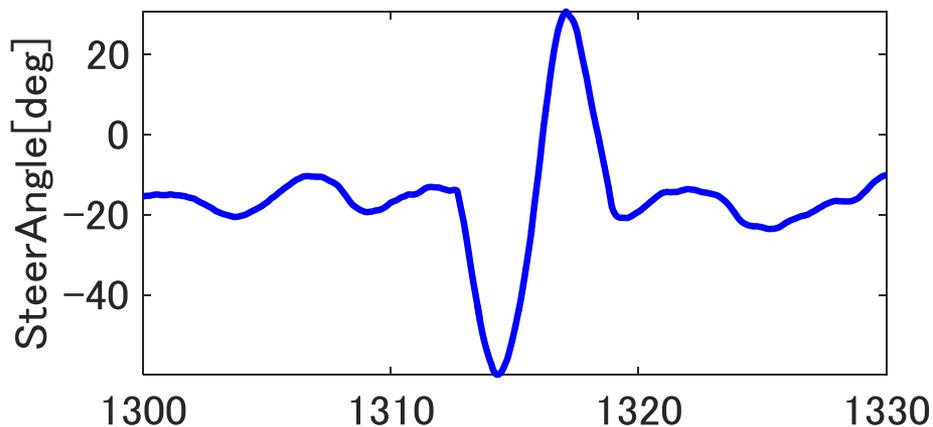
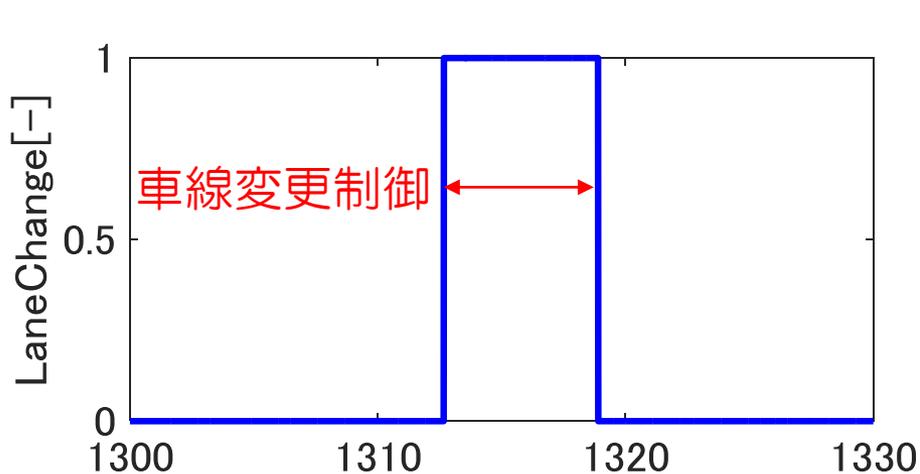
車線変更制御の準備完了をドライバーに告知

ドライバーが抑止(キャンセル)をしなければ、車線変更制御を開始

- ・ 宜野湾マリーナ行きは路肩の駐車車両が多かったため、障害物回避を実施
- ・ 安全のため、回避幅は右車線にはみ出さない程度(40cm)に設定



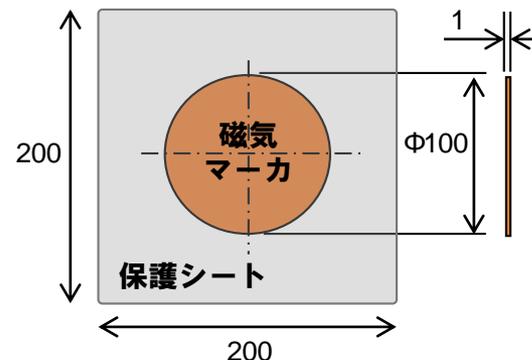
- ・主に宜野湾バイパスの右折前に実施
- ・交通量が多いため、ドライバーが周囲の安全を確認したうえで制御を実施



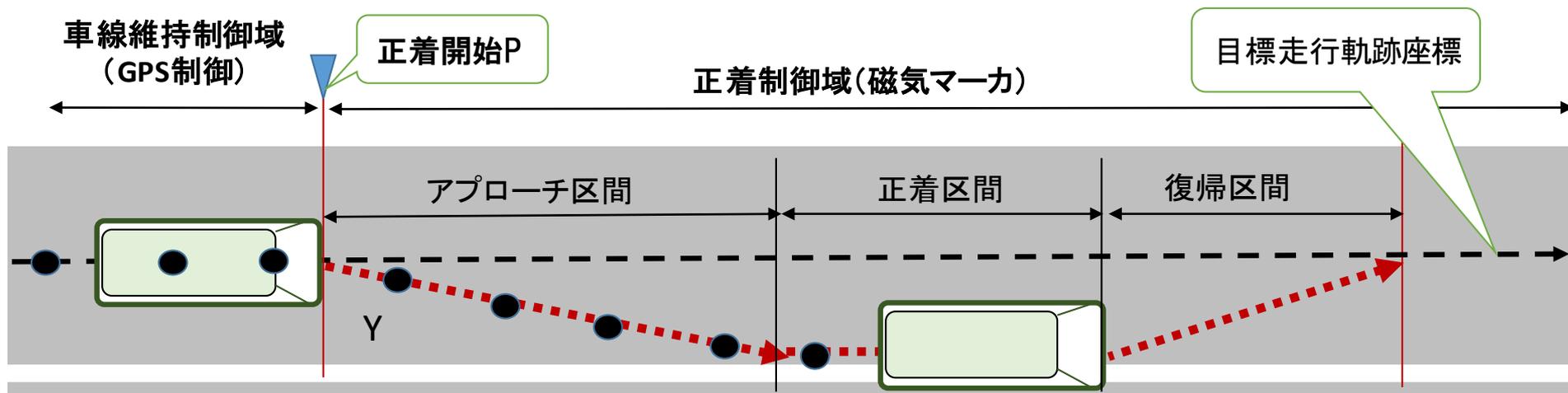
3. 3.5.1 磁気マーカを利用した正着制御

走行ルート折り返し点の**宜野湾港マリーナ内道路**に磁気マーカを敷設し、正着制御実験実施。

- 磁気マーカ：平板タイプマーカ
- 敷設方法：接着方式
- 敷設間隔：50cm



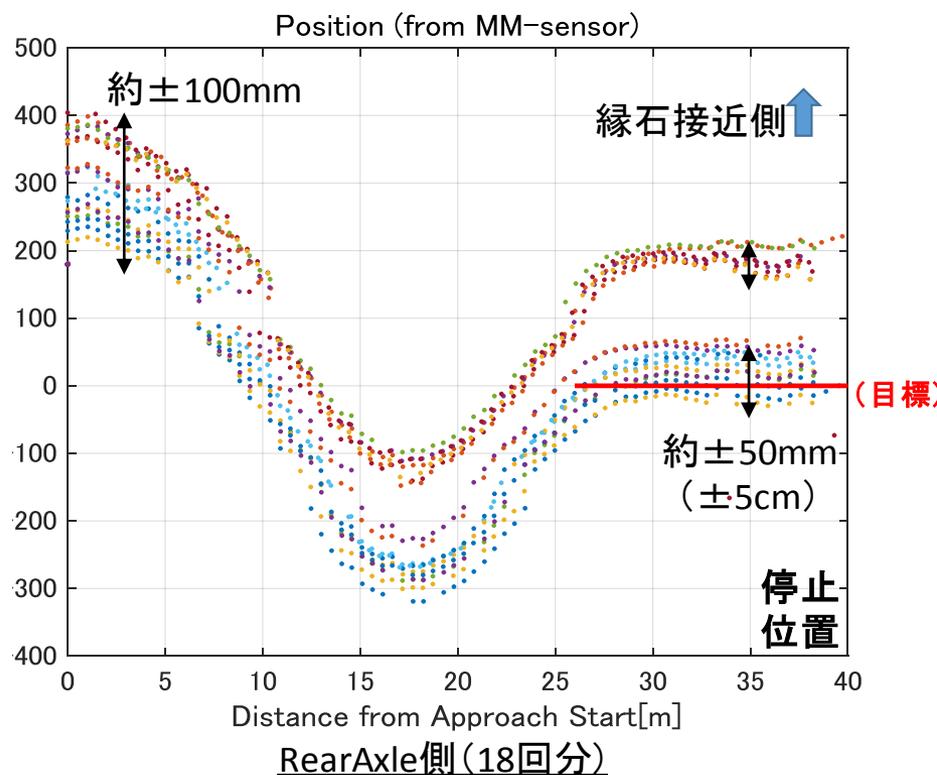
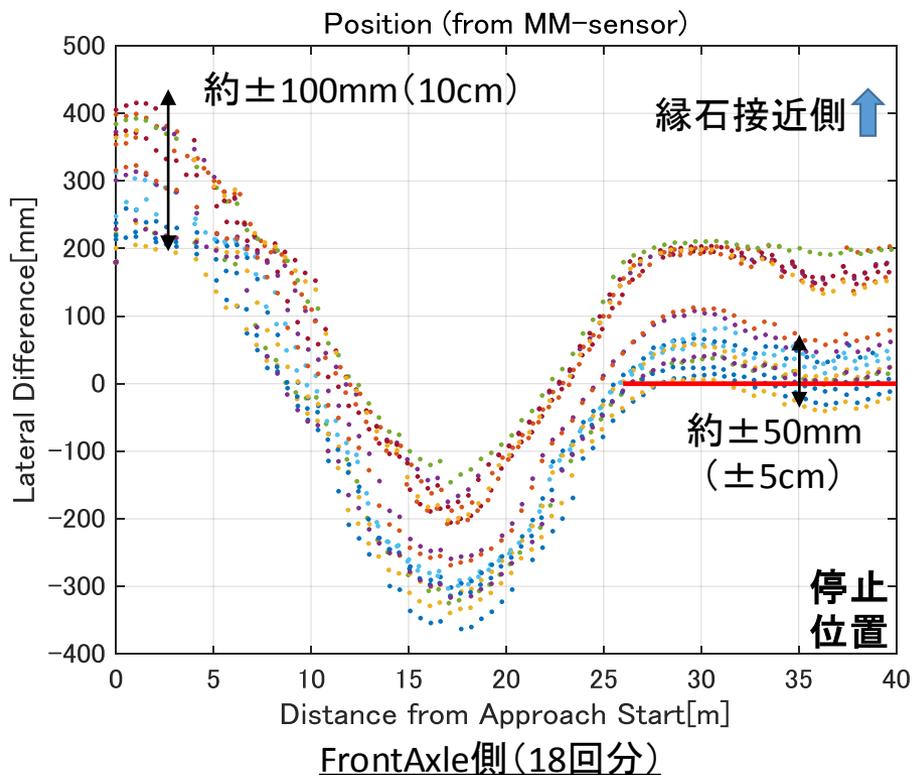
- **正着目標距離（縁石～バス本体）は20cmとした。**
※ **縁石高さが比較的高く、またドアが外側に飛出る（10cm弱）タイプであったことから、接触するリスクを鑑み余裕を持たせた。**



3.

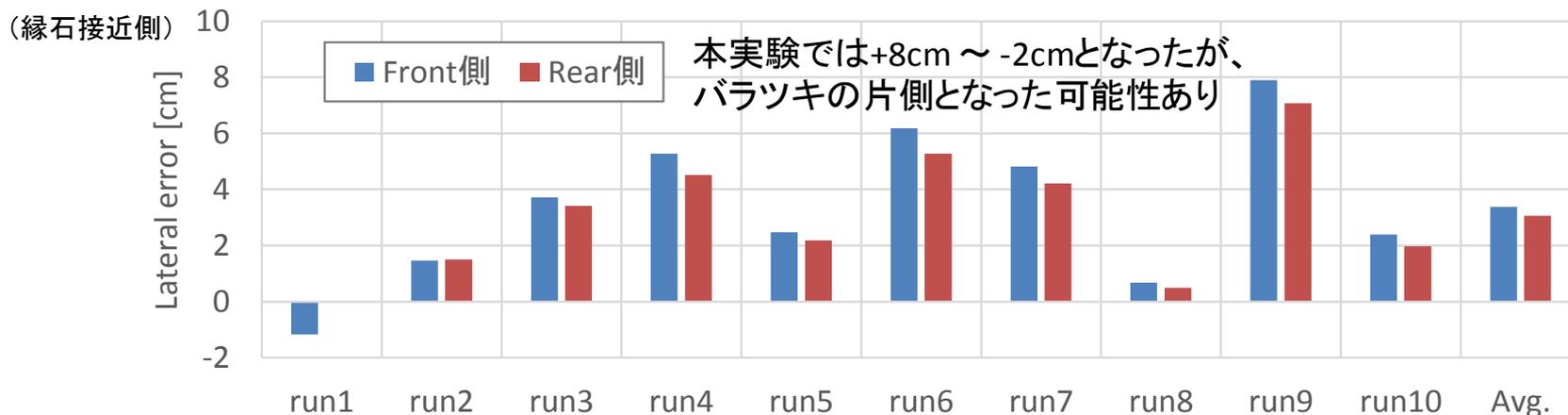
3.5.2 磁気マーカを利用した正着制御(正着制御結果)

- 本実証実験では、基本的には(RTK)GPSによる車線維持制御により走行し、磁気マーカ区間ではGPSと磁気マーカを複合的に利用し、バス停への正着制御を実施した。
- (RTK)GPSは、衛星状態や電波状態に影響され、位置推定の精度は $\pm 10\text{cm}$ 程度となる。一方、磁気マーカは位置推定の基準が地上側に固定されている。このことから、磁気マーカをGPSの補償機能として利用した例となる。
- 正着制御開始時には横方向偏差で $\pm 10\text{cm}$ 程度のバラツキを有するが、停止位置では約 $\pm 5\text{cm}$ とできることが分った。一方、縁石側に寄るケースも見られ、初期状態の影響を受けていることが考えられる結果となった。



■ 磁気マーカを利用した場合の正着精度

- 磁気マーカを利用した場合の **正着精度は ±8cm程度** の実力と考えられる。
(なお、進入状態の影響を強く受けていると考えられるケースは除いて評価した)



■ 正着精度の比較

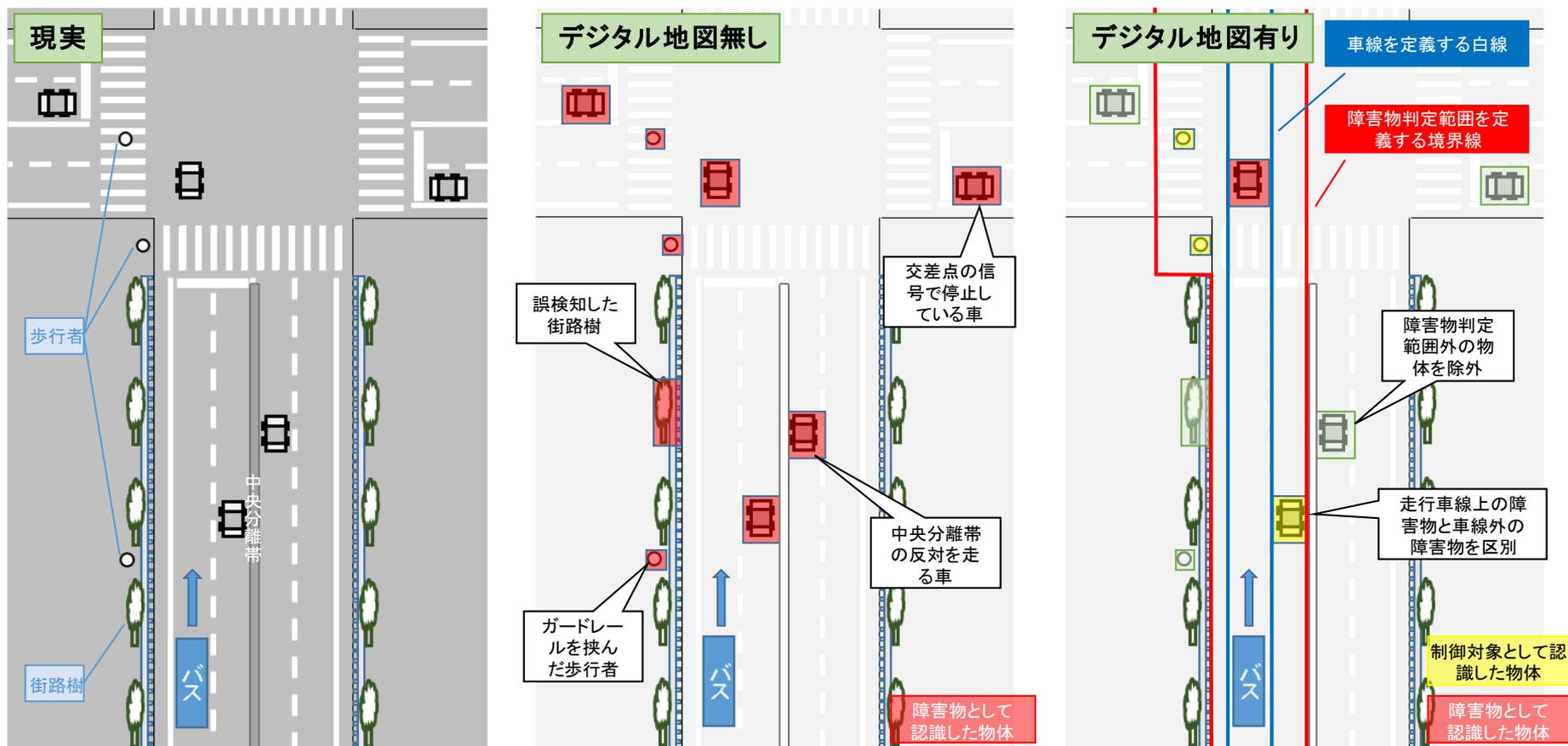
- バス停での正着制御に関し、位置推定手法ごとの正着精度を比較した。
- 白線や縁石を認識する場合と比べ磁気マーカは認識が離散的であり、原理的には精度が劣る可能性が考えられる。
- 一方、磁気マーカによる制御は、制御パラメータ調整等で**今後性能改善を見込む**。
また、**天候条件や縁石・白線の状態に対してロバスト**であることがメリットと考えられる。

位置推定手法	GPS(RTK)	磁気マーカ	白線(カメラ)	縁石(LiDAR)
認識の特徴	連続(高速)	離散	連続(高速)	連続(高速)
正着精度	±10cm	±8cm	±5cm	±2cm

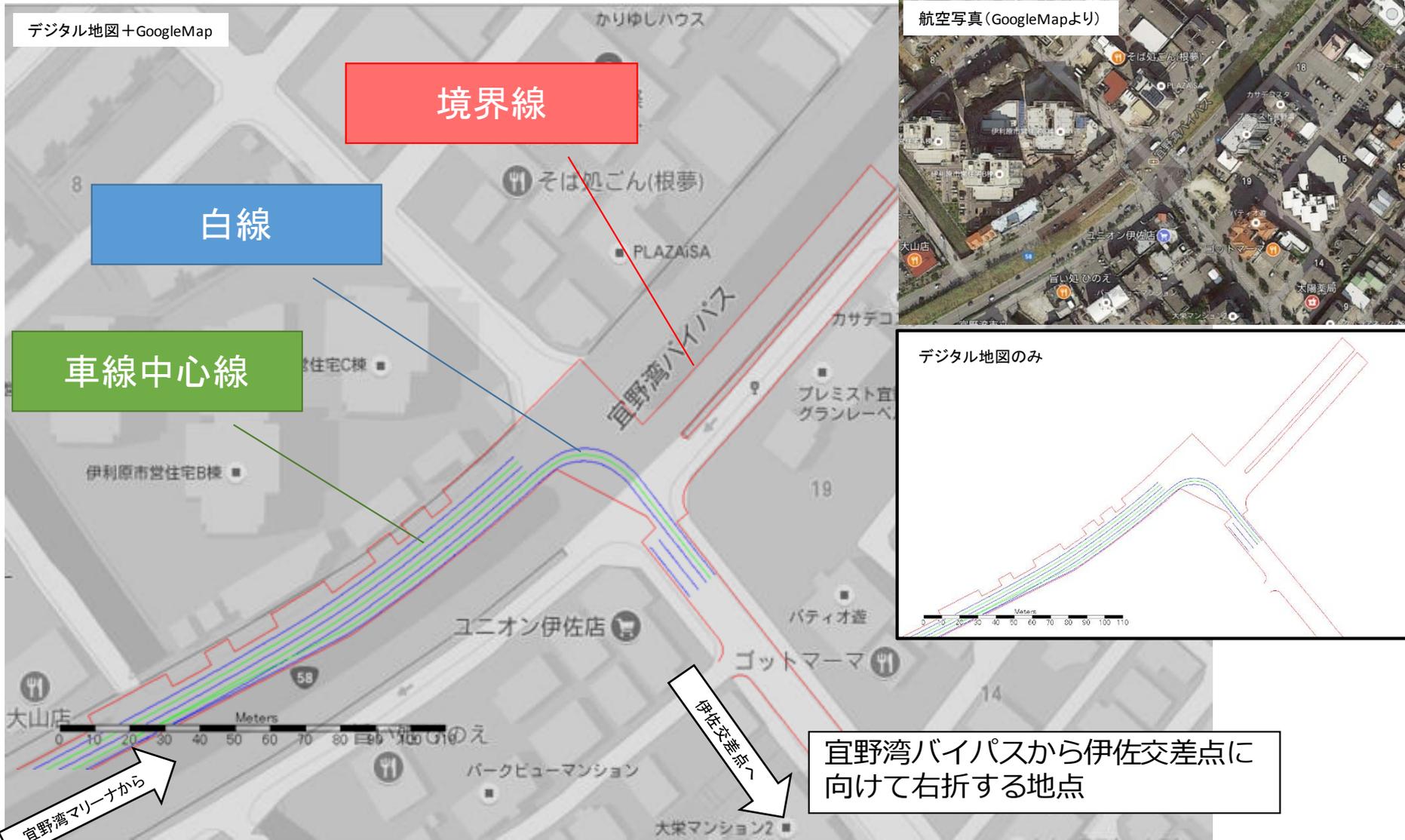
(ARTに関する取り組み実績等を考慮)

従来は、道路内外関係無く、センサーが検知した物体(誤検知を含む)を障害物としていた。

→ デジタル地図により、バスの進路上にあるバスの制御に関係ある物体のみを障害物とし、制御に関係ない物体を除外する。

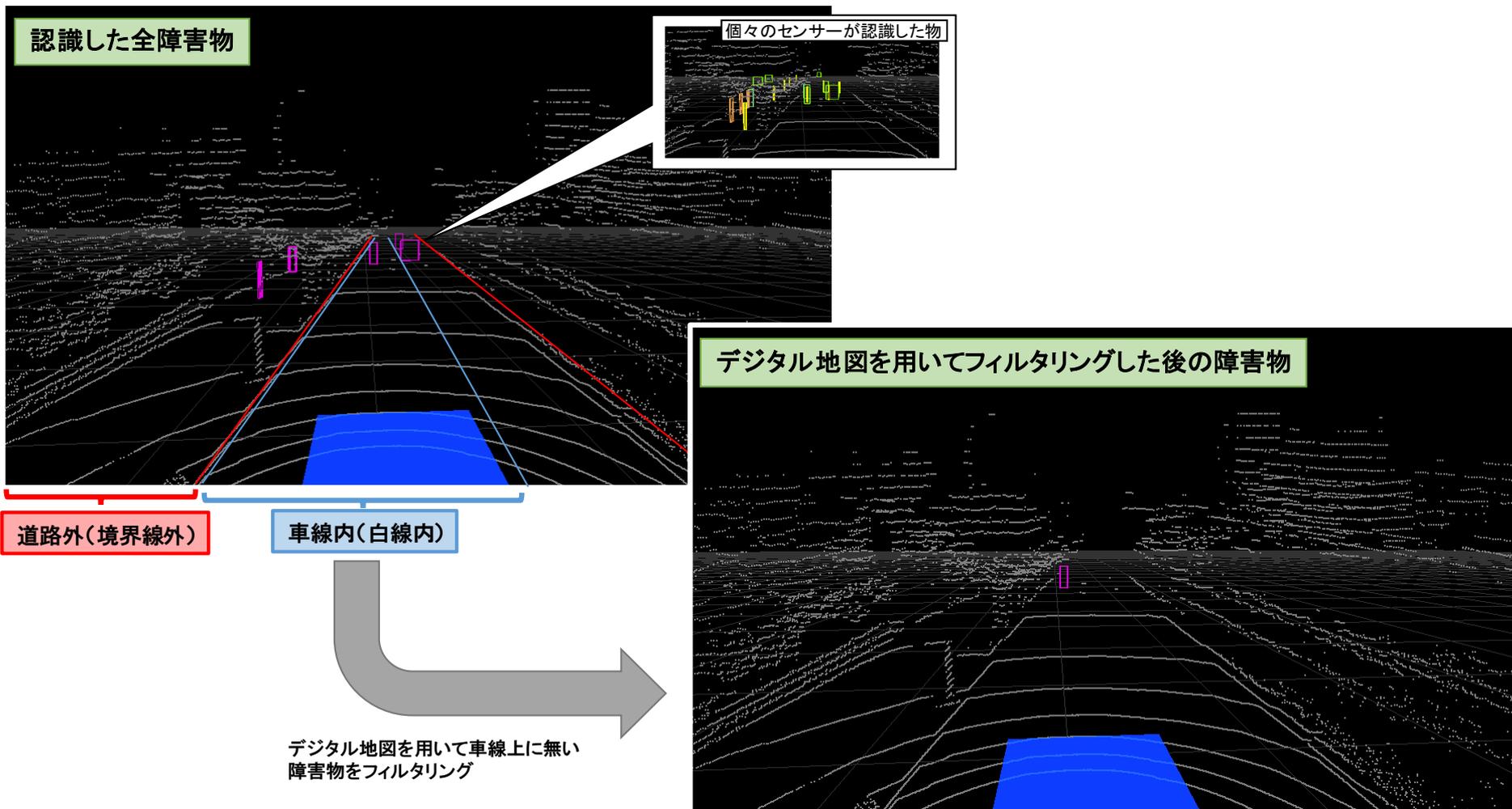


3. 3.6.2 沖縄で使用したデジタル地図



(※)実際には白線が引かれていない地点においても、車線に沿って左右に仮想線の白線を作成

デジタル地図を用いて、道路内外、車線内外の障害物を区別



従来の手法(※)と比較した、車線上の障害物判定結果の比較

計測に使用した走行ログ

経路: 宜野湾港マリーナ発 → ライカムイオン行(2017/11/29 12:33-13:16)

走行時間: 約43分(約25000フレーム)

自転車線上にあると判定した障害物(車両、歩行者)の数だけカウント

	自転車線上にあると判定した 障害物の数
従来の手法	21793
デジタル地図を用いた手法	18506

- ・ライカム～マリーナ(往復:約20km)について、ランダムに取り上げた3往復分を評価
- ・予期せぬステアリングオーバーライド回数は平均2.3回/20km、
予期せぬブレーキオーバーライド回数は平均4回/20kmであった。

ステアリングオーバーライド回数(平均)

計	車線変更	その他
3.3回	1回(58号線)	2.3回

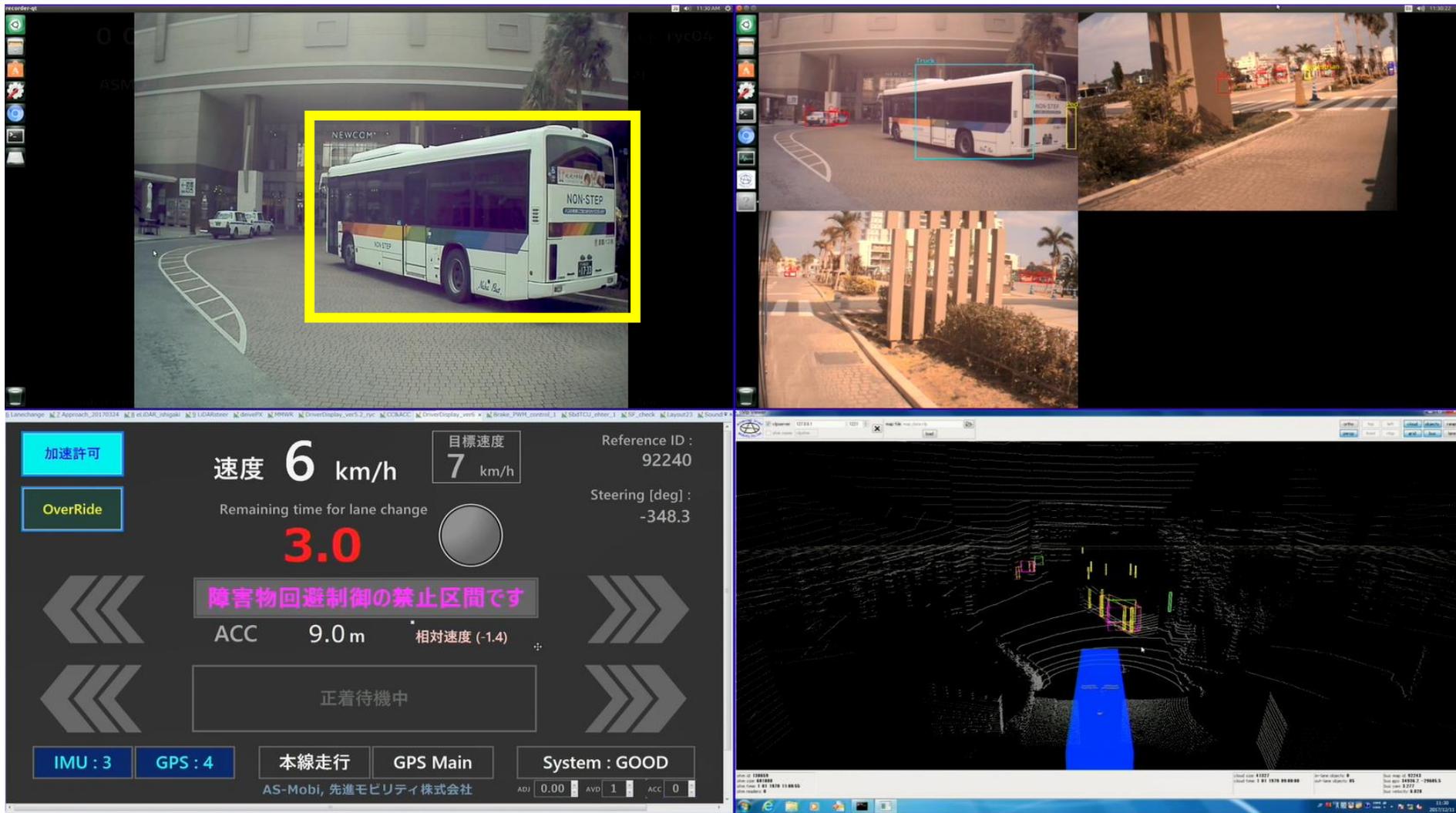
交通密度の高い環境下での車線変更が課題

ブレーキオーバーライド回数(平均)

計	赤信号	右折時	その他
16.7回	11回	1.7回	4回

信号情報授受の仕組みが課題

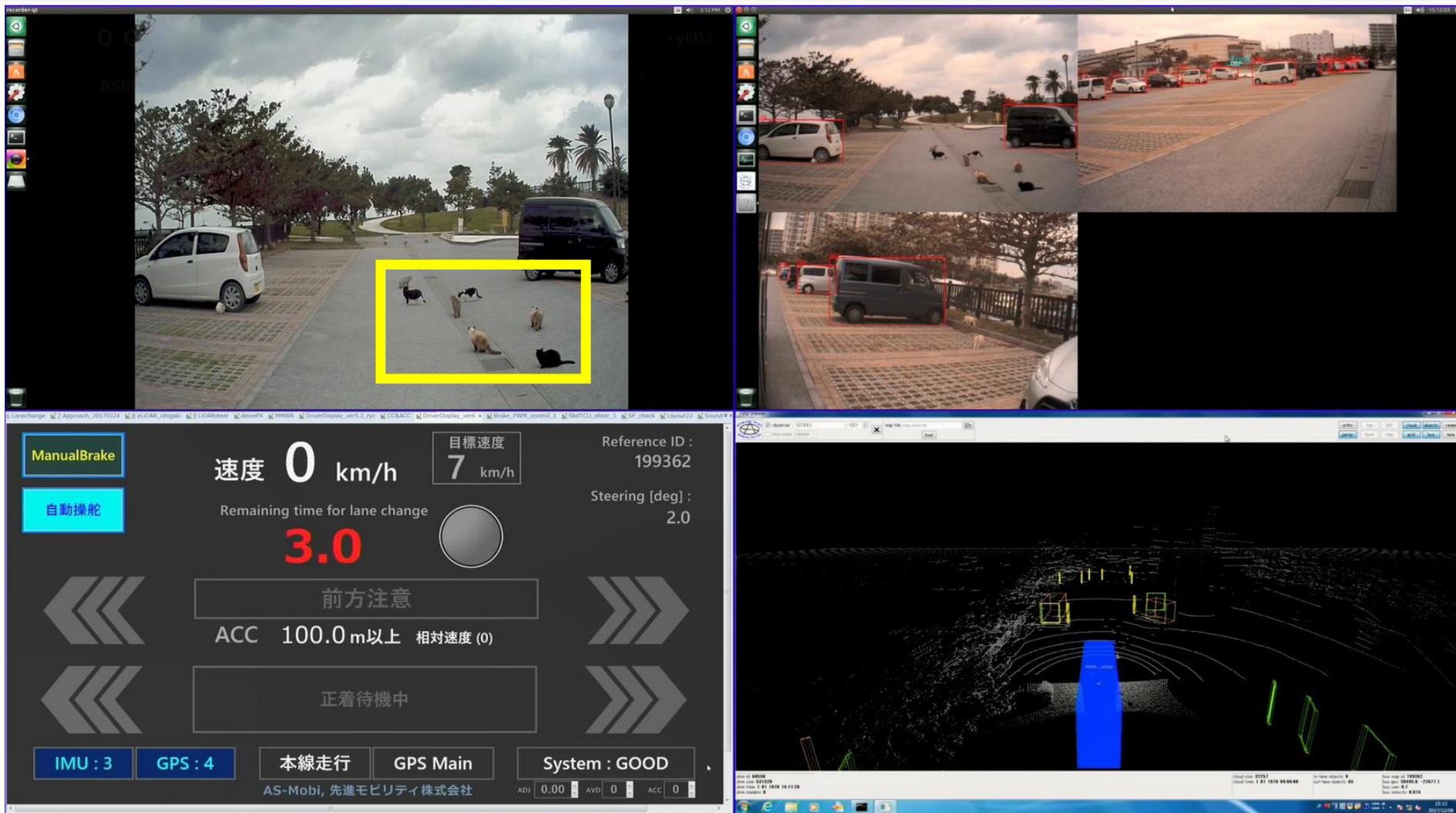
対向車がいる中での右折が課題



- 自車線に大型車等が大きくはみ出しており、自動での回避が困難
- 回避するためには、**後方や側方の安全**が十分に確認できていることが必要

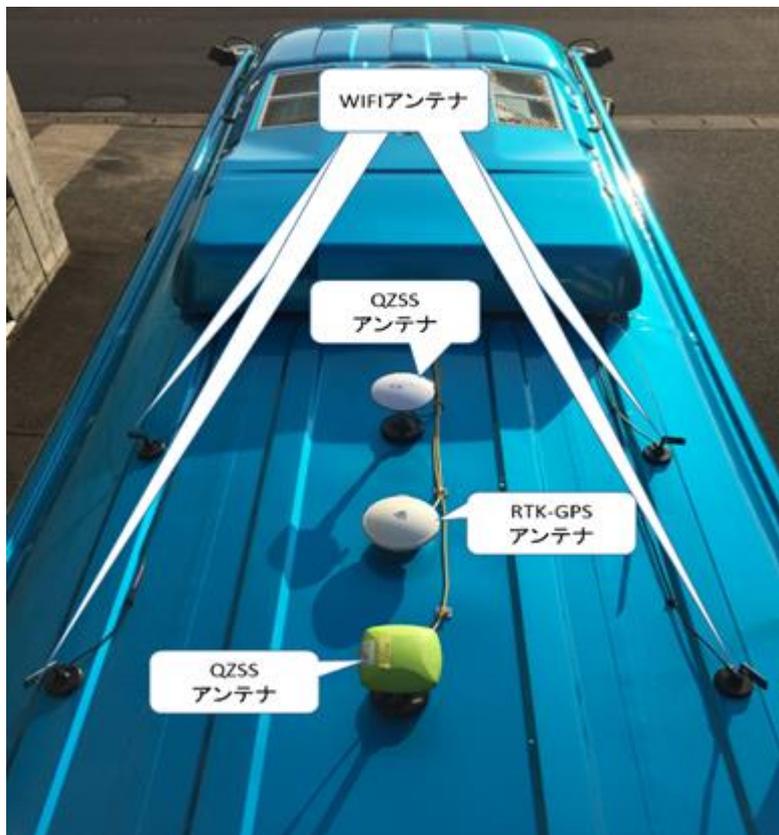


- 路肩車両を自車線内で回避中に、ドライバーが安全のために速度低下
- 後方や側方の安全が十分に確認できていれば、路肩車両との距離を広げられる



- 猫の認識ができず、ドライバーのブレーキにより停止
- **小動物等の小さな物体の認識が必要**

- QZSSを評価するために、実験車にQZSS受信機やアンテナを搭載し、評価実験を実施(2017年12月:沖縄)。
- リファレンスとして、RTK-GPSを用いる。



◇ RTK-GPS

- トリブル社のVRS方式

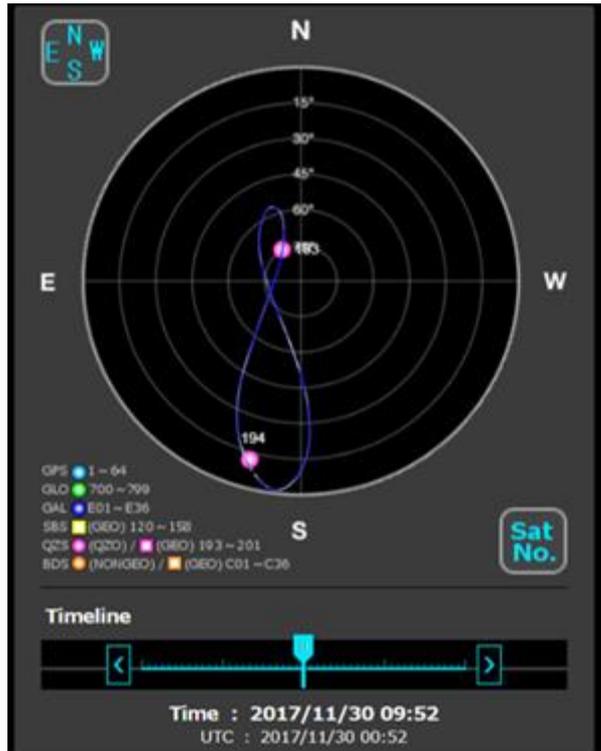
◇ QZSS

- CLAS: 三菱電機社

- MADOCA: マゼランシステムズジャンパン社

(製品が間に合わなかったため、今回は評価なし)

現状、準天頂衛星は1～4号機の4機体制となっているが、評価実験当時(昨年12月)、試験サービス前(チューニング中)であり、CLAS測位に使用可能な信号が配信されていたのは1～2号機の2機のみ。



日本時刻10:00

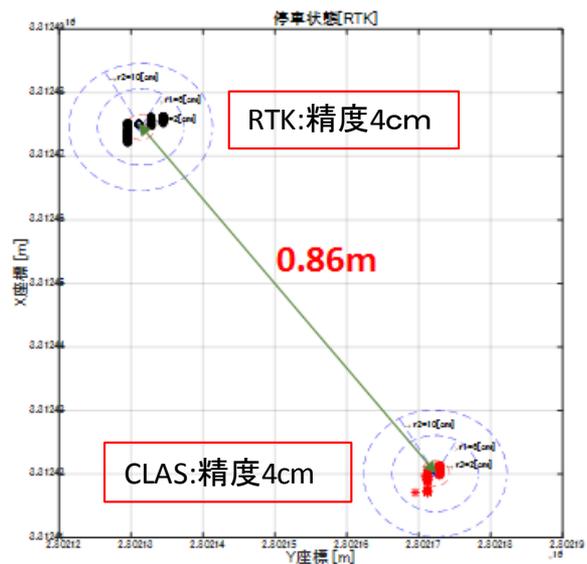
内閣府宇宙開発戦略推進事務局
GNSS Viewより

衛星番号	仰角条件	配信時間帯(理論上)
193(1号機)	60度以上	02:00~14:00
	70度以上	03:00~12:30
194(2号機)	60度以上	11:00~23:00
	70度以上	12:00~21:30

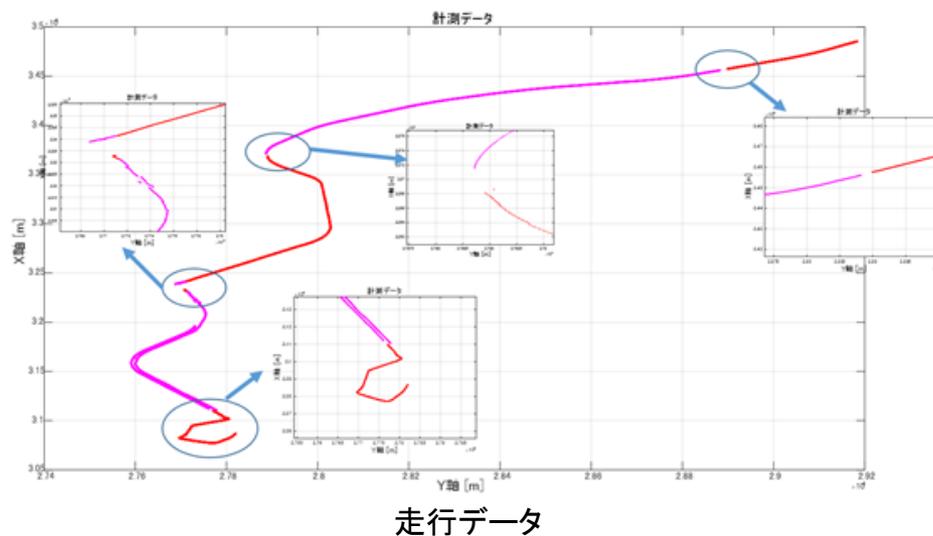
QZSS測位Qualityの定義

Quality	定義	位置精度	自動運転へ応用
0	未測位	NaN	×
1	単独測位	3m~5m	×
2	DGPS(相対測位)	1m	×
4	CLAS/FKP測位(FIX)	10cm以内	○
5	CLAS/FKP測位 (Float)	50cm	×
6	Dead Reckoning	10cm~1m	△

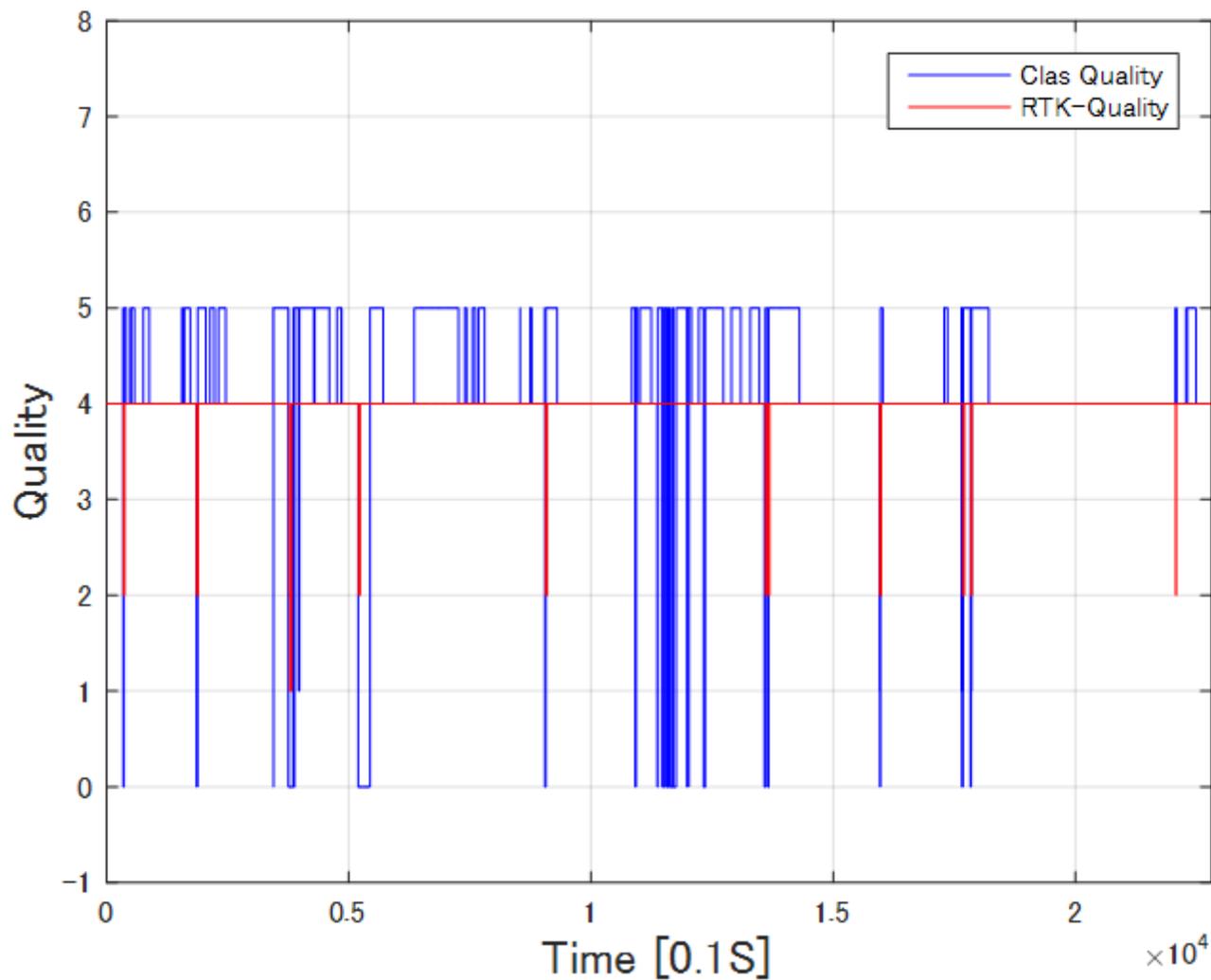
No.	評価項目	内容	評価
1	FIX状態での測位精度	静止4cm以内、走行10cm以内	問題なし
2	RTK-GPSとの差異	0.86m	当該差異は、地殻情報の違いによるものであるため、同様時期の地殻情報を用いることによりキャンセル可能
3	FIX率低下、未測位	32.8% (RTK 98%~)	現状、測位アルゴリズム修正により68.7%まで改善を確認しているが、自動運転に必要なFIX率ではないため、引き続き更なる改善が必要
4	復帰時間	33.4秒 (RTK 11.2秒)	今後、補強対象衛星数の増加により復帰時間の短縮が期待されるが、受信機での補強情報の処理改善やIMUとの併用も検討必要



No. 2 RTK-GPSとの差異
RTKとCLASの地殻情報の違いによるもの。
(RTK:1997年の元期情報 CLAS:最新の今期情報)

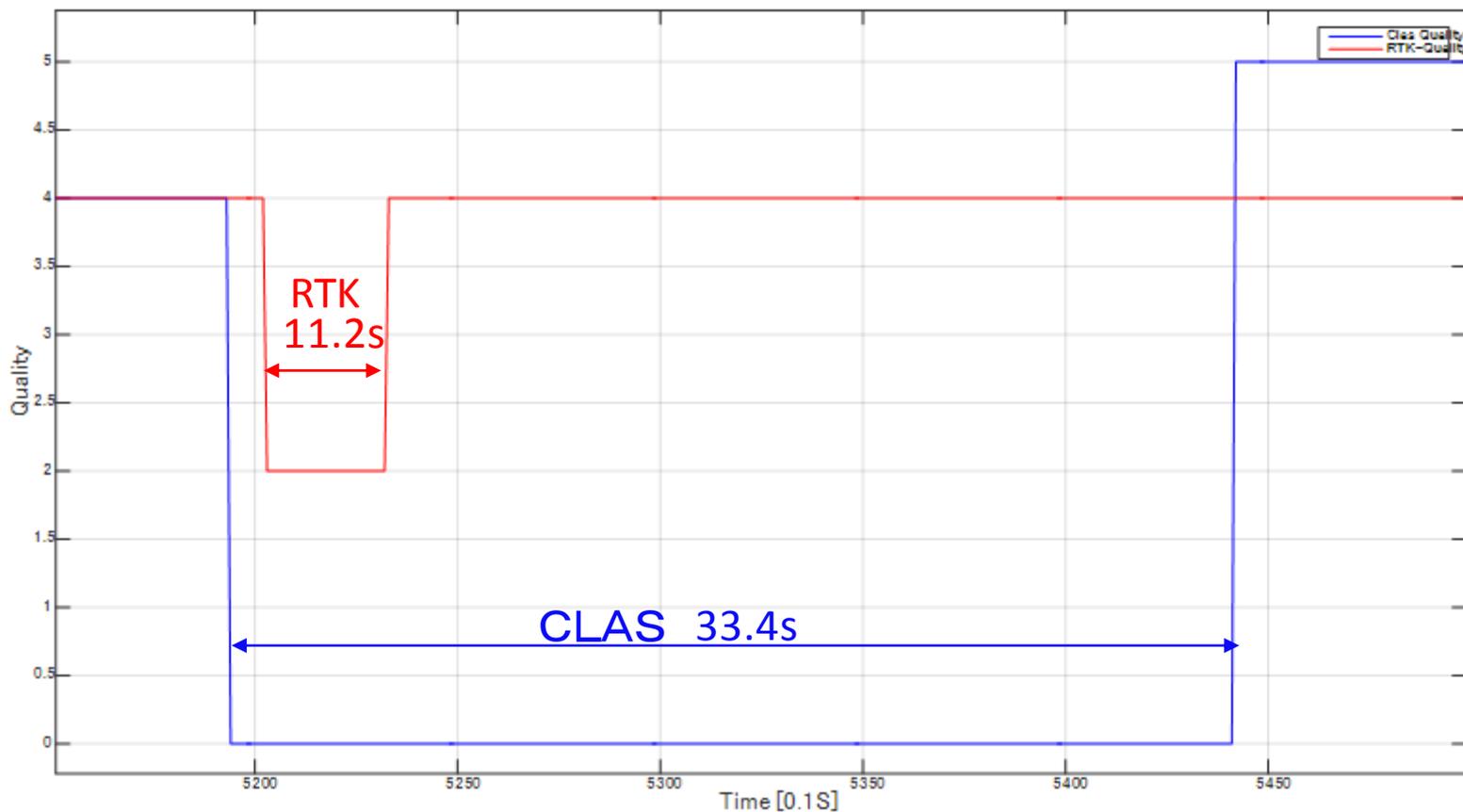


No. 3 FIX率が低い、未測位
No. 4 復帰時間がかかる



<現状>

- Fix QualityがCLASの場合、4 (FIX状態) から5 (Float状態) や0 (未測位状態) に頻繁に変化し、RTK方式の場合は4 (Fix状態) がほとんどであることに対して、CLASの場合はFIX率が低下しており、未測位が多い。



<現状>

- 測位信号が途絶える（高架橋等の下）環境から抜けた時のFIX Qualityが復帰する時間が、CLASの場合は33.4秒で5（Float状態）になるが、RTK方式の場合は11.2秒で4（FIX状態）まで戻る。
- CLASは復帰時間が長いので、信頼性の高い（FIX Quality 4）測位結果が使えない。

■ 実験結果

FIX状態での測位精度は、静止状態で4cm、走行状態で10cmであり、自動運転への利用が期待できる。ただし、FIX率低下、及び復帰時間がかかる課題がある。

■ 課題と今後の対策

課題	原因	今後の対策	参照
FIX率低下 当初: 32.8% 現状: 68.7% 目標: 95%以上	(1) 基準衛星とした高仰角衛星のマルチパス	受信機における基準衛星の選定方法アルゴリズムの改善	補足1
	(2) 電離層及び対流圏の残差推定	受信機における測位アルゴリズムに残差推定処理を追加改善	
復帰時間 現状: 33.4秒 目標: 30秒以内 ※受信機のIMUとの複合により測位結果が途切れ難くする	(1) 補強対象衛星数が少ない	CLASの開発進捗により今後解消(補強対象にGalileoが追加されれば衛星数が約2倍)	補足2
	(2) CLAS補強情報更新周期が最長30秒	受信機における補強信号の処理改善による復帰時間の短縮	
	※ 測位結果が途切れる	※ IMUとの複合効果により衛星不可視時も連続した測位結果出力	補足3

■ 結論

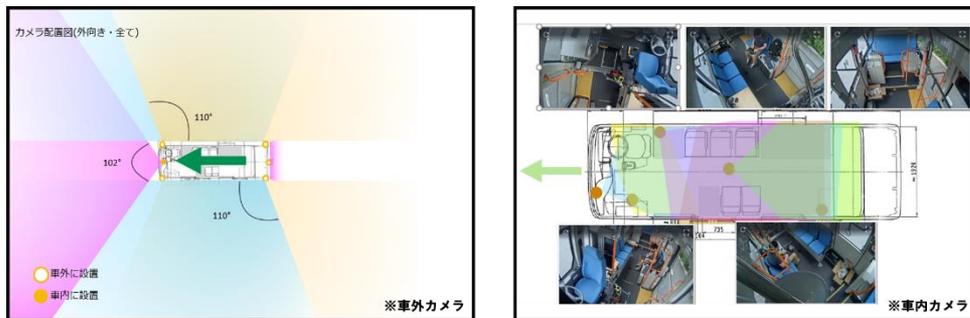
受信機の開発進捗、CLASの開発進捗等により、FIX率および復帰時間の課題については解消の見込み。来年度以降も引き続き自動運転への利用検討を進める。

自動運転バス遠隔監視システム：車両状態監視/車内通話



位置や速度を遠隔から監視することで、車両が正しく走行しているかどうかを遠隔監視者に伝える。状況に異常が発生した時点で遠隔監視者が車両映像を確認し、車内乗客とのコミュニケーションが必要な場合は遠隔監視者が車内通話機能を使うことで双方向通話を行った。

自動運転バス遠隔監視システム：車両映像監視



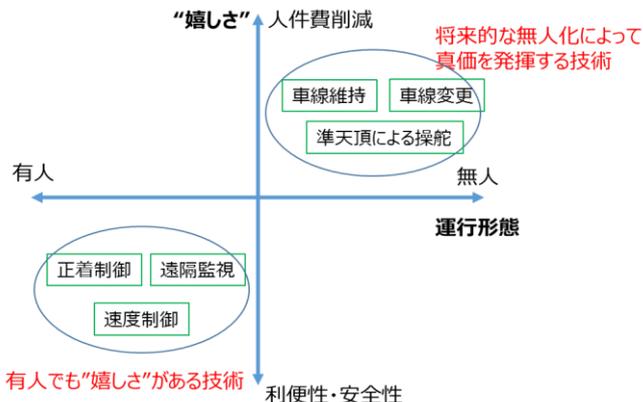
バス外部、内部の安全をリモートの運行管理システムで確認できるようにするため、
 ・車外向けカメラ 6台
 ・車内向けカメラ 5台
 を設置し、運行管理システムで常に見える状態のリアルタイム表示を行った。
 車外360度、車内の死角がない画角で実装している。

自動運転バス遠隔監視システム：停止/発進



画面右上のボタンが走行中は「停止」、停止時は「走行開始」へと変化し、遠隔から車両の停止及び走行開始を行うことができる。
 「走行開始」ボタンを押下すると走行開始アナウンスが流れ、自動的にドアが開まる。

検証した要素技術	実用化可能性		実現する“嬉しさ” (交通事業者 / 自治体 / 利用者)	技術課題
	2020~	2023~		
正着制御	○		ユーザーの利便性向上に加えて、乗降時間の短縮効果についても一定の関心が見られた。	バスベイ型バス停では正着距離が不足し、目標制御精度の達成困難
車線維持制御	○		有人運転の場合、慣れないシステム監視等により、ドライバー負担増加の懸念も有り	GPS受信レベルの低下時に制御が不安定化 ・交通密度が高く車線変更が困難 ・AIによる周辺環境認識性能の向上が必要
車線変更制御		○		
速度制御 (含むACC)	○		ヒューマンエラーによる事故や車内転倒事故の防止に繋がるのであれば有用	
交差点での速度制御 = 信号現示に応じた速度制御	(○) 固定スプリット	○	ジレンマゾーンでの信号予測に基づくブレーキ制御は、車内転倒事故防止に有効	集中制御信号機における信号現示連携には、対応する信号機の整備が必要
準天頂衛星を用いた操舵制御		○	自動運転の低コスト化や安定性向上に資する可能性有り	移動時でのcm級の位置精度達成には、受信機やCLASの改善が必要
遠隔監視・車内監視	○		安全性向上に加えて、ドライバーの軽労化にも寄与する	車内監視の認識精度のさらなる向上



運転手は走行中にミラーで車内監視を行っているが、運転手への負荷は高く、かつ十分な監視ができないケースも存在する。
運転手の業務から車内監視を切り離す、もしくは軽減させる仕組みを導入することで、車内事故の低減に繋がると期待できる。

他方、正着制御、加減速制御（ACC）、車線維持・車線変更等については、安全性・利便性の向上や運転手の負担軽減という観点で有益であるものの、個々の技術が、運転手不足をはじめとする事業者の経営課題に直接貢献するものではないため、事業者単独の費用負担での導入は困難と考えられる。

4. 自動運転バスに関する受容性調査

ヒアリング結果:ビジネス化における現状と課題①

問1	LV2~3の段階の自動運転技術に対して、事業者のニーズはあるのか？ 無人化による人件費削減メリットが無い状態でも事業者に技術の導入意向はあるのか？
考察	<p>ほとんどの事業者が自動運転に解決を期待する課題として「運転手の確保」をあげている一方で、車内監視による安全面の向上について自動運転に期待する向きも多い。運転手の負担軽減を求める声も一定数あるが、Lv2~3の自動運転技術では実際に運転手の負担を軽減できるのか疑問である。</p> <p>車両価格については既存車両+1,000万円~2,000万円程度をみこむ事業者が多いが、自動運転車導入の原資として多くの事業者が「人件費の削減」を上げており、人件費削減メリットの無い状態で同程度の価格を負担できる事業者はほとんど見受けられないのが現状。</p> <p>無人でない車両でビジネス化を推進するためには、乗車員を運転手でなく車掌とするなど、2種免許が不要で既存の運転手よりも人件費が低く採用しやすい人材をあてがえる仕組み作りが必要（運転手不在のLv4相当）</p>
ヒアリングからのコメント抜粋 (交通事業者)	<ul style="list-style-type: none">・乗車の必要が無くなった人件費分が浮けば良い。・車内の前方のモニターや遠隔監視システムで車内の様子や、立ち上がるなどの危ない状況が発生した時、運転手に知らせてくれる機能は、今でも導入できるし、運転手にとって有り難い。・車内の監視システムだけを個別に売るとか、安全性を担うシステムの部分だけを売るとか、事業を行ってほしいと思う。・今回のように自動運転機能+乗務員ということになると、乗務員にストレスが溜まるかもしれない。・乗務員を搭乗させた状態で1,000万円が上乗せされるのであればメリットはないと思う。・新たに路線を通せば儲かる路線もあるが、新しい路線を作るどころか既存路線を維持することで精いっぱいである。原因は運転手不足である。・通常、運転手による周囲や車内の安全確認を行うが、この際の人による判断の誤りなどがAIによって減ることを期待する。・直近の課題解決のためにも運転手の負担を減らしてくれればそれで十分である。・自動運転の機能を乗せることによって、人件費の削減等、1年にどれくらいコストが浮くのかの源泉。・自動運転にかかる費用を捻出するなら、収益拡大による原資獲得よりは、費用削減効果による原資獲得が良いだろう。・価格イメージはつかないが、通常バスより上乗せされて2,000-3,000万円であっても、将来的に乗務員が必要なくなり人件費の削減につながれば安いものだ。しかしながら、ドライバー以外の人材が乗車しないと高い。パートタイムジョブが乗車すればいいということであれば安い。・完全自動でなくとも、運転手の補助となる機能であれば、運転手の疲労減少につながる。運転手が運転以外の業務、たとえば安全性の確保などに集中できる可能性も感じている。・イニシャルで1,000万と言われても即答できない。ランニングを合わせてトータルで考えた、費用対効果を見たい。

4. 自動運転バスに関する受容性調査

ヒアリング結果:ビジネス化における現状と課題②

問2	今回の検証技術(正着、車線維持・変更、加減速制御、遠隔監視等)について自治体、事業者、ユーザーの関心やニーズがどの程度あるか？ また、ニーズがあると分析された技術について、現状の技術レベルはニーズを十分に充足するレベルとみなされているか？
考察	<p>ヒアリング上では正着制御に関するニーズが比較的多く見られ、技術レベルについても充足するレベルとしてみなされていた。また、問1でも示されたように、安全性の観点から車内監視についてはニーズが見込める。</p> <p>一方で、車線維持・変更や加減速制御の技術レベルに関しては十分であるとの声もある一方で、違和感を感じる声も多かった。対象が交通事業者へのヒアリングであったため自社の運転手と比較されるケースが多かったことが想定される。しかしながら、自動運転バスに対してプロの運転手以上の安全性が必要であることは言うまでもないが、プロの運転手と同等のサービスが十分条件であるのかについては検討が必要である。</p>
ヒアリングからのコメント抜粋 (交通事業者)	<ul style="list-style-type: none">・車線変更が不安であった。車線変更時、少しスピードが落ちすぎていたため、危険を感じた。周囲の走行車両にスピードを合わせきれていない。・車線維持は何も障害物が無い場所ではスムーズだった。・公道だと課題もありそうだが、閉鎖空間では問題無いレベルまで技術は進んでいると思う。・車線変更はスムーズで、特に問題無いと思った。・ブレーキをかける際、ガクッと感じるほど急なブレーキがかかっており、車内乗客の転倒の恐れや後続車両との接触など危険があると感じた。・オーバーライドでブレーキを踏んだりとかは、まだ課題が大きいのかなと、率直な感想。・磁気マーカーを用いた停車では、あれくらい寄せられるのであれば、個人的にはあれだけ寄ってあげた方が、お客様の乗降はスムーズになる。それこそ本当に車いすの乗降にもつながるのでは。 <p>止まる瞬間など、ブレーキの抜きが大分甘いと思い、ここが人間の挙動に近づけば良いのではと感じた。</p> <ul style="list-style-type: none">・正着制御の「寄せる」という目的は、高齢者や子供など利用者を限定せず、全ての乗客に利便性をもたらすため、どのバスにも入れていいと思う。・現時点の技術でも、人間が介在しなくても走れるのではないかと感じた。

4. 自動運転バスに関する受容性調査

ヒアリング結果:ビジネス化における現状と課題③

問	自治体・事業者の目線での事業化に向けた課題・不安は何か？ また、その解決のためにどのような技術開発や実証実験が期待されているか？
考察	<p>事業化に向けては事故の際の責任の所在を問う声が聞かれた。また、運賃の収受についても不安の声が多かった。運賃の収受に関しては決済手段の検討や、遠隔監視、IDとの紐づけなどテクノロジーについての検討が求められている。</p> <p>最も大きな課題とは導入及び運用の費用に関する問題だと思われる。問1で示されたように多くの事業者は車両価格+1,000万円~2,000万円を想定しており、原資として運転手削減による人件費を想定しているが、自動運転車においてはハードウェアにかかるイニシャルコストに加え、遠隔監視の人件費や設備投資費、通信費など、ランニングのコストについても追加で発生してくるため、資金が潤沢な一部の交通事業者を除けば導入におけるハードルは決して低くはないのが現状である。今後は技術実証のみではなく、持続可能なビジネスモデルについての検討や検証が求められるだろう。</p>
ヒアリングからのコメント抜粋	<ul style="list-style-type: none">・誰の責任になるのか。運転席に人がいたらその人になるのか。無人の場合はどうなるのか。・近くのバス停までいける団地内の循環バスを自動化できないだろうか。・バスは生産性（乗車率）が重要。都市型乗合バスであれば、大型バスで終日運行しても問題ないが、自社のような路線エリアでは朝夕の通勤通学利用は多いが、昼間の利用は少ない。・自動運転車の場合、料金収受が不安である。・幹線交通としてBRTみたいにしては、例えば運賃収受も車外で行うような。・車両購入補助などがあれば、導入の足かせが軽くなる。・大型2種免許保有者による監視が必要になると、過渡期は運転手もいるため、監視に対する投資ばかりかかるのでは。・猫が飛び出してくる、走行経路上にいて避けようとしていないなどへの対策も必要なのではないか。