

自動走行システムの実現に向けた諸課題と
その解決の方向性に関する調査・検討における
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

報告書 概要版

2017年3月10日

株式会社ジェイテクト

はじめに

第1章 操舵進み制御に関する調査検討

- 1.1 目的
- 1.2 操舵系の応答遅れ実測結果
- 1.3 実測結果を踏まえた正着精度向上に向けた検討

第2章 操舵系におけるシェアードコントロールの調査検討

- 2.1 調査の目的
- 2.2 シェアードコントロール評価
- 2.3 評価環境
- 2.4 評価結果
- 2.5 評価の考察
- 2.6 実車環境(大型HVバス)での試行評価
- 2.7 シェアードコントロールまとめ

第3章 正着制御における快適な乗り心地の実現に向けた課題調査

- 3.1 乗り心地、快適性の向上に関する調査
- 3.2 快適な乗り心地を実現させるための課題調査
- 3.3 正着制御中における外乱要因と対処方法の調査検討(周辺監視)
- 3.4 制動制御に関する調査

第4章 まとめ

事業の目的と実施内容について

本事業は、内閣府が関係省庁などと連携して進める「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」の一環として行っている事業の一つで、次世代都市交通システムとして位置づけられるART(Advanced Rapid Transit)バスの自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討を行ったものである。

平成27年度までの正着制御の施策において操舵系の機構的な課題や制動制御との連携など基本的な制御要素技術を再構築すべきことが分かってきた。また、自動制御と運転者が協調しあって安全を確保するようなシェアードコントロール(同時連携制御)型HMIについても、根本的な再構築を行うべきことが示唆された。次世代のシステム構築において、より高みを目指すためにも、本事業では、シェアードコントロール型のHMIなどを考慮したバス正着制御に対する制御要素技術について、以下の3項目について調査検討した。

- 1) 操舵進み制御に関する調査検討
- 2) 操舵系におけるシェアードコントロールの調査検討
- 3) 正着制御における快適な乗り心地の実現に向けた課題調査

1.1 目的

バスなどの大型車の操舵系は、その機械的リンクの長さなどのためにリンク系のあそびや不感帯の非対称性や非線形性が顕在化しやすい。

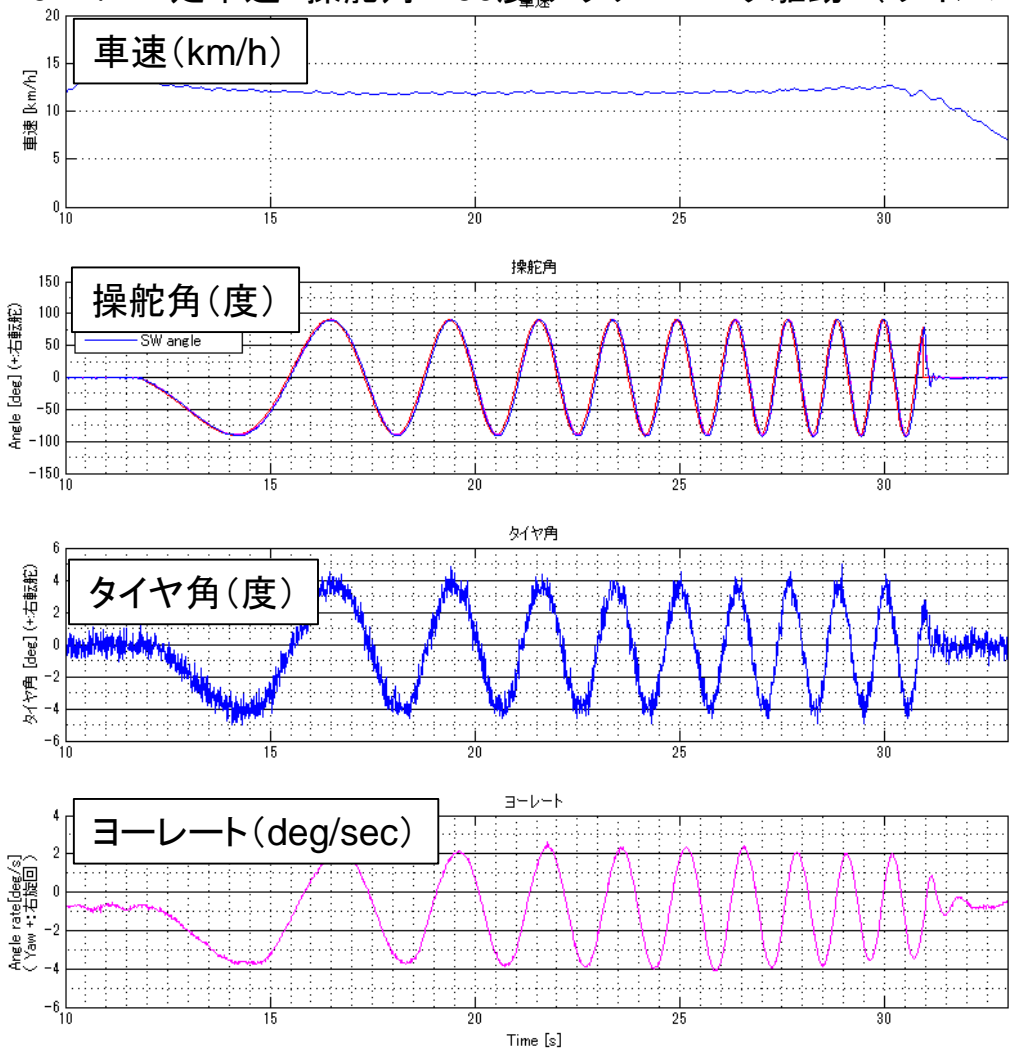
このことが、バス停に対し数センチオーダーの隙間の正着精度実現における課題と考えられる。これらを機械的な機構だけで補正することは難しいため、操舵系の応答遅れや左右転舵差、精度などを補償した操舵予測制御などによる位相進み制御の導入が有効と考えられる。

そこで本章では、バスの操舵系における応答遅れなどの特性を把握するとともに、正着時の操舵系挙動や車両挙動などから正着精度に寄与する要因を調査し、正着制御開発に活用できる知見を得ることを目的とする。

1.2 操舵系の応答遅れ実測結果(例)

文書管理No. 08J3-F-73-006-000

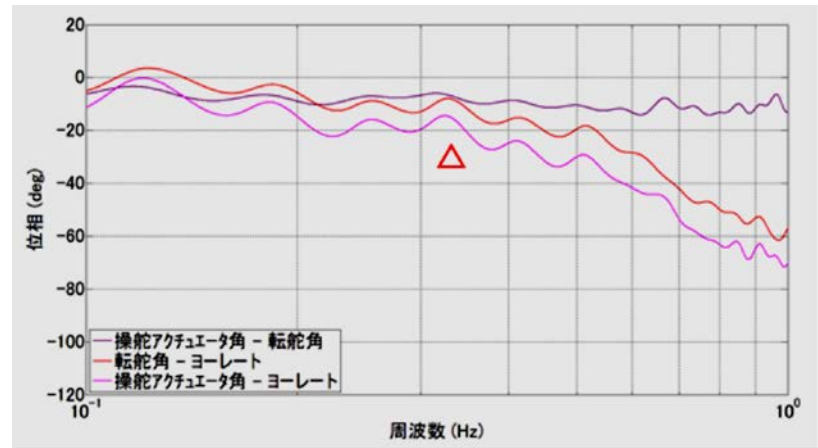
10km/h一定車速 操舵角±90度 アクチュエータ駆動 (サインスイープ指示)



時間(sec) →

位相遅れ特性

- ・ステアリングホイール～タイヤ
- ・ステアリングホイール～車両挙動
- ・タイヤ～車両挙動



⇒ 想定した通りであり、
アクチュエータ制御改善につなげる

1.3 実測結果を踏まえた正着精度向上に向けた検討

1.2項で、バスの操舵系の特性並びに現時点での正着制御の状況を把握した。これらの結果を踏まえ、今後の正着精度向上の方策を検討した。

- ① 操舵進み制御
- ② 白線認識カメラの姿勢補償
- ③ 目標軌跡(正着経路)の適正化
- ④ 車両傾き角偏差 e_3 の検出精度向上

2.1 調査の目的

正着制御では、正着目標地点付近に人や障害物があるときは、運転者の意志で正着とは反対方向に操舵して回避行動を行うが、運転主権をシステムに100%依存していたのでは、運転者の応答が遅れてしまう可能性がある。そのため、正着制御を行う場合は、運転主権が運転者とシステムの両方にあり、役割分担によって実施されること(シェアードコントロール)により、常に運転者が操舵操作に関与していることが望ましい。

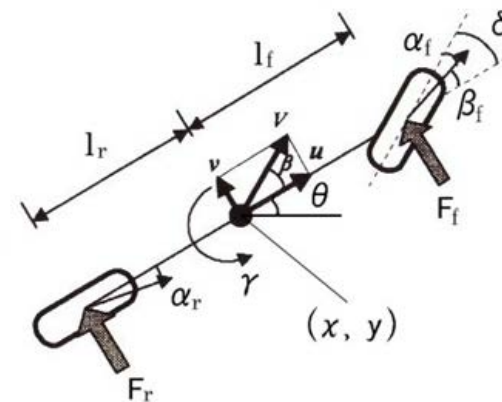
本調査では、運転者が常にステアリングホイールを把持する(以下「ハンドルオン」という)条件下で、操舵行動(操舵力)を運転者の意思として動作する正着制御プロトタイプシステムを提案し、その効果を検証する。

ドライビングシミュレータを用いて評価し、本システム利用時の運転者の操舵特性について解析する。その結果から本システムにおけるシェアードコントロールの実現方法を検討する。

2.2 シェアードコントロール評価

(i) 正着制御アルゴリズム

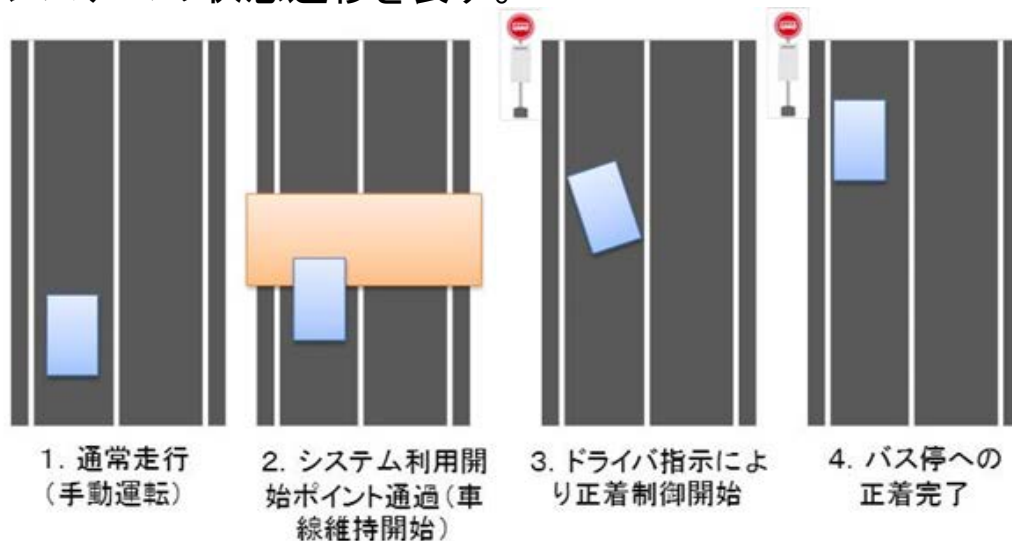
正着のための目標軌道への追従アルゴリズムには、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のエネルギーITS推進事業の自動運転・隊列走行システムの操舵制御アルゴリズムであるPath Following制御を採用した。操舵制御系設計に用いる車両運動モデルとしては、等価二輪モデルを選定した。(右図)



等価二輪モデル

(ii) シェアードコントロールのプロトタイプシステム

運転者の意思確認を操舵力(操舵トルク)により行う。下図に本システムの状態遷移を表す。



1. 通常走行
(手動運転)

2. システム利用開始
ポイント通過(車
線維持開始)

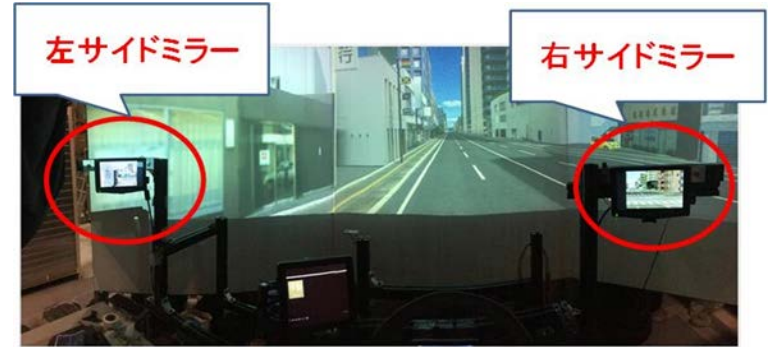
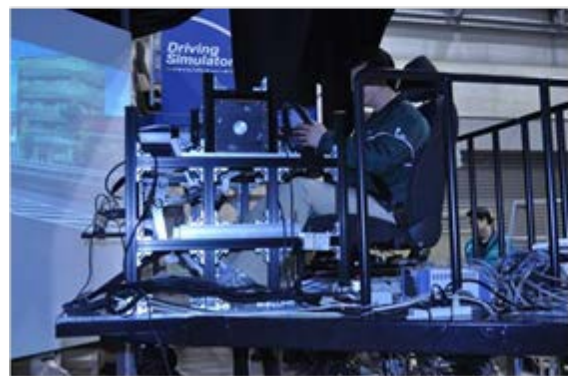
3. ドライバ指示によ
り正着制御開始

4. バス停への
正着完了

本システムの状態遷移

2.3 評価環境

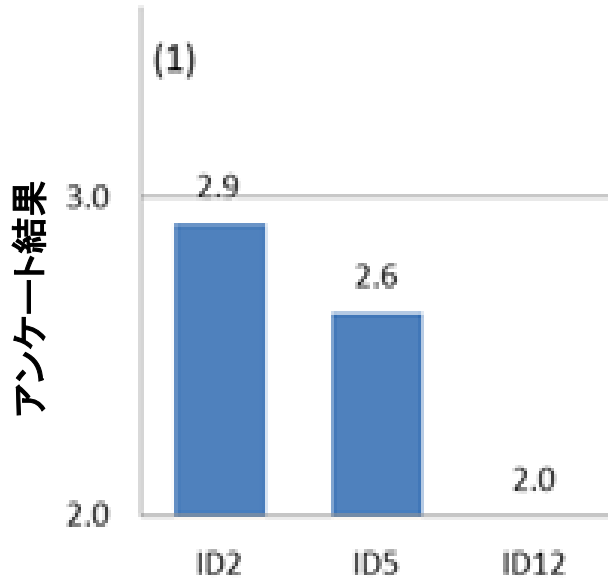
本調査では、東京大学生産技術研究所所有のドライビングシミュレータ(DS)を使用した。大型車両を可能な限り模擬して運転席を再現した。運転席では、大型車両のステアリングホイールを角度を変更して取り付けるとともに、シートの高さを大型車に合わせた。また、サイドミラーの位置も変更し、大型車両の再現性の向上を行っている。また、試験用の情報提示モニタを取り付けている。



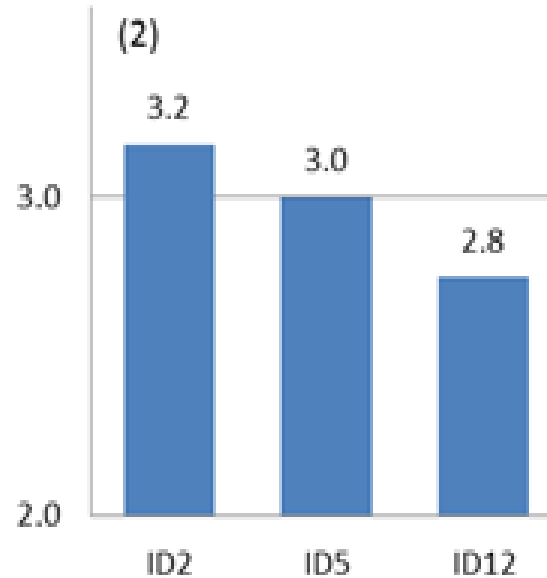
東京大学様 ドライビングシミュレータ

2.4 評価結果

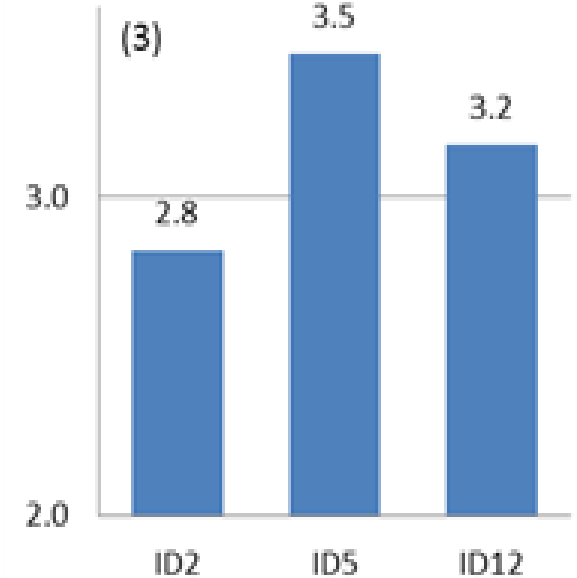
リラックス度



切り替えやすさ



運転のしやすさ



	ID2	ID5	ID12
正着開始判定トルク	2Nm	4Nm	2Nm
正着維持判定トルク	1Nm	2Nm	0Nm
ハンドルオン/手放し	ハンドルオン	ハンドルオン	手放し



2.4 評価結果

パネル（大型免許保持者12名） 評価コメント

① システムについて

- ・システムに慣れると問題なく切り替えができるようになった
- ・正着の操作をシステムがやってくれるのは操作が楽になる
- ・システムが正常に動くかが心配である
- ・人のいる方へ操舵を続けるのは怖い
- ・左側へ操舵していると右への回避行動の遅れにつながる（通常はブレーキであるが。）
- ・ウィンカーなどを制御開始用のスイッチとするといいかもしれない
- ・ハンドルオンの方が安心できる。
- ・ハンドルオフだと反応がどうしても遅れ、不安。

② 走行条件について

- ・正着の軌跡が通常よりきついので不安である
- ・バス停へ近付く速度がいつもより速いので不安である
- ・歩道のぎりぎりに立っている人が気になる
- ・減速のタイミングが通常と異なり不安である
- ・側方の自転車やバイクすり抜けのために事前に幅寄せを行っているため、バス停直前では実際はほとんどステアリングホイールを切らない

Sub.	性別	年齢	バスの職業ドライバ経験	運転頻度
A	男性	60	バス運転手	週5
B	男性	38	約10年前に経験約1年	週5～7
C	男性	30	バス運転手	週5
D	男性	36	バス運転手	週5
E	男性	50	マイクロバス運転手	週5
F	男性	41	大型免許保有者	週3
G	男性	65	バレエスクールのバスの運転手 約2年	週3
H	女性	45	バス運転手	週5
I	男性	47	マイクロバス運転手	週1～2
J	男性	46	建築系の大型運転手	週6
K	男性	32	ルート配送運転手	週3
L	男性	52	福祉バス運転手	週5

2.5 評価の考察

1) 正着制御開始判定に関する評価

6Nmの場合は意図通りに正着制御を開始できない確率が92%と低く、4Nm未満の値が望ましいことが分かった。

2) 正着制御維持判定に関する評価

4Nmで定常区間でも制御が維持できる確率が52%と低く、2Nm以下が望ましいことが示された。

一方、正着制御開始判定トルクと正着制御維持トルクの関係が正着制御維持の確率に影響を与えることも示唆された。

ただし、アンケート結果よりシステムへの慣れが重要であり、2Nm以下でも判定条件については検討が必要であることも示唆された。

3) ハンドルオンとハンドルオフからのオーバーライド

アンケート結果からハンドルオンの優位性が示され、

フリーコメントでもハンドルオンの方が安心できるという意見が大多数であった。

本試験の設定では、オーバーライド判定ができず、意図通りに手動に切り替えられなかったが、ハンドルオンではハンドルオフに比べて回避行動を取る確率が高いことが示された。

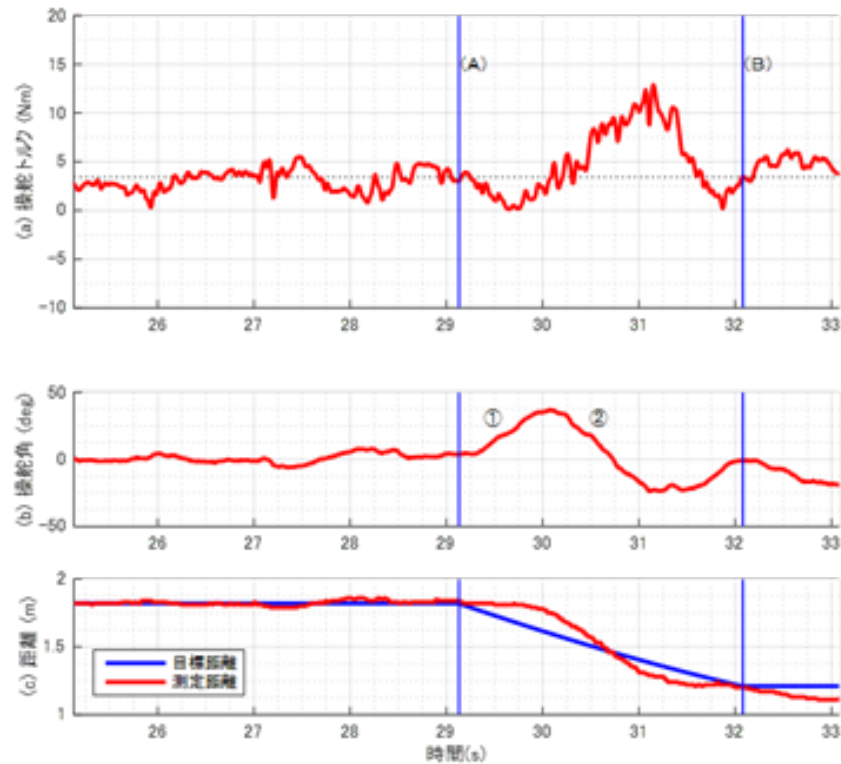
ハンドルオフの場合は子供の飛び出しに反応できず操舵を行うことができないケースが多かった。

そのため、本システムのコンセプトの有効性が示唆されたと考える。

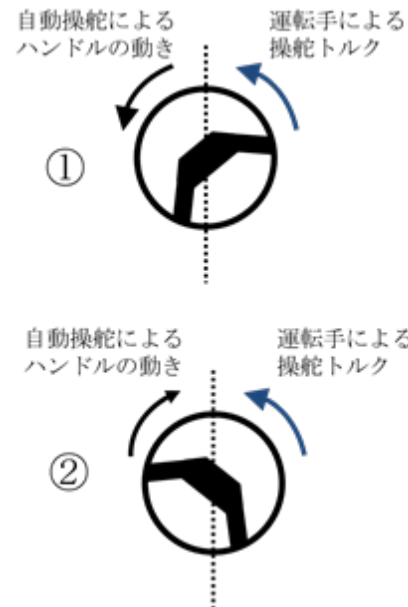
一方、左方向へトルクを与えることは右方向への反応の遅れにつながる可能性も示唆され、正着制御維持の方法については引き続き検討が必要である。

2.6 実車環境(大型HVバス)での試行評価

正着制御維持の意図としての操舵トルク値は個人差が大きいので、正着制御維持判定に用いるしきい値については、個人差に対応できる決定方法を検討する必要がある。また、本評価を実施した運転者からは、正着制御中常に左方向に操舵トルクを与えるという操作に違和感があり、システムへの慣れに時間を要するというコメントがあった。今後は運転者に違和感のない制御を検討する必要がある。



運転者の正着制御維持入力時の走行結果



自動操舵と操舵トルク

2.7 シェアードコントロールまとめ

文書管理No. 08J3-F-73-006-000

DS評価、実車評価の結果から、シェアードコントロールのコンセプトが有効であること確認できた。一方、以下の課題が抽出された。

①正着制御開始・維持について

- ・正着制御維持の意図としての操舵トルク値はばらつきが大きく、正着制御維持判定に用いるしきい値の決定方法を検討する必要がある。

②オーバーライドについて

- ・DS評価では、ハンドルオンがハンドルオフに比べ優位であることが分かった。アンケート結果やコメント内容から、ハンドルオンが運転者に受容されやすいことが分かった。今後、実際の運転での意識レベルを再現できるような試験方法を検討する必要がある。
- ・実際の交通の状況では、運転者が事前に歩行者飛出しなどに気付くことは容易に想像できる。その場合、運転者は比較的小さい操舵トルクで正着制御を解除しようとする可能性が高い。今後はそのような状況にも対応できるようなロジックの検討が必要である。

③その他

- ・実車評価では、システムの制御に使用する変数を算出する機能に問題がある時、正着制御維持判定を続けると誤判定してしまうことがあったので、状況に応じた機能の制限を検討する必要がある。
- ・本評価での正着軌道や車速が、通常のバス運転者が正着する軌道、車速と大きく異なることを指摘する意見があった。

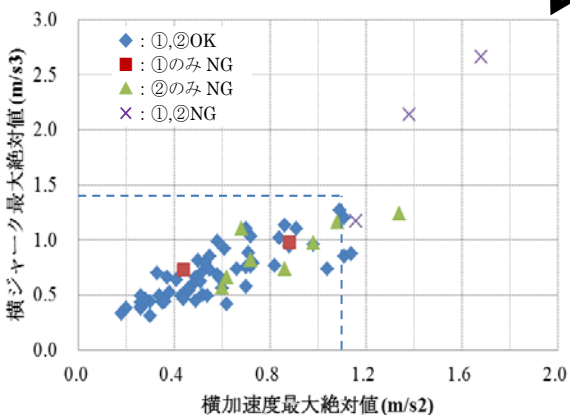
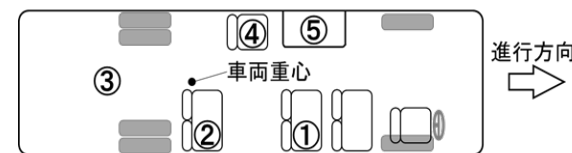
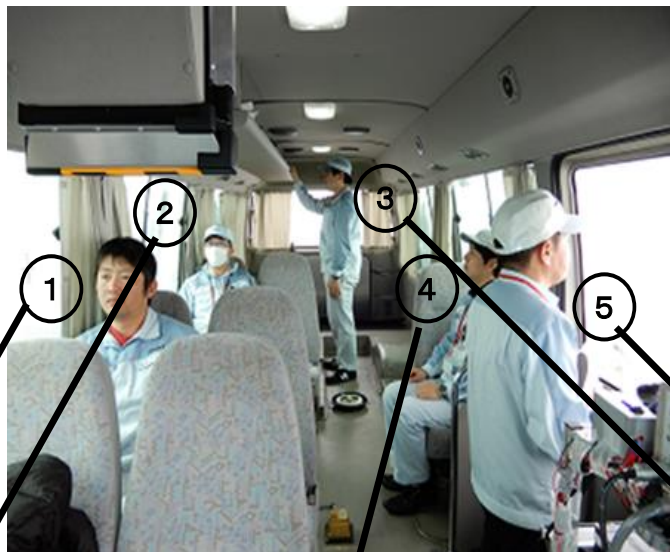
また、運転者からは、システムへの慣れに時間を要するというコメントもあった。今後は、運転者への親和性を考慮したシステム設計が必要である。

第3章 正着制御における快適な乗り心地の実現に向けた課題調査

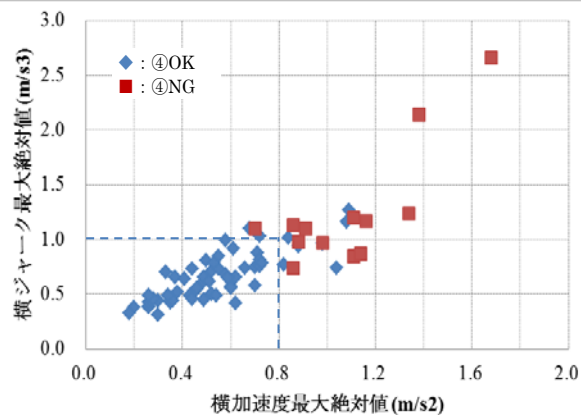
3.1 乗り心地、快適性の向上に関する調査（例）

文書管理No. 08J3-F-73-006-000

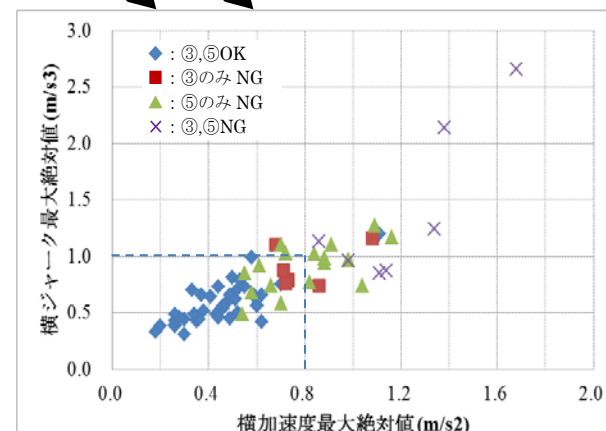
横方向の加速度・ジャークについての評価結果



着座・前向き



着座・横向き



立位

3.2 快適な乗り心地を実現させるための課題調査

文書管理No. 08J3-F-73-006-000

正着時の減速制御

快適な乗り心地を実現するためには、減速度を 1.0m/s^2 以下、ジャークを 1.0m/s^3 以下に抑制するのが望ましく、少なくとも 0.05m/puls 以下の車輪速の分解能が必要となる。より綿密な制御を実現するためには、特に低速域での車輪速分解能が必要であり、これまでの乗用車などにおける車両運動制御とは異なる視点で検討しなければならない。車輪速においては、メータパルスを利用する場合、駆動軸1回転当りの発生パルス数が、20もしくは25パルスは必要であり、ABSセンサにおいても、ホイールハブ1回転当り48パルス以上の分解能は必要となる。

より綿密な制動制御を行うには、ディーゼル・バスの制動制御よりも、ハイブリッド・バスの駆動モータとの制動協調制御が望ましい。

正着時の操舵制御

快適な乗り心地を実現するための横加速度やジャーク抑制については経路生成や、操舵制御を滑らかに行うことで実現可能である。横加速度の変化率であるジャークを抑制するためには操舵角の変化率、すなわち操舵角速度にも留意し、滑らかに操舵角速度が変化するような経路を生成することが必要となる。

また、制動時と同様に、定常状態から横変位を発生させる操舵開始時の変化率や左から右への切返時の変化率を抑制することが必要となる。

一方で横変位の正着制御については、既存の横変位に対する位置情報検出では、カントなどの道路形状や車体揺れによる影響など、外乱要因を補償してバス停への正着精度 $4\text{cm} \pm 2\text{cm}$ を実現することは非常に困難であると言える。

課題克服のためには、複数センサの情報を加味した高度な位置推定技術が必要となる。

3.3 正着制御中における外乱要因と対処方法の調査検討(周辺監視)

文書管理No. 08J3-F-73-006-000

快適な乗り心地を確保するために認識すべき距離、時間の領域は、バスの速度に応じて変化する。

(i) 障害物検知について

バスに搭載するセンサのみでは駐車車両や物陰など、死角内にある障害物の認識が不可能となるので、バス停周辺にセンサを設置するなどにより死角を減らすとともに、死角の障害物を検知する必要がある。クラウドから配信されるダイナミックマップ情報を利用してバス停周辺の道路状況や気象状況を認識し、バス停周辺に設置されたセンサによる障害物検知の結果を反映し、さらにバスに搭載するセンサによって障害物を検知し、正着制御を実行する。

(ii) 障害物の動体予測について

死角からの飛び出しなど、それ以外の領域で歩行者を検知することも考えられる。このような場合でも、できるだけ「快適な乗り心地」を確保するためには、障害物を認識するだけでなく、以後の障害物の位置(範囲)を予測できることが望ましい。予測する位置(範囲)は認識した障害物の種別により変動させる必要がある。

(iii) 最適な走行経路の生成について

バスの走行経路は、障害物検知、動体予測の結果を用いて、安全かつ快適な乗り心地を確保するために、進路と速度(減速)を統合して最適化し、通過地点と地点ごとの速度から生成する必要がある。このとき乗客に作用する力(加速度)をできるだけ一定方向にすべきであり、減速して障害物を回避することを最優先して経路を生成することが望まれる。

3.4 制動制御に関する調査

文書管理No. 08J3-F-73-006-000

・ディスクブレーキ化検討

本事業で対象とした車両(大型HVバス)はドラムブレーキを採用している。ドラムブレーキは低速域において自己サーボ効果によりブレーキが効き過ぎる場合がある。この現象は停止位置精度および停止時の減速度変動に大きな影響を与えることとなり、停止位置精度の低下および減速度変動の増加という悪影響を発生させる可能性がある。これに対し、ディスクブレーキは自己サーボ効果がないためブレーキ圧力に応じた減速度が得られる。さらに放熱性、速乾性に優れておりブレーキ頻度の影響を受けにくいいため、安定した減速度を実現することが可能である。よってディスクブレーキの採用は停止位置精度向上および停止時の減速度変動低減に対し大きな効果が得られると考える。

・EBS制御による停止位置精度向上、減速度変動の低減効果検討

停止位置精度向上に関しては、EBS側では停止位置に対する情報がわからないため、統合制御ECU側からEBS側に対し、停止位置までの距離(位置)を正確に把握しながら、残存距離に合わせて最適な減速度要求をEBS側に送信し、EBS側はその要求減速度に合わせて最適なブレーキ圧力を計算しブレーキチャンバ圧力を制御する。その際、車両重量などによって減速度や制動距離が変動するので、エアサスペンションシステムから車両軸重情報を受信し、ブレーキ圧力を補正する機能を織り込むことで停止位置精度向上を実現する。停止時の減速度変動の低減においては、停止寸前のブレーキ挙動データを収集し、滑らかな制動制御プロファイルを検討することで停止寸前の減速度変動の低減は可能であると考えられる。

ART正着制御に係るアクチュエータおよび制御技術について、
制御対象である車両挙動に対する操舵系の応答遅れの影響を明らかにすることができた。

また、操舵系におけるシェアードコントロール実現に向け、
常に運転者が操舵に関与するプロトタイプシステムを提案し、有効性を確認することができた。

また、快適な乗り心地を実現するための前後方向、横方向の加速度
およびその変化率(ジャーク)の目標指標を明らかにすることができた。

一方、乗客が快適と感じる乗り心地は、現状運営されている路線バスよりも厳しい値となっているが、
これを実現するための操舵・制動統合制御に必要な要件も明らかにすることができた。
ただし、車両位置情報の検出分解能や絶対精度に課題が残り、
さらには、バス停近傍の歩行者の飛び出しなどの外乱への対応についても
課題が残されていることが明らかになった。

今後これらの課題解決に向けた調査検討が引き続き必要と考えられる。