

「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

平成 29 年 3 月 10 日

株式会社ジェイテクト

まえがき

「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」に関する受託業務を完了したので報告する。

本報告書は、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム委託費による委託業務として、株式会社ジェイテクトが実施した平成28年度「『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』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」の成果を取りまとめたものです。

従って、本報告書の著作権は、内閣府に帰属しており、本報告書の全部又は一部の無断複製等の行為は、法律で認められたときを除き、著作権の侵害にあたるので、これらの利用行為を行うときは、内閣府の承認手続きが必要です。

目次

はじめに	1
第 1 章 操舵進み制御に関する調査検討	2
1.1 目的	2
1.2 操舵系の応答遅れ実測結果	2
1.2.1 操舵系の構成と計測機器	2
1.2.2 タイヤ角の代用特性としての転舵角計測	9
1.2.3 操舵系基礎特性	12
1.2.4 正着時の操舵系・車両挙動	17
1.3 実測結果を踏まえた正着精度向上に向けた検討	28
1.3.1 操舵進み制御	28
1.3.2 白線認識カメラの姿勢補償	28
1.3.3 目標軌跡（正着経路）の適正化	28
1.3.4 車両傾き角偏差 e_3 の検出精度向上	29
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	30
2.1 調査の目的	30
2.2 シェアードコントロール評価	31
2.2.1 シェアードコントロール実現に向けた検討	31
2.2.2 評価手法	35
2.3 評価環境	35
2.3.1 ドライビングシミュレータ	35
2.3.2 システム構成	38
2.3.3 HMI（Human Machine Interface）	41
2.3.4 評価条件	44
2.4 評価結果	50
2.4.1 評価条件ごとの結果	50
2.4.2 主観評価結果	68
2.5 評価の考察	75
2.6 実車環境（大型 HV バス）での試行評価	76
2.6.1 実車環境（大型 HV バス）におけるシェアードコントロール評価内容	76
2.6.2 実車環境（大型 HV バス）における正着制御維持の検証	76
2.6.3 実車環境（大型 HV バス）におけるオーバーライド判定の検証	81
2.6.4 実車環境（大型 HV バス）におけるシェアードコントロール評価まとめ	83
2.7 シェアードコントロールまとめ	84

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	86
3.1 乗り心地、快適性の向上に関する調査	86
3.1.1 鉄道車両における乗り心地基準	86
3.1.2 試験車両（マイクロバス）での乗り心地評価方法	87
3.1.3 試験車両（マイクロバス）での乗り心地評価結果	91
3.1.4 試験車両（マイクロバス）での乗り心地評価（横方向）考察	94
3.1.5 試験車両（マイクロバス）での乗り心地評価（前後方向）考察	98
3.1.6 試験車両（マイクロバス）での乗り心地評価 まとめ	102
3.2 快適な乗り心地を実現させるための課題調査	105
3.2.1 正着時の減速制御	105
3.2.2 正着時の操舵制御	106
3.2.3 快適な乗り心地と安全性を両立する正着経路	107
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）	108
3.3.1 外乱要因検討の前提条件	108
3.3.2 快適な乗り心地の実現に必要な要件	109
3.3.3 動体予測技術例	112
3.3.4 性能要件の検討	115
3.3.5 外乱（走行経路への歩行者などの進入）への対応方法考察	116
3.4 制動制御に関する調査	117
3.4.1 ディスクブレーキ化検討	117
3.4.2 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	120
第4章 まとめ	121

はじめに

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（S I P）・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する。

第 1 章では、大型バスの操舵進み制御に関する調査について報告する。バス停に対し数センチオーダーの隙間で正着を行うためには、操舵系の応答遅れや左右転舵差、精度などを補償して操舵制御入力を与える必要がある。バスなどの大型車の操舵系における機械的リンクの長さなどに起因する影響の調査結果について報告する。

第 2 章では、操舵系におけるシェアードコントロール実現に向けた調査について報告する。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、常に運転者が操舵に関与することが望ましいと考える。その実現を目指し検討したシステムの調査結果について報告する。

第 3 章では、高品質な乗り心地を実現し、車室内転倒事故を削減できる高度な操舵・制動統合制御を実現するための調査について報告する。従来の路線バスや ART は鉄道とは異なり、バスの発進停止時や旋回時の前後方向、横方向の加速度およびその変化率（ジャーク）によって、乗客の姿勢維持への負担もしくは転倒の危険性が大きい。そこで、特に制動時や旋回時に着目した調査結果について報告する。

第1章 操舵進み制御に関する調査検討

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

1.2.1 操舵系の構成と計測機器

(i) 試験車両（大型 HV バス）概要

試験車両は、平成 27 年度「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の制御性に関する調査検討」の第 4 章にて使用した単車バス(日野自動車株式会社保有、以下大型 HV バス)を用いた。図 1.2.1-1 に車両外観、図 1.2.1-2 に車両寸法、表 1.2.1-1 に主要諸元を示す。



図 1.2.1-1 試験車両（大型 HV バス）外観

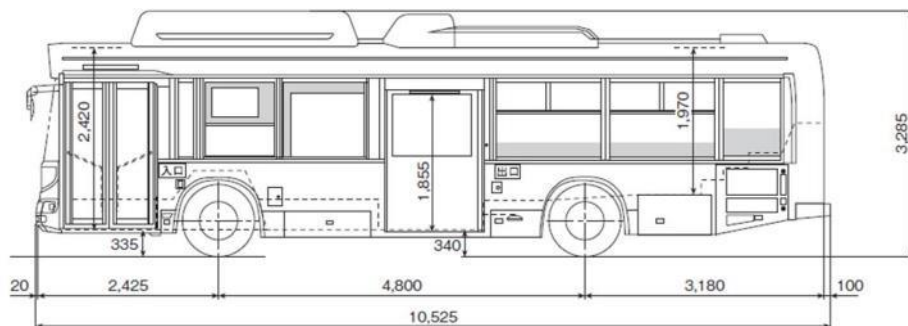


図 1.2.1-2 試験車両（大型 HV バス）寸法

表 1.2.1-1 試験車両（大型 HV バス）主要諸元

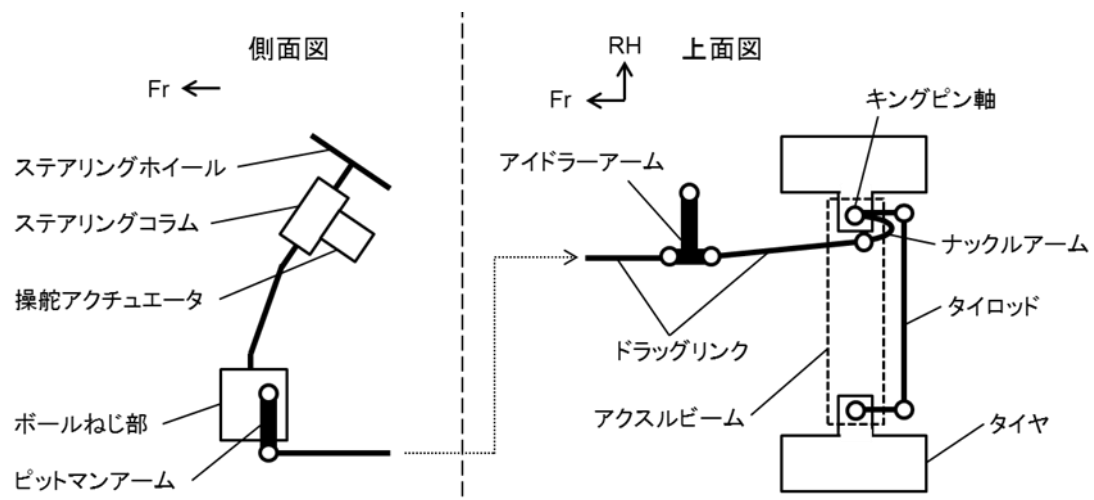
車両型式	HU8JLGP
トランスミッション	5AT
車体寸法 (mm)	全長：10,525、全幅：2,490、全高：3,285
ホイールベース (mm)	4,800
トレッド (mm)	フロント：2,035、リヤ：1,820
タイヤサイズ	275/70R22.5

(出典：日野自動車 HP

https://www.hino.co.jp/etc/designs/hino/images/pdf/service/revolve/hnrevolve_75hu.pdf)

(ii) 操舵系の構成

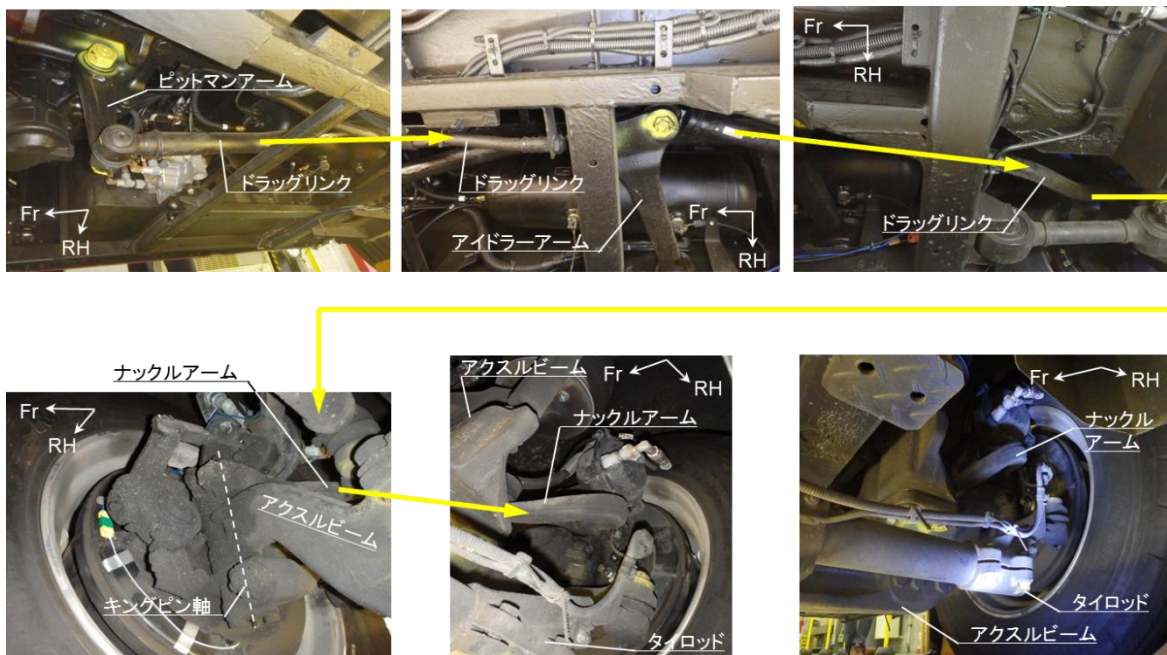
図 1.2.1-3 に操舵系の構成を示す。ステアリングコラムには操舵アクチュエータが取り付けられており、舵角指令値に応じた角度制御を行う。ステアリング機構はボールねじ式油圧パワーステアリングであり、ステアリングコラムからの入力が入力ピットマンアームの揺動運動となる。ピットマンアームは、ドラッグリンク（2本）を介し右輪ナックルアームに接続され、右輪がキングピン周りに転舵される。右輪はタイロッドを介して左輪と接続され、左輪が転舵される。



(a) 操舵系概念図



(b) 操舵アクチュエータ



(c) 操舵系車両下側

図 1.2.1-3 操舵系の構成

(iii) 正着用操舵制御システム

正着用操舵制御は、平成 27 年度「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の制御性に関する調査検討」にて実施した正着制御を用いた。本制御では、仮想的に設けられた参照軌道上を走行する参照車両の軌跡（目標軌跡）を追従させる Path Following 制御^[1]を用いている。図 1.2.1-4 に制御ブロック図を示す。目標軌跡は、走行距離に対する白線と車体（カメラ搭載位置）の横変位としてルックアップテーブルにて持たせている。前方の白線認識カメラ画像より検出した白線と車体の距離を実車両横変位とし、目標軌跡と実車両横変位の差を横偏差 e_2 として算出する。実車両傾き角は、ジャイロセンサより検出されるヨー角を用い、参照車両の目標傾き角（今回の試験ではゼロ一定値）と実車両傾き角の差を傾き角偏差 e_3 として算出する。

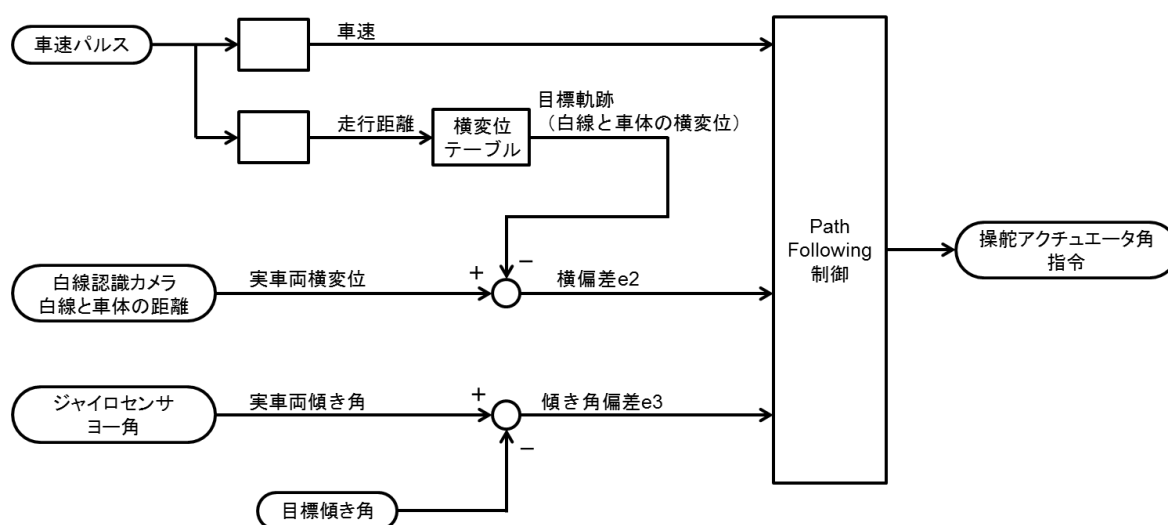


図 1.2.1-4 制御ブロック図

図 1.2.1-5 に、制御システム構成を示す。正着制御の演算は dSPACE 社製の AutoBox^(※1)を用い、制御周期は 10ms である。画像処理装置は前方カメラ画像から白線を検知し、車体との横方向距離の算出を行う。ジャイロセンサは車室内床面の車両重心位置に設置している。AutoBox から操舵アクチュエータ ECU に CAN 通信を介して操舵角指令を行う。

(※1) dSPACE GmbH の商標

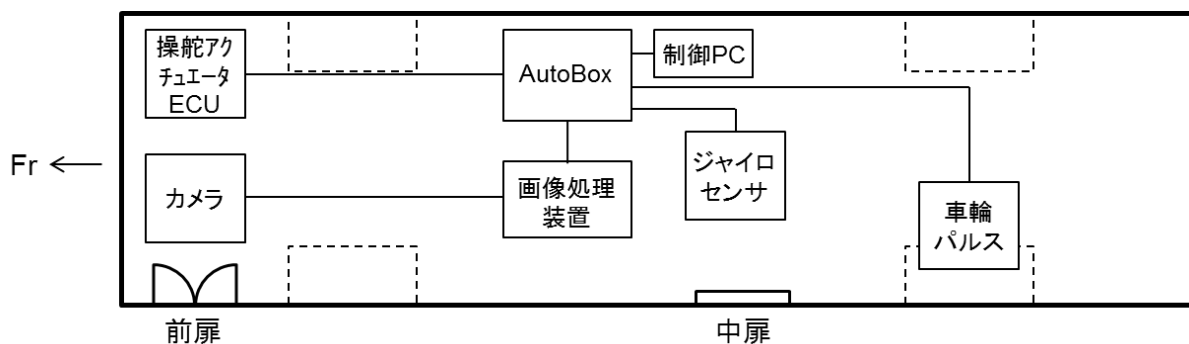


図 1.2.1-5 制御システム構成

(iv) 白線認識カメラ

白線認識カメラは、平成 27 年度「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の制御性に関する調査検討」にて使用した NTSC カメラを用いた。図 1.2.1-6 にカメラ取付位置を、図 1.2.1-7 にカメラ画像の一例と、画像処理にて算出している横変位を示す。白線左端とカメラの前方延長線との距離を横変位として算出する。今回の試験では、バス車体前端より 4300mm の位置の横変位を用いた。

なお、試験前には画像処理より出力される横変位値と実測値の差分を補正值とし、横変位値の補正処理を施している。



図 1.2.1-6 カメラ取付位置

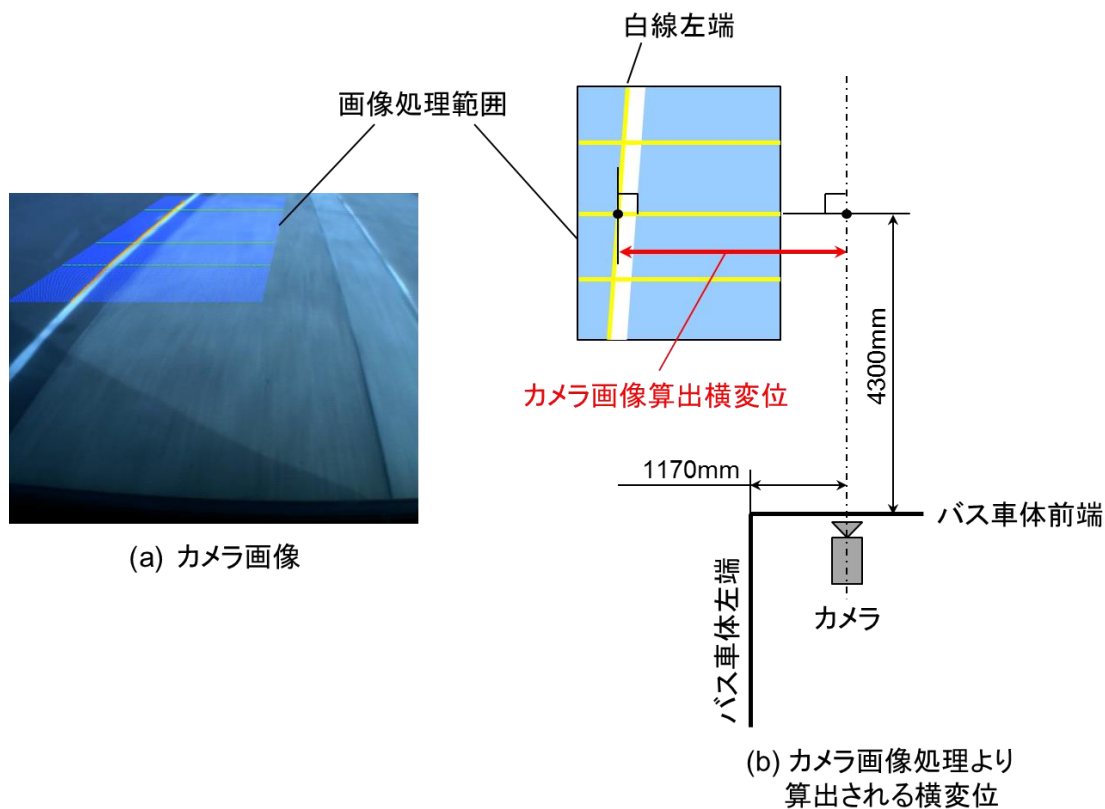


図 1.2.1-7 白線認識カメラにおける横変位算出

(v) 計測機器仕様

表 1.2.1-2、図 1.2.1-8 に計測機器の構成を示す。前述の通り、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。そこで、操舵系の特性を把握するため、ステアリングホイール角とタイヤ角の計測を実施した。走行中のタイヤ角を直接計測するのは困難であるため、タイヤ近傍の操舵系リンク（タイロッド）の挙動をタイヤ角の代用特性とした。詳細については 1.2.2 項にて示す。

なお以降は、下記のように表記するものとする。

操舵角	:	ステアリングホイール角
操舵アクチュエータ角	:	実アクチュエータ角
転舵角	:	タイロッド変位からの換算値 (1.2.2 参照)
タイヤ角	:	ターニングラジアスゲージ計測値 (1.2.2 参照)

車両挙動計測のため、既設のジャイロセンサ（車両重心位置）に加え、前軸と後軸上にジャイロセンサを取り付けた。

各機器の出力値をデータロガー（Keyence NR-600）にアナログ入力し記録した。また、操舵制御に用いる値（車速、操舵アクチュエータ角、車両横変位など）は AutoBox 内で記録し、サンプリング周期は 10ms とした。

なお、計測データについては、車両座標系としてz軸の正方向を鉛直上方とした直交右手系(x, y, z)と定義し、操舵角や転舵角、ヨー角などは左旋回方向を正とした。

表 1.2.1-2 計測機器一覧表

計測項目	計測方法	計測機器
操舵角 (ステアリングホイール角)	操舵角力計	総合計装/TR-60
転舵角 (タイロッド変位)	ワイヤ式変位センサ	マイクロプシロン/ WDS-500-P60-SR-U
タイヤ角	ターニングラジアスゲージ	バンザイ/MB-41DK
車両挙動	ジャイロセンサ	MEMSIC/NAV440 (前軸上) MEMSIC/VG440 (後軸上) 多摩川精機/TAG250 (車両重心、既設)

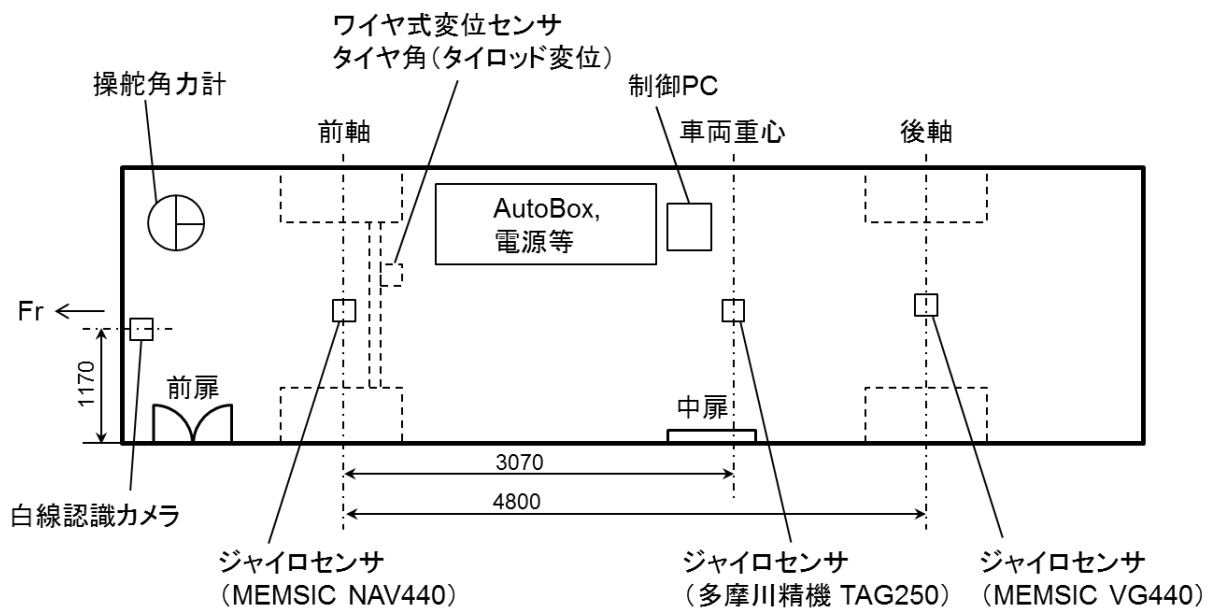


図 1.2.1-8 車両への計測機器搭載図

(vi) 試験環境

試験実施には、国立研究開発法人 産業技術総合研究所、先進モビリティ株式会社にご協力頂き、産業技術総合研究所つくば北サイト内の衝突試験場にて走行試験を実施した。



図 1.2.1-9 車両評価走行環境

1.2.2 タイヤ角の代用特性としての転舵角計測

(i) 試験目的

操舵系は様々な要素で構成される。タイヤ角の代用特性を求める場合、タイヤ近傍の挙動を計測することが望ましい。今回の計測では操舵系の中では比較的タイヤに近いこと、挙動を並進運動とみなすことができ、計測が容易であることから、タイヤ角相当値としてタイロッドの左右変位を選択した。転舵角（タイロッド変位）の計測を実施し、この値とタイヤ角の関係を求め、タイヤ角の代用特性とした。

(ii) 計測機器取付方法

計測はワイヤ式変位センサを用い、センサ本体をアクスルビームに取り付け、タイロッドの変位を計測した。図 1.2.2-1 に取付状態を示す。

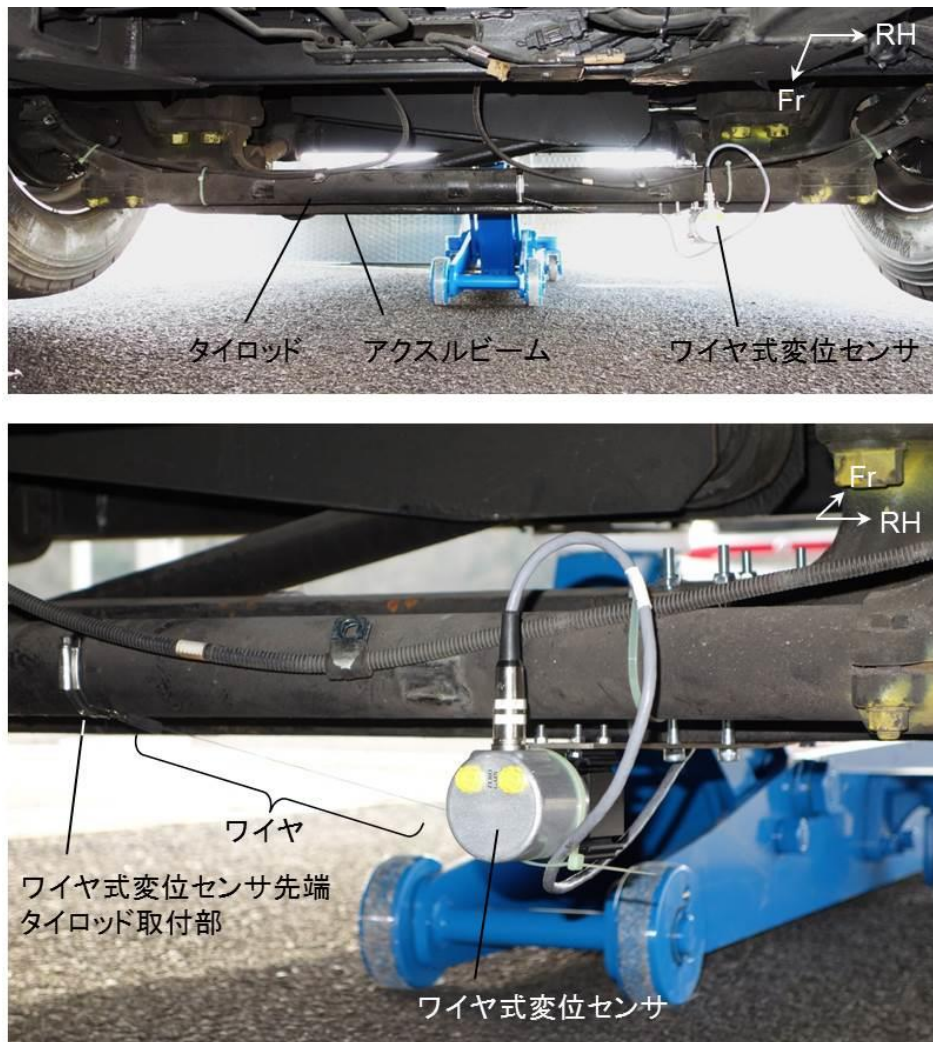


図 1.2.2-1 ワイヤ式変位センサ取付状態

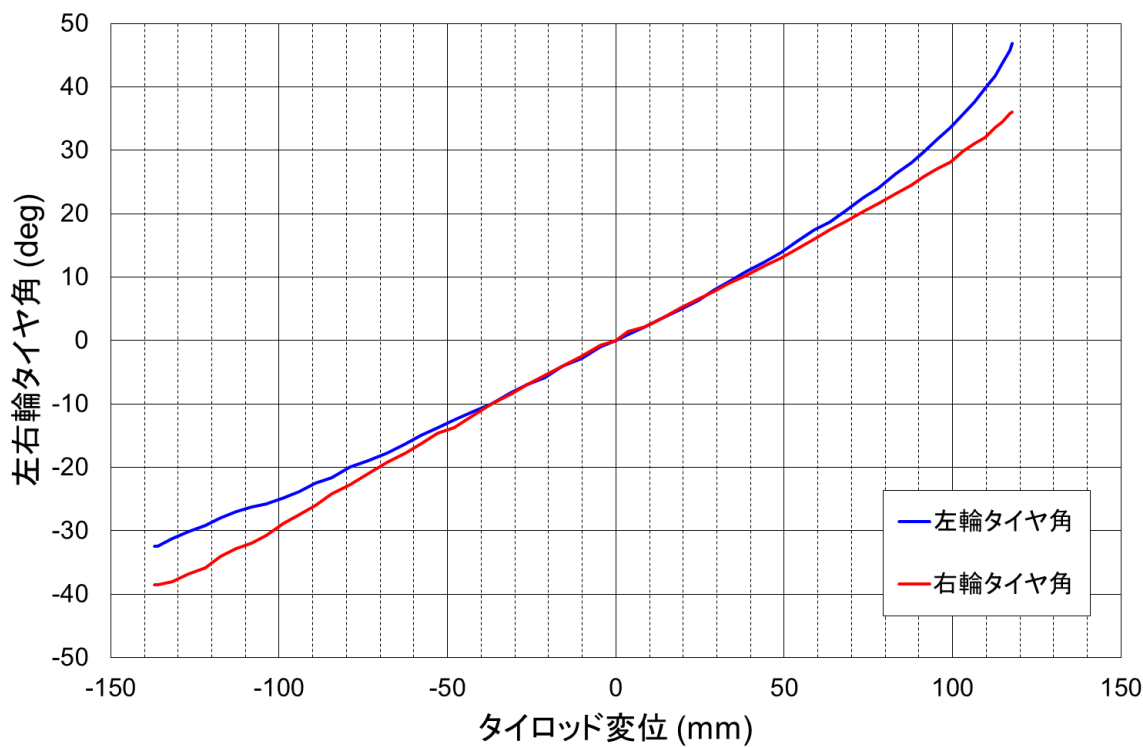
(iii) 試験方法

タイロッド変位とタイヤ角の関係を求めるため、車両静止状態で、前輪をターニングラジアスゲージに乗せ、ステアリングホイールを中立位置から 30deg ずつ端当てまで操舵し、その時の左右輪タイヤ角、ワイヤ式変位センサの値を計測した。なお、操舵系のあそびの影響を排除するため、操舵は切込側のみで行った。

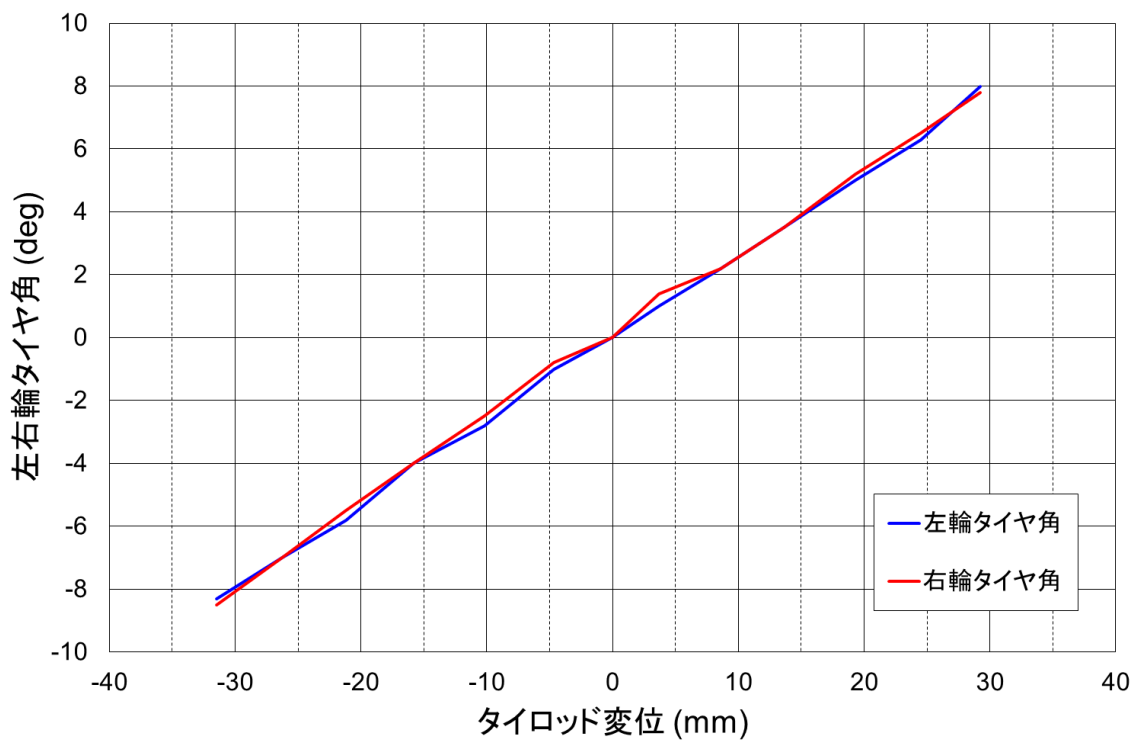
(iv) 計測結果 (タイヤ角と転舵角の関係)

図 1.2.2-2 (a) に、ワイヤ式変位センサ計測値 (タイロッド変位) と左右輪タイヤ角の関係を示す。今回の試験条件で、正着を行う際の操舵角は $\pm 180\text{deg}$ を超えることはなかった。そのため操舵角 $\pm 180\text{deg}$ (タイロッド変位でおおよそ $\pm 30\text{mm}$) において、タイロッド変位とタイヤ角の関係を求めた (図 1.2.2-2 (b))。左右輪ともほぼ線形であり、かつ同様の値を示している。線形近似 (左右輪ともに $R^2 = 0.999$) を行い、タイロッド変位とタイ

ヤ角の関係は、 0.265deg/mm と求められた（左右輪とも同値）。以後、この係数を用いて算出した転舵角をタイヤ角代用特性とする。



(a) 中立から端当てまで全域



(b) 操舵角 $\pm 180\text{deg}$ の範囲拡大

図 1.2.2-2 ワイヤ式変位センサ計測値（タイロッド変位）に対する左右輪タイヤ角

1.2.3 操舵系基礎特性

(i) 試験目的

正着制御の精度向上に向けた操舵進み制御導入のためには、操舵系、車両挙動の各特性把握が必須となる。そこで、正着精度向上における操舵系の課題に関する基礎特性として、操舵系のあそび、周波数応答、ステップ応答について特性を取得した。

(ii) 試験方法

a) 操舵系のあそび（操舵角と転舵角の関係）

極低速（3km/h 程度）にて走行中に、運転者がステアリングホイールをロックトゥロックの位置まで操舵し、その時の操舵角と転舵角の関係を計測した。

b) 周波数応答

走行中に操舵アクチュエータへ正弦波掃引指令（ $\pm 90\text{deg}$ 、 $0.1\sim 1\text{Hz}$ ）を与え、その時の転舵角挙動、車両挙動を計測した。車速は極低速（3km/h 程度）、10km/h、20km/h、25km/h とした。

c) ステップ応答

走行中に操舵アクチュエータへステップ指令（ $\pm 90\text{deg}$ ）を与え、その時の転舵角挙動、車両挙動を計測した。車速は 10km/h、20km/h、30km/h とした。

(iii) 計測結果

a) 操舵系のあそび

図 1.2.3-1 に操舵角と転舵角の関係を示す。ヒステリシスがあり、その大きさは 3.0deg 程度であることが分かった。また、 $\pm 360\text{deg}$ におけるグラフの傾きよりオーバーオールギヤレシオ（操舵角／転舵角比）を求めると、約 21.2 となった。

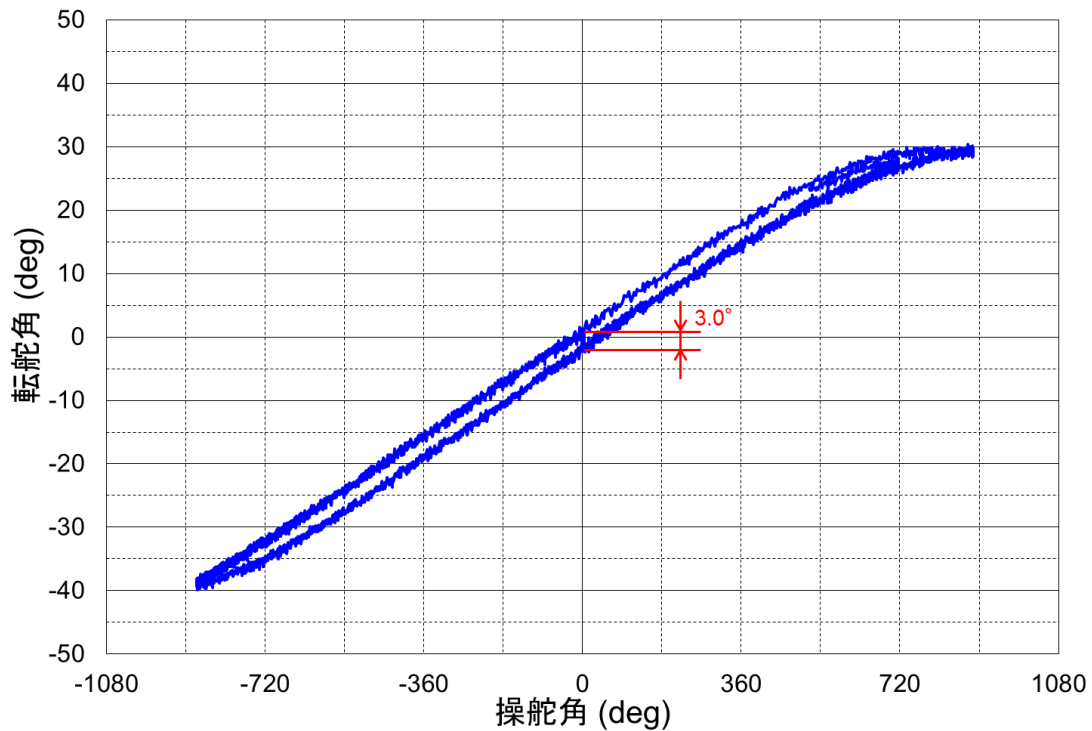


図 1.2.3-1 操舵角－転舵角の関係

b) 周波数応答

操舵アクチュエータ角振幅 90deg、車速 10km/h の周波数特性を図 1.2.3-2 に示す。今回は、車両挙動としてヨーレートを示す。操舵系、車両挙動の応答遅れを確認するため、以下の 3 点について示した。

- ・ 操舵アクチュエータ角に対する転舵角（操舵系挙動）
- ・ 転舵角に対するヨーレート
- ・ 操舵アクチュエータ角に対するヨーレート

今回の試験条件である 0.1～1Hz の位相特性に着目し、各特性を重ねあわせると図 1.2.3-2 の下図となる。ヨーレートに関する位相遅れは、0.3～0.4Hz 付近（図中の△印）から大きく低下し、周波数依存性を確認できた。1Hz 付近での位相遅れは、それぞれ約 10deg、約 55deg、約 65deg となり、操舵系の応答遅れに比べ、タイヤから車両挙動までの応答遅れが大きいことが分かった。

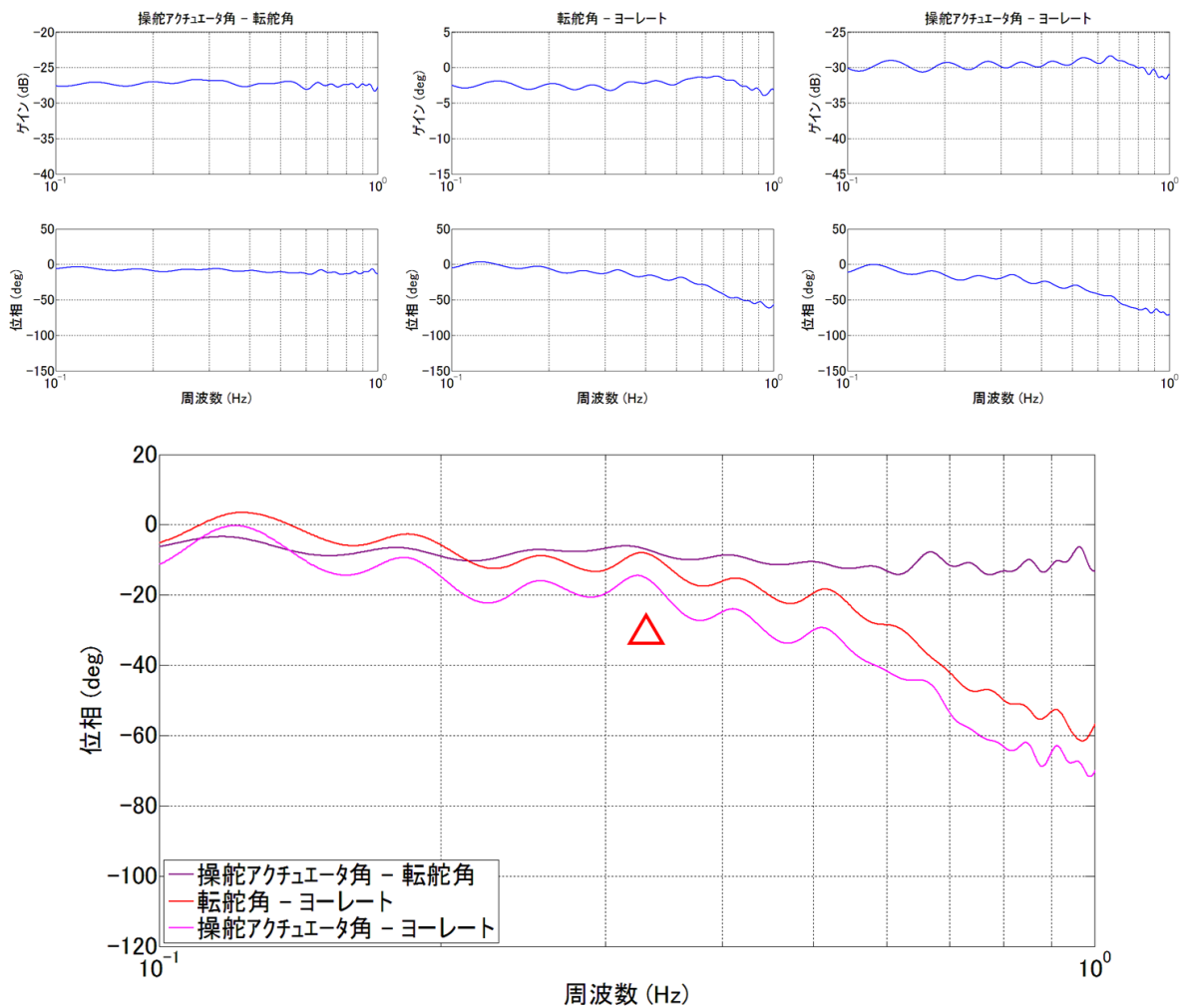


図 1.2.3-2 周波数特性

次に、車速による応答遅れへの影響について確認する。各車速における位相遅れ特性は、おおむね 10km/h の場合と同様で、ヨーレートに関する位相遅れが 0.3~0.4Hz 付近から大きく低下しており、操舵系の応答遅れに比べてタイヤから車両挙動までの応答遅れが大きかった。そこで、1Hz 付近での位相遅れを各条件の代表値として抽出し、図 1.2.3-3 に示す。操舵系の位相遅れは、車速によらずほぼ一定となっている。一方、転舵角からヨーレートまでの特性は車速依存性がみられ、車速の増加に伴い遅れが大きくなっていた。これは、車両の運動方程式より導かれるヨーレートゲインが車速に依存することと傾向が一致しており、本計測の妥当性を定性的に示すものである。

以上の周波数応答結果より、バスの操舵入力から車両挙動までの応答遅れ特性について、操舵系とタイヤから車両挙動までのそれぞれについての特性の切分け、および各特性の違い（周波数依存性、車速依存性）を明らかにすることができた。

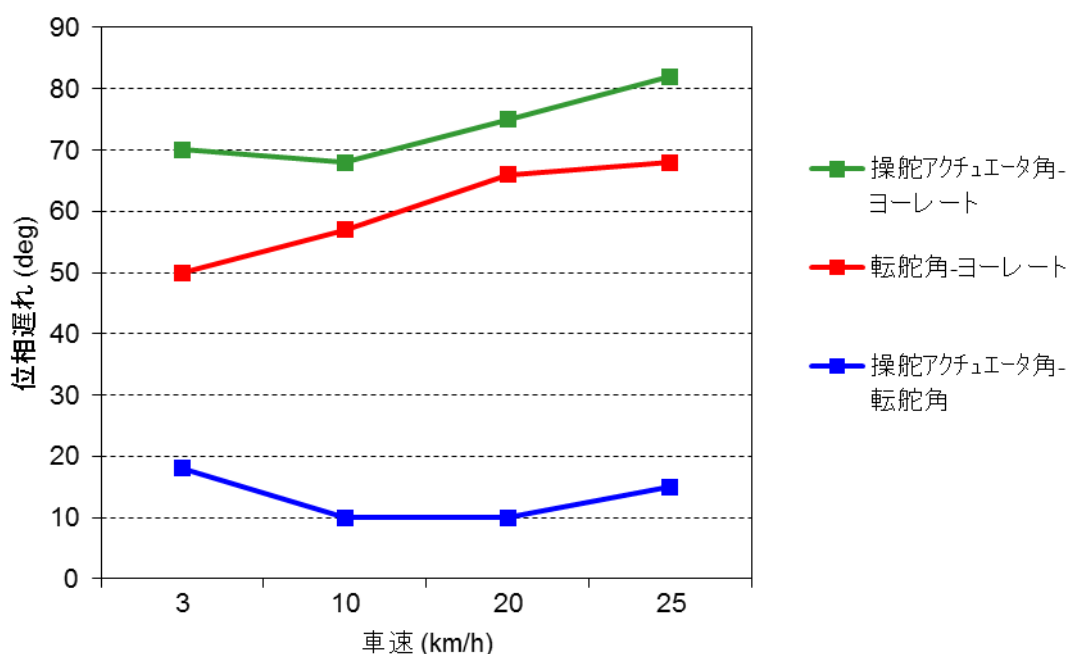


図 1.2.3-3 1Hz 付近の位相遅れ

c) ステップ応答

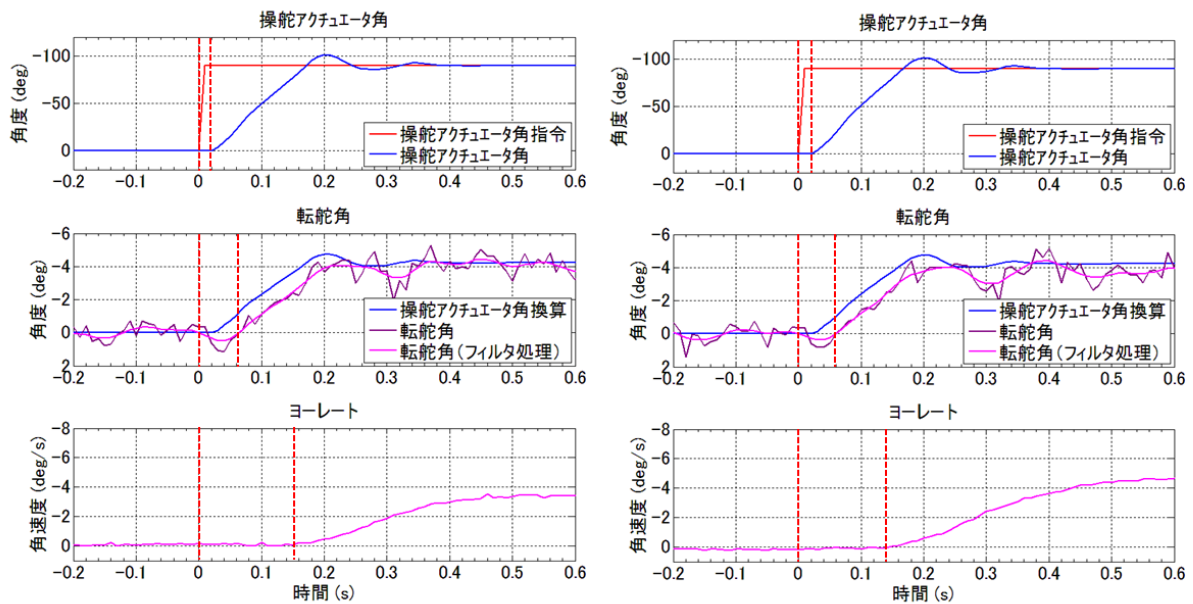
図 1.2.3-4 に、ステップ応答（右方向 90deg 指令）の結果を示す。上段には、操舵アクチュエータ角指令値と操舵アクチュエータ角を示し、中段には操舵アクチュエータ角にオーバーオールギヤレシオ（21.2）を用いて換算した転舵角相当値、タイロッド変位より算出した転舵角を示す。なお、タイロッド変位はノイズの影響が大きいため、フィルタ処理を行った。フィルタは、5 点移動平均処理をデータの順方向／逆方向の両方に施し、位相遅れが生じない方法を用いた。下段には、車両挙動の一例としてヨーレートを示す。

操舵アクチュエータ角では、指令に対する操舵アクチュエータ角応答におけるむだ時間はどの車速においても 0.02s 程度であった。

転舵角では、一旦逆方向に変化した後、立ち上がっている。これは、操舵角指令ゼロの時（-0.2~0s）にタイヤ角の変動があったと考えられる。変動の原因は路面反力などが考えられるが明らかではない。逆方向への変位を無視すると、操舵アクチュエータ角指令に対する転舵角応答のむだ時間はどの車速においても 0.06s 程度と判断できる。

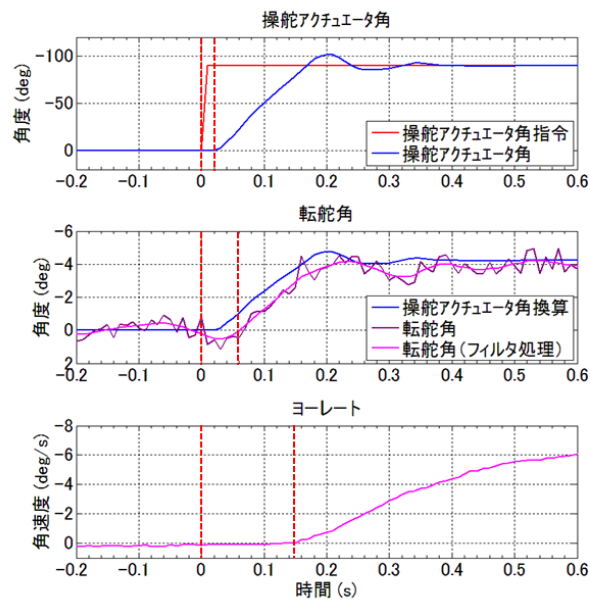
ヨーレートのむだ時間は、どの車速においても 0.15s 程度であり、定常到達値については車速に依存する傾向が確認できた。

以上のステップ応答結果より、操舵系・車両挙動の過渡応答特性の傾向について把握することができた。



(a) 10km/h

(b) 20km/h



(c) 30km/h

図 1.2.3-4 ステップ応答

1.2.4 正着時の操舵系・車両挙動

(i) 試験目的

正着制御の精度向上に向けた操舵進み制御導入のため、実際に正着を行った際の操舵系・車両挙動の各特性把握が必須となる。本項ではその結果より、正着結果に関連する要因について検証を行った。

(ii) 試験方法

a) 正着評価コース（バス停形状、走行経路）

バス停形状はストレート型とし、コースの白線左端を車線左端およびバス停縁石とみなして、試験を実施した。目標軌跡は、平成 27 年度「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の制御性に関する調査検討」の第 4 章にて用いた軌跡とし、図 1.2.4-1 に示す。スタートから 95m 地点までは白線との距離を一定（0.65m）に保ち、その後 25m（95m～120m）で横偏差を縮め、120m 地点以降では横偏差 40mm 一定、135m 地点で停止とした。なお、スタート時は車速 0km/h であり、95m 地点までの間で加速・一定速保持した。車速制御は運転者のアクセル／ブレーキペダル操作による。正着目標は $40\text{mm} \pm 20\text{mm}$ である。

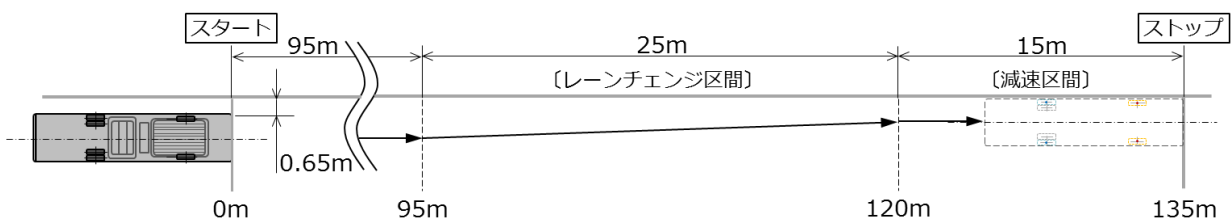


図 1.2.4-1 正着評価コース

b) 試験手順

スタート位置では、車体を白線にほぼ平行に、かつ白線と車体の距離を 0.65m 程度に保ち、操舵角をほぼゼロにして停車させる。停車後、車両重心位置のジャイロセンサ・操舵アクチュエータ角・走行距離の値をリセットした後、操舵制御を ON にする。

運転者はステアリングホイールから手を放した状態でアクセル／ブレーキペダル操作して走行させ、135m 地点で車両を停止させることとした。車両が停止した後、前扉および中扉との白線左端の距離を正着結果として計測した。

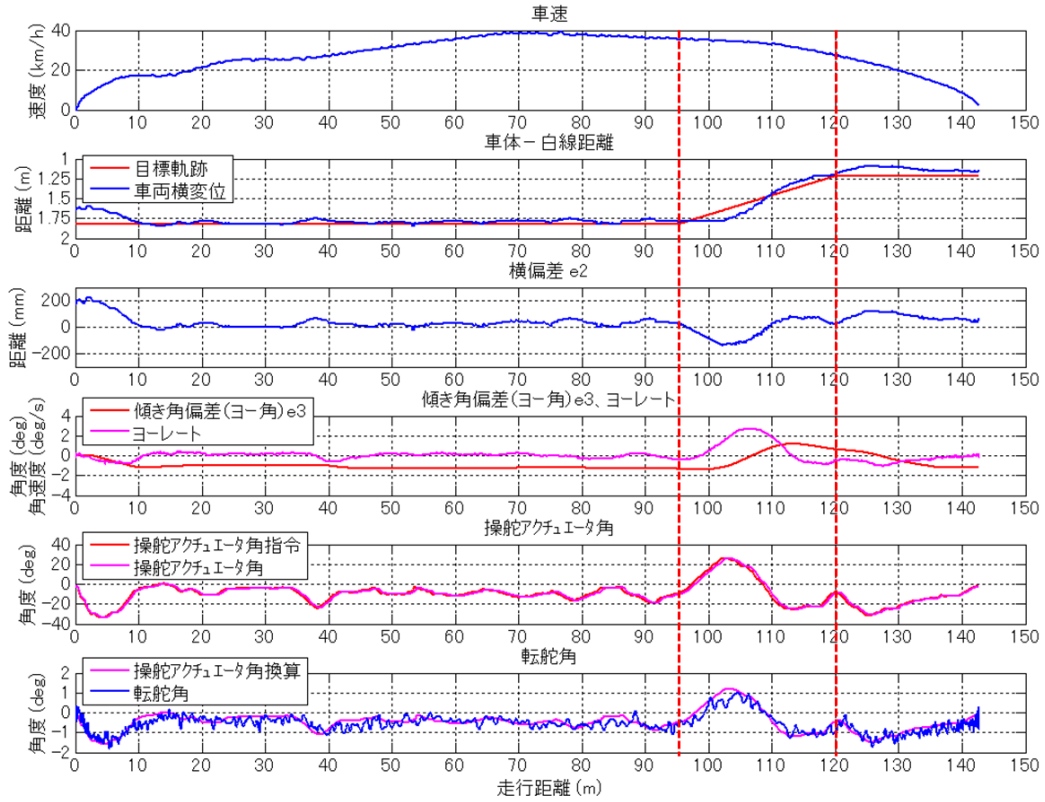
c) 試験条件

本試験では、車速 40km/h、30km/h、20km/h、10km/h にて走行を行った。

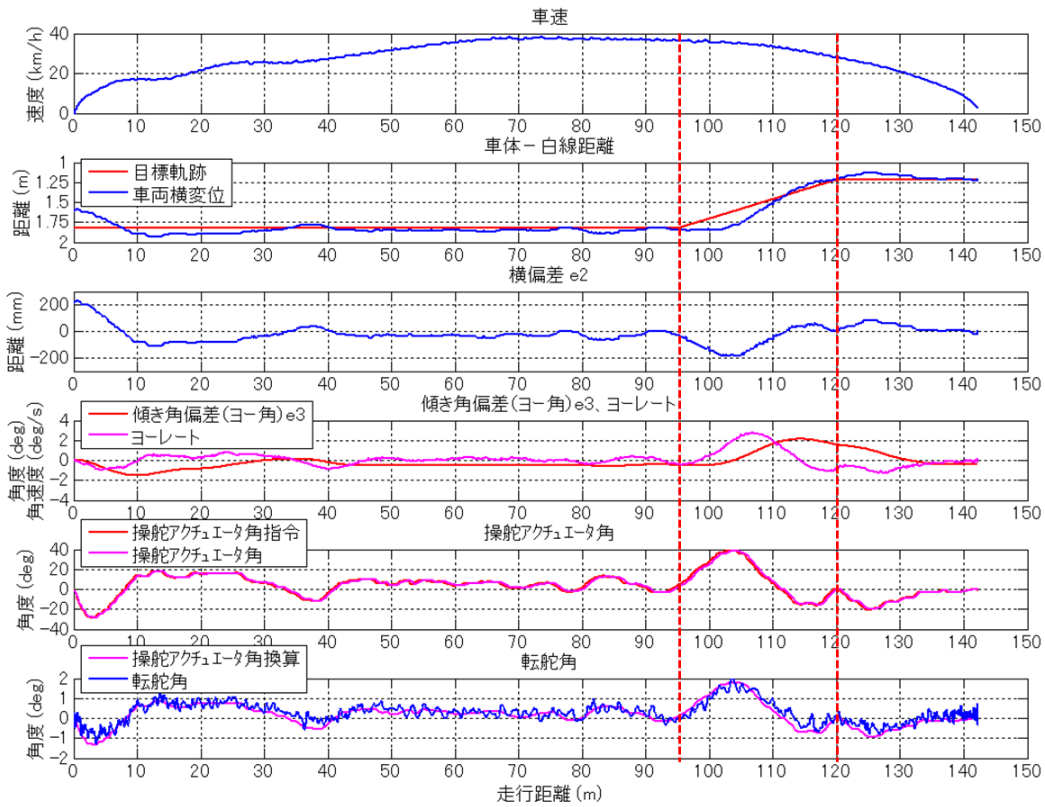
(iii) 計測結果

図 1.2.4-2 に、車速 40km/h の正着制御結果を示す。すべて横軸を距離として示す。目標軌跡と車両横変位の差が横偏差 e_2 であり、 e_2 が正の場合、目標軌跡より車両横変位が小さいことを示す。傾き角偏差 e_3 は車両重心位置のジャイロセンサより出力されるヨー角を表す。転舵角については、操舵アクチュエータ角にオーバーオールギヤレシオ (21.2) を用いて換算した転舵角相当値と、タイロッド変位より算出した転舵角を示す。なお、タイロッド変位は前節と同様のフィルタ処理を行っている。

直線走行部 (0~95m) においては横偏差 e_2 の変動がみられ、操舵アクチュエータ角にも変動が確認できる。正着開始 (95m) 以降では、目標軌跡と車両横変位に差が生まれ、操舵アクチュエータ角が変化している。その後、目標軌跡に追従するように操舵制御されている。また、横偏差、ヨー角、転舵角は各走行において類似した波形となっており、ある程度再現性があるといえる。正着結果については、ばらつきがあり、目標 ($40\text{mm} \pm 20\text{mm}$) 未達との結果となった。次項以降にて、詳細について考察する。



(a) 40km/h ① (正着結果：前 7mm、後 70mm)



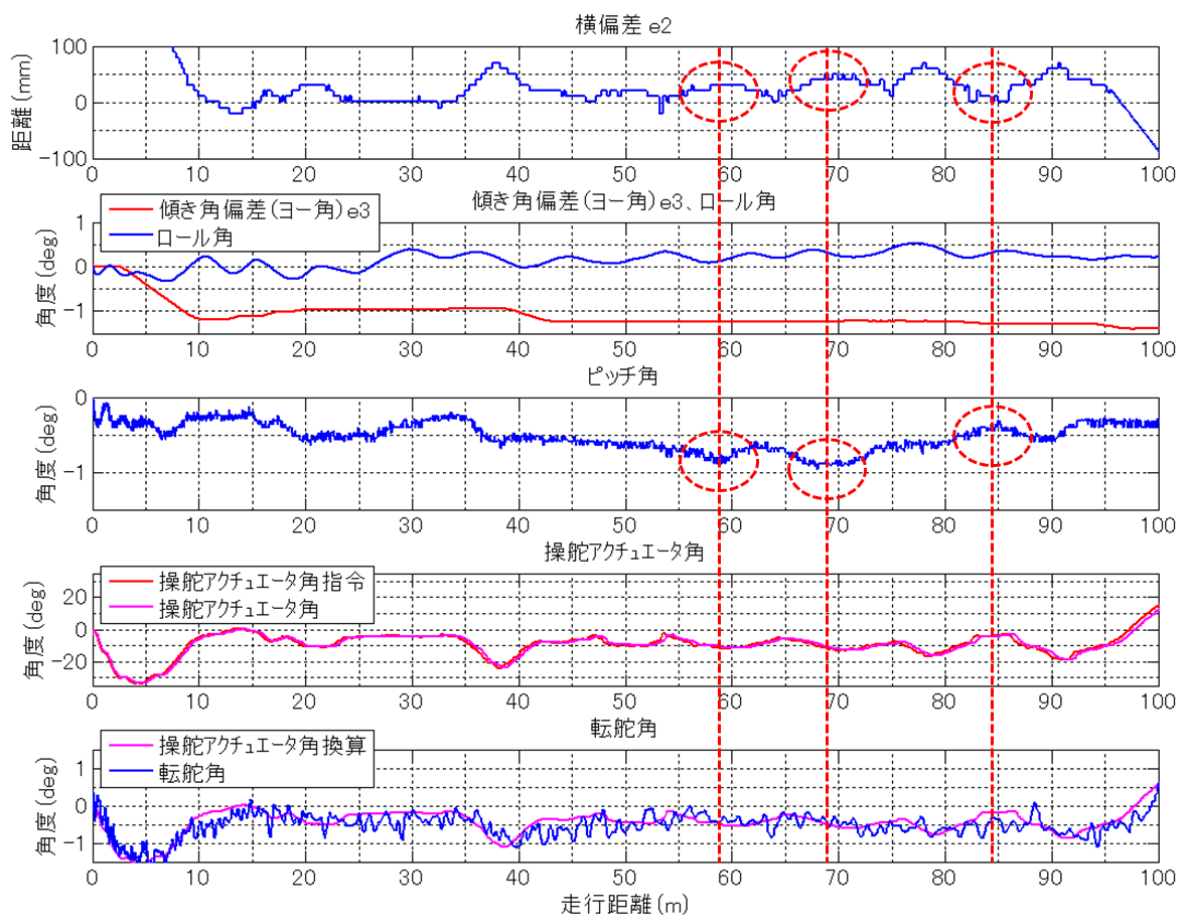
(b) 40km/h ② (正着結果：前 78mm、後 128mm)

図 1.2.4-2 正着制御結果

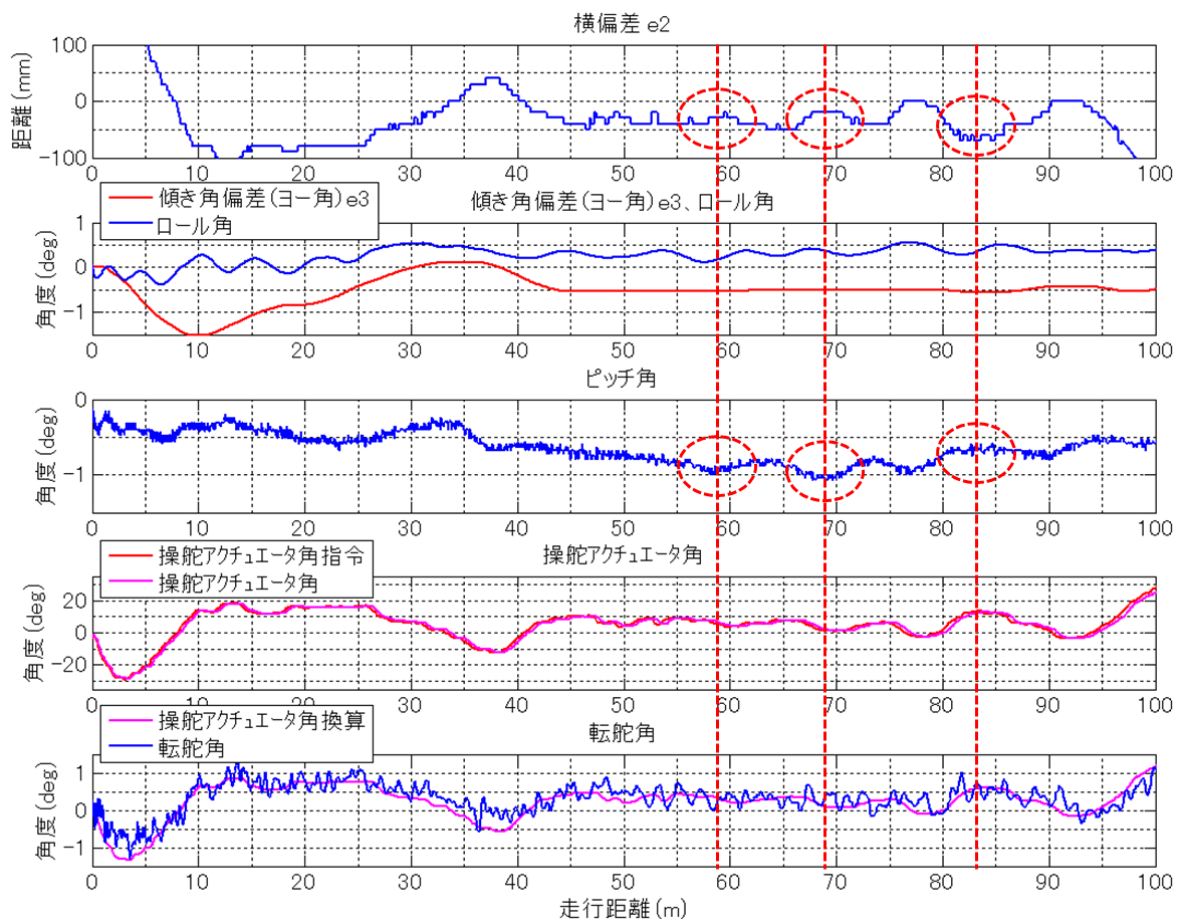
a) 白線認識に対する車両ピッチ角変動の影響について

図 1.2.4-2 に示す通り、横偏差 e_2 は正着開始前までの直線走行区間（0～95m）でやや変動していた。変動について詳しく確認するため、図 1.2.4-3 に正着開始前までの直線走行中の横偏差 e_2 に対する各データを、横軸を走行距離にして示す。

走行開始直後は横偏差 e_2 が大きく、操舵角は最大 25deg 程度変化している。これはスタート位置における横偏差 e_2 をゼロに近づけようとする働きによるものである。走行距離 50m 付近までは、傾き角偏差（ヨー角） e_3 の変化と横偏差 e_2 の変化が同期しており、横偏差 e_2 は傾き角偏差（ヨー角） e_3 に伴うものと考えられる。走行距離 50m 付近から正着開始地点 95m までの区間では、ピッチ角変化と横偏差 e_2 の変化が同様のタイミング（58m、68m、85m 付近）で発生しており、ピッチ角約 0.3deg の変化に対し、横偏差 e_2 は 30mm 程度の変化である。このことから、車両ピッチ角変動によるカメラ姿勢変化に伴い、カメラで認識する車両横変位に影響をおよぼしている可能性が考えられる。



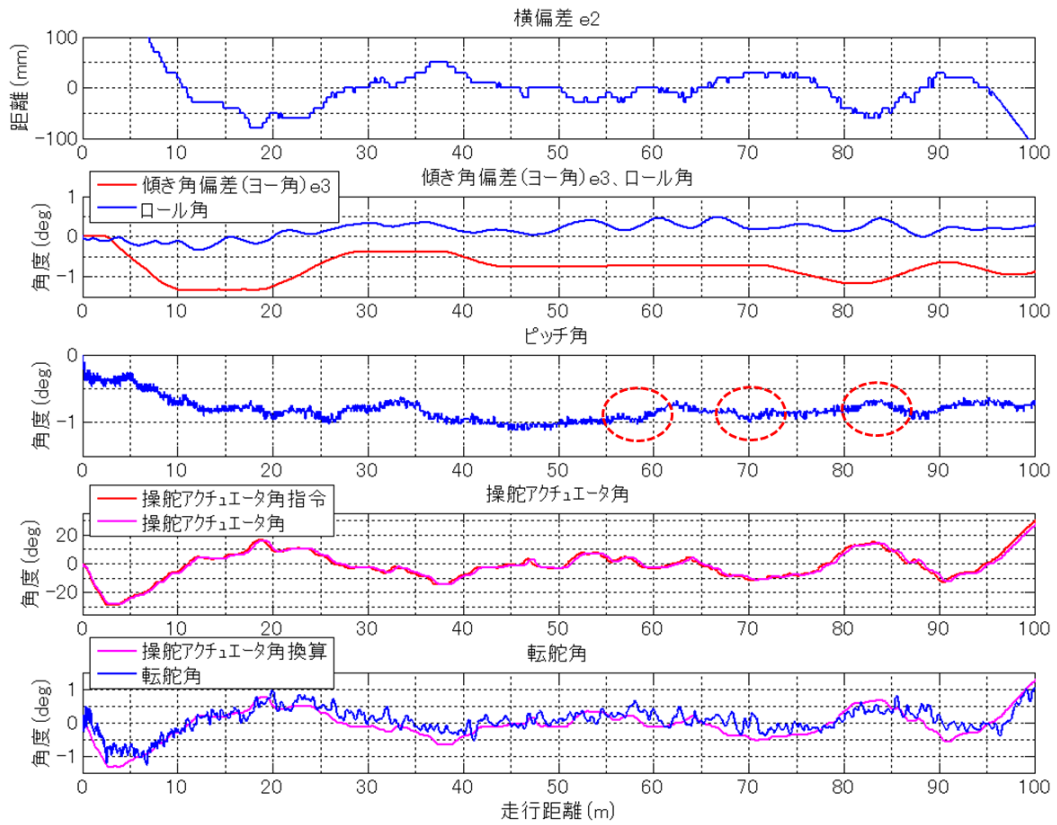
(a) 40km/h ①



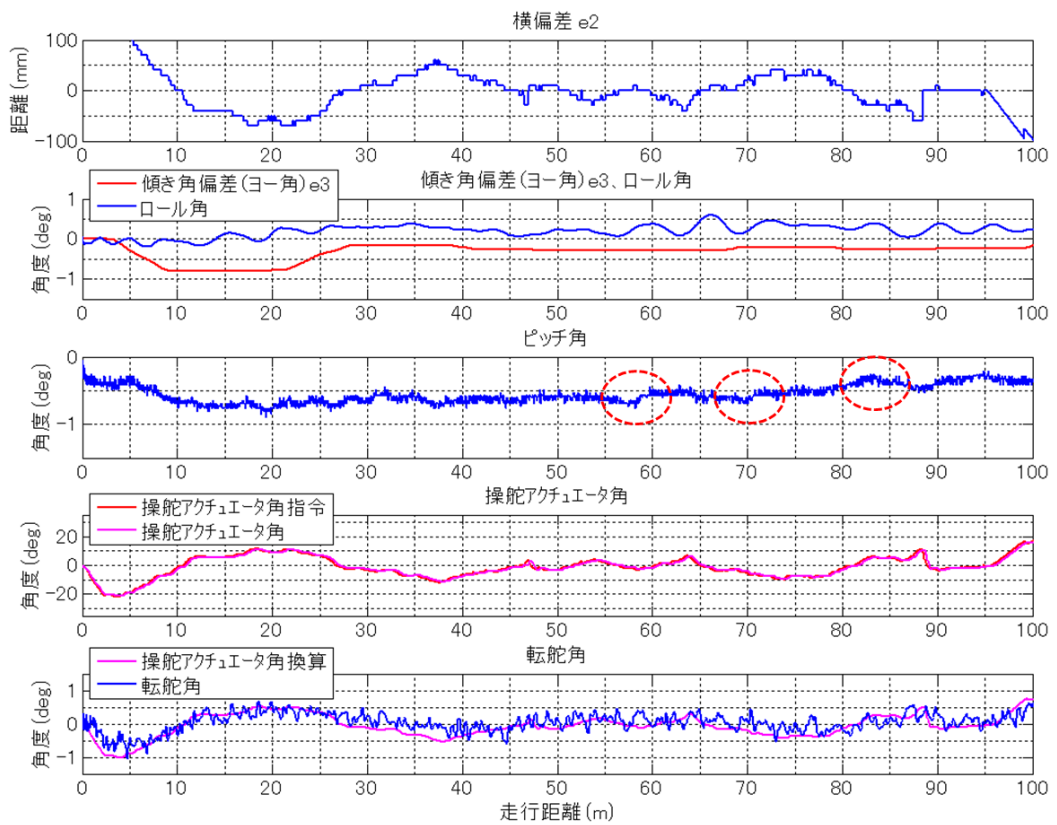
(b) 40km/h ②

図 1.2.4-3 直線部の走行結果 (40km/h)

上記の変化は、異なる車速 (図 1.2.4-4) においても同様の位置で起こっていることが確認できる。このことから、車両ピッチ角変動は路面などの外的要因による影響と考えられ、その際の車両ピッチ角変動でカメラ姿勢変化が生じ、車両横変位 (横偏差 e_2) の変動につながったものと考えられる。



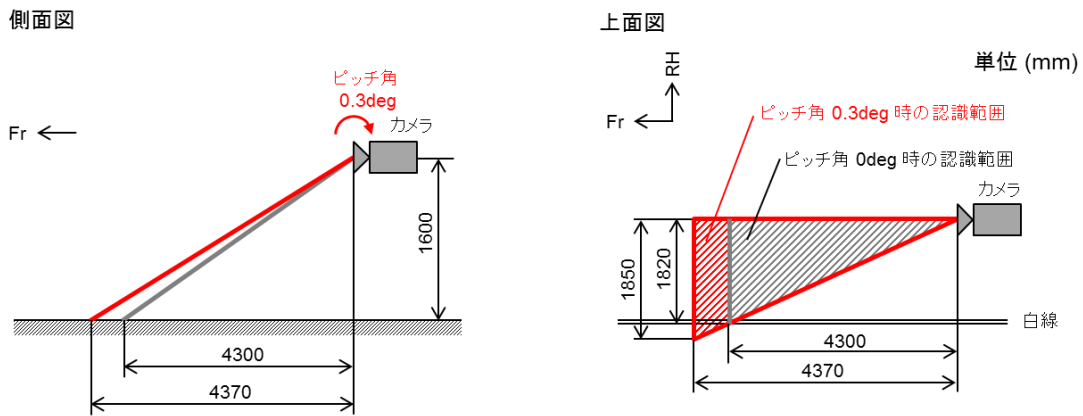
(a) 30km/h



(b) 20km/h

図 1.2.4-4 直線部の走行結果 (30km/h、20km/h)

ここで、カメラのピッチ角変動が車両横変位に与える影響について検討した。図 1.2.4-5 に模式図を示す。車体と白線の距離は 0.65m とし、カメラ先端を中心にして後ろ下がり方向にピッチ角 0.3deg の変化が起こると仮定した。この場合、カメラにて検知される値は 30mm 程度小さくなり、走行結果データとほぼ一致した。この結果より、車両ピッチ角変動によるカメラ姿勢変化が横偏差 e2 に影響する可能性が示唆された。正着精度向上に向けて、車体-白線距離など位置制御にカメラ画像を用いる場合には、車両挙動に伴うカメラ姿勢変化を補正するなどの対策が必要となると考えられる。



ピッチ角変化(0.3deg)に伴い、
前方4300mmの位置は4370mmへ変化

ピッチ角変化(0.3deg)に伴い、カメラの認識範囲が広がるため、
本来1820mmと検出されるべき車両横変位は

$$1820 \times \frac{1820}{1850} = 1791 \text{ mm}$$

と、30mm程度小さい値として検出される。

図 1.2.4-5 カメラ姿勢変化に伴う白線認識距離の変化模式図

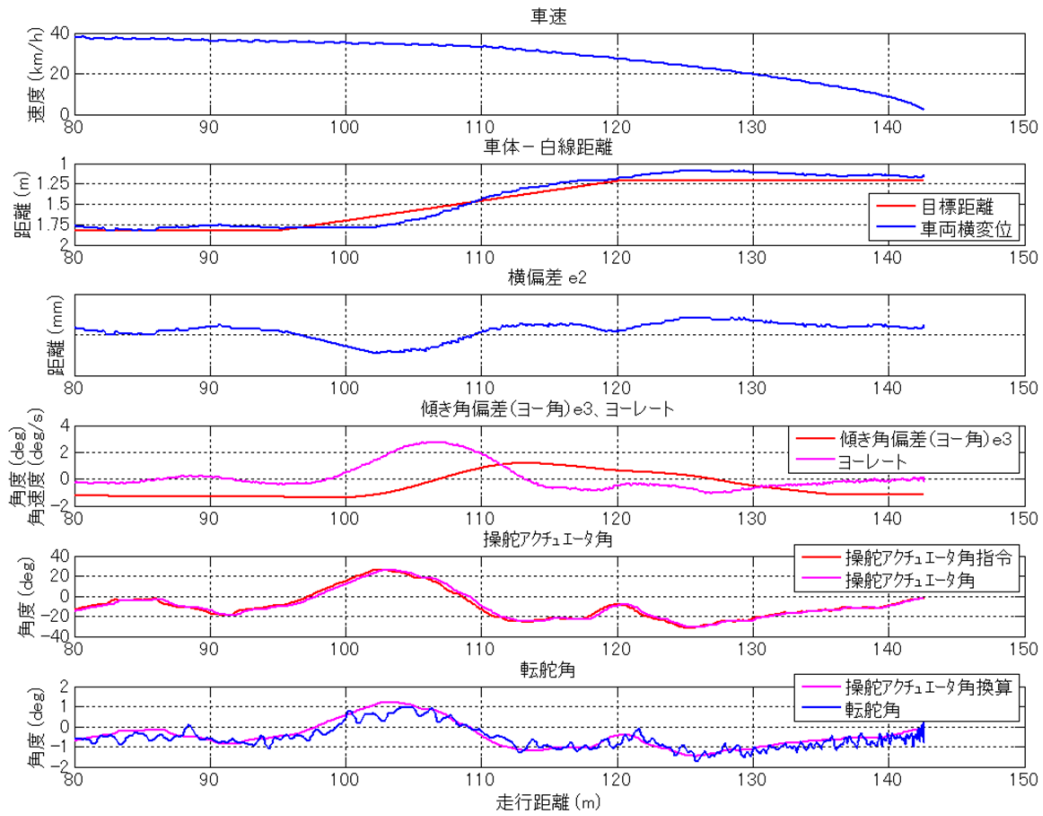
b) 正着時の目標軌跡に対する車両追従性について

図 1.2.4-6 に、正着時（95m 以降）の各挙動を、横軸を距離として示す。まず、(a) 40km/h に着目する。95m から 110m にかけて、目標軌跡に対して車両横変位が追従できておらず、120m 付近において横偏差がゼロに近づいていることが分かる。120m 以降では再び横偏差 e_2 が増加する傾向である。操舵アクチュエータ角はほぼ横偏差 e_2 の変化と同様に変化しており、転舵角は操舵アクチュエータ角に比べ、やや遅れが生じている（93m～103m 付近）。車両挙動のヨーレートは、転舵角に対して遅れが確認できる。

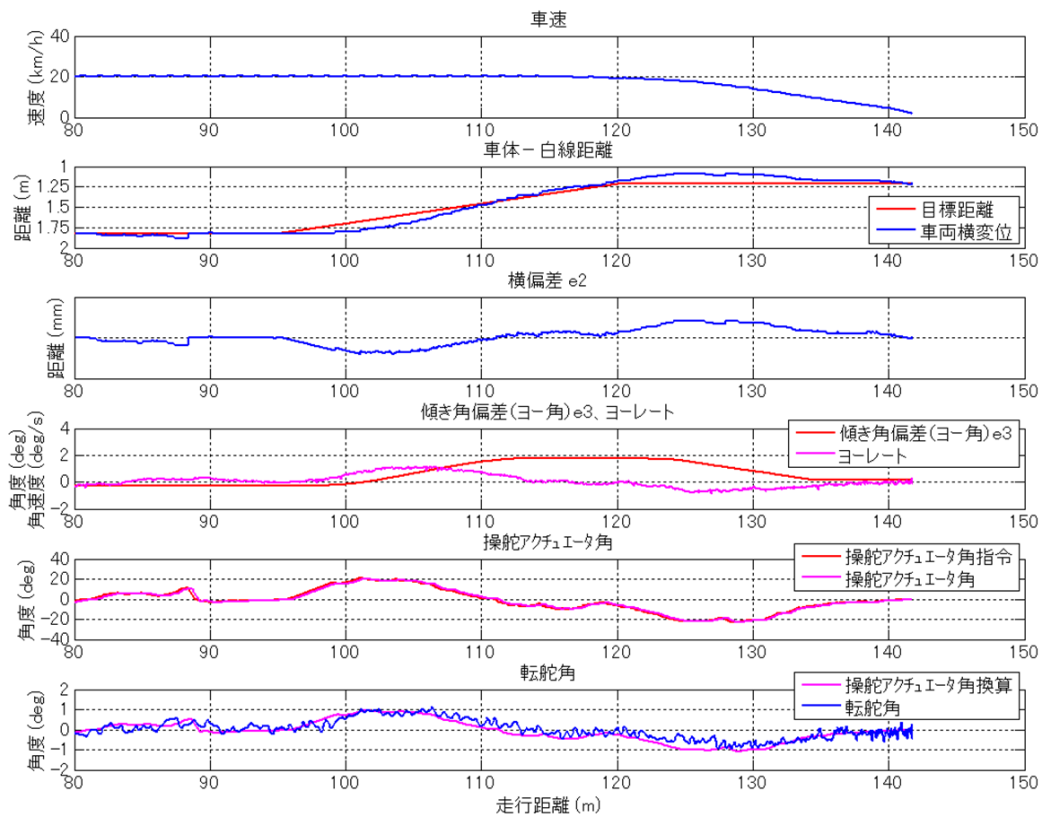
(b) 20km/h においては、40km/h に比べ、各値の変化の大きさや変化勾配は異なるものの、おおよそ類似した傾向を示している。

特に、120m 以降における挙動について着目すると、120m を超えた付近では横偏差 e_2 は増加し、傾き角偏差 e_3 は 1～2deg 程度残っている。このため、これ以降で e_2 、 e_3 をゼロにするための制御が働き、この区間での車両制御が正着結果の良否につながると考えられる。

以上のように 120m 以降、すなわち目標軌跡が白線に対し斜めから平行に切り替わった後の直線区間において、車両の横偏差 e_2 、傾き角偏差 e_3 をいかに小さくするかが重要であると示唆された。この直線部において車両の正着精度を向上させるためには、バスなど大型車両の応答遅れを加味すると、操舵系の応答遅れの改善だけでなく、正着目標軌跡の見直しも必要であると考えられる。



(a) 40km/h (正着結果：前 7mm、後 70mm)



(b) 20km/h (正着結果：前 87mm、後 115mm)

図 1.2.4-6 正着部の走行結果 (40km/h、20km/h)

c) 正着結果と制御パラメータの関係について

正着結果に寄与する要因を把握するため、横偏差 e_2 、傾き角偏差 e_3 に着目する。図 1.2.4-7 に、正着時の横偏差 e_2 から求めたバス停・扉間距離 (e_2 が 0 の時、バス停・扉間距離が 40mm) と、実測した正着結果 (バス停 (白線) と扉間の距離) を示す。 e_2 から求めたバス停・扉間距離と実際の正着結果には正の相関がみられる (前扉 $r = 0.98$ 、中扉 $r = 0.93$)。よって、横偏差 e_2 を限りなくゼロとなるように制御できれば、正着精度を向上させることが可能である。

しかし、横偏差 e_2 から求めたバス停・扉間距離が目標の 40mm の時、正着結果が 40mm とはならず誤差が生じている。今回の試験では、試験前に車両横変位を実測し、画像処理より出力される値に補正処理を施したが、この補正処理のさらなる精度向上が必要であると考えられる。

また、横偏差 e_2 から求めたバス停・扉間距離の振れ幅 (70mm 程度) に比べ、正着結果の振れ幅が大きい (130mm 程度)。これは、横偏差 e_2 はあくまでも白線認識カメラによる車両横変位から算出した値であり、傾き角偏差 e_3 を加味した値でないことが考えられる。

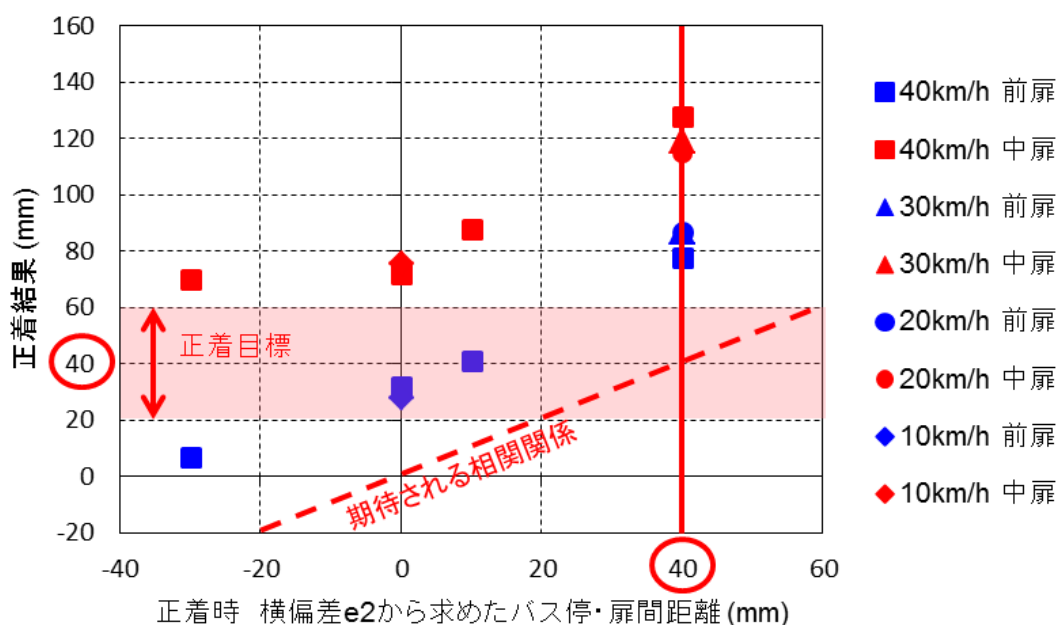


図 1.2.4-7 横偏差 e_2 と正着終了時のバス停・扉間距離

図 1.2.4-8 に正着時の傾き角偏差 e_3 とバス停・扉間距離 (正着結果) の前後差より算出した傾き角の関係を示す。正着結果より求めた傾き角のばらつき約 0.5deg に対し、傾き角偏差 e_3 のばらつきは約 1.7deg であった。

両者には、本来であれば相関関係があると考えられるが、今回の結果では相関は見られなかった。今回の試験では車両傾き角偏差 e_3 にジャイロセンサのヨー角を用いたが、このジャイロセンサのヨー角検出精度が要因として考えられる。正着結果より求めた傾き角のばらつき範囲 (0.5deg) 以下の精度確保は難しい。

以上より、今回正着制御に用いたパラメータである傾き角偏差 e_3 では、正着制御に十分な精度確保ができていなかったと考えられ、 e_3 精度向上が正着結果の精度向上につながると考えられる。

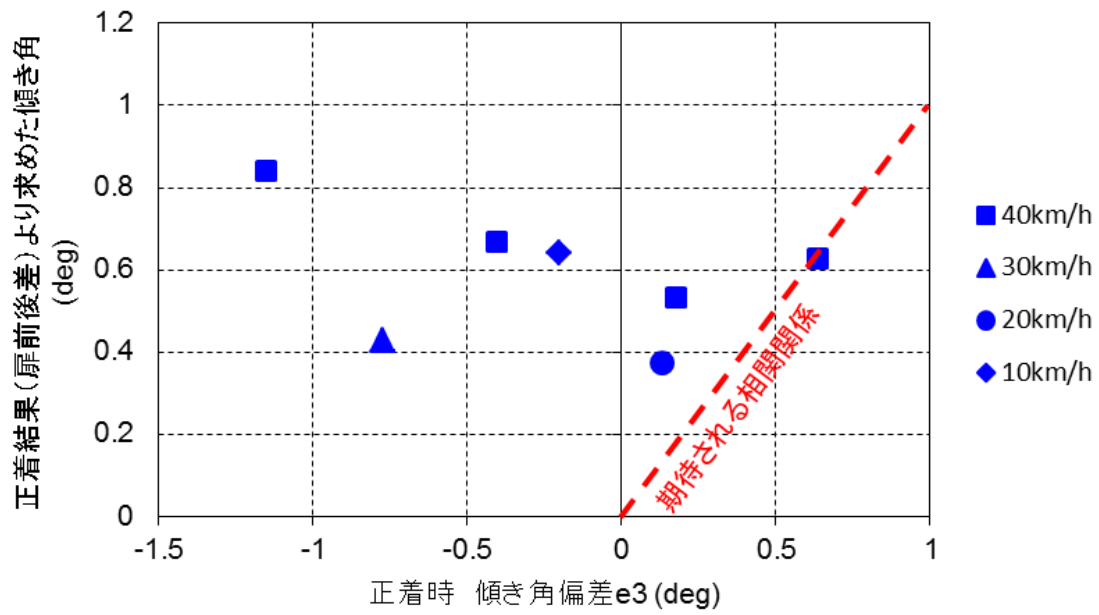


図 1.2.4-8 傾き角偏差 e_3 と正着時の傾き角

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。

1.3.1 操舵進み制御

1.2.3 操舵系基礎特性 により、バスの操舵系とタイヤから車両挙動まで、それぞれの位相遅れ特性や過渡応答特性が明らかになった。バスの操舵入力から車両挙動までの応答の中では、タイヤから車両挙動までの遅れが大きいことが分かった。このような特性を踏まえ、バスの正着精度向上においては、操舵系・車両挙動の遅れを補償できるような操舵進み制御の導入が必要であると考えられる。

1.3.2 白線認識カメラの姿勢補償

1.2.4 (iii) a) 白線認識に対する車両ピッチ角変動の影響について で示した通り、車両のピッチ角変動によるカメラ姿勢変化が横偏差 e_2 に影響する可能性が示唆された。このことから、現状の白線認識カメラによる車両横変位の検知方法について、改善すべき点があると考えられる。

前方白線認識画像より白線との車両横変位を算出する場合、カメラ姿勢が車体挙動に影響されないような対策が必要であり、例えば、白線認識カメラの固定位置や固定方法を改善することなどが考えられる。

1.3.3 目標軌跡（正着経路）の適正化

1.2.4 (iii) b) 正着時の目標軌跡に対する車両追従性について で示した通り、目標軌跡が白線に対し斜めから平行に切り替わった後の直線区間において、車両の横偏差 e_2 、傾き角偏差 e_3 をいかに小さくするかが重要であると示唆された。この直線部において車両を目標正着位置に精度良く正着させるためには、1.3.1 に示した操舵進み制御の導入が必要と考えられるが、それ以外にも正着目標軌跡の見直しも必要であると考えられる。バス停周辺の道路環境が許容できるのであれば、可能な限り車両の傾き角偏差が小さくなるような目標軌跡にすることが望ましい。こうすることで、車両挙動の応答遅れや車両傾き角検出精度の影響を緩和できると考える。しかし、このような正着経路の実現には、バス停の大きさや周辺環境の制約もあり、適正な正着経路の設定には、より詳細な検討が必要になると考えられる。

1.3.4 車両傾き角偏差 e_3 の検出精度向上

1.2.4 (iii) c) 「正着結果と制御パラメータの関係について」で示した通り、正着制御に用いたパラメータである傾き角偏差 e_3 では、正着制御に十分な精度確保ができていなかったと考えられる。今回の試験では、傾き角偏差 e_3 にジャイロセンサのヨー角を用いたが、現時点でのジャイロセンサのヨー角の精度は 1deg 程度である。このことから、ジャイロセンサの出力を用いた車両傾き角の高精度化は大きな課題であり、車両ヨー角検出の高精度化を図る必要がある。

【参考文献】

- [1] 吉田順ほか：トラック Path Following 制御に基づく自動運転，
日本機械学会論文集(c 編) Vol.77 783 号(2011-11)

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

正着制御では、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が望ましい。例えば、正着目標地点付近に人や障害物があるときは、運転者の意志でシステムの自動操舵とは反対方向に操舵して回避行動をとることが求められるが、操舵主権をシステムに100%依存した状態では、運転者の応答が遅れてしまう可能性がある。これを改善するには、常に運転者が操舵に関与していることが望ましいと考える。

そこで、正着制御時のシステムと運転者のシェアードコントロールについて、実現方法を検討し、ドライビングシミュレータ（DS）にて検証を行った。本内容は、東京大学と共同研究として実施した内容であり、2.1節から2.5節で述べる。また、検討したシェアードコントロールの方法の一部を試行的に実車環境下で検証した内容を2.6節で述べる。

2.1 調査の目的

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）で推進されている次世代都市交通システム（ART：Advanced Rapid Transit）の研究開発では、「すべての人に優しく、使いやすい移動手段を提供する」ことを基本理念とし、「段差や幅を最小限に抑えたバス停への正着制御機能により、車いすやベビーカーの方が介助なしで乗降できる使いやすさを実現するほか、周辺の交通状況をふまえたスムーズな加減速機能により、車内転倒事故防止を図る」ことがあげられている。SIPでは、自動運転レベルおよびそれを実現する自動走行システム・運転支援システムを表2.1-1のように定義している（戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）自動走行システム研究開発計画、2016年10月20日）。

表 2.1-1 自動運転レベルおよびそれを実現する自動走行システム・運転支援システムの定義

自動運転レベル	概要	注(責任関係等)	左記を実現するシステム	
レベル1	加速・操舵・制動のいずれかをシステムが行う状態	ドライバー責任	安全運転支援システム	
レベル2	加速・操舵・制動のうち複数の操作をシステムが行う状態	ドライバー責任 ※監視義務及びいつでも安全運転できる態勢	準自動走行システム	自動走行システム
レベル3	加速・操舵・制動を全てシステムが行い、システムが要請したときはドライバーが対応する状態	システム責任(自動走行モード中) ⁵ ※特定の交通環境下での自動走行(自動走行モード) ※監視義務なし(自動走行モード:システム要請前)		
レベル4	加速・操舵・制動を全てドライバー以外が行い、ドライバーが全く関与しない状態	システム責任 ※全ての行程での自動走行	完全自動走行システム	

※ただし、いずれのレベルにおいても、運転者は、いつでもシステムの制御に介入することができる。

レベル3は、基本的にシステムが運転を行い、運転者は監視義務からも解放される。しかし、緊急時の対応やシステム故障時などシステムが要請したときは、運転者が対応を行う必要がある。レベル3は、レベル2の場合と同様に車両の運転主権があるのはシステムか人間かのいずれか一方である。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

2.2.1 シェアードコントロール実現に向けた検討

シェアードコントロール実現に向けた検討として、本調査で用いる正着制御アルゴリズムの選定と、プロトタイプシステムの仕様について検討を行った。

(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、図 2.2.1-1 に示すような等価二輪モデルを選定した。

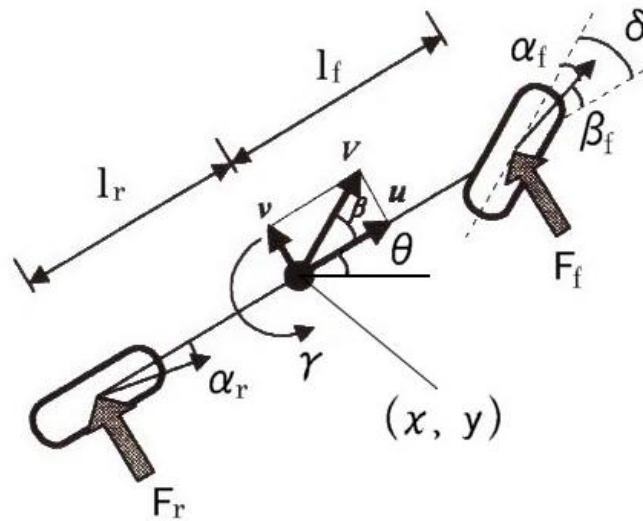


図 2.2.1-1 等価二輪モデル

等価二輪モデルの横すべり角とヨーレートに関する車両ダイナミクスは次式のように表される。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \end{bmatrix} + B\delta \quad (\text{式 2.2.1-1})$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{JV}(K_f l_f^2 + K_r l_r^2) & -\frac{2}{J}(K_f l_f - K_r l_r) \\ -\frac{2}{MV^2}(K_f l_f - K_r l_r) - 1 & -\frac{2}{MV}(K_f + K_r) \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{J} K_f l_f \\ \frac{2K_f}{MV} \end{bmatrix} \quad (\text{式 2.2.1-2})$$

ここで、 V は進行速度、 M は車両質量、 β は横すべり角、 γ は重心回りのヨーレート、 F_f と F_r は前後輪にかかるタイヤの横力、 l_f と l_r は重心から前後軸までの距離、 J は重心回りの慣性モーメント、 K_f と K_r は前後輪のコーナリングパワーである。

操舵制御系設計は、Path Following 制御の概念に従っている。Path Following 制御とは、仮想的に設けられた参照軌道上を走行する参照車両の描く軌跡を実車両に追従させる制御である。これは緊急時などにも対応するため、操舵制御系と速度制御系を分離するためである。参照車両の車両モデルを等価二輪モデルとすると、図 2.2.1-2 のように参照車両から実車両を見たときの絶対座標および傾き角偏差として e_1 、 e_2 、 e_3 を定義すると次式のようになる。ただし、添字の r が付いているものが参照車両における各種の変数を表す。

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r + \beta_r) & \sin(\theta_r + \beta_r) & 0 \\ -\sin(\theta_r + \beta_r) & \cos(\theta_r + \beta_r) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_r \\ y - y_r \\ (\theta + \beta) - (\theta_r + \beta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{式 2.2.1-3})$$

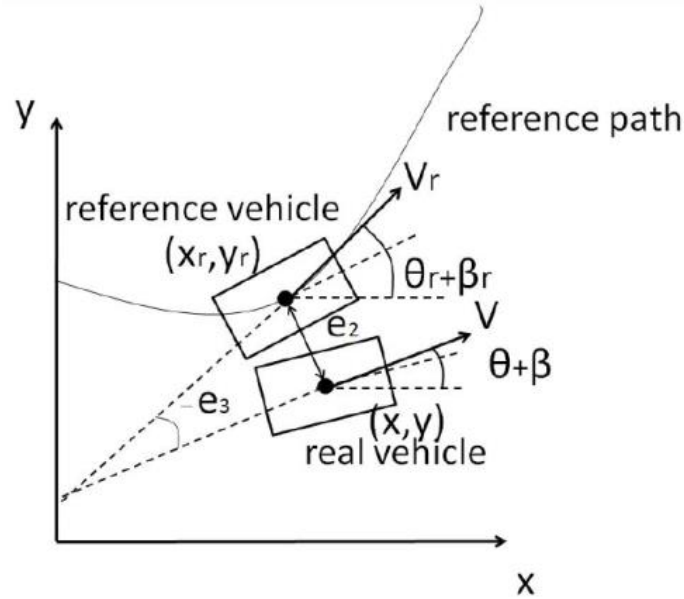


図 2.2.1-2 Path Following 制御

また、 e_1 、 e_2 、 e_3 の時間微分は次式のようなになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos e_3 - V_r + e_2 \omega_r \\ V \sin e_3 - e_1 \omega_r \\ \omega - \omega_r \end{bmatrix} \quad (\text{式 2.2.1-4})$$

参照車両が実車両の走行速度に合わせて常に並走しているとすると、誤差微分方程式は次式のようなになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \sin e_3 \\ \omega - \omega_r \end{bmatrix} \quad (\text{式 2.2.1-5})$$

ここで K_2 と K_3 を正の定数として次式のような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。このコントローラを導入した時の制御系の安定性はリアプノフの安定性理論により保証される。

$$\omega_c = \omega_r - K_2 e_2 V_r - K_3 \sin e_3 \quad (\text{式 2.2.1-6})$$

実車両に対して角速度（ヨーレート） ω_r を直接入力することはできないため、等価二輪モ

デルの式を用いて次式のような舵角入力へと変換し、制御入力とする。

$$\delta_c = \frac{MV}{2K_f} \left[\frac{2(K_f l_f - K_r l_r)}{MV^2} \gamma + \frac{2(K_f + K_r)}{MV} \beta + \omega_r - K_2 e_2 V - K_3 \sin e_3 \right] \quad (\text{式 2.2.1-7})$$

(ii) シェアードコントロールのプロトタイプシステム

シェアードコントロールによる正着制御システムのプロトタイプシステム（以下、「本システム」という）としては、運転者の意思確認を操舵力（操舵トルク）により行う。以下に本システムの内容を時系列で表す。

1. 運転者は通常通り走行する（図 2.2.1-3 1.）。運転手の操舵により車両は動作する状態であり、手動運転と呼ぶ。
2. 正着対象のバス停に近づき、システム利用可能ポイントを通過すると、システムにより車線を保持する制御が行われる。この際、操舵は自動制御（角度制御）された状態である（図 2.2.1-3 2.）。
3. システム利用可能ポイント通過後、正着制御を開始するには、運転者はバス停方向（左方向）に操舵する（操舵力を与える）ことが求められる。この操舵を正着制御システムの運転手の利用意思と捉え、正着制御を開始する（図 2.2.1-3 3.）。
4. 正着制御開始以降、正着制御を維持するには、運転者は、3. に引き続きバス停方向に操舵することが求められる。操舵力が一定時間以上しきい値より小さくなった場合は正着する意図がないと判断し、正着制御を解除し手動運転に切り替える。
5. また、正着制御中、運転手がバス停と逆方向（右方向）に操舵した場合は手動運転に切り替える。

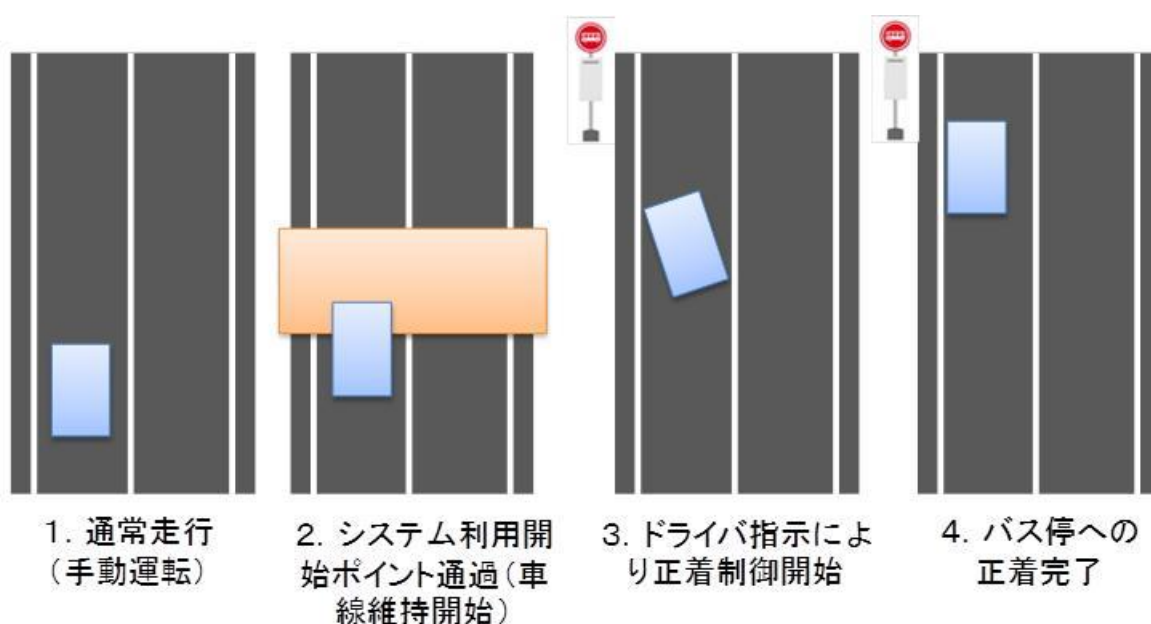


図 2.2.1-3 本システムの状態遷移

2.2.2 評価手法

2.2.1 項で述べた本システムでは、運転者の意図を判断する操舵力の基準値に関するしきい値が重要となる。また、緊急時の対応について、ハンドルオンのコンセプト(*)の有効性について評価を行う必要がある。そのため、東京大学が保有するドライビングシミュレータを利用して次の指標に関する評価を行う。

(※)ハンドルオンのコンセプトとは、ステアリングホイール（ハンドル）を常に把持し運転者が操作を行うことが望ましいという説を指す。

(1) 正着制御開始判定に関する評価

正着制御開始判定の操舵トルク値に関する評価では、試験条件に対して正常にシステムの状態を遷移させることができたかを評価する。

(2) 正着制御維持判定に関する評価

正着制御維持判定の操舵トルク値に関する評価では、運転者が正着制御を維持しようとしている場合を想定し、正着制御開始後にシステムの制御状態を維持してバス停に正着できたかを評価する。

(3) ハンドルオン（常に把持）とハンドルオフ（手放し）からのオーバーライドに関する評価

オーバーライド時の評価では、運転者が正着制御を解除しようとしている場合を想定し、運転者が正着方向とは逆方向に操舵することで制御を解除できたかを評価するとともに、初期条件としてハンドルオン（常に把持）とハンドルオフ（手放し）を設定し、オーバーライド時の反応時間などについて相対的な評価を行って、本システムのコンセプトの有効性について検証する。

また、上記3点ともに、アンケートによる主観評価の結果も合わせて総合的な評価を行う。

2.3 評価環境

2.3.1 ドライビングシミュレータ

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。その外観を図 2.3.1-1 に示す。DS は、最大可搬重量が 1.5t であり、臨場感の再現性向上を目的として様々な改良が施されている。動揺装置として、スチュワートプラットホーム上に電動アクチュエータが 6 本組み合わせられており、6 自由度の運動が可能である。表 2.3.1-1 に、DS の動揺装置の詳細な仕様を示す。キャabin はアルミフレームで構成され、使用用途によってセダン車両のような一般乗用車モードとトラック車両のような商用車モードの換装が可能である。運転席から 120 度の視界をカバーできるスクリーンが設けられており、左右のモニタにサイドミラー映像を表示できる。また、運転者の操舵に対して反

力を発生させられるほか、音響装置によって風による騒音やエンジン音が再現可能であり、実環境に近い臨場感のある運転環境を実現できる。アクチュエータと制御装置、センサなどの異常が発生した際には、すぐにドライビングシミュレータを止められるよう、運転者の手の届く位置および試験従事者の手の届く位置に非常停止装置が備えられている。運転者にはシートベルトの装着を義務付けている。また、被験者からの入力量や装置の制御量およびシミュレーション上の車両の挙動などを記録することが可能である。

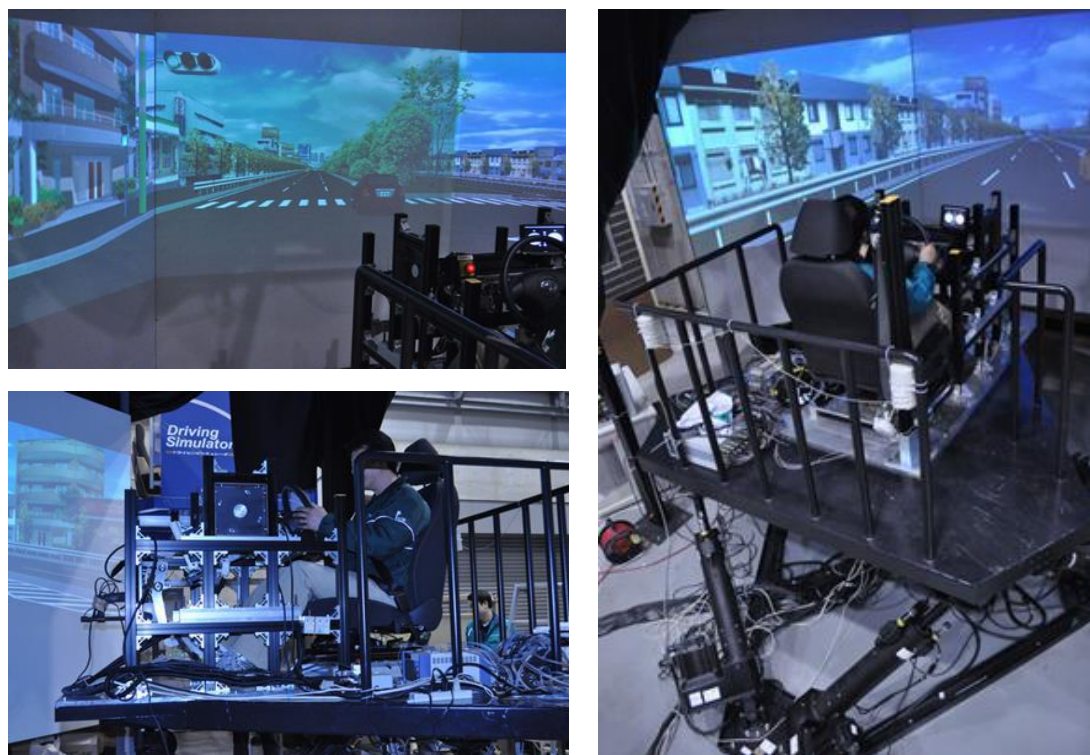


図 2.3.1-1 ドライビングシミュレータの外観

表 2.3.1-1 ドライビングシミュレータ動揺装置仕様表

	可動範囲	最大速度	定格加速度
前後	-200mm～+180mm	300mm/s	0.5G
左右	±190mm	300mm/s	0.5G
上下	-190mm～+230mm	300mm/s	0.5G
ロール角度	±12deg	20deg/s	
ピッチ角度	-11deg～+12deg	20deg/s	
ヨー角度	±11deg	20deg/s	

本 DS では、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、図 2.3.1-2 と図 2.3.1-3 に示すように、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、椅子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、DS 試験用の情報提示モニタを取り付けている。



図 2.3.1-2 ドライビングシミュレータの運転席



図 2.3.1-3 サイドミラー

2.3.2 システム構成

本調査で構築した DS のシステム構成を図 2.3.2-1 に示す。6 軸モーションプラットフォームとその制御器およびペダル、ステアリングホイールなどの操作系は、DS の HOST 計算機に接続される。HOST 計算機は、それ以外にも、映像装置、TruckSIM と Simulink^(※1) によって作成されたプログラムを実装した dSPACE^(※2)、操舵制御器、映像装置と接続されている。

(※1) 米国 The MathWorks, Inc.の登録商標 (※2) dSPACE GmbH の商標

大型バスの車両モデルとしては、産業界で車両運動シミュレーションに実績のある TruckSIM を用いた。TruckSIM は、米国 Mechanical Simulation 社で開発・商品化された、車両運動シミュレーションソフトウェアであり、大型商用車のタイヤ、サスペンション、エンジン、駆動系、制動系の精密な力学モデルにより、車両挙動の正確なシミュレーションを行うことが可能である。大型バスのダイナミクスはバーチャルメカニクス社の TruckSIM を使い、Simulink とリンクし、DS と dSPACE を同期させ、実時間で連動させることにより大型車両のダイナミクスを再現した運転環境の構築を行っている。

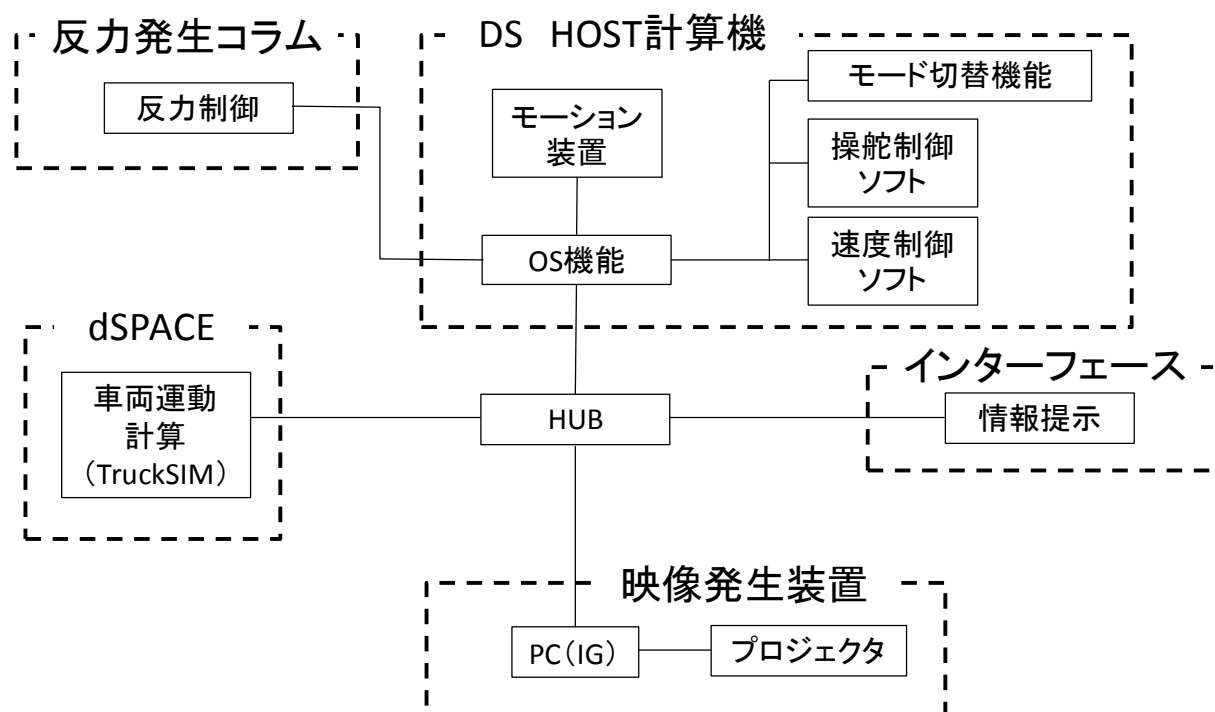


図 2.3.2-1 システム構成

反力発生コラムでは、運転時のステアリングからの反力を発生させる。操舵の角度制御時は、制御入力の目標操舵角に応じてステアリングホイールを必要な角度に回転させる。本システムの状態遷移に対する反力のモードの遷移を図 2.3.2-2 に示す。なお、バス停への正着を行うのは、運転者の正着制御開始の指示があった場合のみである。

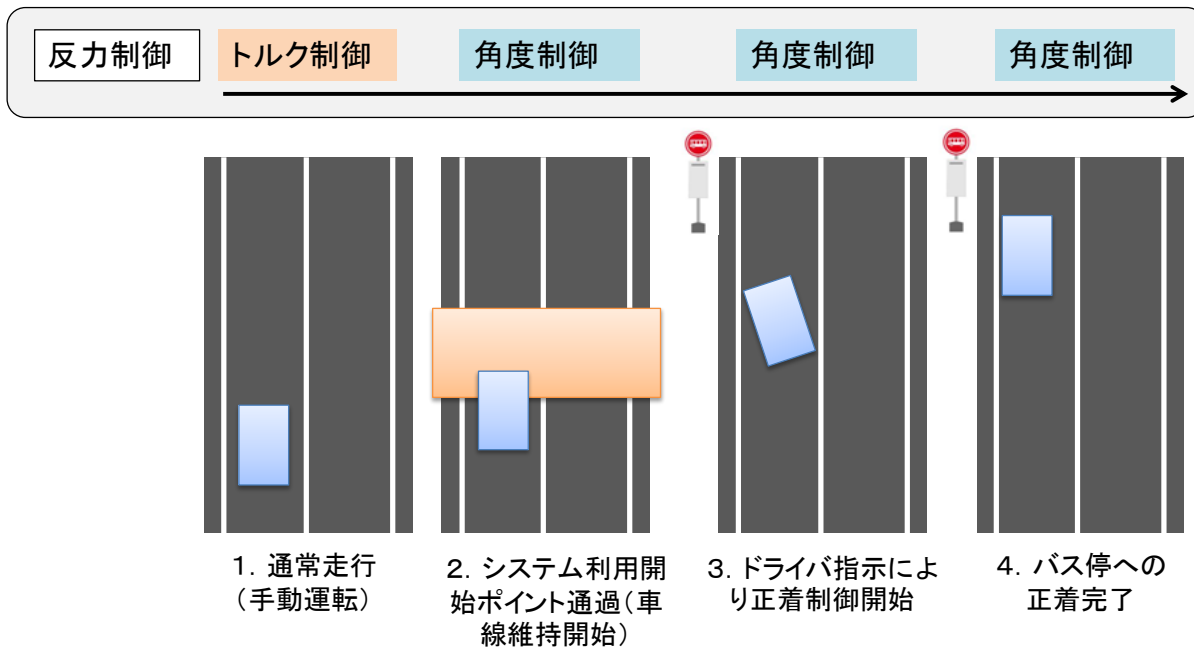


図 2.3.2-2 反力制御のモード切替え

DS の HOST 計算機の「モード切替機能」では、各状態ごとに表 2.3.2-1 のようにモードフラグを立てる。

表 2.3.2-1 システムの状態に対するモードフラグ

システムの状態	フラグの値
通常走行 (手動運転)	0
システム利用開始ポイント通過	1
正着制御開始・制御中	2
正着制御の解除	4
オーバーライド	5

図 2.2.1-3 のようにバス停への正着が完了した場合のモードフラグを図 2.3.2-3 に、正着制御が解除された場合のモードフラグを図 2.3.2-4 に、オーバーライドした場合のモードフラグをを図 2.3.2-5 に示す。

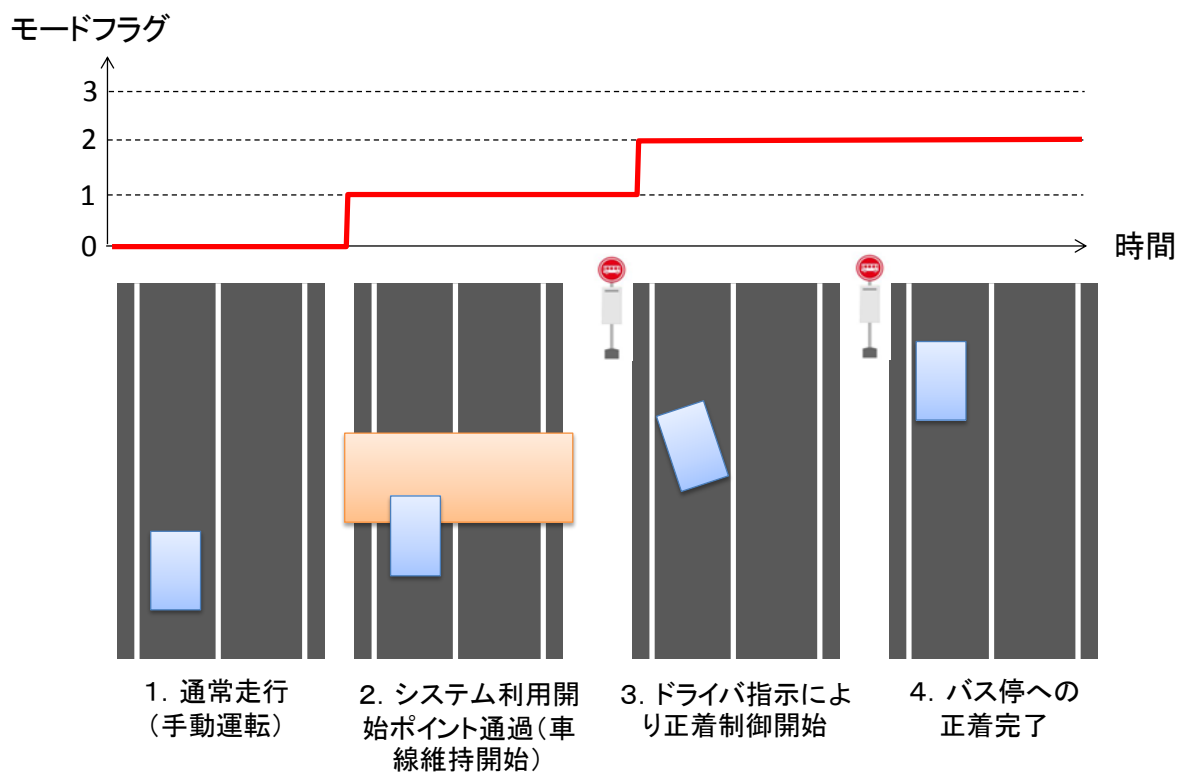


図 2.3.2-3 図 2.2.1-3 のように状態が遷移した場合のモードフラグ

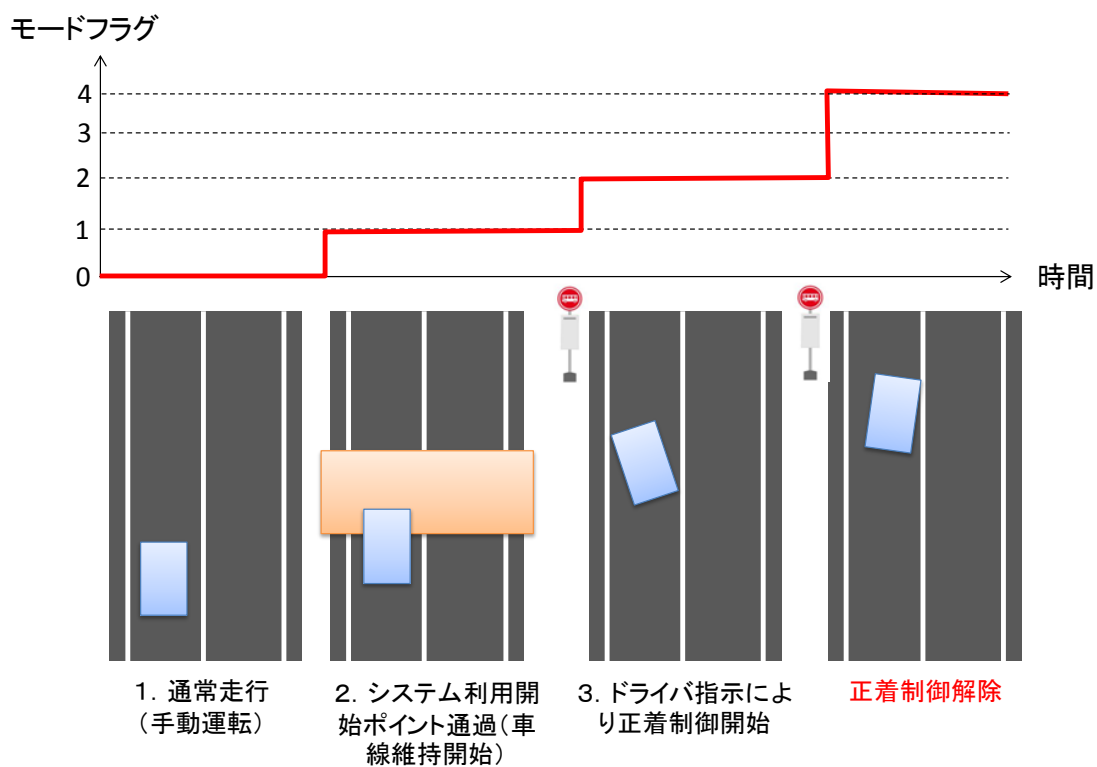


図 2.3.2-4 正着制御解除の場合のモードフラグ

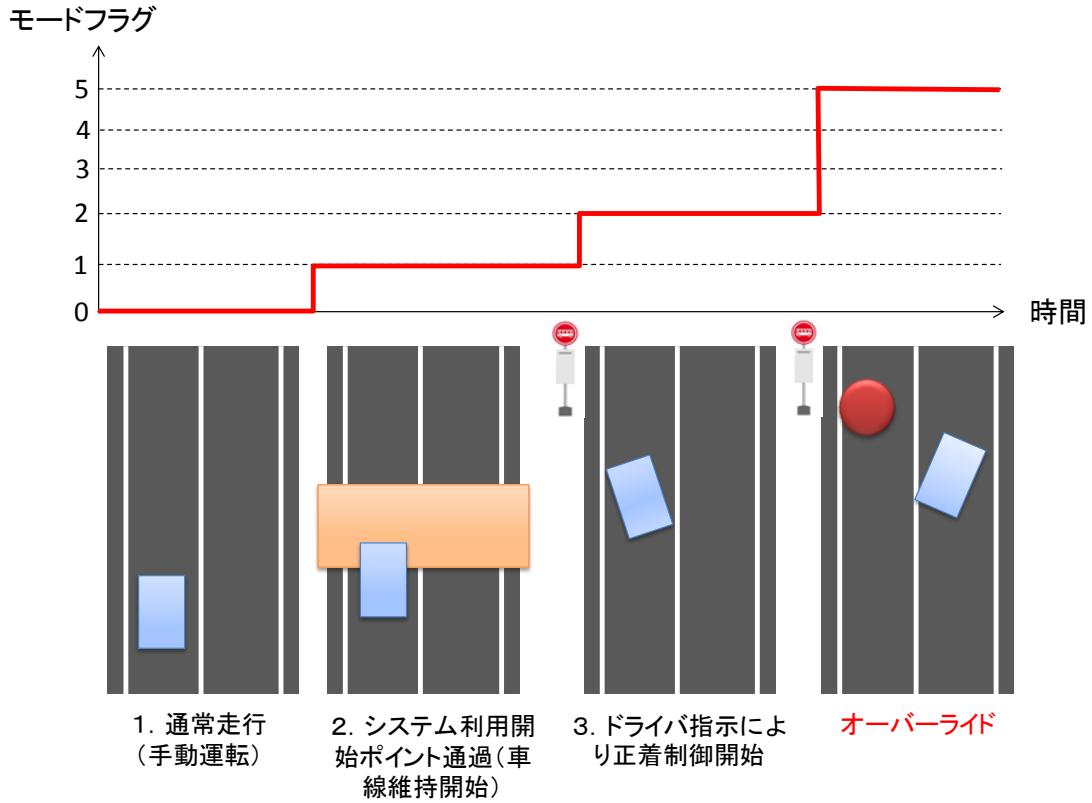


図 2.3.2-5 オーバーライドの場合のモードフラグ

2.3.3 HMI (Human Machine Interface)

本システムの状態遷移に応じて運転手席のモニタに情報提示を行う。まず、手動走行時は図 2.3.3-1 に示すように「手動」のアイコンを表示する。



図 2.3.3-1 「手動」のアイコン表示

次に、システム利用可能ポイントを通過すると、ピンという効果音とともに「正着開始可能」とアイコンが表示される。また、アイコンの表示が変わるとともに、車線保持制御（角度制御）に切り替わる。その際、ステアリングホイールの感触が変わるが、この変化は本調査では評価対象にしない。



図 2.3.3-2 「正着開始可能」とアイコン表示

そして、運転手がバス停のある左方向へ操舵を行うことにより、ドライバ指示により正着制御が開始される状態に遷移し、「正着制御中」のアイコンが表示される。



図 2.3.3-3 「正着制御中」のアイコン表示

「正着制御中」は、ステアリングホイールを左側へ操舵する（操舵力を与える）ことにより正着制御状態が維持される。試験条件に対して運転手の操舵力が小さかった場合は、

「正着制御中」の設定が解除され「手動」に戻る。「手動」に戻った際は、アイコンの表示が切り替わるとともに、操舵制御も解除されるため、通常の手動運転の状態に戻る。



図 2.3.3-4 「正着制御中」の維持・解除

最後に、バス停に到着し車両が停車すると、「バス停到着」のアイコンが表示される。なお、バス停から再出発する際は、「右ウィンカー」を出すことにより、「手動」の状態に遷移して再発進できる。



図 2.3.3-5 「バス停到着」のアイコン表示

2.3.4 評価条件

DS 試験における道路シナリオと評価条件、主観評価のアンケートを以下に示す。

(i) 道路シナリオ

DS 試験のための道路シナリオとして、直線道路約 1.75km の CG で模擬市街路を作成した(図 2.3.4-1)。走行開始地点から 1000m の地点にバス停 A (図 2.3.4-2) を設置し、バス停 A から 300m の位置にバス停 B (図 2.3.4-3) を設置した。DS 試験では、1 条件につきバス停 A とバス停 B への停車、計 2 回を行う。



図 2.3.4-1 CG による模擬市街路 (左図は 500m グリッド)



図 2.3.4-2 バス停 A

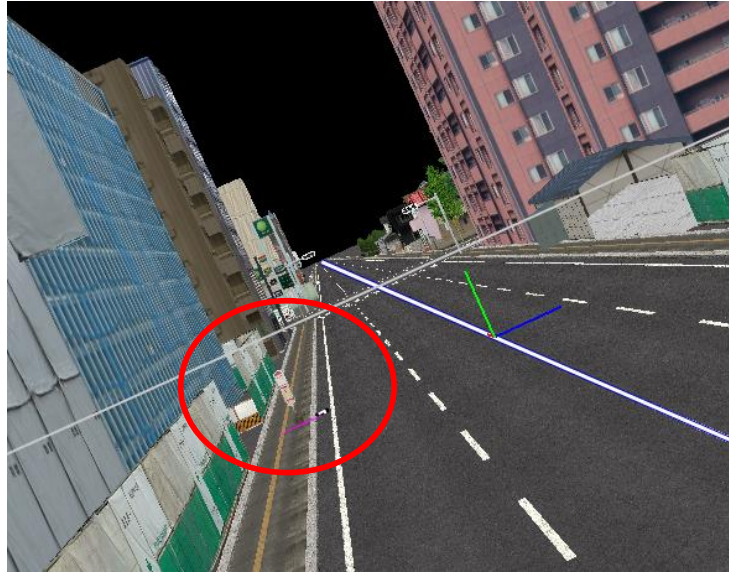


図 2.3.4-3 バス停 B

緊急時のオーバーライド評価用のイベントは、バス停の手前の位置に人の群れから子供が道路中心まで飛び出し歩道へ戻る設定とした。



図 2.3.4-4 子供の飛出し

(ii) 被験者

DS 試験では、健常な成人 12 名（男性 11 名、女性 1 名）を被験者とした。日常的に運転を行っているバスの運転経験のあるドライバ 9 名と大型車両の職業ドライバ 3 名であった。被験者の詳細を表 2.3.4-1 に示す。

表 2.3.4-1 被験者

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	約 5 年前にバレー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

(iii) 評価条件

速度は、走行開始から 40km/h まで加速度 1.47m/s^2 (0.15G) で加速し、バス停車前から減速度約 0.98m/s^2 (0.1G) で減速し停車するよう、自動的に制御される。つまり、被験者は操舵操作のみを行い、本システムを利用したバス停への停車を行う。速度制御については PID 制御を採用した。試験のパラメータや条件を以下に示す。

1. 正着制御開始トルク

正着制御開始トルクは 3 水準 (2Nm・4Nm・6Nm) とし、判定時間は DS の 1 サンプルリング時間 (0.0167sec) とした。本システムが利用可能になってから、各水準値以上に運転者の操舵トルクが生じた場合に、正着制御開始とした (モードフラグ 2 に設定)。

2. 正着制御維持判定トルク

正着制御維持判定トルクは 3 水準 (1Nm・2Nm・4Nm) とし、判定時間は 0.8 秒とした。この判定時間は、人の反応時間を 0.7 秒、機械遅れを 0.1 秒で見積もり算出した。運転者の操舵トルクが判定時間連続して各水準値未満になった場合に正着制御を解除した (モードフラグ 4 に設定)。

3. 運転タスク

運転タスクは、ハンドルオン（常に把持）とハンドルオフ（手放し）、ハンドルオン時のウィンカー操作の3パターンを設定した。ウィンカー操作は、一時的に片手をステアリングホイールから放した状態にすることを狙い設定した。操作は、音声アナウンスに従って左ウィンカーを出す（戻さずウィンカーを出したまま）という操作を運転手に教示して行った。

4. オーバーライド

オーバーライドは2水準（正着制御開始トルク： $2\text{N}\cdot\text{m}$ ・ $4\text{N}\cdot\text{m}$ ）に設定し、0.4秒に対するトルク変化が $7\text{N}\cdot\text{m}$ 以上生じた場合にオーバーライドと判定した。なお、正着制御維持判定トルクは $1\text{N}\cdot\text{m}$ で統一した。オーバーライドの判定に関する条件は、予備試験を実施し設定した。また、オーバーライドは、前述したように子供が飛び出すイベントを発生させた。自車両と子供の飛出しのイベント開始はバス停の手前で、TTC（Time-To-Collision）約3.15秒相当の位置とした。TTC3.15秒は予備試験を実施し設定した。イベントの発生を同じ位置にすると慣れの影響があると考え、条件によってイベントを発生するバス停を変えた。

本DS試験の試験条件を表2.3.4-2に示す。オーバーライドの条件（ID：2,5,12）は、一方のバス停のみで実施し、もう一方のバス停ではイベントを発生させずに実施した。

表 2.3.4-2 試験条件

ID	制御開始トルク(Nm)	制御保持判定トルク(Nm)	運転タスク	オーバーライド (空欄は無し)	備考
1	2	1	ハンドルオン		
2	2	1	ハンドルオン	有り	バス停Aでイベント発生
3	4	1	ハンドルオン		
4	4	2	ハンドルオン		
5	4	1	ハンドルオン	有り	バス停Bでイベント発生
6	6	1	ハンドルオン		
7	6	2	ハンドルオン		
8	6	4	ハンドルオン		制御が入らない場合は開始トルクを4Nmで再度
9	2	0	ハンドルオフ		
10	4	2	ウィンカー		ウィンカー操作は音声で指示
11	6	2	ウィンカー		ウィンカー操作は音声で指示
12	2	0	ハンドルオフ	有り	バス停Aでイベント発生

試験の試行順の影響を除くため、ラテン方格により試験の試行順を表 2.3.4-3 に示すように決定した。

表 2.3.4-3 試行順

Sub.	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th	11th	12th
A	1	2	12	3	11	4	10	5	9	6	8	7
B	2	3	1	4	12	5	11	6	10	7	9	8
C	3	4	2	5	1	6	12	7	11	8	10	9
D	4	5	3	6	2	7	1	8	12	9	11	10
E	5	6	4	7	3	8	2	9	1	10	12	11
F	6	7	5	8	4	9	3	10	2	11	1	12
G	7	8	6	9	5	10	4	11	3	12	2	1
H	8	9	7	10	6	11	5	12	4	1	3	2
I	9	10	8	11	7	12	6	1	5	2	4	3
J	10	11	9	12	8	1	7	2	6	3	5	4
K	11	12	10	1	9	2	8	3	7	4	6	5
L	12	1	11	2	10	3	9	4	8	5	7	6

(iv) アンケート

DS 試験の主観評価では、図 2.3.4-5 のように 5 段階評価により「運転時のリラックス度」と「システムを意図通りに切り替えられたか」、「運転のしやすさ」について評価を行った。また、対話形式で被験者からフリーコメントを取得した。

アンケート 1 走行目

ID:

【いま体験された走行について伺います】

質問1 走行開始からバス停到着まで安心して走行できましたか？
最も近い数字に○を付けてください。

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

不安 ←————→ 安心

質問2 運転支援システムのモードを意図通りに
切り替えられましたか？
最も近い数字に○を付けてください。

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

できなかった ←————→ できた

質問3 運転のしやすさはいかがでしたか？
最も近い数字に○を付けてください。

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

運転しにくい ←————→ 運転しやすい

図 2.3.4-5 アンケート

2.4 評価結果

2.4.1 評価条件ごとの結果

(1) 正着制御開始判定に関する評価

制御開始判定の操舵トルク値に関する評価では、試験条件（正着制御開始トルク）に対して正常にシステムの状態を遷移させることができたかを評価する。具体的には、試行数を揃えるためにバス停 A に対するデータを対象とし、各被験者の運転データについてモードフラグを確認し、本システム利用開始可能エリア通過後に制御開始へと状態を遷移することができているかを確認した。参考のため、図 2.4.1-1 に正着制御開始判定に関するグラフの一例を示す。

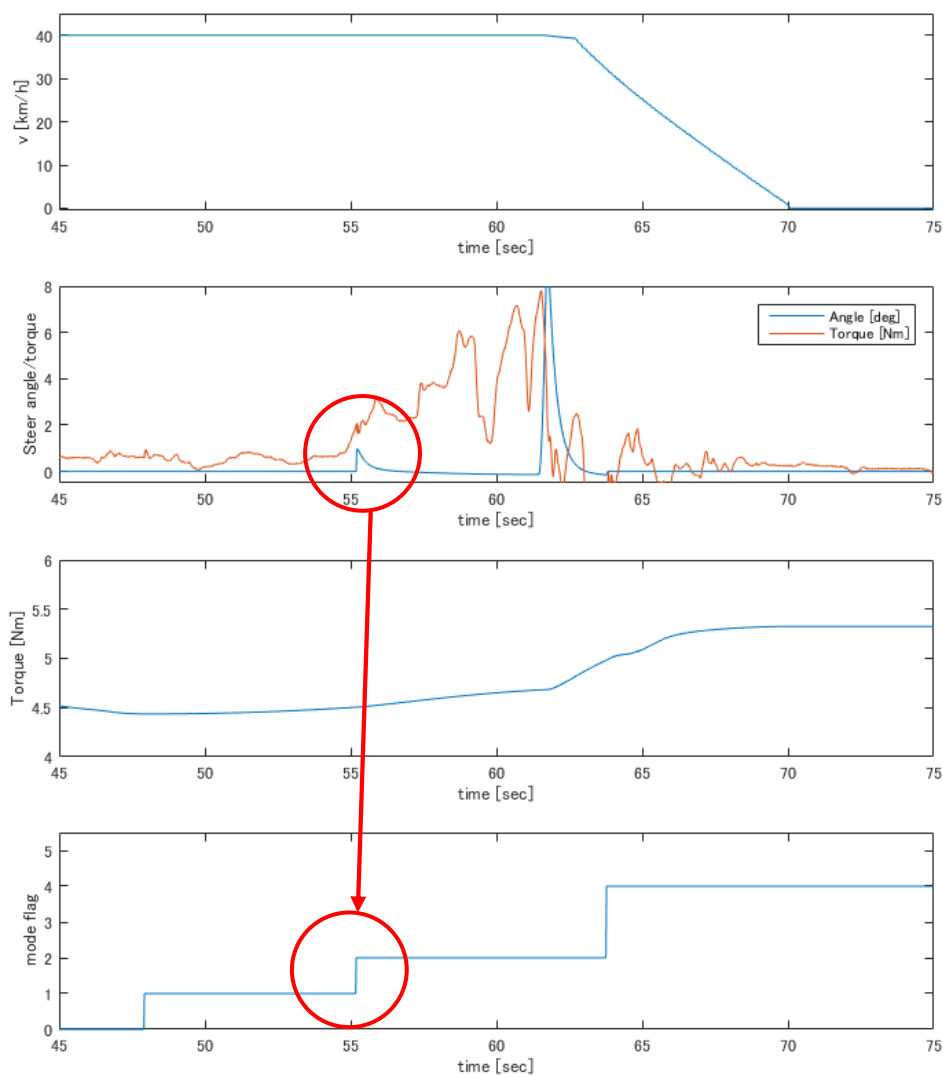


図 2.4.1-1 モードフラグの遷移例（判定トルク：1Nm）

正着制御開始時のモードフラグの遷移を表 2.4.1-1 と図 2.4.1-2 に示す。表中の「1」のところは正常に正着制御を開始できたことを示し、色付きの空欄は制御を開始できなかったことを示す。システム利用開始可能エリア通過後、試験 ID が 7 と 10、11 以外はすべて制御を開始することができた。

表 2.4.1-1 正着制御開始時のモードフラグの切り替わり

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
D	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
H	1	1	1	1	1	1		1	1			1
I	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
J	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1
K	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1
L	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
%	100	100	100	100	100	100	92	100	100	92	75	100

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm])

ID1:(2,1)、ID2:(2,1)、ID3:(4,1)、ID4:(4,2)、ID5:(4,1)、ID6:(6,1)、

ID7:(6,2)、ID8:(6,4)、ID9:(2,0)、ID10:(4,2)、ID11:(6,2)、ID12:(2,0)

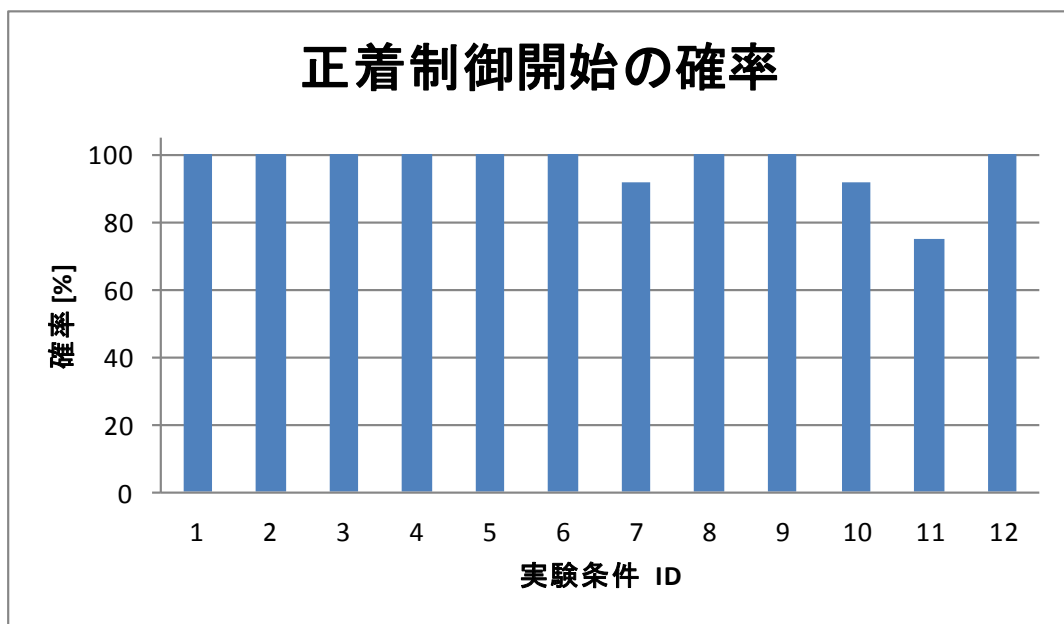


図 2.4.1-2 正着制御開始の切り替え確率

ここで、正着制御開始の判別トルクごとにモードフラグの遷移を表 2.4.1-2 と図 2.4.1-3

に示す。判別トルクの値が 2Nm のときは全被験者が制御を開始することができ、4Nm の時は被験者 H の 1 施行だけが正着制御を開始できなかった。判別トルクが 6Nm の時は、被験者 H と K で正着制御が開始できず、制御開始の確率も 92% と低くなっている。

表 2.4.1-2 正着制御開始判定トルクごとのモードフラグの切り替わり

ID	1	2	9	12	3	4	5	10	6	7	8	11
トルク	2Nm				4Nm				6Nm			
A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
D	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
H	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0
I	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
J	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
K	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
L	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sum.	12	12	12	12	12	12	12	11	12	11	12	9
%	100				98				92			

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm])

ID1:(2,1)、ID2:(2,1)、ID3:(4,1)、ID4:(4,2)、ID5:(4,1)、ID6:(6,1)、

ID7:(6,2)、ID8:(6,4)、ID9:(2,0)、ID10:(4,2)、ID11:(6,2)、ID12:(2,0)

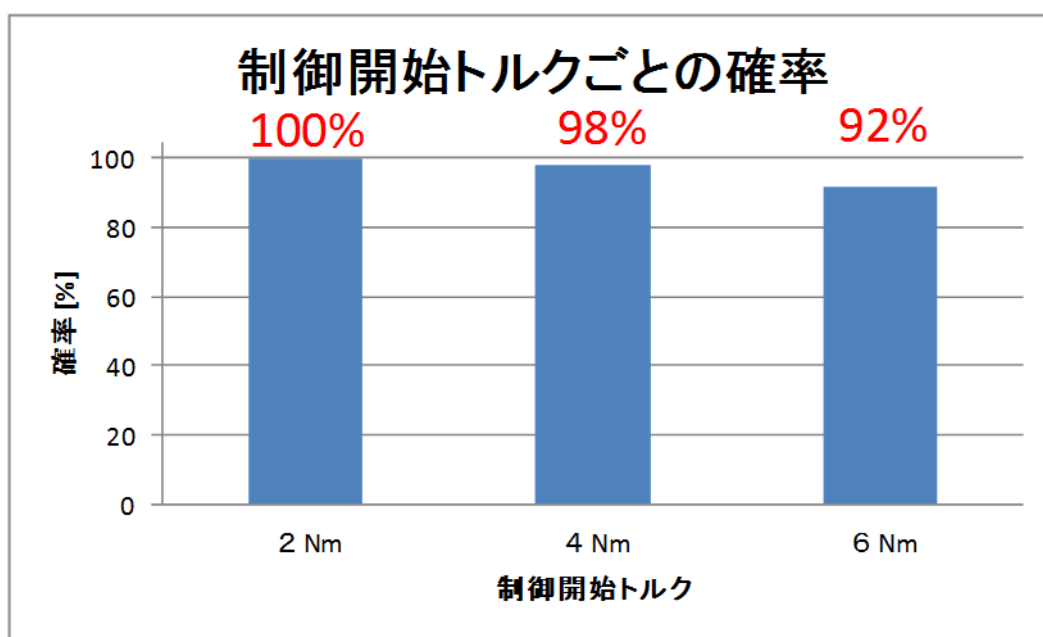


図 2.4.1-3 正着制御開始判定トルクごとの正着制御開始の切り替え確率

(2) 正着制御維持判定に関する評価

正着制御維持判定の操舵トルク値に関する評価では、ハンドルオンの状態で運転者が正着制御を維持しようとしている場合を想定し、正着制御開始後にシステムの制御状態を維持してバス停に正着できたかを評価する。ここでは、まず、オーバーライドのイベントが発生する試行とウィンカー操作の伴う試行以外を対象とし、各被験者の運転データについてモードフラグを確認し、制御開始ができたデータについてバス停に到着するまで制御状態を維持できたかを確認した。

正着制御中のモードフラグの遷移を表 2.4.1-3 から表 2.4.1-5 に示す。表中の「1」のところは各モードフラグが立ったことを示し、2は正着制御開始、4は正着制御解除、5はオーバーライド判定されたことを示す。ピンクの色付きの空欄は正着制御を開始できなかったことを示し、グレーの色付きの空欄は機器トラブルや時間の制約から実施を見送った試行、もしくは、オーバーライドのイベントに相当する試行を示す。表 2.4.1-3 から表 2.4.1-5 中の一番下に各フラグが立つ確率を示しているが、実施しなかった施行については母数に含んでいない。また、バス停到着まで正着制御を維持できた確率（モードフラグが最後まで「2」の確率）を表 2.4.1-6 と図 2.4.1-4 に示し、正着制御維持判定トルクごとに整理した確率を表 2.4.1-7 と図 2.4.1-5 に示す。モードフラグの結果だけを見ると、正着制御維持判定トルクが小さい場合も制御が解除されることが多い結果となった。判定トルクごとのバス停到着まで正着制御を維持できた確率をみると、図 2.4.1-5 に示すように 2Nm の条件が最も確率が高く、4Nm が最も確率が低い結果となった。

表 2.4.1-3 正着制御中のモードフラグの遷移 (ID: 1~3)

ID	1						2						3					
	Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B		
	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5
A	1	1		1	1					1	1		1	1		1	1	
B	1			1	1					1	1		1	1		1		
C	1			1						1			1			1	1	
D	1			1	1					1	1		1	1		1		
E	1	1		1	1					1	1		1	1		1	1	
F	1			1						1	1		1	1		1		
G	1	1		1	1					1	1		1	1		1	1	
H	1	1		1						1			1			1		
I	1			1						1			1			1		
J	1	1		1	1								1			1	1	
K	1			1						1			1			1		
L	1			1	1					1			1			1		
%	100	42	0	100	58	0				100	55	0	100	50	0	100	42	0

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm]) ID1:(2,1)、ID2:(2,1)、ID3:(4,1)

表 2.4.1-4 正着制御中のモードフラグの遷移 (ID : 4~6)

ID	4						5						6					
	Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B		
	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5
A	1	1		1	1		1	1					1	1				
B	1	1		1			1	1					1	1		1	1	
C	1			1			1						1			1		
D	1	1		1	1		1	1					1	1		1		
E	1	1		1	1		1	1					1	1		1		
F	1			1			1						1			1		
G	1	1		1			1	1					1			1		
H	1	1		1	1		1	1					1	1				
I	1			1			1						1			1		
J	1			1	1		1						1	1		1		
K	1			1			1						1			1		
L	1			1			1						1			1		
%	100	50	0	100	42	0	100	42	0				100	50	0	83	9	0

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm]) ID4:(4,2)、ID5:(4,1)、ID6:(6,1)

表 2.4.1-5 正着制御中のモードフラグの遷移 (ID : 7~8)

ID	7						8					
	Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B		
	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5
A	1	1					1		1			
B	1			1			1			1		
C	1			1			1	1		1	1	
D	1			1	1		1	1		1	1	
E	1	1		1	1		1	1		1	1	
F	1			1			1			1		
G	1			1			1			1	1	
H							1	1		1	1	
I	1			1			1			1		
J	1	1		1	1		1	1		1	1	
K	1			1			1			1		
L	1			1			1			1		
%	92	27		91	30	0	100	42	8	100	50	

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm]) ID7:(6,2)、ID8:(6,4)

表 2.4.1-6 バス停到着まで正着制御を維持できた確率

ID	1	2	3	4	5	6	7	8
確率[%]	50	45	54	54	58	70	73	52

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm])

ID1:(2,1)、ID2:(2,1)、ID3:(4,1)、ID4:(4,2)、ID5:(4,1)、ID6:(6,1)、ID7:(6,2)、ID8:(6,4)

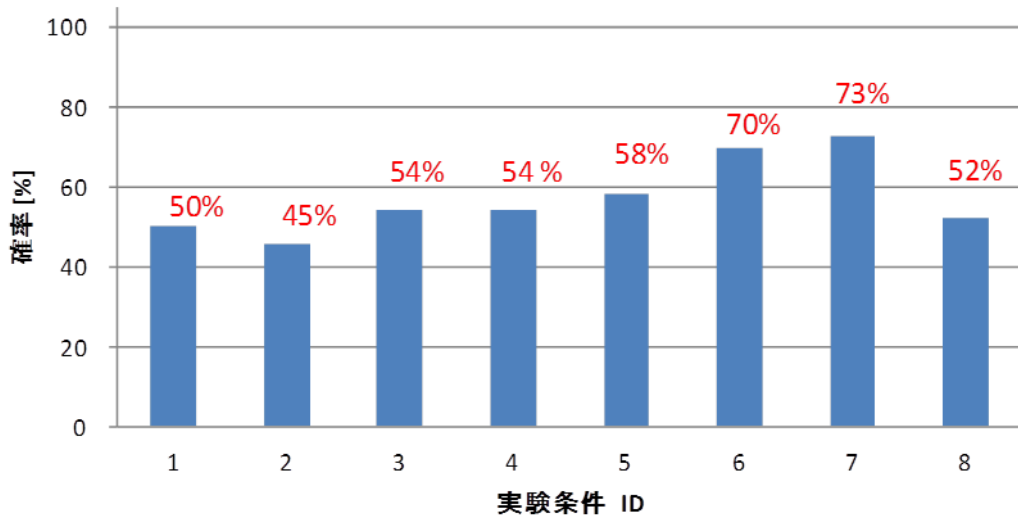


図 2.4.1-4 バス停到着まで正着制御を維持できた確率

表 2.4.1-7 正着維持判定トルクごとのバス停到着まで正着制御を維持できた確率

ID	1	2	3	5	6	4	7	8
判別トルク	1Nm					2Nm		4Nm
確率[%]	50	45	54	58	70	54	73	52
	56					63		52

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm])

ID1:(2,1)、ID2:(2,1)、ID3:(4,1)、ID4:(4,2)、ID5:(4,1)、ID6:(6,1)、ID7:(6,2)、ID8:(6,4)

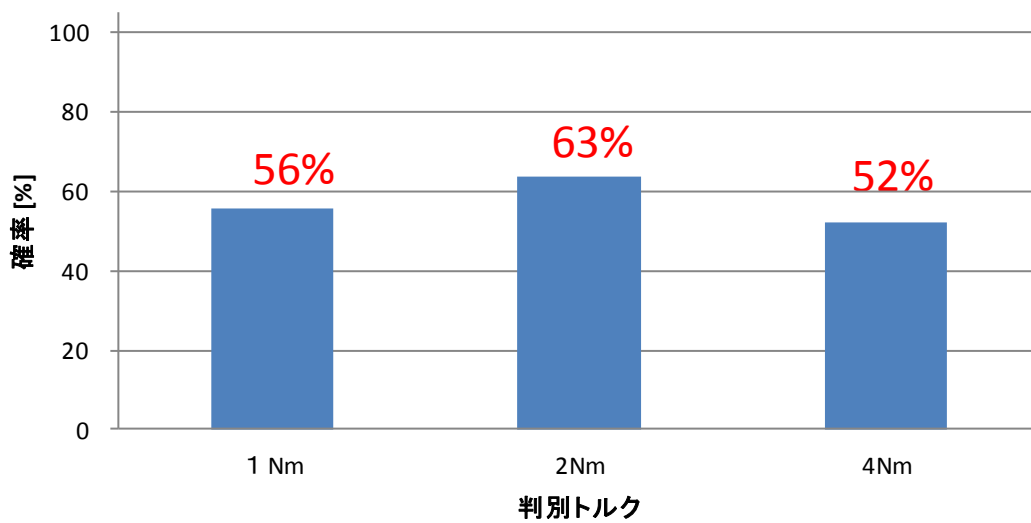


図 2.4.1-5 判定トルクごとのバス停到着まで正着制御を維持できた確率

正着制御を維持できない原因を調査するため、各被験者のデータの解析を行った。図 2.4.1-6 に停車まで正着制御を維持できた場合の一例を示す。正着制御開始可能（モードフラグ=1）となった後、左方向に操舵トルクが与えられ、正着制御が開始（モードフラグ=2）され、幅寄せのための操舵が入る際、一時的に左方向の操舵トルクが小さくなるものの、停車まで安定して制御が維持できている。一方、制御が維持できていない場合を検証すると大きく 3 種類に分類できることが分かった。

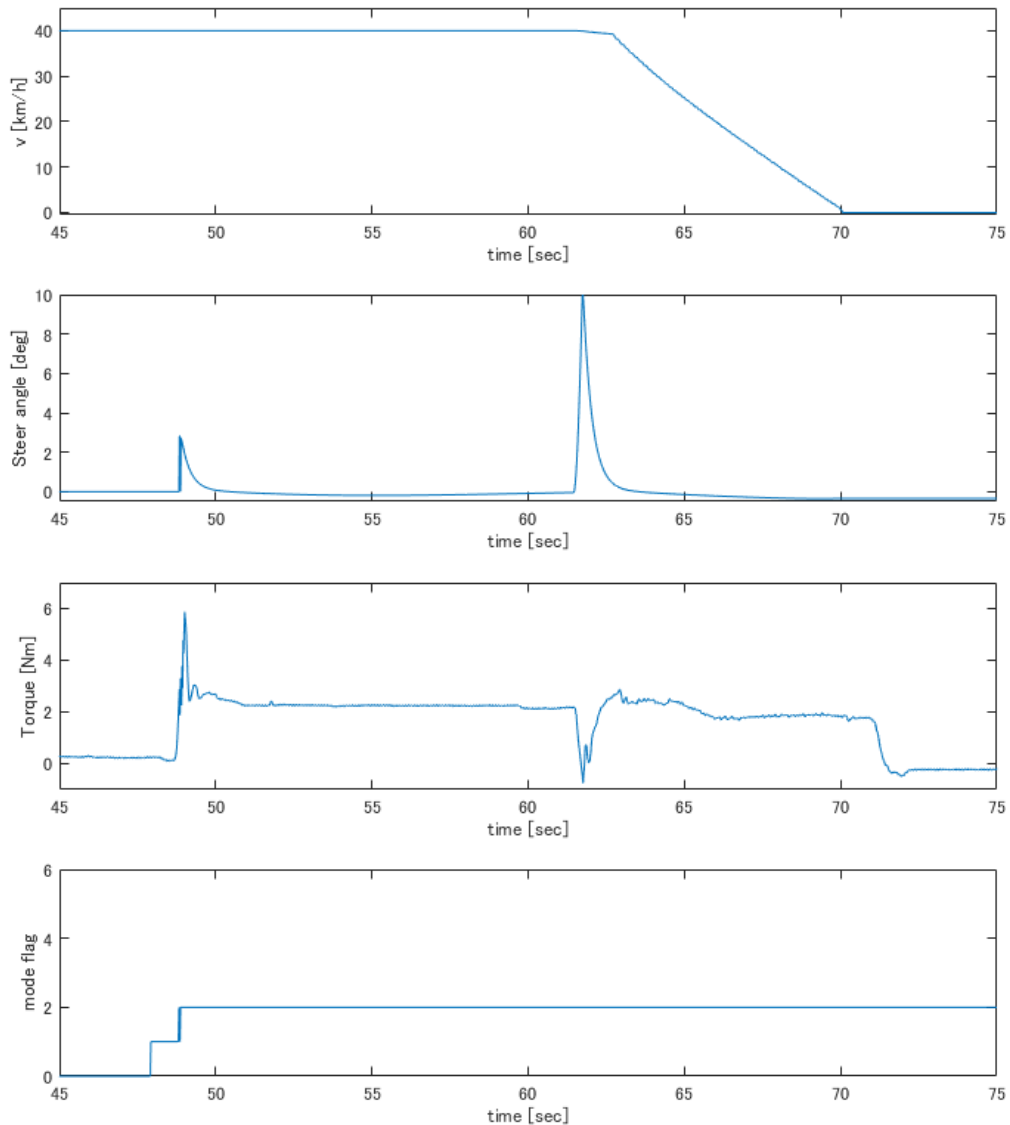


図 2.4.1-6 停車まで正着制御を維持できた場合の例（被験者 C : ID=1）

正着制御が維持できていない場合の 1 ケース目を図 2.4.1-7 に示す。正着制御開始後、幅寄せが始まる前の定常走行時に、左方向への操舵トルクが小さくなる、または思わず逆方向へ操舵トルクを与えてしまうケースである。走行中に運転者の左方向への操舵トルクの意識が下がったときに生じるものと考えられる。

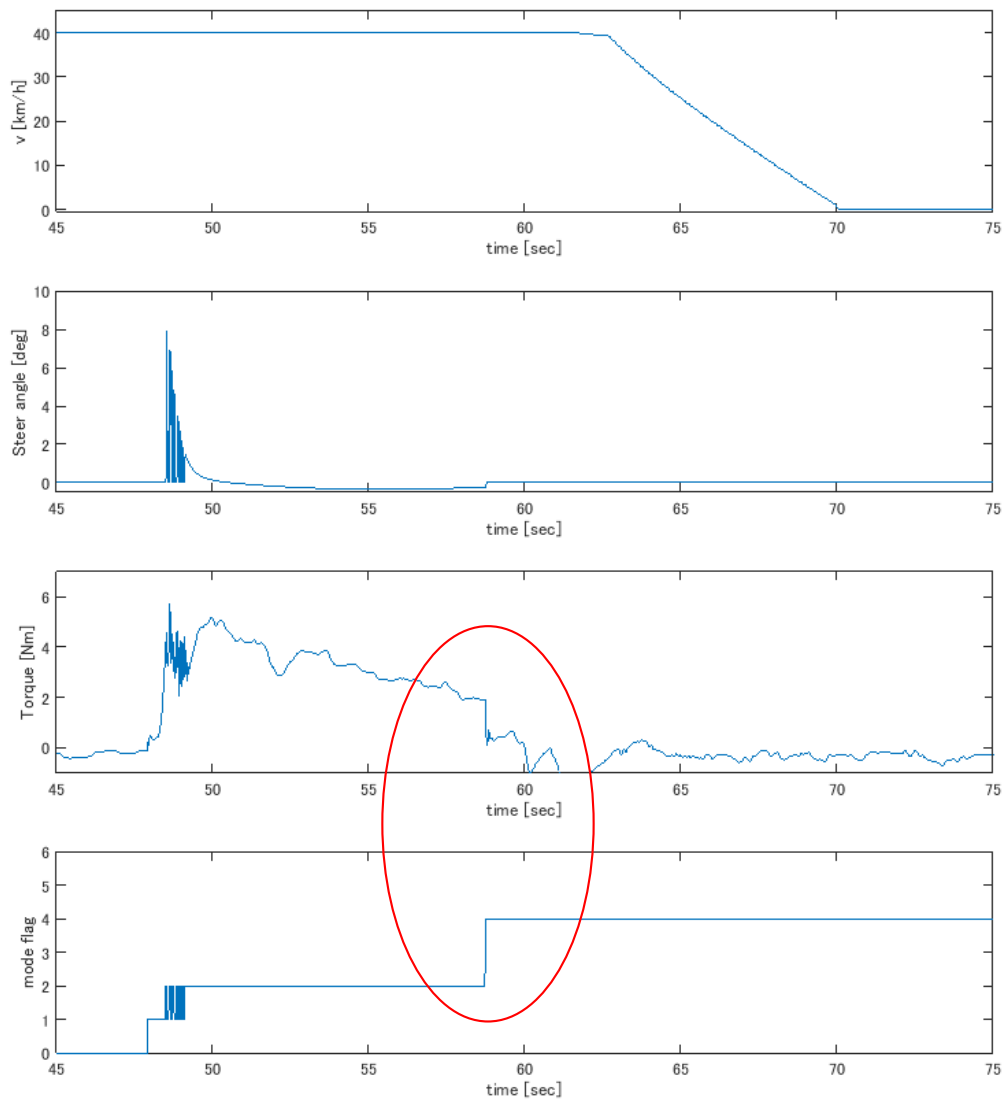


図 2.4.1-7 定常区間で制御が解除される例（被験者 G : ID=4）

正着制御が維持できていない場合の2ケース目を図 2.4.1-8 に示す。停車直前で正着が完了したと運転者が思い、気が緩んだため、操舵トルクが小さくなることにより正着制御が解除されるケースである。全体の傾向として、速度が 6~7km/h 以下になると図 2.4.1-8 の 68sec 付近のように操舵トルクが小さくなり、正着制御が解除されてしまうことが多い。走行後実施したアンケートから、解除されたことに気付いていないケースもあった。

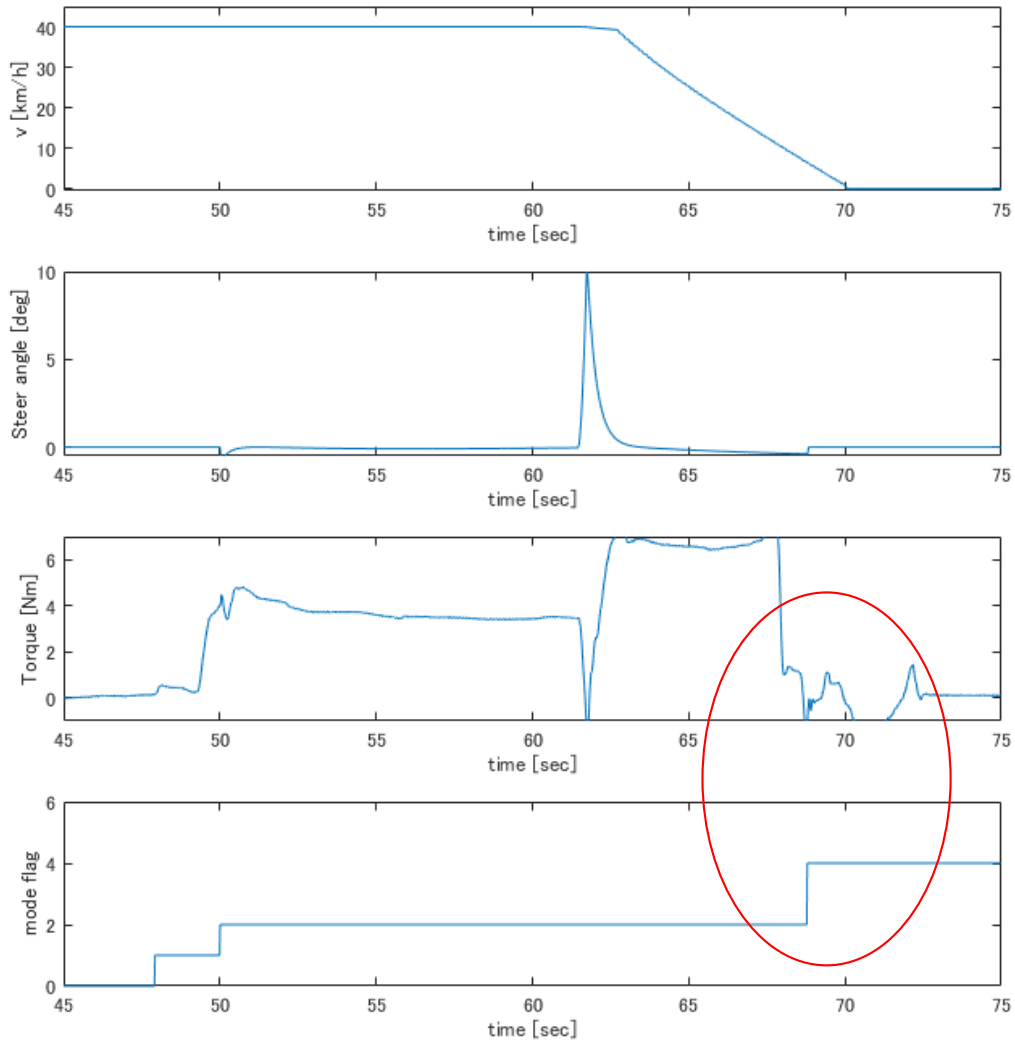


図 2.4.1-8 停車直前で制御が解除される例（被験者 B : ID=4）

正着制御が維持できていない場合の3ケース目を図 2.4.1-9 に示す。システムによる幅寄せのための操舵が始まるまでは、安定して左方向へ正着制御維持のための操舵トルクが入力されている。しかし、幅寄せのための操舵(左方向への転舵)が行われ操舵トルクが減少した後、システムにより右方向に転舵される際、運転者はその動きに気を取られ左方向への操舵入力が足りず、正着制御が解除されてしまうケースである。また、システムによる右方向への転舵に合わせて右方向に操舵トルクを与える運転者もいた。

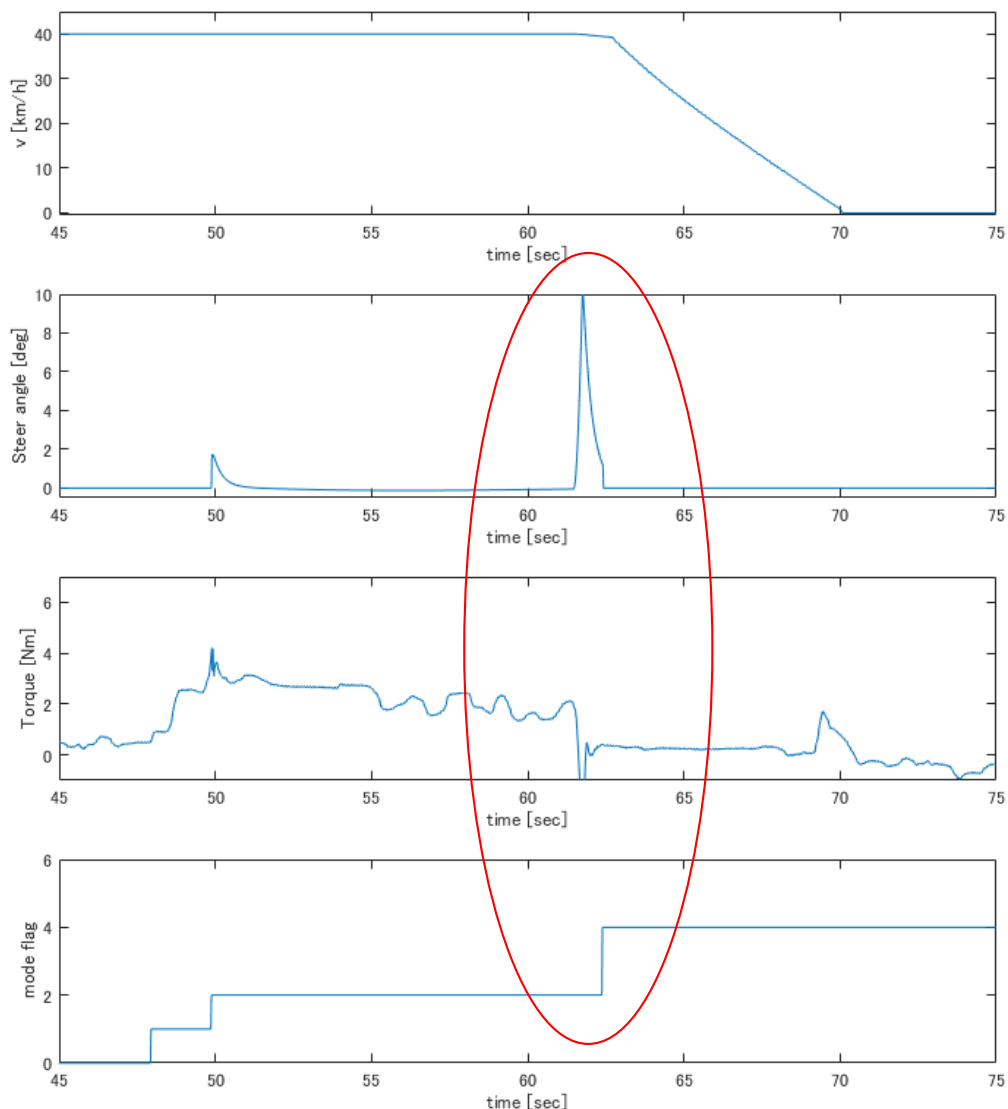


図 2.4.1-9 幅寄せの操舵時に制御が解除される例 (被験者 B : ID=3)

本 DS 試験では、正着開始判定されると、被験者にかかわらず同一のタイミングで幅寄せ(操舵)、減速が行われ、バス停に停車する。正着制御の開始に成功したデータに対し、以下のように定常的な区間と過渡的な区間を設定し、モードフラグの解析を行った。図

2.4.1-10 にバス停 A に対する各区間の概要図を示す。バス停 B に対しても同様の評価を行った。

- ・ 定常区間：正着開始（モードフラグ：2）から 61.5sec までの区間
- ・ 操舵区間：61.5sec から 65sec までの区間
- ・ 停車区間：68sec～70sec までの区間（0～10km/h の極低速区間）

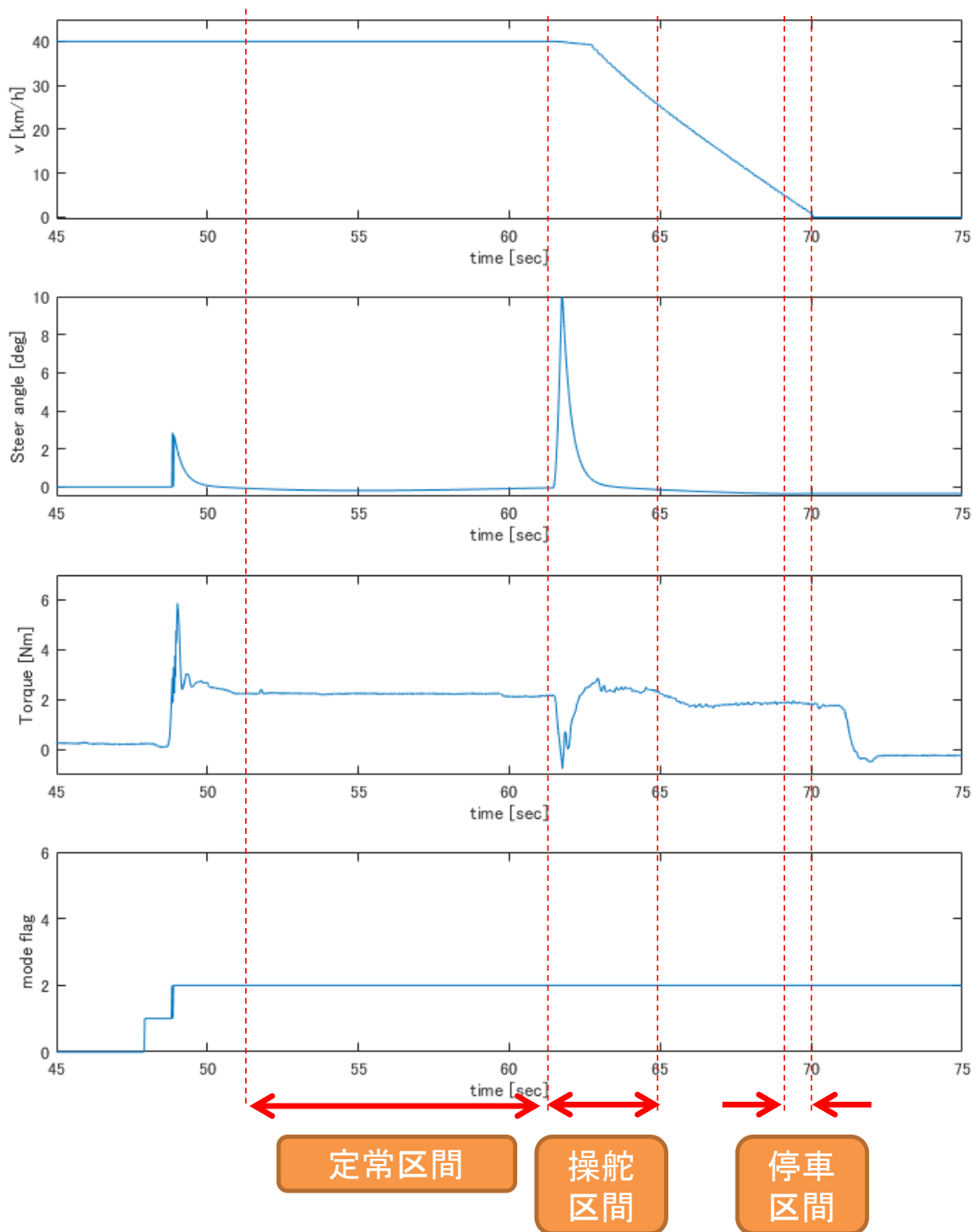


図 2.4.1-10 正着に関する区間の定義

・ 定常区間

定常区間における正着制御中のモードフラグの遷移を表 2.4.1-8 から表 2.4.1-10 に示し、定常区間におけるバス停到着まで正着制御を維持できた確率を表 2.4.1-11 および図 2.4.1-11 に示す。表中の「1」は、各モードフラグが立ったことを示し、2は正着制御開始、4は正着制御解除、5はオーバーライド判定されたことを示す。ピンクの色付きの空欄は正着制御を開始できなかったことを示し、グレーの色付きの空欄は機器トラブルや時間の制約から実施を見送った試行を示す。

表 2.4.1-8 定常区間における正着制御中のモードフラグの遷移 (ID: 1~3)

ID	1						2						3					
	Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B		
	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5
A	1			1	1					1	1		1	1		1	1	
B	1			1	1					1	1		1			1		
C	1			1						1			1			1		
D	1			1						1			1			1		
E	1			1	1					1	1		1			1	1	
F	1			1						1			1			1		
G	1	1		1						1			1			1	1	
H	1			1						1			1			1		
I	1			1						1			1			1		
J	1	1		1	1								1			1	1	
K	1			1						1			1			1		
L	1			1						1			1			1		
%	100	17	0	100	33	0				100	27	0	100	8.3	0	100	33	0

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm]) ID1:(2,1)、ID2:(2,1)、ID3:(4,1)

表 2.4.1-9 定常区間における正着制御中のモードフラグの遷移 (ID: 4~6)

ID	4						5						6					
	Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B		
	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5
A	1			1	1		1	1					1					
B	1			1			1						1	1		1	1	
C	1			1			1						1			1		
D	1			1	1		1						1			1		
E	1			1	1		1						1	1		1		
F	1			1			1						1			1		
G	1	1		1			1	1					1			1		
H	1	1		1	1		1	1					1	1				
I	1			1			1						1			1		
J	1			1			1						1	1		1		
K	1			1			1						1			1		
L	1			1			1						1			1		
%	100	17	0	100	33	0	100	25	0				100	33	0	91	10	0

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm]) ID4:(4,2)、ID5:(4,1)、ID6:(6,1)

表 2.4.1-10 定常区間におけるモードフラグの遷移 (ID: 7~8)

ID	7						8					
	Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B		
	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5
A	1						1					
B	1			1			1			1		
C	1			1			1	1		1	1	
D	1			1	1		1	1		1	1	
E	1			1	1		1	1		1	1	
F	1			1			1			1		
G	1			1			1			1	1	
H							1	1		1	1	
I	1			1			1			1		
J	1			1			1	1		1	1	
K	1			1			1			1		
L	1			1			1			1		
%	92	0	0	91	20	0	100	42	0	100	55	0

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm]) ID7:(6,2)、ID8:(6,4)

表 2.4.1-11 定常区間における正着制御を維持できた確率

ID	1	2	3	4	5	6	7	8
確率[%]	75	73	79	75	75	78	91	52

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm])

ID1:(2,1)、ID2:(2,1)、ID3:(4,1)、ID4:(4,2)、ID5:(4,1)、ID6:(6,1)、ID7:(6,2)、ID8:(6,4)

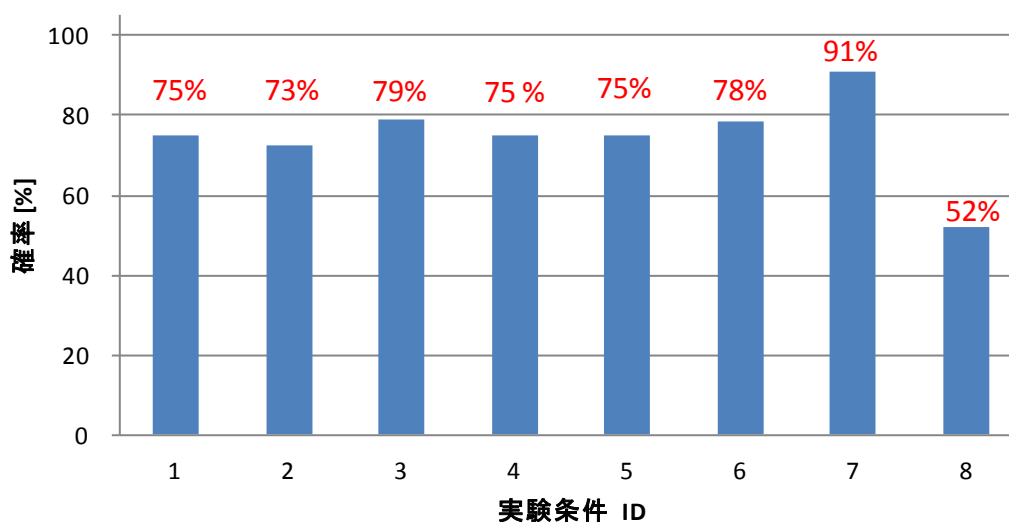


図 2.4.1-11 定常区間における正着制御を維持できた確率

定常区間のみを対象とした場合、ID8 を除いて正着を維持する確率が高い。本結果を正着制御維持判定トルクに層別した結果を表 2.4.1-12、図 2.4.1-12 に示す。1Nm、2Nm は 4Nm と比較すると、正着制御を維持できる確率が 20%以上高い。また 2Nm が 1Nm より高確率となった要因は、ID7 の結果による。ID7 は正着制御開始判定トルクが 6Nm と高いため、

その影響で正着制御開始以降も操舵トルクの値が高くなり、正着制御の維持を高確率で実現できた可能性がある。この結果より、正着開始判定トルクと正着維持判定トルクの関係が、正着を維持する確率に寄与する可能性が示唆された。

表 2.4.1-12 定常区間における正着制御維持判定トルクごとの確率

ID	1	2	3	5	6	4	7	8
判別トルク	1Nm					2Nm		4Nm
確率[%]	75	73	79	75	78	75	91	52
	76					83		52

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm])

ID1:(2,1)、ID2:(2,1)、ID3:(4,1)、ID4:(4,2)、ID5:(4,1)、ID6:(6,1)、ID7:(6,2)、ID8:(6,4)

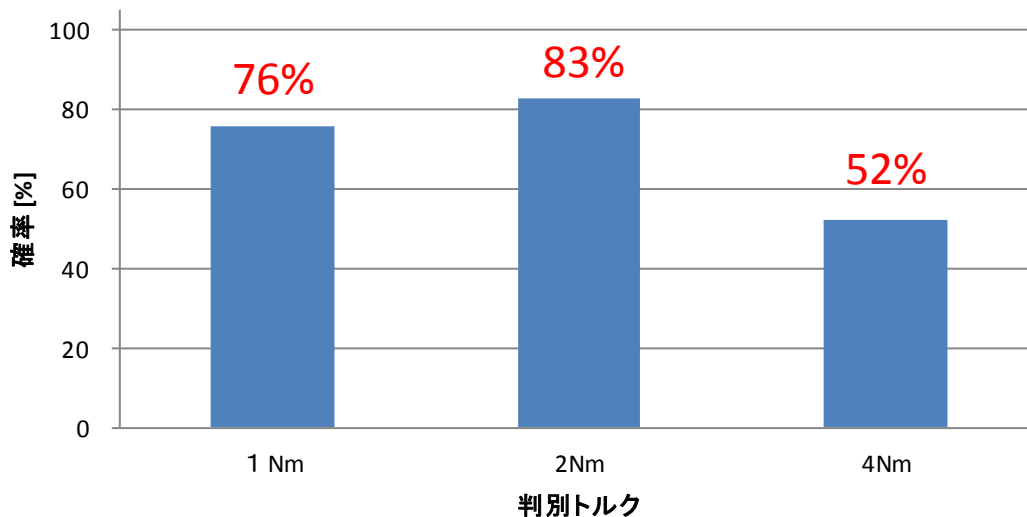


図 2.4.1-12 定常区間における正着制御維持判定トルクごとの確率

・操舵区間、停車区間

操舵区間と停車区間ごとのモードフラグの遷移を表 2.4.1-13、表 2.4.1-14 に示す。表中の「1」は各モードフラグが立ったことを示し、2は正着制御開始、4は正着制御解除、5はオーバーライド判定されたことを示す。ピンクの色付きの空欄は正着制御を開始できなかったことを示し、グレーの色付きの空欄は機器トラブルや時間の制約から実施を見送った試行を示す。また、表中の白色が定常区間でフラグが立っていること、青色が操舵区間でフラグが立っていること、緑色が停車区間でフラグが立っていることを示す。

表 2.4.1-13 操舵・停車区間におけるモードフラグの遷移 (ID : 1~4)

ID	1						2						3						4					
	Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B		
	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5
A	1	1		1	1					1	1		1	1		1	1		1	1		1	1	
B	1			1	1					1	1		1	1		1	1		1	1		1	1	
C	1			1						1			1			1			1			1		
D	1			1	1					1	1		1	1		1	1		1	1		1	1	
E	1	1		1	1					1	1		1	1		1	1		1	1		1	1	
F	1			1						1	1		1	1		1	1		1	1		1	1	
G	1	1		1	1					1	1		1	1		1	1		1	1		1	1	
H	1	1		1						1			1			1			1	1		1	1	
I	1			1						1			1			1			1			1		
J	1	1		1	1								1			1	1		1			1	1	
K	1			1						1			1			1			1			1		
L	1			1	1					1			1			1			1			1		
定常区間	/	2	0	/	4	0				/	3		/	1	0	/	4	0	/	3	0	/	4	0
停車区間	/	1	0	/	1	0				/	3	0	/	2	0	/	1	0	/	1	0	/	1	0
操舵区間	/	2	0	/	2	0				/	0	0	/	3	0	/	0	0	/	2	0	/	0	0
Sum	12	5	0	12	7	0				11	6	0	12	6	0	12	5	0	12	6	0	12	5	0

※白：定常区間でフラグ、青：操舵区間でフラグ、緑：停車区間でフラグ

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm])

ID1:(2,1)、ID2:(2,1)、ID3:(4,1)、ID4:(4,2)

表 2.4.1-14 停車・操舵区間におけるモードフラグの遷移 (ID : 5~8)

ID	5						6						7						8					
	Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B			Bus Stop A			Bus Stop B		
	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5
A	1	1					1	1					1	1					1	1				
B	1	1					1	1					1	1					1	1				
C	1						1						1						1	1			1	
D	1						1	1					1						1	1			1	
E	1	1					1	1					1	1					1	1			1	
F	1						1						1						1				1	
G	1	1					1						1						1				1	
H	1	1					1	1					1	1					1	1			1	
I	1						1						1						1				1	
J	1						1	1					1	1					1	1			1	
K	1						1						1						1				1	
L	1						1						1						1				1	
定常区間	/	3	0				/	4	0	/	1	0	/	0	0	/	2	0	/	5	0	/	6	0
停車区間	/	1	0				/	0	0	/	0	0	/	1	0	/	1	0	/	0	0	/	0	0
操舵区間	/	1	0				/	2	0	/	0	0	/	2	0	/	0	0	/	0	1	/	0	0
Sum	12	5	0				12	6	0	10	1	0	11	3	0	10	3	0	12	5	1	11	6	0

※白：定常区間でフラグ、青：操舵区間でフラグ、緑：停車区間でフラグ

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm])

ID5:(4,1)、ID6:(6,1)、ID7:(6,2)、ID8:(6,4)

表 2.4.1-15 に正着制御解除になった全 69 点に対し、定常区間・操舵区間・停車区間で発生した割合を示す。また正着制御維持判定トルクごとに分類し、各区間での正着解除発生割合を示す。定常区間での発生割合が全体では 6 割程度と高く 4N・m では全て定常区間であった。1、2N・m では、操舵区間、停車区間でどちらも 2 割程度発生した。操舵区間や停車区間のような過渡的な応答に対しては、定常区間と異なる対応を取る必要があると考える。

表 2.4.1-15 正着制御維持判定トルクごとに分類した正着制御解除の割合

正着制御維持 判定トルク	全 69 点	1N・m 41 点	2N・m 17 点	4N・m 11 点
定常区間	61%	54%	53%	100%
操舵区間	20%	24%	24%	0%
停車区間	19%	22%	24%	0%

本試験では、正着制御の維持中の一時的な手放しやサブタスク時のトルク変化に対する検証として、定常区間でのウィンカー操作に関するタスクを設定した。正着制御開始後の定常走行区間で、音声アナウンスに従ってドライバは左ウィンカーを出す。定常区間のウィンカー操作に関するモードフラグの遷移を表 2.4.1-16 に示す。表中の「1」は、各モードフラグが立ったことを示し、2 は正着制御開始、4 は正着制御解除、5 はオーバーライド判定されたことを示す。ピンクの色付きの空欄は正着制御を開始できなかったことを示し、グレーの色付きの空欄は機器トラブルや時間の制約から実施を見送った試行を示す。ウィンカー操作を伴うと、正着制御開始判定トルクが 6Nm (ID=11) では、正着制御開始の確率が下がっている。また、正着制御開始後の正着制御維持(正着制御維持判定トルク:2Nm)については、正着制御開始判定トルクが 4Nm、6Nm とともに解除の確率が約 30%である。この結果は、図 2.4.1-12 の正着制御維持判定トルク 2Nm の結果(解除 17%)と比較して、解除される確率が約 2 倍と高い結果となった。

表 2.4.1-16 定常区間のウィンカー操作に関するモードフラグの遷移

ID	10						11					
	A			B			A			B		
	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5
A	1						1			1	1	
B	1			1			1			1		
C	1			1			1			1		
D	1	1		1	1		1	1		1	1	
E	1	1		1	1		1	1		1	1	
F	1			1			1			1		
G	1			1			1			1		
H				1	1					1	1	
I	1			1	1		1			1		
J	1	1		1						1		
K	1			1						1	1	
L	1			1			1			1		
%	91.7	27	0	100	36	0	75	22	0	100	42	0

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm]) ID10:(4,2)、ID11:(6,2)

(3) ハンドルオンとハンドルオフからのオーバーライドに関する評価

オーバーライド時の評価では、運転者が意図的に正着制御を解除しようとしている場合を想定し、運転者が正着する方向とは逆方向に転舵することで制御を解除できたかを評価した。

オーバーライドにおけるモードフラグの遷移を表 2.4.1-17 に示す。ハンドルオンの ID2 と ID5 では、オーバーライドフラグ（モードフラグ：5）が被験者 D 以外は立っていない。被験者 D の ID2 のグラフを図 2.4.1-13 に示す。図中の赤線は子供の飛び出しイベントの開始タイミングを示し、「X pos」は自車両の横方向の位置（左方向が正）を示している。図 2.4.1-13 より、運転者が子供を認知した後、右方向に転舵して回避を試みていることが分かる。また、オーバーライド条件での全被験者の走行データを確認したところ他の被験者も回避行動を行っていることが分かった。モードフラグは「オーバーライド：5」ではないが、「正着制御解除：4」と判定され手動に切り替わっていることが分かった。代表例として、被験者 E のオーバーライド時の運転データを図 2.4.1-14 に示す。図中の赤丸が示すように、運転者は飛び出しの子供を認知して右方向に転舵を行っている。しかし、システムの判定条件を満たさなかったため、オーバーライド判定とはならず、正着維持判定で正着制御が解除されることになった。表 2.4.1-17 のモードフラグ「4」は、回避行動のため転舵が起因していることが分かった。このように、本評価のために設定したオーバーライド判定しきい値、ロジックについては改良の余地があることが分かった。

上記の解析結果を踏まえると、表 2.4.1-17 よりハンドルオンの時は、1 試行（被験者 I の ID5）を除いてすべての試行で転舵の反応を示している（定常区間でモードフラグが「4」となっている場合も含む）。一方、ハンドルオフの場合（ID12）は、回避の反応ができず、何もしないまま飛び出した子供に衝突しているケースが見られた。

表 2.4.1-17 オーバーライドの結果

ID	2						5						12					
	A			B			A			B			A			B		
	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5
A	1	1											1					
B	1	1								1	1		1		1			
C	1	1								1	1		1					
D	1		1							1	1		1					
E	1	1								1	1		1					
F	1	1								1	1		1					
G	1	1								1	1		1					
H	1	1								1	1		1		1			
I	1	1								1			1					
J	1	1								1	1		1					
K	1	1								1	1		1		1			
L	1	1								1	1		1					
%	100	92	8.3							100	91	0	100	0	25			

※(正着開始判定トルク [Nm], 正着維持判定トルク [Nm]) ID2:(2,1)、ID5:(4,2)、ID12(2,0)
 ID2 : ハンドルオン、ID5 : ハンドルオン、ID12 : ハンドルオフ

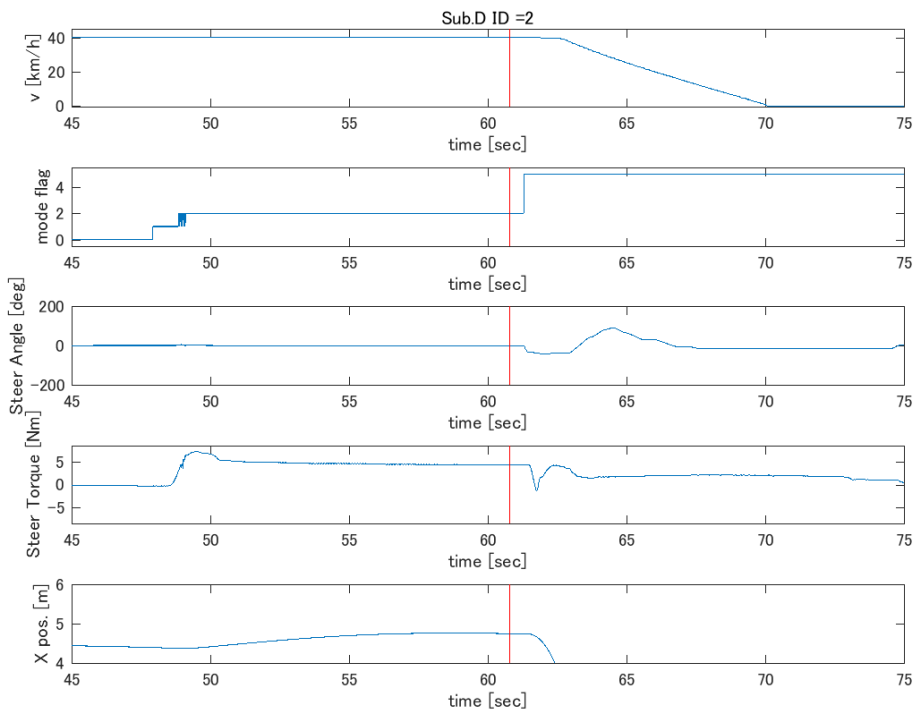


図 2.4.1-13 オーバーライド時の運転データ (被験者 D : ID=2)

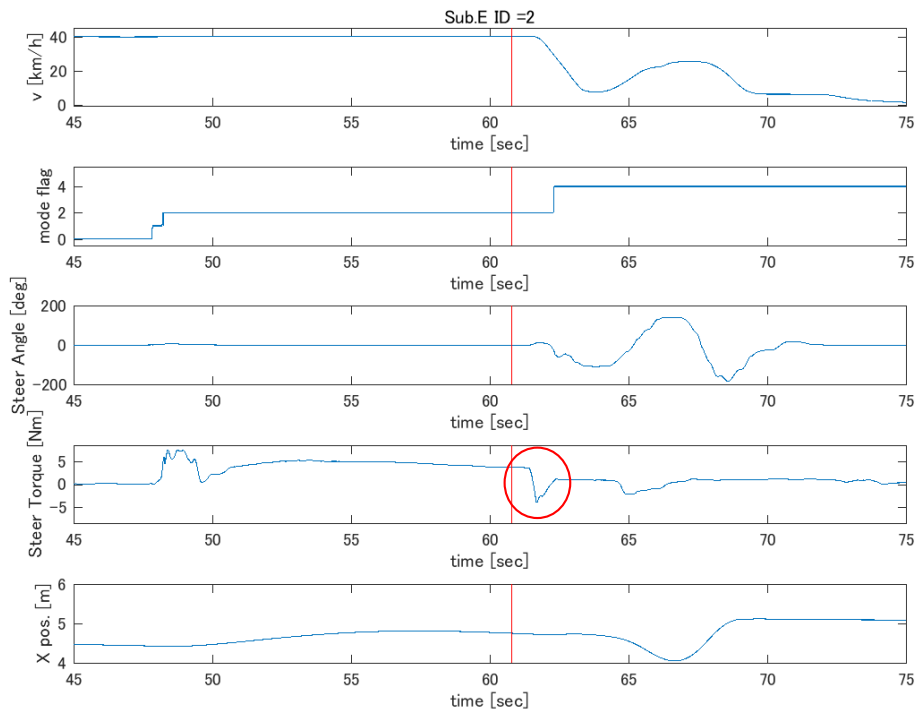


図 2.4.1-14 オーバーライド時の運転データ（被験者 E: ID=2）

2.4.2 主観評価結果

DS 試験にて実施した全条件における主観評価(アンケート)結果を表 2.4.2-1 から表 2.4.2-3 に示す。グレーの色付きの空欄は機器トラブルや時間の制約から実施を見送った試行である。また参考までに、評価条件（表 2.3.4-2）を再掲する。

表 2.3.4-2 試験条件（再掲）

ID	制御開始トルク(Nm)	制御保持判定トルク(Nm)	運転タスク	オーバーライド (空欄は無し)	備考
1	2	1	ハンドルオン		
2	2	1	ハンドルオン	有り	バス停Aでイベント発生
3	4	1	ハンドルオン		
4	4	2	ハンドルオン		
5	4	1	ハンドルオン	有り	バス停Bでイベント発生
6	6	1	ハンドルオン		
7	6	2	ハンドルオン		
8	6	4	ハンドルオン		制御が入らない場合は 開始トルクを4Nmで再度
9	2	0	ハンドルオフ		
10	4	2	ウinker		ウinker操作は音声で指示
11	6	2	ウinker		ウinker操作は音声で指示
12	2	0	ハンドルオフ	有り	バス停Aでイベント発生

表 2.4.2-1 質問 1 (リラックス度) の集計結果

ID	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1
A	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	4	5	5	5	4	4	4	4	4	4	1	4	
B	5	5	3	3	4	4	4	4	4	3	4	4	4	5	5	5	4	4	5	5	5	5	3	4
C	4	4	2	5	5	5	5	5	5	2	5	5	5	5	5	4	4	5	5	5	5	1	4	
D	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2
E	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4	4	4	4
F	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	2	4
G	4	4	5	5	4	3	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4
H	3	4	1	3	4	4	1	1	3	1	3	3	3	4	1	1	3	3	3	3	4	4	1	3
I	4	5	2	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	5	3	4	4	5	5	5	3	2	4
J	4	4	1	5	5	5	5	5	5	1	4	5	5	5	4	4	5	5	4	4	3	5	1	1
K	1	3	3	2	1	2	2	2	1	1	1	3	2	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	1
L	4	4	4	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	2	3	
Ave.	3.6	3.9	2.9	3.5	3.9	3.9	3.8	3.8	3.8	2.6	3.7	4.0	3.8	4.0	3.9	3.6	3.8	4.0	4.1	4.0	4.1	4.1	2.0	3.2

表 2.4.2-2 質問 2 (切り替えやすさ) の集計結果

ID	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2
A	1	1	2	1	3	3	3	3	3	4	3	3	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	5	3
B	5	4	2	2	3	4	4	4	4	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
C	5	5	4	5	4	5	5	5	5	2	4	4	5	5	2	2	5	5	5	5	4	5	2	4
D	3	4	3	3	3	4	4	4	3	3	3	3	3	4	2	2	4	4	2	2	3	3	4	3
E	4	4	2	4	4	4	4	2	3	3	2	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
F	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	1	5
G	4	5	5	5	5	5	5	5	5	2	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	1	5
H	3	4	1	3	4	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	1	5	1	1	1	3
I	5	5	3	5	5	5	5	5	5	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	2	5
J	1	1	4	5	4	5	4	5	5	1	5	4	4	1	1	4	5	2	4	1	5	1	5	
K	1	2	4	5	2	5	5	5	5	3	1	5	5	5	5	4	5	5	5	4	4	5	5	3
L	4	4	3	4	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	2	3
Ave.	3.4	3.7	3.2	3.8	4.0	4.3	4.3	4.0	4.0	3.0	3.3	4.1	4.2	4.3	3.7	3.5	4.7	4.8	3.9	4.4	3.7	4.2	2.8	4.0

表 2.4.2-3 質問 3 (運転のしやすさ) の集計結果

ID	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3	Q3
A	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	5	4
B	4	4	3	3	3	3	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
C	5	5	2	5	5	5	5	5	5	3	5	5	5	3	3	5	5	5	5	4	5	2	3	
D	2	3	2	2	3	3	3	3	4	3	3	3	2	3	2	4	4	3	3	3	3	3	4	3
E	4	4	2	4	4	3	4	3	4	4	3	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	4
F	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	2	5
G	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5
H	3	4	1	3	4	4	1	1	3	1	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1
I	5	5	3	5	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
J	5	5	1	5	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5	4	4	5	5	5	4	2	5	1	5
K	3	3	1	3	2	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
L	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	4
Ave.	4.1	4.3	2.8	4	4.2	4.2	4.1	4	4.3	3.5	3.8	4.3	4.3	4.3	3.8	3.8	4.4	4.4	4.3	4.2	3.9	4.3	3.2	3.8

被験者 A は時間の制約上、後半の試行についてはバス停 A のみで実施した。また、被験者 A の ID5 でのオーバーライド条件は実施できていない。

- ・リラックス度について

質問 1(リラックス度)の集計結果より、オーバーライド条件(ID2のA、ID5のB、ID12のA)を除くと、評価は4点付近であり、リラックスできていることを示す結果となった。フリーコメントでは、ハンドルオフでは緊急時の対応が不安というコメントが多く寄せられたが、ID9(ハンドルオフで正着)の結果はハンドルオンと同様の結果であった。ID12のB(オーバーライドのイベント後)は、緊張度が増加し、ハンドルオンの同様のイベント後(ID2のB)より低い評価となった。

- ・切り替えやすさについて

質問 2(切り替えやすさ)の集計結果より、正着制御は多くの場合で解除される結果となっているにも関わらず(前項参照)、アンケートの回答では、高評価となった。この要因は以下が挙げられる。

- ・幅寄せの操舵時や停車直前といった過渡状態での正着制御解除に気付いていない。

アンケート結果より、ハンドルオンでの正着条件では、正着完了全 91 件の平均値は 4.6、定常区間での解除全 42 件の平均値は 2.6、操舵区間での解除全 15 件の平均値は 3.5、停車区間での解除全 13 件の平均値は 4.2 となり、停車区間での解除の結果が高い値となっている。

- ・正着制御を開始できたことで低評価をつけるのをためらう。

実際に各試行後のフリーアンケート時の確認で正着制御が解除され、手動に切り替わっていることに気付いていない被験者もいた。また、正着制御開始可能エリアを通過した際の力覚の変化(角度制御への切替りによる変化)で制御が入ったと勘違いする被験者もいた。被験者のシステム理解は今後の重要な課題と考える。

- ・運転しやすさについて

質問 3(運転しやすさ)の集計結果より、オーバーライド条件(ID2のA、ID5のB、ID12のA)を除くと、評価は4点以上と高く、被験者が運転を容易と感じていることを示す結果となった。

以下では、上記アンケート結果を層別して傾向の詳細を確認する。

(1) 正着制御開始判定トルク、正着制御維持判定トルクによる分類

すべてのハンドルオンでの正着条件(オーバーライド、ウィンカー、ハンドルオフ条件を除く)に対し、正着制御開始判定トルクにより層別した結果について、図 2.4.2-1 に各質問における全被験者の回答の平均値を示す。また、正着制御維持判定トルクにより層別した結果について、図 2.4.2-2 に各質問における全被験者の回答の平均値を示す。

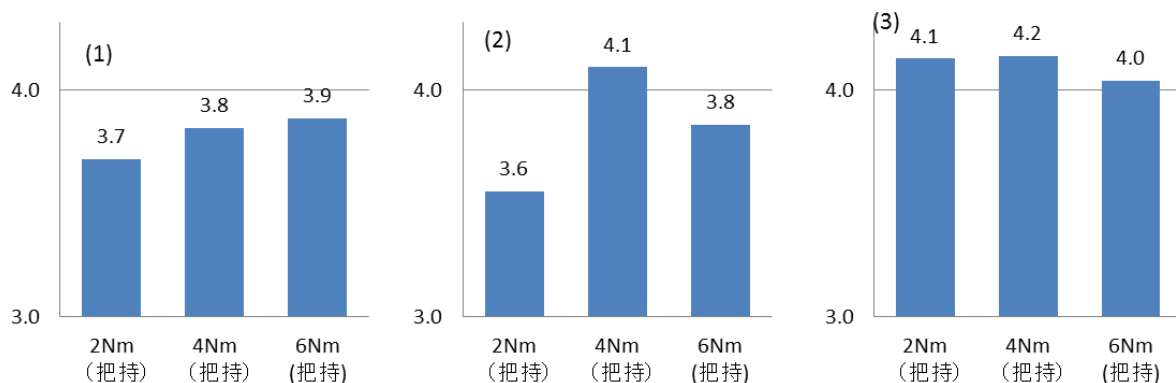


図 2.4.2-1 アンケート結果(正着制御開始トルクによる層別)

(1) : 質問 1(リラクセス度)、(2) : 質問 2(切り替えやすさ)、(3) : 質問 3(運転のしやすさ)

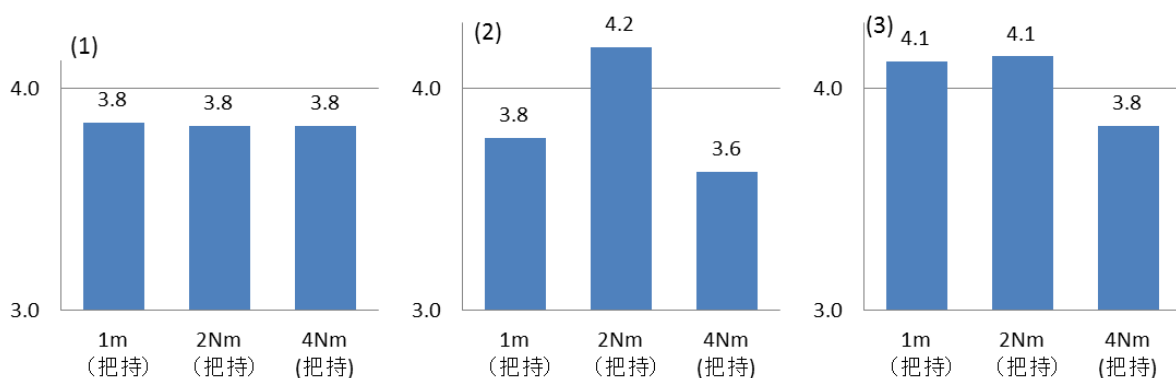


図 2.4.2-2 アンケート結果(正着制御維持トルクによる層別)

(1) : 質問 1(リラクセス度)、(2) : 質問 2(切り替えやすさ)、(3) : 質問 3(運転のしやすさ)

この結果について、以下に考察する。

正着制御開始判定トルクの値にかかわらず、高確率で開始できている (図 2.4.1-3) ことから、本アンケート結果が正着制御開始判定のみを評価した結果と考えるのは難しい。正着制御維持判定トルクに着目する。正着制御維持判定トルクごとの正着維持確率(図 2.4.1.5)より正着制御維持判定トルク 1N・m で 56%、2N・m で 63%、4N・m で 52%であるが、この傾向は切り替えやすさ (図 2.4-2-2(2)) の傾向と一致することが分かる。実際の制御モードの切替りとアンケートに相関があることが確認できた。

(2) 一時的な手放しの影響(ウィンカーの影響)

ウィンカーを出すことにより実現した一時的な手放しの影響を確認するため、常時ハンドルオンの条件と比較した。図 2.4.2-3 に正着開始判定トルク 4Nm、正着維持判定トルク 2Nm 条件での比較(ID4 と ID10)、図 2.4.2-4 に正着開始判定トルク 6Nm、正着維持判定トルク 2Nm 条件での比較(ID7 と ID11)を示す。

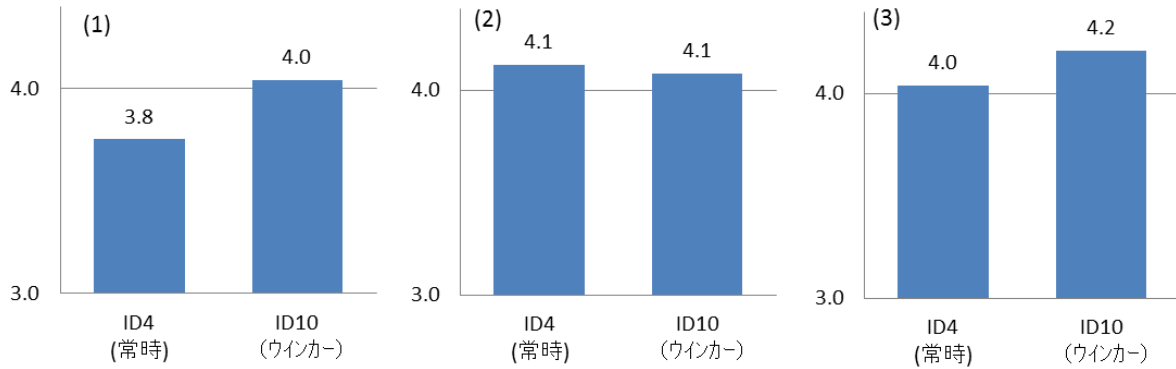


図 2.4.2-3 一時的な手放し(ウィンカー)の影響 ID4 Vs ID10

(1) : 質問 1(リラクセス度)、(2) : 質問 2(切り替えやすさ)、(3) : 質問 3(運転のしやすさ)

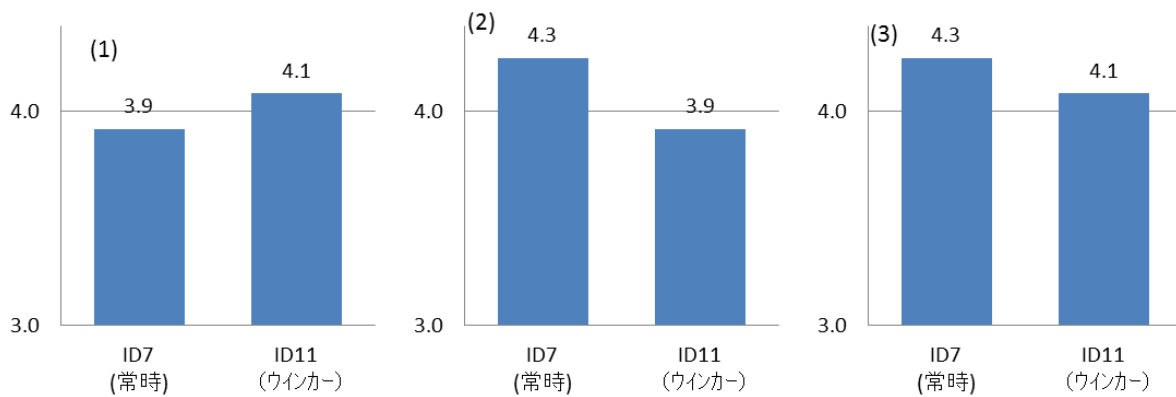


図 2.4.2-4 一時的な手放し(ウィンカー)の影響 ID7 Vs ID11

(1) : 質問 1(リラクセス度)、(2) : 質問 2(切り替えやすさ)、(3) : 質問 3(運転のしやすさ)

図 2.4.2-3、図 2.4.2-4 より、各質問におけるウィンカー操作を伴う場合の結果とハンドルオンの結果に明確な差はなく、リラクセスして運転できていることを確認できた。ただし、正着制御開始判定 6Nm では、正着開始できなかった被験者の割合が増え(表 2.4.1-16)、切り替えやすさの値が低くなった。

(3) オーバーライドの影響

図 2.4.2-5 では、ハンドルオンからのオーバーライド条件と、その条件と同じ正着開始判定トルク、正着維持判定トルク条件でのハンドルオンでの正着の結果を比較する。具体的には、オーバーライド条件は ID2 のバス停 A、ID5 のバス停 B の結果の平均値、比較条件は、ID1 のバス停 A、B、ID2 のバス停 A、ID3 のバス停 A,B の結果の平均値である。

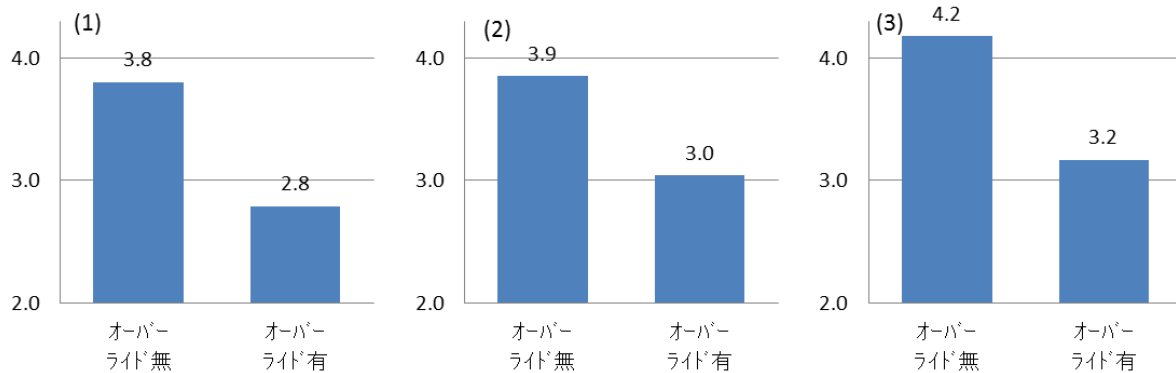


図 2.4.2-5 オーバーライド有無の比較

(1)：質問 1(リラックス度)、(2)：質問 2(切り替えやすさ)、(3)：質問 3(運転のしやすさ)

図 2.4.2-5 より、各質問においてオーバーライド条件の結果が低く、運転者にとってオーバーライドの負荷が大きいことを確認できる。一方、前項で述べた通り、被験者の回避のための操舵トルク入力がシステムのオーバーライド判定条件に合致せず、正着制御を解除できなかったことが要因となり、低い評価となっているとも考えられる。

次に、ハンドルオン(ステアリングホイール把持)からのオーバーライドとハンドルオフ(手放し)からのオーバーライドの結果を比較する。具体的には、ID2、ID5、ID12 のオーバーライド条件を比較する。図 2.4.2-6 に各質問における全被験者の回答の平均値を示す。

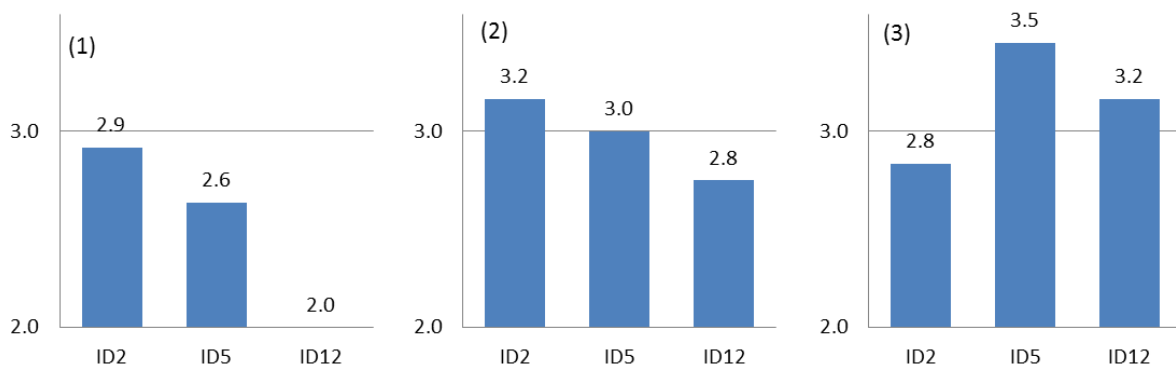


図 2.4.2-6 オーバーライド条件の比較

(1)：質問 1(リラックス度)、(2)：質問 2(切り替えやすさ)、(3)：質問 3(運転のしやすさ)

※ ID2：正着開始判定トルク 2Nm、正着維持判定トルク 1Nm、ハンドルオン

ID5：正着開始判定トルク 4Nm、正着維持判定トルク 2Nm、ハンドルオン

ID12：正着開始判定トルク 2Nm、正着維持判定トルク 0Nm、ハンドルオフ

図 2.4.2-6 より、リラックス、切り替えやすさにおいて、ハンドルオンがオフより評価が高いことが分かる。一方アンケート結果からは、ハンドルオン、オフどちらが好ましいか、各被験者によって嗜好が異なることが分かった。そこで以下の分類を実施する。

被験者ごとに、ハンドルオン条件(ID2,4)のアンケート結果の平均を算出する。その値とハンドルオフ条件(ID12)での結果を比較する。差分が 1 以上ある時、大きい方の条件を被験

者が好むとみなし、差分が 1 未満であれば同等とみなす。被験者 12 名に対し嗜好を分類した結果を表 2.4.2-4 に示す。

表 2.4.2-4 オーバーライドにおける全被験者(12 名)の嗜好

	質問 1 (リラックス)	質問 2 (切り替えやすさ)	質問 3 (運転のしやすさ)
ハンドルオン	5	5	3
ハンドルオフ	0	5	5
同等	7	2	4

表 2.4.2-4 より、オーバーライド条件において、ハンドルオンの方がリラックスする被験者が多いことが分かる。また切り替えやすさ、運転のしやすさは、ハンドルオン、オフに大きな差はなく、被験者の嗜好が分かれた。

また、上記アンケート実施後のフリーコメントでは、システムの長所、短所を指摘するもの、正着軌跡などの走行条件に関するものが挙げられた。今後の取組みの参考にする。コメントの一部を分類し、以下に示す。

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

2.5 評価の考察

DS 試験では、次の内容について評価を実施した。

- ・ 正着制御開始判定に関する評価
- ・ 正着制御維持判定に関する評価
- ・ ハンドルオンとハンドルオフからのオーバーライドに関する評価

正着制御開始判定に関する評価では、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。

正着制御維持判定に関する評価では、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。

操舵区間、停車区間での運転者の意図せぬ解除が発生したことから、状況に合わせた判定が必要なことが判明した。対策としては例えば、速度や偏差の状況を考慮し、バス停到着直前の低速領域では手動に切り替えないなどが考えられる。

正着軌道、車速について、通常バス運転者の走行と異なるという意見があった。運転者に親和性の高いシステムを検討する必要がある。例えば、目標軌道と目標速度を実際の運転者が行う挙動に近づけるなどが考えられる。

ハンドルオンとハンドルオフからのオーバーライドについての評価では、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自体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

前節までは、システムと運転者のシェアードコントロールの実現を目指し検討した方法と DS で検証した内容について報告した。本節では、検討した方法を実車環境で評価した内容について報告する。本内容は今後のシェアードコントロールの課題の抽出を目的として実施した内容である。

2.6.1 実車環境（大型 HV バス）におけるシェアードコントロール評価内容

DS での評価では、シェアードコントロールに関して、正着制御開始判定、正着制御維持判定、オーバーライド判定を評価した。実車環境（大型 HV バス）では、正着制御維持判定、オーバーライド判定を想定した運転者挙動について評価する。

試験車両は第 1 章に記載した大型 HV バスを使用する。走行条件は、ストレート型のバス停への正着を想定した経路を全て自動操舵で走行するものとする。これは第 1 章での正着制御の評価と同条件（25m 走行する間に車両の横方向に 0.61m 移動、加減速は運転者が操作、正着開始時の車速は 40km/h）である。

2.6.2 実車環境（大型 HV バス）における正着制御維持の検証

(i) 正着制御維持評価条件

DS での評価同様、運転者にはバス停への正着制御中、ステアリングホイールの左方向に操舵トルクを与えるよう指示を与える。この入力を運転者の正着制御維持の意図とみなす。DS での評価では操舵トルクのしきい値によって正着制御を解除するが、本評価では正着制御を解除する仕様にはしていない。

本評価は運転者 1 名で実施した。多様な運転者の操舵入力を想定し、運転者には入力する操舵トルクは、軽め、ふつう、重めで入れるよう指示を与えた。試験は計 5 回実施した。

(ii) 正着制御維持の検証結果

図 2.6.2-1 に運転者が正着制御維持の意図を入力した際の正着時の結果の一例を示す。上から順に、(a)操舵トルク、(b)操舵角、(c)正着目標軌跡と車両中心との横方向の目標距離と測定距離である。

横方向目標距離の変化直後（図 2.6.2-1(A)参照）、制御による自動操舵によりステアリングホイールは左方向（CCW 方向）に操舵される（図 2.6.2-1①参照）。運転者が入力する操舵は同じ向きであり（図 2.6.2-2①参照）、操舵トルクが減少する傾向にある。その後、自動操舵によりステアリングホイールは右方向（CW 方向）に操舵される（図 2.6.2-1②参照）。運転者が入力する操舵と自動操舵によるステアリングホイールの操舵の向きが逆となり（図 2.6.2-2②参照）、操舵トルクは増加する傾向にある。この傾向は DS での評価と同じ傾向である。

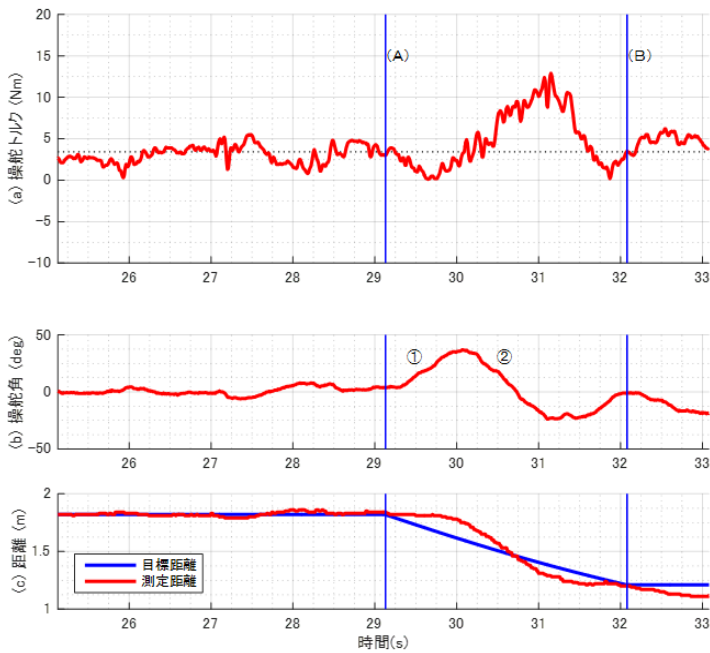


図 2.6.2-1 運転者の正着制御維持入力時の走行結果

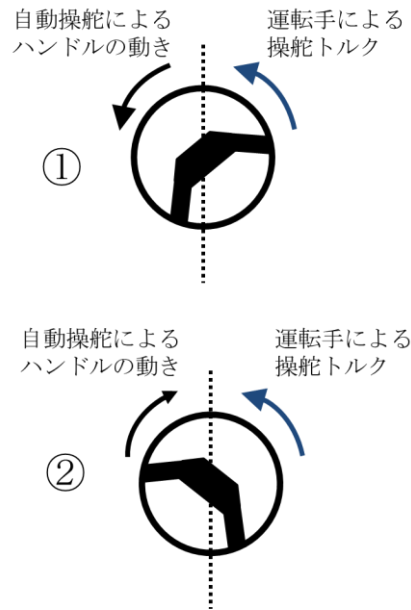


図 2.6.2-2 自動操舵と操舵トルク

(iii) 正着制御維持評価

DSでの評価では、特定の操舵トルク（1, 2, 4[N・m]）をしきい値として0.8秒連続でそのしきい値を下回った際、正着制御維持の意図がないと判定する方法を検証した。

大型HVバスでの本評価では、操舵トルクの値が0.8秒連続で下回る値を導出することにした。

この値を正着制御維持判定上限しきい値と呼ぶ。この値より大きい値を正着制御維持判定のしきい値として設定すると、正着制御維持の意図があるにもかかわらずシステムが正着制御維持の意図がないと判定してしまう。具体的に結果を使用して示す。図2.6.2-3は図2.6.2-1の操舵トルクを抽出したものである。図2.6.2-3の(i)で0.8秒連続して3.5N・mを下回る。この値が正着制御維持判定上限しきい値である。

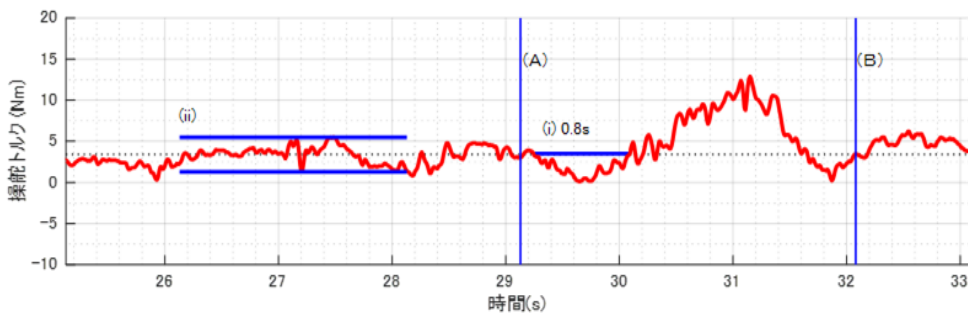


図 2.6.2-3 運転者の正着制御維持入力時の操舵トルク

各試験における運転者の正着制御維持意図としての操舵トルクの大きさの傾向は、直進時の操舵トルク値で把握する。具体的には横方向目標距離が変化する時間より3秒前から1秒前の操舵トルクに着目する。図 2.6.2-3 では(ii)の区間に該当する。図 2.6.2-3 のケースでは、直進時の操舵トルクは平均 3.4N・m、最小 1.3N・m、最大 5.5N・mとなる。表 2.6.2-1 に本評価で実施した全てのケースでの結果を示す。また本評価では、操舵は全て自動制御（角度制御）されており、直進走行時の操舵トルク入力は走行経路に大きく影響を与えることはないと考えられる。

表 2.6.2-1 正着制御中の操舵トルク（正着制御維持判定）

Case	直進時操舵トルク [N・m]			正着制御維持判定 上限しきい値[N・m]
	平均	下限	上限	
1	3.4	1.3	5.5	3.5
2	5.6	3.0	8.5	4.5
3	8.4	3.8	11.6	3.0
4	9.4	2.9	15.5	18.5
5	※	9.6	22.0	17.5

本評価において、操舵トルクは操舵角力計（第1章記載）で計測した。計測器の仕様上、計測範囲は 22.0Nm が上限であるが、Case5 では直進時、上限（22.0Nm）を超えるトルクが入力されたため、平均を算出することができない。よって、表内に※と記載した。

(iv) 正着意図評価考察

表 2.6.2-1 の結果より、以下の3点が分かる。

- ・ 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い。
- ・ Case3 以外では、正着制御維持判定上限しきい値は直進時操舵トルクの下限を上回る。
- ・ Case3 以外の事例を比較すると、直進時の操舵トルクと正着制御維持判定上限しきい値の大小は同じ傾向である。

この3点の結果を踏まえ、実際のシステムへの適用を考える。

正着制御維持判定の操舵トルクしきい値を一定値として決定する場合、入力する操舵トルクが小さい運転者に合わせる必要がある。仮にそのように設定した場合、運転者に正着制御維持の意図がない状況にもかかわらず正着制御維持の意図があるとシステムが判定する懸念がある。

具体的には、正着が可能な環境ではあるが正着を行わずそのまま通過するようなシチュエーションが該当する。

この懸念に対し、本評価の結果を踏まえた対策について、以下に提案する。

直進時の正着制御維持の意図として入力する操舵トルク値から運転者の傾向をシステム

が学習し、その傾向を基に正着制御維持判定上限しきい値を随時変更する。例えば、運転開始直後はデフォルトのしきい値にしておき、走行中、正着制御維持判定上限しきい値を変更する仕様などが考えられる。

Case3 について、他のケースと異なる傾向が見られるため、その要因について考察する。表 2.6.2-1 より、Case3 では、直進時操舵トルクの値に比べ、正着制御維持判定上限しきい値の値が小さい。図 2.6.2-4 に Case3 での走行結果を示す。また、比較のため図 2.6.2-5 に Case1 での結果を示す。Case1 の結果は Case3 以外の結果と同様の傾向があるので選択した。また、図 2.6.2-1 は Case1 の結果である。

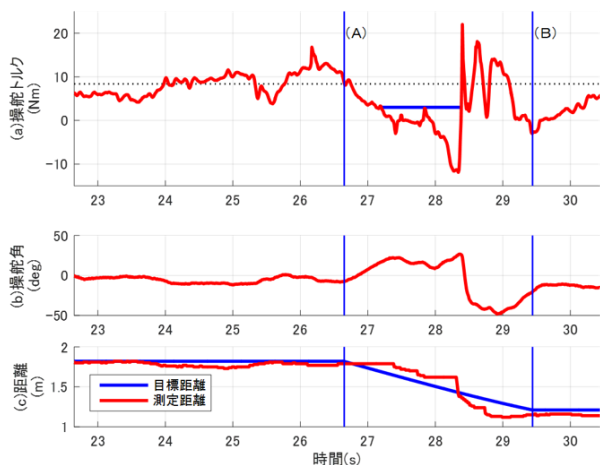


図 2.6.2-4 走行結果(Case3)

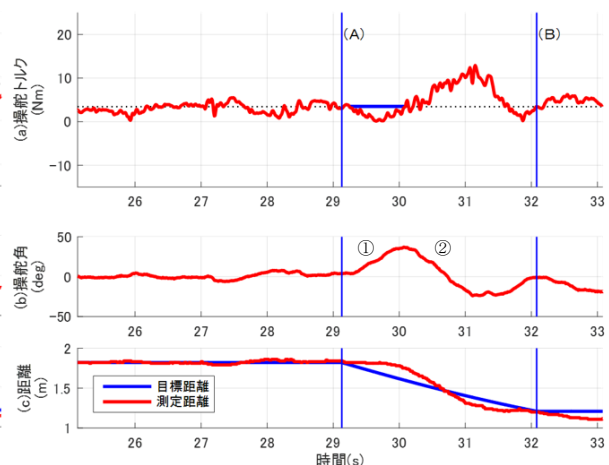


図 2.6.2-5 走行結果(Case1)

2.6.2 項(ii)に記載したが、システムによる自動操舵の向きと操舵トルクの向きが同方向である場合、操舵トルクは減少する傾向にある。Case3 と Case1 の結果を比較する。

Case1 では、操舵角（図 2.6.2-5(b)）は、横方向の目標距離が変化する区間（(A)から(B)）で正弦波的な挙動となり、正着制御維持判定上限しきい値を導出したタイミングは②付近となる。これはシステムによる自動操舵の方向が右方向に変わるタイミングといえる。

一方 Case3 では、操舵角（図 2.6.2-4(b)）は、横方向の目標距離が変化する区間（(A)から(B)）で正弦波的な挙動になっておらず、操舵角が正となる時間、すなわち左方向に操舵されている時間が長いため、操舵トルクがより減少し、結果的に正着制御維持判定上限しきい値は直進時操舵トルクより低い $3.0\text{N}\cdot\text{m}$ となる。

この結果から以下の内容を推測する。

- ・ストレート型のバス停より切込み時間が長いタイプのバス停では、制御による正方向（左方向）の操舵の時間が長くなるため、正着制御維持の意図としての操舵トルクは減少する傾向にある。

対策は、正着制御維持判定しきい値を下げる、またはバス停形状に合わせた判定時間にするなどが考えられる。

次に Case3 の結果の要因を以下に示す。

本システムの制御対象は車両横方向距離と方位角であり、これらを基に操舵角目標値を決定し制御している。図 2.6.2-4(c)より、Case3 の区間(A)から区間(B)で計測距離が更新されていないことが分かる。今回の試験では横方向距離算出に問題があったとしてもその状態で制御を続ける仕様としていた。そのため、操舵角は図 2.6.2-4(c)の結果に基づき制御されており、操舵角は他の事例とは異なる傾向を示していた。

この結果より今後の正着制御システムの構成において、以下の内容に留意する必要がある。

制御に使用する変数の算出過程に問題が生じた場合、正着制御維持判定システムの機能を制限する必要がある。今回の Case3 では、横方向距離算出に問題があったが、それ以外に問題が生じた場合にも同様の制限が必要と考える。また、このような状況を運転者に伝える方法も今後検討する必要がある。

2.6.3 実車環境（大型HVバス）におけるオーバーライド判定の検証

(i) オーバーライド評価条件

DS での評価同様、運転者には初期条件として、正着制御中ステアリングホイールから手放しする、または、ステアリングホイールの左方向に操舵トルクを与えるよう指示を与える。次に、正着制御中、運転席に設置してあるランプが点灯したらステアリングホイールを右方向に操舵するよう指示を与える。試験に際し、運転者にはオーバーライドを検証する試験か前節の正着制御維持の意図を検証する試験かを知らせず実施する。DS での評価とは異なるトリガの与え方であるが、視覚情報をトリガに右方向に操舵するという点では一致するため、本指示でオーバーライドの評価とみなす。また実際には運転者が右方向に操舵トルクを与えてもシステムが解除される仕様にはしていない。

本評価は運転者 1 名で実施した。手放し状態からの試験を 3 回、ステアリングホイール把持からの試験を 2 回、計 5 回実施した。

(ii) オーバーライド評価結果

図 2.6.3-1 にステアリングホイール手放し状態からの結果、図 2.6.3-2 はステアリングホイール把持状態からの結果の一例を示す。上から順に、(a)操舵トルク、(b)操舵角、(c)正着目標軌跡と車両中心との横方向の目標距離と測定距離である。図中の線(C)がランプを点灯させるタイミングである。正確にはランプを点灯させるボタンを押すタイミングであるため、実際に点灯するタイミングは一定時間遅れる。

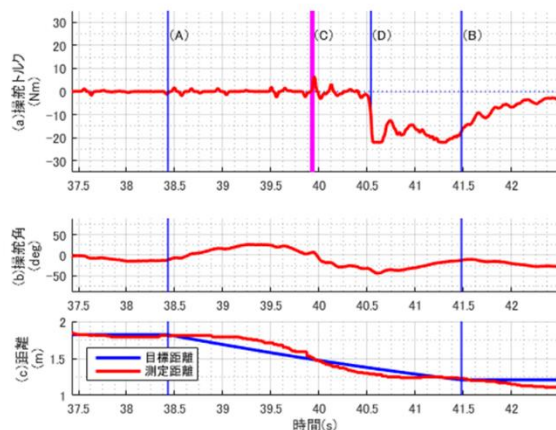


図 2.6.3-1 走行結果（手放し状態）

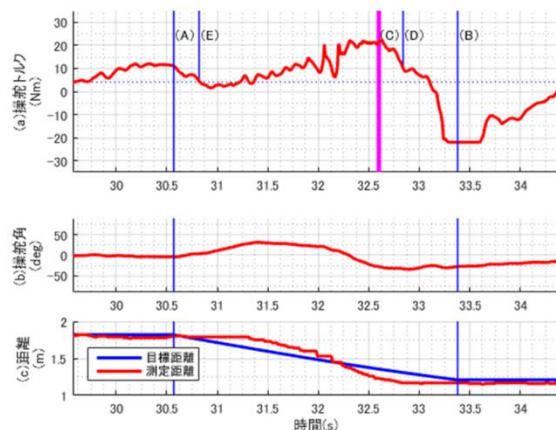


図 2.6.3-2 走行結果（把持状態）

図 2.6.3-1、図 2.6.3-2 より、どちらの条件でもランプ点灯後、運転者が負方向（右方向）に操舵していることが分かる。また、ランプ点灯以前は手放し状態では操舵トルク値は 0 付近の値をとること、把持状態では操舵トルクは正值（左方向）となっていることが分かる。

(iii) オーバーライド評価

DS での評価では、オーバーライド判定のしきい値を 0.4 秒間の操舵トルク変動量 $7\text{N}\cdot\text{m}$ と設定し DS 画面上で歩行者が飛び出すトリガからの反応時間を導出した。従って DS で評価は、ステアリングホイール手放し状態とステアリングホイール把持状態での反応時間を比較した。

大型 HV バスを使用した本評価でも同じしきい値の設定で検証を試みた。しかしステアリングホイール把持条件では、運転者はランプ点灯まで正着制御維持の意図のための操舵入力を行うが、車両横方向目標距離の変化後、システムにより操舵されるタイミング（図 2.6.3-2(E)）で操舵トルクが減少してしまい、オーバーライド判定されてしまうという誤判定が生じた。そこで、実際のオーバーライド操舵をしたタイミングを抽出できるような操舵トルク変動量のしきい値（ $10\text{N}\cdot\text{m}$ ）を設定した。その場合のオーバーライド判定したタイミングは図 2.6.3-1、図 2.6.3-2 の(D)に該当する。オーバーライド判定のしきい値の設定は今後の改善対象と考える。

表 2.6.3-1 にオーバーライド評価で実施した全てのケースの結果を示す。また 2.6.2 項 表 2.6.2-1 と同様、直進時の操舵トルクも記載する。

表 2.6.3-1 正着制御中の操舵トルク（オーバーライド判定）

Case	操舵初期条件	直進時操舵トルク ($\text{N}\cdot\text{m}$)			反応時間(s)
		平均	下限	上限	
1	手放し	-0.01	-1.2	1.0	0.18
2	手放し	-0.02	-1.3	0.8	0.62
3	手放し	-0.01	-1.5	0.8	0.38
4	把持	4.1	1.5	7.3	0.25
5	把持	6.5	3.8	11.0	0.55

(iv) オーバーライド評価考察

表 2.6.3-1 の結果より、本評価ではステアリングホイール手放し状態からのオーバーライドとステアリングホイール把持状態からのオーバーライドで反応時間に明確な差は見られなかった。本評価では、手放しの状態であってもオーバーライド評価を実施する可能性があるとして運転者は認識しており、状況の変化に集中していたため、反応時間に差が出なかった可能性がある。今後、実際の乗車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。

2.6.4 実車環境（大型 HV バス）におけるシェアードコントロール評価まとめ

実車環境（大型 HV バス）でのシェアードコントロール評価として、正着制御維持の意図とオーバーライドについて評価を実施した。

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ため、正着制御維持判定に用いるしきい値については、この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が一般的に行わない操作であるため違和感があり、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。

今回はシステムが角度制御をした状態でそのシステムに運転者がトルクを与える方式を実施したが、実際に運転者に操舵させつつ目標走行経路を通過するよう反力で誘導するような方式が違和感解消につながる可能性があると考えており、今後詳細を検討する。

以下に、検討中の反力での誘導の一案を示す。

- ① 車両とバス停との距離が十分ある時、操舵は通常のアシスト制御とする。
- ② 車両とバス停との距離があるしきい値を下回ったら、操舵角の可動範囲を制限する。
- ③ それ以降、車両とバス停との距離が小さくなるにつれ、操舵角の可動範囲を縮小する。
- ④ 最終的にバス停に正着する。

オーバーライドでの検証の結果、判明した点、今後への提言を以下に示す。

- ・ ステアリングホイール手放し状態と把持状態で反応時間に明確な差は見られなかった。手放しの状態であってもオーバーライド評価を実施する可能性があるため運転者は認識しており、状況の変化に集中していたため、反応時間に差が出なかった可能性がある。今後、実際の乗車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。
- ・ 本章提案の正着制御維持入力を行うと、システムによる操舵角指令に起因する運転者の操舵トルク入力の変動がオーバーライド判定に誤判定されてしまうことがある。この状況を防ぐための改善が必要である。

また本評価では、正着制御中突然発生するイベントをトリガとして、運転者が正着とは反対方向に強く操舵するという状況での反応時間に着目した。しかし実際の交通環境では、運転者が事前に歩行者飛出しなどの周辺環境の変化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試みる可能性が高い。今後はそのような状況にも対応できるようなアルゴリズムの検討が必要である。

2.7 シェアードコントロールまとめ

本調査では、正着制御システムの維持と解除についてプロトタイプシステムの提案を行い、ドライビングシミュレータを用いて運転者の操舵特性に関する解析を実施した。また同様の内容を実車環境でも調査した。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。DS 評価では、しきい値によっては正着制御を開始できないケースがあった。実車評価では、DS 評価より操舵トルクが大きい傾向であった。実車評価の結果から、直進制御時の正着制御維持の意図としての操舵トルクから判定値を調整できれば、判定の精度を上げることができると考える。
- ・正着制御維持の入力に関して、運転者の意図しない制御解除があった。

(1) システムによる操舵の影響

システムの左操舵により操舵トルクは減少するが、その後のシステムの右操舵時に、左操舵入力を中止するケースがあった。

実車評価では、システムの左操舵による操舵トルク減少をオーバーライドと誤判定するケースがあった。

(2) バス停止直前の運転者の操舵入力の中止 (DS 評価)

バス停付近での極低速領域で、正着できたと安心し、操舵トルク印加を中止するケースがあった。

これらの結果より、システムによる操舵、車速、横偏差を考慮した判定アルゴリズムを検討する必要がある。また、バス停の形状などの正着条件も考慮したアルゴリズム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。設定したオーバーライド判定ロジックのしきい値の影響で、オーバーライド判定できないケースが多かったが、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。また操舵トルクのデータより、運転者の回避行動は確認できた。この回避行動を検知できるようなロジックの改良が必要である。実車評価では、反応時間を比較したが、差はなかった。要因は、ドライバが状況変化に集中していたためである可能性が高い。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。
- ・また、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の周辺環境の変化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試みる可能性が高い。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

平成26年度報告書「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要件の実現可能性に係る調査検討」にて、発進時の加速度を最大0.1[G] (1.0m/s²)、停止時の減速度を最大0.1[G] (1.0m/s²)と目標性能が示されている。本章では、正着制御の操舵時に発生する横加速度と乗り心地に関する調査を行うと同時に、前後加速度、横加速度の変化率を表すジャークと乗り心地の関連性について調査を行った結果を報告する。

3.1.1 鉄道車両における乗り心地基準

鉄道の乗り心地評価に対して最初に体系的に取り組んだ一連の結果は、1963年の“国鉄列車速度調査委員会”の資料に記述されており、大多数の乗客が許容できる限度値として以下のような値が示されている。^[1]

(i) 加減速時

立位乗客：加速度 0.8m/s²、ジャーク 0.5m/s³

着座乗客：加速度 1.0m/s²、ジャーク 0.7m/s³

(ii) 曲線通過時

立位乗客：加速度 0.8m/s²

着座乗客：加速度 0.9m/s²、ジャーク 0.7m/s³

鉄道車両における立位乗客が許容できる減速度 0.8m/s²、ジャーク 0.5m/s³をバス正着制御に適用した時の減速開始から停止までの所要時間と距離を表3.1.1-1に示す。

表 3.1.1-1 減速パターンと停止までの所要時間および距離

減速パターン	停止までの所要時間	停止までの距離
40km/h ⇒ 0km/h (減速度 0.8m/s ² 、ジャーク 0.5m/s ³)	約 15.5 秒	約 85m
30km/h ⇒ 0km/h (減速度 0.8m/s ² 、ジャーク 0.5m/s ³)	約 12.0 秒	約 50m
20km/h ⇒ 0km/h (減速度 0.8m/s ² 、ジャーク 0.5m/s ³)	約 8.5 秒	約 23.5m

3.1.2 試験車両（マイクロバス）での乗り心地評価方法

試験車両（マイクロバス）を用いて乗車姿勢が異なる場合の乗り心地に関する調査を実施した。なお、本評価は株式会社ジェイテクト伊賀試験場にて実施した。試験車両の主要諸元と外観写真を表 3.1.2-1、図 3.1.2-1 に示す。

表 3.1.2-1 試験車両（マイクロバス）主要諸元

車両型式	BDG-XZB50M
トランスミッション	6AT
車体寸法 (mm)	全長：6,990、全幅：2,035、全高：2,580
トレッド (mm)	フロント：1,690、リヤ：1,490
タイヤサイズ	215/70R17.5

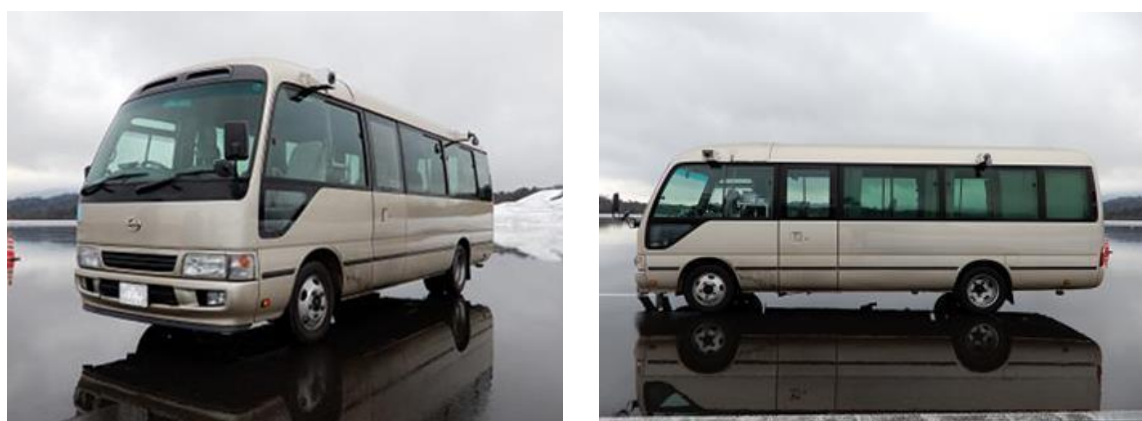


図 3.1.2-1 試験車両（マイクロバス）（日野自動車リエッセⅡ）

なお、試験車両には車両挙動を計測するため、3軸ジャイロセンサや操舵角力計、データロガーなどを搭載している。主要装備を表 3.1.2-2 に示す。

表 3.1.2-2 搭載計器仕様

計器	メーカー／型式
データロガー	キーエンス／NR600
ジャイロセンサ	MEMSIC／NAV440CA-200-1
操舵角力計	総合計装／TR60

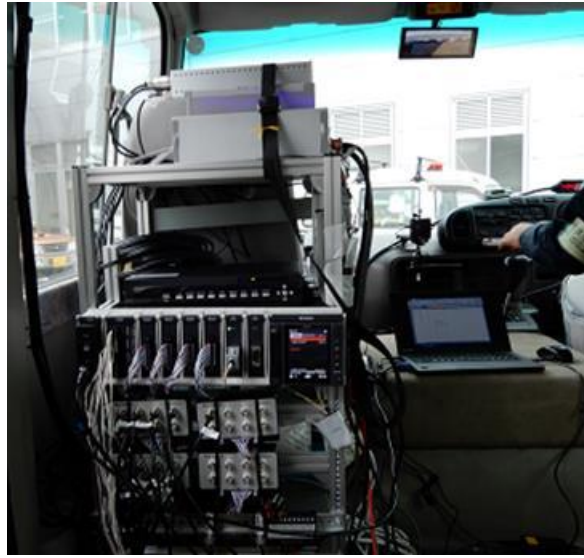
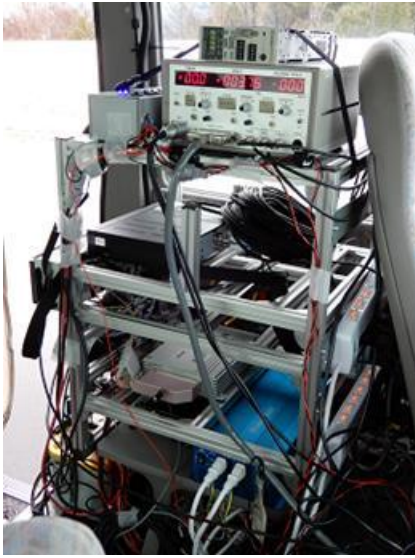


図 3.1.2-2 車両搭載計器（データロガー他）



図 3.1.2-3 ジャイロセンサ



図 3.1.2-4 操舵角力計、操舵アクチュエータ

乗り心地評価を行うバス正着を模擬した走行パターンは、第 1 章で述べた大型 HV バスでの正着制御評価と同様の横変位量 0.65m と、操舵角と横加速度が大きくなる横変位量 3.0m の 2 種とした。また本評価では、運転者の操作は以下のように設定した。

- ・ 走行に係る全ての操作は運転者が実施する。
- ・ 操舵開始ポイント通過後、アクセル、ブレーキ操作は行わず操舵のみで 25m 先のポイントまでに横方向の移動を完了させる。そのポイントを通過後、ブレーキ操作を行い停車する。操舵開始までの進入速度と制動開始からの減速度をそれぞれ数パターン設けた。走行パターンの見取図を 3.1.2-5、図 3.1.2-6 に示す。

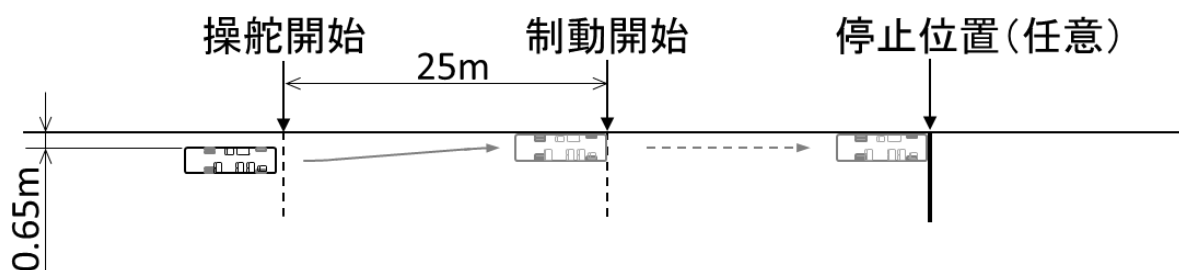


図 3.1.2-5 横変位パターン I (横変位量 0.65m)

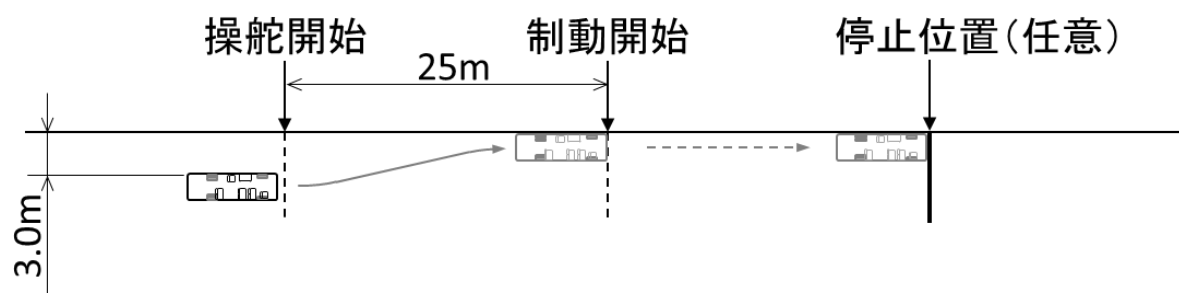


図 3.1.2-6 横変位パターン II (横変位量 3.0m)

運転者の操作に関して、操舵と制動を明確に分けた理由は以下の通りである。

一般的に正着動作を行うと、操舵と制動を連動させる運転となり個人差が大きいと考える。本年度の評価では、乗車位置や乗車姿勢による乗り心地の違いをできる限り定量的に評価するため、運転者の個人差に起因するばらつきを低減することを狙い操舵と制動を明確に分けた。乗り心地評価では前後方向と横方向を分けて評価することにし、前後方向に影響を与える因子を制動(ブレーキ操作)、横方向に影響を与える因子を操舵に限定することを狙った。操舵と制動の相互作用による乗り心地への影響の調査は今後の課題とする。

乗り心地評価での条件(変更パラメータ)は以下の通りである。

- a) 運転者：A、B、C、D、E の5名
- b) 進入速度：20km/h、30km/h
- c) 横変位量：0.65m、3.0m
- d) 減速度：強、中、弱 の3種
- e) 乗車位置：①、②、③、④、⑤ の5種×被験者6名

また、乗り心地評価を実施したバス乗車位置の詳細と乗車姿勢は以下の通りである。

(図 3.1.2-7、図 3.1.2-8 参照)

- ・乗車位置①：車両前方を向き着座
- ・乗車位置②：車両前方を向き着座
- ・乗車位置③：車両右方向を向き立位(棚を手すりに見立て、片手持持)
- ・乗車位置④：車両右方向を向き着座
- ・乗車位置⑤：車両左方向を向き立位(腰位置の手すり、左手把持)

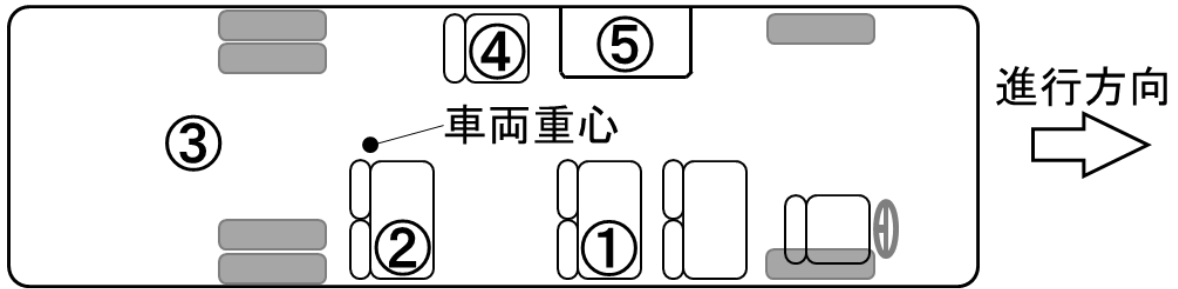


図 3.1.2-7 乗車位置見取図

乗車位置、姿勢は、実際の大型バスでの乗客の代表的な姿勢を考慮して設定した。乗車位置と乗車姿勢の狙いを以下に示す。

- ・車両前方を向き着座する①と②はバス乗車時の基本姿勢とし、①は車両重心より前方、②は車両重心付近に設定し、乗車位置、乗車姿勢との比較を行う。
- ・大型バスでは混雑時に、立位乗客が存在する。立位姿勢の場合、着座姿勢に比べると車両の揺れに対して姿勢維持が困難になると予想される。そこで、立位乗客の手すり、または吊り革を持つ姿勢を模擬して評価を行うこととし、③と⑤で乗客の向きを逆方向にすることで、車両横方向運動に対し、評価に差異が生じるかの確認を行う。また、立位乗車での減速に対する評価、前後方向の乗車位置の差による影響がないかの確認を行う。
- ・大型バスでは車両中央付近に横向きのシートがあることが多く、優先座席になっている場合も多い。一般的に車両の前後方向と横方向に働く力(加速度)の傾向は異なるので、着座姿勢であっても体の向きが異なれば乗り心地が異なると予想し乗車位置④を設定した。

乗り心地評価は、走行ごとに各々の被験者が実施した。その際、前後方向、横方向に対し評価するようにし、具体的な評価指標は与えず、フリーコメントとして取得した。



図 3.1.2-8 乗車位置および乗車姿勢

3.1.3 試験車両（マイクロバス）での乗り心地評価結果

前述した評価方法に基づき実施した乗り心地の官能評価の一例を示す。表 3.1.3-1 が車両横方向、表 3.1.3-2 が車両前後方向に関する評価結果である。

表 3.1.3-1 車両横方向 乗り心地評価

Case		1	2	3
走行条件	運転者	A	E	B
	車速	30km/h	30km/h	30km/h
	横変位量	0.65m	3.0m	3.0m
評価結果	着座①	特に不快感なし	左右の横揺れがあるが気にならない	体の揺れが大きく不快
	着座②	OK	切込み：4 切戻し：5 ※5段階評価	不快感あり
	立位③	Gの大きさはやや大きいが快適	切戻時、大きく引っ張られる	切出し、切戻し共に強い
	着座④	切込み：5 切戻し：5 ※5段階評価	切戻時、振られる	物が落ちるくらいに大きく揺られた。NG
	立位⑤	問題なし	全身が後方に大きく振られる	切込み：2 切戻し：2 ※5段階評価

表 3.1.3-2 車両前後方向 乗り心地評価

Case		4	5	6
走行条件	運転者	C	E	B
	車速	20km/h	30km/h	30km/h
	減速度	強	強	強
評価結果	着座①	問題なし	停止時のショックが少しあるが快適	ブレーキの強弱があり、違和感あり
	着座②	ブレーキ時 G は大きく感じない	減速開始：5 減速中：4 停止直前：5 ※5段階評価	△
	立位③	○	左足を踏ん張る。停止時、揺れが気になった	左足で踏ん張るレベル
	着座④	OK	体が席から浮く	隣の人に圧力がかかる
	立位⑤	Gが一定であり強くなりなく快適	△	減速開始：2 減速中：2 停止直前：4 ※5段階評価

乗り心地の官能評価の傾向把握のため、被験者が実施した官能評価の結果を「快適・許容」と「不快」に分類した。分類の要領を以下に示す。

「問題なし」、「快適」、「○」といった、快適であることを示唆するコメントを「快適」に分類した。また、「停止時のショックが少しある」、「少し体が振られる」「△」といった、快適ではないが明確に不快とは表現していないコメント、「少し○○」という表現を「許容」とみなした。「体の揺れが大きい」、「切戻し時、振られる」、「左足を踏ん張る」、「右足が浮く」といった、明確に不快であることを示唆するコメントを「不快」に分類した。本評価では乗車位置による「不快」レベルの抽出を主とし、「快適」「許容」を一つにまとめた。表 3.1.3-1、表 3.1.3-2 では、「快適・許容」を青色に、「不快」を赤色で示した。

表 3.1.3-3、表 3.1.3-4 に本評価で実施した走行条件における横方向、前後方向の「不快」コメント数を示す。

表 3.1.3-3 車両横方向「不快」コメント数

走行条件		「不快」コメント数 ※各条件 18 回実施				
車速	横変位量	着座①	着座②	立位③	着座④	立位⑤
20 km/h	0.65m	0	1	1	0	1
30 km/h	0.65m	2	2	2	1	3
20 km/h	3.0m	1	3	4	3	10
30 km/h	3.0m	4	8	12	12	13

表 3.1.3-4 車両前後方向「不快」コメント数

走行条件		「不快」コメント数 ※各条件 12 回実施				
車速	減速度	着座①	着座②	立位③	着座④	立位⑤
20 km/h	弱	2	2	1	3	0
30 km/h	弱	2	2	2	4	2
20 km/h	中	2	2	2	3	3
30 km/h	中	1	4	4	6	3
20 km/h	強	6	4	4	6	4
30 km/h	強	6	3	10	10	7

被験者による乗り心地の感じ方、コメントに個人差はあるが、全被験者が①から⑤の乗車位置で評価したため、「不快」とコメントする傾向がある被験者が特定の乗車位置に局在することはなく、表 3.1.3-3、表 3.1.3-4 から乗り心地に関する傾向は把握できると考える。

また、乗り心地の官能評価と走行データを比較するため取得したデータの一例を図 3.1.3-1、図 3.1.3-2 に示す。図 3.1.3-1 は表 3.1.3-1 の Case3 での、図 3.1.3-2 は表 3.1.3-2 の Case5 に該当する。

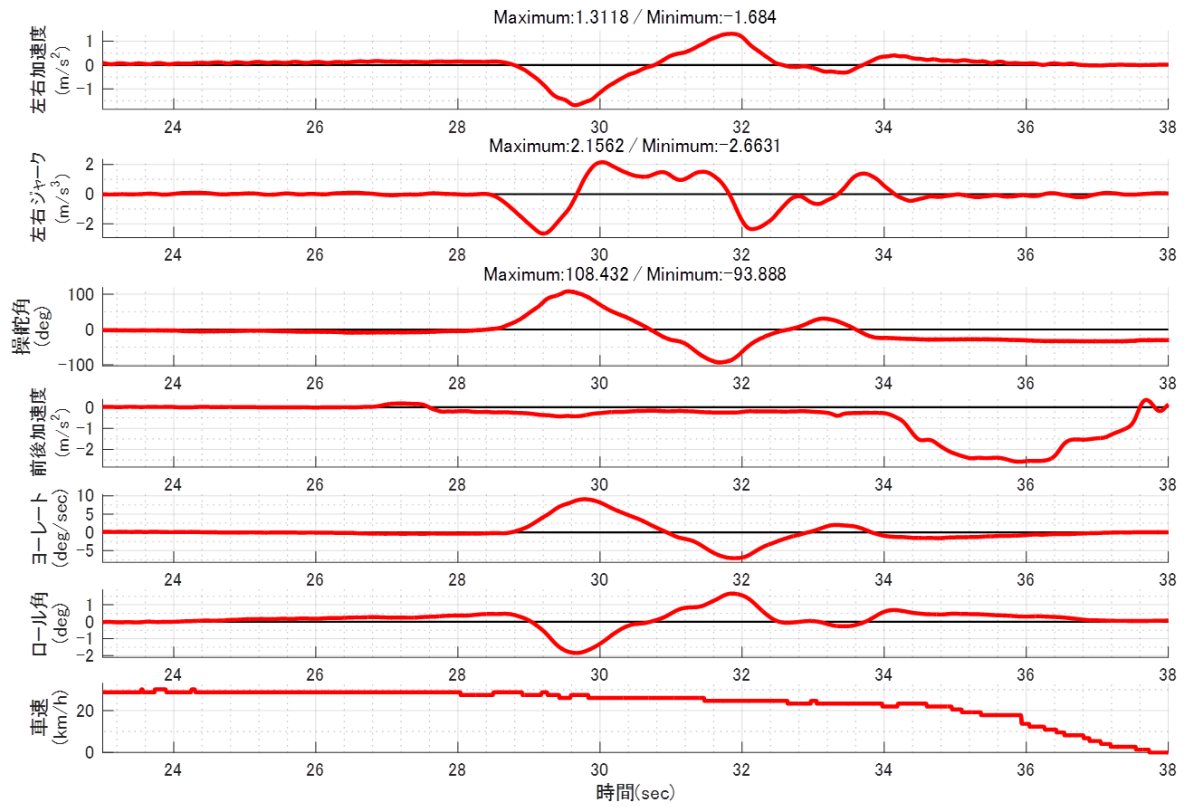


図 3.1.3-1 車両横方向評価向け走行データ [表 3.1.3-1 Case3]

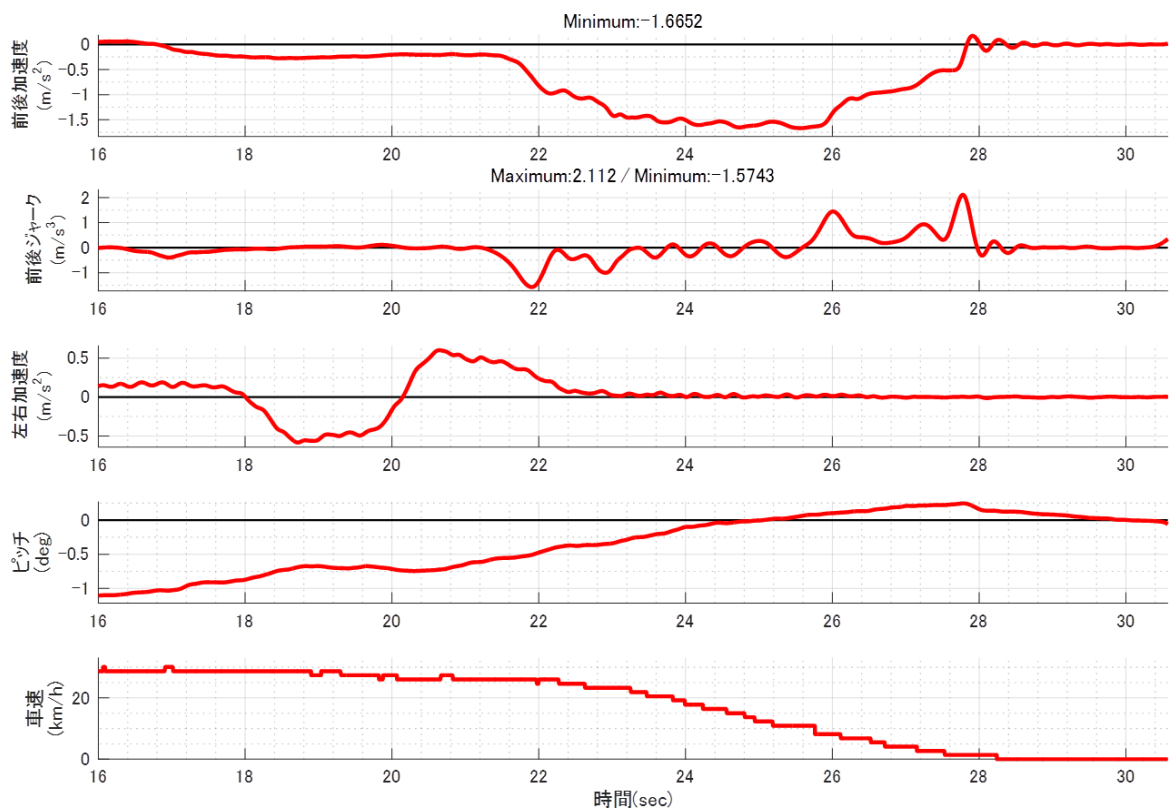


図 3.1.3-2 車両前後方向評価向け走行データ [表 3.1.3-2 Case5]

走行データの解析に当たり、ジャイロセンサで取得した値に以下の処理を行った。
 1ms のサンプリングで取得した走行データに対し、Matlab/Simulink^(※1)のゼロ位相デジタルフィルタ処理 `filtfilt` (フィルタ次数 100) を行う。100 個のデータを正方向でフィルタ処理した後、そのデータを逆方向にフィルタ処理して導出する処理である。その結果得られた加速度の値を使用し、前回値との差分を取りそのデータにゼロ位相デジタルフィルタ処理 `filtfilt` (フィルタ次数 250) を行うことで、ジャーク値を求めた。本評価では、加速度、ジャークの時系列変化の詳細を評価の対象にはせず、最大値や変化の傾向を把握する程度であるので、本処理で十分であると考えられる。

(※1) 米国 The MathWorks, Inc.の登録商標

3.1.4 試験車両 (マイクロバス) での乗り心地評価 (横方向) 考察

本項では、横方向の乗り心地について考察する。表 3.1.3-3 より、以下の点が分かった。

- (i) 車速、横変位量が大きくなるにつれ、「不快」コメントが増加する。
- (ii) 立位⑤ (車両左向き立位)、立位③ (車両右向き立位)、着座④ (車両右向き着座)で「不快」コメントが多く、前方向き着座①②に比べ乗り心地に関する許容レベルは厳しい。
- (iii) 特に立位⑤ (車両左向き立位) は 20km/h、横変位量 3.0m の条件から「不快」コメントが増加し、乗り心地に関する許容レベルは最も厳しい。

これらの内容を踏まえ、横加速度、ジャークに着目し、以下の内容を考察する。

- (1) 前方向き着座①②の横方向許容レベル
- (2) 車両右向き着座④の横方向許容レベル
- (3) 立位③⑤の横方向許容レベル、車両右向き立位③と車両左向き立位⑤の違い

図 3.1.4-1 に横方向の乗り心地評価で実施した全 72 回の横加速度、横ジャークの最大絶対値を示す。本来、切込み、切戻し方向で符号は異なるが、傾向把握するため絶対値とし、官能評価コメントが操舵切込時に集中していたため、操舵切込時のデータに着目した。

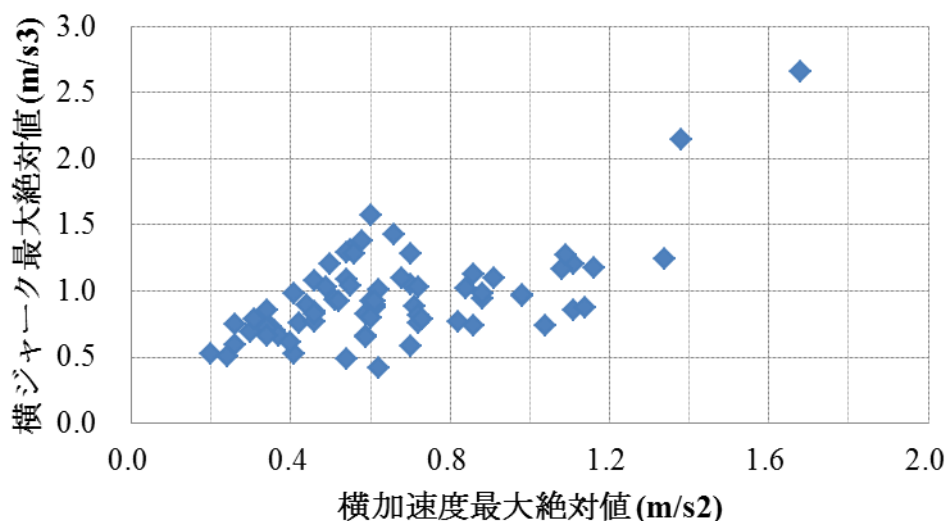


図 3.1.4-1 乗り心地評価における横加速度、横ジャーク最大絶対値

(1) 前方向き着座①②の横方向許容レベル

表 3.1.4-1 に、前方向き着座①と②での官能評価における「不快」コメントの内訳を示す。○は「快適・許容」、×は「不快」を指し、操舵切込時のデータを抽出した。

表 3.1.4-1 前向き着座の「不快」コメント数

前向き着座①	前向き着座②	回数	シンボル
×	○	2	■
○	×	8	▲
×	×	3	×

図 3.1.4-2 に、前方向き着座①、②で「不快」と感じた時の横加速度、横ジャークの最大絶対値を示す。その際、表 3.1.4-1 に示したシンボルで表示する。①②ともに「快適・許容」は◆で表示する。また凡例では「快適・許容」を OK、「不快」を NG と表す。

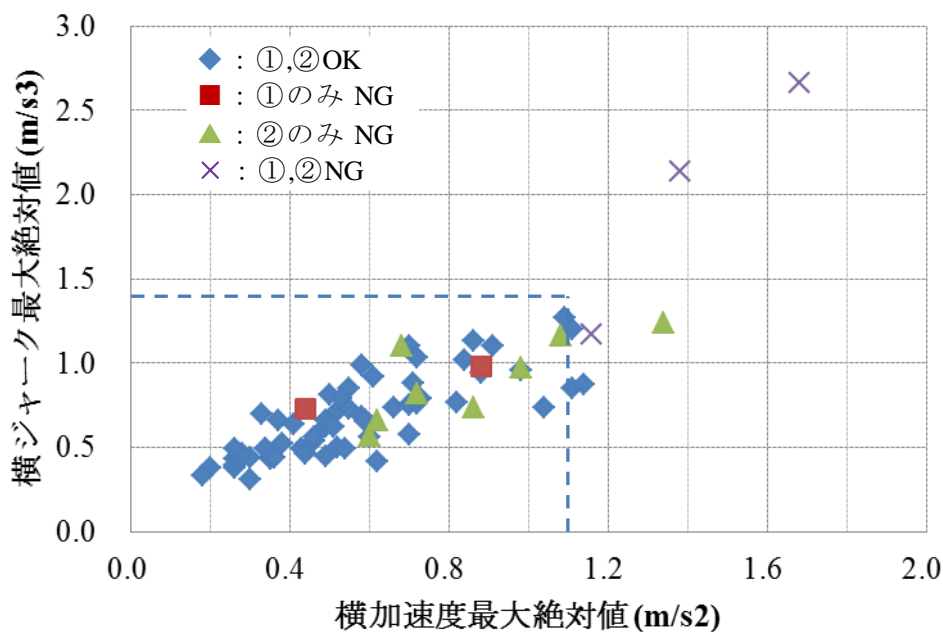


図 3.1.4-2 横加速度、横ジャーク最大絶対値 着座①②「不快」抽出

図 3.1.4-2 から、官能評価結果に多少の個人差はあるものの、前方向き着座姿勢における①と②の着座位置による明確な差はなかった。本評価における横加速度と横ジャークの許容レベルは以下の通りであった。

「乗り心地が良い」：横加速度 1.1m/s^2 以下、かつ横ジャーク 1.4m/s^3 以下

(2) 車両右向き着座④の横方向許容レベル

横向き着座④での官能評価での「不快」コメントは表 3.1.3-3 より計 16 回ある。図 3.1.4-3 に、横向き着座④で操舵切込時に「不快」と感じた時の横加速度、横ジャークの最大絶対値を■で示す。それ以外のデータは◆で表示する。また凡例では「快適・許容」を OK、「不快」を NG と表す。

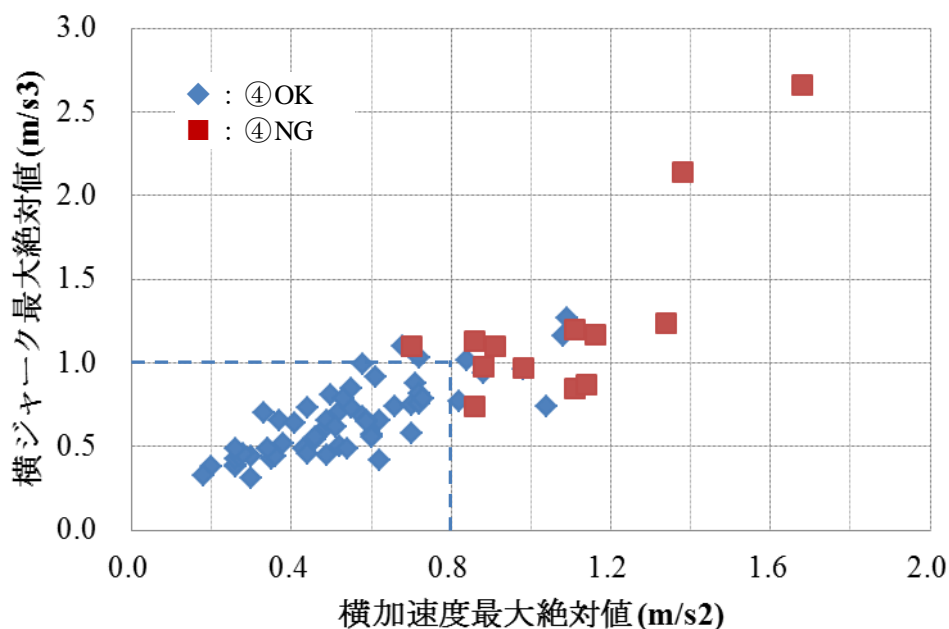


図 3.1.4 -3 横加速度、横ジャーク最大絶対値 着座④「不快」抽出

図 3.1.4-3 から、官能評価結果に多少の個人差はあるものの、前方向きに比べ横向き着座姿勢では横加速度、横ジャークに対する許容レベルは厳しい結果となった。

「乗り心地が良い」：横加速度 0.8m/s^2 以下、かつ横ジャーク 1.0m/s^3 以下

(3) 立位③⑤の横方向許容レベル、車両右向き立位③と車両左向き立位⑤の違い

表 3.1.4-2 に、車両右向き立位③と車両左向き立位⑤の「不快」コメントの内訳を示す。○は「快適・許容」、×は「不快」を指し、操舵切込時のデータを抽出した。

表 3.1.4-2 立位の「不快」コメント数

右向き立位③	左向き立位⑤	回数	シンボル
×	○	6	■
○	×	17	▲
×	×	7	×

図 3.1.4-4 に、車両右向き立位③と車両左向き立位⑤で「不快」と感じた時の横加速度、横ジャークの最大絶対値を示す。その際、表 3.1.4-2 に示したシンボルで表示する。③⑤ともに「快適・許容」は◆で表示する。また凡例では「快適・許容」を OK、「不快」を NG と表す。

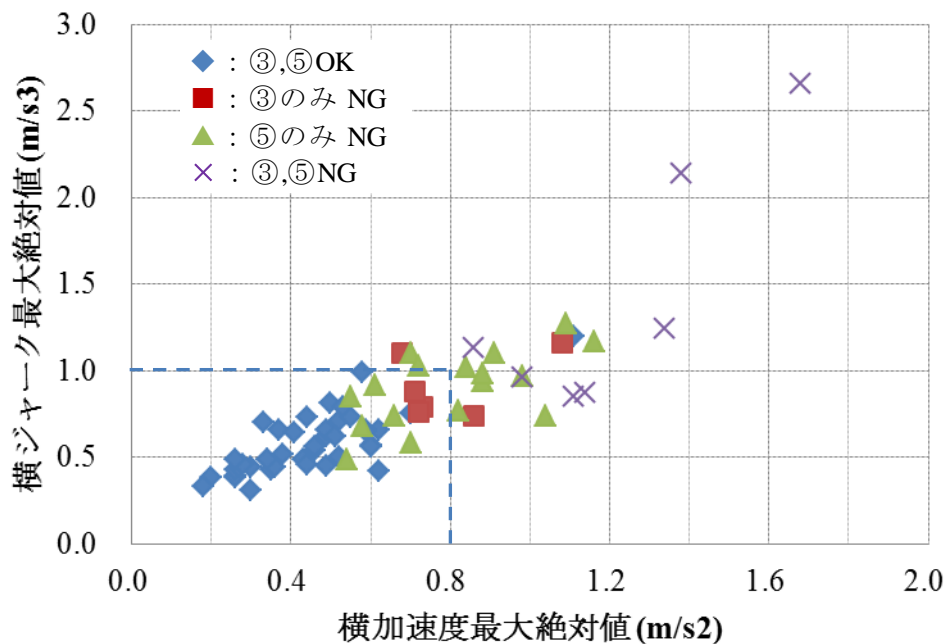


図 3.1.4-4 横加速度、横ジャーク最大絶対値 立位③⑤「不快」抽出

図 3.1.4-4 から、官能評価結果に多少の個人差はあるものの、横向き着座姿勢と同様に横加速度、横ジャークに対する許容レベルは厳しい結果となった。

「乗り心地が良い」：横加速度 0.8m/s^2 以下、かつ横ジャーク 1.0m/s^3 以下

また、車両右向き立位③と車両左向き立位⑤の違いについては、立位姿勢⑤では手すりを把持する位置が肩の位置よりも低く、総じて立位姿勢③（手すりを把持する位置が肩よりも高い）に対しやや厳しいコメントが多かった。車両右向きと左向きでは、操舵の切込みと切戻しで、身体をつま先方向とかかと方向への揺れが逆方向となり、総じて身体のかかと方向への揺れに対し身体を支えるのが困難であるとの意見が多かった。立位姿勢における乗り心地に関しては、手すりを把持する位置、揺れの方向、立位姿勢の細かな点（両足間の幅、つま先の向き）などに留意して評価を行う必要がある。

3.1.5 試験車両（マイクロバス）での乗り心地評価（前後方向）考察

本項では、前後方向の乗り心地について考察する。表 3.1.3-4 より、以下の点が分かった。

- (i) 車速、減速度が大きくなるにつれ、「不快」コメントが増加する。
- (ii) 着座④（車両右向き着座）で最も「不快」コメントが多く、乗り心地に関する許容レベルは厳しい。
- (iii) 最も厳しい条件である車速 30km/h、減速度強では、立位での「不快」コメントが多い。一方、全体を通してみると、立位が前方向き着座より「不快」と感じる事が明確に多いとは言い切れない。

これらの内容を踏まえ、減速度、前後ジャークに着目し、以下の内容を考察する。

- (1) 前方向き着座①②の前後方向許容レベル
- (2) 車両右向き着座④の前後方向許容レベル
- (3) 車両右向き立位③、車両左向き立位⑤の前後方向許容レベル

まず、前後方向の乗り心地評価で実施した全 72 回の減速度、前後ジャークの最大絶対値を図 3.1.5-1 に示す。

図 3.1.5-1 に前後方向の乗り心地評価で実施した全 72 回の減速度、前後ジャークの最大絶対値を示す。ジャークは減速開始時と停止時で符号が異なるが、傾向を把握するため絶対値とした。

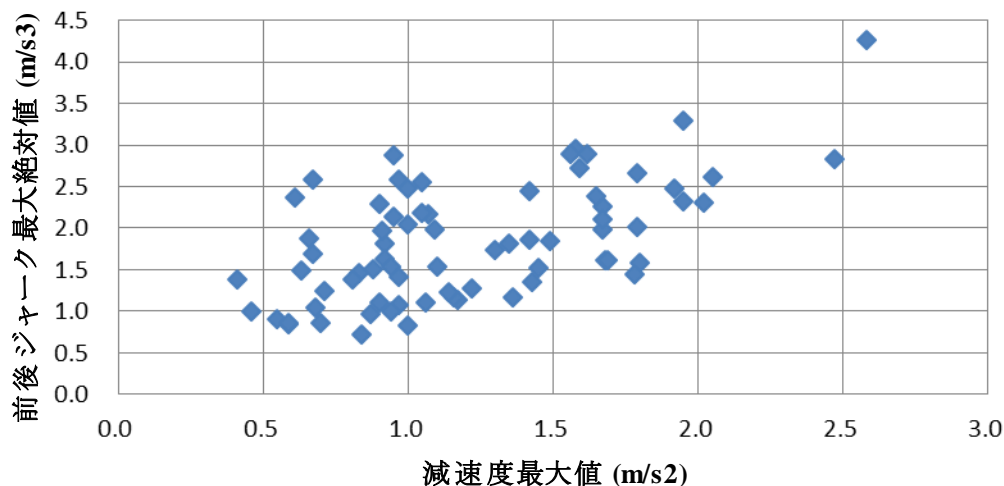


図 3.1.5-1 乗り心地評価における減速度、前後ジャーク最大絶対値

(1) 前方向き着座①②の前後方向許容レベル

表 3.1.5-1 に、前方向き着座①と②での官能評価における「不快」コメントの内訳を示す。○は「快適・許容」、×は「不快」を指す。

表 3.1.5-1 前向き着座の「不快」コメント数

前向き着座①	前向き着座②	回数	シンボル
×	○	13	■
○	×	11	▲
×	×	6	×

図 3.1.5-2 に、前方向き着座①、②で「不快」と感じた時の減速度、前後ジャークの最大絶対値を示す。その際、表 3.1.5-1 に示したシンボルで表示する。①②ともに「快適・許容」は◆で表示する。また凡例では「快適・許容」を OK、「不快」を NG と表す。

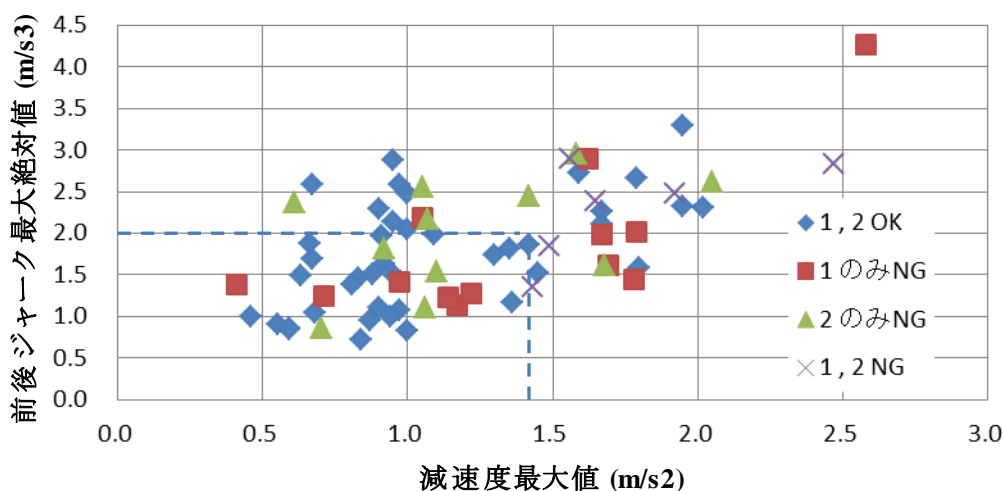


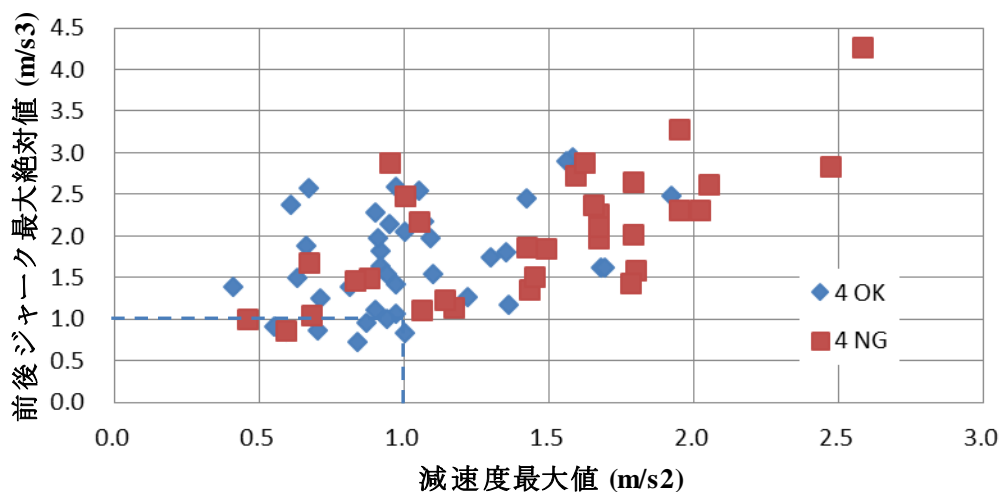
図 3.1.5-2 減速度、前後ジャーク最大絶対値 着座①②「不快」抽出

図 3.1.5-2 から、官能評価結果に個人差のばらつきはあるものの、前方向き着座姿勢における①と②の着座位置による明確な差はなかった。本評価における減速度と前後ジャークの許容レベルは以下の通りであった。

「乗り心地が良い」：減速度 1.4m/s^2 以下、かつ前後ジャーク 2.0m/s^3 以下

(2) 車両右向き着座④の前後方向許容レベル

車両右向き着座④での「不快」コメントは表 3.1.3-4 より計 32 回ある。図 3.1.5-3 に、車両右向き着座④で「不快」と感じた時の減速度、前後ジャークの最大絶対値を■で示す。それ以外のデータは◆で表示する。また凡例では「快適・許容」を OK、「不快」を NG と表す。



(3) 車両右向き立位③と車両左向き立位⑤の前後方向許容レベル

表 3.1.5-2 に立位③、⑤の「不快」コメントの内訳を示す。○は「快適・許容」、×は「不快」を指す。

表 3.1.5-2 立位の「不快」コメント数

右向き立位③	左向き立位⑤	回数	シンボル
×	○	12	■
○	×	8	▲
×	×	11	×

図 3.1.5-4 に、車両右向き立位③と車両左向き立位⑤で「不快」と感じた時の横加速度、横ジャークの最大絶対値を示す。その際、表 3.1.5-2 に示したシンボルで表示する。③⑤ともに「快適・許容」は◆で表示する。また凡例では「快適・許容」を OK、「不快」を NG と表す。

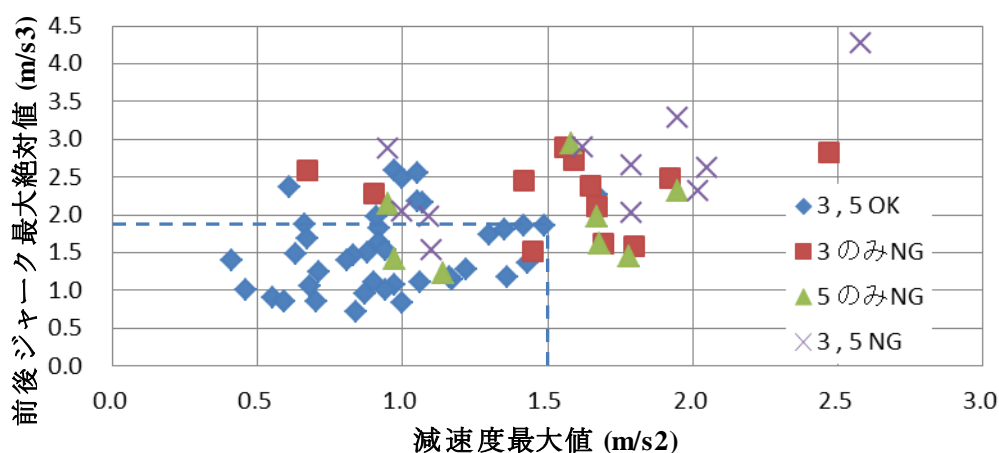


図 3.1.5-4 減速度、前後方向ジャーク最大絶対値 立位③⑤「不快」抽出

図 3.1.5-4 から、個人差のばらつきはあるものの、本評価における減速度と前後ジャークの許容レベルは以下の通りであった。

「乗り心地が良い」：減速度 1.5m/s^2 以下、かつ前後ジャーク 1.9m/s^3 以下

減速度、前後ジャークに対する横向き立位姿勢の場合、③の右向きと⑤の左向きによる明確な差はなかった。つまり、身体の横揺れに対する姿勢維持に対しては、把持する手すりの高低差による影響は小さかった。むしろ、両足の間隔が肩幅程度の立位姿勢と、両足を揃えた状態での立位姿勢による影響の方が大きいと思われる。

3.1.6 試験車両（マイクロバス）での乗り心地評価 まとめ

予測していた通り、車両前方を向き着座姿勢の場合は車両挙動に対する寛容性が高く、横向き立位姿勢では、横揺れ（横加速度、横方向ジャーク）に対し過敏となる。また、横向き着座姿勢では、同じ横向き立位姿勢に比べて、下半身による踏張りが効き難くなるため、前後揺れ（前後加速度、前後方向ジャーク）に対し過敏となる傾向が顕著であった。特に、前後加速度や横加速度の絶対値だけでなく、加速度の変化率であるジャークも乗り心地指標として抑制しなければ、乗客に対し姿勢維持のために緊張感を強いることになるということが明らかになった。

また、今回実施した乗り心地の評価方法について課題を整理する。

乗り心地の官能評価において、被験者に先入観を与えず、素直に感じた内容を抽出することを狙いとしたので、フリーコメントの取得とした。その結果、評価コメントの内容から着眼すべき点が判明した。一方で、評価コメントから一定の基準で「快適・許容」と「不快」に分類し、加速度とジャークに着目して解析したが、「不快」に分類したコメントの中には、個人差が生じてしまい、実質的には許容レベルのもの、やや不快と感じる程度のもの、倒れそうになり不快と感じるものが含まれ、評価を難しくしてしまった。これらの反省を踏まえ、バスの乗り心地評価において留意すべき点を以下に示す。

a) 乗り心地評価実施時の姿勢について

乗り心地評価では、乗車姿勢の影響が大きい。評価時の姿勢を明確にし、立位姿勢の場合は、身体を支える持ち手にも注意する必要がある。

（例）立位か着座、体の向き(車両前向き、右向き、左向き)、手すりの位置、つり革

b) 官能評価の分類について

官能評価では、「快適」、「許容」、「やや不快」、「不快」という分類を被験者に選択させたうえで、コメントを残す手法が望ましい。

c) 車両横方向評価について

車両横方向評価では、操舵切込時か切戻時のどちらでの評価コメントかを明確にするとよい。また、操舵のイメージがない被験者には車両横移動の前半か後半かを明確にさせるとよい。

d) 車両前後方向評価について

車両前後方向評価では、減速開始時、減速中、停車直前のどのタイミングでの評価コメントかを明確にするとよい。

今回の評価では、操舵と制動の操作を分け、車両横方向と前後方向の評価に分けて実施したが、今後は連動させた評価も実施する。

参考までに、第1章産業技術総合研究所つくば北サイトにて実施した大型HVバス正着制御時の車両挙動データの代表例を図3.1.6-1、図3.1.6-2に示す。

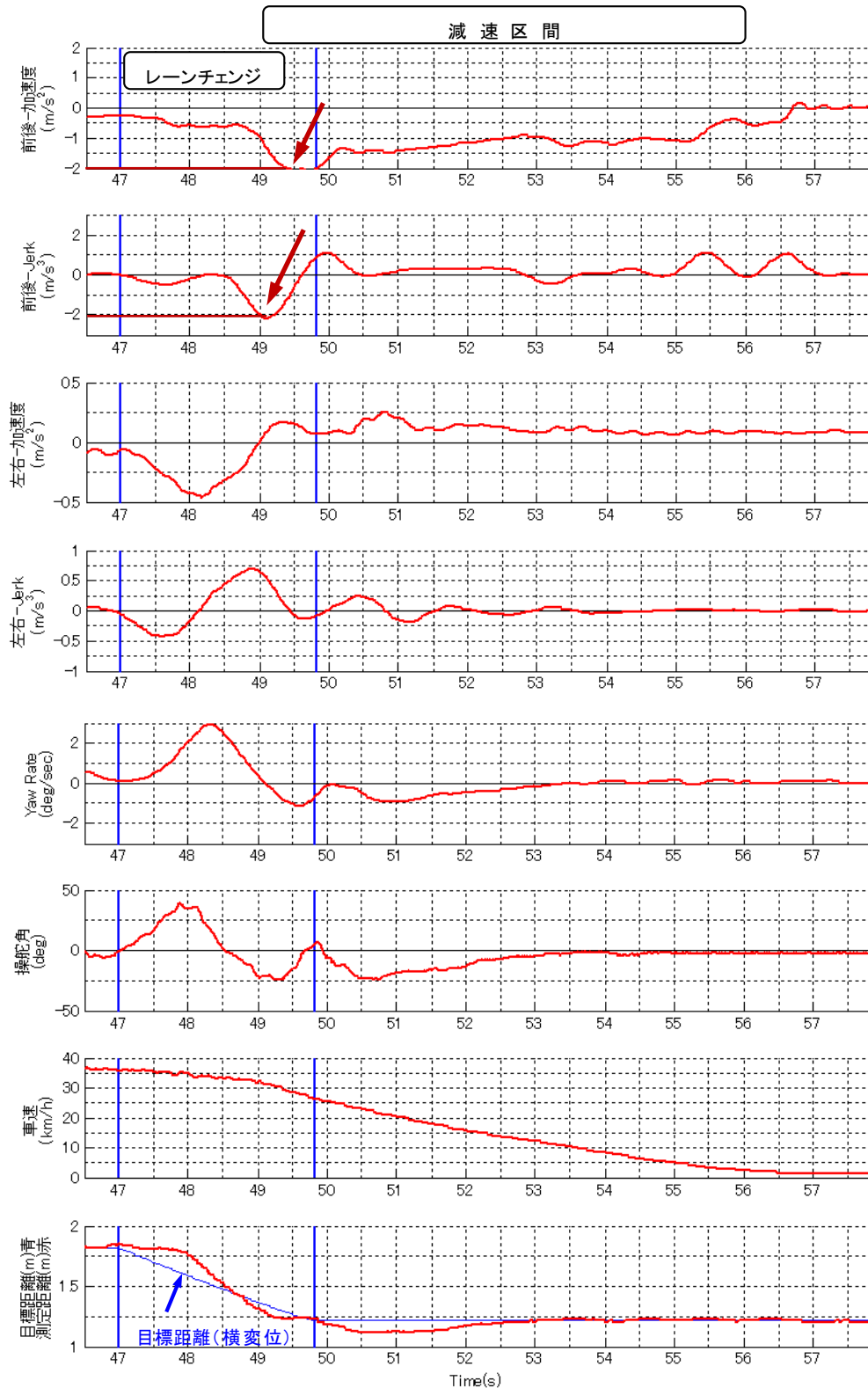


図 3.1.6-1 大型 HV バス正着制御時の車両挙動データ (Case I)

図 3.1.6-1 に示す Case I では、乗員は着座姿勢であったが減速挙動を不快と感じた。この際の車両挙動データは、前後方向の最大減速度が約 2.0m/s^2 、最大前後ジャークは約 2.1m/s^3 であった。横変位（操舵制御）に関しては、乗り心地として問題はなかった。

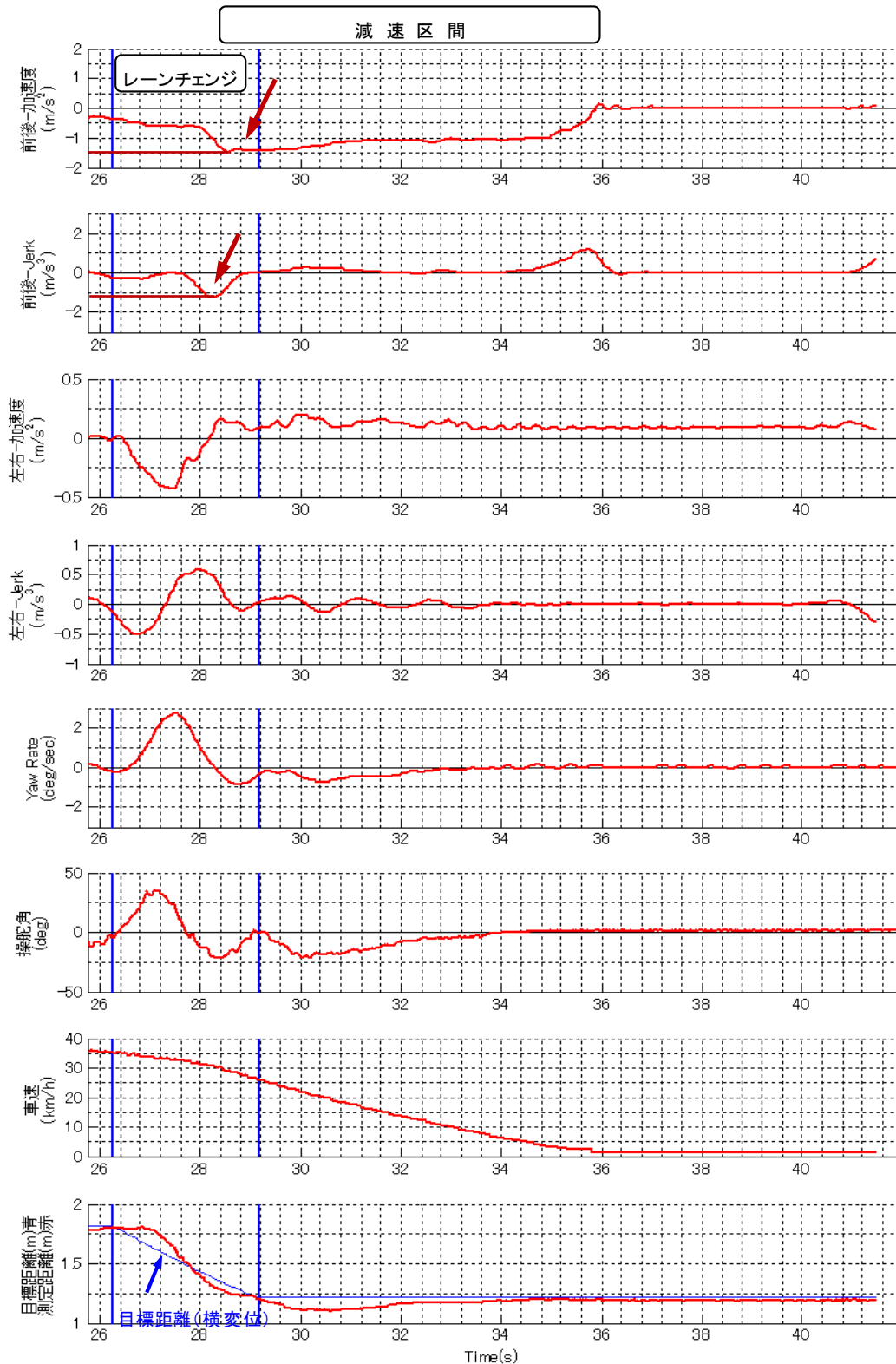


図 3.1.6-2 大型 HV バス正着制御時の車両挙動データ (Case II)

図 3.1.6-2 に示す Case II では、Case I と同様に乗員は着座姿勢であったが減速挙動、横変位ともに不快と感ずることはなかった。この際の前後方向の最大減速度は約 1.5m/s^2 、最大ジャークは約 1.2m/s^3 であった。

マイクロバスと大型HVバスによる乗り心地評価から、前方向き着座姿勢では同様の結果が得られ、マイクロバスでの評価結果から、乗車姿勢によって乗り心地に対する感じ方、姿勢を維持するための許容レベルに差が生じるということが明確になった。

理想的には、鉄道車両の乗り心地基準で示されている値が指標となるが、平成26年度報告書「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要件の実現可能性に係る調査検討」の中で、都営バスの深川営業所～晴海埠頭間における停車減速度に関する調査が実施されており、運転者3名の最大減速度平均は0.15[G] (1.5m/s²)程度、平均減速度は0.13[G] (1.3m/s²)程度であった。バス停付近の道路・交通状況を考慮すると、減速度は1.0m/s²、ジャーク1.0m/s³が目標指標として妥当であると考え。また許容限界値は、1.5m/s²、1.5m/s³を仮指標とする。横方向に関しては、乗り心地の評価結果から前後方向よりも厳しく設定すべきであり、横加速度は0.8m/s²、ジャーク1.0m/s³が目標指標として妥当であると考え。また許容限界値は、1.0m/s²、1.5m/s³を仮指標とし、快適な乗り心地を実現するための経路生成および車両挙動制御における課題を整理していく。

表 3.1.6-1 減速パターンと停止までの所要時間および距離

減速パターン	停止までの所要時間	停止までの距離
40km/h ⇒ 0km/h (減速度 1.0m/s ² 、ジャーク 1.0m/s ³)	約 12.0 秒	約 67.0m
30km/h ⇒ 0km/h (減速度 1.0m/s ² 、ジャーク 1.0m/s ³)	約 9.5 秒	約 38.5m
20km/h ⇒ 0km/h (減速度 1.0m/s ² 、ジャーク 1.0m/s ³)	約 6.5 秒	約 18.0m

3.2 快適な乗り心地を実現するための課題調査

3.2.1 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/s²以下、ジャークを1.0m/s³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。目標を達成するために必要となる代表的な車両情報と分解能について整理したものを表3.2.1-1に示す。

表 3.2.1-1 減速制御の仮目標値と既存技術での対応可否

車両の状況	制御目標(仮)	車両情報	必要分解能	既存技術対応可否
車速 40km/h からの 減速停止	減速度： 1.0m/s ² 以下 ジャーク： 1.0m/s ³ 以下	車輪速	0.05m/puls 以下 0.1m/s 以下	車速パルス：△ ハイブリッド・バス：○
		減速度	0.1m/s ² 以下	ジャイロセンサ：○
	前後位置 ±200mm 以下	前後位置 (進行方向 座標)	50mm 以下	GPS センサ：×/△ 準天頂 GPS：△/○ LIDAR など：△/○

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。

3.2.2 正着時の操舵制御

前項同様に、操舵制御における車両情報の必要分解能と既存技術での対応可否について整理したものを表 3.2.2-1 に示す。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する必要がある。理想的には規範となる正着経路生成時に、なめ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 4cm±2cm 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。

安定したバス停への正着制御を実現するためには、欧州で実施されているような路肩形状を利用した手法（カッセルカーブプラス）が位置制御では有効であるが、乗り心地に係る横加速度や横ジャークを制御することは困難である。

表 3.2.2-1 操舵制御の仮目標値と既存技術での対応可否

車両の状況	制御目標(仮)	車両情報	必要分解能	既存技術対応可否
車速 40km/h 以下での レーン チェンジ	横加速度： 0.8m/s ² 以下 ジャーク： 1.0m/s ³ 以下	操舵角	0.5deg 以下	操舵角センサ：○
		操舵角速度	1.0deg/s 以下	EPS：○
	横変位 ±20mm 以下	横変位 (左右方向 座標)	5mm 以下	ジャイロセンサ：○ GPS センサ：× 準天頂 GPS：×/△ LIDAR など：×/△

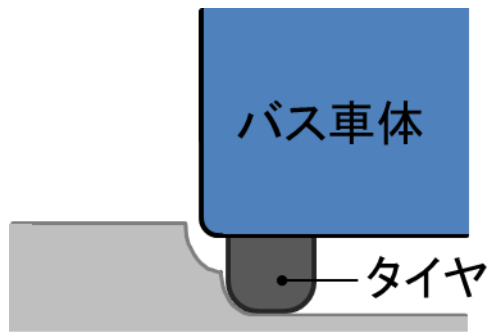


図 3.2.2-1 カッセルカーブプラス

3.2.3 快適な乗り心地と安全性を両立する正着経路

バス停への正着制御経路を第1種第4級の車線幅員 3.25m、路肩 2.5m の条件において、バス停へのアプローチ距離を十分に確保できない場合と、比較的手前からレーンチェンジが可能な場合について調査した。図 3.2.3-1 に示すようにアプローチ距離が短い場合は、横加速度やジャークを抑制するためには、レーンチェンジ開始までに十分な減速が必要となり、車速 15km/h 以下での操舵制御（旋回半径 21.7m 以上）が望ましい。

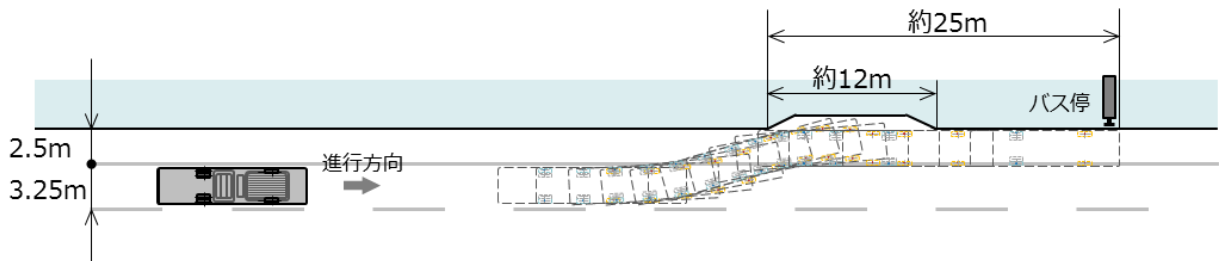


図 3.2.3-1 バス停へのアプローチ距離が短い場合

バス停へのアプローチ距離を十分に確保できる場合は、左後方からの自動二輪車や自転車の進入を防止するためにも、早めにレーンチェンジを開始することが望ましい。この場合は車速 30km/h 程度でも、小舵角の滑らかな操舵制御（旋回半径 87m 以上）を行うことで快適な乗り心地の実現が可能である。

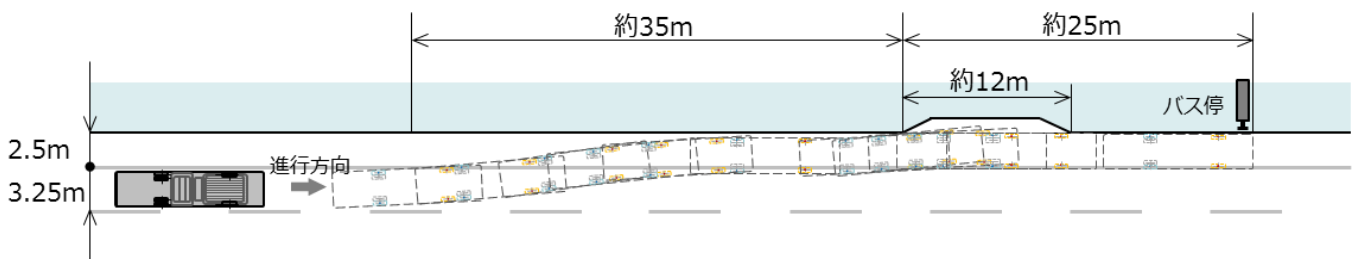


図 3.2.3-2 バス停へのアプローチ距離が長い場合

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）

3.3.1 外乱要因検討の前提条件

バス正着制御においては、安全かつ快適な乗り心地を実現することが求められる。しかしながら、正着制御の外乱要因としては、路面状態の変化など車両挙動に影響を与える要因以外に、バス停周辺の歩行者、自転車や走行経路近傍の他の車両などが走行経路に進入してくる可能性が考えられる。前者の外乱要因については、ダイナミックマップ配信やインフラ側との情報通信の充実によって対処可能であると考えるが、後者については、十分な調査検討が不可欠である。定時性や輸送効率の観点からも、バス停周辺での事故を撲滅する必要がある。バス停周辺の安全性を考えると、鉄道の一部の駅などに設置されている転落防止防護柵を設置することが望ましい。ただし、数十メートルにもおよぶ防護柵を設置するとバス停周辺での人の動線が限定され、またデッドスペースや死角の増加、防護柵の誤作動などのデメリットも多く、整備に必要な費用以外にも導入するための課題は多い。そのため、現状の道路インフラ環境下で、歩行者や車両などの走行経路への進入という外乱要因が発生した場合の対処方法について調査検討を行うことにした。

車両などの陰（死角）から歩行者が飛び出してくる可能性もあるため、正着制御中は走行経路、走行経路近傍の車両、およびバス停周辺の監視を行い、走行経路への歩行者などの進入にも十分に対処する必要がある。調査検討を行うユースケースとして、下記のようなシチュエーションを設定した。

●外乱発生シチュエーション

「快適な乗り心地」実現として、車速 40km/h から減速度 1.0m/s^2 以下、横加速度 0.8m/s^2 以下、かつ、各ジャーク 1.0m/s^3 以下という条件を設定する。この条件下で正着制御を実行している途中に、バス停周辺にある停止（駐車）車両の死角から歩行者の飛び出しが発生する。以降、正着経路の外乱要因を駐車車両、歩行者問わず、障害物と記載する。

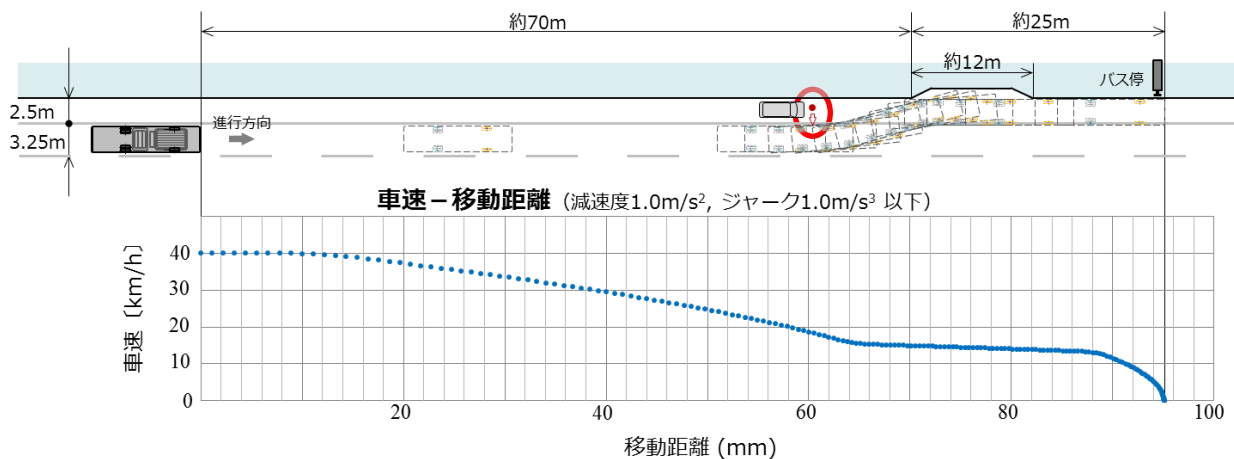


図 3.3.1-1 外乱発生シチュエーション

3.3.2 快適な乗り心地の実現に必要な要件

外乱発生時においても「快適な乗り心地（前後方向： 1.0m/s^2 以下、 1.0m/s^3 以下 横方向 0.8m/s^2 以下、 1.0m/s^3 以下）」を実現するために必要な要件を検討する。バスが一定減速度で減速する場合の停止距離、および、停止時間は次のような関係がある。

$$x_s = -\frac{1}{2} \frac{v_0^2}{a} \quad (\text{式 3.3.2-1}) \quad , \quad t_s = -\frac{v_0}{a} \quad (\text{式 3.3.2-2})$$

v_0 : 速度, a : 加速度, x_s : 停止距離, t_s : 停止時間

減速度が 1.0m/s^2 のときの速度と停止距離の関係を図 3.3.2-1 に、速度と停止時間の関係を図 3.3.2-2 に示す。

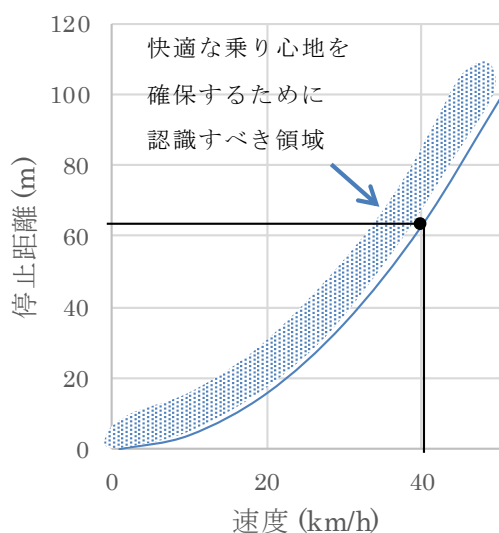


図 3.3.2-1 速度と停止距離の関係

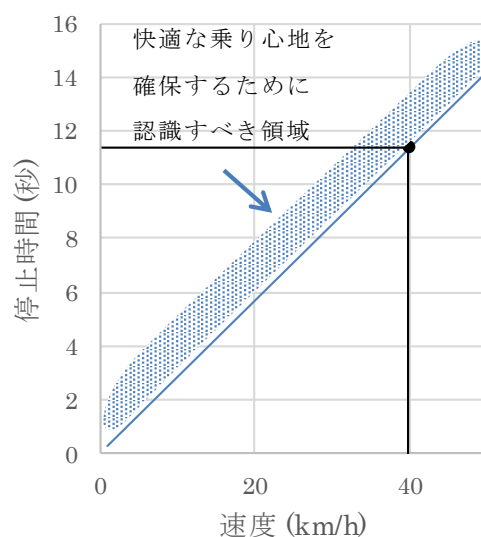


図 3.3.2-2 速度と停止時間の関係

この図から例えばバスが 40km/h で走行している場合、 1.0m/s^2 の減速を維持するためには約 62m 以上先の障害物を認識している必要があり、また同様に、約 11.3 秒先の危険を予測する必要があると考えられる。したがって、3.3.1 で設定した外乱発生シチュエーションにおいて、 1.0m/s^2 の減速を維持し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、その地点でのバスの速度に応じて変化することが分かる。（図 3.3.2-1、図 3.3.2-2 のハッチング部分参照。）

(i) 障害物検知について

外乱要因となる障害物を検知するためセンサの特徴を参考として表 3.3.2-1 に示す。

表 3.3.2-1 センサの種類と特徴（参考）

センサ種類	検知距離	検知対象物の識別
カメラ	約 0.1m～約 60m	可能
3D LIDAR	約 0.1m～約 100m	短距離であれば可能性あり
ミリ波レーダ	約 1m～約 100m	不可能

また、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の方策により死角を極力少なくするとともに、死角の障害物を検知する必要がある。

さらに、クラウドから配信されるダイナミックマップを受信し、正着制御を実行する前からバス停周辺の情報を得る必要がある。ダイナミックマップには下記のような情報を盛り込む必要がある。

- 渋滞、工事、事故、天候など刻々と変化する情報
- 車両から集めたプローブ情報を分析した結果



(出典：SIP 自動走行システム；ダイナミックマップより)

図 3.3.2-3 ダイナミックマップ例

これらを総合したバスの正着制御全体のシステム概要を図 3.3.2-4 に示す。

バスは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。

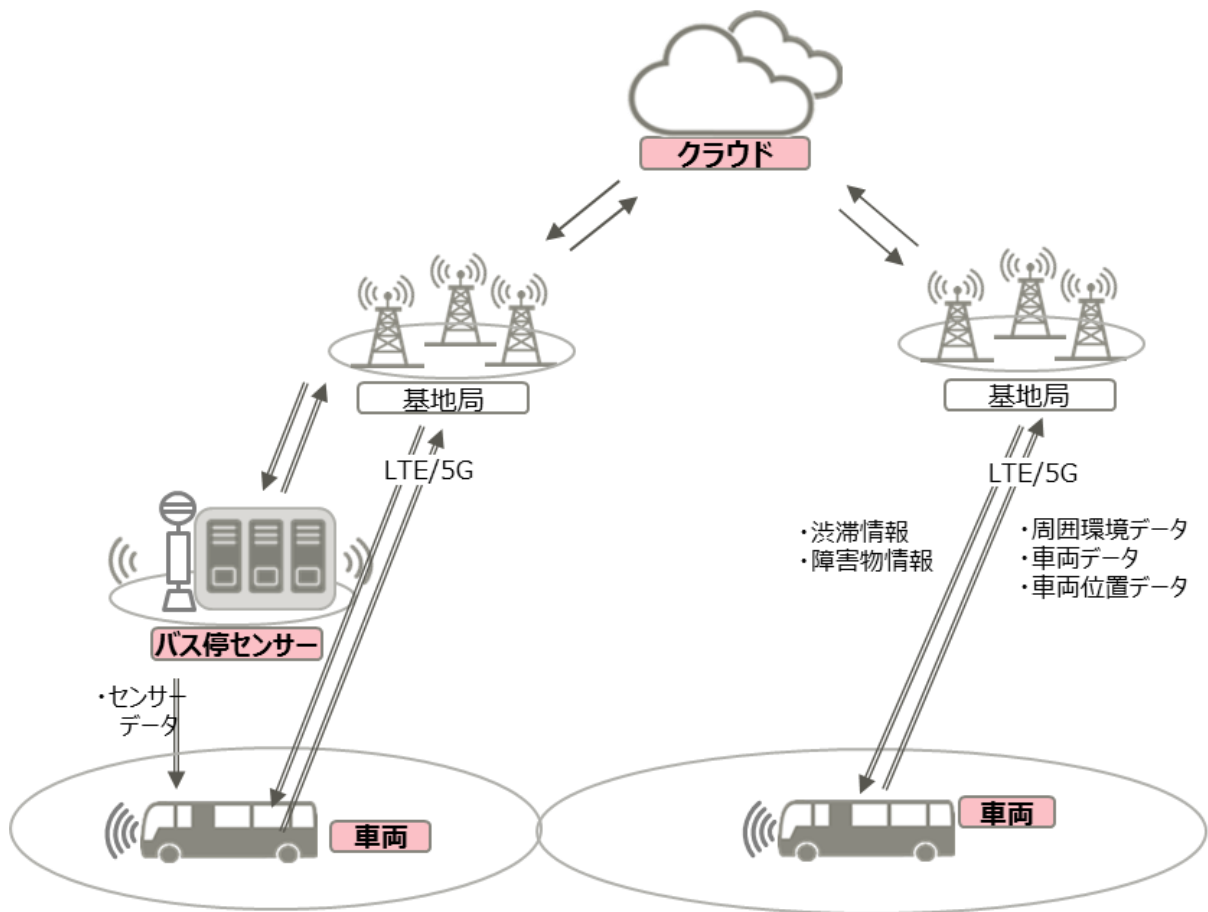


図 3.3.2-4 全体システム構成例

(ii) 障害物の動体予測について

図 3.3.2-1、図 3.3.2-2 の「快適な乗り心地を確保するために認識すべき領域」で障害物を検知することができれば、 1.0m/s^2 での減速が可能となるが、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。

上記 (i) ~ (iii) を常時繰り返し、走行経路を最適化すべく、修正を実行する。

3.3.3 動体予測技術例

走行経路へ進入する障害物を安全に回避するためには、動体の検知・予測が必要であり、以下の機能が技術的な要件となる。

- a) 自転車走行軌跡の取得
- b) オブジェクトの検出
- c) オブジェクトの進行方向・速度の予測

また、動体予測を可能とする手段について代表的な考え方を以下に示す。

(i) 単眼カメラによる動体予測

図 3.3.3-1 のように、オブジェクト検出とそのトラッキング情報から動体を検出する。例えば「人」を機械学習で検出するため、奥行き情報がなくてもオブジェクトの検出が可能である。一方、あらかじめ学習した形状以外や、一部が隠れた場合などで検出不可となる。

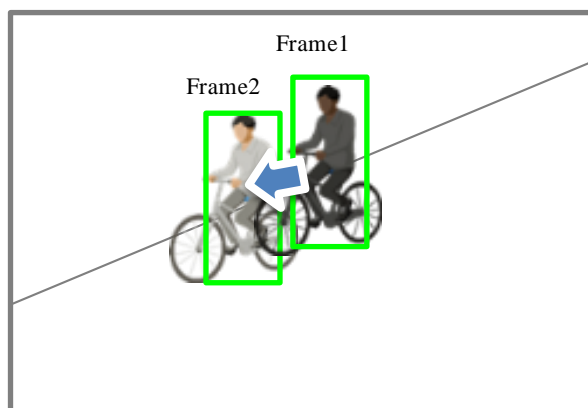
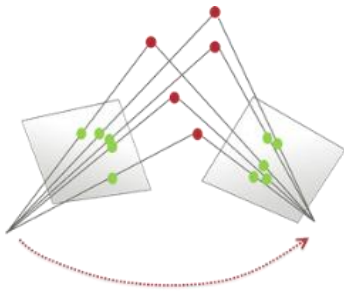


図 3.3.3-1 機械学習によるオブジェクトトラッキング

[処理概略]

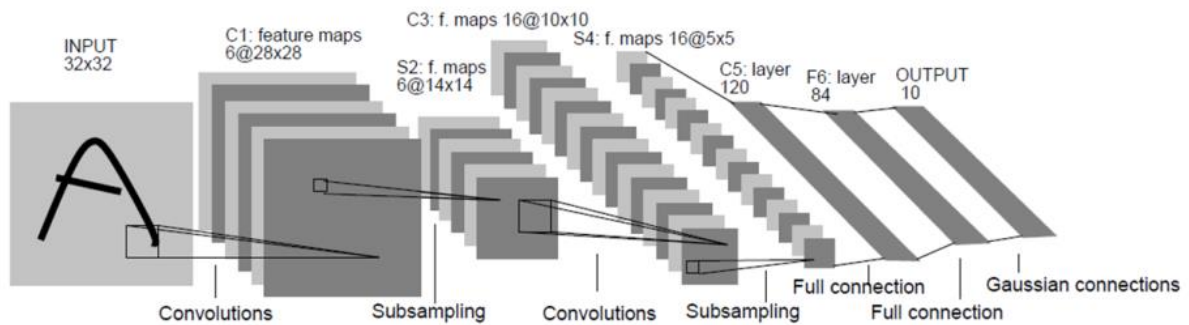
- a) 自転車走行軌跡の取得
 - ・複数フレームの画像から5点アルゴリズム^(※2)などを用いて自転車の走行軌跡を取得
- b) オブジェクトの検出
 - ・CNN^(※3)などを用いたオブジェクト検出を複数フレーム間で実施、トラッキング
- c) オブジェクトの進行方向・速度の予測
 - ・接地位置から画像底辺までのピクセル数を用いて距離を推定
 - ・自転車移動分を差し引き、検出した動体の移動の方向と速度を推定

(※2) 5点アルゴリズム



1組の画像ペアからカメラ移動量・方向を推定する方式

(※3) CNN (Convolutional Neural Network)



(出典 : <http://yann.lecun.com/exdb/publis/pdf/lecun-98.pdf>)

図 3.3.3-2 画像認識 (物体検出など) に有効な多層ニューラルネットワーク

(ii) ステレオカメラによる動体予測

図 3.3.3-3 に示すように、距離情報と走行軌跡情報の差分から動体を数学的に検出する。そのため、物体としては何でも区別なく検出できる。一方、動体も含めた距離情報が必要であるため単眼カメラによる対応は困難で、ステレオカメラが必要となり、比較的高価なセンサを使う必要がある。



(出典 : <http://lelaps.de/projects.html> より)

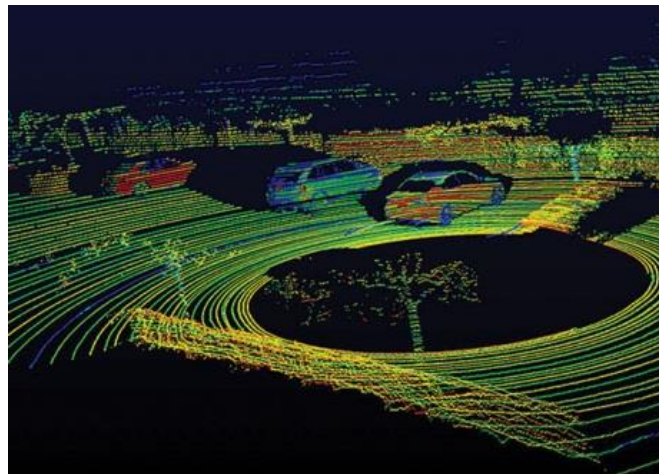
図 3.3.3-3 ステレオカメラによる動体予測

[処理概略]

- a) 自転車走行軌跡の取得
 - ・複数フレームの画像から 5 点アルゴリズムなどを用いて自転車の走行軌跡を取得
- b) オブジェクトの検出
- c) オブジェクトの進行方向・速度の予測
 - ・特徴点を抽出、複数フレーム間でマッピング・トラッキング
 - ・ステレオ視により各特徴点までの距離を推定し、移動量・方向を推定
 - ・各特徴点について自転車移動に伴う動きをマスクすることで、動体の検出、移動の方向・速度を推定

(iii) 3D LIDAR による動体予測

図 3.3.3-4 のように、3D LIDAR による点群データを使って動体を検出する。取得時刻の異なる点群データを静止物に関して位置合せを行い重ね合わせたときに、差分が生じる部分が動体と考えられる。データの信頼度は高いが、センサのコスト高が課題となる。



(出典 : <http://spectrum.ieee.org/transportation/advanced-cars/cheap-lidar-the-key-to-making-selfdriving-cars-affordable>)

図 3.3.3-4 3D LIDAR による点群データ

[処理概略]

- a) 自転車走行軌跡の取得
 - ・車速パルス、操舵角などから自転車の走行軌跡を取得
 - ・3D LIDAR で点群データを取得
- b) オブジェクトの検出
- c) オブジェクトの進行方向・速度の予測
 - ・時間的に隣り合う 2 つの点群データについて、走行軌跡情報などを用いながら位置補正し重ね合せ
 - ・一致部分をマスクし、差分から動体の移動方向、速度を予測

(iv) 手法比較

動体予測技術の実現手法で示した方式を表 3.3.3-1 に整理する。

表 3.3.3-1 動体予測技術の実現方式

センサ種	単眼カメラ	ステレオカメラ	3D LIDAR
データ処理	機械学習(CNN)	画像処理	点群処理
検出の網羅性	学習済みのオブジェクト以外は検出不可	オブジェクトの形状によらず検出可能	オブジェクトの形状によらず検出可能
動体の移動方向・速度の予測精度	低（画面上の位置から予測）	中（色・模様などに依存性あり）	高（Laser 反射時間を計測）
センサのコスト	単眼カメラであるため安価	ステレオカメラを必要とするため比較的高価	LIDAR を必要とするため高価
フレームレート (※4)	数 FPS	数十 FPS	数十 FPS
遅延量 (※4)	大（CNN の network 規模に依存）	中	中

(※4) 見積り・計測による定量化は今後の課題

今後の課題として、以下の項目が考えられる。

- a) PC シミュレーションによる検出精度の比較
- b) 組込化時の処理量・遅延量の定量化

なお、自転車走行軌跡については、車速パルス、操舵角の各センサ情報から推定する方法もあり、PC シミュレーションによる検出精度結果も参考にしながらセンサを決定していく必要がある。

3.3.4 性能要件の検討

バスの運転者の観察眼を上回るような動体予測を行うためには、知覚してから車両の制動が始まるまでの時間短縮と、視野角の広さが必要である。後者はセンサの種類や個数、配置により決定されるため人を上回することは容易である。そのためここでは前者について考える。

一般的に運転者が危険を知覚して行動を始めるまでの「反応時間」、ペダルの「踏替時間」「踏込時間」を合計した「ブレーキ反応時間」は約 0.6 秒とされる。^[2]

20km/h で走行している自転車が 2m 走って進入することで知覚すると仮定すると、その間 0.36 秒であるため、合わせて約 1 秒の時間を要することになる。

これを動体予測に当てはめると、踏替時間、踏込時間はコンピュータ制御では不要とな

るため、「認知」「判断」の時間を如何に小さくするかという問題となる。

「認知」は、場合によってはセンサに近い ECU で処理される場合があるが、ブレーキシステムに指示を出すのは統合制御部であり、統合制御部で「判断」が行われる。「認知」については、カメラ画像（毎秒 30 フレーム）の 5 フレーム分の時間で、一連のデータ処理が完了すると仮定すれば 0.167 秒かかることになる。さらにカメラ画像データの取込みに 1 フレーム分の遅延が発生すると仮定すると 0.2 秒となる。

統合制御部への通信オーバーヘッドについては、送信するデータ量が小さいため無視できる。「判断」においては、誤判断を防止するために連続検出などの正確性向上の処理が必要と思われるが、保護方式は設計思想次第であるため、ここでは「判断」の目標設定の検討は省略する。仮に「判断」を 0.1 秒（速度 20km/h の自転車が約 0.56m 移動で判断）とすれば合計 0.3 秒となり、人と比較して約 1/3 の時間で制動を始めることが可能となる。

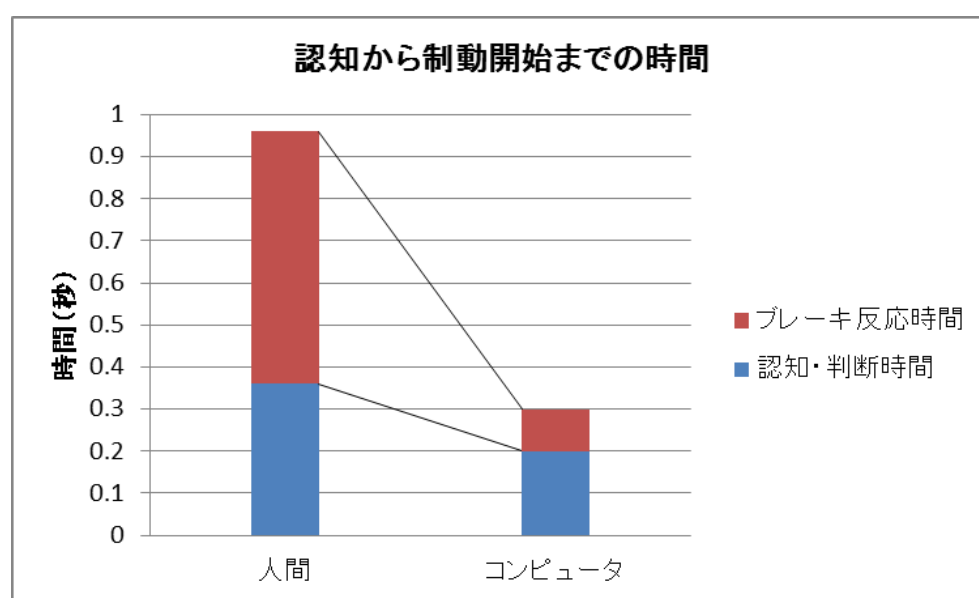


図 3.3.4-1 認知から制動開始までの時間比較

3.3.5 外乱（走行経路への歩行者などの進入）への対応方法考察

昨今のコンピュータによる画像処理技術の性能向上によって、統合制御部における認知・判断から制動開始までの時間は運転者と比較して 1/3 程度に小さくなり、運転者を上回る外乱対応が可能になってきている。

一方、外乱が生じたとしても乗り心地を維持しつつ障害物の手前で完全停止を行うためには、例えば車速 40km/h では危険予測発生地点より 62m 以上手前（11.3 秒以上前）で制動を開始する必要がある。さらに認知・判断に必要な時間を考慮すると、運転者の場合には 10.7m（0.96 秒）、統合制御の場合には 3.7m（0.3 秒）の距離が必要である。つまり、運転者の場合は 72.7m 以上手前から、統合制御の場合には 65.7m 以上手前から障害物の検知が必要になることとなる。このように、認知・判断の時間を短くすることは、障害物の検知距離を短くできる効果があり、正着制御に対しては時間にして 0.6 秒、距離にして 7m

の余裕を生むことになる。

バスが障害物を検知して完全停止するまでの間に、危険度に応じて減速度の上限値を適宜変更することも可能であるが、 3.0m/s^2 以上の減速度の場合、立位乗客の転倒事故が懸念される。そのため、バス停周辺にもセンサを設置して、死角に隠れてバスからは認知できない障害物をより早く検出し、さらに動体予測を行ってバス側に伝達する手段を有すること（バス停周辺の路車間通信と障害物の認知、動体予測技術）が重要になると考えられる。これにより、バス車両からは認知しにくい地点で外乱が発生する可能性が高い場合には、規範速度より早めに減速制御を行うことが可能となり、62m以下で認識することとなって障害物との接触回避のために減速度を強めざるを得ない状況を回避できる可能性が高くなる。バス停周辺のセンサで62m以上手前の時点で正着経路付近の危険予測を行い、早期に減速開始させることで乗り心地を維持しつつ接触事故を低減できる可能性がある。

3.4 制動制御に関する調査

正着制御の精度向上、乗り心地の改善に向けた制動制御に関する取組みについて報告する。本内容はワブコジャパン株式会社にて検討した内容である。

3.4.1 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とが知られている。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。

そこで、対象の大型バス車両へのディスクブレーキシステム（ADB）の搭載を検討した。

(i) 検討結果

対象車両はSカムドラムおよびエアサスコンポーネントを搭載しており、スペースがなくADBの搭載は非常に困難であることが分かった。

a) 前軸側

ショートシャフト Sカムでの Sカムブレーキアッシーであり、Sカムブレーキチャンバ（アクチュエータ）はリムに近接装着されている。また軸の中央部にはエアサスのショックアブソーバが装着されている。前軸の9時方向にはステアリングアームがあり搭載スペースはない。3Dモデルを使用しての詳細な搭載検討なしでは ADB（アクチュエータ含む）の搭載可否に明確な判断はできない。前軸側への ADB 装着については 3D モデルを使用したさらなる検討が必要不可欠である。詳細を以下に示す。

図 3.4.1-1 に前軸側の右ホイールエンド①、図 3.4.1-2 に前軸側のアクスルビーム①、ステアリングロッド②、アクスルブラケット③を示す。

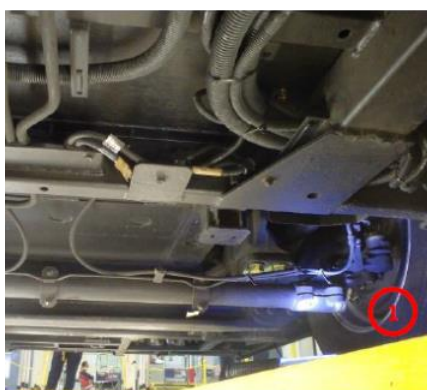


図 3.4.1-1 前軸ホイールエンド（右）



図 3.4.1-2 前軸ホイールエンド（右）

図 3.4.1-3 に示すチャンバブラケット③がホイールリム⑤とステアリングリンク④に近接しており、操舵を考慮した場合、ブレーキチャンバとベローズ①とショックアブソーバ②の左側にスペースがない。

図 3.4.1-4 のスラックアジャスタ②とチャンバブラケット③は狭いスペース中に収まっている。ステアリングアーム①の右側には ADB 装着に対しての追加の障害（ブレーキチャンバとの干渉）がある。

前軸側の部品装着は低床バスの限られたスペースに最適に配置されている。エアサスペンションとステアリングの装着はある程度のスペースを必要とする。ADB 装着に対して十分なスペースがあるとは言い難い。しかしながら 3D モデルを使用しての詳細な搭載検討を行えば、ADB 装着に対しての解決策を見出す可能性はある。

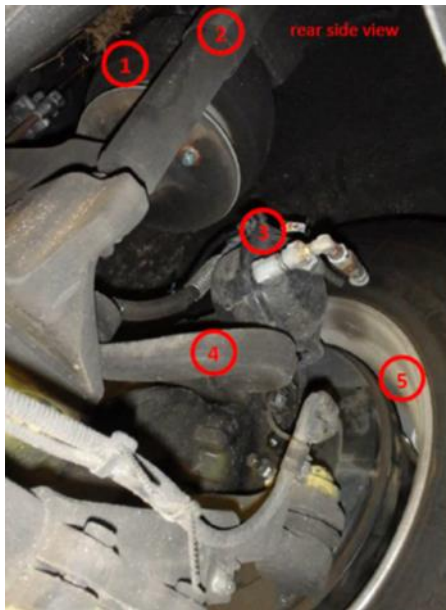


図 3.4.1-3 前軸ホイールエンド (右)

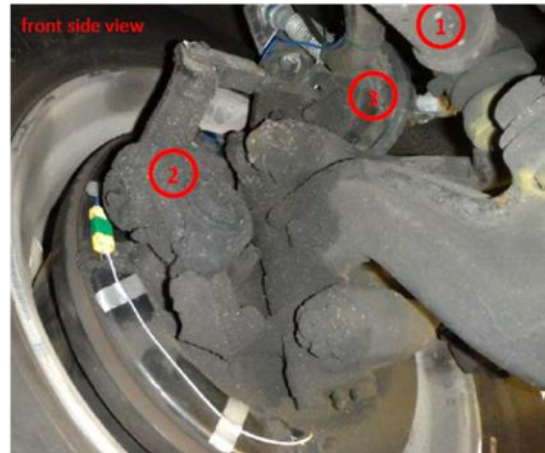


図 3.4.1-4 前軸ホイールエンド (右)

b) 後軸側

後軸はエアサスペンション構成であり、軸前後にエアベローズとショックアブソーバが装着されている。後軸のドラムブレーキはロングシャフトにて車両センター部に装着されているスラックアジャスタ付アクチュエータにて作動されている。大型のブラケットがサスペンション部品とシャシによって後軸に接続されている。よってホイールリムとブラケットの間隔は 100~150mm しかなく、ADB およびブレーキチャンバの装着スペースはない。以上より、ADB の装着の可能性については、後軸側は前軸側以上に困難である。

前軸側が 3D モデルの検討によって ADB 搭載可能となった場合でも、前軸側 ADB+後軸側ドラムのコンビネーションでは正着制御時のブレーキ性能向上には疑問が残るところである。詳細を以下に示す。

図 3.4.1-5 より、後軸側には大型のブラケット②が装着されている。エアサスペンションは後軸を挟んで前後に 2 個のエアベローズとショックアブソーバが装着されている。なお、エアベローズとショックアブソーバはブラケット②に隠れており確認できない。S カムドラム①はロングシャフトにてスプリングブレーキチャンバ③とスラックアジャスタ④はアクスルブラケットと後軸中心に装着されている。

図 3.4.1-6 より、アクスルブラケットとエアサスペンション部品の搭載状況はスプリングブレーキ付 ADB を装着するスペースがないことを示している。ドラムブレーキのダストカバー①とアクスルブラケット②の間隔はおおよそ 100~150mm である。これに対し ADB のブレーキチャンバを装着するには、ダストカバー①の横に 250~300mm のスペースが必要となる。

後軸側への ADB 装着は前軸側以上に困難であり、サスペンション部品の大幅な装着位置の変更が必要となる。



図 3.4.1-5 後軸ホイールエンド (左)



図 3.4.1-6 後軸ホイールエンド (左)

3.4.2 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。

【参考文献】

[1] 榎本衛ほか：乗り心地の向上をめざして，RRR Vol.67 No.3 p.4 (2010)

[2] 最高速度違反による交通事故対策検討会

「資料 5 自動車の走行速度の低下による交通事故の低減効果等」,平成 21 年 9 月 2 日

第4章 まとめ

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。