
平成 23 年度 修士学位論文

ロジスティック回帰モデルを用いた
確率型ドライバ判断モデルの構築と有効性検証

指導教員 早川 聡一郎 准教授

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻

廣瀬 昭貴



目次

第 1 章	序論	1
	1.1 研究背景	1
	1.2 研究目的	2
	1.3 本論文の構成	3
第 2 章	ロジスティック回帰モデル	4
	2.1 ロジスティック回帰モデルの概要	4
	2.2 パラメータ推定	7
	2.3 運転行動判断モデルとしての使用方法	8
	2.3.1 ドライバの行動判断について	8
	2.3.2 設定した閾値を用いた行動判断の条件	9
第 3 章	実験装置と実験環境	11
	3.1 ドライビングシミュレータの概要	11
	3.1.1 DS の構成	11
	3.1.2 情報収集プログラム	13
	3.1.3 DS 使用時の実験環境	14
	3.2 運転情報収集車	17
	3.2.1 運転情報収集車の概要	17
	3.2.2 搭載 PC	18
	3.2.3 車体挙動測定機器	18
	3.2.4 運転情報収集機構	19
	3.2.5 実験時合図用 LED	19
第 4 章	ドライバの車線変更行動判断 モデルの同定と検証	21
	4.1 車線変更行動判断モデル同定実験	21
	4.2 車線変更行動判断モデルの同定	23
	4.2.1 車線変更行動判断モデル同定に使用する各変数の定義	23
	4.2.2 車線変更行動判断の定義	23

4.2.3	結果変数と説明変数の定義	25
4.2.4	実験データからの結果変数の抽出	28
4.2.5	車線変更行動判断のモデル化	32
4.3	運転支援システムの DS への実装と閾値設定方法	35
4.3.1	運転支援システムの概要	35
4.3.2	車線維持システムの制御系の構築	36
4.3.3	車線変更システムの制御系の構築	40
4.3.4	ドライバ毎の閾値の設定方法	42
4.4	車線変更行動判断モデルの検証	43
4.4.1	車線変更行動判断モデル検証実験の実験条件	43
4.4.2	車線変更行動判断モデル検証実験の実験結果	43
第 5 章	ドライバの停止行動判断モデルの同定と検証	49
5.1	車線変更行動判断モデルにおける問題点	49
5.2	停止行動判断モデル同定実験	50
5.3	停止行動判断モデルの同定	52
5.3.1	停止行動判断モデル同定に使用する各変数の定義	52
5.3.2	停止行動判断の定義	53
5.3.3	実験データからの結果変数の抽出	54
5.3.4	停止行動判断モデル同定結果	57
5.3.5	停止行動判断定義の検証	61
5.4	停止行動判断モデルの検証	64
5.4.1	共通モデルの各ドライバへの適応方法	64
5.4.2	停止行動判断モデルの検証実験条件	64
5.4.3	停止行動判断モデルの検証実験結果	66
5.4.4	実験結果についての考察	74
第 6 章	結論	78
6.1	まとめ	78
6.2	今後の課題	79

参考文献	80
謝辞	83

第1章

序論

1.1 研究背景

我が国の交通事故発生件数は、Fig. 1.1 に示される発生件数推移から分かるように昭和50年頃から増加傾向となり、平成15年にピークを迎えて以来減少傾向にある。また、死亡者数はピークであった平成4年以降は減少傾向を維持し、平成22年には4863人まで減少した。しかし、交通事故発生件数・死亡事故数共に依然として多い状況であり、交通事故による負傷者や死者を減少させることが大きな課題となっている^[1]。

近年、交通事故減少のための手段として、交通事故を未然に防ぐことを目的とした自律走行システム^{[2][3][4]}や運転支援システム^{[5][6][7][8][9]}、またこれらに使用するための技術に関する研究が盛んに行われている。また、道路交通の安全化や効率化を目的としたITS(Intelligent Transport Systems: 高度交通システム)の一部である先進安全自動車(ASV: Advanced Safety Vehicle)が推し進められ、先進技術を搭載した自動車はますます増えていくことが予想される^{[10][11]}。

交通事故の大半はヒューマンエラーによるものであると言われており、予防安全技術により事故を未然に防ぐ技術の普及は著しい^{[12][13][14]}。しかし、これまでの予防安全技術は機能の実現を優先とし、その効果は平均的なドライバーに対応するものであり、ドライバー毎の運転特性の差異を考慮して実現されたものではない^[15]。今後、自動車をより安全なものとするために、自動車を運転する個々のドライバーに適応できる各種の予防安全技術の開発が求められている。このような、個々のドライバーの特性に対応したシステム設計を実現するために、ドライバーの自動車運転特性を解析し、その解析結果を基にドライバーの運転行動を数値モデルで表現し、その数値表現された運転行動モデルを用いてのシステム設計技術が必要となる^{[16][17]}。

このような背景の中、本研究室ではドライバの運転行動のモデル化と、そのドライバモデルの車両運動制御システム設計への応用を目指した研究を各種行っている[18][19][20]。これは、ドライバの行動を離散的な行動判断と連続的な動作に分けるハイブリッドシステム表現を用いる確定型モデル同定手法であり、同定されたドライバ運転行動モデルを用いて自律走行車の車両運動制御系に実装することで、人間のような運転を行う自律走行車実現を目指している。この手法はある特定のドライバの行動を正確に表現することに主眼を置いており、他の運転特性の異なるドライバに対して適応することが難しい。

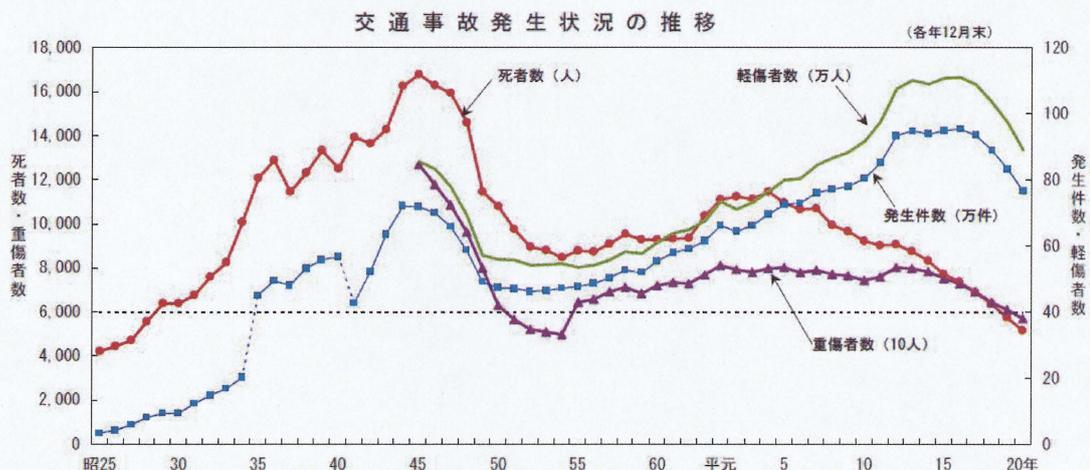


Fig. 1.1 Process of traffic accidents

1.2 研究目的

このように、従来本研究室でのドライバの運転行動モデル同定は、基本的に特定のドライバに特化したモデル同定手法であった。その手法によってドライバの数値モデル表現は実現できているが、多様なドライバの運転特性を表現することには対応できない。このようなことから、本研究ではドライバの「行動判断」に着目して、多様なドライバの運転特性が表現できるモデル表現を検討する。

ドライバが自動車運転中に何らかの行動を起こす場合、ドライバはその行動を起こすために無意識に「行動判断」していることになる。この行動判断は確率的なばらつきを伴う二値変数で表現できると考えられる。そのため、本研究では従来の確定型モデルではなく、確率型モデルを用いてドライバの確率型運転行動判断モデル（以下運転行動判断モデル）を用い、各ドライバの運転特性の差異を表現できるモデルを提案する。この確率的なばらつきを表現できる運転行動判断モデルとして、ロジスティック回帰モデル (Logistic Regression Model)^{[21][22][23][24]}を用いることを考える。

本研究では、このロジスティック回帰モデルを運転行動判断モデルとして使用可能であるかの検証と、そのドライバの運転行動判断モデルのシステム実装レベルでの有効性の検証を行うことを目的とする。まず、ドライバの車線変更行動判断モデルの同定と運転支援システムへの実装による検証を目的として、ドライビングシミュレータを用い、ロジスティック回帰モデルがドライバの運転行動判断支援を行うことができるかの検証と、ドライバの運転特性の差異の表現ができるかの検証を行う。次に、ロジスティック回帰モデルがドライバの停止行動判断を表現できるかの検証と各ドライバの運転特性の差異の表現が可能かを検証することを目的として、一人乗り電気自動車を用い、現実走行環境下において検証を行う。これらの検証より、提案するロジスティック回帰モデルを用いた運転行動判断モデルの有効性を確認する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。まず、第2章では本研究で使用するロジスティック回帰モデルを説明する。第3章では本研究で使用するドライビングシミュレータと運転情報収集車について説明する。第4章ではロジスティック回帰モデルを用いたドライバの車線変更行動判断モデルの同定と運転支援システムへの実装による検証について説明する。第5章ではロジスティック回帰モデルを用いたドライバの停止行動判断モデルの同定と検証について説明する。最後に、第6章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。

第2章

ロジスティック回帰モデル

本章では、本研究で使用するロジスティック回帰モデルについて述べる。2.1 節ではロジスティック回帰モデルの概要について述べる。2.3 節ではロジスティック回帰モデルを運転行動判断モデルとして使用方法について説明する。

2.1 ロジスティック回帰モデルの概要

ドライバの行動判断は、ある物事を「行う」、「行わない」などの確率的なばらつきを伴う 2 値変数で表現できると考えられる。このため、「行う」、「行わない」という行動判断を確率的にモデル表現できるロジスティック回帰モデルを本研究では使用することを考える。このロジスティック回帰モデルは主に疫学分野において幅広く利用されているモデルである [25]。2 値の結果変数（ある病気である、病気ではないなど）が発生する確率を連続変数である説明変数（体温、咳、腹痛の有無など）を用いてモデル化でき、結果変数が発生する可能性を確率を用いて表すことができる。したがって、ロジスティック回帰モデルはある条件下における結果変数の発生する確率を算出することに適したモデルであると考えられる。本研究ではこのロジスティック回帰モデルを利用して、ドライバの確率的なばらつきを伴う行動判断をモデル化し、運転行動判断モデルを同定する。

ロジスティック回帰モデルは一般に、ある事象が発生する確率 p を、その事象の発生要因となる変数群 $x = (x_1, x_2, \dots, x_r)$ (説明変数) で説明しようとする場合、説明変数という状態の下で事象が発生するという条件付き確率 $p(x)$ で表し、これを

$$p(x) = p\{\text{Occurrence} | (x_1, x_2, \dots, x_r)\} \quad (2.1)$$

とし、さらに式(2.1)を

$$p(x) = F(x_1, x_2, \dots, x_r) \quad (2.2)$$

という関数 F を用いて表す。ここで、 r 個の変数の影響を線形な合成関数を使用して表すと

$$Z = \eta_0 + \eta_1 x_1 + \eta_2 x_2 + \dots + \eta_r x_r \quad (2.3)$$

となり、これを関数 F に Z のロジスティック関数 (Logistic Function)

$$p(x) = F(Z) = \frac{\exp(Z)}{1 + \exp(Z)} \quad (2.4)$$

としたモデルがロジスティック回帰モデルである。式(2.4)に式(2.3)の計算結果を代入することにより、その条件の下での現象の確率を算出することができる。また、式(2.4)を $-\infty$ から ∞ までの範囲で変動する説明変数の合成関数 Z を横軸に、 0 から 1 までの範囲で値を持つ確率 p を縦軸にとりグラフ化すると Fig. 2.1 のようになる。横軸の Z が正の際に出力確率が 0.5 以上であり、 Z が負の際に出力確率が 0.5 以下である。ここで η はパラメータであり、このパラメータの求め方は2.2節で説明する。

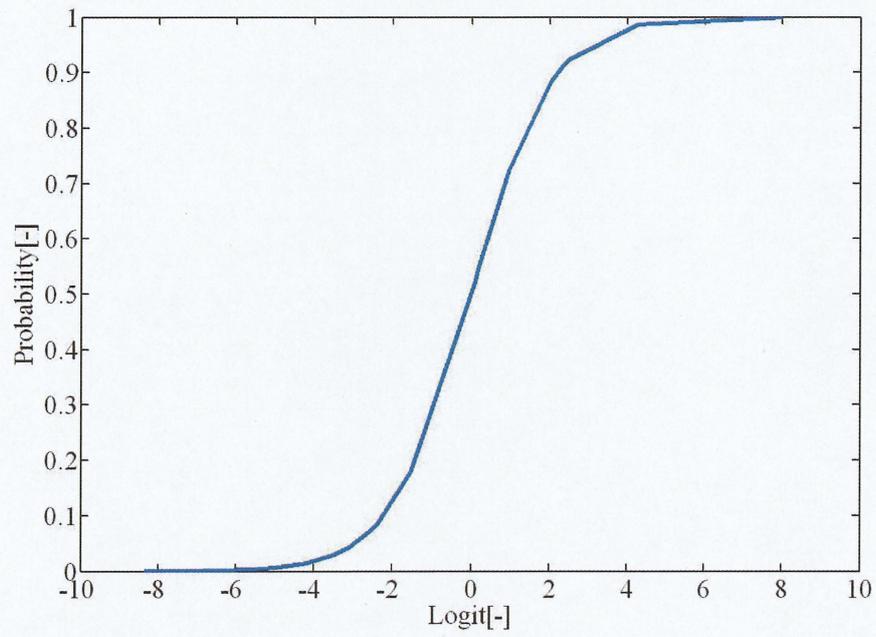


Fig. 2.1 Logistic Curve

2.2 パラメータ推定

本研究では、ロジスティック回帰モデルで使用するパラメータの推定に、最尤推定法を用いる。

独立な n 個の標本を収集したとし、まず以下のように定義する。

- 2値の確率変数 Y のベクトル

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T$$

- 確率変数 Y の観測値ベクトル

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$$

- 説明変数 x の行列

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$$

- 第 i 標本の説明変数ベクトル

$$x_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})^T$$

ここで、 $p = Pr\{Y = 1\}$ 、 $1-p = Pr\{Y = 0\}$ とすると、ロジスティック回帰モデルでは、出力確率 p を説明する説明変数ベクトルの線形結合のロジスティック関数

$$p(x_i) = \frac{\exp((1, x_i^T)\eta)}{1 + \exp((1, x_i^T)\eta)} \quad (2.5)$$

で表現したものである。ここで、

$$x_i^T = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ri}) \quad (2.6)$$

$$\eta^T = (\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_r) \quad (2.7)$$

である。これを変形すると、

$$\log \frac{p(\mathbf{x}_i)}{1-p(\mathbf{x}_i)} = (\mathbf{1}, \mathbf{x}_i^T) \boldsymbol{\eta} = \eta_0 + \eta_1 x_{1i} + \dots + \eta_r x_{ri} \quad (2.8)$$

であり、式(2.8)を「ロジット」と呼ぶ。

このモデルのもとで、確率変数 \mathbf{Y} の観測値が \mathbf{y} となる確率は、

$$Pr\{\mathbf{Y} = \mathbf{y} | \boldsymbol{\eta}\} = \prod_{i=1}^n p(\mathbf{x}_i)^{y_i} (1-p(\mathbf{x}_i))^{1-y_i} \quad (2.9)$$

となる。この確率を観測値 \mathbf{y} が与えられた条件下でパラメータ $\boldsymbol{\eta}$ の関数として

$$like(\boldsymbol{\eta}) = \prod_{i=1}^n p(\mathbf{x}_i)^{y_i} (1-p(\mathbf{x}_i))^{1-y_i} \quad (2.10)$$

としたものを尤度、または尤度関数という。

尤度 $like(\boldsymbol{\eta})$ を最大にするには、対数尤度関数

$$L(\boldsymbol{\eta}) = \log\{like(\boldsymbol{\eta})\} = \sum_{i=1}^n \{y_i (\mathbf{1}, \mathbf{x}_i^T) \boldsymbol{\eta} + \log(1-p(\mathbf{x}_i))\} \quad (2.11)$$

を最大にする。このような $\boldsymbol{\eta}$ を求める。

2.3 運転行動判断モデルとしての使用方法

2.3.1 ドライバの行動判断について

2.1節のようにロジスティック回帰モデルは、ある事象が発生する可能性をその事象が発生する要因となる変数群である説明変数を使用し、結果変数が発生する確率として

表すことができるモデルである。このモデルを運転行動判断モデルとして利用するための方法について述べる。

本研究では、ロジスティック回帰モデルの出力確率に対して閾値を設定し、このモデルを使用してドライバが行動判断すると判断する場合を以下の2つに分ける。

- 設定した閾値以上であればドライバが行動判断すると判断する場合
- 設定した閾値にてドライバが行動判断すると判断する場合

これは自動車運転中のドライバの行動判断には、行動判断すると判断すべきポイントが曖昧なものどそうでないものがあるからである。例えば、ドライバが車線変更行動を判断する場合のステアリング操作判断は、危険環境下でなければいつ行っても良いため、運転行動判断モデルによってドライバが行動判断すると判断する場合も危険環境下でなければ良い。しかし、ドライバが停止行動を判断する場合のアクセル・ブレーキ操作判断は運転行動判断モデルによってドライバが行動判断すると判断する際の遅れによって危険を伴う状況に陥りかねない。これらの理由により、本研究では上記2通りの行動判断パターンについて検証する。

したがって、本研究ではロジスティック回帰モデルを運転行動判断モデルとして使用する方法として、「ロジスティック回帰モデルの出力確率に行動判断のための閾値を設定し、出力確率と比較して行動判断が発生するかを判定する方式」をとるが、各条件での運転行動判断モデルとしての使用方法については以下の項で説明する。

2.3.2 設定した閾値を用いた行動判断の条件

ロジスティック回帰モデルを用いた運転行動判断モデルとしての使用方法を 2.3.1 項で述べたが、ここではその詳細について述べる。

まず、運転行動判断モデルを使用して設定した閾値以上であれば行動判断すると判断する場合は、閾値を設定した上で、その閾値を境として閾値以上ならば行動判断すると判断するをした、閾値未満であれば行動判断していないとして条件域を設定する方式である。Fig. 2.1 の図において、閾値を仮に 0.5 に設定する。そしてロジスティック回帰モ

デルの出力確率を閾値と比較し、0.5 以上においてドライバからの入力があればある行動を判断した、0.5 未満ではある行動を判断していないとする。

また、運転行動判断モデルを使用して設定した閾値にて行動判断すると判断する場合は、閾値を設定した上でその閾値であれば行動判断した、それ以外は行動判断していないとする場合である。Fig. 2.1 の図において、閾値を仮に 0.5 に設定する。そしてロジスティック回帰モデルの出力確率を 0.5 と比較し、0.5 の際にある行動を判断した、それ以外はある行動を判断していないとする。

第3章

実験装置と実験環境

本章では、本研究で用いた情報収集可能なドライビングシミュレータ（以下 DS）と1人乗り電気自動車について述べる。3.1節では、情報収集実験と車線変更を行う運転支援システムを用いた運転行動判断モデルを検証する際に使用した DS について述べる。3.2節では、ドライバの運転情報収集実験に用いた1人乗り電気自動車について述べる。

3.1 ドライビングシミュレータの概要

3.1.1 DS の構成

本研究で用いる DS の構成を Fig. 3.1 に示す。また、DS の外観を Fig. 3.2 に示す。本研究で用いるドライビングシミュレータは3台の PC、ステアリング、アクセル、ブレーキ、スクリーン3枚、小型モニター2台とルームミラー型モニターを1台で構成されている。スクリーンとモニターについては、DS の環境を表示するために使用し、前方映像、後方映像ともに3面化している。このようにして、ドライバの視野の多くを運転映像を示させることにより、DS への没入感を増大させている。ここで、PC の詳細を Table 3.1 に示す。

PC2, PC3 は PC1 より送られた車両運動情報をもとにリアルタイムで現在の自車内からの風景を表示する。それぞれの表示状態にずれがないようにするため、PC3 台をそれぞれ Interface 社の 3m 版メモリンクを用いてデータの送受信を可能にしている。

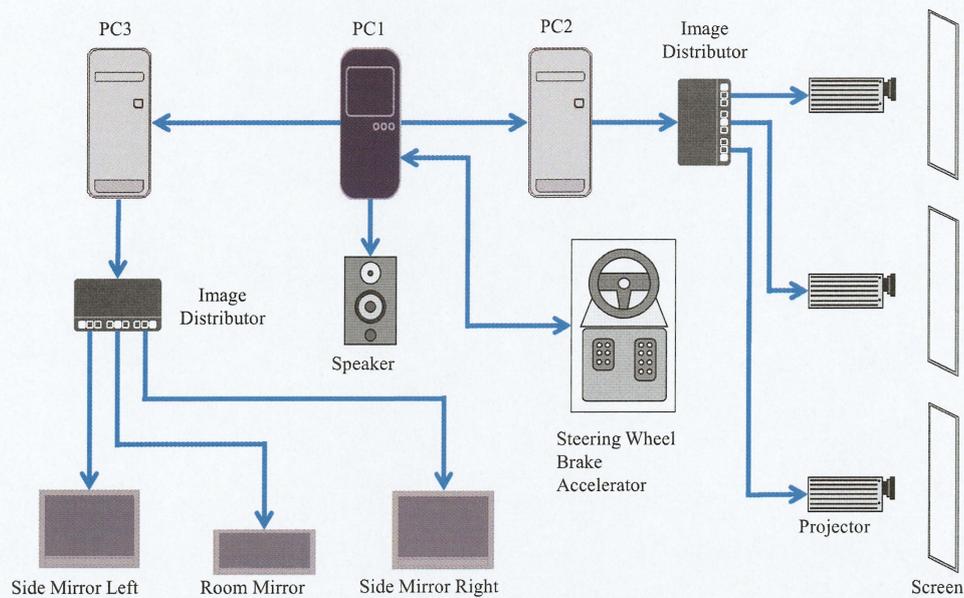


Fig. 3.1 Configuration of driving simulator

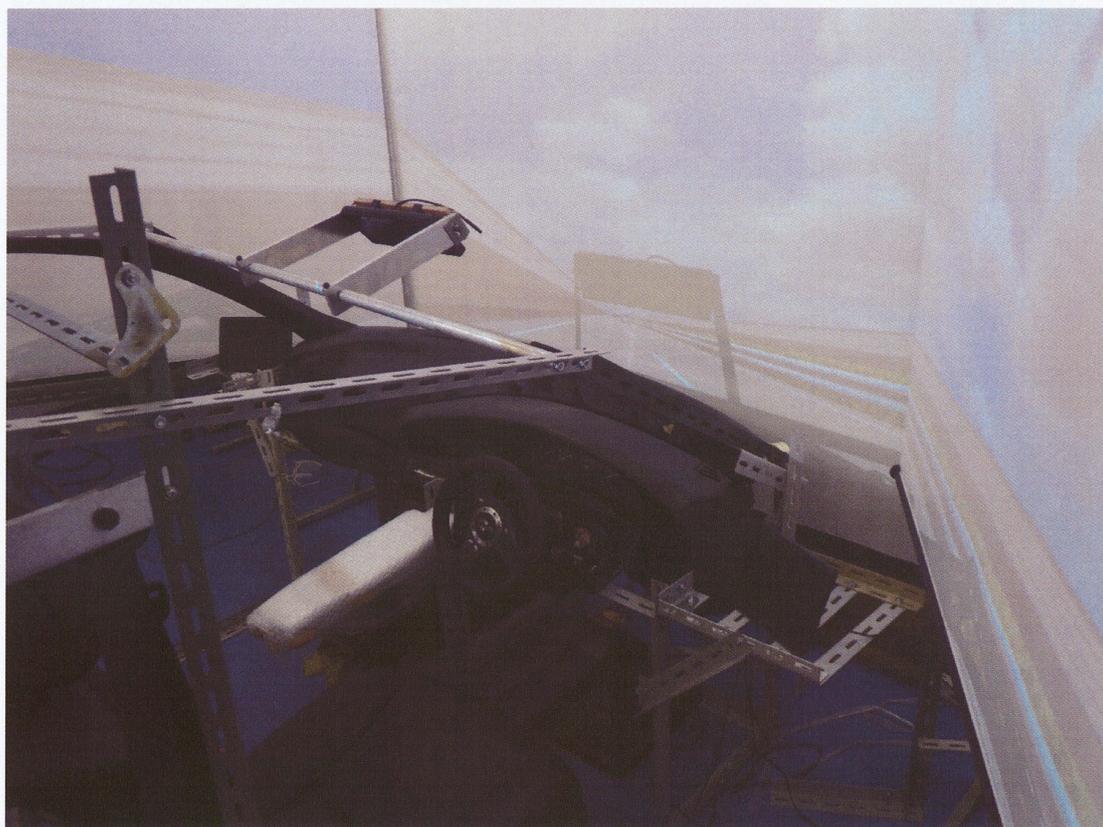


Fig. 3.2 Outside view of DS

Table 3.1 Configuration of DS

	For control (PC1)	For projection (PC2)	For side mirrors (PC3)
OS	Windows XP Home Edition	Windows XP Professional	Windows XP Professional
CPU	Core 2 Duo 3.16GHz	Pentium 4 3.20GHz	Pentium D 3.40GHz
Memory	3.30GB RAM	2.00GB RAM	3.20GB RAM
Graphic board	NVIDIA GeForce 9500GT	NVIDIA Quadro FX5500	NVIDIA GeForce 9800GT
Configuration software	Carsim(ver 5.15) C++ builder DirectX library	Visual C++ DirectX library	Visual C++ DirectX library
Display device	Standard monitor	EB-1770W×3	8.0inches LCD monitor×2 10.2inches LCD monitor
Connected device	GT FORCE Pro Speaker		

3.1.2 情報収集プログラム

PC1 には USB を介してステアリングコントローラが接続されており、ステアリングコントローラからアクセル、ブレーキへ接続されている。また、エンジン音の再生に使用するスピーカも接続されている。

Carsim は、車両挙動情報を計算するために用いる。本研究では Version 5.15 を用いる。Carsim はドライバの運動情報である、ステアリングとアクセル、ブレーキの操作情報や走行環境などのパラメータを入力として受け取り、車両ダイナミクスの計算をリアルタイムで行い、出力として車両の速度やエンジン回転数、車体姿勢などを出力する。また、これらの入力を自由に変更することができ、その条件を満たす車両挙動をシミュレーションすることができる。

統合管理ソフトは主にステアリングなどのデバイスからドライバの運転情報を収集し、その情報を Carsim に送信するとともに Carsim から車両の各種状態情報を受け取り、ロギングや反力などをデバイスに出力する。

3.1.3 DS 使用時の実験環境

本研究で DS を用いた実験時に使用した実験環境の模式図を Fig. 3.3 に示し、直線部の様子を Fig. 3.4 に、カーブ部の様子を Fig. 3.5 に、サイドミラーのうち、右サイドミラーに表示される映像例を Fig. 3.6 に示す。

本研究では実験環境を高速道路とし、すべての区間において片側 2 車線の第 1 種第 1 級道路としている。コースを走り続けると 1 周できるようになっている。コースは Fig. 3.3 のように 6 つの区間に分けることができる。区間 2、区間 4 は半径 500m のカーブとなっており、区間 6 は半径 700m のカーブとなっている。各区間の長さは走行車線走行時において区間 1 が約 1500m、区間 2 が約 800m、区間 3 が約 400m、区間 4 が約 800m、区間 5 が約 1500m、区間 6 が約 2200m で全長は約 7200m となっている。天候は晴れ、路面は乾いたものとし、路面摩擦係数は 0.7 に設定した。この環境内を走行している自動車は、ドライバが運転する自車と、走行車線を走行しスタートの際に自車の前方を走行する走行車（以下前方車）、追越車線を走行し実験中に自車を追い越していく走行車（以下追越車）、対向車線を走行する対向車である。前方車は大型トラック 3 種類、ワゴンタイプの乗用車の全 5 台が走行している。追越車はミニバンタイプの乗用車、コンパクトタイプの乗用車が全 18 台走行している。また、対向車も同形状の自動車が 6 台走行している。

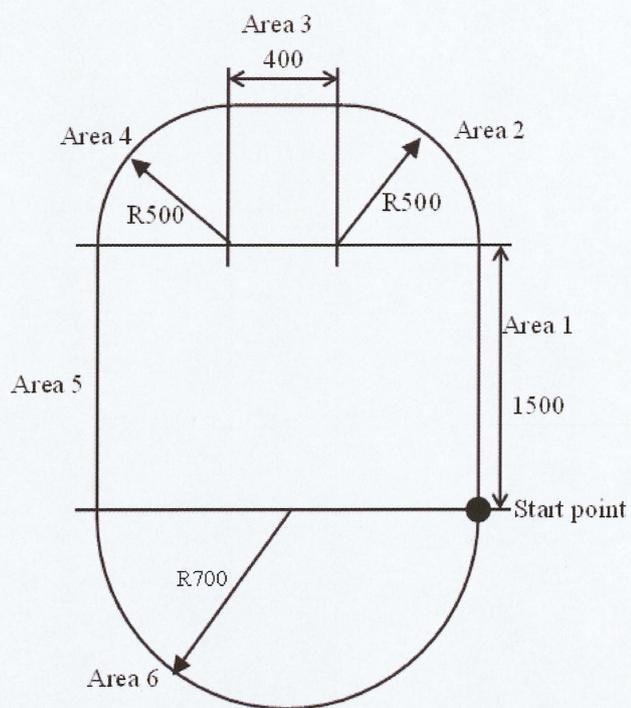


Fig. 3.3 Pattern diagrams of experiment environment

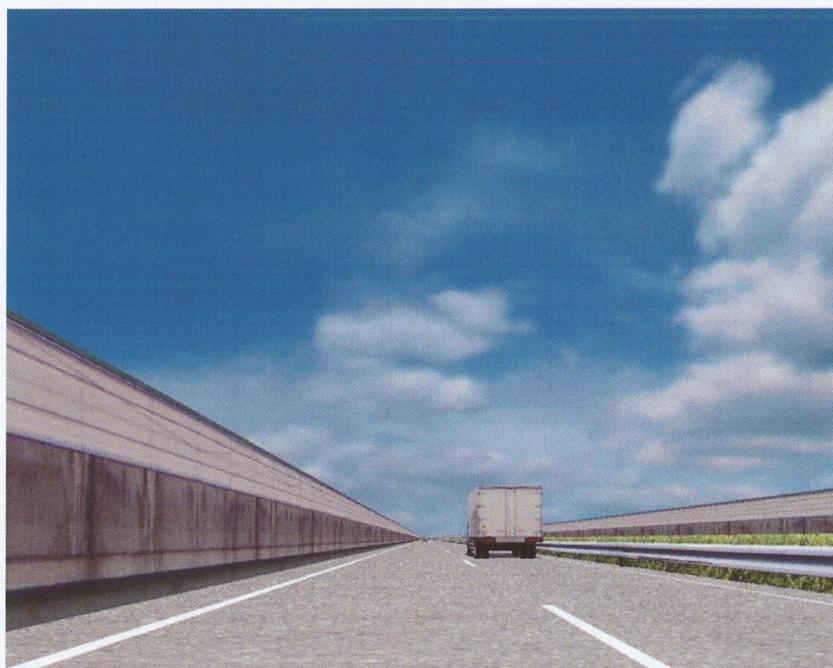


Fig. 3.4 Straight area

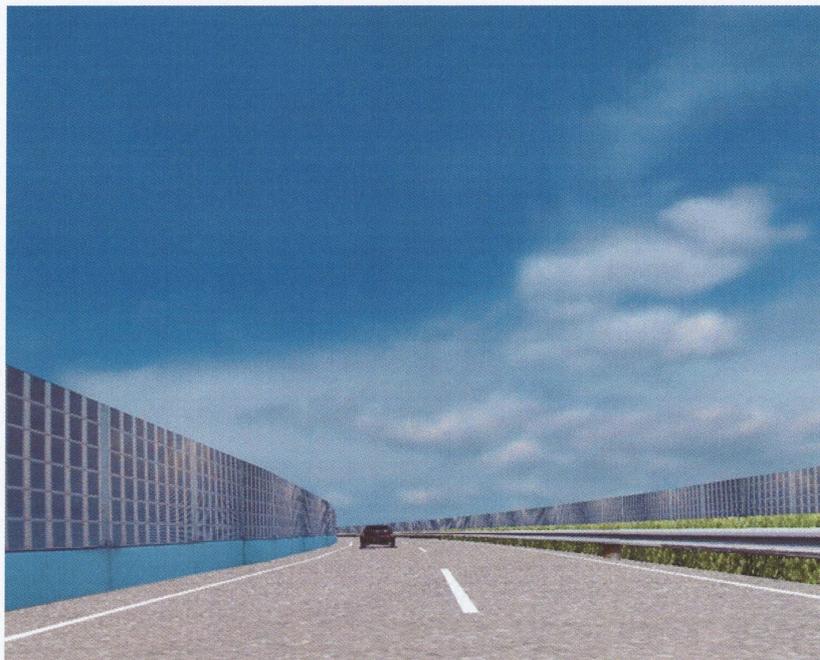


Fig. 3.5 Curve area

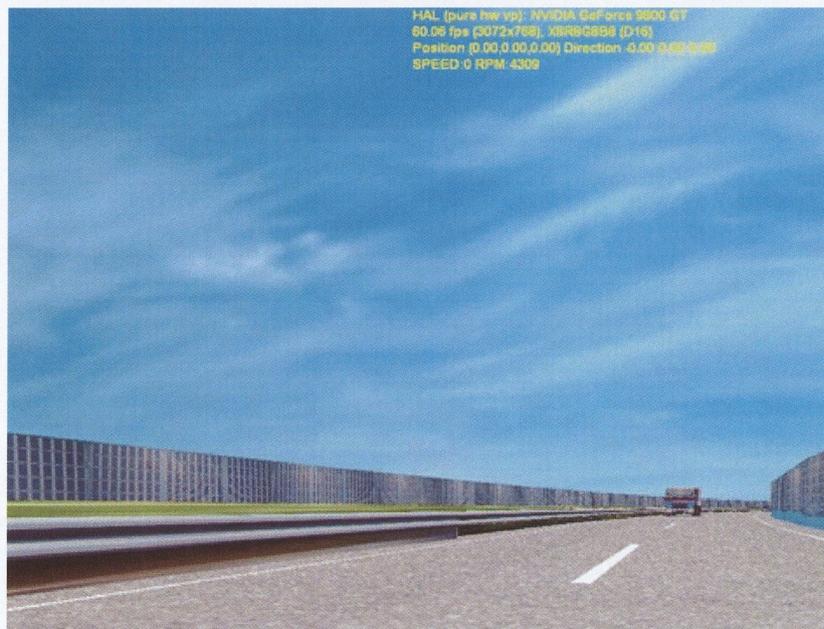


Fig. 3.6 Side mirror view

3.2 運転情報収集車

3.2.1 運転情報収集車の概要

本研究で使用した運転情報収集車兼自律走行車 MURV-1 翠（以下 COMS）の外観を Fig. 3.7 に示す。なお、本研究では MURV-1 の自律走行機能は使用せず、あくまでも運転情報収集機能のみを使用している。この COMS は市販の 1 人乗り電気自動車 COMS（デリバリー）を改造したものである。



Fig. 3.7 Outside view of COMS

3.2.2 搭載 PC

PC の諸元を Table 3.2 に示す。OS は Windows XP を採用し、記憶媒体には衝撃に強く省電力である SSD を採用した。搭載場所はトランクの中である。本制御用 PC には AD ボード、カウンタボードが搭載されている。次に各拡張ボードについて解説する。

AD ボードは、ハンドル、アクセル、ブレーキに取り付けられた操作量検出センサからの出力電圧と、F/V コンバータからの速度出力電圧、G センサからの出力を読み込むに用いられる。AD ボードは Interface 社の PCI-3155 を用いており、分解能は 16bit で、電圧レンジは $\pm 10\text{V}$ である。カウンタボードは COMS の左右後輪に取り付けられたホイールエンコーダの出力を取り込み、走行距離を検出するために使用する。カウンタボードは 32bit カウンタを持つ Interface 社の PCI-632206 を用いた。

Table 3.2 Specification of control computer

CPU	Pentium 4 (Intel)
CPU Clock	3.20 GHz
Main Memory	1GB
Main Board	775i65G(ASRock)
SSD	64GB
OS	Windows XP
AD Board	PCI-3155
AD/DA Board	PCI-3523A
Counter Board	PCI-632206

3.2.3 車体挙動測定機器

車体挙動測定用には G センサを搭載し、加速度を測定できる。両後輪には自転車速度と走行距離を得る為のホイールインエンコーダが取り付けられている。このエンコーダは、ホイールに貼られた白と黒が交互に 1mm 間隔で並んでいるテープを反射型ファイバセンサによって、受光した光の電圧値をカウントすることで走行距離の検出を可能とする。ホイール 1 回転あたりは 212 パルスである。また、車両速度はエンコーダの出力を F/V コンバータを用いて速度に比例した電圧を計測する。F/V コンバータはフルスケー

ルを 1500Hz, 出力電圧レンジを 10V に設定した. タイヤ 1 周の長さが 1.41m であり, 計測可能な最高速度は 36.0km/h である.

3.2.4 運転情報収集機構

ドライバの運転情報を収集するためにアクセル, ブレーキには操作量検出センサが取り付けられている. アクセルにはスクリーン反射型ファイバセンサを用いて, 操作した際に変化する受光する光量を電圧として出力することで操作量検出を行っている. ブレーキには, COMS 本体に取り付けられた片持ちばりをブレーキペダルに当て, ばりに取り付けられたひずみゲージによってたわみを計測し, 電圧として出力することで操作量検出を行っている.

アクセルは踏んでいない状態で約 1.1V, 最大まで踏むと約 2.7V 出力される. ブレーキは踏んでいない状態で 0V, 最大まで踏むと約 -4.3V 出力される.

3.2.5 実験時合図用 LED

Fig. 3.8 は実験時に使用する LED であり, この LED の点灯用回路を Fig. 3.9 に示す. この装置は塩ビ筒の中に赤色 LED ランプを内蔵している. 運転席に座った状態で LED の発光が確認できるように設置している. また, 日中の実験を想定し, 太陽光の影響を受けないようにしている. この LED は搭載 PC から出力されるアナログ出力を入力して点灯する. 回路に 5V を入力し, オペアンプを介して LED に入力する.



Fig. 3.8 LED for signal

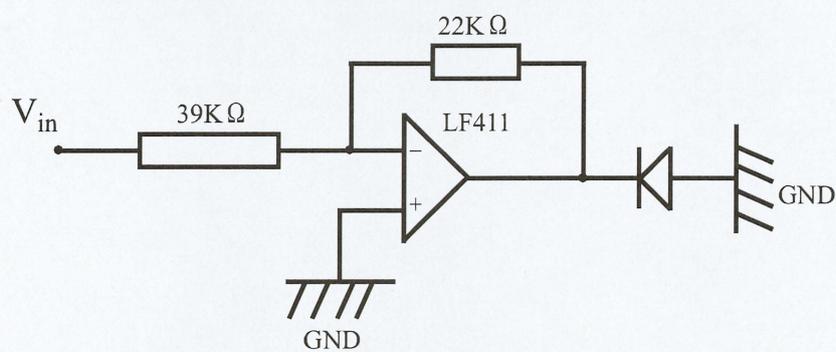


Fig. 3.9 The circuit to light up LED

第4章

ドライバの車線変更行動判断 モデルの同定と検証

本章では、ロジスティック回帰モデルを用いた車線変更行動判断モデルの同定と、ドライバの運転特性の差異の表現ができるかの検証を目的として、実験装置を DS として検証した詳細について説明する。4.1 節では、モデル同定実験の実験条件について説明する。4.2 節では、実験結果からモデル同定を行う際の車線変更行動判断の定義、変数の定義、結果変数の抽出に関する説明を行う。4.2.5 節では、モデル同定結果と同定したモデルから確率の算出を行い、ドライバの車線変更行動判断との関係を確認する。4.3 節では本研究で用いる運転支援システムについての説明を行い、ドライバごとの閾値の決定を行う。4.4 節では、同定したモデルの検証実験の実験条件と実験結果について説明する。

4.1 車線変更行動判断モデル同定実験

車線変更行動判断モデル同定実験では、ドライバの車線変更行動を判断する時点に着目する。実験は以下のような条件下で実験を行った。

- 前方車が全 5 台，追越車が全 18 台
- 前方車は 80km/h で走行し，車間距離は 50~170m
- 追越車は 120km/h で走行し，車間距離は 30~120m
- 自車速度は 100km/h 程度で走行するよう指示

上記の条件下で、ドライバの車線変更行動判断モデル同定実験を行う。ドライバには、普段から自動車を運転しており、高速道路の走行に抵抗はないという人物を選択し、合計7名に対して行う。走行中の自車以外の自動車の速度の変化、車間距離の変化は基本的にないものとする。ただし、追越車は追突防止機能が実装されているため、自車が追越車線に車線変更し追越車線を走行中に後方より追いついた追越車が自車に衝突しないよう、数メートル手前で速度調整するようになっている。したがって、自車の速度が追越車の速度より遅い場合は後方に数メートルの車間を開けた状態で速度調整するようになっており、自車が走行車線に車線変更し、速度が回復した後もその車間距離を保ちながら走行することになる。

DS のシミュレーションがスタートした際、自車は必ずスタート地点で停止している状態となっている。そのため、シミュレーションスタート後に 100km/h まで加速してもらい、自車が指定速度まで加速を完了した際に実験開始とする。実験開始と同時に追越車が走行を始める。ドライバには前方車よりも速い速度で走行する指示を出しているため、必然的に前方車を追いつくことになる。そのため、前方車に追いついた場合はドライバの任意のタイミングで車線変更を行い、前方車を追い越していく。ここで、道路交通法から追越車線のみでの走行は禁止されているため、道路交通法に法り1台追い越しが完了したら1度走行車線に戻ってもらい、次の前方車に追いついたら車線変更してもらうように指示した。このように、追いついたら追い越すという動作を15分間行った。このような条件下で、ドライバには実車の運転のように普段通り安全運転をする、ということを守ってもらった。

また、実験の際には、事前に練習走行を行い、ある程度 DS に慣れてもらった上で行った。さらに、走行前にアンケート調査を行い、ドライバの運転経歴・運転頻度や車種などの個人情報を聞くことで、運転に慣れているかなどの情報を得た。

4.2 車線変更行動判断モデルの同定

4.2.1 車線変更行動判断モデル同定に使用する各変数の定義

車線変更行動判断モデルでの他車の番号, 速度, 車間距離の定義を Fig. 4.1 に示す. 上側が走行車線, 下側が追越車線となり, 右を進行方向と仮定する. 前方車, 追越車共に自車から近い順にそれぞれ (前方車 1, 前方車 2・・・・), (追越車 1, 追越車 2・・・・) とすると, 自車と前方車, 追越車との関係は以下のように定義できる.

- 自車と前方車 1 との車間距離 l_1
- 自車と追越車 1 との車間距離 l_2
- 自車速度 v
- 前方車速度 v_f
- 追越車速度 v_p

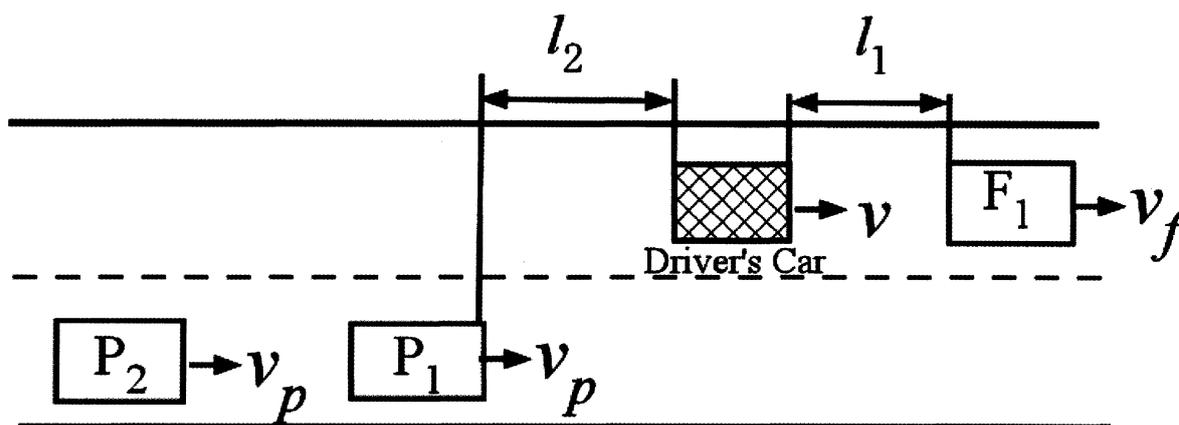


Fig. 4.1 Definition of variables

4.2.2 車線変更行動判断の定義

ドライバーが前方車の追越を行う際に後方から追越車が迫ってくる場合, 車線変更の行動として以下の2つに分けることができる.

- 追越車に追いつかれる前に車線変更行動判断する場合 (Fig. 4.2)
- 追越車に追い越されてから車線変更行動判断する場合 (Fig. 4.3)

ここで、車線変更時の行動として、ステアリングを操作するという行動があるため、「数秒後に前方車の追越のために追越車線に侵入しており、ステアリングを操作したタイミング」をドライバーが車線変更行動を判断したタイミングとする。また、実験においては、自車は前方車より速く追越車より遅いという条件下のため、必然的に上記の2パターンの車線変更方法のどちらかを行っている。

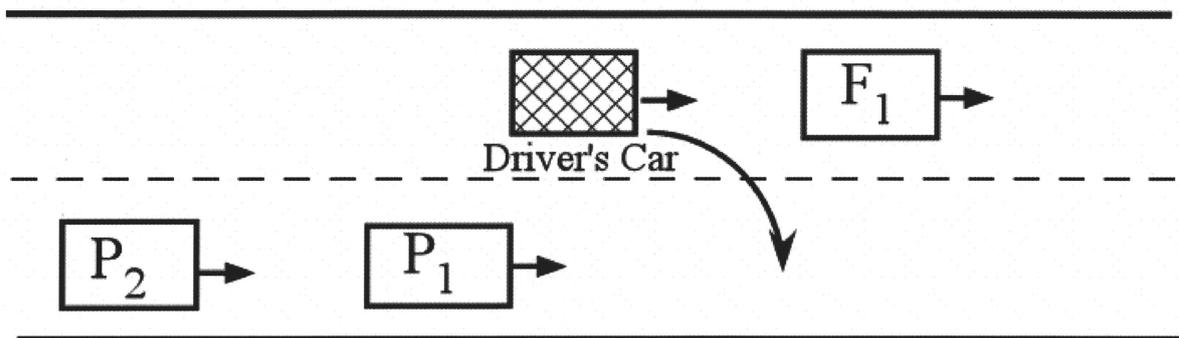


Fig. 4.2 Lane change before be overtaken

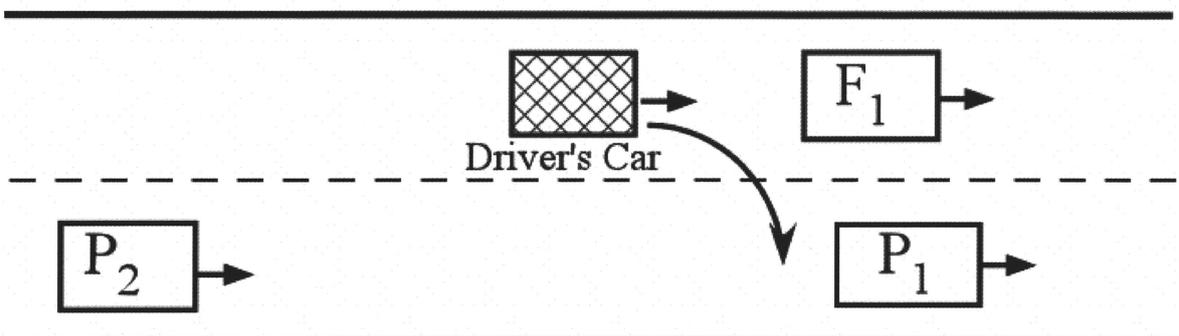


Fig. 4.3 Lane change after be overtaken

4.2.3 結果変数と説明変数の定義

4.2.2 項の2つの場合に対応して、ロジスティック回帰モデルを用いたモデルを定義する。ここで、前方車は5台、追越車は18台存在するが、これらを1つのモデルとして扱うために、以下に示す対象車との車間距離の変更の法則に基づき条件が満たされた際は車間距離を計算する対象車を変更する。

1) 前方車

前方車との車間距離は、自車のフロントバンパー先端より前方車リアバンパー後端までの距離とする。ここで、Fig. 4.4 のように、自車が前方車1を追越し、車間距離が0m以下になった際、ドライバは前方車1より前にいる前方車2を対象として見る。したがって、車線変更のための説明変数として必要なのは自車より前を走行している前方車との車間距離となる。そのため、車間距離は前方車1との車間距離が0m以下になった際、車間距離は前方車2との距離になる。同様に、前方車2との車間距離が0mになった際も、前方車2の前を走行中の前方車3との距離になる。

2) 追越車

追越車との車間距離は、自車のリアバンパー後端から追越車フロントバンパー先端までの距離とする。ここで、Fig. 4.5 のように、自車が追越車1に追い越され、車間距離が0m以下になった際、ドライバは追越車1より後ろにいる追越車2を対象として見る。したがって、車線変更のための説明変数として必要なのは、自車より後ろを走行している追越車との車間距離になる。そのため、車間距離は追越車1との車間距離が0m以下になった際、車間距離は追越車2との距離になる。同様に、追越車2との車間距離が0mになった際、追越車3との距離になる。

以上のように車間距離について定義した上で、車線変更行動判断モデルを同定するために結果変数と説明変数を以下のように定義する。車間距離 l [m]，相対速度 v [m/s] についてはそのまま使用せず、この両パラメータが含まれるリスク認知指標である接近離

間状態評価指標 KdB に置き換えパラメータ数を減らすことにした。 KdB はドライバの網膜に映る前方車の背面積の変化率を表しており、次式で定義される [26].

$$KdB = 10 \times \log \left(\left| \frac{K}{5 \times 10^{-8}} \right| \right) = 10 \times \log \left(\left| -2 \times \frac{V_r}{D^3} \times \frac{1}{5 \times 10^{-8}} \right| \right) \quad (4.1)$$

ここで、 V_r は対象として見ている車との相対速度 [m/s]、 D は対象として見ている車との車間距離 [m] を表す。 $KdB[dB]$ は前方車が離れる場合には負の値を取り、前方車が接近する場合には正の値を取る。また、接近具合が急なほど大きな値を取り、ドライバの感じるリスクを数値化できるという特徴がある。

車線変更行動判断モデルで、ロジスティック回帰モデルに用いる変数を以下に示す。

- 結果変数 (y_i)

$y_i = 1/0$: 車線変更行動判断する / しない

- 説明変数 (x_i)

KdB_{Fi} : 前方車と自車との KdB

KdB_{Pi} : 追越車と自車との KdB

a_i : 自車の加速度

ここで、 $KdB_{Fi}[dB]$ は自車を運転するドライバから見た前方車の背面積変化として、 $KdB_{Pi}[dB]$ は自車の後方を走行する追越車を運転するドライバから見た自車の背面積変化として、式 (4.1) を適応させることにより使用する。

上記のような説明変数を使用するため、これらを合わせると以下のようなになる。

$$x_i = (KdB_{Fi} \ KdB_{Pi} \ a_i) \quad (4.2)$$

したがって、ロジスティック回帰モデルの確率算出式は式(2.4)より次式のように定義する。

$$p(x_i) = \frac{\exp Z_i}{1 + \exp Z_i} \tag{4.3}$$

ここで、ロジットZは

$$Z = \eta_0 + \eta_1 KdB_{Fi} + \eta_2 KdB_{Pi} + \eta_3 a_i \tag{4.4}$$

であり、式(4.4)が本研究の車線変更行動判断モデル式となる。

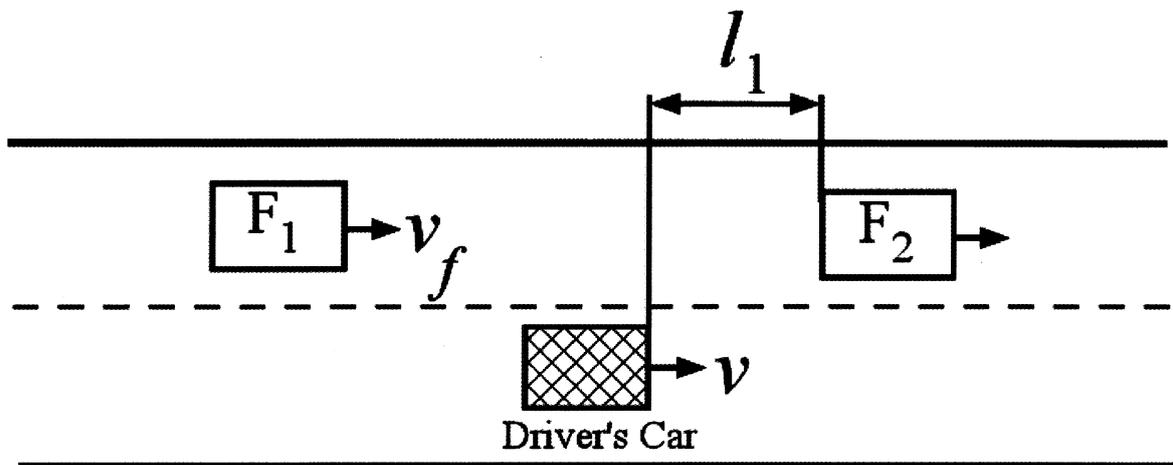


Fig. 4.4 Changing the target leading vehicle

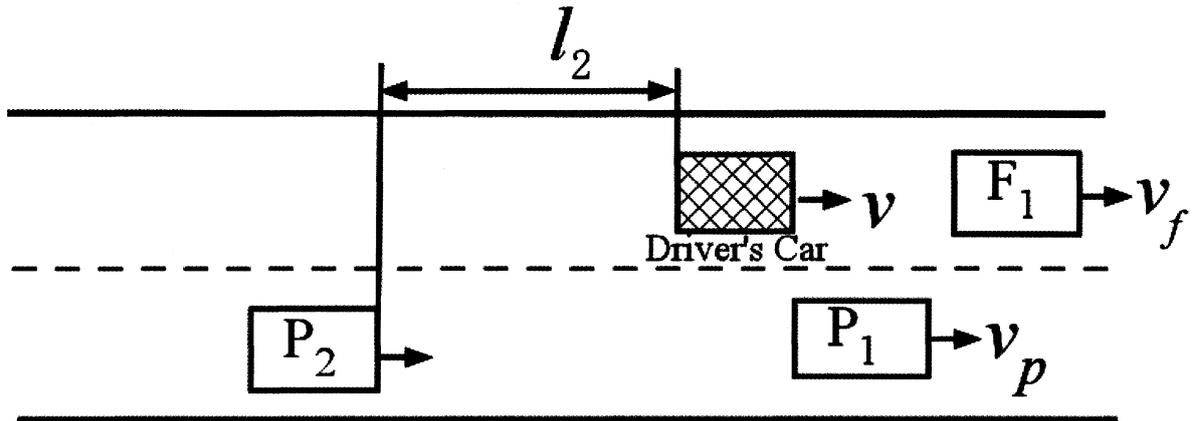


Fig. 4.5 Changing the target passing vehicle

4.2.4 実験データからの結果変数の抽出

ロジスティック回帰モデルに用いるデータのうち、説明変数は実験データをそのまま用いれば良い。しかし、結果変数は車線変更行動を判断した、しないを表わす値が実験データの中に表されているわけではない。そのため、実験データから車線変更行動判断をした、していない場合を見分ける必要がある。そこで、4.2.2項で定義した車線変更行動判断の定義に基づき、数秒後に追越車線に侵入しており、車線境界線からの距離に大きな変化があった付近においてステアリング操作量が大きく変化したときを1、それ以外を0として、車線変更行動判断を行ったタイミングとその前後25msの前方車、追越車との相対速度 v [m/s]と車間距離 d [m]、自車加速度データを抽出する^[27]。

車線変更行動判断モデルでのモデルの結果変数は

$$y_i = 1/0: \text{車線変更行動判断した/しない}$$

とした。すなわち、ステアリングを操作したタイミングを $y_i = 1$ 、それ以外を $y_i = 0$ として、結果変数 y_i を実験データから抽出する。また、データ抽出の際に追越車との車間距離が約15m以下のデータを、車線変更をしてはいけない安全確保のための車線変更禁

止区間データ（以下禁則と呼ぶ）としてモデル同定用データの中に取り入れることで、危険な条件下においてドライバからの入力があったとしても車線変更行動を行うと判断しない条件域となるよう同定する。

Fig. 4.6 はドライバが車線変更行動を判断した時点を抽出するために用いたモデル同定実験結果の走行結果例である。Fig. 4.6 は縦軸が上から車線境界線からの距離 Lane[m]、前方車との相対速度 v_1 [m/s]（実線）、追越車との相対速度 v_2 [m/s]（破線）、前方車との車間距離 l_1 [m]（実線）、追越車との車間距離 l_2 [m]（破線）、ステアリング操作量 Steering[deg]、前方車との KdB_F [dB]（実線）、追越車との KdB_P [dB]（破線）、加速度 a [m/s²] であり、横軸はいずれにおいても Time[s] である。また、Lane の横の破線は車線境界線の位置を表している。ステアリング操作量は右に操作すると正、左に操作すると負の値をとる。Lane において値が負から正に変わった時点、自車が追越車線に進入したことになる。したがって、その時間より前にステアリングを右に操作させているときがドライバが車線変更行動を判断したタイミングとなる。このことから、ドライバが車線変更行動を判断し、開始したのは図中の縦に引いた破線のタイミングとなる。このように、15 分間のデータから結果変数を抽出していくことで車線変更行動判断モデル同定用データを作る。結果変数を抽出した結果の一例を Table 4.1 に示す。Table 4.1 の 16 から 20 番目の抽出結果は、上記で述べた禁則のためのデータを表す。

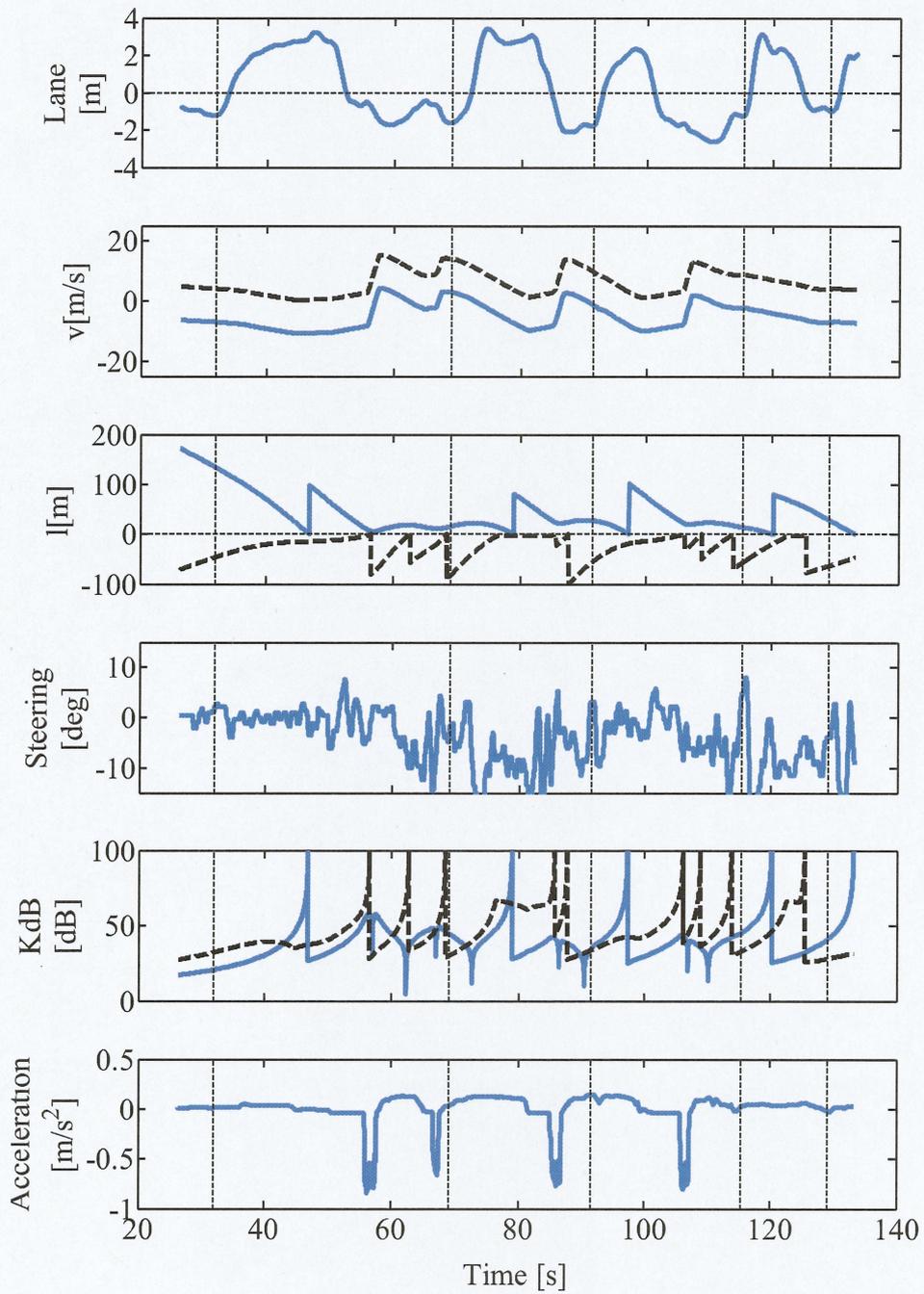


Fig. 4.6 Extraction of the dependent variable

Table 4.1 Data extraction

Number	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	l_1 [m]	l_2 [m]	a [m/s ²]	y_i
1	-1.056	10.055	27.776	-57.647	0.142	1
2	-1.078	10.033	27.759	-57.489	0.142	1
3	-1.100	10.011	27.741	-57.331	0.142	1
4	-1.123	9.989	27.723	-57.174	0.142	1
5	-1.145	9.966	27.705	-57.017	0.142	1
6	-2.304	8.807	14.701	-58.270	0.011	1
7	-2.306	8.805	14.665	-58.132	0.012	1
8	-2.308	8.803	14.628	-57.993	0.013	1
9	-2.310	8.801	14.592	-57.855	0.014	1
10	-2.313	8.798	14.556	-57.716	0.016	1
11	-1.929	9.182	19.776	-27.736	-0.590	0
12	-1.823	9.288	19.746	-27.591	-0.726	0
13	-1.707	9.404	19.718	-27.444	-0.737	0
14	-1.592	9.519	19.691	-27.296	-0.736	0
15	-1.476	9.635	19.666	-27.146	-0.731	0
16	-4.584	6.527	37.167	-5.123	-0.030	0
17	-4.579	6.532	37.094	-5.019	-0.030	0
18	-4.574	6.537	37.021	-4.914	-0.029	0
19	-4.570	6.541	36.947	-4.810	-0.030	0
20	-4.565	6.546	36.875	-4.705	-0.030	0

4.2.5 車線変更行動判断のモデル化

4.2.4 項まで、モデル同定実験の結果から各変数を定義し、結果変数の抽出方法について述べ、実際に結果変数の抽出を行った。これらの結果を基に、各ドライバのデータを使用して複数ドライバの運転データからロジスティック回帰モデルを同定する。同定したデータから Fig. 2.1 のようなロジスティック曲線を描くことができ、その状態がモデル同定が完了したことになる。

ロジスティック回帰モデルの特徴として、モデル同定の際に使用したデータの多い部分に同定結果が偏りやすく、平均的な運転を行うドライバのデータを多く使用した場合は特徴的な運転を行ったドライバの運転特性を反映しにくくなる。そのため、モデル同定実験では7名のドライバの運転データを収集したがそのうちの3名のドライバのデータを使用する。実際にモデル同定に使用するデータの運転を行ったドライバは、車線変更行動を判断したときの前方車との車間距離を基準にして選出する。これは、ドライバが車線変更行動を判断する要因の中で前方車との車間距離が最も影響が大きいと考えられるからである。そのため、ドライバが車線変更行動を判断し、ステアリングを操作した際の前方車との車間距離が 30m 以下と最小のドライバ D、100m 以上と最大のドライバ G、50~70m とドライバ D とドライバ G の間の運転を行ったドライバ B の3名のドライバの運転データを使用してモデル同定を行う。この3名のドライバの運転データより、車線変更行動を判断した場合、していない場合を 450 点ずつ、合計 900 点を抽出して完成した車線変更行動判断モデルは以下の式 (4.5) のようになり、各説明変数を代入することでドライバが車線変更行動を判断する確率の算出が可能になる。

$$Z_i = 1.8124 + 0.1091KdB_{Fi} - 0.1375KdB_{Pi} + 11.5291a_i \quad (4.5)$$

Fig. 4.7 は同定したモデルを用い、ドライバ A のモデル同定実験結果のうち、モデル同定に用いていない運転データを使用して、走行時のモデル出力を算出した一部を示す。Fig. 4.7 は縦軸が上から車線変更行動判断する確率 Probability、車線境界線からの距離 Lane[m]、前方車との相対速度 v_1 [m/s] (実線)、追越車との相対速度 v_2 [m/s] (破線)、前方車との車間距離 l_1 [m] (実線)、追越車との車間距離 l_2 [m] (破線)、ステアリング操作

量 $\text{Steering}[\text{deg}]$, 前方車との $KdB_F[\text{dB}]$ (実線), 追越車との $KdB_P[\text{dB}]$ (破線), 自車の加速度 $a[\text{m/s}^2]$ であり, いずれの場合も横軸は $\text{Time}[\text{s}]$ である. Lane の横の破線は車線境界線の位置を表し, 縦の破線は車線変更行動判断を行い, 車線変更を開始したタイミングである. ここで, 説明変数は前方車との KdB_F , 追越車との KdB_P と自車の加速度 a のデータである. この結果で確率の変化が著しいのは前方車との車間距離が小さくなる時のほか, 加速度の変化にも左右され, 前方車との車間距離が最も車線変更行動判断決定に影響していることが分かる. さらに, 追越車が近い状況など車線変更を行うと危険な状況下での確率の増加がなく, 安全性が確保されている. また, 車線変更を躊躇した際には確率も増加していない. これは, ブレーキを踏んだことによる加速度の急激な減少, 相対速度の大幅な変化によるものであると考えられる.

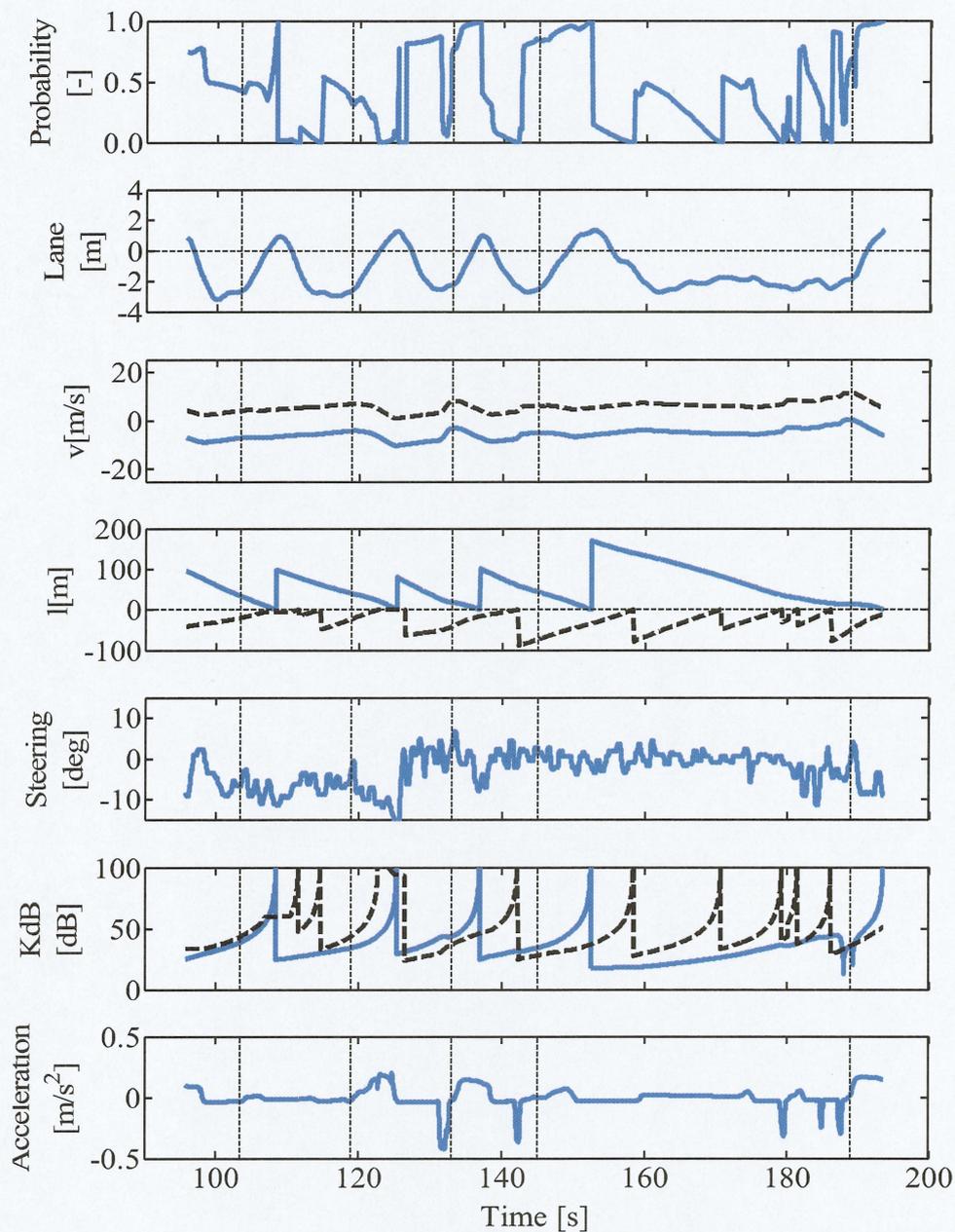


Fig. 4.7 Calculation of probability

4.3 運転支援システムのDSへの実装と閾値設定方法

4.3.1 運転支援システムの概要

4.2.5節までのように、複数ドライバの運転データから車線変更行動判断モデルの同定を行った。この車線変更行動判断モデルの検証を行うために、車線変更に関する何らかのシステムに搭載し、検証を行う必要がある。そのため、本研究では車線維持・車線変更を行う運転支援システムを想定し、同定したモデルの検証を行う。

本研究で想定する運転支援システムは、高速道路走行時の横方向制御ミスによる事故防止を目的とした運転支援システムとして、車線維持・車線変更システムを想定する。この運転支援システムが搭載されている車両はステアバイワイヤ構造の車両であるとし、運転支援システム作動中はドライバからのステアリング操作を運転にダイレクトに反映せず、制御系が行うようになっている。しかし、システムはドライバによるステアリング操作量を常に把握できる。

この運転支援システムは同定したモデルに基づいてドライバの車線変更行動を判断する確率を出力するが、同時にドライバの実際の車線変更行動判断との比較も行い、その結果に基づいて作動するため、同定したモデルの出力が仮に設定した閾値となったとしても同定したモデルのみでのシステムの切り替えが行われないようにしている。そのため、ドライバからの何らかの入力があって初めて車線維持システムから車線変更システムへ切り替えが行われるよう同定している。この運転支援システムは、走行中常に作動状態となるが、車線変更を行う必要のない場合は車線維持システムが作動し、車線維持を容易に行うことができるよう作用する。また、走行中にモデルの出力確率が増加して設定した閾値以上となり、かつドライバからの入力としてドライバが車線変更行動判断を行いステアリング操作を行った時点でシステムはドライバが車線変更行動を判断したと判断し、車線維持システムから車線変更システムに切り替え、ステアリングの操作支援を行う。(1.2節参照)つまり、出力確率に設定された閾値に加え、ステアリング操作にも閾値を追加することでシステム切り替えを実現する。

4.3.2 車線維持システムの制御系の構築

車線維持操作は、他車走行下に接触事故を起こさないために車線逸脱することなく走行することや、高速走行での車線維持などもあり、長時間の単調な操作を伴う高速道路走行時にドライバーにとって負担になる操作の一つである。高速道路は、一般道路に比べて白線の状態や道路などが良く整備されており、白線の認識が容易である。本研究における車線維持は仮想走行環境上に目標軌道を設定し、その目標軌道上を走行するように制御を行う。この制御系のブロック線図を Fig. 4.8 に示し、直線走行時、カーブ走行時の変数の定義をそれぞれ Fig. 4.9, Fig. 4.10 に示す。

ある位置での自車が走行するべき目標軌道上での位置（以下目標位置）を p_t 、車体角度（以下目標車体角度）を θ_t 、現在の自車の位置（以下現在位置）を p_c 、車体角度（以下現在車体角度）を θ_c とする。目標軌道上での目標位置、目標車体角度を入力とし、実際の挙動を出力としている。本研究での制御は比例制御を用いており、 P は制御対象を示しており、現在車体角度と現在位置のために2つの存在する。Car dynamics は Carsim によって計算される自動車の挙動となる。このゲインとステアリングの出力から現在の値を出力する。ステアリング制御運転時のステアリング操作量 *Steering* の算出には式 (4.6) を用いる。

$$\text{Steering} = P_{yaw}(\theta_t - \theta_c) + P_{pos}(p_t - p_c) \quad (4.6)$$

この制御系では、カーブ走行時の車線変更後の目標車体角度 θ_t と現在車体角度 θ_c の差が特に大きくなりやすいことから、制御を強めるため Fig. 3.3 の各区分毎に P_{yaw} と P_{pos} を変更し、カーブ時におけるゲインを大きく設定した。Table 4.2 に各区分毎のゲインを示す。

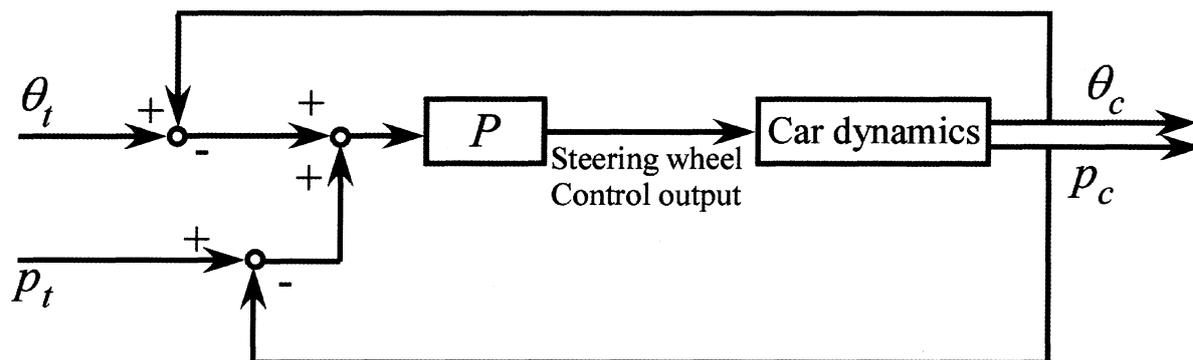


Fig. 4.8 Block diagram of lane keep

Table 4.2 Gain of each section

Section	P_{pos}	P_{yaw}
1	30	20
2	35	20
3	20	15
4	35	20
5	20	15
6	30	15

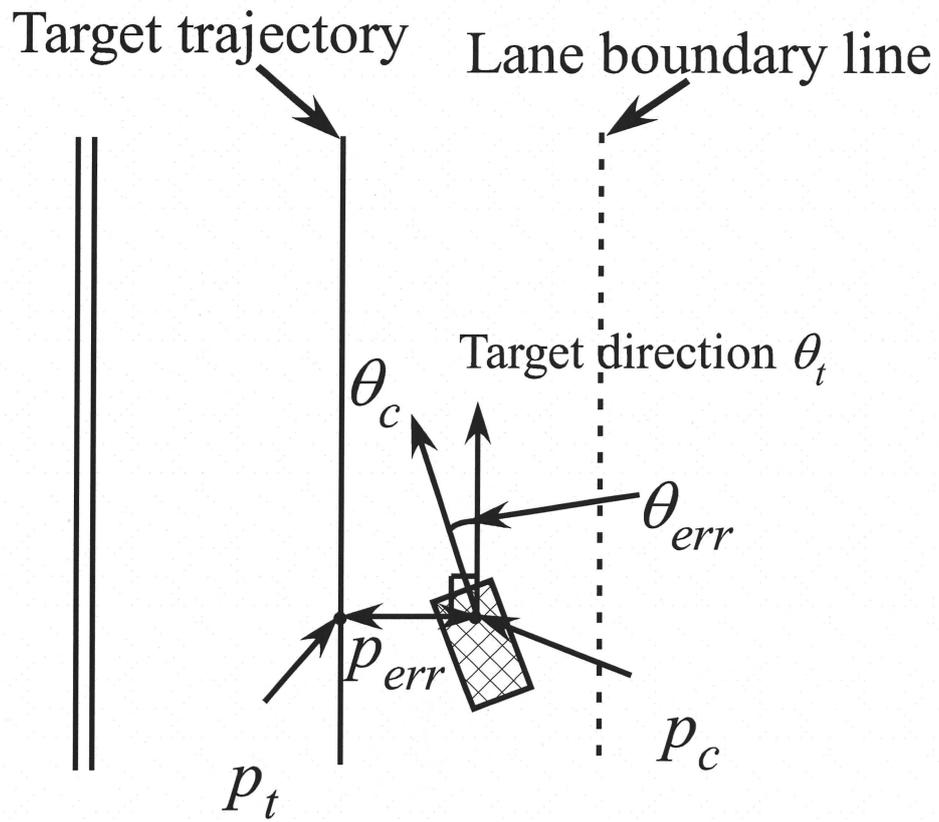


Fig. 4.9 Lane keeping when driving straight

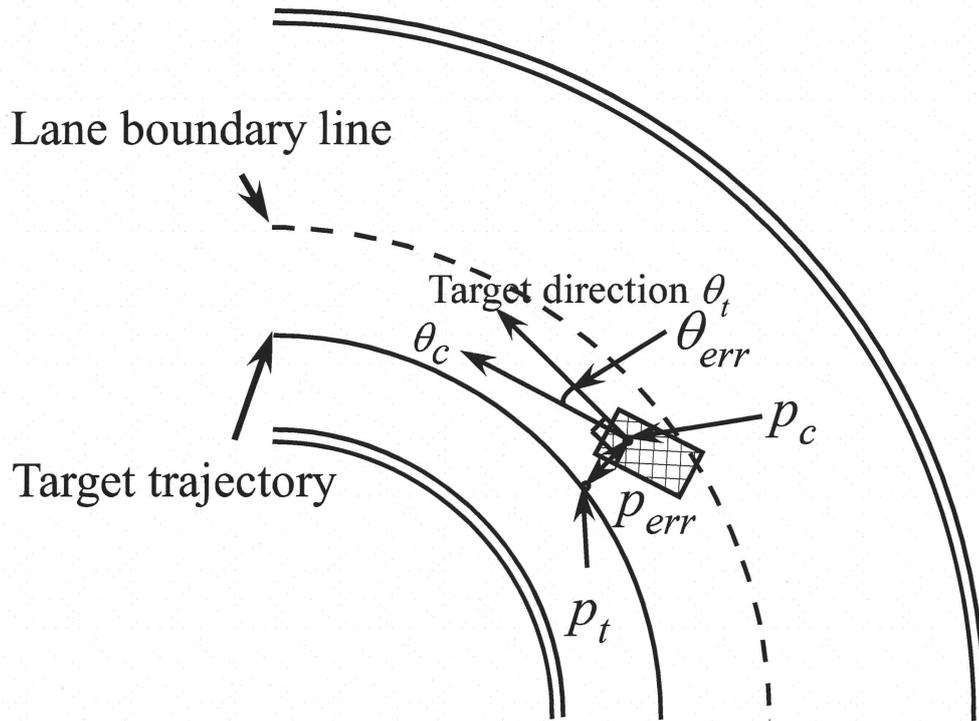


Fig. 4.10 Lane keeping when driving curve

4.3.3 車線変更システムの制御系の構築

自車よりも低速で走行している前方車を追い越す場合、車線変更を行う必要がある。本研究での車線変更システムは 4.3.2 項の車線維持システムを応用する。4.3.1 項のように、ステアリングにも閾値を設定し、車線変更行動判断を行う出力確率が設定した閾値以上であり、かつドライバーがステアリングを閾値以上に操作した場合、車線変更システムに切り替える。

Fig. 4.11 のように、車線維持システムが走行車線の直線走行中に作動している際、自車は一点鎖線を目標軌道として走行する。縦の破線の位置で確率が設定した閾値を越えた状態でドライバーが車線変更行動を判断してステアリングを閾値以上に操作したとする。その際、自車が今まで走行していた車線維持システムは一点鎖線から破線で示される追越車線の目標軌道に変更する。したがって、自車は追越車線の破線の目標軌道上を走行しようとするため、自動的に車線変更を行う。また、追越が完了して走行車線に戻る場合、確率が設定した閾値以下、かつドライバーが左にステアリングを閾値以上に操作した場合も同様に、目標軌道が破線から一点鎖線の目標に変更となる。また、Fig. 4.12 のように、カーブ走行中も同様に、車線維持システムの作動中に自車が一点鎖線上を目標軌道として走行し、確率が閾値以上でステアリング操作があった場合、目標軌道が破線に変更になり、システム破線上を走行しようとするため、自動的に車線変更を行う。しかし、DS の仕様上カーブ走行時の車線変更行動判断の場合でも、ドライバーはステアリングを設定した閾値以上に操作しなければならない仕様となっている。このように、車線維持システムをそのまま用いて、目標軌道を変更することで車線変更システムを同定した。

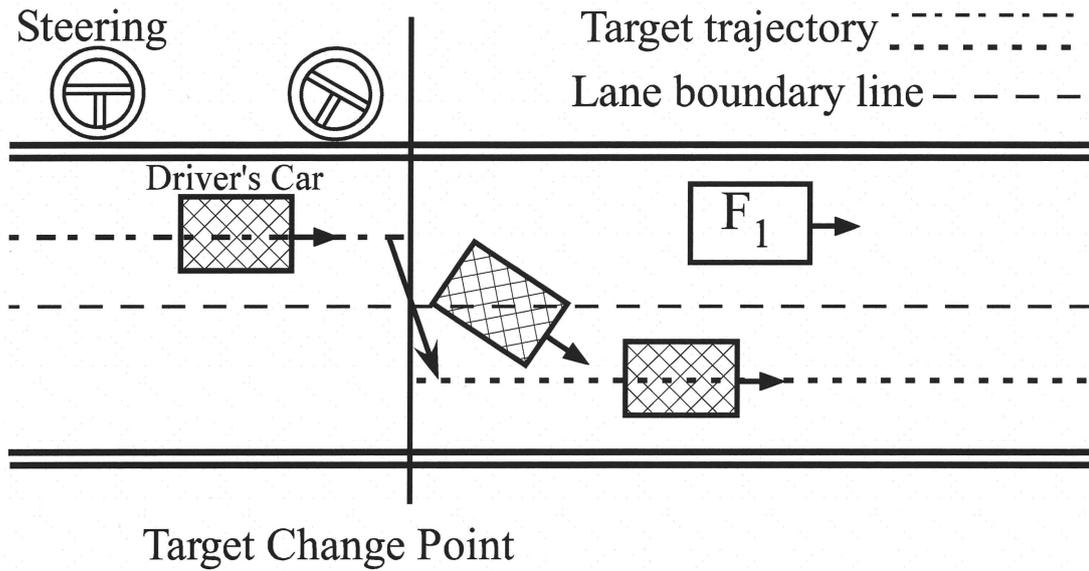


Fig. 4.11 Lane change when driving straight

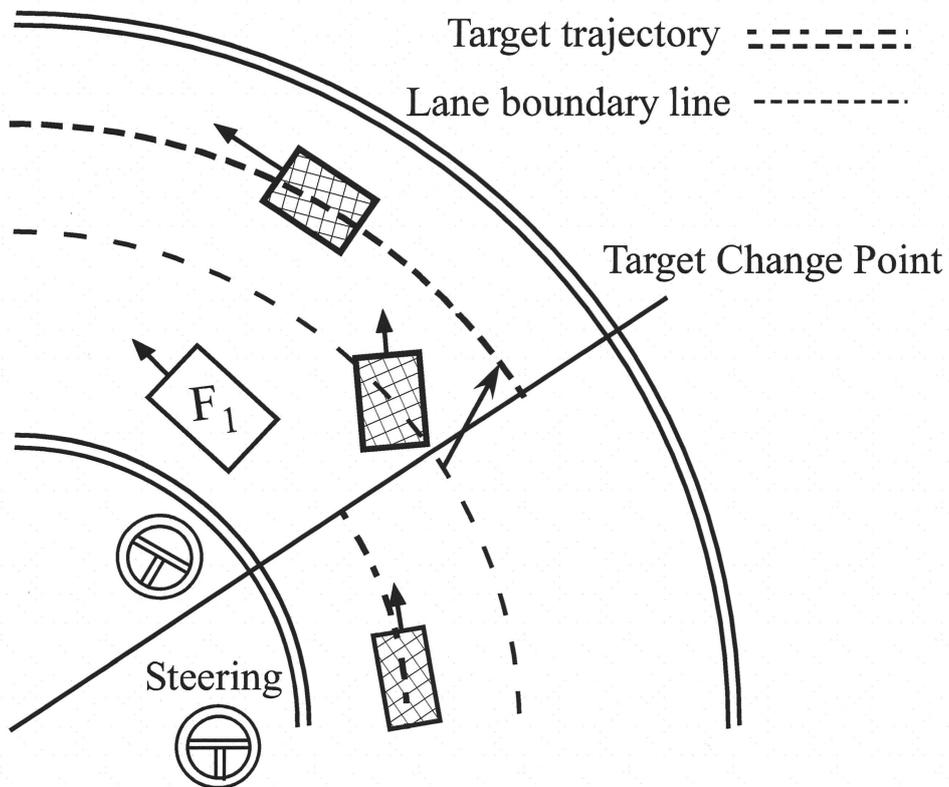


Fig. 4.12 Lane change when driving curve

4.3.4 ドライバ毎の閾値の設定方法

4.2.5 節で同定した車線変更行動判断モデルは、ドライバ3名の運転データを用いて同定したモデル（以下共通モデル）である。そのため3名の運転の特徴を表現できるモデルであり、共通モデルを同定するにあたり抽出した車線変更行動を判断した際の前方車との車間距離の差を含めた各ドライバの運転特性の差異を表現できると考えられる。しかし、この共通モデルは運転特性の差異を表現できる代わりに、各ドライバへどのように適応させるかが問題となる。この問題の解決のため、2.3 節に示すように出力確率に閾値を設け、その閾値を各ドライバによって変化させた値とすることにより、運転特性の差異を表現できるモデルにする。したがって、このために各ドライバの閾値を設定する実験を行う。

実験条件・実験環境はモデル同定実験の条件と同様であるが、運転支援システムが作動した条件で運転を行う。また、ドライバが違和感を感じたかどうかで閾値を変更する。各ドライバへの閾値の設定方法は、共通モデルの出力確率に初期閾値を 0.5 に設定し前方車を 20 台追い越しを行ってもらい、そして実験を一時中断し、ドライバにどう感じたかを聞き、その結果によって閾値を変化させていく。例えば、閾値が 0.5 での走行においてドライバが車線変更行動を判断しステアリングを操作しているにも関わらずシステムの切り替えが行われなかった場合、ドライバにとっては違和感のあるものとなる。これはロジスティック回帰モデルの出力確率が 0.5 に達していなかったため、運転支援システムはドライバが車線変更行動を判断すると判断していなかった条件下でドライバが車線変更行動を判断していたことになる。したがって、この場合は閾値が高いと判断でき、閾値を 0.05 下げ実験を再開する。そして、これを 0.05 刻みで繰り返し、最終的に違和感がなかった閾値をそのドライバの閾値とする。反対に閾値が 0.5 の走行において違和感がなかった場合、閾値を 0.05 上げ実験を再開し、ドライバが車線変更行動を判断しているにも関わらずシステムの切り替えが行われない状況まで 0.05 刻みで実験を続ける。そして、違和感が出始めた閾値の 1 走行前の閾値がそのドライバの閾値となる。

4.4 車線変更行動判断モデルの検証

4.4.1 車線変更行動判断モデル検証実験の実験条件

本実験は、同定した共通モデルにドライバ毎に閾値を設定した状態でドライバに運転してもらうことによって、共通モデルがドライバの運転行動判断を表現することが可能かと、4.3.4項において設定したドライバ毎の閾値によってドライバの運転特性の差異の表現ができるか検証するために行う。実験条件として、他車の挙動や自車速度などの条件はモデル同定実験時と同様であるが、30台の追越を行うことで検証を行う。また、運転支援システムが作動した条件で走行実験を行う。

4.4.2 車線変更行動判断モデル検証実験の実験結果

Fig. 4.13, Fig. 4.14, Fig. 4.15は、本実験での結果の一部をドライバD, B, Gの順で示したものである。どの図においても縦軸は上から共通モデルの出力である車線変更行動判断を行う確率 **Probability**, 車線境界線からの距離 **Lane[m]**, 前方車との相対速度 v_1 [m/s] (実線), 追越車との相対速度 v_2 [m/s] (破線), 前方車との車間距離 l_1 [m] (実線), 追越車との車間距離 l_2 [m] (破線), 運転支援システムによるステアリング操作量 **Steering[deg]**, 自車の加速度 a [m/s²] であり、横軸はいずれの場合も **Time[s]** である。また、縦の破線はドライバが車線変更行動を判断し、ステアリングを操作したタイミングであり、すなわち車線維持システムから車線変更システムへの切り替えが行われた時でもある。確率の横の破線は4.3.4項において各ドライバに設定した確率の閾値を示している。

共通モデルは4.2.4項で述べたように追越車が近い状況などでは確率が増加することのないようにモデル同定の際に禁則を組み込んでいる。これにより追越車が近い状況などでは確率は増加せず、安全性が確保されている。また、加速度が確率の増減に大きく影響しているため、車線変更を判断しステアリング操作を行う際の前方車の車間距離が大きいドライバGのようなドライバでも、アクセルを踏み加速度が大きくなると確率も増加して閾値を越えており、適応できている。

Fig. 4.13 に示されるドライバ D の場合、閾値が 0.5 の際に違和感を感じなかったとのことなので閾値を上げていき、0.75 に設定した際に違和感を感じたとのコメントがなされたので 0.7 をドライバ D の閾値とした。ドライバ B もドライバ D と同様に 0.5 の際に違和感を感じなかったとのことなので閾値を上げ、0.55 に設定した際に違和感を感じたため 0.5 を閾値とした。ドライバ G は前方車との車間距離が大きい際でも車線変更行動を判断しており、閾値が 0.5 の際に違和感がなかったため閾値を下げていき、0.25 の際に違和感を感じたとのことだったので 0.3 を閾値とした。

実験の結果、確率の閾値はドライバ D が 0.7、B が 0.5、G が 0.3 としたときに違和感を感じない結果となり、車線変更行動判断モデルは閾値を操作してそれぞれのドライバに適応した。

Fig. 4.16 は縦軸が車線変更行動を判断する確率であり、図中の点は、各ドライバが車線変更行動判断をし、車線変更のためにステアリングを操作開始した時点の共通モデルの出力確率であり、○、+、×の記号はそれぞれステアリングを操作した時点の平均値、上限値、下限値を表わしており、横の破線は各ドライバに設定した閾値を示している。これを見ると、どのドライバも多くの状況で車線変更行動判断を行う確率がそれぞれ設定した閾値以上のタイミングで車線変更行動を判断している。このことから、ロジスティック回帰モデルを用いた運転行動判断モデル（本章では車線変更行動判断モデル）は、ドライバの行動判断を表現することができ、さらに閾値を変化させることによって各ドライバの運転特性の差異を表現できることが確認でき、運転行動判断モデルの有効性が検証できた。

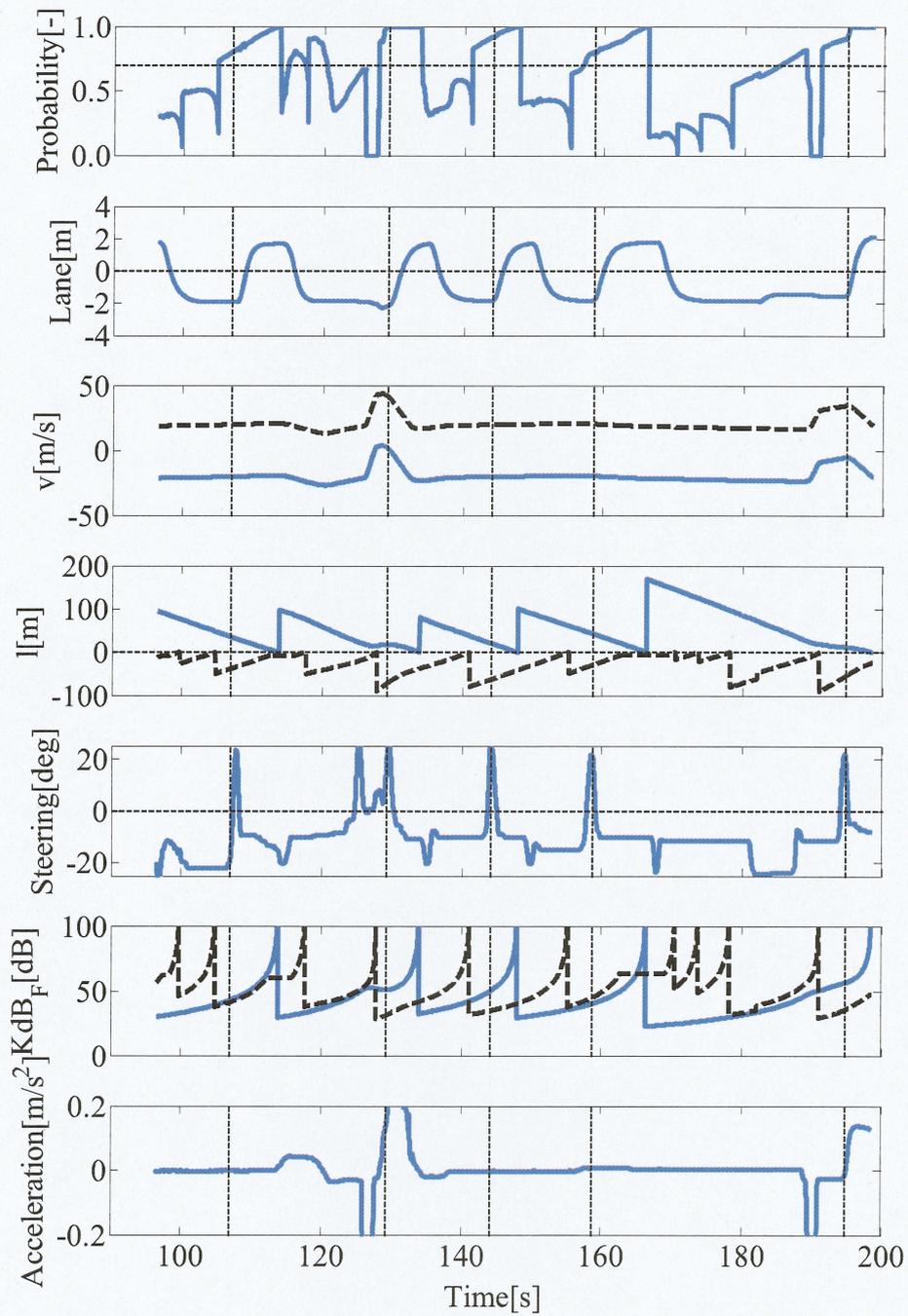


Fig. 4.13 Experimental result (Driver D)

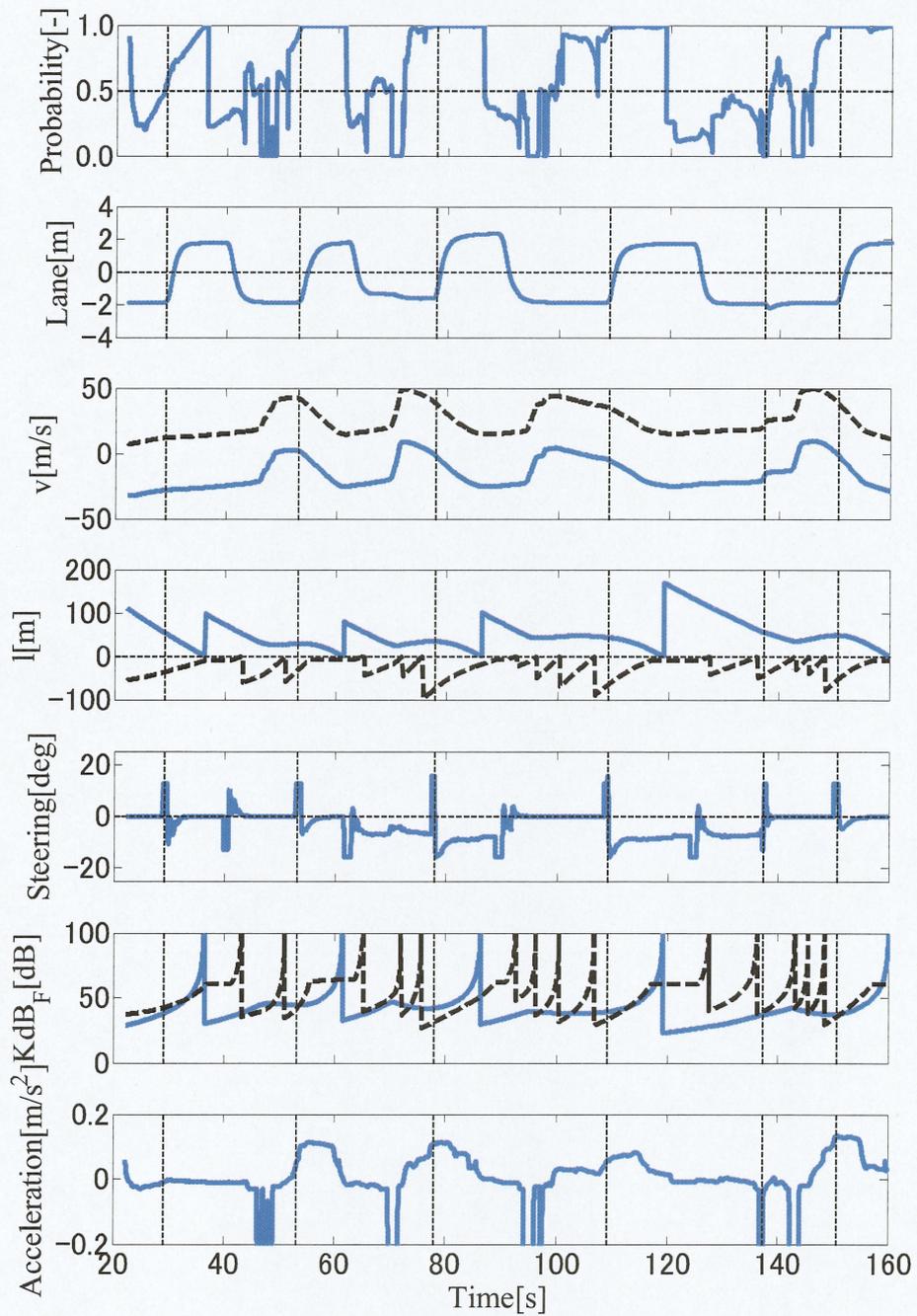


Fig. 4.14 Experimental result (Driver B)

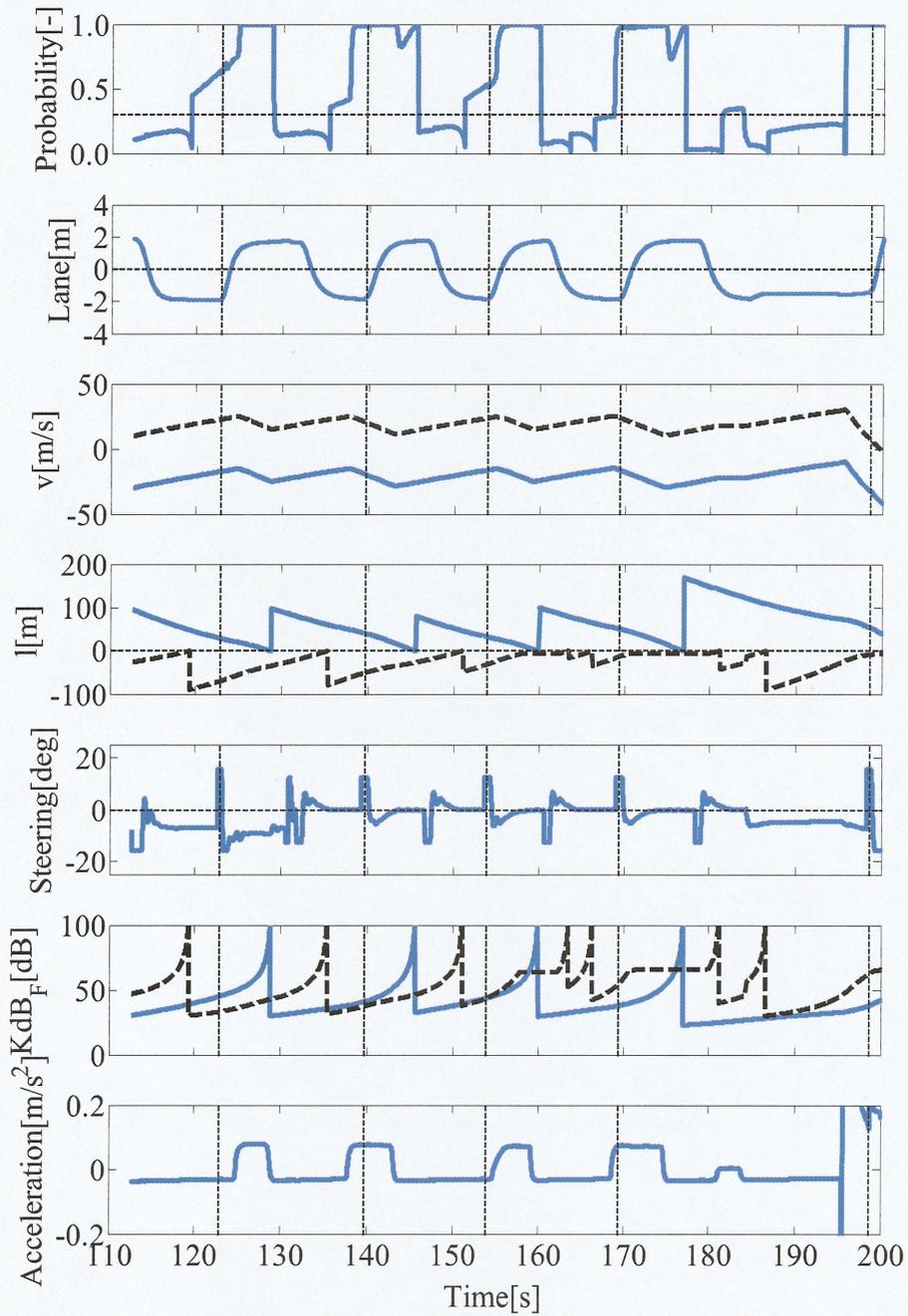


Fig. 4.15 Experimental result (Driver G)

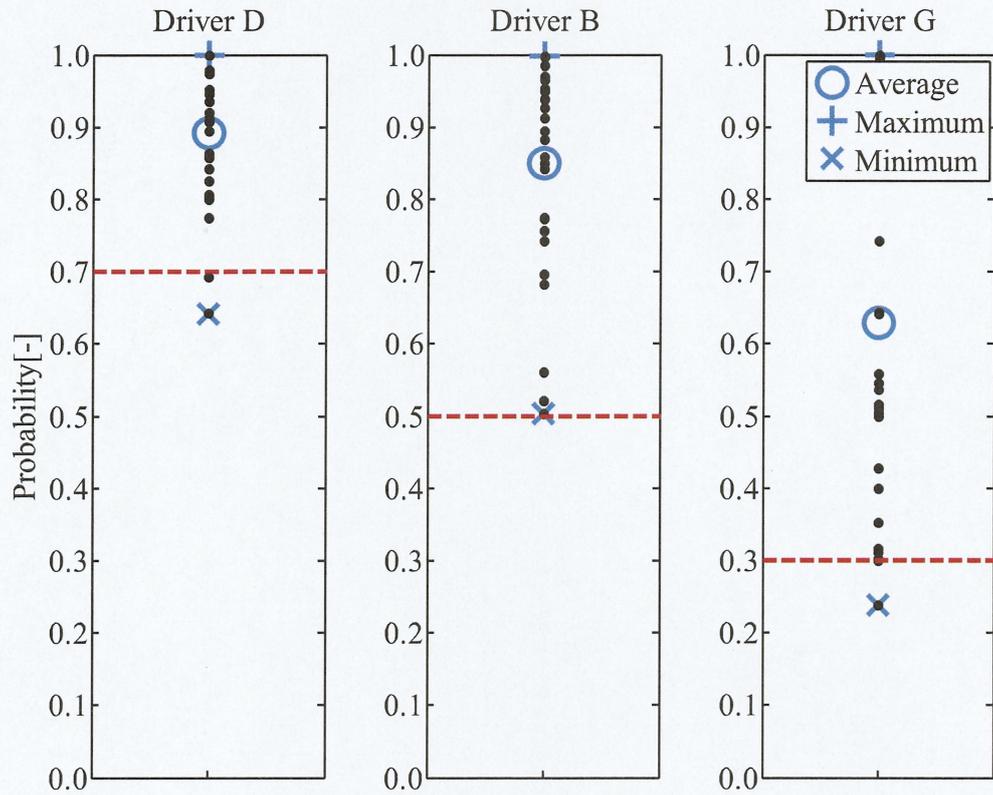


Fig. 4.16 Plot of lane-changing behavior decision points

第5章

ドライバの停止行動判断モデルの 同定と検証

本章では、ロジスティック回帰モデルを用いた停止行動判断モデルの同定と、ドライバの運転特性の差異の表現ができるかの検証を目的として、実験装置を COMS として検証した詳細について説明する。5.1 節では、車線変更行動判断モデルでの問題点を挙げる。5.2 節では、モデル同定実験の実験条件について説明する。5.3 節では、実験結果からモデル同定を行う際の各変数の定義とモデル同定を行い、各ドライバの運転の特徴について説明する。5.4 節では、各ドライバの停止行動判断モデルの特徴から、共通モデルをドライバに適応させるために閾値を変化させて評価する実験とその結果を示す。

5.1 車線変更行動判断モデルにおける問題点

第4章において、ロジスティック回帰モデルを用いた車線変更行動判断モデルを同定し、車線維持・車線変更を行う運転支援システムに適用し、その車線変更行動判断モデルの出力確率に閾値を設定することで運転支援システムは閾値以上においてドライバからのステアリング操作入力があればドライバが行動判断したと判断する方式を用いて検証し、この手法の有効性を確認できた。しかしこの手法は、ロジスティック回帰モデルの出力確率が設定した閾値以上の際にドライバからのステアリング操作入力があった場合にドライバが車線変更行動判断したと運転支援システムが判断することによって車線変更システムへの切り替えを行うという使用方法であった。この手法は、ドライバが車線変更行動を判断して車線変更を行う場合、この行動判断はある程度前方車に近づき、モデルの出力確率が設定された閾値以上という条件域内であればどの時点で

ドライバが車線変更行動を判断しても良い。そのため、ドライバが行動判断すると判断すべきポイントが曖昧であった。しかし、自動車運転時においてその方式がすべての行動判断において成立するわけではない。例えば、停止行動を行う際の停止行動判断においては、停止行動判断モデルによってドライバが停止行動を判断したと判断すべきポイントが遅れた場合に追突事故を起こしかねない。

このような問題に対して、モデルの出力確率に閾値を設定し、その閾値をドライバが行動判断したとして判断する使い方のように、ドライバが行動判断するタイミングを正確に捉える使用方法も必要とされるため、本提案手法の有効性を示すために検証を行う必要がある使用方法である。そのため、ロジスティック回帰モデルを用いたドライバの運転行動判断モデルが閾値にてドライバが行動判断すると判断する場合について検証するために実験車両として第3章で述べた実験車両である COMS を用いて検証することにした。

5.2 停止行動判断モデル同定実験

5.1 節の問題から、本章ではモデルの出力確率に設定した閾値にてドライバが行動判断すると判断する手法の検証を行う。そのため、自動車運転中にドライバが停止線に停止するための停止行動判断を対象としてモデル化することを考える。

モデル同定を行うための運転データを収集するため、Fig. 5.1 に示す実験環境で走行実験を行う。このコースは全長 50m であり、停止位置をスタート地点から 45,47.5,50m の3種用意している。30m 地点でプラカードでの提示により停止位置を指定し、ドライバはそのプラカードに書いてある番号を基に停止位置を認識し、最終的に指定された停止位置に停止する。また、走行速度は速度域として指定し、15~20,20~25,25~30km/h の3種で指定している。実験はスタートの際に速度域の指定を行い、ドライバはスタート地点から 30m までの加速区間を使用して指定された速度域内まで加速する。この際、停止行動のタイミングはドライバの任意とする。これを1走行とし、各速度域、停止位置の組み合わせをランダムに合計 30 回行うことで実験を行った。ドライバには普段から自動車を運転している人物を選択し、合計 3 名に対して行った。また COMS の特性とし

て、走行中にアクセルをオフにした際に発生する回生ブレーキによる減速度が大きい。そのため、本走行の前には本走行で指定する速度域を練習走行で十分走行してもらうとともに、特に COMS の回生ブレーキの特性の理解を行ってもらった上で実験を行った。

本研究で COMS を用いた実験時に使用した実験環境の模式図を Fig. 5.1 に、その様子を Fig. 5.2 に示す。実験環境は全長 50m の直線路を使用する。使用する環境は平坦なアスファルトであり、人通りの少ない場所を選択している。この実験環境では、スタートから 30m, 45m, 47.5m, 50m の地点に目印が置いてある。実験によって目印の数に変化はあるが、この形を基本として、30m 地点までに指定された速度域まで加速を行ってもらい、①, ②, ③はモデル同定実験の際に停止する位置を示している。

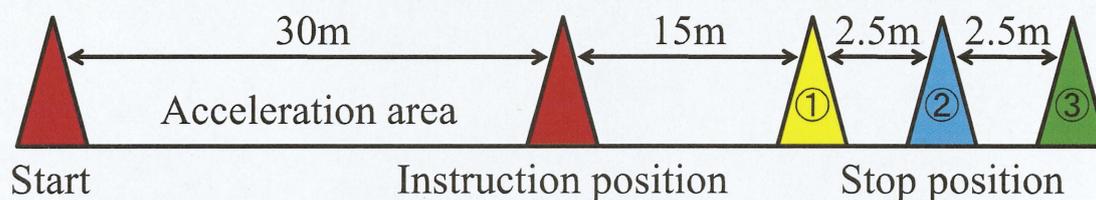


Fig. 5.1 Experimental environment of information gathering experiment



Fig. 5.2 Experimental environment

5.3 停止行動判断モデルの同定

5.3.1 停止行動判断モデル同定に使用する各変数の定義

停止行動判断モデルで使用する各変数の定義を Fig. 5.3 に示す。停止行動判断モデルでは、停止線までの距離 d [m] と停止線との相対速度 v [km/h] として以下のように変数を定義する。ただし、実験結果などで図示する際は相対速度ではなく自車速度 v_d [km/h] として表示する。

- 停止線との相対速度 v_i
- 停止線までの距離 d_i

停止行動判断モデルでのロジスティック回帰モデル用の各変数を以下に示す。

- 結果変数 (y_i)

$y_i = 1/0$: 停止行動判断する / しない

- 説明変数 (x_i)

$v_i (=v_{fi} - v_{di})$: 停止線との相対速度 [km/h]

d_i : 停止線までの距離 [m]

ここで、 v_f は停止線の速度として定義する。そして、この説明変数をまとめると以下のようになる。

$$x_i = (v_i, d_i) \quad (5.1)$$

したがって、ロジスティック回帰モデルの確率算出式を次式のように定義する。

$$p(x_i) = \frac{\exp Z_i}{1 + \exp Z_i} \quad (5.2)$$

ここで、ロジット Z は

$$Z = \eta_0 + \eta_1 v_i + \eta_2 d_i \quad (5.3)$$

であり、式(5.3)が本研究の停止行動判断モデル式となる。

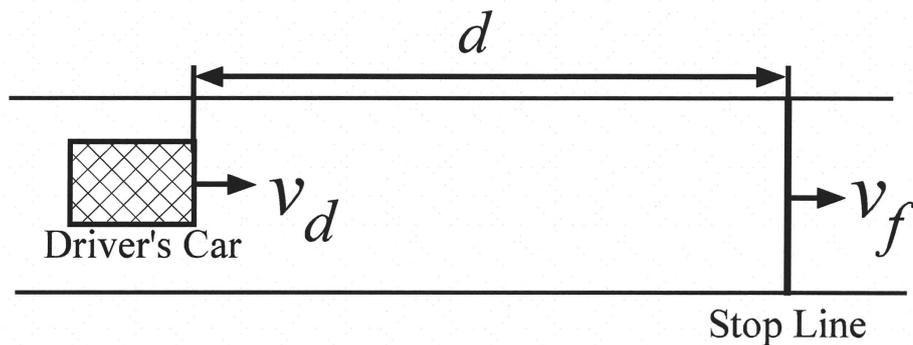


Fig. 5.3 Definition of variables

5.3.2 停止行動判断の定義

ドライバーが停止行動を行う際、アクセルをオフにし、フットブレーキを踏むという行動がある。そのため通常の停止行動は、ドライバーがフットブレーキを踏んだ時点がドライバーが停止行動を判断した時点であると考えられる。しかし、5.2節でも述べたように、COMSは回生ブレーキによる減速度が大きく、回生ブレーキによる減速を開始した時点でドライバーが停止行動を判断したとも考えられる。本研究での停止行動判断モデルにおいては、「ドライバーがアクセルをオフにし始めたとき」を停止行動を判断したとし、減速をするためにアクセルをオフにした際にドライバーが停止行動を判断したとしてモデル同定を行った。この定義をドライバーの停止行動判断として良いかの検証実験の結果については5.3.5項で述べる。

5.3.3 実験データからの結果変数の抽出

停止行動判断モデルを同定する際に使用する結果変数は、4.2.4項でも述べたように実験結果から抽出する必要がある。そのため5.3.2項の定義から、停止行動を行うためにアクセルをオフし始めたときを1、それ以外は0として、その瞬間のタイミングと前後0.1sの停止線までの距離 d [m]と停止線との相対速度 v [m/s]のデータを抽出する。

Fig. 5.4は停止行動を判断した時点を抽出するために用いたモデル同定実験の走行結果例である。縦軸が上から自車速度 v_d [km/h]、停止線までの距離 d [m]、アクセル操作量[V]（実線）、ブレーキ操作量[V]（破線）、加速度 a [m/s²]であり、横軸はいずれの場合もTime[s]である。停止行動判断定義に基づいてドライバーが停止行動を判断した時点を抽出すると、縦の破線の時点が停止行動を判断したタイミングとなる。Fig. 5.4に示される走行の際の運転データを用いて実際にアクセルオフをし始めた時点を判別するために使用したデータをTable 5.1に示す。Table 5.1は左から実験開始からの時間Time[s]、加速度 a [m/s²]、アクセル操作量[V]、現在の加速度とサンプリングタイムである0.008s前の加速度との差、現在のアクセル操作量と0.008s前のアクセル操作量との差である。停止行動のためにアクセルをオフにし始めると、アクセル操作量が変動する。また、アクセル操作量はアクセルを踏んでいる際は正の値で表示され、大きく踏むほど値も大きくなる。したがって、アクセルをオフにするためにアクセル操作量が小さくなったとき、現在のアクセル操作量と0.008s前のアクセル操作量の差が負の値となる。この時点を、ドライバーが停止行動を判断してアクセルをオフにし始めた時点とする。Table 5.1は9.496sまでしか示していないが、これは停止のために行動した部分を抜粋しているためであり、これ以降も減速し続け、最終的に停止する。この場合、走行開始から9.432sの時点でドライバーがアクセルオフにするためにアクセル操作をし始めたことになる。したがって、抽出するデータは9.432sの前後0.1sを抽出する。このような方法を用いて抽出した結果変数の一例をTable 5.2に示す。

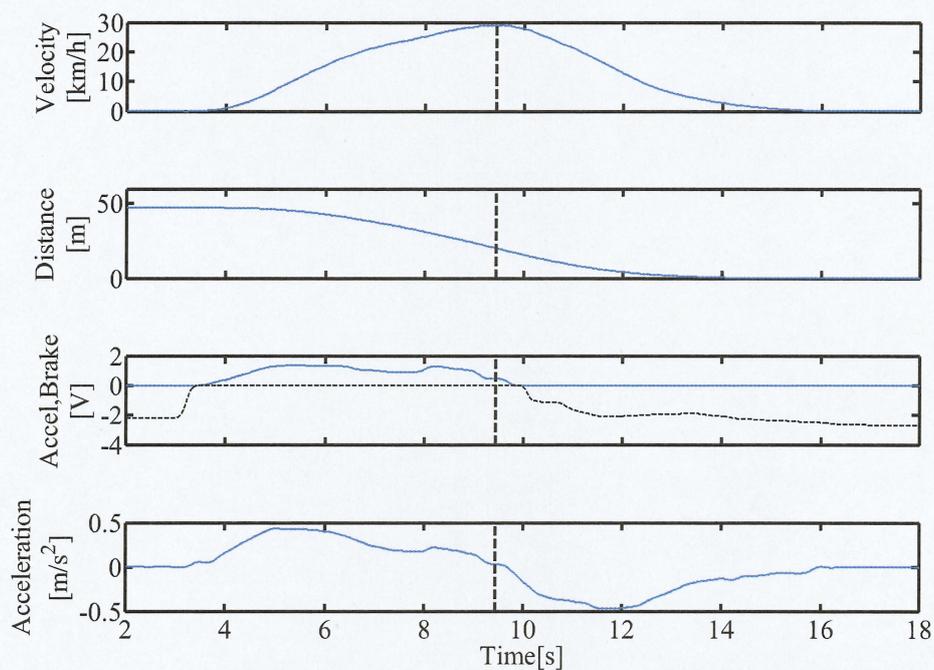


Fig. 5.4 Extraction of the dependent variable

Table 5.1 Determining when to turn off the accelerator

Time [s]	Acceleration [m/s ²]	Accel [V]	Defference of Acceleration	Defference of Accel
9.384	0.0338	0.4739	-0.0005	0.0011
9.392	0.0333	0.4748	-0.0005	0.0009
9.400	0.0329	0.4756	-0.0004	0.0008
9.408	0.0325	0.4761	-0.0004	0.0005
9.416	0.0322	0.4764	-0.0004	0.0003
9.424	0.0318	0.4764	-0.0003	0.0000
9.432	0.0315	0.4762	-0.0003	-0.0002
9.440	0.0312	0.4756	-0.0003	-0.0005
9.448	0.0309	0.4748	-0.0003	-0.0008
9.456	0.0306	0.4737	-0.0003	-0.0011
9.464	0.0303	0.4723	-0.0003	-0.0014
9.472	0.0300	0.4705	-0.0003	-0.0017
9.480	0.0298	0.4685	-0.0003	-0.0020
9.488	0.0295	0.4662	-0.0003	-0.0023
9.496	0.0292	0.4636	-0.0003	-0.0026

Table 5.2 Data extraction

Number	v [km/h]	d [m]	y_i
1	17.183	11.585	1
2	17.191	11.552	1
3	17.199	11.512	1
4	17.207	11.472	1
5	17.215	11.432	1
6	28.816	21.030	1
7	28.821	20.970	1
8	28.825	20.903	1
9	28.829	20.843	1
10	28.834	20.776	1
11	17.254	13.960	0
12	17.255	13.920	0
13	17.256	13.880	0
14	17.256	13.847	0
15	17.256	13.807	0
16	28.187	25.005	0
17	28.195	24.945	0
18	28.203	24.885	0
19	28.210	24.818	0
20	28.217	24.758	0

5.3.4 停止行動判断モデル同定結果

5.3.3 項の方法で抽出した運転データを用いて停止行動判断モデル同定を行う。ドライバ毎に同定したモデル（以下個人モデル）とドライバ全員のデータを使用して同定したモデル（以下共通モデル）の合計4モデル同定する。個人モデルは停止行動を判断した場合とそうでない場合を合計1200点を抽出して同定し、共通モデルは停止行動を判断した場合とそうでない場合を合計約3600点抽出してモデル同定を行った。また、モデル同定用データの抽出の際には1度アクセルオフしたが再度アクセルを踏んだ場合など、抽出が困難なデータは排除した。同定したモデルのパラメータをTable 5.3に示す。本パラメータを式(5.3)に代入して得られるロジット Z に対して説明変数を代入することで停止行動判断を行う確率の算出が可能になる。

Fig. 5.5は同定したモデルのうちドライバAのモデルを用い、ドライバAのモデル同定実験結果のうち、モデル同定に用いていない運転データを使用して、走行時のモデル出力からの出力確率を算出したものを示す。Fig. 5.5は縦軸が上から停止行動判断モデルを用いて算出した停止行動判断を行う確率 **Probability**、自車速度 v_d [km/h]、停止線までの距離 d [m]、アクセル操作量 [V]（実線）、ブレーキ操作量 [V]（破線）、自車の加速度 a [m/s²]であり、横軸はいずれにおいても **Time[s]** である。また、縦の破線は5.3.2項の停止行動判断定義に基づいてドライバが停止行動を判断したとした時点を示し、確率の横の破線は出力確率 0.5 を表す。この結果をみるとドライバが停止行動を判断した際、ロジスティック回帰モデルの出力確率が 0.5 付近となっていることが分かる。このことからドライバの実際の停止行動判断と、ロジスティック回帰モデルの出力確率の 0.5 を閾値として判断した際のタイミングに大きな差がないことが確認できた。

第4章で示した車線変更行動判断モデルの検証では説明変数が多く、同定した運転行動判断モデルの特徴を確認することが出来なかった。しかし、停止行動判断モデルでは同定したモデルの特徴を確認するため、説明変数を停止線との相対速度 v [km/h]と停止線までの距離 d [m]として同定を行った。モデルの確認のため、Fig. 5.6に示すような自車速度、停止線までの距離と出力確率で構成された確率出力図を用いて確認する。Fig. 5.6は、横軸を停止線までの距離 d [m]、自車速度 v_d [km/h]として実験時の停止行動を判断したタイミング周辺をとり、同定した共通モデルを使用してその範囲での出力確率を

縦軸にとったものである。図中のプロットは、停止行動を判断した場合を丸印、停止行動を判断していない場合をバツ印として、青色がドライバ A、黒がドライバ B、赤がドライバ C のモデル同定に使用したデータである。また、出力確率の 0.1, 0.5, 0.9 に赤実線を引き、等高線（以下モデル等高線）とすることで以降同定したモデルの特徴の確認等を行っていく。この 3 次元のモデル等高線を見やすくするため、Fig. 5.7 のように自車速度、停止線までの距離の 2 次元平面化したモデル等高線を使用していく。Fig. 5.7 は縦軸を自車速度 v_d [km/h]、横軸を停止線までの距離 d [m] として、Fig. 5.6 を表したものである。この図は、停止線までの距離が小さくなるほど、自車速度が速くなるほど停止行動を判断する確率が高くなり、図の左上の領域ほど停止行動を判断する確率が高くなる。図中のプロットは Fig. 5.6 と同様に、停止行動を判断した場合を丸印、停止行動を判断していない場合をバツ印として、青色がドライバ A、黒がドライバ B、赤がドライバ C のモデル同定に使用したデータである。また、黒の斜め実線は共通モデルの出力確率 0.1, 0.5, 0.9 の等高線を示している。この結果を見ると、各ドライバの停止行動を判断した、していないとして抽出したデータから、同定ができていることが分かる。

Table 5.3 Parameters of each model

Model	η_0	η_1	η_2
A	-5.9378	-5.9345	-2.0394
B	-2.7829	-4.1405	-1.5122
C	0.3983	-5.8444	-2.4000
Mutual	-3.6613	-5.0491	-1.8231

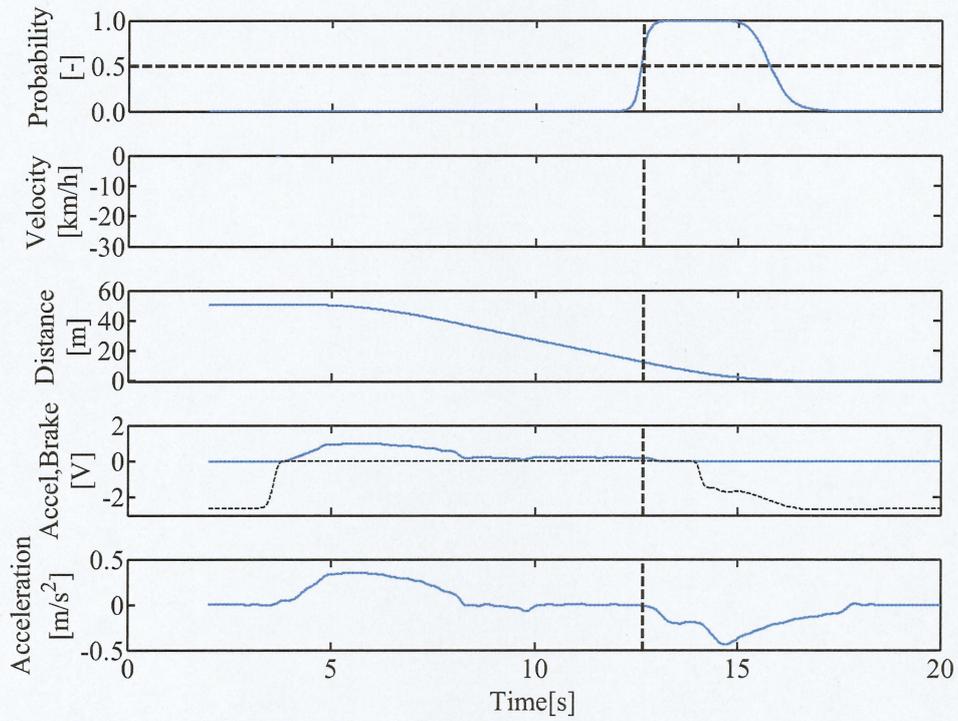


Fig. 5.5 Calculation of probability(Driver A)

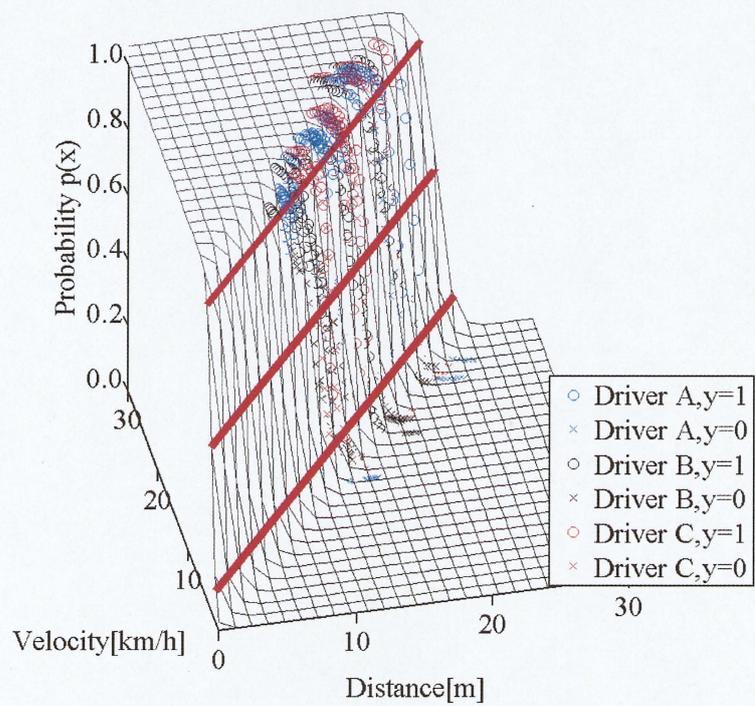


Fig. 5.6 Three dimensional plane of the output probability(Mutual model)

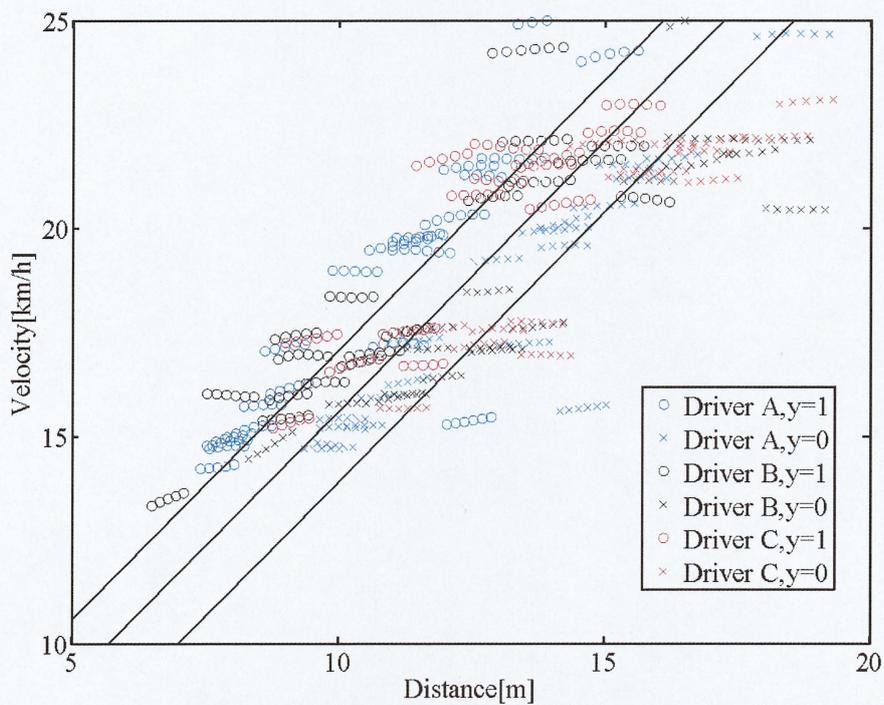


Fig. 5.7 Two dimensional plane of the output probability(Mutual model)

5.3.5 停止行動判断定義の検証

5.3.2 項では、回生ブレーキにより大きな減速度が生じるという COMS の特性の問題から、ドライバは回生ブレーキを使用し始めた時点で停止行動を判断したとして、アクセルをオフにするためにアクセル操作をし始めた時点をも $y_i = 1$ として抽出してモデル同定を行ってきた。しかし、この定義は COMS の特性から考えた予測であり、ドライバがアクセルオフした際に停止行動を判断しているのかは定かではない。そのため、Table 5.3 の各ドライバに対応したモデルを PC に実装し、ドライバが停止行動を判断した時点とモデルによってドライバが停止行動判断すると判断する時点とのタイミングの比較実験を行うことにより、この停止行動判断定義が正しいのかを検証する。

5.3.4 項で述べたように、停止行動判断モデルの同定には停止行動を判断した場合とそうでない場合を約 600 点ずつを使用した。そのため、どのドライバの停止行動判断モデルも Fig. 2.1 のロジット Z が 0 で出力確率が 0.5 に達した際にドライバが行動判断したと判断することができる。したがって、同定した各ドライバのモデルの出力確率 0.5 を閾値として設定し、モデルの出力確率が閾値に達した時点でドライバに合図を送る。そして、その合図があったタイミングとドライバが実際に停止行動を判断したタイミングとの差を確認してもらい、現在の停止行動判断の定義が正しいかの検証を行った。

実験条件として、Fig. 5.1 に示すような実験環境を用い、停止位置は③のみとする。したがって、この実験では停止位置①と②の目印は存在しない。スタート地点から 30m の目印までが加速域のため、ドライバには 30m の目印までに指定速度域まで加速してもらい、その後 50m の目印の停止位置に停止する際には任意のタイミングで停止行動を行ってもらう。このとき、PC では同定したモデルとリアルタイムで収集している停止線との相対速度 v [m/s]、停止線までの距離 d [m] を使用して、リアルタイムでドライバが停止行動を判断する確率を出力し続ける。そして、出力確率が閾値に達した際にドライバが停止行動判断したとし、Fig. 3.8 の装置を用いて LED を点灯させることでドライバに合図を出す。ドライバはこの合図を確認するとともに任意のタイミングで停止位置への停止行動を行い、1 回の走行終了後にドライバに LED の点灯タイミング、すなわち停止行動判断モデルによってドライバが停止行動判断したとしたタイミングとドライバ自身の停止行動判断のタイミングとの差を回答してもらった。この主観評価では、1 回の走行

につきタイミングの差を5段階で評価してもらう。この条件下で、モデル同定実験の際に実験条件となっていた速度域につき5本、合計15本走行してもらう。実験はモデル同定を行った3名のドライバで行った。

実験結果を Fig. 5.8 から Fig. 5.10 に示す。Fig. 5.8 はドライバ A, Fig. 5.9 はドライバ B, Fig. 5.10 はドライバ C の結果を示す。これらの図は縦軸が主観評価項目を答えた回数、横軸がその主観評価項目であり、ドライバ自身の停止行動判断と停止行動判断モデルによってドライバが停止行動判断したと判断した時点で、LED の点灯とのタイミングの違いを1走行毎に評価してもらったものである。この結果を見ると、各ドライバとも速度域によっては許容範囲だが早い、許容範囲だが遅いという結果が出ているものの、多くの場合で適切という結果が出た。このことから、ドライバの感覚では各ドライバに対応して同定したモデルが自らの停止行動判断のタイミングとほぼ一致しているという結果となった。これより、今後 COMS における停止行動判断モデルは停止のためにアクセルをオフし始めた時点のデータを抽出して同定したモデルを使用することで問題ないことが確認できた。

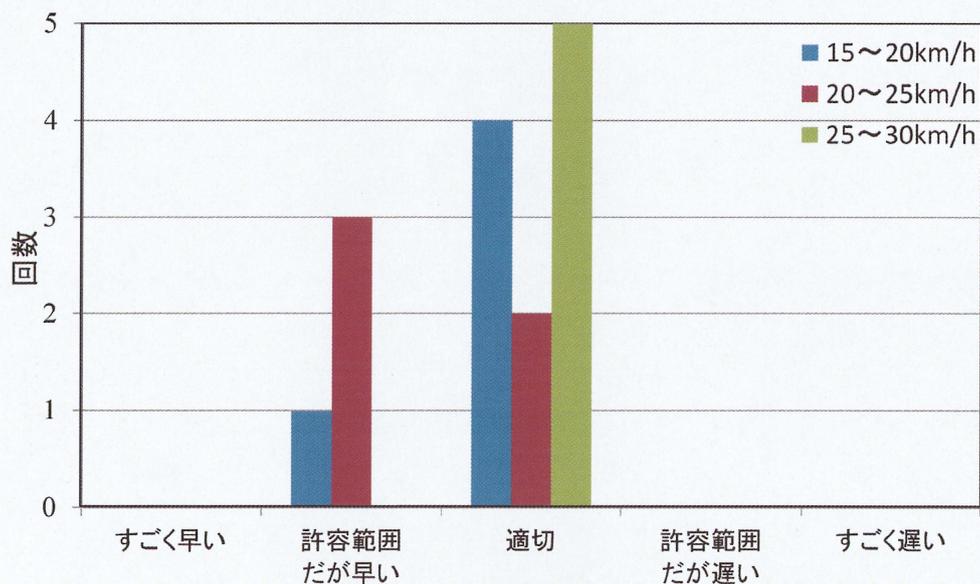


Fig. 5.8 Results of subjective assessment(Driver A)

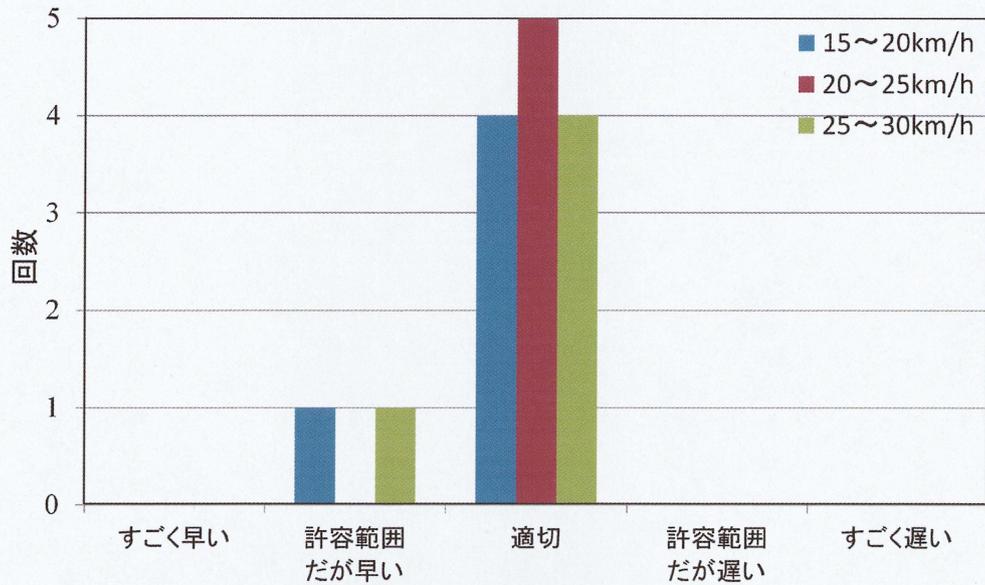


Fig. 5.9 Results of subjective assessment(Driver B)

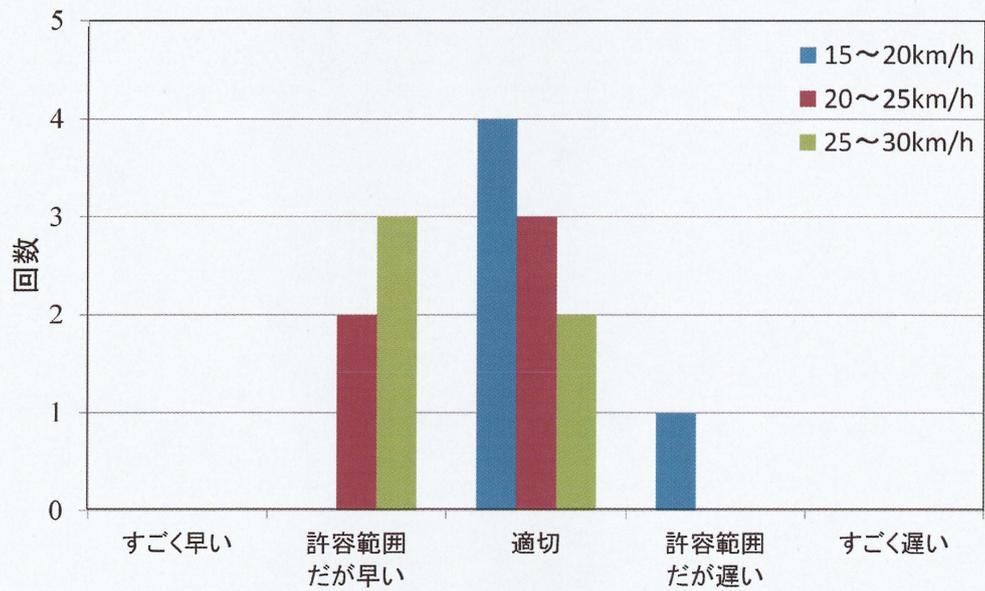


Fig. 5.10 Results of subjective assessment(Driver C)

5.4 停止行動判断モデルの検証

5.4.1 共通モデルの各ドライバへの適応方法

第4章では、複数ドライバの運転データから同定した車線変更行動判断モデルの有効性の検証を行い、同定した共通モデルを各ドライバに適応させる手法として、共通モデルの出力確率に閾値を設定し、その閾値を変化させて1回の走行終了後に違和感の有無を聞き、その結果によってさらに閾値を変化させていくことで各ドライバにとって違和感がない出力確率を探し、最終的に違和感がない出力確率を適切な閾値として設定することで適応させてきた。これは、例えば Fig. 5.7 において初期閾値を出力確率 0.5 に設定し、停止行動判断モデルによってドライバが停止行動判断すると判断するポイントとして設定していたのを出力確率 0.9 に設定することで平行移動させ、出力確率 0.9 を新たにドライバが停止行動判断すると判断するポイントとすることと等価である。停止行動判断モデルにおいても共通モデルを各ドライバに適応させる必要がある。そのため、ドライバ毎の閾値の設定によって共通モデルを各ドライバに適応させるため、各ドライバに対して閾値を変化させる実験を行う。

5.4.2 停止行動判断モデルの検証実験条件

実験条件として、Fig. 5.1 のコースのうち、30m 地点と停止位置①、②の目印をなくした全長 50m の実験コースを使用する。速度は従来他研究で使用されていた 15km/h、23km/h を指定し、ドライバはドライバ A、ドライバ C である。停止行動判断モデルは共通モデルを用い、COMS に搭載した PC ではリアルタイムで収集している停止線との相対速度 v [m/s] と停止線までの距離 d [m] を使用して、その走行中におけるドライバが停止行動を判断する確率をリアルタイムで算出し、設定した閾値に達した時点でドライバが停止行動を判断したとして Fig. 3.8 の装置によりドライバに合図を送る。共通モデルの閾値は各ドライバの特性に応じて各速度に対して 5 種類設定し、Table 5.4 のように設定した。この閾値を走行毎にランダムで変更することとし、ドライバにはその順番は伝えない。また、停止行動はドライバの任意で行ってもらうが、1 走行につき LED による合図

とそれの際のドライバ自身の停止行動判断のタイミングとを比較してどう感じたかを回答してもらう。回答内容は Table 5.5 に示すようになっており、今回の走行はどのように感じたかの絶対評価と、前回との走行を比較してどのように感じたかの相対評価の2項目の回答をしてもらう。絶対評価については「良い」、「許容範囲」、「悪い」の3段階で、相対評価については「良くなった」、「変わらなかった」、「悪くなった」の3段階で答えてもらう。これは、例えば悪くはなったがまだ許容範囲であるといった結果にも対応するためであり、この2つの方式で評価を行ってもらうことにした。以上の条件で各速度につき15本行い、その中で設定した閾値の走行データが3回ずつとなるように走行順を設定した。

Table 5.4 Threshold at each velocity

	15km/h					23km/h				
Driver A	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
Driver C	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7

Table 5.5 Evaluation item

Compared with the previous	Result of the times
3:Better	3:Right
2:Same	2:Acceptable
1:Bad	1:Bad

5.4.3 停止行動判断モデルの検証実験結果

各ドライバの主観評価の結果を Table 5.6 と Table 5.7 に示す。これは左が 15km/h、右が 23km/h の走行実験の際の評価結果を示しており、上から本走行で走行した順に並べられている。また、絶対評価と相対評価結果をそれぞれ3段階評価してもらった結果が示され、評価内容は Table 5.5 に記載した回答項目となっており、結果は数字で示している。さらに Fig. 5.11 から Fig. 5.14 は、上記の結果を図示したものであり、順にドライバ A の 15km/h、ドライバ A の 23km/h、ドライバ C の 15km/h、ドライバ C の 23km/h の結果である。左縦軸が各主観評価項目の3段階評価結果、右縦軸が閾値、横軸が実験の走行回数を表している。また、黄色の棒グラフは絶対評価を、青色の棒グラフは相対評価を、赤色の折れ線グラフはその走行で設定した閾値を示している。これらの結果を見ると、絶対評価では 15km/h の場合、ドライバ A は共通モデルの出力確率の 0.6 付近を閾値として設定した場合に「良い」と回答することが多いことが分かる。また、ドライバ C は共通モデルの出力確率の 0.3 付近を閾値として設定した場合に「良い」との回答が得られた。さらに 23km/h の場合、どちらのドライバも共通モデルの出力確率の 0.5 付近を閾値として設定した場合に「良い」、「許容範囲」との回答が得られた。これは、速度が速いことによってドライバの停止行動判断タイミングと LED の点灯タイミングの差が見分けにくくなっていたと考えられる。実際に、速度が速いことによりタイミングの差が分かりにくく、多少のタイミングの差に気づかなかつたとの回答が得られた。

また Table 5.8 から Table 5.11 は、2回目以降から回答を得た前回の走行との相対評価結果を示している。縦軸が前回の走行時の閾値、横軸を今回の走行時の閾値として、対戦表形式で表示している。ある走行において、前回との比較結果が良くなったと回答し、それが「許容範囲」から「良い」という回答であった場合は 3 (許→良) と表示している。括弧の前にある数字は前回との比較結果を表している。この結果を見ると、どちらのドライバも 15km/h、23km/h とともに良いと回答した閾値に近づくほど良くなったという結果が出たほか、その閾値から急激に遠ざかると悪くなったとの結果が出ていることが分かる。

Fig. 5.15 と Fig. 5.16 は実験結果のうち、各ドライバの主観評価結果を Fig. 5.7 にプロットしたものである。Fig. 5.15 はドライバ A の結果を、Fig. 5.16 はドライバ C の結果を示

し、ドライバ A, ドライバ C を同時にプロットしたものを Fig. 5.17 に示す。これらは縦軸が自車速度 v_d [km/h], 横軸が停止線までの距離 d [m] である。また、実線は上から共通モデルの出力確率 0.9, 確率 0.5, 確率 0.1 を表す。図中のプロットは、共通モデルの出力確率が設定した閾値に達して LED が点灯し、合図が伝達された時点での自車速度と停止線までの距離である。また、そのプロットの内容として LED による合図とドライバ自身のタイミングとの差を評価してもらった結果によって丸印, 三角印, バツ印で示しており、丸印は「良い」、三角印は「許容範囲」、バツ印は「悪い」の結果を表しており、青がドライバ A, 赤がドライバ C の評価結果を示している。この結果を見ると、両ドライバの結果とも 23km/h の場合に共通モデルの出力確率の 0.5 周辺を閾値として設定した場合に「良い」、「許容範囲」との回答が集中した。このことから、23km/h 付近では、共通モデルの出力確率の閾値を 0.5 に設定することによってどちらのドライバにも適応できることが分かる。しかし 15km/h 付近においては、各ドライバの運転特性の差異が現れるという結果となった。15km/h の際のドライバ A は、共通モデルの出力確率 0.5 より高い出力確率を閾値とした場合に「良い」という結果が集中している。また、ドライバ C は共通モデルの出力確率 0.5 より低い出力確率を閾値とした場合に「良い」という結果が集中している。また、各ドライバがその走行で「良い」と回答した閾値のみを抽出し、その閾値の平均を求めたものを Table 5.12 に示す。この結果を見ると、23km/h の走行では、両ドライバが「良い」と回答した閾値の平均が 0.5 付近となっていることが分かり、この結果からも共通モデルの出力確率 0.5 を閾値と設定した場合に各ドライバに適応できることが分かる。一方で、15km/h の結果では両ドライバが「良い」とする共通モデルの出力確率の閾値に差があることが分かる。これらの結果から、共通モデルの出力確率にドライバ毎の閾値を設定することによって、各ドライバに適応できることを確認した。

Table 5.6 Results of verification experiment(Driver A)

15km/h				23km/h			
Number of trial	Threshold	Result of the times	Compared with the previous	Number of trial	Threshold	Result of the times	Compared with the previous
1	0.3	2		1	0.3	2	
2	0.4	2	2	2	0.4	2	2
3	0.5	3	3	3	0.5	2	2
4	0.6	3	3	4	0.6	3	3
5	0.7	3	3	5	0.7	3	2
6	0.5	1	1	6	0.5	2	1
7	0.6	1	2	7	0.6	2	2
8	0.7	3	3	8	0.7	2	1
9	0.3	2	1	9	0.3	3	3
10	0.4	2	2	10	0.4	1	1
11	0.7	3	3	11	0.7	2	3
12	0.6	3	2	12	0.6	2	2
13	0.5	2	1	13	0.5	2	2
14	0.4	3	3	14	0.4	3	3
15	0.3	1	1	15	0.3	2	1

Table 5.7 Result of verification experiment(Driver C)

15km/h				23km/h			
Number of trial	Threshold	Result of the times	Compared with the previous	Number of trial	Threshold	Result of the times	Compared with the previous
1	0.5	2		1	0.6	2	
2	0.1	2	3	2	0.3	2	3
3	0.3	3	3	3	0.7	1	1
4	0.7	2	1	4	0.4	3	3
5	0.2	2	3	5	0.5	3	2
6	0.1	1	1	6	0.3	2	1
7	0.2	3	3	7	0.4	2	2
8	0.3	3	3	8	0.5	3	3
9	0.5	2	1	9	0.6	2	1
10	0.7	1	1	10	0.7	2	2
11	0.3	2	3	11	0.6	3	3
12	0.2	2	2	12	0.4	3	2
13	0.7	1	1	13	0.7	1	1
14	0.1	2	3	14	0.3	2	3
15	0.5	3	3	15	0.5	2	2

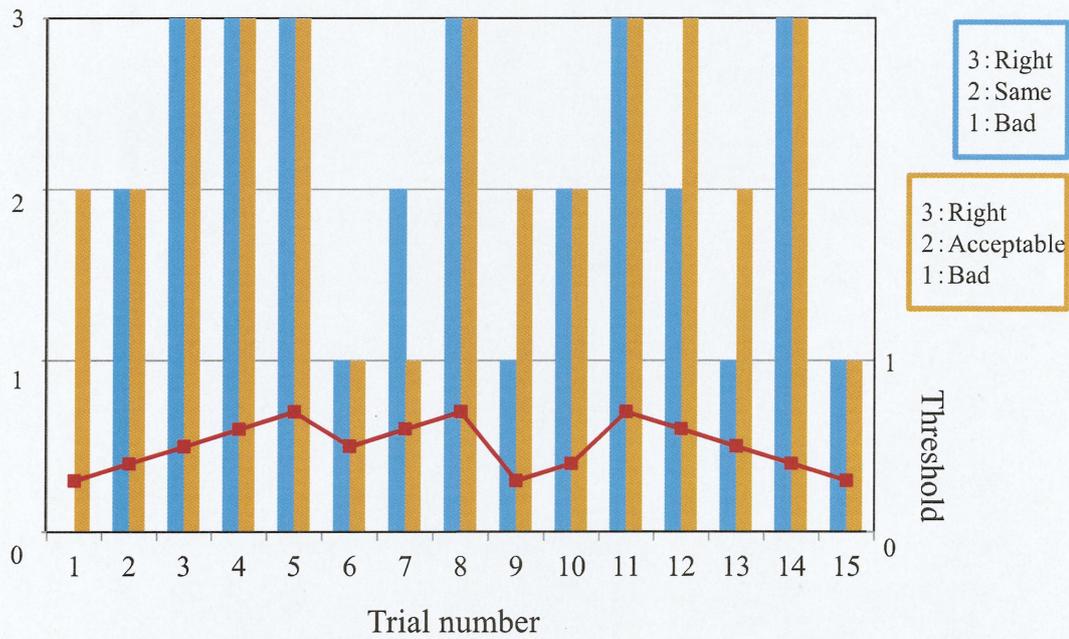


Fig. 5.11 Transition of threshold change and evaluation results (15km/h, Driver A)

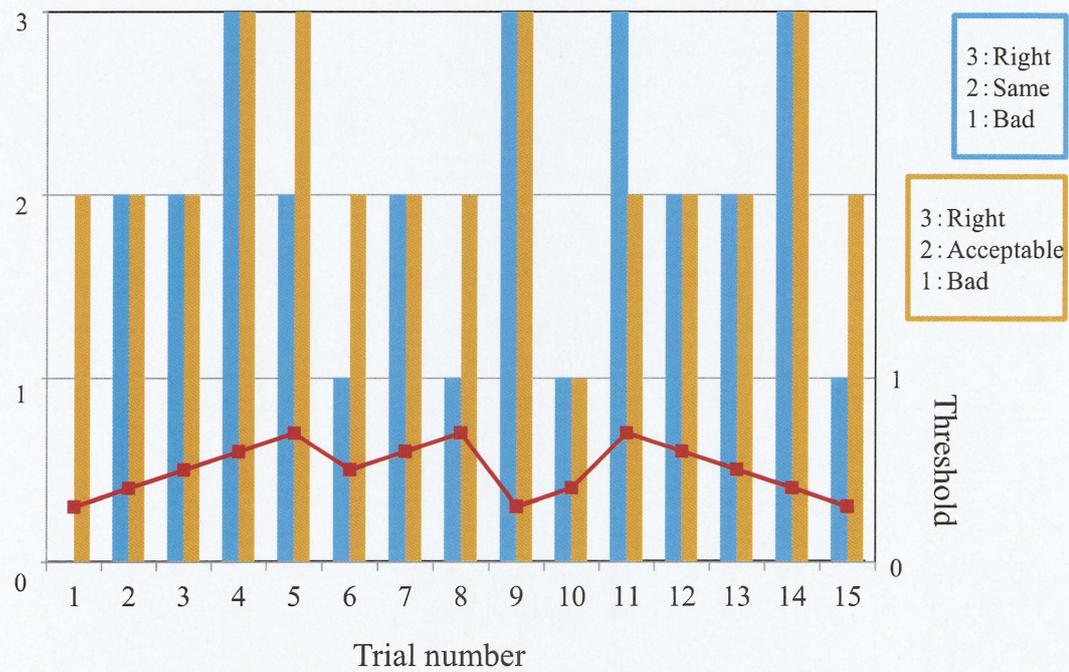


Fig. 5.12 Transition of threshold change and evaluation results (23km/h, Driver A)

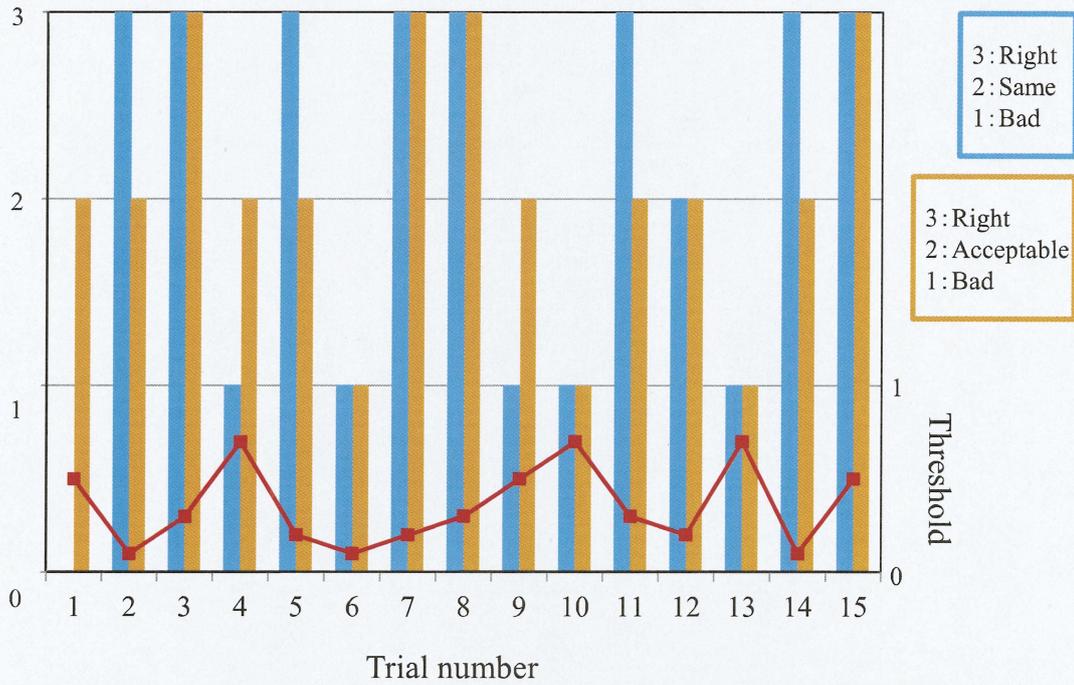


Fig. 5.13 Transition of threshold change and evaluation results (15km/h, Driver C)

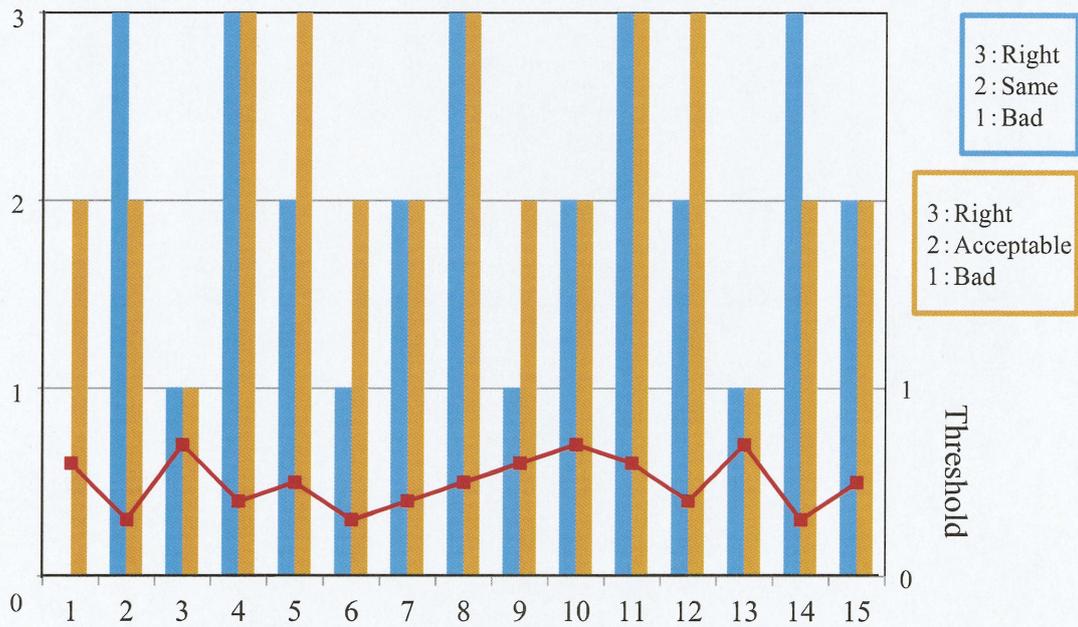


Fig. 5.14 Transition of threshold change and evaluation results (23km/h, Driver C)

Table 5.8 Results of compared with the previous trial(15km/h,Driver A)

		After				
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
Before	0.3		2(許→許) 2(許→許)			
	0.4	1(良→悪)		3(許→良)		1(許→良)
	0.5		3(許→良)		3(良→良) 1(悪→悪)	
	0.6			1(良→許)		3(許→良) 3(許→良)
	0.7	1(良→許)		1(良→悪)	2(良→良)	

Table 5.9 Results of compared with the previous trial(23km/h,Driver A)

		After				
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
Before	0.3		2(許→許) 1(良→悪)			
	0.4	1(良→許)		2(許→許)		3(悪→許)
	0.5		3(許→良)		3(許→良) 2(許→許)	
	0.6			2(許→許)		2(良→良) 1(許→許)
	0.7	3(許→良)		1(良→許)	2(許→許)	

Table 5.10 Results of compared with the previous trial(15km/h,Driver C)

		After				
		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7
Before	0.1		3(悪→良)	3(許→良)	3(許→良)	
	0.2	1(許→悪)		3(良→良)		1(許→悪)
	0.3		2(許→許)		1(良→許)	1(良→許)
	0.5	3(許→許)				1(許→悪)
	0.7	3(悪→許)	3(許→許)	3(悪→許)		

Table 5.11 Results of compared with the previous trial(23km/h,Driver C)

		After				
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
Before	0.3		2(許→許)	2(許→許)		1(許→悪)
	0.4			2(良→良) 3(許→良)		1(良→悪)
	0.5	1(良→許)			1(良→許)	
	0.6	3(許→許)	3(良→良)	1(許→悪)		2(許→許)
	0.7	3(悪→許)	3(悪→良)		3(許→良)	

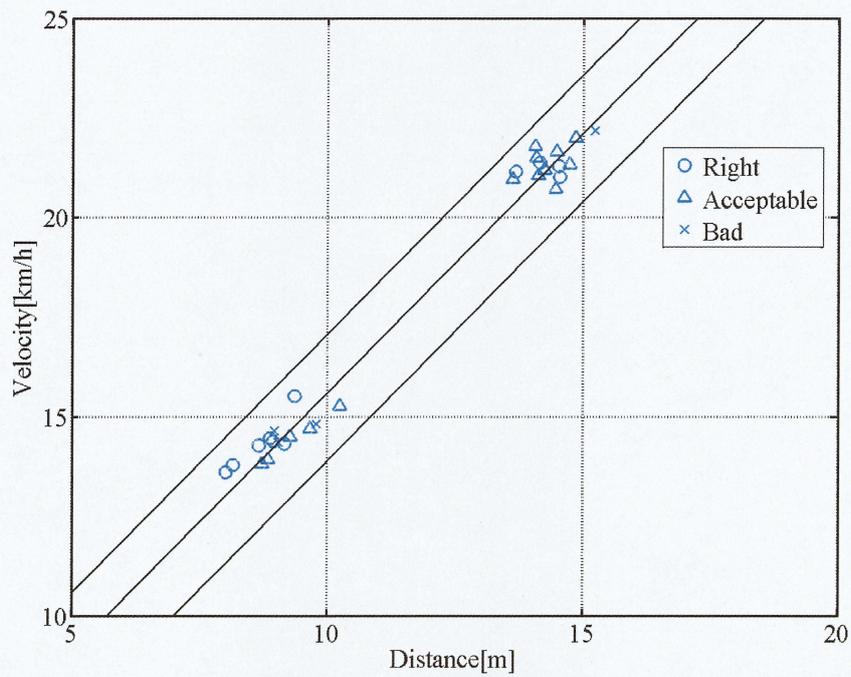


Fig. 5.15 Results of subjective evaluation(Driver A)

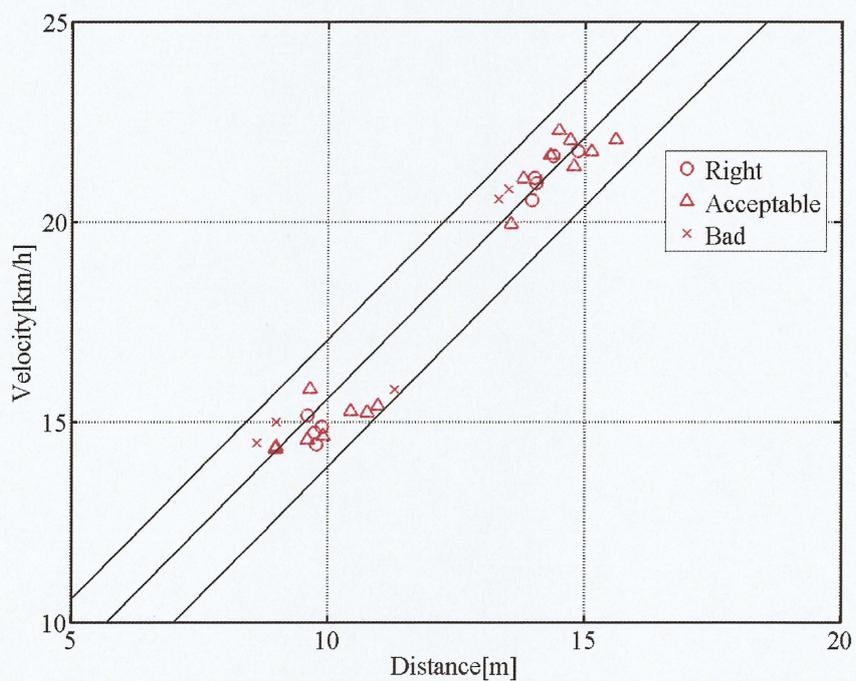


Fig. 5.16 Results of subjective evaluation(Driver C)

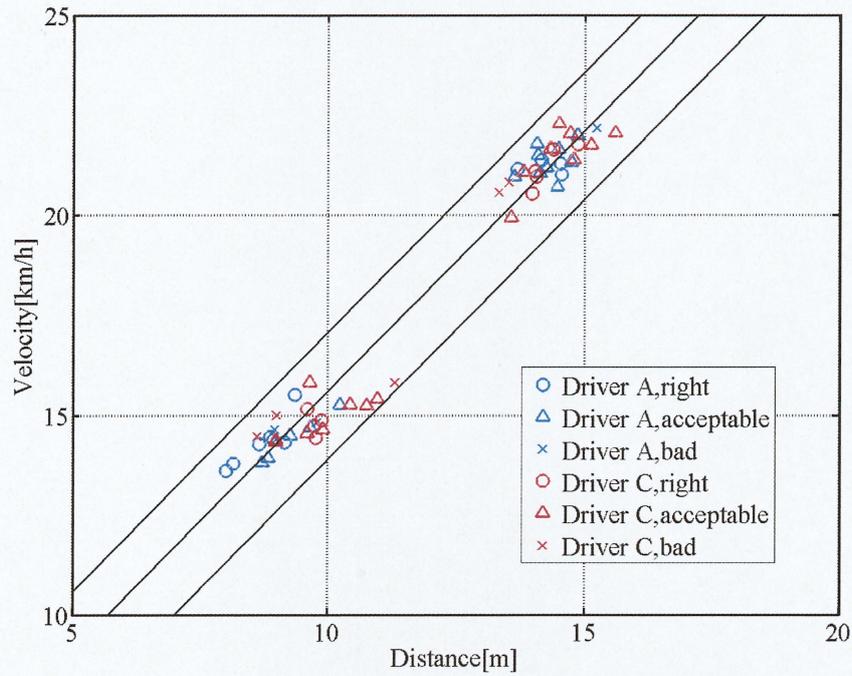


Fig. 5.17 Results of subjective evaluation(Driver A,Driver C)

Table 5.12 Average threshold

Driver A		Driver C	
15km/h	23km/h	15km/h	23km/h
0.60	0.50	0.27	0.48

5.4.4 実験結果についての考察

Fig. 5.18, Fig. 5.19, Fig. 5.20 は, 5.4.3 項で示した Fig. 5.15, Fig. 5.16, Fig. 5.17 に対して 5.3.4 項で同定した各ドライバの個人モデルの出力確率 0.5 の線を同時に示したものである。これらは縦軸が自車速度 v_d [km/h], 横軸が停止線までの距離 d [m] である。また, 実線は上から共通モデルの確率 0.9, 確率 0.5, 確率 0.1 を表し, 破線がドライバ A, 点線がドライバ B, 一点鎖線がドライバ C の個人モデルの出力確率 0.5 の線を表している。Fig. 5.18 はドライバ A の絶対評価結果を, Fig. 5.19 はドライバ C の絶対評価結果を, Fig. 5.20 は両ドライバの絶対評価結果を示しており, 丸印が「良い」, 三角印が「許容範囲」, バツ印が「悪い」の結果である。これらの結果を見ると, 23km/h においては個人モデルの出力確率 0.5 が共通モデルの出力確率 0.5 の線と重なっており, 同定した個人モデルの出力確率 0.5 の線と共通モデルの出力確率 0.5 の線が一致するとともに, どちらのドライバの絶対評価の結果とも一致した。したがって, 23km/h では, 共通モデルの出力確率の 0.5 を閾値とすることによって, 両ドライバに適応できることが分かった。また 15km/h では, 5.4.3 項でも述べたように各ドライバの絶対評価の結果に差があることが分かっているが, この絶対評価結果が個人モデルの出力確率 0.5 の線に一致していることが分かる。そのため, 各ドライバの絶対評価の結果は実際に同定した個人モデルと一致していることが分かった一方で, 各ドライバで「良い」とする閾値に違いがあることも確認できる。したがって, 15km/h においてはドライバ A の場合は共通モデルの出力確率に 0.6 付近の閾値を設定することによって適応でき, ドライバ C は共通モデルの出力確率に 0.3 付近の閾値を設定することによって適応できることが分かった。この結果から, 共通モデルの出力確率にドライバ毎の閾値を設定することによって各ドライバに適応できることを同定したモデルとドライバの主観評価結果の双方から確認した。

また, この結果から共通モデルを各ドライバに適応させるために設定すべき閾値として, ドライバ A に関しては共通モデルの出力確率に閾値 0.55 から 0.6 を設定することによってドライバ A に適応させることができる。一方で, ドライバ C に関しては共通モデルの出力確率の 0.5 付近に閾値を設定することによって 23km/h の場合は適応できるが 15km/h の場合は適応できず, 0.3 付近に閾値を設定すると 23km/h の場合に適応できないという結果となり, 1 つの閾値を設定するだけでは適応できないドライバも存在するこ

とが分かった。このことから、ドライバCのような運転特性を持つドライバには、共通モデルの出力確率に閾値を設定するだけでなく、共通モデルのモデル等高線の傾きを調整することにより、ドライバCに適応させることが必要であることも分かった。

このように、閾値を適切に設定することで共通モデルが各ドライバに適応することが可能になることが確認できたが、ドライバの運転特性によっては状況に応じてその閾値を変化させる必要があることも確認できた。したがって、多様なドライバに適応するためには、1つの閾値を設定する、すなわち共通モデルのモデル等高線の平行移動だけの適用では対応しきれないため、この問題を解決するには共通モデルのモデル等高線の平行移動と傾きを変更する必要がある、個人適応のための設定を変更する手法の開発が必要であると考えられる。

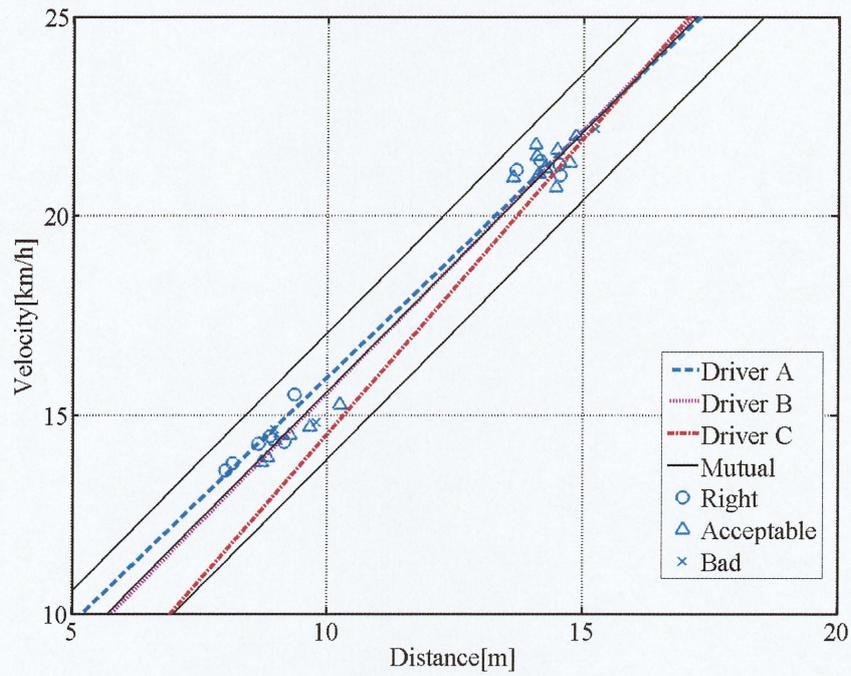


Fig. 5.18 Compared with model results and subjective evaluation(Driver A)

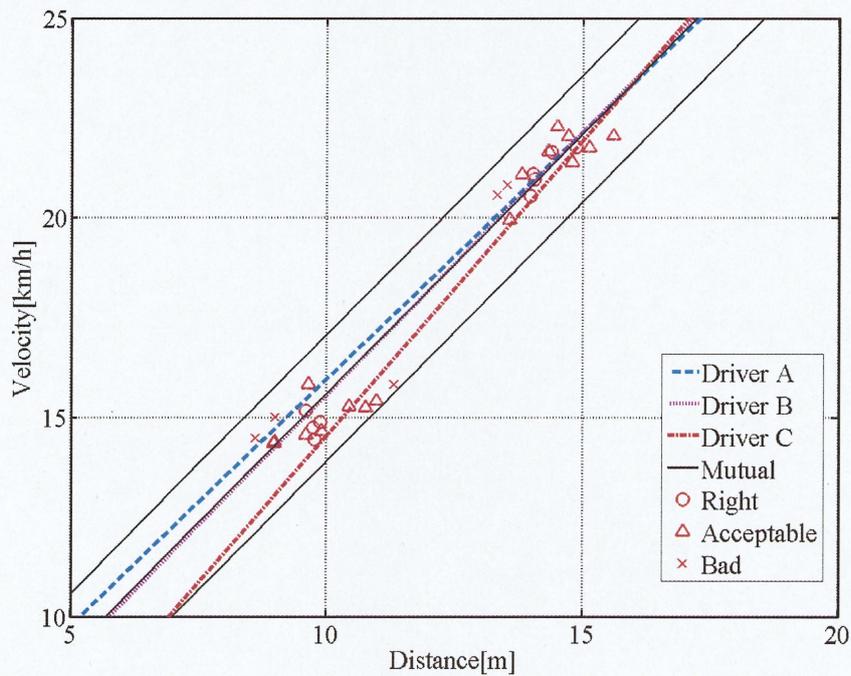


Fig. 5.19 Compared with model results and subjective evaluation(Driver C)

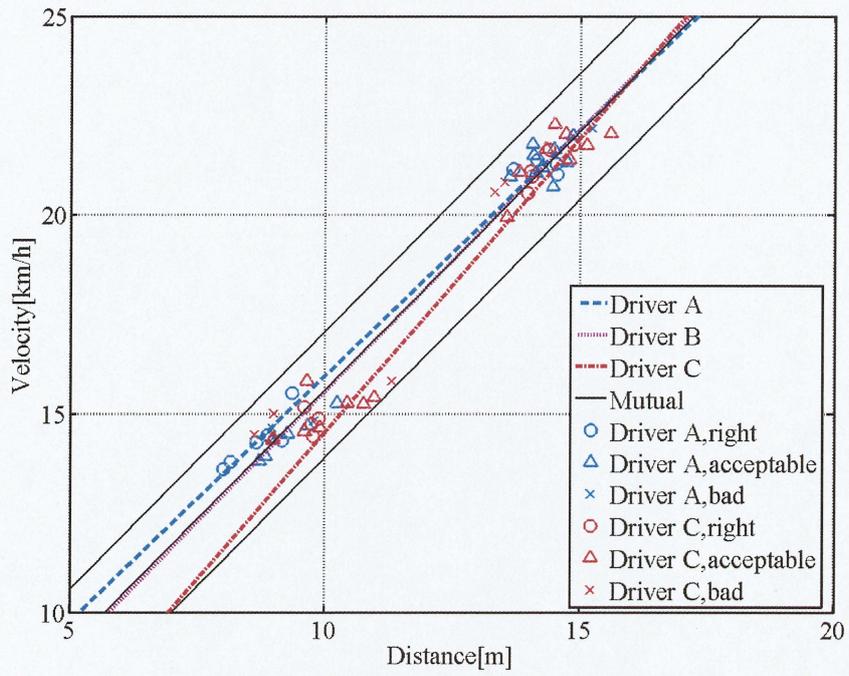


Fig. 5.20 Compared with model results and subjective evaluation(Driver A,C)

第6章

結論

6.1 まとめ

本研究では確率型モデルであるロジスティック回帰モデルを用いてドライバの運転行動判断モデルを同定し、ドライバの運転行動判断をモデル表現することが可能であるかの検証と、各ドライバの運転特性の差異の表現ができるかの検証をシステム実装レベルで行い、提案システムの有効性を検証することを目的とした。

まず、ドライバの運転行動判断は確率的なばらつきを伴う二値変数で表現できると考えられるため、ドライバの運転行動判断を確率型モデルであるロジスティック回帰モデルを用いてモデル表現することを考えた。このモデルを複数ドライバの運転データから同定し、モデル出力値に対して閾値を設定することで行動判断の有無を決定する方式とすることで、運転行動判断のモデル化と各ドライバの運転特性の差異を表現する手法を提案した。

実際に、ロジスティック回帰モデルを用いて複数ドライバの運転データから、車線変更行動判断モデルの同定を行い、設定した閾値以上が行動判断を行う条件域とする方式での有効性を検証するために、提案モデルを車線変更を行う運転支援システムに適用することを想定し、ドライビングシミュレータを用いて検証実験を行った。そして、ロジスティック回帰モデルを用いた運転行動判断モデルは、出力確率に閾値を設定して閾値以上を行動判断する条件域とすることでドライバの運転行動判断を表現できることを確認した。さらに、複数ドライバの運転データから同定した車線変更行動判断モデルであっても、ドライバ毎に閾値を変化させる実験を行い、その結果に基づいてドライバに適応する閾値に設定した場合、ドライバの運転特性の差異を表現できることを示し、提案手法の有効性を確認した。

運転行動判断モデルの別の使い方として、閾値にて行動判断を行うとする方式もまた必要とされる使い方であると考えられたため、1人乗り電気自動車を用いて停止行動判断を対象として閾値の変更によってドライバ毎の運転特性の差異の表現が可能かを検証するため、停止行動判断モデルの同定と有効性の検証実験を行った。そして、共通モデルの出力確率に対して閾値を変更させて実験を行った結果、各ドライバの運転特性の差異を表現できることを確認でき有効性は検証できた。しかし、運転に使用する速度域が広く、速度域によってドライバ毎に最適となる閾値が変化することも実験結果より確認され、多様なドライバに対して閾値というパラメータ1つで設定を行うことで適応させることは難しいことが分かり、今後はこれに対応できる設定手法を検討する必要があることが分かった。

6.2 今後の課題

上記のように停止行動判断モデルの各ドライバの特徴において、共通モデルを各ドライバに適応させるためには1つの閾値を設定するのみでは、モデルを使用する範囲（走行速度、停止線までの距離など）が広がってしまうと適応できず、走行速度に応じた閾値の変更が必要であることが判明した。今回の停止行動判断モデルの共通モデルは行動判断条件線の平行移動によって各ドライバに適応させる手法であり、この行動判断条件線の傾きをも各ドライバに対応させるには考慮すべきパラメータであることが分かり、今後は閾値の変更方法の確立と、行動判断条件線の傾きの変化方法の確立が必要である。

参考文献

- [1] 警察庁：平成 20 年中の交通事故の発生状況,2010
- [2] FredW.Rauskolb,KaiBerger,ChristianLipski,MarcusMagnor,KarstenCornelsen,JanEffertz,ThomasForm,FabianGraefe,SebastianOhl,WalterSchumacher,Jom-MartenWille,PeterHecker,TobiasNothdurft,MichaelDoering,KaiHomeier,JohannesMorgenoth,LarsWolf,ChristianBasarke,ChristianBerger,TimGulke,FelixKlose,BernhardRumpe,Caroline: An Autonomously Driving Vehicle for Urban Environment, J Field Robot, Vol.25, No.9, pp.674-724,2008
- [3] SebastianThrun,MichaelMichael Montemerlo,JanBecker,SuhridBhat,HendrikDahlkamp,DmitriDolgov,ScottEttinger,DirkHaelnel,TimHilden,GabeHoffmann,BurkhardHuhnke,DougJohnston,StefanKlumpp,DirkLanger,AnthonyLevandowski,JesseLevinson,JulienMarcil,DavidOrenstein,JohannesPaefgen,IsaacPenny,AnnaPetrovskaya,MikePflueger,GanymedStanek,DavidStavens,AntoneVogt, 「Junior: The Stanford Entry in the Urban Challenge」, J Field Robot, Vol.25, No.9, pp.569-597,2008
- [4] 富沢哲雄, 村松聡, 岩井純一, 佐藤晶則, 御堂丸圭介, 工藤俊亮, 末廣尚士, 平井雅尊, 「公共空間で自律走行可能な電動カートの開発」, つくばチャレンジ 2010 開催記念シンポジウム,2011
- [5] 松下純輝, 三浦純: 「距離データと画像データの系列統合による道路境界推定と走行制御」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, Vol.2007, 2A2-E09,2007
- [6] 堀松哲夫, 一津屋正樹: 「実用化を迎えたミリ波レーダーシステム」, 電子情報通信学会誌, Vol.87, No.9, pp.756-759,2004
- [7] 飯田正光, 菅沼直樹, 藤原直史: 「デッドレコニングを利用した予見フィードバック制御による自動車の自動操舵に関する研究」, 日本機械学会北陸支部総会講演会講演論文集, Vol.39, pp.229-230,2002
- [8] 田原雅樹, 平岡敏洋, 西原修, 熊本博光, 畑中健一: 「ドライビングシミュレータを用いた夜間運転支援システムの効果評価」, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.137-06, pp.5-10,2006

- [9] 田中宏, 川上慎太郎, 吉本堅一:「自動操舵による運転支援システム」,自動車技術会学術講演会前刷集, No.114-99, pp.9-12, 1999
- [10] 中村秀一, 津川定之, 山本真規, 武田信之:「自動車プロジェクト開発工学」, 技報堂出版, pp.64-113, 2001
- [11] 先進安全自動車 (ASV): <http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/index.html>
- [12] 古川修:「アクティブセイフティー」, 日本機械学会誌, Vol.100, No.942, pp.497-499, 1997
- [13] 永井正夫:「交通事故死傷者ゼロを目指す予防安全技術」, 日本損害保険協会予防誌, No.224, pp.6-7, 2006
- [14] 田久保宣晃:「交通事故データによる運転者のヒューマンエラーと心的負荷の一考察」, IATSS Rev(International Association of Traffic and Safety Sciences), Vol.30, No.3, pp.299-308, 2005
- [15] 山田喜一:「自動車の運転支援システムの効果とリスク評価について」, 日本信頼性学会誌, Vol.26, No.2, pp.95-103, 2004
- [16] 和田隆広:「予防安全のためのヒューマンファクタ解析」, 計測と制御, Vol.45, No.8, pp.667-670, 2006
- [17] 鈴木達也:「運転におけるヒューマンファクタの解析~コントローラとしてのドライバ~」, 計測と制御, Vol.45, No.3, pp.231-236, 2006
- [18] 天野恍人, 早川聡一郎, 池浦良淳, 澤井秀樹:「ハイブリッドシステムに基づく停止操作モデルの自律走行制御系への実装」, 三重地区計測制御研究会講演会講演論文集, RC05, pp.1-4, 2011
- [19] 柳沢浩晃, 三田誠一, 早川聡一郎:「自律走行車両の心電図を用いた乗り心地評価」, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.74-11, pp.7-10, 2011
- [20] 堀内尚行, 早川聡一郎, 池浦良淳, 澤井秀樹, 三浦祥太, 三田誠一:「RRV法を用いた自律走行車の減速動作の乗り心地評価」, 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集 (7), No.10-1, pp.411-412, 2010
- [21] 高田直樹:「ロジスティック回帰分析結果の解釈, 利用のための新手法」, IBM プロフェッショナル, PROVISION No.53, pp.71-77, 2007
- [22] Ying So:「A Tutorial on Logistic Regression」, SUGI Proceedings, pp.1-6, 1995

-
- [23] Making Sense of the Binary Logistic Regression Tool : <http://europe.isixsigma.com/library/content/c070418b.asp>
- [24] Scott W. Menard : Applied Logistic Regression Analysis (Sage University Papers Series. Quantitative Applications in the Social Sciences, No. 106.) , Sage Pubns, 2001
- [25] 瀧口徹 : 「歯科疫学統計第3報重回帰分析, 多重ロジスティック回帰分析モデルの適合度判定指標の解釈—SPSS, STATA の利用に際して—」, ヘルスサイエンス・ヘルスケア , Vol.5, No.1, pp.35-49, 2005
- [26] 津留直彦, 伊佐治和美, 和田隆広, 土居俊一, 西山明宏, 金子弘 : 「前後方向の接近に伴う危険状態評価に関する研究 (第3報)」, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.116-06 , pp.1-6, 2006
- [27] 関沢省吾 : 「ロジスティック回帰モデルを用いた運転行動におけるモデル化とその応用」, 名古屋大学大学院修士論文 , 2006

謝辞

本研究を進めるにあたり，三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 池浦良淳教授には研究に関する有益な御助言を頂き，深く感謝致します。厚く御礼申し上げます。

また，大変お忙しい中本論文を査読して頂くとともに，多数のご教示，ご助言を賜りました三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 石田宗秋教授に暑く御礼申し上げます。

また，三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 早川聡一郎准教授には終始多大なる御指導，御鞭撻を親身になって行って頂き，深く感謝致します。心より御礼申し上げます。

さらに，実験装置の作成にあたり，親身な御協力，御尽力，アドバイスをくださった澤井秀樹技官に厚く御礼申し上げます。

本研究を行うに際しまして，お忙しい中実験に協力していただきましたドライバの皆様には貴重な間を割いていただき，厚く御礼申し上げます。

また，同じ自動車関係の研究を行い，先輩である後藤真一氏，高田侑宜氏，堀内尚行氏，同期である天野洸人氏，坪井一樹氏，後輩である内田龍貴氏，太田晋輔氏，杉浦拓弥氏，松崎雅広氏，三鬼拓也氏，藤井克圭氏，加藤聖也氏，後藤翔平氏，佐橋光氏，高橋雄輝氏，堀木亮佑氏，そしてドライビングシミュレータを用いた研究グループのメンバーである安藤雅人氏には本研究を行う上で様々な提案，意見交流をし，共に良い刺激となって研究を行うことができました。厚く御礼申し上げます。

そして，先輩方，同期各氏のおかげで，充実した研究室生活を送ることができました。これら各位のご指導，ご協力に対し，心より御礼申し上げます。

最後に，学部・修士の間，より勉強をしたいという私の我儘に対して快く賛同して頂き，また惜しみない援助を送ってくださった家族のお陰で充実した素晴らしい勉強・研究生生活を送ることができました。感謝の気持ちを述べることで謝辞の最後とさせていただきます。