

複数データを用いた 災害時の車両挙動モデルの構築

伊藤 篤志¹・北澤 俊彦²・柳沼 秀樹³・羽藤 英二³

¹正会員 東急不動産株式会社 (〒 150-0043 東京都渋谷区道玄坂 1-21-2)

E-mail: Atsushi_Ito@tokyu-land.co.jp

²正会員 阪神高速道路株式会社 (〒 541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

³正会員 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒 113-8654 文京区本郷 7-3-1)

自動運転技術の普及を目前に、制御介入による高速道路上事故リスクの低減が期待される。災害や事故など突発事象に際した車両挙動は実車を用いた検証が難しいため、ドライビング・シミュレータを用いた異常時車両挙動のデータ収集が有用とされる。一方で、仮想的な状況であることから、被験者が現実の運転挙動と異なる動きを示す可能性がある。そこで、本研究では平常時の実観測車両挙動データと突発事象時の仮想空間実験データを統合し、運転挙動を分析するモデルシステムの開発を試みた。分析には、信頼性の高い実車両挙動データ、観測精度に優れる実データ再現実験データ、仮想的な説明変数を有する突発事象実験データを用いる。相互に補完的な役割を為す、性質の異なる複数のデータを用いて、共通する認知構造と非常時に固有の認知構造を互いに分離しながら統合的に推定することで、現実には取得が難しい運転挙動パラメータの推定精度の向上を図った。

Key Words : *Driving simulator, Multiple data*

1. はじめに

(1) 本研究の背景

近年、自動運転技術の実用化を目指した開発競争が目覚ましい。一部の機能については既に実車への実装が進んでおり、国土交通省¹⁾は2014年11月以降に生産される新型車の大型トラックについて、自動ブレーキ装置の設置を義務づけている。また、内閣府²⁾は2020年代前半を目処に準自動走行システムの市場化を目指していることなどから、自動車交通の新しい時代が目前に迫っていることは疑いない。自動運転制御技術の導入は、ドライバーの運転支援のみならず、社会的な交通問題である事故の減少や渋滞の解消に資する可能性が高く³⁾、また、ヒューマンエラーを排除し、交通安全の確保を可能とするなどの期待がもたれている。新しい技術の実社会への導入ならびに普及を見据え、手動・自動運転の車両が混在する交通流を想定すると、いま一度道路ネットワーク上におけるドライバーの運転行動についての検討を行う必要があり、制御介入が交通流に与える影響評価や、制御の根拠となる閾値を設定するシミュレータの開発が求められている。しかしながら、ミクロな交通挙動に関する研究においては不完全な部分も多い。本研究では特に、次の2点に着目したい。1点目は、突発事象に伴う挙動の考察である。車両運転に伴う突発事象に対する研究としては、仮想空間における実験が一般的とされている。しかしなが

ら、仮想空間実験における被験者の挙動が、現実的な交通状況における再現性には保証がない。2点目は、車両挙動観測の誤差である。車両挙動の解明については、ビデオカメラによる画像取得が一般的とされているが、観測に伴う誤差の回避は難しい。以上で述べたように、自動運転技術の導入を目前にした制御介入のあり方について考えるとき、既存の交通流を形成する各車両のミクロな挙動解明については、依然として取り組むべき課題が多い。

(2) 既往研究の整理

a) 仮想空間データを用いた研究

平時には想定されない突発的な事象に対する車両挙動の観測は、コストや安全面の問題から実車両データの取得が困難である。車両の予防安全性を考慮したモデルを構築する際、ドライビング・シミュレータ(DS)を用いた仮想空間実験が特に有用とされる。

名切ら(1998)⁴⁾、土居ら(1998)⁵⁾、天野ら(1999)⁶⁾は車両の飛び出しや路面摩擦の急変に対応するドライバ挙動の観測を行っている。鄭ら(2012)⁷⁾、山邊ら(2012)⁸⁾は、ITS導入によるトラックの隊列走行(プラトゥニング)を想定し、緊急時のドライバの制動、操舵による衝突回避行動を考察している。山口ら(2007)⁹⁾は、交差点進入におけるジレンマゾーン(黄信号に直面した際、ドライバが停止または通過の判断に迷う領域)での挙動を解析している。田中ら(2007)¹⁰⁾は、夜間の歩行者飛び

出しに対する情報支援システムの効果を検証している。

突発事象を想定した研究として、特に地震動を想定した車両挙動に関する研究の蓄積がある。これらは、振動に対する挙動の考察と、地震認知に対する考察の大きく2つに分類される。

前者に関しては、振動制御装置を備えたDSによる実験が行われている。山之内ら(1999)¹¹⁾は地震波の特性や加速度と走行安定性の関係性を考察している。丸山ら(2003)¹²⁾はハンドル操舵に着目し、ドライバー属性が揺れへの反応に関わる可能性を示唆している。

後者に関しては、DSでの挙動データ収集と、これを用いたマイクロシミュレータによる解析が行われている。丸山ら(2005)¹³⁾は、地震動を伴う車両走行、及び障害物の突発的な出現への走行反応検証に際して、緊急地震速報受信の有無について比較している。山崎ら(2007)¹⁴⁾は2台のDSを連動させ、緊急地震速報の受信に関して車両間に情報格差が生じた場合の事故の危険性について検討を行っている。松本ら(2008)¹⁵⁾は、DS実験で得られたデータからパラメータを与え、マルチエージェント・システム(MAS)上でシミュレーションを行っている。北村ら(2011)¹⁶⁾は道路構造物の揺れなど視覚による地震の認知に着目し、DSのバーチャルリアリティ(VR)空間に道路橋地震応答を再現した実験を行っている。また丸山ら(2005)¹⁷⁾は、アンケートによって実地震動の強さと高速道路運転者の反応度合いの関係性を考察している。

b) 実データとの比較を目的としたデータ収集

DS実験の再現性評価とその有用性向上のため、大口ら(2007)¹⁸⁾は同区間の実車両データとDSにより取得されたデータから、追従挙動の比較分析を行っている。その結果、両実験結果間の速度変動には大きな差が見られないものの、車間距離や反応遅れ時間の差異を確認したと結論づけている。

(3) 本研究の目的

本研究では、突発事象の発生時、その運転挙動メカニズムの解明を目的とする。

極端な交通状態のメカニズムを明らかにしようとするれば、実証的な分析が欠かせないものの、実際のデータ取得は困難を伴うであろう。本研究はこうした点に着目して、ドライビング・シミュレータ(DS)を用いて異常時の車両挙動のデータ収集を行い、運転挙動の分析を行うこととする。DSは極端な交通状態の再現が容易であり、モデル分析のためのデータも十分に得られやすい。一方で、仮想的な状況であることから、被験者が現実の運転挙動と異なる動きを示す可能性は否定できない。そこで、本研究では平常時と異常時のデータを統合し、より再現性の高い突発事象に伴う車両挙

動モデルシステムの開発を行うこととしたい。これは、異常時のデータが現実的な反応が得られていない可能性がある反面、平常時のデータに基づいたシステム方程式は、非常時の行動をうまく再現できない怖れがあることに着目したものである。こうした二つの性質の異なるデータを統合的に用いて、共通的な認知構造と、非常時に固有の認知構造を互いに分離しながら、統合的に推定することで、突発事象に伴う車両挙動モデルの構築を目指すものである。

本章では、研究の背景や既存の研究、本研究の目的について述べた。2章では本研究の下地となる融合推定手法について整理する。3章ではDSを用いた仮想空間実験とそのデータ処理手順について述べる。4, 5章ではそれぞれ平常時、突発事象を想定した場合での2次元車両挙動モデルの構築と推定を行い、6章を本論のまとめとする。

2. 複数データの融合推定

(1) 融合推定手法

本章では、複数のデータを用いた推定手法として、RPとSPのデータを用いた融合推定手法についての整理を行う。

非集計タイプの交通行動モデルを推定する際に用いられるデータは、RPとSPの2つに大分される。前者は、実際の行動に基づくため信頼性が高い反面、選択に影響を与える要因や選択肢集合が不明瞭である点や、説明変数間に強い相関(*e.g.* 交通手段選択における料金と移動時間)が含まれる点などの短所を持つ。後者は、実験者により提示される仮想の状況における被験者選好の意思表示データであるため、現存しない選択肢や説明変数を扱うことが出来る。また、実験者が被験者に対して要因の値を恣意的に制御できるため、被験者が持つ要因間の重要度の関係性を把握しやすい。しかしながら仮想的な状況での実験であるために、観測される選択結果に対する信頼性の低さが問題となる。

Ben-Akiva *et al.*(1990)¹⁹⁾はSPデータが抱える信頼性の問題として、具体的に信憑性(Validity)と安定性(Stability)の2つを指摘している。信憑性とは、SP実験内で得られた選好情報と、実際の市場での行動との一致性を指す。例えばDSでの実験であれば、シミュレータ内で接触事故が生じていても実害は発生しないため、リスクに対する感度は実際の運転行動と大きく異なる恐れがあり、得られた挙動にバイアスが含まれる可能性がある。また、安定性は実験条件による回答のばらつきを指す。DSでは複数のモニターや音響システムを通じて自車周辺の状況を表現するが、距離感や速度の認知、周囲の風景、周辺車両の挙動など、実空間の再現

性には限界があり、これに基づく選択の誤差が含まれる可能性が考えられる。

本研究において重要となる RP データ, SP データの特徴を表-1 にまとめる。森川 (1990)²⁰ は、このように相互に補完的な役割を果たす RP データ, SP データを同時に利用した統計的手法を提案している。式 (1), (2) はそれぞれ RP データ, SP データ内で行動 i を選択した場合の効用 u_i を表す。

$$u_i^{RP} = \alpha_i^{RP,SP} x_i^{RP,SP} + \alpha_i^{RP} x_i^{RP} + \varepsilon_i^{RP} \quad (1)$$

$$u_i^{SP} = \alpha_i^{RP,SP} x_i^{RP,SP} + \alpha_i^{SP} x_i^{SP} + \varepsilon_i^{SP} \quad (2)$$

$x_i^{RP,SP}$, $\alpha_i^{RP,SP}$ はそれぞれ RP データ, SP データに共通の説明変数及びこれに対応したパラメータである。説明変数間のトレードオフが実際の市場と仮想的な状況において共通であると仮定できる場合に、モデル内でパラメータを共有する。 x_i^{RP} , α_i^{RP} , x_i^{SP} , α_i^{SP} は RP, SP データに固有の説明変数及びこれに対応したパラメータである。例えば Morikawa(1989)²¹ は、説明変数 x_i^{SP} に関して SP 調査に基づく正当化バイアスがはたらくと考えられる場合に、パラメータの分離を行う、としている。誤差項 ε_i に i.i.d. ガンベル分布を仮定する場合、 i の選択確率 p_i は次のロジットモデルで与えられる。

$$p_i^{RP} = \frac{\exp\left(\alpha_i^{RP,SP} x_i^{RP,SP} + \alpha_i^{RP} x_i^{RP}\right)}{\sum_{i'=1}^{IRP} \exp\left(\alpha_{i'}^{RP,SP} x_{i'}^{RP,SP} + \alpha_{i'}^{RP} x_{i'}^{RP}\right)} \quad (3)$$

$$p_i^{SP} = \frac{\exp\left(\mu\left(\alpha_i^{RP,SP} x_i^{RP,SP} + \alpha_i^{SP} x_i^{SP}\right)\right)}{\sum_{i'=1}^{ISP} \exp\left(\mu\left(\alpha_{i'}^{RP,SP} x_{i'}^{RP,SP} + \alpha_{i'}^{SP} x_{i'}^{SP}\right)\right)} \quad (4)$$

ここで μ はスケールパラメータであり、誤差項の分散の違いを次式で与える。

$$\text{Var}(\varepsilon^{RP}) = \mu^2 \text{Var}(\varepsilon^{SP}) \quad (5)$$

また、尤度関数は RP, SP それぞれの尤度関数の線形和として次のように定式化される。

$$\begin{aligned} LL^{RP+SP} &= LL^{RP+SP}(\alpha^{RP+SP}, \alpha^{RP}, \alpha^{SP}, \mu) \\ &= LL^{RP}(\alpha^{RP+SP}, \alpha^{RP}) \\ &+ LL^{SP}(\alpha^{RP+SP}, \alpha^{SP}, \mu) \end{aligned} \quad (6)$$

(2) 融合推定の適用例

Morikawa(1989)²¹ は、地下鉄の新規建設に伴う利用調査データと実利用データを用いて融合推定を行い、モ

表-2 DS を用いた実験の概要

実験区間	阪神高速守環合流部
実施日	2014 年 12 月 26 日
被験者数	16 名 (京都大学大学院学生)

デルの有用性を示している。また RP モデルに潜在していた説明変数間の相関に基づくパラメータ推定値のバイアスを指摘し、考察したい変数のみを取り入れることが出来る SP データを同時に用いることで、バイアス修正の効果を示している。溝上ら (1997)²² は、パークアンドライド (P&R) 施策の需要予測を目的とした SP 調査の信頼性向上のため、実交通手段利用データを融合し、モデル推定の有効性を示している。岩倉, 原田 (2005)²³ は、現存しない都市鉄道のピーク需要分散政策評価を目的として、実データと Web 調査結果を融合した出発時刻選択モデルを構築している。

これらの研究から、融合推定は実データで設定できない説明変数、もしくは存在しない選択肢への嗜好を把握する上で特に有用と考えられる。

3. 仮想空間上での車両挙動実験

(1) 使用機器

図-1 は本実験で使用した DS の写真であり、図-2 は本研究で使用した DS システム構成図である。シミュレータの構成²⁴ は、1/4 サイズの実車運転席キャビン (HMC CLICK), 5 チャンネル映像システム (60 インチ 5CH モニター), 補助映像装置: ルームミラー (10.2 インチ)/サイドミラー (7 インチ× 2 セット), 5.1 チャンネルサウンドシステム, 6 軸モーションシステム及びモーション非常停止スイッチ, 運転者用インターフェースモジュール, ソフトウェア: 6 軸モーション制御ソフトウェア/, キャビン機能テスト (キャビン I/O 制御) 及びシステムのセットアップの 8 つの要素から成る。運転台を半円状に 5 台のモニターが囲い、周囲の車両ならびに情景が映し出される。またバックミラー, 左右サイドミラーを含み、全 8 台のモニターによって周辺状況を表現する。本 DS は 6 軸モーションによって運転や接触に伴う振動の表現も可能であるが、本実験では特に使用していない。

(2) DS 実験設計

表-2 に DS 実験概要を記す。実験空間は実データ走行区間と同じく、阪神高速道路守口線環状線合流部を模擬した区間とした。本実験は、2014 年 12 月 26 日に実施した。

表-1 RP データと SP データの比較 (森川 (1990)²⁰⁾ より一部引用)

	RP データ	SP データ
選好情報 (被説明変数)	実際の行動に基づく 市場における行動と一致	仮想の状況における意思表示 選択不一致の可能性
属性 (説明変数)	測定誤差の可能性	知覚誤差の可能性



図-1 ドライビング・シミュレータ (DS)(フォーラムエイト社製, 京都大学所有)

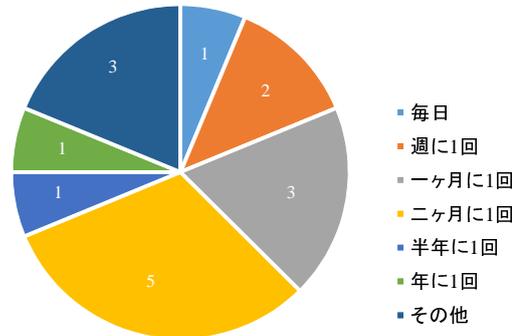


図-3 被験者の運転頻度

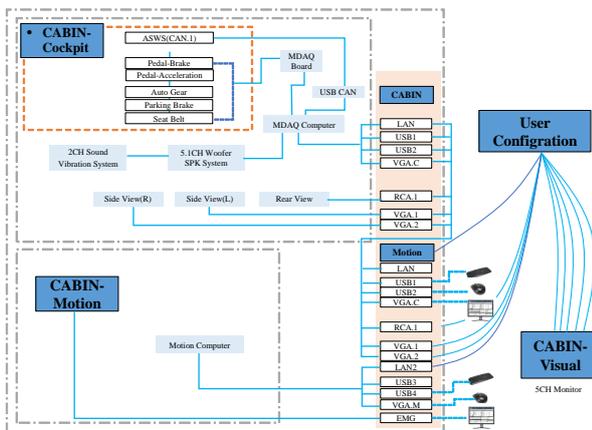


図-2 DS システムブロック図 (取扱説明書²⁴⁾ を基に作成)

a) 被験者属性

被験者は京都大学学生 16 名である。図-3 は、アンケートに基づく被験者の運転頻度の分布を表す。対象が学生であったことから、乗用車を日頃から乗り慣れているサンプルではないことがわかる。

b) 慣熟走行

初めに、DS に対する慣熟走行として、周辺車両なしの状況で守環合流部の単独走行を行った。次に全く別の箇所において周辺車両が走行する状況で、追従及び車線変更の練習を行った。DS の操作性に問題が認められないと確認できたところで、本実験 1,2 を行った。

c) 実データ再現実験 (実験 1)

本実験では、実データと仮想空間データでのドライバーの挙動の違いを検証するため、実データ交通状況の再現を試みた。周辺車両に関しては、非混雑、混雑時の 2 つの交通状況想定し、車両速度、車両出現頻度などを調整した。池田線環状線合流部から進行する場合と、守口線から進入する場合の 2 パターンを行い、交通状況と併せて 4 回の走行を行った。これらの実験条件の順序を被験者ごとに変えることで、順序効果の低減を図った。

d) 突発的な事象に対する挙動実験 (実験 2)

本実験では、守環合流部にて前方を走行する車両が横転した場合のドライバーの反応を観測した。図-4 は、本実験における周辺車両挙動の模式図である。

右車線前方を走行する車両 (図中黒) がバランスを崩し、被験者が走行する車線に倒れこんでくる状況を設定する。この際被験者は加速による回避、減速による接触防止、あるいは車線変更 (左旋回) による回避を行うことが予想される。実験開始時に前方にペースメーカーとなる車両を走行させ、追従するよう指示した。また、転倒車両に対する反応を確実に観測するため、適当なところで加速度を調整するよう実験者側から随時指示を出した。

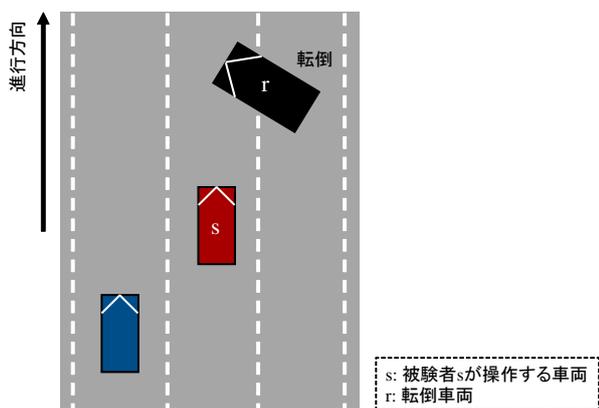


図-4 実験 2 における周辺車両の挙動設定

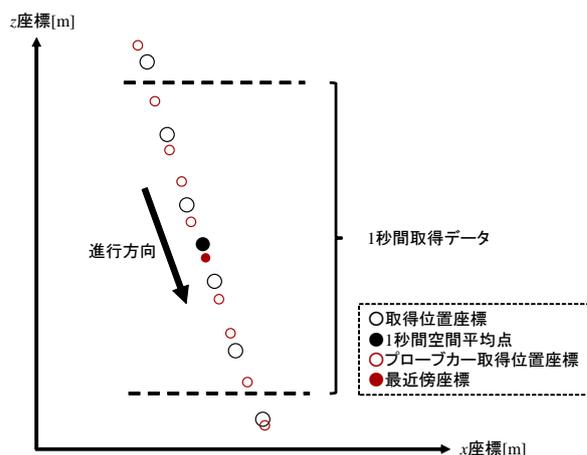


図-5 DS 取得位置座標の車線番号判定手法

(3) データ処理手順

a) DS データの処理

DS 実験から取得されたデータには、被験者ならびに周辺車両の ID、車種、時刻、位置座標が記録されている。また本実験とは別に、DS 上で各車線にプローブカーを比較的低速で走行させ、 x, z 両座標と車線番号を記録した。この位置座標から実験データのキロポスト kp 、走行車線番号を取得した。図-5 は、DS 取得位置座標のマッピングの概念図である。図中白抜き丸は、本実験で得られた車両の位置座標を表す。取得間隔は不均一であり、50[Hz] 程度であった。図中黒点は 1 秒間に取得された位置座標の空間平均点を表す。実データに合わせて時間分解能を 1[s] とし、この平均点を時刻 t における位置座標とみなした。キロポストはプローブカー取得位置座標から得られた単回帰式を用いて、1 秒間空間平均点の位置座標から推定された。図中赤線白抜き丸はプローブカーによる取得位置座標を表し、このうち赤点は黒点に対する最近傍の点を表す。この赤点に記録されている車線番号を、実験データから得られた被験者ならびに周辺車両が走行する車線番号とした。

b) 実車両挙動データの 2 次元軌跡処理

ここでは、実車両挙動画像データを 2 次元座標データに変換する手順について説明する。図-6 (左) は観測されたビデオ画像であり、赤点は画像上で取得された車両の位置座標である。図-6 (右) は、射影変換後の車両の 2 次元座標を表す。

4. 2 次元車両挙動モデルの構築

本節では、実車両挙動データと仮想空間における実データ再現実験 (実験 1) データを用いた 2 次元車両挙動モデルの構築を行う。実車両挙動データ HX の取得調査概要を、表にまとめる。ここで用いられる実車両

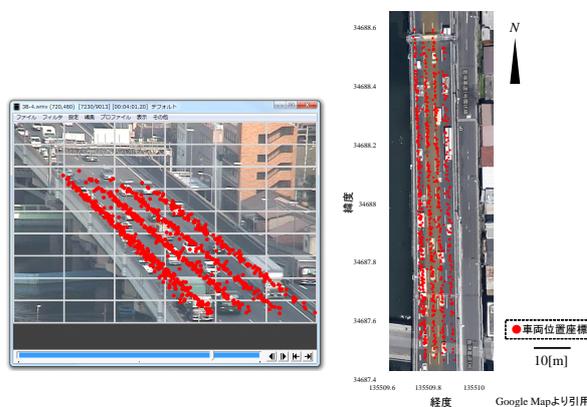


図-6 射影変換前の画像取得座標 (左) と射影変換後の 2 次元座標 (HX) (右)

挙動データ HX (Hanshin Express way) は、混雑時間帯 (11:30-11:35) のうち、高麗橋入口料金所付近から本町出口分流開始までのおよそ 120[m] の直線区間データを指す。また仮想空間実験における車両挙動データ (以下、DS1) も同様に、実験 1 で得られた全ての車両挙動データのうち、 $z \leq 2300$ (図-7) を満たす直線区間のものを指す。

(1) 2 次元車両挙動のデータ分析

ここでは、車両が図-8 に記される角度 θ 、加速度 a に関する 9 肢 (左, 直進, 右, 加速, 定速, 減速) を離散的に選択しながら車両挙動を行うと仮定する。このモデルは、歩行者挙動の解明を目的とした Antonini(2006)²⁶⁾ の手法を下地としている。観測対象を直線部のみに限定していることから、ここで特に考察すべき車両の挙動は、追従と車線変更の 2 つに絞られる。追従挙動に関しては従来の 1 次元シミュレータにおいて蓄積されている概念を援用し、直進角度 ($-0.5^\circ \leq \theta \leq 0.5^\circ$) を選択した上で、先行車両の相対速度などに反応しながら

表-3 調査内容 (羽藤ら²⁵⁾ より引用)

項目	内容
調査日時	2006年1月12日
調査時間帯	午前7時~12時
調査区間	阪神高速道路守口線環状線合流部から高麗橋入口付近まで
調査機器	ビデオカメラ, ITVカメラ, プローブカー

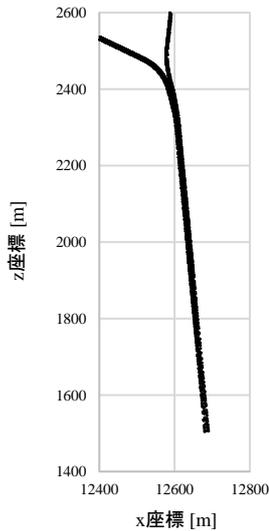


図-7 DS 実験 1 での取得軌跡の一部

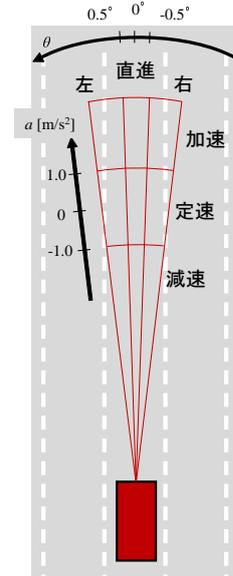


図-8 2次元車両挙動離散選択モデル

ら加速度 a を決定するものとする．ここでは特に，1次元シミュレータが一般的とされる土木計画の分野では考察が少ない，車線変更に伴う2次元挙動について詳しく考察する．なお，機械工学の分野では例えば Chee and Tomizuka(1994)²⁷⁾ が円弧や余弦波，多項式などを用いた線形近似を行っている．

図-9(左)は，車線変更における軌跡の一例である．縦軸に表されるキロポスト [m] と横軸の法線方向位置 [m] は，掲載の都合上縮尺が異なる．車線幅は3.6[m]である．図-9(右)は，車線変更に伴う選択角度 θ と進行方向に対する車両の角度 δ の遷移を表している．選択角度 θ と進行方向に対する車両の角度 δ の違いは，図-10に示されている．この車線変更事例では，車線変更に伴って進行方向に対して 3° から 4° 程度の角度に至っていることがわかる．車線変更の挙動は，隣車線への進入，進行方向に対する車両の角度 δ 修正の2つのフェーズに分かれると考えることが出来る．

図-11は，進行方向に対する車両の角度 δ に対する選択角度 θ の割合を表す．はじめに $|\delta| > 2^\circ$ のとき，角度 δ を修正する (δ の絶対値を小さくする) 角度 θ の選択割合が増加していることがわかる．すなわちこの範

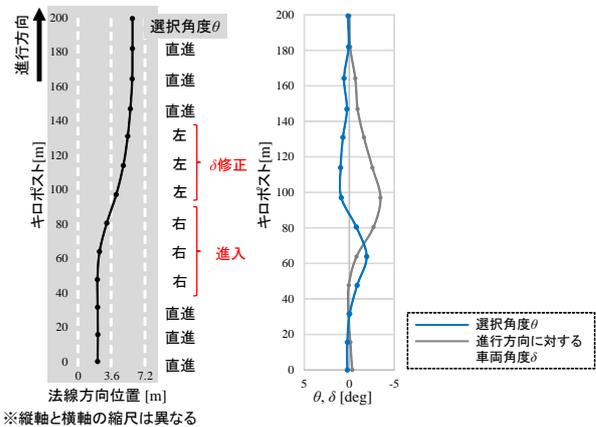


図-9 車線変更の軌跡(左)と車線変更に伴う選択角度 θ と進行方向に対する車両の角度 δ の遷移(右)

囲においては， θ が δ に対して負の相関をもつ，といえる．次に $|\delta| \leq 1^\circ$ のとき，追従挙動のための直進選択割合が，左右の選択割合より明らかに大きいことがわかる．また，先ほど指摘した θ と δ の相関関係も，この範囲においては特異的に失われていることがわかる．さらに， $|\delta| \leq 2^\circ$ の範囲においては進入と修正の双方の

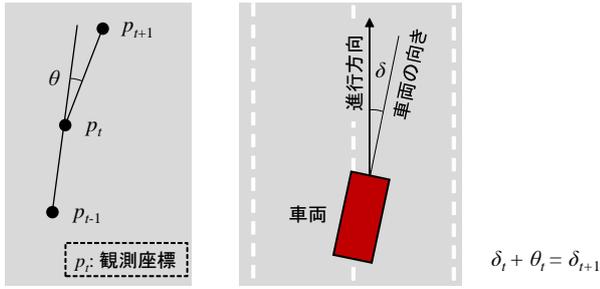


図-10 選択角度 θ (左) と進行方向に対する車両の角度 δ (右) の定義

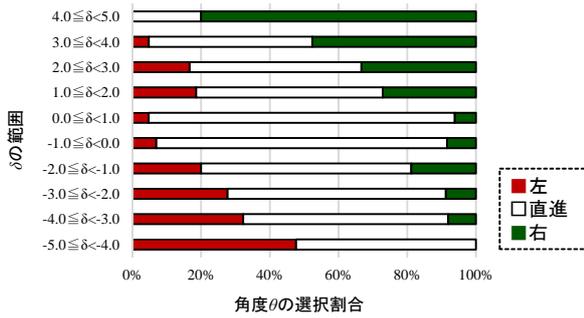


図-11 進行方向に対する車両角度 δ と選択角度 θ の関係性

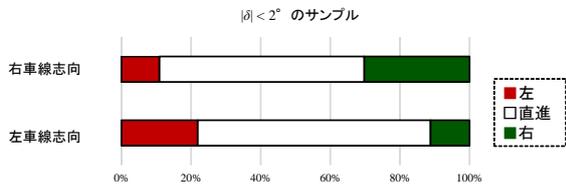


図-12 進行方向に対する車両角度 δ が小さい場合の目標車線の志向性と選択角度の関係性

場合が考えられるため、両者の選択割合が相殺し合っている(均衡状態にある)、と仮定できる。

図-12は、 $|\delta| \leq 2^\circ$ の範囲において、目標車線の向きに関して進入行動を分析したグラフである。 δ の絶対値が小さい範囲においては、角度 θ の選択割合に目標車線の志向性が大きく影響していることがわかる。

図-13は、実車両挙動データならびにDS1における、各選択肢の選択数を表す。HXとDS1の比較から、DS1では観測数が左右対称であるが、HXにおいては左右非対称であることがわかる。このことから、実際の交通流では車線毎に速度が異なり、車線変更に際して加減速を要する可能性が考えられる。仮想空間実験において実データを厳密に再現する上では、周辺車両の走行状況を忠実に再現する必要があることがわかる。

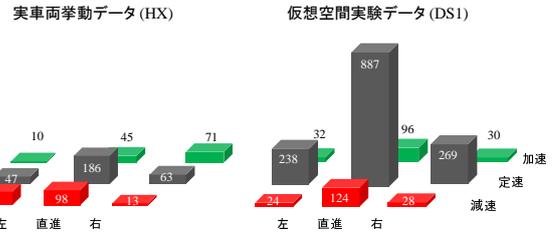


図-13 車両挙動比較(実車両挙動/DS実験1)

(2) モデルの定式化

本項では、(1)項での分析を踏まえ、2次元車両挙動モデルの定式化を行う。選択確率は、HX、DS1に関してそれぞれ式(3)、(4)で与える。効用 u_i は式(1)、(2)とする。被験者 s に関して、時刻 t における各選択肢 i の効用関数の確定項 $v_i^{s,t}$ は次式に従う。また、各記号、添字については表-4に整理する。

$$v_{steady, straight}^{s,t} = const_{steady, straight} + \alpha_{path} I_{path}^{s,t} \quad (7)$$

$$v_{acc/dec, straight}^{s,t} = const_{acc/dec, straight} + \alpha_{path} I_{path}^{s,t} \quad (8)$$

$$v_{steady, left/right}^{s,t} = I_{path}^{s,t} I_{2^\circ}^{s,t} (\alpha_{dis-lead} \ln(x_{dist-lead}^{s,t})) + I_{path}^{s,t} I_{2^\circ}^{s,t} (\alpha_{dis-lag} \ln(x_{dist-lag}^{s,t})) \pm \alpha_{slope} x_{slope} \quad (9)$$

$$v_{acc/dec, left/right}^{s,t} = I_{path}^{s,t} I_{2^\circ}^{s,t} (\alpha_{dis-lead} \ln(x_{dist-lead}^{s,t})) + I_{path}^{s,t} I_{2^\circ}^{s,t} (\alpha_{dis-lead} \ln(x_{dist-lead}^{s,t})) \pm \alpha_{slope} x_{slope} \pm \alpha_{relative-front} x_{relative-front}^{s,t} \quad (10)$$

(3) 2次元車両挙動モデル推定結果(HX, DS1)

本項では、実車両挙動データHX及び仮想空間実験データDS1を用いて(2)項で定式化された2次元車両挙動モデルの推定を行う。

a) HX, DS1 単独推定

表-5に、実車両データHX及びDS1データ、両データ融合推定の結果を示す。

ここでは杉恵ら(1993)²⁸⁾の手法に従い、HX、DS1両モデルの比較検討を行う。HX、DS1間のパラメータ推定値の差の t 検定は、次式に従う。

$$t = \frac{|\alpha_{HX} - \alpha_{DS}|}{\sqrt{\frac{(n_{HX}-1)n_{HX}S_{HX}^2 + (n_{DS}-1)n_{DS}S_{DS}^2}{n_{HX} + n_{DS} - 2}}} \sqrt{\frac{1}{n_{HX}} + \frac{1}{n_{DS}}} \quad (11)$$

表-4 記号・添字と意味の対応 (2次元車両挙動モデル)

記号・添字	意味
<i>straight,left/right</i>	直進, 左右選択
<i>steady,acc/dec</i>	定速, 加減速選択
<i>const.</i>	定数項
<i>u</i>	効用関数
<i>v</i>	効用確定項
ε	効用誤差項
<i>s</i>	観測対象車両
<i>t</i>	時刻
α	効用確定項の説明変数に対応する未知パラメータ
$I \in \{0, 1\}$	指示関数
$I_{path}^{s,t}$	選択角度 θ の向きが経路整合する場合に 1, それ以外の場合に 0 の値をとる指示関数
$I_{2^\circ}^{s,t}$	進行方向に対する車両の角度 δ が $ \delta \leq 2^\circ$ を満たす場合 1, それ以外の場合に 0 の値をとる指示関数
<i>relative</i>	相対速度 $\times 10^2$ [km/s]
<i>dist.</i>	車頭間隔 [m]
<i>-front</i>	先行車両
<i>-lead</i>	前方車両
<i>-lag</i>	後方車両
<i>slope</i>	進行方向に対する車両の角度 δ
x_{TTC}^{DS2}	転倒車両に対する TTC[s]
$x_{s-velocity}^{DS2}$	観測対象車両の速度 [m/s]
$S^2 = \left(\frac{\alpha}{t}\right)^2$	パラメータ推定値の母分散推定値
<i>n</i>	推定に用いられたサンプル数

表-5 2次元車両挙動モデル推定結果 (HX/DS1)

説明変数	HX 単独推定		DS1 単独推定		HX+DS1 融合推定		
	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	
加速度選択	定数項 (定速直進 HX)	1.80	8.90	**			
	定数項 (定速直進 DS1)				2.47	26.08	**
	定数項 (加減速直進)	0.82	3.97	**	0.36	3.24	**
	先行車両相対速度	0.28	4.07	**	0.47	3.21	**
角度選択	車線整合ダミー	-0.09	-0.41		0.47	3.80	**
	前方車両車間距離	-0.07	-0.37		0.16	3.66	**
	後方車両車間距離	0.43	2.46	*	0.19	4.81	**
	進行方向に対する角度 δ	-1.33	-10.29	**	-0.50	-13.23	**
	スケールパラメータ μ						0.58
サンプル数		622		1721		2343	
初期尤度		-1366.67		-3781.42		-5148.10	
最終尤度		-1183.26		-2767.93		-3974.45	
尤度比		0.13		0.27		0.23	
自由度修正済尤度比		0.13		0.27		0.23	

*5%有意, **1%有意

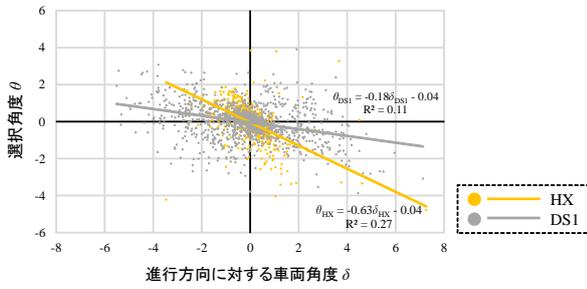


図-14 進行方向に対する角度 δ と選択角度 θ の相関 (データ間比較)

表-6 HX モデルと DS1 モデルのパラメータ間の差の t 検定

説明変数	t 検定量	
定数項 (定速直進)	3.33	**
定数項 (加減速直進)	2.06	*
先行車両相対速度	0.78	
車線整合ダミー	2.30	*
前方車両車間距離	1.68	
後方車両車間距離	1.94	
進行方向に対する角度 δ	8.34	**

*5%有意, **1%有意

各記号の意味は、表-4 に従う。表-6 に、 t 検定の結果をまとめる。この表から、定速直進、加減速直進の定数項と車線整合ダミー、進行方向に対する角度 δ に対するパラメータ間に統計的有意差が確認された。

図-14 は、進行方向に対する角度 δ と選択角度 θ の相関について、HX と DS1 間で比較したものである。この図では進入時挙動を考慮していないため、一概に比較は出来ないが、HX データの方が DS1 データに対して両変数間に強い相関があることがわかる。

b) HX+DS1 融合推定

続いて HX+DS1 融合推定結果について考察を行う。図-13 から定速直進の選択率がデータ間で大きく異なるため、定速の定数項は HX データ、DS1 データにおいて固有のものとした。

表-5 より、パラメータの値が双方に近づいていることがわかる。前方車両車間距離のパラメータは有意に正の値であり、HX モデルによるバイアスを修正し、論理的に整合した結果となった。また、加速度を決定づける前方車両相対速度に対するパラメータは、各単独モデルより t 値が大きくなっていることから、融合推定によって説明力を増しているといえる。DS 実験においては周辺車両の速度のばらつきが小さいため、相対速度に対する反応が強く検出できなかったことが原因として考えられる。また、仮想空間での走行においては、

周囲の車両と同調する必要がなく、自身のペースで走行を行った被験者が多かった可能性も示唆される。

スケールパラメータ μ は 1 より小さな値を示したため、DS での車両挙動の方が誤差分散の値が大きいといえる。一般には、RP データに比べて SP データの方が分散が大きいものとされ、 μ の値は $0 \leq \mu \leq 1$ の範囲に収まるものとされる。仮想空間実験では接触などによる損害を伴わないことから、実際の交通流での走行に比べて、リスクに対する意識が被験者間で大きく異なっていたことが原因として考えられる。

5. 突発事象に対する車両挙動モデルの構築

本節では、突発事象に対する車両挙動モデルの構築を行う。

(1) データ分析 (DS2)

実験 2 において、図-15 に示される 6(時点)×15(被験者)のうち、車線変更を行う前(追突の危険性が残っている状態)のデータを DS2 と定義する。

a) 実験 2 で得られた軌跡

図-15 は、実験 2 における各車両の軌跡である。バランスを崩している転倒車両(黒線)は時刻 $t = 2$ において大きく車線を逸脱し、被験者が走行する車線に倒れこんでくる。被験者車両(細線)は減速停止、もしくは車線変更によって接触を回避していることがわかる。

b) 全被験者の各時刻での挙動

図-16 は、被験者の挙動を分類したものである。被験者 2 に関しては、記録がうまく取れなかったためにここでは排除した。15 被験者のうち、4 名が制動によって衝突を回避し、11 名は操舵によって回避している。操舵回避を行った者は、被験者 4 を除き、減速を行わずに操舵のみで回避していることが特徴として挙げられる。

田中ら(2007)¹⁰ は街路走行中での歩行者飛び出しに対する反応を検証しているが、多くの被験者は制動によって衝突を回避している。このことから、特に今回は高速道路を仮想した状況(時速およそ 50[km/h] 超)での実験のため、路上での停止に対する抵抗から、多くの被験者が操舵回避を選択したと考える事が出来る。

c) 被験者車両挙動と周辺状況

2次元車両挙動モデル構築に向け、行動選択を決定づける要因を詳細に考察する。

図-17 は、転倒車両に対する被験者車両 TTC(Time to Collision)[s] を縦軸、被験者車両速度 v_s [m/s] を横軸にとり、被験者の挙動(選択結果)を色と記号で示している。転倒車両に対する被験者車両 TTC は、以下の式で与えられる。

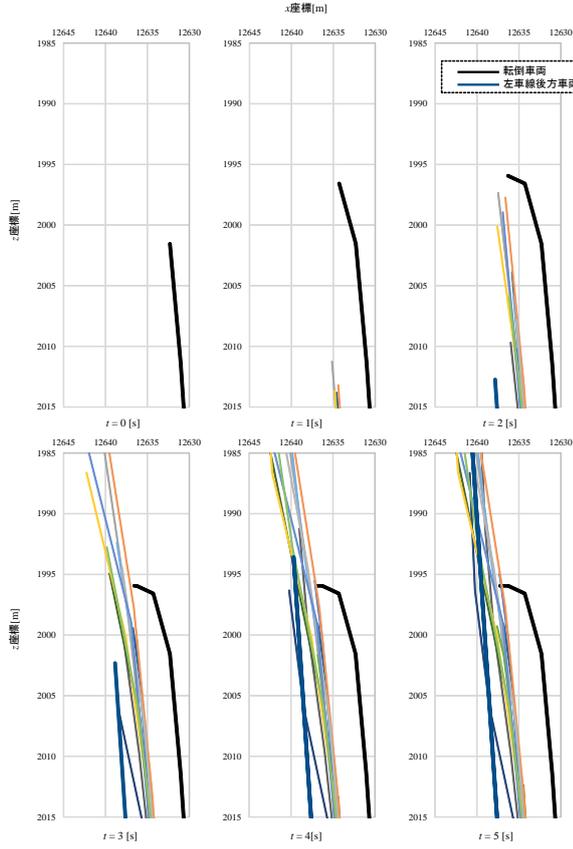


図-15 実験 2 における各車両の軌跡

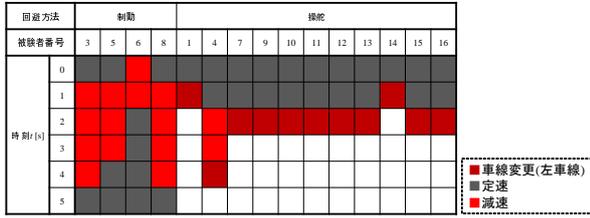


図-16 実験 2 における被験者車両 s の挙動

$$TTC = \frac{kp_r - kp_s}{v_s - v_r} \quad (12)$$

kp_r , kp_s はそれぞれ転倒車両 r , 被験者車両 s のキロポスト, v_r , v_s は車両速度を表す。TTC が小さいほど、特に $TTC \leq 5[s]$ のとき、制動や操舵などなんらかの回避行動をとることがわかる。また、被験者車両速度 v_s が大きいほど速度を維持したままの操舵回避が多くなり、小さいほど操舵と制動を組み合わせた回避が多くなることわかる。

(2) モデルの定式化

突発事象に際して、2次元車両挙動モデルの特定の選択肢に対して新たな説明変数を加える。加えられた説明変数は、転倒車両に対する TTC と観測主体車両の速

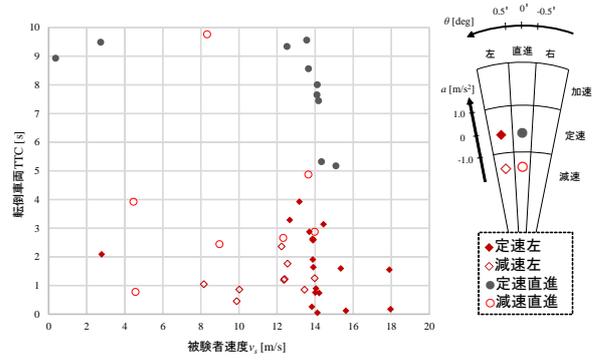


図-17 実験 2 における転倒車両に対する TTC, 被験者車両速度 v_s と被験者の角度/加速度選択

度である。

$$v_{acc/dec, straight}^{s,t} = const_{acc/dec, straight} + \alpha_{path}^{HX, DS1} I_{path}^{s,t} \pm \alpha_{relative-front} x_{relative-front}^{s,t} \quad (13)$$

$$v_{steady, straight}^{s,t} = const_{steady, straight}^{HX} + const_{steady, straight}^{DS1} + const_{steady, straight}^{DS2} + \alpha_{path}^{HX, DS1} I_{path}^{s,t} - \alpha_{TTC}^{DS2, DS2} x_{TTC}^{s,t} \quad (14)$$

$$v_{acc, left/right}^{s,t} = I_{path}^{s,t} I_{2^\circ small}^{s,t} \alpha_{path} (\alpha_{dis.-lead} \ln(x_{dist.-lead}^{s,t})) + I_{path}^{s,t} I_{2^\circ small}^{s,t} \alpha_{path} (\alpha_{dis.-lag} \ln(x_{dist.-lag}^{s,t})) \pm \alpha_{slope} x_{slope} + \alpha_{relative-front} x_{relative-front}^{s,t} \quad (15)$$

$$v_{steady, left}^{s,t} = I_{path}^{s,t} I_{2^\circ small}^{s,t} \alpha_{path} (\alpha_{dis.-lead} \ln(x_{dist.-lead}^{s,t})) + I_{path}^{s,t} I_{2^\circ small}^{s,t} \alpha_{path} (\alpha_{dis.-lag} \ln(x_{dist.-lag}^{s,t})) + \alpha_{slope} x_{slope} + \alpha_{TTC}^{DS2} x_{TTC}^{DS2} + \alpha_{velocity-s}^{DS2} x_{velocity-s}^{DS2} + const_{steady, left}^{DS2} \quad (16)$$

$$v_{dec, left}^{s,t} = I_{path}^{s,t} I_{2^\circ small}^{s,t} \alpha_{path} (\alpha_{dis.-lead} \ln(x_{dist.-lead}^{s,t})) + I_{path}^{s,t} I_{2^\circ small}^{s,t} \alpha_{path} (\alpha_{dis.-lag} \ln(x_{dist.-lag}^{s,t})) + \alpha_{slope} x_{slope} - \alpha_{relative-front} x_{relative-front}^{s,t} + \alpha_{TTC}^{DS2} x_{TTC}^{DS2} - \alpha_{velocity-s}^{DS2} x_{velocity-s}^{DS2} + const_{dec, left}^{DS2} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
v_{steady,right}^{s,t} &= I_{path}^{s,t} I_{2^\circ small}^{s,t} \alpha_{path} \left(\alpha_{dis.-lead} \ln \left(x_{dist.-lead}^{s,t} \right) \right) \\
&+ I_{path}^{s,t} I_{2^\circ small}^{s,t} \alpha_{path} \left(\alpha_{dis.-lag} \ln \left(x_{dist.-lag}^{s,t} \right) \right) \\
&- \alpha_{slope} x_{slope} \\
v_{dec,right}^{s,t} &= I_{path}^{s,t} I_{2^\circ small}^{s,t} \alpha_{path} \left(\alpha_{dis.-lead} \ln \left(x_{dist.-lead}^{s,t} \right) \right) \\
&+ I_{path}^{s,t} I_{2^\circ small}^{s,t} \alpha_{path} \left(\alpha_{dis.-lag} \ln \left(x_{dist.-lag}^{s,t} \right) \right) \\
&+ \alpha_{slope} x_{slope} \\
&- \alpha_{relative-front} x_{relative-front}^{s,t}
\end{aligned}$$

(3) 突発事象に対する車両挙動モデル推定結果 (HX/DS1/DS2)

表-7に、突発事象に対処するドライバー挙動を説明変数に加えた、2次元車両挙動モデルの推定結果を示す。

a) DS2 単独推定

DS2の単独推定では、突発事象によって新たに生じた説明変数(TTC, 主体車両の速度)のパラメータについて、一定の説明力を有している。しかしながら、事象の特異性とサンプル数の少なさから、進行方向に対する角度 δ や角度選択に伴う後方車両への車間距離に対するパラメータが有意な結果を示さなかった。

b) HX+DS2 融合推定

DS2データのみでは考察が困難であった、車両挙動における基本的な性質を補うため、実車両挙動データHXを用いて融合推定を行った。実車両挙動を融合した場合においても、TTCに対するパラメータは有意な説明力を保持している。表-7から、進行方向に対する角度 δ や角度選択に伴う後方車両への車間距離に対するパラメータが有意な値を示していることがわかる。誤差スケールを表すパラメータ μ は0.09と小さい。これは突発事象実験のサンプル数が少ないことが一因として考えられるだろう。

c) HX+DS1+DS2 融合推定

さらに平時の運転挙動データとして観測精度の高いDS1を融合することで、モデルの尤度比が向上した。また、全体的に t 値が向上しており、現象記述力が高まっている。一方で、サンプル数の違いが大きいために、突発事象によって発生したパラメータの説明力が著しく低下している。

6. 結論

本論では、相互に補完的な役割を為す複数のデータを同時に推定する森川(1990)²⁰の手法に従い、実車両挙動データと仮想空間実験データを同時に用いた2次元車両挙動モデルの融合推定を行った。

実車両挙動データが有する実際の運転挙動の再現性、実データ再現実験データが有する取得位置座標観測精度の高さ、突発事象に対する車両挙動実験データが有する仮想的な説明変数を組み合わせることで、現実には取得が困難な運転挙動パラメータに関して、より精度(18度)の高い値を取得することが出来た。

今後の課題として、モデルのさらなる精緻化が期待される。本モデルでは曲率をもった道路線形に対する角度選択や、車線の中央を走行するといった説明変数を含められなかったため、これらを加味することで、あらゆる道路幾何構造に対応した、より説明力の高いモデル構築が可能と考えられる。また、ここでは高速道路の単路部という、状況として極めて単調な箇所を扱ったが、道路規格や走行速度によって角度選択や加速度選択の切り分け方も異なると考えられるため、より深い考察が求められる。

謝辞：本研究では、実験に際し、京都大学大学院交通情報工学研究室の宇野伸宏准教授、中村俊之助教、ならびに中山達貴さんをはじめ多くの学生の皆様にご協力いただいた。ここに、関係者の皆様に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省: <http://www.mlit.go.jp/common/000194113.pdf>, 2015年2月3日閲覧。
- 2) 内閣府: SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)自動走行システム研究開発計画, 2014.
- 3) 津川定之: 自動運転システムの展望, IATSS Review, Vol.37, No.3, 2012.
- 4) 名切末晴, 武井一剛, 土居俊一: 運転環境模擬装置によるドライバ操作挙動の解析とデータベース構築, 日本機械学会論文集, C編, 64(627), pp.4338-4344, 1998.
- 5) 土居俊一, 名切末晴, 天野也寸志: ドライバの緊急操作挙動に基づく車両の予防安全性能解析, 日本機械学会論文集, C編, 64(627), pp.4331-4337, 1998.
- 6) 天野也寸志, 名切末晴, 羽田昌敏, 土居俊一: 緊急時におけるドライバの運転動作モデル: 障害物回避時および車両特性急変時への適用, 日本機械学会論文集, C編, 65(632), pp.1586-1592, 1999.
- 7) 鄭仁成, 山邊茂之, 李昇勇, 中野公彦, 安藝雅彦, 須田義大: ドライビングシミュレータによる自動隊列走行時のドライバの緊急回避行動分析, 自動車技術会論文集, 43(2), pp.627-632, 2012.
- 8) 山邊茂之, 鄭仁成, 李昇勇, 中野公彦, 安藝雅彦, 須田義大: 自動運転隊列走行時の操舵回避におけるドライバ挙動の検討, 生産研究, 64(2), pp.229-232, 2012.
- 9) 山口大助, 織田利彦, 須田義大, 田中伸治: ジレンマゾーン実験へのドライビングシミュレータの活用, 生産研究, 59(3), pp.192-196, 2007.
- 10) 田中雅樹, 平岡敏洋, 西原修, 熊本博光, 畑中健一, 齋藤裕昭: 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, 自動車技術会論文集, 38(5), pp.185-190, 2007.
- 11) 山之内宏安, 山崎文雄: 運転シミュレータを用いた地震時の走行安定性実験に関する検討, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, pp.1049-1052, 1999.
- 12) 丸山喜久, 山崎文雄: ドライビングシミュレータを用いた地震時運転者の反応特性に関する基礎的検討, 土木学会地震工学論文集, Vol.27, CD-ROM, 8p, 2003.

表-7 突発事象に対する2次元車両挙動モデル推定結果 (HX/DS1/DS2)

説明変数	DS2 単独推定		HX+DS2 融合推定		HX+DS1+DS2 融合推定					
	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値				
加速度選択	定数項 (定速直進 HX)		1.83	9.03	**	1.57	9.64	**		
	定数項 (定速直進 DS1)					4.59	7.27	**		
	定数項 (定速直進 DS2)	-0.42	-0.45	-7.94	-0.79	-7.93	-0.78			
	定数項 (加減速直進)	1.17	2.13	*	0.85	4.12	**	0.66	4.33	**
	先行車両相対速度			0.28	4.09	**	0.31	4.71	**	
角度選択	車線整合ダミー			-0.12	-0.56		0.22	1.45		
	前方車両車間距離	-0.46	-0.74	-0.08	-0.39		0.23	3.20	**	
	後方車両車間距離	0.52	1.23	0.45	2.55	*	0.35	4.66	**	
	進行方向に対する角度 δ	-0.10	-1.54	-1.32	-10.23	**	-0.97	-7.97	**	
突発事象	転倒車両 TTC	-0.43	-4.26	**	-4.46	-2.20	*	-4.27	-1.57	
	車両速度	0.12	1.82		1.34	1.48		1.32	1.22	
	定数項 (左定速 DS2)	2.04	1.89		22.59	1.62		19.84	1.29	
	定数項 (左減速 DS2)	4.30	4.15	**	46.47	2.34	*	43.58	1.60	
	スケールパラメータ μ (DS1)						0.56	7.10	**	
	スケールパラメータ μ (DS2)			0.09	2.24	*	0.09	1.53		
サンプル数		60		682		2403				
初期尤度		-131.83		-1498.51		-5279.93				
最終尤度		-80.47		-1266.89		-4057.96				
尤度比		0.39		0.15		0.23				
自由度修正済尤度比		0.32		0.15		0.23				

*5%有意, **1%有意

- 13) 丸山喜久, 山崎文雄: ドライビングシミュレータを用いた地震動早期警報の効果検討 土木学会論文集, No.787/I-71, pp.177-186, 2005.
- 14) 山崎文雄, 丸山喜久, 坂谷将人: 複数のドライビングシミュレータを連動した走行模擬実験による緊急地震速報の影響評価, 地域安全学会論文集, No.9, pp. 289-294, 2007.
- 15) 松本和貴, 丸山喜久, 山崎文雄: マルチエージェント・シミュレーションを用いた高速道路走行車両に与える緊急地震速報の影響に関する検討, 地域安全学会論文集, No. 10, pp. 321-330, 2008.
- 16) 北村健, 丸山喜久: 道路橋地震応答の可視化による自動車運転者の地震時反応特性の評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.66, I-395, pp.787-788, 2011.
- 17) 丸山喜久, 山崎文雄: 2003年宮城県沖の地震における地震動強さと高速道路運転者の反応の関係, 土木学会論文集, No.794/I-72, pp.307-312, 2005.
- 18) 大口敬, 津田浩輝, 桑原雅夫, 田中伸治: ドライビングシミュレータの高速道路追従走行の再現性, 生産研究, 59(3), pp.222-225, 2007.
- 19) Ben-Akiva, M., Morikawa, T., Shiroishi, F.: Analysis of the reliability of preference ranking data, *Journal of Business Research*, 23(3), 253-268, 1990.
- 20) 森川高行: ステイティッド・プリファレンス・データの交通需要予測モデルへの適用に関する整理と展望, 土木学会論文集, pp.9-18, 1990.
- 21) Morikawa, T.: Incorporating stated preference data in travel demand analysis, Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1989.
- 22) 溝上章志, 柿本竜治, 首藤成次郎: P&R システムの需要予測のための調査及びモデル構築法, 土木計画学研究・講演集, (20), 2, 1997.
- 23) 岩倉成志, 原田知可子: 都市鉄道のピーク需要分散策を念頭においた時刻別需要予測モデルの研究, 運輸政策研究, 8(3), pp.4-15, 2005.
- 24) (株)フォーラムエイト: 京都大学ドライビングシミュレータ 5CH 6DOF Driving Simulator PR-R-5-60-AW-AT-380-6X 取扱説明書, 2012.
- 25) 羽藤英二, 横田幸哉, 中西雅一, 北澤俊彦: 車線変更行動のモデル化と反応の非対称性に関する考察, 第27回交通工学研究発表会論文報告集, pp.129-132, 2007.
- 26) Antonini, G., Bierlaire, M., Weber, M.: Discrete choice models of pedestrian walking behavior, *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(8), 667-687, 2006.
- 27) Chee, W., Tomizuka, M.: Vehicle lane change maneuver in automated highway systems, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), 1994.
- 28) 杉恵頼寧, 藤原章正, 山根啓典: 選好意識パネルデータに潜在する消耗バイアスの修正, Correcting attrition biases latently existing in SP panel data, 土木計画学研究・論文集, 11, pp.311-318, 1993.

(2015. 4. 24 受付)

Driving model estimation in time of disaster using multiple data

Atsushi ITO, Toshihiko KITAZAWA, Hideki YAGINUMA and Eiji HATO

It is expected to decrease accidental risk on highway with automated control with introduction of automated vehicles. Validation of driving behavior with emergent event such as disaster and accident using real vehicles is so difficult that data collection with driving simulator is useful. However, in virtual situation, examinee may have different behavior from real situation. Then in this paper, we present the model which analyzes driving behavior by merging real driving behavior data and virtual data with emergent event. We used 3 data they are real driving behavior data with high authority, reproducing experimental data with high observing accuracy and experimental emergency data which has virtual explanatory variables. We improved estimation accuracy of driving behavior model parameter by merging multiple data they are complementary and have different quality.