

駐車車両陰からの歩行者飛び出しが予想されるシーンにおける運転行動分析（第2報）

歩行者飛び出し前の運転行動の違いが飛び出し後の回避パフォーマンスに与える影響の
モデル化

Driving Behavior Analysis in the Possible Scene in which Pedestrian Rushing out from behind Parked Vehicle (Second Report)

Modeling of the Preventing Maneuver Performance Considering Driving Behavior before Pedestrian's Rushing out

今長 久^{*1}
Hisashi IMANAGA

岩城 亮^{*2}
Ryo IWAKI

内田 信行^{*1}
Nobuyuki UCHIDA

Abstract

This study attempts to make a quantitative model expressing avoidance behavior at rushing out pedestrian. The model is constructed by avoidance maneuver data measured in encountering rushing out pedestrian situation which are produced by JARI-ARV. The model are constructed by "Start avoidance sub-model" and "Avoidance maneuver sub-model". Former one is for estimating start braking timing from driving behavior such as gaze direction, driving speed, and brake preparation. On the other hand, latter one is for estimating the decelerating waveform from start braking timing. The model enables to evaluate driving behavior by the possibility of crashing if a pedestrian rushing out.

1. はじめに

近年の車両安全対策においては、事故被害軽減の最終的なフェーズである衝突安全性の向上に加えて衝突自体を回避する予防安全性に注目が集まっている。今後、予防安全技術がより高度でより安全な運転を目指すためには、「危険な場面に遭遇した際に衝突を回避する」発想から「危険な場面に遭遇することを回避する」発想を目指す必要がある。ひとつの方策として、どのような危険が起こりうるかを予測しながら運転することで危険に遭遇する機会を減らそうとする「先読み運転」を実施する方向に運転を向けさせることが考えられる。たとえば、死者数が多い対歩行者事故において、歩行者がどのような場所から飛び出してくる可能性があるかを予測しながら運転をし、危険が予測される場合には、減速しながら通過したり、

飛び出してきてもすぐに対応できるように注視したりすることで危険の発生を回避、あるいは危険自体を軽度なものにできる。

このような先読み運転は最終的に自動運転車両がドライバに替わり運転する場合や、運転支援として車両が先読み運転できているかできていないかを評価し、先読み運転できていないと判断される場合には先読み運転をしてもらうようにドライバを支援することに活用できる。

本研究では、上記の思想に基づく先読み運転支援を実施するためのドライバモデルを構築することが目的である。なお、モデルを構築する対象シーンとしては、死亡事故件数が多い対歩行者飛び出しシーンを取り扱う。

2. 歩行者飛び出し予見シーンにおけるドライバモデル

2.1 先読み運転支援のためのドライバモデル

*1 一般財団法人日本自動車研究所 安全研究部 博士（工学）

*2 一般財団法人日本自動車研究所 安全研究部

*本速報はJSAE著作権規則に基づくJSAE20166119の転載である。

本研究における先読み運転支援は、「あるシーンにおける運転行動が先読み運転できていない場合に、ドライバに支援を実施することで先読み運転をするように変容させること」である。このような支援は、以下の4つの要素で構成される。

①どのような危険を予見するか

運転中には、交通安全に関連する多様な危険に遭遇する。本来、この多様な危険それぞれに遭遇しないように、起こりうる危険を予測しながら運転する必要がある。しかしながら、多様な危険自体を完全に予測することは非常に難しい。まず、システムとしてどのような状況でどのような危険を予見すべきかを設定した上で、具体的にどのような先読み運転行動を取るべきかを検討することが必要である。

②危険が予見される状況でどのように運転すべきか

危険を予見した場合、ドライバはどのような行動を取るのか（べきなのか）、あるいは、普段の運転の仕方と何が違うのか、運転の仕方を定義する必要がある。

③先読み運転ができていないかをどのように判断するか

ある運転行動が先読み運転できているのか、それともできていないのかを判断するための具体的な指標が必要である。

④先読み運転できていないドライバの運転をどのように先読み運転にシフトさせるか

先読み運転できていないドライバに対しての支援の仕方（どのようにして先読み運転をしてもらうのか）を準備しておく必要がある。

本研究では、①に対し、交通事故死者数が多い重大な事故形態である歩行者が横断する状況に限定し、先読み運転支援のためのドライバモデル構築を検討することとする。そして、この歩行者遭遇シーンにおいて先読み運転行動として、どのような運転行動が取られているのか、そして、先読み

運転ができていないかをどのように表現あるいは評価すればよいのか、に着目しモデル化のための検討を行う（項目②および③）。なお、④のどのように先読み運転に変容させるかについては、重要な課題であるが、本研究の検討範囲には含めない。

2.2 飛び出し歩行者遭遇シーンにおける先読み運転

Fig. 1に、モデル化の対象とした飛び出し歩行者との遭遇状況を示す。片側2車線道路の内側車線を走行中に外側車線に駐車中の車両の陰から歩行者が飛び出してくるシーンである。また、第1報²⁾で検討したように同じ駐車車両の陰からの飛び出しでも、注意分散要因が影響する状況では、危険度が異なることから、注意分散要因がある場合とない場合の双方をモデルとして取り扱えるモデルを構築するため右側停止車両および歩行者が存在する場合としない場合について検討する。

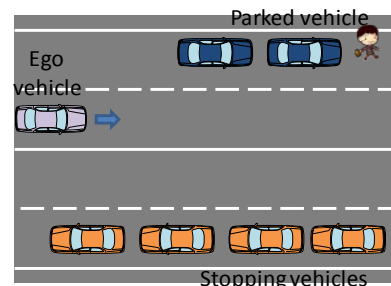


Fig. 1 The scene of encountering rushing out pedestrian

このような状況における歩行者との遭遇および回避行動を整理したものが Fig. 2 である。まず、ドライバは、リスク発生対象である駐車車両やその他にも注意を払うべき車両等が存在する現在の交通環境 (Traffic environment) にあわせて運転行動 (Driving behavior) を決定する。具体的には、どこにどの程度の注視を向けるか、どの位の速度で走行するか、ブレーキを踏めるように準備するか（それともアクセルを踏んで速度低下を避けるか）、駐車車両からどの位離れて通過するか、を決定する。このような状況での走行時に、あるタイミングで歩行者が飛び出しを開始する (Risk exteriorization)。飛び出し歩行者を認知したドラ

イバは減速回避行動（Avoidance maneuver）を開始する。最終的に歩行者よりも手前で停止できる場合には衝突を回避できるが、止まれない場合には衝突する（Result）。

先読み運転支援の目的は、ある特定のシーンにおける運転行動が先読み運転であるか否かを判断し、先読み運転でない場合には支援をすることで先読み運転にシフトさせることである。よって、ここで構築するモデルの目的は、ある「Traffic environment」における「Driving behavior」が、想定する「Risk exteriorization 条件」で顕在化したときに「Result」が衝突にならない状況であるか否かを判別することである。この目的を達成するためのドライバモデルには、以下の2つのサブモデルが必要になる。

①減速回避開始サブモデル（Start avoidance sub-model）

ある運転行動がどの程度すばやく減速を開始できるかを予測するためのモデル（Fig. 2 中の赤色矢印の部分）

②減速回避行動サブモデル（Avoidance maneuver sub-model）

減速回避行動を開始する時点での時間的余裕およびそのときの走行状態によってどのようにブレーキを操作するかを予測するためのモデル（Fig. 2 中の紫色矢印の部分）

上記2つのモデルを用いることで、運転行動の違いにより歩行者飛び出し後、どの位すばやく減速回避行動を開始でき、ブレーキによる減速回避行動により回避開始からどの程度の距離の間に車両を停止させることができるかが予測できる。このモデルを用いて、歩行者との衝突予定位置を考慮することで、ある交通環境下での運転行動が飛び出し条件を仮定した場合に衝突を回避できる状況か否かを判断できる。よって、このモデルにより先読み運転ができていないか否かを判別することができる。

以下では、まず、第3章でモデル化に用いるデータについて説明し、第4章で減速回避開始サブ

モデルについて説明する。そして第5章では、減速回避行動サブモデル構築とモデル全体の活用方法について説明する。

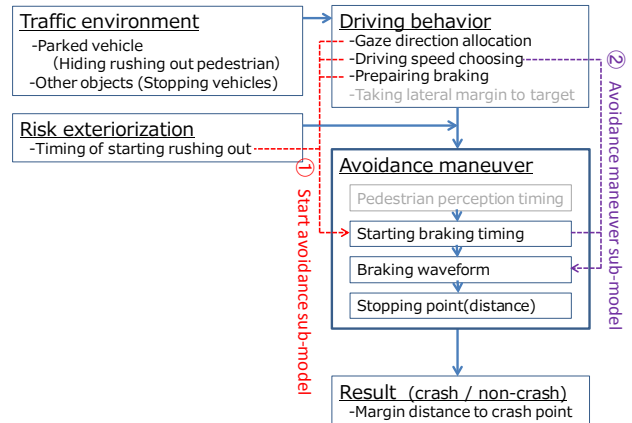


Fig. 2 Driver model structure at rushing out pedestrian

3. モデル構築に用いるデータセット

3.1 データ収集対象シーン

ドライバモデル構築に用いるデータは、拡張現実実験車（以下 JARI-ARV と記す。Fig. 3）を用いたニアミスシーン再現実験に協力いただいた一般の実験参加者の走行データである。JARI-ARV は、実車のフロントガラス前方に設置された3枚のディスプレイに直接視認すべき前方映像をカメラを通してリアルタイムに表示することで本来の運転行動と同等の運転ができるのと同時に、画面上の意図した地点に歩行者や車両等の交通参加者をコンピュータグラフィック映像として配置し動かすことが可能なシステムである。ドライバは実際に運転しているテストコースにはあたかも他の交通参加者がいるように感じながら運転することが可能である。



Fig. 3 JARI-ARV for scene reconstruction experiment

Fig. 4 に実験で再現した交通環境を示す。今回の実験では、2つの走行環境が用意されている。どちらの条件も片側2車線道路の左外側車線に配置された駐車車両の陰から歩行者が飛び出す条件は同じである。違いは、対向車列側に他に注意を払うべき存在として停止車列および歩行者があるか否かである。なお、実験方法の詳細は第1報²⁾を参照されたい。

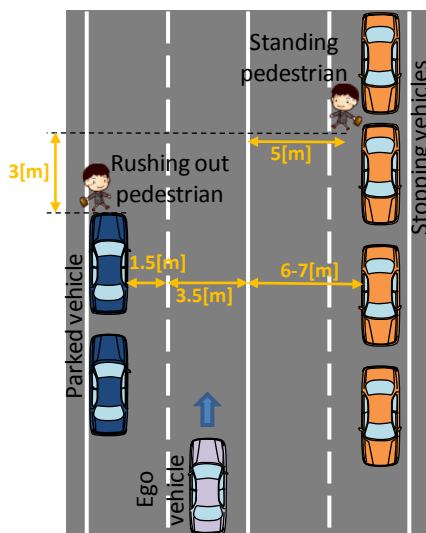


Fig. 4 The scene at pedestrian rushing out in the experiment

3.2 実験参加者

今回の実験で構築するドライバモデルでは、先読み運転が上手いドライバと上手くないドライバの違いがモデルに反映できることが必要である。そこで、先読み運転が上手いと予想されるハイヤー運転手や逆にそれほど先読み運転が上手くないことが予想される初心者ドライバ（免許取得3年以内）のデータを収集することとした。Table 1 に実験参加者の概要を示す。実験参加者は対向車線側にドライバの注意を分散させる要因である車列および歩行者が存在しない状況で飛び出し歩行者に遭遇する群と存在する状況で遭遇する群に分けている。注意分散要因がない条件の走行が16名（男女各8名）、一方、注意分散要因がある条件については、一般ドライバ22名、初心者ドライバ10名、ハイヤー運転手5名である。

なお、実験の内容および安全性について(一財)

日本自動車研究所の定める倫理委員会の審議にて承認が得られた後に実験を実施している。

Table 1 Constitution of subjects

Attention allocation factor	Group	Subjects (M/F)
No	N : Non-vehicles and a pedestrian at opposite lane	16 (8/8)
Stopping vehicles and a pedestrian at opposite lane	P : Private adult drivers	22 (11/11)
	Y : Young drivers	10 (6/4)
	C : Commercial professional drivers	5 (5/0)

4. 減速回避開始サブモデルの構築

ここでは、歩行者飛び出し前の運転行動から（歩行者を認識して）ブレーキを踏み始めるタイミングを予測するモデル構築について説明する。

4.1 モデルの構造

モデル化の対象とした運転行動は、視線配分、ブレーキ準備行動、速度選択である。モデルは、被説明変数をブレーキ開始時間とし、説明変数として視線行動、ブレーキ準備行動（ダミー変数）、歩行者飛び出し時の衝突余裕時間（以後TTCと記す）および、定数項を持つ形状とし、重回帰分析により導出する。非説明変数としては、歩行者認知までに要する時間が適切であるが、ドライバの認知タイミングの観測が困難なため、認知直後の観測可能な行動であるブレーキ開始タイミングを説明する構造とした。なお、昨年度報告した減速回避サブモデルの構築³⁾においては、アクセルオフタイミングを認知タイミングの代理指標として利用しているが、ブレーキ準備行動を取っているドライバの運転行動においてはアクセルオフというイベントが歩行者認知後に発生しないため全体の行動を表現するには不向きであることがわかったため、本研究ではブレーキ開始タイミングを説明する構造とした。

4.2 視線行動のモデル化

準備行動の内、ブレーキ準備は準備行動をしているか否かをダミー変数として扱い、速度選択に

については選択された速度を連続量として扱う（この値を用いて歩行者飛び出し時の TTC を求める）。一方、視線行動についてはモデル化のために定量化する必要がある。本研究では、視線計測器で毎秒 30 フレームで計測される視線の向きを大きく「進行方向」「左側駐車車両（飛び出し地点）」「右側駐車車列」「その他」「消失」に分類する。進行方向は、直進単路の進行方向であり、左側駐車車両は最終的に歩行者が飛び出してくる車両の周辺である。右側駐車車列は右側に置かれた注意分散状況を作り出すための車列である。車列が存在しない条件のデータにおいてもこの部分に視線が向いている場合にはこのカテゴリに分類する。その他は、空や車内に視線が向いている状況である。消失は計測器で計測できていない状況である。

(1) 視線行動の定量化

まず、視線行動をどのように定量化するかを検討した。視線行動を評価する基準としては、リスク要因である左側駐車車両に対して適切に視線を向けているか、逆に、その他の要因（今回は右側停止車列）に注意を引き付けられすぎているか、全体的に満遍なく視線を配分しているか、といった考え方が考えられる。これらを定量化する指標として以下の指標を作成した。

左側注視比率：消失以外の視線配分時間に対する左側駐車車両への注視の割合。見るべき対象をどの程度見ているかを表す指標

右側注視比率：消失以外の視線配分時間に対する右側駐車車両への注視の割合。注視対象以外の主要な注意を引く要因にどの程度視線が引き付けられているかを表す指標

視線配分率：消失以外の視線配分時間の標準偏差。どの程度視線を周辺に満遍なく割り振っているかを現す指標

これらの指標のうち、右側注視比率と左側注視比率および視線配分率間の相関係数はそれぞれ -0.83 , 0.84 と非常に高い傾向が見られる。また、左側注視比率と視線配分率間の相関係数も -0.46 と比較的高い。したがって、モデル化では、すべての項目を加えることはできないため選択する必要がある。そこで、左側注視比率をモデルに組み込んだ場合と右側注視比率を組み込んだ場合のモデルの精度を比較検討することとした。ここで、視線配分率を検討候補から外したのは、視線配分率という指標が、走行中の視線を向ける対象すべてを定義しないと作成できない指標であり、実際の交通場面で活用することが難しいと判断したためである。なお、左側注視比率は実際にリスクが起ころ場所、右側注視比率は注意が過度に集中している場所のみを定義できれば定量化が可能である。

以下では、2つの考え方に基づくモデル化の比較検討結果を示す。ひとつは、本来向けるべき左側駐車車両への注意を向きにくくする要因である右側停止車列への注意がどの程度引き付けられているかをモデルに組み込むものである。もうひとつは、本来向けるべき左側駐車車両への注意がどの位向けられているかをモデル化したものである。

(2) モデルの精度

Fig. 5 に、左側および右側注視比率とブレーキ反応時間の関係を示す。ブレーキ反応時間は歩行者飛び出し後からブレーキを踏み始めるまでに要する時間であり、ブレーキ開始タイミングを表す指標である。左側駐車車両の場合には注視比率が高くなるとブレーキ反応時間が短くなる傾向があり、早期認知が早期ブレーキ対応につながることがわかる。一方、右側停止車列では、大まかな正の相関が見られるノモの関係性は左側駐車車両の場合ほど明確ではない。

Table 2 に、推計されたモデルのパラメータを示す。左側駐車車両モデル (LPV) は、左側注視比率、ブレーキ準備状況パラメータが負値、定数項および TTC が正值となっており解釈上問題ない。一方、右側注視比率モデル (RSVs) ではブレーキ準備行動のパラメータが正值となっており、

ブレーキ準備をしているとブレーキ開始により時間がかかることになる。

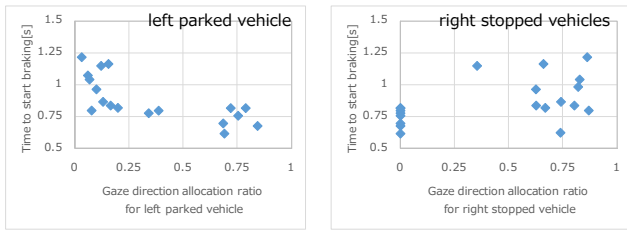


Fig. 5 Relationship between gaze direction allocation and time to start braking

Table 2 Estimated model parameter

	LPV ¹	RSVs ²
Constant [sec]	0.716 (3.14)	0.262 (1.16)
Gaze direction allocation	-0.368 (-3.63)	0.208 (2.36)
Braking preparation (if prepared, variable=1)	-0.0697 (-1.20)	0.0102 (0.157)
TTC ³ at pedestrian starting rushing out [sec]	0.124 (1.54)	0.198 (2.28)

*Values in the table are parameter of each variables, and values in the brackets are t-statistics
 *1 Left parked vehicle
 *2 Right stopped vehicles
 *3 Considered actual driving speed

Fig. 6 は、モデルの当てはまりのよさを表す決定係数である。左側駐車車両モデルの方が当てはまりがよい。

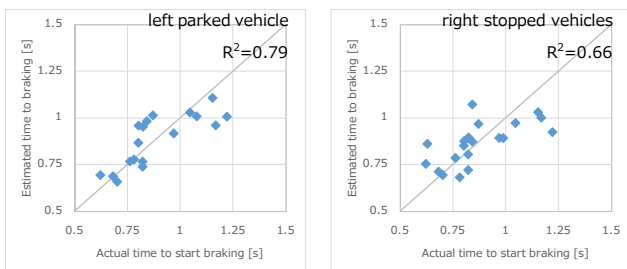


Fig. 6 Model validation at each gaze direction allocation model

したがって、パラメータの符号条件やモデルの適合度を見ると視線行動を表すパラメータとしては、左側注視比率が適切な指標となりうると判断

する。このことから、歩行者遭遇前の運転行動が飛び出し歩行者回避行動に与える影響モデルは、ブレーキ反応時間を説明する式 (1) となる。

$$RT = 0.716 - 0.368 \cdot GA - 0.0697 \cdot BP + 0.124 \cdot TTC_{PA} \quad (1)$$

ここで、RT はブレーキ反応時間[s]、GA は左側注視比率、BP はブレーキ準備行動[有りの場合 1]、TTC_{PA} は歩行者飛び出し時の歩行者までの距離をその時点の走行速度で除した値[s]である。この式は、基本的なブレーキ反応時間が 0.716[s]であり左側を注視率が高い場合、および、ブレーキ準備をしている場合には反応時間を短縮できることを意味している。また、走行速度が低いと TTC_{PA} が大きくなるので反応時間が長くなる。これは、切迫度が低くなる (TTC_{PA} が大きくなる) とドライバの急いで減速する意図が小さくなることを表している。

Table 3 に、パラメータの影響力を比較するための、構築したモデルの標準偏回帰係数、および、その構成比率を示す。表より、左側注視比率の影響力が 58% と最も大きいことがわかる。

Table 3 Weight of the each parameter

	SPRC ¹	Weight
Gaze direction allocation	-0.630	58%
Braking preparation	-0.198	18%
TTC ³ at pedestrian starting rushing out	0.267	24%

*1 Standard partial regression coefficient

5. 飛び出し歩行者遭遇シーンのドライバモデル構築

前節では、歩行者飛び出し前の運転行動から飛び出した際のブレーキ反応時間までをモデル化した。本章では、5.1 節でブレーキ開始時点での切迫度に応じた減速方法を現す減速回避行動サブモデルを構築しモデル全体を整備した上で、5.2 節でモデルの活用方法を整理する。

5.1 減速回避行動サブモデル

Fig. 7 にブレーキ開始時点での衝突余裕時間（以下 TTC_{GP} と記す）と最大減速度の関係を実験参加者群別に示す。このモデル化については今長他³⁾で検討しており、衝突回避のためのブレーキの最大減速度はブレーキ開始時点での TTC_{GP} の逆数に比例することがわかっている。この関係に対して、右側停止車列の有無やドライバ属性の違いによる顕著な違いは見られなかった。図には、今長他³⁾での実験で得られた TTC_{GP} 最大減速度の分布も併記してあるが、今回の実験結果の傾向と類似する傾向である。ひとたびブレーキ回避を開始すると TTC_{GP} に応じたブレーキ操作を行っているとは解釈できる。

今回の実験のデータを用いて構築した減速回避行動サブモデルと今長他³⁾のモデルを比較した (Fig. 8)。その結果、最大減速度や減速度の変曲点の値を導出する部分ではほぼ同等のパラメータが得られた。一方で、減速度の傾き (jerk) は若干異なっていた (図中の J_1, J_2)。これは実験で使用している車両や実験参加者の差異による影響と考えられるが、最終的な車両停止位置の推計への影響は少ない (TTC_{GP} を 2.5[s] と仮定した計算結果で 5%未満の誤差)。

以上の結果より、右側停止車列は減速を開始してから (ブレーキを踏んでから) のドライバの行動に与える影響は少ないと考えられ、モデルでは考慮する必要がないと考える。

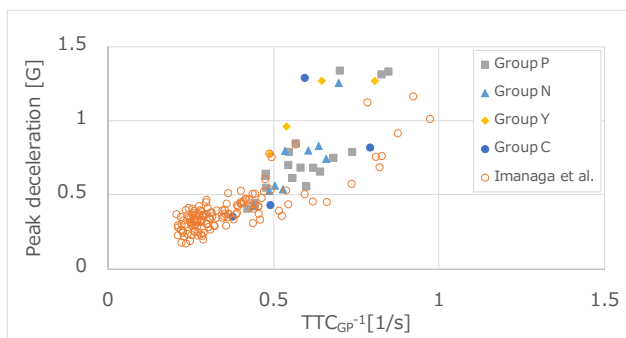


Fig. 7 The relationship between TTC at start braking and peak deceleration

5.2 ドライバモデルを活用した運転行動の評価

最後に構築したサブモデルを統合したドライバモデルを用いた実用例として、左駐車車両への注視比率と歩行者飛び出しタイミング (TTC) を複数設定し、停止位置を計算した結果を Fig. 9 に示す。図は、ある条件化で走行している状況 (速度、ブレーキ準備有無、左側注視比率、歩行者が飛び出してきたタイミングでの切迫度) においてどの

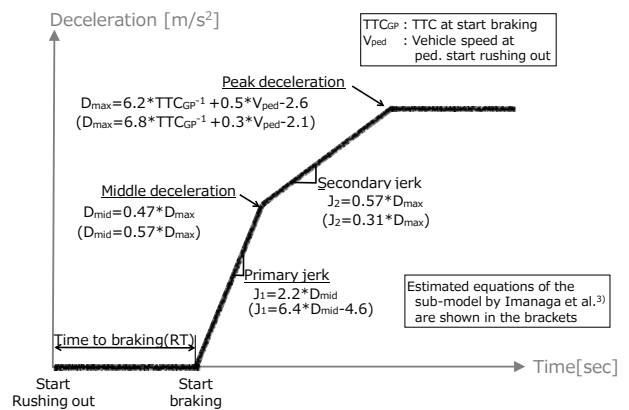


Fig. 8 Comparison of brake avoidance sub-model

位の距離を余裕を持って停止できるかを表している。なお、図の上段は速度 40[km/h] でブレーキ準備をしていた場合であり、下段はブレーキ準備がない場合の計算結果である。図中の値が正值の場合は歩行者と接触前に停止できている (赤字, 黄色背景部分) が、負値の場合は、歩行者を通過してからでないと停止できないため衝突していることを示す。

speed=40[km/h] Brake preparing		Gaze direction allocation ratio to left parked vehicle				
		10%	30%	50%	70%	90%
TTC when pedestrian start rushing out [s]	1	-7.5	-6.7	-5.9	-5.1	-4.2
	1.2	-5.6	-4.7	-3.9	-3.1	-2.3
	1.4	-3.6	-2.8	-2.0	-1.2	-0.3
	1.6	-1.7	-0.8	0.0	0.8	1.6
	1.8	0.3	1.1	1.9	2.7	3.6
	2	2.2	3.1	3.9	4.6	5.1
	2.2	4.2	4.8	5.4	6.0	6.6
	2.4	5.6	6.2	6.8	7.4	8.0
speed=40[km/h] No brake preparing		Gaze direction allocation ratio to left parked vehicle				
		10%	30%	50%	70%	90%
TTC when pedestrian start rushing out [s]	1	-8.3	-7.5	-6.6	-5.8	-5.0
	1.2	-6.3	-5.5	-4.7	-3.9	-3.1
	1.4	-4.4	-3.6	-2.8	-1.9	-1.1
	1.6	-2.4	-1.6	-0.8	0.0	0.8
	1.8	-0.5	0.3	1.1	2.0	2.8
	2	1.5	2.3	3.1	3.9	4.6
	2.2	3.4	4.2	4.8	5.4	6.0
	2.4	5.0	5.6	6.2	6.8	7.4

Fig. 9 Model application for comparison of safety of driving behavior at the same scene

たとえば、ブレーキ準備を行い、かつ左側注視比率が70%の場合、1.6[s]のタイミングで飛び出されてもかろうじて回避可能であるが、30%程度しか視線を向けられていない場合は衝突することが予想される。

このドライバモデルを活用することで、歩行者飛び出しが予想される交通環境下において、運転行動が先読み運転を上手くできているか、できていないかの判断基準を得ることが可能である。先読み運転ができていないドライバへの支援のタイミング判断や、システム構築時のHMI (Human Machine Interface) の検討にも利用可能となると考える。

6. おわりに

本研究では、道路直進時に左側駐車車両の陰から歩行者が飛び出すシーンにおけるドライバモデルを提案したものである。モデルは、先読み運転が上手いドライバと上手くないドライバの飛び出し前の運転行動（注視行動、ブレーキ準備行動、速度選択）が、歩行者が飛び出したあとの減速回

避行動にどのように影響を与えるかを評価できるように構築した。そして、モデルの活用方法として、対象シーン遭遇時の先読み運転ができていないかを判断するために活用し、必要に応じて支援を実施する利用方法を提案した。

今後の課題は、以下の2点である。まず、モデル化自体の改良として、駐車車両通過時に車両からどの位横位置の余裕を取るかをモデルに組み込む必要がある点が挙げられる。また、モデルの活用としては、構築したモデルを支援に活用するために先読み運転支援の方法を組み合わせた支援方法の提案が必要であると考えている。

なお、本研究は経済産業省製造産業局自動車課からの委託業務「平成27年度次世代高度運転支援システム研究開発・実証プロジェクト」における「ドライバモデルの有効性の検証」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 経済産業省：平成27年度次世代高度運転支援システム研究開発・実証プロジェクト報告書（2016）
- 2) 岩城，今長，内田：駐車車両陰からの歩行者飛び出しが予想されるシーンにおける運転行動分析（第1報），歩行者飛び出し前の運転行動の違いと飛び出し後の回避パフォーマンスの関係性分析，自動車技術会秋季大会学術講演会講演予稿集（2016）
- 3) 今長，岩城，山口，内田：単路部における飛び出し歩行者回避行動の特性分析（第2報），減速回避行動のモデル化，自動車技術会秋季大会学術講演会講演予稿集，p.828-833（2015）
- 4) 岩城，若杉，モラレス，田中，内田：横断歩行者に対するドライバの行動分析，自動車技術会秋季大会学術講演会講演予稿集，No.146-13，p.1-7（2013）