

博士学位論文

リスクポテンシャル推定に基づく
自律型衝突回避システムに関する研究

Study on Autonomous Collision Avoidance System
based on Risk Potential Estimation

国立大学法人東京農工大学大学院

工学府 機械システム工学専攻

松實 良祐

論文要旨

近年，我が国における交通事故発生件数および死傷者数は法令の厳罰化，安全技術の発展等により減少傾向にあるが，依然高い水準にあるといえる．特に，高齢者や歩行者などに代表される交通弱者が被害者となる事故の発生が近年の交通事故における深刻な問題だといえる．そのため，車両メーカや研究機関では外界環境認識に基づく予防安全技術の研究・開発が盛んに行われてきた．

しかし，現在事故被害が深刻化している対歩行者場面での事故発生要因の1つとして「発見の遅れ」があり，これはドライバの不注意や漫然運転によるものだけではなく，歩行者側の構造物や周辺車両陰からの飛び出し，車両直前での急な横断など，衝突に対する事故リスクの顕在化するタイミングが遅い場面が存在する．このような場面对し，従来の運転支援または自動運転システムでは，センサの検出性能と作動領域が限定されているため，対向車や構造物による死角からの飛び出し場面では衝突事故を防ぐことはできない．また，路車間，車車間通信で情報を伝達するシステム等も提案されているが，これらのシステムの事故予防効果が情報の伝達に必要となる装置の普及率に依存することや，インフラ整備の問題等が存在する．

本論文では実際のドライバのような道路文脈の理解に基づく危険予測運転行動を含む自律運転知能とそれに基づく車両制御システムの構築の一環として，対歩行者事故場面に注目し，顕在化したリスクと道路環境が有する潜在的なリスクの定量化手法とそれに基づく衝突回避のための車両制御システムを提案する．提案したシステムの検証には，超小型電気自動車をベースにした自律走行車両を用いた実装試験ならびに，ヒヤリハットデータベース解析に基づくヒヤリハット場面を再現した検証場面における走行シミュレーションによりシステムの有効性について検証する．

Abstract

Recent advances in passive safety and active safety technologies have greatly contributed to a remarkable decrease in traffic fatalities; however, the number of road accidents remains high. Moreover, in an aged society, accidents involving elderly drivers are increasing every year due to their declined physical ability in terms of recognition and decision-making. For instance, the effective visibility range for elderly drivers is narrower than that for young drivers. Based on a driving test of a forward collision warning system using a driving simulator, it was found that there are many elderly drivers who cannot recognize the collision warning sound produced by the driver assistance system. Moreover, even when some of them recognize the collision warning sound, they cannot brake in time to react to a critical situation. These facts indicate that in critical situations, an autonomous driving system is one of the promising solutions to prevent collisions involving elderly drivers. To improve their degraded driving performance, this research project aims at considerably improving road safety by allowing autonomous driving control intervention in the last few seconds before an accident. To assist safe driving to prevent accidents by compensating for human error with intelligent vehicle technologies, intervention by autonomous driving systems such as emergency braking and steering assist has become one of the promising technical solutions. This paper describes autonomous driving intelligence systems for collision avoidance. Here, this paper focuses on a driving scenario in which drivers need to negotiating pedestrian. The autonomous driving intelligence systems are designed by the application of potential field theory, and the potential field function and potential parameters are determined by expertised driving behavior. Finally, the effectiveness of the proposed system is verified by computer simulations and driving experiments using a micro-scale electric vehicle.

目次

本論文で使用する主な記号

第 1 章 緒論	1-15
1.1 研究の背景	1-9
1.2 自動車の安全技術に関する従来の研究	10-12
1.3 本研究の問題提起と目的	13-14
1.4 本論文の構成	14-15
第 2 章 周囲環境情報に基づく自律型衝突回避システムの設計	16-41
2.1 はじめに	16
2.2 自律型衝突回避システムの概要	16-17
2.3 自律走行車両プラットフォームの概要	17-31
2.4 LIDAR を用いた障害物検出アルゴリズム	32-37
2.5 ポテンシャルフィールド理論によるリスク評価アルゴリズム	37-38
2.6 インホイールモータの制駆動力制御系の設計	39-40
2.7 まとめ	41
第 3 章 対歩行者場面における衝突回避システムの実験的検証	42-84
3.1 はじめに	42
3.2 歩行者に対するリスクポテンシャルの理論的設計	42-45
3.3 交差点右折場面における衝突回避システムの理論的設計	45-53
3.4 交差点右折場面における衝突回避システムの理論的解析	54-64
3.5 交差点右折場面における衝突回避システムの実験的検証	65-83
3.6 まとめ	84
第 4 章 無信号交差点における運転指導員の運転行動解析	85-111
4.1 はじめに	85
4.2 実験装置の概要	85-90
4.3 運転指導員の運転行動データの取得	91-92
4.4 運転指導員の運転行動解析	93-110

4.5	まとめ	111
第 5 章	潜在リスク評価に基づく衝突回避システムの理論的解析	112-153
5.1	はじめに	112-113
5.2	潜在リスクに対するリスクポテンシャルの理論的設計	113-126
5.3	ヒヤリハットデータベースを用いた検証場面の抽出	127-130
5.4	ヒヤリハット場面における潜在リスク評価に基づく 衝突回避システムの予防安全性能の評価	131-152
5.5	まとめ	153
第 6 章	結論	154-156

参考文献

関連論文リスト

謝辞

研究業績

本論文で使用する主な記号

【車両挙動に関する記号】

m_c	車体重量
a_{x_c}	車両の前後加速度
V_c	車両速度
γ	ヨーレート
ψ	ヨー角
δ_{sw}	操舵角
R_t	旋回半径
$a_{x_c}^*$	目標加速度
V_c^*	目標速度
ψ^*	目標ヨー角
T_m^*	駆動トルク制御指令値
δ_{sw}^*	操舵角制御指令値

【衝突回避のためのリスク評価に関する記号】

S_P	目的地までの走行距離
X_{ped}	歩行者の X 座標
Y_{ped}	歩行者の Y 座標
V_{ped}	歩行者の移動速度
S_{cp}	衝突点までの走行距離
T_{cp}	衝突点到達時間
D_{ped}	歩行者の予測位置との距離
F_{x_af}	引力の前後方向成分
F_{rf}	斥力
F_{x_rf}	斥力の前後方向成分
D_{margin}	安全確保余裕距離

【運転指導員の運転行動解析に関する記号】

P_b	ブレーキ圧
X_{int}	交差点入り口までの距離
V_{max}	歩行者・自転車との衝突回避のための限界速度
D^*	事故回避距離
τ_c	自動ブレーキが作動するまでのむだ時間
α_{ped}	歩行者の X_{int} 方向飛び出し位置
T_{tc-car}	自動車側の衝突点到達余裕時間
T_{tc-ped}	歩行者側の衝突点到達余裕時間

【危険予測のための潜在リスク評価に関する記号】

V_{ref}	徐行速度
C_{rf}	斥力係数
D_{th}	斥力の臨界距離
L_p	前方注視距離
T_p	前方注視時間
X_{edge}	障害物の代表値（ X 軸座標）
Y_{edge}	障害物の代表値（ Y 軸座標）
X_e	歩行者の飛び出し位置偏差
\hat{X}_{ped}	飛び出し歩行者の推定位置（ X 軸座標）
\hat{Y}_{ped}	飛び出し歩行者の推定位置（ Y 軸座標）
a_{max}	最大減速度

第 1 章

序論

本章では，1.1 節で自動車の抱える交通事故の問題に対して，社会的視点から研究背景について述べ，1.2 節で自動車の安全技術に関する従来の研究について述べる．1.3 節ではそれらの背景から本研究の問題提起と目的について述べ，1.4 節で本論文の全体構成について述べる．

1.1 研究の背景

図 1.1.1 に自動車保有台数の推移を示す．図 1.1.1 より，我が国における平成 25 年 3 月末現在の自動車保有台数は約 7,962 万台であり，これは，自動車 1 台当たりの人口は 1.60 人と 2 人に 1 人以上は自動車を所有していることになる⁽¹⁾⁽²⁾．このように我が国では広く自動車が普及し，生活の一部となっている．しかし，その一方で，交通事故の多発が深刻な問題として挙げられる．そこで，本節では，交通事故の発生状況について述べる．

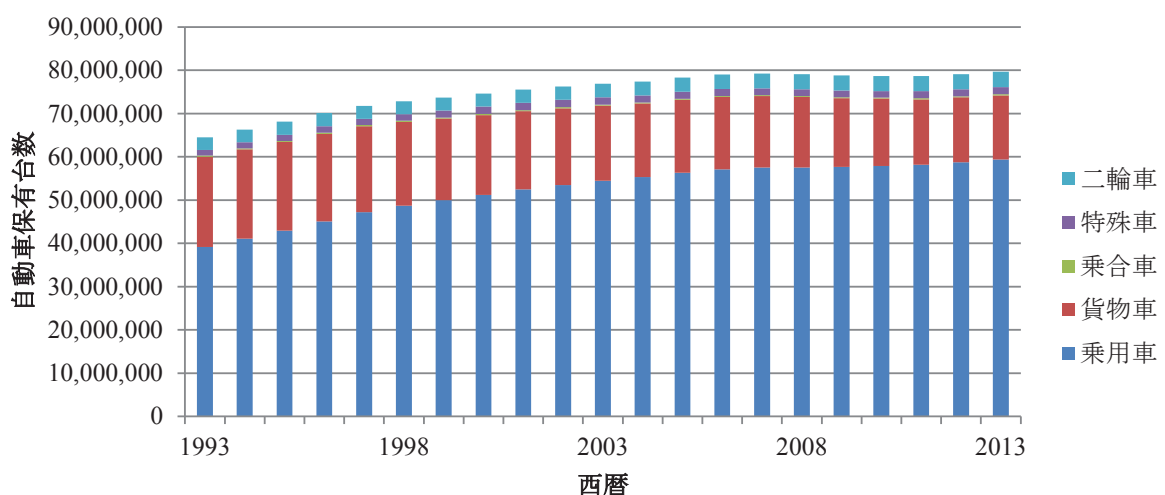


Fig. 1.1.1 Transition of the number of car possession

1.1.1 交通事故発生状況

図 1.1.2 に我が国の交通事故発生件数及び負傷者数，死者数の推移を示す⁽³⁾．近年の我が国における交通事故発生件数と交通事故による死傷者数は減少傾向にある．平成 24 年中の交通事故による死者数は 4,411 人であり，12 年連続の減少傾向を示している．これは，ピーク時（昭和 45 年＝16,765 人）の 3 割以下であり，昭和 27 年以降初めて 4,500 人を下回った．また，平成 16 年に過去最悪を記録した交通事故発生件数及び負傷者数も 8 年連続で減少しており，発生件数は平成 4 年以来 19 年振りに 70 万件を下回った昨年より更に減少した⁽⁴⁾．まず，交通事故による死者数の推移に注目すると，それまで交通事故発生件数と平行して推移していたものが，平成 5 年より，発生件数とは関係なく減少傾向を示している．これは，シートベルト着用率の増加⁽⁵⁾や，医療技術の発展，そして，事故発生時に被害を最小限に抑える衝突安全技術(Passive Safety)の発展が起因していると考えられる⁽⁶⁾．一方，交通事故発生件数及び負傷者数に注目すると，こちらも平成 17 年度より減少傾向にある，こちらは，法令の厳罰化に伴う安全意識の向上や，自動車の危険場面発生を抑止する予防安全技術(Active safety)等の技術の発展が起因していると考えられる．

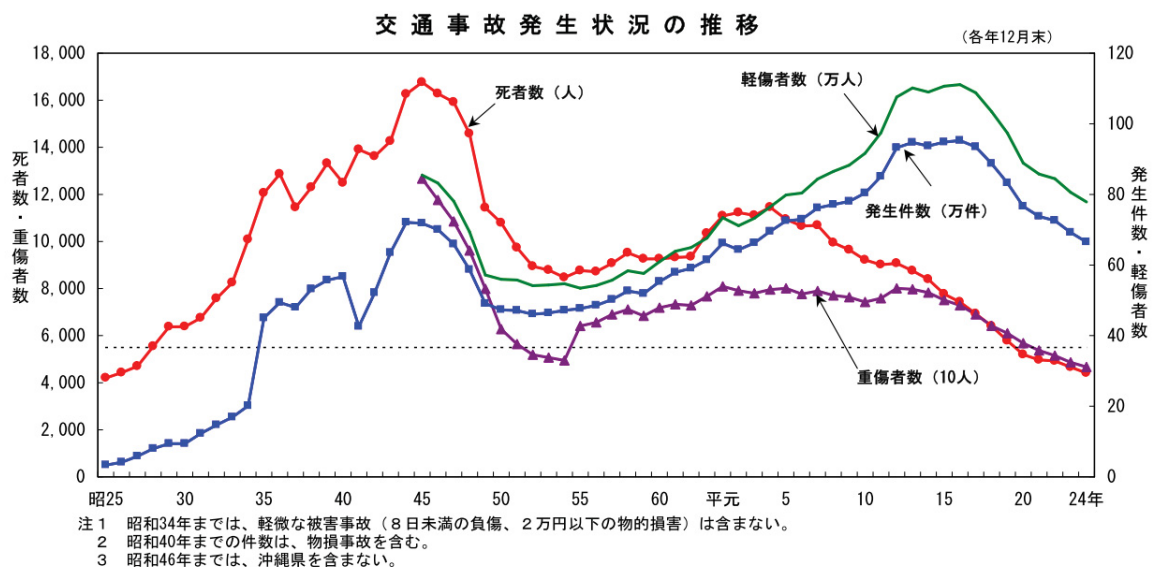


Fig. 1.1.2 Statistical data of traffic accidents in Japan⁽³⁾

1.1.2 年齢層別交通事故死者数

図 1.1.3 に 年齢層別の負傷者数の推移を示し、図 1.1.4 に 年齢層別死者数の構成率を示す⁽³⁾。図 1.1.3 より、負傷者数を年齢層別に注目すると、30 歳代（構成率 18.7%）が最も多く、次いで 40 歳代（同 16.8%）、若者（16～24 歳）（同 15.4%）の順となった。増減数を前年と比較すると、40 歳代を除く全ての年齢層で減少し、その中でも若者（前年比－8,189 人、－6.1%）が最も減少した。若者の負傷者数は、昭和 50 年代前半から増加傾向を示し、平成 2 年以降はほぼ横ばいで推移した後、12 年をピークに減少（平成 14 年の 0.51 倍）している。一方、40 歳代、60～64 歳及び高齢者（65 歳以上）の負傷者数は、高い水準（それぞれ同 0.99 倍、同 0.92 倍及び同 0.94 倍）にある。

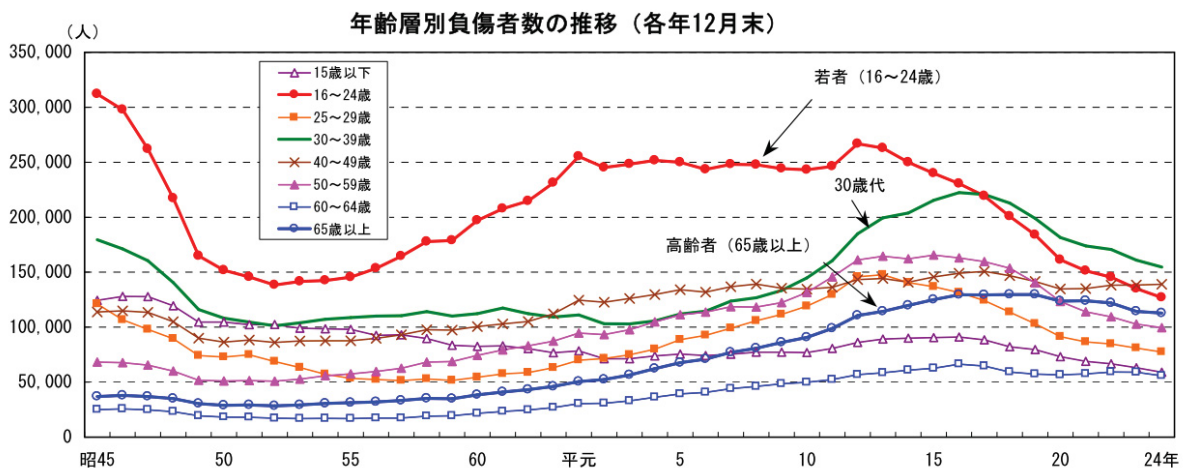


Fig. 1.1.3 Transition of the number of casualties categorized by drivers age⁽³⁾

次に、図 1.1.4 より、死傷者数を年齢層別・被害程度別に注目すると、高齢者の構成率は、軽傷者では 12.5%であるのに対して、重傷者では 32.5%、死者では半数以上の 51.3%となっており、被害程度が深刻になるほど高齢者の構成率が高くなっている。重傷者数及び軽傷者数について、増減数を前年と比較すると、重傷者数は全ての年齢層で減少しており、また、軽傷者数は 40 歳代を除いた全ての年齢層で減少している。軽傷者のうち、若者（前年比－7,834 人、－6.1%）が最も減少し、次いで 30 歳代（同－5,967 人、－3.8%）の順となった。過去 10 年間の推移をみると、軽傷者全体（平成 14 年の 0.71 倍）は 16 年をピークに減少傾向にあるが、中でも若者（同 0.51 倍）は約

2 分の 1 まで減少した。また、重傷者（同 0.60 倍）は全体で 5 分の 3 まで減少したが、高齢者（同 0.81 倍）は高い水準にある。

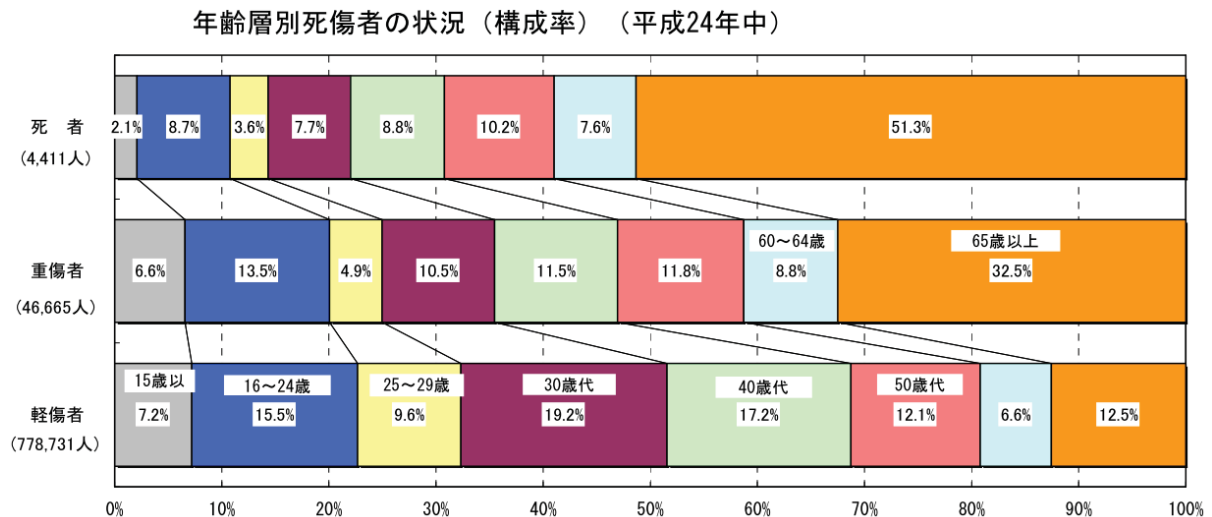


Fig. 1.1.4 Proportion of the number of fatalities and casualties categorized by drivers age⁽³⁾

1.1.3 状態別交通事故死者数

図 1.1.5 に 状態別の交通事故負傷者数の推移を示し、図 1.1.6 に 状態別交通事故首相者数の構成割合を示す⁽³⁾。図 1.1.5 より、負傷者数を状態別に注目すると、自動車乗車中（構成率 64.4%）が 6 割以上を占め最も多く、次いで自転車乗用中（同 15.9%）、二輪車乗車中（同 11.9%）の順となった。増減数を前年と比較すると、全ての状態で減少しており、中でも自転車乗用中は、減少数全体（29,214 人）の約 5 分の 2 を占める減少（前年比－11,941 人、－8.3%）となった。過去 10 年間の推移をみると、いずれも平成 12～16 年をピークに減少傾向にあるものの、歩行中（平成 14 年の 0.75 倍）は 10 年前の 8 割近くと最も高い指数である。

また、図 1.1.6 より、死傷者数を状態別・被害程度別に注目すると、自動車乗車中は、軽傷者の 6 割以上（構成率 66.6%）、死者の 3 割以上（同 32.1%）、重傷者の 3 割近く（同 28.0%）と各被害程度で多数を占めている。また、歩行中は軽傷者が 1 割以下（同 7.0%）であるのに対して、重傷者では 20.6%、死者では 37.0%を占め、被害

程度が深刻になるほど歩行中の構成率が高くなり、致死率も全体の4.7倍と高い。軽傷者数及び重傷者数の増減数を前年と比較すると、全ての状態で減少しており、中でも軽傷者は自動車乗車中（前年比：-6,300人，-1.2%）が、重傷者は原付乗車中（前年比-655人，-8.0%）の減少幅が最も大きい。

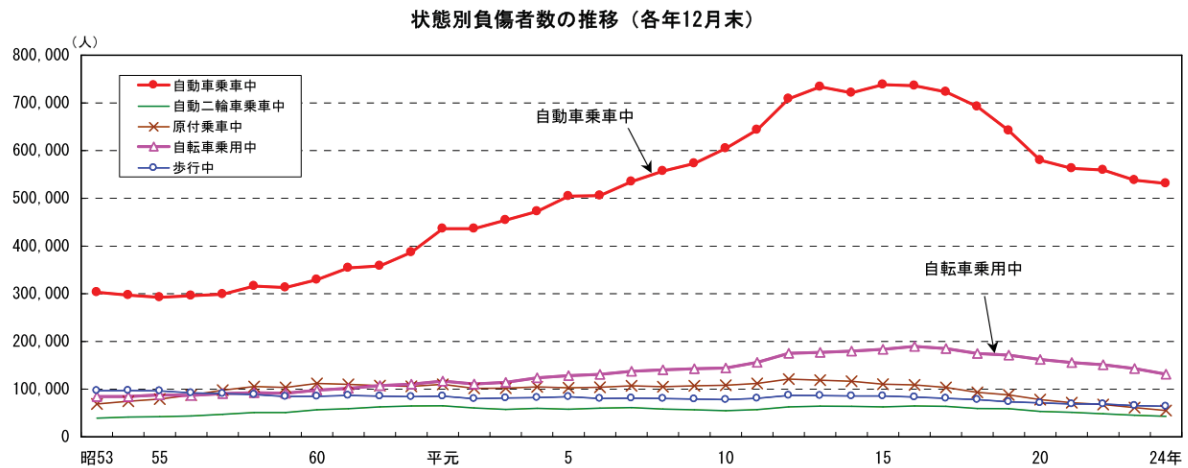


Fig. 1.1.5 Transition of the number of casualties categorized by road user type⁽³⁾

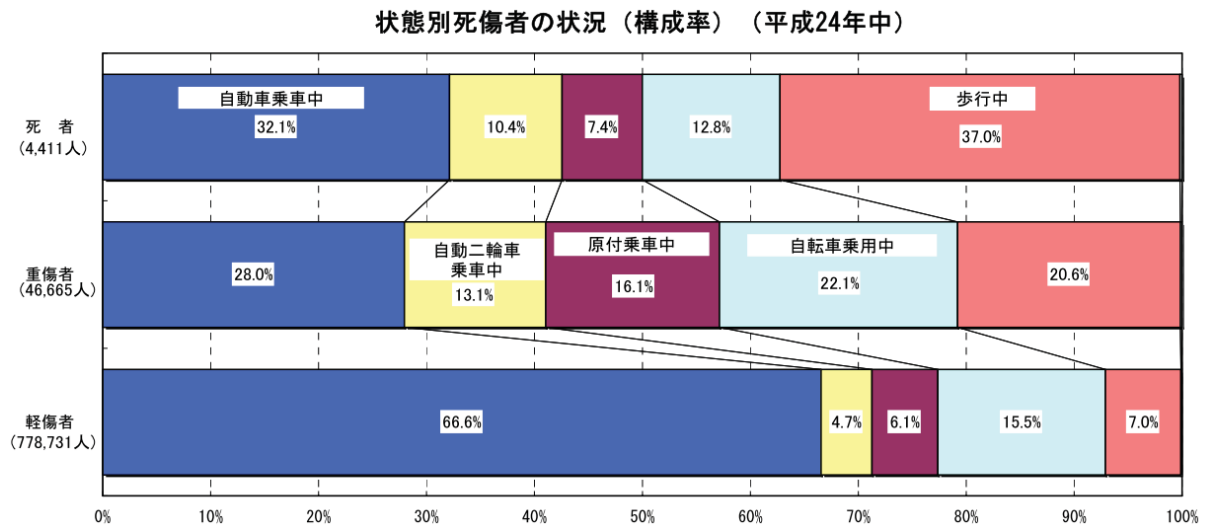


Fig. 1.1.6 Proportion of the number of fatalities and casualties categorized by road user type⁽³⁾

1.1.4 歩行者の法令違反別の状況と特徴

道路交通法第 38 条では、図 1.1.7 に示すように、横断歩道上の歩行者を中心とした保護規定が定められている⁽⁷⁾。この道路交通法第 38 条の規定違反は「横断歩行者妨害違反」と呼ばれており、本節では、横断歩行者妨害違反による事故発生状況について述べる。

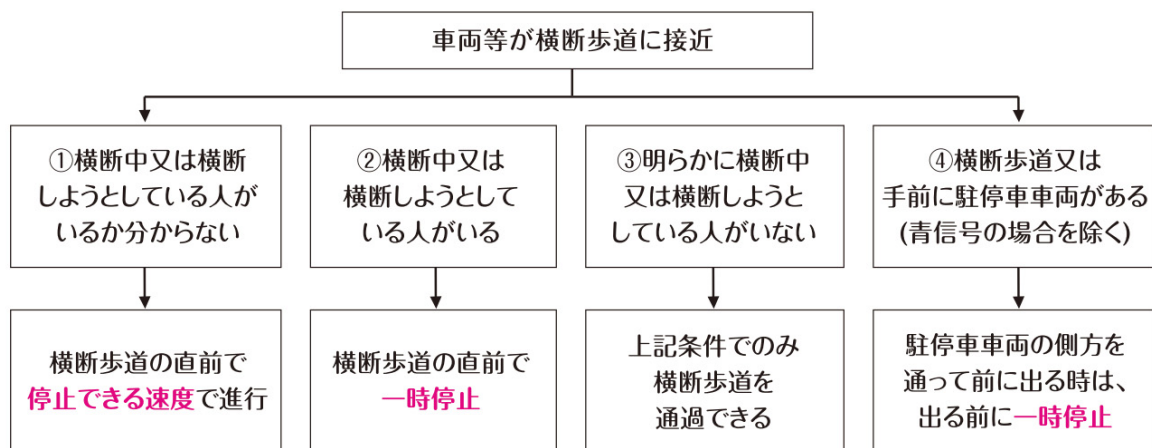


Fig. 1.1.7 Safeguards of pedestrian protection set forth by Road Traffic Law ⁽⁷⁾

図 1.1.8 に横断歩行者妨害違反による死亡事故の道路形状別構成割合を示す⁽⁷⁾。横断歩行者妨害違反による死亡事故の 88%が交差点内で発生していることが確認できる。また、横断歩行者妨害違反に事故の死傷数を車両と歩行者の進行方向別に分類したものを図 1.1.9 に示す。図 1.1.9 より、まず、歩行者の進行方向に注目すると、車両が右左折を行っている際には、進行方向左側からの死者数が多いが、車両直進中の死者数は進行方向右側からの方が多いことが確認できる。

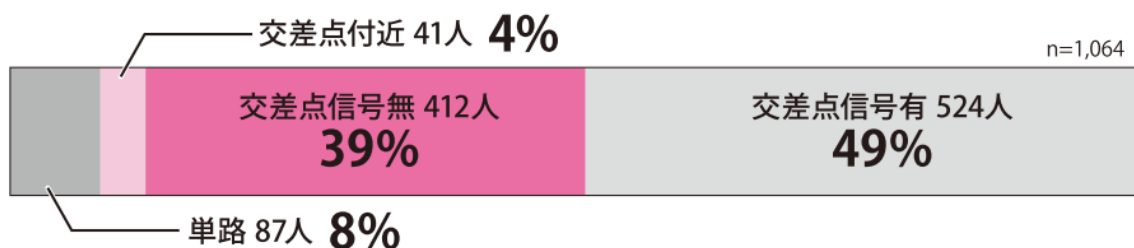


Fig. 1.1.8 Proportion of the number of fatalities categorized by road type⁽⁷⁾

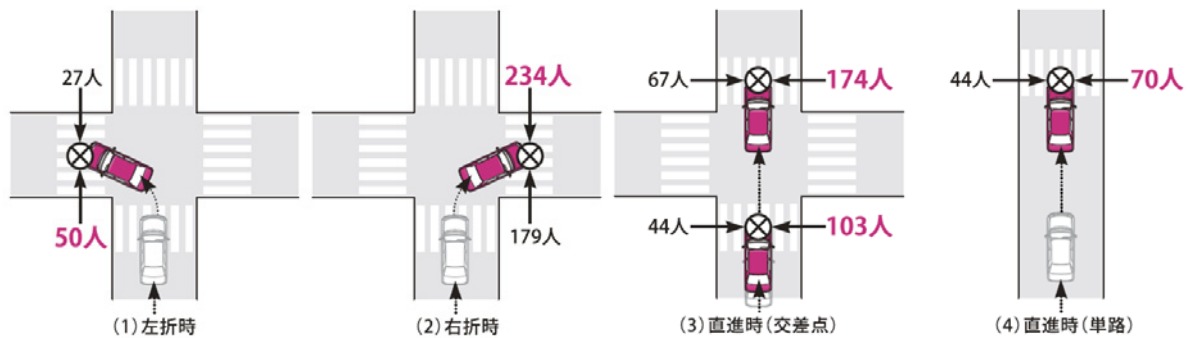


Fig. 1.1.9 Proportion of the number of fatalities categorized by traveling direction⁽⁷⁾

図 1.1.10 に車両側の人的事故要因の構成割合を示す⁽⁷⁾。図 1.1.10 より、横断歩行者妨害違反による死亡事故の主要因は「発見の遅れ」であることが確認できる。ここでの「発見の遅れ」とは、事故発生まで対象に気付かなかった場面と、事故直前に発見したものの、結果として事故が発生してしまったものを含む。

発見遅れの原因については、車両側の違反の他にも、歩行者側の違反行動として、周辺車両や構造物のからの飛び出しや、車両直前・直後での横断など、歩行者に対する発見可能なタイミング自体が遅く、その結果、事故へとつながった事例もあると考えられる。生活道路における歩行者側の法令違反別の死傷事故件数の割合と、自動車直進中の歩行者側の法令違反別の死者数の割合をそれぞれ図 1.1.11, 1.1.12 に示す⁽⁸⁾。

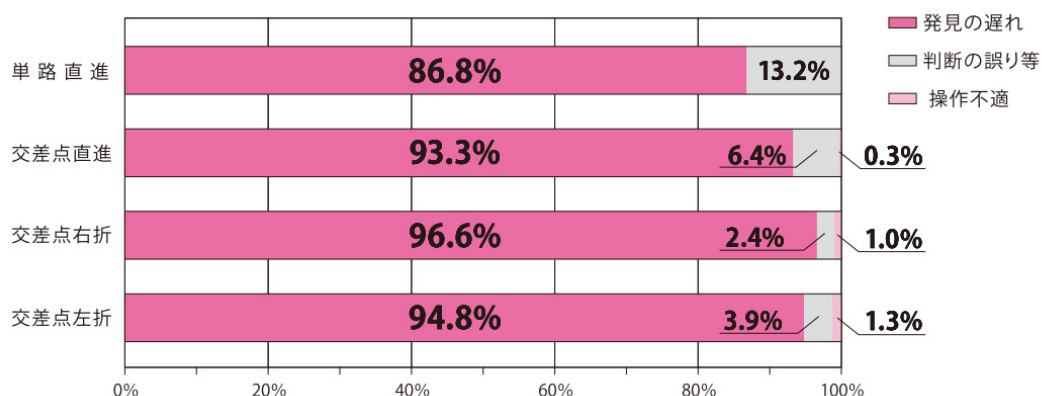


Fig. 1.1.10 Proportion of the number of fatalities categorized by driver's error⁽⁷⁾

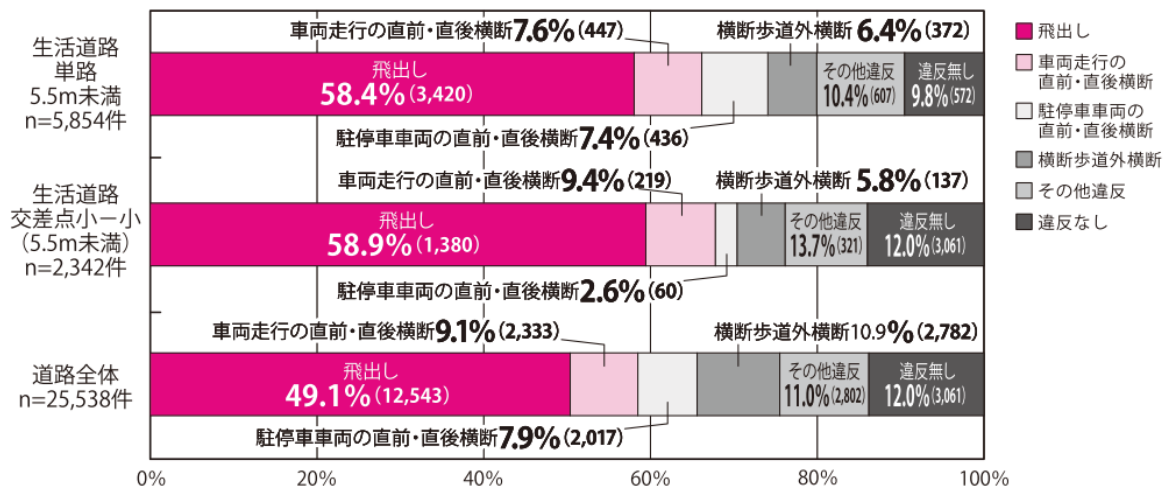


Fig. 1.1.11 Proportion of the number of fatalities categorized by law violation of pedestrian⁽⁸⁾

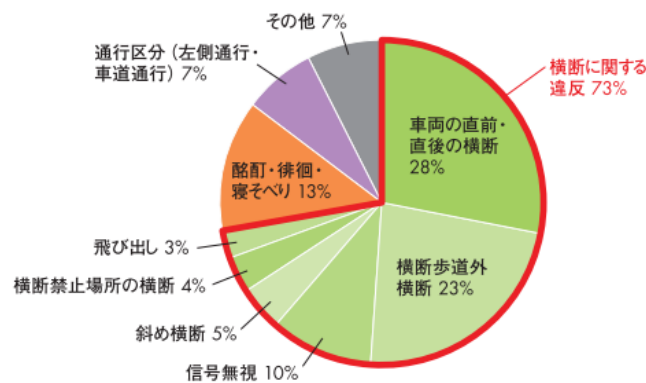


Fig. 1.1.12 Proportion of the number of fatalities categorized by law violation of pedestrian in straight roadway⁽⁹⁾

また、交通事故総合分析センターの交通事故例調査結果より得られた、自動車直進中に歩行者が横断歩道以外を横断して死亡事故になった事例と軽傷事故の事例における運転者が危険を認知した地点での自動車の走行速度と歩行者までの距離を歩行者の被害程度別にまとめた結果を図 1.1.13 に示す⁽⁹⁾。図 1.1.13 では、推測される自動車の空走距離（危険認知後、ブレーキを踏んで減速し始めるまでに進む距離）と停

止距離（危険認知後、停止するまでに進む距離）を示す．なお，空走距離および停止距離の算出には，反応時間を一般的な範囲が 0.5～1.0 秒であることから，0.7 秒と設定し，ブレーキによる減速度は急ブレーキ相当の 0.6Gとしている．

図 1.1.13 より，死亡事故の多くは空走エリア内で発生しており，自動車が減速する前に衝突している事例が多いことが確認できる．また，走行速度 60km/h や 80km/h 等の走行速度が速い場合は，空走距離より遠い地点で危険認知しても死亡事故が発生している．一方，軽傷事故は死亡事故に比べ走行速度が低速かつ歩行者までの距離が遠い位置に分布していることが確認できる．

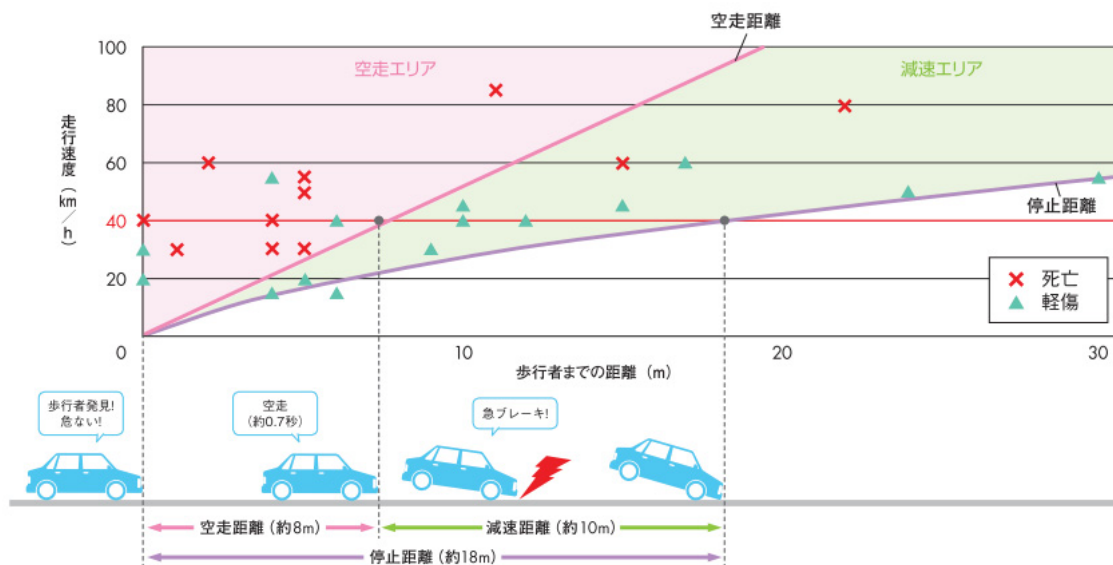


Fig. 1.1.13 Statistical data of vehicle velocity and distance to pedestrian categorized by accidental damage⁽⁹⁾

1.2 自動車の安全技術に関する従来の研究

現在，実用化に至っている自動車の安全技術は，図 1.2.1 に示すように，2 種類に大別することができる．

1 つは，事故が起こった際の被害を軽減するための技術である衝突安全技術 (Passive Safety) であり，その代表な技術として，シートベルト，エアバック，衝撃ボディなどが挙げられる．衝突安全技術は，交通事故死者数が 1 万人を超えた 1988 年頃に注目されるようになり，その後，シートベルト着用義務の強化，運転席エアバック装置の普及，前面衝突試験の普及など，衝突時における衝撃吸収と生存空間の確保を考慮した自動車の設計が盛んに行なわれるようになった．

次に，Anti-lock Brake System (ABS)，Adaptive Cruise Control (ACC) 等の予防安全技術 (Active Safety) である．この技術の基本は，車両の安定性を確保すること，ドライバの運転負担軽減，そしてドライバの事故回避のための支援を行なうことであり，ドライバの運転を積極的に支援し，交通事故そのものを未然に防ぐことを目的とした技術である．衝突安全技術は事故件数の減少には直接結びつかないことから，この予防安全技術が自動車の抱える交通事故問題を解決するための中心技術になると考えられ，盛んに研究・開発が行なわれている．

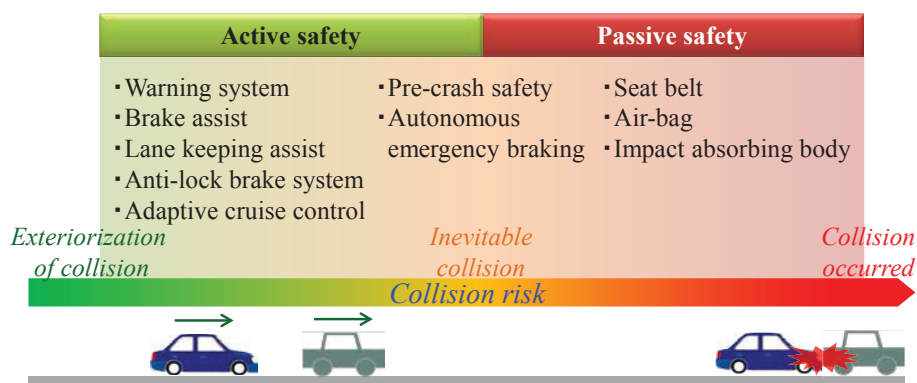
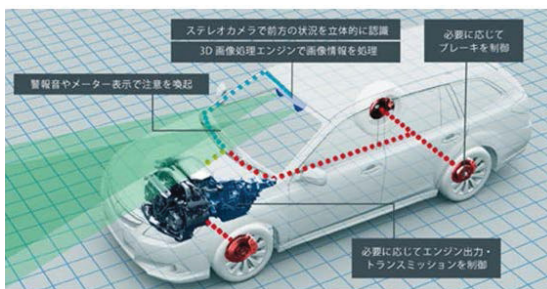


Fig. 1.2.1 Classification of safety technology

また近年の技術動向としては，車載センサ情報を利用した高度な予防安全技術の技術開発が着目を集めている．車載センサ情報を用いた予防安全技術の例として，

Eyesight Ver.2(SUBARU)やHuman Safety(VOLVO)が挙げられる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。Eyesight Ver.2 と Human Safetyのイメージをそれぞれ図 1.2.2, 図 1.2.3 に示す⁽¹²⁾⁽¹³⁾。さらに, Eyesight Ver.2 と Human Safetyを含めた, 既存の衝突事故回避システムを表 1.2.1 に示す⁽¹⁴⁾。表 1.2.1 より, Eyesight Ver.2 は, センサにステレオカメラを使用しており, 衝突回避のための自車速度は 30km/hまでと定められている⁽¹²⁾。ステレオカメラの水平方向視野角は約 26degである⁽¹⁰⁾。一方Human Safetyは, センサにミリ波レーダと単眼カメラを使用しており, 衝突回避のための自車速度は 35km/hまでと定められている。ミリ波レーダの視野角は 60deg, 単眼カメラの視野角は 48degである⁽¹¹⁾。この他にもNISSANのディスタンスコントロールアシスト(DCA: Distance Control Assist)等, 車載センサ情報を利用した予防安全技術が盛んに開発されている⁽¹⁵⁾

Fig. 1.2.2 Eyesight Ver.2 (SUBARU)⁽¹⁰⁾Fig. 1.2.3 Human Safety (Volvo)⁽¹¹⁾

搭載車種	スウェーデンVolvo社 XC60	富士重工 レガシィ	ドイツVolkswagen社 パサートCC	Volvo社 S60	日産自動車 —
システム名	City Safety	アイサイト	シティ エマージェンシーブレーキ	Human Safety	未定
センサ	レーザーレーダ	ステレオカメラ	ミリ波レーダ	ミリ波レーダと単眼カメラ	ミリ波レーダ
センサの 部品メーカー	ドイツContinental社	日立製作所と共同開発	非公開	ミリ波レーダ(米Delphi社) とカメラ(非公開)	検討中 (開発車両のミリ波レーダ はContinental社製)
主な障害物	車両	車両+歩行者	車両	主に歩行者(車両も含む)	車両
システムが 作動する速度域	30km/hまで	制限なし	30km/hまで	80kmまで	制限なし
衝突を回避する ときの自車速度	15km/hまで	30km/hまで	30km/hまで	35kmまで	60km/hまで
日本導入時期	2009年8月	2010年5月	2011年1月	2011年3月	2013年までに 実用化を計画
実質のシステム価格	非公開(全車標準装備)	10万円	30万4500円(オプション)	25万円(オプション)	10万円以内を想定
自動ブレーキの 作動タイミング	国土交通省の技術指針(衝突直前の1.4秒間)				衝突直前の1.4秒よりも 早いタイミングで、 弱いブレーキを作動

Table 1.2.1 Collision accident avoidance systems⁽¹⁴⁾

また、近年の交通事故死者数減少の要因の1つとして、交通環境におけるITS（Intelligent Transport System）技術の進歩が挙げられる。ITSとは、エレクトロニクスや情報通信技術を用いて「人」、「車」、「道路」の間で情報のネットワークを構築することで、交通事故、渋滞、環境問題などの交通問題を解決し、安全で快適な交通社会の実現を目指す諸々のサービスに包括的に与えられた名称である。図1.2.4に概要を示す。

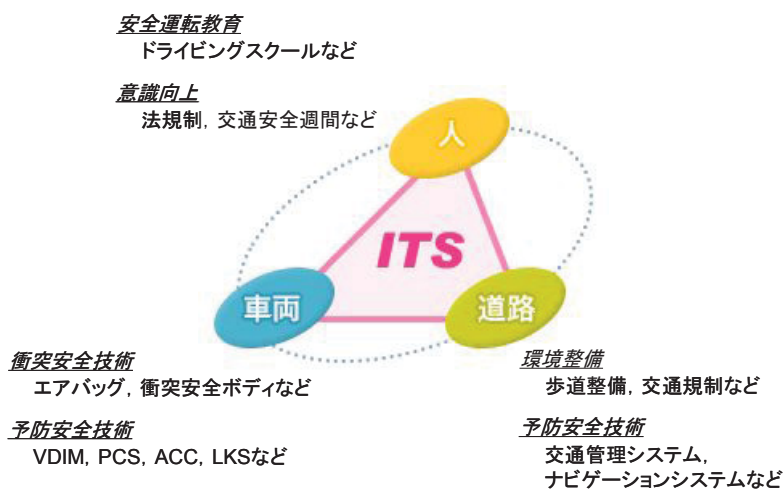


Fig.1.2.4 ITS technology

ITSは、平成8年に当時のITS関連5省庁(警察庁、通産省、運輸省、郵政省、建設省)が策定した「ITS推進に関する全体構想」に基づいて、官民協力の下に鋭意進められてきた⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。その中でも、車両の安全技術については、盛んな先進安全自動車ASV(Advanced Safety Vehicle)の開発・普及の促進活動により、自動車の安全性向上を促してきた。特に、追突事故に対する運転支援として、衝突の可能性を事前に検知してドライバに知らせるとともに、万が一、衝突が避けられない場合でも、必要な装備を衝突に備えて作動させることで、乗員の被害を軽減する技術が開発されている。

1.3 本研究の問題提起と目的

本節では研究背景から本研究の問題提起と目的について述べる。

1.3.1 問題提起

近年、我が国における交通事故発生件数および死傷者数は法令の厳罰化、安全技術の発展等により減少傾向にあるが、依然高い水準にあるといえる。特に、高齢者や歩行者などに代表される交通弱者が被害者となる事故の発生が近年の交通事故における深刻な問題だといえる⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。高齢のドライバの事故増加については認知・判断能力の低下が影響しているものだと考えられ、先行研究では、若年者に比べ、対向車速度を最大で 8km/h 過小評価するとの報告がある⁽²¹⁾。

これらの問題に対し、車両メーカーや研究機関では外界環境認識に基づく予防安全技術の研究・開発が盛んに行われてきた。例えば、米国における軍需目的の DARPA Urban Challenge では、アメリカでの市街地環境を模擬したコースにて無人運転自動車が走破した実績があり⁽²²⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾、また、イタリアのパルマ大学の VisLab で開発された自律移動車両はイタリアのパルマから中国の上海までの 13,000km を走破した実績がある⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾。また、日本におけるプロジェクトの一例としては、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のエネルギー ITS 推進事業の一環として、高速道路を想定したコース内で、大型車両の自動隊列走行を実現した⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾。これらの他にも、車載センサの情報に基づく前方障害物に対する衝突回避システム⁽¹¹⁾⁽¹²⁾や、車車間通信、歩車間通信、路車間通信を用いた他車の位置情報をドライバに提示するシステム⁽³¹⁾⁽³²⁾⁽³³⁾等が挙げられる。

しかし、1.1 節で述べたように、現在事故被害が深刻化している対歩行者場面での事故発生要因の 1 つとして「発見の遅れ」があり、これはドライバの不注意や漫然運転によるものだけではなく、歩行者側の構造物や周辺車両陰からの飛び出し、車両直前での急な横断など、衝突に対する事故リスクの顕在化するタイミングが遅い場面が存在する。しかし、従来の運転支援または自動運転システムでは、センサの検出性能と作動領域が限定されているため、対向車や構造物による死角からの飛び出し場面で

は衝突事故を防ぐことはできない。また，路車間，車車間通信で情報を伝達するシステム等も提案されているが，これらのシステムの事故予防効果が情報の伝達に必要な装置の普及率に依存することや，インフラ整備の問題等が存在する⁽³⁴⁾。

そこで，今後の交通事故被害の更なる軽減には，決められた目的地へと走破するための車線追従や先行車追従機能等に代表される「基本走行機能」と，顕在化した事故リスクに対する自動ブレーキ等による「衝突回避機能」に加え，道路文脈に基づく事故に対する潜在的なリスクを低減するための「危険予測機能」の 3 機能を実現する自律運転知能とそれに基づく車両制御システムが必要不可欠であると考えられる。

1.3.2 研究目的

前節では，近年の我が国における交通事故発生状況から，歩行者や高齢者など，交通弱者に対する事故被害が深刻であることについて述べ，それらの事故発生状況から道路文脈に基づく潜在的なリスクを低減するための「危険予測機能」が必要不可欠であることを述べた。そこで，本研究では「基本走行機能」と「衝突回避機能」に加え「危険予測機能」を有する自律運転知能とそれに基づく車両制御システムの構築を目的とした。

本論文では自律運転知能とそれに基づく車両制御システムの構築の一環として，近年の事故発生状況から対歩行者事故場面に注目し，顕在化したリスクと道路環境が有する潜在的なリスクの定量化手法とそれに基づく衝突回避のための車両制御システムを提案する。提案したシステムは，車載の外界センサを有する超小型電気自動車に基づいた自律走行車両を用いた実装試験ならびに，ヒヤリハットデータベース解析に基づくヒヤリハット場面を再現した検証場面における走行シミュレーションにより，システムの有効性について検証した。

1.4 本論文の構成

本論文では，1.1 節で自動車の抱える交通事故の問題に対して，社会的視点から研究背景，1.2 節で自動車の安全技術に関する従来の研究について述べた。そして，1.3 節ではそれらの背景から本研究の問題提起と目的について述べた。以下に第 2 章以降

の構成について述べる。

第 2 章では、本研究で提案する自律型衝突回避システムについて述べる。2.2 節では、自律型衝突回避システムの概要について述べ、2.3 節で使用する実験車両である超小型電気自動車「RAVEL-II」と、車両に搭載する制御系及び計測装置について述べる。2.4 節では LIDAR を用いた歩行者検出システムについて述べ、2.5 節では、検出した歩行者に対する衝突リスク表手法について述べる。そして、2.6 節で超小型電気自動車の搭載されたインホイールモータの制駆動トルク制御系について述べる。

第 3 章では、対歩行者場面における衝突回避のためのリスク評価手法の提案と、事故発生状況から交差点右折場面に注目し、衝突回避のための制駆動力制御系を設計した。そして、MATLAB/Simulink を用いたコンピュータシミュレーションと実験車両を用いた実験より、システムの検証結果について述べる。3.2 節では対歩行者場面におけるリスクポテンシャルの設計について述べる。3.3 節では、交差点右折場面での実際のドライバの運転行動特性を抽出、それに基づくリスクポテンシャルの適用方法について述べ、3.4 節で MATLAB/Simulink を用いたコンピュータシミュレーション、3.5 節で実験車両を用いた実験よりシステムの検証結果について述べる。

第 4 章では、常時記録型ドライブレコーダを用いた、運転指導員の市街地走行データ収集と、収集したデータの解析結果について示す。まず、熟練ドライバの市街地走行データの収集について述べ、本研究の対象とする無信号交差点について示す。最後に無信号交差点における熟練ドライバの運転行動の解析結果について述べる。

第 5 章では、潜在リスクポテンシャル推定に基づく運転知能モデルの構築として、遮蔽物などで歩行者が直接センシングできない場面における潜在リスク評価手法を提案し、それに基づく衝突回避アルゴリズムの有効性の検証について述べる。5.2 節ではポテンシャルフィールドの理論に基づく潜在リスク評価手法を提案した。そして、5.3 節で、提案したリスク評価手法の検証のために、ヒヤリハットデータベースの分析から検証場面の抽出した結果について述べ、5.4 節で抽出した場面での有効性を検証した結果に述べる。

第 6 章で、本研究の結論を述べる。

第 2 章

周囲環境情報に基づく自律型衝突回避システムの理論設計

2.1 はじめに

本章では、リスクポテンシャル推定に基づく自律型衝突回避システムについて述べる。2.2 節では、提案するシステムの概要について述べ、2.3 節で使用する実験車両である超小型電気自動車「RAVEL-II」と、車両に搭載する制御系及び計測装置について述べる。2.4 節では LIDAR を用いた歩行者検出システムについて述べ、2.5 節では、検出した歩行者に対する衝突リスク表手法について述べる。そして、2.6 節で超小型電気自動車の搭載されたインホイールモータの制駆動トルク制御系について述べる。

2.2 自律型衝突回避システムの概要

本節では本の論文で提案するリスクポテンシャル推定に基づく自律型衝突回避システムの概要について述べる。本論文で提案するシステムの概要を図 2.2.1 に示す。

本システムはでは車両に搭載された LIDAR の情報と事前に入力した走行計画に基づいて自律的に走行を行うシステムである。LIDAR より得られた距離情報は障害物の認識処理により、歩行者やそれ以外の障害物として認識され、その位置情報を出力する。そして、走行計画と障害物の位置情報を利用し、ポテンシャルフィールド理論を拡張したリスク評価手法により、車両前後方向の運動を決定する。このとき、周辺環境のリスク評価は、自車の走行計画、顕在化した歩行者に対する衝突リスク、道路文脈の理解による潜在リスクのそれぞれを各ポテンシャルで表現し、それらの評価結果と道路環境の制約条件に基づき、車両の前後方向の運動を決定する。そして算出された目標加速度は、実験車である超小型電気自動車のインホイールモータの制駆動トルクへと変換され、車両へと出力されることで自車の運動をリスク評価結果に基づいて制御を行う。

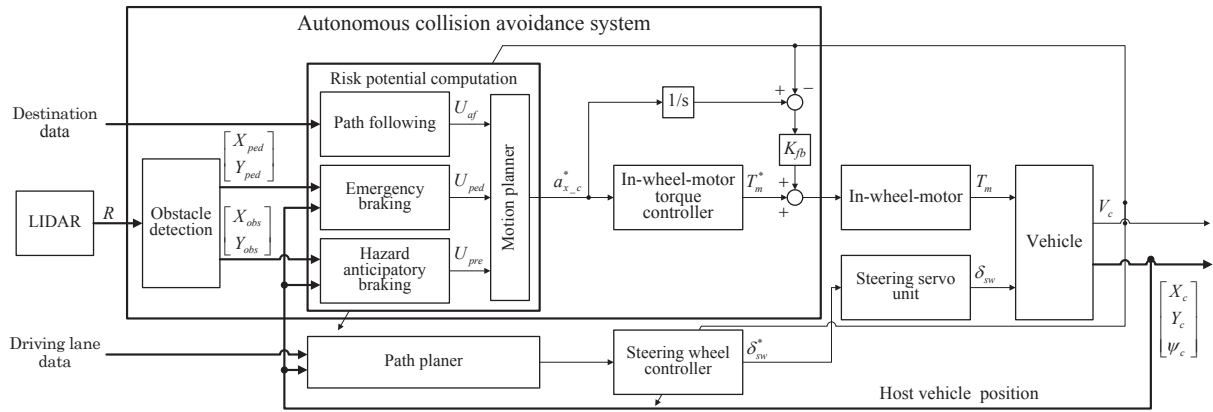


Fig. 2.2.1 Generic overview of autonomous collision avoidance system
based on risk potential estimation

2.3 自律走行車両プラットフォームの概要

RAVEL-II は図 2.3.1 に示すトヨタ車体制の超小型電気自動車 COMS をベースに製作した実験車両である．2.3.1 節では実験車両のベースである COMS の概要について述べ，2.3.2 節で改造を加えた RAVEL-II について述べる．



Fig. 2.3.1 Micro Electric Vehicle (COMS)

2.3.1 超小型電気自動車 COMS の概要

図 2.3.2 に COMS の駆動システムの概略を示し，表 2.3.1 に主要構成要素及び機能を示す。

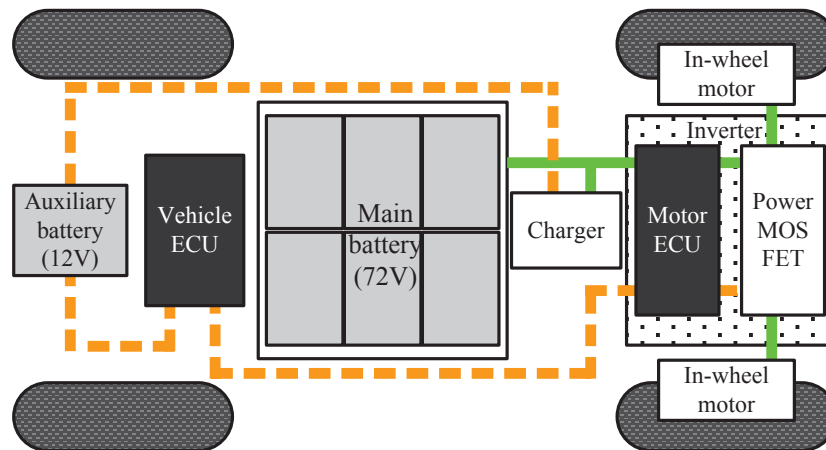


Fig. 2.3.2 Schematic diagram of vehicle system (COMS)

Table 2.3.1 Main components and features (COMS)

Main components	Features
車両制御ECU	①各センサからの情報をもとにモータ制御ECUに対して出力すべきトルク値を指示 ②モータ制御ECUからの情報により速度表示およびモータ過熱等の異常の警告
アクセルセンサ	アクセルペダルの踏み込み量を電圧に変換. 安全のため2系統.
シフトセンサ	前進，後進およびニュートラルの切り替えをおこなう
ブレーキセンサ	回生制動力を発生させるための信号を出力
モータ制御ECU	①車両制御ECUからのトルク指示値から，必要な電力を演算し，モータに供給 ①モータ回転数等の情報の発信 ②異常時の緊急処理と情報発信

まず、図 2.3.3 に示す電気自動車の最大の特徴であるインホイールモータについて説明する。インホイールモータとはホイール内にモータを直接組み込んだものである。表 2.3.2 にインホイールモータの仕様を示す。実験車両には後輪に左右独立のインホイールモータが存在し、これにより左右が機械的に独立となり、ディファレンシャルギヤによって機械的に力を左右に分配する従来の内燃機関自動車では実現が困難な、片側に外乱が入った場合に、もう片側への外乱の伝播を防ぐ事が可能である。また、動力を伝達するためのシャフト及びディファレンシャルギヤが必要ないため、軽量化に効果がある。更に、ホイール内に駆動源であるモータが配置されることで、スペースを有効に活用することが可能である。使用されているモータは DC ブラシレスモータであるため、ブラシと回転子の接触音がなく、従来の DC モータに比べ静寂性が向上している。さらに減速時に発生する運動エネルギーを電気に変えてバッテリーに回生する機能がついている。

ほかにも、車両の外装は樹脂で構成され、フレームは全てアルミ素材を使用しており、非常に軽量となっているほか、バッテリーを床下に配置することで、低重心化と前後バランスが良くなり、航続距離の向上とともに旋回安定性を高めるためにも有利である。また、サスペンションには、ジオメトリ変化が少なく、タイヤの接地性が高いダブルウィッシュボーン方式を前後に採用している。

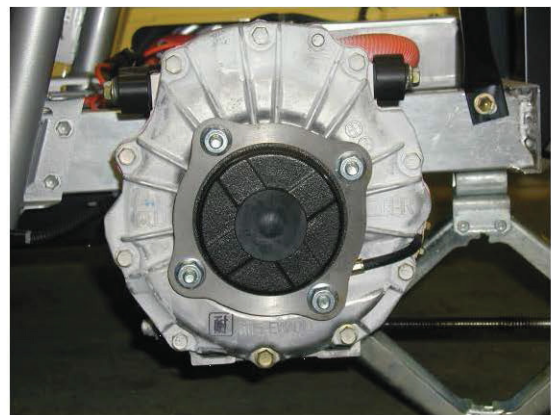


Fig. 2.3.3 In-wheel motor

Table 2.3.2 Specification of In-wheel motor

モータ形式	—
減速比	6.267
定格出力 [kW]	0.29
最大出力 [kW]	2
最大回転速度 [r/min]	700
定格トルク [Nm]	—
最大トルク [Nm]	100
慣性モーメント [kgm ²]	0.028

2.3.2 RAVEL-II の概要

図 2.3.4 に本研究で扱う実験車両 RAVEL-II の概要を示し、表 2.3.3 に車両パラメータを示す。車両前方には SICK 製のレーザレーダが取り付けられ、周囲の環境情報の取得を可能にしている。また、自車の車両挙動計測のため、両後輪にロータリエンコーダを搭載し、車両中央にはコンバインセンサを搭載することで、車輪速度及び前後・横加速度、ヨーレイトの計測を可能にしている。さらに、操舵角計測及び制御のため、ハンドルにはサーボユニットが取り付けられ、また、アクセルペダル変位量の計測及び制御のため、アクセルセンサと車両 ECU 間の配線を変更している。そして、以上の各種センサより得られるデータの取得と制御のため、車両後部の荷台に dSPACE 社製の Digital Signal Processor(以下 DSP)を搭載した計算機(PC)を積み込み、各種センサと接続している。

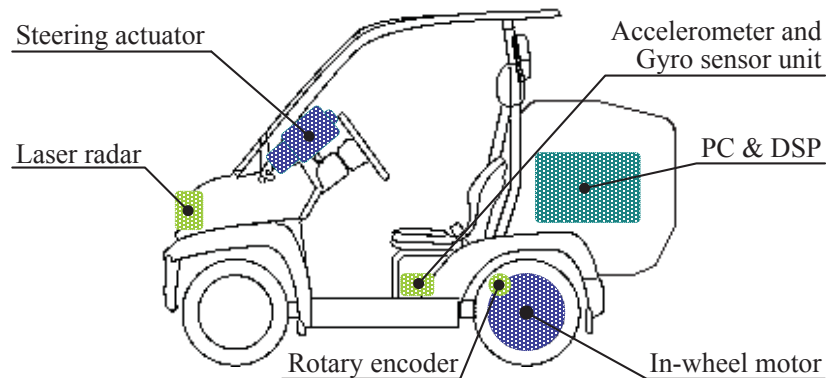

Fig. 2.3.4 Device layout of experimental vehicle RAVEL-II

Table 2.3.3 Specification of experimental vehicle

DEFINITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
車両総重量	m	400	kg
全長	l_c	2.250	m
全幅	d_c	0.995	m
全高	h_c	1.6	m
ホイールベース	l	1.28	m
前輪車軸－車両重心間距離	l_f	0.75	m
後輪車軸－車両重心間距離	l_r	0.53	m
前輪トレッド	d_f	0.840	m
後輪トレッド	d_r	0.815	m
ヨー慣性モーメント	I_z	159	kgm ²
前輪コーナリングパワー(一輪分)	C_f	10	kN/rad
後輪コーナリングパワー(一輪分)	C_r	16	kN/rad

2.3.3 データ取得と制御

dSPACE 社製の Digital Signal Processor である DS1104 R&D コントローラボードと CP1104 コントローラパネルを用いて，計算機での各種データの取得と車両運動の制御が可能となる．図 2.3.5 と図 2.3.6 にコントローラボードとコントローラパネルの外観を示す．このボードは一枚のボードによる完結型のリアルタイムコントローラシステムであり，A/D・D/A・Digital I/O の機能が全て組み込まれている．各センサからの電圧情報やデジタル情報を，コントローラパネルを介して計算機に取り込むことと，目標制御量を D/A を介して各アクチュエータに出力することが可能である．データの観察と操作は専用ソフトウェア Control Desk を用いて，dSPACE のリアルタイムプロセッサにアクセスし，必要な変数の観測及び保存，オンラインでのパラメータの変更などが可能である．



Fig. 2.3.5 DS1104R&D controller board



Fig. 2.3.6 CP1104 controller panel

2.3.4 操舵角制御系

図 2.3.7 にステアリングサーボユニットの外観と操舵角制御系の概略図を示す．図 2.3.7 に示すように，ステアリングサーボユニットは，サーボモータとサーボアンプの二つで構成され，サーボモータの駆動力をベルトを介してステアリングに伝えることで操舵角の制御を可能としている．また，サーボアンプは DSP と接続されており，DSP から出力される正転パルス C_A もしくは逆転パルス C_B によりサーボモータの制御を可能とするほか，サーボモータより出力される回転角をサーボアンプにて差動パルス F_A ， F_B に変換し，DSP に出力することで，操舵角の計測も可能にしている．

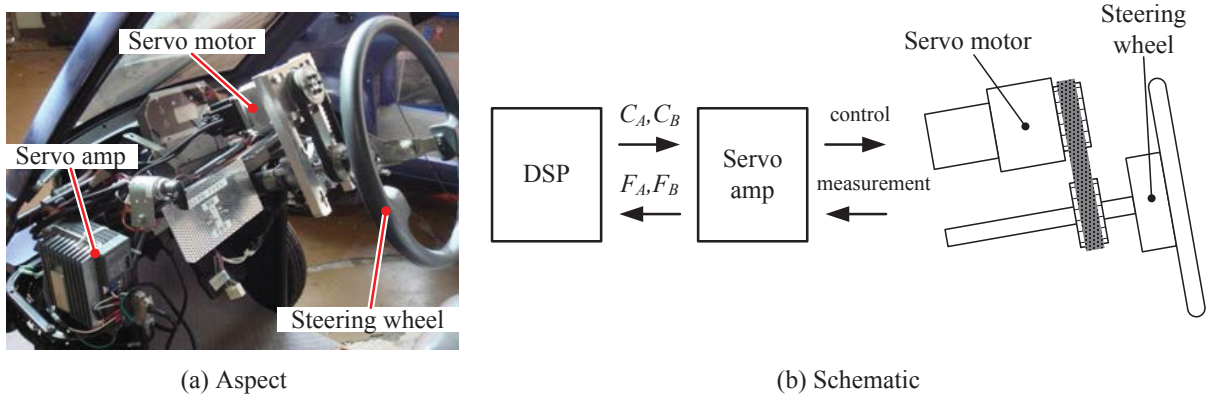


Fig. 2.3.7 Schematic of steering servo unit

また，今回使用したサーボモータには 16 ビットシリアルエンコーダとギヤが内蔵されており，最大 65536/回転の分解能を持ちギヤ比は 1/9 であるため，1 パルスあたり 0.5 度回転するよう，式(2.3.1)の α と β の値をアンプに設定した． ($\alpha = 8192$, $\beta = 10$)

$$\frac{360}{65536} \times \frac{1}{9} \times \frac{\alpha}{\beta} = 0.5 \quad [\text{deg}] \quad (2.3.1)$$

2.3.5 制駆動トルク制御系

本節ではインホイールモータの制駆動トルク制御系について述べる．図 2.3.8 に車両 ECU の外観を示し，図 2.3.9 にアクセル—ECU 間の配線の変更について示す．本車両では，制駆動トルクの制御を行うため，電圧—トルク特性の仕様が変更された車両 ECU を用い，本来アクセルペダルから車両 ECU へ出力されるアナログ信号を PC より出力することで制駆動トルクの制御を実現している．



Fig. 2.3.8 Vehicle ECU

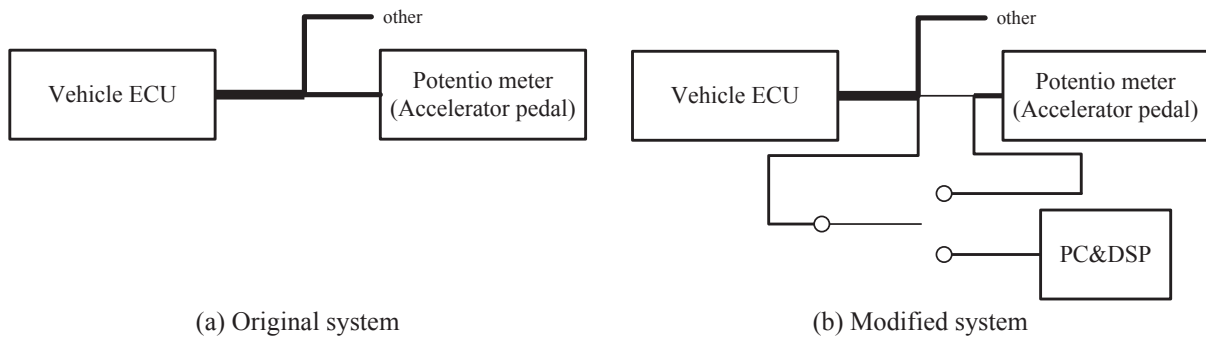


Fig. 2.3.9 Modification of wiring for vehicle ECU

2.3.6 計測機器

本研究に使用する実験車両において, 計測が可能な情報と計測機器の一覧を表 2.3.4 に示す. 以下にそれぞれの詳細について述べる.

Table 2.3.4 Relationship between state variables and sensors

State variable	Sensor
横加速度	コンバインセンサ
前後加速度	
ヨーレート	
操舵角	サーボモータ
車輪速度	ロータリエンコーダとデジタル回転系
周辺車両・移動物体の位置	レーザーレーダ

<コンバインセンサ>

コンバインセンサ 曙ブレーキ製

- ・ 前後加速度センサ (SCA320-N1000040)
- ・ 左右加速度センサ (SCA610-D24T41)
- ・ ヨーレートセンサ (STD-8:ASIC2)

図 2.3.10 にコンバインセンサの外観を示す. また, 表 2.3.5 に共通の仕様を示し, 表 2.3.6, 表 2.3.7 に前後・左右加速度センサとヨーレートセンサの使用を示す. なお, 表中に示す V_{cc} は供給電圧を表す. コンバインセンサとは加速度センサとヨーレートセンサを 1 パッケージ化した複合センサであり, 主に車両姿勢制御システム(ESC)にて使用されている. これら 2 つのセンサは温湿度, ノイズ, 衝撃に対して最適に設計された電子基板, センサーを収めるハウジングに組み付けられ, 厳しい車載環境にお

いても誤差が少なく高精度に車両の挙動を検知することが出来る．本研究では，車両挙動の計測に用いる．



Fig.2.3.10 Combined sensor (Gyro sensor and accelerometer)

Table 2.3.5 Common specification of acceleration and yaw rate sensor

Specification	Value	Unit
供給電圧 (V_{cc})	5.00 ± 0.25	V
最大電圧	8.2	V
使用温度範囲	$-30 \sim 80$	$^{\circ}\text{C}$
重量	150	g

Table 2.3.6 Specification of acceleration sensor

Specification	Value	Unit
加速度検出範囲	± 14.7	m/s^2
オフセット出力	$0.5V_{cc}$	V
感度	$0.2V_{cc}$	$\text{V}/(9.8\text{m/s}^2)$

Table 2.3.7 Specification of yaw rate sensor

Specification	Value	Unit
加速度検出範囲	± 100	deg/s
オフセット出力	$0.5V_{cc}$	V
感度	$0.04V_{cc}$	$\text{V}/(\text{deg/s})$

<AC サーボモータ>

ギヤ付きモータ DX220A-9 オリエンタルモータ製

図 2.3.11 に AC サーボモータの外観を示し，表 2.3.8 に主な仕様を示す．本研究で
使用したサーボモータは，従来のサーボモータに比べ低速域でのフラッタ特性が大幅
に改善され，低速での滑らかな運転が必要な用途に最適である．本研究では操舵角の
計測及び制御に用いる．

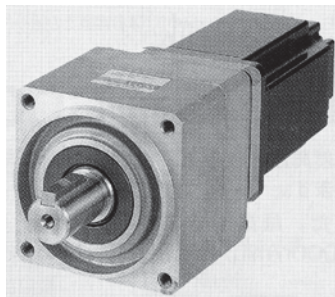


Fig. 2.3.11 AC servo motor

Table 2.3.8 Specification of AC servo motor

電源電圧	AC100-115 V -15% ~ +10%
定格出力	200 W
使用温度範囲	-10℃ ~ +40℃
定格回転速度	333.3 rpm
最大回転速度	555.5 rpm
定格トルク	4.9 Nm
最大トルク	14.7 Nm
ロータ慣性モーメント	$0.135 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$
許容慣性モーメント	$219 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$
定格電流	2.3 A
最大電流	6.9 A
重量	3.3 kg

＜サーボアンプ＞

サーボアンプ DXDV020-A オリエンタルモータ製

図 2.3.12 にサーボアンプの外観を示し，表 2.3.9 に主な仕様を示す．本研究ではパルス列入力タイプのものを使用し，サーボモータと合わせて，操舵角の計測及び制御に用いる．

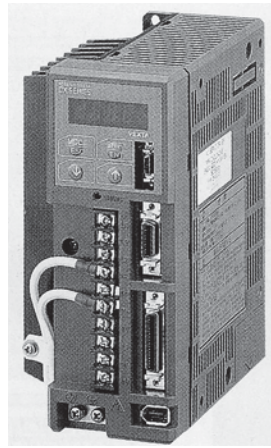


Fig. 2.3.12 Servo amplifier

Table 2.3.9 Specification of servo amplifier

上位インターフェイス	パルス列 / アナログ速度指令電圧
パルス列入力	最大入力周波数 500 kHz
パルス列形態	1, 指令パルス/指令符号 2, 正転/逆転パルス 3, 90 度位相差 2 信号
分周出力	90 度位相差 2 信号
分周出力パルス数	16 ~ 16384 パルス/rev
速度指令用電源	10±0.4V (最大出力電流 30mA)
速度指令入力	±10 V
トルク指令入力	±10 V
インターフェイス用電源	DC24 V / 0.3 A
コントロール用入力	DC24 V / 10 mA
使用温度範囲	-10℃ ~ +55℃

<ロータリエンコーダ>

光電式検出器 LG-916 小野測器製

図 2.3.13, 図 2.3.14 にロータリエンコーダと反射マークの外観を示す. また, 表 2.3.10 に主な仕様を示す. 検出器から赤外線を放ち, 回転軸に当たって戻ってきた反射光を検出する非接触方式回転検出器で, 回転軸に反射マークを貼って使用する. 本研究では, 車両速度を計測するために用いる.



Fig. 2.3.13 Rotary encoder



Fig. 2.3.14 Reflection mark

Table 2.3.10 Specification of rotary encoder

Specification	Value	Unit
印加電圧	12 ± 2	V
応答速度	0.6	m/s
使用温度範囲	-10~60	°C
検出距離	20	mm
外形	21(W)×24(H)×117(L)	mm

<デジタル回転計>

デジタル回転計 TM-3130 小野測器製

図 2.3.14 にデジタル回転計の外観を示し，表 2.3.11 に主な仕様を示す．マイコンによる単位換算機能により，回転数，車体速度，流量などの計測・監視に適している．また，光電式検出器より得られるパルスを基に電圧出力を行う，F/V コンバータである．本研究では，光電式検出器とともに用いることにより，車両速度を計測するために用いる．



Fig. 2.3.14 Digital tachometer

Table 2.3.11 Specification of digital tachometer

Specification	Value	Unit
電源電圧	AC100~240	V
出力方式	12bit D/A 変換方式	-
直線性	±0.3	%
出力電圧	Hi レベル : +4.5 以上 Lo レベル : +0.5 以下	V
使用温度範囲	0 ~ 50	℃
外形寸法	96 (W) × 48 (H) × 148 (D)	mm

<LIDAR>

レーザ測定システム LMS291-S05 SICK 製

図 2.3.15 に LIDAR の外観を示し，表 2.3.12 に主な仕様を示す．この LIDAR は，非接触性の測定システムであり，この LMS システムはレーザ光のパルス伝播時間の測定の原理で距離を測定する．パルスレーザビームが内部の回転ミラーで方向を変えることで，周囲を扇形にスキャンする．測定データは，外部評価機器用としてシリアルインターフェイス経由でリアルタイムに供給される．本研究では，歩行者や周辺の障害物の検出に用いる．



Fig. 2.3.15 Laser rangefinder

Table 2.3.12 Specification of laser rangefinder

Specification	Value	Unit
距離測定範囲	80	m
角度測定範囲	180	deg
角度分解能	0.25/0.5/1.0	deg
応答時間	53/26/13	ms
測定分解能	10	mm
システム誤差	±35(距離範囲1~20m)	mm
インターフェイス	RS232	-
電源電圧	24±15%	V
消費電力	20	W
使用周囲温度	-30~+50	℃
重量	4.5	kg

2.4 LIDAR を用いた障害物検出アルゴリズム

本節では，レーザレーダから物体までの距離情報 R より歩行者の位置情報 X_{ped}, Y_{ped} および歩行者の X 軸方向速度 V_{ped} を検出する手法について述べる．

本研究で使用するレーザレーダは，周辺エリアを水平な扇状に 180 度スキャンし，最長 80m先まで計測することができる．本システムでは，2 度刻みの 180 度分のレーザレーダデータ R を用いる．以下に，歩行者位置情報 X_{ped}, Y_{ped} および歩行者の X 軸方向速度 V_{ped} を検出する過程を説明するにあたり，図 2.4.1 に示す場面で実際に取得した 1 度刻みの 90 度分の距離情報 R を基に情報処理手順を述べていく．また，図 2.4.2 に本手法のフローチャートを示す．

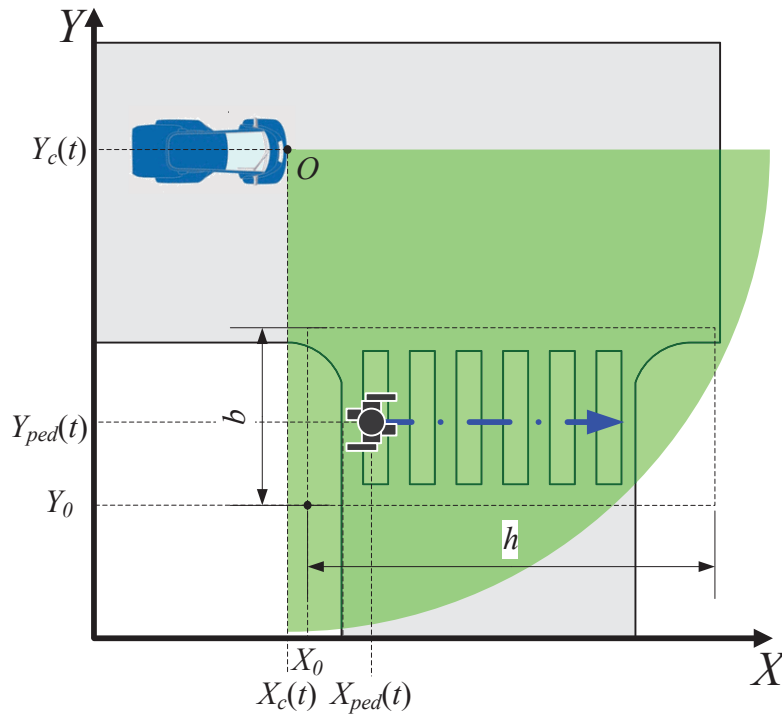


Fig. 2.4.1 Pedestrian detection in intersection

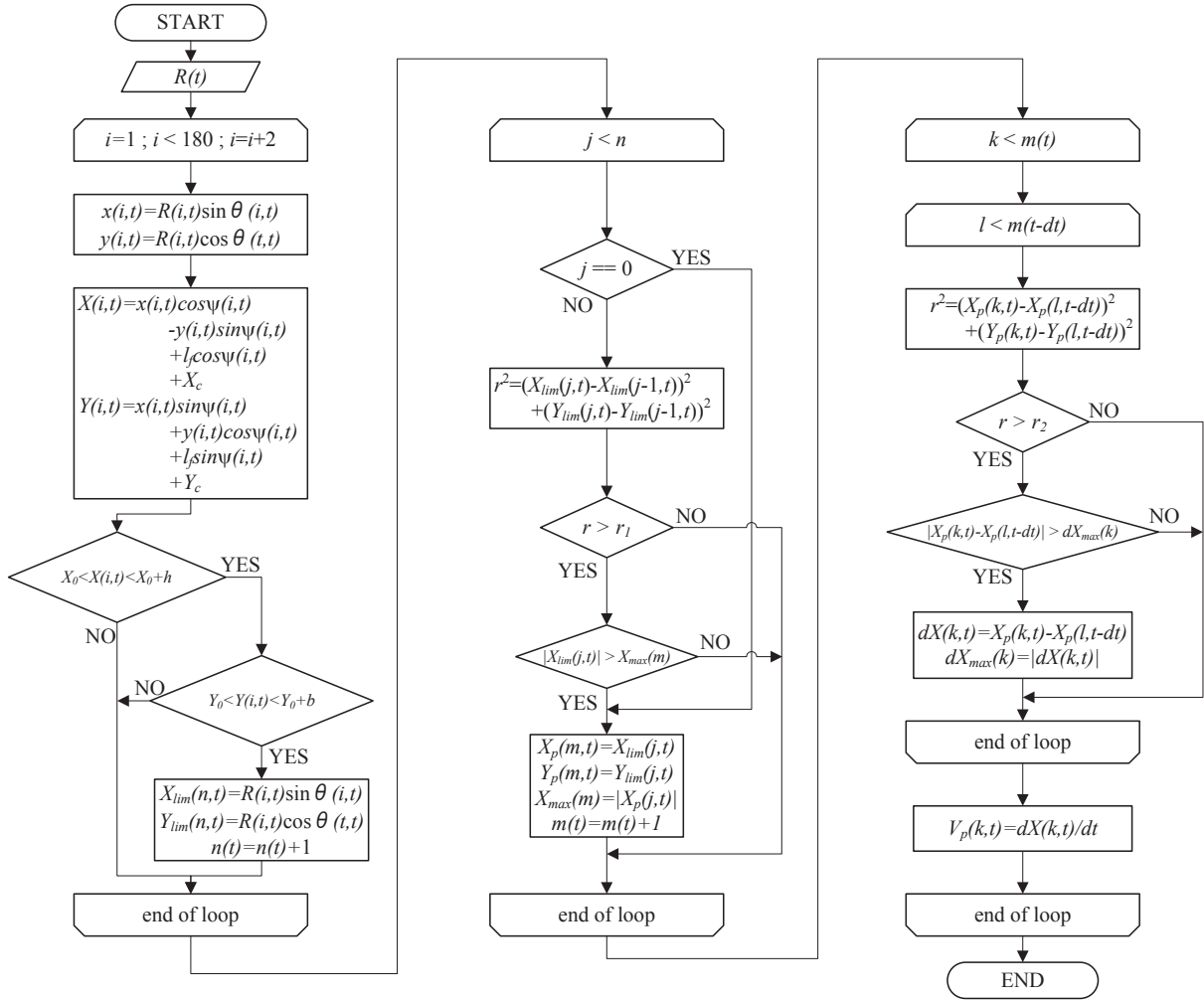


Fig. 2.4.2 Flowchart of pedestrian detection process right turn maneuver

2.4.1 注目領域内の移動物体の抽出

本研究では図 2.4.3 に示すよう，検出領域端座標 X_0, Y_0 から歩道幅 b ，歩道及び周辺領域長 h 内のデータが必要となる．そこでレーザレーダより取得できる距離情報 R を座標変換し，さらに検出領域内のデータのみを処理することで計算負荷を軽減し，処理時間の短縮を図った．なお，検出領域を限定する際に必要となる交差点の道路情報は，地図データ等のデータベースにあらかじめ記録されているものと仮定する．

式 2.4.1 に距離情報 R と角度 θ からの歩行者の移動座標上の点 x_p, y_p の算出式を示し、式 2.4.2 に静止座標への変換式を示す。また、図 2.4.3 に実際に車両が停止した状態で取得した距離情報 R の処理結果を示し、表 2.4.1 に処理条件を示す。

$$\begin{aligned} x_p &= R \sin \theta \\ y_p &= R \cos \theta \end{aligned} \quad (2.4.1)$$

$$\begin{aligned} X_p &= x_p \cos \psi - y_p \sin \psi + l_f \cos \psi + X_c \\ Y_p &= x_p \sin \psi + y_p \cos \psi + l_f \sin \psi + Y_c \end{aligned} \quad (2.4.2)$$

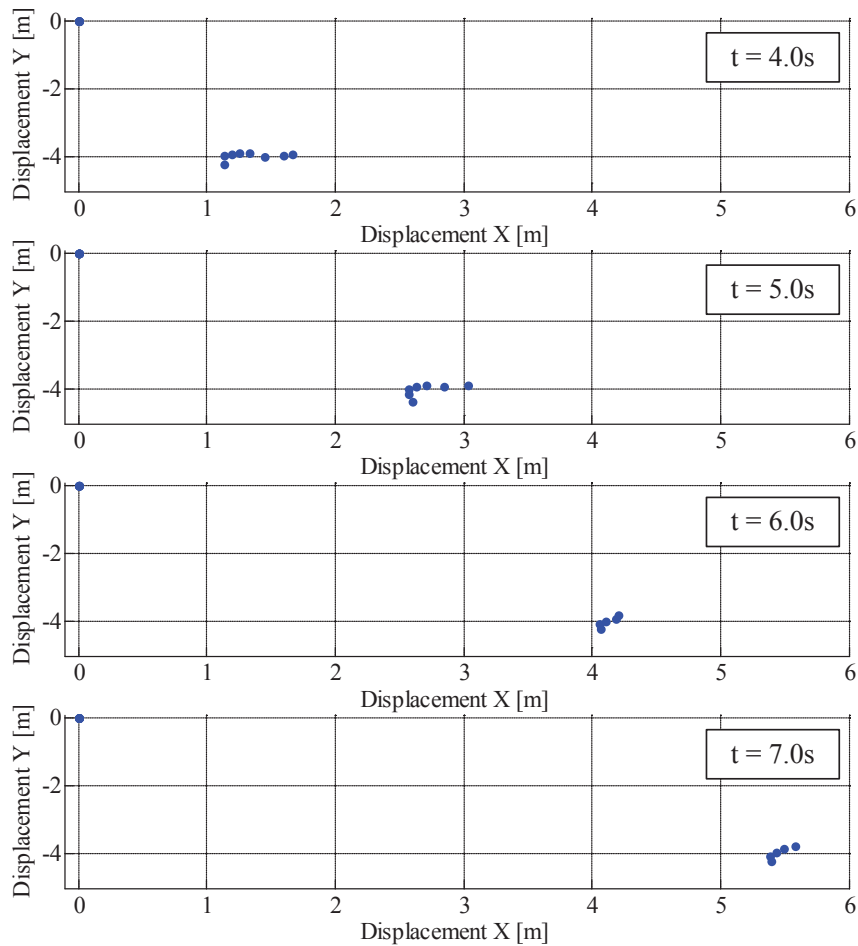


Fig. 2.4.3 Analysis result of moving objects in Region of Interest

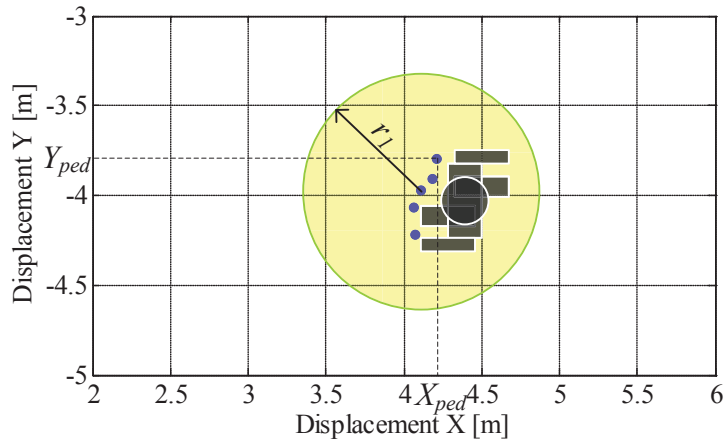
Table 2.4.1 Condition of pedestrian crosswalk

Symbol	Value	Unit
X_{c0}	0.0	m
Y_{c0}	-5.0	m
h	10.0	m
b	2	m

2.4.2 物体識別手法

次に、有効データの抽出によって限定された座標点より、ある一つの物体を構成する複数の座標点を一つにまとめ、その代表値を決定する過程について述べる。

図 2.4.4 に示すよう、ある座標点の半径 r_1 以内に他の座標点が存在した場合、それらの座標点は同一物体とみなす。なお、このように複数の座標点で構成される物体を一点で表す場合、その物体位置情報はX軸方向に最も大きな値をその集合体の位置情報 X_{ped}, Y_{ped} とみなした。図 2.4.5 に複数の座標点で構成される物体の識別処理例を示す。また、 r_1 の値については、実験を重的に検討した結果、本論文では識別する物体の大きさに応じて r_1 を設定することが望ましいと考え、 $r_1=0.5\text{m}$ とする。


Fig. 2.4.4 Laser radar data association

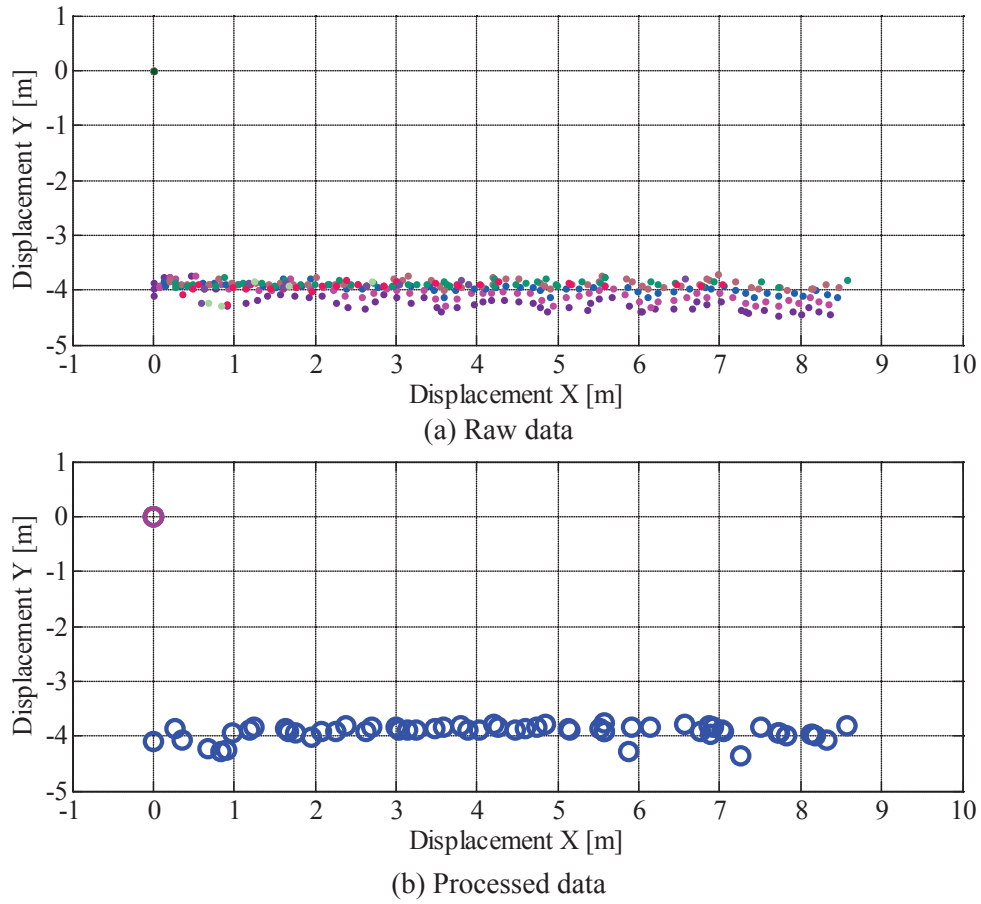


Fig. 2.4.5 Analysis result of discriminate aggregation

2.4.3 移動物体の速度算出手法

識別された物体位置情報 X_{ped}, Y_{ped} より, その物体の速度を算出する手法について述べる. 図 2.4.6 に現在の物体座標とレーザレーダの更新周期である dt 秒前の物体座標を示す. 図 2.4.6 に示すよう, 現時刻での物体座標の半径 r_2 以内に, dt 秒前の物体の座標が存在する場合, それら二つの物体を同一物体としてみなし, その X 座標の差 dX より移動物体の速度を算出する. 式 (2.4.3) に移動物体の速度算出式を示す.

$$V_{ped}(t) = dX(t)/dt = (X_{ped}(t) - X_{ped}(t - dt))/dt \quad (2.4.3)$$

ここで、 r_2 の値について述べる。 r_2 は、ある物体が、 dt の間に移動する距離を考慮して決定するものとするが、物体識別処理において、ある物体の座標点が常に同一箇所にならない場合が考えられるので、本論文では $r_1=r_2$ とした。

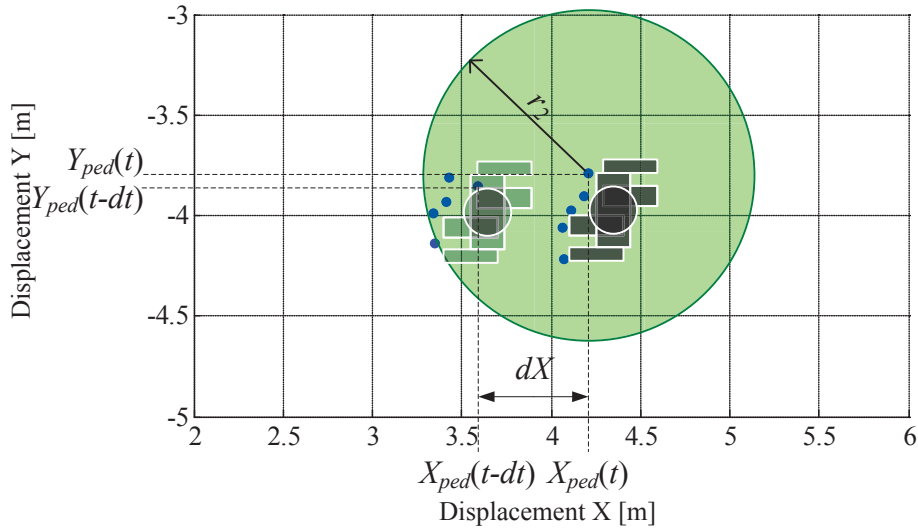


Fig. 2.4.6 Calculation of pedestrian velocity

2.5 ポテンシャルフィールド理論によるリスク評価アルゴリズム

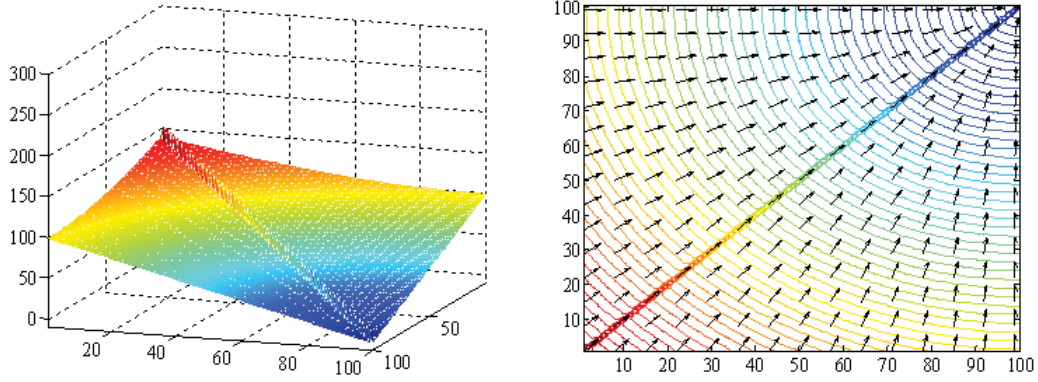
本節では、本システムで適用したポテンシャルフィールド理論と、リスク評価アルゴリズムの概念について述べる。

ポテンシャルフィールドとは、主にロボットの経路計画で用いられる手法の一つである。その概念は、あるフィールド内において、移動物体の経路計画に影響を及ぼす要素を中心に、引力もしくは斥力が発生していると仮定し、それらの力によって形成されるポテンシャル場の作用力より、移動物体の速度ベクトルの大きさと向きを決定することで経路計画を行う手法である⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾。図 2.5.1 に経路計画シミュレーションの一例を示す。本手法の概念は広くロボットの経路計画手法で用いられているほか⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾、車両制御の場面においても、先行車追従場面⁽⁴⁰⁾や、レーンキーピングシステムの研究でも用いられている⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾。

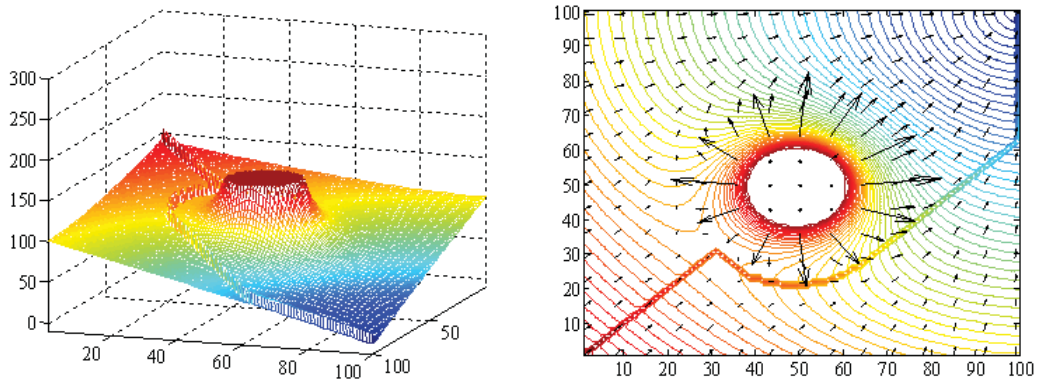
本論文では、式 (2.5.1) で示される自車に作用する力 \mathbf{F} の前後方向成分を F_{x_c} を算出することで、自車の衝突リスクを表現する．式 (2.5.2) に作用力の前後歩行成分を示す．式 (2.5.2) 中の各ポテンシャルエネルギーの設計については、次章以降で説明する．

$$\mathbf{F} = -\nabla U(X, Y) = -\begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial X} \\ \frac{\partial U}{\partial Y} \end{bmatrix} = m_c \begin{bmatrix} a_{x_c}^* \\ a_{y_c}^* \end{bmatrix} \quad (2.5.1)$$

$$F_{x_c} = \frac{\partial U}{\partial X} = \sum_i \frac{\partial U_i}{\partial X} = \frac{\partial U_{af}}{\partial X} + \frac{\partial U_{rf}}{\partial X} = -m_c a_{x_c}^* \quad (2.5.2)$$



(a) Without obstacle



(b) Obstacle avoidance

Fig. 2.5.1 One example of simulation results using potential field concept

2.6 インホイールモータの制駆動力制御系の設計

本項では，車両のタイヤ周りの運動モデルについて述べる．本システムは入力された目標加速度 $a_{x_c}^*$ をインホイールモータの制御指令値 T_m^* へと変換する必要がある．そこで，図 2.6.1 に示す一輪モデルより，制御指令値へと変換する．式 (2.6.1) に車輪の運動方程式を示し，式 (2.6.2) に車輪の回転運動方程式を示す．なお，式中の m_c は車両重量， V_c は車体速度， F_x はタイヤ路面間の制駆動力， F_R は車両全体に働く走行抵抗， J は駆動系の慣性モーメント， ω は車輪の回転角速度， T は1輪あたりの駆動トルク， r_w はタイヤの有効半径を表す．

$$m_c a_{x_c} = 2F_x - F_R \quad (2.6.1)$$

$$J\dot{\omega} = T_m - F_x r_w \quad (2.6.2)$$

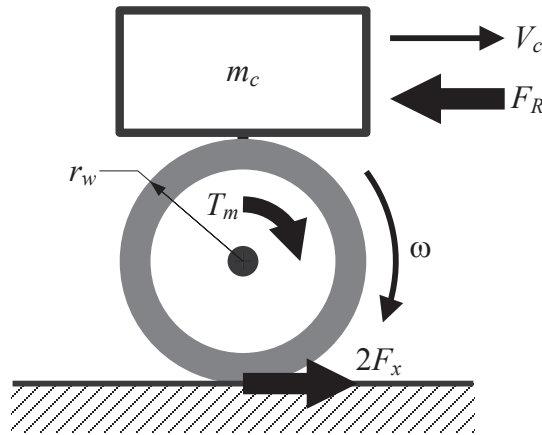


Fig. 2.6.1 1-wheel rotation model

また，車輪の回転速度と車体速度の間には式 (2.6.3) の関係が成り立つ．

$$V_c = r_w \omega \quad (2.6.3)$$

式 (2.6.1)，式 (2.6.2)，式 (2.6.3) より，目標前後加速度 $a_{x_c}^*$ は式 (2.6.4) より目標トルク T_m^* に変換される．

$$T_m^* = \frac{J + m_c r_w^2}{r_w} a_{x_c}^* + \frac{1}{2} F_R r_w \quad (2.6.4)$$

そして、算出された目標トルク T_m^* は車両ECUへの入力電圧との関係を示すトルクマップより車両ECUの入力電圧へと変換する．図 2.6.2 に示す実験的に求めたトルクマップを示す．最後に、算出された入力電圧を車両ECUへと出力することで車両の前後運動を制御する．また、インホイールモータの加減速時における加加速度の限界を調査したところ、加速、減速時の限界はそれぞれ、 3m/s^3 、 -3m/s^3 であった．そこで本システムでは、目標加速を加加速度でフィルタリング処理を行っている

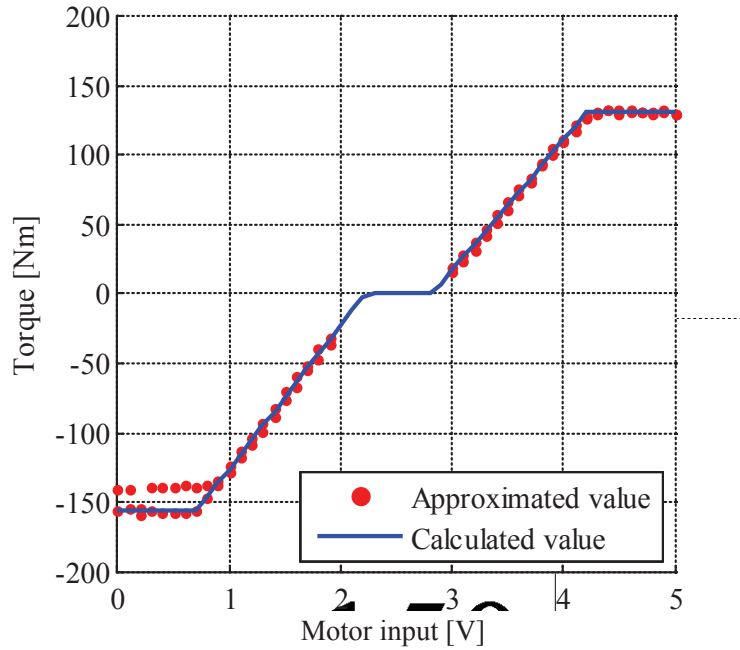


Fig. 2.6.2 Torque map

2.7 まとめ

本章では，本研究で提案する自律型衝突回避システムについて述べた．実験車両は超小型電気自動を用い，各種センサ・アクチュエータを搭載することで，周辺環境の認識と車両運動の制御を可能にした．そして，LIDAR の情報を用いた歩行者検出アルゴリズムを構築し，その情報を用いた，ポテンシャルフィールドに基づくリスク評価および速度計画手法を提案した．そして，実験車両に搭載されたインホイールモータの制駆動トルク制御系を設計した．

第3章

対歩行者場面における衝突回避システムの実験的検証

3.1 はじめに

本章では、対歩行者場面における衝突回避のためのリスク評価手法の提案と、事故発生状況から交差点右折場面に注目し、衝突回避のための制駆動力制御系を設計した。そして、MATLAB/Simulink を用いたコンピュータシミュレーションと実験車両を用いた実験より、システムの検証結果について述べる。

3.2 節では対歩行者場面におけるリスクポテンシャルの設計について述べる。3.3 節では、交差点右折場面での実際のドライバの運転行動特性を抽出、それに基づくリスクポテンシャルの適用方法について述べ、3.4 節で MATLAB/Simulink を用いたコンピュータシミュレーション、3.5 節で実験車両を用いた実験よりシステムの検証結果について述べる。

3.2 歩行者に対するリスクポテンシャルの理論的設計

本項では、ポテンシャルフィールドの概念に基づくリスク回避のための、速度計画手法について述べる。また、本節では、歩行者との衝突場面を簡略化するため、歩行者との直行場面とし、それぞれを質点モデルとして扱う。

図 3.2.1 に自転車に作用する力の概要を示す。

まず、目的地へと引き寄せる力（引力） F_{x_af} は、目的地 P を発生源とし、式（3.2.1）で表される。このとき、 m_c は車体質量であり、加速度 a_{x_af} は歩行者が存在しない場面における車両の前後加速度とする。

$$F_{x_af} = m_c a_{x_af} \quad (3.2.1)$$

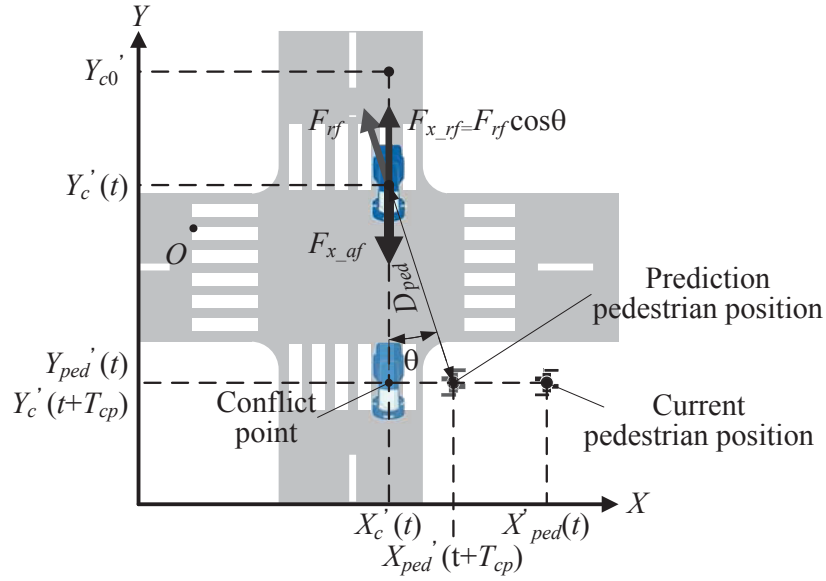


Fig. 3.2.1 Pictorial diagram of Repulsive force field

次に、障害物より発生するしりぞける力（斥力） F_{x_rf} は、発生源を自車の衝突点（conflict point）到達時間 T_{cp} における歩行者位置 $(X_{ped}'(t+T_{cp}), Y_{ped}'(t+T_{cp}))$ とする。

次に、斥力の前後方向成分 F_{x_rf} は式（3.2.2）で表される。以下に F_{x_rf} の決定方法について述べる。ただし、 θ は自車と歩行者の予測位置とを結ぶ直線と歩行者の移動軸のなす角度である。つまり、なす角 θ は、 $\theta=0^\circ$ のとき、自車の真正面に歩行者が存在することを示し、また、 $\theta=90^\circ$ のときは、自車の真横に存在することを示す。

$$F_{x_rf} = m_c a_{x_rf} = m_c a_{rf} \cos \theta \quad (3.2.2)$$

まず、力学的関係より、車両が歩行者と衝突しないための加速度 a_{stop} は、制動距離 D_{stop} と速度 V_c から式（3.2.3）より求めることができる。また、この時の自車の加速度 a_{stop} 、速度 V_c 、制動距離 D_{stop} の関係を図 3.2.2 に示す。図 3.2.2 より、自車の速度が高く、相対距離に近いほど大きな減速を要求されることが確認できる。

$$a_{stop} = -\frac{V_c^2}{2D_{stop}} \quad (3.2.3)$$

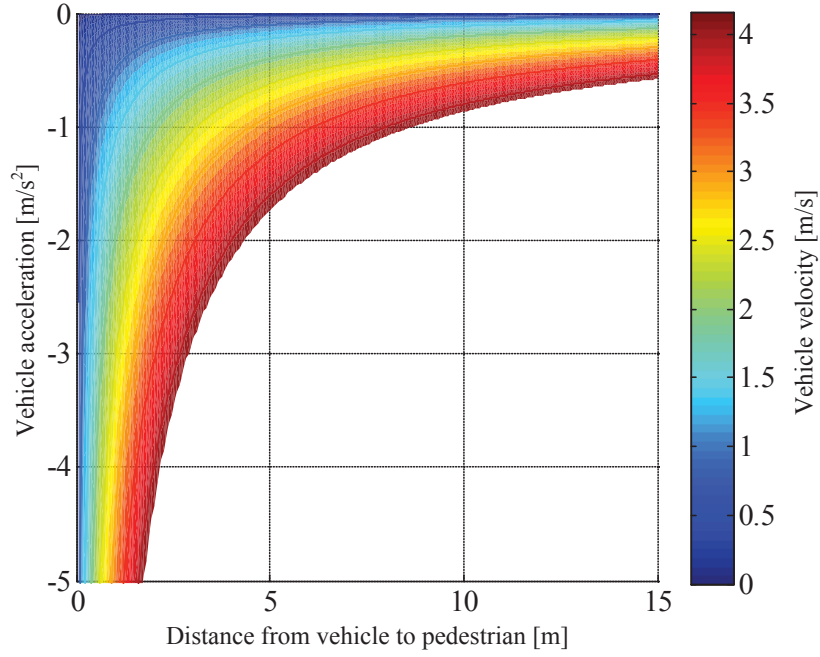


Fig. 3.2.2 Acceleration map of decelerating

ただし、車両が式 (3.2.3) で表される引力が作用している力学場に存在すると考えているため、歩行者との衝突回避のために要求される加速度 a_{rf} は式 (3.2.4) で表される。

$$a_{rf} = a_{stop} - a_{x_af} = -\frac{V_c^2}{2D_{ped}} - a_{x_af} \quad (3.2.4)$$

式 (3.2.4) を式 (3.2.2) に代入すると、斥力の前後方向成分 F_{x_rf} は式 (3.2.5) で表される。

$$F_{x_rf} = m_c \left(-\frac{V_c^2}{2D_{ped}} - a_{x_af} \right) \cos \theta \quad (3.2.5)$$

以上より、自車の目標加速度 $a_{x_c}^*$ は引力と斥力の総和によって発生する加速度であり、式 (3.2.6) のように表せる。ただし、ここでは、加速度の総和が閾値 a_{th} より大きい場合、斥力を無視することで極僅かな減速度での減速行動を防ぎ、後退走行を防ぐ

ため、自車が停止している際に、減速が要求される場面では目標加速度 $a_{x_c}^*$ を0とする。

$$a_{x_c}^* = \begin{cases} a_{x_{af}}(1 - \sin \theta) - \frac{V_c^2}{2D_{ped}} \cos \theta & \text{if } (a_{x_{af}} + a_{x_{rf}} \leq a_{th}) \text{ and } (V_c > 0) \\ 0 & \text{if } (a_{x_{af}} + a_{x_{rf}} \leq a_{th}) \text{ and } (V_c = 0) \\ a_{x_{af}} & \text{if } (a_{x_{af}} + a_{x_{rf}} > a_{th}) \text{ and } (V_c \geq 0) \end{cases} \quad (3.2.6)$$

3.3 交差点右折場面でのリスクポテンシャルの理論的設計

本節では、交差点右折場面にて横断歩道周辺に存在する歩行者に対する衝突リスク回避のための行動計画手法を提案する。図 3.3.1 に実際のドライバの交差点右折場面での衝突回避方法の概略図を示す。図 3.3.1 に示すように、実際のドライバが交差点を右折する際、車線の制約等により、歩行者の有無に関わらず、走行経路はほぼ一定である。そのため、歩行者との衝突のリスクがある場面では、(b)の経路変更ではなく、(a)の減速行動にて接触を回避するのが一般的かつ、車両挙動においても安定であると考えられる。そこで、本研究では、顕在化している歩行者との衝突リスクに対し、減速もしくは停止行動によるリスク回避手法を提案する。

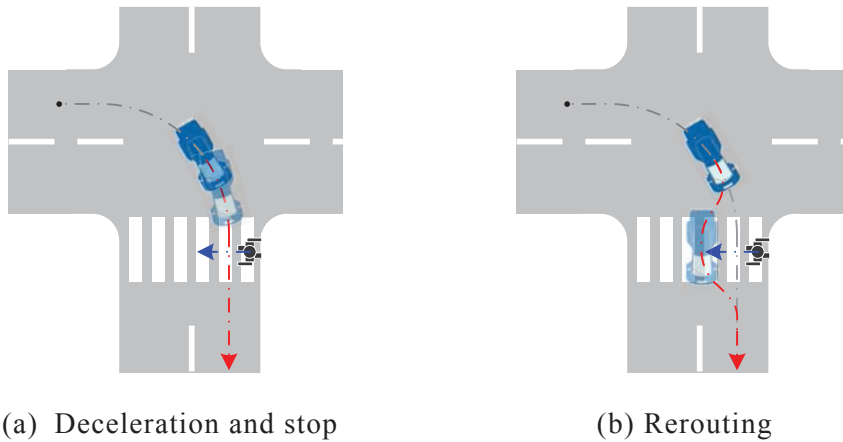


Fig. 3.3.1 Generic overview of risk avoidance in right turn maneuver

3.3.1 交差点右折時の規範運転操作特性の抽出

ドライバやその周辺の車両や歩行者にとってわずらわしさのないシステムを構築するためには、実際のドライバが運転している際の車両挙動を模擬する必要がある。そこで、本研究ではドライバの運転操作特性に沿った自動運転の実現を目的とし、各制御指令値を設定するにあたり、ドライバの規範運転操作特性の抽出を行った。そこで、本節では、ある交差点右折時におけるドライバの運転操作データを収集し、得られた運転操作及び車両挙動データより抽出した規範運転操作特性について述べる。

実験条件

図 3.3.2 に規範運転操作特性の抽出実験の概要を示す。実験車両には超小型電気自動車 RAVEL-II を用い、図 3.3.2 に示すように、右折待ち状態から旋回半径 R_t の円弧を描き、90 度旋回後直進するコースと設定し、手動操作で 10 回走行実験を行った。

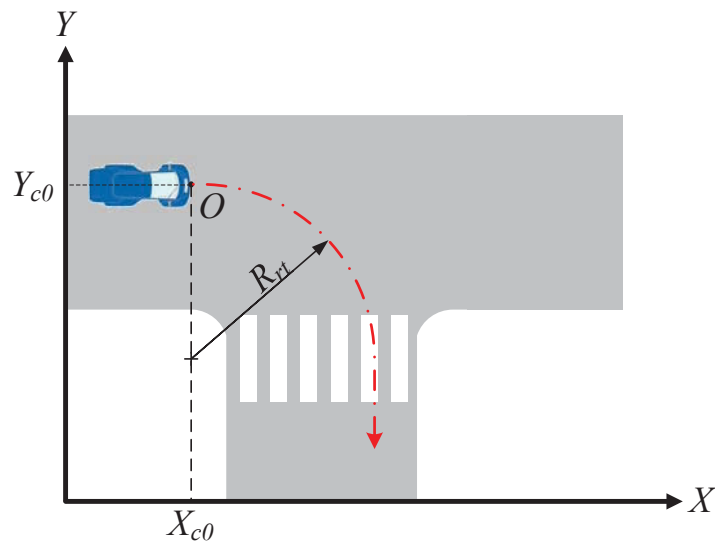


Fig. 3.3.2 Schematic of driving test in Right Turn Maneuver

Table 3.3.1 Parameter setting for right turn experiment

Symbol	Value	Unit
X_{c0}	0.0	m
Y_{c0}	0.0	m
R_t	5.0	m

規範運転操作特性の抽出

図 3.3.3 に規範運転操作特性の抽出実験より得られた車両速度及び操舵角データを示し、図 3.3.4 にアクセルペダル変位の立ち上がりを $t=1s$ として時間軸を補正したデータを示す。そして、図 3.3.5 に図 3.3.4 のデータを平均化したものを示す。

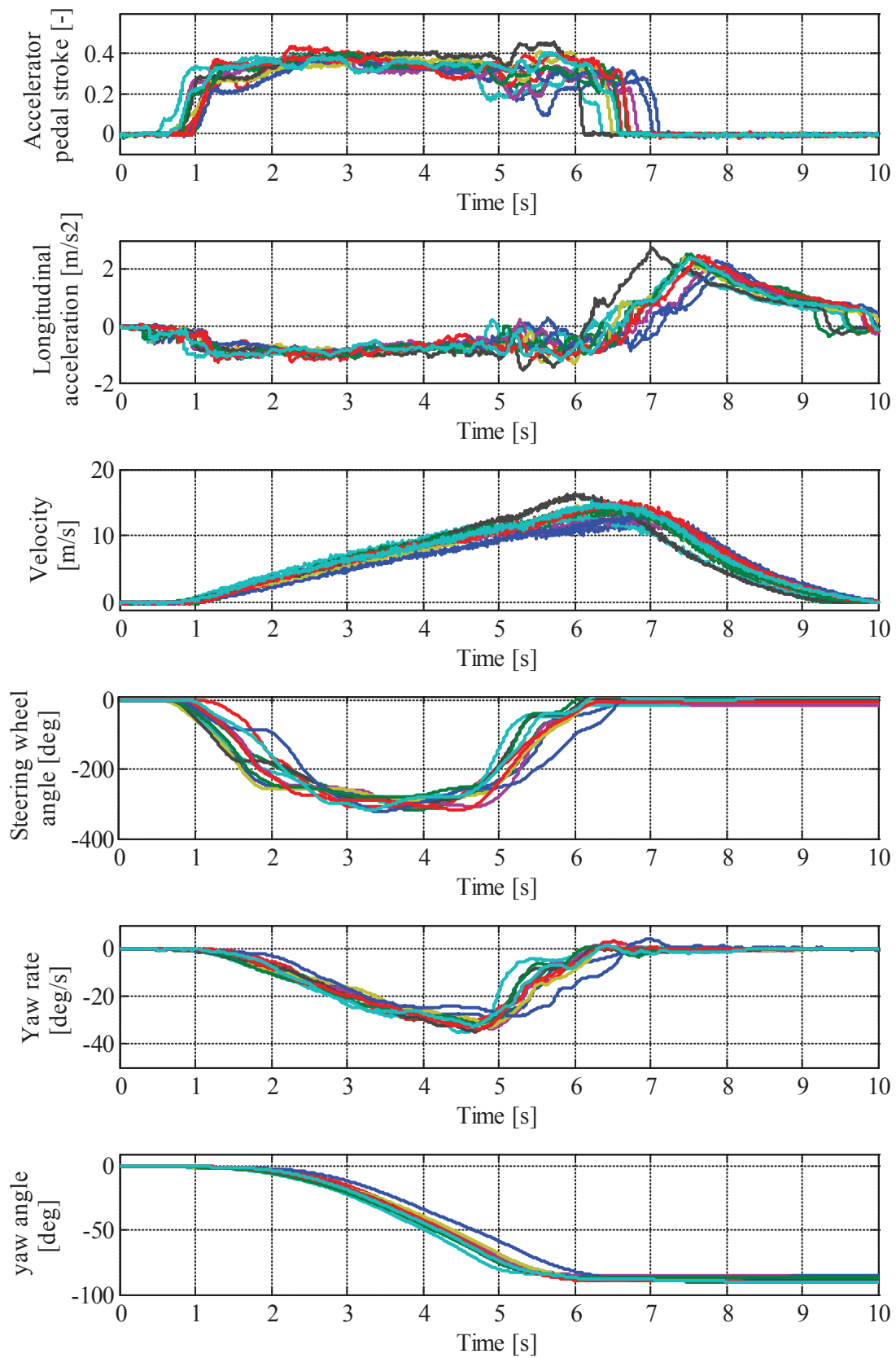


Fig. 3.3.3 Experimental result by driver in right turn maneuver

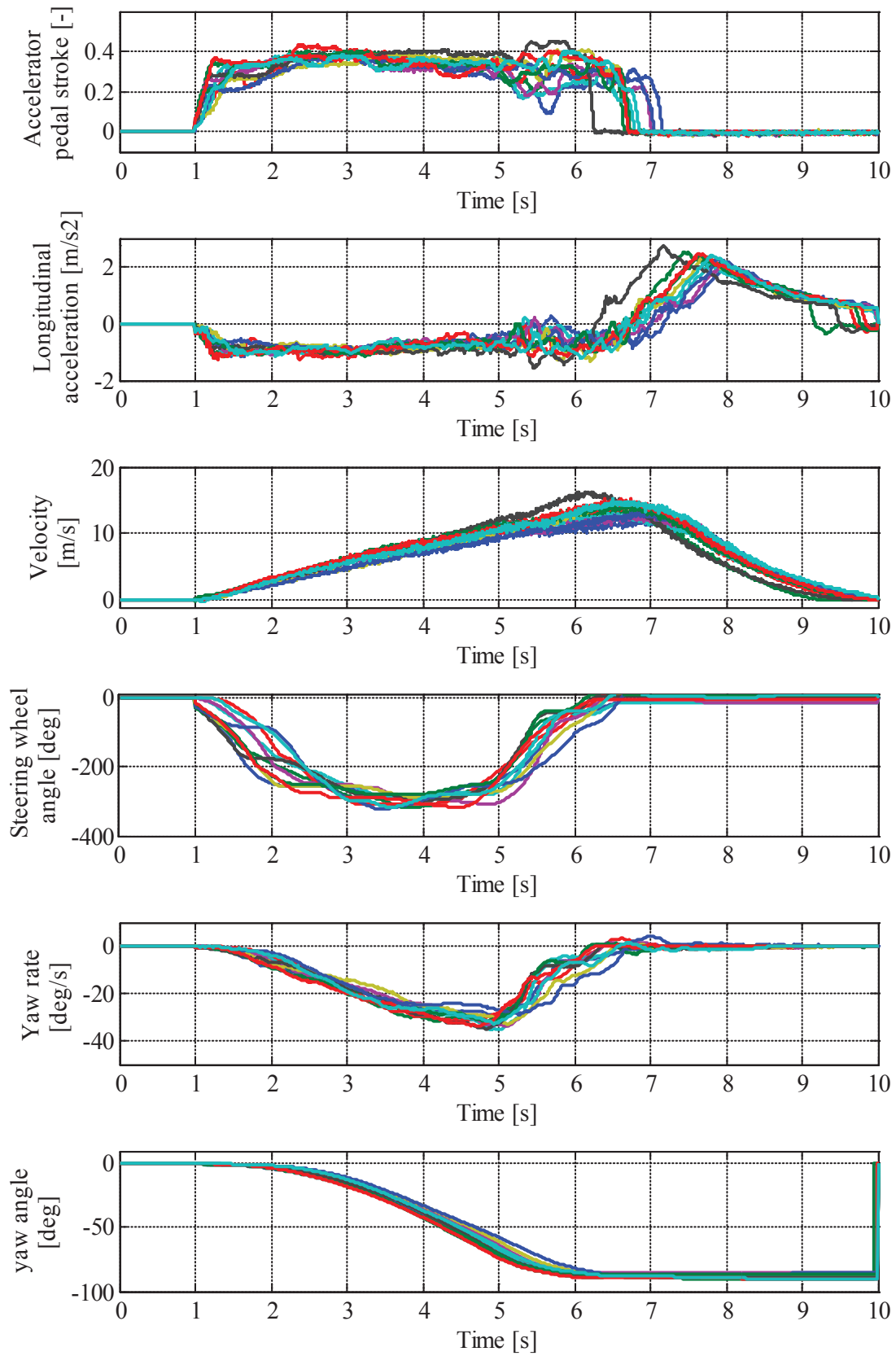


Fig. 3.3.4 Data of driving behavior with time-offset correction

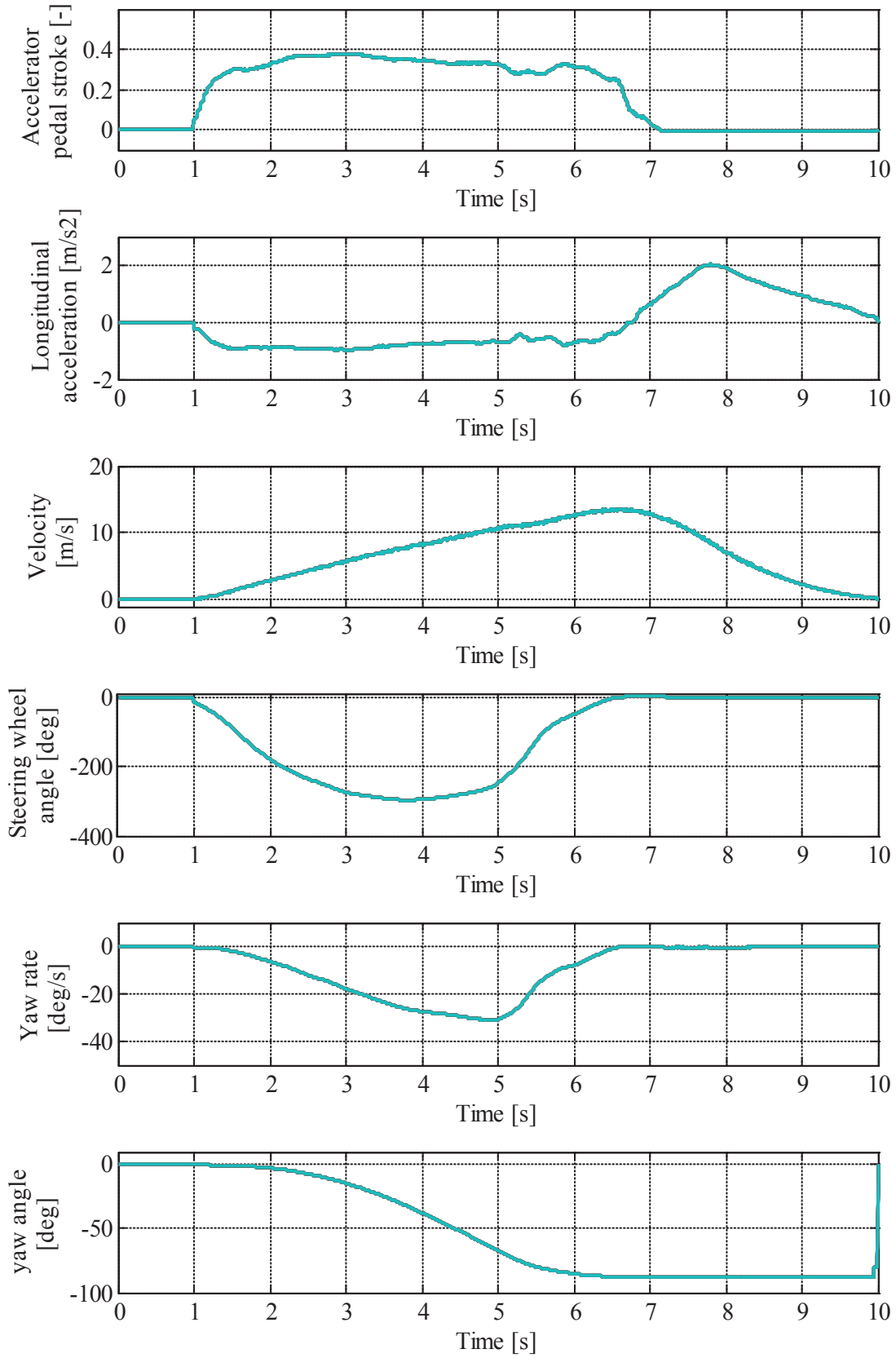


Fig. 3.3.5 Driver operation model in right turn maneuver

図 3.3.4 より，毎実験ごとの各種データに大きな差異が見られない．そこで本研究では図 3.3.5 に示す平均化した値より，ドライバの運転特性の抽出を行った．

まず，ドライバの縦方向の車両挙動に注目すると，図 3.2.7 より，単独走行場面における交差点右折自の車両の前後方向運動は，加速度 $\ddot{a}_{x_c}=0.7\text{m/s}^2$ で等加速度運動を行っていることが確認できた．

次に，ドライバの横方向の車両挙動について述べる．図 3.3.6 にヨー角 ψ とスタート地点からの走行距離の関係および近似曲線を示し，式 (3.3.1) に近似曲線の式を示す．横方向の車両挙動に関しては図 3.3.6 に示すヨー角 ψ と走行距離の関係を運転特性とし，式 (3.3.1) を目標ヨーレイトの決定に用いる．

$$\psi^* = \sum_{i=1}^4 K_i \left(\int_0^t V_c(t) dt \right)^i = K_4 \left(\int_0^t V_c(t) dt \right)^4 + K_3 \left(\int_0^t V_c(t) dt \right)^3 + K_2 \left(\int_0^t V_c(t) dt \right)^2 + K_1 \left(\int_0^t V_c(t) dt \right) \quad (3.3.1)$$

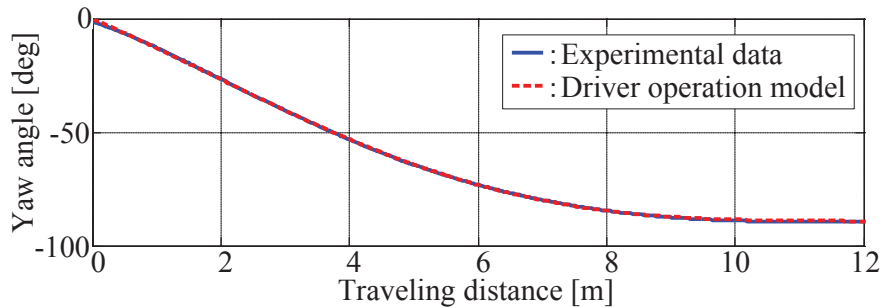


Fig. 3.3.6 Relationship of yaw angle and travel distance

3.3.2 交差点右折場面におけるリスクポテンシャルの適用

交差点右折時における走行経路は対向車や歩行者の有無に関わらず、ほぼ一定である。そこで、図 3.3.7 に示す、横断歩道通過点を目的地 $P(X_c^*, Y_c^*)$ とし、右折開始位置 (X_{c0}, Y_{c0}) から目的地までの走行距離 S_P が同一 ($S_P = S_P'$) の出会い頭事故場面と等価であると仮定して運動制御問題を定式化する。右折経路上の車両位置を仮想的な直線の経路上の位置車両位置に算出するための変換式を式 (3.3.2) に示す。そして、リスク回避のための速度計画は、前節で述べたポテンシャルフィールドに基づくリスク評価アルゴリズムを適用し、前後方向の目標加速度 $a_{x_c}^*$ を算出することで決定する。

$$\left. \begin{aligned} X_c' &= R_t \left[1 - \cos \left(\sin^{-1} \frac{Y_c - Y_{c0} + R_t}{R_t} \right) \right] + X_{c0} + X_c \\ Y_c' &= -R_t \left[1 - \left(\sin^{-1} \frac{Y_c - Y_{c0} + R_t}{R_t} \right) \right] + Y_{c0} \end{aligned} \right\} \quad (3.3.2)$$

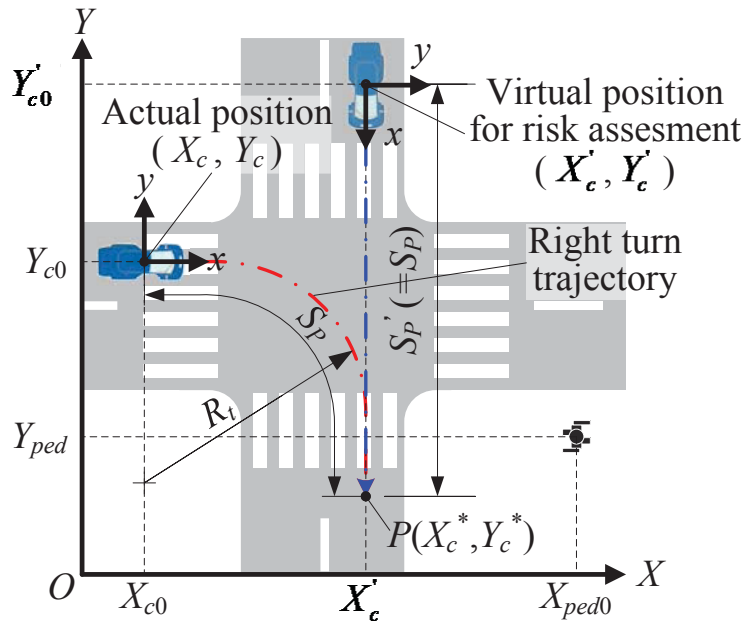


Fig. 3.3.7 Coordinate transformation for risk potential computation

(S =Actual path, S' = Virtual path)

3.3.3 横断歩道上における歩行者の移動モデル

本項では、自車の衝突点到達時間における歩行者位置予測手法について述べる。

障害物より発生するしりぞける力（斥力） F_{x_rf} は、発生源を自車の衝突点到達時間 T_{cp} における歩行者位置 $(X_{ped}'(t+T_{cp}), Y_{ped}'(t+T_{cp}))$ とする。

歩行者の行動予測モデルは、歩道上の移動のため、 Y 軸方向の移動は僅かであることから、 X 軸方向に一定速で移動するものと仮定する。そして、自車の衝突点到達時間の歩行者位置 $(X_{ped}'(t+T_{cp}), Y_{ped}'(t+T_{cp}))$ は式（3.3.3）で表される。

$$\left. \begin{aligned} X_{ped}'(t+T_{cp}(t)) &= X_{ped}'(t) + \dot{X}_{ped}'(t) \cdot T_{cp}(t) \\ Y_{ped}'(t+T_{cp}(t)) &= Y_{ped}'(t) \end{aligned} \right\} \quad (3.3.3)$$

また、自車の衝突点到達時間 T_{cp} は、斥力が存在しない場面における通常走行時のものとし、3.3.1節より、単独走行時の車両挙動は等加速度運動であることから、衝突点までの距離 S_{cp} は加速度 \tilde{a}_{x_c} と速度 V_c によって式（3.3.4）で表される。そして、式（3.3.4）より、自車の衝突点到達時間 T_{cp} は式（3.3.5）より求められる。

$$S_{cp} = V_c \cdot T_{cp} + \frac{1}{2} \tilde{a}_{x_c} \cdot T_{cp}^2 \quad (3.3.4)$$

$$T_{cp} = \frac{-V_c + \sqrt{V_c^2 + 2\tilde{a}_{x_c}T_{cp}}}{\tilde{a}_{x_c}} \quad (3.3.5)$$

3.4 交差点右折場面における衝突回避システムの理論的解析

本節では，提案した交差点右折時における歩行者との衝突リスク回避アルゴリズムについてシミュレーションを行い，その有効性について検証した結果について述べる．

本節では，3.4.1 項でシミュレーションの条件について述べ，3.4.2 項でシミュレーション結果と考察について述べる．

3.4.1 シミュレーション条件

図 3.4.1 にシミュレーション場面の概略図を示し，表 3.4.1 に各種パラメータの設定を示す．シミュレーションの場面設定については，まず，自車は3章の実験場面と同様に，右折待ち状態から旋回半径 R_t の円弧を描き90度旋回後直進するコースと設定する．そして，そこに歩行者が歩道から横断歩道に侵入する場面とする．歩行者の行動パターンは，図 3.4.1 に示す，対向方向から移動する場面での(a)通過 (Scenario 1)，(b)一時停止 (Scenario 2)，(c)折り返し (Scenario 3) 行動を行う場面と，同方向に移動する場面での(d)通過 (Scenario 1) を行う場面でシミュレーションを行った．なお，今回，歩行者はY軸方向への移動は行わないものとし，また，車両の全長や安全度を考慮し，相対距離 D_{ped} に安全確保余裕距離 D_{margin} を設けてシミュレーションを行った．

Table 3.4.1 Condition of verification by simulation

Symbol	Value	Unit
X_{c0}	0.0	m
Y_{c0}	0.0	m
X_{p0}	Scenario 1 : 10 Scenario 2 : 10 Scenario 3 : 10 Scenario 4 : -5	m
Y_{p0}	-4.5	m
R_t	5.0	m
D_{margin}	2.0	m
a_{th}	0.5	m/s ²

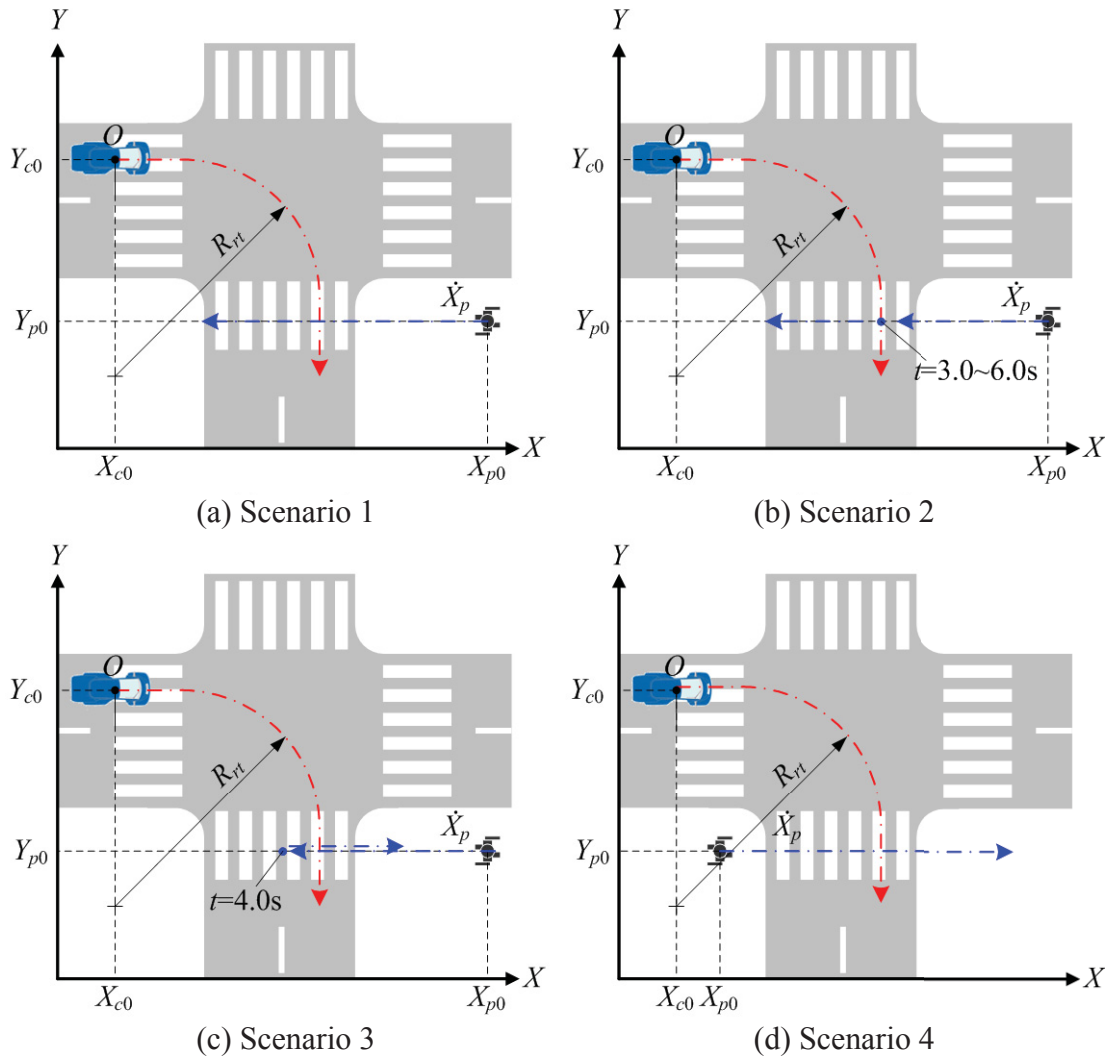


Fig. 3.4.1 Pictorial diagram of simulation scenario

3.4.2 シミュレーション結果と考察

本節では、提案した交差点右折時における歩行者との衝突リスク回避アルゴリズムについてシミュレーションを行い、その有効性について検証した結果について述べる。図 3.4.2 から図 3.4.5 に、Scenario 1~4 でのシミュレーション結果を示す。

まず、図 3.4.2 に示す歩行者が対向方向に通過する場面（Scenario 1）について述べる。図 3.4.2 より、 $t=3s$ 手前までは斥力の加速度 a_{x_tf} が発生しておらず、単独走行時と同様の車両挙動を示ししており、車両速度が加速しているため、歩行者の予測位置との距離が加速的に減少している。しかし、 $t=3s$ に差し掛かると、斥力の加速度 a_{x_tf} が

発生し、減速行動を開始している。このとき、自車の加速度 a_{x_c} は斥力の加速度 $a_{x_{tf}}$ に対し遅れが生じているが、これは車両モデルにて自車の限界加加速度を考慮したためであり、本手法では問題がないとする。そして、減速が開始されると、それまで加速的に減少した歩行者の予測位置との距離は減少傾向が緩和し、自車の衝突点到達時間の減少傾向も小さくなっている。 $t=5.0s$ になると、自車が衝突点を通過し、再度加速行動をとっていることが確認できる。また、ヨー角の最終値に注目すると、90度に収束していることから右折が完了していることが確認できる。

次に、図 3.4.3 に示す歩行者が対向方向に通過する途中、 $t=3.0\sim 6.0s$ で一度停止する場面（Scenario 2）について述べる。図 3.4.3 より、 $t=3.0s$ までは Scenario 1 と同様な挙動を示している。しかし、 $t=3.0s$ で歩行者が停止すると、歩行者の予測位置が急に変化するため、歩行者の予測位置との距離も僅かではあるが段階的な変化を示す。そして、 $t=3.0\sim 5.0s$ の間で、減速を行うことで、歩行者との衝突を回避を図るが、歩行者は移動していないため、 $t=5.0s$ で歩行者の予測位置との距離が安全確保余裕距離に達したため車両が停止していることが確認できる。最後に、 $t=6.0s$ で歩行者が再度移動を開始すると、自車も再度加速を開始していることが確認できる。

次に、図 3.4.4 に示す歩行者が対向方向に移動を行い、 $t=4.0s$ で進行方向を反対に変更する場面（Scenario 3）について述べる。図 3.4.4 より、 $t=4.0s$ までは歩行者は Scenario 1 と同様の行動を行うため、車両挙動も同様な挙動を示している。しかし、 $t=4.0s$ で歩行者が進行方向を変更すると、歩行者の予測位置が急激に変化するため、歩行者の予測位置との距離も急激な変化を示し、それに伴い、斥力の加速度 $a_{x_{tf}}$ が大きく変化している。そして、 $t=5s$ 付近までは歩行者の予測位置との距離近いことため大きな減速が要求されているが、 $t=5s$ 以降、歩行者の予測位置との距離が離れていくため、徐々に加速行動に移行していることが確認できる。

最後に、図 3.4.5 に示す歩行者が自車と同方向に通過する場面（Scenario 4）について述べる。本場面は、歩行者の移動方向が Scenario 1 と異なるものの、自車との相対関係は同一なため、減速等の車両挙動は図 3.4.2 と同様な値を示し、歩行者の移動方向が影響していないことが確認できる。

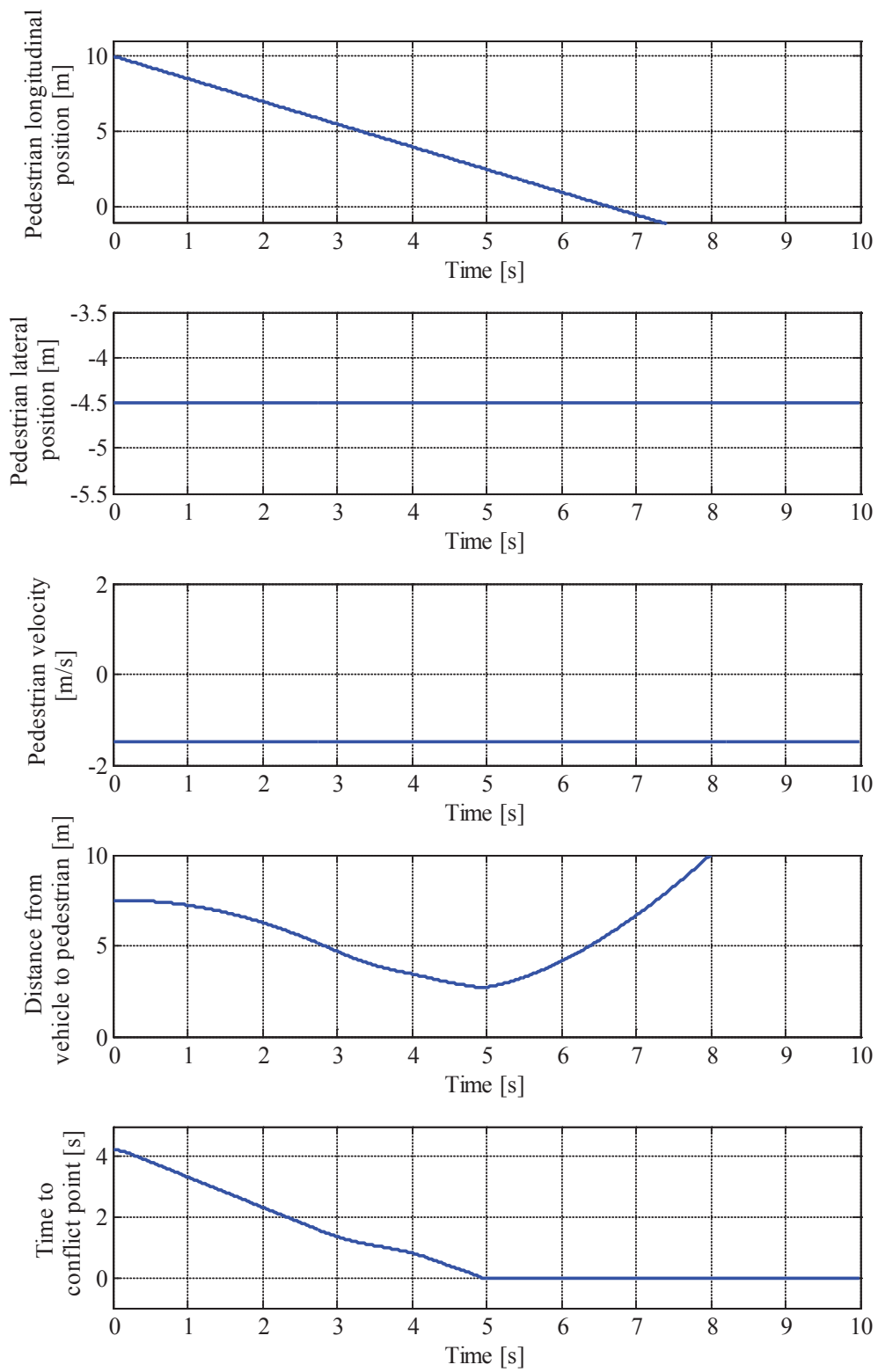


Fig. 3.4.2 Simulation result in right turn maneuver
(Scenario 1)

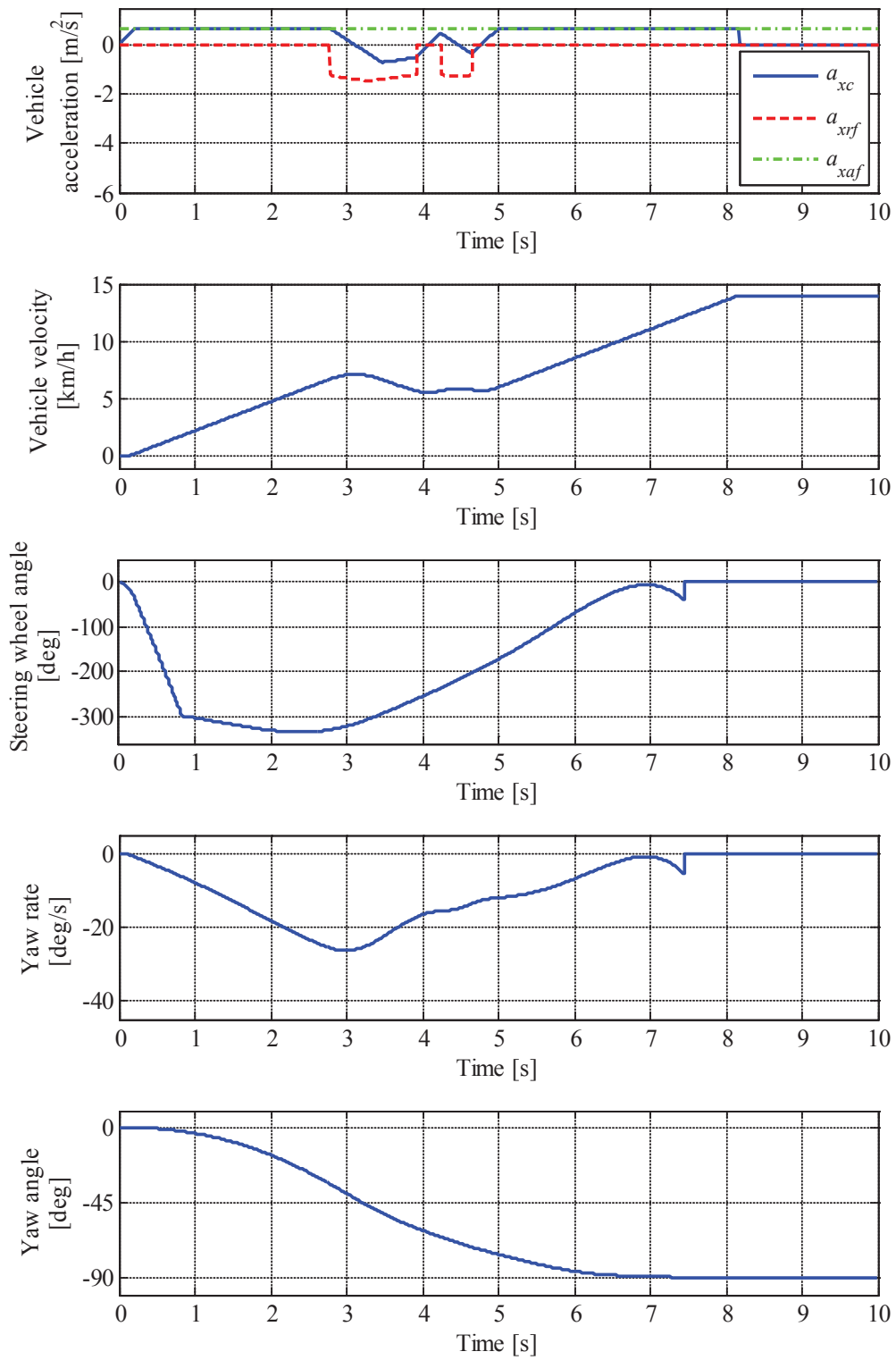


Fig. 3.4.2(Cont'd) Simulation result in right turn maneuver
(Scenario 1)

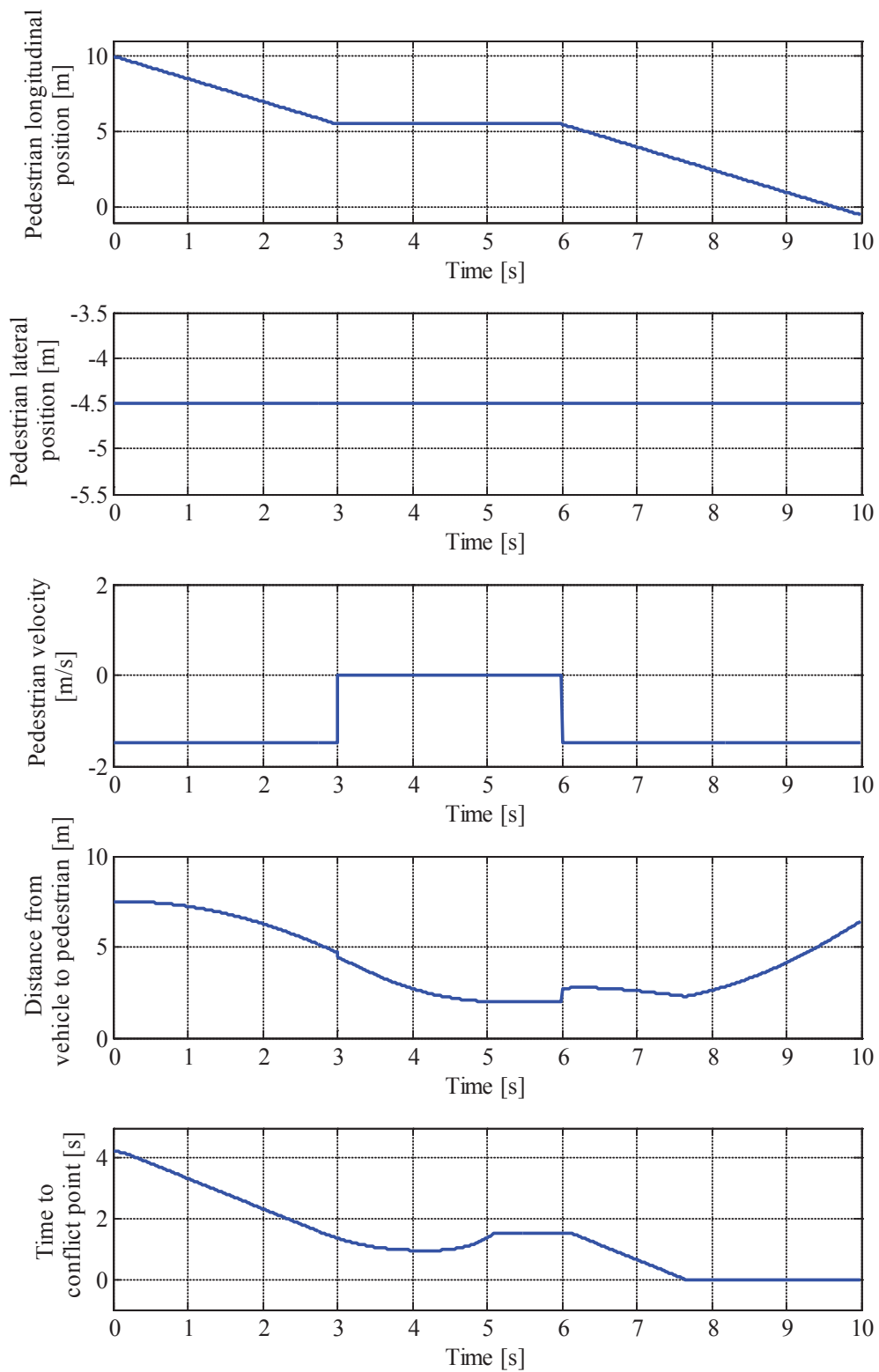


Fig. 3.4.3 Simulation result in right turn maneuver
(Scenario 2)

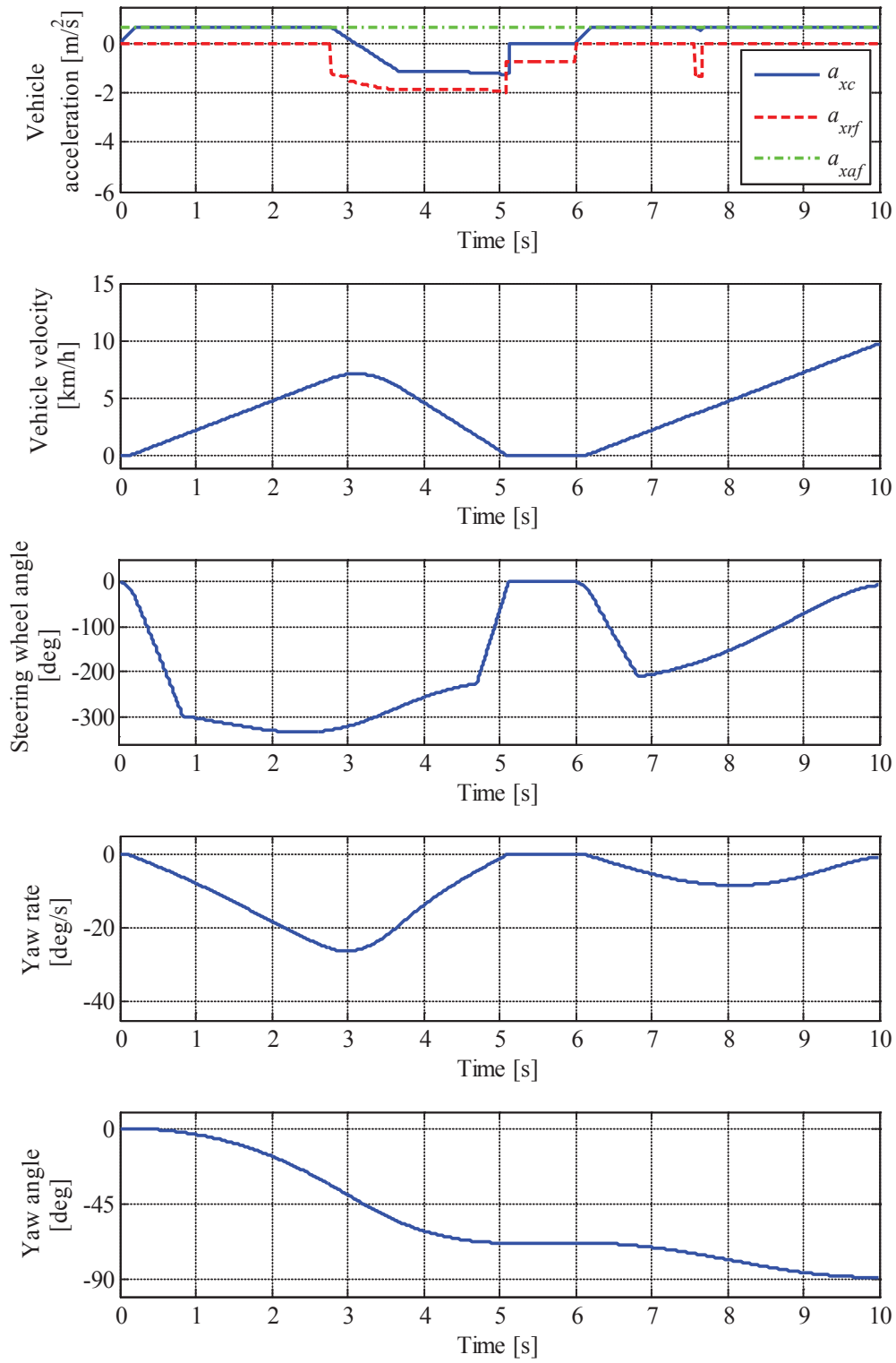


Fig. 3.4.3(Cont'd) Simulation result in right turn maneuver
(Scenario 2)

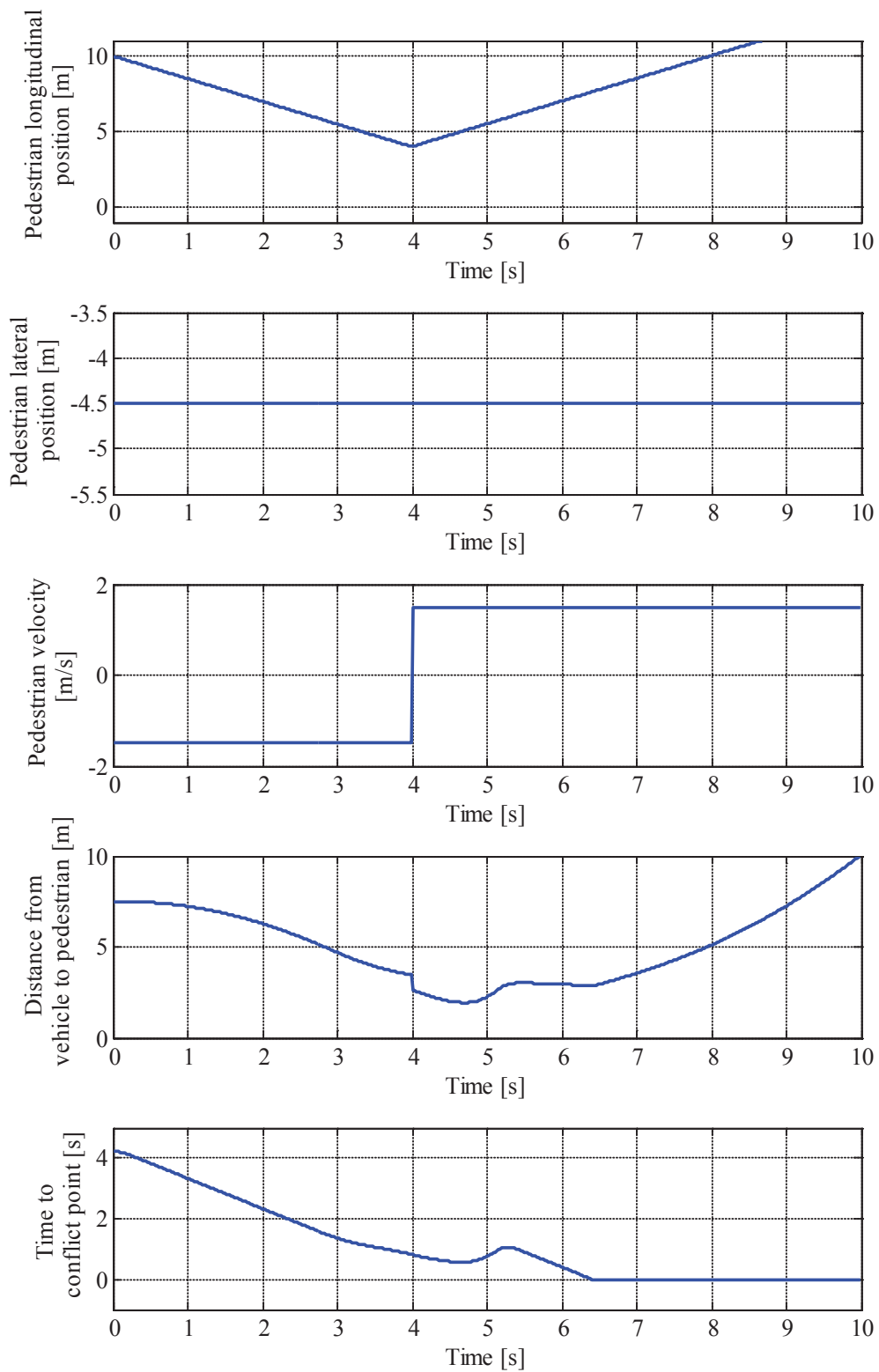


Fig. 3.4.4 Simulation result in right turn maneuver
(Scenario 3)

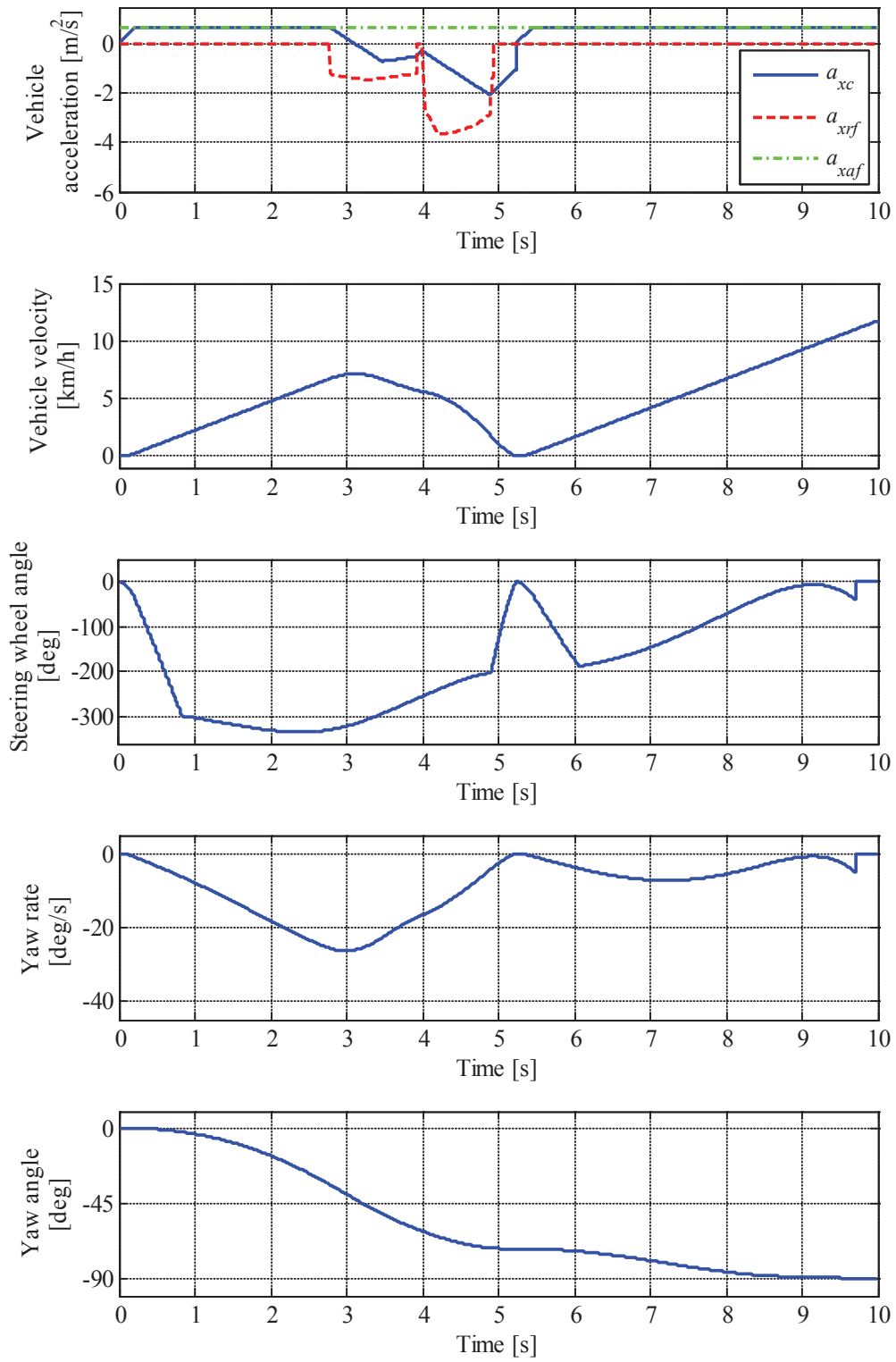


Fig. 3.4.4(Cont'd) Simulation result in right turn maneuver
(Scenario 3)

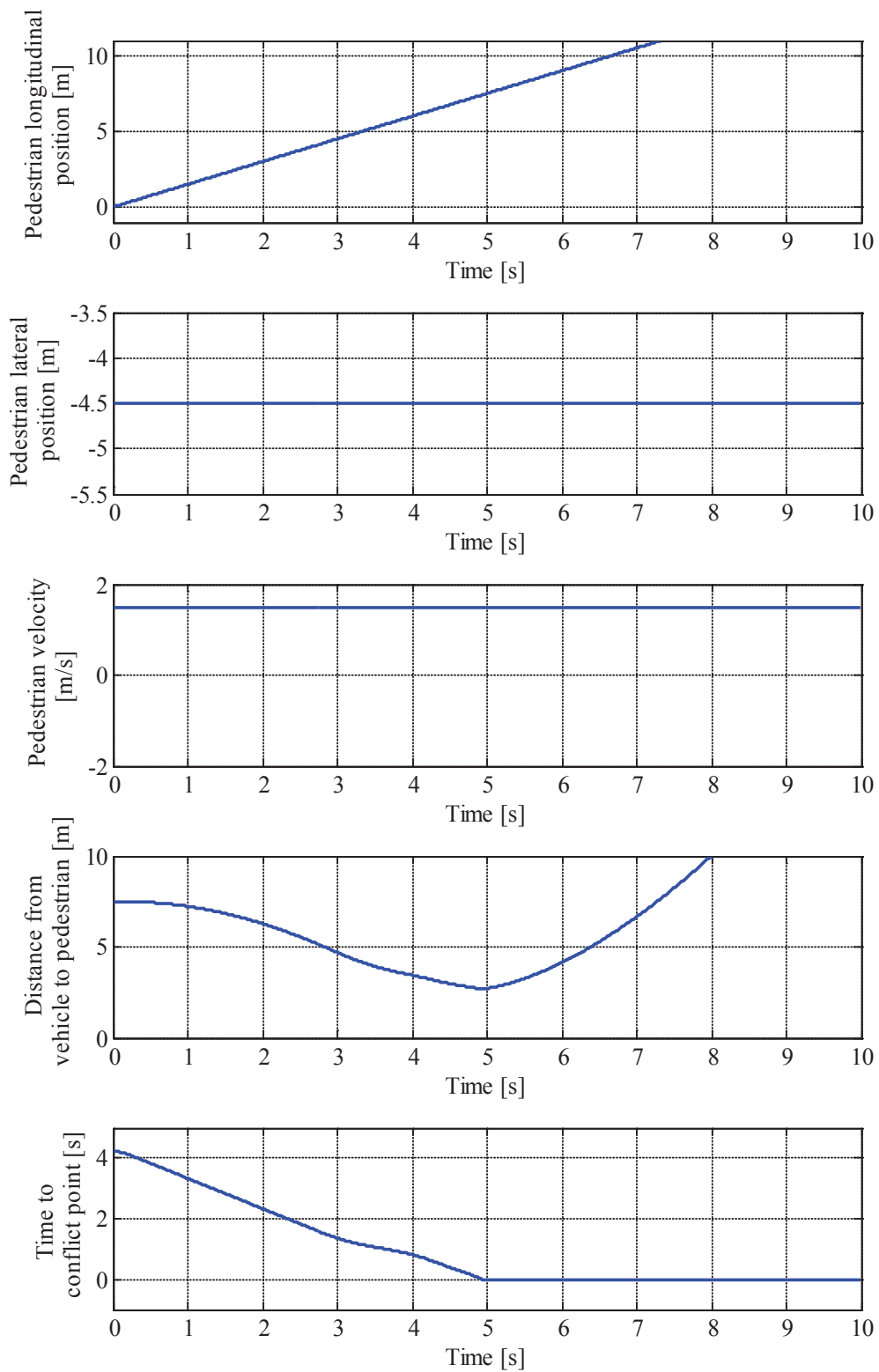


Fig. 3.4.5 Simulation result in right turn maneuver

(Scenario 4)

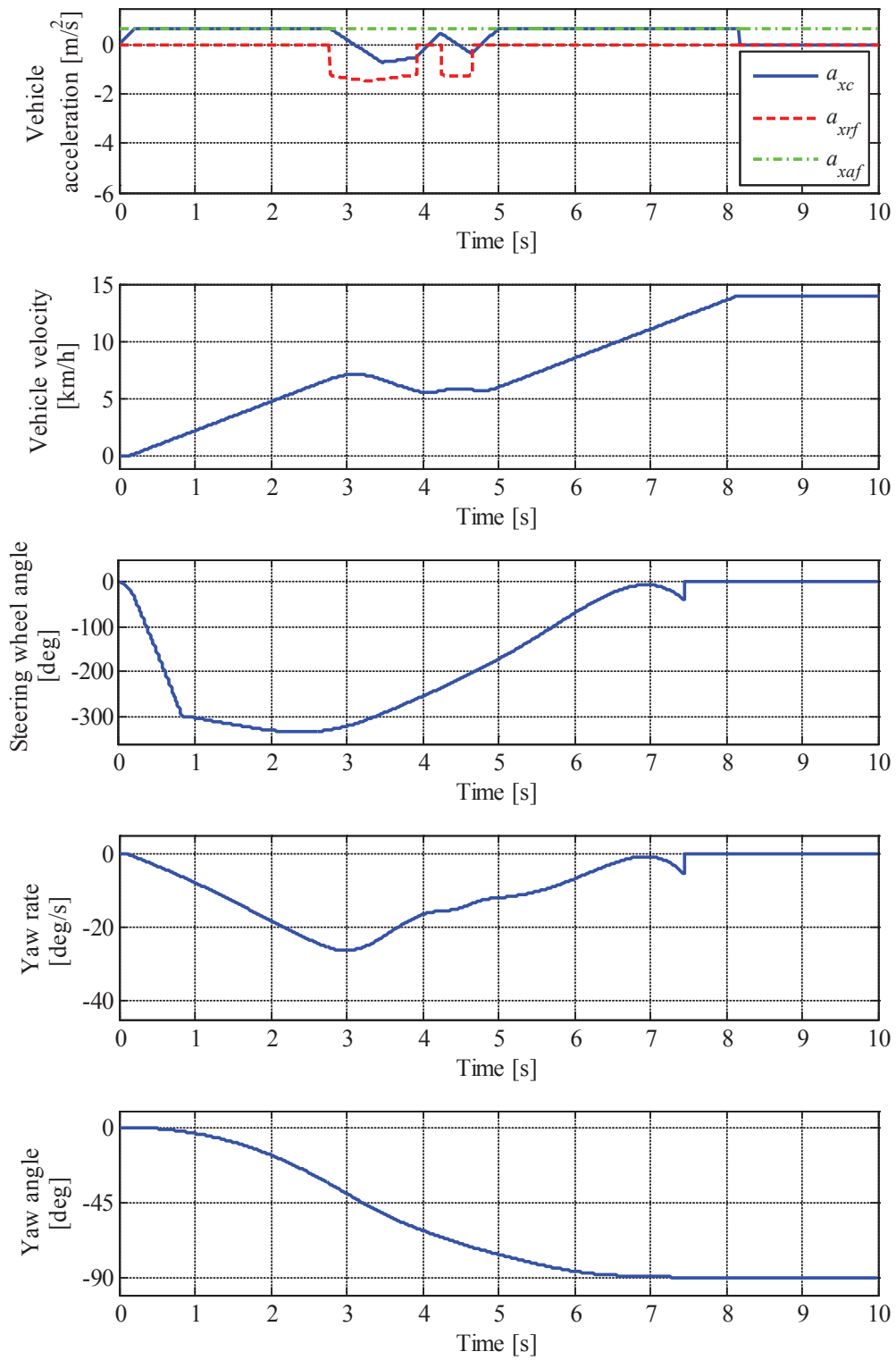


Fig. 3.4.5(Cont'd) Simulation result in right turn maneuver
(Scenario 4)

3.5 交差点右折場面における衝突回避システムの実験的検証

本節では，提案した歩行者との衝突リスクを考慮した自動運転システムを用い，実際に横断歩道上および周辺に歩行者が存在する場面での実車両を用いた自動運転実験より，システムの有効性を検討する．

3.5.1 実験概要

図 3.5.1 に実験概要を示し，表 3.5.1 に実験条件を示す．本実験では，実験車両に超小型電気自動車 RAVEL-II を用い，3 章での実験場面と同様に，右折待ち状態から旋回半径 R_t の円弧を描き 90 度旋回後直進するコースと設定する．また，歩行者はシミュレーションと同様，対抗方向の通過(Scenario 1)，一時停止(Scenario 2)，折り返し(Scenario 3)，同方向の通過(Scenario 4)の 4 つの場面を模擬して実験を行った．

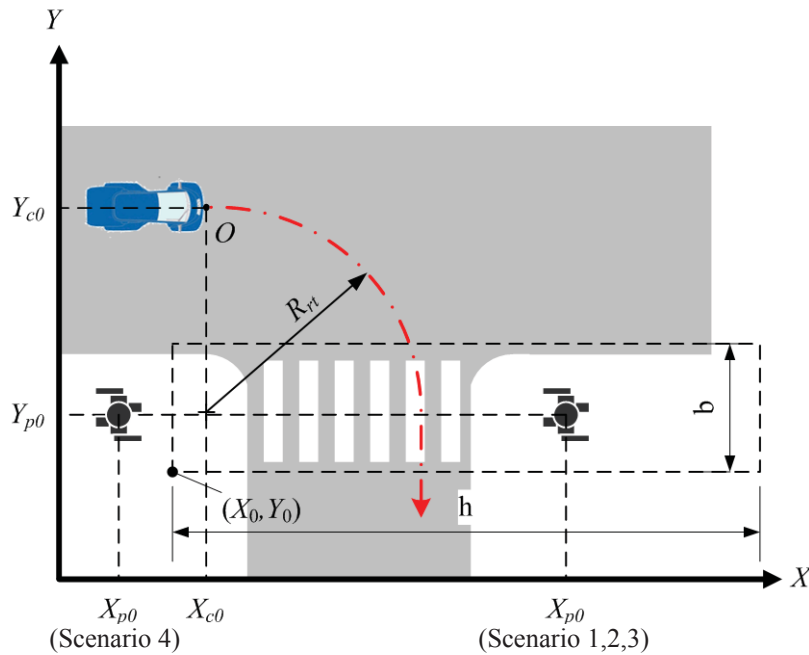


Fig. 3.5.1 Verification experiment of automatic driving system in right turn maneuver

Table 3.5.1 Condition of verification experiment

Symbol	Value	Unit
X_{c0}	0.0	m
Y_{c0}	0.0	m
X_{p0}	Scenario 1 : 9 Scenario 2 : 9 Scenario 3 : 9 Scenario 4 : -2	m
Y_{p0}	-4.5	m
R_t	5.0	m
D_{margin}	2.0	m
a_{th}	0.5	m/s ²
X_{c0}	0.0	m
Y_{c0}	-5.0	m
h	10.0	m
b	2	m

3.5.2 実験結果と考察

本節では、提案した歩行者との衝突リスクを考慮した自動運転システムを用いて、実際に横断歩道上および周辺に歩行者が存在する場面での実車両を用いた自動運転実験を行った結果よりシステムの妥当性について検討する．図 3.5.2 から図 3.5.5 に、Scenario 1～4 での実験結果を示し、図 3.5.6 から図 3.5.9 に各場面での実験の様子を示す．

まず、図 3.5.2 に示す歩行者が対向方向に通過する場面（Scenario 1）について述べる．図 3.5.2 より、レーザレーダの情報より、歩行者の位置情報が移動中も検出できていることが確認でき、またその値から、速度を算出できていることが確認できる．車両挙動に注目すると、 $t=3.5s$ までは、単独走行時と同様の車両挙動を示ししており、車両速度が加速しているため、歩行者の予測位置との距離が加速的に減少している．しかし、 $t=3.5s$ 以降に、減速行動を開始されると、それまで加速的に減少した歩行者の予測位置との距離は減少傾向が緩和し、自車の衝突点到達時間の減少傾向も小さく

なっている．そして， $t=6.0\text{s}$ 以降，歩行者がレーザレーダの視野角から外れたため，再度加速行動をとっていることが確認できる．また，車両の挙動を示す車両速度とヨー角に注目すると，どちらもよく目標値を追従しており，ヨー角に関しては，最終値が90度に収束していることから右折が完了していることが確認できる．

次に，図3.5.3に示す歩行者が対向方向に通過する途中，一度停止する場面(Scenario 2)について述べる．図3.5.3より， $t=3.0\text{s}$ まではScenario 1と同様な挙動を示している． $t=3.0\text{s}$ で歩行者が停止すると，それを検出し，減速行動を促していることが確認できる．そして，歩行者が再度発進すると自転車も再度加速していることが確認できる．

次に，図3.5.4に示す歩行者が対向方向に移動を行い，途中で進行方向を反対に変更する場面(Scenario 3)について述べる．図3.5.4より，進行方向を変更する歩行者の位置情報が検出されていることができる．そしてScenario 2同様，歩行者の情報に応じて減速，一時停止を行うことで歩行者との衝突を回避していることが確認できる．

最後に，図3.5.5に示す歩行者が自転車と同方向に通過する場面(Scenario 4)について述べる．本場面は，レーザレーダの視野角の制限により， X 軸上で負の座標に存在する歩行者は検出が不可能である．図3.5.5からも値が0mの地点から検出されていることが確認できる．しかし，検出後は他の場面同様，歩行者を検出し，減速を行うことで衝突を回避していることが確認できる．

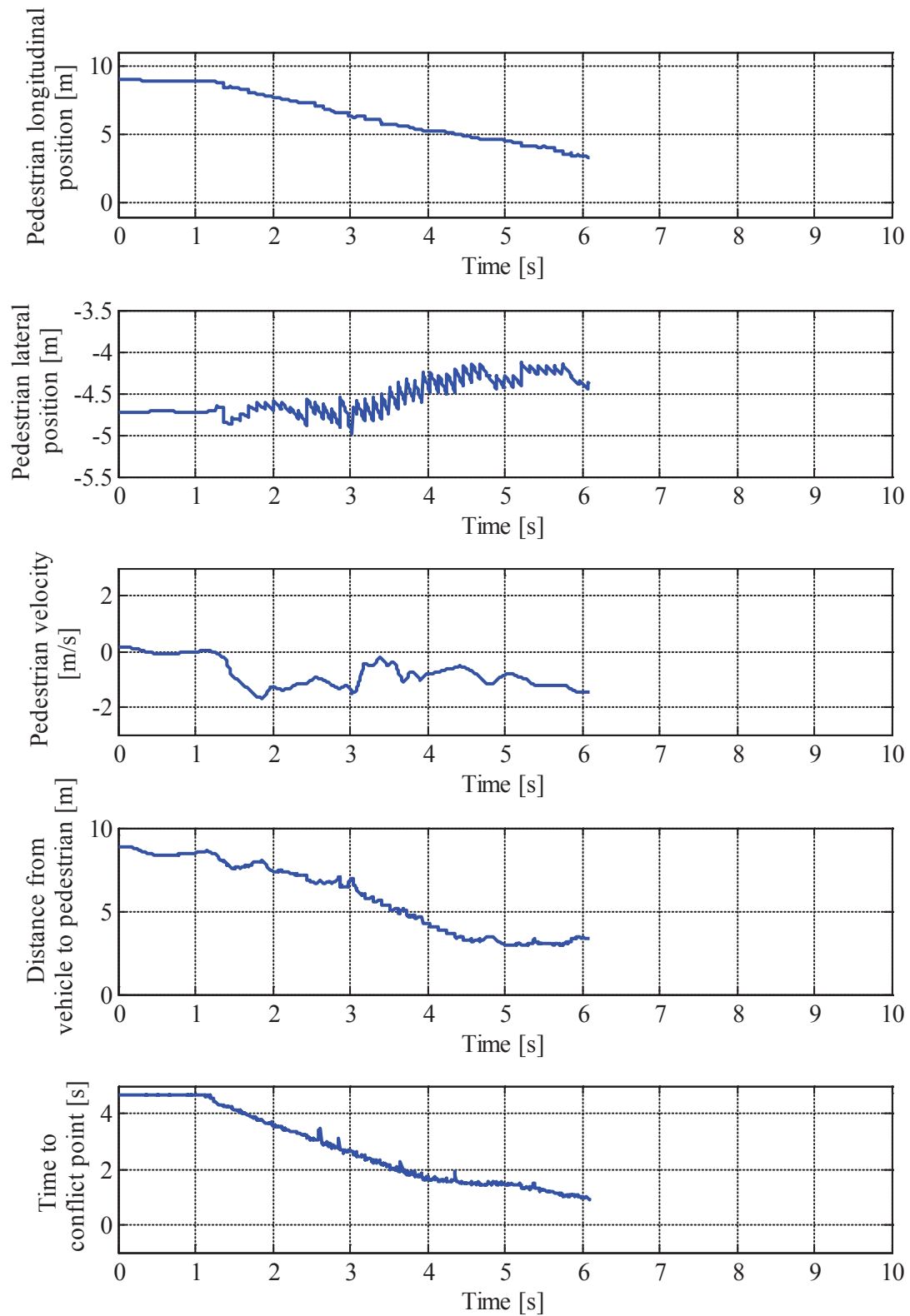


Fig. 3.5.2 Experiment Result in right turn maneuver

(Scenario 1)

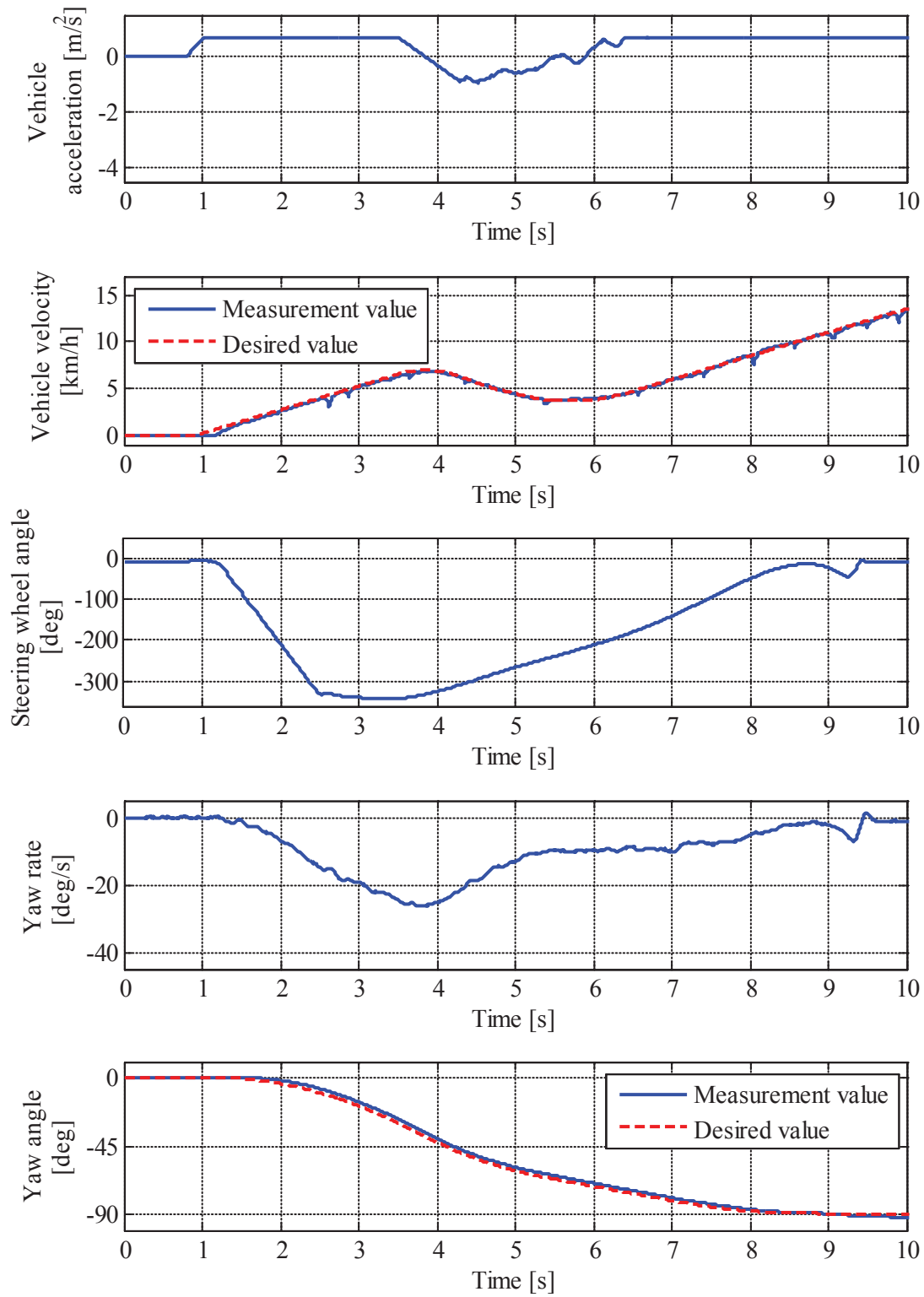


Fig. 3.5.2(Cont'd) Experiment Result in right turn maneuver
(Scenario 1)

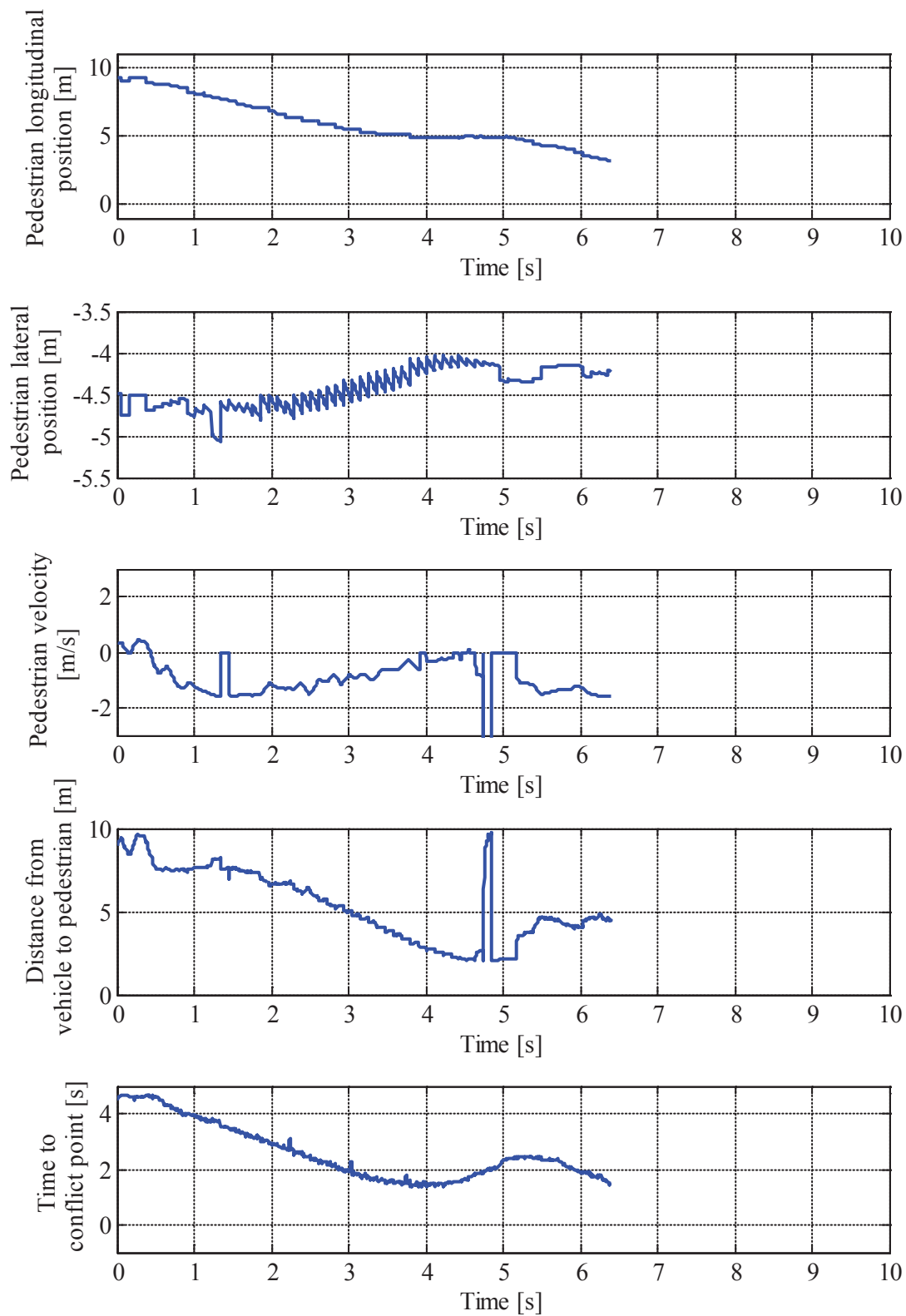


Fig. 3.5.3 Experiment Result in right turn maneuver

(Scenario 2)

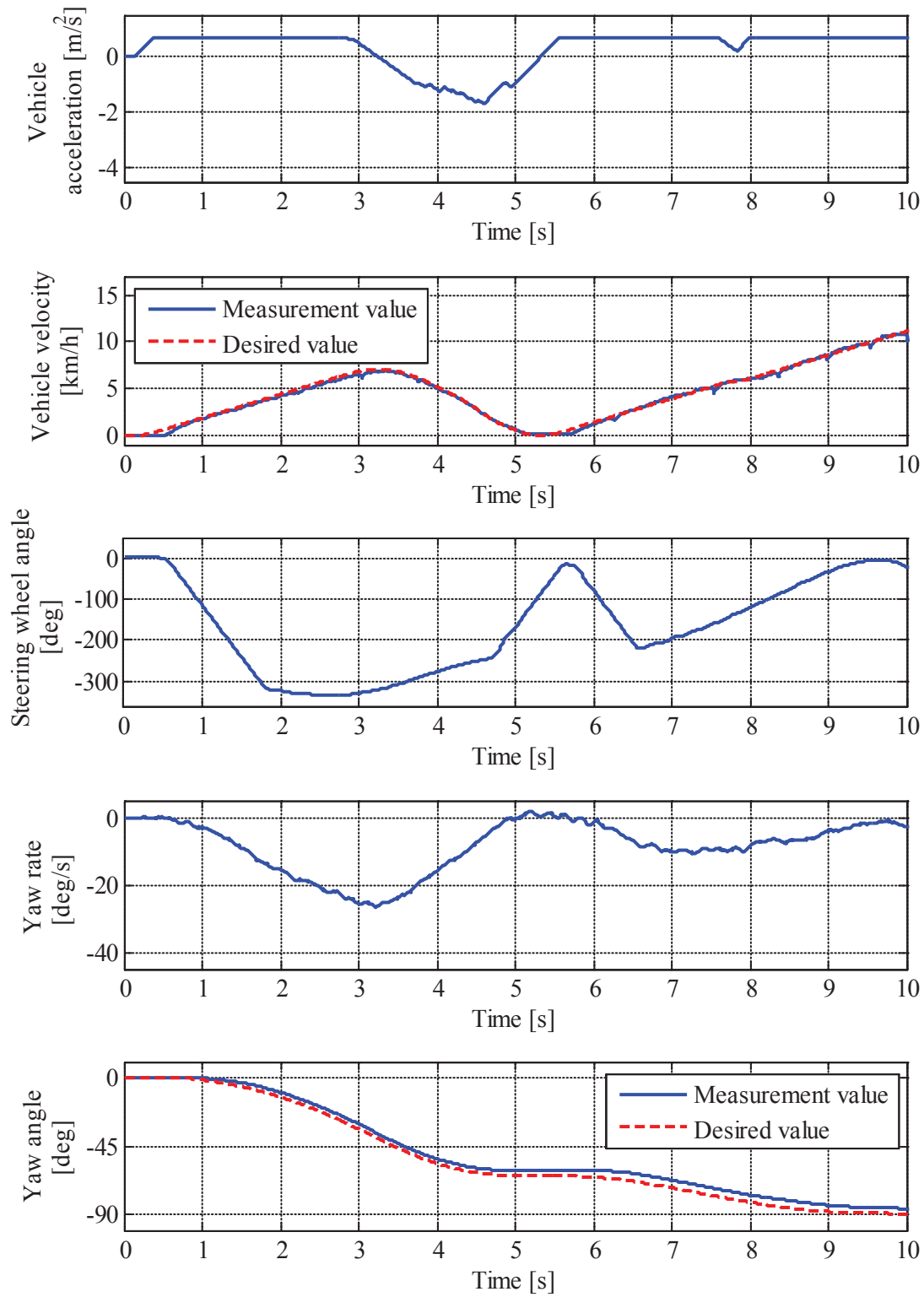


Fig. 3.5.3(Cont'd) Experiment Result in right turn maneuver
(Scenario 2)

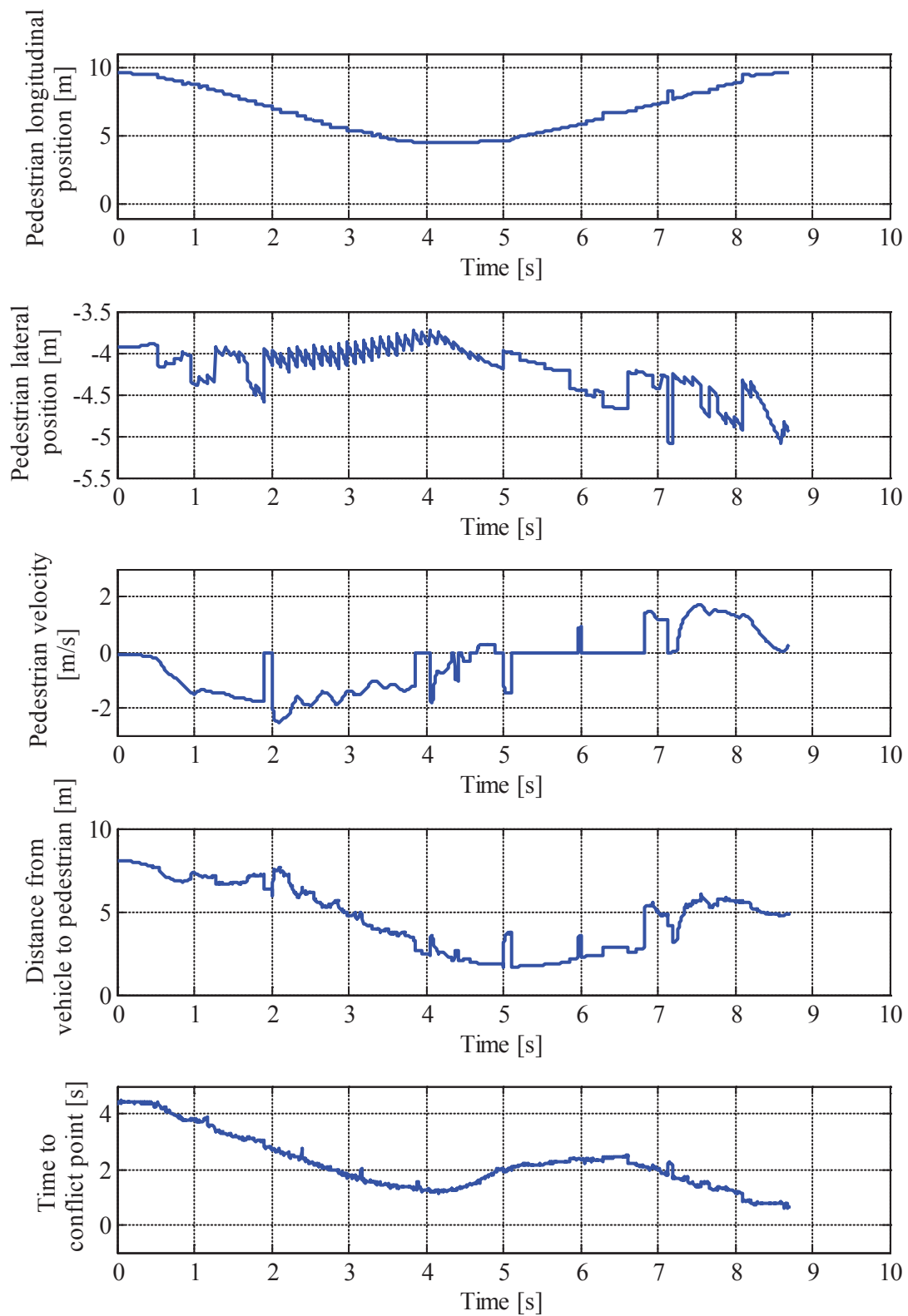


Fig. 3.5.4 Experiment Result in right turn maneuver

(Scenario 3)

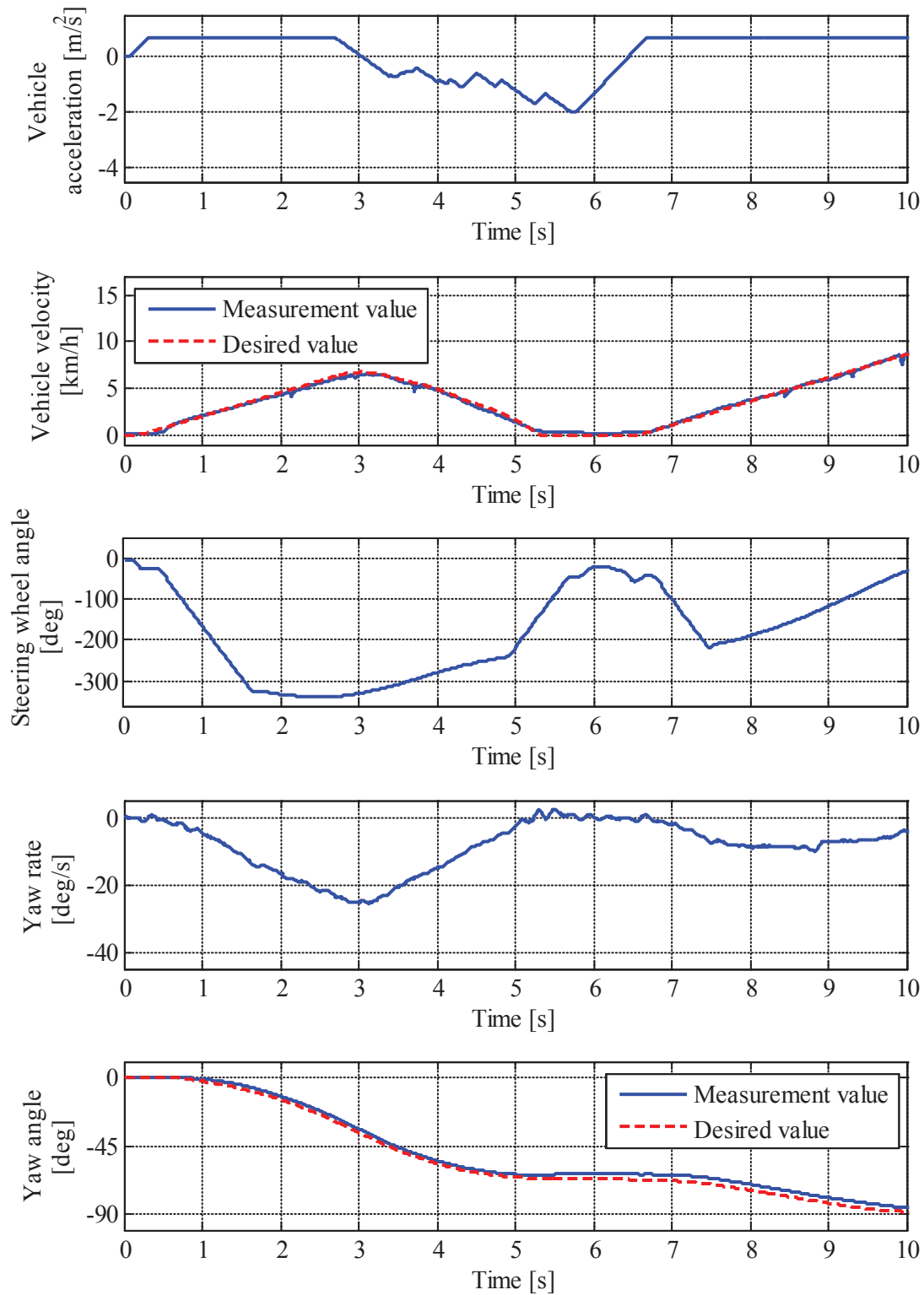


Fig. 3.5.4(Cont'd) Experiment Result in right turn maneuver
(Scenario 3)

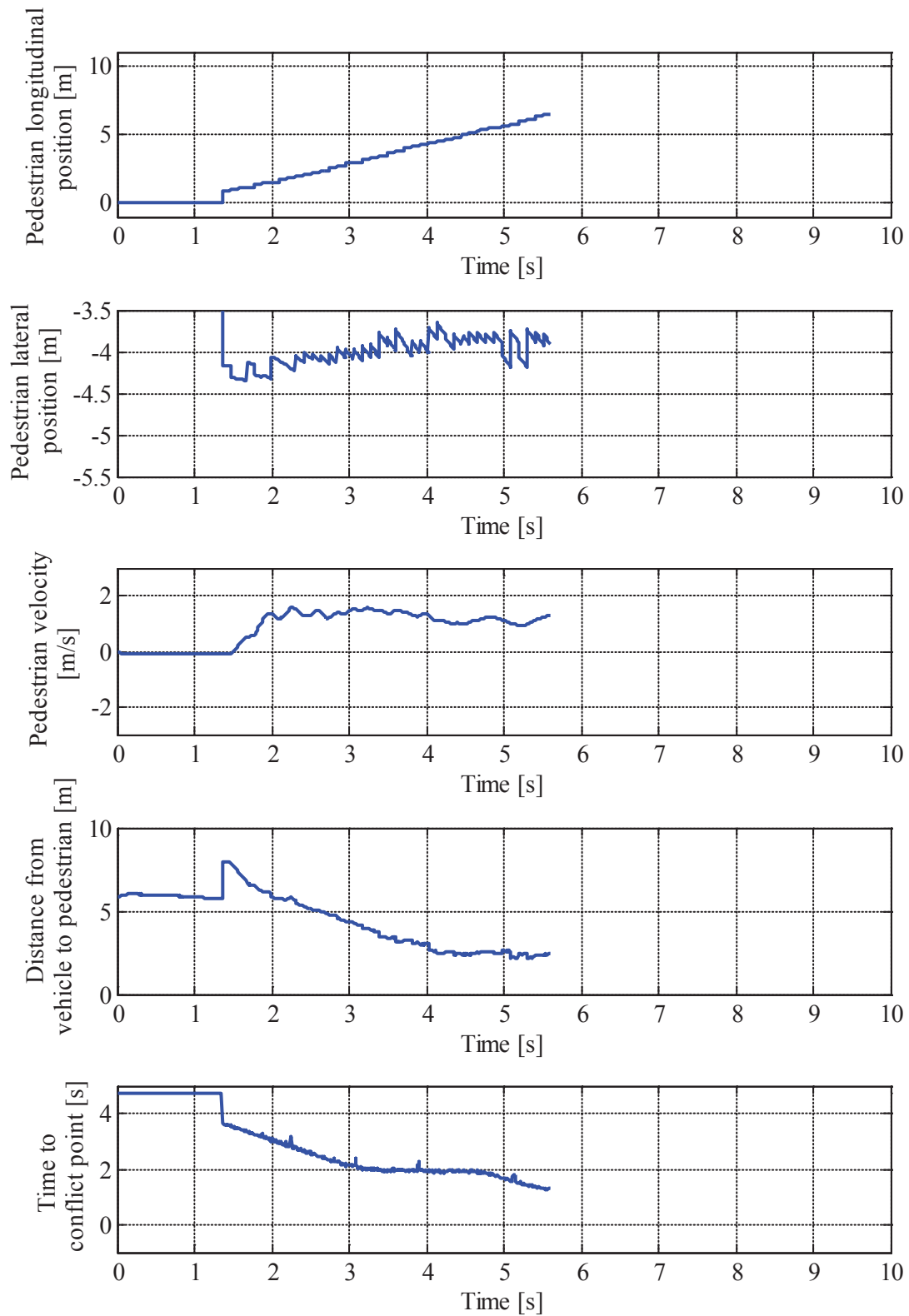


Fig. 3.5.5 Experiment Result in right turn maneuver

(Scenario 4)

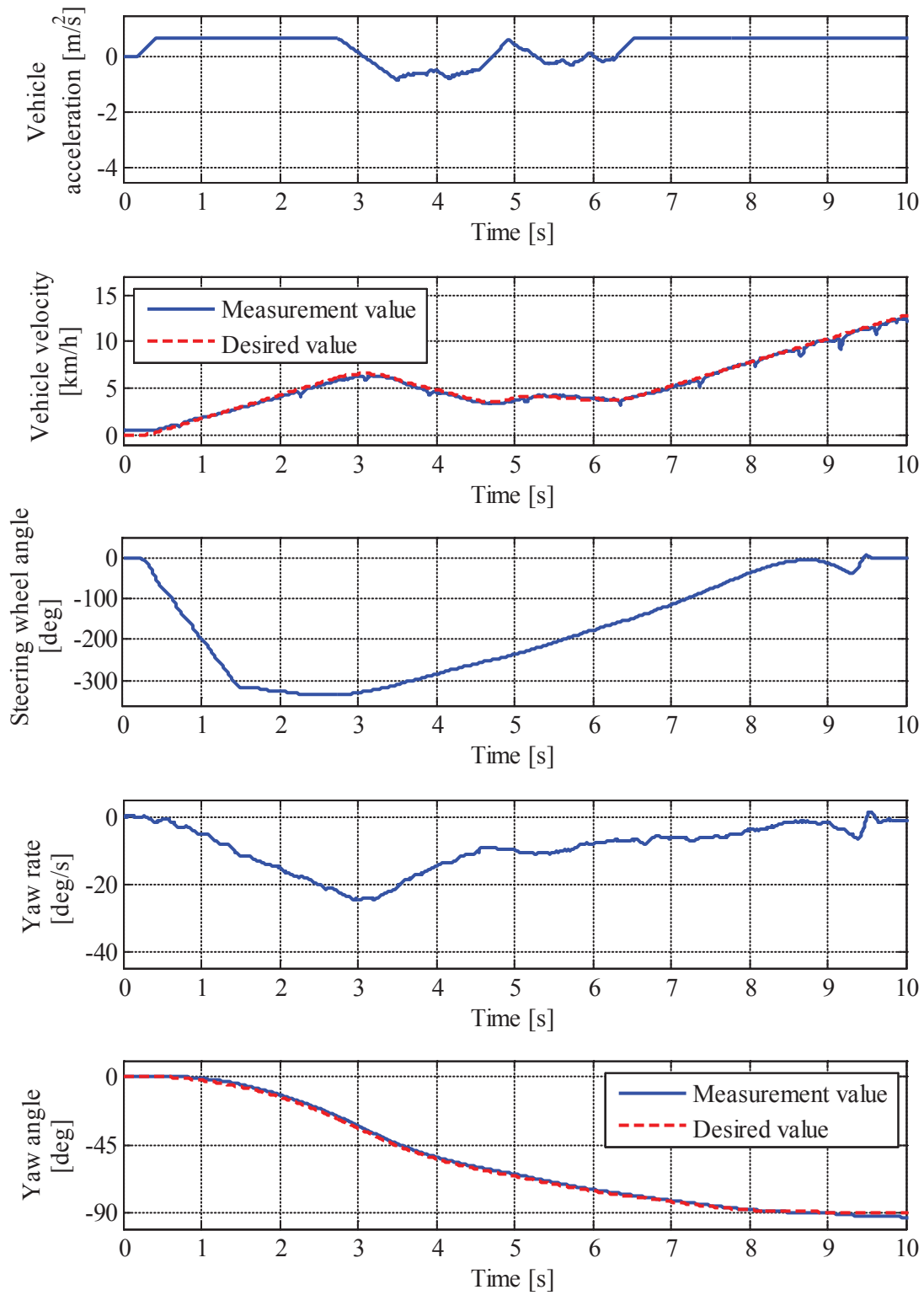


Fig. 3.5.5(Cont'd) Experiment Result in right turn maneuver
(Scenario 4)



Fig. 3.5.6 Snapshots of automatic right turn (Scenario 1)



Fig. 3.5.6(Cont'd) Snapshots of automatic right turn (Scenario 1)



Fig. 3.5.7 Snapshots of automatic right turn (Scenario 2)



Fig. 3.5.7(Cont'd) Snapshots of automatic right turn (Scenario 2)



Fig. 3.5.8 Snapshots of automatic right turn (Scenario 3)



Fig. 3.5.8(Cont'd) Snapshots of automatic right turn (Scenario 3)



Fig. 3.5.9 Snapshots of automatic right turn (Scenario 4)



Fig. 3.5.9(Cont'd) Snapshots of automatic right turn (Scenario 4)

3.6 まとめ

本章では、交差点右折場面に注目し、リスク評価手法を設計した。そして、MATLAB/Simulink を用いたコンピュータシミュレーションと実験車両を用いた実験より、システムの検証結果について述べた。シミュレーションの結果より、提案した交差点右折時における歩行者との衝突リスク回避アルゴリズムにより、横断歩道周辺に存在する歩行者に対して、リアルタイムで衝突リスクの評価を行い、衝突リスク回避のための速度計画を決定することで、行動が動的に変化する歩行者との衝突を回避することができることを確認した。そして、超小型自動車を用いた実装実験の結果より、横断歩道上及び周辺の歩行者を実験車両に搭載したレーザレーダにより検知し、その情報から衝突のリスク評価を行い、リスク回避のための速度計画に基づいた車両制御を行うことで、歩行者との衝突リスクを考慮した自動運転が実現できていることを確認できた。

第4章

無信号交差点における運転指導員の運転行動解析

4.1 はじめに

本章では、常時記録型ドライブレコーダを用いた、運転指導員の市街地走行データ収集と、収集したデータの解析結果について示す。まず、熟練ドライバの市街地走行データの収集について述べ、本研究の対象とする無信号交差点について示す。最後に無信号交差点における熟練ドライバの運転行動の解析結果について述べる。

4.2 実験装置の概要

本節では、実験車両と実験車両に搭載された各種センサ、常時記録型ドライブレコーダの概要について述べる。

4.2.1 実験車両

運転指導員の運転行動データ収集は、図 4.2.1 に示す実験車両**ASTERISK (Active Safety Technology by Estimating RISK)**、トヨタ自動車株式会社製、マークX)を用いて行う。マークXの車両寸法を表 4.2.1 に示す。ASTERISKには、2種類の計測機器が搭載されている。1つ目は、LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging, ibeo社製、ibeo LUX)である。本LIDARの最大の特徴は、図 4.2.2 に示すように4レイヤでの同時スキャニングが可能ということである。データ取得例を図 4.2.3 に示す。図 4.2.3(a)がカメラで取得した画像、(b)がLIDARで取得したデータである。図 4.2.3(b)より、建物の壁や車両の角が検出できていることがわかる。その他の仕様については、表 4.2.2 に示す。表 4.2.2 より、レーザは波長 905nmの近赤外線、レーザクラスはIEC規格のClass1であり、目に対して安全なレベルである⁽⁴⁶⁾。つぎに、2つ目の計測機器は、常時記録型ドライブレコーダ (アイティエス 21 企画社製)である。本ドライブレコーダは、車両前方3方向、車両後方、ドライバの顔、足元の計6方向の映像を記録するためのカメラと、車両速度、前後方向加速度、ブレーキ圧等のデータ取得のためのドライブレ

コード本体により構成されている。ドライブレコーダで取得可能な詳細データについては、4.2.2 項で示す。

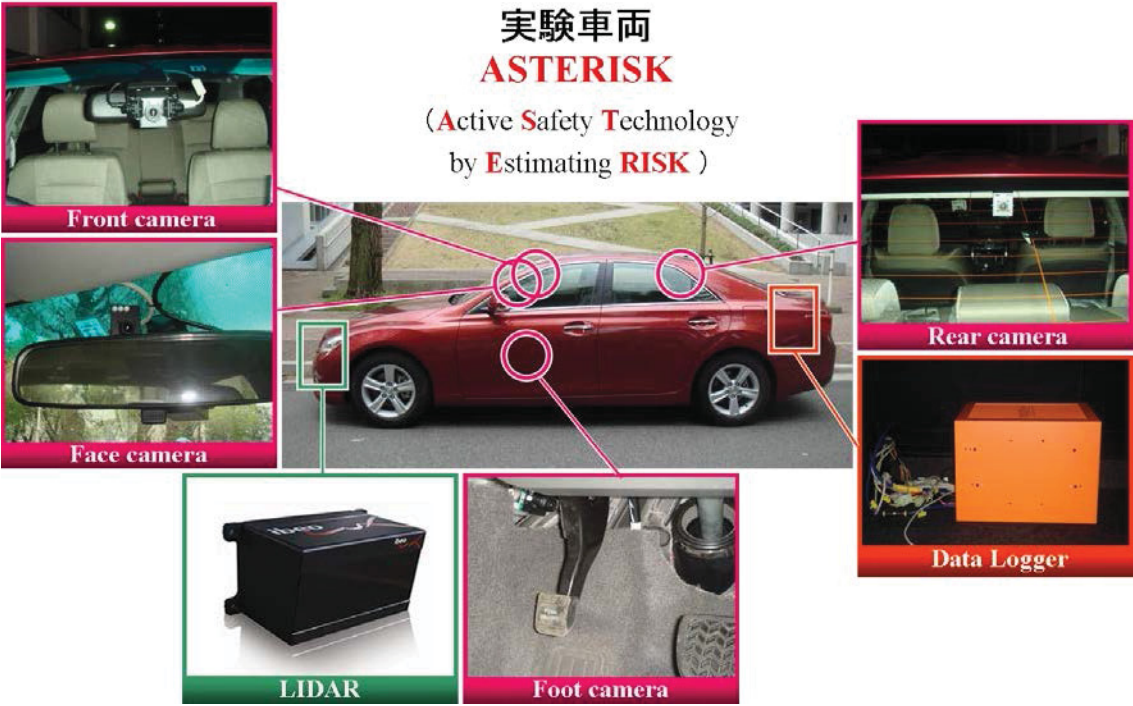


Fig. 4.2.1 Experimental vehicle

Table 4.2.1 Specifications of MARK X

全長		mm	4,730
全幅		mm	1,795
全高		mm	1,435
ホイールベース		mm	2,850
トレッド	フロント	mm	1,535
	リヤ	mm	1,535
最低地上高		mm	155
室内	長	mm	1,975
	幅	mm	1,500
	高	mm	1,170✕7

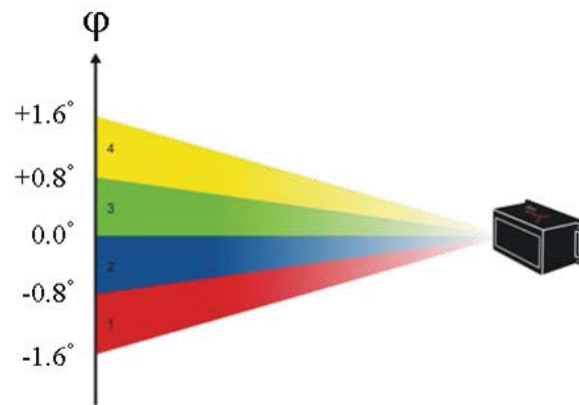
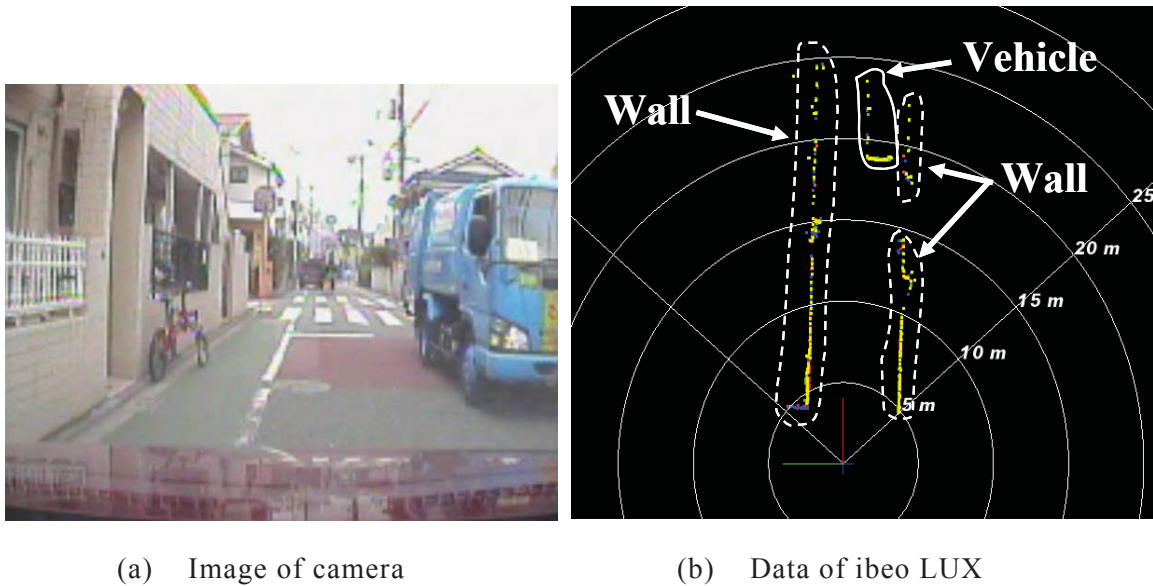


Fig. 4.2.2 4 layers scanning by ibeo LUX



(a) Image of camera

(b) Data of ibeo LUX

Fig. 4.2.3 Data of ibeo LUX

Table 4.2.2 Specifications of ibeo LUX

Definition	Value	Unit
Laser class	Class 1, Eye safe	-
Wave length	905	nm
Range	200 (average)	m
Horizontal field of view	4 layers : 110 (50 ~ -60)	deg
Vertical field of view	3.2	deg
Data update rate	12.5 / 25.0 / 50.0	Hz
Accuracy (distance independent)	10	cm
Angle resolution	Horizontal : 0.125	deg
	Vertical : 0.8	deg
Distance resolution	4	cm

4.2.2 常時記録型ドライブレコーダ

本ドライブレコーダは、車両エンジン始動後1分半程度で起動し、その後エンジンが停止するまでの間、映像および運転行動の記録を続ける。データ取得サンプリング周波数は30Hzである。映像データおよび運転行動データは、ポータブルハードディスクドライブ(以下 ポータブル HDD)に記録される。データ取得の際は、ポータブル HDD の空き容量に注意する必要がある。各種取得データは、専用の再生ビューアを使用することで、同期しての再生が可能である。本ドライブレコーダで取得可能なデータを表 4.2.3 に示す。

Table 4.2.3 Acquirable data of drive recorder

[Serial data output specifications]	
•Communication specifications	
38400bps, non parity, data bit 8, stop bit 1	
•Data specifications	
Comma-separated text, footer is ¥r¥n (linefeed code)	
Header	\$IDR fixing
Version	29 fixing
Year month day	yyyyMMdd format
Hour minute second	HHmmss format
Latitude	NMEA format
Longitude	NMEA format
Altitude	m
Velocity (CAN velocity)	km/h
Orientation	clock rotation, degree unit, north is 0 degree
Velocity variation	
Orientation variation	
Odometer	
Longitudinal acceleration	G unit
Lateral acceleration	G unit
Accel value	
Handle angle	Counterclockwise is positive
Brake	
Blinker right	1:ON, 0:OFF
Blinker left	1:ON, 0:OFF
Distance to preceding vehicle	m unit, the same as preceding vehicle distance 1
Relative velocity against preceding vehicle	
Pressure of brake	
(Spare)	
Rotation number of engine	
Preceding vehicle distance 1	
Signal level 1	
Preceding vehicle distance 2	
Signal level 2	
Preceding vehicle distance 3	
Signal level 3	
Preceding vehicle distance 4	
Signal level 4	
Preceding vehicle distance 5	
Signal level 5	
Preceding vehicle distance 6	
Signal level 6	
Preceding vehicle distance 7	
Signal level 7	
Preceding vehicle distance 8	
Signal level 8	
Check sum	EXCLUSIVE-OR of character code from header beginning to comma of just before check sum
Footer	¥r¥n (linefeed code)

再生ビューアの画面を図 4.2.4 に示す。図 4.2.4 の①が映像データ、②がドライブレコーダより取得した速度等の各種データ、③は GPS より取得した位置情報データである。

専用の再生ビューアを用いなくても、映像データのみであれば一般動画再生ソフトでの再生が可能である。また、速度等の各種データに関しても、取得したデータを再生ビューアで読み込む際に生成されるテキスト形式のファイルを基にした数値解析が可能である。



Fig. 4.2.4 Driving data viewer

4.3 運転指導員の運転行動データの取得

本節では運転指導員の運転行動データの取得について述べる。4.3.1 項では運転指導員について、4.3.2 では実施した走行実験の実験について述べる。

4.3.1 運転指導員

運転指導員による市街地走行データ取得のため、都内の自動車教習所にご協力いただいた。被験者の選定条件を表 4.3.1 に示す。表 4.3.1 の被験者の選定条件に当てはまる指導員を、教習所の代表者に選定していただいた。被験者のデータを表 4.3.2 に示す。

Table 4.3.1 Selecting condition of subjects

(1) Skill testing coach	1person
(2) The person who is true of all the following contents	1person
(a) License acquisition years are over 20years	
(b) Coaching years are over 10years	
(c) Annual running distance with 4 wheel vehicle is over 5,000 kilometer	
(d) In driving , you have consciousness of safety driving . And you have never caused an accident and had violation .	
(3) The person who is true of all the following contents	1person
(a) License acquisition years are over 10years but under 20 years	
(b) Coaching years are over 5years	
(c) Annual running distance with 4 wheel vehicle is over 5,000 kilometer	
(d) In driving , you have consciousness of safety driving . And you have never caused an accident and had violation .	

Table 4.3.2 Data of instructors

		sex	age
Instructor E1	Skill testing coach	male	41
Instructor E2	Driving coach	male	54
Instructor E3	Driving coach	male	36
	coaching years	License acquisition years	
Instructor E1	14years and 7months	22years and 4months	
Instructor E2	16years	36years and 8months	
Instructor E3	6years	16years and 11months	

4.3.2 実験条件

運転指導員による市街地走行データ取得実験を行うにあたり、本学の研究倫理委員会に対し研究倫理審査をお願いした。委員会に実験が承認されるまでには1ヶ月程度の期間が必要である。また、各被験者に対し、インフォームドコンセントを実施した。実験条件を以下に示す。

・実験条件

被験者：運転指導員3名

実験経路：全長約6.1km 所要時間約20分

実験時間帯：午前8時30分～9時30分

天候：晴または曇

走行周数：各被験者とも1周 / 1日×6日 = 6周

実験経路を図4.3.1に示す。実験経路における交差点の総数は、優先側道路の交差点のみで107交差点あり、各交差点にID付けを行った。非優先側道路の交差点は1交差点である。



Fig. 4.3.1 Route of experiment

4.4 運転指導員の運転行動解析

本節では、収集した運転指導員の実路走行データの内、無信号交差点での単独走行時のデータに着目し、その結果について述べる。また 4.4.2 項では、収集したデータの危険予測行動が予防安全の観点から妥当であるか定量的に評価した結果について述べる。

4.4.1 運転指導員の無信号交差点における運転行動データ

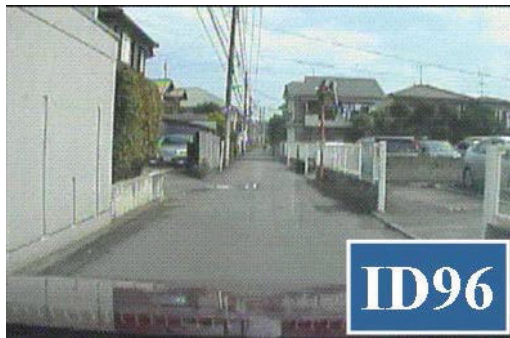
図 4.3.1 の実験経路に示す ID8, 94, 96, 98 の交差点を図 4.4.1 に示す。図 4.4.1 に示す交差点を、被験者 3 名が通過した際の運転行動データの一例を図 4.4.2 に示す。さらに、各被験者が、ID8 の交差点を通過した際の運転行動データを図 4.4.3 に示す。同様に、ID94 のデータを図 4.4.4, ID96 のデータを図 4.4.5, ID98 のデータを図 4.4.6 に示す。図 4.4.2~4.4.6 は、縦軸が上からブレーキ圧 P_b [MPa], 前後方向加速度 a [m/s^2], 速度 V_c [km/h], 横軸は交差点入り口までの距離 X_{int} [m] である。 $X_{\text{int}} = 0$ (ゼロ点) は、自車先端が交差点入り口の角に到達した時点を示す。また、取得したデータの内、周囲に動物体が存在したデータは、交差点という静的な環境に対する運転行動ではないと判断し除外した。ここで、図 4.4.2 より、運転行動には被験者による違いがあることが確認できた。また、図 4.4.3~図 4.4.6 より、被験者別では運転行動に再現性があることが確認できた。



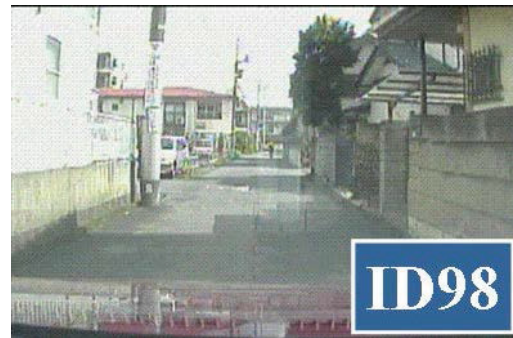
(a) Intersection ID8



(b) Intersection ID94

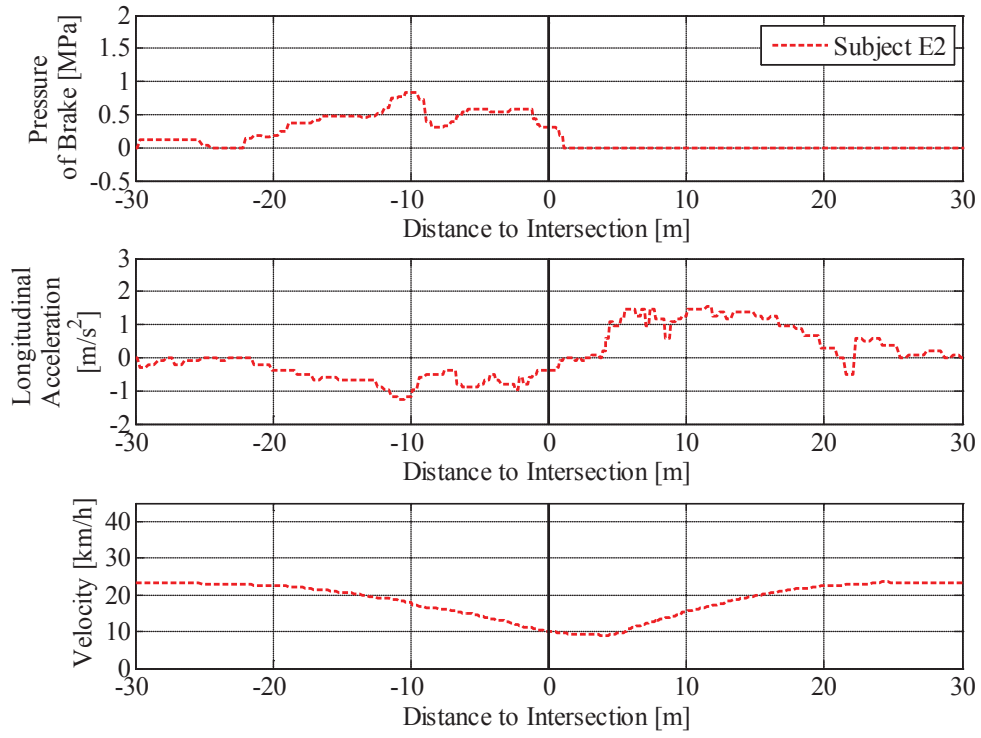


(a) Intersection ID96

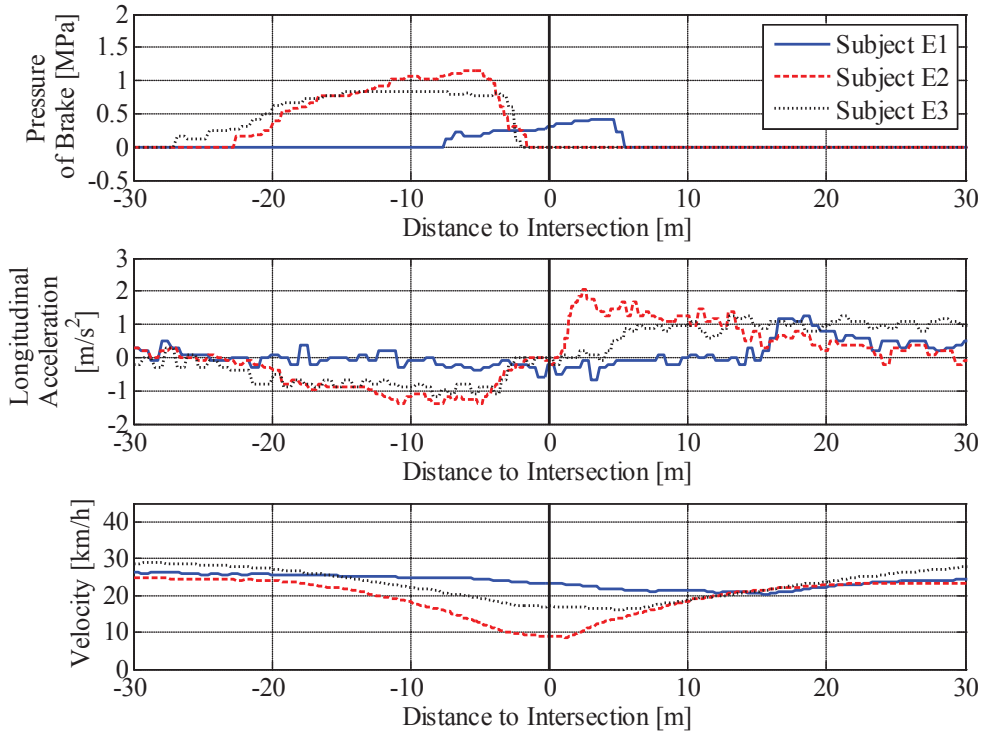


(b) Intersection ID98

Fig. 4.4.1 Examples of intersections

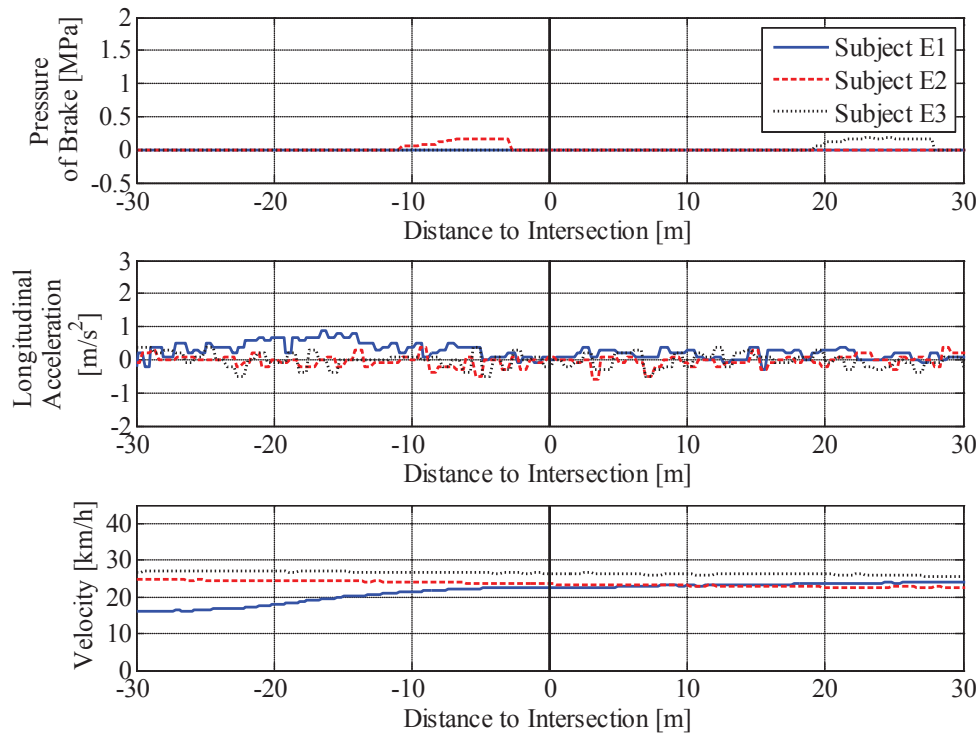


(a) Intersection ID8

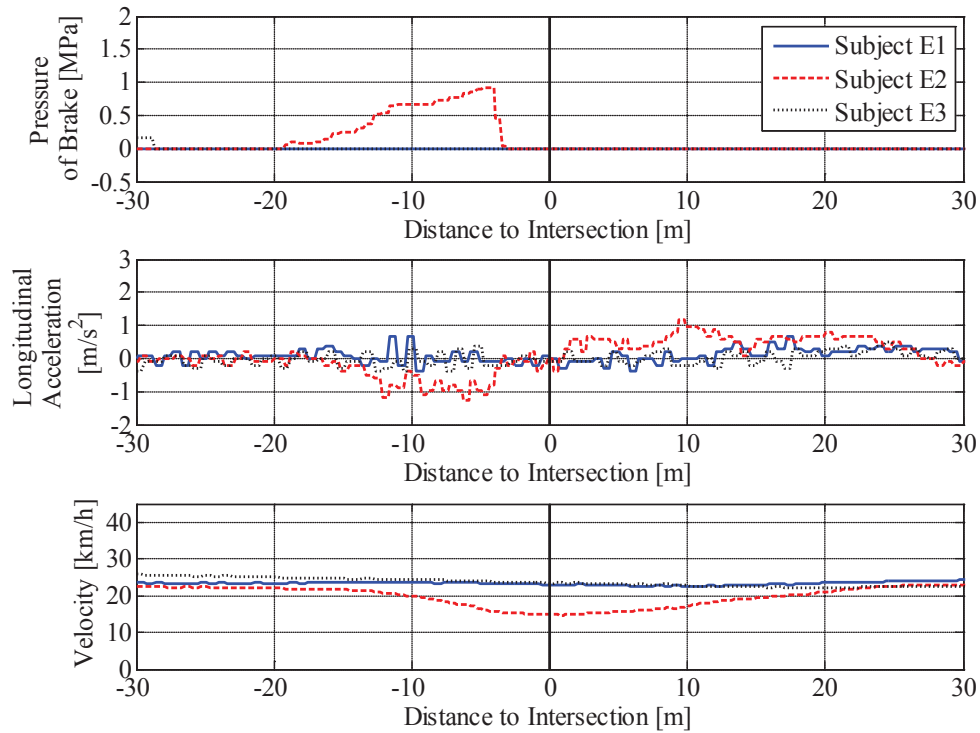


(b) Intersection ID94

Fig. 4.4.2 Examples of measurement data

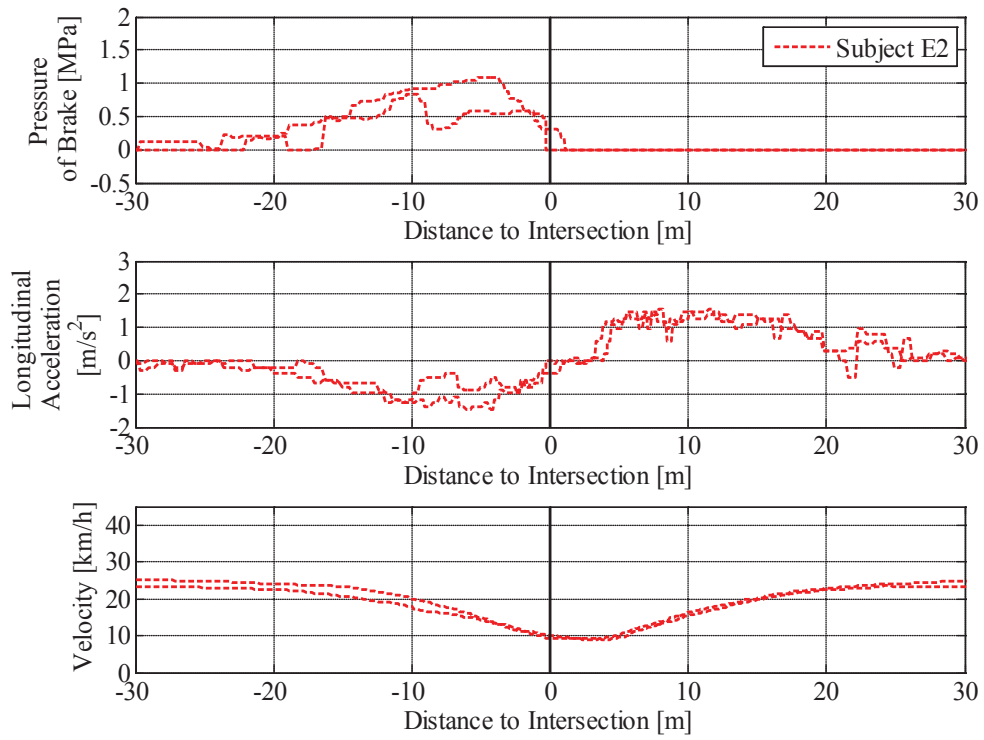


(c) Intersection ID96



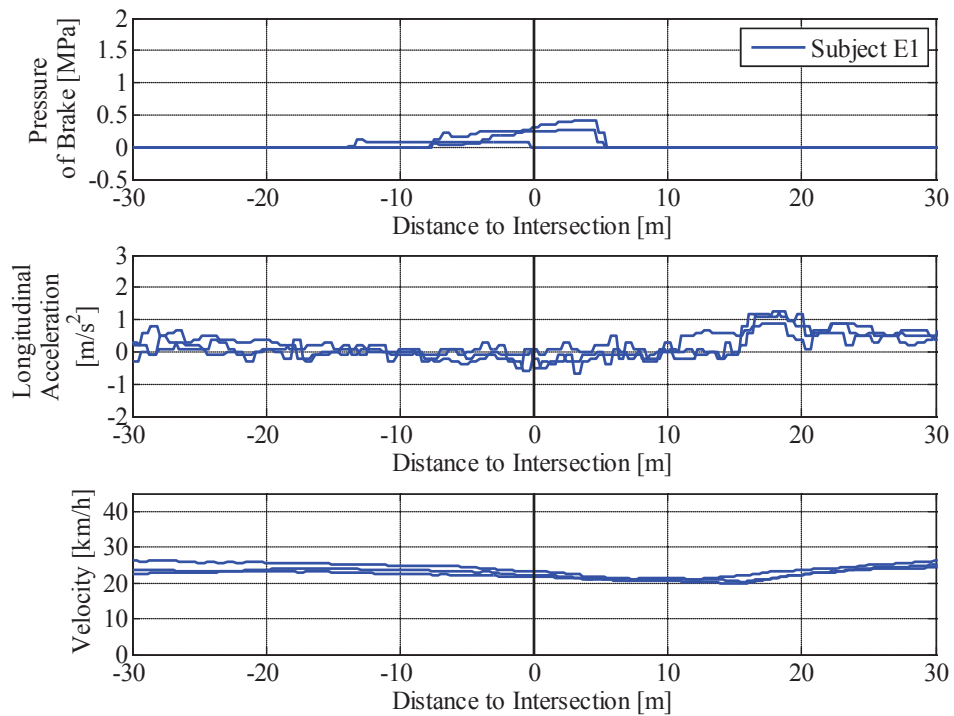
(d) Intersection ID98

Fig. 4.4.2(Cont'd) Examples of measurement data



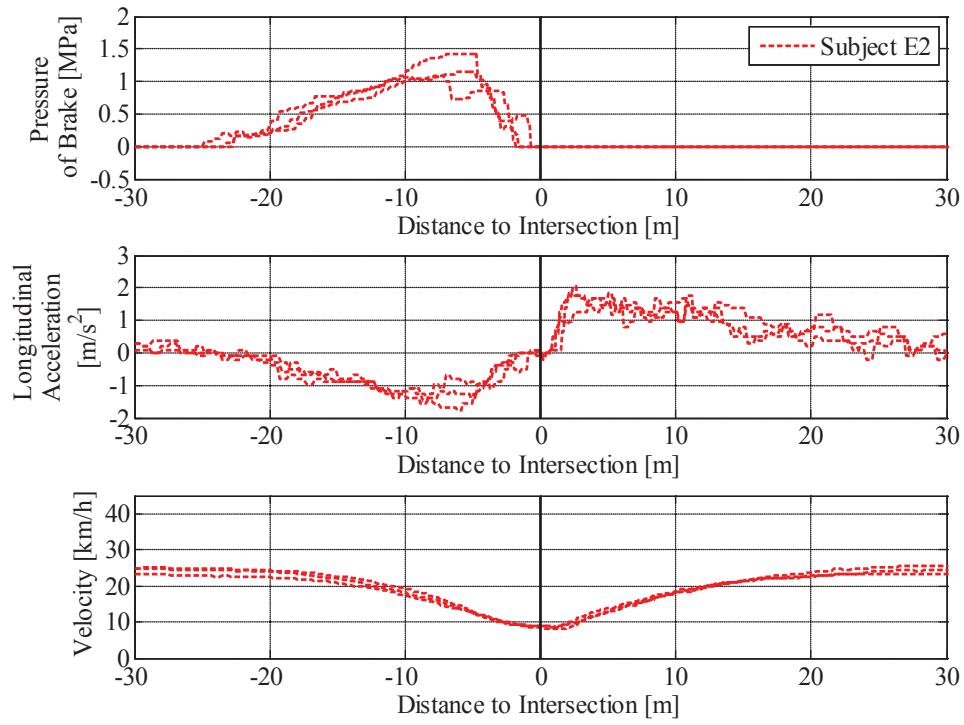
(a) Subject E2

Fig. 4.4.3 Measurement data at intersection ID8

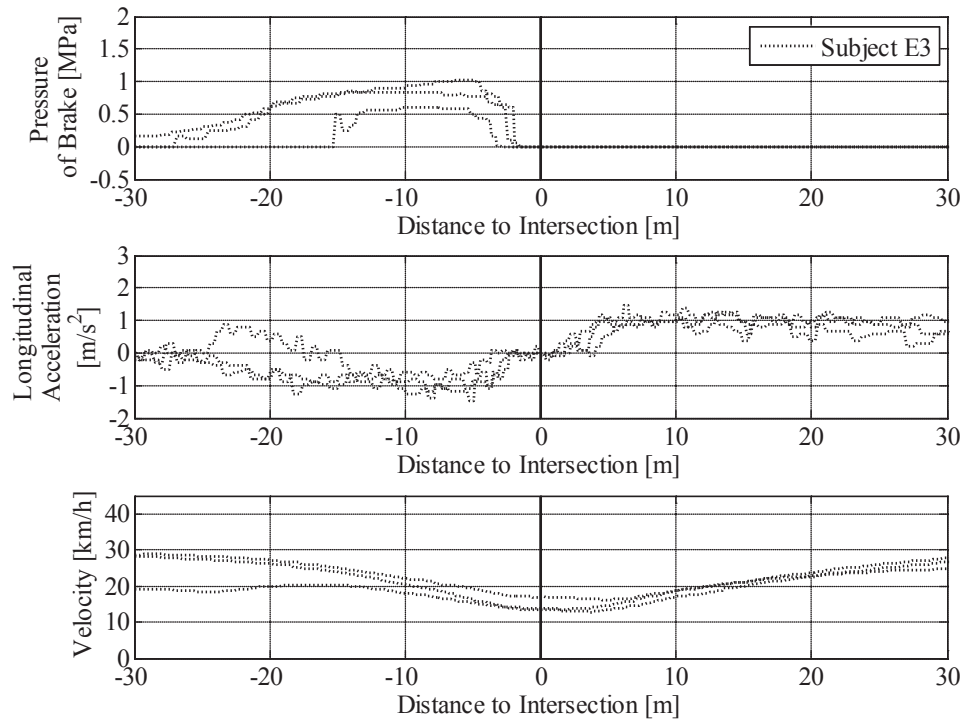


(a) Subject E1

Fig. 4.4.4 Measurement data at intersection ID94

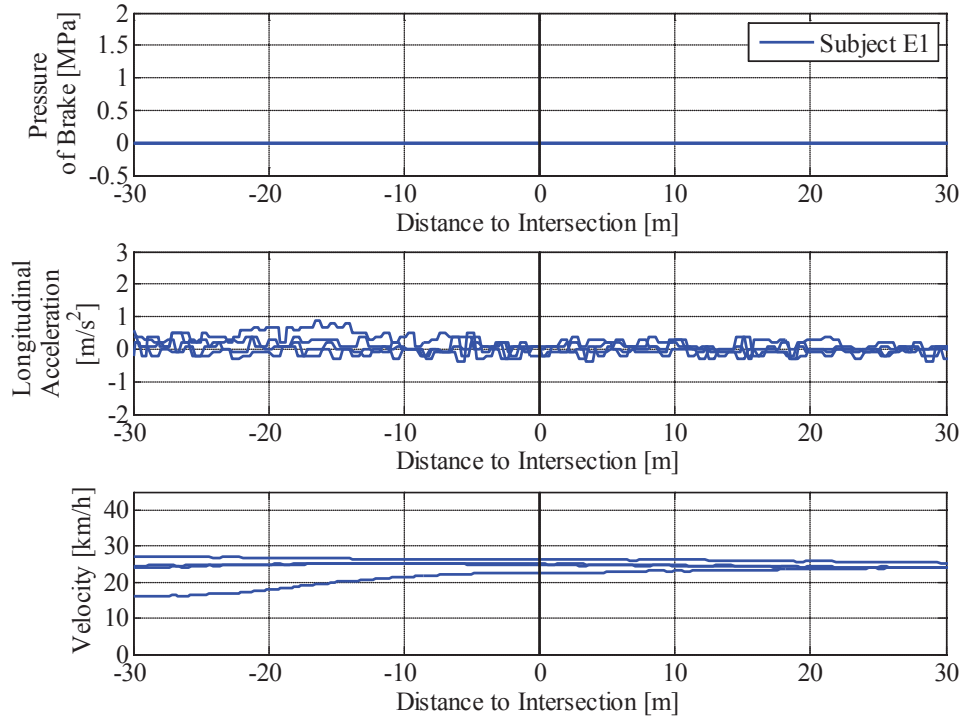


(b) Subject E2

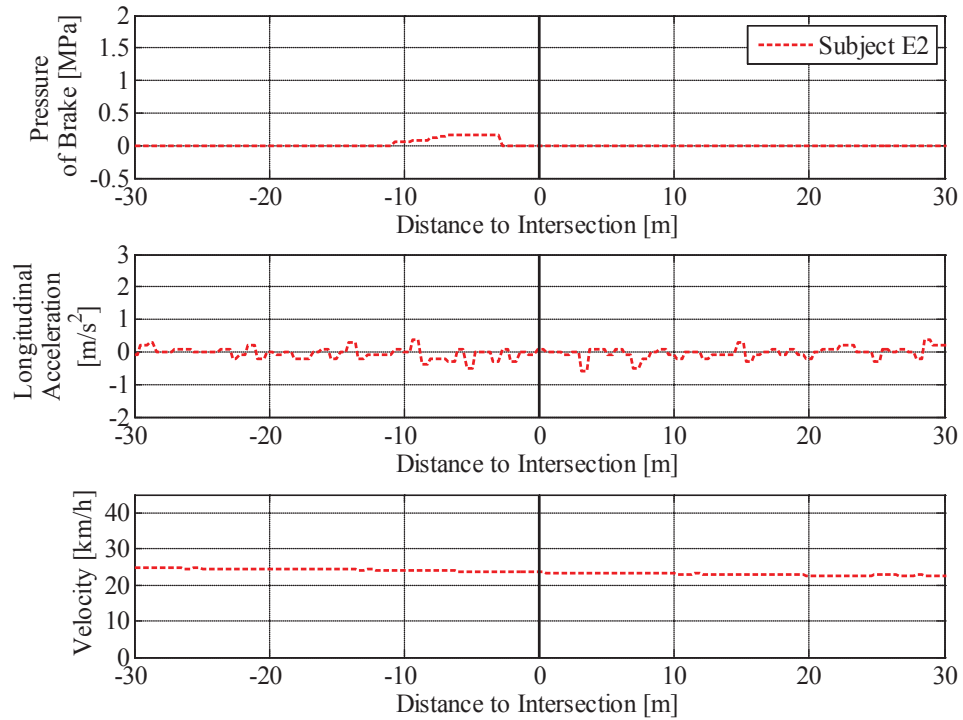


(c) Subject E3

Fig. 4.4.4(Cont'd) Measurement data at intersection ID94

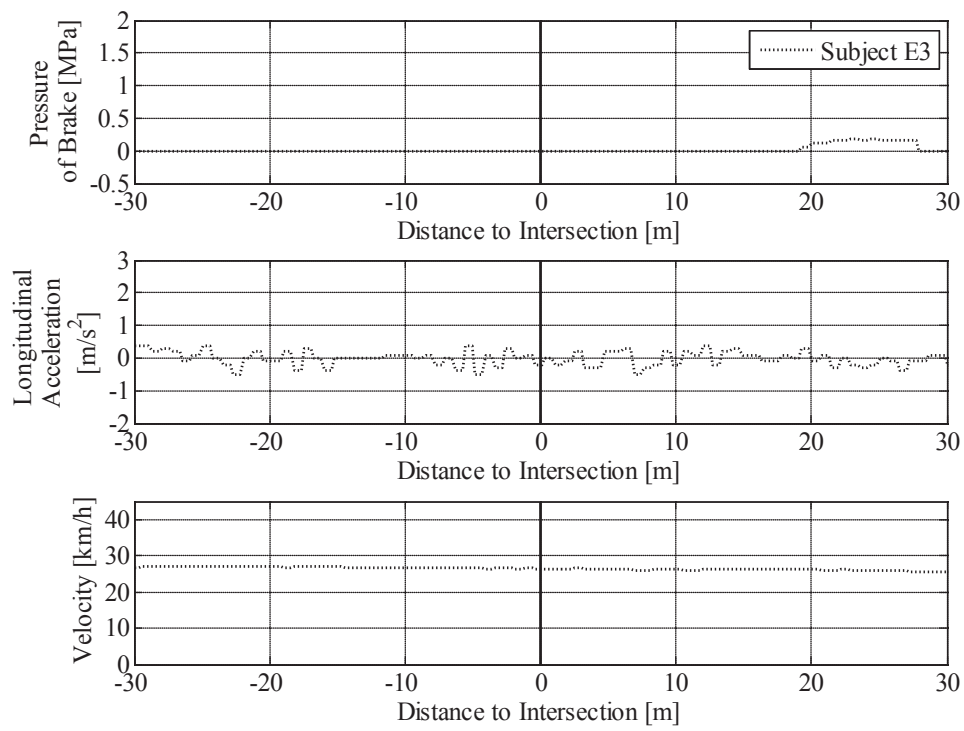


(a) Subject E1



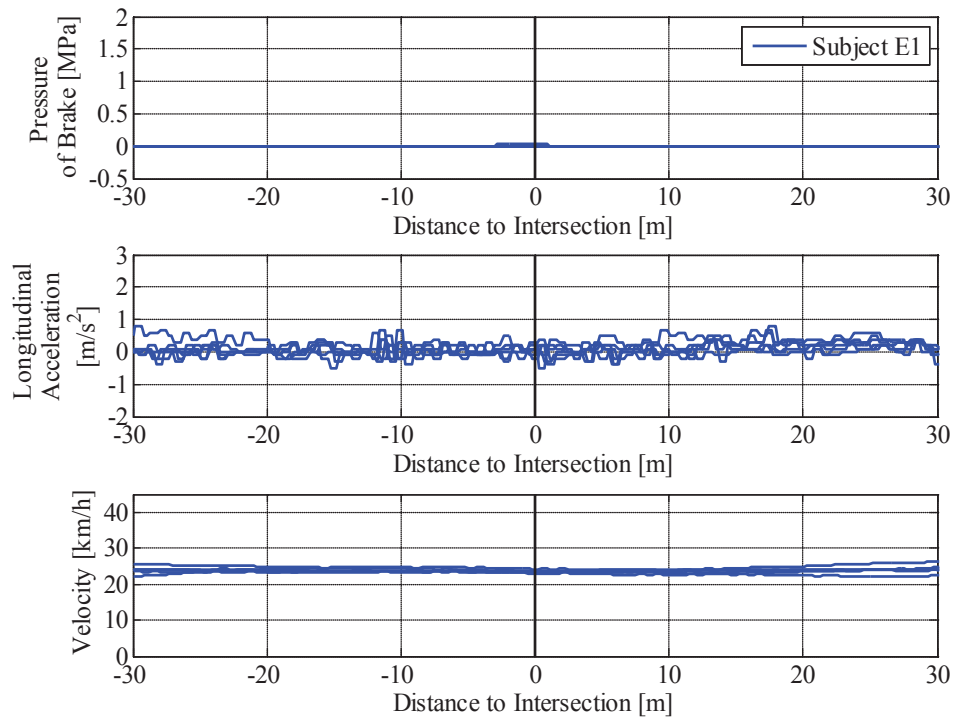
(b) Subject E2

Fig. 4.4.5 Measurement data at intersection ID96



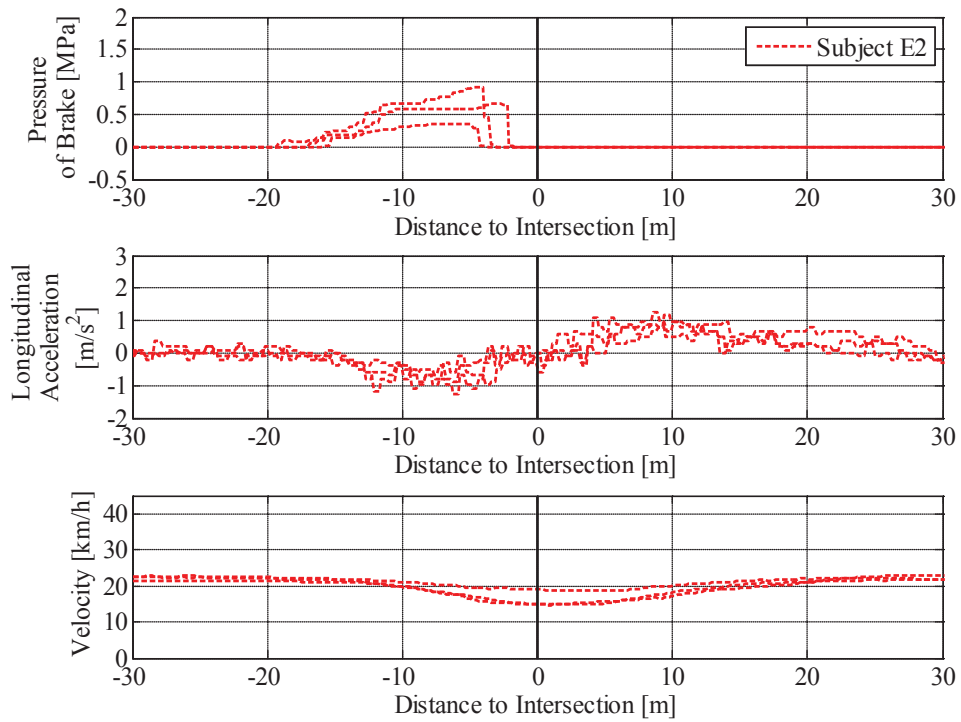
(c) Subject E3

Fig. 4.4.5(Cont'd) Measurement data at intersection ID96

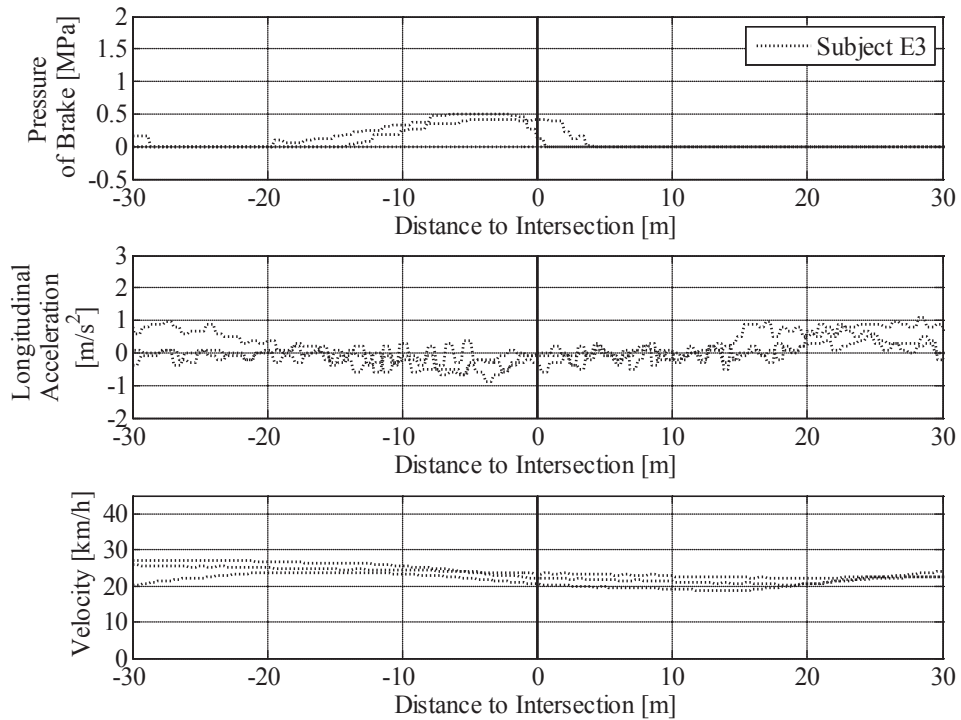


(a) Subject E1

Fig. 4.4.6 Measurement data at intersection ID98



(b) Subject E2



(c) Subject E3

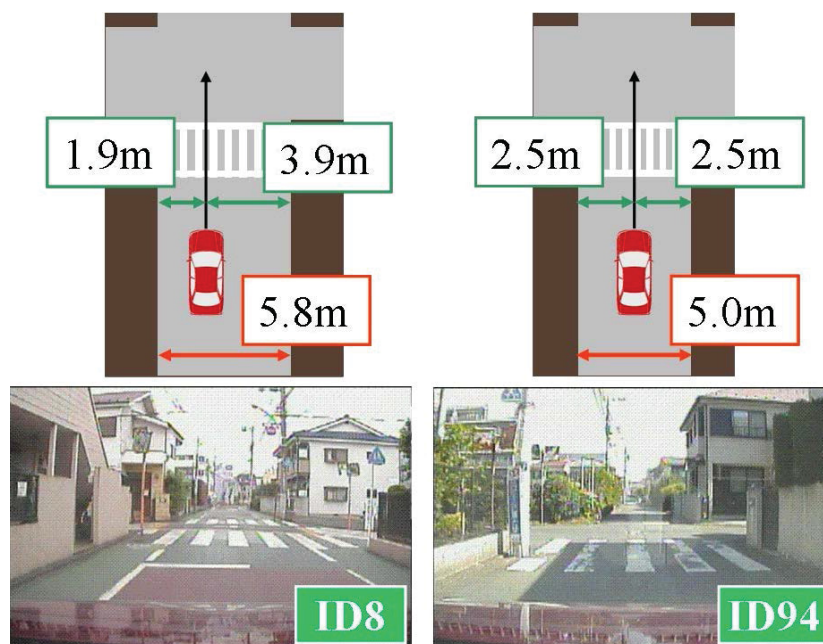
Fig. 4.4.6(Cont'd) Measurement data at intersection ID98

4.4.2 運転指導員の予防安全性能評価

本項では、取得した運転指導員の市街地走行データの危険予測行動について予防安全性能を定量的に評価した結果について述べる。尚、本項では、被験者 E2 のデータに関し、危険予測による減速行動を行っていた見通しの悪い十字路を分析対象場面とする。

分析対象場면을図 4.4.7 に示す。図 4.4.7 において、分析対象場面は ID8 が 2 件、ID94 が 3 件であった。道路幅員は Google マップの距離測定ツールを用いて計測し、左右の壁から自車中心までの距離は、取得した映像データから決定した。

交差点 ID8 における左壁から自車中心までの距離は、路側帯の幅を 1m と仮定し、路側帯の幅に車両幅 1.8m の半分となる 0.9m の値を加え、1.9m とした。交差点 ID94 における左壁から自車中心までの距離は、自車が道路中心を走行していると判断し、道幅 5.0m の半分である 2.5m とした。



(a) Intersection ID8

(b) Intersection ID94

Fig. 4.4.7 Objective scenes for theoretical consideration

本節では、衝突事故において最も危険な場合と考えられる正面衝突に着目し、運転指導員（被験者E2）が、歩行者の飛び出しに対し、正面衝突を回避できる速度で走行しているかどうかを分析する．図4.4.8に運転行動評価方法を示す．図4.4.8において、被験者E2 の速度プロファイル V_{E2}^* が、停止距離に基づく限界速度 V_{max} 以下の状態で、 $V(T_{tc-car} = T_{tc-ped})$ の帯の左端と交差していれば、正面衝突可能性が低い運転行動であるといえる．ここで、 T_{tc} は衝突点到達余裕時間(Time to conflict-point)を表している． T_{tc} の計算式は本節で後述する．

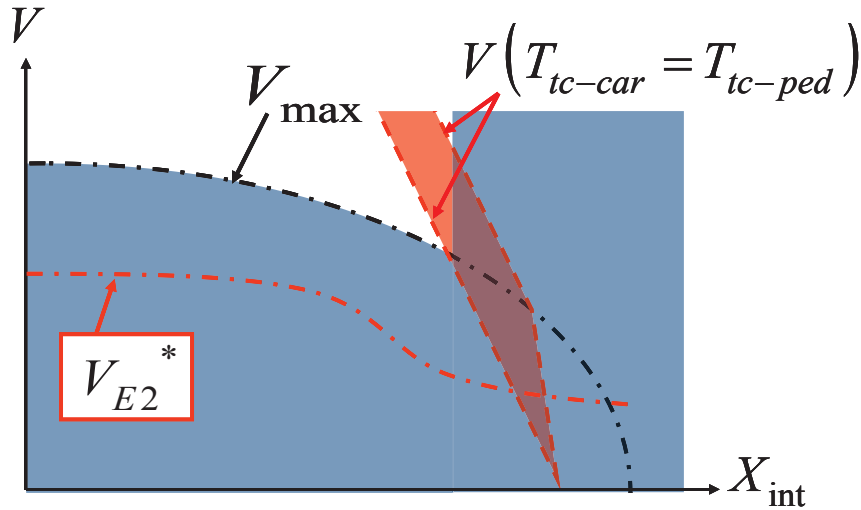


Fig. 4.4.8 Image of driving behavior assessment

被験者E2 の運転行動を評価するにあたり、まず、停止距離に基づく限界速度 V_{max} の導出方法を示す．ここで、対歩行者・自転車衝突回避システムの事故回避必要距離 D^* は、式(4.4.1)のように表すことができる⁽⁴⁷⁾．式(4.4.1)に示す衝突回避システムの事故回避必要距離に対し、停止距離 D を算出するため、式(4.4.1)の目標減速度 a^* を最大減速度 a_{max} 、カメラに歩行者・自転車が写ってから自動的にブレーキが作動開始するまでに要する時間 τ_c をむだ時間 τ に置き換える．さらに、限界速度 V_{max} の式を導出するため、歩行者がカメラに写った時点の自車速度 V_0 を、限界速度 V_{max} に置き換える．以上より、停止距離 D の導出式は式(4.4.2)、対歩行者・自転車衝突回避のための限界速度 V_{max} の導出式は式(4.4.3)に示す形となる．式(4.4.3)に関し、 a_{max} は最大減速度(0.85G),

τ はむだ時間（反射時間 0.4s + 踏替え時間 0.2s + 踏込み時間 0.1s = 0.7s）, j はジャーク (12m/s^3), α_{ped} は歩行者 X_{int} 方向飛び出し位置, D は交差点入り口までの距離(= X_{int}) である. t_1 の算出式を式(4.4.4)に示す.

$$D^* = \frac{V_0^2}{2a^*} + \left(\tau_c + \frac{t_1}{2} \right) V_0 - \frac{j t_1^3}{24} \quad (4.4.1)$$

$$D = \frac{V_{\max}^2}{2a_{\max}} + \left(\tau + \frac{t_1}{2} \right) V_{\max} - \frac{j t_1^3}{24} \quad (4.4.2)$$

$$V_{\max} = \left(-\tau + \frac{t_1}{2} \right) a_{\max} + \sqrt{\left(\tau + \frac{t_1}{2} \right)^2 a_{\max}^2 + a_{\max} \left\{ 2(-D + \alpha_{ped}) + \frac{j t_1^3}{12} \right\}} \quad (4.4.3)$$

$$t_1 = \frac{a_{\max}}{j} \quad (4.4.4)$$

つぎに, $T_{tc-car} = T_{tc-ped}$ となる場合の車両速度 V の導出方法を示す. 自動車側, 歩行者側の衝突点到達余裕時間 T_{tc-car} , T_{tc-ped} の算出式を, それぞれ式(4.4.5)と(4.4.6)に示す. 式(4.4.5)と(4.4.6)より, $T_{tc-car} = T_{tc-ped}$ となる場合の車両速度 V は, 式(4.4.7)のように導出できる.

式(4.4.5)に関し, X_{int} は交差点入り口までの距離, α_{ped} は歩行者 X_{int} 方向飛び出し位置である. ここで, α_{ped} の値は 1 とした. 式(4.4.6)に関し, \hat{Y}_{ped} は歩行者 Y 方向飛び出し位置, w は車両幅(= 1.8m), \tilde{V}_{ped} は歩行者速度である. 歩行者速度について, ピヤポンらは, ヒヤリハットデータベースを用い, 無信号交差点における歩行者飛び出し速度分析を行った. ピヤポンらの歩行者速度分析より, 無信号交差点において歩行者は $1.0\text{m/s} \sim 2.0\text{m/s}$ の速度で飛び出してくる場合が多いことがわかった⁽⁴⁸⁾. そこで本節では, ピヤポンらの歩行者速度分析結果を基に, 歩行者速度の値を 1.5m/s と設定した. 各パラメータの説明を図 4.4.9 に示す.

$$T_{tc-car} = \frac{|X_{int}| + \alpha_{ped}}{V_c} \quad (4.4.5)$$

$$T_{tc-ped} = \frac{\hat{Y}_{ped} - w/2}{\tilde{V}_{ped}} \quad (4.4.6)$$

$$T_{tc-car} = T_{tc-ped}$$

$$\frac{|X_{int}| + \alpha_{ped}}{V_c} = T_{tc-ped}$$

$$\therefore V_c = \frac{|X_{int}| + \alpha_{ped}}{T_{tc-ped}} \quad \left(V_L = \frac{|X_{int}| + \alpha_{ped}}{(\hat{Y}_{ped,L} - w/2)/\tilde{V}_{ped}}, V_R = \frac{|X_{int}| + \alpha_{ped}}{(\hat{Y}_{ped,R} - w/2)/\tilde{V}_{ped}} \right) \quad (4.4.7)$$

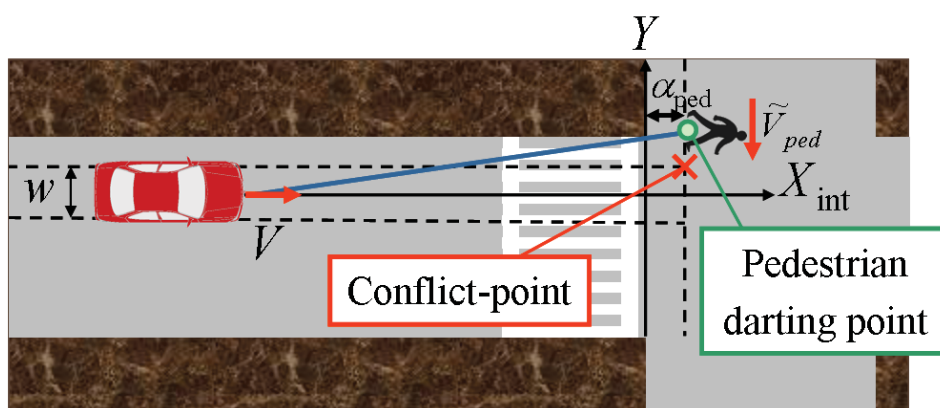


Fig. 4.4.9 Parameters for calculation of Time to conflict-point

最後に、式(4.4.7)中の歩行者Y方向飛び出し位置 \hat{Y}_{ped} の導出方法を示す． \hat{Y}_{ped} 導出のための、パラメータの説明を図 4.4.10 に示す．図 4.4.10 より、歩行者飛び出し位置は、自転車先端中央である点Aから交差点の角である点Bを通り、歩行者 X_{int} 方向飛び出し位置 α_{ped} の値が1となる点Cとする．歩行者Y方向飛び出し位置 \hat{Y}_{ped} の計算式を式(4.4.8)に示す．

$$\begin{aligned}
 A:(x_A, y_A) &= (X_{int}, 0), & B:(x_B, y_B) &= (0, d_L), & C:(x_C, y_C) &= (\alpha_{ped}, \hat{Y}_{ped}) \\
 |X_{int}|:(X_{int} + \alpha_{ped}) &= d_L : \hat{Y}_{ped} \\
 \therefore \hat{Y}_{ped} &= \left(1 + \frac{\alpha_{ped}}{|X_{int}|}\right) d_L
 \end{aligned} \tag{4.4.8}$$

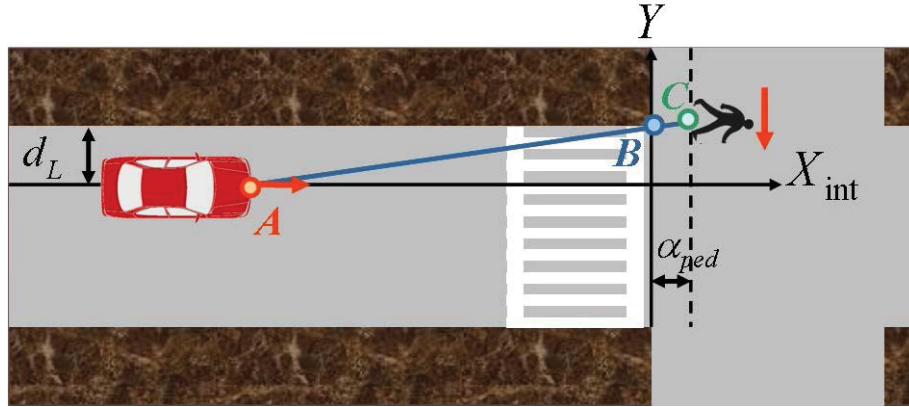
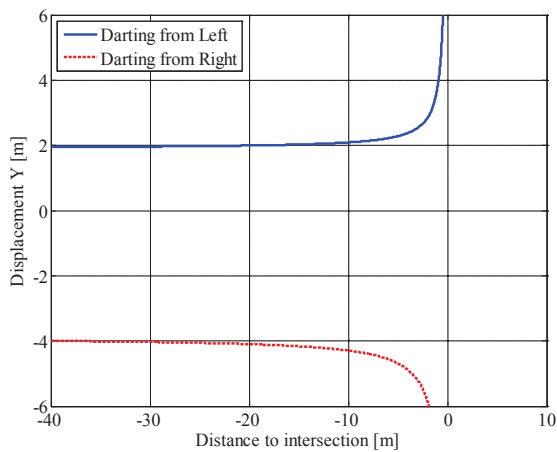
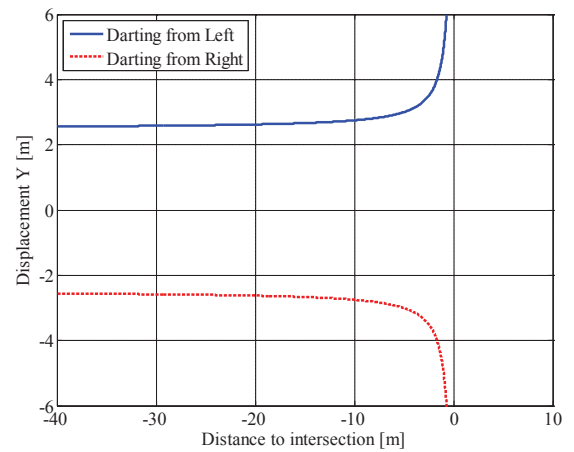


Fig. 4.4.10 Parameters for calculation of pedestrian darting point of Y direction

ID8, ID94 の交差点における歩行者Y方向飛び出し位置 \hat{Y}_{ped} の計算結果を、それぞれ図 4.4.11 に示す．図 4.4.11 より、歩行者Y方向飛び出し位置 \hat{Y}_{ped} は、交差点入り口までの距離 X_{int} が約 2m の地点から大きく変化していることが確認できる．



(a) Intersection ID8



(b) Intersection ID94

Fig. 4.4.11 Visibility line with respect to the vehicle position

つぎに，ID8，ID94の交差点における限界速度 V_{max} ，および $T_{tc-car} = T_{tc-ped}$ となる場合の車両速度 V の計算結果を図4.4.12に示す．図4.4.12について， V_R は，右側の交差点の角からの歩行者飛び出しに対し $T_{tc-car} = T_{tc-ped}$ となる速度である． V_L は，左側の交差点の角からの歩行者飛び出しに対し $T_{tc-car} = T_{tc-ped}$ となる速度である． V_R ， V_L ともに，帯の左端は，自車前方の角を基準として $T_{tc-car} = T_{tc-ped}$ となる場合，帯の右端は，自車後方の角を基準として $T_{tc-car} = T_{tc-ped}$ となる場合である． V_{max1} は，式(4.4.3)の a_{max} の値を最大減速度0.85Gとして計算した場合， V_{max2} は，式(4.4.3)の a_{max} の値を通常減速度0.30Gとして計算した場合の限界速度である．

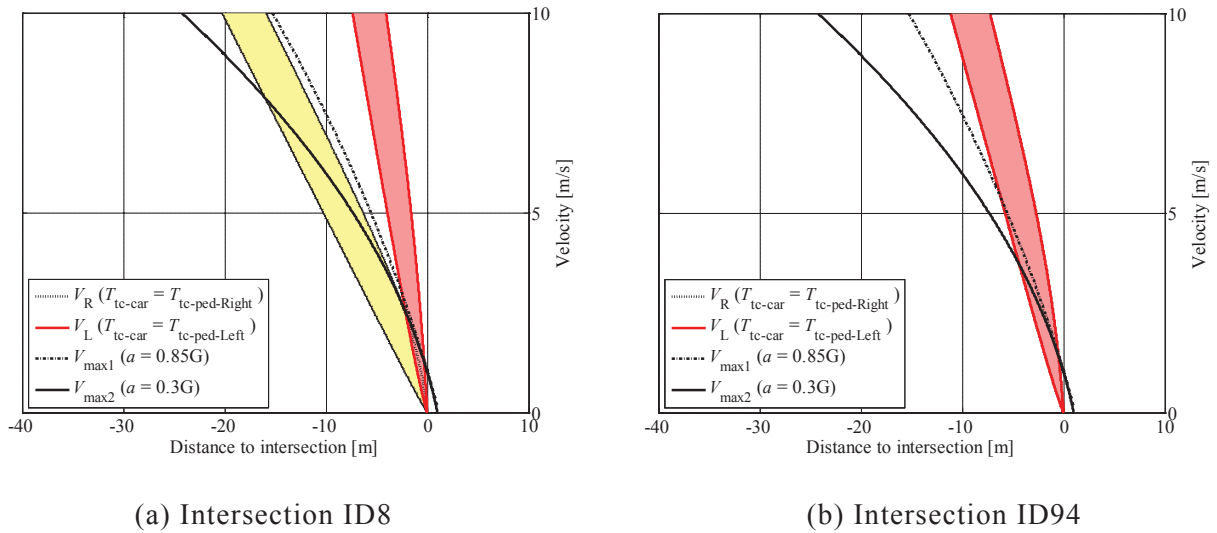


Fig. 4.4.12 Velocity of high collision possibility and max velocity

図4.4.12において，歩行者の飛び出しに対する正面衝突回避可能領域を塗りつぶした結果を図4.4.13に示す．正面衝突回避可能領域の決定では， V_R と V_L のうちの速度が高い方と， V_{max1} の値を比較する．図4.4.13より， $V_L > V_R$ であるので，本論文では V_L と V_{max1} の値を比較する．詳しくは， V_L と V_{max1} の左端の線を比較する．正面衝突回避可能領域は，2つの場合分けにより決定する．1つ目は $V_L \geq V_{max1}$ の場合である． $V_L \geq V_{max1}$ の場合，運転指導員が V_{max1} 以上の速度で走行していたとすると，歩行者の飛び出しに対し，正面衝突を回避できない．ゆえに， $V_L \geq V_{max1}$ の場合の正面衝突回避可能領域は， V_{max1} 以下の速度域となる．2つ目は， $V_L < V_{max1}$ の場合である． $V_L < V_{max1}$ の場合，

運転指導員が V_{max1} 以上の速度で走行していたとしても、自車の方が歩行者よりも先に衝突点を通過するため、正面衝突を回避することが可能である。ゆえに、 $V_L < V_{max1}$ の場合の正面衝突回避可能領域は、すべての速度域となる。以下に、無信号交差点において、歩行者との正面衝突を回避できる車両速度 V の条件を示す。ここで、 $V_L \geq V_{max1}$ の場合の V の計算式は、式(4.4.3)に $a_{max} = 0.85G (\doteq 8.3 \text{ m/s}^2)$ を代入した結果である。

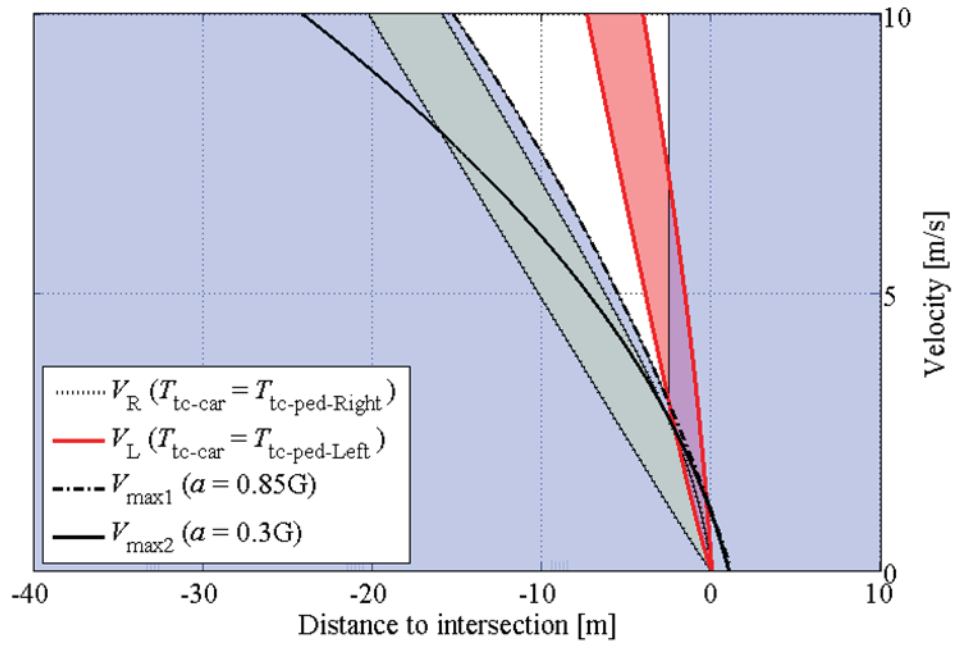
- ・ $V_L \geq V_{max1}$ の場合

$$V \leq V_{max1} = 8.3 \left(-\tau + \frac{t_1}{2} \right) + \sqrt{68.9 \left(\tau + \frac{t_1}{2} \right)^2 + 8.3 \left\{ 2 \left(-D + \alpha_{ped} \right) + \frac{jt_1^3}{12} \right\}}$$

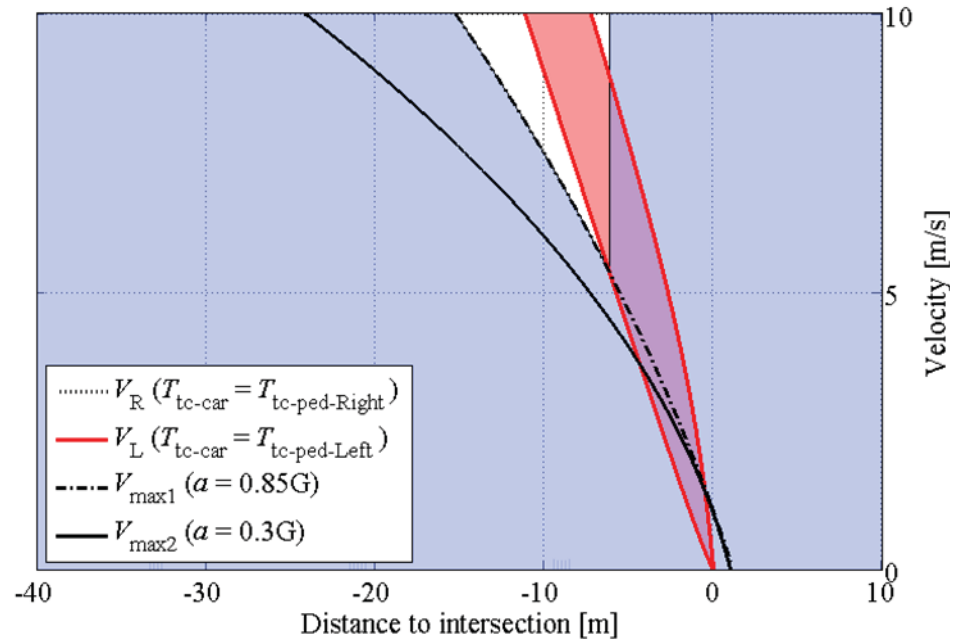
- ・ $V_L < V_{max1}$ の場合

$$V \geq 0$$

図 4.4.13 で示した正面衝突回避可能領域に対し、被験者E2 の走行データを重ね合わせたものを図 4.4.14 に示す。図 4.4.14 において、被験者E2 の速度プロファイル V_{E2}^* 、一般ドライバの速度プロファイルを V で示す。図 4.4.14 より、一般ドライバの速度プロファイル V は、正面衝突回避可能領域外を通過しているため、歩行者が飛び出してきた場合に正面衝突を回避できないことがわかる。一方、被験者E2 の速度プロファイル V_{E2}^* は、 $-40 < X_{int} < 0$ において正面衝突回避可能領域を通過していることがわかる。ゆえに運転指導員は、無信号交差点における歩行者の飛び出しにそなえ、正面衝突を回避できる速度で走行していることが確認できる。

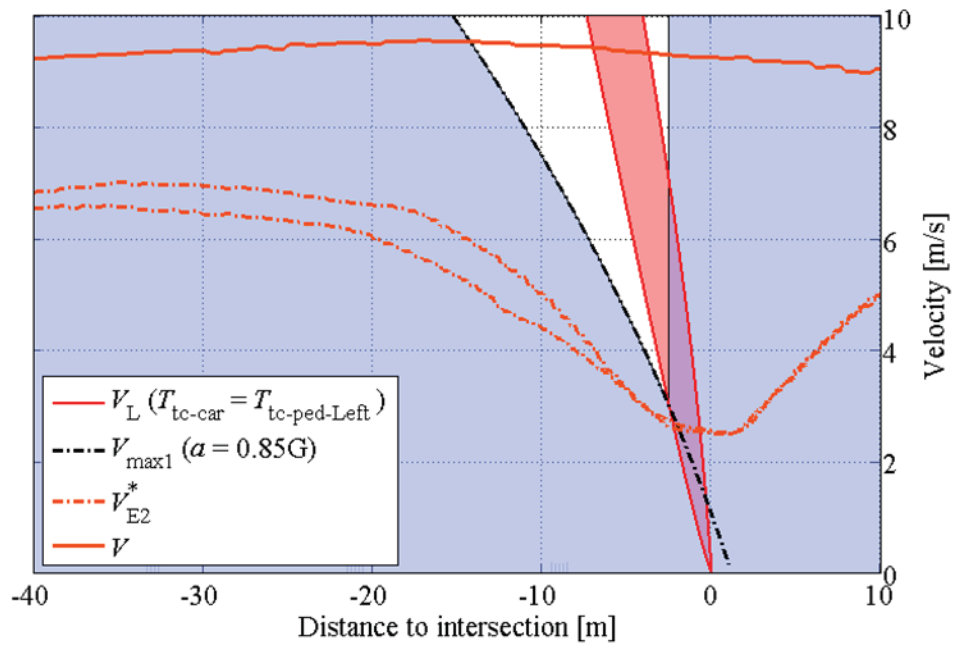


(a) Intersection ID8

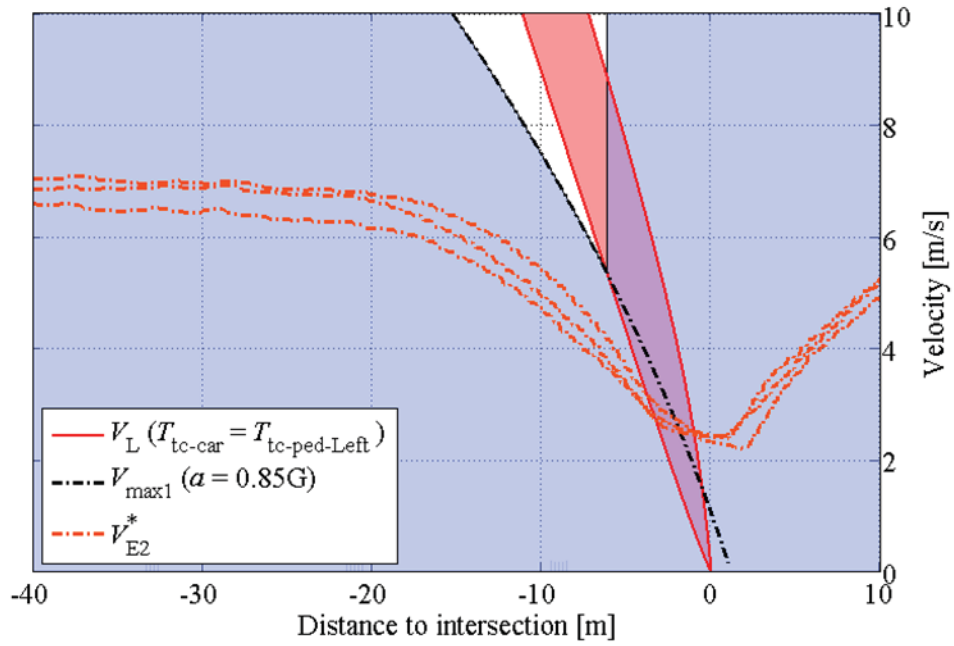


(b) Intersection ID94

Fig. 4.4.13 Possible region of front collision avoidance



(a) Intersection ID8



(b) Intersection ID94

Fig. 4.4.14 Results of driving behavior assessment

4.5 まとめ

本章では、実験車両 ASTERISK を用いた運転指導員の市街地走行データ収集と収集したデータの理論的考察を行った。その結果、運転指導員3名の市街地走行データより、運転行動には被験者ごとの違いがあるが、被験者別では運転行動に再現性があることが確認できた。また、運転行動の理論解析により、運転指導員は、無信号交差点における歩行者の飛び出しにそなえ、正面衝突を回避できる速度で走行していることが確認できた。以上の結果より、運転指導員の運転行動をモデル化することは可能であり、また、運転指導員の運転行動は模範とすべき運転行動であることを示した。

第5章

潜在リスク評価に基づく衝突回避システムの理論的解析

5.1 はじめに

図 5.1.1 にヒヤリハットデータ内の対歩行者場面の一例を示す．図 5.1.1 に示すように，歩行者や自転車等が駐車車両等の障害物の陰より飛び出すことで検出の遅れが生じ，ヒヤリハット場面となっている場面が存在する．そのため，このような場面で安全に走行するには障害物の陰などのセンサのオクルージョンより出現する歩行者を想定した潜在リスクの評価が必要であると考えられる．



Fig. 5.1.1 Snapshot of near-miss incident database

本章では，潜在リスクポテンシャル推定に基づく運転知能モデルの構築として，遮蔽物などで歩行者が直接センシングできない場面における潜在リスク評価手法を提案し，それに基づく衝突回避アルゴリズムの有効性の検証について述べる．5.2 節ではポテンシャルフィールドの理論に基づく潜在リスク評価手法を提案する．5.3 節では，提案したリスク評価手法の検証のために，ヒヤリハットデータベースの分析から検証場面の抽出した結果について述べ，5.4 節で抽出した場面での有効性を検証した結果に述べる．5.5 節では，本章より得られた知見をまとめる．

5.2 潜在リスクに対するリスクポテンシャルの理論的設計

本章では，熟練ドライバの運転行動を模擬した衝突リスクの定量化手法を提案する．4 章より，熟練ドライバは，見通しの悪い無信号交差点等の，歩行者が知覚できない場面では，その陰より出現する歩行者の存在確率を考慮した減速行動を行うことを確認できた．

そこで，本節では，これらの熟練ドライバの運転操作特性を模擬したリスクポテンシャルの設計について述べる．なお，本節では図 5.2.1 に示す，路上駐車した車両の陰から歩行者が飛び出す場面に定式化を行う．

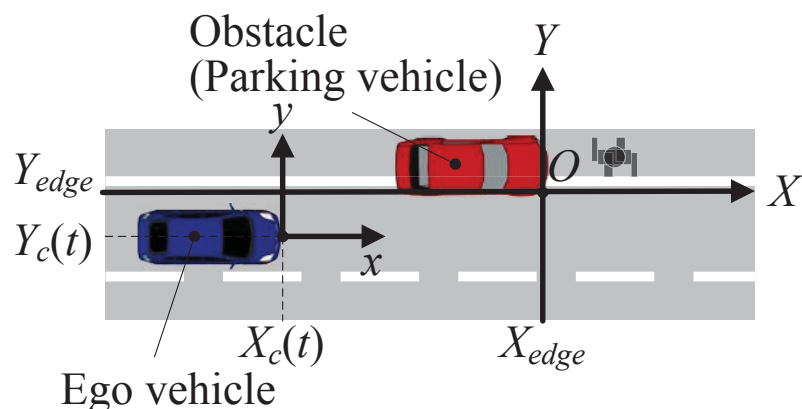


Fig. 5.2.1 Pictorial diagram of pedestrian dart out scenario

5.2.1 リスクポテンシャルの定式化

本節では、熟練ドライバの運転操作特性を模擬したリスクポテンシャルの定式化について述べる．

図 5.2.2 に第 4 章で得られた熟練ドライバの一例として、ID94 の場面での運転行動を示す．図 5.2.2 より、熟練のドライバ無信号交差点の潜在リスクに対し、加速度 0 の状態から、なめらかに減速度を増加させるようなプロファイルであることが確認できる．本論文では、減速度の増加を表現するため、無限遠では 0 となり、ポテンシャルの発生源に近いほどポテンシャルエネルギーは増大する斥力ポテンシャルの発生源からの距離 D_{rf} を逆数を持つ関数で潜在リスクのポテンシャルを表現する．式 (5.2.1) に潜在リスクポテンシャル関数を示す．

$$U_{rf}(X,Y) = C_{rf} \frac{1}{D_{rf}(X,Y)} \quad (5.2.1)$$

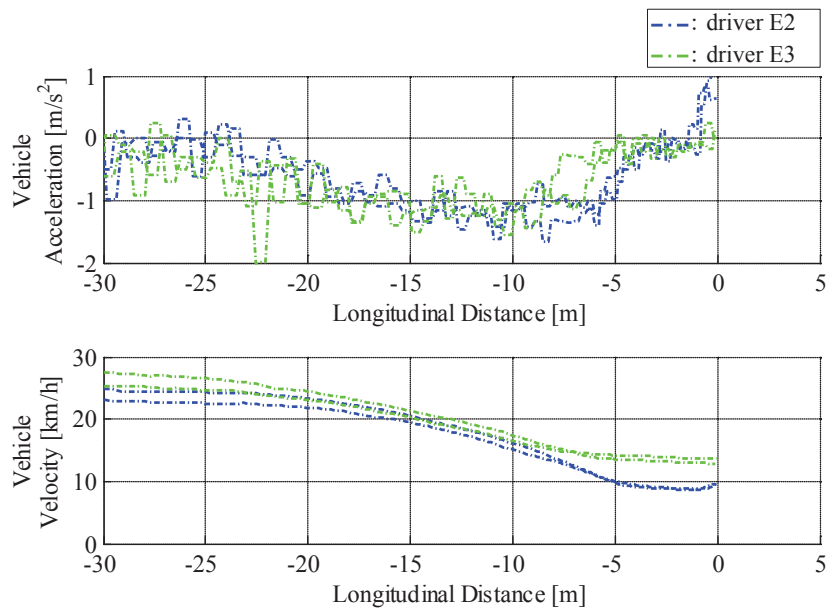


Fig. 5.2.2 Measurement data at intersection ID94

次に、式 (5.2.1) 中のポテンシャルの係数 C_{rf} の設計について述べる。

本論文では、係数 C_{rf} を、臨界距離 D_{th} で斥力のポテンシャルエネルギー U_{rf} が、自車の速度 V_c から参照速度 V_{ref} まで変化する際に変動する運動エネルギーと同様になるように設定した。エネルギーの釣り合いの式は式 (5.2.2) で表され、式 (5.2.2) より、係数 C_{rf} は式 (5.2.3) で表される。

$$U_{rf} = \frac{C_{rf}}{D_{th}} = \frac{1}{2} m_c (V_c^2 - V_{ref}^2) \quad (5.2.2)$$

$$C_{rf} = D_{th} \frac{1}{2} m_c (V_c^2 - V_{ref}^2) \quad (5.2.3)$$

式 (5.2.1), (5.2.3) より、斥力ポテンシャルは式 (5.2.4) で表され、自車に作用する斥力、加速度はそれぞれ、式 (5.2.5), (5.2.6) で表される。

$$U_{rf} = \frac{C_{rf}}{D_{rf}} = D_{th} \frac{m_c (V_c^2 - V_{ref}^2)}{2D_{rf}} \quad (5.2.4)$$

$$\begin{aligned} F_{x_rf} &= -\frac{\partial U_{rf}}{\partial X} = -D_{th} \frac{m_c (V_c^2 - V_{ref}^2)}{2D_{rf}^2} \frac{dX_{rf}}{D_{rf}} \\ &= -D_{th} \frac{m_c (V_c^2 - V_{ref}^2)}{2D_{rf}^2} \cos \theta_{rf} \end{aligned} \quad (5.2.5)$$

$$a_{x_rf} = -\frac{1}{m} \frac{\partial U_{rf}}{\partial X} = -D_{th} \frac{(V_c^2 - V_{ref}^2)}{2D_{rf}^2} \cos \theta_{rf} \quad (5.2.6)$$

5.2.2 臨界距離の理論的設計

本節では、臨界距離の設計について述べる。

斥力ポテンシャルとのなす角 θ_{rf} が 0 のとき、式 (5.2.6) より、斥力ポテンシャルより生じる加速度は式 (5.2.7) で表すことができる。式 (5.2.6) 中の a_{x_rf} は斥力ポテン

シャルとの前後方向距離 dX_{rf} で参照速度 V_{ref} まで等加速度運動で減速する際の加速度（参照加速度）を表す．

$$\begin{aligned}
 a_{x_{rf}} &= -\frac{1}{m} \frac{\partial U_{rf}}{\partial X} = -D_{th} \frac{(V_c^2 - V_{ref}^2)}{2D_{rf}^2} \cos \theta_{rf} \\
 &= -\frac{D_{th}}{D_{rf}} \frac{(V_c^2 - V_{ref}^2)}{2D_{rf}} \cos \theta_{rf} \\
 &= -\frac{D_{th}}{dX_{rf}} \frac{(V_c^2 - V_{ref}^2)}{2dX_{rf}} \\
 &= \frac{D_{th}}{dX_{rf}} a_{x_{ref}} \\
 a_{x_{rf}} &= -\frac{1}{m} \frac{\partial U_{rf}}{\partial X} = \frac{D_{th}}{dX_{rf}} a_{x_{ref}} \tag{5.2.7}
 \end{aligned}$$

式 (5.2.7)，より斥力のポテンシャルより生じる加速度は，斥力ポテンシャルとなす角 θ_{rf} が 0 のとき，臨界距離 D_{th} を臨界点として，参照加速度にたいして加速度が増減する加速度を生じることが確認できる．

100m 前方に斥力ポテンシャルがあり，初期速度が 20-70km/h の場面での車両挙動を図 5.2.3 に示す．なお，シミュレーション条件と制御パラメータはそれぞれ，表 5.2.1，5.2.2 に示す．

Table 5.2.1 Simulation condition

Symbol	Value	Unit
X_{c0}	0.0	m
Y_{c0}	0.0	m
X_{rf}	100.0	m
Y_{rf}	0.0	m

Table 5.2.2 Control parameters

Symbol	Value	Unit
D_{margin}	2.0	m
D_{th}	20	m
V_{c0}	20.0 ~ 70.0	km/h
V_{ref}	0.0	m/s
m_c	400	kg

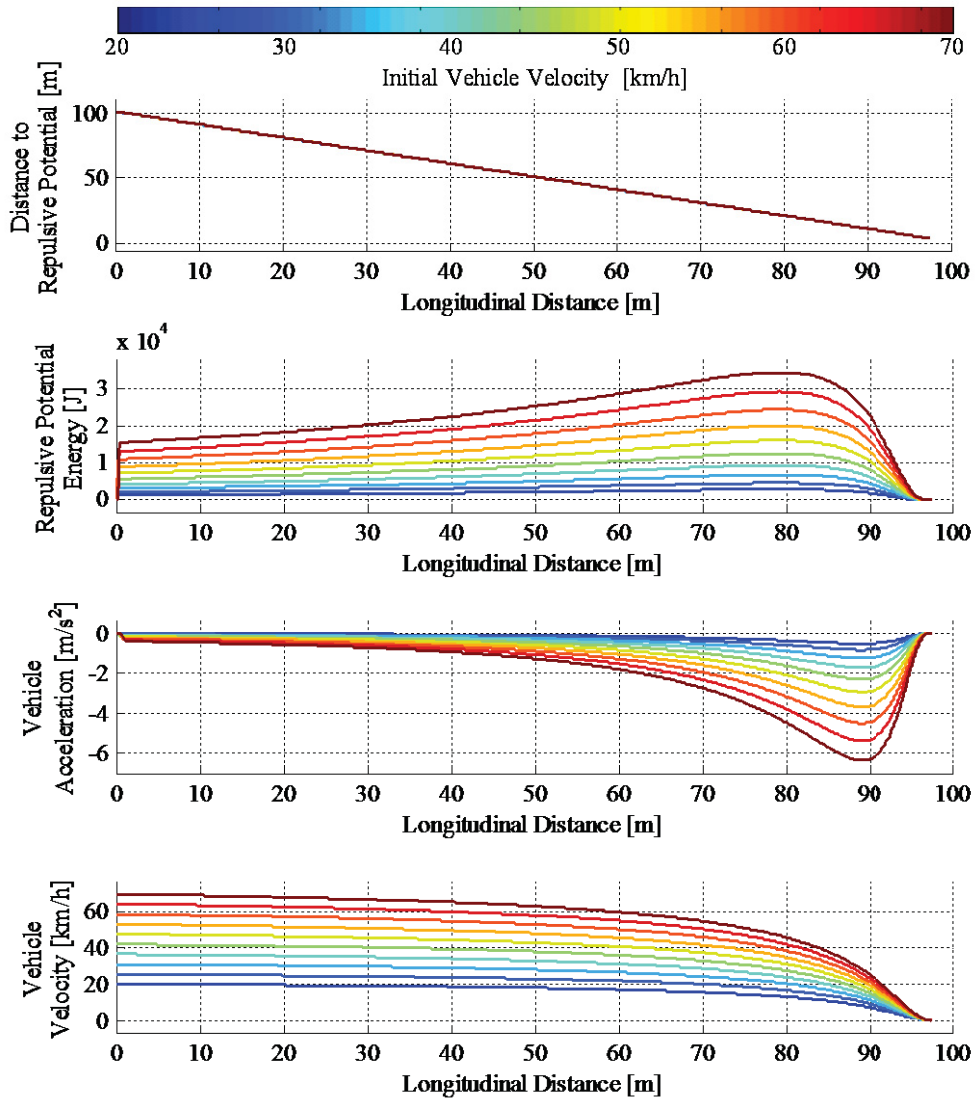


Fig. 5.2.3 Simulation result with changing V_{c0}
(D_{th} =Constant)

図 5.2.3 より，式 (5.2.7) で斥力ポテンシャルを算出することで，滑らかな減速行動をよく表現できていることが確認できる．しかし，表 5.2.2 に示す条件のように，臨界距離を一定値で与えた場合，初期速度が増加した場合，臨界点が固定されているため，最大減速度が大きく増加していることが確認できる．

そこで，本論文では，初期速度が最大減速度に与える影響を考慮して，臨界距離 D_{th} を自車の前方注視時間 T_p が一定である前方注視距離 L_p に設定した．臨界距離の算出式を式 (5.2.8) に示す．

$$D_{th}(t) = L_p(t) = V_c(t)T_p \quad (5.2.8)$$

臨界距離を式(5.2.8)で与えた場合の初期速度が 20-70km/h の場面での車両挙動を図 5.2.4 に示す．そして，前方注視時間の影響を調査するため，前方注視時間 T_p を 1-5s で変更した場合の車両を図 5.2.5 に示す．なお，シミュレーション条件は表 5.2.1 と同様とし，制御パラメータはそれぞれ，表 5.2.3，5.2.4 に示す．

図 5.2.4 より，臨界距離 D_{th} を一定に設定した場合に比べ，初期速度が増加するにつれて臨界点が自車の初期位置に近づくため，最大減速度に与える影響を低減できていることが確認できる．また，図 5.2.5 より，前方注視時間 T_p を長くするほど緩やかな減速度を要求し，短くするほど急な減速度を要求するポテンシャルを表現できることが確認できた．

Table 5.2.3 Control parameters

($T_p = \text{constant}$)

Symbol	Value	Unit
D_{margin}	2.0	m
T_p	1.5	s
V_{c0}	20.0 ~ 70.0	km/h
V_{ref}	0.0	m/s
m_c	400	kg

Table 5.2.4 Control parameters

($V_{c0} = \text{Constant}$)

Symbol	Value	Unit
D_{margin}	2.0	m
T_p	1.0 ~ 5.0	s
V_{c0}	30.00	km/h
V_{ref}	0.0	m/s
m_c	400	kg

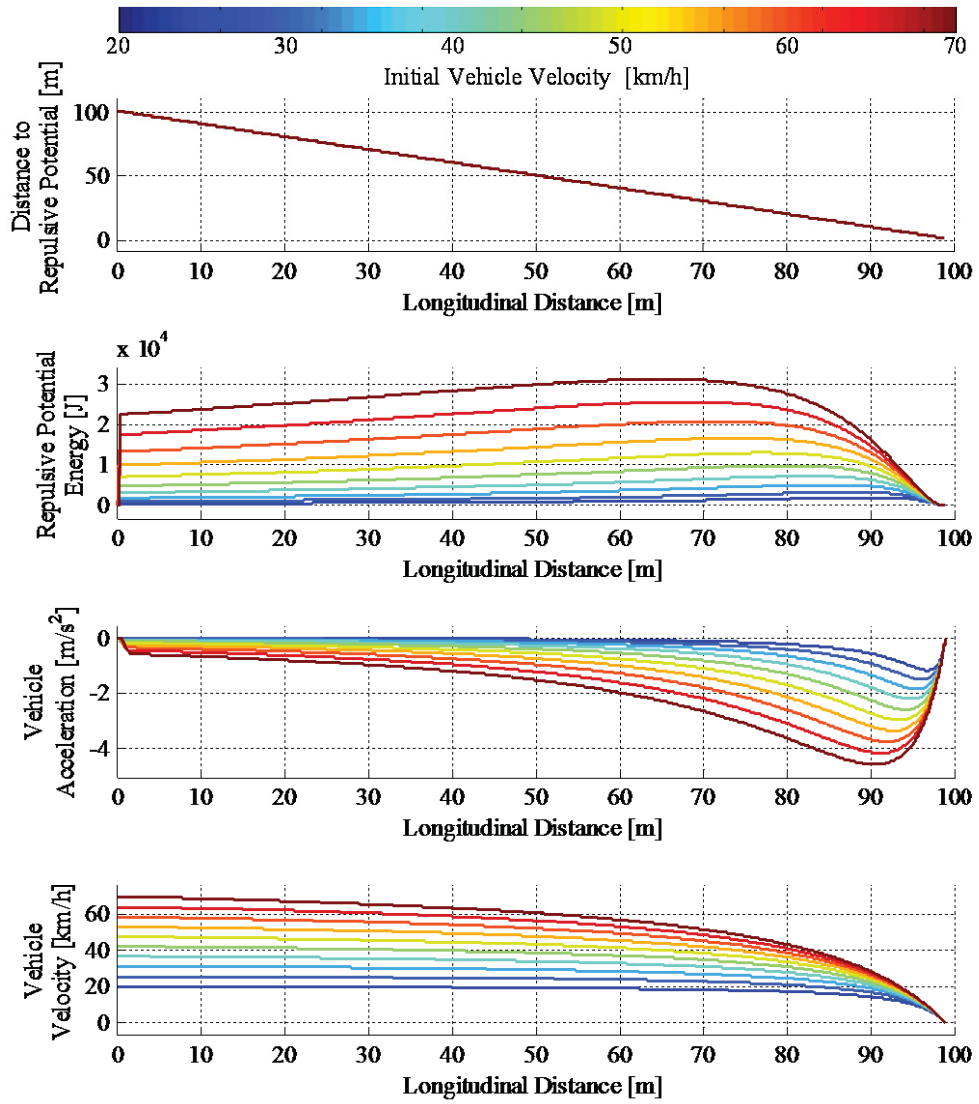


Fig. 5.2.4 Simulation result with changing V_{c0}
($T_p = \text{constant}$)

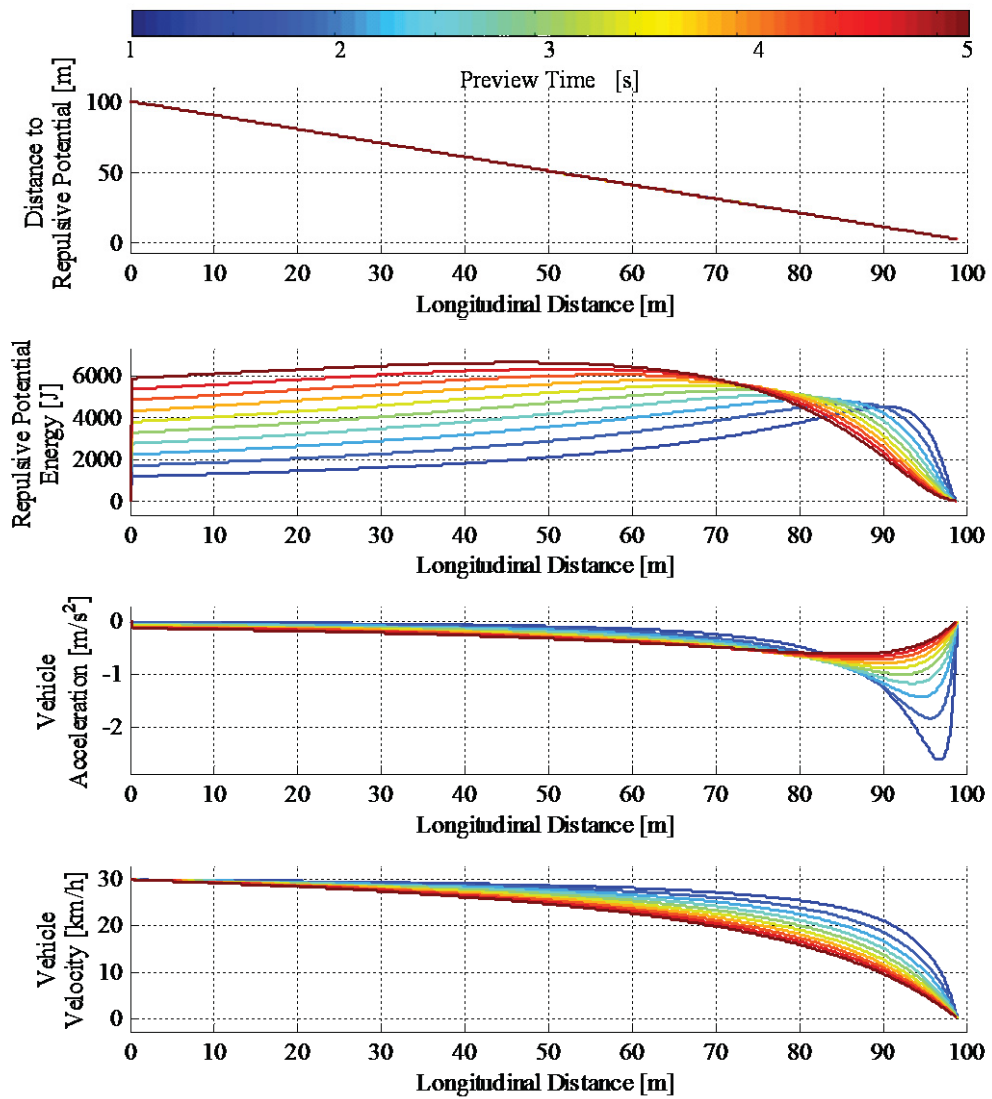


Fig. 5.2.5 Simulation result with changing T_p

5.2.3 徐行速度の理論的設計

本節では，障害物の陰より飛び出す歩行者の移動予測と歩行者の移動予測に基づく徐行速度の決定方法について述べる．

図 5.2.6 に示すように，路肩等に駐車車両が存在する場合，その陰より歩行者は X 軸方向に余裕距離をとった位置から進入することが想定される．そこで，本論文では，障害物の後方より X 軸方向の距離 X_e の偏差を持った位置から歩行者が自車の経路に進入してくる場面を想定し，式 (5.2.9) より歩行者の位置を予測する．なお，式中の予測時間 T_{pre} は，予測される歩行者との衝突点までの自車の到達時間とし，式 (5.2.10) より求められる．

$$\left. \begin{aligned} \hat{X}_{ped} &= X_{edge} + X_e \\ \hat{Y}_{ped}(t + T_{pre}) &= \frac{Y_c(t) - Y_{edge}}{X_c(t) - X_{edge}} (X_c(t) - \hat{X}_{ped}) + \tilde{V}_{ped} T_{pre}(t) \end{aligned} \right\} \quad (5.2.9)$$

$$T_{pre}(t) = \frac{-V_c(t) + \sqrt{V_c(t)^2 + 2a_{x_c}(t)(X_c(t) - \hat{X}_{ped})}}{a_{x_c}(t)} \quad (5.2.10)$$

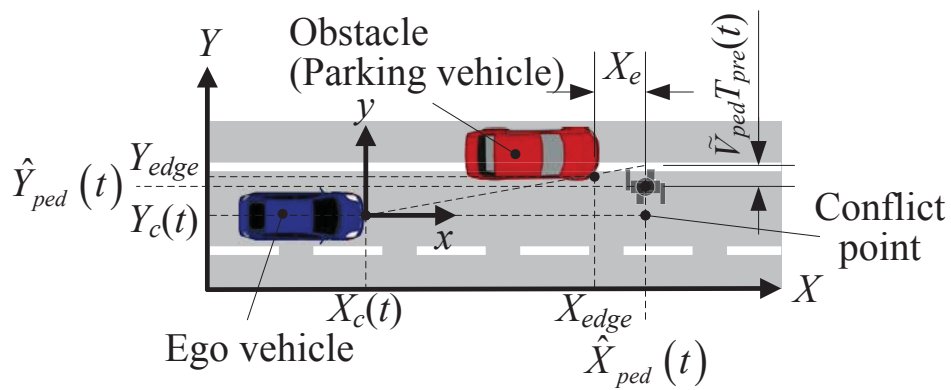


Fig. 5.2.6 Pictorial diagram of predictive virtual point

次に，徐行速度の算出方法について述べる．徐行時の速度は歩行者・自転車が飛び出してきた際に，緊急停止可能な値である必要がある．つまり，歩行者の衝突点到達時間 T_{stop} 内で，停止可能な速度と距離より求められる．歩行者の速度を一定と仮定した場合，歩行者の衝突点到達時間 T_{stop} は式（5.2.11）で表される．

$$T_{stop}(t) = \frac{Y_c(t) - \frac{Y_c(t) - Y_{edge}}{X_c(t) - X_{edge}}(X_c(t) - \hat{X}_{ped})}{\tilde{V}_{ped}} \quad (5.2.11)$$

自車が一定の加速度 a_{max} で減速可能であると仮定した場合，歩行者の衝突点到達時間 T_{stop} で，停止可能な速度（徐行速度） V_{ref} とその時の制動距離 S_{ref} は式（5.2.12）より求められる．

$$\begin{aligned} V_{ref}(t) &= -a_{max}T_{stop}(t) \\ S_{ref}(t) &= -\frac{a_{max}}{2}T_{stop}^2(t) \end{aligned} \quad (5.2.12)$$

表 5.2.5 に示すシミュレーション条件で，歩行者の予測速度 \tilde{V}_{ped} ，想定する減速度 a_{max} ，障害物と歩行者の飛び出し位置の偏差 X_e をそれぞれ変化させた場合の，徐行速度の変化を図 5.2.7 から 図 5.2.9 に示す．

Table 5.2.5 Simulation parameter

Symbol	Value	Unit
V_{c0}	30.00	km/h
\tilde{V}_{ped}	1.5	m/s
X_e	0.5	m
a_{max}	-0.85	G

図 5.2.7, 図 5.2.8 より, 歩行者の予測速度 \tilde{V}_{ped} , 想定する減速度 a_{max} については, それぞれのパラメータが増加すると, 徐行速度の値が小さくなっていることが確認できる. また, 図 5.2.9 より, 障害物と歩行者の飛び出し位置の偏差 x_e については, 駐車車両の遠方では大きな影響がないものの, 近傍の徐行速度の分布が変化し, 偏差が多きい程, 早期の段階で徐行速度が緩和する傾向にあることが確認できた.

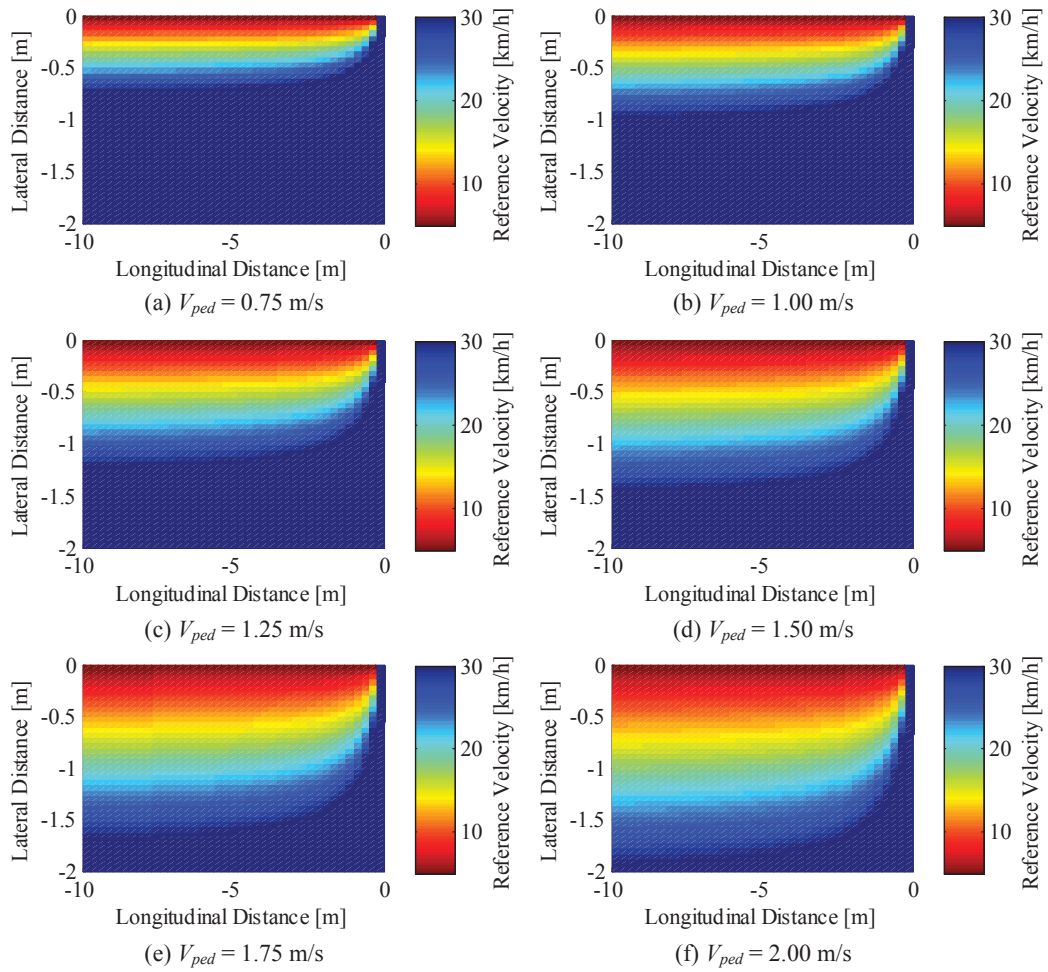


Fig. 5.2.7 Simulation result with changing \tilde{V}_{ped}

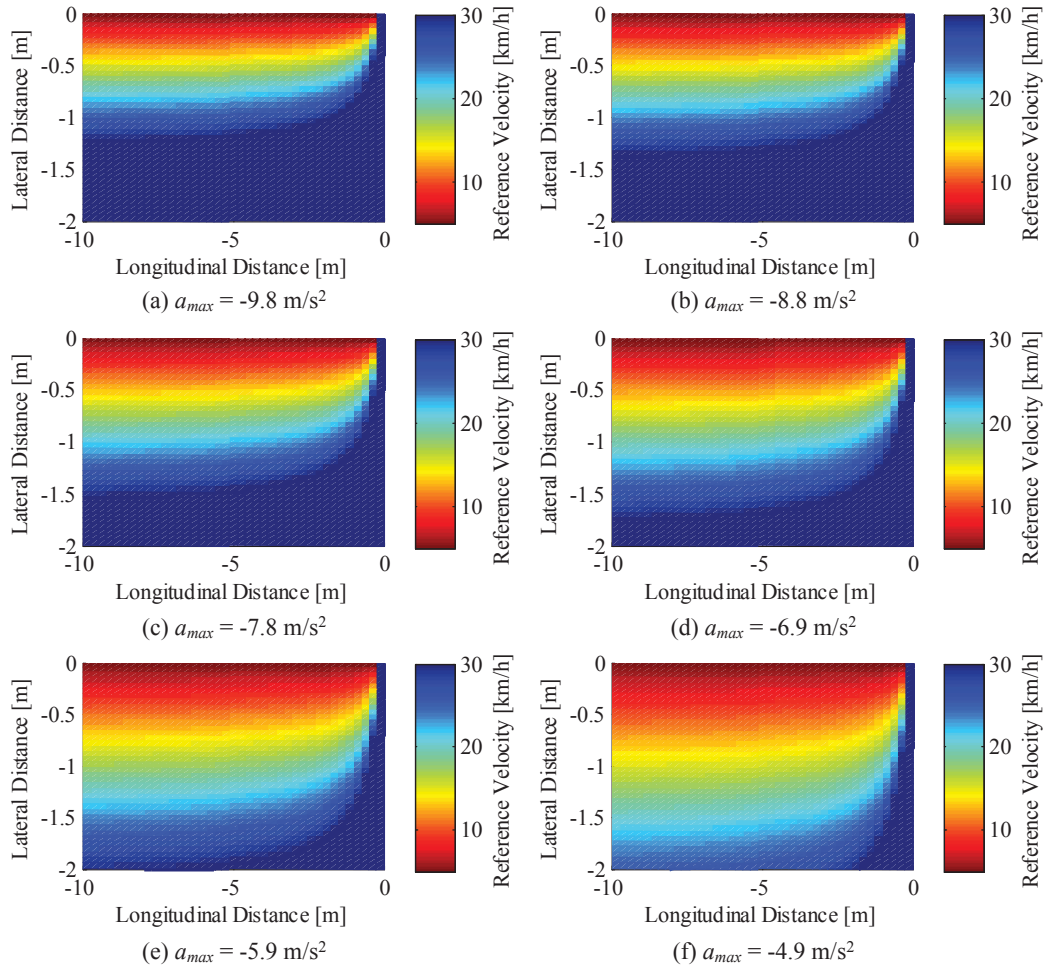


Fig. 5.2.8 Simulation result with changing a_{max}

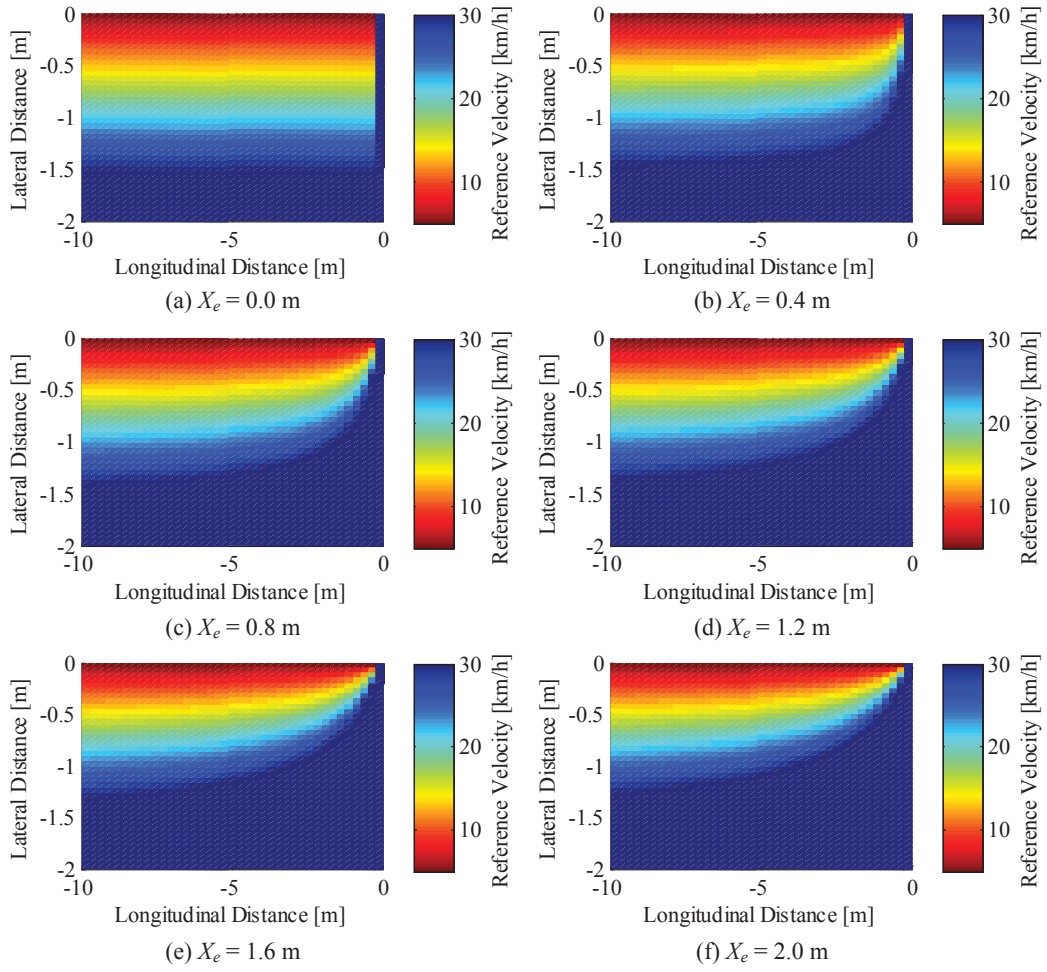


Fig. 5.2.9 Simulation result with changing X_e

5.2.4 熟練ドライバの運転データに基づくパラメータ設定

本節では、前節で提案した潜在リスクポテンシャルの各種パラメータのデータを、4 章で収集した運転指導員の実路走行データより決定した。

本論文で設定したパラメータを表 5.2.6 に示し、運転指導員の運転行動との比較を図 5.2.10 に示す。歩行者・自転車の想定速度 V_{ped} は先行研究より $2.75\text{m/s}^{(48)}$ と設定し、他のパラメータを前節で得られた各種パラメータの影響に基づき実験的に決定した。

Table 5.2.6 Risk potential parameter setting based on expert driver's data

Symbol	Value	Unit
T_p	4.75	s
X_e	1.0	m
V_{ped}	2.75	m/s
\tilde{a}_{x_c}	0.7	m/s^2
a_{max}	-1.7	m/s^2

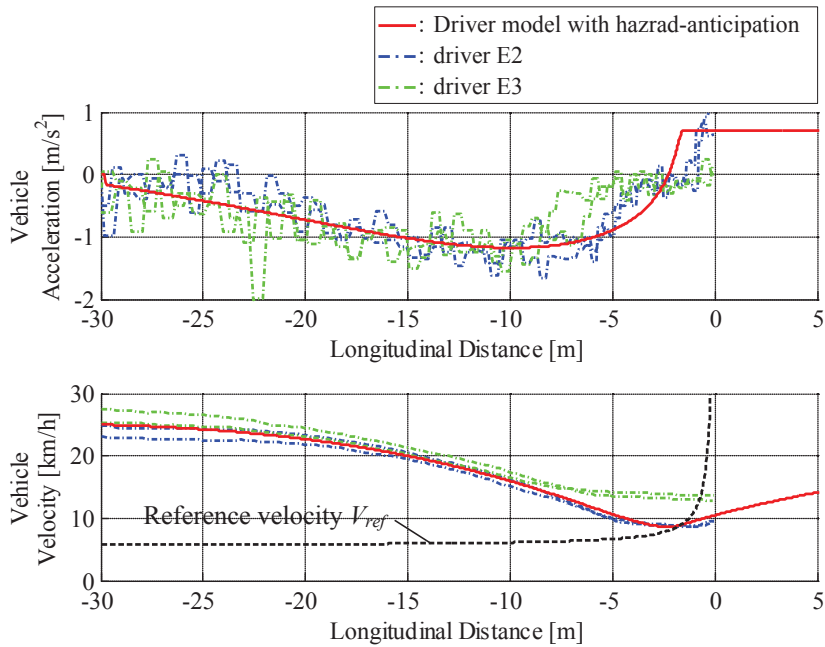


Fig. 5.2.10 Comparison to hazard anticipatory system and expert driver's data

5.3 ヒヤリハットデータベースを用いた検証場面の抽出

本章では、ヒヤリハットデータベースを用いて提案したシステム検証場面である対歩行者・自転車ヒヤリハット場面を抽出した結果について述べる。

5.3.1 ヒヤリハットデータベースの概要

危険予測運転モデルの効果評価は、ヒヤリハットデータベースにおけるヒヤリハット場面を用いて行う。ヒヤリハットデータベースとは、イベント記録型ドライブレコーダをタクシーに搭載し、都市内および都市近郊を走行した際の多数のヒヤリハットデータを収集・分析したものである。タクシーに装着されたイベント記録型ドライブレコーダ(HORIBA どん猫)を図 5.3.1 に示す。ヒヤリハットデータベースは、自動車技術会が所有している。2006 年から 2010 年 3 月までは自動車技術会がデータの拡張を行っていたが、2010 年 10 月からは、本学の永井研究室が自動車技術会に代わりデータの拡張を行っている。ヒヤリハットデータの総数は 2011 年 11 月 15 日時点で 56,208 件あり、すべて都内および静岡市内で取得したデータである。データの更新は月に 1~2 回の頻度で行っており、今後は、福岡、秋田、北海道におけるヒヤリハットデータも追加する予定である。ここで、ヒヤリハットデータとは、常時記録型ドライブレコーダにより計測した加速度の絶対値が、0.45Gを超えた状態で一定時間経過したデータのことである。記録されるデータは、0.45Gを超えた時点から前 10s、後 5s 分の映像と、車両速度・前後方向加速度などの運転行動である⁽²¹⁾。



Fig. 5.3.1 Event recording drive recorder

つぎに、ヒヤリハットデータベースにおいて、自車と歩行者・自転車までの相対距離を計測するための距離測定ツールについて示す。距離測定ツール画面を図 5.3.2 に示す。相対距離を計測するためには、まず、カメラ取付情報を登録する必要がある。カメラ取付情報は、図 5.3.2 の実線で囲んだ部分で設定する。図 5.3.2 に示すように、左右それぞれのフェンダーミラー中央に白丸が位置するよう、カメラ取付位置とカメラ取付角度の値を調整する。値の調整における注意点としては、図 5.3.2 の一点差線で囲った部分に表示されているヒヤリハットIDが 19122 以下の場合はHの値を 1.25 に、ID19123 以上の場合にはHの値を 1.31に設定することと、S、Tではなくできるだけ θ 、 μ 、 ω の値を調整するということである。理由としては、カメラ取付位置に関し、どのタクシーにおいても図 5.3.1 に示す位置で取り付けられているからである。図 5.3.2 の点線で囲った部分に表示される相対距離は、自車先端中央から画面上のプロット点までの距離を表している。距離測定ツールにおける座標軸を図 5.3.3 に示す。

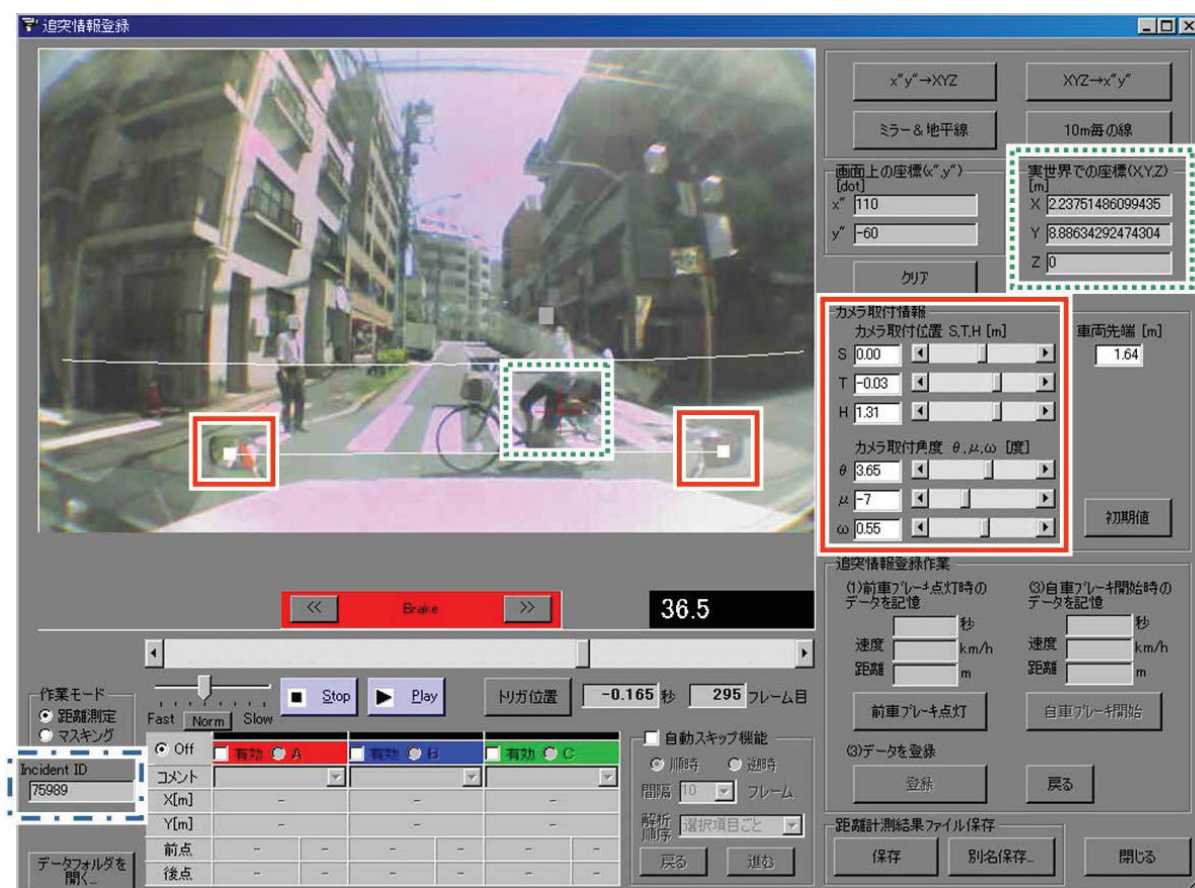


Fig. 5.3.2 Screen of distance measurement tool

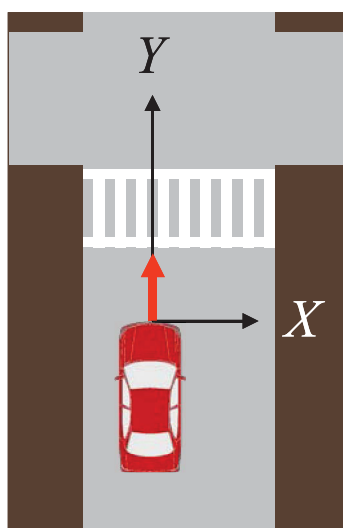


Fig. 5.3.3 Coordinates of distance measurement tool

5.3.2 分析対象場面の抽出

前節で示した本学所有のヒヤリハットデータベースにおける，ヒヤリハットデータ 56,208 件(2011.11.15 現在)の中から，分析対象場面の抽出を行う．分析対象場面の抽出は，下記の検索条件①②③で行った．ヒヤリハットデータベースの検索画面を図 5.3.4 に，分析対象場面の抽出結果を表 5.3.1 に示す．表 5.3.1 より，分析対象場面の合計は 18 件である．

【検索条件①】

- ・ ヒヤリハットレベル：事故
- ・ 対象：歩行者
- ・ 対象：自転車

【検索条件②】

- ・ ヒヤリハットレベル：高
- ・ 対象：歩行者 & ヒヤリハット類型：出合頭
- ・ 対象：自転車 & ヒヤリハット類型：出合頭

Fig. 5.3.4 Screen for searching accident or incident data

【検索条件③】

- ・ 自車直進かつ歩行者・自転車は飛び出し時に自車に交差するよう直進
- ・ 見通しの悪い無信号交差点もしくは駐車車両の陰からの飛び出し
- ・ 自車方向に斜め横断していない
- ・ 法定速度 30km/h 以下の道路

Table 5.3.1 Accident and incident data for quantitative analysis

Searching condition	Objective	Cases for searching	Total number of cases
① & ③	Pedestrian	0	15
	Bicycle	4	44
② & ③	Pedestrian	1	28
	Bicycle	13	123

5.4 潜在リスク評価に基づく速度制御系の理論的検証

本節では、ヒヤリハットデータベースより抽出した対歩行者・自転車場面における18件のヒヤリハット場面にて、顕在化された移動物体に対する衝突回避システムと、潜在リスクポテンシャル推定を適用した衝突回避システムを用いてシミュレーションを行った結果について述べる。

5.4.1 シミュレーション条件

シミュレーション場面の概要を図5.4.1に示す。図5.4.1に示すように、自車は速度 V_{c0} で直進し、駐車車両の脇を通過する場面とした。このとき、歩行者は、自車との x 軸方向距離が x_{ped0} に達した際に、歩行者の出現位置 (X_{ped0}, Y_{ped0}) より飛び出すように設定し、自車の初期速度 V_{c0} 、駐車車両との側方間隔 Y_{c0} 、歩行者の出現位置 (X_{ped0}, Y_{ped0}) 、飛び出しタイミング x_{ped0} はヒヤリハットデータベースのヒヤリハット場面より抽出した。再現するヒヤリハット場面の概要表5.4.1に示し、制御パラメータを表5.4.2に示す。このとき、最大減速度 a_{max} はタイヤ路面間の摩擦力の関係より 8.33m/s^2 に設定し、最大加加速度 j_{max} は国土交通省の技術指針より 12m/s^3 に設定した⁽¹⁴⁾。なお、歩行者出現後は、3章で提案した衝突回避のためのリスク（顕在リスク）評価を行い、潜在リスク評価結果と比較し、より大きな要求減速度を目標減速度とした。また、潜在リスク評価に基づく危険予測行動の有効性を検証するため、顕在リスク評価に潜在リスク評価機能を拡張したシステムと、顕在リスク評価のみのシステムでシミュレーションを行った。

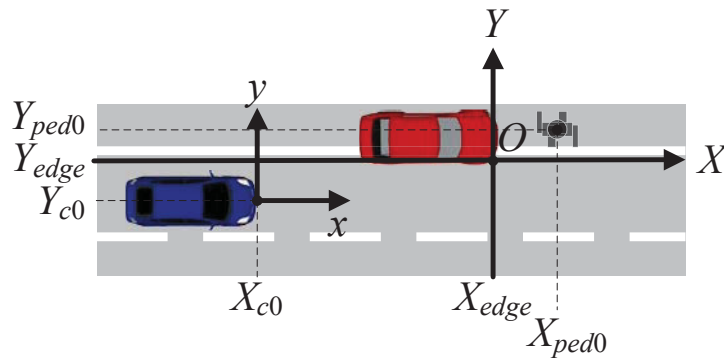


Fig. 5.4.1 Pictorial diagram of simulation condition

Table 5.4.1 Accident and incident data list

No	Time	Condition	Objective	Type of impact	Data ID
1	18:50	Incident	Bicycle	CR/CW	6302
2	2:29	Incident	Bicycle	CR/CW	21510
3	9:58	Incident	Bicycle	CR/CW	26851
4	22:11	Accident	Bicycle	CR/CW	31422
5	16:43	Incident	Bicycle	CR/CW/PC	32894
6	20:48	Incident	Bicycle	PC	33461
7	1:02	Incident	Bicycle	CR/PC	67366
8	12:37	Accident	Bicycle	OC	74958
9	13:00	Accident	Bicycle	CR/CW/OC	75989
10	13:56	Incident	Pedestrian	CR/PC	83039
11	16:46	Incident	Bicycle	CR/PC	84162
12	11:43	Incident	Bicycle	CR/PC	84451
13	15:26	Incident	Bicycle	CR	97003
14	23:00	Incident	Bicycle	CR/CW	112969
15	6:24	Incident	Bicycle	CR/CW	113007
16	22:02	Accident	Bicycle	CR/CW	124259
17	21:40	Incident	Bicycle	CR/CW	150456
18	12:03	Incident	Bicycle	OC	155051

CR: Cross Road CW: Cross Walk PC: Parking Car OC: Oncoming Car

Table 5.4.2 Control parameters setting for simulation

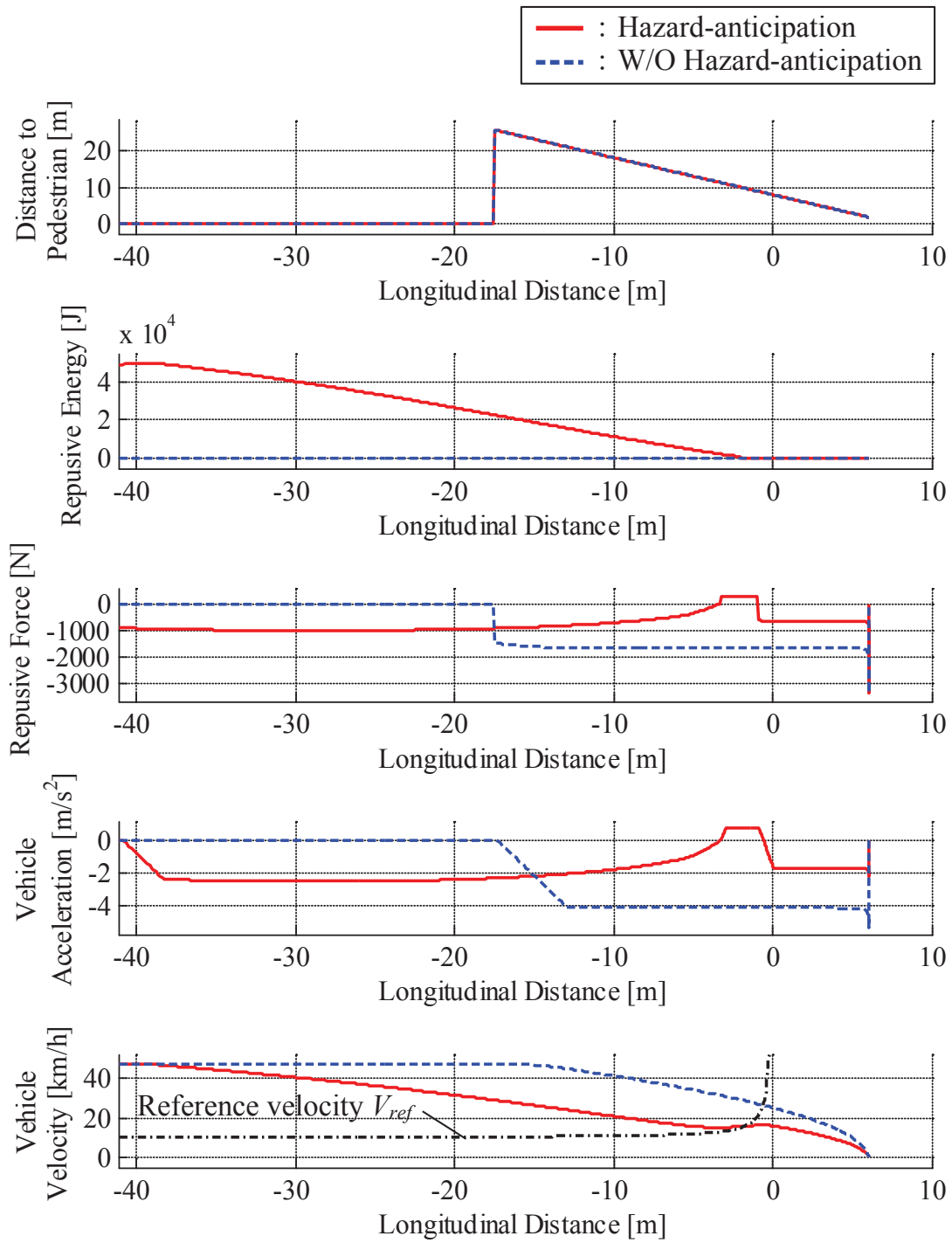
Symbol	Value	Unit
T_p	4.75	s
X_e	1.0	m
V_{ped}	2.75	m/s
\tilde{a}_{x_c}	0.7	m/s ²
a_{max}	-1.7	m/s ²

5.4.2 シミュレーション結果

ヒヤリハットデータベースに基づいたヒヤリハット場面にて，潜在リスクポテンシャル推定を適用したシステムと，歩行者の検出結果に基づく衝突回避システムのみとで検証した結果を図 5.4.2 に示す．図 5.4.3 に歩行者出現時の車両速度をまとめた結果を示す．

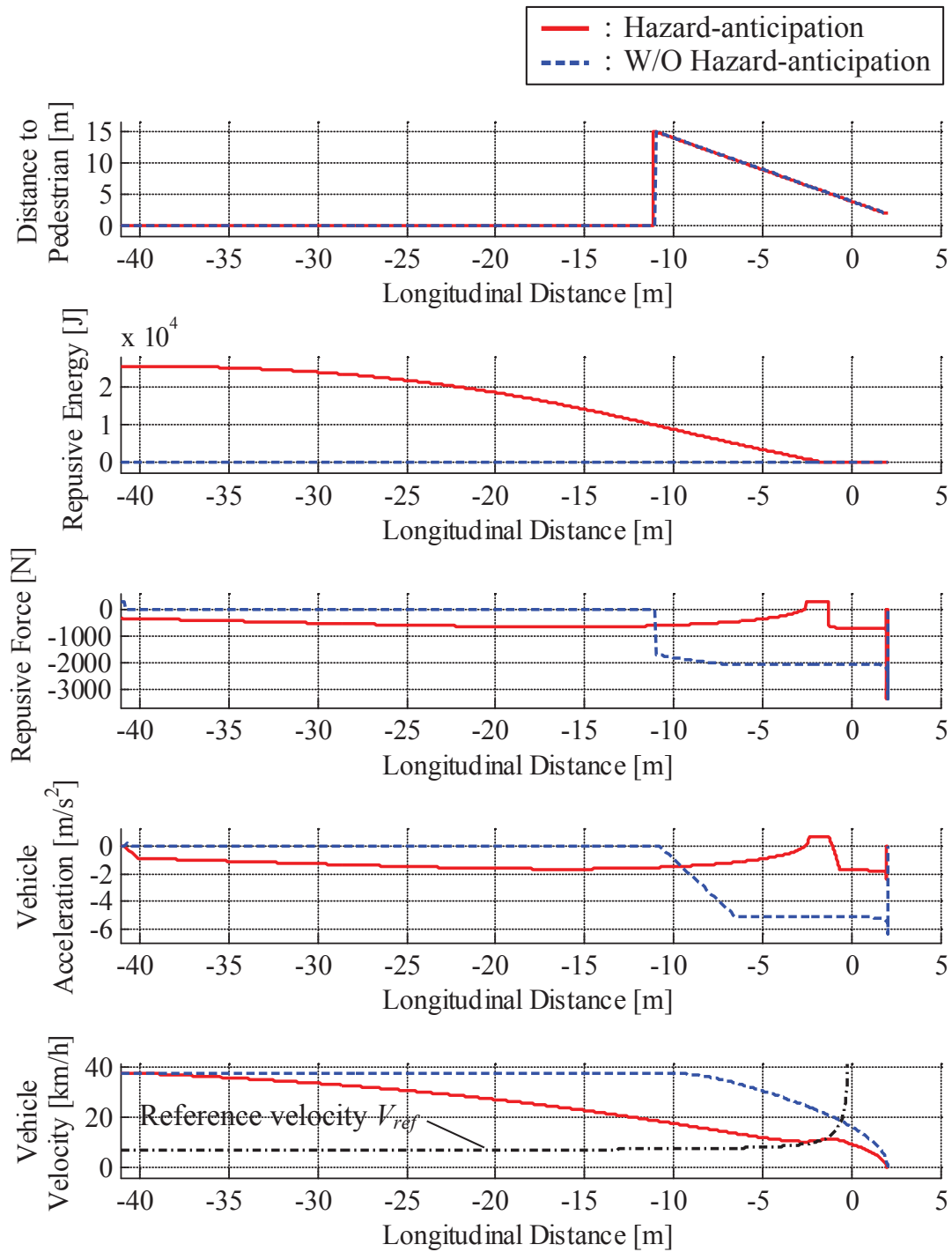
図 5.4.2 より，青の破線で示す従来の顕在リスク評価に基づくシステムのみ場合では，全 18 件のシナリオの内，(q) 以外の 17 件のシナリオで衝突を回避できているものの，安全確保余裕距離 D_{margin} を保つことができていないシナリオが 3 件存在した．また，最大減速度に注目すると 12 件のシナリオでドライブレコーダのデータ記録閾値である 0.45Gを上回る減速度を記録した．一方，赤の実線で示す潜在リスク評価に基づくシステムでは歩行者飛び出し前に減速を開始しているため，全 18 シナリオで設定した安全確保余裕距離 D_{margin} で衝突を回避しているとともに，最大減速度を低減できていることが確認できる．

ここで，対歩行者場面である図 5.4.2 (j) に注目すると，顕在リスク評価のみに基づく衝突回避システムでは，歩行者が出現するまで一定速度で走行しているため，歩行者が出現すると，減速を開始し衝突回避には成功しているものの， 6m/s^2 程度の大きな減速度を生じている．一方，潜在リスク評価を拡張したシステムでは，潜在リスク評価結果により減速を開始しているため，歩行者飛び出し時には， 17km/h 程度まで速度が低下しており，この結果，歩行者に対し 2.0m/s^2 程度の減速度で停止している．これにより，従来の顕在リスク評価のみのシステムではヒヤリハットになってしまう場面にて，安全に停止できていることが確認できた．



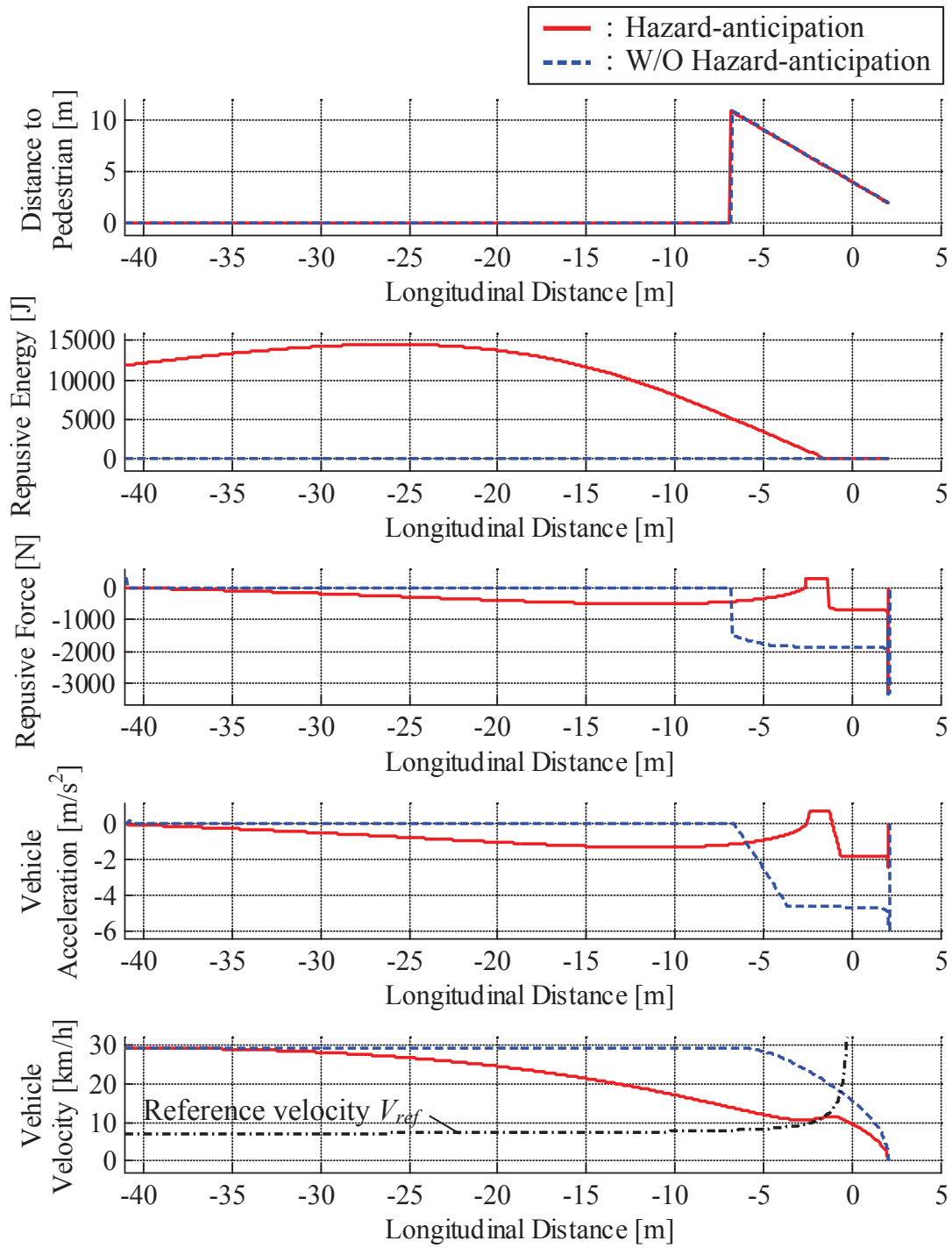
(a) ID6302

Fig. 5.4.2 Comparison of automatic braking control system
 between the case of without hazard -anticipation



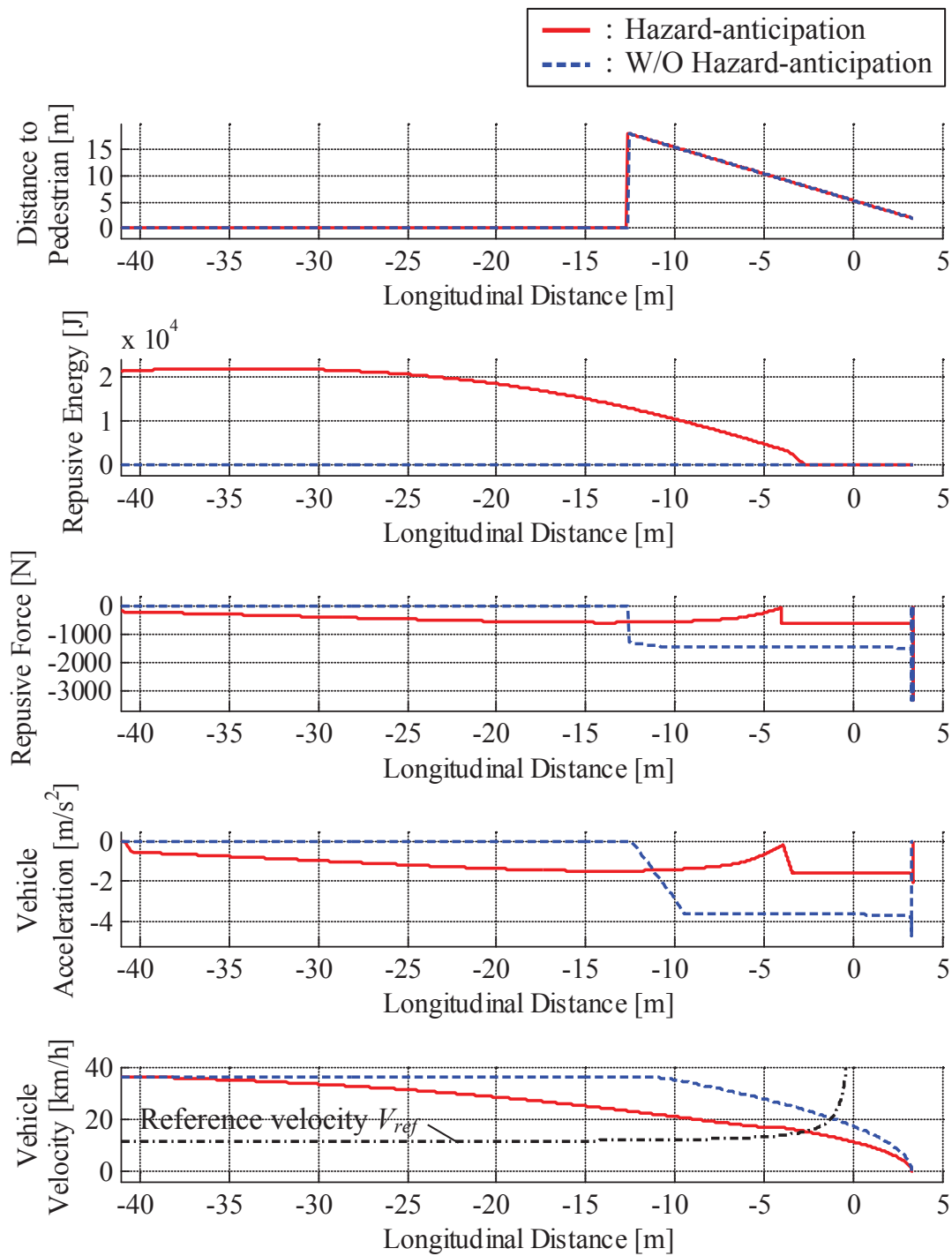
(b) ID21510

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system
between the case of without hazard -anticipation



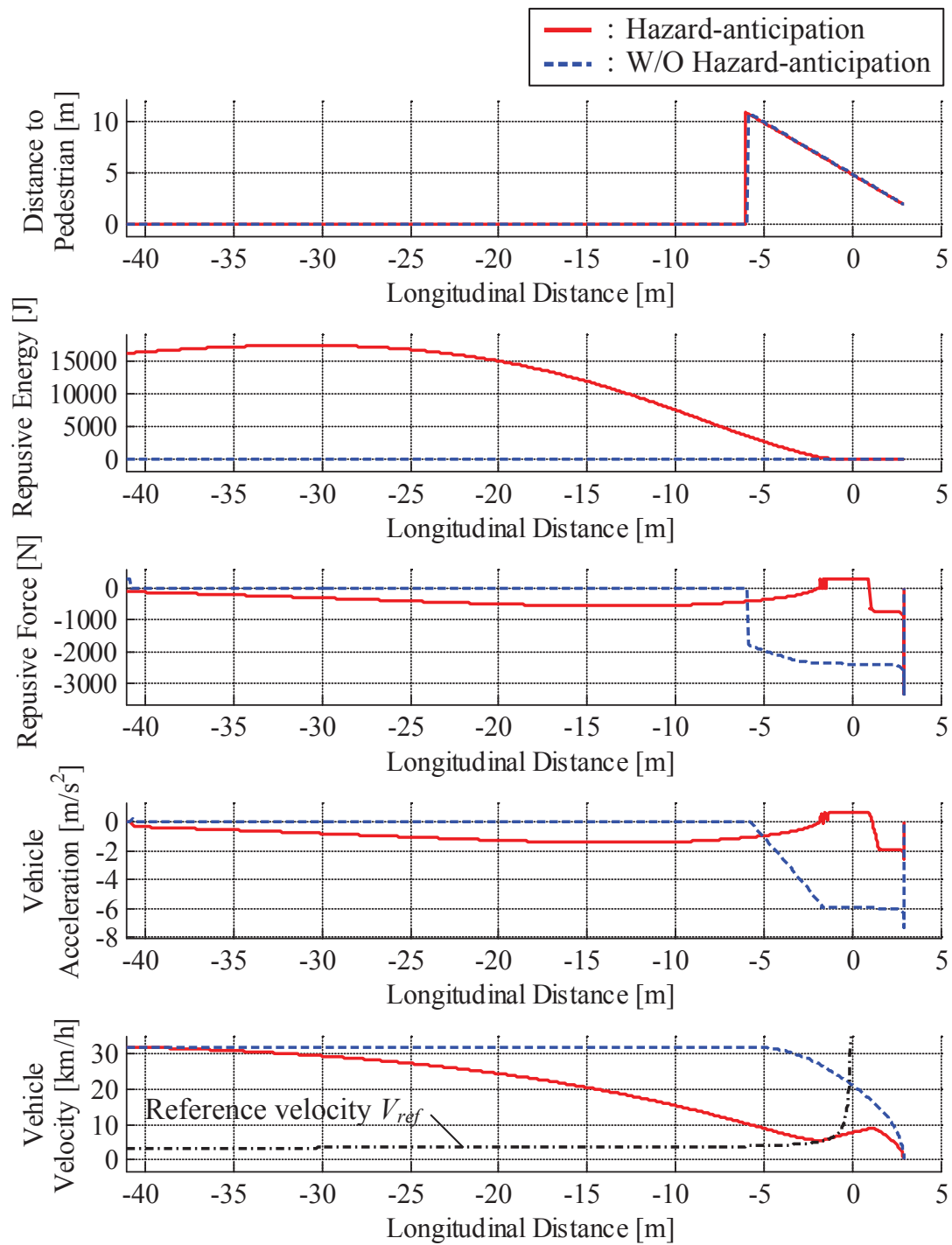
(c) ID26851

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system
 between the case of without hazard -anticipation



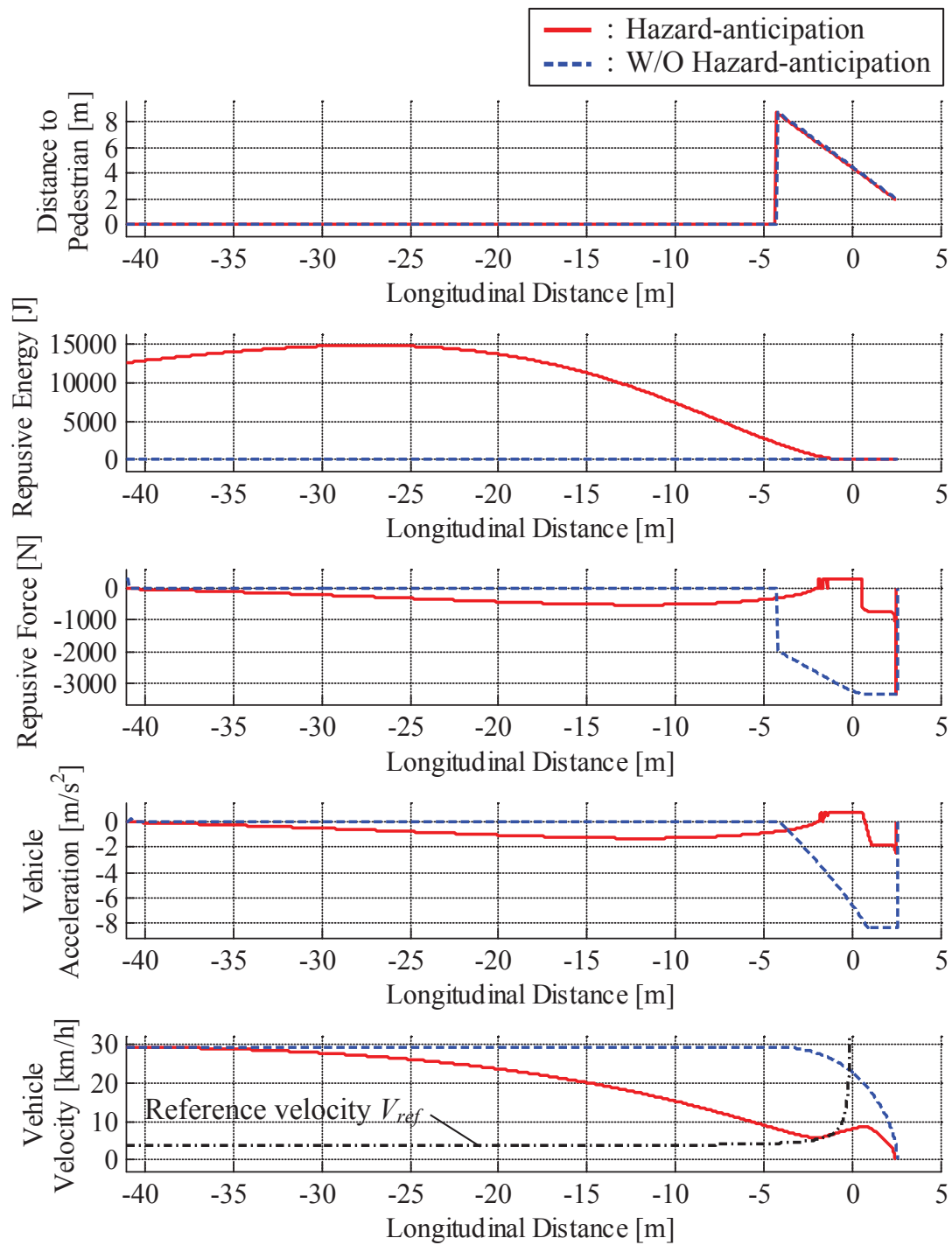
(d) ID31422

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system between the case of without hazard -anticipation



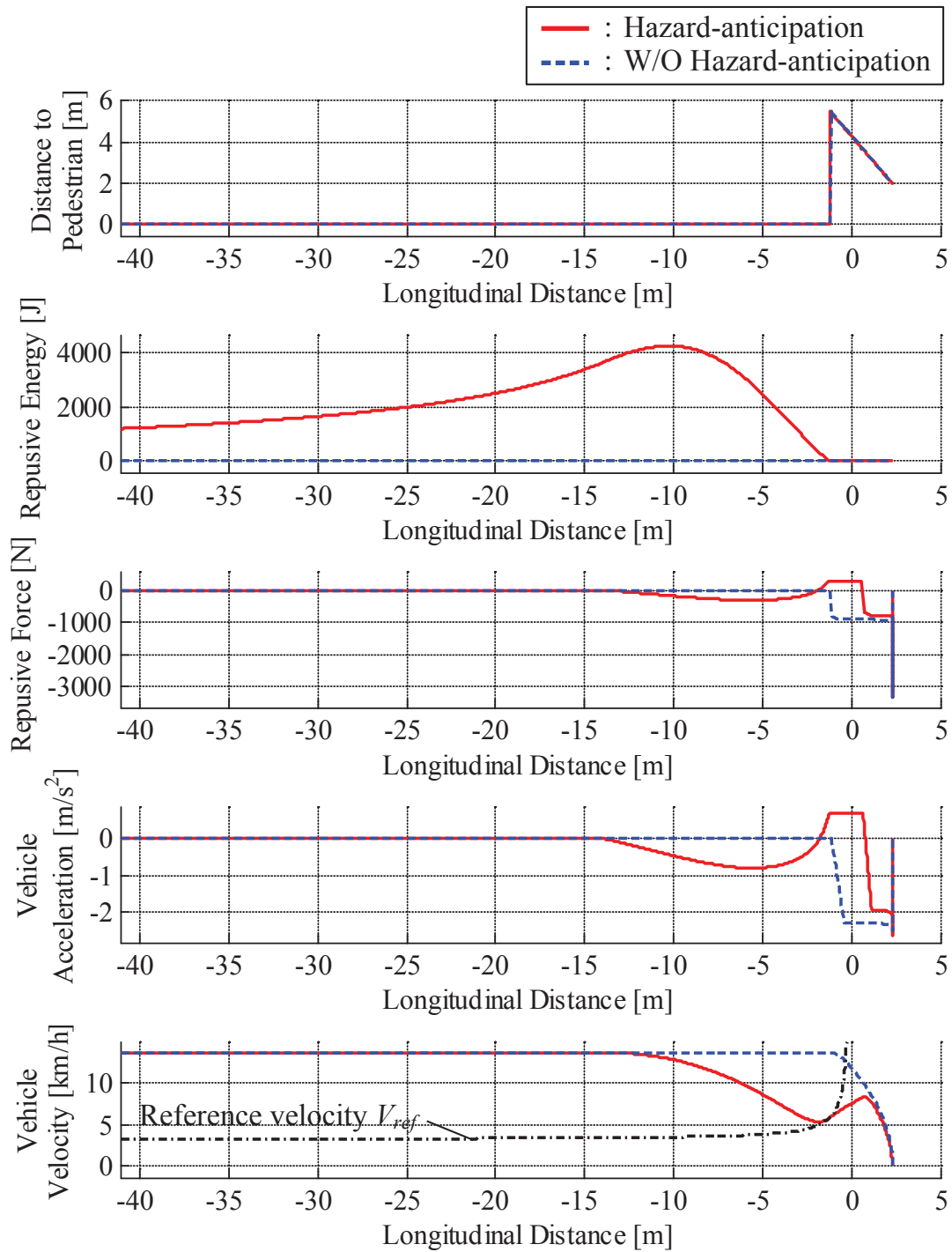
(e) ID32894

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system
between the case of without hazard -anticipation



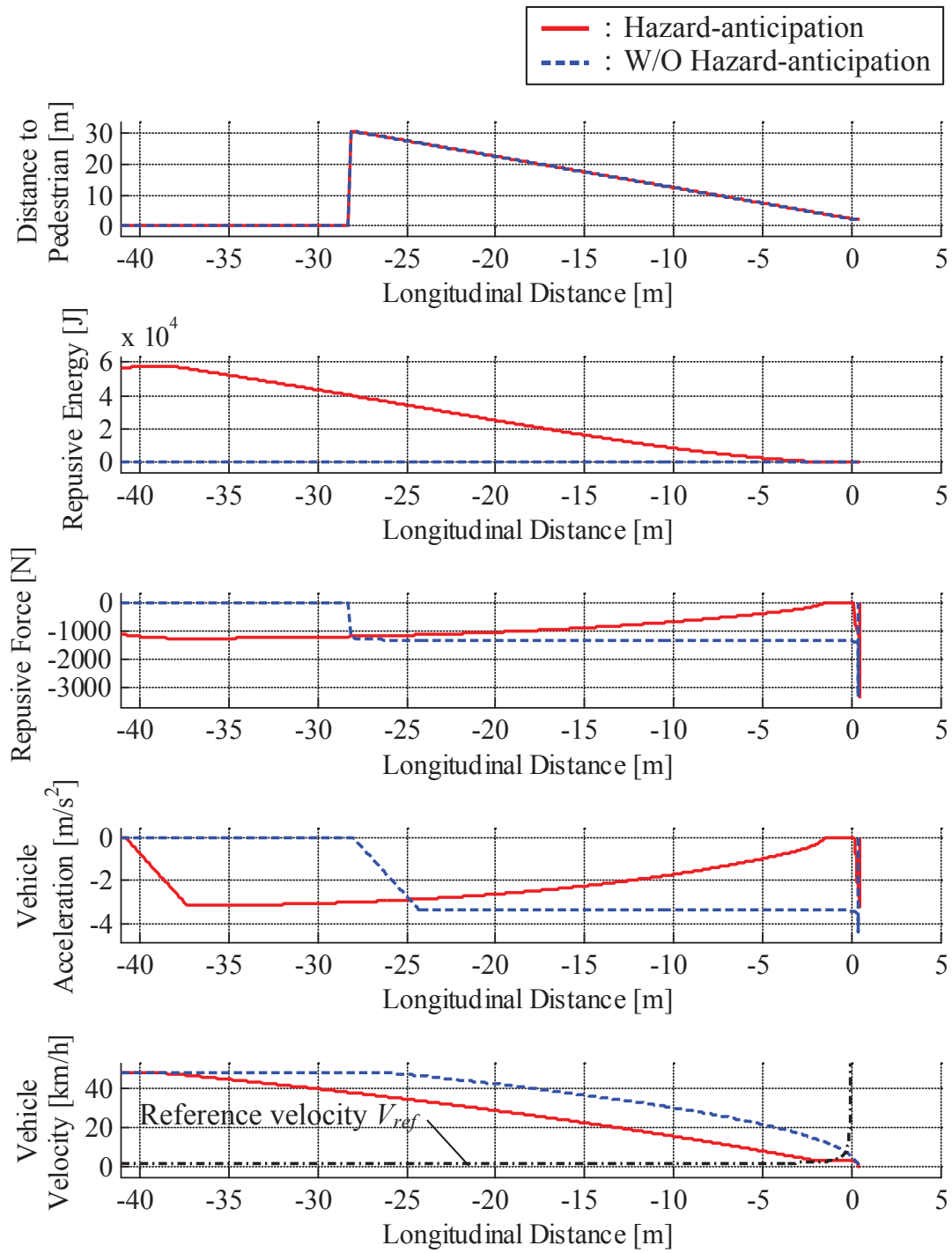
(f) ID33461

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system
between the case of without hazard -anticipation



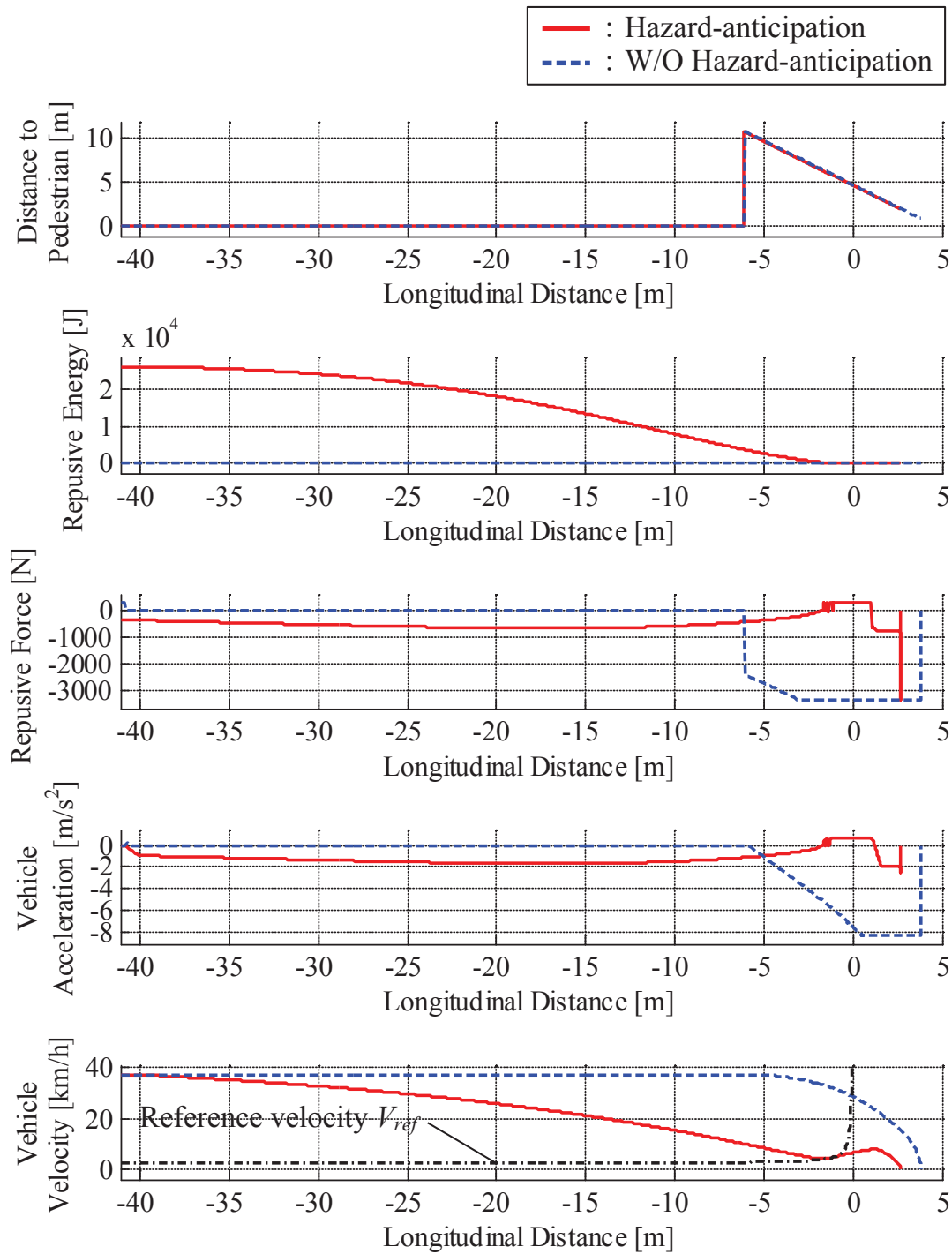
(g) ID67366

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system
between the case of without hazard -anticipation



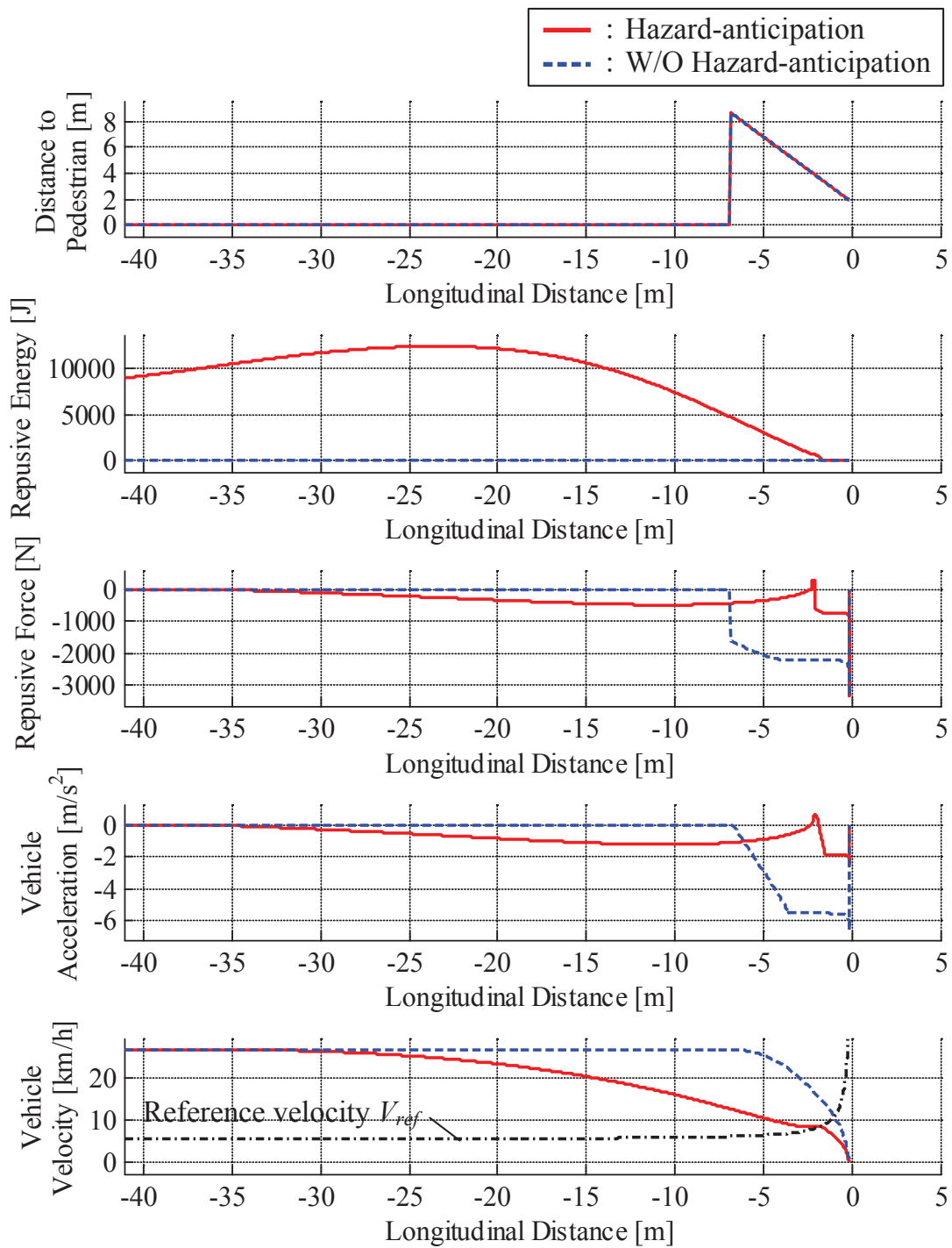
(h) ID74958

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system
between the case of without hazard -anticipation



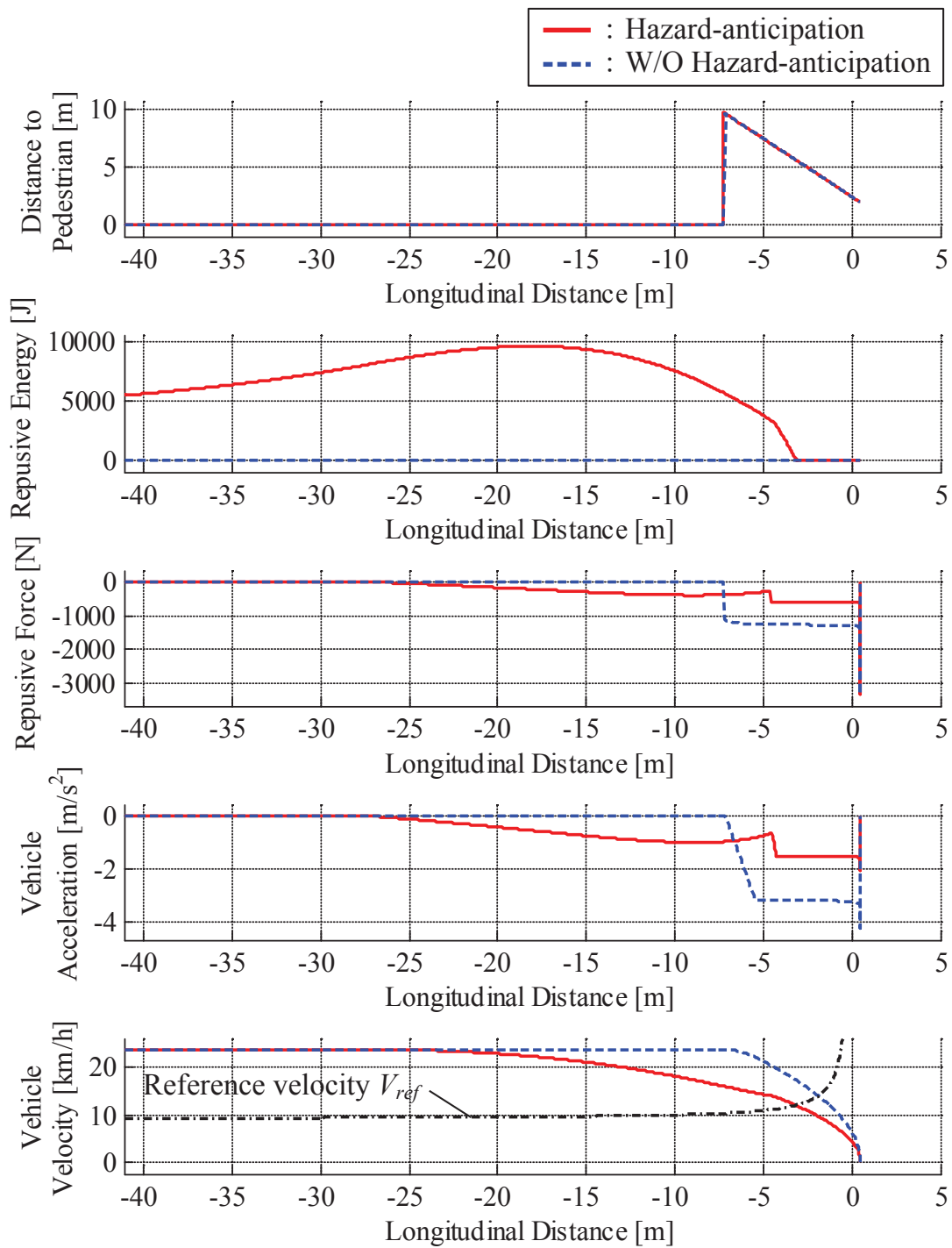
(i) ID75989

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system
between the case of without hazard -anticipation



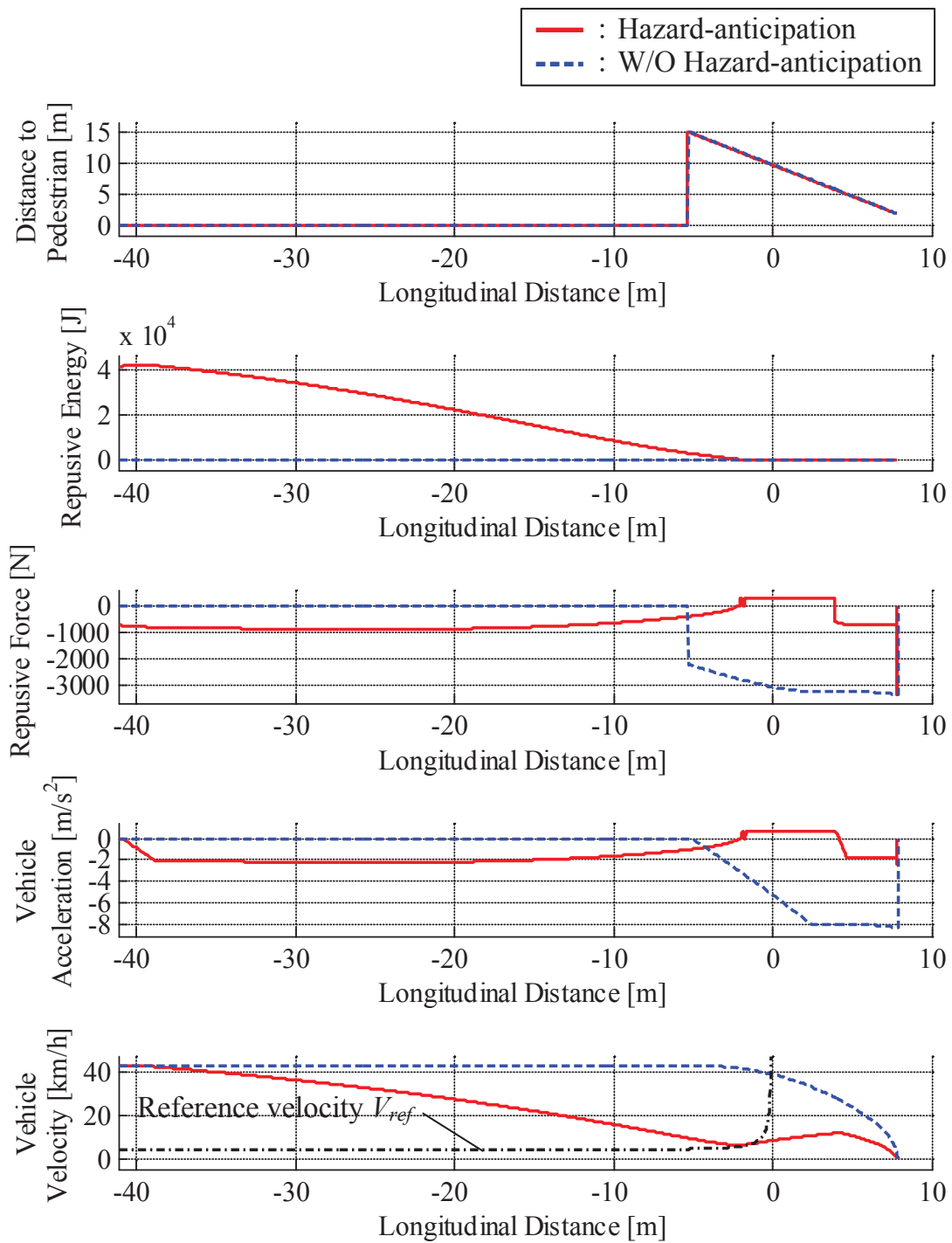
(j) ID83039

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system between the case of without hazard -anticipation



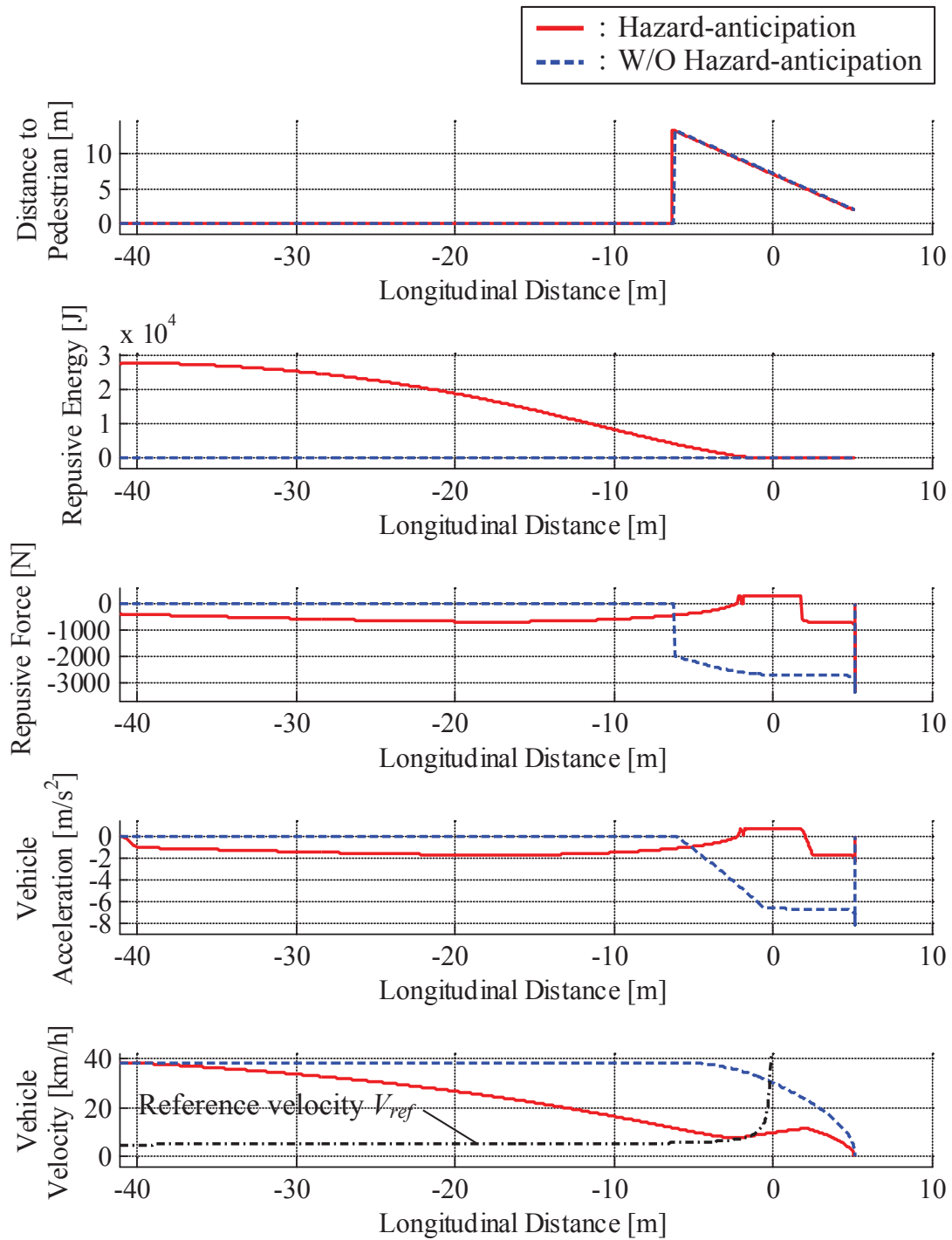
(k) ID84162

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system between the case of without hazard -anticipation



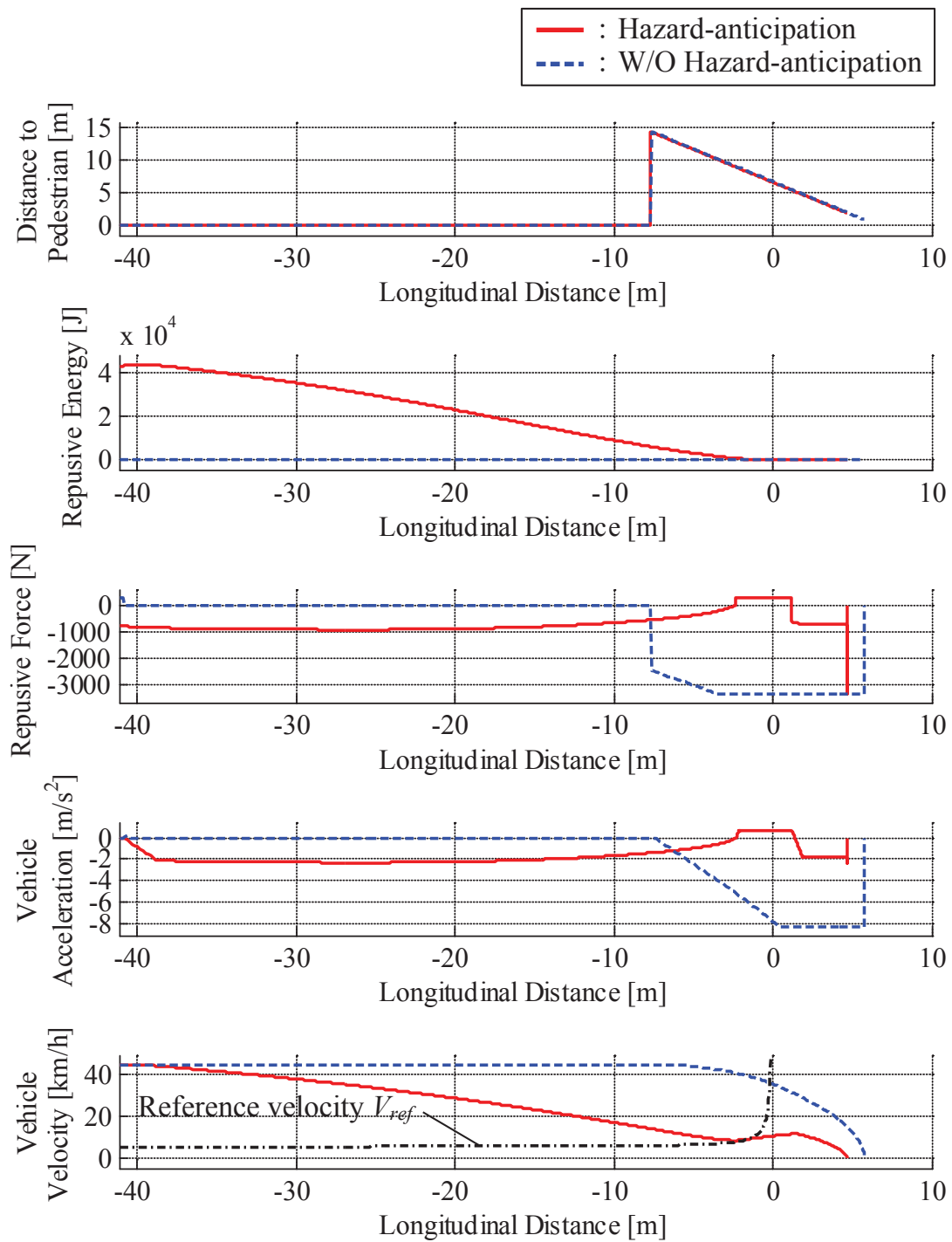
(l) ID84451

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system
between the case of without hazard -anticipation



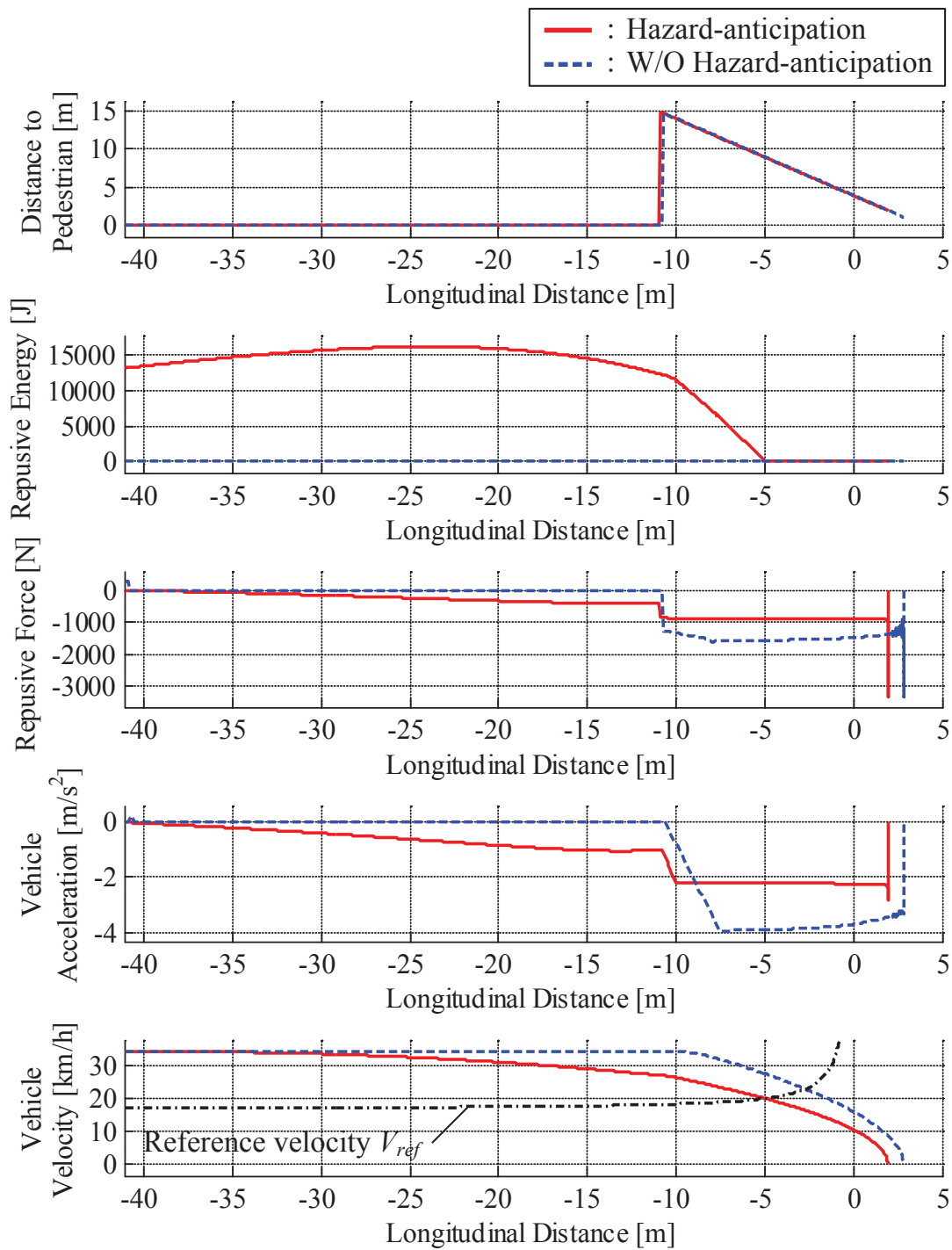
(m) ID97003

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system
between the case of without hazard -anticipation



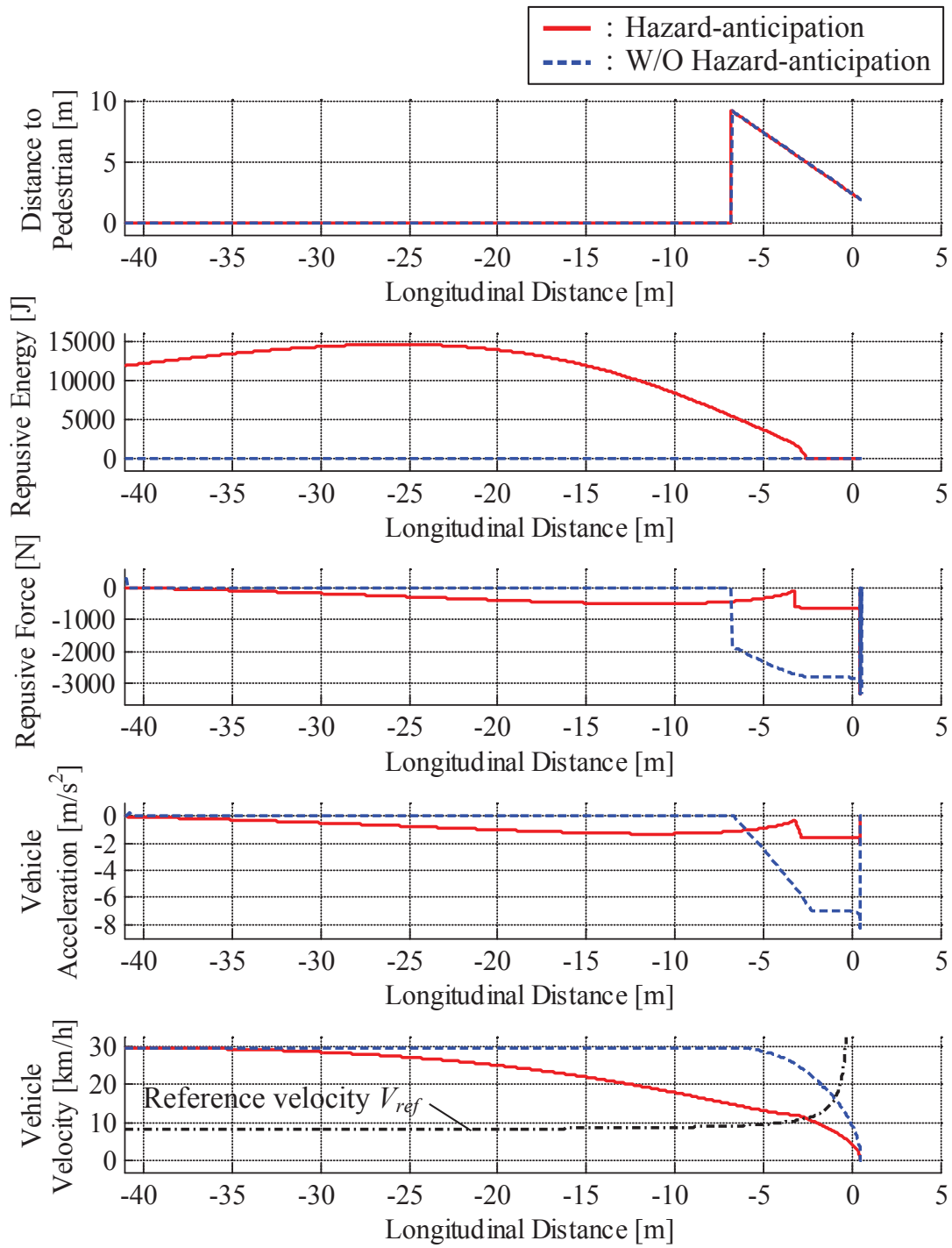
(n) ID112969

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system
between the case of without hazard -anticipation



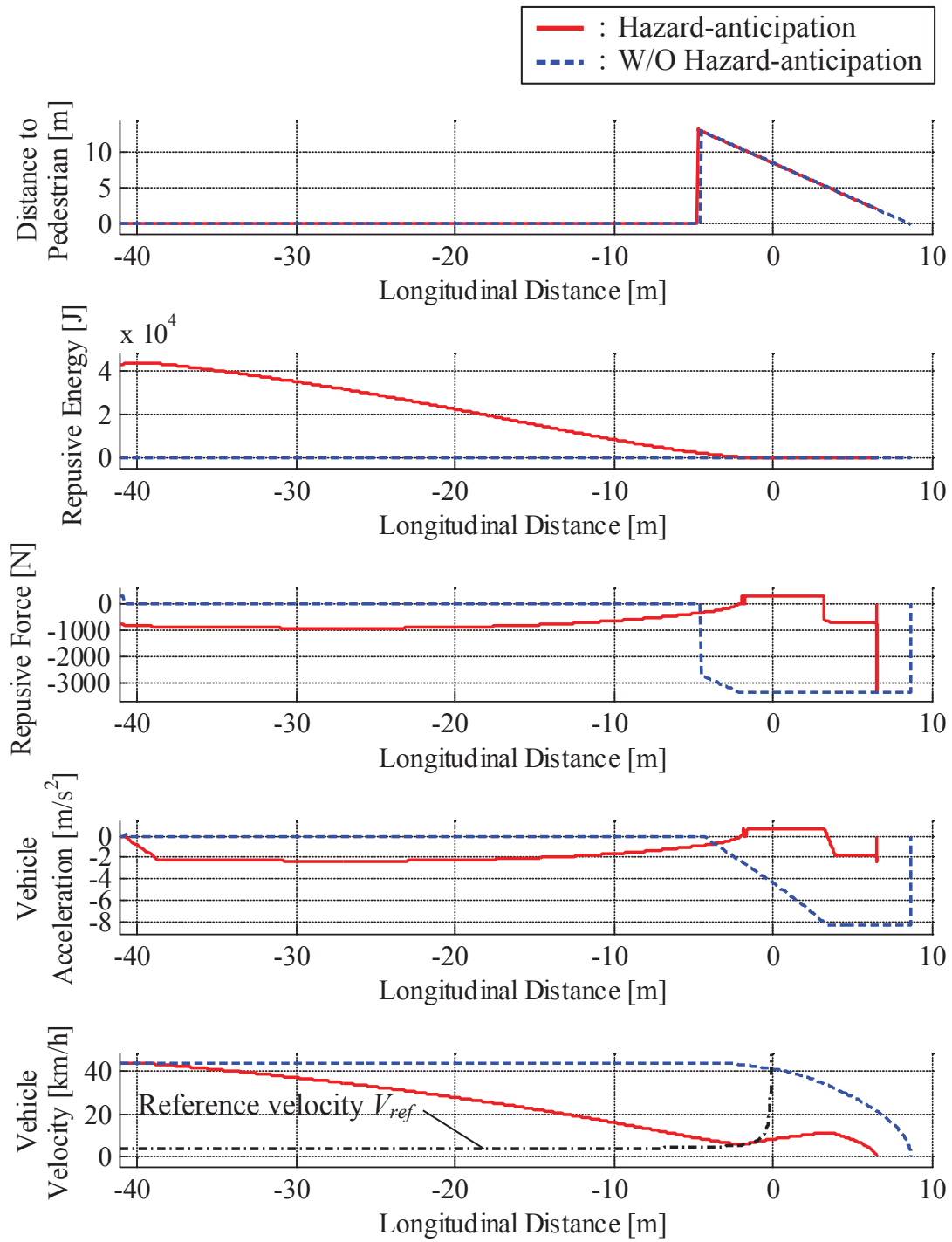
(o) ID113007

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system
 between the case of without hazard -anticipation



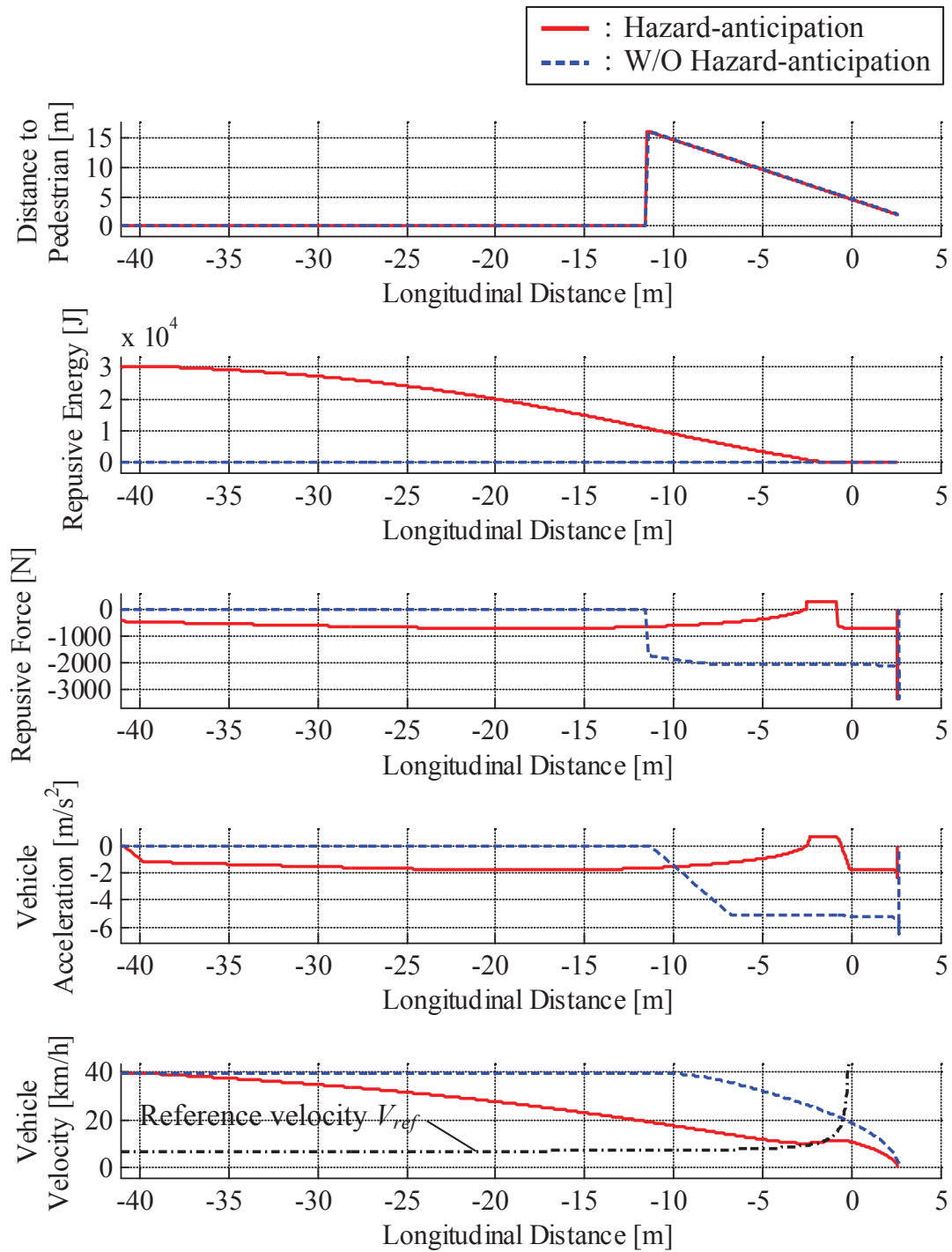
(p) ID124259

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system
between the case of without hazard -anticipation



(q) ID150456

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system between the case of without hazard -anticipation



(r) ID155051

Fig. 5.4.2(Cont'd) Comparison of automatic braking control system
between the case of without hazard -anticipation

図 5.4.3 に歩行者出現時の車両速度を示す．なお，図 5.4.3 に示す線分は式 (4.4.1) より算出した線分である．パラメータはそれぞれ，既存の衝突回避システムの想定される制動限界速度（最大減速度 $0.85G$ ，最大加加速度 $12m/s^3$ ，むだ時間 $0.1s$ ），ドライバが運転時ヒヤリハット場面となる境界速度（最大減速度 $0.45G$ ，最大加加速度 $12m/s^3$ ，むだ時間 $0.5s$ ）を示す．なお，ヒヤリハット場面の境界速度の算出に使用したむだ時間は先行研究より決定した⁽⁴⁹⁾．

図 5.4.3 より，青の三角形と丸で示す，ヒヤリハットデータの事例では，ヒヤリハット場面の境界速度より高い値から，既存の衝突回避システムの制動限界速度の間の領域に分布していることが確認できる．一方，赤の三角形と丸で示す本論文で提案する潜在リスク評価に基づく衝突回避システムでは，全 18 場面でヒヤリハット場面の境界速度より低い値となっていることが確認できる．以上の結果から，実際のドライバが事故もしくはヒヤリハットとなった場面において，本論文で提案するシステムは，実際に歩行者が出現した場合でも，ヒヤリハットにも陥らない程度の減速度で衝突を回避可能な速度に制御可能であることが確認できた．

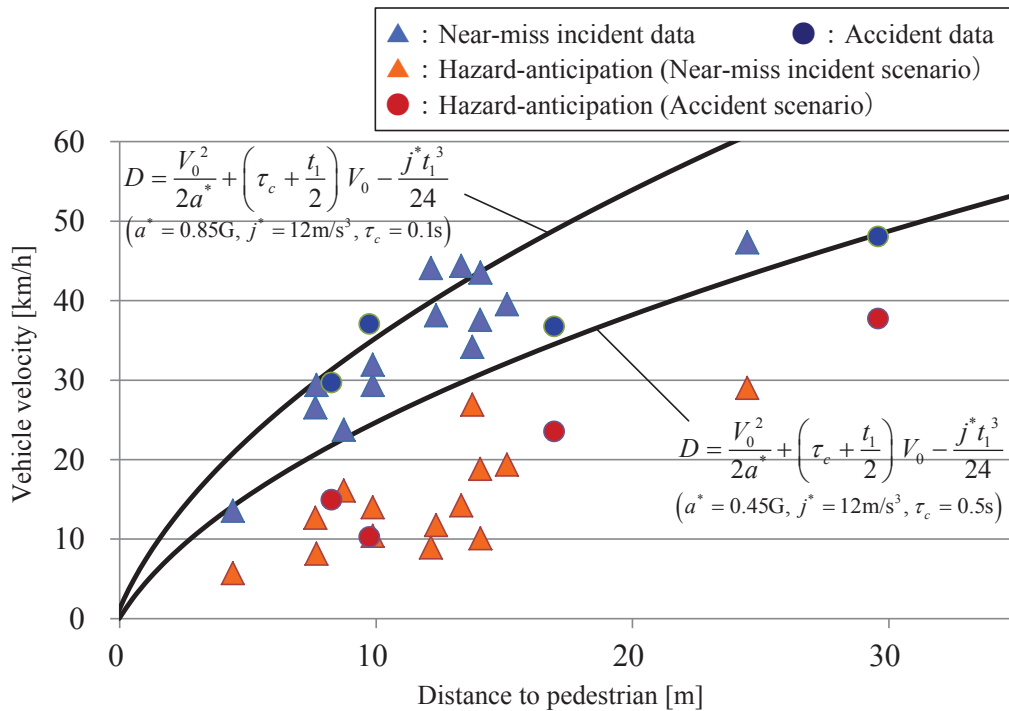


Fig. 5.4.3 Effect assessment of hazard-anticipatory driving model

5.5 まとめ

本章では、オクルージョンにより歩行者が直接検知できない場面、いわゆる潜在的リスクがある場面に対し、その衝突リスクを回避するための移動物体の行動予測およびポテンシャルフィールドによる運転知能モデルを提案した。次に、ヒヤリハットデータベースに基づく対歩行者場面におけるヒヤリハット場면을再現したシナリオでシミュレーションを行い、衝突回避システムの予防安全性能評価について検証を行った。その結果、オクルージョンより歩行者の出現を想定した、潜在的なリスクをポテンシャルフィールドにより理論的に記述することで、早期の減速行動を行うことが確認でき、これにより、歩行者を検出後の制動では急制動が必要な走行条件にて、急減速を必要とすることなく、歩行者との衝突を回避することを確認した。

第 6 章

結論

本論文では、交通事故発生件数及び交通事故死傷者数のさらなる減少を目指し、多様かつ複雑な状況判断を要する交差点に注目し、実ドライバの単独走行データ及びポテンシャルフィールド理論を用いた周囲環境のリスク評価手法を用いた、認知・判断・操作の一連の行動モデルを内蔵した自律型危険回避システムの開発を目的とした。そして、自律型危険回避システムの運転知能モデルに関する研究の一環として、対歩行者場面における衝突リスクの定量化とそれに基づく衝突回避機能に注目し、ポテンシャルフィールドの理論に基づくリスク評価手法とそれに基づく自律型衝突回避システムを提案した。

具体的には、超小型電気自動車をベースに各種センサおよびアクチュエータを搭載した実験車両を用いた周囲環境の歩行者検出システムを構築した。そして、検出された歩行者との衝突危険度算出から衝突のリスク回避のための速度計画アルゴリズムを設計し、超小型電気自動車のインホイールモータの制駆動力制御系を構築した。これらシステムからなる自律型衝突回避システムの有効性を、交差点右折場面に注目して、コンピュータシミュレーションと実験車を用いた自律走行試験より検証した。

さらに、自動車教習所の運転指導員の市街地での走行データ分析より、見通しの悪い交差点での危険予測行動を分析した。そして、ポテンシャルフィールドの理論に潜在的なリスクを推定する危険予測モデルを拡張し、ヒヤリハットデータベースより抽出された、歩行者飛び出し場면을模擬したコンピュータシミュレーションより有効性の検証を行った。以下に本論文で得られた知見を述べる。

1. 対歩行者場面における衝突回避システムの実験的検証

交通事故の発生状況から交差点右折場面に注目し、提案したシステムが、横断歩道周辺に存在する歩行者に対して、搭載した LIDAR の距離情報を用いた、事故リスク

のリアルタイム評価であることを示し、それに基づく車両速度制御系により、自律した衝突回避走行が可能であることを示した。

2. 熟練ドライバの危険予測運転行動を模擬した潜在リスク評価

オクルージョンが存在する場面におけるポテンシャルフィールドを用いたリスク評価手法により、熟練のドライバの危険予測運転行動をモデル化し、パラメータ同定により熟練ドライバの運転行動を模擬できることを示した。

3. 潜在リスク評価に基づく衝突回避システムの理論的解析

熟練ドライバの危険予測運転行動を模擬した潜在リスク評価に基づく速度制御系を理論的に設計することで、歩行者が飛び出した際に、急減速を必要とすることなく、歩行者との衝突を回避することが可能であることを示し、また、ヒヤリハット場面にて予防安全性能の向上を確認した。

以上より、将来の高度予防安全システムおよび自動運転車両の実現に向けて、本研究で提案した歩行者との衝突リスクの定量化手法と、それに基づく自律型危険回避システムは、今後の予防安全技術の複雑な環境下への展開において基盤技術となりうると考えられる。そして、今後の次世代電気自動車やパーソナルモビリティなどに適用され、特に歩行者場面における事故の減少に貢献できると考えられる。

また、今後の技術発展や社会への普及に向けた課題は、以下の通りである。

(1) 周辺環境の認識技術の向上

本論文では、自律走行車両プラットフォームを用いたシステムの実装試験まで行ったが、システムの信頼性の向上や、システムの多様な場面への展開には、周辺環境のオブジェクトの位置、運動情報の認識精度の向上や、正確な属性判別手法が必要不可欠であると考えられる。

(2) リスク評価に基づく走行経路生成アルゴリズムの構築

本論文では、事故被害低減効果を考え、車両前後方向の運動制御問題について注目したが、制動により回避できない場面や、事前の経路選択により、衝突リスクを低減できる可能性がある。そこで、今回提案した、衝突回避のためのリスク評価結果に基づき、車両の前後方向の運動制御に限らず、左右方向の運動制御を加えることで、衝突回避性能の向上や、事前の危険予測行動によりリスク低減効果の向上が求められる。

(3) 個人ドライバの運転操作特性に適合した運転支援システムの構築

本論文では、提案したリスク回避のための規範行動によって自動制御を行ったが、実際のドライバの受容性について考えると、ドライバ個々人の特性に応じて制御介入量を決定する必要がある。特に、近年の事故発生状況から、高齢ドライバが増加傾向にあることが確認されており、その運転操作特性は、若年者と大きく異なる。そこで、今回提案した、環境における最適な運転行動計画だけではなく、個々人の運転操作特性に適合した運転支援システムの構築が必要不可欠であると考えられる。

(4) 実際の道路環境における交通流に与える影響の調査

本論文では提案したシステムの予防安全性に注目してきた。しかし、提案したシステムのような減速を早期に促すようなシステムでは、減速機会の増加や平均速度の低下等の傾向が見られたため、これらの結果が道路交通に与える影響についても調査すべきである。本論文で注目した場面は、一般的に自動車の交通量は少ない場面であり、影響は少ないと考えられるが、交通流に与える影響を定量的に評価することで、有効性を示すことにつながり、社会への波及を早めるものだと考えられる。

参考文献

- (1) 一般財団法人 自動車検査登録情報協会, “自動車保有台数の推移”
- (2) 総務省統計局, “平成 25 年 9 月報”, 各月 1 日現在人口
- (3) 共生社会政策統括官, “平成 24 年度交通事故の状況及び交通安全施策の現況”, 交通安全白書
- (4) 警察庁交通局, “平成 24 年中の交通事故の発生状況”
- (5) 警察庁交通局, “平成 20 年中の交通死亡事故の特徴及び道路交通法違反取締り状況について”
- (6) ポンサトーンラクシンチャランサク, 永井正夫, “先進運転支援技術の現状と展望”, 光技術コンタクト, Vol.44, No.9, pp.3-10, 2006
- (7) 財団法人 交通事故総合分析センター, イタルダイインフォメーション, No.100, 2013
- (8) 財団法人 交通事故総合分析センター, イタルダイインフォメーション, No.98, 2013
- (9) 財団法人 交通事故総合分析センター, イタルダイインフォメーション, No.94, 2012
- (10) 柴田英司, “新開発ステレオカメラによる運転支援システム「EyeSight」の開発”, 自動車技術, Vol.63, No.2 (2009), pp.93-98
- (11) E. Coelingh, A. Eidehall, M. Bengtsson, “Collision Warning with Full Auto Brake and Pedestrian Detection – a practical example of Automatic Emergency Braking”, 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (2010), pp.155-160
- (12) SUBARU, “事故を起こさない車を目指し, 運転支援範囲を大幅に拡大した先進運転支援システム「新型 EyeSight(アイサイト)」を開発”, SUBARU ホームページ, <http://www.subaru.jp/news/2010/eyesight/>

- (13) VOLVO, “HUMAN SAFETY MOVIE” , VOLVO ホームページ,
<http://www.volvocars.com/jp/all-cars/volvo-s60/pages/hfmovie.aspx>
- (14) “なぜ今「ぶつかからない」クルマが増えているのか”, 日経 Automotive Technology 2011 年 5 月号, (2011), pp.60-65.
- (15) 小林雅裕, 井田崇之, 佐藤一人, 瀬戸陽治, 高江康彦, 菅野健, 佐藤亮太, 倉田和典,
“ディスタンスコントロールアシストの開発”, NISSAN TECHNICAL REVIEW, No. 63,
No. 1 (2008).
- (16) Kanazawa, Fumihiko, Sakai, Koichi, Suzuki, Kazufumi, Nakamura, Satoru, “User Survey of
Effectiveness of Road Traffic Information for Drivers”, 18th ITS World Congress, Orlando,
2011.
- (17) 金澤文彦, 坂井康一, 鈴木一史, 中村悟, “モニタ調査による ITS スポットサービスに
おける音声情報提供の有効性”, 日本道路会議論文集, No.27, 2011.
- (18) 金澤文彦, 坂井康一, 鈴木一史, 中村悟, “高速道路サグ部における ACC 車両の混入状
況に応じた渋滞緩和効果”, 第 10 回 ITS シンポジウム 2011, Vol.10, p.67-72, 2011.
- (19) 橋本博, 細川崇, 平松真知子, 新田茂樹, 吉田傑: 高齢運転者の交差点通過時の運転行
動実態把握, 自動車技術会秋季大会学術講演会前刷集, No.120-09, pp.1-6, (2009).
- (20) 細川崇, 橋本博, 平松真知子, 新田茂樹, 吉田傑: 交差点通過場面における高齢者のギ
ャップアクセプタンスの把握, 自動車技術会秋季大会学術講演-会前刷集, No.120-09,
pp.7-12, (2009).
- (21) B.Hills : Vision Visibility, and Perception in Driving, Perception, Vol. 9, pp.183-216, 1980
- (22) Chris Urmson, *et al.*, “Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban
Challenge”, Journal of Field Robotics, Volume 25, Issue 8, pages 425–466, August 2008.
- (23) Fred W., *et al.*, “Caroline: An Autonomously Driving Vehicle for Urban Environments”, Journal
of Field Robotics, Volume 25, Issue 9, pages 674-724, August 2008.

- (24) John Leonard, *et al.*, “A Perception-Driven Autonomous Urban Vehicle”, *Journal of Field Robotics*, Volume 25, Issue 10, pages 727–774, August 2008.
- (25) Antonio Prioletti, Andreas Molgemoose, Paolo Grisleri, Mohan Manubhai Trivedi, Alberto Broggi, and Thomas B. Moeslund, “Part-Based Pedestrian Detection and Feature-Based Tracking for Driver Assistance: Real-Time, Robust Algorithms, and Evaluation”, *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 14(3):1346-1359, September 2013.
- (26) Alberto Broggi, Stefano Debattisti, Paolo Grisleri, Maria Chiara Laghi, Paolo Medici, and Pietro Versari, “Extensive Tests of Autonomous Driving Technologies”, *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 14(3):1403-1415, September 2013.
- (27) Alberto Broggi, Pietro Cerri, Mirko Felisa, Maria Chiara Laghi, Luca Mazzei, and Pier Paolo Porta, “The VisLab Intercontinental Autonomous Challenge: an Extensive Test for a Platoon of Intelligent Vehicles”, *Intl. Journal of Vehicle Autonomous Systems*, special issue for 10th Anniversary, 10(3), 2012.
- (28) 安藝雅彦, ROJANAARPA Teerapat, 中野公彦, 須田義大, 高須賀直一, “自動隊列走行におけるレーザレーダ路面状態推定に関する研究”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.55-13, pp.1-6, (2013)
- (29) 菅沼直樹, 小池翔太 “センサフュージョンによる障害物検出および先行車両認識”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.55-13, pp.7-10, (2013)
- (30) 景山一郎, 栗谷川幸代, 金子哲也, 靱山富士男, “隊列走行制御構築のための大型トラックのモデル化に関する研究”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.56-13, (2013)
- (31) 小島和浩, 亀田能成, 大田友一, “NaviView 見通しの悪い交差点での仮想ミラー提示による運転者への視覚支援”, 電子情報通信学会 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol.103, No.737, pp.19-24, 2004

- (32) 鈴木秀格, 村田英一, 荒木純道, “出会い頭衝突事故防止のための位置情報を利用した車車間通信方式に関する検討”, 電子情報通信学会 電子情報通信学会技術研究報告.ITS IEICE technical report, Vol.105, No.464, pp.7-12, 2005
- (33) 鈴木延昌, “第4期ASV推進計画の普及活動と技術開発の現状について”, 国際交通安全学会誌, Vol.33, No.4, (2008), pp.304-310.
- (34) 塚原俊哉, 伊藤政義, 御室哲志: 出会い頭事故予防システムのヒヤリハットシーンへの有効性検討, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.145-08, pp.1-4, 2008.
- (35) Oussama Khatib, “Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots.” International Journal of Robotics Research, Vol.5, pp.90-98, (1986)
- (36) Michael A. Goodrich, “Potential Fields Tutorial”, (2002).
http://borg.cc.gatech.edu/ipr/files/goodrich_potential_fields.pdf
- (37) Saroj Kumar Pradhan, Dayal Ramakrushna Parhi, Anup Kumar Panda, Rabindra Kumar, “Potential field method to navigate several mobile robots”, Applied Intelligence, Volume 25, pp 321-333, December 2006.
- (38) 島倉諭, 項警宇, 稲垣伸吉, 鈴木達也: ポテンシャルを組み込んだパーティクルコントロールによる自律移動ロボットの障害物回避制御
- (39) 石川敏照, 堀 浩一: 相対速度を考慮した人工ポテンシャル法による衝突回避アルゴリズム, The 22nd Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2008
- (40) 金子 哲也, 栗谷川 幸代, 景山 一郎, “混合交通下における車両周辺の危険感ドライバモデルを用いた走行経路生成に関する研究”, 第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 1M1-3, December 2013.
- (41) Gerdes, J.C., Saur, U. and Rossetter, E.J., “Combining Lanekeeping and Vehicle Following with Hazard Maps”, Proceedings of the 2000 International Symposium on Advanced Vehicle Control, Michigan, USA, (2000).

- (42) Reichardt, D. and Schick, J., “Collision Avoidance in Dynamic Environments Applied to Autonomous Vehicle Guidance on the Motorway”, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Paris, France, (1994).
- (43) Sattel, T. and Brandt, T. : From robotics to automotive: lane-keeping and collision avoidance based on elastic bands. Vehicle System Dynamics, Vol. 46, No.7, pp. 597-619, (2008).
- (44) E. J. ROSSETTER, J. P. SWITKES and J. C. GERDES : EXPERIMENTAL VALIDATION OF THE POTENTIAL FIELD LANEKEEPING SYSTEM, International Journal of Automotive Technology, Vol. 5, No. 2, pp. 95–108 (2004)
- (45) Joshua P. Switkes, J. Christian Gerdes, Stanford University, Stanford University : An Energy Based Performance Bound for Lanekeeping Assistance with Force Feedback, AVEC “06
- (46) KEYENCE, “レーザ規格 IEC について”, [sensor.co.jp, http://www.sensor.co.jp/worldsupport/kikaku/07.html](http://www.sensor.co.jp/worldsupport/kikaku/07.html)
- (47) 永井正夫, ポンサトーンラクシンチャランサク, 林隆三, 石崎由也, ヒヤリハットデータベースを基にした対歩行者・自転車事故回避システムの評価手法の検討, 第 54 回自動制御連合講演会 講演論文集 CD-ROM (2011), pp.222-226
- (48) ウォンワイウィット ピヤポン, ポンサトーンラクシンチャランサク, 道辻 洋平, “ヒヤリハットデータベースに基づく無信号交差点における歩行者・自転車の行動分析”, 交通・物流部門大会講演論文集, No.20, pp. 19-22, (2011).
- (49) 森田 和元, 廣瀬 敏也, 波多野 忠, 児島 亨, 田中 信壽, “横方向からの飛び出し車両に対するドライバの衝突回避操作に関する実車実験結果”, 日本機械学会論文集 C 編, 79 巻, 807 号, No.2013-JCR-0570, pp.4311-4320, (2013)

関連論文リスト

査読付き論文

第2章

- [1] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, “交差点右折時の歩行者衝突回避のための超小型電気自動車の制駆動トルク制御に関する研究”, 日本機械学会論文集C編, Vol. 78, No. 785, pp.102-113, (2012)

第3章

- [2] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, “ポテンシャルフィールドに基づく交差点右折時の歩行者衝突回避に関する研究”, 自動車技術会論文集, Vol. 42, No. 6, pp. 1295-1301, (2011)

第5章

- [3] Ryosuke Matsumi, Pongsathorn Raksincharoensak and Masao Nagai, “Autonomous Braking Control System for Pedestrian Collision Avoidance by Using Potential Field”, *7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control*, Vol.7, Part 1, pp.328-334, Tokyo, Japan, September, (2013).
- [4] Ryosuke Matsumi, Pongsathorn Raksincharoensak and Masao Nagai, “Development of Autonomous Intelligent Driving System to Enhance Safe and Secured Traffic Society for Elderly Drivers”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.25, No.6, December, (2013).
(掲載決定)

口頭発表（査読なし）

第2章

- [1] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, “超小型電気自動車を用いた右折時の自動運転システムに関する研究”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 1P1-A29, 旭川, 北海道, 2010 年 6 月.
- [2] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, “右折時の環境危険度を考慮した自律走行車両の操舵・速度制御に関する研究”, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 1F3-6, 名古屋, 愛知, 2010 年 9 月.

第3章

- [3] Ryosuke Matsumi, Pongsathorn Raksincharoensak and Masao Nagai, “Pedestrian Collision Avoidance by Automatic Braking in Intersection Based on Potential Fields”, *First International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic-accident*, Tokyo, Japan, September, 2011.
- [4] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, “右折時における歩行者衝突回避のための自動運転システムに関する研究”, 第 53 回自動制御連合講演会, No.223, 高知, 高知, 2010 年 11 月.
- [5] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, “ポテンシャルフィールドに基づく交差点右折時の歩行者衝突回避に関する研究”, 自動車技術会 2011 年春季大会, No.59-11, pp.7-12, 横浜, 神奈川, 2011 年 5 月.

第5章

- [6] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, “オクルージョンを考慮した対歩行者衝突回避システムに関する研究”, 自動車技術会 2011 年秋季大会, No.138-11, pp.1-4, 札幌, 北海道, 2011 年 10 月.
- [7] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, “リスクポテンシャルフィールドに基づく歩行者衝突回避システムの予防安全性能評価”, 自動車技術会学術講演会 2012 年春季大会, No.16-12, pp.17-20, 神奈川, 横浜, 2012 年 5 月.

- [8] Ryosuke Matsumi, Pongsathorn Raksincharoensak, Masao Nagai, “Hazard-Anticipatory Pedestrian Collision Avoidance System by Autonomous Braking”, *The 11th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, Seoul, Korea, September, 2012.
- [9] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, “リスクポテンシャルフィールドに基づく危険予測型衝突自動回避システムに関する研究”, *Dynamics and Design Conference 2012*, Vol.2012, 神奈川, 横浜, 2012 年 9 月.
- [10] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, “潜在リスクポテンシャル推定に基づく自律走行車両の運転知能モデルに関する研究”, *MOVIC2013, B16*, 福岡, 福岡, 2013 年 8 月.

謝辞

本研究の進行ならびに、本論文をまとめるにあたり、東京農工大学 永井正夫教授ならびにポンサトーン・ラクシンチャランサク准教授には、研究室に配属されてからの5年間懇切丁寧なご指導をいただきました。著名な雑誌への投稿、国際会議や学術講演会での発表、投稿をさせていただいたことに加え、東京モーターショーなどでのデモンストレーションを経験させていただく等、多くの貴重な機会を与えていただいたことを心より感謝しております。また、同大学 鎌田崇義教授、田川泰敬教授、遠山茂樹教授、和田正義准教授から御助言をいただけたことを大変感謝しております。

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的イノベーション創出推進プログラムの研究プロジェクト「高齢者の自立を支援し安全安心社会を実現する自動運転システム」の一環として行ったものであり、関係者の方々には大変お世話になりました。東京大学 鎌田実教授、伊藤太久磨様、トヨタ自動車 井上秀雄様、水越雅司様、美尾昌宏様、坂井田慎吾様、豊田中央研究所 大桑政幸様、田中雄一様、清水司様には打ち合わせやシステムの試乗会の機会に、貴重なご意見やご助言をいただけたことを、心から感謝しております。トヨタ自動車 美尾様、坂井田様には、考案したシステムの実装にあたり、市販車の制御技術から、安全管理に対する考え方等非常に多くのご助言をいただき、私にとって大変貴重な経験となりました。深く感謝申し上げます。東京大学 伊藤太久磨様には、システムの設計の段階から、親身にお話しさせていただきありがとうございました。また、プロジェクトの共通プラットフォームについても懇切丁寧な説明や対応をしていただき、大変お世話になりました。

本研究を遂行するにあたり共に研究生活を過ごした永井研究室、ポンサトーン研究室の助教の先生方や先輩、同期、後輩の方々には大変お世話になりました。自動操舵システムの設計では、永井研究室 磯谷十蔵さんにはサーボアンプの設定から制御プログラムの内容にいたるまで丁寧にご指導していただき、ありがとうございました。歩行者検知アルゴリズムの設計では、ポンサトーン研究室 吉澤孝紀さんに忙しいなか時間を割いていただき本当に感

謝しております。同研究室 平尾基裕君にはシステムの実装試験についてお世話になりました。永井研究室 西郷慎太郎さんには、博士後期課程の同期として、日々の研究生活から、モーターショー等のイベント対応等、ここでは書ききれない程の場面でお世話になりました。永井・ボンサトーン研究室の秘書である本間容子様、高橋智恵子様には、国内外の学会参加の際の旅費等の書類作成、物品購入に至るまで、様々な場面でサポートしていただき感謝しております。

本研究室で過ごした5年間、お世話になった永井・ボンサトーン研究室OBの諸先輩方、現永井・ボンサトーン研究室の皆様には大変お世話になりました。何より、私の研究活動への意欲、博士後期課程への進学に対する考えを理解し、このような機会を与えてくださった家族の皆さんに心から深く感謝申し上げます。

平成26年3月25日

松實 良祐

研究業績

(1) 学術雑誌等（.紀要・論文集等も含む）に発表した論文、著書

- [1] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, “交差点右折時の歩行者衝突回避のための超小型電気自動車の制駆動トルク制御に関する研究”, 日本機械学会論文集C編, Vol. 78, No. 785, pp.102-113, (2012)
- [2] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, “ポテンシャルフィールドに基づく交差点右折時の歩行者衝突回避に関する研究”, 自動車技術会論文集, Vol. 42, No. 6, pp. 1295-1301, (2011)
- [3] Ryosuke Matsumi, Pongsathorn Raksincharoensak and Masao Nagai, “Autonomous Braking Control System for Pedestrian Collision Avoidance by Using Potential Field”, *7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control*, Vol.7, Part 1, pp.328-334, Tokyo, Japan, September, (2013).
- [4] Ryosuke Matsumi, Pongsathorn Raksincharoensak and Masao Nagai, “Development of Autonomous Intelligent Driving System to Enhance Safe and Secured Traffic Society for Elderly Drivers”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.25, No.6, December, (2013). （掲載決定）

(2) 国際会議における発表

- [1] Ryosuke Matsumi, Pongsathorn Raksincharoensak and Masao Nagai, “Pedestrian Collision Avoidance by Automatic Braking in Intersection Based on Potential Fields”, *First International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic-accident*, Tokyo, Japan, September, 2011.

- [2] Ryosuke Matsumi, Pongsathorn Raksincharoensak, Masao Nagai, “Hazard-Anticipatory Pedestrian Collision Avoidance System by Autonomous Braking”, *The 11th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, Seoul, Korea, September, 2012.

(4) 国内学会・シンポジウム等における発表

- [1] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, “超小型電気自動車を用いた右折時の自動運転システムに関する研究”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 1P1-A29, 旭川, 北海道, 2010 年 6 月.
- [2] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, “右折時の環境危険度を考慮した自律走行車両の操舵・速度制御に関する研究”, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 1F3-6, 名古屋, 愛知, 2010 年 9 月.
- [3] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, “右折時における歩行者衝突回避のための自動運転システムに関する研究”, 第 53 回自動制御連合講演会, No.223, 高知, 高知, 2010 年 11 月.
- [4] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, “ポテンシャルフィールドに基づく交差点右折時の歩行者衝突回避に関する研究”, 自動車技術会 2011 年春季大会, No.59-11, pp.7-12, 横浜, 神奈川, 2011 年 5 月.
- [5] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, “オクルージョンを考慮した対歩行者衝突回避システムに関する研究”, 自動車技術会 2011 年秋季大会, No.138-11, pp.1-4, 札幌, 北海道, 2011 年 10 月.
- [6] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, “リスクポテンシャルフィールドに基づく歩行者衝突回避システムの予防安全性能評価”, 自動車技術会学術講演会 2012 年春季大会, No.16-12, pp.17-20, 神奈川, 横浜, 2012 年 5 月.
- [7] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, “リスクポテンシャルフィールドに基づく危険予測型衝突自動回避システムに関する研究”, Dynamics and Design Conference 2012, Vol.2012, 神奈川, 横浜, 2012 年 9 月.

- [8] 松實良祐, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, “潜在リスクポテンシャル推定に基づく自律走行車両の運転知能モデルに関する研究”, MOVIC2013, B16, 福岡, 福岡, 2013 年 8 月.

(6) 受賞歴 :

- [1] 松實良祐, “優秀発表賞”, 第 53 回自動制御連合講演会, 2011 年 1 月