

博士学位論文

歩行者衝突速度に基づく潜在リスクの定量化と
リスク予測型運転支援への応用

Quantification of Risk Based on Collision Velocity with Pedestrians and
Its Application to Risk Predictive Driver Assistance System

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

清水司

Tsukasa Shimizu

2022年3月

要旨

近年、国内の交通事故件数、交通死亡者数ともに減少傾向にあるが、未だ安全な交通社会が実現されてはいない。とりわけ、国内の交通死亡者数の半数以上を占める車両対歩行者・自転車事故に対する対策が必要である。このような背景の下、歩行者対応型の衝突被害軽減ブレーキの開発、普及が進んでいる。しかしながら、現状のシステムでは、駐車場、交差点などの死角からの歩行者の突然の飛び出しなどの不測の状況に対して、その効果は限定的である。このような潜在リスク場面での歩行者事故を回避したり、衝突被害を抑制したりできれば、交通事故死者数の低減につながると考えられる。そこで、本研究では、潜在リスク場面において熟練ドライバーが行っている合理的な運転戦略である先読み運転を工学的に実現する「リスク予測型運転支援システム」を実現するために、潜在リスク場面における運転行動分析、リスク指標の定量化と安全な走行軌道生成、および運転支援システム応用に関する研究を行った。

まず、潜在リスク場面における望ましい運転（支援目標となる運転）についての知見を得るために、自動車教習所の指導員の走行および運転行動の分析、安全運転に関する行動ルールのヒアリングを行った。その結果、熟練ドライバー（指導員）は潜在リスク場面での先読み運転のために、道路環境に依存して一定の運転行動パターンを取っていることを明らかにした。また、指導員へのヒアリングから、以降のリスク指標の定量化の基本アイデアに繋がる運転行動ルール「何か出てきた時に止まれる速度、停止距離を心がけている」を得た。

次に、潜在リスク場面において運転支援を受ける側の対象ドライバーの不安全運転についての知見を得るために、テストコースにて駐車車両通過場面における一般ドライバーの走行データを収集し、運転行動を分析した。その結果、不安運転の特徴の1つとして、駐車車両を回避するための操舵開始タイミング後のアクセルオフ遅れ、もしくは、アクセルオフ不実行に起因する減速不足により、通過時の速度が高めになることを明らかに

した。また、これらの不安全行動に対して、減速支援として減速 G の印加や力覚提示を用いる運転支援デザインの提案を行った。

明らかになった一般ドライバーの不安全運転のリスクの程度を定量化するリスク指標の開発を行った。具体的には、死角からの仮想飛び出し歩行者に対して AEB が作動した際の衝突速度をリスク指標とした。このリスク指標は、従来研究でのリスク指標では満たされていなかった 4 つ要件を満たすものである。また、開発したリスク指標により、一般ドライバーの走行データに対して、走行時のリスクの推定および可視化を行った。

さらに、潜在リスク場面における走行状態のリスクを評価する評価関数（リスクフィールド）を提案し、それを用いて安全な走行軌道を生成することで、開発したリスク指標の妥当性の検証を行った。駐車車両側方通過時における熟練ドライバーの操作を正弦波モデル（縦・横加速度モデル）で近似し、リスクフィールドを用いて走行軌道の生成を試み、熟練ドライバーの安全な走行軌道に類似した軌道を生成することができた。

最後に、提案したリスク指標を用いて、歩行者側方通過時場面におけるリスク推定システムを構築し、提案したリスク指標のシステム応用実現性の検証を行った。FOT (Field Operational Test) で収集した実際的な走行データの車両情報、カメラ情報、LiDAR 情報から歩行者通過時のリスクを推定することができた。これにより、実際的な走行環境において車載センサで得られる情報に対して援用可能であることを示した。

先読み運転の運転ルールに照らして合理的な考え（AEB 作動時の衝突速度）に基づく潜在リスク場面におけるリスク指標を開発し、不安全運転を支援するシステムへの応用実現性が検証できた。従来の ADAS では救えない潜在リスク場面での歩行者事故を低減するリスク予測型運転支援システムの実現に向けた貢献ができたと考える。

Abstract

In recent years, both the number of traffic accidents and the number of traffic fatalities in Japan have been declining, however a safe traffic society has not yet been realized. In particular, it is necessary to take measures against vehicle-to-pedestrian accidents, which account for more than half of the traffic fatalities in Japan. Against the background, AEB (Automatic Emergency Braking) with pedestrian detection are being developed and popularized. However, the current system has a limited effect on unexpected situations such as sudden darting out of pedestrians from blind spots behind parked vehicle intersections with poor visibility. If pedestrian accidents in such risk situations can be avoided and collision damage can be mitigated, it will lead to a reduction in the number of fatalities in traffic accidents. Therefore, in this study, in order to realize a "risk predictive driving support system" that engineeringly realizes foreseeing driving, which is a rational driving strategy performed by experienced drivers in risk situations, the research on driver behavior analysis, quantification of risk indicators, generation of safe driving trajectory, and application of driving support systems have been conducted.

First, in order to comprehend desirable driving (driving as a support target) in risk situations, we analyzed driving behavior of a driving-school instructor and interviewed rules regarding safe driving. As a result, it was clarified that the experienced driver takes a certain driving behavior pattern depending on the road environment for foreseeing driving in the risk situations. In addition, from the interviews with the instructor, we obtained the driving rule "I keep in mind the speed and distance to stop when something darts out", which leads to the basic idea of quantifying the risk index.

Next, in order to comprehend unsafe driving behavior in risk situation, we collected the driving data of the normal drivers in passing-parked-vehicle scene and analyzed driving behaviors. As a result, we found that some unsafe drivers pass by the parked vehicle at higher speed due to the

insufficient deceleration caused by accelerator-off delay and the accelerator off failure. For these unsafe behaviors, we proposed a driving support design that uses haptic feedback and automatic deceleration.

We have proposed a risk index that can quantify the degree of unsafe driving. The collision velocity with activation of AEB for a virtual darting out pedestrian from a blind spot was used as a risk index. In addition, using the proposed risk index, we estimated and visualized the risk while driving in a risk situation.

Furthermore, we have proposed an evaluation function (risk field) that evaluates the risk of driving in risk situations and used it to generate a safe driving trajectory to verify the validity of the proposed risk index. We can generate a driving trajectory using a risk field, and a generated trajectory was similar to the safe driving trajectory of an experienced driver.

Finally, using the proposed risk index, we constructed a risk estimation system in a-pedestrian-passing scene, and verified the system application feasibility of the proposed risk index. We were able to estimate the risk using the vehicle information, camera information, and LiDAR information of the actual driving data collected by FOT (Field Operational Test).

In conclusion, we have developed a risk index in a risk situation based on a rational idea (collision velocity with AEB activation) and have verified the applicability to a system that supports unsafe driving. We believe that we have contributed to the realization of a risk-predictive driving support system that reduces pedestrian accidents in risk situations that cannot be saved by conventional ADAS.

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 研究背景.....	3
1.2.1 日本の人口推移.....	3
1.2.2 日本の交通事故の状況.....	3
1.2.3 予防安全技術の普及と事故低減.....	6
1.2.4 潜在リスク場面における先読み運転.....	10
1.3 研究目的.....	11
1.3.1 リスク予測型運転支援システム.....	11
1.3.2 リスク予測型運転支援システムの実現に向けた課題.....	12
1.3.3 潜在リスク場面におけるリスク指標に関する従来研究.....	15
1.4 本論文の構成.....	20
第2章 熟練ドライバの先読み運転の特徴	22
2.1 はじめに.....	22
2.2 走行および運転行動データの計測.....	22
2.2.1 ドライバおよび計測データ.....	22
2.2.2 対象交差点.....	22
2.3 見通しの悪い交差点通過時における先読み運転.....	23
2.3.1 運転行動の可視化.....	23
2.3.2 運転行動パターン.....	25

2.4	先読み運転における運転行動ルール	27
2.4.1	ヒアリング方法	27
2.4.2	実路運転評価	28
2.4.3	運転行動ルール	28
2.5	先読み運転における運転行動ルールと運転行動との対応	30
2.6	運転行動ルールの支援適用に関する考察	31
2.7	まとめ	32
第3章	潜在リスク場面における一般ドライバの運転の特徴	38
3.1	はじめに	38
3.2	運転行動分析の目的	38
3.2.1	従来研究	38
3.2.2	本研究の位置づけ	38
3.3	走行実験	39
3.3.1	車両および装置	39
3.3.2	ドライバ	40
3.3.3	走行内容	41
3.4	走行および運転行動データ	42
3.4.1	計測データ	42
3.4.2	走行軌跡, 速度変化	43
3.5	通過時の側方間隔, 速度によるドライバ分類	44
3.5.1	ドライバ分類の考え方	44
3.5.2	ドライバ分類の手順	46
3.6	ドライバ群間の比較	48

3.6.1	通過時の側方間隔, 速度	48
3.6.2	操舵開始タイミングでの側方間隔, 速度.....	50
3.6.3	ハンドル操作, ペダル操作	53
3.7	潜在リスク場面における支援デザインについての考察	57
3.8	まとめ.....	59
第 4 章	衝突速度に基づくリスク指標の定量化.....	62
4.1	はじめに.....	62
4.1.1	リスク指標の要件	62
4.2	潜在リスク場面におけるリスクの考え方と定式化.....	63
4.2.1	潜在リスク場面におけるリスクの考え方.....	63
4.2.2	リスクの一般定式化	64
4.2.3	衝突速度を用いたリスクの定式化	65
4.2.4	緊急減速を仮定した衝突速度の定式化.....	66
4.3	潜在リスク場面におけるリスクの定量化.....	73
4.4	まとめ.....	80
第 5 章	リスクフィールドによる走行軌道生成の基礎検討.....	81
5.1	はじめに.....	81
5.2	リスクフィールド.....	81
5.2.1	走行状態空間	81
5.2.2	リスクフィールド	82
5.3	軌道生成の定式化.....	84
5.3.1	規範軌道生成の定式化 (一般式)	84

5.3.2	加速度モデルを用いた定式化	85
5.4	正弦波加速度モデルを用いた走行軌道生成の一例	91
5.5	まとめ	94
第6章	リスクフィールドを用いたリスク推定システム	95
6.1	はじめに	95
6.2	FOTによる走行データの収集	95
6.2.1	車両および装置	95
6.2.2	走行コース	96
6.2.3	ドライバ	97
6.3	リスク指標の拡張	97
6.4	歩行者飛び出しリスク推定システム	99
6.5	歩行者側方通過場面における走行リスクの分析	102
6.5.1	走行場面の分類	102
6.5.2	走行リスクの分析	102
6.6	まとめ	105
第7章	結論	106
7.1	本論文のまとめ	106
7.2	今後の課題	108
	引用文献	110
	謝辞	118

第1章

序論

1.1 はじめに

図 1.1 は、1938 年に Gibson と Crooks [1]が安全運転に関する認知モデルを説明する中で用いた図である。彼らは、「安全運行の場 (field of safe travel)」と「最短停止領域 (minimum stopping zone)」という概念を用いて、認知学的な立場から運転行動についてモデル化を試みた。「安全運行の場 (図 1.1 中の右車両前方に広がる帯状の領域)」は、ある時点で取り得る安全な走行パスの集合であり、交通状況 (道路形状, 他の交通参加者) の影響を受けて変化する。「最短停止領域」は、「安全運行の場」を、自車速度や制動性能, 路面状況によって決まる最短停止位置 (図 1.1 中の縦線分) で区切ったうちの自車側領域である。彼らは、「最短停止領域」の奥行き距離 (l) に対する「安全運行の場」の奥行き距離 (L) の比率 (field-zone ratio: L/l) を運転の注意深さの程度として考えた。つまり, field-zone ratio が大きければ (最短停止領域に対して安全運行の場が十分に大きければ) 安全運転であり, field-zone ratio が 1 に近づくほど不安な全運転をしていると考えた。

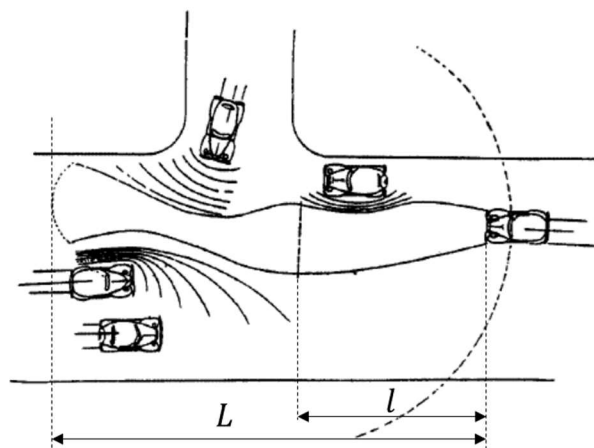


図 1.1 「安全走行の場」と「最短停止領域」の概念図 ([2, p. 95] から転載)

field-zone ratio のような周辺交通状況と自車状態によって決まる安全性（もしくはリスク）に関する評価値とその基準値（field-zone ratio では1）によって運転行動をモデル化するという考えは、その後の様々な運転行動の認知モデル [3][4][5][6]の基礎となっただけでなく、予防安全技術の基本的な考えに通底している。

今日の先進運転支援システム（ADAS: Advanced Driver Assistance System）の個々のシステム [7][8]では、それぞれ固有の事故類型を対象に安全性に関する評価値 [9][10]を算出し、評価値がある基準範囲に収まるよう車両を安全な状態に維持したり、評価値が基準範囲から外れた場合、警報の発出、操作の介入を行ったりする。これらのシステムにより、交通事故件数や死者数は減少傾向にある [11, p. 14]。ただし、現状では、評価値が算出できるのは追突・衝突対象や逸脱対象がセンシング可能な（顕在化している）場合に限られている。

本研究では、図 1.2 に示すような障害物や交差点などの死角からの歩行者・自転車の飛び出しの可能性、追い越し時の歩行者、自転車の急な進路変更の可能性のある場面を対象としたリスクの評価法、および、その工学的応用について扱う。本研究では、上記の場面のことを、危険事象の発生が不確実であるという意味で潜在リスク場面と呼ぶ。潜在リスク場面では、衝突対象や衝突事象を事前にセンシングしたり、その発生を予測したりすることができないため、安全性に関する評価が困難である。

本章の以降では、1.2 節において社会的、工学的な視点から研究背景について述べ、1.3 節において研究目的および課題について述べる。最後に、1.4 節において本論文の構成を示す。



図 1.2 本研究で対象とする潜在リスク場面の一例

1.2 研究背景

1.2.1 日本の人口推移

図 1.3 に日本の人口推移を示す。日本では 2008 年に人口のピークを迎え、それ以降、人口減少が始まるとともに少子高齢化が進んでいる。2030 年には、65 歳以上の高齢者の全人口に対する割合が 3 割に達する見込みである。特に 75 歳以上の後期高齢者の増加が顕著となり、2030 年には後期高齢者は全人口に対して約 2 割となると予測されている。この人口の推移予測に基づくと、将来的には高齢ドライバーの増加とともに、歩行者、自転車といった交通弱者（ここでは *vulnerable road users* の意味）に占める高齢者の割合も増えていくことが考えられる。

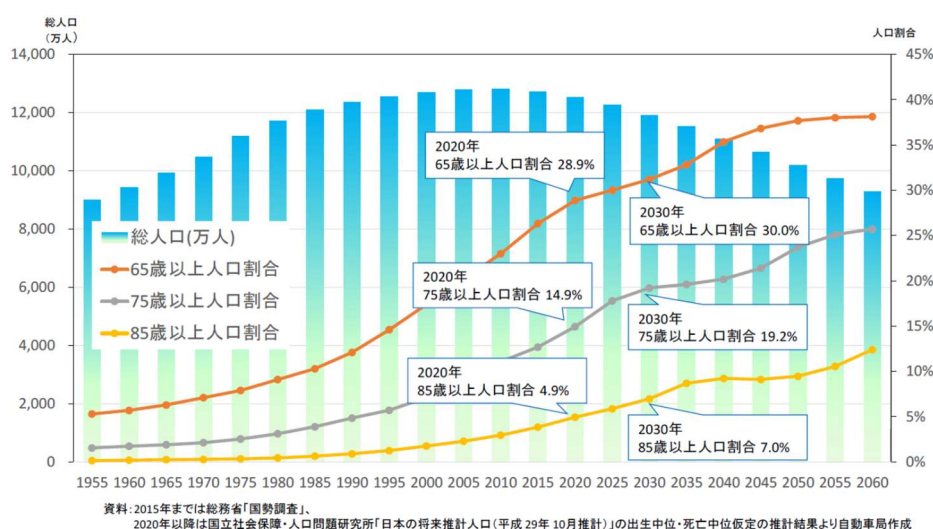


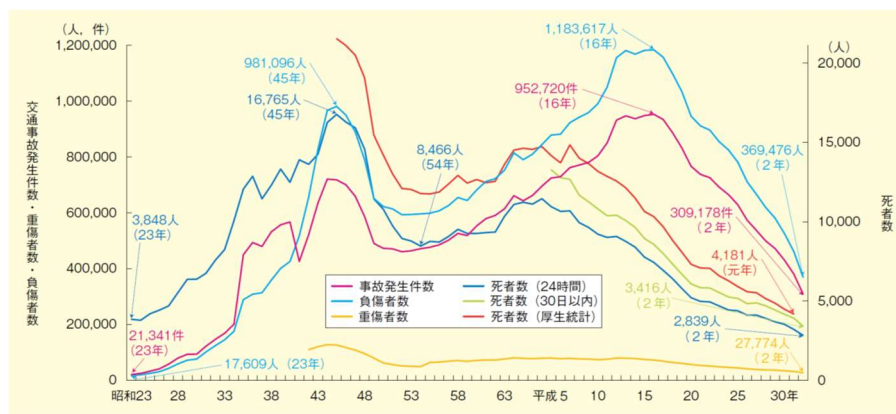
図 1.3 日本の人口推移（ [11, p. 2]から転載）

2015 年までは国政調査の結果であり、それ以降は推計値である。

1.2.2 日本の交通事故の状況

図 1.4 に国内の交通事故件数、死者数、負傷者数、重症者数の推移（昭和 23 年～令和 2 年）を示す。交通事故件数は平成 16 年（2004 年）に、死者数は平成 2 年（1990 年）にピークを迎え、その後、減少傾向が続き、令和 2 年（2020 年）には交通事故件数が 309,178 件、死亡者数は 2839 人まで減少した。負傷者数、重症者数も同様に減少傾向が

続いている。この交通事故件数などの減少傾向は、交通安全への取り組みに加えて、衝突被害軽減ブレーキなどの ADAS の普及によるものと考えられている。

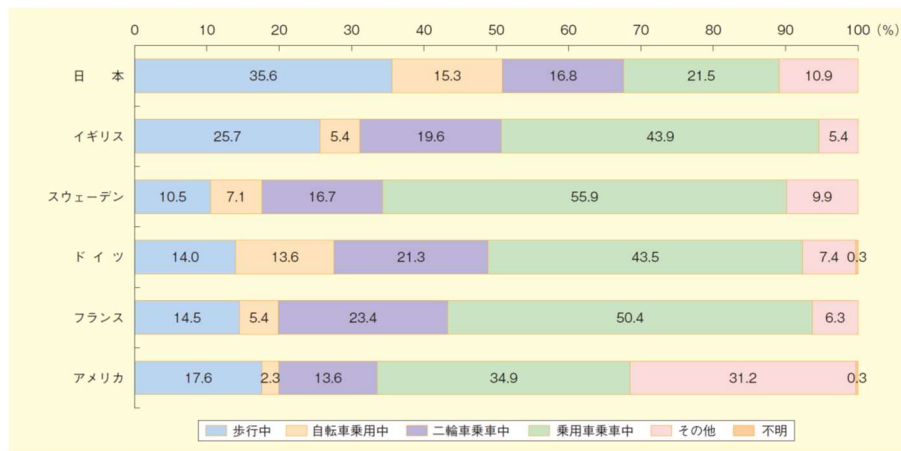


- 注 1 警察庁資料による。
 2 「死者数(24時間)」とは、交通事故によって、発生から24時間以内に死亡した者をいう。
 3 「死者数(30日以内)」とは、交通事故によって、発生から30日以内(交通事故発生日を初日とする。)に死亡した者をいう。
 4 「死者数(厚生統計)」は、警察庁が厚生労働省統計資料「人口動態統計」に基づき作成したものであり、当該年に死亡した者のうち原因が交通事故によるもの(事故発生後1年を超えて死亡した者及び後遺症により死亡した者を除く。)をいう。
 なお、平成6年以前は、自動車事故とされた者を、平成7年以降は、陸上の交通事故とされた者から道路上の交通事故ではないと判断される者を除いた数を計上している。
 5 昭和41年以降の交通事故発生件数は、物損事故を含まない。
 6 死者数(24時間)、負傷者数及び交通事故発生件数は、昭和46年以前は、沖縄県を含まない。

図 1.4 交通事故件数，死者数，負傷者数，重傷者数の推移（ [12, p. 2]から転載）

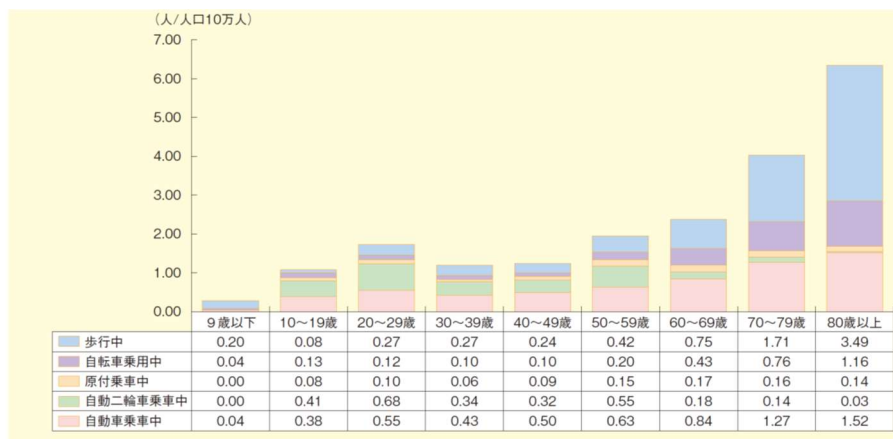
交通事故に関する件数は順調に減少してきたが、内閣府が 2016 年に設定した第 10 次交通安全基本計画 [13]の目標「2020 年までに 24 時間死者数 2500 人以下とする」は未達に終わった。そこで、2021 年に策定された第 11 次交通安全基本計画 [14]では、新たに「2025 年までに 24 時間死者数 2000 人以下とする」という目標を設定し、更なる交通事故死者数の低減を目指す。

国内の交通事故死者数を状態別で見ると、歩行中(約 35%)、自転車乗車中(約 15%)が多く、この 2 つで交通事故死者数の半数を超える(図 1.5)。この傾向は、欧米諸国に対して日本の特異的な特徴といえる。交通事故死者数の低減を目指す上で、歩行者、自転車との交通事故への対応が重要となってくる。



注 警察庁資料による。

図 1.5 状態別交通事故死者数の構成率の各国比較 (2018 年) ([12, p. 17]から転載)



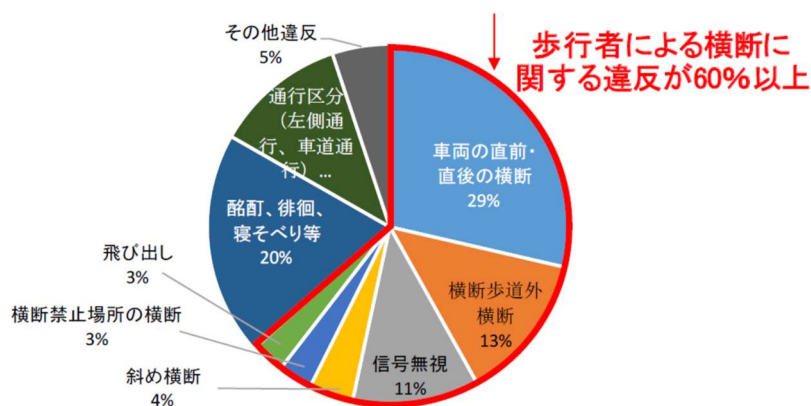
注 1 警察庁資料による。

2 算出に用いた人口は、総務省統計資料「人口推計」(令和元年10月1日現在)による。

図 1.6 年齢層別・状態別の人口 10 万人当たりの交通事故死者数 (2020 年) ([15, p. 80]から転載)

歩行中の交通事故死者数の約 70%は、70 歳以上の高齢者であり (図 1.6), その多くが自宅周辺の生活圏内 (自宅から 500m 圏内) で事故に遭遇している [16]. また, 歩行中の死亡事故の事故類型別で見ると, 車両の状態として直進中が約 80%と最も多く, 歩行者の状態として横断中が約 65%と最も多い ([11, pp. 18-19]). つまり, 歩行者死亡事故では, 直進中車両と横断中歩行者との事故が最も多い. また, 車両直進時の歩行者死

亡事故において、歩行者側に法令違反があった場合、違反の約 60%が横断に関する違反（車両の直前直後の横断、横断歩道以外での横断、信号無視など）である（図 1.7）。これは、ドライバにとって予期しない状況で歩行者の横断に遭遇し、死亡事故に至るケースが多いということである。



資料：ITARDAの集計結果より自動車局作成

図 1.7 歩行者法令違反があった場合の違反別の歩行者死亡数割合（2019年）
（[11, p. 20]から転載）

1.2.3 予防安全技術の普及と事故低減

日本では、国土交通省が主導する「ASV 推進計画」に沿って、1991 年からドライバの安全運転を支援する技術の開発、実用化、普及促進を行ってきた。なお、ASV (Advanced Safety Vehicle) とは、ドライバの安全運転を支援する先進運転支援システム (ADAS : Advanced Driver Assistance System) を搭載した自動車のことを指す。既に最初の計画から 30 年経過しており、様々なシステムが実用化されてきた（図 1.8） [8][17]。乗用車における主な ADAS の搭載率（生産台数に対する搭載台数の割合）を図 1.9 に示す。開発されたシステムの中には、既に新車への搭載率が 90%程度までに普及しているもの、今後、新車への搭載率がさらに高まっていくと期待されるもの、搭載が始まったものがあることが見て取れる。

全車速域定速走行・車間距離制御装置 (全車速ACC)
全車速域において一定速で走行する機能および車間距離を制御する機能をもった装置

例:100km/hに設定した場合

(1)定速走行
100km/h(設定速度)

(2)減速/追従走行
100km/h→80km/h 先行車あり

(3)加速走行
80km/h→100km/h(設定速度) 先行車離脱

(4)追従走行/停止
80km/h→0km/h 先行車あり 80km/h→0km/h

定速走行する場合や追従走行する場合の運転負荷を軽減するため、中高車速域では運転者がセットした車速で定速走行する。定速走行中、自車より遅い先行車がいる場合、先行車との車間距離を適切に維持する。低車速域では先行車との車間距離を適切に維持する。先行車が停止した場合には停止し、停止状態を保持。何らかの理由で先行車の急制動などに対応しきれないことを、運転者に注意を喚起する。

(a) 全車速 ACC

車線維持支援制御装置 (レーンキープアシスト)
走行車線の中央付近を維持するよう操作力を制御する装置

トルクアシスト
ドライバー操舵

走行車線の中央付近を維持して走行する際の運転負荷を軽減するため、走行車線を認識し、車線維持に必要な運転者の操作力を軽減する。何らかの理由で車線から逸脱しそうになった場合には、運転者が車線中央に戻す操作をするよう警告する。

(b) レーンキープアシスト

車間距離警報装置 (車間距離警報)
前方車両への追突を予測して警告する装置

先行車に接近 カメラと遠くまで検知できるミリ波レーダー 警告

前方の車両への追突事故の防止のため、前方の車両との車間距離を検知し、そのまま走行すれば衝突の可能性が高いと判断した場合には、運転者に衝突を回避するよう警告する。

(c) 車間距離警報

車線逸脱警報装置 (車線逸脱警報)
走行車線からの逸脱を警告する装置

警告ブザー

走行車線からの逸脱を防止するため、走行車線を認識し、車線から逸脱した場合、あるいは逸脱しそうになった場合には、車線中央にハンドルを戻すよう警告する機能。

(d) 車線逸脱警報

前方障害物衝突被害軽減制動制御装置 (衝突被害軽減ブレーキ)
前方の障害物（車両）との衝突を予測して警告し、衝突軽減のために制動制御する装置

先行車に接近 カメラと遠くまで検知できるミリ波レーダー 警告

さらに先行車に接近 衝突被害軽減ブレーキ

前方の障害物への衝突防止と衝突時の被害を軽減するため、前方の障害物との距離および相対速度を検知し、そのまま走行すれば衝突の可能性が高いと判断した場合には運転者に衝突を回避するよう警告する。さらに衝突が避けられないと判断した場合には自動的に制動装置を制御する

(e) 衝突被害軽減ブレーキ

路外逸脱抑制装置 (路外逸脱抑制機能)
路外（車線）への逸脱を抑制、支援する装置

(1) (2)

路外への逸脱を抑制するために、車両を自車線に戻すまたはそれ以上逸脱させないように支援する機能。

(f) 路外逸脱抑制機能

図 1.8 主な ADAS の例 ([8]から転載)

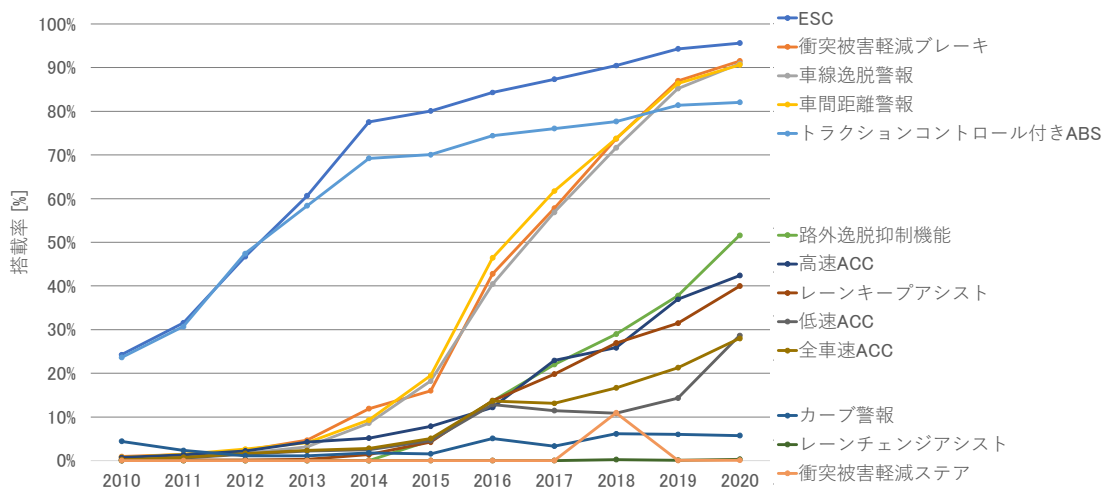


図 1.9 乗用車における主な ADAS の搭載率（搭載台数／生産台数）（ [17]から作成）

既に高い搭載率のシステムの中で、ESC（Electronic Stability Control；車両横滑り時制動力・駆動力制御装置）とトラクションコントロール付きABS（Antilock Braking System）は、ドライバーが車両を制御することが困難になってしまう不安定挙動を抑止するためのものである。ESCは、あらゆる横すべり事故の最大80%を未然に防ぐことができるとされている [18]。また、トラクションコントロール付きABSは、追突事故に対して一定の事故低減効果が確認されている [19]。これは、追突回避のための急制動時に、トラクションコントロール付きABSにより車両挙動を安定に保ちつつ、制動力を十分に発揮できるためである。これらのADASは早くから搭載が進んでおり、2010年以降の主に車両単独もしくは車両対車両の交通事故件数および死亡者数の減少に寄与していると考えられる。

車線逸脱警報、車間距離警報、衝突被害軽減ブレーキは、近年、急速に搭載率が高まってきたADASであり、2020年時点で搭載率は90%に達している。なお、日本では世界に先駆けて、新型車について2021年11月から衝突被害軽減ブレーキを義務化することが決まっている（継続生産車は2025年12月から） [20]。また、路外逸脱抑制機能、レーンキープアシスト、ACC（Adaptive Cruise Control）群は、2020年時点では約30～

50%程度の搭載率であるが、国内全ての OEM から様々な名称で製品化されていることに加え、JNCAP（Japan New Car Assessment Program）での評価対象 [21]となっていることから、今後、さらに搭載が進むと考えられる。

ACC 群とレーンキープアシストは、通常運転時の負荷軽減をねらったシステムであり、それぞれ、先行車との車間距離、走行車線中の位置（中央付近）を適切に維持するよう速度制御もしくは操舵制御を行うことでドライバの操作を軽減する。これらのシステムは、運転自動化システムのレベル分類 [22]においてレベル1（運転支援）に位置付けられ、現状、日本国内では自動車専用道路での利用が前提となっている。車間距離警報と車線逸脱警報は、それぞれ、前方車両への追突、車線からの逸脱につながる可能性が高いと判断した場合、ドライバに回避操作を行うよう警告するシステムである。警報によりドライバに危険を気づかせた後、ドライバが回避操作する必要があるため、警報発出のタイミングと車両速度に依存して事故低減効果変動する [23]。衝突被害軽減ブレーキ、路外逸脱抑制機能は、それぞれ、前方の障害物・車両との衝突、車線からの逸脱を避けるため、強い操作介入を行う。これらのシステムは直接的に事故回避を行うため、事故低減効果は大きい。

特に衝突被害軽減ブレーキに関しては、実際の交通事故データをもとに事故低減効果の検証が行われており [24] [25] [26] [27] [28]、衝突被害軽減ブレーキを搭載することで車両への追突事故の概ね 4～6 割程度が減少すると報告されている。また、歩行者対応型の衝突被害軽減ブレーキの搭載により、対歩行者事故の低減効果も報告されている [25] [28]。ただし、現状、対車両事故に比べて事故低減効果は限定的であり、死角からの歩行者の飛び出しなどでは、歩行者を検知した時点で制動距離が不足し、衝突を回避できない場合がある [28]。歩行者、自転車などの直前の飛び出しによる事故は、自動運転（レベル 5）、衝突被害軽減ブレーキを対象とした事故低減評価シミュレーションにおいても、回避不可能であったと報告されている [29]。

1.2.4 潜在リスク場面における先読み運転

1.1 節で述べたが、本論文では、突然の歩行者の出現や進路変更が生じる可能性がある場面を潜在リスク場面と呼ぶ。潜在リスク場面では、必ずしも歩行者の飛び出しなどの危険が顕在化するわけではないが、そのような可能性を考慮して飛び出しなどにも対応できるような運転が求められる。しかしながら、ドライバの多くは潜在リスク場面において、日常的、恒常的に不安全運転を行っているとの指摘がある [30][31]。そのような不安全運転はヒヤリハットデータに例を見ることができる。

図 1.10 は、東京農工大学スマートモビリティ研究拠点のヒヤリハットデータベース [32]から選んだ駐車車両の側方通過場面におけるヒヤリハット事例である。乗客の乗降待ちで停車しているバスの側方を通過する際、減速が不十分なため（各画像の右下の数値は速度[km/h]）、歩行者に衝突しそうになった事例である。歩行者の飛び出しタイミングがもう少し遅ければ、衝突事故になっていたかもしれない。



図 1.10 潜在リスク場面の 1 例（駐車車両の側方通過） [32]

一方、このようなリスク場面でも安全に運転を行えるドライバもいる。自動車教習所の指導員と一般ドライバの駐車車両側方通過時の運転行動を比較した研究 [31]では、指導員は、駐車車両の死角からの歩行者の飛び出しを想定して、駐車車両との側方間隔を十分に確保するか、確保できない場合は十分に減速することが観察された。また、交通状況の写真を用いたハザード知覚 [33]、速度選択 [34][35]の研究では、運転歴の長いドライバは、運転歴の短いドライバと比較して、ハザード知覚に優れており、低い速度を選択する傾向にあることが示された。

自動車教習所の指導員のように、潜在リスク場面においてリスクの顕在化（死角から

の歩行者の飛び出しなど)の可能性を想定し、事前に減速を行ったり側方間隔を取ったりする運転のことを「先読み運転 [36][37]」と呼ぶことがある。先読み運転の特徴である事前の減速と側方間隔の確保は互いに関連しあって、潜在リスク場面において次の2つの効果を生む [31]。1つは危険が顕在化した際の対処のし易さである。事前の減速により制動距離が短くなるとともに、側方間隔を取ることで衝突位置までの横方向の空間的な余裕を確保できる。また、アクセルオフもしくはブレーキペダルへの足の載せ替えをしておくことでブレーキ反応時間も早まる。もう1つは死角領域に対する目視確認のし易さである。事前の減速により確認のための時間的な余裕が生まれるとともに、側方間隔を取ることで死角領域に対する見易さを生む。つまり、先読み運転は、潜在リスク場面における合理的な運転戦略といえる。

死角からの飛び出し歩行者との衝突が回避できなかつたとしても、先読み運転をおこなうことで衝突速度を下げるができるため、被害を抑えられる可能性が高い。歩行者事故における衝突速度と重傷率・死亡率の関係については多くの調査 [38]がなされており、衝突速度が30 [km/h]未満であれば死亡率を低く抑えられると言われている [39, p. 5]。また、衝突速度と死亡率の関係は車両タイプに依存し、セダンタイプで30 [km/h]、1BOXタイプで20 [km/h]未満であれば死亡率が5%未満に抑えられる [40]。さらに、死亡率は年齢にも依存しており、同じ衝突速度でも高齢者ほど死亡率が高くなる [41]。

1.3 研究目的

1.3.1 リスク予測型運転支援システム

ここでは、前節(1.2節)で述べた研究背景をまとめ、本研究の目的であるリスク予測型運転支援システムの実現に向けた取り組みについて述べる。

1.2.2節で述べたように、国内の交通事故死者数の半数以上が車両対歩行者・自転車の事故によるものであり、特に、生活圏内における高齢歩行者が占める割合が高い。また、少なからず、車両の直前直後の横断など歩行者の違反が伴う。さらに、1.2.1節で見たように、今後、国内の総人口に占める高齢者の割合がますます大きくなるため、生活

道路での車両対歩行者の事故がさらに増えていくことが予想される。

一方、1.2.3 節で述べたように、交通事故を防ぐために様々な ADAS の開発が進められており、今後、歩行者対応型の衝突被害軽減ブレーキの普及も見込まれる。しかしながら、現状のシステムでは、障害物や交差点などの死角からの歩行者の飛び出しや、追い抜き時の歩行者の突然の横断や進路変更に対して、その効果は限定的である。したがって、このような潜在リスク場面において歩行者との衝突を回避したり、衝突被害を抑制したりできれば、交通事故死者数の低減につながる。

1.2.4 節では、潜在リスク場面における合理的な運転戦略である先読み運転の特徴「事前減速と側方間隔の確保」と、その効果「リスクが顕在化した際の対処のし易さと死角領域に対する目視確認のし易さ」について述べた。

以上の背景から、本研究では、先読み運転を工学的に実現する「リスク予測型運転支援システム」の実現に向けた研究を行う。このシステムは、潜在リスク場面でのリスク推定値に基づき、適切な事前減速と側方間隔の確保を支援するシステムであり、衝突被害軽減ブレーキ（AEB: Automatic Emergency Braking）と組み合わせることで、潜在リスク場面での歩行者事故を低減することを目的とするシステムである。本論文では、潜在リスク場面でのリスク指標の定量化、および、そのシステム応用についての基礎的な検討を行う。

1.3.2 リスク予測型運転支援システムの実現に向けた課題

リスク予測型運転支援システムの実現に向けて、大きく分けて次の3つの課題に取り組む必要がある。1つめは、潜在リスク場面における適切な運転と支援対象となる不安全運転についての理解である。2つめは、システムの根幹となるリスク指標の定量化法とそれに基づく車両軌道生成法の提案である。3つ目は、実現性確認のためのシステム応用検討である。以下では、それぞれの課題の位置づけと本研究における取り組みについて述べる。

①運転行動の理解

ある状況下において運転を支援するためには、その状況下での目標となる望ましい運転が明らかになっている必要がある。潜在リスク場面での望ましい運転は自明ではないが、本研究では、熟練ドライバの先読み運転を望ましい運転として考える。1.2.4節で述べたように先読み運転の定性的な特徴として「事前減速と側方間隔の確保」が挙げられるが、その再現性や交通状況・環境への依存性についての定量的な理解が不足している。また、熟練ドライバがどのような考え（運転行動ルール）に基づいて運転を行っているのかを知ることは支援システムを検討する上で有用である。そこで、本研究では、自動車教習所の運転指導員による実路走行データを収集し、潜在リスク場面での運転行動の分析および運転行動ルールのヒアリングを行うことで先読み運転の理解を深める。また、運転支援デザインを検討する上では、支援対象となるドライバの運転、すなわち、潜在リスク場面での不安全運転についての理解も必要である。本研究では、テストコースでの模擬環境における一般ドライバの走行データを収集し、走行状態や運転行動からリスクの程度や再現性について分析し、潜在リスク場面における運転支援のデザイン検討を行う。

②リスク指標の提案

潜在リスク場面における先読み運転の特徴が分かれば、次に、それを工学的に実現するための手立てが必要となる。すなわち、潜在リスク場面における走行状態の良し悪し（リスク）を定量評価できるリスク指標が必要となる。先行車追従時の走行状態の評価指標として、TTC（Time-To-Collision）やその改良版 [42] [43]や、TTCの逆数や車間時間に基づいたもの [44] [45] [46]が提案されてるが、これらは全て、追従もしくは追突対象である先行車との関係に基づいている。一方、潜在リスク場面では、潜在的な衝突対象である歩行者や自転車などが顕在化していない（存在していないか、存在していても検知できない）ため、これらの指標を直接用いることはできない。そのため、潜在リスク場面における走行のリスクの程度を定量評価できる指標が必要となる。

そこで、本研究では、死角から突然飛び出す仮想歩行者との衝突速度に基づくリスク

指標の提案を行う。さらに、提案するリスク指標の妥当性を検証するために、提案リスク指標を用いた安全走行軌道の生成を試みる。なお、潜在リスク場面におけるリスク指標に関する従来研究の概要とその問題点については、次節（1.3.3 節）でまとめる。

③支援システムへの応用

潜在リスク場面におけるリスク指標を提案するとともに、何らかのシステムに搭載し、その実証試験を行うことが望ましい。特に一般ドライバーによる実車実路での効果検証することで提案リスク指標の有用性の確認が可能となる。本研究では、FOT（Field Operational Test）で収集した一般ドライバーの実路走行データを用いたリスク推定オフラインシステムを構築し、提案したリスク指標のシステム応用検討を行う。

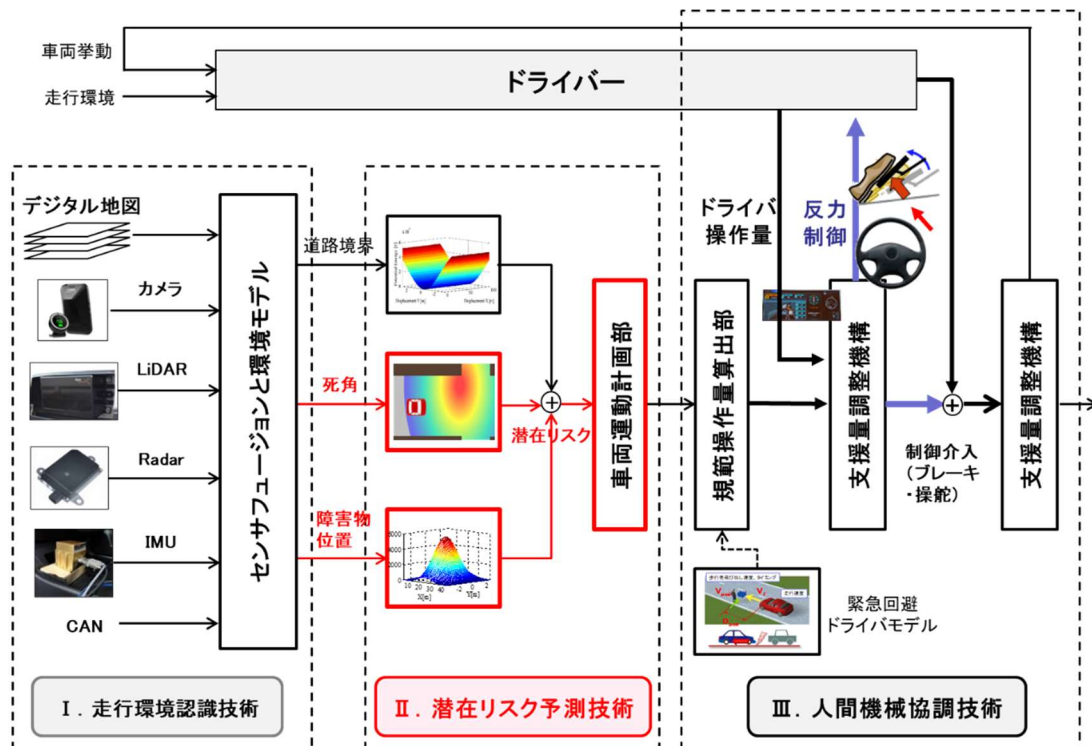


図 1.11 リスク予測型運転支援システムの概念図

図 1.11 にリスク予測型運転支援システムの概念図を示す。このシステムは技術的に次の3つの技術群から成る。

- I. 地図と各種センサ入力から外界の環境モデル [47]を構築する走行環境認識技術
- II. 死角や歩行者位置などの環境モデルから走行リスクを定量化し、リスクに応じた安全走行軌道を算出する潜在リスク予測技術
- III. リスクに応じた安全走行軌道とドライバ操作量との差分から適切な支援を行う人間機械協調技術

上記で述べた課題は、II. 潜在リスク予測技術に関するものであり、本論文の研究スコープである。本論文では、潜在リスク予測技術の入力となる環境モデルは既知のものとして扱い、潜在リスク場面におけるリスクの定量化およびその応用について焦点を当てる。III. 人間機械協調技術については、ドライバの運転行動分析に基づき支援デザインを提案する。なお、具体的な支援機構に関しては研究スコープ外である。

1.3.3 潜在リスク場面におけるリスク指標に関する従来研究

運転支援システムでは、支援を行う運転タスクに対する適切なリスク評価（もしくは安全性評価）が求められる。その際、周辺の交通状況、道路環境の下での自転車やドライバの状態を評価する必要がある。本論文は、潜在リスク場面における運転支援システムを対象としているが、本節では、まず、一般的な運転支援システムに関わるリスク指標について概観し、次に、潜在リスク場面におけるリスク指標に関わる従来研究について述べる。

従来の運転支援システムに関わるリスク指標は、時間に基づく指標、運動学に基づく指標、統計に基づく指標、ポテンシャルフィールドに基づく指標、運転行動に基づく指標の5つのカテゴリに大別できる [48]。時間に基づく指標には、THW (Time Headway) [49]、TTC (Time To Collision) [50]、TTR (Time To Reaction) [51]などがあり、主に先行車追従や追突防止に関わる支援システムに用いられている。TTC に一定加速度を考慮したもの [52]も提案されている。運動学に基づく指標は、主に追突防止システムで用

いられており、停止距離 [53][54]、減速度 [55][56]に関するものがある。時間および運動学に基づく指標は扱いが簡単なこともあり、実用化システムのベース指標となることも多い。自動運転システムの安全性検証に用いられている RSS (Responsibility-Sensitive Safety) [57]、他車(他者)の急激な挙動変化を考慮に入れて RSS を拡張した RSS+ [58] もこれらの指標の範疇に入る。

統計に基づく指標には、確率論をその背景に持つものと、機械学習に基づくものがある。衝突確率 [59][60]は、前者に属する指標であり、確率分布で表した自車と他車(他者)の軌跡の重なりから衝突リスクを算出する。ヒヤリハットデータのリスクレベルの分類に寄与する特徴量抽出 [61]や、追突防止システムのための追突判定 [62]などに機械学習に基づくリスク指標が用いられている。ポテンシャルフィールドに基づく指標は、それによって道路端や障害物を空間的な仮想斥力(ポテンシャル)として表現し、経路追従 [63]や割込み対応 [64]などの運転タスクにおける車両軌道生成に用いられている。斥力としてではなく、軌道生成時のコスト関数として利用されることもある。その場合、人のリスク感をモデル化した Sarvesh ら [65]の Driver's Risk Field (DRF) の使われ方に近い。後述するように、ポテンシャルフィールドを潜在場面でのリスクとして利用することも試みられている。最後の運転行動に基づく指標は、路側のカメラ・センサ情報を用いて一時不停止や信号無視など異常行動(異常挙動)の検出に用いられることが多く [66][67]、交通シーンの分類で利用されている。

以下では、潜在リスク場面におけるリスク指標(潜在リスク指標)について述べる。潜在リスク指標は、駐車車両通過、見通しの悪い交差点通過、歩行者・自転車通過の際の先読み運転に関する研究の中で扱われてきた。上で述べた一般的なリスク指標を仮想的な車両や歩行者に適用し、算出することが多い。ここでは、潜在リスク場面におけるリスク指標に関する先行研究事例を挙げ、その問題点について述べる。

①衝突確率

文献 [68][69]では、歩行者通過時の先読み運転の生成を目的に、衝突確率により歩行

者の横断に対する潜在リスクを推定している。パーティクルフィルタで自転車や歩行者の移動を予測し、自転車パーティクルと歩行者パーティクルの衝突割合によって将来の衝突確率を求めている。道路環境に依存して変わる歩行者の移動のし易さを移動コストとして定義し、それらをパーティクルフィルタのリサンプリング過程の重みに用いることで、歩行者の移動予測を行っている。

衝突確率を求める際に、歩行者と自転車の状態だけでなく、道路環境も考慮している点の特徴である。しかし、衝突確率をリスク指標として考えたときに、衝突確率の値と減速度や横移動量などの先読み運転行動との物理的な意味づけが明確ではないため、運転支援への適用に課題が残る。

②交差点進入速度

文献 [70][71]では、見通しの悪い交差点における先読み運転行動の生成を目的に、道路環境要因（道路幅、車線数、歩道-車道の分離境界種など）を用い、運転指導員（熟練ドライバの典型例）の交差点進入速度の予測を行っている。また、文献 [71]では、予測した交差点進入速度を実現する速度生成モデルを提案し、シミュレーションにより、生成した速度プロファイルであれば、突然の飛び出し歩行者との衝突が回避可能であることを示した。

これらの研究では、直接的に潜在リスクを扱っていないものの、見通しの悪い交差点の進入速度を潜在リスクに関連した指標として考えることができる。例えば、低速で進入する交差点ほど、潜在リスクの大きい交差点と考えることができる。他にも、予測した運転指導員の速度を規範速度とし、自転車速度との速度差分により自転車状態を含めた潜在リスクとして用いることが考えられる。しかし、これらの研究には、運転指導員などの熟練ドライバの運転行動データが必要である。様々な交差点の全てで熟練ドライバの運転行動データを収集するのは現実的ではなく、進入速度のシステム応用の点に課題が残る。

③リスクポテンシャル

文献 [72][73][74]では、自律移動ロボットの障害物回避の研究で用いられているポテンシャル法 [75]を駐車車両通過場面における走行軌道の生成に応用している。自律移動ロボットの障害物回避との違いは、ポテンシャルの大きさを潜在リスクの程度に対応づけ、ポテンシャルの大きさを変えることで回避の程度を変えられるようにしている点である。ただし、リスクポテンシャルの決定には、運転指導員などの熟練ドライバーの実運転行動データが必要である点と、リスクポテンシャルの大きさに物理的な意味付けが困難な点が課題として挙げられる。また、文献 [73][74]では、車両の位置系列と速度系列を求めるためのリスクポテンシャルをそれぞれ別に設定し、独立に求めている。駐車車両通過時の位置と速度は必ずしも独立ではなく、この点も課題である。

④安全最高速度

文献 [76][77]では、狭路での歩行者通過場面における安全指標として、ある一定範囲内での歩行者の飛び出し挙動を仮定し、その際の衝突回避可能な最大速度（最高安全速度）を提案している。さらに、実車実験での速度データと最高安全速度とを比較し、走行時の安全性について論じている。最高安全速度は潜在リスク場面での安全基準となる指標として用いることができるが、走行中のリスクの程度の指標にはならない。例えば、最高安全速度から 5 [km/h]超過した状態と 10 [km/h]超過した状態の差と、最高安全速度から 10 [km/h]超過した状態と 15 [km/h]超過した状態の差は、どちらも 5 [km/h]の差であるが、潜在リスクの程度として同定度とみなしてよいのかは自明ではない。

⑤その他（市街地自動運転における軌道生成）

市街地での自動運転の中でもとりわけ難しい走行状況の 1 つに死角領域への対応があり、近年、萌芽的な取り組みが報告されている。文献 [78][79][80]では、見通しの悪い無信号交差点への進入時の速度生成を扱っている。それぞれ、制御手法に違いがあるが、死角領域に配した仮想車両に衝突しないよう速度生成を行っており、リスク指標に

相当するものは明示的に算出していない。仮想車両と衝突する／しないの2値状態が潜在リスクと言えるかもしれない。

文献 [81][82]では、障害物などの死角領域からの歩行者の飛び出しに備えた速度生成を扱っている。文献 [81]では、歩行者の出現確率を潜在リスクの程度として用いている。歩行者の出現確率は、可視歩行者（見えている歩行者）の密度、駐車車両の密度、横断歩道までの距離、最近傍駐車車両までの距離、最近傍可視歩行者までの距離から算出した値に基づき定めている。潜在リスクの程度に従って、加減速度や参照速度などの車両挙動状態を切り替えながら速度を生成している。ただし、現状、出現確率の元となる値の算出時の係数は経験的に定めており、一般性の検証はなされていない。

文献 [82]では、死角領域に存在しているかもしれない歩行者を部分観測状態として扱い、POMDP (Partial Observation Markov Decision Process : 部分観測マルコフ決定過程) により、速度を維持しつつ (リワード)、飛び出し歩行者に衝突しないよう (ペナルティ) 最適ポリシー (歩行者との相対位置における減速度) を求めている。最適ポリシーから生成される減速系列の結果、死角領域付近では緩減速を行うようになる。更に、自転車と歩行者の位置分布の重なりから算出される衝突確率に基づき、衝突危険度が高いと判断された場合、AEBによる衝突回避を試みる。ここで、衝突確率がリスク指標となり得るが、この値はPOMDPでの部分観測状態である歩行者の出現確率の与え方に大きく依存するため、リスク値としての一般性の検証が必要である。なお、事前の緩減速とAEBの組合せは、本論文で提案するリスク予測型運転支援の在り方に近いが、POMDPによって得られる緩減速は、AEBによる衝突回避、衝突被害の程度を保証するものではない。

本研究では、上で述べたリスク指標に関する従来研究の問題点を踏まえ、第4章で運転支援システムへの適用可能なリスク指標の定量化法の提案を行う。

1.4 本論文の構成

図 1.12 に本論文の構成を示す。1.3.2 節で挙げたようにリスク予測型運転支援システムの実現に向けて、大別すると3つの課題があり、それぞれが、図 1.12 に示す研究のステップ①～③に対応する。本論文において、①運転行動の理解には第2章、第3章、②リスク指標の提案には第4章、第5章、③支援システムへの応用には第6章がそれぞれ対応する。以下に、本章を含めて各章について概要を述べる

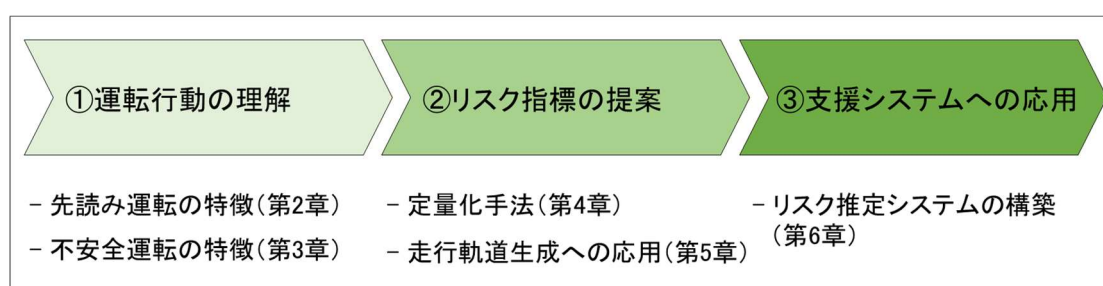


図 1.12 本論文の構成 (研究ステップ)

第1章では、本研究の社会的、技術的な背景である交通事故および予防安全技術の現状と課題をまとめ、潜在リスク場面における先読み運転の重要性について述べた。そこで、先読み運転を工学的に実現する「リスク予測型運転支援システム」を提案し、その実現に向けた課題として、潜在リスク場面における、①運転行動の理解、②リスク指標の提案、③システム応用検討を挙げ、本論文の導入とした。

第2章では、潜在リスク場面における望ましい運転（支援目標となる運転）についての知見を得るために、熟練ドライバーによる先読み運転の分析を行う。具体的には、熟練ドライバーとして自動車教習所の指導員に着目し、実道路環境で収集した走行データを用いて、見通しの悪い無信号交差点における先読み運転の分析を行う。また、先読み運転を実践する上での安全に対する考え方（運転行動ルール）についての考察も行う。

第3章では、潜在リスク場面において運転支援の対処となる不安全運転についての知

見を得るために、潜在リスク場面として駐車車両通過場面を取り上げ、テストコースにて一般ドライバーから走行データを収集し、不安全運転の特徴を分析する。また、分析結果に基づき、潜在リスク場面における運転支援デザインについて考察する。

第4章では、第3章で明らかにする潜在リスク場面における不安全運転のリスクの程度を定量化するリスク指標を提案する。具体的には駐車車両の死角からの仮想飛び出し歩行者との衝突速度に基づきリスクを指標化し、駐車車両側方通過場面での代表的な一般ドライバーの走行状態のリスクを可視化する。

第5章では、第4章で提案するリスク指標の妥当性を検証するため、リスク指標を用いた安全走行軌道の生成を試みる。リスク指標を走行状態空間全体に適用し、評価関数（リスクフィールド）として用いることで、潜在リスク場面における安全な走行軌道の生成の基礎的な検討を行う。

第6章では、第4章、第5章で提案するリスク指標の有用性を検証するため、システムへの応用検討を行う。FOT（Field Operational Test）で収集した実際的な走行データを用いて、歩行者側方通過場面におけるリスク推定システムの構築を行い、リスク予測型運転支援システムの実現性を示す。

第7章では、本論文のまとめと今後の課題について述べ、結論とする。

第2章

熟練ドライバの先読み運転の特徴

2.1 はじめに

本章では、リスク予測型運転支援システムによって実現したい潜在リスク場面における望ましい運転についての知見を得るために、熟練ドライバによる先読み運転の特徴について調査する。具体的には、自動車教習所の指導員による実路での走行および運転行動データを計測し、見通しの悪い無信号交差点での先読み運転の分析を行う。また、指導員からヒアリングを行い、先読み運転を実践する上での安全に対する考え方（運転行動ルール）についての考察を行う。

2.2 走行および運転行動データの計測

2.2.1 ドライバおよび計測データ

40代男性指導員（指導員歴19年）に、静岡県沼津市に定めた一般道コース（約15キロ）を同一日に6回走行してもらい、走行および運転行動データを計測した。計測データは、速度、ペダル（アクセル・ブレーキ）ストローク量などの車両情報（10 Hz）、前方風景、ドライバの顔と足元のカメラ画像（5 Hz）、前方LiDAR情報（12 Hz）であった。指導員には事前に運転行動計測の目的と内容を口頭で説明し、参加の同意を得た。

2.2.2 対象交差点

見通しの悪い無信号交差点（以降、単に交差点と表すこともある）の通過時の走行データおよび運転行動パターンを確認するために、比較的外乱要因（交差点付近に存在する他車・歩行者、対向・交差道路から交差点への他車・歩行者の進入など）の少なかった6つの無信号交差点（ID 39, 47, 90, 104, 143, 152）を分析対象の交差点とした。図 2.1 に分析対象の交差点の様子を示す。



交差点 ID:39



交差点 ID:47



交差点 ID:90



交差点 ID:104



交差点 ID:143



交差点 ID:152

図 2.1 分析対象交差点

2.3 見通しの悪い交差点通過時における先読み運転

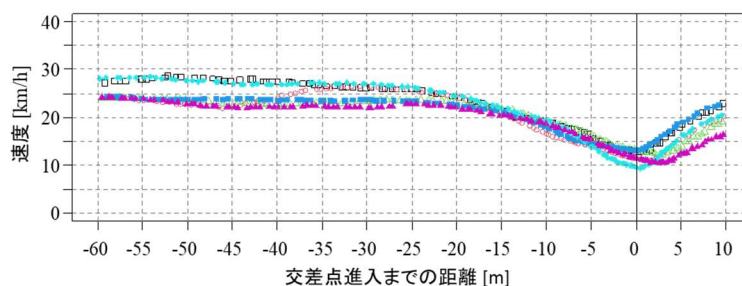
2.3.1 運転行動の可視化

交差点通過時の着目する運転行動として次の運転行動を取りあげる。

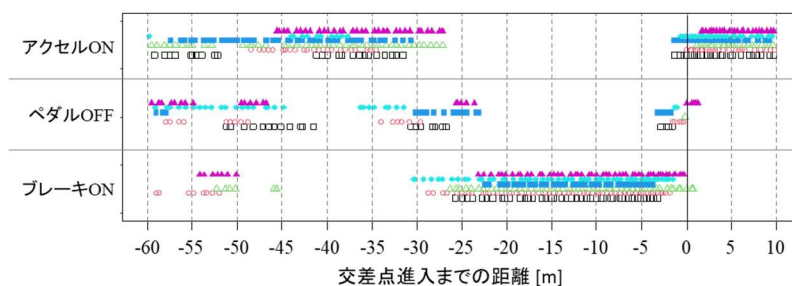
- ① ペダル操作行動（ブレーキ ON／アクセル ON／ペダル OFF）
- ② 確認行動（視線方向：左側視認／正面視認／右視認／不明）

これは、減速およびブレーキ構え、確認行動は、交差点通過時の先読み運転の重要な要素として考えられるからである。これらの行動が、交差点進入手前で毎回、同じであれば、運転指導員は何らかの運転行動ルールに基づいて運転を行っていると考えられる。運転行動ルールに基づく交差点通過時の運転支援を考えると、運転行動が交差点までの

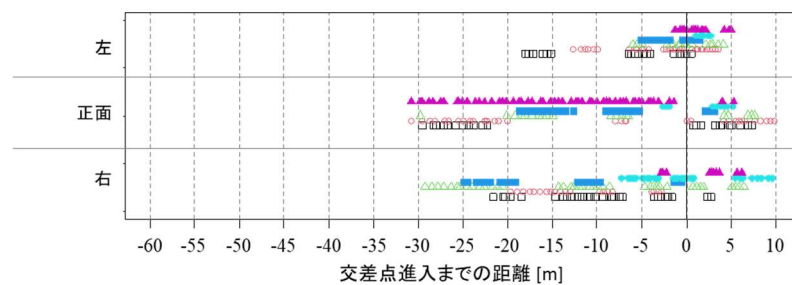
距離で規定されていることが工学的な観点から望ましい。そこで、交差点進入までの距離に対する上記運転行動の可視化を試みる。図 2.2 に交差点 ID 90 への進入時の運転行動（速度プロファイル、ペダル操作、確認行動）を示す。図には 6 回分の走行データを重畳して示す。他の交差点における運転行動は、本章末にまとめて記載する（図 2.6 ～ 図 2.10）。



(a) 速度プロファイル



(b) ペダル操作



(c) 確認行動

図 2.2 交差点進入時の運転行動（交差点 ID90）

図 2.2 (a), (b), (c)は、それぞれ、交差点進入までの距離（横軸）に対する速度プロファイル、ペダル操作、確認行動の結果である。ペダル操作（図 2.2 (b)）は、ブレーキ ON、アクセル ON、ペダル OFF の 3 状態に離散化し、確認行動は（図 2.2 (c)）は、左側視認、正面視認、右側視認の 3 状態に離散化している。図 2.2 から、運転指導員は毎回ほぼ同じ速度プロファイルで走行していることが分かる。また、その際のペダル操作もほぼ同じタイミングで行っているように見える。確認行動に関してはややバラつきが見られるものの、交差点進入直前・直後で左側を確認している傾向が見られる。

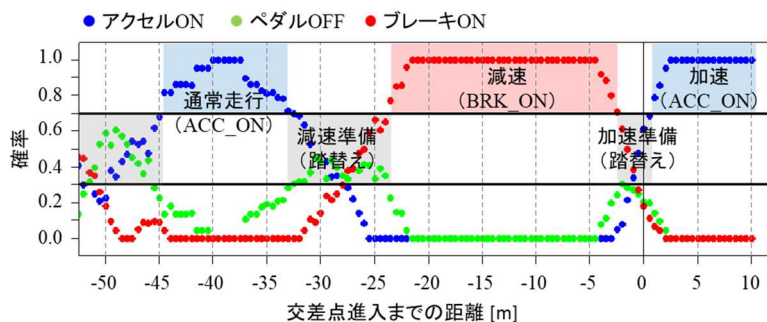
2.3.2 運転行動パターン

前節（2.3.1 節）での運転行動の可視化結果から、運転指導員の交差点進入時における運転行動をいくつかの区分に分割することができる。ここでは、交差点 ID90 における運転行動の可視化結果（図 2.2）を行動区分に分割する。他の交差点での行動区分結果は行動可視化結果とともに本章末に記載する。

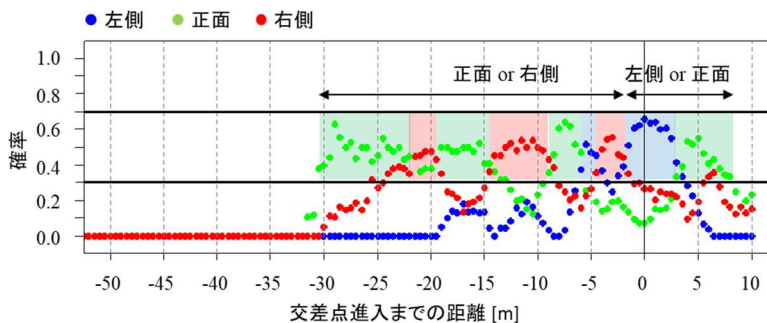
まず、交差点に進入する際のある地点（交差点進入までの距離）における行動確率を算出する。ある地点における行動確率は、6 回分の走行データを対象としてその地点を含む±1.2 [m] 区間における行動状態の割合として求める。また、ある行動の確率が 0.7～1.0 であれば、その行動を典型的な行動としてみなし、行動確率が 0.3～0.7 の間で複数の行動が混在している場合は、それらの行動を切り替えながら運転しているとみなす。図 2.3 にペダル操作、確認行動における行動確率を示す。前節（2.3.1 節）で見られたようにペダル操作（図 2.3 (a)）にはアクセル ON とブレーキ ON の明確な行動パターンが見られる。また、特定の位置（図中グレー部分）でアクセルとブレーキの踏み替えを行っていることが分かる。一方、確認行動（図 2.3 (a)）では、交差点進入 30[m]～6 [m] 手前で正面もしくは右側を確認し、その後、進入直後にかけて左側確認を行う傾向が見られる。

行動確率に基づき、運転行動系列をパターン化したものを図 2.4 に示す。運転指導員の交差点 ID90 の通過時の運転行動は、概ね、次のような定型パターンで表せる。運転

指導員は、交差点進入 30 [m]手前でアクセルを戻し、25 [m]手前付近からブレーキを踏み込み、交差点進入直前でブレーキを戻し、進入直後にアクセルを踏み込み始める。また、確認行動においては、交差点進入 30 [m]～6[m]手前で正面もしくは右側を確認し、その後、交差点進入直前・直後にかけて左側を確認する傾向が見られる。



(a) ペダル操作



(b) 確認行動

図 2.3 交差点進入時の行動確率 (交差点 ID 90)

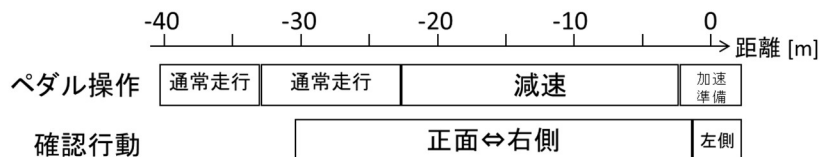


図 2.4 交差点進入時の運転行動パターン (交差点 ID90)

他の交差点での運転行動も同様に可視化し、運転行動にパターンが見られるか確認したところ、図 2.5 に示す結果となった。ペダル操作は、概ね、交差点への接近に伴いア

クセルを戻し、進入時にはブレーキを踏み込むというパターンが見られる一方で、交差点毎に行動の切り替わり位置が異なっている。確認行動については、左右確認の順序、確認開始位置・終了位置が交差点毎に異なる。交差点毎に見られる運転行動パターンの存在は、指導員は交差点通過時に場当たりの判断に基づいて運転しているというよりも、何らかの運転行動ルールに則って運転している可能性を示唆している。

交差点ID	分類	写真	-40 -30 -20 -10 0 距離 [m]				
39	Type1		ペダル	減速準備	減速	加速準備	
			確認	正面			左側
47	Type2		ペダル	走行	減速準備	減速	
			確認	正面			右側
90	Type1		ペダル	走行	減速準備	減速	加速準備
			確認	正面⇔右側			左側
104	Type2		ペダル	走行	減速準備	減速	
			確認	正面(全体)確認			
143	Type1		ペダル	走行			減速準備
			確認	正面			正面 右側
152	Type1		ペダル	走行	減速準備	減速	加速準備
			確認	正面(全体)			右側 左側

図 2.5 交差点における運転行動パターン

2.4 先読み運転における運転行動ルール

ここでは、安全運転を行う上での留意点や、前節で確認した運転行動パターンの目的や意味について指導員にヒアリングを行い、指導員の運転行動ルールを明らかにし、前節で確認した運転行動パターンとの対応を考察する。

2.4.1 ヒアリング方法

前節（2.3 節）での運転行動分析の対象とした指導員にヒアリングを行った。指導員

に自身の運転行動を振り返ってもらい、個々の運転行動の目的や意味を聞き出すために前節で得られた運転行動結果を参考資料として用いた。さらに、事前（ヒアリングの5日前）に実路における筆者らの運転を評価してもらい（2.4.2節）、その評価結果（一般ドライバーの不安全運転とみなせる）も参考資料として用いた。これは、会議室でのヒアリングでは運転時の臨場感に欠け、指導員として当然もしくは常識と考えている事柄を抽出できない可能性があると考えたためである。

2.4.2 実路運転評価

ヒアリングに先立って行った実路運転評価実験について簡単にまとめる。筆者らを含む5名が評価対象者（ドライバー）として参加した。静岡県沼津市内の住宅街を中心とする約6キロの周回コースを1人あたり3回走行し、その際、助手席に同乗した指導員にドライバーの不安全行動を評価シートに記入してもらった。

15回の走行（3回×5人）で、合計59件の不安全行動の指摘を受けた。場面別では、本研究で対象としている交差点通過に関わる不安全行動の指摘が最多であった（21件）。代表的な指摘事項は、「進入手前でのブレーキ構え・減速タイミングの遅れ（7件）」、「進入時の減速不足（5件）」、「死角領域の確認不足（3件）」であった。

2.4.3 運転行動ルール

指導員へのヒアリングから、一般ドライバーの交差点通過時の問題点として以下の点を抽出した。筆者らが実路運転評価（2.4.2節）で指摘された不安全行動は、一般ドライバーの問題点そのものであった。

【一般ドライバーの問題点】

(Problem-1) 優先交差点進入手前では、早めのアクセルオフが望ましいが、一般ドライバーはそのタイミングが遅い。

(Problem-2) その結果、交差点間際で急減速して確認することになるが、実際は、した

いと思っていることを十分にできずに通過することになる。

すなわち、見通しの悪い交差点を安全に通過するには、「早めの減速行動」、「十分な確認行動」が重要と考えられる。ここでは、さらに実路運転評価で指摘があった「進入速度」も加え、3点について焦点を絞り、指導員の運転行動ルールを明らかにする。ヒアリングで得られた指導員のコメントのうち、上述の3点に関するものを以下に示す。

【早めの減速行動】

- (A-1) 事前に遠方を見て、交差点の存在やその周辺の情報を大まかに把握する。
- (A-2) 特に交差点に横断歩道があり、その付近に歩行者がいた場合、横断歩道手前で停止しなければいけない（道路交通法により）ため、横断歩道手前位置での停止を意識した早めの減速行動をとる。

【十分な確認行動】

- (B-1) 確認行動は、他者の存在を認知し、自車に関係あり／なし（コンフリクトの可能性）を判定することである。関係なしと判断した場合は、以後、必要以上に意識を向けない。
- (B-2) 死角領域の確認行動では、まずは死角領域での他者の存在／不在をしっかりと認知し、存在すれば、自車に関係あり／なしを判定する。
- (B-3) 十分な確認行動の時間確保のために減速する。
- (B-4) 死角領域は見えない位置から見ようとせず（無意味であり、忙しくなるため）、見える位置にきてから見る。

【進入速度】

- (C-1) 交差点通過時には、何か出てきた時に止まれる速度、停止距離を心がけている。
- (C-2) 予め進入速度を想定するのではなく、すべき確認行動の結果、ある速度になっている。確認すべき対象が増えれば、必然的に速度が落ちる。

本研究では、上記の指導員コメント内容を先読み運転の運転行動ルールとして扱う。次節では、運転行動ルールと運転行動パターンとの対応について考える。

2.5 先読み運転における運転行動ルールと運転行動との対応

まず、「早めの減速行動」ルールとペダル操作行動の対応について考える。ID39, 90の交差点（図 2.1）は、横断歩道がある無信号交差点である。図 2.5 を見ると、これらの交差点進入時には、他の交差点進入時に比べてアクセルを戻すタイミング（減速準備）が早く、ブレーキの踏み込みも早い。指導員のコメント通り、横断歩道への意識が早めの減速行動につながったと考えられる。

次に、「十分な確認行動」ルールと実際の運転行動との対応について考える。ID90の交差点は、交差点直前まで進行方向左側にブロック塀が設けられており、早い段階で左側死角領域は確認できない。図 2.5 を見ると、指導員は進入直前までほとんど左側を見ておらず、左側死角領域が見え始める位置にきて左側に視線を向けている。また、左側死角領域が見え始めた段階以降も減速を続けており、これにより左側死角領域の確認のための十分な時間を確保していると考えられる。実際、指導員は ID90 の交差点への進入直前の 5 [m]を進むのに約 1.5 秒かけている。左側死角領域に他者がいない場合でも、他者がいないと判断できるまで確認に時間をかけていると推察される。指導員は、効率的かつ合理的な確認行動を行っていると言える。

次に、「進入速度」ルールと速度プロファイルとの対応について考える。指導員は ID90 の交差点を通過する際、毎回、ほぼ同じ速度プロファイルを描いている（図 2.2 (a)）。予め想定した進入速度を目標に減速しているとする、走行中に速度メータを確認してもよさそうであるが、走行中の顔画像からはそのような様子は見られない。むしろ、速度プロファイルは、横断歩道の認知に基づく安定した減速開始と、パターン化された確認行動に基づく減速により、結果的に得られたものと解釈する方が自然である。

また、交差点毎に見られた運転行動パターンの違いは、交差点毎に異なる環境（横断

歩道の有無，死角領域の見通し，確認すべき箇所の数など) に対して運転行動ルールを適用した結果，生じたものと考えることができる。

2.6 運転行動ルールの支援適用に関する考察

前節までに，指導員の見通しの悪い交差点通過時における運転行動パターンと行動生成のための運転行動ルールについて明らかにした。ここでは，得られた知見を基に見通しの悪い交差点を安全に通過するための運転支援について考察する。特に，運転支援に用いる情報レベルについて考える。

①速度レベル（車両挙動レベル）

交差点通過時の指導員の速度プロファイルは安定しており，速度プロファイルを推定する [71] ことで，速度情報に基づいた支援が考えられる。例えば，推定した速度プロファイルとドライバの速度を比較し，警報や介入を行う支援が考えられる。もしくは，指導員の進入速度ルール（2.4.3 節の(C-1)「何か出てきた時に止まれる速度，停止距離を心がけている」）からの逸脱度を評価できるような方法を考案することで，警報や介入を行う支援も考えられる（本研究では，このアプローチを採用する。詳細は，第4章で述べる）。

②運転行動レベル

指導員のペダル操作行動，確認行動には，交差点環境毎に一定のパターンが見られた。交差点環境から運転行動パターンが推定できれば，指導員の具体的な行動手順の指示，運転行動レベルの乖離に基づく警報などの支援が考えられる。ただし，運転行動レベルの情報を用いて支援する場合，ドライバの意図する行動との競合によりドライバに違和感を与える可能性があるため，支援側の行動の根拠・意図を正しく伝えることも重要である [83]。

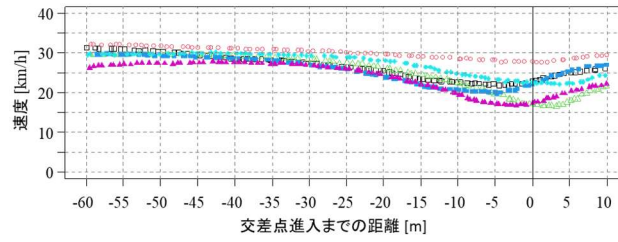
③運転行動ルールレベル

指導員の運転行動ルールをドライバに正しく伝えることができれば、様々な交差点において効果的にドライバを安全な運転行動に導くことができるかもしれない。ここで、2.4.3 節で示した運転行動ルールは、次のように安全運転を行う動機（理由や目的を含む）と、適切な行動手順実施のための行動方針に分けることができる。運転行動ルールレベルの情報を使った支援では、動機と行動方針を同時または個別にドライバに伝える支援が考えられる。

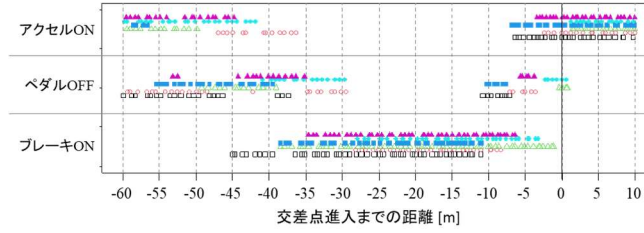
- ・横断歩道の存在は、確認、停止位置、減速量を決定する動機付けとなる。
- ・横断歩道が存在する場合、突然の他者の出現に備えて横断歩道手前で停止できるような減速方針をとる。
- ・交差点死角領域の存在は、他者の存在／不在の確認とコンフリクト判断（不確実性解消）の動機付けとなる。
- ・コンフリクト判断では、確認時間を確保するために減速し、確認可能な位置から確認し易い方（一般に右側）の死角領域から対処するような確認・判断方針をとる。

2.7 まとめ

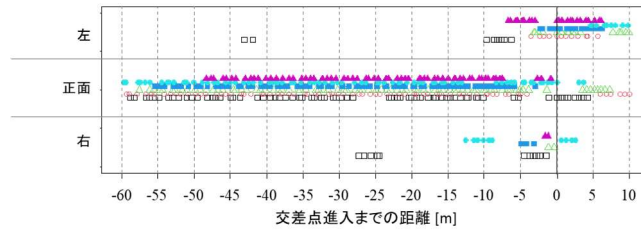
本章では、潜在リスク場面として見通しの悪い交差点通過時を取り上げ、自動車教習所の指導員の走行および運転行動データの分析、ヒアリングを行い、交差点通過における安全な運転行動パターン、その運転行動パターンを生み出す運転行動ルールについて検討を行った。その結果、指導員は交差点毎にある一定の運転行動パターンとることが分かった。また、指導員へのヒアリングにより、それらの運転パターン（先読み運転）を生み出す運転行動ルールについても明らかにした。さらに、得られた先読み運転に関する知見から、危険を顕在化させないための運転支援に用いる情報レベルについて考察を行った。



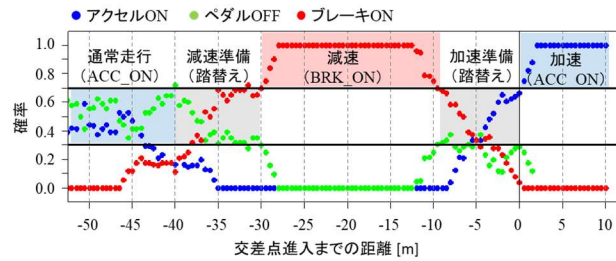
(a) 速度プロファイル



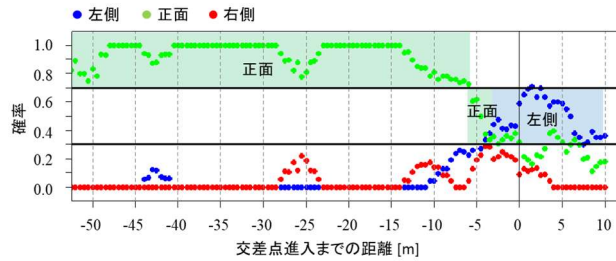
(b) ペダル操作



(c) 確認行動

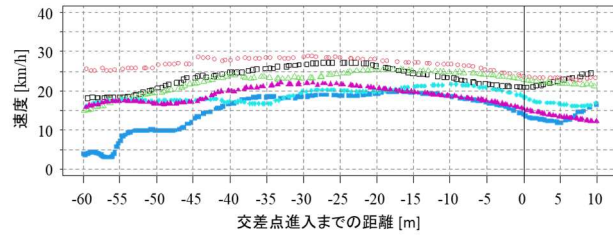


(d) 行動確率 (ペダル操作)

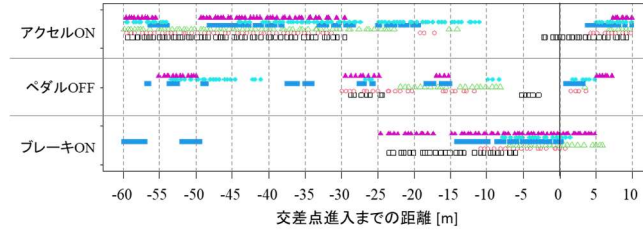


(e) 行動確率 (確認行動)

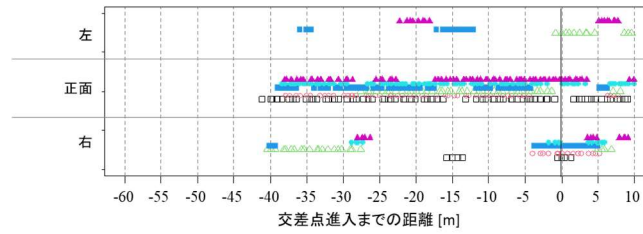
図 2.6 交差点進入時の運転行動 (交差点 ID39)



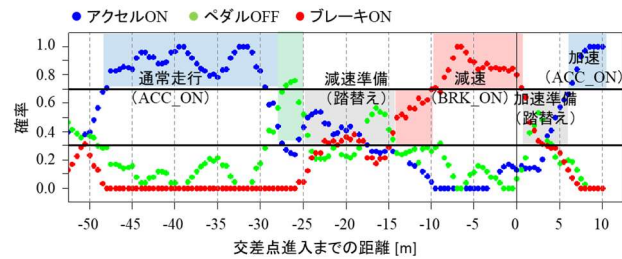
(a) 速度プロファイル



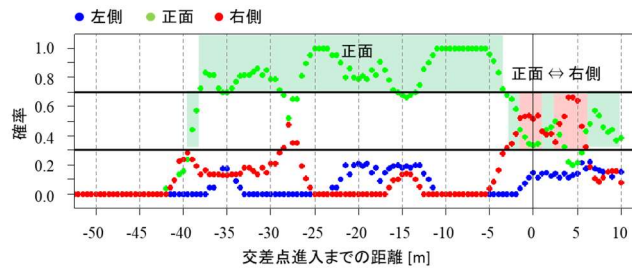
(b) ペダル操作



(c) 確認行動

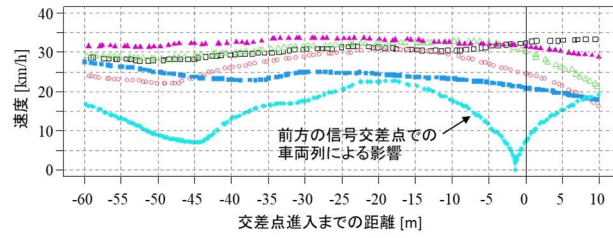


(d) 行動確率 (ペダル操作)

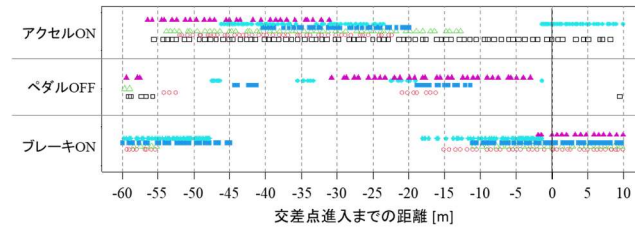


(e) 行動確率 (確認行動)

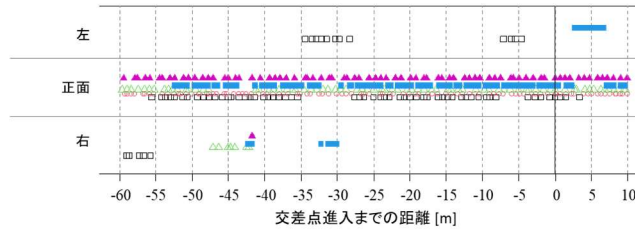
図 2.7 交差点進入時の運転行動 (交差点 ID47)



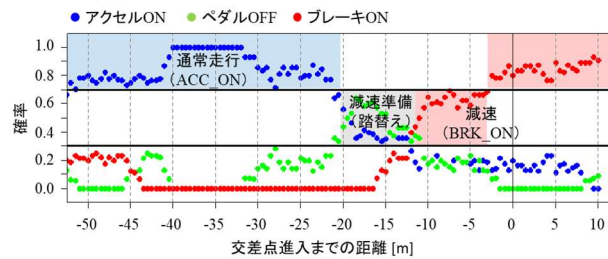
(a) 速度プロファイル



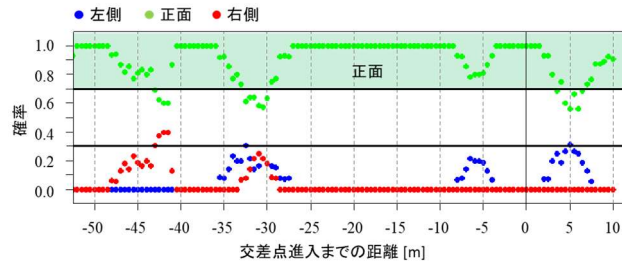
(b) ペダル操作



(c) 確認行動

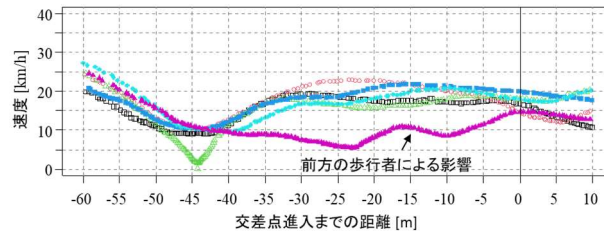


(d) 行動確率 (ペダル操作)

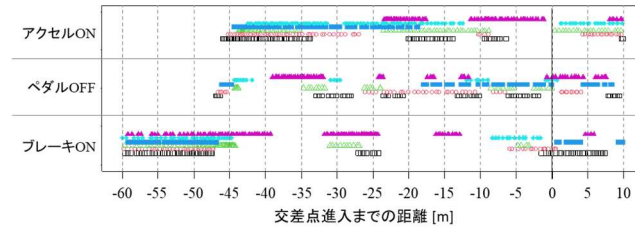


(e) 行動確率 (確認行動)

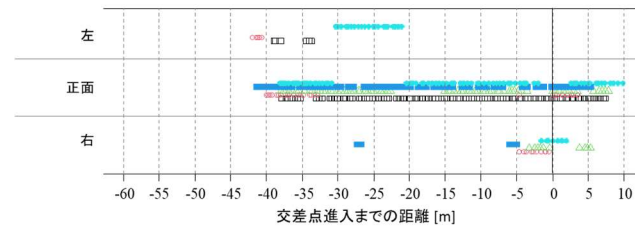
図 2.8 交差点進入時の運転行動 (交差点 ID104)



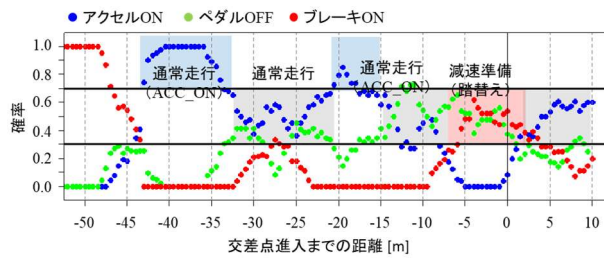
(a) 速度プロファイル



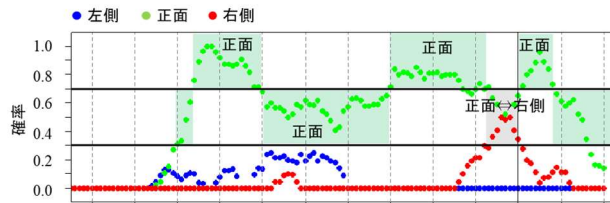
(b) ペダル操作



(c) 確認行動

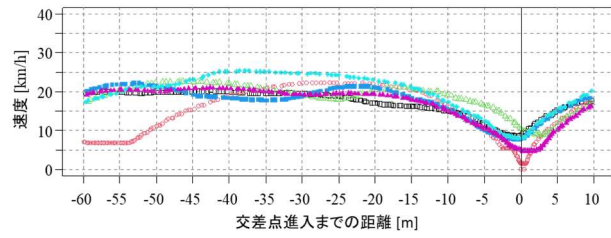


(d) 行動確率 (ペダル操作)

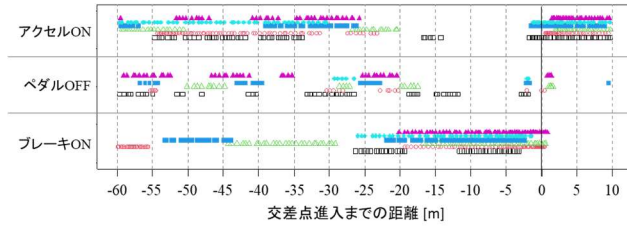


(e) 行動確率 (確認行動)

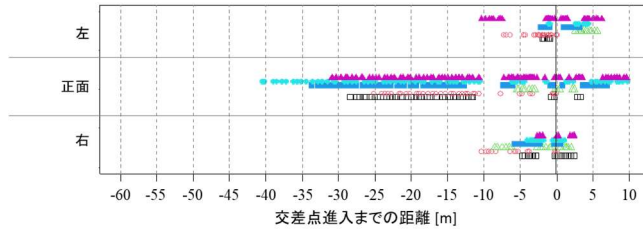
図 2.9 交差点進入時の運転行動 (交差点 ID143)



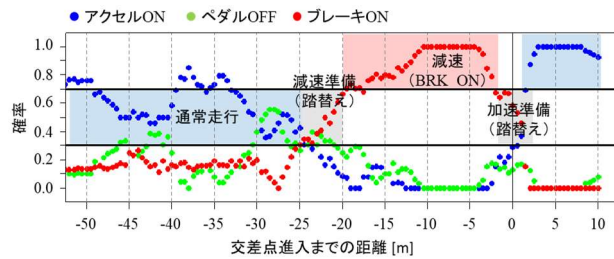
(a) 速度プロファイル



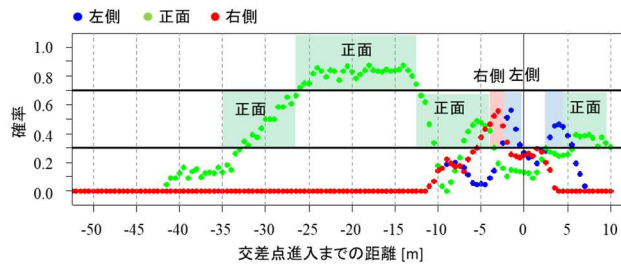
(b) ペダル操作



(c) 確認行動



(d) 行動確率 (ペダル操作)



(e) 行動確率 (確認行動)

図 2.10 交差点進入時の運転行動 (交差点 ID152)

第3章

潜在リスク場面における一般ドライバの運転の特徴

3.1 はじめに

前章（第2章）では，潜在リスク場面における望ましい運転について知見を得るために，熟練ドライバによる先読み運転の特徴について明らかにした．本章では，運転支援を受ける側の対象ドライバの運転について調査する．潜在リスク場面として駐車車両通過場面を取り上げ，通過過程における運転行動を分析することにより，支援が必要なドライバの運転行動の特徴を明らかにし，潜在リスク場面での運転支援デザインについて考察を行う．

3.2 運転行動分析の目的

3.2.1 従来研究

駐車車両通過場面における一般ドライバの不安全行動の特徴を分析した研究に文献 [31]がある．文献 [31]では，20～60代の一般ドライバを対象に一般道での走行実験を行い，駐車車両通過時の不安全行動の特徴分析を行った．その結果，一般ドライバの不安全行動の要因として，駐車車両の陰からの飛び出し歩行者を正しく想定していない場合と，駐車車両の陰からの飛び出し歩行者を正しく想定していた場合でも，それを安全に回避できる側方間隔，もしくは，速度を正しく理解していないことを明らかにした．これらの不安全行動要因により，運転指導員がとらない0.7[m]以下の側方間隔をとる場面が31%あり，このうちの18%では30[km/h]以上の車速で走行していた．

3.2.2 本研究の位置づけ

本研究では，前節で述べた文献 [31]と同じく，駐車車両通過場面における運転行動分析を行うが，以下の2点で異なる．

1点目は，統制されたテストコース環境での繰り返し走行により得られた走行データ

を用いる点である。文献 [31]では実路での走行データを用いており、実場面での行動分析という点で価値があるが、道路環境、交通状況の様々な要因が運転行動に影響を与えていると考えられる。駐車車両以外の影響を排除するためにデータスクリーニングを行っているが、十分に統制されているとは言えない。また、文献 [31]では、個々のドライバの走行サンプルは少数であり、あるドライバの1つの不安全行動を取り上げたとき、たまたまの行動なのか、そのドライバの特徴的な行動（再現性のある行動）なのかを明らかにすることは難しい。本分析では、繰り返しの走行データを用いることで、個々のドライバ内での運転行動の再現性についても確認する。

2点目は、駐車車両通過の過程における車両挙動および操作（ハンドル操作、ペダル操作）も分析対象とする点である。文献 [31]では、自動車教習所の指導員が駐車車両通過場での評価ポイントとして通過時の側方間隔と速度を重要視していることを明らかにし、通過時の側方間隔と速度の観点から分析を行った。支援を行うことを考えた場合、最終状態である側方間隔と通過速度だけではなく、その過程での車両挙動および操作も分析すべきと考える。

そこで、本研究では、まず、走行軌跡、速度プロファイルを見ることで個々のドライバの運転の再現性およびドライバ間の相違について確認する。次に、通過時の重要な評価ポイントである側方間隔と速度に基づきドライバを分類し、ドライバ群毎に側方間隔と速度について相違を分析する。また、代表的なドライバを取り上げ、側方間隔と速度の相違を生むハンドル操作、ペダル操作について比較する。最後に、分析の結果から、駐車車両通過時における運転支援のデザインについて考察する。

3.3 走行実験

3.3.1 車両および装置

実験車両には、ドライブレコーダ（ユピテル社製 BU-DRS901S）、各種車両データ・ドライバの操作量データを収集するためのCANロガーシステム（KVASER社製 Kvaser

Memorator HS/HS+PC), RTK-GPS による高精度測位システムを搭載したトヨタ社製プリウス (ZVW30, 1.8L) を用いた。また, 運転中の視線を計測するために, ドライバには視線計測システム (NAC 社製 EMR9) を装着してもらった。図 3.1 に実験車両と装置の写真を示す。なお, 駐車車両には, ホンダ社製・オデッセイ (全長 4.77m, 全幅 1.8m) を用いた (図 3.3, 図 3.2 参照)。



(a) 実験車両の全体図



(b) データ収集装置



(c) ドライブレコーダ



(d) ドライバ視線計測装置

図 3.1 実験車両および装置

3.3.2 ドライブ

20 名の高齢ドライバ (男性 15 名・女性 5 名; 平均年齢 70.85 歳; 62~80 歳, 6 名の非高齢者ドライバ (男性 4 名・女性 2 名; 30~40 代), 3 名の熟練ドライバ (男性 3 名; 20~50 代) が実験に参加した。全てのドライバには, 事前に口頭で実験内容を説明し, 書面にてインフォームドコンセントを得た。なお, 本研究での熟練ドライバは, 自動車教習所の指導員ではなく, 民間企業にて車両実験のドライバとして従事する者である。

3.3.3 走行内容

走行実験は、テストコース内の約 250[m]の直線部分を利用して行った。図 3.2 に本実験に用いたコースレイアウトを示す。白線で区切られた 2 車線部分（車線幅 3.15[m]）を、片側 2 車線の道路として見立てて用いた（図 3.2 中の右側車線は対向車線ではなく、同一進行車線という設定）。コースは、加速区間（スタート地点～操舵開始地点；67[m]）、回避区間（操舵開始地点～駐車車両；50[m]）、通過後区間（駐車車両～ゴール地点；80[m]）の 3 つの区間からなっており、スタート地点、操舵開始地点、ゴール地点のそれぞれには、目印となるようパイロンを設置した（図 3.2 中の三角印）。

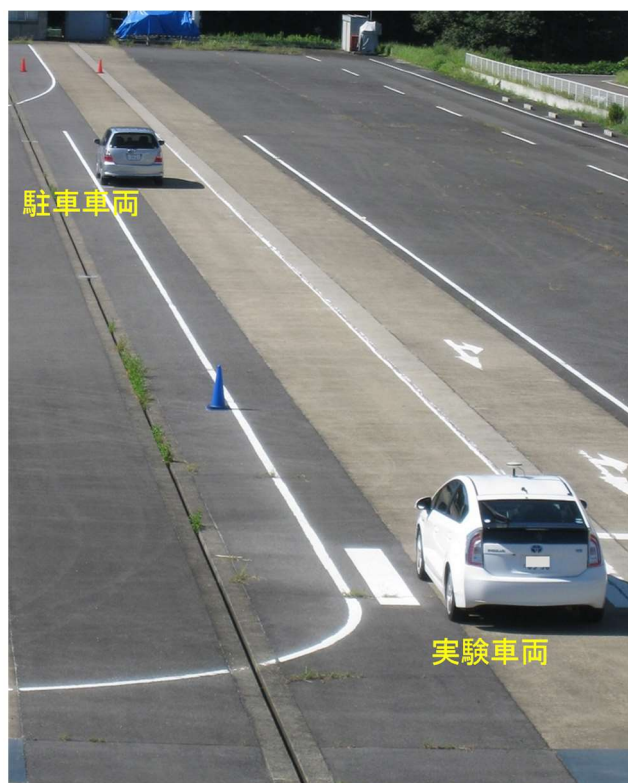
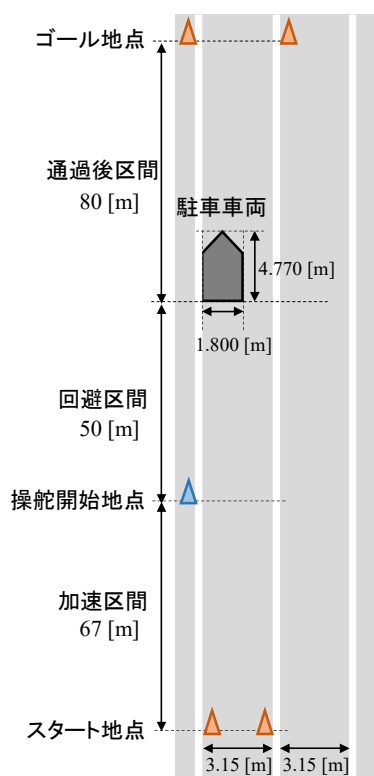


図 3.2 コースレイアウト

図 3.3 実験の様子

ドライバ（実験参加者）には、加速区間内で約 40[km/h]まで加速し、その後、回避区間内でドライバ自身の判断で操舵および速度調整を行い、駐車車両を通過するよう教示した。駐車車両通過後の操作については特に教示はしなかったが、通過後の状態をドラ

イバ間である程度統制するため、ゴール地点の2つのパイロンの間を通過するよう教示した。なお、過剰に安全運転になることを防ぐために、ドライバ自身の判断基準で「かなり危険／少し危険／まあまあ安全／かなり安全」の4段階の安全度合いのうち「まあまあ安全」と感じるような走行を心掛けてもらった。また、「まあまあ安全」な走行を意識づけるために、走行後に自身の走行を上記4段階で評価してもらった。本章末に実験で用いた教示シートを付ける。各ドライバは、3回の練習走行の後、5回の本走行を行った。本研究では5回の本走行データを分析の対象とする。実験の様子を図 3.3 に示す。

3.4 走行および運転行動データ

3.4.1 計測データ

3.2 節で述べたように、潜在リスク場面に対するドライバの準備過程を側方間隔と通過速度の観点から分析する。駐車車両との側方間隔は、RTK-GSP の測位結果から求めた自車位置と駐車車両位置から算出した。また、通過速度は、CAN 速度データを用いず、測位結果に基づく移動量から求めた速度 (GPS 速度) を用いる。一方、ドライバのステアリング操作量 (角度)、ペダル操作量 (ブレーキ圧、アクセル開度) は、CAN データを用いる。

RTK-GPS データ (10[Hz]) と CAN データ (30[Hz]) は、時刻同期が正しく取れていない場合があったため、各ドライバの試行毎に、GPS 速度パターンと CAN 速度パターンのマッチングにより時刻ズレを求め、同期補正を行った。さらに、RTK-GPS データを平滑化補完することで 30[Hz]にリサンプリングし、CAN データのサンプリング周期に合わせた。

運転行動分析で用いる自車位置および側方間隔の取り方について図 3.4 を用いて説明する。自車進行方向の軸をX軸、それと直行する方向の軸をY軸とし、駐車車両の前方左角を原点とする。X軸、Y軸の正負は図 3.4 のように取り、自車位置は自車 (実験車

両) の前方中心部を自車位置 (X_{ego}, Y_{ego}) とする。そのため、駐車車両を通過するまで、便宜上、自車位置は X 値、 Y 値ともに負の値で表されることになる。本研究では、自車の X 位置が0となる時点、すなわち、自車前部と駐車車両前部が並んだ時点を駐車車両通過時とする。なお、文脈上誤解の恐れのない場合には、通過全体の過程に対しても通過時と表記することがある。自車、駐車車両の車幅をそれぞれ、 W_{ego} (1.745[m])、 W_{prk} (1.80[m])とすると、側方間隔 D_{lat} は、 $-(Y_{ego} + \frac{W_{ego}}{2} + W_{prk})$ で求められる。

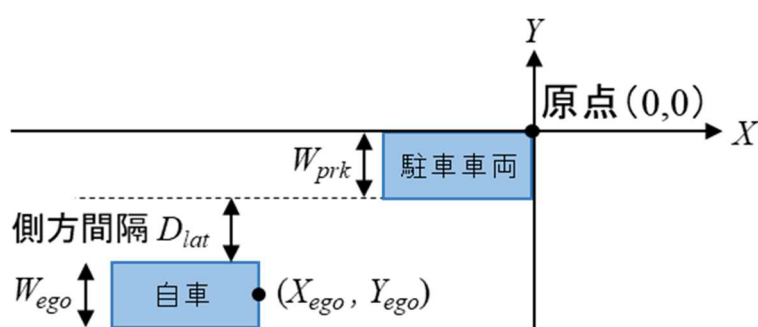


図 3.4 位置，側方間隔の取り方

3.4.2 走行軌跡，速度変化

図 3.5 に、高齢ドライバー3名の走行軌跡（位置変化）および速度変化の例を示す。左側グラフが走行軌跡，右側グラフが速度変化。走行軌跡のグラフ中の $Y=1.8\text{m}$ 付近の横線は、駐車車両の右横位置を示す。各グラフには、各ドライバーの5回の走行の結果を重ねて表示している。

図から分かるように、走行軌跡，速度変化ともに個人内では再現性が高く、概ね一定のパターンを示している。一方、ドライバー間では、横移動の開始位置，減速量に違いが見られ、個人内でのばらつき以上に走行パターンに違いが見られる。これは、例示した3名に限らず、今回、収集した走行データ全体で見られる一般的な特徴である。このことから、ドライバーは個人の中で安定した判断基準，操作手順で行っている一方で、この判断基準，操作手順はドライバー毎に異なっていると考えられる。したがって、駐車車両通過場面での運転行動には個々のドライバーの特性が反映されており、また、その特性は

ドライバ間で十分比較可能なものである。駐車車両通過場面での運転支援を考えた場合、ドライバの特性に応じた支援が必要となると考えられる。

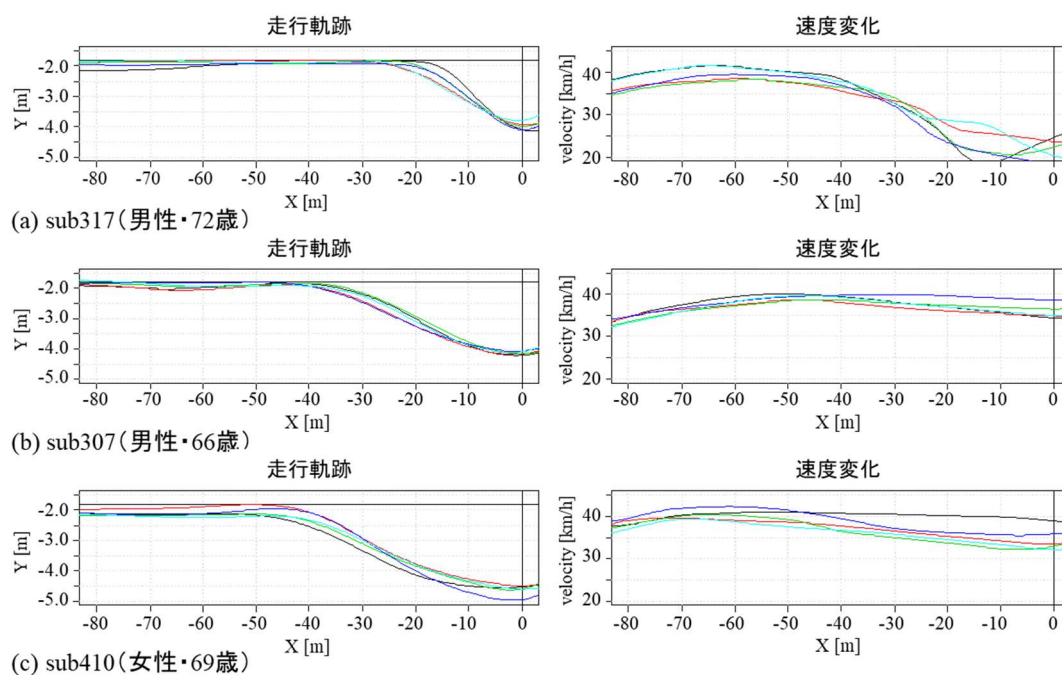
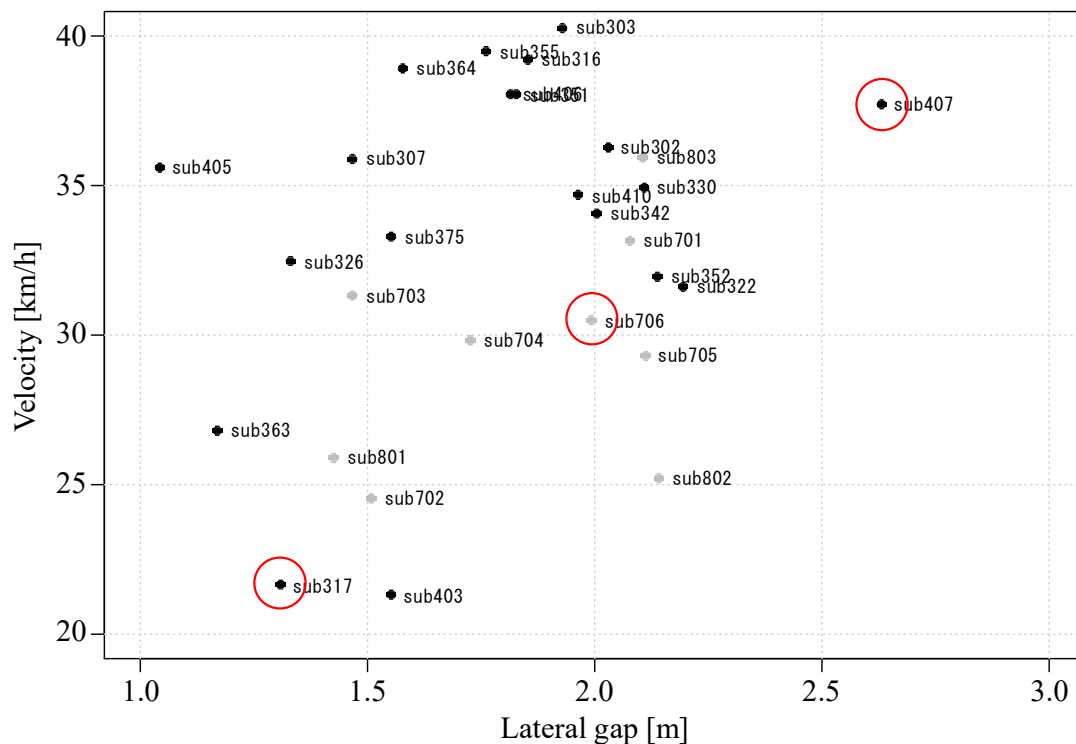


図 3.5 駐車車両通過場面における走行軌跡，速度変化の例

3.5 通過時の側方間隔，速度によるドライバ分類

3.5.1 ドライバ分類の考え方

3.4.2 節では，駐車車両通過時の走行軌跡，速度変化は個人間で異なることが分かった。運転支援を考える上では，個々人のドライバについて運転行動を分析するよりも，ドライバをいくつかのタイプに分類し，その運転行動を分析できることが望ましい。そこで，ここでは，駐車車両通過場面での安全性評価において運転指導員が重要視している通過時の側方間隔，速度に基づきドライバの分類を行う。



sub407 を結ぶ線上付近にプロットされている sub706 は、ちょうど両者の中間的な側方間隔と速度を取っており、sub706 も sub317 と sub407 同様に安全余裕を確保していると考えることができる。

そこで、ドライバ分類の1つの試みとして、「図 3.6 の平面上で右肩上がりの直線付近にプロットされているドライバは同程度の安全余裕を持っている」との仮定を置き、ドライバ进行分类する。今回は、次に述べる回帰直線による分類を繰り返す方法により、ドライバを4群に分類する。

3.5.2 ドライバ分類の手順

以下にドライバを4群に分類する手順(①~⑥)を示す(図 3.7)。

- ① 図 3.7 の全ドライバのプロット点に対して回帰直線 l_0 を求める。
- ② 回帰直線 l_0 より上側のプロット点をA群、下側のプロット点をB群とする。
- ③ A群に属するプロット点に対して回帰直線 l_1 を求める。
- ④ 回帰直線 l_1 より上側のプロット点をA1群、下側のプロット点をA2群とする。
- ⑤ B群に属するプロット点に対して回帰直線 l_2 を求める。
- ⑥ 回帰直線 l_2 より上側のプロット点をB1群、下側のプロット点をB2群とする。

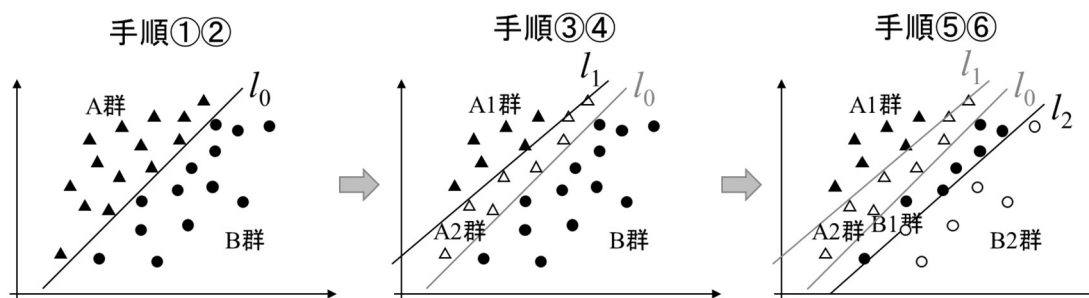


図 3.7 ドライバ分類の手順

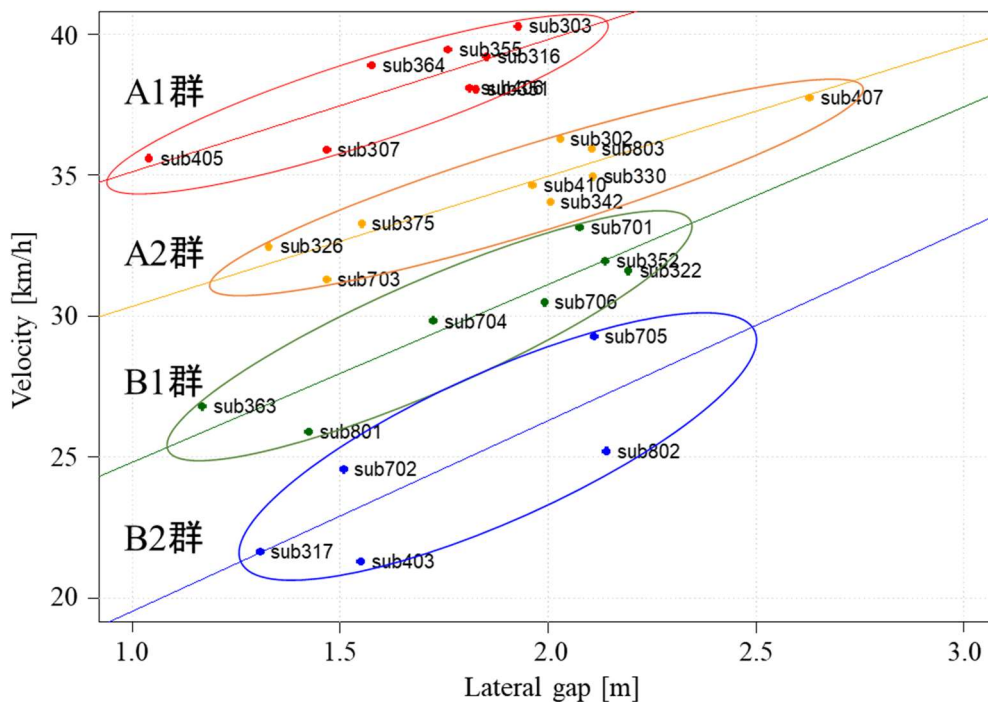


図 3.8 ドライバ分類の結果

図中の直線は、各群に属するプロット点で求めた回帰直線である。

上記の手順によってドライバを分類した結果を図 3.8 に示す。図 3.8 中には、各群に属するプロット点から求めた回帰直線も表示している。各群に属するプロット点は概ね 1 つの直線付近にあり、上述した狙い通りにドライバを分類することができている。同じ側方間隔を取っている場合、A1 群、A2 群、B1 群、B2 群となるに従い、通過速度が低くなっているため、定性的にはこの群の並び順で安全余裕が大きくなると考えられる。ただし、今回の分類結果では、同一群内のドライバが同程度の安全余裕を有していることを定量的に保障しているわけではないことに注意が必要である。

安全余裕が小さい A1 群、A2 群は、駐車車両通過場面において十分な準備行動がとれていないと考えられるため、運転支援の対象となるドライバである。各群に分類されたドライバ属性の内訳を表 3.1 に示す。本研究では、同齡ドライバと非高齡ドライバの詳細な比較は行わないが、高齡ドライバが A1 群、A2 群に属している割合が非高齡ド

ライバや熟練ドライバに比べて多いのは、特記すべきことである。高齢ドライバの過半数が、駐車車両場面において十分な準備行動がとれていないことから、高齢ドライバはリスク予測型運転支援システムのメインの対象ドライバと言える。

表 3.1 ドライバ分類の結果（ドライバ属性のうち内訳）

分類	高齢ドライバ	非高齢ドライバ	熟練ドライバ
A1	8	0	0
A2	7	1	1
B1	3	3	1
B2	2	2	1

3.6 ドライバ群間の比較

3.6.1 通過時の側方間隔，速度

図 3.9, 図 3.10 に、それぞれ、駐車車両通過時の側方間隔，速度の分布をドライバ群毎に示す（箱ひげ図）。分散分析の結果，側方間隔（図 3.9）では，ドライバ群に有意な効果が見られた（ $F(3,140) = 3.75, p < 0.05$ ）。Tukey 法による多重比較検定の結果，A1 群と A2 群の間の側方間隔に有意差（ $p < 0.05$ ）が見られたものの，平均値の差は 0.25[m] 程度とそれ程大きなものではなく，4 つのドライバ群で側方間隔の取り方に大きな違いはないと考えられる。一方，通過速度（図 3.10）では，分散分析の結果，ドライバ群に有意な効果が見られた（ $F(3,140) = 113.4, p < 0.001$ ）。Tukey 法による多重比較検定の結果，全ての群の組合せで有意差（ $p < 0.01$ ）が見られ，A1 群，A2 群は，B1 群，B2 群に比べて通過速度が明らかに高かった。

これらの結果から，A1 群，A2 群における安全上の問題点は，側方間隔の割には通過速度が高いことである。これらの群のドライバには減速支援が有効と考えられる。

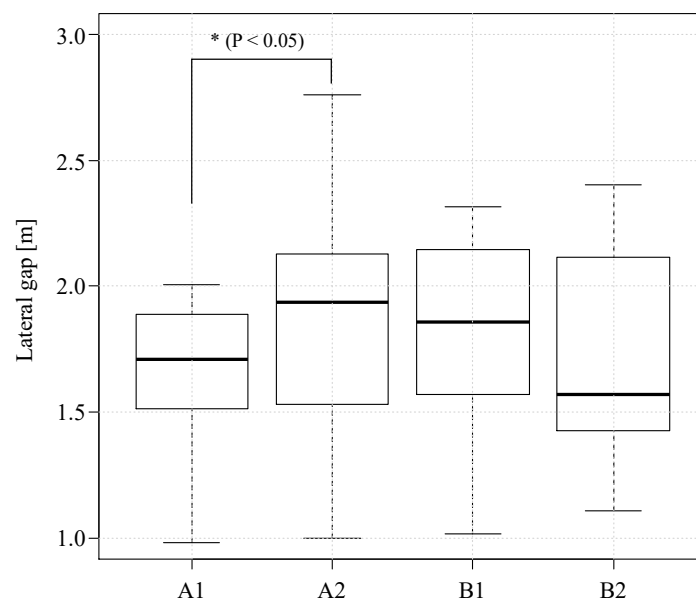


図 3.9 通過時の側方間隔

群間比較には Tukey 法を用いた.

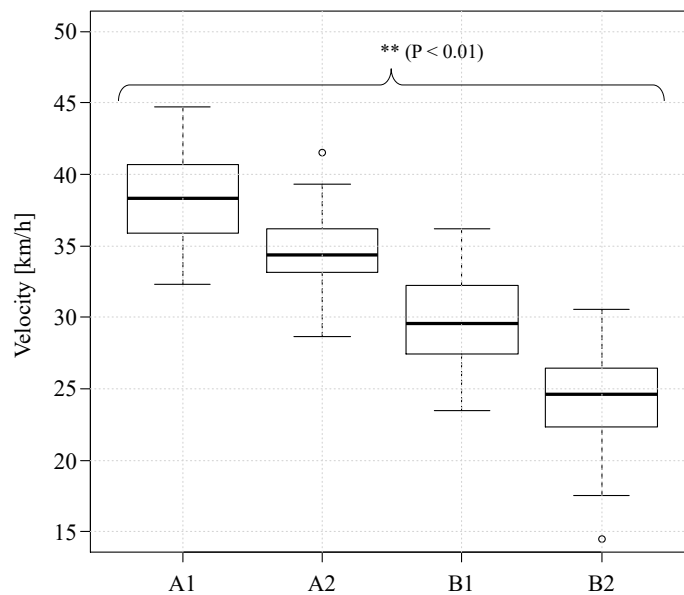


図 3.10 通過時の速度

群間比較には Tukey 法を用いた. 全ての 2 群の組合せで有意差($p < 0.01$)が見られた.

3.6.2 操舵開始タイミングでの側方間隔，速度

3.6.1 節では，駐車車両通過過程の最終状態である通過時の側方間隔と速度に着目し，側方間隔の割に通過速度が高いドライバ群（A1 群，A2 群）があることを確認した．支援では，このような安全余裕のない状態にならないように事前にドライバに働きかける必要がある．そこで，次に，各ドライバ群において，事前の状態がどのようなものであったかを調べる．事前の状態として，駐車車両までの固定距離もしくは固定時間での状態を比較することもできるが，ここでは，駐車車両を避けるために右側に操舵を開始したタイミングでの状態を比較する．これは，操舵開始タイミングが，駐車車両通過に備える意思決定のタイミングを反映していると考えられるからである．

操舵開始タイミングは CAN データに含まれるハンドル角度データから求めた．ただし，ハンドル角度データは，ドライバ毎に値の範囲が大きく異なる上に，ドライバの中には加速区間で操舵がふらつく者もいたため，固定角度によって操舵開始タイミングを決定することはできなかった．そこで，駐車車両を避さけるための右操舵時の最大ハンドル角度の 15%を超えた時点を操舵開始タイミングとした（15%という値は，全走行データの操舵開始タイミングを判定できるよう実験的に求めた値である）．

図 3.11，図 3.12 にそれぞれ，操舵開始タイミングでのX位置（駐車車両先頭位置までの進行方向距離；図 3.4 参照），TWH（駐車車両までの車頭時間）を示す．分散分析の結果，操舵開始タイミングでのX位置，TWH とともに，ドライバ群の有意な効果は見られなかった（X:F(3,140) = 1.00, $p > 0.05$; TWH:F(3,140) = 0.53, $p > 0.05$)．TWH の平均値の差は，最大でも 0.24[s]程度（B1 群と B2 群）であるため，全てのドライバ群で，平均的には，ほぼ同じタイミングで操舵を開始していると考えてもよい．すなわち，操舵の観点から見た場合の駐車車両通過に備える意思決定のタイミングには，ドライバ群による違いはないと考えられる．

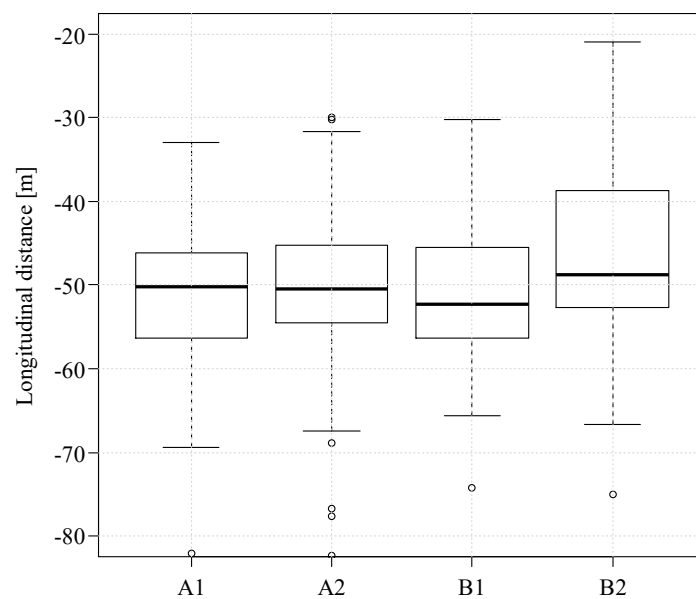


図 3.11 操舵開始タイミングでのX位置

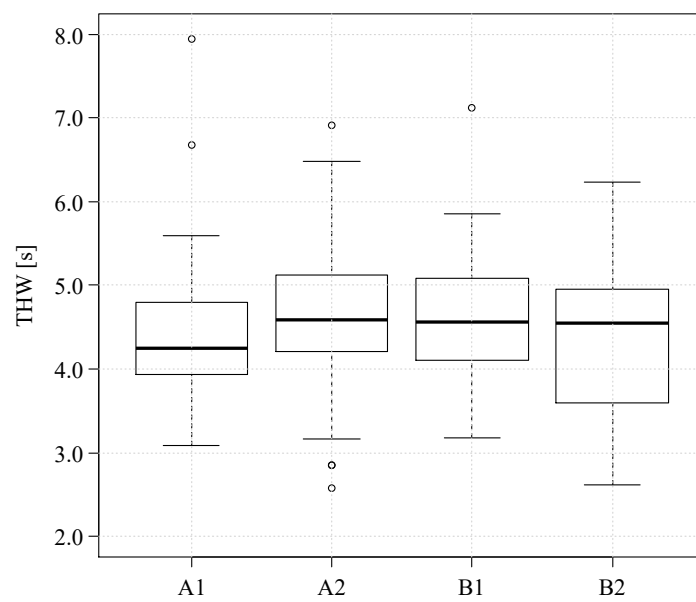


図 3.12 操舵回避タイミングでの THW

次に、操舵開始タイミングにおける側方間隔、速度について見てみる。図 3.13、図 3.14 にそれぞれ、操舵開始タイミングにおける側方間隔、速度を示す。図 3.13 のマイナスの側方間隔は、前方にある駐車車両と、進路上、重なっていることを表している（図 3.4 参照）。分散分析の結果、操舵開始タイミングでの側方間隔（図 3.13）では、ドライバ群に有意な効果が見られた（ $F(3,140)=9.8, p<0.001$ ）。Tukey 法による多重比較検定の結果、有意差が見られた群間もあるが、平均値の差は最大でも 0.19[m]（A2 群と B1 群）であり、運転行動の側面からはそれ程大きな差ではないと考えられる。一方、操舵開始タイミングでの速度にもドライバ群に有意な効果が見られた（ $F(3,140)=12.96, p<0.001$ ）。Tukey 法による多重比較検定の結果、A1 群が他の全ての群に対して有意に高かったが、その差は最大でも 4[km/h]であり、駐車車両通過時の速度に見られたドライバ群間の速度差（図 3.10）に比べると大きな差ではない。

操舵開始のタイミングでは、ドライバ群間で位置、速度に大きな違いは見られなかった一方で、駐車車両通過時の速度には大きな違いが見られた（3.6.1 節参照）。つまり、ドライバの操舵開始以降の速度生成に違いがあると言える。

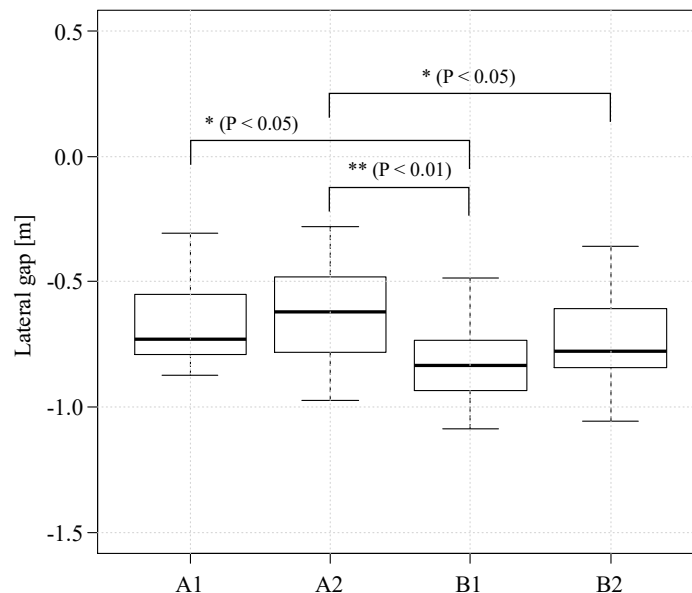


図 3.13 操舵開始タイミングでの側方間隔

群間比較には Tukey 法を用いた。

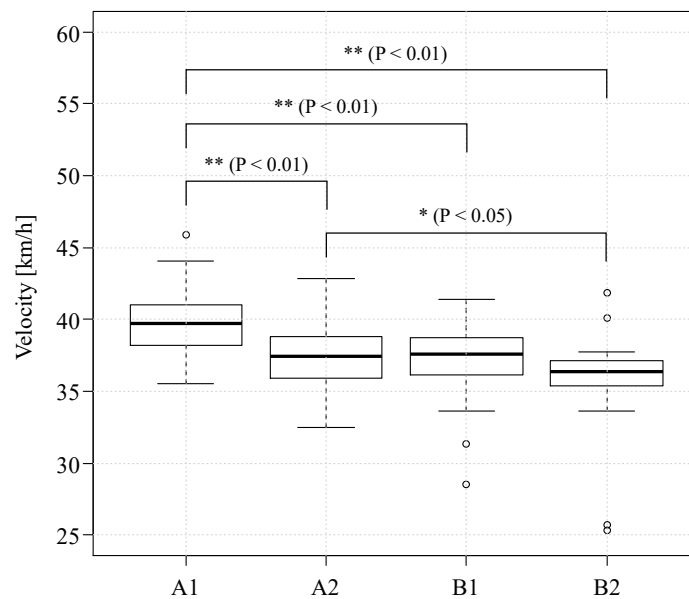


図 3.14 操舵回避タイミングでの速度

群間比較には Tukey 法を用いた。

3.6.3 ハンドル操作, ペダル操作

ここまで、駐車車両通過時の側方間隔と速度の観点からドライバを分類し、通過前の準備が不十分な群 (A1 群, A2 群) の特徴として、操舵開始からの減速が不足していることを明らかにした。ここでは、これまで見てきた車両挙動レベル (側方間隔, 速度) の違いを生む、ドライバの操作レベルでの違いを見る。特に、速度の違いを生むペダル操作に着目する。そこで、駐車車両通過時の安全要因の 1 つである側方間隔がほぼ同じ通過時側方間隔 (約 1.5[m]) を持つドライバを各ドライバ群から 1 名ずつ選び、ペダル操作を比較する。各群の代表ドライバとして次の 4 名を選んだ (図 3.8 参照)。

- ・ A1 群 : sub307 (高齢ドライバ : 66 歳・男性)
- ・ A2 群 : sub375 (高齢ドライバ : 67 歳・男性)
- ・ B1 群 : sub801 (熟練ドライバ : 20 代・男性)
- ・ B2 群 : sub702 (非高齢ドライバ : 30 代・男性)

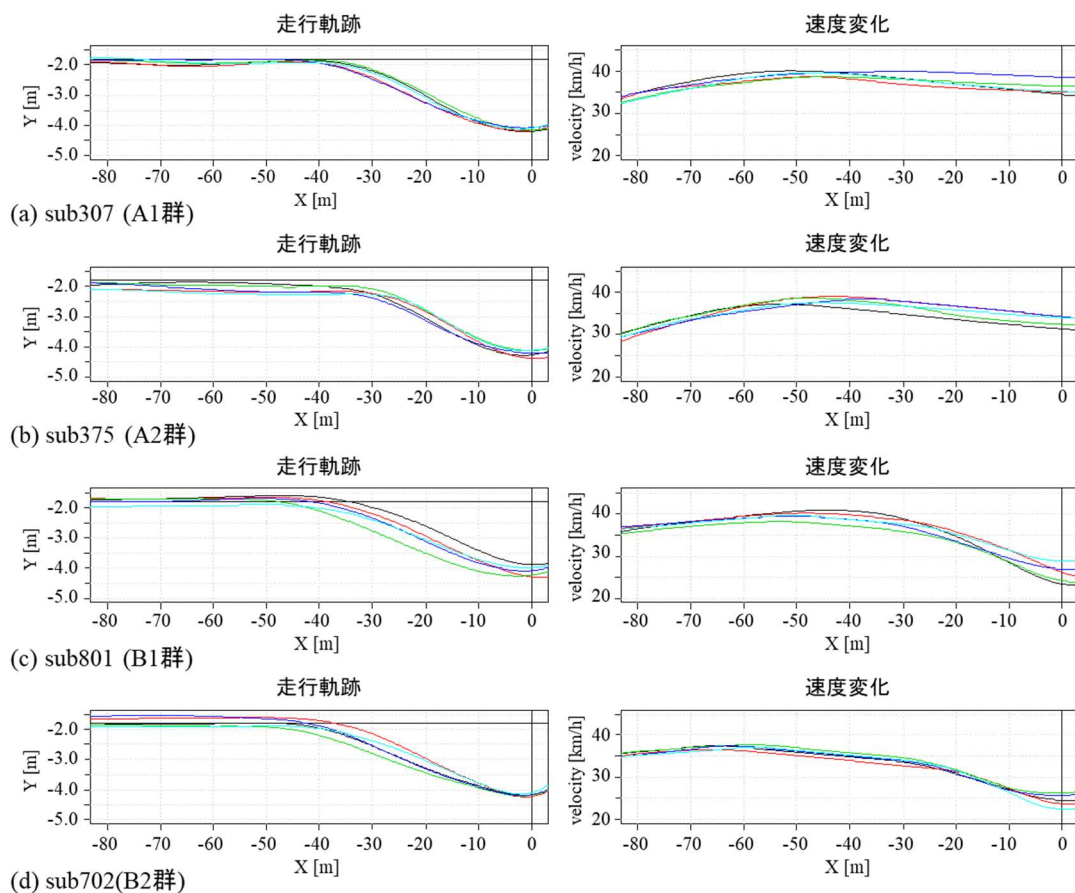


図 3.15 各ドライバ群の走行軌跡と速度変化の例

(a), (b), (c), (d)は、それぞれ、A1 群、A2 群、B1 群、B2 群のドライバ（通過時の側方間隔が約 1.5[m]のドライバ）の例。

図 3.15 に 4 名の走行軌跡と速度変化を示す（5 回走行分を重ね描き）。駐車車両通過時の側方間隔が約 1.5[m]の 4 名を選んでいるため、横移動の開始タイミングに若干の違いは見られるものの、ほぼ同じような走行軌跡を取っている。一方、速度変化については、大きく異なっており、各ドライバ群を代表する速度変化パターンとなっていることが分かる。

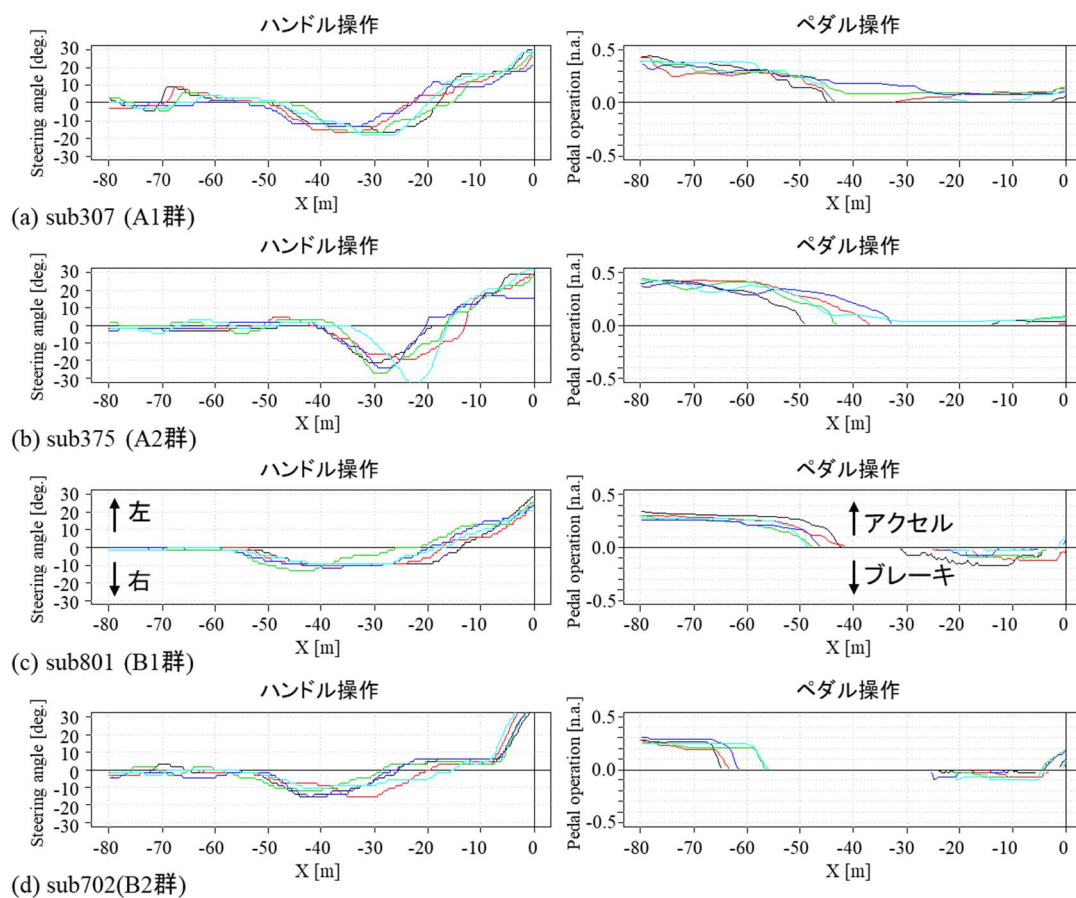


図 3.16 各ドライバ群のハンドル操作とペダル操作の例

(a), (b), (c), (d)は、それぞれ、A1 群、A2 群、B1 群、B2 群のドライバ（通過時の側方間隔が約 1.5[m]のドライバ）の例。ハンドル操作の正值、負値はそれぞれ左操舵、右操舵に対応し、ペダル操作の正值、負値はそれぞれアクセル操作、ブレーキ操作に対応する ((c)参照)。

次に、図 3.15 で見られた車両挙動の違いを生み出す操作レベルの違いを見る。図 3.16 に、4 名のハンドル操作（ハンドル角度）、ペダル操作のパターンを示す（5 回走行分を重ね描き）。ハンドル角度は、左操舵を正值に、右操舵を負値に取っている。ペダル操作は、アクセル開度を正值に、ブレーキ圧を負値に取り、可視化のためにそれぞれ適当

な係数を掛けて合成したものである（視覚的にペダル操作の変化傾向を確認するためであり、正と負の値の定量的な比較には意味はない）。なお、ペダル操作 0 は、CAN データの中でアクセル開度、ブレーキ圧ともに 0 であった状態であり、ドライバの足の構えの状態は不明である。図 3.16 を見ると、操作レベルでのパターンは、ドライバ内ではばらつきが少なく、ドライバ間で大きく異なっており、車両挙動レベルで見られたドライバ内での再現性とドライバ間での違い（図 3.15）は、操作レベルでの特徴に起因していることが分かる。

ハンドル操作では、sub375（A2 群）が他のドライバと異なっている（操舵開始タイミングが遅く、その後、大きく右操舵を行う）が、他の 3 名は比較的似た操作パターン（駐車車両から約 50[m]手前で操舵を開始し、最大で 10~15[度]程度の右操舵を行い、25[m]手前から左操舵を行う）である。

ペダル操作は、4 名のドライバでそれぞれ異なっている。速度変化で見られたドライバ間の違いがより顕著に表れている。sub801（B1 群）、sub701（B2 群）は、アクセルオフの後、ブレーキを踏み込み、減速を行っていることが分かる。sub701（B2 群）は、より手前からアクセルオフを行い、アクセルオフの期間（区間）が sub801（B1 群）より長い。一方、sub307（A1 群）と sub375（A2 群）は、駐車車両に接近する過程で全くブレーキを踏んでおらず、アクセルオフだけで速度調整を行っていることが分かる。sub307（A1 群）は、5 回の走行のうち 2 回はアクセルオフを行っておらず、また、アクセルオフを行ったとしても、sub375（A2 群）に比べてその期間（区間）は短い。

3.6.2 節では操舵開始以降の速度パターンがドライバ群間で異なると述べたが、車両挙動である速度パターンとともにドライバ行動であるペダル操作パターンに着目することで、ドライバ群間での違いがより明確になった。

3.7 潜在リスク場面における支援デザインについての考察

ここでは、駐車車両通過場面の運転行動データの分析結果を以下にまとめ、駐車車両通過時の先読み運転支援のデザインについて考える。

- ① ドライバは個人内で安定した走行パターンを取っている (3.4 節)。
- ② ドライバ間では、走行パターンにバリエーションがある (3.4 節)。
- ③ 駐車車両通過時の側方間隔、速度に基づく安全余裕の仮説を置き、ドライバを分類する (3.5 節) と、通過時の側方間隔の割に速度が高いドライバ群 (A1 群, A2 群) が見られた (3.6.1 節)。
- ④ ドライバ群間で操舵開始タイミングはほぼ同じであり、その時点の速度にも大きな違いはなく、③で見られた通過速度の違いは、操舵開始後の速度パターンの違いによる (3.6.2 節)。
- ⑤ 操舵開始後の速度パターンに見られた違いは、ペダル操作パターンでより顕著に表れる。A1 群, A2 群にはアクセルオフが遅れ、さらにはブレーキ操作を行わないドライバがいる (3.6.3 節)。

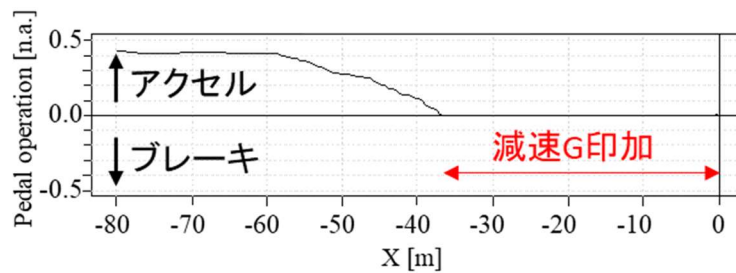
まず、支援の対象となるドライバは、明らかに A1 群, A2 群のドライバである。これらのドライバは、通過時の側方間隔の割には速度が高いため、事前の減速支援が効果的と考えられる。操舵開始タイミングにおける車両状態、操作状態は、全てのドライバ群でほぼ同じであることから、操舵開始後の速度とペダル操作に基づいて支援開始の判断を行うことになる。今回の分析では、減速不足と判断できるペダル操作のパターンとして、アクセルオフの遅れ、アクセルオフの不実行の 2 通りが見られる。以下では、それぞれの減速不足につながるペダル操作パターンに対する運転支援デザインを考える。

【アクセルオフの遅れ】

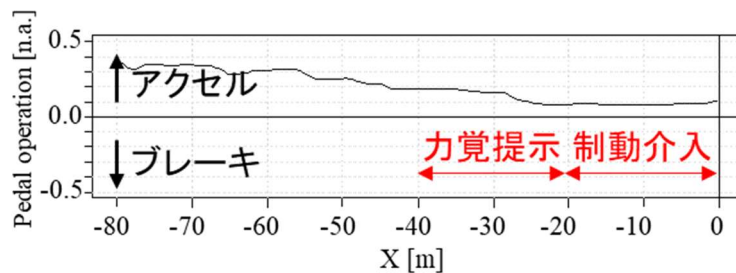
アクセルオフのタイミングで減速介入を行い、通常のアクセルオフによって生じる減速 G より強めの減速を行うことでアクセルオフの遅れを補償する (図 3.17 (a)). アクセルオフ行動によって減速意図が認められるため、通常より強めの減速 G に対して違和感を抱きにくいと考えられる。ただし、アクセルオフを待つ間に、次で述べるアクセルオフの不実行と判断するためのロジックが必要である。

【アクセルオフの不実行】

アクセルオフが行われないと判断した場合、アクセルオフを促すためにアクセルペダルに振動や押し戻しなどの力覚提示を行う (図 3.17 (b)). その結果、アクセルオフがなされた場合には、上記の①と同様に強めの減速 G を与える。アクセルオフがなされない場合、減速介入を行う。ただし、介入量は受容性の面からの検討が必要である。



(a) アクセルオフの遅れ



(b) アクセルオフの不実行

図 3.17 駐車車両通過場面における減速支援

3.8 まとめ

本章では、駐車車両通過場面での運転行動分析を通じて、潜在リスク場面における運転支援デザインについて考察を行った。テストコースで収集した一般ドライバーの走行データの分析により、駐車車両通過場面では、操舵開始タイミング後の減速不足が原因で通過時の速度が高めになるドライバーがいることを明らかにした。これらのドライバーのペダル操作の特徴として、アクセルオフ遅れ、もしくは、アクセルオフ不実行が見られた。これらの不安全行動に対して、減速支援として減速 G の印加や力覚提示を用いる運転支援デザインの提案を行った。

本章で提案した運転支援デザインは、2章(2.6節)で考察した運転行動レベルの情報に基づく支援であるが、速度レベル(車両挙動レベル)の情報と組み合わせることにより良い支援が実現できると考えられる。減速 G の印加、力覚提示など、どのような形で支援を行うにしても、支援開始の判断をできるだけ早めに行う必要がある。その際、速度情報を用いて何らかの基準速度からの逸脱度などを評価することで支援開始の判断を行うことが考えられる。

なお、本研究で用いたドライバー分類法は、「図 3.6 図 3.8 の平面上で右肩上がりの直線付近にプロットされているドライバーは同程度の安全余裕を持っている」との仮定に基づいており、各走行に対して定量的な安全性の検討がなされていない。例えば、飛び出し歩行者に対して自動緊急ブレーキを作動させたとした場合の衝突速度シミュレーションなどで走行状態の安全性を評価する必要がある。この場合、支援が必要なドライバー群として今回と異なる特徴が見つかるかもしれない。

駐車車両回避



【概要】

40km/hの直進状態から、「まあまあ安全」と感じる程度に速度・側方間隔を調整しながら駐車車両を通過する。

【場面】

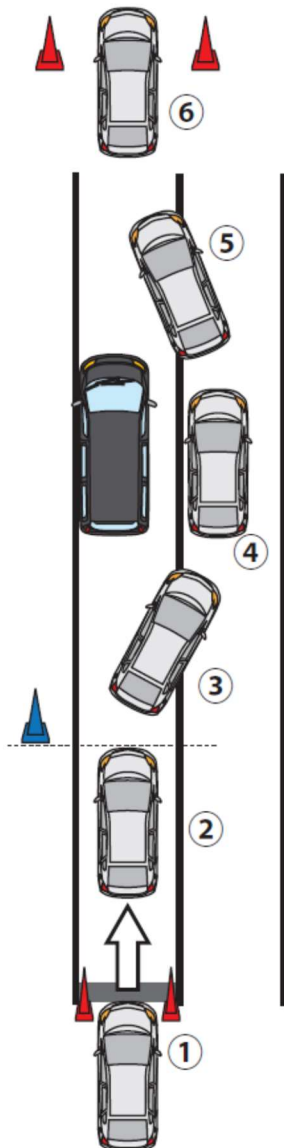
- 制限速度 40km/h の市街路
 - ※ 駐車車両の死角領域から人が飛び出してくるかも？
- 軽度な交通流
- 対向車はない（片側二車線のため、右の車線も同進路）

【通過時の心構え】

あなたが「まあまあ安全」と考えられる通過安全の度合いを以下の4段階に分けたときの「まあまあ安全」
かなり危険・少し危険・まあまあ安全・十分安全

図 3.18 教示シート (1)

駐車車両回避



⑦安全度合いの自己評価

ゴール地点通過後に、その時の側方通過の安全の度合いを4段階（かなり危険 / 少し危険 / まあまあ安全 / かなり安全）で評価する。

⑥ゴール地点

2本のパイロンの間を通過する。（停止無用）
ゴール地点通過後は、Uターンしてスタート地点に戻る。

⑤側方通過後

「まあまあ安全」に車両を回避したあとは、元の車線に戻る。

④車両回避

停止している車両を自分が「まあまあ安全」だと判断する速度・側方距離で回避する。
※ウinkerならびに安全確認は自由（普段通りの感覚で）

③車両回避開始

青いパイロンを過ぎたら、いつでも回避を開始して良い。
※青いパイロンを過ぎたら**すぐに回避をしなくてはいけない**という訳ではない。（もちろんすぐに回避を開始しても良い）

②加速区間

左に青いパイロンにがあるところまでに
約40 km/h（37～43 km/h）になるように**加速**

①スタート地点

車が左右のパイロンの中心になるよう左右を調整し、
停止線に車の前端を合わせて停止する。

図 3.19 教示シート (2)

第4章

衝突速度に基づくリスク指標の定量化

4.1 はじめに

第3章(3.7節)では、潜在リスク場面(駐車車両通過場面)における一般ドライバーの不安全行動の特徴として、アクセルオフの遅れやアクセルオフの不実行に起因する減速不足を明らかにした。ただし、そこで見られた不安全行動の危なさ(リスク)の定量的な評価が課題として残った。そこで、本章では、潜在リスク場面における走行状態のリスクの程度を定量化する指標の提案を行う。

4.1.1 リスク指標の要件

第1章(1.3.3節)では、これまでに提案されてきたいくつかの潜在リスク場面でのリスク指標の概要および問題点について述べた。それらの問題点を整理すると、運転支援システムに応用する上でのリスク指標の要件は以下のようにまとめることができる。

要件①：走行中のあらゆる自転車状態においてリスク値を与えることができる。

要件②：リスク値に物理的な意味がある、もしくは、関連付けられる。

要件③：自転車速度と自転車位置の両方を考慮している。

要件④：実運転行動データが不要である。

要件①は、予防安全システムとしての必須の要件である。

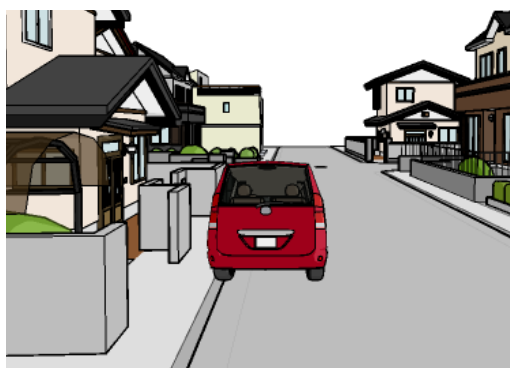
死角からの歩行者などの飛び出しに備えるための支援であれば、想定される飛び出し位置への接近過程において常時リスク値を算出できる必要がある。要件②は、運転支援によるリスク低減の効果が、現実世界で明確な意味を持つために必要な要件である。例えば、この要件が満たされていたら、運転支援によって低減できる被害の頻度や程度を定量的に示すことができる。要件③は、潜在リスク場面での安全には、速度の低減と側方間隔の確保が重要視されている [31]ためであり、リスク値を算出する上で速度と側

方間隔を等価的に扱える必要がある。要件④は、運転支援システムとして対応できる場面のカバレッジを上げるために必要である。個別の蓄積データに頼らずに車載センシング結果からリスク値が算出できることが望ましい。

以降では、死角からの仮想飛び出し歩行者との衝突速度に基づくリスク指標の提案を行う。

4.2 潜在リスク場面におけるリスクの考え方と定式化

4.2.1 潜在リスク場面におけるリスクの考え方



(a) 飛び出しが不顕在化



(b) 飛び出しが顕在化

図 4.1 駐車車両通過場面

ここでは、潜在リスク場面として図 4.1 に示す駐車車両通過場面を例に取り、潜在リスクを2つの要因に分けて考える。

1つは、駐車車両の陰から歩行者などが飛び出す可能性である。飛び出す可能性が高ければ高いほど、この場面でのリスクは大きくなると考えられる。これは自車の状態以外によって決まるリスク要因である。

もう1つの要因は、図 4.1(b)で示すように、歩行者が駐車車両の陰から飛び出してきた場合の危なさの程度である。この危なさの程度を表すには、いくつかの考え方がある

得る。例えば、飛び出してきた瞬間の TTC や、歩行者位置での完全停止に必要な減速度などが考えられるが、本研究では、緊急減速した際の衝突速度を考える。緊急減速によって歩行者との衝突を回避できる場合（衝突速度が 0 の場合）はリスクの程度を 0 とし、衝突が回避できない場合は衝突速度をリスクの程度とする。

緊急減速した際の衝突速度をリスク指標に用いることで、4.1.1 節で挙げた 4 つのリスク定量化の要件を全て満たすことができる。なぜなら、衝突速度は、自車がとり得るあらゆる状態（位置と速度）に対して（要件①，要件③），実走行データを必要とせず（要件④），算出可能であり，物理的な意味を持つ（要件②）からである。

また，緊急減速した際の衝突速度の考え方は，第 2 章（2.4 節）でまとめた熟練ドライバーの先読み運転に関する運転行動ルール(c-1)「何か出てきた時に止まれる速度，停止距離を心がけている」に照らしても合理的な考え方である。

4.2.2 リスクの一般定式化

前節（4.2.1 節）で示した潜在リスク場面におけるリスクの考え方にに基づき，リスクの定式化を行う。飛び出しなどの危険事象を表す確率変数を ω とし，危険事象が起こった際の衝突速度を v_{col} （確率変数）とする。ここで，危険事象 ω と衝突速度 v_{col} の同時確率 $p(\omega, v_{col})$ を考える。

$p(\omega, v_{col})$ は，危険事象 ω の生起確率 $P(\omega)$ と，危険事象 ω が生起した際の衝突速度 v_{col} の確率分布 $p(v_{col}|\omega)$ の積として表される（式(4.1)）。

さらに，式(4.1)は，自車状態 s_{ego} ，危険対象（飛び出し歩行者）の状態 s_{ped} ，緊急減速の挙動 α について周辺化することにより，式(4.2)のように展開することができ，最終的に式(4.3)で表される。式(4.3)の積分項（周辺化項）の第 1 項 $p(v_{col}|s_{ego}, s_{ped}, \alpha, \omega)$ は，衝突速度 v_{col} が自車状態 s_{ego} ，危険対象（飛び出し歩行者）の状態 s_{ped} ，緊急減速の挙動 α に依存して決まることを表している。式(4.3)が，本研究で提案する潜在リスク場面におけるリスクの一般式である。

$$p(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{v}_{col}) = P(\boldsymbol{\omega})p(\boldsymbol{v}_{col}|\boldsymbol{\omega}) \quad (4.1)$$

$$= P(\boldsymbol{\omega}) \iiint p(\boldsymbol{v}_{col}, \boldsymbol{s}_{ego}, \boldsymbol{s}_{ped}, \boldsymbol{\alpha}|\boldsymbol{\omega}) d\boldsymbol{s}_{ego} d\boldsymbol{s}_{ped} d\boldsymbol{\alpha} \quad (4.2)$$

$$= P(\boldsymbol{\omega}) \iiint p(\boldsymbol{v}_{col}|\boldsymbol{s}_{ego}, \boldsymbol{s}_{ped}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\omega}) p(\boldsymbol{s}_{ego}, \boldsymbol{s}_{ped}, \boldsymbol{\alpha}|\boldsymbol{\omega}) d\boldsymbol{s}_{ego} d\boldsymbol{s}_{ped} d\boldsymbol{\alpha} \\ = P(\boldsymbol{\omega}) \iiint p(\boldsymbol{v}_{col}|\boldsymbol{s}_{ego}, \boldsymbol{s}_{ped}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\omega}) \\ \cdot p(\boldsymbol{s}_{ego}|\boldsymbol{\omega}) p(\boldsymbol{s}_{ped}|\boldsymbol{\omega}) p(\boldsymbol{\alpha}|\boldsymbol{\omega}) d\boldsymbol{s}_{ego} d\boldsymbol{s}_{ped} d\boldsymbol{\alpha} \quad (4.3)$$

4.2.3 衝突速度を用いたリスクの定式化

ここでは、提案した潜在リスク場面におけるリスクの一般式（式(4.3)）から、自転車状態 \boldsymbol{s}_{ego} 、飛び出し歩行者の状態 \boldsymbol{s}_{ped} 、緊急減速の挙動 $\boldsymbol{\alpha}$ が確率変数でない場合のリスクの定式化を行う。自転車状態、飛び出し歩行者の状態、緊急減速の挙動を通常の変数とし、次のようにおくと、

自転車状態： $\bar{\boldsymbol{s}}_{ego}$

飛び出し歩行者の状態： $\bar{\boldsymbol{s}}_{ped}$

緊急減速の挙動： $\bar{\boldsymbol{\alpha}}$

$p(\boldsymbol{s}_{ego}|\boldsymbol{\omega})$ 、 $p(\boldsymbol{s}_{ped}|\boldsymbol{\omega})$ 、 $p(\boldsymbol{\alpha}|\boldsymbol{\omega})$ は、ディラックのデルタ関数 $\delta(x)$ を用いて、それぞれ、次のように表すことができる（ $\delta(x)$ は $x = 0$ でのみ 1 となる関数）。

$$p(\boldsymbol{s}_{ego}|\boldsymbol{\omega}) = \delta(\boldsymbol{s}_{ego} - \bar{\boldsymbol{s}}_{ego}|\boldsymbol{\omega}) \quad (4.4)$$

$$p(\boldsymbol{s}_{ped}|\boldsymbol{\omega}) = \delta(\boldsymbol{s}_{ped} - \bar{\boldsymbol{s}}_{ped}|\boldsymbol{\omega}) \quad (4.5)$$

$$p(\boldsymbol{\alpha}|\boldsymbol{\omega}) = \delta(\boldsymbol{\alpha} - \bar{\boldsymbol{\alpha}}|\boldsymbol{\omega}) \quad (4.6)$$

これらを式(4.3)に代入し、展開すると次のようになる。

$$\begin{aligned}
p(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{v}_{col}) &= P(\boldsymbol{\omega})p(\boldsymbol{v}_{col}|\boldsymbol{\omega}) \\
&= P(\boldsymbol{\omega}) \iiint p(\boldsymbol{v}_{col}|\boldsymbol{s}_{ego}, \boldsymbol{s}_{ped}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\omega}) \\
&\quad \cdot \delta(\boldsymbol{s}_{ego} - \bar{\boldsymbol{s}}_{ego}|\boldsymbol{\omega})\delta(\boldsymbol{s}_{ped} - \bar{\boldsymbol{s}}_{ped}|\boldsymbol{\omega}) \delta(\boldsymbol{\alpha} - \bar{\boldsymbol{\alpha}}|\boldsymbol{\omega})d\boldsymbol{s}_{ego}d\boldsymbol{s}_{ped}d\boldsymbol{\alpha} \\
&= P(\boldsymbol{\omega})p(\boldsymbol{v}_{col}|\bar{\boldsymbol{s}}_{ego}, \bar{\boldsymbol{s}}_{ego}, \bar{\boldsymbol{\alpha}}, \boldsymbol{\omega}) \\
&= P(\boldsymbol{\omega}) \delta(\boldsymbol{v}_{col} - \bar{\boldsymbol{v}}_{col}) \tag{4.7}
\end{aligned}$$

$$\text{ただし, } \bar{\boldsymbol{v}}_{col} = f(\bar{\boldsymbol{s}}_{ego}, \bar{\boldsymbol{s}}_{ego}, \bar{\boldsymbol{\alpha}}) \tag{4.8}$$

式(4.7)は、潜在リスクの式が、危険事象の生起確率と確定的な値 ($\bar{\boldsymbol{v}}_{col}$) を持つ衝突速度の分布の積として表されることを示している。

ここで、先読み運転では、常に危険事象（歩行者の飛び出しなど）が生起すると想定して運転しているものとする。この場合、 $P(\boldsymbol{\omega}) = 1$ と等価であり、このとき、式(4.7)は式(4.9)となる。すなわち、潜在リスク場面において、常に危険事象の生起を想定して運転している場合のリスクは、危険が生起した際の衝突速度として表現できる。ただし、 $\bar{\boldsymbol{v}}_{col}$ は式(4.8)で表されるように $\bar{\boldsymbol{s}}_{ego}$, $\bar{\boldsymbol{s}}_{ego}$, $\bar{\boldsymbol{\alpha}}$ で決まる衝突速度である。

$$p(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{v}_{col}) = \delta(\boldsymbol{v}_{col} - \bar{\boldsymbol{v}}_{col}) \tag{4.9}$$

4.2.4 緊急減速を仮定した衝突速度の定式化

ここでは、式(4.8)で与えた衝突速度 $\bar{\boldsymbol{v}}_{col}$ の具体的な導出を行う。図 4.2 に駐車車両通場面での座標系と自車位置(X_{ego}, Y_{ego})、駐車車両位置(X_{prk}, Y_{prk})、仮想飛び出し歩行者（以下、歩行者）位置(X_{ped}, Y_{ped})を示す。自車位置は自車の中心位置とする。歩行者のX位置は駐車車両の先端から l_{ped} だけ離れているとする ($X_{ped} = l_{ped}$)。

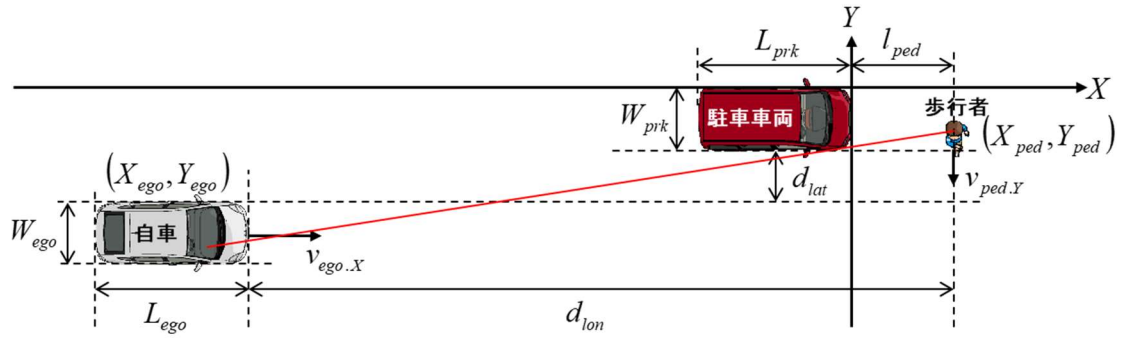


図 4.2 駐車車両通過場面における座標系

衝突速度の算出には、次の歩行者飛び出しシナリオを考える。自車が速度 $(v_{ego.X}, v_{ego.Y})$ で走行中に、歩行者が駐車車両から l_{ped} [m] だけ離れた位置 $(X = l_{ped})$ から速度 $(v_{ped.X}, v_{ped.Y})$ で飛び出す。ドライバは直ちに歩行者を発見し、衝突すると判断した場合、緊急減速により衝突回避を試みる。なお、緊急減速まで車両は等速運動を続けるとする。

本研究では、緊急減速は、常に一定のシステム作動遅れ τ_a [s]、減速度 $a_{ego.X}$ [m/s²] ($a_{ego.X} < 0$) で作動する自動緊急ブレーキシステム (AEB) によるものと仮定する。また、自車速度はX方向にのみ成分を持つものとし ($v_{ego.Y} = 0$)、歩行者速度Y方向にのみ成分を持つものとする ($v_{ped.X} = 0$)。

自車の車幅、車長をそれぞれ W_{ego} [m]、 L_{ego} [m]、駐車車両の車幅、車長をそれぞれ W_{prk} [m]、 L_{prk} [m] とすると、自車と歩行者X位置までの前方間隔 d_{lon} [m]、自車と駐車車両の側方間隔 d_{lat} [m] は、式(4.10)、式(4.11)となる。

$$d_{lon} = (X_{ped} - X_{ego}) - \frac{1}{2}L_{ego} \quad (4.10)$$

$$d_{lat} = (-W_{prk} - Y_{ego}) - \frac{1}{2}W_{ego} \quad (4.11)$$

また、ドライバの視点位置(X_{drv}, Y_{drv})を式(4.12), 式(4.13)のように定めると (自車の右 1/4 幅, 前 1/4 長の位置), 歩行者の発見位置 (歩行者初期位置) (X_{ped}^0, Y_{ped}^0)は, 式(4.14), 式(4.15)で求められる.

$$X_{drv} = X_{ego} + \frac{1}{4}L_{ego} = -\left(d_{lon} + \frac{1}{4}L_{ego} - l_{ped}\right) \quad (4.12)$$

$$Y_{drv} = Y_{ego} - \frac{1}{4}W_{ego} = -\left(d_{lat} + W_{prk} + \frac{3}{4}W_{ego}\right) \quad (4.13)$$

$$X_{ped}^0 = l_{ped} \quad (4.14)$$

$$Y_{ped}^0 = Y_{drv} + \frac{d_{lon} + \frac{1}{4}L_{ego}}{d_{lon} + \frac{1}{4}L_{ego} - l_{ped}}\left(d_{lat} + \frac{3}{4}W_{ego}\right) \quad (4.15)$$

ここまで準備した変数を用いて, 自車がある状態 (位置, 速度) の時に飛び出す歩行者との衝突速度を求めることができる. 図 4.3 に衝突速度を求めるフローチャートを示す. 最終的な衝突速度を求めるために 3 回の衝突判定を行う.

まず, 最初の衝突判定 (図 4.3 の衝突判定 1) では, 自車と歩行者の等速運動を仮定した時に衝突するか否かを判定する. ここで衝突すると判定された場合, 緊急減速を行う必要がある. しかし, 自動緊急ブレーキシステムには $\tau_a[s]$ だけのシステム遅れ時間があるため, $\tau_a[s]$ だけ空走する. そこで, 衝突判定 2 では, 空走中に衝突するか否かを判定する. 衝突する場合の衝突速度は, 減速しないため $v_{ego,x}[m/s]$ のままである.

次に, 減速度 $a_{ego,x}[m/s^2]$ の減速によって歩行者X位置 (X_{ped}) に到達するか否かの判定を行う (図 4.3 の到達判定). 歩行者X位置に到達しない場合は, 緊急減速により停止することを意味している. 一方, 歩行者X位置に到達する場合 (到達速度を $v_{rch2,x}[m/s]$ とする), 再度, 歩行者との衝突判定を行う (図 4.3 の衝突判定 3). 減速により自車の歩行者X位置への到達時間が変わり, その間に歩行者位置も変わるため, 再判定が必要となる. 衝突する場合の衝突速度は, 歩行者X位置への到達速度である $v_{rch2,x}[m/s]$ である.

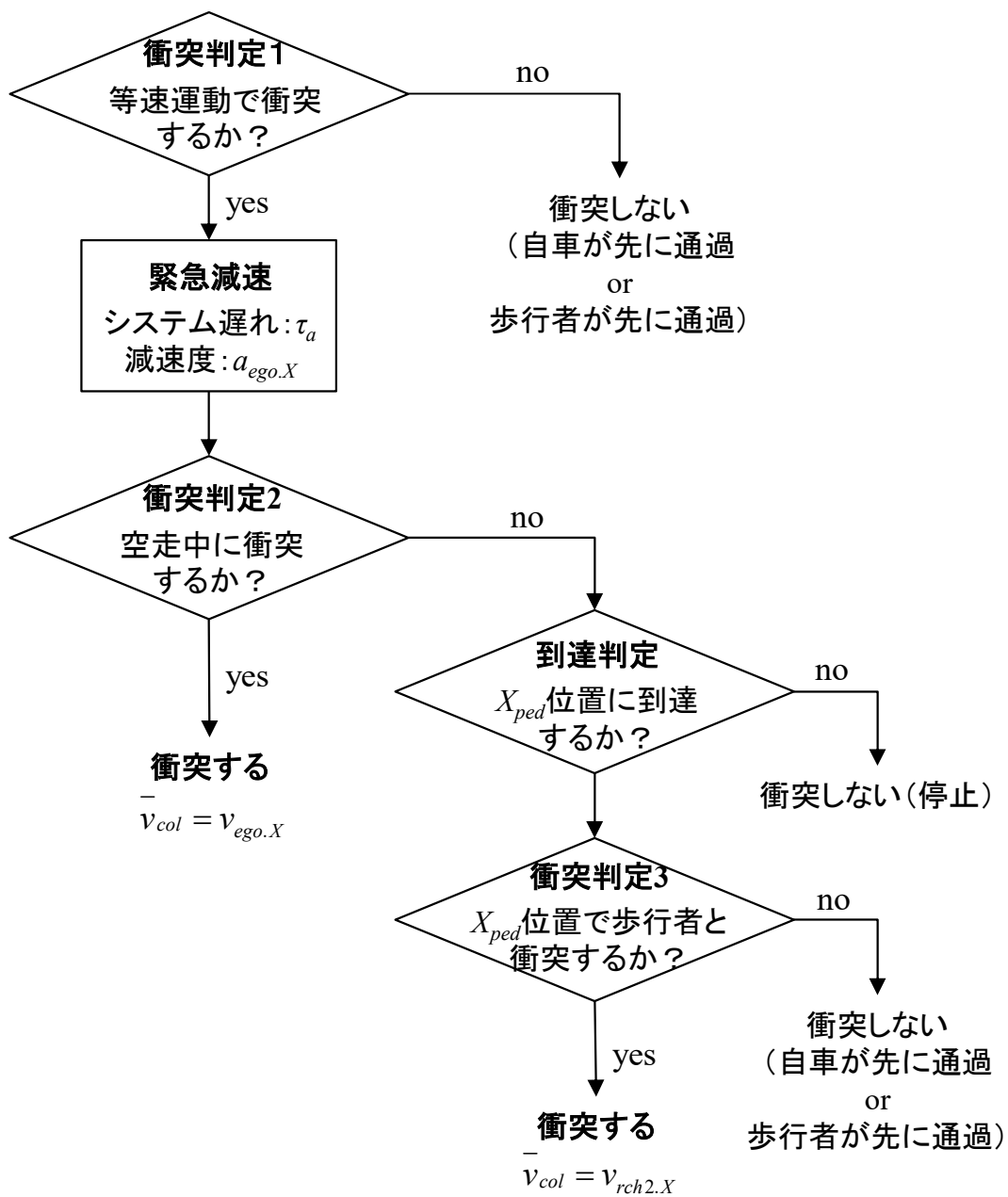


図 4.3 衝突速度を求めるフローチャート

以降では、衝突判定 1、緊急減速、衝突判定 2、到達判定、衝突判定 3 について詳細を述べる。

【衝突判定 1】

ここでは、自車と歩行者が等速運転を続けた場合に衝突するか否かを判定する。まず、自車が歩行者X位置 (X_{ped}) に到達した時の歩行者位置を求める。自車が X_{ped} に到達するまでの時間 t_{rch} は式(4.16)であり、この時の歩行者位置($X_{ped}^{trch}, Y_{ped}^{trch}$)は、式(4.17)、式(4.18)で与えられる。

$$t_{rch} = \frac{d_{lon}}{v_{ego.X}} \quad (4.16)$$

$$X_{ped}^{trch} = l_{ped} \quad (4.17)$$

$$Y_{ped}^{trch} = Y_{ped}^0 + v_{ped.Y} \cdot t_{rch} \quad (4.18)$$

自車が歩行者X位置 (X_{ped}) を通過 (自車先端が X_{ped} に到達～自車後端が X_{ped} に到達) するのに要する間 (τ [s]) に歩行者のY位置 (式(4.18)) が、次の条件 A を満たせば衝突し、条件 B を満たせば自車が先に通過し、条件 C を満たせば歩行者が先に通過する。衝突すると判定された場合 (条件 A)、緊急減速を行う。

$$\tau = \frac{L_{ego}}{v_{ego.X}} \quad (4.19)$$

・条件 A : 自車と歩行者は衝突する

$$Y_{ego} - \frac{1}{2}W_{ego} \leq Y_{ped}^{trch} \leq Y_{ego} + \frac{1}{2}W_{ego} - v_{ped.Y} \cdot \tau \quad (4.20)$$

・条件 B : 自車が先に通過 (衝突しない)

$$Y_{ped}^{trch} > Y_{ego} + \frac{1}{2}W_{ego} - v_{ped.Y} \cdot \tau \quad (4.21)$$

・条件 C : 歩行者が先に通過 (衝突しない)

$$Y_{ped}^{trch} < Y_{ego} - \frac{1}{2}W_{ego} \quad (4.22)$$

【緊急減速】

緊急減速では、歩行者を初期位置（式(4.14), 式(4.15)）で直ちに認識し、減速を開始する。ただし、減速開始までには AEB のシステム遅れ時間 τ_a [s] が存在する。これは、人ドライバであれば、認知・判断・操作（ブレーキ踏込み）でのトータルの遅れ時間に相当する。減速開始後は、一定の減速度 $a_{ego.X}$ [m/s²] ($a_{ego.X} < 0$) で減速する。

【衝突判定 2】

緊急減速では減速開始までの遅れ時間 τ_a [s] が存在するため、その間、自車は空走（等速運動）する。次の条件 D を満たせば空走中に歩行者に速度 $v_{ego.X}$ [m/s]で衝突する。一方、条件 E を満たせば（条件 D を満たさなければ）、自車は歩行者X位置に到達する前に減速を開始し、次の到達判定を行う。

- ・条件 D：空走中に自車は歩行者と衝突する

$$d_{lon} \leq v_{ego.X} \cdot \tau_a \quad (4.23)$$

- ・条件 E：歩行者X位置に到達する前に減速を開始する

$$d_{lon} > v_{ego.X} \cdot \tau_a \quad (4.24)$$

【到達判定】

空走により、自車は $v_{ego.X} \cdot \tau_a$ [m]だけ進むため、空走後の歩行者X位置までの残り距離 d_{rst} [m]は式(4.25)で与えられる。この残り距離に対して減速を行う。一方、減速開始から歩行者X位置に到達するまでの時間（制動時間）を τ_a [s]とすると、 d_{rst} は式(4.26)となる。

$$d_{rst} = d_{lon} - v_{ego.X} \cdot \tau_a \quad (4.25)$$

$$d_{rst} = v_{ego.X} \cdot \tau_b + \frac{1}{2} a_{ego.X} \cdot \tau_b^2 \quad (4.26)$$

ここで、 τ_b について式(4.26)を解く。

・ $D = v_{ego.X}^2 + 2a_{ego.X} \cdot d_{rst} \geq 0$ の時

自車は以下のように τ_b [s]後に速度 $v_{rch2.X}$ [m/s]で歩行者X位置に到達する。

$$\tau_b = \frac{-v_{ego.X} + \sqrt{v_{ego.X}^2 + 2a_{ego.X} \cdot d_{rst}}}{a_{ego.X}} \quad (4.27)$$

$$v_{rch2.X} = v_{ego.X} + a_{ego.X} \cdot \tau_b = \sqrt{v_{ego.X}^2 + 2a_{ego.X} \cdot d_{rst}} \quad (4.28)$$

・ $D = v_{ego.X}^2 + 2a_{ego.X} \cdot d_{rst} < 0$ の時

減速開始から $t = -\frac{v_{ego.X}}{a_{ego.X}}$ [s]後に、歩行者のX位置手前で停止し、歩行者との衝突は

回避される。

【衝突判定 3】

ここでは、減速したにも関わらず、歩行者X位置に到達した場合の歩行者との衝突判定を行う。この時点で歩行者の発見から、 $t_{rch2} = (\text{空走時間}\tau_b + \text{制動時間}\tau_b)$ [s]だけ時間が経っており、その時の歩行者位置は、式(4.29)、式(4.30)で与えられる。

$$X_{ped}^{trch2} = l_{ped} \quad (4.29)$$

$$Y_{ped}^{trch2} = Y_{ped}^0 + v_{ped.Y} \cdot t_{rch2} \quad (4.30)$$

自車が歩行者X位置 (X_{ped}) を通過 (自車先端が X_{ped} に到達～自車後端が X_{ped} に到達) するのに要する間 (τ_2 [s]; 式(4.31)) に, 歩行者の Y位置 (式(4.30)) が次の条件 F を満たせば, 自車は歩行者と $v_{rch2.X}$ [m/s] (式(4.28)) で衝突し, 条件 G を満たせば自車が先に通過し, 条件 H を満たせば歩行者が先に通過する.

$$\tau_2 = \frac{L_{ego}}{v_{rch2.X}} \quad (4.31)$$

・条件 F : 自車と歩行者は衝突する

$$Y_{ego} - \frac{1}{2}W_{ego} \leq Y_{ped}^{trch2} \leq Y_{ego} + \frac{1}{2}W_{ego} - v_{ped.Y} \cdot \tau_2 \quad (4.32)$$

・条件 G : 自車が先に通過 (衝突しない)

$$Y_{ped}^{trch2} > Y_{ego} + \frac{1}{2}W_{ego} - v_{ped.Y} \cdot \tau_2 \quad (4.33)$$

・条件 H : 歩行者が先に通過 (衝突しない)

$$Y_{ped}^{trch2} < Y_{ego} - \frac{1}{2}W_{ego} \quad (4.34)$$

4.3 潜在リスク場面におけるリスクの定量化

前節 (4.2 節) では, 駐車車両通過場면을対象に, 緊急減速を仮定した場合の衝突速度の定式化を行った. 衝突速度が, 自車の状態 (位置, 速度), 歩行者の状態 (位置, 速度), 緊急減速を考慮したリスクを表す. ここでは, 定式化に従ってリスク値の算出を行う. 改めて, 駐車車両通過場面の位置関係を図 4.4 に示す. 今回は, 潜在リスクを算出するにあたり, 変数に表 4.1 の値を与えた.

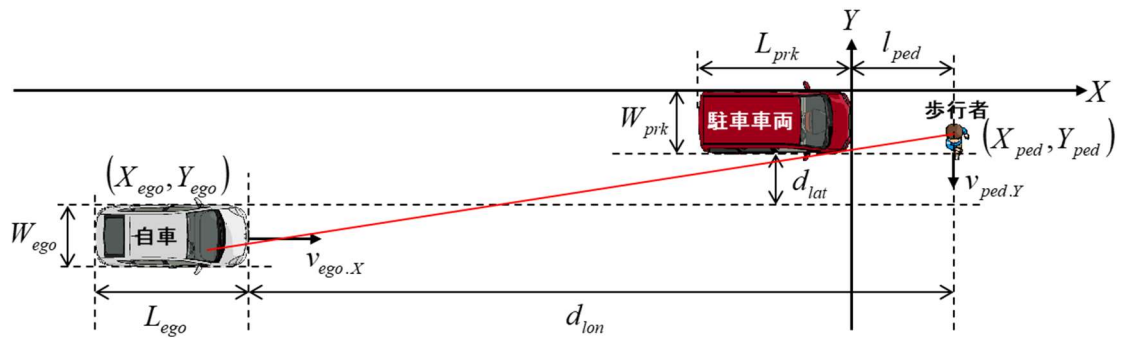


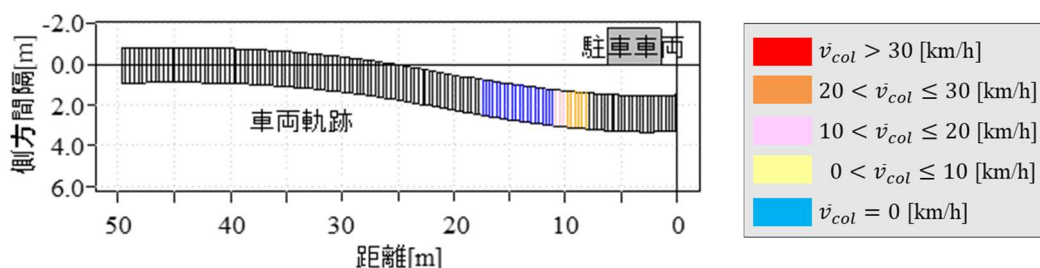
図 4.4 駐車車両通過場面 (図 4.2 の再掲)

表 4.1 変数の値

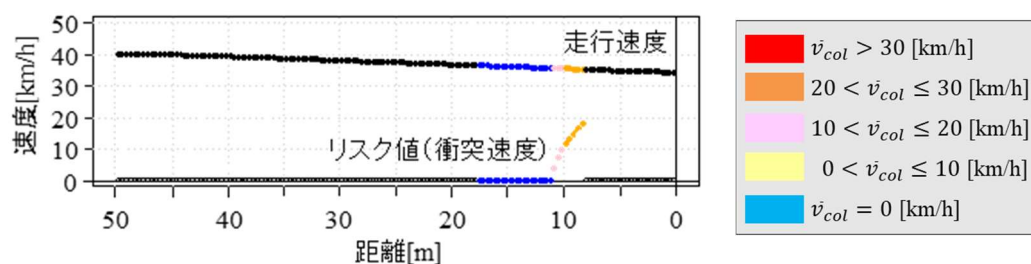
変数	値
自車サイズ	車幅 $W_{ego} = 1.745 [m]$, 車長 $L_{ego} = 4.480 [m]$
自車Y速度	$v_{ego.Y} = 0.0 [m/s]$
駐車車両サイズ	車幅 $W_{prk} = 1.800 [m]$, 車長 $L_{prk} = 4.770 [m]$
歩行者X位置	$X_{ped} = l_{ped} = 1.5 [m]$
歩行者速度	$v_{ped.X} = 0.0 [m/s]$, $v_{ped.Y} = -1.5 [m/s]$
自動緊急ブレーキシステムのシステム遅れ時間	$\tau_a = 0.1 [s]$
自動緊急ブレーキシステムの減速度	$a_{ego.X} = -4.9 [m/s^2]$ (-0.5G)

図 4.5 にリスク値の算出結果の例を示す。図は、第 3 章 (3.6.3 節) の駐車車両通過場面での運転行動分析で取り上げた高齢ドライバー (sub307) のある走行時のリスク値を算出し、可視化したものである。図 4.5 (a)の帯は走行時の車両軌跡を表しており (帯幅は車幅)、帯の色は接近過程でのリスク値 (衝突速度) を表している。青色は、AEB により仮想飛び出し歩行者との衝突が回避できる ($\bar{v}_{col} = 0$) 走行状態を表しており、黄色～赤色は、AEB により減速するものの、衝突が回避できない ($\bar{v}_{col} > 0$) 走行状態を表している。図 4.5 (b)には、走行時の車両速度とリスク値 (衝突速度) を示す (図中の色は図 4.5 (a)と同様)。図 4.5 (a)(b)中の黄色～赤色がついている瞬間は、もしそのタイミ

ングで駐車車両の死角から歩行者が飛び出すと、AEB が作動しても歩行者との衝突を回避できない走行状態である。すなわち、潜在的にリスクを内包した状態(リスク状態)で走行していること表している。



(a) リスク値と車両軌跡



(b) リスク値と走行速度

図 4.5 リスク値の算出例 (sub307 の 1 走行目)

図 4.6 から図 4.9 に、第 3 章 (3.6.3 節) の駐車車両通過場面での運転行動分析で取り上げた 4 名のドライバーの走行時のリスク値を算出した結果を示す (図中に色は図 4.5 の色と同じのリスク値を表す)。この 4 名は、駐車車両通過時の速度と側方間隔を基に分類した 4 つのドライバー群からそれぞれ選ばれたドライバーであった。

- ・ A1 群 : sub307 (高齢ドライバー : 66 歳 ・ 男性)
- ・ A2 群 : sub375 (高齢ドライバー : 67 歳 ・ 男性)
- ・ B1 群 : sub801 (熟練ドライバー : 20 代 ・ 男性)
- ・ B2 群 : sub702 (非高齢ドライバー : 30 代 ・ 男性)

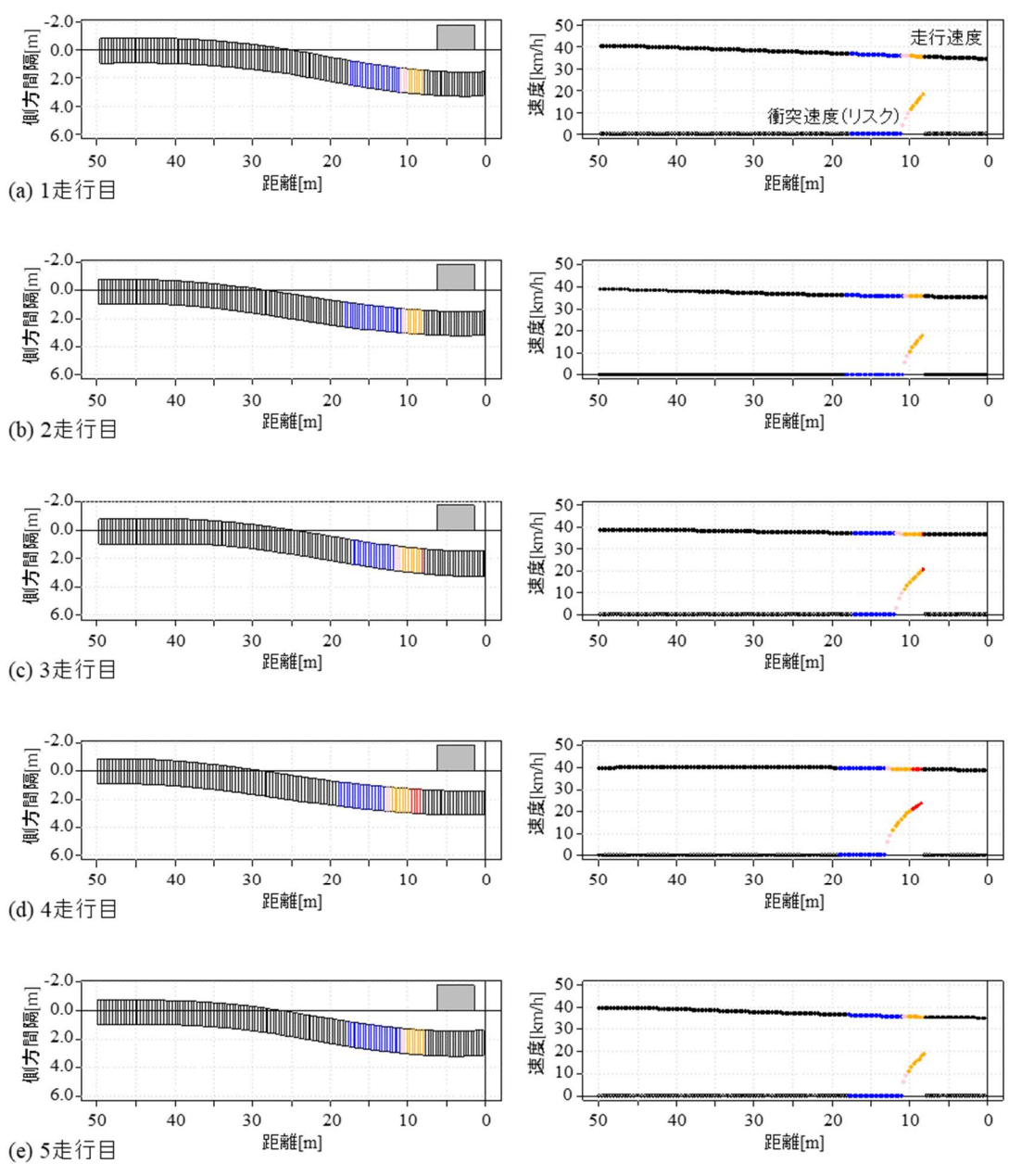


図 4.6 sub307 の走行時のリスク

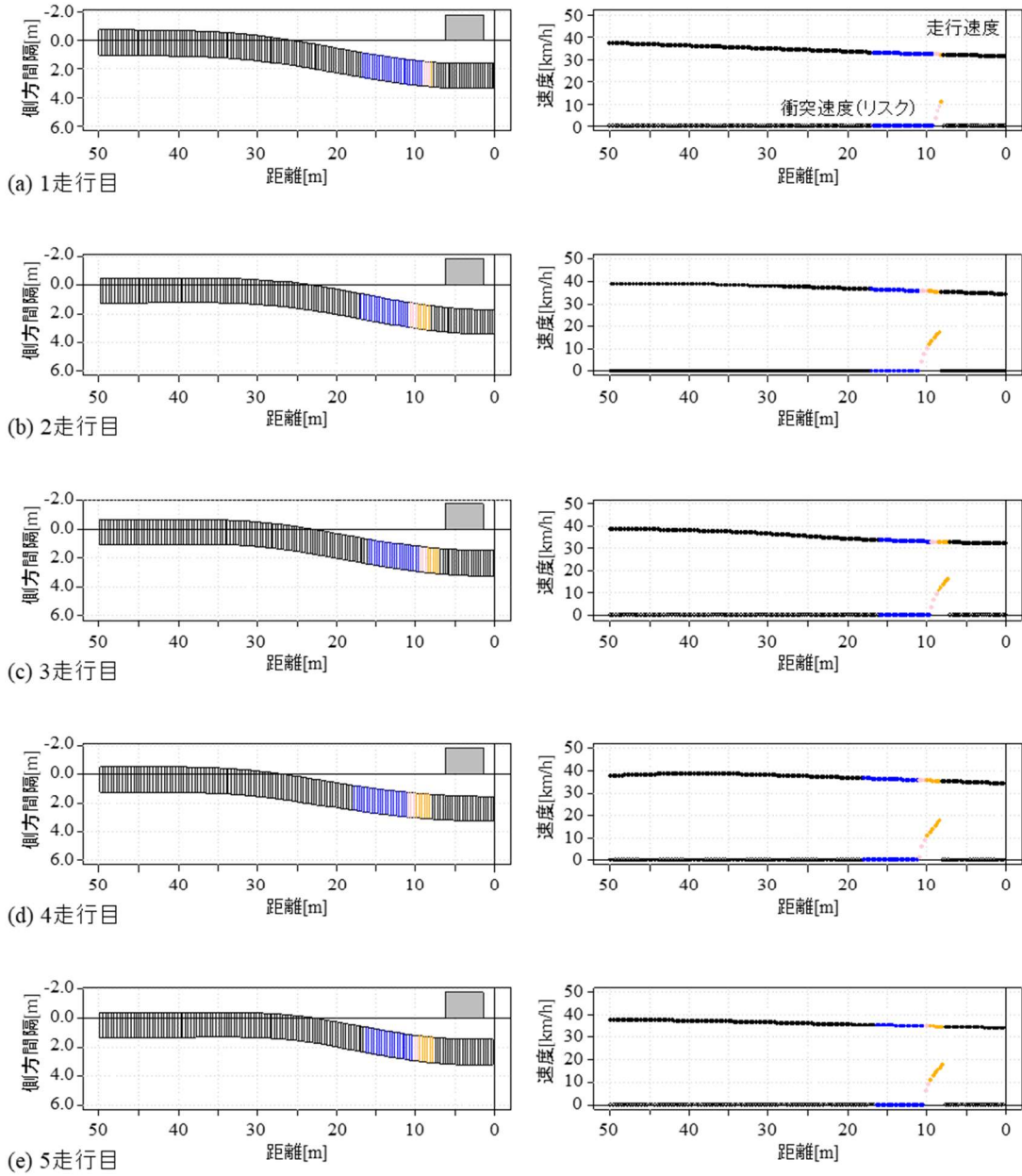


図 4.7 sub375 の走行時のリスク

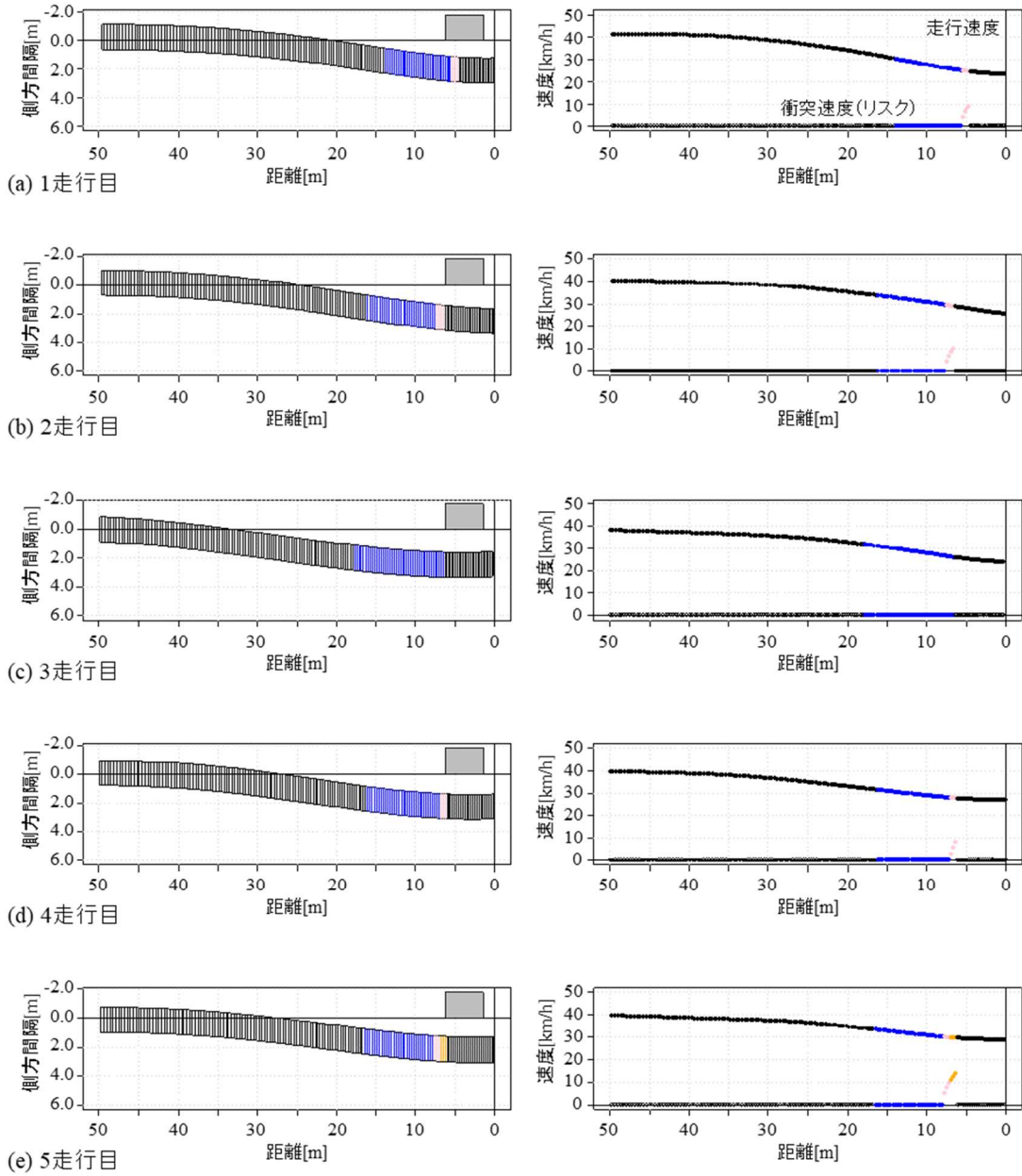


図 4.8 sub801 の走行時のリスク

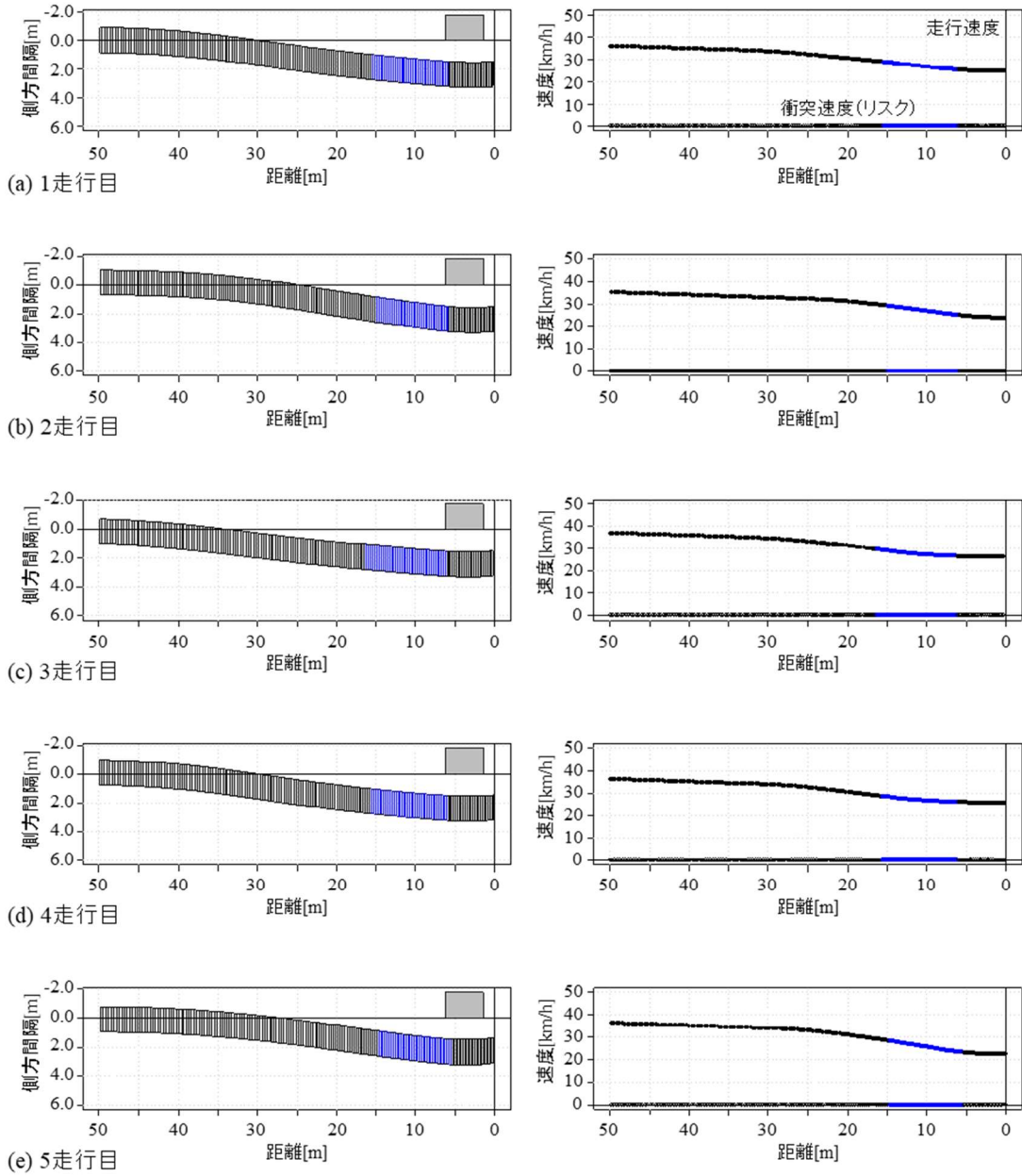


図 4.9 sub702 の走行時のリスク

ドライバ sub307 (図 4.6), ドライバ sub375 (図 4.7) は全ての走行において駐車車両への接近過程においてリスク状態にあることが分かる。ドライバ sub801 (図 4.8) も 5 回中 4 回でリスク状態にあるが, ドライバ sub307, sub375 に比べてその期間 (区間) が短い。一方, ドライバ sub702 (図 4.9) は全ての走行でリスク状態に陥っていない。これは, 駐車車両への接近過程のどの瞬間においても, 仮想歩行者の飛び出しに対して AEB の作動によって衝突を回避できるということを表している。これは, AEB の作動の前提で, 安全運転が行えていると解釈できる。

4.4 まとめ

リスク予測型運転支援システムの実現をめざし, 潜在リスク場面における走行時のリスク指標の提案を行った。潜在リスク場面として駐車車両通過場面を取り上げ, 仮想歩行者の飛び出しに対して, 緊急減速した際の衝突速度をリスク値として定義し, 定式化および定量化を行った。

衝突速度で定義したリスクは, 自車の走行状態 (位置と速度) に対して, 幾何学的情報から算出可能であり, 衝突速度という物理的な意味を有している。これは, 4.1.1 節で挙げたリスク定量化の要件を全て満たしており, 従来手法の問題点を解消することができた。また, 提案したリスク指標により, 実走行データのリスクの可視化を行い, 駐車車両への接近時のどのタイミングでどの程度のリスクが生じているかを示すことができた。

第5章

リスクフィールドによる走行軌道生成の基礎検討

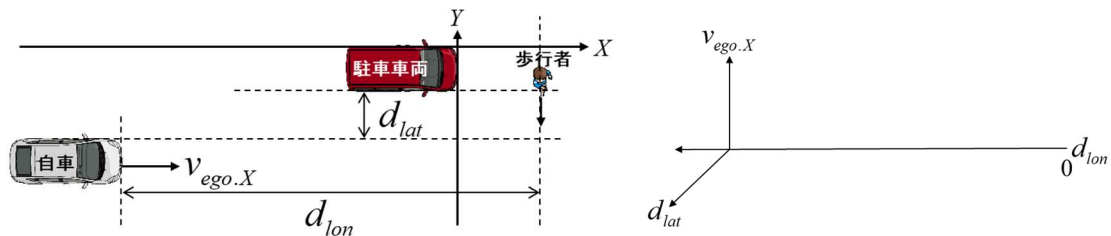
5.1 はじめに

第4章では、死角からの仮想飛び出し歩行者との衝突速度によって潜在リスク場面における走行状態のリスクの程度を定量化する指標を提案した。本章では、この指標を走行状態空間全体に適用した評価関数（リスクフィールド）として用い、潜在リスク場面における安全な走行軌道生成を通じて、提案したリスク指標の妥当性を検討する。

5.2 リスクフィールド

5.2.1 走行状態空間

図 5.1 (a)に駐車車両通過場面の模式図を記す。4.2.4 節で求めたように、自転車と駐車車両のサイズ、仮想歩行者の状態（位置、速度）、AEBの作動遅れ時間と減速度が与えられれば、この場面における仮想飛び出し歩行者との衝突判定および衝突速度は、仮想歩行者までの前方距離 d_{lon} [m]、駐車車両との側方間隔 d_{lat} [m]、自転車速度 $v_{ego.X}$ （ここではX方向の速度のみを考える）の3つの状態量で決まる。すなわち、この場面における走行状態は、図 5.1 (b)で示す3次元空間内の1点で表され、その点に対応してリスク値が定まる。なお、図 5.1 (b)の d_{lon} は便宜上左側を正とする。



(a) 駐車車両側方通過場面

(b) 走行状態空間（3次元空間）

図 5.1 潜在リスク場面における走行状態空間

5.2.2 リスクフィールド

図 5.1 (b)で示される 3 次元空間は，駐車車両側方通過時において自車が取り得る走行状態を表す空間である．本研究では，この空間内に渡って提案したリスク指標値を求めたものをリスクフィールドと名付ける．図 5.2 に，空間内の離散点でリスク指標値を算出し，可視化したリスクフィールドを示す．リスクフィールドの水色の領域は，AEB の作動によって仮想飛び出し歩行者との衝突を回避できる走行状態の領域であり，黄色～赤色の領域は，AEB が作動しても仮想飛び出し歩行者との衝突する走行状態の領域である．色が赤色に近いほど衝突速度（リスク）が高い．

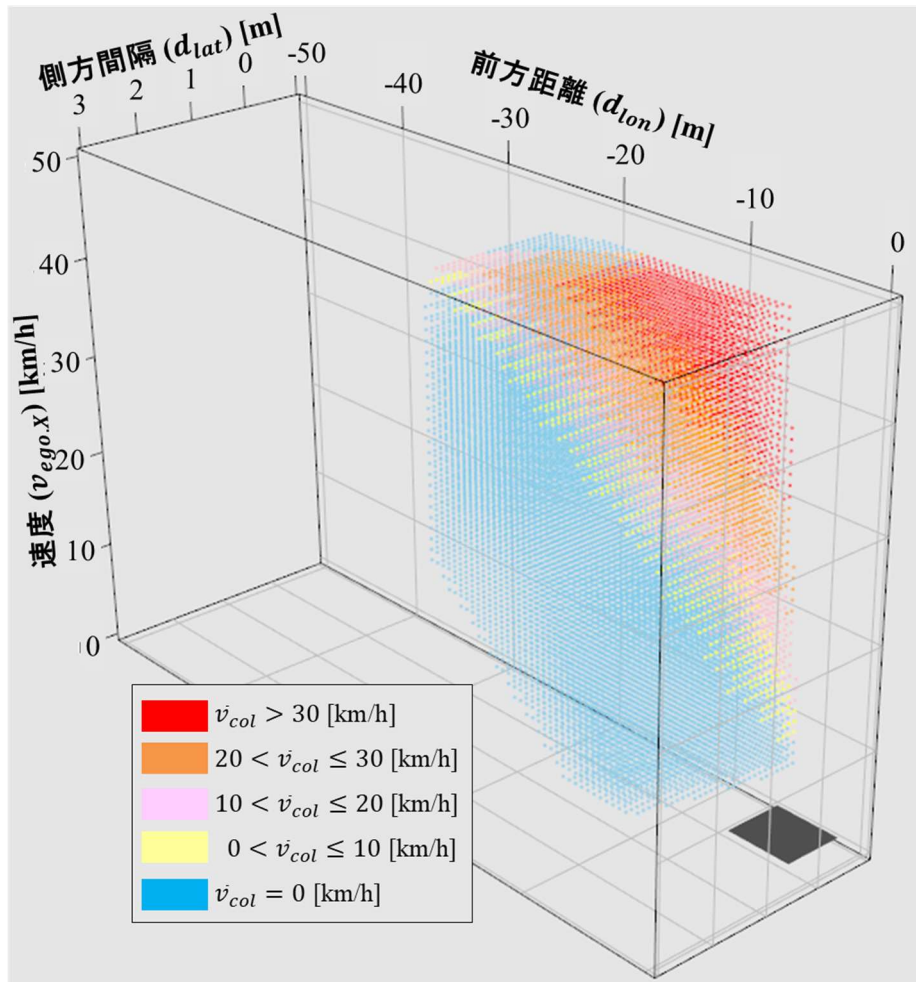


図 5.2 駐車車両通過時のリスクフィールド

図 5.3 に、リスクフィールド（図 5.2）に第 3 章（3.4 節）で計測した駐車車両側方通過時の実走行データ 4 例を重畳したものを示す。走行軌道は、図 5.3 の空間内で車両状態系列として表される。ドライバは位置と速度を調整しながら駐車車両を通過している様子うかがえる。

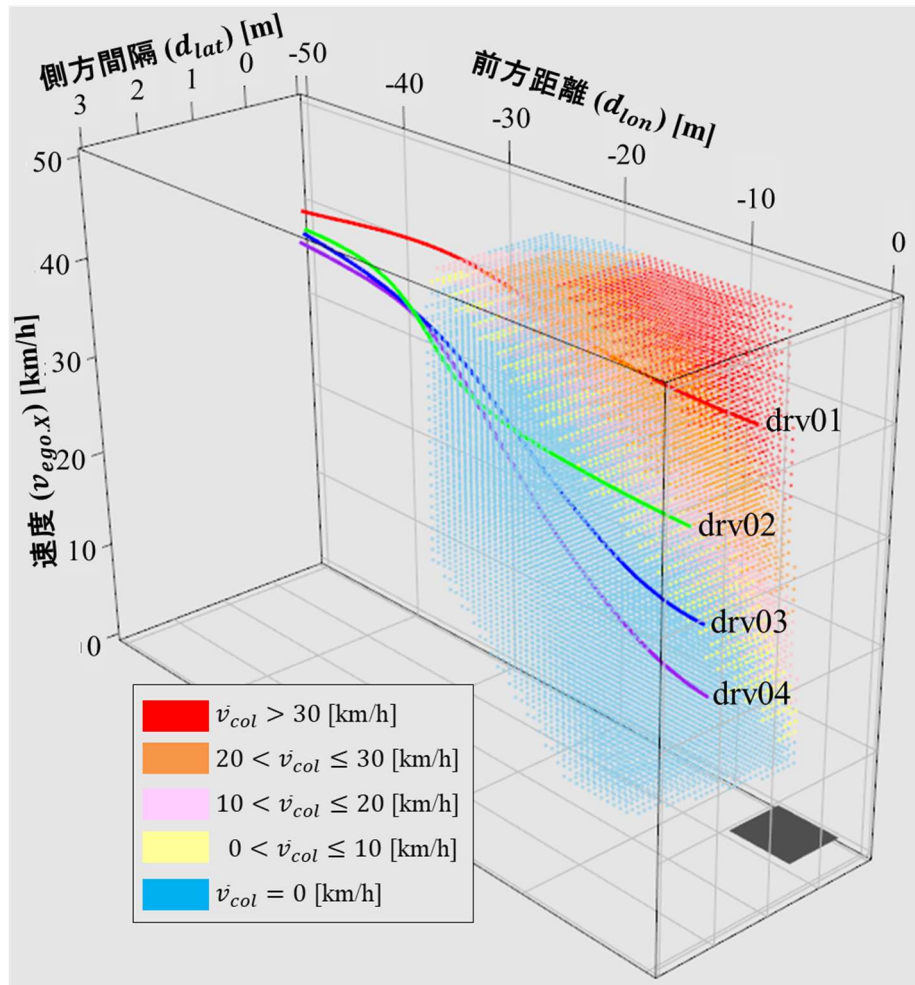


図 5.3 リスクフィールド中の走行軌道

赤色線で示した **drv01** の走行軌道を見ると、大きく減速することなく、かつ、駐車車両との側方間隔を十分に取らずに走行している様子が分かる。そのため、駐車車両の手前では、大きなリスク状態で走行している。一方、走行軌跡 **drv02**, **drv03**, **drv04** は、常に水色領域（衝突速度が 0 [km/h] の領域）にあり、これら 3 人のドライバはリスク状

態に陥らないで走行していることが分かる。ただし、drv02, drv03, drv04 では、リスクの回避の仕方（安全余裕の取り方）が異なっている。drv02 は走行速度が高いものの、駐車車両との側方間隔を大きくとることでリスクを回避している。drv04 は十分に走行速度を下げることでリスクを回避している。drv03 は drv02 と drv04 の中間的な運転を行っている。

これらの実走行データの走行状態系列を見ると、潜在リスク場面における安全運転の仕方は唯一の形態ではなく、ある幅を持った運転であることが分かる。リスクフィールドを安全性指標としてリスク予測型運転支援に適用できれば、図 5.3 の drv02, drv03, drv04 に見られるように、安全である限り（衝突速度が 0[km/h] という意味で）、ある程度の幅の走行を許容した柔軟な運転支援の実現につながる。この場合、熟練ドライバなどの唯一の規範軌道に基づく運転支援アプローチに比べ、受容性が格段に向上することが期待できる。

5.3 軌道生成の定式化

5.3.1 規範軌道生成の定式化（一般式）

5.2.1 節で述べたが、リスクフィールドは、自車と駐車車両のサイズ、仮想歩行者の状態（位置、速度）、AEB のシステムパラメータが与えられれば、自車の走行状態（位置、速度）によって決まる。そこで、リスクフィールドを次のようなリスク関数として表す。

リスク関数： $risk(x, y, \dot{x}, \dot{y})$

(x, y) は自車位置を表し、 (\dot{x}, \dot{y}) は自車速度を表す。なお、図 5.2 のリスクフィールドの算出の際には、自車の y 速度成分を 0 としたが、ここでは一般性を持たせるため、自車の y 速度成分も含めて考える。また、図 5.2 では、自車位置を歩行者までの前方間隔、駐車車両との側方間隔で表したが、自車位置 (x, y) の表現でも本質的には変わらない。

このようなリスク関数を考えた時、潜在リスク場面における安全な走行軌道生成は、リスク関数値の総和を最小化する走行状態系列を求める問題として扱うことができる。

また、走行軌道は安全性だけでなく、車両挙動の滑らかさも同時に満たすことが望ましい。そこで、本研究では、挙動の滑らかさの指標としてジャーク(\ddot{x}, \ddot{y})を用い、走行軌道生成を、式(5.1)の評価関数を最小化する位置系列($x_{0:N}, y_{0:N}$)と速度系列($\dot{x}_{0:N}, \dot{y}_{0:N}$)を求める最適化問題として定式化する (式(5.2))。

$$J(x_{0:N}, y_{0:N}, \dot{x}_{0:N}, \dot{y}_{0:N}) = \frac{1}{N} \sum_{x_{0:N}, y_{0:N}, \dot{x}_{0:N}, \dot{y}_{0:N}} \{q_1 \cdot risk(x, y, \dot{x}, \dot{y}) + q_2 \cdot \ddot{x}^2 + q_2 \cdot \ddot{y}^2\} \quad (5.1)$$

$$\hat{x}_{0:N}, \hat{y}_{0:N}, \hat{\dot{x}}_{0:N}, \hat{\dot{y}}_{0:N} = \underset{x_{0:N}, y_{0:N}, \dot{x}_{0:N}, \dot{y}_{0:N}}{\operatorname{argmin}} J(x_{0:N}, y_{0:N}, \dot{x}_{0:N}, \dot{y}_{0:N}) \quad (5.2)$$

x_i は、自車の X 位置系列の i 番目の値を表しており、 $x_{0:N}$ は0番目から N 番目までの自車の X 位置系列を表す。

5.3.2 加速度モデルを用いた定式化

前節 (5.3.1 節) では、駐車車両通過時のリスク関数 (リスクフィールド) を用いた走行軌道生成のための一般式 (式(5.1), 式(5.2)) を定めた。しかし、図 5.2 に示すリスク関数形状では、必ずしも所望の走行軌道が得られるとは限らない。なぜならば、図 5.2 の水色領域では常にリスク関数の値が 0 であるため、この領域ではジャーク最小軌道 (式(5.1), 式(5.2)参照) となり、駐車車両を回避し、再度、元の横位置に戻ってくるような軌道を作り出すことができない。

この問題を解消するためには、リスク関数形状を適切なものへと改良するか、車両軌道をモデル化することで軌道に制約を設けるかの2通りの方法がある。本研究では、後者の方法で走行軌道生成を試みる。駐車車両通過場面における熟練ドライバーの加減速 (縦方向) および操舵 (横方向) の加速度パターンが正弦波様となっていることから (図 5.4 参照)、本研究では、加減速、操舵のモデルとして正弦波加速度モデルを適用する。

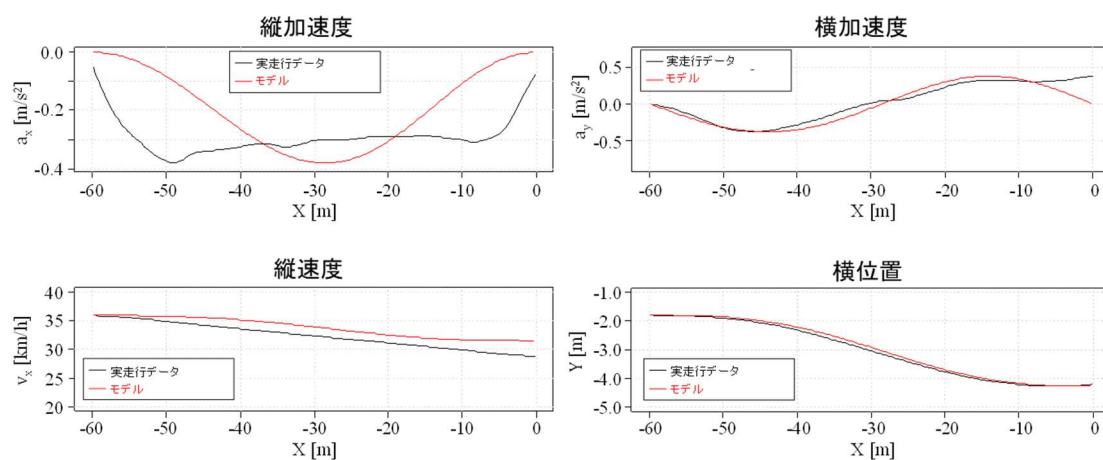


図 5.4 駐車車両側方通過時の熟練ドライバーの実走行データと加速度モデル

加減速加速度モデル（以下，縦加速度モデルと記す），操舵加速度モデル（以下，横加速度モデルと記す）をそれぞれ式(5.3)，式(5.4)とする．また，式(5.3)，式(5.4)の形状を，それぞれ，図 5.5，図 5.6 に示す ($A_x = 0.2$ ， $A_y = 0.2$ ， $T = 6.0$ とした場合)．

$$a_x(t) = A_x(\cos \omega t - 1) \quad (5.3)$$

$$a_y(t) = -A_y \sin \omega t \quad (5.4)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (T \text{は操作周期})$$

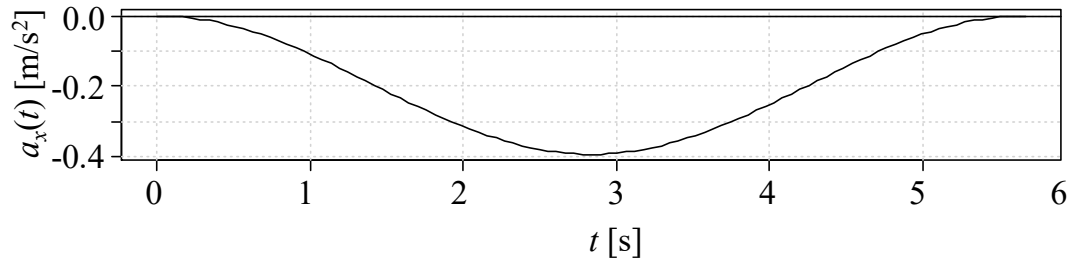


図 5.5 横加速度モデル (式(5.3)参照)

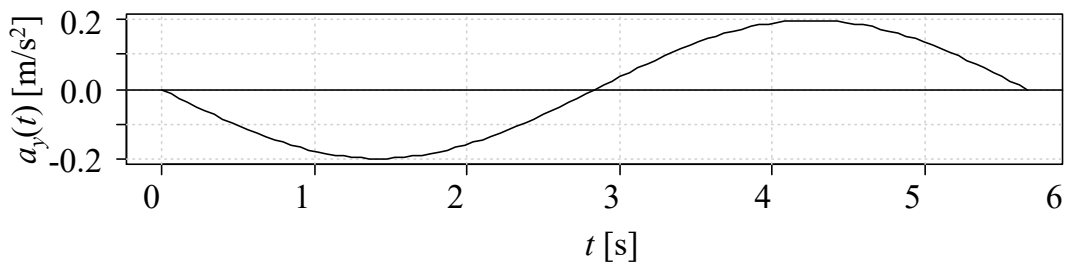


図 5.6 縦加速度モデル (式(5.4)参照)

上記のように縦、横の加速度を正弦波モデルで定めた場合、それぞれのジャーク、速度、位置は表 5.1 のように求まる（表 5.1 に縦加速度モデルおよび縦加速度モデルも再掲する）。また、適当な初期値を与えた場合のそれぞれのモデル形状を図 5.7 にまとめて示す。図 5.7 中の横軸は時間軸であり、操作開始から 6.0[s]で駐車車両を通過することを想定している。図 5.7 の縦速度、横位置は車両の速度パターン、軌跡（位置パターン）を示しており（図 5.7 中点線囲み）、縦、横の加速度をそれぞれ式(5.3)、式(5.4)で定めることで、駐車車両通過時の減速行動および回避行動を模擬できていることが分かる。

表 5.1 縦, 横のジャークモデル, 加速度モデル, 速度モデル, 位置モデル
モデル 式

縦ジャークモデル	$j_x(t) = \frac{d}{dt} a_x(t) = -A_x \omega \sin \omega t$	(5.5)
横ジャークモデル	$j_y(t) = \frac{d}{dt} a_y(t) = -A_y \omega \cos \omega t$	(5.6)
縦加速度モデル	$a_x(t) = A_x(\cos \omega t - 1)$	(5.3)
横加速度モデル	$a_y(t) = -A_y \sin \omega t$	(5.4)
縦速度モデル	$v_x(t) = v_x(0) + \int_0^t a_x(\tau) d\tau = v_x(0) + A_x \left(\frac{1}{\omega} \sin \omega t - t \right)$	(5.7)
横速度モデル	$v_y(t) = v_y(0) + \int_0^t a_y(\tau) d\tau = v_y(0) + \frac{A_y}{\omega} (\cos \omega t - 1)$	(5.8)
縦位置モデル	$p_x(t) = p_x(0) + \int_0^t v_x(\tau) d\tau$ $= p_x(0) + v_x(0)t + A_x \left\{ \frac{1}{\omega^2} (1 - \cos \omega t) - \frac{1}{2} t^2 \right\}$	(5.9)
横位置モデル	$p_y(t) = p_y(0) + \int_0^t v_y(\tau) d\tau$ $= p_y(0) + v_y(0)t + \frac{A_y}{\omega} \left(\frac{1}{\omega} \sin \omega t - t \right)$	(5.10)

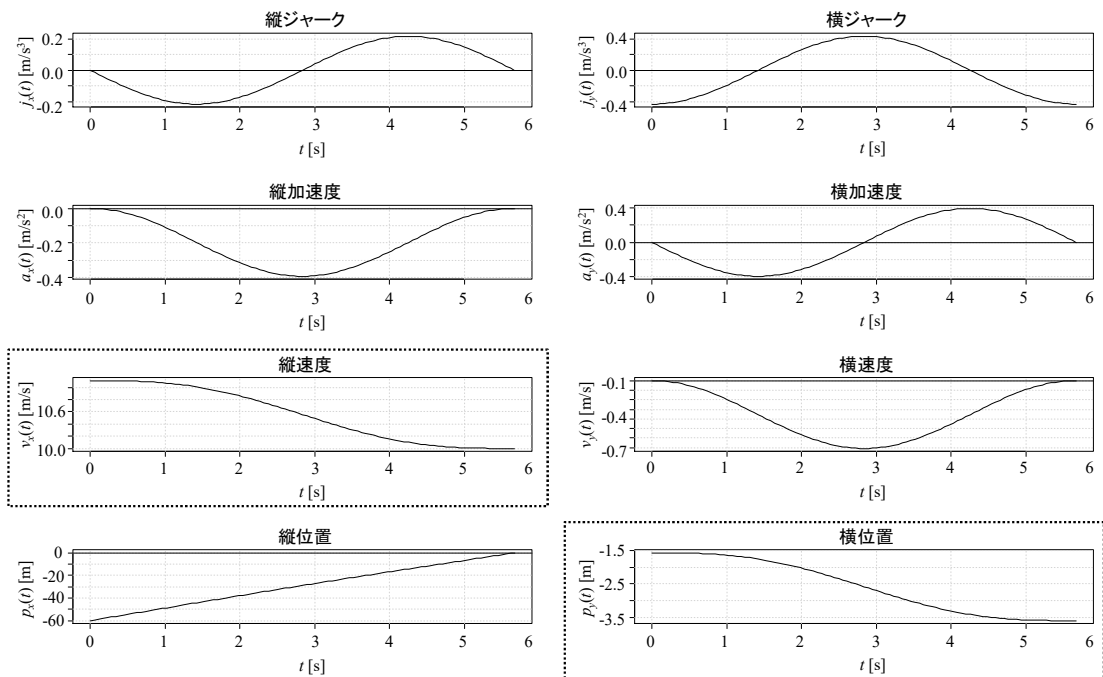


図 5.7 縦・横加速度モデルに基づくジャーク・速度・位置モデルの形状

これらの式を用いて、式(5.1), 式(5.2)で定めた走行軌道を求める問題を考える. 表 5.1を見ると, ジャークモデル, 速度モデル, 位置モデルともに, 加速度モデルの振幅(A_x, A_y)と操作周期 T でモデル化されていることが分かる (式中は ω で表されている). 実は, 操作周期 T も操作開始距離 (減速および操舵の開始時点での駐車車両との距離 ($dist[m]$))を導入することで, 次のように縦加速度モデルの振幅 A_x で表すことができる.

駐車車両から $dist[m]$ 手前で減速を開始し (ブレーキを踏み), 駐車車両通過時に最大減速を得る (ブレーキを離す) と考えると, 式(5.9)により式(5.11)の関係が得られる. これを解くと, 操作周期 T は縦加速度モデルの振幅 A_x と操作開始距離 $dist[m]$ で表すことができる.

$$v_x(0)T + A_x \left\{ \frac{1}{\omega^2} (1 - \cos \omega T) - \frac{1}{2} T^2 \right\} = 0 \quad (5.11)$$

$$A_x T^2 - 2v_x(0)T + 2dist = 0 \quad (5.12)$$

$D = v_x(0)^2 - 2A_x dist \geq 0$ の時

$$T = \frac{v_x(0) - \sqrt{v_x(0)^2 - 2A_x dist}}{A_x} \quad (5.13)$$

以上をまとめると、操作開始距離 $dist[m]$ を与えると、式(5.1)の評価関数は、式(5.14)に示すように加速度モデルの振幅 (A_x, A_y) の関数となる。その結果、式(5.2)の最適化問題は最適な振幅値 (\hat{A}_x, \hat{A}_y) を探索する問題へと帰結される（式(5.15)）。式(5.14)中の $p_x(\cdot), p_y(\cdot), v_x(\cdot), v_y(\cdot), j_x(\cdot), j_y(\cdot)$ は、表 5.1 に示したものであり、全て、加速度モデルの振幅 (A_x, A_y) のみをパラメータとして持つ。そのため、式(5.14)は加速度モデルの振幅 (A_x, A_y) の関数となる。

$$J(A_x, A_y) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N \left\{ q_1 \cdot risk \left(p_x(\Delta t \cdot k), p_y(\Delta t \cdot k), v_x(\Delta t \cdot k), v_y(\Delta t \cdot k) \right) \right. \\ \left. + q_2 \cdot j_x(\Delta t \cdot k)^2 + q_3 \cdot j_y(\Delta t \cdot k)^2 \right\} \quad (5.14)$$

ただし、 $N = \frac{T}{\Delta t}$ (T は操作周期)

$$\hat{A}_x, \hat{A}_y = \underset{A_x, A_y}{\operatorname{argmin}} J(A_x, A_y) \quad (5.15)$$

式(5.15)により求められる最適な振幅値 (\hat{A}_x, \hat{A}_y) を用いて、式(5.7)から速度パターン（式(5.16), 式(5.17)）、式(5.10)から走行軌跡（式(5.18), 式(5.19)）が求まる。

$$\hat{v}_x(t) = v_x(0) + \hat{A}_x \left(\frac{1}{\omega} \sin \omega t - t \right) \quad (5.16)$$

$$\hat{v}_y(t) = v_y(0) + \frac{\hat{A}_x}{\omega} (\cos \omega t - 1) \quad (5.17)$$

$$\hat{p}_x(t) = p_x(0) + v_x(0)t + \hat{A}_x \left\{ \frac{1}{\omega^2} (1 - \cos \omega t) - \frac{1}{2} t^2 \right\} \quad (5.18)$$

$$\hat{p}_y(t) = p_y(0) + v_y(0)t + \frac{\hat{A}_y}{\omega} \left(\frac{1}{\omega} \sin \omega t - t \right) \quad (5.19)$$

5.4 正弦波加速度モデルを用いた走行軌道生成の一例

前節 (5.3.2 節) で定式化した正弦波加速度モデル (式(5.14)~式(5.19)) による走行軌道生成の一例を示す. ただし, 本研究では, 式(5.14), 式(5.15)の最適化問題を直接解くのではなく, 縦加速度振幅 A_x , 横加速度振幅 A_y をある範囲で振り, その中で式(5.14)の値が最も小さくなる組合せを選択する手法をとる.

加速度振幅が与えられた時に, 式(5.7), 式(5.8)の速度, 式(5.9), 式(5.10)の位置を算出するには, 車両の初期速度, 初期位置が必要である. さらに, 操作周期 T (式(5.13)) を定めるために, 操作開始距離 $dist[m]$ が必要である. そこで, ここでは, 車両初期状態を図 5.8 のように与える. 自車は駐車車両の手前 60[m]で操作 (減速, 操舵) を開始することとし ($dist = 60$), この時点時刻を時刻 $t = 0$ とする. また, この時の車両の初期位置 ($p_x(0), p_y(0)$)を(-60, -1.575), 初期速度 ($v_x(0), v_y(0)$)を(11.11, 0)とする. すなわち, 時速 40[km/h]でレーン中心を走行している自車が, 駐車車両手前 60[m]から回避のための操作を開始するイメージである.

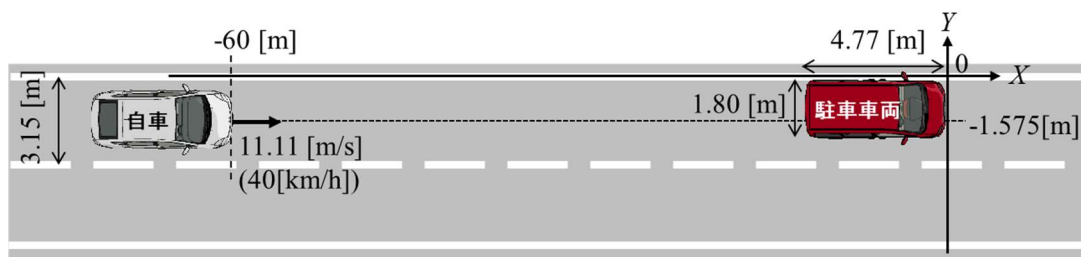


図 5.8 初期走行状態

規範軌跡を求めるために用いる加速度振幅の範囲は、以下の通りである。縦加速度振幅の範囲は、駐車車両通過までに 5~15[km/h]の減速する範囲とした。また、横加速度振幅の範囲は、駐車車両通過時までに 1.5~3.0[m]の横移動する範囲とした。

- ・ 縦加速度振幅 A_x : 0.241~0.627 [m/s²] (0.01 [m/s²] ステップ)
- ・ 横加速度振幅 A_y : 0.284~0.427 [m/s²] (0.005 [m/s²] ステップ)

以上により、軌道生成の評価関数である式(5.14)の計算に必要なパラメータは、重み $(q_1, q_2, q_3,)$ を除き揃った。今回、重みは事前の検討により $(q_1, q_2, q_3,) = (100, 0.8, 1.0)$ とした。図 5.8 の初期状態の設定で縦加速度振幅 A_x 、横加速度振幅 A_y を上記の範囲で振りながら、式(5.14)の値が最小となる (\hat{A}_x, \hat{A}_y) の組合せを求め、式(5.16)~(5.19)を適用することで、安全かつ滑らかな走行軌道を生成することができる。

図 5.9, 図 5.10 に、それぞれ、生成した速度パターン、軌跡 (位置パターン) の結果を示す。図 5.9, 図 5.10 中の影部分は上記の加速度振幅の範囲で生成可能な速度領域、および、生成可能な軌跡領域である。生成可能な速度領域、軌跡領域の中で、式(5.14)の値が最も小さかったものが生成速度パターン、生成軌跡である。

また、図 5.9, 図 5.10 には、第 3 章 (3.6 節) の駐車車両通過場面での運転行動分析において、不安全傾向の A1 群 (sub307), A2 群 (sub375), 安全傾向の B1 群 (熟練ドライバー) のドライバーの走行データ例も示す。図 5.9 の生成速度パターンには正弦波様のパターンが見られるものの、熟練ドライバーの走行速度パターンに近いパターンと

なっている（誤差は最大で2 [km/h]程度）。また、図 5.10 の生成軌跡は、熟練ドライバーの走行軌跡に似ている（図に示した3例のドライバーは、駐車車両と同程度の側方間隔をとる傾向のドライバーであるため、それぞれ類似した軌跡となっている）。すなわち、生成された走行軌道（速度パターンおよび軌跡）は、安全運転に準じた軌道と考えられる。したがって、本研究で提案したリスクフィールド（図 5.2 参照）を用いた走行軌道生成手法の妥当性を示す結果と考えられる。

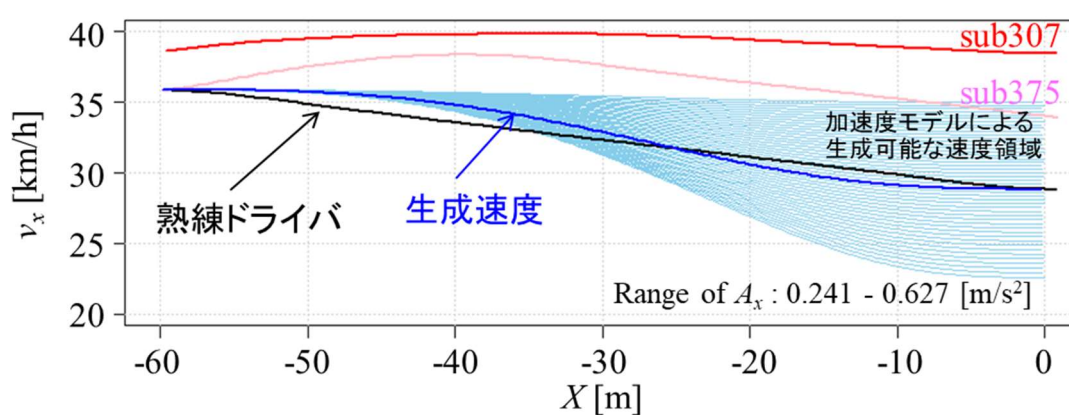


図 5.9 生成した速度パターン結果

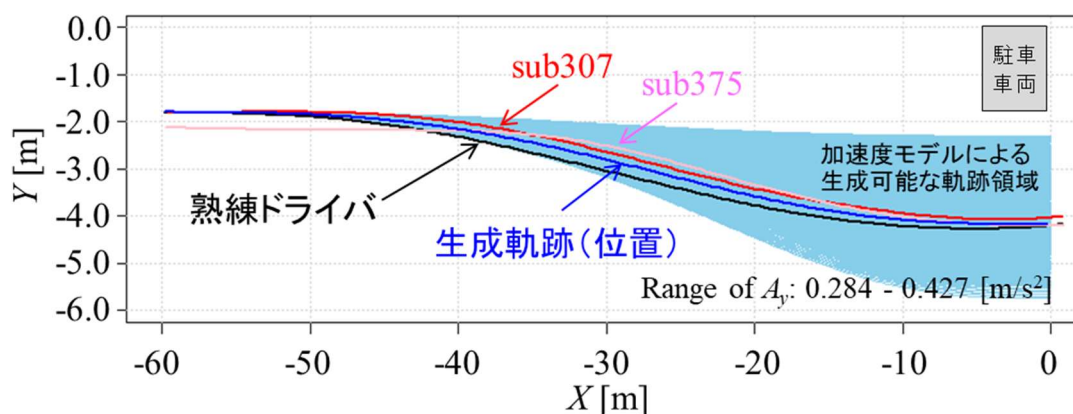


図 5.10 生成した軌跡結果

5.5 まとめ

潜在リスク場面における安全な走行軌道生成を通じて、前章（第4章）提案したリスク指標の妥当性の検証を行った。適用場面として前章と同様、駐車車両通過場面を扱った。まず、軌道生成のための一般的な定式化を行い、次に、駐車車両通過場面に特化した減速、操舵の加速度モデルを用いた定式化を行い、軌道生成の結果を示した。生成された軌道は、駐車車両通過場面で観察された安全な走行軌道に類似しており、提案したリスク指標の妥当性を示すことができた。

ただし、今回検討した走行軌道生成は、場面限定な操作加速度モデルを仮定したものであり、より一般的なモデルによる走行軌道生成での検証が必要である。また、リスク指標の運転支援システムへの適用を考えた場合、式(5.15)を解くにあたり総当たり手法をとったが、これに関してもより計算コストの低い手法の開発が必要である。さらに、今後、式(5.14)の重みについても感度分析や決定法の検討が必要である。

第6章

リスクフィールドを用いたリスク推定システム

6.1 はじめに

本章では、第3章、第4章で提案した潜在リスク場面でのリスク指標の定量化手法およびリスクフィールドのシステムへの応用検討を行う。車載システムを構築して実車の検討を行うのが望ましいが、本研究では、走行データをオフラインで用いるシステムを構築する。ただし、用いるデータはFOT (Field Operational Test) で収集した走行データであり、次の3つの点でより実際的な検証となっている。

- ① 歩行者、自転車、周辺車両が存在する実際的な走行環境
- ② 一般ドライバーによる現実的な走行データ
- ③ 車載カメラおよびLiDAR情報を用いたセンシング結果の利用

また、本章では、潜在リスク場面として歩行者側方通過場面を扱う。これは、ガードレールや縁石などで物理的に歩車分離されていない生活道路でよく遭遇する交通状況であり、歩行者の突然の進路変更(飛び出しを含む)が生じうる潜在リスク場面である。そこで、本章では、これまで死角からの歩行者飛び出しを想定していたリスク指標を歩行者側方通過場面に適用できるよう拡張し、リスク推定システムの構築を行う。また、それを用いた歩行者側方通過場面でのリスク分析を行う。

6.2 FOTによる走行データの収集

6.2.1 車両および装置

図 6.1 に実験車両およびセンシング装置の様子を示す。実験車両にはトヨタ社製アクアを用いた。走行環境の情報をセンシング用としてカメラ (PointGrey 社製 グラスホッパーカメラ)、LiDAR (Ibeo 社製 LUX) を車両前方に搭載した。また、これらのセンシング情報と同期して、CAN 情報、IMU (Inertial Measurement Unit)、GPS (Global Positioning

System) 装置から車両情報, 車両挙動, 走行位置を取得できる.



図 6.1 走行データ収集に用いた車両とセンシング装置

6.2.2 走行コース

図 6.3 に走行コースを示す. 走行コースは, 東京農工大学を反時計回りに周回する約 2.5 km のコースである. 図中の区間 A と区間 B は, 物理的な歩車分離がなされていない双方通行の 1 車線道路であり, 車道幅はそれぞれ 3.3m (左右の歩道を含めると 6.1m), 4.2m (左右の歩道を含めると 6.1m) である. 両区間ともに歩行者の通行量が多く, 歩行者側方通過場面に遭遇しやすい区間である. 両区間の道路環境の様子を図 6.2 に示す.

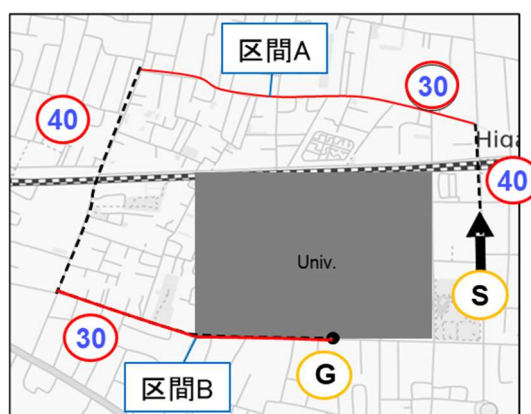


図 6.3 走行コース

スタート地点 (S) からゴール地点 (G) までの反時計回りコース.



(a) 区間 A の道路環境



(b) 区間 B の道路環境

図 6.4 走行コースの道路環境の様子

6.2.3 ドライバ

走行データの収集には 129 名のドライバーが参加した。全てのドライバーに事前に走行内容を説明し、書面にてインフォームドコンセントを得た。本章では、そのうち表 6.1 に示すドライバーの走行データを用いる。

表 6.1 参加ドライバー

	参加人数	平均 (標準偏差)
若齢ドライバー	男性：10 名，女性：0 名	平均：23.8 歳 (標準偏差：2.52 歳)
高齢ドライバー	男性：8 名，女性：1 名	平均：71.1 歳 (標準偏差：3.84 歳)

6.3 リスク指標の拡張

第 4 章 (4.2 節) で提案したリスク指標は、潜在リスク場面として駐車車両通過場面を対象として、駐車車両の死角からの仮想飛び出し歩行者との衝突速度によってリスクを定量化していた。本章ではこれを図 6.5 に示す歩行者側方通過場面に拡張する。歩行者側方通過場面では、歩行者の突然の進路変更 (車道への飛び出し) が潜在リスクとして考えられる。このリスクは、4.2 節で提案した手法の中で仮想歩行者を実在歩行者に置き換えることで同様に扱うことができる。その際、歩行者の飛び出し位置は、歩行者

を検知した位置（自車からの相対位置）とし，歩行者が方向転換するための時間として 0.2[s]の遅延を想定する．その後は，図 4.3 のフローチャートと同様に衝突判定と衝突速度の算出を行う．ただし，以降の具体的なリスク値の算出では，歩行者検知時間，ECU 間通信時間を含む AEB が作動するまでのシステムの遅れ時間 (τ_a) を 0.7[s]，AEB の減速度 ($a_{ego,X}$) を -0.7[G]とする．これらのパラメータによって求めた歩行者側方通過場面におけるリスクフィールドを図 6.6 に示す．

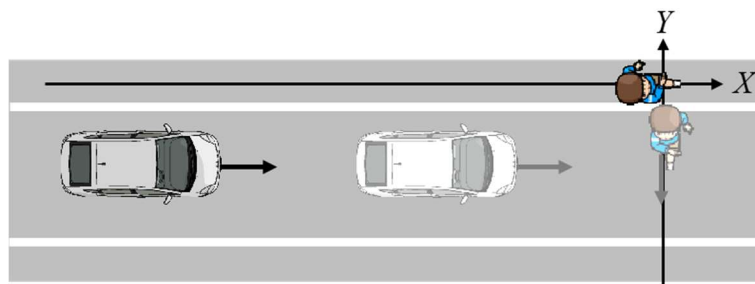


図 6.5 歩行者側方通過場面

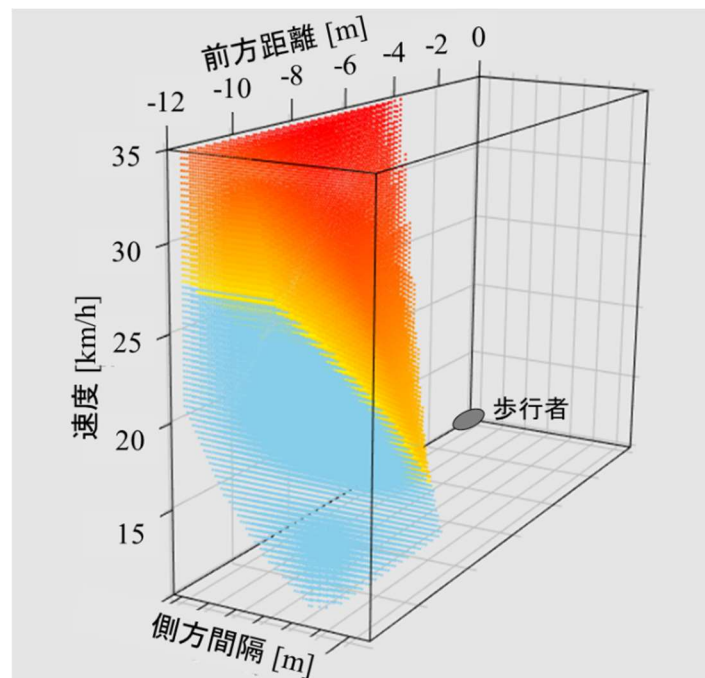


図 6.6 歩行者側方通過場面におけるリスクフィールド

6.4 歩行者飛び出しリスク推定システム

6.2 節で収集した走行データを用いて歩行者の飛び出しリスクを推定するシステムを構築する。図 6.7 にリスク推定システムの処理の流れを示す。まず、走行データの前方のカメラ映像から歩行者を検知する。歩行者の検知には YOLO v3 [59]を用いる。YOLO は画像中の任意の対象物の矩形領域を検出する Deep Neural Network の手法の 1 つである。2 次元画像上の歩行者検知結果に対してカルマンフィルタおよび移動平均フィルタによってトラッキング処理を行い、車両からの距離の算出（3 次元空間への変換）を行う。距離算出は、事前に求めたリファレンスカメラの画像位置と実空間と対応付けに基づき歩行者足元位置から簡易的に求める。ここまでの処理結果を図 6.8 に示す。図 6.8 の道路上の緑色の横線が画像位置と実空間での距離の対応づけの結果である。

次に、走行データの LiDAR 点群情報を用いてカメラ映像から算出した歩行者距離を補正する。この処理により歩行者検知結果に対して LiDAR 精度での距離情報を与えることができる。LiDAR 点群情報とカメラ映像からの歩行者検知結果のマッチング処理の様子を図 6.9 に示す。図中の歩行者検知枠の内の赤点が、歩行者検知結果とマッチングした LiDAR 点群である。

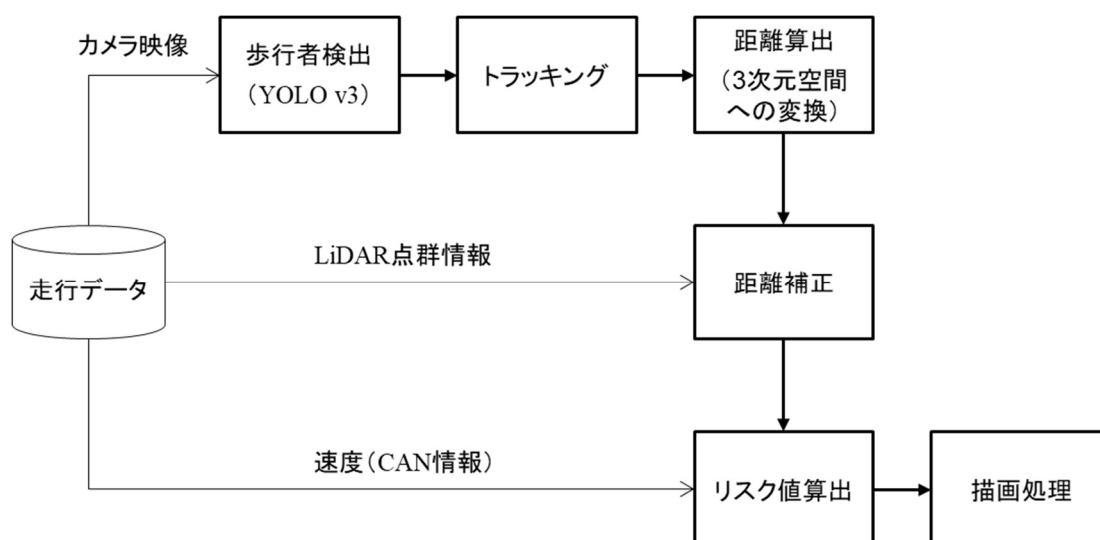


図 6.7 リスク推定システムの処理の流れ

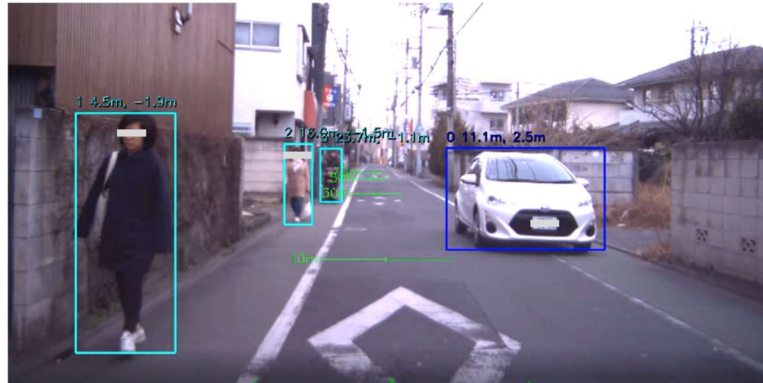


図 6.8 歩行者検知結果の例



図 6.9 歩行者検知結果と LiDAR 点群情報のマッチングの様子

ここまでの処理により自車からの歩行者位置が推定できる。次に、走行データの自車速度（現在速度）を使って、自車の前方領域のリスク値を算出する。これは、図 6.6 のリスクフィールドを現在速度で輪切りにしたイメージである。図 6.10 に、図 6.6 のリスクフィールドを速度 20 [km/h]で輪切りにしたイメージを示す。現在の速度で自車前方黄色～橙色の領域（歩行者との相対位置）に進入すると、歩行者の突然の進路変更に対して潜在的にリスクを取った状態になる（AEB が作動しても歩行者と衝突する）。

最後に、自車の前方領域のリスク値をカメラ映像に重畳する。図 6.11 にシステムの最終的な出力結果を示す。図 6.11 の左図がカメラ映像に自車前方のリスク領域を重畳表示したものであり、現在の速度を維持したままその領域に入るとリスク状態となることを表している。収集したオフラインデータを利用したものではあるが、車載カメラ、LiDAR のセンシング結果から歩行者側方通過時のリスクを推定することができた。

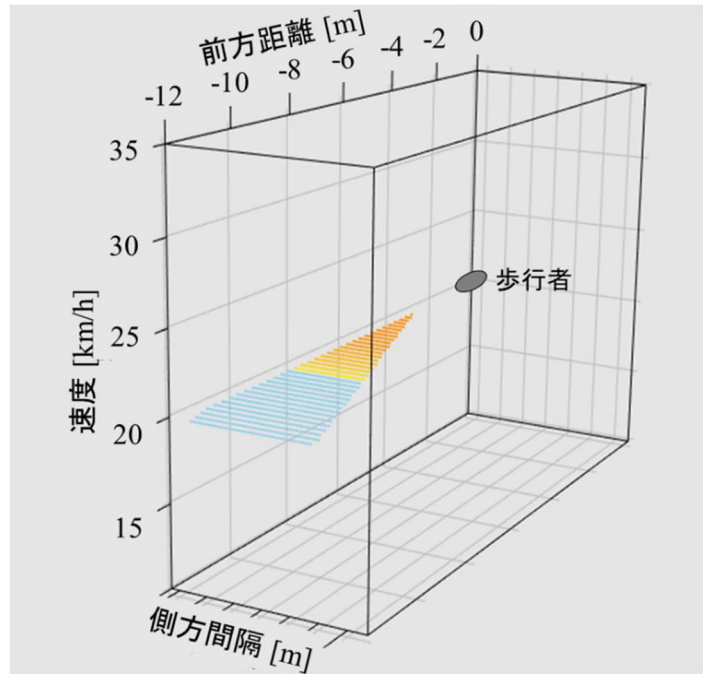


図 6.10 歩行者側方通過場面におけるリスクフィールド（2次元平面）
 自車速度 20 [km/h] でリスクフィールドを輪切りにして表示.

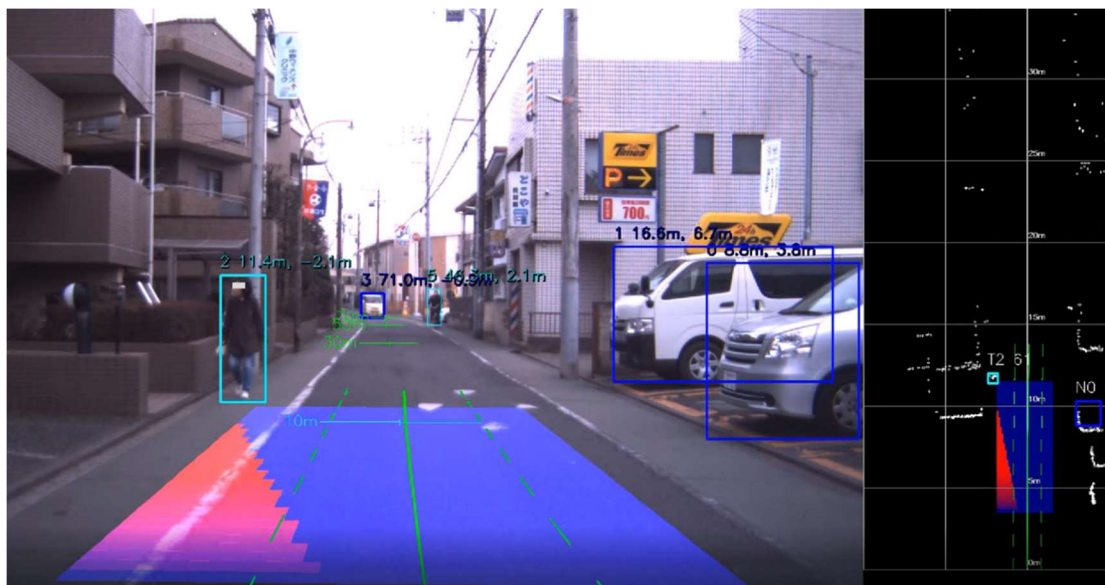


図 6.11 歩行者側方通過場面におけるリスク推定システムの動作例

6.5 歩行者側方通過場面における走行リスクの分析

ここでは、6.2 節で収集した走行データと構築したリスク推定システムを用いて、歩行者側方通過場面での走行リスクの分析を行う。

6.5.1 走行場面の分類

歩行者の進行方向（静止／対向／並進）別に走行リスクの分析を行うために、6.2 節で収集した走行データの中から、歩行者の進行方向別に歩行者側方通過場面を抽出した。歩行者の進行方向別の場面数を表 6.2 に示す。ここでの分類では、歩行者の進行方向に着目したものであり、自転車から見た歩行者の左右位置については区別していない。また、次節（6.5.2 節）の歩行者との側方間隔についても左右は区別しない。

表 6.2 歩行者側方通過場面の数

進行方向	場面数
静止	7
対向	54
並進	37

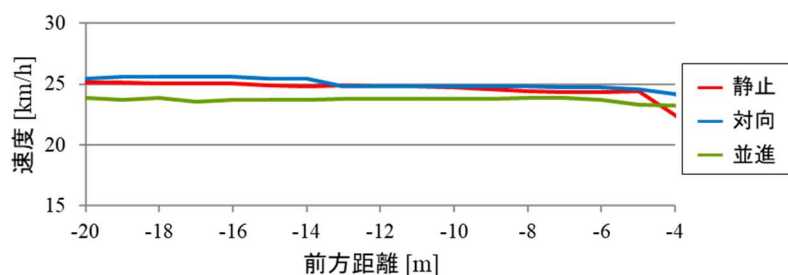
6.5.2 走行リスクの分析

構築したリスク推定システムを用いて、抽出した個々の場面での自転車速度、歩行者との相対位置（前方距離、側方間隔）、リスク値を算出し、歩行者の進行方向別に平均値を求めた。図 6.12 にその結果を示す（図の横軸の前方距離は、便宜上、負値としている）。各グラフが前方距離-4[m]までしか描かれていないのは、それ以降、歩行者の検出範囲外となるためである。

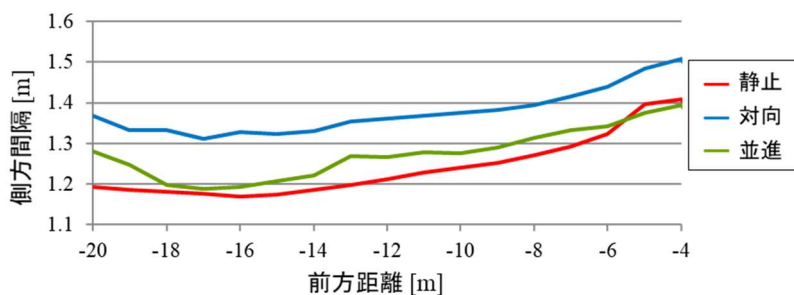
図 6.12 (a)から、歩行者側方通過場面では歩行者進行方向によらず、概ね平均 25[km/h]で定速走行していることが分かる。一方、歩行者との側方間隔（図 6.12 (b)）には、歩行者の進行方向による違いが見られる。対向歩行者に対しては、他の 2 つの歩行者進行

方向比べて 0.1~0.15 [m]程度，側方間隔を開けて走行している。

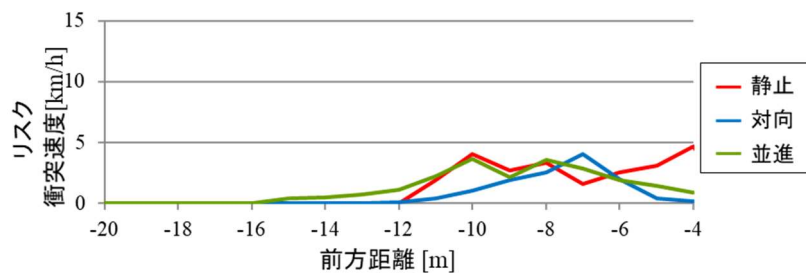
図 6.12 (c)を見ると，走行データ収集に参加したドライバは，平均的にある程度のリスクを伴いながら歩行者側方を通過していることが分かる．歩行者の進行方向によらず，リスクの程度は最大で 5[km/h]の衝突速度である．すなわち，歩行者通過時に歩行者が突然車道に進路変更したとした場合，タイミングによっては AEB が作動したとしても歩行者との衝突を回避できないということである。



(a) 走行速度



(b) 側方間隔



(c) リスク (衝突速度)

図 6.12 歩行者側方通過場面における走行状態とリスク (平均)

上では、最大リスクについて述べたが、リスクの積算値により走行時全体に渡るリスクの程度を歩行者進行方向間で比較する。図 6.13 にリスクの積算値の結果を示す。対向歩行者に対してリスクの積算値が低いことが分かる。これは、歩行者の進行方向によらず、同程度の走行速度（図 6.12 (b)）であっても、対向歩行者には若干広めに側方間隔を取っている（図 6.12 (b)）ことに起因すると考えられる。

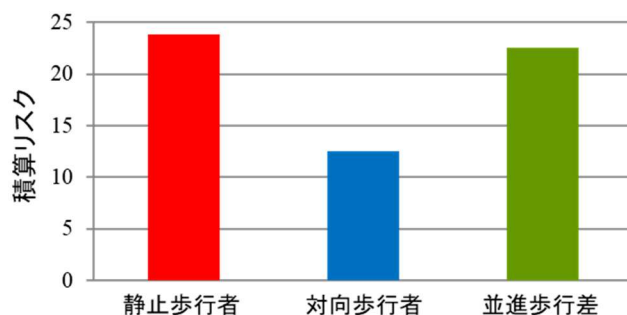


図 6.13 歩行者側方通過場面におけるリスクの積算値 (平均)

対向歩行者に対して見られた広めの側方間隔について走行データを確認したところ、対向歩行者が車両の接近に気づき、自ら車両を避ける（車道から遠ざかる）ケースが多く見られた。対向歩行者の 54 場面中 18 場面で、歩行者が自ら車両を避けていた（図 6.14）。これが対向歩行者に対する広めの側方間隔になった要因である。構築したリスク推定システムが推定したリスク値には、この歩行者の自発的な側方間隔の確保が反映されていると言える。

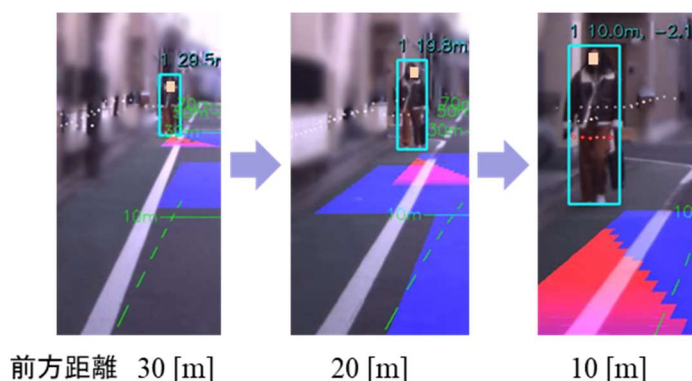


図 6.14 対向歩行者の側方通過時の様子

歩行者は車両の接近に伴い、車道から遠ざかるように移動している。

6.6 まとめ

本章では、第4章、第5章で提案した潜在リスク場面におけるリスク指標およびリスクフィールドのシステムへの応用検討を行った。一般ドライバーによる実交通環境での走行実験で収集した実際的な走行データを用いた歩行者側方通過場面におけるリスク推定システムを構築した。構築したリスク推定システムは、車両情報、カメラ情報、LiDAR情報から歩行者通過時のリスクを推定することができた。

推定したリスク値は、歩行者の自発的な安全行動（車道から遠ざかる行動）を反映した値となっており、提案したリスク指標が、実際的な走行環境において車載センサで得られる情報から算出可能であることを示した。これにより、提案したリスク指標を用いた運転支援システムへの実現性の一端を示せたと考える。

第7章

結論

7.1 本論文のまとめ

近年、国内の交通事故件数、交通死亡者数ともに減少傾向にあるが、未だ安全な交通社会が実現されてはいない。とりわけ、国内の交通死亡者数の半数以上を占める車両対歩行者・自転車事故に対する対策が必要である。このような背景の下、歩行者対応型の衝突被害軽減ブレーキの開発、普及が進んでいる。しかしながら、現状のシステムでは、駐車場、交差点などの死角からの歩行者の突然の飛び出しなどの不測の状況に対して、その効果は限定的である。このような潜在リスク場面での歩行者事故を回避したり、衝突被害を抑制したりできれば、交通事故死者数の低減につながると考えられる。

そこで、本研究では、潜在リスク場面において熟練ドライバが行っている合理的な運転戦略である先読み運転を工学的に実現する「リスク予測型運転支援システム(図 1.11 参照)」の実現を目指し、環境モデルが既知の下で潜在リスク予測技術に関して、潜在リスク場面における運転行動分析(第2章, 第3章)、リスク指標の定量化と安全な走行軌道生成(第4章, 第5章)、および運転支援システム応用(第6章)に関する研究を行った。

第2章では、潜在リスク場面における望ましい運転(支援目標となる運転)についての知見を得るために、自動車教習所の指導員の走行および運転行動の分析、安全運転に関する行動ルールのヒアリングを行った。その結果、熟練ドライバ(指導員)は潜在リスク場面での先読み運転のために、道路環境に依存して一定の運転行動パターンを取っていることが明らかになった。また、指導員へのヒアリングから、以降のリスク指標の定量化の基本アイデアに繋がる運転行動ルール「何か出てきた時に止まれる速度、停止距離を心がけている」を得ることができた。

第3章では、潜在リスク場面において運転支援を受ける側の対象ドライバの不安全運転についての知見を得るために、テストコースにて駐車車両通過場面における一般ドライバの走行データを収集し、運転行動を分析した。その結果、不安運転の特徴の1つとして、駐車車両を回避するための操舵開始タイミング後のアクセルオフ遅れ、もしくは、アクセルオフ不実行に起因する減速不足により、通過時の速度が高めになることを明らかにした。また、これらの不安全行動に対して、減速支援として減速Gの印加や力覚提示を用いる運転支援デザインの提案を行った。

第4章では、第3章で明らかになった潜在リスク場面における一般ドライバの不安全運転のリスクの程度を定量化する手法の開発を行った。具体的には死角からの仮想飛び出し歩行者に対して緊急減速した際の衝突速度によるリスク指標の定量化を試みた。このリスク指標は、従来研究でのリスク指標では満たされていなかった次の4つ要件を満たすものである。

要件①：走行中のあらゆる自車状態においてリスク値を与えることができる。

要件②：リスク値に物理的な意味がある、もしくは、関連付けられる。

要件③：自車速度と自車位置の両方を考慮している。

要件④：実運転行動データが不要である。

また、第3章で収集した一般ドライバの走行データに対して、開発したリスク指標により走行時のリスクの推定および可視化を行った。

第5章では、第4章で開発したリスク指標を用いて、潜在リスク場面における走行状態のリスクの程度を評価できる評価関数（リスクフィールド）を提案し、それを用いた安全な走行軌道生成に関する基礎検討を行った。駐車車両側方通過時における熟練ドライバの操作を正弦波モデル（縦・横加速度モデル）で近似し、リスクフィールドを用いて走行軌道の生成を試みた。その結果、駐車車両通過場面での安全な走行軌道に類似した軌道が得られ、開発したリスク指標の妥当性を示すことができた。

第6章では、第4章、第5章で開発したリスク定量化手法のシステム応用への実現性の検証を行った。FOT (Field Operational Test) で収集した実際的な走行データを用いて、歩行者側方通過場面におけるリスク推定システムの構築を行った。構築したリスク推定システムは、車両情報、カメラ情報、LiDAR 情報から歩行者通過時のリスクを推定することができ、実際的な走行環境において車載センサで得られる情報に対して援用可能であることを示した。

以上をまとめる。熟練ドライバの先読み運転の運転ルールに照らして合理的な考えに基づく潜在リスク場面におけるリスク指標を開発し、一般ドライバの不安全運転を支援するシステムへの応用実現性の検証を行った。このことから、リスク予測型運転支援システムの実現に向けた貢献ができたと考える。

7.2 今後の課題

本研究で対象とした潜在リスク場面でのリスク指標は、本質的にその値を直接検証することはできない。提案したリスク指標を用いて生成した走行軌道と熟練ドライバの安全運転軌道と比較したり、運転支援システムに組み込んでその安全効果を検証したりして、リスク指標の蓋然性や妥当性を高める必要がある。また、第4章、第5章で行ったリスク指標化および安全走行軌道生成は、直線路を仮定し、死角位置が既知のものとして検討したが、地図情報およびセンシング結果を用いて現実的な道路線形や死角環境への適用を図る必要がある。

第5章で行った安全運転の軌道生成では、場面限定な操作加速度モデルを仮定したものであった。今後、リスクフィールドと組み合わせたより一般的な軌道生成手法を開発し、様々な潜在リスク場面での走行軌道の生成を行い、安全運転との比較を行う必要がある。また、その際には、リスクと車両挙動の滑らかさをコントロールする式(5.14)の重みについての感度分析や決定法の検討も必要である。

第 6 章で構築したリスク推定システムは、オフラインデータを利用したものであった。今後、これをオンボードで動作するシステムに拡張させる必要がある。さらに、リスク予測型運転支援システムの実現のためには、リスク推定だけではなく、ドライビングシミュレータや実車での運転支援に展開し、運転支援レベルでの効果検証を行う必要がある。

第 4 章のリスクの定式化で導入した危険事象 ω の生起確率 $P(\omega)$ については、本研究では深掘りせずに、死角から歩行者が飛び出す（必ず危険事象が生起する）ことを想定した先読み運転の心構えとして $P(\omega) = 1$ として扱った。 $P(\omega)$ は、リスク予測型運転支援システムの安全性の選好の調整機能として利用可能ではないかと考えている。式(4.7)に従うと、同じ交通状況であっても $P(\omega)$ の大きさにより、衝突速度（リスク値）を変えることができる。どのような状況でどの程度 $P(\omega)$ の値を変えるとよいかについて、大きな研究テーマになると考える。

最後に、提案したリスク指標は、第 4 章で行ったように運転行動評価にも利用できるため、今後、運転支援や運転教育での安全性の効果検証での活用も期待したい。

引用文献

- [1] J. J. Gibson and L. E. Crooks, "A theoretical field-analysis of automobile-driving," *The American journal of psychology*, vol. 51, no. 3, pp. 453-471, 1938.
- [2] B. Peters and L. Nilsson, "Modelling the Driver in Control," in *Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments*, Springer, 2007, pp. 85-104.
- [3] G. J. Wilde, "The theory of risk homeostasis: implications for safety and health," *Risk Analysis*, vol. 2, no. 4, pp. 209-225, 1982.
- [4] H. Summala, "Risk control is not risk adjustment: The zero-risk theory of driver behaviour and its implications," *Ergonomics*, vol. 31, pp. 491-506, 1988.
- [5] R. Fuller, "Towards a general theory of driver behaviour," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 37, no. 3, pp. 461-472, 2005.
- [6] R. Fuller, C. McHugh and S. Pender, "Task difficulty and risk in the determination of driver behaviour," *European Review of Applied Psychology*, vol. 58, no. 1, pp. 13-21, 2008.
- [7] 公益社団法人自動車技術会, "ITS の標準化 2020," 9 2020. [Online].
Available: https://www.jsae.or.jp/01info/org/its/its_2020_jp.pdf. [Accessed 1 9 2021].
- [8] 第 6 期先進安全自動車 (ASV) 推進計画 ASV 推進検討会, "主要な ASV 技術の概要," [Online].
Available:
<https://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/resource/data/asvtechnology.pdf>. [Accessed 1 9 2021].
- [9] E. Johansson, J. Engström, C. Cherri, E. Nodari, A. Toffetti, R. Schindhelm and C. Gelau, "Review of existing techniques and metrics for IVIS and ADAS assessment (Project PAIDE IST-1-507674-IP),"
[Online]. Available: http://www.aide-eu.org/pdf/sp2_deliv_new/aide_d2_2_1.pdf.
[Accessed 1 9 2021].
- [10] "Operational definitions of driving performance measures and statistics," SAE International, 2015 (A draft version is available:
https://www.auto-ui.org/docs/sae_J2944_PG_13-02-12.pdf

- https://www.auto-ui.org/docs/sae_J2944_appendices_PG_130212.pdf).
- [11] 国土交通省 交通政策審議会陸上交通分科会自動車部会, "交通事故のない社会を目指した今後の車両安全のあり方について," 28 6 2021. [Online]. Available: <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001411236.pdf>. [Accessed 1 9 2021].
- [12] 内閣府, "令和3年版交通安全白書 特集 「道路交通安全政策の新展開」 一第11次交通安全基本計画による対策一," 2021. [Online]. Available: https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/r03kou_haku/index_zenbun_pdf.html. [Accessed 1 9 2021].
- [13] 内閣府, "第10次交通安全基本計画," 11 3 2016. [Online]. Available: https://www8.cao.go.jp/koutu/kihon/keikaku10/pdf/kihon_keikaku.pdf. [Accessed 1 9 2021].
- [14] 内閣府, "第11次交通安全基本計画," 29 3 2021. [Online]. Available: https://www8.cao.go.jp/koutu/kihon/keikaku11/pdf/kihon_keikaku.pdf. [Accessed 1 9 2021].
- [15] 内閣府, "令和3年版興津安全白書 第1編陸上交通 第1部道路交通 第1章道路交通事故の動向," 2021. [オンライン].
Available:
https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/r03kou_haku/index_zenbun_pdf.html. [アクセス日: 1 9 2021].
- [16] 公益財団法人交通事故総合分析センター, "交通事故分析レポート No.118 高齢歩行者の道路横断中の事故," 10 2016. [Online].
Available: <https://www.itarda.or.jp/contents/149/info118.pdf>. [Accessed 1 9 2021].
- [17] 国土交通省, "A S V 技術普及状況調査," 30 6 2021. [Online]. Available: <https://www.mlit.go.jp/jidosha/anken/01asv/resource/data/r3souchakudaisu.pdf>. [Accessed 1 9 2021].
- [18] BOSCH Press release, "ボッシュ、ESCの量産開始から25周年 横滑りを防止する画期的なセーフティシステム," 19 5 2020.
[Online]. Available: <https://www.bosch.co.jp/press/group-2005-01/media/PI11130-ja.pdf>. [Accessed 1 9 2021].
- [19] 西田泰, "交通事故の防止と被害軽減のための交通事故統計分析," *表面科学*, vol. 37, no. 4, pp. 187-189, 2016.
- [20] 国土交通省, "乗用車等の衝突被害軽減ブレーキに関する国際基準を導入し、新車を対象とした義務付けを行います。," 31 1 2020.
[Online]. Available: <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001326168.pdf>.

- [Accessed 19 2021].
- [21] 独立行政法人自動車事故対策機構, “メーカー別、車種別、安全装置の装備状況一覧表,” 3 2021. [オンライン].
Available:https://www.nasva.go.jp/mamoru/download/JNCAP_2021.3_safety_devices.pdf. [アクセス日: 19 2021].
- [22] 公益社団法人自動車技術会, "JASO テクニカルペーパー 自動車用運転自動化システムのレベル分類および定義 JASO TP 18004:2018," 12 2018. [Online]. Available: https://www.jsae.or.jp/08std/data/DrivingAutomation/jaso_tp18004-18.pdf. [Accessed 19 2021].
- [23] K. D. Kusano and G. C. Hampton, "Comparison of expected crash and injury reduction from production forward collision and lane departure warning systems," *Traffic Injury Prevention*, vol. 16, no. sup2, pp. S109-S114, 2015.
- [24] SUBARU, "PRESS INFORMATION スバル アイサイト搭載車の事故件数調査結果について ～搭載車は非搭載車比、約 6 割減～," 26 1 2016. [Online]. Available: https://www.subaru.co.jp/press/file/uploads/news/2016_0126_01_6.pdf. [Accessed 19 2021].
- [25] 公益財団法人交通事故総合分析センター, "交通事故分析レポート No.133 軽乗用車の衝突被害軽減ブレーキ(AEB)の効果分析," 3 2020. [Online]. Available: <https://www.itarda.or.jp/contents/8685/info133.pdf>. [Accessed 19 2021].
- [26] B. Fildes, M. Keall, N. Bos, A. Lie, Y. Page, C. Pastor, L. Pennisi, M. Rizzi, P. Thomas and C. Tingvall, "Effectiveness of low speed autonomous emergency braking in real-world rear-end crashes," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 81, pp. 24-29, 2015.
- [27] J. B. Cicchino, "Effectiveness of forward collision warning and autonomous emergency braking systems in reducing front-to-rear crash rates," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 99, no. Part A, pp. 142-152, 2017.
- [28] R. Spicer, A. Vahabghaie, D. Murakhovs, B. Drayer, G. Bahouth and S. S. Lawrence, "Effectiveness of Advanced Driver Assistance Systems in Preventing System-Relevant Crashes," *Proceeding of FAST-zero'21*, 2021.
- [29] 国土交通省, "先進安全自動車 (ASV) 推進計画 報告書 第2章 第4節 自動運転システムの事故削減効果評価の検討," 5 2021. [Online]. Available: https://www.mlit.go.jp/jidosha/anken/01asv/report06/file/asv6_houkokusho_honpen.pdf. [Accessed 19 2021].
- [30] 國分三輝, 大濱吉紘, 樋口和則, "一般ドライバの不安全運転行動の分析と運転指導による行動変容効果の測定," *自動車技術会論文集*, vol. 40, no. 2, pp. 561-566,

2009.

- [31] 竹本雅憲, 樋口和則, "駐車車両速報通過における不安全運転行動の特徴分析," *人間工学*, vol. 48, no. 1, pp. 7-16, 2012.
- [32] 東京農工大学スマートモビリティ研究拠点, "ヒヤリハットデータベース," [Online]. Available: <http://web.tuat.ac.jp/~smrc/drcenter.html>. [Accessed 19 2021].
- [33] A. Borowsky, T. Oron-Gilad and Y. Parm, "The role of driving experience in hazard perception and categorization: A traffic-scene paradigm," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 66, pp. 305-309, 2010.
- [34] S. De Craen, D. A. M. Twisk, M. P. Hagenzieker, H. Elffers and K. A. Brookhuis, "The development of a method to measure speed adaptation to traffic complexity: identifying novice, unsafe, and overconfident drivers," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 40, no. 4, pp. 1524-1530, 2008.
- [35] S. De Craen, D. A. Twisk, M. P. Hagenzieker, H. Elffers and K. A. Brookhuis, "The Adaptation Test: The development of a method to measure speed," *Proceedings of the Fifth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, pp. 300-305, 2009.
- [36] 永井正夫, ポンサトーン・ラクシンチャランサク, "高齢者の自立を支援し安全安心社会を実現する自律運転知能システム," *精密工学学会誌*, vol. 81, no. 1, pp. 26-29, 2015.
- [37] 二宮芳樹, 竹内栄二郎, 山口拓真, 新村文郷, 吉原佑器, 赤木康宏, 川西康友, 松林翔太, 三輪和久, 出口大輔, 早川聡一郎, 鈴木達也, 村瀬洋, "先読み運転を可能にするスーパーバイザ型運転支援の提案と実車実証," *自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集*, pp. 634-637, 2016.
- [38] E. Rosén, H. Stigson and U. Sander, "Literature review of pedestrian fatality risk as a function of car impact speed," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 43, no. 1, pp. 25-33, 2011.
- [39] World Health Organization & Global Road Safety Partnership, "Speed management : a road safety manual for decision-makers and practitioners," 2008.
- [40] 松井靖浩, 及川昌子, "交通事故における大型車両の車両衝突速度と歩行者の重傷率・死亡率との関係," *日本交通科学学会誌*, vol. 18, no. 1, pp. 32-37, 2018.
- [41] E. Rosén, U. Sander, "Pedestrian fatality risk as a function of car impact speed," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 41, no. 3, pp. 536-542, 2009.
- [42] M. M. Minderhoud and P. H. Bovy, "Extended time-to-collision measures for road

- traffic safety assessment," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 33, no. 1, pp. 89-97, 2001.
- [43] J. R. Tresilian, "Visually timed action: time-out for 'tau'," *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 3, no. 8, pp. 301-310, 1999.
- [44] R. J. Kiefer, D. J. LeBlanc, C. A. Flannagan, "Developing an inverse time-to-collision crash alert timing approach based on drivers' last-second braking and steering judgments," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 37, no. 2, pp. 295-303, 2005.
- [45] T. Kondoh, T. Yamamura, S. Kitazaki, N. Kuge, E. R. Boer, "Identification of visual cues and quantification of drivers' perception of proximity risk to the lead vehicle in car-following situations," *Journal of Mechanical Systems*, 第 卷 1, 第 2, pp. 170-180, 2008.
- [46] 伊佐治和美, 津留直彦, 和田隆広, 今井啓介, 土居俊一, 金子弘, "前後方向の接近に伴う危険状態評価に関する研究(第1報)ドライバ操作量に基づく接近離間状態評価指標の提案," *自動車技術会論文集*, vol. 38, no. 2, pp. 25-30, 2007.
- [47] A. Broggi, P. Cerri, S. Ghidoni, P. Grisleri and H. G. Jung, "A new approach to urban pedestrian detection for automatic braking," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 10, no. 4, pp. 594-605, 2009.
- [48] Y. Li, Y. Zheng, B. Morys and S. Pan, "Threat assessment techniques in intelligent vehicles: A comparative survey," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 71-91, 2021.
- [49] V. Katja, "A comparison of headway and time to collision as safety indicators," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 35, no. 3, pp. 427-433, 2003.
- [50] J. C. Hayward, "Near miss determination through use of a scale of danger," 1972.
- [51] H. Hamdane, T. Serre, C. Masson and R. W. G. Anderson, "Issues and challenges for pedestrian active safety systems based on real world accidents," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 82, pp. 53-60, 2015.
- [52] E. Coelingh, A. Eidehall and M. Bengtsson, "Collision warning with full auto brake and pedestrian detection - a practical example of automatic emergency braking," *Proceedings of 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, p. 155-160, 2010.
- [53] A. Doi, T. Butsuen, T. Niibe, T. Takagi, Y. Yamamoto and H. Seni, "Development of a rear-end collision avoidance system with automatic brake control," *JSAE Review*, vol. 15, no. 4, pp. 335-340, 1994.
- [54] T. B. Wilson, W. Butler, D. V. McGehee and T. A. Dingus, "Forward-looking collision

- warning system performance guidelines," *Proceedings of SAE International Congress and Exposition*, pp. 119-143, 1997.
- [55] M. Brannstrom, J. Sjoberg and E. Coelingh, "A situation and threat assessment algorithm for a rear-end collision avoidance system," *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV)*, 2008.
- [56] J. Nilsson, A. C. E. Ödblom and J. Fredriksson, "Worst-case analysis of automotive collision avoidance systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 4, pp. 1899-1911, 2016.
- [57] S. Shalev-Shwartz, S. Shammah and A. Shashua, "On a formal model of safe and scalable self-driving cars," *arXiv:1708.06374*, 2017.
- [58] F. Oboril and K.-U. Scholl, "RSS+: Pro-Active Risk Mitigation for AV Safety Layers based on RSS," *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2021.
- [59] J. C. Redmon, "Survival Strategies for the Robot Rebellion , yolo Real-Time Object Detection," [オンライン]. Available: <https://pjreddie.com/darknet/yolo/>. [アクセス日: 19 2021].
- [60] S. Joerer, M. Segata, B. Bloessl, R. L. Cigno, C. Sommer , F. Dressler, "A vehicular networking perspective on estimating vehicle collision probability at intersections," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 4, pp. 1802-1812, 2014.
- [61] J. Wang, Y. Zheng, X. Li, C. Yu, K. Kodaka and K. Li, "Driving risk assessment using near-crash database through data mining of tree-based model," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 84, pp. 54-64, 2015.
- [62] D. Lee and H. Yeo, "Real-time rear-end collision-warning system using a multilayer perceptron neural network," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 11, pp. 3087-3097, 2016.
- [63] M. T. Wolf , J. W. Burdick, "Artificial potential functions for highway driving with collision avoidance," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3731-3736, 2008.
- [64] B. Sultan, M. Brackstone, B. Waterson and E. R. Boer, "Modeling the dynamic cut-in situation," *Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1803, pp. 45-51, 2002.
- [65] S. Kolekar, J. d. Winter , D. Abbink, "Human-like driving behaviour emerges from a risk-based driver model," *Nature Communications*, No. 11, 2020.
- [66] J. Salas, H. Jimenez, J. Gonzalez and J. Hurtado, "Detecting unusual activities at vehicular intersections," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and*

Automation, pp. 864-869, 2007.

- [67] S. Lefèvre, C. Laugier and J. Ibañe, "Evaluating risk at road intersections by detecting conflicting intentions," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4841-4846, 2012.
- [68] 大濱吉紘, 清水司, 永田真一, 佐久川純, "衝突確率推定のための歩行者の行動予測法," *自動車技術会学術講演会前刷集*, no. 142-10, pp. 19-22, 2010.
- [69] Y. Ohama, T. Shimizu, S. Nagata and J. Sakugawa, "Pedestrian Behavior Generation Method for Estimating Collision Probability on Road Environment," *Proceedings of First International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic-accident (FAST-zero'11)*, 2011.
- [70] 清水司, 大濱吉紘, 藤枝延維, "一般道における運転指導員の行動分析—その1. 速度決定要因—," *自動車技術会学術講演会前刷集*, no. 15-11, pp. 11-14, 2011.
- [71] ポンサトーン ラクシンチャラーンサク, 長谷川大悟, 岩澤一成, 道辻洋平, "無信号交差点における歩行者事故防止のための危険予測運転ドライバモデルの構築," *自動車技術会論文集*, vol. 43, no. 6, pp. 1379-1385, 2012.
- [72] P. Raksincharoensak, Y. Akamatsu, K. Moro and M. Nagai, "Driver speed control modeling for predictive braking assistance system based on risk potential in intersections," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 26, no. 5, pp. 628-637, 2014.
- [73] 長谷川隆裕, ポンサトーン ラクシンチャラーンサク, 山崎彬人, 毛利宏, 永井正夫, "リスクポテンシャルを考慮した最適制御理論による自律運転知能システムに関する研究," *自動車技術会論文集*, vol. 46, no. 2, pp. 497-502, 2015.
- [74] P. Raksincharoensak, T. Hasegawa and M. Nagai, "Motion planning and control of autonomous driving intelligence system based on risk potential optimization framework," *International Journal of Automotive Engineering*, vol. 7, no. AVEC14, pp. 53-60, 2016.
- [75] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *International Journal of Robotics Research*, vol. 5, no. 1, pp. 90-98, 1986.
- [76] 露木元, 林隆三, 永井正夫, "狭路における歩行者追い越し時の危険予測運転支援システムの開発," *自動車技術会学術講演会前刷集*, no. 125-13, pp. 5-8, 2013.
- [77] 林隆三, 青柳宗一郎, 露木元, 西郷慎太郎, 永井正夫, "狭路における歩行者の急横断に備えた危険予測運転メカニズム," *自動車技術会論文集*, vol. 44, no. 6, pp. 1439-1444, 2013.
- [78] O. S. Tas and C. Stiller, "Limited Visibility and Uncertainty Aware Motion Planning for Automated Driving," *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2018.

- [79] P. F. Orzechowski, A. M. and M. Lauer, "Tackling occlusions & limited sensor range with set-based safety verification," *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2018.
- [80] M. Naumann, H. Königshof, M. Laue and C. Stiller, "Safe but not overcautious motion planning under occlusions and limited sensor range," *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2019.
- [81] M. Koç, E. Yurtsever, K. Redmill and Ü. Özgü, "Pedestrian emergence estimation and occlusion-aware risk assessment for urban autonomous driving," *Proceedings of IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2021.
- [82] M. S. M. B. M. J. Kochende and D. W. , "Pedestrian collision avoidance system for scenarios with occlusions," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 1054–1060, 2019.
- [83] 稲垣敏之 “人と機械の協調における安全と安心 ー人間中心の自動化の視点からの考察ー,” *日本交通科学協議会誌*, vol. 9, no. 1, pp. 11-20, 2010.

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教官のポンサトーン・ラクシンチャラーンサク教授には多大なるご助言・ご指導を頂きました。リスクフィールドの軌跡生成への応用をはじめとした運転支援技術、国際学会への投稿・発表、本学位論文の構成など多岐に渡るご助を賜りました。国プロ（S-イノベ）で一緒させていただいたご縁で学生としてお世話になることになりましたが、学位論文をまとめる段階で筆が進まない状態の私を常に辛抱強く温かく励ましていただきました。先生の励ましによりここに至ることができました。深く深く感謝いたします。

同じく本研究を進めるにあたり、多大なご指導を賜りました東京農工大学 工学府 機械システム工学専攻の毛利宏教授，田川泰敬教授，鎌田崇義教授，ベンチャー・ジェンチャン教授，前田孝雄准教授 には，本研究を公平な立場から見て頂くことで，多くの建設的なご教授を頂きました。深く感謝いたします。

リスク予測型運転支援，先読み運転などの安全運転に関する議論の深化には，S-イノベメンバーとの議論が不可欠でした。井上秀雄教授（神奈川工科大学），永井正夫教授（東京農工大学），鎌田実所長（日本自動車研究所），井上慎太郎博士（トヨタ自動車），斎藤裕一博士（筑波大学），伊藤太久磨博士（東京大学）をはじめ，多くのS-イノベメンバーの皆様に感謝いたします。本論文6章は菅谷文男氏（トヨタ自動車）との共著の研究が元となっており，学位論文での利用にご快諾いただいた菅谷氏に感謝いたします。

会社人として迷いが生じていた私をS-イノベに誘っていただき，さらに社会人ドクターという選択肢を示していただいた当時の上司である大桑 政幸博士（現・トヨタ紡織新価値創造センター センター長）には，感謝に堪えません。ありがとうございました。

社会人ドクターとして活動する機会を与えていただいた（株）豊田中央研究所の皆様には，業務への影響にもご理解・ご容赦いただき，感謝いたします。