

令和4年度「交通安全等に関する公募による委託調査研究」

ヒヤリハットデータベースに基づく一般道走行時の事故リスク分析と
危険予測運転支援システムへの応用

研究代表者

東京農工大学

大学院工学研究院 先端機械システム部門 教授

ポンサトーン・ラクシンチャーンサク

2023年3月31日

令和4年度「交通安全等に関する公募による委託調査研究」

課題名：ヒヤリハットデータベースに基づく一般道走行時の事故リスク分析と
危険予測運転支援システムへの応用

調査研究の要旨

本調査研究は、一般道の交通安全確保に寄与するための調査研究である。特に交差点通過時の衝突事故を防止するための安全運転支援技術として、過去に発生したヒヤリハット事例を調査し、特に交差点右折ヒヤリハットに着目し、交通環境文脈を元に知識ベースの危険予測運転モデルを構築する。特に死角からの飛び出しに注目し、ヒヤリハットを誘発した要因を分析する。また、予測された顕在・潜在的危険に対して安全に減速・停止可能な自動ブレーキ制御システムを設計し、シミュレーションを用いてその安全性能向上効果について調査する。

本報告書の前半では、タクシー車両に取り付けられたドライブレコーダーから得られた右折ヒヤリハットデータの分析について述べる。一般道において起こりうる交差点右折時の衝突危険度を定量的に評価することについて論じた。ドライブレコーダー映像から交通参加者（対向直進車）の飛び出し速度および相対距離等の算出、出現タイミングの分析を行い、右折ヒヤリハットの交通外乱環境パラメータの特徴を抽出した。次に、右折時のヒヤリハットを誘発する要因を分析し、対向車線に存在する右折待ち車両や自車の前方にある車両が死角となったケースを解析した。特定の交差点2ヶ所について取り上げて、右折時に注意すべき点について分析した。

本報告書の後半では、右折時の衝突リスクを低減する方法として、安全速度を算出するアルゴリズムを提案する。コンピュータシミュレーションを使って、危険場面を再現し、速度超過分を抑制する自動ブレーキ制御システムを設計し、そのシステムの安全性向上に対する有効性を検証した。緊急自動ブレーキ制御（衝突被害軽減ブレーキ）単体に比べて、本研究で提案した先読み危険予測運転支援システムを加えると、早い段階での減速支援を行うことで衝突回避性能向上への効果があることが確認できた。

目次

第1章 本調査の背景・目的	5
1.1 はじめに	5
1.2 社会的背景	5
1.3 工学的背景	6
1.4 本調査研究の目的	14
参考文献	15
第2章 ドライブレコーダーの映像データ等によるヒヤリハット発生状況の解析	17
2.1 はじめに	17
2.2 ヒヤリハットデータベースによる分析対象と距離計測	17
2.3 衝突余裕時間と衝突リスクレベルの分布	20
2.4 まとめ	24
参考文献	24
第3章 交差点右折時の死角の存在およびヒヤリハット多発交差点の解析	25
3.1 はじめに	25
3.2 ヒヤリハットデータベースによる右折場面の特徴	25
3.3 交差点内の死角の分類	26
3.4 ケーススタディ選定方法と分析方法	27
3.5 交差点の概要	29
3.6 道路環境文脈	31
3.7 右折時の対向直進車発見地点における相対距離と自車速度	33
3.8 まとめ	35
参考文献	36
第4章 画像認識により対向車状態の推定	37
4.1 はじめに	37
4.2 画像検知技術に基づく相対位置の推定	37
4.3 対象車のトラッキング	44
4.4 対象車両の相対変位の推定	45
4.5 自車速度の取得と最適化	45
4.6 対象車両の移動状態の推定	46
4.7 まとめ	47
参考文献	48
第5章 右折時における死角領域を考慮したリスク予測型自動運転システムに関する研究	49
5.1 緒言	49

5.2 システムの設計.....	49
5.3 シミュレーションによる有効性の検証.....	51
5.4 結論	52
参考文献	52
第6章 結論	54

第1章 本調査の背景・目的

1.1 はじめに

本章では、本研究の背景について述べる。まず 1.2 項にて交通事故分析から社会的な研究背景について述べ、1.3 項にて工学的な研究背景について述べる。

1.2 社会的背景

近年、日本の自動車乗車中における死亡者数は減少傾向にあるものの、依然として高い水準となっており、歩行中の死者数と自動車乗車中の死者数が大きな割合を占めていることがわかる。道路形状別の交通事故件数を見ると、交差点内における事故が全体の 4 割以上を占め、交差点付近を含めると交差点における交通事故は全体の約 6 割を占めており、交差点に関連した事故の削減が急務であるといえる。交差点における事故に着目し、交差点における 1 当四輪車行動類型別事故件数を見てみると、1 当四輪車の右折時における事故が最も多いことがわかる。表 1 をみても、右折対直進の事故は死傷事故件数、死亡重傷事故件数、死亡重傷事故割合の項目でいずれも上位であり、課題の一つであることがわかる。

交通事故分析センターの分析によると、四輪車同士の右直事故の年齢層別の第 1 当事者による人的要因を図 1.1 に示す[1]。道路環境における他の交通参加者等に意識が取られ発見の遅れや判断の誤りが多いことがわかった。国内での交差点における右直事故のデータ分析や運転行動分析は、これまでも多く行われてきた。藤田らによる信号交差点通過時の右直ヒヤリハットデータの分析によると、右直ヒヤリハットは対向直進車間を右折するという状況と信号が黄信号から赤信号に変化した直後が多いこと、対向直進車の前車と後車の間に速度差がある場合、後車への注視時間が減少し、後車の到達時間の予測に影響を与える可能性があることが報告されている[2]。右折事故の多くは当事者の双方が青信号で交差点に進入し事故を起こしていることから、右折事故はドライバが対向車を認識できなかった場合に加えて、右左折の可否に対するドライバの判断ミス（例えば、「先に行ける」と判断してしまったなど）が原因であると考え

えられる。また，追突や正面衝突に比べて，右折事故は発見の遅れが原因となったケースが多いことが報告された。

表 1 四輪車同士の事故類型別の事故件数と死亡重傷事故割合
(マクロデータ (2009-2018 年)) [1]

	死傷事故件数	死亡重傷事故件数	死亡重傷事故割合(%)
正面衝突	④ 95,988	② 19,224	① 20.0
追突	① 1,942,032	③ 19,217	1.0
出会い頭	② 640,099	① 29,167	③ 4.6
左折時	22,031	446	2.0
右折時	③ 123,680	④ 8,537	② 6.9
右折時 右折対直進	③ 123,680	④ 8,537	② 6.9
右折時 その他	38,490	859	2.2
追越追抜時	26,383	712	2.7
すれ違い時	30,838	1,099	④ 3.6
その他	283,024	5,914	2.1

[表1の○数字は、各項目の上位からの順位を表す(その他を除く)]

(出典：交通事故分析センター ITARDA Information No. 136)

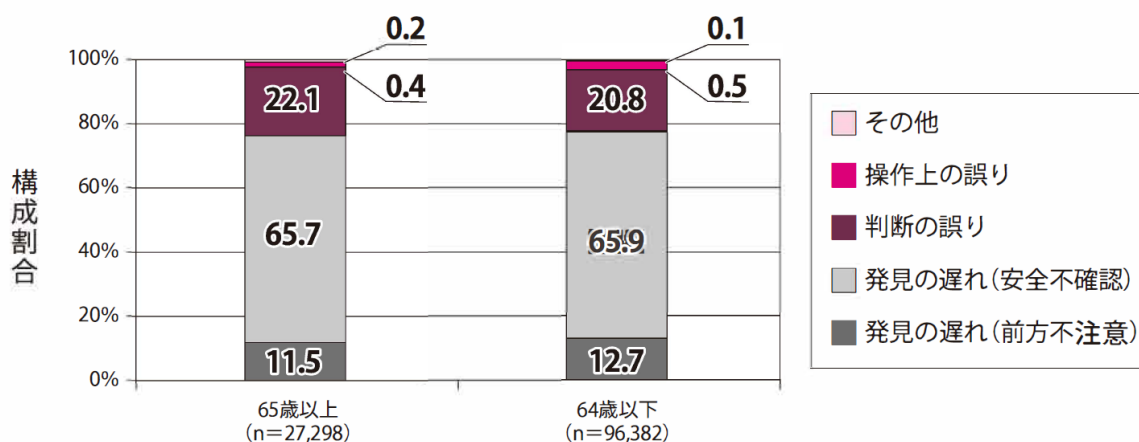


図 1.1 四輪車同士の右直事故の年齢層別の第 1 当事者による人的要因 (マクロデータ 2009-2018 年) (出典：交通事故分析センター ITARDA Information No. 136) [1]

1.3 工学的背景

近年，衝突安全技術に加え，事故を未然に防ぐ予防安全技術の開発が盛んに行われ，実用化されている。現在実用化されている代表的な予防安全技術としては，アダプティブクルーズコントロールやレーンキープアシスト，衝突被害軽減ブレーキなどが挙げられる。アダプティブクルーズコントロールは，車両の前方に

搭載したレーダを用いて、前方を走行する車両との車間距離を一定に保ち、必要に応じてドライバへの警告を行うシステムである。レーンキープアシストは、車両の前方に取り付けられたカメラ等を利用して道路の白線などの走行環境を検知し、車両が走行車線を維持するよう、ハンドル操作を支援するシステムである。衝突被害軽減ブレーキは、車両の前方に取り付けられたカメラやレーダを利用して前方の障害物を検知し、ドライバへ警告および自動ブレーキを行うシステムである。

近年では、中低速域までにおいては前方の障害物との完全に回避する性能を備えた衝突被害軽減ブレーキが実用化されている。衝突被害軽減ブレーキシステムの例として、EyeSight（スバル社）のイメージを図 1.2 に、Human Safety のイメージを図 1.3 に、Toyota Safety Sense のイメージを図 1.4 に示す。



図 1.2 安全運転支援システム
(出典：スバル Eyesight X)

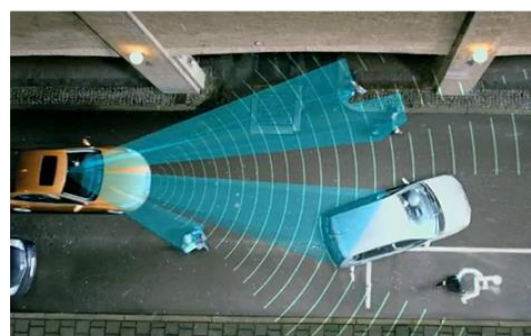


図 1.3 安全運転支援システム
(VOLVO)

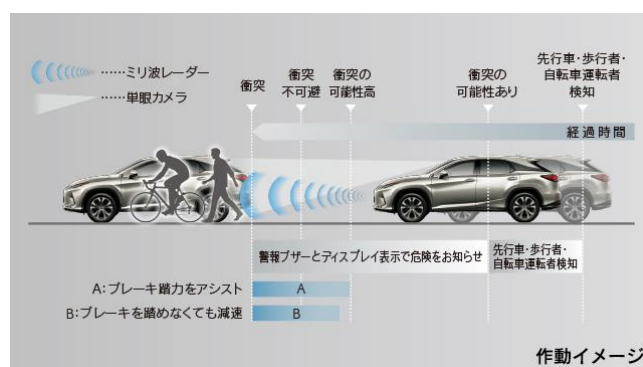


図 1.4 安全運転支援システム (出典：Lexus Safety System)

さらに近年では、交差点における対向車との衝突事故を防止するための運転支援システムの開発がさかんに行われており、トヨタ自動車や Volvo Cars 社が今後発売する市販車両への搭載を発表している。一例としてトヨタ自動車が開発を行っているインフラ協調型右折時衝突防止システムの概要を図 1.5 に示す。

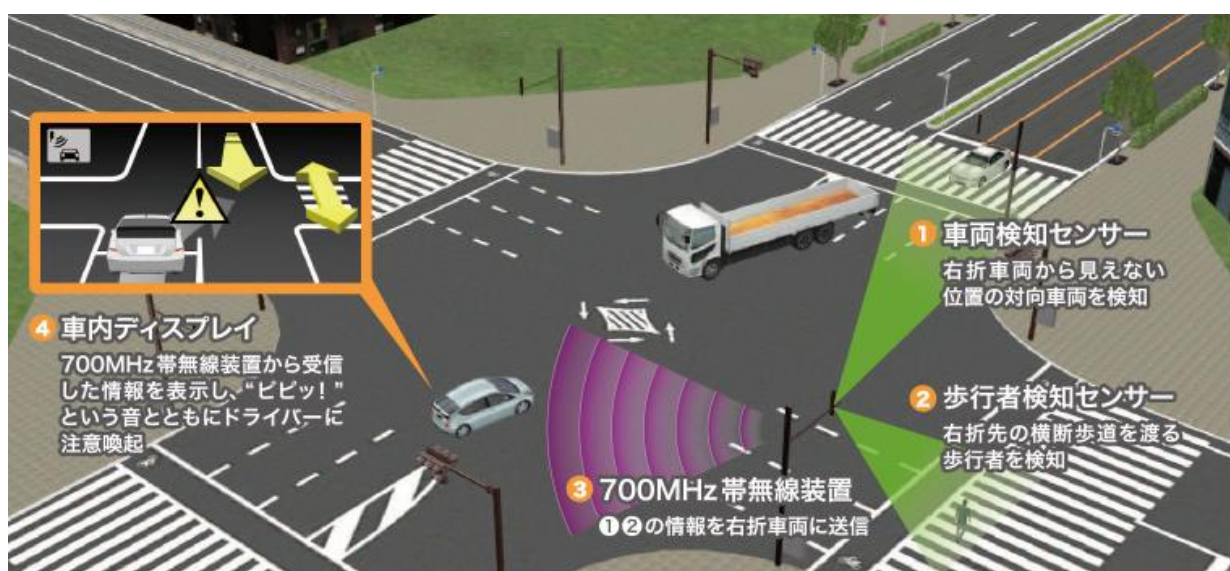


図 1.5 インフラ協調の運転支援システム

インフラ協調型右折時衝突防止システムは、路車間通信を使用することで、交差点内で右折待ちを行っている車両に対して対向車についての情報提供や警告を行うシステムである[3][4][5]。システムの概略は次の通りである。

- ①道路側に設置された車両検知センサにより、対向車の有無を検知する
- ②700MHz 帯高度道路交通情報システムの周波数帯を用いて、道路に設置されたビーコンから、右折待ち車両へ検知結果を送信する
- ③右折待ち車両は受信機によって対向車の検知結果を取得する。対向車が交差点中心に到達するまでの時間が 6 秒以上の場合に、ドライバーが停止状態からブレーキを離すとディスプレイ表示を用いてドライバーへ注意喚起を行う。対向車が交差点中心に到達するまでの時間が 6 秒以下の場合に、ドライバーが停止状態からブレーキを離すとディスプレイ表示と警報音を用いて、ドライバーへ警報を行う。

インフラ協調型右折時衝突事故防止システムは、2012 年から、約 100 名の一般ドライバーに対して、6 交差点で公道実験が行われてきた。トヨタ自動車は 2015 年から発売する車両の一部にインフラ協調型右折時衝突防止システムを導入することを発表している。これまでも路車間通信を用いた交差点右折時における衝突事故防止技術の研究開発が行われており、他の研究機関でも実用化が進められている。

VolvoCars 社が開発した City Safety に実装されている Auto Brake at Intersections およびトヨタの最新の SAFETY SENSE の概要を図 1.6 に、車両に搭載されているセンサを図 1.7 に示す。

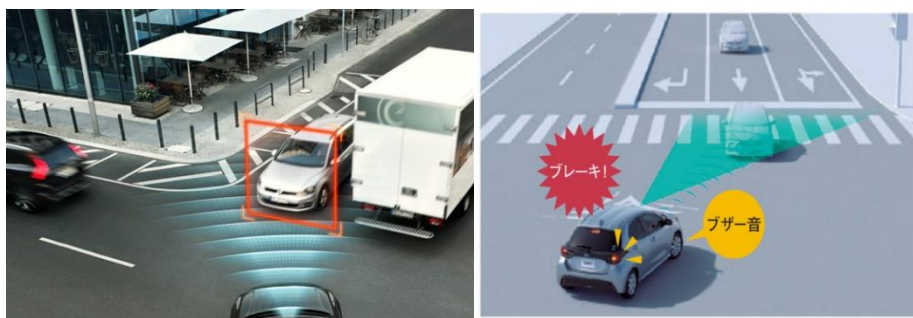


図 1.6 交差点对应の緊急自動ブレーキシステムの商品化の例

(出典：VOLVO, トヨタ自動車株式会社)



図 1.7 運転支援システムのセンサ認識系 (出典：VOLVO)

City Safety は、車両前方に搭載されたミリ波レーダ、カメラ、赤外線レーダを用いて対向車を検知し、自車が対向車の前を通過しようとした場合には、自動ブレーキを作動させることにより、対向車との衝突回避を行うシステムである。赤外線レーダとカメラは車両のフロントウィンドウ上部に設置されており、

RACam (Integrated radar and camera sensor fusion system) と呼ばれるシステムによって統合されている。ミリ波レーダは 76GHz の短距離レーダが使用されており、車両の前部に設置されている。VolvoCars 社は 2014 年以降に発売する車両に Automatic Brake at Intersections を備えた City Safety を導入することを発表している。

また、欧州では EU のフレームワークプログラムにおける PReVENT プロジェクトの一環として、交差点事故を防止する予防安全技術の開発を目的とした INTERSAFE プロジェクトが実施されてきた。INTERSAFE は第 6 期欧州フレームワークプログラムの一環として 2004 年から 2007 年まで行われ、その後 INTERSAFE2 が第 7 期欧州フレームワークプログラムの一環として 2008 年から 2011 年まで実施された。INTERSAFE2 プロジェクトには、SICK, BMW, IKA, INIRIA, NEC, Signalbau Huber, TRW, Cluj-Napoca 大学, VTEC, VTT, Volkswagen が参加しており、欧州全体からメーカーや研究機関が集まっている。INTERSAFE2 プロジェクトで使用された実験車両の概要を図 1.8 に、センサの検知範囲を図 1.9 に示す。



図 1.8 INTERSAFE2 プロジェクト実験車両

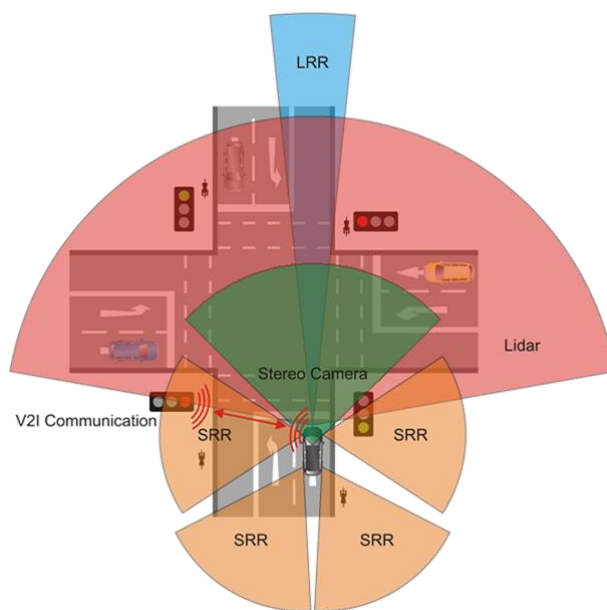


図 1.9 全方位安全運支援システムのセンサの認識範囲

実験車両には，前方にステレオカメラ，Lidar，77GHz ミリ波レーダ（LRR）が設置され，左右側面および後方に 24GHz ミリ波レーダ（SRR）が搭載されている．さらに路車間通信のための V2I 通信装置が搭載されており，車載センサを用いた自律的な交差点事故防止システムと，路車間通信を用いた交差点事故防止システムを組み合わせた事故防止システムの開発が行われている．

米国では，カルフォニア PATH プログラム（Partners for Advanced Transportation Technology）の一環として，路車間通信を用いた交差点事故防止に関する研究が進められてきた．PATH プログラムで使用された実験車両を図 1.10 に示す．



図 1.10 米国における California PATH project の実験車両

実験車両には GPS、データ記録装置、ドライバ視線観測装置、カメラが設置されており、車両の前後にレーダを搭載している。図 1.10 に示す実験車両を用いて走行データを収集し、交差点におけるドライバの運転行動解析を行っている。路車間通信を用いた交差点事故防止システムでは、自車両および道路側インフラから取得したデータを基に左折の可否判断を行い、信号機横に設置された表示機を用いてドライバへ情報提供を行うシステムが研究されている。

また、アメリカ合衆国運輸省の ITS プログラムにおいては、CICAS(Cooperative Intersection Collision Avoidance Systems) に関する研究が進められてきた。CICAS における交差点左折時の事故防止システムの概要を図 1.11 に示す。CICAS では、車載センサを用いた事故防止システム、道路インフラを用いた事故防止システムの開発が行われている。路車間通信を使用しない事故防止システ

ムとしては、道路に設置されたセンサを用いて車両を検出し、交差点の信号が青の場合でも、対向車が存在する場合には、信号の横に左折禁止表示を提示するシステムが研究されている。車両側の装備が不要なため、道路インフラの整備のみでシステムを使用できる利点がある。

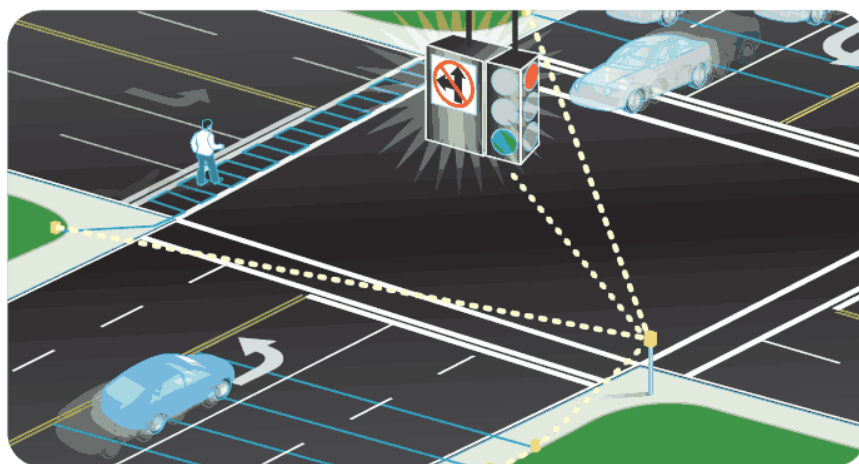
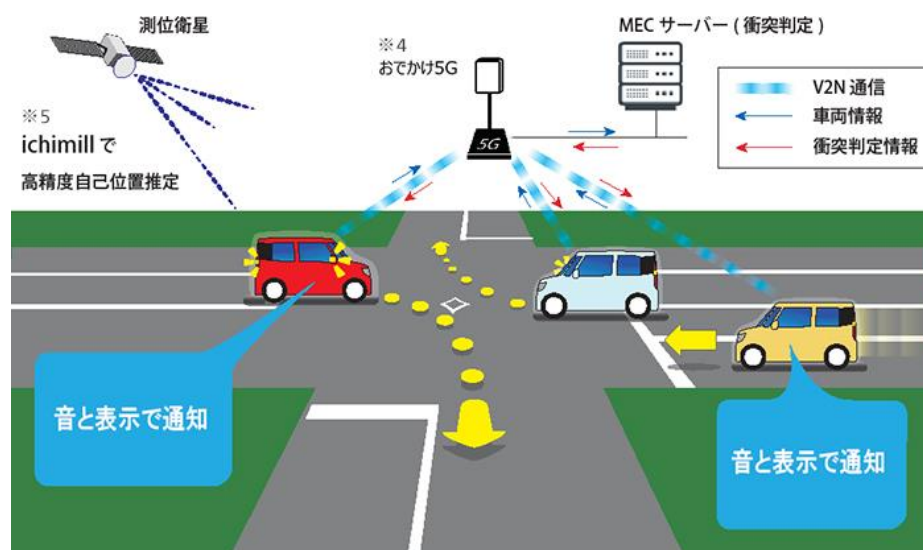
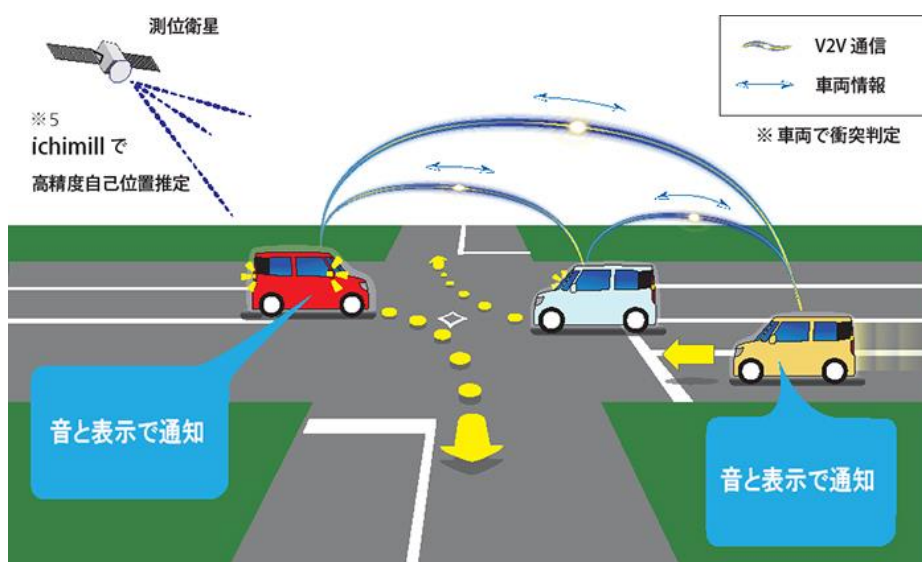


図 1.11 Signalized Left Turn Assist System in CICAS project

最近では、5G等の通信技術が急速に発展し、その通信を活用した事故防止技術が各方面で実証実験が行われている。例えば、クルマが交差点を右折する際に、対向車線に右折待ち車両が存在し、見通しが悪く対向車線を走る直進車両が目視およびセンサーで検知できない場面があり、本調査研究もこの場面を取り扱うこととする。それぞれの車両が、位置情報や車両情報を、V2Nを活用してMEC(Multi-access Edge Computing)サーバー経由で他の車両に、もしくはV2Vを活用して他の車両へ送信することで、各車両の情報を集約する。各車両の情報を基に衝突判定を実施し、衝突の危険がある場合は、その結果を対象の車両へ送信し、車両のドライバに音と表示で通知を行う。ドライバに対向車線の直進車の存在を通知することで、右折時の衝突事故を防止する。その作動イメージを図1.12(a)に示す。もう一つの方法としては、車と車の間の直接通信(V2V)で、交差点付近にいる車両は、位置情報や車両情報などを周辺車両へ直接送信する。周辺車両の情報を受信した車両が、情報の管理を行うとともに衝突判定を実施して、衝突の危険がある場合は音と表示でドライバに警報通知を行う。



5G SA を活用した V2N で、車両から MEC サーバーを介して車両に通信する場合



セルラーV2X を活用した V2V で、車両から車両へ直接通信する場合

図 1.12 通信技術を活用した交差点右折時の事故防止 [6]

1.4 本調査研究の目的

右折時の衝突回避システムの技術的課題の一つとして、図 1.13 に示されるように「何かの陰になって見えなかった」要因に対する対策が考えられる。突然死角となった物陰からの対向車、二輪車等に対する事故防止策が重要である。本調査研究ではそういったリスクが高い場面において、ヒヤリハットデータ解析から得られた知見を見出すことと、リスクを低減するブレーキ支援制御システムの設計論および検証を目的とする。第2章以降では、交差点通過時の衝突事故を防止するための安

全運転支援技術として、過去に発生したヒヤリハット事例を調査する。特に交差点右折ヒヤリハットに着目し、交通環境文脈を元に知識ベースの危険予測運転行動モデルを構築する。特に死角・遮蔽物からの飛び出しに注目し、ヒヤリハットを誘発した要因を分析する。また、予測された顕在・潜在的危険に対して安全に減速・停止可能な自動ブレーキ制御システムを設計し、シミュレーションを用いてその安全性性能向上効果について調査する。

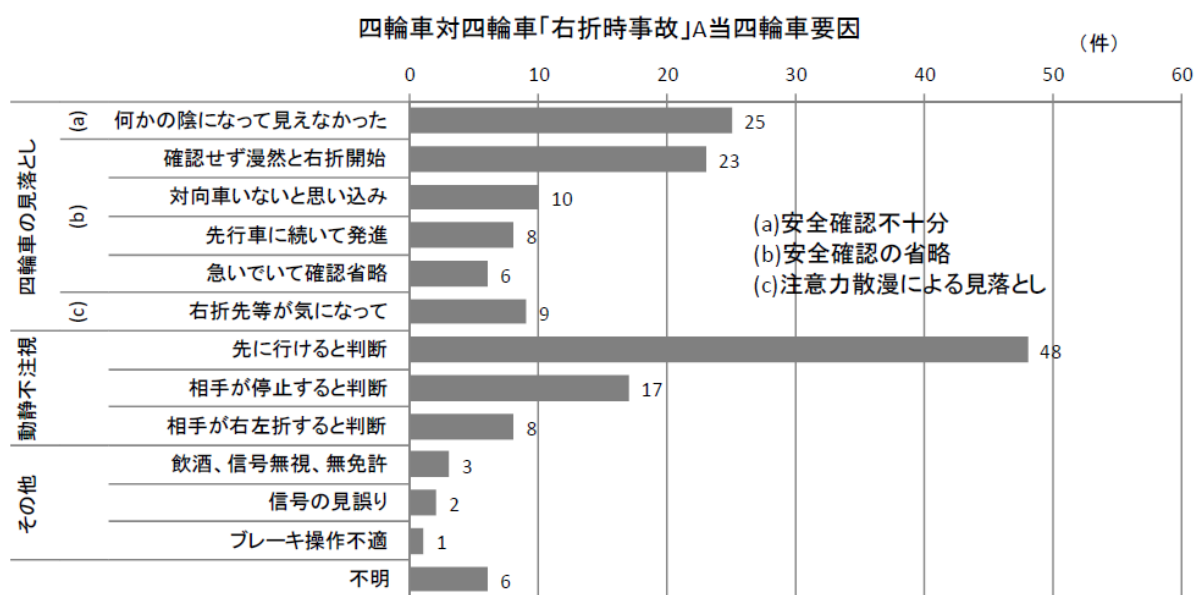


図 1.13 四輪車同士の右折時事故の要因

参考文献

- [1] 交通事故総合分析センター，四輪車同士の右折対直進の事故，イタルダ・インフォメーション No. 136, 2020 .
<https://www.itarda.or.jp/contents/8941/info136.pdf> (2022/03/14 アクセス).
- [2] 藤田浩徳，小竹元基，鎌田実，永井正夫，茂呂克巳，” 信号交差点通過時のヒヤリハットデータに基づく運転行動分析”，自動車技術会学術講演会前刷集，No. 98-10 (2010)，pp. 17-20
- [3] 中村俊祐，菅沼英明，菊地一範，本間亮平，” インフラ協調型右折時衝突防止支援システムの効果評価”，自動車技術会学術講演会前刷集，No. 49-14 (2014)，pp. 23-28
- [4] 鈴木桂輔，井田雄也，山田喜一，” 交差点右折ドライバモデルの構築と

右折時衝突防止支援情報による事故低減効果の分析”，自動車技術会論文集，Vol.40 No.3（2009），pp.925-932

- [5] 大谷亮，岩城亮，中村之信，”インフラ協調型安全運転支援システムの表示インターフェイスに関する研究（第4報）”，自動車技術会学術講演会前刷集，No101-11（2011），pp.7-12

- [6] スズキと共同で 5G SA とセルラーV2X を活用したクルマの交差点右折時の事故低減に向けたユースケースの検証を実施
https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20230317_02/

（参照日 2023/3/18）

第2章 ドライブレコーダーの映像データ等によるヒヤリハット発生状況の解析

2.1 はじめに

本章では、東京農工大学スマートモビリティ研究拠点で収集したドライブレコーダーの走行データを用いて、交差点の右折場面における自動車とのヒヤリハット場面での距離測定を行う（図2.1）。具体的には、昨年度の分析を元に**衝突**リスクレベルの分布について再考する。

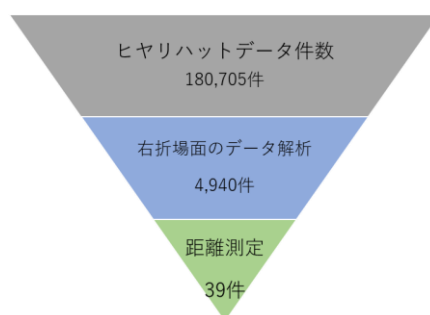


図 2.1 本研究のフロー図

2.2 ヒヤリハットデータベースによる分析対象と距離計測

本節では、東京農工大学 Smart Mobility Research Center（SMRC）が所有するヒヤリハットデータベースと距離測定ツールについて紹介する。

2.2.1 ヒヤリハットデータベースによる分析

ヒヤリハットデータベースとは、東京、札幌、秋田、静岡、福岡の各地域で撮影されたタクシーのドライブレコーダーから収集した映像データと物理データに、分析者がタグ情報を付加したものである¹。ヒヤリハットデータは約180,000件（2022年4月現在）であり、ヒヤリハットが発生した時刻の10秒前から発生時刻5秒後までの映像と車両速度、加速度、GPS情報、ペダル操作の有無などで構成されている。ヒヤリハットデータはSMRCが製作した「DR manager 2」にて検索することが可能である（図2.2）。

ヒヤリハットデータベースから図2.3に示すように、「自車が右折時の対向直進車」についてデータを検索した。なお、DR manager 2による検索設定の条件は以下である。検索したところ4,940件のデータが抽出された。

【DR Manager での検索設定】

1. 発生年月日：2005 / 1 / 25～2021 / 12 / 25
2. 対象種別：自動車

3. 事故キーワード：右直
4. 地域：東京，札幌，秋田，静岡，福岡
5. ヒヤリハットレベル：高レベル，中レベル，低レベル

著者が使用許諾を受けているデータは 2005 年から 2021 年に計測された 180,705 件である。

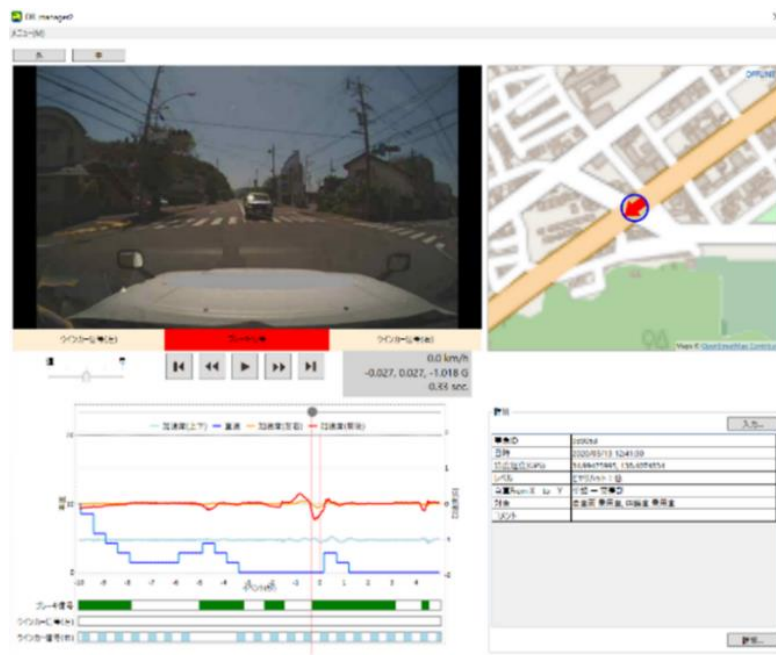


図 2.2 DR manager2



図 2.3 ヒヤリハットデータベースによる右折場面の分析対象

2.2.2 距離計測

2.2.1 の方法で検索した「自車が右折時の対向直進車」のヒヤリハットデータ 4,940 件から以下の条件に当てはまるデータを任意抽出し距離計測を行った。

【距離計測の条件】

- 本研究では、ヒヤリハット発生地点の手前でブレーキを踏んだ瞬間を「対向直進車発見地点」としているため、「自車が停止状態から発進直後にヒヤリハットが生じるデータ」、「減速するために断続的にブレーキを踏んでいるデータ」について除外した。
- 距離測定を行う上で、「かなり前からブレーキをかけていて対向直進車との距離が遠いデータ」、「対向直進車発見地点において、対向直進車の前方に先行車がいるデータ」などのように距離測定が困難なものについて除外した。
- 距離測定を行う上で映像からの判断が難しいもの（夜間、激しい雨や雪）について除外した。

これらのデータについて、自車が対向直進車に気づいてブレーキを踏んだ瞬間（対向直進車発見地点）での自車と対向直進車の相対距離と自車の速度について計測した。「対向直進車発見地点」は、ヒヤリハット発生地点の手前で対向直進車が出現した際に運転者がブレーキ操作をした瞬間と定義し、その地点における自車の車両先端から対向直進車の車両右先端までの相対距離を測定した。

計測には DR manager 2 に搭載されている任意の座標とカメラ間の距離を測定する「DR manager 距離測定ツール」を用いた（図 2.4）。

抽出したデータに関して、以下の数値を記録した。

- ・ A_X[m]：前方距離計測結果（車両先端からの距離）
- ・ A_Y[m]：左右距離計測結果
- ・ Speed（km/h）：ブレーキを踏んだ瞬間の車速



図 2.4 DR manager 距離測定ツール

2.3 衝突余裕時間と衝突リスクレベルの分布

本節では、ヒヤリハットデータベースから得られたデータを元に、衝突余裕時間（Time to collision：TTC）と衝突リスクレベルの分布を示す。

2.3.1 衝突余裕時間（Time to collision：TTC）

TTC は自車が対向車などの対象物と衝突するまでの余裕時間であり、ヒヤリハット映像の画像処理を施して得られた対向直進車との相対距離（ターゲットの対向直進車両出現時）と、そのときの自車と相手車両（Target Vehicle）との相対速度から算出する場合、TTC は次式によって算出される。

$$TTC = \frac{D_{brake}}{\Delta V} \quad (2.1)$$

ただし、 D_{brake} は制動距離、 ΔV は自車と相手車両との相対速度である。

ただし、相手車両の速度を直接画像から読み取るが困難なため、まず相手車両（対向直進車）発見時のリスクレベルを定量化するため、相手車両の車速を考えない場合についてデータを分析することとした。

昨年度の報告では、ヒヤリハット映像の画像処理を施して得られた対向直進車との相対距離（ターゲットの対向直進車両出現時）と、そのときの自車の速度から、理論的に制動距離を算出したが、対向車の速度が加味されていないという課題があった。そこで、今回は、自車が対向直進車を発見した地点から 0.2 秒後の自車と対向直進車の相対距離を計測し、対向直進車発見地点との差を時間差で割ることによって相対速度を求めた¹。

上記の条件に当てはまる 昨年度に任意抽出した 53 件から、TTC が 5 秒以内の 39 件に限定し解析を行った。

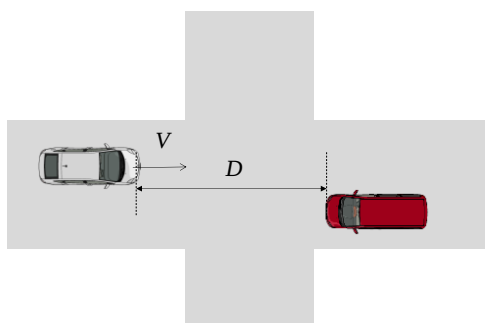


図 2. 5 衝突リスクレベルに関する変数

¹ 一部のデータは対向直進車発見地点から 0.20 秒後の画像が取得できなかったため、0.21 ～0.22 秒後のデータが含まれている。

2.3.2 衝突リスクレベルの定量化

本節では抽出したヒヤリハットデータの各イベントから、右折時の対向直進車に対する衝突危険度を物理的な意味を持つ客観的指標の算出方法について述べる。本調査研究では、ヒヤリハット映像の画像処理を施して得られた対向直進車との相対距離（ターゲットの対向直進車両出現時）と、そのときの自車の速度から、理論的に制動距離を算出することとする。

自動車の制動距離は以下の式によって計算できる。

$$D_{brake} = \frac{V^2}{2a} \quad (2.1)$$

ただし、 D_{brake} は制動距離、 V は自車速度、 a は減速度である。ここでは乾燥路面での強いブレーキを想定し、 $a = 4\text{m/s}^2$ とする。

ここでは、式(2.1)の距離を基準に、対向直進車が出現した際に運転者がブレーキ操作した瞬間の相対距離（自車と対向直進車間距離）との比率を衝突リスクレベルとする。基準となる制動距離に対して現在取っている相対距離の比率が小さければ危険度（リスク）が高く、逆に基準に対する相対距離の比率が大きければ、余裕があるので危険度（リスク）が低いと解釈できる。すなわち、リスクレベル(Risk Level :RL)は以下の式で表現できる。

$$RL = \frac{D_{brake}}{D} = \frac{V^2}{2aD} \quad (2.2)$$

ただし、 D は実際の相対距離である。

また、式(2.2)から、自車速度と相対距離との関係を以下の式で表すことができる。

$$V^2 = (2 \cdot a \cdot RL) \cdot D \quad (2.3)$$

この方程式から、リスクレベルRLの大きさから、自車速度の安全性を物理法則から客観的に評価できることがわかった。また、この考え方を使えば、ヒヤリハットデータベースから抽出した右折場面のシーンの危険度（リスク）を評価することができる。

ヒヤリハットデータベースから抽出した右折場面のシーンの危険度とTTCを示したものが図2.6～図2.9である²。図2.6と図2.7は自車速度との関係、図2.8と図2.9は相対速度との関係を示した。衝突リスクレベルの分布はITARDAより得られた事故28件のマイクロデータ（2009-2018）^[2]と衝突リスクレベルの等高線との関係を示す。事故データとヒヤリハットデータの領域が明確に分かれたことが確認できた。事故データは急ブレーキを踏んでも事故が回避出来ない程の危険場面であるのに対し、ヒヤリハットデータは相手車両（対向直進車）発見時に十分物理限界の中で衝突を回避できることがわかった。

² 図2.9は、自車が対向直進車を発見した地点から0.2秒後の自車と対向直進車の相対距離が計測不能なデータがありN=38となっている。

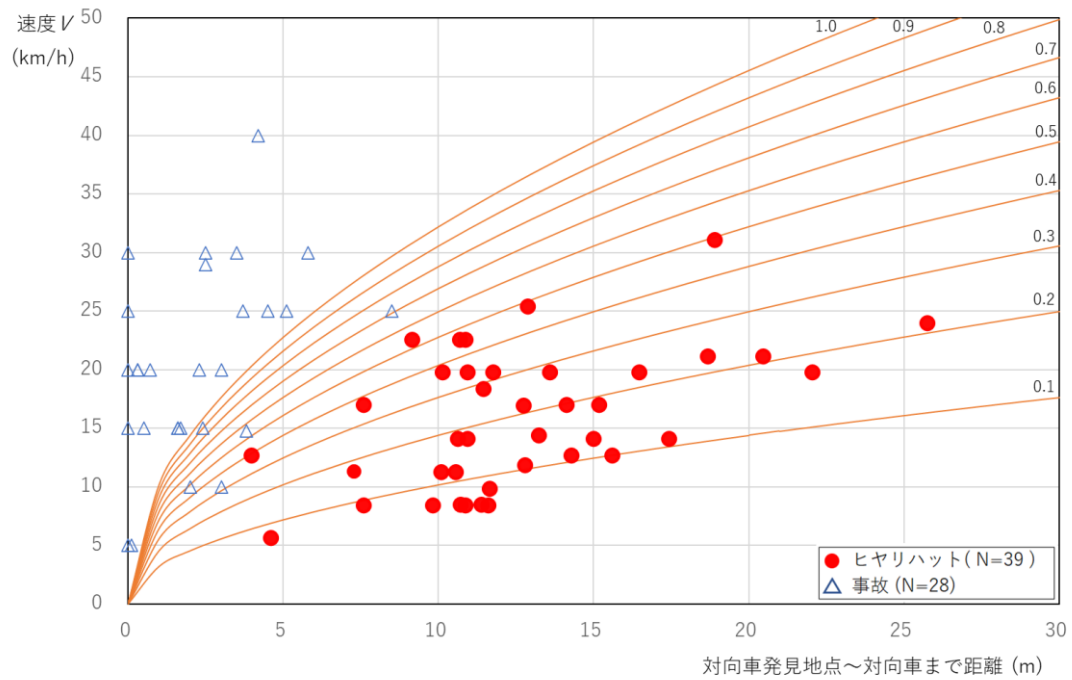


図 2. 6 右折時の対向直進車発見地点における衝突リスクレベルの分布 (N= 39)
 線 : 衝突リスクレベルの等高線 (値は数字で表記)

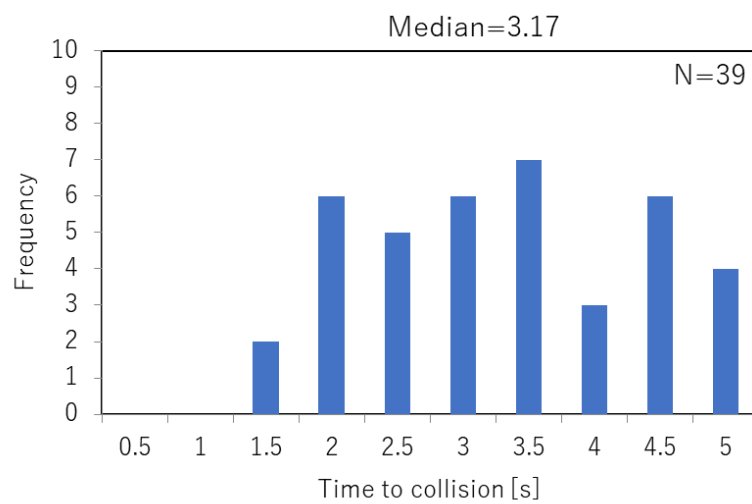


図 2.7 Pseudo-Time to collision (自車速度で計算する場合)

次に、発見時点の前後の位置情報を使って、相対速度を読み取る作業を行った。右折時の対向直進車発見地点における相対距離と相対速度の関係を図 2.8 に示す。図 2.8 より、右折時に二台の車両が互いに対向しているため、相対速度の値が自車速度より高いため、より高い危険度が増すことになる。各イベントデータから衝突余裕時間指標に換算したヒストグラムを図 2.9 に示す。図 2.9 より、ヒヤリハットの度合いに対応する衝突余裕時間の値は 1.0 秒から 4 秒まで分布しており、2.5 秒に最頻値を持つことになる。このデータは事故シナリオ再現のために重要な環境パラメータの一つである。

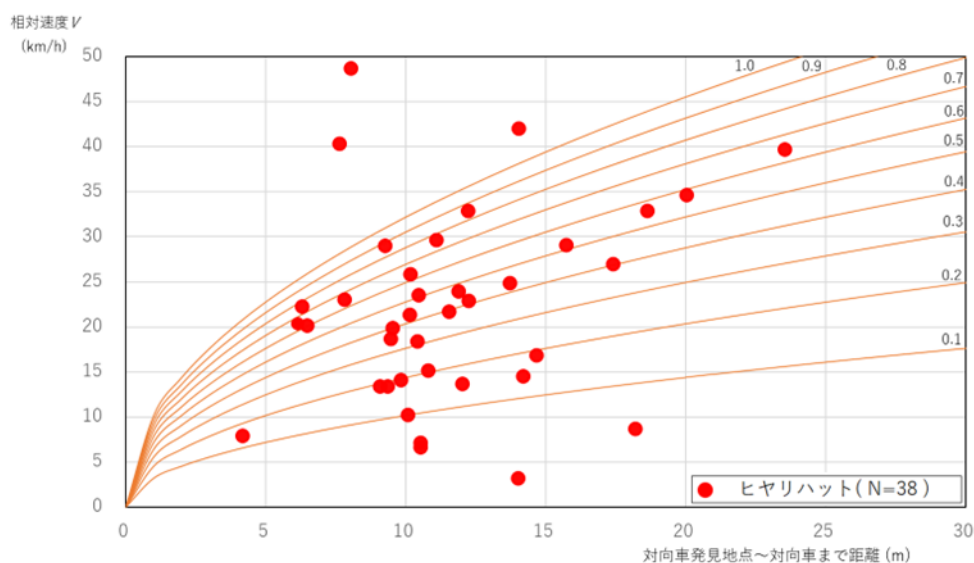


図 2.8 右折時の対向直進車発見地点における衝突リスクレベルの分布（ $N = 38$ ）
線：衝突リスクレベルの等高線（値は数字で表記）相対速度との関係

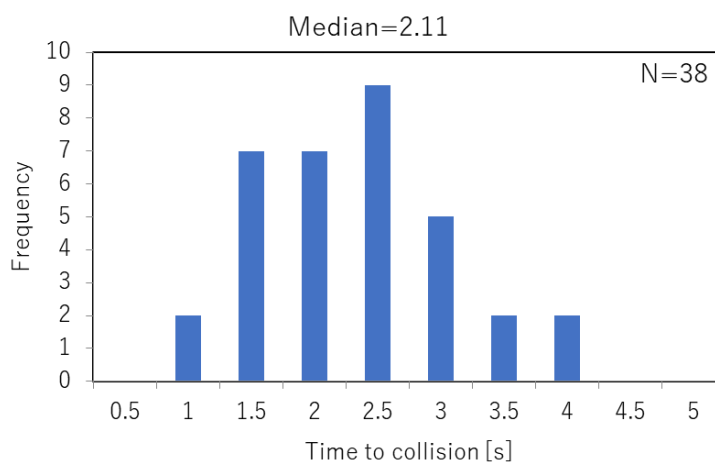


図 2.9 右折時の衝突余裕時間のヒストグラム
（相対距離と相対速度の除算）

2.4 まとめ

本章では、東京農工大学スマートモビリティ研究拠点で収集したドライブレコーダーの走行映像および車両運動データを用いて、交差点の右折場面における自動車とのヒヤリハット発生状況の解析を行った。その結果、ITARDA の過去のマイクロデータと照らし合わせて、ヒヤリハットデータの衝突リスクレベルが比較的到低い領域に存在していることが確認できた。また、映像データから算出された相対速度と相対距離のデータより、ヒヤリハットの度合いに対応する衝突余裕時間の値は 1.0 秒から 4 秒まで分布しており、2.5 秒に最頻値を持つことになる。この分布データは、安全運転支援システム設計・評価に向けて、事故シナリオ再現のために重要な環境パラメータの一つである。

参考文献

- [1] <http://web.tuat.ac.jp/~smrc/SMRCnew/about.html> (2023/03/28 アクセス)
- [2] 交通事故総合分析センター，四輪車同士の右折対直進の事故，イタルダ・インフォメーション No. 136, 2020.
<https://www.itarda.or.jp/contents/8941/info136.pdf> (2023/03/14 アクセス).

第3章 交差点右折時の死角の存在およびヒヤリハット多発交差点の解析

3.1 はじめに

本章では，東京農工大学スマートモビリティ研究拠点で収集したドライブレコーダーの走行データを利用し，交差点右折時のリスクの高い場面の特徴の中から死角に着目して分析する．また，図 3.1 に示すように収集したデータから東京と福岡の 2 地点のケーススタディを行う．

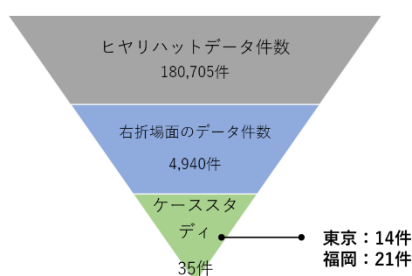


図 3.1 本研究のフロー図

3.2 ヒヤリハットデータベースによる右折場面の特徴

ヒヤリハットデータベースによる交差点右折時のヒヤリハット件数は全体で 4,940 件である．レベル別に見ると低レベル 3,870 件（78 %），中レベル 996 件（20 %），高レベル 74 件（2 %）と昨年度とほぼ同じで低レベルの割合が 7 割以上を占めている（図 3.2）．

また，ヒヤリハットデータで検索可能な 5 地域（東京，札幌，秋田，静岡，福岡）の分布をみると，東京 1,503 件（31 %），福岡 1,459 件（30 %）が多く，次に札幌 959 件（19 %），静岡 802 件（16 %），秋田 217 件（4 %）と続く（図 3.3）．

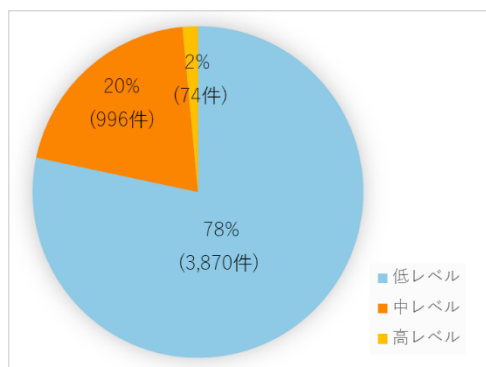


図 3.2 ヒヤリハットレベル別構成比率
（右折ヒヤリ N=4940）

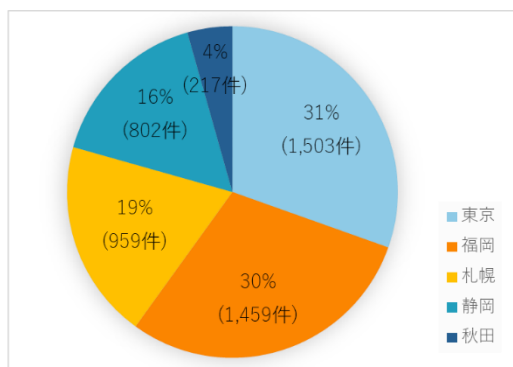


図 3.3 地域別構成比率
（右折ヒヤリ N=4940）

3.3 交差点内の死角の分類

図 3.2, 図 3.3 に示した 4,940 件について, 自車の右折時に死角があるかどうかを 1 件ずつ映像で確認した。また, 右折時に死角があると確認された場合には, 何で死角になっていたかを記載した。その結果, 図 3.4 に示すように, 右折時の死角には大きく分けて「先行車による死角」, 「対向車による死角」, 「その他の死角」に分類された。なお, データによっては, 先行車と対向車がどちらも死角となる場合があったが, この場合は, ヒヤリハットに, より影響を与えた死角のみをカウントした。そのため, 1 データにつき「先行車による死角」と「対向車による死角」を重複してカウントはしていない。

3.3.1 先行車による死角

四輪車（先行車）の後について右折したところ, 先行車が死角となり, 陰に隠れて見えなかった直進対向車とぶつかりそうになったケースである。この場合, 先行車は右折のケースだけでなく, 左折や直進の場合もあった（図 3.5）。

3.3.2 対向車による死角

交差点で対向右折車が死角となり直進対向車が見えなかったケースである。直進車が来ないと思い右折をしたところ, 対向右折車の陰から対向直進車が出てきてぶつかりそうになったケースをカウントした（図 3.6）。

3.3.3 その他の死角

先行車や対向車などの四輪車以外の死角である。「その他の死角」は, ①構造物がある, （中央分離帯やガードレールがあり, 対向直進車が見えにくい）, ②道路形状（坂の上にある交差点で, 自車、対向車共に坂を上りきらないとお互いが見えにくい。カーブで対向車が見えない）, ③対向車の過失（対向直進車が自車の車線にはみ出て来た。無信号交差点で自車ドライバが対向車接近を見落としていた。対向右折車のライトが眩しく見えない）の 3 つに分類した（図 3.7）。

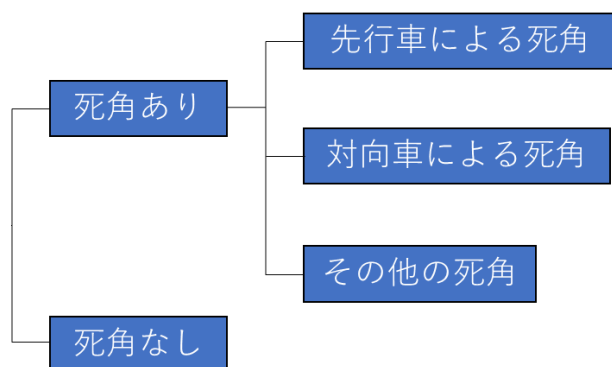


図 3.4 交差点内の死角の類型



図 3.5 先行車によって対向直進車が見えなくなったイベントデータの一例



図 3.6 対向車線に存在する右折待ち車両によって対向直進車が死角に入った場合の一例



図 3.7 その他の死角の例

ヒヤリハットデータベース 4940 件の死角の分類結果を図 3.8 に示す。その結果、死角が無い場合が 3,089 件（63%）であり全体の 6 割を占める。死角がある場合は、対向車による死角が 1,159 件（23%）と一番多く、次に先行車による死角 552 件（11%）、その他の死角 140 件（3%）であった。

今回の結果では、交差点右折時の周辺環境情報では、先行車による死角よりも対向車による死角が多かった。

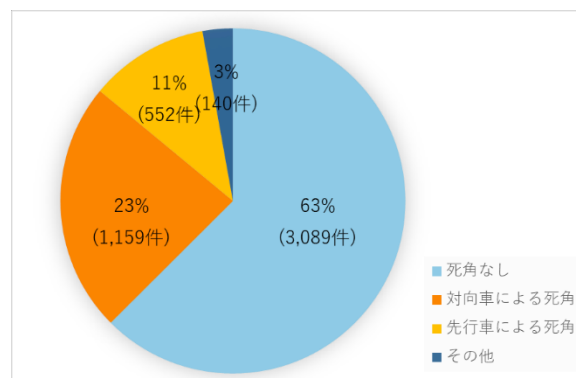


図 3.8 死角の分類別構成比率

3.4 ケーススタディ選定方法と分析方法

本節では、ケーススタディの場所の選定方法と分析方法について述べる。

3.4.1 地点の選定方法

図 3.3 で述べたように、ヒヤリハットデータベースから得られた右折場面 4,940 件は、

地域別でみると東京 1,503 件（31%）と福岡 1,459 件（30%）のデータが多い。そこで、ケーススタディの地点を東京と福岡から 1 地点ずつ選定した。

具体的には、ヒヤリハットデータベースの中から同地点のヒヤリハット数を検索し、データ数の多い 2 地点を選定した。この 2 地点は、交通事故総合分析センターが交通事故の発生状況をマップ上で公開しているメッシュ別生活道路事故件数^[1]においても比較的事故件数の多い場所である。

3.4.2 分析方法

3.4.1 によって選定された地点のヒヤリハットデータについてアノテーションを設定した（表 3.1）。道路環境文脈として、地図情報に設定可能である静的周辺環境情報と、交通量や先行車などの他者の行動によって変化する動的周辺環境情報、天気や時間などの地図情報以外に設定可能であるその他の周辺環境情報に分けた。昨年度報告のアノテーション定義と異なる点は 2 点ある、1 つは、動的周辺環境情報の「先行車」を「死角」とし、先行車の他に死角となる対向車の状況についても区分した。2 つ目は、その他の情報に「信号」を追加している。これは、ヒヤリハットが起きた時点で信号が青か否かで区分している。「信号」の設定を追加することによって、黄色信号や赤信号で直進してきた対向車の状況が確認できる。アノテーション設定後には、2 章の分析と同様に距離測定を行った。

道路環境文脈	項目	定義		
静的周辺環境情報	地域	住宅街	ビジネス街 (繁華街を含む)	その他 (郊外など)
	交差点信号	無		有
	車線数	1車線		2車線以上
	右折レーン	無		有
	交差点の形状	T字路	4差路	その他
動的周辺環境情報	歩行者	0～2 (少ない)	3～9 (普通)	10～ (多い)
	交通量	0～2 (少ない)	3～9 (普通)	10～ (多い)
	駐車車両	0～2 (少ない)	3～5 (普通)	6～ (多い)
	死角	無		有 (先行車・対向車・その他)
その他の周辺環境情報	天候	晴 or 曇		雨 or 雪
	時間	日中		夜(ヘッドライト点灯)
	信号	青信号		黄・赤信号

表 3.1 アノテーション定義

3.5 交差点の概要

本節では、3.4 の選定方法で決定した 2 つの交差点の概要（表 3.2）について述べる。

3.5.1 呉服橋交差点（東京都）

呉服橋交差点は東京都中央区八重洲の永代通りと外堀通りの十字路である。観光やビジネスの中心である東京駅に近いこと、昼夜問わず交通量の多い場所である。車線数も片側 5 車線と幅広く、外堀通りの道路幅は、片側約 13m（全体 38m）である^[2]。交差点の一角は再開発事業が始まっており、地上 44 階、高さ約 217m の超高層ビルが建設されている^[3]。

ヒヤリハットデータ数を見ると呉服橋交差点南（外堀通り）から東（永代通り）へ右折する場面が一番多く 14 件確認された。内訳は、05 年 1 件、07 年 4 件、11 年 1 件、18 年 2 件、19 年 2 件、20 年 3 件、21 年 1 件であり、レベル別にみると、高レベル 1 件、中レベル 6 件、低レベル 7 件である。

3.5.2 天神交差点（福岡県）

天神交差点は福岡県福岡市中央区天神の明治通りと渡辺通りの十字路である。明治通りに沿ったビジネス街と渡辺通に沿ったショッピング街が交差した場所であり、交通量が 1 日を通じて多い場所である。天神交差点も地上 19 階、高さ約 97 m の大型複合施設の建替工事が行われている場所である^[4]。

交差点西（明治通り）から南（渡辺通り）へ右折する場面のヒヤリハット数が一番多く 21 件であった。内訳は、2013 年 4 件、14 年 2 件、15 年 5 件、16 年 7 件、17 年 2 件、18 年 3 件、19 年 1 件、20 年 1 件、21 年 1 件であり、レベル別にみると、中レベル 1 件、低レベル 25 件である。

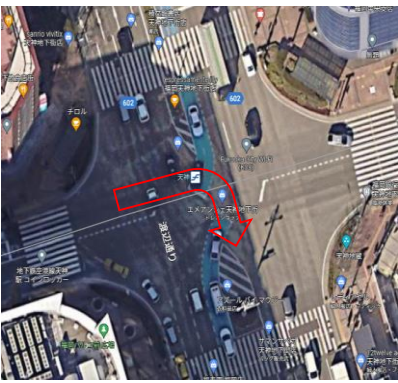
交差点名	呉服橋交差点	天神交差点
地点	東京都中央区八重洲1丁目11	福岡県福岡市中央区天神2丁目11
交差点の概要	東西:国道1号・国道20号（永代通り） 南北:東京都道405号外濠環状線（外堀通り）	東西:福岡市道 千代今宿線（明治通り） 南北:福岡県道 後野福岡線（渡辺通り）
車線数	片側5車線	片側2車線
ヒヤリハットデータ数	交差点南（外堀通り）から東（永代通り） n=14 (高レベル1, 中レベル6, 低レベル7) (05年1件, 07年4件, 11年1件, 18年2件, 19年2件, 20年3件, 21年1件)	交差点西（明治通り）から南（渡辺通り） n=21 (中レベル1, 低レベル20) (13年3件, 14年2件, 15年5件, 16年4件, 17年1件, 18年3件, 19年1件, 20年1件, 21年1件)
平面図 (Google マップを加工して作成)	 	 

表 3.2 交差点概要

3.6 道路環境文脈

本節では、2 地点の道路環境文脈について述べる。道路環境文脈は大きく分けて「静的周辺環境情報」、「動的周辺環境情報」、「その他の周辺環境情報」の 3 つに区分される。

3.6.1 動的周辺環境情報

地図情報に設定可能な静的周辺環境情報には地域や道路情報が該当する。表 3.3 に示す通り、2 地点とも同じ定義に分類された。具体的には、周辺にビルや繁華街のあるビジネス街で、信号が有り車線数は多く右折レーンもある交差点である。

3.6.2 動的周辺環境情報

動的周辺環境情報は、交通量や先行車などの他者の行動によって変化する。表 3.4 に示す通り、歩行者は普通が過半数（呉服橋 50 %，天神 48 %）であった。また、どちらの交差点も交通量は普通（呉服橋 100 %，天神 90 %）で駐車車両は少ない（呉服橋 100 %，天神 100 %）。死角に関しては、ほとんどが先行車や対向車などの死角があり、死角の無いデータは呉服橋 7 %，天神 10 % であった。死角がある場合を見ると、両交差点とも対向車が一番多く（呉服橋 71 %，天神 71 %），先行車による死角（呉服橋 14 %，天神 19 %），その他の死角（呉服橋 7 %，天神 0 %）と続く（図 3.9）³。

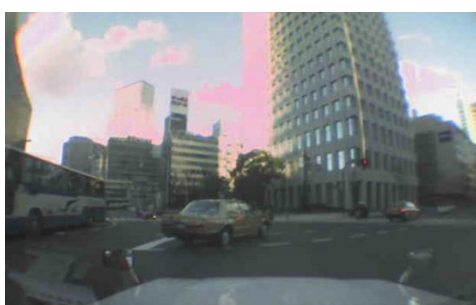


図 3.9 その他の死角 例

3.6.3 その他の周辺環境情報

その他の周辺環境情報には、天気や時間などの地図情報以外に設定可能な情報のことであり、ここでは天候、時間、信号を区分した。今回のデータでは、天神の 2 件（10 %）を除き晴れ又は曇り（呉服橋 100 %，天神 90 %）であり路面は乾燥している。時間は呉服橋が全て日中に対し、天神は日中と夜が同程度だった（日中 57 %，夜 43 %）。

³ 呉服橋交差点は右折レーンが 2 車線ある。進行方向から見て左側の右折レーンから右折した他車が死角になり、右側の右折レーンにいた自車が対向直進車に気づかなかった例である。

信号は自車がブレーキを踏んだ時の信号の色である。信号が黄色から赤色への変わり目であれば、対向車が無理に直進したと考えられる。呉服橋は1件を除いて青信号であったが（青信号 93 %，黄・赤信号 7 %），天神交差点は 9 件（43 %）が黄・赤信号であった。

道路環境文脈	項目	定義		
静的周辺環境情報	地域	住宅街	ビジネス街 (繁華街を含む)	その他 (郊外など)
	交差点信号	無		有
	車線数	1車線		2車線以上
	右折レーン	無		有
	交差点の形状	T字路	4差路	その他

表 1.3 静的周辺環境情報の特徴

動的周辺環境情報	項目	呉服橋 (n=14)		天神 (n=21)	
歩行者	0～2(少ない)	5	36%	5	24%
	3～9 (普通)	7	50%	10	48%
	10～ (多い)	2	14%	6	29%
交通量	0～2(少ない)	0	0%	0	0%
	3～9 (普通)	14	100%	19	90%
	10～ (多い)	0	0%	2	10%
駐車車両	0～2(少ない)	14	100%	21	100%
	3～9 (普通)	0	0%	0	0%
	10～ (多い)	0	0%	0	0%
死角	無	1	7%	2	10%
	有(先行車)	2	14%	4	19%
	有(対向車)	10	71%	15	71%
	有(その他)	1	7%	0	0%
その他の周辺環境情報	項目	呉服橋 (n=14)		天神 (n=21)	
天候	晴 or 曇	14	100%	19	90%
	雨 or 雪	0	0%	2	10%
時間	日中	14	100%	12	57%
	夜	0	0%	9	43%
信号	青	13	93%	12	57%
	黄・赤	1	7%	9	43%

表 3.2 動的周辺環境情報・その他の周辺環境情報の集計結果

3.7 右折時の対向直進車発見地点における相対距離と自車速度

本節では、自車が対向直進車に気づいてブレーキを踏んだ瞬間（対向直進車発見地点）での自車と対向直進車の相対距離と自車の速度の距離計測を行った⁴。

3.7.1 死角別：右折時の対向直進車発見地点における相対距離と自車速度

対向直進車発見地点での自車と対向直進車の相対距離と自車の速度を死角別に表したグラフを、図 3.12（呉服橋交差点）と図 3.13（天神交差点）に示す。グラフの青丸は死角なし、赤丸は先行車による死角、黄丸は対向車による死角、黒丸はその他の死角を示す。

呉服橋交差点は、対向車発見地点から対向車までの距離は、天神交差点と比較すると 8.91 m から 43.39 m と幅広く分布する。自車の速度は 5.7 km/h から 19.8 km/h である。右折レーンで一度停止してからの発進になるので速度はあまり出ていない。

天神交差点は、対向車発見地点から対向車までの距離は 17.22 m から 41.93 m で、呉服橋交差点と比べると、自車が対向車を発見する地点が比較的同じ位置である。自車の速度は 0.39 km/h から 17 km/h である。呉服橋交差点と同様で、右折レーンで一度停止してからの発進になるので速度はあまり出ていない。

3.7.2 信号の状況別：右折時の対向直進車発見地点における相対距離と自車速度

対向直進車発見地点での自車と対向直進車の相対距離と自車の速度を、信号の状況別に表したグラフを図 3.14 と図 3.15 に示す。自車側から見た信号が青信号の場合を青色、黄・赤信号の場合を赤色で表している。また、その時の先行車の有無についても区分している。青や赤の塗りつぶしは自車の前に先行車がいる場合、青や赤の白抜きは先行車が無い場合を表している。

呉服橋交差点と天神交差点は、自車の進行方向に右折矢印式信号機が設置されている（図 3.10，図 3.11）。したがって、右折矢印信号が出てから右折をした場合、対向車は直進しないはずである。



図 3.10 呉服橋交差点の信号機

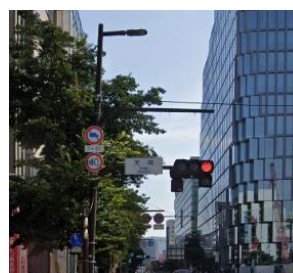


図 3.11 天神交差点の信号機

出典：Google map を加工して作成

⁴ 距離計測の方法は、2 章（2.3 距離計測）参照

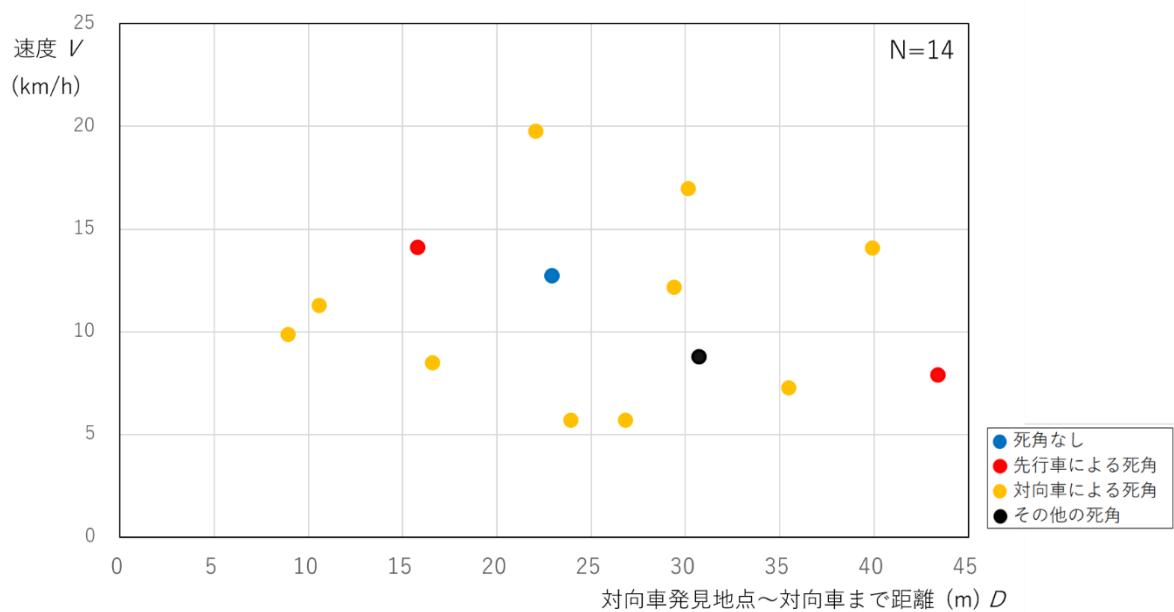


図 3.12 死角別：右折時の対向直進車発見地点における相対距離と自転車速度
(呉服橋交差点)

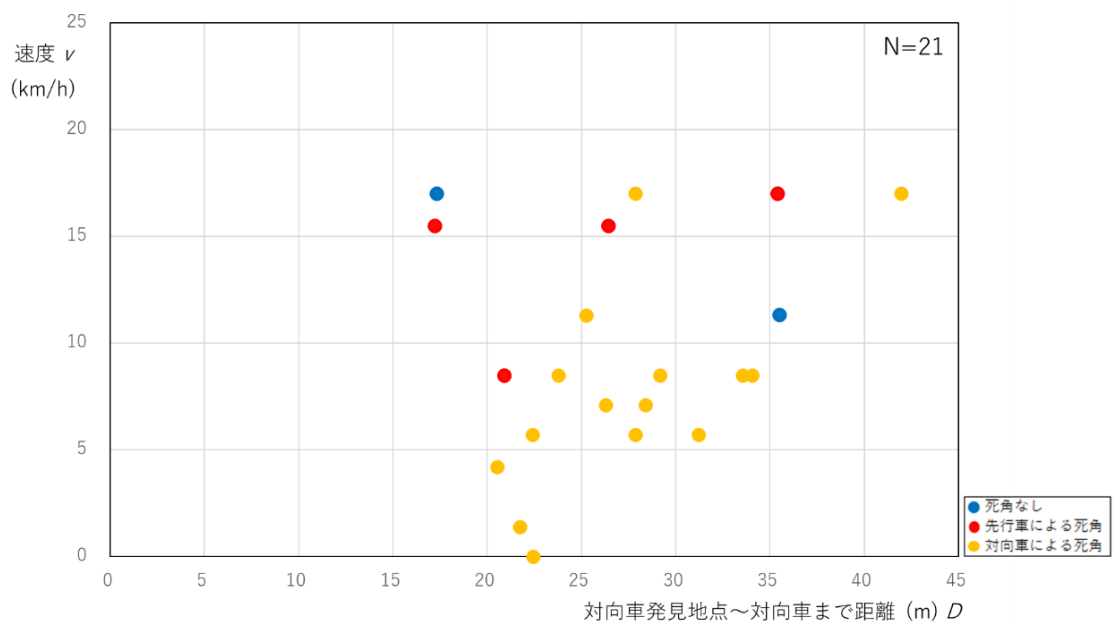


図 3.13 死角別：右折時の対向直進車発見地点における相対距離と自転車速度
(天神交差点)

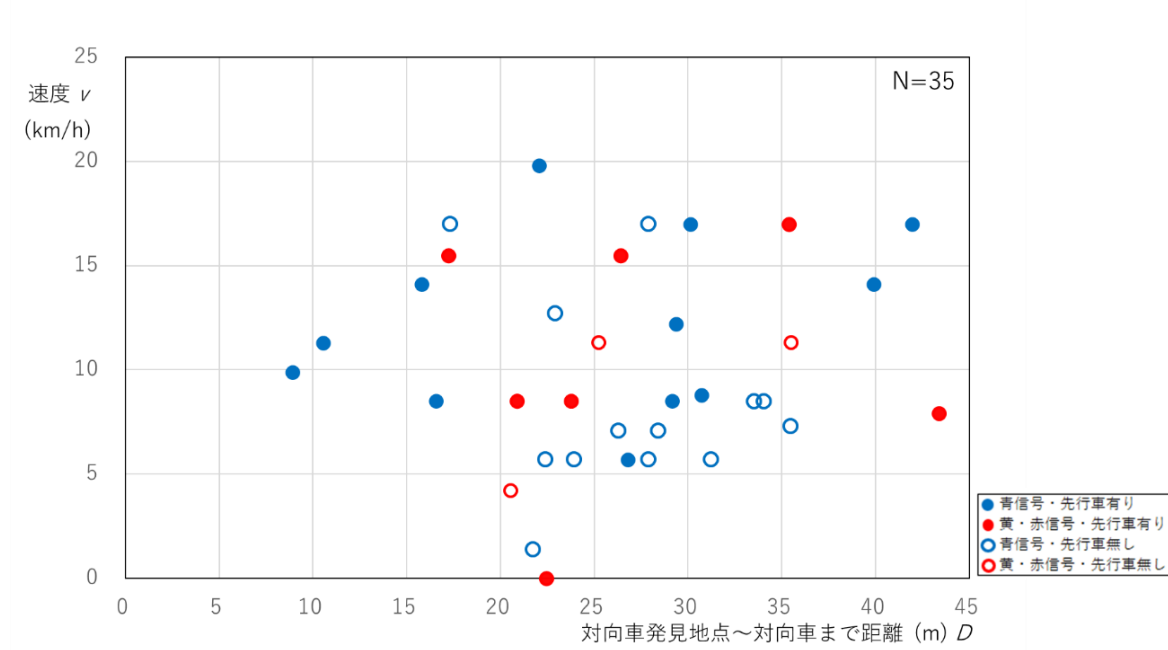


図 3.14 信号の状況別：右折時の対向直進車発見地点における相対距離と自転車速度

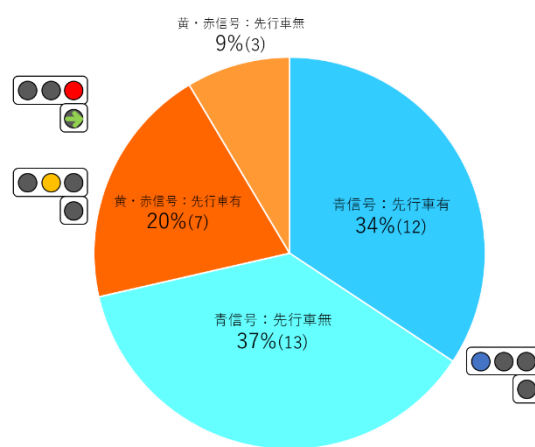


図 3.15 対向車発見地点時の信号の状況と先行車の有無

3.8 まとめ

本章では、東京農工大学スマートモビリティ研究拠点で収集したドライブレコーダの走行データを用いて、交差点右折時になんらかの要因で死角が存在する走行シナリオに焦点を当て分析を行った。

これらの結果から、交差点での右折場面での対向直進車発見地点では先行車と対向車による死角が発見の遅れにつながる交通環境要因になることが明らかになった。

交通量の多い交差点では、対向車線に存在する右折待ちの車両などの死角の存在や対向車線数の多さにより、安全確認を行わなければならないポイントの多い走行区間である。ヒヤリハットに至ったケースを分析してみると、右折するドライバは、過去の経験から対向直進車はそこにはいないと思い込んで安全確認を怠った可能性が考えられる。

また、ドライバは「先行車が右折したので対向車は来ていない」、「先行車についていけば安心だ」という心理が働き、先行車の右折の実行によって安全がすでに確認されたはずだという思い込みが生じてしまう。

したがって、経験豊富なドライバの認知・判断・操作の行動モデルとして、右折する際に死角をしっかりと認知して、その背後に対向車が存在し向かって来るかもしれないという知識のもとに、衝突が起きないように適切な車速で交差点を通過すべきである。

今後のさらなるヒヤリハットの低減に向けて、死角に対応可能な予防安全対策ができるか考える必要がある。

参考文献

- [1] 公益財団法人交通事故総合分析センター，生活道路事故メッシュ図．
https://www.itarda.or.jp/web_map（2023/03/14 アクセス）．
- [2] 東京都 HP，報道発表資料，2021 年 11 月 29 日，都市整備局．
<https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2021/11/29/04.html>
（2023/03/14 アクセス）．
- [3] 23 区内都道検索・閲覧システム．<https://tokyoto.roadic-tokyo.org>
（2023/03/14 アクセス）．
- [4] 西鉄グループ，創造交差点福ビル街区建替プロジェクト，
https://www.nnr.co.jp/new_fukubiru/（2023/03/14 アクセス）．

第4章 画像認識により対向車状態の推定

4.1 はじめに

自動運転や安全運転の分野において、車の周りの環境や目標物の認識と理解は重要な課題である。車の周りの環境や目標物には、自動車、歩行者、自転車、車道線、交通信号などが含まれる。特に、対象車の速度や距離などの情報を予測し、自動車事故の防止につながる事が期待されている。

これらの情報を検出するには、現在、様々な技術が用いられている。例えば、レーダーや超音波センサーなどがあるが、これらのセンサーは高価であり、複雑な取り付けが必要となるため、普及には課題がある。そのため、車載カメラを利用することで、低コストかつ簡単な取り付けが可能となるため、近年注目されている。[1][2]

しかしながら、車載カメラだけを使用して検出することには、いくつかの制限がある。例えば、車載カメラから得られる画像情報は、角度や距離によって大きく異なる。また、夜間や悪天候の場合、画像の品質が低下することがあり、車の周りの環境や目標物の検出が困難になることがある。

本章では、TUAT のヒヤリハットデータベース内のビデオに含まれる対向車オブジェクトの距離と速度の検出方法について、以下の6つの部分に分けて紹介する。

4.2. 画像検知技術に基づく相対位置の推定. 4.3. 対象車のトラッキング. 4.4. 対象車両の相対変位の推定. 4.5. 自車速度の取得と最適化. 4.6. 対象車両の移動状態の推定

4.2 画像検知技術に基づく相対位置の推定

4.2.1 2DBounding Box と 3DBounding Box

自動車などの目標物の検出を画像から行う場合、2DBounding Box 検出技術の使用がまず思い浮かぶ。確かに、2DBounding Box の検出は、多くの分野で高精度の検出結果を得ることができる成熟した技術である[3][4]。しかし、図 4.1 に示されるように、2DBounding Box は、目標物の左上隅と右下隅の画像上の座標位置情報のみを提供し、目標物の正確な距離、回転角度、および目標物のサイズなどの情報をより詳細に把握することは困難である。そのため、3DBounding Box は、より正確な位置を世界座標系にマッピングし、目標物の回転方向情報に基づいて、次に目標物がどのように移動するかを予測することができる。

3DBounding Box の検出には、以下のようないくつかの難点がある：

1. 3DBounding Box の検出には、立体情報または画像の深度情報が必要。そのため、多くの高精度なアルゴリズムは、レーダーなどのセンシングデバイスから取得されたポイントクラウドデータに依存している。二次元の画像には、各ピクセルの深度情報が欠落しているため、TUAT ヒヤリハットデータベースのようなドライブレコーダーだけで収集されたデータに対して、補助情報に依存せずに画像だけを使用して 3DBounding Box の検出を行うこ

とは、依然として大きな課題になる。

2. 画像のトレーニングには、多数のアノテーションされたラベル情報が教師データとして必要であり、3D 検出ボックスのラベルデータは、2D 検出ボックスの4つの座標情報以外に、車両サイズ、実際の位置、回転角度など、さまざまな情報が必要である。これは、ラベルデータのキャリブレーションに関連する人工コストにとって非常に高い。

3. 上記の点に関連する問題として、人工的にラベル付けされたデータがない場合、検出結果の精度をどのように定量的に評価するかという問題が生じる。

次は、上記の3つのポイントを踏まえた解決策をご紹介します。

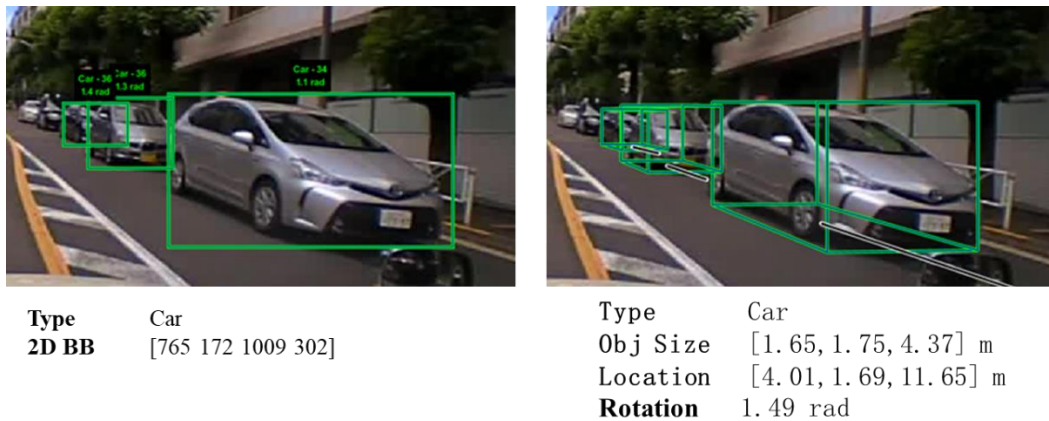


図 4. 7 2D Bounding Box と 3D Bounding Box の検知結果

4.2.2 Depth Encoder を使った 3D Bounding Box の予測

単眼カメラを使用した 3D 物体検出は長い間困難なタスクと考えられてきた。ほとんどの既存手法では、従来の 2D 物体検出器に従い、オブジェクトの中心を基準に位置を特定し、中心周辺の特徴量によって 3D 属性を予測している。しかし、局所的な特徴量のみを使用すると、シーン全体の 3D 空間構造を理解することができず、画像全体の文脈やオブジェクト間の深度関係を無視してしまう。本研究では、深度誘導トランスフォーマーを使用した単眼映像認識フレームワークである MonoDETR[5]を改良し、モノクライテリア映像から 3D オブジェクトの検出を行う。MonoDETR は、通常の Visual Encoder に加えて Depth Encoder を追加し、深度情報を推定することで、2D 画像から End to End での 3D オブジェクト検出を実現している。

4.2.3 転移学習を用いて手動での 3D ラベリング作業を削減する

機械学習において、学習データの準備は非常に重要である。アルゴリズムが予測するために必要なパラメータを決定するために使用される。すなわち、機械学習アルゴリズムは、適切に訓練されたデータセットから学習し、新しいデータに対して予測を行う。そのため、学習データの質が高くなければ、アルゴリズムが正確な予測を行うことは難しくなる。

3DBounding Box の注釈にはいくつかの困難がある。3DBounding Box は、物体の立体的な形状を正確に捉える必要があるため、2D 画像よりもはるかに難しいタスクである。また、3DBounding Box の注釈には、多くの時間とコストがかかる。さらに、3DBounding Box の注釈は主観的な判断が必要であり、注釈者の経験や知識によって注釈の精度が異なることがある。

公開データベースを使用することで、データセットの多様性を増やし、モデルの汎化性能を向上させることができる。転移学習は、すでに訓練されたモデルを新しいタスクに適用することで、新しいタスクを学習するためのデータセットが不足している場合に特に役立つ。KITTI データセットは、自動運転分野で最も広く使用されているデータセットの 1 つであり、車両検出、3D 物体検出、物体トラッキング、道路検出、自己位置推定などのタスクを含んでいる。KITTI データセットは、専門家によって手動でアノテーションされた高品質なデータであり、自動運転技術を開発するための理想的なデータセットとなっている。また、TUAT データベースのアノテーションには、人間の注釈者が手動で Bounding Box を作成する必要がある。しかし、KITTI データベースのアノテーションは、すでに高品質な Bounding Box が付与されている。そこで、転移学習を用いることで、KITTI データベースで訓練されたモデルを TUAT データベースに適用し、手動で Bounding Box を作成する作業を低減することができる。

具体的には、KITTI データベースで訓練された 3D 物体検出モデルを TUAT データベースに適用する。その後、TUAT ヒヤリハットデータベースの画像をモデルに入力して、物体検出を行う。このとき、KITTI データベースのアノテーションされた Bounding Box を使用して、TUAT データベースの画像に Bounding Box を付与する。これにより、手動で Bounding Box を作成する必要がなくなり、作業の効率化が図れる。



図 4. 8 KITTI データベースのタグ付きデータ



図 4. 9 KITTI データベースの画像比率 (1242×375)



図 4. 10 KITTI 画像の消失点検出結果

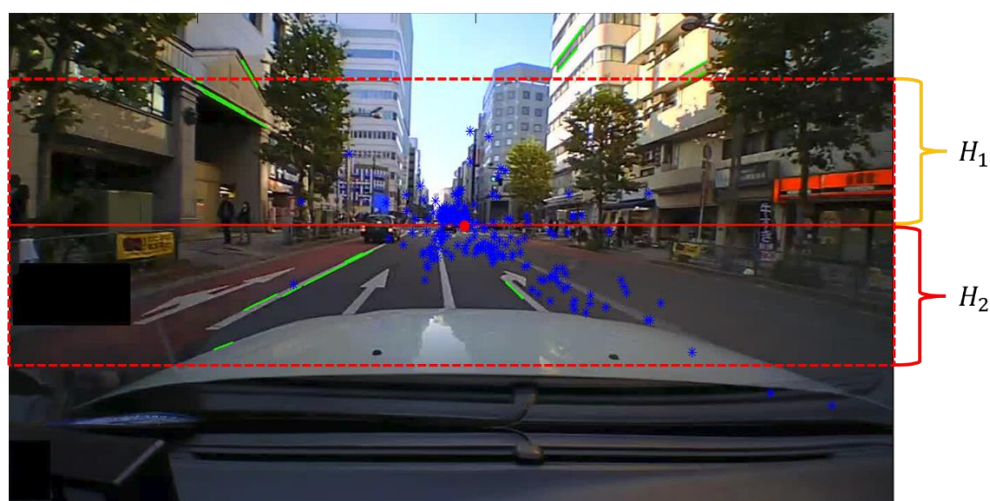


図 4. 11 TUAT データセットの画像で消失点を検出し、基準点として上下に分割する

4.2.2 3D Bounding Box の予測結果

上記の方法を用いて、TUAT データベースの 3DBounding Box 検出結果を図 4.6 に示す。検出結果には、画像のカテゴリと 2D ボックスの座標情報だけでなく、オブジェクトの回転角度、サイズ、カメラからの距離も含まれている。図 4.7 には、より多くの検出結果が示されている。

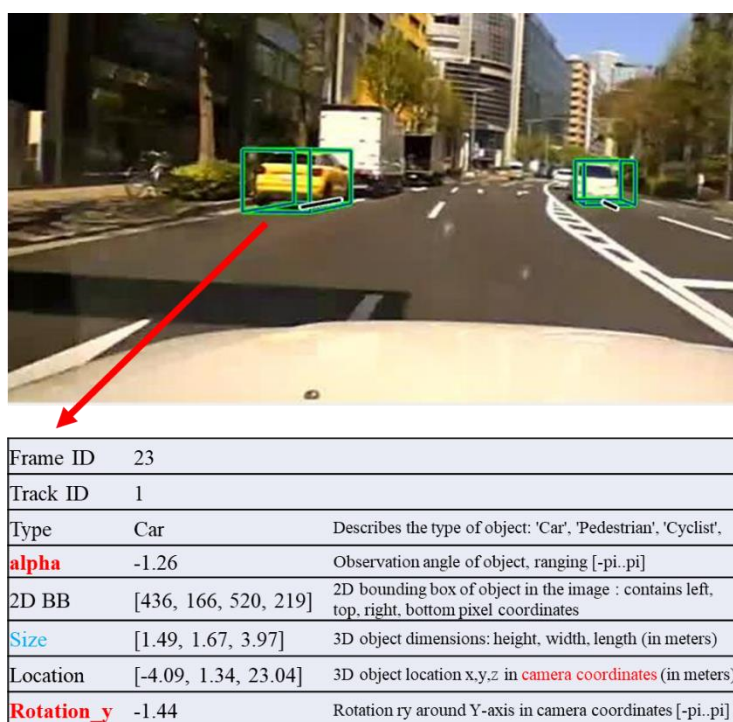


図 4. 12 3D BB の検出結果に含まれる情報

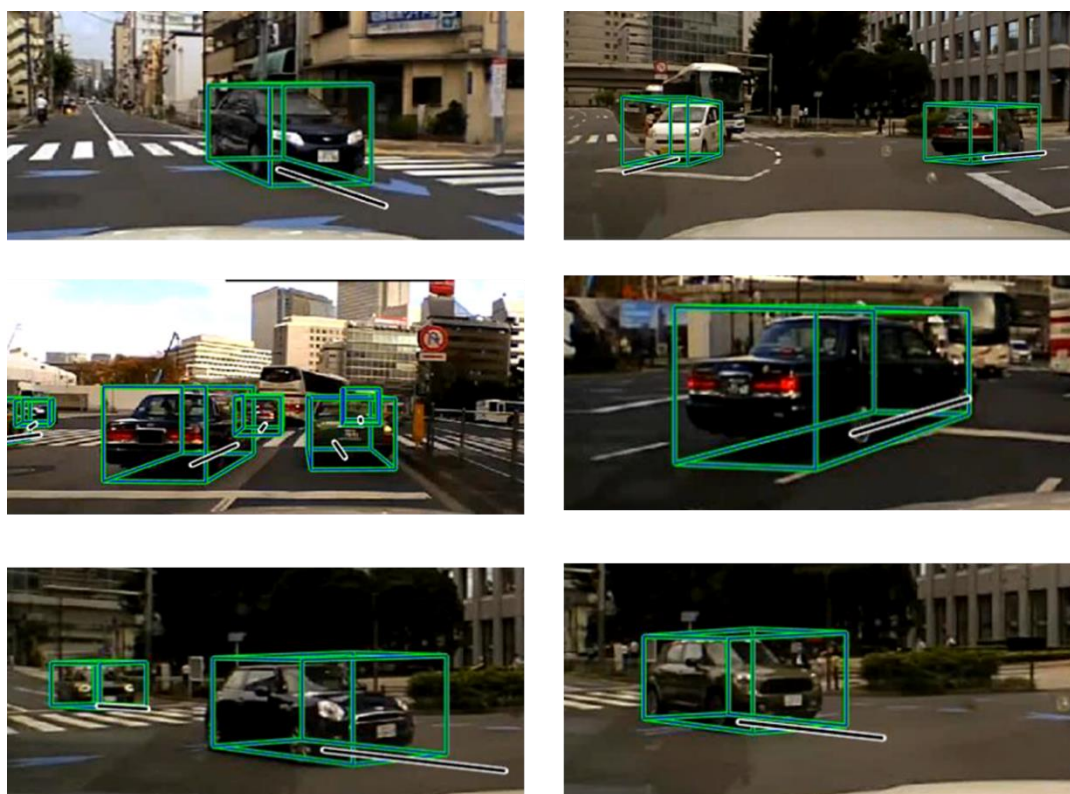


図 4. 13 他の検出結果の例

4. 2. 2 推定結果の検証

図 4. 7 に表示される 3DBounding Box の可視化の結果が、推測された目標のサイズ、距離、および回転角度に基づいて逆に計算された 8 つの座標点の位置によるものである。したがって、可視化の結果が画像の目標に一致する場合、推測された物理情報（サイズ、距離、および回転角度）が正しいことを意味である。ただし、推測結果の正確性を定量的に評価するために、Google Earth Pro を使用して実際の距離を検証している。

図 4. 8 に示すように、まず、写真を観察し、2 点を使用してラインを決定することで、目標が存在する位置を決定する。同時に、参照物に基づいてカメラの位置を決定した（焦点距離のため、カメラ位置は画像の底部ではありません）。次に、これら 2 つのポイントを Google Earth のマップにマッピングし、Google Earth Pro の測定機能を使用して実際の距離を計算する。図 4. 8 に示すように、Google Earth の測定距離は 49. 01m であり、私たちのアルゴリズムの推定距離は 49. 11m で、誤差は 0. 1m 未満である。

同様の方法で、現在のオブジェクト車両がより近い場合の検出結果は、図 4. 9 に示されている。Google Earth の測定距離は 17. 78m であり、私たちのアルゴリズムの推定距離は 14. 77m で、誤差は 0. 01m 未満である。

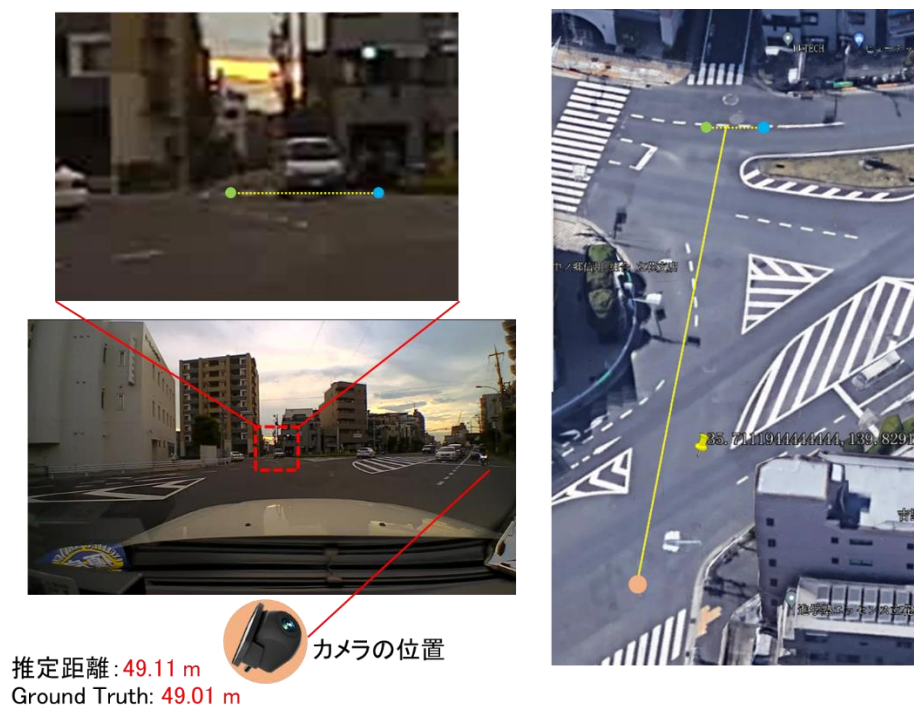


図 4. 14 Google Earth Pro を利用して画像検出結果の検証(1)



図 4. 15 Google Earth Pro を利用して画像検出結果の検証(2)

4.3 対象車のトラッキング

前述の方法では、車両の位置を単一フレーム内で検出できるけれど、前後のフレームで検出された対象が同じオブジェクトであるかどうかを判断するには、追跡アルゴリズムが必要である。現在、物体追跡技術には、様々な手法がある。その中でも、IOU (Intersection Over Union) 交叉法は、物体追跡技術に広く応用されている。図 4.10 に示すように、この手法は、物体の検出結果を交差領域の面積で割った値 (IOU 値) を計算することで、物体を追跡する。

具体的には、物体検出器が画像内の物体を検出すると、その物体は一意的な ID 番号が割り当てられる。その後、次のフレームにおいて、物体検出器によって検出された物体の IOU 値を計算し、一定以上の閾値を超えた場合は、前のフレームでの物体 ID 番号を引き継ぎ、物体を追跡する。この手法は、物体の動きに対して強力な追跡能力を持ち、リアルタイムでの処理が可能です。本研究では、IOU の閾値は 0.5 に設定されている。

$$IOU(a,b) = \frac{Area(a) \cap Area(b)}{Area(a) \cup Area(b)} \quad (4.1)$$

しかし、IOU 交叉法は、物体検出の誤検出に対して弱いという問題がある。誤検出が起きた場合、IOU 値が低くなり、正しい追跡ができなくなってしまう場合がある。将来は、慣性力学などの手法を使用して、追跡アルゴリズムの精度を向上させる必要がある。

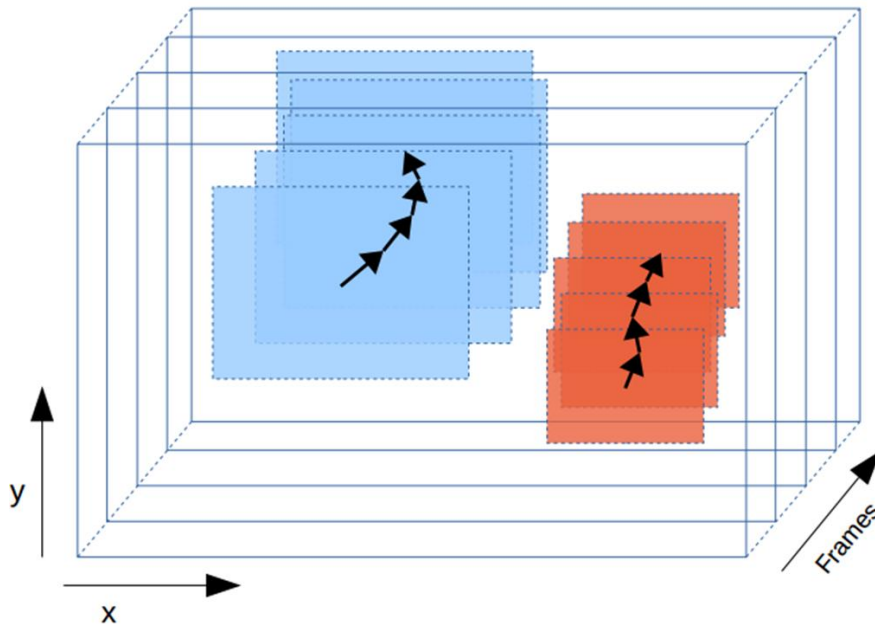


図 4.16 IOU を利用して映像中の対象を追跡

4.4 対象車両の相対変位の推定

上述の追跡アルゴリズムに基づくと、オブジェクトの連続的な移動変化を推定が可能になる。図 4.11 に示されるように、オブジェクトの車両の相対的な距離変化は、前半部分では 2 台の車両が迅速に接近し、後半部分では、自車両の減速により距離の短縮が明らかに緩やかになったことが示した。

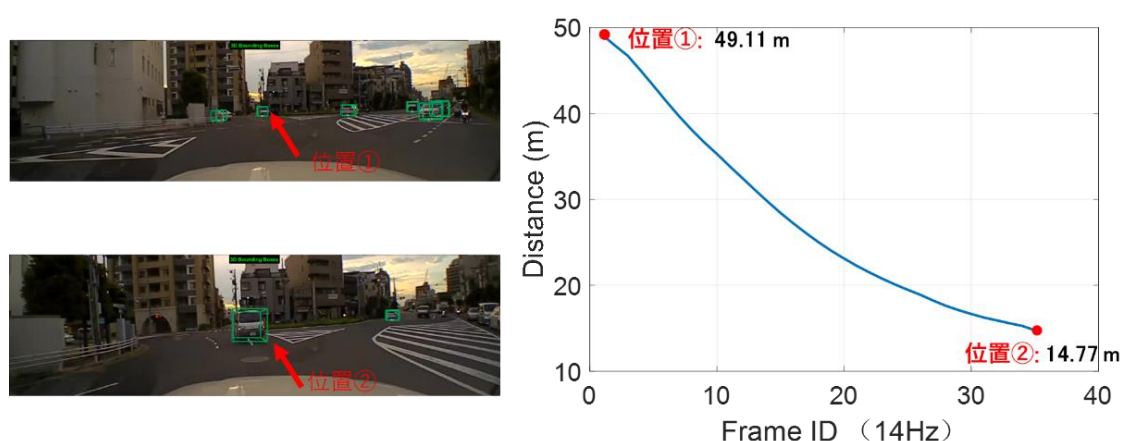


図 4. 17 3D BB 検出と追跡に基づくオブジェクト相対距離の推定

4.5 自車速度の取得と最適化

前のセクションで述べたように、画像検出によって、対象車両との相対距離の変化を推定することができ、それによって相対速度の変化を推定することができる。さらに、対象車両の実際の位置と速度を知りたい場合は、自車の実際の速度を知る必要がある。TUAT のデータベースには、自車の速度情報が記録されている。図 4.12 に示すように、その数値は 2Hz の有効な更新頻度で更新される。ただし、ビデオの更新頻度は 14Hz になるので、Cubic spline 補間法を利用して自車速度を補間してから、相対速度から対向車の速度の推定することが可能になる。

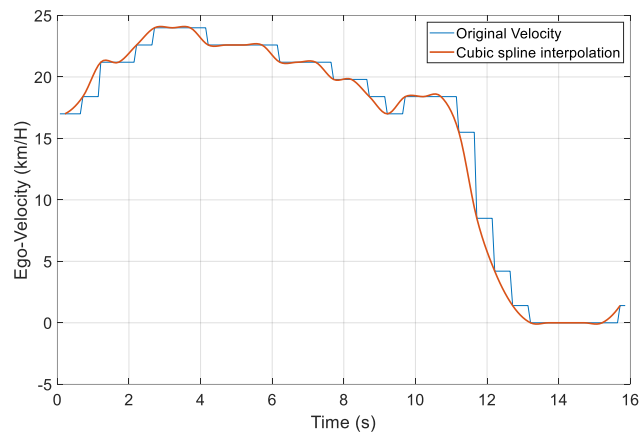


図 4. 18 Cubic spline 補間法を利用して自車速度を補間

4. 6 対象車両の移動状態の推定

次に、一つ例(ID00816537)を使用して、TUAT ヒヤリハットデータベース内の車両の相対移動状態を推定する効果を評価する．図 4. 13 に示すように、交差点で右折する車両のビデオで、直進する黒い対向車両が静止状態から加速し、十字路に入って右折する自車に遭遇し、双方が緊急ブレーキをかける必要が生じた．黒い車両の相対位置をビデオで検出した結果の軌跡は、図 4. 14 に示されている．オブジェクト車両が検出され始めた距離は 54m であり、ビデオ車両が右折するため、x 方向の相対距離が減少すると同時に、横方向の Y 方向の距離も短くなっていることがわかる．

さらに、推定された自車両と対象車両の速度変化は、図 4. 15 に示されている．ビデオ車両は交差点に入る時、ビデオの 6 秒目から多段減速し、対象車はビデオの 8 秒目から始動し加速する．自車両と対象車両は、10 秒目に衝突を避けるために緊急ブレーキをかける必要があった．上記の速度推定の結果は、ビデオ観察の感覚的な結果と一致し、方法の有効性が検証された．

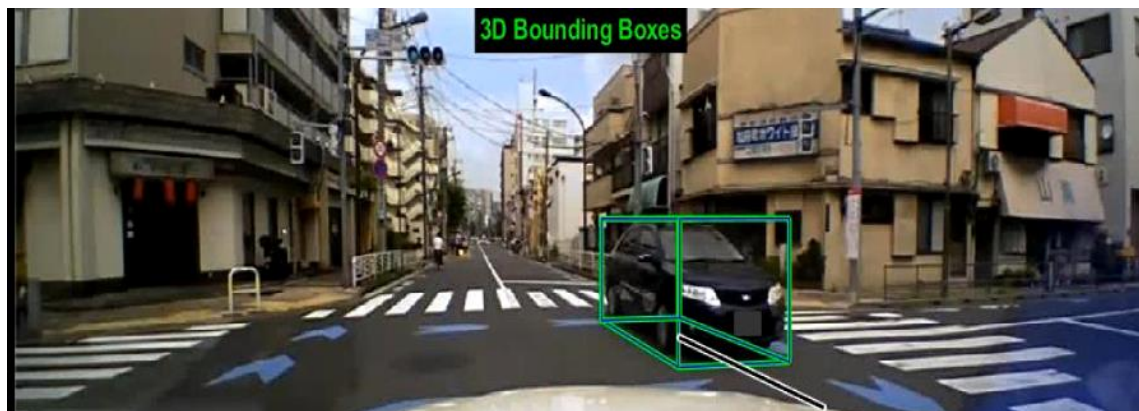


図 4. 19 交差点に右折時のヒヤリハット事例

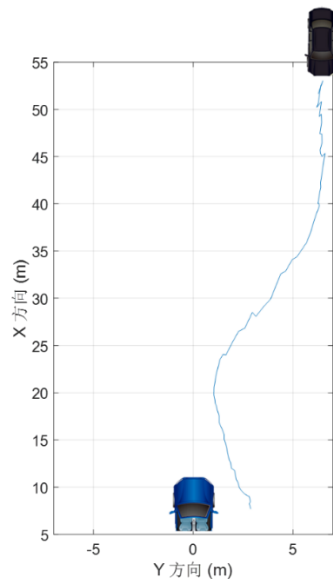


図 4. 20 対向車の相対位置推定

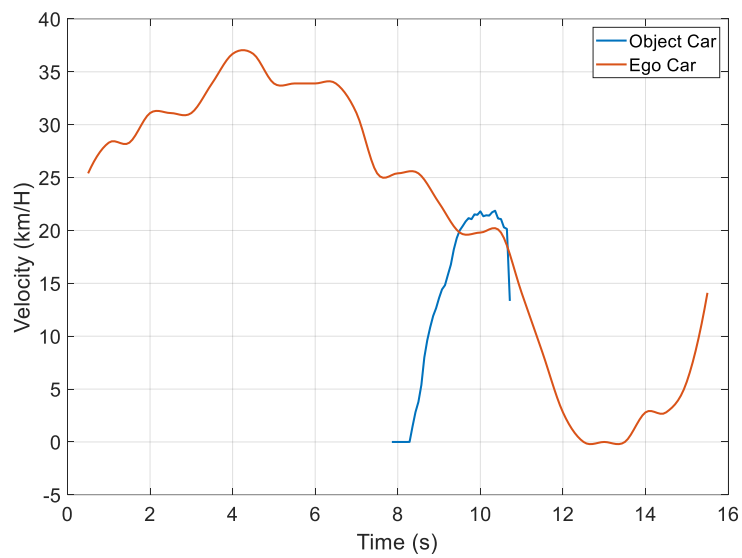


図 4. 21 自車と対向車の車速変化

4.7 まとめ

本章では，TUAT ヒヤリハットデータベース内の車両オブジェクトに対して，画像処理技術を使用して 3D Bounding Box，移動距離および対向車速度を推定する方法を紹介した．検証実験により，この方法の有効性が証明された．

今後は，より多くの分類可能な検出対象を拡張し，3D 検出および追跡アルゴリズムの精度を向上させる必要がある．

参考文献

- [1] J. Yao, S. Ramalingam, Y. Taguchi, Y. Miki, and R. Urtasun, “Estimating drivable collision-free space from monocular video,” *Proceedings - 2015 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV 2015*, pp. 420–427, 2015, doi: 10.1109/WACV.2015.62.
- [2] M. S. Hutchinson and V. N. Gadepally, “Video action understanding,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 134611–134637, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115476.
- [3] K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, and R. Girshick, “Mask R-CNN,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 42, no. 2, pp. 386–397, 2020, doi: 10.1109/TPAMI.2018.2844175.
- [4] W. Liu *et al.*, “SSD: Single shot multibox detector,” *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 9905 LNCS, pp. 21–37, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-46448-0_2.
- [5] R. Zhang *et al.*, “MonoDETR: Depth-aware Transformer for Monocular 3D Object Detection,” 2022, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2203.13310>.

第5章 右折時における死角領域を考慮したリスク予測型自動運転システムに関する研究

5.1 緒言

現在、国内の四輪車の交差点事故の4割を右折時の事故が占めており、右折事故の7割が対向車、二輪車、自転車、および歩行者（以下、対向車等）との事故である(1)。それゆえ、交差点事故を低減するために、車両右折時の対向車等との衝突を回避するシステムの開発が必要とされている。

右折時の衝突回避支援システムの既存技術として、車載センサにより対向車等を検出し、AEB（自動緊急ブレーキ）を作動させて衝突回避を行う技術がある。しかし、停止中の対向車などにより死角が存在する場合、死角から急に飛び出す対象に対しては、回避が間に合わない可能性がある。同じく既存技術として、インフラ協調型支援技術が挙げられるが、通信設備がない交差点では支援を行えないという問題点がある。これに対し先行研究では、飛び出し発生時にAEBの作動で衝突回避できる速度まで、あらかじめ減速するシステムが提案された(2)。しかし、全条件で衝突回避できるわけではなく、停止時の回避対象までの距離を考慮していないため、乗員が不安を感じる可能性が考えられる。

そこで本研究では、インフラ設備を用いずに、車載センサを用いて交差点右折時に死角から飛び出す対向車等との衝突を回避するシステムの開発を目的とする。本稿では、飛び出し発生時の自車両の危険速度領域を考慮した、リスク予測型衝突回避システムを提案する。また、シミュレーションにより、提案システムの有効性と、車載センサの取り付け位置による回避余裕の向上について検証する。

5.2 システムの設計

5.2.1 右折時の危険速度領域の定量化

図1に見通しの悪い交差点右折シーンの略図を示す。図1では、右折をする際に交差点入口付近で停止している対向車の死角から、回避対象が飛び出してくる場面を想定している。飛び出し発生時に自車両の安全な対応を判断するためには、緩やかな減速によって衝突回避が可能な最高速度である安全速度と、回避対象よりも先に通過できる速度を求める必要がある。ここで、回避対象の予測軌道と自車両の予測軌道から衝突予測点(Conflict point)を求め、現在の自車位置から衝突予測点までの円軌道上の距離を $D_{c.p.}$ 、システムの作動遅れ時間を T_d 、緩やかな減速度を a_b とすると、飛び出し発生時に緩やかに減速をし、余裕距離 D_{safe} だけ手前で停止するための安全速度 V_{safe} は式(1)で表される。

$$V_{safe}(t) = a_b T_d + \sqrt{(a_b T_d)^2 - 2a_b (D_{c.p.}(t) - D_{safe})} \quad (1)$$

次に、対向車線において、回避対象の死角からの飛び出し位置から衝突予測点までの距離を D_{obj} 、回避対象の飛び出し速度を V_{obj} 、とおくと、回避対象が飛び出してから衝突予測点に到達するまでの時間 T_{obj} は式(2)で表される。

$$T_{obj}(t) = \frac{D_{obj}(t) - V_{obj}T_d}{V_{obj}} \quad (2)$$

また、自車両の全長を L_{ego} 、自車両が衝突予測点を通過してから回避対象が衝突予測点に到達するまでの余裕時間を PET (Post encroachment time)とみると、飛び出し発生時に自車両が回避対象よりも先に、衝突予測点を、余裕をもって通過できる最低速度 V_{pass} は、式(3)のように表される。

$$V_{pass}(t) = \frac{D_{c.p.}(t) + L_{ego}}{T_{obj} - PET} \quad (3)$$

以上より、想定速度以下で飛び出す回避対象に対する、自車位置ごとの V_{safe} 、 V_{pass} を求めることができる。

この V_{safe} 、 V_{pass} の遷移のモデルを図2に示す。図2における V_{safe} と V_{pass} の間の網掛け部分はジレンマゾーンと呼ばれており、飛び出し発生時の衝突回避のために急加速または急減速が必要であり、危険な速度領域であるといえる。

5.2.2. 飛び出し未発生時の目標加速度の導出

飛び出し発生時に余裕をもって衝突を回避するためには、安全速度以下の速度で走行すればよい。よって、現在時刻から T_p 秒後の安全速度を目標速度とし、減速するために必要な目標加速度 a^* は、現在の自車位置から衝突予測点までの円軌道上の距離 $D_{c.p.}$ 、自車速度 V_{ego} を用いて式(4)のように表される。

$$a^*(t) = \frac{V_{safe}(D_{c.p.}(t) - V_{ego}(t)T_p) - V_{ego}(t)}{T_p} \quad (4)$$

なお自車両の最低速度 V_{min} を設定し、自車速度が V_{min} 以下になると、ジレンマゾーンへ進入する。

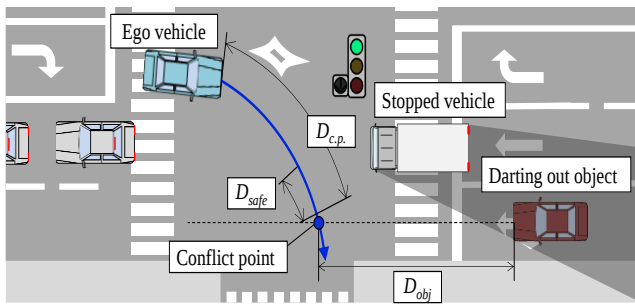


Fig. 1 Darting out scenario at intersection

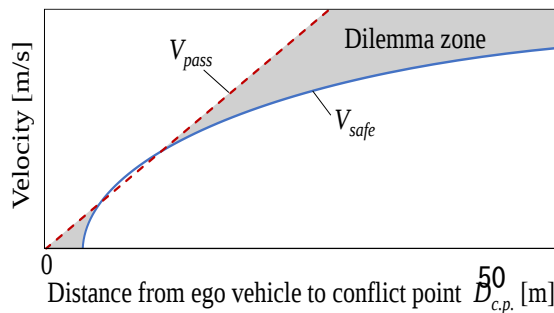


Fig. 2 Model of V_{safe} and V_{pass} transitions

5.2.3. 飛び出し発生時の行動判断

本システムでは、飛び出し発生時に自車速度が図2のどの領域に存在するかで、以下の3つの処理を実行する。

- (1) 自車速度が V_{safe} 以下の場合：緩やかに減速し、 $D_{c.p.} = D_{safe}$ となる地点で停止
- (2) 自車速度がジレンマゾーン内にある場合：AEB を作動させ、減速度 a_{AEB} で減速し、停止
- (3) 自車速度が V_{pass} 以上の場合：現在の自車速度を維持して、回避対象よりも先に衝突予測点を通過

5.3 シミュレーションによる有効性の検証

5.3.1. シミュレーション概要

提案システムを用いて図1のような右折シーンを想定したシミュレーションを行った。片側2車線の市街地交差点において、対向車線に停止車両があり、停止車両の背後の死角から回避対象が60 km/hの速度で飛び出す。自車両は初期速度17 km/hで右折を行う。シミュレーションは、停止車両の位置 D_{stop_offset} を11通りずつ、衝突回避動作を行わなかったときの回避対象と自車両の衝突位置 D_{obj_offset} を11通りずつ変化させて行う。また、提案システム有効性と、センサ取り付け位置による衝突回避性能の違いを調べるために、各走行条件において表1のように、3つの車両状態を設定してシミュレーションをした。各条件における衝突の有無、および停止時の回避対象までの余裕距離を比べ、衝突回避性能を評価する。なお各種パラメータの値は次の通りである。 $T_d = 0.3$ s, $a_b = -2.94$ m/s², $a_{AEB} = -5.89$ m/s², $T_p = 2.0$ s, $V_{min} = 1.0$ m/s。また、目標経路は半径12 mの円弧とし、目標経路追従は一次予測ドライバモデルを用いた。

5.3.2. シミュレーション結果

図3に、自車速度のシミュレーション結果の一例を示す。図3のState 1とState 2より、提案システムによって事前に減速を行うことで、飛び出し検知後すぐに停止ができたことがわかる。また、State 2とState 3より、センサの取り付け位置を右前端にすることで早く検知ができ、AEBの作動なしで、緩やかな減速で停止できたことがわかる。

各条件における衝突の有無と衝突地点までの停止余裕距離の結果を図4に示す。図4は赤から白の濃淡で停止余裕距離の大きさを示している。また、赤いセルに白字でcolは衝突発生条件を、青いセルは回避対象よりも先に衝突予測点を通過したことを示す。図4(a), (b)より、提案システムを搭載することにより衝突発生場面を36件から0件まで、大幅に低減できたことがわかる。しかし、(b)では停止余裕距離が1 m以下の場面が36%と、危険度の高い場面が依然として多くみられる。これに対し図4の(c)では、停止余裕距離が1 m以下の場面が1.7%であり、センサの取り付け位置を前端中心から右前端にすることで停止

余裕距離が増加し、より安全に衝突を回避できたことがわかる。これは、回避対象を早くに検知することで、余裕をもって減速できたと考えられる。

5.4 結論

本稿では、車載センサを用いて交差点右折時に死角から飛び出す対向車等との衝突を回避するシステムとして、飛び出し発生時のジレンマゾーンを考慮したリスク予測型衝突回避システムを提案した。また、シミュレーションにより、本システムの有効性と、車載センサの取り付け位置を従来の前端中心から右前端に付け替えることで、対象を早く検知でき、余裕をもって回避行動がとれることを示した。

今後はドライバとシステムとの運転協調性を検討するため、提案した速度制御支援系をドライビングシミュレータあるいは実車実験に実装し、右折場面での安全性への向上効果を確認する予定である。

参考文献

- (1) 公益財団法人交通事故総合分析センター，“信号交差点における右折事故～右折先の自転車，歩行者に注意～”，イタルダ・インフォメーション No.95(2012)，pp. 4-5.
- (2) 藤波洋平ほか 3 名，“リスク予測型安全速度制御による交差点右折時の衝突回避システムの開発”，日本機械学会第 25 回交通・物流部門大会講演論文集，(2016)

Table 1 Ego vehicle state

	State	On-board system	Sensor mounting position.
1	AEB	Center of front end	
2	AEB + Proposed system	Center of front end	
3	AEB + Proposed system	Right edge of front end	

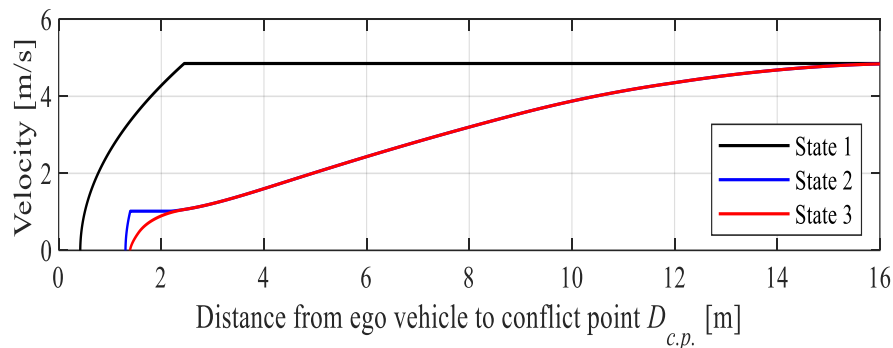
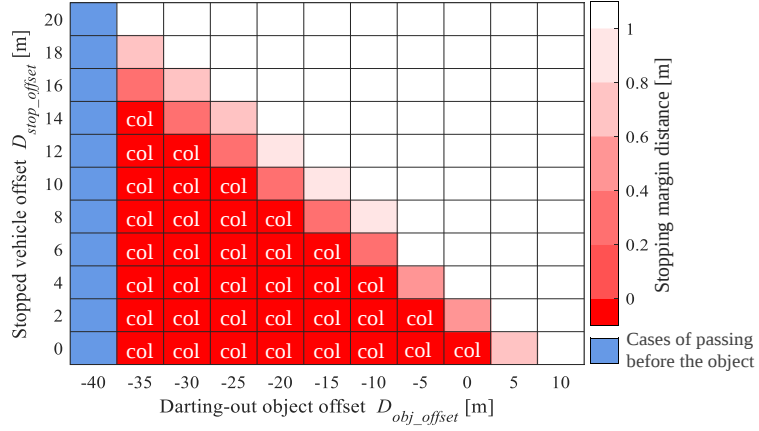
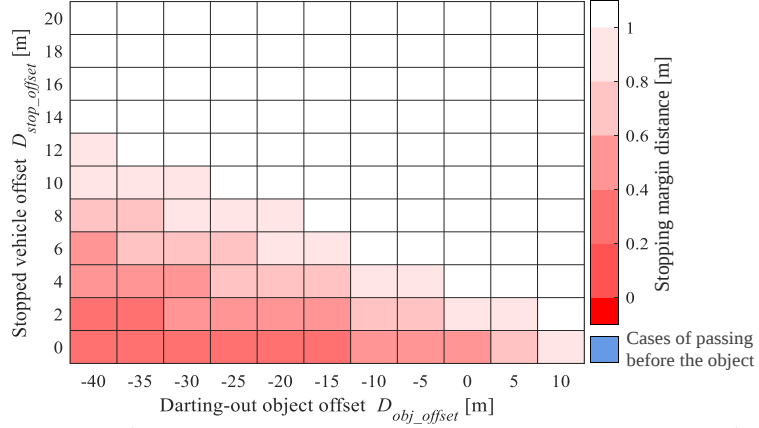


Fig. 3 Comparison of ego vehicle velocity

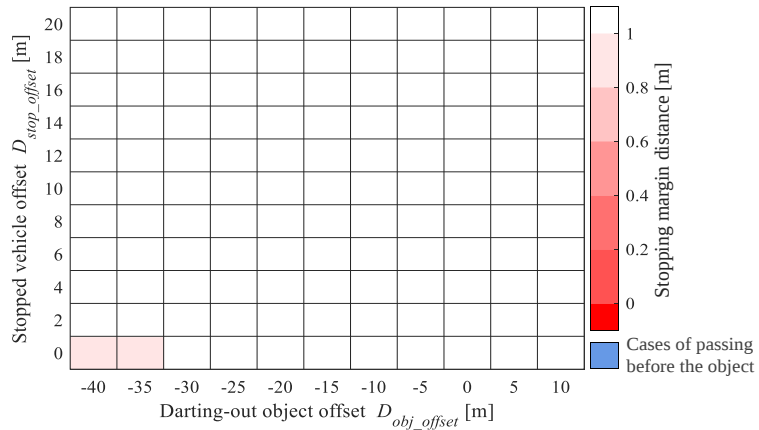
($D_{stop_offset} = 6$ m, $D_{obj_offset} = -10$ m)



(a) State 1(AEB, Sensor position : center)



(b) State 2(AEB + Proposed system, Sensor position center)



(c) State 3(AEB + Proposed system, Sensor position right)

Fig. 4 Collision occurrence and stopping margin distance

第6章 結論

結論

本調査研究は、一般道の交通安全確保に寄与するための調査研究である。特に交差点通過時の衝突事故を防止するための安全運転支援技術として、交差点右折ヒヤリハットに着目し、交通環境文脈を元に知識ベースの危険予測運転モデルを構築する。特に死角からの飛び出しに注目し、ヒヤリハットを誘発した要因を分析する。また、予測された顕在・潜在的危険に対して安全に減速・停止可能な自動ブレーキ制御システムを設計し、シミュレーションを用いてその安全性能向上効果について調査した。

第2章では、タクシー車両に取り付けられたドライブレコーダーから得られた右折ヒヤリハットデータの分析を行った。一般道において起こりうる交差点右折時の衝突危険度を定量的に評価することについて論じた。ドライブレコーダー映像から交通参加者（対向直進車）の飛び出し速度および相対距離等の算出、出現タイミングの分析を行い、右折ヒヤリハットの出現タイミングは、衝突余裕時間に換算すると、1秒から4秒に分布しており、最頻値が2.5秒ほどであった。

第3章では、右折時のヒヤリハットを誘発する要因を分析し、対向車線に存在する右折待ち車両や自車の前方にある車両が死角となったケースを解析した。特定の交差点2ヶ所について取り上げて、右折時に注意すべき点について分析した。先行車が存在する場合、信号の状況にもかかわらず、ドライバの思い込みによってヒヤリハットが生じた例が多々みられた。死角がある場合は、十分に注意しながら右折を行う必要があることが示唆された。

第4章では、ドライブレコーダーの映像データから相手車両の運動状態（位置、速度）を抽出する手法とその結果について述べた。これは事故を含めた危険場面再現のために必要な要素技術である。

第5章では、右折時の衝突リスクを低減する方法として、安全速度を算出するアルゴリズムを提案した。コンピュータシミュレーションの結果によると、緊急自動ブレーキ制御（衝突被害軽減ブレーキ）単体に比べて、本研究で提案した先読み危険予測運転支援システムを加えると、早い段階での減速支援を行うことで衝突回避性能向上への効果があることが確認できた。

以上をまとめると、ヒヤリハットデータベースより、特に大きい交差点では死角が多数存在する。その場所において、万が一交通参加者が突然出現したとしても十分に止まれる速度で走行しなければならないことが確認できた。本調査研究によって、その規範速度で右折走行すれば、事故が未然に防げると定量的に示すことができた。