

修士論文

画像センサを用いた
路車間協調システムに関する研究

A Study on Vehicle Infrastructure
Interaction based on Image Sensing
Technology

指導教官 上條 俊介 准教授



東京大学大学院
情報理工学系研究科
電子情報学専攻

学籍番号・氏名 66419 木間 俊宏

提出日 平成 20 年 2 月 4 日

目次

第1章	序論.....	1
1.1	背景	2
1.2	目的	3
1.3	本論文の構成.....	4
第2章	関連研究	5
2.1	交通事象検出.....	6
2.2	安全運転支援技術.....	6
2.2.1	日本での取り組み.....	6
2.2.2	アメリカでの取り組み	7
2.2.3	ヨーロッパでの取り組み.....	8
第3章	センサによる交通流データ収集.....	9
3.1	超音波センサ	10
3.2	画像センサ	11
3.2.1	画像処理システム.....	13
3.2.2	手動解析による交通流データ収集.....	14
3.3	センサの比較.....	16
第4章	高速道路における事故回避支援システム	18
4.1	事故要因分析	19
4.1.1	事故形態.....	20
4.1.2	事故直前の交通状況	21
4.1.3	道路特性.....	24
4.1.4	事故時の速度、天候、逆車線.....	24
4.1.5	事故発生時の速度推移	25
4.2	事故回避支援方法.....	26
4.3	単体画像センサ開発	29
4.3.1	状態遷移の速度閾値	29
4.3.2	発報時における状態遷移の継続時間閾値	30
4.3.3	解報時における状態遷移の継続時間閾値	31
4.3.4	急減速波検出アルゴリズム	33
4.3.5	例外オブジェクト除去アルゴリズム	34
4.3.6	単体画像センサ処理結果.....	36
4.3.7	感度調整.....	38
4.4	画像センサの連携による急減速波検出.....	40
4.5	効果測定	44

4.5.1	情報提供の有効性.....	45
4.5.2	不感地帯における欠報の影響.....	49
第 5 章	交差点における事故回避支援システム	54
5.1	事故要因分析	55
5.1.1	観測交差点	55
5.1.2	交差点内事故.....	55
5.1.3	事故車両挙動分析.....	56
5.2	事故回避支援方法.....	57
5.2.1	右直事故防止のための直進車両検知	58
5.2.2	右直事故防止のための右折車両検知	59
5.2.3	巻込事故防止のための直進車両検知	61
5.3	画像処理システムによる車両位置検出.....	62
5.3.1	直進車両の位置検出	62
5.3.2	右折車両の検出	64
第 6 章	結論と今後の課題	65
6.1	本研究のまとめ	66
6.2	今後の課題	66
付録	68
謝辞	76
発表文献	77
参考文献	78

表目次

表 3.1 画像センサと超音波センサの比較.....	17
表 4.1 事故分類.....	20
表 4.2 事故形態.....	21
表 4.3 事故発生状況.....	23
表 4.4 事故時速度.....	24
表 4.5 事故時天候.....	25
表 4.6 情報提供位置から各センサまでの距離.....	28
表 4.7 発報閾値.....	31
表 4.8 解報閾値.....	32
表 4.9 急減速波検知実験結果.....	38
表 4.10 画像センサと超音波センサにおける伝播時間の比較.....	39
表 4.11 急減速波が存在している地点と出会う地点.....	41
表 4.12 ドライバにとっての欠報と誤報の定義.....	42
表 4.13 aksk2 で検出した時に発報した場合の欠報と誤報.....	43
表 4.14 各画像センサについて発報した時の欠報率・誤報率.....	44
表 4.15 情報提供の有効性の実験シナリオ.....	47
表 4.16 被験者情報.....	47
表 4.17 どの情報で発報に気づいたか.....	47
表 4.18 視認状況.....	48
表 4.19 追突件数.....	48
表 4.20 各画像センサで発報した場合の不感地帯にいる車両が急減速波に出会う地点	50
表 4.21 不感地帯にいる車両が急減速波に出会う地点.....	50
表 4.22 欠報時の実験シナリオ.....	51
表 4.23 被験者情報.....	51
表 4.24 追突件数.....	52
表 5.1 交通事故種類別件数.....	56
表 5.2 直進車両検知の場合の情報提供範囲の条件.....	59
表 5.3 右折車両検知の場合の情報提供範囲の条件.....	60
表 5.4 巻込事故の場合の情報提供範囲の条件.....	61
表 5.5 誤差平均と標準偏差.....	64

図目次

図 1.1 交通事故発生件数、死傷者数の推移	3
図 2.1 参宮橋地区社会実験	7
図 2.2 交差点支援システム	8
図 2.3 交通情報提供システム	8
図 3.1 超音波センサ	10
図 3.2 超音波センサの原理	11
図 3.3 超音波センサの設置	11
図 3.4 トラッキング結果	12
図 3.5 オブジェクトマップ	13
図 3.6 意味階層構造	14
図 3.7 手動による軌跡修正	16
図 4.1 首都高側道路 4 号新宿線	19
図 4.2 キロポスト別事故件数	20
図 4.3 渋滞延伸末尾における事故	21
図 4.4 渋滞内の疎密境界における事故	22
図 4.5 渋滞内における事故	22
図 4.6 急減速波の伝播	23
図 4.7 事故発生位置	24
図 4.8 事故発生時の速度推移	26
図 4.9 赤坂トンネルの画像センサと超音波センサの位置	26
図 4.10 各画像センサ映像	28
図 4.11 図形表示板	29
図 4.12 発報閾値	30
図 4.13 解報閾値	32
図 4.14 背景の汚れ	34
図 4.15 例外オブジェクトの例 1	35
図 4.16 リージョン	35
図 4.17 例外オブジェクトの例 2	36
図 4.18 単体画像センサの処理結果	37
図 4.19 伝播の様子	39
図 4.20 急減速波が存在している地点と出会う地点	41
図 4.21 各画像センサについて発報した時の欠報率・誤報率	43
図 4.22 ドライビングシミュレータ	45
図 4.23 急減速波伝播速度と占有率と減速度の相関関係	46

図 4.24 減速開始時の速度と減速度の相関関係.....	46
図 4.25 平均速度変化.....	48
図 4.26 平均車頭間隔距離変化.....	49
図 4.27 aksk2 における減速開始時の速度と減速度の相関関係	51
図 4.28 平均車頭間隔距離.....	52
図 4.29 平均想定度	52
図 5.1 駿河台下交差点	55
図 5.2 事故回避支援方法.....	58
図 5.3 右直事故防止のための直進車両検知	59
図 5.4 右直事故防止のための右折車両検知	60
図 5.5 巻込事故防止のための直進車両検知	61
図 5.6 下辺エッジ抽出結果	62
図 5.7 進入車両位置検出結果.....	64

第1章 序論

近年、交通事故死亡者数は減少しているが、交通事故件数は年々増加している。その中で事故削減を目的とした研究開発が国家プロジェクトとして動き出している。本研究では、交差点や高速道路における典型的な事故について、発生メカニズムを定量的に分析することで、事故回避の支援を行うためのセンシングシステム開発を行った。危険状況を運転者に知らせることで事故防止の効果があることをドライビングシミュレータによって確認した。本章では、本研究の背景と目的、本論文の構成について述べる。

1.1 背景

シートベルトの着用の徹底、エアバッグなどの衝突安全装置やABS（Anti-lock Brake System）などの予防安全装置の普及、および医療技術の向上により延命措置が高度化されるなど、様々な取り組みがなされた結果、近年の日本における死亡事故、重傷事故などの大事故は減少傾向にあり、最新の統計 [1]（図 1.1）交通事故死者数は 7 年連続で減少し、2007 年には 5,744 人と 54 年ぶりに 5,000 人台まで減少した。しかし、死傷者数については、年間交通事故死者数が増勢に転じた 1970 年を基準とすると、2005 年の死傷者数は 1.92 倍で自動車保有台数の 2.03 倍、運転免許保有者数の 1.83 倍にほぼ比例して増加している。また、交通事故が引き起こす被害としては、加害者・被害者の肉体的・精神的苦痛といった人的なものや、構造物の破損といった直接的なものが注目されがちだが、事故渋滞による経済損失も深刻な問題である。平成 11 年度の統計によると国内の事故渋滞による経済損失は年間 1,500 億円にのぼるとされている。このことから死亡事故・重傷事故だけでなくすべての事故数を削減することが課題となっている。2006 年 1 月の政府 IT 新改革戦略では、IT の構造改革力を追求し、日本社会が抱える問題を解決しようということで医療、環境、災害と共に、世界一安全な道路交通社会の実現を IT 施策の重点として位置づけ、ITS（Intelligent Transport System、高度交通システム [2]）技術を活用し交通事故を未然に防ごうとの目標が掲げられた。具体的には 2012 年末に交通事故死者数を 5,000 人以下にすること、そのために路者間協調による安全運転支援システムの実用化を達成するなどの目標が掲げられています。また、2008 年までの実証実験を行い、2010 年から全国展開を行うスケジュールも示されている。国土交通省が行っている AHS の社会実験 [3][4] は、その具体策を示した一例であり、注目されている。首都高速道路 4 号線新宿線参宮橋区間の急カーブで渋滞末尾や停止車両などの突然の危険に起因する追突事故が多く発生しており、路上センサから得られる情報を VICS 対応カーナビ搭載車両に提供する安全走行支援サービスの実験が 2 ヶ月間行われ、その効果が認められたと報告されている。このような実験で重要な要素となるのが停止車両、低速車両、渋滞、交通量などの交通事象を自動検出するリアルタイム交通監視システムである。実際に運用されている異常事象検出システムとしては、Traficon の異常事象検出システム [5] や国内での Taams（Traffic Accident Auto Memory System）などがあげられる。上條研究室においても近年画像処理を用いた異常事象監視システムを開発してきた。また、画像のみからでは得られない情報を得る目的、また画像によるセンサフュージョンによる異常事象監視を行うことを目的として、超音波センサを用いた交通流監視システムを開発している。

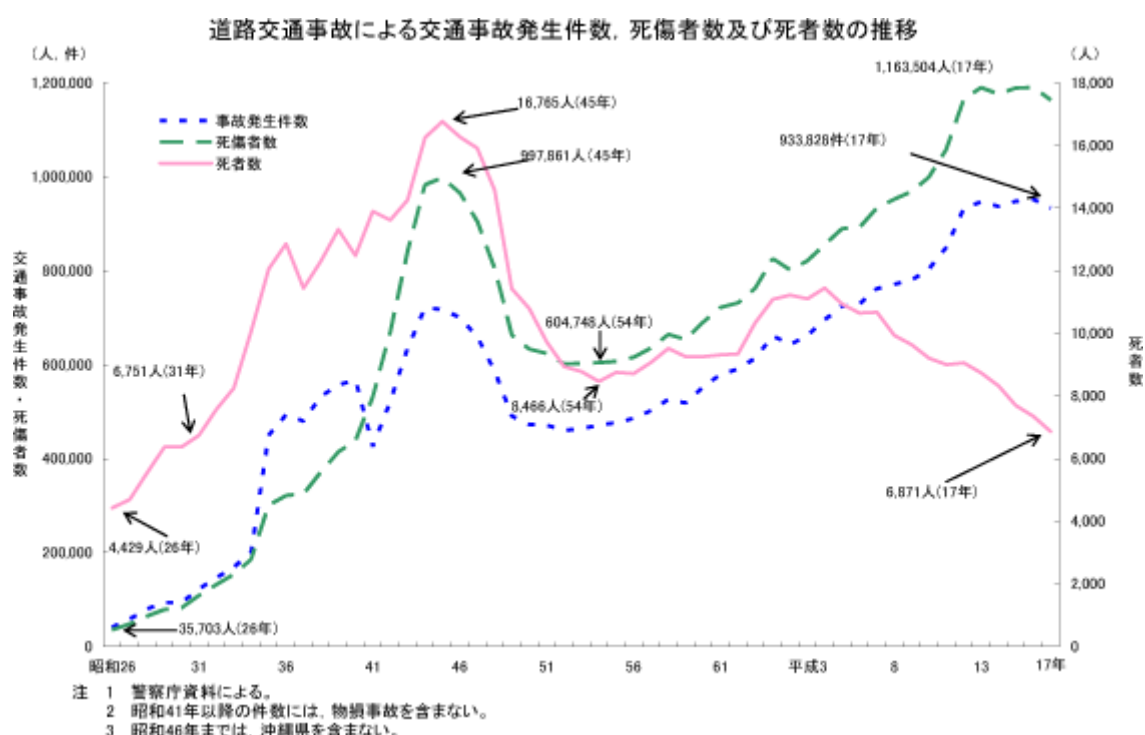


図 1.1 交通事故発生件数、死傷者数の推移

1.2 目的

我が国の一般道路・高速道路空間上には、超音波や画像カメラ等の様々なセンサが設置されている。超音波センサからは超音波の反射波の状態を表す電気信号を車両の感知、無感知の 1 ビットの論理信号が得られる。この論理信号から通過車両台数、車両速度、占有率、車頭時間、車間距離などの情報が精度よく得ることができる。一方、画像カメラからはさまざまな情報が得られるものの処理が複雑であり、主な使い道は人による交通監視である。しかし、人が監視するに数が膨大であり、全てを監視し続けることは現実的に不可能である。そこで本研究室では画像処理を用いた交通異常事象検出システム（画像処理システム）[6]を開発してきた。このシステムは、首都高速道路に既設の交通管制用CCTVカメラの映像を画像処理することで、事故などの異常事象をリアルタイムで検出するもので、これまで首都高速道路 4 号新宿上り赤坂トンネル入り口で行った評価実験では、重交通量の映像にもかかわらず高い事故検出率と低い誤報率を実現している。また単一のカメラからの情報のみでは検出不可能な事故も存在する。そこで、単一カメラの情報を他のセンサを用いて補完することで精度の向上を試みるセンサ融合異常事象検出システム [7]も開発してきた。首都高速道路には 200～300m毎に超音波センサが配置されており、これを 2 番目のセンサとして利用した。

異常事象を早期に発見することで救急車の出動などの後処理を迅速に開始することが可能になると考えられる。この技術で死傷者数を減らすことは出来ると考えられるが、事故発生件数自体を減らすことは出来ない。そこで、一般道路・高速道路のそれぞれにおいて、事故発生要因を分析し、どのようにしたら事故を防げるか事故回避支援システムの性能要求を明らかにするとともに事故回避支援システムの要素技術の開発を行うものである。

1.3 本論文の構成

第 2 章では、本研究の目的である交通監視、事故回避支援技術について関連研究を紹介する。

第 3 章では、研究で用いられる超音波センサと画像センサおよび本研究室で開発されてきた時空間 MRF について説明する。

第 4 章では、高速道路における事故データから画像センサ、超音波センサを用いて事故発生状況と事故要因を分析する。事故回避システムを開発し、ドライビングシミュレータを用いて効果を確認する。

第 5 章では、交差点における事故画像を収集し、収集した画像データを用いて事故要因を分析する。事故回避システムの性能要求を明らかにするとともに精度確認の実験を行う。

最後に第 6 章で結論と今後の課題を述べる。

第2章 関連研究

事故を含む異常事象に管制官が対処するための手助けとして、交通監視システムの研究開発が広く行われている。また、交通監視ではなく、事故が発生しやすい状況を検知し、情報提供することで事故を未然に防ぐための安全運転支援技術の研究開発も行われている。本章では世界各地で行われているこれらの先行研究を紹介する。

2.1 交通事象検出

すべてが人手によって行われる交通監視はコストの面からも実用的ではなく、道路上に設置されたセンサ類を利用した交通監視が従来から行われてきた。交通監視を目的とした異常事象検出システムについては、運用レベルに達していないものを含め、広く研究が行われている。トンネル内の低画角に設置されたカメラ映像を用いて道路上の障害物を検出する研究や、橋に設置されたカメラ映像を用いて、停止車両を検出し交通制御を行う研究 [8] がある。そのほかにも、交通監視システムを目的とした画像処理に関する研究として [9] などがある。また、ベイジアンネットワークやニューラルネットワークを用いた事象検出アルゴリズム [10][11] など、アルゴリズムに焦点をおいた研究も多い。道路上には様々なセンサが配置されているので、超音波センサのようなスポットセンサを用いた交通事象観測も行われている。しかし、各種センサは長短所を持ち、単一センサのみで正確な事象検出を行うことは難しい。センサ融合 [12] はこのような問題点を解決する手法である。[13][14] では、複数地点に配置された画像センサを空間的に融合する研究が実用レベルで行われている。この研究では、1 日平均交通量 10 万台という重交通量区間において事象検出をする際、頻繁に生じる渋滞内の低速車両や停止車両と事故車両を区別することが課題であった。そこで、隣接するカメラ間に速度差が生じているかどうかを確認することで、事故と渋滞を区別している。このように隣接カメラ情報をセンサ融合することで、事故検出の recall rate、障害物検出の precision rate とともに 90% を超え、実用に耐えうるシステムとなっている。

2.2 安全運転支援技術

2.2.1 日本での取り組み

日本で取り組まれている安全運転支援技術として AHS (Advanced Cruise-Assist Highway Systems) が挙げられる。AHS とは道路交通のさまざまな課題を解決するために、道路に高度な検出機能と通信機能を持たせ、収集した情報を車両が活用することにより、道路と車両が連携し (路車協調)、道路交通の安全性や効率性の向上を目指すシステムである。

AHS は様々な事故要因のうち、75% を占め、事故の直接の引き金となるドライバの発見の遅れ、判断の誤り、操作の誤りなど事故直前のヒューマンエラーに対し、①情報提供、②警報、③操作支援といったサービスを行うことで、効果的に事故の発生を防ぐものである。

AHS における路車間通信システムは、刻々と変化する障害物等検出事象の情報を車両に

提供する役割を果たし、通信領域内の全ての車両に同じ情報（停止車両、低速車両、及び歩行者の有無、路面状態、道路線形情報）を与える同報通信、及び個々の車両へ情報を与える個別通信を要求する。

一例として、参宮橋地区社会実験 [3][4]を挙げられる。これは 図 2.1 に示すように、参宮橋カーブ区間で発生する渋滞や停止・低速車両を赤外線センサがリアルタイムで検知し、カーブの手前約 300mの地点で、その情報を後続の車両の 3 メディアVICS（Vehicle Information and Communication System）対応カーナビに、VICSビーコンから送信することで、カーナビに喚起音・簡易図形を用いて「この先渋滞、注意」の情報をドライバに提供するシステムである。この実験は、事故率が平均の 2.6 倍も起こる半径 200m以下のカーブでの追突事故やヒヤリハットなどの削減を目指すものである。



図 2.1 参宮橋地区社会実験

2.2.2 アメリカでの取り組み

アメリカでは道路死亡事故のほとんどが車線変更や交差点通過に起因しており、交通事故死者数は 42000 人に上る。交通遅延も増加の一途を辿り、ラッシュアワーの通勤者は年間 40 時間を渋滞によって失っている。このため、死亡事故と交通遅延を大幅に削減する有効な手段が模索されてきた。

アメリカ運輸省（USDOT）は衝突防止、車両制御、自動運転等、車両安全制御に関するシステムの開発を統合した新たな研究開発へのプロジェクトであるIVI (Intelligent Vehicle Initiative) [15]を立ち上げた。この許で通信技術を活用した交差点判断支援IDS (Intersection Decision Support) がカリフォルニア、ミネソタ、ヴァージニアの 3 州で行われた。カリフォルニアのIDSは交差点での左折時に地上から対向直進車を検出するだけでなく、GPSと車車間・路車間通信を用いて各車に他車の位置を車内表示している（図 2.2）。

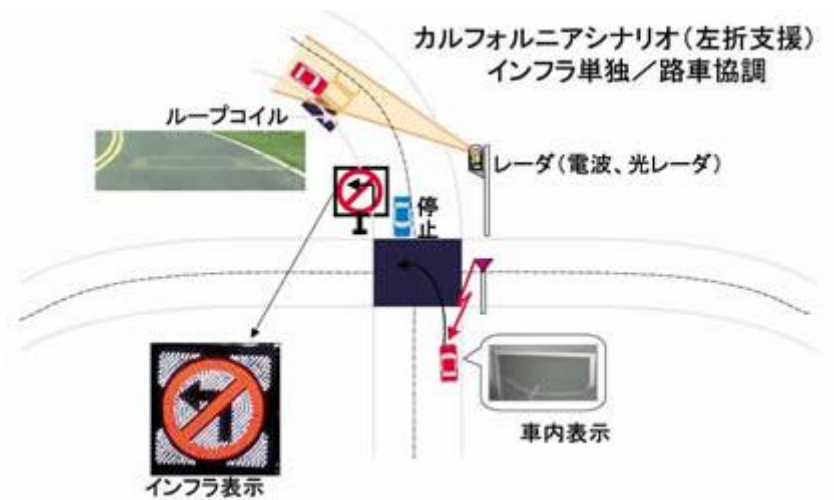


図 2.2 交差点支援システム

2.2.3 ヨーロッパでの取り組み

IVHW (Inter Vehicle Hazard Warning) はドイツ・フランス共同のプロジェクト DEUFRAKOの中で実施された運転支援実験である。高速道路や自動車専用道路の事故低減のため、GPSによる位置検出機能と 869MHz帯の電波を利用した運転支援システム (図 2.3) の有効性を示した。

車車間通信と 2.5km ごとに設置された路側アンテナを用いた路車間通信を併用して前方渋滞・衝突警報など近距離かつ緊急度の高いものは車車間通信で、道路規制情報など広域の情報は路車間通信と使い分けている。GPS の位置情報・エアバッグなどの作動情報・速度・道路状態 (例えば摩擦係数) を周囲に伝え、事故・渋滞の警告、車線変更支援、道路状態モニタリング、渋滞末尾の識別などの機能を実現している。

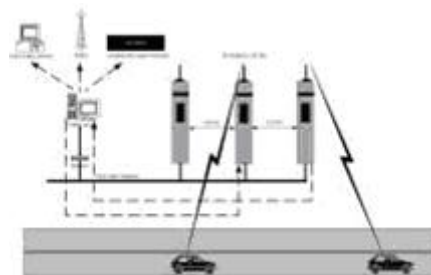


図 2.3 交通情報提供システム

第3章 センサによる交通流データ収集

本章では、本研究で用いられる超音波センサと画像センサおよび本研究室で開発されてきた時空間 MRF について説明する。

3.1 超音波センサ

超音波センサは図 3.1 に示すように、橋渡しするもしくは道路側面に超音波の発信・受信器を取り付けて使用される。超音波を路面に向けて発射し、発信された超音波は車両によって反射される。反射波が再び超音波センサによって受信され、その反射波の状態を表す電気信号が車両の感知・無感知の 1 ビットの論理信号として変換され提供される(図 3.2)。図 3.3 のように 1 地点につき、セット側ヘッドとリセット側の 2 ヘッドを設置し、その間を車両が通過する時間から速度も測定することが出来る。超音波センサのセンシング領域は半径 1 メートル程度の円内と画像センサと比べて非常に狭く、局所型センサに分類される。得られる情報は車両感知・無感知の 1 ビットのみで、これが 20msecごとに取得され、このパルス情報から車両速度、交通量、時間占有率、車両時間、車間距離など様々情報を計測することができる。得られる情報は 1 地点の車両感知・無感知という非常に限られたものであるが、一方で、その検出原理ゆえに非常に高い精度の情報を得ることができる。現在のところ画像センサでは超音波センサほどの高い精度は実現されていない。また、超音波センサは照明変動、天候変動に対して頑健である。さらに、画像センサの処理には 1 台のカメラに対し 1 台の処理マシンが必要であるのに対し、超音波センサは、1 台の処理マシンで多地点を処理できる。処理量が少ないこともこのセンサの特徴とであろう。実際、Pentium4 (3.2GHz)、1024MBのメモリを搭載したマシンで同時に 44 ヘッド (22 地点) の超音波データを処理することが可能であることが確認されている。

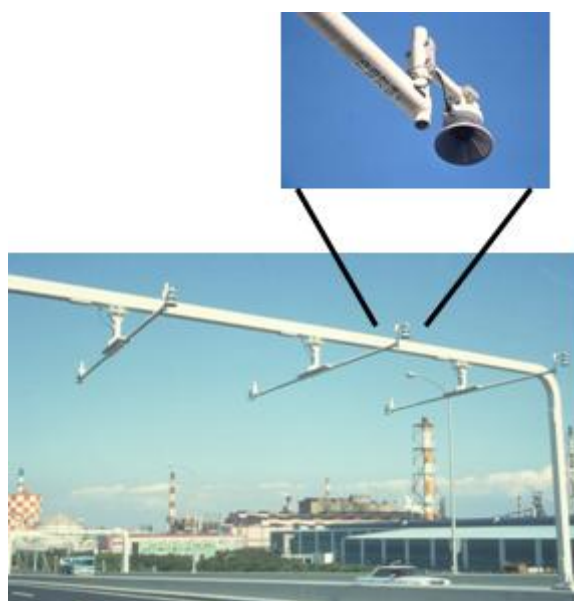


図 3.1 超音波センサ

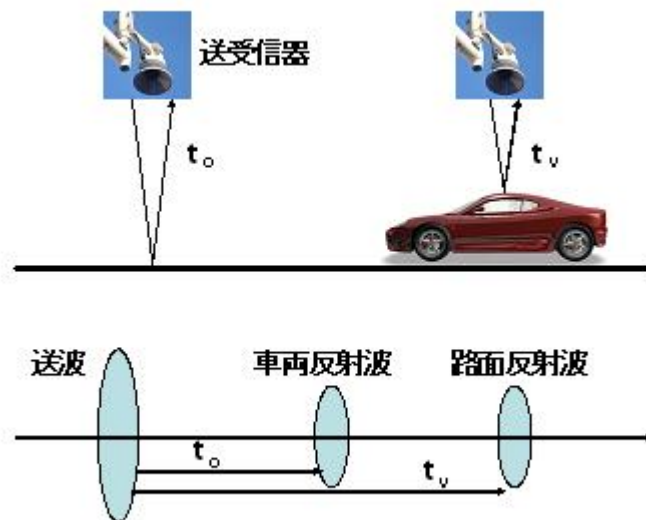


図 3.2 超音波センサの原理

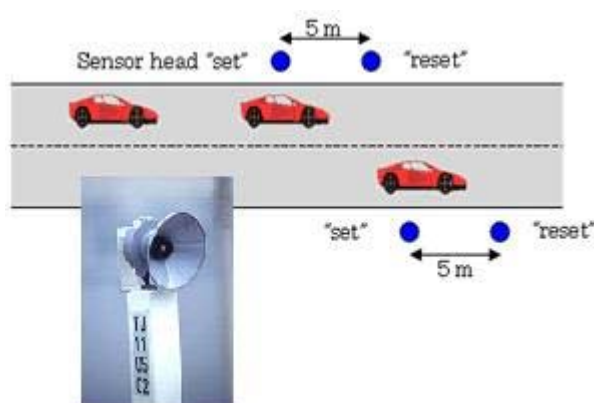


図 3.3 超音波センサの設置

3.2 画像センサ

CCTVカメラなどの可視光画像センサは車載システム、インフラ側のシステムなど実環境で広く利用されている。画像センサは広域型センサであるので、広いセンシング領域を持ち、得られる情報量が潤沢であるという利点があり、画像処理により車両追尾も可能である。また、画像センサによって得られる映像は人にとって視覚的に理解し易い。しかし一方で、画像センサではオクルージョンが問題となる。本研究室では、オクルージョンに頑健なトラッキングアルゴリズムとして、時空間MRFモデル [16]によるトラッキング手法を

開発し、これを用いて交通事象監視システムを開発してきた。時空間MRFモデルでは、連続画像から得られる背景差分とそのテクスチャや動きベクトルを使用し、 8×8 ピクセルの画素から構成されるブロックがどのオブジェクトに属するかを確率的に決定し、時空間画像の領域分割を行い、領域ごとにIDを付与して車両を検出する手法である。この手法ではオクルージョンが起こるような画像でも正確に物体の検出、追跡を行うことができる。図 3.4、図 3.5 に時空間MRFの出力であるオブジェクトマップと、トラッキング例を示す。また、画像センサは環境変動から受ける影響が大きく、特に昼夜の違いによる照度変化や、晴れ、曇り、降雨、降雪といった天候変化に精度が影響される。さらに、画像センサは計算量が膨大となり、必要とされるCPU処理能力が高くなることも画像センサの短所である。しかし、オクルージョンに頑健な時空間MRFモデルを用いたシステムでの車両検出精度は重交通量時でもプラスマイナス 5%程度となっている。

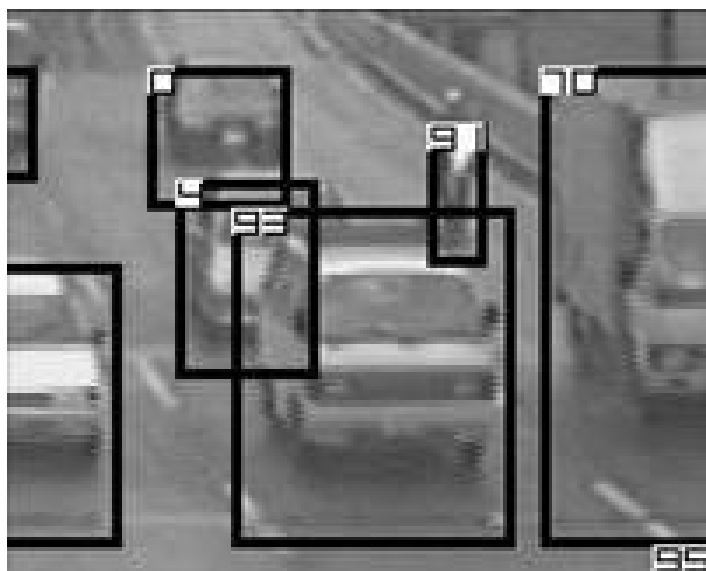


図 3.4 トラッキング結果

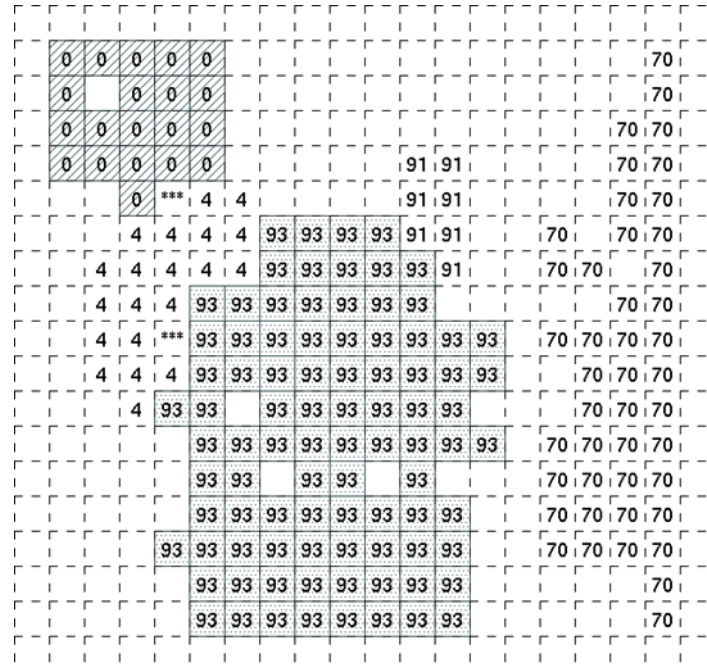


図 3.5 オブジェクトマップ

3.2.1 画像処理システム

本研究室では、これまで画像処理に基づいた異常事象検出システムを開発してきた。このシステムでは、図 3.6 に示す意味階層構造を利用し、事故後に起こる道路上の挙動に着目して事故を検出する。意味階層構造とは音声認識から画像認識に至るまで広く使用されている手法で、信号レベルの情報から人間が理解できる意味論的形式までを階層的に構築することで、柔軟な認識を行う技術である。第一階層である座標クラス (Coordinate-class) に時空間MRFトラッキング手法に基づいたトラッキング結果が入力される。具体的には領域分割によるオブジェクトマップと動きベクトルマップに相当する。座標クラスではトラッキング結果から軌跡や速度といった、各車両の基礎的な情報が得られる。次に、これらの情報が挙動クラス (Behavior-class) に入力され、一次元の高い情報として、停止挙動、低速挙動、車線変更挙動といった各車両の挙動に関する情報が抽出される。この各車両の挙動の組み合わせから異常事象や渋滞といった交通事象が定義され、挙動クラス (Event-class) で検出が行われる。意味階層構造による事象検出は、人間の認識過程との親和性が高く、交通管制官や交通工学研究者の理解との整合性を保つことが出来る。また、地点や条件に合わせた意味階層構造の再構築が可能である利点がある。

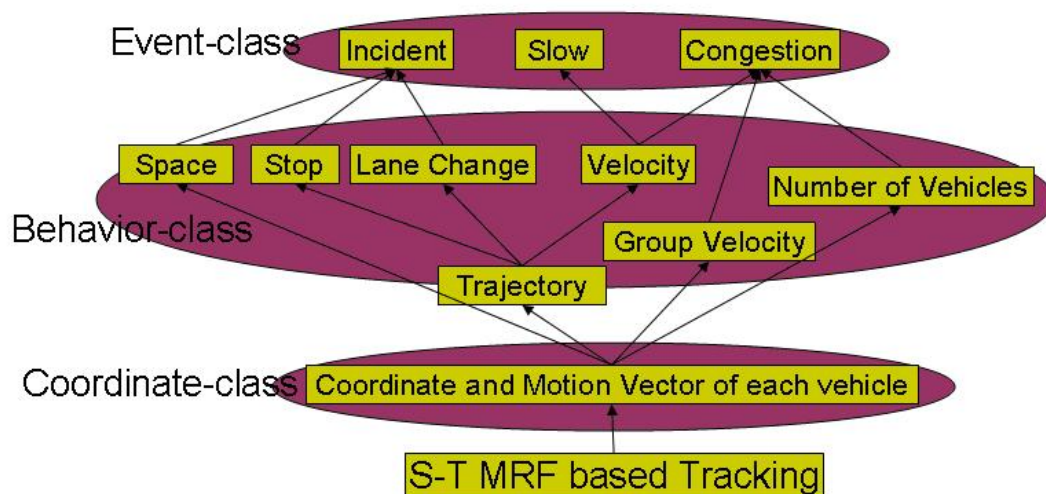


図 3.6 意味階層構造

3.2.2 手動解析による交通流データ収集

首都高速道路において超音波センサは速度や台数と交通流計測に使われており、200～300m 間隔でくまなく設置されている。一方画像センサは主に事故多発地点に重点的に設置されており、人による交通監視を目的としている。事故多発地点に設置されている画像センサから超音波センサと同様のデータを取得することが出来れば、そのデータを事故要因分析や危険状況予測などに利用することが出来る。本研究室で開発してきた時空間 MRF モデルを用いたシステムは重交通量時において台数ベースの誤差がプラスマイナス 5%程度となっているが、オブジェクトごとの軌跡が精度よく取れない場合がある。台数ベースの誤差を小さくするためだけでなく、速度ベースの誤差も小さくするために手動による画像解析を行えるよう改良を行った。

使用方法是以下の通りである。

1. 軌跡がずれてきたと判断したフレームにおいて、一時停止をして対象オブジェクトの軌跡を選択する。
2. 正しい座標の位置を指定する。
3. 過去にさかのぼって修正された軌跡が表示されるので、確認し確定させる。
4. 一時停止を解除し処理を続ける。以後のフレームにおいても修正した軌跡が反映される。

使用方法 3 における過去にさかのぼって軌跡を修正している理由は、あるフレームにおける座標は 1 フレーム前の座標にその 1 フレームに移動した動きベクトル分加えたものとしているために、一度ずれると誤差は大きくなる方向に処理されてしまうからである。また 2 度以上修正を行った場合は前回修正した座標以降の軌跡のみを修正する。以下にアル

ゴリズムを示す。

1. 一時停止したフレームの座標 (x_{now}, y_{now}) を手動で入力した座標 $(x_{now-rev}, y_{now-rev})$ に

置き換える。差分を $\begin{cases} dx_{now} = x_{now-rev} - x_{now} \\ dy_{now} = y_{now-rev} - y_{now} \end{cases}$ とする。

2. 初めての修正ならばオブジェクトが確定したフレーム以降のフレーム数、2 度目以降の修正ならば前回修正したフレーム以降のフレーム数 (n フレームとする) を求める。
3. 一時停止したフレームの i フレーム前の差分を n フレームで均等

$$\begin{cases} dx_{now-i} = \frac{n-i}{n} \times dx_{now} \\ dy_{now-i} = \frac{n-i}{n} \times dy_{now} \end{cases} \text{にし、補正} \begin{cases} x_{now-i-rev} = x_{now-i} + dx_{now-i} \\ y_{now-i-rev} = y_{now-i} + dy_{now-i} \end{cases} \text{する。}$$

手動によって軌跡修正をした結果画像を図 3.7 に示す。



(a) 時空間 MRF の出力



(b) 手動による軌跡修正の結果

図 3.7 手動による軌跡修正

カメラごとに 1 ピクセルあたり何メートルなのかを求めることで、軌跡から速度が求められる。これにより事故多発地点において密に設置されている画像センサからも超音波センサと同等に車線別の速度と台数のデータを収集することができ、事故要因分析に役立てることで安全運転支援システムの開発を行えると考えられる。

3.3 センサの比較

画像センサと超音波センサの特徴比較を表 3.1 にまとめる。まず、これらの最も大きな違いとして、センシング領域の広さがあげられる。超音波センサは検出対象が一点に限られるのに対し、画像センサは、空間的に広い領域をセンシング対象とする空間形センサである。このため、画像センサでは撮像範囲内での車両の時空間軌跡を抽出し、車両追尾が可能であるという特長がある。また、センシング領域は設置コストと大きく関わる。複数車線道路や分合流地点などを監視対象とする場合、超音波センサを用いる場合、すべての車線に対して設置しなければならず、コストが車線数に比例して増大するのに対し、画像センサを用いれば、そのすべてを 1 台のカメラでカバーすることも可能であり、設置コストを抑えることが出来る。一方で、超音波センサは検出性能が非常に高いという特長がある。車両の存在有無のみに焦点を当てているのでほぼ 100%の精度を実現できる。また、環

境変動に強いことも超音波センサの特長である。超音波センサは、その検出原理ゆえ、日照変動や天候変動に関係なく、安定した検出を行うことができる。研究対象としている首都高速では200～300m間隔で全地点に超音波センサが設置されている。表 3.1 から、これら 2 つのセンサは互いに相補的な役割を果たしていることが分かる。このように、互いにない機能や特長を活かすことがセンサ融合の意義であり、より高い精度の事象検出が実現できる。

表 3.1 画像センサと超音波センサの比較

条件	画像センサ	超音波センサ
センシング領域	○	×
車両追尾	○	×
車両検出・計測制度	△	○
日照変動	△	○
天候変動	△	○
計算量	×	○

第4章 高速道路における事故回避支援システム

本章では高速道路における事故データから画像センサ、超音波センサを用いて事故発生状況と事故要因を分析する。画像センサを用いた事故回避システムを開発し、超音波データと照らし合わせ、実際の交通を再現するシミュレートを行い、精度を確認する。情報提供によりドライバにとって効果があるのかをドライビングシミュレータを用いて確認する。

4.1 事故要因分析

首都高側道路 4 号新宿線上り (図 4.1) 赤坂トンネルは、事故多発地点に挙げられており、図 4.2 はキロポスト別の 1 年間の事故発生頻度を表している。赤坂トンネル入り口の 2.1km ポストから 2.3km ポスト付近での事故が多発しており、この区間での追突事故の多発が問題となっている [17][18]。本研究室では赤坂トンネル入り口の事故について長年にわたって赤坂トンネル入り口での異常事象検出と、事故要因分析のために画像データと超音波データを収集してきた。

画像データと超音波データの両方が収集できた事故 35 件について分析を行った。各事故に対して表 4.1 に示すように、画像データ、超音波データから、追突、停車などの事故形態、車線を含めた細かい発生位置、超音波センサから得られる事故時の速度、天候、時間、事故発生直前の交通状況、逆車線の状況といった項目で分析を行った。

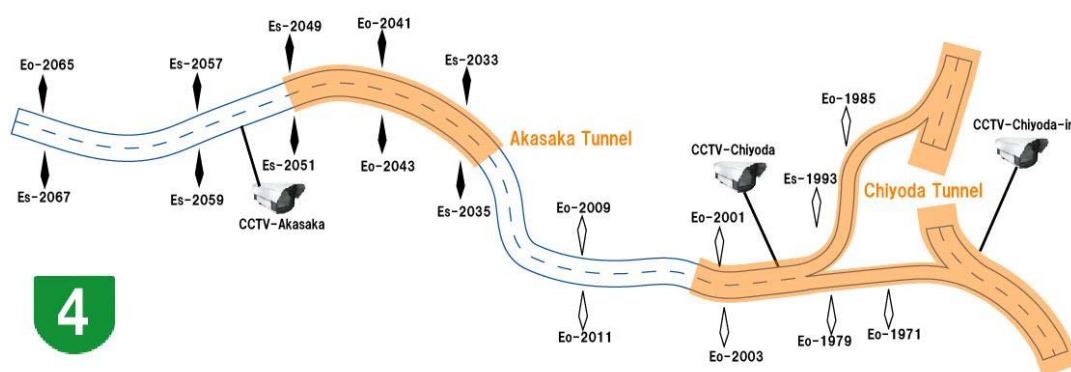


図 4.1 首都高側道路 4 号新宿線

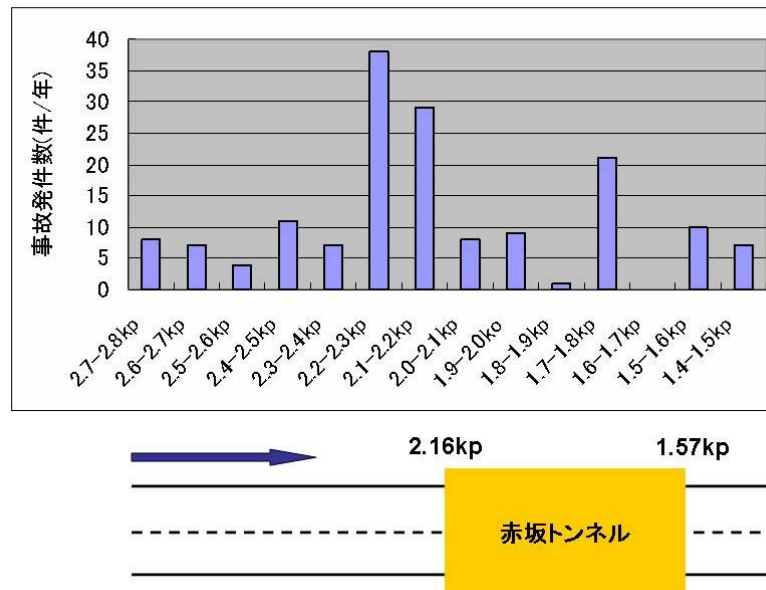


図 4.2 キロポスト別事故件数

表 4.1 事故分類

項目	備考
事故形態	追突、停車等
交通状況	渋滞延伸末尾、渋滞中の疎密部境界、渋滞内
発生位置	位置、車線
事故速度	5km/h ごと
時間帯	昼間、夜間
天候	晴れ、曇り、雨
逆車線の状況	

4.1.1 事故形態

事故形態について分析を行った結果を 表 4.2 に示す。表 4.2 から明らかであるように、当該区間で発生する事故の多くは追突（29 件/35 件）であることが分かる。また、停車が確認された 5 件中、2 件については画面領域外で追突した車両が画面内で停車した可能性が高い。また、その他の 1 件については、追突回避の急減速により、積荷が落下するという事故形態で、追突に近い事象であると考えられる。また、表から左車線での事故割合が高く、渋滞中の追突の割合が右車線と比べて特に高いことが分かる。このことから左車線での渋滞の多発が推測できる。

表 4.2 事故形態

事故形態	左車線	右車線	小計
追突	10 件	9 件	19 件
渋滞内追突	9 件	1 件	10 件
停車	4 件	1 件	5 件
その他	1 件	0 件	1 件
小計	24 件	11 件	35 件

4.1.2 事故直前の交通状況

当該区間で発生する事故のほとんどは追突である。事故発生直前の交通状況について事故発生画像および超音波データを用いて分析を行った結果、大別して渋滞延伸末尾、渋滞中の疎密境界、渋滞内の 3 種類に分類された。これらの事故パターンに対して以下のように要因を分析した。

- ・ 渋滞延伸末尾における事故

図 4.3 に示すように、下流（都心環状線）からの渋滞（この場合単発の疎密波の密部であることが多い）が延伸し、その末尾で発生する追突事故。渋滞末尾は下流から延伸することが多いが、赤坂トンネル入り口付近は疎密波の発生地点となることも多い。

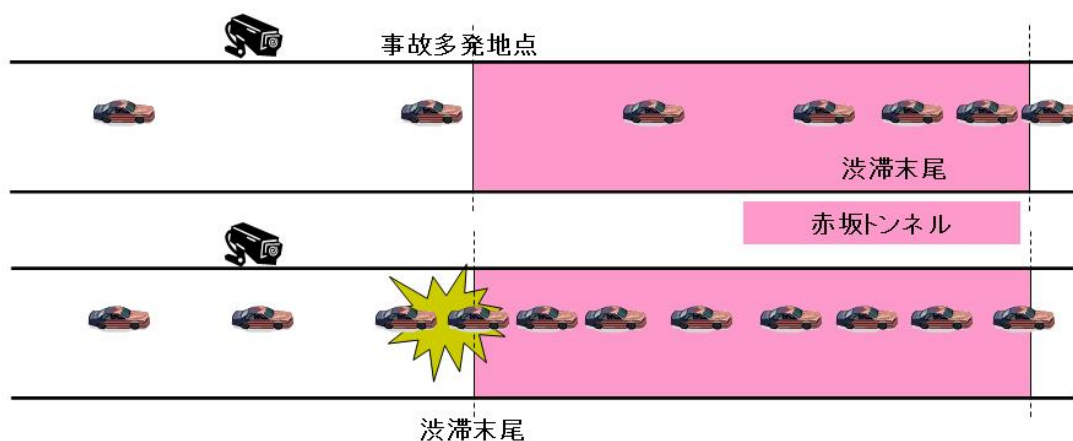


図 4.3 渋滞延伸末尾における事故

- ・ 渋滞内疎密境界における事故

渋滞中の疎部と密部の境界で発生する事故。図 4.4 に示すように、速度が 40km/h 程度となる疎部と、ほぼ 0km/h となる密部が繰り返すため、その境界での急激な速度変化による事故が発生する。

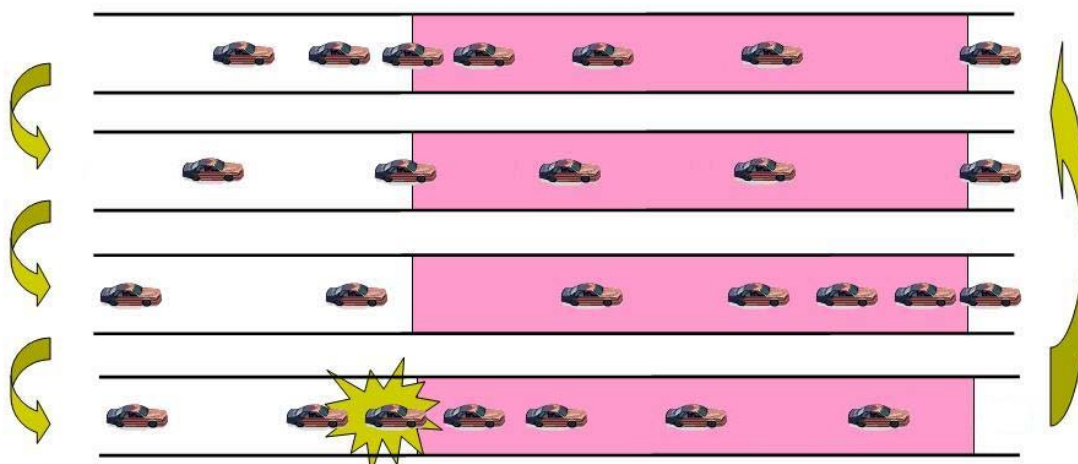


図 4.4 渋滞内の疎密境界における事故

- ・ 渋滞内における事故

図 4.5 に示すように、渋滞内で発生する事故で、前方で生じた若干の減速に気づかずブレーキが遅れにより発生する事故。10km/h程度の速度で事故が発生する。この事故形態には前方が動き出し間もなく停止するが、それに気づかず後続車が減速することなく追突する傾向が多く見られ、急減速による事故形態とは大きく異なる。その原因は、わき見やぼんやりしているなどの不注意であると考えられる。またトンネル内で多発していることから照明変化なども影響していると考えられる。

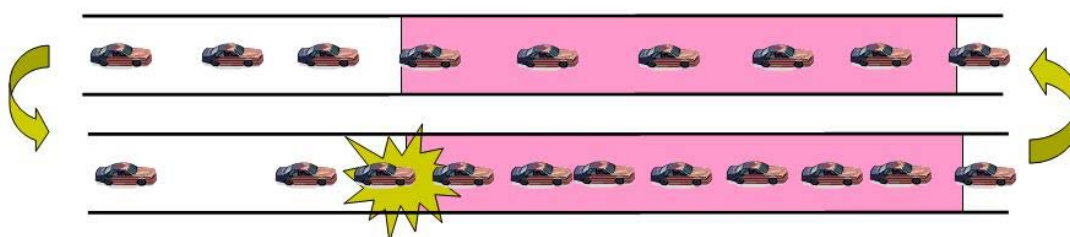


図 4.5 渋滞内における事故

これらから、事故要因は渋滞延伸末尾および渋滞中の疎密境界で発生する減速波が原因となる事故と、渋滞内で発生するドライバの不注意による事故に大別される。急減速波の伝播の様子を図 4.6 に示す。図は、上が速度、下が交通量を表しており、横軸が時間、縦

軸が超音波設置地点であり、速度、交通量共に赤、黄、緑、青の順で増大する。下流から上流に向かい、急減速波が伝播する様子が見て取れる。このような急減速波 1800 件について伝播時間を計測した結果、240m 下流に設置されている超音波センサから上流の超音波センサに急減速波が到達する時間は、平均 42.5 秒、標準偏差 12.5 という分布となるという結果が得られた。よって急減速波が伝播する速度波 6m/sec 程度となる。

車線別事故発生状況頻度を表 4.3 に示す。またそのときの事故発生位置を図 4.7 に示す。右車線と比べて、左車線での事故が多く発生していることが分かる。特に左車線では赤坂トンネル入り口付近に事故が集中している。また、左車線では渋滞内や渋滞中の疎密境界付近での事故が多いのに対し、右車線では各 1 件のみとなっている。このことから左車線での渋滞の多発が推測できるが、これについては次節で検証する。逆に、右車線では渋滞の延伸末尾で起こる追突事故が大半である。

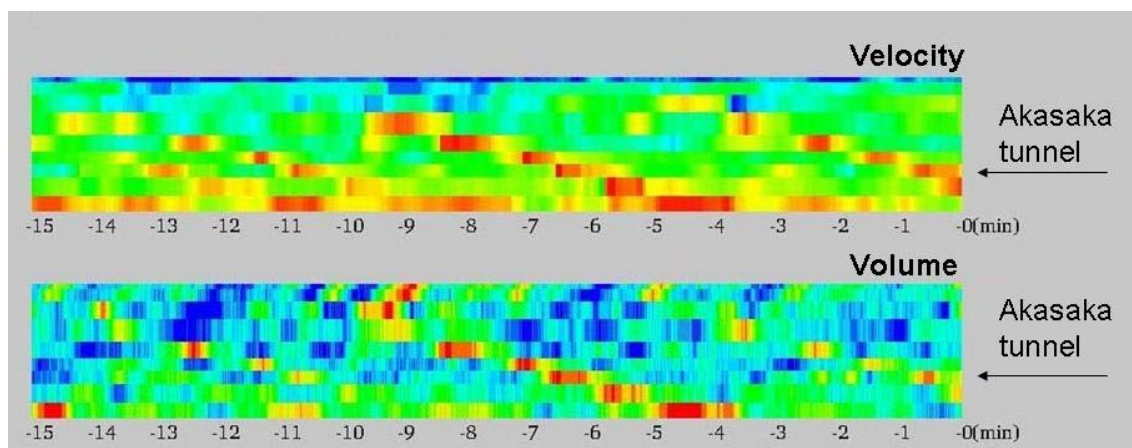


図 4.6 急減速波の伝播

表 4.3 事故発生状況

事故発生状況	左車線	右車線	計
渋滞延伸末尾	7 件	9 件	16 件
渋滞内の疎密境界	8 件	1 件	9 件
渋滞内	9 件	1 件	10 件
合計	24 件	11 件	35 件

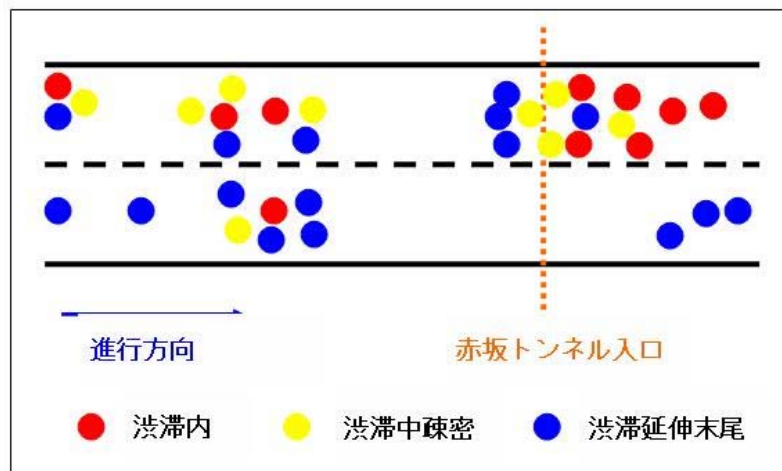


図 4.7 事故発生位置

4.1.3 道路特性

当該区間では左右車線で事故特性が異なることに着目し、パーセンタイル速度を用いた左右両車線における道路ポテンシャルの分析を行った。道路ポテンシャルを分析することで、連続する複数地点の交通特性 [19] を把握することが出来る。

当該区間でも地点 5（赤坂トンネル出口）、地点 3（千代田トンネル入り口）にボトルネックが存在することが確認され、これらで生じた疎密波の伝播が赤坂トンネル入り口での事故につながると推測できる。

4.1.4 事故時の速度、天候、逆車線

最後に事故時の速度、天候、逆車線の状況について分析した結果をまとめる。事故時の速度を表 4.4 に示す。事故速度は渋滞延伸末尾での事故においては 40～50km/h、渋滞中の疎密境界での事故では 30～35km/h と若干低くなり、渋滞内での事故では 10～15km/h となる。また、事故時の天候は表 4.5 のように、日中曇りに多発していることが分かる。最後に、逆車線の交通状況と事故との関係は得られなかった。

表 4.4 事故時速度

速度[km/h]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60～
渋滞延伸末尾								8	2	3		4
渋滞中疎密境界					1	4	2	1				
渋滞内		4	6									

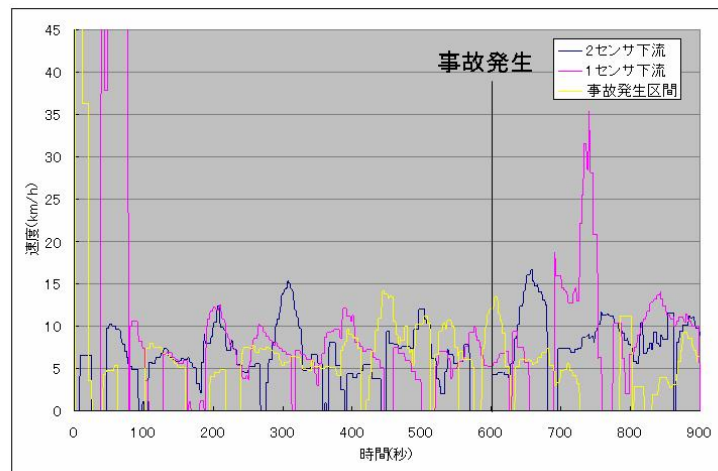
表 4.5 事故時天候

天候	昼・晴れ	昼・曇り	昼・雨	夜・晴れ	夜・雨
件数	9	17	2	6	1

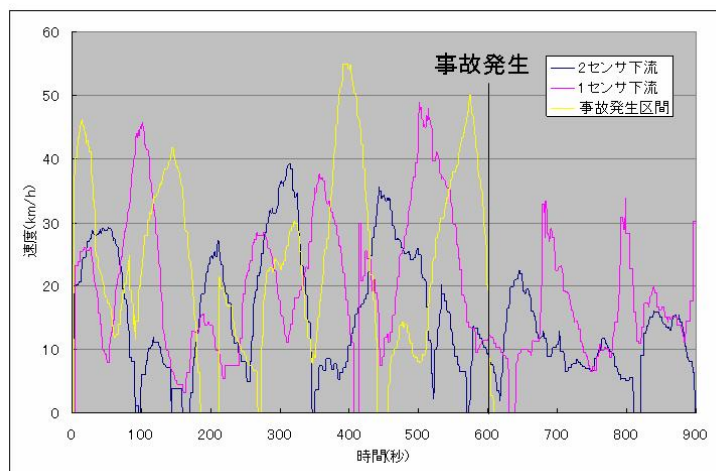
4.1.5 事故発生時の速度推移

超音波データを用いて、事故発生時の交通流状況の分析を行った。事故時の交通流の特徴は大きく分けて、渋滞内での事故と渋滞中の疎密境界および渋滞延伸末尾での事故の 2 つに分類された。渋滞内での事故の特徴は平均的に速度が低く、不規則な速度変化が生じ、下流区間の速度変化の推移との関連性がほとんど観測されない。渋滞中の疎密境界、渋滞延伸末尾での事故の特徴は下流で発生した急減速が伝わり連鎖的な速度低下の中で事故が起きる。それぞれおける下流 2 区間の速度変化推移速度推移を図 4.8 に示す。

渋滞内での事故において下流センサからの速度伝播は観測されず、不規則な速度変化を繰り返すことが分かる。一方、渋滞中の疎密境界および渋滞延伸末尾での事故は下流区間からの連続的な速度低下が発生し、事故が起きていることが分かる。



(a) 渋滞内での事故における速度推移



(b) 疎密境界、渋滞延伸末尾での事故における速度推移

図 4.8 事故発生時の速度推移

4.2 事故回避支援方法

首都高側道路 4 号新宿線上り赤坂トンネル付近の事故のほとんどは追突事故であり、その事故原因の大変は下流のジャンクションや道路特性によるボトルネックから発生する渋滞による車両の減速の伝播であることが分かった。なお、このような急減速波による事故は本地点において特有のものではなく、一般的な事故要因 [20]として注目されている。

首都高側道路 4 号新宿線上り赤坂トンネル付近の設置されている画像センサと超音波センサの位置の概略図を図 4.9 に示す。

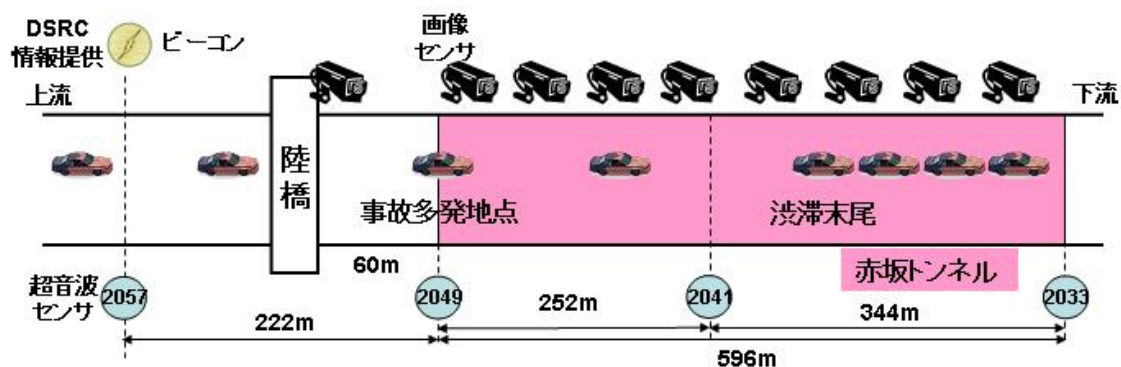


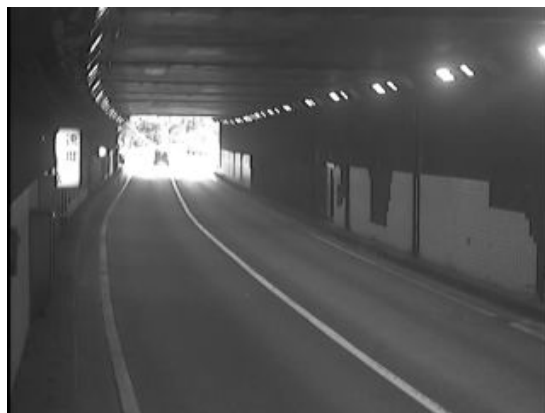
図 4.9 赤坂トンネルの画像センサと超音波センサの位置

またトンネル出口からトンネル入口へ向かって画像センサをaksk1、aksk2…、aksk8 と

し、各画像センサの映像は 図 4.10 の通りである。



(a) aksk1



(b) aksk2



(c) aksk3



(d) aksk4



(e) aksk5



(f) aksk6



(g) aksk7

(h) aksk8

図 4.10 各画像センサ映像

また情報提供位置（2057 番センサ）を基準として各センサまでの距離を表 4.6 に示す。

表 4.6 情報提供位置から各センサまでの距離

センサ番号	情報提供位置からの距離[m]
2057	0
2049	222
2041	474
2033	818
aksk8	222
aksk7	274
aksk6	345
aksk5	408
aksk4	518
aksk3	604
aksk2	679
aksk1	757

このように赤坂トンネルには 50～100m おきに画像センサが、200～300m おきに超音波センサが設置されている。そしてトンネル手前 220m 付近に情報提供行える DSRC が設置されている。本研究では赤坂トンネル内に設置されている画像センサを用いて伝播する急減速波を検知し、その情報をトンネル手前の DSRC にてドライバに提供する事故回避支援システムを提案する。

赤坂トンネル内に設置された 8 台の各画像センサにおいて急減速波を検知し、得られた急減速波検知情報を連携させることで最終的に情報提供するかどうか判断するシステムを考える。

4.3 単体画像センサ開発

急減速波を検知するセンサを開発するにあたり、急減速波とはどれくらい速度がどれくらい経過したら発生したかを定義する必要がある。

4.3.1 状態遷移の速度閾値

急減速波が原因となる渋滞延伸末尾と渋滞中疎密境界における事故は表 4.4 より 25km/h以上で走行しているときに発生している。また渋滞延伸末尾における事故は自由流で走行していた車両が渋滞に出会ったと考えられることより、自由流とは 40km/h以上であると考えられる。また急減速波による追突事故が起こりやすい条件として速度 30~40km/h、交通量 7~10 台付近の交通流が 0~15km/h、交通量 0~4 台へと推移する状況があげられる [21]。

一方、高速道路における図形表示板（図 4.11）における渋滞情報は 40km/h以上は順調（黒色）、20km/h~40km/hは混雑（オレンジ色）、20km/h以下は渋滞（赤色）と区別されている。



図 4.11 図形表示板

ドライバは 40km/h 以上の状態から 20km/h 以下になったときに渋滞していると感じ、逆に 20km/h 以下の状態にあるときは 40km/h 以上の状態になったときに渋滞が解消されたと感じると考えられる。また 20km/h~40km/h の状態は直前の状態が 20km/h 以下であったか、40km/h 以上であったによって感じ方が変わると考えられる。その影響を反映させるために、20km/h 以下、20km/h~40km/h、40km/h 以上のどの状態にあるのかを識別する画像センサを開発する。

4.3.2 発報時における状態遷移の継続時間閾値

画像センサは入力画像を 0.1 秒ごとに処理している。それゆえ 0.1 秒ごとに 20km/h 以下、20km/h～40km/h、40km/h 以上のいずれに当たるか判別することができる。また車両が常に画面に存在しているわけではなく、非常に空いているために車両がないのか、渋滞中に一時的で局所的な空間が出来てしまっているのかを 1 台の画像センサで判別することは難しい。これらの問題により 0.1 秒ごとに判別した状態をそのまま情報提供に利用するには不安定であると考えられる。

そこで 20km/h 以下、20km/h～40km/h、40km/h 以上のいずれかが x 秒以上続いた場合に状態が変わったとするシステムを考える。まず情報提供していない状況のときに、20km/h 以下の状態が何秒続いた場合に情報提供することでシステムにとっての誤報率と欠報率を最小にするのかを検討する。

超音波センサデータの速度の情報を用いて以下のように条件を定めた。

- ・ 対象センサは 2041 番
- ・ 急減速波発生の条件は 20 秒間の平均速度が 20km/h 以下になった場合（真値）
- ・ 急減速波解消の条件は 20 秒間の平均速度が 40km/h 以上になった場合（真値）
- ・ 発報の条件は急減速波検出の条件が x 秒続く場合
- ・ 欠報の条件は急減速波の継続時間が x 秒よりも短い場合
- ・ 誤報の条件は情報を受けた車両が 2049、2041、2033 番の各センサに到達した時点で平均速度が 40km/h 以上となっていた場合

以上にして実験を行った。結果を図 4.12、表 4.7 に示す。

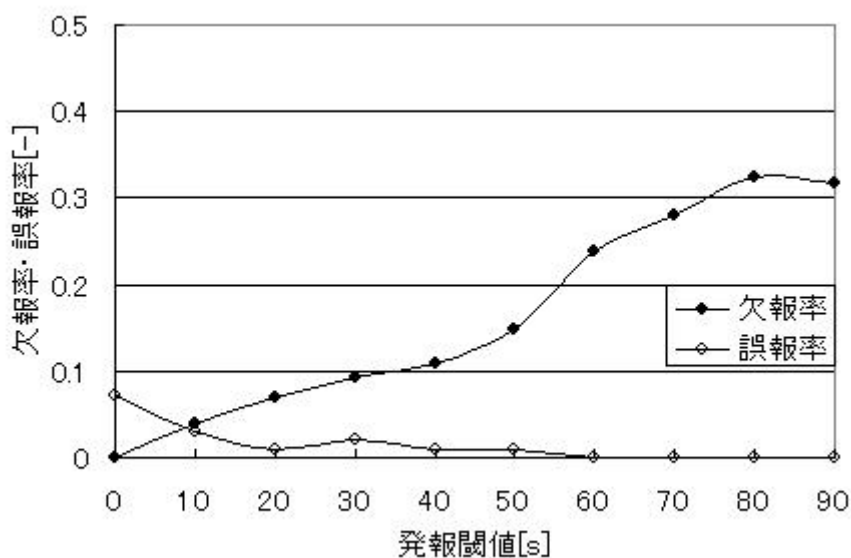


図 4.12 発報閾値

表 4.7 発報閾値

発報閾値	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
観測数	97	100	101	97	101	108	101	107	99	98
欠報数	0	4	7	9	11	16	24	30	32	31
誤報数	7	3	1	2	1	1	0	0	0	0
欠報率	0	0.04	0.07	0.09	0.11	0.15	0.24	0.28	0.32	0.32
誤報率	0.07	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0	0	0	0
F'値	0.963	0.965	0.96	0.94	0.94	0.92	0.87	0.84	0.81	0.81

一般的に事象検知の閾値を下げれば欠報は減るが誤報が増え、逆に閾値を上げれば誤報は減るが欠報が増えるとされており、この場合も当てはまることが分かる。前者は、システムの嘘にドライバが慣れることにより情報提供の効果が持続しない問題が生じ、後者は、ドライバが情報提供を受けなかった事象に多く遭遇する問題が生じる。誤報はドライバにそろそろ疎密波に出会おうだろうという緊張感与えることになり、運転に慎重になることで不必要な減速が行われることが予想され、新たな渋滞を引き起こしてしまう可能性がある。欠報は情報提供がなかったから疎密波には出会わないだろうという安心感から事故を引き起こしてしまう可能性がある。これは情報提供サービスをしていない時に情報がないことは、ドライバが疎密波に出会うかもしれないし、出会わないかもしれないと予想するが、情報提供サービスをしているときに発報されずに情報がないことは、システムが疎密波に出会わないことを示しており、異なる意味を持つ。

欠報率と誤報率の評価方法として検索性能などの評価として用いられている F 値を参考とした。F 値は適合率 (precision rate) と再現率 (recall rate) の調和平均とされ、以下のよう定義されている。

$$F - measure = \frac{2 \times precision \times recall}{precision + recall}$$

F 値が高ければ、性能がよいとされている。この F 値を参考として

$$F' - measure = \frac{2 \times (1 - \text{欠報率}) \times (1 - \text{誤報率})}{(1 - \text{欠報率}) + (1 - \text{誤報率})}$$

を定義し、評価したところ発報閾値は 10 秒のとき最も性能がよいことが分かった。

4.3.3 解報時における状態遷移の継続時間閾値

発報時と同様にして、情報提供している状況のときに、40km/h 以上の状態が何秒続いた場合に情報提供を解除することでシステムにとっての誤報率と欠報率を最小にするのかを検討する。

以下のように条件を定めた。

- ・ 対象センサは 2041 番
- ・ 急減速波発生の条件は 20 秒間の平均速度が 20km/h 以下になった場合（真値）
- ・ 急減速波解消の条件は 20 秒間の平均速度が 40km/h 以上になった場合（真値）
- ・ 解報の条件は急減速波検出の条件が x 秒続く場合
- ・ 欠報の条件は情報を受けていない車両が 2049、2041、2033 番の各センサに到達した時点で平均速度が 20km/h 以下になっていた場合
- ・ 誤報の条件は発報閾値 x よりも疎波の継続時間が短い場合

以上にして実験を行った。結果を図 4.13、表 4.8 に示す。

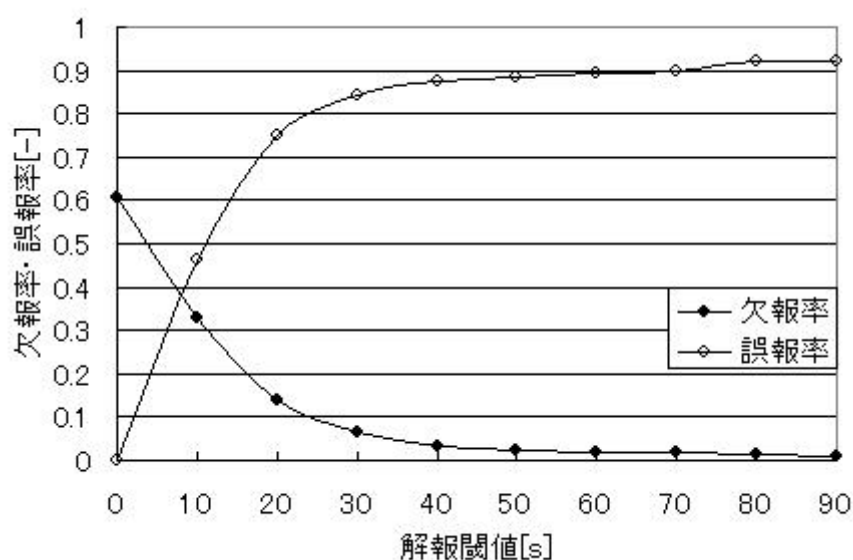


図 4.13 解報閾値

表 4.8 解報閾値

発報閾値	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
観測数	74	97	115	122	120	120	120	120	124	124
欠報数	45	32	16	8	4	3	2	2	2	1
誤報数	0	45	86	103	105	106	107	108	114	114
欠報率	0.61	0.33	0.14	0.06	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01
誤報率	0	0.46	0.75	0.84	0.88	0.88	0.89	0.9	0.92	0.92
F'値	0.56	0.60	0.39	0.27	0.22	0.21	0.20	0.18	0.15	0.15

前項と同様に F'値で評価したところ解報閾値も 10 秒のとき最も性能がよいことが分かった。

4.3.4 急減速波検出アルゴリズム

前項までに 20km/h 以下の状態が 10 秒続いたら急減速波が発生したとして情報提供すればシステムにとって欠報率と誤報率を最も低く抑えることが分かった。それを元に単体画像センサによる急減速波検出システムを開発する。

画像センサは入力画像を 0.1 秒ごとに処理している。それゆえ 0.1 秒ごとに 20km/h 以下、20km/h～40km/h、40km/h 以上のいずれに当たるか判別することができる。しかし速度を計るためにはピクセル単位での精度が必要となり、時空間 MRF ではブロック単位（8 ピクセル四方）で処理をしているために大まかに正しく処理できるが、すべてのフレームで正しく処理できるとは限らない。車両が画面奥に移動すると必然的にオブジェクトは小さくなり精度が落ちてしまい、状態を判別するのに利用できなくなってしまう。また車両が常に画面に存在しているわけではなく、非常に空いているために車両がないのか、渋滞中に一時的で局所的な空間が出来てしまっているのかを 1 台の画像センサで判別することは難しい。

以下にアルゴリズムを示す。

まず 0.1 秒ごとに 20km/h 以下、20km/h～40km/h、40km/h 以上のいずれに当たるか判別したものを $score_{frame}$ として点数化する。

$$score_{frame} = \begin{cases} 1 & velocity \geq 40km/h \\ 2 & 40 > velocity \geq 20 \\ 3 & 20 > velocity \end{cases}$$

$score_{frame}$ をバッファとなる約 10 秒(128 フレーム)分を $average_score$ に平均化する。

$$average_score = \left(\sum_{frame=1}^{128} score_{frame} \right) / 128$$

$average_score$ を基にして、各フレームの今の状態 tmp_flag_{now} を $flow, critical, congestion$ に分類する。

$$tmp_flag_{now} = \begin{cases} flow & 1.6 \geq average_score \\ critical & 2.4 > average_score \geq 1.6 \\ congestion & average_score \geq 2.4 \end{cases}$$

情報提供はする・しないの 2 状態なのに対し、ここで 3 状態に分類した理由は、2 状態で分類するとその境界付近の値を $average_score$ が取った場合に状態が頻繁に変化してしまうからである。情報提供では 2 状態なので間の状態である $critical$ の場合を過去の状態によって変化させるアルゴリズムとした。

$$flag_{now} = \begin{cases} on(congestion) & tmp_flag_{now} = congestion \\ on(congestion) & (tmp_flag_{now} = critical) \& (tmp_flag_{now-1} = congestion) \\ off(flow) & (tmp_flag_{now} = critical) \& (tmp_flag_{now-1} = flow) \\ off(flow) & tmp_flag_{now} = flow \end{cases}$$

4.3.5 例外オブジェクト除去アルゴリズム

時空間 MRF は車両のパターン学習によるマッチングではなく、背景差分によってオブジェクトを認識しているため、渋滞等で背景が汚れた場合は車両以外のものをオブジェクトとして認識してしまう場合がある。そのような例外オブジェクトが存在し、車両だと認識してしまうと、実際に車両は通行していない自由流の状態でも、例外オブジェクトを停止車両があると認識してしまい渋滞が発生していると判断してしまう。しかし現状において台数ベースにおいてすでに誤差 10% 以内の精度でトラッキングできることが確認されているので、すべてのオブジェクトに対して車両であるものを見つけるより、車両でない例外オブジェクトを発見するアルゴリズムを構築する方が効率よく分類できると考えられる。

以下に例外オブジェクトとその除去アルゴリズムを示す。

1. 渋滞による背景の汚れと小さいオブジェクト

画面奥はオブジェクトの移動量が小さいために背景が汚れやすく（図 4.14）、車両がないにもかかわらずオブジェクトがあると認識しやすい。これは画面奥の特徴なのでオブジェクトの下辺の座標を見ることで例外オブジェクトを認識（図 4.15 の ID77）するようにした。

また車両は有る程度の大きさがあるのでオブジェクトの幅、高さが一定以上なければ例外オブジェクトであると認識（図 4.15 の ID79）することとした。



図 4.14 背景の汚れ

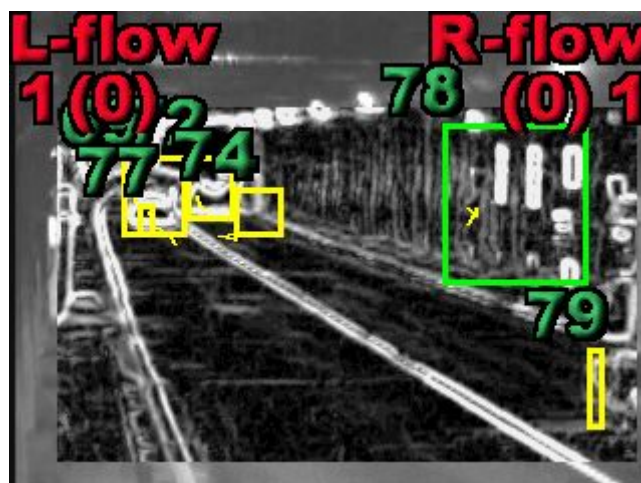


図 4.15 例外オブジェクトの例 1

2. 対向車線の光漏れ

トンネル内の対向車線との境には壁ではなく柱になっている場所があり、柱の隙間から対向車線のヘッドライトなどの光が漏れてオブジェクトと認識してしまう場合がある。この光漏れは足らの隙間から見えるものなので地面から浮いた場所に見えるのが特徴である。しかし左車線が混雑している場合の左車線の車両は上部しか見えず光漏れと同様に地面から浮いているように見えてしまう。そこで左車線に「車線がない場合」かつ「地面から浮いている場合」のみ光漏れと定義することとした。ここで地面から浮いている場合とはオブジェクトのリージョンが 4 (図 4.16 の水色) になっているものとした (図 4.15 の ID78)。

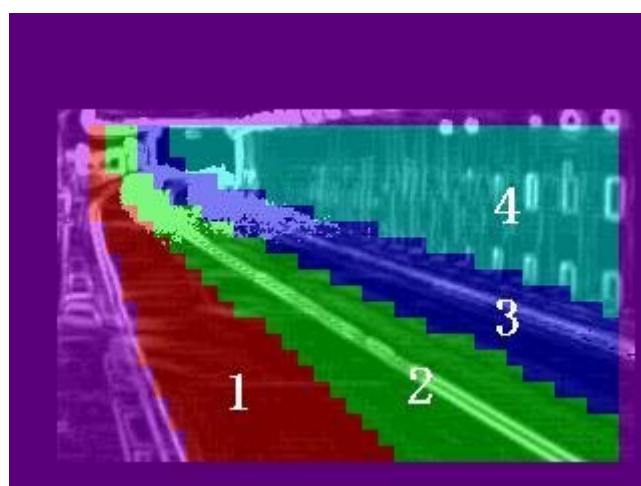


図 4.16 リージョン

3. 白線

トンネル内の照明は、昼は明るく、夜は暗くなるよう変化している。照明の明るさが変化するときや雨が降り出して水溜りが発生した場合などに背景差分によって白線をオブジェクトとしてしまう場合がある。白線は線であるために画面に対して垂直または水平であれば幅や高さが小さくなり 1 の方法で除去すること出がきる。しかし実際は図 4.10 のように画面に対して斜めに映っている。そこで単純に表示されている枠の幅や高さを見るのではなく、実際にIDの割り振られているブロックを調べる。各行におけるIDの割り振られているブロックの幅と各列におけるIDの割り振られているブロックの高さが一定以上でなければ例外オブジェクトであることとした（図 4.17）。同様に各列におけるIDの割り振られているブロックの高さと各行におけるIDの割り振られているブロックの幅が一定以上でなければ例外オブジェクトであることとする処理も行っている。

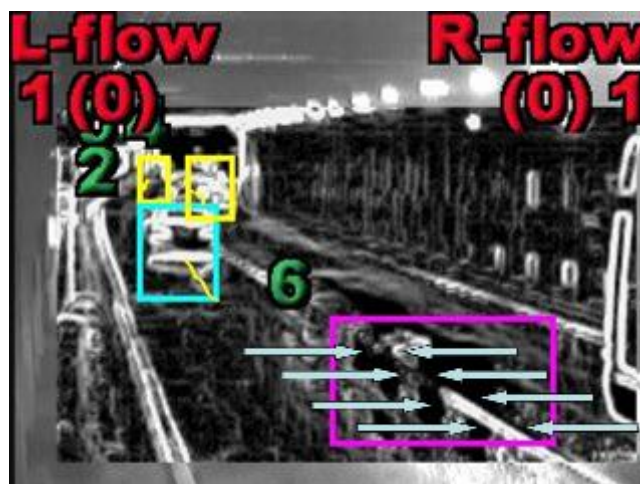
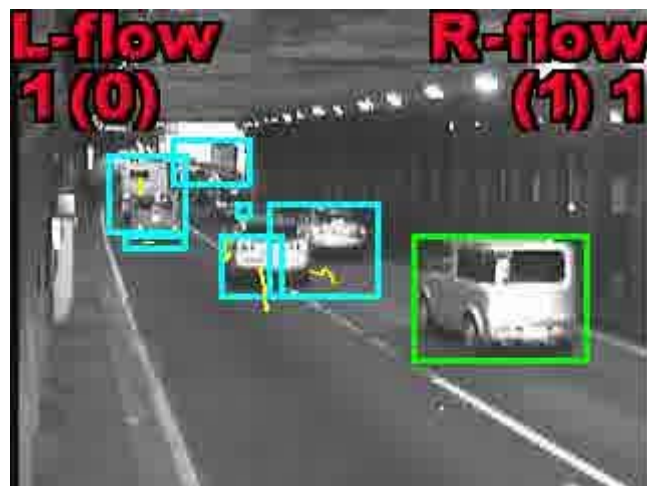


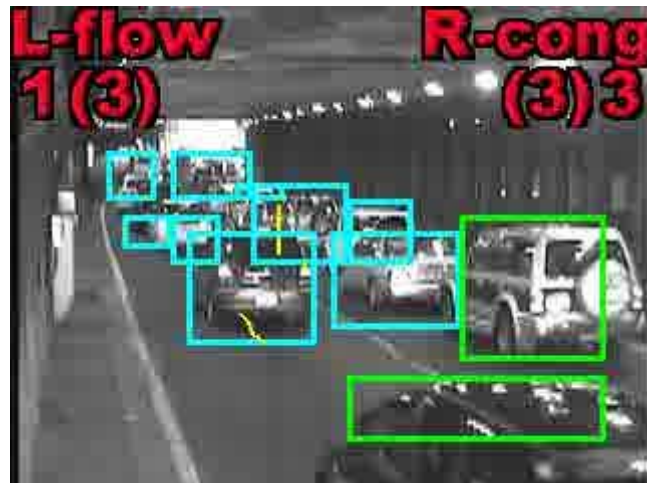
図 4.17 例外オブジェクトの例 2

4.3.6 単体画像センサ処理結果

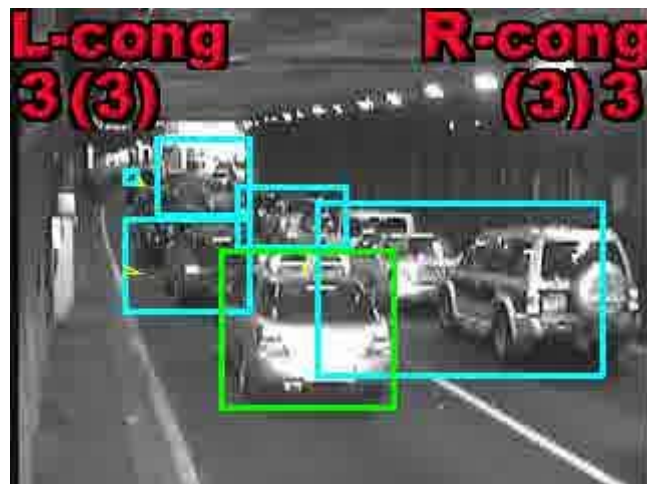
赤坂トンネルの画像を入力として、時空間MRFによるトラッキングを行い、例外オブジェクトを除いた上で急減速波検出アルゴリズムによって処理を行うと 図 4.18 の情報が出力される。左上は左車線、右上は右車線についての情報である。左上について括弧内の数字は $score_{frame}$ 、括弧外の数字は tmp_flag_{now} 、文字の L は左車線、 $flow$ は tmp_flag_{now} を表している。



(a) 両車線 *flow* の場合



(b) 右車線が *cong* の場合



(c) 両車線 *cong* の場合

図 4.18 単体画像センサの処理結果

次に画像センサの性能を評価するために、aksk8 の映像を用いて急減速波検知実験を行った。結果を表 4.9 に示す。正発報とは実際に急減速波が発生かつ情報提供した場合であり、欠報は急減速波が発生かつ情報提供しなかった場合であり、誤報は急減速波が発生しないかつ情報提供した場合のことである。

表 4.9 急減速波検知実験結果

日付	時間	天候	正発報	欠報	誤報	備考
2006/06/19	17~22	晴れ	10	0	2	
2004/12/27	22~03	晴れ	0	0	0	
2005/11/24	03~07	晴れ	7	0	0	
2006/04/26	07~12	晴れ	37	0	0	
2006/06/11	12~17	雨	61	0	0	
2005/11/16	12~17	晴れ	12	0	1	西日による誤報

時間帯や天候に関わらず急減速波は欠報なく検出された。また誤報の 1 件は、西日がトンネル内に入ってきている状態で、西日の明かり自体は例外オブジェクトとして除去しているが、車両が通過する時、動きベクトルが正しく求められないことで低速車両が存在しているとしてしまい誤報になってしまった。

4.3.7 感度調整

同じアルゴリズムを 8 台のカメラに対して行うにあたり、情報提供の閾値となる速度 20km/h と 40km/h をそれぞれのカメラで調整する必要がある。これはそれぞれのカメラの画角や道路形状が直線やカーブが混在しているためである。調整の方法としてはトンネル出口、中央、入口に関しては設置されている超音波センサから得られた速度情報と時刻を比較することにより調整する。その場所以外の画像センサに関しては赤坂トンネル出口より下流側で発生し、入口より上流まで伝播する急減速波に注目し、各カメラで順に急減速波を検出するように調整を行った。図 4.19 は伝播の様子を表しており、情報提供している時はビットが上がっている時、情報提供していない時はビットが下がっている状態を示す。

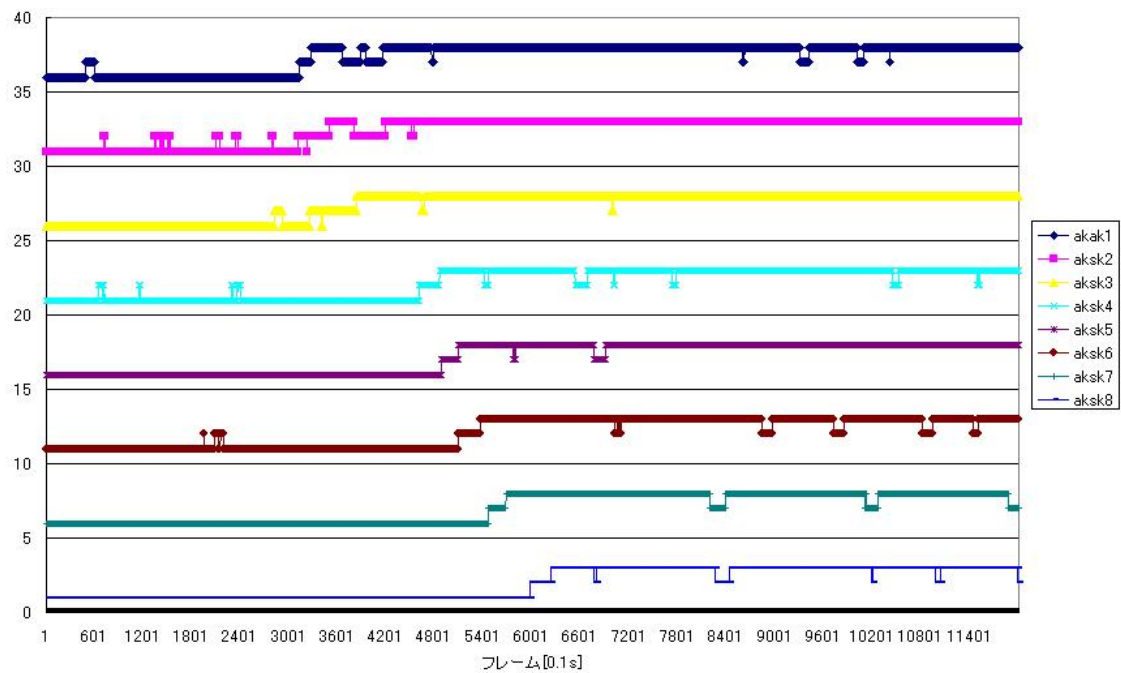


図 4.19 伝播の様子

急減速波の伝播時間を画像センサ（aksk1～aksk8）と超音波センサ（2033～2049）で比較した結果を表 4.10 に示す。

表 4.10 画像センサと超音波センサにおける伝播時間の比較

日付	発生 時間	画像セン サによる 伝播時間 [s]	超音波セ ンサによ る伝播時 間 [s]	距離を等し くした場合 の画像セン サによる伝 播時間 [s]	超音波と の誤差 [%]
2007/08/16	07:24	139	164	155	-5.5
2007/08/17	07:04	125	146	139	-4.8
2007/08/17	14:12	339	371	378	1.8
2007/08/20	08:19	241	272	280	2.9
2007/08/20	10:09	192	215	214	-0.5

表 4.6 に示した通り、赤坂トンネル入口と出口に設置されている画像センサと超音波センサの位置は異なり、超音波センサのほうやや離れている。そこで仮に同じ距離であったとして画像センサの距離を超音波センサと同じであったとして伝播時間を比例し、補正した。その結果画像センサと超音波センサの誤差は-5.5%～3%となった。

4.4 画像センサの連携による急減速波検出

赤坂トンネル内に設置してある 8 つの画像センサそれぞれにおいて急減速波の検出が可能となった。急減速波はある地点で発生して解消するものではなく、下流から上流に向かって伝播する性質がある。そこで 8 つのうちどれか 1 つでも発報したらシステム全体として情報提供を行うべきかまたは画像センサ間である条件を満たしたときに情報提供するべきかを検討する。

画像センサデータと超音波センサデータを用いて実際の交通流を再現し、どのような条件のときにドライバの立場で欠報率と誤報率が低くなるのかをシミュレーションを行い、情報提供する条件を求める。シミュレーション方法は以下のように定めた。超音波センサと画像センサの位置は図 4.9 を参照のこと。

- ・ 情報提供位置（2057）に車両が到達した際、20km/h 以下となっている画像センサが存在すれば最も上流側の画像センサを調べる。
- ・ その車両が等速（2057～2049 間は 2057 を通過した時の速度、2049～2041 間は 2049 を通過した時の速度、2041～2033 間は 2041 を通過した時の速度）で移動しているものとする。
- ・ 赤坂トンネル内を走行したとして、各画像センサ通過時に 20km/h 以下となっている画像センサに出会えばもっとも上流側の画像センサを調べる。

以上のようにして情報提供位置に到達したときに急減速波が存在している地点と、急減速波に実際に出会う地点の相関関係を調べる。2008 年 11 月 2 日～4 日の 7 時～22 時に赤坂トンネルを通過した全 38897 台について調べた結果を表 4.11、図 4.20 に示す。

表 4.11 急減速波が存在している地点と出会う地点

		車両が急減速波に出会う地点									
		なし	aksk1	aksk2	aksk3	aksk4	aksk5	aksk6	aksk7	aksk8	DSRC
車両が情報提供地点に来たとき急減速波が存在する地点	なし	21120	192	255	186	57	1	6	0	11	0
	aksk1	128	73	65	88	66	7	3	0	0	0
	aksk2	77	37	113	142	155	39	0	0	0	0
	aksk3	36	47	66	180	207	87	57	6	0	0
	aksk4	21	12	15	74	114	137	140	14	0	0
	aksk5	42	0	15	34	8	137	145	48	2	0
	aksk6	42	23	1	15	1	2	240	216	66	0
	aksk7	0	2	2	6	4	6	26	522	509	0
	aksk8	0	0	0	0	0	0	64	306	3318	0
	DSRC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9061
	小計	21466	386	532	725	612	416	681	1112	3906	9061

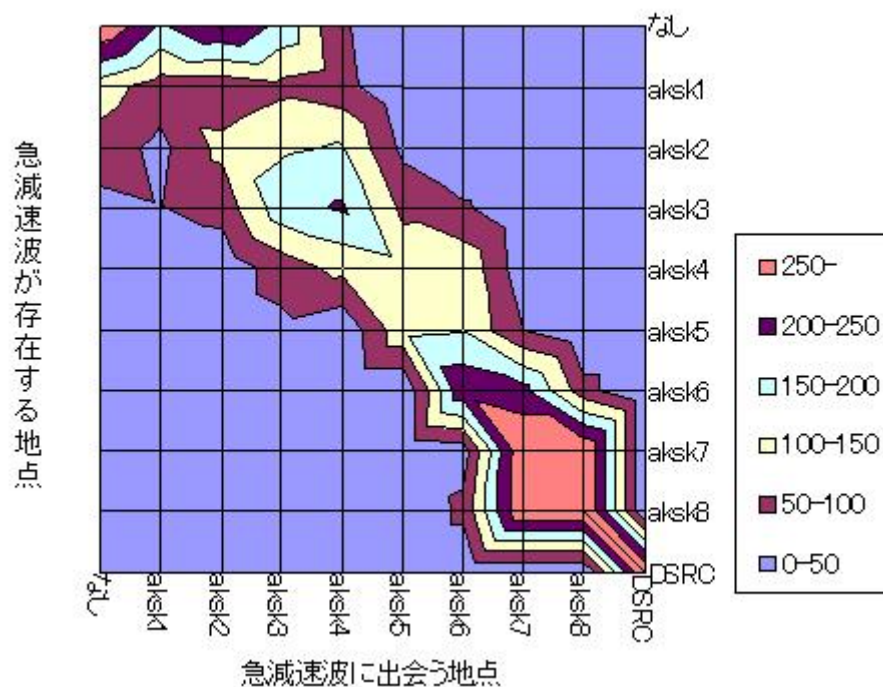


図 4.20 急減速波が存在している地点と出会う地点

車両が情報提供地点に来たとき急減速波が存在する画像センサ地点と同じもしくは、1～2つ上流の画像センサ地点で急減速波に出会うことが多いことより、急減速波は一度発生したら、途中で消滅することなく上流まで伝播することが分かる。また情報提供地点に来た

とき急減速波が存在しない場合に急減速波に出会う画像センサ地点は aksk1～aksk3 であることより赤坂トンネルの途中で急減速波が発生することも少ないと考えられる。

次にドライバにとっての欠報率と誤報率を検討するにあたり、欠報と誤報を表 4.12 のように定義した。

表 4.12 ドライバにとっての欠報と誤報の定義

		急減速波に出会うかどうか	
		出会う	出会わない
情報提供	あり	正発報 (A)	誤報 (C)
	なし	欠報 (B)	なし (D)

同様にドライバにとっての欠報率と誤報率を以下のように定義した。ローマ字は表 4.12 における分類である。

$$\text{欠報率} = \frac{\text{情報提供を受けなかった車両}}{\text{急減速波に出会った車両}} = \frac{B}{A+B}$$

$$\text{誤報率} = \frac{\text{急減速波に出会わなかった車両}}{\text{情報提供を受けた車両}} = \frac{C}{A+C}$$

ここで欠報率について、

$$\text{欠報率} = \frac{\text{急減速波に出会わなかった車両}}{\text{情報提供を受けた車両}} = \frac{B}{B+D}$$

としない理由は、主に空いている状況である夜間などにおいてほぼ全ての車両が表 4.12 のDに当てはまることにより、分母が非常に大きくなり値が小さくなる影響が出てしまうからである。急減速波と関係ない状況における車両が影響すると公平に評価できないと判断した。また、DSRCの地点ですでに 20km/h以下になっている場合（表 4.12 のAの一部に含まれる）は渋滞中であると判断し、欠報率と誤報率に含めないこととした。

例えばaksk2 における欠報率と誤報率を求める際の表 4.12 のA、BおよびCに該当する車両は表 4.11 を用いて表すと次の表 4.13 で示す部分となる。

表 4.13 aksk2 で検出した時に発報した場合の欠報と誤報

		車両が急減速波に出会う地点										
		なし	aksk1	aksk2	aksk3	aksk4	aksk5	aksk6	aksk7	aksk8	DSRC	小計
車両が情報提供地点に来たとき急減速波が存在する地点	なし	21120	192	255	186	57	B	6	0	11	0	21828
	aksk1	128	73	65	88	66		3	0	0	0	430
	aksk2	77	37	113	142	155	39	0	0	0	0	563
	aksk3	36	47	66	180	207	87	57	6	0	0	686
	aksk4	21	12	15	74	114	A	140	14	0	0	527
	aksk5	0	0	15	34	8		145	48	2	0	431
	aksk6	42	23	1	15	1	2	240	216	66	0	606
	aksk7	0	2	2	6	4	6	26	522	509	0	1077
	aksk8	0	0	0	0	0	0	64	306	3318	0	3698
	DSRC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9061	9061
	小計	21466	386	532	725	612	416	681	1112	3906	9061	38897

定義した欠報率と誤報率を各画像センサについて発報したと仮定して求めた結果を 図 4.21、表 4.14 に示す。ローマ字は表 4.12 における分類である。

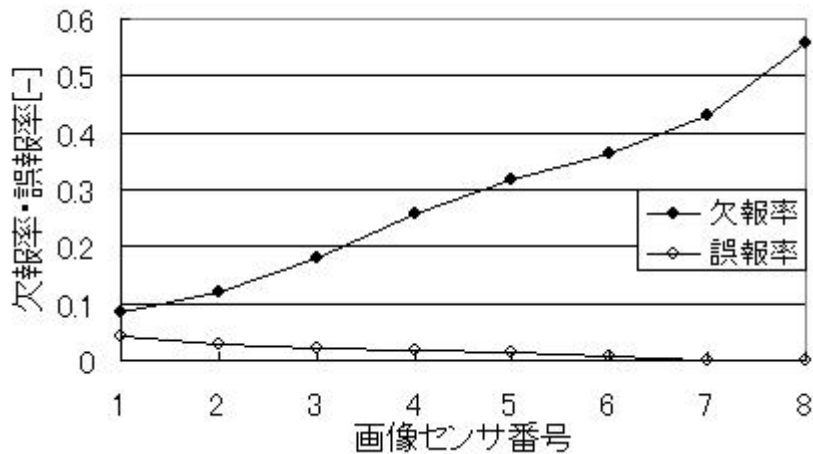


図 4.21 各画像センサについて発報した時の欠報率・誤報率

表 4.14 各画像センサについて発報した時の欠報率・誤報率

		B	A+B	欠報率	C	A+C	誤報率	F'値
急減速波が到達したら 情報提供する画像センサ	aksk1	708	8370	0.084	346	8008	0.043	0.936
	aksk2	1010	8370	0.120	218	7578	0.028	0.923
	aksk3	1496	8370	0.178	141	7015	0.020	0.894
	aksk4	2146	8370	0.256	105	6329	0.016	0.847
	aksk5	2652	8370	0.316	84	5802	0.014	0.807
	aksk6	3041	8370	0.363	42	5371	0.007	0.776
	aksk7	3605	8370	0.430	0	4765	0	0.726
	aksk8	4682	8370	0.559	0	3688	0	0.612

4.3.2 で定義したF'値を用いて評価すると下流になればなるほど性能がよくなることが分かった。

4.5 効果測定

前項までに急減速波が発生したときに急減速波を検知し、情報提供をするかどうかを決定する画像センサの開発を行った。次に情報提供することによって実際にドライバを事故から防ぐことが出来るのかどうか、ドライビングシミュレータ（以下 DS）を用いて検証する。

実験では図 4.22 に示す慶應義塾大学のDS（慶應義塾大学・国土技術政策総合研究所共同開発）を使用した。DSの映像スクリーンは前方、左右前方、左右側方、左右後方、後方からなる 8 画面で構成され、これらのスクリーンに対して 10 台の映像用プロジェクタから走行映像が投影された。運転席からのドライバの視野角は 360 度で、左右サイドミラーおよびルームミラーは実車と同様な鏡面体を用いており、後方スクリーンの映像を間接的に捉えることができる方式である。車載モニタはカーナビ用に市販されている 7 インチワイド型モニタとスピーカが搭載されており、ビーブ音の注意喚起音と音声案内とともに車載モニタに「この先渋滞注意」の警告画面が表示される仕組みとなっている。

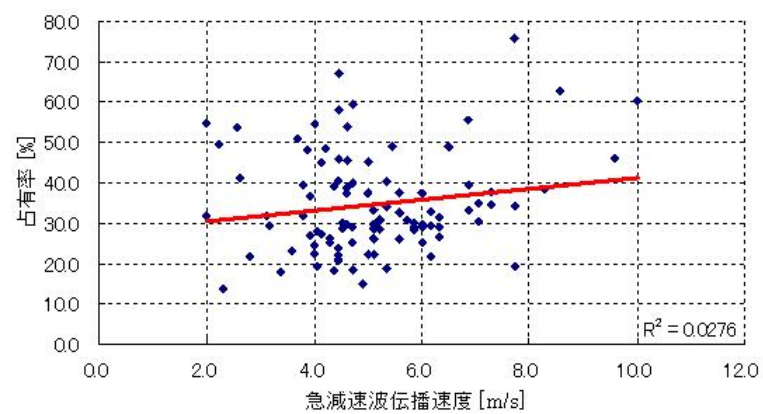


図 4.22 ドライビングシミュレータ

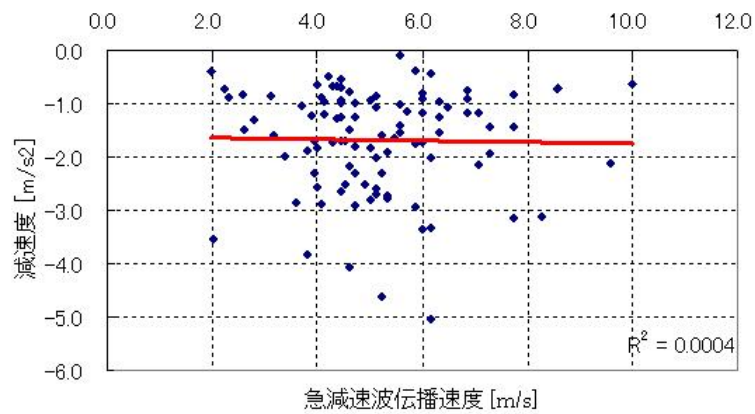
4.5.1 情報提供の有効性

情報提供の有無（表 4.12 におけるAとB）によってドライバの挙動がどう変化するかを調べるにあたり、DS実験の工数として何が必要であるか検討する。

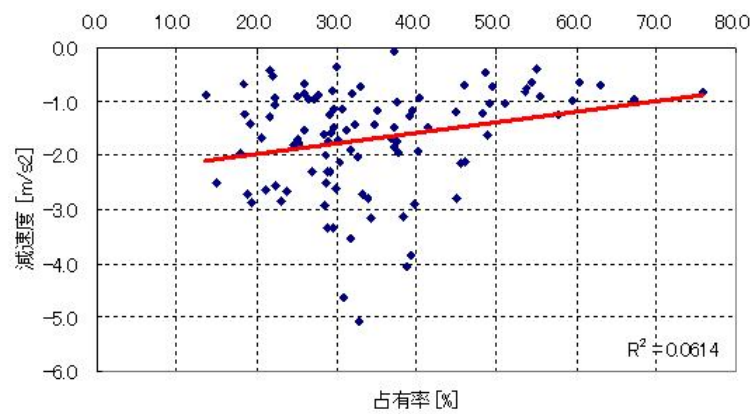
システム側（全体的な交通流）から見た要素として急減速波伝播速度、占有率、減速度が挙げられる。それぞれに対しての相関関係を調べた結果を図 4.23 に示す。



(a) 占有率と急減速波伝播速度



(b) 減速度と急減速波伝播速度



(c) 減速度と占有率

図 4.23 急減速波伝播速度と占有率と減速度の相関関係

それぞれにおいて近似直線の決定係数は 0.01 以下であり、ほとんど相関関係はないものと考えられる。次にドライバにとっての要素として減速開始時の速度と減速度の相関関係を調べた結果を図 4.24 に示す。

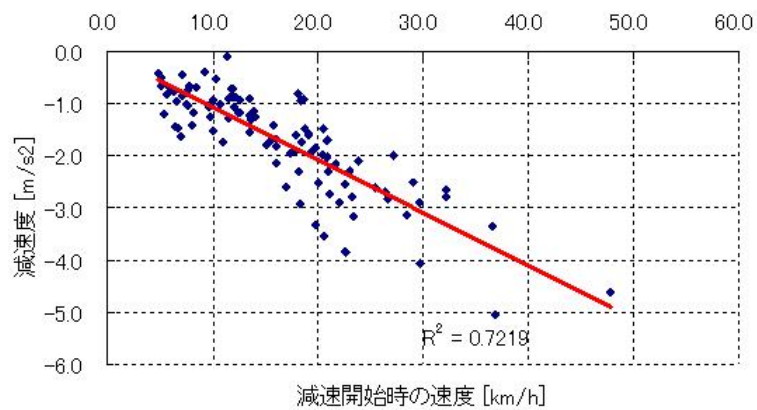


図 4.24 減速開始時の速度と減速度の相関関係

減速開始時の速度と減速度の相関関係における直線近似の決定係数は 0.72 と比較的高いことから、一定の相関関係があると考えられる。特に走行速度が大きい車両ほど、ブレーキによる減速度が大きくなる傾向が見られる。

以上により実験シナリオは情報提供の有無（2 通り）、走行速度と減速度（2 通り）の計 4 通り（表 4.15）を行うこととした。

表 4.15 情報提供の有効性の実験シナリオ

シナリオ	急減速波に出会う地点	情報提供	走行速度と減速度
シナリオ A	トンネル入口	あり	急減速 (50km/h、-5m/s ²)
シナリオ B	トンネル入口	なし	急減速 (50km/h、-5m/s ²)
シナリオ C	トンネル入口	あり	緩減速 (30km/h、-3m/s ²)
シナリオ D	トンネル入口	なし	緩減速 (30km/h、-3m/s ²)

4 つの実験シナリオに対して 8 人ずつ実験を行うこととした。被験者情報を表 4.16 に示す。

表 4.16 被験者情報

実験シナリオ	男性			女性			小計
	20 代	30 代	40 代	20 代	30 代	40 代	
シナリオ A	2	1		2	2	1	8
シナリオ B	2		1	2	2	1	8
シナリオ C	1		1	1	4	1	8
シナリオ D	1	1		2	3	1	8
小計	6	2	2	7	11	4	32

実験シナリオを体験する前に DS の運転に慣れるために首都高 4 号線において赤坂トンネル手前の IC で左側に車線変更し出口に向かう走行、停車車両による右車線への車線変更する走行、首都高 6 号線における通常走行を行った。そして 4 回目に急減速波の発生しない赤坂トンネルを被験者ごとの実験シナリオと同じ速度で走行し、5 回目に実験シナリオを行い 4 回目と 5 回目の走行を比較した。

情報提供を行った被験者に対して、与えた情報に対する反応を表 4.17、表 4.18 に示す。

表 4.17 どの情報で発報に気づいたか

視覚情報	聴覚情報	
	注意喚起音	音声メッセージ
6	6	3

表 4.18 視認状況

	モニタを確認するまでの時間 [s]	平均視認回数 [回]	平均視認時間 [s]
平均値	0.67	1.84	0.73
標準偏差	0.51	0.73	0.23

すべての被験者に対して、追突した件数を表 4.19 に、平均速度の変化を図 4.25 に、平均車頭間隔距離の変化を図 4.26 に示す。

表 4.19 追突件数

実験シナリオ	追突件数 (男性/女性)
シナリオ A	1 (0/1)
シナリオ B	3 (2/1)
シナリオ C	0 (0/0)
シナリオ D	2 (0/2)

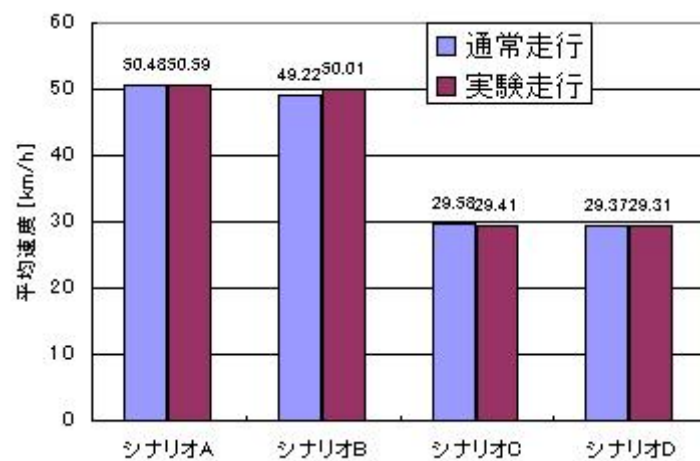


図 4.25 平均速度変化

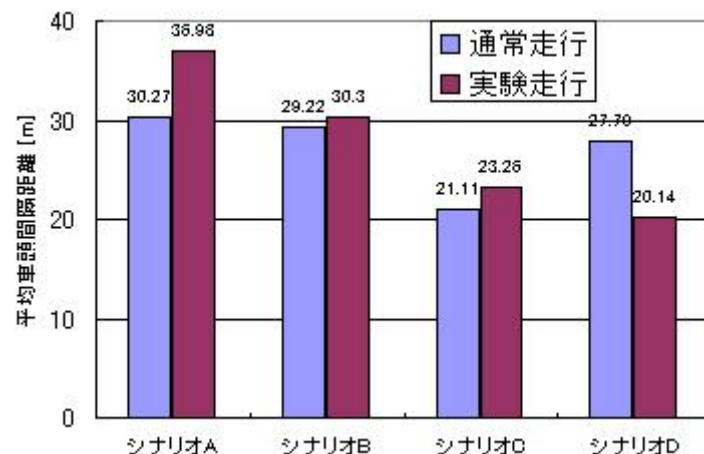


図 4.26 平均車頭間隔距離変化

追突件数は情報提供を行った場合の方が少なくなっている。走行速度に大きな変化は見られないのに対し、車頭間隔距離を長めにとるようになったことが理由と考えられる。

シナリオ A で追突したドライバに追突した理由をアンケートしたところ情報提供の意味を取り違えたと回答した。情報提供をしたほかの 15 人に関してそのような回答はなかった。また情報提供がなく追突したドライバに追突した理由アンケートしたところ停止することは予測できなかったという回答が多かった。

情報提供により、先行車両との距離を広め取ることで余裕を持って減速することができ、結果として追突件数が減ったことで情報提供は効果があると考えられる。

4.5.2 不感地帯における欠報の影響

画像センサの精度がいかに高くても、画像センサの位置と情報提供の位置が離れているために、欠報となってしまう地帯が存在する。厳密には実際に急減速波が発生した時における発生地点から情報提供地点までと、急減速波が発生した時からシステムが検知するまでにかかる時間の分だけ上流にさかのぼった地帯には情報提供することが出来ない。この地帯を不感地帯と定義する。

赤坂トンネル付近において、仮に急減速波が発生したと同時に情報提供したとすると、急減速波が aksk1 に到達した時に情報提供地点より下流側にいる車両には情報提供できずに欠報となってしまう。現状のシステムではこの不感地帯にいる車両に対して必ず欠報となってしまうので、このような場合ドライバにとってどのような影響があるのかを DS で調べる必要がある。

4.4 項でより下流側の画像センサで急減速波を検出したら発報する方がシステムとして有効であることが分かっている。そこで下流側から 3 つのセンサにおいて各画像センサまで急減速波が到達した時に発報したとすると、不感地帯にいる車両はどこで急減速波に出会

うかについて検討する。aksk1 で発報する場合は、急減速波がまだ存在していない状況の車両のみが不感地帯にいることになる。aksk2 はで発報する場合は、aksk2 より下流のaksk1 まで急減速波が到達している場合も不感地帯にいることになる。aksk3 も同様にして、表 4.11 より不感地帯にいる車両が急減速波に出会う地点を表 4.20 に示す。

表 4.20 各画像センサで発報した場合の不感地帯にいる車両が急減速波に出会う地点

		不感地帯にいる車両が急減速波に出会う地点							
		aksk1	aksk2	aksk3	aksk4	aksk5	aksk6	aksk7	aksk8
発報画像センサ	aksk1	184	225	170	81	23	37	57	34
	aksk2	219	280	268	137	34	55	60	47
	aksk3	259	356	380	191	76	94	78	58

4.4 項で求めたF'値を各画像センサの信頼度として捉え、表 4.20 の値と積をとり、不感地帯にいる車両が急減速波に出会う地点の和を取った結果を表 4.21 に示す。

表 4.21 不感地帯にいる車両が急減速波に出会う地点

		不感地帯にいる車両が急減速波に出会う地点							
		aksk1	aksk2	aksk3	aksk4	aksk5	aksk6	aksk7	aksk8
発報画像センサ	aksk1	172	211	159	76	22	35	53	32
	aksk2	202	258	247	126	31	51	55	43
	aksk3	232	318	340	171	68	84	70	52
	小計	606	787	746	373	121	170	178	127

不感地帯にいる車両はaksk2 において急減速波に出会いやすいことが分かった。aksk2 走行速度と減速度を調べた結果を図 4.27 に示す。

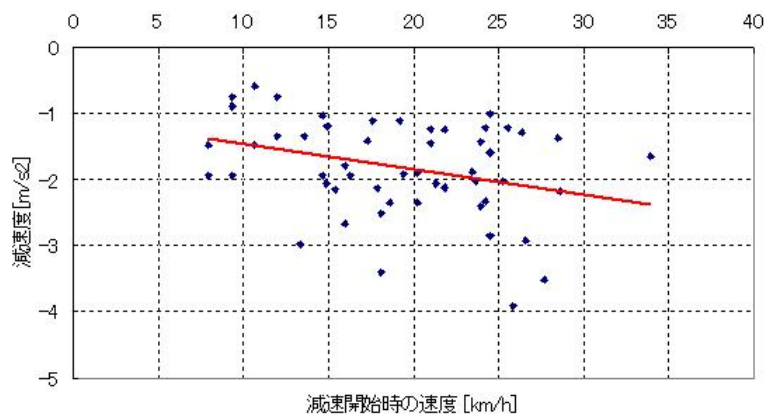


図 4.27 aksk2 における減速開始時の速度と減速度の相関関係

トンネル入口のときのように走行速度が 50km/hとなる場合はなかった。これは 図 4.8 (b) から下流側の走行速度は上流側の走行速度よりも遅いことが分かる。実験シナリオは急減速波に出会う地点の異なる緩減速の3通り（表 4.22）行うこととした。

表 4.22 欠報時の実験シナリオ

シナリオ	急減速波に出会う地点	情報提供	走行速度と減速度
シナリオ E	トンネル入口（aksk8）	なし	緩減速（30km/h、-3m/s ² ）
シナリオ F	トンネル中央（aksk5）	なし	緩減速（30km/h、-3m/s ² ）
シナリオ G	トンネル出口（aksk2）	なし	緩減速（30km/h、-3m/s ² ）

被験者情報を表 4.23 に示す。

表 4.23 被験者情報

実験シナリオ	男性			女性			小計
	20 代	30 代	40 代	20 代	30 代	40 代	
シナリオ E	1	1	1	2	1	1	7
シナリオ F	1	2	0	3	1	1	8
シナリオ G	1	1	1	2	2	1	8
小計	3	4	2	7	4	3	31

先の DS 実験と同様にして、練習走行を行った。そして 4 回目に急減速波の発生しない赤坂トンネルを 30km/h で走行し、5 回目に実験シナリオを行った。

シナリオごとの追突した件数を表 4.24 に、平均車頭間隔距離の変化を図 4.28 に、平均想定度を図 4.29 に示す。想定度とは被験者に急減速波に対して「全くの想定外」なら 1 点とし、「想定外」「やや想定外」「どちらでもない」「やや想定内」「想定内」「全くの予想の想定内」の順に 7 点まで点数化したものであり、点数が高いほど想定できたことを示す

ものである。

表 4.24 追突件数

実験シナリオ	追突件数（男性/女性）
シナリオ E	0（0/0）
シナリオ F	0（0/0）
シナリオ G	0（0/0）



図 4.28 平均車頭間隔距離

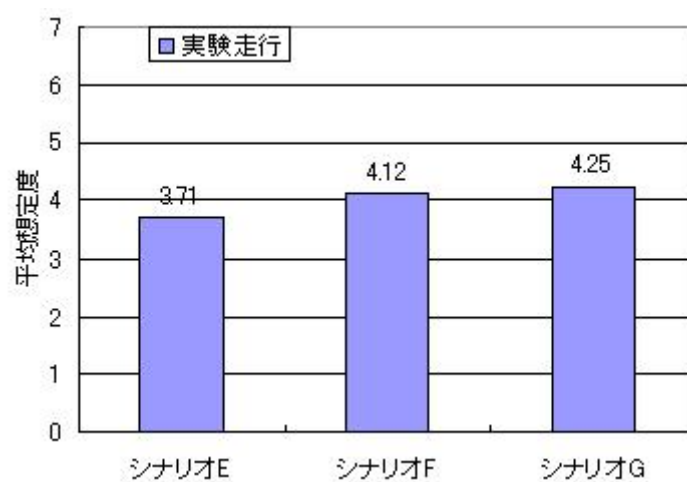


図 4.29 平均想定度

前回の実験のシナリオ D と今回の実験のシナリオ E に関して急減速波に出会う地点、速度と減速度は同じである。DS のシステムの音響と車載モニタに表示される地図の縮尺が変更された。スクリーンに表示される映像や周囲の車両の車種は同じである。

シナリオ D とシナリオ E を比較すると追突件数が 2 件から 0 件に減少している。実験後の口頭アンケートにおいても音響や車載モニタに表示される地図に関する意見は聞かれな

かったので個人差によるものであると考えられる。シナリオ F やシナリオ G では 30km/h と低速で赤坂トンネルを走行し続けるために、先行車両との車間距離をやや広めに取り、先行車両が停止することを想定しながら走行する傾向があることが分かった。

第5章 交差点における事故回避支援システム

本章では交差点における事故を未然に防ぐために、事故画像を収集し事故要因分析を行う。事故回避支援システムの性能要求を明らかにするとともに、実際に道路にカメラを設置し、時空間 MRF を用いた進入車両検出実験を行い、検出精度を確認する。

5.1 事故要因分析

5.1.1 観測交差点

本研究室では、千代田区駿河台下交差点において 7 年間に渡る定点観測を通し全ての画像を記録し、30 件に及ぶ事故画像を収集してきた。駿河台下交差点は上下に走る片側 3 車線と右折専用車線の計 7 車線からなる道路と、左右に走る片側 2 車線と右折専用車線の計 5 車線からなる道路のほかに、専用の信号機の無い道路が 図 5.1 の左上と右下にあり、6 差路の交差点となっている。



図 5.1 駿河台下交差点

5.1.2 交差点内事故

駿河台下交差点における定点観測により、収集した 30 件の交通事故について以下の 5 通りに分類した。

- ・ 右直 : 右折車両と対向直進車両による接触事故
- ・ 側面衝突 : 直進車両と横切る方向の直進車両による接触事故
- ・ 追突（接触）: 同方向直進車両同士による接触事故
- ・ 巻き込み : 直進車両と左折車両による接触事故
- ・ 単独転倒 : 2 輪車による単独転倒

一般的な交差点における事故回避支援システムを検討するにあたり、この交差点特有の 6

差路に起因する交通事故（側面衝突）と予測することが困難な交通事故（追突、巻き込み）を分析から除いた。そして、交差点に進入してくる車両に周囲の車両の情報を提供すれば交通事故を未然に防げたと思われる交通事故を選別した、その内訳を表 5.1 に示す。なお、右直事故のうち画像が不鮮明なために正確な座標を測定することが出来なかった 1 件を分析対象から除いた。

表 5.1 交通事故種類別件数

交通事故種類	収集事故件数	分析対象件数
右直	10 件 (8 件)	9 件 (8 件)
側面衝突	6 件 (6 件)	0 件 (0 件)
追突	8 件 (2 件)	0 件
巻き込み	5 件 (5 件)	5 件 (5 件)
単独転倒	1 件 (1 件)	0 件

(件数の括弧の中の数字は 2 輪車が関係)

2 輪車の関係する交通事故の割合が 4 輪車同士の交通事故に比べ高い。これは渋滞している 4 輪車の間をすり抜けて走行する 2 輪車が死角になっており、それに気づかない車両が進行することによって事故を起こしてしまう状況が全てである。また、一般に二輪車の走行速度は、4 輪車に比べて高い傾向にあり、その速度ギャップが事故の要因となる可能性もあり、すり抜けて走行する 2 輪車が関係する交通事故を減らすことができれば、交差点における交通事故を減らす効果があると考えられる。

5.1.3 事故車両挙動分析

事故が起こった際の車両の詳しい挙動を調べるために、選別した 14 件の事故を起こした車両について、接触 2.0 秒前から接触するまでの 0.1 秒ごとの座標を求めた。(付録:資料 1) 現地で測量した交差点四隅の長さを基に以下の射影変換を行った。

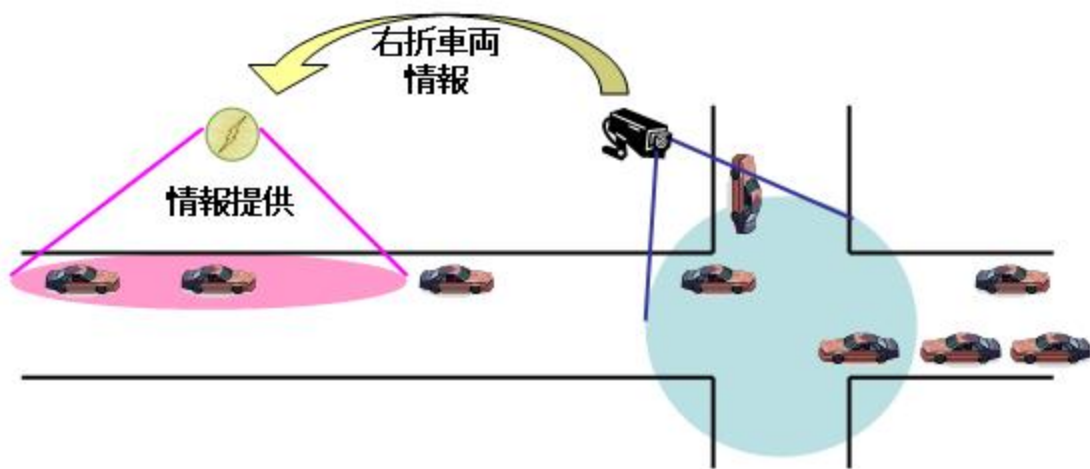
$$X = \frac{rx + sy + t}{px + qy + 1}$$

$$Y = \frac{ux + vy + w}{px + qy + 1}$$

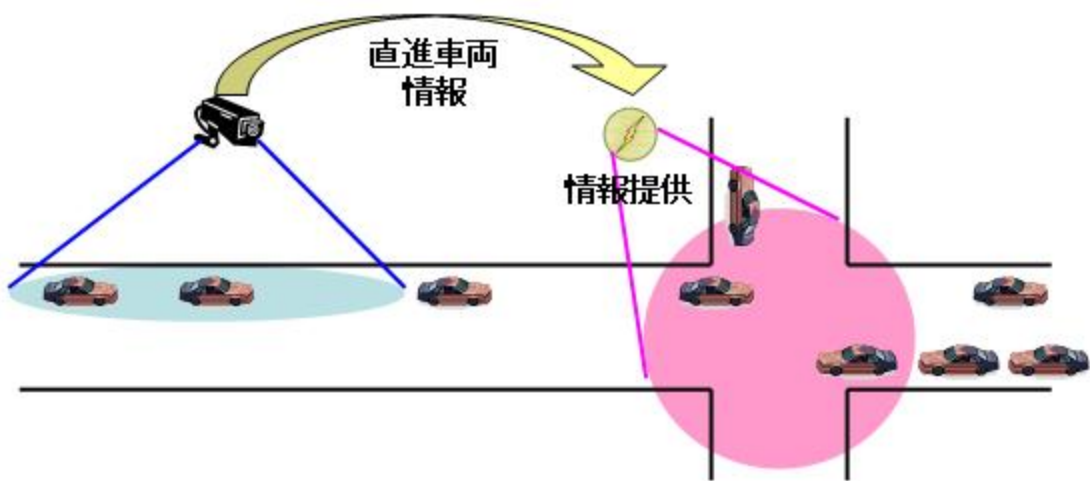
(x, y) は画面上でのピクセル単位の座標であり、(X, Y) は実空間でのメートル単位の座標である。」射影変換により実座標においての車両の位置を求めた。そして事故地点までの距離、速度、さらに減速度を仮定 (0.3G) することにより、停車するまでに必要な距離を推定した。(付録:資料 2)

5.2 事故回避支援方法

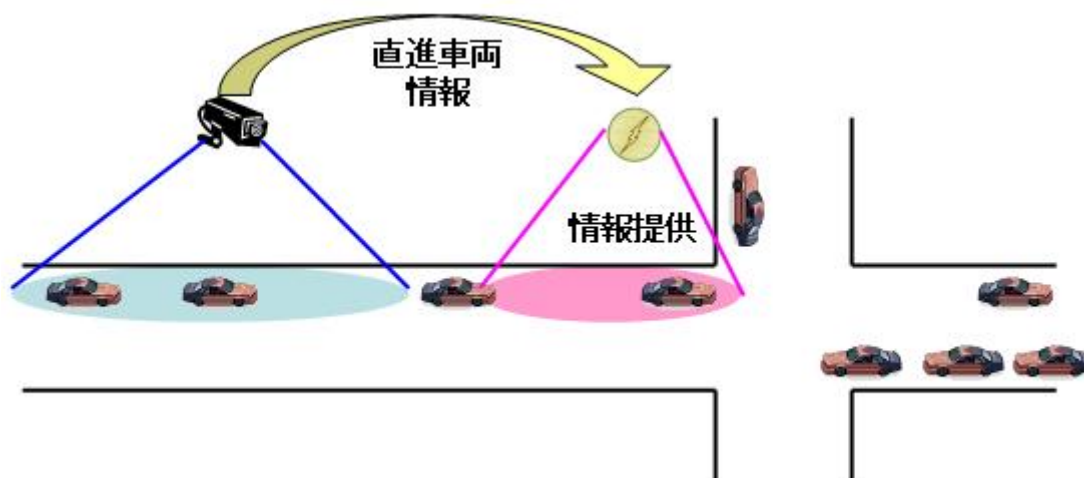
事故回避支援システムの性能要求を明確にするために、右直事故を防ぐための「直進車両を検知し、右折車両に情報提供する方法（図 5.2 (a)）」、「右折車両を検知し、直進車両に情報提供する方法（図 5.2 (b)）」、巻き込み事故を防ぐための「進入車両を検知し、左折車両に情報提供する方法（図 5.2 (c)）」について検討する。そして、それぞれの場合においてどこにセンサを設置し、どのタイミングで情報提供するかを明確にする。



(a) 直進車両検知



(b) 右折車両検知



(c) 巻き込み事故防止のための直進車両検知

図 5.2 事故回避支援方法

5.2.1 右直事故防止のための直進車両検知

右折車両が右折専用車線で停止状態から右折開始までの時間 (a)、右折開始から事故までの時間 (b)、直進車両の進入速度 (x) を表 5.2 に示す。

右折車両は右折専用車線で停止した後右折を開始する傾向があることが分かる。右折車両が右折専用車線でブレーキを解除し、右折を開始し始めたときに、路側機に直進車両の情報を問い合わせることを考える。右折開始時に直進車両をセンシングし、その情報を提供する通信時間は無視できるほど小さく、車載機側の応答時間は 0.5 秒程度と考えられる。また、ドライバの反応時間を 2 秒と見積もると、

$$b > 0.5 + 2.0$$

が成り立てば、右折車両は直進車両が通過する前に右折を中断することができ、事故を防ぐことが出来ると考えられる。

右折開始時の直進車両が存在する範囲をセンシングするので範囲は、

$$l = bx$$

となる。また、事故地点から停止線までは 20m 程度であることより、停止線から 30m から 80m 付近をセンシングし、進入車両を検知したときに、右折車両に情報提供することで事故回避できると考えられる。(図 5.3) しかし、小さい交差点では右折開始と同時に対向車線にはみ出す形となり b が限りなく小さくなると考えられることより、全ての交差点で適応することを考えるとセンシング範囲は停止線から 80m までとなる。

表 5.2 直進車両検知の場合の情報提供範囲の条件

	停止から右折開始までの時間 [s] (a)	右折開始から事故までの時間 [s] (b)	直進車両の進入速度 [m/s] (x)	右折開始時からシステム応答時間だけ遡った時点での事故地点から直進車両までの距離 [m] (l)
Case1	11.0	4.0	17.5	70.0
Case2	10.0	5.6	12.8	71.7
Case3	40.0	6.3	14.3	90.1
Case4	4.5	7.3	13.7	100.0
Case5	19.0	4.6	16.4	75.4
Case6	7.3	7.1	13.2	93.7
Case7	14.9	3.7	14.1	52.2
Case8	23.0	4.5	21.2	95.4
Case9	32.2	6.1	14.1	86.0

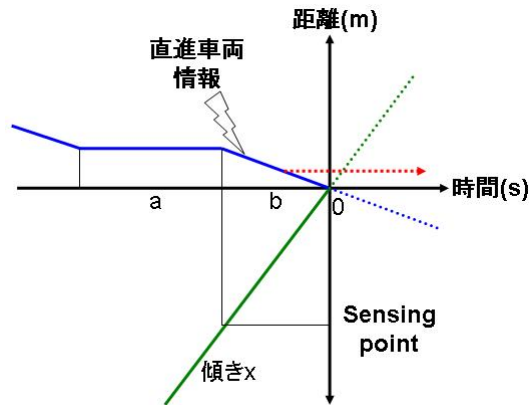


図 5.3 右直事故防止のための直進車両検知

5.2.2 右直事故防止のための右折車両検知

右折車両が右折専用車線に停止してから事故が起こるまでの時間と、進入車両のドライバーに情報提供し、減速し停止するまでの時間は、通信時間と応答時間と反応時間を先ほどと同様として見積もると、

$$a+b > e+0.5+2$$

が成り立てば、直進車両は右折車両より手前で停止することができ、事故を防ぐことが出

来ると考えられる。(図 5.4) 情報提供する範囲は、交差点から右折車両進入時の直進車両の位置の最小値(最低速進入車両が通過する位置)より近い、かつ、停止距離の最大値(最高速進入車両が止まれる位置)より遠く条件を満たす必要がある。まず右折車両進入時の右折車両の位置(0)は、 $a+b$ を最小の11.8[s]と固定すると、

$$o = 11.8x$$

となる。一方、停止距離(n)は、

$$n = m + (0.5 + 2)x$$

となる(表 5.3)。この2つの条件を満たすところで情報提供すればよい。事故地点から停止線までは20m程度であることより、停止線から110mから131m付近で情報提供することで事故回避できると考えられる。

表 5.3 右折車両検知の場合の情報提供範囲の条件

	直進車両の進入速度 [m/s] (x)	右折車両進入時の右 折車両までの距離 [m] (0)	直進車両の停止距離 [m] (n)
Case8	21.2	151.0	59.9
Case1	17.5	155.8	62.6
Case5	16.4	161.7	66.2
Case3	14.3	166.4	69.1
Case7	14.1	166.4	69.1
Case9	14.1	168.4	70.5
Case4	13.7	193.5	86.7
Case6	13.2	206.2	95.8
Case2	12.8	250.2	129.4

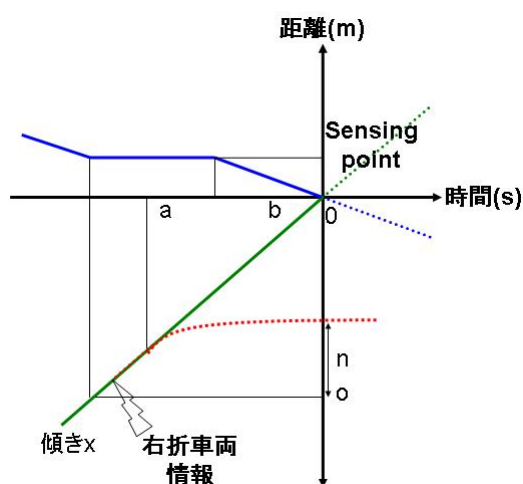


図 5.4 右直事故防止のための右折車両検知

5.2.3 巻込事故防止のための直進車両検知

左折車両の場合、情報提供さえすれば、事故を防げることが出来ると考えられる。これは右直事故の場合は直進車両か右折車両が停止しなければ事故を防げないのに対し、巻き込み事故の場合は左折開始地点において左折車両は十分に減速しており、左折開始を中断すればよいと考えられる。(図 5.5)

情報提供は、左折開始時より車載機側の応答時間の 0.5 秒とドライバの反応時間の 2 秒の合計 2.5 秒前に行えばよい。これに該当する範囲は、事故地点から 表 5.4 の (p) の付近であり、これは交差点の内部と停止線から 10m の付近となる。

センシングの範囲は、同様に左折開始地点より 2.5 秒前に直進車両の存在する範囲の、
 $q = y \times (0.5 + 2.0)$

となる。停止線までは 20m ほどなので、停止線から 25m の間で行えばよいと考えられる。

表 5.4 巻込事故の場合の情報提供範囲の条件

	事故 2.5 秒前の事故地点から左折車両までの距離 [m] (p)	直進車両の速度 [m/s] (y)	事故 2.5 秒前の事故地点から直進車両までの距離 [m] (q)
Case10	9.5	17.5	43.8
Case11	26.6	14.2	35.5
Case12	26.4	10.7	26.8
Case13	3.8	9.4	23.5
Case14	23.5	9.6	24.0

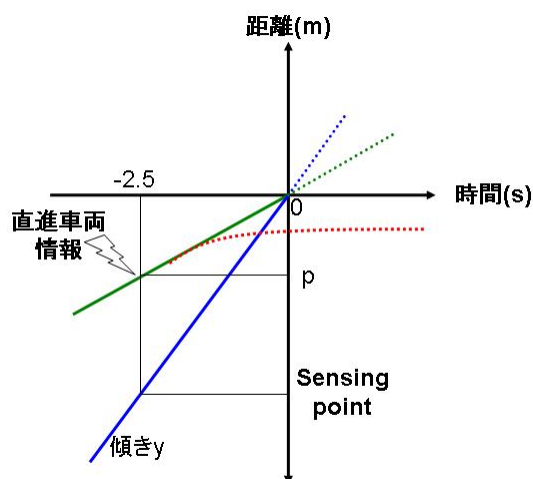


図 5.5 巻込事故防止のための直進車両検知

5.3 画像処理システムによる車両位置検出

5.3.1 直進車両の位置検出

これまでに本研究室で開発してきた時空間MRFを用いて、例えば交差点に進入する車両の方向別台数をカウントする手法を提案 [22] してきた。直進車両の位置検出も同様に交差点にカメラを設置し、映像を収集し、時空間MRFを用いた直進車両の位置検出実験を行った。時空間MRFによって得られたオブジェクトの位置から、正確な位置を求めるために、オブジェクトの下辺のエッジ（図 5.6）を求めることにした。交差点に進入する車両にカメラを取り付けて固定し、位置を書き込んでおいた路面を撮影することによってどのタイミングでどの場所にいたかを測り、真値とした。測定値のピクセル座標から実座標への変換はカメラの俯角からy座標のみを用いて求めた。普通車、大型車、2 輪車、自転車においてのカメラまでの距離[m]と速度[km/h]を真値と比較した結果を図 5.7 に、それぞれにおける誤差平均[m]と標準偏差を表 5.5 に示す。

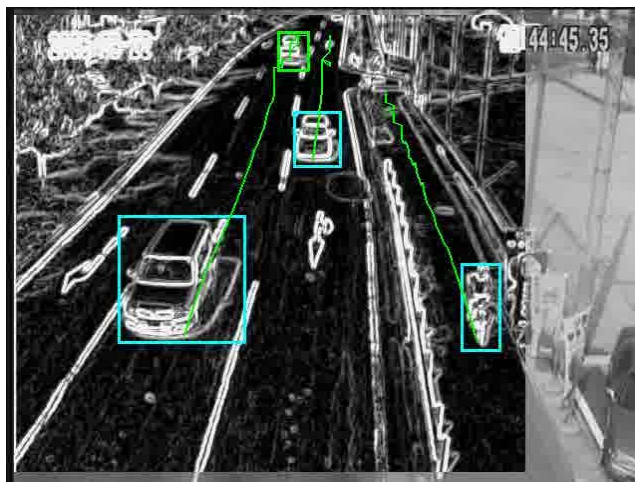
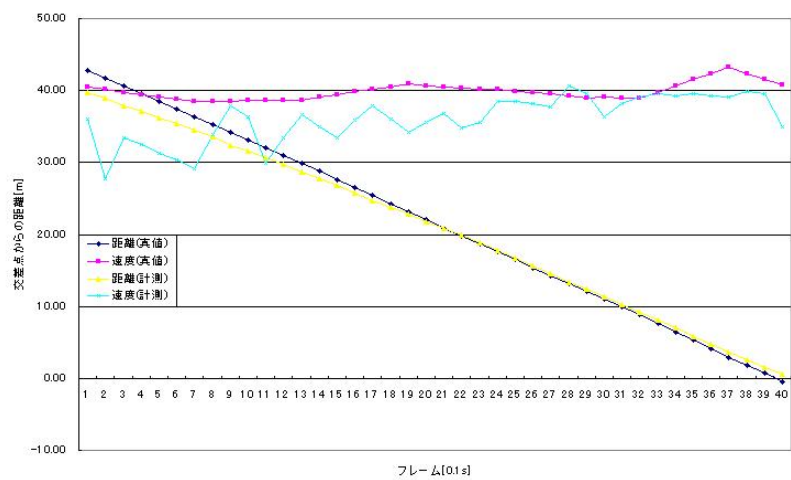
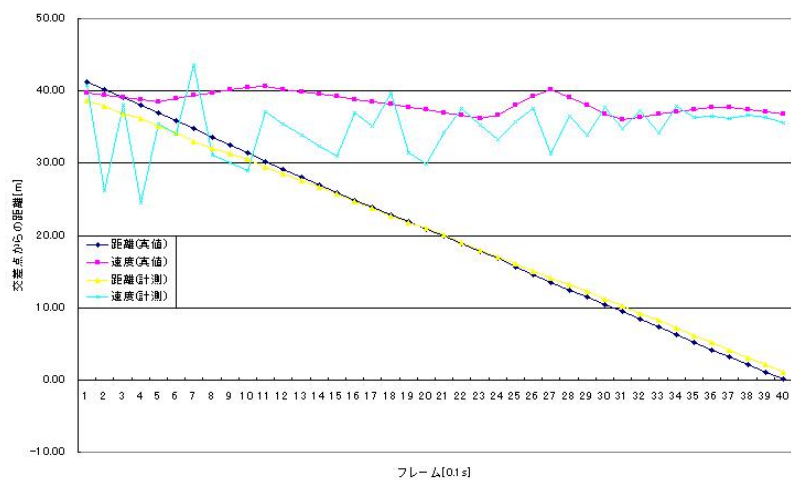


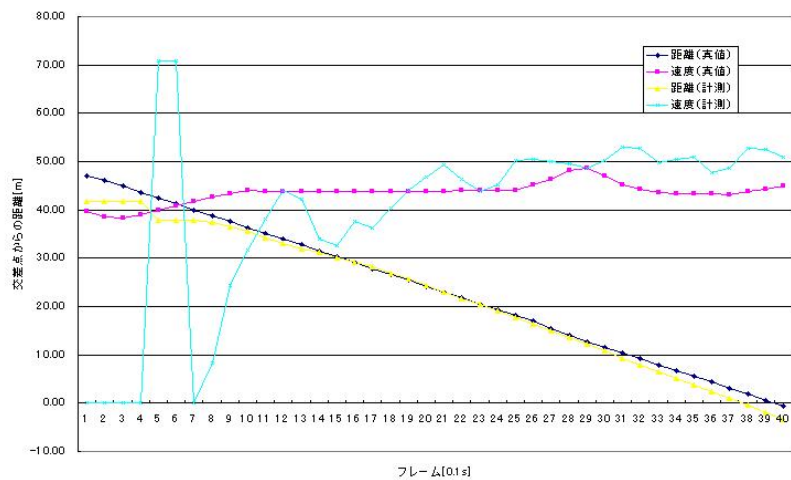
図 5.6 下辺エッジ抽出結果



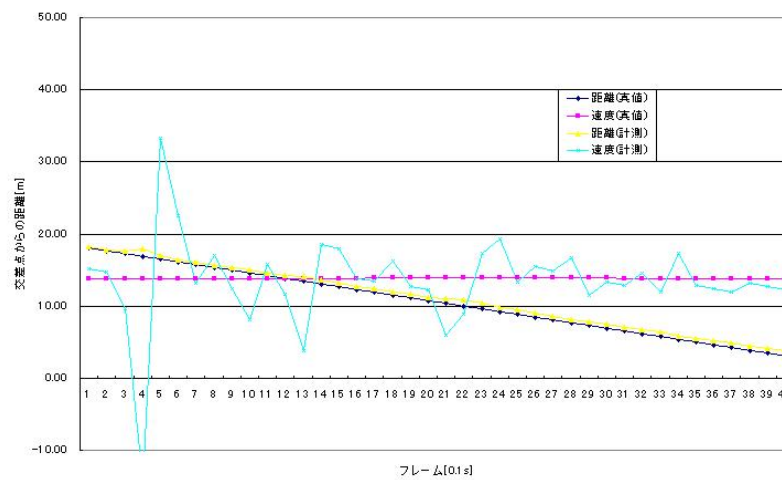
(a) 普通車



(b) 大型車



(c) 2 輪車



(d) 自転車

図 5.7 進入車両位置検出結果

表 5.5 誤差平均と標準偏差

	誤差平均[m]	標準偏差
普通車	0.54	0.38
大型車	0.56	0.33
2 輪車	0.86	0.80
自転車	0.51	0.11

5.3.2 右折車両の検出

右折車両検出については、これまでの研究 [23]により交差点内の事象検出において、右折車両が右折中なのか、対向直進車両が来なくなるのを待って停止しているのか、事故で停止しているのかといった事象を識別する手法を提案してきた。この手法を用いれば右折車両が右折専用車線に存在するかどうかということも識別できると考えられる。

第6章 結論と今後の課題

本章では、本研究のまとめと今後の課題について述べる。

6.1 本研究のまとめ

本研究では、事故削減を目的として路車間協調システムの開発をおこなった。高速道路においては今までの研究により渋滞末尾の延伸や、渋滞中の急激な減速の伝播である急減速波が原因となっていることが分かっており、一般道路においては交差点における右直事故や巻込事故が他車両の死角やすり抜ける2輪車が原因となっていることが分かった。

路車間協調システムの開発にあたり、システムの性能要求を明確にするために高速道路においては本研究室で開発してきた時空間 MRF を用いた画像センサとすでに世の中で広く使われている超音波センサを用いて定量的に交通流の分析を行った。20km/h 以下の状態が10秒間続いたときに情報提供すると欠報と誤報の影響を最も低く抑えられることが分かった。また赤坂トンネルでは8つの画像センサが連続して設置されており、伝播する急減速波の発生情報を上流で情報提供するにはより下流側で検出したときに情報提供すればよいことが分かった。つぎに情報提供することでドライバにどう影響を与えるのかをドライビングシミュレータを用いて検証し、情報提供によってドライバは余裕のある減速を行うことができ、事故件数を減少させる効果があることが確認された。一般道路の交差点においては右直事故を防ぐためには直進車両を停止線から80mまでの範囲を、画像センサで位置と速度を求め、その情報を右折車両に情報提供することで事故を防げることが分かり、巻込事故を防ぐためには直進車両を停止線から25mまでの範囲を画像センサで位置と速度を求め、その情報を交差点内と停止線から10mまでの範囲で左折車両に情報提供することで事故を防げることが分かった。

6.2 今後の課題

高速道路における急減速波の伝播などを分析する際に超音波センサデータを用いて行った。超音波センサは200～300mごとに設置されているのに対し、画像センサは50～100mごとに設置されており、手動解析が行えるようになったことで超音波センサ同様のデータが収集することでより詳細な分析が行えると考えられる。

不感地帯における車両はトンネル出口付近で急減速波に出会うことが分かり、トンネル内においてはドライバがより注意することで事故がおきにくくなっていることが分かったが、情報提供するとより高い効果が得られることより、不感地帯における車両に対しては危険状況予測をしたこれまでの研究と組み合わせることでより安全な路車間協調システムを構築できる可能性がある。

交差点におけるシステムの性能要求は停止線から80mまでであったが、実際に設置した

画像では停止線から 10m～60m の範囲しかセンシング出来なかった。より広い範囲のセンシングのために 2 台やそれ以上のカメラを道路に連続に設置させてオブジェクトを引き継いでいくカメラ間連携システムや、1 台のカメラをパンニングさせることなどが考えられる。また歩行者保護のために歩行者情報の検出も重要であると考えられる。

付録

資料 1

事故を起こした車両の軌跡（赤点は 4 輪車、緑点は 2 輪車）



Case1



Case2



Case3



Case4



Case5



Case6



Case7



Case8



Case9



Case10



Case11



Case12



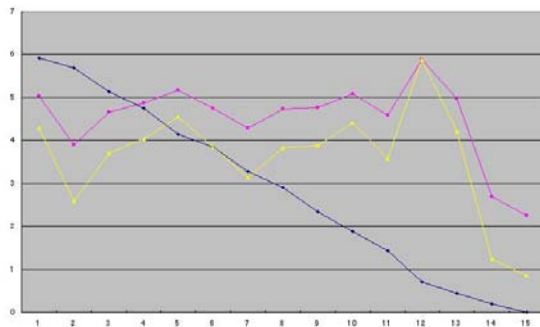
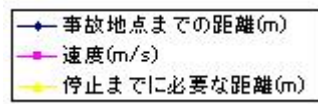
Case13



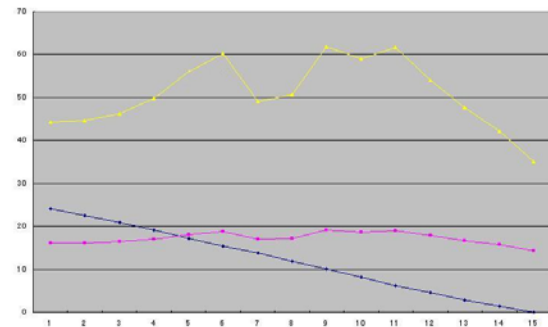
Case14

資料 2

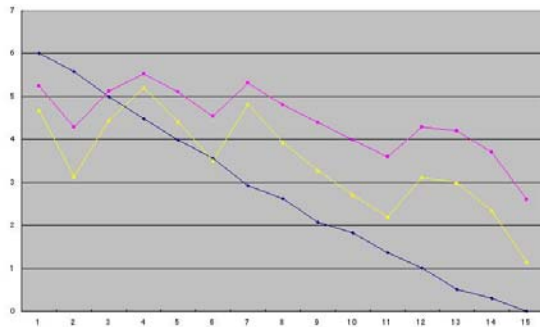
事故を起こした車両の 0.1 秒ごとの事故地点までの距離、速度、停止までに必要な距離



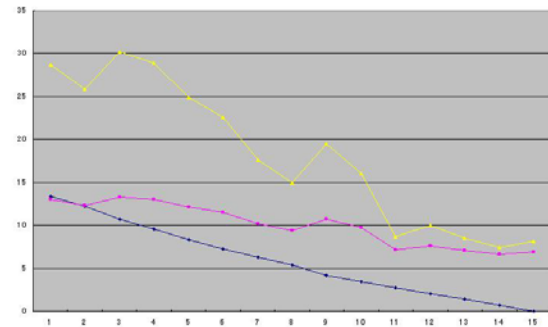
Case1 右折車



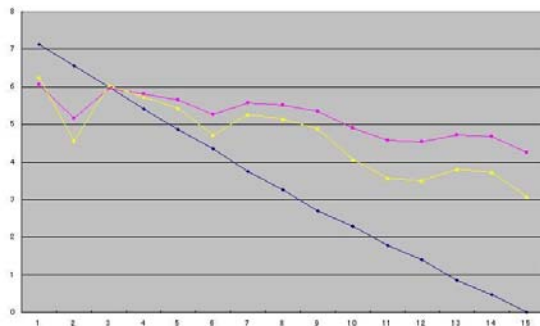
直進バイク



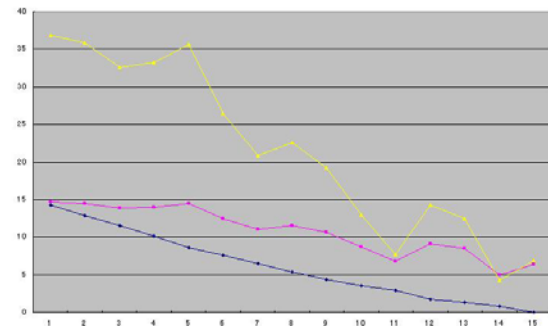
Case2 右折車



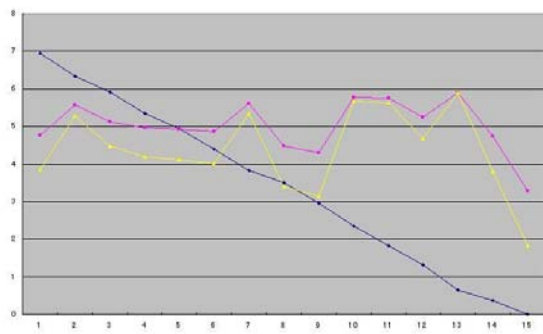
直進バイク



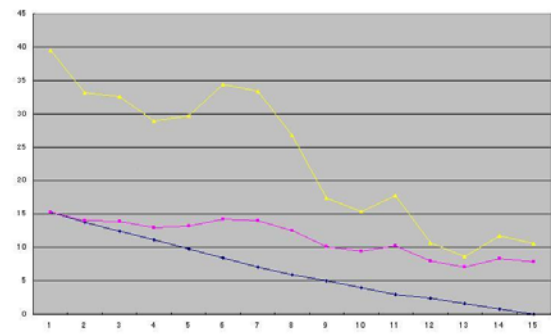
Case3 右折車



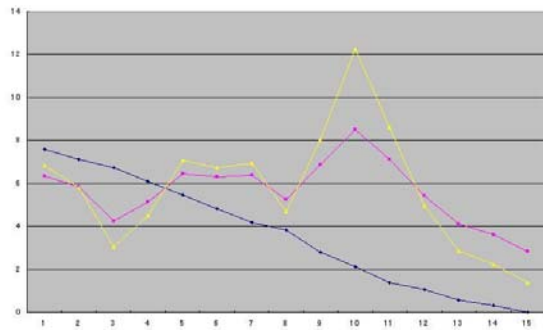
直進車



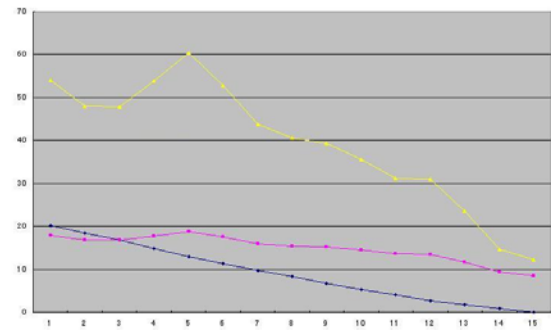
Case4 右折車



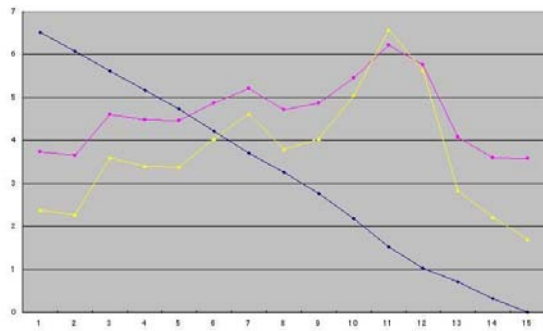
直進バイク



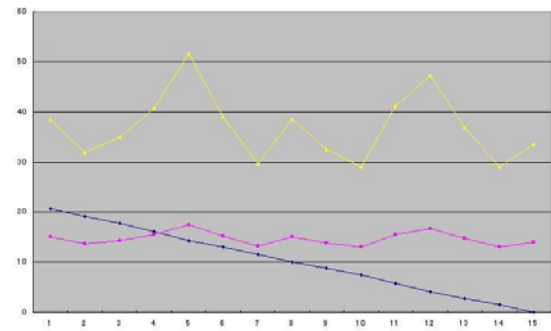
Case5 右折車



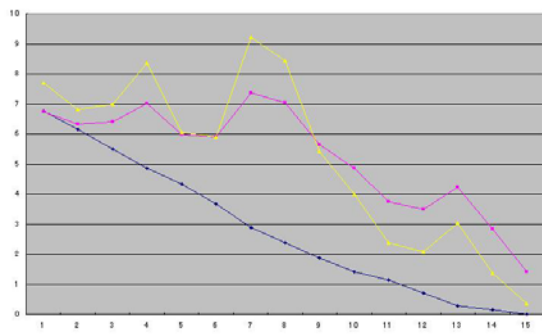
直進バイク



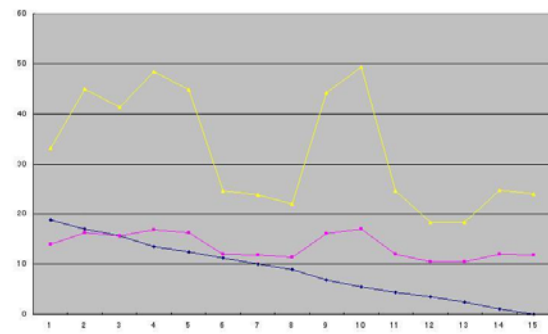
Case6 右折車



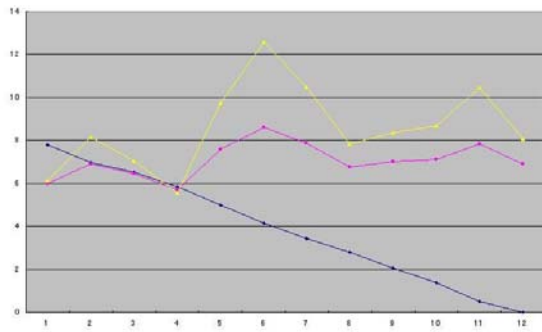
直進バイク



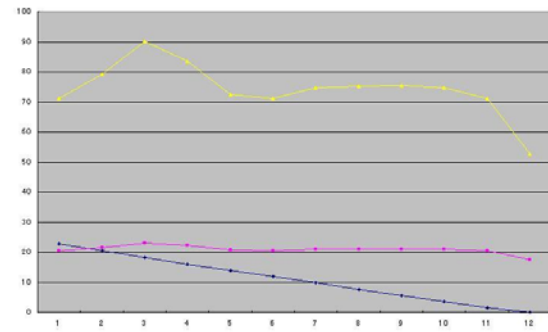
Case7 右折車



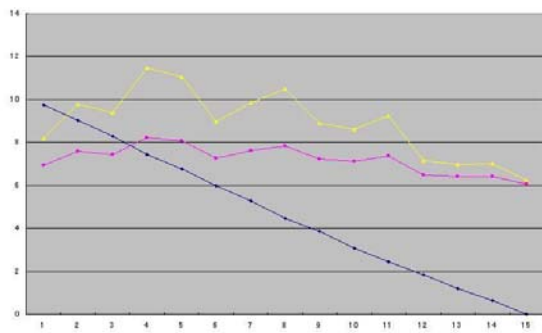
直進バイク



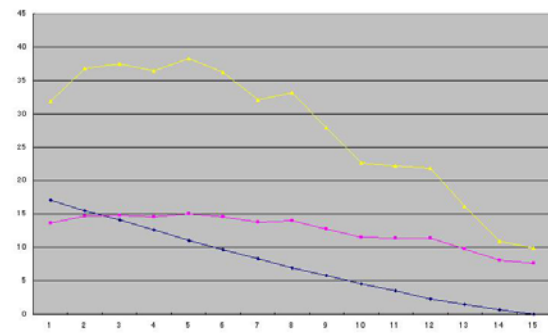
Case8 右折車



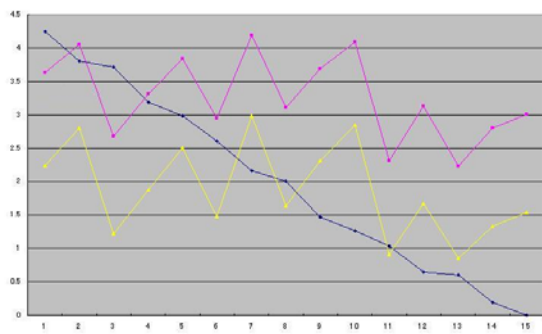
直進バイク



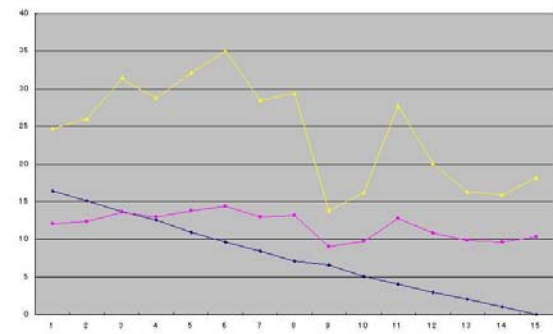
Case9 右折車



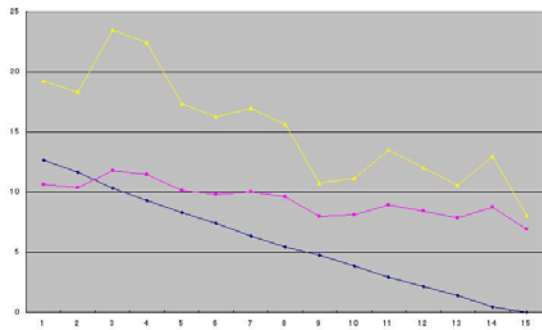
直進バイク



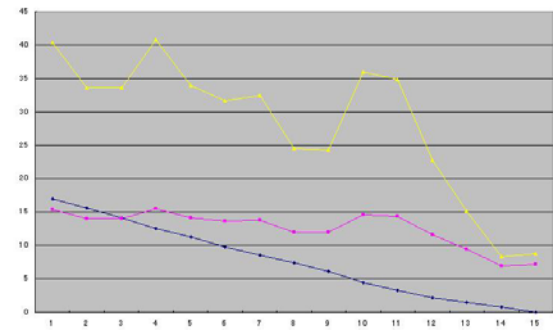
Case10 左折車



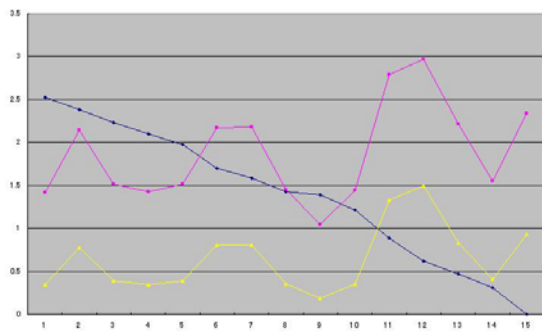
直進バイク



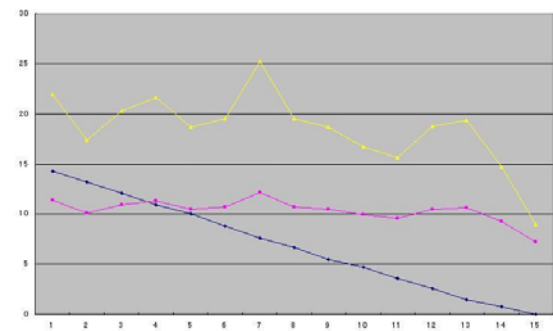
Case11 左折車



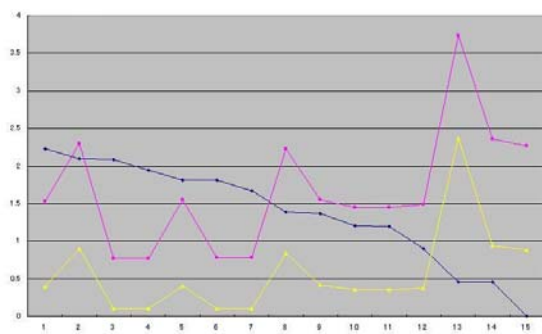
直進バイク



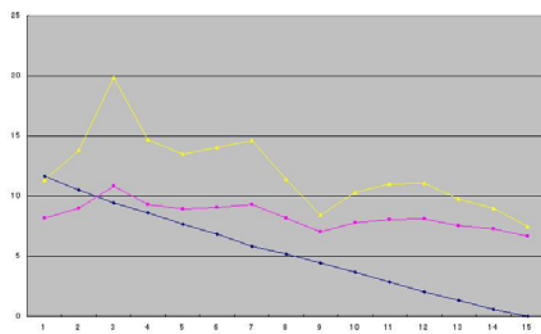
Case12 左折車



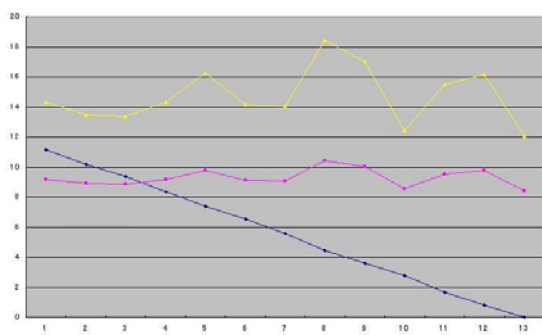
直進バイク



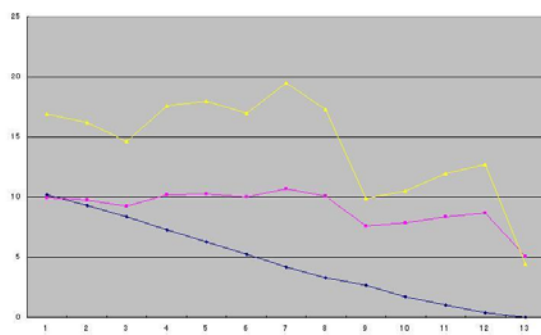
Case13 左折車



直進バイク



Case14 左折バイク



直進バイク

謝辞

本研究を進めるにあたり、御指導、御助言をいただきました上條俊介准教授に深く感謝いたします。研究の基礎から御指導いただき、大学院生活の支えとなりました。また研究内容だけでなく今後の人生においても必要なことをたくさん学ぶことが出来ました。

研究に欠かすことの出来ない道路交通資料をご提供いただきました、首都高速道路株式会社の皆様に感謝いたします。

ドライビングシミュレータ実験に関して、御助言をいただき実験設備を提供して下さった慶應義塾大学の大門樹准教授に感謝いたします。

映像チェックやデータ管理に協力していただいた技術補佐員の小師さん、伝票や書類を処理していただいた秘書の佐久間さん、三輪さんには大変お世話になりました。

ITSの分野で一緒に研究をしてきた研究員の藤村さんにはITSにおける知識だけでなく、プログラミングに関することまで様々なことを学ばせていただきました。

修士1年の兵動君には研究に関するデータ整理だけでなく、様々な雑用も任せてしまい大変迷惑をかけたと思います。来年はこれらのことが必ず役に立つと思うので頑張ってください。

最後に、小野寺さん、藤井さん、若林さん、センさんをはじめ、私の研究を支えてくださった皆さんに感謝いたします。

最後に重ねて御礼申し上げます。

平成20年2月4日

発表文献

- [1] 木間俊宏, 藤村嘉一, 上條俊介, “交差点事故回避支援システムの実現へ向けた事故画像解析”, 電子情報通信学会 ITS 研究会, pp.19-24, 2007
- [2] 木間俊宏, 藤村嘉一, 上條俊介, “時空間 MRF モデルを用いた交差点事故回避支援技術”, 情報処理学会 第 70 回全国大会, 2008
- [3] 木間俊宏, 藤村嘉一, 上條俊介, “高速道路における安全運転支援システムの開発”, 情報処理学会 第 70 回全国大会, 2008

参考文献

- [1] 内閣府, “平成19年交通安全白書”, http://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/h19kou_haku/index.html/
- [2] 国土交通省道路局ITSホームページ, <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j.html/>
- [3] 牧野浩志, 山崎勲, 平沢隆之, 山田康右, 水谷博之, “路車協調システムを活用したカーブ区間における安全走行支援サービスの社会実験結果について” 第4回ITSシンポジウム2005, pp.1-13, 2005
- [4] 安全走行支援サービス参宮橋社会実験ホームページ <http://sangubashi.ahsra.or.jp/pc/index.html>
- [5] traficon web site, <http://www.traficon.com/>
- [6] 上條俊介, 原田将弘, 坂内正夫, “統計モデルと意味階層構造の結合による交通映像異常事象検出システム”, 電子情報通信学会論文誌A Vol. J88-A No.2 pp.152-163
- [7] N.Sumiya, K.Fujihira, S.Kamijo, “Incident Detection System by Sensor Fusion Network Employing Image Sensors and Supersonic Wave Sensors”, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Paper No.189, 2006
- [8] Tomas Wells, Eric Toffin, “Video-based Automatic Incident Detection on Sanmateo Vridge in the San Francisco Bay Area”, 12th World Congress on ITS, San Francisco, November 2005
- [9] J. Versavel, “Securing Our Roads: Automatic Incident Detection, The European Experience”, 11th World Congress on ITS, Madrid, November 2003
- [10] K. Zhang, M. A P Taylor, “A New Method for Incident Detection on Arban Arterial Roads”, 11th World Congress on ITS, Nagoya Octover 2004
- [11] D. Srinivasan, X. Jin, R. Long Cheu, “Evaluation of Adaptive Neural Network Models for Freeway Incident Detection”, IEEE Trans.ITS, Vol.5, No1, March 2004
- [12] 山崎弘郎, 石川正俊 “センサフュージョン”, コロナ社
- [13] Eiichi Hasegawa, Masatoshi Onda, Yoshihisa Kazuno, Shunsuke Kamijo, “Development of Traffic Obstacles Detection System on Urban Tunnels with Heavy Traffic Flow”, 12th World Congress on ITS, San Francisco, November 2005
- [14] 田沢誠也, 長谷川栄一, 数野慶久, 上條俊介, “重交通量トンネルにおける交通異常検出の精度向上”, 第4回ITSシンポジウム2005 O1-2
- [15] United States Department of Transportation, IVI project, <http://www.its.dot.gov/ivi/ivi.htm>
- [16] S.Kamijo, T.Nishida, M.Sakauchi, “Occlusion robust and Illumination Invariant Vehicle Tracking for Acquiring Detailed Statistics from Traffic Images”, IEICE

TRANSACTIONS on Information and Systems, Vol.E85-D, No.11, pp.1753-1764,
November 2002

- [17] 首都高速道路株式会社ホームページ ,
<http://www.shutoko.jp/safety/safety/index.html>
- [18] 池田公雄, 岡田知朗, 割田博, 田中淳, 竹平誠治, 川崎洋輔, 上條俊介, “事故発生時画像とヒヤリハット調査による事故要因分析”, 第 5 回 ITS シンポジウム 2006, pp.211-216, 2006
- [19] 割田博, 岡村寛明, 森田, 桑原雅夫 “速度分析を通じた運転支援, シミュレータのパラメータ, 道路設計への提言” 第 4 回 ITS シンポジウム 2005, pp.271-276, 2005
- [20] 大口敬, 赤羽弘和, 山田芳嗣, “高速道路交通流の臨界領域における事故率の検討” 交通工学, Vol.39, No.3, pp.41-46, 2004
- [21] S.Kamijo, N.Sumiya, “Development of VII System Based on Shockwave Prediction on Saturation”, 10th ITSC, Seattel, Sep. 2007.
- [22] S.Sakamoto, S.Kamijo. “Development on the image processing vehicle detector for intersections”, World Congress on ITS, London, Nov. 2006.
- [23] S.Kamijo, “Semantic hierarchy based reasoning chain algorithm for event detection on an intersection”, 9th ITSC, Toronto, Nov. 2006.