

## 第1章 緒言

本章では、まず社会的な面と学術的な面から本研究が行われている背景について述べ、研究目的として自動運転車の安全性評価のためのシナリオ抽出システムの概要と単眼カメラにおけるピッチ角推定の必要性、従来手法について説明する。さらに、本論文の各章の概要を述べる。

### 1.1 社会的背景

本節では、交通事故などの日本が抱えている道路交通における社会的な課題と現状を紹介した上で、自動運転の開発が進められるようになった社会的背景について述べる。

#### 1.1.1 交通事故の現状

図 1.1 に昭和 23 年～平成 29 年にかけての交通事故死者の推移を示す<sup>[1]</sup>。日本においては、交通事故の死者数は減少傾向にあり、平成 30 年には 3532 人と、昭和 23 年以降の統計で最少となっている。この要因は、シートベルトやエアバッグなどの衝突安全装備の普及率や着用率が向上したことで、制動性能や予防安全技術の向上が考えられる。しかし、内閣府が掲げる「2020 年までに交通事故死者数を 2,500 人以下とし、世界一安全で円滑な道路交通社会を実現する。」という国家目標の実現は大変厳しい状況である。

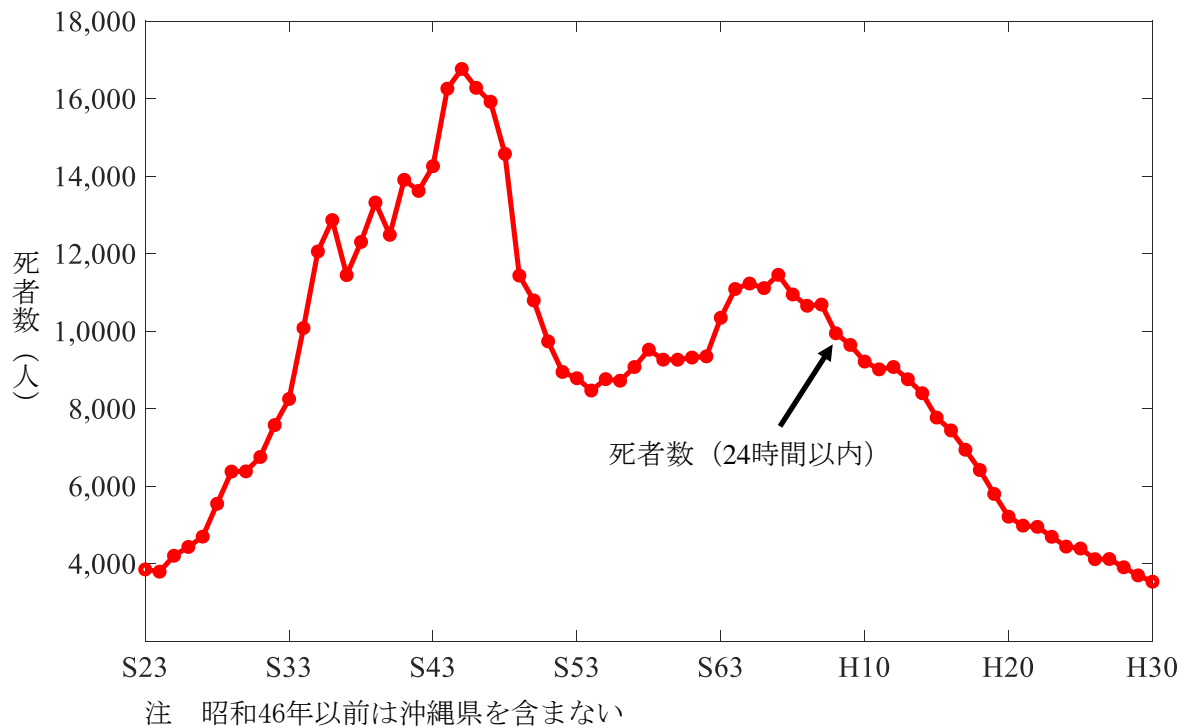


図 1.1 交通事故死者数の推移（昭和 23 年～平成 30 年）

図 1.2 に示すように平成 30 年に起きた交通事故を法令違反別の件数で分析すると、安全不確認が 12,495 件と全体の 31.5%を占めている<sup>[2]</sup>。また、次に多いのが脇見運転の 60,990 件で 15%であることから、ヒューマンエラーが交通事故の大きな要因であることがわかる。こういった運転手のヒューマンエラーによる交通事故を防ぐ手段として自動運転の実現が期待されている。自動運転において、運転の三要素である「認知・判断・操作」が機械によって実現できれば、他の自動車の動きや潜在的な障害物に対して迅速に適切な行動をとることができ、人間の意思決定や不注意が自動車の運転に介入する余地をなくすることができるため、交通事故の低減につながる。

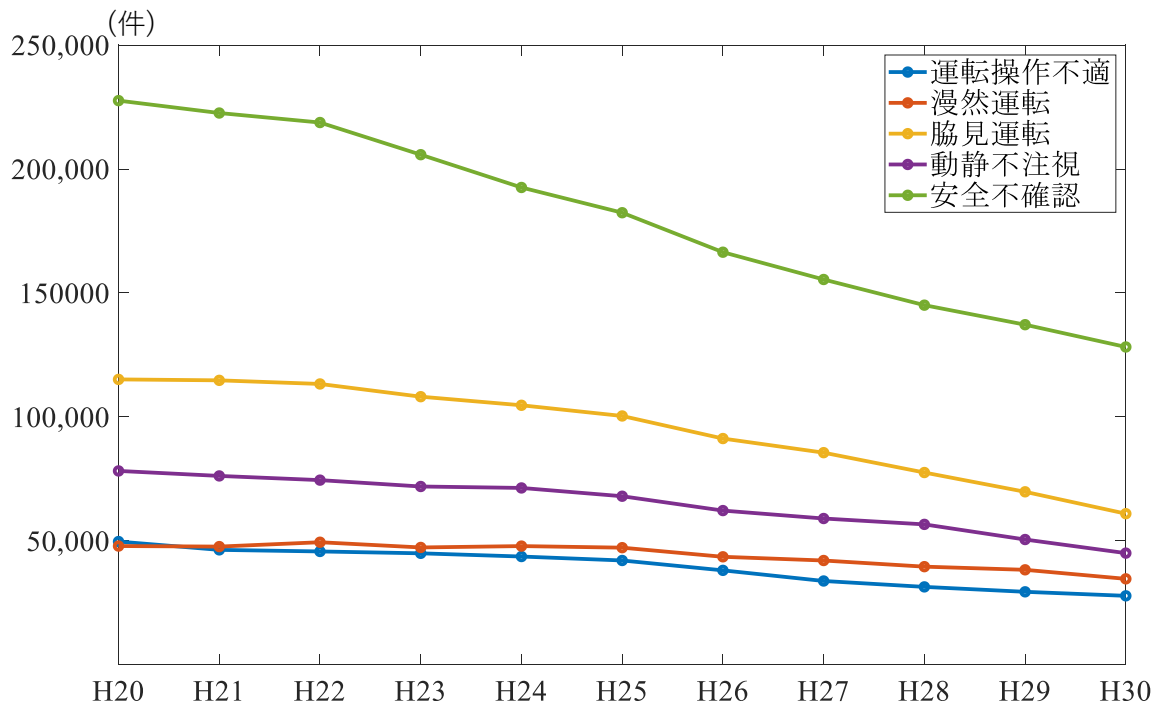


図 1.2 交通事故を法令違反別件数

### 1.1.2 高齢運転者と交通事故

現代の日本では少子高齢化が進み、年少人口(0～14 歳)と生産年齢人口(15～64 歳)は減少傾向にある中、65 歳以上の人口は増加傾向にある。

図 1.3 に 75 歳以上の高齢運転者による死亡事故件数の推移を示す<sup>[3]</sup>。平成 29 年における 75 歳以上の高齢運転者による死亡事故は、前年と比較して、死亡事故件数・構成比ともに若干の減少がみられた。しかし、件数は横ばい、全体に占める割合は増加の傾向であった。

また、図 1.4 に死亡事故の人的要因比較を示す。75 歳未満の運転者の死亡事故において操作不適による事故は 16%であるのに対し、75 歳以上の高齢運転者は 31%と最も割合が大きくなっている。そのうち、ブレーキとアクセルの踏み間違いによる事故は、75 歳未満が全体の 0.8%に過ぎないのに対し、75 歳以上の高齢運転者は 6.2%と高い水準にある。高齢者の交通事故件数増加の背景の 1 つには認知機能の低下が挙げられる。図 1.5 に高齢運転者の認知機能検査結果を示す。左図は平成 27～29 年中の認知機能検査受験者の検査結果、右図は平成 29 年中に死亡事故を起こした 75 歳以上の高齢運転者の検査結果である。死亡事故を起こした 75 歳以上の高齢運転者は、全受検者と

比較して、直近の認知機能検査の結果が第1分類（認知症のおそれ）・第2分類（認知機能低下のおそれ）であった者の割合が高いことから、認知機能の低下が死亡事故の発生に影響を及ぼしているものと考えられる。

認知機能は自動車の運転の大きな要素の一つであるが、この認知機能が低下すると運転操作を誤る、もしくは交通ルールを無視するなどの症状が出やすくなり、それが重大事故につながるケースが多い。以上から、高齢化社会が進む日本において、高齢運転者の交通事故を防ぐためにも自動運転の実現が必要とされている。

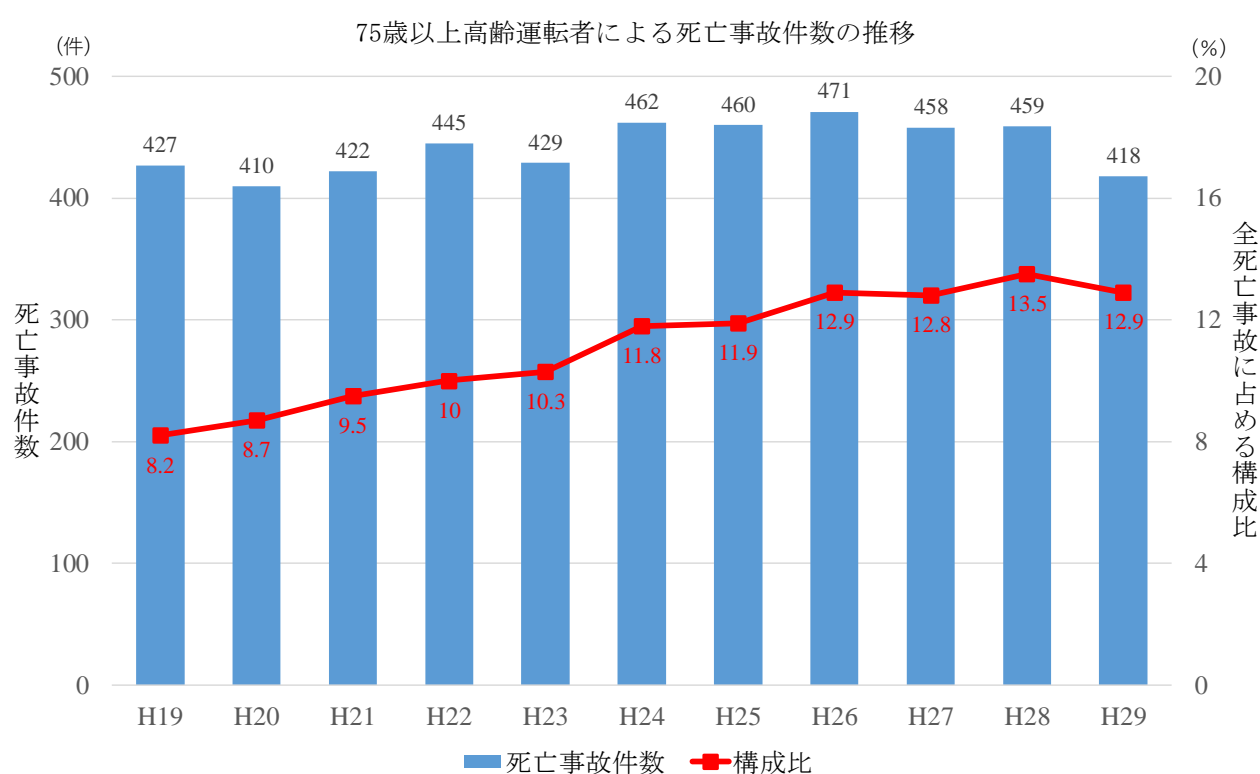


図 1.3 75 歳以上高齢運転者による死亡事故件数の推移

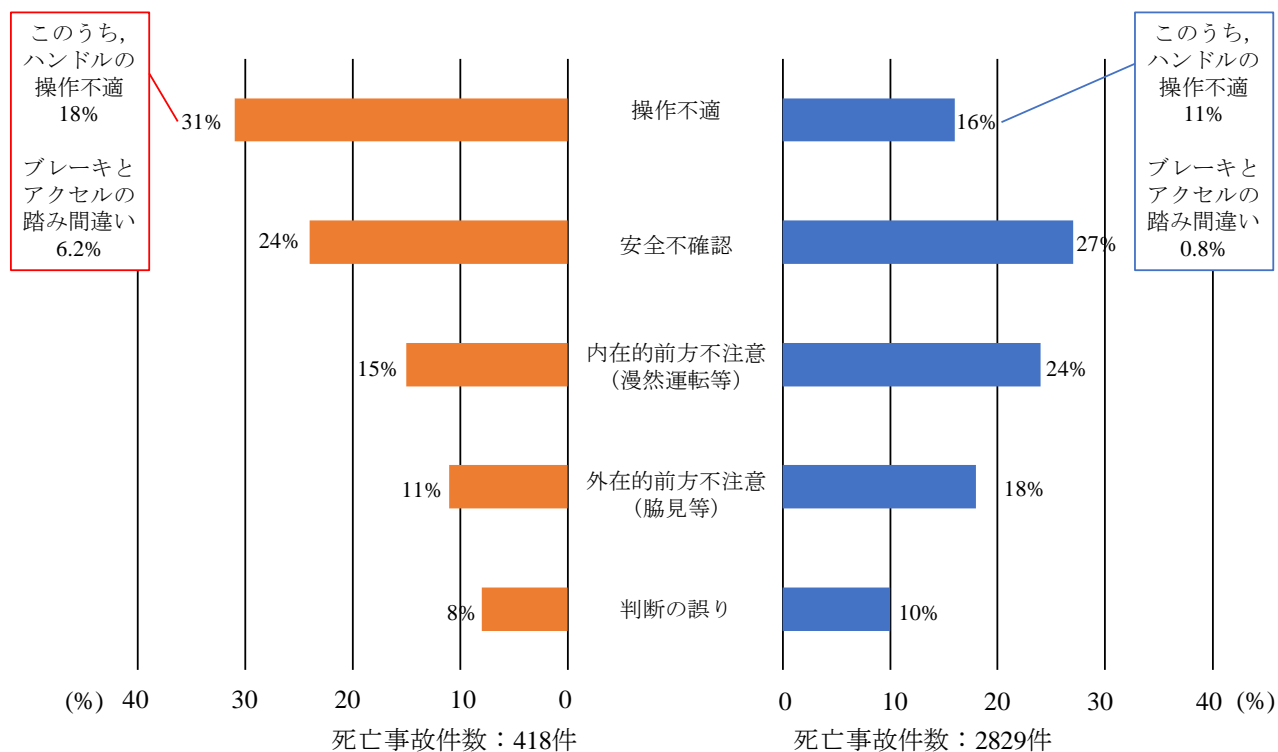


図 1.4 死亡事故の人的要因比較

### 認知機能検査結果

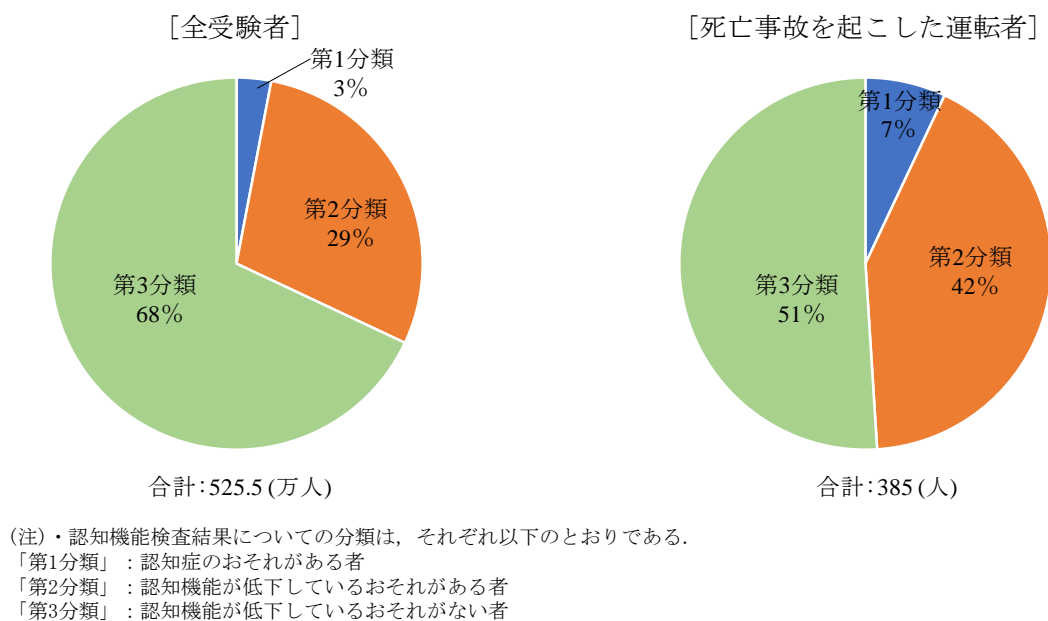


図 1.5 認知機能検査結果

### 1.1.3 ITS・自動運転に関する国家施策

政府は ITS・自動運転に係る政府全体の戦略である「官民 ITS 構想・ロードマップ」を、2014 年に IT 総合戦略本部にて決定し、最近の情勢変化等を踏まえ、毎年ロードマップを改定している。2019 年 6 月に発表された「官民 ITS 構想・ロードマップ 2019」では、自動運転の目標年である 2020 年の実用化に向けた詳細な取り組みの明確化、自動運転の社会実装に向けた持続可能なビジネスモデルの確立のに向けた検討、急速に発展する MaaS ( Mobility as a Service)に自動運転を取り込んだ将来像の提示といった項目が改定された<sup>[4]</sup>。

現在日本で採用されている SAE International の J3016 の自動運転レベルの定義を表 1.1 に示す<sup>[5]</sup>。

表 1.1 SAE による自動車の自動化レベルの定義の概要

レベル	定義	操縦の主体
レベル 0	・運転者が全ての動的運転タスクを実施	運転者
レベル 1	・システムが縦方向又は横方向のいずれかの車両運動制御のサブタスクを限定領域において実行	運転者
レベル 2	・システムが縦方向及び横方向両方の車両運動制御のサブタスクを限定領域において実行	運転者
レベル 3	・システムが全ての動的運転タスクを限定領域において実行 ・作動継続が困難な場合は、運転者がシステムの介入要求等に適切に応答	システム (作動継続が困難な場合は運転者)
レベル 4	・システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への応答を限定領域において実行	システム
レベル 5	・システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への応答を無制限に（限定領域内ではない）実行	システム

自動運転は、その技術に応じて五つのレベルに分けられる。レベル 0 は、一切自動化がない従来の手動運転である。レベル 1 は自動ブレーキなどの安全運転支援システムなどによって運転者のステアリング操作か加減速のいずれかをサポートする。レベル 2 は、ステアリング操作と加減速の両方をサポートする。

近年の市販車に搭載が増えてきているアダプティブ・クルーズ・コントロール(ACC)や、レーンキープアシスト(LKA)などの運転支援システムは、レベル2に分類される。レベル2までの自動運転レベルにおいては、事故時の責任はドライバにあるため、ドライバは常に運転の監視義務が生じる。しかし、レベル3以降の自動運転レベルとなれば、ドライバは監視義務から解放される。レベル3は、特定の環境ですべての操作が自動化され緊急時のみ運転者が操作する。レベル4は特定の環境で全ての操作が完全に自動化される。日本では、特定のエリアに限定した自動運転の路線バスの実証実験などが既に行われている。レベル5はあらゆる環境ですべての操作が完全に自動化される。

レベル1～2は運転支援であり、レベル3～5が自動運転となる。現在、日本で実用化されているのはレベル2までの運転支援であり、レベル3以降の自動運転は実証実験の段階にある。

現在の法律ではレベル3以降の自動運転車は公道を走ることができず、実用化に向けて技術開発や法整備が進められている。

#### 1.1.4 自動運転の基準・標準の作成

現在日本では、高度な自動運転車を市場に導入するにあたり、安全性評価などの統一された基準・標準の作成が急務となっている。

海外での評価基準や標準作りの取り組みをしている例として、ドイツのPEGASUSプロジェクトが挙げられる<sup>[6]</sup>。これはドイツの経済・エネルギー省が主導となって進めている自動走行システムの期待性能水準と評価基準を明確化するための産官学が共同で実施するプロジェクトあり、2016年1月から2019年9月までの期間で実施されている。自動運転の市場投入に向けた安全性評価の拠り所を必要とするドイツの自動車メーカー3社(Daimler, BMW, VW)及び認証機関TUVの4者が中核となり、Bosch社やContinental社などのTier-1サプライヤを含めた17団体が参画している。このプロジェクトの目的は大きく4点挙げている。

- シミュレーション、テストスタンドおよび実環境での自動車両システムのテストおよび実験のための標準化された手順の定義
- 自動運転を保護するための連続的で柔軟なツールチェーンの開発

- 初期段階の開発プロセスにおける試験の統合
- 高度自動運転機能を保護するための製造業者間の方法の作成

PEGASUS プロジェクト自体が認証制度や車両規格をアウトプットするものではなく、それらを検討するためのインプットを提供する役割を担っており、適宜 BAST(ドイツ運輸省参加の連邦道路交通研究所)やドイツ自動車局といった規格作りを行う機関と連携している。ドイツではアウトバーンにおける自動走行レベル3を対象とした認証の導入について、2019年までをターゲットとした検討を行っているとの情報も存在し、この検討に大きく貢献しているのも PEGASUS プロジェクトと言われている<sup>[6]</sup>。

こういった海外の取り組みに対して、国内でも同様の取り組みが行われている。経済産業省と国土交通省が主導している自動走行ビジネス討論会という取り組みがある。そこでは自動走行分野でリードし、社会課題の解決に貢献するために産学官オールジャパンでの戦略が検討されている。この取り組みの中で、①一般車両の自動走行等の将来像を明確化、②協調領域を特定、③国際的なルール(基準、標準)作りに戦略的に対応する体制の整備、④産学連携促進、に関する議論を行い、「自動走行の実現に向けた取組方針」Version2.0を掲げた<sup>[7]</sup>。中でも②協調領域の特定に関しては、図1.5に示されている10領域を協調領域と検討会で定めたと記されている。そして、それぞれの分野では大きく「技術開発の効率化」と「社会価値の明確化・受容性の醸成」の2つの分類から具体的取組の抽出が行われた。

安全性評価にあたっては、これまでのドライバーによる認知・判断・操作をシステムが行うことになるため、実車において自動運転が人間よりも安全なことを示すには66億キロの走行が必要となり限界がある<sup>[8]</sup>。そのため、シミュレーション上での走行評価を行うべきとの考え方が国際的に示されている<sup>[9]</sup>。我が国においても2016年度以降日本自動車工業会が整理してきたユースケースをベースとして、2018年度から日本自動車研究所が経済産業省委託事業として安全性評価を行うためのシナリオ作成手法等の開発に取り組んでいる。そして安全性評価技術の開発・検討におけるシナリオ作成を行うにあたり、実際の事故データや走行データからシナリオを構成する様々なパラメータを抽出する必要がある。これらのパラメータには、運動行動や交通環境といった情報か



ら，自車の速度や加速度のセンシング情報等があげられる．また，他にも，他車の情報である速度や相対距離も必要となるため，走行データから抽出する必要がある．

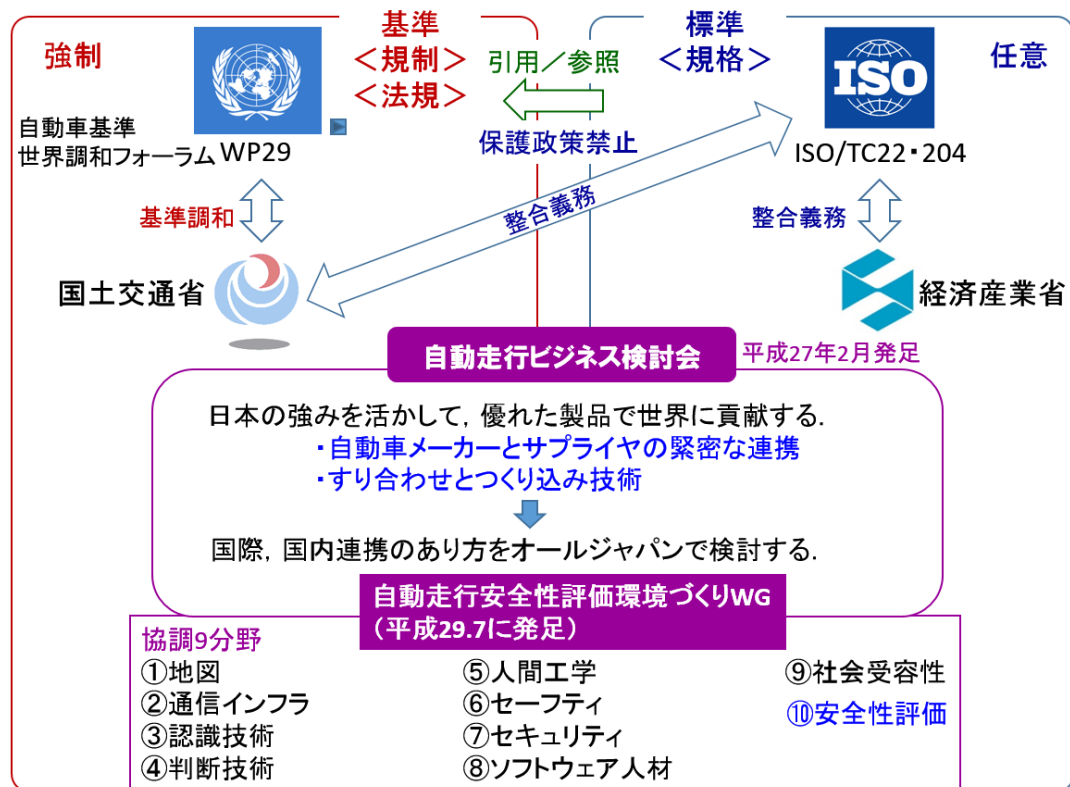


図 1.5 国土交通省と経済産業省の取り組み

## 1.2 学術的背景

本節では、自動走行車安全性評価シナリオの作成システムの全体像について説明をする。また、事故データや走行データからシナリオを作成する際に必要な他車との相対距離の推定と車載カメラのピッチ角推定の必要性を理解するために、従来の単眼カメラにおける距離推定手法とピッチ角推定手法に関する知識について述べる。

### 1.2.1 自動走行車安全性評価シナリオの作成システム

前述の 1.1 節では、自動運転車の普及には安全性の評価が必要であり、実際の事故データ等からシナリオを作成する必要があることを述べた。

本学の組織であるスマートモビリティ研究拠点ではタクシーに装着したドライブレコーダから採取された映像データと物理データを分析者がタグ情報を付加したヒヤリハットデータベースを保有している。そこで本学では、これらのヒヤリハットデータベースをもとに自動走行車安全性評価シナリオの作成を自動で行うシステムの開発を行っている。図 1.6 に自動走行車安全性評価シナリオの作成システムの流れを示す。

まず初めに、前処理として各タクシーによって異なる車載カメラの設置位置や走行中に発生するピッチ角の推定、カメラレンズの影響による歪みを補正する。その後、機械学習を用いて物体検出を行うことで画像上において車両や人の位置を求め、自車との相対距離を推定する。最後に、得られた相対距離やあらかじめヒヤリハットデータベースに登録されているセンサデータを用いて衝突回避減速度<sup>[10-12]</sup>や衝突余裕時間<sup>[13-14]</sup>といった安全性の指標を計算し、シナリオを作成することで評価を行うことができる。

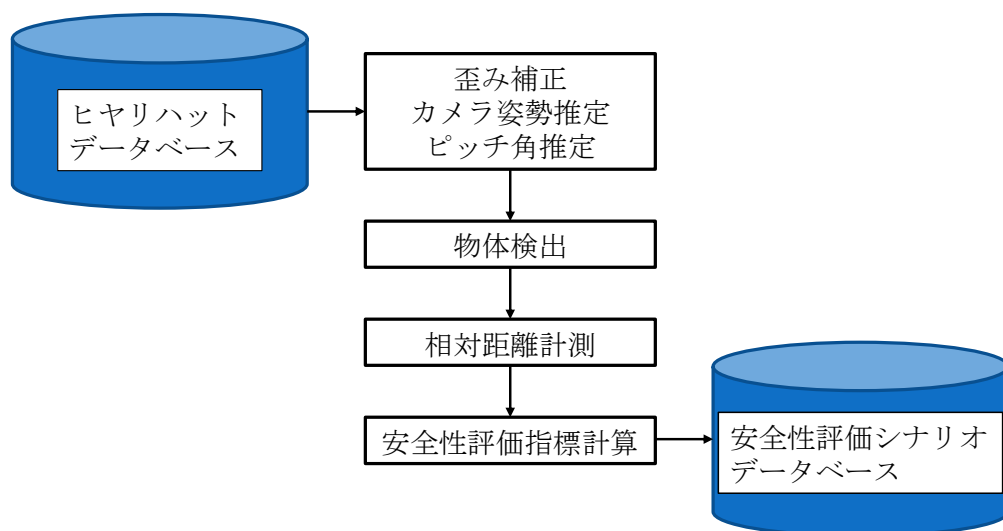


図 1.6 自動走行車安全性評価シナリオの作成システムの流れ

### 1.2.2 単眼カメラを用いた相対距離推定

本研究では安全性評価シナリオ作成に必要な対象車との相対距離をヒヤリハット映像から抽出するために、Stein らが提案した接地点俯角による距離推定手法を使用する<sup>[15]</sup>。図 1.7 に示す接地点俯角 $\alpha$ は焦点距離 $f$ と接地点距離 $L$ から式(1.1)で求まる。

焦点距離は事前にカメラキャリブレーションを行うことで求める。また、接地点距離は、YOLO (You Only Look Once)<sup>[16]</sup>などの機械学習を用いて物体が検出された検出枠の最下端から光学中心までの画素数から求めることができる。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{L}{f} \quad (1.1)$$

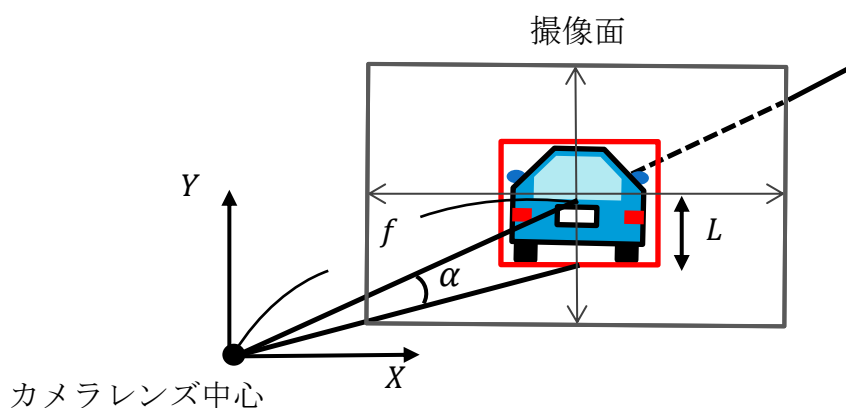


図 1.7 接地点俯角

道路平面とカメラの光軸が平行であれば、接地点俯角 $\alpha$ から相対距離が計測できる。図 1.8 に示す相対距離 $D$ は接地点俯角 $\alpha$ とカメラの路面からの設置高さ $H$ から式(1.2)で求まる。

$$D = \frac{H}{\tan \alpha} \quad (1.2)$$

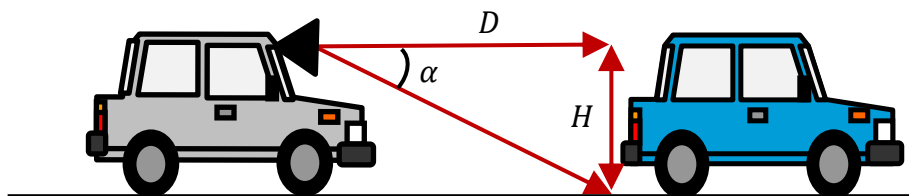


図 1.8 接地点俯角による相対距離推定

しかし、実際には道路平面とカメラの光軸が平行とは限らない。ヒヤリハットデータベースに登録されている車載カメラの設置角度は各タクシーによって異なる。また、加速や急ブレーキによってピッチングが発生するため、光軸の傾きが変化する。その場合、図 1.9 のように、相対距離は接地点俯角 $\alpha$ に加えて、ピッチ角 $\beta$ を考慮して計算する必要がある。ピッチ角 $\beta$ が含まれる場合、相対距離 $D$ は式(1.3)で求まる。

$$D = \frac{H}{\tan(\alpha + \beta)} \quad (1.3)$$

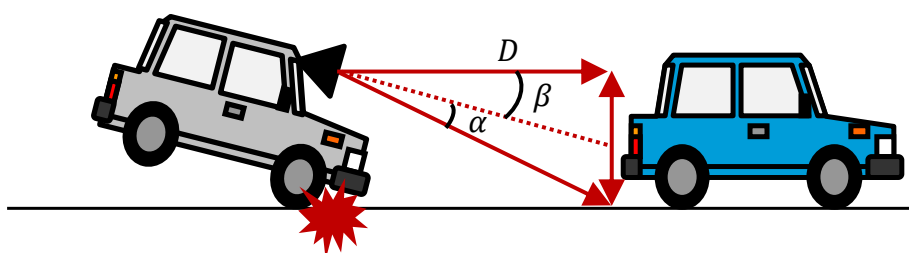


図 1.9 ピッチ角が距離推定に与える影響

したがって、ドライブレコーダ映像から相対距離を推定するためにはカメラのピッチ角を推定し、補正する必要がある。

### 1.2.3 単眼カメラを用いたピッチ角推定

従来研究では、ピッチ角推定手法として周辺環境画像またはランドマークのデータベースを用いた車両姿勢推定法<sup>[17]</sup>もあるが、データベースの用意が必要であるため、あらかじめヒヤリハットデータベースに登録されているデータに応用することは困難である。また、車両姿勢を推定する手法として、高精度な IMU(Inertial Measurement Unit:慣性計測装置) を用いる手法がある<sup>[18]</sup>。この手法は、ジャイロセンサと加速度センサから 3 軸の角速度と加速度を計測し、車両姿勢を推定する。しかし、この手法もドライブレコーダには IMU が搭載されていないため、ヒヤリハットデータベースのデータに対して適用することはできない。また、SfM(Structure from Motion) を利用した車両姿勢推定手法も提案された<sup>[19]</sup>。この手法は、動画フレーム間の車両姿勢の変化を推定可能である。しかし、車両停止時の初期ピッチ角を推定することができない。また、長時間の計測で累積誤差が生じる。

李らは、車両運動からピッチ角を推定する手法を提案した<sup>[20]</sup>。この手法は、SfM を利用して走行映像から車両運動を推定し、車両が道路面に平行して走行するという拘束に基づきピッチ角を推定する。ピッチ角は車両の回転運動と並進運動それぞれから推定され、それらを平均移動法で合成することで高精度にピッチ角が推定される。並進運動を利用することで、累積誤差が生じず、初期ピッチ角を推定可能である。しかし、車両が道路面に平行して走行する拘束を用いているため、急ブレーキでの停止など、ピッチ角変化が大きく車速が低い場合に並進運動から推定されるピッチ角の推定精度が低下する。

## 1.3 研究目的

前節では自動運転の実用化に向けて安全性評価のシナリオ作成と、ヒヤリハットデータベースからのデータ抽出の必要性を述べた。その中でも、ドライブレコーダ映像から正確な相対距離を推定するためにはピッチ角の推定が重要であることを述べた。

そこで本研究では、特徴点のマッチングによって 2 フレーム間のピッチレートを計算することによってヒヤリハットデータベースのデータにもロバストな単眼車載カメラのピッチ角推定を、高精度で実現することを目的とする。また、初期ピッチ角の推定は入力画像を鳥瞰図に変換し、道路面の

白線の平行度を計算することで推定を行う。本研究では、 $\pm 0.5^\circ$  以内の精度でピッチ角を推定することを目標とする。

## 1.4 本論文の構成

第1章では、本研究の社会的背景と学術的背景を示した。次に、本研究の目的として相対距離計測のためのピッチ角推定の必要性を述べた。本節ではこれ以降の本論文の展開を示す。

第2章では、本研究の目的に基づいて要件分析を行い、ピッチ角推定手法に必要とされる精度を検討する。まず、シナリオ抽出システムの距離推定に必要とされる精度の検討を行い、次にピッチ角推定に必要とされる精度の検討を行う。

第3章では、本研究で用いるヒヤリハットデータベースの概要を説明する。また、ヒヤリハットデータベースに登録されているドライブレコーダの種類とその仕様について示す。

第4章では、相対距離計測のためのピッチ角推定システムの提案を行う。まず、システム全体の流れを示す。次に、前処理として、カメラキャリブレーションについて説明を行う。その後、鳥瞰図変換と白線検出による初期ピッチ角推定、特徴点のマッチングによる走行時等の変動するピッチ角の推定について各工程で行う処理内容を詳しく説明する。

第5章では、本研究の提案手法の精度評価について述べる。5.1節にまず実験車両や走行条件といった実験環境について説明する。5.2節には実験車両を用いた走行時のピッチ角推定を行い、慣性計測装置との比較結果を示す。5.3節には実際にヒヤリハットデータベースに登録されている映像を用いて提案手法よりピッチ角推定を行った結果を示す。最後に、5.4節には推定したピッチ角を用いて相対距離計測を行い、精度を確認する。

第6章では、本論文で得られた結論を述べる。

## 第2章 要件分析

本章では，シナリオ抽出システムの距離推定に必要とされる精度の検討とピッチ角推定に必要とされる精度の検討を行う．

### 2.1 距離計測の要件分析

ヒヤリハットデータベースから抽出するシナリオは，ヒヤリハットが発生した前後 15 秒間の自動車と対象物体の位置関係を地図上に表示した時系列データである．ヒヤリハットが発生する条件の一つとして対象物体との接近が挙げられる．そのため，遠距離での距離計測は必要なく，距離推定範囲を 30m と設定する．また，誤差の許容範囲を 10% と設定する．

### 2.2 ピッチ角推定の要件分析

接地点俯角による距離推定手法を利用した測距を行う場合，ピッチ角のずれによって距離推定誤差が発生する．図 2.1 に示すように，対象物とカメラとの距離の拡大に伴い，誤差も増大してしまう．例えば， $1^\circ$  のピッチ角のずれが発生した場合，30 m 先の対象物との推定距離は 56 m と大きな誤差が発生している．これは前節で述べた誤差の許容範囲である 10% を超過している．したがって，単眼カメラを用いて高精度な距離推定を実現するためには，高精度なピッチ角推定が必要である．本研究では， $\pm 0.5^\circ$  以内の精度でピッチ角を推定することを目標とする．

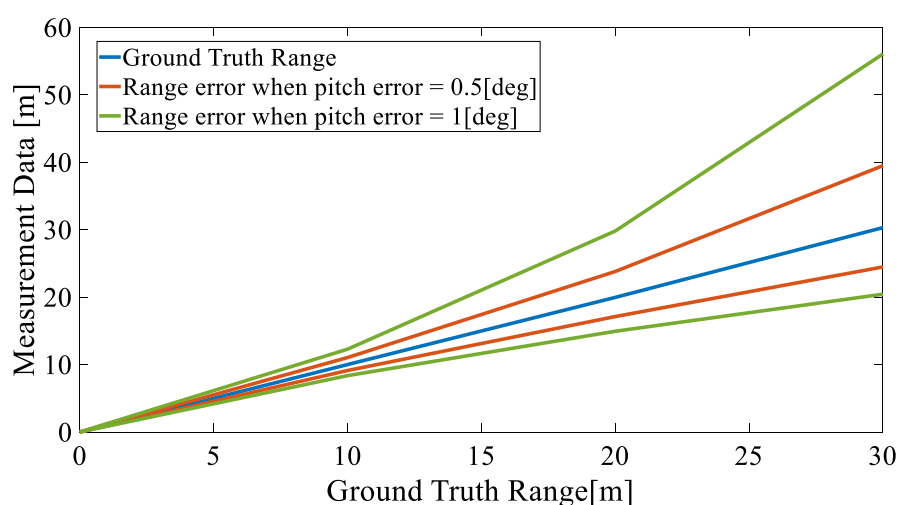


図 2.1 ピッチ角と距離推定誤差

## 第3章 ヒヤリハットデータベースの概要

本章では、シナリオ作成においてデータの抽出対象であるヒヤリハットデータベースについての説明を行う。また、ヒヤリハットデータベースに登録されているドライブレコーダの各仕様について述べる。

### 3.1 ヒヤリハットデータベースについて

ヒヤリハットデータベースは、2005年に自動車技術会において構築が開始された。2010年にその活動が東京農工大学に移管され、ヒヤリハットデータベース構築が強化されて進められている。このヒヤリハットデータベースは日本国内における現実の交通社会の中から、事故やヒヤリハットが起きた時の複雑な筋書きをデータ化し、データベースとしてまとめたものである。現在に至るまでに収集されたヒヤリハットデータの量は16万件にも及び、これは世界でも類を見ない研究用データベースとなっている。

ヒヤリハットデータはタクシーに装着されたドライブレコーダによって採取されている。タクシーに装着することで、広い範囲の市街地走行をカバーし、一日の運転時間も長いため、比較的短期間で大量のデータ採取が期待できる。データは、札幌・秋田・東京・静岡・福岡の5都市で採取されており、採取されたデータは東京農工大学スマートモビリティ拠点にて、データ処理、タグ付け、分類によるデータベース構築を行っている。これらのデータベースから得られる情報によって、ヒヤリハット事象の分析、原因の分析を行うことや、予防安全システムや自動運転システムの研究開発や評価用の基礎データとして利用されることを想定している。最終的には交通事故ゼロ社会への貢献を目的としたものである。データベース化は「回避操作がどれくらい遅れたら事故に至ったか」で危険度判定を行い、事故に近いものから順に、高、中、低と各データに対しレベル付けされている。判定基準は下記の通りである。

- ・事故 : 対象と衝突、接触した事象.
- ・高レベル : ドライバの回避操作が1.0秒未満の遅れでも事故になっていたと思われる事象.



・中レベル：ドライバの回避操作が 1.0～2.0 秒遅れていた場合に事故になっていたと思われる事象.

・低レベル：ドライバの回避操作が 2.0 秒以上遅れていた場合に事故になっていたと思われる事象.

測定されるデータの概要を図 3.1 に示す.

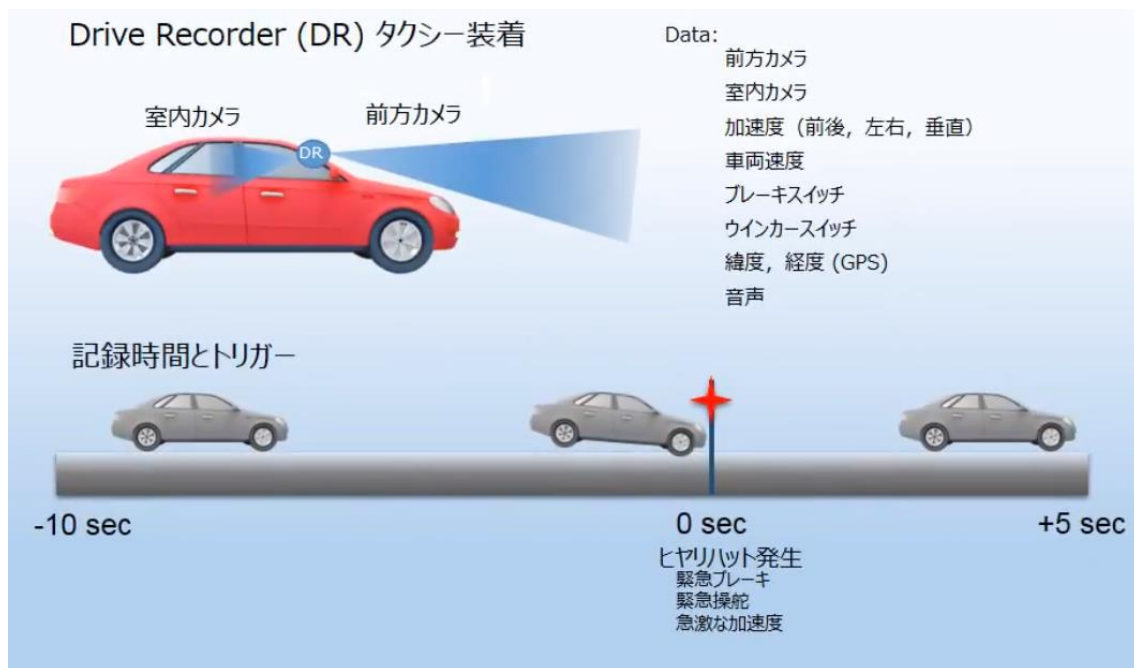


図 3.1 ヒヤリハットデータの概要

このデータベースは映像によるデータと車載されているセンサデータによって構成される. 具体的には緊急ブレーキや緊急操舵, 急激な加速度など, ヒヤリハットが発生したと考えられる時点を 0 秒地点として 10 秒前から 5 秒後までの計 15 秒を記録する. 記録されるデータを述べると, 映像は前方カメラによる車外の映像と, 車内カメラによるドライバの操作が写されている映像(音声入り)の 2 種類であり, センサデータは 3 軸方向(前後, 左右, 垂直)の加速度, 車両速度, ブレーキスイッチ, ウィンカースイッチ, GPS による緯度経度の情報である.

図 3.2 に, ヒヤリハットデータベースのビューワの一例を示す. ビューワ上では, ドライブレコーダの映像や収集された情報を閲覧することができる.

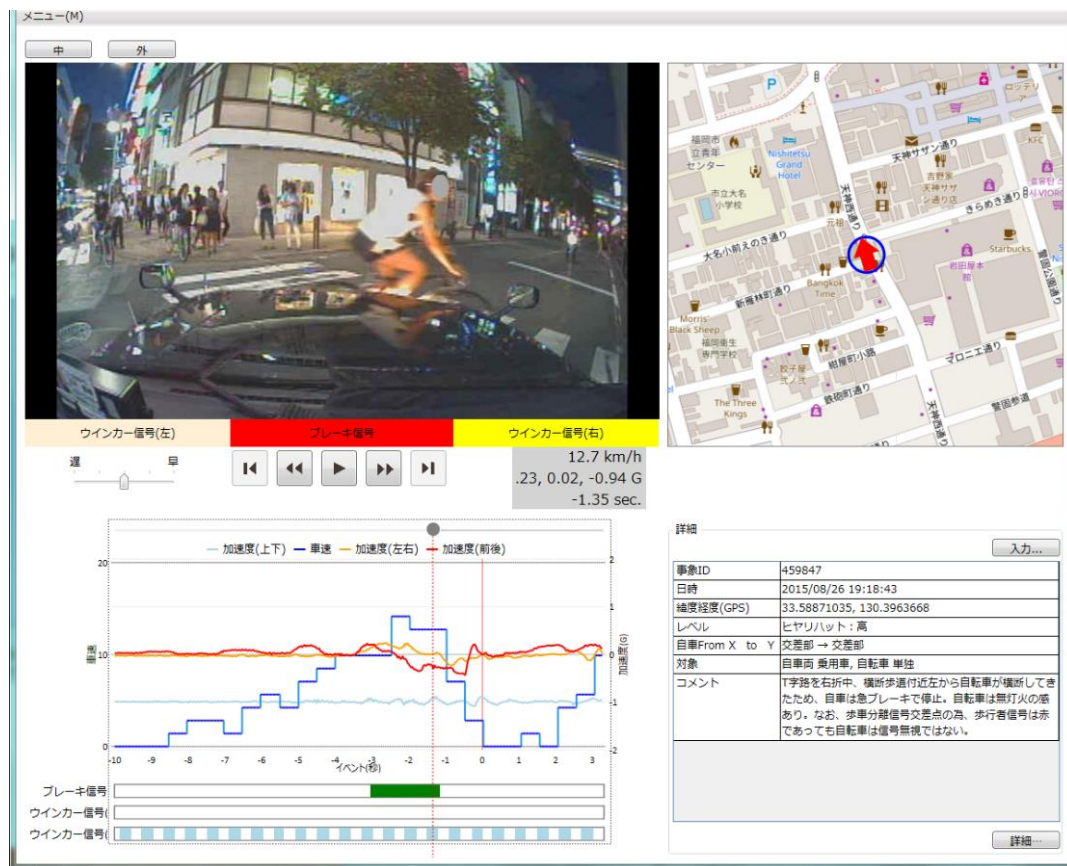


図 3.2 データビューワの一例

### 3.2 ドライブレコーダの概要

現在，ヒヤリハットデータベースに登録されているドライブレコーダの機種は，デンソーテンの OBVIOUS DRU5010 と，堀場製作所の DR-3031，DR-6200，DR-9100，DRT-7300，堀場試作品の 5 機種を含む全 6 機種である．これらのドライブレコーダの各仕様を表 3.1，表 3.2 に示す．また，デンソーテン製ドライブレコーダの走行映像の例を図 3.3 に，堀場製作所製ドライブレコーダの走行映像の例を図 3.4 に示す．

表 3.1 デンソーテン製ドライブレコーダの仕様

機種	OBVIOUS DRU5010
画面サイズ	1280×720
最大フレームレート	28fps
カメラ画角(水平)	110°
カメラ画角(垂直)	70°
HDR	あり
GPS 情報	○
音声入力	○



図 3.3 デンソーテン製ドライブレコーダの走行映像

表 3.2 堀場製作所製ドライブレコーダの仕様

機種		DR-3031	DR-6200	DR-9100	DRT-7300	堀場試作品
映像	記録画素数	640×400	640×400	640×400	640×400	640×480
	カメラ画角(水平)	107°	117°	112°	117°	111.8°
	カメラ画角(垂直)	79°	82°	84°	84°	81.9°
	記録映像数(タイプ)	1 (前方)	2 (前方＋車内)	2 (前方＋車内)	2 (前方＋車内)	1 (前方)
サンプリング周期	映像データ	30fps	30fps	30fps	30fps	30fps
	加速度	30Hz	30Hz	30Hz	30Hz	30Hz
	車速パルス	2Hz	2Hz	2Hz	2Hz	2Hz
	ブレーキ信号(On/Off)	30Hz	30Hz	30Hz	30Hz	30Hz
	ウインカ信号(On/Off)	30Hz	30Hz	30Hz	30Hz	30Hz
GPS 情報		○	○	○	○	○
音声入力		×	×	○	○	×



図 3.4 堀場製作所製ドライブレコーダの走行映像 (DR-3031)

## 第4章 相対距離計測のためのピッチ角推定システムの提案

本章では、相対距離計測のためのピッチ角推定システムの提案と処理プロセスの説明を行う。

まず、処理プロセス全体の説明を行い、カメラキャリブレーション、ピッチ角の推定手法の各工程について説明をする。

### 4.1 処理プロセスの全体

ピッチ角推定の処理プロセスを図 4.1 に示す。

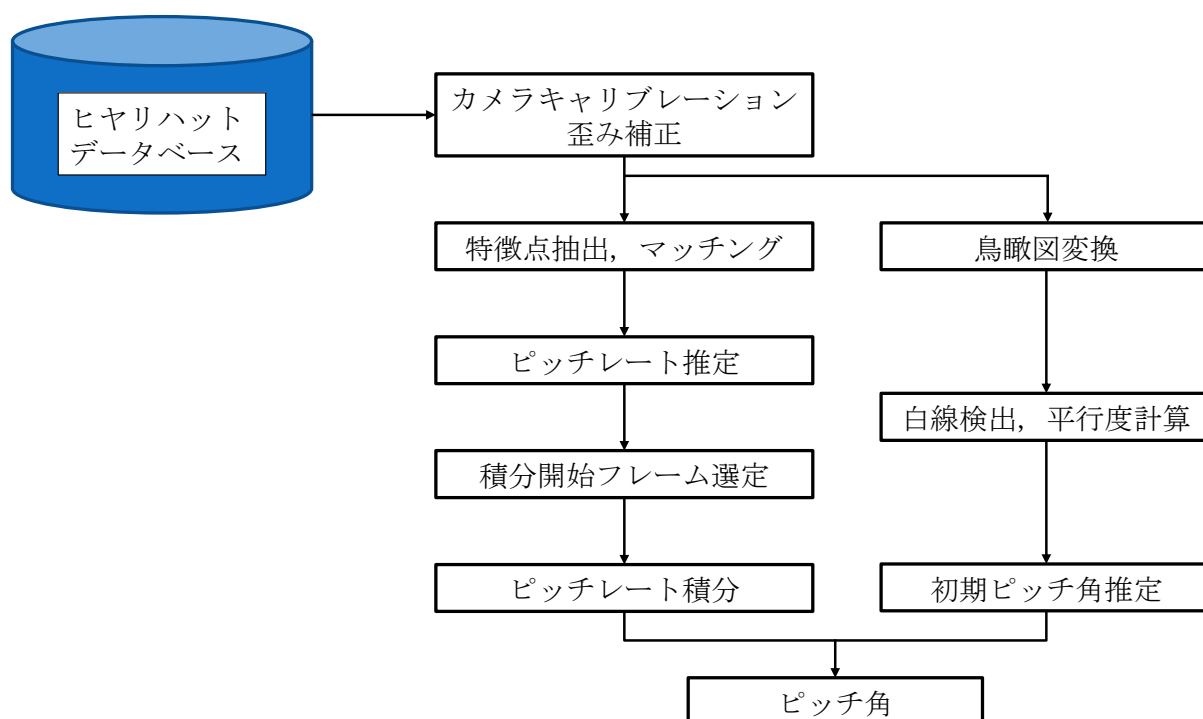


図 4.1 ピッチ角推定の流れ

まず初めに、カメラキャリブレーションと歪み補正を行う。次に、特徴点の抽出を行い、2フレーム間で特徴点のマッチングを行う。特徴点のピクセル移動距離からフレーム間のピッチレートを求める。ピッチ角はピッチレートを積分することで求められるので、積分を始めるフレームを前後加速度とジャークから選定し、ピッチ角を計算する。また、鳥瞰図変換と白線検出を用いた初期ピッチ

角の推定を行い，前述のピッチ角に加算することでドライブレコーダ映像における単眼車載カメラのピッチ角推定を行う．

## 4.2 前処理

本節では，処理プロセスのうち，前処理について説明をする．はじめに，カメラキャリブレーションについての説明を行い，本学のヒヤリハットデータベースに登録されているドライブレコーダの各機種についてカメラキャリブレーションを行った結果を示す．また，得られたパラメータを用いて画像の歪みを補正した例について述べる．

### 4.2.1 カメラキャリブレーション

カメラキャリブレーションでは，カメラの内部パラメータ，外部パラメータ，レンズのゆがみ係数を推定する．カメラの内部パラメータはカメラ固有のパラメータを含み，式 (4.1) で表される． $(C_x, C_y)$  はピクセル単位の光学中心， $(f_x, f_y)$  はピクセル単位の焦点距離， $s$  はせん断係数である．せん断は図 4.2 で表され，せん断係数  $s$  は  $f_y \tan \alpha$  で計算される．

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

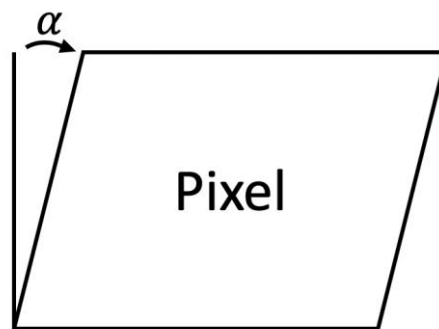


図 4.2 ピクセルのせん断図

カメラの外部パラメータは図 4.3 のように 3 次元空間上でのカメラの位置と姿勢を表す<sup>[21]</sup>。カメラの座標系の原点は光学中心にあり，x 軸と y 軸で画像平面が定義される。

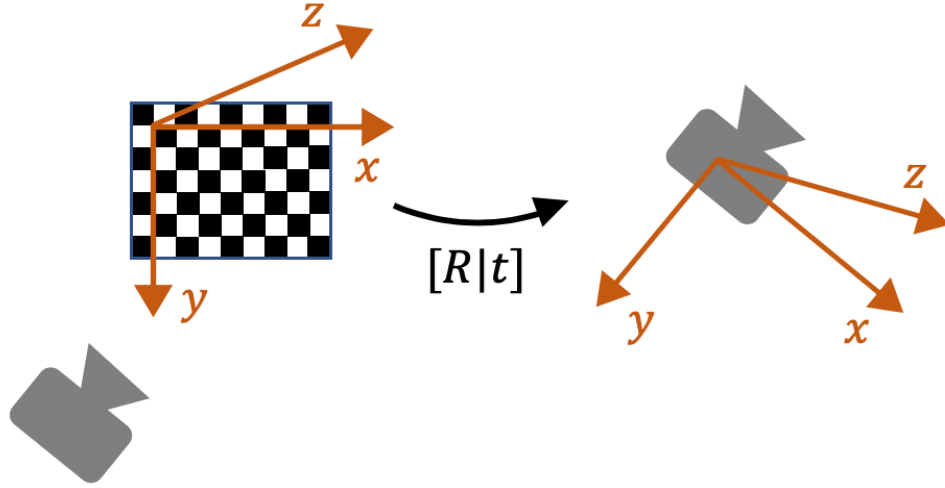


図 4.3 カメラの外部パラメータ

実際のカメラレンズでは，半径方向や円周方向に歪みを有している．半径方向の歪みは，レンズ形状が曲面であることにより，光線がレンズに当たった場所に応じて撮像素子上での投射位置が移動することで発生する歪みである<sup>[22]</sup>．光軸から離れるほど移動量は大きく，移動方向は光軸を中心に等方的である．一方，円周方向の歪みは，レンズと撮像素子が完全に平行でない場合に発生する歪みである．このようなレンズの歪みは，歪みのない投影による画像座標上の点を $(u, v)$ ，歪みを含んだ画像座標上の点を $(u_D, v_D)$ とし，半径方向の各歪み係数を $k_1, k_2, k_3$ ，円周方向の各歪み係数を $p_1, p_2$  とすると，以下の式 (4.2) で表される．

$$\begin{aligned} u_D &= u + u(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 uv + p_2(r^2 + 2u^2) \\ v_D &= v + v(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_2 uv + p_1(r^2 + 2v^2) \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここで，

$$r = \sqrt{u^2 + v^2}$$

である。ただし、多くの場合は、第 2 項の半径方向の歪みを考慮すれば十分である。

これらのカメラの内部パラメータ、外部パラメータ、歪み係数を Zhang のカメラキャリブレーションアルゴリズムを用いて求める<sup>[23]</sup>。Zhang のキャリブレーション法では、図 4.4 に示すようなチェスボードパターンなどの幾何特性が既知の平面パターンを多方向から撮影し、「得られた複数画像中の特徴点の位置関係をもとに」カメラパラメータを推定する。まず初めに、レンズ歪みをゼロと仮定して、内部パラメータおよび外部パラメータについて閉形式で解く。次に、非線形最小二乗の最小化 (レーベンバーグ・マルカート アルゴリズム)<sup>[24]</sup>を使用して、歪み係数を含むすべてのパラメータを同時に推定する。前の手順で求めた閉形式の解を、内部パラメータと外部パラメータの初期推定値として使用する。歪み係数の初期推定値をゼロに設定してバンドル調整を行い、カメラの内部パラメータ、外部パラメータ、歪み係数を求める。

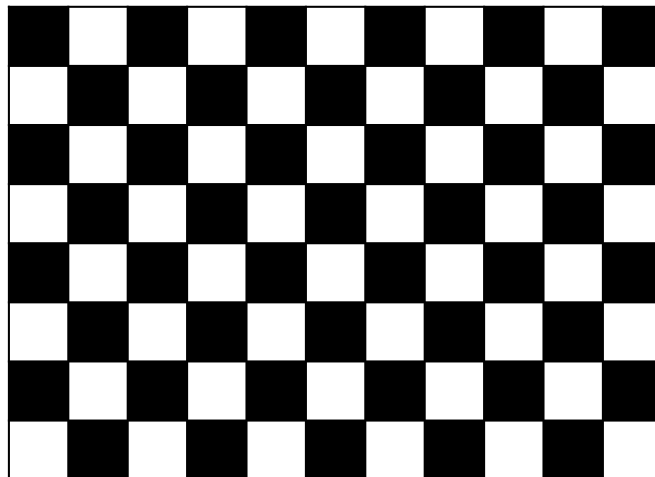


図 4.4 キャリブレーションパターン例



### 4.2.2 カメラキャリブレーション結果

第3章の2節に示したヒヤリハットデータベースに登録されているドライブレコーダの各機種についてカメラキャリブレーションを行った結果を以下に示す。表4.1にドライブレコーダカメラのキャリブレーション結果として各機種の焦点距離 $f_x, f_y$ ，光学中心 $C_x, C_y$ ，半径方向の歪み係数 $k_1, k_2$ を示す。

表 4.1 ドライブレコーダカメラのキャリブレーション結果

機種	OBVIOUS DRU5010	DR-3031	DR-6200	DR-9100	DRT-7300	堀場試作品
$f_x$ [pixel]	527.79	338.38	338.38	370.86	377.64	377.64
$f_y$ [pixel]	531.27	338.45	338.45	365.34	372.92	372.92
$C_x$ [pixel]	645.55	324.09	324.09	316.49	314.34	314.34
$C_y$ [pixel]	356.41	240.53	240.53	245.49	243.81	243.81
$k_1$	-0.0430	-0.2850	-0.2850	-0.3336	-0.3271	-0.3271
$k_2$	-0.0221	0.0603	0.0603	0.0768	0.0731	0.0731

ピンホールカメラモデルはレンズ歪みのない理想的なカメラモデルであるので事前に動画フレームから歪みを補正する必要がある。カメラキャリブレーションによって得られたカメラの内部パラメータとレンズの歪み係数を用いて画像の歪みを補正した結果を以下に示す。図4.5にデンソーテン製 OBVIOUS DRU5010 の撮影画像を歪み補正した結果を，図4.6に堀場製作所製 DR-3031 の撮影画像を歪み補正した結果を示す。

図4.5(a)と図4.5(b)を比較すると背景のビル群等の歪みが補正されていることがわかる。しかし，デンソーテン製のドライブレコーダカメラは記録画素数が $1280 \times 720$ と大きいため，歪みもあまり発生していない。しかし，図4.6において堀場製作所製のドライブレコーダカメラの歪み補正結果を比較すると，図4.6(a)の画像左に存在していた電柱が図4.6(b)の補正後には画像外に行ってしまう

ほど大きく歪んでいることが分かる．このように DR-3031 の記録画素数は  $640 \times 480$  と，デンソー  
テン製のドライブレコーダに比べて小さいため，歪みも非常に大きくなっている．歪みは画像中心  
が一番小さく，中心から離れるほど大きくなるため，画像から相対距離を計測する際にはこのよう  
に前処理として画像の歪みを補正することが重要である．



(a) 歪み補正前



(b) 歪み補正後

図 4.5 歪み補正の例 (OBVIOUS DRU5010)



(a) 歪み補正前



(b) 歪み補正後

図 4.6 歪み補正の例 (DR-3031)

### 4.3 特徴点のマッチングによるピッチ角推定

本節では、特徴点のマッチングによるピッチ角推定手法について説明をする。はじめに、画像の特徴点抽出として、FAST アルゴリズムについて述べた後、特徴点のマッチングに使用する FREAK 記述子について説明をする。次に、特徴点のピクセル移動距離からのピッチレート計算と、積分開始フレームの選定方法について述べる。最後に、初期ピッチ角の推定手法として、鳥瞰図変換と白線検出、平行度の計算について説明をする。

#### 4.3.1 特徴点抽出

本手法では、2 フレーム間の特徴点の移動距離を元にピッチレートを計算する。特徴点の検出は、Harris コーナー<sup>[25]</sup>や、Shi-Tomashi コーナー<sup>[26]</sup>などが存在するが、より多くのコーナーを高速に検出することが可能な FAST (Features from Accelerated Segment Test) 特徴抽出を用いた<sup>[27]</sup>。このアルゴリズムは、点 P とその周囲の小さな円周上の点の集合とを直接比較するという考えに基づいている。基本的な考え方は、点 P の近隣で P に類似している点が少ない場合に P がよいキーポイントとするということである。この考え方の初期の実装である SUSAN アルゴリズム<sup>[28]</sup>では、点 P の周囲の円内の全ての点を比較していたが、後継である FAST は 2 つの相違点が挙げられる。一つ目は、図 4.7 に示すように FAST では P の周りのリング上の 16 点だけを用いるということである。2 つ目は、リング上の個々の点を、P よりも暗い、P よりも明るい、P と類似、のいずれかに分類することである。この分類は閾値  $t$  を使って行われる。注目画素 P の画素値を  $I_p$  とすると、暗いピクセルは  $I_p - t$ 、明るいピクセルは  $I_p + t$ 、近いピクセルは  $I_p - t$  と  $I_p + t$  の間になる。この分類が行われた後、FAST は、P より明るい、P より暗い、リング上の連続した点の個数を数える。リング上の点の数を  $N$  とすると、P が特徴点であるためには、明るい、もしくは暗い点だけを含む円弧が少なくとも  $N/2+1$  個（つまりリング上の半分以上の数）のピクセルを占めている必要がある。

				16	1	2				
			15				3			
		14						4		
		13			P			5		
		12						6		
			11				7			
				10	9	8				

図 4.7 点 P の円周上の画素値

また，隣接するすべてのピクセルをコーナーとして検出されてしまうことを回避するために，FAST アルゴリズムでは各コーナーに対する式 (4.3) で表されるスコアを定義している．

$$score = \max \left( \sum_{x \in \{brighter\}} |I_x - I_P| - t, \sum_{x \in \{darker\}} |I_x - I_P| - t \right) \quad (4.3)$$

スコアの構築では，まず明るいピクセルと中心ピクセルの差分の絶対値の総和を計算し，それから同様の計算を暗いピクセルに対して行い，最後にこれら 2 つのうち大きいほうをスコアとして採用する．

図 4.8 にヒヤリハットデータベースに登録されている映像を用いて FAST 特徴点の抽出結果を示す．



図 4.8 FAST 特徴点抽出結果

### 4.3.2 FREAK 記述子抽出

前節で述べた FAST アルゴリズムを用いて画像上の特徴点を抽出したのち、記述子を求める。記述子とは、特徴点周りの領域から取り出した特徴量である。連続する 2 フレームで特徴点とその記述子を求めることで特徴点のマッチングを行う。本研究では、Alahi ら<sup>[29]</sup>によって提案された FREAK (Fast Retina Keypoint) アルゴリズムを使用して記述子を計算する。FREAK は BRIEF<sup>[30]</sup>, BRISK<sup>[31]</sup>, ORB<sup>[32]</sup>などの改良版として提案され、生物の網膜の構造を模している点が特徴的である。網膜の中心に近づくほど神経節細胞の密度が高くなるという生物学的事実を参考とし、キーポイント中心に近づくほど密度が高くなるようなサンプリングパターンを用いることを提案している。図 4.9 は FREAK で用いられるサンプリングのパターンである。それぞれのサンプリング点を中心とする円は、平滑化のためのガウスフィルタの分布を表す。この円の大きさは外側に向かうほど指数関数的に大きくなるように設計されている。外側のサンプリング点における平滑化の範囲は、互いに重なり合うほど大きくなるので、サンプリング点における値は隣り合う点と独立にはな

らない。しかし、このような冗長性は生物の視覚システムの中にも存在しており、これが識別性能の好況に寄与すると Alahi らは主張している。

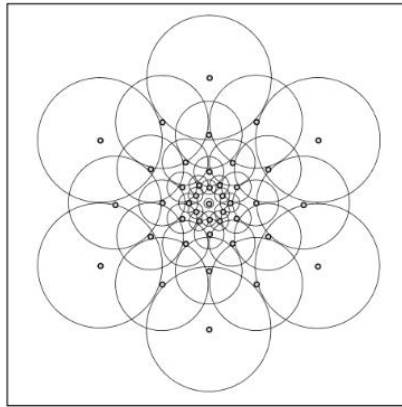
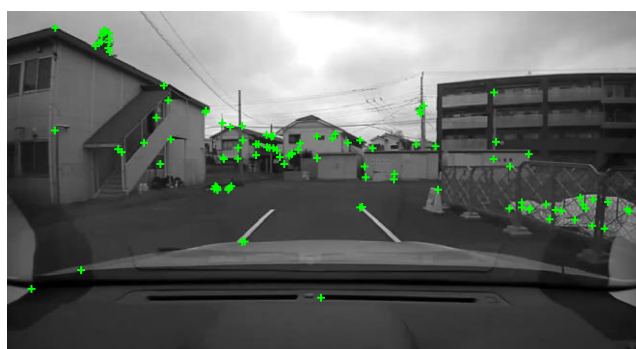


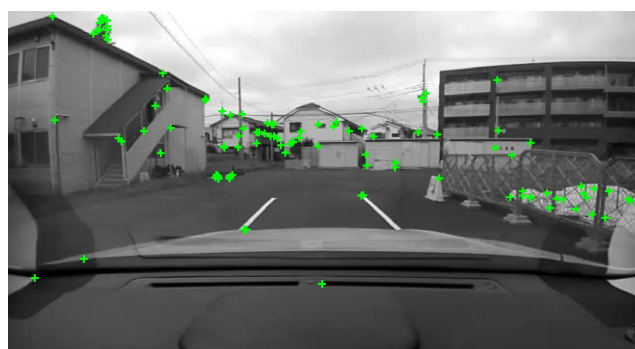
図 4.9 FREAK のサンプリングパターン

FREAK で採用されているサンプリングの点は 43 箇所である。しかしながら、これらの全ての組み合わせを用いて二値特徴量を抽出すると、そのビット長は数千ビットにも及ぶため、ペアの選択が必要である。そこで、ORB と同じ Greedy アルゴリズムを適用することで、二値特徴量の情報量が大きくなるような 512 種類のペアを選択している。ここで Alahi らは、選ばれた 512 種類のペアを観察すると、そこには生物の視覚システムと似た挙動が現れていると主張している。生物の視覚システムは、周辺視野で大まかに対象を把握したのちに、中心視野で対象物をより細かく観察するように機能する。一方で、FREAK において用いられている 512 種類のペアを、Greedy アルゴリズムで選ばれた順に追っていくと、初めは外側のサンプリングパターンが選択されていることが多く、後半になると中心に近いサンプリングパターンが選択されていることが多いことがわかる。すなわち、生物の視覚システムと同様に coarse-to-fine な特徴選択が行われていることがわかる。この点に着目し、FREAK では 512 ビットの二値特徴量の距離計算を行う際に、128 ビットごとに 4 分割し、4 段のカスケード構造を取ることで、マッチング処理の高速化を図っている。すなわち、各段では 128 ビット分のみの距離計算を行い、距離の値が所定のしきい値を超える場合は計算を打ち切ることで、マッチング処理を高速化している。実際には、初段で 90%以上の候補が棄却されるため、実質 128 ビット分の距離計算のみでマッチングが行える。

図 4.10 に連続する 2 フレームの特徴点抽出結果を示す．図 4.10(b)は図 4.10(a)よりドライブレコーダのピッチ角を大きくして撮影した画像である．



(a)フレーム A における特徴点抽出結果



(b)フレーム B における特徴点抽出結果

図 4.10 2 フレーム間の特徴点抽出結果

図 4.11 にフレーム A とフレーム B の特徴点抽出結果を用いて記述子を計算し，マッチングした結果を示す．画像はフレーム A とフレーム B を重ね合わせて出力している．赤丸で表される点がフレーム A における特徴点，緑の十字で表される点がフレーム B における特徴点である．黄色の直線で繋がっている二点は，フレーム A とフレーム B でマッチングした点である．マッチングした各特徴点が縦方向に移動していることから，カメラを下向きに傾けることで画像上の特徴点が画像の上部に移動したことがわかる．



図 4.11 特徴点マッチング結果

### 4.3.3 ピクセル移動距離からピッチレートの算出

カメラのピッチ角は前述の特徴点マッチングより、ピッチレートを計算することで求められる。

はじめにカメラ座標系と、画像座標系の関係を図 4.12 に示す。カメラのレンズ中心（焦点） $O_c$ を原点とし、光軸方向を  $Z$  軸とする。  $X$  軸・ $Y$  軸は、投影する画像平面  $I$  ( $Z$  軸方向に焦点距離  $f$  離れた点  $O_{XY}$  が原点になる) における座標系  $\Sigma_{XY}$  の  $X$  軸・ $Y$  軸にそれぞれ揃えて右手系で構成した座標系である。画像座標系において、画像上の点  $O_{U-V}$  を原点とし、 $U$  軸・ $V$  軸はそれぞれ実際の撮像素子配置軸に合わせた座標系  $\Sigma_{UV}$  である。

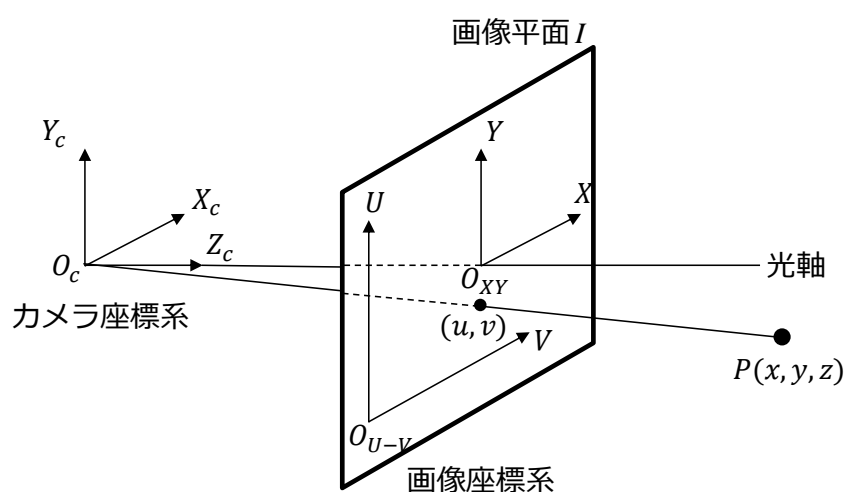


図 4.12 カメラ座標系

また、車両座標系を図 4.13 に示す。車載カメラのロール、ピッチ、ヨーは図 4.14 に示す向きとする。

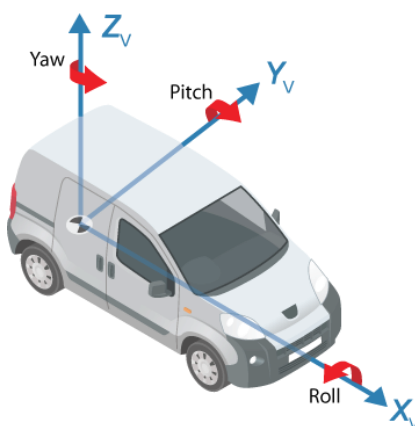


図 4.13 車両座標系



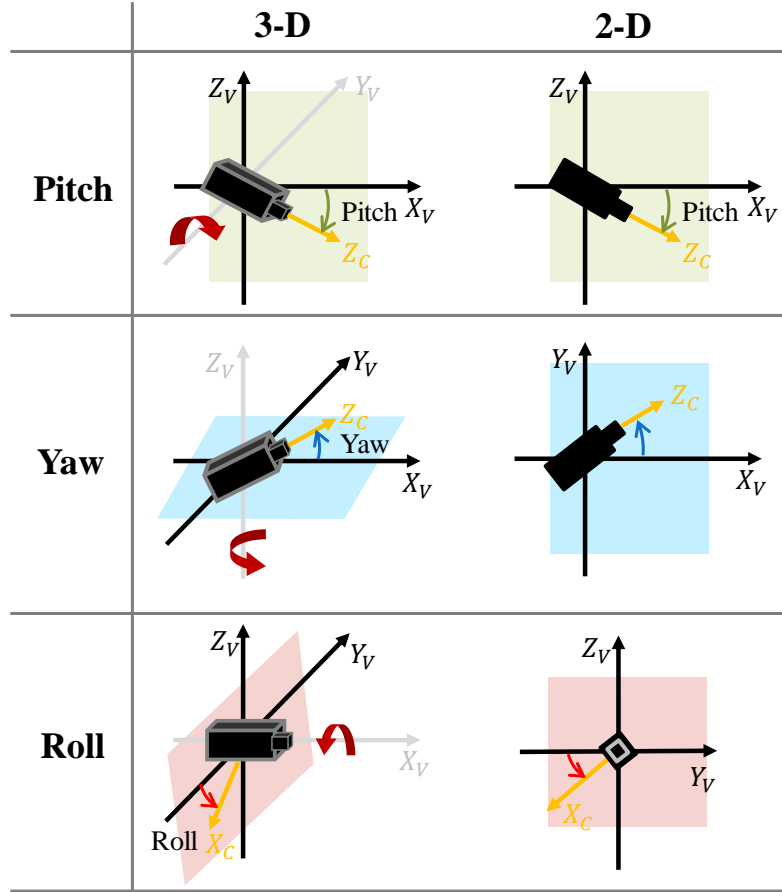


図 4.14 車載カメラの座標系

図 4.15 に示す座標系と画像座標系の関係から特徴点のピクセル移動距離を計算することができる。カメラの初期ピッチ角を $\theta_p$ ，設置高さを $H$ ，フレーム A における特徴点のある 1 点の座標を $(x_{Ai}, y_{Ai})$ ，フレーム B における特徴点の座標を $(x_{Bi}, y_{Bi})$ とする。車両の急制動などが発生し、車体が沈み込むピッチ角が発生した場合、フレーム A とフレーム B の特徴点は移動する。ピッチは縦方向の動きであるため特徴点の $y$ 座標の変化のみを考えると、2 フレーム間のある 1 点のピッチレート $\dot{\theta}_l$ は式 (4.4) で表される。

$$\dot{\theta}_l = \arctan\left(\frac{y_{Ai} - y_{Bi}}{f}\right) \quad (4.4)$$

式 (4.4) を用いて抽出した特徴点全てでピッチレートを計算し、これらの平均を計算することでフレーム A とフレーム B の 2 フレーム間におけるピッチレートを式 (4.5) から求めることができる。

$$\dot{\theta}_{AB} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \dot{\theta}_i \quad (4.5)$$

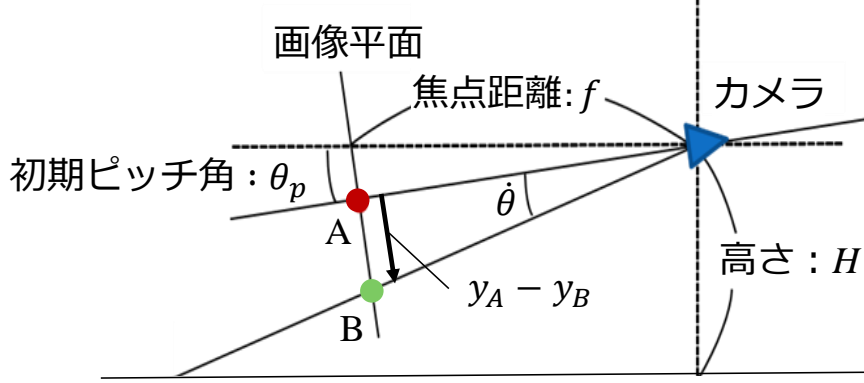


図 4.15 横から見たカメラと画像平面の関係

全フレームにおいてピッチレートを求めた後に、フィルタ処理をすることでノイズの影響を小さくする。本研究ではカットオフ周波数が 0.2 Hz をもつ 2 次のローパスデジタルバタワースフィルタを設計し、伝達関数の係数を求めた。求めた伝達関数を用いてゼロ位相デジタルフィルタ処理を行った。このフィルタは、入力データを順方向と逆方向の両方向で処理することで、ゼロ位相の歪みを小さくし、処理の実行開始時と終了時の過渡状態を最小にする。最後にフィルタ処理前の入力データからローパス処理後の出力データの差分を取ることで推定したピッチレートにハイパス処理を行う。推定したピッチレートを  $\dot{\theta}$ 、ローパス処理後の信号を  $y$ 、ハイパス処理後のピッチレートを  $\dot{\theta}_y$  とすると、式 (4.6) のように表すことができる。

$$\dot{\theta}_y(k) = \dot{\theta}(k) - y(k) \quad (4.6)$$

#### 4.3.4 積分開始フレームの選定

特徴点のマッチングによって求められたピッチレートを積分することでピッチ角を求めることができる。しかし、ピッチ角の変動がない最初のフレームからすべてのピッチレートを積分すると累積誤差が発生してしまい、正確なピッチ角の推定ができない。そのため、急ブレーキ等によるピッチ角の変動が始まるイベント発生直前のフレームからピッチレートを積分することでピッチ角を求める。本節ではこのイベント発生直前の積分を開始するフレームの選定方法について述べる。

本研究では、あらかじめドライブレコーダに記録されており、センサデータとして保有している加速度データと、加速度の微分であるジャークの変化をもとにフレームを決定する。ドライブレコーダに記録されている前後加速度と求めたジャークにそれぞれ閾値を設定し、閾値を同時に超えた1フレーム前を積分開始フレームとした。

本研究では、ジャーク $\Delta G$ を式(4.7)、式(4.8)、式(4.9)より求めた。ここで、 $x_g$ はドライブレコーダに記録された前後加速度、 $\tau$ は時定数、 $\Delta T$ はサンプリングタイムである。はじめに式

(4.7)と式(4.8)を用いて、前後加速度に一次のハイパスフィルタをかける。

次に、ハイパスフィルタ処理後の前後加速度の3データ前と現在のデータの差分からジャークを式(4.9)より求めた。1フレーム前との差分を取ってジャークを計算すると、小さな前後加速度の変化でも閾値を超えてしまうため3フレーム前との差分をとってジャークを計算した。

$$x_g'(k) = \frac{\tau}{\tau + \Delta T} x_g'(k-1) + \frac{\Delta T}{\tau + \Delta T} x_g(k) \quad (4.7)$$

$$G(k) = x_g(k) - x_g'(k) \quad (4.8)$$

$$\Delta G = G(k) - G(k-3) \quad (4.9)$$

加速度の閾値は  $-0.15 \text{ m/s}^2$ 、ジャークの閾値は  $-0.15 \text{ m/s}^3$ とした。この二つの閾値を超えたフレームの1つ前のフレームを手法の切り替えフレームとした。

## 4.4 初期ピッチ角推定

4.3 節では，特徴点のマッチングによるピッチ角の推定手法を提案した．しかし，提案手法は前フレームとのピッチ角の変化量を計算しており，初期ピッチ角を考慮していないため実際のドライブレコーダカメラのピッチ角とのオフセットが発生してしまう．そこで本節では，各タクシーによって異なるドライブレコーダカメラの初期ピッチ角の推定方法について説明する．初めに，入力画像の鳥瞰図変換について述べる．次に，鳥瞰図上での白線検出と，平行度の計算方法について説明をする．

ここで，ヒヤリハットデータベースに登録されているドライブレコーダカメラの初期ピッチ角の真値は不明であるため，白線のある走行場面において入力画像を鳥瞰図に変換し，白線が平行になっている時のピッチ角を真値とする．

### 4.4.1 鳥瞰図変換

鳥瞰図への変換は Inverse Perspective Mapping (IPM) を用いる<sup>[33]</sup>．図 4.16 に画像座標系とワールド座標系の関係図を示す．座標変換は以下の式 (4.10) を用いて行う．

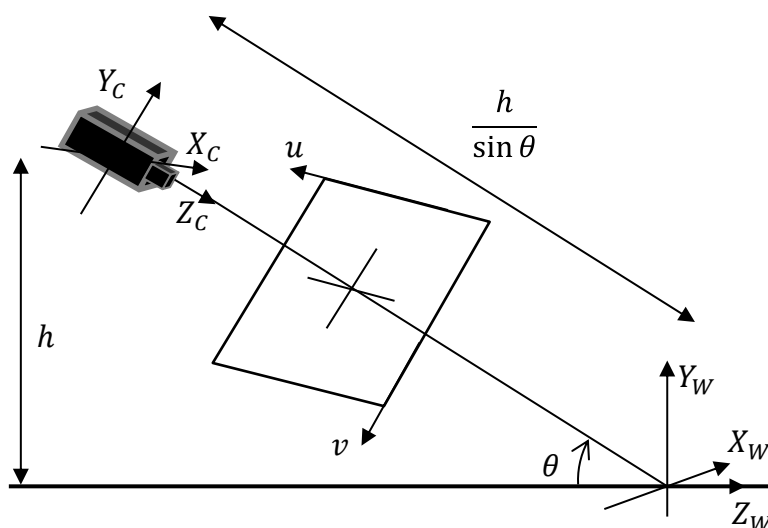


図 4.16 画像座標系とワールド座標系の関係図

$$(u, v, 1)^T = \mathbf{KTR}(x, y, z, 1)^T \quad (4.10)$$

ここで $\mathbf{R}$ は、回転行列であり、式 (4.11) で表される。 $\theta$ は初期ピッチ角である。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

$\mathbf{T}$ は、平行移動行列であり、式 (4.12) で表される。

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{h}{\sin \theta} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

$\mathbf{K}$ は、カメラ行列であり、式 (4.13) で表される。

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} f \times ku & s & u_o & 0 \\ 0 & f \times kv & v_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

ここで、 $f$ はカメラの焦点距離、 $s$ はピクセルのせん断パラメータ、 $ku, kv$ はピクセルのアスペクト比である。これより、式 (4.10) は以下の式 (4.14) のように変形できる。

$$\begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

鳥瞰図への変換は道路平面上の点のみに注目するので $Y_W = 0$ を代入して、式 (4.15) のように表せる。

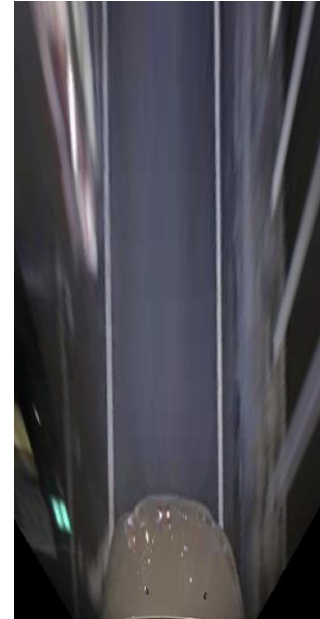
$$\begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{33} & p_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_W \\ Z_W \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

以上の式を用いて、入力画像を鳥瞰図に変換する。

図 4.17 にドライブレコーダ映像を鳥瞰図に変換した例を示す。図 4.17 (b) を見ると、鳥瞰図に変換した時の白線が平行に伸びていることが確認できる。したがって変換する際に用いたピッチ角がこの例で用いたドライブレコーダの初期ピッチ角となる。



(a)入力画像



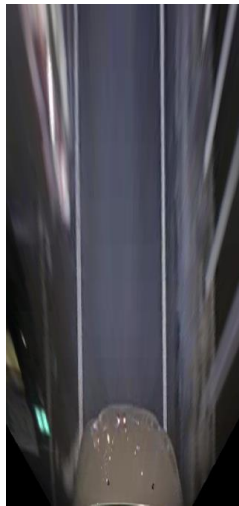
(b)鳥瞰図

図 4.17 IMP を用いた鳥瞰図作製

#### 4.4.2 白線検出

次に，鳥瞰図上で白線を検出していく．図 4.18 に白線検出の例を示す．図 4.18(b)は鳥瞰図を二値化した図を示す．図 4.18(c)は最終的な白線検出結果であり，黄色と緑色の直線が検出結果である．はじめに，隣接するピクセルの輝度値を比較してエッジを検出し，二値化する．その後，あらかじめ設定した白線の幅をもとに RANSAC アルゴリズムを用いて放物線モデルを検出する<sup>[34]</sup>．RANSAC アルゴリズムとは，目立つ外れ値を削除して正しい答えを見つけ出す方法として効果的な手法である．検出された白線は式(4.16)示す二次曲線の式で表され， $a, b, c$  の各係数を出力する．

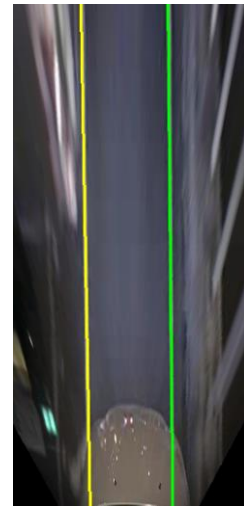
$$y = ax^2 + bx + c \quad (4.16)$$



(a) 鳥瞰図画像



(b) 二値化画像



(c) 白線検出結果

図 4.18 白線検出の例

最後に，検出した二直線の平行度を計算する．平行度を表す指標  $p$  を式 (4.17) より求めた．ここで，検出した白線の片側の直線の一次の項の係数を  $b_1$ ，もう一つの直線の一次の項の係数を  $b_2$  とする．

$$p = |b_1 - b_2| \quad (4.17)$$

これらの平行度の計算を-15 度から 15 度でピッチ角を変えて行い，その中で  $p$  が最小となった時のピッチ角を入力画像の初期ピッチ角とした．

## 第5章 ピッチ角推定システムの精度評価

本章では、提案するピッチ角推定手法の精度評価する。また、ヒヤリハットデータベースに登録されているデータを使用してピッチ角の推定および距離計測を行った結果を示す。

### 5.1 実験環境

本研究で使用するのは、図 5.1 に示す SUBARU 製のインプレッサ G4 である。本実験は、20 km/h で直進走行した後、急ブレーキをかけて停止をするという走行条件で実験を行った。提案手法でのピッチ角推定の精度評価のために慣性計測装置である Oxford Technical Solutions 社の RT3000 を搭載し比較のためのピッチレートとピッチ角を計測した。ドライブレコーダはデンソーテン製の OBVIOUS DRU5010 を使用した。設置位置はフロントガラス内側、高さ 1.25 m の場所に設置した。表 5.1 に慣性計測装置の仕様を、表 5.2 にドライブレコーダの仕様を示す。



図 5.1 実験車両





図 5.2 慣性計測装置の外観

表 5.1 慣性計測装置の仕様

機種	RT3000
ピッチ角精度	$\pm 0.05^{\circ}$
累積誤差	$2^{\circ}/\text{hr}$
サンプリング周期	100Hz

表 5.2 デンソーテン製ドライブレコーダの仕様

機種	OBVIOUS DRU5010
画面サイズ	1280×720
最大フレームレート	28fps
カメラ画角(水平)	$110^{\circ}$
カメラ画角(垂直)	$70^{\circ}$
HDR	あり
GPS 情報	○
音声入力	○

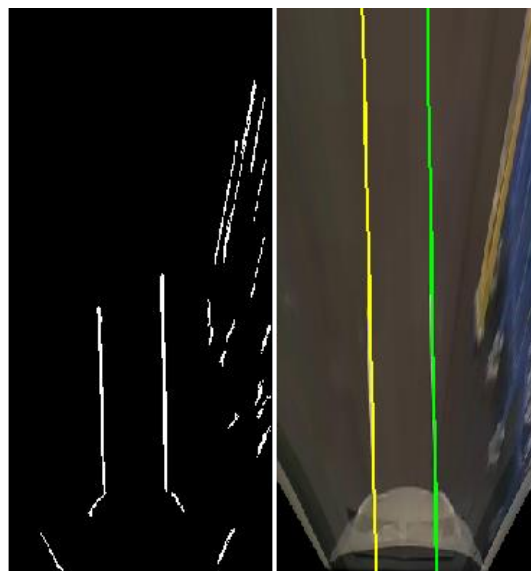
## 5.2 実験車両によるピッチ角推定実験

本節では、提案手法の有効性を確認するために実験車両に搭載されたドライブレコーダを使用して走行実験を行いピッチ角の推定を行った。まず初めにドライブレコーダカメラの初期ピッチ角の推定を行った。初期ピッチ角の推定に用いた撮影画像を図 5.3 に示す。白線を検出し、初期ピッチ角の推定を行った結果、最も平行度が高い時のピッチ角は  $-2.2^{\circ}$  あった。

得られたピッチ角を用いて鳥瞰図に変換した画像を図 5.4 に示す。図 5.4 より、鳥瞰図上の二本の白線が平行に伸びており、正しいピッチ角を用いて鳥瞰図に変換できていることがわかる、



図 5.3 初期ピッチ角推定に用いた入力画像



(a) 二値化画像      (b) 白線検出結果

図 5.4 白線検出結果

次に、走行中のピッチ角を特徴点のマッチングを用いて推定した。20 km/hで直進走行した後、急ブレーキをかけて停止をするという走行条件で各データを取得した。ドライブレコーダに記録された前後加速度と、慣性計測装置に記録された前後加速度、ジャークを計算することによって選定したピッチレートの積分開始フレームを図 5.5 に示す。図 5.6 に前後加速度から求めたジャークを示す。

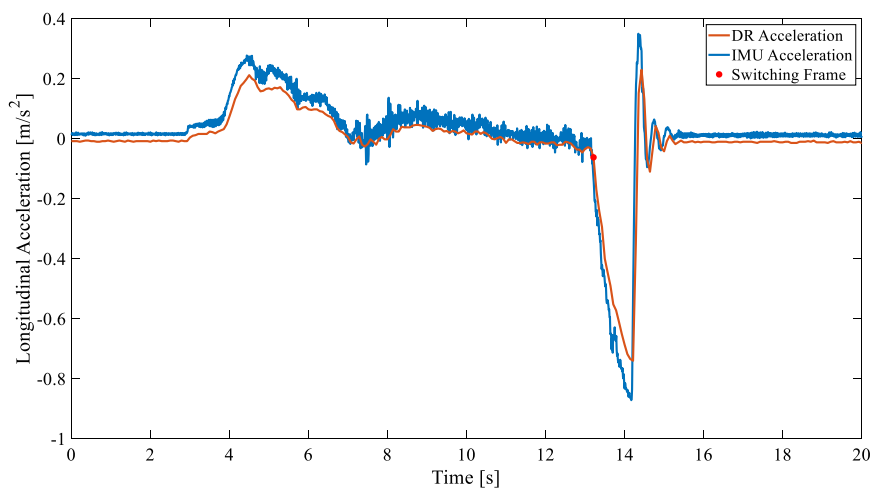


図 5.5 ドライブレコーダと IMU の前後加速度

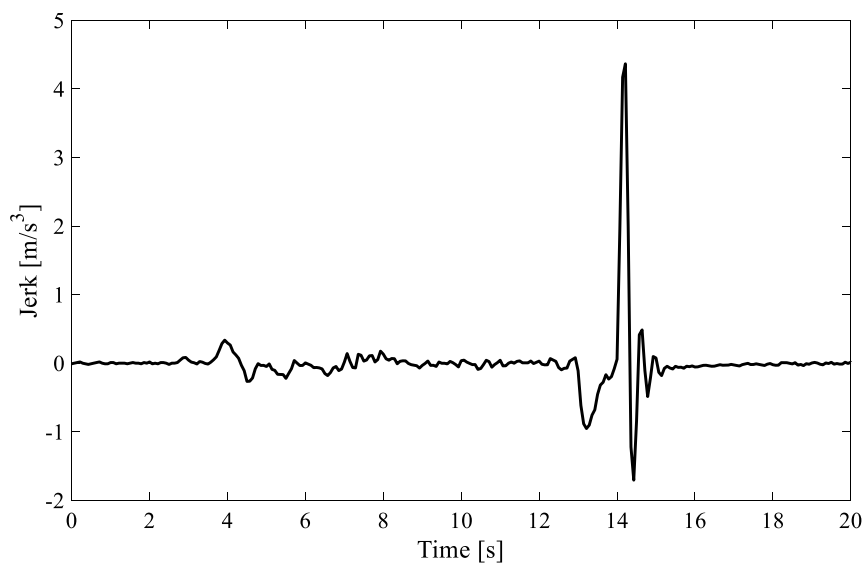


図 5.6 ジャーク計算結果

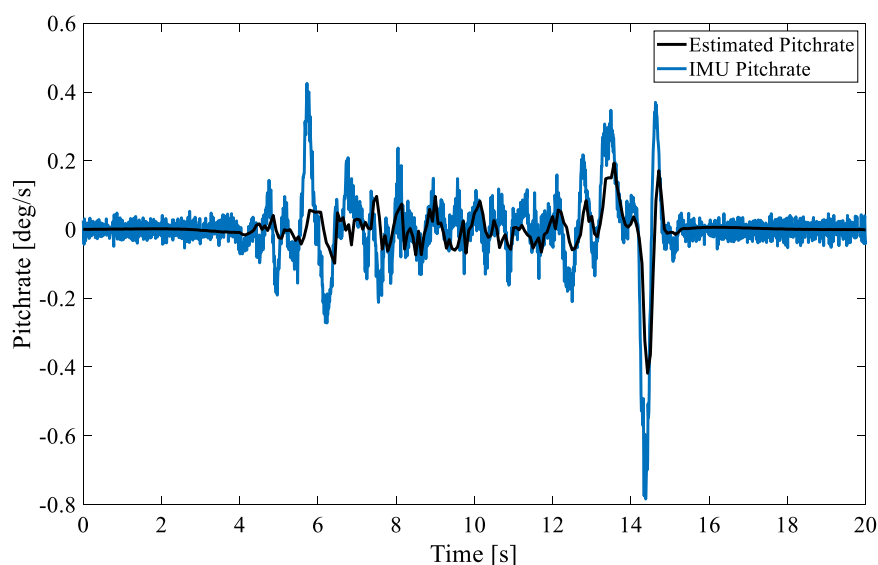


図 5.7 ピッチレート推定結果

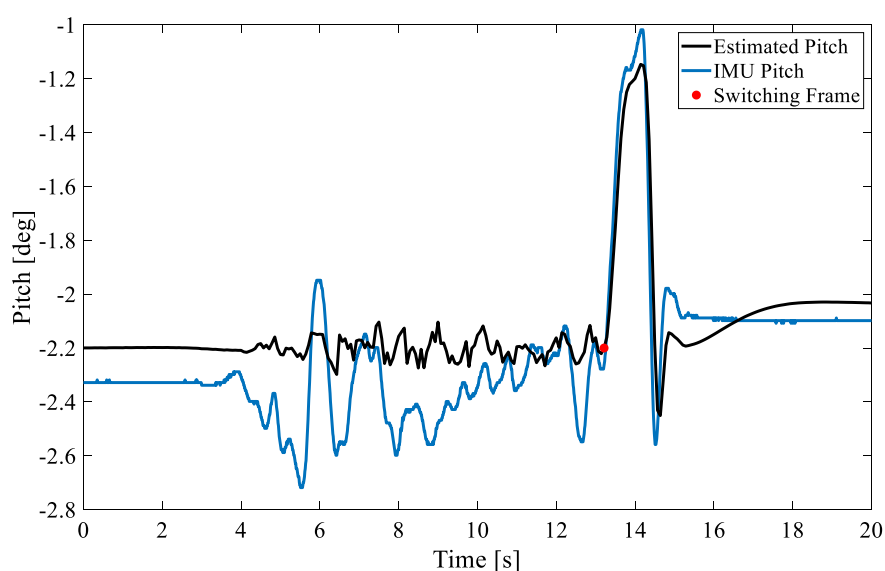
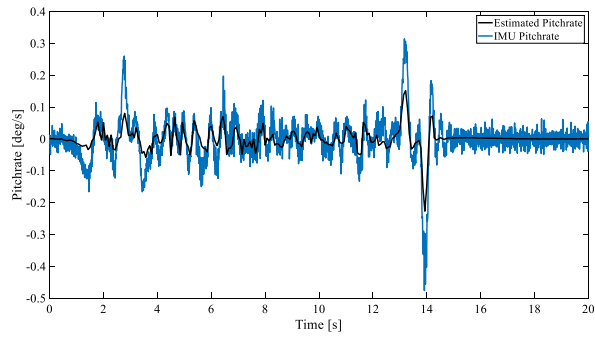


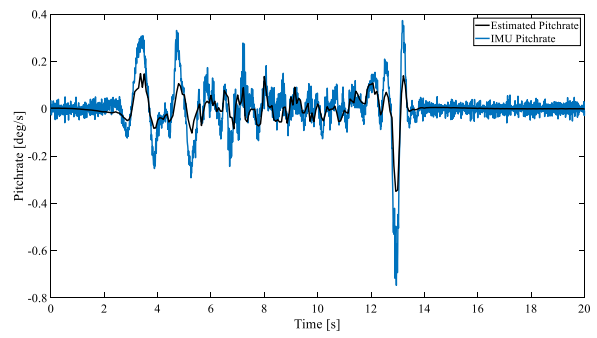
図 5.8 ピッチ角推定結果

図 5.5 より，急ブレーキをかけ始めて前後加速度に変化が出始めたフレームを積分開始フレームとして選定できていることがわかる．また，図 5.7 に提案手法を用いて推定したピッチレートと慣性計測装置によって計測したピッチレートを，図 5.8 にピッチレートを積分して求めたピッチ角を示す．図 5.8 より，急ブレーキの影響により車体が沈み込むことによって発生するピッチ角の変化が推定できていることがわかる．慣性計測装置との最大ピッチ角の誤差は  $0.14^{\circ}$  であり，目標推定精度とする  $0.5^{\circ}$  以内に収まっていることがわかる．

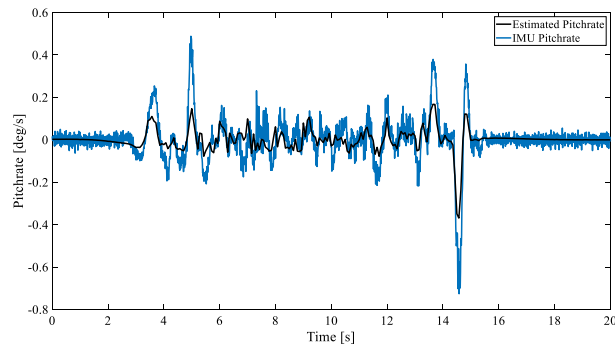
同様の実験を4回行ったため、残りの3つのピッチレートを図5.9に、ピッチ角推定結果を図5.10に示す。



(a)実験結果 2

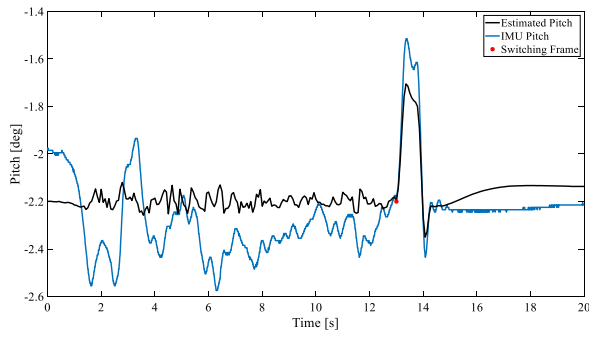


(b)実験結果 3

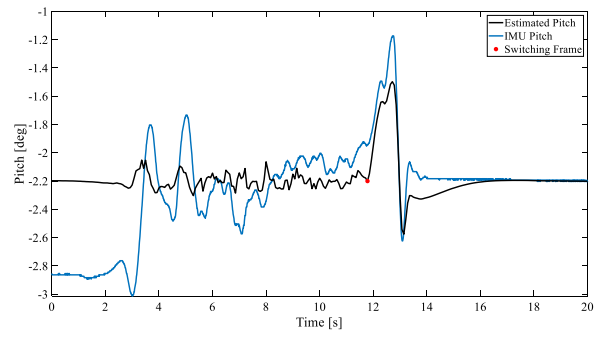


(c)実験結果 4

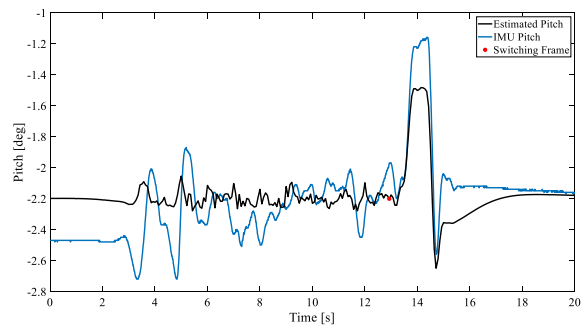
図 5.9 ピッチレート推定結果



(a)実験結果 2



(b)実験結果 3



(c)実験結果 4

図 5.10 ピッチ角推定結果

以上より，提案手法によって急ブレーキ時に発生するピッチ角の推定を行った結果，最も大きくピッチ角が発生した際の推定誤差は平均  $0.25^{\circ}$  であり，高精度で推定できていることから提案手法の有効性を確認できた。

### 5.3 実環境における距離計測検証実験

推定したピッチ角を用いて単眼車載カメラによる相対距離計測を行い提案手法の有効性を検証した。目標車両との車間距離の真値を計測には、単眼カメラで測距が可能な Mobileye 社の Mobileye C-270 を車両に設置し、計測した<sup>[35]</sup>。Mobileye C2-270 の計測値は、測定値の異常値を回避するためにフィルタリングされている。通常、Mobileye の測定誤差は 10%未満または 2 メートルである。Mobileye で計測する前方車両との相対距離と、慣性計測装置で計測するピッチ角、ドライブレコーダの映像情報を同期させて記録した。図. 5.11 に示すように、Mobileye とドライブレコーダの車載カメラを実験車両に取り付けた。

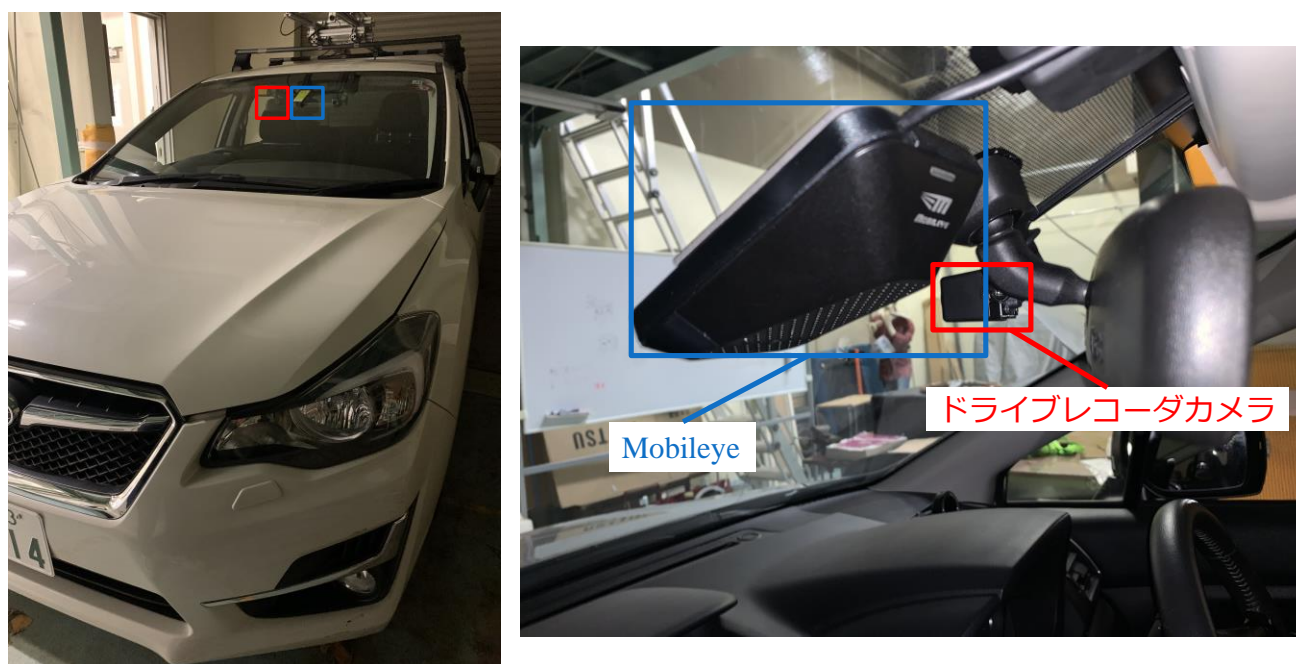


図 5.11 Mobileye とドライブレコーダカメラの設置位置

自車両前方に停止した車両との相対距離を計測し、Mobileye で計測した真値と提案手法によって推定した相対距離を比較した。本実験では、車両検出アルゴリズムによる検出枠の誤差の影響をなくするため、手動で検出枠を作製した。

実験結果は以下のようになった。図 5.12 に走行時の映像、図 5.13 に走行実験結果を示す。



図 5.12 距離計測実験映像

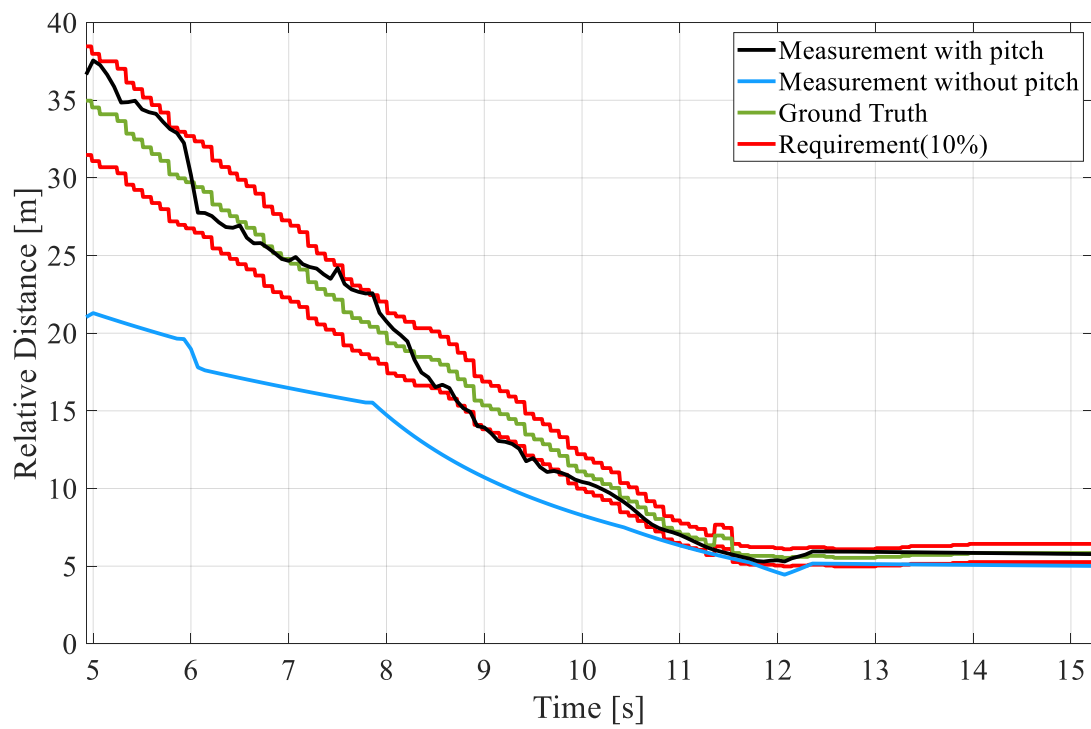


図 5.13 走行実験結果



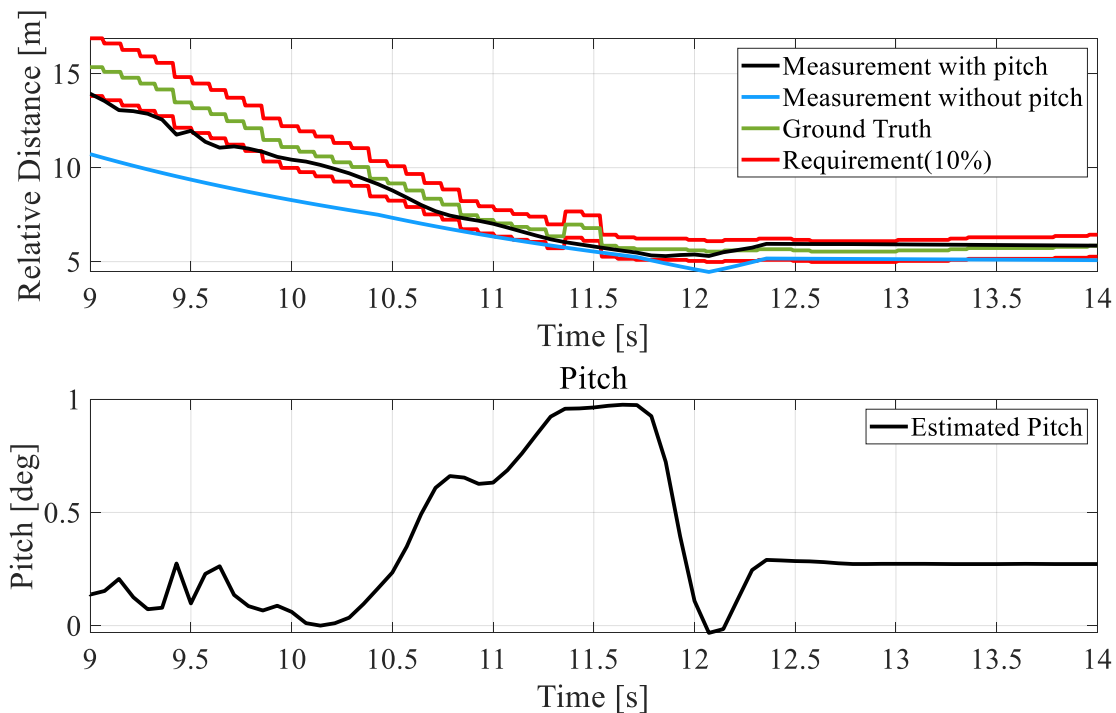


図 5.14 距離計測とピッチ角推定結果（拡大図）

図 5.13 に示すように、実環境において前方車両との相対距離を提案手法によって計測した結果、推定誤差が精度要件とする 10%に達しており、Mobileye と同程度の精度で距離計測ができた。それに対して、車載カメラのピッチ角推定を実施しない場合において誤差は 10%以上になった。以上の結果より、提案手法の有効性を確認した。

また、図 5.14 より、急ブレーキによるピッチ角変動が発生する 11 秒～12 秒の間を見ると、Mobileye で計測した相対距離が大きくなっていることがわかる。これは Mobileye の距離計測の手法が単眼カメラを用いて、道路の幅や車線は無限遠の地平線で一点（消失点）に収束するという遠近法の原理を利用していることによる影響と考えられる。前方のクルマのタイヤが地面に接する位置は、近くなるにつれて無限遠の 1 点（消失点）より下にずれて見え、消失点からどれだけ下にずれるかをカメラの CMOS センサーで常時観測して距離を計測している。そのため、急ブレーキによってカメラが沈みこむことによって、消失点の位置が移動し、計測誤差が発生したと考えられる。しかし、提案手法によってピッチ角を推定し、急ブレーキによるピッチ角の変動を考慮することで相対距離は滑らかに減少し、計測誤差を小さくすることができた。

## 5.4 ヒヤリハットデータベースの映像を用いたピッチ角推定

本節では、実際にヒヤリハットデータベースに登録されている映像について提案手法を用いてピッチ角の推定を結果について述べる。ヒヤリハットデータベースに登録されているデータは、ピッチ角の真値については不明であるため、初期ピッチ角推定は白線の平行度、走行時のピッチ角推定はイベント発生前後でピッチ角の変動が推定できているかを確認する。

初めにデンソーテン製のドライブレコーダである OBVIOUS DRU5010 に記録されたヒヤリハット映像（データ ID:565436）を用いてピッチ角推定を行った。この映像は高速道路上で前方車両が急停車したため、自車両も急ブレーキをかけて停止する追突のヒヤリハット映像である。初期ピッチ角の推定に用いた入力画像と鳥瞰図上に変換した結果をそれぞれ図 5.15 と図 5.16 に示す。図 5.15 より、鳥瞰図上で白線が平行に伸びており、この時のピッチ角  $-0.8^{\circ}$  を初期ピッチ角とする。



図 5.15 ID565436\_走行映像

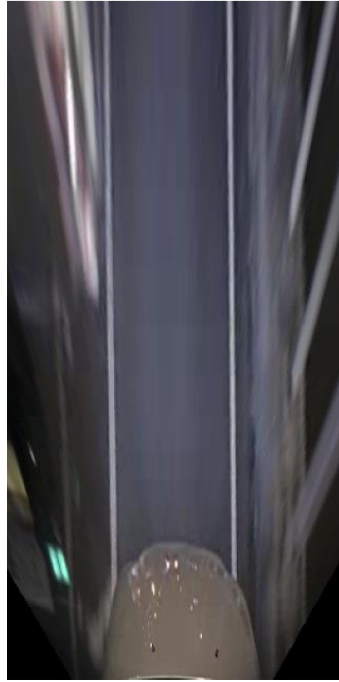


図 5.16 ID565436\_初期ピッチ角を用いた鳥瞰図変換

次に、特徴点のマッチングを用いて走行中のピッチ角を推定する。図 5.17 に、ドライブレコーダに記録された前後加速度、図 5.18 に前後加速度から計算したジャーク、図 5.19 に推定したピッチレート、図 5.20 にピッチ角を示す。

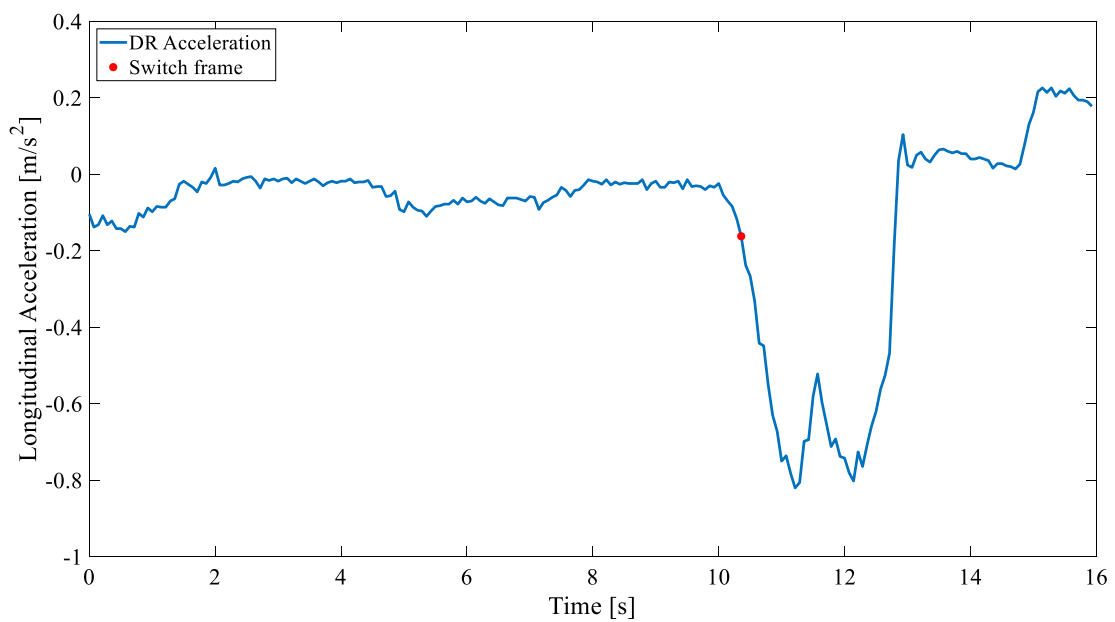


図 5.17 ID565436\_前後加速度

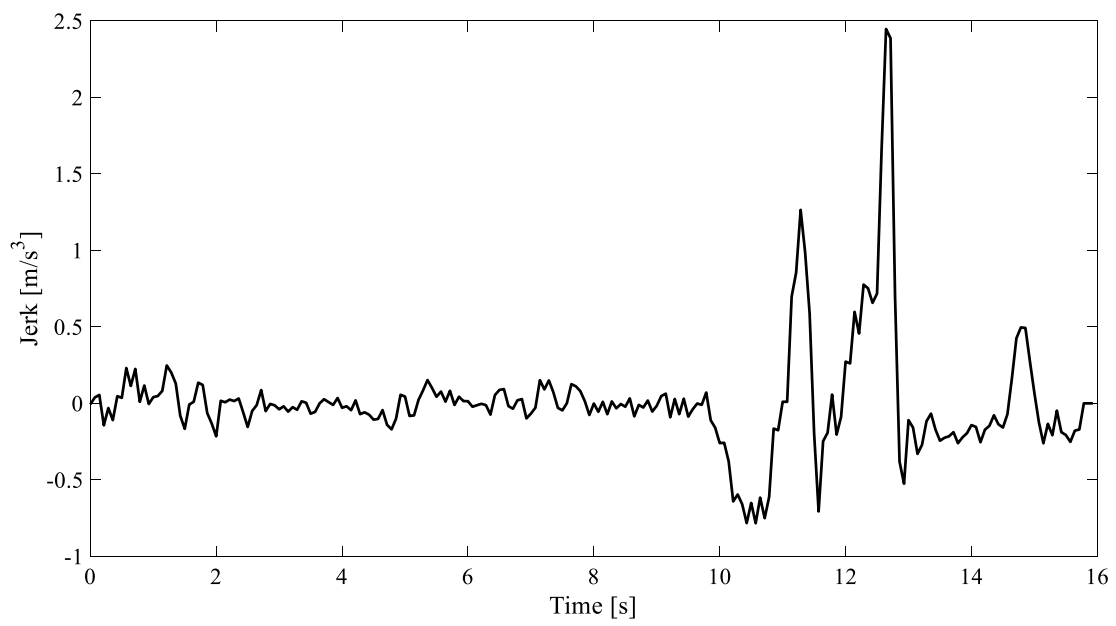


図 5.18 ID565436\_ジャーク計算結果

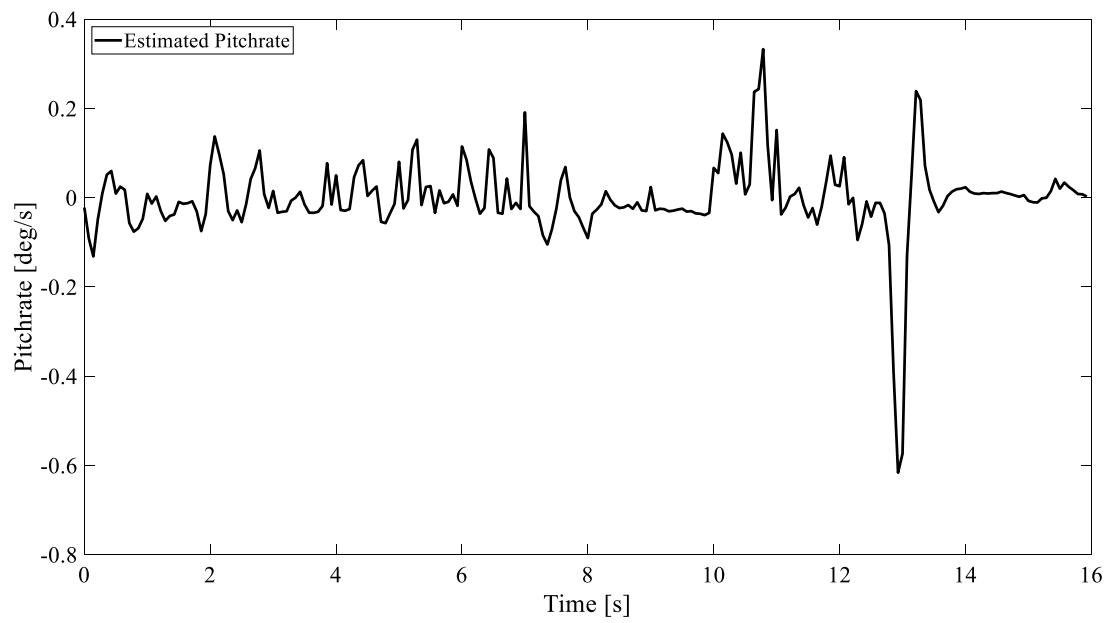


図 5.19 ID565436\_ピッチレート推定結果

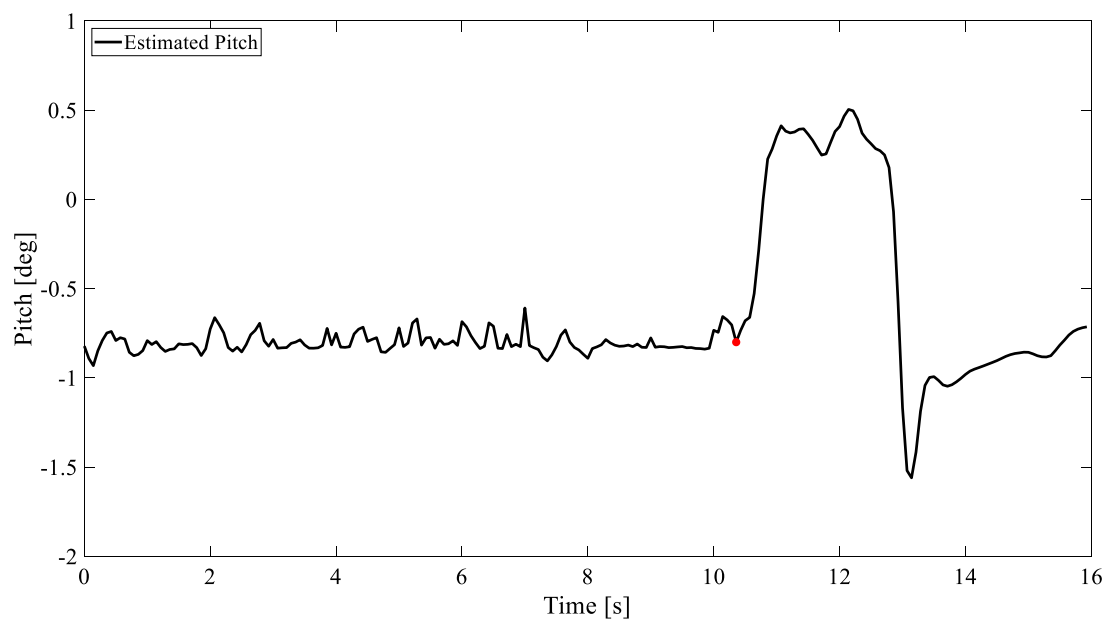


図 5.20 ID565436\_ピッチ角推定結果

図 5.17 より，赤色のプロットで示すように前後加速度の変化が始まるフレームを積分開始するフレームとして選定できていることがわかる．同様に図 5.18 より，イベントが発生する直前で大きくジャークが発生していることがわかる．

図 5.19 のピッチレートを積分して図 5.20 に示すピッチ角を求めた．図 5.27 より，車両が急ブレーキをかけて車体とカメラが沈み込むことによって発生するピッチ角を推定できていることがわかる．

次に，堀場製作所製のドライブレコーダである DR-3031 に記録されたヒヤリハット映像（データ ID:93203）を用いてピッチ角推定を行った．この映像は前述の ID565436 と同様に高速道路上で前方車両が急停車したため，自車両も急ブレーキをかけて停止する追突のヒヤリハット映像である．初期ピッチ角の推定に用いた入力画像と鳥瞰図上に変換した結果をそれぞれ図 5.21 と図 5.22 に示す．図 5.21 より，鳥瞰図上で白線が平行に伸びており，この時のピッチ角  $2.5^{\circ}$  を初期ピッチ角とする．



図 5.21 ID93203\_走行映像



図 5.22 ID93203\_初期ピッチ角を用いた鳥瞰図変換

次に，特徴点のマッチングを用いて走行中のピッチ角を推定する．図 5.23 に，ドライブレコーダに記録された前後加速度，図 5.24 に前後加速度から計算したジャーク，図 5.25 に推定したピッチレート，図 5.26 にピッチ角を示す．

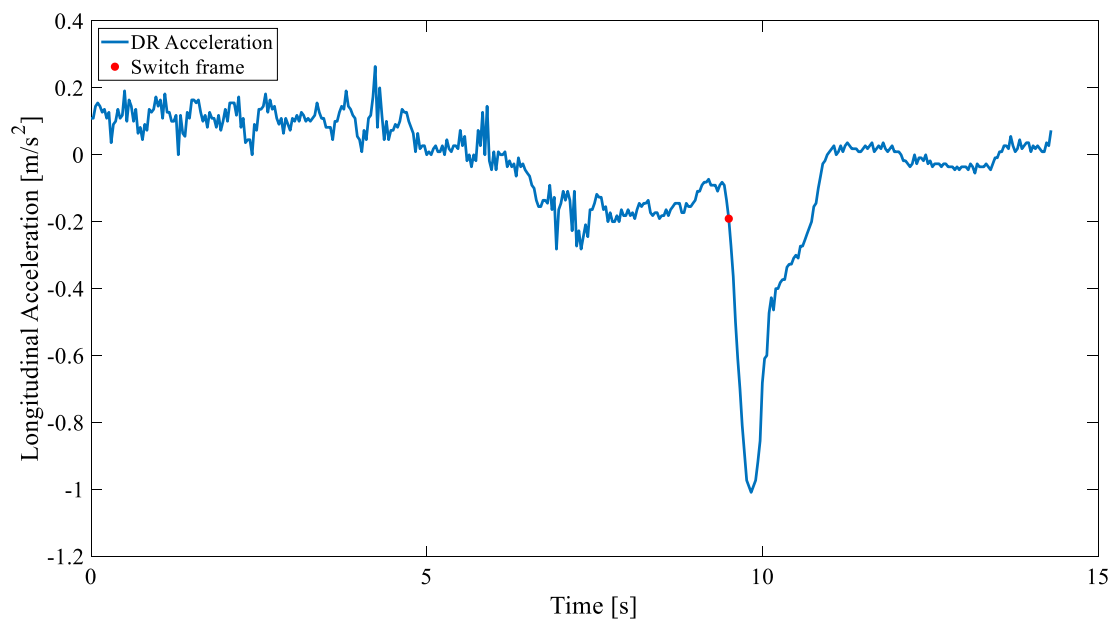


図 5.23 ID93203\_前後加速度

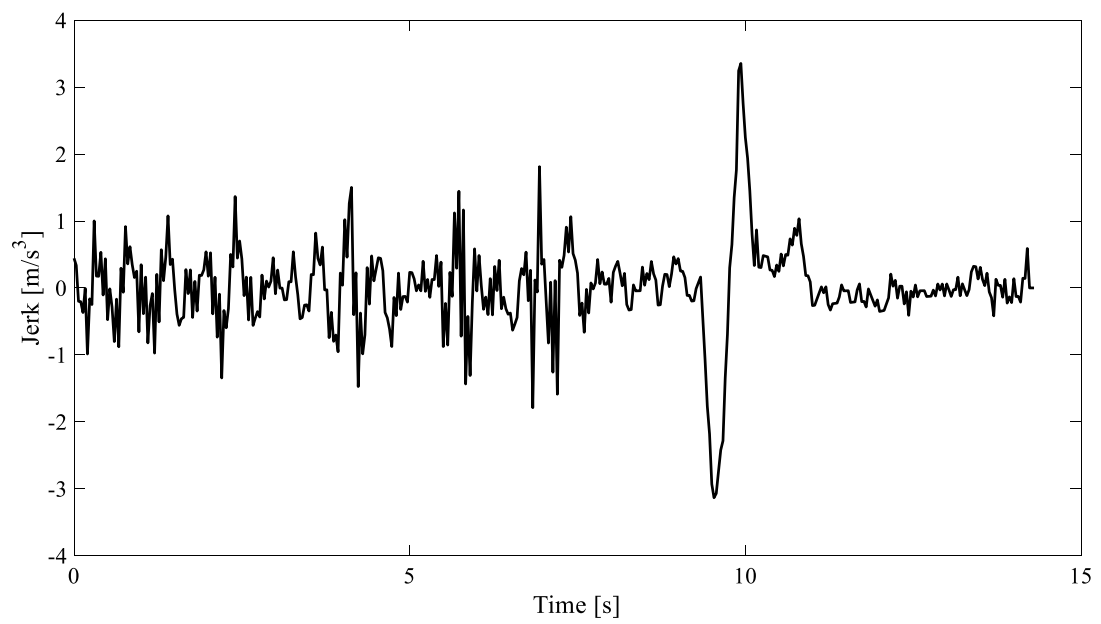


図 5.24 ID93203\_ジャーク計算結果

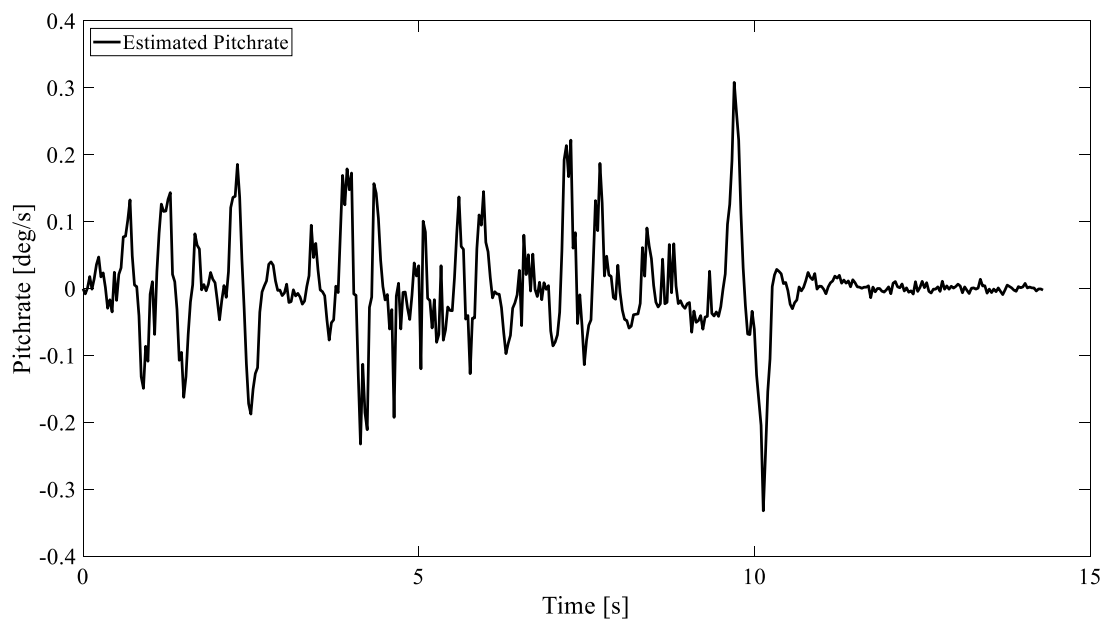


図 5.25 ID93203\_ピッチレート推定結果

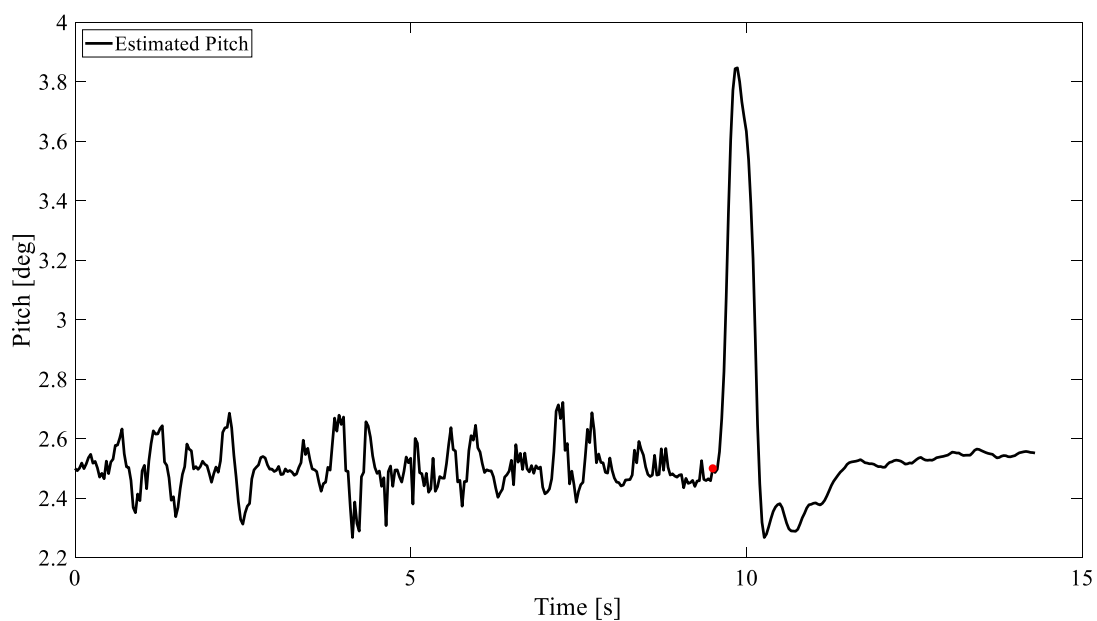


図 5.26 ID93203\_ピッチ角推定結果

図 5.23 より、赤色のプロットで示すように前後加速度の変化が始まるフレームを積分開始するフレームとして選定できていることがわかる。同様に図 5.24 より、イベントが発生する直前で大きくジャークが発生していることがわかる。



図 5.25 のピッチレートを積分して図 5.20 に示すピッチ角を求めた。図 5.26 より、車両が急ブレーキをかけて車体とカメラが沈み込むことによって発生するピッチ角を推定できていることがわかる。

以上から、解像度の違う 2 種類のドライブレコーダの映像を用いて提案手法の有効性を確認することができた。

また、推定したピッチ角を用いてヒヤリハットの対象車両との相対距離を計測した。図 5.27 に自動車と対象車両の距離を示す。相対距離は対象車両が現れたフレーム間のみ計測している。対象車両は 9 秒の時点で完全に停止しているため、相対距離は減少していくはずであるが急ブレーキによってピッチ角が変動する 9 秒から 10 秒付近を見ると、初期ピッチ角を固定して相対距離を計測した場合には相対距離が大きく増加していることがわかる。これは急ブレーキをかけることでカメラが沈み込み、対象車両が遠くの位置にいるように映ってしまうためである。しかし、提案手法により推定したピッチ角を用いてピッチ角の変動を考慮して相対距離を計算することで、相対距離は滑らかに減少しながら前方車両に近づいていることがわかる。ピッチ角を固定した状態とピッチ角補正後の相対距離を比較すると、1.9 m の計測誤差が出ていることがわかる。

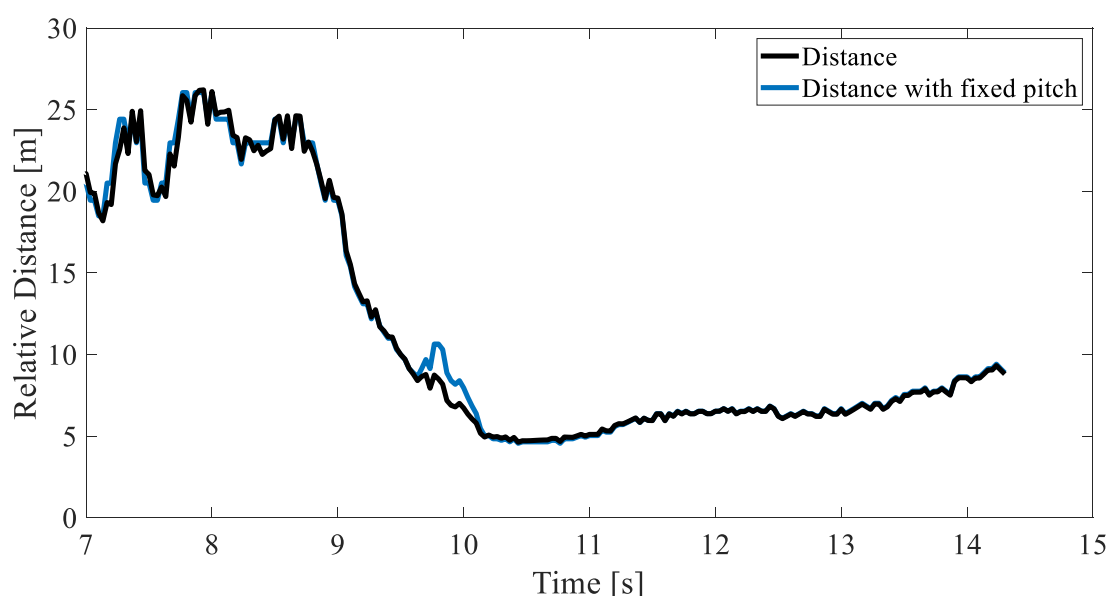


図 5.27 ID93203\_距離計測結果

## 第6章 結言

近年、自動運転の開発と実用化に向けた動きが急速に高まっている。しかし、自動運転車を導入・普及させるためには自動運転車が安全であるということを示すことが必要であり、自動走行システムにおける安全性評価については、バーチャルによるシミュレーションによって評価を行うための安全性評価用のシナリオ作成が必要となる。シナリオ作成は、実際の事故データや走行データからシナリオを構成する様々なパラメータを抽出する必要がある。その中でも、自車両と対象車両との相対距離は、対象車両の挙動や危険度指標を計算するにあたって重要なパラメータである。相対距離は接地点俯角による距離推定手法を用いており、カメラのピッチ角を正確に推定することが相対距離推定の誤差を小さくすることに繋がる。

そこで本研究では、ヒヤリハットデータベースに登録されているドライブレコーダの映像から相対距離計測を正確に行うために、カメラのピッチ角を高精度で推定することを目的とした。ヒヤリハットデータベースには、急ブレーキ等によってピッチ角が変動する映像が多く存在する。このようなピッチ角変化もロバストに推定するために、フレーム間の特徴点をマッチングさせ、移動量を計算することでピッチ角を計算する手法を提案した。また、カメラの初期ピッチ角は、路面上の白線の平行度を計算することによって求めた。また、実験車両を用いて走行実験を行い提案手法の有効性を検証した。さらに、推定したピッチ角をもとに距離計測を行うことで提案手法の有効性と距離計測の精度を検証した。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- ・2フレーム間の特徴点のマッチングにより、ピクセル移動距離からピッチレートを計算する手法を提案した。
- ・ピッチレートをイベント発生直前から積分することで累積誤差を小さくした。積分を開始するフレームの選定は、ドライブレコーダに記録された前後加速度と、ジャークから求めた。
- ・カメラの初期ピッチ角は、ドライブレコーダ映像を鳥瞰図に変換し、白線の検出と平行度を計算することで求めた。

- ・実験車両に搭載されている IMU を用いて走行実験を行い、ピッチ角の推定精度誤差が目標の 0.5 度以内に収まっていることを確認した.
- ・前方車両との相対距離を計測できる Mobileye を実験車両に搭載し、提案手法によって求めたピッチ角を用いて相対距離を推定し、Mobileye と同程度の精度で推定できることを確認した.
- ・実際のヒヤリハットデータベースに登録されているドライブレコーダ映像を用いてピッチ角の推定と相対距離計測を行い、ピッチ角の変動を考慮することで相対距離の計測誤差が小さくなることを確認した.

以上より、本研究で提案した特徴点のマッチングによるピッチ角推定と、白線検出による初期ピッチ角推定手法により、ヒヤリハットデータベースに登録されているドライブレコーダ映像のピッチ角を高精度に推定できることを確認した.

## 参考文献

- [1] 警察庁交通局，統計「平成 30 年中の交通事故死者数について」
- [2] 警察庁交通局，統計「平成 30 年中の交通事故」
- [3] 内閣府，平成 29 年中における高齢運転者による死亡事故に係る分析について
- [4] 官民 ITS 構想・ロードマップ 2019，高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議（2019 年 6 月 7 日）
- [5] 内閣府，官房 IT 総合戦略室，「自動運転レベルの定義を巡る動きと今後の対応」(2016)
- [6] Research project PEAGSUS，Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2016
- [7] 自動走行ビジネス検討会「自動走行の実現に向けた取組方針」Version2.0，国土交通省(2018)
- [8] H.Winner et al., “Safety Assurance for Highly Automated Driving”，TRB Annual Meeting, 2017
- [9] 高度な自動走行システムの社会実装に向けた研究開発・実証事業，国土交通省(2018)
- [10] 近藤 崇之，山村 智弘，北崎 智之，“先行車接近時におけるリスク感の定量化に関する研究”，自動車技術会学術講演会前刷集，No.99-05，2005
- [11] 平岡 敏洋，田中 雅樹，熊本 博光，泉 達也，畑中 健一，“衝突回避減速度を用いたリスク評価指標の提案”，自動車技術会論文集 vol.40 No.2，2009
- [12] 北島 創，丸茂 喜高，平岡 敏洋，伊藤 誠，“衝突回避減速度を用いたリスク評価指標の提案”，自動車技術会論文集 vol.40 No.2，2009
- [13] 平松 真知子，寸田 剛司，小竹 元基，鎌田 実，“潜在リスクに対するドライバの危険感度定量化手法の研究”，自動車技術会学術講演会前刷集 No.85-12 p7-10, 2012
- [14] 平松 真知子，寸田 剛司，小竹 元基，鎌田 実，“一時停止交差点におけるドライバのヒヤリハット・リスク定量化手法の研究”，自動車技術会論文集 Vol.45, No.4, 2014

- [15] G. P. Stein, O. Mano, A. Shashua, “Vision-based ACC with a Single Camera: Bounds on Range and Range Rate Accuracy”, Intelligent Vehicles Symposium 2003, pp. 120-125, 2003.
- [16] Redmon, Joseph, et al., “You only look once: Uni\_ed, real-time object detection”, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 779-788, 2016.
- [17] 武富 貴史, 佐藤 智和, 横矢 直和, “拡張現実感のための優先度情報を付加した自然特徴点ランドマークデータベースを用いた実時間カメラ位置・姿勢推定”, 信学論, J92-D, 8, pp.1440-1451, 2009
- [18] H. Eric Tseng, Li Xu and DavorHrovat, “Estimation of Land Vehicle Roll and Pitch Angles”, AVEC'06, pp. 445-449, 2006.
- [19] Yuichi Sakai, Pongsathorn Raksinchareonsak, Ikuko Shimizu, Masao Nagai, Dirk Ulbricht and Rolf Adomat, “Development of an On-Board Crosswalk Detection for Pedestrian Protection Using a Monocular Camera”, 2012 FISITA world automotive congress, 2012.
- [20] 李 博, 張 曉林, 佐藤 誠, “車間距離計測のための車載単眼カメラを用いたピッチ角推定”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 69, No. 4, pp. J169-J176 (2015)
- [21] Bouguet, J. Y. “Camera Calibration Toolbox for Matlab”, Computational Vision at the California Institute of Technology.
- [22] Heikkila, J., and O. Silven , “A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction.”, IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition., 1997.
- [23] Zhang, Z., “A Flexible New Technique for Camera Calibration”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 22, No. 11, pp. 1330-1334, 2000
- [24] Levenberg, Kenneth , “A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares”, Quarterly of Applied Mathematics. 2 (2), pp.164–168, 1944
- [25] Harris, C., M. Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector”, 4th Alvey Vision Conference, pp. 147-151, 1988.
- [26] Shi, J., C. Tomasi, “Good Features to Track”, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 593-600, 1994.

- [27] Rosten, E., and T. Drummond. “Fusing Points and Lines for High Performance Tracking”, Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Vol. 2 (October 2005): pp. 1508–1511
- [28] S.M. Smith and J.M. Brady , “SUSAN - a new approach to low level image processing”, International Journal of Computer Vision, vol. 23, No. 1, pp. 45-78, 1997
- [29] Alahi, A., Ortiz, R. and Vanderghenst, P.: FREAK: Fast Retina Keypoint, CVPR, pp. 510–517, 2012
- [30] Calonder, M., Lepetit, V., Strecha, C. and Fua, P, “BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features”, ECCV, pp. 778–792, 2010
- [31] Leutenegger, S., Chli, M. and Siegwart, R, BRISK: “Binary Robust invariant scalable keypoints, ICCV, pp.2548–2555, 2011
- [32] Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K. and Bradski, G, “ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF”, ICCV, pp. 2564–2571, 2011
- [33] S.Tuohy, D.O’Cualain, E.Jones, M.Glavin, “Distance Determination for an Automobile Environment using Inverse Perspective Mapping in OpenCV”, ISSC2010, UCC, pp.100-105, 2010
- [34] M. A. Fischler, R. C. Bolles, “Random Sample Consensus : A Paradigm for Model Fitting with Applications to Images Analysis and Automated Cartography”, Communications of the ACM, Vol. 24, pp. 381-395, 1981.
- [35] Mobileye モービルアイ製品-後付けの衝突警報・車線逸脱警報装置-テクノロジー,  
<https://www.imobile.bz/product/technology>

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，テーマ決めから研究の進め方に至るまでご指導を頂いた

毛利 宏 教授

感謝致します。

研究の相談に乗って頂くとともに，適切なアドバイスをして下さった，

今関 隆志 特任教授

研究内容やプログラミング等の技術に関して，適切なアドバイスをして下さった，

趙 開開 特任助教

ヒヤリハットデータベースやドライブレコーダの使用において，アドバイスやご協力頂いた，

大北 由紀子 連携研究員

那住 正樹 連携研究員

にお世話になりました。感謝致します。

そして，毛利研究室，同期の小川君，小山君，品田君に感謝申し上げます。皆と過ごした時間はとても楽しかったです。

後輩の皆様にも感謝申し上げます。輪講や発表におけるアドバイス，研究室の運営など様々な面でお世話になりました。

研究を進めるにあたり，自分の未熟さを知ると同じに多くのことを学ぶことができました。なかなか思い通りにいかず，苦悩することも多くありました。皆様のご協力なしでは，到底ここまで進めることはできませんでした。大変感謝しております。

最後に，私の長きにわたる学生生活を生活面，経済面から支えて下さった家族に心から感謝申し上げます。

協力していただいた皆様への心からの感謝の気持ちとお礼を申し上げたく，謝辞に代えさせていただきます。

2020 年 01 月 31 日 \_\_\_\_\_