

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	ピッチ角推定に基づく車載単眼カメラによる車間距離計測システム
Title(English)	
著者(和文)	李博
Author(English)	Bo Li
出典(和文)	学位:博士（学術）, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9945号, 授与年月日:2015年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:佐藤 誠,長橋 宏,熊澤 逸夫,中村 健太郎,山口 雅浩,張 曉林
Citation(English)	Degree:, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9945号, Conferred date:2015/6/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

博士論文

ピッチ角推定に基づく車載単眼カメラによる
車間距離計測システム

平成27年6月

東京工業大学 総合理工学研究科 物理情報システム専攻
佐藤研究室

指導教官 佐藤 誠 教授, 張 曉林 教授

李 博

概要

近年、交通事故による死傷者数が減少し続けた。その要因は、シートベルトやエアバックなどの衝突安全装備の普及率や着用率が向上して事故の被害が軽減されていること、飲酒運転、速度超過などの悪質な法令違反が減少していることなどが考えられる。今後、交通事故による死傷者数と事故件数の減少へのさらなる努力に向け、より効果的な予防安全や走行支援システムの研究、開発および普及が必要となる。

予防安全や走行支援システムでは自車両周辺他車両、歩行者および道路上の標識を識別した上で三次元位置を計測できる対外環境センシング技術が重要となる。しかしながら、ミリ波レーダーやレーザーレーダーなどの TOF 式センサは、周辺車両や歩行者の位置情報を推定することは可能だが、ターゲットの属性を判断することはできない。ターゲットの位置情報と属性情報の両方を検知できるセンシング手段としては、高度な画像処理アルゴリズムを持つ車載単眼カメラとステレオカメラが挙げられる。本研究では、コストの面においてステレオカメラよりアドバンテージを持っていた単眼カメラに注目する。

単眼カメラは、属性判定可能な点においてミリ波レーダーやレーザーレーダーより優位性を持つが、測距性能が劣る。しかしながら、カメラ単独で構成されるシステムであれば測距能力は不可欠である。また、レーダーとビジョンから構成されるデータフュージョンシステムにおいても、センサ間のターゲットマッチングを実現するためにはカメラの測距能力が必要となる。本研究では、ドライビングシミュレーターを構築し、衝突警報の発生時におけるドライバーの運転特性を統計した。その統計データに基づき、単眼カメラによる距離推定の精度要件および範囲要件を設定した。

単眼カメラを用いた距離推定手法を比較した上で、接地点俯角による距離推定手法を選択した。この手法では、カメラの光軸と車両の走行道路平面の間で形成されたピッチ角の変化が測距精度に大きく影響する。したがって、車載単眼カメラによる測距を実現するため、ピッチ角の推定が必要とされている。

本研究では、車載単眼カメラのみで累積誤差が発生せず、初期姿勢推定可能な高精度なピッチ角推定手法を提案した。当手法はハリスコーナーおよびピラミッド型 Lucas-Kanade 法を用いて、画像を縦方向に領域を分割した上で前後

フレーム間のコーナーのオプティカルフローを検出する．検出されたオプティカルフローに基づき，**Structure from Motion** 法で回転行列および並進ベクトルを推定し，モーションステレオ法を用いて運動パラメータの正当性を判定した上でカメラの自己運動推定を実現している．そして，ガウス・ニュートン法を用いて推定された自己運動パラメータを最適化する．さらに，本研究では並進ベクトルから直接に車載カメラが走行道路平面に対するピッチ角の推定手法について提案した．また，そのピッチ角と回転行列から分解した前後フレーム間のピッチ角レートを移動平均法で合成し，高精度なピッチ角推定を実現している．

本研究では，シミュレーション画像と実画像の両方を用いて検証実験を実施した．高精度な慣性計測装置は体積が大きく，ねじりや曲げの発生しないように車載単眼カメラと固定することは困難である．そこで，予防安全システム開発専用のシミュレーションソフトを用いてピッチ角推定精度を定量的に評価した．さらに，実環境における有効性を評価するため，ミリ波レーダーと実験用車載単眼カメラを同時に装備したテスト車両を用いて実環境のデータを収集した上で，提案手法による距離推定の精度を検証した．

車載単眼カメラを用いて連続画像を処理し，高精度にピッチ角を推定する手法を提案した．さらに，当ピッチ角推定手法に基づき，接地点俯角による距離推定手法を用いて単眼カメラによる距離推定手法を提案した．シミュレーション環境で直接ピッチ角推定の性能を評価し，実環境下において距離推定の有効性を検証した．その結果によって，本提案手法は，近距離・低速度域の予防安全や走行支援システムに適用可能な距離推定性能を有することを確認した．本研究では，天候および路面状況が良好な環境下で提案手法を評価したが，今後の課題として悪環境において有効性を検証する必要がある．また，正確なピッチ角推定を実現できれば，三次元地図上の道路情報を車載カメラ画像に再投影することも可能となるので，将来に自動運転技術への応用も考えられる．

Abstract

In the future, to reduce the number of traffic accidents and the casualties in the accidents, the development and popularization of Active-Safety system and Advantage Drive Assist system will be necessary. To achieve a usable Active-Safety system using a vehicle-mounted monocular camera, range measurement feature with high accuracy is required. In this study, a range measurement method based on high accuracy pitch angle estimation using a vehicle-mounted monocular camera is proposed. And, we propose a method for estimating pitch angle with a non-occurrence of cumulative error. Using this method, the initial pitch angle can be estimated simultaneously. We use the Harris-corner algorithm and the pyramid Lucas-Kanade method to detect the optical flow of feature points between adjacent frames from the monocular camera. With the result of the optical flow detection using Structure from Motion method to estimate the camera ego-motion parameters, including the rotation matrix and the translation vector. And, to optimize the estimated ego-motion parameters using the Gauss-Newton method. In addition, we propose a method of estimating pitch angle relative to the road surface from the translation vector. The pitch angle estimated from translation vector and the pitch angle rate decomposed from the rotation matrix of the adjacent frames are composed using an average transfer method, to achieve the high accuracy pitch angle estimation. Further, the effectiveness of pitch angle estimation using a vehicle-mounted monocular camera is confirmed in simulation environment. And, the accuracy of range measurement based on pitch angle estimation is evaluated with real world image data. By experiments, that the performance of the proposed method is applicable for Active-Safety system and Advantage Driver Assist system in the low speed range, is confirmed.

目次

第 1 章

序論	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究背景	8
1.3 研究目的と概要	13

第 2 章

システム開発に向けた技術要件分析	16
2.1 距離推定の要件分析	16
2.2 ピッチ角推定の必要性	22

第 3 章

ピッチ角推定に基づく車間距離計測システムの提案と開発	25
3.1 処理プロセスの全体	25
3.2 特徴点の抽出手法	26
3.3 オプティカルフローの検出手法	29
3.4 Structure from Motion 法	30
3.5 モーションステレオ法	34
3.6 自己運動パラメーターの最適化	36
3.7 回転行列を用いたピッチ角レート推定	37
3.8 並進ベクトルを用いたピッチ角推定	38
3.9 移動平均法を用いたピッチ角合成	39
3.10 接地点俯角による距離推定	42

第 4 章

ピッチ角推定に基づく車間距離計測システムの評価	44
4.1 実験環境	44
4.2 シミュレーション画像によるピッチ角推定パラメーター比較実験	46
4.3 シミュレーション画像によるピッチ角推定ロバスト性実験	50
4.4 実環境における距離推定検証実験	62

第 5 章

結論	68
----------	----

5.1 結論	68
5.2 今後の展望	69
謝辞	70
参考文献	71
付録	74
研究業績	78

第 1 章

序論

本章では、本研究の動機を述べ、研究背景として必要される予防安全技術の現状、単眼カメラによる距離推定の従来手法などを解説する。さらに、本研究の目的と各章の概要を述べる。

1.1 研究動機

本節では、交通事故の現状、交通事故の防止策および法規の動向を紹介した上で、予防安全技術の現状を述べる。

1.1.1 交通事故の現状

現代社会において、交通道路システムは不可欠な社会基盤として人々の生活を支えるが、その一方で交通事故や交通渋滞など様々な社会問題も存在している。その中で最も身近で、かつ命にも関わる重大な問題が交通安全問題である。WHO（世界保健機関）によれば、世界範囲内で毎年 100 万を超える人が交通事故によって犠牲した。

日本においては、図 1.1 に示すように平成 25 年中の交通事故による死者数は、4,373 人で 13 年連続の減少となり、交通事故の発生件数及び負傷者数も減少した。その要因は、安全ボディ、シートベルトやエアバックなどの衝突安全装備の普及率や着用率が向上して交通事故の被害が軽減されていること、飲酒運転、速度超過などの悪質な法令違反が減少していることなどが考えられる。一方、平成 23 年度から 27 年度までの 5 年間を計画期間とする第 9 次交通安全基本計画[1]では、交通事故のない社会を目指して、平成 27 年までに 24 時間死者数を 3000 人以下にすることを目標とした。平成 25 年中の交通事故件数と死者数は連続減少したものの、交通安全基本計画で設定した目標に達成していない。交通事故による死傷者数と事故件数の減少へのさらなる努力に向け、交通安全基本計画の目標を実現するためには、より効果的な予防安全技術と走行支援技術

の研究，開発および普及が必要となる。

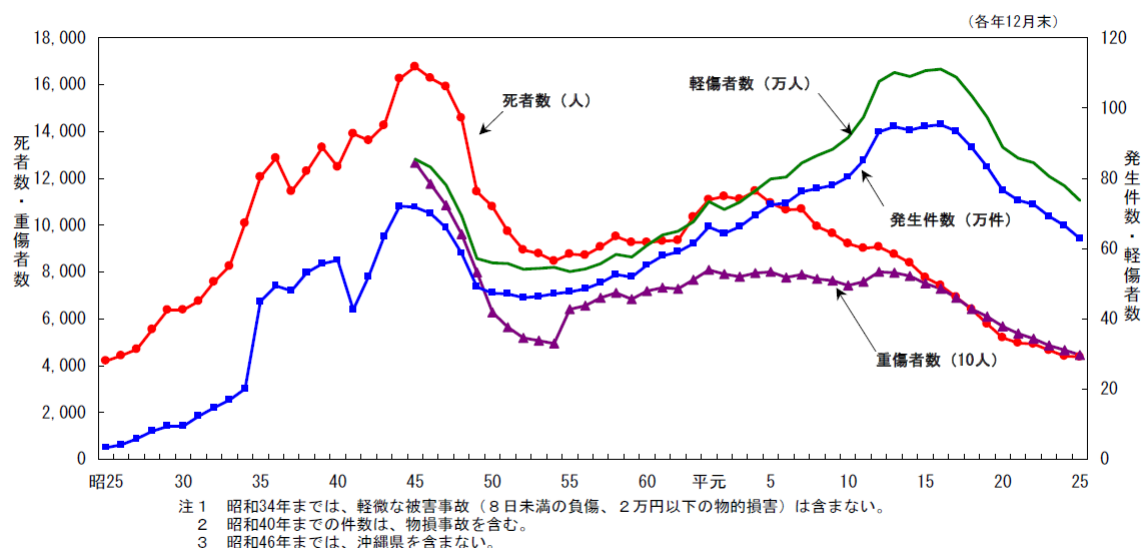


図 1.1 : 交通事故発生状況の推移[2]

日本の交通事故件数を事故類型別に分析すると，追突事故と出会い頭衝突事故の両方で事故全体の 6 割を占めている．さらに，事故全体の 8 割以上は車両相互事故が占めている．また，高速道路における交通事故件数を事故類型別に統計したデータによって，高速道路で発生した車両相互事故が事故全体の 9 割近くを占めており，追突事故が全体の 7 割を占めている[2]．そのため，追突事故の防止を目的とした衝突警報システムや自動緊急ブレーキシステムなどの予防安全技術が効果的に交通事故件数を削減できると予想される．

20 世紀 90 年代末から，中国の交通事故の総件数および死傷者数が世界最大になった．図 1.2 に示すように，2001 年から 2010 年までの 10 年間の国別年間死者数に参考すれば，中国の交通事故死者数は同時期にアメリカの約 2 倍で，日本の約 12 倍になる．また，同時期の中国の一万台自動車保有台数あたりの死亡率は 7.99 で，アメリカの約 5 倍，日本の約 10 倍である[3]．

図 1.3 に示すように，2012 年において中国の交通事故による死者数は約 6 万人であり，負傷者数 22.4 万人に上った．中国の高速道路における交通事故で，追突による事故が多発している．疲労運転，速度超過などが死亡事故の原因になる．

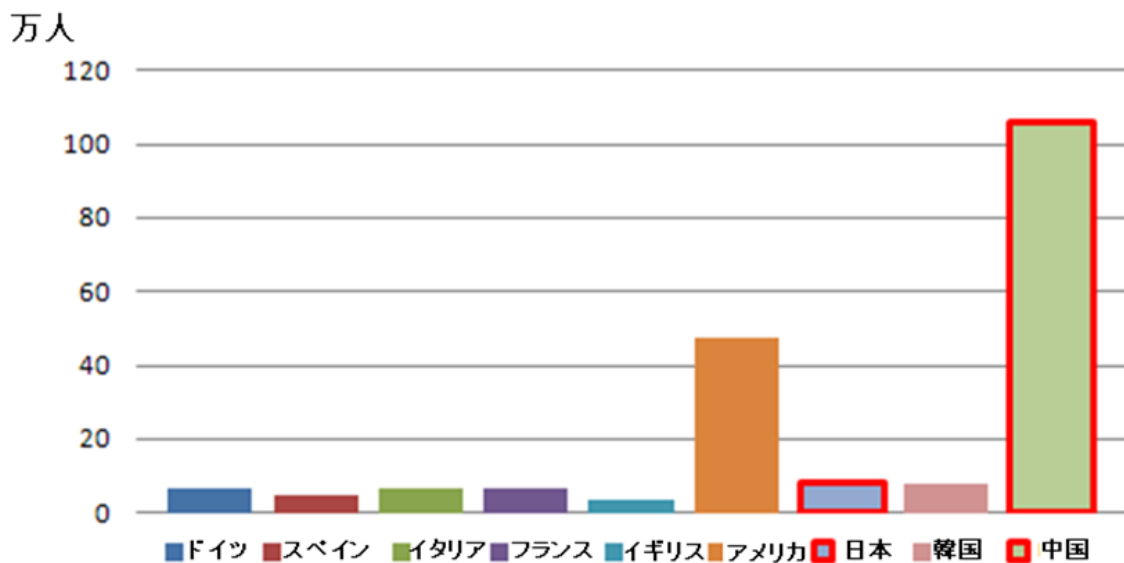


図 1.2：国別年間死者数比較[3]

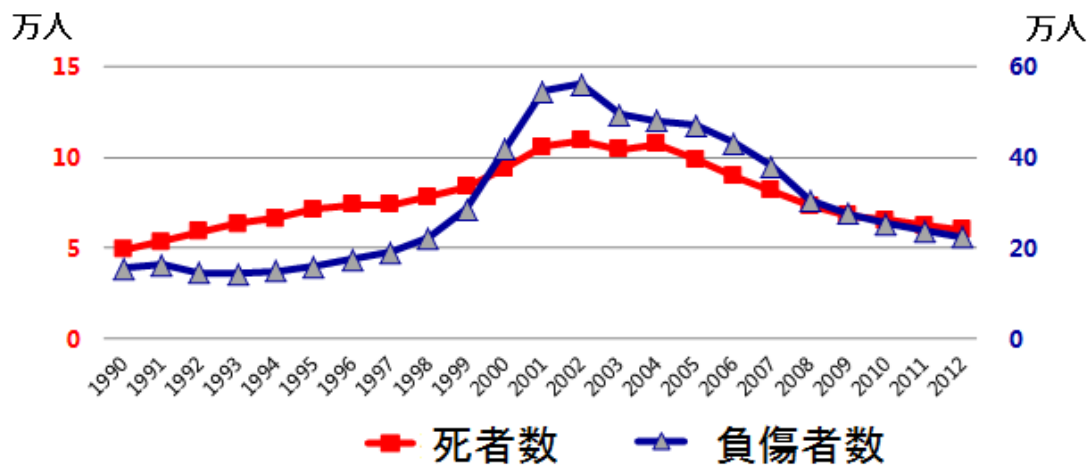


図 1.3：中国交通事故死者数および負傷者数[3]

図 1.3 に示すように、近年、中国においてはシートベルト、エアバッグなどの衝突安全装置が幅広く応用され、交通法規の整備や交通知識の普及によって交通事故の死者数と負傷者数が減少傾向になる。だが、日中両国の交通事故死者数の前年比減少率はわずかにとどまった。その原因に追求すると、衝突安全技術の応用、交通法規と交通常識の普及による効果が徐々に限界に達し、ボトルネック現象が発生した。より安全・安心な交通社会を実現するため、日本にも中国にも予防安全技術の開発、応用と普及が必要となる。

1.1.2 交通事故の防止

図 1.4 に示すように、各類型の交通事故の中で側面衝突と追突衝突の割合が最大である。その中、88%の追突事故がドライバーの集中力低下や追従距離近すぎる事が原因になっている。

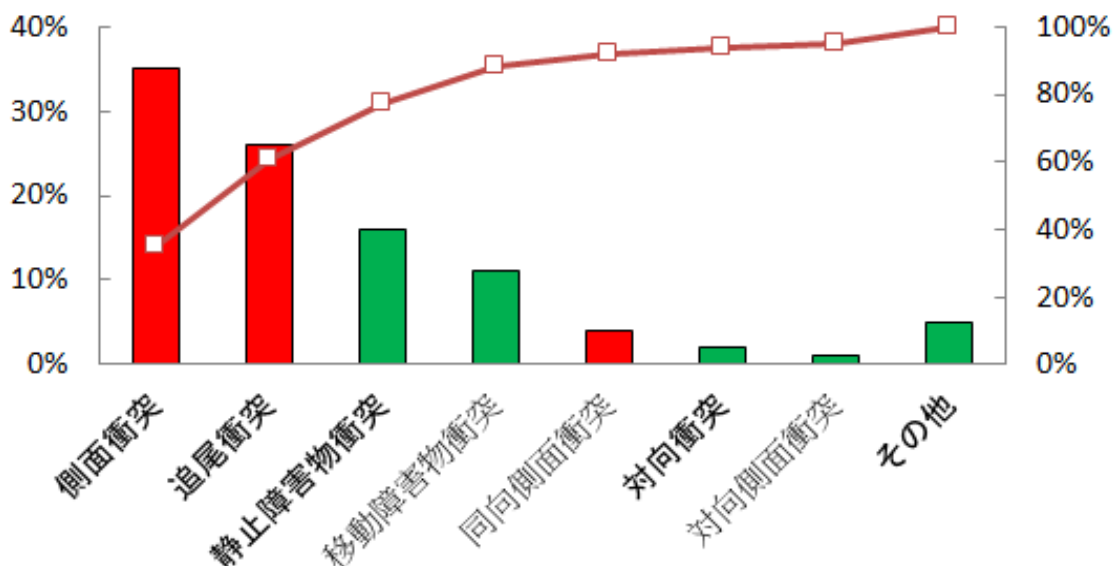


図 1.4： 交通事故類型別比例

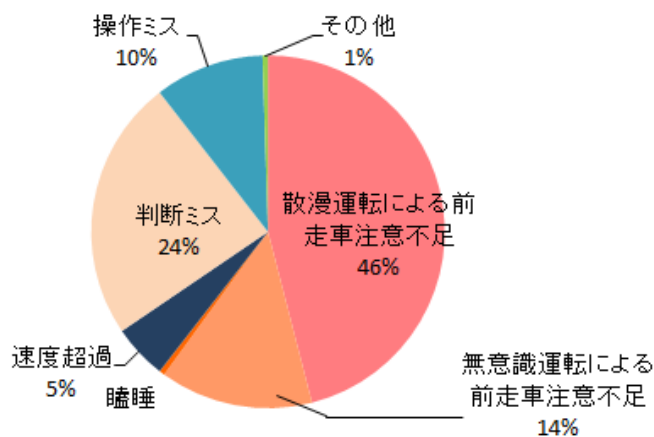


図 1.5：交通事故の原因分析

図 1.5 に示すように、交通事故原因を分析すると、散漫運転や無意識運転による前走車注意不足による事故が全体の 6 割を占めている。そのため、衝突警報システムなどの警報機能に基づいた早期警報機能を利用して、この原因による交通事故を抑制することが可能である。また、24%の交通事故はドライバーの

判断ミスによって発生するものである。このような事故に対して、自動緊急ブレーキなどの制御介入機能を利用して防止することが可能である。

1.1.3 法規の動向

図 1.6 に示すように、全世界範囲内で欧州による Euro-NCAP とアメリカ国家道路交通安全局による US-NCAP が積極的に予防安全技術の評価実験を推進し、世界の先頭に立った。Euro-NCAP は 2013 年から低速時の自動緊急ブレーキシステム（AEB-City）と中高速時の自動緊急ブレーキシステム（AEB-Urban）の評価を開始した。低速時の自動緊急ブレーキシステムが乗員保護範疇に設定され、評価点数は 3 ポイント（乗員保護評価点数全体の 7.9%を占める）である。中高速時の自動緊急ブレーキシステムが安全補助範疇に設定され、評価点数は 3 ポイント（安全補助評価点数全体の 23.1%を占める）になる。それ以外、車線逸脱警報システム（LDW）、スピードアシストシステム（ISA）の評価も行う。

日本の J-NCAP は欧米の後に続いて急速に予防安全性能アセスメントの評価要件を整備し、予防安全技術の発展を後押しした。J-NCAP は車線逸脱警報システムだけではなく、車線維持支援システム（LKA）の評価も行った。中国の C-NCAP も 2018 年から自動緊急ブレーキシステム、衝突警報システムと車線逸脱警報システムの評価を追加する予定となる。

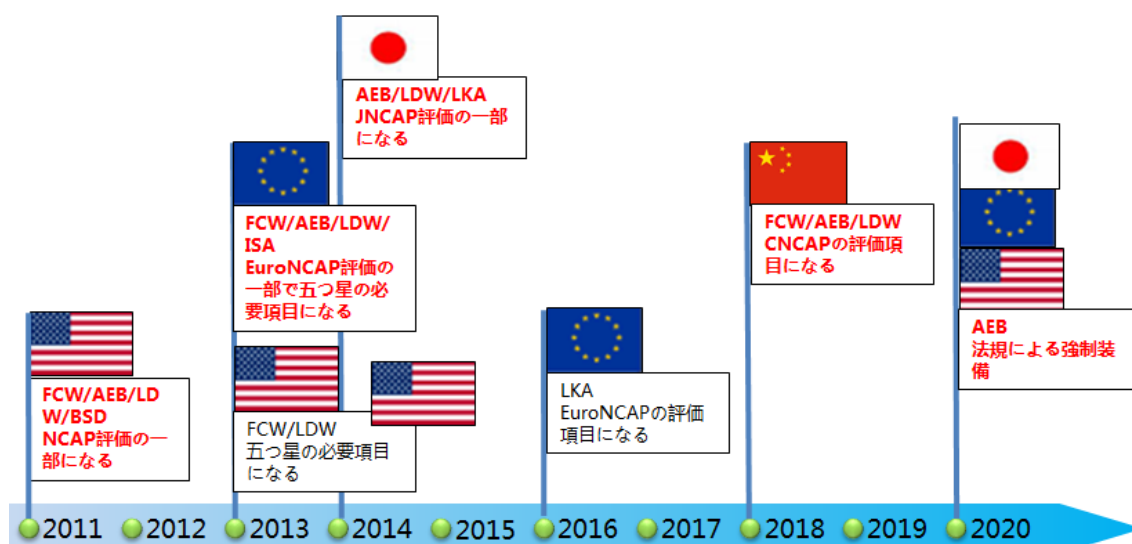


図 1.6： 全世界範囲内の NCAP 動向

1.1.4 予防安全技術の現状

近年、知能化技術とマイクロエレクトロニクス技術の急速な発展と BRICS などの新興国の自動車消費市場の拡大により、自動車産業には巨大な変化が行っている。下述の三つの変化は取分け目立った。

- ・電気化：BRICS をはじめとする新興国市場の拡大により、全世界の自動車保有量が急速に拡大した。伝統的な化石燃料車のエネルギー確保が難しくなった。そのため、電気自動車の普及が世界中から期待されている。

- ・知能化：上述に紹介したとおり、交通事故が社会問題になり、衝突安全技術のみで事故の損害を防ぐことの限界が見えた。より安全・安心な交通社会を構築するため、対外環境センシング技術に基づいた予防安全技術が必要となる。また、予防安全技術は究極的な安全交通手段である自動運転車の基礎でもあるため、産業界から注目されている。

- ・インターネット化：前世紀 90 年代からマルチメディア技術と近年に普及されたナビゲーションシステムにより、自動車が単純な移動手段から情報社会の中に不可欠な移動端末に進化した。将来、自動車のインターネット化に伴い、ビッグデータ、Deep Learning などの最先端技術も自動運転の開発に応用できる。

また、電気化技術と知能化技術は互いに推し進める。様々な電気製品の進化をよく観察すれば分るように、常に製品の電気化とともに製品の知能化も行っていた。したがって、未来数年には自動車の電気化と予防安全技術を含めた知能化が相乗効果で急速に発展することが予測される。

図 1.7 に示すように、予防安全技術の分類は、作動段階の衝突確率に基づいて安全保持機能、危険警報機能と自動操作機能に分類された。安全保持機能には、アダプティブクルーズコントロール (ACC)、車線維持支援 (LKA) などが挙げられる。危険警報機能には、衝突警報 (FCW)、車線逸脱警報 (LDW) と車線変更警報 (LCW) などが挙げられる。自動操作機能には、自動緊急ブレーキ (AEB) と歩行者緊急ブレーキ (AEB-P) が挙げられる。

表 1.1 に示すように、世界各国の自動車メーカーが積極的に各種の予防安全技術を開発し、自社ブランドと安全戦略を確立している。中には、「2020 年までに完全自動運転自動車を実現すること」と宣言する自動車メーカーもいった。2020 年まで自動運転自動車を実現することが困難だが、未来数年に、予防安全

技術は急速に普及することが予想される。

以上の理由から、本研究では交通事故数を減少するため、衝突警報や自動緊急ブレーキなどの予防安全システムの開発と普及が必要と考えた。

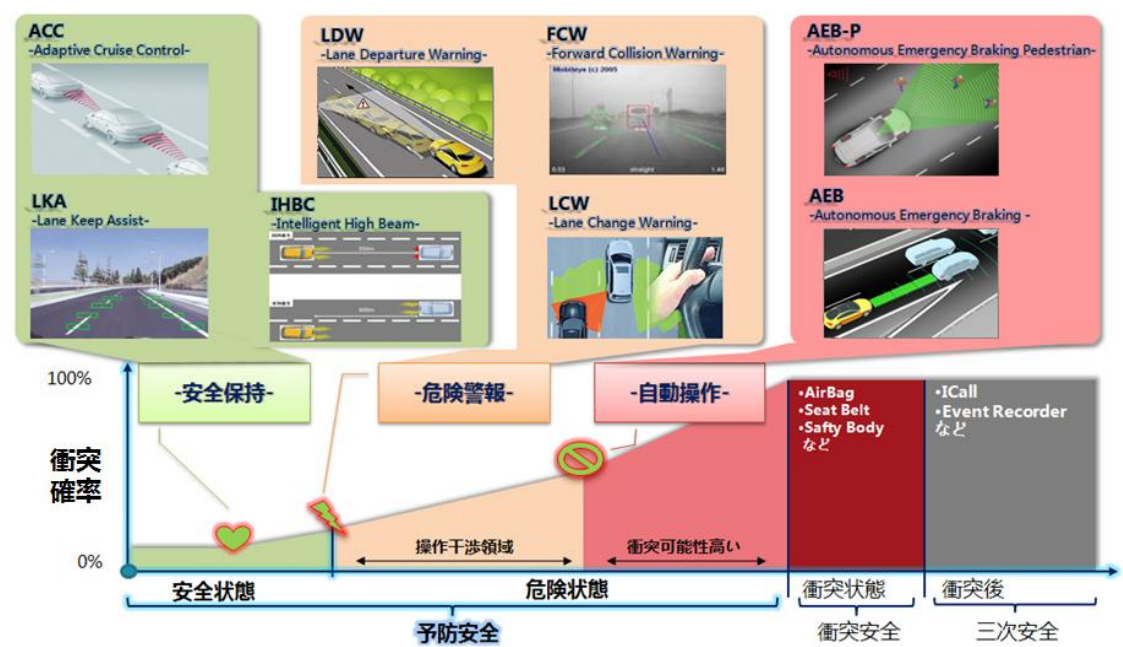


図 1.7：予防安全技術の分類

表 1.1：世界各社が開発した予防安全技術

	EyeSight Ver2 @ Subaru	Crown Athlete @Toyota	SafetyPackage @ Volvo	Driver-assist @Daimler	GC-9 @GEELY
衝突警報	○	○	○	○	○
車線逸脱警報	○	○	○	○	○
歩行者警報	○		○	○	
スマートハイビーム コントロール			○	○	
速度制限補助					
車線保持補助	○	○		○	
アダプティブクルーズ コントロール	○	○	○	○	○
緊急自動ブレーキ	○	○	○	○	○
歩行者緊急ブレーキ	○		○		
ナイトビジョン	-	-	-	-	-
					

1.2 研究背景

本節では、本論文で必要となる背景知識について説明する．単眼カメラによる距離推定とピッチ角推定の必要性を理解するため、従来の対外環境センシング技術、単眼カメラによ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 センシング技術の比較

予防安全システムでは自車両周辺他車両、歩行者および道路上の標識を識別した上で測距できる対外環境センシング技術が重要となる．表 1.2 に示すように、対外環境センサは波長によって異なるタイプのものがある．ミリ波を利用したものは、基本的に TOF (Time Of Fly) 式の距離センサとしてのミリ波レーダーになる．近赤外線と遠赤外線を利用したセンサは基本的に、TOF 式のレーザーレーダーと夜間補助機能を実現するための赤外線カメラがある．可視光カメラは、他のセンサより多くの機能を実現できるポテンシャルを持つ．

表 1.2：センシング技術の比較

100M	1G	10G	100G	1T	10T	100T	1P		
		ミリ波			遠赤外線	近赤外線	可視光		
1m	10cm	1cm	1mm	100μm	10μm	1μm	100nm		
	ミリ波レーダー			遠赤外線カメラ		近赤外線		可視光カメラ	
	24GHz	77GHz 機械式	77GHz 電子式	単眼	ステレオ	カメラ	レー ダー	単眼	ステレ オ
衝突警報		√	√					√	√
低速緊急ブレーキ		√	√				√	√	√
中速緊急ブレーキ		√	√					√	√
歩行者警報				√	√			√	√
歩行者緊急ブレーキ								√	√
アダプティブクルーズコントロール		√	√					√	√
車線逸脱警報								√	√
車線保持補助								√	√
速度制限補助								√	√
スマートハイビームコントロール								√	√
ナイトビジョン				√	√	√			
車線変更警報	√								

夜間専用の赤外線センサを除き、汎用性の高い可視光カメラと TOF 式センサの特性を分析する．表 1.3 に示すように、ミリ波レーダーおよびレーザーレーダー

一は、周辺車両および歩行者の距離情報を推定することはできるが、車両、歩行者や障害物などのターゲット属性を識別することはできない。距離情報と属性情報の両方を捉えるセンシング手段としては高度な画像処理を持つステレオカメラと単眼カメラが挙げられる。単眼カメラは HoG[4]などの特徴点および Adaboost[5]などの学習手法でターゲット属性を判定可能な点においてミリ波レーダーなどに比べて優位性を持つが、測距性能は劣る。しかしながら、カメラ単独で構成されるシステムであれば測距能力が不可欠である。また、レーダーとビジョンから構成されるデータフュージョンシステムにおいても、ターゲットマッチングを実現するためにはカメラの測距能力が必要となる。

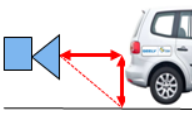
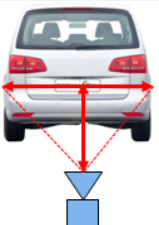
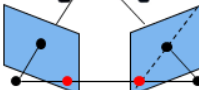
表 1.3：可視光カメラとレーダーの特性分析

	距離推定	TTC	相対速度	物体属性			車線	灯火	標識	霧	雨	雪
				車両	二輪車	歩行者						
ステレオカメラ	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	×	△	△
単眼カメラ	○	○	△	○	○	○	○	○	○	×	△	△
レーザレーダー	◎	○	△	○	△	△	×	×	×	×	×	×
ミリ波レーダー	◎	○	○	○	×	×	×	×	×	○	○	○

1.2.2 単眼カメラを用いた距離推定法

表 1.4 に示すように、単眼カメラを用いて距離計測機能を実現するため、「接地点俯角による距離推定法」、「平均車幅法」、「面積拡大率法」と「モーションステレオ法」四つの手法がある。

表 1.4：単眼カメラによる距離推定手法の拘束条件

	接地点俯角による距離推定	平均車幅法	面積拡大率法	モーションステレオ
処理手法				
拘束条件	ピッチ角による推定誤差が発生	車幅のばらつきによる推定誤差	-	ターゲットは静止物体に限定
計測可能な物理量	距離	距離	衝突時間	距離

Dagan らは画像上ターゲットのスケール変化率から TTC (Time to Collision, 衝突時間) を直接推定できる手法[6]を提案したが, アダプティブクルーズコントロール (Adaptive Cruise Control) システムなどには TTC ではなく距離情報が必要とされる. 図 1.8 に示すように, 自車両と前走車間の距離が d_0 から d_1 に変わった場合, 前走車が自車両に取り付けた単眼カメラへの投影上の任意两点間の長さも l_0 から l_1 へ変化する. 図 1.9 に示すように, 前走車上の二点の実際の幅 w , 車間距離 d , 画像上の投影の二点間隔 l と焦点距離 f の関係は式(1)に示すようになる.

$$\frac{l}{f} = \frac{w}{d} \Rightarrow l \cdot d = f \cdot w \quad (1)$$

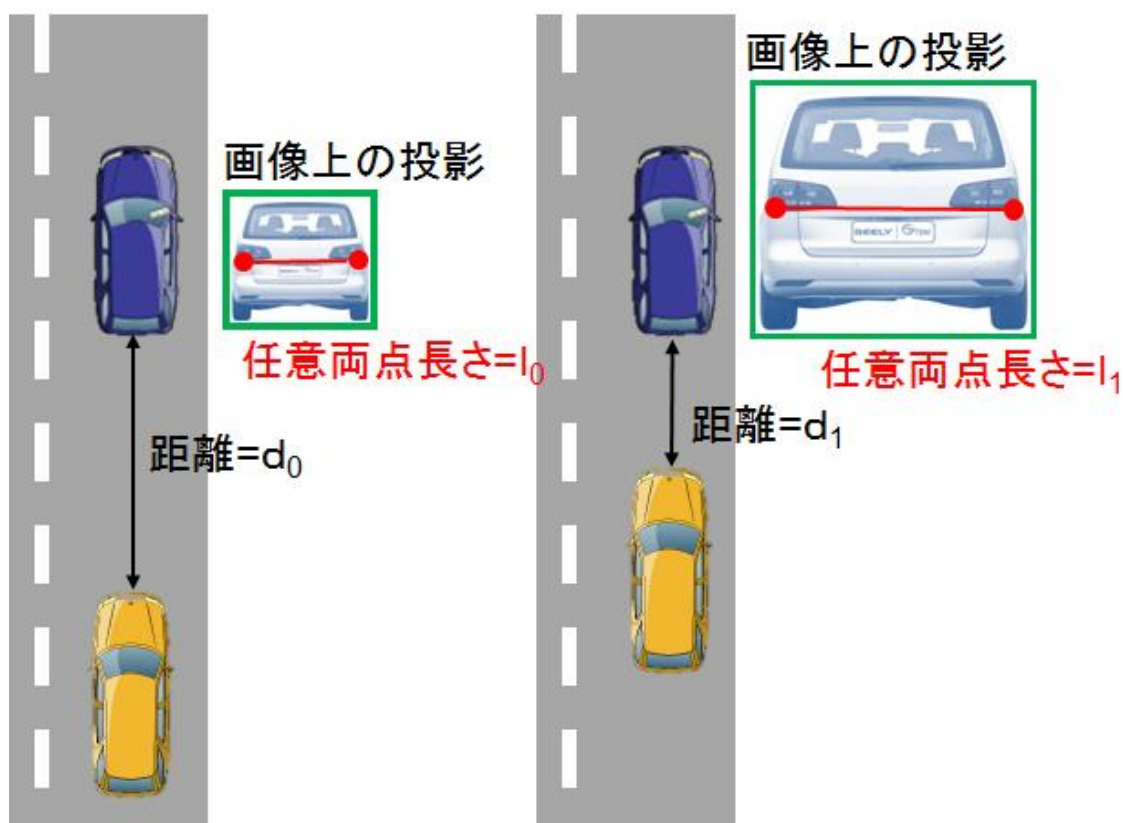


図 1.8 : 画像上前走車のスケール変化

従って, 式(2)に示すように, スケール変化率から TTC (Time to Collision, 衝突時間) を直接推定することが可能である. $\angle S$ は前後両フレーム間においての前走車投影の拡大率であり, v は自車両と前走車間の相対速度である. TTC は,

自車両と前走車両の相対距離を相対速度で割った結果である．

$$\begin{aligned}
 l_1 d_1 &= l_0 d_0 \\
 \Rightarrow \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} &= \frac{d_1 + v \cdot \Delta t}{d_1} \\
 \Rightarrow 1 + \Delta S &= 1 + \frac{\Delta t}{d_1/v} \\
 \Rightarrow TTC &= \frac{\Delta t}{\Delta S}
 \end{aligned} \tag{2}$$

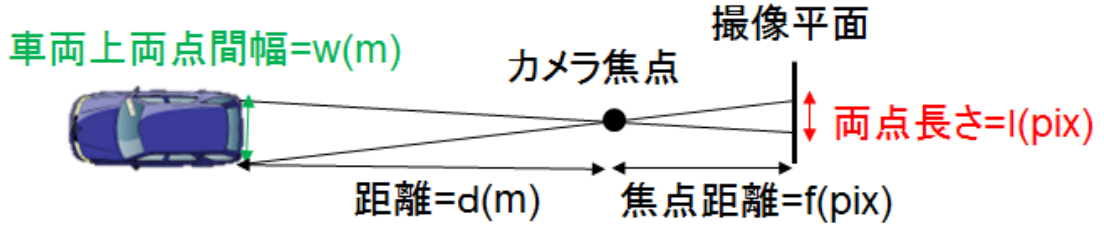


図 1.9： スケール変化と距離の関係

また，歩行者や車両などの平均身長や平均車幅を利用して距離を推定する方法も提案されている．図 1.9 に示すように，車両幅が既知であれば式(1)により車間距離 d が求められる．だが，対象歩行者または車両の身長や車幅が事前に設定した平均値から大きく外れると測距性能が極端に低下する場合もある．

モーシヨンステレオ[7]を用いて車載単眼カメラで測距を実現する研究[8]も報告されているが，測距可能な拘束条件として対象物が静止物である必要があり，車両などの移動物体に対して正確に測距できないという問題が存在する．測距対象となる移動物体と同距離の静止物体を参照物としてモーシヨンステレオによる測距手法がその問題を解決したものの，同距離の静止物体の探索は困難である．式(3)と図 1.10 に示すように，静止物体の奥行き Z をモーシヨンステレオで推定することが可能である．

$$Z = \frac{|t|}{|p_1| \sin \omega} = \frac{t \cdot (((p_1 + Rp_2) \times t) \times Rp_2)}{p_1 \cdot (((p_1 + Rp_2) \times t) \times Rp_2)} \tag{3}$$

$\cos \gamma$

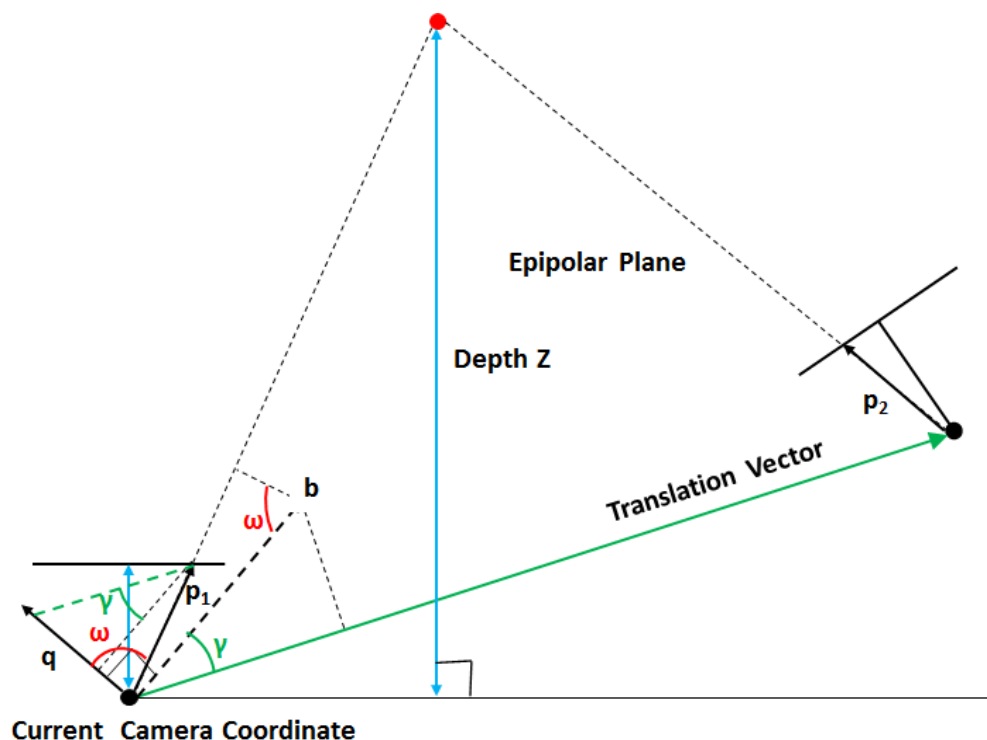


図 1.10 : モーションステレオを用いた奥行き推定

図1.11と式(4)に示すように, Steinらは接地点俯角による距離推定手法[9]を提案した. D は車間距離, H_c はカメラ高さを示す. HoG[4]などの特徴検出手法およびAdaboost[5]などの学習手法で車両を検出し, 検出枠の最下端から画像中心までの画素数で俯角 α を推定することが可能である. ピッチ角 β は, カメラの光軸と車両が走行する道路平面間の角度である. 当手法では, ピッチ角 β の変化が測距精度に大きく影響する. 従って, 車載単眼カメラによる測距を実現するため, ピッチ角の推定が必要とされている.

$$D = \frac{H_c}{\tan(\alpha + \beta)} \quad (4)$$



図 1.11 : ピッチ角が距離推定に対する影響

「平均車幅法」, 「面積拡大率法」と「モーションステレオ法」三つの手法の制約条件を観察すれば, 実際の道路交通環境下で解決できるものではないと考えられる. 本研究では, 「接地点俯角による距離推定法」を選び, 単眼カメ

ラによる距離推定を実現する．そのため，測距精度に対するピッチ角の影響を減らすため，高精度ピッチ角推定手法は不可欠である．

1.3 研究目的と概要

1.3.1 研究目的

車載単眼カメラを用いた車間距離計測を実現するためには高精度なピッチ角推定が必要となる．そのため，本研究では車載単眼カメラのみで累積誤差が発生せず初期姿勢推定可能な高精度なピッチ角推定手法を提案し，ピッチ角推定に基づく車載単眼カメラによる車間距離計測手法の確立を目的としている．

1.3.2 研究概要

第1章 序論の概要

本章では，まず研究背景を述べ，続いて本研究の対象とする予防安全システムおよび走行支援システムの分類とコア技術を明記した．

世界各国における交通事故の現状，交通事故の防止策，予防安全関連法規の動向を紹介した上で，ステレオカメラ，単眼カメラ，ミリ波レーダー，レーザーレーダーを含めた環境センシング技術の重要性を述べた．また，予防安全システムおよび走行支援システムに応用した各センシング技術の優劣について分析し，それぞれの特徴を示した．さらに，予防安全システムの構成について議論し，ミリ波レーダーとビジョンのデータフュージョンに基づいた衝突軽減自動ブレーキシステムにおいても，車載単眼カメラのみで構成した衝突警報システムにおいても車載単眼カメラによる車間距離計測機能が不可欠であることを示した．車載単眼カメラによる距離推定の四つの手法を挙げて，それぞれの手法の制約条件を明確にした．実用環境を考慮し，接地点俯角による距離推定手法の選択した理由を述べた．その上で，車載単眼カメラのみで高精度なピッチ角推定手法を確立し，ピッチ角推定に基づく車載単眼カメラによる車間距離計測手法の確立を目的としていた．

第2章 システム開発に向けた技術要件分析の概要

第2章では，本研究の目的に基づいて技術要件を分析し，それに達成するた

めの従来技術の問題点を述べた。

技術要件を明確にするため、ドライビングシミュレーションシステムを構築した。六自由度のドライビングシミュレーターで異なるデザインの衝突警報ヒューマンマシンインタフェースに対するドライバーの反射時間およびブレーキシステムの作動時間のデータを収集した。そのデータに基づき、車載単眼カメラの距離計測範囲要件と精度要件を設定した。さらに、距離範囲要件および距離精度要件に満足するためには、高精度なピッチ角推定が必要となることを示した。それに対して、ピッチ角推定の従来手法の問題点を述べた上で、ピッチ角の誤差が接地点俯角による距離推定の精度に対する影響を示した。

第3章 ピッチ角推定に基づく車間距離計測システムの提案と開発の概要

第3章では、ピッチ角推定に基づく車間距離計測システムの原理および全体の処理フローを示し、アルゴリズムに構成する各手法について説明した。

車載単眼カメラのみで累積誤差が発生せず初期姿勢推定可能な高精度なピッチ角推定手法を提案した。当手法はハリスコーナーおよびピラミッド型 Lucas-Kanade 法を用いて、画像を縦方向に領域を分割した上で前後フレーム間のコーナーのオプティカルフローを検出する。検出されたオプティカルフローに基づき、Structure from Motion 法で回転行列および並進ベクトルを推定し、モーションステレオ法を用いて運動パラメーターの正当性を判定した上でカメラの自己運動推定を実現している。そして、ガウス・ニュートン法を用いて推定された自己運動パラメーターを最適化する。さらに、本研究では並進ベクトルから直接に車載カメラが走行道路平面に対するピッチ角の推定手法について提案した。そのピッチ角と回転行列から分解した前後フレーム間のピッチ角レートを移動平均法で合成し、高精度なピッチ角を推定する。最後に、推定された高精度なピッチ角を用いた距離計測の実現について述べた。

第4章 ピッチ角推定に基づく車間距離計測システムの評価の概要

第4章では、シミュレーション画像と実画像の両方を用いて検証実験を実施した。高精度な慣性計測装置は体積が大きく、ねじりや曲げの発生しないように車載単眼カメラと固定することは困難である。そこで、走行支援システム開

発専用のシミュレーションソフトを用いてピッチ角推定精度を定量的に評価した。さらに、実環境における有効性を評価するため、ミリ波レーダーと実験用車載単眼カメラを同時に装備したテスト車両を用いて実環境のデータを収集した上で、提案手法による距離推定の精度を検証した。

第 5 章 結論の概要

第 5 章では、第 2 章から第 4 章で得られた成果を要約し、本論文を総括するとともに、今後の展望と課題について述べ、本論文の結論とする。

第2章

システム開発に向けた技術要件分析

本章では、ピッチ角推定に基づく車載単眼カメラによる車間距離計測システムを開発するための技術要件を分析する。ピッチ角推定の必要性についても述べた。

2.1 距離推定の要件分析

本節では、単眼カメラによる車間距離推定の範囲要件および精度要件を得るため、ドライバーのブレーキ操作特性を解説し、衝突警報時のドライバーの反応時間と操作時間について評価した。

2.1.1 ドライバーのブレーキ操作特性

自動車の停止距離 S は、実際に制動力が作用して車両を停止させる制動距離と、ドライバーの反応時間（踏替え時間）やブレーキの操作時間（踏み込み時間）による空走距離を含んだものである。 t_0 は反応時間と操作時間を合わせた空走時間、 V_0 は制動時の初速度、 a は減速度の平均値とすると、停止距離 S は、

$$\begin{aligned} S &= t_0 \cdot V_0 + V_0^2 / 2a \\ t &= t_0 + V_0 / a \end{aligned} \quad (5)$$

で表される[10]。図 2.1 に示す。

車両の減速度 a が大きければ、停止距離は相応に短縮する。だが、ブレーキが出しうる減速度の上限値は、路面とタイヤ間の摩擦係数によって決められる。平坦な路面で評価実験を通じて、一般的なドライバーのブレーキ特性を測定した。一般的なドライバーの減速度範囲は、 $0.38g$ ($3.6m/s^2$) から $0.8g$ ($7.9m/s^2$) までになる。衝突警報が発生した場合、ドライバーのブレーキ操作は普段の操作より緊急なため、より大きな減速度を出せる傾向にある。したがって、本研究では制動距離を計算するには、減速度範囲の上限値である $0.8g$ の減速度を利用する。

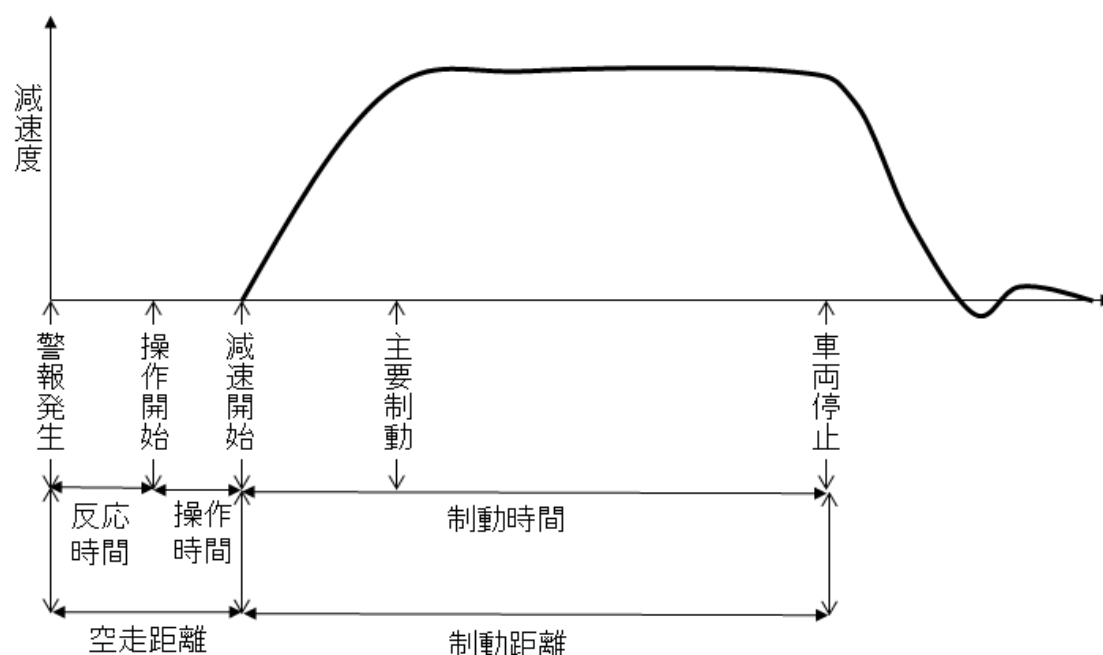


図 2.1： 車両の停止距離

2.1.2 衝突警報システムのヒューマンマシンインターフェイスデザイン

近年、車線逸脱警報システム、衝突警報システムなどの予防安全や走行支援システムの開発に伴い、どのようなヒューマンマシンインターフェイス（HMI）がより有効な警報通知機能を発揮できるかというテーマに関心を集まっている。本研究では、距離推定の要件を分析するため、6 自由度のドライビングシミュレーターを用いて異なるタイプの HMI の有効性を定量的に評価する方法を提案した。その方法を利用してドライバーの反応時間およびブレーキの操作時間を統計し、HMI の有効性を評価した上で、衝突警報システムに必要な距離計測の技術要件を分析した。

視覚警報、聴覚警報、触覚警報および以上三種類の警報方式の任意な組合せを異なるドライビングシナリオ下で有効性評価実験を実施する。一定量の受験者の実験データから、ドライバーの反応時間およびブレーキの操作時間を統計する。実験の中には、メーターを通じて文字やシンボルによる視覚警報と、ブザー式や音声式聴覚警報を提供する。図 2.2 に示すように、視覚警報の方式として、(a)シンボル式警報と(b)文字式警報がある。また、ブレーキシステムの作動を通じて急激かつ短期間内の減速度変化を発生させ、触覚警報としてドライバ

一に危険を感知させる。



図 2.2： 視覚警報の一例

2.1.3 ドライビングシミュレーターの構築

自動的かつ正確的に警報発生時刻，ドライバーの反応時刻（操作開始時刻，踏替え時刻），踏込み時刻を記録するため，6 自由度の運動を再現できるドライビングシミュレーターを利用した[11]．その目的に達成するため，二つの実験方法を考案した．実験方法一は，画像処理設備を利用してドライバーの顔および目の動作を監視し，顔の表情および目の動きを分析してドライバーの反応を記録して分析する．実験方法二は，アクセルペダルとブレーキペダルにセンサを取り付けてドライバーの操作を監視し，記録されたセンサのデータを用いてドライバーの反応を分析する．実験方法一は，ドライバーの心理変化を直接観測することが可能だが，正確にドライバーの動作を記録することができない．本実験の目的は，ドライバーの運転心理を分析することではなく，ドライバーが異なる種類の警報に対して反応特性を評価することである．そのため，より実際の運転環境に近づき，監視カメラなどの特殊装備によるドライバー心理的な負担をかけないように，実験方法二を選択した．実験設備は以下の要求に準じて設計する．

- ・警報時刻を記録するため，車両 CAN ネットワーク（Control Area Network）を監視して警報信号の発生時刻を記録するモジュールを設置する．

- ・ドライバー反応時刻を記録するため，アクセルペダルにスイッチングセンサを設置する必要がある．アクセルペダルがリリースされた時刻は踏替え時刻として記録する．

- ・踏込み時刻を記録するため，ブレーキペダルに開度センサを設置する必要がある．ブレーキペダル開度は一定の閾値以上になった時刻を踏込み時刻とし

て記録する.

図 2.2 に示すように, ドライビングシミュレーターは以下のコンポーネントから構成する.

- ・車両運動モデル (Vehicle Dynamic Model) : 既存のソフトウェアを利用して車両運動モデルを生成し, 車両運動をシミュレーションするモジュール.

- ・コントロールボックスとドライビングシミュレーター (Control Cabinet and E-Move Motion) : この二つのコンポーネントは, 車両運動モデルから指令を受け, ドライビングシミュレーターに加速度と角速度の指令を出す. 触覚警報もドライビングシミュレーターの加速度変化を通じて生成する.

- ・衝突警報コントローラ (Active Safety Function Controller) : このコンポーネントは衝突警報システムの機能を実現する. C/C++や Simulink で作られたモデルで実現することも, 実際の ECU ハードウェアで実現することも可能である. 本実験では, Simulink で作成されたモデルで実装した.

- ・HMI 入力装置 : ドライバーはブレーキペダル, アクセルペダル, ステアリングなどの入力装置を通じて車両を操作する. 入力信号を車両運動モデルや衝突警報コントローラに送られる.

- ・HMI 出力装置 : 出力装置は, 実際車両のメーターを用いる. メーターを通じてドライバーに視覚と聴覚の警報情報を伝える.

- ・対外環境センサモデル (Sensor Model) : 対外環境センサモデルを生成し, ミリ波レーダーや車載カメラなどの特性をシミュレーションする.

- ・ドライビング環境モデル (Environment Model) : ドライビング環境モデルは, 道路と建築物などを構築できる. 車両運動モデルから出力した自車両位置と姿勢情報 (x , y , z , Heading Angle, Pitch Angle, Roll Angle) を受け, ドライビング環境下の自車位置を更新する.

- ・シナリオと画像生成 (Scenario and Image Generator) : シナリオモジュールは環境中に他の車両の移動情報を提供する. 画像生成モジュールは, 環境モデルおよびシナリオモジュールから提供された情報に基づき, ドライバーが運転席から見られる環境映像を生成する.

- ・プロジェクター : 生成された環境映像をドライバー前方のスクリーンに投影する.

- ・ドライバー： 車両を運転し、シミュレーターに指令を出す受験者；

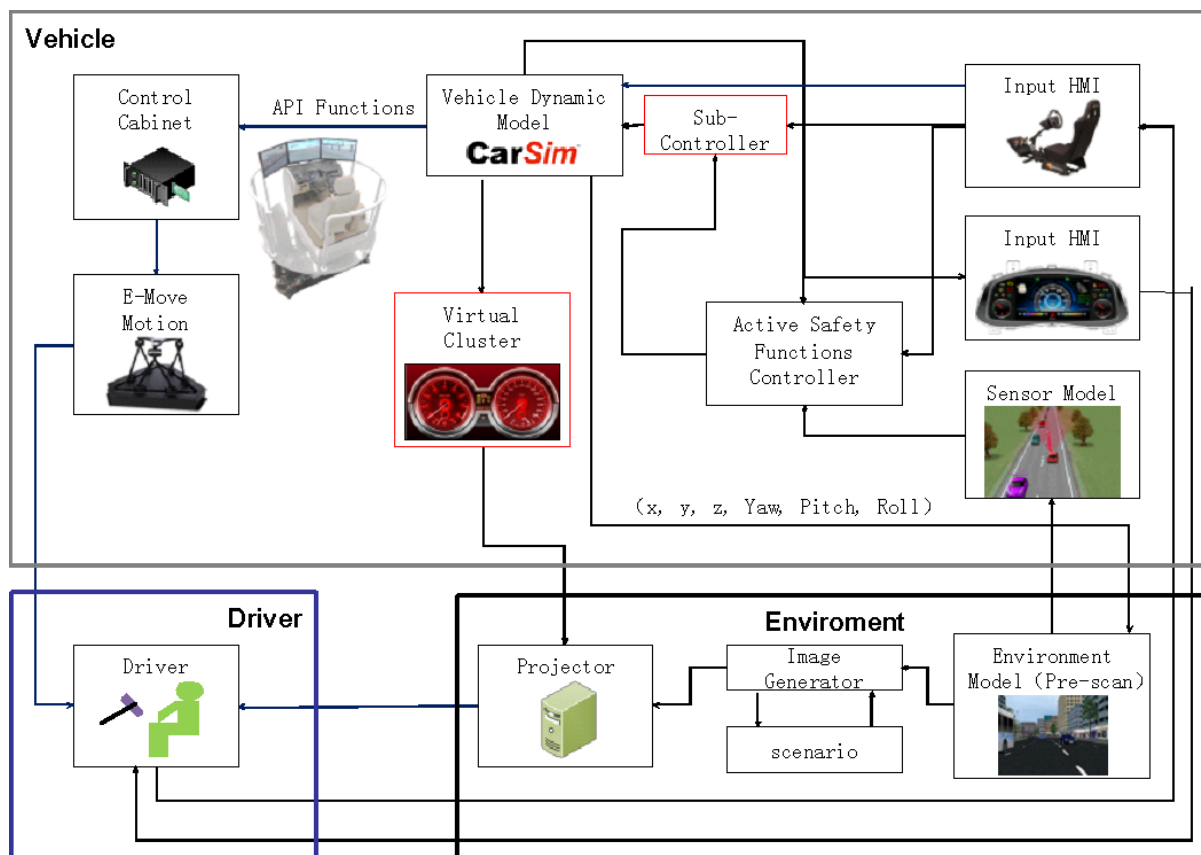


図 2.3： ドライビングシミュレーターの構造

2.1.4 ドライバー反応時間とブレーキ操作時間の統計

本研究では、2.1.3 に述べた実験手法を利用して、シンボル式や文字式視覚警報、ブザー式や音声式聴覚警報と触覚警報およびその組み合わせの警報方式の有効性を評価し、ドライバーの反応時間およびブレーキの操作時間を統計した。

「シンボル式視覚警報＋ブザー式音声警報」と「シンボル式視覚警報＋ブザー式音声警報＋触覚警報」による警報情報を受けたドライバーは、最高のブレーキ操作パフォーマンスを出した。実験結果によれば、ドライバーの反応時間とブレーキ操作時間を合わせて最短として約 1.2s となる。そのため、次節から距離推定範囲要件を分析する前提条件として空走距離の経過時間を 1.2s と設定する。

2.1.5 距離推定範囲の要件分析

アメリカ国家道路交通安全局に編成された US-NCAP 評価標準 “Forward Collision Warning System Confirmation Test” [12]の中に，衝突警報システムに対して，図 2.4 に示された三種類のテストシナリオを設けた．



図 2.4： US-NCAP 評価シナリオ

前走車静止，前走車減速と前走車低速の三種類のテストシナリオには，自車両の速度は同じく 72.4km/h である．そのため，より大きな相対速度を持つ前走車静止のテストシナリオは，最も長い検知距離を必要とする．したがって，衝突時間 TTC と自車両速度に基づいて距離推定の範囲要件を 40m と設定した．

2.1.6 距離推定精度の要件分析

式(5)に基づき，最適な警報タイミング TTC を計算した．車両の空走距離の経過時間 t_0 は 1.2s と設定し，制動開始後に車両の平均減速 a を $0.8g$ (7.9m/s^2) と設定する．図 2.5 に示すように，空走距離 s' の 24m と制動距離 s の 25.3m を

合わせて、前走車静止のテストシナリオにおいて最適な警報タイミングの TTC は 2.45s である。

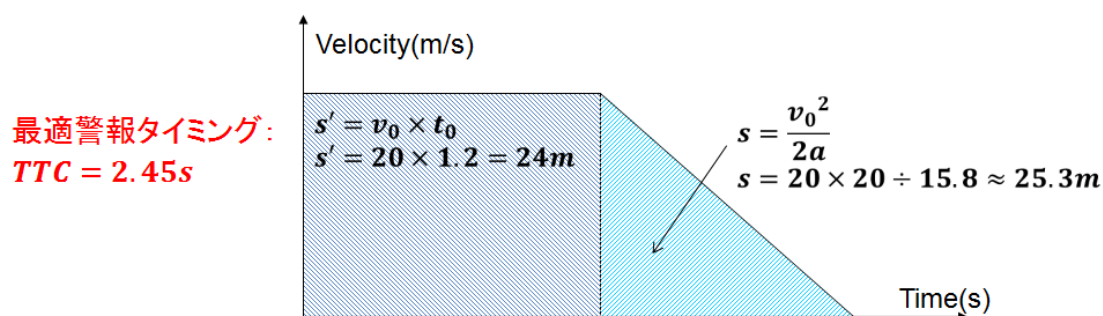


図 2.5 : 最適な警報タイミング分析

US-NCAP 評価標準には、距離推定精度について要求していないが、最遅の警報タイミングを TTC (Time to Collision, 衝突時間) として要求した。前走車静止のテストシナリオにおいて、最遅の警報 TTC は 2.1s と設定した。そのため、図 2.6 に示すように、TTC の推定精度は 16% と要求した。TTC は前走車と自車両の相対距離と相対速度の比例であるため、TTC の推定精度は距離の推定精度と同等的なものと考えられる。本研究では、相対速度推定の誤差を考慮した上で、距離推定の精度要件を 10% と設定した。

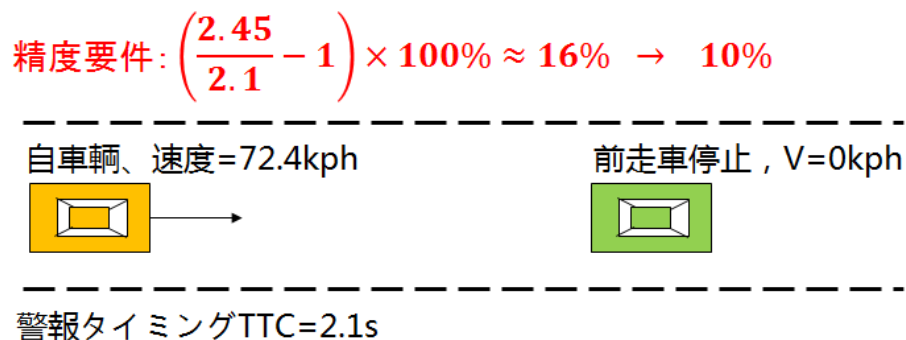


図 2.6 : 距離推定精度要件分析

2.2 ピッチ角推定の必要性

本研究では、接地点俯角による距離推定法を実現するため、ピッチ角推定が必要となる。本節では、その必要性について解説する。

2.2.1 車両のピッチ角変動範囲

乗員数および乗車位置が変わると、車両の重心位置も変化する。したがって、車両の静止状態（空載状態、半載状態、満載状態を含めて）におけるピッチ角が変動する。車種によって変動範囲は異なるが、その範囲は約 $\pm 0.5^\circ$ である。また、高速道路や郊外道路で走行する場合、実測した結果で走行振動によりピッチ角の変動範囲は $\pm 1.5^\circ$ と示された。ドライバーによる急加速や緊急ブレーキも考慮すれば、走行状態によってピッチ角のズレは最大 $\pm 2.5^\circ$ になる。

2.2.2 ピッチ角変動による距離推定誤差

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、ピッチ角ズレによって距離推定誤差が発生する。図 2.7 に示すように、ターゲット距離の拡大に伴い、測距誤差も増大してしまう。例えば、 0.5° のピッチ角ズレが補正できない場合、20m 先のターゲットの距離推定誤差は距離推定精度要件とする 10% を超過する。したがって、高精度な車間距離計測を実現するためには、高精度かつ累積誤差なしのピッチ角推定手法が必須である。

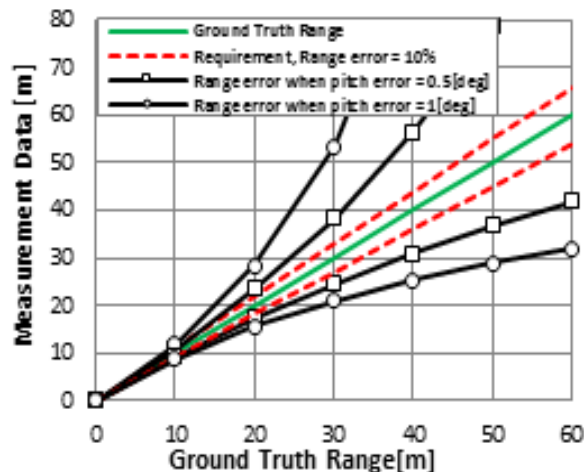


図 2.7： ピッチ角ズレによる距離推定誤差

2.2.3 従来のピッチ角推定手法

近年、ピッチ角推定法として RTK-GPS と高精度な慣性計測装置を利用する手法[13], [14], [15], [16]が多数提案されたが、高精度な慣性計測装置のコストが極端に高い。また、RTK-GPS の実現には、ローカルな基準局が必要なため、

作用範囲が制限されている．したがって，上記の手法は量産乗用車に応用できない．

また，量産可能な加速度・角速度センサを利用した姿勢角推定手法[17]も提案されたが，計測誤差や設置誤差が存在するという問題がある．加速度・角速度センサは，車両の中心位置付近に車体と密接に設置することが一般的である．それに対して，車載カメラはフロントウィンドに設置する．車両は剛体でないため，速度・角速度センサとカメラ間に設置位置による誤差は常に存在する．

事前に記録した環境画像やランドマークのデータベースを用いた車両姿勢推定手法[18], [19], [20]も存在するが，実用上データベースの用意が必須なため，実道路環境に応用することは困難である．上記の手法を応用するため，色情報付の詳細な三次元地図が必要となる．また，環境がリアルタイムに変化するため，それに対応する手段も必要とする．

根岸らは路面上の白線情報を利用した車両姿勢角推定手法[21]を提案した．しかし，実道路環境において車線が整備されていない道路も多数存在しているため，上記手法が応用可能な環境は限られる．

Structure from Motion 法を利用した自己運動推定[22]も提案されており，回転行列から分解したピッチ角レートの推定が可能だが，車両が静止状態下のピッチ角変動を推定できない．また，ピッチ角レートから累加したピッチ角は，長期間の推定により累積誤差の発生が避けられない．

本論文では，Structure from Motion 法を利用して車載単眼カメラの前後両フレーム間の並進ベクトルと回転行列を推定する．車両が常に道路上に走行するため，視点間自己運動の並進ベクトルは道路平面に平行すべき．この拘束条件に基づき，並進ベクトルからピッチ角を推定する手法を提案する．また，考察により回転行列から分解したピッチ角レートで累加したピッチ角は，短期間において推定精度が高い．したがって，移動平均法を利用して並進ベクトルから推定したピッチ角と回転行列から分解したピッチ角レートを合成し，より高精度なピッチ角推定法を提案する．高精度かつ累積誤差なしのピッチ角に基づき，車載単眼カメラによる車間距離計測を実現する．

第3章

ピッチ角推定に基づく車間距離計測システムの提案と開発

本章では、ピッチ角推定に基づく車載単眼カメラによる車間距離計測の提案手法と処理プロセスを紹介する。

3.1 処理プロセスの全体

ピッチ角推定に基づく車間距離計測システム全体の処理流れを図 3.1 に示す。

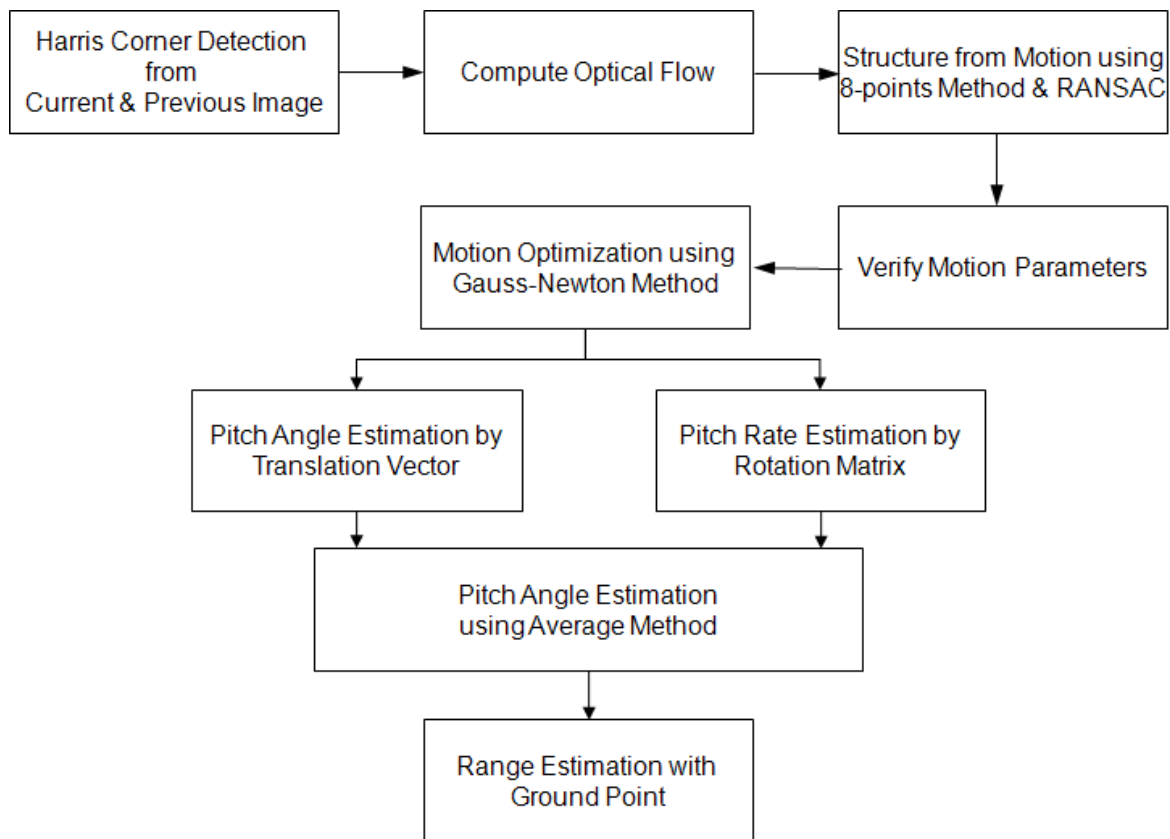


図 3.1 : 全体の処理流れ

まず、当時刻および前時刻の車載単眼カメラの画像からハリスコーナーを特徴点として検出する。次に、前後両フレーム間のコーナーをマッチングするた

め、ピラミッド型 Lucas-Kanade 法を用いてフレーム間のオプティカルフローを画像領域ごとにサブピクセル精度で推定する。Structure from Motion 法を利用して前後両フレーム間の回転行列および並進ベクトルを RANSAC 法で推定し、モーシヨンステレオ法で異なる回転行列と並進ベクトルの組み合わせの中から適正なパラメーターのペアを探索する。そして、ガウス・ニュートン法で推定された回転行列と並進ベクトルの最適化を図る。ガウス・ニュートン法で得られた回転行列からピッチ角レートを分解し、独自の提案で並進ベクトルからピッチ角を算出する。最後に、移動平均法を用いて推定されたピッチ角レートおよびピッチ角を合成し、より高精度なピッチ角を推定する[23]。その高精度なピッチ角を利用して、接地点俯角による距離推定を実現する。

3.2 特徴点の抽出手法

追従可能な特徴点には、独特な特徴量を持つことが必須である。真っ白な壁や色が均一な道路平面を車載カメラで撮影し、得られた画像から任意な 1 点を選んだとしても次のフレームから同じ点を検出することが非常に困難である。一方で、独特な特徴量を持つ点を連続フレーム間で追従することがより簡単に実現できる。

VGA サイズ (640×480) の一枚の画像を一つの特徴ベクトルと見なせば、その自由度 (次元数) はピクセルの総数 307200 になる。各自由度における特徴量の範囲は各ピクセルの輝度値の最大値になる。例えば、8 ビットのモノクロ画像であれば、各自由度における特徴量の範囲は 0~255 になる。したがって、一画像そのままを一つの特徴ベクトルと考える場合、次元数は非常に高く、マッチングアルゴリズムを実現するための計算量が膨大である。また、カメラで任意に撮られた画像であれば、画像全体を一つの特徴ベクトルと考えることが有意義なものでは限らない。逆に、画像上の一部のみが有意義なものである可能性が非常に高い。例えば、車載カメラから撮られた画像の一部のみは、車両画像または歩行者画像になり、それ以外の部分は無意義な環境画像になる。また、独特で追従可能な特徴は画像全体ではなく、画像上で任意に選ばれた特徴を持たない一点でもない。特徴点は、時間軸において不変な特徴量を持つものである。例えば、車線の四角の頂点のようなものが時間軸において不変であり、追

従可能な特徴点と考えられる．特徴点抽出の目的は，画像全体のような高次元のベクトルを低次元の特徴空間へ投影することと，画像全体から有意義な部分のみ抽出することである．

特徴量の中にも，用途によって様々な種類がある．例えば，パターン認識を実現するために Haar-like, HoG などの特徴量がよく使われている．また，フレーム間オプティカルフローを検出するため，ハリスコーナー (Harris-Corner), Watershed などの特徴量もよく使われている．真っ白の壁のような単一な色で構成された面より，異なる色で構成された異なる領域を分割するエッジは安定な特徴量として考えられる．しかしながら，一本のエッジも無数の点から構成するものであり，その中から 1 点を選び，次のフレームから同じ点を検索することも困難である．二つのエッジからなる交点であればそのような問題はなく，独特な特徴点としてフレーム間の追従が可能となる．この理解を数学問題に投影すると，図 3.2 に示すようにハリスコーナーは二つの直行する方向で微分値が大きな点になる．ハリスコーナー[24]は 1988 年に Harris らに提案され，今現在にごく一般的な特徴量として幅広く使われている．

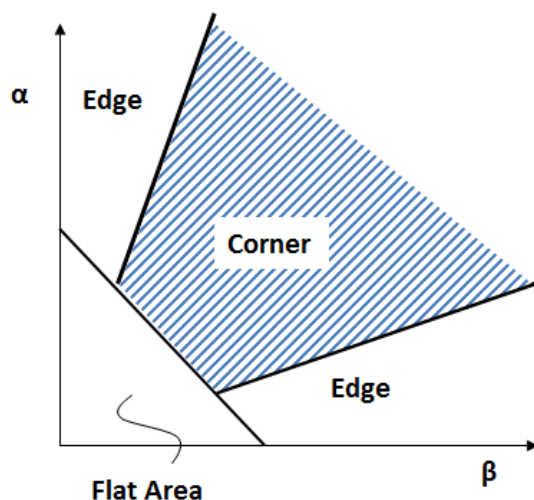


図 3.2： 画像上の面とエッジとコーナー

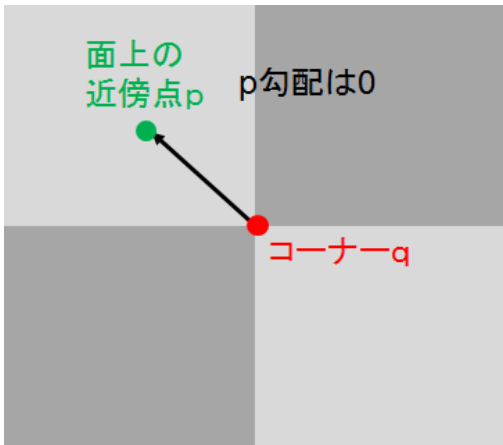
本研究では，ピッチ角推定手法の汎用性に影響しないという観点から特徴点抽出手法のうちのより一般的なものを選び，二つの直交方向で両微分値とも大きなハリスコーナー点を追従可能な特徴点として利用している．式(6)に示すように，ハリスコーナーは画像輝度の二次微分 D_{xx} , D_{yy} , D_{xy} を用いて，各点周りの小さな窓上におけるヘッセ行列 H_p を求め，その自己相関行列の固有値を特徴

量として評価する．二つの固有値がその該当点における曲率を表現するため，両固有値とも閾値より大きな場合のみハリスコーナーとして検出される．

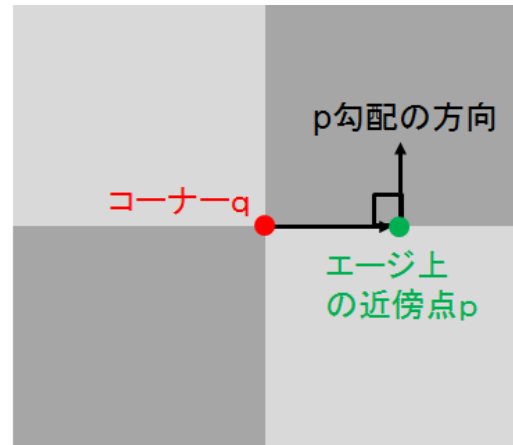
$$H(p) = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

また，より高精度カメラの自己運動推定を実現するためには，サブピクセル精度なコーナー推定[25]を行う．実世界のコーナー点は，ほとんどカメラの撮像素子へ投影しなく，その撮像素子の間に投影する．すなわち，真のコーナー点は画像ピクセル要素上になく，ピクセル間に存在する．このような制約条件を克服するため，画像の輝度値を線形近似し，ピクセル間の輝度値を補完する．まず，前節の手法でピクセル単位のコーナーの場所を見つける．サブピクセル精度の推定はピクセル単位におけるコーナーの場所から詳細化するものである．真のコーナーの投影点 $\mathbf{q}$ とその近傍の任意点 $\mathbf{p}$ と形成したベクトルと， $\mathbf{p}$ 点の勾配ベクトルからなる内積は 0 になる．図 3.3(a)に示すように，近傍点 $\mathbf{p}$ は色変化の少ない面にある場合， $\mathbf{p}$ 点の勾配ベクトルは $\mathbf{0}$ になる．図 3.3(b)に示すように，近傍点 $\mathbf{p}$ はエッジにある場合，その勾配は $(\mathbf{p}-\mathbf{q})$ ベクトルと直交する．そのため，式(7)に満足した $\mathbf{q}$ 点の場所はコーナーのサブピクセル位置になる．

$$\Delta I(p) \cdot (p - q) = 0 \quad (7)$$



(a) 点 $\mathbf{p}$ は面上



(b) 点 $\mathbf{p}$ はエッジ上

図 3.3 : サブピクセルコーナーの特性

3.3 オプティカルフローの検出手法

本研究では、車載カメラの自己運動を推定するため、前後フレーム間のモーションを求める必要がある。図 3.4 に示すように、オプティカルフローは、そのモーションを表現するものであり、前節で紹介した特徴点の動きでもある。即ち、オプティカルフローは前後フレーム間の特徴点をトラッキングしたものである。

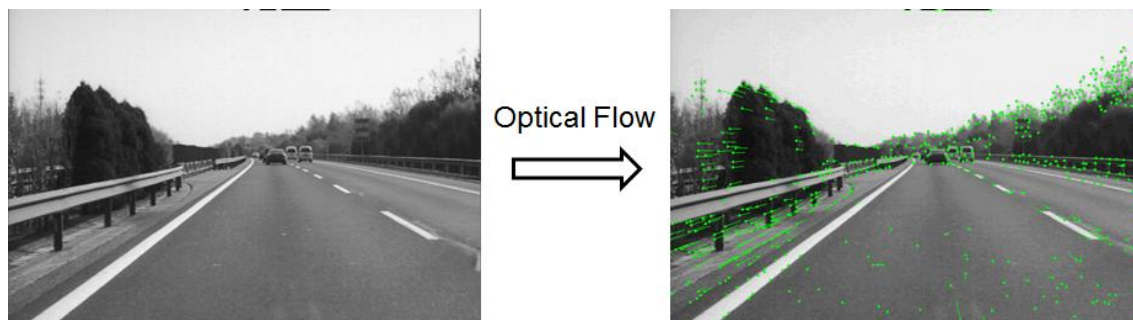


図 3.4： 車載単眼カメラ画像によるオプティカルフロー推定結果

1981 年に **Lucas-Kanade** アルゴリズム[26]が発表され、クラシックな手法として幅広く使われている。発表当時には、密なオプティカルフローを検出する手法として提案された。しかしながら、当手法は画像内局所の部分画像だけに応用することも可能なため、現在には一般的な疎なオプティカルフロー検出手法として広範に使われている。**Lucas-Kanade** アルゴリズムは、複数の特徴点を囲む小さなマッチング窓から得られた特徴情報を利用して、フレーム間に特徴点の追従を実現する。**Lucas-Kanade** アルゴリズムで小さな局所な窓に注目することの欠点は、車載カメラの大きな自己運動が発生する際に特徴点が局所な窓から出てしまう場合がある。そのような追従不可能なシチュエーションに対応するためには、ピラミッド型 **Lucas-Kanade** アルゴリズムが開発された。ピラミッド型アルゴリズムでは、最初に元画像から何倍にも縮小した詳細情報の最も少ないピラミッド画像からマッチングを始め、得られたマッチング情報をより詳細なピラミッド画像まで伝えていく。最終的に、大きな自己運動が発生した際にも、元画像の特徴点のオプティカルフローを正確に検出することができる[25]。

本研究では、ピッチ角推定手法の汎用性に影響しないという観点でより一般的な **Lucas-Kanade** アルゴリズムをオプティカルフロー推定手法として利用し

た．また，フレーム間に対応付けた特徴点からカメラの自己運動を推定する場合，移動物体から検出された特徴点による推定誤差および特徴点が画像上での分布の不均一性を抑制するため，Yamaguchi らの提案した，画像を縦方向に領域分割し特徴点候補を探索する手法[22]を利用する．図 3.4 に示すように，画像を三つの領域に分割した．High ゾーンと Low ゾーンは，特徴のすくない空と路面しかないため，オプティカルフローの推定精度が低くなり，コーナーの数を抑制する．Middle ゾーンは移動する車両などの外乱が存在するが，特徴が最も豊富な領域になるため，コーナー点の数を多めに設定する．

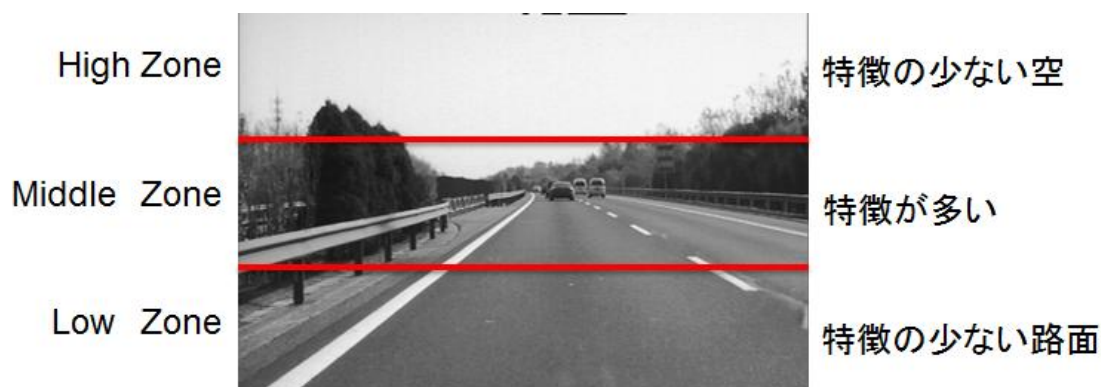


図 3.5： 画像領域の分割

3.4 Structure from Motion 法

カメラの自己運動推定手法を簡単に理解するため，カメラ射影モデルを構築する必要がある．図 3.6 に示すように，ピンホールカメラの撮像平面は焦点面の後ろにあるが，それを焦点面の前に反転させる．便利のため，コンピュータビジョンでは，この表現の方が多く利用されている．

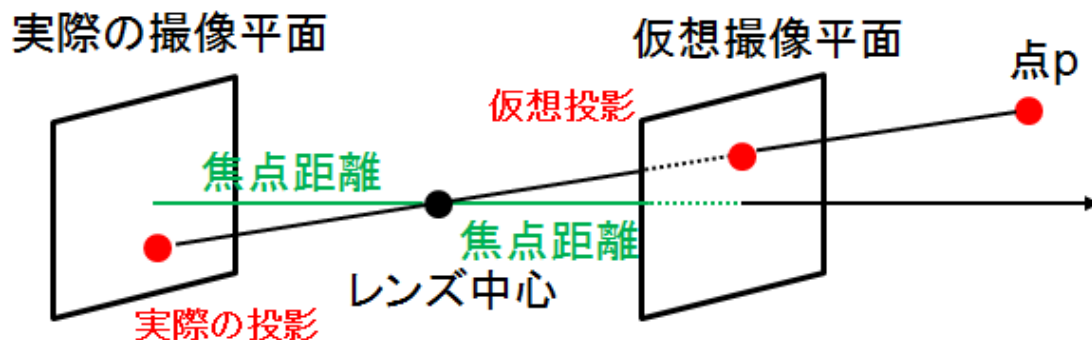


図 3.6： ピンホールカメラモデル

ピンホールカメラモデルをさらに簡単化にするため，一般カメラ座標系から正規カメラ座標系に変換する．実世界の任意点の座標 $\mathbf{P}=[X, Y, Z]^T$ が一般カメラ座標系に投影する場合，その座標は $\mathbf{p}_{cam}=[x_{cam}, y_{cam}, f]^T$ になる．その焦点距離 f を 1 に正規化する．正規座標系に投影する場合，座標は $\mathbf{p}_{nor}=[x_{nor}, y_{nor}, 1]^T$ になる．正規カメラ座標は同次座標になるため，数値計算をより便利に行うことができる．Structure from Motion 法でカメラの自己運動を推定する場合，あらかじめ車載単眼カメラで撮影された画像を正規カメラ座標系に変換する必要がある．

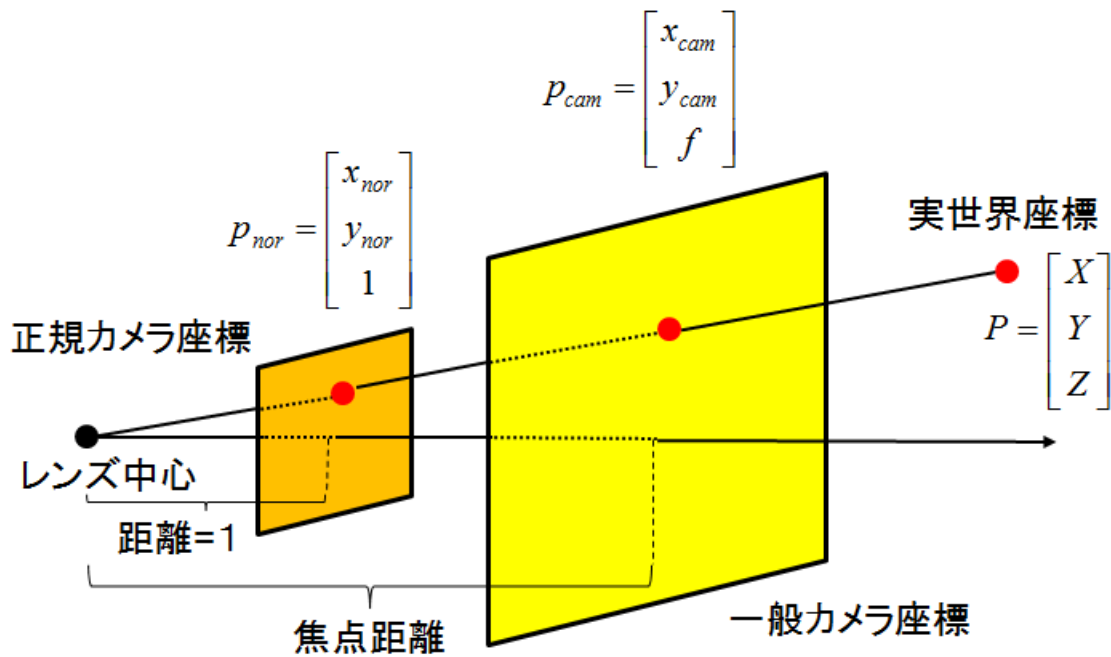


図 3.7： 正規カメラ座標系

画像間の幾何関係，いわゆるエピポラ幾何[27]，[28]について述べる．エピポラ幾何は，最初にステレオカメラによる立体視の対応点探索の問題から考案された．本研究では，前後フレームの両画像をステレオカメラから取れた両画像と考えられるため，エピポラ幾何を活用することもできる．図 3.8 に示すように，二つのカメラ視点から三次元空間の同じ点 $\mathbf{P}$ に注目する．三次元空間の点 $\mathbf{P}$ と二つの視点におけるカメラのレンズ中心からなる平面をエピポラ平面 (Epipolar Plane) という． $\mathbf{P}_1$ はカメラ視点 1 から見た三次元空間の点 $\mathbf{P}$ の世界座標， $\mathbf{p}_1$ はその $\mathbf{P}_1$ が正規カメラ座標系への投影である． $\mathbf{P}_2$ はカメラ視点 2 から見た三次元空間の点 $\mathbf{P}$ の世界座標， $\mathbf{p}_2$ はその $\mathbf{P}_2$ が正規カメラ座標系への投

影である． $\mathbf{t}$ は二つのカメラ視点間の並進関係を表す並進ベクトルである．図 3.8 に示すように，観測点 $\mathbf{P}$ の実世界位置や距離によらず， $\mathbf{P}_1$ ， $\mathbf{p}_1$ ， $\mathbf{P}_2$ ， $\mathbf{p}_2$ ， $\mathbf{t}$ はエピポーラ平面にあることが成り立つ．また，カメラ視点 2 からカメラ視点 1 への回転関係を表す回転行列は $\mathbf{R}$ である．

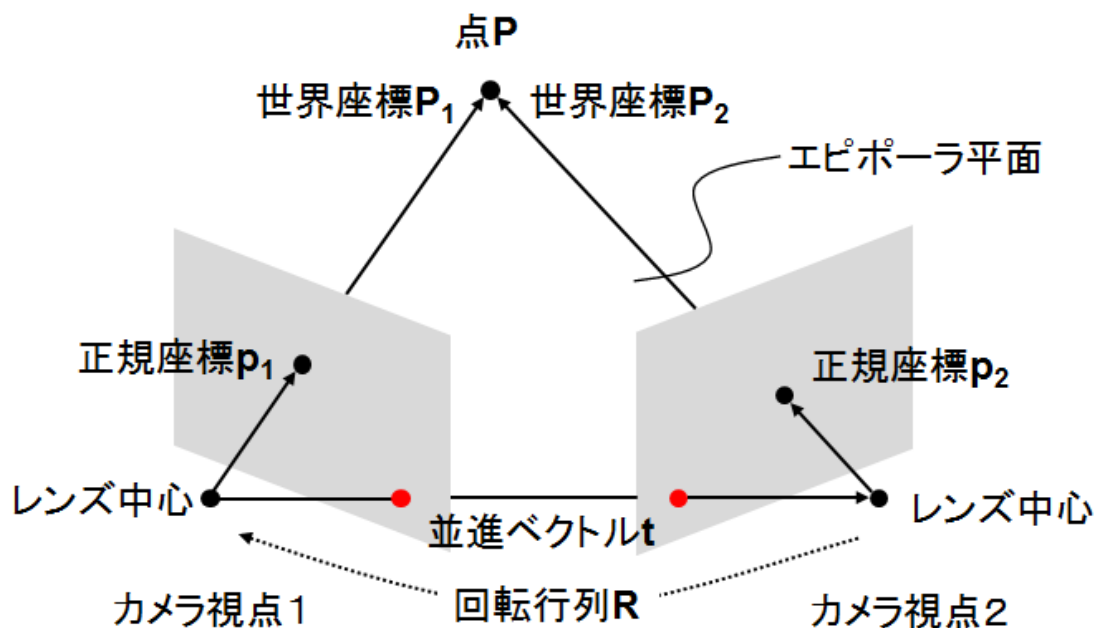


図 3.8： エピポーラ幾何

図 3.9 に示すように，カメラ視点 1 を基準視点と仮定する．並進ベクトル $\mathbf{t}$ ，カメラ視点 1 正規座標 $\mathbf{p}_1$ ，カメラ視点 2 正規座標 $\mathbf{p}_2$ はエピポーラ平面にあるという拘束条件を利用して，カメラ間のモーションを表す並進ベクトル $\mathbf{t}$ と回転行列 $\mathbf{R}$ を推定できる． $\mathbf{t}$ ， $\mathbf{p}_1$ は同じ視点 1 の正規座標系にあるが， $\mathbf{p}_2$ は視点 2 の正規座標系にある．したがって， $\mathbf{p}_2$ を視点 1 の正規座標系に変換する必要がある．回転行列 $\mathbf{R}$ を利用して， $\mathbf{p}_2$ を基準視点の正規座標系に変換し，その表現は $\mathbf{Rp}_2$ になる．また， $\mathbf{Rp}_2$ と $\mathbf{t}$ の外積ベクトルを求め，それは $\mathbf{t} \times \mathbf{Rp}_2$ になる．その外積ベクトル $\mathbf{t} \times \mathbf{Rp}_2$ はエピポーラ平面に垂直するベクトルである．式(8)に示すように， $\mathbf{p}_1$ と $\mathbf{p}_2$ は共平面である拘束条件を利用して， $\mathbf{p}_1$ と $\mathbf{t} \times \mathbf{Rp}_2$ の内積は 0 になる．

$$\begin{aligned}
p_1 \cdot (t \times R p_2) &= 0 \\
\Rightarrow p_1^T [t]_{\times} R p_2 \\
\Rightarrow p_1^T E p_2 \\
E &= [t]_{\times} R \\
t &= \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}, [t]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{8}$$

式(8)をエピポーラ方程式と呼ぶ． $[t]_{\times}$ は並進ベクトル $\mathbf{t}$ の外積行列である．行列 $\mathbf{E}=[t]_{\times}\mathbf{R}$ を基本行列 (Essential Matrix) と呼び，カメラ間のモーションを表現する．

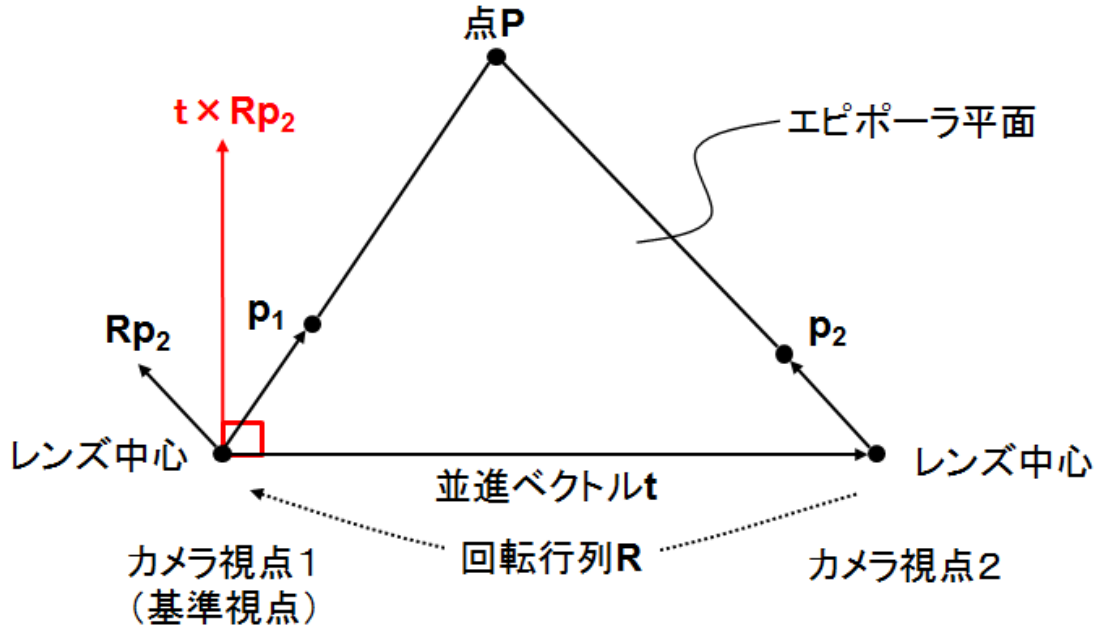


図 3.9 : エピポーラ拘束

式(8)に示すように，前後フレームの両画像における対応づけた多数のコーナー一点の同次座標を用いて，エピポーラ拘束によって両フレーム間カメラの位置・姿勢の情報からなる基本行列 $\mathbf{E}$ を求める． $\mathbf{p}_1=[x_1, y_1, 1]^T$ は当時刻のコーナー一点座標， $\mathbf{p}_2=[x_2, y_2, 1]^T$ は前時刻のコーナー一点座標を示す．

式(9)に示すように， $\mathbf{E}$ 行列はスケール不定のため，8 自由度を持つ．したがって，原理上，基本行列 $\mathbf{E}$ は対応付けたコーナー一点から任意の 8 点を選び，連立方程式を解くことにより推定できる[29]．

$$p_1^T E p_2 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & e_3 \\ e_4 & e_5 & e_6 \\ e_7 & e_8 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

多数のコーナ一点ペアから基本行列 $\mathbf{E}$ を得るため、ランダムなサブセットから何度も解を求めて外れ値を除去し、特定の解を取る手法 **RANSAC** アルゴリズム[30]を用いる。式(10)で表されるように基本行列 $\mathbf{E}$ から回転行列 $\mathbf{R}$ と並進ベクトル $\mathbf{t}$ の外積行列 $[\mathbf{t}]_{\times}$ に分解する。

$$E = [\mathbf{t}]_{\times} R \quad (10)$$

自車両速度およびフレームレートの情報を入力しない場合は、**Structure from Motion**法で並進ベクトル $\mathbf{t}$ のスケール情報が得られない。したがって、 $|\mathbf{t}|=1$ とし並進ベクトルを正規化する。また、回転行列 $\mathbf{R}$ は直交行列のため、基本行列 $\mathbf{E}$ のフロベニウスノルムを式(11)で正規化する。

$$E' = \frac{\|[\mathbf{t}]_{\times} R\|}{\|E\|} E = \frac{\sqrt{2}}{\|E\|} E \quad (11)$$

3.5 モーションステレオ法

回転行列 $\mathbf{R}$ が直交行列かつ並進ベクトルの外積行列 $[\mathbf{t}]_{\times}$ が反対称行列のため、正規化された基本行列 $\mathbf{E}'$ を特異値分解した上で回転行列 $\mathbf{R}$ および並進ベクトルの外積行列 $[\mathbf{t}]_{\times}$ の解候補 8 ペアが得られる。その 8 ペアの解候補から唯一の正しい解を選ぶため、コーナ一点の奥行き Z を正当性の評価指標として設定した。各解候補を用いてモーションステレオ法により一定量のコーナ一点に対して奥行き Z を求める。図3.10に示すように、まず、 $\mathbf{p}_2$ を基準カメラ視点へ変換させ、 $\mathbf{Rp}_2$ になる。 $\mathbf{p}_1$, $\mathbf{Rp}_2$ と $\mathbf{t}$ は共平面のため、式(12)でエピポーラ平面に垂直な外積ベクトルを生成する。 $\mathbf{p}_1$ と $\mathbf{Rp}_2$ の和を求めることで誤差を抑制する。

$$(\mathbf{p}_1 + \mathbf{Rp}_2) \times \mathbf{t} \quad (12)$$

また、エピポーラ平面の中に $\mathbf{Rp}_2$ に垂直なベクトル $\mathbf{b}$ を求める。式(13)に示す。

$$\mathbf{b} = ((\mathbf{p}_1 + \mathbf{Rp}_2) \times \mathbf{t}) \times \mathbf{Rp}_2 \quad (13)$$

三角形の比例関係によって、下記の比例式が成り立つ。

$$\frac{Z}{|t|} = \frac{1}{|p_1| \sin \omega}, (f=1)$$

$$\Rightarrow Z = \frac{|t| \cos \gamma}{|p_1| \sin \omega} = \frac{t \cdot b}{p_1 \cdot b} = \frac{t \cdot (((p_1 + Rp_2) \times t) \times Rp_2)}{p_1 \cdot (((p_1 + Rp_2) \times t) \times Rp_2)} \quad (14)$$

そのため、 $\mathbf{p}_1$ の世界座標 $\mathbf{P}_1$ は式(15)になる.

$$P_1 = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = Zp_1 = Z \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$\mathbf{p}_2$ の世界座標 $\mathbf{P}_2$ は式(16)になる.

$$P_2 = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R^T(P_1 - t) \quad (16)$$

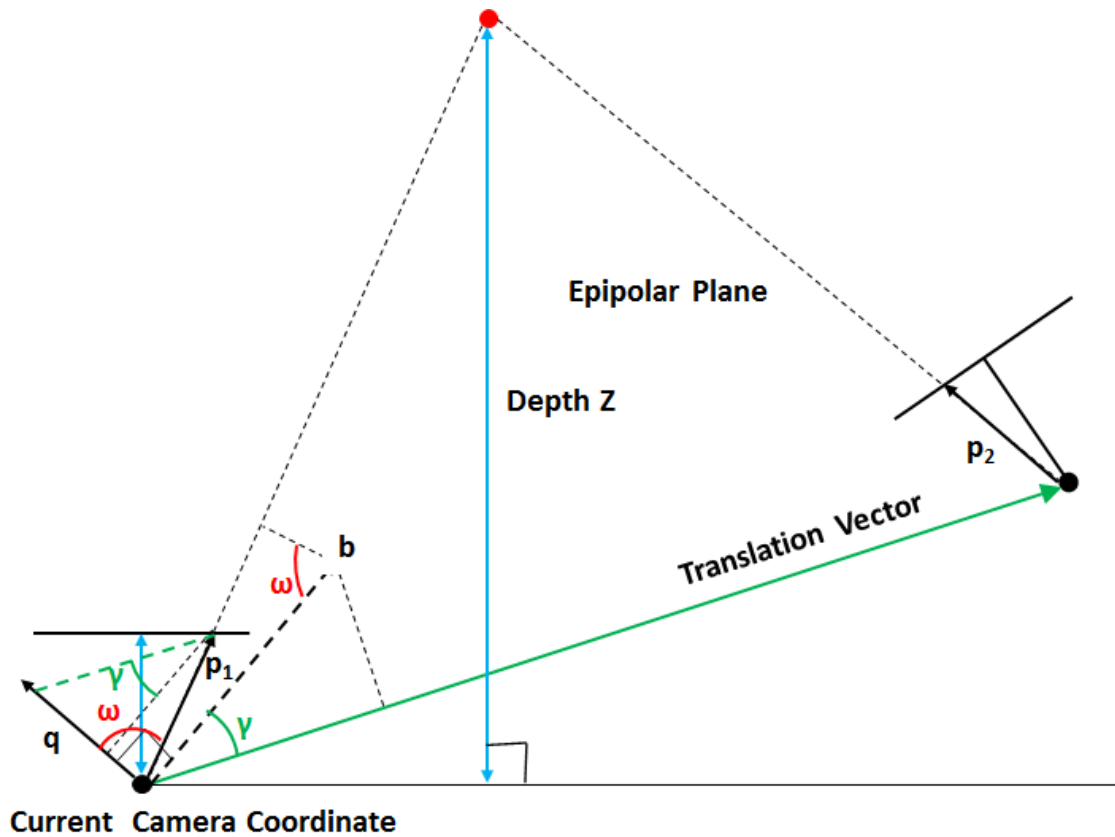


図3.10： モーションステレオ

上記の手法で、各自己運動パラメーターの解候補を用いてモーションステレ

オ法により一定量のコーナ一点に対して奥行き Z を求める．画像に投影されたすべてのコーナ一点がカメラの前方にあるため，奥行き Z は正数かつ焦点距離より大きいはずである．したがって，8 ペアの解候補でコーナ一点の奥行き Z を求め，正当な奥行き Z が最も多く得られたものが適切な自己運動パラメーターと判定する．

3.6 自己運動パラメーターの最適化

Structure from Motion で求めたカメラの自己運動パラメーターをより高精度に最適化するため，ガウス・ニュートン法を用いてコーナ一点の再投影誤差を最小化とする． $\mathbf{x}$ は自己運動パラメーターであり，三軸方向の並進運動と三軸周りの回転運動から構成される． t_x, t_y, t_z は並進ベクトル $\mathbf{t}$ の要素である． r_x, r_y, r_z は回転ベクトル $\mathbf{r}$ の要素である． r_x は x 軸周りのピッチ方向回転で， r_y は y 軸周りのヨー方向回転で， r_z は z 軸周りのロール方向回転である．また，並進ベクトルのノルムが 1 で x 軸方向および y 軸方向の分量 t_x, t_y を用いて z 軸方向の分量 t_z を表せるため，自己運動パラメーター $\mathbf{x}$ は 5 自由度を持つ．式(17)に示すように，再投影誤差 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ はエピポーラ方程式の二乗和の残差で表現される．

$$f(x) = \sum \left[\frac{1}{2} w(x)^2 \right] = \sum \left[\frac{1}{2} (p_2^T E(x) p_1)^2 \right] \quad (17)$$

$$x = [r_x \quad r_y \quad r_z \quad t_x \quad t_y]^T$$

再投影誤差を最小化するため，テイラー展開を行い，局所領域の極小値を探索する．式(18)に示すように，展開された式を最小化するように更新量 $\delta \mathbf{x}$ を決める．ヤコビ行列 $\mathbf{J}_w$ を用いて $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ の勾配 $\mathbf{g}$ およびヘッセ行列 $\mathbf{H}$ を表す．

$$f(x + \delta x) = f(x) + g^T \delta x + \frac{\delta x^T H \delta x}{2} \rightarrow g^T \delta x + \frac{\delta x^T H \delta x}{2} = 0 \quad (18)$$

$$\delta x = -H^{-1} g = -(J_w^T J_w)^{-1} J_w^T w$$

ヤコビ行列 $\mathbf{J}_w$ を求めるため， $\mathbf{E}$ 行列を展開する．前後フレーム間の回転変化が微小のため，回転ベクトル $\mathbf{r}$ は微小回転になる．また，Structure from Motion で推定された回転と実際回転の間の誤差 $d\mathbf{r}$ も微小回転のため，回転行列は単位行列と回転ベクトル $\mathbf{r}$ の外積行列の和に近似できる．また， $[\mathbf{r}]_\times$ と $[d\mathbf{r}]_\times$ は微小なものでその積を省略できる．

並進ベクトルの z 軸方向分量を式(19)で表し，ロドリゲス変換公式で微小回転を表現する．各対応付けたコーナ一点 $\mathbf{p}_1=[x_1, y_1, 1]^T$ ， $\mathbf{p}_2=[x_2, y_2, 1]^T$ におけるヤコビ行列は式(20)のように求められる．各点のヤコビ行列の総和を取り，更新量 $\delta \mathbf{x}$ を求める．再投影誤差の閾値および最大計算回数を設定し，カメラの自己運動パラメーターを最適化する．

$$dt_z = -\frac{t_x dt_x + t_y dt_y}{t_z} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} J_w &= \begin{bmatrix} \frac{\partial w}{\partial r_x} & \frac{\partial w}{\partial r_y} & \frac{\partial w}{\partial r_z} & \frac{\partial w}{\partial t_x} & \frac{\partial w}{\partial t_y} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -p_1([t]_x)_2 + y_2 p_1([t]_x)_3 \\ p_1([t]_x)_1 - x_2 p_1([t]_x)_3 \\ -y_2 p_1([t]_x)_1 + x_2 p_1([t]_x)_2 \\ ((R)_2 p_2 - y_1 (R)_3 p_2) - \frac{t_x}{t_z} (y_1 (R)_1 p_2 - x_1 (R)_2 p_2) \\ (- (R)_1 p_2 + x_1 (R)_3 p_2) - \frac{t_y}{t_z} (y_1 (R)_1 p_2 - x_1 (R)_2 p_2) \end{bmatrix}^T, \\ R &= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}, (R)_n = \begin{bmatrix} R_{1n} \\ R_{2n} \\ R_{3n} \end{bmatrix} \\ [t]_x &= \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix}, ([t]_x)_n = \begin{bmatrix} T_{1n} \\ T_{2n} \\ T_{3n} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

3.7 回転行列を用いたピッチ角レート推定

式(21)に示すように，ロドリゲス変換を用いて推定された回転行列 $\mathbf{R}$ から前後フレーム間のカメラ角度変化に分解できる．カメラ角度変化は， x 軸周りのピッチ角レート， y 軸周りのヨー角レートおよび z 軸周りのロール角レートが含まれる． $\mathbf{r}$ の長さによって回転の大きさ θ を定義する．回転行列から分解したピッチ角レートからピッチ角に累加することが可能である．

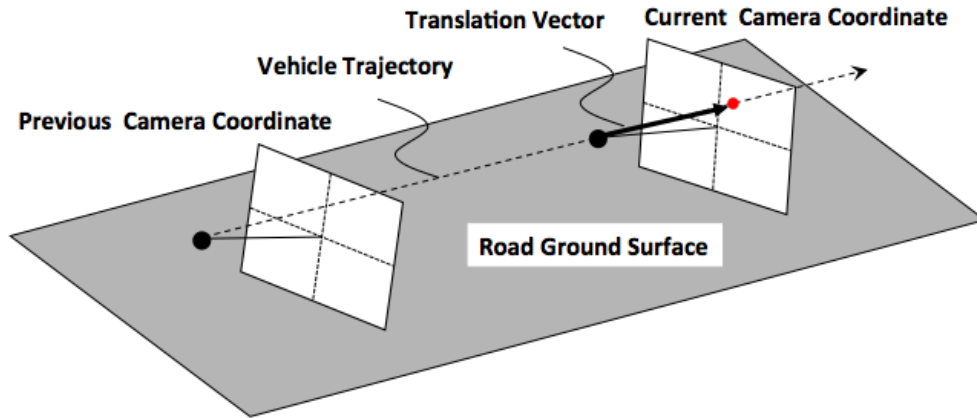
$$R = \cos \theta \cdot I + (1 - \cos \theta) \cdot rr^T + \sin \theta \cdot [r]_{\times}$$

$$r = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix}, [r]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

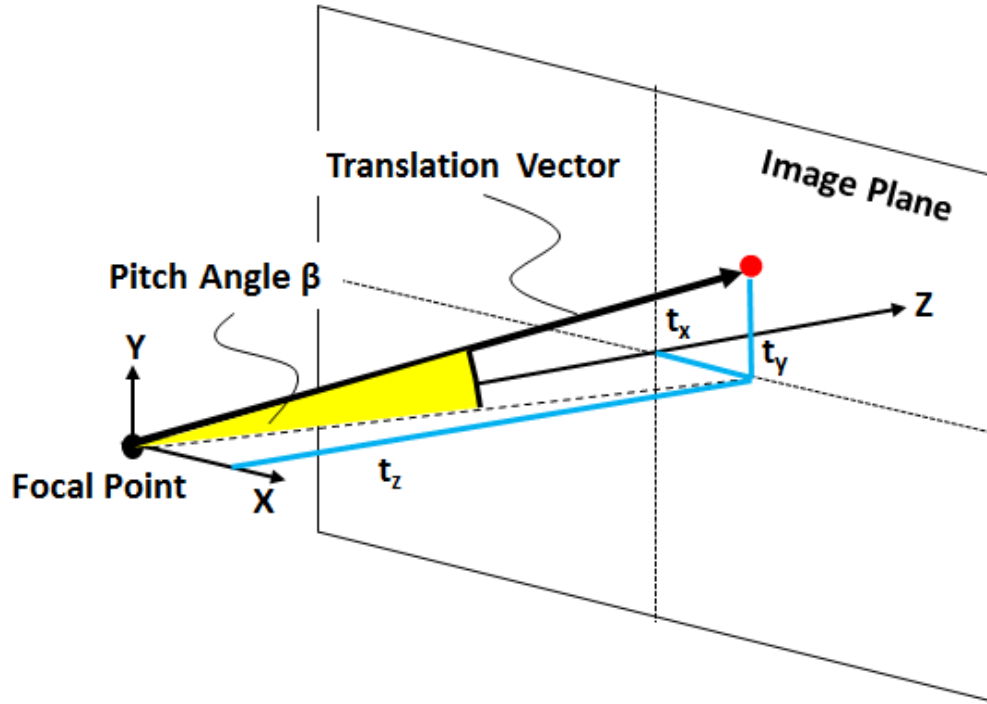
前後フレーム間のピッチ角変化をカメラのピッチ角レートとして観測する．しかしながら，ピッチ角レートのみを観測することにより，長期間計測の場合に累積誤差の発生を避けられない．また，乗員数および乗車位置による車両の静止状態での姿勢変化が初期ピッチ角にも影響する．そのため，ピッチ角を直接観測する手段が必要となる[23]．

3.8 並進ベクトルを用いたピッチ角推定

本研究では，自車両が道路平面上に走行するという条件に注目し，前後カメラ視点間の並進ベクトルが走行道路平面に平行する拘束条件を利用して絶対ピッチ角を推定する．図3.11(a)に示すように，両カメラ視点間の並進ベクトルは走行道路平面に平行すべき．したがって，並進ベクトルと当時刻のカメラ座標系のz軸から形成した角度は，車載カメラの光軸が走行道路平面に対するピッチ角となる．単一フレームにおいて，車両走行時に車体振動が常に存在することによって並進ベクトルを用いたピッチ角推定の誤差は発生する．長期間にピッチ角推定を行うと，より安定な推定結果が得られる．しかしながら，長期間の推定により，推定結果のリアルタイム性を失う．



(a) 並進ベクトルと道路平面



(b) ピッチ角と並進ベクトル

図3.11 並進ベクトルを用いたピッチ角推定

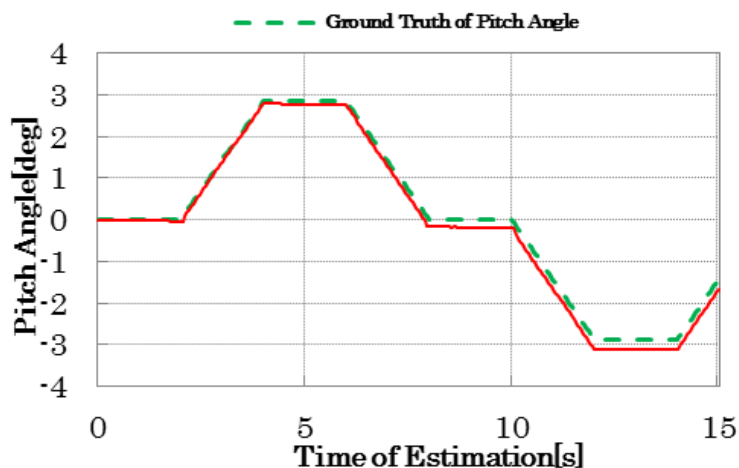
図3.11 (b)に示すように，式(22)で当時刻における単眼カメラの走行道路に対するピッチ角 β を推定する． t_x , t_y , t_z は並進ベクトル $\mathbf{t}$ の x , y , z 各軸における値である．前述したように，単一フレームで推定されたピッチ角の精度が低い．次節では，より高精度なピッチ角推定を実現するため，回転行列から分解したピッチ角レートと融合してリアルタイムで推定誤差を抑制する手法を提案する．

$$\beta = \arctan\left(-\frac{t_y}{\sqrt{t_x^2 + t_z^2}}\right) \quad (22)$$

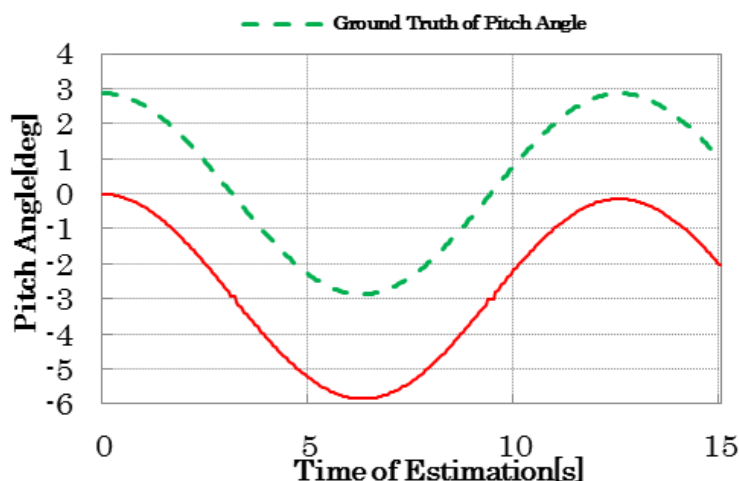
3.9 移動平均法を用いたピッチ角合成

回転行列から分解したピッチ角レートで累加したピッチ角の推定結果を図3.12に示す．並進ベクトルから推定したピッチ角の推定結果を図3.13に示す．図3.12(a)，図3.13(a)に示すように，回転行列から分解したピッチ角レートで累加したピッチ角は長期間の推定で累積誤差が発生したものの，短期間内や単一フレームにおいて推定精度が並進ベクトルから推定したピッチ角より高い．その

一方，並進ベクトルから推定したピッチ角は走行中の車両振動による高周波数のノイズが常に存在したため，単一フレームにおいて推定精度は低い，長期間では累積誤差が発生しない優勢がある．



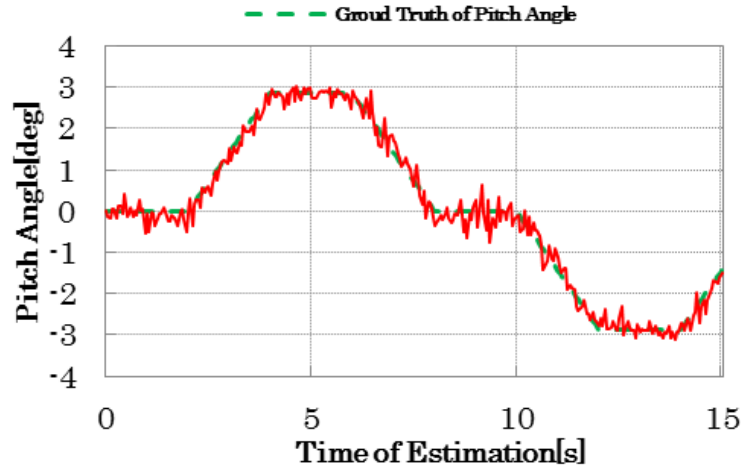
(a) The occurrence of accumulative error



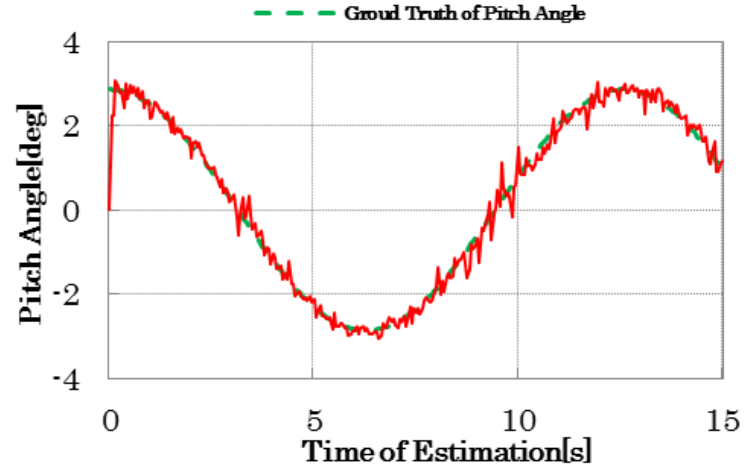
(b) The offset due to initial pitch

図3.12： 回転行列を用いたピッチ角推定結果

車両が静止状態において車載カメラによる自己運動推定を実現できないため，静止状態のピッチ角変化を観測できない．図3.12(b)，図3.13(b)に示すように，回転行列から分解したピッチ角レートから累加したピッチ角は，車両運動開始前の初期ピッチ角を推定できない．それに対して，並進ベクトルから推定したピッチ角は，運動開始後にカメラの初期ピッチ角を推定することが可能である．



(a) No accumulative error



(b) The Estimation of initial pitch

図3.13 並進ベクトルを用いたピッチ角推定結果

上記の両手法は互いの欠点を補完する特性があり，推定されたピッチ角レートとピッチ角を合成すればより高精度なピッチ角推定が実現可能となる．本論文では，移動平均法を用いたピッチ角合成手法を提案する．図3.14に示すように，累加した短期間で高精度なピッチ角レートを補うため，並進ベクトルから推定したピッチ角 $\beta_t(i)$ の一定時間内の平均 μ_t を求める．その平均を基準として回転行列によるピッチレートで累加したピッチ角 $\beta_r(i)$ の同等時間内の平均 μ_r を移動させる．図3.14に示すように，移動平均法を用いて合成したピッチ角 $\beta_a(i)$ は，式(23)で求められる． μ_{Gap} は，平均値 μ_t と μ_r の差である[23]．

$$\mu_t = \frac{\sum_{i=0}^n \beta_t(i)}{n}, \mu_r = \frac{\sum_{i=0}^n \beta_r(i)}{n}$$

$$\mu_{Gap} = \mu_t - \mu_r$$

$$\beta_a(i) = \beta_r(i) + \mu_{Gap}$$
(23)

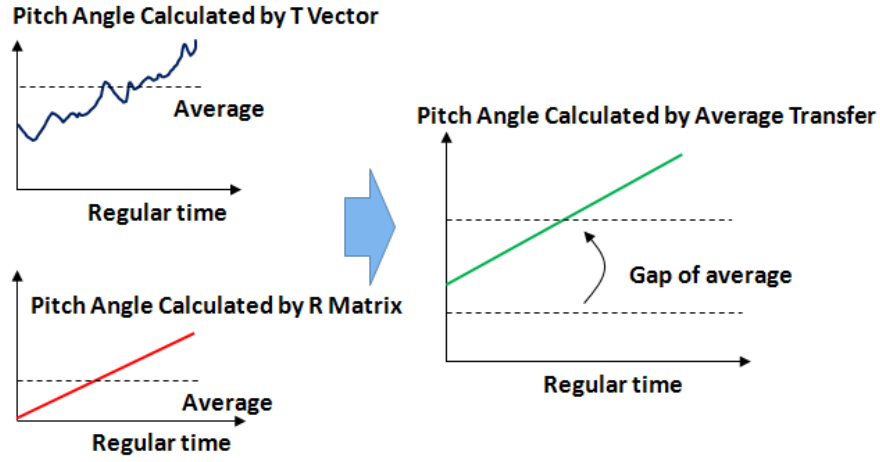


図3.14： 移動平均法用いたピッチ角合成

3.10 接地点俯角による距離推定

図 3.15 に示すように、画像上から前走車の接地点を検出して、接地点から画像中心までの縦方向距離 $L(\text{pix})$ を計算する．式(24)に示すように、接地点俯角 α が求められる．

$$\alpha = \arctan\left(\frac{L}{f}\right) \quad (24)$$

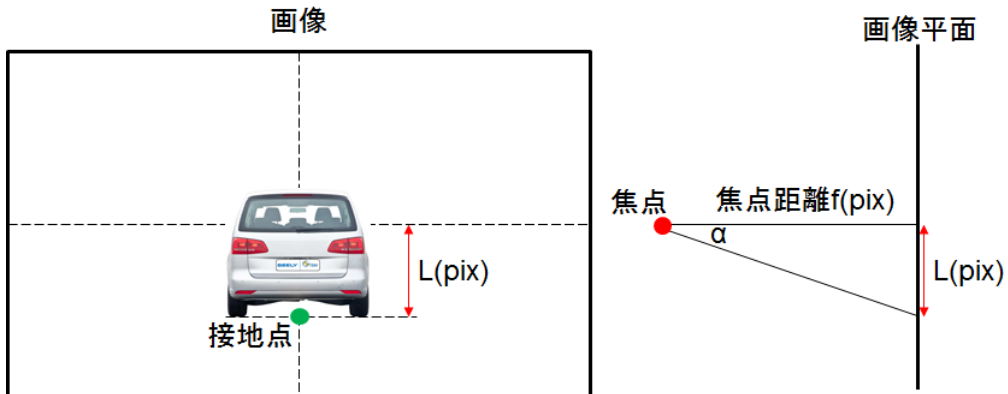


図 3.15： 接地点俯角 α の計算

また，接地点俯角 α を補完するため，ピッチ角 β を本章で紹介した手法で求められる．図 3.16 と式(25)に示すように，ピッチ角 β ，俯角 α と既知のカメラ高を合わせて，三角形関係を利用して車間距離 D を推定可能となる．

$$D = \frac{H_c}{\tan(\alpha + \beta)} \quad (25)$$

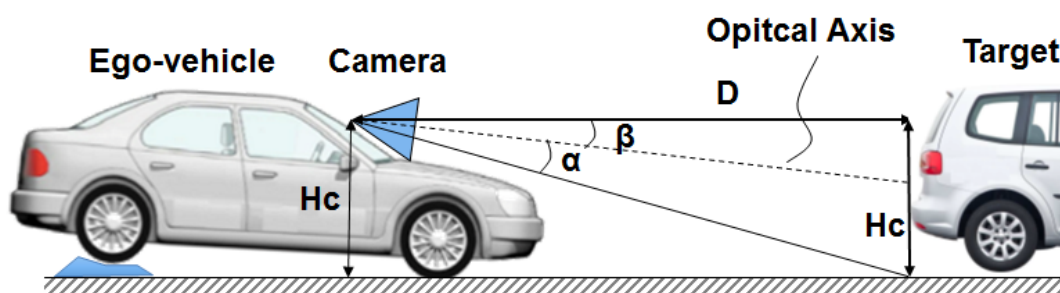


図 3.16： 接地点俯角による距離推定

第4章

ピッチ角推定に基づく車間距離計測システムの評価

本章では、ピッチ角推定に基づく車載単眼カメラによる車間距離計測システムの評価結果を紹介する。

4.1 実験環境

本研究では、シミュレーション画像と実画像の両方を用いて検証実験を実施した。シミュレーション画像を用いて、ピッチ角推定のパラメータ比較実験とロバスト性評価実験を実施した。また、ピッチ角推定に基づく車間距離計測の検証実験を実環境で実施した。

ピッチ角推定精度を評価するため、高精度な真値が必要となる。そのような真値を実環境で得るため、車載用の高精度な慣性計測装置が必要となる。図 4.1 に示すように、慣性測量装置の姿勢と車載単眼カメラの姿勢を一致させるため、慣性測量装置と車載単眼カメラを剛性の高い板で固定する方法が理想的である。しかしながら、表 4.1 に示されるように上記の慣性測量装置のサイズが大きいため、法律に許される範囲内の改造で剛性的な固定を実現することが困難です。また、乗員の安全を考慮すれば、図 4.1 に示されるような取り付けを実現できない。

そのため、可能な取り付け案として図 4.2 のように、慣性測量装置を車両の後部座席付近に設置するものが一般的である。したがって、後部に固定する慣性測量装置とカメラ間の初期姿勢は一致しない。また、車体が完全な剛体ではないため、慣性計測装置と車載単眼カメラ間にねじりや曲げの発生しないように固定することが困難である。車体剛性の評価指標として、ねじれ剛性と曲げ剛性がある。車両によって異なりますが、ねじれ剛性の範囲は 14000Nm/deg ～ 35000Nm/deg 、曲げ剛性の範囲は 8000N/mm ～ 19000N/mm になる。したがっ

て、車両走行中に $\pm 0.05^{\circ}$ ～ $\pm 0.2^{\circ}$ のねじれ変化が発生する可能性があり、カメラと慣性測量装置間の姿勢角のズレに影響する。表 4.1 に示すように、慣性計測装置の測量誤差と取り付け誤差も合わせて $\pm 0.08^{\circ}$ 以上の総合誤差になる。

このため、実映像によるピッチ角推定精度の評価は容易ではない。そこで本研究では、予防安全システム開発専用のシミュレーションソフトを用いてピッチ角推定精度を定量的に評価した。また、実環境における有効性を評価するため、ミリ波レーダーを用いてピッチ角推定に基づく車間距離計測を実験で検証した。

予防安全システム開発専用のシミュレーションソフトを用いて、極端な天候、危険なドライビングシナリオ、良好な再現性、柔軟なカメラ設定などを指定することが可能である。そのため、車載画像処理開発の分野において品質の高いシミュレーション画像をアルゴリズムの設計・開発・検証各段階で幅広く活用しています。本研究では、生成するシミュレーション映像を利用すれば、測量誤差のないピッチ角の真値が得られる。

表 4.1： 慣性計測装置の仕様

	 OXTS 社の RT シリーズ	 GeneSys 社の ADMA-INS
ピッチ角精度	$\pm 0.03^{\circ}$ ～ $\pm 0.05^{\circ}$ 1σ	$\pm 0.05^{\circ}$ 1σ
誤差の累積	$\pm 2^{\circ}$ /1hr	$\pm 1^{\circ}$ ～ $\pm 6^{\circ}$ /1hr
サイズ	23.4×12×8cm	11×17×18cm

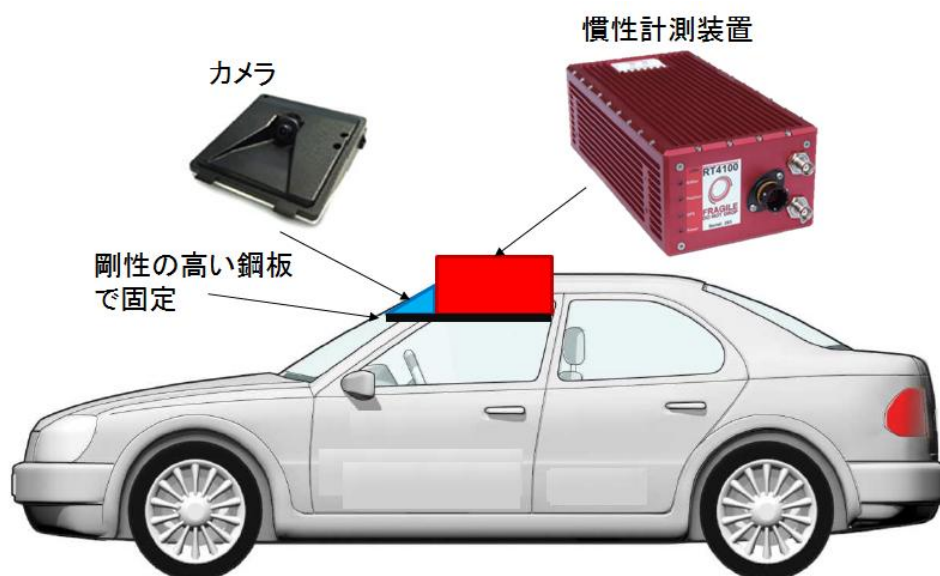


図 4.1： 理想な慣性計測装置固定方法



図 4.2： 実用可能な慣性計測装置固定方法

4.2 シミュレーション画像によるピッチ角推定パラメーター比較実験

本実験では、シミュレーション画像を一般的な車載カメラで撮影された画像と同等な条件下での検証[23]を行うため、サイズを 640 ピクセル×480 ピクセル、フレームレートを 20fps と設定した。カメラの設置位置はフロントガラスの内側で路面からの高さは 1.2m である。カメラ横方向の視野角は 29.8° 、縦方向の視野角は 22.6° である。車両ピッチ角の変動範囲を一般車両の限界であ

る $\pm 2.5^\circ$ と設定した。

誤差のないピッチ角真値を利用して提案手法を評価するため、前記のシミュレーション映像で実験環境を構築した。図 4.3 に示されたように、実映像と同様な処理条件を満足させるため、シミュレーション映像をモノクロ画像に指定し、色情報を持たず輝度情報のみで画像処理を行った。さらに、シミュレーション映像と実映像間の等価性を検証するため、一定期間内のシミュレーション映像と実映像に同様な処理を行い、検出されたコーナー一点の数を評価した。図 4.4 に示されたように、両映像から検出されたコーナー一点の数が同水準に維持している。シミュレーション映像から検出されたコーナー一点の数の平均値は 427 点／フレーム、実映像の場合は 460 点／フレームである。



図4.3： シミュレーション画像と実画像の比較

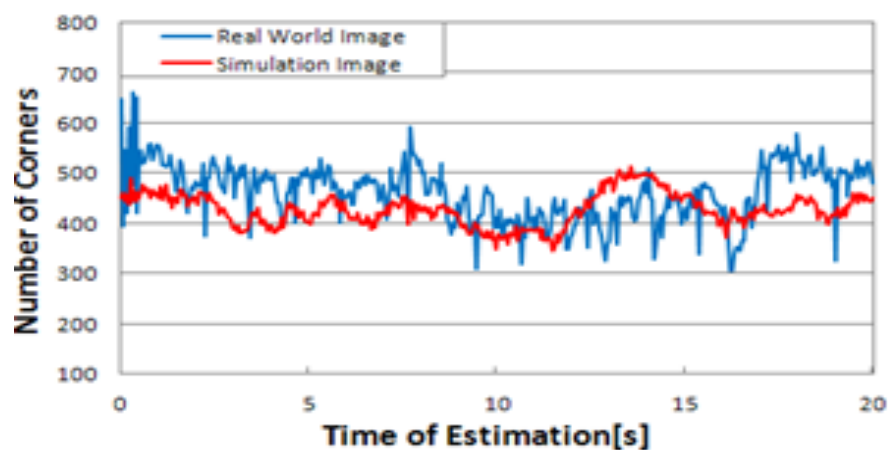


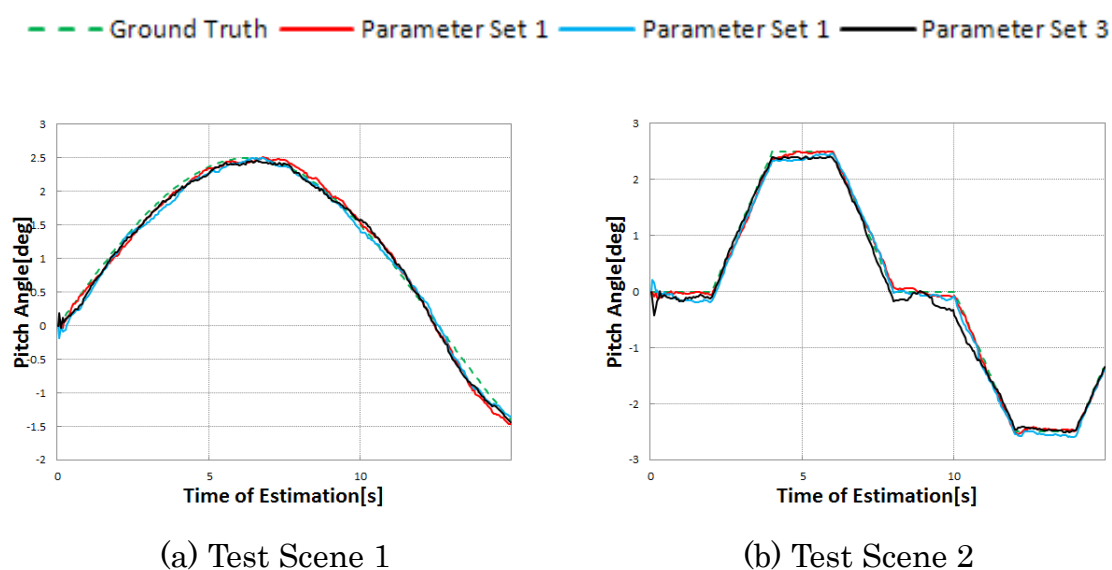
図4.4： コーナー一点数の比較

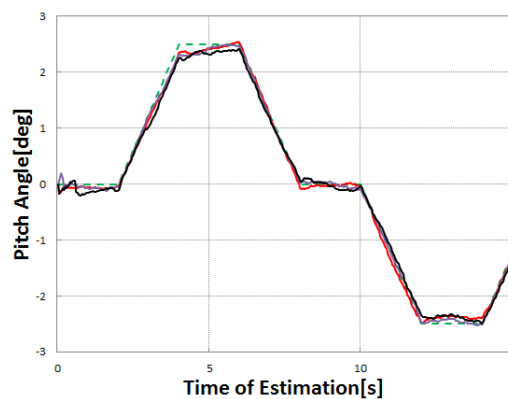
表4.2：ピッチ角推定検証実験の項目

実験	対応シーン	自車速[km/h]	シミュレーション条件
1	市街地	30	自車低速走行
2		40	前走車多数存在
3	郊外道路	50	自車中速走行
4		60	砂利道によるノイズ
5	高速道路	80	カーブ走行, R=500m
6		100	自車高速走行

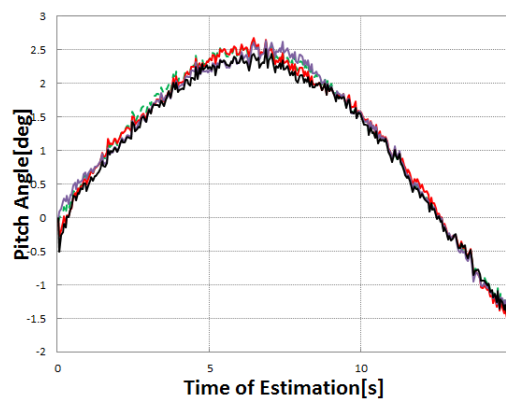
本実験では、市街地、郊外道路および高速道路の環境を想定し、自車両の速度を 30km/h～100km/h 範囲に設定した。表 4.2 に示すように、異なるシミュレーション条件に応じた車載カメラのテスト用動画像を出力した。

本実験では、パラメーターによる性能変化を考査するため、異なるセットで評価を行った。セット 1 では、移動平均法の平均値の算出時間を 1.5s、コーナー一点間の最小距離を 6 ピクセルと指定した。セット 2 では、ピッチ角のリアルタイム性を考慮した上で移動平均値の算出時間を 1.0s、コーナー一点間の最小距離を 6 ピクセルと指定した。セット 3 では、移動平均法の平均値の算出時間を 1.5s、オプティカルフロー推定の安定性を考慮した上でコーナー一点間の最小距離を 8 ピクセルと指定した。提案手法で推定されたピッチ角に真値を重ね書きして、図 4.5 に示す。

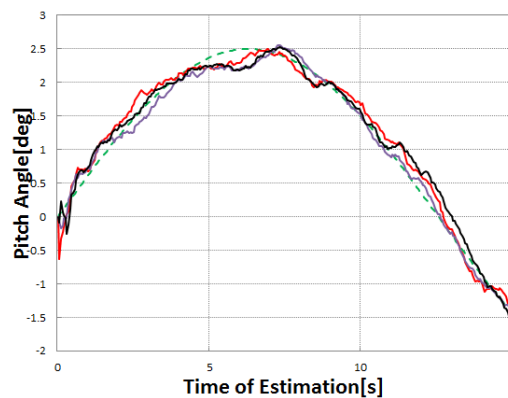




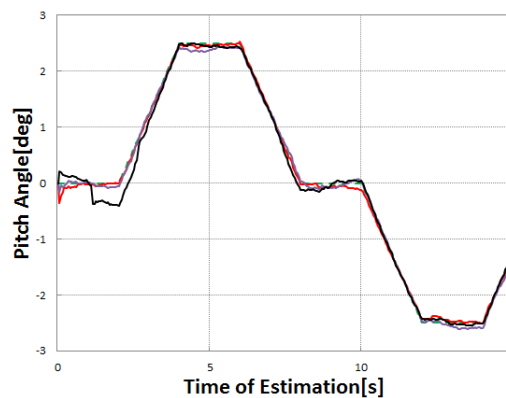
(c) Test Scene 3



(d) Test Scene 4



(e) Test Scene 5



(f) Test Scene 6

図 4.5 : ピッチ角推定パラメーター比較実験の結果

表 4.3 : ピッチ角推定パラメーター比較実験の結果

パラメーター	各実験における誤差 [deg]					
	実験1	実験2	実験3	実験4	実験5	実験6
セット1	0.053	0.040	0.046	0.042	0.086	0.036
セット2	0.058	0.055	0.048	0.049	0.076	0.036
セット3	0.048	0.092	0.061	0.067	0.11	0.10

各実験の誤差を標準偏差で表 4.3 に示す. 接地点俯角による距離推定法を利用

する場合，車間距離が 40m 以内において，測距誤差が予防安全システムの精度要件とする 10%[12]に達するため，式(25)によって 0.15° 以内のピッチ角推定精度が必要となる．図 4.5 および表 4.3 に示すように，提案手法によるピッチ角推定の誤差は，異なるパラメーターセットにおいて 0.11° 以内に収まり，シミュレーション環境下で 0.15° の精度要件に満たした．また，各パラメーターの中にセット 1 で得られた結果が最も安定し，推定精度が 0.086° 以内に収まったことが確認された．したがって，シミュレーション画像によるピッチ角推定ロバスト性実験において，パラメーターセット 1 を用いて提案手法のロバスト性を評価する．

4.3 シミュレーション画像によるピッチ角推定ロバスト性実験

4.2 節でパラメーター設定の比較実験を実施した．そのパラメーターセット 1 のロバスト性を検証するため，より複雑なテストシナリオでロバスト性検証実験[31]を実施した．

本実験では，画像サイズを 640 ピクセル×480 ピクセル，フレームレートを 20fps と設定した．カメラの設置位置はフロントガラスの内側で路面からの高さは 1.2m である．カメラ横方向の視野角は 29.8° ，縦方向の視野角は 22.6° である．車両ピッチ角変動の波形を正弦波及び台形波と設定し，その変動範囲を一般車両の限界より大きな $\pm 3.0^{\circ}$ と規定した．市街地，郊外道路及び高速道路など異なる環境を考慮し，36km/h から 100km/h までの自車速を指定した．図 4.6 に示されたように，複雑な環境下のロバスト性を評価するため，雨・霧・雪，カーブ走行，多数の対向車（二輪車を含めて）などのシーンでも評価を行った．



(a) Simulation image: Fog



(b) Simulation image: curve



(c) Simulation image: snow

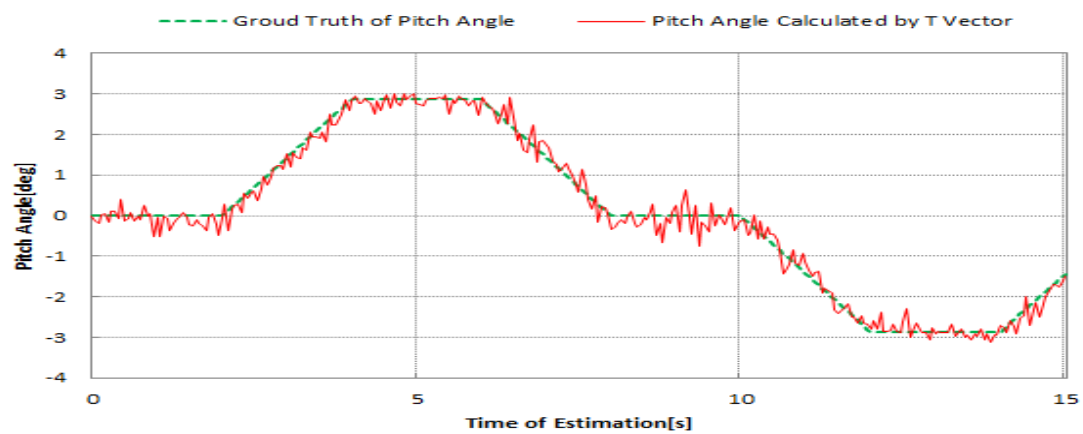


(d) Simulation image: Oncoming car

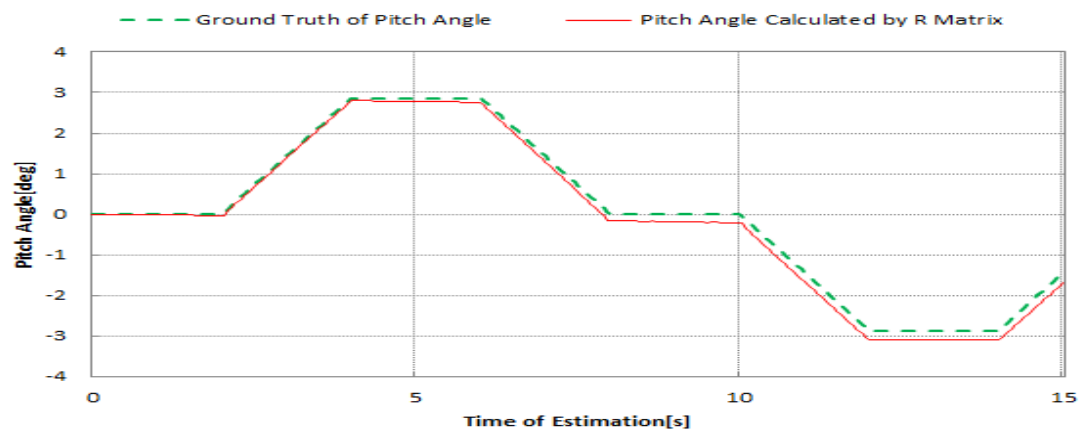
図4.6： 異なる環境下のシミュレーション映像

各シーンにおいての自車両，前走車及び対向車の走行シナリオを設定し，車載カメラに撮られた動画像を出力する．上記条件のもとに作成された．それぞれ 15s の出力画像を処理し，提案手法の評価を行った．

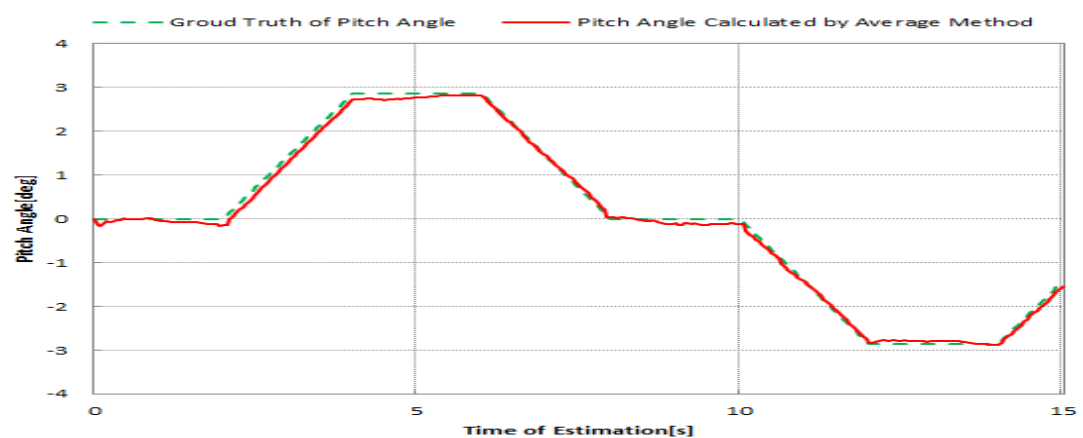
シーン1は、ピッチ角変化が台形波で、車両速度が36km/hで、環境が霧（視程=500m）での条件下で実施した。その実験結果は以下になる。



(a) Pitch angel calculated by Translation vector



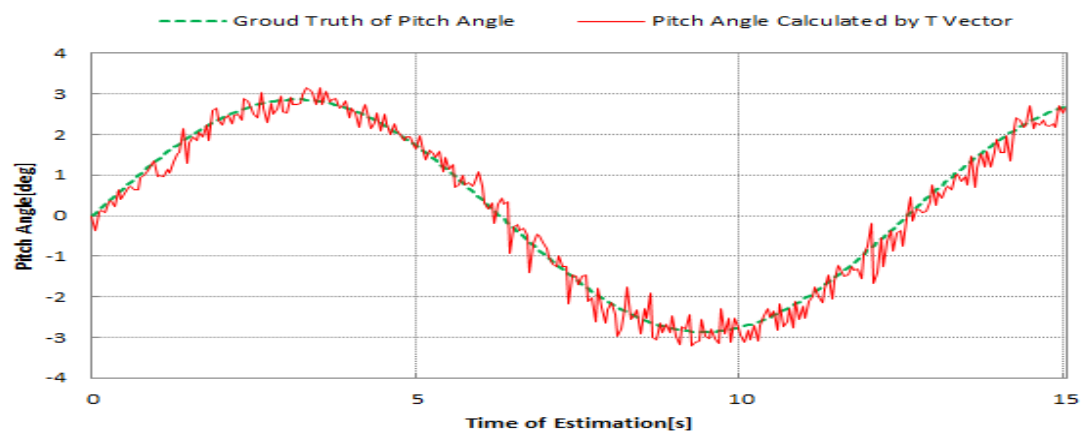
(b) Pitch angel calculated by Rotation matrix



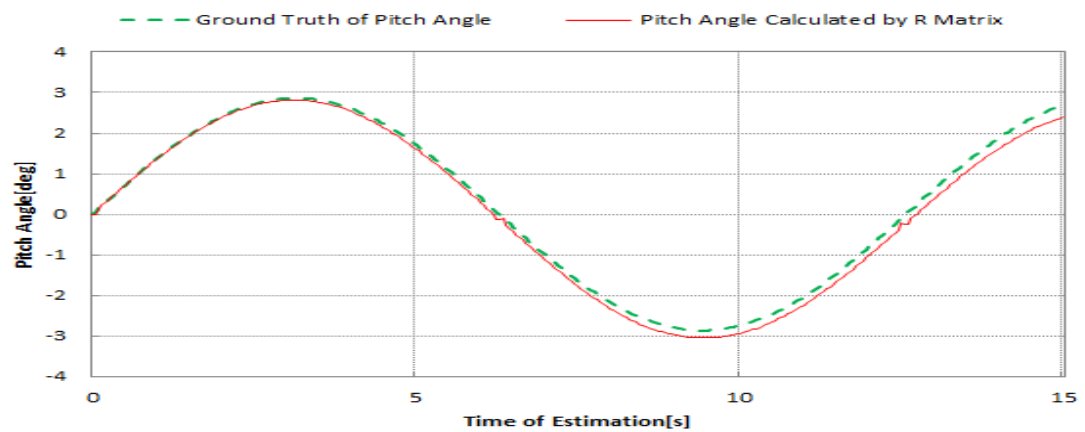
(c) Pitch angel calculated by average method

図 4.7 : シーン1の実験結果

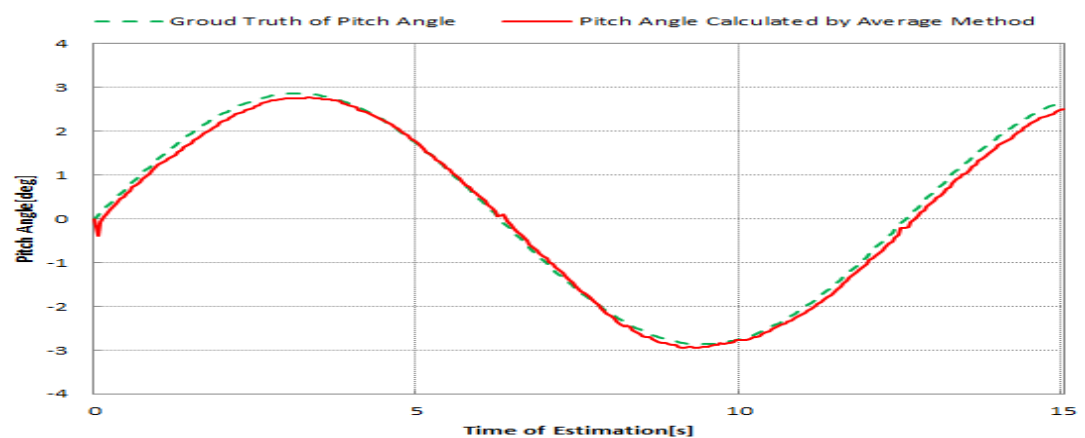
シーン2は、ピッチ角変化が正弦波で、車両速度が 36km/h で、環境がやや強い雨での条件下で実施した。その実験結果は以下になる。



(a) Pitch angel calculated by Translation vector



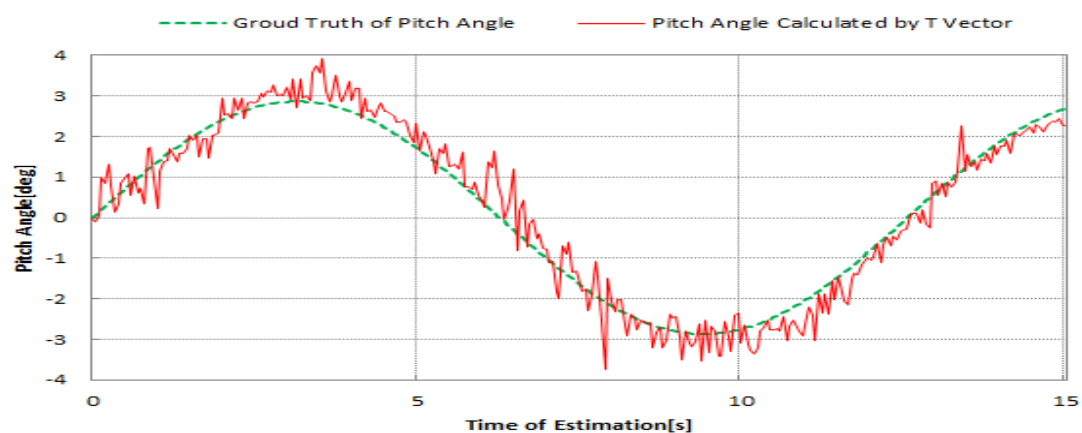
(b) Pitch angel calculated by Rotation matrix



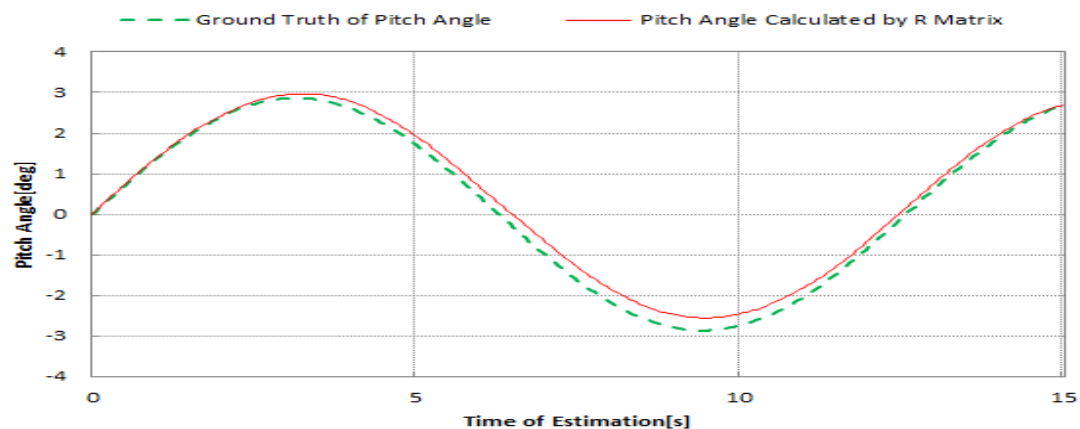
(c) Pitch angel calculated by average method

図 4.8 : シーン 2 の実験結果

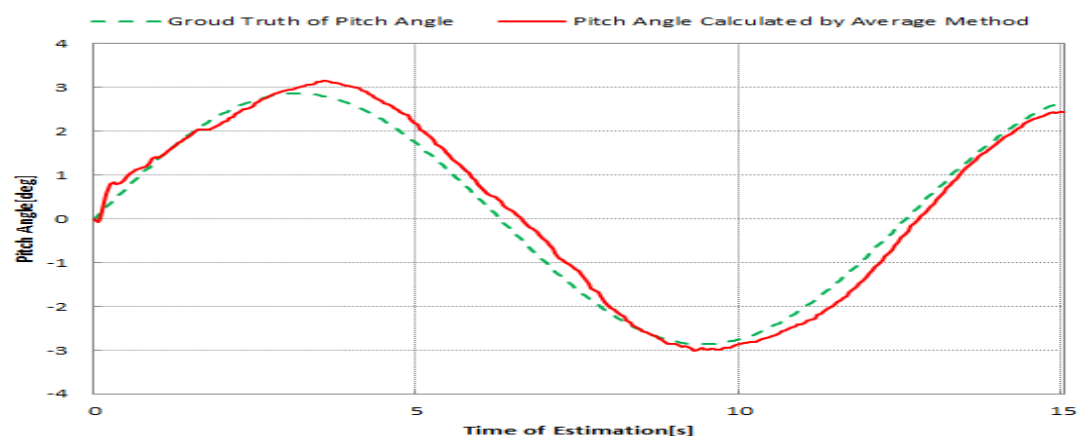
シーン3は、ピッチ角変化が正弦波で、車両速度が 54km/h で、環境がカーブ (R=800m) での条件下で実施した。その実験結果は以下になる。



(a) Pitch angel calculated by Translation vector



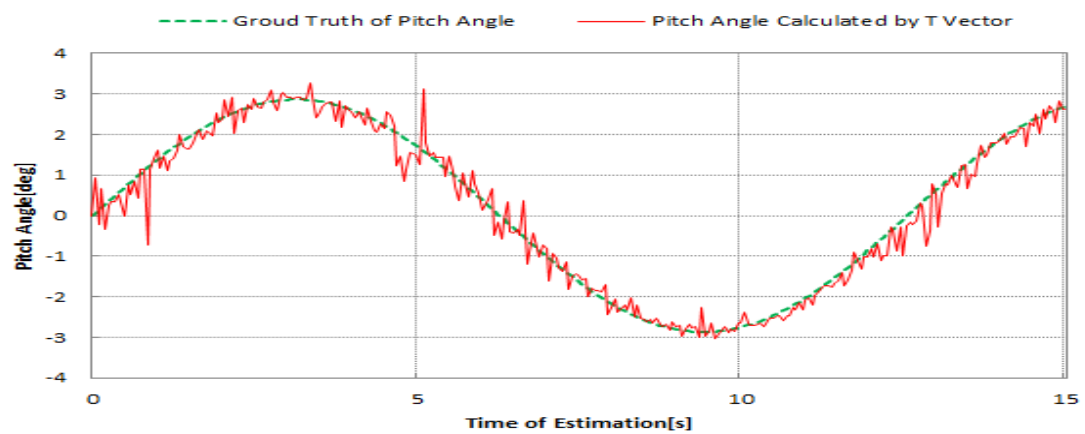
(b) Pitch angel calculated by Rotation matrix



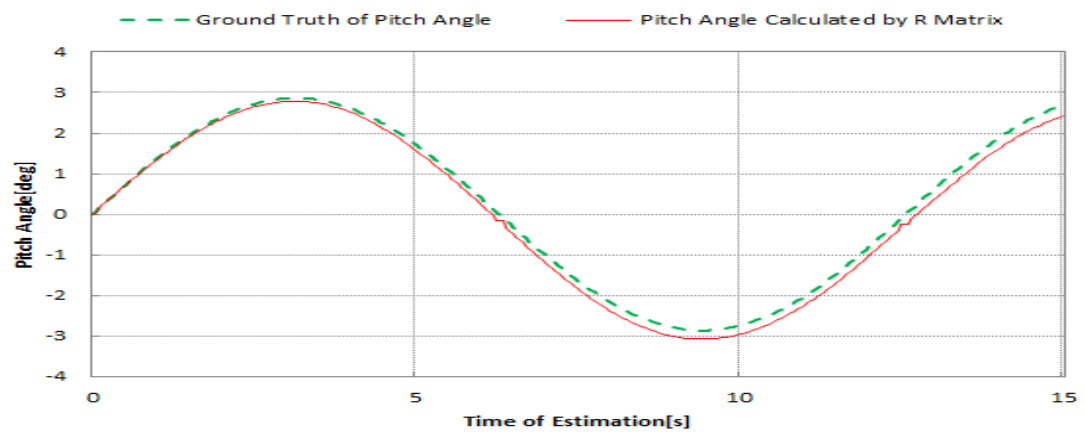
(c) Pitch angel calculated by average method

図 4.9 : シーン3の実験結果

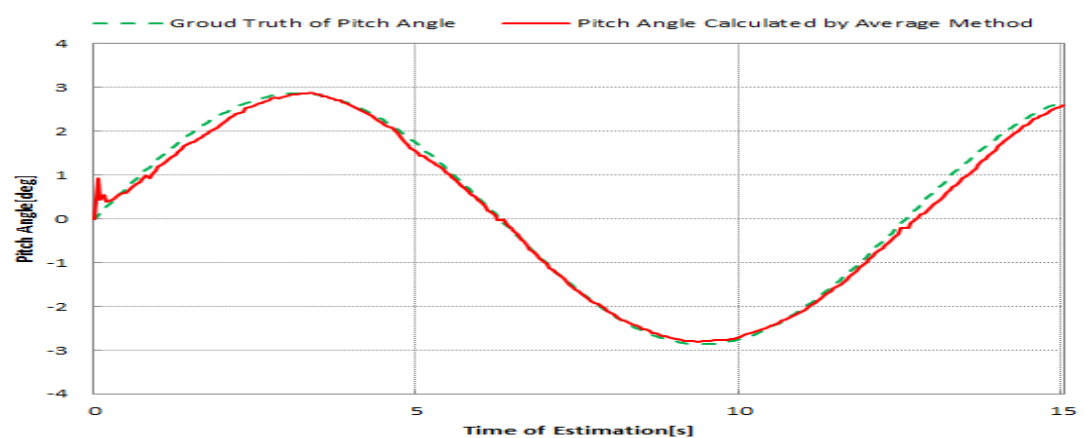
シーン4は、ピッチ角変化が正弦波で、車両速度が 54km/h での条件下で実施した。その実験結果は以下になる。



(a) Pitch angel calculated by Translation vector



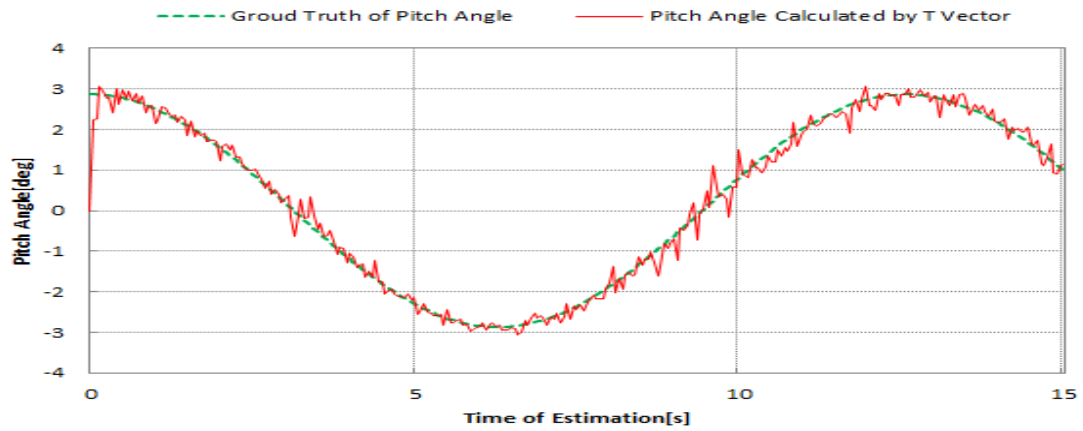
(b) Pitch angel calculated by Rotation matrix



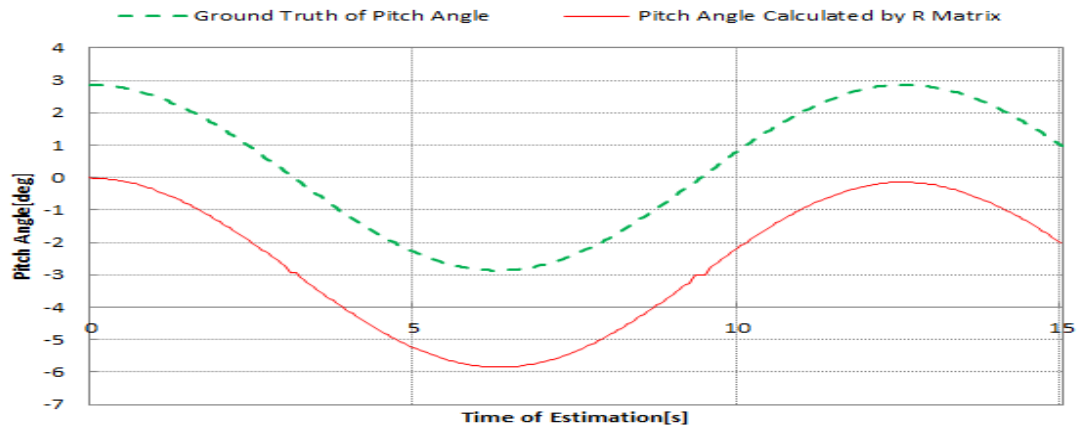
(c) Pitch angel calculated by average method

図 4.10 : シーン 4 の実験結果

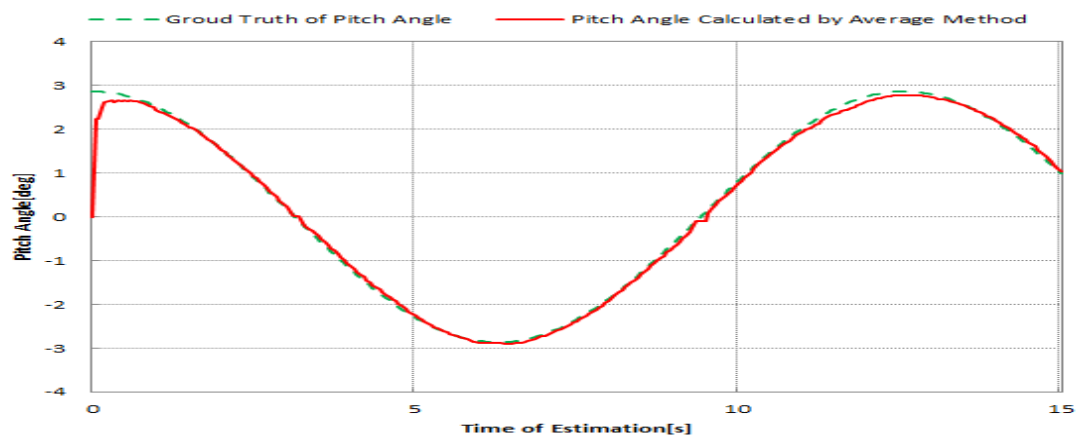
シーン5は、ピッチ角変化が正弦波で、車両速度が 54km/h で、環境は初期ピッチありでの条件下で実施した。その実験結果は以下になる。



(a) Pitch angel calculated by Translation vector



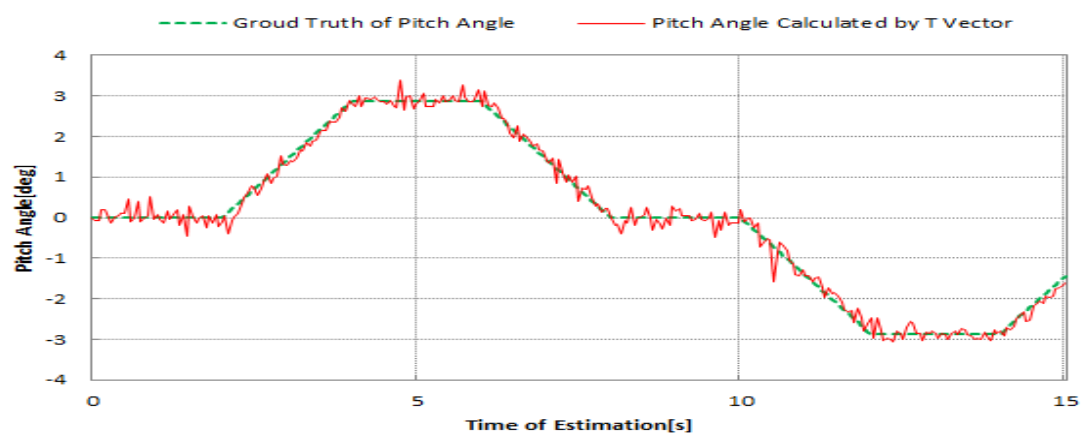
(b) Pitch angel calculated by Rotation matrix



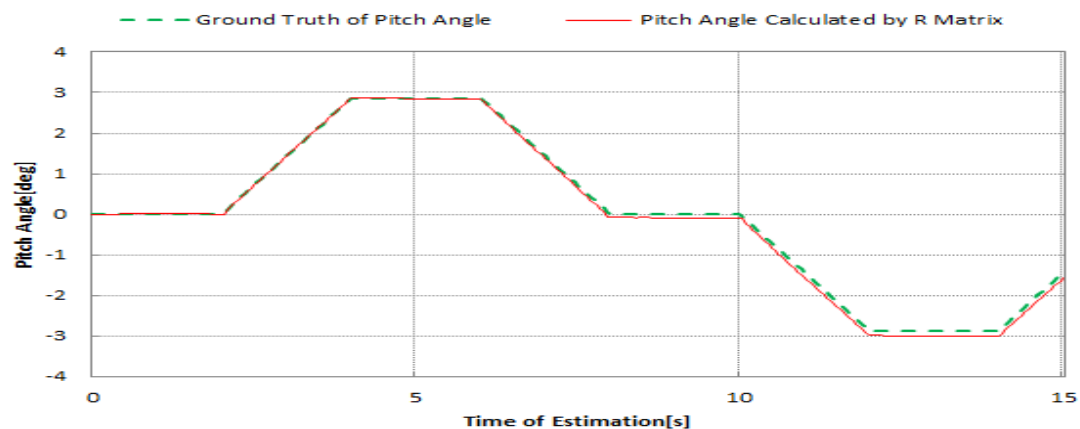
(c) Pitch angel calculated by average method

図 4.11 : シーン 5 の実験結果

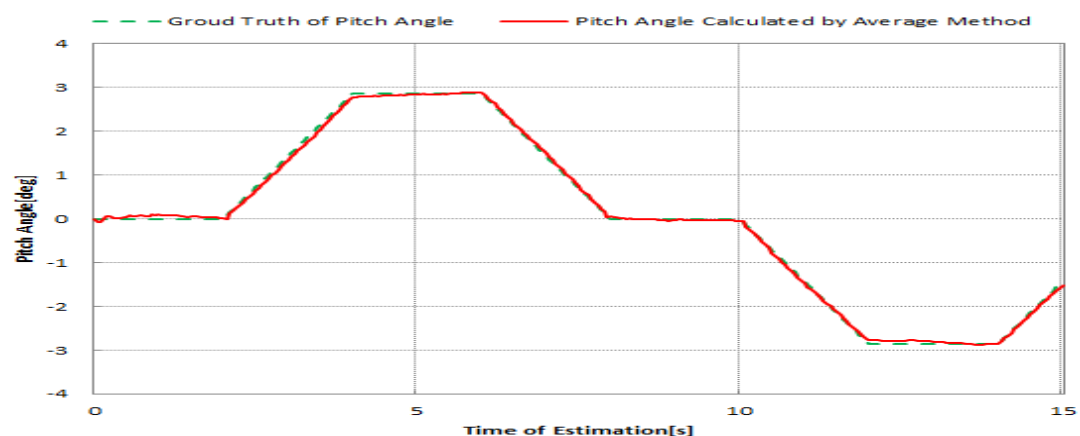
シーン6は、ピッチ角変化が台形波で、車両速度が 54km/h で、環境は多数の対向車での条件下で実施した。その実験結果は以下になる。



(a) Pitch angel calculated by Translation vector



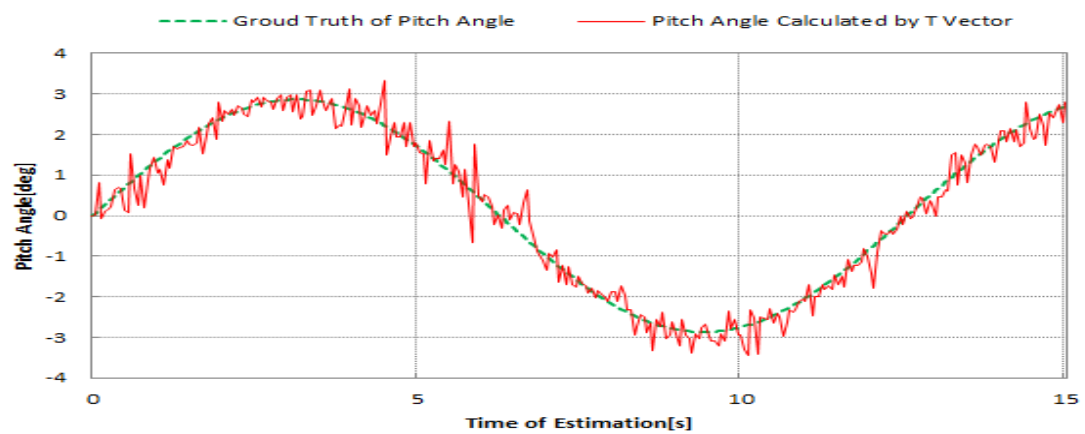
(b) Pitch angel calculated by Rotation matrix



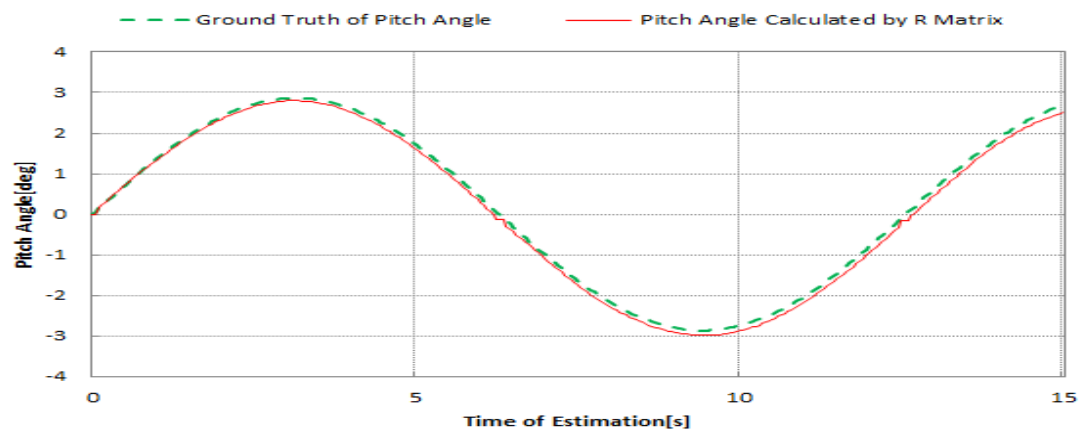
(c) Pitch angel calculated by average method

図 4.12 : シーン6の実験結果

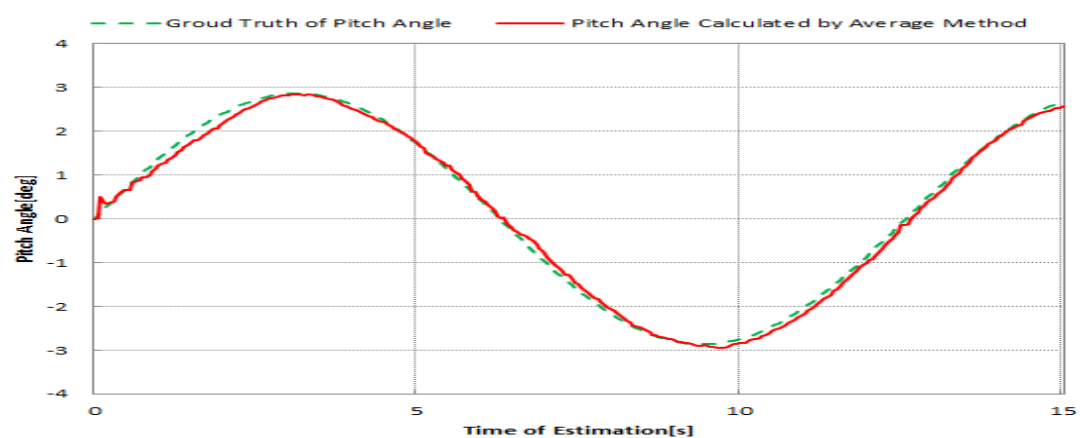
シーン7は、ピッチ角変化が正弦波で、車両速度が 65km/h で、環境はやや強い雪での条件下で実施した。その実験結果は以下になる。



(a) Pitch angel calculated by Translation vector



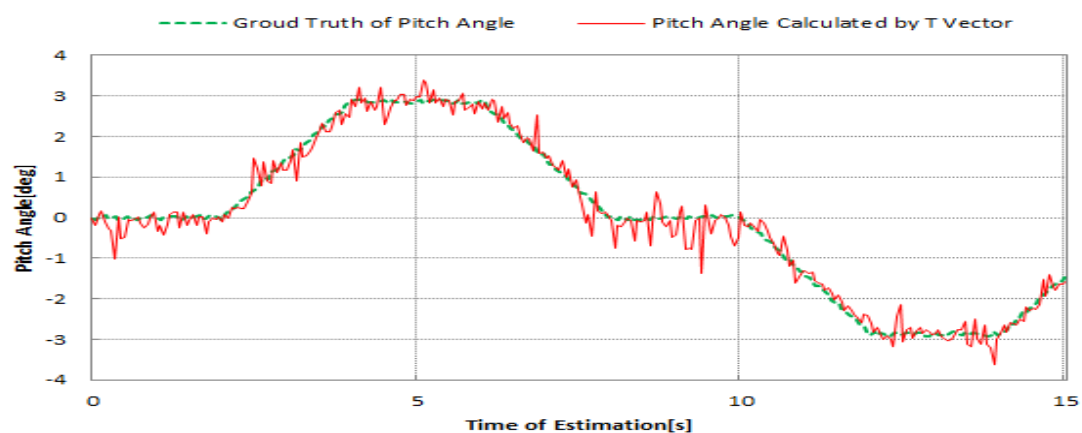
(b) Pitch angel calculated by Rotation matrix



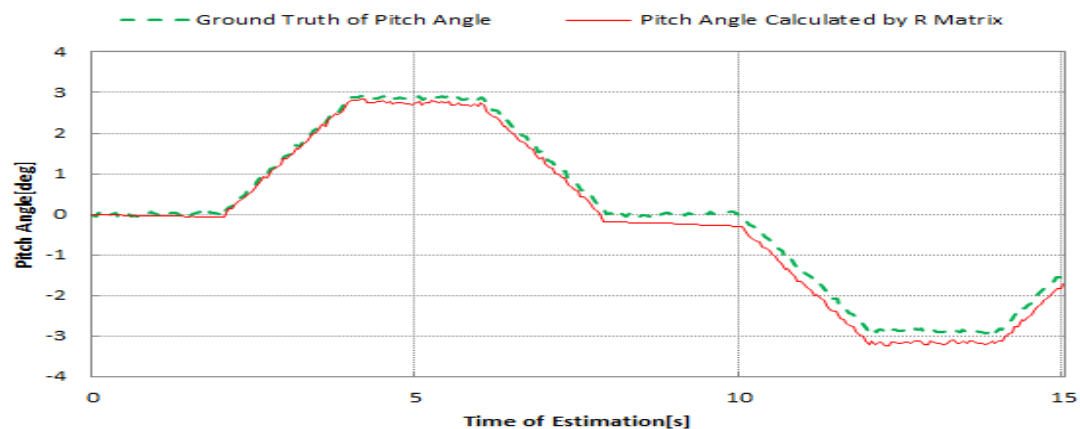
(c) Pitch angel calculated by average method

図 4.13 : シーン7の実験結果

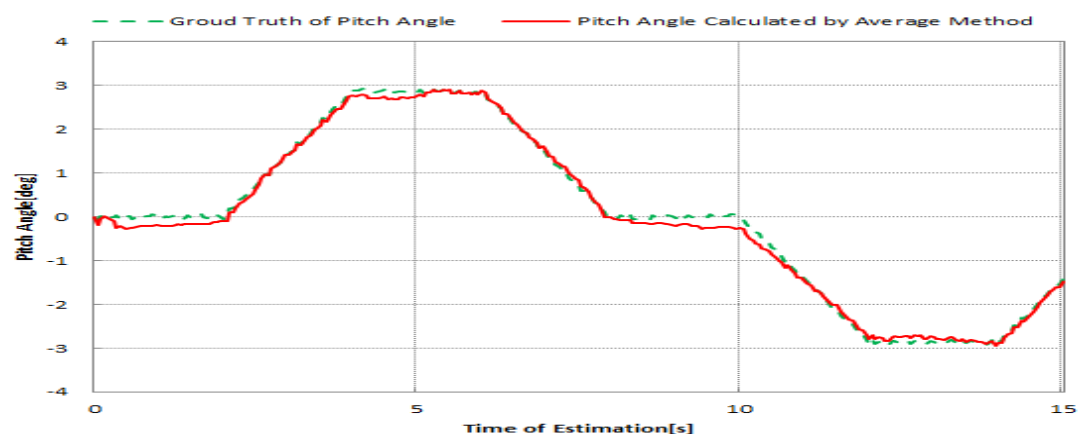
シーン8は、ピッチ角変化が台形波で、車両速度が 72km/h で、環境はランダムなピッチ角ノイズ付きでの条件下で実施した。その実験結果は以下になる。



(a) Pitch angel calculated by Translation vector



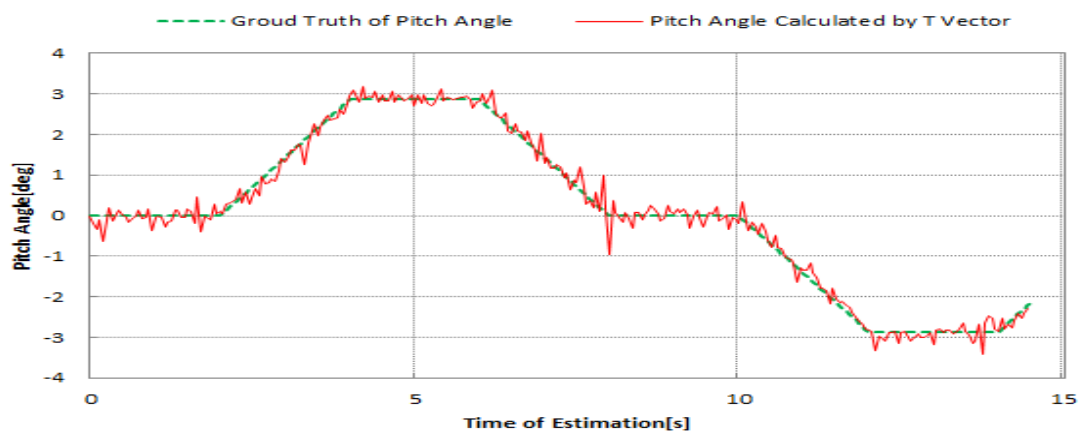
(b) Pitch angel calculated by Rotation matrix



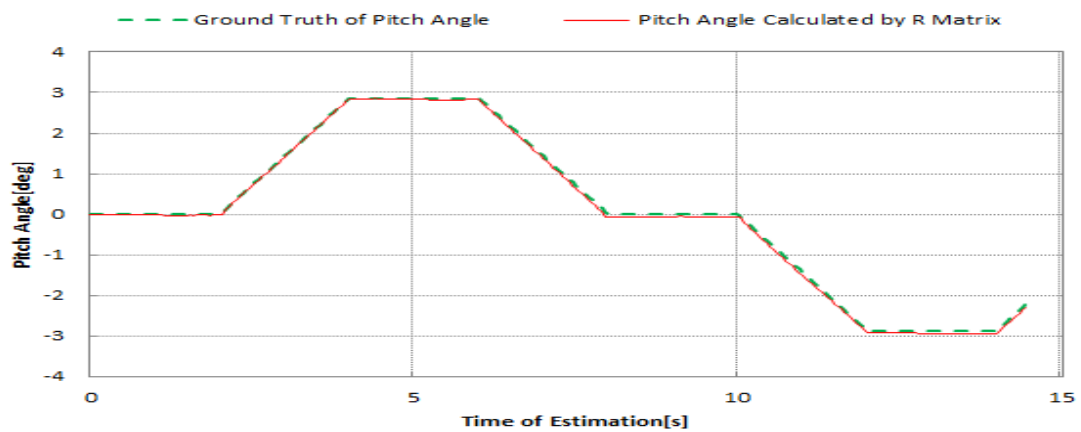
(c) Pitch angel calculated by average method

図 4.14 : シーン 8 の実験結果

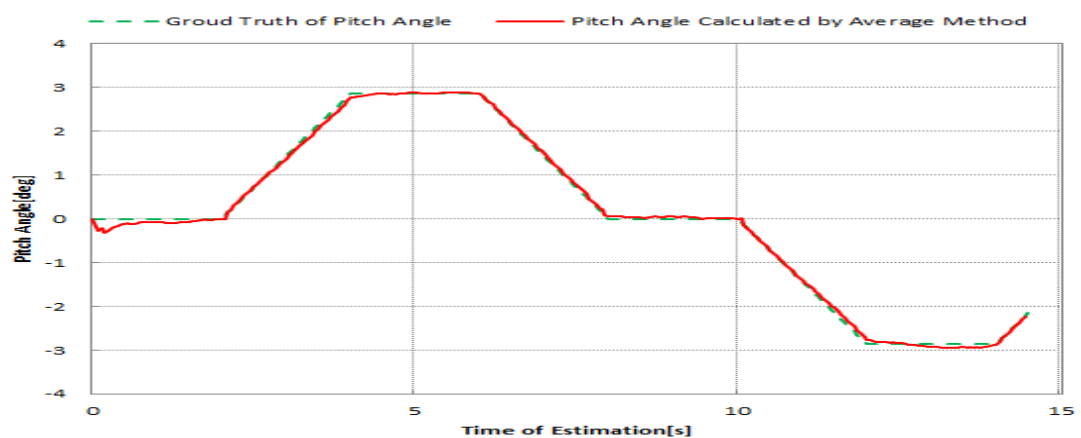
シーン9は、ピッチ角変化が台形波で、車両速度が 100km/h で、環境は自転車高速走行での条件下で実施した。その実験結果は以下になる。



(a) Pitch angel calculated by Translation vector



(b) Pitch angel calculated by Rotation matrix



(c) Pitch angel calculated by average method

図 4.15 : シーン9の実験結果

九つのシーンそれぞれの評価条件を表 4.4 に示された．初期処理部分以外のデータの標準偏差を用いて誤差を求め，評価指標として使われる．表 4.4 に示すように，本提案手法を用いたピッチ角推定の誤差の標準偏差を 0.15° 以内に収めた．また，自車両の速度，対向車の数または雨・霧・雪などの悪環境による影響が極端に小さいことを示した．自車両がカーブに走行する場合，限定的な影響が見られる．

表 4.4： ピッチ角推定ロバスト実験結果

項目	実験条件				標準偏差 [deg]
	ピッチ 角の波 形	自車速度	前走車ま での距離	他の条件	
Scene01	台形波	36km/h	30m	霧（視程=500m）	0.046
Scene02	正弦波	36km/h	30m	やや強い雨	0.072
Scene03	正弦波	54km/h	30m	カーブ（R=800m）	0.150
Scene04	正弦波	54km/h	40m	なし	0.098
Scene05	正弦波	54km/h	40m	初期ピッチあり	0.034
Scene06	台形波	54km/h	50m	多数の対向車	0.028
Scene07	正弦波	65km/h	60m	やや強い雪	0.064
Scene08	台形波	72km/h	50m	ランダムノイズ 付き	0.076
Scene09	台形波	100km/h	80m	自車高速走行	0.046

接地点俯角による距離推定手法を利用する場合， 0.15° のピッチ誤差による距離推定誤差は表 4.5 に示されるようになる．自車から前車までの車間距離が 40m 以内の範囲において，車載カメラによる予防安全システムの測距要件とする 10% に満足し，十分な距離計測性能の実現性を示した．

表 4.5： ピッチ誤差による距離推定誤差

実際距離	10m	20m	30m	40m	50m
誤差範囲	2.2%	4.6%	7.0%	9.6%	12.2%

4.4 実環境における距離推定検証実験

実画像を用いて距離計測の検証実験[23]を実施した．実環境において車載カメラによる距離推定手法の有効性を検証するため，目標車輦との車間距離の真値を計測する必要がある．本実験では，高精度な車載用ミリ波レーダーを利用して，ベンチマック用の距離データを記録した．図4.16に示すように，ミリ波レーダーと車載カメラを実験車両に取り付けた．ミリ波レーダー（計測精度は50m範囲内で $\pm 0.2\text{m}$ ）に検知された距離情報と車載カメラに撮られた映像情報を同期に記録した．



図4.16： 実験車両

実画像のサイズは640ピクセル×480ピクセル，フレームレートは20fpsである．また，カメラ横方向の視野角は 32.1° ，縦方向の視野角は 24.3° である．図4.17に示すように，車載単眼カメラはフロントウィンドの内側で高さが1.16mのところに設置した．車両前進方向において，車載カメラとミリ波レーダー間の距離オフセットは1.77mである．4.2節の検証結果をもとに，実環境における距離推定にはパラメーターとしてセット1を選択した．

市街道路，郊外道路および高速道路において，異なる交通環境下の映像を撮影した．自車両前方の10m～50m間に走行する前走車の距離を計測し，ミリ波レーダーで検知した目標車両の距離真値と比較して提案手法の測距精度を評価した．市街地で実施した実験は，交通状況および周辺車両速度の制限によって近距離データのみ収集した．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ため，接地点を画像上に直接入力した．

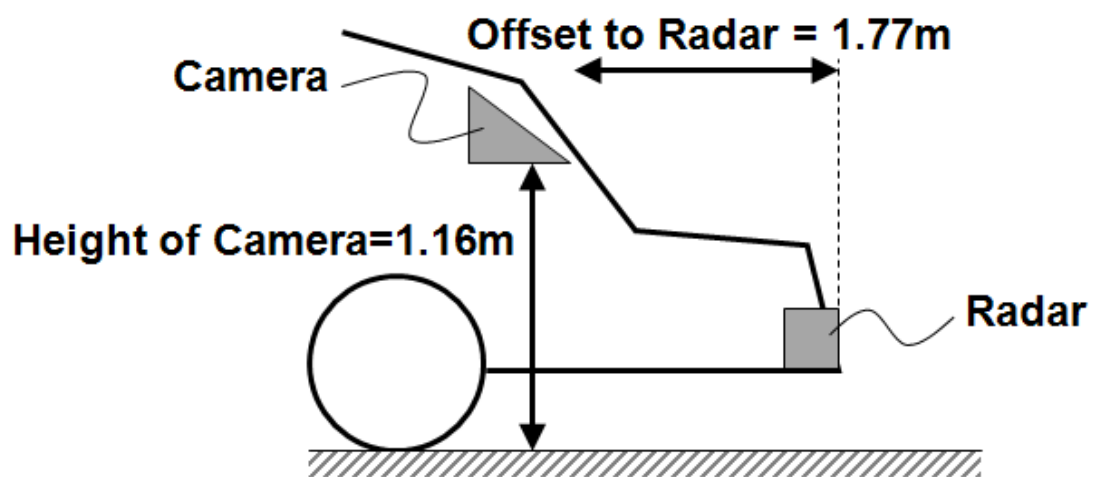
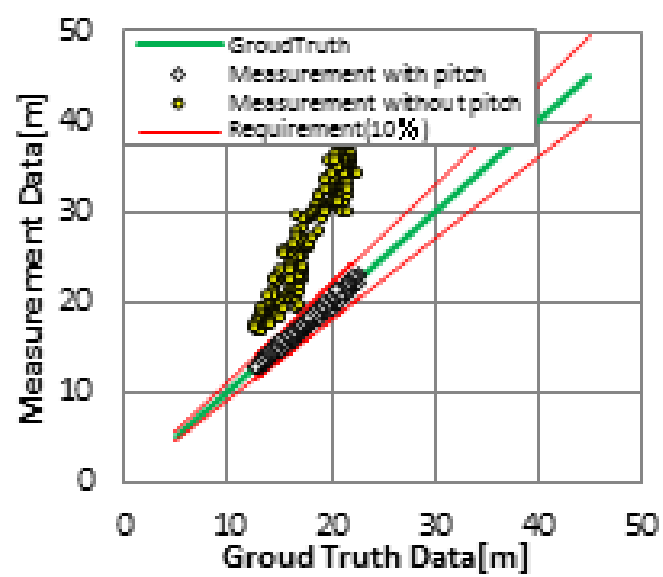


図4.17： カメラとミリ波レーダーの位置関係

市街道路において、距離計測精度の検証実験を実施した。その実験結果は以下になる。



(a) Image sample of city road



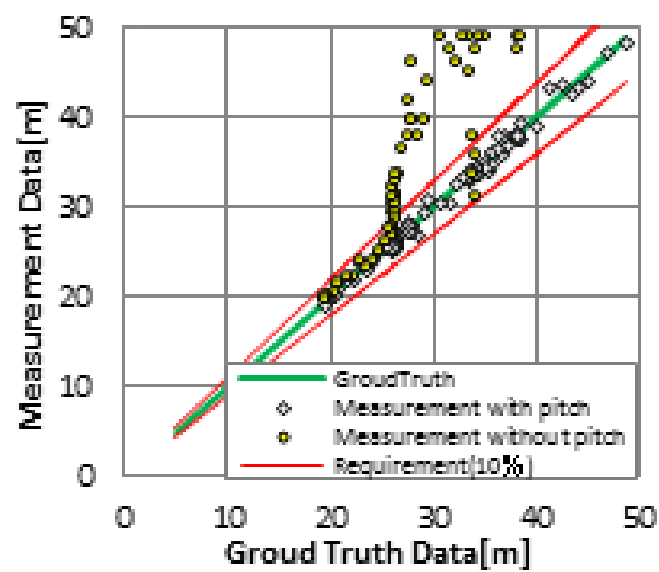
(b) Result of city road test

図 4.18 : 市街地テストの実験結果

郊外道路において、距離計測精度の検証実験を実施した。その実験結果は以下になる。



(a) Image sample of urban road



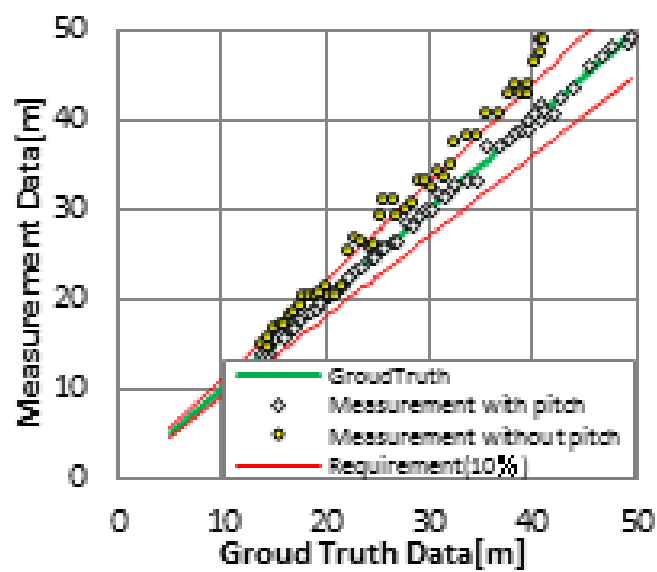
(b) Result of urban road test

図 4.19 : 郊外路テストの実験結果

高速道路において、距離計測精度の検証実験を実施した。その実験結果は以下になる。



(a) Image sample of highway road



(b) Result of highway road test

図 4.20 : 高速道路テストの実験結果

図 4.18, 4.19, 4.20 に示すように, 実環境において前走車との車間距離が 40m 以内の場合, 提案手法による距離推定誤差が設定した精度要件とする 10%に達した. それに対して, 車載カメラによるピッチ角推定を実施しない場合において距離推定の最大誤差は実距離の 1 倍以上に拡大した. 以上の結果により提案手法の有効性を検証した.

本実験には, CPU が Intel i3-4000M 2.40GHz, メモリが 4.0GB の計算機を使用し, 画像 1 枚の処理に平均 163ms を要した. 本実験では実時間処理が可能な速度に達しなかったものの, 実装の工夫により実時間処理も可能であると考えられる.

第5章

結論

5.1 結論

本論文では、車載単眼カメラのみで累積誤差が発生せず初期姿勢推定可能な高精度なピッチ角推定手法を提案し、推定されたピッチ角に基づく車載単眼カメラによる車間距離計測システムを実現した。並進ベクトルから車載カメラが走行道路に対するピッチ角を推定する独特な手法を提案した。そのピッチ角と回転行列から分解した前後フレーム間のピッチ角レートを移動平均法で合成し、高精度なピッチ角推定を実現した。我々の知る限り、カメラ自己運動の並進ベクトルを利用したピッチ角推定は本研究で始めて提案された。また、並進ベクトルから推定したピッチ角と回転行列から推定したピッチ角レートを移動平均法で合成する手法も、本論文で始めて提案された。

本論文では、シミュレーション画像と実画像の両方を用いて提案システムの有効性を検証した。シミュレーション環境でピッチ角推定の精度を検証し、実環境において距離計測システムの精度を検証した。以下の結果が得られた。

- ① 提案手法によるピッチ角推定は累積誤差が発生しないことを確認できた。また、提案手法は初期姿勢のピッチ角を推定可能であることを確認できた。
- ② 提案手法によるピッチ角推定誤差の標準偏差が 0.15° 以下を達成した。
- ③ 提案されたピッチ角推定手法に基づいた車間距離計測システムは、50m 範囲内のターゲットに対して距離推定精度は、技術要件である $\pm 10\%$ に以内に収めた。

上記の結果によって、提案手法は近距離・低速度域の予防安全システムに適用可能な性能を有することを確認した。

また、開発したシステムを用いて、本来の研究目的ではない用途を発見した。提案手法を用いて、車両の操作安定性を評価することが可能である。すなわち、提案手法を用いて自動車の急加速または急ブレーキ時のピッチ角を計測することが可能である。提案システムを用いてより軽量化した車両操作安定性評価装

置を実現できる．

5.2 今後の展望

近年，予防安全システムや走行支援システムが普及し続け，車載センシング技術の開発が盛んでいる．距離情報と属性情報の両方を捉えるセンシング手段としては高度な画像処理を持つ車載単眼カメラが注目されている．単眼カメラはターゲット属性を判定可能な点においてミリ波レーダーなどに比べて優位性を持つが，測距性能は劣っている．一方，カメラ単独で構成されるシステムにおいても，レーダーとビジョンから構成されるデータフュージョンシステムにおいても，車載単眼カメラの測距能力が不可欠である．

これまで提案されたピッチ角推定手法では，累積誤差と初期姿勢の推定が不可能のため，安定した車載単眼カメラによる距離推定を実現できない．本研究では，累積誤差なしかつ初期姿勢推定可能なピッチ角推定手法を提案したことによって，より高精度かつ安定な車載単眼カメラに基づいた車間距離計測システムを実現できた．

本研究では，シミュレーション環境と実環境において，提案手法のロバスト性を検証した．今後の課題として路面状況の変化（トンネルなど）や夜間において提案手法の有効性を検証する必要がある．トンネルや夜間などの環境照明不良なシチュエーションにおいて，カメラハードウェアが可視光に対する感度を高めながら，赤外領域にも撮影できる能力が必要とする．

本研究では，市街地，郊外道路，高速道路などの環境で車間距離計測システムの精度を評価した．将来，予防安全システムや走行支援システムを実現するため，距離推定手法のみならず，物体認識（車輻，歩行者など）手法の開発も必要とする．

謝辞

この研究を進めるに当たって様々な御指導，御助言を頂き，佐藤誠教授，張曉林教授に深く感謝致します。

本論文を執筆するにあたり，有益な議論と貴重な御意見をいただきました。熊澤逸夫教授，中村健太郎教授，長橋宏教授，山口雅浩教授に深く感謝いたします。

5年間において，研究内容にこだわらず様々な相談に乗ってくださった，小林剛氏，加藤芳彦氏，黄河氏，李嘉茂氏をはじめとする佐藤研究室や張研究室の皆様，この場を借りてお礼申し上げます。邢玉冠氏を手伝っていただき，日本語論文や発表資料無事にできます。同じ中国からの留学生たちお陰様で，日本での留学生活を楽しく過ごせることができました。また，事務の方お世話になった吉田貴子氏，黒澤みゆき氏，西條梨恵氏，安見久仁子氏，西瀬由利子に感謝致します。

家族の皆様からの支えがあったからこそ，社会人になっても目標を忘れず，様々な困難を乗り越え，博士課程の修了を迎えます。家族の皆様感謝いたします。特に妻の浦曉瀾氏，自分の仕事が忙しいことにも関わらず，家事と育児を一人でやっていただき，私は研究に専念することができました。まことにありがとうございました。

参考文献

- [1]. “第 9 次交通安全基本計画”，内閣府（2011）
- [2]. “平成 25 年度交通安全白書”，内閣府（2013）
- [3]. “中華人民共和国道路交通事故統計年報”（2011）
- [4]. D. Navneet and B. Triggs: “Histograms of oriented gradients for human detection”, Computer Vision and Pattern Recognition 2005, pp.886-893 (2005)
- [5]. Y. Freund and R. E. Schapire: “A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting”, Journal of Computer and System Sciences, pp.119-139 (1997)
- [6]. E. Dagan, O. Mano, G. P. Stein and A. Shashua: “Forward collision warning with a single camera” , Intelligent Vehicles Symposium 2004, pp.37-42 (2004)
- [7]. R. Nevatia: “Depth measurement by motion stereo”, Computer Graphics and Image Processing, 5, pp.203-214 (1976)
- [8]. 滝本周平, 伊藤崇晶: “車載カメラを用いた単眼測距検証システムの開発”, SEI テクニカルレビュー, 169, p.82-87 (Jul. 2006)
- [9]. 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)
- [10]. “自動車技術ハンドブックー設計シャシ編”, 自動車技術会（1990）
- [11]. B. Li, W. Liu, X. Zhang, Z. Pan, F. Zhao: “Effectiveness Assessment of Human-Machine Interface in Driver Assistance System”, Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, Volume 197, pp 567-574 (Nov. 2012)
- [12]. “Forward Collision Warning System Confirmation Test”, NHTSA (2006)
- [13]. 小宮粹史, 大口敬, 赤羽弘和, 桑原雅夫: “GPS 測位に基づく自車および周辺車両走行挙動観測システムの開発”, 第 24 回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 21-24 (Oct. 2004)

- [14]. J. Ryu, E. J. Rossetter, J. C. Gerdes: “Vehicle Sideslip and Roll Parameter Estimation using GPS”, 2002 6th Int. Symposium on Advanced Vehicle Control (2002)
- [15]. H. S. Bae, J. Ryu, J. C. Gerdes: “Road Grade and Vehicle Parameter Estimation for Longitudinal Control Using GPS”, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, pp.166-171 (2001)
- [16]. 神原誠之, 横矢直和: “RTK-GPS と慣性航法装置を併用したハイブリッドセンサによる屋外型拡張現実感システム”, 信学技報, PRMU 104-572, pp.37-42 (Jan. 2005)
- [17]. 小野英一, 三浦有美子, 安富大祐, 山口克之: “3軸加速度・2軸角速度センサを利用した姿勢角推定”, 自動車技術会論文集, 41-1, pp. 7-12 (Jan. 2010)
- [18]. 内山寛之, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬洋: “自車位置推定のための車載全方位カメラ映像と通常カメラ映像のフレーム間対応付け”, 信学技報, PRMU 107-539, pp.167-172 (Mar. 2008)
- [19]. 野田雅文, 高橋友和, 出口大輔, 井手一郎, 村瀬洋, 小島祥子: “空撮画像と時系列車載カメラ画像との照合による自車位置推定”, 信学技報, PRMU 109-306, pp.177-182 (Nov. 2009)
- [20]. 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 (Aug. 2009)
- [21]. 根岸慎治, 千葉昌孝, 小沢慎治: “高速道路における車両姿勢角推定に基づく道路エッジの自動追跡”, 信学論, J77-D-2(5), pp.931-939 (May. 1994)
- [22]. K. Yamaguchi, T. Kato and Y. Ninomiya: “Vehicle Ego-Motion Estimation and Moving Object Detection using a Monocular Camera”, the 18th International Conference on Pattern Recognition, pp.610-613 (2006)
- [23]. 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.169-176(2015)
- [24]. C. Harris, M. Stephens: “A combined corner and edge detector”, Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference, pp.147-151 (1988)
- [25]. G. Bradski, A. Kaebler: “詳解 OpenCVーコンピュータビジョンライブラ

リを使った画像処理・認識” (2009)

- [26]. B. D. Lucas, T. Kanade: “An iterative image registration technique with an application to stereo vision”, the 1981 DARPA Imaging Understanding Workshop, pp.121-130 (Apr. 1981)
- [27]. 徐剛, 辻三郎 : “3次元ビジョン” (1998)
- [28]. R. Hartley, A. Zisserman: “Multiple View Geometry in Computer Vision”, Cambridge University Press, Cambridge (2006)
- [29]. R. I. Hartley: “In defence of the 8-point algorithm”, the 5th International Conference on Computer Vision, pp. 1064-1070 (1995)
- [30]. M. A. Fischler and R. C. Bolles: “Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography”, Communications of the ACM, Vol. 24, pp.381-395 (1981)
- [31]. B. Li, X. Zhang, M. Sato: “Pitch Angle Estimation using a Vehicle-Mounted Monocular Camera for Range Measurement”, Signal Processing (ICSP) 12th International Conference, pp.1161-1168 (2014)

付録

付録では，ピッチ角推定に基づく車載単眼カメラによる車間距離計測システムを実装した処理関数について解説する．

```
Processor:: Processor( int width, int height );
```

width- 入力画像の幅

height- 入力画像の高さ

Processor 関数はピッチ角推定および車間距離計測を実現するクラスのコンストラクタである．

```
Processor:: ~Processor();
```

~Processor 関数はピッチ角推定および車間距離計測を実現するクラスのデストラクタである．

```
void Processor:: Run( IplImage* greyImage, double velocity );
```

greyImage- 車載単眼カメラから取得した入力画像

velocity- 車両の CAN ネットワークから取得した自車両速度

Run 関数は全体の処理を総括した関数である．節 3.1 に記述した処理プロセスの全体をこの関数で実装した．

```
void Processor:: Renew();
```

Renew 関数は毎フレームの処理後にデータを更新する関数である．Renew 関数は RenewImage 関数，RenewCorner 関数，RenewMat 関数を総括した．

```
void Processor:: RenewImage();
```

RenewImage 関数は毎フレームの処理後に画像データを更新する関数である．

```
void Processor:: RenewCorner();
```

RenewCorner 関数は毎フレームの処理後にコーナーの情報を格納したメモ

リ空間を初期化する関数である.

```
void Processor:: RenewMat();
```

RenewMat 関数は毎フレームの処理後に並進ベクトル, 回転行列の情報を格納したメモリ空間を初期化する関数である.

```
void Processor:: SetCurImage( IplImage* greyImage );
```

greyImage- 車載単眼カメラから取得した入力画像

SetCurImage 関数は車載単眼カメラから取得した最新の画像情報を記録する上で, 前フレームの画像を更新する関数である.

```
void Processor:: ComputeFlow( int threshold );
```

threshold- コーナーの **Quality Level** の閾値

ComputeFlow 関数は, 前後フレームのコーナ一点を検出し, そのサブピクセル位置を探索し, ピラミッド型 **Lucas-Kanade** アルゴリズムを用いてコーナーのオプティカルフローを推定する. コーナーを検出するときに, 指定された **threshold** を超えた **Quality Level** を持つ点のみに対してオプティカルフローを推定する.

```
void Processor:: SfM();
```

SfM は **Structure from Motion** の略称である. **SfM** 関数は, 基本行列 **E** (**Essential Matrix**) を求める関数である.

```
void Processor:: DecomposeMotion();
```

DecomposeMotion 関数は特異値分解を用いて, 基本行列 **E** を並進ベクトル **t** と回転行列 **R** の 8 ベアの解候補に分解する.

```
int Processor:: VerifyMotion( CvMat* tVec, CvMat* rMat );
```

tVec- 並進ベクトルの解候補

rMat- 回転行列の解候補

戻り値- 正当な奥行き Z を得たコーナ一点の数

VerifyMotion 関数は、並進ベクトル $\mathbf{t}$ と回転行列 $\mathbf{R}$ の 8 ペアの解候補を用いてモーションステレオ法により一定量のコーナ一点に対して奥行き Z を求め、その奥行き Z が正当なコーナ一点の数を返す。

```
double Processor::OptimizeMotion();
```

OptimizeMotion 関数は、Structure from Motion で求めたカメラの自己運動パラメーターをより高精度に最適化するため、ガウス・ニュートン法を用いて再投影誤差を最小化とする関数である。

```
void Processor:: CalPitchByAver();
```

CalPitchByAver 関数は、並進ベクトルから直接に推定した車載カメラが走行道路平面に対するピッチ角と回転行列から分解した前後フレーム間のピッチ角レートを移動平均法で合成し、高精度なピッチ角を推定する関数である。

```
double Processor:: CalDepth( int x, int y, double pitch );
```

x- 前方車両の接地点の x 座標

y- 前方車両の接地点の y 座標

pitch- 提案手法で推定されたピッチ角

CalDepth 関数は、接地点の座標と推定されたピッチ角を入力して、接地点俯角による距離推定手法を用いて前方車両の距離を推定する関数である。

```
CvPoint2D32f* Processor:: GetCurCorners();
```

GetCurCorners 関数の戻り値は、当時刻の画像上のコーナ一点リストと座標情報である。

```
CvPoint2D32f* Processor:: GetPreCorners();
```

GetPreCorners 関数の戻り値は、前時刻の画像上のコーナ一点リストと座標情報である。

`int Processor:: GetCurCornerCounter();`

`GetCurCornerCounter` 関数の戻り値は、当時刻の画像上のコーナ一点の総数である.

`CvMat* Processor:: GetTVec();`

`GetTVec` 関数の戻り値は、推定された車載カメラの並進ベクトルである.

`CvMat* Processor:: GetRVec();`

`GetRVec` 関数の戻り値は、推定された車載カメラの回転行列である.

`double Processor:: GetPitchRT();`

`GetPitchRT` 関数の戻り値は、推定されたカメラの光軸と車両が走行する道路平面間のピッチ角である.

`void Processor:: PrintMat( CvMat* mat );`

`mat`- プリントアウトした行列

`PrintMat` 関数は、任意の行列やベクトルをプリントアウトする関数である.

研究業績

学術雑誌：

1. 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.169-176 (Apr. 2015)

国際会議における発表：

1. B. Li, W. Liu, X. Zhang, Z. Pan, F. Zhao: “Effectiveness Assessment of Human-Machine Interface in Driver Assistance System”, Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, Volume 197, pp 567-574 (Nov. 2012)
2. B. Li, X. Zhang, M. Sato: “Pitch Angle Estimation using a Vehicle-Mounted Monocular Camera for Range Measurement”, Signal Processing (ICSP) 12th International Conference, pp.1161-1168 (Oct. 2014)