# T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

## 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 暁林					
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)						
Type(English)	Doctoral Thesis					

## 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 暁林 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の他車両,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いけるドライバ 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

Ι

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.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.

Π

#### 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
<b>1.1</b> 研究動機1
1.2 研究背景
<b>1.3</b> 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
<b>2.1</b> 距離推定の要件分析16
<b>2.2</b> 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
<b>3.1</b> 処理プロセスの全体25
<b>3.2</b> 特徴点の抽出手法
<b>3.3</b> オプティカルフローの検出手法
3.4 Structure from Motion 法
<b>3.5</b> モーションステレオ法
<b>3.6</b> 自己運動パラメーターの最適化
<b>3.7</b> 回転行列を用いたピッチ角レート推定
<b>3.8</b> 並進ベクトルを用いたピッチ角推定
<b>3.9</b> 移動平均法を用いたピッチ角合成
<b>3.10</b> 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
<b>4.1 実験環境</b>
<b>4.2</b> 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
<b>4.3</b> 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
<b>4.4 実環境における距離推定検証実験</b> 62
第5章
結論

5.1	結論	68
5.2	今後の展望	69
謝辞		70
参考文	て献	71
付録		74
研究業	笔積	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することが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 ぎることが原因になっている.



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	0	0	0	0	0
車線逸脱警報	0	0	0	0	0
步行者警報	0		0	0	
スマートハイビーム コントロール			0	0	
速度制限補助					
車線保持補助	0	0		0	
アダプティブクルー ズコントロール	0	0	0	0	0
緊急自動ブレーキ	0	0	0	0	0
歩行者緊急ブレー キ	0		0		
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の他車両,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.

100M	1G		10G	100G		1T	10T	10	то	1P
			ミリ波				遠赤外線	近赤外	線可	視光
	1m	10cm	1cm	1	lmm	100µm	10µm	1μ	ւտ	100nm
			ミリ波レーダ	(—	遠赤外	線カメラ	近赤	外線	可視光	もカメラ
		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		√	√					√	√
步行	<b>亍者</b> 警報				√	√			√	√
步行者	緊急ブレーキ								√	√
アダプラ ズコン	ティブクルー ットロール		V	V					√	√
車線	逸脱警報								√	√
車線	保持補助								√	√
速度	制限補助								√	√
スマ- コン	トハイビーム トロール								V	√
ナイ	トビジョン				√	√	√			
車線	変更警報	√								
-										

表 1.2: センシング技術の比較

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.

	距相		相	物体属性								
	離 推 定	ттс	対速度	車両	二輪車	步行者	車 線	灯 火	標 識	霧	雨	雪
ステレオカメラ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	Δ	Δ
単眼カメラ	0	0	Δ	0	0	0	0	0	0	×	Δ	Δ
レーザレーダ	Ô	0	$\Delta$	Ó	Δ	Δ	×	×	×	×	×	×
ミリ波レーダ	Ô	0	0	Ó	×	×	×	×	×	0	0	Ó

表 1.3: 可視光カメラとレーダーの特性分析

#### 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.

	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

表 1.4: 単眼カメラによる距離推定手法の拘束条件

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 do から d1 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両点 間の長さも lo から l1 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1と焦点距離 f の関係は式(1)に示 すようになる.



$$\frac{l}{f} = \frac{w}{d} \Longrightarrow l \cdot d = f \cdot w \tag{1}$$

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. ∠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, 自車両と前走車間の相対距離を相対速度で割った結果である.

$$l_{1}d_{1} = l_{0}d_{0}$$

$$\Rightarrow \frac{l_{0} + \Delta l}{l_{0}} = \frac{d_{1} + v \cdot \Delta t}{d_{1}}$$

$$\Rightarrow 1 + \Delta S = 1 + \frac{\Delta t}{d_{1}/v}$$

$$\Rightarrow TTC = \frac{\Delta t}{\Delta S}$$
(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手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.

モーションステレオ[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ョンステレ 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 をモーションステ レオで推定することが可能である.

$$Z = \frac{|t|}{\frac{|p_1|\sin\omega}{\cos\gamma}} = \frac{t \cdot \left(\left(\left(p_1 + Rp_2\right) \times t\right) \times Rp_2\right)}{p_1 \cdot \left(\left(\left(p_1 + Rp_2\right) \times t\right) \times Rp_2\right)}$$
(3)



図 1.10:モーションステレオを用いた奥行きの推定 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、Hc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8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8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.

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



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とで、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.toは反応時間と操作時間を合わせた空 走時間,Vo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,

$$S = t_0 \cdot V_0 + V_0^2 / 2a$$
  

$$t = t_0 + V_0 / \alpha$$
(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<sup>2</sup>)から0.8g(7.9m/s<sup>2</sup>) 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 ーに危険を感知させる.



#### 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 サを設置する必要となる.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 となる.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わる.

・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 to 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<sup>2</sup>) 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±0.5°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±1.5°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±2.5°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、モーショ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、独自な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<sub>xx</sub>, D<sub>yy</sub>, D<sub>xy</sub>を用いて、各点周り の小さな窓上におけるヘッセ行列 Hp 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.

$$H(p) = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \end{bmatrix}$$
(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 q とその近傍の任意点 p と形成したベクトルと、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 p は色 変化の少ない面にある場合、p 点の勾配ベクトルは0になる.図3.3(b)に示すよ うに、近傍点 p はエッジにある場合、その勾配は(p-q)ベクトルと直交する.そ のため、式(7)に満足した g 点の場所はコーナーのサブピクセル位置になる.

$$\Delta I(p) \cdot (p-q) = 0 \tag{7}$$



(a) 点 p は面上
 (b) 点 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性がある. 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.



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 図 3.4: 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、フレーム間で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 **P**=[X, Y, Z]<sup>T</sup>が一般カメラ 座標系に投影する場合、その座標は **p**cam=[xcam, ycam, f]<sup>T</sup>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 **p**nor=[xnor, ynor, 1]<sup>T</sup>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,いわゆるエピポーラ幾何[27],[28]について述べる.エピ ポーラ幾何は,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,エピポー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 P に注目する.三次元空間 の点 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ーラ平 面(Epipolar Plane)という.P1はカメラ視点1から見た三次元空間の点 P の 世界座標, p1はその P1が正規カメラ座標系への投影である.P2はカメラ視点2 から見た三次元空間の点 P の世界座標, p2 はその P2 が正規カメラ座標系への投 影である. 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 P の実世界位置や距離によらず, P<sub>1</sub>, p<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, p<sub>2</sub>, 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 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 t, カメラ視点 1 正規座標 p1,カメラ視点 2 正規座標 p2 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 t と回転行 列 R を推定できる. t, p1 は同じ視点 1 の正規座標系にあるが、p2 は視点 2 の 正規座標系にある. したがって、p2 を視点 1 の正規座標系に変換する必要があ る. 回転行列 R を利用して、p2を基準視点の正規座標系に変換し、その表現は Rp2 になる. また、Rp2 と t の外積ベクトルを求め、それは t×Rp2 になる. そ の外積ベクトル t×Rp2 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、p1 と p2 は共平面である拘束条件を利用して、p1 と t×Rp2 の内積は 0 になる.

$$p_{1} \cdot (t \times Rp_{2}) = 0$$

$$\Rightarrow p_{1}^{T} [t]_{\times} Rp_{2}$$

$$\Rightarrow p_{1}^{T} Ep_{2}$$

$$E = [t]_{\times} R$$

$$t = \begin{bmatrix} t_{x} \\ t_{y} \\ t_{z} \end{bmatrix}, [t]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -t_{z} & t_{y} \\ t_{z} & 0 & -t_{x} \\ -t_{y} & t_{x} & 0 \end{bmatrix}$$
(8)

式(8)をエピポーラ方程式と呼ぶ. [t]<sub>x</sub>は並進ベクトル t の外積行列である.行列 **E**=[t]<sub>x</sub>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 E を求める. p1=[x1, y1, 1]<sup>T</sup>は当時刻のコー ナー点座標、p2=[x2, y2, 1]<sup>T</sup>は前時刻のコーナー点座標を示す.

式(9)に示すように、**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**E**は対応付けたコーナー点から任意の8点を選び、連立方程式を解くことにより推定できる[29].

$$p_{1}^{T} E p_{2} = \begin{bmatrix} x_{1} \\ y_{1} \\ 1 \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} e_{1} & e_{2} & e_{3} \\ e_{4} & e_{5} & e_{6} \\ e_{7} & e_{8} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{2} \\ y_{2} \\ 1 \end{bmatrix}$$
(9)

多数のコーナー点ペアから基本行列 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 E から回転行列 R と並進ベクトル t の外積行列[t] x に分解する.

$$E = \begin{bmatrix} t \end{bmatrix} R \quad (10)$$

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tのスケール情報が得られない.したがって、|t|=1として並進ベクトルを正規化する.また、回転行列Rは直交行列のため、基本行列 Eのフロベニウスノルムを式(11)で正規化する.

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

# 3.5 モーションステレオ法

回転行列Rが直交行列かつ並進ベクトルの外積行列[t]×が反対称行列のため, 正規化された基本行列E'を特異値分解した上で回転行列Rおよび並進ベクトル の外積行列[t]×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当 な解を選ぶため,コーナー点の奥行き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ー点に対して奥行 きZを求める.図3.10に示すように,まず,p2を基準カメラ視点へ変換させ,Rp2 になる.p1, Rp2と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.p1とRp2の和を求めることで誤差を抑制する.

$$\left(p_1 + Rp_2\right) \times t \tag{12}$$

また,エピポーラ平面の中にRp2に垂直なベクトルbを求める.式(13)に示す.

$$b = ((p_1 + Rp_2) \times t) \times Rp_2 \tag{13}$$

三角形の比例関係によって、下記の比例式が成り立つ.

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

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

そのため、p1の世界座標P1は式(15)になる.

$$P_{1} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = Zp_{1} = Z \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$
(15)

**p2**の世界座標**P2**は式(16)になる.







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ー点に対して奥行きZを求める.画像に投影されたす べてのコーナー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ー点の奥行き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ー点の再投影誤差 を最小化とする. **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 **t** の要素である.  $r_x$ ,  $r_y$ ,  $r_z$  は回転ベクトル **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**x** は **5** 自由度を持つ. 式(17)に示す ように、再投影誤差 **f**(**x**) はエピポーラ方程式の二乗和の残差で表現される.

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

$$x = \begin{bmatrix} r_x & r_y & r_z & t_x & t_y \end{bmatrix}^T$$
(17)

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  $\mathbf{J}_{\mathbf{w}}$ 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.

$$f(x + \delta x) = f(x) + g^T \delta x + \frac{\delta x^T H \delta x}{2} \to g^T \delta x + \frac{\delta x^T H \delta x}{2} = 0$$
  
$$\delta x = -H^{-1}g = -(J_w^T J_w)^{-1} J_w^T w$$
(18)

ヤコビ行列  $J_w$ を求めるため、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 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 dr も微小回転のため、回転行列は単位 行列と回転ベクトル r の外積行列の和に近似できる.また、 $[r]_x \ge [dr]_x$ 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ー点  $p_1=[x_1, y_1, 1]^T$ ,  $p_2=[x_2, y_2, 1]^T$ 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.

$$dt_{z} = -\frac{t_{x}dt_{x} + t_{y}dt_{y}}{t_{z}}$$
(19)  

$$J_{w} = \begin{bmatrix} \frac{\partial w}{\partial r_{x}} & \frac{\partial w}{\partial r_{y}} & \frac{\partial w}{\partial r_{z}} & \frac{\partial w}{\partial t_{x}} & \frac{\partial w}{\partial t_{y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p_{1}([t]_{x})_{2} + y_{2}p_{1}([t]_{x})_{3} & p_{1}([t]_{x})_{1} - x_{2}p_{1}([t]_{x})_{3} & p_{1}([t]_{x})_{1} + x_{2}p_{1}([t]_{x})_{2} & (R)_{2}p_{2} - y_{1}(R)_{3}p_{2}) - \frac{t_{x}}{t_{z}}(y_{1}(R)_{1}p_{2} - x_{1}(R)_{2}p_{2}) \\ (-R)_{1}p_{2} + x_{1}(R)_{3}p_{2}) - \frac{t_{y}}{t_{z}}(y_{1}(R)_{1}p_{2} - x_{1}(R)_{2}p_{2}) \end{bmatrix}^{T},$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}, (R)_{n} = \begin{bmatrix} R_{1n} \\ R_{2n} \\ R_{3n} \end{bmatrix}$$

$$[t]_{x} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix}, ([t]_{x})_{n} = \begin{bmatrix} T_{1n} \\ T_{2n} \\ T_{3n} \end{bmatrix}$$
(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**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.**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.

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

$$r = \begin{bmatrix} r_{x} \\ r_{y} \\ r_{z} \end{bmatrix}, [r]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -r_{z} & r_{y} \\ r_{z} & 0 & -r_{x} \\ -r_{y} & r_{x} & 0 \end{bmatrix}$$
(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<sub>x</sub>,t<sub>y</sub>,t<sub>z</sub>は並進ベクトル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.

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

# 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が,長期 間では累積誤差が発生しない優勢がある.



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.



(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,累加した短期間内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&t(i)の一定時間内の平均µt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&r(i)の同等時間内の平均µr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&a(i)は,式(23)で求められる.µGapは,平均値µtとµr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)

Pitch Angle Calculated by T Vector



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(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.



また,接地点俯角  $\alpha$ を補完するため,ピッチ角  $\beta$ 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  $\beta$ ,俯角  $\alpha$  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ー比較実験 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±0.05°~±0.2°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±0.08°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.

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

表 4.1: 慣性計測装置の仕様



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±2.5°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.



(a)Real world image
 (b) Simulation image
 図4.3: シミュレーション画像と実画像の比較



実験	対応シーン	自車速[km/h]	シミュレーション条件
1	古街地	30	自車低速走行
2	川川田江	40	前走車多数存在
3	初め送政	50	自車中速走行
4	307下担的	60	砂利道によるノイズ
5	古法送政	80	カーブ走行, R=500m
6	向速坦始	100	自車高速走行

表4.2: ピッチ角推定検証実験の項目

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.





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	

表 4.3: ピッチ角推定パラメーター比較実験の結果

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±3.0°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.



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.



図 4.8: シーン2の実験結果





(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.



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.



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.



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.



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.



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.



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.

項目	ピッチ 角の波 形	自車速度	前走車ま での距離	他の条件	標準偏差 [deg]
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

表 4.4: ピッチ角推定ロバスト実験結果

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.

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

表4.5: ピッチ誤差による距離推定誤差

# 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、目標車輌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±0.2m)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.



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



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


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



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.

提案手法によるピッチ角推定は累積誤差を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±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(車輌、歩行者など)手法の開発も必要とする.

69

### 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 暁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.家族の皆様に感謝いたし ます.特に妻の浦暁瀾氏,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]. 小宮粋史,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, 張暁林, 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-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<sup>-</sup> 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 thresold );

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ー点を検出し,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 を得たコーナー点の数

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

#### double Processor::OptimizateMotion();

OptimizateMotion 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ー点リストと座標 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ー点リストと座標 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ー点の総数 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, 張暁林, 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)