学位論文 博士(工学)

平面拘束を用いた 道路映像からの車両の水平位置推定および 路面上の鏡面反射領域検出

2011年3月

慶應義塾大学大学院理工学研究科

手島 知昭

要旨

今日の運転支援システムにおいて,カメラをセンサとして利用する手法が多数 提案されている.コンピュータビジョンの技術は古くより様々な研究が行われて きたが,近年カメラの低価格化や,コンピュータの高性能化に伴い,自動車の運 転支援として多岐にわたり利用されるようになってきた.

本論文は,路面や周辺環境が平面で近似できるという仮定を利用することで,車 両の水平位置推定手法と,路面上の鏡面反射領域検出手法を提案し,実験を通じ てその有用性を実証した研究についてまとめたものである.

本論文では2つの手法を提案する.1つは,路面を平面と仮定し平面拘束を利用 することで,自車両の水平位置を推定する手法である.具体的には平面拘束を導 入することにより,違う時刻に撮影された2枚の入力画像をそれぞれ俯瞰画像に 変換する.得られた俯瞰画像を比較することにより,車両の移動量を安定して推 定する.従来手法では,白線の位置検出により,白線からの相対的な位置を推定 することで車両の軌跡を推定する研究が行われていたが,そのために白線がカメ ラから観測できない未舗装道路や,雪道で覆われた道路では軌跡の推定が行えな いという問題があった.実験においては,平面拘束を導入することにより,未舗 装道路や,雪道で覆われた道路でも自車両の水平位置が推定できることを示した. また,応用の一例として,実際にWebカメラとノートPCで走行軌跡推定システ ムを構築し,車載して,実時間での走行軌跡推定が可能であることを示した.

本論文で提案するもう1つの手法は,路面や周囲環境の平面拘束を利用して路 面上の鏡面反射領域を検出する手法である.路面と,その周辺に存在する物体の 形状を平面で近似することで,平面拘束を利用して仮想鏡面反射画像を生成する. 入力画像と仮想鏡面反射画像の両方で,同じ領域における路面の輝度を,複数フ レームにわたって観測することで,鏡面反射領域を検出する.従来は路面上の水た まりを検出するために,光源環境を制御可能なプロジェクタを用いた手法や,偏 光レンズを用いる手法が提案されてきたが,本手法では,単眼カメラのみで鏡面 反射領域を検出することに成功した.実験においては,実際に水たまりを撮影し た画像から,良好に鏡面反射領域を検出できることを確認した.

以上本論文では,平面拘束という2枚の平面間で密な対応関係を得られる拘束 条件を利用し,従来手法で必要とされた白線の位置検出やGPS,偏光レンズを利 用することなく,単眼カメラだけで水平位置を推定する手法と,鏡面反射領域を 検出する手法の2つを提案した.実際の道路環境には,路面をはじめとして平面 と仮定できる形状が多数存在するため,これらの手法は運転支援の発展に役立つ と期待される.

目 次

第1章	序論	1
1.1	ITS におけるコンピュータビジョンの応用	1
	1.1.1 自己運動推定	1
	1.1.2 路面状況把握	3
	1.1.3 覚醒度推定と居眠り検出	5
	1.1.4 障害物検出	5
	1.1.5 步行者検出	6
1.2	各手法のまとめと本研究の目的	7
1.3	本論文の構成	8
第2章	平面拘束を用いた車両の水平位置推定 1	.1
2.1	概要	1
2.2	俯瞰画像のマッチングに基づいた車両の水平位置推定	2
	2.2.1 マッチングの概要 1	4
	2.2.2 カメラモデル 1	4
	2.2.3 カメラの位置計測	.6
	2.2.4 ホモグラフィ \mathbf{H}_P の求め方1	9
	2.2.5 ホモグラフィ \mathbf{H}_N の求め方	9
	2.2.6 俯瞰画像間の SAD 値の計算 2	21
2.3	実験	24
	2.3.1 合成画像を用いた予備実験 2 2	24
	2.3.2 実画像での実証実験 3	32
	2.3.3 実時間システムの構築	12

ii

2.4	考察	45
2.5	本章のまとめ	53
第3章	平面拘束を用いた鏡面反射領域の検出	55
3.1	概要	55
3.2	原理	57
3.3	複数フレームにわたった観測に基づいた鏡面反射領域検出	60
	3.3.1 仮想鏡面反射画像生成	63
	3.3.2 領域の追跡	63
	3.3.3 特徴量算出とクラス判定	65
3.4	実験	68
	3.4.1 環境 1(屋内) での実験	68
	3.4.2 環境 2(屋外) での実験	72
3.5	考察	74
	3.5.1 特徴量の組み合わせ	74
	3.5.2 3次元形状および追跡の精度に関する考察	79
3.6	本章のまとめ	81
第4章	結論	83
謝辞		85
参考文薛	犬	87

図目次

2.1	車両の水平位置推定手法の概要	12
2.2	俯瞰画像の一例	13
2.3	マッチング処理の概要	15
2.4	水平位置推定手法で利用しているカメラモデル.........	15
2.5	ホモグラフィを用いた俯瞰画像への変換	18
2.6	ホモグラフィ \mathbf{H}_P と \mathbf{H}_N の違い	20
2.7	パラメータの妥当性と差分画像の例...............	22
2.8	俯瞰画像及び俯瞰画像生成に用いられた領域(150フレーム目,合成	
	画像)	25
2.9	合成画像を用いた実験における入力画像の例..........	26
2.10	合成画像を用いた実験において,推定されたカメラの水平位置	27
2.11	移動物体を含む入力画像の例	30
2.12	移動物体を含む画像において,推定されたカメラの水平位置	31
2.13	俯瞰画像及び俯瞰画像生成に用いられた領域(850フレーム目,実画	
	像)	32
2.14	実画像における入力画像の例	33
2.15	実画像において,推定されたカメラの水平位置.........	34
2.16	俯瞰画像及び俯瞰画像生成に用いられた領域(121フレーム目,雪道	
	上)	35
2.17	雪道上で撮影された入力画像の例	37
2.18	雪道上において,推定されたカメラの水平位置	38
2.19	ランダムなテクスチャを持つ路面上の俯瞰画像の例	39

٠	
1	X 7
	v
-	

2.20	ランダムなテクスチャを持つ路面上で撮影された入力画像の例	40
2.21	ランダムなテクスチャを持つ路面上にて , 推定されたカメラの水平	
	位置	41
2.22	実時間システムに用いた入力画像の例	43
2.23	実時間システムで推定されたカメラの水平位置........	43
2.24	$v-\theta$ 空間における評価関数の形状	46
2.25	周期的なパターンが路面上に現れたときの評価関数	48
2.26	X 軸回りの回転が生じたときの評価関数	48
2.27	Condensation アルゴリズムを使わずに全探索した結果	49
2.28	推定に失敗した入力画像	51
2.29	合成画像................................	51
2.30	白線のある実画像...........................	51
2.31	雪道上の画像	52
2.32	ランダムなテクスチャのある実画像..............	52
2.33	図 2.28 における評価関数の形	52
3.1	濡れと乾きによるアスファルト路面の違い	56
3.2	鏡面反射の概念図.............................	57
3.3	本手法が想定する入力画像列	58
3.4	各フレームにおける各種輝度の時間遷移	58
3.5	鏡面反射領域検出手法の手順	61
3.6	仮想鏡面反射画像.............................	62
3.7	特徴量の3次元分布	64
3.8	実験環境とカメラの配置	68
3.9	実験環境と観察対象領域・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	69
3.10	実験の入力画像 (室内環境)	70
3.11	中間画像および実験結果 (室内環境で)	70
3.12	実験環境 (屋外)	72
3.13	実験の入力画像 (屋外)	72

3.14	屋外での実験における中間画像および実験結果.........	73
3.15	本手法による検出結果	75
3.16	類似度のみによる検出結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	75
3.17	反射光の変化のみによる検出結果	75
3.18	判定不能領域内の,特徴量の分布	77

v

表目次

1.1	推定位置推定手法の各アプローチ	2
1.2	路面状況把握の各アプローチ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
1.3	各手法の分類	7
1.4	面によるマッチングを利用した各手法	9
2.1	合成画像実験時に利用したパラメータ・・・・・・・・・・・・・・	24
2.2	実画像実験時に利用したパラメータ...............	29
2.3	雪道上の実験時に利用したパラメータ・・・・・・・・・・・・・・	36
2.4	実験に用いた Web カメラの仕様	42
2.5	処理用コンピュータの仕様.......................	42
2.6	1フレームの処理に要する時間	45
2.7	各実験画像に含まれるエネルギー量...............	47
3.1	検出結果 (室内実験)	71
3.2	検出結果 (屋外)	74
3.3	各特徴量を用いた場合の比較	79

第1章 序論

1.1 ITSにおけるコンピュータビジョンの応用

ITS の分野では,近年カメラをセンサとして利用した運転支援システムが多数 提案されており,既に商品化されてる例としてインテリジェントパーキング(トヨ タ),EyeSight(スバル)やインテリジェントウォーニングシステム(デンソー) などが挙げられる.より安全な運転のためにも,ITSにおけるコンピュータビジョ ンの応用はこれからも期待される分野と言える.以下に,コンピュータビジョン の技術を応用した運転支援のための研究を紹介する.

1.1.1 自己運動推定

自己運動推定とはその名の通り,カメラやカメラを取り付けた物体の運動をカメラ自身からの情報で推定する研究であり,Egomotion 推定とも呼ばれる.

自己運動推定は自己位置推定と密接な関係にある.精度良く自己位置が求められていれば,自己運動は位置を微分することで求められる.また,精度良く自己 運動が求められていれば,運動を積分することで自己位置が求められる.このように,互いの研究が相補的な立場にあるため,どちらも密接に関連している.

自己運動推定は様々な研究が行われており,例として特徴点や路面のマッチン グを利用する手法が挙げられる.表1.1に,自己運動推定手法を大まかに分類した グループを示す.

点のマッチングを利用した研究とした一例として, Simond らの研究が挙げられる [37]. Simond らが提案した手法では路面が平面であるという前提と, 消失点の

マゴローチ	白線の無い道路への	動物体が含まれた
アフローテ	適用	状況への適用
白娘の位置検山	海田できず	白線が画像に
日緑の世里快山	週用できり	見える限り適用可能
一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	海田可能	画像中に静止物体のみが
画像中の点のマッナノク	週份り能	映っていることが前提
吹声のフッチング	海田可能	画像中に静止物体のみが
	適用可能	映っていることが前提

表 1.1: 推定位置推定手法の各アプローチ

情報から自己運動推定を行っている.Wangらが提案した自己運動推定では路面上から特徴点の抽出を行い,平面拘束を利用することで誤対応を除去し,得られた対応関係から自己運動推定を行っている[47].

画像中の特徴点のマッチングの例として,SLAM(Simultaneous localization and mapping)と呼ばれる分野の研究が挙げられる [6,24,39].移動ロボットが,カメラの移動に伴い,画像中の特徴点の移動から自身の運動や周囲の形状復元を行う手法である [25].自己運動推定に加えて,周囲の地図を同時に生成(mapping)するために,SLAMと呼ばれている.

路面のマッチングを利用した研究も存在する.関らが提案した手法では,路面 のマッチングに基づき車両の運動推定を行っている[36].Meiらは,全方位カメラ を用いて路面画像のマッチングを行い,カメラの運動を推定した.[23].Fangらは 単眼で事前に登録された画像をもとに,車両の位置推定を行う手法を提案した[8]. このように路面の平面性に着目した手法は多数提案されている.

一方で,特徴点や路面のマッチングを利用する手法では,表1.1 に示すように動物体が画像中に含まれていない状況を想定することが多い.入力画像中に移動物体が含まれると,画像の変化,もしくは特徴点の移動が移動物体によって引き起こされたのか,Dメラの運動によって引き起こされたのか,区別できないためで

ある.例えばIraniらが提案した手法では,画像のマッチングにより自己運動推定 を行っているが,対象を静的な状況に限定している[12].Farnebackらは,3次元 テンソルを用いて精度の良いオプティカルフローを求める手法を提案したが,対 象としたのは静的領域だけだった[9].関らの手法も,同じ研究の中で移動物体除 去のアルゴリズムを提案している[36].SLAMも,原理としては静止した状況を 考慮しており,移動物体が画像内に含まれる場合は,森岡らの手法のように,移 動物体を切り分ける必要がある[25].

道路画像を利用した自己位置推定や自己運動推定において,多数利用されてい るアプローチは白線や道路標示の位置検出である.これは道路上に描かれた白線 や道路標示を元に,車両の位置を画像から推定する手法である.Rodríguezらは, 画像中から路面に描かれた白線を抽出し,それに自動的に追随する手法を提案し た[34].Martinetらが提案した自動走行システムにおいても,水平位置推定は白 線の位置検出によるものであった[21].これらの研究は1980年代に立ち上がった, EUREKA プロメテウス計画内で提案された自動走行車両 VaMP [7] や ARGO [4] 内においても,白線を認識して追従するシステムとして取り入れられている.

白線の位置検出手法は,動物体が含まれていても適用可能だが,白線の無い道 では適用できないという欠点を持つ.画像中の点のマッチングや,路面のマッチ ングについては,白線のない道でも適用可能だが,動物体が含まれる領域では適 用できない.道路画像を用いた自己運動推定は,対象とする状況に応じて,運動 推定のための特徴量を適切に選ぶ必要があると言える.

1.1.2 路面状況把握

路面状況の把握,特に濡れた路面状況を把握する研究は古くから行われている [17,20,44].路面の状況をコンピュータビジョンの手法で推定する分野は,反射解 析とも呼ばれており,様々な手法が提案されてきた.表1.2に様々なアプローチを 分類して示す.

路面状況把握のためのシステムの代表例が,プロジェクタ-カメラシステムであ

アプローチ	通常レンズで利用可能	車載の可能性	
プロジェクターカメラ	カメラは通常レンズで	プロジェクタも	
システム	利用可能	車載する必要あり	
偏光レンズ	偏光レンズが必須	従来研究あり	
	カメラは通常レンズで	あり	
複数ノレームの観測	利用可能		

表 1.2: 路面状況把握の各アプローチ

る [2,10,43]. プロジェクタから既知のパターンを路面に投影し,観測された映像 を解析することで,路面の状況を把握する研究である.Fukuiらが行った研究では, プロジェクタから既知のパターンを路面に投影し,カメラで観測された反射を解 析することで路面状況を把握することに成功した [10]. プロジェクタを利用した アプローチでは,プロジェクタとカメラとの相対的な位置関係を固定する必要が ある.車載システムを考慮した際,カメラで撮影される領域に光を投影できるよ うに,プロジェクタも車載する必要がある.つまり,プロジェクターカメラシステ ムは車載にはむいていないと言える.

車載システムには, 偏光レンズが使われた例が多い.水の表面で反射した光は, 偏光状態が変化することが知られている.偏光レンズを利用することで, 偏光を検 出するのが, 偏光レンズを用いて路面状況を把握する研究の原理である.上田ら が提案した手法では偏光状態を把握することで, 湿った領域の範囲及び湿った程度 まで把握する手法を提案した[46].山田らが提案した手法では偏光レンズを使う ことで,濡れた路面と雪道と乾いた路面の3種類で路面の認識を可能とした[51].

偏光レンズも用いず,プロジェクタも利用せずに路面状況を把握するアプロー チとして,カメラの移動と,複数フレームにわたる観測を用いた例もある.久野 らが提案した手法 [16] は,複数フレームにわたって,カメラが移動しながら得ら れた画像を用い,「光沢度」と定義された尺度に基づき,偏光レンズもプロジェク タも用いずに路面の状況把握を行った. このように路面状況把握は,路面上での反射解析と言い換えられ,そのために 路面上のどんな反射特性に注目するかで手法が分類できる.

1.1.3 覚醒度推定と居眠り検出

運転手の居眠りは危険な状況の1つである.この危険な運転を検出して運転手 に警告する研究も行われている.

この研究は大別して,2種類の研究に分けられる.1つは外向きのカメラを利用 する研究,もう1つは内向きのカメラを利用する研究である.

外向きのカメラを利用する場合は,居眠り時に発生する蛇行を検出することで居 眠りを検出する.居眠り運転時には特有な蛇行が発生することが知られており[55], その蛇行を検出するために,自己運動を推定する研究などが行われている[40,41].

内向きのカメラを利用する研究においては,運転手の挙動を解析するものが多 い.Smithらが提案した研究では視線の移動に基づき,運転手の覚醒度を推定し ている [38].Ilkwonらが提案した手法では,まばたきの回数を数えることで運転 手の覚醒度を推定している [30].McCallらは白線の位置検出と運転手の頭部の動 作を測定するセンサを組み合わせる手法を提案した [22].

このように,事故を防ぐためにコンピュータビジョンの技術を有効に使う研究 はさかんに行われている.

1.1.4 障害物検出

車載カメラを用いて障害物検出を行う研究が数多く行われている.障害物検出 は前方,後方両方の障害物検出の研究が行われている.運転支援のため,これら の研究は既に商品化しているものも多くあり,インテリジェントウォーニングシ ステム(デンソー)やインテリジェントパーキングアシスト(トヨタ)など,障 害物検出に基づいた運転手をアシストする機能が多数開発されている.

障害物検出は,SFM(Structure from Motion)を用いて復元する研究が多い.SFM

とは,カメラを動かしたとき,近い物体ほど早く,遠い物体ほど遅く動く特徴を 利用して,カメラに映っている物体の形状を復元する研究のことである.Branca らが提案した手法では車両の前方にある障害物を,SFMを用いて形状復元してい る[3].Moltonらは点でなく,パッチの集合を利用した手法に基づいた,障害物の 形状復元手法を提案した[24].

また,カメラだけでなく,ソナーやミリ波レーダを利用する研究も多い.小島 らはカメラだけでなく,多数のセンサを組み合わせることで障害物を検出する手 法を提案した [15].Yuらが提案した手法では,ステレオカメラを用いることで障 害物の検出を行っている [56].ステレオカメラとは2台のカメラのをセットで利 用することで,視差,つまり2台のカメラ間の違いを計算し,撮影された画像内 の,カメラからの距離を計算する.

様々な障害物検出の方法が提案されているが,実用化された技術は,ステレオ カメラやレーダとの併用が多い.

1.1.5 步行者検出

ITS の分野の一つに,歩行者検出がある.この分野の目的は,歩行者の存在,位置を検知,検出し,運転手に注意を促すことである.Caoらは単眼カメラを用い, 学習に基づく手法で歩行者を検出する手法を提案した[5].Munderらは同じく物体の輪郭線の形状とテクスチャに基づき,歩行者を検出する手法を提案した[26].

人間を検出するためには,人間の動きを検知するための仕組みも求められてお り,人間の歩きの運動を解析する研究も多数行われている.特に注目されているの が,1998年にIsardらによって提案されたCondensationアルゴリズムである[13]. 従来,運動する対象物体の動きは,Kalmanフィルタで追跡されることがほとんど であったが,これには対象の動きを線型のモデルに当てはめる必要がある.しかし, 人間の動きは線型モデルでは予測しきれないことが多かった[14,48].Condensation アルゴリズムは非線型なモデルを扱えるようにKalmanフィルタの欠点を改良し ており,人間追跡の分野で大いに利用されている.

表 1.3: 各手法の分類

対象とする危険性			
運転手由来の危険性	環境由来の危険性		
自己運動推定	路面状況把握		
	障害物検出		
店眠り快山	步行者検出		

歩行者と自動車の事故は人的被害が大きいものであり,それを回避するための 歩行者検出技術は需要が高い.

1.2 各手法のまとめと本研究の目的

1.1 節において,様々な危険性とそれを解決するための研究を紹介した.本論文 では,平面拘束を利用することで運転支援の手法を提案する.平面拘束とは,2枚 の平面間で密に座標の対応関係を推定するための拘束条件である.本論文で対象 とする道路画像においては,路面や周辺の建物など,平面と近似できる物体が数 多く存在すると考えられる.この平面拘束を利用することで,本論文では運転支 援の手法を2つ提案する.

また,1.1節において紹介した研究は,大別すると2つのグループに分けられる と言える.運転手の不注意や操作ミスなどから生じる,危険性を対象としたもの と,周囲の環境に存在する危険性を対象としたもの,の2種類である.本論文で は前者の対象を「運転手由来の危険性」,後者の対象を「環境由来の危険性」と呼 称する.表1.3にそれぞれの手法を分類する.本論文では2種類の危険性それぞれ を対象とし,平面拘束を利用して問題を解決する手法を提案する.運転手由来の 危険性としては,蛇行検出を想定し,水平位置推定手法を提案する.環境由来の 危険性としては,水たまり検出を想定し,鏡面反射領域検出手法を提案する.

表1.4 に従来の水平位置推定手法をまとめる. 従来, 白線を用いる研究は多数提

案されてきたが,面のマッチング,もしくは平面拘束を利用した手法は表1.4 に示 すような,条件全てを解決する手法はなかったと言える.本論文では,平面拘束 を用いて,路面のマッチングを利用することで,単眼カメラのみを用い,水平位 置推定手法を提案する.また,合成画像,実画像両方を用いた実験を行い,有用 性を検証する.

また本論文では,水たまり検出を想定した手法として,平面拘束を用いて,単眼 のみを用いて路面上の鏡面反射領域を検出する手法を提案する.本手法では,水 平位置推定手法で用いた,路面が平面であるという仮定に加え,車両の周辺に存 在する物体の形状も,平面で近似可能であるという仮定を利用する.平面拘束を 用いて視点変換を行い,路面全体が鏡面反射した仮想的な画像,仮想鏡面反射画 像を生成する.入力画像,仮想鏡面反射画像両方において,路面の輝度を観測し, その時間的変化を比較することで,従来手法で用いられていた,プロジェクタや 偏光レンズを利用することなく,鏡面反射領域の検出を行う.また,実際に濡れ た路面を撮影した画像を用いて,有用性を検証する.

本論文では,平面拘束を利用した視点変換によって,単眼のみによる,水平位 置推定手法と鏡面反射領域検出手法を提案する.それぞれの手法は,平面拘束を 導入することにより,従来手法では達成できなかった問題を解決する.

1.3 本論文の構成

本論文の構成は,全4章からなる.本章では,従来研究との比較を行い,本論 文で提案する手法の位置づけについて述べた.

第2章では,平面拘束を用いた水平位置推定手法について述べる.平面拘束を 利用することで俯瞰画像同士のマッチングにより,水平位置の推定を行い,単眼 カメラによる,水平位置推定が可能な手法を提案する.

第3章では,平面拘束を用いた鏡面反射領域検出手法について述べる.平面拘 束を利用することで,仮想鏡面反射画像を生成し,プロジェクタも偏光レンズも 利用せずに,路面上の鏡面反射領域を検出する手法を提案する.

1.3. 本論文の構成

表 1.4: 面によるマッチングを利用した各手法

手法	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
	`ᅕᇚ ᅻᄮ	移動物体を	実時間で	ステレオカメラ
[¥] [30]	迴用り能	画像中から除去	推定可能	を利用
Weng [47]	海田可能	画像中に静止物体のみが	実時間で	推空司能
Wang $[47]$	迴用刂駝	映っていることが前提	推定可能	作作品
M.: [99]	海田可能	画像中に静止物体のみが	オフライン	全方位カメラ
mer [25]	迴用り能	映っていることが前提	で推定	を利用
Eang [9]	適用可能	画像中に静止物体のみが	実時間で	推空司能
rang [8]		映っていることが前提	推定可能	推進可能

条件 1:白線の無い道にも適用可能 条件 3:実時間で推定可能

条件 2:動物体を含む状況にも適用可能 条件 4:通常の単眼カメラのみで推定可能

第4章では本論文の結論を述べる.第2章,第3章で得られた結果を元に,本論 文で達成された成果について述べ,本論文をまとめる.

第2章 平面拘束を用いた車両の水平 位置推定

2.1 概要

本章では,単眼カメラと平面拘束を用いた車両の水平位置推定手法を提案する. 第1章でも述べたように,運転手由来の危険性の一つとして,蛇行が挙げられる. 蛇行の原因として挙げられるのは運転手の居眠り運転であり,蛇行の有無を知る ことで運転手の状態を逆推定することも可能であると考えられる.このように,車 両の位置,特に水平位置を知ることは運転支援の観点から有効である.

従来研究では,白線の位置検出を利用する手法が多数提案された.Sotelo らや Martinet らが提案した手法 [21] においても,路面に白線が描かれている前提を用 いている.

一方で現実世界において,白線がない,あるいは見えない状況は多々存在する. 一例として雪道が挙げられる.雪道において,白線は雪に覆われて見えないため, 白線を用いた水平位置推定はできない.前述の研究では,このような状況は対象 外としていた.

しかし,雪に覆われた道路でも,位置推定のための情報が完全に失われたわけ でない.轍があったり,一部雪が解けていたりと,路面から断片的に位置推定の ための情報を得られると考えられる.本手法では平面拘束を用いて,断片的な情 報を効率的に使い,車両の水平位置推定を目指す.

具体的には,白線がなくても水平位置推定を可能にするために,提案手法では 俯瞰画像同士のマッチングを利用し,各フレームごとの移動量を推定する.提案 手法や俯瞰画像の詳細は2.2節で述べ,2.3節で実験を行う.実験結果に基づく考



図 2.1: 車両の水平位置推定手法の概要

察を2.4節で述べる.

2.2 俯瞰画像のマッチングに基づいた車両の 水平位置推定

本手法では,平面拘束を導入することで,水平位置を得るために1フレームご との移動量を取得し,時系列に加算する.1フレームごとの移動量を取得するため に,2段階のステップに分けた推定を行う.図2.1に2段階のステップを示す.第 一段階はマッチング処理であり,図2.1の下半分での流れがマッチングに相当する. 多数生成した仮説に基づき,2枚の連続した画像をマッチングする.図2.1中の細 い縦線は,各仮説とその尤度を表したものである.第二段階は現フレームで得ら れた結果を元に次フレームでのマッチングの仮説を生成する.図2.1中の上半分に 相当し,現フレームで得られた仮説の尤度を元に,次フレームでのマッチングの



(a) **原画像**

(b) 俯瞰画像

図 2.2: 俯瞰画像の一例

仮説を生成する.

マッチング処理では,俯瞰画像のマッチングを行う.図2.2に入力画像と俯瞰画像に視点変換した例を示す.図2.2(a)にカメラで撮影された画像を示し,図2.2(b)に視点変換された俯瞰画像を示す.図2.2(b)に示す俯瞰画像は撮影後に視点変換されており,仮想的な視点から撮影された画像を表すが,平面拘束により,視点が自然に変換されていることが分かる.

マッチング処理の際は,現フレームと次フレームの2枚より生成された俯瞰画像 を比較することにより,1フレーム間でのカメラの移動量を推定する.マッチング において様々なパラメータを推定することで正しい移動量を推定するが,この時, 計算量が膨大にならないように,車両の運動に前提を加えることで,パラメータ の探索空間を元の6次元から2次元に縮小する.

このような時系列処理を繰り返すことで本手法は水平位置推定結果を得る.俯 瞰画像生成,マッチングに関する詳細を 2.2.1 節以降で述べる.

2.2.1 マッチングの概要

図 2.3 に示すように本手法は連続した 2 フレームを入力とする.図 2.3 の H_P と H_N はそれぞれ現フレームと次フレームの画像を俯瞰画像に変換するホモグラフィ である. H_P はカメラの内部パラメータと外部パラメータより計算されており, H_N はカメラの内部パラメータと外部パラメータに加え,状態ベクトルである車速と 仮定された車両の進行方向の角度の情報を含んでいる.このホモグラフィの求め 方は 2.2.4 節で述べる.

作成された2枚の俯瞰画像は差の絶対和 (SAD 値) によって類似度を計算する ことができ,これは状態ベクトルの尤度を表す.この仮定と評価を Condensation アルゴリズムで繰り返すことによって正しい車両の進行方向を推定することがで きる.

2.2.2 カメラモデル

本手法で用いるカメラモデルを図 2.4 に示す.世界座標系は現フレームにおける カメラの鉛直真下が原点であるとし,カメラの光軸は Z_W 軸と共平面であるとする.また,カメラ座標系の X 軸は世界座標系の X 軸と平行であるとする.v は1 フレームの間にカメラが移動した距離であり,車速に相当する. θ は車両の進行方 向を表す.また,車両は平面上を走行しているとして,カメラの高さhはフレー ム間で変化せず,またカメラの X_W 軸と Z_W 軸周りに関する回転運動 R_X , R_Z は 0 であるとする.カメラの Y_W 軸周りに関する回転運動 R_Y は進行方向 θ であると する.これによりカメラの光軸は車両の進行方向と常に一致していると言う仮定 を導入できる.

関らや Martinet らが提案した手法 [21,36] においては自動車の運動を自転車に 近似した「自転車モデル」を利用しているが,本手法ではこれよりさらに簡素化 したモデルを利用している.このモデルを導入することにより自己運動推定は本 来の回転3次元+並進3次元の6自由度から,進行方向θと車速vの,2自由度に



(a) 世界座標系とカメラの位置関係

(b) カメラ間の位置関係

図 2.4: 水平位置推定手法で利用しているカメラモデル

まで減らしている.これは,本手法が高速道路走行中の車両を対象としており,θ が小さいために導入できる仮定である.なお,2.3節の実験において,このモデル が妥当な仮定であることを示す.

2.2.3 カメラの位置計測

本手法では俯瞰画像生成のために,カメラと地面の相対関係を求める必要がある.カメラと地面の相対関係は2.2.2節で述べたhと ϕ を求める事である.本節では,このhと ϕ を求める方法として,直接測定する方法と,平面パターンを撮影した画像を用いる方法の2つを説明する.

なお,ここではカメラの内部パラメータは事前に求められているものとする.

カメラの位置と角度を実測する方法

測定を利用した方法では, hを測定するのは簡単であるが, φは光軸と言う見え ない線の角度であるため,測定は容易でない.そこで,光軸は画像平面の中心を 通過すると考え,画像の中心に来る位置に目印を置く.この目印は光軸と地面が 交差する場所である.

カメラの真下から光軸と地面が交差する場所までの長さを*l* で表すと, ϕ は式 (2.1) で求められる.

$$\phi = \arctan\left(\frac{l}{h}\right) \tag{2.1}$$

この測定を利用した手法では, *h* と*l* を測定して, *φ* を求めた後,後に示す式 (2.6), (2.7)よりカメラパラメータを求める.

平面パターンを撮影した画像を利用する方法

平面パターンを撮影した画像を利用する手法では,平面パターンを撮影し,平 面キャリブレーションを行う.平面キャリブレーションを行うことで,平面パター ンとカメラとの相対的な位置関係が求められる.しかしこの場合,原点が2.2.2節 で述べたカメラモデルと一致しない.2.2.2節で述べたカメラモデルでは,カメラ の鉛直真下が世界座標系の原点としているが,実際は平面パターン上の原点が世 界座標の原点となってしまう.このために,平面パターンを用いてキャリブレー ションを行った後,座標系の変換が必要となる.

平面キャリブレーションとは,平面パターンとカメラ座標との間に成り立つホ モグラフィ H_P を求めることである.この H_P は俯瞰画像生成に使うホモグラフィ とは違うホモグラフィのため,座標系の変換が必要となる.まずはホモグラフィか ら外部パラメータを求める必要がある.ホモグラフィは,内部パラメータと,外 部パラメータの1部分から成り立っており,その関係は式 (2.2)の通り,行列演算 の形で表される.内部パラメータAは既知であるので,ホモグラフィ H_P と内部 パラメータAから,外部パラメータ r_1 , r_3 , tを求める.

$$\mathbf{A}^{-1}\mathbf{H}_{P} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{A}\left(\begin{array}{cc} \boldsymbol{r}_{1} & \boldsymbol{r}_{3} & \boldsymbol{t}\end{array}\right)$$
(2.2)

ホモグラフィは1平面に関する記述なので,完全な外部パラメータを求める事 はできない.しかし,回転行列の列ベクトルはそれぞれが直交性を持つという特 徴がある.つまり,式(2.3)に示すように,3つの列ベクトルのうち,2つの列ベク トル同士の外積は残りの1本の列ベクトルを表す.この特徴を利用し,外部パラ メータを復元する.

$$\boldsymbol{r}_2 = \boldsymbol{r}_1 \times \boldsymbol{r}_3 \tag{2.3}$$

カメラと地面のなす角度 ϕ は,式 (2.4) により求められる.

$$R_z = \arctan\left(\frac{r_{21}}{r_{11}}\right) \tag{2.4}$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{-r_{31}}{r_{11}\cos(R_z) + r_{21}\sin(R_z)}\right)$$
(2.5)

式 (2.4), (2.5) において, r_{11} は式 (2.3) のベクトル r_1 の第1成分を表す.同様に r_{21} , r_{31} は r_2 , r_3 の第1成分を表す.



(a) 現フレーム画像の俯瞰画像への変換 (b) 次フレーム画像の俯瞰画像への変換

図 2.5: ホモグラフィを用いた俯瞰画像への変換

また,式(2.2)で求められたtは世界座標系をカメラ座標系に変換する並進ベク トルであり,カメラ設置高さhではない.カメラの設置位置 t_c を $(0,h,0)^{\top}$ とする と, $t = \mathbf{R} t_c$ なので, $t_c = \mathbf{R}^{-1} t$ となり, t_c を求められる.つまり,hが求められる.

以上で, 平面パターンを撮影した画像を用いて, カメラと地面の相対関係を表 $fheta h e \phi$ を計算できた.

前述の測定を利用した方法と比べると, 平面パターンを利用した方法では,パ ラメータの精度が良いことが知られている.しかし平面パターンが画面全体にひ ろがって映る必要があり,それ以外の場合ではカメラパラメータの誤差が増大す ることが知られている.

2.2.4 ホモグラフィ \mathbf{H}_P の求め方

 H_P は現フレームの入力画像のうち,あらかじめ指定された領域を俯瞰画像に変換するホモグラフィである.図2.5に2つの違うホモグラフィで違うフレームの画像を俯瞰画像に変換した様子を示す.ホモグラフィ H_P は式(2.6)で求められる.

$$\mathbf{H}_{P} = \mathbf{A} \left(\boldsymbol{r}_{1} \boldsymbol{r}_{3} \boldsymbol{t} \right) = \mathbf{A} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \phi & h \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & h \sin \phi \end{pmatrix}$$
(2.6)

ここで行列Aはカメラの内部パラメータ, r_1 , r_3 は回転行列の1列目と3列目, ϕ は地面とカメラの光軸の成す角度, hはカメラの設置されている高さを表す.こ の角度 ϕ とカメラの設置位置 h はあらかじめ計測されており, 既知である.つま り, キャリブレーションデータを利用するだけで,図2.5(a)のように現フレーム の入力画像を俯瞰画像に変換できる.

2.2.5 ホモグラフィ \mathbf{H}_N の求め方

 H_N は次フレームの入力画像のうち,あらかじめ指定された領域を俯瞰画像に 変換するホモグラフィである.次フレーム画像を H_P を用いて俯瞰画像に変換す ることも可能だが,その場合車両が進行していること,ハンドルを切っているこ となどから俯瞰画像は一致しなくなってしまう.よって,仮定した車速 v と進行 方向 θ を利用して,ホモグラフィ H_N が次フレームの入力画像のうち,現フレーム の俯瞰画像と同じ領域を俯瞰化するように設定する.

2.2.2 節で導入したカメラモデルを利用すると,ホモグラフィ \mathbf{H}_N は式 (2.7) で表される.



(a) 現フレーム画像

(b) 次フレーム画像



(c) \mathbf{H}_P を用いて俯瞰化し (d) \mathbf{H}_P を用いて俯瞰化し (e) \mathbf{H}_N を用いて俯瞰化し た現フレーム画像

た次フレーム画像

た次フレーム画像

図 2.6: ホモグラフィ \mathbf{H}_P と \mathbf{H}_N の違い

$$\mathbf{H}_{N} = \mathbf{A} \left(\boldsymbol{r}_{1} \boldsymbol{r}_{3} \boldsymbol{t} \right) = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & v \sin \theta \\ -\sin \phi \sin \theta & \sin \phi \cos \theta & h \cos \phi + v \cos \theta \sin \phi \\ -\cos \phi \sin \theta & \cos \phi \cos \theta & h \sin \phi + v \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix}$$
(2.7)

式 (2.7) に示されるように, H_N には $v \ge \theta$ の情報が取り込まれている.これに より,図2.5(b)のように次フレームの入力画像における,現フレームの俯瞰画像 と同じ領域を,同じ位置に変換できる.

時系列に連続した2枚の俯瞰画像を並べてみると,車速の速度情報が含まれて いることが分かる.

図 2.6 は現フレーム画像 (a) と次フレーム画像 (b) を $H_P \ge H_N$ でそれぞれ俯瞰

2.2. 俯瞰画像のマッチングに基づいた車両の水平位置推定

化したものである.画像下部の赤丸を付けている部分で,図2.6の(e)には(d)と 比べて画像情報が欠損している部分が見える.これは現フレーム画像で映ってい た路面が,カメラが進行することによって画面外へ移動してしまったことに起因 する情報の欠損である.この欠損は1フレームの間に車両が進んだ実測値に対応 し,すなわち車速である.

また,画像右上部の赤丸の中に見えているのは路面上の雪である.図 2.6 の (d) では図 2.6 の (c) より雪が多く映ってしまっている.これは車両が回転したことに より雪が多く映るようになってしまった結果である.一方で図 2.6 の (e) では映っ ている雪の量は図 2.6 の (c) と同程度である.この差が,カメラの進行方向 θ をホ モグラフィ \mathbf{H}_N に含んだ結果である.

このようにホモグラフィ \mathbf{H}_N に車速の情報vと車両の進行方向の情報 θ が含まれ,正しく2枚の俯瞰画像の位置合わせができていることがわかる.

2.2.6 俯瞰画像間のSAD 値の計算

本手法では状態ベクトル,車速vと車の進行方向 θ の尤度を評価する必要がある.前述したとおり,2つのパラメータvと θ が正しいとき,図2.7(b)のように差分画像は限りなくゼロに近づく.よって,本手法では単純に現フレームと次フレームから得られた俯瞰画像2枚の差分画像を作成し,その平均明度値を求めることによって,2つのパラメータの尤度とする.

計算量の観点より,差分は単純に明度差の絶対値の総和を計算する SAD(Sum of Absolute Difference) 値を利用する. SAD 値は式 (2.8) により表される.

$$S = \frac{\sum_{xy} |f_{xy} - g_{xy}|}{N} \tag{2.8}$$

ここで S は SAD 値, f_{xy} と g_{xy} は画像の座標 (x, y) における明度値, N は利用 された全画素数をそれぞれ表す.

SAD 値を求める際,俯瞰画像に利用する地面の領域次第では,図2.7(d)のよう



(a) 入力画像 (雪道, 2001 フレーム目) (b) 差分画像 (正解パラメータ時)



(c) 差分画像 (妥当でないパラメータ時) (d) 雪道における俯瞰画像の1例



(e) マスク画像の1例

図 2.7: パラメータの妥当性と差分画像の例

に入力の画像情報が欠落してしまう部分も現れる.よって,SAD 値を求める際に 画素数を考慮に入れる.具体的には俯瞰画像を生成する際に,図2.7(e)のように 画像情報を有している画素の位置を記録したマスク画像も生成し,画像情報を有 していない画素に関してはSAD 値の計算に含めないこととする.

この条件を含んだ SAD 値の定義は式 (2.9) で表される.ただし, N_{mask} は,図 2.7(e) で示したマスク画像の白画素の数を表す.

$$S_{mask} = \frac{\sum_{mask,xy} |f_{xy} - g_{xy}|}{N_{mask}}$$
(2.9)

パラメータ	值
ϕ (見込み角)	8.13°
h(カメラ 設置高さ)	2.0(m)
焦点距離	360 (pixel)
	360×240 (pixel)
Condensation アルゴリズムに利用したパーティクルの数	20 (particles)

表 2.1: 合成画像実験時に利用したパラメータ

2.3 実験

本手法の追跡精度と計算速度を,実験により検証した.2.3.1節では合成画像を 用いて予備実験を行った.本手法の推定精度,動物体の影響,白線のない状況で の推定などについて検証する.2.3.2節では実際に車載カメラから撮影された画像 を用いた実験を行った.予備実験で得られた成果が,実画像においても変わらず 有効であるか,検証する.2.3.3節では実際に実時間で稼働するシステムを構築し た.本手法が実際に高速に推定可能であることを示す.

2.3.1 合成画像を用いた予備実験

本節では推定結果の精度検証と,路面のパターンに依存しないことを示すため 合成画像を用いて実験を行った.画像合成には POV-Ray for Windows ver 3.6 を 利用した.実験に用いたパラメータを表 2.1 に示す.

路面テクスチャに対するロバスト性

本節の実験では本手法が路面上に白線が無い状況でも蛇行を検出できることを 示す.


(a)俯瞰画像生成に用いられた領域 (b) 生成された俯瞰画像

図 2.8: 俯瞰画像及び俯瞰画像生成に用いられた領域 (150 フレーム目, 合成画像)

実験では路面のテクスチャを3種類用意し,それ以外は同じ条件とした.実験 用の入力画像を図2.9 に示す.

1種類目はガードレールと白線が映っている画像を、2種類目にはガードレール のみ映っている画像を、3種類目には白線がない画像をそれぞれ用意した。各テク スチャの上を車が居眠り運転で蛇行したと想定した映像を生成した。各入力画像 において、カメラは同じ軌跡を示す。図2.8(a)に俯瞰画像に使用された領域を、図 2.8(b)に俯瞰画像の例を示す。

各入力画像から得られた運動軌跡を図 2.10 に示す.図 2.10の MARKER はガードレールと白線が映っている画像を入力とした結果, RAIL はガードレールのみ 映っている画像を入力とした結果, TEXTURE は白線もガードレールも無い画像 を入力とした結果, Ground Truth に正解値をそれぞれ示す.

各結果と正解値との差は,正解値の振幅に比べて小さいことが分かる.正解値 からの差はTEXTUREの場合で平均25cm,正解値の振幅4mに対して6.25%であ る.この結果より,本手法が白線を利用せずに水平位置を推定しており,何らか のテクスチャが画像に撮影されていればカメラの水平位置が推定可能である.路 面に存在するテクスチャのエネルギー量に関しては節にて考察を述べる.



(b) MARKER 300 フレーム目

(a) MARKER 1 フレーム目



(d) RAIL 300 フレーム目

(c) RAIL 1 フレーム目



 (e) TEXTURE 1 フレーム目
 (f) TEXTURE 300 フレーム目

図 2.9: 合成画像を用いた実験における入力画像の例



図 2.10: 合成画像を用いた実験において,推定されたカメラの水平位置

画像中の動物体の影響

画像中の動物体が本手法に及ぼす影響について本節で検証する.車載カメラ画像において,リアルタイムでの背景と対象領域の切り出しについて,Lorakisが提案した手法 [18] など,複数存在する.本手法では路面領域の切り出しに計算コストをかけずに,車両前方に存在する車間の領域に着目して車両の水平位置を推定する.

合成画像生成時に利用したパラメータは表 2.1 と同じで,自車両の右側から追い 越し車両が現れる状況を生成した.生成した入力画像の例を図 2.11 に,実験結果 を図 2.12 に示す.

今回の実験において, FOE を用いた手法 [40] とオプティカルフローを用いた手 法と比較を行った.また動物体の影響を評価するために, FOE を用いた手法にお いてマスキングをした場合としなかった場合の2通りを試した.オプティカルフ ローを用いた手法では KLT [19] を利用して特徴点の追跡を行い, 求められたオプ ティカルフローからカメラの運動ベクトルを復元した.マスキングした領域は図 2.8(a) に示された白枠の中と同じ領域を利用した.1.1.1 節での分類に合わせると, FOE を用いた手法は面でのマッチング, オプティカルフローを用いた手法は点で のマッチングに属する.

本手法の結果を図 2.12 に示す.本手法の推定結果は正解値の振幅と比較して差 異が小さい.一方で他の手法は,動物体による影響を受けているため,正解値とは 程遠い結果を推定している.本手法では,動物体の映りこまない車両前方の路面 領域を利用しているため,動物体の影響を受けることなく水平位置を推定できる.

比較に用いた他の手法において,車両前方の路面領域だけを利用するようにマ スキングしても,本手法のように推定精度が向上する訳ではない.1.1.1節で述べ たように,面でのマッチングや点でのマッチング手法は動物体による影響を受け るためである.本手法では,車両前方の領域を利用し,効率的に運動を推定でき るように,俯瞰画像に変換した.俯瞰画像を利用したことで移動物体に対する耐 性ができたわけではなく,移動物体に影響されにくい領域を効果的に使う方法を 提案したと言い換えることができる.

パラメータ	值
ϕ (見込み角)	5.40°
h(カメラ 設置高さ)	2.5(m)
焦点距離	578 (pixel)
画像サイズ	360×240 (pixel)
Condensation アルゴリズムに利用したパーティクルの数	20 (particles)

表 2.2: 実画像実験時に利用したパラメータ

以上のように,本手法は他の白線を利用しない手法に比べて,動物体の影響を 減らすことができることが分かる.



(a) 150 フレーム目



(d) 400 フレーム目



(c) 350 フレーム目



(f) 500 フレーム目

(e) 450 フレーム目

図 2.11: 移動物体を含む入力画像の例



図 2.12: 移動物体を含む画像において,推定されたカメラの水平位置



(a) 俯瞰画像生成に用いられた領域

(b) 俯瞰画像

図 2.13: 俯瞰画像及び俯瞰画像生成に用いられた領域(850 フレーム目, 実画像)

2.3.2 実画像での実証実験

通常の道路における実験

実環境における精度実証のため,実画像を用いて実験を行った.実験時の環境を 表2.2 に,入力画像の例を図2.14 に,図2.13 に各フレームでの俯瞰画像に利用し ている領域と俯瞰画像を表示する.本手法は,車両の前方の路面だけを利用して 水平位置を推定する.動物体が映りこんでいないため,動物体の影響を受けるこ となく水平位置を推定できる.図2.13 に示された領域は幅5m,長さが4mである.

この実験では白線ありの画像を入力としたため,白線の位置検出に基づく結果 を正解値として取り扱う.白線の位置検出に基づく手法は結果を正規化し,本手 法の結果と合わせ図 2.15 に示す.

比較のため,2.3.1 節で利用した,FOE を用いた結果,およびオプティカルフ ローを利用した結果も合わせて載せる.図2.14 に示すとおり,入力画像700 フレー ム前後で実車を追い越す車両が存在する.その近辺でFOE に基づく手法では結果 が不自然に振れており,動物体によって正しく水平位置推定が行えていないこと が分かる.このことより,蛇行を推定するための手法として,本手法が他の手法 より優れていることがわかる.



(a) 650 フレーム目





(c) 850 フレーム目

(d) 950 フレーム目



(e) 1050 フレーム目

(f) 1150 フレーム目

図 2.14: 実画像における入力画像の例



図 2.15: 実画像において,推定されたカメラの水平位置



(a) 俯瞰画像生成に用いられた領域

(b) 俯瞰画像

図 2.16: 俯瞰画像及び俯瞰画像生成に用いられた領域(121 フレーム目,雪道上)

雪道における実験

本手法が白線が無い状況下でも有効であることを示すために雪道上で実験を行った.雪道実験の入力画像の例を図2.17に,実験に用いた俯瞰画像の例を図2.16に 示す.図2.17に示すとおり,まっすぐな幹線道路の雪道上を車両が直進しており, 路面上に白線は見えない.本実験では画像中に他の走行車両は含まれていない.実 験時のカメラパラメータを表2.3に示す.

比較のため,2.3.1節で利用した,FOEを用いた結果,およびオプティカルフ ローを利用した結果も合わせて提示する.正解値として評価していた白線に基づ く手法は白線が見えなかったため,用いなかった.

図 2.18 に推定された結果を示す.図 2.18 では,車両が直進したという推定結果 になっており,実際に実験時に車両はハンドル操作なしに直進していた.実際の車 両の動きと同じような直線状の推定結果が得られているところから本手法が雪道 上でも正しく推定できることを示している.一方でオプティカルフローを用いた 位置検出手法では雪道上を直進しているにもかかわらず,水平位置が左右に振れ ており,実際の車両の動きとは明らかに異なる結果となっている.路面上の特徴 点が少なく,フレーム間で対応点を正しく推定できなかったためだと考えられる. この結果より,本手法では従来の白線を利用する手法ではできなかった,雪道 上で水平位置の推定を実現している.

パラメータ	值
ϕ (見込み角)	5.40°
h(カメラ 設置高さ)	2.5(m)
焦点距離	578 (pixel)
画像サイズ	360×240 (pixel)
Condensation アルゴリズムに利用したパーティクルの数	20 (particles)

表 2.3: 雪道上の実験時に利用したパラメータ



(a) 1 フレーム目

(b) 151 フレーム目

(d) 451 フレーム目



(c) 301 フレーム目



(e) 601 フレーム目

(f) 751 フレーム目

図 2.17: 雪道上で撮影された入力画像の例



図 2.18: 雪道上において,推定されたカメラの水平位置



(a) 俯瞰画像生成に用いられた領域

(b) 俯瞰画像

図 2.19: ランダムなテクスチャを持つ路面上の俯瞰画像の例

ミニチュアを用いた実験

本手法が白線が無い道の上でも蛇行を検出できることを示すために実験を行った.実際の環境として,雪道上を蛇行させながら走行することは困難であり,路面 上にランダムなテクスチャを用意することでミニチュアの実験を行った.図2.20 に実験に利用した入力画像の一部を,図2.19に俯瞰画像の一例とその生成に用い た領域を示す.

図 2.20 では絨毯の上に小さい紙片をまき,その上をカメラを 18m に渡って動か し,撮影を行った.地面とカメラの光学中心の間の距離は 15cm であった.この実 験はカメラの高さ 2.5m,車速約 90km/h,15fps で撮影した環境を想定した.

図 2.21 に本手法による結果と正解値を示す.平均誤差は 16mm であり,蛇行の振幅は 200mm に対して誤差は 8%であった.つまり白線が無い道の上でも妥当な水平位置を推定できた.



(a) 1 フレーム目

(b) 31 フレーム目



(c) 61 フレーム目

(d) 91 フレーム目



(e) 121 フレーム目(f) 151 フレーム目

図 2.20: ランダムなテクスチャを持つ路面上で撮影された入力画像の例



図 2.21: ランダムなテクスチャを持つ路面上にて,推定されたカメラの水平位置

パラメータ	值
ϕ (見込み角)	18.7°
h	2.5(m)
焦点距離	420 (pixel)
画像サイズ	320×240 (pixel)
フレームレート	15fps

表 2.4: 実験に用いた Web カメラの仕様

表 2.5: 処理用コンピュータの仕様

CPU	Pentium4 2.6GHz
メモリ	2.0GB
OS	WindowsXP $Pro(SP2)$
コンパイラ	Visual Studio .NET VC++
開発プラットフォーム	VC++ + OpenCV

2.3.3 実時間システムの構築

本手法の目指すところは車載システムによる実時間の水平位置推定である.性能評価のため,車載システムをノート PC と Web カメラによって作成し,実験を行った.車載システムに用いたカメラの仕様を表 2.4 に,計算機の主な仕様を表 2.5 に,実験時の入力画像の例を図 2.22 に示す.

実験時の環境として,雪道を用意することは困難であり,通常の高速道路上に て実験を行った.図2.22に示す通り,路面上には白線が描かれているが,,本手法 では白線の位置検出は行っていない.俯瞰画像に利用したのは車両前方6m,幅約 4mの領域を利用した.

計算時間削減のため,作成した実時間システムでは車両の速度推定は行わず車 両の速度センサを利用した.これにより計算すべきパラメータを θ のみの1つとし



(a) 65 フレーム目

(b) 365 フレーム目



(c) 665 フレーム目

(d) 965 フレーム目





図 2.23: 実時間システムで推定されたカメラの水平位置

た.Condensation アルゴリズムを利用せずに角度に関しては全探索を行った.こ れにより計算時間は0.25 秒まで削減され,4Hz で水平位置が推定できた.居眠り運 転中に発生する蛇行の周波数は0.1Hz-0.2Hz 程度であることが知られている[55]. 蛇行の検出のためには,標本化定理より0.4Hz 以上でサンプリングする必要があ り,計算が2.5 秒以内に終了する必要がある.本手法で計算時間は0.25 秒であった ため,本手法は蛇行推定に必要な計算速度を有していると言える.

本手法による水平位置の推定結果を図 2.23 に示す.実験中に居眠りを想定した 蛇行運転を行い,その区間を入力画像として利用した.本実験では正解位置とし て,白線を用いた実験結果と比較する.

本実験においては正解値を得られなかったので,定量的な誤差を検討すること はできないが,白線から得られた検出結果に良く追従した結果が得られているこ とが分かる.目標とする蛇行は約0.1Hz-0.2Hz 程度の周波数,つまり5-10秒程度 のゆっくりとした周期の蛇行を対象としている.本手法は白線を用いた手法を40 秒以上,安定して追従しており,蛇行検出に十分な性能を有している.

2.4. 考察

2.4 考察

本章で行った実験をもとに,本手法が達成できた点について考察する.

本手法では,平面拘束により,水平位置手法の問題を俯瞰画像のマッチング問 題に置き換えた.これにより,6次元あった探索空間を2次元の空間に削減するこ とに成功し,水平位置を高速に推定できた.

全探索の場合と,計算時間を比較した結果を表 2.6 に示す.各場合において,全 探索手法より本手法の方が計算時間を削減できていることが分かる.つまり Condensatin アルゴリズムを用いたことにより,計算時間を削減できたことを意味す る.本来,Condensatin アルゴリズムは Oka ら [28] や Pupilli ら [33] が示すように, 数千--数万のオーダでパーティクルを利用する必要がある.しかし,本手法では探 索空間の次元を削減しており,それにより,パーティクルが 20 個でも,妥当な推 定ができたと考えられる.

Condensation アルゴリズムを用いた高速化は,効果的なサンプリング点を選択 することにより,評価回数を削減したことに意味がある.Condensation アルゴリ ズム以外にも Levenberg-Marquardt 法や最急降下法などの,最小化アルゴリズム を用いることで,評価回数を削減でき,高速化できる可能性を含んでいる.図2.24 に,v-θ空間における差分画像の平均明度値を示す.本手法は,この関数の最小値 を求めることと言い換えることができる.図2.24 で示した評価関数は単峰性を示 しており,最小化アルゴリズムにより最小値を推定できると考えられる.また,そ の際収束に要する反復回数は,全探索アルゴリズムで要する評価回数より少ない

入力画像	本手法	全探索手法
白線	0.28 sec	$3.07 \sec$
雪道	0.28 sec	3.16 sec
合成画像	0.27 sec	2.77 sec

表 2.6: 1フレームの処理に要する時間

と思われる.



図 2.24: v-θ 空間における評価関数の形状

また,本手法で利用した Condensation アルゴリズムには,計算速度向上の他に, 時系列情報を取り扱えるという特徴がある.図2.25,2.26 に別のフレームにおけ る評価関数を示す.図2.25 では,評価関数に極小値を取る箇所が,多数存在して いることが分かる.このようなときには,最小化アルゴリズムで局所解に陥り,結 果水平位置推定に失敗すると思われる.一方 Condensation アルゴリズムは,前フ レームの結果に基づき,大量のパーティクルを散布して評価するため,近傍に多 数の極小値を取る箇所があっても,安定して水平位置を推定できると考えられる. 図2.26 には,別の評価関数の例を示す.本手法では,Y軸回りの回転以外は存在 しないという制約を用いてるが,実際には,路面の継ぎ目や段差を走行した時など に車両が前後に傾き,X軸回りの回転が生じることがある.その際には,図2.26 に示すような形の評価関数になる.この時,極小値を取る箇所が図2.25 と同じく 存在するが,そもそも最小値の位置が正解と離れているという問題がある.図2.26 中の, v-θ 平面上の*印が, 表関数におけるの最小値の位置を示している.しかし, この時の正解の運動パラメータは 印で示した位置であり, 評価関数の最小値の 位置とずれている.このように, X 軸周りの回転が発生した場合, 評価関数の形 状が歪み, 最小化アルゴリズムを利用した場合は水平位置が正しく推定できない と思われる.Condensation アルゴリズムを利用した場合は,前フレームからの情 報を利用し,図2.25 や図2.26 のような評価関数においても,推定誤差を軽減でき る可能性がる.

Condensation アルゴリズムと全探索手法を比較した場合を考察する.図2.27 に Condensation アルゴリズムを用いず,各フレーム全探索することで推定を行った 結果を示す.入力に用いた画像は2.3.1節の図2.9である.Condensation アルゴリ ズムを用いた場合は,実験により,平均25cmの誤差を生じているが,全探索の 場合は,図2.27 に示すとおり,平均で約1m,最終フレームで2mもの誤差があ る.これは,全探索の場合,推定される移動量は離散的な値になり,誤差が生じ て,フレームごとに積み重なって最終的に2mも誤差が生じたと考えられる.一方 でCondensation アルゴリズムを利用した場合は,近傍を探索した上で,各仮説の 重み付き平均により結果を出力できるため,より良い精度で推定できたと考えら れる.

このように, Condensation アルゴリズムを用いた場合は,精度面において全探 家アルゴリズムより上回り,計算速度においては最小化アルゴリズムと同様,高

エネルキー量		堆空の司不
凶笛方	(1pixel あたり)	推進の可占
2.28	45.41	失敗
2.29	764.0	成功
ً ≥ 2.30	614.6	成功
🙁 2.31	1344	成功
2.32	273.4	成功

表 2.7: 各実験画像に含まれるエネルギー量



図 2.25: 周期的なパターンが路面上に現れたときの評価関数



図 2.26: X 軸回りの回転が生じたときの評価関数



図 2.27: Condensation アルゴリズムを使わずに全探索した結果

速化の効果が得られ,また,全探索アルゴリズムや最小化アルゴリズムには無い, 時系列の情報を加味するという特性がある.上記の特徴より,Condensationアル ゴリズムは本手法に適していると考えられる.

本手法で目的としたのは,白線が無い道でも,動物体が画像中に含まれていて も適用可能な,水平位置推定手法であった.2.3.1節の図2.10より,路面のテクス チャが図2.9程度のテクスチャがあれば本手法で水平位置推定が可能であると分 かる.具体的に,どの程度テクスチャが必要であるか,追加実験を行った.実験 で用いた入力画像,および各入力画像に対応する俯瞰画像を図2.28-2.32に示す. 図2.29は2.3.1節にて,図2.30は2.3.2節にて,図2.31は2.3.2節にて,図2.32は 2.3.2節にて,それぞれ実験に用いた入力画像と,俯瞰画像である.

一方で,図2.28は推定に失敗した時の入力画像である.図2.28は俯瞰画像に含まれるテクスチャ量が少なく,Condensation アルゴリズムでの追跡で,パーティクルが発散してしまい,追跡ができなかった.これは ν-θ 空間における俯瞰画像の差分が小さすぎて,正しいパラメータが推定出来ず,結果パーティクルが発散

してしまったためと考えられる.

図 2.33 にパーティクルが発散したときの評価関数を示す.評価関数は傾いてお り,図 2.24 に示す通常の評価関数の形とは異なっている.図 2.33 において,正解 値は探索空間のほぼ中央に来るはずであったが,評価関数の形が正しくないため, 推定に失敗したと思われる.

各俯瞰画像に含まれるテクスチャエネルギー量 *Variation* を式 (2.10) によって 求めた.表 2.7 に,各入力画像に対するテクスチャのエネルギー量を示す.

$$Variation = \frac{\sum_{xy,mask} \left(f_{xy} - \bar{f}\right)^2}{N_{mask}}$$
(2.10)

表 2.7 より,推定に失敗した時は他の入力画像と比べてエネルギー量が概ね $0.3 \times 10^{-1} - 1.0 \times 10^{-1}$ 倍であることが分かる.これより,本手法を適用するためには,式 (2.10)に示すエネルギー量が概ね 100 以上必要であると言える.



(a) 原画像(b) 俯瞰画像図 2.28: 推定に失敗した入力画像



(a) **原画像**

(b) 俯瞰画像

図 2.29: 合成画像





(b) 俯瞰画像

図 2.30: 白線のある実画像



(a) **原画像**

(b) 俯瞰画像

図 2.31: 雪道上の画像



(a) 原画像
 (b) 俯瞰画像
 図 2.32: ランダムなテクスチャのある実画像



図 2.33: 図 2.28 における評価関数の形

2.5 本章のまとめ

本章では平面拘束を導入することで,俯瞰画像同士のマッチングを行い,単眼 だけで車両の水平位置を推定する手法を提案した.提案手法は以下の特徴が挙げ られる.

白線位置検出を利用せずに水平位置の推定を行っている。

• 他の白線を利用しない手法に比べ,動物体の影響を減らせる.

計算が高速である.

推定精度については,2.3.1節で述べたように,1フレームあたり平均25cmの誤 差で推定が可能であった.

特徴の1点目については2.3.1節,2.3.2節の実験結果に基づいて言える.白線の 位置検出を利用せず,俯瞰画像同士のマッチングを用いてるため,白線の無い道 においても,適用可能である.

2点目については,2.3.1節,2.3.2節や2.3.3節にて実験した結果に基づく.本手 法で対象としているのは目の前の路面領域だけであり,画像中に動物体が含まれ ていても推定は可能である.

3点目については 2.3.3 節で示した実験結果の通りであり,具体的に要した計算 時間については 2.4 節にて述べた.6次元の探索空間から,平面拘束を利用するこ とで 2 次元の v-θ 空間まで探索空間を絞ったことが最大の高速化の点である.ま た,実験においては Condensation アルゴリズムを利用することでさらに評価回数 を削減し,車載で利用可能なシステムを提案した.

第3章 平面拘束を用いた鏡面反射領 域の検出

3.1 概要

第2章において提案したのは,運転手による危険な状況を推定する手法であった.一方で,運転手がどれほど注意を払っていても,運転している環境自体に危険が潜んでいることも考えられる.例として,濡れた路面が挙げられる.図3.1に濡れた路面と乾いた路面の例を示す.濡れた路面はスリップ事故の元になり,危険であると考えられる.

このように路面上に濡れた領域があるか,どのような状態になっているか,な どをカメラを利用して確認する研究は路面状態把握と呼ばれる分野であり,様々 な先行研究がある [46,50–53].Mallらの提案した手法では,濡れた路面を鏡面反 射領域と仮定し,カメラを用いて鏡面反射領域を画像中から求めている [20].ま た上田らや山田らが提案した手法 [46,51,52] などをはじめ,プロジェクターカメラ システムを利用する手法も多数提案されている.路面状態把握のにおいて固定さ れたカメラを利用する研究は多い.特定の光を路面に投射し,得られた反射光を 解析することで把握するのが原理である.車載カメラを考えた場合,特定の光を 路面に投影することは現実的ではない.

一方で, 偏光レンズを用いたアプローチも, 鏡面反射領域検出によく使われる. 山田らの研究と久野らの研究が先行研究として挙げられる [16,51,53]. 山田らの研 究では偏光レンズを用い, 観測された光の偏光成分を求めることで, 鏡面反射領 域を求めている.

一方で,プロジェクタも偏光レンズも利用せずに路面状況を把握する研究もあ



(a) 乾いた路面

(b) **濡れた路面**

図 3.1: 濡れと乾きによるアスファルト路面の違い

る.久野らの研究では可動カメラを用いて「光沢度」を定義し,その光沢度に基 づき,路面が濡れているか,判定する手法を提案した[16].この手法では,路面 全体を見て,濡れているか乾いてるかの単一の結果を求めているだけであり,鏡 面反射領域の検出は行っていない.

そこで本章法では,単眼カメラを用いて,複数フレームにわたって路面を観測 することにより,鏡面反射領域を検出する手法を提案する.平面拘束を利用する ことで,仮想鏡面反射画像を生成し,そこから観測される輝度変化に着目して,鏡 面反射領域検出を行う.

本章は,以下のような章立てで構成される.3.2節では,鏡面反射領域検出の原 理について述べる.3.3節では,3.2節で述べた原理を実際に用いるための仮想鏡 面反射画像生成や,輝度変化の観測について述べる.3.4節では,本手法を用いて 実験を行った.3.5節では,利用している特徴量の有用性,既知としている3次元 形状情報,および追跡精度が本手法の結果に及ぼす影響について考察を述べ,3.6 節にて本手法をまとめる.



図 3.2: 鏡面反射の概念図

3.2 原理

本節では,鏡面反射領域を検出するための原理について記述する.

図 3.2 に本手法が想定する環境を示す.図 3.2 では,路面上の対象領域が鏡面反 射を起こしており,その対象領域に向かって車両(カメラ)が近づいている状況を 表す.ここで述べる対象領域とは,路面上をメッシュ状に区切った領域であり,画 像上では数ピクセル程度に相当する矩形領域を想定している.本手法では,この ような状況で路面上のある一点に着目して鏡面反射領域を検出する.

図 3.2 に示す状況下で,路面上のある一点の輝度は,路面の状況により異なった 反応を示す.路面上で鏡面反射が起きている場合,着目している一点の輝度は,カ メラと路面の成す角度により変化する.一方で,路面上で拡散反射が起きている 場合は,カメラと路面の成す角度が変化しても,着目している一点の輝度は変わ らない.このように,路面状況を把握する研究において,路面上の輝度の変化に 着目する研究 [16,42] は多数行われている.なお,本手法における路面は平面を想 定している.

図 3.3 に,鏡面反射領域へ時々刻々とカメラが近づいている状況を,図 3.4 にその時の路面の輝度変化を示す.画像中の黒い平面は拡散反射を起こす領域であり, その上に水溜りを作り,鏡面反射領域に見立てている.カメラは常に前進してい



 (a) 1 フレーム目
 (b) 39 フレーム目
 (c) 77 フレーム目













(c) 拡散反射領域における路面上と入射光の輝度



図 3.4: 各フレームにおける各種輝度の時間遷移

3.2. 原理

るため,全ての時刻においてカメラの光軸と鏡面反射領域との成す角度が,異なっている.図3.3中の 印と×印は,それぞれ鏡面反射領域内と拡散反射領域内にある,一点を表す.各時刻の, 印と×印における輝度を表したのが,図3.4(a)である.

実線が鏡面反射領域における輝度の変化を表し,破線が拡散反射領域における 輝度の変化を表す.拡散反射領域における輝度の変化に比べ,鏡面反射領域にお ける輝度の変化が激しいことが分かる.このように,路面上の輝度の変化に着目 することは,鏡面反射領域を検出するために,有効であることが分かる.

本手法では更に検出精度を上げるため,路面の輝度の変化に加えて,路面への 入射光の変化も推定する.路面へ到達する入射光は,簡単に単眼カメラのみで観 測することはできないが,本手法では,周囲の3次元空間の形状情報が既知な状 況を想定し,形状情報を元に入射光を推定する.詳細は3.3節にて述べるが,これ により本手法では,路面上のある一点をカメラで観測したときに,ある一点から カメラへの直線が路面と成す角度と,等しい方向からの入射光を推定できる.

本手法のように,路面上のある一点と,その一点とカメラが成す角度と等しい 方向からの入射光の輝度が推定できると,2つのメリットが得られる.

一つは仮想的な鏡面反射画像を生成できることである.路面に到達する入射光が推定できる場合,反射光と入射光を置き換えることで,路面上が完全な鏡面反射を起こした状態の,仮想的な画像を生成することができる.本手法では,この仮想的な画像を仮想鏡面反射画像と呼ぶ.路面の輝度値の変化が入射光の変化と類似している場合,路面が鏡面反射を起こしていると言える.

図 3.4 に路面上の輝度変化の具体例を示す.図 3.4(b) に鏡面反射領域の,(c) に 拡散反射領域の,各時刻における輝度と,カメラが路面と成す角度で入ってきた 入射光の輝度をそれぞれ示す.実線が路面上のある一点の,破線がその一点とカ メラが成す角度と等しい方向からの入射光の輝度をそれぞれ表す.図 3.4(b)では, 入射光の輝度の変化に応じて,路面上の輝度が追従して変化していることが確認 できる.一方で,図 3.4(c)では,入射光の輝度が変化しても,路面上の輝度が殆 ど変化していないことが確認できる.このように本手法は,路面上の一点と,そ の一点に対応する入射光の輝度,両方を観測することで,鏡面反射領域と拡散反 射領域を区別する.

入射光の輝度の推定によるもう一つのメリットは,入射光が変化しない状況に おける誤検出の軽減である.本手法では路面上のある一点における輝度の変化に 着目しているが,そもそもある一点に対し,どの角度からも,似たような輝度の入 射光が到達していた場合,ある一点が鏡面反射領域内にあろうと,拡散反射領域 内にあろうと,その領域内の輝度はほぼ一定となってしまう.このような状況で は路面上の輝度の変化に着目しても,路面と対応する入射光両方の輝度に着目し ても,鏡面反射領域と拡散反射領域の区別が付かなくなってしまう.図3.4(d)に, どの角度からも似たような輝度の入射光が到達していた場合の具体例を示す.図 3.4(d)に示したのは(a)-(c)とは別の領域の,各時刻における路面上の輝度と,そ れに対応する入射光の輝度である.入射光の輝度が,どの時刻においてもほぼ一 定である.このような状況では,路面上の状態にかかわらず,観測される路面の 輝度は常に一定となってしまう.

そこで,本手法は入射光の輝度の変化にも着目し,入射光の輝度がどの角度で も一様な場合は,本手法が用いる前提が成り立たない状況として,検出対象から 除外する.

3.3 複数フレームにわたった観測に基づいた

鏡面反射領域検出

前節に示した考え方に基づき,本手法では鏡面反射領域の検出を行う.本節で は,その具体的な処理アルゴリズムについて説明する.本手法の流れを図3.5に示 す.3.2節で述べたように本手法では鏡面反射領域を検出するため,路面上の輝度, 及び入射光の輝度に着目する.

図 3.5 に示すように,まず入力画像から仮想鏡面反射画像を生成する.図 3.6 に 仮想鏡面反射画像の例を示す.仮想鏡面反射画像とは,ある平面全体が鏡面反射


図 3.5: 鏡面反射領域検出手法の手順

を起こした場合に得られる,仮想的な画像である.仮想鏡面反射画像において,各 画素の明度値は,自身に対応する入射光の輝度を表す.仮想鏡面反射画像生成に ついては詳細を 3.3.1 節で述べる.

続いて,入力画像及び仮想鏡面反射画像両方において追跡を行う.本手法はカ メラが動きながら撮影することを想定しているため,各時刻において対象領域を 追跡する.そして,この追跡処理により,各時刻における対象領域内の輝度とそ れに対応する入射光の輝度を得られる.追跡の詳細について3.3.2節で述べる.

ここまでの処理で得られた,各時刻における路面の輝度と,対応する入射光の 輝度から,3種類の特徴量を求める.求める3種類の特徴量はそれぞれ3.2節で述 べたように,路面上の輝度の変化,対応する入射光の輝度の変化,路面と対応す る入射光それぞれの輝度変化の類似性を表す.求められた特徴量を用いて,各対 象領域が鏡面反射領域かどうか,判定を行う.特徴量の算出と判定に関する詳細 を3.3.3節で述べる.

一連の処理を路面全体に適用することで,鏡面反射領域を検出する.



(a) 入力画像



(b) 3 次元形状の反転



(c) 仮想鏡面反射画像

図 3.6: 仮想鏡面反射画像

3.3.1 仮想鏡面反射画像生成

本節では仮想鏡面反射画像生成の手順を述べる.本手法では周辺の3次元形状 を利用して,仮想鏡面反射画像を得る.

図 3.6 に仮想鏡面反射画像生成の例を示す.図 3.6(a) に入力画像を,図 3.6(b) に 仮定した 3 次元形状を,図 3.6(c) に仮想鏡面反射画像の例を示す.

図 3.6(b) は,廊下を壁,天井,床の合計4枚の平面で周囲の3次元形状で表している.このような状況で床が鏡面反射を起こした場合,壁や天井はそれぞれ床に対して対称な位置に存在するように見える.図 3.6(b) では,その他に入力画像中に当てはめた天井と2枚の壁を,床に対して反転させた領域を表している.

それぞれ面同士で対応関係を持っているため,壁,天井,それぞれの領域のテクスチャを,反転させた位置に貼り付けたものが図 3.6(c) である.図 3.6(c) において,ゴミ箱や植木など,一部平面でない部分の形状がゆがんでいるが,概ね床が全部鏡面反射を起こしているように見える.

このように,本手法は周囲の3次元形状をもとに,1枚の入力画像から仮想鏡面 反射画像を生成する.仮想鏡面反射画像生成の際,鏡などの,見る方向に対して 光の輝度や色が変わるような物体が存在すると,正しく仮想鏡面反射画像が生成 できない.本手法ではこのような物体が存在しない状況を対象とする.単眼カメ ラを用いた3次元形状復元に関しては,先行研究[11,31,32,49]が報告されており, 本手法では,これらの手法を用いて周囲の3次元形状が既に既知である環境を想 定する.

3.3.2 領域の追跡

本手法では各時刻における路面上の輝度と入射光の輝度を観測する必要がある. 本手法ではカメラが移動するため,対象領域の位置を入力画像中において追跡し 続ける必要がある.

本手法では,対象領域を追跡するために,カメラの移動ベクトルを考える.カメ







(b) 拡散反射領域における特徴量の分布



(c) 入射光の変化が小さい領域における特徴量の分布

図 3.7: 特徴量の 3 次元分布

ラの移動ベクトルに関しては,多数の手法[1,9,12,15,27,29,45,54]が提案されてい る.カメラの移動ベクトル推定に関しては,GPS[1,29]やカメラ[9,12,15,27,45,54], その両方を用いて推定する手法が提案されている.本手法ではこのような既存手 法を組み合わせて,カメラの移動ベクトルが既知な状況を想定する.カメラの移 動ベクトルがフレームごとに既知な場合,前フレームにおける路面上の対象領域 が,現フレームにどこに移動したかを知ることができる.これにより,対象領域 をフレームごとに追跡する.本手法では各時刻において,対象領域内における明 度値の平均を求め,蓄積する.

$$\boldsymbol{r} = \{I_{r1}, I_{r2}, \dots, I_{rn}\}$$
(3.1)

式 (3.1) において, I_r はある時刻の入力画像における対象領域内の明度値の平均 値を表し, I_{r1} , I_{r2} , ..., I_{rn} が各時刻における, I_r を表す. r は各時刻における I_r の集合であり, n 個の要素を持つベクトルである.

3.3.1 節で説明したように,仮想鏡面反射画像の明度値は,入射光の輝度を表す. 仮想鏡面反射画像において,対象領域と同じ位置の明度値を得ることにより,各 時刻の仮想鏡面反射画像における,対象領域内の明度値の平均値を得る.

$$\mathbf{i} = \{I_{i1}, I_{i2}, \dots, I_{in}\}$$
 (3.2)

式 (3.2) において, *I_i* はある時刻の仮想鏡面反射画像における,対象領域内の明 度値の平均値を表し,対象領域に到達した入射光の輝度を意味する.*i* が各時刻に おける *I_i* の集合であり,本手法では*n* 次元のベクトルとみなす.各要素 *I_{i1}*, *I_{i2}*, ..., *I_{in}* が各時刻における, *I_i* を表す.

このように,画像中の対象領域を追跡することで,対象領域ごとにrとiを得る

3.3.3 特徴量算出とクラス判定

3.3.2節までで, I_r の集合を表すr及び I_i の集合iが得られた.得られた $r \geq i$ から,対象領域が鏡面反射領域かどうか判定するため,特徴量を計算する.本手

法では, 3.2節で述べた通り, $I_r \ge I_i$ の変化が似ているか, $I_r \ge I_i$ それぞれが変化しているかを表す特徴量を用いる.式 (3.3), (3.4), (3.5)にそれぞれの特徴量の定義を示す.

$$s = \frac{(\boldsymbol{r} - \bar{r}) \cdot (\boldsymbol{i} - \bar{i})}{|\boldsymbol{r} - \bar{r}| |\boldsymbol{i} - \bar{i}|}$$
(3.3)

$$n_r = |\boldsymbol{r} - \bar{r}| \tag{3.4}$$

 $n_i = |\mathbf{i} - \overline{i}| \tag{3.5}$

式 (3.3) に表された s は r と i の正規化された内積であり, I_r と I_i の変化の類似 度を表す. \bar{r} と \bar{i} はそれぞれ r と i の要素の平均値を表す.

3.2節で述べたように,路面上の輝度と入射光の輝度は一致するのではなく,比例の関係になる.そのため,単純にベクトル同士の内積を利用するのではなく,正 規化することで,路面の輝度と対応する入射光の輝度における比例の関係を表す 類似度を導入した.

式 (3.4), (3.5) に表された n_r , n_i はそれぞれ $r \ge i$ のノルムを表し, I_r 及び I_i の 変化を表す. n_r , n_i は, それぞれ I_r , I_i が変化していなければ小さくなり, 変化 していれば大きくなる.

このように,本手法では3種類の特徴量を導入する.ここで3種類の特徴量に 対して,鏡面反射が起きているかどうか判定する方法として,それぞれの特徴量 にしきい値を設定することが考えられるが,以下に述べるように,実際には特徴 量が広い範囲に分布を持つため,単純なしきい値処理ではうまくいかない.

図 3.7 に各領域から得られた,3種類の特徴量をプロットした図を示す.各プロット図において類似度 s,路面上の輝度変化のノルム n_r ,入射光の輝度変化のノルム n_r ,入射光の輝度変化のノルム n_i を軸としており,同じ実験画像において,様々な対象領域から得られた特徴量を特徴量空間中の1点としてプロットしたものである.図 3.7(a)は鏡面反射領域から,図 3.7(b)は拡散反射領域から,図 3.7(c)は I_i の変化が小さく,判定不能と思われる領域から,それぞれ得られた特徴量の分布を表す.

図3.7に示すように,各領域から得られた特徴量は分布を持って,それぞれ重心

が離れて存在していることが分かる.鏡面反射領域の検出は,この特徴量空間に おけるクラス分けに等しい.3.2節で定義した特徴量を利用することで,拡散反射 領域から得られた特徴量と鏡面反射領域から得られた特徴量がそれぞれ離れて分 布し,クラス分けに適した特徴量であったことを意味する.

一方で,得られた特徴量をしきい値処理することは,特徴量空間を各軸に垂直 な面で分割することに相当する.各特徴量は,それぞれ分布を持つため,必ずし も各軸に平行に存在するわけではなく,しきい値処理によってクラス分けを行う のは妥当ではない.

そこで本手法では,この特徴量空間中の特徴量をクラス分けするため,クラス 重心からのマハラノビス距離を用いる.各特徴量は,マハラノビス距離がもっと も近いクラスに属すると判定する.

このようにして,本手法では路面上の領域を「鏡面反射領域」「拡散反射領域」 「判定不能」の3クラスに分類する.



図 3.8: 実験環境とカメラの配置

3.4 実験

本手法の有効性を確かめるため,実験を行った.まず2種類の環境にて検証実験 を行った.それぞれ3.4.1節,3.4.2節に示す.次に,特徴量の組み合わせの効果を 示す比較実験を3.5.1節に示す.最後に,既存手法により既知とした3次元形状と 領域の追跡精度が,本手法の検出結果に及ぼす影響について3.5.2節にて考察する.

3.4.1 環境1(屋内)での実験

実験環境を図 3.8 と図 3.9 に示す.図 3.8 に実験環境の平面図と側面図を,図 3.9 に実験環境を撮影した図を示す.拡散反射領域としてテーブルの上にスポンジ素 材を置き,その上に鏡面反射領域として水をこぼした.図 3.9 内の白い枠で示し た領域を観察対象領域とし,観察対象領域を横 320,縦 240 個の対象領域に分割 し,各対象領域に対して判定を行った.各対象領域は1辺およそ数 mm のサイズ であった.

図 3.8 に示すように,観察対象領域の隣に壁を用意し,アルファベットの文字列 を印刷してテクスチャを与えた.カメラの光軸は路面と水平に,且つ進行方向に 対し右側に約 10 度向けた状態で,テーブルの上約 10cm の高さを移動させた.本



図 3.9: 実験環境と観察対象領域

手法はカメラの運動が既知ならば,直進に限定されないが,今回はカメラを直進 させ,移動ベクトルを手動で与えた.

図3.10 に入力画像の一部を示す.図3.10 に示された白枠は観察対象領域を表し, 図3.9 に描かれたものと同じ領域である.また,その白い枠内を各フレームにおい て真上から見た状態に射影変換した俯瞰画像を,入力画像と合わせて図3.10 に示 す.水溜りに映りこんだ壁のテクスチャが,各フレームで違うことが確認できる.

図 3.11(a) に入力画像と観察対象領域を,図 3.11(b) に観察対象領域を真上から 見た状態に射影変換した俯瞰画像を示す.俯瞰画像における各画素を対象領域と して実験を行った.また俯瞰画像から,目視で正解画像を作成した.作成した正 解画像を図 3.11(c) に示す.図 3.11(c) に示す正解画像では,白い領域が鏡面反射 領域を,黒い領域が拡散反射領域を示す.図 3.11(c) の各画素は,図 3.11(b) の各 画素に対応する.判断の基準は,俯瞰図にした観察対象領域を複数フレーム目視 し,各画素における明度値の変化の有無とした.



図 3.10: 実験の入力画像 (室内環境)



図 3.11: 中間画像および実験結果 (室内環境で)

図 3.11(d) に本手法によって判定された結果を示す.図 3.11(c) と同じく,(d)の 各画素は(b)の俯瞰画像の各画素に対応し,白い領域は鏡面反射領域,黒い領域は 拡散反射領域,灰色の領域は判定不能とされた領域をそれぞれ示す.表 3.1 に各ク ラスに判定されたサンプル数の割合を示す.

本手法において分類のために,比較する基準用データがあらかじめ必要になる が,本実験においては,入力画像より手動でデータを切り出した.具体的には,あ らかじめ全対象領域から特徴量を計算し,入射光の輝度が十分変化している特徴 量のうち,rとiの類似度sが高く,路面上の輝度の変化が大きい特徴量を鏡面反 射領域の基準とし,rとiの類似度sが低く,Irの変化nrが小さい特徴量を拡散 反射領域の基準とした.また,Iiの変化niが小さい特徴量を判定不能領域の基準 とした.入力画像の画素数に対して1%程度のサンプルをランダムに抜きだし,基 3.4. 実験

準用データとした.

本手法による判定結果のうち,判定不能とされた 20.93%の領域を除き,判定結 果を4種類に分ける.本手法により鏡面反射領域と判定され,正解画像でも鏡面 反射領域だったものを TP(True positive),本手法により鏡面反射領域と判定され, 正解画像では拡散反射領域だったものを FP(False positive),本手法により拡散反 射領域と判定され,正解画像では鏡面反射領域だったものを FN(False negative), 本手法により拡散反射領域と判定され,正解画像でも拡散反射領域だったものを TN(True negative)とする.

本手法の検出性能を示すため,再現率と適合率を計算した.再現率は $\left(\frac{TP}{(TP+FN)}\right)$ で求められ,正解の内,何%を検出できたかを示す.適合率は $\left(\frac{TP}{(TP+FP)}\right)$ で求められ,検出結果に,何%正解が含められていたかを示す.どちらも0-1の間の値を示し,値が大きい程性能が良いことを示す.

本実験における判定結果の再現率は0.871,適合率は0.827であった.適合率は 0.827にとどまったのは,カメラの位置推定誤差などの影響により,完全に同じ点 からの反射光の輝度変化や,同じ点への入射光の輝度変化を得ることができなかっ たためだと考えられる.誤判定の結果となる FN,FPの結果を調べると,追跡の 誤差による影響が発生していた.撮影時に誤差が発生したと考えられる.このよ うなカメラの移動軌跡推定誤差の影響が全く存在せず,完全に同じ点からの反射 光の輝度変化や同じ点への入射光の輝度変化が得られる状況を想定して,CG 生 成ソフト POV-Ray により作成した合成画像でも同じ実験を行った.この場合は,

		正解		
		鏡面反射領域	拡散反射領域	合計
検出結果	鏡面反射領域	22.0%	4.60%	26.6%
	拡散反射領域	3.24%	49.3%	52.5%
	判定不能領域	5.82%	15.1%	20.9%
合計		31.0%	69.0%	100.0%

表 3.1: 検出結果 (室内実験)



図 3.12: 実験環境(屋外)



図 3.13: 実験の入力画像 (屋外)

カメラの移動軌跡の推定の誤差が無いため,100%の認識結果を得ることができた. つまり,本手法では,カメラの移動軌跡の推定精度を上げることによって,鏡面 反射領域の推定精度を向上できることが示唆された.

3.4.2 環境2(屋外)での実験

3.4.1 節にて行った実験と環境を変え,本節での実験は屋外で行った.実験環境の平面図と側面図,及び観察対象領域を図3.12 に示す.拡散反射領域,鏡面反射領域,観察対象領域を,図3.12(a)中の黒い領域,灰色の領域,白い枠でそれぞれ 表す.観察対象領域は横320,縦240個の対象領域に分割し,各対象領域に対して 判定を行った.各対象領域は1辺およそ数 cmのサイズになった.

また,鏡面反射画像を生成するため,壁が隣接する路面を選んで実験を行った. 壁には溝など,表面に凹凸があったが,今回の実験では1枚の平面と考えて扱っ

72



(a) 入力画像 (1 フレーム目)

(b) 俯瞰画像 (1 フレーム目)



(c) 目視による正解画像

(d) 判定結果

図 3.14: 屋外での実験における中間画像および実験結果

た.図 3.12(b) に路面と平面,および観察対象領域の位置関係を示す.図 3.12(a) に示したように,カメラは路面上一定の高さを路面と水平に,且つ壁と一定距離 を保ったまま直進し,カメラの光軸は路面に対して下側に約10度,右側に約15度 向けた状態で実験を行った.3.4.1節と同じく,対象領域の追跡のために,フレー ム間での位置関係を手動で与えた.図 3.13 に入力画像の一部を示す.

図 3.14(a) に入力画像と観察対象領域を,図 3.14(b) に観察対象領域を真上から 見た状態に射影変換した俯瞰画像を示す.俯瞰画像における各画素を対象領域と して実験を行った.また俯瞰画像から,目視で正解画像を作成した.作成した正 解画像を図 3.14(c) に示す.図 3.14(c) に示す正解画像では,白い領域が鏡面反射 領域を,黒い領域が拡散反射領域を示す.図 3.14(c)の各画素は,図 3.14(b)の各 画素に対応する.図 3.14(d) に示す白,黒,灰色それぞれの領域は,鏡面反射領域, 拡散反射領域,判定不能領域に対応する.

表 3.2 に各クラスに判定されたサンプル数を示す.3.4.1 節と同じく,本手法による判定結果のうち,判定不能とされた 36.27%の領域を除き,判定結果を TP, FP, FN, TN の4 種類に分ける.本手法の検出性能を示すため,3.4.1 節と同じく,再現率と適合率を計算した.

本実験によって,本手法は屋外においても再現率0.869,適合率0.830で鏡面反射 領域を検出できることを示した.これは3.4.1節で示した結果とほぼ同等であった.

3.5 考察

3.5.1 特徴量の組み合わせ

本節では 3.4.1 節で得られた結果をもとに 3 種類の特徴量を組み合わせた効果を 検証する.

入射光と反射光の変化に着目して鏡面反射領域を検出している従来手法と,本 手法を比較する.久野らが提案した手法 [16] では「光沢度」を入力画像から求め

		正解			
		鏡面反射領域	拡散反射	合計	
検出結果	鏡面反射領域	20.4%	4.19%	24.6%	
	拡散反射	3.09%	36.0%	39.1%	
	判定不能領域	0.00%	36.3%	36.3%	
合計		23.5%	76.5~%	100.0%	

表 3.2: 検出結果 (屋外)



(a) 検出結果(b) 目視による鏡面反射領域図 3.15: 本手法による検出結果



(a) 類似度 s(グレースケールに正規化)
 (b) 類似度 s のみで検出された鏡面反射領域
 図 3.16: 類似度のみによる検出結果



(a) *I_r* の変化 *n_r*(グレースケールに正規化)
 (b) *n_r* のみで検出された鏡面反射領域
 図 3.17: 反射光の変化のみによる検出結果

ている.光沢度は路面上の輝度の変化を観察することにより得られており,本手法で用いた n_rに相当する.入射光と反射光の類似度に着目した研究 [35,42] も行われており,本手法で用いた s を利用して鏡面反射を検出していることに相当する.これらの手法の結果と比較する.

各特徴量を用いた場合の適合率,再現率,F値を表3.3にまとめる.F値とは適 合率と再現率を合わせた総合的な評価値で,0-1の間の値を示し,値が大きい程性 能が良いことを示す.適合率,再現率,F値いずれも本手法が高い値を示している.

図 3.15(a) に本手法による検出結果を,図 3.15(b) に正解画像を示す.以下,各 特徴量を利用した場合を考察する.

類似度 s のみを利用した場合

図 3.16(a) に観察対象領域の類似度のマップを,図 3.16(b) に類似度のみで検出 した鏡面反射領域を示す.白い領域が鏡面反射領域,黒い領域が拡散反射領域を 示す.

図 3.16(b) は図 3.16(a) をしきい値処理したものである.図 3.16(a) はグレース ケールに正規化してあるが,内積の値を類似度として利用しているため,値域は -1 から1である.しきい値は検出結果のF値が最大になるように設定し,F値は 最大で 0.632, この時のしきい値は 0.80 であった.しきい値を超える特徴量を持つ 領域は鏡面反射領域,それ以外は拡散反射領域とした.

図 3.15(b) と図 3.16(b) を比較すると, 拡散反射領域を誤って鏡面反射領域とし て検出していることが分かる.入射光の輝度に変化が小さいため, 拡散反射領域 においても類似度 s が高くなってしまった結果であり, 類似度 s だけを用いた検出 は難しいと言える.

路面上の輝度変化 n_r を利用した場合

図 3.17(a) に *n_r* のマップを,図 3.17(b) に *n_r* をしきい値処理して検出した鏡面 反射領域を示す.白い領域が鏡面反射領域,黒い領域が拡散反射領域を示す.図



(a) 鏡面反射領域内で,判定不能領域に属するところの特徴量の分布



(b) 拡散反射領域内で,判定不能領域に属するところの特徴量の分布



⁽c) 教師用データとして用いた,鏡面/拡散反射領域の特徴量の分布

図 3.18: 判定不能領域内の,特徴量の分布

3.17(b) は図 3.17(a) をしきい値処理することで求めた.しきい値は判別分析法に よって決定し,この時の F 値は 0.746 であった.

図 3.15(a),図 3.15(b),図 3.17(b)を比較すると、大まかに同じ領域が検出されているが、本手法で判定不能とされた領域内で比較すると、反射光 *I_r*の変化 *n_r* だけで検出した場合は、鏡面反射領域を拡散反射領域と誤検出している領域がある.

反射光 *I_r* の変化 *n_r* だけで検出を行う場合,路面に達する入射光が時間によらず 一定の時,誤検出の可能性が高くなる.本手法では,入射光の時間変化 *n_i* が小さ い場合は判定不能とすることで,この誤検出を回避している.図 3.18 に誤検出の 原因となる特徴量を示した.

図 3.18(a) と図 3.18(b) は,本手法で判定不能とされた領域内での特徴量の分布 を表している.具体的には,図 3.15(a) と図 3.15(b) を比較し,「目視では鏡面反射 領域と判定されたが,本手法で判定不能とされた領域」と「目視では拡散反射領域 と判定されたが,本手法で判定不能とされた領域」の2つに分け,各領域内の n_r , n_i , s をプロットしたものがそれぞれ図 3.18(a) と図 3.18(b) である.図 3.18(a) と 図 3.18(b) を比較すると,互いの分布の形状が似ており,近くに存在していること がわかる.

参考に,同実験においてマハラノビス距離を計算するために用いられた教師デー タを図 3.18(c)に示す.図中の+で表された分布が鏡面反射領域の,×で表された 分布が拡散反射領域の分布を示す.重なりはあるものの,互いの分布の形状は異 なっていることが分かる.図 3.18(c)中の教師データの分布と比べると,図 3.18(a)と図 3.18(b)は近くに存在していることが分かる.つまり本手法で提案した特徴量 n_r , n_i ,sの3つを用いただけでは,本手法の判定不能領域内の特徴量を拡散反射 領域と鏡面反射領域に分離するのには不十分であると考えられる.

判定不能領域と本手法の原理について

本手法は,カメラが移動することに伴い対象領域に対する見込み角が変化し,それに伴う映り込みの変化に着目した手法である.そのためには,映り込む対象物体,例えばビルの壁や窓,道路の案内標識などが,何らかのテクスチャを持って

いることを想定している.逆に,均一な素材でできている壁や,雲ひとつ無い晴 天などが映りこんでる状況では,図3.18に示すような特徴量の分布しか得られず, 本手法で利用している分類方法では,観測するフレーム長,撮影時のノイズ,カ メラの移動ベクトルの復元精度など,さまざまな条件でどちらの領域としても誤 判定される可能性がある.偶然正解判定される場合もあり得るが,それは本手法 による正解とは言えず,あくまで偶然正解していたに過ぎない.

入射光に変化がないような状況でも検出を可能にする場合,本手法で利用した n_r,n_i,s以外の新たな特徴量を導入したり,別の判定基準を導入する必要がある. 判定不能領域を導入することにより,本手法の原理が適用できない領域を検出で きたと言える.

3.5.2 3次元形状および追跡の精度に関する考察

本節では,本手法で既知としている周辺環境の3次元形状および対象領域の追跡精度が本手法の結果に及ぼす影響について考察する.本手法では,これらの情報が既知な状況を想定している.しかし実際は様々な理由から,外乱が混じり,正しい形状が得られなかったり,追跡が行えないことが考えられる.

追跡に失敗し,周辺環境の3次元形状にも誤差が含まれている場合,当然ながら 推定に失敗する.ここではまず,追跡が正しく行われており,利用する3次元形状 に誤差が含まれている場合を考察する.原則として3次元形状に誤差が含まれて

用いた特徴量	適合率	再現率	F 値			
sのみ	0.690	0.583	0.632			
n_r ወታ	0.708	0.789	0.746			
本手法						
$(s \ge n_r \ge n_i \mathcal{O})$	0.827	0.871	0.848			
組み合わせ)						

表 3.3: 各特徴量を用いた場合の比較

いる場合は,本手法による鏡面反射領域の検出精度は低下すると考えられる.ただし,3次元形状の復元精度の悪いフレームが,撮影されたフレーム中わずかだった場合においては,復元精度の影響を受けずに,同等の精度を得られると考えられる.

例えば,1フレームだけにおいて復元精度が悪かった場合,本手法では検出精 度が低下しないと考えられる.これは本手法では複数フレーム(環境1では100フ レーム以上,環境2では12フレーム)にわたった輝度の変化に着目しているため, 大局的な輝度の変化に影響が無ければ,1フレームだけ形状復元に誤差が含まれて いたとしても,同等の検出精度が得られると考えられる.

しかし,大局的な輝度の変化に影響するほど,複数フレームにおいて形状復元 に誤差が含まれている場合,本手法の検出精度は低下すると考えられる.本手法 では路面上の対象領域内の輝度 *I_r* と,対応する入射光の輝度 *I_i* を比較することで 鏡面反射領域を検出しており,形状復元に誤差が含まれると,*I_r* に対応する *I_i* を 正しく画像中から取得できない.結果,本手法の鏡面反射領域の検出精度が低下 すると考えられる.

一方で追跡が正しく行われていない場合,つまりフレームごとのカメラの運動 ベクトルが正しく求められてない場合を考察する.同一対象領域の追跡精度が悪 い場合,本手法による鏡面反射領域の検出精度も低下すると考えられる.3.4節の 環境1では対象領域の大きさは1辺数mm,環境2では1辺数cmであり,このサ イズ以下の誤差で追跡できれば,本手法により鏡面反射の検出が可能となる.し かし,それ以上の追跡誤差がある場合,そもそも違う領域の輝度を同じ領域の輝 度として取得することになり,本手法による鏡面反射領域の検出がうまくいかな くなると思われる.

3次元形状復元,対象領域の追跡についての精度は,前述のように提案手法によ る鏡面反射領域の推定結果に大きく関係している.本手法では,どちらの情報も 既知であるとして,手動で情報を与えたが,これらの情報を直接画像から復元す る場合,できるだけ高精度な復元情報が得られるようにすることが,提案手法に よる鏡面反射領域の検出には重要である.

3.6 本章のまとめ

本章では,複数フレームにわたって路面を観測することで,鏡面反射領域を検 出する手法を提案した.平面拘束を利用した視点変換を用い,仮想鏡面反射画像 を生成し,入射光および反射光の両方を推定することで,鏡面反射領域の検出を 行っている.従来,濡れた路面の検出には,入射光を制御可能なプロジェクターカ メラシステム,もしくは反射光の偏光特性を観測するために偏光レンズをカメラ に取り付けたシステムの,どちらかを利用する必要があった.

本手法では,仮想鏡面反射画像を生成することで,入射光の時間変化も推定した.また,複数フレームにわたって路面の輝度を観測することで,路面上の鏡面 反射領域の検出を行った.得られた時間変化から反射光の時間変化 n_r,入射光の 時間変化 i_r,それぞれの時間変化の類似度 s の3種類の特徴量を抜き出し,特徴量 空間での分類によって鏡面反射領域を検出した.

本手法では入射光と反射光の時間変化に注目しており,どちらも変化しない状況には適用することができない.よって,適用できる状況かどうかを判定するために,判定不能領域というクラスを導入し,鏡面反射領域,拡散反射領域,判定不能の3クラス分類問題として検出を行った.

判定不能クラス内の領域を分類する新たな指標として,領域間の相関関係が考 えられる.現在は,対象領域それぞれを独立に判定しているが,鏡面反射領域や 拡散反射領域は固まって存在していると考えられる.そこで,判定不能とされた 領域に関しては近傍領域の結果も踏まえて推定することが考えられるが,これは 今後の展望としたい.

第4章 結論

本論文では,平面拘束を用いた視点変換を利用することで,自車両の水平位置 を推定する手法と,路面上の鏡面反射領域を検出する手法の2つを提案し,水平 位置を推定する手法では実画像と合成画像両方において,鏡面反射領域を検出す る手法では実画像において実験を行い,有用性を確かめた.

第2章では俯瞰画像同士のマッチングを利用することで,単眼で車両の水平位 置を推定する手法を提案した.路面を平面と仮定することで,入力画像を俯瞰画 像に変換し,違う時刻に撮影された2枚の俯瞰画像同士を比較することでテクス チャが少ない路面上においても,安定して対応画素を推定可能となり,自車両の 水平位置を推定することが可能となった.また,以下の特徴が挙げられる.

- 白線位置検出を利用せずに水平位置の推定が可能
- 他の白線を利用しない手法に比べ,動物体の影響を減らせる
- 高速に計算が可能

提案手法では,平面拘束を導入し,水平位置の推定を俯瞰画像同士のマッチング に置き換えることで,上記の特徴を持つことができた.これにより,単眼のみを 用いて車両の水平位置を推定することができた.

第3章では,濡れた路面領域を検出する状況を想定し,鏡面反射領域検出手法 を提案した.路面や周辺の3次元形状を平面と仮定することで,鏡面反射領域を 検出する.従来,濡れた路面の検出には,照明環境を制御可能なプロジェクターカ メラシステム,もしくは反射光の偏光特性を観測する,偏光レンズを用いるシス テムの,いずれかが主流であった.それに対し,本手法では平面拘束を用いるこ とにより,仮想鏡面反射画像を生成した.また,同一領域からの反射光を複数フレームにわたって観測することにより,単眼のみで鏡面反射領域の検出を行った. これにより,偏光レンズもプロジェクタも利用することなく,鏡面反射領域を検出 することに成功した.従来研究に比べ,鏡面反射領域検出を行える状況が広がったと言える.

本論文をまとめると,平面拘束という,2枚の平面間で密な対応関係を得られる 拘束条件を利用し,GPSや偏光レンズと行った,従来必要とされていた特殊なデ バイスを利用することなく,単眼カメラのみで,車両の水平位置や,鏡面反射領 域の検出といった,運転支援のための手法を提案し,実験からその有用性を確認 した.

謝辞

本研究は,著者が慶應義塾大学大学院理工学研究科在学中に,行ったものである.本研究を遂行するにあたり,終始ご指導下さり,本研究の内容の詳細にわた り貴重なご助言を賜りました同大学理工学部教授斎藤英雄博士に心から深く感謝 致します.研究に対する的確なアドバイスを頂き,研究全般にわたってご支援を 賜りました.この場を借りて感謝の念を申し上げます.

また,本論文の副査を引き受けていただいた,同大学理工学部教授萩原将文博 士,同准教授重野寛博士,同准教授青木義満博士,ならびに愛知工科大学工学部 教授小沢愼治博士に心から感謝致します.特に小沢愼治博士には,著者の現勤務 先において,博士論文に関する助言を賜りました.この場を借りて感謝致します.

また,実験データの撮影や車載システムを用いた実験にご協力頂いた,三菱ふ そうトラック・バス株式会社の山本恵一氏,伊原徹氏に感謝致します.また,実験 方法から研究のアドバイスまで,ディスカッションに乗っていただいた,富士通 研究所の清水雅芳氏,田口哲典博士に感謝致します.

また,著者が後期博士課程に入学してから,COE-RA として研究に関する幅広 い視野,知識を身につけるための経験を積む機会を与えてくださいました21世紀 COE プログラム,およびグローバル COE プログラムの諸先生方に感謝の意を表 します.また,研究をすすめるにあたり,良き仲間,ライバルとして切磋琢磨した 両 COE プログラム RA の皆様,および研究活動を支えてくださいました COE 事 務職員の皆様に,感謝の意を評します.

研究室全般でサポートいただいた小沢研・斎藤研の関係者皆様に感謝の意を表します.また,精神面でのサポートをして頂きました,CTCの皆様,J科同期の 皆様,研究室同期の皆様に感謝の意を表します.

末筆になりましたが,後期博士課程進学を支えてくれた家族と,論文の修正を 手伝って頂いた Dr. Noriko Dethlefs,小林公子氏に心から感謝したいと思います.

参考文献

- [1] 安達俊行, 近藤克哉, 小橋昌司, 畑豊. "GPS と地図情報を利用した撮像画像 からのハンディカメラの軌跡推定".電子情報通信学会技術研究報告. SIS, ス マートインフォメディアシステム, Vol. 106, No. 96, pp. 19–24, 2006.
- [2] R. Bajcsy, S. W. Lee and A. Leonardis. "Detection of diffuse and specular interface reflections and inter-reflections by color image segmentation". *International Journal of Computer Vision*, Vol. 17, No. 3, pp. 241–272, March 1996.
- [3] A. Branca, E. Stella and A. Distante. "Qualitative scene interpretation using planar surfaces". Autonomous Robots, Vol. 8, No. 2, pp. 129–139, 2000.
- [4] A. Broggi, M. Bertozzi, A. Fascioli and G. Conte. Automatic vehicle guidance: the experience of the ARGO autonomous vehicle. World Scientific Pub Co Inc, 1999.
- [5] X.-B. Cao, H. Qiao and J. Keane. "A low-cost pedestrian-detection system with a single optical camera". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 9, No. 1, pp. 58–67, March 2008.
- [6] A. J. Davison, I. Reid, N. Molton and O. Stasse. "Monoslam: Real-time single camera slam". Vol. 29, No. 6, pp. 1052–1067, June 2007.
- [7] E. D. Dickmanns. "Vehicles capable of dynamic vision: a new breed of technical beings?". Artificial Intelligence, Vol. 103, No. 1-2, pp. 49 - 76, 1998. Artificial Intelligence 40 years later.

- [8] Y. Fang, D. Dawson, W. Dixon and M. d. Queiroz. "Homography-based visual servoing of wheeled mobile robots". In *IEEE Conference on Decision* And Control, Vol. 3, pp. 2866–2871, 2002.
- [9] G. Farnebäck. "Fast and accurate motion estimation using orientation tensors and parametric motion models". In *Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 135–139, Barcelona, Spain, September 2000. IAPR.
- [10] H. Fukui, J. Takagi, Y. Murata and M. Takeuchi. "An image processing method to detect road surface condition using optical spatial frequency". In *IEEE Conference on Intelligent Transportation System*, pp. 1005–1009, 1997.
- [11] E. Guillou, D. Meneveaux, E. Maisel and K. Bouatouch. "Using vanishing points for camera calibration and coarse 3D reconstruction from a single image". *The Visual Computer*, Vol. 16, pp. 396–410, 2000.
- [12] M. Irani, B. Rousso and S. Peleg. "Recovery of ego-motion using image stabilization". In *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 454–460, June 1994.
- [13] M. Isard and A. Blake. "Condensation conditional density propagation for visual tracking". International Journal of Computer Vision, Vol. 29, No. 1, pp. 5–28, August 1998.
- [14] R. E. Kalman. "A new approach to linear filtering and prediction problems". *Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering*, Vol. 82, No. Series D, pp. 35–45, 1960.
- [15]小島祥子,高橋新,城殿清澄,山口晃一郎,二宮芳樹."車載外界監視センサを 用いた高精度自車運動推定および自車位置推定".電子情報通信学会技術研究 報告. ITS, Vol. 107, No. 161, pp. 15–20, 20070719.

- [16] 久野徹也, 杉浦博明, 吉田潤一. "車載カメラによる路面状態検出方式の検討".
 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J81-D-2, No. 10, pp. 2301–2310, 1998.
- [17] J. Lekner and M. C. Dorf. "Why some things are darker when wet". Appl. Opt., Vol. 27, No. 7, pp. 1278–1280, 1988.
- [18] M. Lourakis and S. Orphanoudakis. "Visual detection of obstacles assuming a locally planar ground". In R. Chin and T.-C. Pong, editors, 3rd Asian Conference on Computer Vision, Vol. 1352 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 527–534. Springer Berlin / Heidelberg, 1998.
- [19] B. D. Lucas and T. Kanade. "An iterative image registration technique with an application to stereo vision". In *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI '81)*, pp. 674–679, April 1981.
- [20] H. Mall, Jr. and N. D. Vitoria Lobo. "Determining wet surfaces from dry". In Fifth International Conference on Computer Vision, pp. 963–968, Jun 1995.
- [21] P. Martinet and C. Thibaud. "Automatic guided vehicles: Robust controller design in imagespace". Autonomous Robots, Vol. 8, No. 1, pp. 25–42, 2000.
- [22] J. C. McCall, D. Wipf, M. M. Trivedi and B. Rao. "Lane change intent analysis using robust operators and sparse bayesian learning". *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 8, No. 3, pp. 431–440, September 2007.
- [23] C. Mei, S. Benhimane, E. Malis and P. Rives. "Efficient Homography-Based Tracking and 3-D Reconstruction for Single-Viewpoint Sensors". *Robotics*, *IEEE Transactions on*, Vol. 24, No. 6, pp. 1352 –1364, 2008.
- [24] N. Molton, A. Davison and I. Reid. "Locally Planar Patch Features for Real-Time Structure from Motion". In *BMVC*, September 2004.

- [25] 森岡博史, 李想揆, N. Tongprasit, 長谷川修. "人の多い混雑な環境下でのSLAM
 による移動ロボットのナビゲーション". 第 28 回日本ロボット学会学術講演
 会, 2010.
- [26] S. Munder, C. P. Schnorr and D. Gavrila. "Pedestrian detection and tracking using a mixture of view-based shape-texture models". *Intelligent Transporta*tion Systems, IEEE Transactions on, Vol. 9, No. 2, pp. 333–343, June 2008.
- [27] 登一生. "2 段階カメラ動き推定法による車載カメラ映像からの移動軌跡算出". 電子情報通信学会技術研究報告. ITS, Vol. 104, No. 762, pp. 23-28, 2005.
- [28] K. Oka, Y. Sato, Y. Nakanishi and H. Koike. "Head pose estimation system based on particle filtering with adaptive diffusion control". In Proc. IAPR Conference on Machine Vision Applications, pp. 586–589, May 2005.
- [29] 大前学,小木津武樹,清水浩. "高精度 GPS を用いた構内の自動運転における
 走行可能領域情報を利用した操舵制御に関する研究". 自動車技術会論文集,
 Vol. 40, No. 5, pp. 1387–1392, 2009.
- [30] I. Park, J.-H. Ahn and H. Byun. "Efficient measurement of eye blinking under various illumination conditions for drowsiness detection systems". In *ICPR '06: Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition*, pp. 383–386, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society.
- [31] M. Pollefeys, L. V. Gool and M. Proesmans. "Euclidean 3D reconstruction from image sequences with variable focal lengths". In *European Conference* on Computer Vision, pp. 31–42. Springer-Verlag, 1996.
- [32] M. Pollefeys, D. Nistér, J.-M. Frahm, A. Akbarzadeh, P. Mordohai, B. Clipp,
 C. Engels, D. Gallup, S. J. Kim, P. Merrell, C. Salmi, S. N. Sinha, B. Talton,
 L. Wang, Q. Yang, H. Stewénius, R. Yang, G. Welch and H. Towles. "De-

tailed real-time urban 3d reconstruction from video". International Journal of Computer Vision, Vol. 78, No. 2-3, pp. 143–167, 2008.

- [33] M. Pupilli and A. Calway. "Real-time camera tracking using a particle filter". In In Proc. British Machine Vision Conference, pp. 519–528, 2005.
- [34] F. J. Rodríguez, M. Mazo and M. A. Sotelo. "Automation of an industrial fork lift truck, guided by artificial vision in open environments". *Autonomous Robots*, Vol. 5, No. 2, pp. 215–231, 1998.
- [35] B. Sarel and M. Irani. "Separating transparent layers through layer information exchange". In European Conference on Computer Vision, pp. 328–341, 2004.
- [36] 関晃仁, 奥富正敏. "ステレオ動画像を利用した道路面領域の抽出と追跡による自車両の運動推定". 情報処理学会論文誌. コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 47, No. 5, pp. 90–99, 2006.
- [37] N. Simond and P. Rives. "Homography from a vanishing point in urban scenes". In Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on, Vol. 1, pp. 1005 1010, 2003.
- [38] P. Smith, M. Shah and N. D. V. Lobo. "Determining driver visual attention with one camera". *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 4, pp. 205–218, 2003.
- [39] R. C. Smith and P. Cheeseman. "On the Representation and Estimation of Spatial Uncertainty". *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 56–68, 1986.
- [40] T. Teshima, H. Saito, S. Ozawa, K. Yamamoto and T. Ihara. "Estimation of FOE without optical flow for vehicle lateral position detection". In *MVA*, pp. 406–409, 2005.

- [41] T. Teshima, H. Saito, S. Ozawa, K. Yamamoto and T. Ihara. "Vehicle lateral position estimation method based on matching of top-view images". In *The 18th International Conference on Pattern Recognition 2006*, pp. 626–629, Aug. 2006.
- [42] T. Teshima, Y. Uematsu and H. Saito. "Detection of the wet area of the road surface based on a saturated reflection". In *Meeting on Image Recognition* and Understanding, pp. 1218–1223, 2007.
- [43] F. Torres, J. Angulo and F. Ortiz. "Automatic detection of specular reflectance in colour images using the ms diagram". In *Computer Analysis of Images and Patterns*, 2003.
- [44] S. A. Twomey, C. F. Bohren and J. L. Mergenthaler. "Reflectance and albedo differences between wet and dry surfaces". *Appl. Opt.*, Vol. 25, No. 3, pp. 431– 437, 1986.
- [45] 内田秀雄, 杉本茂樹, 奥富正敏. "ステレオ時系列画像を用いた直接法による高速・高精度モーション推定". 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 92, No. 8, pp. 1414–1424, 2009.
- [46] 上田浩次, 堀場勇夫, 池谷和夫, 大井史倫. "画像処理を用いた路面湿潤状況検出方式". 情報処理学会論文誌, Vol. 35, No. 6, pp. 1072–1080, June 1994.
- [47] H. Wang, K. Yuan, W. Zou and Q. Zhou. "Visual odometry based on locally planar ground assumption". In *IEEE International Conference on Information Acquisition*, 2005.
- [48] G. Welch and G. Bishop. "An Introduction to Kalman Filter". Technical Report TR95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina, 1995. http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/.

- [49] M. Wilczkowiak, E. Boyer and P. Sturm. "Camera calibration and 3d reconstruction from single images using parallelepipeds". In *International Confer*ence on Computer Vision, Vancouver, pp. 142–148, 2001.
- [50] B. Xie, H. Pan, Z. Xiang and J. Liu. "Polarization-based water hazards detection for autonomous off-road navigation". In *International Conference* on Mechatronics and Automation, pp. 1666–1670, August 2007.
- [51] 山田宗男, 上田浩次, 堀場勇夫, 津川定之, 山本新. "画像処理による車載型路 面状態検出センサの開発". 電気学会論文誌 C, Vol. 124, No. 3, pp. 753–760, 2004.
- [52] M. Yamada, K. Ueda, I. Horiba and N. Sugie. "Discrimination of the road condition toward understanding of vehicle driving environments". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 26–31, March 2001.
- [53] M. Yamada, K. Ueda, I. Horiba, S. Yamamoto and S. Tsugawa. "Detection of wet-road conditions from images captured by a vehicle-mounted camera". *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 17, No. 3, pp. 269–276, 2005.
- [54] 山口晃一郎,加藤武男,二宮芳樹."車載単眼カメラを用いた自車両の運動推 定".電気学会論文誌 C, Vol. 129, No. 12, pp. 2213-2221, 2009.
- [55] 山本恵一,市川孝夫,平田由紀江,樋口伸一. "ドライバ覚醒度と車両の蛇行量 との相関について". 学術講演会前刷集, No. 941, pp. 25-28, 1994.
- [56] Q. Yu, H. Araújo and H. Wang. "A stereovision method for obstacle detection and tracking in non-flat urban environments". *Autonomous Robots*, Vol. 19, No. 2, pp. 141–157, 2005.