

カーナビゲーションのための
路面画像処理に関する研究

野田 雅文

目次

第 1 章	序論	1
1.1	高度交通システム (Intelligent Transport Systems)	1
1.2	ITS におけるコンピュータビジョン	3
1.2.1	車載カメラを用いたカーナビゲーション	3
1.2.2	車内に設置したカメラを用いたドライバの状態理解	4
1.2.3	道路環境中に設置したカメラを用いた環境認識	4
1.3	本研究の目的	5
1.4	本論文の構成	5
第 2 章	関連研究および本研究の位置付け	7
2.1	カーナビゲーション	7
2.2	関連研究	9
2.2.1	自車位置推定	9
2.2.2	環境地図構築	15
2.2.3	経路探索	17
2.2.4	走行環境認識	18
2.2.5	物体検出	18
2.2.6	情報提示	21
2.3	路面画像処理	22
2.3.1	自車位置推定	23
2.3.2	路面画像地図構築	24
2.3.3	路面領域検出	24
2.3.4	路上障害物検出	26

2.3.5	路面標示検出・認識	26
2.3.6	区画線検出	27
2.4	本研究の位置付け	28
第3章	空撮画像を用いた自転車位置推定	31
3.1	はじめに	31
3.1.1	背景と目的	31
3.1.2	関連研究	33
3.1.3	本章の構成	34
3.2	自転車位置推定の概要	34
3.2.1	空撮画像	35
3.2.2	車両モデル	35
3.2.3	路面画像	38
3.2.4	路面画像と環境地図との対応関係	39
3.3	空撮画像からの環境地図構築	40
3.4	自転車位置推定	42
3.4.1	手法の流れ	42
3.4.2	特徴点検出	43
3.4.3	自転車の動き推定	44
3.4.4	局所地図の構築	45
3.4.5	環境地図との対応付け	46
3.5	実験	47
3.5.1	実験条件	47
3.5.2	実験結果と考察	54
3.6	おわりに	56
第4章	路面画像地図構築	57
4.1	はじめに	57
4.1.1	背景と目的	57
4.1.2	関連研究	58
4.1.3	本章の構成	60
4.2	路面画像地図の構築	60

4.2.1	提案手法の流れ	62
4.2.2	路面画像への変換	63
4.2.3	連続するフレーム間の対応付け	64
4.2.4	キーフレーム選択	64
4.2.5	路面画像と空撮画像間の対応付け	64
4.2.6	各フレームのモザイク領域の算出	65
4.2.7	路面画像のモザイク	66
4.3	実験	67
4.3.1	実験条件	67
4.3.2	実験結果と考察	74
4.4	おわりに	76
第5章	路面標示検出	79
5.1	はじめに	79
5.1.1	背景と目的	79
5.1.2	関連研究	80
5.1.3	本章の構成	82
5.2	位置依存型識別器を用いた路面標示検出	82
5.2.1	特徴量と識別器	82
5.2.2	路面画像への変換	82
5.2.3	候補領域の抽出	83
5.2.4	HOG 特徴量の算出	84
5.2.5	位置依存型識別器を用いた候補領域の識別	84
5.3	生成型学習法を用いた位置依存型識別器の学習	87
5.3.1	生成モデル	87
5.3.2	生成手法	88
5.3.3	位置依存型識別器の学習	90
5.4	実験	91
5.4.1	実験条件	91
5.4.2	評価方法	93
5.4.3	実験結果	93

5.5	考察	96
5.5.1	位置依存型識別器を用いた路面標示検出	96
5.5.2	生成型学習法を用いた位置依存型識別器の学習	97
5.5.3	誤検出・未検出への対応	97
5.6	おわりに	98
第6章	結論	99
6.1	総括	99
6.2	今後の課題と展望	101
	参考文献	109
	研究業績	121

表目次

3.1	実験に用いた走行区間の情報	48
3.2	自車位置推定の実験結果	53
4.1	実験結果	73
5.1	実験に用いたカメラパラメータ	92
5.2	実験に用いた車両パラメータ	92
5.3	実験結果：検出性能	93

目次

1.1	ITS におけるコンピュータビジョン技術の分類	4
2.1	カーナビゲーションの技術要素の関係図	8
2.2	3次元点群からなる環境地図	11
2.3	マップマッチング：黒線が道路，青線が GPS により測位した位置の軌跡，赤色がマップマッチングにより補正した位置の軌跡を示す	12
2.4	距離データの対応付け	14
2.5	3次元モデル	15
2.6	車載カメラ画像とデジタル地図の併用による3次元復元：上：車載カメラ画像を走行領域（赤），建物（青）に分類，左下：俯瞰画像，右下：3Dポップアップ表示	17
2.7	車載カメラ画像の風景認識	19
2.8	シーンコンテキストを用いた歩行者検出：赤い枠が歩行者の存在する確率を表す． $P(\cdot)$ はシーンの幾何構造や視点に条件付けられた歩行者の存在確率が求まる	21
2.9	拡張現実型カーナビゲーションシステム	22
2.10	路面画像処理で対象とする画像	23
2.11	路面性状測定車	24
2.12	広範囲の路面の画像地図	25
2.13	路面画像のモザイクキング	25
2.14	B-Snake による区画線検出	27
3.1	空撮画像中の交差点直前の路面領域：赤枠で示す領域が図 3.2 中の路面領域に相当する	32

3.2	空撮画像 (図 3.1) と共通する路面標示が撮影された車載カメラ画像 . . .	32
3.3	自車位置推定の概要	35
3.4	空撮画像中の車両位置と対応付けに用いる領域	36
3.5	車載カメラ画像中の対応付けに用いる路面領域 : 図中 $a'_1 \sim a'_4$ は図 3.6 中の $a_1 \sim a_4$ に対応する	37
3.6	対応付けに用いる路面領域	37
3.7	対応付けに用いる路面領域	38
3.8	路面画像の座標空間	39
3.9	路面画像の座標空間と環境地図の座標空間の対応関係	40
3.10	環境地図の例 : 自車位置推定に用いる特徴点を赤丸で示す	41
3.11	自車位置推定の流れ	42
3.12	路面画像から検出した特徴点の例 : \times 印で検出した特徴点を示す	43
3.13	自車の動き推定	44
3.14	局所地図 : 時刻 t の自車位置を基準として構築する	45
3.15	局所地図と環境地図の対応付け : 赤い点は環境地図中の特徴点 , 青い点 は局所地図中の特徴点を示す . 橙の枠で囲まれている特徴点は距離が最 小かつしきい値以下であるため , 対応付いていることを示す . ICP によ る繰り返し回数が増えるほど高精度に対応付けられる	46
3.16	車載カメラ画像 (系列 1) : 明瞭な路面標示が存在する直進の経路	49
3.17	空撮画像 (系列 1) : 走行経路を赤線で示す	49
3.18	車載カメラ画像 (系列 2) 車線変更を行うことにより , 大きな姿勢変動を 含む経路	50
3.19	空撮画像 (系列 2) : 走行経路を赤線で示す	50
3.20	車載カメラ画像 (系列 3) : 路面に強い影が発生する経路 . また , 駐車車 両を回避するための車線変更も含む	51
3.21	空撮画像 (系列 3) : 走行経路を赤線で示す	51
3.22	車載カメラ画像 (系列 4) : 交差点内のカーブに沿って曲る経路	52
3.23	空撮画像 (系列 4) : 走行経路を赤線で示す	52
4.1	路面画像地図	58
4.2	路面画像地図の構築に向かない空撮画像	59

4.3	車載カメラ画像中の路面標示	60
4.4	路面画像地図構築の概要	61
4.5	路面画像地図構築の流れ	62
4.6	モザイクングに用いる路面領域	63
4.7	キーフレームの選択	65
4.8	モザイクング	66
4.9	車載カメラ画像（系列1）	68
4.10	車載カメラ画像（系列2）	69
4.11	基準点：図中の印により表す	70
4.12	空撮画像および構築した路面画像（系列1）	71
4.13	空撮画像および構築した路面画像（系列2）	72
4.14	高解像度化	77
4.15	遮蔽の除去	77
5.1	車載カメラ画像：矩形は検出される路面標示を表す	80
5.2	路面画像中の路面標示の見え：路面画像中の位置に応じて、形状、解像度、ぼけ方が異なる	81
5.3	候補領域の抽出	83
5.4	分断された路面標示の統合	84
5.5	識別器の配置	85
5.6	識別結果の統合	86
5.7	車両モデル	88
5.8	生成過程	89
5.9	生成画像	89
5.10	生成画像を用いた識別器の学習	90
5.11	検出対象とする路面標示	92
5.12	実験結果：白枠で検出結果を示す	94
5.13	誤検出の削減	95

第 1 章

序論

本論文は、カーナビゲーションのための路面画像処理に関する研究成果をまとめたものである。本研究全体の目的は、コンピュータビジョン技術を活用することで、カーナビゲーション技術を発展させ、より安全で快適な交通社会を実現することである。本論文では、特に車両に搭載したカメラから撮影した画像中の路面領域に注目したカーナビゲーション技術に関する研究について述べる。これらの研究の意義を明確にする、まず本章ではカーナビゲーション技術の母体となる高度交通システム (Intelligent Transport Systems; ITS) およびコンピュータビジョン技術について述べる。そして、第 2 章でカーナビゲーション技術に対する関連研究を述べた上で、本論文で扱う研究を位置付ける。

本章では、1.1 節でカーナビゲーション技術を含む ITS について述べる。次に、1.2 節で ITS におけるコンピュータビジョン技術について述べ、その関連研究を概説する。そして、1.3 節で本研究の目的について述べ、1.4 節で本論文の構成について述べる。

1.1 高度交通システム (Intelligent Transport Systems)

現在、自動車は現代社会において必要不可欠なものとなっている。自動車は交通・物流の基盤であり、人々の生活に強く結びついている。警察庁交通局の報告資料によると、日本国内の運転免許保持者は 7,800 万人以上 (2011 年時点) ということから、多くの人が自動車を利用していることが分かる [1]。一方で、交通事故による死傷者 [2]、自動車台数増加による渋滞問題、排気ガスによる公害など、自動車は様々な社会問題も引き起こしている。このため、これらの問題を防ぎ、安全で快適な交通社会を実現することが至上命題である。

このような社会を実現するため，ITS（高度交通システム）の名のもとに，様々な分野を横断した研究開発が行われている．ITSは自動車のみを対象にしたものに留まらず，あらゆる交通環境の高度化を目指すものである．日本政府はITSの開発・展開目標として，以下の9つの分野を掲げている [3]．

1. ナビゲーションシステムの高度化
2. 自動料金収受システム
3. 安全運転の支援
4. 交通管理の最適化
5. 道路管理の効率化
6. 公共交通の支援
7. 商用車の効率化（運行管理支援，自動運転）
8. 歩行者等の支援
9. 緊急車両の運行支援

これらを実現するため，産官学が連携した研究が盛んに行われている．

学術的な見地からITSを覗き見ることも非常に興味深い．ITSを対象とした代表的な学術論文誌として，IEEE Transactions on Vehicular Technology [4] や IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems [5] が発行されており，様々な研究事例が取り扱われている．また，国際会議として，ITS 国際会議 [6] や IEEE Intelligent Vehicle Symposium [7] が開催されており，多数の大学や企業に所属する研究者が研究発表および聴講のために参加している．これらの会議は毎年開催され，最先端のITS技術を知る上で大いに役立つ．また，研究会やワークショップなどの小規模な会議も世界各地で盛んに行われている．このような事例から見ても，ITSに対する世界的な関心が窺い知れる．ITSが対象とする問題は制御工学，センシング，通信技術，ヒューマンインタフェースなど，非常に多岐に渡る．このため，異なる研究分野に属する研究者が交流するための分野の交差点としての役割も果たしている．このようにITSが扱う分野の中で，近年コンピュータビジョンを用いたITS技術が注目されている．本論文では，このようなITSにおけるコンピュータビジョンについて述べる．

1.2 ITSにおけるコンピュータビジョン

コンピュータビジョンは、カメラから撮影した画像を通じて現実世界を理解することを目的とした研究分野である。現在、コンピュータビジョンの分野は実応用化が非常に盛んであり、様々な場面で普及が加速している。身近な例として、デジタルカメラからの顔認識、家庭用ゲーム機向けの人体モーションキャプチャ技術などが挙げられる。レーザレーダや超音波センサなどの専用のセンシングデバイスに比べて、カメラは汎用のセンシングデバイスとして多様な情報を現実世界から取得することができる。また、人間は外界の情報の多くを視覚から得ているため、カメラにより撮影した画像から得られる情報は人間の感覚に近いものとなる。このため、このような画像を用いることで、ドライバに対してより分かりやすい運転支援を行うことが可能となる。これらの理由から、様々な情報を処理して高度な交通社会を実現することを目的とする ITS においても、コンピュータビジョンに対する関心は高い。

本論文では、ITS におけるコンピュータビジョン技術をカメラの利用方法により、以下の3つに分類する。図 1.1 に、これらの概略を示す。

1. 車載カメラを用いたカーナビゲーションにおける自車位置推定と環境認識
2. 車内に設置したカメラを用いたドライバの状態理解
3. 道路環境中に設置したサーベイランスカメラを用いた環境認識

ここでは、これらの技術について概説する。

1.2.1 車載カメラを用いたカーナビゲーション

車載カメラを用いて車両の周辺環境を認識することにより、車両の自律制御およびドライバに対する運転支援を行うことができる。カーナビゲーションは運転支援に直結するため、ITS 分野における重要な技術の一つである。本論文は、このような車載カメラ画像を用いたカーナビゲーション技術に関して述べるものである。そこで、第 2 章以降ではこの技術に関して詳細に述べる。

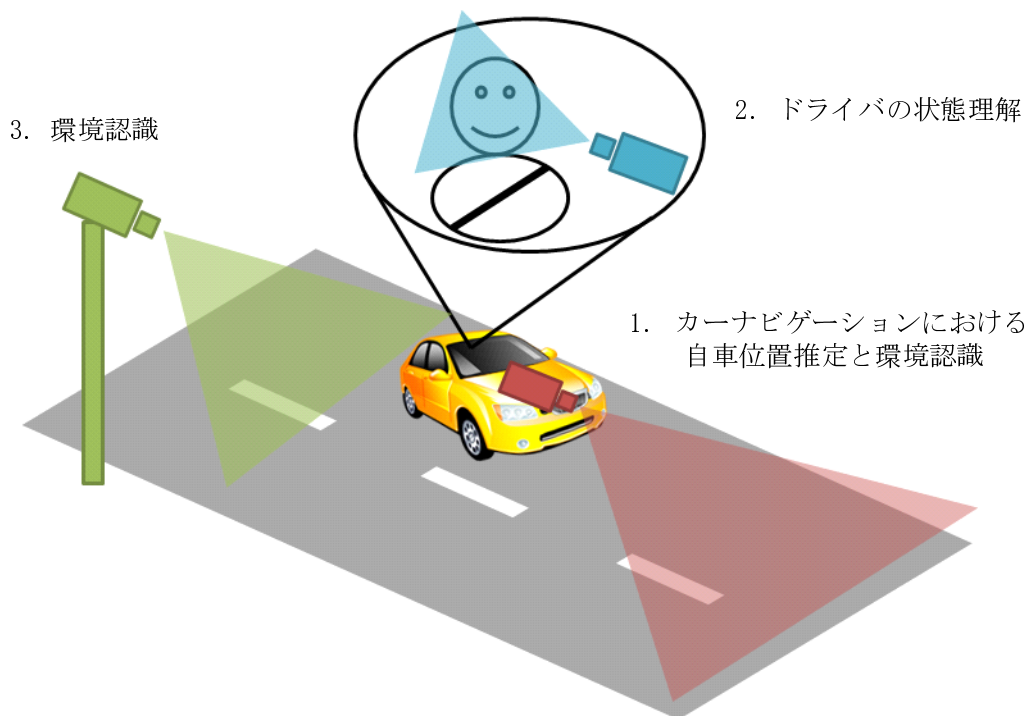


図 1.1 ITS におけるコンピュータビジョン技術の分類

1.2.2 車内に設置したカメラを用いたドライバの状態理解

車内に設置したドライバの方向に向けたカメラを用いてドライバの状態を理解し、運転支援を行うことを目的とする研究が行われている。走行に伴い、ドライバにはストレスや疲れ、緊張、眠気などが引き起こされる。これらを認識するため、車両内のカメラ画像から顔検出を行う手法が提案されている [8, 9]。Baker らの研究では、Active Appearance Model (AAM) を用いた高精度な顔追跡により、表情の認識を行なっている [9]。また、ドライバの視線から運転行動を予測する手法も提案されている [10]。武田らのグループでは、顔の状態や車両に関する様々な情報をデータベース化することにより、ドライバの運転行動を理解するプロジェクトを進めている [11, 12]。

1.2.3 道路環境中に設置したカメラを用いた環境認識

道路の周辺環境に設置したカメラを用いて、道路状況を理解することを目的とする。具体的には交通流計測 [13, 14]、危険車両監視 [15]、路面状態監視 [16] などの研究が行われ

ている．従来，これらには専用のセンシングデバイスを用いていたが，安価かつ多くの情報を一度に取得できるという理由から，カメラの普及が進んでいる．これに伴い，人間が多数のカメラから得られた画像を確認する必要性が生じており，コンピュータビジョン技術を用いることで，これらを自動化することが望まれている．

環境と車両の間で通信することによって，より高度に運転支援を行う試みも行われている．道路環境から得られた渋滞情報などを車の位置に基づき配信するサービスである VICS (Vehicle Information and Communication System) [17] は，現在広く利用されている．また，大田らは，車両からは見えにくい位置の情報を環境中のカメラにより補うことで，ドライバーに対して様々な視覚支援を行う “NaviView” と呼ばれるシステムを提案している [18]．このような環境と車両が一体になってドライバーを支援するようなものは，次世代のシステムとして期待されている．

1.3 本研究の目的

本研究全体の目的は，コンピュータビジョン技術を活用することで，カーナビゲーション技術を発展させ，より安全で快適な交通社会を実現することである．近年，車両に搭載されたカメラから撮影された画像（車載カメラ画像）を用いたカーナビゲーション技術が注目されている．車載カメラ画像から得られる実世界の情報は様々であり，これを有効活用することで，高度な運転支援を実現することができる．このような車載カメラ画像中で，路面領域は大きな面積を占めており，車両の走行に重要な情報を多く含む．このため，これを利用することでカーナビゲーション技術の発展に貢献できると考えられる．このような路面領域の画像（路面画像）を処理することを，路面画像処理と呼ぶ．本論文では，高度なカーナビゲーションを実現するための路面画像処理に関する研究について述べる．

1.4 本論文の構成

以降，本論文の構成を各章の概要とともに述べる．

第2章では，カーナビゲーション技術について述べ，そのために必要な要素技術を以下の5つに分類し，これらの関係について述べる．

1. 自転車位置推定：走行環境中における自転車の位置を知る技術
2. 環境地図構築：走行環境の地図をデータベースとして構築する技術

3. 経路探索：現在位置から目的地までの経路を求める技術
4. 走行環境認識：走行領域を特定したり，歩行者などを検出したりする技術
5. 情報提示：以上の技術で得られた情報をドライバへ提示する技術

そして，これらの技術に関する関連研究を幅広く述べることで，カーナビゲーションに対するコンピュータビジョン技術を俯瞰する．さらに，本研究に特に関連するものとして，車両の走行環境において走行基盤として重要である路面の画像を対象とした研究について述べる．本論文では，路面画像を利用することでカーナビゲーション技術に貢献できるものとして，前述したカーナビゲーションに必要な要素技術のうち，「1. 自車位置推定」，「2. 環境地図構築」，「4. 走行環境認識」に関する研究として，以下の 3 つの研究を扱う．

- (a) 空撮画像を用いた自車位置推定（第 3 章）：「1. 自車位置推定」に関連
- (b) 路面画像地図構築（第 4 章）：「2. 環境地図構築」に関連
- (c) 路面標示検出（第 5 章）：「4. 走行環境認識」に関連

そして，第 2 章の最後で，関連研究を踏まえた上でこれらの研究の目的および位置付けについて述べる．

第 3 章では，カーナビゲーションの基本技術となる自車位置推定に関する研究について述べる．ここでは，空撮画像と車載カメラ画像を対応付けることにより，高精度の自車位置を推定する手法について述べる．

第 4 章では，第 3 章で述べる自車位置推定などの利用するための環境地図を構築する研究について述べる．ここでは，第 3 章と同様に空撮画像を用いることで，高解像度かつ遮蔽を含まない高品質な路面画像の地図を構築する手法について述べる．

第 5 章では，運転中のドライバ支援のため，車載カメラ画像中から路面標示を検出する研究について述べる．実世界における路面標示はその見えが様々であり，検出することが困難であるが，ここではこのような見えの変化に対して頑健な検出手法について述べる．

最後に，6 章で本論文をまとめた上で今後の展望について述べる．

第 2 章

関連研究および本研究の位置付け

本章では，2.1 節でカーナビゲーションについて述べ，2.2 節で要素技術に対する関連研究について述べる．そして，2.3 節で本研究が対象とする路面画像処理について述べる．最後に，2.4 節でこれらの関連研究に対する本研究の位置付けについて述べる．

2.1 カーナビゲーション

カーナビゲーションとは，ドライバに対して車両の現在位置と目標地点までの経路を示すとともに，走行環境を認識することで運転支援を行うものである．このような技術は，1 つのシステムとして開発が行われ，現在では多くの車両に標準的に搭載されている [19]．特に，我々が住む日本国はカーナビゲーションの技術が進んでおり，多くの試行錯誤が行われてきた [20]．近年では，運転支援システム「EyeSight」(富士重工業(株)) [21] のような車両の制御まで含めたものも既に実用化されている．また，車載カメラから得られた画像上にナビゲーション情報を提示するカーナビの研究開発も行われている [22]．このようなドライバに対する運転支援技術は，加速度的に進歩しており，新技術の導入も早い．特に最近の運転支援技術は，カメラから得られた画像情報の処理に基づいたものが多いため，本論文で述べる技術は重要性を増している．

本論文では，カーナビゲーションに必要な要素技術を以下の 5 つに分類して考える．

1. 自車位置推定：走行環境中における自車の位置を知る技術
2. 環境地図構築：走行環境の地図をデータベースとして構築する技術
3. 経路探索：現在位置から目的地までの経路を求める技術
4. 走行環境認識：走行領域を特定したり，歩行者などを検出したりする技術

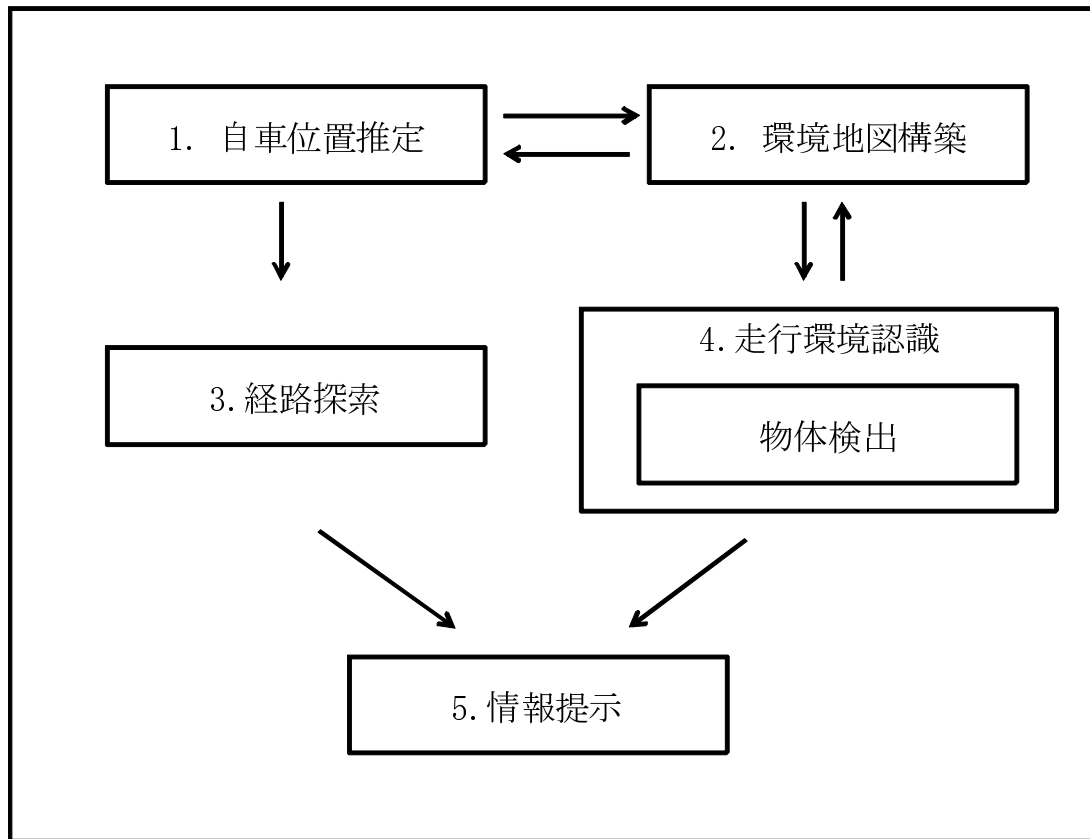


図 2.1 カーナビゲーションの技術要素の関係図

5. 情報提示：以上の技術で得られた情報をドライバへ提示する技術

図 2.1 に、これらの技術の関係を示す。カーナビゲーションにおいて、「1. 自車位置推定」は、以降の運転行動を決定するための基本となる。このため、正確な自車位置を推定するための技術が必要となる。このとき、多くの場合では走行環境中における位置が重要となるため、事前に走行環境をモデル化して地図とする「2. 環境地図構築」の技術が必要となる。この際、このような環境地図を構築するためにも自車位置が必要となるため、「1. 自車位置推定」と「2. 環境地図構築」は相互に関係する。自車の現在位置が得られたら目的地へと向かうための「3. 経路探索」が行われる。また、実際に走行している際には実世界の状況を理解するため、「4. 走行環境認識」を行う必要がある。これは、車両が走行できる領域を特定したり、悪天候時にワイパを起動したりする運転支援を行う技術である。また、歩行者や道路標識などを検出する物体検出技術も走行環境認識技術の一つである。物体検出技術はカーナビゲーションに対して特に重要であるため、本論文では詳しく

述べる．このような環境認識技術は，環境地図を構築する際に，必要な情報を取捨選択するためにも必要となる．反対に，構築した環境地図を用いることによって，環境を認識することも行われる．このため，「2. 環境地図構築」と「4. 走行環境認識」も相互に関係する．最後に，「1. 自転車位置推定」「2. 環境地図構築」から得られた地図中の自転車位置や「3. 経路探索」により得られた経路，「4. 走行環境認識」の結果をドライバーに対して提示するため，「5. 情報提示」が行われる．

カーナビゲーションは，以上の要素技術からなる高度な技術であり，個々について多くの研究が行われている．次節ではこれらの要素技術に関連する研究について述べる．

2.2 関連研究

カーナビゲーションの要素技術に対する関連研究について述べる．

2.2.1 自転車位置推定

カーナビゲーションは現在の自転車位置に基づいて行われるため，自転車位置推定はすべての基本となる技術である．ここでは，現在広く用いられている自転車位置推定技術は以下の4つに分類できる．

1. GPS (Global Positioning System) 測位
2. 自律航法
3. SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)
4. 環境地図との対応付け

本節では，これらの自転車位置推定技術について述べる．

GPS (Global Positioning System) 測位

地球の衛星軌道上を周回する GPS (Global Positioning System) 衛星から電波を受信することにより，自転車の緯度経度を絶対座標として得る仕組みである [23, 24]．正確な自転車位置を測位するためには最低 3 基 (高度を得るためには 4 基) の GPS 衛星が自転車から観測できる状態でなければならない．このため，ビルなどによる遮蔽が多く存在する市街地では，測位性能が低下する．また，トンネル内や高架下などでは測位自体が不可能である．GPS は軍事用と民生用が存在し，軍事用 GPS はおよそ数 10cm，民生用 GPS はお

よそ 5m から 30m 程度の測位誤差を持つ。カーナビ用途には民生用 GPS が利用されている。2000 年頃まで、軍事的な理由から、民生用 GPS は意図的に測位精度が 100m 程度に制限されており、より高精度な測位結果を得るため、D-GPS (Differential GPS) が用いられていた [25]。D-GPS は、正確な位置が分かっている地上の基準局から発信された電波を利用し、測位結果の補正を行うものである。しかし、民生用 GPS の制限の解除や測位技術の向上によって、2008 年に D-GPS のサービスは終了している。さらに高精度な測位精度を持つ RTK-GPS (Real Time Kinematic GPS) は、基準局からの搬送波の位相を測定することにより測位を行う。RTK-GPS では、数 cm という非常に高精度な位置を得ることができ、空港の建設現場などで利用される。RTK-GPS の問題として、一般車両へ搭載するためには非常に高価であること、初期化の手間が大きいことが挙げられる。近年では、日本国向けの測位システムとして、準天頂衛星「みちびき」が 2010 年に打ち上げられ、2015 年までに 3 基が竣工する予定である [26]。準天頂衛星は車両から観測しやすい天頂付近に存在する。このような準天頂衛星を従来の GPS 衛星に加えて利用することにより、測位性能の向上を見込める。しかし、ビルなどによる遮蔽が存在する市街地では準天頂衛星以外の GPS 衛星が観測できないことがあるため、依然として測位性能は不十分である。以上のように、GPS のみで自車位置を完全に測位することは困難である。

自律航法

車両に搭載されたセンサにより、計測した車両の加速度などを時系列に累積することにより自車位置を求める自律航法 (Dead Reckoning; DR) も広く用いられている。自律航法システムとして、車輪の回転角を利用するオドメトリシステムや、加速度や角速度を利用する慣性航行システム (Inertial Navigation System; INS) が主に用いられる。自律航法は民生用カーナビの開発初期から利用されていたが、センサの計測誤差などにより時間の経過に伴って位置測定誤差が累積するため、位置精度が低下することが問題となる。そのため、累積誤差が大きくなった場合は GPS 測位により補正し、GPS では測位できない箇所では自律航法を利用するというように、相補的に利用されている。

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

車両に搭載されたレンジレーダスキャナなどにより得られた外界の情報を用いて自車位置を推定する手法は、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) と呼ばれる [27]。SLAM はその名前の通り、自車の位置を推定しながら外界の情報を地図として

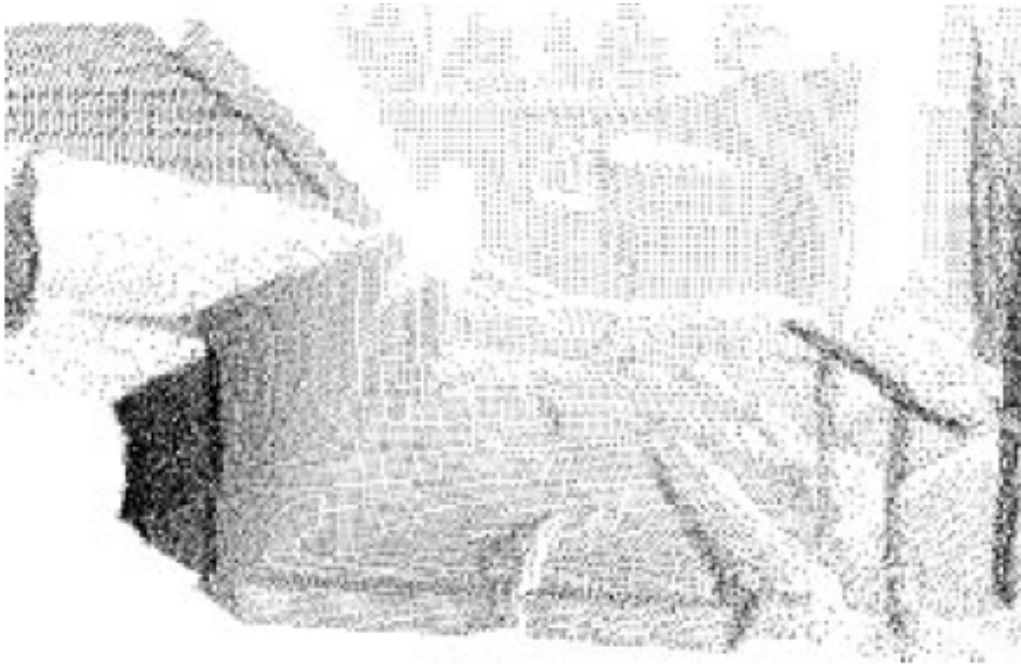


図 2.2 3次元点群からなる環境地図

構築する手法である．ロボティクス分野で盛んに研究され，未知の環境下におけるロボット制御に広く利用されている．SLAMの中でも画像を用いるものは，特に Visual-SLAM と呼ばれる [28, 29]．Visual-SLAM は，各時刻において撮影された画像から検出した特徴点を用いて，図 2.2 に示すような 3次元位置の環境地図を構築すると同時に，カメラの位置・姿勢を推定する [29]．このような画像から構築した環境地図を用いることで，高精度にカメラ位置・姿勢を推定することができる．しかし，SLAM は自律航法と同様に，時間に伴い累積誤差が発生することが問題点として挙げられる．特に自動車による SLAM は走行する範囲が広いため，累積誤差による推定性能への影響も大きい．

環境地図との対応付け

カーナビを対象とした場合，ドライバーに対して地図上の自車位置を提示する必要がある．前述したように GPS 測位，自律航法，SLAM により求めた自車位置は誤差を含むため，地図上に表示した際にずれが生じることがある．そこで，地図中に正確な自車位置を表示するため，地図と対応付ける必要がある．

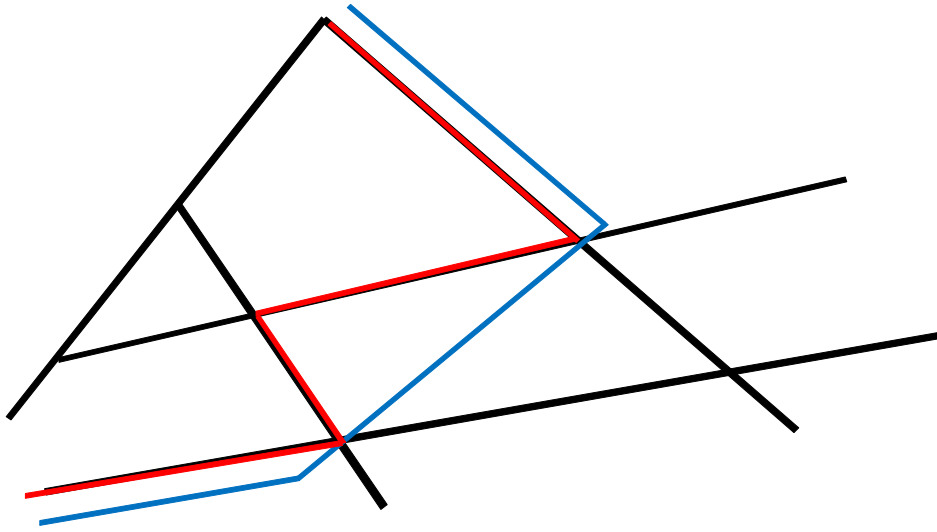


図 2.3 マップマッチング：黒線が道路，青線が GPS により測位した位置の軌跡，赤色がマップマッチングにより補正した位置の軌跡を示す．

地図との対応付け手法で代表的なものとしてマップマッチング [30] が挙げられる．マップマッチングは，図 2.3 に示すように道路構造をネットワークで表現した地図を用意し，これに対して GPS などにより得られた車両の移動軌跡を対応付けることにより，自車位置を道路上に補正する手法である．これによって，現在走行している道路に基づいたカーナビゲーションを行うことが可能となる．現在普及しているカーナビゲーションシステムは GPS 測位，自律航法およびマップマッチングを併用したハイブリット型のものが主流となっている．しかし，マップマッチングは走行している道路内の高精度な位置までは分からない．このため，より高度なカーナビゲーションを行うためには，より高精度な自車位置を求める手法が必要となる．

地図中の高精度な自車位置を求めるため，事前に周辺環境の地図を詳細に構築し，これと画像を対応付ける研究が多数行われている [31, 32] [33–37], [38–41]．本論文では，周辺環境から構築した地図を環境地図と呼ぶ．環境地図が詳細であるほど，高精度な自車位置を推定することができる．なお，ここでは車両に限らず，一般のカメラの位置・姿勢推定についても述べる．環境地図は様々な形式で構築され，カメラで撮影した画像と環境地図を対応付けることでカメラ位置・姿勢を推定する．以降，環境地図を以下の 4 つの形式に分類した上で述べる．

1. 画像データベース

2. 自然特徴点
3. 深度データ
4. モデルデータ

画像データベース

画像データベースは、事前に撮影した画像を輝度の正規化など、地図として利用しやすい形式に変換して、データベース化したものである。岩佐ら [31] や興梠ら [32] は、撮影時のカメラの位置・姿勢情報を画像に付加し、最も類似する画像を検索することでカメラの位置・姿勢を推定している。この手法は、カメラの位置・姿勢の推定精度がデータベース中の画像の枚数に依存するため、高精度に推定するためには大量の画像を収集する必要がある。しかし、近年では Google Street View [42] のようなサービスにより収集された大量の道路周辺の画像を用いることで、高精度な自車位置推定が可能となってきている。また、時系列に撮影した全方位画像を用いた自車位置推定手法が提案されている [33–35]。これらの手法は、自車の走行軌跡が地図構築時と近い場合には精度良く推定できるが、走行軌跡が離れている場合には精度が低下することが問題となる。また、多くの画像データを保持する必要があるため、データベースに必要となる記憶容量が増大することも問題として挙げられる。

自然特徴点

環境地図として、画像中から検出したユニークな点（自然特徴点）を用いる手法が提案されている [36, 37]。このような自然特徴点は 3 次元の点群として得られ、視点変換にも対応することが出来るため、環境地図の構築時と走行経路が離れている場合にも精度良く自車位置を推定できる。また、自然特徴点は画像データベースと比べ、疎なデータであるため、環境地図の記憶容量も小さく抑えることができる利点を持つ。カメラから得られた画像から 3 次元の点群を得ることは、Structure from Motion (SfM) として知られている [43, 44]。自然特徴点を用いる場合、対応付けに適した特徴点を用いることによって、カメラの位置推定精度が向上する。このような画像間の対応付けに適した特徴点の検出手法は近年多数提案されている。最も広く利用される Harris オペレータ [45] をはじめとして、SIFT [46]、SURF [47]、ORB [48]、PIRF [49] などが挙げられる。一般的に対応付け精度と特徴点検出の処理時間がトレードオフの関係にあるので、対象に応じて適したものを選択する必要がある。

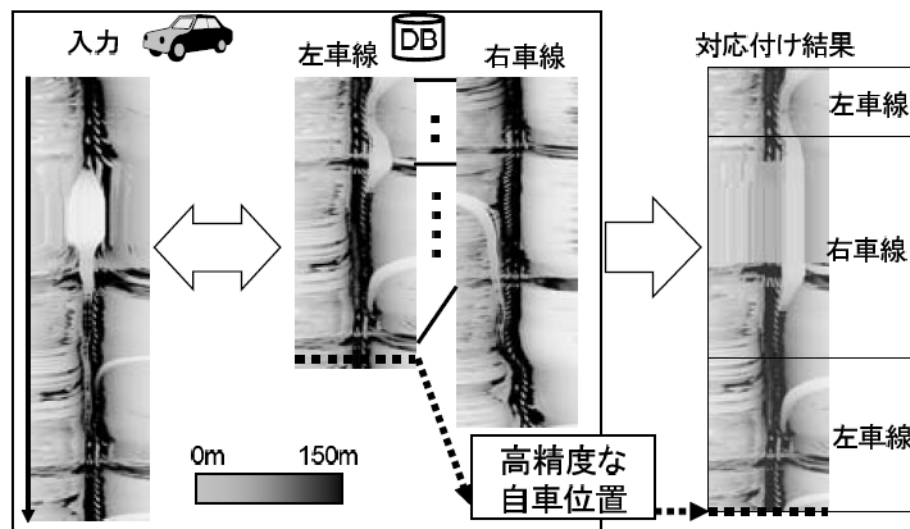


図 2.4 距離データの対応付け

深度データ

深度データは、カメラからの深度（もしくは距離）を持つ点群データである。これはレンジレーダスキャナやステレオカメラによって取得することができ、自然特徴点が疎な点群データであるのに対して、密な点群データを取得できる。深度データの対応付けは ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム [50] により行うことが主流である。澁久らは、図 2.4 に示すように、レーザレーダから得られた時系列の距離データを DP マッチングにより対応付けることで、自車位置を求めている [38]。このような距離データは、外乱に対して頑健であるため、走行環境の形状を有効に対応付けることができる。従来深度データを取得するためのデバイスは高価であり、適用範囲が限られていた。しかし、近年 Kinect* に代表される距離計測センサの低価格化が進んでおり、今後さらに発展するものと考えられる。

モデルデータ

Reitmayr らは、図 2.5 のような 3 次元モデルを用いて、これをレンダリングした画像と実際に撮影した画像を対応付けることによりカメラ位置・姿勢を求めている [39]。ま

* Kinect は、Microsoft 商標のゲームコントローラ。



図 2.5 3次元モデル

た，Huら [40] や小島ら [41] は，道路形状を曲線パラメータで表現したモデルデータとして用意し，車載カメラ画像中の区画線（白線）と対応付けることにより，自車の位置を求めている．このようなモデルデータはユーザによる制御が比較的容易であることが利点として挙げられる．また，一度構築してしまえば，前述した画像データベースや自然特徴点による環境地図を構築することもできるので，汎用性のある環境地図として有用である．一方で，市街地のように広大な空間を正確にモデリングするには高いコストを要する．

2.2.2 環境地図構築

前節で述べた自車位置推定を行うためには，事前に環境地図を構築する必要がある．本論文では環境地図を，画像やモデルデータそのものに限らず，これらに付随する位置情報などを含めたデータベースとして扱う．また，自車位置推定以外の目的としてデジタル地図やメディアコンテンツの作成，都市環境の管理などにも環境地図は有用である．特に市街地におけるカーナビゲーションは，より高い精度の自車位置が必要となるため，詳細な環境地図の構築が必要となる．また，都市環境は時間の経過とともに変化するため，定期的に環境地図を更新する必要がある．本節ではこのような環境地図の構築手法および更新手法について述べる．

環境地図を構築する手段として，高精度な計測機器を搭載した専用車両による構築手法と，安価なカメラを搭載した多数の一般車両による構築手法が挙げられる．

専用車両による構築

専用車両により環境地図を構築する手法では、様々な計測用の機器を搭載した車両が用いられる。慣性計測装置、車速パルス、搬送波位相/コード GPS を併用した三菱電機（株）のモバイルマッピングシステム（MMS） [51] をはじめとして、同様の専用車両により取得した市街地や道路環境の高精度な 3 次元地図を構築する商用サービスが近年盛んである [52, 53]。また、広域の路面の画像地図を構築する研究も行われている [54]。専用車両で構築された環境地図は、計測精度が数 cm と高精度であり、自車位置推定に十分であるだけでなく、映画やゲーム向けのコンテンツとしても有用である。しかし、専用車両による計測は高価な計測機器を用いるため、環境地図構築のコストが高い。このため、広範囲の環境地図の構築および更新を行うことが困難となる。

一般車両による構築

専用車両に対して一般車両を用いて環境地図を構築する手法では、安価なカメラを多くの一般車両に搭載することで道路の情報を収集する。多数の一般車両にカメラを搭載することで、定期的な環境地図の更新を行うこともできると考えられる。しかし、高精度な計測機器を搭載している専用車両とは異なり、一般車両による周辺環境の計測精度は低い。佐藤ら [35] や澁久ら [38] は、同地点を複数回走行した際の GPS 測位値を平均化している。GPS 測位誤差の分散は大きいですが、バイアスは小さいため、多数のデータを平均化することで、位置の精度を高めることができる。一方で、Geiger らは車載カメラ画像から自車の動きを推定した結果を用いて、車載カメラ画像中の路面領域をモザイクングすることにより環境地図を構築している [55]。しかし、この手法では累積誤差が蓄積するため、広範囲の環境地図を構築することは難しい。さらに、彼らはデジタル地図を併用することによって、図 2.6 に示すような道路面および周辺の建物の 3D モデルを復元する手法を提案している [56]。このように、異なる種類の地図を併用することで、より詳細な地図を構築する研究も行われている。

環境地図の更新

環境は時間の経過とともに変化するため、環境地図は定期的に更新する必要がある。効率的に更新を行うために、構築した環境地図を用いて自車位置を推定し、環境地図中の変化した箇所を特定する手法が提案されている [35]。佐藤らは画像データベースとの画像類

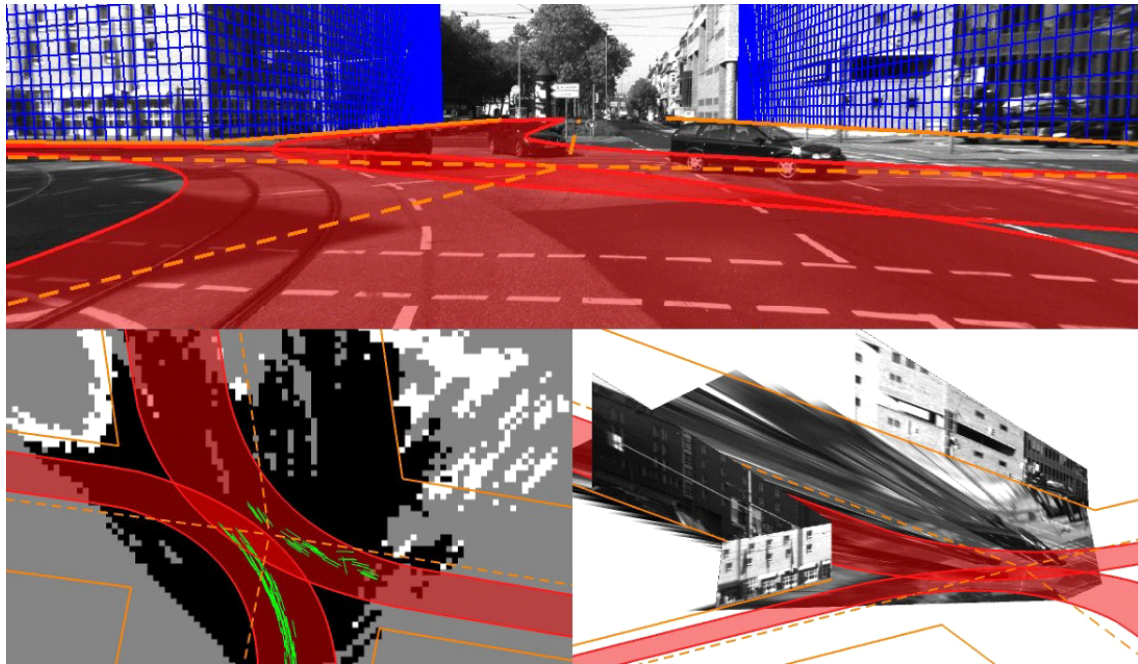


図 2.6 車載カメラ画像とデジタル地図の併用による 3 次元復元：上：車載カメラ画像を走行領域（赤），建物（青）に分類．左下：俯瞰画像．右下：3D ポップアップ表示．

似度を用いることにより，市街地の増改築が行われた建物を検出している [35]．また，内山らは同地点で撮影した複数の画像を用いて，一時的に存在する障害物を除去した画像データベースを構築している [57]．

2.2.3 経路探索

自車位置と地図が得られたら，現在位置から目的地までの最適な経路が探索される．標準的なカーナビでは交差点をノード，道路をリンクとしたネットワークとして道路構造を表現したネットワークに対する経路探索を行なっている．経路探索には主に Dijkstra 法 [58] が用いられ，目的地までの最短経路が求められる．しかし，渋滞などの道路状況に応じて最適な経路は変化するため，道路条項からノードの重みが設定される．渋滞などの交通情報は，車両の位置に応じて配信される VICS（Vehicle Information and Communication System） [17] というサービスから得ることができる．また，コンビニエンスストアなどに立ち寄ることを考慮したドライバ志向の経路探索手法も提案されてい

る [59] .

2.2.4 走行環境認識

実際に車両を運転する場合は、その時々々の走行環境に適した行動を取らなければならない。このため、走行環境をリアルタイムに認識する技術が必要となる。ここでは、走行環境認識技術として走行可能領域検出、風景認識、天候認識について述べる。なお、2.2.5 で述べる物体検出も走行環境認識の 1 つではあるが、本論文では節を分けて述べる。

走行可能領域検出

走行環境の障害物が存在する領域を避けて運転を行うため、走行可能な領域を検出する手法が提案されている [60–62]。道路領域の検出は主に道路面の平面仮定や、道路特有の色特徴を用いて行われる [60]。また、ステレオカメラにより路面上の高さを持つ物体を除くことで、走行可能領域を検出する手法も提案されている [61, 62]。

風景認識

ドライバの注意力が低下するような単調な風景が続く箇所の検出などを行うため、車載カメラ画像中の風景を解析する研究が行われている [63, 64]。これらの研究では、図 2.7 のように、画像を小領域ごとに分割し、特徴量を判別することで、空や街頭樹などの判定を行なっている [64]。

天候認識

雨天や濃霧のような悪天候時には視界が低下するため、交通事故の発生率が高くなる。このため、このような悪天候下における運転支援を行うことを目的とし、雨や霧の程度を認識する研究が行われている [65, 66]。Kurihata らは、雨滴の固有参照画像を用いて、フロントガラス上の雨滴を検出することにより雨の程度を計測している [65]。Mori らは、光の減衰モデルを考慮することにより、霧の深さを車載カメラ画像から計測している [66]。

2.2.5 物体検出

ドライバは走行環境中の運転に必要な様々な情報を視覚から取得している。このため、以下に挙げるような様々な対象を車載カメラ画像中から検出し、危険検知や情報取得をド

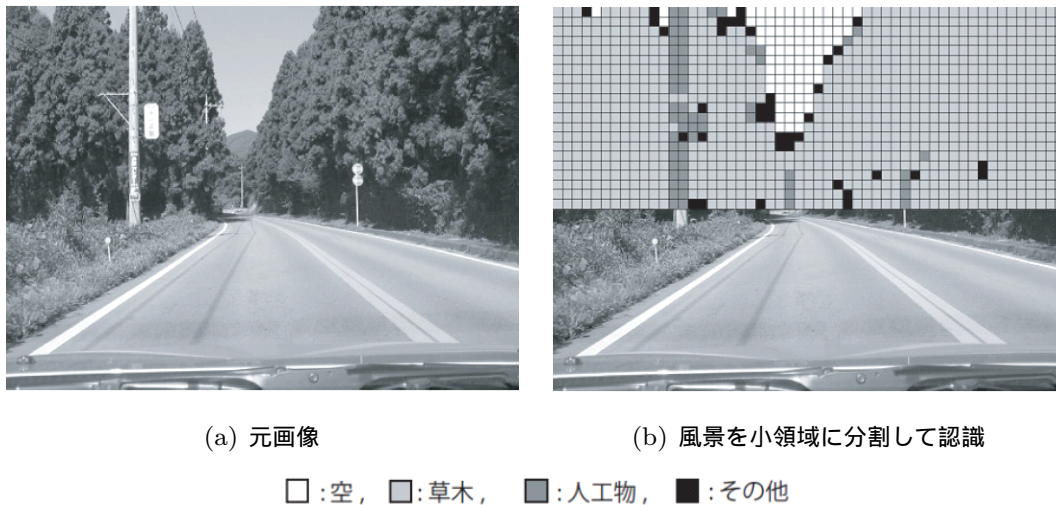


図 2.7 車載カメラ画像の風景認識

ライバに対して行うことを目的とした研究が広く行われている。

1. 危険検知：歩行者 [67, 68]，車両 [69]
2. 情報取得：信号機 [70]，道路標識 [71–74]，路面標示 [75, 76]

物体検出の研究は，コンピュータビジョンの基礎的な問題として広く行われてきた．物体検出手法はテンプレートマッチング [77] を基本とする．テンプレートマッチングは，画像中から注目領域（Region of Interest; ROI）を走査し，参照画像（テンプレート）との類似度を求めることにより検出を行う手法である．実際の画像では，検出対象には幾何変換，輝度変化，解像度低下，ぼけなどの様々な見えの変化が生じる．このため，これらの見えの変化に対して頑健に対象を検出することが，物体検出の分野の技術課題である．ここでは，物体検出手法において重要と考えられる特徴量，識別器（検出器），学習画像，シーンコンテキストの4つの要素について述べる．

特徴量

物体検出を行う際には，画像をベクトルなどの数値表現に変換する必要がある．検出対象とする画像中の物体は，様々な見えの変化を含んでいるため，これらに不変な特徴ほどより良い特徴量と考えられる．物体検出に用いられる特徴量は，最近10年間で特に進歩した分野であり，様々な種類の特徴量が提案されている [78]．代表的なものとして

Haar-like [79], HOG (Histogram of Oriented Gradients) [80], LBP (Local Binary Pattern) [81] が広く用いられている。

識別器 (検出器)

得られた特徴量が検出したい対象であるか識別するものを識別器と呼ぶ。また、画像全体を走査し、各注目領域に対して識別器を適用することで対象を検出するものを検出器と呼ぶ。最も単純な識別器は、対象との類似度 (もしくは相違度、距離) に対してしきい値処理を行うものである。類似度 (相違度、距離) として、絶対誤差和、2乗誤差和、正規化相互相関などが用いられる。これらは、単一の参照画像との類似度であるため、見えの変化に対する頑健性は弱い。

対象の様々な見えの変化に対応するためには、これらの変化を含んだ画像を識別器に学習させる手法が有効である。学習を伴う手法として、多くの学習画像から構築した部分空間と入力した画像との正準角により認識を行う部分空間法 [82] が良く用いられる。また、対象 (ポジティブ) と非対象 (ネガティブ) の両方の画像を学習させ、これらの境界を得る識別器として SVM (Support Vector Machine) [83] や AdaBoost 識別器 [84] は非常に広い範囲で用いられている。

学習画像

高い識別性能を持った識別器を構築するためには、様々な見えを含む学習画像を収集し、学習させる必要がある。対象により規模が異なるが、走行環境において歩行者や道路標識、路面標示を精度良く検出するためには、数千枚から数万枚の学習画像が必要である。また、これらの学習画像は対象とする物体に起こりうる見えの変化をバランス良く含んでいる必要がある。このような学習画像は、通常事前に撮影した画像から人手で切り出すことで収集するが、これは困難な作業である。これに対して、実世界における検出対象の見えがモデル化できる場合、人工的に学習画像を生成し、学習する生成型学習法 [85] を適用することができる。生成型学習法では、原画像に対して画像処理により幾何学変換、色変換、ぼけ付与などを行うことにより、実世界で収集した画像と同等の学習画像を生成する。車両の走行環境においては、歩行者 [68]、道路標識 [73]、路面標示 [86] の検出に対する生成型学習法の有効性が確認されている。また、実画像から効率的に学習画像を収集する手法も提案されている [87]。この手法では道路標識を対象とし、検出が容易である道路標識が大きく映っている画像から時間を遡って追跡することで、検出しにくい低解像度

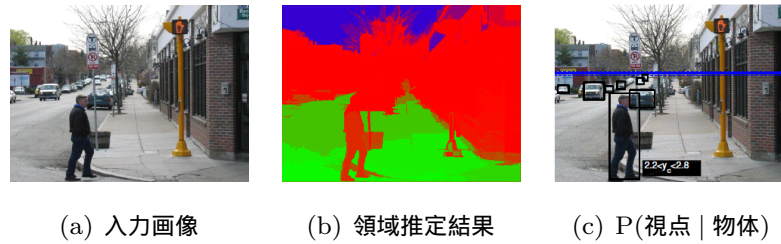


図 2.8 シーンコンテキストを用いた歩行者検出：赤い枠が歩行者の存在する確率を表す． $P(\cdot)$ はシーンの幾何構造や視点に条件付けられた歩行者の存在確率が求まる．

の道路標識画像を収集している．

シーンコンテキスト

監視カメラや車載カメラなどは設置条件が事前に分かっている場合が多いため、画像中のどこに何が映っているかをシーンコンテキスト（事前知識）として利用することができる．車載カメラ画像の下半分は道路領域であるため、歩行者は道路の上に存在するという事前知識から、画像中の探索範囲を制限することで、誤検出の抑制と処理の高速化が通常行われる．Hoiem らは、事前に歩行者が存在する領域を学習した歩行者存在マップを利用することで、歩行者検出の性能を向上させている [88]．様々なシーンコンテキストを適切に用いることで、検出性能を向上することができる．

2.2.6 情報提示

カーナビゲーションシステムは、自転車位置や車載カメラ画像中からの物体検出結果をドライバにわかりやすい形で提示する必要がある．従来のカーナビゲーションシステムでは、デジタル地図や CG で表現された画像中への自転車位置や経路を表示、音声による案内が行われている．近年では、図 2.9 のように車載カメラにより撮影した画像上にこれ

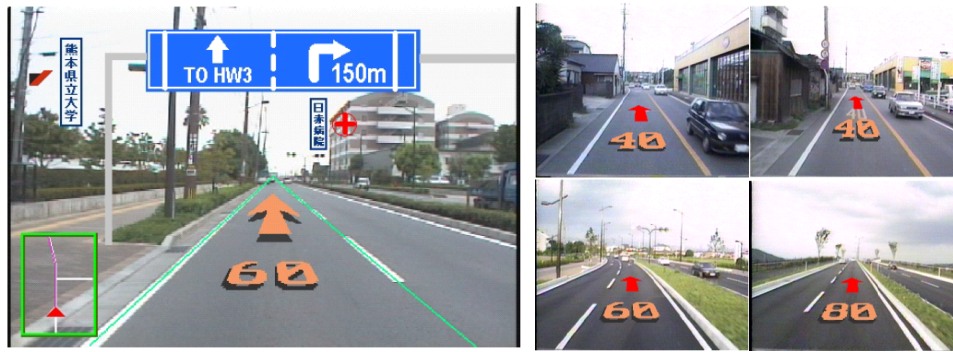


図 2.9 拡張現実型カーナビゲーションシステム

らを重畳して表示する拡張現実型のカーナビゲーションシステムの研究開発が盛んである [40]。また、検出した結果を全てドライバに提示することで、ドライバの注意が散漫になることが考えられる。このため、情報を取捨選択し、必要なものだけをドライバに提示する技術が必要となる。このような考えの一つとして、検出した物体の見やすさ（視認性）を評価することで、見えにくい物体のみを提示することを目的とした研究も行われている [89]。

以上、カーナビゲーションの要素技術に関する研究について述べた。これらの技術が対象とする問題は様々であり、本章で挙げたもの以外にも多数の車載カメラを用いた研究が行われている [90]。

2.3 路面画像処理

走行中に撮影した車載カメラ画像中では、図 2.10(a) に示すように、路面領域が画像の大部分を占める。このような路面領域には、路面標示をはじめとして多くの運転に関する情報が含まれる。そこで本論文では、特に路面領域を対象とし、活用することで、カーナビゲーション技術の発展に取り組む。このような路面領域は通常、路面を平面と仮定し、図 2.10(b) のように仮想的に俯瞰した画像へと変換することで利用する。本論文では、この画像を路面画像と呼び、路面画像に対する処理を路面画像処理と呼ぶ。路面は車両が走行する基盤であり、走行領域、走行に関する指示などの運転に必要な情報をドライバに与えている。このため、路面画像処理はカーナビゲーションに対して有用であると考えられる。

ここでは、前述したカーナビゲーション技術の中で特に路面画像処理を用いたものに関



図 2.10 路面画像処理で対象とする画像

して述べる．

2.3.1 自車位置推定

路面領域を用いて自車位置推定を行う手法が提案されている．車載カメラ画像のみを用いる手法として，農宗らは時系列の車載カメラ画像中の道路形状を推定すると同時に，自車の位置・姿勢を推定している [91]．また，Lovegrove らはリアカメラから撮影した小領域の路面を追跡することで，推定している [92]．一方，事前に構築した地図と路面を対応付けることで，自車位置を推定する手法が提案されている [41, 93, 94]．小島らはデジタル地図から構築した道路形状モデルと車載カメラ画像中の区画線に対応付けている [41]．また，Pink らは空撮画像中の路面上に印字された路面標示から特徴点を検出し，車載カメラ画像と対応付けている [93, 94]．本論文の第 3 章では，このような空撮画像と車載カメラ画像を用いて自車位置を推定する手法について述べる．



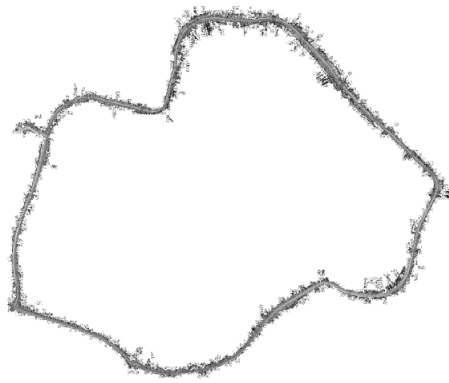
図 2.11 路面性状測定車

2.3.2 路面画像地図構築

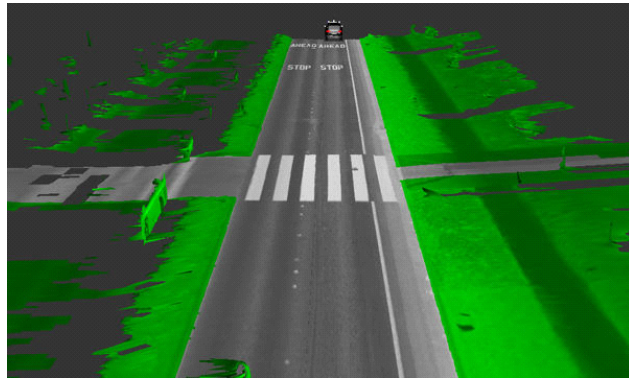
広範囲の路面を上空から撮影した画像の地図である路面画像地図を構築することで、GIS (Geographic Information System) や、交通シミュレーション、映画やゲーム向けの CG コンテンツに役立てることができる。また、前述した自車位置推定のための環境地図として利用することもできる。このような路面画像地図は、図 2.11 のような路面性状測定車により計測され、構築される [95]。一方、通常の子載カメラ画像中の路面領域をモザイクングすることで、路面画像地図を構築することも行われている。高精度な計測装置を搭載した専用車両を用いることで、図 2.12 に示すような路面画像地図を構築することができる [54]。また、GPS などを用いず、画像から車両の動きを推定することで、路面をモザイクングする研究も行われている [55]。この研究では、時系列に撮影した路面画像をモザイクングすることで、図 2.13(b) のように遮蔽を除去している。本論文の第 4 章では、図 2.13(a) のように遮蔽を含む路面画像から、空撮画像を位置合わせの基準とし、路面画像をモザイクングすることで路面画像地図を構築する手法について述べる。

2.3.3 路面領域検出

路面に対する処理を行いたい場合、子載カメラ画像から路面領域を検出する必要がある。このような路面領域を検出するため、単眼カメラを用いたもの [60] と、ステレオカメラを用いたものがある [61, 62]。単眼カメラを用いたものは、区画線やテクスチャの境界を検出する手法や、路面の輝度からセグメンテーションに基づく手法などが提案されている [60]。一方、ステレオカメラを用いたものは、自車から前方の物体までの距離を求め、

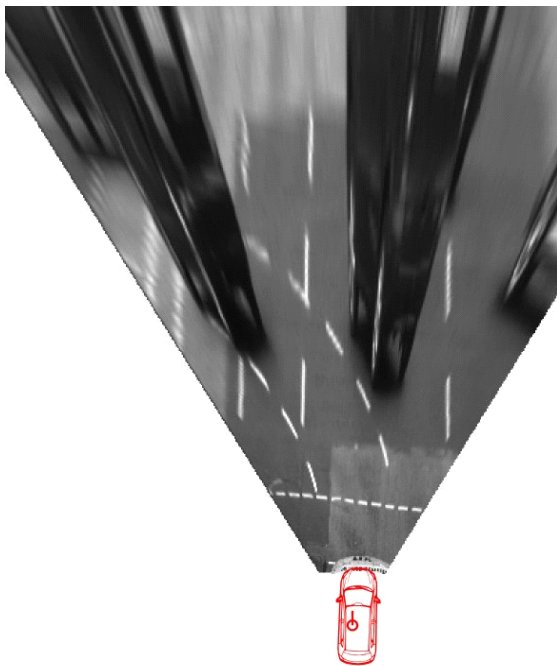


(a) 路面の画像地図全域

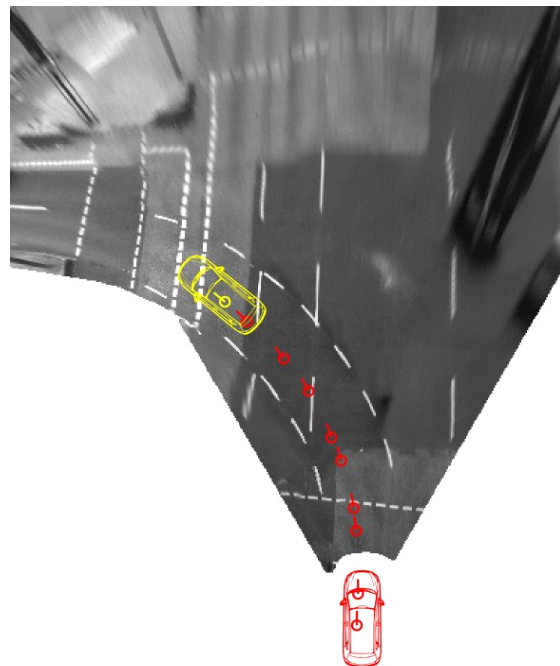


(b) (a) の画像の一部

図 2.12 広範囲の路面の画像地図



(a) 元画像



(b) モザイクング結果：路面画像内の車両を除去

図 2.13 路面画像のモザイクング

地平面と見なせる領域を路面領域として検出している [61,62] .

2.3.4 路上障害物検出

車両が走行する際、路上に存在する物体は車両と衝突する危険があるため、事前に検出する必要がある。単眼カメラを用いたものとして、車載カメラ画像の連続するフレームからオプティカルフローを求め、その動きの違いから路上障害物を検出する手法が提案されている [96]。また、Kyutoku らは過去に撮影した車載カメラ画像と現在の車載カメラ画像を位置合わせし、画像間の差分を用いて路面上の障害物を検出する手法を提案している [97]。一方、ステレオカメラを用いて、路面と障害物の動きの違いを利用することで、路上障害物を検出する手法が提案されている [61]。

路面状態判別

路面の状態を把握することにより、安全な運転支援を行うことができると考えられる。久野らはアスファルトの反射モデルを利用することにより、路面の状態が乾燥、湿潤、冠水のいずれであるかを判別している [98]。また、手島らは路面上の水たまりなどの鏡面反射領域の検出を行なっている [99]、

2.3.5 路面標示検出・認識

路面標示は、ドライバーに対して走行に関する案内、誘導、警戒、規制、指示を行う路面上に印字された文字やシンボルである。路面標示は、その役割の違いから道路標示と区画線の 2 種類に分けられる。

- 道路標示：指示標示（矢印のように進行方向や横断歩道、停止線など）、規制標示（上限速度や駐車禁止など）からなる。
- 区画線：車両の走行領域の境界を示すものであり、実線および破線などで描かれる。

本論文中では、道路標示を路面標示として扱い、区画線は別のものとして扱う。このような路面標示は、走行環境において信号機や道路標識と同様に重要である。このため、路面標示を検出し、その種類を認識する研究が行われている [75, 76]。路面標示は路面に対して高い輝度を持つため、輝度に対するしきい値処理を行うことにより候補領域を検出し、この領域に対して識別器を適用することにより、その種類を認識している。路面画像中の路面標示の見えは、車両の動きやカメラ特性により様々に変化するため、このような見え

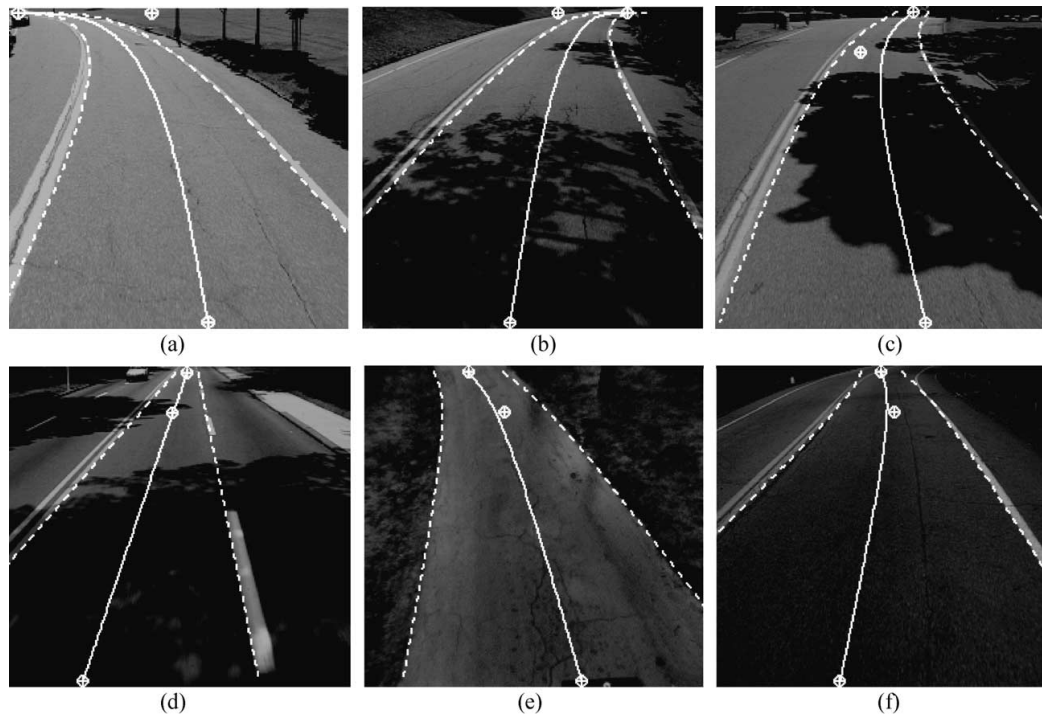


図 2.14 B-Snake による区画線検出

に頑健な認識手法が必要となる．本論文の第 5 章では，このような見えの変化を含む路面標示を頑健に認識する手法について述べる．

2.3.6 区画線検出

区画線は走行領域の境界を示すものであり，これを検出する研究は車載カメラ画像を運転支援に利用する研究が開始された初期の頃から行われている [100,101]．調査論文 [100] では，区画線検出に関する研究事例が多く挙げられている．これらの研究事例には区画線の直線性を仮定するもの，カーブなどの道路形状にも対応したもの，単眼カメラを用いたもの，ステレオカメラを用いたもの，と様々なアプローチが取られている．B-Snake のようなモデルフィッティング手法を用いて，図 2.14 のように強い影が路面に生じている場合でも区画線を検出することが可能である．区画線検出は，高速道路などの理想環境下では車両の自律制御に利用できるほどの精度が達成されている．また，自車と区画線の関係から車線を逸脱した際に警告するようなレーンキーピングアシストなどの運転支援システムが既に実用化されている．しかし，市街地などの複雑な環境や悪天候下において，いま

だ精度は不十分である。

2.4 本研究の位置付け

本章では、カーナビゲーションに必要な技術に関する研究について述べ、2.3 節では特に路面画像処理が重要であると位置付けた。本論文では、路面画像処理を特に活用できると考えられる「1. 自車位置推定」、「2. 環境地図構築」、「4. 走行環境認識」に対する以下の 3 つの研究について述べる（図 2.1 (p.8) 参照）。

- (a) 空撮画像を用いた自車位置推定（第 3 章）: 「1. 自車位置推定」に関連
- (b) 路面画像地図構築（第 4 章）: 「2. 環境地図構築」に関連
- (c) 路面標示検出（第 5 章）: 「4. 走行環境認識」に関連

一方、「3. 経路探索」「5. 情報提示」に関しては、カーナビゲーションシステムを開発する際に必要となる技術と考え、以降の章では扱わない。

以降、各研究の目的と位置付けについて述べる。

- (a) 空撮画像を用いた自車位置推定（第 3 章）

第 3 章では、「1. 自車位置推定」を目的とした研究について述べる。高精度な自車位置を求めることは、カーナビゲーションにおける重要な基本課題である。市街地では周辺のビルなどの影響で、GPS による測位精度が低下するため、高精度な位置に基づくカーナビゲーションは依然として難しい。特にドライバの取りうる行動が多く起こる交差点付近において、高精度な自車位置を求めることは重要である。このため、本研究ではこのような地点における高精度な自車位置推定を目的とする。このような自車位置推定手法として、実際の走行環境から構築した環境地図と車載カメラ画像を対応付けることが考えられる。交差点付近にはドライバに進行方向を指示する路面標示が多く存在しており、空撮画像からも視認することができる。このことに着目し、本研究では車載カメラ画像と空撮画像に共通して撮影されている路面標示を対応付けることにより、高精度な自車位置を推定する手法を提案する。提案手法では、時系列の情報を用いることにより、従来よりも高精度な自車位置推定の実現を目指す。

- (b) 路面画像地図構築（第 4 章）

第 4 章では、「2. 環境地図構築」を目的とした研究について述べる。各種センサを

用いて実世界の情報を収集し、コンピュータ上に実世界の環境地図を構築する試みが近年行われている。このような環境地図は、第3章で述べる自転車位置推定に利用することができる。また、GIS (Geographic Information System) や、交通シミュレーション、映画やゲーム向けのCGコンテンツとして利用することもできる。本研究では、このような環境地図の一つとして、路面を上空から見たような路面画像地図を扱う。路面画像地図は、実世界の路面に関する情報を集約したデータベースである。これらの用途に利用するためには、高解像度かつ遮蔽を含まない高品質な路面画像地図が必要となる。また、このような路面画像地図を、一般車両に搭載された車載カメラを用いて安価に構築することは有用である。これを実現するため、本研究では空撮画像を位置合わせの基準として用い、車載カメラ画像中の路面領域をモザイクングすることで路面画像地図を構築する。自転車前方の路面領域は高解像度かつ遮蔽を含まないため、構築された路面画像地図も高解像度かつ遮蔽を含まないものとなる。本研究では、低解像度な空撮画像や、路面上に遮蔽が含まれている空撮画像を用いて、高品質な路面画像地図を構築することを目指す。

(c) 路面標示検出 (第5章)

第5章では、「4. 走行環境認識」の一つとして、車載カメラ画像中の路面標示の検出を目的とした研究について述べる。走行環境中には、ドライバーが認識すべき様々な対象が存在する。車両が走行環境を正しく理解することにより、あたかも知性を持ったかのようにドライバーの運転を支援できるようになる。走行環境には様々な外乱が含まれている。このような外乱に対して頑健に対象を認識することはコンピュータビジョン技術の大きな課題の一つである。本研究では、走行環境中から認識すべき対象の一つとして、路面上に存在する路面標示を対象とする。路面標示は走行に関する情報をドライバーに提示するためのものであり、このような路面標示を検出することで運転支援に役立てることができる。車載カメラ画像中の路面標示は、様々な要因によってその見えが変化するため、検出が難しくなる問題がある。本研究では、特に車載カメラ画像中における路面標示の位置の違いによる見えの変化に着目する。路面標示は規格により大きさや形状が決まっているため、車両との位置関係が分かれば、その見えはある程度予想できる。本研究では、これを利用して路面画像中の路面標示の位置に応じた位置依存型識別器を用いることによって検出精度の向上を図る。また、識別器の学習のため、3次元空間中の路面標示に対する車両の位置・姿勢を考慮した生成型学習法を適用することで、学習画像の収集コスト

を削減する．ここで述べる考えは路面標示検出に限らず，様々な対象の検出に対して適用することができる．

第 3 章

空撮画像を用いた自転車位置推定

本章では、以下に挙げるカーナビゲーションに必要な技術の中で「1. 自転車位置推定」に関する研究について述べる（太字で示す）。

1. **自転車位置推定**
2. 環境地図構築
3. 経路探索
4. 走行環境認識
5. 情報提示

3.1 はじめに

3.1.1 背景と目的

高精度な自転車位置を求めることは、カーナビゲーションの基本技術である。現在、一般に普及しているカーナビゲーションシステムは、経路案内を行うためには十分な位置推定精度を有している。特にドライバーの取りうる行動が多く起こる交差点付近において、高精度な自転車位置を求めることは重要である。これを実現することができれば、停止や車線変更の支援などを含む従来では難しかった高度なカーナビゲーションが可能となる。これらの運転支援を行う場合、1m 以下の推定精度を必要とする高精度な自転車位置推定手法が必要となる。しかし、民生用 GPS は、ビルなどの遮蔽物が多く存在する市街地において測位精度が低下し、5 m から 30 m 程度の推定誤差が発生する。よって、市街地中に多く存在する交差点付近において高度な運転支援を行うためには、位置の推定精度が不十分であ

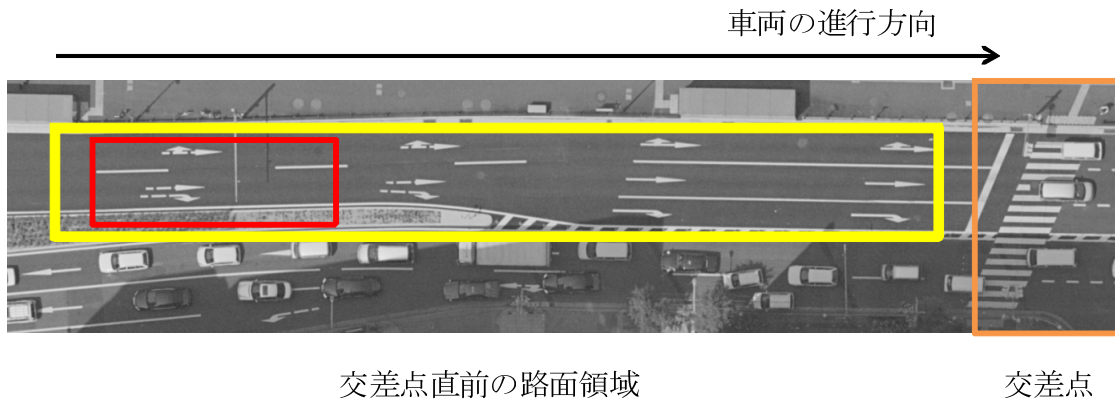


図 3.1 空撮画像中の交差点直前の路面領域：赤枠で示す領域が図 3.2 中の路面領域に相当する。



図 3.2 空撮画像（図 3.1）と共通する路面標示が撮影された車載カメラ画像

る．これに対して，車載カメラを利用することで高精度な自車位置を推定する手法が提案されている（2章を参照）．本研究では，このような車載カメラを用いることにより，交差点付近の区間において，高精度な自車位置を推定することを目的とする．

3.1.2 関連研究

2章では、自車位置推定手法のアプローチを以下の4つに分類し、関連研究を述べた。

1. GPS 測位
2. 自律航法
3. SLAM
4. 環境地図との対応付け

市街地において測位精度が低下する GPS 測位や、累積誤差が生じる自律航法、SLAM に比べて、「4. 環境地図との対応付け」(太字で示す)は、自車位置を高精度に推定することができる [31, 32] [33–37], [38–41]。この手法は、事前に構築した環境地図と車載カメラ画像を対応付けることで、自車位置を求めるものである。環境地図との対応付けを行うためには、環境地図と車載カメラ画像中に対応付けに用いることができる情報が含まれている必要がある。本章では、このような情報として路面上に存在する路面標示を用いる。本研究が対象とする交差点付近の路面領域には、図 3.1 の空撮画像で示すように、進行方向や交差点の路面標示が存在する。このような空撮画像中の路面標示は、図 3.2 に示すような車載カメラ画像内にも存在する。このため、これらの路面標示を対応付けることにより、自車位置を求めることができると考えられる。

2章では、環境地図を以下の4つの形式に分類した上で、関連研究について述べた。

1. 画像データベース
2. 自然特徴点
3. 深度データ
4. モデルデータ

2章で述べた関連研究の多くは、事前に走行して撮影した車載カメラ画像から環境地図を構築する必要がある。これに対して、空撮画像を用いることで、広範囲の路面を一度に取得できるため、環境地図構築のコストを大きく低減することができる。また、空撮画像は GoogleMaps [102] などの地図サービスの普及により、近年比較的容易に手に入れることができることも利点の一つである。トヨタ自動車は、リアカメラで路面標示を認識することにより交差点までの距離を提示するナビ・ブレーキアシストを開発している [103]。このシステムでは、空撮画像やデジタル地図から事前に路面標示をプロットして環境地図

を構築している．また，Pinkらは車載カメラ画像と空撮画像中に共通する路面標示を対応付けることにより自車位置を推定する手法を提案している [93, 94]．彼らは画像間の対応付けに路面標示から検出した特徴点を環境地図として用いている．この手法は，2章で述べた環境地図の形式のうち，「2. 自然特徴点」を用いたものである．自然特徴点を用いる場合，環境地図と車載カメラ画像中に共通して含まれる特徴点を十分に得ることができる必要がある．しかし，走行中の車両から撮影される車載カメラ画像に含まれる路面標示の数はフレームごとに変化するため，特徴点を十分に得られるとは限らない．このため，Pinkらの手法では車載カメラ画像中に路面標示が少ない場合，空撮画像との対応付けが困難となり，自車位置推定精度が低下する．

そこで本研究では，車両の動きが連続していることから，自車の動き推定により過去の特徴点を対応付けに用いることを考える．この考えに基づき，本章では複数の時刻から検出した特徴点を統合して局所地図を構築することにより，自車位置の推定精度を向上する手法を提案する．

3.1.3 本章の構成

提案手法による自車位置推定は以下の2段階からなる．

1. 環境地図構築段階：空撮画像から環境地図を構築する．
2. 自車位置推定段階：車載カメラ画像を環境地図に対応付けることにより自車位置を推定する．

以降，3.2節では自車位置推定の概要について述べ，本論文で用いる空撮画像と車両モデルおよびこれらの関係について述べる．3.3節では空撮画像からの環境地図構築，3.4節では自車位置推定手法について具体的に述べる．そして，3.5節で実験結果を示し，考察する．最後に，3.6節で本章をまとめる．

3.2 自車位置推定の概要

図 3.3 に，本章で提案する自車位置推定手法の概要を示す．提案手法は，自車位置を空撮画像上の1点として推定する．そのために，車載カメラ画像中の自車前方の路面領域を路面画像に変換した上で，空撮画像中の領域と対応付ける．自車位置の推定は時系列に行い，前時刻の結果を用いて現在時刻の自車位置を推定する．なお，提案手法は環境地図と

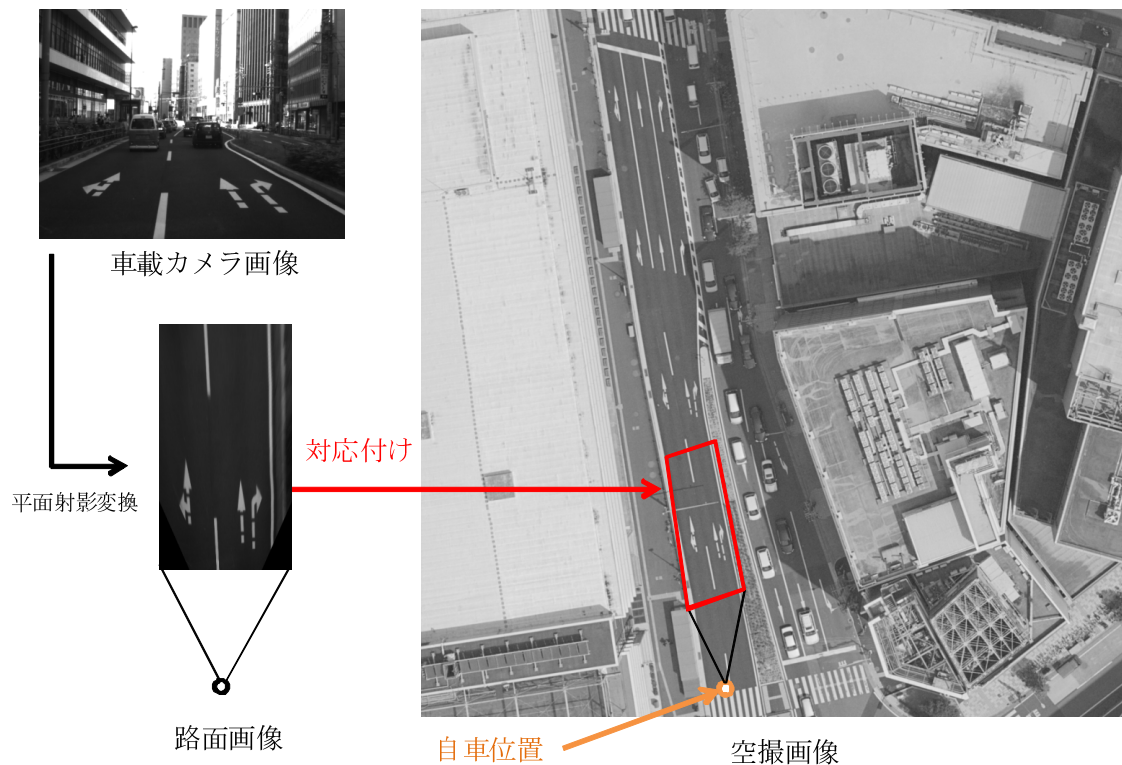


図 3.3 自車位置推定の概要

の対応付けのみで自車位置を推定し，GPS などの測位システムは併用しない．

以降，本章で用いる空撮画像と車両モデルおよびこれらの関係について述べる．

3.2.1 空撮画像

本章で用いる空撮画像は，図 3.3 に示すように航空機から地上を撮影したものである．高解像度なものは 1 画素が約 5 cm 四方に相当し，路面標示を視認することができる．空撮画像は，航空機を中心として広範囲を撮影しているため，画像中心からの端に向かうほど歪みが生じている．本研究では，このような歪みを持つ空撮画像を用いて，自車位置の推定を行う．また，本研究では車両などによる路面上の遮蔽はないものとする．

3.2.2 車両モデル

図 3.4 に示すように，時刻 t の車両の位置を空撮画像中の座標 p_t で表す．また，車両前方の対応付けに用いる路面領域を \mathcal{R}_t とする． \mathcal{R}_t は，図 3.5 に示す時刻 t の車載カメ

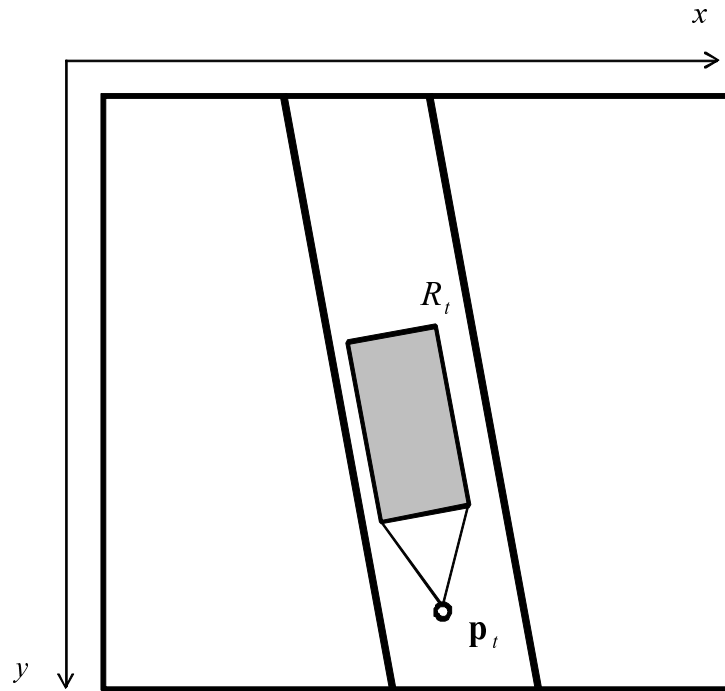


図 3.4 空撮画像中の車両位置と対応付けに用いる領域

ラ画像中の領域 $a'_1 \sim a'_4$ に対応する．この領域 $a'_1 \sim a'_4$ は，図 3.6 に示す 3 次元空間中の車両モデルを用いて与える．ここでは，路面が平面であると仮定し，自車前方の路面領域 $a_1 \sim a_4$ を空撮画像との対応付けに用いる． $a'_1 \sim a'_4$ と， $a_1 \sim a_4$ は対応する．車載カメラは地面からの高さ h [m] に設置し，カメラの向きは車両の進行方向かつ道路面と平行にする．このとき，車載カメラを道路面に投影した位置を基点とした車両の進行方向への距離 d_0 [m] から d_1 [m]，カメラ方向を中心とした幅 w [m] の領域を空撮画像との対応付ける路面領域として定義する．この路面領域を，次式の 4 端点の 3 次元座標で与える．

$$a_1 = (-w/2, d_1, 0)$$

$$a_2 = (w/2, d_1, 0)$$

$$a_3 = (w/2, d_0, 0)$$

$$a_4 = (-w/2, d_0, 0)$$

これらの端点を 2 次元の画像平面上の座標へ変換する行列 \mathbf{T} を次式で求める．

$$\mathbf{T} = \mathbf{C}_{\text{in}}(f_x, f_y, z)\mathbf{C}_{\text{out}}(h) \quad (3.1)$$

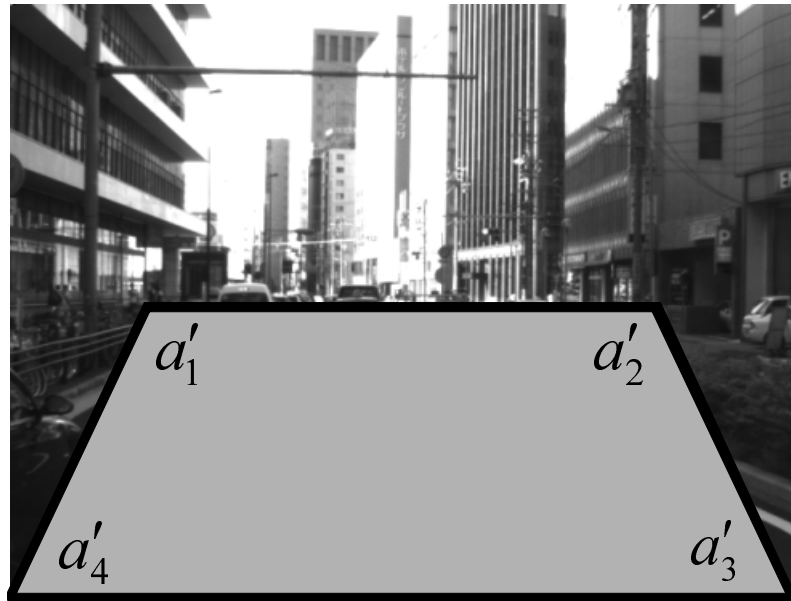


図 3.5 車載カメラ画像中の対応付けに用いる路面領域：図中 $a'_1 \sim a'_4$ は図 3.6 中の $a_1 \sim a_4$ に対応する。

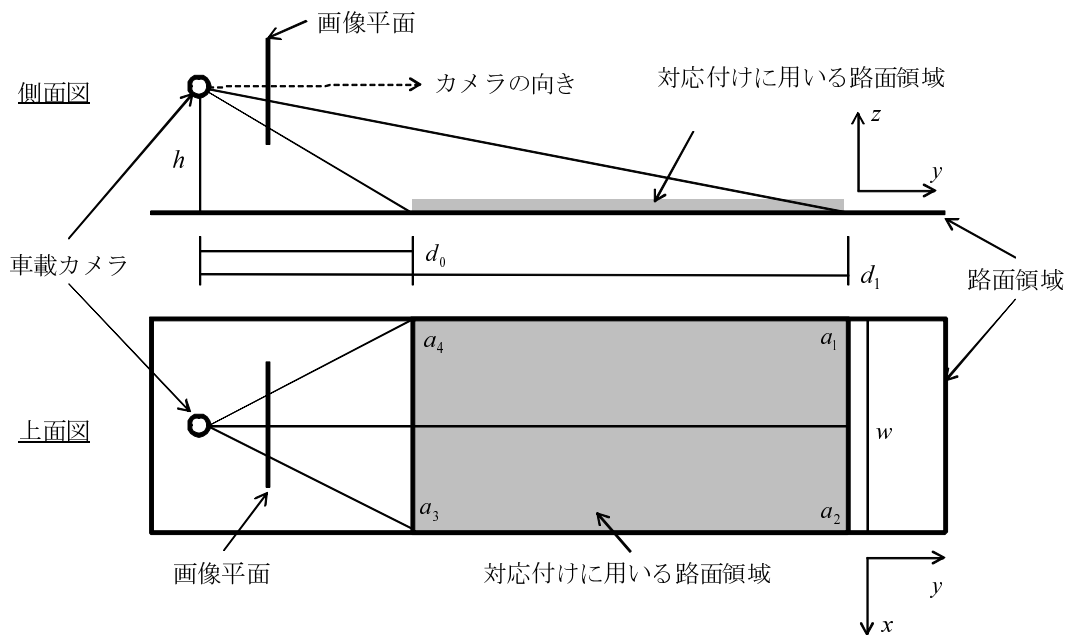


図 3.6 対応付けに用いる路面領域

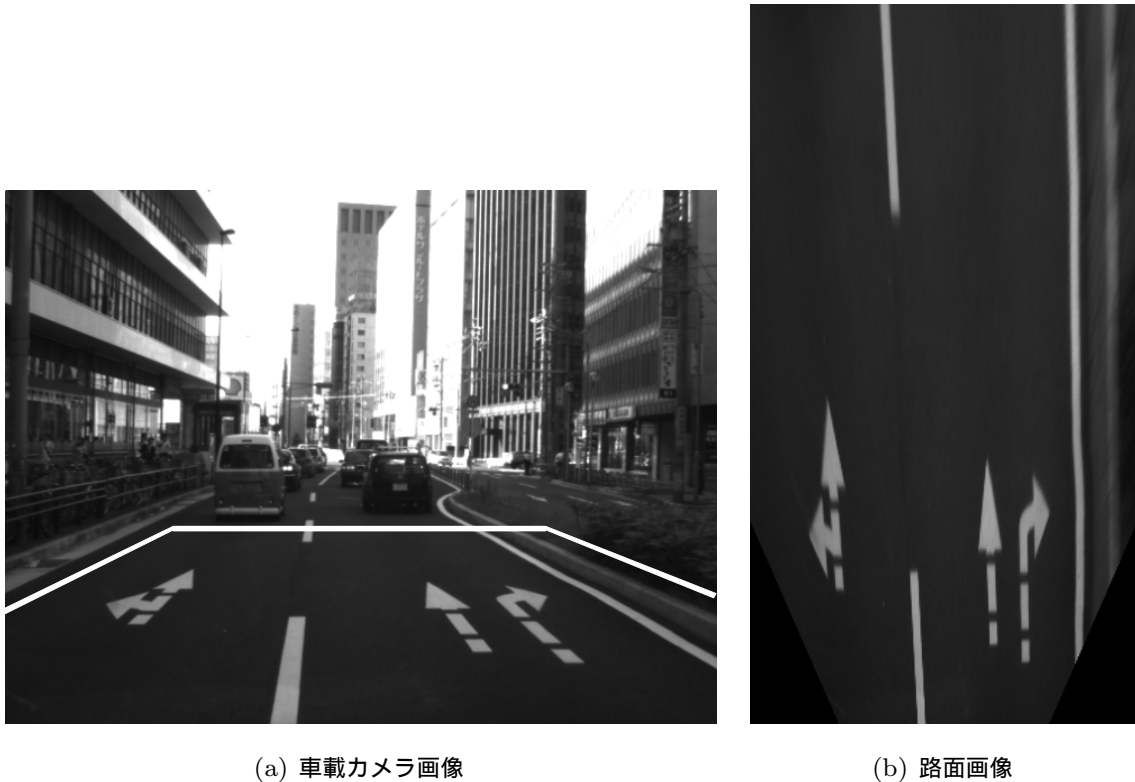


図 3.7 対応付けに用いる路面領域

ここで、 C_{in} はカメラの内部行列、 C_{out} は外部行列を表す。また、カメラ内部パラメータとして焦点距離 f_x, f_y [pixel]、画角 z [rad] を用いる。T を用いることで、図 3.6 中の $a_1 \sim a_4$ から図 3.5 中の $a'_1 \sim a'_4$ を得ることができる。

3.2.3 路面画像

車載カメラ画像は空撮画像と、路面に対する撮影角度が大きく異なるため、このまま対応付けることは難しい。このため、車載カメラ画像（図 3.7(a)）中の路面領域を仮想的に俯瞰した路面画像（図 3.7(b)）に変換することで、空撮画像の見た目に近づける。

路面を平面と仮定し、平面射影変換行列 P を用いて車載カメラ画像中の路面領域を路面画像に変換する。 P は、次式で表される形式の 3×3 正方行列である。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

このとき、車載カメラ画像中の座標 (x, y) と路面画像中の座標 (x', y') は以下の関係と

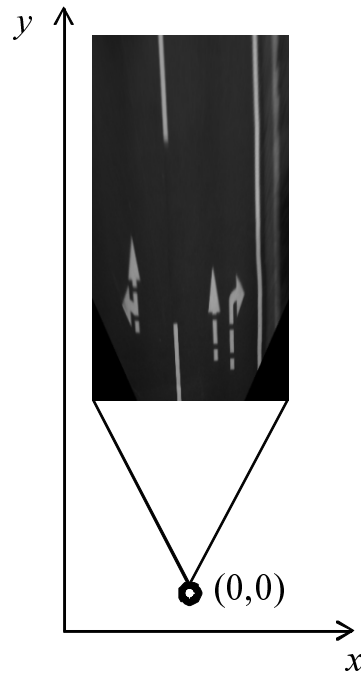


図 3.8 路面画像の座標空間

なる．

$$x' = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + 1} \quad (3.3)$$

$$y' = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + 1} \quad (3.4)$$

P は，両画像中の 4 点以上の対応点から求めることができる [104, 105]．このため，前節で求めた車載カメラ画像中の領域 $a'_1 \sim a'_4$ と，路面画像の端点を対応点とすることで求める．このとき，図 3.8 に示すように，カメラ位置を原点とした路面画像の座標空間を定義する．これは図 3.6 に示す車両モデルを上面から見た座標空間に等しい．

3.2.4 路面画像と環境地図との対応関係

図 3.9 に示すように，時刻 t の路面画像を空撮画像上の領域 \mathcal{R}_t に変換する平面射影変換行列を A_t とする．路面画像と空撮画像中の路面は互いに平面同士であると仮定する．空撮画像中の自転車位置 $\mathbf{p}_t = (x_t, y_t)$ は，路面画像中の原点 $(0, 0)$ を式 3.3，式 3.4 により変換することで求める．

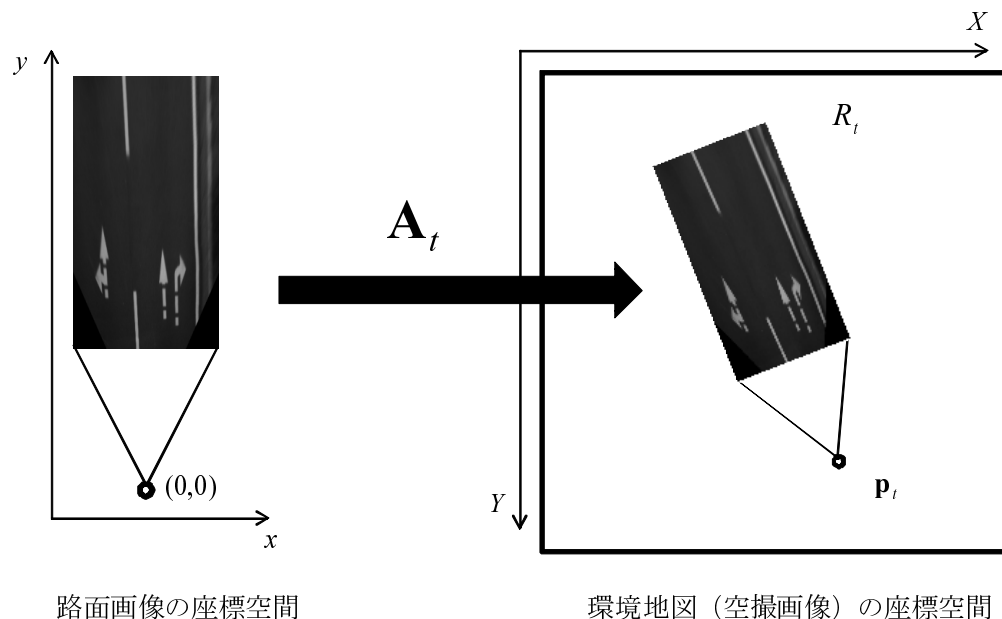


図 3.9 路面画像の座標空間と環境地図の座標空間の対応関係

車両の運動は並進および回転であるため，路面画像と R_t は本来剛体変換である．しかし，本論文では空撮画像が歪みを含んでいることを考慮し，平面射影変換モデルを用いる．

3.3 空撮画像からの環境地図構築

提案手法では，空撮画像中の路面標示から特徴点を抽出することで環境地図を構築する．図 3.10 に構築した環境地図の例を示す．図中の赤丸で示す特徴点が自車位置推定に用いる環境地図となる．以降，提案手法による環境地図構築の流れを示す．

1. 空撮画像から路面領域を切り出す．本研究ではこれを人手により行う．
2. 2 値化処理により，路面上の路面標示を抽出する．
3. Harris オペレータ [106] を適用し，路面標示上のコーナを特徴点として検出する．
4. 路面上に存在しない信号機などから検出された特徴点を人手で削除する．

検出した N 個の特徴点の 2 次元座標を f^i ($i = 1, \dots, N$) と表す．自車位置推定時に特徴点間を高速に対応付けるため，検出した特徴点を k -d tree [107] に格納する．

なお，空撮画像から路面領域を切り出すために，路面の輝度情報や道路間の接続情報を利用する手法が提案されている [108]．このような手法を利用することにより，人手によ



図 3.10 環境地図の例：自転車位置推定に用いる特徴点を赤丸で示す。

る切り出しコストを低減することができる。

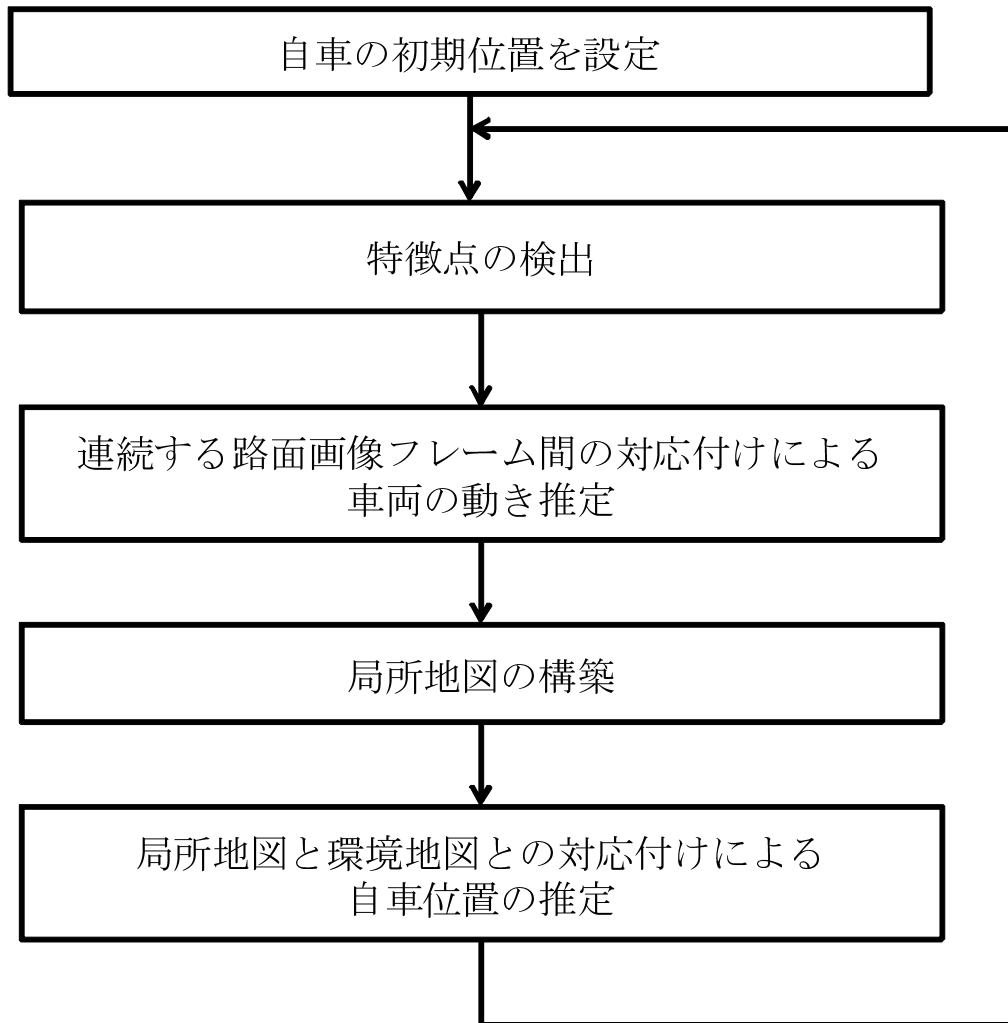


図 3.11 自転車位置推定の流れ

3.4 自転車位置推定

本節では、提案手法による自転車位置推定について述べる。

3.4.1 手法の流れ

自転車位置推定手法の流れを図 3.11 に示す。ここでは、時刻 t における自転車位置 p_t および A_t を推定する流れについて述べる。提案手法では、逐次的に p_t を推定するため、前時刻 $t-1$ の結果 A_{t-1} が得られているものとする。

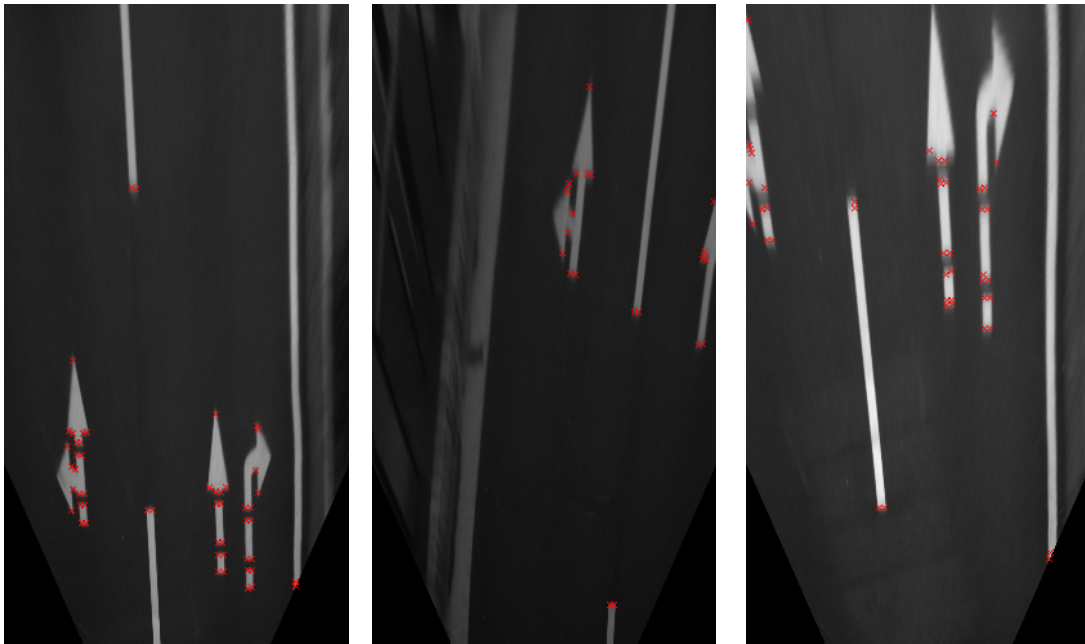
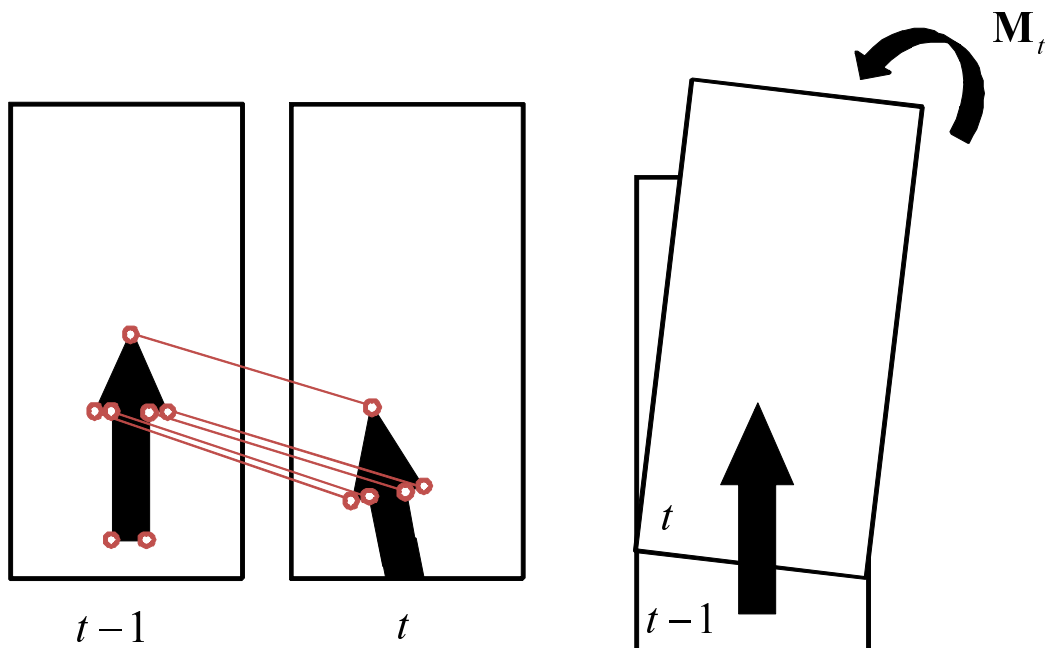


図 3.12 路面画像から検出した特徴点の例：×印で検出した特徴点を示す。

時刻 t における処理の流れを述べる．はじめに，車載カメラ画像を路面画像に変換した上で特徴点を検出する．そして，連続する時刻の路面画像間を対応付けることにより自転車の動きを推定する．この動き推定の結果を用いて，過去の時刻の路面画像から検出した特徴点を統合することで，局所的な地図を構築する．そして，局所地図と環境地図を対応付けることによって，最終的な自転車位置を求める．なお，初期時刻 t_0 における対応付けは与えられているものとする．また，ある時刻における路面画像のことを本論文中では路面画像フレームまたは単にフレームと呼ぶ．

3.4.2 特徴点検出

車載カメラ画像を路面画像に変換した上で特徴点を検出する．特徴点検出は環境地図構築の際と同様の手順で，路面標示のコーナを得る．はじめに，2 値化処理により路面標示領域を抽出する．次に，Harris オペレータを適用することで特徴点を検出する．時刻 t において検出した N_t 個の特徴点を路面画像の座標空間中の位置 \mathbf{g}_t^i ($i = 1, \dots, N_t$) と表す．図 3.12 に検出した特徴点の例を示す．



(a) 連続するフレーム間の対応点：フレーム間で対応する特徴点を線分で示す。

(b) 対応付け結果

図 3.13 自車の動き推定

3.4.3 自車の動き推定

図 3.13(a) に示すように、連続する路面画像フレームの特徴点を対応付けることにより、自車の動きを推定する。自車の動きは、図 3.13(b) に示すように、時刻 t の路面画像を時刻 $t-1$ の路面画像の座標空間に変換する平面射影変換行列 M_t で表す。特徴点の対応付けは、図 3.13(a) に示すように、現在時刻の特徴点 g_t^i に対して、直前の時刻の路面画像中の特徴点 $\{g_{t-1}\}$ のうち、互いの距離がしきい値以下である、かつ各特徴点周辺から算出した輝度値の平均 2 乗誤差が最小となるものを選択することで行う。得られた M 個の対応点を (g_{t-1}^j, g_t^j) ($j = 1, \dots, M$) と表す。そして、これらの対応点から定義する以下の目標関数を最小化することで、 M_t を求める。

$$E(M_t) = \sum_j^M \|g_{t-1}^j - M_t g_t^j\|^2 \quad (3.5)$$

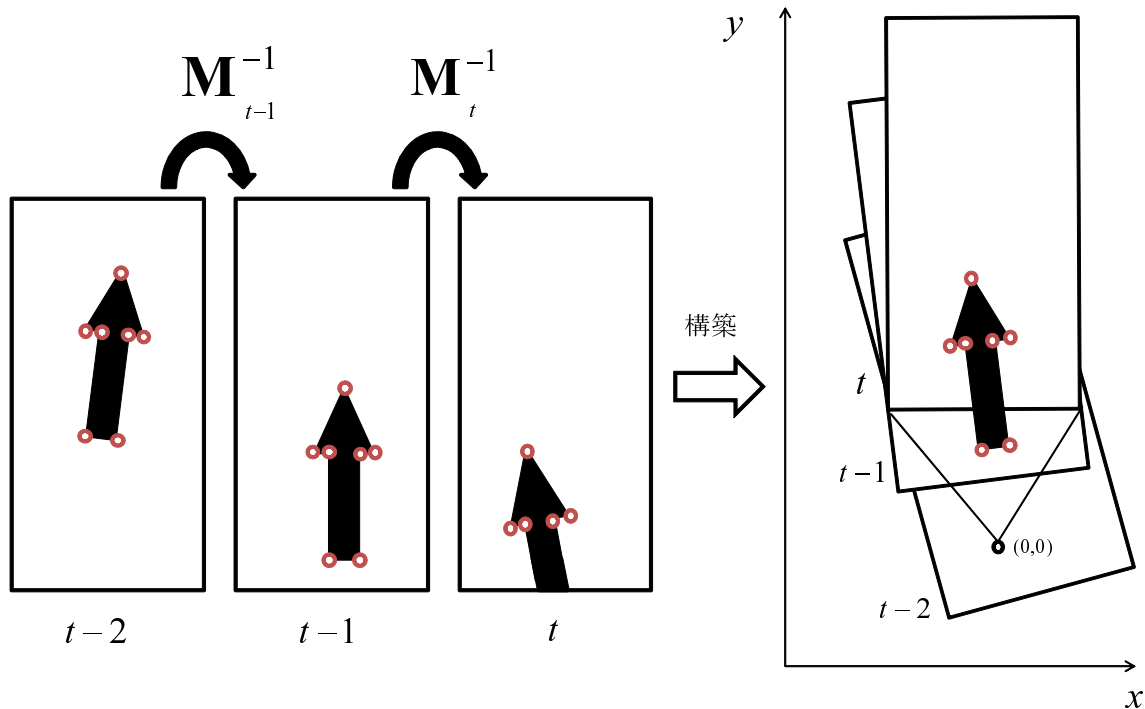


図 3.14 局所地図：時刻 t の自転車位置を基準として構築する．

この最小化は，最急降下法によって行う．また，最小化を行う際の初期値 $M_t^{(0)}$ として，前時刻の自転車の動き M_{t-1} を与える．

このとき， M_t は対応点を用いて解析的に解くこともできる．しかし，対応点が路面画像中に偏って存在する場合， M_t の推定精度が大きく低下する．このため，提案手法では最小化手法により， M_t を求める．

3.4.4 局所地図の構築

自転車の動き推定の結果を用いて，図 3.14 に示すように，複数時刻の特徴点を統合することで局所地図を構築する．局所地図には，時刻 $t - (F - 1)$ から現在時刻 t までの F 枚の路面画像から検出した特徴点を用いる．自転車の動き推定により求めた M_t を用いて，各時刻 t' ($t - (F - 1) \leq t' < t$) の特徴点 $g_{t'}$ を現在時刻 t の路面画像空間における座標 $\hat{g}_{t'}$ に変換する平面射影変換行列 G を次式で求める．

$$G = M_t^{-1} \cdots M_{t'+1}^{-1} \quad (3.6)$$

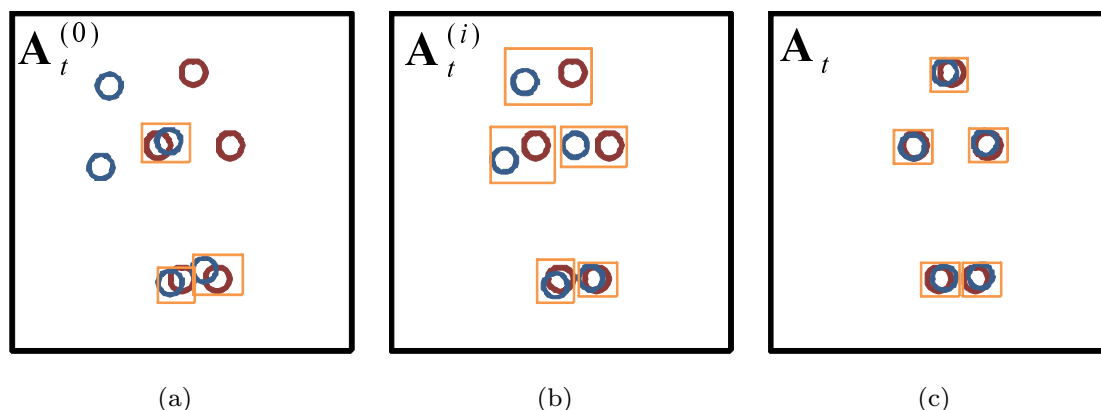


図 3.15 局所地図と環境地図の対応付け：赤い点は環境地図中の特徴点，青い点は局所地図中の特徴点を示す．橙の枠で囲まれている特徴点は距離が最小かつしきい値以下であるため，対応付いていることを示す．ICP による繰り返し回数が増えるほど高精度に対応付けられる．

これによって得られた $\hat{g}_{t'}$ に，現在時刻の特徴点 g_t を加える．このとき，連続するフレームで対応付いた特徴点は，局所空間では同じ位置に存在すると考えられる．このため，互いの Euclid 距離がしきい値未満の特徴点は同一の特徴点として統合する．最後に得られた K 個の特徴点を \bar{g}_t^k ($k = 1, \dots, K$) とする．

なお，実装上は KLT Tracker [109] などによって特徴点を追跡することで，効率的に局所地図を構築することができる．

3.4.5 環境地図との対応付け

局所地図と環境地図を対応付けることにより A_t を求める．対応付けには ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム [50] を用いる．ICP は特徴点間の対応付けを行いながら，対応する特徴点間の距離の総和を最小とする変換パラメータを求めるものである．本研究のように，2 つの特徴点群が与えられたとき，それらの間の幾何関係を求めるために用いられる．ここでは，図 3.15 に示すように， $A_t^{(0)}$ を初期値として与え，特徴点間の対応付けと A_t の更新を交互に繰り返す．特徴点間の対応付けは，局所地図の特徴点 \bar{g}_t^k に対して，距離 $\|f^i - A_t \bar{g}_t^k\|^2$ を最小とする環境地図の特徴点 f^i を選択することにより行う．ただし，この距離がしきい値以上である場合，外れ値として対応点にしない．得られた L 個の対応点を (\hat{g}_t^l, f^l) ($l = 1, \dots, L$) と表す．そして，以下の目標関数を最小化する

\mathbf{A}_t を求める .

$$E(\mathbf{A}_t) = \sum_l^L \|\mathbf{f}^l - \mathbf{A}_t \hat{\mathbf{g}}_t^l\|^2 \quad (3.7)$$

この最小化は RANSAC [110] を用いた最急降下法によって行う . \mathbf{A}_t を更新するたびに , 特徴点を対応付け直す . また , 初期値 $\mathbf{A}_t^{(0)}$ は次式で求める .

$$\mathbf{A}_t^{(0)} = \mathbf{A}_{t-1} \mathbf{M}_t \quad (3.8)$$

以上の処理を時系列に繰り返すことによって , 系列全体の自車位置を推定する .

3.5 実験

本実験では , 実際の車載カメラ画像を用いて , 交差点付近の区間を対象として自車位置の推定を行った .

3.5.1 実験条件

本実験に用いた車載カメラ画像の解像度は 640×480 pixels , フレームレートは 30 fps であった . 実験には表 3.1 に詳細を示す 4 系列を用いた . 各車載カメラ画像系列は , 走行軌跡や影の有無などの条件が異なるものを用いた . また , 車載カメラの設置位置は地平面から高さ 1.6 m , 画角は約 36° , 焦点距離は車載カメラの解像度から求めた . 対応付けに用いる車両前方の路面領域を $d_0 = 5$ m , $d_1 = 30$ m , $w = 6$ m とした . 局所地図を構築するフレーム数は $100 (=F)$ とした . これは予備実験により決定した .

空撮画像は , 解像度が約 3 cm/pixel であり , 車載カメラ画像系列に対応する路面領域が撮影されているものを用いた . 表 3.1 に , 各系列で用いた空撮画像の図番号を示し , 空撮画像中に走行経路を重畳した . 本研究では , 空撮画像中の路面に遮蔽は含まないものと仮定するが , 実際に遮蔽がない空撮画像を得ることは難しい . このため , 本実験では遮蔽が存在する箇所に関しては , 人手により特徴点を付与した .

表 3.1 実験に用いた走行区間の情報

系列番号	フレーム数	区間長 [m]	車載カメラ画像系列	空撮画像
1	500	約 160	図 3.16 (p.49)	図 3.17 (p.49)
2	330	約 80	図 3.18 (p.50)	図 3.19 (p.50)
3	600	約 100	図 3.20 (p.51)	図 3.21 (p.51)
4	270	約 100	図 3.22 (p.52)	図 3.23 (p.52)

評価には、以下に示す対応付け成功フレーム数および推定誤差の平均・標準偏差を用いた。

対応付け成功フレーム数

あるフレームにおいて、路面画像と環境地図の対応付けに誤ると、その後のフレームで対応付けの誤差が増大し、環境地図との対応付けが不可能になることがある。このようなフレームに対して人手で対応付けし直した上で、以降の処理を続けた。人手による対応付けをしなかったフレームの数を対応付け成功フレームとみなし、その数を計数することで評価に用いる。ただし、初期フレームは対応付けに成功しているものとして扱う。

推定誤差の平均・標準偏差

参照値と推定値の誤差の平均と標準偏差を評価に用いる。これらの値は対応付け成功フレームのみから算出した。参照値として高精度自転車位置推定システム (Applanix 社, POSLV) [111] の計測値を空撮画像上へプロットしたものを利用した。このシステムは、推定誤差 0.1 m 以下と非常に高精度な計測が可能であり、周辺の建物などによる計測への影響が極めて小さい。しかし、初期設定が煩雑であり、かつ非常に高価であるため、現状での一般車両への搭載は困難である。

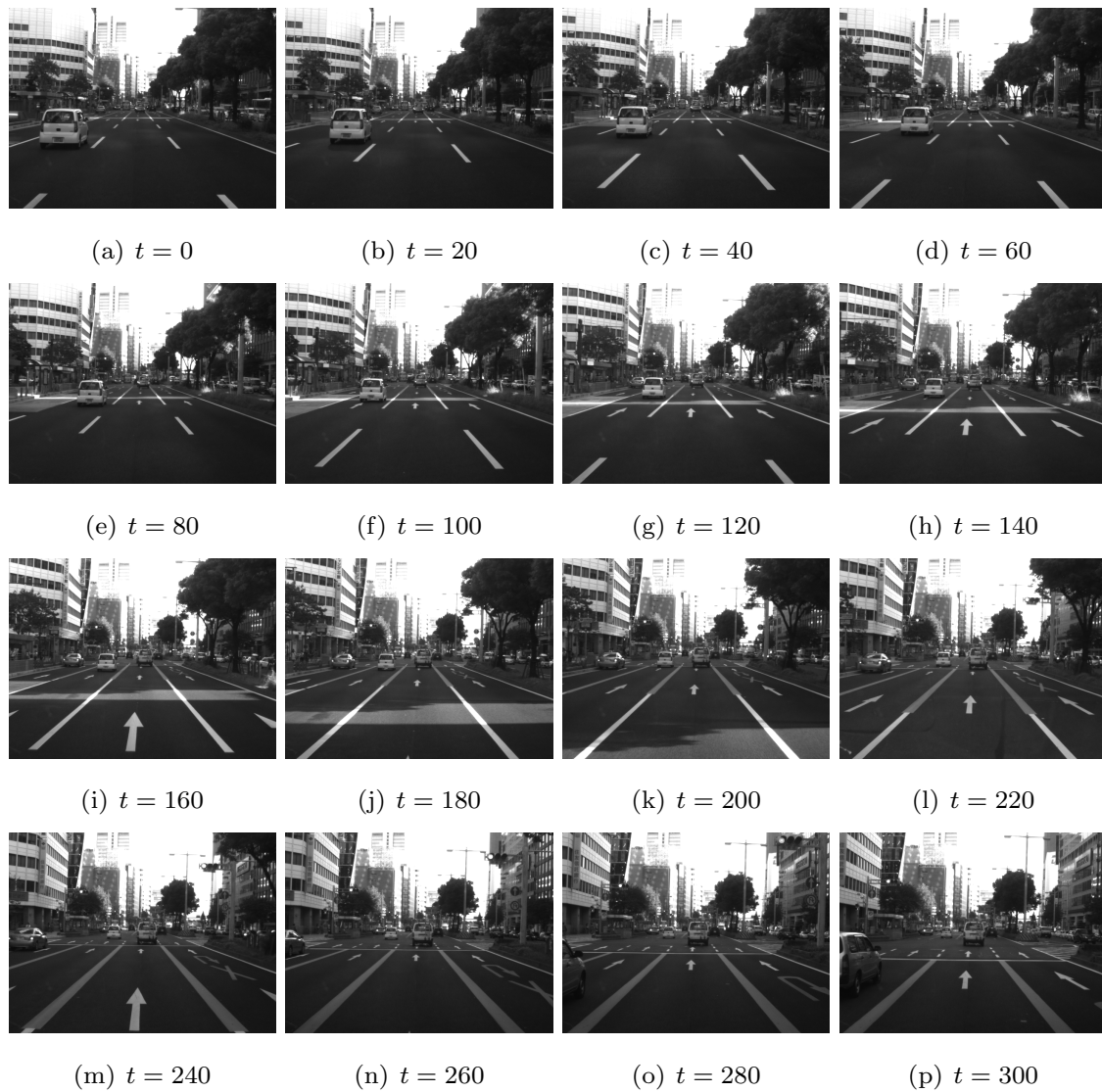


図 3.16 車載カメラ画像 (系列 1): 明瞭な路面標示が存在する直進の経路 .

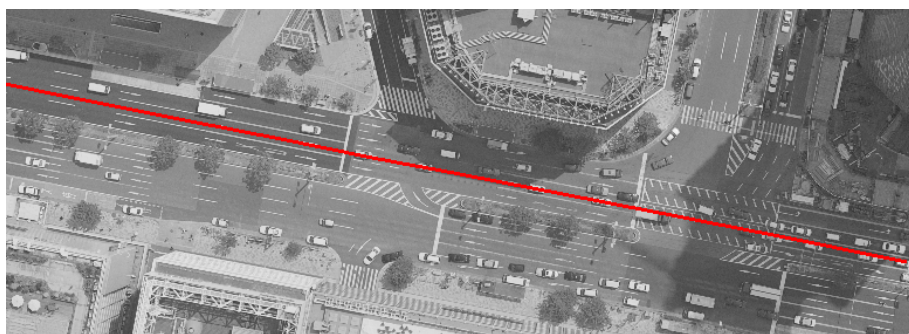


図 3.17 空撮画像 (系列 1): 走行経路を赤線で示す .

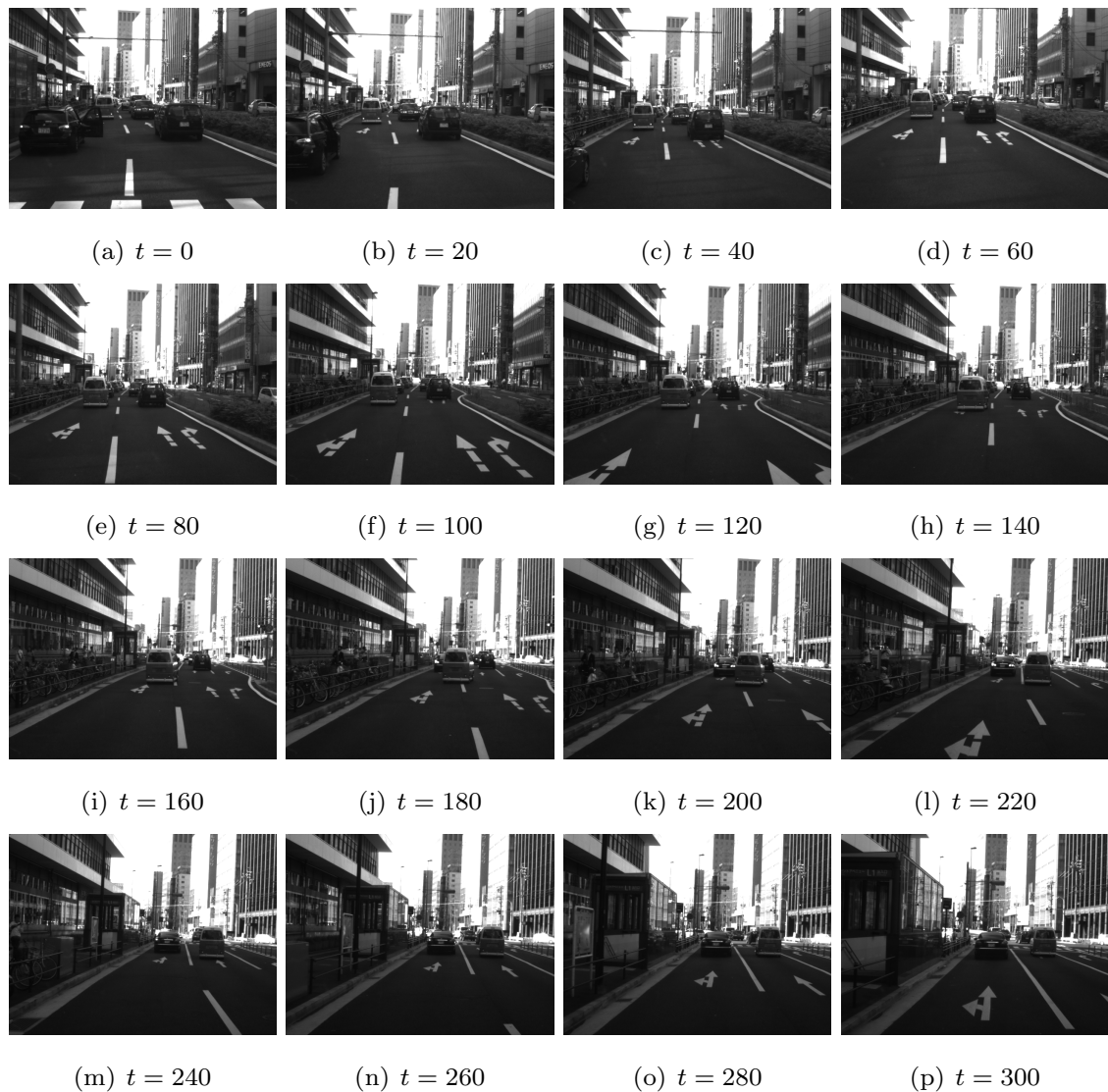


図 3.18 車載カメラ画像 (系列 2) 車線変更を行うことにより, 大きな姿勢変動を含む経路 .

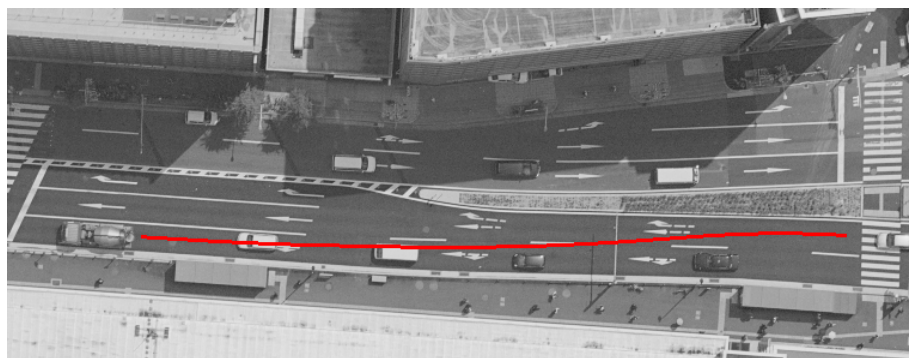


図 3.19 空撮画像 (系列 2): 走行経路を赤線で示す .



図 3.20 車載カメラ画像 (系列 3): 路面に強い影が発生する経路. また, 駐車車両を回避するための車線変更も含む.

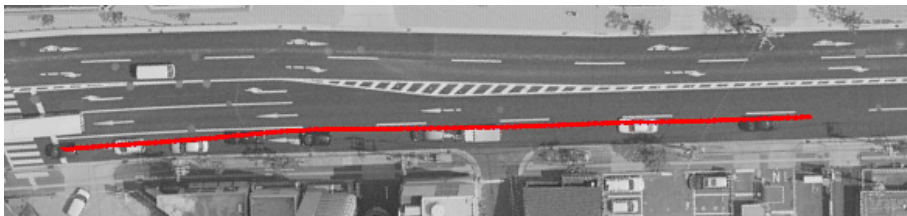


図 3.21 空撮画像 (系列 3): 走行経路を赤線で示す.

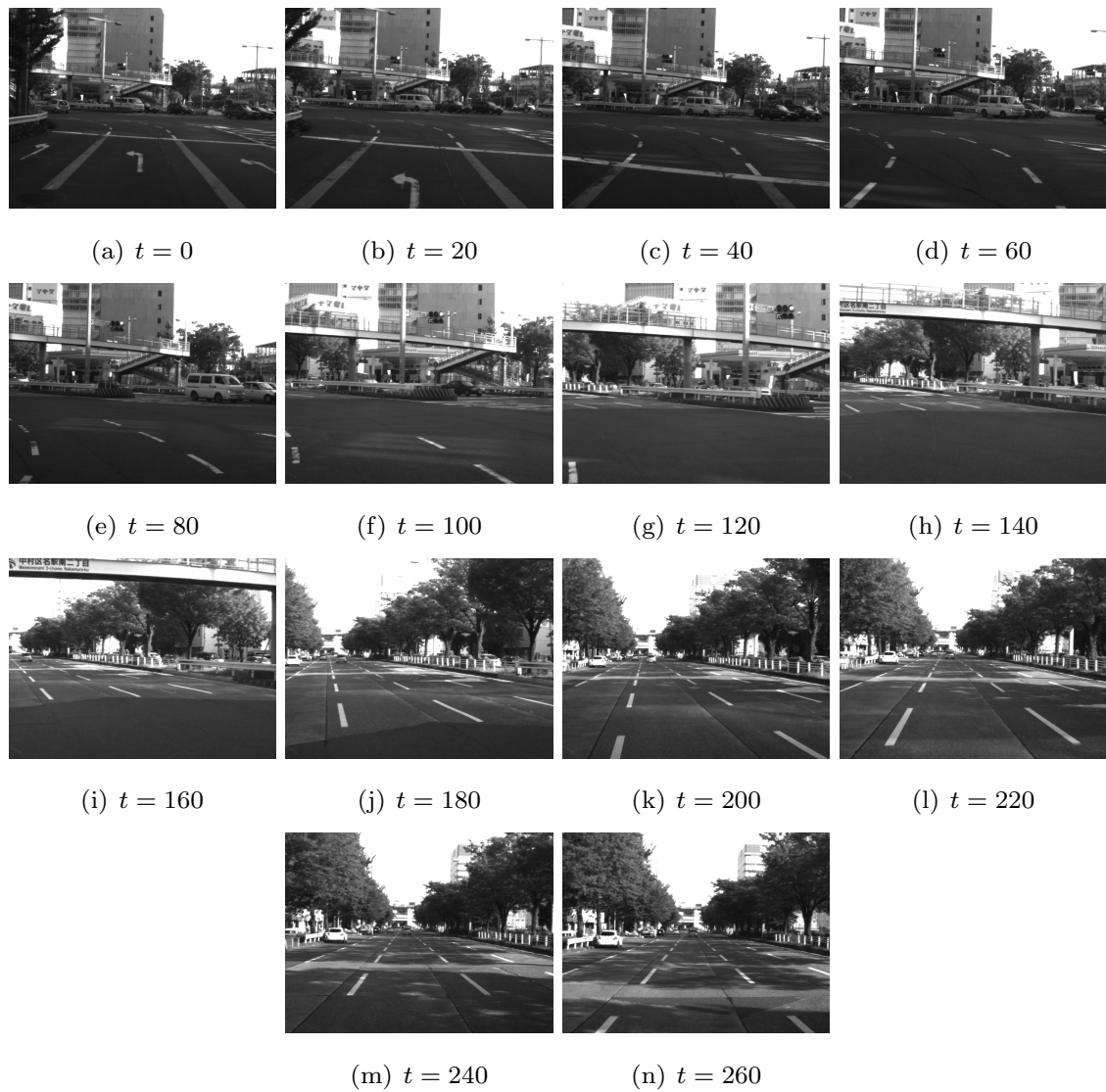


図 3.22 車載カメラ画像 (系列 4): 交差点内のカーブに沿って曲る経路 .

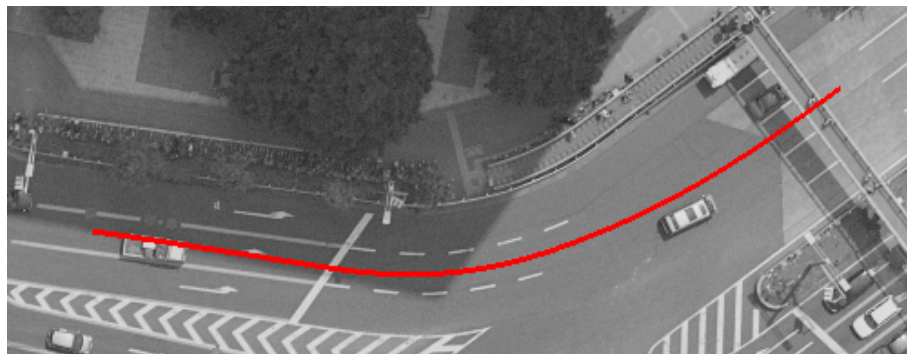


図 3.23 空撮画像 (系列 4): 走行経路を赤線で示す .

表 3.2 自転車位置推定の実験結果

系列	提案手法			比較手法		
	対応付け成功フレーム数 (/ 全フレーム数)	平均 [cm]	位置推定精度 標準偏差 [cm]	推定可能フレーム数 (/ 全フレーム数)	平均 [cm]	位置推定精度 標準偏差 [cm]
1	500 (/500)	22	20	300 (/300)	56	34
2	330 (/330)	46	51	297 (/330)	78	55
3	315 (/600)	51	66	274 (/300)	72	52
4	80 (/300)	32	28	32 (/270)	58	70

3.5.2 実験結果と考察

表 3.2 に実験結果を示す．比較手法として，単一フレームのみを用いて路面画像と空撮画像を対応付ける手法を用いた．この手法は，同様に空撮画像を用いる Pink ら [93] の手法に基づく．

表 3.2 より，全ての系列に対して提案手法が比較手法に対して性能が向上していることを確認した．本実験では提案手法，比較手法ともに，対応付けが誤った場合は人手により対応付け直したため，自転車位置の推定誤差の平均・標準偏差は一定の範囲内に収まった．一般的な道路の車線幅が 3m とした場合，対応付けが正しく行われているならば，車線の判別（推定誤差が 1.5m 以内）を行うためには十分な精度であった．

各系列に対する実験結果と考察

系列 1 は，直進かつ路面標示が多く存在する経路であった．提案手法，比較手法ともに全フレームで自転車位置を推定することができ，推定精度も高かった．これは，系列 1 では大きな車両の動きの変化がないことに加えて，対応付けに十分な路面標示が得られることが要因である．また，系列 1 は破線の区画線が続く経路であったため，比較手法ではフレームごとの推定精度にばらつきが出た．これに対して，提案手法では局所地図を用いたため，自転車位置を安定して求めることができた．

系列 2 では，系列 1 と同様に直進の道路であるが，途中で車線変更を行う区間 ($t = 80 \sim 100$) を含む．このような区間では車両の姿勢が大きく変動する．特に車両のピッチの変動により，路面画像が大きく変化する．このような場合，比較手法では環境地図と対応付けに用いる特徴点の数が十分でなかったことが，自転車位置の推定精度が低下した要因だと考えられる．比較手法では一部のフレームで対応付けの失敗が起こった．これに対して，提案手法で局所地図を用いることで，このような姿勢変動にも対応できたと考えられる．また，系列 2 は路面標示がまばらに存在する系列であった．このことに対して，提案手法が比較手法の推定性能を上回っていたことから，対応付けに利用できる特徴点が少ない場合に対する提案手法の有効性を確認した．

系列 3 では，日光の影響により路面に強い影が存在した．このような場合，影の境界に特徴点が検出されるため，環境地図との対応付けが難しくなる．しかし，このような影が存在する場合であっても，路面画像から環境地図中の特徴点を包含していれば，対応付けの際に外れ値を除去することにより，ある程度の対応付けは可能であると考えられる．ま

た，影を除去した上で特徴点を検出することも考えられる．同様に，雨天や夜などに対する提案手法の性能を評価する必要がある．

系列 4 では，提案手法，比較手法ともに多くのフレームで対応付けができなかった．これは交差点内の路面標示が少ないため，局所地図を用いても対応できなかったと考えられる．また，カーブを曲がる際の車両の動きが大きいため，自車の動きを推定することが困難になったことも原因として考えられる．このような環境に対しては，提案手法で用いた路面上の特徴点のみで対応することは難しい．このため，車両周辺の異なる情報や，GPS 測位，自律航法と併用することが必要となる．

局所地図の利用

提案手法では複数時刻の特徴点を統合し，局所地図を構築した上で空撮画像との対応付けを行った．これにより，特徴点の位置を安定させるとともに，広範囲の特徴点を対応付けに利用することができ，比較手法からの性能向上が見られた．一方，局所地図の構築には自車の動き推定の結果を用いているため，多くのフレームを用いることで累積誤差が発生する．このため，適切なフレーム数を選ぶ必要がある．局所地図を構築するフレーム数を変化させて予備実験を行った結果， $F = 100$ 程度で推定精度が最大となり，それ以上のフレーム数を用いた場合，推定精度が低下した．

処理速度

実験には CPU: Intel Core 2 Quad 2.83 GHz メモリ: 8 MB の計算機を用いた．処理速度は 1 フレームあたり平均 60 ms であった．

実利用に向けて

提案手法は，路面標示が存在する交差点付近の区間を対象としたため，このような区間では高精度な自車位置を求めることができる．一方で，路面標示が存在しない区間では，自車位置を推定することが困難となる．また，路面標示が存在する区間においても，誤対応により推定できない場合に，人手を介さなければなかった．実際に利用する場合は，継続して位置を推定する必要があるため，GPS や自律航法などと組み合わせることで，路面標示の対応付けが可能な位置では提案手法により高精度な自車位置を求め，それ以外の位置ではその他の手法を用いる必要がある．

3.6 おわりに

本章では、第2章で述べたカーナビゲーションに必要な要素技術のうち、「1. 自車位置推定」に関する研究を行った。高精度な自車位置を求めることは、カーナビゲーションにおける基本課題である。本研究は、特に交差点付近で高精度な自車位置を推定することを目的としたものであった。本研究では、路面に存在する路面標示が空撮画像と車載カメラ画像の両方に共通して撮影されていることに着目し、空撮画像を環境地図として用いた。そして、この環境地図に対して車載カメラを対応付けることにより高精度な自車位置を推定する手法を提案した。提案手法では、路面標示が少ない区間に対応するため、複数時刻の路面画像を統合した局所地図を用いた。市街地の交差点付近における4つの車載カメラ画像系列を対象とした実験を行い、提案手法による自車位置推定性能の向上を確認した。

本論文では、環境地図の構築に用いる空撮画像が、対応付けに十分なほど高解像度かつ道路面の遮蔽が少ないという高品質であることを前提とした。しかし、実際に得られる空撮画像は多くの場合、低解像度であったり、遮蔽が含まれていたりする。また、路面は時間の経過とともに変化するため、定期的な更新処理が必要となる。次章ではこのような場合に対応するため、車載カメラ画像から路面画像の地図を構築する方法を考える。