

平成 20 年度 修士論文

複比を用いた複数車線検出処理
Multi-Lane Detection using Cross Ratio

指導教授 渡辺 裕 教授

2009 年 3 月

早稲田大学大学院 国際情報通信研究科
国際情報通信学専攻

4207A145-3

谷 誠 一

Seiichi TANI

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	車載カメラを用いた車線検出技術の現状および関連研究	4
2.1	まえがき	4
2.2	車線検出に用いられる基本技術	4
2.2.1	Hough変換	4
2.2.2	キャニーフィルタ	5
2.3	関連研究	5
2.3.1	車線特徴の抽出方法	5
2.3.2	単眼カメラを使用した車線検出	7
2.3.3	ステレオカメラを用いた車線検出	7
2.4	車線検出技術の現状	8
2.5	むすび	9
第3章	複比を用いた車線検出手法	10
3.1	まえがき	10
3.2	複比の性質	10
3.3	複比を用いた車線検出	10
3.3.1	複比を用いたエッジ検出	11
3.3.2	複比を用いた車線検出処理	11
3.3.3	従来手法の確認実験	14
3.3.4	従来手法の問題点	14
3.4	むすび	18
第4章	複比を用いた複数車線検出手法	19
4.1	まえがき	19
4.2	複比を用いた複数車線検出処理	19
4.2.1	複比の画像歪みへの耐性	19
4.2.2	車線ごと複比の処理	20

4.2.3	角度を用いた直線群の限定処理	22
4.3	むすび	23
第5章	実験による提案手法の評価	24
5.1	まえがき	24
5.2	評価方法	24
5.3	実験・評価	26
5.3.1	シミュレーション条件	26
5.3.2	提案手法の検出結果	26
5.3.3	検出結果の評価・考察	28
5.4	むすび	28
第6章	結論	34
6.1	総括	34
6.2	今後の課題	35
6.2.1	カーブのある道路環境に対する検出	35
6.2.2	評価手法の確立	35
6.2.3	道路環境による車線特徴の検出性能	35
	謝辞	36
	参考文献	37
	図一覧	40
	表一覧	41
	研究業績	42

第1章

序論

1.1 研究の背景

近年、様々な分野にコンピュータビジョン技術が応用されており、カメラなどの画像センサからの情報を解析する研究が盛んに行われている。現在、計画が推し進められているITS(高度道路交通システム)も同様にコンピュータビジョンを用いることで走行環境の把握を可能にし、事故防止やより快適な運転環境の提供など運転者支援システムの向上につながると考えられている。

社会においても、自動車の安全運転システム技術の発達により、さまざまな形で安全を目的とした技術を搭載した自動車が市販されるようになり、我々にとって身近な存在となっている。現在市販されている自動車にも多くのセンサが用いられており、それは高級車のものだけではなくなっている。カーナビゲーションの装着率も高くなり、駐車補助システムや巻き込み防止などに効果があるアラウンドビューモニタ⁽¹⁾などディスプレイから自車両の周辺状況を知るシステムも多く展開されている。

一方、研究分野では自動運転に対する研究も盛んに行われており、道路などのインフラ上にチップ等を埋め込みを行うことや各種センサを自動車の搭載することで実現のための検討がされている。特にコンピュータビジョン技術は、自動車の人間の視覚としての機能を持たせようとする分野においても期待されている。視覚機能を持たせることで危険察知などの運転者支援システム^(2, 3, 4)や自律走行システム⁽⁵⁾に有用であると考えられている。

こうした技術面においてカメラからの情報はとても重要視されている。自動車の搭載されるカメラは大きく自動車の内部と外部を撮影するものがある。内部を撮影するものの中には、例えば自動車の中からドライバーを撮影し、居眠り検知などをおこない、ドライバーに注意を促すというシステムも登場している。対して外部を撮影するものは上記の駐車補助以外にも、道路上の情報を得ることを目的とされることも多い⁽⁴⁾。それは障害物や歩行者、標識、他車両そして白線などさまざまなものが対象となっている。

近年の車両走行環境認識技術では、手法・アルゴリズムの安定化や車載用ハードウェアの高性能化に伴い、より複雑な走行環境である市街地の一般道路の環境認識をターゲットとした手法が多くなっている。環境認識の中でも車線検出は車両の位置推定や危険判断などの情報を得るための重要な技術である。

車載カメラで前方道路を撮影し、車線を検出する技術においては、高速道路のような画像中の道路構造が単純な道路に対して車線を検出することは容易であるが、より複雑な道路構造をもつ市街地での検出は困難である。加えて、走行車線だけでなく、隣車線など複数の車線を検出においても課題の余地があると思われる。また、車線検出処理において、検出結果の評価方法も課題の一つである。車線検出結果は主に主観的評価により評価されるものが多く、客観的評価においても、独自の方法で誤検出の確率を測定するにとどまっていた。

そこで、本研究では車載カメラから前方を撮影した静止道路画像の車線特徴に着目し、車線検出に重点を置く。そして、車線特徴を利用した複比を用いることにより複数の車線を検出する手法を提案する。さらに提案手法の検出結果に対して精度を示す定量的評価を行う。

数井らにより提案された車線検出手法⁽⁶⁾は、複比を車線特徴に用いた手法である。複比の性質は画像の端部分に現れる隣の車線にも適用できる。加えて、Hough変換から検出される直線群に対して角度の制限を用いることで、車載カメラ画像上の車線の特徴を抽出できるという点で有効であると考えた。

1.2 本研究の目的

本研究では、車載カメラから前方を撮影した静止道路画像の車線特徴に着目し、車線検出に重点をおき、複比を車線特徴に利用する。さらに複比を車線ごとに用いることにより複数の車線を検出する手法を提案する。複比を用いることでレーンマーキングが他車両により隠蔽され、わずかに画像に現われているときの車線候補のエッジ検出に対してロバスト性がある。車線候補のエッジは複比とエッジの方向を併用することにより検出される。そして、車線ごとに特徴量を計算し、複数車線のロバストな検出を実現する。さらに検出結果に対して定量的評価を示し、精度の実験から有効性の定量化を目指す。

1.3 本論文の構成

以下に本章以降の構成を示す。

第1章 本章であり，研究の背景およびその目的について述べている．

第2章 車載カメラを用いた道路環境把握技術における車線検出技術の現状について述べる．まず，車線検出手法によく用いられる既存技術について説明する．車載カメラで撮影する際の様々な環境下における車線特徴について説明する．そして，単眼カメラとステレオカメラの2種類のカメラ使用について，それぞれカメラを用いた車線検出技術の研究概要について述べる．最後に，近年の研究に基づき，車線検出技術の現状をまとめる．

第3章 従来の車線検出に関連する一手法である複比を用いた研究について説明する．まず，複比の説明を行い，複比が道路面を撮影した画像に適用可能であることについて述べる．次に，従来の複比を用いた車線検出手法について説明する．そして，上記の手法において実験を行い，その問題点について述べる．最後に，複数車線検出に対する必要性を述べる．

第4章 提案手法として，複比を用いた複数車線検出手法について提案し，その概要および詳細を述べる．まず，カメラのレンズ歪みに対して複比を用いた際の耐性を評価し，考察を行う．次に，複数の車線検出に対応するために車線ごとの複比の適用について説明する．最後に，Hough変換による直線群に対する角度の限定処理について説明し，その利点を述べる．

第5章 実験により提案手法による複数車線検出の精度についての評価・検討を行う．まず，提案手法の実験を行い，その結果を画像を用いて示す．次に，評価手法が確立されていないことに触れ，本研究で行った評価方法について説明を行う．そして，実験画像，評価値を用いて手法の有効性を示す．最後に，評価方法，評価値に対するの考察を行う．

第6章 本研究の総括と今後の課題について述べる．

第2章

車載カメラを用いた車線検出技術の現状および 関連研究

2.1 まえがき

本章では，車載カメラ画像からの車線検出技術の現状について述べる．まず，多くの車線検出手法に基本技術として用いられている Hough 変換とキャニーフィルタについて説明する．そして，車線検出に関するさまざまな関連研究を説明する．

次に，車線検出技術の関連研究について近年の概要を述べる．主に車線特徴の抽出方法に着目し，その違いについて述べる．また，車載カメラの種類について単眼カメラとステレオカメラを用いた車線検出手法にも触れ，それらを用いた関連研究の概要を述べる．

最後に，近年の研究に基づき，車線検出技術の現状をまとめる．

2.2 車線検出に用いられる基本技術

ここでは，車線検出時に多く用いられる Hough 変換と画像からエッジを抽出する際に多く用いられるキャニーフィルタの説明を行う．

2.2.1 Hough 変換

Hough 変換は，2 値画像中の直線，円，任意図形などの抽出を行う有効且つ汎用的な手法として知られている⁽⁷⁾．一般的に直線検出を行う θ - ρ -Hough 変換について述べる．

θ - ρ -Hough 変換では， θ ， ρ をパラメータとする極座標表現である式 (2.1) を用いることにより， x - y 空間から θ - ρ 空間への変換が可能である．

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2.1)$$

x - y 空間で ρ は原点から直線に垂線を引いた時の長さ， θ は x 軸とのなす角をあわらす⁽⁸⁾．例えば，原画像を走査し，ある図形画素 $P_1(x_1, y_1)$ に着目したとき， (x_1, y_1) を式 (2.1) の x ， y に代入することにより θ と ρ の関係式となる．これは θ - ρ 空間で一つの正弦曲線に相当し，ある 1 点 (x_1, y_1) が決まれば θ ， ρ が一義に決まることを意味する．つまり，画像上の直線に

対応するには、2点以上の情報が必要となり、画像上の2点から2つの曲線を描いた場合、その2曲線が交わる点が直線に対応するということになる。

Hough変換は車線検出においてもその有効性が示されている。それは、車載カメラから道路を撮影した画像には直線形状やレーンマーク等による線状の特徴を持っているため、直線のフィッティングの際に非常に有効な手段となる。そのため、Hough変換に限定条件をつける手法やHough変換の前の処理段階で如何に目的とするエッジ等を候補とするかに着目している手法などもあり、様々な手法が提案されている。

2.2.2 キャニーフィルタ

キャニーフィルタは、Cannyが提案したエッジ検出手法⁽⁹⁾である。彼はエッジの検出・局所化・複数応答の最小化を可能にする理想の平滑化フィルタを数学的に検討した。そして、仮定に基づく理想のフィルタが4つの指数項の総和で表されることを示した⁽¹⁰⁾。この最適化されたフィルタは次式のようなガウシアン⁽¹¹⁾の1次微分であらわされることが知られている。

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.2)$$

$$G(x)' = -\frac{x}{\sqrt{2\pi}} \sigma^{-3} e^{-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.3)$$

キャニーフィルタのエッジ検出は強力であり、ある特殊な条件の画像でない限り、とても性能のよいエッジ検出法であることが知られている。キャニーフィルタを施すと図2-1の例のようになる。

2.3 関連研究

車線検出は古くからある技術であり、様々な検討がされてきた。以下に近年行われてきた研究の概要を示す。

2.3.1 車線特徴の抽出方法

車線検出では、車線特徴の抽出が重要な役割を持っており、古くから考察がなされている。そこで、車線検出において車線の特徴をいかに抽出するかという点に着目し、既存手法を紹介する。

安達らは、走行している車線の方向は自動車の進行方向に対してほとんど変化しないと仮定することでパラメータ空間を1次元空間にし、Hough変換により車線を検出する手法⁽¹¹⁾を提案した。彼らはカメラと道路平面との位置・姿勢の関係を世界座標系 (X, Y, Z) で表し、道路平面と画像平面とを一対一対応にすることで自動車の姿勢からの直線検出を可能にした。

KreucherらはLANA(Lane-finding in ANother domAin)と呼ばれる車線検出手法⁽⁵⁾を提案した。彼らは画像内における白線部分の周波数成分の変化に着目した。離散コサイン変

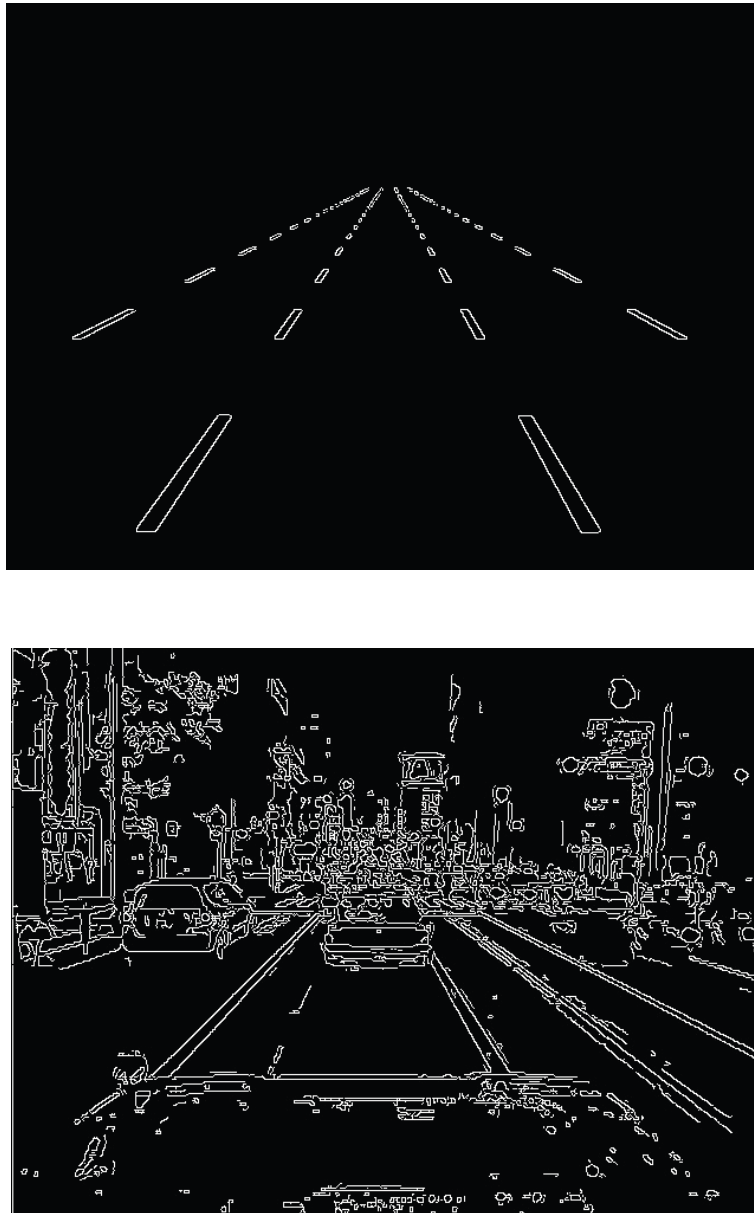


図 2-1: キャニーフィルタ処理画像例

換の係数により車線特徴を抽出し車線検出を行う手法である。

WangらはB-Snake法を用いた車線検出手法⁽¹³⁾を提案した。B-Snake法は、Kassらが提案した動的輪郭法として知られるSnake法⁽¹⁴⁾の派生手法である。B-Snakeにおいて評価関数を最小平均二乗エネルギーの収束させることで検出領域を絞り、検出を行う。B-スプライン曲線を用いることである程度の曲がりのある車線も比較的高速な検出を可能にした。

Chenらは車線を双曲線にあてはめる車線モデルを用いて車線検出⁽¹⁵⁾を提案した。まず、曲率を考慮した双曲線モデルを作成し、実画像の消失点をもとに水平部分の推定を行う。それによりレーンの中心と消失点、水平部分の情報から双曲線のフィッティングを行い、車線を検出する手法である。

Chiuらは色情報を用いた車線検出手法⁽¹⁶⁾を提案した。彼らは、カラー画像から統計的手法を用いてRGB情報のしきい値を決め、検出部分となりそうな領域を選択する。そして、領域ごとに色情報にあてはまる白線の検出を行う。これにより、影や太陽の光のある複雑な環境でも車線の検出を可能にした。

上記に挙げたように、車線特徴抽出には様々な手法が提案されている。主にエッジから得られるものや色情報、DCT成分をもとに応用されているものが多い。また、夜間の検出⁽¹⁷⁾など外部環境の変化に応じて使用する特徴抽出手法に変化が見られる。

2.3.2 単眼カメラを使用した車線検出

古くから車載カメラとして単眼カメラを用いた車線検出手法は研究されており、近年の研究でも様々な提案がされている。

Schreiberらは光の変化のある道路を対象に単眼カメラを用いて車線検出・追跡手法⁽¹⁸⁾を提案した。主にエッジの傾きから車線特徴を抽出し、はじめに画像から消失点を求め、消失点をなす直線群から直線のセグメント化を行う。そして、左右ペアの発見や車線幅の情報を用いることで車線境界を抽出するものである。

他にも多くの車線検出手法に単眼カメラは使用されている。単眼カメラによる車線検出処理は、処理速度の速さや装備の手軽さなどの理由により多くの研究がされている。

2.3.3 ステレオカメラを用いた車線検出

単眼カメラに対し、ステレオカメラを用いた車線検出手法は比較的最近よく使用されるようになった。主な理由として、ハードウェアの機能向上により計算処理が飛躍的に早くなったことが挙げられる。ハードウェアの処理速度が向上したことでステレオカメラの利点を活用できるようになった。例えば、車載カメラにステレオカメラを使用することで3次元空間情報を得ることができる。そのため、画像内で立体領域を認識できるようになり、路地などの白線のない道路において走行領域を検出することができる。こうした仮想3次元空間情報を利用した車線検出手法⁽¹⁹⁾などもある。また、どちらかの画像に検出対象のオクルージョンが発生した場合、2個のカメラの画像から補完することでオクルージョンに強い検出が可能となる。このように、ハードウェアの向上がステレオカメラの効果的利用を後押しし

ている。

例えば、BertozziらはGOLD(Generic Obstacle and Lane Detection)と呼ばれるステレオカメラベースの車線検出手法⁽²⁾を提案した。ステレオカメラを用いて仮想的に道路を上から見た画像モデルをつくり、周波数の異なる部分をしきい値処理することで車線検出を行う手法である。

また、田中らは白線やガードレールなど直線構造をもつものの3次元位置を検出する手法^(20, 21)を提案した。Hough変換から直線群を抽出した後、ステレオ画像から直線ペアの対応付けを行うことで両サイドの直線検出を行う手法である。

Bertozziらの手法は1998年のものだが、当時より格段にハードウェア性能が向上したため、ステレオカメラを用いた車線検出手法は比較的最近様々な研究に使用されている。

2.4 車線検出技術の現状

車線検出においてリアルタイム性と安定性は長年求められてきた性能である。現在は、ハードウェア性能の向上により安定性を得るために計算コストがかかる手法においても見直され、様々なアプローチがされている。より多くの情報が得られるステレオカメラは、アプリケーション上のシステムの情報量としてはとても有用である。ステレオカメラを利用してサイドのガードレールや直線部分の検出を行う手法⁽²²⁾も提案されている。しかし、車線検出においては車線特徴を抽出するための情報の単純化を考慮すると単眼カメラから情報でも有効であると考えられる。2つ以上のカメラの使用ははある得意な場面における補完という形で用いることで有用であると思われる。

こうしたアプローチは単眼カメラとステレオカメラだけではない。他にも、オムニカメラと呼ばれるカメラ周辺360度の全方向視野画像を撮影することが可能なカメラを用いて車線検出を行う手法⁽²³⁾も提案されている。オムニカメラには死角が少なくなることや光の変化が少ないといった利点がある。また、車載カメラとともにレーザーセンサを用いて色情報を獲得するという手法も提案されており、さまざまなハードウェアを用いた複合的なシステムも見られる。

このように多種多様な手法が提案されている中で、現在、いろいろな場面、環境ごとに有用なカメラシステムを使おうという流れが広まっており、企業を中心に様々なシステムが開発・提案され、発展段階であるというのが現状である。近年の研究において車線を検出し、追跡することを目的とした手法の多くは、カルマン・フィルタ⁽²⁴⁾やパーティクルフィルタ⁽³⁾といった確率手法や統計手法を用いている。これは、適切なパラメータ設定を行うことで処理速度が速く、精度の高い追跡ができるためである。その際の車線検出においては単純なエッジによる特徴などが使用されており、環境が変わった際に車線検出を行うこととなる。そのため、車線検出のための特徴抽出の重要度は高い。

2.5 むすび

本章では、車載カメラを用いた車線検出技術の現状および関連研究について述べた。まず、車線検出手法に多く利用される基本技術である Hough 変換とキャニーフィルタについて説明した。次に、関連研究に関する近年の概要を述べた。関連研究では、車線特徴の抽出方法の違いと装備カメラの違いに着目し、概要を述べた。最後に、その他のハードウェアを用いた手法に触れ、車線検出技術の現状をまとめた。

第3章では、幾何学的特徴を用いた複比について述べ、複比を車線特徴に用いた車線検出手法について述べる。

第3章

複比を用いた車線検出手法

3.1 まえがき

近年，複比（非調和比）と呼ばれる直線状の射影変換の性質をもとにした車線検出手法が提案されている．これは自動走行システムが直線路において車両の進行方向を決定するための消失点の推定と車線の検出を目的とされた手法⁽⁶⁾である．

本章では，複比を用いた車線検出手法について述べる．まず，複比に対して説明する．そして，複比の特性を道路画像上に適用することにより車線を検出する手法について説明し，検出結果を示す．最後に，本章で述べる内容に基づき第4章において，複数車線検出の検討を行う．

3.2 複比の性質

複比は投影に関して不変である性質を持つ⁽²⁵⁾．図3-1のように直線上の4点 P_A, P_B, P_C, P_D の複比は(3-1)式のようにあらわされる．

$$[P_A P_B; P_C P_D] = \frac{\overline{P_A P_C} / \overline{P_A P_D}}{\overline{P_B P_C} / \overline{P_B P_D}} \quad (3.1)$$

また，図3-2のように，平面上に2直線 L, l とそれらの上にない1点を与えられたとき，直線 L 上の点 P をある1点からの直線と直線 l の交点 p へ対応させる写像のことを透視投影と呼び，直線 L 上の4点の像をそれぞれ p_A, p_B, p_C, p_D とすると式(3-2)の関係がある⁽²⁵⁾．

$$[p_A p_B; p_C p_D] = [P_A P_B; P_C P_D] \quad (3.2)$$

3.3 複比を用いた車線検出

ここでは数井らが提案した複比を用いた車線検出処理手法⁽⁶⁾を紹介し，説明する．複比を用いたエッジ検出方法に触れ，車線検出手法について述べる．

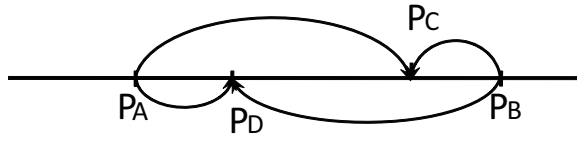


図 3-1: 複比 (文献⁽²⁹⁾ 参照)

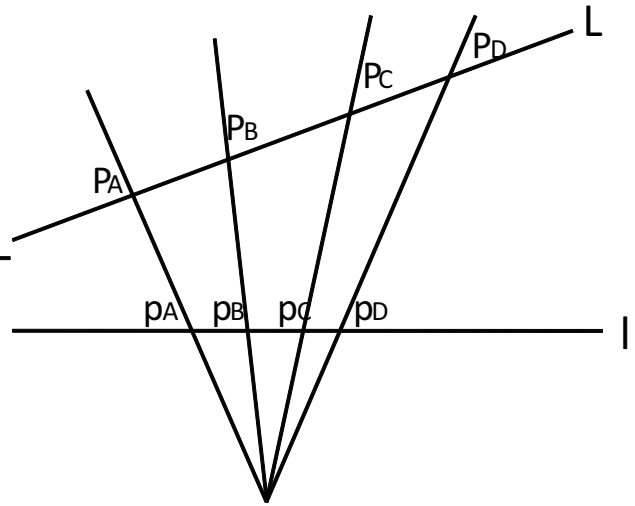


図 3-2: 投影による不変性 (文献⁽²⁹⁾ 参照)

3.3.1 複比を用いたエッジ検出

前述の複比の透視投影のもとで不変である性質を用いることで画像からエッジを検出することができる。

図 3-3 にあらわされるように，道路面 Π 上のレーンマーキングは射影変換されて画像面 π に投影される．同一直線状の 4 点 A, B, C, D の複比を式 (3-3) のように定義する．

$$f(A, B, C, D) = [A, B, C, D] = \frac{\overline{AC}}{\overline{BC}} \cdot \frac{\overline{BD}}{\overline{AD}} \quad (3.3)$$

ここでは，複比の上限値を 1.0 とするため，複比 σ の計算を次式により行う．

$$\sigma = \frac{f(A, B, C, D) - 1.0}{f(A, B, C, D)} \quad (3.4)$$

ただし，従来手法では計算を容易にするため，レーンマーキング等の路面標示の太さが左右で等しいと仮定し，その時の $f(A, B, C, D)$ は式 (3-5) であらわされる．

$$f(A, B, C, D) = \frac{\overline{AC}^2}{(\overline{AC} - \overline{AB})(\overline{AC} + \overline{AB})} \quad (3.5)$$

次に，複比の範囲設定を行うために道路構造令⁽²⁸⁾を用いる．道路構造令により車線幅やレーンマークの幅が定められているため，道路構造令に基づき複比の範囲を設定することが可能である．表 3-1 のように道路構造令に示されるレーンマーキングの実寸値から複比 σ の範囲が算出される．表 3-1 の範囲設定により，車線候補らしいエッジを抽出することができる．

3.3.2 複比を用いた車線検出処理

複比から車線の特徴を抽出し，それを用いて車線検出を行う．

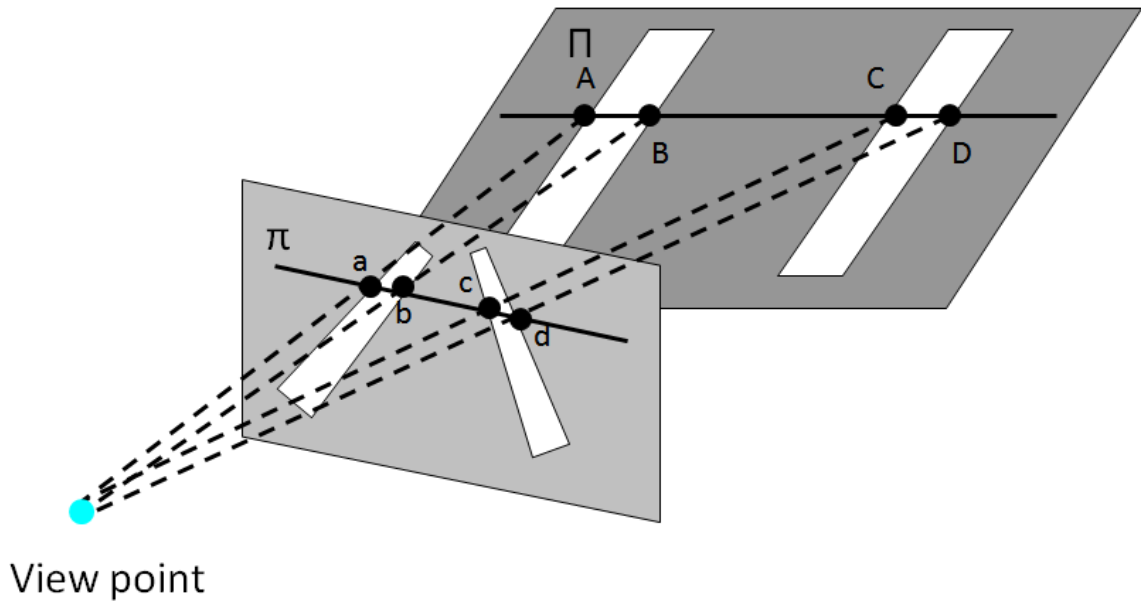


図 3-3: 一直線上の 4 点による複比 (文献⁽⁶⁾ 参照)

表 3-1: 路面標示の様式及び複比の範囲 (文献⁽⁶⁾ 参照)

	$\overline{AB}, \overline{CD}$ (Thickness)[m]	$\overline{AC}, \overline{BD}$ (Width)[m]	σ [$\times 10^{-5}$]
レーンマーキング	0.10-0.20	3.25-3.75	71-378
横断歩道	0.45-0.50	0.90-1.00	20250-30864
その他	0.30-0.75	3.25-3.75	444-5325

図 3-4 にこの車線検出処理の流れを示す．入力画像に対してキャニーフィルタを施した画像と Sobel フィルタを施した画像にわけるとして，キャニーフィルタの画像に対して複比を用いて境界線候補のエッジ検出を行う．複比のエッジ検出処理については，上記で説明した通りである．

つぎに，Sobel フィルタの画像に対してはエッジの方向を計算する．複比のエッジとエッジの方向を併用することでレーンマーキングとなるエッジを検出する．エッジの 2 点を用いてエッジの方向から計算される接線の交点を (x_{vp}, y_{vp}) とし，図 3-5 にあらわされるように， y_{vp} の頻度の最も高いものを消失点の候補とする．ただし今回 y 座標は 5 刻みで頻度を計算している．そして，頻度が最も高い消失点候補の y_{vp} を y_{peak} とし，次式が表すように y_{peak} の近傍 $\pm \Delta y$ 以内の y 座標を持つエッジの組を抽出する．

$$y_{peak} - \Delta y \leq y \leq y_{peak} + \Delta y \tag{3.6}$$

そして，候補となるエッジを絞った後，そのエッジ画像をもとに，Hough 変換を用いて消

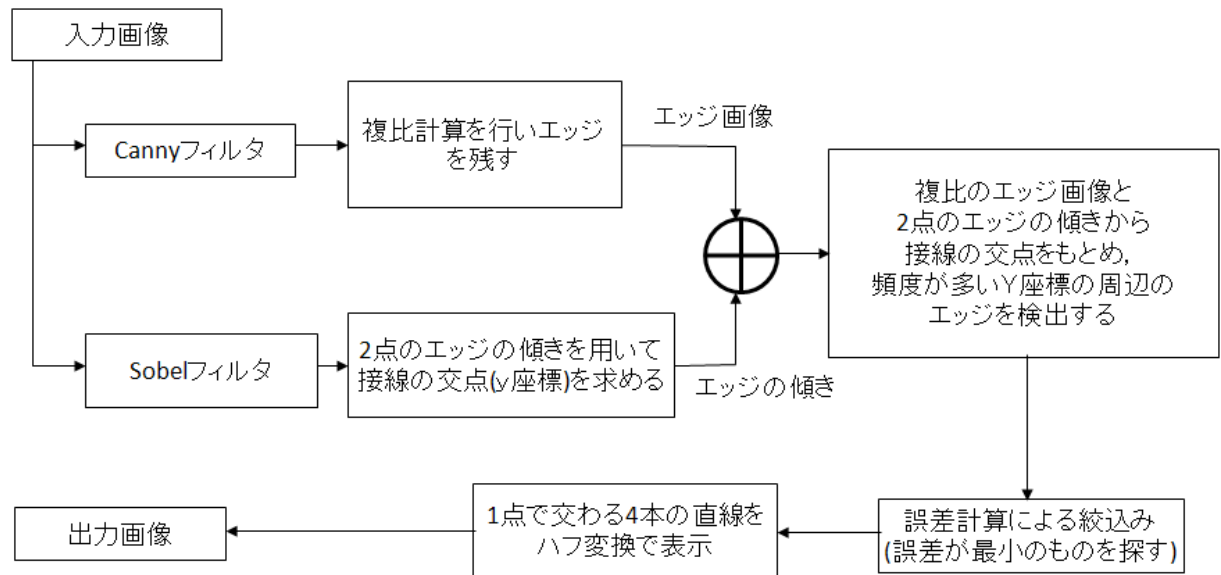


図 3-4: 複比を用いた車線検出のフロー

失点と道路境界を形成する直線群を推定する．あらかじめ1点 (x_{vp}, y_{vp}) で交差する4本の直線群に対して，Hough空間中の4点から，式(3.7)に示される正弦曲線への当てはめ残差 e_{vp} が最小になる4点の組を求める．

$$e_{vp} = \sum_{n=0}^3 (\rho_n - (x_{vp} \cos \theta_n + y_{vp} \sin \theta_n))^2 \quad (3.7)$$

直線を選択する際は，Hough空間上の4点を選択し，正弦曲線への当てはめ残差 e_{vp} と，式(3.8)に示される直線群の複比とエッジ画像から求めた複比の2乗誤差 e_{cr} とを最小化する．ここで σ_{peak} はエッジ点による複比の最も頻度が高い値を表す．

$$e_{cr} = \left(\frac{f(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3) - 1.0}{f(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3)} - \sigma_{peak} \right)^2 \quad (3.8)$$

式(3.7)，(3.8)から次式の最小化する拘束条件を用いることで直線群を推定する．

$$e_{total} = e_{vp} + w e_{cr} \quad (3.9)$$

ただし， w は残差 e_{vp} と e_{cr} の比率を決める重み係数である．式(3.9)の最小化は $\theta - \rho$ 平面の投票ピークから抽出した (θ_n, ρ_n) ， $n = 0, \dots, 3$ の組み合わせのうち，式(3.9)が最小となる (θ_n, ρ_n) の4点の組み合わせを探し出すことにより行う．

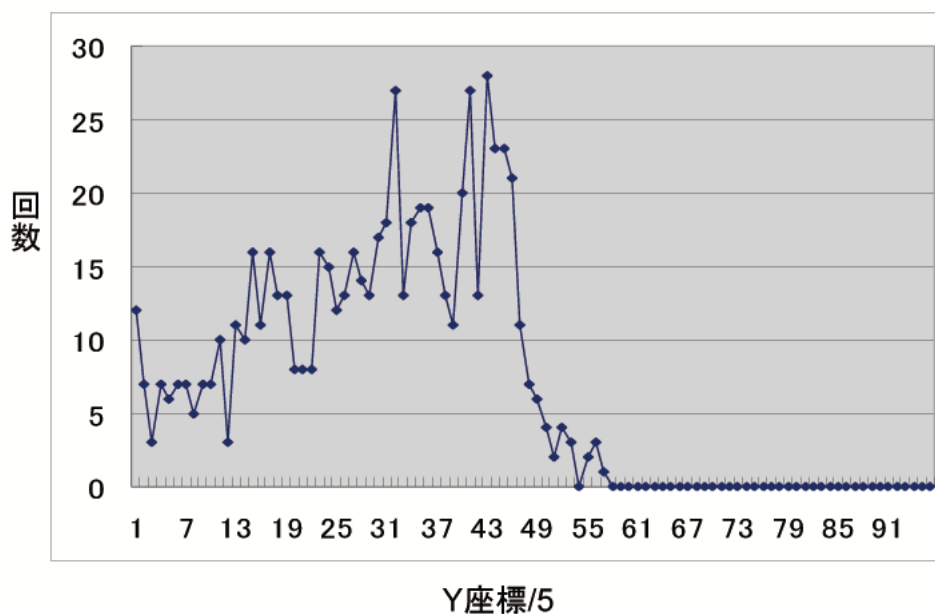


図 3-5: y_{vp} のヒストグラム (文献⁽⁶⁾ 参照)

3.3.3 従来手法の確認実験

従来手法の確認実験を行った。シミュレーションにおける初期条件は、従来手法に従った。図 5-6 に前処理であるキャニーフィルタ画像とその原画像の例を示す。おもに光源とレーンマーキングのエッジが検出されている。次に、図 3-7 は上記のキャニーフィルタ画像に対して複比によるエッジ検出画像であり、図 3-8 は複比処理後のエッジ画像に対して y 座標の頻度処理後のエッジ画像である。図 3-7 はレーンマーキングと光源部分のエッジが検出されていることがわかる。光源部分は車線と同様の間隔で設置されているので車線候補エッジとして残ったと思われる。また、図 3-8 では光源部分のエッジもなく車線のエッジが検出されていることがわかる。そして、従来手法の車線検出結果画像を図 3-9 に示す。4 本の検出線がレーンマーキング上のあり、車線検出ができていることがわかる。

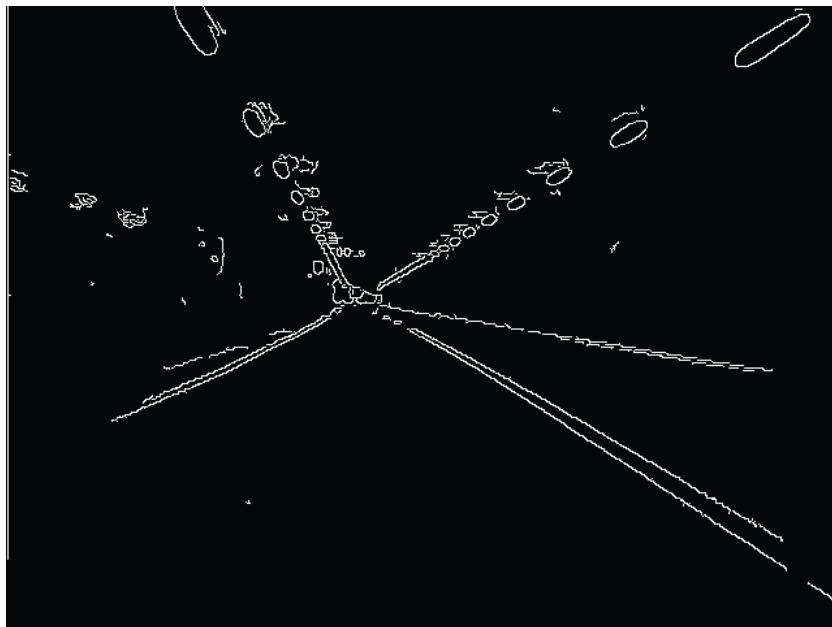
3.3.4 従来手法の問題点

この従来手法は、複比を用いて検出した境界線候補のエッジとエッジの方向を併用することでレーンマーキングとなるエッジを絞る。そして、エッジ画像をもとに、Hough 変換を用いて消失点と道路境界を形成する直線群を推定する手法である。実験結果を確認すると道路境界と消失点の推定はおおむね検出されているが、エッジ画像と原画像を比較したところ、検出されたエッジ点にずれが出る。これは直線のフィッティングの際にエッジを参照するので、誤検出のおそれがあるため問題である。

また、道路境界を求める際、複数車線に対する検討が不十分である。さまざまな走行環境



(a) 原画像



(b) 自然画像のキャニーフィルタ画像例

図 3-6: キャニーフィルタ処理

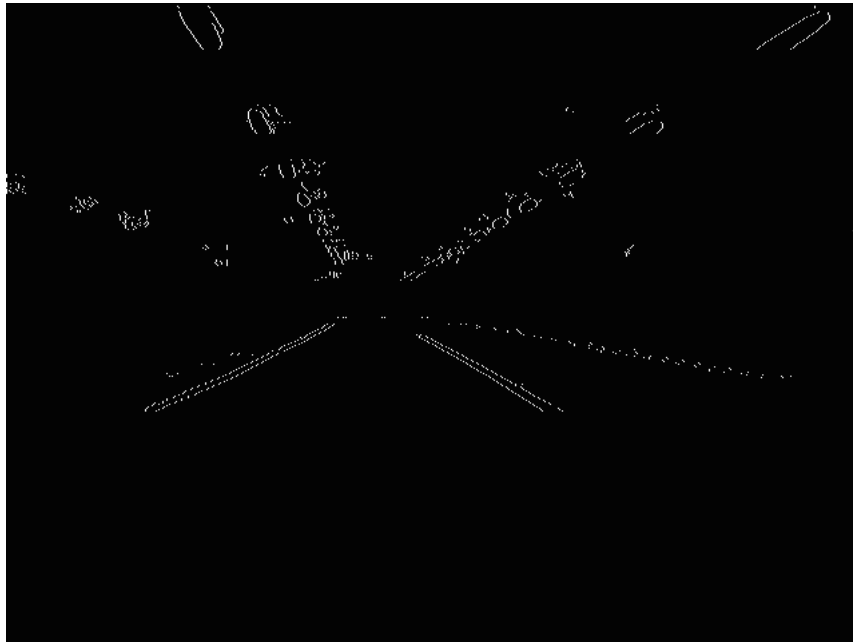


図 3-7: 複比処理後のエッジ画像

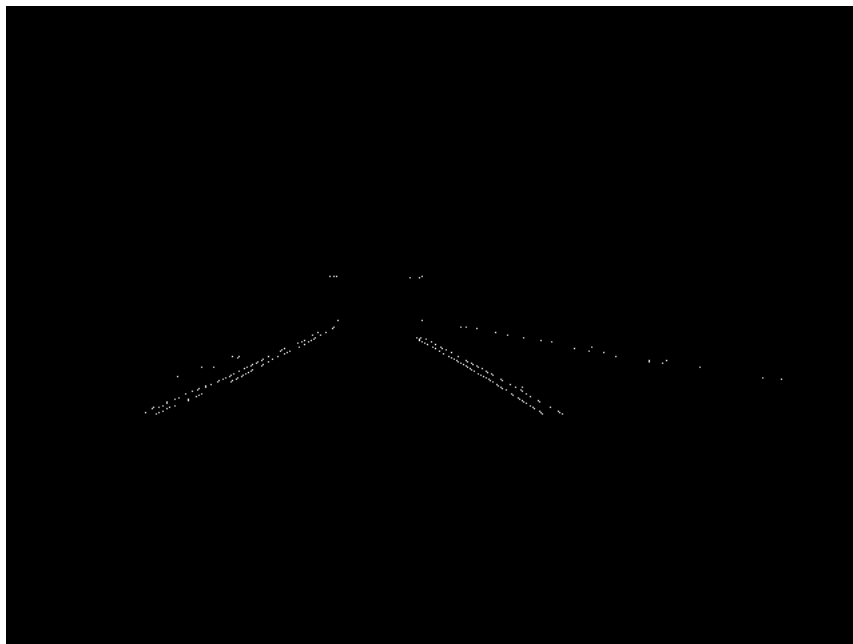


図 3-8: y 座標の頻度を考慮したエッジ画像

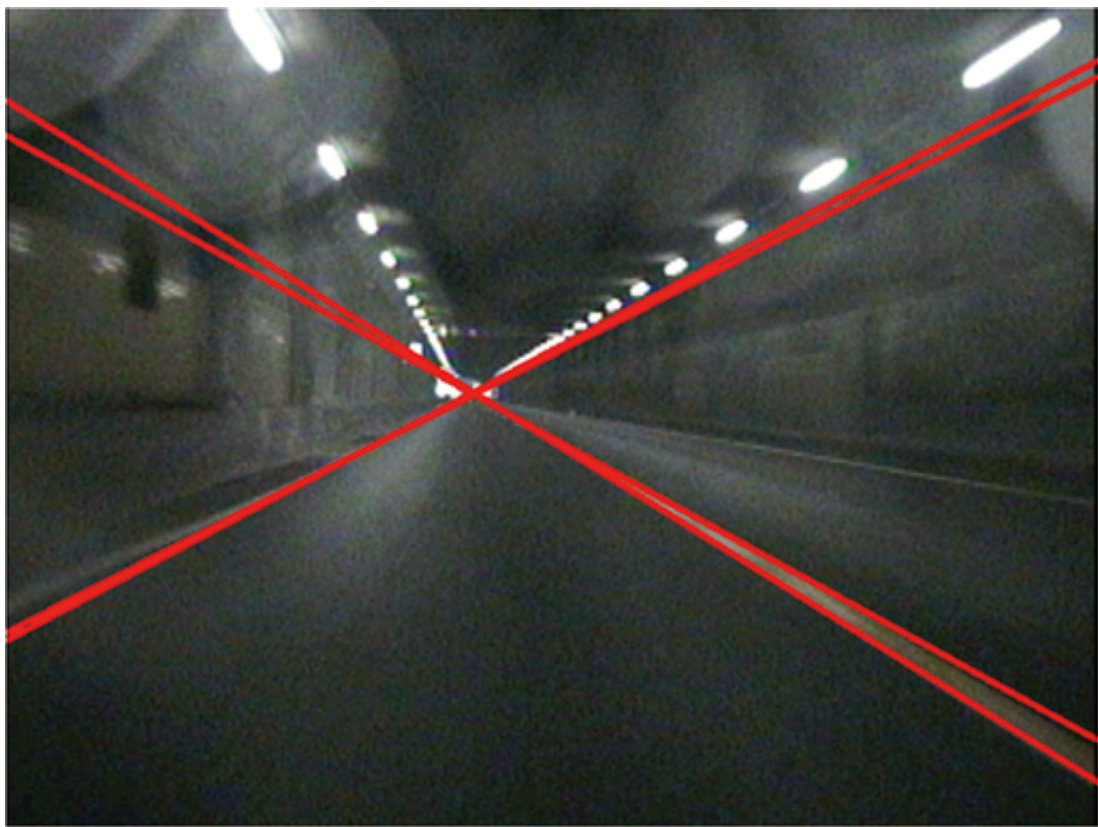


図 3-9: 自然画像に対する従来手法の実験 1

に対応するために複数車線の検出は必要である．車両の車線変更による危険察知や走行領域検知にも利点があるため，複数車線を検知できることは重要である．

他にも，カメラレンズの歪みの考慮が必要である．複比の性質により3次元空間から2次元画像に透視投影した場合には走行車線，隣車線にかかわらず複比は等しい．そのため，複数車線に複比を適用することは可能である．しかし，実際に撮影するカメラ事態にレンズ歪みがあるため，部分的に複比の性質が当てはまらないことがある．数井らは処理速度を高めるためレーンマーキングの幅を等しいと仮定したが，仮定により部分的に複比の値にばらつきがでることが問題である．

3.4 むすび

本章では，複比の説明を行った．また，複比を用いたエッジ検出について説明をおこなった．そして，複比を用いた車線検出手法について述べ，その手法の確認実験を行った．最後に，従来手法の問題点と複数車線検出の必要性について述べた．

第4章では，本章の内容に基づき，複比を用いた複数車線検出手法の検討を行う．

第4章

複比を用いた複数車線検出手法

4.1 まえがき

第3章において、従来手法の問題点から様々な道路環境を考慮することで複数車線の検出に関する検討の必要性と、車線の検出精度を向上させる必要があることについて述べた。本章では、複比を用いた複数車線検出の検討を行う。まず、従来の複比を用いる手法に対する問題点を指摘し、確認実験によりそれを示す。次に、よりロバストな計算手法を施した上で、複比の性質が複数車線にも保存されることを示し、複数車線検出手法を提案する。

4.2 複比を用いた複数車線検出処理

4.2.1 複比の画像歪みへの耐性

複数車線に対して複比を計算する場合、画像歪みがエッジ検出に影響を与える。カメラレンズの歪みに対して、画像の歪み補正を施すことである程度複比の性質を保持することは可能だが、歪み補正には適切なパラメータの設定が難しいという問題がある。そのため、複比の計算を行う際、本研究では、様々なメーカーから製品化されているカメラを用いることを想定しているため、複比の画像歪みへの耐性を考慮する必要がある。また、通常のカメラの場合、隣車線のレーンマーキングは画像の端に現れることが多いため、わずかな変化がエッジの未検出につながる。

第3章で紹介した手法⁽⁶⁾のようにレーンマーキングの幅を等しいと仮定した場合と通常の方法である4点すべてを用いた場合の数値を比較したところ、仮定のある条件での数値はばらつきが見られ、一部では範囲外の数値のものもあったのに対し、通常の方法では数値のばらつきが抑えられ、範囲内に収まることが確認された。そのため、本研究では、従来手法で用いた仮定を用いずに式(4.1)のように複比計算を行うことで車線の候補となるエッジの検出精度を高めた。

$$f(A, B, C, D) = \frac{(\overline{AC})(\overline{AD} - \overline{AB})}{(\overline{AC} - \overline{AB})(\overline{AD})} \quad (4.1)$$

また、画像歪みによる複比の変化を表すため、表4.2.1, 4.2.1に従来手法での複比計算と通常方法での複比計算の比較を3種類の自然画像について複比計算を行った際の数値のばらつきを正規化した分散値としてあらわす。表4.2.1は走行車線の複比についてはばらつき度を

表 4-1: 提案手法と従来手法の走行車線における複比のばらつき度の比較

	提案手法	従来手法
画像 A	0.93	1.71
画像 B	2.05	5.93
画像 C	2.08	7.09

表 4-2: 提案手法と従来手法の隣車線における複比のばらつき度の比較

	提案手法	従来手法
画像 A	0.52	1.33
画像 B	0.67	0.78
画像 C	2.47	7.71

示し、表 4.2.1 は隣車線の複比についてばらつき度を示す。

もし多少の画像歪みがある場合でも、ばらつき度の低いほうが画像歪みに対する耐性が強い手法であるといえる。表 4.2.1, 4.2.1 とともに左右のレーンマークの幅が等しいという仮定がないほうが、ばらつきが抑えられていることがわかる。そのため、複比の計算に 4 点使ったほうがよりロバストにエッジを検出することができると推察できる。

4.2.2 車線ごと複比の処理

複数車線を検出するにあたり、走行車線と隣車線の各々の複比の値を得ることにより異なる車線を検出する手法を提案する。

走行車線と隣車線を検出する流れを説明する。図 4-1 のように一直線上の 6 点 $P_A, P_B, P_C, P_D, P_E, P_F$ に対して先に 4 点 P_A, P_B, P_C, P_D の複比を求め、レーンマーキングの範囲内であれば 4 点 P_C, P_D, P_E, P_F の複比を求める。これを繰り返すことにより 2 種類の複比の値を得る。このように、走行車線用の複比と隣車線用の 2 番目以降の複比の間で

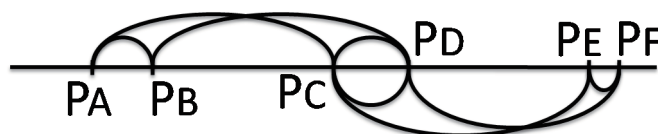


図 4-1: 2 種類の複比計算例 (文献⁽²⁹⁾ 参照)

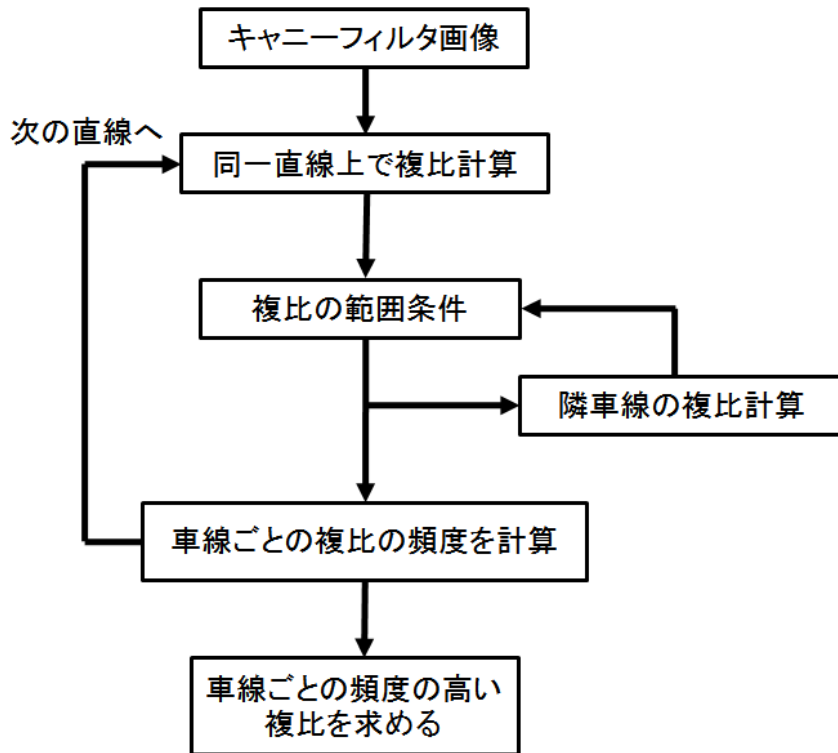


図 4-2: 車線ごとの複比の計算フロー

エッジ 2 点を共有することで、効率的な計算ができると同時に車線ごとの複比を得るのに効果的である。さらに、図 4-2 にアルゴリズムを示す。次に、従来手法と同じく、エッジの方向と消失点のを利用して境界線候補のエッジを絞り込む。そして、Hough 変換により車線の候補となる直線群を抽出し、フィッティングさせる。その際、複数車線検出のために 2 種類のパラメータを用いての直線検出を行う。また、直線に角度条件を持たせることで候補となる直線群を減らすことができる。

走行車線と左右の車線の 3 車線以上を求める際は、上記の方法を左右に計算することで可能である。走行車線と左右の車線の複比 σ_{peak} 、 $\sigma_{peak(R_i)}$ 、 $\sigma_{peak(L_i)}$ をそれぞれ計算し、各々の車線に対して、次式の拘束条件を用いる。

$$e_{cr} = \left(\frac{f(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3) - 1.0}{f(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3)} - \sigma_{peak} \right)^2 \quad (4.2)$$

$$e_{cr(R_i)} = \left(\frac{f(\theta_{0R_i}, \theta_{1R_i}, \theta_{2R_i}, \theta_{3R_i}) - 1.0}{f(\theta_{0R_i}, \theta_{1R_i}, \theta_{2R_i}, \theta_{3R_i})} - \sigma_{peak(R_i)} \right)^2 \quad (4.3)$$

$$e_{cr(L_i)} = \left(\frac{f(\theta_{0L_i}, \theta_{1L_i}, \theta_{2L_i}, \theta_{3L_i}) - 1.0}{f(\theta_{0L_i}, \theta_{1L_i}, \theta_{2L_i}, \theta_{3L_i})} - \sigma_{peak(L_i)} \right)^2 \quad (4.4)$$

$$f(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3) = \frac{(\tan\theta_0 - \tan\theta_2)(\tan\theta_1 - \tan\theta_3)}{(\tan\theta_1 - \tan\theta_2)(\tan\theta_0 - \tan\theta_3)} \quad (4.5)$$

これにより、走行車線と左右の車線に対して式 (4.2)、(4.3)、(4.4) が適用される。そのた

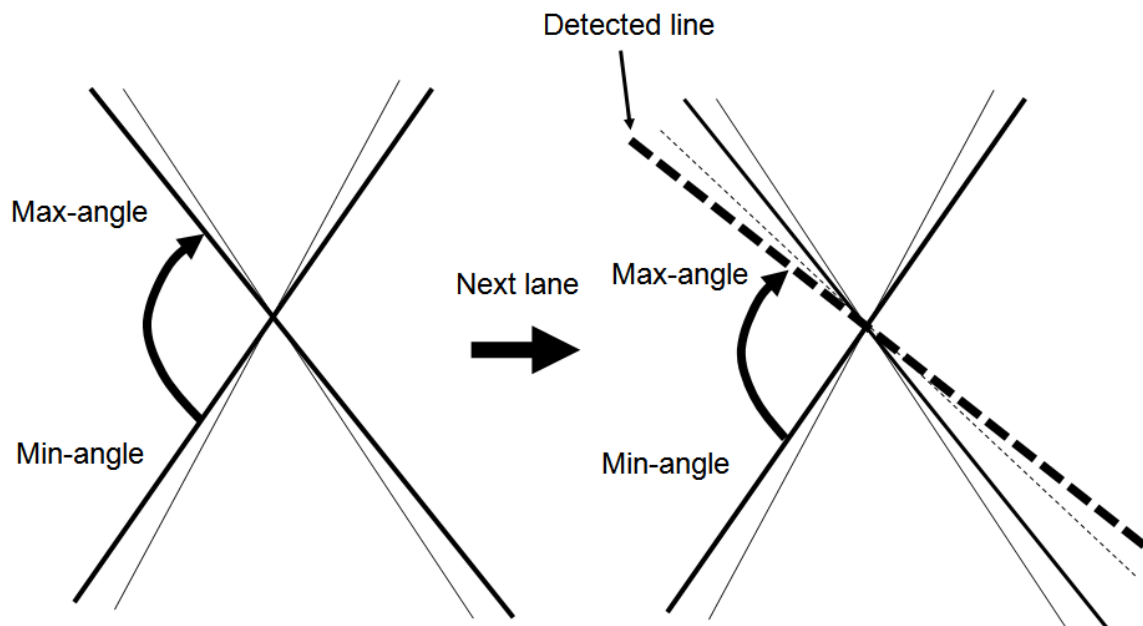


図 4-3: 角度による制限

め、複比と残差 e_{cr} , $e_{cr(R_i)}$, $e_{cr(L_i)}$ が車線に応じた値に固定される。そして、式 (3.7) と式 (4.2), (4.3), (4.4) から従来手法と同様に残差 e_{total} の最小化により、直線群を推定することができる。

4.2.3 角度を用いた直線群の限定処理

Hough 変換により検出された直線群に対してフィッティングを行う際に、直線群に対して角度の制限を用いることで車線毎に複比の計算値を当てはめることができるようになる。

まず、走行車線、左右の車線の順に複比を求め、走行車線の複比の値を用いて車線のフィッティングを行う。そして、検出された 4 本の直線に対し角度を調べ、最小・最大の角度を得る。その角度を用いて直線群を制限する。

図 4-3 に車線ごとの角度の制限部分イメージを示す。例えば、走行車線検出を行い、角度の大きい順で $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ の 4 つの角度が検出された場合、最大角 θ_0 と最小角 θ_3 がなす角の範囲の外にある直線群に対して次の車線検出を行う。そして、隣の車線を検出を行うごとに検出された角度を調べ、最大・最小の角度を更新し、車線検出する範囲を狭めていく。範囲を狭めることで車線部分を Hough 変換による直線群をより限定できる。こうすることで複比の計算値と同期がとれるため複比を車線ごとに適用でき、よりロバストな複数車線の検出が可能となる。また、図 4-4 は、図 5-6 の原画像から得られた直線群に対して角度と直線群の関係を表した図である。こうした角度の偏りがある画像に対しても制限を用いることは有効であると考えられる。さらに、他の車線部分の誤検出防止に有効である。他にも、直線群の探索本数を減らすことができるため、処理速度の向上にもつながるというメリットが

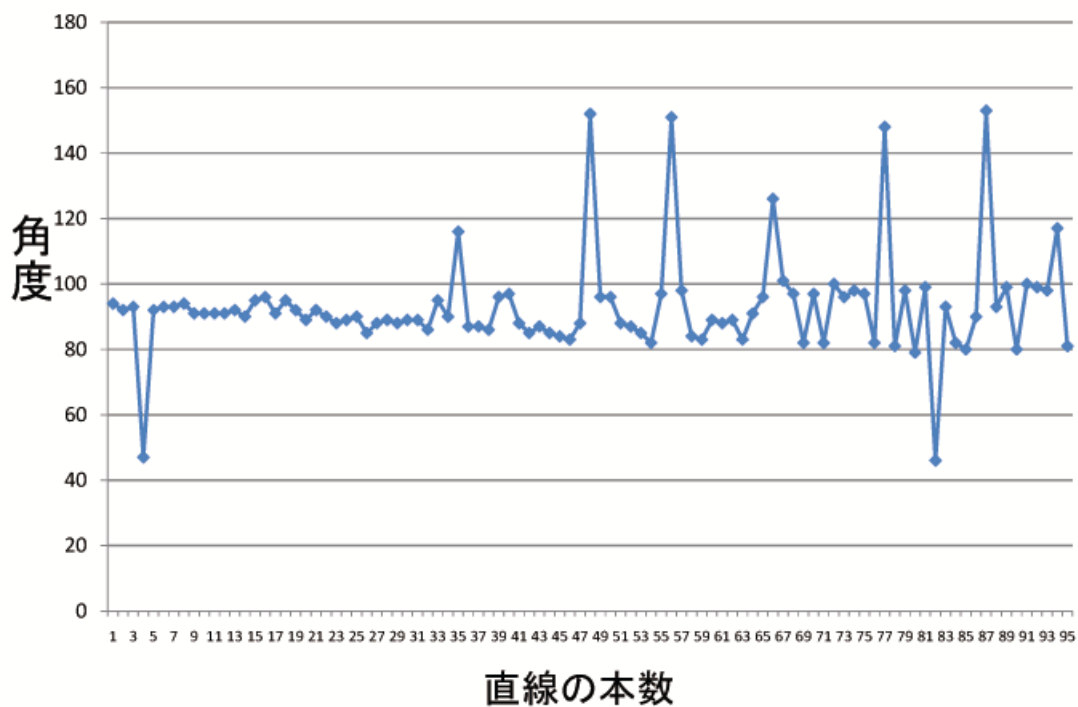


図 4-4: 検出された直線群と角度の関係

ある。

4.3 むすび

本章では、複比を用いた複数車線検出に対する検討を行った。まず、画像歪みによる複比の値のばらつき度を抑制するために、レーンマーキングの幅が等しいという仮定を用いずに直線上の4点を用いて複比を用いることの利点を表を用いて述べた。次に、車線ごとに複比を用いることで車線に対して適した複比を当てはめることが可能であることについて述べた。最後に、Hough変換により検出された直線群に対し、車線を検出することに角度を制限する方法を説明し、それによる利点を述べた。以上より、複比を用いた複数車線検出に関する手法の提案を行った。

第5章では、車線検出画像の評価手法について検討を行い、本稿で示した評価手法を用いて提案した手法の評価・実験を行う。

第5章

実験による提案手法の評価

5.1 まえがき

本章では、評価手法を説明する。そして、前章で提案した手法に対して評価実験を行い、提案手法の有効性を示す。車線検出結果は主に主観的评价により評価されるものが多く、客観的评价においても、独自の方法で誤検出の確率を測定するにとどまっていた。今回、評価するにあたり、市街地を撮影した自然画像と3Dソフトウェアを用いて仮想の道路面を作成し、ある位置から道路を撮影した仮想道路モデル画像を用いて提案手法の実験を行う。

5.2 評価方法

ここでは、検出結果の評価方法について説明する。

評価の初期条件として、道路構造令に基づいた普通道路の直線路のモデルを3Dソフトウェアにより再現し、車載カメラを模して道路を撮影した仮想道路モデル画像を用いる。この仮想モデル画像を評価に用いる目的は、白線のエッジを残すアルゴリズムの正確性を確認し、直線検出の評価を行うことである。

まず、仮想モデル画像にレベルの異なるガウス雑音を付加させた画像を数種類用意する。そして各々の画像に対して、複数車線検出を行う。評価は正解マスク画像(図5-1)と検出結果画像(図5-2)の画素数を比較する。図5-3が示すようにある画像中のある範囲を走査し、正解画像の白線部分の合計画素 $p_{correct}$ と2本からなる検出線の幅の合計画素 p_{detect} を求める。そして、検出線の幅の合計画素から白線部分の合計画素の差を求め、検出線の幅の合計画素との割合 rr を求めることでずれを評価する。本稿では、1.0を完全適合とするために式(5.1)を用いた。

$$rr = 1.0 - \frac{(p_{detect} - p_{correct})}{p_{detect}} \quad (5.1)$$

また、遠方の白線に対するずれの評価はあまり有効ではないため、ずれを走査する範囲は、撮影位置から距離の近い部分(画像の下部)と車線情報から得られる消失点との間で適宜変化させる必要がある。

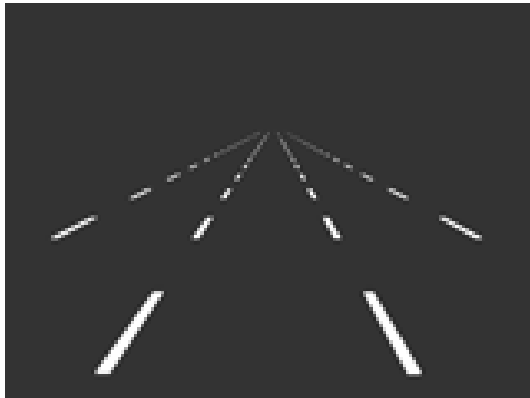


図 5-1: 正解マスク画像

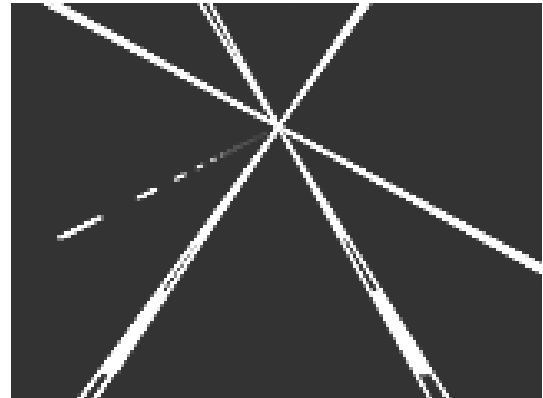


図 5-2: 検出画像例

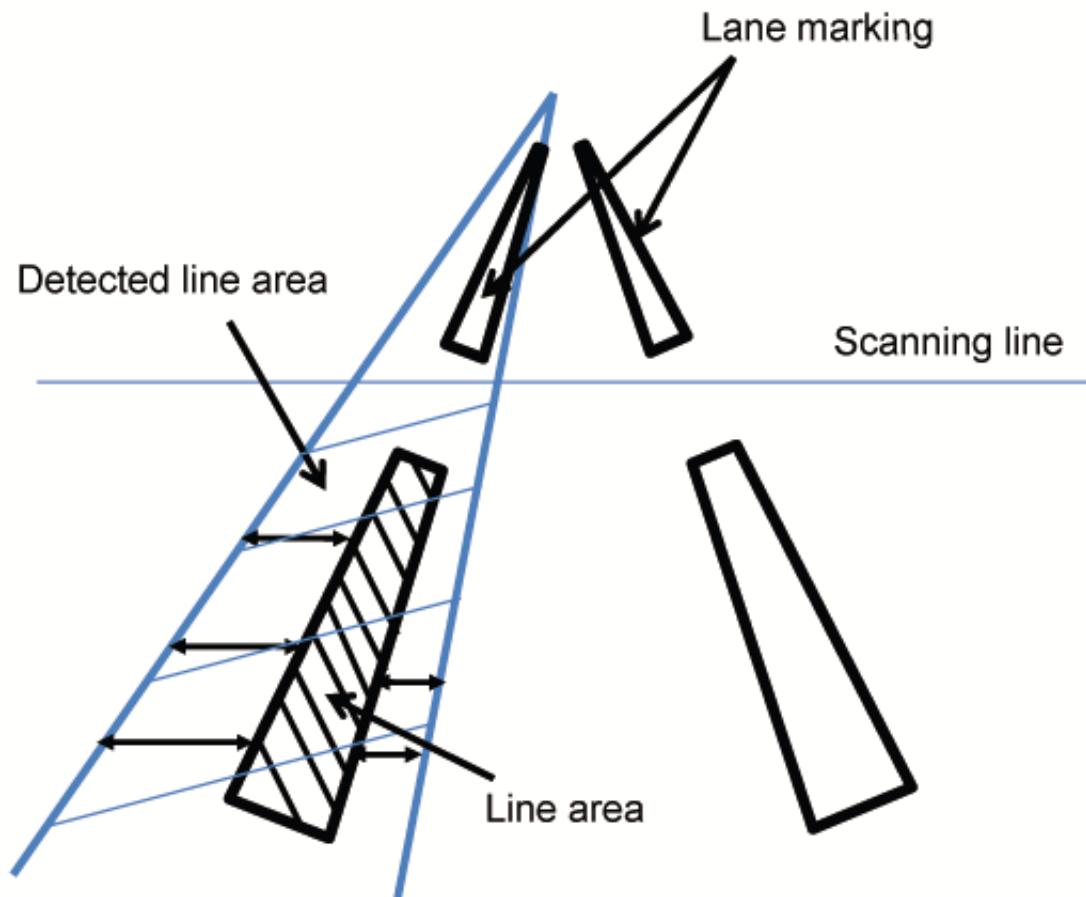


図 5-3: 検出線の幅及び白線部分のずれ量

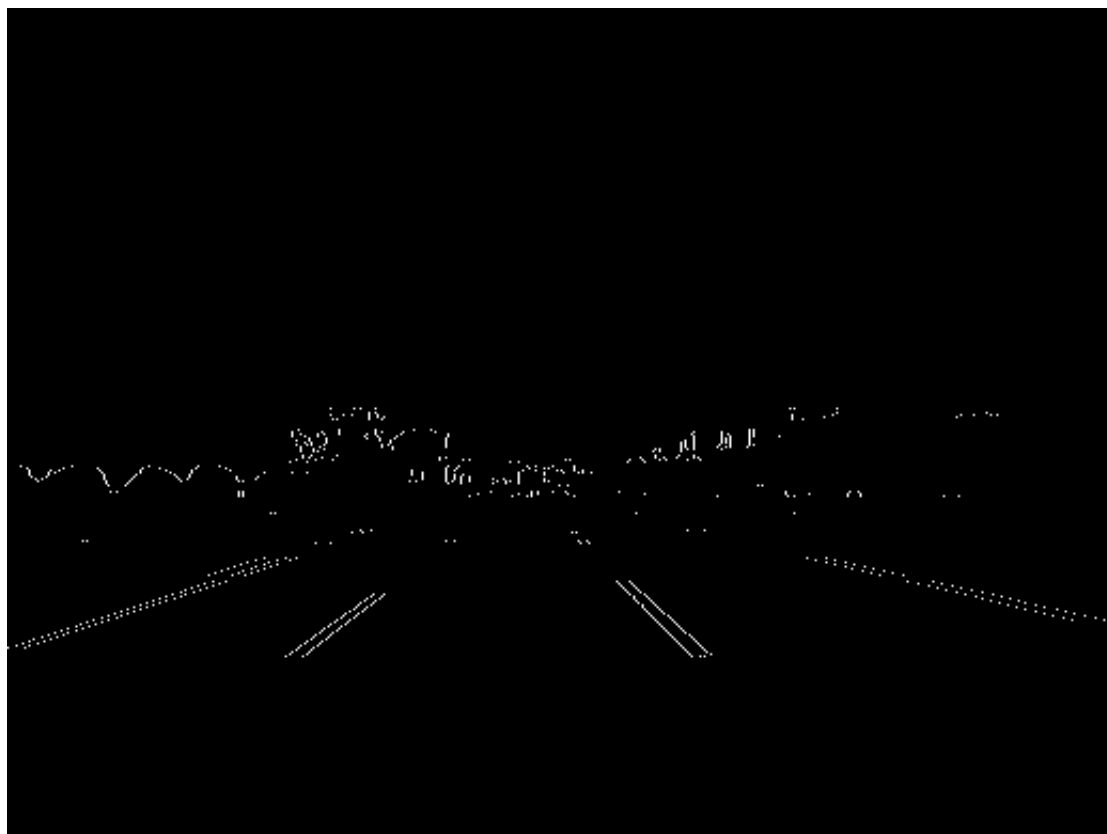


図 5-4: 高速道路画像の複比によるエッジ検出結果

5.3 実験・評価

5.3.1 シミュレーション条件

提案手法の評価をするにあたり、シミュレーション条件を設定する。市街地の直線路を撮影した画像と第 5.2 章の評価手法を数種類の仮想モデル画像に対し適用する。仮想モデル画像はひとつの画像に対し強度レベルを変化させてガウス雑音を付加させたものであり、サイズは 640×480 である。今回は簡単のため走行車線と右隣の車線の 2 車線を検出し、適合率を評価した。

5.3.2 提案手法の検出結果

まず、自然画像に対して実験を行った。画像は高速道路と市街地の直線路を走行する車に載せたカメラから前方を撮影したものをを用いた。また、実験に用いた数種類の画像から一例を用いて、図 5-6 に市街地のキャニーフィルタ処理画像、図 5-4, 5-7 に複比から抽出した境界線候補のエッジ画像、そして、図 5-5, 5-8 に車線検出結果を示す。

図 5-7 は路面状態のレーンマーキングに対してエッジが検出されていることがわかる。中心に見られる多くのエッジは建物のライトによる影響からエッジが残ったものである。次に、

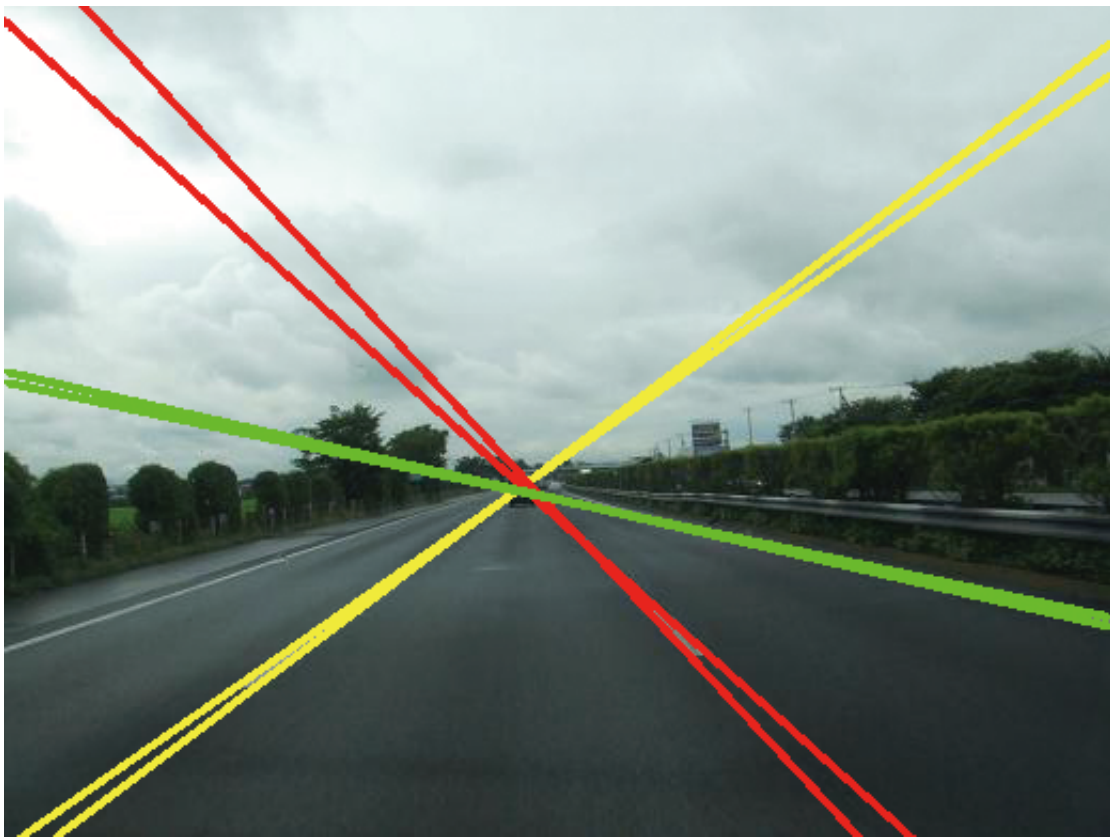


図 5-5: 高速道路画像の車線検出結果

表 5-1: 車線検出結果の車線適合率 (文献⁽²⁹⁾ 参照)

	PSNR(dB)	適合率 (%)
画像 1	38	92
画像 2	28	86
画像 3	25	85
画像 4	23	84
画像 5	22	84
画像 6	20	—

車線の検出を高速道路画像と市街地画像に対して行った実験結果画像を図 5-5, 5-8 に示す。走行車線と隣車線を 6 本の直線により、検出できていることがわかる。隣車線が検出できていることに対し、2 種類の複比を求めたことが隣車線の検出に効果的に働いているためと考えられる。

5.3.3 検出結果の評価・考察

次に、仮想道路モデル画像を用いて検出結果の定量的評価を行った。

図 5-9, 5-10, 5-11, 5-12, 5-13, 5-14 は図 5-1 の正解画像に雑音を付加し、複数車線検出を行った結果である。おおむね意図した白線を検出できていることが確認できる。しかし、図 5-14 は検出に失敗している。これは走行車線の検出時において誤検出が起きており、雑音によるエッジの数が膨大となったことで車線候補エッジの誤検出が多く見られたことが原因だと考えられる。

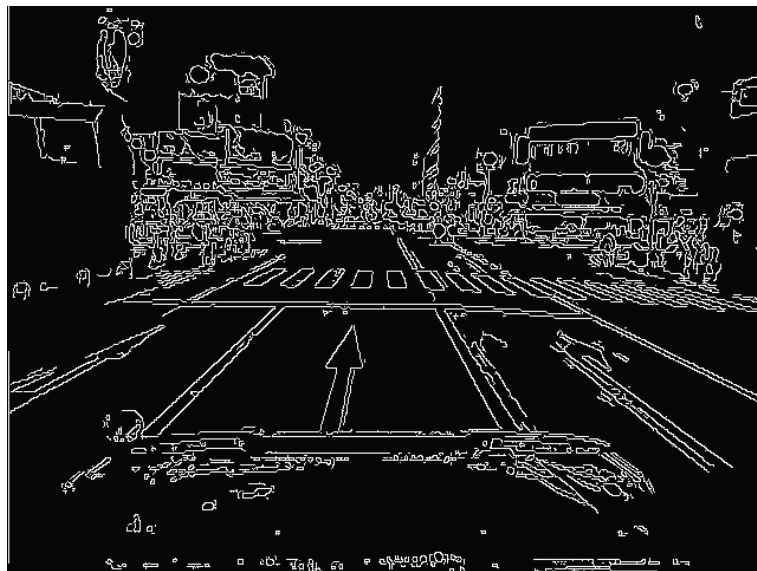
次に、上記の検出画像に対して第 5.2 章で定めた定量的評価を行ったものを表 5-1 に示す。表 5-1 より、雑音の強度レベルを高めても高い適合率を維持していることがわかる。雑音の強度レベルが高くなるにつれて画面上に現れるエッジは多くなるが、Hough 変換の直前までの処理が隣車線候補のエッジを制限できているため、ずれを小さくすることができている。加えて、雑音に対してはキャニーフィルタのしきい値を変化させることで雑音を軽減する効果があり、適切なパラメータ設定をすることで複比に有効なエッジを残す役割を担っている。

5.4 むすび

本章では、提案手法に対しその評価実験を行った。まず、本稿での評価方法を定め、評価方法の説明を行った。次に、自然画像に対する提案手法の実験結果を示した。最後に、仮想モデル画像に対する実験結果を示し、その画像に対して定量的評価を行った。画像と定量的



(a) 原画像



(b) 市街地道路のキャニーフィルタ画像

図 5-6: キャニーフィルタ処理



図 5-7: 市街地道路のエッジ抽出画像 (文献⁽²⁹⁾ 参照)

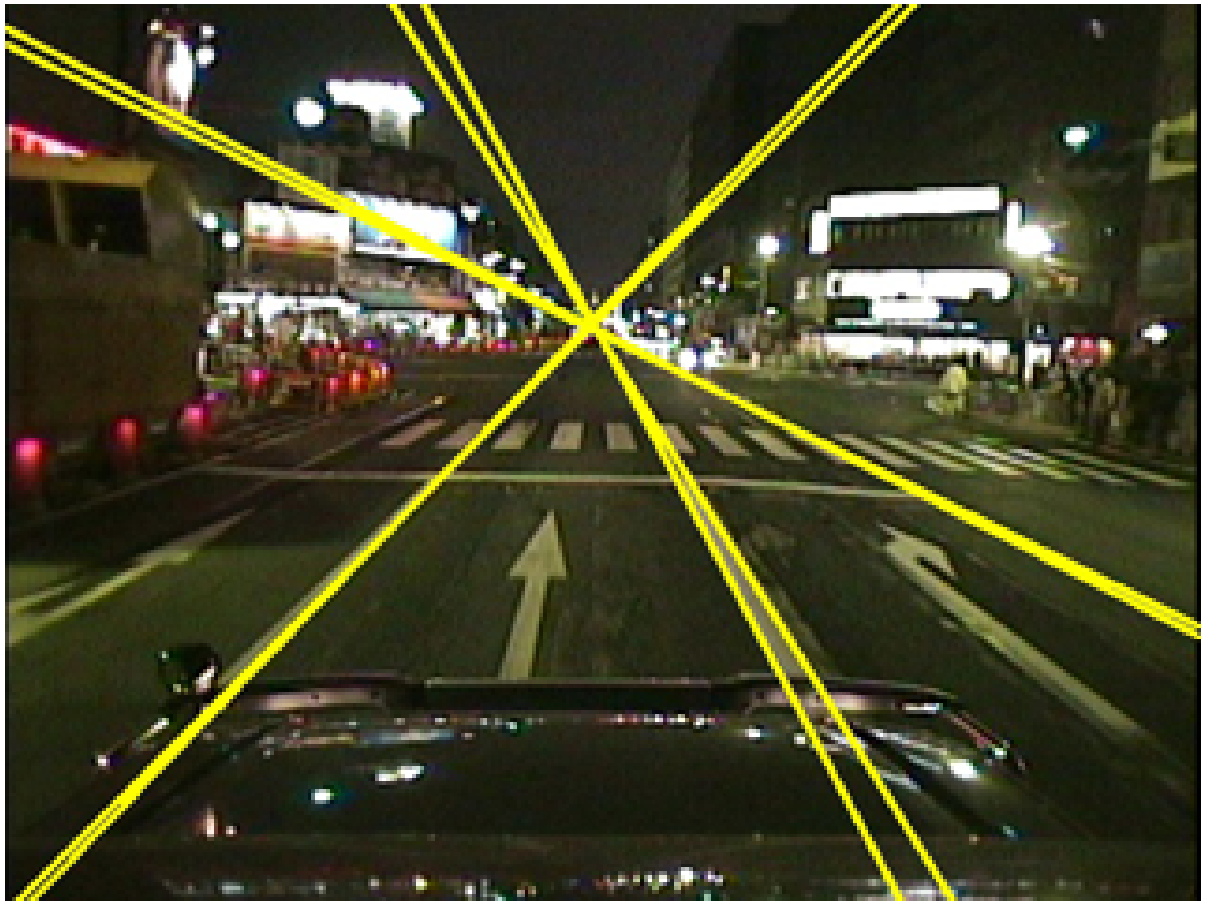


図 5-8: 市街地道路の実験結果 (文献⁽²⁹⁾ 参照)

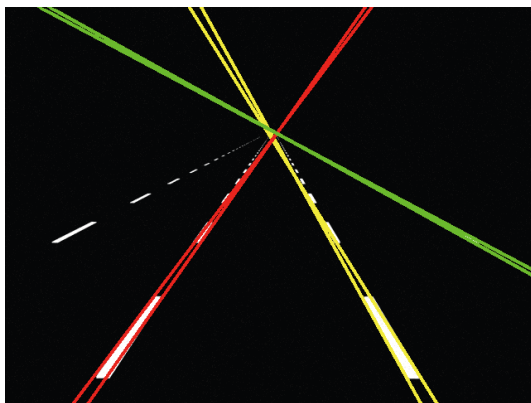


図 5-9: 雑音付加画像 38 dB (文献⁽³⁰⁾ 参照)

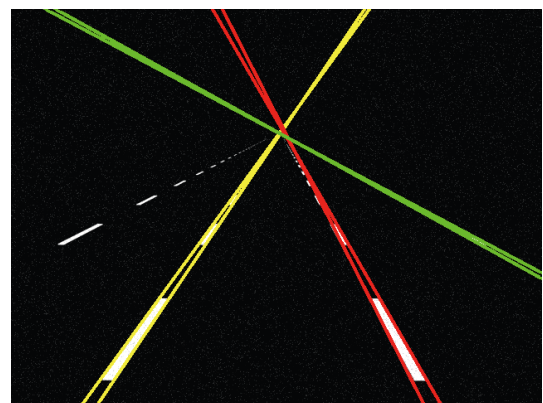


図 5-10: 雑音付加画像 28 dB

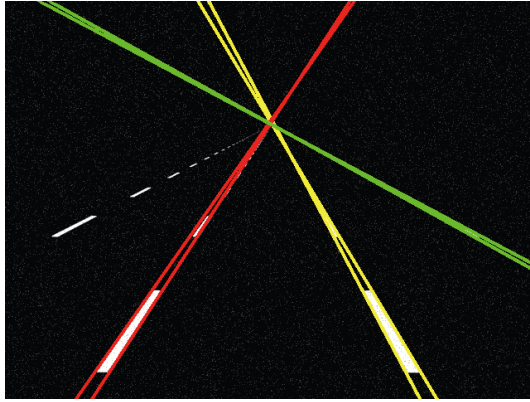


図 5-11: 雑音付加画像 25 dB

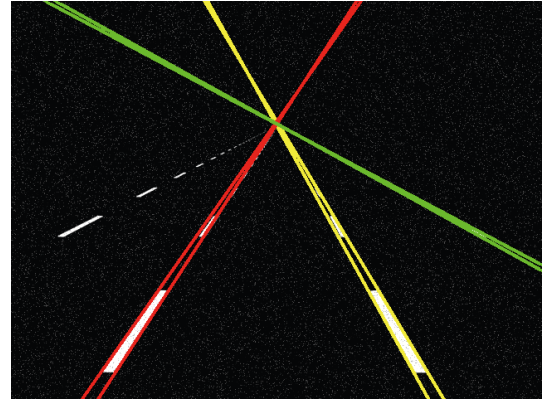


図 5-12: 雑音付加画像 23 dB

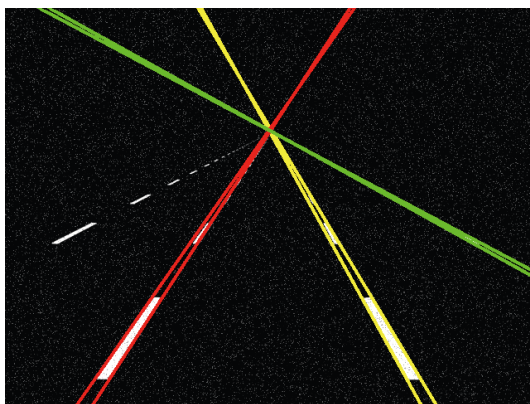


図 5-13: 雑音付加画像 22 dB (文献⁽³⁰⁾ 参照)

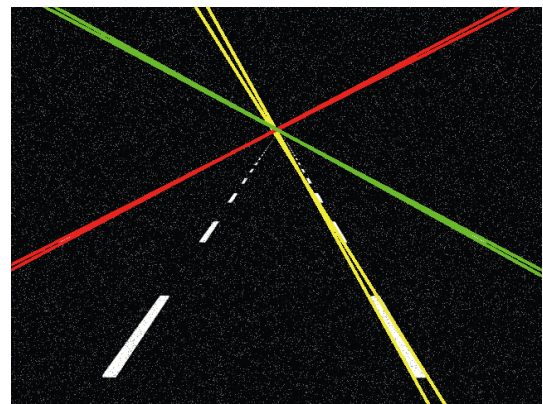


図 5-14: 雑音付加画像 20 dB

評価とともに提案手法の有効性を示した。

第 6 章では、本論文の総括をする。そして、今後の課題を含めまとめる。

第6章

結論

6.1 総括

本研究では、複比の性質を用いた複数車線検出の検討を行った。車載カメラから前方を撮影した静止道路画像に対して、車線検出のために複比から得られる車線特徴に着目した。その特徴量を用いた頑健な複数車線検出を目的として、複比を車線ごとに用いることにより複数の車線を検出する手法を提案した。そして、車線ごとに特徴量を計算し、複数車線のロバストな検出を実現した。さらに、検出結果に対して評価方法を定め、定量的評価を示し、提案手法の有効性を示した。

第1章では、本研究の背景と目的、および本論文の構成について述べた。

第2章では、車載カメラを用いた車線検出技術の現状について述べた。まず、車線検出手法によく用いられる既存技術である Hough 変換とキャニーフィルタについて述べた。次に、車載カメラで撮影する際の様々な環境下における車線特徴の抽出方法について述べ、単眼カメラとステレオカメラの2種類のカメラ使用について、それぞれカメラを用いた車線検出技術の研究概要について述べた。最後に、近年の研究に基づき、車線検出技術の現状をまとめるた。

第3章では、従来の車線検出に関連する一手法である複比を用いた研究について説明した。まず、複比の説明を行い、複比を用いたエッジ検出と道路構造令を利用することで、複比が道路面を撮影した画像に適用可能であることについて述べた。次に、従来の複比を用いた車線検出手法について説明した。そして、上記の手法において実験を行い、その問題点について述べた。最後に、複数車線検出に対する必要性を述べた。

第4章では、複比を用いた複数車線検出手法について提案し、その概要および詳細を述べた。まず、カメラのレンズ歪みに対して複比を用いた際の耐性をばらつき度の測定結果から評価し、考察を行った。次に、複数の車線検出に対応するために車線ごとの複比の適用について説明した。最後に、Hough 変換による直線群に対する角度の限定処理について説明し、その利点を述べた。

第5章では、実験により提案手法による複数車線検出の精度についての評価・検討を行った。まず、提案手法の実験を行い、その結果を画像を用いて示した。次に、評価手法が確立されていないことに触れ、本研究で行った評価方法について説明を行った。そして、実験結

果画像の確認と評価を行い、雑音付加画像に対して高い適合率を得ることで手法の有効性を示した。最後に、評価方法、評価値に対するの考察を行った。

第6章は結論であり、本論文の総括および今後の課題について述べている。

6.2 今後の課題

今後の課題として以下がある。

6.2.1 カーブのある道路環境に対する検出

本研究では、仮想モデル画像を用いて複数車線の直線路に対して車線検出の有効性を示したが、カーブのある道路や交差点画像の場合については検討が不十分である。本手法では、自動車に近い車線特徴を利用しているため、遠方のカーブについては車線の直線により検出可能である。しかし、カーブの曲率や自動車からカーブの距離等の検出有効範囲を示す必要がある。

6.2.2 評価手法の確立

本研究では、3Dモデルを用いた仮想的な道路面を用いて独自の評価を行ったが、車線検出における理想的な評価手法はまだ確立されていない。本研究のようにある程度の限定条件の中で、評価を行う場合、アルゴリズムの有効性は確認できるが、手法の柔軟さについては有効性を評価することが難しい。そのため、多くの車線検出手法ごとの定量的評価は困難であり、検出精度を表す指標の確立が求められる。

6.2.3 道路環境による車線特徴の検出性能

本研究では、複比を車線ごとに計算することで複数車線の特徴を抽出し、車線検出を行ったが、道路環境によっては車線候補となるエッジが多い場合があり、誤検出の一因となる。車線候補エッジの削減には時空間情報を用いることが有効であると考えられる。フレーム間の情報を加えることでより幅広い環境に対応した検出が見込める。また、評価手法にも言えることであるが、道路状態や道路環境の細分化をすることにより、適切な検出処理が行えると考えられる。

謝辞

本研究の機会及び素晴らしい実験環境を与えて下さり、貴重な時間を割いて研究の方向性を御指導頂きました渡辺 裕 教授に心から感謝致します。

また、学部時代の指導教授であり、研究の方向性について、数々の有意義な御意見、御助言を賜りました早稲田大学国際情報通信研究科富永 英義 教授に深く感謝致します。

本研究を進めるにあたり、日頃から惜しみなく御指導して頂き、文章の書き方等でお世話になりました河村 圭氏に心から感謝いたします。

貴重な御意見、様々な御提案を頂いた渡辺研究室の皆様に御礼申し上げます。さらに、学部時代からの同期である高木 鉄平 君に感謝致します。

学部時代からお世話になった富永研究室の皆様に、御礼申し上げます。特に、3年間公私にわたり、共に頑張ってきた同級生のみなに感謝致します。

最後に、私をここまで育てて下さった家族に深く感謝します。

平成 21 年 2 月 5 日

参考文献

- (1) 日産ホームページ, “日産 技術紹介 アラウンドビューモニター,”
<http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/INTRODUCTION/DETAILS/AVM/>
- (2) M. Bertozzi, and A. Broggi, “GOLD: A parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.7, no. 1, pp.62–81, Jan. 1998.
- (3) N. Apostoloff, and A. Zelinsky, “Robust vision based lane tracking using multiple cues and particle filtering,” *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.558–563, Columbus, OH, USA, Jun. 2003.
- (4) M. Bertozzi, A. Broggi, M. Cellario, A. Fascioli, P. Lombardi, and M. Porta, “Artificial Vision in Road Vehicles,” *Proc. IEEE*, vol 90, no. 7, pp.1258–1271, Jul. 2002.
- (5) C. Kreucher, and S. Lakshmanan, “LANA: A lane extraction algorithm that uses frequency domain features,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol.15, no.2, pp.343–350, Apr. 1999.
- (6) 数井 誠人, 長谷山 美紀, 北島 秀夫, “複比を用いた自動走行システムのための消失点推定,” *信学論 (D-II)*, vol.J84-D-II, no.7, pp.1319–1327, Jul. 2001.
- (7) 安居院 猛, 長尾 智晴, “C 言語による画像処理入門,” 昭晃堂, Dec. 2000.
- (8) 酒井 幸市, “デジタル画像処理の基礎と応用,” C Q 出版, Sep. 2003.
- (9) J. Canny, “A computational approach to edge detection,” *Trans. IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.8, pp.679–698, Nov. 1986.
- (10) ウィキペディアホームページ, “エッジ検出,” <http://ja.wikipedia.org/wiki/>
- (11) 安達 栄輔, 鍋島 彰崇, 栗田 多喜夫, “車の姿勢を考慮したハフ変換による車線検出,” *信学技報*, vol.105, no.615, pp. 103–107, PRMU2005-219, Feb. 2006.
- (12) 安達 栄輔, 栗田 多喜夫, “車の安全運転システムのための車線状態の推定法,” *信学技報*, vol.106, no.605, pp. 79–84, PRMU2006-248, Mar. 2007.
- (13) Y. Wang, E. K. Teoh, and D. Shen, “Lane detection and tracking using B-Snake,” *Proc. IEEE Information Intelligence and Systems*, pp.438–443, Nov. 1999.
- (14) M. Kass, A. Witkin, and D. Teraopoulos, “Snakes: Active Contour Models,” *Int. J. Computer Vision*, vol.1, pp.321–331, 1988.
- (15) Q. Chen, and H. Wang, “A Real-time Lane Detection Algorithm Based on a Hyperbola-Pair Model,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.510–515, Jun. 2006.

- (16) K. Y. Chiu, and S. F. Lin, "Lane Detection using Color-Based Segmentation," Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.706–711, Jun. 2005.
- (17) H. Wang, and Q. Chen, "Real-time Lane Detection in Various Conditions and Night Cases," Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems, pp.1226–1231, Toronto, Canada, Sep. 2006.
- (18) D. Schreiber, B. Alefs, and M. Clabian, "Single camera lane detection and tracking," Proc. 2005. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems, pp.1114–1119, Vienna, Austria, Sep. 2005.
- (19) S. Nedevschi, R. Schmidt, T. Graf, R. Danescu, D. Frentiu, T. Marita, F. Oniga, and C. Pocol, "3D Lane Detection System Based on Stereovision," IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems, Washington, USA, pp.161–166, Oct. 2004.
- (20) 田中 健一, 奥富 正敏, "ステレオ画像を用いた道路シーン中の直線の抽出と識別," vol.2005, No.38, pp. 83–87, 2005–CVIM–149.
- (21) 田中 健一, 奥富 正敏, "ステレオ画像を用いた道路シーン中の直線の検出," 電子情報通信学会論文誌, vol.J89–D, no.8, pp.1892–1896, Aug. 2006.
- (22) R. Danescu, S. Sobol, S. Nedevschi, and T. Graf, "Stereovision-Based Side Lane and Guardrail Detection," Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems, pp.1156–1161, Toronto, Canada, Sep. 2006.
- (23) M. Amemiya, K. Ishikawa, K. Kobayashi, and K. Watanabe, "Lane detection for intelligent vehicle employing omni-directional camera," SICE Annual Conference, Sapporo, Japan, Aug. 2004.
- (24) 有本 卓, "カルマン・フィルター," 産業図書, Jan. 1977.
- (25) 金谷 健一, "形状CADと図形の数学," 共立出版, Feb. 1998.
- (26) 高橋 新, 二宮 芳樹, "走行レーン認識におけるロバストなレーンマーキング候補選択の一手法," 信学論 (D-II), vol.J81-D-II, no.8, pp.1904–1911, Aug. 1998.
- (27) A. AM. Assidiq, O. O. Khaliafa, M. R. Islam, S. Khan, "Real Time Lane Detection for Autonomous Vehicles," Proc. 2008. IEEE Conference on Computer and Communication Engineering, pp.82–88, 2008.
- (28) "道路構造令," <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S45/S45SE320.html>
- (29) 谷 誠一, 河村 圭, 渡辺 裕, "複比を用いた複数車線検出に関する検討," 情報科学技術フォーラム, H-040. Sep. 2008.

- (30) 谷 誠一, 河村 圭, 渡辺 裕, “角度と複比を用いた複数車線検出に関する一検討,” 信学春季全大, ——-. Mar. 2009.

図一覧

2-1	キャニーフィルタ処理画像例	6
3-1	複比 (文献 ⁽²⁹⁾ 参照)	11
3-2	投影による不変性 (文献 ⁽²⁹⁾ 参照)	11
3-3	一直線上の4点による複比 (文献 ⁽⁶⁾ 参照)	12
3-4	複比を用いた車線検出のフロー	13
3-5	y_{vp} のヒストグラム (文献 ⁽⁶⁾ 参照)	14
3-6	キャニーフィルタ処理	15
3-7	複比処理後のエッジ画像	16
3-8	y 座標の頻度を考慮したエッジ画像	16
3-9	自然画像に対する従来手法の実験 1	17
4-1	2種類の複比計算例 (文献 ⁽²⁹⁾ 参照)	20
4-2	車線ごとの複比の計算フロー	21
4-3	角度による制限	22
4-4	検出された直線群と角度の関係	23
5-1	正解マスク画像	25
5-2	検出画像例	25
5-3	検出線の幅及び白線部分のずれ量	25
5-4	高速道路画像の複比によるエッジ検出結果	26
5-5	高速道路画像の車線検出結果	27
5-6	キャニーフィルタ処理	29
5-7	市街地道路のエッジ抽出画像 (文献 ⁽²⁹⁾ 参照)	30
5-8	市街地道路の実験結果 (文献 ⁽²⁹⁾ 参照)	31
5-9	雑音付加画像 38 dB (文献 ⁽³⁰⁾ 参照)	31
5-10	雑音付加画像 28 dB	31
5-11	雑音付加画像 25 dB	32
5-12	雑音付加画像 23 dB	32
5-13	雑音付加画像 22 dB (文献 ⁽³⁰⁾ 参照)	32
5-14	雑音付加画像 20 dB	32

表一覧

3-1 路面標示の様式及び複比の範囲 (文献 ⁽⁶⁾ 参照)	12
4-1 提案手法と従来手法の走行車線における複比のばらつき度の比較	20
4-2 提案手法と従来手法の隣車線における複比のばらつき度の比較	20
5-1 車線検出結果の車線適合率 (文献 ⁽²⁹⁾ 参照)	28

研究業績

	題 名	発表年月	発表掲載誌	連名者
国内				
(1)	複比を用いた複数車線検出に関する検討	2008年9月	情報科学技術フォーラム, H-40	谷 誠一 河村 圭 渡辺 裕
(2)	角度と複比を用いた複数車線検出に関する一検討	2009年3月	信学春季全大,	谷 誠一 河村 圭 渡辺 裕