

平成15年度 修士論文

エピソード平面画像中における特徴軌跡抽出と
領域分割に基づく路上駐車車両の検出

指導教授 池内 克史 教授

2003年8月27日提出

東京大学大学院 情報理工学系研究科
電子情報学専攻

16157

朱 成華

ChengHua ZHU

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	2
1.2	関連研究	2
1.2.1	車載レンジセンサによる路上駐車車両計数システム	2
1.2.2	パノラマ画像を用いた路肩停車車両計数システム	3
1.3	目標	3
1.4	手法の概要	4
1.5	本論文の構成	4
第2章	EPI解析法と特徴軌跡	8
2.1	EPI解析法 [7][8][9]	9
2.1.1	ステレオ構成	9
2.1.2	ラテラルモーション	10
2.1.3	EPIの関連研究例	11
2.2	路上駐車車両の特徴軌跡	14
2.3	路上駐車車両のモデル	14
2.4	EPIの取得	15
2.5	エピポーラ平面の高さ	15
第3章	エッジ法による路上駐車車両の検出	28
3.1	奥行きグラフ	29
3.1.1	画像の分割	30
3.1.2	エッジ検出	30
3.1.3	直線抽出	30
3.1.4	奥行き角度グラフの作成	31
3.2	奥行きグラフから路上駐車車両の検出	32
3.2.1	奥行きの閾値	32
3.2.2	車長の閾値	34
3.2.3	反射光による特徴点の消失の対策	34

第4章	領域法による駐車車両の検出	40
4.1	モルフォロジー処理	41
4.1.1	2値化	41
4.1.2	モルフォロジー処理	42
4.2	テンプレートマッチング	43
4.2.1	前処理	43
4.2.2	テンプレートマッチング	43
第5章	エッジ法と領域法の結合による路上駐車車両の検出	47
5.1	実験からまとめた3つのケース	48
5.2	論理的な表現	49
第6章	実験	51
6.1	エッジ法実験	52
6.2	領域法実験	53
6.3	エッジ法と領域法の融合実験	54
第7章	総括	56
7.1	まとめ	57
7.2	応用	58
7.3	今後の課題	59
	謝辞	60
	参考文献	61
	研究業績	63

目 次

1-1	路面上の遮蔽に着目した手法	5
1-2	車体側方シルエットに着目した手法	6
1-3	車両側面画像の例 (2400x480 画素)	7
1-4	2 値画像	7
1-5	ホイール領域の大きさ	7
2-1	ステレオ構成	9
2-2	ラテラルモーションによる EPI の構築	10
2-3	EPI 上の特徴軌跡	11
2-4	ラテラルモーションのエピポーラ平面	12
2-5	3 次元時空間画像から 2 次元時空間画像の取得	16
2-6	実験結果	17
2-7	カメラの設置と座標系	18
2-8	道路画像での双曲スリット	19
2-9	車両検出	19
2-10	双曲形のオムにカメラで取得した時空間ボリューム	20
2-11	放物形のオムにカメラで取得した時空間ボリューム	20
2-12	双曲形の時空間ボリュームでの EPI	21
2-13	放物形の時空間ボリュームでの EPI	22
2-14	半径と垂直方向での切断面	23
2-15	計測法と生成される EPI	24
2-16	実世界と EPI 上での路上駐車車両のモデル	25
2-17	ラインスキャンカメラと計測車両	26
2-18	3 つのスキャン高度で分析	27
3-1	エッジ法のブロックダイアグラム	29
3-2	ROI と画像分割	30
3-3	エッジ検出	31
3-4	Hough 変換による直線抽出時の射影	32
3-5	Hough 空間	33

3-6	傾きグラフ	34
3-7	奥行きグラフ	35
3-8	閾値の求め方法	35
3-9	計測道路の幅員	36
3-10	処理領域による車両のピクセル長さ	37
3-11	車体からの反射光の影響	38
3-12	三つの領域の論理和	39
4-1	領域分割法のブロックダイアグラム	41
4-2	取得した EPI	42
4-3	EPI の 2 値化画像	42
4-4	構造要素	42
4-5	モルフォロジー処理結果	43
4-6	モルフォロジー処理後求めた奥行き曲線	44
4-7	モルフォロジー処理画像のピクセルシフト結果	44
4-8	25 ピクセルのテンプレートのマッチング結果	45
4-9	70 ピクセルのテンプレートのマッチング結果	46
4-10	二つの幅のテンプレートでマッチングした結果	46
5-1	case1	48
5-2	case2	49
5-3	case3	50
6-1	計測場所	52
6-2	駐車車両以外の物体の検出	53
6-3	複雑なテクスチャの駐車車両の認識漏れ	54
6-4	背景からの反射光による過剰認識	54
6-5	複数台が 1 台に認識されることによる認識漏れ	55
7-1	同期を取った EPI 画像とパノラマ画像	59

表 目 次

6-1	周波数 1.8kHz の場合のエッジ法の実験結果	52
6-2	周波数 200Hz の場合のエッジ法の実験結果	53
6-3	周波数 1.8kHz の場合の領域法の実験結果	53
6-4	周波数 200Hz の場合の領域法の実験結果	54
6-5	周波数 200Hz の場合の融合実験結果	55

第1章

序論

1.1 研究の背景

路上駐車は交通渋滞と交通事故の原因になるばかりでなく、緊急車両の通行の妨げとなり、事故や災害をより大きなものにする可能性もある [1], [2]。このように混雑した都市交通において大きな悪影響を持っている路上駐車の実態を把握することは、効果的な道路交通施策を考える上で重要である。現在、路上駐車の実態把握として、路上駐車車両台数の計測が行われているが、計測車両に同乗した調査員による手動計測で行われている。このため、数え間違いなどがあり、計測結果における十分な信頼性が確保できず、また、人件費による多くの経費を必要としている。これを自動化し、頑健で、信頼性の高い、かつ効率的な計測法を実現することによって、道路交通の実態を容易に把握し、道路交通施策に反映させることができる。

1.2 関連研究

他の手法を用いた、いくつかの発表がされている。ここでは、車載型センサによる距離データの計測とパノラマ画像解析による路上駐車車両の検出に基づく、2つの関連研究について紹介する。

1.2.1 車載レンジセンサによる路上駐車車両計数システム

車載型レーザスキャニングセンサを用いて取得された、パノラマ距離画像 [3] を解析し、路上駐車車両を検出する手法が提案されている ([4])。進行方向に対して90度左に向けて車載したレーザスキャニングセンサを、計測車両の等速走行中に、鉛直方向にスキャンさせることで、パノラマ距離画像が生成される。次に、路面のクラスタリングから路面点集合を生成し、路上駐車車両によって路面上に生じる、遮蔽領域の境界を「奥行き曲線」として抽出する (図 1-1)。さらに、車体側面のクラスタリングから車体側面点集合を生成し、側方シルエットの境界を「高さ曲線」として抽出する (図 1-2)。この2つの曲線に対して各々、閾値を用いることで路上駐車車両を検出し、その結果の論理和により、路上駐車車両の台数を検出している。障害物が存在しない状況を仮定し、計測車両が、20km/h までの低速で、一定な速度で、路上駐車車両の隣接車線上を直線走行しているという理想的な計測条件を満たした実験の結果として、検出率は100%であると報告している。レーザスキャニングセンサは能動的なセンサであるが、レーザスポット径に応じた誤差を含み、機械式のスキャン機構のため角度分解能が低く、計測される情報は粗くなる。一方、ラインスキャンカメラは受動的なセンサであるが、精密な CCD 技術と電気式の高速なスキャニングレートによって、時間および空間に対して緻密な情報が計測可能と

なる。カメラが受動センサであるため、環境中に与える影響も少ない。対象物体までの奥行きを計測する点では、レーザスキャニングセンサは直接的計測であり、優れている。また、カメラはレーザセンサよりコストが低いという利点を持っている。ラインスキャンカメラは、対象物体までの奥行きの情報だけではなく、対象物体のテクスチャの情報も同時に計測できるため、異なる用途への発展性を持っている。

1.2.2 パノラマ画像を用いた路肩停車車両計数システム

車載したテレビカメラで撮影した路肩の映像から作成されたパノラマ画像を解析することで、路肩停車車両の台数を計数する手法が報告されている ([5])。この手法では、ビデオカメラを計測車両に搭載して、隠蔽なしに撮影した路肩の停車車両の映像から、図 1-3 のようなパノラマ画像を作成する。このパノラマ画像について、ホイール領域を白に、タイヤ領域を黒に分離する動的 2 値化処理を行う (図 1-4)。白領域に対してラベル付けを行い、領域連結処理によりホイール領域を求め、その領域の外郭方形の大きさから車輪を検出する (図 1-5)。検出された車輪数の半数を路肩停車車両数としている。路肩停車車両が隠蔽されない撮影条件のもとで実験した結果、木漏れ日やマンホールなどが車輪として過剰に検出されたり、前後の一方の車輪の未検出が起きたりしたが、車両の検出率は 94 % で、前後車輪の両方ともが検出されなかった車両は 3 % であると報告している。この手法が隠蔽に弱いことに比べて、私たちの手法の基礎となる EPI は隠蔽された特徴の検出にも効果的な利点を持っている。さらに、駐車車両を検出するために我々が利用している情報は時間軸での連続的な特徴情報であり、駐車車両の特定な部分 (ホイール) の情報に基づく手法よりもっと信頼性が高い。

1.3 目標

私たちはコストの安いカメラを用いて得られた画像から対象物体までの距離情報と対象物体のテクスチャ情報を取得し、これらの情報に基づいて路上駐車車両を検出するロバストなシステムを構築する。具体的に次のような目標を実現しようとしている。

- 高い検出率
- ロバスト
- 実時間処理

1.4 手法の概要

私たちはラインスキャンカメラ [6] による路上駐車車両の計測を提案している。ラインスキャンカメラを用いて取得したライン画像を時系列順序に積層して、エピポーラ平面画像を生成し、画像中の3次元情報とテクスチャ情報を画像処理によって抽出することで、路上駐車車両の検出をする。エッジ法ではエピポーラ平面画像中で検出された特徴軌跡の傾き変化により、特徴点の奥行き変化の情報を取得し、駐車車両の有無を判断している。領域法ではエピポーラ平面画像中の特徴軌跡の数の多少によって駐車車両の有無を判断している。ラインスキャンカメラの高いライン走査周波数により、空間中の3次元情報と対象物体のテクスチャ情報を緻密に取得することができる。低周波数の場合、エッジ法と領域法を結合することにより、高い検出率を得ることが出来る。

1.5 本論文の構成

以下に本章以降の構成を示す。

第2章 EPI解析法と特徴軌跡について説明する。

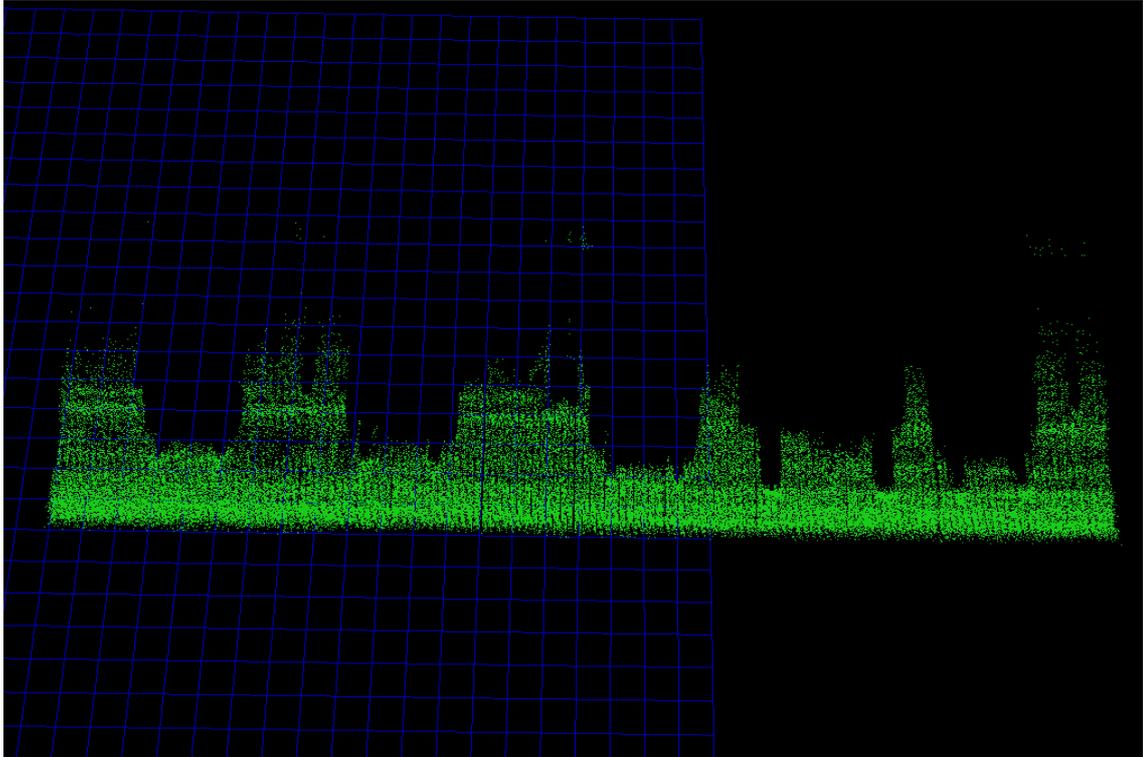
第3章 エッジ法による路上駐車車両の検出について説明する。

第4章 領域法による路上駐車車両の検出について説明する。

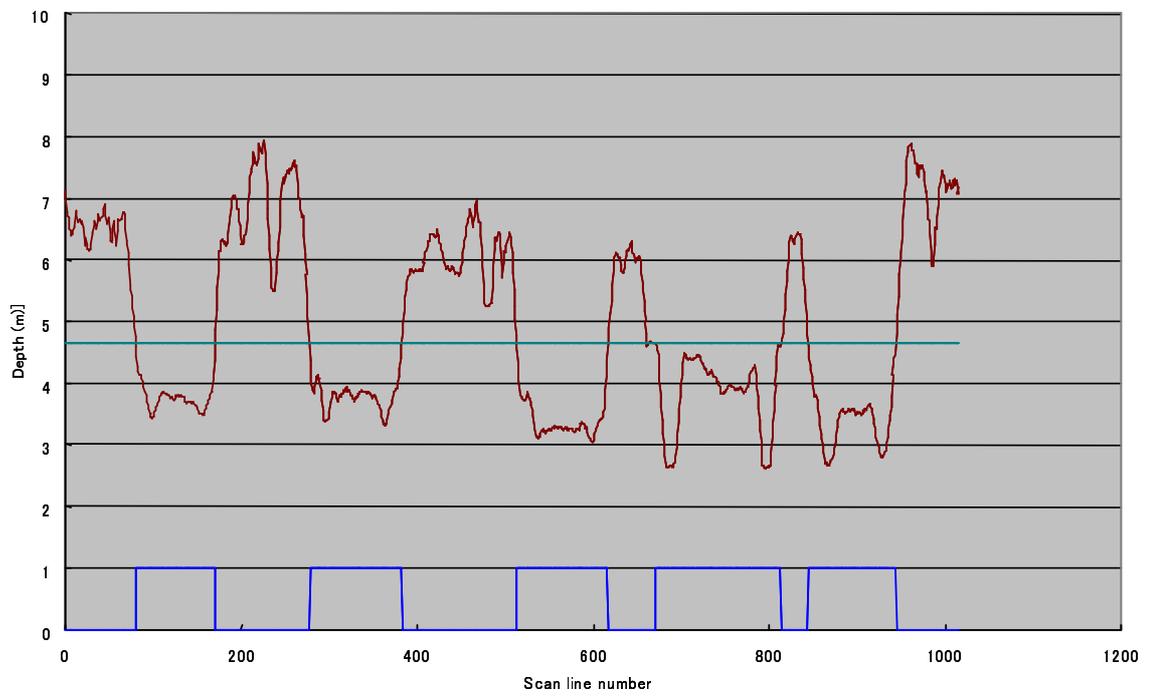
第5章 エッジ法と領域法の結合による路上駐車車両の検出について説明する。

第5章 実験結果について述べる。

第7章 本研究の総括と今後の課題について述べる。

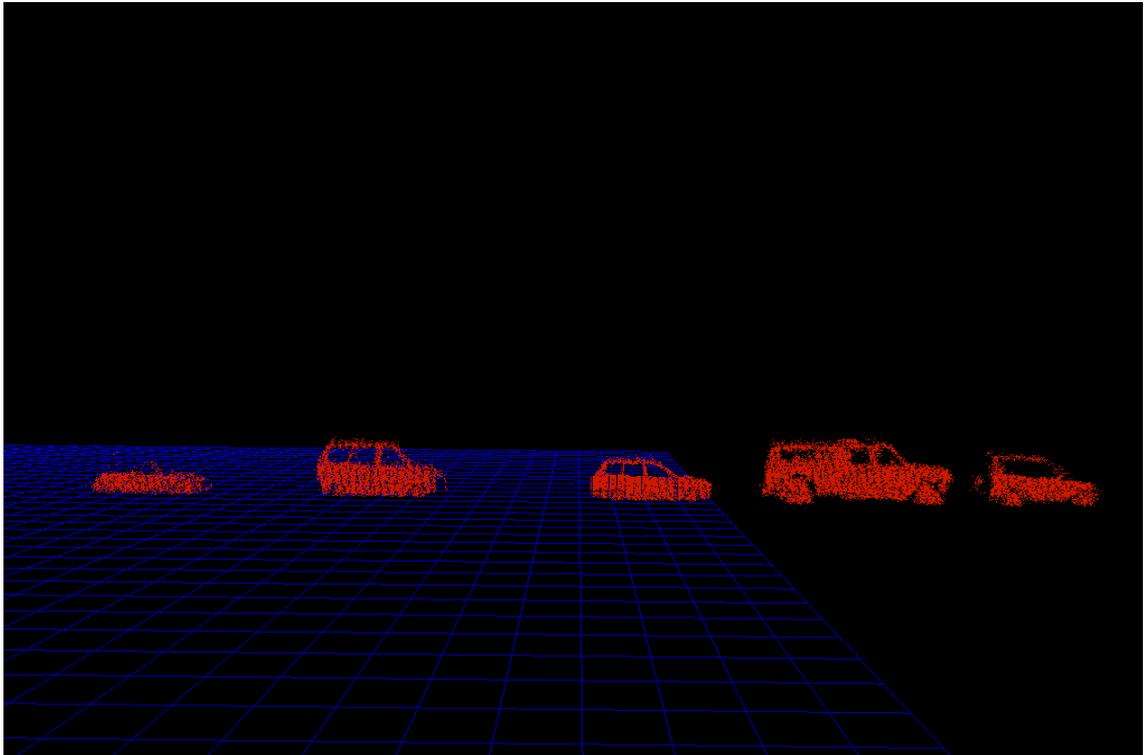


(a) 路面点群の抽出後

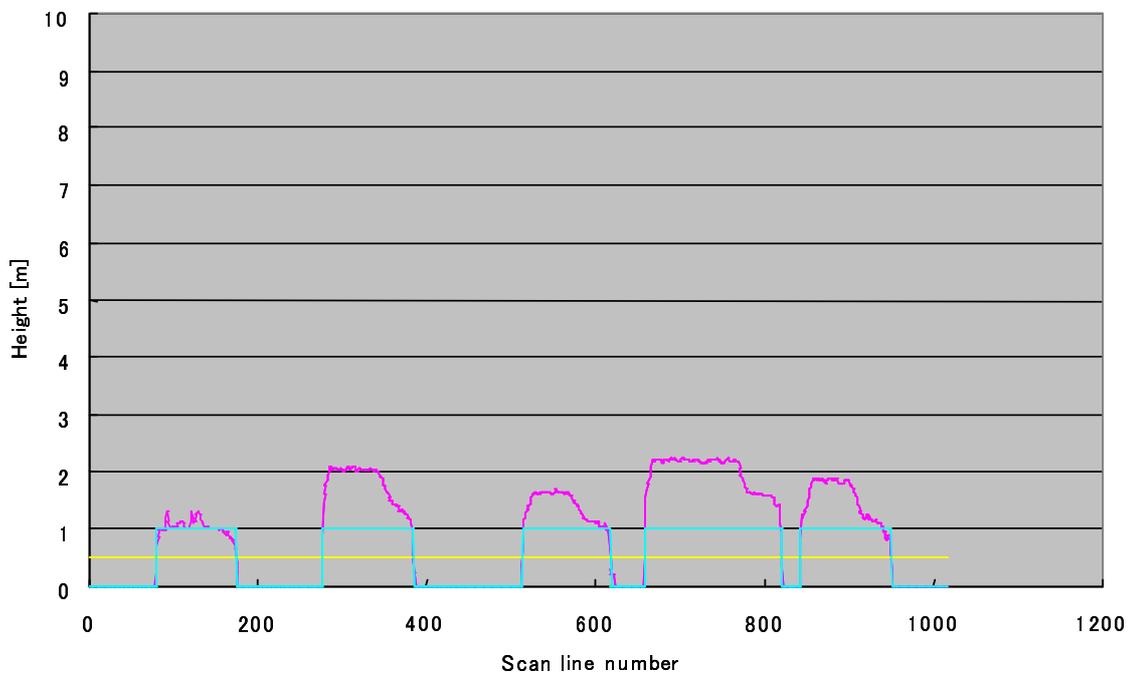


(b) 遮蔽境界曲線

図 1-1: 路面上の遮蔽に着目した手法



(a) 抽出した車体側面点群



(b) 側方シルエット曲線

図 1-2: 車体側方シルエットに着目した手法

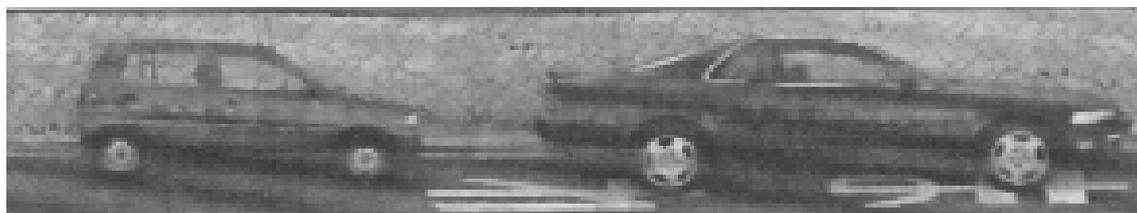


図 1-3: 車両側面画像の例 (2400x480 画素)

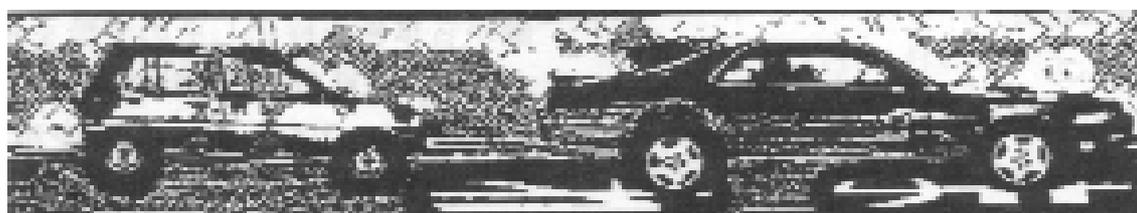
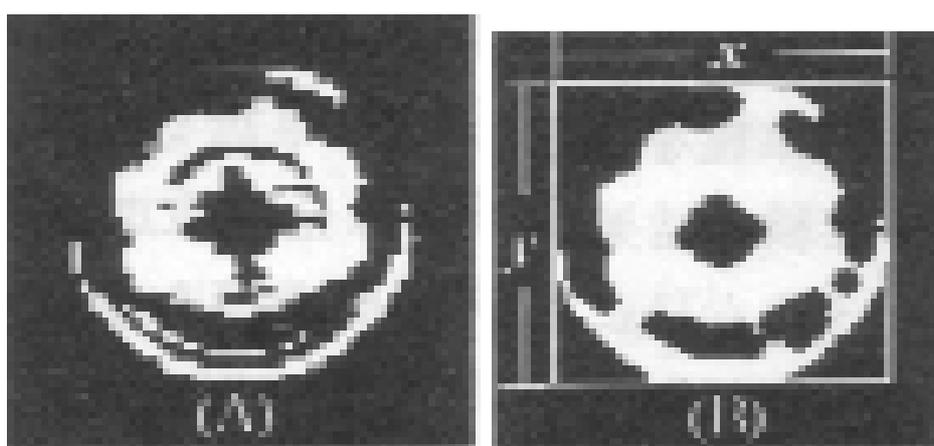


図 1-4: 2 値画像



(a) 前輪 2 値画像

(b) ホイール領域に接する外郭方形

図 1-5: ホイール領域の大きさ

第2章

EPI解析法と特徴軌跡

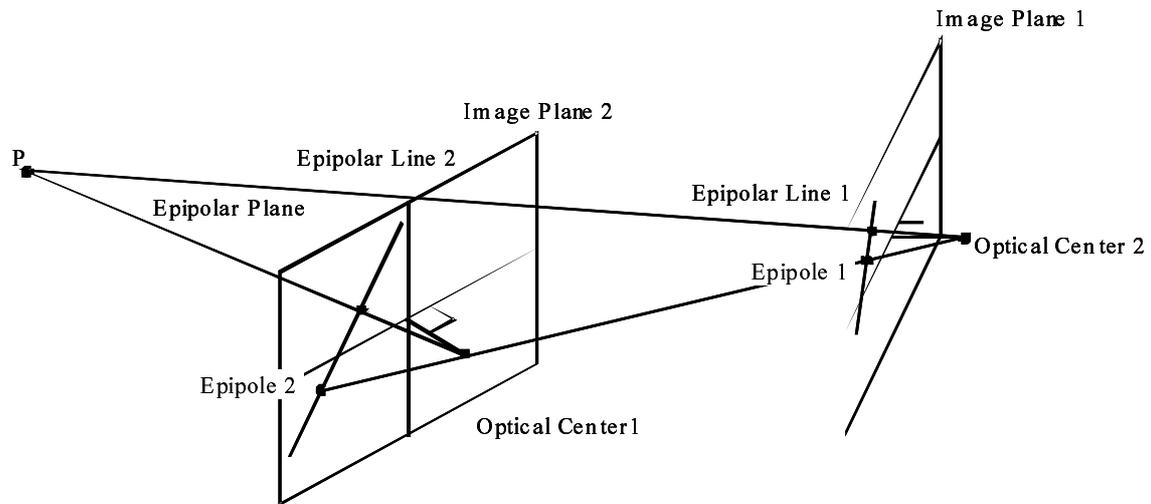


図 2-1: ステレオ構成

本章では，時空間画像の一つである，EPIの解析法について紹介する．EPIは対象物体の3次元情報とテクスチャ情報を含んでいる．EPIは画像センサーのラテラルモーションによって取得することが出来る．また，EPIの関連研究としていくつかの時空間画像の解析についても紹介する．そして，EPI解析法を利用した，路上駐車車両の検出の基本的な構想について説明する．

2.1 EPI解析法 [7][8][9]

2.1.1 ステレオ構成

ここでは，EPIの基礎となるステレオ構成を述べる．

図 2-1 は一般的なステレオ構成を表している．2台のカメラは，ピンホールモデルによって，光学中心（Optical Center）とレンズ前の画像平面（Image Plane）および情景中の特徴点（Feature Point） P によって表現されている．エピポーラ平面（Epipolar Plane）は，特徴点 P と2つの光学中心によって構成される平面である．エピポーラ平面のすべての点は，各々の画像平面上の一直線に投影され，この直線をエピポーラ線（Epipolar Line）と呼ぶ．2つの光学中心を結ぶ直線とエピポーラ線との交点をエピポール（Epipole）という．エピポーラ平面は各画像平面上のエピポーラ線をすべて含み，これら一群のエピポーラ線から新たに生成される画像をエピポーラ平面画像（EPI epipolar plane image）という．EPIは特徴点に関する3次元情報を含む．

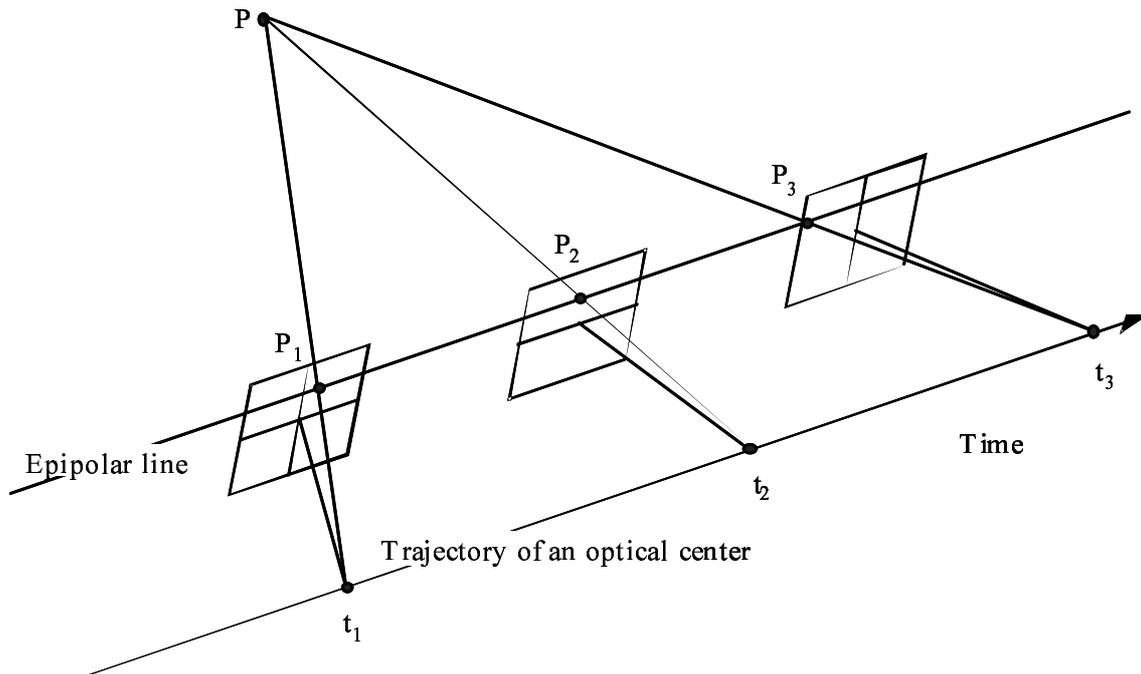


図 2-2: ラテラルモーションによる EPI の構築

2.1.2 ラテラルモーション

ここではラテラルモーションによる EPI の生成について説明し、特徴点までの距離と特徴軌跡との関係について分析する。EPI は、2 台のカメラによるステレオ構成と同様に、カメラの光学中心の直線移動に際して、取得される画像列からも生成できる。

図 2-2 に示すように、光学中心の直線軌跡に対して直交する向きにカメラを向けて、カメラを直線移動させる場合、EPI は特徴点と光学中心の軌跡を含む平面となる。このときのカメラの動作をラテラルモーション (Lateral Motion) という。ラテラルモーション時の各画像平面上のエピポーラ線は、光学中心の軌跡と平行な同直線となる。この際に生成される EPI は、図 2-3 のようになる。情景中の特徴点は EPI 上で一本の軌跡を描き、これを特徴軌跡 (Feature Path) という。カメラのラテラルモーション時の速度が一定の場合、特徴軌跡は直線となる。エピポーラ平面上の特徴点 p と光学中心の移動の関係を図 2-4 に示す。時刻 t_1 と t_2 における画像平面上の投影点を各々 p_1 と p_2 とし、画像平面上の移動距離を $\Delta u = |u_1 - u_2|$ とする。光学中心からの画像平面および特徴点までの距離を各々 h と D とする。光学中心の移動速度を V (一定) とする。 h に対する D の比率は、 Δu に対する $V \times \Delta t$ の比率に等しい。つまり、EPI 上の特徴軌跡の傾きを $m = \Delta t / \Delta u$ とすれば、距離 D は傾き m に比例し、以下の式が成り立つ。

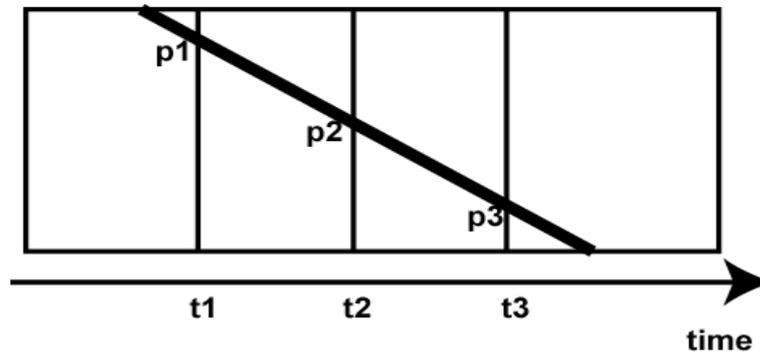


図 2-3: EPI 上の特徴軌跡

$$D = h \times \frac{V \times \Delta t}{\Delta u} = h \times V \times m$$

2.1.3 EPI の関連研究例

EPI に関するいろいろな研究が行われている [10][11][12][13][14][15][16][17] . ここでは , 3 次元時空間画像の切断方法によるいくつかの関連研究を紹介する .

サインスリットによる 2 次元時空間画像からの 3 次元直線の抽出 [10]

この論文では 3 次元直線を抽出するための手法を紹介している . 手法は 3 次元時空間画像をサインスリットで切断することにより , 3 次元情報を含んだ 2 次元時空間画像の解析に変換する .

3 次元時空間画像から 2 次元時空間画像への変換は次のようなステップで導いている .

- 3 次元直線のパラメータを実空間座標からカメラ座標系に変換する
- 3 次元直線が 2 次元時空間空間での表現を導いて次のような式を得る .

$$fQ_X + vQ_Y + uQ_Z + svQ_d = s(us_X - fs_Z) \quad (2.1)$$

Q_X, Q_Y, Q_Z, Q_d は 3 次元直線のパラメータで , u, v は画像平面の座標である . 上の式で f, v, u, sv が線形関係でないと 3 次元直線のパラメータを求めることが出来る . サインカーブ適用可能である .

$$u = a \sin\left(\frac{2\pi v}{K}\right) \quad (2.2)$$

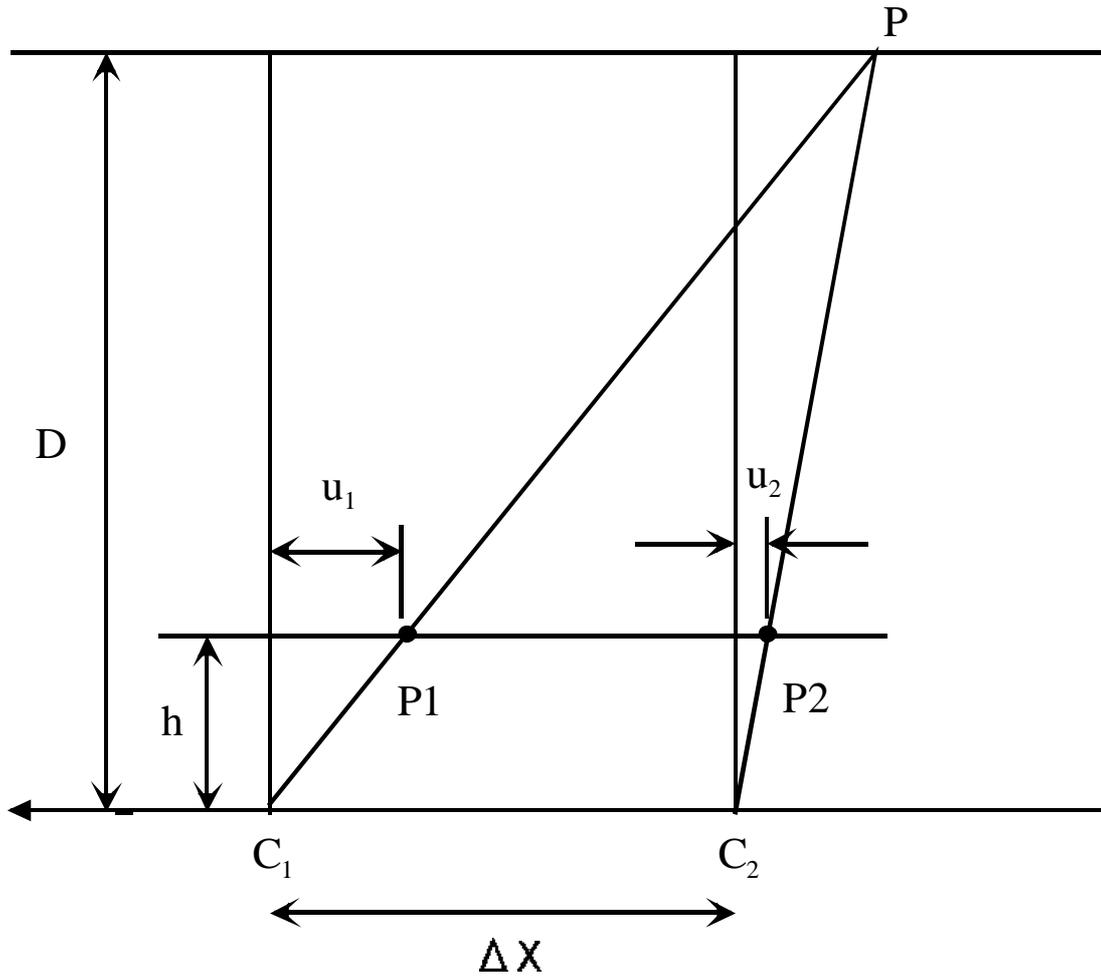


図 2-4: ラテラルモーションのエピポーラ平面

というサインカーブを使用している．ここで a は振幅である．式 2.2 を式 2.1 に代入すると

$$fQ_X + vQ_Y + a\sin\left(\frac{2\pi v}{K}Q_Z\right) + svQ_d = s\left(a\sin\left(\frac{2\pi v}{K}s_X\right) - fs_Z\right) \quad (2.3)$$

になる．これから，3次元直線が2次元時空間画像では曲線であるということが分かる． v と s は2次元時空間画像の二つの座標軸である．

四つのパラメータを決めるためにハフ変換を使っている．2次元時空間画像の曲線状で $\sin\left(\frac{2\pi v_1}{K}\right) = \sin\left(\frac{2\pi v_2}{K}\right)$ を満たす二つの点 (s_1, v_1) と (s_2, v_2) で

$$(v_1 - v_2)Q_Y + (s_1v_1 - s_2v_2)Q_d = s_1\left(a\sin\left(\frac{2\pi v_1}{K}s_X\right) - fs_Z\right) - s_2\left(a\sin\left(\frac{2\pi v_2}{K}s_X\right) - fs_Z\right) \quad (2.4)$$

を得る．式 2.4 に対してハフ変換をして Q_Y と Q_d を求める．同様に Q_Y と Q_d を式 2.3 に代入して Q_X と Q_Z も求められる．図 2-6 に2組の実験結果が示されている．

左から右にかけて各画像シーケンス，2次元時空間画像，エッジ画像，セグメント画像，結果（正面からのビューア，上からのビューア，側面からのビューア）である．

ビデオカメラを用いた，2次元時空間画像の変換による交通情報の取得 [11]

この論文では道路の上側に設置されたビデオカメラ（図2-7(a)）で通過する車両を検出する手法について書いている．図2-7(b)で Y 軸は垂直方向の座標軸で， Z 軸は水平で，道路に平行している． α は光学軸と Z 軸との角度である．

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 1 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\frac{Y}{y} = \frac{X}{x} = \frac{Z_0 - vt}{f} \quad (2.6)$$

式2.5と式2.6から式2.7を得られる．

$$\frac{f}{y - f \tan \alpha} = \frac{\cos^2(\alpha)(Z_0 - vt) - Y \sin(\alpha) \cos(\alpha)}{Y} \quad (2.7)$$

ここで $C = (y - f \tan \alpha)(x + a)$ のような双曲線スリットで2次元時空間画像を得る．すると，

$$x = -a - \frac{C \sin(2\alpha)}{2f} + \frac{Z_0 C \cos(\alpha)^2}{Yf} - \frac{Cv \cos(\alpha)^2}{Yf} t \quad (2.8)$$

になる．従って， Y ， Z ， vc ， f と α が一定であれば2次元時空間画像で $x-t$ は直線になる． X 軸に平行で水平の線を捜せばいい．このような線は車によくある線であるのでこれに基づいて車両を検出することが出来る．実験結果は図2-9にある．

オムニ画像に対する時空間画像の解析 [12]

この論文では，双曲形と放物形の2種類のオムニカメラを用いて取得した時空間ボリュームの解析について説明している．図2-10(a)と図2-11(a)は双曲形と放物形のオムニカメラを示している．図2-10(b)と図2-11(b)は双曲形と放物形のオムニカメラで取得した時空間ボリュームである．この2種類の時空間ボリュームをいくつかの切断面で切断して分析している．

ストリーム曲線に沿って切断：

図2-12(a)と図2-13(a)は双曲形と放物形時空間ボリュームをストリーム曲線に沿って切断した断面を示している．図2-12(b)と図2-13(b)は図2-12(a)と図2-13(a)の曲線を直線に変換したのである．

半径に沿って切断：

図 2-14(a) は時空間ボリュームを半径に沿って切断した断面を示している．断面は PVI になっている．

垂直面で切断：図 2-14(b) は時空間ボリュームを垂直切断面で切断した断面を示している．実空間の垂直エッジは 2 次元時空間画像で直線になっている．

2.2 路上駐車車両の特徴軌跡

スキャンラインがカメラの運動軌跡と平行する場合，一本のスキャンラインを時間方向で累積することにより，EPI を形成することが出来る（図 2-2）したがって，撮像素子として 2 次元 CCD センサの代わりに，1 次元 CCD センサを用いることで十分であり，ラインスキャンカメラの画像がそのまま EPI を生成することになる．ラインスキャンカメラの利点のひとつは，数 kHz におよぶ極めて高いライン走査周波数である．ライン走査周波数が高いことで，EPI は時系列方向に緻密に構成されるため，EPI 上の特徴軌跡は極めて滑らかになる．駐車車両の自動計測法として，まず，計測車両にラインスキャンカメラを搭載し，カメラのラテラルモーションを実現する．カメラを，走査平面が水平面に，高さが駐車車両本体を切断するように設置する．図 2-15 に計測法の概要と得られる EPI 上の特徴軌跡を示す．

特徴軌跡に含まれている，次のような情報によって駐車車両の有無を検出することが出来る．

- 奥行き情報

カメラと特徴点の距離 D は対応する特徴軌跡が EPI 上での傾きから計算することが出来る．特徴軌跡 (a) と (d)，(b) と (c) の傾きの違いから，駐車車両の有無を検出することができる．

- テクスチャ情報

駐車車両は人造物であり，環境に比べて少ない特徴点を持っている．特徴点の数により，駐車車両を検出することも出来る．すなわち，EPI 上の特徴軌跡の数によって駐車車両を検出することが出来る．

2.3 路上駐車車両のモデル

実世界と EPI 上での路上駐車車両の対応関係は図 2-16 に示している． L と W は路上駐車車両の長さおよび幅である．カメラから路上駐車車両までの距離奥行きは D である．EPI 上で対応する路上駐車車両の長さおよび幅は L_{EPI} と W_{EPI} で表示する． L と

L_{EPI} , W と W_{EPI} の変換はカメラパラメータを介して次のように表示される．

$$L_{EPI} = \frac{L \times f}{V}$$

$$W_{EPI} = \frac{W \times f \times \tan \frac{\phi}{2}}{V}$$

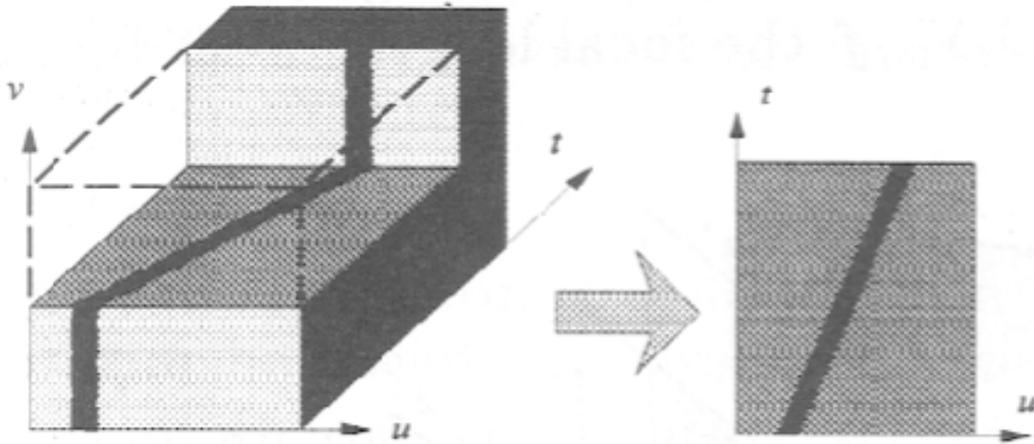
ここで f , ϕ , V はラインスキャンカメラの周波数, 画角, 移動速度である．

2.4 EPIの取得

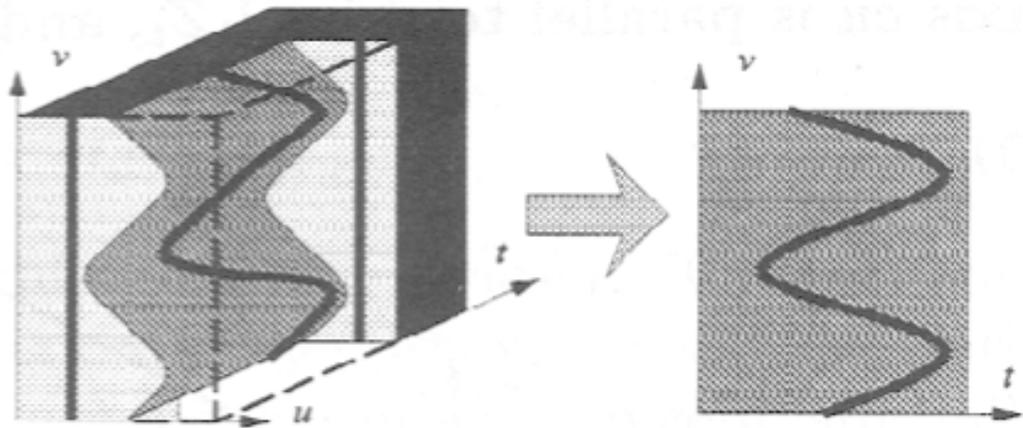
ラインスキャンカメラの方向は路上駐車車両に向けていて, カメラの移動方向と垂直である (図 2-17) . スキャン平面は水平である . 計測車両は車線に沿って等速直線運動をする . スキャン平面はエピポーラ平面になり, 特徴点は EPI 上で特徴軌跡を描く .

2.5 エピポーラ平面の高さ

EPI 上で安定した特徴軌跡を描くのは, カメラの振動による影響を受けにくい鉛直線上の特徴点に対応するものである . この観点から, スキャン平面の高さとして, 2-18 に示す 3 通りを考える . スキャン平面を最も高くした場合, 車窓を通した背景が撮影され, 得られる EPI は複雑なものになる . スキャン平面を中段にした場合, ドアの鉛直方向の境界線上の特徴点が EPI 上に特徴軌跡を描く . また, 車体の境界線上の特徴点が EPI 上に特徴軌跡を描く . さらに, 取得される EPI は車体領域と背景領域とに区別できる . スキャン平面を最も低くした場合, タイヤによる特徴軌跡が EPI 上に現われる . この特徴派鉛直方向の直線でないため, カメラの振動の影響により, EPI 上への出現の仕方が変化するので, 不向きである . 以上の 3 つの高さの考察から, スキャン平面は中段にするのがよい .

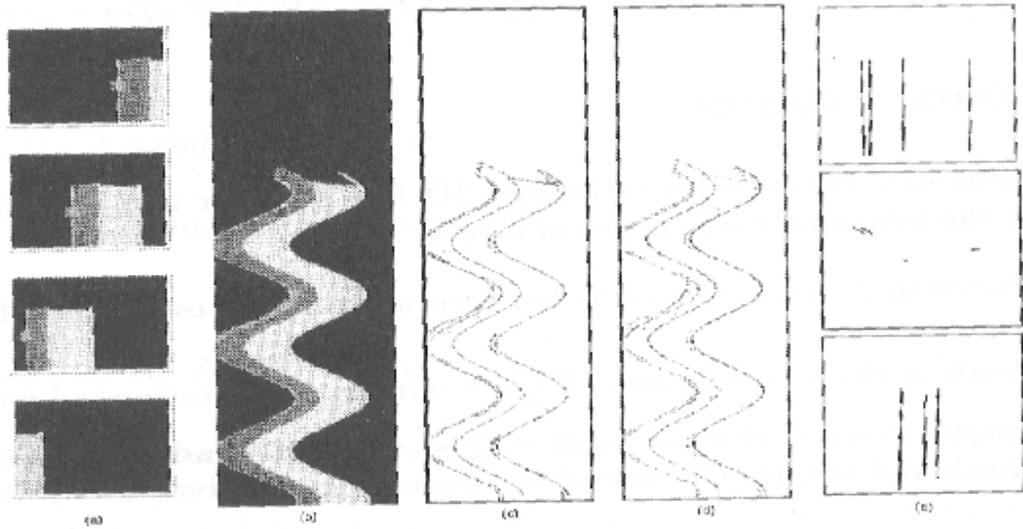


(a) エピポーラ平面画像

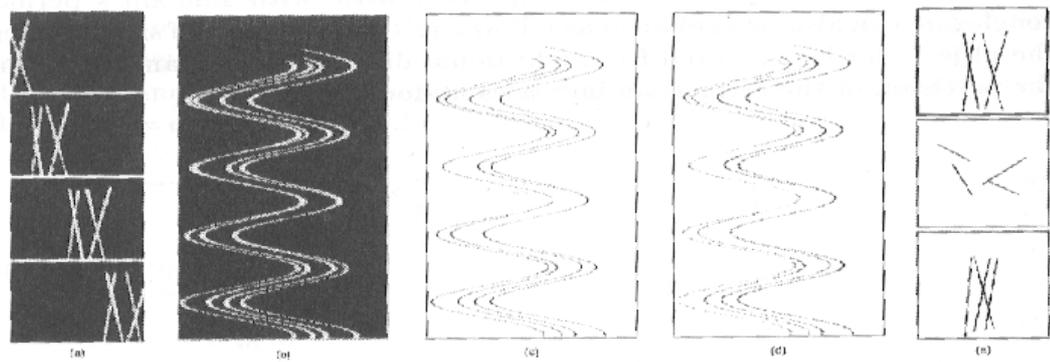


(b) サインスリットによって得られた2次元時空間画像

図 2-5: 3次元時空間画像から2次元時空間画像の取得

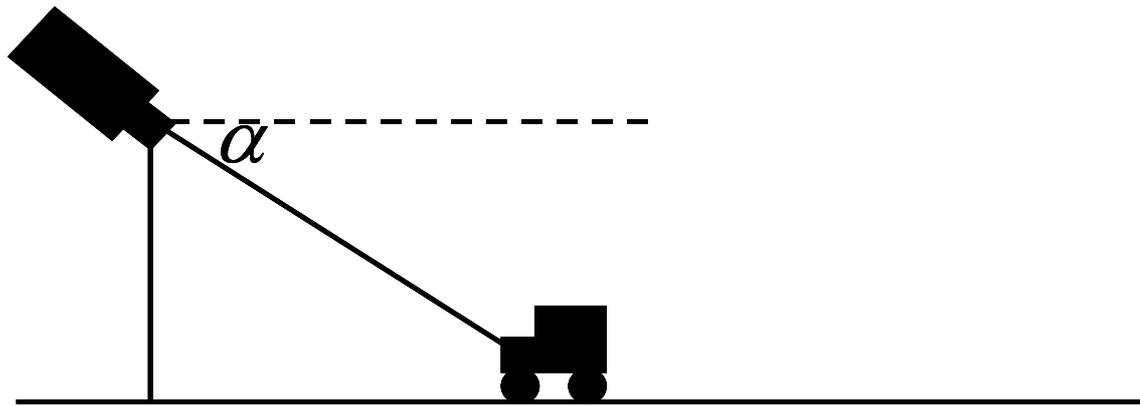


(a) エピポーラ平面画像

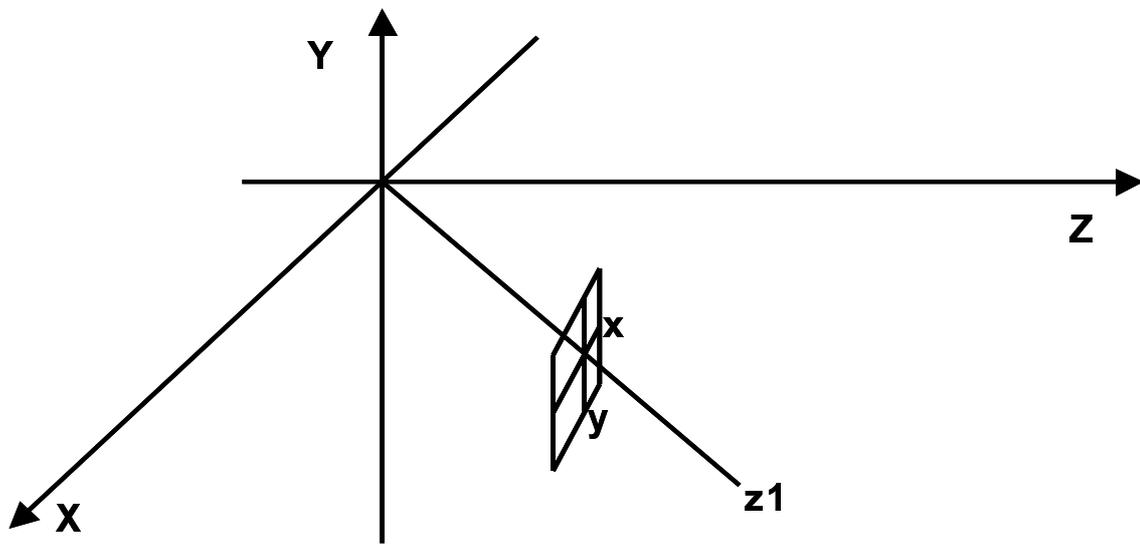


(b) サインスリットによって得られた2次元時空間画像

図 2-6: 実験結果



(a) カメラの設置



(b) 二つの座標系

図 2-7: カメラの設置と座標系



図 2-8: 道路画像での双曲スリット

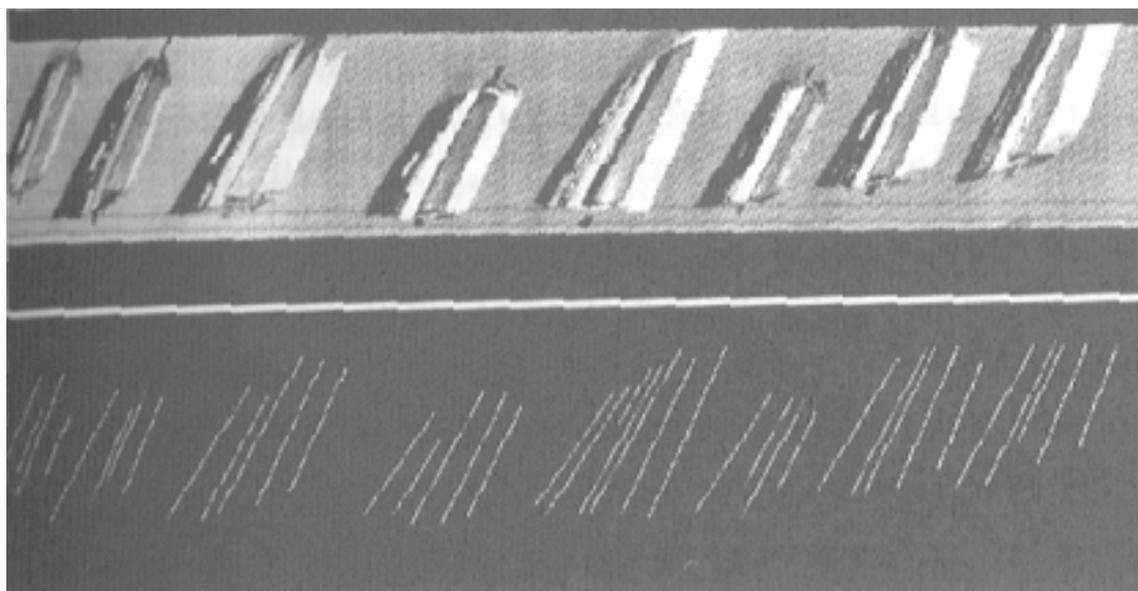


図 2-9: 車両検出

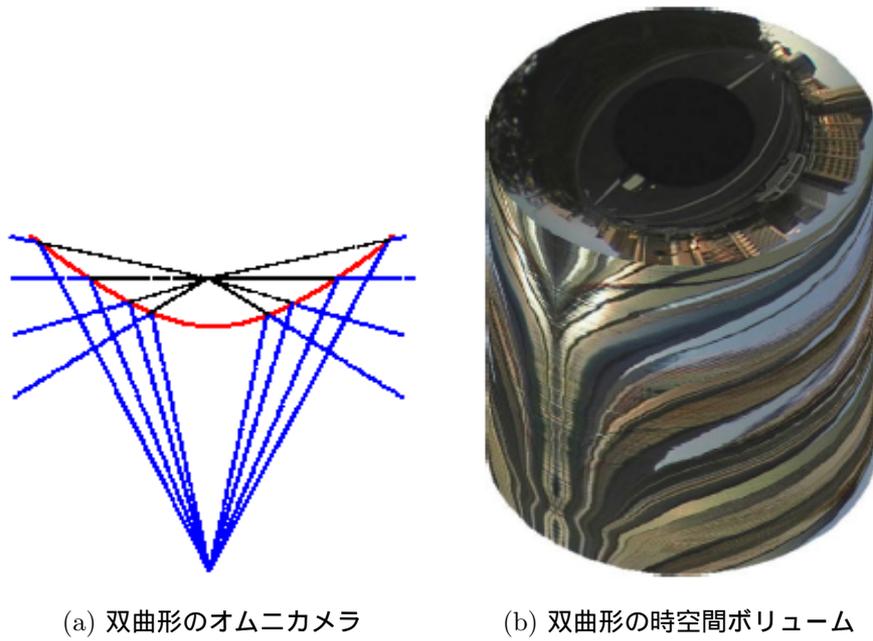


図 2-10: 双曲形のオムニカメラで取得した時空間ボリューム

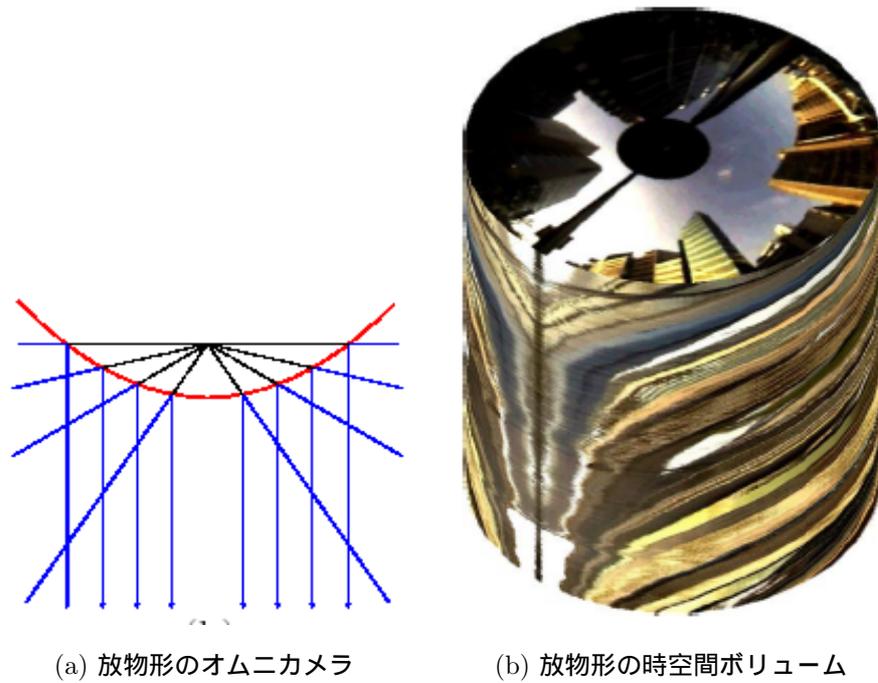
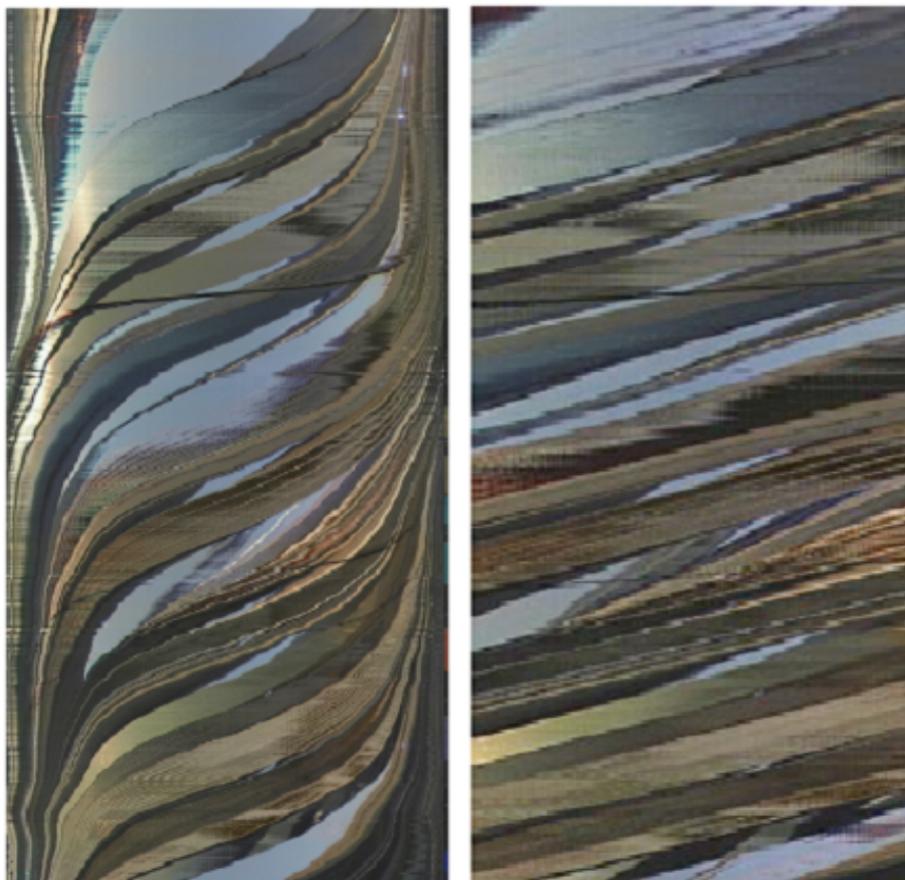


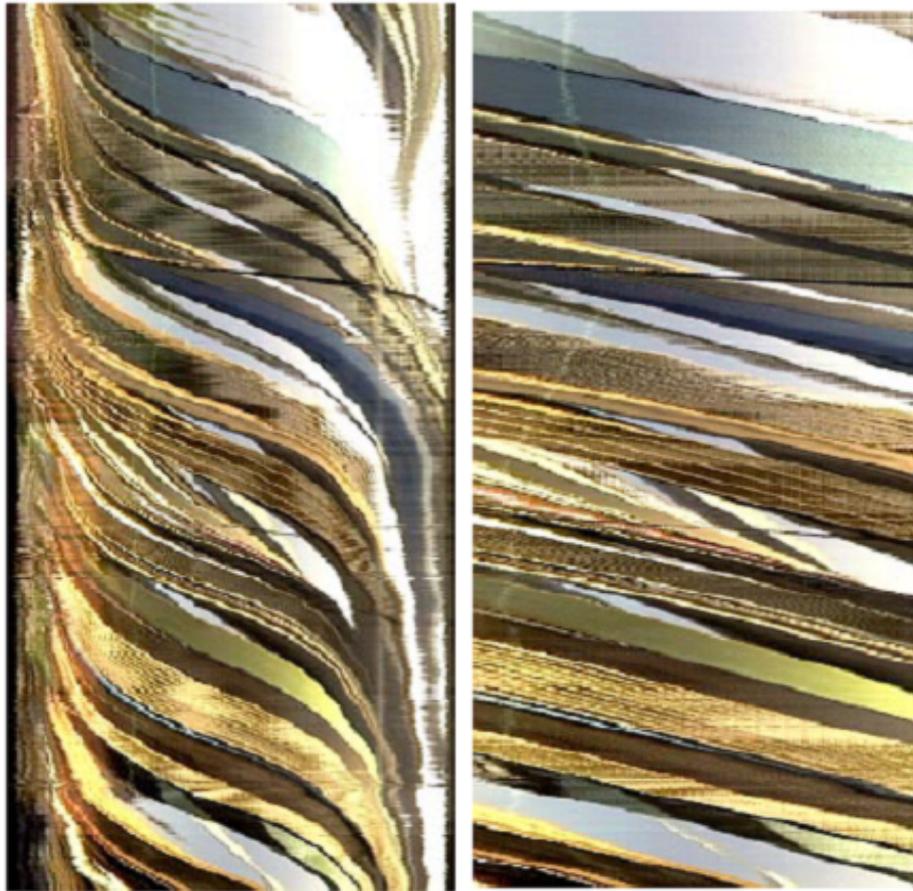
図 2-11: 放物形のオムニカメラで取得した時空間ボリューム



(a) 双曲形の時空間ボリュームのストリーム

(b) 曲線を直線に変換した後の変換された EPI

図 2-12: 双曲形の時空間ボリュームでの EPI



(a) 放物形の時空間ボリュームのストリーム

(b) 曲線を直線に変換した後の変換された EPI

図 2-13: 放物形の時空間ボリュームでの EPI

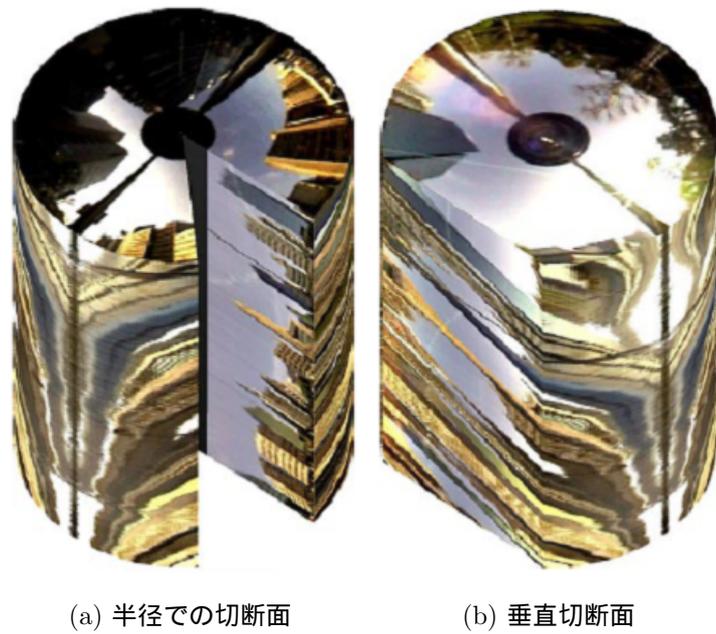
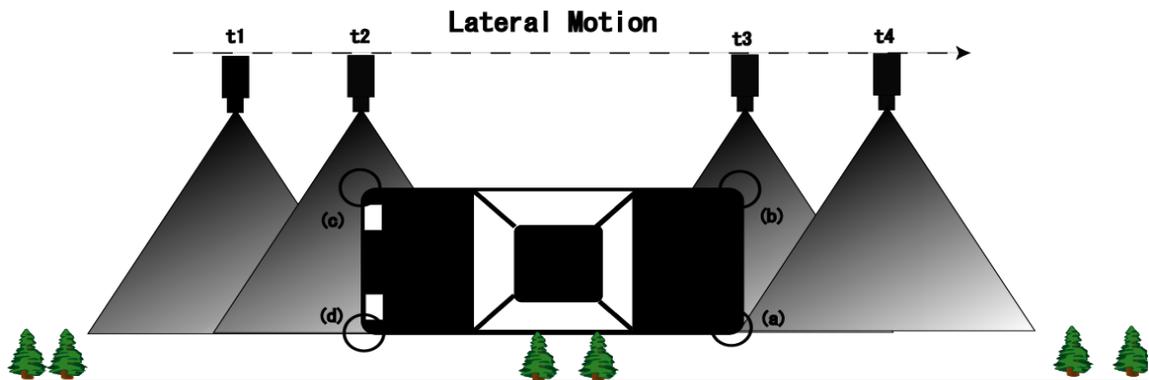
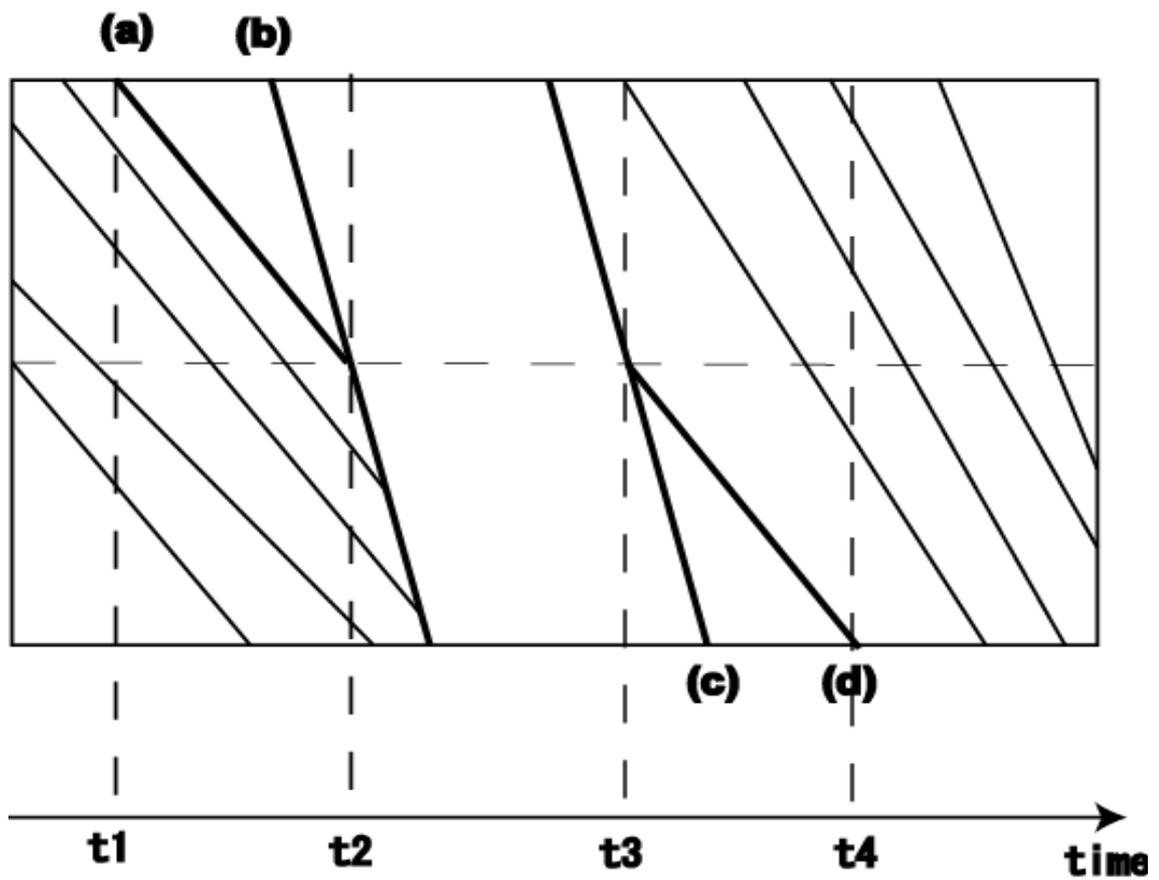


図 2-14: 半径と垂直方向での切断面



(a) 路上駐車車両の計測法



(b) 生成される EPI

図 2-15: 計測法と生成される EPI

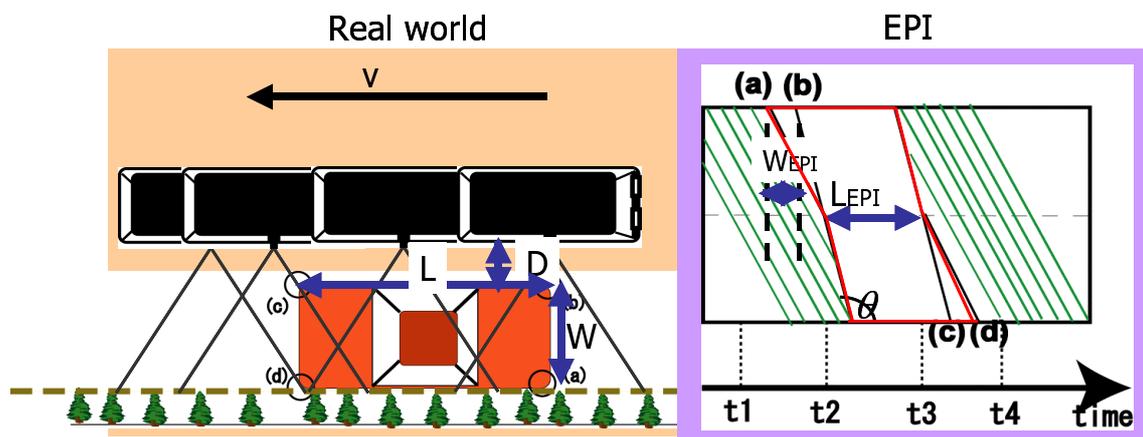
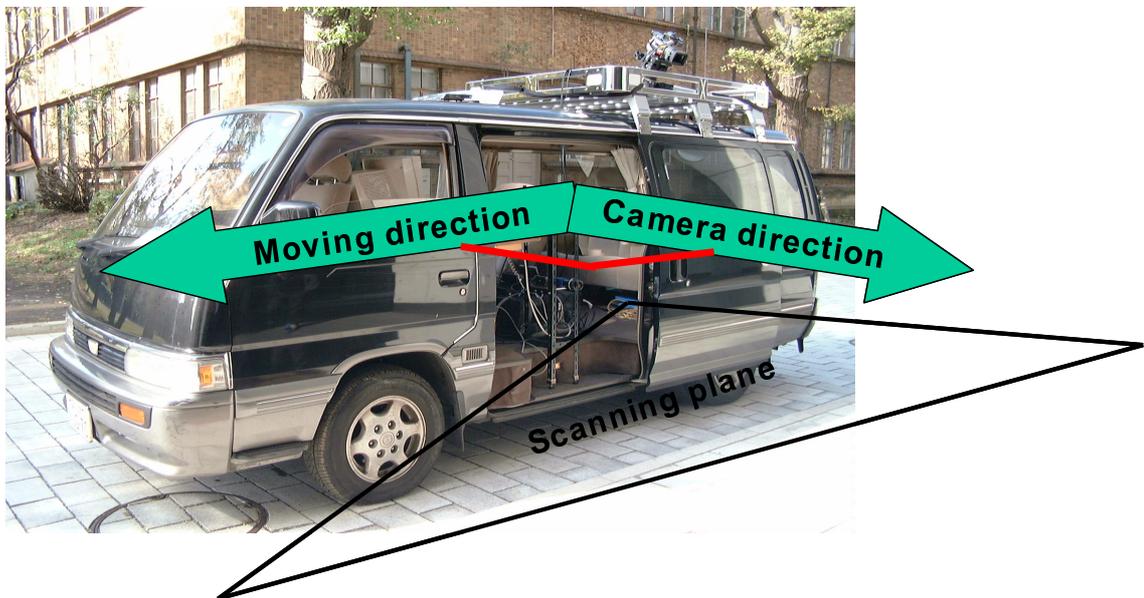


図 2-16: 実世界と EPI 上での路上駐車車両のモデル



(a) ラインスキャンカメラの正面図

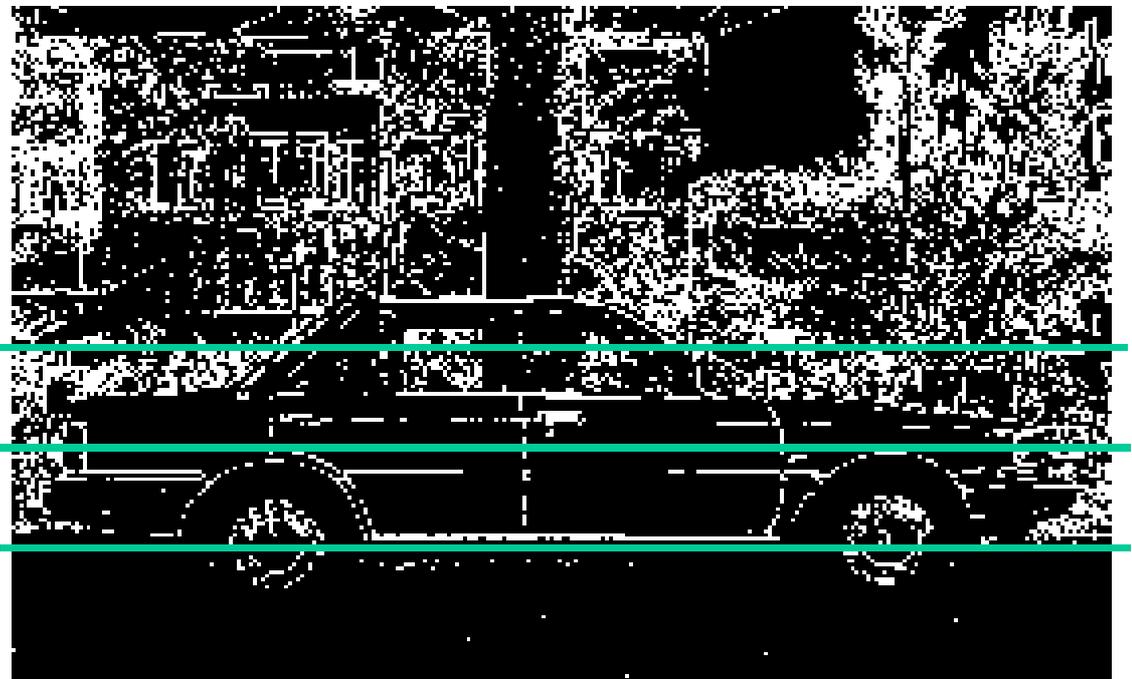


(b) 全体図

図 2-17: ラインスキャンカメラと計測車両



(a) 駐車車両



(b) 3つのスキャン高度

図 2-18: 3つのスキャン高度で分析

第3章

エッジ法による路上駐車車両の検出

ブロックダイアグラム図3-1に示したように、エッジ法ではEPI処理によって取得した奥行きの変化（奥行きグラフ）を分析することによって路上駐車車両を検出する。

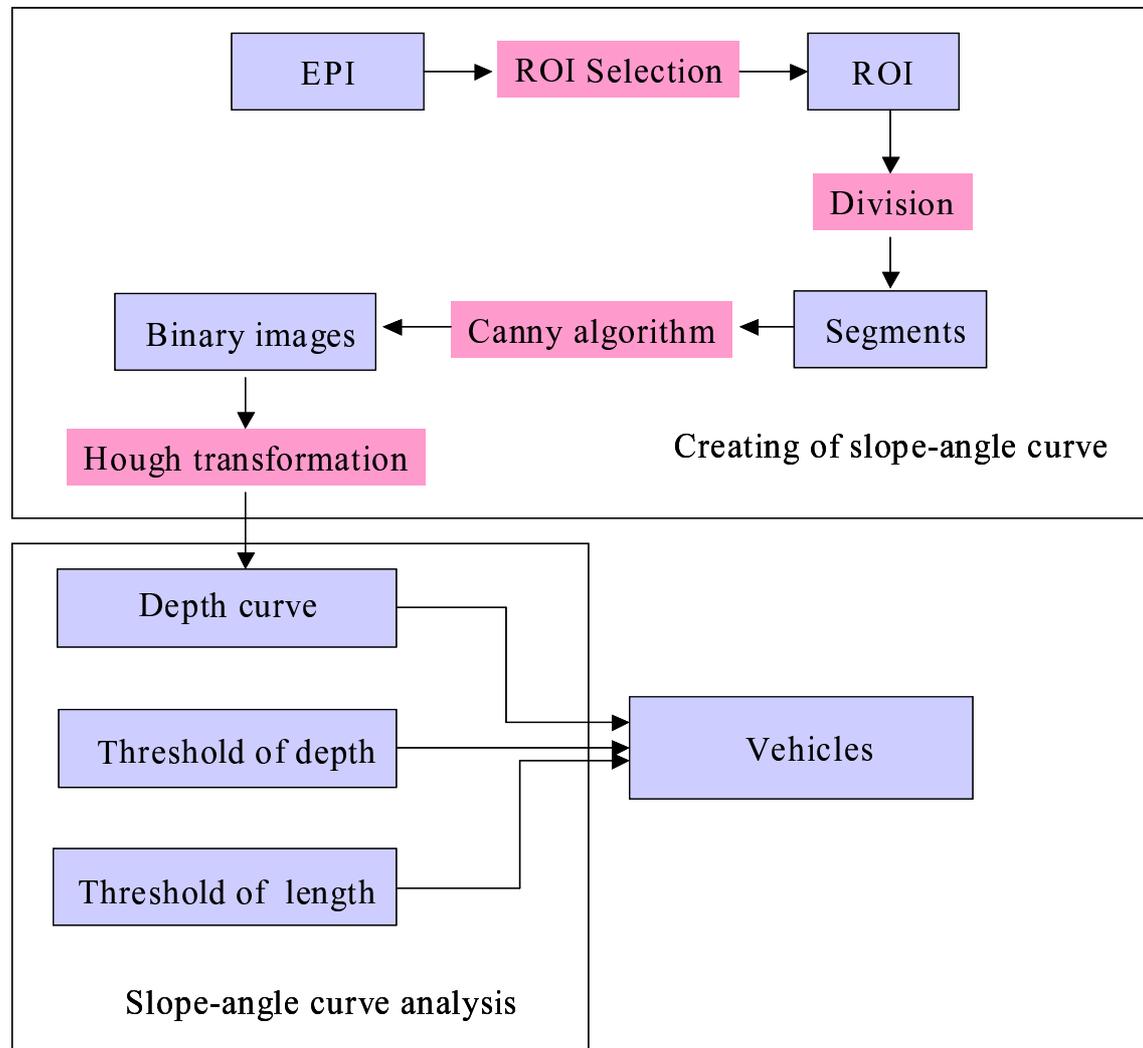


図 3-1: エッジ法のブロックダイアグラム

3.1 奥行きグラフ

EPI に対する画像処理は主に以下の4つの処理から構成される (1) 画像分割 (2) エッジ検出 (3) 直線抽出 (4) 傾きグラフから奥行きグラフの変換。

処理手法は具体的に次のようである。

3.1.1 画像の分割

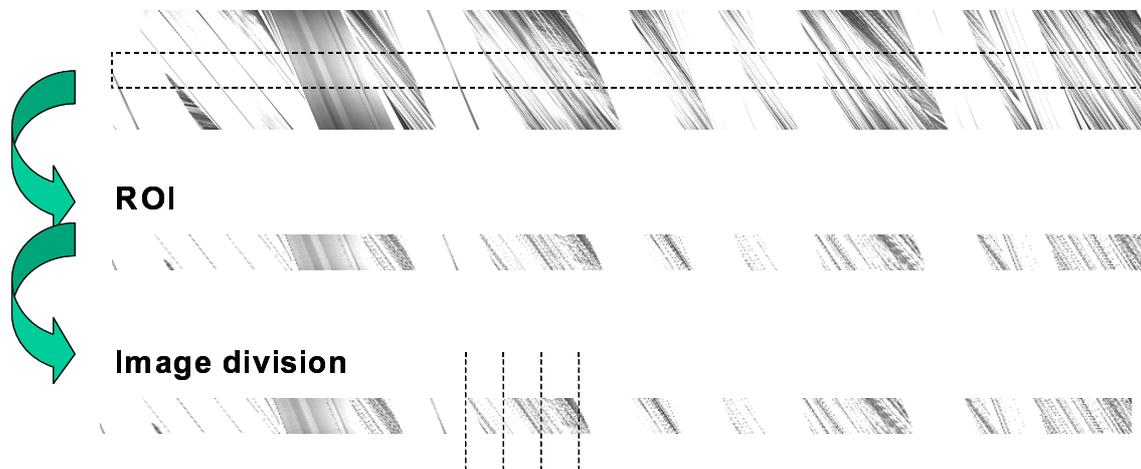


図 3-2: ROI と画像分割

ラインスキャンカメラのレンズ中心から真正面に位置する対象物の特徴点までの奥行きは計測車両の走行によって変化する．この奥行きの変化を求めるには，レンズ中心の真正面に位置する特徴点軌跡の傾きの変化を求めればよい．時系列順序で特徴点軌跡の傾きの変化を求めるために画像を時間軸方向に一定の長さで分割する．このときの分割ライン数を d (pixels) とする．分割した各画像における代表的な特徴軌跡を選択し，その傾きに対応する奥行きをその時点での奥行きとして求める．これによって，奥行きの変化を時系列順序で求めることができる．そうすることで， $(\text{EPI 全体の時間軸方向の長さ}) \div (\text{分割の長さ})(\text{枚})$ の画像が得られる．

3.1.2 エッジ検出

Canny[18] のアルゴリズムを使って，分割された各画像についてエッジを出す．出力されるエッジ画像は 2 値化画像である．Canny オペレータとして閾値は，18.8 と 46.9 であり，標準偏差は 1 を使ってエッジを出した結果，図 3-3 のような特徴軌跡が現れている．

3.1.3 直線抽出

ハフ変換 [19] を用いて一番強い特徴軌跡を抽出する．各分割画像に対して，図 3-4 に示すような，画像中心を原点とする直交座標系を設定する．原点を通り，傾き角度 θ を持つ直線に対して，2 値化画像の全画素を射影する．この射影直線上に，原点からの距離に対する，射影された画素数の変化として，ヒストグラムが得られる．

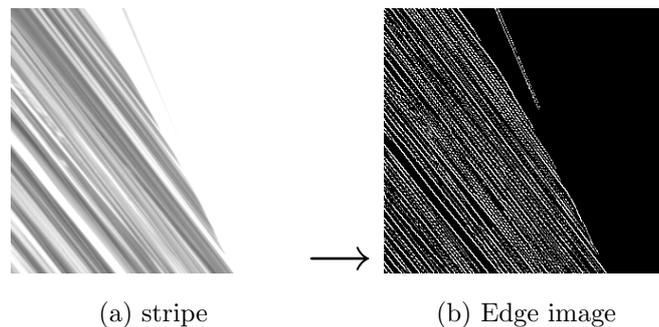


図 3-3: エッジ検出

射影直線の傾き角度 θ の, 1 度から 180 度までの角度範囲に対して, 同様な射影を行うことで, ハフ空間画像が得られる. 図 3-4 において, 特徴軌跡と直交する直線へ射影する場合, 射影点 (r, θ) は, ハフ空間中で最大のピークを形成する. 図 3-5 に示すハフ空間では, 射影画素数に比例した濃淡マップを用いているため, 濃淡の違いは射影画素数の違いを示している.

3.1.4 奥行き角度グラフの作成

i_{nd} 目の分割画像に対する, ハフ空間上のピークの角度 θ_{max} は, 抽出された直線の傾き角度 θ_{ind} である. 分割画像に対して, 抽出された直線の法線の傾き角度 θ_{ind} を, 時系列順序にプロットしたグラフを図 3-6 に示す. 図 3-6 において, x 軸は各分割画像の時系列順序のインデックスを示し, y 軸は各分割画像で抽出した直線の法線の傾き角度 θ_{ind} (degree) である. また, ハフ空間上のピークがある値 (閾値) 以下の場合, 顕著なピークが存在しないものとする. その閾値は $W_{seg} \times 0.6$ として計算する. W_{seg} は分割画像の幅である. エッジ検出をしてみると, 現れた駐車車両の特徴はとても少ないのである. 分割画像で特徴軌跡が抽出されなかった場合, θ_{ind} は特徴軌跡が抽出された, 一番近い分割画像の θ と同じ値をとる.

抽出された直線の傾き角度 θ に対して, それに対応する特徴点までの奥行き距離 D が次式に従って計算される.

$$D = \frac{V \times \tan(\theta - 90) \times p}{2 \times f \times \tan \frac{\phi}{2}}$$

ただし, カメラの移動速度 (つまり計測車両の速度) を V (m/s), 1 ライン分の画素数を p (pixels), カメラの画角を ϕ (degree), カメラのライン周波数を f (Hz), EPI 中の直線の傾きを m (> 0) とする. したがって, 奥行距離 D と EPI 中の特徴軌跡の傾き m は比例する. また, 図 3-6 の時間軸の単位を m に変換する式は次のようである.

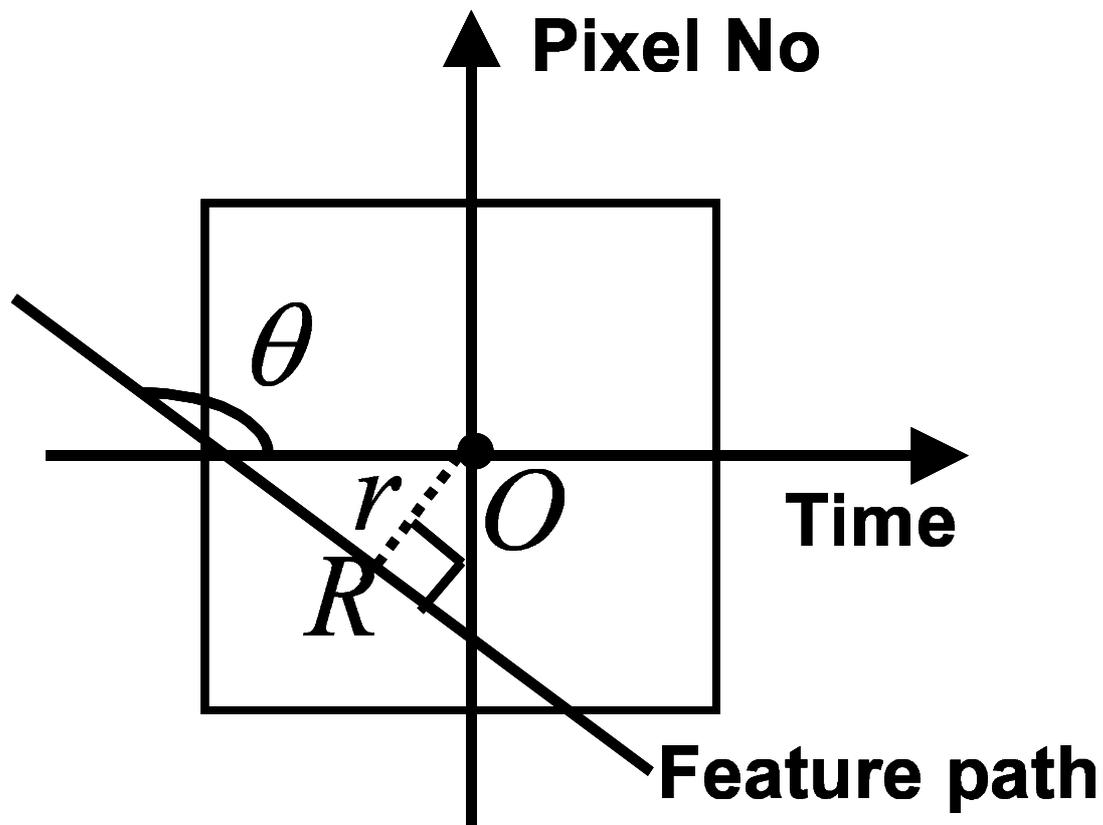


図 3-4: Hough 変換による直線抽出時の射影

$$VL = \frac{PL \times V}{f}$$

PL はピクセル単位での長さである．図 3-6 の傾きグラフを奥行きグラフに変換した結果は図 3-7 に示されている．

3.2 奥行きグラフから路上駐車車両の検出

奥行きの閾値と車長（車の長さ）の閾値は傾きグラフの解析と路上駐車車両の検出に使われる．

3.2.1 奥行きの閾値

特徴軌跡の奥行き D がある閾値より低いとき，その特徴点は路上駐車車両の特徴点である可能性があるとして判断する．

近似的な奥行き値は次のように求める．図 3-8 のように， θ の出現数のヒストグ

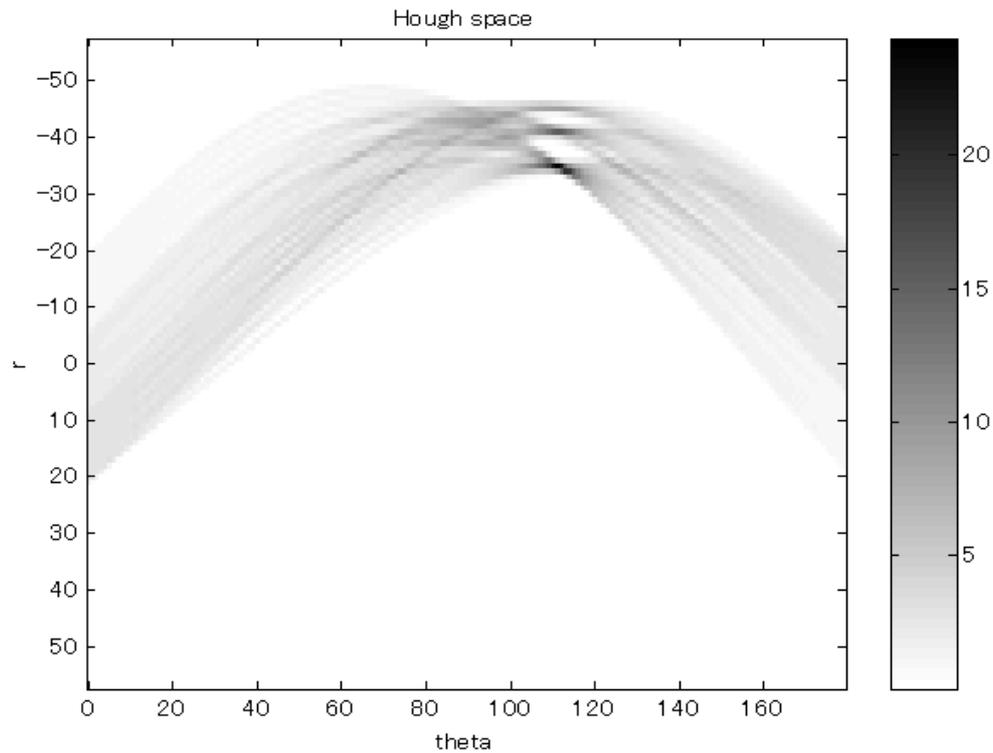


図 3-5: Hough 空間

ラムを作成する．そして， θ を一定の間隔でいくつかの分割し，各区間に対する特徴軌跡の数を求める．最大の特徴軌跡の数をもっている二つの区間における最大値を持っている二つの θ の平均値を傾き角度の閾値とする．その傾き角度の閾値に対応する奥行きを奥行きの閾値とする．このように求められた奥行きの閾値は次のような方法で検証することが出来る．

図 3-9 で W_{left} と W_{middle} 各車線の幅である． W_{SPV} と W_{probe} は駐車車両と計測車両の車幅の値である．すると，

$$D = W_{left} - W_{common} + \frac{W_{middle} - W_{probe}}{2}$$

になる．

上の式に一番小さい車の幅を代入して奥行きの閾値 D_{th} を求める．このように求められた D_{th} と奥行きの閾値を比べて求められた奥行きの閾値が理論的に可能な値かどうか検証する．

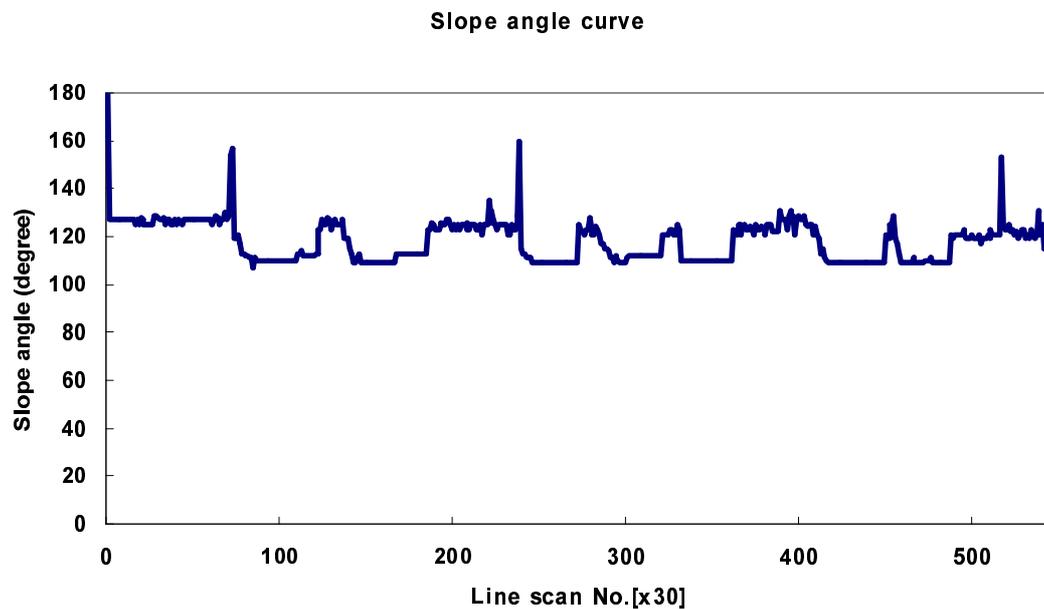


図 3-6: 傾きグラフ

3.2.2 車長の閾値

図 3-10 は ROI が車長に与える影響を説明している。3-10(b) の三つのケースで、 VL_2 は実際の車の長さが一番適合な値である（図 2-15 を参照） VL_1 と VL_2 は VL_2 より大きい。一番小さい車の長さ L_{th} を車長の閾値とする。奥行きグラフ（図 3-7）の奥行きを D_{th} で切って、奥行きが D_{th} より小さい連続的な長さが L_{th} より大きい部分で駐車車両が検出されたと判断する。

3.2.3 反射光による特徴点の消失の対策

車体からの反射光がレンズに入射する場合（図 3-11(a)），CCD 素子の感度が飽和してしまう。このため、EPI 上で真白い部分ができ、特徴直線が抽出されない場合がある。図 3-11 に示したように、EPI 画像でカメラの運動方向に対して前方、真横、後方の 3 部分図 3-11(b) に分けて傾き角度の時系列変化を求め、それら 3 つの結果の論理和を求めることで、このような問題を回避し、検出結果の信頼性は高くなる。OR をとった結果は図 3-12 に示している。

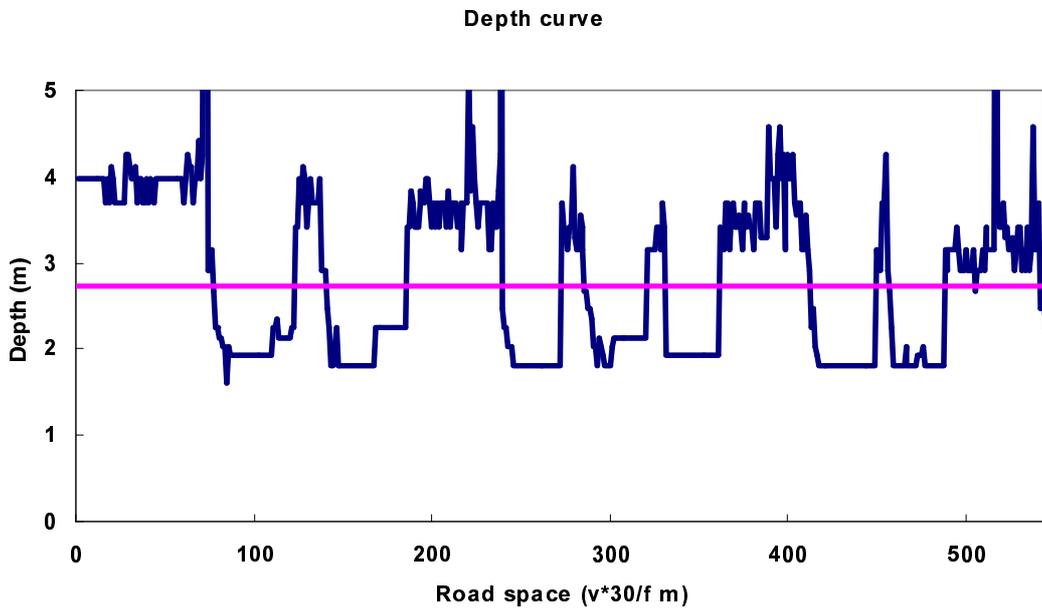


図 3-7: 奥行きグラフ

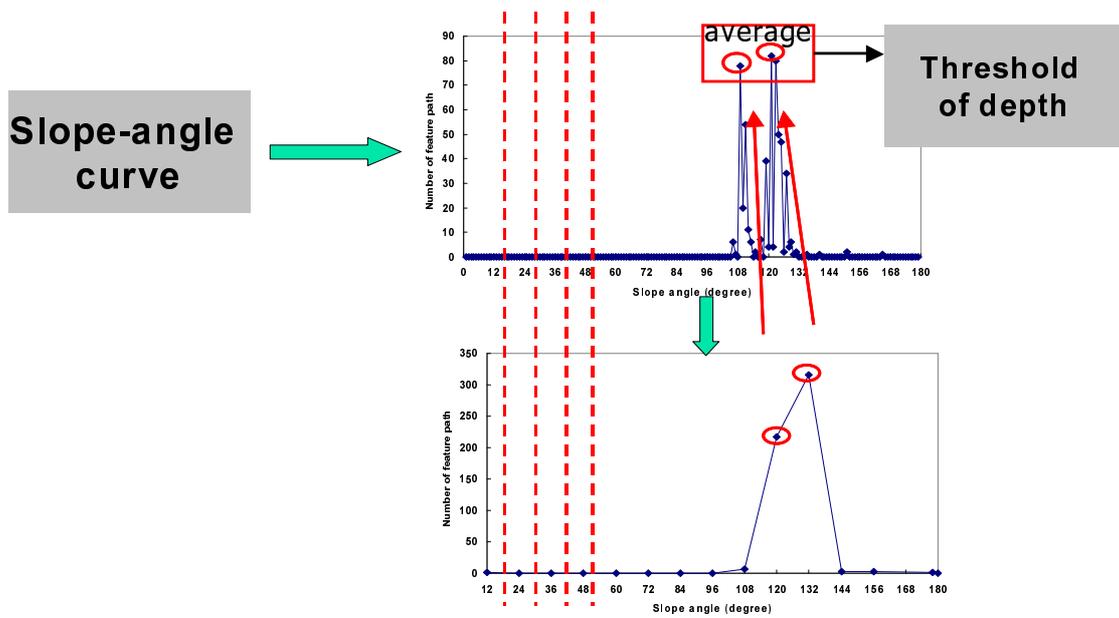


図 3-8: 閾値の求め方法

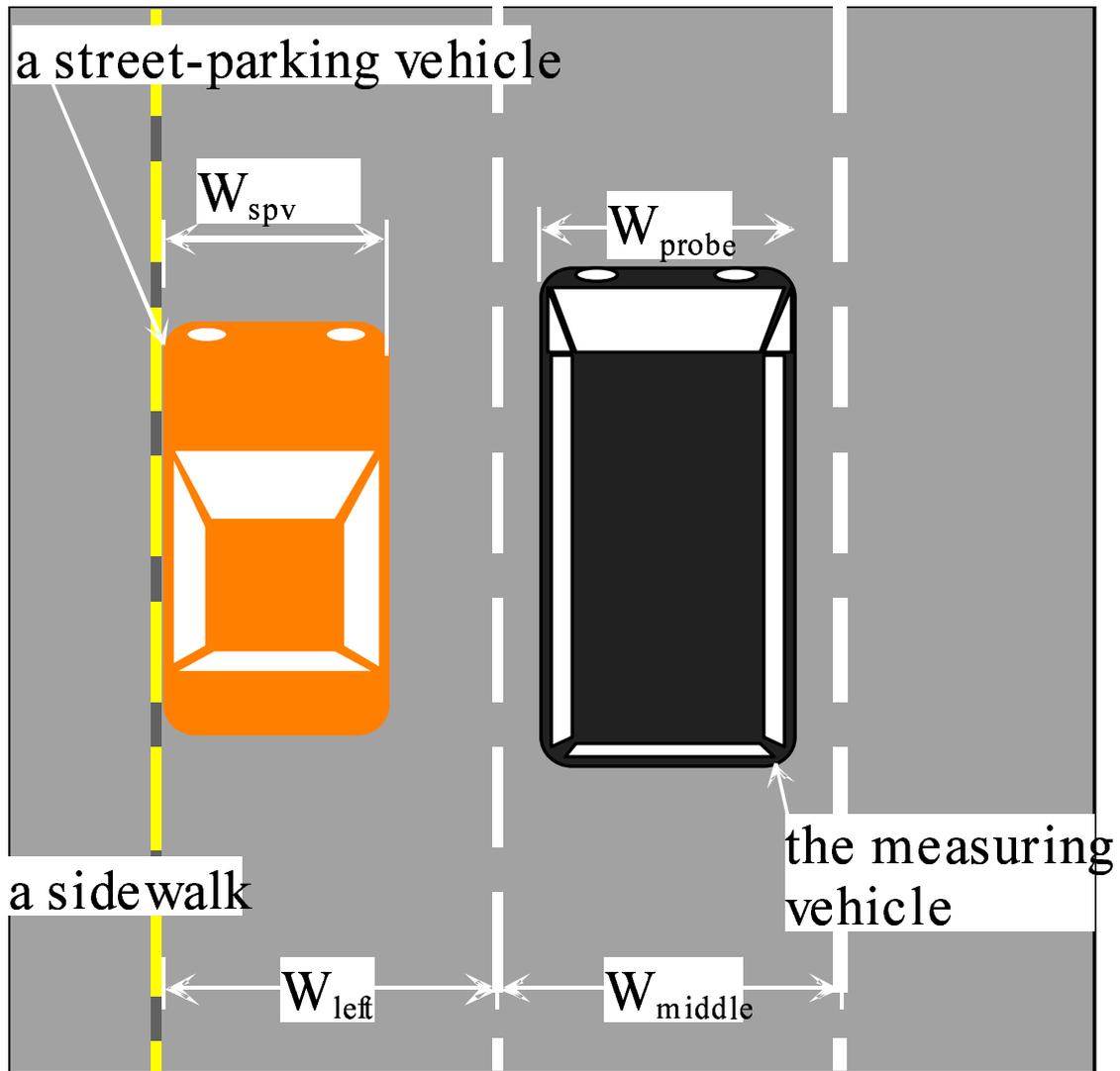


図 3-9: 計測道路の幅員

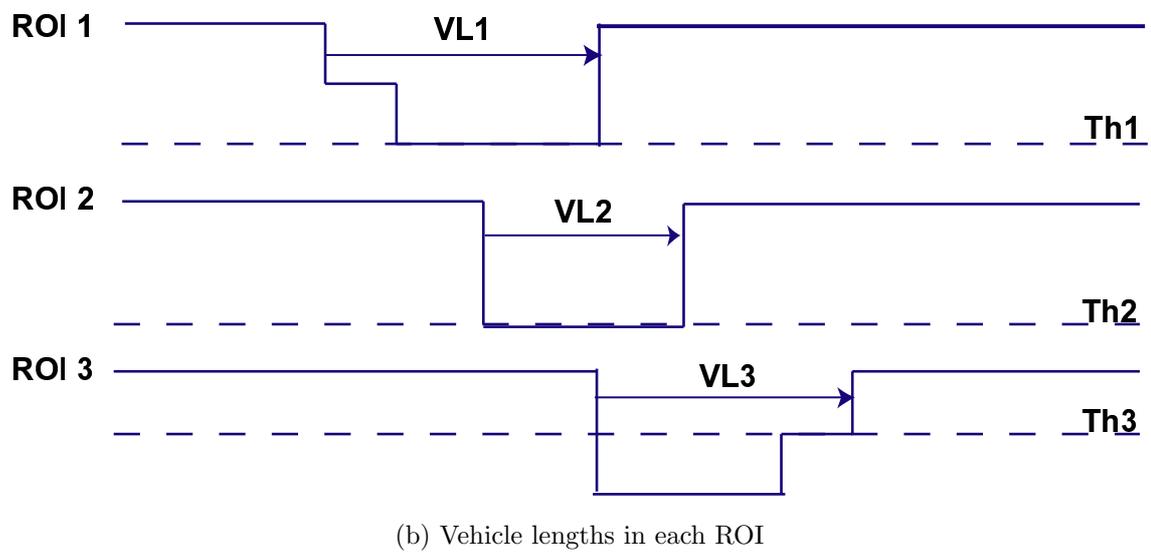
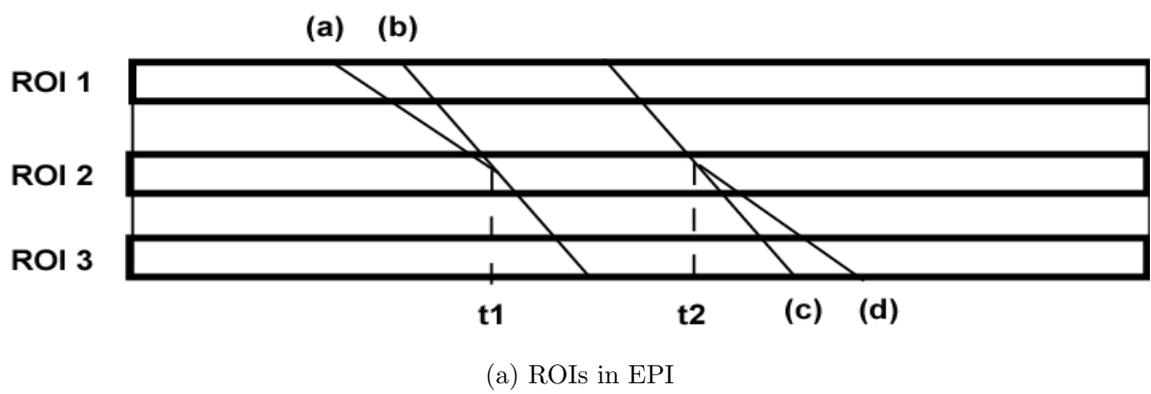
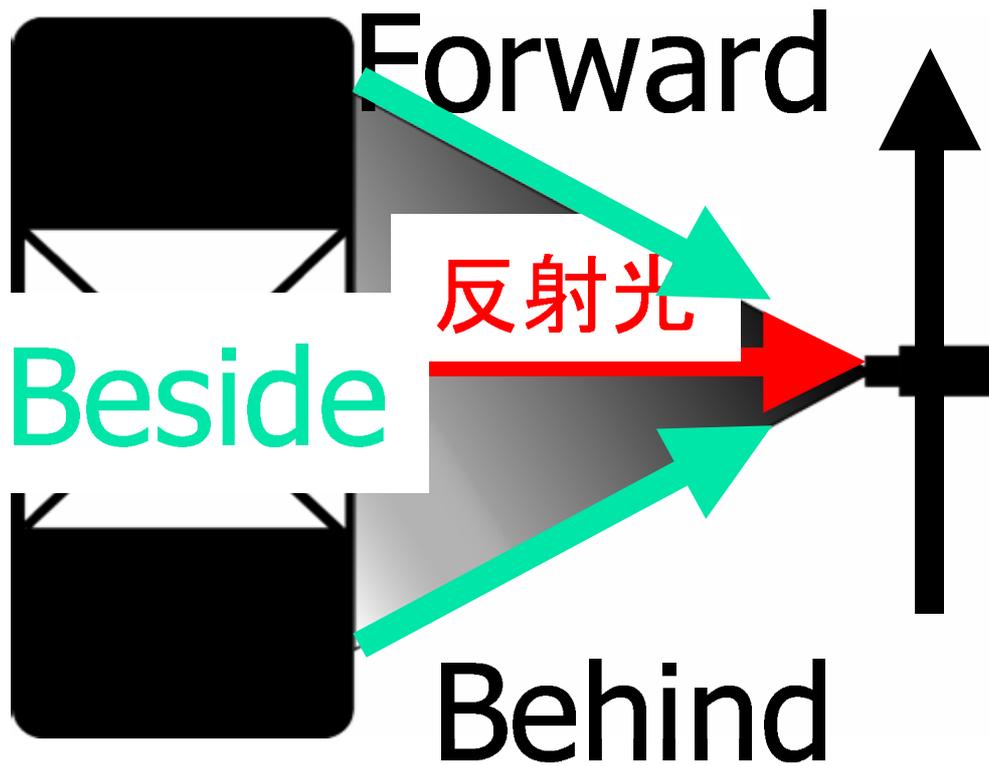
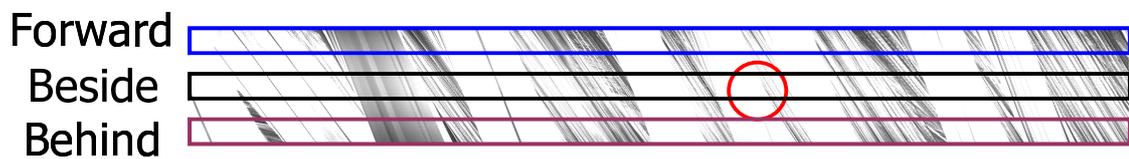


図 3-10: 処理領域による車両のピクセル長さ



(a) 車体からの反射光



(b) EPI におけるの三つの部分

図 3-11: 車体からの反射光の影響

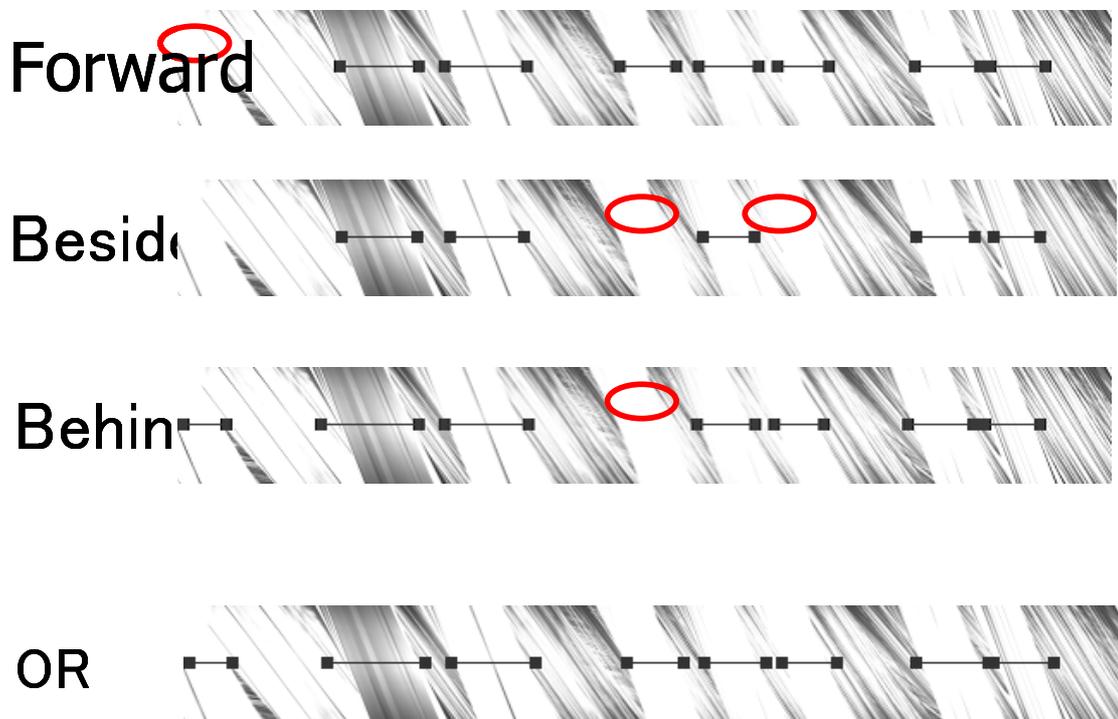


図 3-12: 三つの領域の論理和

第4章

領域法による駐車車両の検出

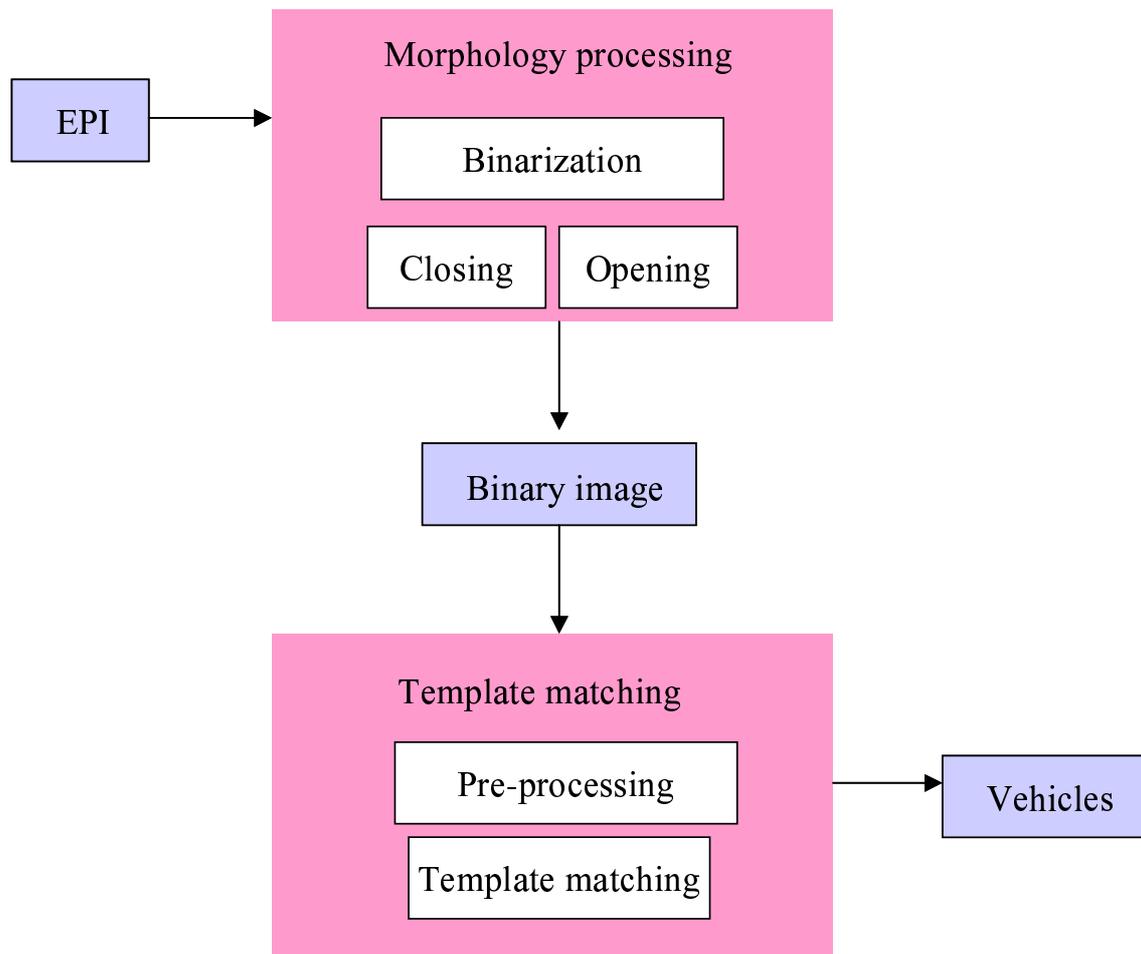


図 4-1: 領域分割法のブロックダイアグラム

この章では領域法による路上駐車車両の検出について説明する。

図 4-1 のブロックダイアグラムのように，領域法は主にモルフォロジー処理とテンプレートマッチング二つのステップを含んでいる。

4.1 モルフォロジー処理

このステップは 2 値化と opening と closing オペレータを使ったモルフォロジー処理で構成されている。

4.1.1 2 値化

対象物体の特徴情報を得るために，EPI に対して Canny のアルゴリズムを使った 2 値化をする。EPI 上の背景（環境）に該当する部分は複雑なテクスチャを持っているので，数多いエッジが検出される。逆に，前景（路上駐車車両）に該当する部分

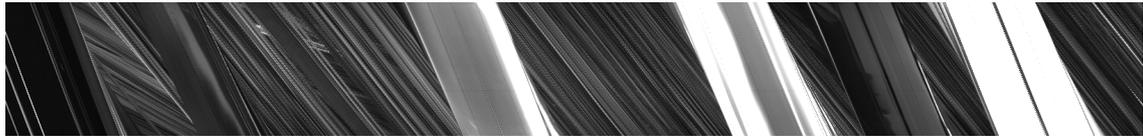


図 4-2: 取得した EPI



図 4-3: EPI の 2 値化画像

は簡単なテクスチャを持っているので数少ないエッジが現れる。

2 値化後，背景の部分はたいてい白い部分として，前景の部分は黒い部分として現れる．数多い白いピクセルで構成されている部分は数多い特徴を持っている部分であるため，環境の部分である．数多い黒いピクセルで構成されている部分は数少ない特徴を持っている部分であるため，路上駐車車両の部分である．

図 4-2 と図 4-3 は EPI と対応する 2 値画像の例である．

4.1.2 モルフォロジー処理

路上駐車車両と環境の部分分割のためにモルフォロジー処理 [20] をした．そのため，図 4-4 のような 3×3 の構造要素を使った．まず，Closing オペレータを 10 回使って，同じ領域にある環境の部分のピクセルを結びつける．後，Opening オペレータを 10 回使って，駐車車両領域の部分の小さいノイズを除去する．図 4-5 は図 4-3 に対して Closing と Opening オペレータを適用した後の 2 値画像である．

1	1	1
1	1	1
1	1	1

図 4-4: 構造要素

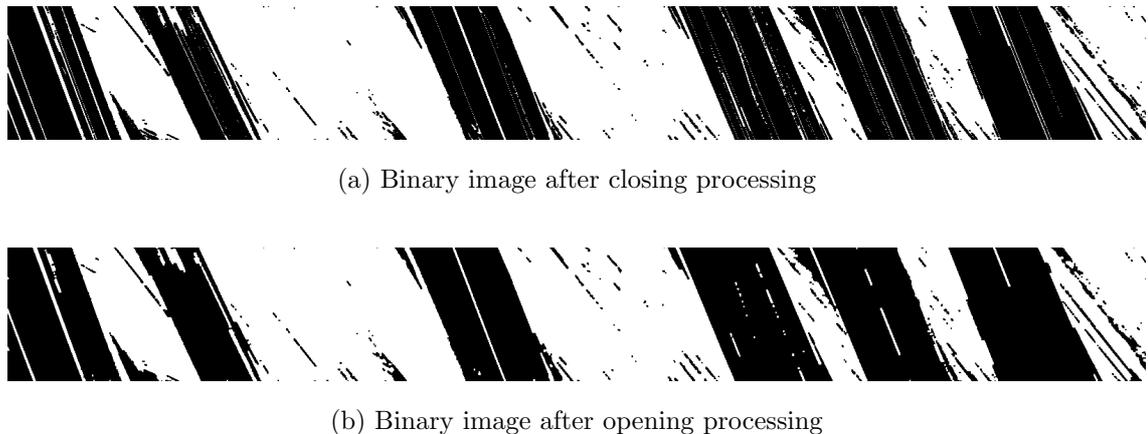


図 4-5: モルフォロジー処理結果

4.2 テンプレートマッチング

この部分は前処理とテンプレートマッチングを含んでいる。

4.2.1 前処理

路上駐車車両の領域を取得するために、テンプレートマッチングを使った。駐車車両の領域は平行四辺形の形であるため、次のような処理をして平行四辺形から長方形に変形させる。前処理：

- 3.1 で紹介した方法で、路上駐車車両の特徴の傾き角度を求める
 図 4-6 の傾き角度グラフで、一番小さい角度 θ_{min} を路上駐車車両の特徴軌跡の傾き角度に近似する角度だとする。
- モルフォロジー処理後の画像 図 4-5 (b) を時間軸で $\theta_{min} - 90$ 度シフトさせる (図 4-7)。

ピクセル P_{ind} (ind はスキャンラインでのピクセルインデックスである) は $ind \times \tan(\theta_{min} - 90)$ ピクセル時間軸で移動する。

4.2.2 テンプレートマッチング

高さがスキャンラインのピクセル数と同じである黒い長方形の形の画像をテンプレートとして使用した。テンプレート画像の幅が各 25 ピクセルと 70 ピクセルの場合のマッチング率は図 4-8 と 4-9 に示している。テンプレート画像の幅の設定はとても重要である。テンプレート画像の幅が短すぎると、路上駐車車両は余分の検出

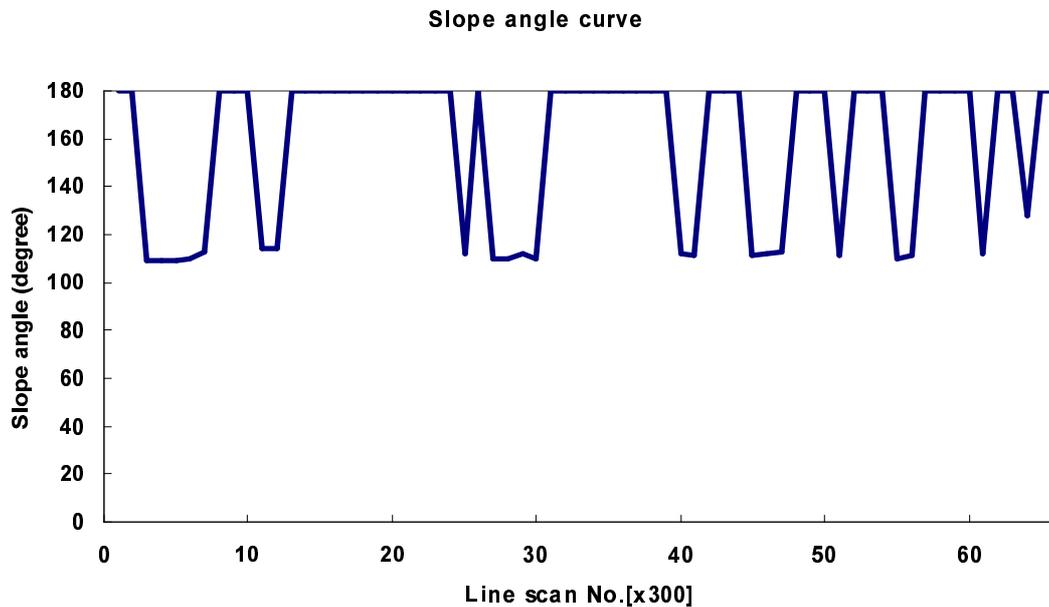
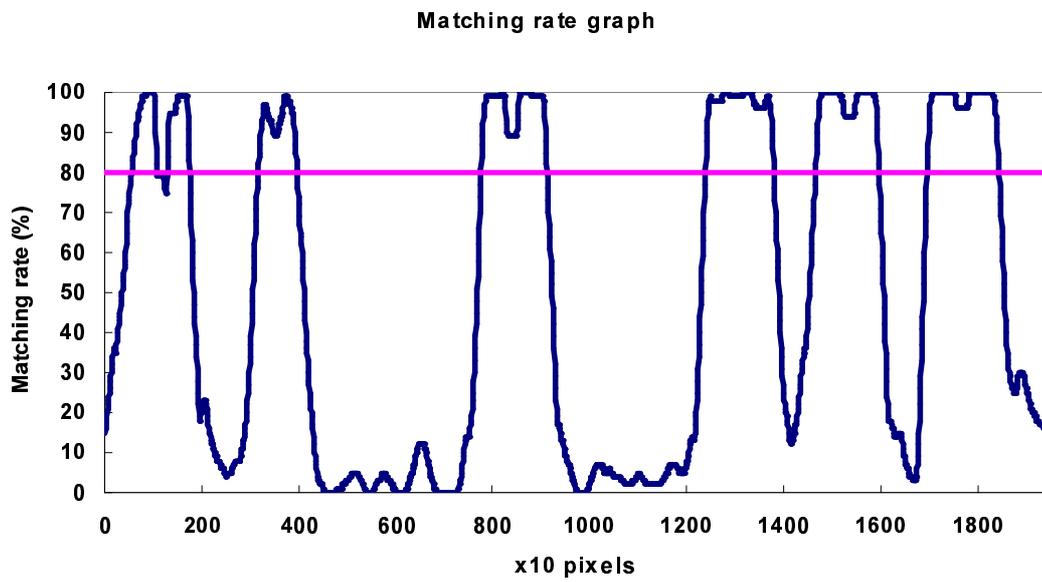


図 4-6: モルフォロジー処理後求めた奥行き曲線

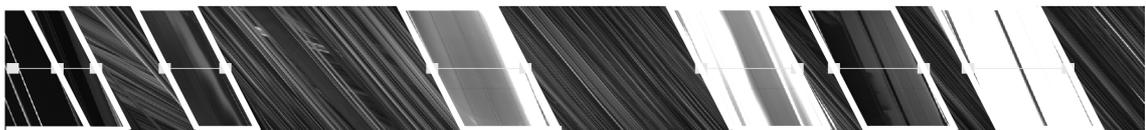


図 4-7: モルフォロジー処理画像のピクセルシフト結果

がされる可能性がある。すなわち，1 台の車両は 2 台以上にカウントさせる可能性がある。図 4-8 の一番目の駐車車両は 2 台としてカウントされている。テンプレート画像の幅が長すぎると，路上駐車車両の領域の幅が正しくないとか路上駐車車両が検出されない可能性がある。図 4-9 で，検出された駐車車両の長さは実際の長さより大きい。正確台数と長さを得るために，異なる幅の 2 つのテンプレートでマッチング処理をした。まず，駐車車両の長さの閾値に近似する幅 L_{th} のテンプレートでマッチングして駐車車両の台数を得る。その後，もっと小さ目のテンプレートでマッチングして駐車車両の長さを決める。二つのテンプレートを使った結果は図 4-10 に示している。

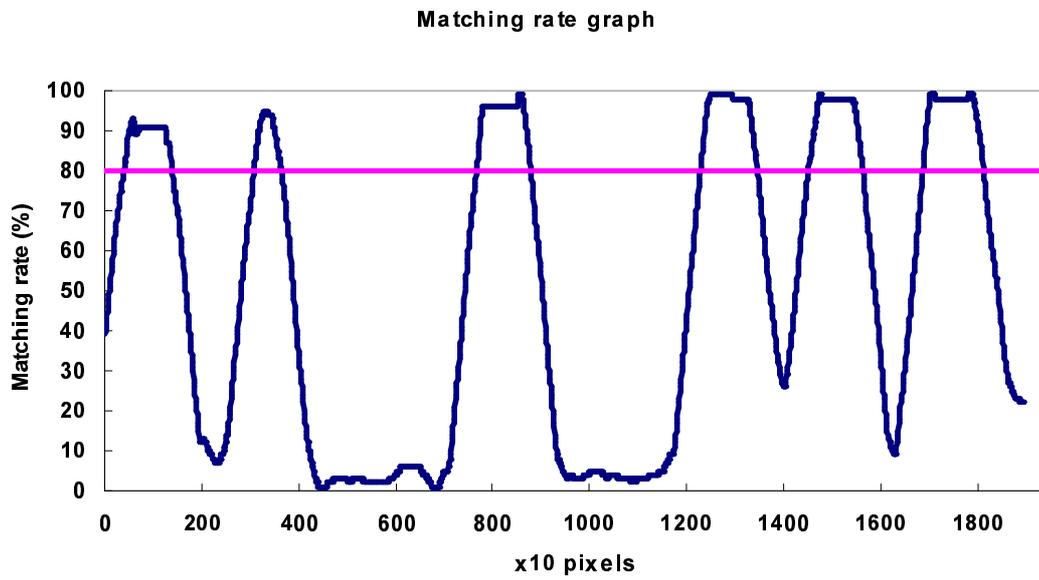


(a) Matching rate

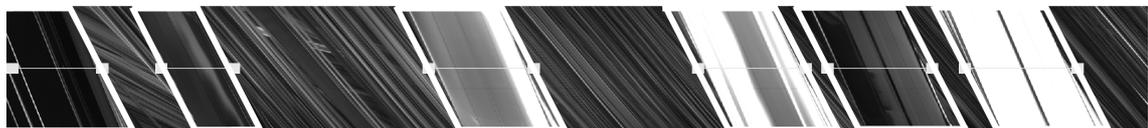


(b) Vehicle length

図 4-8: 25 ピクセルのテンプレートのマッチング結果



(a) Matching rate



(b) Vehicle length

図 4-9: 70 ピクセルのテンプレートのマッチング結果

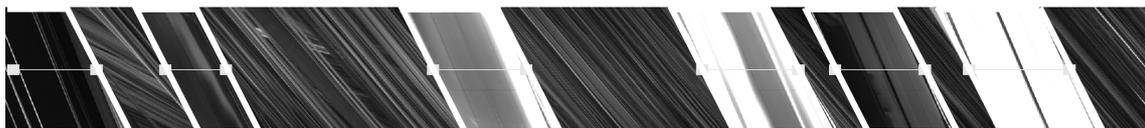


図 4-10: 二つの幅のテンプレートでマッチングした結果

第5章

エッジ法と領域法の結合による路上駐 車車両の検出

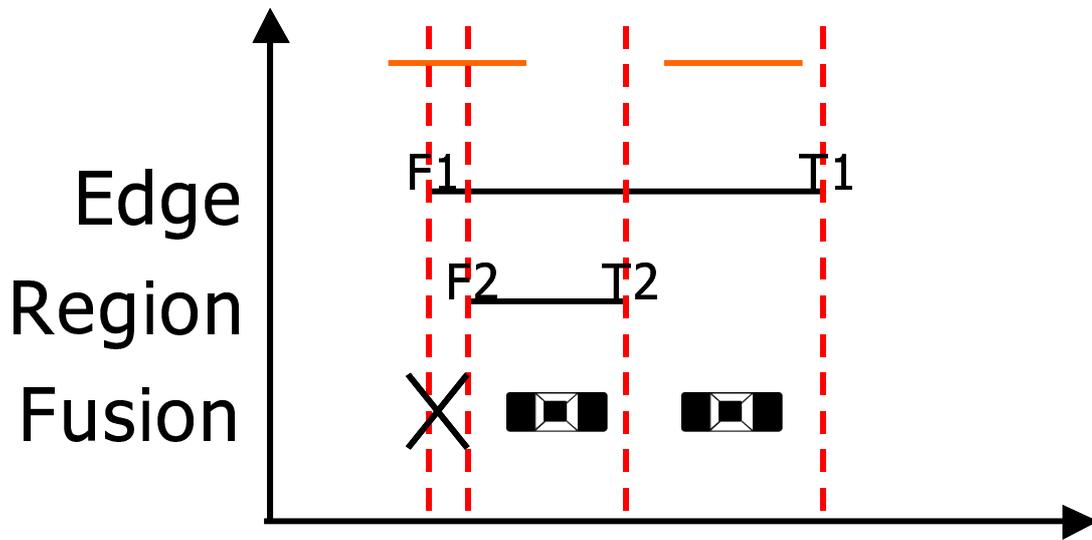


図 5-1: case1

よりロバストな路上駐車車両検出システムを構築するために、エッジ法と領域法を融合した。

5.1 実験からまとめた3つのケース

エッジ法と領域法の融合の典型的な例として次のような3つのケースがある。

- Case 1 (図 5-1): 領域法で検出された駐車車両の部分はエッジ法で検出された駐車車両の部分を含んでいる ($F_1 < F_2 < T_2 < T_1$)
 $F_2 - F_1 > L_{th}$ の場合, F_1 から F_2 の部分で駐車車両 1 台が検出されたとする。
 F_2 から T_2 の間にも駐車車両が検出された。 $T_1 - T_2 > L_{th}$ の場合, T_1 から T_2 の部分で駐車車両 1 台が検出されたとする。
- Case 2 (図 5-2): 領域法で検出された駐車車両の部分とエッジ法で検出された駐車車両の部分には重なっている部分がある ($F_1 < F_2 < T_1 < T_2$)。 $F_2 - F_1 > L_{th}$ (L_{th} は車長の閾値である) の場合 F_1 から F_2 の部分で駐車車両 1 台が検出されたとする。 F_2 から T_1 の間にも駐車車両が検出された。 $T_2 - T_1 > L_{th}$ の場合 T_1 から T_2 の部分で駐車車両 1 台が検出されたとする。
- Case 3 (図 5-3): F_1 から T_1 の間ではエッジ法で駐車車両が検出されたが、領域法では検出されていない。この場合, F_1 から T_1 の間で駐車車両が検出されたとする (logical OR)。

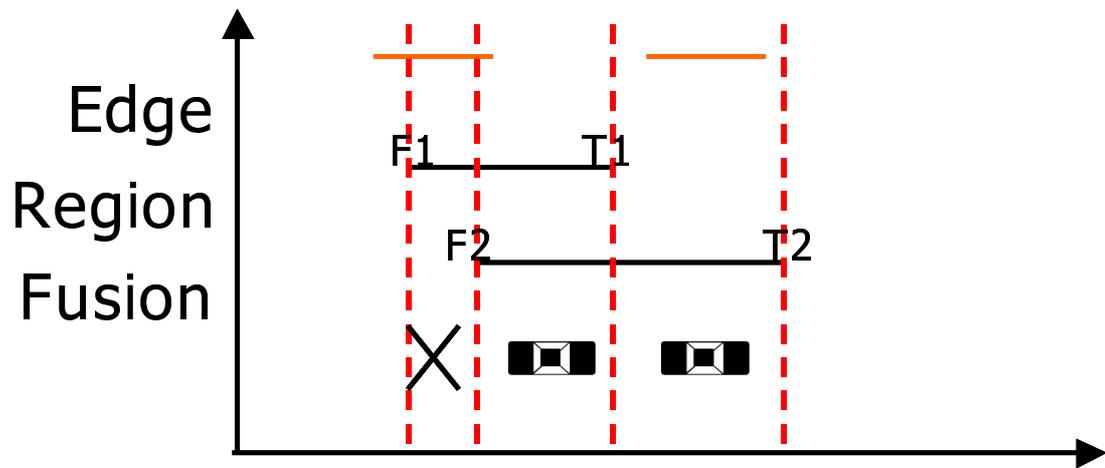


図 5-2: case2

5.2 論理的な表現

このようなケースについてまとめると、次のような論理演算になる。1) エッジ法と領域法の結果について論理 "AND" を適用する。"AND" を適用した結果の各シーケンスは駐車車両が存在するとして認識する。

2) エッジ法と領域法の結果について論理 "XOR" を適用する。"XOR" を適用した結果の各シーケンスの長さが L_{th} より大きい場合、駐車車両が存在すると認識する。

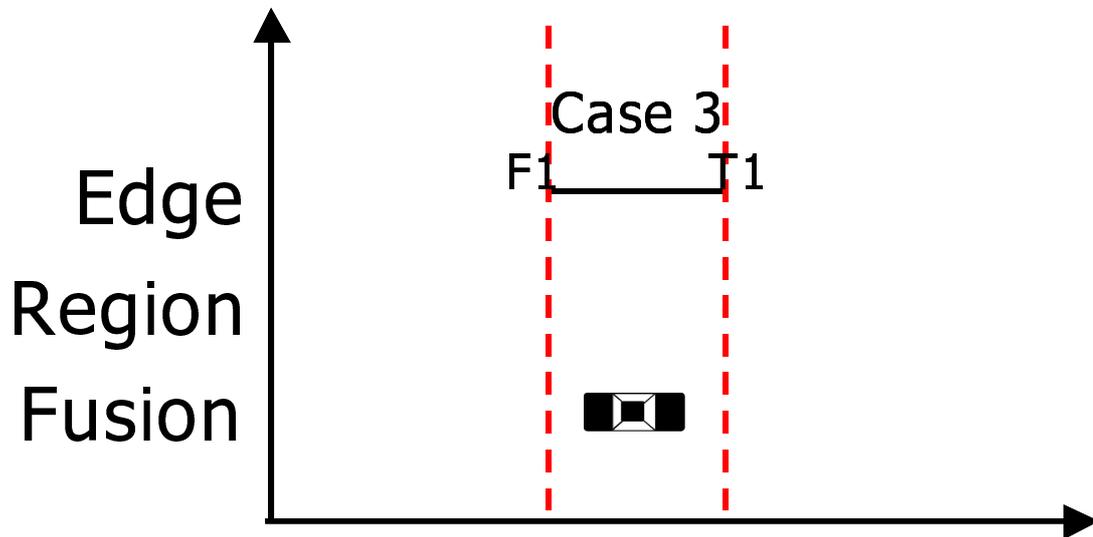


図 5-3: case3

第6章

実験



図 6-1: 計測場所

放射 23 号線の「代々木公園交番前」交差点から「渋谷区神園町」交差点の区間 (図 20) において計測実験を行った。1.8kHz と 200Hz 二つのラインスキャンカメラのスキャン周波数で計測し、結果を比較した。カメラの画角は 62 度、設置高度は 700mm 前後、計測車両の速度は 20km / h 前後であった。次に周波数と手法に分けて検出結果と問題点について分析する。検出結果において、TruePositive は正確に検出された台数、FalsePositive は過剰検出台数、FalseNegative は見落とし台数で、DetectionRate は検出率である。検出率は $\frac{TruePositive}{TruePositive+FalseNegative}$ によって計算する。

6.1 エッジ法実験

表 6-1: 周波数 1.8kHz の場合のエッジ法の実験結果

	TruePositive	FalsePositive	FalseNegative	DetectionRate
前方	78	2	1	98.7
真横	77	2	2	97.5
後方	78	1	1	98.7
OR	79	4	0	100

周波数 1.8kHz の場合のエッジ法の実験結果は表 6-1 に示されている。カメラの運動方向に対して前方，真横，後方 3 つの部分による EPI の ROI を取って画像処

表 6-2: 周波数 200Hz の場合のエッジ法の実験結果

TruePositive	FalsePositive	FalseNegative	DetectionRate
91	0	8	91.9

表 6-3: 周波数 1.8kHz の場合の領域法の実験結果

TruePositive	FalsePositive	FalseNegative	DetectionRate
78	4	1	98.7

理をし、駐車車両を検出した結果と3つの結果のORを取った結果が示されている。ORをとることによって駐車車両の検出率は高くなった。ただし、4台の過剰な検出もある。



図 6-2: 駐車車両以外の物体の検出

その原因は：

- 閾値を決めるとき、ヒストグラムから求められた奥行き閾値が背景に近い従って、環境が駐車車両として認識されてしまう。
- 駐車車両以外の物体の検出
図 6-2 に示したように、駐車車両以外の物体が駐車車両として認識されるのも過剰検出の原因となっている。

周波数 200kHz の場合のエッジ法の実験結果は表 6-2 に示されている。周波数が 1.8kHz の場合に比べて検出率は低いのである。主に低周波数による認識漏れが原因となっている。

6.2 領域法実験

周波数 1.8kHz の場合の領域法の実験結果は表 6-3 に示されている。検出率は 98.7% に達しているが、1 台の認識漏れと 4 台の過剰な検出がある。認識漏れとしては図 6-3 のように複雑なテクスチャの駐車車両が数多い特徴をもっているため、EPI

表 6-4: 周波数 200Hz の場合の領域法の実験結果

TruePositive	FalsePositive	FalseNegative	DetectionRate
54	0	45	54.5

上で数多い特徴軌跡を描き，環境として認識されたからである．過剰検出としては図 6-4 のように背景からの反射光がカメラのレンズに入射し，EPI 上で特徴軌跡の消失現象が起きたため，環境が駐車車両として認識されたからである．

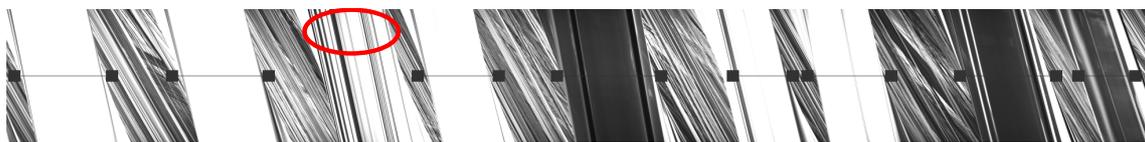


図 6-3: 複雑なテクスチャの駐車車両の認識漏れ

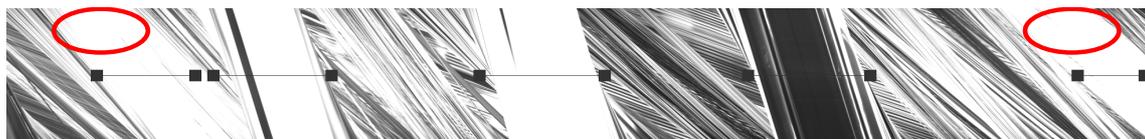


図 6-4: 背景からの反射光による過剰認識

周波数 200kHz の場合の領域法の実験結果は表 6-4 に示されている．周波数が 1.8kHz の場合に比べて検出率はとても低くなっている．

6.3 エッジ法と領域法の融合実験

周波数が 200 の場合，エッジ法と領域法を融合した結果は表 6-5 に示されている．エッジ法と領域法を融合することで，検出率はエッジ法と領域法を単独に使う場合より高くなっている．ただし，4 台の認識漏れと 2 台の過剰検出がある．

認識漏れとしては図 6-5 のように，複数台の駐車車両の間の距離が近すぎるため，複数台が 1 台として認識されたからである．過剰認識としては主にエッジ法と領域法の XOR をとるとき生成された過剰認識である．

表 6-5: 周波数 200Hz の場合の融合実験結果

	TruePositive	FalsePositive	FalseNegative	
Edge-based method	91	0	8	91.9
Region-based method	54	0	45	54.5
Fusion result	95	2	4	96.0



図 6-5: 複数台が1台に認識されることによる認識漏れ

第7章

総括

7.1 まとめ

この論文では計測用車両に積載したラインスキャンカメラを用いて得られたエピポーラ平面画像中における特徴軌跡抽出と領域分割に基づく路上駐車車両の検出について紹介した。エッジ法と領域法、二つの手法を融合して路上駐車車両を検出している。エッジ法ではEPI上で抽出した特徴軌跡によって奥行き情報を取得し、路上駐車車両の検出をしている。領域法ではEPI上の特徴軌跡の数によって路上駐車車両を検出している。実験結果として、二つの手法を結合することで、検出率は200Hzという低周波数の条件でも96%に達した。

ここで、本システムの特徴をまとめておく。具体的には次のようなことである。

- 画像センサの使用

路上駐車車両を検出するためのセンサとしてレーザなどのセンサではなく、ラインスキャンカメラという画像センサを使用した。画像センサはコストが低い利点を持っている。画像センサで得られる情報は距離情報ではなく、テクスチャ情報である。このテクスチャ情報を解析して距離情報を取得することが出来る。

- EPIの直接的な生成

ラインスキャンカメラで取得したライン画像を時間列に並べることにより、直接にエピポーラ平面画像が生成できる。このエピポーラ平面画像は対象物体の距離情報とテクスチャ情報が得られる。対象物体までの距離情報（エッジ法）と対象物体のテクスチャ情報（領域法）に基づいて路上駐車車両の判断が出来る。

- 広範囲な路上駐車車両の計数

交差点やトンネルなどの限られた場所に対する駐車車両の検出ではなく、広範囲な道路での駐車車両の検出ができる。広範囲な道路の占有状況を反映することが出来る。

- 実時間処理の可能性
ラインスキャンカメラの高周波数により，時間軸で，より緻密な情報が得られる．画像処理のためのROIを選んで処理することにより，画像処理の時間を短くした．計測車両の走行速度と処理速度が近いレベルに達し，実時間処理が可能となっている．
- 高い検出率
前述べたように，エッジ法と領域法を結合することにより，200Hz という低周波数の条件でも検出率は96%に達した．

7.2 応用

本システムの検出率が高いのである．ただし，本システムは計測車両が等速直線運動をするという前提が必要である．実際の応用のためには，次のような場合についての対策を考える．

- 計測車両がカーブを曲がる場合
道路状況のデータを結合することにより解決可能である．
- 速度変化がある場合
時間ごとの速度を計測することにより速度変化を結合し，解決可能である．

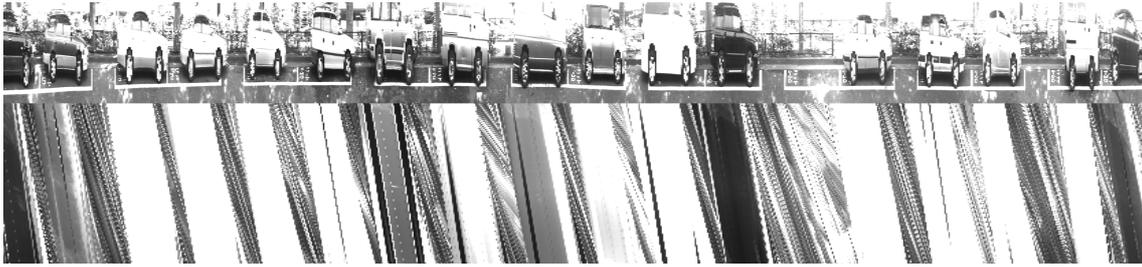


図 7-1: 同期を取った EPI 画像とパノラマ画像

7.3 今後の課題

同期を取ってとった横スキャンで得られたエピポーラ平面画像と縦スキャンで得られたパノラマ画像は図 7-1 のようである．今後はこのエピポーラ平面画像とパノラマ画像を結合して，駐車車両の分類 [21] まで行くことである．まず，エピポーラ平面画像を解析して，路上駐車車両の検出をして，パノラマ画像上でそれに対応する部分の解析をして，路上駐車車両の分類をすることである．

謝辞

本研究の機会及び素晴らしい研究環境を与えて下さり，貴重な時間を割いて毎週のように研究の方向性を御指導頂きました池内克史教授に心から感謝致します。

本研究のきっかけを与えて下さり，研究の進め方から文章の書き方まで丁寧に御指導下さった平原清隆さんにはこの場を借りて心から深く感謝致します。本研究の指導や研究内容の相談に乗っていただくだけでなく，計算機環境の管理など研究以外にもご指導，ご協力をしていただいた影澤政隆助手に深く感謝いたします。論文の書き方を教えたり，難題にあったとき，適切な助言をして下さった Supatana Authavekiat に深く感謝いたします。打ち合わせで質問に答えていただいたり，毎回様々な助言や提案，指導をしていただいた，川崎洋さん，小野晋太郎さん，Mohottala Yasanthi Shirmila Wickramachchi さんに感謝いたします。

学会出席や事務手続きで大変お世話になった池内研究室の秘書のみなさま，池内研究室の職員のみなさまに感謝いたします。

発表練習を開いていただくなど研究に対してアドバイスや協力をしていただき，研究生活を送るにあたっていろいろと支えていただいた池内研究室の学生のみなさま，研究室こえてお世話していただいた佐藤研究室，坂内研究室のみなさまに感謝いたします。

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 15 年 8 月 27 日

関連図書

- [1] 道路交通の現状 <http://www.kkr.mlit.go.jp/road/koutsugenyoushou/>
- [2] 第3章 情報化・知能化の交通流改善効果の検討 <http://www.eccj.or.jp/fuel/94/>
- [3] H.Zhao and R.Shibasaki, "High Accurate Positioning and Mapping in Urban Area Using Laser Range Scanner," *Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.125-132, 2001.
- [4] S.Ono, M.Kagesawa and K.Ikeuchi, "Parking-Vehicle Detection System by Using Laser Range Sensor Mounted on a Probe Car," *Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symp.*, 2002.
- [5] S.Sakuma, Y.Takahashi, A.Shio and S.Ohtsuka, "Vehicle Counter System Using Panoramic Images," *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol.J85-D, No.8, pp.1361-1364, 2002.
- [6] DALSA Digital Imaging Solutions <http://www.dalsa.com/>
- [7] R.C.Bolles, H.H.Baker and D.H.Marimont, "Epipolar-Plane Image Analysis: An Approach to Determining Structure from Motion," *Int'l J. Compute Vision*, Vol.1, pp.7-55, 1987.
- [8] H. Baker and R.C.Bolles, "Generalizing Epipolar Plane Image Analysis on the Spatiotemporal Surface," *Int'l J. Computer Vision*, Vol.3, pp.33-49, 1989.
- [9] M. Yamamoto, "Determining Three-Dimensional Structure from Image Sequences given by Horizontal and Vertical Moving Camera," *IECE Trans.*, Vol. J69-D, No.11, pp.1631-1638, 1986 (in Japanese).
- [10] P.Wang, K.Ikeuchi and M.Sakauchi, "3D Line's Extraction From 2D Spatiotemporal Image Created by Slit," *Proc. Asian Conf. Computer Vision*, pp.408-415, 1998.

- [11] C.Li, H.Zen, M.Sakauchi, "Creation of plane spatiotemporal image using a hyperbolic slit and acquisition of 3D information," *Systems and Computers in Japan*, Vol.31, No.6, pp.99-107, 2000
- [12] H. Kawasaki, K. Ikeuchi, M. Sakauchi, "Spatio-Temporal Analysis of Omni Image," *IEEE International Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.II, No.6, pp.577-584, 2000
- [13] Z.Zhu, G.Xu, X.Lin, "Panoramic EPI Generation and Analysis of Video from a Moving Platform with Vibration," *IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.2, pp.531-537, 1999.
- [14] J.Chai, S.Chan, H.Shum, X.Tong "Plenoptic sampling," *International Conf. Computer Graphics and Interactive Techniques* , pp.307-318, 2000.
- [15] M.Nakagawa, H.Saito, S.Ozawa, "Three Dimensional Reconstruction of Room Environment by Correcting EPI from Image Sequence Taken with Handy Camera," *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol.J84-D-II, No.2, pp.266-275, 2001.
- [16] H.Shum and S.Kang, "A Review of Image-based Rendering Techniques," *IEEE/SPIE Visual Communications and Image Processing*, pp.2-13, 2000.
- [17] H.Kawasaki, M.Murao, K.Ikeuchi and M.Sakauchi, "Enhanced Navigation System with Real Images and Real-Time Information," *8th World Congress on Intelligent Transport Systems*, 2001.
- [18] J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.8, No.6, pp.679-698, 1986.
- [19] P.V.C. Hough, "Machine Analysis of Bubble Chamber Pictures," *Proc. Int'l Conf. High Energy Accelerators and Instrumentation*, pp.536-554, 1959.
- [20] J.Serra, "Image Analysis and Mathematical Morphology," *Academic Press*, 1982.
- [21] T.Yoshida, M.Kagesawa, T.Tomonaka, and K.Ikeuchi "Enhanced Navigation System with Real Images and Real-Time Information," *8th World Congress on Intelligent Transport Systems*, 2001.

研究業績

- 朱 成華, 平原 清隆, 松田 真理, 上條 俊介, 池内 克史, ”ラインスキャンカメラを用いた路上駐車車両の検出,” 第1回 *ITS*シンポジウム, pp.505-514, 2002.
- Cheng Hua Zhu, Kiyotaka Hirahara, Katsushi Ikeuchi, ”Street-Parking Vehicle Detection Using Line Scan Camera,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.575-580, 2003.
- 朱 成華, 平原 清隆, 池内 克史, ”Street-Parking Vehicle Detection Based on EPI Analysis,” 情報処理学会 第14回 高度交通システム研究会 (*ITS*) 研究発表会, 2003.
- Cheng Hua Zhu, Kiyotaka Hirahara, Katsushi Ikeuchi, ”Street-Parking Vehicle Detection on EPI Using Edge- and Region-Based Algorithm,” *the 10th World Congress on Intelligent Transport Systems*, 2003 (発表予定).