

修士論文

車載レンジセンサによる  
自車速度推定と駐車車両認識

2003年1月31日提出

指導教官 池内克史 教授

情報理工学系研究科 電子情報学専攻

16078 小野 晋太郎



# 目次

第 I 部	序論	1
第 1 章	序論	3
1.1	本研究の背景と目的 . . . . .	4
1.2	本研究の構成 . . . . .	4
第 2 章	レンジセンサの特徴とスキャン手法	5
2.1	はじめに . . . . .	6
2.2	レンジセンサの特徴 . . . . .	6
2.3	垂直スキャンと水平スキャン . . . . .	7
第 II 部	エピポーラ平面距離画像による自車速度推定	9
第 3 章	エピポーラ平面距離画像	11
3.1	はじめに . . . . .	12
3.2	関連研究 . . . . .	12
3.3	エピポーラ平面画像 . . . . .	13
3.4	エピポーラ平面距離画像 . . . . .	15
第 4 章	自車速度・位置推定と広域三次元空間の復元	21
4.1	はじめに . . . . .	22
4.2	速度推定アルゴリズム . . . . .	22
4.3	三次元空間の復元 . . . . .	28
4.4	実験 . . . . .	29
4.5	評価と考察 . . . . .	35
4.6	今後の課題 . . . . .	36

---

第 III 部	路上駐車車両の自動認識	41
第 5 章	路上駐車車両の自動認識	43
5.1	はじめに . . . . .	44
5.2	関連研究 . . . . .	44
5.3	データ収集システムの構成 . . . . .	46
5.4	認識アルゴリズム . . . . .	48
5.5	実験 . . . . .	59
5.6	おわりに . . . . .	62
第 IV 部	結論	67
第 6 章	結論	69
6.1	結論 . . . . .	70
6.2	応用と今後の課題 . . . . .	70
	謝辞	73
	発表文献	75

# 目次

2.1	レーザレンジセンサ	6
2.2	イメージセンサ（左）とレンジセンサ（右）	7
2.3	垂直スキャンと水平スキャン	7
3.1	エピポーラ平面画像	13
3.2	ラテラルモーション	14
3.3	ハフ変換による直線検出	15
3.4	エピポーラ平面距離画像	16
3.5	エピポーラ平面距離画像内に形成されるクラスタ面（模式図）	17
3.6	時空間距離画像によるセンサ自己位置・速度の推定	18
3.7	実験により得られたエピポーラ平面距離画像の例 (b)(c):10km/h, (d)(e):20km/h	19
4.1	速度推定処理の流れ	23
4.2	データ収集用レンジセンサおよび車両	24
4.3	エピポーラ平面距離画像に表れるクラスタ面（セグメント）	25
4.4	セグメンテーション後のエピポーラ平面距離画像	26
4.5	セグメントへの回帰曲線の当てはめ	27
4.6	各セグメントから得られた速度曲線	27
4.7	全区間に渡る速度曲線	29
4.8	走行経路	30
4.9	実験から得られた速度推定曲線	31
4.10	推定速度にもとづいて三次元形状を復元した例（全体図）	32
4.11	推定速度にもとづいて三次元形状を復元した例（部分図）	33
4.12	実際の画像（参考）	34
4.13	柱側面に対するスキャンラインのずれ	36
4.14	評価用データの計測	37

---

4.15	実験結果と評価用結果 . . . . .	38
5.1	都内の典型的な道路状況 . . . . .	45
5.2	データ収集システム . . . . .	47
5.3	解析の手順 . . . . .	50
5.4	形状復元した街路 . . . . .	51
5.5	点の個数のヒストグラム . . . . .	51
5.6	抽出した車体側面点群 $A$ . . . . .	53
5.7	側方シルエット曲線 . . . . .	54
5.8	車両の検出 . . . . .	55
5.9	形状復元した街路 (II) . . . . .	56
5.10	抽出した路面点群 $B$ . . . . .	57
5.11	遮蔽境界曲線 . . . . .	58
5.12	車両の検出 . . . . .	60
5.13	走行経路図 . . . . .	61
5.14	道路のおおよその諸元 (平均的な 1 地点の値) . . . . .	64
5.15	実験風景 . . . . .	65

# 表目次

3.1	エピソード平面画像 (EPI) と エピソード平面距離画像 (EPRI) . . . . .	16
4.1	レーザレンジセンサの仕様 . . . . .	24
5.1	レーザレンジセンサの仕様 . . . . .	48
5.2	計数結果 . . . . .	63

# 第 I 部

## 序論



# 第 1 章

## 序論

## 1.1 本研究の背景と目的

近年、計算機の処理能力が飛躍的に向上し、画像処理やコンピュータビジョンの研究が幅広い分野で応用されるようになってきている。中でも三次元オブジェクトのモデル化に関する研究は盛んに行われ注目を集めている。我々は特に建造物や都市空間などの広範囲にわたった環境における大規模な空間に対して現実感の高い三次元モデルを作成することを試みている。これに類する研究はこれまでも多くなされてきたが、いずれもデータ収集の効率性やモデルの精度、発展性などに関して何らかの問題を抱えている。

活用性の高いモデルを作成するためには、内部にその幾何情報を保持していることが不可欠である。また広範囲にわたる空間データを効率的に取得するためには、移動と計測を同時に行うことが必要である。我々はこのような観点から、車載したレンジセンサを用いて高精度な空間のモデル化を行うことを目指している。

本研究ではそれらの要素技術の一つとしてエピポーラ平面距離画像の概念を導入し、自車速度・位置の推定を行って測位システムとしての活用を提案する。

また、活用性の高いモデルを作成するための距離画像からのオブジェクト抽出の一例として路上駐車車両の検出を取り上げ、その解析手法と検出結果を示す。

## 1.2 本研究の構成

第1章は本章であり、本研究の背景と目的、本論文の構成について述べた。第2章ではレンジセンサー一般について述べる。第3章では、まず通常のエピポーラ平面画像について説明する。その上で新たにエピポーラ平面距離画像の概念を提案し、その特徴を述べる。第4章では、提案したエピポーラ平面距離画像の特長を生かして自車速度・自己位置推定を行う手法について述べる。また、実空間を対象として実際に推定実験を行い、その結果を示す。さらに最後に、推定結果にもとづいて距離画像の位置合わせを行い、都市空間モデルの構築実験を行う。第5章では都市空間モデルにおけるオブジェクト抽出の一環として路上駐車車両をとりあげ、それらを自動的に計数する手法を提案する。さらに、実際の路上において計数実験を行い、その結果を示す。第6章では、本論文で述べた研究結果をまとめるとともに、その結果について検討を行う。また、今後の研究の課題などについて議論を行う。

## 第2章

# レンジセンサの特徴とスキャン手法



図 2.1: レーザレンジセンサ

## 2.1 はじめに

本章ではレンジセンサの特徴について説明した上で、ラインスキャンを行うレーザレンジセンサを移動体に積載して計測を行う場合の設置・スキャン方法について述べる。

## 2.2 レンジセンサの特徴

レンジセンサは測定物体に対してレーザ光を照射し、送出波と反射波の時間差などから対象物体までの距離を得る装置である(図 2.1)。通常はレーザの照射方向を周期的に変化させて1次元または2次元の範囲を計測することができる。レーザ光の反射点が描く軌跡はスキャンラインと呼ばれる。以下では1次元領域の計測(ラインスキャン)のみを扱う。

図 2.2 にイメージセンサ(カメラ)とレンジセンサの比較を示す。イメージセンサには撮像面が存在し、その面上に濃淡値を要素とした1次元配列が並んでいる。一方レンジセンサには撮像面は存在せず、レンジデータはレーザの照射方向(スキャン角)に沿った1次元配列として得られる。配列の各要素はセンサから対象物体までの距離である。

レンジセンサによって取得された点は全ていずれかのスキャンラインに属している。

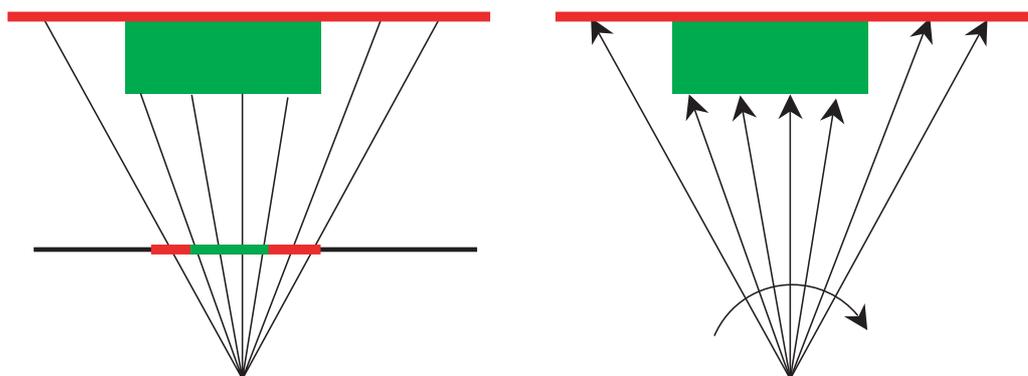


図 2.2: イメージセンサ (左) とレンジセンサ (右)

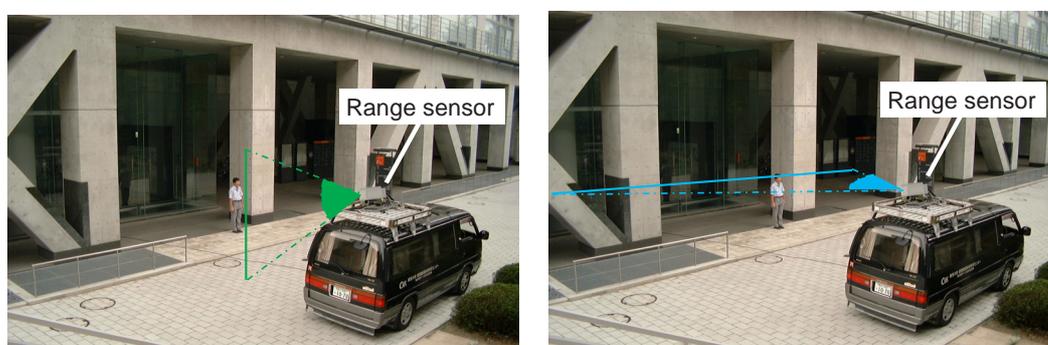


図 2.3: 垂直スキャンと水平スキャン

従ってそのデータには点の位置情報のほかに所属を表すタグが付随しており、 $\vec{p}_{m,n}$  のように表すことができる。これは点  $\vec{p}$  が  $m$  番目のスキャンライン (第  $m$  フレーム) 中の  $n$  番目の点であることを意味する。

## 2.3 垂直スキャンと水平スキャン

レンジセンサがラインスキャンと同時に移動する場合には、センサの設置方法に関してスキャンラインを垂直方向に描かせる方法 (垂直スキャン) 及び水平方向に描かせる方法 (水平スキャン) の二通りが考えられる (図 2.3)。センサが水平に移動するとき、垂直スキャンでは移動経路に沿って対象全体をスキャンすることができる。水平スキャンでは前後のフレームに重なりが生じるため、スキャン対象の時間的な推移を観測することができる。



## 第II部

# エピポーラ平面距離画像による自転車 速度推定



## 第3章

# エピポーラ平面距離画像

### 3.1 はじめに

この章では、まず通常のエピポーラ平面画像について説明する。その上で新たにエピポーラ平面距離画像の概念を提案し、その特徴を述べる。

### 3.2 関連研究

大規模な三次元空間のモデル化に関する研究は内部に幾何情報を保持しているか/いないか (a/b)、データの取得を固定したセンサにより行うか/移動体に積載したセンサにより行うか (c/d) の2軸によって大まかに分類できる。

	(c)	(d)
(a)	[15]	[1, 14]
(b)	[3]	[11]

内部に幾何情報を保持しない [3, 11] の手法は、カメラによって得られたカラー画像から非常に現実感の高いモデルを手軽に作成できるのが大きな特長である。しかしながら、これらの手法ではその内部にある特定のオブジェクトを抽出したり、画像に含まれる影を除去するといった高度な処理を行うには限界がある。本研究ではレンジセンサを用いることによってオブジェクトの幾何形状を取得し、活用性の高いモデルの作成を目指す。

一方、データの取得を地面に対して固定したセンサで行う [15, 3] の手法では比較的高精度なデータを得ることはできるものの、広範囲にわたった空間をモデル化するには非効率であり現実的とは言いがたい。本研究ではセンサを計測車両に積載して走行と計測を同時に行い効率よくデータを収集することを目指す。

[1, 14] では内部に幾何情報を保持し、かつセンサを車載する方式を採用して都市空間のモデル化を試みている。しかしこの研究では内部に保持する幾何情報は精細なものではなく、建物が「箱」であるかのように見なされている。また計測と走行を同時に行うことにより生じるレンジデータの位置合わせ問題を解決する手段として GPS を用いているが、実際には高速道路の高架などが存在する都市空間では電波状況からその信頼性が低くなることもあるほか、センサデータと GPS データの同期・統合にもコストがかかる。本研究ではレンジセンサによって得られる幾何情報そのものの推移から正しい位置合わせを行う手法を提案する。

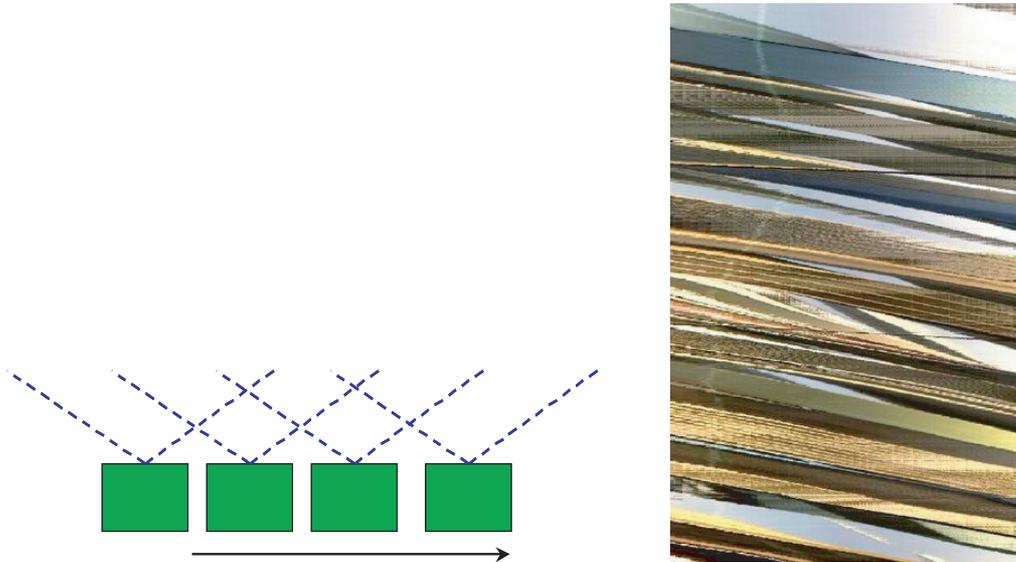


図 3.1: エピポーラ平面画像

### 3.3 エピポーラ平面画像

ここでは、エピポーラ平面距離画像の概念を提案するにあたり、まず一般的な時空間画像およびその代表例であるエピポーラ平面画像について説明し、その解析手法を述べる。

#### 3.3.1 時空間画像とは

時空間画像とは 1 次元または 2 次元の一連の濃淡画像を時間軸に沿って並べたものである。図 3.1 に時空間画像の例を示す。これは、カメラを水平方向に移動させながら取得した高さ 1 ピクセルの 1 次元画像を積み重ねたものである。

時空間画像の解析手法のひとつとしてエピポーラ平面画像(EPI; Epipolar Plane Image)解析法が知られている。以下ではこの EPI 解析法について説明する。

#### 3.3.2 EPI 解析法

図 3.1 からわかるように、カメラが水平方向に移動すると、それから得られる時空間画像ではそれを構成する画像間の対応点は連続したエッジを描き、まさに「風景が流れていく」様子を見ることができる。

図 3.1 の画像にはさまざまな傾き成分を持ったエッジが含まれている。この傾き差は、センサの水平位置の違いによる視差から生じるものであり、撮像面を持ったカメラに特有の結果であると言える。図 3.2 はカメラ位置が C1 から C2 へ移動した時の視差の変化を

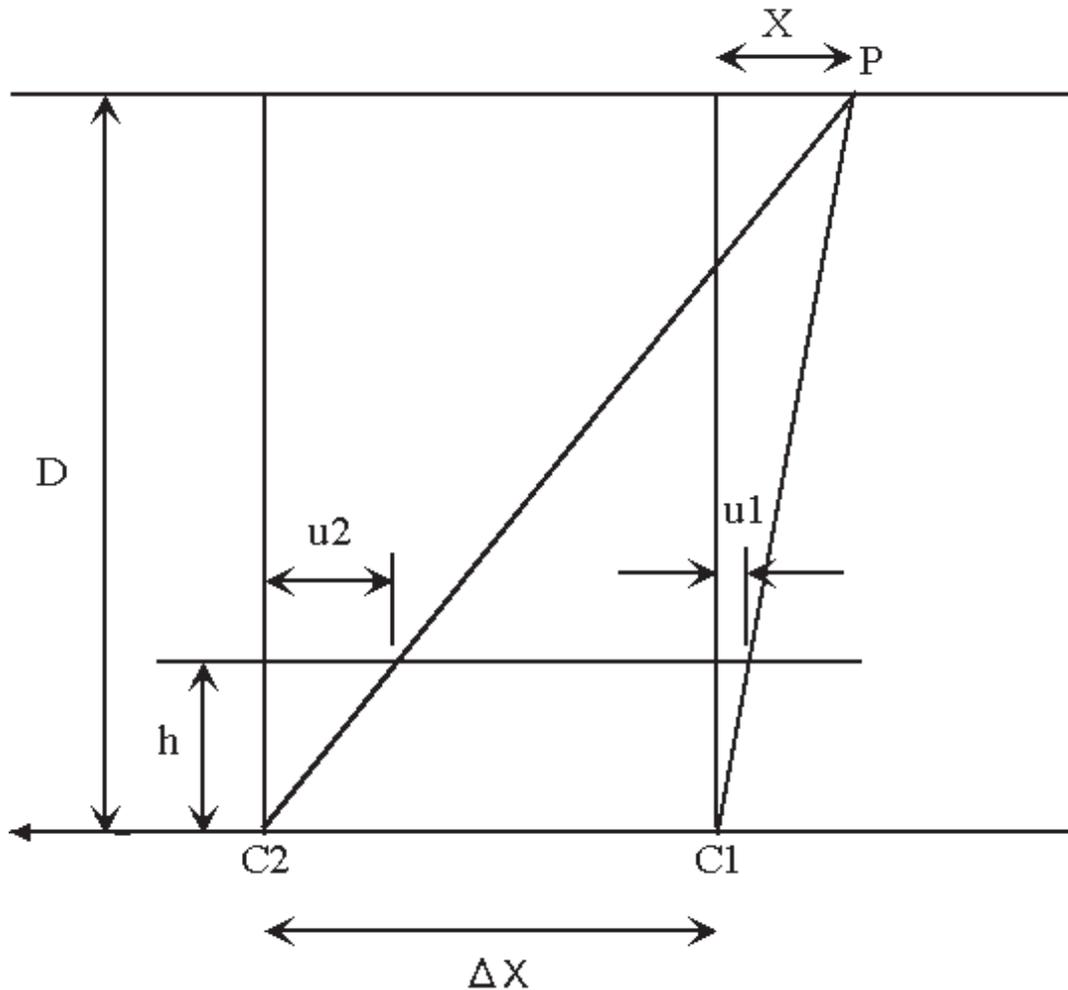


図 3.2: ラテラルモーション

表したものである。この図から、奥行き  $D$  と視差  $u$  は移動距離  $\Delta X$  を用いて次のように関係づけられる。これが [7, 8] に提案されている EPI 解析の基本概念である。

$$\Delta U = u_2 - u_1 = \frac{h(\Delta X + X)}{D} - \frac{hX}{D} = \Delta X \frac{h}{D} \quad (3.1)$$

式 (3.1) を用いると、EPI 中のエッジの傾き  $m$  がそれを描いた点の奥行き位置  $D$  に対応することが導かれる<sup>\*1</sup>。

$$mV \propto D \quad (3.2)$$

ここで  $V$  はカメラの移動速度である。これにより、ある対象物体の奥行き位置は EPI からのエッジ検出という画像処理の問題に帰着することで、三次元情報の獲得が可能にな

<sup>\*1</sup> 電車に乗って外を眺めていると、近くの電柱は瞬間的に流れ去ってしまうが、遠くの富士山は長い時間見えている状況と同じである。

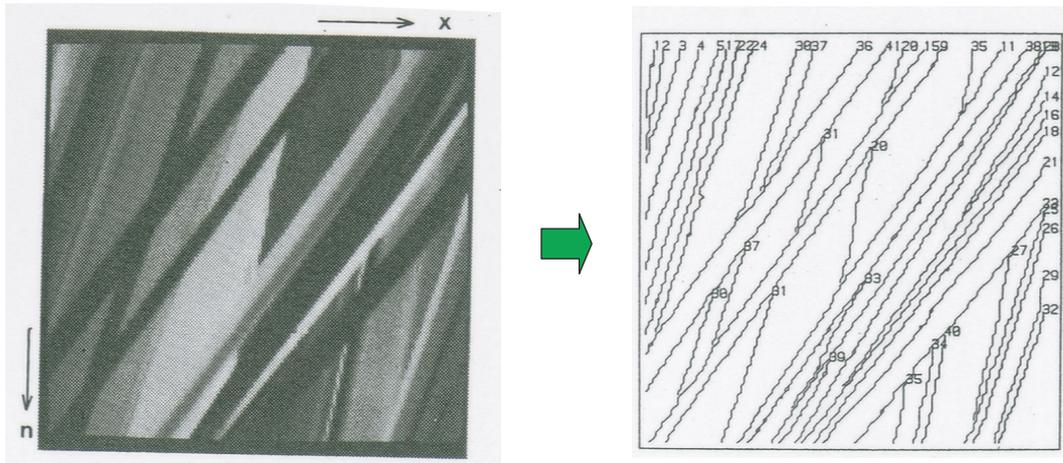


図 3.3: ハフ変換による直線検出

る [9]。これが EPI 解析の原理であり、[11] [12] [10] をはじめとした数多くの研究に応用されている。

エッジの検出は通常、画像の二値化とハフ変換により行う (図 3.3)。EPI 解析では三次元情報の取得を画像からの直線検出に帰着させるのが特長であるため、通常はカメラが等速で移動することを前提とする。

## 3.4 エピポーラ平面距離画像

ここでは、先に説明した通常のエピポーラ平面画像に対してエピポーラ平面距離画像を提案し、その特徴や解析方法についてエピポーラ平面画像との比較を交えながら述べる。

### 3.4.1 エピポーラ平面距離画像とは

先述の EPI においては、データ取得に用いるセンサはカメラすなわちイメージセンサであった。ここでは、イメージセンサのかわりにレンジセンサを用いることを考える。水平方向にラインスキャンを繰り返して得られる距離画像を時間軸方向に積層すれば EPI に類似した時空間画像 (正確には時空間距離画像) を得ることができる。本論文では、このようにして得られる間距離画像のことをエピポーラ平面画像 (EPI) に倣い、「エピポーラ平面距離画像 (EPRI)」と呼ぶことにする。図 3.4 にエピポーラ平面距離画像の模式図を示す\*<sup>2</sup>。

\*<sup>2</sup> 実際にはオクルージョンの問題から見えない部分も存在するが、図中には全て示した。

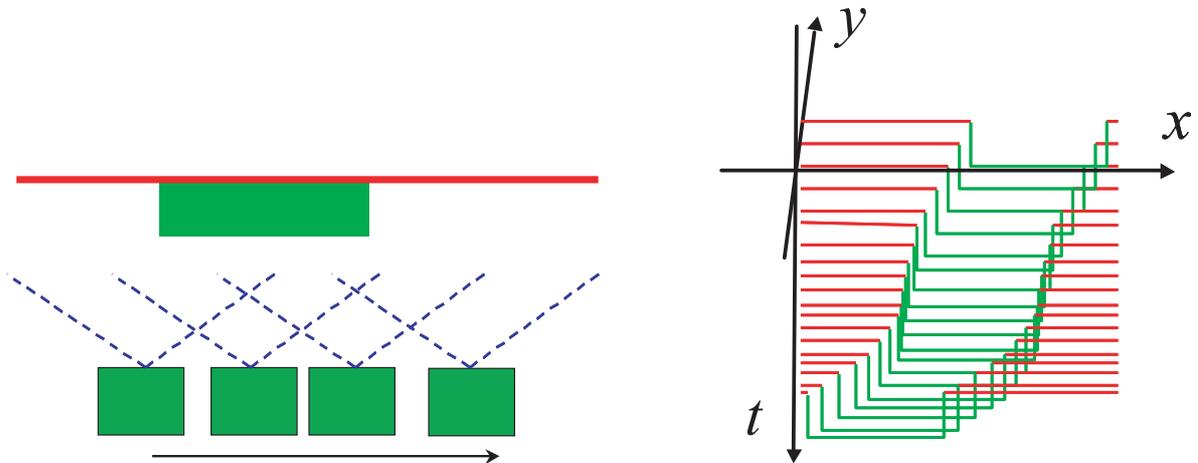


図 3.4: エピポーラ平面距離画像

表 3.1: エピポーラ平面画像 (EPI) と エピポーラ平面距離画像 (EPRI)

	エピポーラ平面画像	エピポーラ平面距離画像
使用するセンサ	イメージ	レンジ
奥行き情報	未知	既知
奥行きと画像内のエッジの傾き	依存	無関係
センサ自身の移動速度	等速を仮定	等速を仮定しない
画素	一様	非一様

### 3.4.2 エピポーラ平面距離画像の特徴

表 3.1 に、エピポーラ平面距離画像とエピポーラ平面画像の対比を示す。

エピポーラ平面距離画像ではイメージセンサのかわりにレンジセンサを用いる。したがって、各点の奥行き位置は EPI と異なり既知である。またレンジセンサには撮像面の概念が存在しないことからイメージセンサのような視差は生じず、したがって EPI のように奥行き位置によるエッジの傾きの違いは生じない。

またエピポーラ平面距離画像では、そのデータ取得に際し、必ずしもセンサを等速で移動させることを要請しない。これは、エピポーラ平面距離画像ではエッジ検出をハフ変換に頼る必要がなく、エッジは必ずしも直線でなくてもよいと考えられるからである。距離画像では各点の奥行き位置が分離されており、したがってエピポーラ平面距離画像中では各点が図 3.5 のように複数のクラスタ面を形成する。これらの面は容易に分離することができるため、エッジも容易に検出することができる。

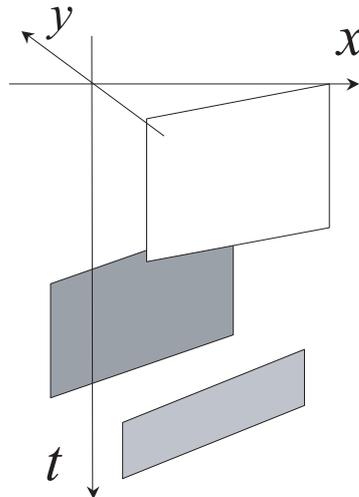


図 3.5: エピポーラ平面距離画像内に形成されるクラスタ面 (模式図)

また EPI はあくまでも一枚の濃淡画像あり、その画素は画像内に二次元配列の形で一様に分布している。これに対し時空間距離画像は、その構成点が上述の同じクラスタ面内に属するものであっても一様には分布していない。したがって、各クラスタ面ごとにその内部からエッジ検出処理を行うことができると考えられる。

### 3.4.3 解析と利用

エピポーラ平面距離画像においてある特徴点が時間的に隣り合うフレームで移動する距離は、 $V$  をセンサの移動速度、 $f$  をセンサのフレーム周波数とすると  $V/f$  と表せる。よって、EPI での式 (3.2) に対し、エピポーラ平面距離画像では次式が導かれる。

$$mV = \text{const.} \quad (3.3)$$

EPI では各点の奥行き位置が未知であり、センサの移動速度を等速とした。一方、エピポーラ平面距離画像では奥行きが既知であることから、EPI と同様の解析手法を用いることによって逆にセンサの移動速度を未知数として、その推定を行うことが可能であると考えられる (図 3.6 上)。

更に、エピポーラ平面距離画像ではセンサのオブジェクト方向への位置変化も得られると考えられる (図 3.6 下)。この問題は画像中に存在するクラスタ面に関する適当なパラメータ (曲率など) を求める問題へと帰着することができると考えられるためである。

以上のことから、エピポーラ平面距離画像はセンサの移動速度および自己位置にシステムとして活用が期待できると考えられる。

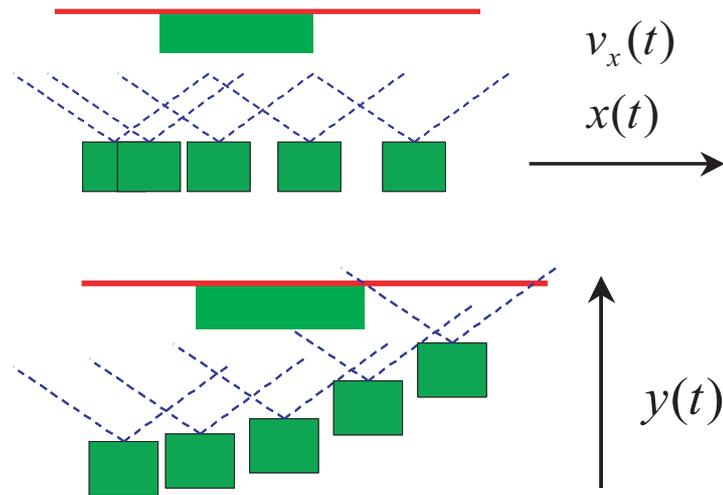


図 3.6: 時空間距離画像によるセンサ自己位置・速度の推定

#### 3.4.4 エピポーラ平面画像の作成実験

実際の街路を走行してデータ収集を行い、そのデータからエピポーラ平面距離画像の作成を行った。今回は走行速度は 10km/h および 20km/h の等速とし、走行経路は直線とした。図 3.7(a) に作成結果の一例を示す。図 3.7(b)~(e) は、(a) と同様のエピポーラ平面距離画像を正面から見て、奥行きが大きい点を黒、小さい点を白で表したグレースケール画像に変換したものである。これを見ると 10km/h の画像よりも 20km/h の画像の方が傾きが緩やかであり、式 (3.3) に合った結果が得られていることがわかる。

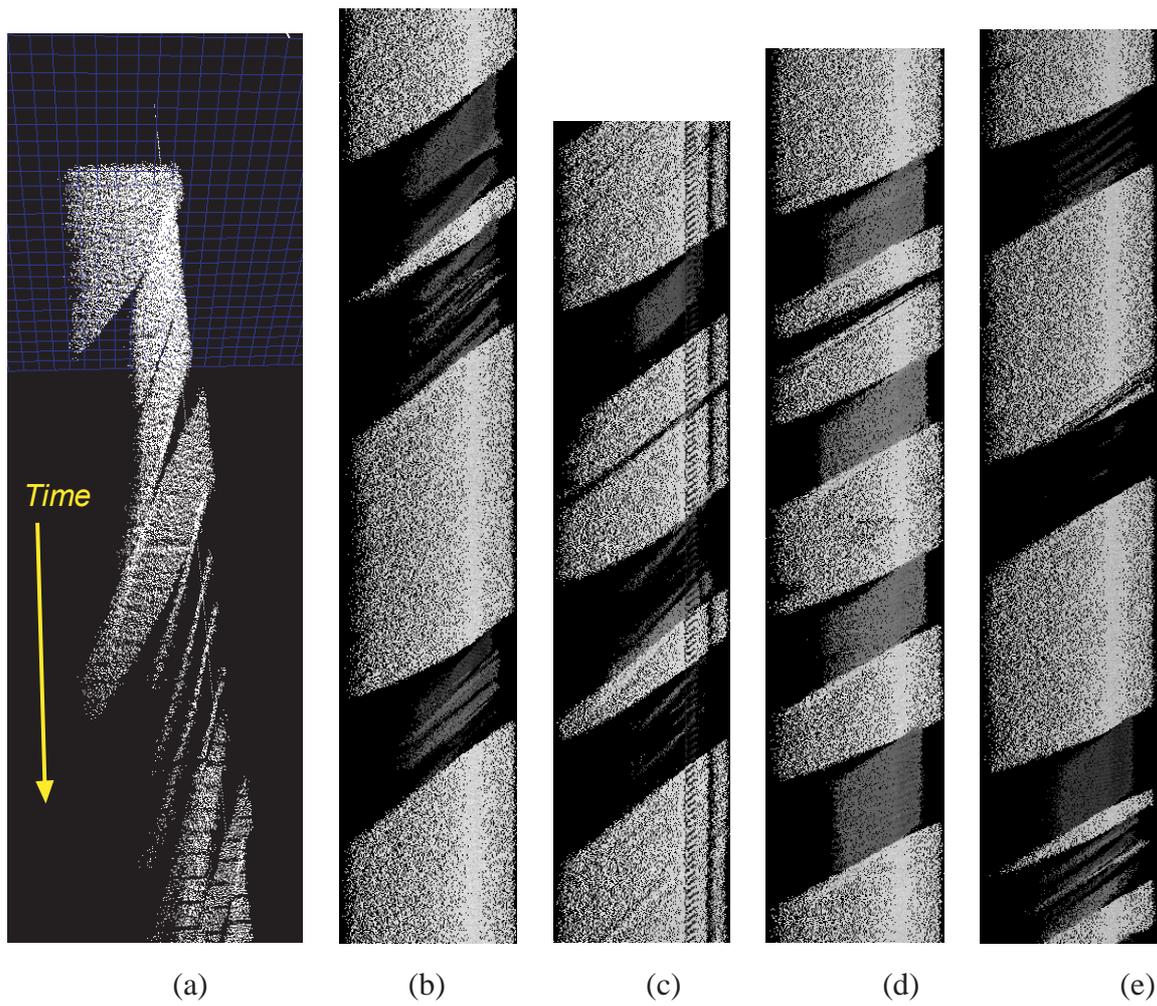


図 3.7: 実験により得られたエピポーラ平面距離画像の例 (b)(c):10km/h, (d)(e):20km/h



## 第 4 章

# 自転車速度・位置推定と広域三次元空間の復元

## 4.1 はじめに

前章 3.4.3 ではエピポーラ平面距離画像を提案し、これを利用することによってセンサの移動速度、および自己位置を推定することが可能であることを述べた。本章ではその具体的な推定アルゴリズムを説明し、実際にレンジセンサを計測用車両に積載して推定実験を行う。

また、正しくセンサの自己位置を推定することができれば、同時に積載した垂直方向のスキャンを行うセンサから得られたレンジデータを正しい位置に合わせることが可能となり、実空間の形状を正しく復元できることになる。本章では実際の建物を対象としてその形状復元実験を行う。

## 4.2 速度推定アルゴリズム

ここでは本研究で提案する速度推定アルゴリズムについて説明する。推定処理は以下のように表される。

1. データ取得
2. エピポーラ平面距離画像のセグメンテーション
3. 各セグメントへの曲線の当てはめ
4. セグメント毎の速度曲線の算出
5. 全区間に渡る速度曲線の生成

図 4.1 に処理の流れを示す。以下ではそれぞれの処理について詳細を述べる。

### 4.2.1 データ取得とエピポーラ平面画像の作成

エピポーラ平面距離画像を得るためには水平方向にラインスキャンを繰り返すレンジセンサを移動体に積載する必要がある。

図 4.2 にデータ収集システムの構成を示す。レーザレンジセンサは計測車両の進行方向に対して右側に設置し、水平方向にラインスキャンを繰り返す。表 4.1 に積載しているレーザレンジセンサの仕様を示す。JIS 規格の定めるレーザ保護クラスは 1 であり、目に安全な出力レベルである [18]。計測原理は Time-of-flight 方式であり、レーザ光の伝播時間から距離を計測する。

得られたデータは時間軸方向に積層するとエピポーラ平面距離画像が得られる。





図 4.2: データ収集用レンジセンサおよび車両

表 4.1: レーザレンジセンサの仕様

計測原理	Time-of-flight 方式
スキャン周波数	最大 75Hz
スキャン角度	100°/ 180°
スキャン角分解能	0.25°/ 0.5°/ 1.0°
測定分解能	10 mm
測定確度 (代表値)	±35 mm
レーザ保護クラス	1
製造元	ジック株式会社 [19]

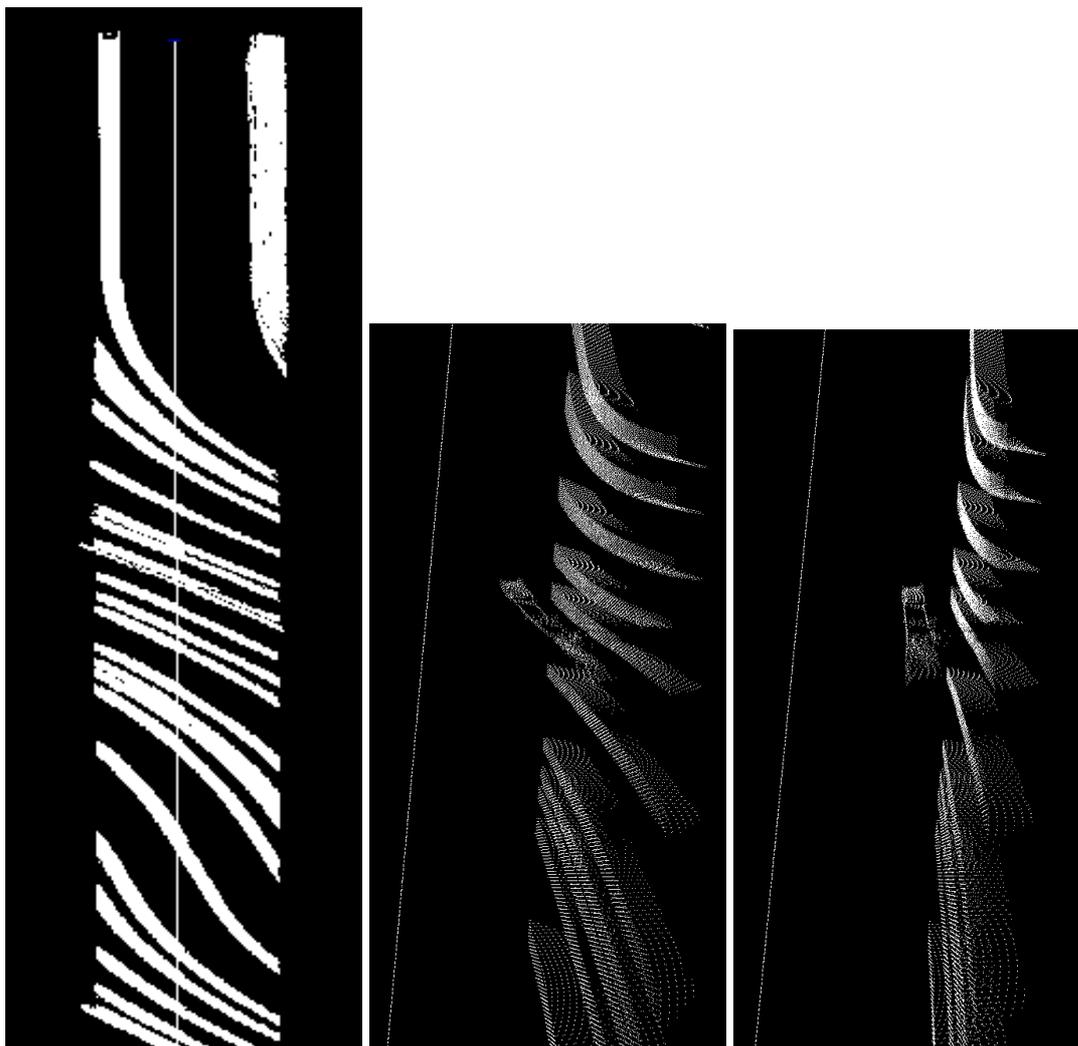


図 4.3: エピポーラ平面距離画像に表れるクラスタ面 (セグメント)

#### 4.2.2 エピポーラ平面距離画像のセグメンテーション

前章にも述べたとおり、エピポーラ平面距離画像内では複数のクラスタ面が現れる (図 4.3)。これらのクラスタを個々のセグメントに切り分ける。セグメンテーションを行った結果を図 4.4 に示す。

#### 4.2.3 各セグメントへの曲線の当てはめ

得られたセグメントにはそれぞれ対象物体がセンサの可視範囲を時間に伴って推移する様子が表現されている。これはセンサを積載した移動体の位置・速度変化に他ならない。しかし、これらのセグメントは測定誤差に伴うノイズから一様な面とはなっていない。ま

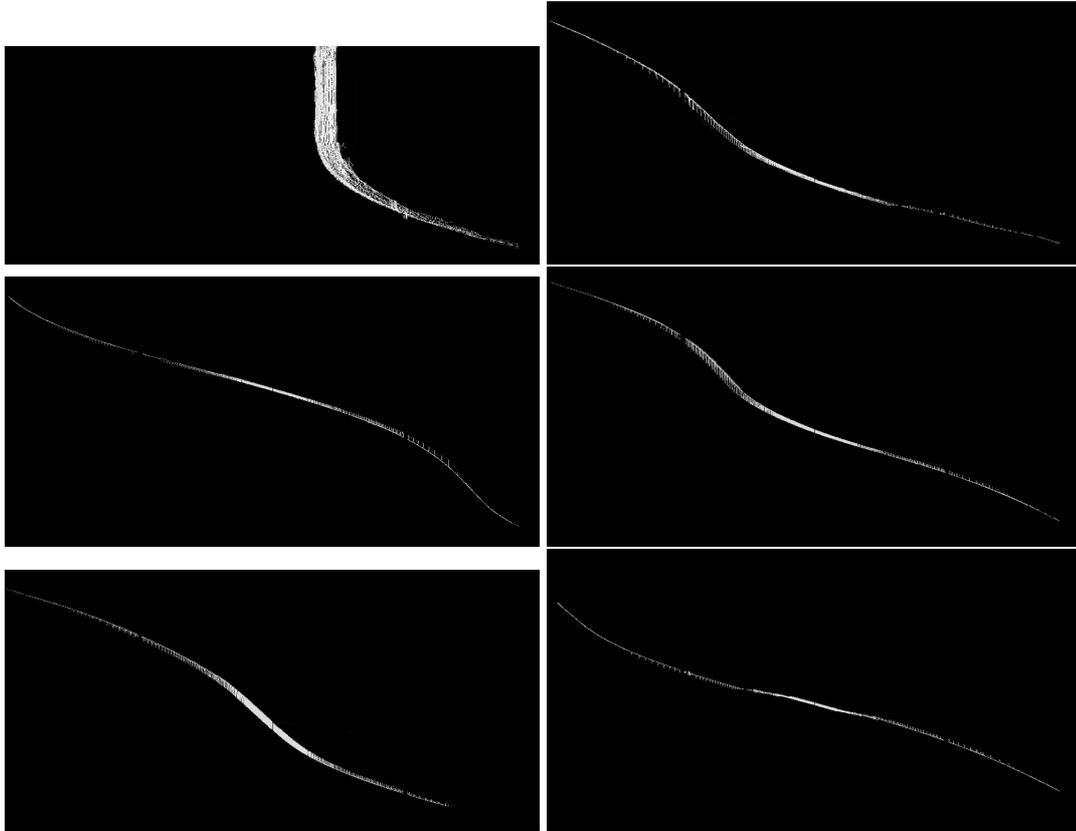


図 4.4: セグメンテーション後のエピポーラ平面距離画像

た、スキャン角の分解能やスキャン周波数が有限であることから、レーザの照射点は離散的に分布しており、各セグメントのエッジも滑らかではない。

一方で、本研究ではレンジセンサは計測用車両に積載している。一般に自動車はその機械的な加速・減速の原理から、意図的に急発進・急停止を行わない限りその速度変化は滑らかであると考えられる。そこで、本研究ではレンジセンサは連続した速度変化をするものと仮定し、得られた各セグメントに対して回帰的に曲線を当てはめる。図 4.5 では 6 次の多項式を当てはめている。

#### 4.2.4 セグメント毎の速度曲線の算出

前項においてセグメント毎に当てはめた曲線は解析的に式で表されており、各々のローカルな短区間における位置変化を表している。したがって、これらを解析的に微分することで各セグメント毎の速度曲線を得ることができる。図 4.6 に各セグメントから得られた速度曲線を示す。

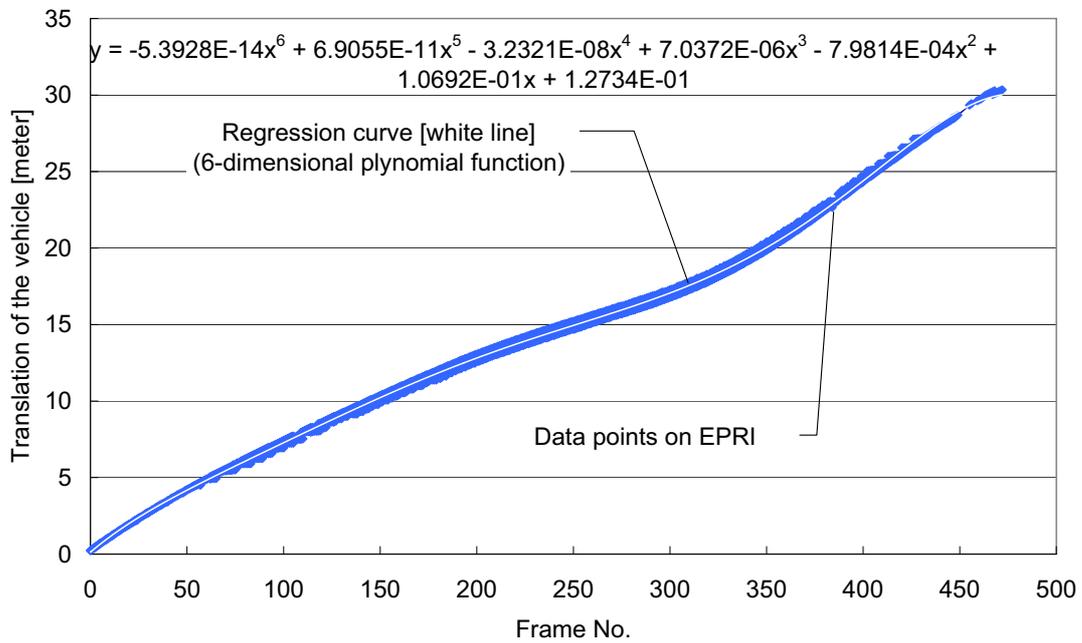


図 4.5: セグメントへの回帰曲線の当てはめ

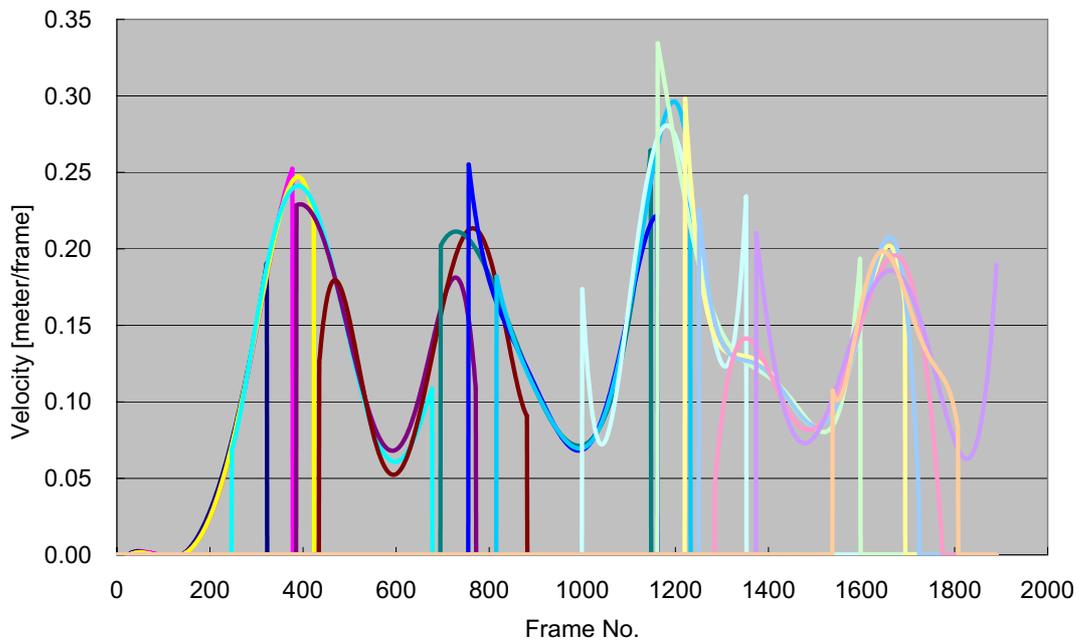


図 4.6: 各セグメントから得られた速度曲線

### 4.2.5 全区間に渡る速度曲線の生成

それぞれのセグメントから得られる速度曲線はそのセグメントの存在している区間に対して局所的なものである。そこで、各々の速度曲線を連結して全区間に渡る速度曲線を生成する。

ここで、これらの速度曲線は回帰的な処理によって得られたものである。よって、セグメントの中央付近では速度曲線の信頼度は高く、末端付近では信頼度は低いと考えられる。したがって、ある特定の区間において複数のセグメントから速度曲線が得られる場合は、高い信頼度を与える速度曲線を優先的に信頼する必要がある。

一方で、本研究では移動体の速度変化は滑らかであることを仮定している。そこで、セグメントごとの推定値をその信頼度に従って重み付けし、足し合わせることを考える。

具体的には、セグメント  $S_n$  が第  $k_n$  フレーム目から  $k'_n$  フレーム目にわたって存在している場合、第  $k$  フレームにおける速度推定値の信頼度を以下のように定義する。

$$R_n(k) = \begin{cases} 0 & (k < k_n, k'_n < k) \\ \exp\left\{-\frac{(k-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} & (k_n \leq k \leq k'_n) \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\mu = \frac{k'_n - k_n}{2} \quad (4.2)$$

$$6\sigma = k'_n - k_n \quad (4.3)$$

$S_n$  から得られる速度曲線を  $v_n(k)$  とすると、全区間に渡る推定速度曲線  $v(k)$  は以下のように表される。

$$v(k) = \sum_{n \in N} \frac{R_n(k)}{R} v_n(k) \quad (4.4)$$

$$R = \sum_{n \in N} R_n(k) \quad (4.5)$$

( $N$  : 第  $k$  フレームを含んでいるセグメントの集合)

これにより、それぞれの信頼度に応じてセグメント毎の速度曲線を滑らかに連結することができる (図 4.7)。

## 4.3 三次元空間の復元

エピソード平面距離画像からセンサの移動速度を推定する場合は、水平方向にラインスキャンを繰り返すレンジセンサを用いた。このとき、垂直方向にラインスキャンを繰り返すレンジセンサを積載して同時に計測を行えば、速度推定を行った結果を反映させること

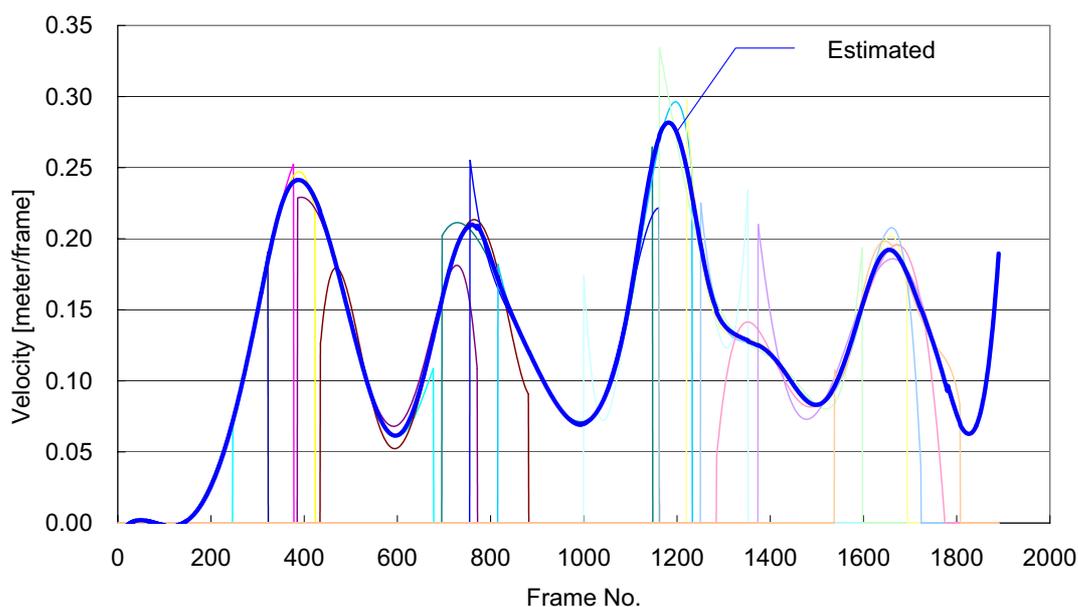


図 4.7: 全区間に渡る速度曲線

により垂直方向のスキャンを行うセンサから得られたレンジデータを正しい位置に合わせることが可能となり、実空間の形状を正しく復元することができる。

## 4.4 実験

以上の手法の有効性を確かめるため、実際にレンジセンサを計測用車両に積載して路上を走行し、速度推定を試みた。走行したのは東京大学駒場リサーチキャンパス内、生産技術研究所 B 棟前から F 棟前までである。図 4.8 に走行経路を示す。

図 4.9 に得られた速度推定曲線を示す。また、図 4.10, 4.11 に推定した速度結果にもとづいて 1 階部分の三次元形状復元を行った例を示す。



図 4.8: 走行経路

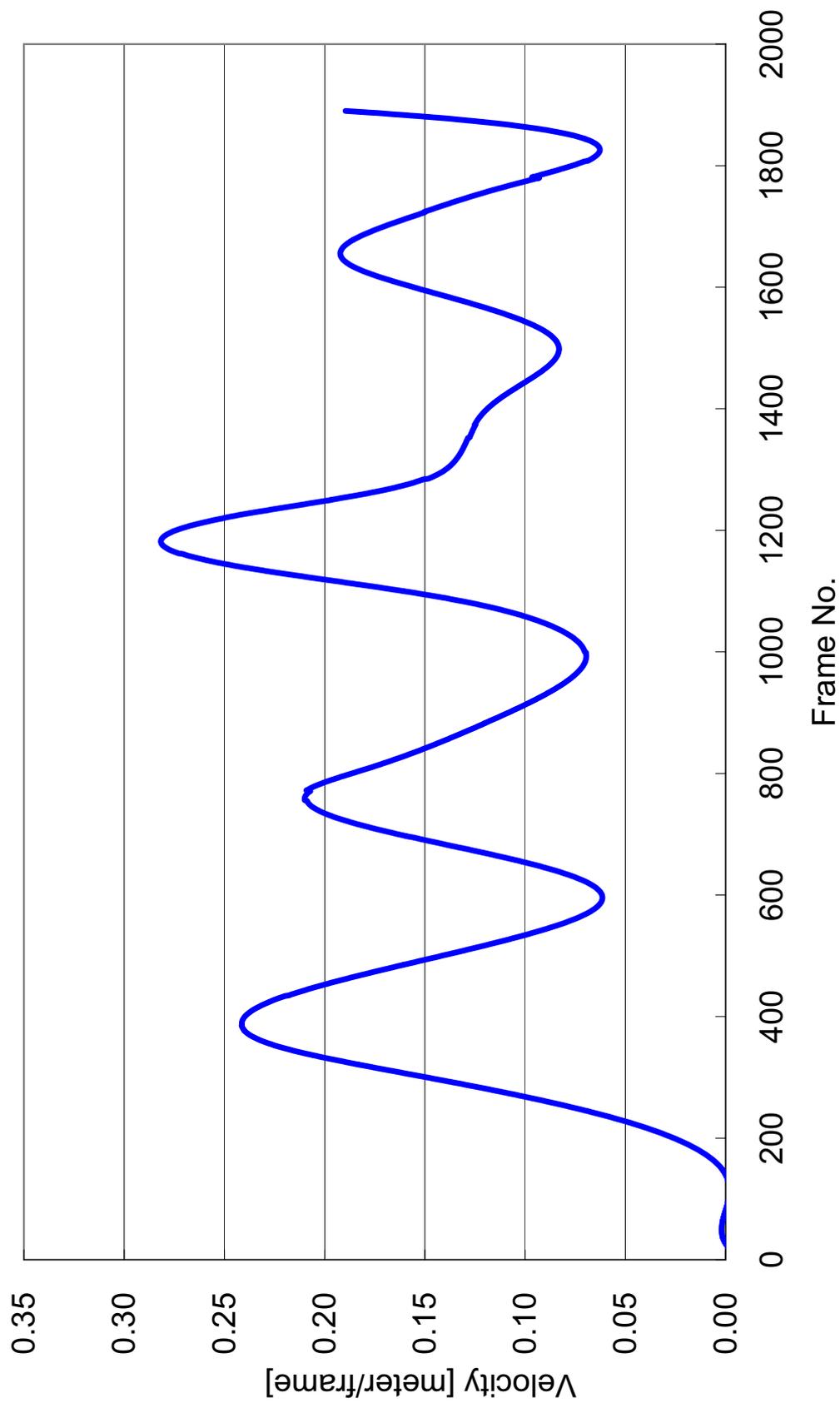
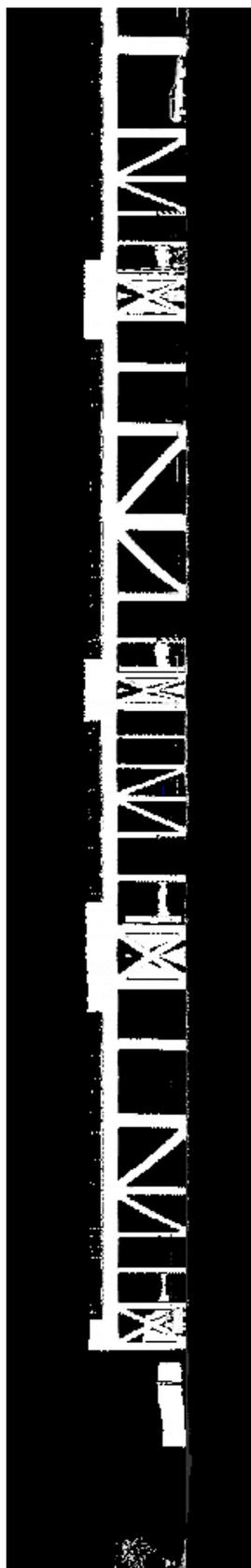
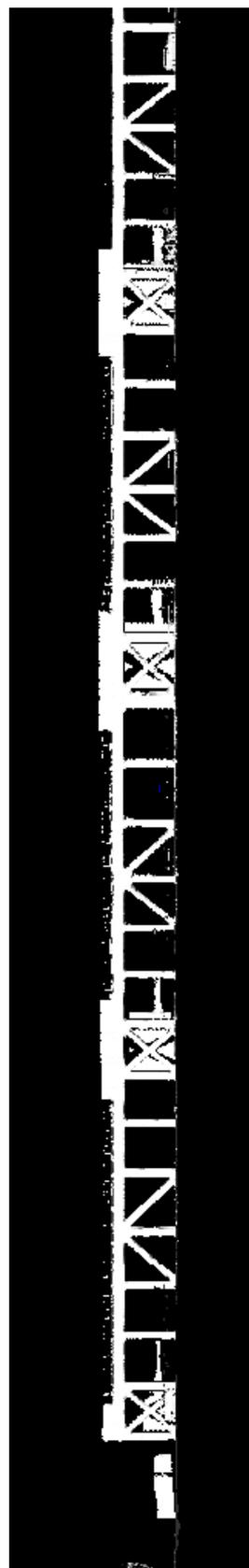


図 4.9: 実験から得られた速度推定曲線

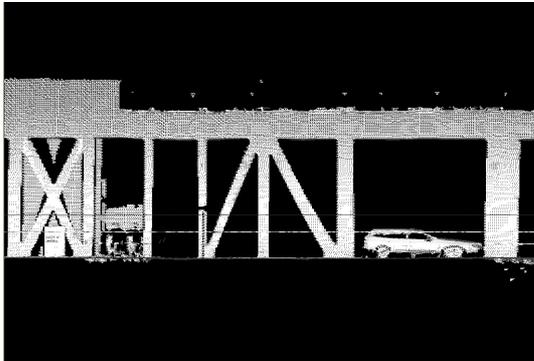


(a) 速度推定結果反映前（等速走行を仮定した場合）

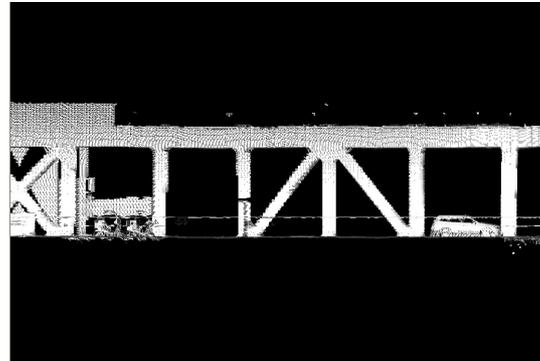


(b) 速度推定結果反映後

図 4.10: 推定速度にもとづいて三次元形状を復元した例（全体図）



(a1)



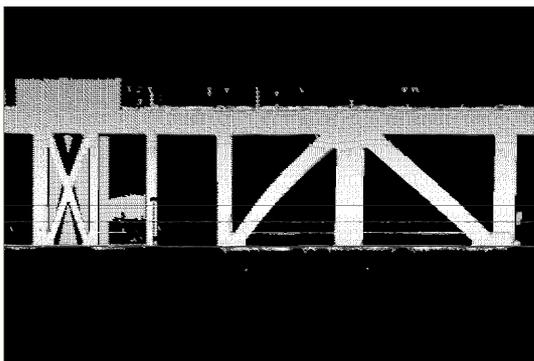
(b1)



(a2)



(b2)



(a3)



(b3)

(a1) ~ (a3): 速度推定結果反映前 (等速走行を仮定した場合)

(b1) ~ (b3): 速度推定結果反映後

図 4.11: 推定速度にもとづいて三次元形状を復元した例 (部分図)



図 4.12: 実際の画像 (参考)

## 4.5 評価と考察

### 4.5.1 評価用データ (正解速度) の取得

評価用のデータは、図 4.10(a) のモデル (推定結果反映前) において隣接する柱の間隔 (実測値) と、その間隔を描くのに必要としたスキャンラインのフレーム数から求めた。具体的には以下のとおりである。

1. 垂直に立っている柱 (全 28 本) に対し、各々の北側面 (左側) を描いているスキャンラインのフレーム番号を  $N_n^1, N_n^2, \dots, N_n^{28}$  とする。
2. 同様に、南側面 (右側) を描いているスキャンラインのフレーム番号を  $N_s^1, N_s^2, \dots, N_s^{28}$  とする。
3. レーザ距離計と反射板を用いて  
各柱の北面から隣の柱の北面までの距離  $D_n^{1,2}, D_n^{2,3}, \dots, D_n^{27,28}$   
および南面から隣の柱の南面までの距離  $D_s^{1,2}, D_s^{2,3}, \dots, D_s^{27,28}$   
を測る (図 4.14)。
4. 第  $\frac{N_n^i + N_n^{i+1}}{2}$  フレーム目における瞬間速度を  $\frac{D_n^{i,i+1}}{N_n^{i+1} - N_n^i}$  [meter/frame]  
第  $\frac{N_s^i + N_s^{i+1}}{2}$  フレーム目における瞬間速度を  $\frac{D_s^{i,i+1}}{N_s^{i+1} - N_s^i}$  [meter/frame]  
とする。

なお、レンジセンサのスキャン周波数は有限である。よって、1., 2. において、各柱の北側面および南側面を描いているスキャンラインの位置は実際の柱の側面に対して最大で 1 フレーム分のずれが生じる (図 4.13)。したがって 4. における瞬間速度の分母には最大で  $\pm 1$  の誤差があると考えられる。

### 4.5.2 評価と考察

実験によって得られた推定速度曲線と、上述の手法によって得られた評価用速度曲線を図 4.15 に示す。

推定した速度と評価データは概ね合致しており、本手法が速度推定に有効であると言える。一方、特に極大点、および極小点において顕著に差が現れており、最大で 8~12% 程度の誤差を生じている。以下では考えられる原因を挙げ、精度向上に関する考察を行う。

単一の多項式による回帰 今回の実験では、各セグメントには単一の多項式を当てはめることによって回帰を行った。回帰式は必ずしも多項式である必要はなく、移動体 (車両)

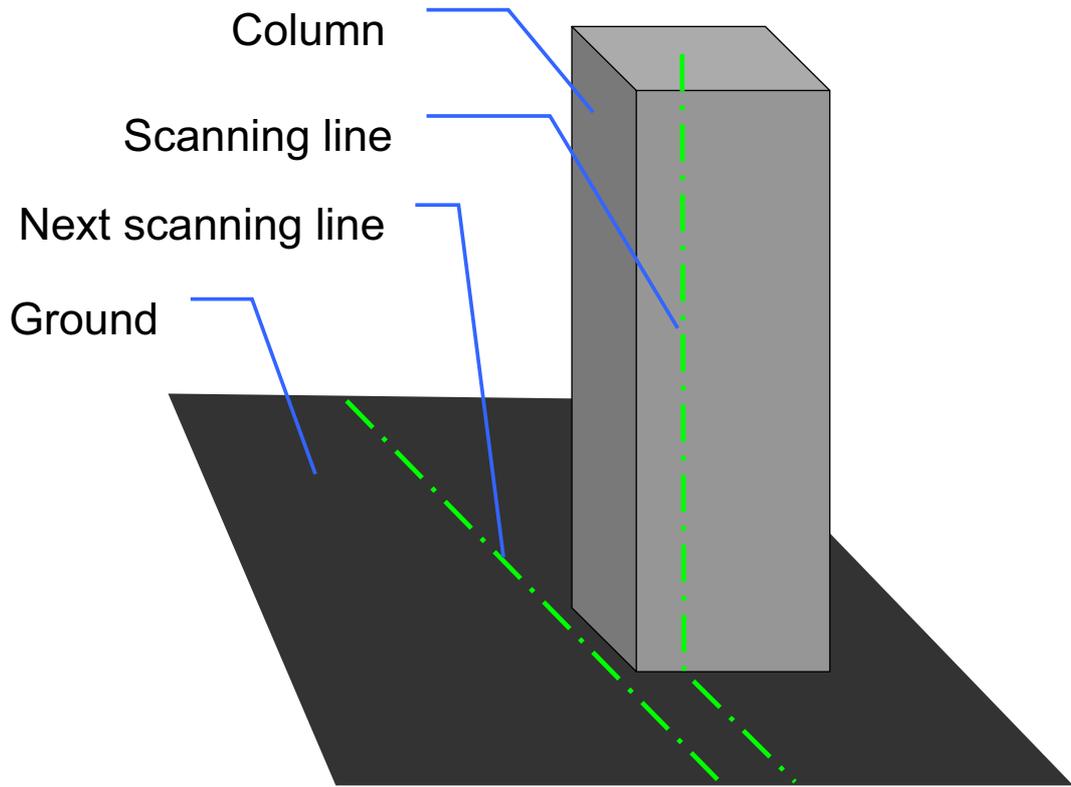


図 4.13: 柱側面に対するスキャンラインのずれ

の運動特性を考慮した回帰式を検討する必要がある。

1 セグメント内で完結した処理 今回の実験では推定速度曲線の算出は個々のセグメントにおいて内部で完結した処理を行い、最後にそれらを滑らかにつなぐ手法をとった。しかし、それぞれのセグメントに対してその近傍のセグメントは、互いに近い速度を表現しているはずである。従って、回帰式を求める段階でセグメント間の連続性を制約に入れ、複数のセグメントから同時に速度を推定することで精度向上が見込まれる。

反射率の利用 今回の実験で用いたレンジセンサからはレーザ反射率の情報を得ることはできないが、それが可能であるレンジセンサを用いれば、エピソード平面距離画像中には凹凸による幾何的なエッジに加え、反射率によるエッジも現れる。これを利用すれば対象物体が平坦な面からもエッジが得られ、密にセグメントをとることで精度向上が見込まれる。

## 4.6 今後の課題

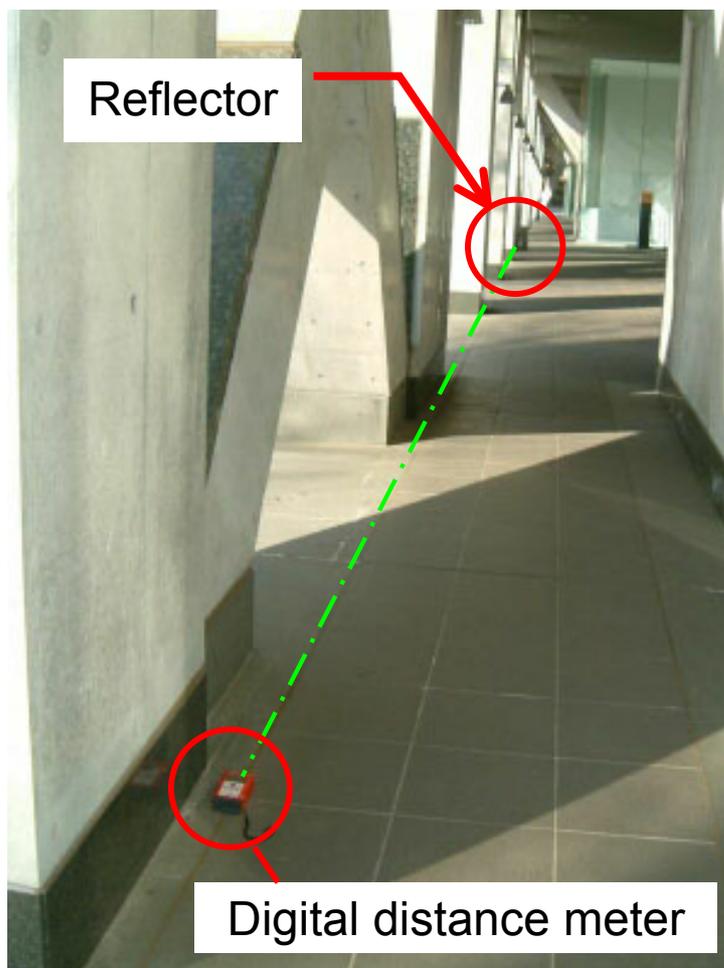
今後の課題としては、先に述べた精度向上のほか、以下の事項が挙げられる。



(a) デジタルレーザ距離計



(b) 反射板



(c) 評価用データの計測

図 4.14: 評価用データの計測

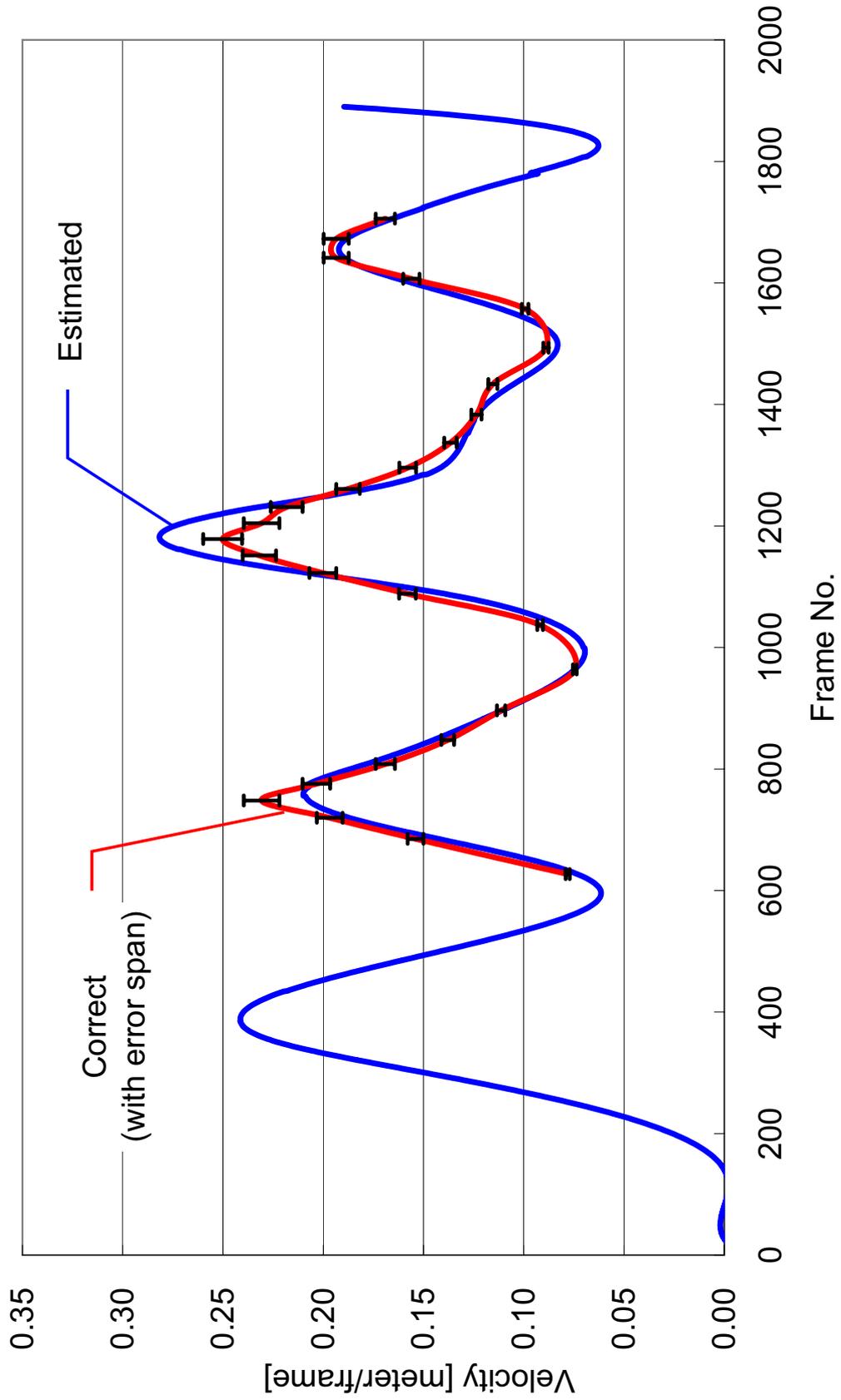


図 4.15: 実験結果と評価用結果

**自由走行経路の場合の実験** 本実験では走行経路は直線を仮定したが、これを自由走行経路に対応させる。この場合はエピポーラ平面距離画像内の各点群が形成する面は平面から曲面となるが、これを解析することで自由な自転車走行経路を推定する。

**様々な対象空間における実験** 本実験では対象空間は建物の柱であり、エピポーラ平面距離画像は明らかなセグメントに分かれていた。今後はさらに樹木などの多い一般的な対象空間において実験を行い、本手法のロバスト性を評価する。

**テクスチャマッピング** レンジセンサのほか、イメージセンサも計測車両に搭載して同時に映像を取得し、幾何モデルとテクスチャを統合する。

**オクルージョンの考慮** 本実験ではオクルージョンについては考慮しなかったが、実際にはオクルージョンが生じた場合、エピポーラ平面距離画像内のエッジに変化が現れると考えられる。

**スキャン時間の考慮** 本実験では一度のラインスキャンは瞬間的に行われるものと仮定したが、実際には有限の所要時間をもって行われる。今後、計測車両の走行速度が速くなった場合にどの程度まで仮定が成立するか評価する必要がある。

**動物体と静物体、速度の異なる物体の自動分離** 本実験では、レーザの照射される実空間に存在するオブジェクトはすべて静止していた。この場合エピポーラ平面距離画像内では、局所区間内においてすべてのエッジが同じ傾きを持つ。ここで、レーザの照射される空間内に速度をもったオブジェクト（動物体）が存在している場合、そのオブジェクトはエピポーラ平面距離画像内で異なる傾きを描くと考えられる。このことから、動物体と静物体、速度の異なる物体の自動分離が可能であると考えられる。



## 第 III 部

# 路上駐車車両の自動認識



## 第5章

# 路上駐車車両の自動認識

## 5.1 はじめに

今日の日本では、交通渋滞がさまざまな側面から問題となっている。渋滞の原因の一つに挙げられるのが路上駐車車両による道路容量の減少である。図 5.1 は東京都内の典型的な道路状況である。左端の一車線が駐車車両によって占拠され、道路の容量が  $2/3$  に減少している。これらの車両のうち数割をなくすことができれば、交通渋滞は大幅に緩和されることが知られており、従って道路の空間的・時間的容量、すなわちどの程度の数の車両がどの程度の時間に渡って駐められているかを把握することは日本の道路行政にとって非常に重要な課題となっている。しかし現在、これらの統計量はすべて人手によって求められており、数年に一度しか把握することができない。このような状況から、効率的な自動駐車車両認識システムを開発する必要性が高まっている。

このような状況において我々は、計測用車両に積載したレンジセンサによって路上を走行しながら計測を行って得られた距離画像から自動的に駐車車両を認識するシステムの開発を試みている。

レンジセンサは物体検出を目的とした場合、カメラよりも情報量の面で有利である。さらに、駐車車両を含めた街路の形状を取得することができ、車両計数のみならず都市空間のデジタルモデリングなどに応用することができる。また、装置としても近年の技術進歩により、小型・軽量、安全で精度に優れた安価な製品が登場しており、カメラのように身近で扱いやすいものになりつつある。

また一方で我々は、都市空間の“動き”としての車両認識にも関心を向けている。都市空間のデジタルモデルを考えた場合、活用性の高いモデルを実現するためには、建物などの静的なオブジェクトと車両や歩行者などの動的なオブジェクトを分離する必要がある。我々は本研究で提案する手法をこのような問題を解決し、活用性の高い都市空間モデルを実現するための第一段階として位置付けている。

本稿の構成は以下のとおりである。まず、5.2 章で関連する研究について述べ、5.3 章でデータ収集システムの構成について述べる。次に、5.4 章で路上駐車車両の認識アルゴリズムを提案する。5.5 章では実際の路上からデータを取得し、そのデータに提案したアルゴリズムを適用した結果を示す。5.6 章でまとめとする。

## 5.2 関連研究

路上駐車車両認識を行った研究としては [16, 17] がある。これらはいずれも車載したカメラから得られた画像を利用して車両検出を行った研究例である。[16] は、車載カメラからパノラマ画像作成し、車両のタイヤ (ホイール) を手がかりとして車両を検出する。[17]



図 5.1: 都内の典型的な道路状況

は、車載したラインスキャンカメラから EPI (エピポーラ平面画像) を作成し、距離情報を利用して車両を検出している。しかし、カメラ画像を用いているため、特に [17] は光源環境などの撮影条件にロバストでなく、また、いずれの手法も走行速度、走行経路の変動には柔軟に対処できない。

レンジセンサを利用すると、カメラのような撮影条件に依存しない幾何形状データが得られ、走行速度や走行経路が変動する場合でも GPS や INS (慣性航法装置) などから位置情報得が得られれば容易にそれを形状データに反映することができ、都市空間のデジタルモデリングにも応用することができる。

都市空間のデジタルモデリングは近年盛んに研究されており、[1, 2, 3, 15, 4] などがある。これらの研究はいずれも建物などの固定されたオブジェクトをモデル化することに焦点が当てられている。一方我々は都市空間のデジタルモデリングを考える際、車両 (走行中、停車中) や歩行者など、空間中に存在する“動き”をもったオブジェクトに関心を向けている。我々が既に開発した三次元地図視覚システム [5, 6] では、実際の車両の動きを表現することが可能になっている。本研究で提案する手法は、これらと組み合わせることによって、活用性の高い都市空間モデルの再現に応用することを目指している。

### 5.3 データ収集システムの構成

本システムでは、広範囲にわたった領域を効率的に測定する必要があることから、レンジセンサを実験用データ収集車に積載し、走行と計測を同時に行う方式をとる。

本手法で用いるレーザレンジセンサは、以下の要件を満たす必要がある。

- 車両検出に十分な精度を備えている
- レーザ出力が目には安全なレベルである
- ラインスキャン (直線に沿った一次元的な計測) が可能である

一般にレンジセンサは一度の計測で二次元の領域をスキャンできるものが多いが、二次元領域の計測にはある程度の時間を要する。本手法では走行と計測を同時に行うため、計測時間の短いラインスキャンを繰り返すことによってデータを取得する。図 5.2 にデータ収集システムの構成を示す。レーザレンジセンサは計測車両の進行方向に対して左側に設置し、垂直方向にラインスキャンを繰り返す。計測車が走行するにしたがって一次元の垂直な距離画像が連続的に得られ、走行経路の左側領域全体にわたって距離画像を得ることができる。最も近い場合でも 2~3m 以上離れた位置を走行すれば、高さ 3~4m の範囲をスキャン領域に納めることができる。

表 5.1 に積載しているレーザレンジセンサの仕様を示す。JIS 規格の定めるレーザ保護クラスは 1 であり、目に安全な出力レベルである [18]。計測原理は Time-of-flight 方式で

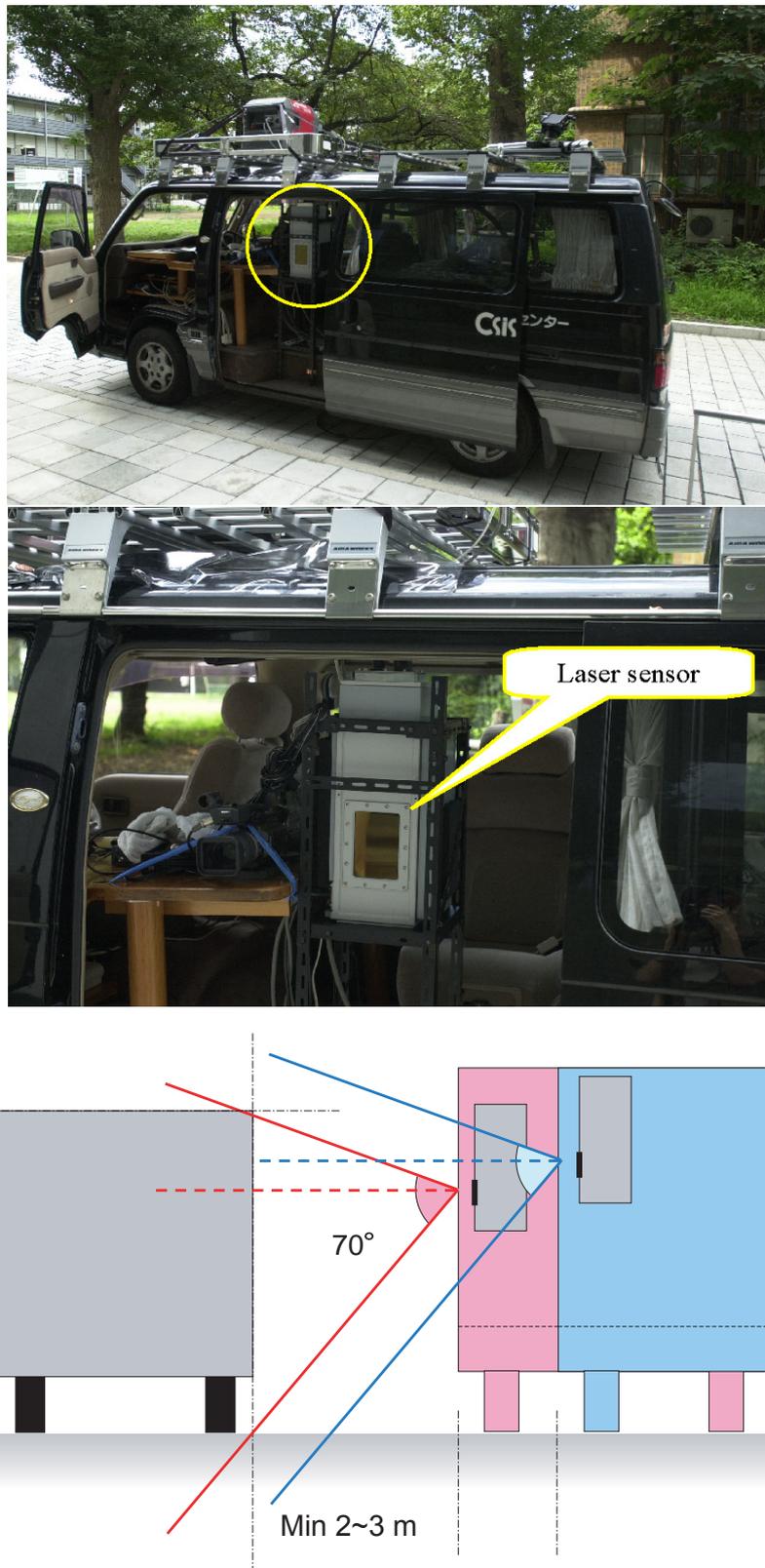


図 5.2: データ収集システム

あり、レーザ光の伝播時間から距離を計測する。ラインスキャンの周波数は 100Hz であり、36km/h で走行時にはスキャンラインの間隔は 10cm となる。最大誤差は  $\pm 50\text{cm}$  であるが、この精度でも車両検出には充分である。

計測車が等速度で走行するか、またはレンジセンサと GPS などの測位システムを結合することにより、各々のスキャンラインは実空間上と同様の正しい位置に合わせられる。

表 5.1: レーザレンジセンサの仕様

計測原理	Time-of-flight 方式
スキャン周波数	100Hz
スキャン角度	70°
最大誤差	$\pm 50\text{cm}$
レーザ保護クラス	1
製造元	石川島播磨重工業株式会社 [20]

## 5.4 認識アルゴリズム

ここでは、レンジセンサによって得られる幾何情報から駐車車両を認識するアルゴリズムについて述べる。本手法では、基本的には、計測車両の左側に位置し、適当な奥行き位置に存在し、適当な大きさを持つ物体はすべて駐車車両とみなす。

出力の弱いレーザレンジセンサでは反射率の低い黒色の物体は鮮明な像が得られず、車両を認識できない可能性がある。そこで我々は、二種類の異なる検出アルゴリズムを考案した。

### 5.4.1 解析の流れ

本システムでは、得られた同一のデータに対して、以下の二種類の検出手法を用いる。

- (I) 車体側方シルエットに着目した手法
- (II) 路面上の遮蔽に着目した手法

これら二手法では、車両の存在位置を独立に検出することができる。それぞれの検出位置について、存在 (1) / 非存在 (0) に関する論理輪 (OR) をとったものを、システム全体としての検出結果とする。

(I) の手法では、以下のような流れに沿って解析を行う。

1. 得られたデータによる街路三次元形状の復元

2. 車体側面点データの抽出
3. 側方シルエット曲線の作成
4. 1 車両の判別
5. 計数

(II) の手法では、以下のような流れに沿って解析を行う。

1. 街路三次元形状の復元 (I と共通)
2. 路面点データの抽出
3. 遮蔽境界曲線の作成
4. 1 車両の判別
5. 計数

図 5.3 に解析の手順を示す。

以下、5.4.2 節では、(I) (II) に共通の処理である三次元形状の復元について説明し、5.4.3 節では手法 (I) の、5.4.4 節では手法 (II) の処理の詳細を述べる。

## 5.4.2 三次元形状の復元

取得したレンジデータは、センサ位置からの相対座標で表されている。これにセンサの自己位置を加えて世界座標に変換し、三次元形状の復元を行う。座標系の原点は計測車両の走行開始点とし、軸は以下のように定める。

- $z$  軸: 鉛直上方向
- $x$  軸: 走行経路の前方向 (計測車の進行方向)
- $y$  軸:  $z$  軸と  $x$  軸の外積方向

図 5.4 に形状復元を行った例を示す。

取得したレンジデータはラインスキャンを繰り返して得られたものである。従って、すべての計測点 (レンジポイント) は、“ $m$  番目のスキャンライン内の  $n$  番目の点” のようにタグが付けられており、以下のように表すことができる。

$$\vec{p}_{m,n} = (x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$$

## 5.4.3 手法 I: 車体側方シルエットに着目した手法

図 5.4 から、駐車車両を形成する点群は以下の特徴を持つことがわかる。

1. 車両はおおよそ一定の奥行き位置に整列している。

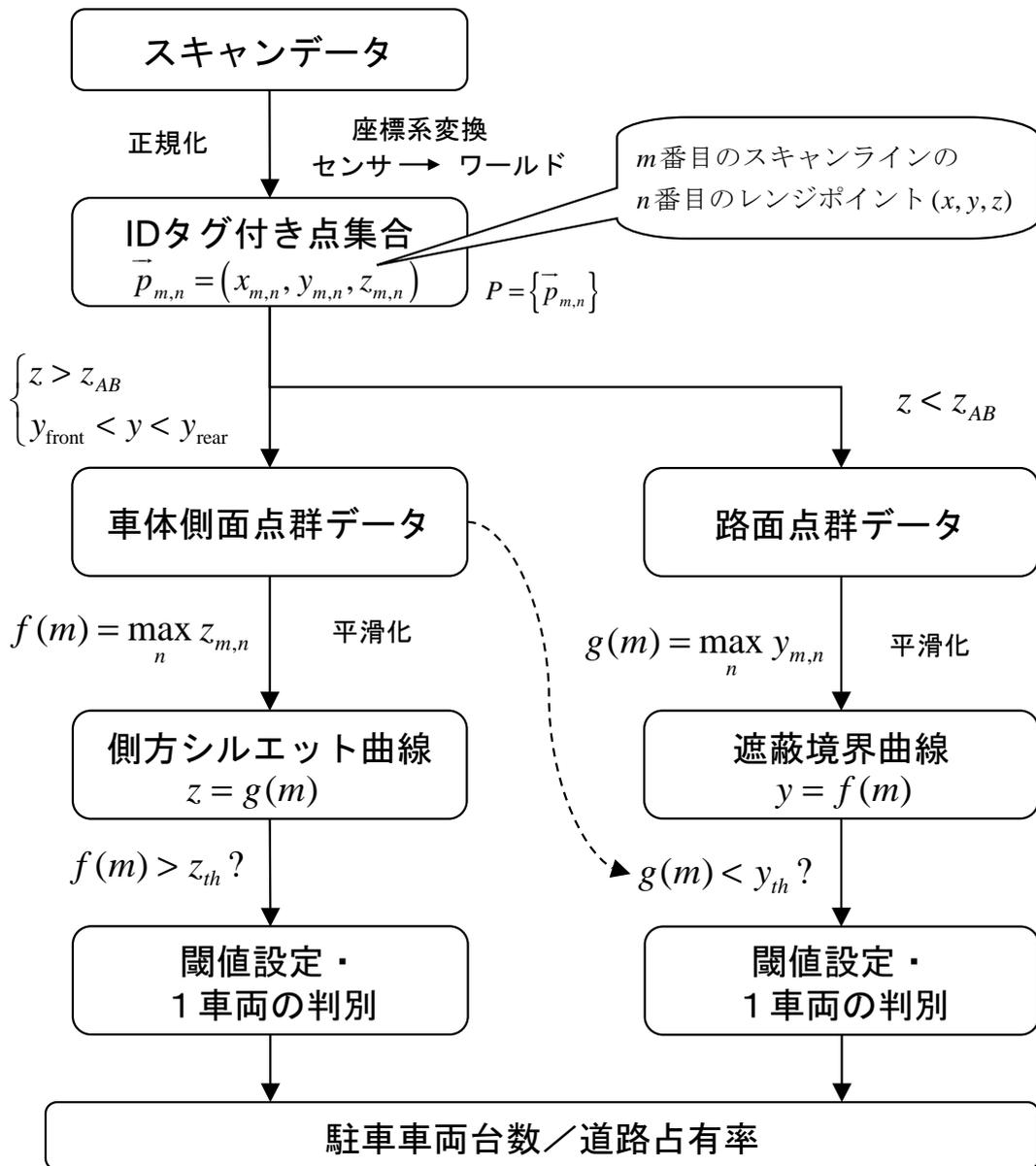


図 5.3: 解析の手順

2. 車両の側面はレーザ光を受け、垂直に切り立っている。

図 5.5 は、復元した街路形状の点群を  $yz$  平面に射影し、 $y$  方向に点の個数に関するヒストグラムをとったものである。この図では 1, 2 の両特徴が明示的に表わされており、車両が存在する付近にヒストグラムのピークが現れる。本手法では、この特徴を利用して車体側面点群を抽出し、台数を計数する。

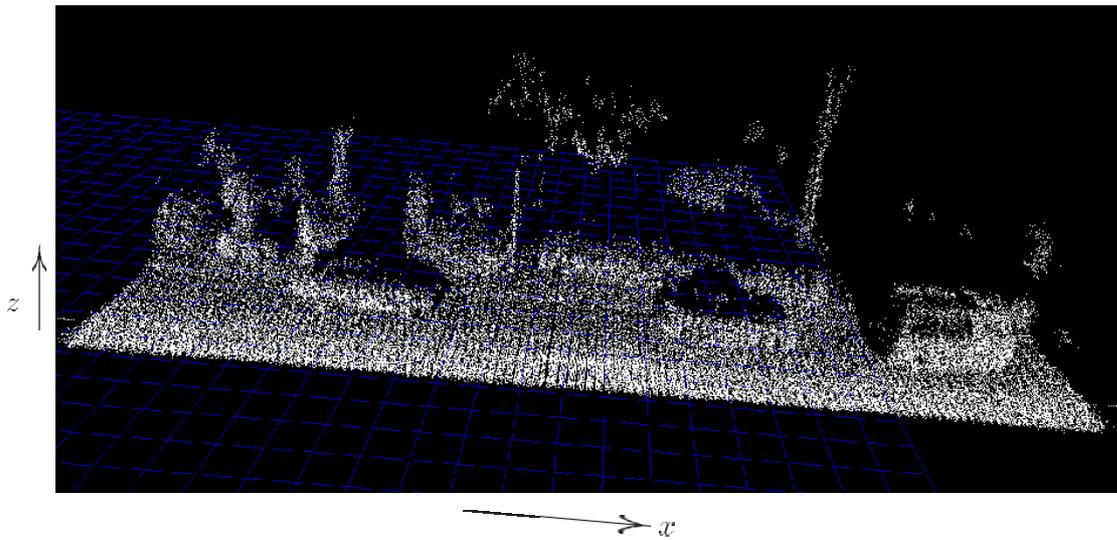


図 5.4: 形状復元した街路

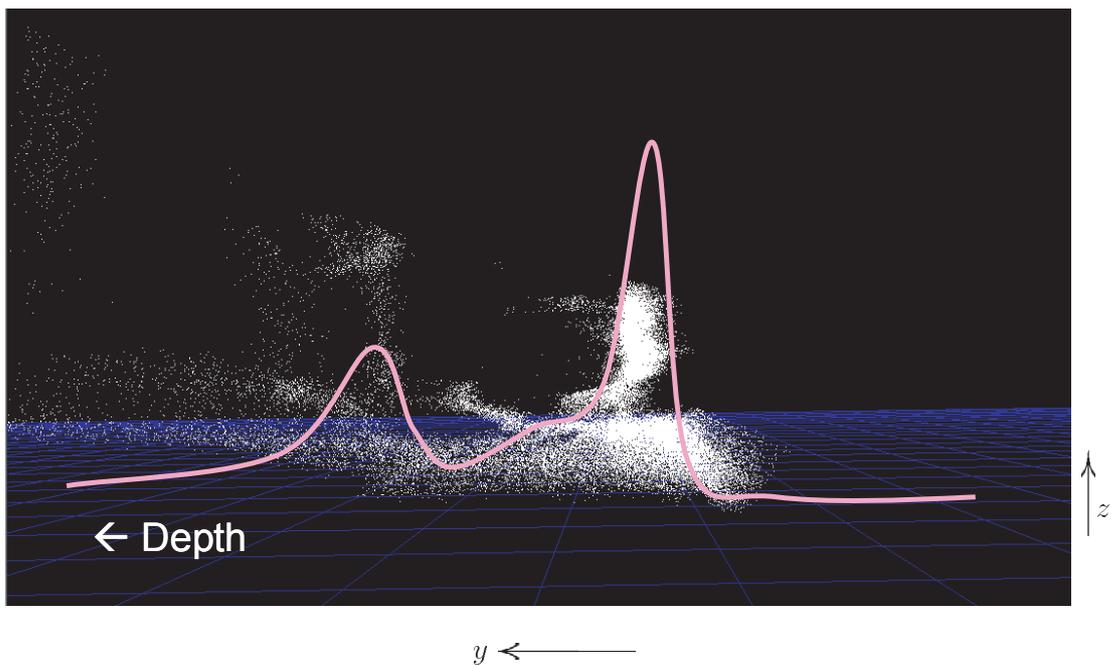


図 5.5: 点の個数のヒストグラム

#### 車体側面点群の抽出

車体側面点群  $A$  は以下のように抽出した。

$$A = \{(x, y, z) \mid z > z_{AB}, y_{front} < y < y_{rear}\}$$

$$z_{AB} = 0.5 \text{ (m)}$$

$$y_{front} = 1.0 \text{ (m)}$$

$$y_{rear} = y_{peak} + 1.0 \text{ (m)}$$

ここで  $y_{peak}$  は、図 5.5 のようなヒストグラムにおいて、極大点を与える最小の  $y$  である。このようにして抽出した車体側面点群の例を図 5.6 に示す。

### 側方シルエット曲線の作成

次に、車体側面点群から側方シルエット曲線を作成する。この曲線は、点群内の各スキャンラインについて、 $z$  座標が最大となる点を結ぶことによって得られる。

$$z = f(m) = \max_n z_{m,n}$$

ここで  $m$  はその点の所属するスキャンライン (フレーム) の番号、 $n$  はフレーム内での点番号である。曲線には平均フィルタをかけて平滑化する。図 5.7 に側方シルエット曲線を示す。

### 1 車両の判別と計数

次に、得られたシルエット曲線を利用して 1 車両の判別と計数を行う。この曲線は低周波成分が大きく、安定して極大・極小を繰り返すため、適当な「しきい値線」を与えることで容易に 1 車両の存在する部分を検出することができる。具体的には、

$$f(m) > z_{th}$$

をみたく部分をのうち、その長さが 2m 以上あるものを 1 台の駐車車両とみなす。

しきい値は以下のように定数とした。

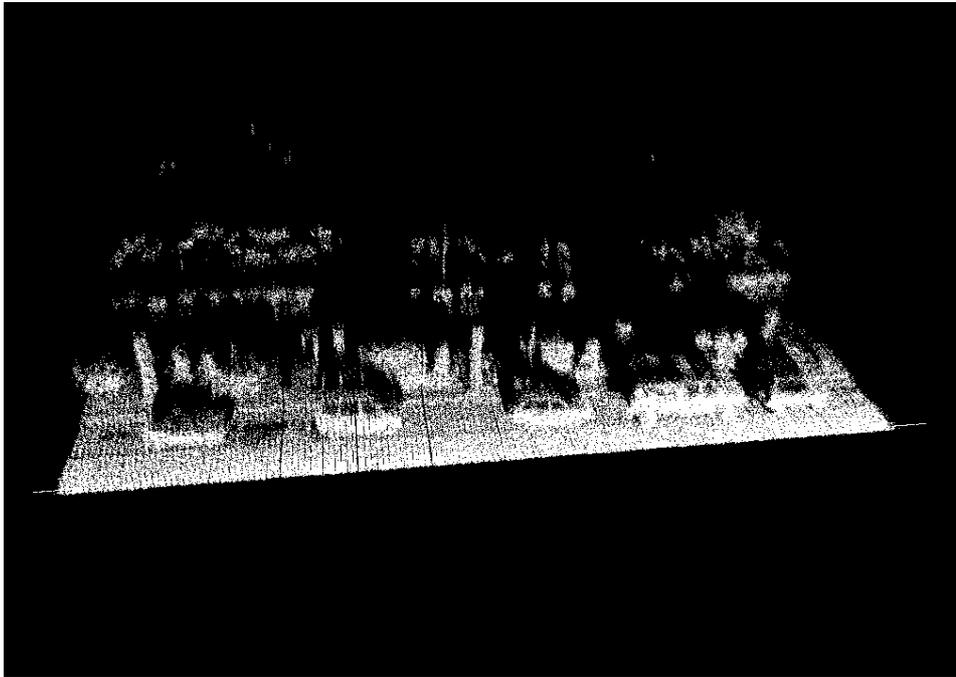
$$z_{th} = z_{AB} = 0.5 \text{ (m)}$$

図 5.8 に 1 車両を検出する様子を示す。

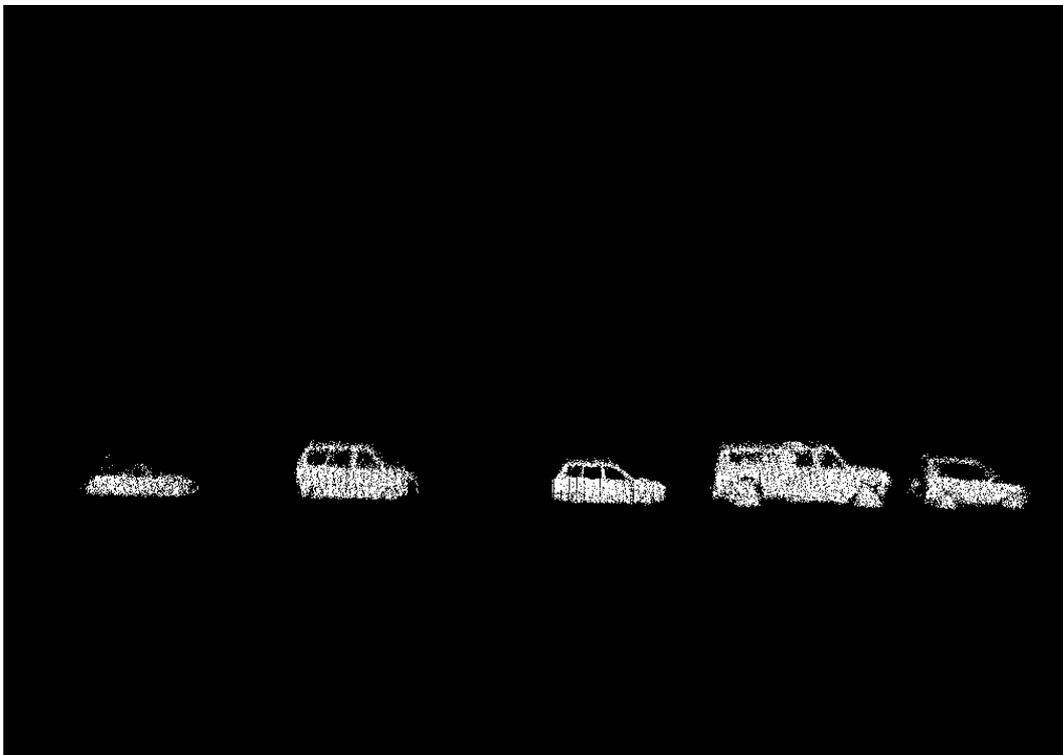
### 5.4.4 手法 II: 路面上の遮蔽に着目した手法

手法 I では、車体の側面をそのまま認識に利用している。この手法は車体のレーザ反射率に依存する手法である。すなわち、車体表面の材質や色の条件によっては反射率が低くなり、計測結果にノイズを与えたり、検出もれをひき起こす可能性がある。

ここでは、車体のレーザ反射率に依存しない別手法として、路面上の遮蔽に着目した手法を導入する。



抽出前



抽出後

図 5.6: 抽出した車体側面点群  $A$

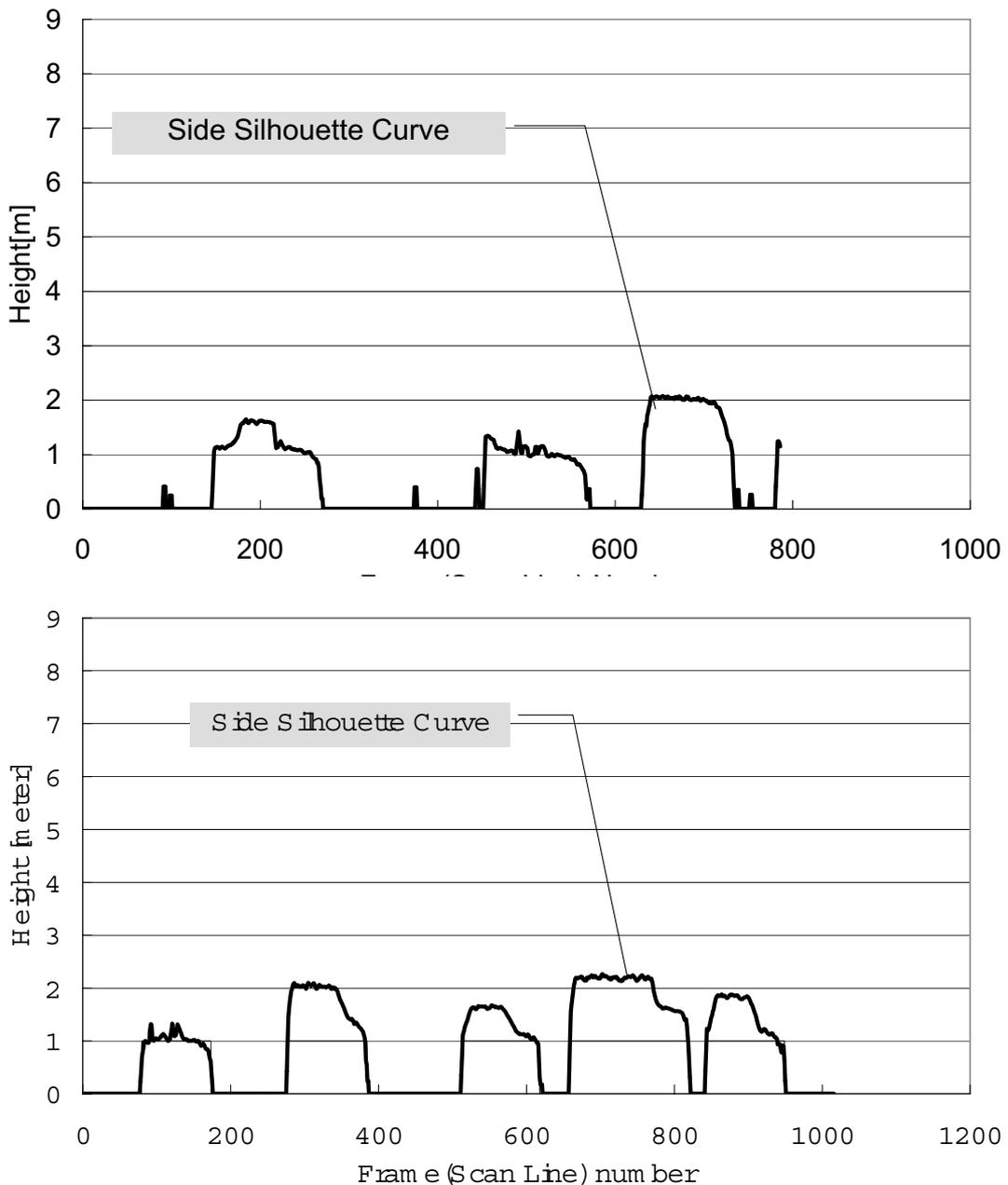


図 5.7: 側方シルエット曲線

図 5.9 は、図 5.4 と同様に形状復元を行った街路の例である。この図から、駐車車両を形成する点群は以下の特徴を持つことがわかる。

1. 車体の背面には、レーザ光の届かない「影」の領域 (レーザ遮蔽領域) が発生し、路面上に穴が空いているかのように見える。
2. 遮蔽領域は、おおよそ一定の奥行き位置に整列している。

本手法では、この特徴に着目し、路面上の遮蔽領域を利用して台数を計数する。この遮蔽

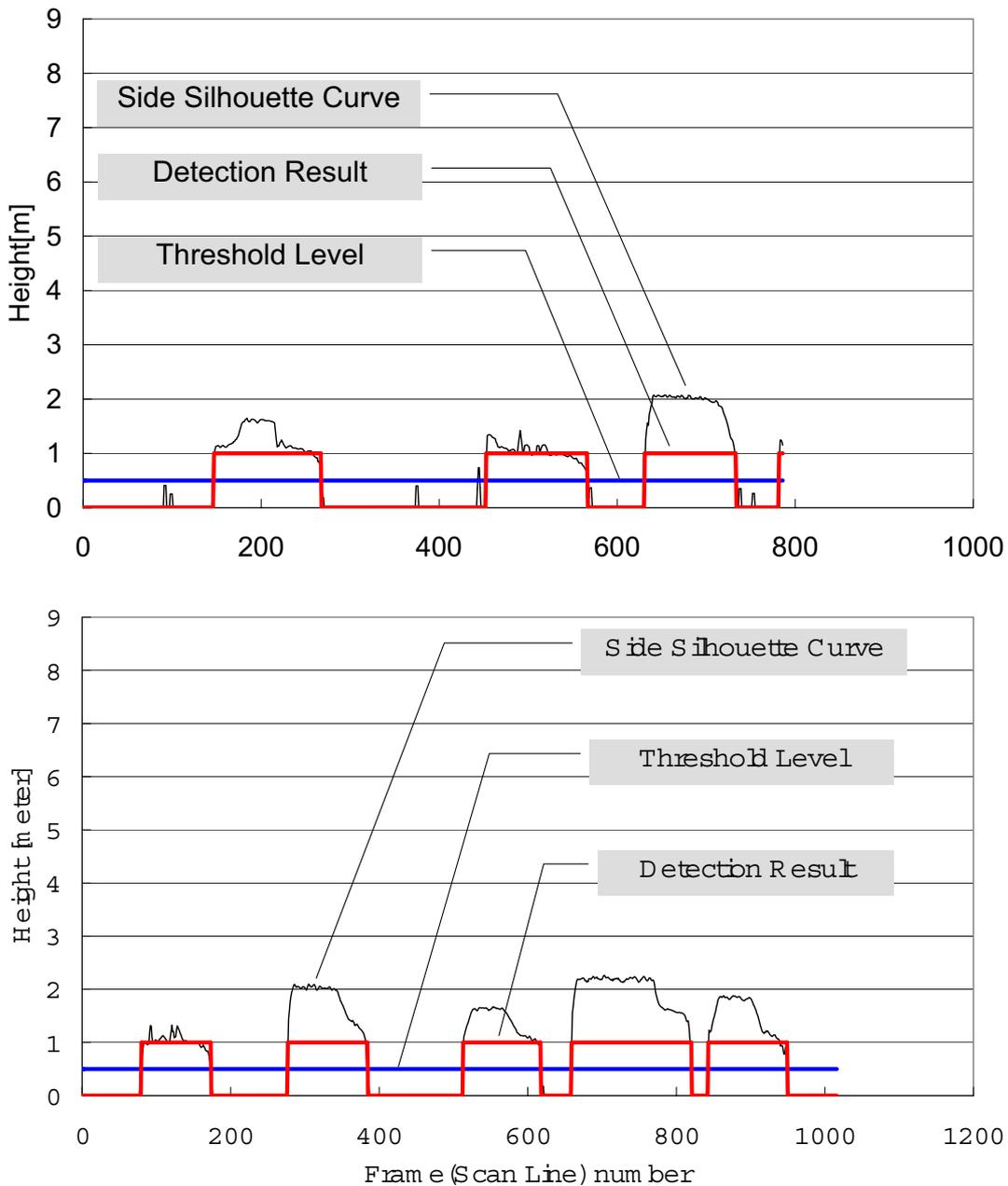


図 5.8: 車両の検出

領域は、車体のレーザ反射率にかかわらず必ず発生する。従って、反射率の低い車両であっても確実に認識することが可能であると考えられる。一方で、この手法は、逆に路面からの反射率が低い場合<sup>\*1</sup>には適用できない可能性がある。

<sup>\*1</sup> 雨天時などは低くなる可能性がある。

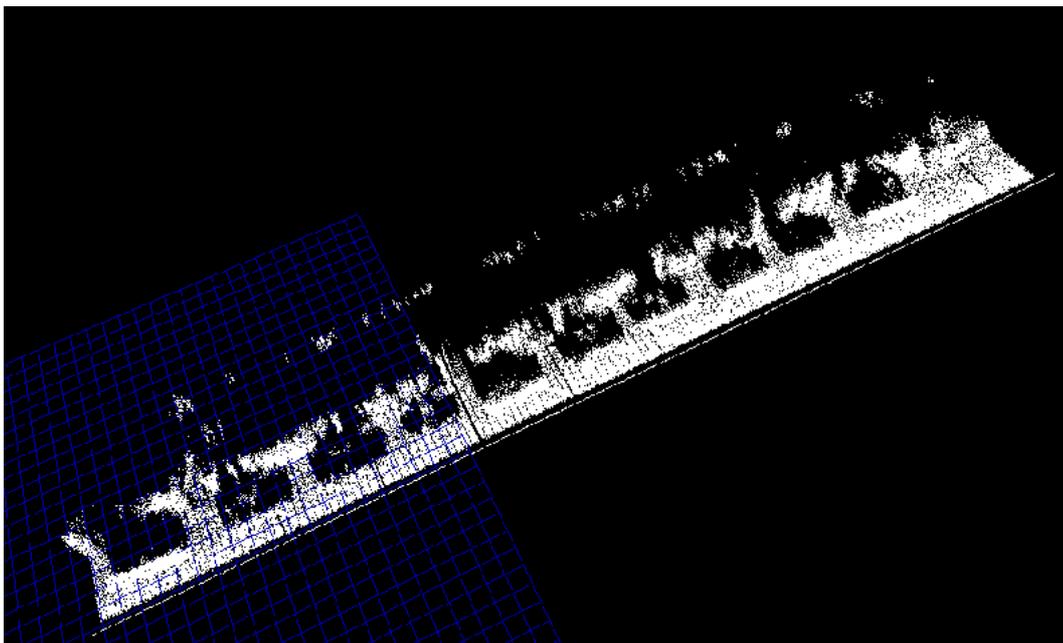


図 5.9: 形状復元した街路 (II)

#### 路面点群の抽出

遮蔽領域を利用するため、路面点群を抽出する。路面点群  $B$  は単に各点の垂直位置のみを考え、以下のように抽出した。

$$B = \{(x, y, z) \mid z \leq z_{AB}\}$$

$$z_{AB} = 0.5 \text{ (m)}$$

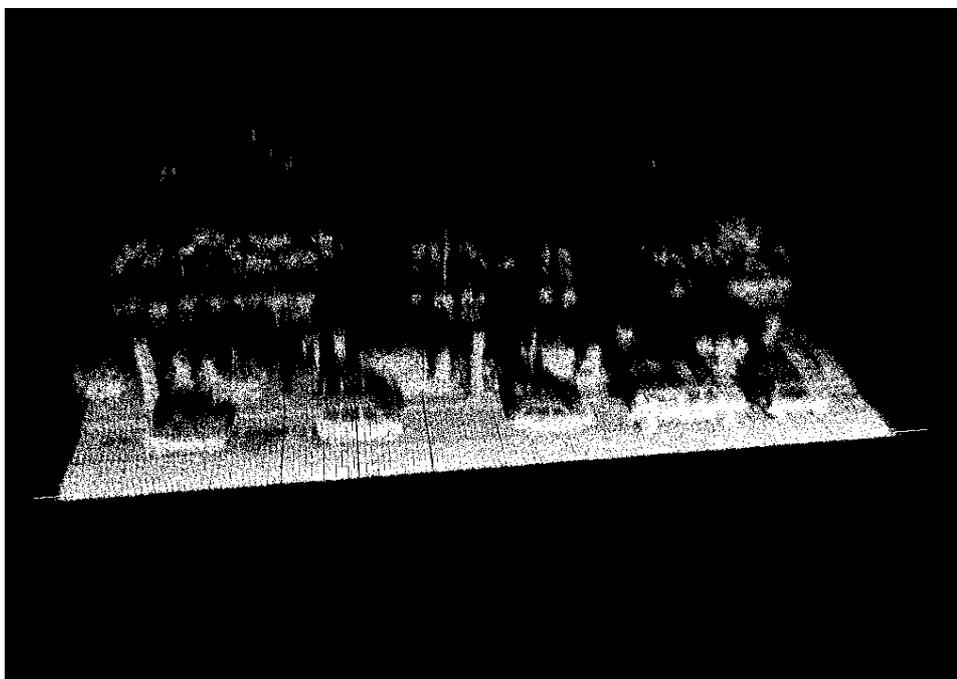
このようにして抽出した路面点群の例を図 5.10 に示す。図の上方 (= 実空間では奥方)、点群の存在しない部分が遮蔽領域である。

#### 遮蔽境界曲線の作成

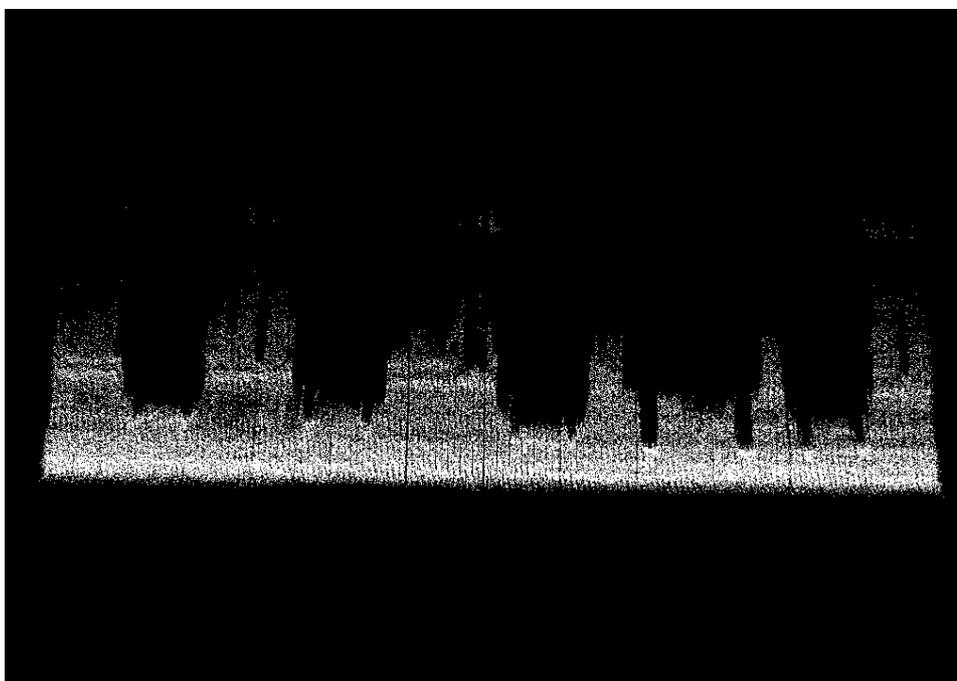
次に、路面点群から遮蔽境界曲線を作成する。この曲線は、点群内の各スキャンラインについて、 $y$  座標が最大となる点を結ぶことによって得られる。

$$y = f(m) = \max_n y_{m,n}$$

曲線には平均フィルタをかけて平滑化する。図 5.11 に遮蔽境界曲線を示す。



抽出前



抽出後

図 5.10: 抽出した路面点群  $B$

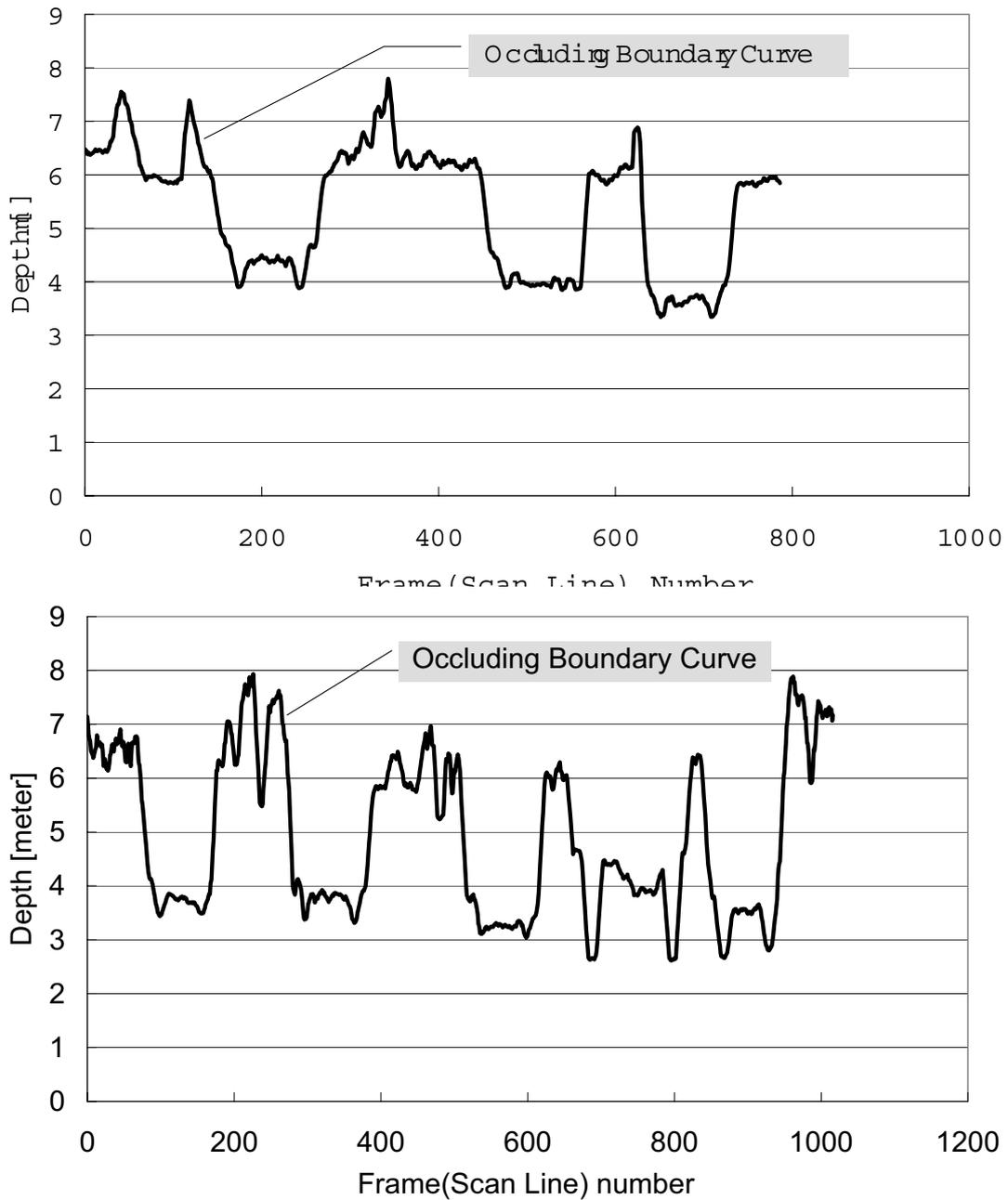


図 5.11: 遮蔽境界曲線

### 1 車両の判別と計数

次に、得られた遮蔽境界曲線を利用して 1 車両の判別と計数を行う。

先の手法 I では、シルエット曲線に対し適当なしきい値線を与えて 1 車両の判別を行った。一方、本手法における遮蔽境界曲線はシルエット曲線と比較して極大・極小の変動に

ばらつきが大きく、高周波成分も大きくなっている。前者の原因は、遮蔽領域の生じる位置が車両の種別に左右されやすい\*<sup>2</sup>ことによるものであり、後者の原因はレーザの照射角度に対する反射点の位置変化が大きいことによるものであると考えられる。

しかしながら、この曲線はシルエット曲線よりも極大と極小の差が大きいため、「しきい値線」を適切に設定すれば、同様の手法によって1車両の存在する部分を検出することができる。具体的には、

$$g(m) < y_{th}$$

をみたく部分をのうち、その長さが2m以上あるものを1台の駐車車両とみなす。

ここで、しきい値は以下のように与える。

$$y_{th} = \overline{y_B} + 1.5(\text{m})$$

$\overline{y_B}$  は車体側面点群 (A 領域) における  $y$  の平均値である。これは、路面上の遮蔽境界が車体側面位置から奥方向に存在していることを利用したものである。車体側面位置の情報は、手法 I において抽出した点群の平均奥行き位置として得ることができる。

図 5.12 に、遮蔽境界曲線から 1 車両を検出する様子を示す。

## 5.5 実験

前述の検出アルゴリズムは、実際に都内の路上を走行して収集したデータに適用し、駐車車両の計数実験を行った。ここではデータ収集実験の概要と、計数実験の結果を述べる。

### 5.5.1 データ収集実験の概要

計測日時、場所などは以下のとおりである。本実験では計測車は等速直線運動をするものとした。

日時 2001 年 9 月 5 日 11 ~ 16 時ごろ

場所 国道 246 号線 神泉 ~ 上馬 間 3.5km、および代々木公園内の横断道路 1.0km 内のうち、数 10m 程度の直線小区間 15 箇所 (代々木公園内の 1 箇所については 300m 程度)

走行速度 10km/h, 20km/h

図 5.13 に走行経路図を、図 5.14 に計測地の道路に関するおおよその諸元を、図 5.15 に実験風景を示す。

\*<sup>2</sup> 大型車では車体と地面の間の空間が大きく、遮蔽領域は奥へずれ込む。

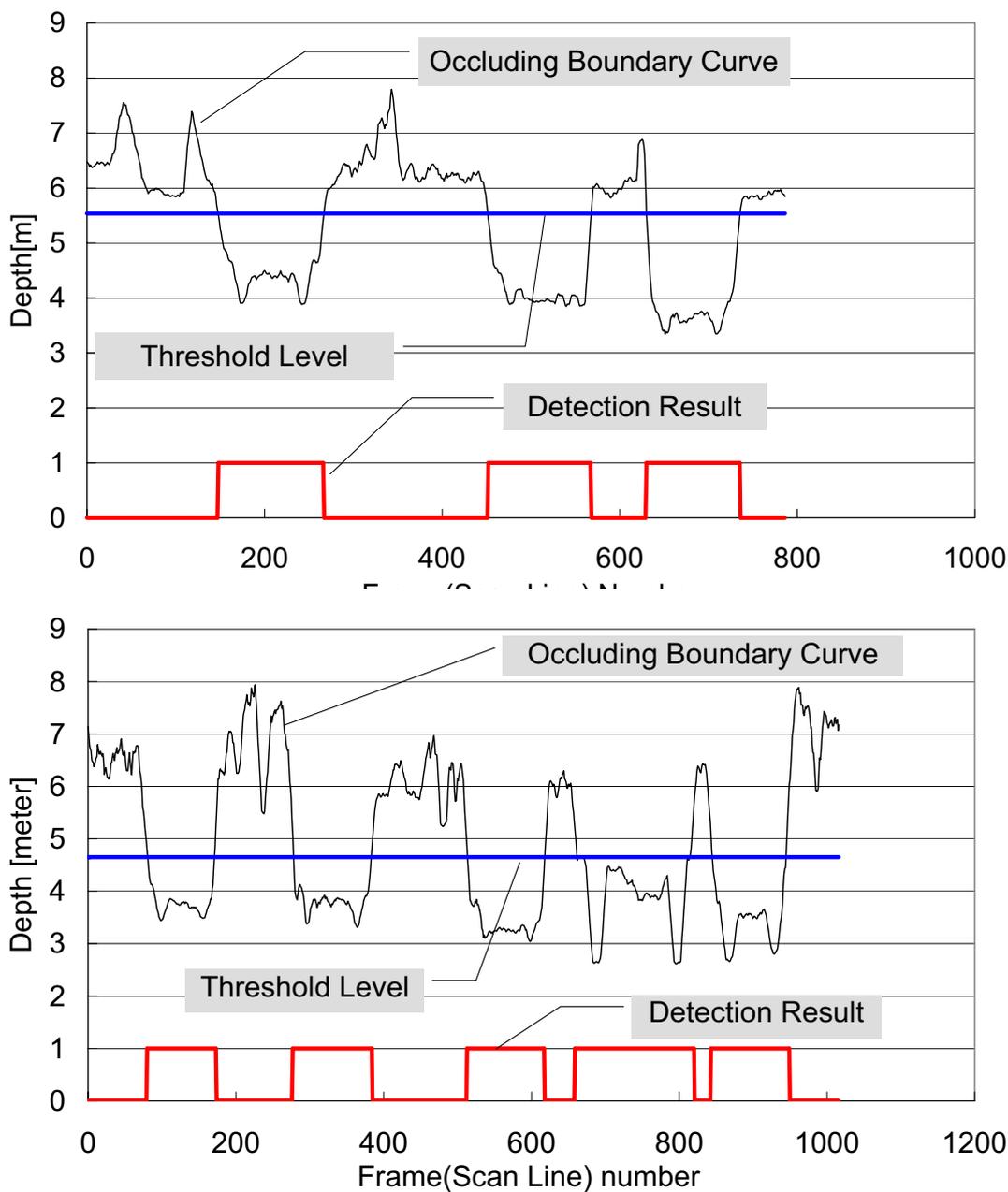


図 5.12: 車両の検出

### 5.5.2 計数結果

表 5.2 に路上駐車車両の計数結果を示す。本手法により、対象としたすべての計測データに対し正しく駐車車両の台数を数えることができた。



代々木公園内の横断道路



国道 246 号線 神泉 ~ 上馬 間

図 5.13: 走行経路図

### 5.5.3 考察

本実験では等速度走行によるデータ取得を行ったが、より実用的な認識システムのためには非等速度で走行した場合でも正しく駐車車両を認識できることが望まれる。このためには、GPS など何らかの手段によって計測車両の自己位置を取得する必要がある。これにより正しく位置合わせの行われた幾何情報が得られれば、同様の解析手法によって車両計数が可能になると考えられる。

また本手法では、車体の形状など車両そのものの特徴量を用いた解析は行っておらず、類似したオブジェクトが他の駐車車両などと近い位置に存在すれば誤って認識する可能性が高い。このような問題を解決する手がかりとしては、オブジェクトと地面の接続点の数<sup>\*3</sup>などが考えられる。これを行うためにはより高精度なセンサが不可欠となる。

## 5.6 おわりに

本稿では、街路における駐車車両の自動認識手法を提案した。センシングデバイスにレーザレンジセンサを用い、これを計測車両に積載して移動と計測を同時に行うことによって効率的にデータを取得することが可能である。また、これらのデータに対する二種類の認識アルゴリズムを開発し、実際の路上から得られたデータに対して双方のアルゴリズムが有効であることを確認した。また本手法によれば、従来は得られなかった道路の占有率も自動的に算出することが可能である。

今後は、レーザレンジセンサと測位システムを結合することにより、等速走行など、実験上の制限条件を取り除く。また、都市空間など屋外広域環境のモデリングに応用することを目指す。

---

<sup>\*3</sup> 車両であればタイヤ部分の4箇所(センサから見える範囲では2箇所)

表 5.2: 計数結果

場所	走行速度	駐車車両数	手法Ⅰの結果(台)	手法Ⅱの結果(台)	システム全体の結果(台)	検出率
国道 246号	20km/h	5	5	5	5	100%
		5	5	5	5	
		4	4	4	4	
		2	2	2	2	
		7	7	7	7	
		2	2	2	2	
		10	10	10	10	
代々木公園	20km/h	3	3	3	3	100%
		3	3	3	3	
		53	53	53	53	
		2	2	2	2	
		3	3	3	3	
		5	5	5	5	
		1	1	1	1	
代々木公園	10km/h	2	2	2	2	100%
		3	3	3	3	
		5	5	5	5	
		1	1	1	1	
		2	2	2	2	
		5	5	5	5	
		1	1	1	1	

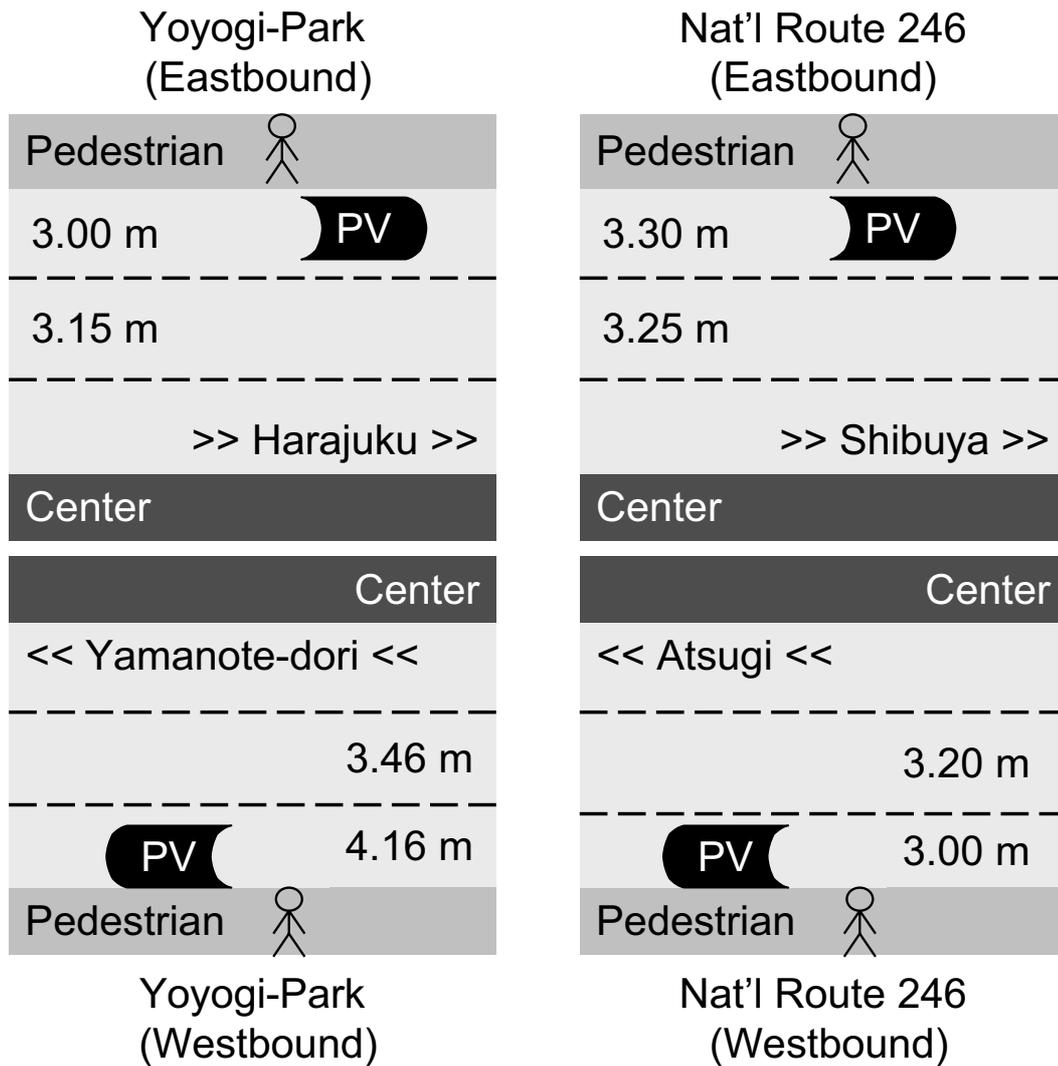


図 5.14: 道路のおおよその諸元 (平均的な 1 地点の値)



図 5.15: 実験風景



## 第 IV 部

### 結論



## 第 6 章

## 結論

この章では、これまで述べてきた本研究の手法や実験結果などを踏まえて結論を述べる。また合わせて、応用例や今後の課題について述べる。

## 6.1 結論

本研究において筆者らは、計測用車両に積載したレンジセンサを用いて自車速度推定および路上駐車車両認識を行う新たな手法を提案し、その手法の実験や考察を行った。

ここで、本研究の特徴をまとめておく。具体的には次のような事柄である。

1. (全般) 移動体による効率的な計測
2. (全般) レンジセンサを用いたジオメトリベースの空間復元
3. (A) エピポーラ平面距離画像の概念を導入
4. (A) 外部デバイスに頼らない速度・自己位置推定手法の提案
5. (B) 社会的要請に応えた実用可能なシステムの提案
6. (B) 二つの相補的な手法の提案

(A: エピポーラ平面距離画像による自車速度推定に関する研究; B: 路上駐車車両認識に関する研究)

これらの特徴をもつ本手法について実験と考察を行った結果、以下のような結論が得られた。

- 移動体として乗用車を使用することにより、広域にわたる空間を効率よく計測することができた。
- エピポーラ平面距離画像を解析することにより、都市部での電波状況や精度に問題のあるGPSなどの外部デバイスに頼らずに車両の速度・自己位置を推定することができた。また、その結果を利用して実空間幾何形状を復元することができた。
- ジオメトリベースの空間復元を行うことにより非常に簡便に異なる視点からの見えを得たり、特定のオブジェクトを抽出することができた。
- 公道上での実験により、実用可能なレベルで駐車車両を計数可能であることを確認した。

## 6.2 応用と今後の課題

ここでは本研究の応用および今後の課題について述べる。

### 6.2.1 エピポーラ平面距離画像

**自由走行経路の場合の実験** 本実験では走行経路は直線を仮定したが、これを自由走行経路に対応させる。この場合はエピポーラ平面距離画像内の各点群が形成する面は平面から曲面となるが、これを解析することで自由な自転車走行経路を推定する。

**様々な対象空間における実験** 本実験では対象空間は建物の柱であり、エピポーラ平面距離画像は明らかなセグメントに分かれていた。今後はさらに樹木などの多い一般的な対象空間において実験を行い、本手法のロバスト性を評価する。

**テクスチャマッピング** レンジセンサのほか、イメージセンサも計測車両に搭載して同時に映像を取得し、幾何モデルとテクスチャを統合する。

**オクルージョンの考慮** 本実験ではオクルージョンについては考慮しなかったが、実際にはオクルージョンが生じた場合、エピポーラ平面距離画像内のエッジに変化が現れると考えられる。

**スキャン時間の考慮** 本実験では一度のラインスキャンは瞬間的に行われるものと仮定したが、実際には有限の所要時間をもって行われる。今後、計測車両の走行速度が速くなった場合にどの程度まで仮定が成立するか評価する必要がある。

**動物体と静物体、速度の異なる物体の自動分離への応用** 本実験では、レーザの照射される実空間に存在するオブジェクトはすべて静止していた。この場合エピポーラ平面距離画像内では、局所区間内においてすべてのエッジが同じ傾きを持つ。ここで、レーザの照射される空間内に速度をもったオブジェクト（動物体）が存在している場合、そのオブジェクトはエピポーラ平面距離画像内で異なる傾きを描くと考えられる。このことから、動物体と静物体、速度の異なる物体の自動分離が可能であると考えられる。

### 6.2.2 路上駐車車両認識

**エピポーラ平面距離画像解析との融合** 本実験では計測車両は等速直線運動を行うものと仮定したが、これを自由走行経路に対応させる。これを実現するためにはエピポーラ平面距離画像解析による速度推定手法を応用することができる。

**さまざまな計測条件下での実験** 本実験はすべて晴天時に行っていた。雨天で路面や車体が濡れている条件下で、どこまで安定して注射車両を認識できるかを検討する。また、走行位置と路上駐車車両の間隔が広く、脇をすり抜ける二輪車などが存在する場合の影響についても検討する必要がある。

### 6.2.3 その他

活用性の高い三次元モデルの作成 空間モデル内のオブジェクトに対してさらに汎用的なクラス認識を行い、各オブジェクトをレイヤー分類する。これにより各レイヤーを必要に応じて出現・消去させるといった処理が可能な活用性の高い三次元モデルの作成を目指す。

現実感の高い三次元モデルの作成 ジオメトリベースである本研究の空間モデルをイメージセンサによって得られたデータとテクスチャマッピングにより統合する。また幾何情報を利用したテクスチャからの影除去など、光学的な処理を行って現実感の高い三次元モデルを得る。

歴史的・文化的価値の高い空間のデジタル保存 京都の街並みや白川郷をはじめとした歴史的・文化的価値の高い空間を仮想三次元空間モデルとして計算機内部にデジタル保存する。

# 謝辞

本研究を進めるにあたって、毎週打ち合せをして頂き、素晴らしい研究環境と適切な助言・指導をいただいた池内克史教授に心から感謝いたします。多くの会議や学会活動に積極的に携わられる過密なスケジュールの中、特に最後の半年間は週末に、打ち合わせのためにご自身の時間を割いて頂きました。研究だけでなく、生活、人生に関しても心づかいをいただき、研究生活の支えになりました。

また研究に関して適時に適切な助言・指導をいただいた影澤政隆助手に心から感謝いたします。研究の内容だけでなく、研究の進め方や方向性について、大変勉強になりました。また、研究で使用する計算機の管理や研究室の環境整備などにも尽力して頂きました。

共同研究者として研究に関する様々なアドバイスをして頂き、大変お世話になった博士課程3年の川崎洋さんに、深く感謝します。もとより筆者が空間情報解析の分野に携わる初めのきっかけを与えて頂いたのは川崎さんのおかげによるものでした。

研究を遂行する上で多くの協力や助言をして頂いた博士課程2年の平原清隆さんに、深く感謝します。不慣れな野外実験や物づくりの作業が多くなりがちな本研究分野において、平原さんには積極的に先導して頂き、また実用性の高い数多くの知識を与えて頂きました。

また、同じ研究分野に携わる同士として様々な協力を頂いた、吉田達也さん、Mohottala Yasanthi Shirmila Wickramachchi さん、朱成華さんに感謝いたします。毎週の打ち合わせでは様々な有益な議論を交わすことができました。

増田智仁さん、中岡慎一郎さん、大久保了さん、森田拓磨さん、小川希さん、吉藤伸幸さん、園田展人さんには、研究上の助言や議論のほか、同じ学年の仲間として公私にわたり有益な時間を提供して頂きました。ありがとうございました。

この他にも当研究室では技官の長谷川仁則さん、博士研究員の倉爪亮さん、中澤篤志さん、西野恒さん、小河原光一さん、Supatana Authavekiat さんをはじめ様々な方にたいへんお世話になりました。深く感謝いたします。

松浦芳子さん、元木恵子さん、斉木優子さん、平山幸恵さん、松田真里さんには池内研究室秘書として50余名の大所帯を学会出席やその他の事務面から力強く支えて頂きまし

た。ありがとうございました。

また当研究室以外にも、坂内正夫教授、佐藤洋一助教授、上條俊介助教授をはじめとする坂内・上條研究室、佐藤研究室の皆様にもお世話になりました。深く感謝致します。

最後に、長い間学生生活を支えてくれた家族に感謝します。

2003年 1月 31日

## 発表文献

- Shintaro Ono, Kiyotaka Hirahara, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi,  
“Parking-Vehicle Detection System by using Laser Range Sensor Mounted on a Probe Car”,  
9th World Congress on Intelligent Transport Systems (*ITSWC 2002*), CD-ROM  
(Oct. 2002, Chicago, U.S.)
- Shintaro Ono, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi,  
“A Probe Car for Parking-Vehicle Detection by Using Laser Range Sensor”,  
IEEE Intelligent Vehicle Symposium (*IV 2002*), CD-ROM  
(Jun. 2002, Versailles, France)
- Shintaro Ono, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi,  
“Recognizing Vehicles in a Panoramic Range Image”,  
画像の認識と理解シンポジウム (*MIRU 2002*), Vol.I, pp.183-188  
(Jul. 2002, 名古屋)
- 小野晋太郎, 影沢政隆, 池内克史  
「車載レンジセンサによる距離画像からの駐車車両認識システム」  
第 8 回 画像センシングシンポジウム (*SSII 2002*), pp.89-94  
(Jul. 2002, 横浜)
- 小野晋太郎, 影沢政隆, 池内克史  
「車載レンジセンサによる路上駐車車両計数システム」  
第 1 回 ITS シンポジウム 2002, pp.551-560  
(Dec. 2002, 東京)
- Katsushi IKEUCHI, Masao SAKAUCHI, Masataka KAGESAWA, Hiroshi KAWASAKI,  
Takuji TAKAHASHI, Michihiro MURAO, and Shintaro ONO,  
“Constructing Virtual Cities with Real Activities”,  
IEICE Transactions on Information and Systems (Special Issue on Information System  
Technologies for ITS),

Vol.E85-D, No.11, pp.1734-1744, Nov. 2002

- 小野晋太郎、川崎洋、池内克史、坂内正夫  
「複数ビデオカメラの歪みのない画像統合による広域仮想空間構築」  
コンピュータビジョンとイメージメディア研究会 (CVIM)  
(Mar. 2002 発表予定, 東京)
- 川崎洋、小野晋太郎、池内克史、坂内正夫  
「EPI 解析による複数ビデオカメラのキャリブレーション」  
(電子情報通信学会論文誌; 投稿準備中)

## 参考文献

- [1] H.Zhao and R.Shibasaki, “High Accurate Positioning and Mapping in Urban Area Using Laser Range Scanner,” Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2001 (IV2001) pp.125–132, 2001.
- [2] K.Kato, H.Ishiguro and M.Barth, “Town Digitizing — Recording of Street Views by using ODVS & GPS,” Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2001 (IV2001), pp.183–188, 2001.
- [3] MIT City Scanning Project <http://city.lcs.mit.edu>
- [4] C.Fruh, and Avideh Zakhor, “3D Model Generation for cities Using Aerial Photographs and Ground Level LaserScans”, CVPR, 2000.
- [5] 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 (ITSWC2001), ITS00509, Sydney, 2001.
- [6] Y.Matsushita, M.Murao, S.Kamijo, K.Ikeuchi and M.Sakauchi, “Visualizatin of Traffic Activities at Intersection,” 8th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITSWC2001), ITS00376, Sydney, 2001.
- [7] R.C.Bolles, H.H. Baker, D.H.Marimont, “Epipolar-plane image analysis: an approach to determining structure from motion”, International Journal on Computer Vision, 1, 7-55, 1987
- [8] H.Baker, et.al, “Generalizing epipolar plane image analysis on the spatio-temporal surface”, International Journal on Computer Vision, 3, 33-49, 1989
- [9] 山本 他 “連続ステレオ画像からの三次元情報の抽出”, 電信情報通信学会論文誌 Vol. J69-D, No.11, 1986
- [10] T.Gotoh, M.Kudo, J.Toyama, M.Shimbo, “Geometry Reconstruction of Urban Scenes by Tracking Vertical Edges”, Proc. of 3rd International Conference on Conventional and Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems(KES-99), pp.455-458, 1999
- [11] H.Kawasaki, et.al, “Spatio-Temporal Analysis of Omni Image”, Proc. Computer Vision

- and Pattern Recognition(CVPR), Vol.2, pp.577-584, 2000
- [12] 川崎 洋 他 “時空間画像解析を用いた全方位カメラ映像の超解像度化”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J-84-D-II, No.8, pp.1891-1902, 2001
- [13] P.Wang, et.al., “3D line’s extraction from 2D spatio-temporal image created by sine slit”, Proc. of ACCV, vol.II, pp.405-415, 1998
- [14] H. Zhao, R. Shibasaki, “Reconstructing Textured CAD Model of Urban Environment using Vehicle-borne Laser Range Scanners and Line Cameras”, Proc. of International Workshop on Computer Vision Systems, Jul 2001
- [15] I.Stamos, P.K.Allen, “3-D Model Construcruction Using Range and Image Data”, Proc. of Computer Vision and Pattern Recogniton (CVPR), 2000
- [16] 佐久間 聡, 高橋 裕子, 塩 昭夫, 大塚 作一, “パノラマ画像を用いた路肩駐車車両計数システム”, 電子情報通信学会論文誌 Vol.J85, pp.1361-1364, 2002.
- [17] K.Hirahara, M.Matsuda, S.Kamijo, and K.Ikeuchi, “Detection of Street-Parking Vehicles Using Line Scan Camera”, The 9th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITSWC2002), Chicago, 2002.
- [18] JIS 規格番号 C6802, 日本工業標準化調査会 (Japanise Industrial Standard Comitee; JISC), <http://www.jisc.go.jp>
- [19] ジック株式会社 <http://www.sick.co.jp>
- [20] 石川島播磨重工業株式会社 <http://www.ihl.co.jp>