

博士論文

移動体センサから得られる幾何・
画像データの時空間解析とその応用

指導教官 池内 克史 教授

東京大学大学院 情報理工学系研究科 電子情報学専攻

No. 37407 小野 晋太郎

目次

第1章	序論	1
1.1	本論文の背景	1
1.2	問題設定と本論文の目的	3
1.3	本論文の構成	5
第2章	距離画像の時空間解析によるレンジセンサの自己位置推定	7
2.1	はじめに	7
2.2	関連研究	7
2.3	輝度値データに関する時空間画像	8
2.4	時空間距離画像	10
2.5	速度推定アルゴリズム	12
2.6	三次元空間の復元	15
2.7	実験	15
2.8	評価と考察	26
2.9	まとめ	27
第3章	梯子式レーザ計測システムの開発と大規模文化遺産デジタル保存への 応用	31
3.1	はじめに	31
3.2	梯子式レーザレンジ計測システム	32
3.3	センサユニットの位置推定	36
3.4	実験	38
3.5	まとめ	42
第4章	濃淡画像の時空間解析による複数カメラ画像の統合	47
4.1	はじめに	47
4.2	関連研究	47

4.3	動画像における時空間の表現形	49
4.4	複数時空間ボリュームの同時解析による画像統合	58
4.5	実験	66
4.6	歪み誤差の評価と自由運動への展開	76
4.7	まとめ	81
第 5 章	実写画像と幾何モデルの合成による都市道路交通シーンのモデル化と ITS への応用	83
5.1	はじめに	83
5.2	システムの概要	84
5.3	関連研究	87
5.4	周辺環境画像データの取得	88
5.5	ユーザ視点からの見えの構築	88
5.6	結果	93
5.7	まとめ	94
第 6 章	結論	97
6.1	本論文の主たる成果	97
6.2	今後の課題と展望	99
付録 A	予備的な事項の解説	101
A.1	消失点を利用したカメラパラメータ (回転行列) の算出	101
付録 B	使用した機器などの解説	103
B.1	SICK LMS200	103
B.2	ノビテックリフト NPL-4200	105
謝辞		107
発表文献		111
参考文献		117

目次

2.1	エピポーラ平面画像 (Epipoar Plane Image, EPI)	8
2.2	奥行きと視差の関係	9
2.3	ハフ変換による直線検出	10
2.4	時空間距離画像	11
2.5	時空間距離画像内に形成されるクラスタ面 (模式図)	11
2.6	走行実験により得られた時空間距離画像の例	13
2.7	速度推定処理の流れ	16
2.8	データ収集用レンジセンサおよび車両	17
2.9	時空間距離画像に表れるクラスタ面 (セグメント)	18
2.10	セグメンテーション後の時空間距離画像	19
2.11	セグメントへの回帰曲線の当てはめ	19
2.12	各セグメントから得られた速度曲線	20
2.13	全区間に渡る速度曲線	20
2.14	走行経路	21
2.15	実験から得られた速度推定曲線	22
2.16	推定速度にもとづいて三次元形状を復元した例 (全体図)	23
2.17	推定速度にもとづいて三次元形状を復元した例 (部分図)	24
2.18	実際の画像 (参考)	25
2.19	柱側面に対するスキャンラインのずれ	27
2.20	評価用データの計測	28
2.21	実験結果と評価用結果	29
3.1	狭隘部における計測点密度の不均一性	32
3.2	梯子式レーザ計測システムの外観	33
3.3	梯子式レーザ計測システムにおけるセンサ位置推定への時空間距離画像 の適用	35

3.4	自己位置推定処理の概略図	36
3.5	梯子式レーザ計測システムの副センサから得られる時空間距離画像の例	37
3.6	バイヨン寺院における狭隘部の典型例	39
3.7	梯子式レーザ計測システムによる計測箇所	40
3.8	梯子式レーザ計測システムによる計測の様子	41
3.9	バイヨン寺院・テラスと内回廊間のモデリング結果	43
3.10	梯子式レーザ計測システムによる内回廊間の全計測結果	43
3.11	バイヨン寺院・北経蔵の北東部分のモデリング結果	44
3.12	梯子式センサから得られたモデルと固定設置型センサから得られたモデルを位置合わせした結果	44
3.13	異なる速度から得られたモデルどうしを位置合わせした結果	45
4.1	動画像における一般的な時空間の表現形とエピポーラ平面画像 (EPI)	50
4.2	平面投影を介した時空間画像の表現形	51
4.3	円筒面投影を介した時空間画像の表現形	52
4.4	時空間円柱の例	53
4.5	球面投影を介した時空間画像の表現形 (球体時空間表現)	55
4.6	時空間球体の例	56
4.7	カメラの光学中心と統合画像における歪み	60
4.8	時空間における光学中心の一致	60
4.9	複数カメラのコンフィギュレーション	62
4.10	基準座標系	62
4.11	マッチングの様子およびマッチング後の断面図 (イメージ図)	65
4.12	カメラのおおよその配置図	66
4.13	円柱時空間表現における時空間ボリューム間のマッチング結果	69
4.14	円柱時空間表現におけるマッチング結果の断面図	70
4.15	球体時空間表現における時空間ボリューム間のマッチング結果 (1)	71
4.16	球体時空間表現におけるマッチング結果の断面図	72
4.17	球体時空間表現における時空間ボリュームのマッチング結果 (2)	73
4.18	9台のカメラから得られた画像の統合結果	74
4.19	球体時空間表現での時空間ボリュームのマッチングにおける相関係数	75
4.20	歪み量の解析	76
4.21	歪み量の評価結果 (1)	78
4.22	歪み量の評価結果 (2)	79
4.23	直線でない運動による水平方向のずれ	80

5.1	幾何ベースによるドライブシミュレータのドライバ周辺環境画像	84
5.2	複合現実交通実験空間	85
5.3	本研究で提案するシステムの全体像	86
5.4	全方位画像（前方半方位画像）	89
5.5	新しい視点からの見え生成	90
5.6	正面方向の描画	90
5.7	仮想的な板	91
5.8	テクスチャの更新	92
5.9	幾何モデルと全方位画像撮影点の位置合わせ	92
5.10	IMG 表示系のハードウェア構成	93
5.11	画像ベース部分の表示（走行経路上の視点，正面）	94
5.12	視点変更の例	95
5.13	画像ベース（遠景）と幾何ベース（近景）の合成結果．空，建物，建物に 付随する看板などは画像ベース，防音壁，道路，他車両，道路標識などは 幾何ベースによって描かれている	96
B.1	ノビテックリフト NPL-4200	106

表目次

2.1	エピソード平面画像 (EPI) と 時空間距離画像 (STRI)	11
4.1	各時空間表現形における自由パラメータの個数	57
4.2	カメラの配置条件	67
4.3	実験の内容	67
B.1	LMS200 の仕様	103
B.2	ノビテックリフト NPL-4200 の仕様	105

第 1 章

序論

1.1 本論文の背景

コンピュータグラフィクス (CG) やバーチャルリアリティ (VR) の発展に伴い、実世界の空間を現実感の高い仮想空間としてコンピュータ内に電子的に表現することが可能になってきている。またこれらの表現技術に加え、コンピュータビジョン (CV) やセンシングなど、実世界の情報を獲得する技術もより高度になってきており、仮想空間の再現において大きな役割を果たしている。

高い現実感をもった実世界の仮想モデルを構築し、あるいはそれを応用することは、非常に多くの分野との関連が考えられ、学術的にも理工学領域では情報分野のみならずほとんどの分野がその構築技術に寄与したり、それを利用して新たな知見を得ることができるであろう。特に、都市空間や大規模な遺跡といった広域空間の仮想モデルを構築し、提示することができれば、景観シミュレーションや仮想旅行など多くの応用が期待できる。また近年では、高度交通システム (Intelligent Transport System, ITS) の分野や文化遺産保護の分野においても、社会性や実用性の面から高い関心を集めている。

実世界空間のモデリングは、大きく以下の 2 つに分けて考えることができる。

1. 仮想モデルの表現 (提示)
2. 実世界データの獲得 (計測)

1. は、対象とする空間に関して、任意の地点から見た任意方向の見えを描画することである。2. は、そのために必要な対象物の幾何形状や色情報などを実世界から何らかの方法により観測し、コンピュータ内に適切な形式で保存することである。

1.1.1 仮想モデルの表現方法

幾何形状に基づく表現

最も単純な仮想モデルの表現方法は、計算機内部に対象物体の幾何形状情報を保持しておき、これを CG により描画するものである。対象物の色や表面特性も併せて保持しておき、任意の光源条件における見えを再現することも一般的に行われている。このような表現方法は、幾何（ジオメトリ）ベース、あるいはモデルベースの手法と呼ばれる。

計算機の処理能力が急激に向上したこともあり、対象とする空間が比較的狭い場合や複雑な構造を持っていない場合はこのような処理は一般に容易になってきている。現在では、非常に大規模あるいは複雑な対象をより高速・高品質に描画する研究が盛んであり、視点位置に応じた幾何情報のレベル階層化や、ポイントベースによる描画手法などが提案されている [1]。

見えに基づく表現

これに対し、計算機内部には対象空間の実画像のみを見え方に関する情報として保持しておき、これを適切に加工して描画する方法もある。このような表現方法は画像（イメージ）ベースの手法と呼ばれる。

画像ベース法における基礎的な概念が光線空間 [2] である。ある方向から見た物体の見えは、その物体が存在する空間内において物体表面から視点に達する光線の集合により構成される。光線空間はその分布を表現する空間である。入力画像を元として、物体上の各々の光線の明るさや色を、光線の方角を示すパラメータに基づいて光線空間内に記録する。新たな視点からの画像を表示する際には、パラメータで表現した各画素の方角に基づいて光線空間を参照する。そこから明るさや色などの光学情報を取り出し、組み合わせることで新たな視点に置ける物体の画像を生成する。

光線空間を構成するためには、対象物体をあらゆる方向から撮影した画像が必要である。光線空間内で光線の分布を適切に記述するため、光線空間法 [3]、Light Field Rendering [4]、Lumigraph [5]、Concentric Mosaics [6] などが提案されている。

1.1.2 実世界データの獲得方法

幾何情報の獲得

対象の幾何形状を得るための最も直接的なデバイスはレーザレンジセンサである。これを用いて仮想モデルを構築した例は非常に多く枚挙にいとまがないが、近年では例えば都市空間を対象としたものでは [40, 41, 54, 14, 27, 28] などがある。

他の獲得法としては航空写真による手法がある．この手法の例としては，画像処理によりエッジ抽出した結果を都市のモデルに当てはめたり [7, 8]，複数枚の画像を用いてステレオ法により三次元形状を求める手法 [9]，それらを組み合わせる手法 [10, 11] などが提案されている．しかし，航空写真を利用しているため側面の情報は取得できない．また，広い範囲を上空から撮影しているため，精細な形状取得には限界がある．

光学情報の獲得

光学情報の獲得方法は，構築する仮想モデルの表現方法が幾何ベース法の場合と画像ベース法の場合で状況が異なる．

幾何ベース法の場合は，必要な光学情報は対象のテクスチャである．テクスチャを得るためのデバイスはカメラ（イメージセンサ）であり，近年は特にデジタルカメラにおいてその性能向上がめざましい．CV の分野では複雑な光源環境下におけるダイナミックレンジや表面色推定などの問題が盛んに研究されている．

画像ベース法の場合は，必要な光学情報は対象空間におけるあらゆる光線の集合である．対象が比較的小さく，単純な構造の場合はカメラアレイやレンズアレイが代表的な獲得方法である [12, 13]．これまでの画像ベース法では多くがそのような対象空間を扱っており，光学情報の獲得方法はあまり考察されていない．特に都市空間のような大規模な対象に関しては [24] が挙げられる程度である．

1.2 問題設定と本論文の目的

これまで仮想モデルの表現方法と実世界データの獲得について背景を述べてきたが，本論文が主に扱うのは実世界データの獲得に関するものである．

1.2.1 問題設定

さて，都市空間や遺跡など大規模・複雑な空間においては，データを効率よく，できるだけ残さずに獲得することが非常に大きな課題となってくる．これには，以下のような対策が考えられる．

1. 移動しながら計測を行う
2. 一度に広い領域をカバーしながら計測を行う

移動しながらの計測

1. の例として, [14, 27, 41, 40] などは移動体として自動車を用いている. また [36, 50] ではヘリコプターを, [38] では気球を用いている.

このとき問題になるのは, センサ自身の動き推定, すなわちどのような位置・姿勢の履歴を辿ってきたかを知る必要があることである. [14, 27] では GPS やジャイロセンサなどの外部装置を, [36, 50] ではこれら外部装置のほかカメラ画像を利用している. また, [41, 40] ではレーザレンジセンサと航空写真を利用しており, [38] では他の固定設置型センサから得られた信頼性のあるデータを指標として用いている.

広い領域の計測

次に 2. は, 上空からの計測を行う場合であれば必然的に実現されるが, 地平面近くからの場合は計測システムに広い視野角, 特に全方位のデータを獲得できるよう工夫を施すことになる. 具体的には, レーザレンジセンサであればヘッドや鏡を高速で回転させたり, 複数台のセンサを同時に使うことが考えられる. またカメラの場合は, 魚眼レンズや曲面鏡を用いて広範囲の光線を集約させたり, やはり複数台のカメラを同時に使うことが考えられる.

問題が多いのはカメラの場合である. カメラによる撮影では, 魚眼レンズや曲面鏡を用いると領域あたりの画質が低下し, 十分な精度を確保することは困難であることが多い. また, 複数のカメラを用いた場合は各データの整合性をとる必要があるが, カメラ画像は内部で射影されて得られる関係上, 統合する際には一般には歪みを伴う. 加えて, 時間方向の整合性すなわち同期をとることも必要である.

本論文では複数台のカメラを同時に使う場合の問題解決を図る.

1.2.2 本論文の目的

解決方法の提案

本論文ではこれらの諸問題に対し, 得られた幾何データおよび画像データを時空間的に解析することで解決する手法を提案する.

移動体の動き推定については, 時空間距離画像という新しい概念を定義し, それを解析することによって動き推定を行う. 具体的には移動平面と平行にラインスキャンを繰り返すようなレーザレンジセンサを移動体に載せ, 得られるデータの時空間的な連続性を考慮することで自己位置を得る. また, その結果をもとに移動体から計測対象の形状を正しく復元する.

複数のカメラ画像の統合については, これまで単に画像を時系列に沿って直方体状に並

べることで時空間画像を表現する形態に替わり，新たに円筒や球面へ射影した画像を並べた時空間の表現形態を提案する．それらの表現形態において複数のカメラからそれぞれ得られた複数の時空間ボリュームどうしを相互に比較し，ピクセル単位で統合する．

応用

更にこれらの手法を適用した実用的なシステムとして，以下の開発を行う．

1. 「梯子式レーザ計測システム」という新しい実空間計測システム
2. 時空間画像データおよび幾何モデルを統合した都市道路交通シーンの提示するアプリケーション

1 はカンボジアのバイヨン遺跡，2 は都内の高速道路を対象としており，文化遺産のデジタル保存，および高度道路交通システムという二つの分野に応用的に貢献する．

1.3 本論文の構成

本論文の構成は次の通りである．前半は主に距離画像データの処理と応用，後半は主に濃淡画像データの処理と応用，および幾何データとの合成に関する研究である．

- 第 1 章 序論
- 第 2 章 距離画像の時空間解析によるレンジセンサの自己位置推定
- 第 3 章 梯子式レーザ計測システムの開発と大規模文化遺産のデジタル保存への応用
- 第 4 章 濃淡画像の時空間解析による複数カメラ画像の統合
- 第 5 章 実写画像と幾何モデルの合成による都市道路交通シーンのモデル化と ITS への応用
- 第 6 章 結論

第 2 章では，時空間距離画像という新しい概念を定義し，その特徴などについて考察する．時空間距離画像とは，平面運動を行う移動体上にその面と平行にラインスキャンを繰り返すレーザレンジセンサを載せ，得られる距離画像を時間軸に沿って並べたものである．それを解析することにより移動体の自己位置を推定する手法を提案し，また，その結果をもとに移動体から計測した建物形状を正しく復元する．

第 3 章では，新しい三次元形状計測システム「梯子式レーザ計測システム」の開発を行う．大規模な対象，特に遺跡などの形状計測を行う際には，狭隘部の存在のため，従来型のセンサでは計測が困難なことがある．本システムでは梯子に沿ってレンジセンサをモータにより移動させ，そのような場所の計測を可能とする．センサの自己位置推定には第 2 章で提案した時空間距離画像を用いる．本システムを実際にカンボジアのバイヨン遺跡にて運用し，文化的背景からも重要性が叫ばれている文化遺産のデジタル保存のための一

手法として役立てる。

第 4 章では、広域にわたる空間の光学情報を効率よく密に獲得するため、移動体に積載した複数のカメラから全方位画像を合成するための新たな手法を提案する。これまで濃淡画像では単に画像を時系列に沿って直方体状に並べることで時空間を表現してきた。本章では新たに円筒や球面へ射影した画像を並べた時空間の表現形態を新たに提案し、各々の特徴をまとめる。また、これらの時空間解析を通じて複数のカメラ画像列をピクセル単位で統合する手法を提案する。

第 5 章では、実都市空間の時空間画像データおよび幾何モデルを統合し、提示するアプリケーションの開発を行う。提示対象は、ITS 分野への応用を考え、都市の道路交通シーンとする。具体的には、第 4 章の手法により対象経路に沿って蓄積した道路シーンの全方位画像から都市空間の見えを再現する。そのデータを時空間的に合成することにより任意視点からの見えを再現する。更に、既存の幾何モデルより表現れた都市空間との合成表示を行ってこれを模擬運転映像装置として運用する。画像ベースの見えと幾何ベースの見えには、現実感の高さや汎用性・拡張性などそれぞれに長所・短所があるが、本システムでは、描画対象によって各々の手法を適切に使い分けることによって双方の欠点を相互に補完する。

第 2 章

距離画像の時空間解析によるレンジ センサの自己位置推定

2.1 はじめに

移動体センサによる実世界の計測において，センサの自己位置を確定することは全ての基本となる．マクロな位置確定には GPS や慣性（ジャイロ）センサなどの外部装置が，ミクロな位置確定には例えば自動車であれば車速パルスがよく利用されるが，使用できる状況に制限があるほか，これら中間程度のスケールを補完するような手段は少ない．本論文では水平方向にラインスキャンを行うレーザスキャナを自動車の設置し，このデータを時空間的に解析することで自己位置を得る手段を開発する．同時に垂直方向にもスキャンを行い，このデータを並べることで対象の形状を取得する．

2.2 関連研究

自己位置を推定する最も単純な方法としては，GPS や慣性センサなどの外部機器を利用する方法がある．Zhao らはこの方法により，自動車の積載したレーザレンジセンサから市街地形状の復元を行っている [14, 27]．GPS はグローバルな位置を取得するには適した測位装置であるが，一般的な GPS には数十 m 程度の誤差が含まれる．また，都市空間においては建物や高速道路の高架などのオクルージョンにより著しく信頼性が損なわれたり，全く利用できないことも少なくない．また，測位装置とレンジセンサの同期をとるために，専用の機構を設けなければならない．

Frue らは，移動方向に対し平行にラインスキャンを繰り返すようなレーザレンジセンサを自動車の積載し，得られた距離データをスキャン毎に位置合わせすることによって移動体の相対的な位置関係を求めている [40][41]．この手法は連続する 2 つの計測結果のみの

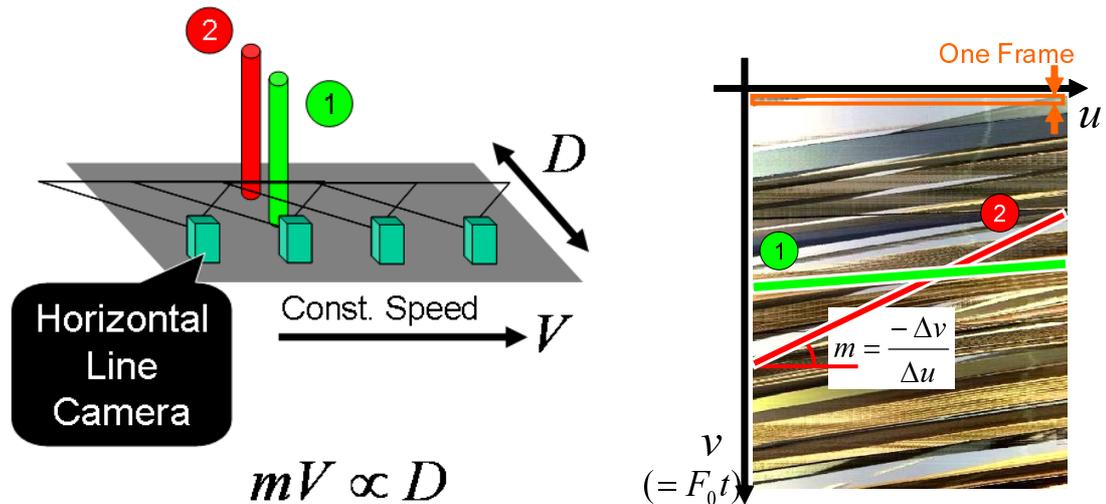


図 2.1 エピポーラ平面画像 (Epipoar Plane Image, EPI)

相対関係から移動体の速度を連続的に計算するため、全体の速度の推定において誤差が蓄積する問題がある。Frueらは航空写真を利用して上空から見た建物などの輪郭をグローバルな位置と共に取得し、水平スキャンの結果と輪郭をフィッティングすることによってこの問題を解決している。しかし、航空写真は必ずしも任意の地域で利用可能であるとは限らず、特に屋内では全く利用できない。

水平方向のラインスキャン距離データを使用する手法はロボット工学の分野においてSLAM (Simultaneous Localisation and Mapping) として知られる。拡張カルマンフィルタを用いる精度改善手法 [42][51] や、近年ではそれら的高速化手法など [43][47][48] も提案されているが、基本的には連続するスキャン間の相対位置を比較することによって推定を行っている。

2.3 輝度値データに関する時空間画像

ここでは、時空間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。

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2.1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。

図2.1からもわかるように、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

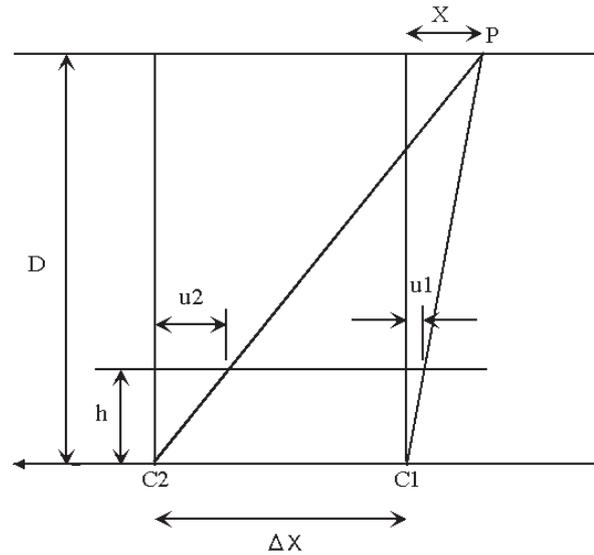


図 2.2 奥行きと視差の関係

去っていく」様子を見ることができる。

図 2.1 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 2.2 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 ΔX を用いて次のように関係づけられる。これが [20, 21] に提案されている EPI 解析の基本概念である。

$$\Delta U = u_2 - u_1 = \frac{h(\Delta X + X)}{D} - \frac{hX}{D} = \Delta X \frac{h}{D} \quad (2.1)$$

式 (2.1) 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^{*1}。

$$mV \propto D \quad (2.2)$$

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き、三次元情報の獲得が可能になる [22]。これが EPI 解析の原理であり、[24] [25] [23] 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 2.3)。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

^{*1} 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。

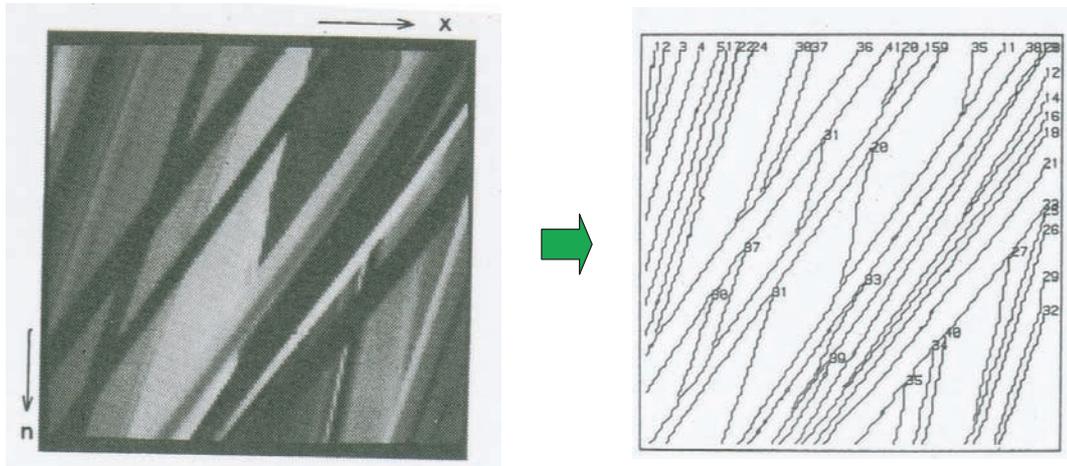


図 2.3 ハフ変換による直線検出

速で移動することを前提とする。

2.4 時空間距離画像

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時空間距離画像を提案し、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。

2.4.1 定義

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 に類似した時空間を表す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距離画像のことを時空間距離画像 (**Spatio-Temporal Range Image, STRI**) と呼ぶことにする。図 2.4 に時空間距離画像の模式図を示す^{*2}。

2.4.2 時空間距離画像の特徴

表 2.1 に、時空間距離画像とエピポーラ平面画像の対比を示す。

時空間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

^{*2} 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。

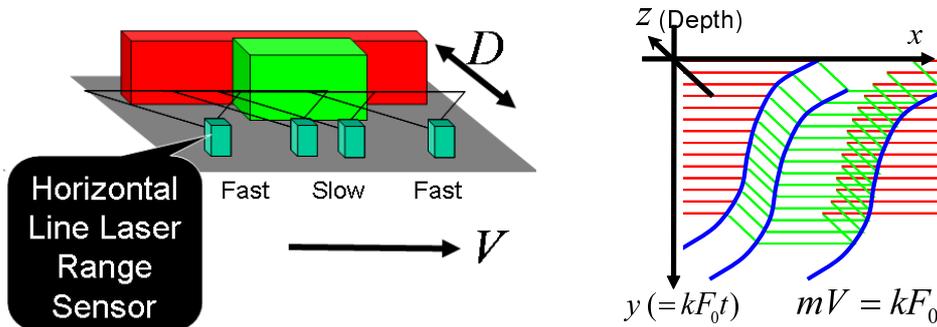


図 2.4 時空間距離画像

表 2.1 エピポーラ平面画像 (EPI) と 時空間距離画像 (STRI)

	エピポーラ平面画像	時空間距離画像
使用するセンサ	イメージセンサ (カメラ)	レンジセンサ
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
ピクセルまたは計測点の分布	一様	一様でない

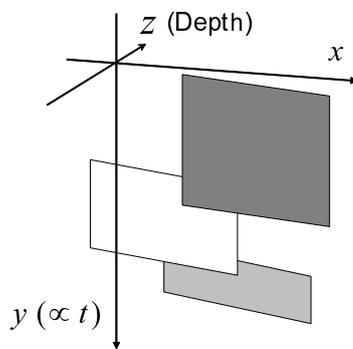


図 2.5 時空間距離画像内に形成されるクラスタ面 (模式図)

置によるエッジの傾きの違いは生じない。

また時空間距離画像では、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、時空間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、したがって時空間距離画像中では各点が図 2.5 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。

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．

2.4.3 解析と利用

EPI での式 (2.2) に対し，時空間距離画像では次式が導かれる．

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{kF_0\Delta t}{\Delta x} = \frac{kF_0}{V} \quad (2.3)$$

ここで， m はエッジの傾き， V はセンサの移動速度であり， xyz 座標は図 2.4 のように定義する． F_0 はラインスキャンセンサのフレーム周波数であり，標準的な単位は Hz または s^{-1} である． k はスキャンラインを並べる間隔であり，標準的な単位は m^{-1} である．

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，時空間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．また，存在するクラスタ面を曲面として解析する場合は，センサの位置変化は直線運動に限定されず，ラインスキャン平面に平行な面内において自由な運動を行った場合でも自己位置を求めることができると考えられる．

2.4.4 時空間距離画像の作成

実際の街路を走行してデータ収集を行い，そのデータから時空間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 2.6(a) に作成結果の一例を示す．図 2.6(b)～(e) は，(a) と同様の時空間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 (2.3) に合った結果が得られていることがわかる．

2.5 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. 時空間距離画像のセグメンテーション

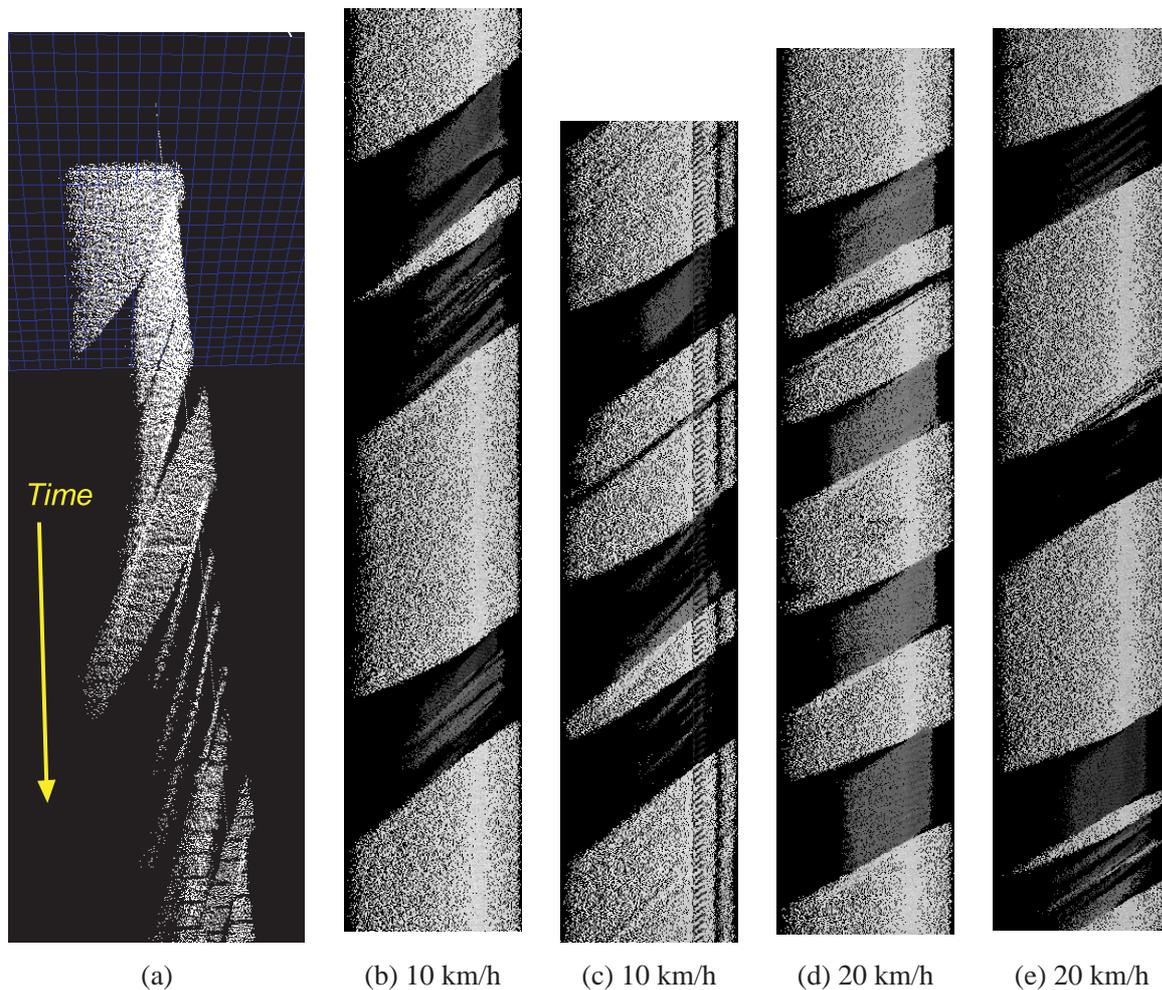


図 2.6 走行実験により得られた時空間距離画像の例

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 2.7 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．

2.5.1 データ取得と時空間距離画像の作成

時空間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 2.8 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 (SICK LMS200) 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．SICK LMS200 の仕様は付録 B.1 のとおりである。

得られたデータは時間軸方向に積層すると時空間距離画像が得られる．

2.5.2 時空間距離画像のセグメンテーション

前章にも述べたとおり，時空間距離画像内では複数のクラスタ面が現れる (図 2.9)．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 2.10 に示す．

2.5.3 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 2.11 では 6 次の多項式を当てはめている．

2.5.4 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 2.12 に各セグメントから得られた速度曲線を示す．

2.5.5 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．

$$R_n(k) = \begin{cases} 0 & (k < k_n, k'_n < k) \\ \exp\left\{-\frac{(k-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} & (k_n \leq k \leq k'_n) \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\mu = \frac{k'_n - k_n}{2} \quad (2.5)$$

$$6\sigma = k'_n - k_n \quad (2.6)$$

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．

$$v(k) = \sum_{n \in N} \frac{R_n(k)}{R} v_n(k) \quad (2.7)$$

$$R = \sum_{n \in N} R_n(k) \quad (2.8)$$

(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 2.13) .

2.6 三次元空間の復元

時空間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．

2.7 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 2.14 に走行経路を示す．

図 2.15 に得られた速度推定曲線を示す．また、図 2.16, 2.17 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．

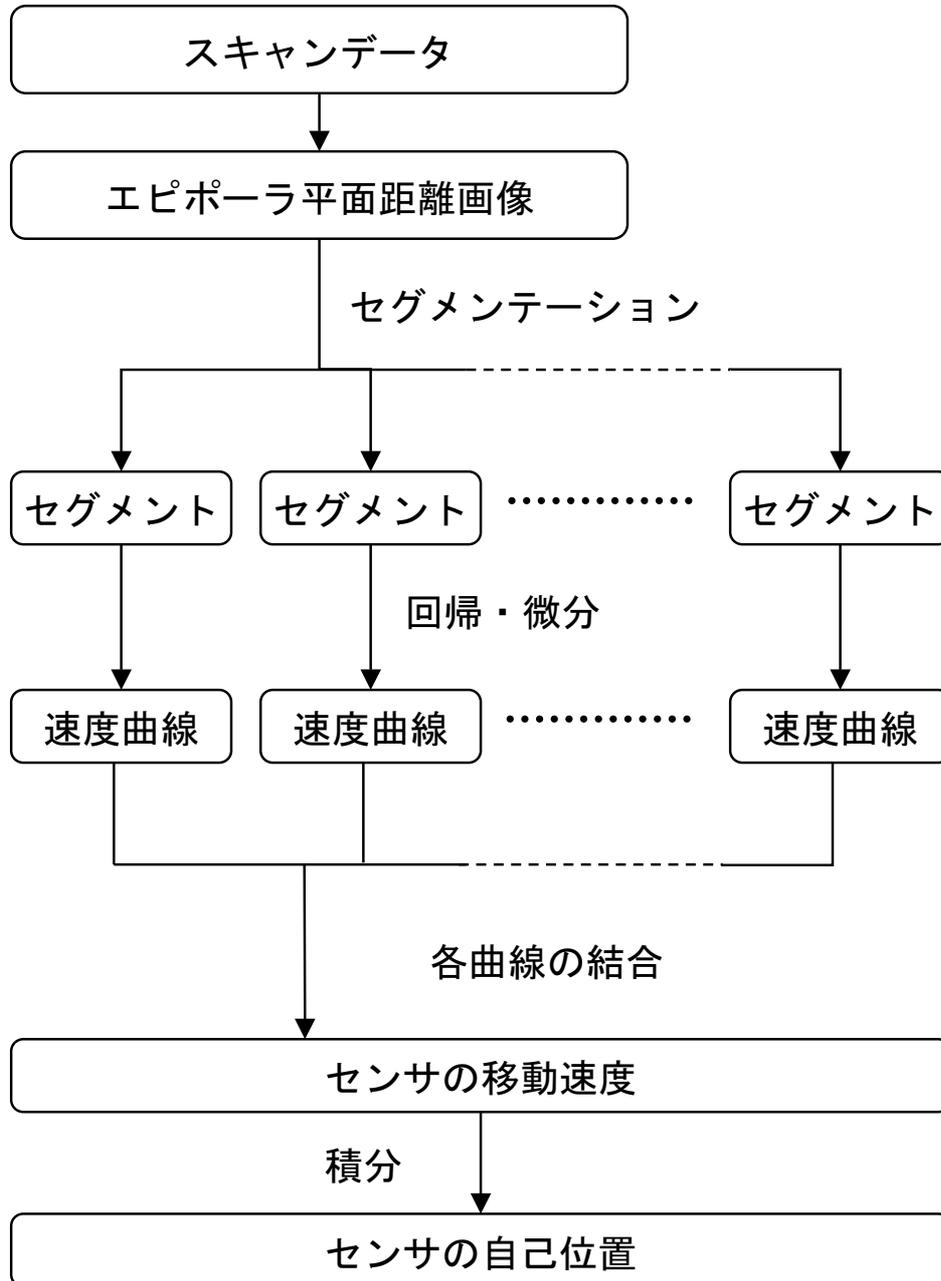


図 2.7 速度推定処理の流れ



図 2.8 データ収集用レンジセンサおよび車両

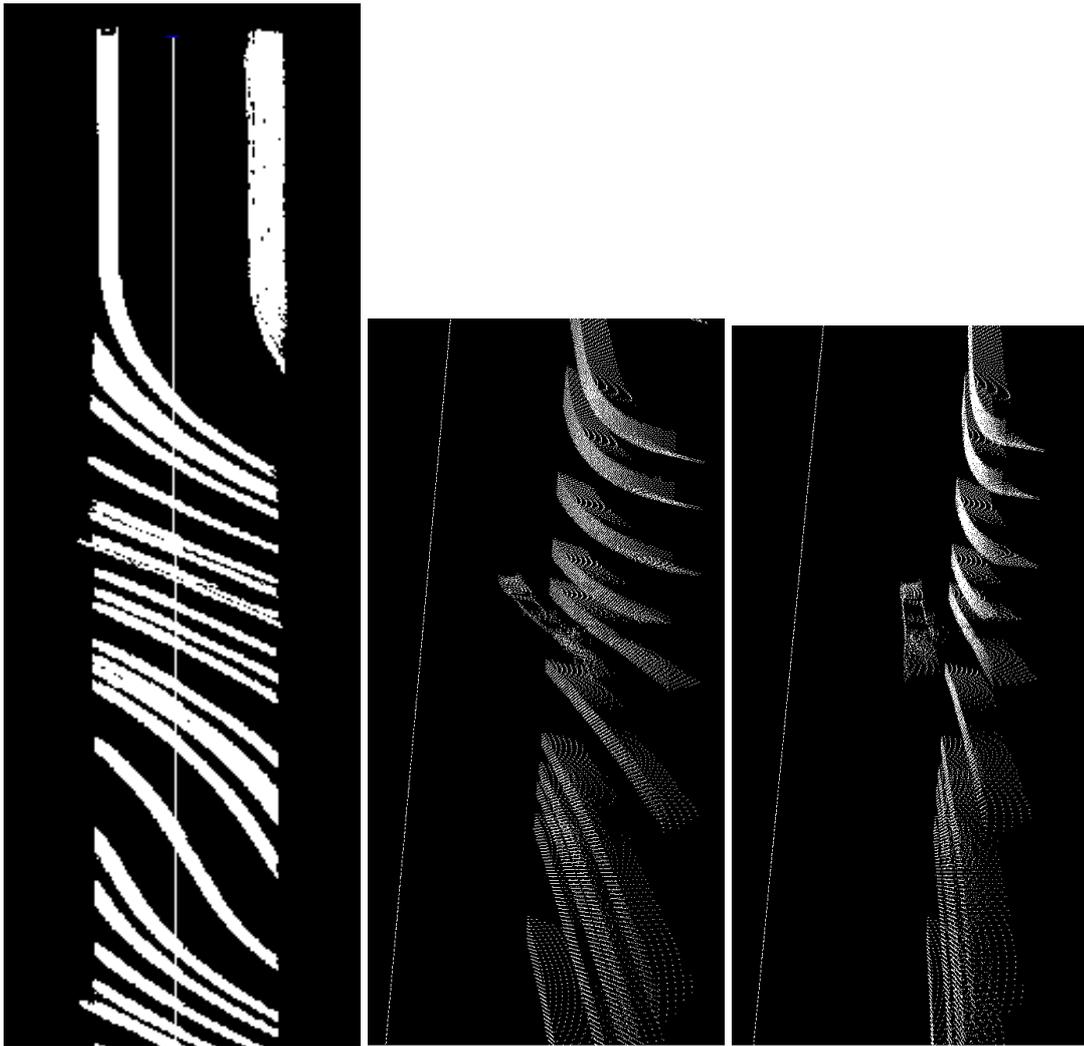


図 2.9 時空間距離画像に表れるクラスター面 (セグメント)

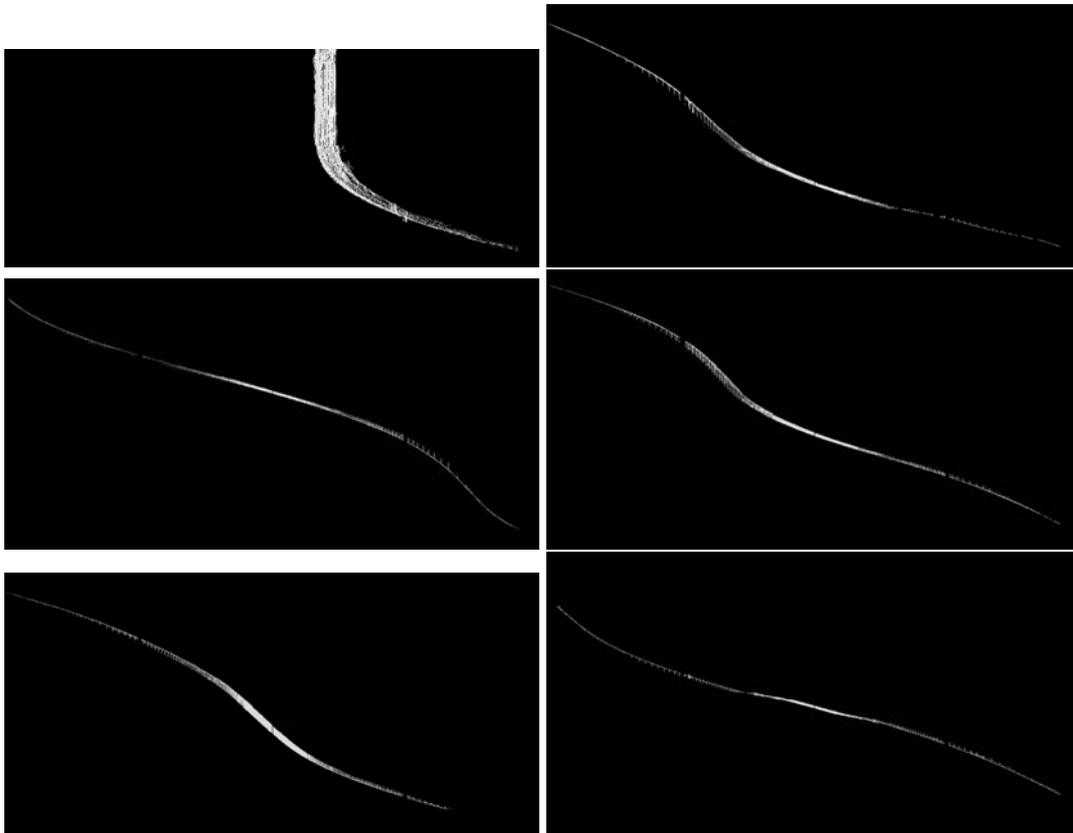


図 2.10 セグメンテーション後の時空間距離画像

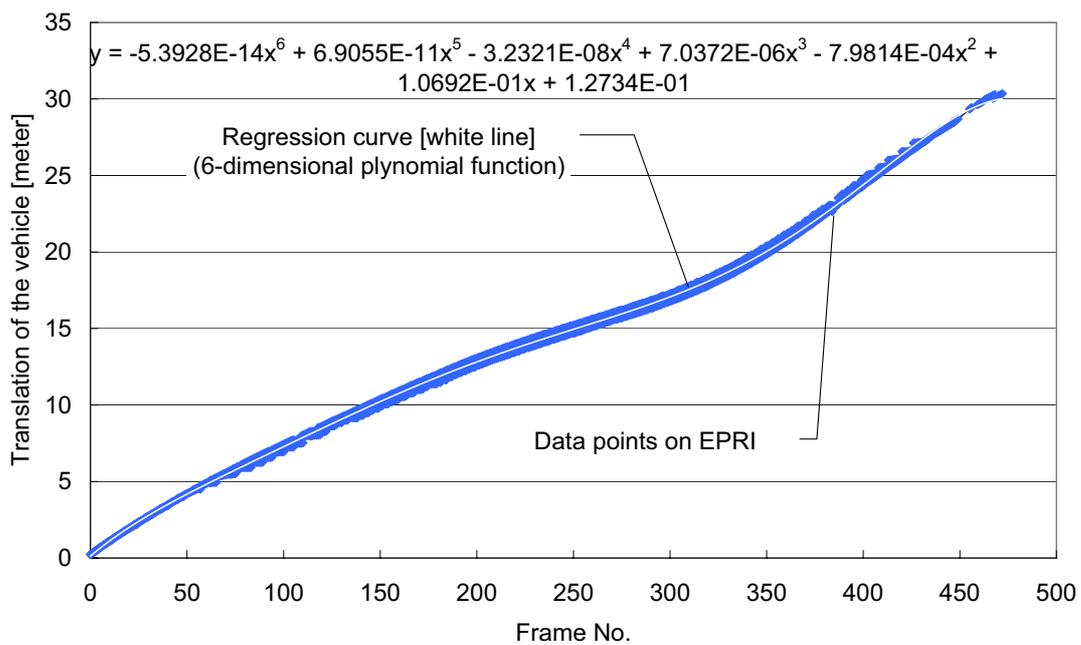


図 2.11 セグメントへの回帰曲線の当てはめ

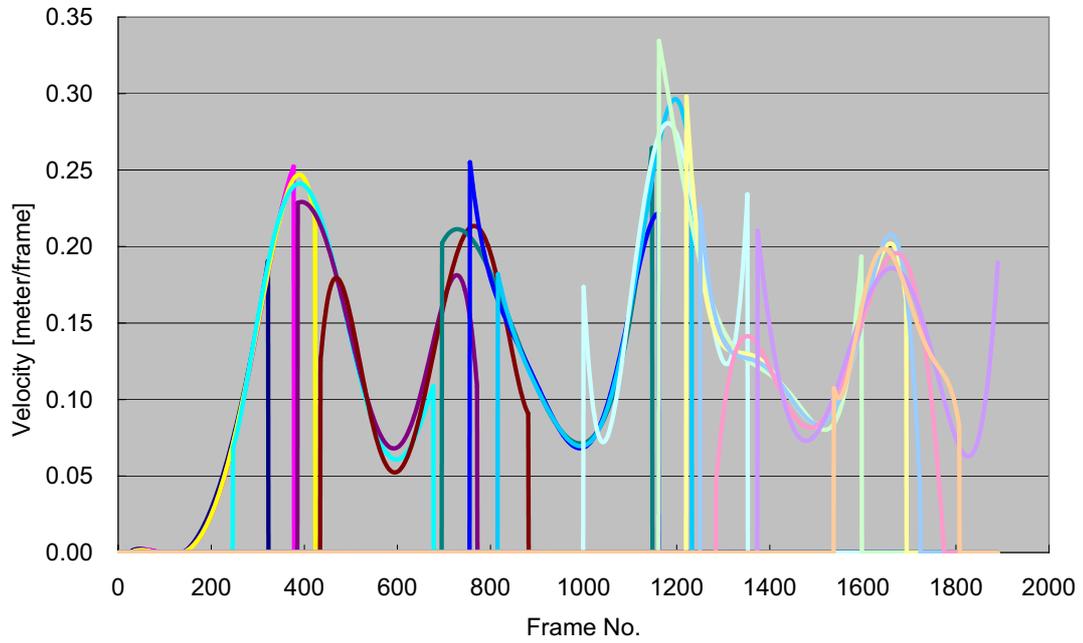


図 2.12 各セグメントから得られた速度曲線

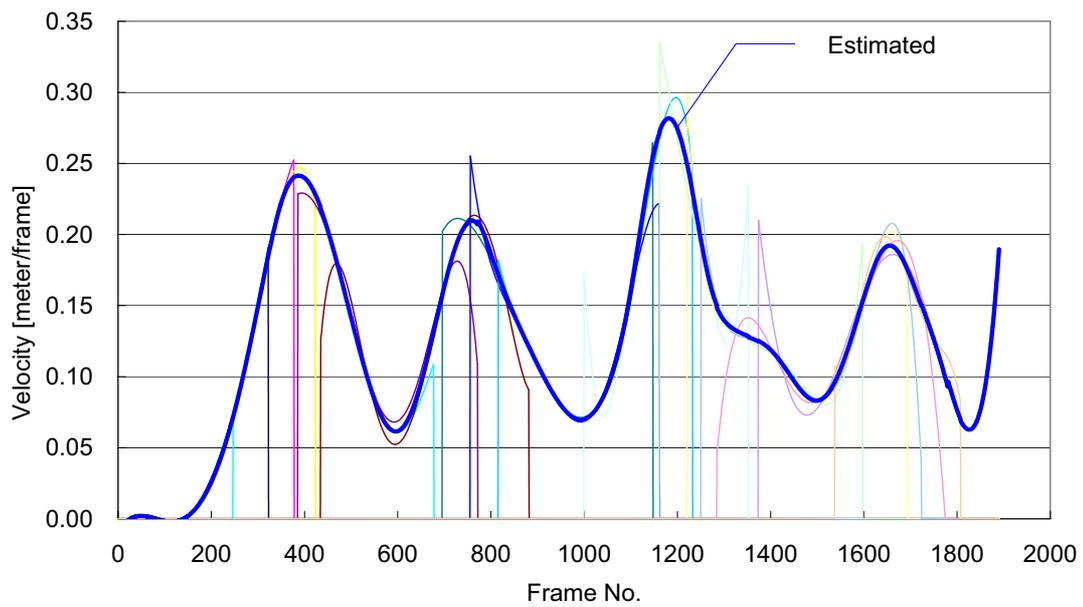


図 2.13 全区間に渡る速度曲線



図 2.14 走行経路

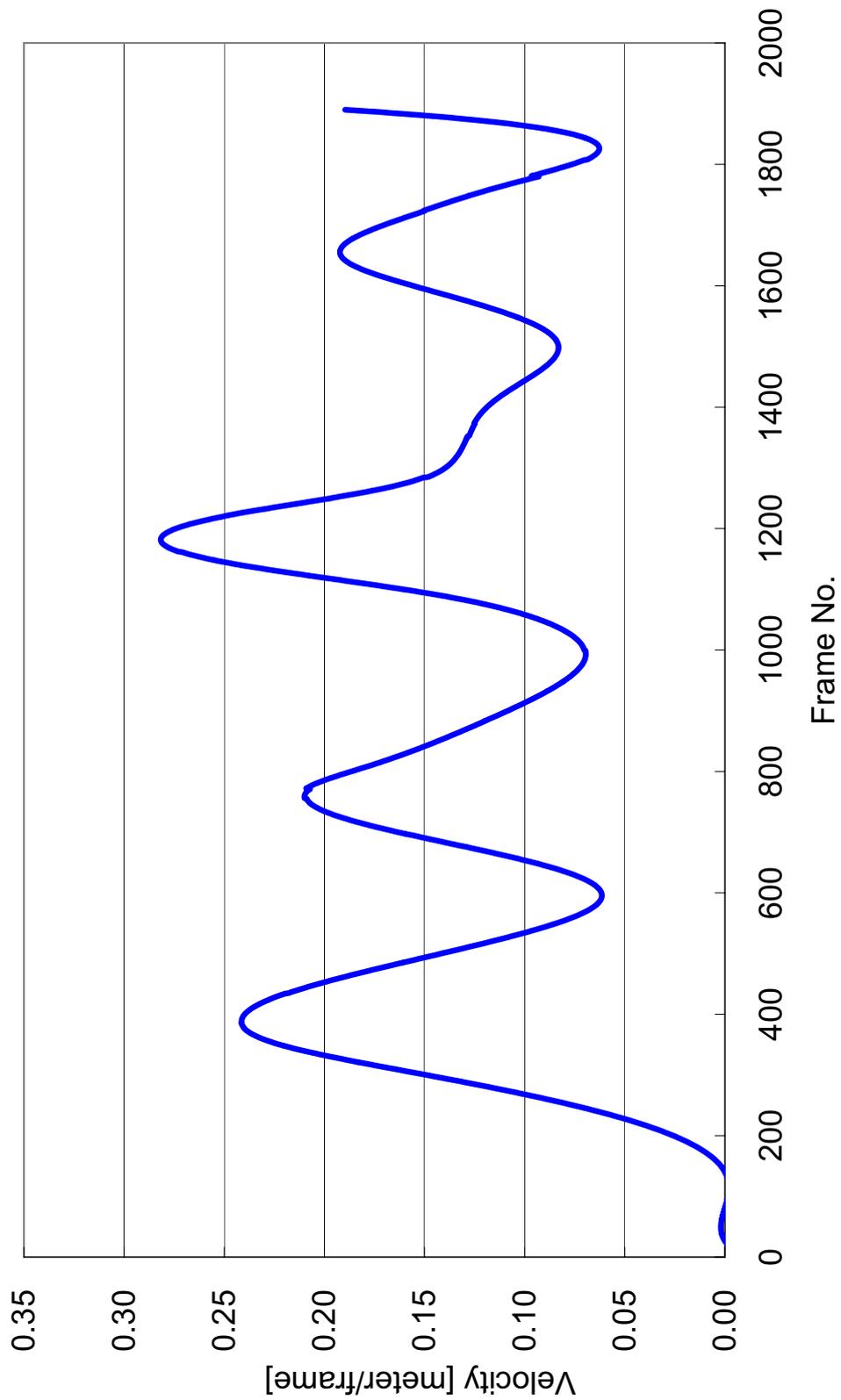
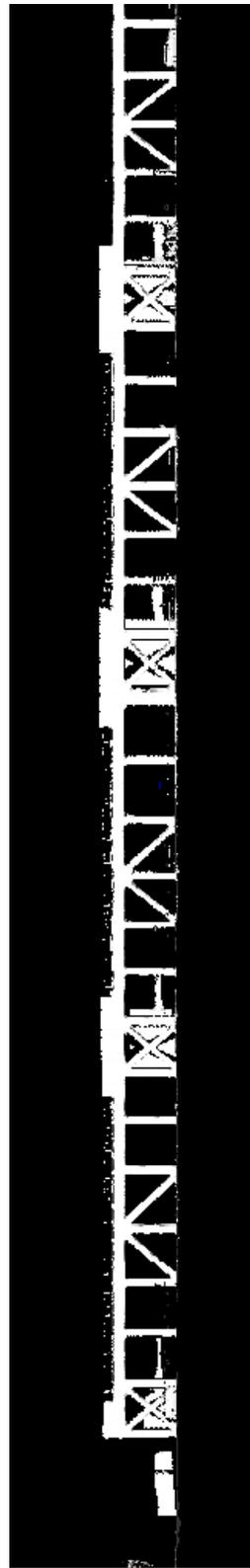


図 2.15 実験から得られた速度推定曲線

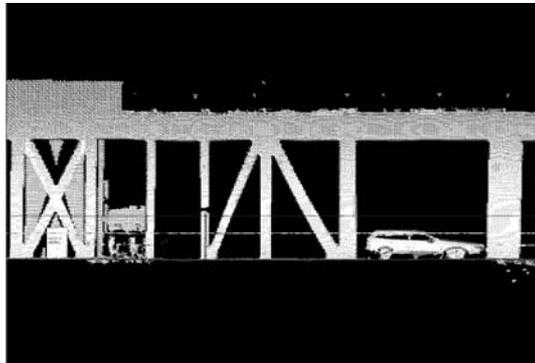


(a) 速度推定結果反映前（等速走行を仮定した場合）

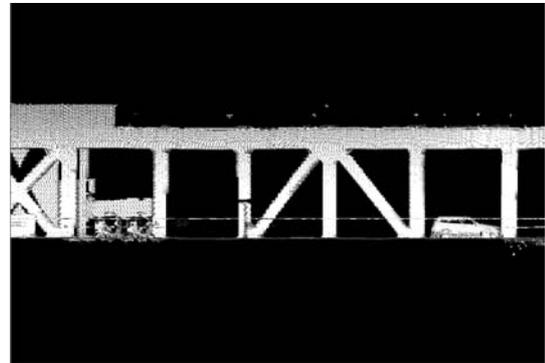


(b) 速度推定結果反映後

図 2.16 推定速度にもとづいて三次元形状を復元した例（全体図）



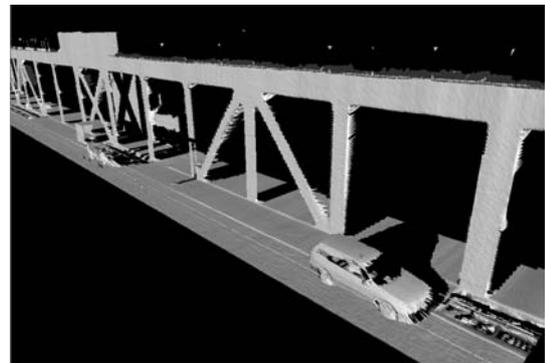
(a1)



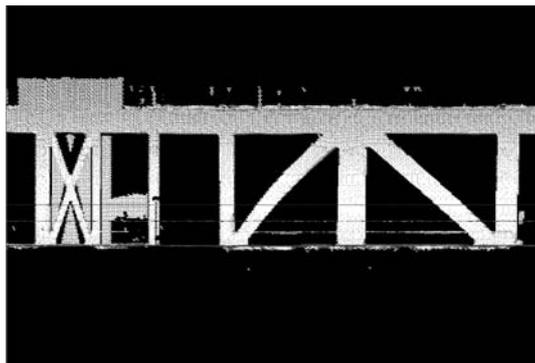
(b1)



(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 2.17 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 2.18 実際の画像（参考）

2.8 評価と考察

2.8.1 評価用データ (正解速度) の取得

評価用のデータは、図 2.16(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 2.20)。
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 2.19)。したがって 4. における瞬間速度の分母には最大で ± 1 の誤差があると考えられる。

2.8.2 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 2.21 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、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。しかし、これらの地点は故意に急激な加速および減速を行った箇所であり、実際の運転ではきわめて例外的にしか発生し得ない状況である。通常の運転状況においては本手法の精度は高いと言える。

更に精度を向上させる方法としては以下が考えられる。

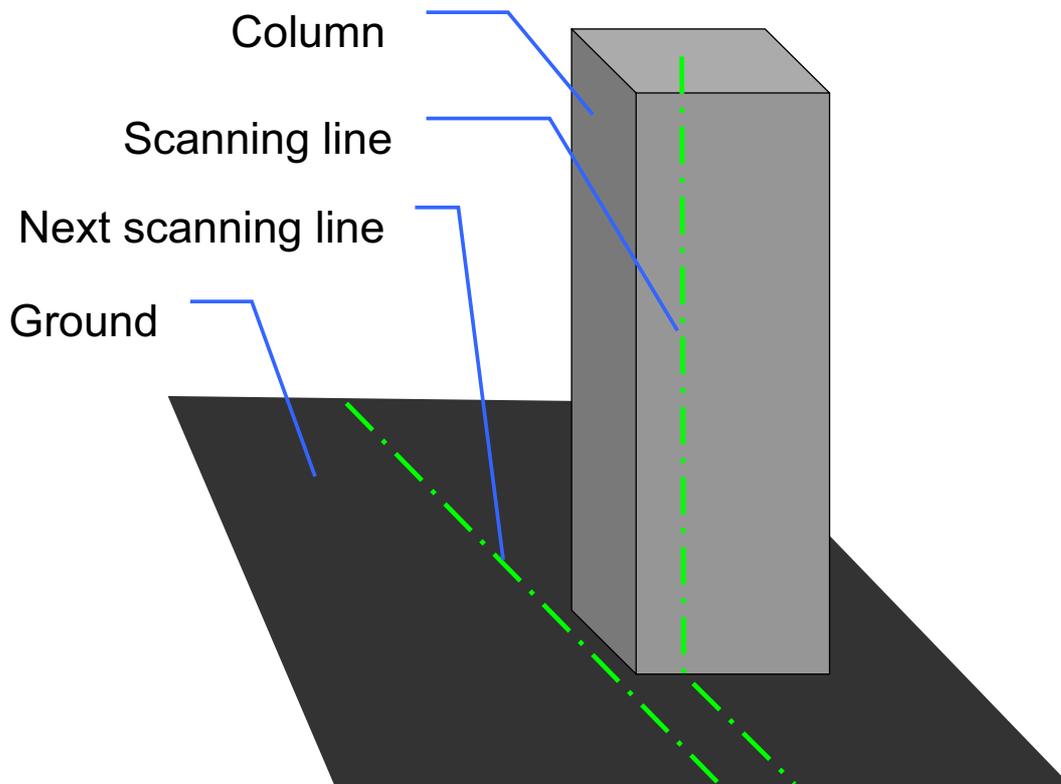


図 2.19 柱側面に対するスキャンラインのずれ

セグメント相互間の拘束 本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，時空間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．

2.9 まとめ

本章では，時空間距離画像という新しい概念を提案し，これを利用して自動車車両の自己位置を求める手法について述べた．

時空間距離画像とは，エピポーラ平面画像におけるビデオカメラのかわりにラインス



(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 2.20 評価用データの計測

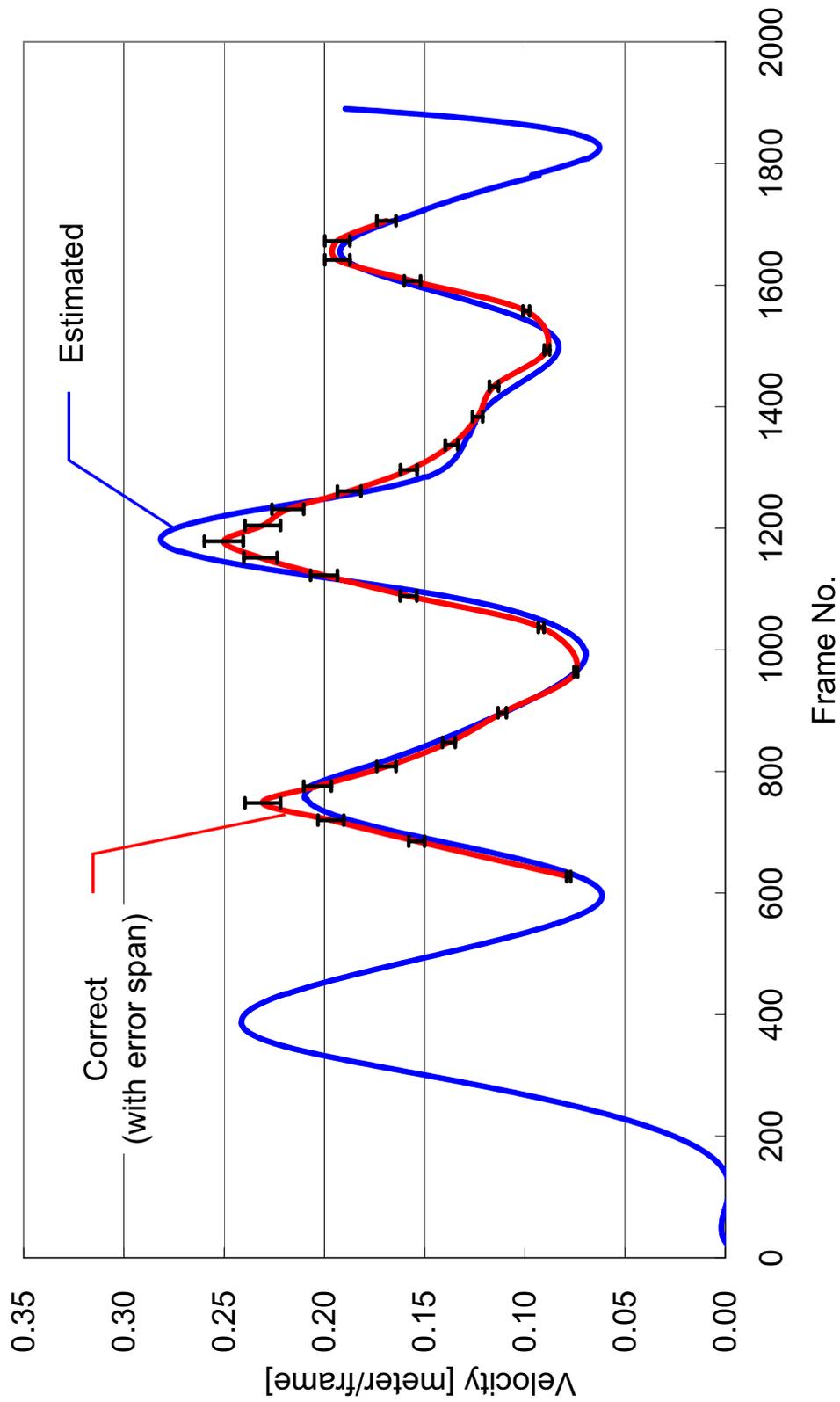


図 2.21 実験結果と評価用結果

キャンを繰り返すレーザレンジセンサを使用し，その距離データを時間軸に沿って並べることで得られる距離画像である．移動体に積載した時空間距離画像は計測対象の形状と時間的推移を同時に表現しており，その特徴を利用すると移動体の自己位置を求めることができる．

本手法を実際の建物データに適用した結果，自己位置を求め，またその結果を利用して，計測対象の三次元形状を概ね正しく復元した．その精度は一般的な測位装置であるGPSよりも高いことを確認できた．

第 3 章

梯子式レーザ計測システムの開発と 大規模文化遺産デジタル保存への 応用

3.1 はじめに

レーザスキャナによって得られる高精度の幾何データは学術調査や娯楽分野への応用など多岐にわたって使用されている。対象物をモデリングする主たる応用例としては、何百年も前に建造された歴史的文化遗产が挙げられる。これらの文化遗产は雨風にさらされ、また、地震や火事など自然災害によって、時間の経過と共に劣化していく。更なる劣化から守り、修復を行うためには、正確な文化遗产のモデルが必要となる。世界的に見ても歴史的に重要な物体の三次元モデリングは重要視されている [46]。奈良や鎌倉の大仏 [35]、廣目天、フゴッペ洞窟などのモデリングはその好例である。

筆者らは、カンボジア・アンコールトム遺跡のバイヨン寺院のモデリング [44] を進めている。計測には、市販の Cyrax 2500[45] や Floating Laser Range Sensor[38] などのセンサを用いている。大部分の領域はこれらのセンサによりモデル化を行ったが、バイヨン寺院には通常の市販のレーザセンサでは、その視野角の制限やセンサの寸法に対して十分な場所を確保できないために、計測が困難、あるいは非常に非効率な範囲が多々あり、そのすべてを計測することができていないという問題がある。球状に測定を行う Z+F 社の IMAGER[55] などを使用するれば視野角の問題は解決できるが、図 3.1 のように測定場所により点密度が大きく異なるといった問題や、測定原理が位相差を用いることによる距離の曖昧性の問題が生じてしまう。

そこでこの問題を解決するため、全く新しい計測システム開発し、問題となる視野角や狭さの問題も解決する。このシステムは、2 台のラインスキャナを装備する基盤を市販の

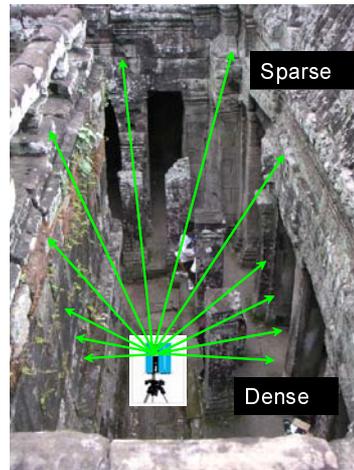


図 3.1 狭隘部における計測点密度の不均一性

梯子形リフトに取り付けることにより，プラットフォームがリフトに沿って移動している間に計測を行うことができる．移動するプラットフォームの自己位置推定には，2章で開発した時空間距離画像を用いることができる．

3.2 梯子式レーザレンジ計測システム

ここでは，本章で開発するレーザレンジ計測システムの概要を述べる．

3.2.1 機構

本章で開発するレーザレンジ計測システムでは，従来の商用レーザレンジセンサ単体では困難であった狭隘部の計測を行う．このため，専用のガイド式移動機構を設け，それに沿ってレーザレンジセンサのユニットを移動させながらある程度の長さをもった狭隘区間全体を計測できるような機構とした．

本研究ではこの計測システムを「梯子式レーザレンジ計測システム」と呼ぶこととする．システムの外観を図 3.2 に示す．この梯子式センサにより，十分な水平方向の画角保ちながら，空間的な制限も解決し，測定点の点密度も一様にすることが可能である．以下では移動機構およびセンサユニットについて解説する．

移動機構

移動機構には Nobitec Lift NPL-4200 (付録 B.2, [49]) を用いる．

この製品は最長で約 4m の長さまで自在に伸縮することが可能な梯子形のリフトである．端部には電気モーターを動力源とするウィンチが設けられており，梯子に沿ってワイ

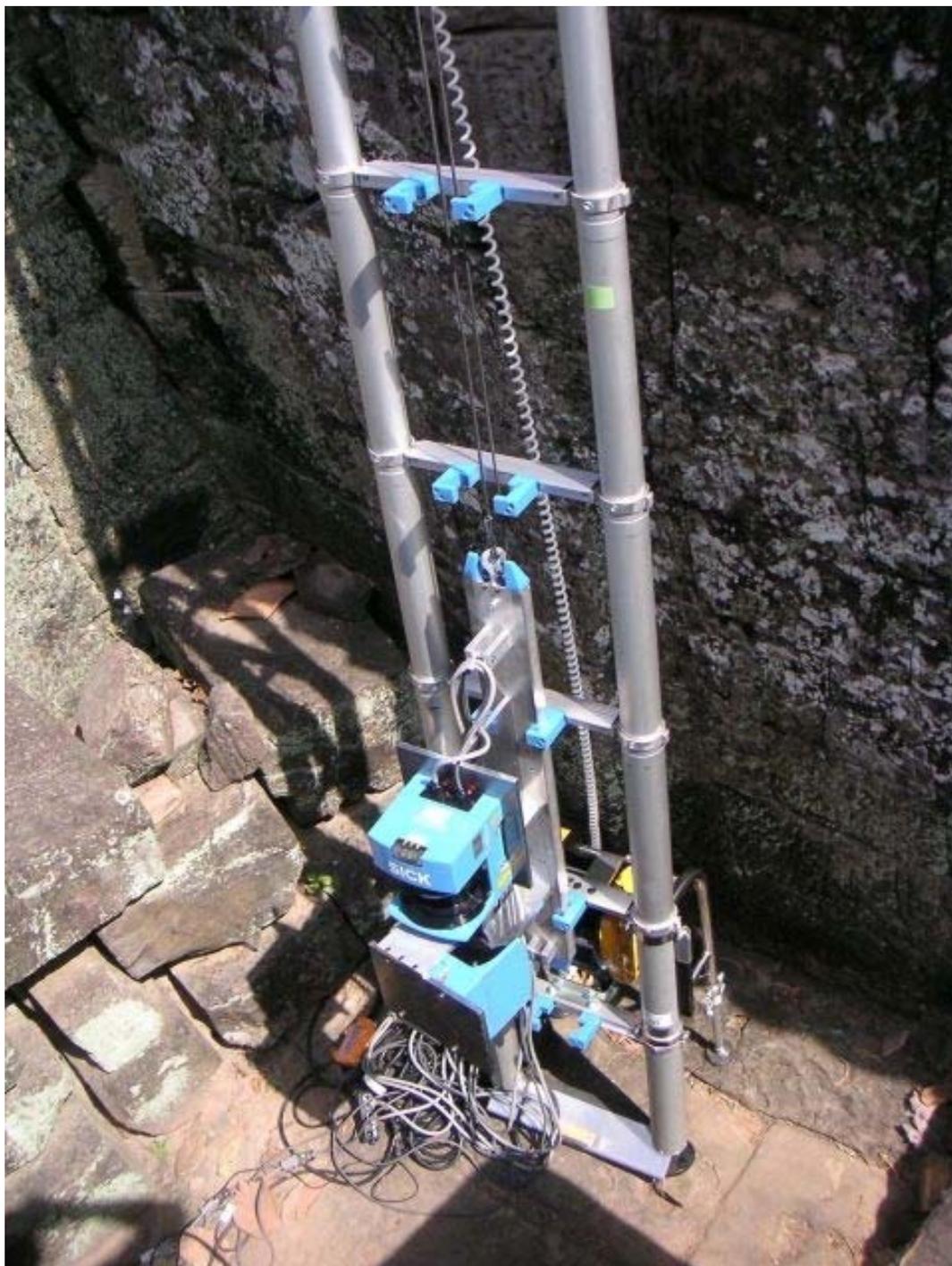


図 3.2 梯子式レーザ計測システムの外観

ヤーを巻き上げられるようになっている。梯子のステップ部には複数のガイドがあり、ワイヤーに接続された移動用プラットフォームはガイドを滑りながら梯子上を往復移動できるようになっている。

この製品は本来は建物の壁などに立て掛けて重量物を高所に揚げるのに用いられるが、本研究で提案する計測システムでは移動用プラットフォーム部分にレンジセンサのユニットを取り付けて使用する。本来のとおり梯子を垂直に近い角度に設置してセンサユニットを上下させながら計測を行うことも可能であるし、計測対象や計測現場の状況によっては梯子を水平に設置し、ユニットを水平移動させながら計測を行うことも可能である。

ウィンチによるリフトの移動速度は仕様上は 25 m/min であるが、本システムによる計測状況では梯子が壁に立て掛けられる際の傾き角度は場合により異なり、それに伴って、ガイドと移動プラットフォームの間に生ずる摩擦の大きさも異なると考えられるため、この値を直接の移動速度としては用いない。

センサユニット

センサユニットには、2章でも用いた SICK LMS200 を用いる。LMS200 の仕様は付録 B.1 のとおりであるが、本システムの想定する計測状況に対して特筆すべき点として、以下が挙げられる。

- 小型（一辺約 15~20 cm）
- 軽量（約 4.5 kg）
- 広いスキャン角 (180°)

特に外形寸法や質量は、商用レーザレンジセンサの中では、特殊なものを除き最も小型・軽量なクラスに属する。これらの特徴はプラットフォームに載せて狭隘部を計測する目的のもとでは最適である。

LMS200 は、移動プラットフォーム上に 2 台を以下のように設置する。

- 主センサ：スキャンラインがプラットフォームの移動方向と垂直になる
- 副センサ：スキャンラインがプラットフォームの移動方向と平行になり、かつ、梯子のステップ部分が観測される

梯子形リフトを鉛直に設置した場合、主センサは水平方向のラインスキャンを、センサ 2 は垂直方向のラインスキャンを繰り返すこととなる。各センサには次のような役割がある。

- 主センサ：計測対象の形状を取得する
- 副センサ：移動プラットフォームの動きを求める

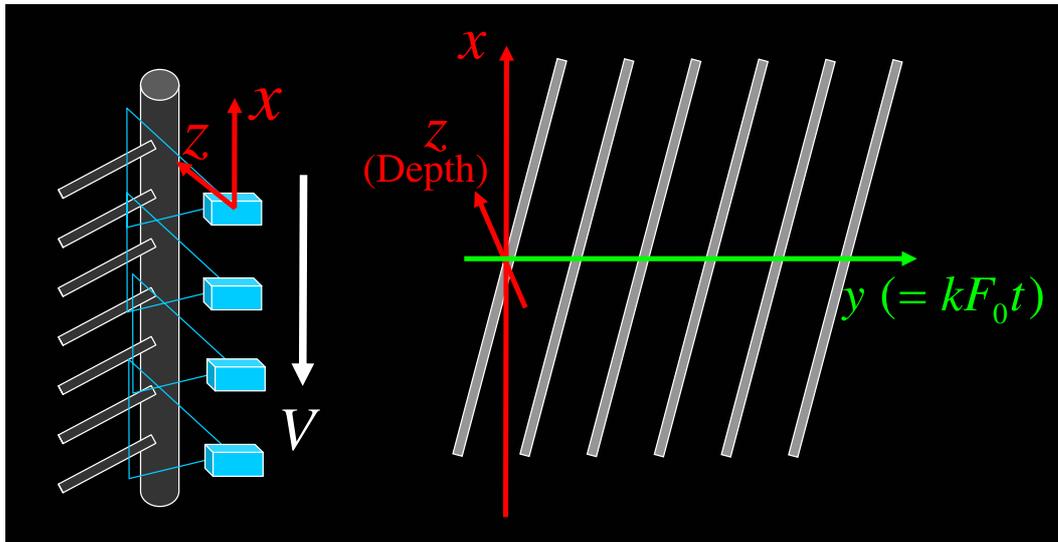


図 3.3 梯子式レーザ計測システムにおけるセンサ位置推定への時空間距離画像の適用

3.2.2 時空間距離画像の利用

移動プラットフォームの動きはロータリーエンコーダ等を用いて求める方法も考えられるが、ここでは前章で提案した時空間距離画像を解析する方法によって求めることとする。

プラットフォームに取り付けたセンサユニットのうち、副センサからは図 3.3 のように時空間距離画像を得ることができる。この時空間距離画像においては、梯子のステップ部分が常に安定して観測されるため、エッジ抽出や速度推定曲線の当てはめは完全に自動で行う。

3.2.3 運動条件の仮定

本システムにおけるセンサユニットの移動には、以下の仮定をおく。

1. センサユニットは直線運動をする。
2. センサユニットは等速運動をする。

1. は、本システムでは移動プラットフォームは梯子上のガイドに合わせて移動していることによるものである。ガイドからプラットフォームのずれは多くとも数 mm であり、積載しているセンサ LMS200 の精度よりも微小である。

2. は、本システムの移動プラットフォームが一定のトルクをもった電気モーターによって駆動されており、一度の計測中は梯子の設置条件が一定であり、負荷が変化しないことによるものである。

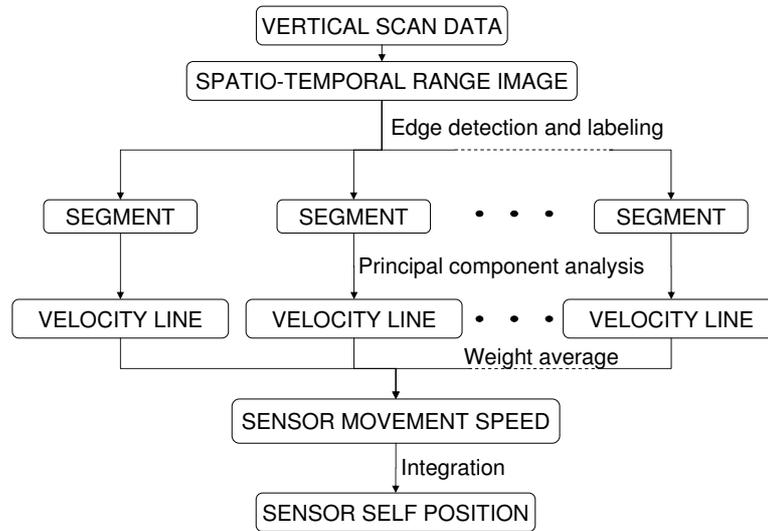


図 3.4 自己位置推定処理の概略図

確認のため，梯子に沿って巻尺を設置し，移動プラットフォームに載せたビデオカメラから梯子長のおよそ 1/8 区間毎に目盛りを読み取ることにより位置変化を算出した．その結果，位置変化はほぼ直線を示し，回帰直線との差は最大でも 5 mm 以内であった．

3.3 センサユニットの位置推定

計測中に移動するセンサユニットの自己位置を推定する処理の概略を以下に示す．図式化すると図 3.4 の通りである．

1. 時空間距離画像を作成する．
2. エッジを抽出する．
3. 各エッジの傾きを主成分分析により求める．
4. 各傾きの重み付き平均をとる．
5. 重み付き平均値をセンサの移動速度に変換する．
6. センサの自己位置を計算する．

3.3.1 時空間距離画像の作成

時空間距離画像は副センサの計測結果を時間軸に沿って並べれば得られる．図 3.5 に実際の例を示す．ステップ部分を観測しているため，時空間距離画像のエッジは顕著に現れる．

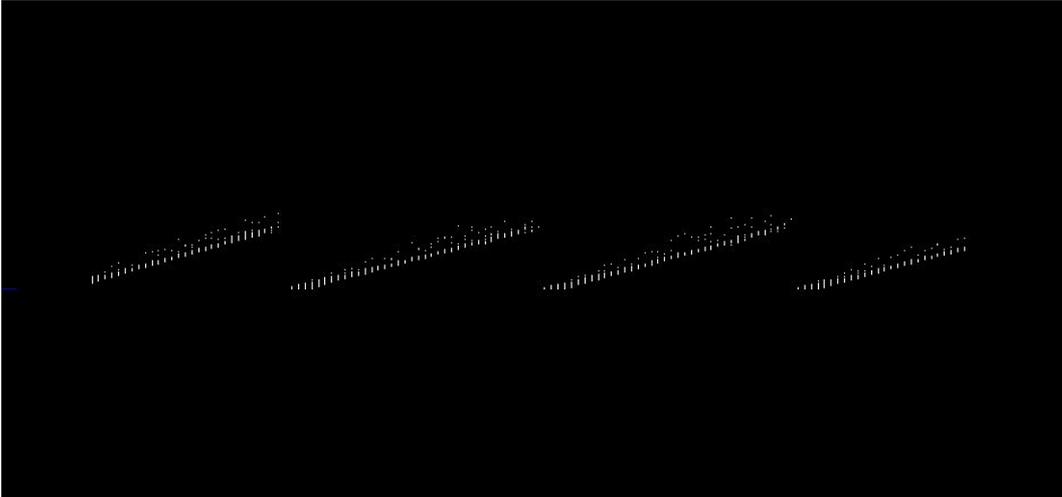


図 3.5 梯子式レーザ計測システムの副センサから得られる時空間距離画像の例

3.3.2 エッジ抽出

時空間距離画像よりエッジの抽出を行う．これには空間微分フィルタ，および隣接点との角度による 2 種類の手法を用いる．両手法でともにエッジであると検出される点を最終的にエッジであるとした．

空間微分フィルタによるエッジ抽出

空間微分フィルタによるエッジ抽出では，ソーベルフィルタを用いた．ソーベルフィルタには画像中の垂直方向と水平方向の変化を検出する行列がある．

$$K_h = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad K_v = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

各画素とその 8 近傍点ごとに上記の行列を掛けることによりその点のエッジ強度の水平成分および垂直成分を計算できる．また，それらの値からエッジの方向やエッジ強度を計算できる．

通常，このような行列形式のフィルタは二次元配列である濃淡画像における各画素に適用されるものであるが，ここでは三次元空間中の点群である時空間距離画像の各点に適用する．時空間距離画像に含まれる全ての計測点 $p = (x, y, z)$ には，その原理上，以下の 2 つのインデックスが付与されており， $p_{m,n} = (x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$ と表される．

- フレーム番号，すなわち何番目のスキャンラインであるかを表す m
- 各スキャンラインにおいて何番目の計測点であるかを表す n

ソーベルフィルタは、 $p_{m,n}$ とその 8 近傍点

$$\begin{array}{ccc} p_{m-1,n-1} & p_{m,n-1} & p_{m+1,n-1} \\ p_{m-1,n} & p_{m,n} & p_{m+1,n} \\ p_{m-1,n+1} & p_{m,n+1} & p_{m+1,n+1} \end{array}$$

に対し、各点とレーザ光源からの距離 $r_{m,n}$ に対して適用する。レーザ光源の軌跡は時空間距離画像では y 軸で表されるので、

$$r_{m,n} = \sqrt{x_{m,n}^2 + z_{m,n}^2} \quad (3.2)$$

である。

隣接点との角度によるエッジ抽出

注目点 $p_{m,n}$ が隣接点となす角は、インデックスの m, n 方向に関してそれぞれ

$$\theta_m = \angle p_{m-1,n} p_{m,n} p_{m+1,n} \quad (3.3)$$

$$\theta_n = \angle p_{m,n-1} p_{m,n} p_{m,n+1} \quad (3.4)$$

である。 θ_m または θ_n (まとめて θ で表す) が以下の条件を満たす場合は、その点をエッジと判定する。

$$\frac{\pi}{12} < \theta < \frac{11}{12}\pi \quad (3.5)$$

3.3.3 センサユニットの移動速度の計算

抽出したエッジからは、傾きを求め、センサユニットの移動速度を計算する。

検出されたすべてのエッジについて、点群の主成分分析を行う。第 1 主成分の方向からエッジの傾きを求め、移動速度を式 (2.3) から逆算する。

移動速度は各エッジから得られるが、本システムではその機構上、長時間すなわち大域的に観測されるエッジの方が、短時間すなわち局所的にしか観測されないエッジよりもセンサの動きに関して高い信頼性を持つと考えられる。そこで、各エッジの長さによって推定移動速度を重み付けし、その平均値を最終的な 1 度の計測における推定移動速度とした。

3.4 実験

開発した梯子式レーザ計測システムにより、アンコールトム遺跡・バイヨン寺院の計測を行った。



図 3.6 バイヨン寺院における狭隘部の典型例

3.4.1 バイヨン寺院

バイヨンは、カンボジア王国のアンコールトム遺跡内にある総石造りの広大な寺院である。同寺院はこれまでも Cyrax 2500 や Z+F Imager, Vivid 910, 気球搭載型レーザレンジセンサなど様々なセンサにより計測・モデル化が行われてきたが、図 3.6 のような狭隘部が数十カ所にわたって存在しており、計測箇所の空間的制約やオクルージョンのために計測できない領域となっていた。

3.4.2 計測内容

本システムにより計測を行ったのは、バイヨン寺院のうち以下の領域である。

- テラスと内回廊の隙間部分：173 スキャン
- 北経蔵の北東部分：5 スキャン

図 3.7 に計測領域の図を、図 3.8 に計測作業の様子を示す。

3.4.3 結果

テラスと内回廊の隙間部分

図 3.9 はテラスと内回廊の隙間部のモデリング結果例である。図中 (a) はカメラによる計測箇所の撮影結果であるが、狭隘な場所であるため対象までの距離が充分にとれず、また画角の限界のため、限られた領域しか写すことができない。Cyrax 2500 などのセンサでも、一度の計測でカバー可能な範囲は同程度である。これに対し図中 (b) は、本システムを用いた一度の計測で得られた三次元モデルである。細長い本体形状や広いスキャン角といった、本システムの特徴が充分に発揮されていることが分かる。

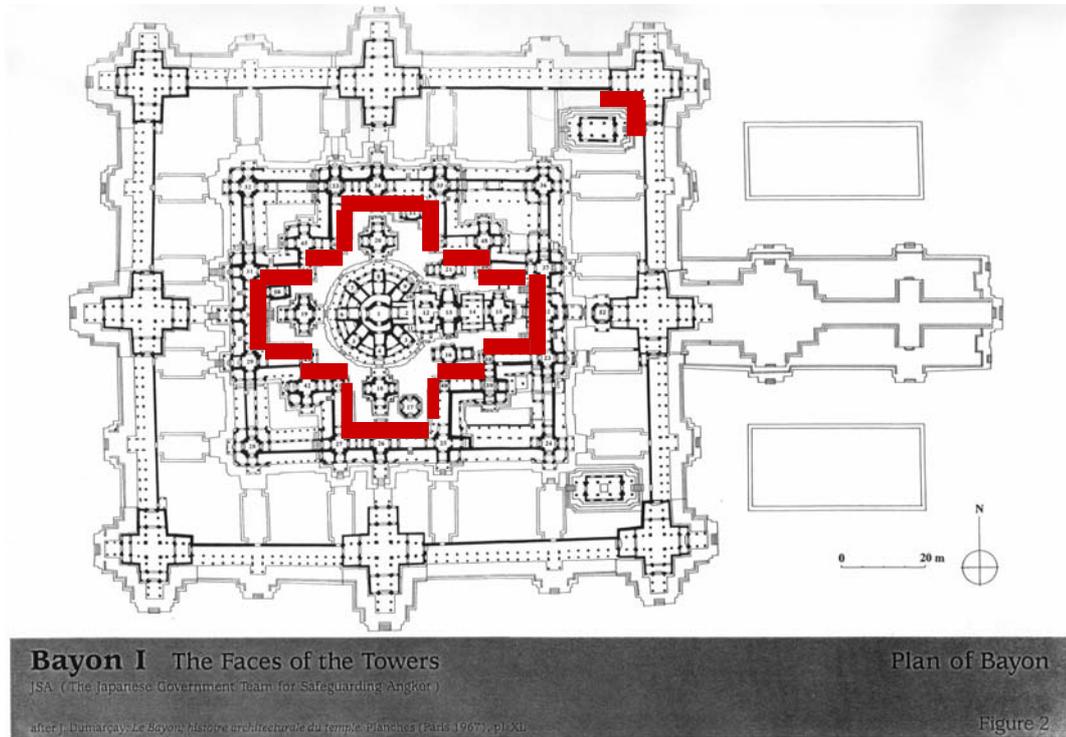


図 3.7 梯子式レーザ計測システムによる計測箇所

図 3.10 は、本システムによる内回廊の隙間部のモデリング結果を全て位置合わせしたものである。北東部分のデータが存在しないのは、本システムをもっても設置不可能な幅 30 cm 程度の箇所が集中しているためである。

北経蔵の北東部分

図 3.11 は北経蔵の北東部分のモデリング結果例である。計測前のデータは Cyrax 2500 によって得られたものである。図中の円内部分はセンサ設置箇所の空間的な制約から計測が困難な箇所であり、データが欠損している。本システムを用いるにより、この欠損部分を補完することに成功した。

3.4.4 評価

基準モデルとの整合性

推定した速度の正確性を確認するため、梯子式センサから得られるモデル結果と基準となるモデルとの位置合わせ（アラインメント）を行った。

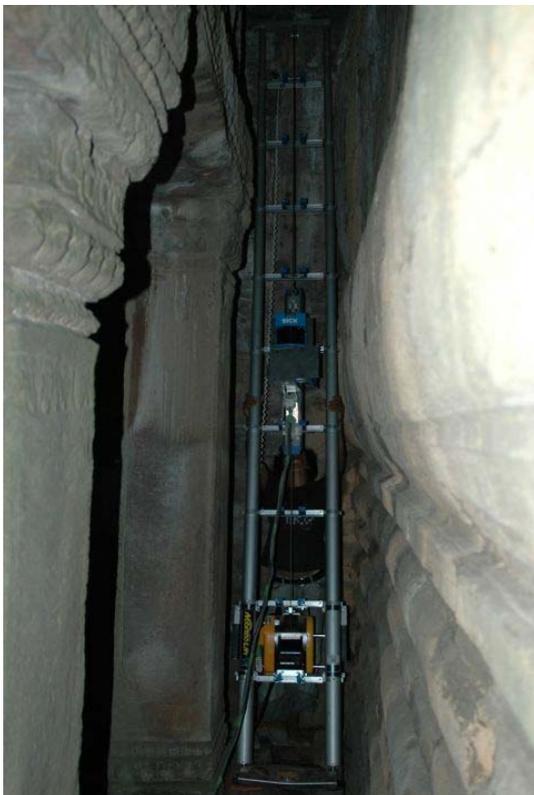
基準となるモデルには、商用レーザレンジセンサ (Cyrax 2500) から得られる距離画像を用いた。Cyrax 2500 は地上固定型であることに加え、奥行き方向の精度が ± 6 mm であ



(a) 北経蔵北東部・垂直に近い設置



(b) テラスと内回廊の隙間部



(c) 特に狭隘な箇所



(d) 水平に近い設置

図 3.8 梯子式レーザ計測システムによる計測の様子

り、LMS200の精度に対して十分に高いことから基準となる正確なモデルと見なした。

位置合わせのアルゴリズムには Iterative Closest Point (ICP) 法 [34, 53] を用いた。位置合わせ処理は安定に収束した。図 3.12 に位置合わせ結果の例を示す。

本システムによるモデルどうしの整合性

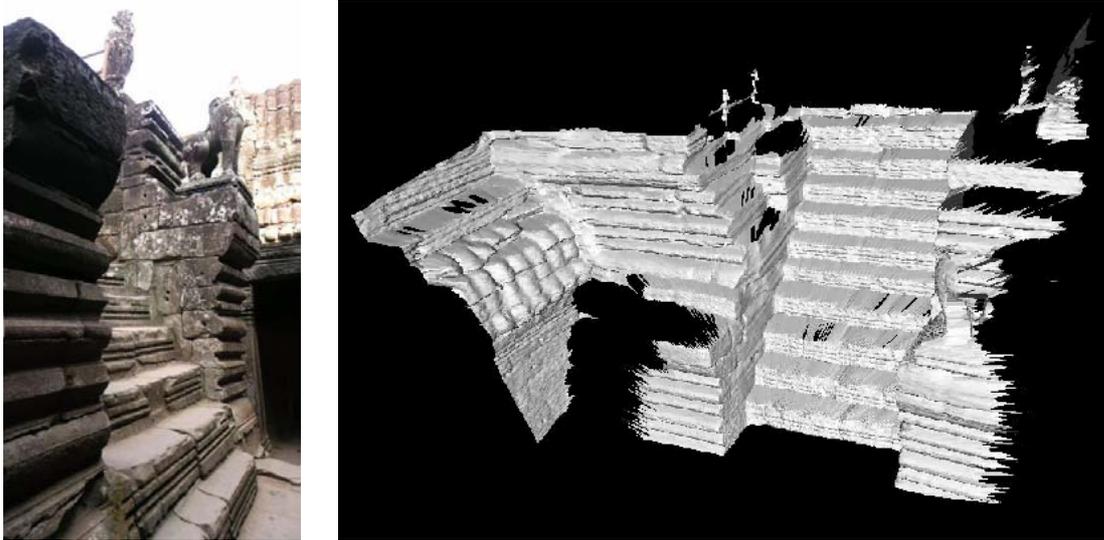
梯子式センサから得られる複数のモデル結果のうち、計測対象にオーバーラップがあり、かつ本提案手法によるセンサユニットの推定移動速度が大きく異なったデータから得られたモデルどうしの位置合わせを行った。

図 3.13 は、推定移動速度がそれぞれ 0.3504 m/s, 0.4081 m/s である 2 つのモデルの位置合わせ結果である。なお、梯子形リフトの仕様書に記載されているウィンチの巻き上げ速度は 0.4167 m/s である。この場合も位置合わせ処理は安定に収束し、それぞれのモデルは問題なく位置合わせされた。

3.5 まとめ

本章では、梯子式レーザ計測システムという新たな計測機構の開発を行った。このセンサを用いることにより、従来の商用センサでは設置箇所の空間的制約や視野角の限界により計測が困難あるいは非常に非効率であった狭隘部を効率的に計測することができる。移動体からの計測における問題点として挙げられる自己位置の推定に関しては、移動方向と平行方向にラインスキャンを行うことにより、誤差を蓄積させず、より正確な速度を求める手法を提案した。

梯子式センサから得られる距離画像と地上固定型センサから得られる距離画像の対応が十分に取れていることから、移動体の速度が十分な精度で算出されていることを確認した。また、梯子式センサから得られる 2 枚の距離画像に関して、算出される速度が異なった場合においても位置合わせされることから算出速度の精度が高いことを確認した。



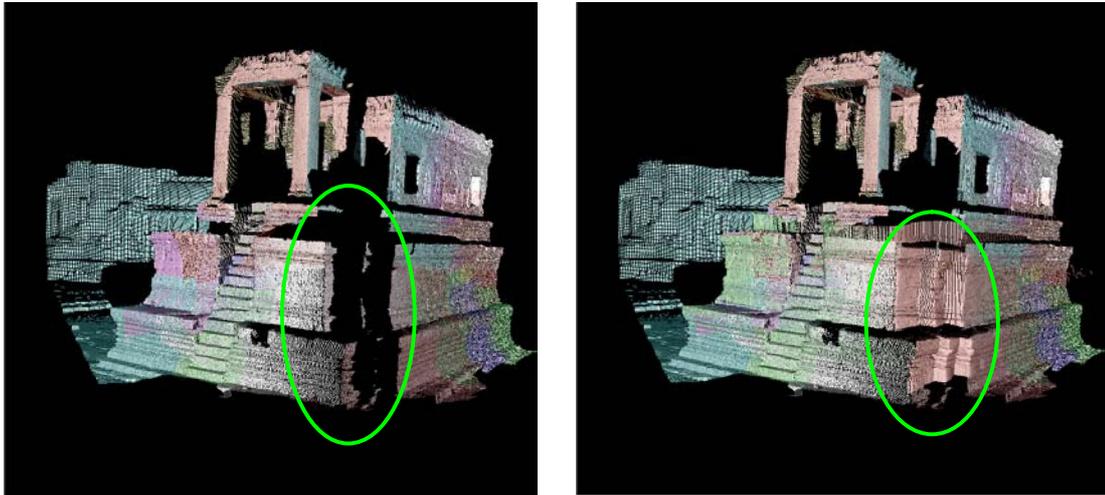
(a) 計測対象

(b) モデリング結果

図 3.9 バイヨン寺院・テラスと内回廊間のモデリング結果



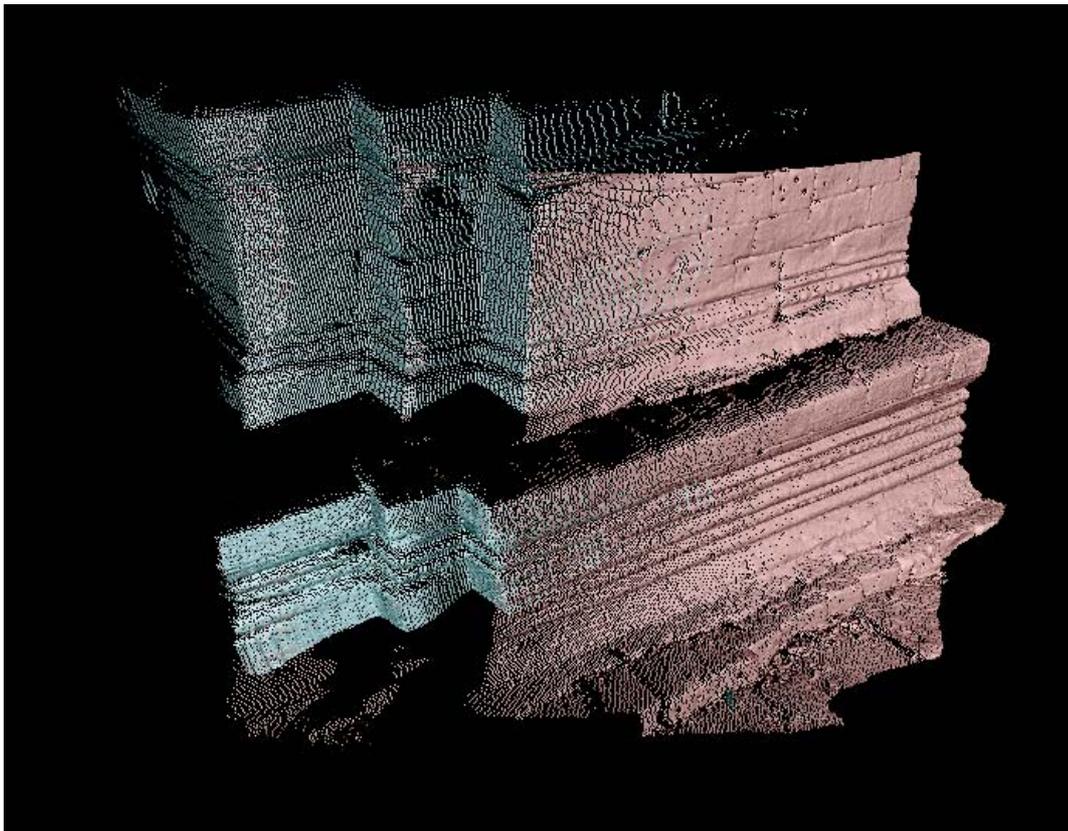
図 3.10 梯子式レーザ計測システムによる内回廊間の全計測結果



(a) 計測前．従来のセンサにより
計測困難な箇所が欠損している

(b) 計測後．欠損部分を補完した．

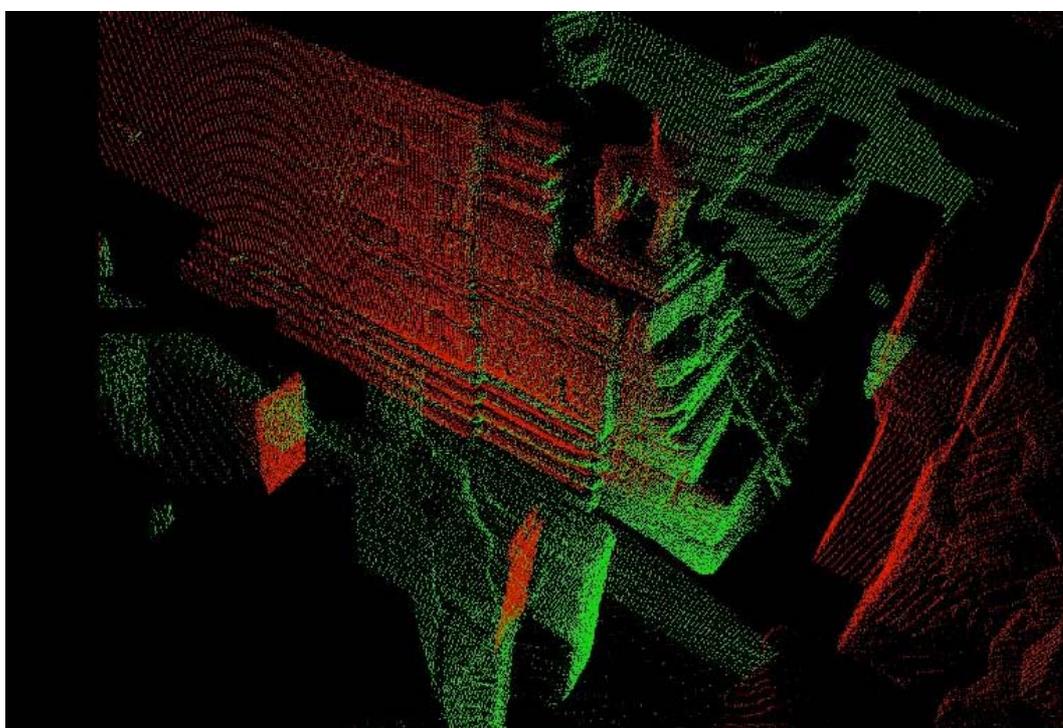
図 3.11 バイヨン寺院・北経蔵の北東部分のモデリング結果



水色点：梯子式センサによるモデル

桃色点：固定設置型センサによるモデル

図 3.12 梯子式センサから得られたモデルと固定設置型センサから得られたモデル
を位置合わせした結果



	緑点：モデル1	赤点：モデル2	仕様書の値
推定速度 (m/s)	0.3504	0.4081	0.4167

図 3.13 異なる速度から得られたモデルどうしを位置合わせした結果

第 4 章

濃淡画像の時空間解析による複数カメラ画像の統合

4.1 はじめに

デジタル撮影装置やコンピュータの発展にともない，全方位画像の合成に関する研究が盛んに行われてきている．全方位画像は半球または全周囲に渡る方向の光線を記録した画像であり，さまざまな応用が考えられることから，これを高い品質で，効率よく，簡便に得ることは非常に重要なことである．

本章では，時空間画像解析を利用して複数のビデオカメラ映像から歪みのない全方位画像を合成する新しい手法を提案する．これまで時空間画像に関する研究は盛んに行われてきたが，それらが対象としていたのは主にシーンの三次元形状復元やカメラの動き推定，新しい見えの合成などであり，また単一のカメラのみを取り扱っていることが多かった．これらとは対照的に，本手法では基本的に複数カメラの画像を同時に解析し，それらの外部パラメータ・同期パラメータを推定する．

本手法において鍵となる新しい概念は，従来の直方体ボリュームではなく，球体による時空間画像の表現である．球体時空間表現では，カメラ画像を投影して得られる時空間ボリュームの形状が，カメラの原点周りの回転に関して不変となることが示される．従って，複数の時空間ボリュームを球体時空間上において位置合わせすることにより，カメラの外部パラメータおよび同期パラメータが同時に求められ，キャリブレーションをすることなく配置した複数のカメラから歪みのない全方位画像を直接に合成できる．

4.2 関連研究

本章における関連研究としては，以下の二つが挙げられる．

1. 全方位画像の合成
2. 濃淡画像の時空間解析

1. は目的に関するもの、2. は手段に関するものである。ここではこれらの研究例について述べ、本論文で提案する手法との違いを明らかにする。

4.2.1 全方位画像の合成

全方位画像を合成する方法は主に二通りある。

一台のカメラと曲面鏡を用いた方法

代表的な全方位撮影システムとして、一台のカメラと鏡を組み合わせたものがある。これは、カメラの前に置いた曲面鏡により周囲の光線をレンズに集約することで全方位を撮影できるようにしたものである。曲面としては、放物面 [61] や双曲面 [62, 73, 68]、円錐面 [69] などを用いるものが提案されている。

これらのシステムでは一度の撮影で水平方向 360° 全ての方向の画像を撮影できるため、時間的・空間的な整合性を保ちながら連続画像データを取得することが可能である。その反面、特殊な形状である曲面上に写った画像を透視投影画像などの一般的な形式に変換するための処理が必要となるほか、光線の方向によって得られる全方位画像の解像度が著しく異なり、画像全体の解像度も比較的低下する問題点がある。

複数台のカメラ画像をつなぎ合わせる方法

いま一つは、光軸を放射状に向けて配置した複数台のカメラ画像をつなぎ合わせる方法である。このようなシステムとしては [70, 71, 72] などが提案されている。これらの方法では解像度の問題を解決することができるが、通常、各カメラの光学中心を一致させることは困難であることが多い。後述のように、複数カメラのカメラの光学中心が一致していない状況では、統合画像に歪みが生じることが知られている。加えて、各カメラの同期をとるためには外部装置を用いるのが一般的であり、それを使わずに同期をとることは困難である。

製品化されたものとしては 6 台の小型 CCD カメラを 10 cm 角程度のユニットに納めた LadyBug / LadyBug2 が開発されている。このシステムでは水平方向の全周囲を約 3800 ピクセルの解像度で取得できる。この解像度は用途によっては充分であるものの、光学中心のずれによる歪みを抑えたまま解像度をこれ以上に高くすることは、物理的な配置制約から困難であると考えられる。

さらには、60 個の CCD を 3 個 1 組とした 20 組のステレオカメラユニットとして

用い、全周囲のカラー画像と距離画像を取得できる全方向ステレオシステム (Stereo Omnidirectional System, SOS) [74, 75] も開発されている。このシステムでは、各ユニットを正二十面体上に配置することで天頂・底部を全領域を一様な精度でリアルタイムに計測することが可能であり、カラー画像情報のみならず、形状情報も同時に取得することによって歪みの問題を解決している。さらに、これを小型軽量化し移動体に搭載する miniSOS [76] も開発されている。しかし、これらのシステムは多数の CCD カメラを使用するため高価であり、カメラの設置方法も特殊であると言える。

4.2.2 動画像の時空間解析

ビデオカメラから得られた濃淡画像の時空間解析に関する研究はこれまでも数多く行われてきた。例えば近年では、Rav-Acha らは時空間ボリュームを利用して、シーン中のそれぞれの領域が独立した時刻に撮影されたような動的なシーンを対象としてパノラマ映像を合成している [64, 65]。また、Wexler, Simakov らは scene manifold と呼ばれる概念を新たに導入している [67]。これは時空間ボリュームの水平断面において、見かけに関する整合性が最適となるような経路を算出し、その経路によって時空間ボリュームを切断するものである。また、動画像のモザイクングに関して Steedly らは、適応的にキーフレームを選別することにより、安定して高速に動画像の各フレームをつなぎ合わせる手法を提案している [66]。

しかしながら、これまでに行われてきた研究の多くは、シーンの三次元形状復元や、カメラの動き推定、新しい見えの合成などを主な目的としており、また単一の映像のみを取り扱っていることが多かった。

これに対し本論文では、時空間画像解析を通して複数カメラの関係、具体的にはカメラの空間（外部）パラメータと同期（時間）パラメータの推定を行い、その画像を統合して全方位画像を合成することを提案する。

4.3 動画像における時空間の表現形

画像の統合を行うに先立って、まず、動画像における空間および時間の表現形について整理する。一般に動画像は、それ自体を一つの「時空間ボリューム」で表現することができる。従来は単純に画像列を並べた直方体のボリュームのみが考えられてきた。ここではそれを更に円筒（円柱）や球体に拡張し、それぞれの表現方法における特徴を明らかにする。

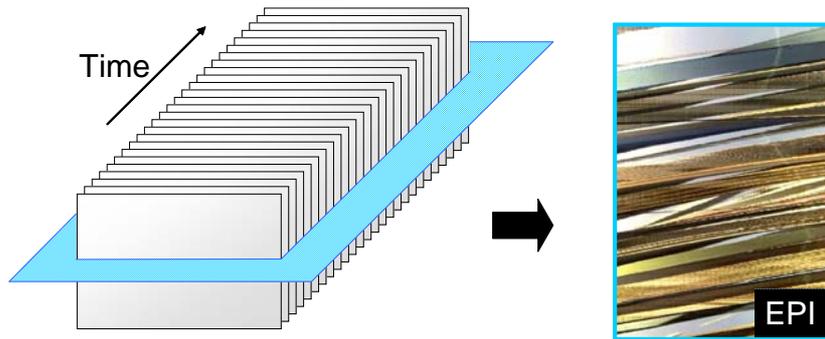


図 4.1 動画における一般的な時空間の表現形とエピポーラ平面画像 (EPI)

4.3.1 通常表現

もっとも一般的な表現形は、図 4.1 に示すような直方体のボリュームによるものである。このボリュームは単に画像列を画像平面に直行する時間軸に沿って並べることで構成されている。また、これらの画像列が水平運動をするカメラから撮影されたものである場合、ボリュームの水平断面に現れる画像は、いわゆるエピポーラ平面画像 (EPI) になることが知られている。

しかしながら、このような時空間の表現方法は、正射影の場合を除き、単一のカメラ画像を扱う場合にのみ有効である。すなわち、複数のカメラ間において共通の座標系が考慮されていないため、ボリュームどうしの関係を考慮することが不可能である。

4.3.2 平面投影を介した表現

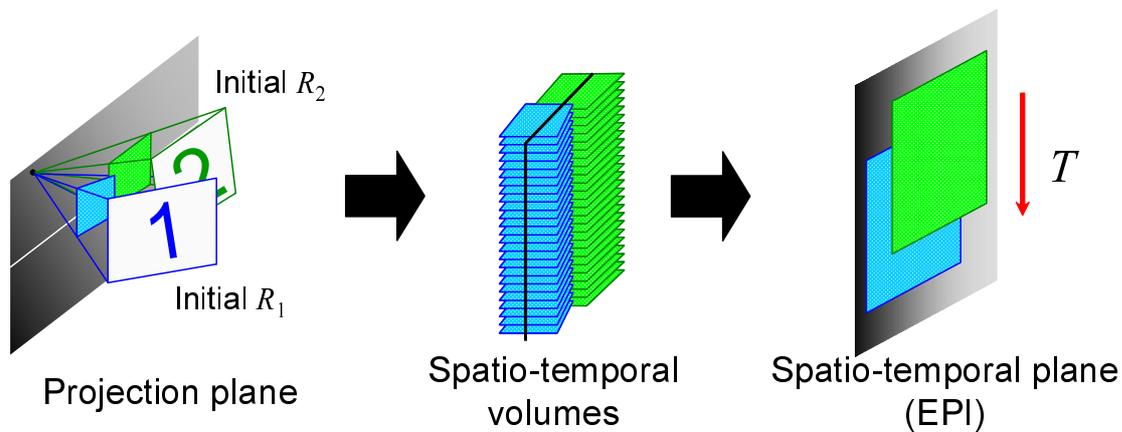
もっとも簡単な共通座標の導入方法として、図 4.2 のようにカメラ画像を仮想的な共通平面にいったん投影し、投影画像から時空間ボリュームを構成する方法が考えられる。この場合も、カメラが移動していれば、

- 運動平面によってボリュームを切断して得られる断面画像 (図 4.2(a))
- 平面投影画像を運動平面によって切断した線状画像を並べた画像 (図 4.2(b))

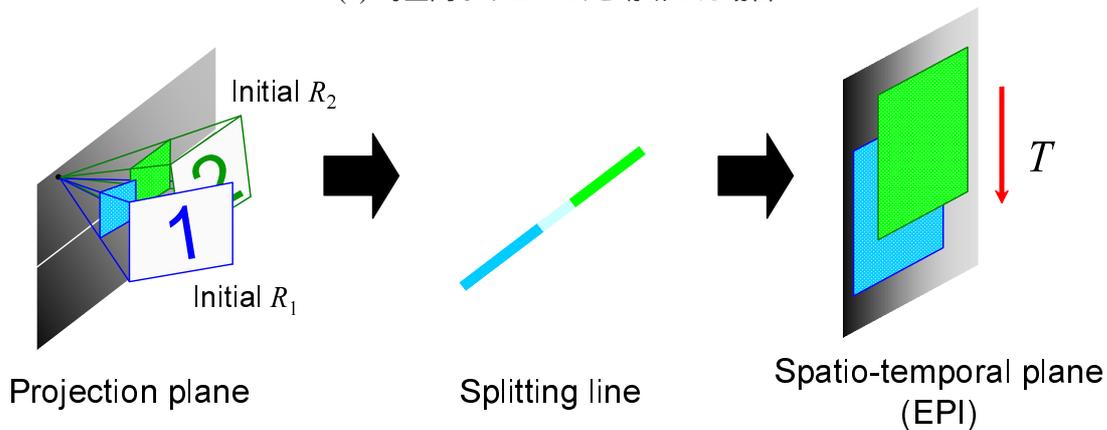
は EPI になる。この両者は切断の順序が異なるだけで本質的には同じである。

このような共通面への投影を介した表現形では、複数のカメラによる時空間ボリュームの関係性を考慮することができ、例えば、各々のボリュームを動かしながらマッチする箇所を探すといった処理も可能になる。

ここで注意すべきは、共通平面を導入したために、カメラの外部パラメータをその平面对して変更すると、その投影した画像の形状が変化し、従って時空間ボリュームおよ



(a) 時空間ボリュームを切断した場合



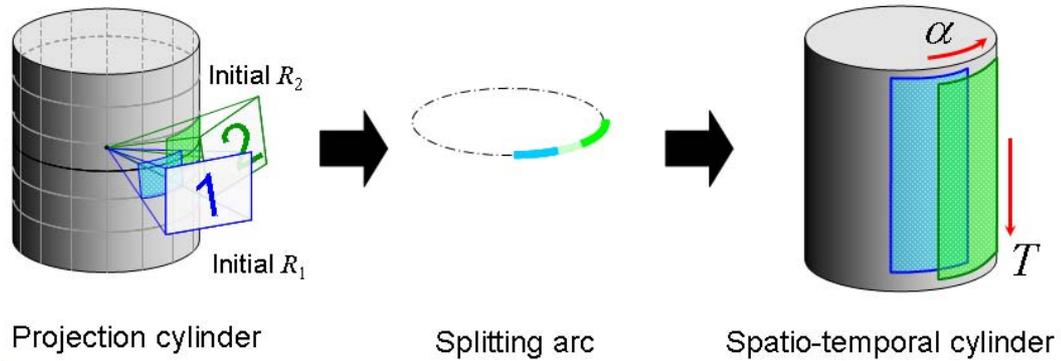
(b) 切断した投影画像を時間軸に沿って並べた場合

図 4.2 平面投影を介した時空間画像の表現形

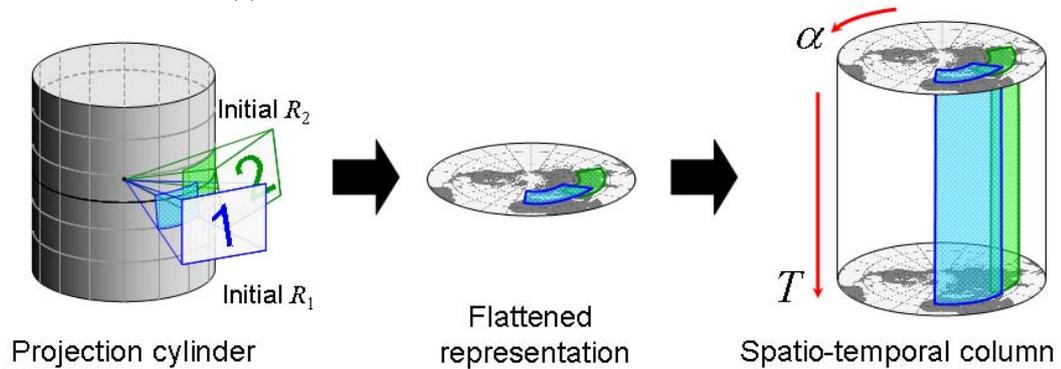
び EPI の形状も変化してしまうことである。すなわち、平面投影を介した表現形では、時空間ボリュームの形状は外部パラメータの推移に関して変化する。

一方で、時間方向の推移はどうであろうか。時間方向の推移は、時空間ボリュームを時間軸方向に移動させると考えることもできるし、ボリューム内部の画像列を時間推移に応じて描き替えるとも考えることもできる（本質的には同じである）が、いずれにしても外部パラメータの場合とは異なり、時空間ボリュームの形状は変化しない。本論文では、このように「変化させても時空間ボリュームの形状が不変のまま保たれるようなパラメータ」を自由なパラメータ、あるいは自由パラメータと呼ぶことにする。平面投影による時空間の表現においては、時刻 T が自由パラメータである。

Kawasaki らによって提案された EPI を用いた複数ビデオカメラのキャリブレーション手法は、この表現方法を使用して複数カメラの EPI を時間軸方向にシフトさせながら同期パラメータを算出するものであると言える。その詳しい方法については後述する。



(a) 切断した投影画像を時間軸に沿って並べた場合



(b) 投影画像を変形させてから時空間ボリュームを構成した場合

図 4.3 円筒面投影を介した時空間画像の表現形

4.3.3 円筒面投影を介した表現

時空間を表現する別の形として、図 4.3 のように中心軸がカメラの光学中心を通過するような円筒面を考え、その円筒面にカメラ画像を投影してから時空間ボリュームを構成することも考えられる。図 4.3(a) では切断した投影画像を時間軸に沿って並べており、図 4.3(b) は便宜上、円筒を円盤で表現し、円柱状のボリュームにより時空間を表現している。図 4.3(b) のような円柱は、同心円筒によって切断するとその断面に EPI が現れ、半径方向に切断すれば Panoramic View Image (PVI) が得られるという特徴がある [58]。ここではこのような円柱を時空間円柱と呼ぶこととする。その実例を図 4.4 に示す。

この表現形においては、投影円筒の軸まわりにカメラを回転（方位角を変更，Pan）しても時空間ボリュームの形状は変化しない。自由パラメータは以下の 2 つである。

- 時刻： T
- 方位角 (Pan)： α

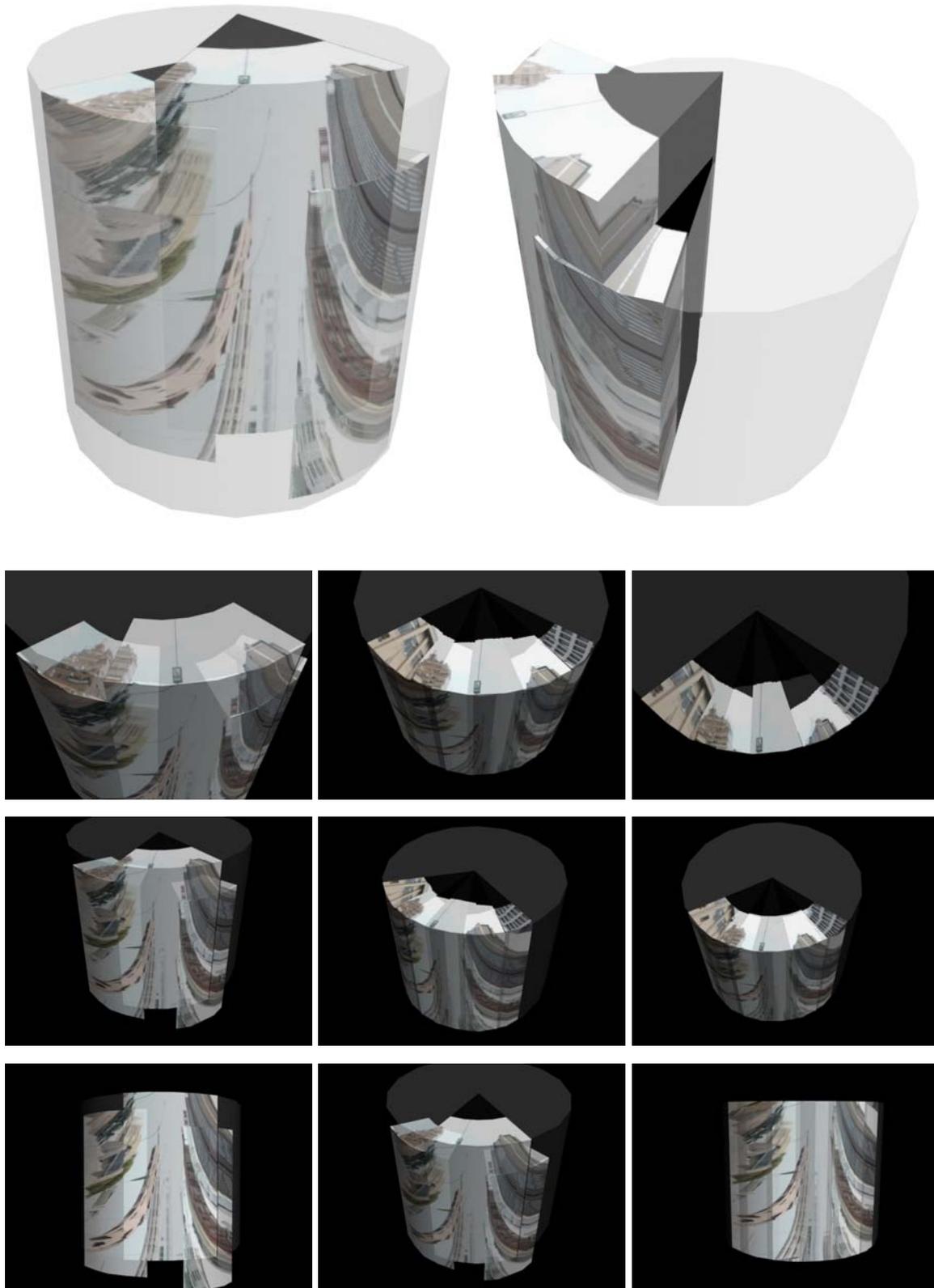


図 4.4 時空間円柱の例

4.3.4 球面投影を介した表現

さらに別の表現形として、球面投影を介して球体により時空間を表現する方法も考えられる。この表現方法では、まず、中心がカメラの光学中心にあるような球面を考え、その球面にカメラ画像を投影する。時間軸を半径方向（球の中心から外へ向かう方向）に定義すると、時空間を球体によって表現することができる。図 4.5 にこの表現方法の概念図を示す。前節に述べた円柱の場合と同様に、時空間ボリュームの断面には EPI または PVI を変形させた模様が現れる。

この表現方法の最大の特徴は、原点の周りの任意の回転に関して時空間ボリュームの形状が不変になることである。すなわち自由パラメータは以下の4つである。

- 時刻： T
- 方位角 (Pan)： α
- 天頂角あるいは仰角 (Tilt)： β
- 光軸周りの回転角 (Roll)： γ

本論文ではこのような時空間の表現形を球体時空間表現と呼び、この球を時空間球体と呼ぶこととする。図 4.6 に時空間球体の実例を示す。

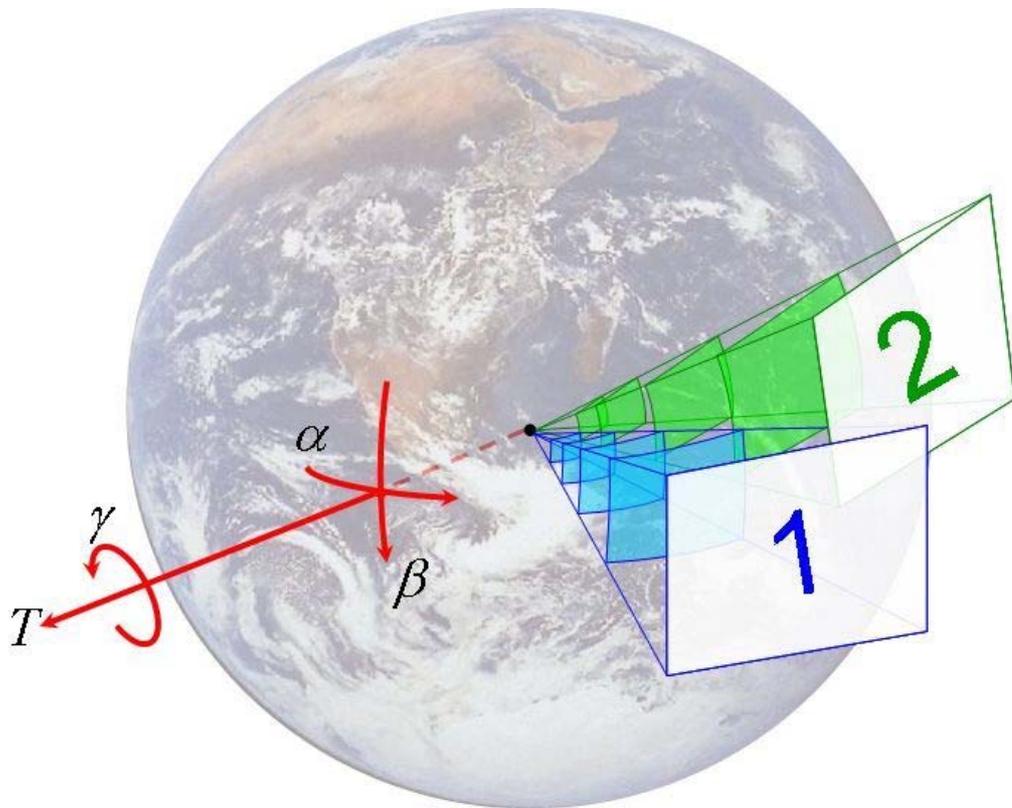


図 4.5 球面投影を介した時空間画像の表現形（球体時空間表現）



図 4.6 時空間球体の例

表 4.1 各時空間表現形における自由パラメータの個数

	時間	空間（回転）	合計
平面投影による時空間表現	1	0	1
円筒面投影による時空間表現	1	1	2
球面投影による時空間表現	1	3	4

4.3.5 時空間表現形のまとめとカメラキャリブレーションへの応用

時空間表現形のまとめ

これまでに述べた動画像における時空間の表現形において、時空間ボリュームの形状を不変に保てるようなパラメータ、すなわち自由パラメータは異なっている。その個数と種類をまとめると表 4.1 のようになる。

カメラキャリブレーションと画像統合への応用

ところで、複数のカメラから得られた個々の時空間ボリュームでは、内部に全く同じカラーパターンが現れることがある。これは、各ボリュームに記録された光線が複数カメラ間で共有されている場合に発生する。具体的には以下のような場合である。

1. 対象シーンが動的なとき：
 - 複数カメラの光学中心が同時に同じ位置にあり、
 - 撮影方向の画角にオーバーラップがある。
2. 対象シーンが静的なとき：
 - 複数カメラの光学中心が任意の時間差をおいて同じ位置にあり、
 - 撮影方向の画角にオーバーラップがある。

このような条件下で撮影された複数のカメラ画像列が構成する時空間ボリュームは、自由パラメータをシフトさせながらボリューム対ボリュームのマッチングを行うことによってかならず位置を合わせることができ、なおかつその結果がカメラ画像の空間的・時間的なキャリブレーションおよび画像統合結果となっている。

この手法の利点は、従来の Shape-from-Motion などをはじめとした時空間画像解析法とは異なり、対応点探索の必要がなく、ブロックマッチベースのロバストな手法により実現することが可能である。

4.4 複数時空間ボリュームの同時解析による画像統合

4.4.1 複数ビデオカメラの時空間キャリブレーション

通常、カメラのキャリブレーションとは、カメラの位置・姿勢、および画像面への射影に関するパラメータを求めることであるが、複数のカメラで動画像を撮影し、それらの動画像から画像統合を行う場合においては以下のように整理できる。

- 空間的キャリブレーション
 - 内部パラメータ（焦点距離，画像中心など）
 - 外部パラメータ（回転行列，並進ベクトル）
- 時間的キャリブレーション
 - 時間パラメータ（カメラ間の時間的対応関係）

空間的キャリブレーションは従来の定義と同様である。時間的キャリブレーションとは、各カメラ間における時間的な対応関係、すなわちカメラ m のローカル時刻 τ_m における画像とカメラ n のローカル時刻 τ_n における画像がグローバル時刻 T において対応するとき、その関係

$$\delta_{m,n}(T) = \tau_m(T) - \tau_n(T) \quad (4.1)$$

を求めることを意味する。時間パラメータは広義の外部パラメータに属するとも考えられるが、ここでは別個のものとする。

したがって、 N 台のビデオカメラのパラメータは、内部行列を A ，世界座標をカメラ座標に変換する回転行列，並進ベクトルを ${}^wR, {}^wt$ として以下のようなになる。

$$\begin{array}{cccc} A_1, & {}^wR_1(T), & {}^wt_1(T), & \delta_{1,1}(T) \equiv 0, \\ A_2, & {}^wR_2(T), & {}^wt_2(T), & \delta_{2,1}(T), \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_N, & {}^wR_N(T), & {}^wt_N(T), & \delta_{N,1}(T) \end{array} \quad (4.2)$$

本論文では、これらのパラメータを複数カメラの時空間パラメータと呼び、これらを求めることをカメラの時空間キャリブレーションと呼ぶこととする。

4.4.2 画像統合と光学中心

カメラの光学中心と統合画像における歪み

画像統合とは、本来、複数枚の画像を接合して1枚の画像にまとめることを意味する。一般に、カメラによって撮影された透視投影画像どうしを統合する場合は、カメラの光学

中心が一致している必要がある。例えば図 4.7 のようなカメラ配置により 2 本の円柱を撮影した場合、カメラ A, B の画像は歪みなく統合されるが、A, C の画像は一方の円柱に合わせて画像統合を行うと他方の円柱が 2 カ所に出現し、歪みとなる。このような場合は、対象の三次元形状情報などを利用して補正を行う必要がある。

通常、カメラの光学中心はカメラ内部に存在するため、複数のカメラにおいてそれらを一致させることは物理的に困難であることが多い。

時空間における光学中心の一致

しかし、対象となるシーンが静的であると見なせる場合は、時間差をつけて光学中心を一致させることは可能である。例えば図 4.8 のようにカメラ A, B, C を直線に沿って平行に移動させた場合、ある一時刻 (Time = 0) では光学中心を空間的に一致させることができなくとも、時刻 t_1 におけるカメラ A, t_2 における B, t_3 における C は光学中心が一致している。本論文ではこのように時間差をもって光学中心を一致させることを、ある瞬間において空間的に光学中心が一致する場合と特に区別して時空間における光学中心の一致と呼ぶこととする。

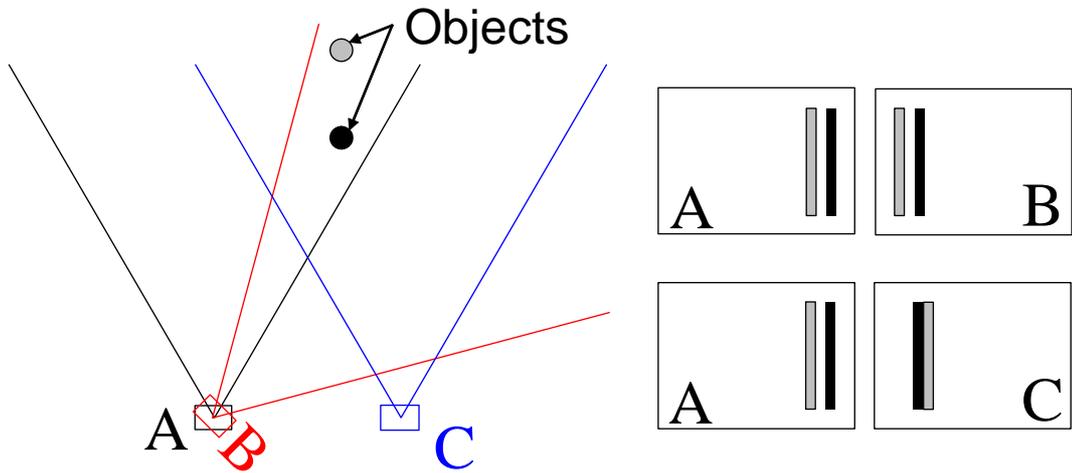


図 4.7 カメラの光学中心と統合画像における歪み

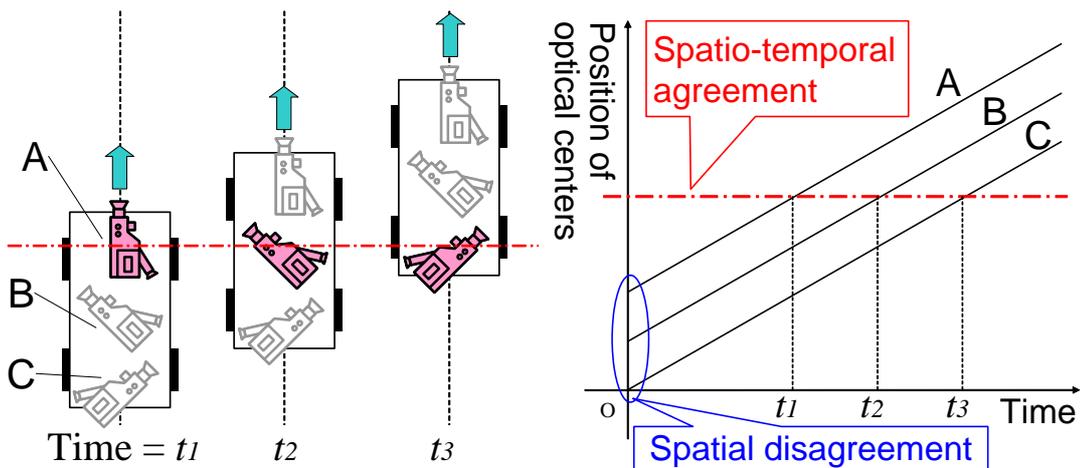


図 4.8 時空間における光学中心の一致

4.4.3 カメラの設置・配置方法（コンフィギュレーション）

さて、複数の時空間ボリュームを同時に解析してカメラの時空間パラメータを求め、画像統合を行うためには、複数カメラな適切な設置・配置方法(コンフィギュレーション)を考える必要がある。このコンフィギュレーションに求められる条件は以下の通りである。

- 各表現形における、自由パラメータ以外の外部パラメータは各カメラに共通である。
- カメラの光学中心を時空間的に一致させることができる。

このような条件を満たすコンフィギュレーションは、既に Kawasaki らによって提案されており [60]、本論文でもこのコンフィギュレーションを利用することとする。

具体的には、図 4.9(a) に示すように、9 台のカメラを平行に一直線上に並べて配置する。移動体としては自動車車両を想定するが、本論文で提案する手法は特定の移動体に限定されるものではない。

各カメラの光学中心は空間的には一致していないが、車両が前進するにしたがって光学中心はそれぞれ異なった時刻に置いて一致することができる。各カメラの光軸をそれぞれ放射状に向けておけば、撮影経路上においてそれぞれの方向のカメラ画像を獲得することができる。これらの画像列からは光学中心の不一致に伴う歪みを含まない全方位画像を合成することが可能となる。

なお、座標系としては図 4.10 のように第 1 のカメラの光学中心を原点とし、車両進行方向を y 軸とする基準直行座標系 Σ をとる。以下ではこの座標系における統合画像を車両の走行経路に沿った各地点で合成するものとする。

4.4.4 仮定条件とパラメータの整理

カメラの設置および運動に関する条件

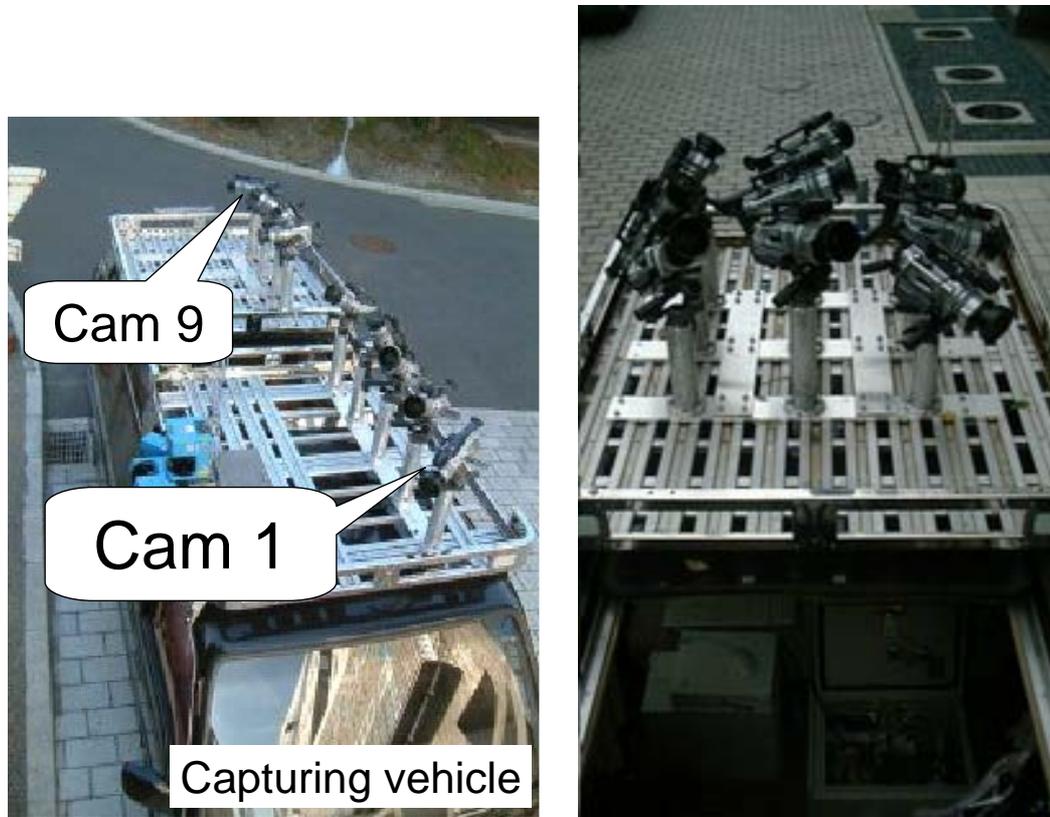
議論を簡単にするため、以下ではまず、

条件 C_1 各光学中心は進行方向直線上に並んでいる

条件 C_2 車両は直線運動をする

条件 C_3 車両は等速運動をする

という条件の下で以降の議論を展開し、実験を行う。後に実環境において運用する一般的な場合について述べる。カメラおよび対象物体の位置関係と画像統合における歪みの大きさについては 4.6 で評価を行う。



(a) 提案手法

(b) 従来の典型例

図 4.9 複数カメラのコンフィギュレーション

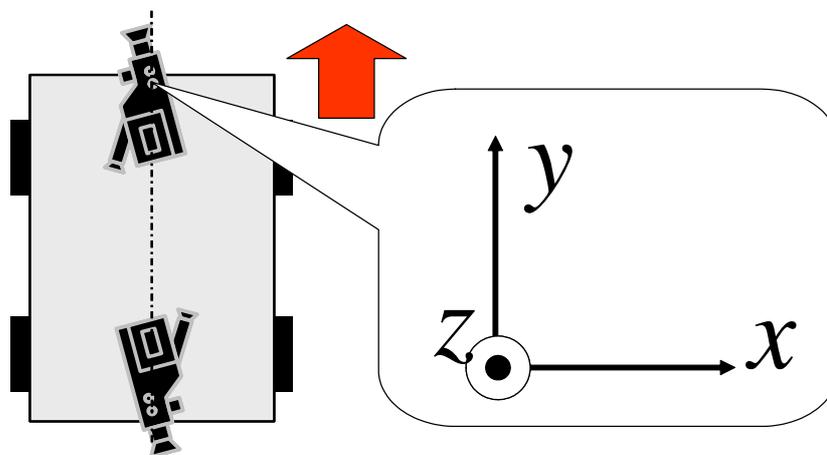


図 4.10 基準座標系

本条件における時空間パラメータの整理

したがって、統合画像を合成するためには式 (4.2) すべてのパラメータが必要な訳ではない。

まず回転行列は、世界座標系に対する行列 ${}^w R_n$ ではなく、 Σ に対する行列 R_n を求めれば必要十分である。この行列は時刻 T に依存しない。

次に並進ベクトルであるが、条件 C_1, C_2 の下では各カメラは配置間隔に拘わらず適当な時間後に第 1 のカメラと同じ位置を通過し、その時点での各撮影画像が統合画像を構成する。故に、並進ベクトルは時間パラメータ $\delta_{n,1}(T)$ 内に集約されることになる。さらに、条件 C_3 の下では $\delta_{n,1}(T)$ は定数 $\delta_{n,1}$ となる。

最終的には、求めるべき時空間パラメータは以下ようになる。

$$\begin{array}{lll} A_1, & R_1, & \delta_{1,1} \equiv 0, \\ A_2, & R_2, & \delta_{2,1}, \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_N, & R_N, & \delta_{N,1} \end{array} \quad (4.3)$$

4.4.5 複数の時空間ボリュームを利用したカメラパラメータの推定

ここでは、複数の時空間ボリュームを利用したカメラパラメータの具体的な推定方法について述べる。

概要

方法の概要は以下の通りである。

1. 内部パラメータ A_1, \dots, A_N を求める。
2. 円筒面または球面を仮定し、時空間ボリューム V_1, V_2, \dots, V_N を構成する。
3. 撮影画角にオーバーラップがある 2 つのボリューム V_m, V_n について、自由パラメータをシフトさせながらマッチングを行い、 $R_m, \delta_{m,n}$ を同時に求める。

まず、内部パラメータに関しては、植芝らのカメラキャリブレーション手法 [78] などを利用してあらかじめ求めておく。内部パラメータが求まれば、投影によって時空間ボリュームを構成することができる。

複数のカメラによって水平包囲を全てカバーできている場合は、全ての重なりを持つボリューム対に関して同時にマッチング評価を行うものとする。そうでない場合は、適当な 1 つのカメラ k の回転行列 R_k のみを別の手法により与える。これには H. Maitre らによる消失点を用いた導出手法 [77] を利用する。

マッチングによって求まる時間パラメータは $\delta_{m,n}$ である． $\delta_{m,1}$ は

$$\begin{aligned}\delta_{m,1} &= \delta_{m,n} + \delta_{n,1} \\ &= \delta_{m,n} + \delta_{n,l} + \delta_{l,1} \\ &= \dots\end{aligned}\tag{4.4}$$

および

$$\delta_{1,1} = 0\tag{4.5}$$

により求められる．

ボリュームマッチングによる時空間パラメータの同時推定

マッチングは2つの時空間ボリューム F, G において自由パラメータを推移させながら，相関係数が最大になる箇所を探索する．相関係数は以下の式で表される．

$$S(F, G) = \frac{\overline{F \cdot G} - \bar{F} \cdot \bar{G}}{\sqrt{F^2 - \bar{F}^2} \sqrt{G^2 - \bar{G}^2}}\tag{4.6}$$

ここで， \bar{X} は，2つのボリュームの重なり部分において X の平均をとることを意味する．

図 4.11 にマッチングの様子，およびマッチング後の断面図のイメージを示す．

カメラの時空間パラメータ $A_n, R_n, \delta_{n,1} (n = 1, \dots, N)$ が求まると，統合されたカメラ画像は時空間円筒または時空間球の表面から直接に得られる．これは，時空間円筒または時空間球上のテクスチャそのものが統合された画像を表しているからである．この具体例は図 4.15(a) および 図 4.17(a) を参照されたい．

本手法の特徴

この手法の特徴的な点として以下が挙げられる．

1. ブロックマッチングによりラスタ的に比較を行うため，特徴点の抽出や追従を行う必要がない．
2. ボリューム間には空間方向の重なり以外にも時間方向の重なりが存在し，マッチングに有効である．

1. は Shape-from-Motion をはじめとした既存の時空間解析手法とは異なる点である．
2. は，カメラどうしの画角に関するオーバーラップが少なくても済むことを意味する．従って，カメラを設置する際も厳密な向き調整を行う必要がない．

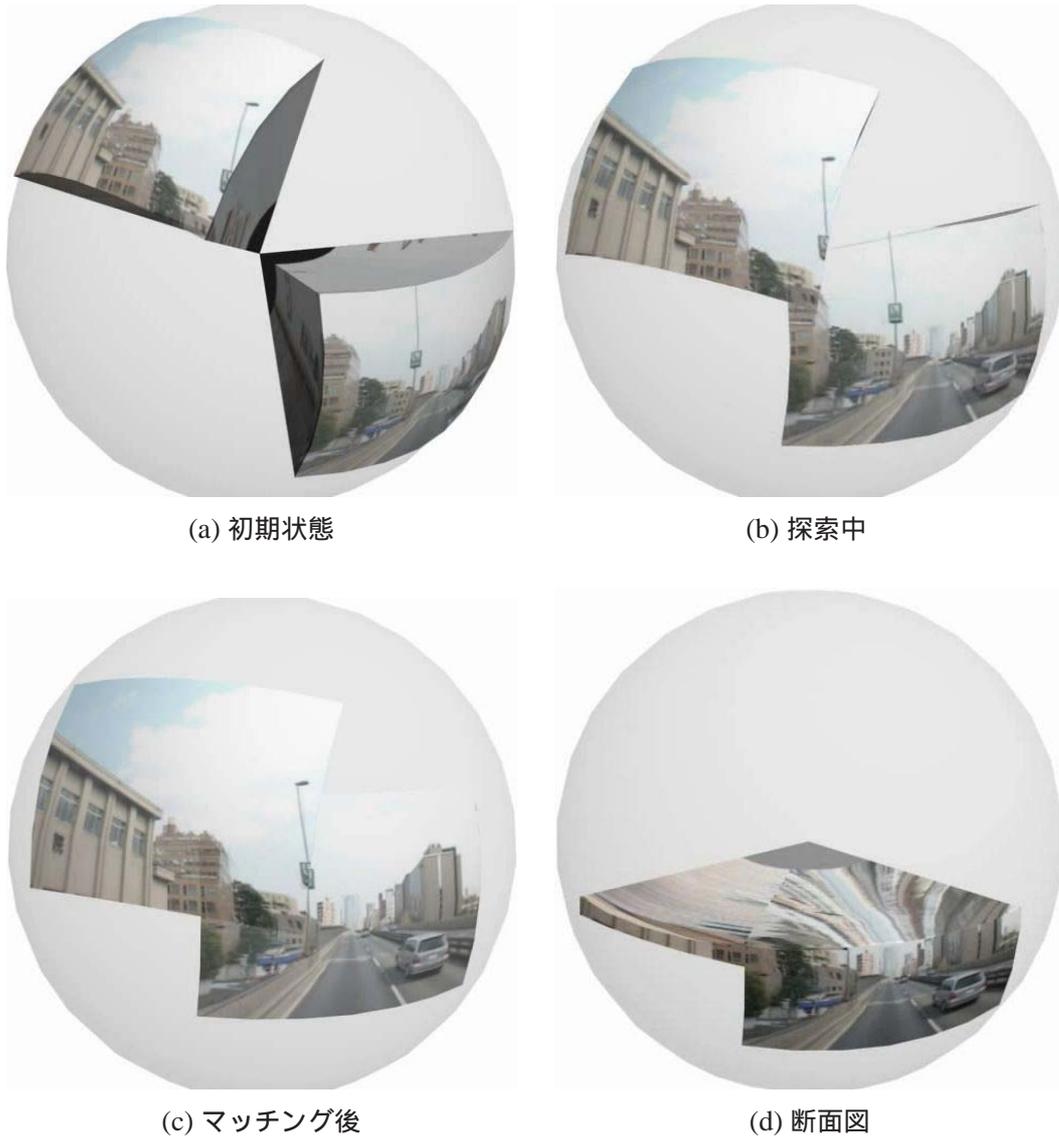


図 4.11 マッチングの様子およびマッチング後の断面図（イメージ図）

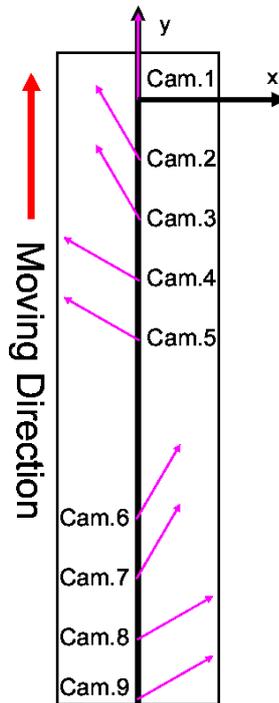


図 4.12 カメラのおおよその配置図

4.5 実験

提案手法の有効性を確認するため、実際に車両によって公道上を走行しながら 9 台のカメラにより撮影を行い、その画像列を統合する実験を行った。

4.5.1 内容

実験の内容、および条件等は以下の通りである。

撮影走行

- ビデオカメラ：SONY-VX2000
- カメラ配置：図 4.12 および表 4.2 の通り。
- 撮影経路：首都高速道路 3 号線，渋谷 霞ヶ関付近
- 走行速度：約 60 km/h

表 4.2 カメラの配置条件

カメラ No.	おおよその位置		おおよその向き	
	x (cm)	y (cm)	方位角	仰角
1	0	0	90°	中
2	0	-30	120°	中
3	0	-60	120°	高
4	0	-90	150°	中
5	0	-120	150°	高
6	0	-213	60°	中
7	0	-243	60°	高
8	0	-273	30°	中
9	0	-309	30°	高

表 4.3 実験の内容

実験 No.	時空間の表現形	推移させるパラメータ	探索空間の次元
1	円柱	時間 T , 方位角 α	2
2	球体	時間 T , 方位角 α , 仰角 β	3

画像統合

円筒時空間表現, 球体時空間表現の双方を用いて時空間ボリュームマッチングおよび画像統合実験を行った. 実験内容を表 4.3 にまとめる. 推移させるパラメータとして示されている以外の自由パラメータに関しては, 初期値として与えるものとした.

4.5.2 結果

実験1において3つの時空間ボリュームを円筒時空間表現においてマッチングした結果の例を図4.13に示す。このケースでは、時空間ボリュームは円筒の経度方向の回転(α)および時間方向(T)に関して推移させている。図4.13(b)に示すとおり、これらの画像はすべて歪みのない単一のパノラマ画像に統合することができており、各カメラ画像の空間的な整合性をとることができている。また、図4.13(c)には、時空間円筒の同心円によって時空間ボリュームの重なり部分を切断した断面の様子を示す。これは各画像列が空間的な整合性に加えて時間的な整合性をとることができていることを示すものである。

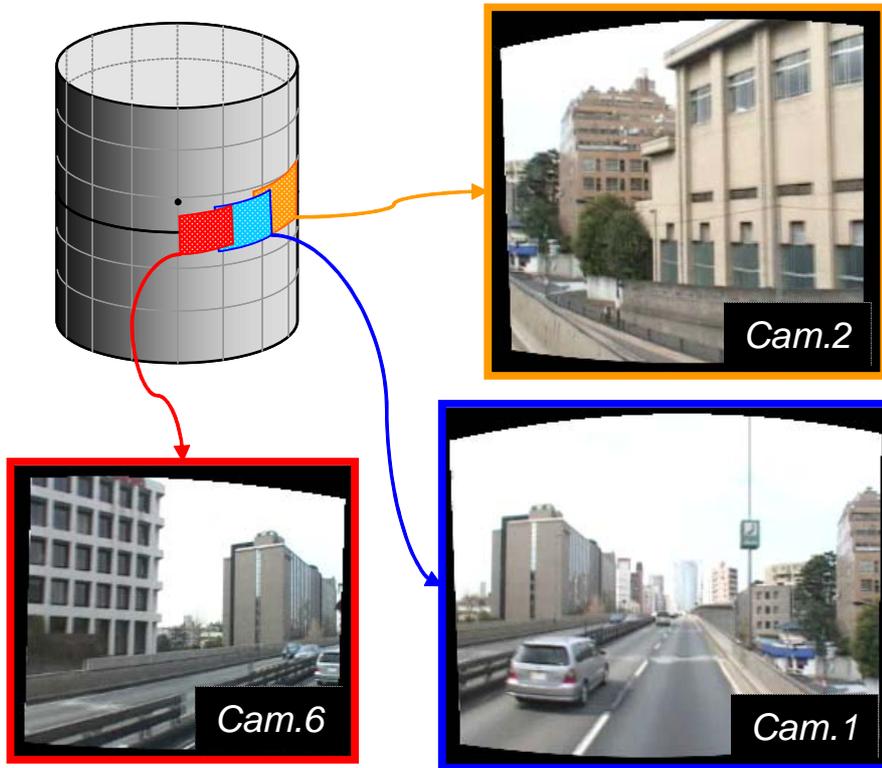
次に、実験2において3つの時空間ボリュームを球体時空間表現においてマッチングした結果の例を図4.15に示す。このケースでは、時空間ボリュームは球体における経度方向の回転(α)および時間方向(T)に加え、緯度方向の回転(β)に関する回転させながら探索を行う。

図4.15(a)に示す3枚の画像は、時空間球体において時空間ボリューム同士の三次元ブロックマッチングを行った結果、時間的に対応すると推定されたものである。この例でも図4.15(b)に示すように、歪みのないパノラマ画像に統合することができている。

また、これらのマッチング結果において、時空間球体の中心を通る平面によって時空間ボリュームを切断した断面図を図4.15(c)に示す。この例においても、マッチング処理の結果として3つのカメラ画像列が空間的・時間的な整合性をもって統合されていることがわかる。

更に、実験2の別のシーンに適用した結果を図4.17に示す。このケースにおいてもカメラ画像列は歪みなく単一のパノラマ画像に統合されている。図4.18には9台すべてのカメラ画像列を統合した結果を示した。統合画像の右側部分には微小な不整合が見られるが、これは今回のマッチングにおいてロール成分を固定していることに起因するものである。

最後に、これらの処理の安定性を考察するため、マッチングにおいてパラメータ推移に伴う相関係数の変化を調べた。図4.19にその結果を示す。これによれば、あらゆるパラメータ推移に関する相関係数は特定の地点において明確なピーク値を有している。これは本手法の処理が安定に機能することを示すものである。



(a) 時間的に対応すると推定された画像の例



(b) その統合結果 (青山学院大学付近)

図 4.13 円柱時空間表現における時空間ボリューム間のマッチング結果

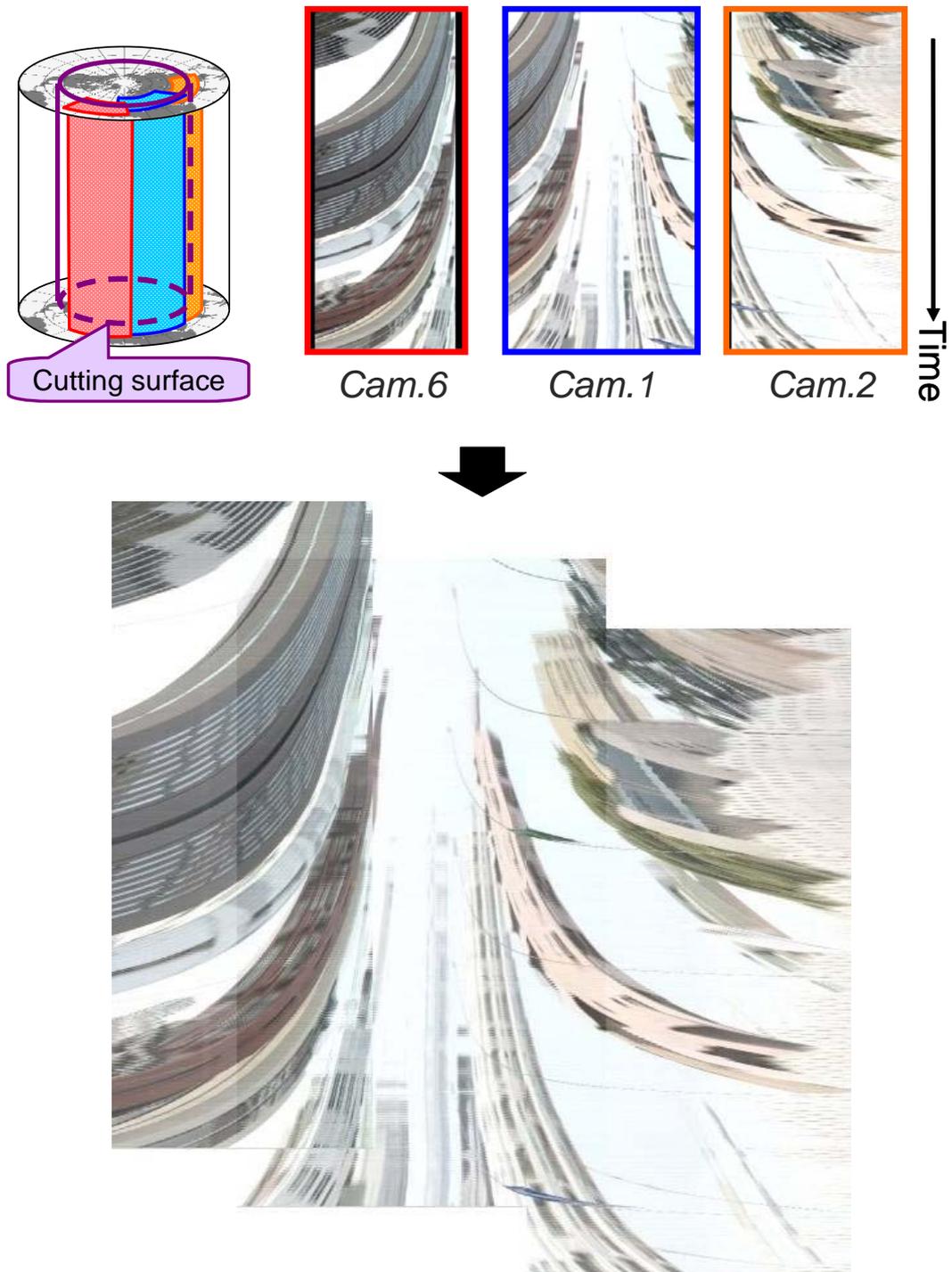
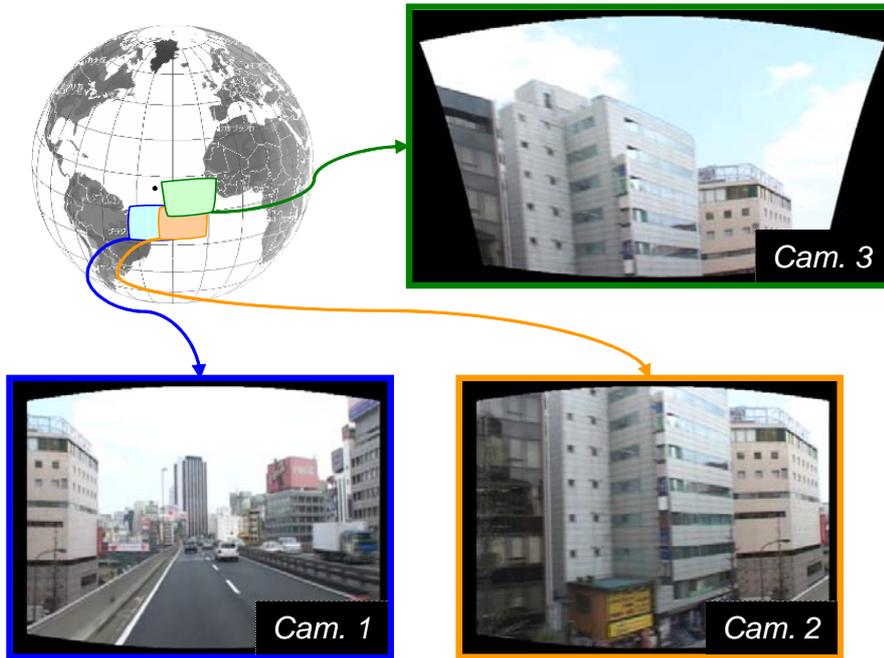


図 4.14 円柱時空間表現におけるマッチング結果の断面図



(a) 時間的に対応すると推定された画像の例



(b) その統合結果（渋谷駅付近）

図 4.15 球体時空間表現における時空間ボリューム間のマッチング結果(1)

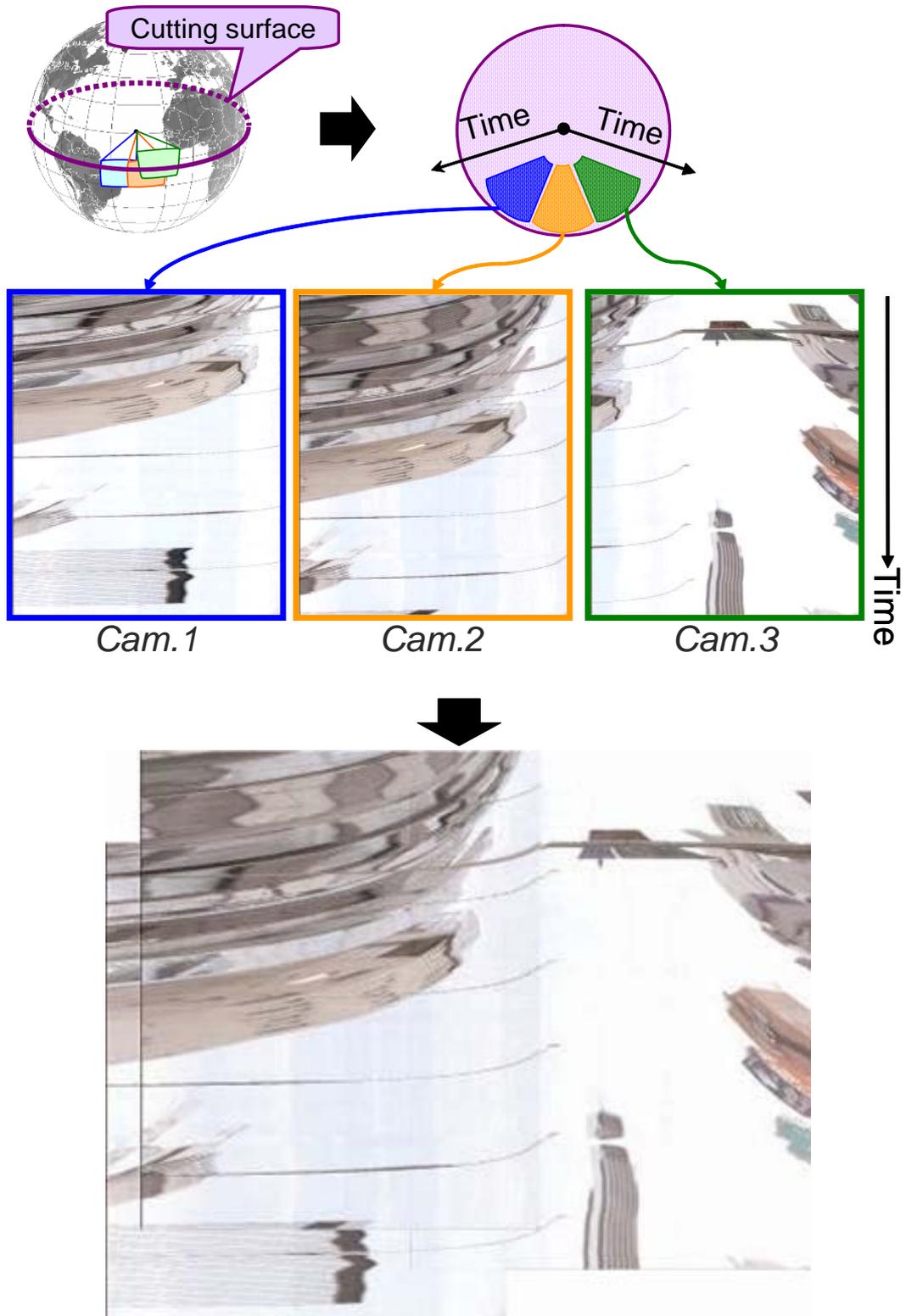
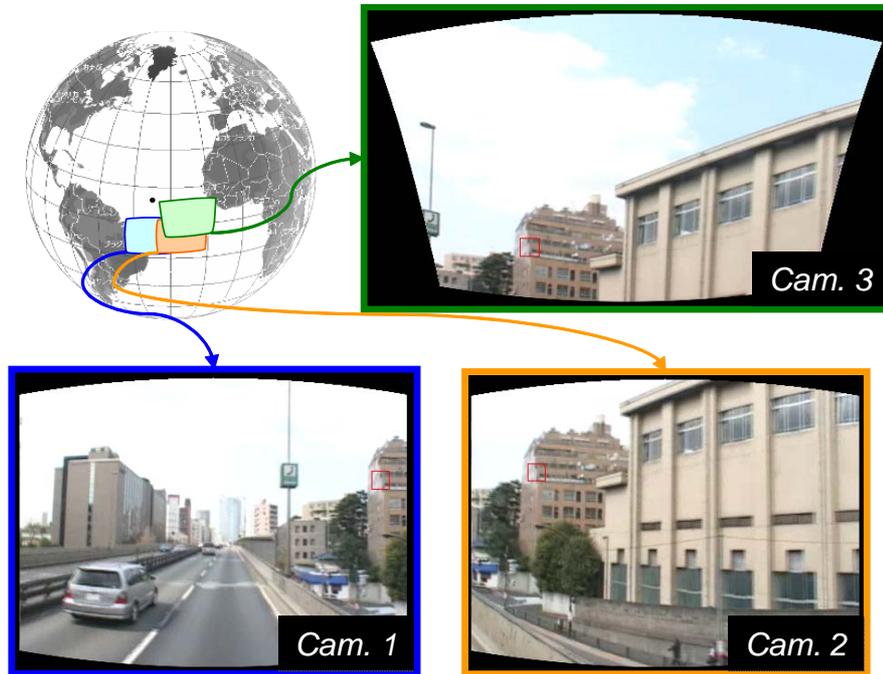


図 4.16 球体時空間表現におけるマッチング結果の断面図



(a) 時間的に対応すると推定された画像の例



(b) その統合結果（青山学院大学付近）

図 4.17 球体時空間表現における時空間ボリュームのマッチング結果 (2)



図 4.18 9 台のカメラから得られた画像の統合結果

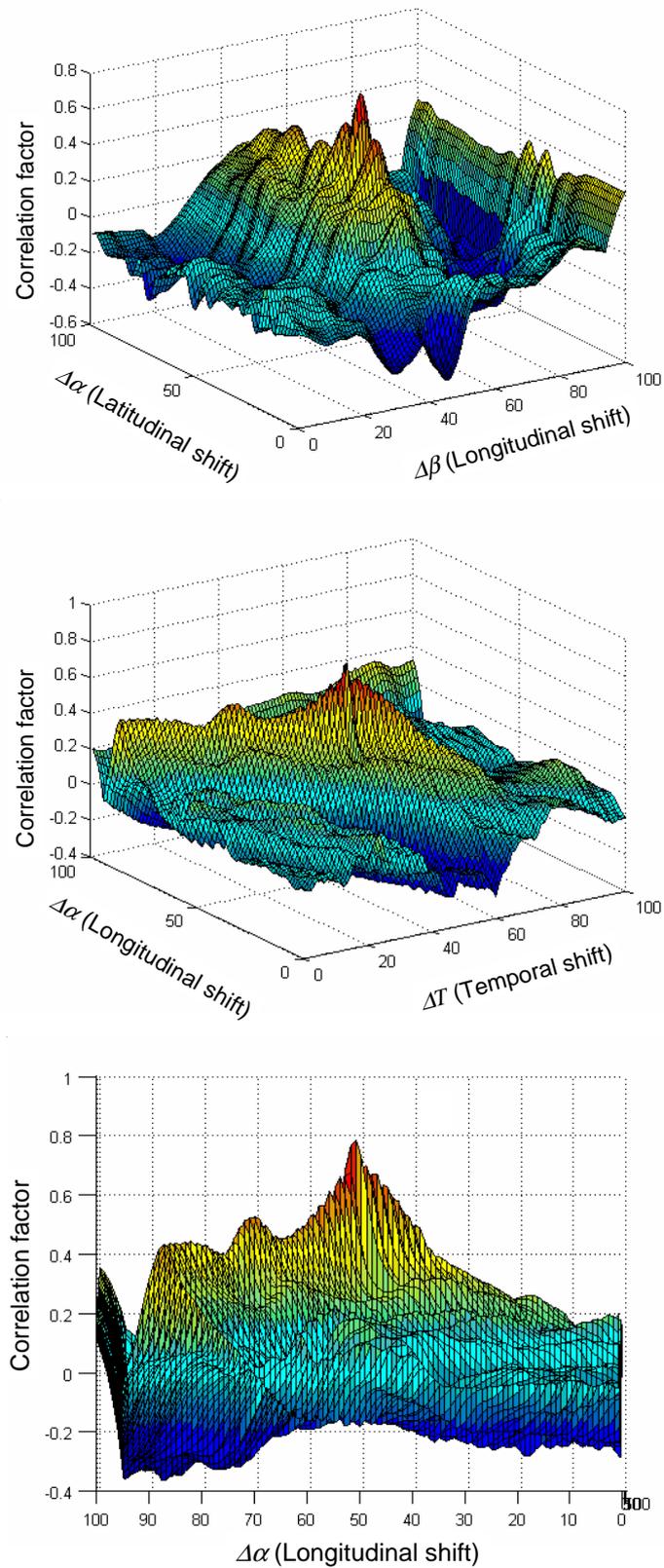


図 4.19 球体時空間表現での時空間ボリュームのマッチングにおける相関係数

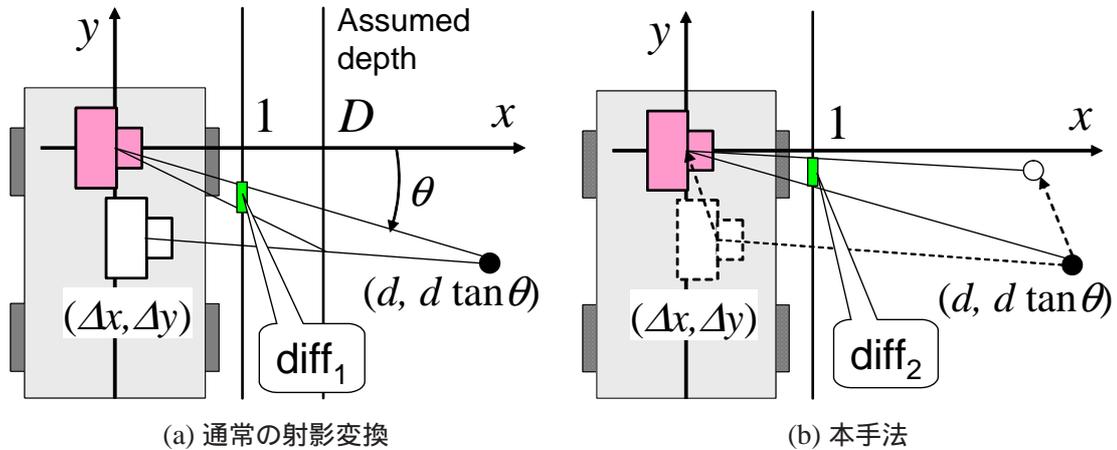


図 4.20 歪み量の解析

4.6 歪み誤差の評価と自由運動への展開

本章では時空間キャリブレーションの有効性を示すため、歪み誤差の評価を行う。また、それらの結果を用いて $C_1 \sim C_3$ の条件について考察し、移動体が自由運動を行った場合の適用性について論じる。

4.6.1 歪み量の解析

歪み量の解析は以下の二つについて行う。

1. 従来のモザイクング（デプスを仮定した射影変換）による画像統合を行った場合の歪み量
2. 本手法による画像統合を行ったときに、光学中心が厳密には一致しないことにより生じる歪み量

図 4.20 のように第一のカメラが原点に、他のカメラが $(\Delta x, \Delta y)$ にあるとすると、それぞれの正規化画像座標上での位置ずれは図中の diff に相当し、以下のように表される。なお、 diff_1 は通常の射影変換を用いた画像統合における位置ずれに、 diff_2 は本手法における位置ずれに相当する。

$$\text{diff}_1 = f(\Delta x, \Delta y) \left(\frac{d}{D} - 1 \right) \quad (4.7)$$

$$\text{diff}_2 = f(\Delta x, \Delta y) \quad (4.8)$$

$$f(\Delta x, \Delta y) = \frac{\Delta y - \Delta x \tan \theta}{d - \Delta x} \quad (4.9)$$

ここで d, θ は注目点の位置を表すパラメータ， D は射影変換において仮定するデプスである．両者は式の上では係数だけの違いであるが，一般に d はシーン中で様々に変化する値をとり， diff_1 よりも diff_2 の方が $\Delta x, \Delta y$ の典型値は小さいことに注意されたい．

まず，カメラを従来手法である図 4.9 (c) の配置とし，歪み量を (4.7) 式により評価する．このような射影変換において歪み誤差を発生させるのは，仮定するデプス値 D と実際のデプス値 d の相違である．図 4.21 は， D および d に対する歪み量を計算したものである．カメラの配置間隔 $(\Delta x, \Delta y)$ は，一般的な民生用ビデオカメラの大きさを考慮して (a) で $(0 \text{ m}, 0.3 \text{ m})$ ，(b) で $(0.3 \text{ m}, 0 \text{ m})$ とし，また $\theta = -30^\circ$ としている．

次に，我々の提案手法における歪み量を (4.8) 式により評価する．本手法において歪み誤差を発生させるのは，仮定 $C_1 \sim C_3$ が完全には成立しないことによる $\Delta x, \Delta y$ の存在である． $\Delta x = \Delta y = 0$ の場合は歪み誤差は生じない．図 4.22 は $\Delta x, \Delta y$ に対する歪み量を計算したものである．なお，図 12, 13 における歪み量は，35mm のレンズを使用して水平解像度 640 ピクセルで撮影した写真のピクセル値に換算すると， $\text{diff} = 0.01$ のときで約 6 ピクセル， $\text{diff} = 0.05$ のときで約 30 ピクセルである．

これらの評価量は以下のことを示している．

- 射影変換による画像統合は，対象とするシーンがほぼ一定のデプスのみによって構成され，かつ，デプスの仮定値を適切に与えた場合に有効に機能する．
- 本手法による画像統合は，対象とするシーンの形状（デプスの分布状況）に関係なく適用でき，また，光学中心のずれが小さければいくらかでも誤差を小さくすることができる．

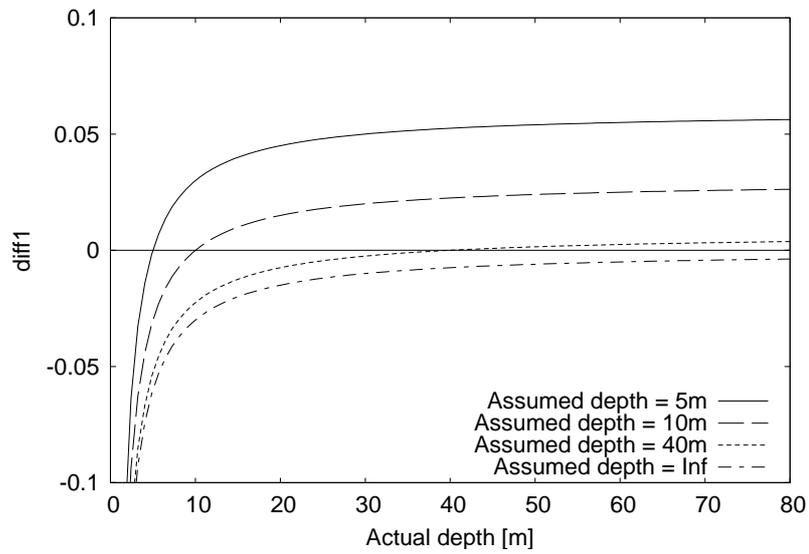
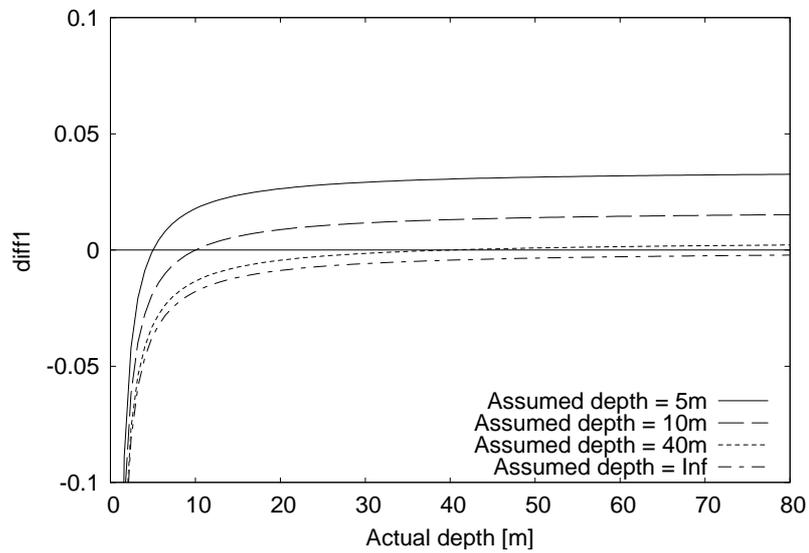
(a) $(\Delta x, \Delta y) = (0, 0.3)$ の場合(b) $(\Delta x, \Delta y) = (0.3, 0)$ の場合

図 4.21 歪み量の評価結果 (1)

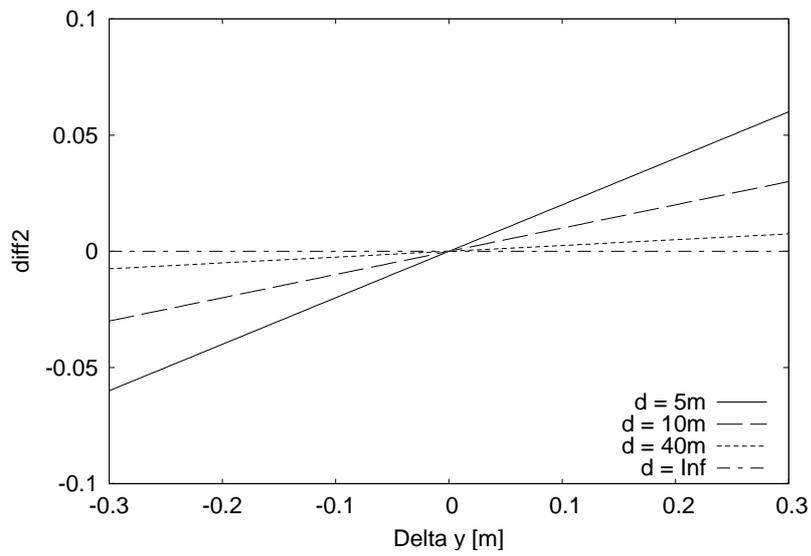
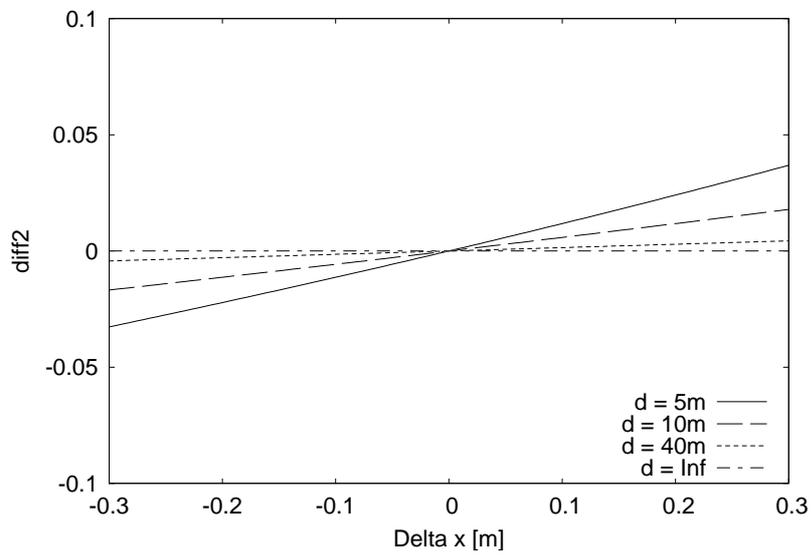
(a) $\Delta x = 0$ の場合(b) $\Delta y = 0$ の場合

図 4.22 歪み量の評価結果 (2)

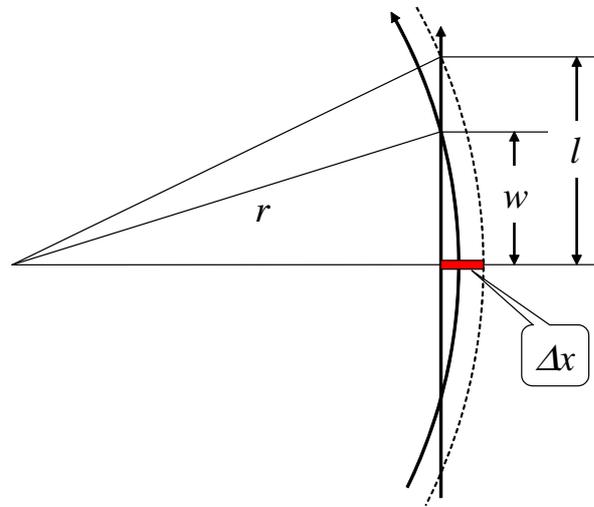


図 4.23 直線でない運動による水平方向のずれ

4.6.2 仮定条件の考察と自由運動への拡張

本節では，提案手法において仮定条件 $C_1 \sim C_3$ を緩和した場合の歪み量について考察し，移動体が自由な運動をした場合の展開について論じる．ここでは移動体は自動車とする．

直線配置条件 (C_1)

直線でない配置による水平方向のずれは図 4.20(b) の Δx で表される．垂直方向のずれは図示していないが，計算上は Δy と同じである．カメラの大きさと内部の光学中心の位置を考えると， $\Delta x, \Delta y$ は高々 10cm 程度と見積られる．図 4.22 によれば，この影響による統合画像の歪みは近くの物体でも $\text{diff}_2 = 0.02$ 程度である．

直線運動条件 (C_2)

直線でない運動による水平方向のずれは図 4.20(b) の Δx で表される．車が半径 r の円運動をしたとすると，この大きさは図 4.23 により以下の式で表される．

$$\Delta x = \sqrt{r^2 + l^2 - w^2} - \sqrt{r^2 - w^2} \quad (4.10)$$

ここで $2l$ はカメラを並べる長さ， $2w$ は車のホイールベースである． $2l = 2w = 3\text{m}$ とすると， Δx は一般国道において急カーブとされる $r = 100\text{m}$ のときで 0.01 程度である．したがって，通常の道路を運転している状況では，この影響による統合画像の歪みはほとんど無視できるとしても問題ないと考えられる．

等速運動条件 (C_3)

等速でない運動に関しては，速度の変化を矩形近似，すなわち短区間毎に等速運動を行っているとは見なして対応することを考える．このとき実際の運動との間に生じるずれは図 4.20(b) の Δy に相当し，以下の式により見積もることができる．

$$\Delta y = \frac{1}{2} a \left(\frac{L}{v_0} \right)^2 \quad (4.11)$$

ここで a, v_0 は車の加速度および初速度， L は画像統合に使用するカメラの端から端までの距離である． $L = 3\text{m}$ とすると，ずれ量は $a = 5\text{ km/h/s}$, $v_0 = 30\text{ km/h}$ のときで $\Delta y = 0.09\text{ m}$ となり，図 4.22 によれば，このずれは近くの物体でも $\text{diff}_2 = 0.02$ 程度に抑えられる．一般に人が車を運転し，メータ読みにより等速を保つ場合でも生じる速度の変動は最大でも 5 km/h/s 程度と考えられる．したがって本条件もその程度の等速条件に緩和しても品質を保つことができる．

4.7 まとめ

本章では，広域空間の光学情報を効率的に獲得するため，移動するカメラ群のデータ列から時間的・空間的整合性を有したパノラマ画像列を効果的に合成する一手法を提案し，その有効性を確認した．

複数のカメラ画像列をそのように統合するためには，各カメラの時空間パラメータ，即ち通常のカメラパラメータに加えて各カメラ間の時間同期パラメータを求める必要がある．これまでの EPI を用いた手法では，マッチング処理によって自動的に得られるパラメータは時間同期パラメータに限られていた．本手法ではまず，EPI を含めた時空間の表現方法を一般的に整理し，円筒時空間表現，および球体時空間表現の概念を導入した．これらの時空間表現では，時間パラメータに加えてカメラの回転パラメータを変化させても，その表現内における時空間ボリュームの形状が不変であることを示した．この理論に基づき，それぞれの表現方法を用いて複数カメラ画像列の時空間ボリュームマッチングを行ったところ，時間同期パラメータに加えて回転パラメータも自動的に算出可能であり，これをもって複数のカメラ画像列を時間的・空間的整合性のとれたパノラマ画像列に統合することに成功した．

第 5 章

実写画像と幾何モデルの合成による 都市道路交通シーンのモデル化と ITS への応用

5.1 はじめに

本章では、画像ベースの描画手法と幾何モデルを合成することにより、都市道路交通シーンの映像を構築するシステムを提案する。

従来から自動車教習所や鉄道会社、ゲームセンターなどに見られたドライブシミュレータでは、ユーザに提供される周辺環境画像は図 5.1 のようにすべて幾何ベースにより表現されていた。ドライブシミュレータでは表示処理に要求される時間制約が大きいこともあってその現実感是非常に乏しいものとなっている。また、シミュレーション映像内に登場する建物や道路などの幾何モデルの構築処理は、現在でも人手に頼っている部分が非常に大きく、膨大な開発コストを招く一因ともなっている。

そこで、運転シミュレーション映像のうちユーザの感ずる現実感に大きく寄与すると考えられる自車両周辺の建物、街路樹、空などの遠景部分を画像ベースレンダリングに置き換えるアプローチを提案する。画像ベースレンダリングでは他車両や歩行者など別のオブジェクトを任意の位置に動的に発生させたり、道路標識の内容や大きさ、設置位置を変更するといったインタラクティブな利用には適していない。そこで、車両、道路標識、路面、ガードレール、トンネル内部などの近景部分については従来どおり幾何ベースによってレンダリングを行い、双方の見えを表示の最終段階で合成する。このように、幾何ベース・画像ベースのレンダリングをその役割に応じて使い分け、合成することによって各々の手法の欠点を補完し、利用価値の高い見えをリアルタイムにユーザに提供することができる。



図 5.1 幾何ベースによるドライブシミュレータのドライバ周辺環境画像

本手法は東京大学国際・産学協同研究センターの産官学連携「サステナブル ITS プロジェクト」[80]として開発されている「複合現実交通実験空間 (Mixed Reality Traffic Experiment Space)」と称する新しい複合現実シミュレーションシステムの一部として機能する。このシステムは、従来の交通シミュレータ・ドライブシミュレータの枠組みを拡張し、交通シミュレータから得られるマクロな交通流の変化と、車体運動力学に基づいた自車両・他車両のミクロな挙動を統合して現実と同じように再現することを目指したものであり、ユーザ視点からの見えが本章で述べる手法によって提供される。

5.2 システムの概要

5.2.1 全体

複合現実交通実験空間は、従来の交通シミュレータ・ドライブシミュレータを拡張し、更に以下のような様々なモジュールを統合して構成されている。

- Traffic Simulator (TS; マクロ交通シミュレータ [81])
- KAKUMO (ミクロ交通シミュレータ [81, 82])
- Driving Simulator (DS; ドライブシミュレータ [82])
- Image Generator (IMG; 画像生成部)

TS は、ノードとリンクのグラフ構造からなる道路ネットワークモデルと交通量のパラメータからマクロな交通流のシミュレーションを行うモジュールである。

DS は、ユーザのハンドル・アクセル・ブレーキ操作から車両の運動力学モデルに基づいて自車両のミクロな動きを再現するモジュールである。自車両の挙動は運転席の振動や勾配としてユーザに伝えられる。

KAKUMO は、TS の出力として与えられたマクロな交通流から、道路上の各車両のミクロな動きのシミュレーションを行うするモジュールである。各車両は他車両との位置関係や速度に応じて車線や速度を変更する。

IMG は自車両および他車両の位置・姿勢からユーザの周辺環境画像をリアルタイムに構成し、提供するモジュールである。詳細は次に述べる。

このようなシステム構成により、従来型の単なる DS とは異なり、ユーザはあらかじめシナリオとして用意された他車両の挙動ではなく TS のネットワーク内で発生した他車両の挙動に基づいて仮想的に運転のシミュレーションを行うことができる。また、自車両の挙動もまた他車両の挙動に影響を及ぼす。そしてその見えは実写画像を取り入れた現実感の高いものとして提供される。図 5.2 にシステム全体の概念図を示す。

この複合現実交通実験空間は、実在の公道を走行舞台として仮想的に扱う。現在のプロトタイプシステムでは、首都高速道路 3 号渋谷線 渋谷～三宅坂間をモデルコースとしている。

5.2.2 IMG: Image Generator

ここでは IMG 部分をより詳細に述べる。IMG がユーザに提供する見えは地上から見た仮想都市空間のモデルに他ならない。このようなモデルには幾何ベースとイメージベースの手法があることは 5.1 に述べた。

システム全体におけるそれぞれの手法の適性を考えると、リアルタイム性や他車両など他のオブジェクトとのインタラクションの再現という観点からはジオメトリベースが有利であり、写実性やユーザに与える現実感の観点からは画像ベースが有利である。そこで、

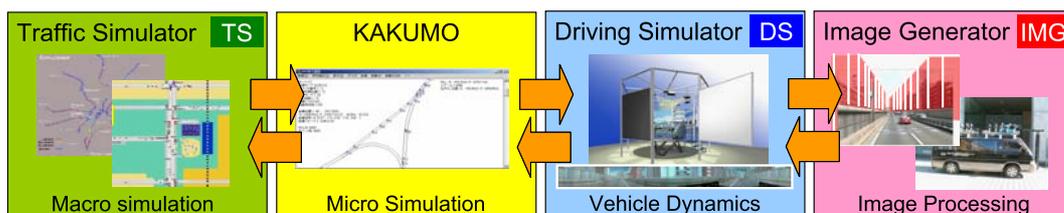


図 5.2 複合現実交通実験空間

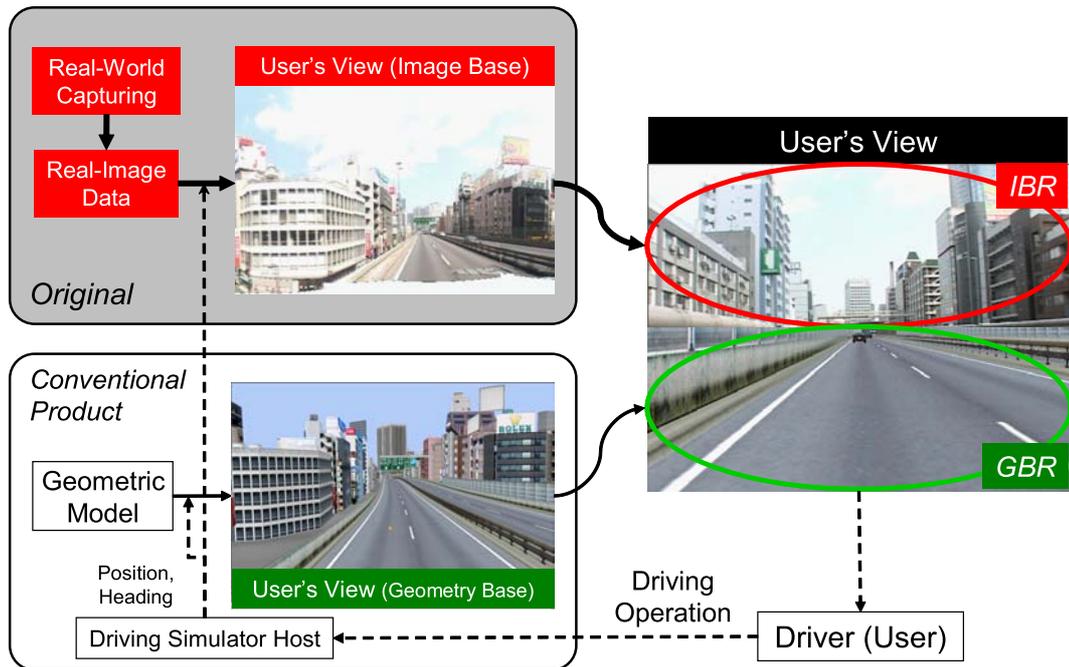


図 5.3 本研究で提案するシステムの全体像

この両者を目的によって使い分け，表示の段階で合成する手法を提案する．具体的には以下のように使い分ける．

- 近景：幾何ベース
- 遠景：画像ベース

近景部分には道路やガードレール，防音壁，標識，信号，他車両などが含まれる．これらの表示系については，三菱プレジジョン社の製品である DS 部において既存の技術で実現されているものをそのまま利用する．このシミュレータは自車両および他車両の動きを 60Hz のレートでリアルタイムに再現することができる．

遠景部分には周辺の建物や空などが含まれる．これらの遠景画像は対象となる道路を実際にデータ計測車両で撮影しながら走行し，あらかじめ画像データセットとして蓄積しておく．撮影には複数台のカメラを用い，計測車両の視点からの全方位画像（または前方半方位画像）を合成しておく．走行経路上の各点において全方位の画像を取得しておくことにより，走行経路外からの見えを後に画像処理によって合成することが可能となる．この周辺環境画像の合成は，DS 部から得られる自車両の位置・姿勢情報からリアルタイム・動的に行われる．

図 5.3 に，本研究で提案するシステムの全体像を示す．画像ベース部分は実世界のモデルコースを撮影して得た画像データを処理して描かれ，幾何ベース部分は既存製品の一部

をそのまま活用してそれぞれ独立に描かれる。両者の見えは奥行き位置によって使い分けられて合成され、ユーザはそれを見て運転操作を行う。運転操作は前述の DS 部に帰還され、DS 部から受け取った自己車両の位置・姿勢は次の描画処理に反映される。

このような使い分けをするのは、両者の利点を相補的に生かした見えを生成することができると考えられるためである。本システムの場合、具体的には以下のような意義がある。

- 現実感：路面上である近景部分は全体を通して比較的画一性が高いのに対し、遠景部分は千差万別であり、人間の感じる現実感により強く影響すると考えられる。この部分を実写画像ベースにすることで、ユーザに高い現実感を与えることが期待される。
- 他車両の隠蔽・重畳：画像ベース部用の実写画像データは、モデルコースである公道上を撮影走行して取得するため、撮影時の周辺車両が写り込んでいる。これらの車両は路上部分を従来の幾何ベースで「重ね描き」することで隠蔽することができる。また、KAKUMO 部により発生したシミュレーション環境上での他車両も、路面上を幾何ベースとすることで容易に重畳することができる。
- 標識、看板などの新設・変更：路面上を幾何ベースとすることにより、シミュレーション映像内に標識などを新設したり、内容を書き換えたりすることが容易に実現できる。この点は、本システムを新標識の効果測定シミュレーションとして活用するなどの際に重要となる。
- コスト低減：現在、製品の DS における建物などの幾何モデル構築は人手に頼っている部分が多く、手間・時間がかかっている。遠景部分に実写ベースを取り入れると、幾何モデルの構築は近景の路上部分のみで済む。路上部分はあらかじめ図面が存在することも多く、開発コストを低減することができる。
- 正面方向の誤差緩和：5.5 に述べるように画像ベース部の正面方向を描く際には誤差が生じるが、幾何ベース部がこの誤差の大きい部分を補い、全体として自然な見えが生成される。

以下では関連研究に続き、5.4 では周辺画像データの取得、5.5 ではレンダリングについて詳細を述べる。

5.3 関連研究

本研究の特徴は、ドライブシミュレータの見え部分が幾何ベース・画像ベースの双方によって実現されている点である。ここではこれらの観点から関連研究について述べる。

都市空間のモデリングは CV, CG 以外にも VR や ITS、建築などの分野で多く研究され

ている。Frue ら [85] や Zhao ら [86] は地上から発せられたレーザのスキャンによって都市空間の幾何モデル構築を行っている。Teller ら [88] は、静止画像の集合から都市空間の幾何モデルを再現している。また、Kotake ら [87] は複数台のビデオカメラを利用して画像ベースにより現実感の高い都市シーンのモデリングを行っている。

ドライブシミュレータは主に企業において開発されてきた [97, 99, 100]。近年では製造会社のほか、ゲームベンダの参入も見られる [98]。学術分野ではシミュレータの開発に加え、それらを利用した実験的な研究が数多く行われてきた [91, 93, 92, 94]。しかし、これらの研究で開発・使用されているドライブシミュレータはいずれも幾何ベースのレンダリングによるものである。Katakura, Ohta ら [89, 90] は、あらかじめ走行経路に沿って撮影しておいた実写映像をユーザの加減速ペダル操作に応じて適切に再表示するシステムを提案しているが、この研究では視点の変更は撮影経路上に限られており、ハンドルを切るような効果は再現されない。

5.4 周辺環境画像データの取得

ユーザに提供する周辺環境画像は実際に対象となる道路を撮影用車両で走行して取得し、処理をして与える。これには4章で提案した手法をそのまま用いることができる。走行経路上においてビデオカメラのサンプリング間隔毎に、その地点からの見えを全方位画像として残しておくことにより、走行経路外からの見えは画像処理によって合成することができる。撮影走行は一度だけで充分である。

図 5.4 に複数カメラの統合を行って得られた全方位画像の例を示す。これは図 5.1 と同じ場所である。なお、今回のシステムでは後方部分はレンダリングには使用しないため、全方位ではなく前方半方位としている。

5.5 ユーザ視点からの見えの構築

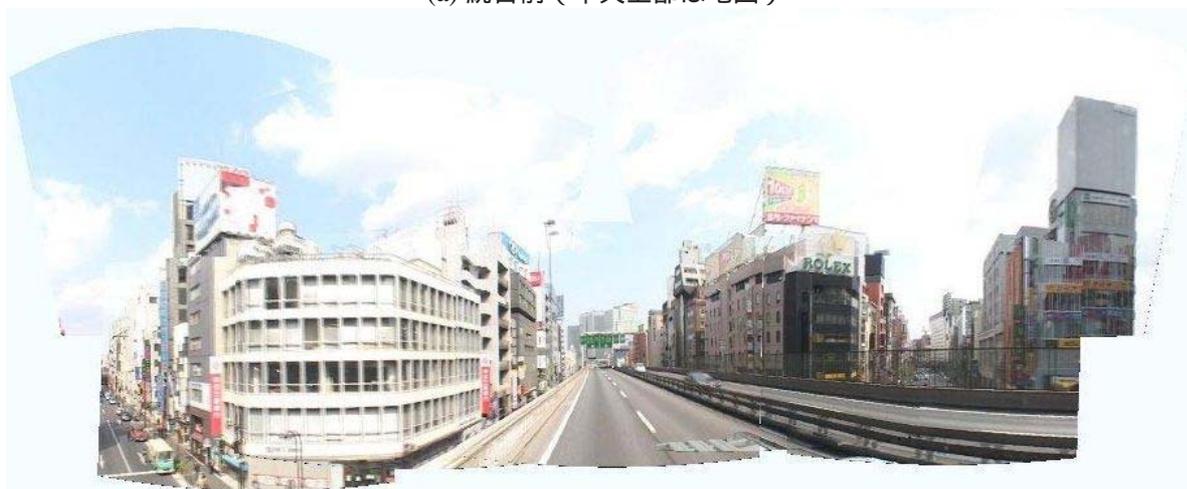
5.5.1 自由視点画像の合成

撮影車両の走行経路上からの見えを全方位画像として残しておく、その経路外からの見えは図 5.5 のように他の時点で撮影した全方位画像の一部をつなぎ合わせることで合成することができる [71]。例えば図 5.5 では、印の地点は撮影時には走行していないが、そこからの左方への見えは、それぞれ時刻 t_1, t_2, t_3 における全方位画像の左前方、左方、左後方の光線を参照してつなぎ合わせることで合成することができる。

このような自由視点画像の合成では、真正面または真後ろ方向の見えについては参照すべき光線が存在せず、特異点となる。[71] ではこの問題は具体的には解決せず、横方向の



(a) 統合前 (中央上部は地図)



(b) 統合後

図 5.4 全方位画像 (前方半方位画像)

見えだけを扱うこととしている．本手法では，真正面または真後ろ方向の見えは，図 5.6 のように最も近傍の全方位画像キャプチャ点の見えをコピーする．この見えは本来表示すべき見えとは異なっており，誤差を生じる．視点の横方向移動量を ΔX ，シーン中のある地点までの奥行きを D とすると，その地点が本来表示されるべき位置との誤差は，

$$\Delta U = \frac{h_0}{D} \Delta X \quad (5.1)$$

と表される． h_0 はカメラの内部パラメータによって決まる定数である．すなわち誤差は手前部分で非常に大きく，遠方になるにつれて急激に減少する．本研究においては誤差の大きい「正面かつ手前の部分」は，ほぼ路面に相当し，この部分は幾何ベースレンダリングによって描かれる．画像ベースレンダリングは誤差の小さい遠方部分のみに適用する．これにより，正面方向についても違和感が少なく再現することができる．

これら一連の処理は実際には図 5.7 のように近景と遠景の境界部分に仮想的な「板」を設け，この面上にテクスチャを貼り付けることで実現する．板面は垂直なスリットに分かれており，スリット毎に適当な地点から撮影された全方位画像の一部が貼り付けられる．

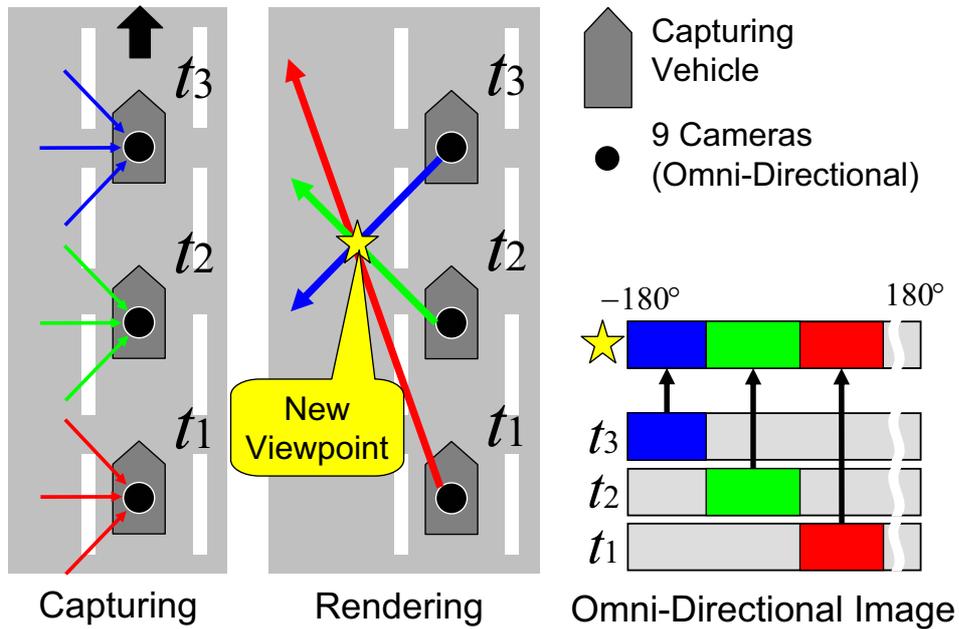


図 5.5 新しい視点からの見え生成

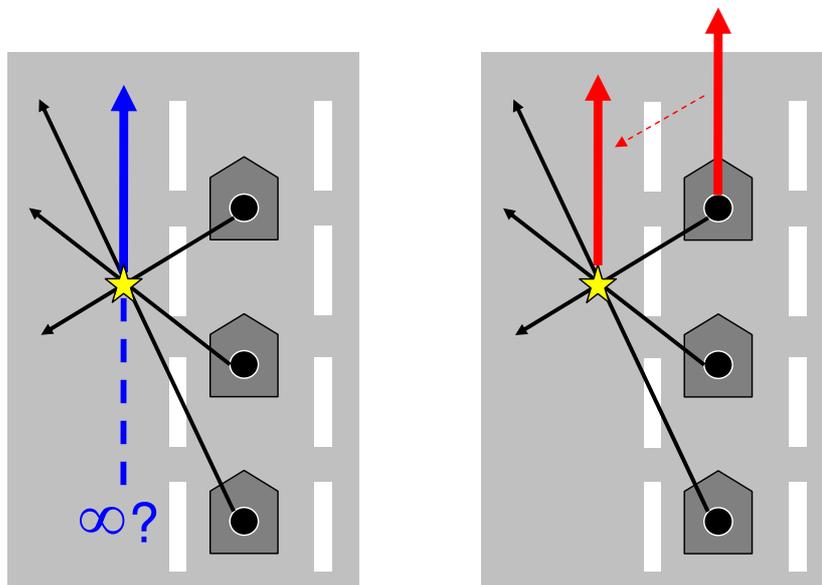


図 5.6 正面方向の描画

このテクスチャはドライブシミュレータの自車両位置が変わるたびに動的に更新される。また、テクスチャの貼り付け面は常に視線方向を向くように回転させる（図 5.8）。

テクスチャ貼り付け面上のデータセットにはその面の各方向からの見えが収められているが、この方向は離散的にしか生成することができない。これは、撮影時のビデオカメラのフレームレートが有限であるため、全方位画像が走行系路上で離散的に存在しているこ

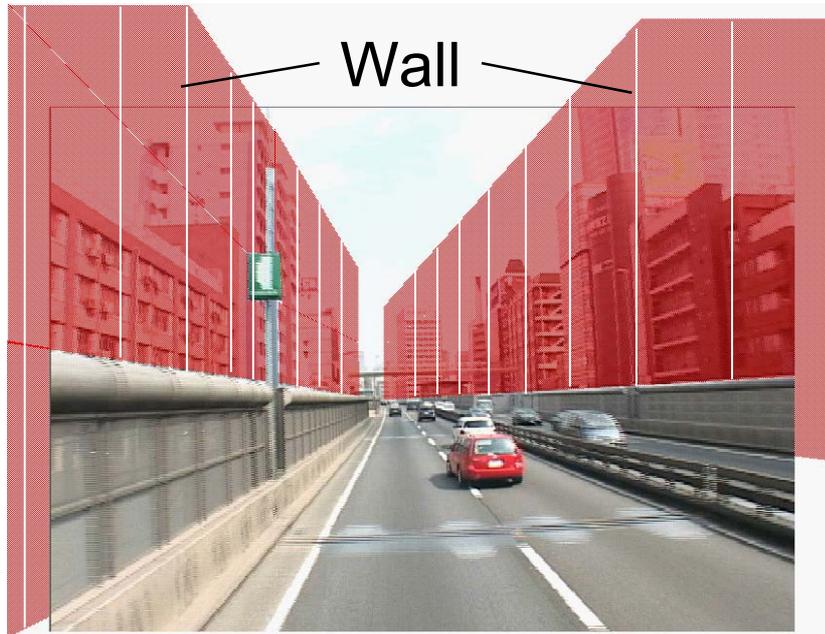


図 5.7 仮想的な板

とによる．データセットが保持している特定の 2 方向の中間に相当する見込み角からの見えが要求された場合は，それらのテクスチャをアルファブレンディングによって補完することにより表示品質を向上させる．

5.5.2 画像ベース部と幾何ベース部の合成

幾何ベースと画像ベースの描画はそれぞれ独立に行われる．前者は既存製品の一部をそのまま活用し，後者は前節に記した方法で描画する．これら両者の見えの位置を合わせ，DS 部から受け取った自己位置・姿勢を適切に反映するためには幾何モデルと全方位画像撮影地点の対応付けが必要になる．本研究で使用する DS 部の幾何モデルは，建物モデルや特に道路構造，標識位置などが現実世界に対してややデフォルメ，および異なった位置に配置されているため，撮影した全方位画像と現実世界の撮影地点を対応づけても幾何ベース部と画像ベース部は適切に対応しない．そこで図 5.9 のように，適当な間隔で全方位画像のフレームと幾何モデル上の撮影地点位置を手動により対応付け，間を 3 次スプラインによって補間した．

また，図 5.10 に IMG 部のハードウェア構成を示す．走行対象区間全体にわたってデータセットをメモリに収めておくことは不可能であるため，画像ベースである遠景部分は複数台のコンピュータ毎に処理担当区間を割り当ててテクスチャの生成を行う．担当区間の表示を終えたマシンには新たな担当区間を割り当て，その部分のデータセットを先読みさ

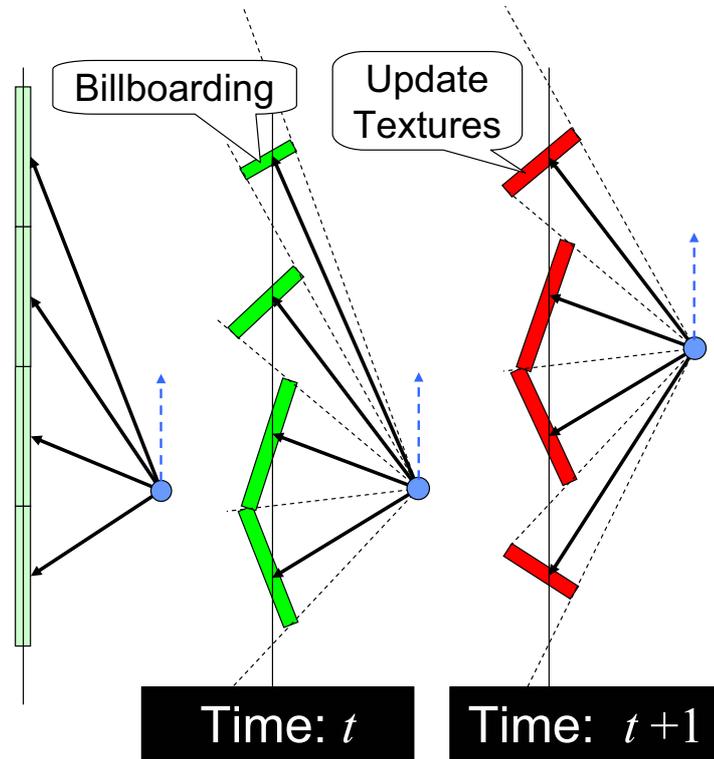


図 5.8 テクスチャの更新

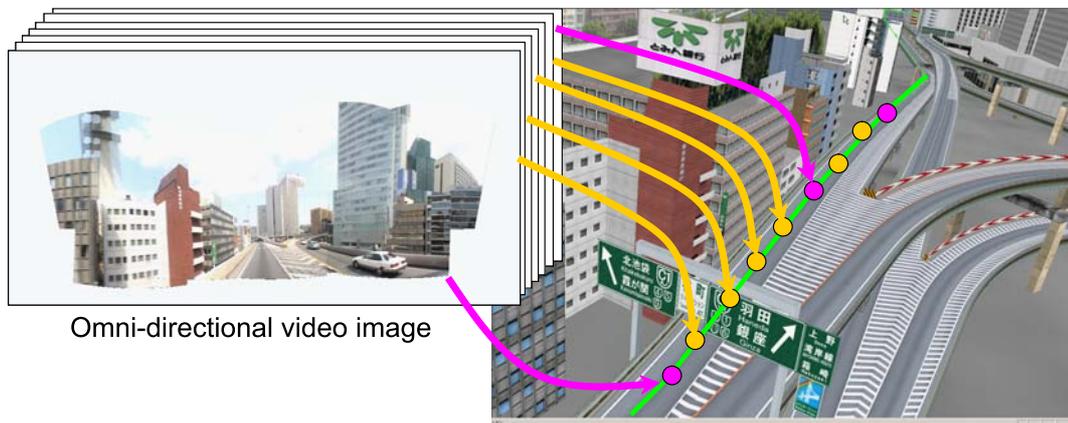


図 5.9 幾何モデルと全方位画像撮影点の位置合わせ

せる．処理部からはピクセルごとにカラー値と奥行き値が出力される．これらの出力は三菱プレシジョン社のコンボジタ (VisCluster) と呼ばれるハードウェアにより奥行き値を考慮してピクセル毎のカラー値が決定され，プロジェクタを通じてユーザ前のスクリーンに投影される．

今回のシステムで遠景部分の表示処理に用いたマシンのスペックは以下の通りである．

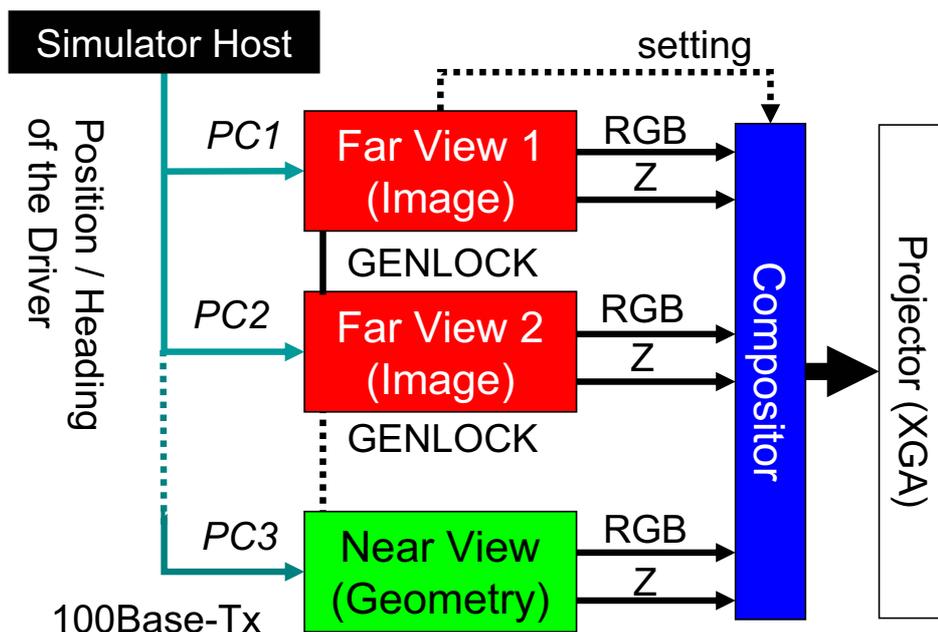


図 5.10 IMG 表示系のハードウェア構成

- CPU: Intel Pentium4 2.80C GHz
- グラフィックボード: QuadroFX3000G
- メモリ: 2GB
- OS: Windows XP

5.6 結果

図 5.11 に画像ベース部分の表示結果を示す。図 5.1 と比較しても非常に現実感の高い画像をユーザに提供することができる。視点も図 5.12 のように自由に変更することができる。また、フレームの更新レートも 60Hz で問題なく動作することを確認している。

更に、図 5.13 にコンポジットを通じて画像ベース部分とジオメトリベース部分を合成した結果を示す。空、建物、建物に付随する看板などは画像ベースにより描かれ、画像ベース部分の仮想壁よりも手前にある道路、防音壁、他車両、道路標識などは幾何ベースによって描かれている。このような使い分けにより、運転者には現実感の高い見えを提供すると同時に、他車両の動きを変化させたり、看板の表示内容を変更させるといったインタラクティブな利用も実現することができる。



図 5.11 画像ベース部分の表示（走行経路上の視点，正面）

5.7 まとめ

本章では，実写画像と幾何モデルを組み合わせることによって都市の道路交通シーンをモデル化するシステムの開発を行った．

このシステムは，幾何ベースの見えと実写にもとづく画像ベースの見えをそれぞれの適性にあわせて近景と遠景で使い分けることにより，ユーザに現実感が高く利用価値の高い見えを提供することができる．

画像ベース部分は，全方位映像を利用することによりある特定の経路を走行しながら撮影するだけで任意視点からの見えを合成することが可能である．合成処理はほぼ自動化されている．幾何ベース部分の構築処理は人手による部分が大きいものの必要なのは道路部分のみでよく，従来よりも開発コストを抑えることができる．

今後は，このシステムを高速道路のサグ区間の運転シミュレーションに活用することを考えている．サグ区間とは道路の勾配が連続して微妙に変化する区間であり，交通事故や道路工事などとは異なる，いわゆる「原因不明の交通渋滞」を引き起こす原因となっている．このような微妙な状況を再現するためには，本システムのようなイメージベースを取り入れた手法が適していると考えられる．現在のところ東名高速道路・横浜青葉 IC～厚木 IC を対象としてシミュレーションを行うことを予定しており，本システムを利用した運転者の運転行動・判断にかかわる人的・心理的パラメタの解析や，サグ情報標識の内容，大きさ 設置位置などによる有効性の検証を行う計画である．



(a) 走行経路から右にずれた視点，左 45° 方向の見え



(b) 走行経路から左にずれた視点，右 45° 方向の見え

図 5.12 視点変更の例

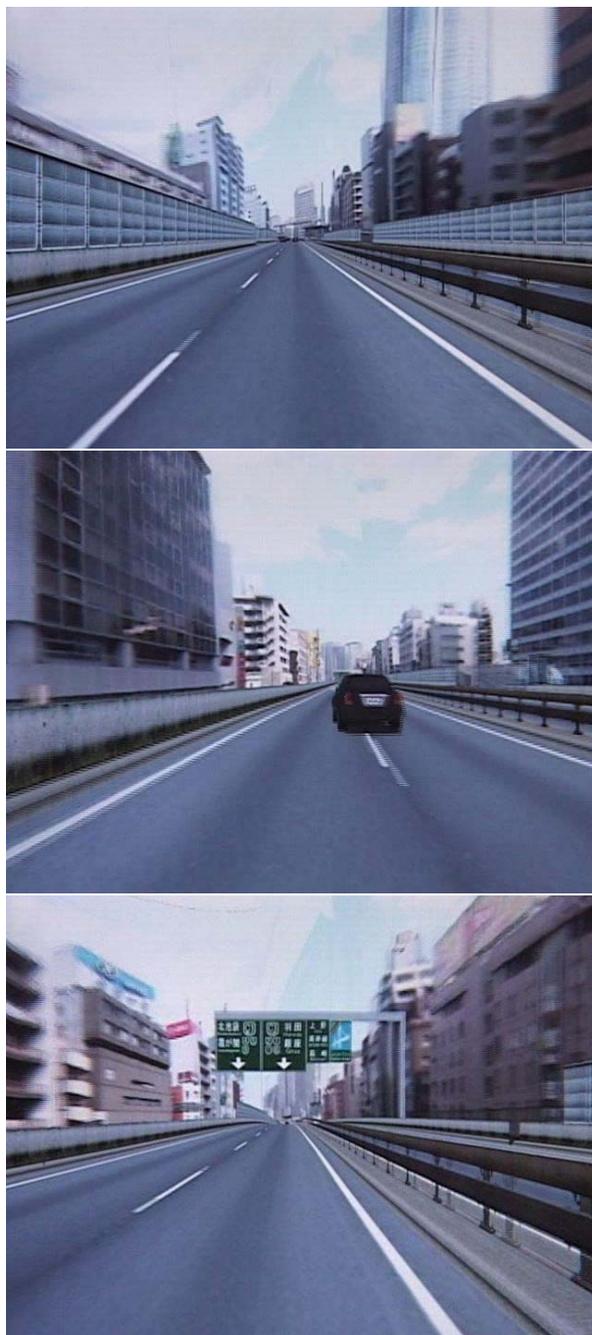


図 5.13 画像ベース（遠景）と幾何ベース（近景）の合成結果．空，建物，建物に付随する看板などは画像ベース，防音壁，道路，他車両，道路標識などは幾何ベースによって描かれている

第 6 章

結論

6.1 本論文の主たる成果

本論文では、移動体による実世界空間の計測において、センサの自己位置を得る問題、および複数台のセンサデータの整合性をとる問題に対し、得られた幾何データおよび画像データを時空間的に解析することで効果的に解決する手法を開発した。更に、その手法適用した実用システムの開発を行い、文化遺産のデジタル保存、および高度道路交通システムという二つの分野対して応用的に貢献した。

6.1.1 センサの動き推定

まず 2 章では、幾何データの時空間解析により移動センサの自己位置を決定するための一手法を提案した。計測系が自動車などに積載され水平移動を行う場合、対象シーンの形状は垂直方向にラインスキャンを行うレンジセンサから復元できる。本手法ではさらに、計測系に水平ラインスキャンを行うレンジセンサを追加する。このスキャンデータを時間軸に沿って並べると、濃淡画像におけるエピソード平面画像 (EPI) に類似した距離画像を得ることができる。EPI と時空間距離画像は対象物までの距離や画像内エッジの傾きについて相互に対照な関係にある概念であり、これを利用して移動体の移動速度および自己位置を算出した。本手法を屋外の道路において適用して実験したところ一般的な GPS よりも十分に高い精度が得られた。

6.1.2 複数カメラ動画画像の統合

4 章は濃淡画像データ処理に関する研究である。放射状に配置した複数台のカメラ画像を歪み無く統合して全方位画像を得るためには光学中心を一致させた上で、各カメラの画像列に対して時間的・空間的な整合性がとれるようなキャリブレーションを行う必要があ

る．本研究ではカメラ画像列を適切な時空間の表現方法へと変換を施すことにより，時空間ボリューム内に同じパターンを出現させることができることを示し，これを満たす時空間表現方法として平面，円筒，球体の3種類を考案した．各表現方法において複数のボリューム同士に対してマッチングを行うと，カメラの間の時空間パラメタを求めることが可能である．その際，平面による表現では時間差パラメタのみしか求めることができないが，円筒や球体による表現では回転パラメタの成分も同時にピクセル単位で求めることが可能である．本理論に基づいて相互相関係数による時空間ボリュームのブロックマッチングを行ったところ，安定してカメラの時空間パラメタを得ることができ，複数カメラ画像を統合して歪みのない全方位画像を合成することに成功した．

6.1.3 応用システムの開発

文化遺産のデジタル保存

3章では，2章で確立した位置決定手法を用いた新しい三次元形状計測システム「梯子式レーザ計測システム」の開発を行った．これは互いに直交する方向にラインスキャンを行う2つのレンジセンサを線形移動を行う梯子型のリフト上に設置したものであり，移動方向と平行にラインスキャンを行うセンサから時空間距離画像を得てセンサの自己位置推定を行い，移動と直交するラインスキャンから得られる対象の形状データにこれを反映させることで対象の正しい三次元形状を得るものである．本システムによって得られた三次元形状データは地上に固定設置した商用のレーザレンジセンサから得られた基準データ，および本システムにより得た形状データのうち，同じ対象シーンを含み，かつ異なる推定速度から構成されたものと安定に整合することに確認した．また，本システムは東京大学池内研究室における大規模有形文化財のデジタルアーカイブ化プロジェクトの一部として機能し，2004年12月および2005年2月にカンボジア王国のアンコールトム・バイヨン寺院計測のため実際に運用したものである．この現場には多数の狭隘部があり，従来の商用固定設置レンジセンサでは計測が非効率であったり計測点の密度が場所によって大きく偏るなどの問題が生じるが，本システムによりそれらの問題が解決された．

高度交通システム

5章では，実世界の時空間画像データおよび幾何モデルを統合し，道路交通シーンを提示するアプリケーションを開発し，模擬運転映像装置として運用した．本システムでは，道路交通シーンにおいて空や建物が含まれる遠景部領域を画像ベースで描き，路面や道路標識，他車両などが含まれる近景部を幾何ベースモデルによって描くことで双方の欠点を相互に補完する．画像ベースの見え構築には4章の手法により獲得した全方位画像を用いた．このとき撮影走行は一度だけであるが，撮影走行経路に沿った各地点における全方

位からの光線が記録されるため、経路外地点からの見えは、全方位画像の前後フレームの一部を参照・補間することで仮想的に合成することが可能である。幾何ベースの見えは既存のドライブシミュレータによって描くが、これらの見えは独立のコンピュータがレンダリングを行い、最終的にハードウェアにより単一の見えに合成される。ユーザはこの映像を見ながら模擬的に自動車の運転操作を行い、その操作が次時刻の運転映像に実時間で反映される。このようなアプリケーションでは、運転映像において遠景部における現実感と、各車両位置や道路標識内容の動的変更といった応用的利用を同時に実現することができる。

6.2 今後の課題と展望

今後の課題としては、幾何モデルと画像データの自動的な統合が挙げられる。幾何データはレーザ計測のほか、全方位画像列やステレオカメラからも得られるし、場合によってはデジタル地図を利用することもできる。それぞれに画像データとの統合のしやすさや、応用的利用に対する向き不向きがあり、これらを適切に取捨選択する必要がある。

また、球面投影した時系列全方位画像には、消失点やエッジの解析を通じてオブジェクトの抽出などを行える可能性があり、更に深い考察をする必要がある。

応用システムでは、特に道路交通シーンを提示するアプリケーションを様々な道路に対して展開し、転者の認知判断、事故解析などに役立てる予定である。

付録 A

予備的な事項の解説

A.1 消失点を利用したカメラパラメータ（回転行列）の算出

画像中の消失点 (Vanishing Point) からカメラの姿勢に関する回転行列を求めることができる。まず、ベクトル r_1 と r_2 を次のように定義する。

$$r_1 = \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad r_2 = \begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

$(u_1, v_1), (u_2, v_2)$ は正規化画像座標における水平、垂直方向の消失点の位置である。したがって第 3 成分に焦点距離 1 を付加した r_1, r_2 は、カメラ座標系において「光学中心から射影面上の消失点に向かうベクトル」を表す。

これらのベクトルは世界座標系の座標軸と平行になっている。したがって、水平、垂直方向の軸を $(0, 1, 0), (0, 0, 1)$ ととれば、回転行列 R に関して

$$R \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \hat{r}_1, \quad R \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \hat{r}_2 \quad (\text{A.2})$$

が成り立つ。ここで $\hat{\cdot}$ は正規化を表す。したがって、回転行列 R は以下ようになる。

$$R = (\hat{r}_1 \times \hat{r}_2, \hat{r}_1, \hat{r}_2) \quad (\text{A.3})$$

付録 B

使用した機器などの解説

B.1 SICK LMS200

SICK LMS200 は、ドイツの SICK 社により製造されているラインスキャン式レーザレンジセンサである。表 B.1 に仕様を示す。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 [31]。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。

表 B.1 LMS200 の仕様

計測原理	Time-of-flight 方式，ラインスキャン
距離測定範囲	最大 80 m
スキャン周波数	37.5 Hz
スキャン角度（視野角）	100°（正面 ±50°）/ 180°（正面 ±90°）
スキャン角分解能	0.25°/ 0.5°/ 1.0°
測定分解能	10 mm
測定精度	代表値 ± 15 mm
データ・インタフェース	RS 232 / RS 422
使用電源	DC 24 V
消費電力	最大 20 W
レーザ保護クラス	1
使用周囲温度	0°C ~ 50°C
質量	4.5 kg
外形寸法	156 mm × 155 mm × 185 mm（突出部除く）

SICK AG <http://www.sick.de/de/en.html>
ジック株式会社 <http://www.sick.co.jp>

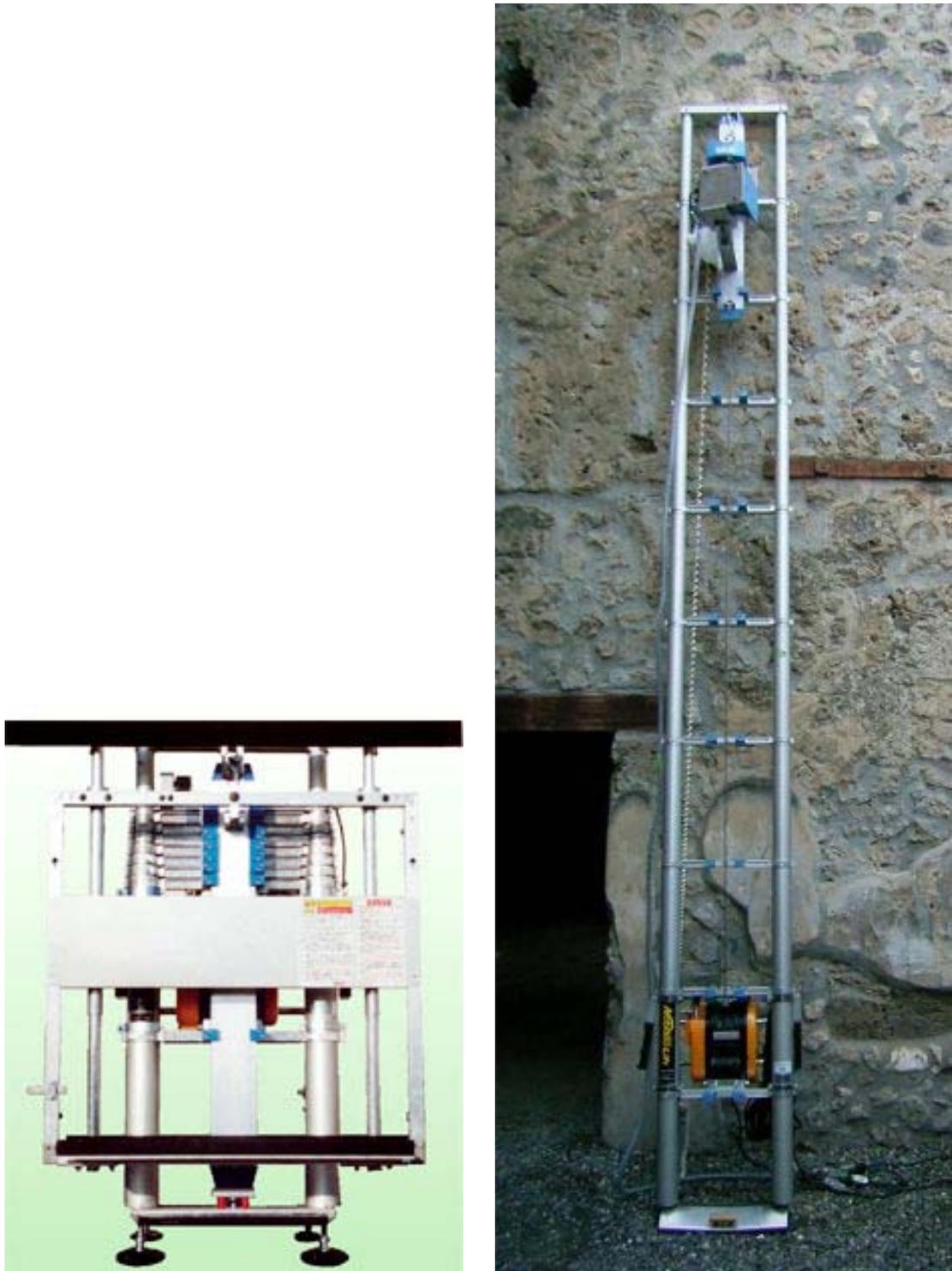
B.2 ノビテックリフト NPL-4200

ノビテックリフト NPL-4200 は、最長約 4m まで自在に伸縮できる梯子形リフトである。端部には電気モーターを動力源とするウィンチが設けられており、梯子に沿ってワイヤーを巻き上げられるようになっている。梯子のステップ部には複数のガイドがあり、ワイヤーに接続された移動用プラットホームはガイドを滑りながら梯子上を往復移動できるようになっている。表 B.2 に仕様を、図 B.1 にその外観を示す。

表 B.2 ノビテックリフト NPL-4200 の仕様

最大吊り上げ加重	100 kgf
最大吊り上げ高さ	接地面より 3200 mm
吊り上げ速度	25 m/min = 0.417 m/s
使用電源	AC 100 V (50 Hz / 60 Hz)
最大消費電力	870 W
外形寸法 (最小時)	H1150 × W866 × D509 mm
外形寸法 (最大時)	H4380 × W1210 × D509 mm

株式会社ケイエスエス <http://www.kss-co.jp/nobitec/lift>



(a) 最小時

(b) 最大時

図 B.1 ノビテックリフト NPL-4200

謝辞

ここに一遍の博士論文をまとめることができました。研究を進めるにあたりましては、数々の方に直接・間接にお世話になり、有形・無形のご厚情を賜りました。皆様方への感謝の気持ちを込め、ここにお礼の言葉を述べさせていただきます。

まず本研究の指導教員、池内克史教授に心より感謝を申し上げます。先生は学内でも電子情報学・コンピュータ科学・情報学環の3専攻を御兼任のうえ、国内外の学会・会議等でも非常に精力的に活動され、毎週電子メールで研究室のメンバー宛に送ってくださる先生のご予定表はまさに多忙の一言でした。しかし、そのような中でも学生との打ち合わせは第一に考えて下さり、海外出張から夜行便で帰国された後に打ち合わせをして頂いたことも一度や二度ではありませんでした。また、世界のコンピュータビジョン界を第一線でリードされながら、一方ではバイオン計測などの実地作業においても可能な限り現場に足を運び一緒に汗を流して下さいました。ワインを通じて熱心に学生と親交を深めて頂いたことも良き思い出であり、研究の励みになりました。

本研究科および情報学環、新領域創成科学研究科の原島博教授、相沢清晴教授、相田仁教授、苗村健助教授、上条俊介助教授にはお手数をおかけして本論文の審査をして頂きました。また、坂内正夫教授にはアドバイザ教員として研究方針に関する御助言を頂きました。学内から数々の博士を送り出された先生方の御意見は大変に参考になりました。御礼申し上げます。

本学国際・産学共同研究センターの桑原正夫教授、須田義大教授、田中敏久客員教授、鈴木高宏助教授にはサスティナブル ITS プロジェクトの指揮者として御尽力下さり、またそれぞれの御専門の立場から御意見を頂きました。ありがとうございました。

埼玉大学の川崎洋助教授、池内研究室の影澤政隆助手には現場に即した共同研究者、また上司として、具体的な研究の進め方や方向性などの深い議論や様々なアドバイスを頂き大変お世話になりました。もとより筆者が時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先生のおかげでした。川崎先生やその学生さんとは、特に最後の1年間はインターネットを介して活発に議論をすることができ、場所の違いを感じさせない共同研究をすることができました。

影澤氏には ITS 分野の先達として指導者の立場から、時に学生の目の高さで適切な御助言・御協力を頂きました。また池内研究室の副首長として研究室の運營業務、更にはサステナブル ITS の運営や計算機管理などにも御尽力を頂きました。ITS 世界会議 2004 の大がかりなデモ発表、カンボジアやイタリアでの計測作業も良い思い出です。

池内研究室の博士研究員の皆様には、研究室の先輩として大変に頼りにさせて頂きました。特に小川原光一氏には、御自身の本来の御専門はロボット分野でありながら、サステナブル ITS の一部には全面的に御協力を頂き、誠に頭の下がる思いでいっぱいです。高松淳氏、大石岳史氏、宮崎大輔氏、工藤俊亮氏、長谷川一英氏^{*1}、ロビー・タン氏^{*2}にも豊富な知識や鋭い洞察力、勉強会の開催など様々な面でリードして頂きました。

増田智仁氏、中岡慎一郎氏、阪野貴彦氏には、研究上の助言や議論に加え、同期修了見込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。個人の業績である学位論文と言えど、同じ立場の仲間が近くにいたことは大きな心の支えとなりました。

後輩の皆様にもお世話になりました。特に松井健氏とは梯子式レーザレンジセンサの開発、およびそれを用いたバイヨンでの計測作業を共同で行うことができました。また埼玉大学の三上武志氏とはビデオカメラ画像の統合に関し、アイデアの提供や実装、論文校正などにおいて互いに貢献し合うことができました。共に修士課程の学生ながら早い時期から研究姿勢が積極的で、良き戦力となってくれました。また一方で、上級生の立場から指示を与え、助言することを学ばせてくれました。二人は民間企業へ進むようですが、就職後もそれぞれの道で活躍してくれることと思います。

この他にも研究室関連ではほぼ全員に何らかの形でお世話になったと思いますが、ここでは博士課程の間に研究の打ち合わせを共にした皆様に挙げるにとどめます。

猪狩壮文，上原康彦^{*3}，尾池治郎^{*4}，太田大介，太田亮^{*5}，岡本泰英，角田哲也，カイリル・アズミ^{*6}，鎌倉真音，川上玲，真川純，朱成華^{*7}，柴田卓司，鄭波，タンダ・ウー^{*4}，佟利洪，富樫政徳，平原清隆，廣田祐一郎，松本裕子，モホッタラ・シャミラ，森本哲郎^{*8}，山田陽介^{*9}，李曉璐，王武宏^{*10}
(五十音順，敬称略)

*1 現 富士写真フィルム

*2 現 オーストラリア国立大学

*3 現 キヤノン(株)

*4 埼玉大学

*5 現(株)日立製作所

*6 現 インドネシア在住

*7 現 ソニー(株)

*8 凸版印刷(株)

*9 現(株)NTT データ

*10 現 中国在住

学生メンバーとして携わりました国際・産学共同研究センター ITS 研究室のサステイナブル ITS では、民間企業や他研究室の方々にお世話になりました。(株)長大の本多建氏、三菱プレシジョン(株)の大貫正明氏、精木順一氏、矢野徹氏、練尾正美氏には IMG のモジュールを構築するにあたり御協力を頂きました。田中伸治助手、白石智良氏、浅野美帆氏、森本紀代子さんをはじめとする桑原研究室の皆様、また須田研究室、鈴木研究室の皆様とは、専門分野に偏りがちな研究生活の中で他分野における ITS 関係者として交流の場を持たせて頂きました。

文化遺産のデジタルアーカイブ化では、主にカンボジアのバイヨン寺院、イタリアのソマ・ポンペイ遺跡の計測に携わりました。カンボジアでは日本政府アンコール救済チーム (JSA)、イタリアでは東京大学人文社会系研究科の青柳研究室をはじめとした関係者の皆様にお世話になりました。そしていつも快活な現地ワーカーやドライバーの方々には計測作業を陰から支えて頂きました。梯子式レーザレンジセンサによる計測が文化遺産保存の一端として役立てば幸いです。

英語論文の執筆の際には、Joan Knapp 氏に添削をして頂きました。E-mail 上でのお付き合いでしたが、大変お世話になりました。

安心して研究を進められたのは職員の皆様のお力添えがあってこそでした。技官の長谷川仁則氏には予算管理のほか、特に実験用車両の利用に関して便宜を図って頂きました。映像技術室の中村氏にはバイヨン計測の撮影や写真・印刷関連の業務で、試作工場の皆様方には実験機材の作成や工作指導などでお世話になりました。松浦芳子さん、元木恵子さん、斉木優子^{*11}さん、平山幸恵^{*12}さん、菊池薫さん、小林聡子さん、ITS 研究室の瀧井京子さんには、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。

最後に、長い学生生活を島根・広島・山口から見守ってくれた両親・妹・祖父母と、旅の連れに、生活の足に活躍してくれた愛車 ZZR に感謝します。

2005 年 12 月



*11 現 中澤優子

*12 現 佐川幸恵

発表文献

学会誌論文

1. K. Ikeuchi, M. Sakauchi, M. Kagesawa, H. Kawasaki, T. Takahashi, M. Murao, S. Ono: “Constructing Virtual Cities with Real Activities,” IEICE Transactions on Information and Systems (Special Issue on Information System Technologies for ITS), Vol. 85–D, No. 11, pp. 1734–1744, Nov. 2002
2. 小野晋太郎, 平原清隆, 影沢政隆, 池内克史: “車載レンジセンサを利用した路上駐車車両の自動検出,” 電子情報通信学会論文誌 (ITS 技術論文特集), Vol. J88–A, No. 2, pp. 247–256, 2005 年 2 月
3. S. Ono, K. Ikeuchi: “Self-Position Estimation for Virtual 3D City Model Construction with the Use of Horizontal Line Laser Scanning,” International Journal of ITS Research, Vol. 2, No. 1, pp. 67–75, Oct. 2004
4. S. Ono, K. Ogawara, M. Kagesawa, H. Kawasaki, M. Onuki, K. Honda, K. Ikeuchi: “Development of Photo-Realistic and Interactive Driving View Generator by Synthesizing Real Image and Artificial Geometry Model,” International Journal of ITS Research, Vol. 3, No. 1, pp. 19–27, Nov. 2005
5. 三上武志, タンダウー, 小野晋太郎, 川崎洋, 大沢裕, 池内克史: “EPI 解析を利用した歪みのない複数ビデオカメラ画像の統合 (Distortion-Free Fusion of Multiple Video Camera Images Using EPI Analysis),” 電子情報通信学会論文誌 (採録決定, 2006 年 5 月以降掲載見込)

国際会議 (査読あり)

1. S. Ono, M. Kagesawa, K. Ikeuchi: “A probe Car for Parking-Vehicle Detection by Using Laser Range Sensor,” IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV 2002), Versailles, France, Jun. 2002

2. S. Ono, K. Hirahara, M. Kagesawa, K. Ikeuchi: "Parking-Vehicle Detection System by Using Laser Range Sensor Mounted on a Probe Car," 9th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services (ITSWC 2002), Chicago, U.S., Oct. 2002
3. S. Ono, H. Kawasaki, K. Hirahara, M. Kagesawa, K. Ikeuchi: "Ego-Motion Estimation for Efficient City Modeling by Using Epipolar Plane Range Image Analysis," 10th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services (ITSWC 2003), Madrid, Spain, Nov. 2003
4. H. Kawasaki, A. Miyamoto, Y. Ohsawa, S. Ono, K. Ikeuchi: "Multiple Video Camera Calibration Using EPI for City Modeling," Asian Conference on Computer Vision (ACCV 2004), Cheju Island, Korea, Jan. 2004
5. K. Azmi, S. Ono, M. Kagesawa, K. Ikeuchi: "Automatic Reconstruction of Large-Scale Virtual Environment for Intelligent Transportation Systems Simulation," 12th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services (ITSWC 2004), Nagoya, Japan, Oct. 2004
6. S. Ono, K. Ogawara, M. Kagesawa, H. Kawasaki, M. Onuki, K. Honda, K. Kenmotsu, M. Sakai, M. Tsuji, K. Ikeuchi: "Image Generation System for Mixed-Reality Traffic Experiment Space," 11th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services (ITSWC 2004), Nagoya, Japan, Oct. 2004
7. S. Ono, K. Ogawara, M. Kagesawa, H. Kawasaki, M. Onuki, J. Abeki, T. Yano, M. Nerio, K. Honda, K. Ikeuchi: "A Photo-Realistic Driving Simulation System for Mixed-Reality Traffic Experiment Space," IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2005), Las Vegas, US, Jun. 2005
8. K. Matsui, S. Ono, K. Ikeuchi: "The Climbing Sensor: 3-D Medeling of a Narrow and Vertically Stalky Space by Using Spatio-Temporal Range Image," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), Edmonton, Canada, Aug. 2005
9. S. Ono, K. Ogawara, M. Kagesawa, H. Kawasaki, M. Onuki, K. Honda, K. Ikeuchi: "Driving View Simulation with a Hybrid Synthesis of Virtual Geometry and Real Image in the Mixed-Reality Traffic Experiment Space," 4th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2005), pp. 214–215, Vienna, Austria, Oct. 2005
10. S. Ono, K. Ogawara, M. Kagesawa, H. Kawasaki, M. Onuki, K. Honda, K. Ikeuchi: "A Proposal to Simulate Driving Scene of Sag Zones in Highway by Using Image-based Rendering," 12th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services (ITSWC 2005), San Fransisco, U.S., Nov. 2005

11. S. Ono, K. Ogawara, M. Kageswa, H. Kawasaki, M. Onuki, J. Abeki, K. Honda, K. Ikeuchi: "A Photo-realistic Driving Simulation with Free Viewpoint by Real-time Image Processing," Driving Simulation Conference Asia-Pacific (DSC-A/P 2006), Tsukuba, Japan, Jun. 2006 (to appear)
12. S. Ono, T. Mikami, H. Kawasaki, Y. Ohsawa, K. Ikeuchi: "Spherical Space-time Representation for Creating Distortion-free Panoramic Video from Multiple Moving Cameras," IEICE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2006), New York, U.S., Jun. 2006 (投稿中)
13. T. Mikami, S. Ono, H. Kawasaki, K. Ikeuchi: "Space-time Analysis of Spherical Projection Image," The 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2006), Hong Kong, China, Aug. 2006 (投稿中)

国内会議 (査読あり)

1. S. Ono, K. Hirahara, M. Kagesawa, K. Ikeuchi: "Recognizing Vehicles in a Panoramic Range Image," 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2002), Vol. I, pp. 183–188, 名古屋, 2002 年 7 月
2. 小野晋太郎, 平原清隆, 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, 横浜, 2002 年 7 月
3. 小野晋太郎, 平原清隆, 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, pp. 551–560, 東京, 2002 年 12 月
4. 小野晋太郎, 平原清隆, 川崎洋, 影沢政隆, 池内克史: "水平レンジスキャンを利用した自己位置推定による三次元都市モデルの構築," 第 2 回 ITS シンポジウム, pp. 415–422, 京都, 2003 年 12 月
5. 小野晋太郎, 川崎洋, 影沢政隆, 池内克史, 坂内正夫: "EPI 解析を利用した画像統合による都市空間のイメージベースレンダリング," 第 2 回 ITS シンポジウム, pp. 473–480, 京都, 2003 年 12 月
6. 小野晋太郎, 川崎洋, 影沢政隆, 池内克史: "時空間距離画像を利用した自己位置推定による効率的な広域空間モデルの構築," 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2004), Vol. I, pp. 201–206, 函館, 2004 年 7 月
7. 小野晋太郎, 小川原光一, 影沢政隆, 川崎洋, 大貫正明, 本多建, 見持圭一, 坂井繭美, 辻求, 池内克史: "複合現実交通実験空間のためのドライバ周辺環境画像構築システム," 第 3 回 ITS シンポジウム, pp. 429–435, 名古屋, 2004 年 10 月

8. 太田亮, 小野晋太郎, 平原清隆, モホッタラ シャミラ, 影沢政隆, 池内克史: “距離画像を用いた路上駐車車両の車種認識,” 第3回 ITS シンポジウム, pp. 471–476, 名古屋, 2004年10月
9. カイリル アズミ, 小野晋太郎, 影沢政隆, 池内克史: “広域仮想都市構築のための航空写真影解析による3次元情報復元,” 第3回 ITS シンポジウム, pp. 99–105, 名古屋, 2004年10月
10. 小野晋太郎, 小川原光一, 影沢政隆, 川崎洋, 大貫正明, あべ木順一, 矢野徹, 練尾正美, 本多建, 池内克史: “実写画像の合成による運転シミュレーション映像の構築,” 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2005), 淡路, 2005年7月
11. 松井健, 小野晋太郎, 池内克史: “木登りセンサ: 時空間距離画像を利用した狭隘部の3次元モデリング化,” 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2005), 淡路, 2005年7月
12. L. Tong, S. Ono, M. Kagesawa, K. Ikeuchi: “Analysis of City Range Image Using Digital Map,” 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2005), 淡路, 2005年7月
13. 尾池治郎, 川崎洋, 大澤裕, 小野晋太郎, 池内克史: “固有画像を用いたイメージベースによる仮想広域空間の実時間レンダリング手法,” 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2005), 淡路, 2005年7月
14. S. Ono, K. Ogawara, M. Kagesawa, H. Kawasaki, M. Onuki, K. Honda, K. Ikeuchi: “画像ベースレンダリングによる高速道路サグ区間における運転シミュレーション映像の生成 (計画概要),” 第4回 ITS シンポジウム, pp.467–472, 東京, 2005年12月
15. L. Tong, S. Ono, M. Kagesawa, K. Ikeuchi: “City Range Data Analysis,” 第4回 ITS シンポジウム, pp.397–402, 東京, 2005年12月

研究会等

1. 小野晋太郎, 川崎洋, 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,” コンピュータビジョンとイメージメディア研究会 (CVIM2003–03 2003), 東京, 2003年3月
 2. 小野晋太郎, 川崎洋, 池内克史: “時空間距離画像の提案・考察と街のモデル化への応用,” コンピュータビジョンとイメージメディア研究会 (CVIM2004–01 2004), 大阪, 2004年1月
-

学会誌論文

	和文誌	英文誌	合計
主著（筆頭）	1	2	3
共著（非筆頭）	1（採録決定）	1	2

査読あり会議

	国内会議	国際会議	合計
主著（筆頭）	9	8（+ 投稿中 1）	17 (+1)
共著（非筆頭）	6	3（+ 投稿中 1）	9 (+1)

参考文献

- [1] 岡本泰英、山崎俊太郎、池内克史, “Sequential Point Clusters を用いた大規模モデルに対する効率的なポイントベースレンダリングシステム,” 「画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004)」, 2004 年 7 月
- [2] E. H. Adelson and J. Bergen: “The plenoptic function and the elements of early vision,” MIT Press Cambridge, MA, pp.3-20, 1991.
- [3] T. Naemura and H. Harashima: “Ray-based creation of photo-realistic virtual world,” in Virtual Reality and Multimedia (VSMM 1997), pp.59–68, 1997.
- [4] Marc Levoy and P. Hanrahan: “Light field rendering,” ACM SIGGRAPH, pp.31–42, 1996.
- [5] S. J. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, M. F. Cohen: “The lumigraph”, ACM SIGGRAPH, pp.43–54, 1996.
- [6] H.Y. Shum, Li-Wei-He: “Rendering with concentric mosaics,” ACM SIGGRAPH, pp.299–306, 1999.
- [7] Yukiko Ogawa, Kazuaki Iwamura, Shigeru Kakumoto: “A map-based approach for extracting object information from aerial images,” in Proc. Machie Vision and Application (MVA 1998), pp.220–223, 1998.
- [8] Katsuyuki Kamei, Wayne Hoy, Takashi Tamada, Kazuo Seo: “Modeling of urban scenes by aerial photographs and simply reconstructed buildings,” in Proc. Machie Vision and Application (MVA 1998), pp.224–227, 1998.
- [9] Z. C. shi and Ryosuke Shibasaki: “Automated building extraction from digital stereo imagery,” Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, pp.119–128, May 1997.
- [10] R. Nevatia and E. P. Keith: “Automatic and interactive modeling of buildings in urban environments from aerial images,” in IEEE International COnference on Image Processing, Vol. III, pp.525–528, 2002.
- [11] Kim Zu Whan, Huetras Andres, Nevatia Ramakant: “Automatic description of build-

- ings with complex rooftops from multiple images,” in Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001), Vol. II, pp.272–279, Dec. 2001.
- [12] Takeshi Naemura, Junji Tago, and Hiroshi Harashima: “Real-Time Video-Based Modeling and Rendering of 3D Scenes,” IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 22, no. 2, pp. 66 – 73, Mar. 2002.
- [13] Takeshi Naemura, Tatsuya Yoshida and Hiroshi Harashima: “3-D computer graphics based on integral photography,” Opt. Express, 8, 4, pp. 255–262, Feb. 2001.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] MIT City Scanning Project <http://city.lcs.mit.edu>
- [17] C.Fruh, and Avidesh Zakhor, “3D Model Generation for cities Using Aerial Photographs and Ground Level LaserScans”, CVPR, 2000.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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
- [21] H.Baker, et.al, “Generalizing epipolar plane image analysis on the spatio-temporal surface”, International Journal on Computer Vision, 3, 33-49, 1989
- [22] 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
- [23] 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
- [24] H.Kawasaki, et.al, “Spatio-Temporal Analysis of Omni Image”, Proc. Computer Vision and Pattern Recogniton(CVPR), Vol.2, pp.577-584, 2000
- [25] 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
- [26] 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
- [27] 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
- [28] I.Stamos, P.K.Allen, “3-D Model Construcruction Using Range and Image Data”, Proc. of Computer Vision and Pattern Recognigiton (CVPR), 2000
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] JIS 規格番号 C6802, 日本工業標準化調査会 (Japanese Industrial Standard Comitee; JISC), <http://www.jisc.go.jp>
- [32] ジック株式会社 <http://www.sick.co.jp>
- [33] 石川島播磨重工業株式会社 <http://www.ihl.co.jp>
- [34] P.J. Besl and N.D. McKay. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence (PAMI)*, 1992.
- [35] Daisuke Miyazaki et al. The Great Buddha Project:Modelling Cultural Heritage through Observation. In *Proc. International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, 2000.
- [36] Sebastian Thrun et al. Scan Alignment and 3-D Surface Modeling with a Helicopter Platform. In *The 4th International Conference on Field and Service Robotics*, 2003.
- [37] Shintaro Ono et al. Self-Position Estimation for Virtual 3D City Model Construction with the Use of Horizontal Line Laser Scanning. *International Journal of ITS Research (ITSJ)*, pages 67–75, 2004.
- [38] Yuichiro Hirota et al. DESIGNING A LASER RANGE FINDER WHICH IS SUSPENDED BENEATH A BALLOON. In *Proc. The 6th Asian Conference on Computer Vision (ACCV)*, 2004.
- [39] Yuichiro Hirota et al. Flying Laser Range Finder and its data registration. In *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2004.
- [40] Christian Früh and Avideh Zakhor. Fast 3D Model Generation in Urban Environments. In *International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, 2001.

- [41] Christian Früh and Avidesh Zakhor. Constructing 3d city models by merging ground-based and airborne views. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2003.
- [42] S. Clark H.F. Durrant-Whyte G. Dissanayake, P. Newman and M. Csroba. *An experimental and theoretical investigation into simultaneous localisation and map building (SLAM)*. 2000.
- [43] E. Nebot J. Guivant. Optimization of the simultaneous localization and map building algorithm for real time implementation. *IEEE Transaction of Robotic and Automation*, May 2001.
- [44] Katsushi Ikeuchi, Kazuhide Hasegawa, Atsushi Nakazawa, Jun Takamatsu, Takeshi Oishi, Tomohito Masuda. Bayon digital archival project. In *Int'l Conf. on Virtual Systems and MultiMedia(VSMM)*, 2004.
- [45] Leica Geosystems HDS. Cyrax 2500. http://hds.leica-geosystems.com/products/cyrax2500_specs_CE.html.
- [46] M. Levoy. The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues. In *SIGGRAPH*, 2000.
- [47] D. Koller B. Wegbreit M. Montemerlo, S. Thrun. Fastslam: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem. In *Proc. AAAI National Conf. on Artificial Intelligence*, Edmonton, Canada, 2002.
- [48] S. Thrun M. Montemerlo. Simultaneous localization and mapping with unknown data association using fastslam. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Taipei, Taiwan, 2003.
- [49] Medicom Corporation. Nobitec Lift NP-4200. <http://www.kss-co.jp/nobitec/lift>.
- [50] Ryan Miller and Omead Amidi. 3-D Site Mapping with the CMU Autonomous Helicopter. In *The 5th International Conference on Intelligent Autonomous Systems*, 1998.
- [51] M. Self R. Smith and P. Cheeseman. *Estimating uncertain spatial relationships in robotics*. Springer-Verlag New York, Inc.
- [52] SICK AG. LMS200. <http://www.sick.de/de/en.html>.
- [53] Zhengyou Zhang. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, 13:119–152, 1995.
- [54] H. Zhao and R. Shibaski. Reconstructiong Urban 3D Model using Vehicle-borne Laser Range Scanners. In *International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, 2001.
- [55] Zoller+Fröhlich. IMAGER 5003. <http://www.zf-laser.com/>

e_produkto_vorteile_hw.html.

- [56] H. Baker and R. Bolles. Generalizing epipolar plane image analysis on the spatiotemporal surface. *Int.J.of Computer Vision*, 3:33–49, 1989.
- [57] R. Bolles, H. Baker, and D. Marimont. Epipolar plane image analysis: an approach to determining structure from motion. In *Int. J. of Computer Vision*, volume 1, pages 7–55, 1987.
- [58] H. Kawasaki, K. Ikeuchi, and M. Sakauchi. EPI analysis of omni-camera image. In *International Conference on Pattern Recognition, IAPR 15th*, volume 1, pages 379–383, Barcelona, Spain, Sept. 2000.
- [59] H. Kawasaki, T. Yatabe, K. Ikeuchi, and M. Sakauchi. Construction of a 3D city map using EPI analysis and DP matching. In *Asian Conference on Computer Vision*, volume 2, pages 1149–1155, Jan. 2000.
- [60] H. Kawasaki, A. Miyamoto, Y. Ohsawa, S. Ono, and K. Ikeuchi. Multiple video camera calibration using EPI for city modeling. In *Asian Conference on Computer Vision*, volume 1, pages 569–574, Jan. 2004.
- [61] Shree. K. Nayar. Catadioptric omnidirectional video camera. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 482–488, June 1997.
- [62] Y. Onoue, K. Yamasawa, H. Takemura and N. Yokoya, “Telepresence by realtime view-dependent image generation from omnidirectional video streams,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol.71, no.2, pp.154-165, Aug. 1998.
- [63] R. Purser. The bi-mercator grid as a global framework for numerical weather prediction. In *The 2004 Workshop on the Solution of Partial Differential Equations on the Sphere*, 2004.
- [64] A. Rav-Acha, Y. Pritch, D. Lischinski, and S. Peleg. Dynamosaics: Video mosaics with non-chronological time. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2005)*, June 2005.
- [65] A. Rav-Acha, P. Yael, and P. Shmuel. Online registration of dynamic scenes using video extrapolation. In *10th International Conference on Computer Vision (ICCV 2005)*, Oct. 2005.
- [66] D. Steedly, C. Pal, and R. Szeliski. Efficiently registering video into panoramic mosaics. In *10th International Conference on Computer Vision (ICCV 2005)*, Oct. 2005.
- [67] Y. Wexler and D. Simakov. Space-time scene manifolds. In *International Conference on Computer Vision (ICCV 2005)*, Oct. 2005.
- [68] K. Yamasawa, Y. Yagi, and M. Yachida. New realtime omnidirectional image sensor with hyperboloidal mirror. In *Proc. 8th Scandinavian Conf. on Image Analysis*, pages

- 1381–1387, 1993.
- [69] J. Zheng and S. Tsuji. Panoramic representation of scenes for route understanding. In *Int. Conf. on Pattern Recognition*, pages 161–167, 1993.
- [70] M. Hirose and E. Takaaki, “Building a virtual world from the real world,” Proc. of International Symposium on Mixed Reality, pp. 183-197, Mar. 1999.
- [71] T. Takahashi, H. Kawasaki, K. Ikeuchi and M. Sakauchi, “Arbitrary view position and direction rendering for large-scale scenes,” *Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 2, pp. 296-303, June 2000.
- [72] 遠藤隆明, 谷川智洋, 広田光一, 廣瀬通孝: “超多眼カメラによる全天周画像の再構成” 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.SIG 11(CVIM 5), p.43-52 (2002.12)
- [73] Y. Yagi and S. Kawato, “Panorama scene analysis with conic projection,” Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.181-187, Jul. 1990.
- [74] 棚橋英樹, 島田大輔, 山本和彦, 丹羽義典: “全方向ステレオシステム (SOS) を用いた移動体追跡”, *View2000*, pp.67-72, (2000).
- [75] 山本和彦, 棚橋英樹, 桑島茂純, 丹羽義典: “実環境センシングのための全方向ステレオシステム (SOS)”, *電気学会論文誌 C 電子・情報・システム部門誌*, Vol.121-C, pp. 876-881, (2001).
- [76] 佐藤雄隆, 王彩華, 棚橋英樹, 丹羽義典, 山本和彦, 桑島茂純: “移動体ビジョンを指向した小型全方向ステレオシステム (miniSOS) の開発”, *画像センシングシンポジウム*, pp. 311-316, (2003).
- [77] H.Maitre E.Lutton and J.Lopez-krahe, “Determining vanishing points using hough transform.” *IEEE Trans. PA*, Vol.16, pp.430-438, 1994.
- [78] 植芝俊夫, 富田文明: “平面パターンを用いた複数カメラシステムのキャリブレーション” 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.SIG 17 (CVIM 8), pp.89-99 (2003.12)
- [79] H.Y.Shum and Li Wei He, “Rendering with concentric mosaics,” *ACM SIGGRAPH*, pp. 299-306, 1999.
- [80] K. Ikeuchi et.al, “Mixed Reality Traffic Experiment Space under Interactive Traffic Environment for ITS Research”, Proc. 11th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services (ITSWC 2004), Nagoya, Japan, Oct. 2004
- [81] T. Shiraishi, H. Hanabusa, M. Kuwahara, E. Chung, S. Tanaka, H. Ueno, Y. Ohba, M. Furukawa, K. Honda, K. Maruoka, T. Yamamoto, “Development of a Microscopic Traffic Simulation Model for Interactive Traffic Environment”, Proc. 11th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services (ITSWC 2004), Nagoya, Japan, Oct. 2004
- [82] Y. Suda, M. Onuki, T. Hirasawa, H. Ishikawa, M. Kano, Y. Mashiyama, T. Oda, A. Tagaya, T. Taguchi, Y. Kanki, “Development of Driver Model using Driving Simulator

- with Interactive Traffic Environment”, Proc. 11th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services (ITSWC 2004), Nagoya, Japan, Oct. 2004
- [83] H. Kawasaki, A. Miyamoto, Y. Ohsawa, S. Ono, K. Ikeuchi, “Multiple Video Camera Calibration using EPI for City Modeling”, Proc. Asian Conference on Computer Vision (ACCV 2004), Jeju Island, Korea, Jan. 2004
- [84] 小野 晋太郎, 川崎 洋, 影沢 政隆, 池内 克史, 坂内 正夫, 「EPI 解析を利用した画像統合による都市空間のイメージベースレンダリング」, 第 2 回 ITS シンポジウム, Dec. 2003
- [85] Christian Frueh, Avideh Zakhor “Constructing 3D City Models by Merging Ground-Based and Airborne Views”, Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Madison US, 2003
- [86] Huijing Zhao, Ryosuke Shibasaki “Reconstruction of Textured Urban 3D Model by Fusing Ground-Based Laser Range and CCD Images”, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E83–D, No. 7, pp.1429–1440, Jul. 2000
- [87] D. Kotake, T. Endo, F. Pighin, A. Katayama, H. Tamura and M. Hirose, “Cybercity Walker 2001: Walking Through and Looking Around a Realistic Cyberspace Reconstructed from the Physical World”, 2nd International Symposium on Mixed Reality (ISMR2001), pp.205–206, Mar. 2001
- [88] Seth Teller, Matthew Antone, Zachary Bodnar, Michael Bosse, Satyan Coorg, Manish Jethwa, Neel Master: “Calibrated, Registered Images of an Extended Urban Area”, Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2001
- [89] M. Katakura, T. Oguchi, S. Shikata, “Development of Moving Scenery Image Experiment System”(in Japanese), Annual Conference of Japan Society of Civil Engineers, pp.57–4, Sep. 2002
- [90] H. Ohta, M. Katakura, T. Oguchi, S. Shikata, “Effects of Traffic Safety Devices on Driver’s Behavior at a Curve Section”(in Japanese), Infrastructure Planning (Japan Society of Civil Engineers) , Nov. 2002
- [91] Panat Leelavansuk, Hidehisa Yoshida, Masao Nagai, “Cooperative Steering Characteristics of Driver and Lane-Keeping Assistance System” International Journal of ITS Research, Vol. 1, No. 1, pp.17–24, Dec. 2003
- [92] Hidehisa YOSHIDA, Masashi IGARASHI, Masao NAGAI “A New Motion Cue Algorithm for Improving Longitudinal Sensation in Driving Simulator” 6th International Conference on Motion and Vibration Control, pp.587–592, Saitama, Japan, Aug. 2002
- [93] Taichi Shiiba, Yoshihiro Suda, Yusuke Tanabe, Masaaki Onuki “Virtual Running Tests of Automobile with Driving Simulator” International Journal of ITS Research, Vol. 1,

- No. 1, pp.33–39, Dec. 2003
- [94] J.H. Kim, Y. Matsui, S. Hayakawwa, T. Suzuki, S. Okuma, N. Tsuchida, “Acquisition and Modeling of Driving Skills by Using Three Dimensional Driving Simulator”, IEICE Trans. Fundamentals Vol. E88–A, No. 3, pp.770–778, Mar. 2005
- [95] Sustainable ITS Project, Center for Collaborative Research, The University of Tokyo, <http://www.its.ccr.u-tokyo.ac.jp>
- [96] Metropolitan Expressway Public Corporation, Tokyo Metropolitan Expressway, <http://www.mex.go.jp/english>
- [97] Mitsubishi Precision Co., Ltd., <http://www.mpcnet.co.jp/e>
- [98] SEGA DRIVING SIMULATOR, <http://sega.jp/simulator>
- [99] Tasknet Inc., ACCESS MASTER, <http://tasknet.co.jp/www/simulator/driving-simulator.html>
- [100] Doron Precision Systems, Inc., <http://www.doronprecision.com/driving.html>