

修 士 論 文

観測系の内外要因による  
形状データの歪み補正

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

氏 名 46433 松井 健

提 出 日 平成 18 年 2 月 3 日

## 概要

物体の3次元モデルは状態の記録，保存という目的だけでなく，解析やシミュレーション，さらにはエンターテインメントへの応用が可能であり現在注目を浴びている．

そこで，本研究は物体の3次元モデルを作成する際に必ず必要となるデータ測定のフェーズに注目し，歪みのないデータを作成するための手法を提案することを目指している．データを測定するレーザレンジファインダの歪みには内的パラメータによるもの，外的パラメータによるもの，と大きく分けて2種類のものが存在するが，本論文では内的要因による歪みを数学的手法を用いて，外的要因による歪みを時空間距離画像という概念を利用することによって除去している．

# 目次

---

第1章	序論	1
1.1	研究背景	2
1.2	研究目的	2
1.3	本研究の成果	3
1.4	本論文の構成	3
第2章	実物体のモデル化	5
2.1	モデリングプロセス	6
2.1.1	幾何学的モデリング	6
2.1.2	光学的モデリング	8
2.1.3	環境に応じたモデリング	8
2.2	レーザレンジファインダ	10
2.2.1	レーザレンジファインダの3次元計測法	10
2.2.2	レーザレンジファインダの種類	14
第3章	内部パラメータによる歪みの補正	17
3.1	大規模モデルの問題点	18
3.2	関連研究	20
3.3	内部パラメータ	21
3.3.1	カメラパラメータとプロジェクタパラメータ	22
3.3.2	キャリブレーション	24
3.4	提案手法	25
3.4.1	測定環境	26
3.4.2	歪み特性	26
3.4.3	補正手法	28
第4章	外部パラメータによる歪みの補正	32
4.1	既存センサの限界	33

---

4.2	関連研究	33
4.3	提案手法	35
4.3.1	木登りセンサの構成	35
4.3.2	時空間距離画像	37
4.3.3	3次元モデル作成のための自己位置推定アルゴリズム	39
<b>第5章</b>	<b>実験・評価</b>	<b>44</b>
5.1	内部パラメータによる歪み補正の評価実験	45
5.1.1	定量的評価	45
5.1.2	既存データの補正	46
5.2	外部パラメータによる歪み補正の評価実験	49
5.2.1	等速直線運動の仮定の検証	49
5.2.2	モデリング結果	50
5.2.3	距離画像の評価	54
<b>第6章</b>	<b>まとめ</b>	<b>58</b>
6.1	はじめに	59
6.2	内部パラメータに起因する歪み補正	59
6.3	外部パラメータに起因する歪み補正	60
	謝辞	<b>62</b>

# 目 次

---

2.1	実物体のモデル化における3つのフェーズ	6
2.2	幾何学的モデリングの流れ	7
2.3	環境情報も考慮して得られる画像	9
2.4	3次元計測法の分類	10
2.5	光時間差法計測	12
2.6	光位相差法計測	12
2.7	スポット光投影システム	13
2.8	スリット光投影システム	13
2.9	(a)Cyrax2500	
	(b)獲得される距離画像	16
2.10	(a)Vivid910	
	(b)獲得される距離画像	16
2.11	(a)Imager5003	
	(b)獲得される距離画像	16
2.12	(a)FLRF	
	(b)獲得される距離画像	16
3.1	壁面画の全体図とその一部分	19
3.2	歪みを含んだ壁画面の全体図	19
3.3	補正関数によるマッチング	21
3.4	メッシュの階層的細分化	21
3.5	透視変換	22
3.6	座標系の関係	23
3.7	平面測定結果 (a)Vivid1 (b)Vivid2	26
3.8	点模様測定結果	26
4.1	(a)ヘリコプタープラットフォーム	
	(b)得られる距離画像	34

---

4.2	車載レンジファインダ	34
4.3	(a) 基盤に装着された2台のLMS200 (b) 木登りセンサの外観	36
4.4	(a) カメラ運動 (b) エピポーラ平面画像	37
4.5	時空間距離画像の基礎概念	
	(a) 水平移動の場合 (b) 垂直移動の場合	38
4.6	自己位置推定処理の概略図	39
4.7	時空間距離画像	40
4.8	エッジ抽出の際に使用するベクトル	42
5.1	(a) 補正前の平面距離画像 (b) 補正後の平面距離画像	46
5.2	特定角度における距離に応じた歪み値	46
5.3	(a) 補正前距離画像 (b) 補正後距離画像	47
5.4	2枚の距離画像を同時に表示した結果 白:補正前 赤:補正後	47
5.5	壁面画の補正の様子	48
5.6	(a) イメージカメラから得られる画像 (b) 傾き角度ごとの1次近似直線	49
5.7	(a) バイヨン寺院におけるデータ未取得部分 (b) モデルのデータ欠損箇所	50
5.8	木登りセンサで計測を行った箇所	51
5.9	(a) 時空間距離画像を用いて作成した距離画像 (b) 実際の計測箇所	51
5.10	(a) 穴のある3次元モデル (b) 木登りセンサにより穴埋めされた3次元モデル	51
5.11	木登りセンサにより得られた3次元モデル	52
5.12	バイヨン寺院の3次元モデルの穴埋め	53
5.13	位置合わせされた距離画像 赤:Cyrax2500による距離画像 青:木登りセンサによる距離画像	55
5.14	位置合わせされた距離画像 (a) 赤:Cyrax 青:木登りセンサ (b) 緑:木登りセンサデータの中で測定点間距離が1.5cm未満の点	55
5.15	推定速度のヒストグラム	56
5.16	異なる計算速度を位置合わせした結果	56
5.17	位置合わせされた距離画像 (緑:点間距離が2cm未満のもの) (a) 速度:0.4167m/s(仕様書)(b) 速度:0.3634m/s(提案手法)	57

# 表 目 次

---

2.1	レーザレンジファインダの仕様 . . . . .	15
4.1	Nobitec Lift の仕様 . . . . .	35
4.2	LMS200 の仕様 . . . . .	36
5.1	評価実験における歪みの最大値と平均値の変移 . . . . .	45

# 第1章

---

序論

## 1.1 研究背景

日本古来の文化財をはじめ，世界の文化遺産の多くは屋外に存在しており，長い年月風雨にさらされ劣化が進み，さらに水害や地震などの自然災害により失われることも少なくない．このような貴重な文化財の状態を記録し保存することは世界各地で必要とされている [1][2]．文化財の多くは建造当時の図面や資料が残されている事が少ないため，レーザレンジファインダを用いて物体の 3 次元形状を保存しておけば，万が一このような文化財が破損，あるいは完全に失われてしまっても後世において修復，復元が可能となる．

また，近年の計算機の処理能力の飛躍的な向上により，画像処理やコンピュータビジョンの研究が幅広い分野で応用されるようになってきているのも事実である．そのため，対象とされる物体の形状も多岐にわたっており，町全体や大規模な遺跡など，その対象は大きくなっている．その際に，広範囲にわたった対象物に対する現実感の高い 3 次元モデルを取得する際には，データ収集の効率性など依然多くの問題を抱えている．

さらに，近年の映像技術の発展に伴い，高品質な映像を一般的に見ることが可能になりつつある．ユーザーを満足させる仮想空間を構築する際には良質の映像が必要となり，そのために求められる 3 次元形状の質は高いものになってきている．高精度な 3 次元形状を獲得することができればそのようなニーズにも応えられるようになると思われる．

## 1.2 研究目的

われわれはこれまで奈良や鎌倉の大仏 [3]，廣目天 [4]，フゴッペ洞窟 [5] などの文化財をモデリングしてきた．さらに，近年においてはより大規模な文化財であるカンボジア・アンコールトム遺跡のバイヨン寺院のモデリングを進めている [6]．その際に，新たな対象物を測定することによって既存の測定手法の問題点が浮き彫りとなってきた．

たとえば，われわれが今まで測定の際に使用していたレーザレンジファインダにおいては，1 回の測定から得られる距離画像のみを見てみると歪みが目立たなかったが，全体の 3 次元モデルを生成してみると微小な歪みが蓄積し全体として大きく歪むといった問題に直面した．バイヨン寺院における壁面画は非常に精密に彫られ

ており近距離で密にデータを取らなければならなかったが、そのために壁面画全体のモデルを得るためには数百枚単位の距離画像を位置合わせしなければならなかった。大規模な対象物を測定することによって初めて微小な歪みの蓄積の問題が認識された。そこで、まず個々の距離画像に対して微小な歪みを除去することを目的とした。

また、バイヨン寺院のように大規模な対象物を測定するときには、その測定箇所に応じてデータ取得を行うレーザレンジファインダを選択してきたが、建築物の内部までモデリングを行おうとすると既存のファインダそのものの大きさや、測定視野角のために十分に満足いく精度のデータを取得することができなかった。たとえば上述した壁面画に関しては正確に密なデータが必要であるのでそのようなファインダを使用し、寺院全体を測定する際には対象物に十分近づかなくても測定が可能なファインダを使用するといったように、既存のレーザレンジファインダで測定可能な箇所であれば問題はなかった。しかし測定箇所に応じた既存のレーザレンジファインダが存在しないときに、バイヨン寺院の完全な 3 次元モデルを作成するというわれわれの目的を果たすことができなかった。すなわち、われわれが作成したバイヨン寺院の 3 次元モデルには依然としてデータ取得が行われていないためにデータ欠損部分が存在したのである。そこでそのような空間的な制約がある場所でも測定が行える測定システムを考案することを次の目的とした。

### 1.3 本研究の成果

本論文の成果として、提案手法によって既存のレーザレンジファインダにおける不正確なキャリブレーションのために生じる歪みの除去を行うことが可能となり、すでに測定を終えている膨大な距離画像という資産を無駄にすることなく、正確な 3 次元モデルの作成が可能となった。また、考案された測定システムによって、今まで測定を行うことができなかったためにデータが欠損していた箇所についても正確な 3 次元モデルを新たに生成することが可能になったことが挙げられる。

### 1.4 本論文の構成

本論文で提案する歪み補正には大きく分けて内部パラメータと外部パラメータの 2 つの要因による歪みを考慮している。内部パラメータによる歪みとはレーザレン

ジファイнда内部で行われているキャリブレーションが不正確なために生じる獲得距離画像の歪みのことである。また、外部パラメータによる歪みとは、空間的制約の問題を解決するために考案した測定システムにおいて、レーザレンジファイнда自身を測定中に移動させることにより得られる距離画像に生じる歪みである。

本論文の構成について述べる。第 2 章では実物体のモデル化についてその概要を述べ、さらにモデル化の際のデータ取得に用いるレーザレンジファイндаについて詳しく述べる。第 3 章では内部パラメータによる歪みの提案補正手法を述べ、次に第 4 章では新たに考案した測定システム(木登りセンサ)が移動しながら測定を行うため、外部パラメータによって生じる歪みの補正手法について述べる。第 5 章では第 3 章、第 4 章で提案した補正手法の精度を実験・検証し、最後に第 6 章で本研究の総括をする。

## 第2章

---

# 実物体のモデル化

## 2.1 モデリングプロセス

実物体をモデリングするには図 2.1 にあらわされるように 3 つの局面から成り立っている．本論文では幾何学的モデリングのフェーズにおける問題点を解決する手法を提案しているため，次節以降は主に幾何学的モデリングに関して述べる．

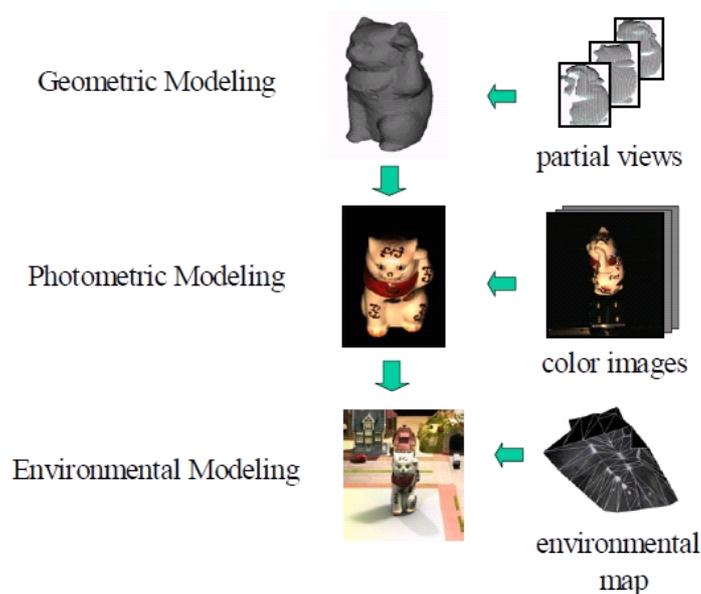


図 2.1: 実物体のモデル化における 3 つのフェーズ

### 2.1.1 幾何学的モデリング

物体の 3 次元モデルを作成するには，内部にその幾何情報を保有していることが不可欠である．幾何情報とはすなわち，ある点から物体表面までの距離のことで，物体全体の幾何情報を得ることによってはじめて形状を表現することができる．その際にはレーザレンジファインダと呼ばれる計測装置を利用してその機器の原点から物体表面までの距離を測定するが，それによって得られる距離データは距離画像と呼ばれる．カメラのようなイメージセンサでは対象物の色情報のみを獲得するのに対し，レーザレンジファインダでは距離情報を獲得する．レーザレンジファインダはレーザを照射することによって距離データを獲得するため，見えている部分し

か測定できないという問題を持つ．そのため，複数の視点から対象物を測定することによって対象物全体の距離データを獲得することが可能となる．

1 枚の距離画像は対象物の部分的な情報しか保有していないため，全体の形状モデルを作成するためには複数の視点から獲得された距離画像の関係性を明らかにし，距離データをつなげなければならない．そのために行われる処理が位置合わせ (レジストレーション) [7][8][9] であり，複数枚の距離画像内において対応する点が重なるようにしなければならない．位置合わせ手法には 2 種類あり，逐次位置合わせとその拡張手法である並列位置合わせ [10][11] があるが，われわれは誤差が蓄積しないようにまず逐次的に位置合わせを行ったあとに並列位置合わせを用いている．そのため，計測を行う際には対応点が存在するように，異なる視野から測定する場面においても他視点で測定した箇所が一部分でも含まれるような視野を選ぶように注意しなければならない．

複数枚の距離画像を位置合わせし，全体の距離データを獲得したら位置合わせされた結果を統合する必要が生じる．各距離画像は異なるメッシュモデルから成り立っているため，それらを統一しなければならない．この処理は統合 (マージング) と呼ばれる [12][13][14]．以上の処理の流れを図 2.2 に示す．

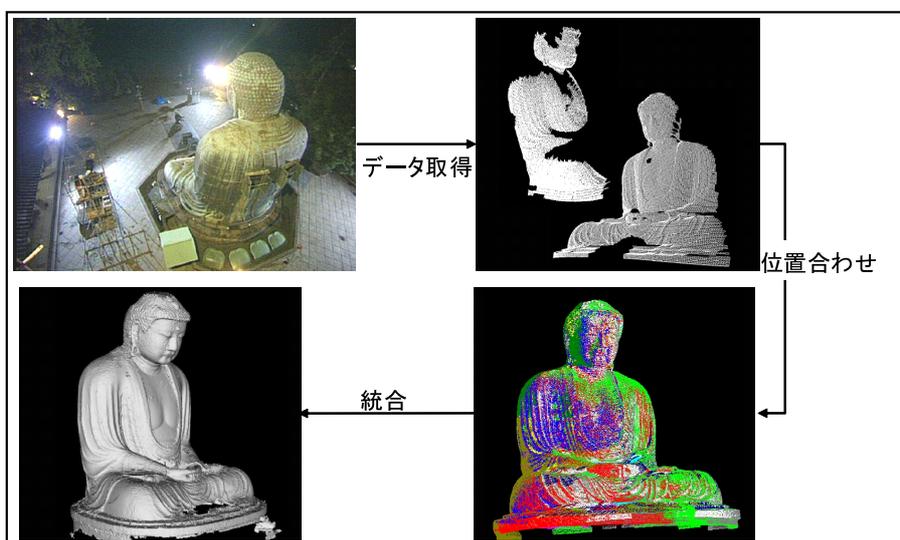


図 2.2: 幾何学的モデリングの流れ

### 2.1.2 光学的モデリング

3次元モデルを表示する際に、画像ベースのレンダリングでは、複数の画像から補間を行うことによって新たな画像を合成する手法がとられるため、周りの照明環境に応じた正確な影などを生成することができないという問題が生じる。一方、幾何学的モデリングによって得られる3次元モデルは対象物までの距離データからなるメッシュモデルであるが、形状だけでなく色情報もモデリングすることができれば上述した問題も容易に解決できる。形状モデルに複数枚の画像から得られる色情報を付加することによって(テクスチャマッピング) [15][16][17][18]、より現実感の高いモデルを生成することが可能となる。

### 2.1.3 環境に応じたモデリング

コンピュータグラフィックスなどでは、仮想物体は単独で表示されることは少なく、現実・仮想的な背景の中に置かれることがほとんどである。そのためにはまず、仮想物体は背景に応じた適切な場所に配置されなければならない。幾何学的情報を持っている3次元モデルを利用することによってこの問題は容易に解決される。次に、仮想物体にそのほかの物体と統合のとれた影が付いていないと、仮想物体が浮き上がっているように見えてしまうため、その環境に応じた影付けが必要となる。3次元モデルにおいて色情報も付加されているため、影を付けることによる色の変化を考慮して色を与えれば、仮想物体を自然に表示させることが可能になる [19][20]。図 2.3 は環境を考慮して色情報も付加させた結果である。



図 2.3: 環境情報も考慮して得られる画像

## 2.2 レーザレンジファインダ

次に 3 次元計測の際に使用されるレーザレンジファインダの特徴について説明した上で、本研究室で保有するいくつかのレンジファインダを紹介する。

### 2.2.1 レーザレンジファインダの 3 次元計測法

3 次元距離を計測する際には、図 2.4 のように大きく能動的計測と受動的計測に分類され、レーザを用いるレーザレンジファインダは前者に当たる。この手法は計測装置から対象物に光を照射し、対象物からの反応（時間差遅れや位相差遅れなど）から位置や形状を計測する手法である。ほかにもステレオ法に代表される受動的計測では、計測装置からエネルギーを出さず、対象物からの光などのエネルギーパターンのみを受け、対象物の位置や形状を計測する手法も存在する。

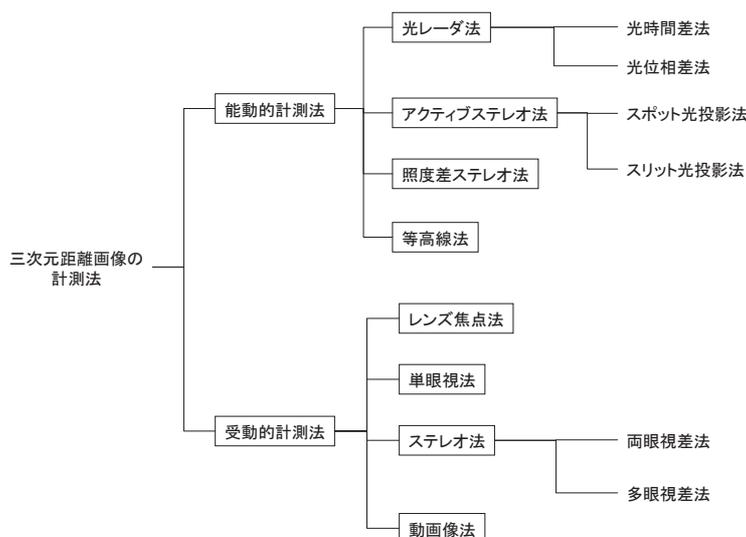


図 2.4: 3 次元計測法の分類

レーザレンジファインダは測定物体に対してレーザ光を照射し、対象物体までの距離を獲得し、3 次元点座標の集合体（点群）として、デジタルデータ化を行う装置である。その際にレーザ光の反射点が描く軌跡はスキャンラインと呼ばれる。レンジファインダによって取得された点群データは、計測対象物の形状の測定はもちろん、3 次元モデルの作成や 2 次元平面図・立面図・縦横断図等への加工が可能となる。以下ではレーザレンジファインダの測定原理の代表方式をいくつか簡単に述べる。

## 2.2.1.1 光飛行時間測定法

光飛行時間測定法とはその名の通り光の飛行時間を測定して 2 点間の距離を計測する手法である。図 2.4 においては光レーダ法に対応する。さらに主に 2 種類に分類され、パルスレーザを用いて光の飛行時間を直接的に計測する Time of Flight 方式や、光強度を周波数で変調して変調波の位相シフトを計る位相差検出方式がある。これらの手法はいずれもレーザを放射し、主にポリゴンミラーを用いレーザを照射する場所を変えることにより対象物全体の 3 次元点座標集合体を獲得している。この手法の長所としては光速度に基づく測量であるため、測定距離によらず測定精度が変わりにくい、不可視領域がない、といった点が挙げられる。逆に短所としては短い距離の計測が難しい、回路が複雑で高価となる、安定な光強度を得るのが困難である、反射特性に依存する、などが挙げられる。

## Time of Flight 方式

この手法は光パルスが対象物に当たり、反射して帰ってくるまでの時間を計測して距離を求める方法である。別名光時間差法とも呼ばれる。すなわちパルスレーザを用いて光の飛行時間を直接的に計測する手法である。図 2.5 において光速一定の原理により、対象物までの距離  $l$  は式 (2.1) であらわされる。

$$l = c \times \Delta t / 2 \quad (2.1)$$

本手法の特徴としては、測定距離によらず測定精度が一定である、という点である。時間を計測する際に、微小な距離の違いを検出するためには非常に高い時間分解能を必要とするが、回路技術を用いて計測することは困難であり、反射光強度の違いを補正するための自動利得調節や、ノイズによる測定誤差を平滑化する平均化回路を用いるのが一般的である。

## 位相差検出方式

この手法は、光の強度を正弦波状に変調したレーザを放射し、対象に当たって反射してくる波と元の波との位相差を検出することによって光の飛行時間を計測する手法である。Time of Flight 方式では反射された光パルスの到着時刻を測定しなければならなかったのに対し、本手法では光信号のパターンを計測するため、ノイズの影響を受けにくく、計測精度が高い、という特徴を持つ。

図 2.6 において周波数  $f$  の変調波の  $\Delta\theta$  位相差分の距離は、位相差の  $2\pi n$  の曖昧性、往復を考慮して、式 (2.2) であらわされる。

$$l = c(\Delta\theta + 2\pi n)/4\pi f \quad (2.2)$$

測定対象までの距離が限られた範囲にあればこのような曖昧性の問題は生じないが、屋外での計測では対象物と遠方の背景など、測定範囲が非常に広い場合も考えられる。その際には前後の領域の連続性などから変調波長  $\lambda$  の影響を考えねばならないが、一般的には光の反射光強度を見てみると遠方であればあるほどその値は小さくなることから容易にその影響を取り除くことができる。注意すべきは対象物の境界などで起こる急激な距離変化である。

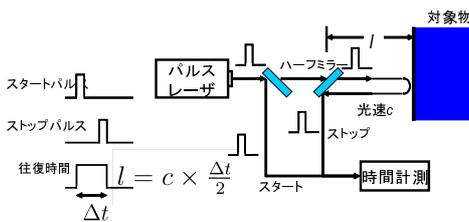


図 2.5: 光時間差法計測

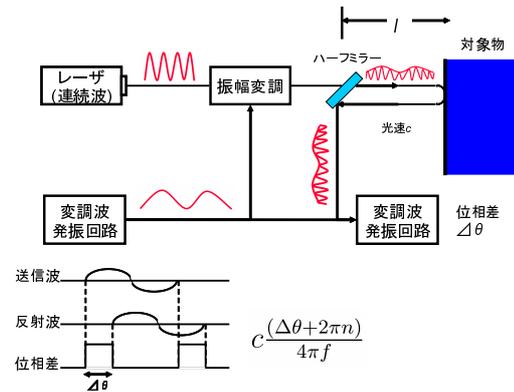


図 2.6: 光位相差法計測

### 2.2.1.2 三角測量に基づく測定法

対象物を異なる位置から目測し、各々の視線方向が定めれば、三角測量の原理から対象までの距離が計算できる。この手法はステレオ画像法と呼ばれるが、ステレオ画像法では異なる視点を左右 2 つのカメラを用いて測定するのに対し、一方を光を発するプロジェクタを使用する手法がこの測定法に分類される。さらにこの方式では投影される光のパターンに応じて分類することができる。

#### スポット光投影法

レーザを対象に投影し、図 2.7 のようにそれにより輝いたスポットを異なる位置からカメラで捉え、スポットの 3 次元位置を求める手法である。レーザ光源、カメ

ラ、スポット像からなる三角形を利用し、三角測量によって距離が求められる。このスポット像はカメラの結像面中、カメラとパターン投影装置を結ぶ基線とスポットの投影軌跡からなる平面(エピポーラ平面)のエピポーラ線上にあるため、線路上に限定して探索することにより容易に検出される。ステレオ画像法では特別なスポット像が得られないため、ある点に対応するカメラ画像中の点の対応をとるのが困難であることからエッジ抽出などを行う必要が生じるのに対し、この手法ではスポット像がレーザ光を使用しているため輝度値が著しく高く、簡単なピーク検出で対応付けを行うことができる。スポット光を逐次対象物全体に投影し、カメラ、光源、スポットからなる三角形を用い三角測量により対象物全体の3次元形状データを得ることができるが、対象物全体にスポット光を照射する必要があるため、時間がかかるという問題点を持つ。

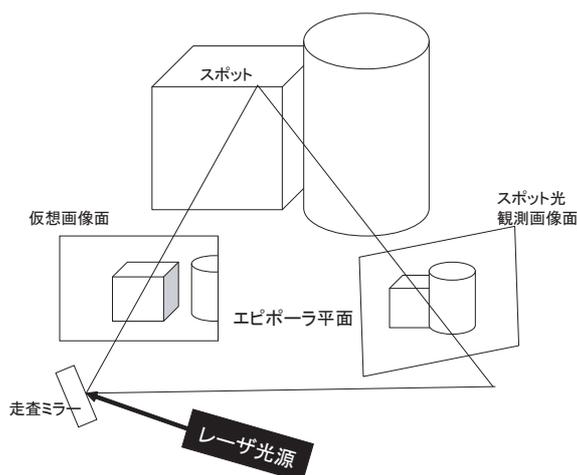


図 2.7: スポット光投影システム

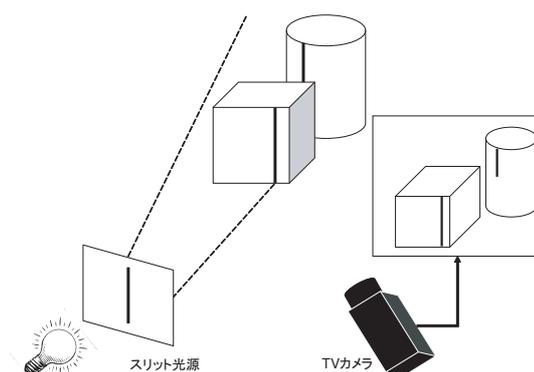


図 2.8: スリット光投影システム

### スリット光投影法

スポット画像法では、1枚の画像から1点のみしか3次元位置が求まらないため測定に時間がかかるという問題がある。このスリット光投影法ではレーザによりスポット光を投影する代わりに1本のスリット光を投影する手法である。図2.8のように1枚の光シートが対象物体を切断するときの切断線像を獲得しながら、徐々にスリットの投影方向を変化させ、観測対象を走査することにより、3次元形状データを獲得することができる。

### 2.2.2 レーザレンジファインダの種類

ここではわれわれの研究室が保有するいくつかのレンジファインダについて簡単にまとめる。それらの仕様は表 2.1 の通りである。たとえばわれわれが測定を行っているカンボジアのバイヨン寺院においては、測定対象に応じてそれぞれの長所を活かすべく使用するレンジファインダを状況に応じて用いている。

#### 2.2.2.1 商用レーザレンジファインダ

##### Cyrax2500[21]

Cyrax2500 は米国の Leica Geosystems 社製のレーザレンジファインダである。遠距離の対象物でも測定精度が比較的高いという特徴を持つ。本レンジファインダを使用して得られる距離画像は図 2.9 のようになる。

##### Vivid910[22]

Vivid910 は KONICA MINOLTA 製のもので測定距離の範囲は狭いものの、非常に高精度に対象物を測定できる。この製品は主にレリーフなど対象物の奥行き差が比較的小さいものに対して使用される。図 2.10 のように微小な奥行きの違いが見て取れることがわかる。

##### Imager5003[23]

Imager5003 は独国の Zoller+Fröhlich 社のもので、Cyrax2500、Vivid910 と大きく異なり、球状に測定を行うといった特徴を持つ。図 2.11 から見てわかるとおり、レーザレンジファインダを中心に球状に測定を行うことができるため、室内や大規模な物体の測定に使用されることが多い。

#### 2.2.2.2 池内研究室が独自に開発したレーザレンジファインダ

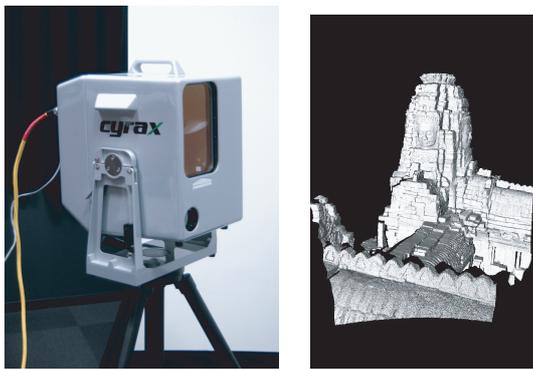
##### Floating Laser Range Finder[24]

商用のファインダでは大規模な物体の上部を測定することが困難であったり不可能であるような場所を空中から効率的に計測する気球搭載型センサ (Floating Laser

Range Finder, FLRF) をわれわれ池内研究室は開発した。このようなセンサを用いて計測を行う場合、センサの位置が変動し画像が歪むという問題が生じるが、ソフトウェアによってその歪みを除去することが可能となっている。図 2.12 に示すように大規模な物体を上部から測定することが可能となっている。

表 2.1: レーザレンジファインダの仕様

	Cyrax2500	Vivid910	Imager5003	FLRF
測定範囲	1.5-50m	0.6-2.5m	0.5-53.5m	0.5-50m
測定精度	±6mm	±0.008mm	±5mm	±5mm
計測時間	1column/sec (1,000points)	0.3-2.5sec/scan	125,000px/sec	1sec/scan
解像度	0.25mm(50m)	640×480	0.018°(垂直方向) 0.01°(水平方向)	900×160
レーザクラス	2	2	3R	3R
測定方式	光時間差法	スリット光投影法	光位相差法	池内研究室 光位相差法
製造元	Leica Geosystems	KONICA MINOLTA	Zoller+Fröhlich	(レーザーレーダーユニットは Z+F 社の LARA25200 を使用)



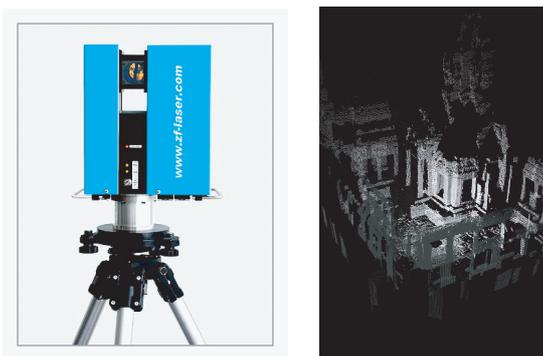
(a) (b)

図 2.9: (a)CyraX2500  
(b) 獲得される距離画像



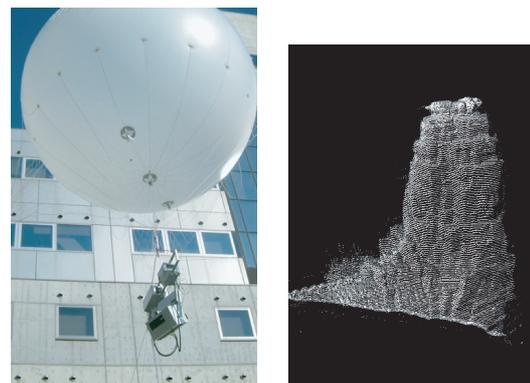
(a) (b)

図 2.10: (a)Vivid910  
(b) 獲得される距離画像



(a) (b)

図 2.11: (a)Imager5003  
(b) 獲得される距離画像



(a) (b)

図 2.12: (a)FLRF  
(b) 獲得される距離画像

## 第3章

---

### 内部パラメータによる歪みの補正

### 3.1 大規模モデルの問題点

計測の際に使用されるレーザレンジファインダは非常に高い精度で実物体を計測することが可能であり、それと同時にセンサ技術の進歩により測定の効率も高まっていることからその対象となる物体も非常に広範囲に広がっている。3次元モデルを生成する際には、レーザレンジファインダを用いての測定が行われることが多い。しかし、1スキャンからは1方向のみからの測定となってしまうため、大規模な物体を測定するには複数回の測定を行うことで全体のモデルを作成せねばならない。複数回の測定から得られる距離画像を位置合わせする手法には2段階の手順がある。まず、個々の距離画像を1枚ずつ、逐次的に位置合わせし、そのあとに全体を同時位置合わせする手法が取られる。

多くのレーザレンジファインダでは、その内部においてキャリブレーションが行われているが、そのキャリブレーションが不正確な場合、個々の距離画像が歪んでしまうといった問題が生じる。上記の逐次的位置合わせや全体位置合わせの手法は、測定の際のノイズに対して頑強であるという特性を持っているが、十分なキャリブレーションが行われていないレーザレンジファインダから得られる距離画像のシステムティックな歪みは修正できない。振動性のエラーであるノイズに対し、不十分なキャリブレーションから生じる歪みは単調で滑らかであるという特性を持つ。

既存のアラインメント手法においては、単調で滑らかな歪みに対し脆い性質を持っており、位置合わせができない、もしくは正しく位置合わせが行われない恐れがある。つまり、単調な歪みを保有する距離画像を逐次的に位置合わせを行っていくと個々の微小な歪みが蓄積し、全体として大きく歪曲したモデルを獲得することになるのである。その中でも、歪みが微小でない場合、位置合わせすらできないという可能性もあらわれる。

われわれ研究室で測定したカンボジアのバイヨン寺院における壁面画においても、複数枚の距離画像をアラインメントすると、一部分のみを見れば図 3.1 のように歪みが目立たないが、全体としては図 3.2 に見られるように大きく歪曲した大規模モデルが生成された。図 3.2 を構成する個々の距離画像は表 2.1 の Vivid910 を使用して獲得された。

そこで、本章では不正確なキャリブレーションによる歪みを含んだ距離画像を容易に補正する手法を提案する。

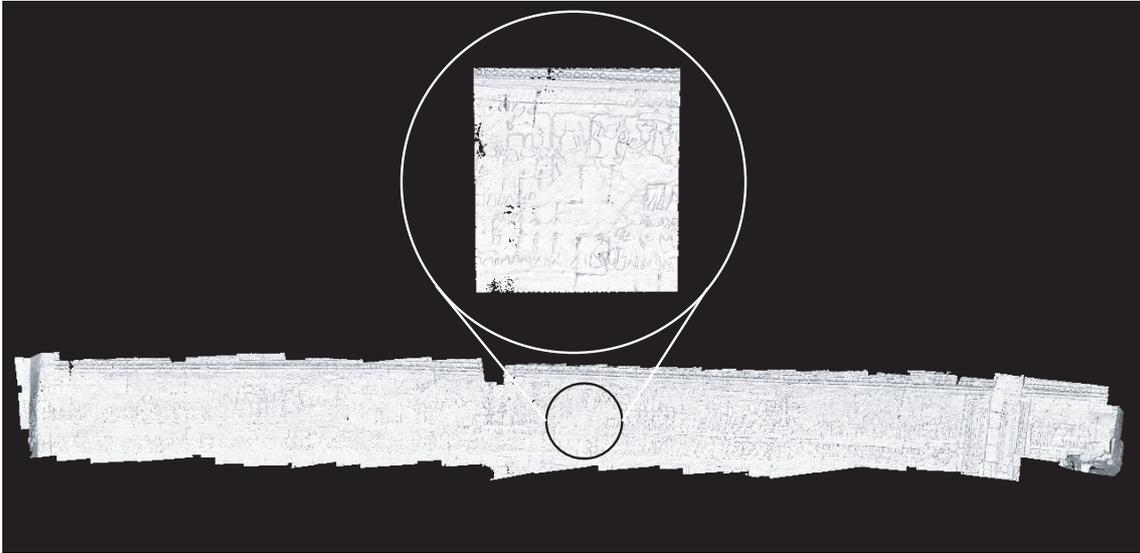


図 3.1: 壁面画の全体図とその一部分



図 3.2: 歪みを含んだ壁画面の全体図

## 3.2 関連研究

一般的に近年のファインダにおける精度は非常に高いものになっており、キャリブレーションの必要がないように思われる。しかし、レーザレンジファインダの仕様書に書かれてある精度は、多くの場合最も精度の高い場所におけるものが記載されており、本研究で明らかになった歪みの特性はあらわれなくなっている。そこで歪みの問題を解決する必要があるが、その方法はいくつか考えられる。

まず、最初に考えられる方法はレーザレンジファインダ内部のキャリブレーションを正確に行うといったものである。この手法は正確に行うことができるのであれば、理想的であるといえる。しかし、市販のファインダにおいてキャリブレーションはレーザレンジファインダ内部で行われ、その仕様は完全には公開されていないため、一般ユーザがキャリブレーションを行うことは困難である。また、製造元にキャリブレーションを依頼することも可能であるが、多くの場合屋外で測定が行われ、さらに測定に何日も要する場合において、そのような解決法は現実的ではないと考えられる。さらに、この解決法の一歩の問題として、すでに測定され獲得されている莫大な距離画像という資産を有効に利用できないといった問題が生じてしまう。

他の手法として考えられるのが、距離画像を補正する関数を求めるといった手法である [25][26]。たとえば、周回状の物体を計測することを考えると、最初と最後に計測した距離画像がずれる恐れがある。その際に、離れている距離画像を補正関数により、マッチングする手法が考えられる。すなわち図 3.3 下部のように本来は重なるべき部分をマッチングする補正関数を求める手法である。しかし、この補正関数を求める手法では、計算コストが非常に高く、それ故収束が遅い、といった問題がある。また、補正関数を求める際に、多くの自由度を与えるため、制御が困難になる。さらに、このような計測物体ではこの手法が有効かもしれないが、多くの場合、マッチングすべき距離画像の位置がわからないため、この手法はとることが不可能である。また、キャリブレーションが不十分なセンサから取られた距離画像には共通の種類歪みをもっており、本手法はそのような再現性のある歪みを補正するには不適切であると考えられる。

このような問題を解決する手法として上記の手法と異なる種類の方法も提案されている。測定から得られる距離画像のメッシュを階層的に細分化し、小さなメッシュ間のアラインメントを行うことで、ミスキャリブレーションから生じる歪み成分の

影響を大規模モデルにおいて少なくする手法が提案されている [27] . 細分化されたメッシュは図 3.4 のように一部分が重なるようなアルゴリズムで細分化されており, その箇所を位置合わせすることで, 歪みを除去している . しかし, この手法は距離画像データの補正という面では, 真値に近づけていないため, 不十分であると考えられる . また, 本手法はメッシュの細分化という手法を用いて, 信頼性のあるデータのみを利用し位置合わせを行う手法であるが, 歪みが曲線的でない場合には収束しない可能性がある . さらに, 前の手法と同様に, 再現性のある歪みを補正する手法としては非効率的であるという問題点もある .

以上を踏まえ, われわれはすでに測定を終え獲得している莫大な距離画像という資産を有効に利用すべく, 距離画像の歪みをその再現性を利用して効率的に除去する手法を提案する .

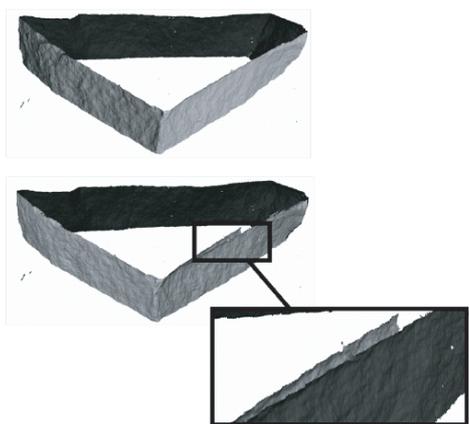


図 3.3: 補正関数によるマッチング

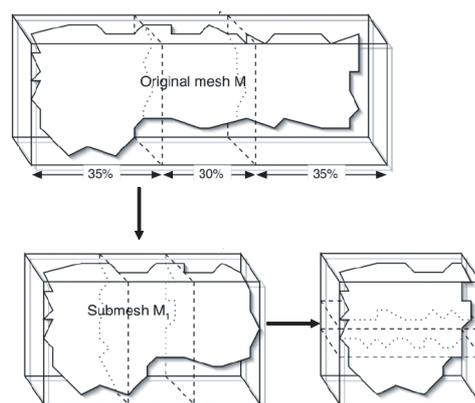


図 3.4: メッシュの階層的細分化

### 3.3 内部パラメータ

ここで, 図 3.2 を構成する距離画像を獲得したレーザファインダは Vivid910 であることから, 3次元計測手法としてスリット光投影法を利用していることがわかる . スリット光投影法を用いるレーザレンジファインダはレーザ光源とカメラによって構成される . 計測点の座標を求めるには, レーザ光やカメラの視線がなす平面や直線などを数式化し, それらの式を連立させ解くという三角測量の方式が用いられる .

数式化の際には，カメラやレーザの系を，位置，姿勢，画角などのパラメータによってモデル化する必要性がある [28][29] .

### 3.3.1 カメラパラメータとプロジェクタパラメータ

図 3.5 にあらわされる空間上のある点  $P(X, Y, Z)$  がピンホールカメラモデルによって結像面  $I$  に透視投影された点  $P'(X_c, Y_c, Z_c)$  は焦点距離を  $f$  とすると非線形な透視変換となるが，3次元の座標を媒介する変数  $W_h$  を 1 つ加えることにより線形化し，同次座標系に変換することができる．同次座標系  $(X_h, Y_h, Z_h, W_h)$  を用いて点  $P$  は

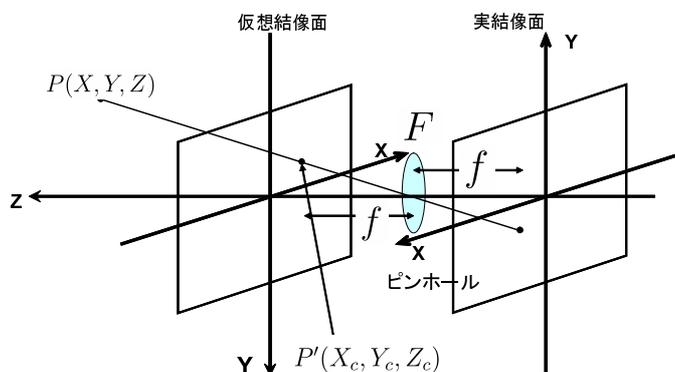


図 3.5: 透視変換

以下のようにあらわされる .

$$\left. \begin{aligned} X &= X_h/W_h \\ Y &= Y_h/W_h \\ Z &= Z_h/W_h \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

同次座標系を利用することにより，透視変換は  $4 \times 4$  の行列演算によりあらわされる .

$$\begin{bmatrix} X_{ch} \\ Y_{ch} \\ Z_{ch} \\ W_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

測定対象に用いる座標系を物体座標系とし，カメラに原点を置いた座標系をカメラ座標系とすると，これらを別の座標系としてあらわす場合，2つの座標系を関連付

ける変換  $T$  が必要となるが,  $T$  はすなわち回転と平行移動をあらわす.

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

よってカメラから得られる結像面上の 2 次元座標  $(X_c, Y_c)$  は, 変換  $T$  を用いた式を変形することにより, 媒介変数  $H_c$  と点  $P(X, Y, Z)$  を用いて次式であらわされる.

$$\begin{bmatrix} H_c X_c \\ H_c Y_c \\ H_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

この変形によって得られる  $3 \times 4$  の  $C$  行列はカメラパラメータと呼ばれる.

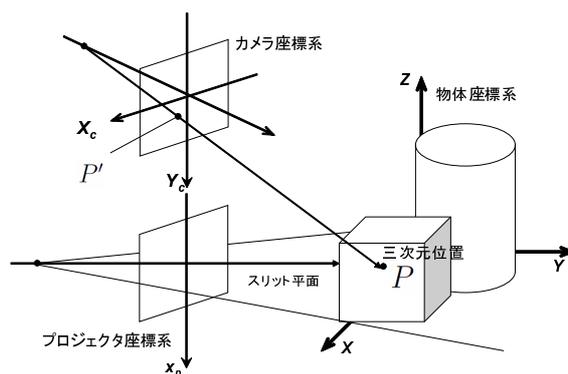


図 3.6: 座標系の関係

また, 図 3.6 のようにスリット光を用いて投影を行うとき, スリット光を回転させるミラーを原点としたプロジェクタ座標系を定義すると, この座標系でもピンホールカメラと同じ関係を用いることができる. 異なる点としては, 結像面における座標が 2 次元でなく 1 次元になっている点であり, 式 (3.4) とほぼ同じ式を得るが,  $4 \times 4$  ではなく,  $2 \times 4$  の変換行列となる.

$$\begin{bmatrix} H_p X_p \\ H_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

カメラにおいては  $C$  , プロジェクタにおいては  $P$  がキャリブレーションすべきパラメータとなる . このパラメータには位置 , 姿勢 , 画角などの外部パラメータ , さらにカメラパラメータにおいては焦点距離などの内部パラメータのデータが含まれている . カメラパラメータには後述するように , ほかにレンズ歪み係数などが含まれる . また , カメラパラメータとプロジェクタパラメータは , あわせてシステムパラメータと呼ばれる .

以上により , カメラ視線とプロジェクタ平面と数式化することができたので 3 次元座標を算出することが可能になる . 式 (3.4) と式 (3.5) を連立することで行列演算の形で表現でき , 逆行列を求める問題として , 交点の座標である点  $P(X, Y, Z)$  が求められることができる .

### 3.3.2 キャリブレーション

上で述べられたパラメータモデルを計測系によってキャリブレーションする必要がある . システムパラメータは 3 次元形状が既知である , キャリブレーションボックスを用い , 3 次元計測することによってパラメータを較正する手法が取られる .

物体座標系で基準となる点  $(X, Y, Z)$  と , それに対応するカメラ画像面での位置  $(X_c, Y_c)$  がわかっている場合 , 12 個の未知数からなるカメラパラメータを求めるには , 同一平面上にない 6 点の基準となる点とその対応座標がわかれば良い . 通常はキャリブレーションの精度を上げるために 6 点以上が用いられ , 最小 2 乗法によってパラメータが固定されることが一般的である .  $n$  点の基準点の物体座標  $(X_i, Y_i, Z_i)$  と対応するカメラ座標  $(X_{ci}, Y_{ci})$  が得られれば  $C_{34} = 1$  とすることで次式を得る .

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_1 X_{c1} & -Y_1 X_{c1} & -Z_1 X_{c1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -X_1 Y_{c1} & -Y_1 Y_{c1} & -Z_1 Y_{c1} \\ & & & & & & & & \dots & & \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_n X_{cn} & -Y_n X_{cn} & -Z_n X_{cn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -X_n Y_{cn} & -Y_n Y_{cn} & -Z_n Y_{cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ \dots \\ C_{32} \\ C_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{c1} \\ Y_{c1} \\ \dots \\ X_{cn} \\ Y_{cn} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

式 (3.6) から最小 2 乗法を用いてカメラパラメータをキャリブレーションできる .

また , 実際にはカメラの画像にはレンズ歪みにより歪みが載っている可能性があるためレンズ歪み分を考慮せねばならない . 画像座標  $(X_c, Y_c)$  における変化分  $\delta_X, \delta_Y$

は多くの場合，次式のように半径方向の歪みによってあらわされる．

$$\delta_X = \kappa_1 X_c (X_c^2 + Y_c^2) \quad (3.7)$$

$$\delta_Y = \kappa_1 Y_c (X_c^2 + Y_c^2) \quad (3.8)$$

レンズ歪み係数は，レンズ歪みを 0 として得られた  $f$  と  $T$  を初期値として，次式を非線形最適化問題として解き，求めることができる．

$$\begin{aligned} & d_Y(Y_c - C_Y) + d_Y(Y_c - C_Y)(\kappa_1(X_c^2 + Y_c^2)) \\ &= f \frac{T_{21}X_i + T_{22}Y_i + T_{23}Z_i + T_{24}}{T_{31}X_i + T_{32}Y_i + T_{33}Z_i + T_{34}} \end{aligned} \quad (3.9)$$

ここで， $d_Y$  は  $Y$  方向の CCD の素子間隔をあらわし， $C_Y$  は画像上の原点座標をあらわす．また，ほかにもレンズ歪みを求める手法は多様に存在する [30][31]．

プロジェクタパラメータのキャリブレーションも同様で，同一平面上にない 8 個以上の基準点  $n$  の物体座標  $(X_i, Y_i, Z_i)$  とそれに対応するプロジェクタ座標  $X_{pi}$  が既知であれば， $P_{24} = 1$  として最小 2 乗法によってプロジェクタパラメータもキャリブレーションできる．なお，ここでは紙面の都合上光切断方式のレーザレンジファインダのキャリブレーションについて説明したが，測定方式が異なるファインダや，同様の光切断方式のファインダにおいてもさまざまなキャリブレーション手法が提案されている [32][33]．

以上の手法によってレーザレンジファインダのキャリブレーションを行うことができる．しかし，時間の経過などの影響を受け，ファインダのキャリブレーションは不十分となることがあり，そのために図 3.2 のように歪んだ距離画像を得ることとなる．前述したとおり，歪みを除去するには正確にキャリブレーションを行うことが理想的ではあるが，市販のレーザレンジファインダの場合，これらの較正作業はほとんどがファインダ内部で行われており，さらにその仕様が非公開であるため，一般ユーザが正確にキャリブレーションを行うことは困難である．

### 3.4 提案手法

そこで，本論文では測定後でも容易に歪みを補正する手法を提案する．この手法を用いることにより，すでに測定を終えた歪みを含んだ莫大な距離画像という資源を有効に使うことができる．

### 3.4.1 測定環境

まず、本研究で使用したレーザレンジファインダについて説明する。本研究では KONICA MINOLTA 製の非接触 3 次元デジタイザ Vivid910 を使用した。

このレーザレンジファインダは測定方式としてスリット光投影方式を用い、三角測量で距離を獲得する。測定入力対象設置範囲は 0.6 ~ 2.5m であり、焦点距離の異なる 3 種類の受光レンズが付属しており、測定範囲に合わせ受光レンズを取り替えることができる。われわれ研究室では多くの場合比較的広範囲が測定可能な WIDE、もしくは MIDDLE を使用している。図 3.2 の測定には Vivid910、受光レンズは WIDE が用いられた。

### 3.4.2 歪み特性

図 3.2 は複数枚の距離画像を位置合わせした結果であるが、歪曲が見て取れる。個々の距離画像が微小ながら中心から外側にかけて瓦状に歪曲しており、逐次位置合わせの際の重なり部分が距離画像の中心から外れた場所であるため、アラインメントした結果として歪みが蓄積し、図 3.2 のような結果を得たと考えられる。

そこで、われわれはまず、平面を Vivid を用いて測定することとした。これにより、特に距離画像の奥行き方向の歪みを検出することができる。われわれ研究室は Vivid910 を 2 台保有しているため、それら 2 台のファインダを用いて測定した結果を図 3.7 に示す。微小ではあるが、確かに平面が歪曲している様が見られる。また、2 つの距離画像の歪み特性が異なっていることもわかる。図 3.7(a) は中心から外側に行くほど奥行き方向の歪み値が正に大きくなり、図 3.7(b) は中心から外側に行くほど奥行き方向の歪み値が負に大きくなっている。これはファインダ内部で行われているキャリブレーションにより、補正が一方のファインダは必要以上に強力であり、他方は微弱であるためと考えられる。

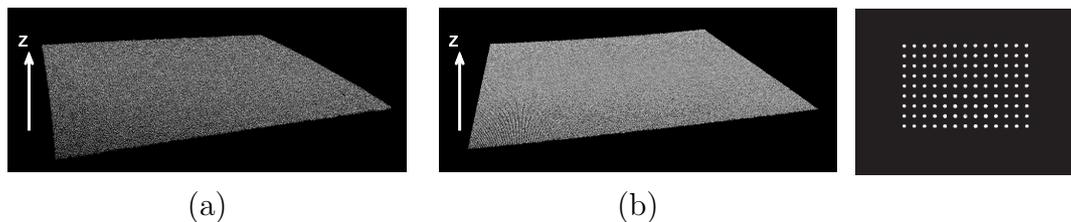


図 3.7: 平面測定結果 (a)Vivid1 (b)Vivid2

図 3.8: 点模様測定結果

このような平面の測定では奥行き方向の歪みは検出できるものの、ファインダから見た縦横方向の歪みの検出は困難である。そこで、キャリブレーションボックスが使用するような点模様を印刷し、それを壁面の貼り付け、計測することで縦横方向の歪みも検出した。得られる距離画像は図 3.8 のようになった。

以上によって得られた距離画像から歪みの特性について検討した。以下詳しく述べる。

#### 奥行き方向歪み特性

まず、奥行き方向の歪みについて考察する。奥行き方向の歪みに関しては得られた距離画像の座標値を主成分分析し、平面の法線方向を求めた。この際に使用した受光レンズは広範囲の測定が可能な WIDE で、平面との距離はおよそ 2.5m であった。次に、平面の全座標値の平均から平面の重心を求め、個々の点に対して重心から平面の法線方向にどれだけずれているかを求め、その値の奥行き方向成分の最大値と最小値から最大誤差を求めた。縦横方向の歪み成分が存在する時、この誤差の値は正確なものではないが、ここでは簡単のため、このような簡略化した手法を用いた。最大誤差は図 3.7(a) で使用した Vivid に関しては  $2.407 \times 10^2 \text{mm}$  となり、(b) で使用した Vivid では  $2.128 \times 10^2 \text{mm}$  となった。Vivid の仕様書において精度は奥行き方向に  $\pm 0.008 \text{mm}$  と書かれていたのに対し非常に大きなオーダーの誤差となっていることがわかる。また、中心から外側に行くほど誤差が大きくなっていることが両方の Vivid からわかった。

#### 縦横方向歪み特性

次に縦横方向の歪みについて述べる。こちらに関しては図 3.7(a) で使用した Vivid を用いた。点模様における点間距離は 10cm とし、点模様を印刷した用紙を貼り付けた壁面までの距離は約 2.3m とした。まず、ファインダから得られる輝度値を用いて点模様部分のみのデータを保有する距離画像を生成した。次に、個々の点模様をなす円をラベリングし、すべての円に対し重心座標を求め、隣接する 8 円の重心座標との縦横方向の差異を調べた。画像原点に位置する円を中心とした 9 円に対し、横方向の差異値は平均して  $9.9865 \times 10 \text{mm}$ 、縦方向の差異値は平均して  $1.00063 \times 10^2 \text{mm}$  であった。また、画像原点から最も離れた中心を持つ 9 円に対しても同様に差異値を求めると、横方向の差異値は平均して  $1.00903 \times 10^2 \text{mm}$ 、縦方向は  $1.00249 \times 10^2 \text{mm}$

となった．点間距離は 10cm としたので縦横方向のどちらに対しても多少の誤差が生じているものの，その誤差は最大でも  $9.03 \times 10^{-1} \text{mm}$  であり，奥行き方向の歪に比べると約  $1/25$  となり，十分小さいとみなすことができる．

### 3.4.3 補正手法

距離画像の歪みの大部分は奥行き方向の歪みに起因するものだということが以上の計測でわかった．そこで，奥行き方向の歪みを補正する手法を以下に提示する．

#### 学習データ

図 3.7 の歪みの特徴として，まず，平面の重心を中心に半径方向に歪みが増大していることがわかった．さらに，光学中心からの距離に応じて歪みは変化し，距離が大きくなると歪みが大きくなる傾向が見てとれた．すなわち，光学中心からの距離が大きくなるとそれだけ歪みが大きくなっている．この歪みの特徴はレンズ歪みによるものに類似している．レンズ歪みは画像原点からの距離をパラメータとしているため，レンジデータの歪みに関しても距離画像原点からの距離に関係すると考えることができる．そこで，ここでは個々の点において歪みの大きさを距離の関数として区分的多項式近似する手法を提案する．

Vivid から得られる距離画像は， $640 \times 480$  の測定点からなり，個々の点に対し距離画像原点からの距離が与えられる．すなわち， $640 \times 480$  の点は，距離画像原点から特定の角度方向における計測物体への距離をあらわす．画像原点を中心とし歪みが増大しているので角度方向も歪みの大きさを決定付けていると考えられる．そこで，個々の角度方向に対し，上述したとおり歪み成分を原点からの距離を用い区分多項式近似する．そのため，学習データとして，奥行き方向の歪みが検出し易い，距離画像原点からの距離が異なる多数の平面を測定する必要がある．これらの平面はファインダの光軸方向と垂直に配置することで，測定点と平面との距離が歪みとしてファインダから見た奥行方向成分にあらわれるようになる．すなわち，平面を主成分分析し，平面の重心から見た法線方向のずれを歪みとする．正確に垂直に平面を配置せねば，上記の歪みは奥行方向のみでなく，縦横方向成分も含んでしまうが，歪みを含んだ平面の法線方向が必ずしも正確な値となると考えられないため，本手法では上記の方法で平面とのずれの奥行方向成分のみを歪みとして扱った．そ

して、複数の平面から、特定の角度方向の測定値の奥行き方向の歪みを検出し、その歪みの値を測定点までの距離をパラメータとして 3 次スプラインで補間した。

### 3 次スプライン補間

3 次スプライン補間とは、与えられた  $n$  点  $(x_i, y_i)$  ( $i = 0, 1, \dots, n-1; x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1}$ ) を通る区分的 3 次式で補間する手法である。ある区間  $[x_j, x_{j+1}]$  を補間する関数を  $S_j(x)$  とすると 3 次スプライン補間法では  $S_j(x)$  は次式のようにあらわせる。

$$S_j(x) = a_j + b_j x + c_j x^2 + d_j x^3 \quad (3.10)$$

$S_j(x)$  の係数が未知数となるが、このような関数が全部で  $n$  個あるため、未知数を  $4n$  個求める必要がある。そこで、3 次のスプラインに以下の条件を課す。

- 全てのデータ点を通る。
- 各々の区分補間式は、境界点の 1 次導関数は連続とする。
- 各々の区分補間式は、境界点の 2 次導関数は連続とする。
- 両端  $x_0$  と  $x_{n-1}$  での 2 次導関数を 0 とする。

この条件に満たす連立方程式を求めることにより、全てのスプライン補間の係数を求めることができる。

### 処理の流れ

以上のスプライン関数で点までの距離と歪みの値を関連付け、実際に補正を行う際には、歪んでいる距離画像のすべての点に対し、獲得した区分的多項式に距離を当てはめることで奥行き方向の歪み値を求める。次に、歪み分を取り除くことで歪みを含まない距離画像を得ることができる。以下に簡単に手法の流れを示す。

1. 学習データとして複数枚の平面を測定する
2. 距離画像から主成分分析で平面の法線方向を検出する
3. すべての点に対し、法線方向の歪みを求め、その奥行き方向成分を獲得すると共に画像原点からの距離も獲得する

4.  $640 \times 480$  の点を  $64 \times 48$  の点としてサンプリングし，サンプリングされた点の歪みの奥行き方向成分と距離の平均値を新たな代表値とする
5. スプライン補間法により再度  $640 \times 480$  のデータに拡張する
6. 2 から 5 をすべての平面に対し行う
7. 複数平面の特定角度方向の歪み値を原点からの距離でスプライン補間する
8. 補正したい距離画像に対し，すべての点の原点までの距離を計算し，角度に応じたスプライン曲線に当てはめることで奥行き方向の歪み値を求める
9. 最後に，得られた歪み値を取り除くことで歪みの無い距離画像を得ることができる

処理 4, 5 は一見余分な処理に見えるが，これらを行うことにより，学習データとして使用する平面のデータのノイズに対し頑強になる．歪み値と原点からの距離を用いるのは，距離をパラメータとして歪み値をスプライン補間するためである．また，学習データとして測定した複数枚の平面を実際の測定での自然な距離付近で密に測定することにより，補間の精度が上がると考えられる．

次に処理の 7 以降を簡単に説明する．まず，同一方向を測定した際に得られる座標値と理論値との差を歪み値とし，同時に歪んだ座標値までの距離を獲得する．この作業を全平面のスプライン補間により拡張された  $640 \times 480$  の点に対し行う．同一方向に関する歪み値と距離の値を用いて，3 次元スプライン補間し，学習データとして測定された平面以外のデータにおいても，原点からの方向と距離を与えれば歪み値が獲得できるようにする．つまり， $640 \times 480$  の角度方向ごとにスプライン曲線を求めるということである．この区分的多項式近似より，ある距離画像において，原点から測定点までの距離とその角度方向がわかれば，同じ角度におけるスプライン曲線からその測定点が持っている歪み成分を求めることができる．よってこの歪みを打ち消せば補正された距離画像を獲得することができる．<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ここで，注意すべき点として，補正すべき測定データにおいて，距離が獲得されていない方向が存在する可能性があるという点である．Vivid の場合においては，データが無い方向の座標値は  $(0, 0, 0)$  であるため，測定点すべてで補正を行うと，本来データの無い方向に対して無意味なデータが挿入される恐れがある．もともとデータが無かった方向に対しては補正を行わず  $(0, 0, 0)$  をそのまま用いる必要がある．

以上の提案手法は Vivid に対して用いられるが、この手法はレーザレンジファインダの種類によらないといえる。歪みの特性が本研究で使用された Vivid のように、すべての距離画像に対し、再現性のある同性質のものである場合において、本手法のように多数の平面を学習データとして測定し、スプライン補間などで歪み値をすべての距離に対して求めることができれば、同様に距離画像の補正が可能であると考えられる。

## 第4章

---

### 外部パラメータによる歪みの補正

## 4.1 既存センサの限界

近年のコンピュータ技術，センサ技術の革新的な進歩により，3次元モデル作成を行う対象は非常に多岐にわたっている．そのため，対象物特有の形状や特長によっては既存のレーザレンジファインダでは測定が非常に困難となる場所が存在する恐れが生じる．

現在われわれは，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を進めている．計測には，市販のCyrax 2500やわれわれが考案したFloating Laser Range Finder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に直面している．球状に測定を行うZ+F社のIMAGERなどを使用することにより視野角の問題や寸法の問題を解決することはできるが，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．

## 4.2 関連研究

移動体から対象物を計測する手法は複数存在する．移動体の1つの例として図4.1(a)のようにヘリコプターがある[34][35]．これらの手法ではヘリコプターが移動している間に対象物を連続して1次元的に計測を行っている．これらの手法に共通する問題点は，ヘリコプターの微小な振動のため図4.1(b)のように周期的な歪みが生じ，その歪みを除去する必要性があることである．また歴史的文化遺産を計測し，モデルを作成する状況では，ヘリコプターによる計測は安全上の問題からあまり適切ではないと考えられる．特に，われわれの場合においては，計測箇所が限られており，ヘリコプターを飛ばすという手法は現実的ではない．

ヘリコプターを利用する手法に類似した方法として，気球を利用する手法も考案されている．この手法では，ヘリコプターの場合に比べてセンサの移動速度が遅いため，2次元的に計測を行うことが可能である．このセンサが考案された背景としては，地上固定型のセンサによる計測が困難である大規模物体の上部を計測することが挙げられる．ヘリコプターを利用する手法と比較しての利点は，移動体の速度

が遅いため歪みの補正が容易になる点である [36][37]。しかし、計測対象物の上部に広大な空間が必要となり、われわれの場合においては利用することが困難である。

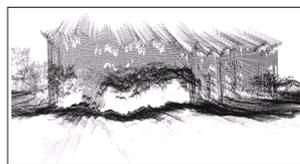
大きな街などの対象物を計測するには、移動体として、図 4.2 のように車を用いる手法が提案されている。自己位置を推定する方法としては、GPS や慣性センサなどの外部機器を利用する方法がある [38] ほか、より正確な位置を獲得するために、2 台の 1 次元センサを利用する手法も考案されている。例えば、一方のスキヤナは移動体の移動と共に対象物全体を計測し、もう一方のスキヤナは移動方向に対し平行に計測を行う。連続する移動方向と平行なスキャンを比較することによって、移動体の相対的な位置関係を求めることが可能である [39]。しかし、この手法は連続する 2 つの計測結果のみの相対関係から移動体の速度を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。正確な街の建造物の輪郭が得られる航空写真に車載センサから得られるモデルを合わせることによってこの問題を解決している [40]。このような写真をバイヨン寺院のような室内で獲得することは不可能であり、この手法を用いることも困難である。

このようにラインスキャンを使用する際の問題はロボットの分野において SLAM (Simultaneous Localisation and Mapping) として知られる。SLAM は基本的には拡張カルマンフィルタを用いる手法によって改善されており [41][42]、近年の傾向は、この手法を拡張し、より高速に広範囲をモデリングするアルゴリズムが考案されている [43][44]。しかし、SLAM は主にロボットが移動する際にロボットの周りの環境を獲得するために使われており、正確な 3 次元モデルを得るためには精度が不十分であるという問題がある。

そこで、われわれが提案する木登りセンサにおいては垂直方向となる移動方向に平行なラインスキャンを用いる手法を考える。しかし、ここでは移動体の自己位置を推定する手法としてより単純で独自の手法である時空間距離画像 [45] を利用する。



(a)



(b)



図 4.2: 車載レンジファインダ

図 4.1: (a) ヘリコプタープラットフォーム  
(b) 得られる距離画像

## 4.3 提案手法

そこで、既存センサの問題を解決するために、われわれは全く新しい「木登りセンサ」という計測システムを開発し、問題となる視野角や狭さの問題も解決できるようにした。木登りセンサは、2 台のラインスキャナを装備する基盤を市販の梯子型リフトに取り付けることにより、基盤がリフトに沿って上下運動をしている間に計測を行うことができる。基盤の上下運動の速度は測定中は一定であるが必ずしも定数ではなく、梯子を立てかける状態に応じて計測ごとに異なる。一方のセンサから得られる、われわれの新しい概念である時空間距離画像を用いることによって、推定段階で誤差が蓄積しない、正確な速度算出を行うことができる。

### 4.3.1 木登りセンサの構成

市販のセンサには計測が困難な空間を計測するために、われわれは商用の伸縮自在な梯子を装備するリフト (メディコム社製, Nobitec LiftNPL-4200[46]) を移動体として使用した。この梯子型リフトを使用することにより、センサは狭隘部を上下方向に運動することが可能となる。われわれはこのセンサを「木登りセンサ」と命名した。この梯子型リフトはウィンチにより上下方向に運動する。リフトの仕様は表 4.1 の通りである。

表 4.1: Nobitec Lift の仕様

最大吊上荷重	100kgf
最高揚程	3200mm
使用電源	AC100V 50/60Hz
消費電力	870W
吊上げ速度	25m/min (0.417m/s)
外形寸法	H4380 × W1210 × D509mm
製造元	Medicom Corporation

リフトには図 4.3(a) のように 2 台の SICK センサ (LMS200[47]) を互いに垂直に配置した。LMS200 の仕様は表 4.2 の通りである。LMS200 を利用した理由は、その軽量性、小型性、そして移動速度に比べて十分な計測周波数、さらには広い計測視野角 (FOV) である。一方のセンサを移動方向に対して垂直に配置し、もう一方は平行に配置した。2 台のセンサの外観を図 4.3(b) に示す。

木登りセンサの梯子は壁に立て掛けられ、2 台のセンサで計測を行いながらリフトが上下する。LMS200 はラインスキャンを行うため、水平スキャンは移動に伴い計測対象の全体形状を計測し、垂直スキャンは 2 台のセンサ位置の時間的推移を求める際に利用される。この木登りセンサによって、十分な水平方向の視野角を保ちながら、空間的な制限も解決し、測定点の点密度を一様にする事が可能となった。

表 4.2: LMS200 の仕様

計測手法	Time of flight, Line-scan
計測周波数	37.5Hz
計測視野角 (FOV)	100° / 180°
角度分解能	0.25° / 0.5° / 1.0°
分解能	10 mm
Systematic error	± 15 mm
計測範囲	80 m
外形寸法	L156 × W155 × H210 mm
製造元	SICK AG



(a)



(b)

図 4.3: (a) 基盤に装着された 2 台の LMS200 (b) 木登りセンサの外観

リフトがウィンチによって移動する速度は 25m/min である。しかし、梯子が壁に立て掛けられる際の傾きは計測毎に異なり、それに伴い摩擦の大きさも異なると考

えられ、仕様書に書かれている速度は正確ではないと思われる。そこで垂直スキャンを利用し時空間距離画像を用いて、正確なセンサの移動速度を求めることを考える。

### 4.3.2 時空間距離画像

ここでは時空間距離画像の概念とその特徴、用法について述べる。時空間距離画像とは一般的な時空間画像であるエピポーラ平面画像の拡張であり、まずエピポーラ平面画像 [48] について簡単にまとめる。

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系列状に並べたものである。図 4.4(a) のようにカメラが光軸に垂直かつ CCD に対し水平方向に等速運動し、静止物体を撮影しているとする。入力画像列を  $i(x, y : t)$  とすると、 $y = y_0$  でのスライス  $I(x, t) = i(x, y_0; t)$  をエピポーラ平面画像 (EPI) とよぶ。このとき、物体上

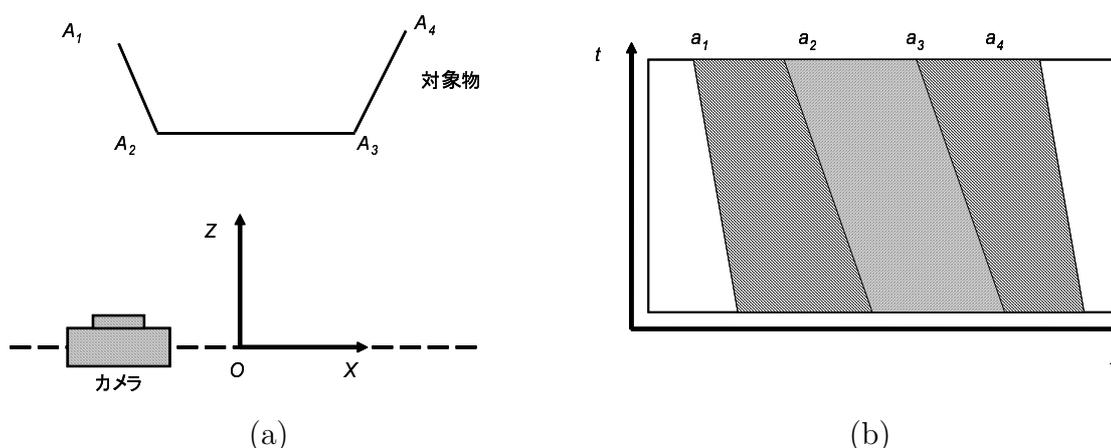


図 4.4: (a) カメラ運動 (b) エピポーラ平面画像

の 1 点の像点の軌跡は同一 EPI 上の線分となり、その傾きは物体点の奥行きに比例する。したがって、EPI 上で直線を検出し、その傾きを求めれば、対応する特徴点の 3 次元座標が得られる。

一方、時空間距離画像とはラインスキャンによる距離データの集合からなる一種の距離画像である。例えば、移動体が水平方向に移動しながら水平方向に連続してラインスキャンを行い、その計測結果を時間軸に沿って適当な間隔で平行に並べると、図 4.5(a) のように時空間距離画像を得ることができる。同様に、移動体が垂直

方向に移動した場合においては，垂直スキャンを並べることによって図 4.5(b) のような時空間距離画像を得ることができる．

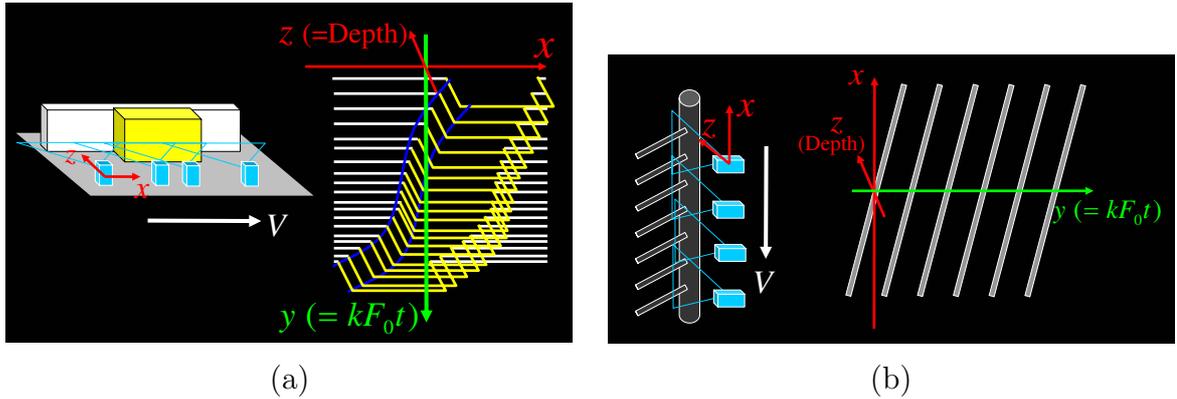


図 4.5: 時空間距離画像の基礎概念  
(a) 水平移動の場合 (b) 垂直移動の場合

時空間距離画像には興味深い特徴がある．時空間距離画像は図 4.5 の  $x$  座標であらわされる計測対象の空間的な特徴だけでなく， $y$  座標であらわされる移動の時間的な連続性も併せ持つ．すなわち，時空間距離画像を  $y$  座標に沿って眺めることにより，センサが時間経過とともにどのように移動したのかを知ることができる．EPI では奥行き情報が未知であったのに対し，時空間距離画像はレーザレンジファインダを用いて作成されるため奥行き情報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となるのである．さらに，時空間距離画像において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複数のクラスタ面を形成する．

クラスタ面を形成するという特徴はすなわち，クラスタ毎のエッジ抽出が容易になるということである．このエッジを用いることによって，移動体の移動速度は以下の式によって計算することができる．

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{kF_0\Delta t}{\Delta x} = \frac{kF_0}{V} \quad (4.1)$$

ここで  $m$  はエッジの傾きをあらわし， $x$ - $y$ - $z$  座標値は図 4.5 のように定義する． $x$  は計測方向， $z$  は奥行き方向， $O$  はレーザ源をあらわす． $F_0$  はセンサの計測周波数で， $k$  は任意に決める時系列上での時空間距離画像におけるスキャンの配置間隔である．

ここで、時空間距離画像は極座標系でなく、デカルト座標系であらわされていることに注意されたい。

以上の手法により、エッジの傾きを得ることができれば移動体の移動速度を求めることができる。本手法はフレーム間の比較を行っていないため、この手法によって、誤差の蓄積を抑えることができる。移動速度を求めることなく、自己位置を推定しようと試みると、フレーム間の比較が必要となり、誤差の蓄積が問題となるが、速度を求めることにより、誤差の分散させることが可能となり、それゆえに正確なモデルを作成することが可能となる。

### 4.3.3 3次元モデル作成のための自己位置推定アルゴリズム

まず、木登りセンサから距離画像を獲得するアルゴリズムの概略を示す。アルゴリズムの概略は図 4.6 の通りである。

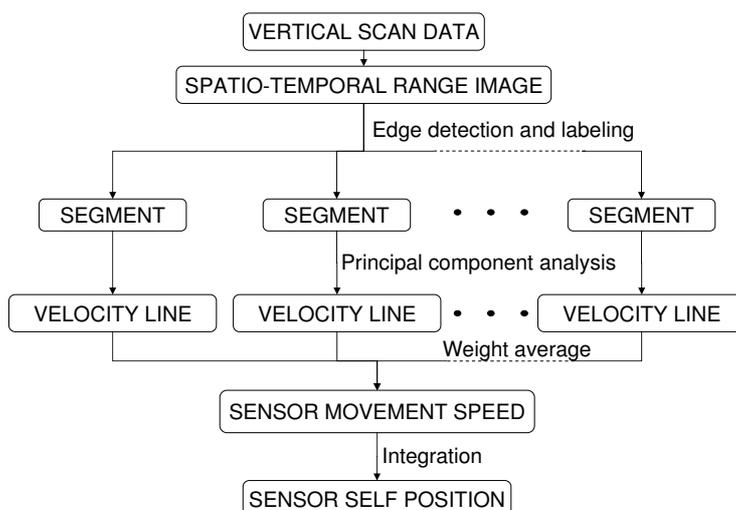


図 4.6: 自己位置推定処理の概略図

1. 垂直スキャンを用いて時空間距離画像を作成する
2. 時空間距離画像の両端の無意味なデータを削除する
3. ソーベルフィルタとベクトルを用いて時空間距離画像からエッジを抽出する

4. エッジのラベリングを行う
5. 複数のエッジの傾きを主成分分析によって獲得する
6. エッジの長さによって重み付けを行う
7. 重み付けされた傾きの平均値を求める
8. 傾きをセンサの移動速度に変換する
9. センサの自己位置を計算する

以上の手順を順を追って説明する .

#### 4.3.3.1 時空間距離画像の作成

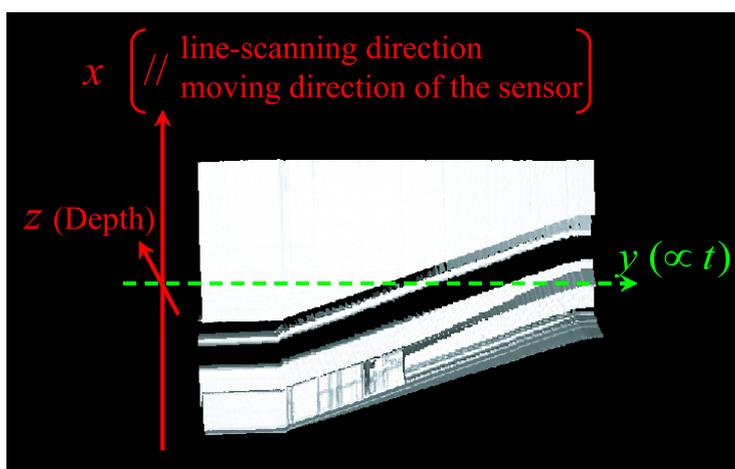


図 4.7: 時空間距離画像

2 台のセンサが同時に垂直方向に移動しているため、垂直スキャンから得られるデータからセンサの時系列上での推移を獲得することができる。LMS200 は 1 次元計測を行うため、垂直スキャンから得られるデータを並べていけば、図 4.7 のような時空間距離画像を獲得することができる。データを並べる間隔は図 4.7 における  $y$  に対応するが、任意に決めることができる。図から見てわかるとおり、時空間距離画像のエッジは顕著にあらわれている。しかし、計測は移動開始前と移動停止後においても行われていたため、得られる時空間距離画像の両端には無意味なデータ

が含まれている．センサや同期を取るハードウェアを梯子に装備することによって移動開始点と終了点を検出することは可能であるが，ここではソフトウェア的に前後のフレーム差分をとり，その際が閾値以下であればセンサが移動していないと判断した．

#### 4.3.3.2 エッジ抽出

移動時のみのデータから得られる時空間距離画像から，エッジの抽出を行った．これにはソーベルフィルタとベクトルを用いた．

ソーベルフィルタを用いたエッジ抽出

ソーベルフィルタには垂直方向と水平方向の変化を検出する 2 つの行列をがある．これらを画像に対し適用すれば，結果から画像のエッジの方向と強さを計算することが可能となる． $3 \times 3$  のソーベルフィルタの行列には以下のものを用いた．

$$K_h = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, K_v = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

ソーベルフィルタは通常，濃淡画像に用いられることが多いが，われわれは今回輝度値の代わりに距離値に使用した．1 スキャンから得られるデータは極座標系  $\mathbf{p} = (r, \theta)$  であらわされているが，簡単にデカルト座標系  $\mathbf{c} = (x, y, z)$  に関係式

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \theta \\ z &= r \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

を用いて変換することができる． $y$  座標値は時系列上にスキャンを並べる間隔である  $k$  を用いることで容易に求めることができる．距離画像  $\mathbf{p} = (x, y, z)$  に対し，各計測点は何スキャン目をあらわす  $m$  と，特定スキャンの中のどの点かをあらわす  $n$  を添え字とし， $\mathbf{p}_{m,n}$  とあらわすことができる．ソーベルフィルタを  $\mathbf{p}_{m,n}$  とその点の周りにある 8 点  $\mathbf{p}_{m-1,n-1}, \mathbf{p}_{m-1,n}, \dots, \mathbf{p}_{m+1,n+1}$  に適用することによって，エッジの強さを求めることができる．得られるエッジの強度を閾値と比べることによってエッジを抽出することができる．

## ベクトルを用いたエッジ抽出

次に、ベクトルを用いたエッジ抽出を検討する。ここでは注目点とその上下左右の点のなす角度に注目した。図 4.8 に見られるように、注目点  $c_{m,n}$  に対し上の点  $c_{m,n+1}$  へのベクトルと下の点  $c_{m,n-1}$  へのベクトル  $v_1, v_2$  を

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= c_{m,n+1} - c_{m,n} \\ v_2 &= c_{m,n-1} - c_{m,n} \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

とし、それらの成す角度を求めた。同様に注目点とその左右の点を結ぶベクトルからなす角度も計算し、それらのいずれかが以下の条件を満たせばエッジとして抽出した。

$$\frac{\pi}{12} < angle < \frac{11}{12}\pi \quad (4.5)$$

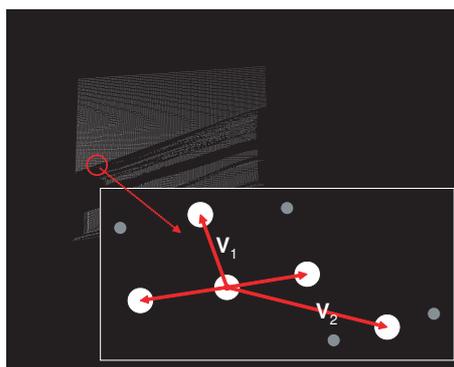


図 4.8: エッジ抽出の際に使用するベクトル

## 2 種類のエッジ抽出の組み合わせ

上で記した 2 種類のエッジ抽出方法を組み合わせることで、より精度の高い抽出を行うことを目指した。漏れなくエッジを抽出するために、エッジ抽出の判別条件を甘くし、両手法のエッジ検出でエッジと検出されるものを抽出した。

## 4.3.3.3 移動体の速度の計算

エッジの傾きからは移動体の速度を計算することが可能である。梯子型リフトの構造から、センサの移動は直線状にあり、さらにリフトの上下運動はモーターに接

続されたウィンチによって行われることから，速度は一定とみなした．しかし，仕様書に記されている速度  $25m/min = 0.4167m/sec$  を用いるのではなく時空間距離画像から得られる速度を使用することとした．

まず，最初にソーベルフィルタとベクトルを用いて得られた複数個のエッジをラベリングした．ラベリングされたエッジごとに主成分分析し，得られる主成分を用いることでエッジの傾きを導いた．主成分は計測点の共分散行列  $\Sigma$  の固有値問題として導くことができる．

$$\Sigma U = U L \quad (4.6)$$

$$\Sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}})(\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}})^T \quad (4.7)$$

ここで， $\mathbf{x}_i$  はエッジにおける計測点で， $\bar{\mathbf{x}}$  は  $\mathbf{x}_i$  の平均をあらわし， $U$  は主成分ベクトルから成る直交行列， $L$  は固有値行列である．

検出されたすべてのエッジに対し，傾きを求め，移動体の速度を式 (4.1) により逆算する．ここで，エッジが長ければ長いほど誤差が分散され精度が上がると考えられるので，エッジの長さで重み付けを行い重み付けされた傾きの平均値から速度を求めた．

## 第5章

---

### 実験・評価

## 5.1 内部パラメータによる歪み補正の評価実験

ここでは第 3 章で述べた内部パラメータによる歪みを補正する提案手法の評価実験についてまとめる。

### 5.1.1 定量的評価

距離画像を補正する際、評価のためには測定物の座標が正確にわかっている必要がある。しかし、多くの場合レーザレンジファインダで測定する計測物の正確な値は既知でない。そこで、本手法の妥当性を調査するために、座標値が既知な物体として、平面を選び、評価実験を行った。それでも、歪みを含んだ計測値に対する正確な座標値は求めることはできないため、主成分分析によって求められる、平面の法線方向と全測定点の平均値から決定される平面からの距離を歪み成分とし、補正前と補正後で比較した。平面をファインダの光線方向に対し垂直に配置するのでは、学習データと同じ実験環境になってしまい、評価実験として適当ではないと考えられるので、評価実験の際には、ファインダの光軸と平面を垂直から大きく外れた位置に配置し、測定を行うこととした。

評価実験から得られた結果は表 5.1 のようになった。それと同時に、得られた距離画像を図 5.1 に示す。図 5.1(a) が補正前の距離画像で図 5.1(b) が補正後の距離画像である。なお、平面までの距離は約 2.65m である。また、特定角度における距離と歪みの関係のスプライン曲線を図 5.2 に示す。

表 5.1: 評価実験における歪みの最大値と平均値の変移

	補正前	補正後
歪み最大値 (mm)	36.856	33.539
歪み平均値 (mm)	24.481	17.782

壁面の右側を見てみると確かに曲線から直線に近づいている様子が見られる。また、表 5.1 を見てわかる通り、補正によって歪みの最大値と共に平均値も小さくなっていることがわかる。ただし、本手法ではファインダから見た奥行方向の歪み成分のみを除去しているため、本実験では平面の法線方向が光軸と平行に近い状態に配置されておらず、歪みの除去は十分に行われていない。実際に壁面画などの平面物

体を測定する際には，平面に対し垂直に測定が行われるので，より良い補正結果が得られると考えられる．

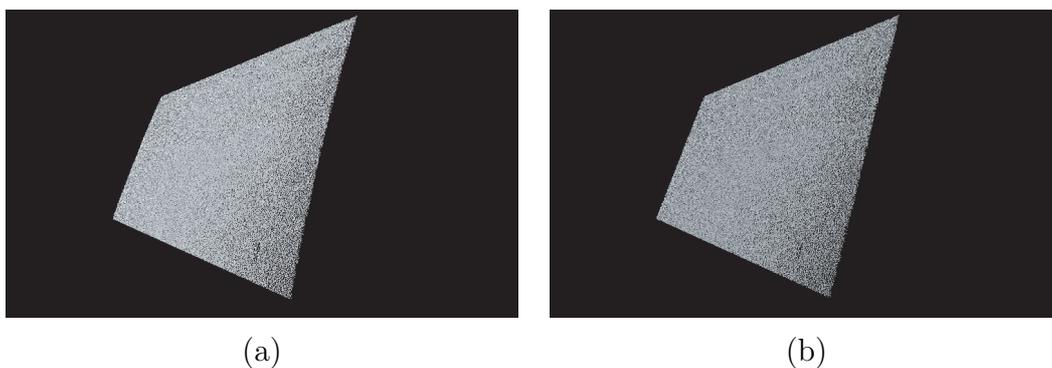


図 5.1: (a) 補正前の平面距離画像 (b) 補正後の平面距離画像

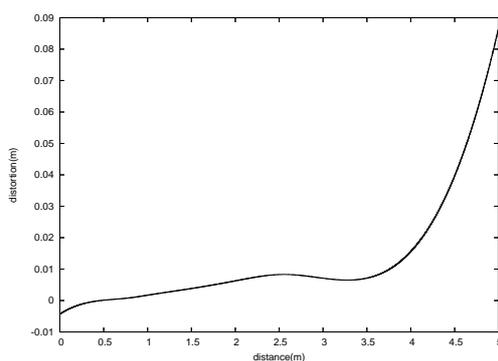


図 5.2: 特定角度における距離に応じた歪み値

### 5.1.2 既存データの補正

第 3 章で述べたとおり，われわれ研究室が歴史的文化遺産のデジタル保存化の一環として測定した，カンボジアのバイヨン寺院における壁面画は全体をアラインメントした結果，図 3.2 のように大きく歪んでいる．そこで，われわれは本手法により個々の距離画像に載っている微小な歪みを補正することを試みた．その際には 3 次元モデルを生成する個々の距離画像に対し補正をかけ歪みを除去し，得られた歪みのない距離画像を再度位置合わせした．図 5.3(a) の 1 枚の距離画像を補正した結果

は図 5.3(b) のようになる．1 枚のみを表示すると歪みが微小であるため顕著に補正の様子が見られないが，2 枚の距離画像を同時に表示した図 5.4 を見てみると，距離画像の中心部分において補正を行った方 (赤色) が表示されていることがわかる．赤色の点が表示されているということはそれらが白色の点よりも前方に位置していることを意味する．中心部分では補正前の測定点が前面にあらわれ，端では補正後の測定点が前面にあらわれることから，画像原点からの距離が大きくなるにつれ，すなわち画像原点から円状に，歪みが大きくなっているというレンズ歪み特徴が考慮された歪み除去を実現できたことをあらわしている．

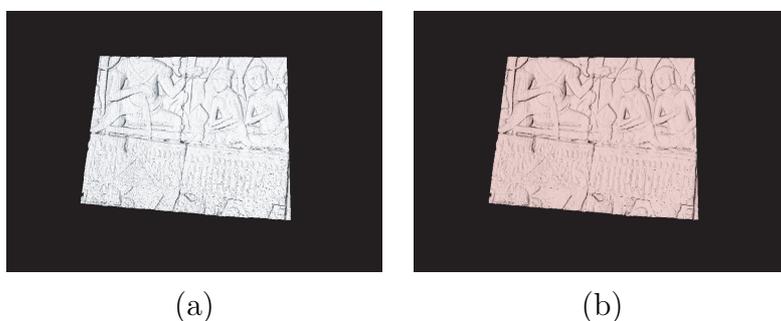


図 5.3: (a) 補正前距離画像 (b) 補正後距離画像

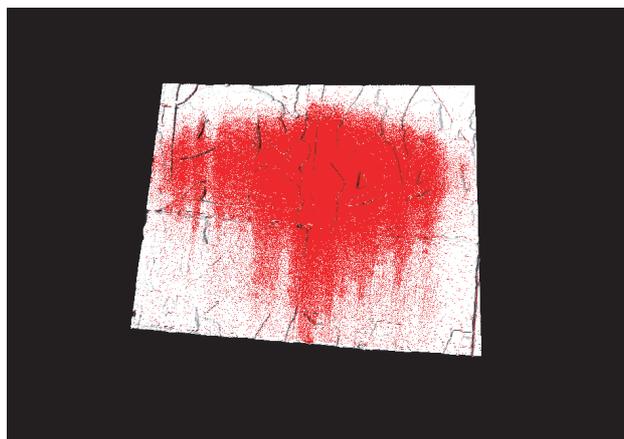


図 5.4: 2 枚の距離画像を同時に表示した結果 白:補正前 赤:補正後

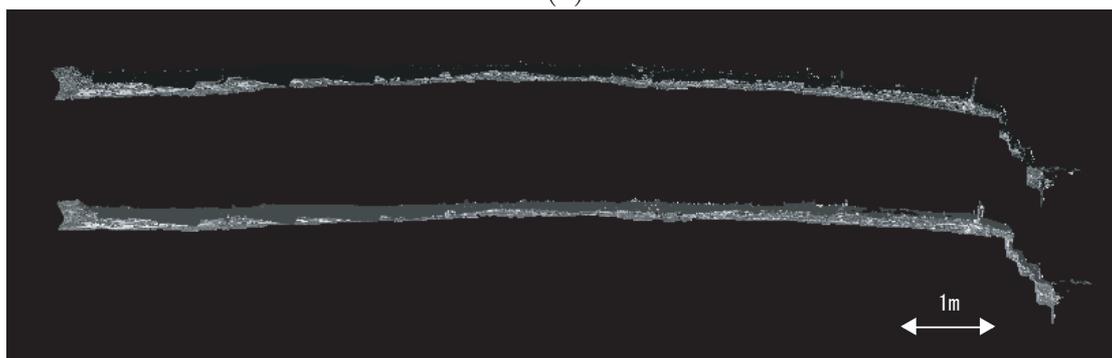
最後に個々の距離画像の歪みを除去したあとに全ての距離画像を用いて位置合わせして得られる結果を図 5.5 に示す．なお，両図において下の結果が本手法を適応

したあとの結果である．どちらの図も同じ視点から壁面画を見た結果である．見てわかるとおり，歪みが除去され，モデルが平面に近づいている．

図 5.5(a) の補正前のモデルの方が大きく歪んでいることがわかるが，図の尺度を見ると図 5.5(a) の方がモデル全体として大きいことがわかる．そのため歪み成分の蓄積が大きいと考えられる．また，撮影の際の平面までの距離が図 5.5(a) では 1.45m 程度であったのに対し，図 5.5(b) では 1.20m 程度と近く，距離が大きいほど歪み成分も大きくなる性質から，両モデル間で歪みの度合いが異なっていると考えられる．



(a)



(b)

図 5.5: 壁面画の補正の様子

## 5.2 外部パラメータによる歪み補正の評価実験

ここでは第 4 章で提案した「木登りセンサ」を用いて測定を行った結果を表示する。

### 5.2.1 等速直線運動の仮定の検証

第 4 章でも述べたとおり、本提案手法では時空間距離画像からエッジを抽出し、式 (4.1) から木登りセンサの移動速度を求めている。その際には移動体の運動を等速直線運動と仮定し、エッジを 1 次式で近似し、その傾きを用いた。ここでは、運動が等速直線運動であるという仮定を検証する。

木登りセンサに装着されているレーザレンジファインダとは別にイメージカメラを用い、移動に伴いながら特定時刻ごとに画像を撮影し、そこから得られる移動体の位置を獲得した。その際には移動体がどの位置にあるか特定できなければならないため、木登りセンサの前に距離が既知な巻尺を配置し、イメージカメラで巻尺を撮影するようにした。イメージカメラから得られる画像は図 5.6(a) のようになった。実際の測定から、木登りセンサの傾きが異なるために測定ごとに推定速度が一定でないことが分かっていたため、ここでは木登りセンサを意図的に水平方向、 $35^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $69^\circ$ 、 $81^\circ$  に傾け実験を行った。傾けた角度ごとにイメージカメラを用いて特定時刻ごとの移動体の位置を得られた画像から求め、それらを 1 次で線形近似した結果が図 5.6(b) である。

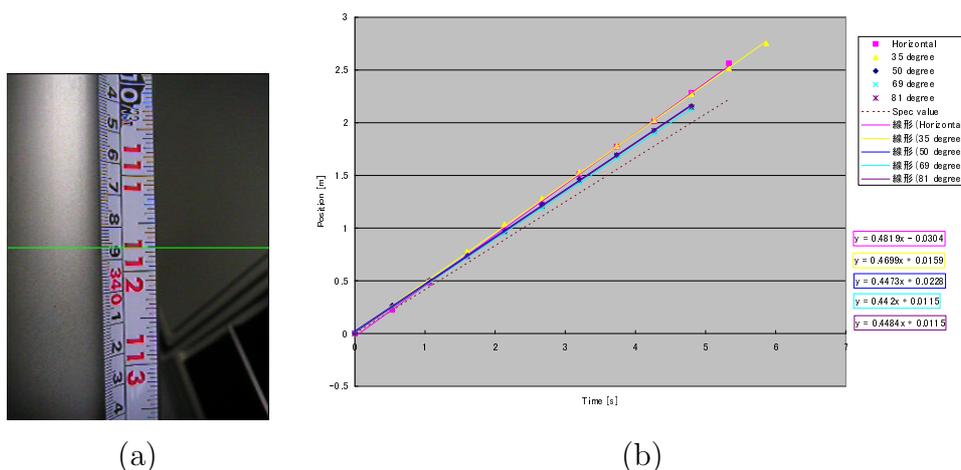


図 5.6: (a) イメージカメラから得られる画像 (b) 傾き角度ごとの 1 次近似直線

図 5.6(b) をみると、破線であらわされている直線が仕様に従った速度直線となっている。図から移動体の速度が仕様と異なっていることがまず分かる。さらに、近似直線(直線)とイメージカメラから得られる移動体の測定位置(四角や三角で表示)がほぼ一致していることが見てとれる。詳しく検証してみると、測定点の値と回帰式の値との差分は 0cm から 2cm の間に収まっており、十分小さいとみなされ、本手法の仮定として掲げていた等速直線運動は妥当であると考えられる。

### 5.2.2 モデリング結果

われわれは木登りセンサを用いてカンボジアのバイヨン寺院の計測を行った。われわれの研究室では数種類のセンサを用いて 3 年間にわたって寺院の計測を行ってきたが、3 次元モデルには計測箇所空間的制約によってデータを取ることができない場所が残っていた。図 5.7(a) のバイヨン寺院の図面をしてみると、未だに多くのデータ未取得箇所が残っており、図 5.7(b) から見てわかるとおり、バイヨン寺院全体の 3 次元モデルに穴が残っている。図 5.8 に見られるような、市販のレーザセンサでは空間的制約と視野角の制限から計測が困難であった狭隘部を木登りセンサを用いて計測を行った。

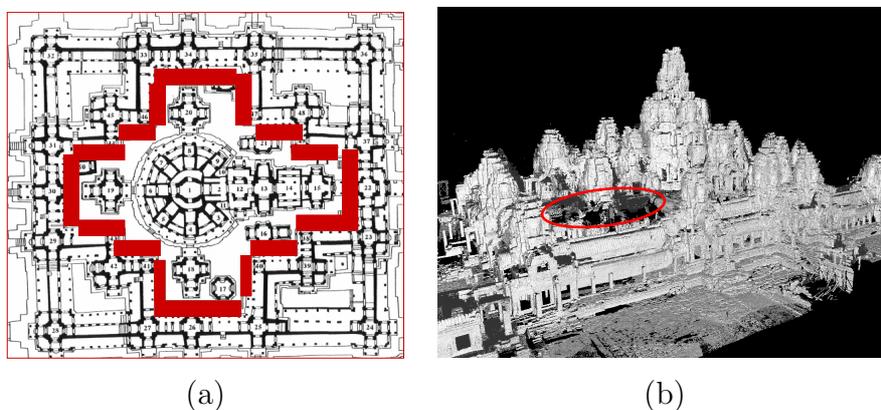


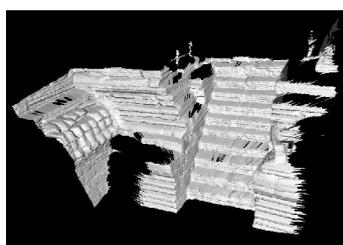
図 5.7: (a) バイヨン寺院におけるデータ未取得部分 (b) モデルのデータ欠損箇所

第 4 章で示したアルゴリズムを用いて、移動体の速度自己位置を推定し、その結果に応じて水平方向のスキャンを並べることによって 1 度の測定により図 5.9(a) のような距離画像を作成することができる。図 5.9(b) が実際の計測箇所の様子であるが、図の右側にも遺跡が存在しており、商用のレーザレンジファインダを配置するのが困難であった。他にも図 5.10 は今まで測定を行うことができなかった箇所を木

登りセンサを利用して測定し穴埋めをした例である．木登りセンサを用いて複数回測定を行い，得られる距離画像を位置合わせすることによって得られる全体の 3 次元モデルは図 5.11 右上のようになった．既存のセンサのみで測定可能範囲をモデル化すると図 5.11 左上のようになるが，両者を位置合わせすることにより，図 5.11 下のような穴埋めされたモデルを獲得することができた．また，木登りセンサから得られる 3 次元モデルを含め，穴埋め作業によって得られた 3 次元モデルを今までのモデルに位置合わせした結果，バイヨン寺院全体も図 5.12 のように穴埋めされた．



図 5.8: 木登りセンサで計測を行った箇所

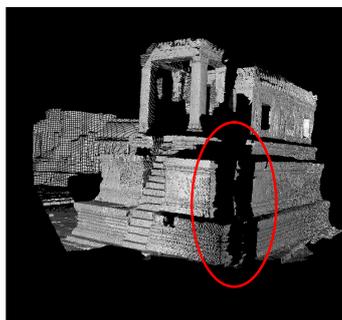


(a)

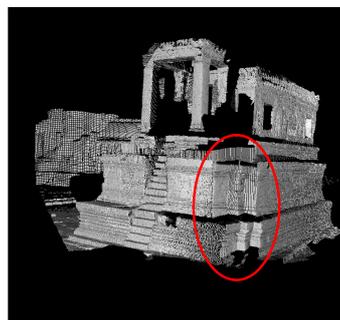


(b)

図 5.9: (a) 時空間距離画像を用いて作成した距離画像 (b) 実際の計測箇所



(a)



(b)

図 5.10: (a) 穴のある 3 次元モデル (b) 木登りセンサにより穴埋めされた 3 次元モデル

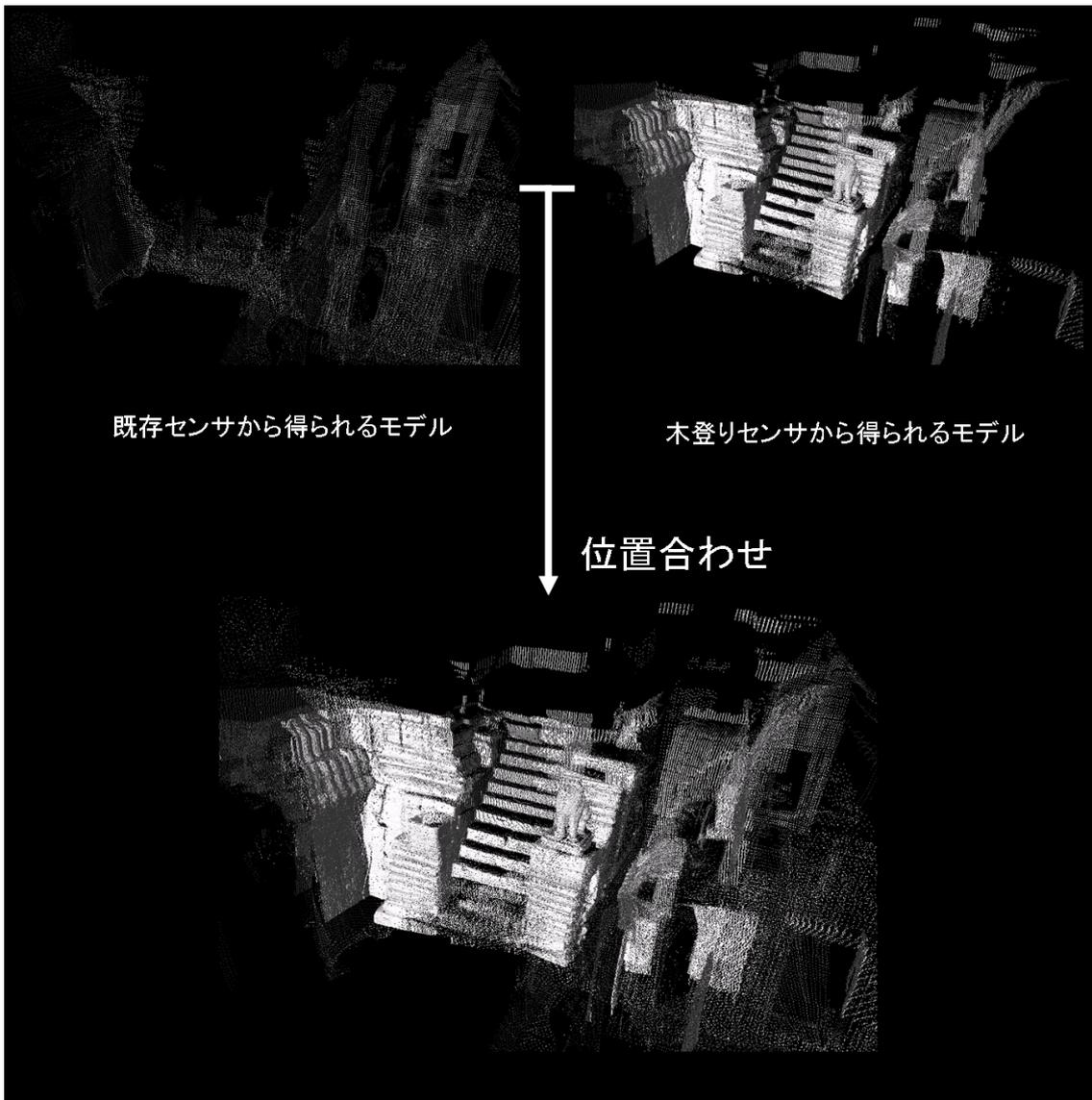


図 5.11: 木登りセンサにより得られた 3 次元モデル

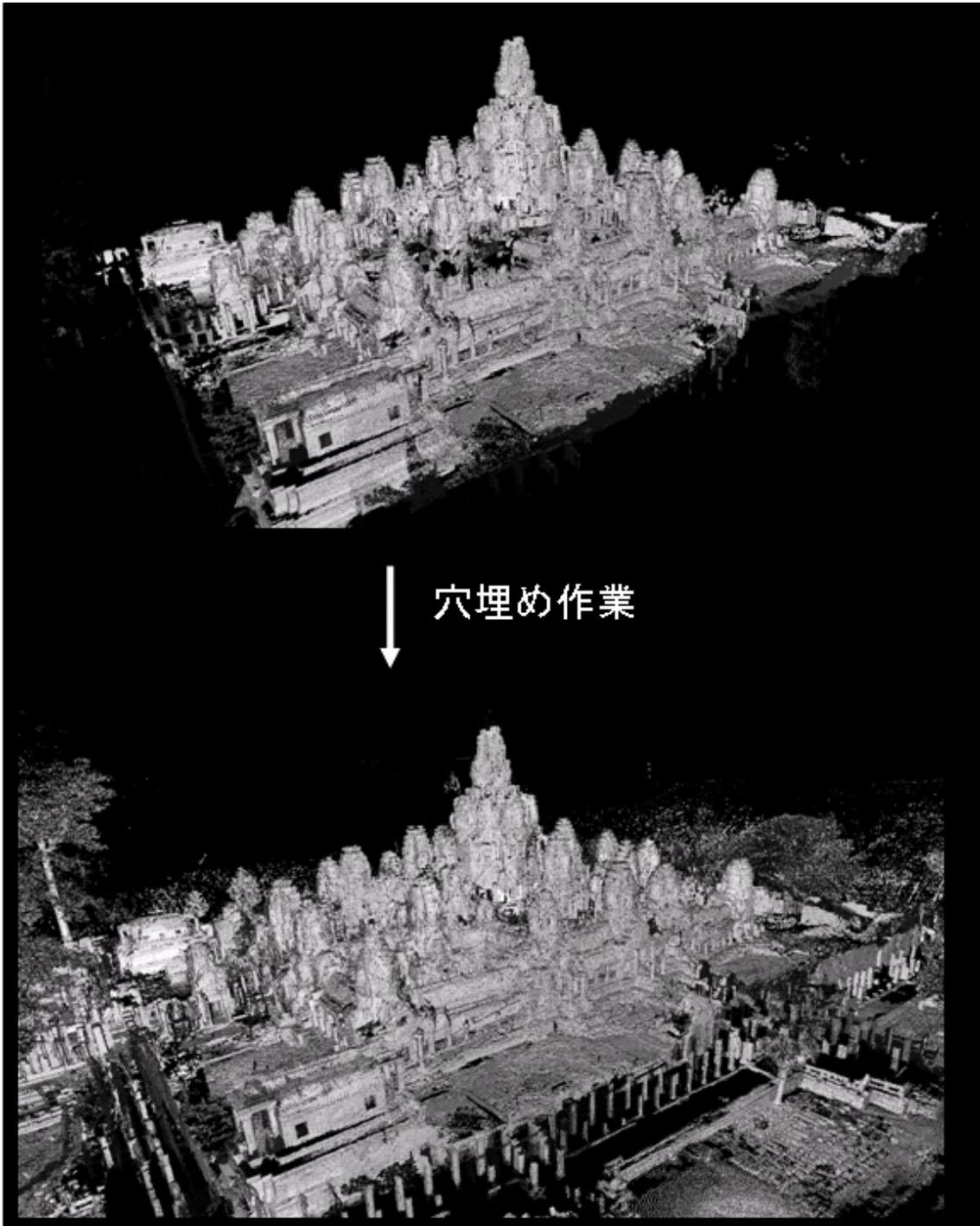


図 5.12: バイヨン寺院の 3 次元モデルの穴埋め

### 5.2.3 距離画像の評価

推定した速度の正確性を確認するために、われわれは木登りセンサから得られる距離画像と地上固定型センサ (Cyrax2500) から得られる距離画像を ICP アルゴリズムを用いて位置合わせした。図 5.13 から見てわかるとおり、2 枚の距離画像は位置合わせされており、位置合わせにおいて収束した。固定センサから得られる距離画像は正確と見なせるため、推定速度の精度も十分に高いと考えられる。

具体的には、図 5.14 を見てみる。図 5.14(a) は木登りセンサから得られる距離画像と Cyrax2500 から得られる距離画像を位置合わせした結果である。一方図 5.14(b) は同様の 2 枚の距離画像に対し、各々の距離画像に対し、測定点の最近傍点を計算し、その距離が 1.5cm 未満のものをハイライトしている。測定箇所として重なっている部分のほとんどが 1.5cm 未満に収まっていることから木登りセンサから得られる距離画像の正確性、すなわち推定速度の正確性が見てわかる。

また、速度推定処理の有効性を明確化するために、異なった算出速度を得た計測結果に対して位置合わせを行った。図 5.15 が示す通り、スキャンごとに移動速度が少なからず異なることがわかる。これは、梯子が壁に立て掛けられており、その傾きが計測ごとに異なり、移動に伴う摩擦が一定ではなく、リフトの移動速度も異なると考えられる。移動速度が異なる場合であっても、図 5.16 のように、それぞれの距離画像が問題なく位置合わせされ、収束した。計算によって得られる速度のいずれも仕様書の速度とは異なることにも注意されたい。木登りセンサの速度はリフトの状況に大きく影響を受けるが、位置合わせした結果から、われわれが提案したアルゴリズムによって梯子の傾きによらず正確な速度を導くことができたことがわかった。さらに、ここでも同様に測定点間距離から推定速度の有効性を示す。図 5.17 は木登りセンサから得られる 2 枚の距離画像を位置合わせした結果であるが、(a) は一方の距離画像を作成する際に、移動速度として仕様書の通り 0.4167m/s としたのに対し、(b) は本提案手法によって移動速度を求めた。推定された速度は 0.3634m/s となった。図 5.14 と同様に、点間距離が閾値 2cm 未満となる点を緑色にハイライトして表示しているが、図から見てわかるとおり、(b) のほうが閾値以内に収まる測定点が多いことから仕様書の速度ではなく、本提案手法によって得られる速度のほうが正確であることがわかった。

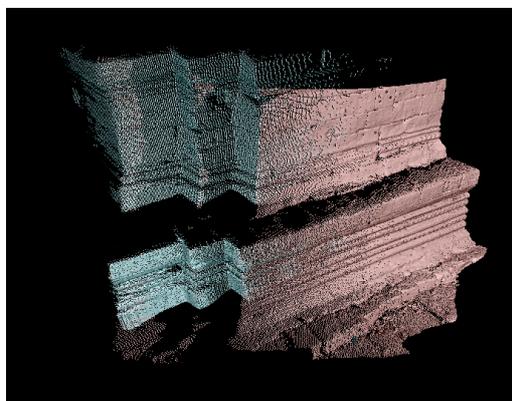
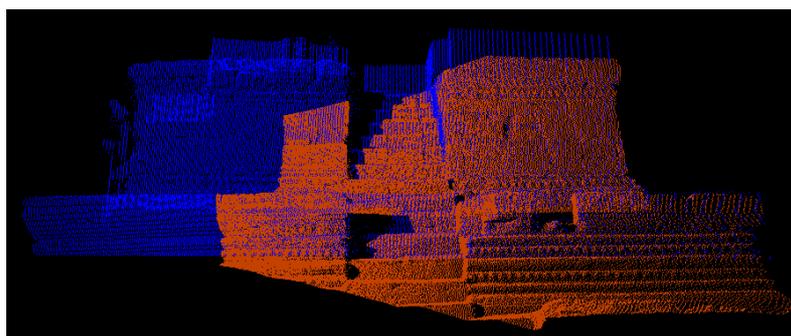
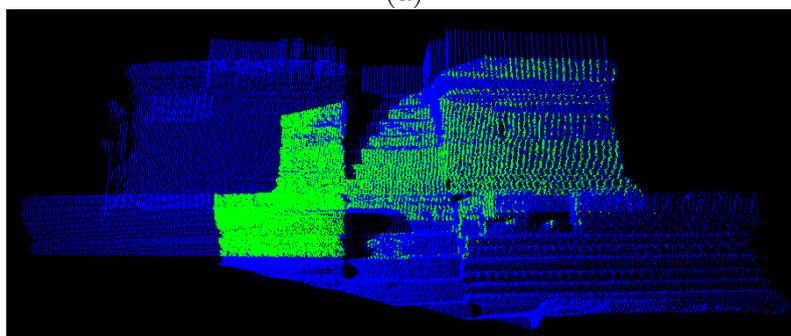


図 5.13: 位置合わせされた距離画像  
赤:Cyrax2500 による距離画像 青:木登りセンサによる距離画像



(a)



(b)

図 5.14: 位置合わせされた距離画像  
(a) 赤:Cyrax 青:木登りセンサ (b) 緑:木登りセンサデータの中で測定点間距離が 1.5cm 未満の点

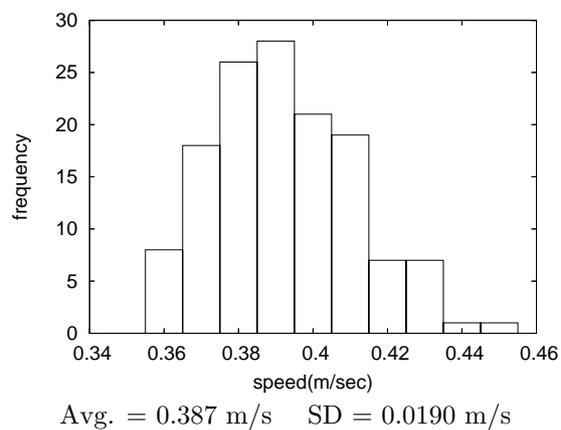
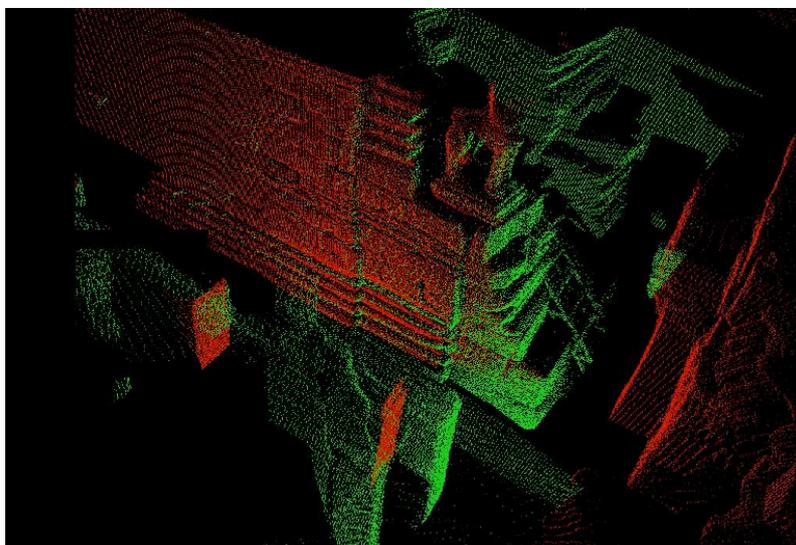
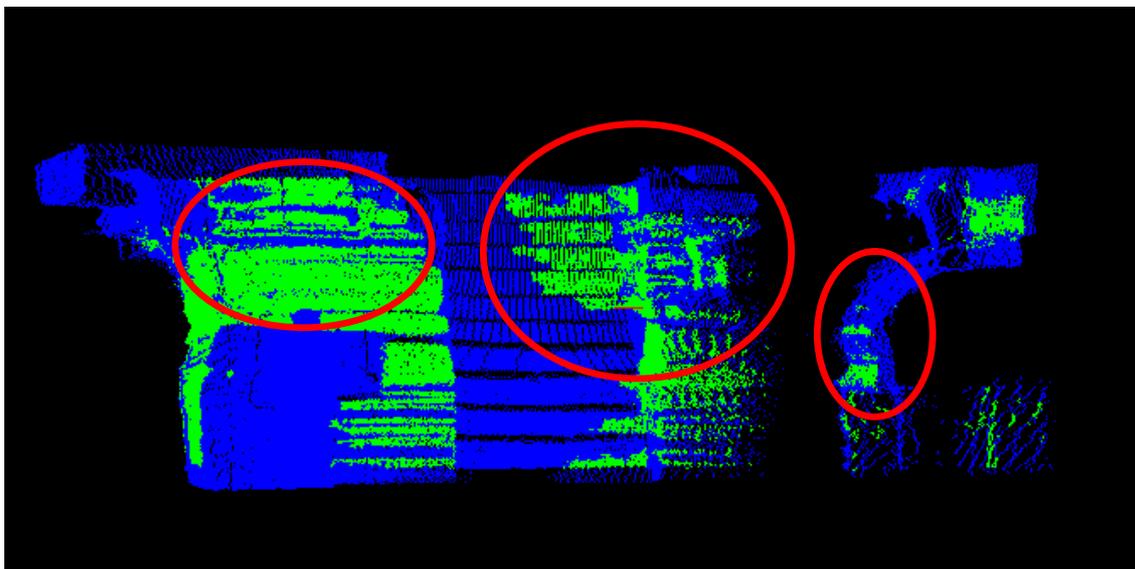


図 5.15: 推定速度のヒストグラム

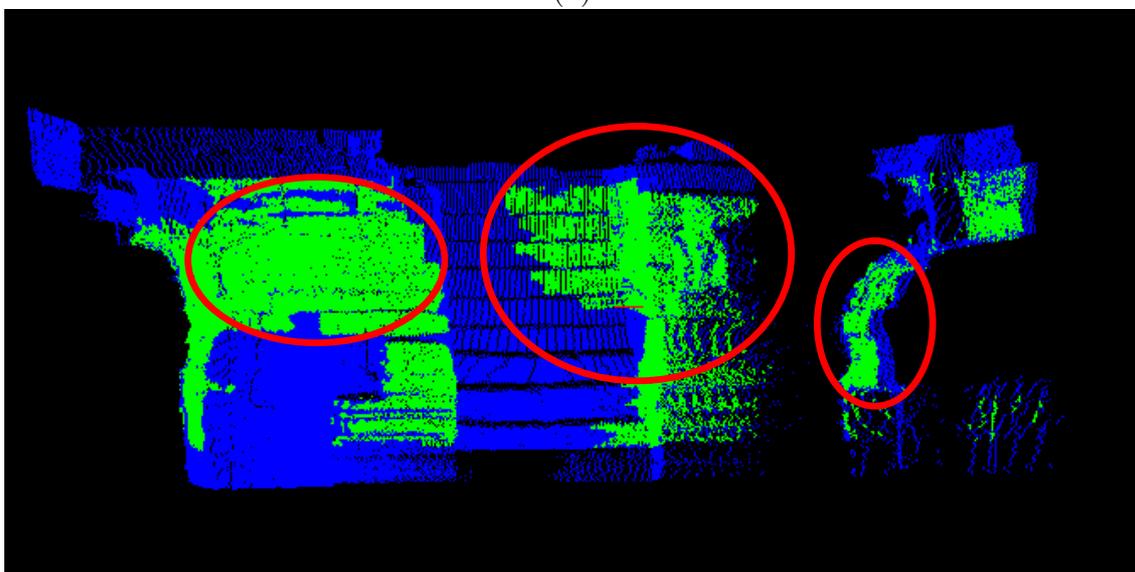


	scan 1 (green)	0.3504
speed (m/sec)	scan 2 (red)	0.4081
	仕様書	0.4167

図 5.16: 異なる計算速度を位置合わせした結果



(a)



(b)

図 5.17: 位置合わせされた距離画像 (緑:点間距離が 2cm 未満のもの)  
(a) 速度:0.4167m/s(仕様書)(b) 速度:0.3634m/s(提案手法)

## 第6章

---

まとめ

## 6.1 はじめに

本論文ではまず，実物体の 3 次元モデルの作成方法について述べ，その際に使用されるレーザレンジファインダについて商用のものからわれわれの研究室が独自に開発したものまでいくつか紹介した．また，レーザファインダから得られる距離画像に関して，内外部パラメータによる歪みが存在することを述べ，それらを除去する手法を提案し，実験により提案手法の効果を示した．

## 6.2 内部パラメータに起因する歪み補正

本論文では基礎的な数学的手法を用いることで容易に距離画像の歪みを除去する手法を提案した．平面の法線方向を求める主成分分析とスプライン補間法のみを使用することにより，平面の奥行方向の歪み値をあらゆる角度方向とあらゆる距離の点に対し保有しておき，その歪み分を差し引くことにより奥行方向の歪みを除去している．奥行方向成分の歪みのみを除去することにより，大きく歪んだモデルを補正することが可能になったという点において，本手法は優れているといえることができるであろう．さらに，奥行方向成分の歪みは厳密な値ではなく，簡略化され求められた値であることに注意していただきたい．さらに，特筆すべき点として，特殊なキャリブレーション機材を使わずに補正ができることも挙げられる．

また，距離画像の奥行方向の歪みを除去することにより，距離画像が補正される様子が実験によりわかった．この手法を用いることですでに獲得されている歪みを含んだ距離画像を補正し，より正確なモデルを作成することが可能になると考えられる．定量的評価の際には，実験環境として本手法の成果があらわれにくい環境で行ったため，大規模な補正は見られなかったが，それでも補正を行わない距離画像に比べれば，誤差は小さくなっていることがわかった．実際の計測においては，測定環境を考えると，より良い補正結果が得られるはずである．この手法により，これまでに蓄積されている貴重なデータを無駄にすることなく，より正確なモデルをキャリブレーションが不正確なファインダにおいて測定したあとからでも作成することが可能になっている．

### 今後の課題

今後の課題を述べる．本手法では，奥行方向の歪み成分が大きいことから，ファインダから見た奥行方向成分のみの歪みを補正するにとどまっている．縦横方向の歪みが存在しない，ということではないため，正確な補正を目指すのであれば，すべての歪みを除去することを試みるべきである．歪みをすべて検出するためには，より計算コストの高い処理を施し，距離画像の理論値を求める必要があるため，より少ないコストで奥行方向のみならず，縦横方向の歪みも検出し，除去する必要がある．

## 6.3 外部パラメータに起因する歪み補正

本論文では，木登りセンサという新たなセンサを提案した．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成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．

木登り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，木登り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．

### 今後の課題

ほとんどの距離画像では問題なく位置合わせが可能であったが，一部の距離画像には位置合わせすることができないものも存在した．この要因として考えられるのは，エッジ抽出が失敗していることや，エッジの傾きを正確に算出していないことなどが挙げられる．

今後の展開としては，位置合わせの際に位置と姿勢だけでなく，同時に形状パラメータを求める方法を用いて，現状で位置合わせ不可能な距離画像の位置合わせを

行うことを考えている．この手法を用いることにより，同部分を地上固定センサで計測が可能であるという条件の下で，正確な移動体速度とそれに伴う正確な距離画像を獲得することが可能となる．ほかにもイメージセンサを用いて structure from motion と呼ばれる手法を用いてより精度の高い距離画像を獲得することも考えている．

また，本論文で提案したアルゴリズムはセンサの移動速度を等速であることを必要としていない．このアルゴリズムの主な利点は，時空間距離画像を利用することにより，移動速度を求めることが可能となり，自由に運動する物体の速度を逆算できる点にある．木登りセンサの場合においては，センサが直線的に，さらにモーターを利用して移動していることから，等速を仮定することが妥当であった．さらに発展するためには，移動体が自由運動を行った場合においても速度が逆算可能なより一般化された実装が必要となる．

# 謝辞

---

本研究を進めるにあたり，毎週のミーティングによって研究の方向性を随時修正していただき，さらにすばらしい研究環境を与えてくださった池内克史教授に心からお礼を申し上げます。

小野晋太郎さん，長谷川一英さんには同室となったよしみもあり，研究室に配属されてから，右も左もわからない状況で常に的確な指導・アドバイスをしていただき本当にお世話になりました。この場を借りて感謝および敬意をあらわします。特に小野さんには本研究の指導だけでなく，論文の書き方に至るまで丁寧にご指導いただき，本当にありがとうございました。

また，同じセンサグループのメンバーである阪野貴彦さん，増田智仁さんには研究が行き詰ったとき，プログラムがわからないとき，さまざまな場面において助言，アドバイスをいただきました。ここに感謝の気持ちをあらわします。センサグループ以外の池内研究室の皆さんにも，実験で使用するデータを提供していただいたり，発表練習に付き合っただきグループを超えてのアドバイスを頂戴し，本当にお世話になりました。ありがとうございました。

学会出席や事務的な手続きでお世話になった秘書の皆様には，いつも期限間際まで必要書類を提出せずご迷惑をおかけしたことを大変申し訳思うのと同時に，深く感謝いたします。また，研究生活を進めるにあたり研究環境をよりよいものにしていただいた職員みなさまに感謝いたします。

最後に学生生活を常に暖かい目で見守って支えてくれた家族と友人，そして学生生活を有意義なものにしてくれたラクロス部に最大限の感謝の気持ちをあらわします。

平成 18 年 2 月 3 日

## 発表文献

---

松井健, 長谷川一英, 池内克史:”文化遺産における壁面画の測定に伴う歪み補正,”  
情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告 (CVIM)(2004)

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  
の三次元モデル化,” 画像の理解・認識シンポジウム (MIRU)(2005)

K. Matsui, S. Ono, K. Ikeuchi:”The Climbing Sensor:3-D Modeling of a Narrow  
and Vertically Stalky Space by Using Spatio-Temporal Range Image,” IEEE/RSJ  
International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)(2005)

## 参考文献

---

- [1] M. Levoy: “The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues,” Proc. of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH) (2000).
- [2] T. Hawkins, J. Cohen and P. Debevec: “A Photometric Approach to Digitizing Cultural Artifacts,” Proc. of International Symposium on Virtual Reality, Archaeology, and Cultural Heritage (2001).
- [3] D. Miyazaki, T. Oishi, T. Nishikawa, R. Sagawa, K. Nishino, T. Tomomatsu, Y. Takase and K. Ikeuchi: “The Great Buddha Project:Modelling Cultural Heritage through Observation,” Proc. of International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM), pp. 138–145 (2000).
- [4] H. Unten and K. Ikeuchi: “Virtual Reality Model of Koumokuten Generated from Measurement,” Proc. of International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM) (2004).
- [5] T. Masuda, Y. Yamada, N. Kuchitsu and K. Ikeuchi: “Sunlight Illumination Simulation for Archaeological Investigation -Case Study of the Fugoppe Cave-,” Proc. of International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM) (2004).
- [6] K. Ikeuchi, K. Hasegawa, A. Nakazawa, J. Takamatsu, T. Oishi and T. Masuda: “Bayon Digital Archival Project,” Proc. of International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM) (2004).
- [7] P. J. Besl and N. D. McKay: “A Method for Registration of 3-D Shapes,” IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence (PAMI) (1992).

- [8] Y. Chen and G. Medioni: "Object Modeling by Registration of Multiple Range Images," *International Journal of Image and Vision Computing* (1992).
- [9] Z. Zhang: "Iterative Point Matching for Registration of Free-Form Curves and Surfaces," *International Journal of Computer Vision (IJCV)* (1995).
- [10] T. Oishi, K. Ikeuchi, A. Nakazawa and R. Kurazume: "Fast Simultaneous Alignment of Multiple Range Image using Index Images," *Proc. of International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM)* (2005).
- [11] P. J. Neugebauer: "Reconstruction of Real-World Objects via Simultaneous Registration and Robust Combination of Multiple Range Images," *International Journal of Shape Modeling* (1997).
- [12] B. Curless and M. Levoy: "A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images," *Proc. of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)* (1996).
- [13] M. D. Wheeler, Y. Sato and I. K.: "Consensus Surfaces for Modeling 3D Objects from Multiple Range Images," *Proc. of International Conference on Computer Vision (ICCV)* (1998).
- [14] R. Sagawa, K. Nishino and K. Ikeuchi: "Adaptively Merging Large-Scale Range Data with Reflectance Properties," *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence (PAMI)* (2004).
- [15] E. Praum, A. Finkelstein and H. Hoppe: "Lapped Textures," *Proc. of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)* (2000).
- [16] P. V. Sander, J. Snyder, S. J. Gortler and H. Hoppe: "Texture Mapping Progressive Meshes," *Proc. of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)* (2001).
- [17] B. Levy: "Constrained Texture Mapping for Polygonal Meshes," *Proc. of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)* (2001).

- [18] P. J. Neugebauer and K. Klein: "Texturing 3D Models of Real World Objects from Multiple Unregistered Photographic Views," Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS) (1999).
- [19] I. Sato, Y. Sato and K. Ikeuchi: "Illumination from Shadows," IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence (PAMI) (2003).
- [20] T. Kakuta, T. Oishi and K. Ikeuchi: "Virtual Kawaradera: Fast Shadow Texture for Augmented Reality," Proc. of International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM) (2004).
- [21] Leica Geosystems HDS: "Cyrax 2500," [http://www.leica-geosystems.com/hds/en/lgs\\_5940.htm](http://www.leica-geosystems.com/hds/en/lgs_5940.htm).
- [22] KONICA MINOLTA: "Vivid910," <http://konicaminolta.jp/products/industrial/instrument/3d/vivid910/index.html>.
- [23] Zoller+Fröhlich: "IMAGER 5003," [http://www.zf-laser.com/e-produktvorteile\\_hw.html](http://www.zf-laser.com/e-produktvorteile_hw.html).
- [24] K. Hasegawa, Y. Hirota, K. Ogawara, R. Kurazume and K. Ikeuchi: "Laser Range Sensor Suspended beneath Balloon: FLRS (Flying Laser Range Sensor)," The IEICE Transaction on Information and Systems (2005).
- [25] R. Szeliski and S. Lavallée: "Matching 3-D Anatomical Surfaces with Non-Rigid Deformations using Octree-Splines," International Journal of Computer Vision (1996).
- [26] T. Masuda, Y. Hirota, K. Ikeuchi and K. Nishino: "Simultaneous Determination of Registration and Deformation Parameters among 3D Range Images," Proc. of International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM) (2005).
- [27] L. Ikemoto, N. Gelfand and M. Levoy: "A Hierarchical Method for Aligning Warped Meshes," Proc. of International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM) (2003).

- [28] R. Y. Tsai: "An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision," Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (1986).
- [29] Z. Zhang: "A Flexible New Technique for Camera Calibration," IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence (PAMI) (2000).
- [30] M. Ahmed and A. Farag: "Nonmetric Lens Distortion Calibration: Closed-form Solutions, Robust Estimation and Model Selection," Proc. of International Conference on Computer Vision (ICCV) (2003).
- [31] L. Lucchese and S. K. Mitra: "Correction of Geometric Lens Distortion Through Image Warping," Proc. of International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (2003).
- [32] I. D. Reid: "Projective Calibration of a Laser-Stripe Range Finder," Image and Vision Computing (1996).
- [33] A. M. McIvor: "Calibration of a Laser Stripe Profiler," Proc. of International Conference on 3-D Imaging and Modeling (3DIM) (1999).
- [34] S. Thrun, M. Diel and D. Hähnel: "Scan Alignment and 3-D Surface Modeling with a Helicopter Platform," Proc. of International Conference on Field and Service Robotics (2003).
- [35] R. Miller and O. Amidi: "3-D Site Mapping with the CMU Autonomous Helicopter," Proc. of International Conference on Intelligent Autonomous Systems (1998).
- [36] Y. Hirota, T. Masuda, R. Kurazume, K. Ogawara, K. Hasegawa and K. Ikeuchi: "Flying Laser Range Finder and its Data Registration Algorithm," Proc. of International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2004).
- [37] A. Banno and K. Ikeuchi: "Shape Recovery of 3D Data Obtained from a Moving Range Sensor by Using Image Sequences," Proc. of International Conference on Computer Vision (ICCV) (2005).

- [38] H. Zhao and R. Shibasaki: “Reconstructing Urban 3D Model using Vehicle-borne Laser Range Scanners,” Proc. of International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM) (2001).
- [39] C. Früh and A. Zakhor: “Fast 3D Model Generation in Urban Environments,” Proc. of International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (2001).
- [40] C. Früh and A. Zakhor: “Constructing 3D City Models by Merging Ground-Based and Airborne Views,” Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (2003).
- [41] G. Dissanayake, P. Newman, S. Clark, H. Durrant-Whyte and M. Csroba: “An Experimental and Theoretical Investigation into Simultaneous Localisation and Map Building (SLAM),” (2000).
- [42] R. Smith, M. Self and P. Cheeseman: “Estimating Uncertain Spatial Relationships in Robotics,” Springer-Verlag New York, Inc. (1990).
- [43] M. Montemerlo, S. Thrun, D. Koller and B. Wegbreit: “FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem,” Proc. of AAAI National Conference on Artificial Intelligence (2002).
- [44] M. Montemerlo and S. Thrun: “Simultaneous Localization and Mapping with Unknown Data Association Using FastSLAM,” Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2003).
- [45] S. Ono and K. Ikeuchi: “Self-Position Estimation for Virtual 3D City Model Construction with the Use of Horizontal Line Laser Scanning,” International Journal of ITS Research (ITSJ) (2004).
- [46] Medicom Corporation: “Nobitec Lift NP-4200,”. <http://www.kss-co.jp/nobitec/lift>.
- [47] SICK AG: “LMS200,”. <http://www.sick.de/de/en.html>.

- [48] R. C. Bolles, H. H. Baker and D. H. Marimont: “Epipolar-Plane Image Analysis: An Approach to Determining Structure from Motion,” *International Journal of Computer Vision* (1987).