

# 梯子式レーザ計測システムによる大規模文化遺産の三次元モデリング

小野 晋太郎 松井 健<sup>\*1</sup> 池内 克史

東京大学

〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

{onoshin, matsu-ken, ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

論文概要：「梯子式レーザ計測システム」という新規の三次元計測機構を提案する。このセンサは、従来の商用レンジセンサではその寸法や視野角の限界により計測が困難であった狭隘部を計測するために設計された。2台のラインスキャンレーザレンジセンサを市販のリフトに装着し、リフトの上下運動に伴って対象物を計測する機構となっている。スキャナの移動速度は時空間距離画像を用いることにより推定され、正確な三次元モデルを形成することが可能となる。このセンサを歴史的文化遗产のデジタル保存の一環としてカンボジアのバイヨン寺院で運用したところ、計測結果から、正確な三次元モデル獲得と速度推定手法の有効性が示された。

## Development of ladder-type laser scanning system for 3-D modeling of large-scale cultural heritages

Shintaro Ono Ken Matsui Katsushi Ikeuchi

The University of Tokyo

4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

**Abstract:** In this paper, we propose a novel type of 3-D scanning system named Ladder-type laser scanning system. This system was designed for scanning narrow and vertically stalky spaces. The climbing sensor equips a platform with two line scanners on a lift, and they scan the whole target while the lift moves vertically. By using spatio-temporal range image we can accurately calculate the speed of the platform, with which correct 3-D models can be constructed. We applied this system to the Bayon Temple in Cambodia. The results proved that the system gives a sufficiently accurate 3-D model and the effectiveness of our proposed system and speed estimating process.

**Keywords:** 3-D modeling, Cultural heritage, laser range scanner, spatio-temporal range image

### 1 はじめに

近年のコンピュータ技術の革新的な進歩により、画像処理やコンピュータビジョンの研究は高い注目を集めている。その中でも、実世界の対象を計測することによってその三次元モデルを作成する研究は、コンピュータビジョンの中でも最も盛んに行われているものの一つである。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な物体の三次元モデリングは重要視されており、ミケランジェロの像 [12] や奈良・鎌倉の大仏 [2] 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 [10] を進めている。計測には、市

<sup>\*1</sup> 現在、三菱商事株式会社

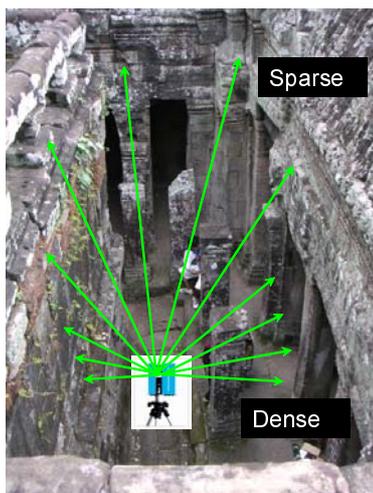


図1 狭隘部における計測点密度の不均一性

販のCyrax 2500 [11] や Floating Laser Range Sensor [5] 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、パイオ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。全天球方向の距離計測を行う Z+F 社の IMAGER 5003 [19] などを使用すれば視野角の問題は解決できるが、図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、時空間距離画像を用いる。

## 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つの例としてヘリコプターがある [3, 14]。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。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適切ではなく、許可を得ることも困難であることが多い。

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 [5, 6]。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。また、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際には、移動体として、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 [18] 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 [7, 8]。例えば、一方のスキャナは移動体の移動と共に対象物全体を計測し、もう一方のスキャ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。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。[7, 8] では、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。

われわれが提案する木登りセンサにおいても、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を利用する。

## 3 梯子式レーザ計測システム

### 3.1 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

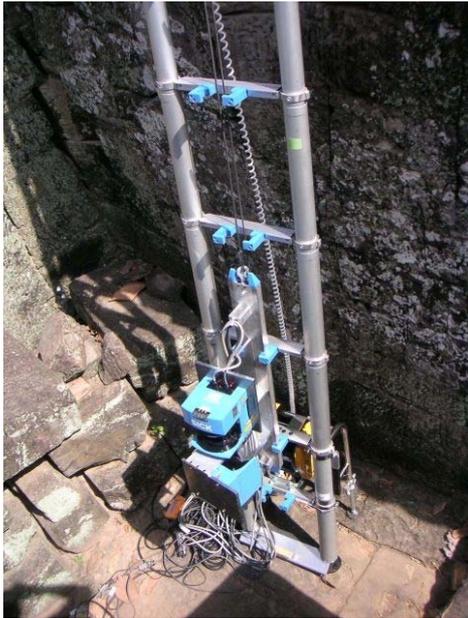


図2 梯子式レーザ計測システムの外観

表1 NPL-4200仕様

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

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「梯子式レーザ計測システム」と呼ぶこととする。システムの外観を図2に示す。この梯子式センサにより、充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事が可能である。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。

### 3.1.1 移動機構

移動機構には Nobitec Lift NPL-4200 (表1, [13]) 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

表2 LMS200仕様

|          |                       |
|----------|-----------------------|
| 計測原理     | ライン走査, Time-of-flight |
| 計測レート    | 37.5 /sec             |
| 視野角      | 180° / 180°           |
| 角度分解能    | 0.25° / 0.5° / 1.0°   |
| 精度       | ±15mm                 |
| レーザ保護クラス | 1                     |
| 最大計測距離   | 80 m                  |
| 重量       | 4.5 kg                |
| 外形寸法     | L156×W155×H210mm      |

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。

### 3.1.2 センサユニット

センサユニットには、SICK LMS200(表2)を用いる。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・軽量のクラスに属する。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、副センサ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。

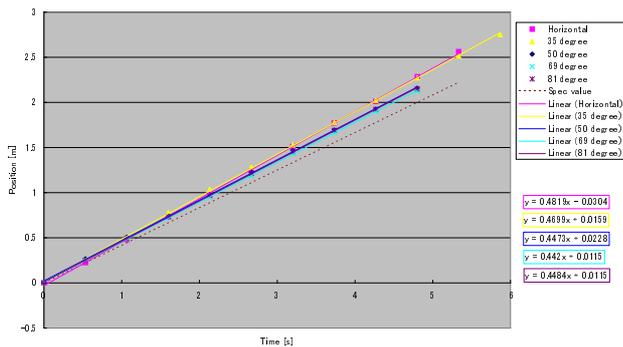


図3 プラットホーム移動の等速性検証

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

### 3.2 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ホ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ホ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ホ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。

確認のため、梯子に沿って巻尺を設置し、移動プラットホームに載せたビデオカメラから梯子長のおよそ 1/8 区間毎に目盛りを手動で読み取るにより位置変化を算出した。梯子の設置における傾き角度は水平から 81° まで 5 段階に変化させた。結果を図 3 に示す。各計測における位置変化はほぼ直線を示しており、回帰直線との差は最大でも 5 mm 以内であった。また一方で回帰直線の傾きは各場合によってばらつきがあり、仕様値からも外れている。これは、上記の運動条件仮定 2、および計測の都度にプラットホームの運動を求めることの妥当性を示すものである。

## 4 センサユニットの位置推定

移動プラットホ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、ここでは時空間距

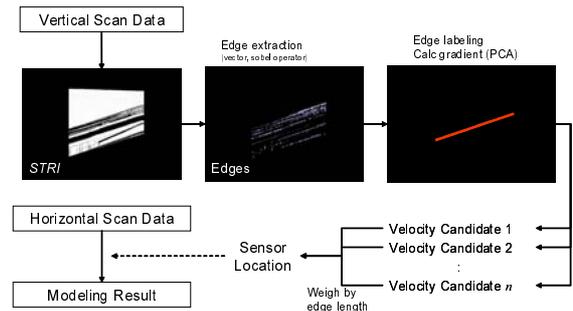


図4 自己位置推定処理の概略図

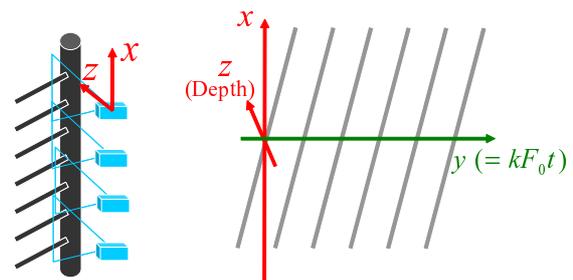


図5 時空間距離画像

離画像 [4] を解析する方法によって求めることとする。

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 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。

### 4.1 時空間距離画像の利用

時空間距離画像とは、時系列のラインスキャン距離データをラインと直交する軸に沿って並べた一種の距離画像である。本システムのプラットホームに取り付けたセンサユニットのうち、副センサはの計測結果を適当な間隔で平行に並べると、図 5 のような時空間距離画像を得ることができる。

時空間距離画像では計測対象の空間的な特徴と移動の時間的な連続性も同時に表現されており、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。スキャン毎にオーバーラップが存在することから各点がクラスタを形成しており、それらのエッジは容易に抽出できる。このエッジにより、移動速度は以下の式によ

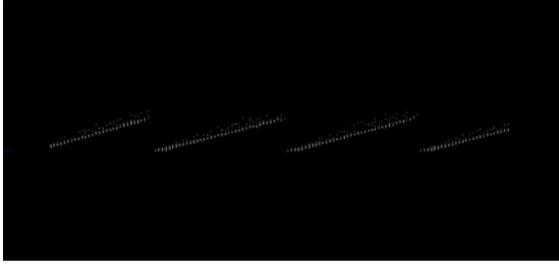


図 6 梯子式レーザ計測システムの副センサから得られる時空間距離画像の例

り計算される．

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = k \frac{F_0 \Delta t}{\Delta x} = k F_0 V \quad (1)$$

ここで  $m$  はエッジの傾き， $F_0$  はセンサの計測レート， $k$  は時空間距離画像におけるスキャンの配置間隔である．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．

図 6 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．

## 4.2 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．

### 4.2.1 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．

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

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，

$$r_{m,n} = \sqrt{x_{m,n}^2 + z_{m,n}^2} \quad (3)$$

である．

### 4.2.2 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

$$\theta_m = \angle p_{m-1,n} p_{m,n} p_{m+1,n} \quad (4)$$

$$\theta_n = \angle p_{m,n-1} p_{m,n} p_{m,n+1} \quad (5)$$

である． $\theta_m$  または  $\theta_n$  (まとめて  $\theta$  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．

$$\frac{\pi}{12} < \theta < \frac{11}{12}\pi \quad (6)$$

## 4.3 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 (1) 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．



図7 バイヨン寺院における狭隘部の典型例

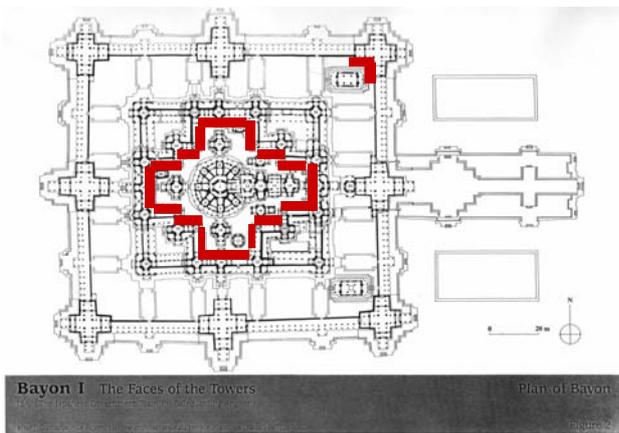


図8 梯子式レーザ計測システムによる計測箇所



(a) 北経蔵北東部



(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9 梯子式レーザ計測システムによる計測の様子

## 5 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。

### 5.1 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7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。

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8に計測領域の図を、図9に計測作業の様子を示す。

### 5.2 結果

#### 5.2.1 テラスと内回廊の隙間部分

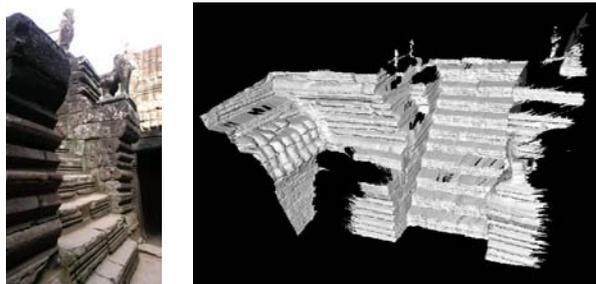
図10はテラスと内回廊の隙間部のモデリング結果例である。図中(a)はカメラによる計測箇所の撮影結果で

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、本システムの特性が十分に発揮されていることが分かる。

図11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30cm程度の箇所が集中しているためである。

#### 5.2.2 北経蔵の北東部分

図12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。



(a) 計測対象 (b) モデリング結果

図 10 テラスと内回廊間のモデリング結果

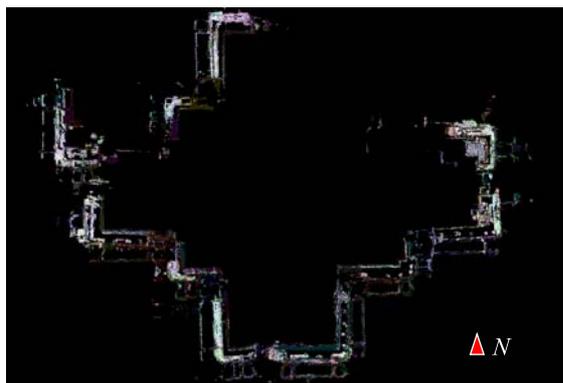


図 11 梯子式レーザ計測システムによる内回廊間の全計測結果



(a) 計測前 (b) 計測後

図 12 北経蔵北東部分のモデリング結果

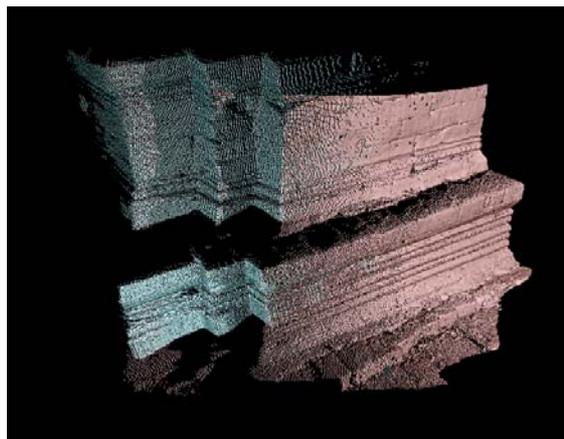
### 5.3 評価

#### 5.3.1 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  $\pm 6 \text{ mm}$  であり、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



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 13 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

(ICP) 法 [1, 17] を用いた。位置合わせ処理は安定に収束した。図 13 に位置合わせ結果の例を示す。

#### 5.3.2 本システムによるモデルどうしの整合性

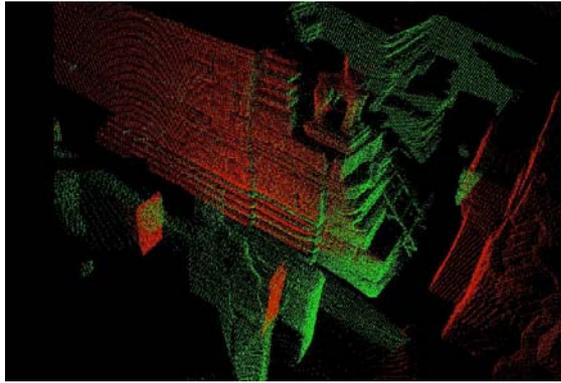
梯子式センサから得られる複数のモデル結果のうち、計測対象にオーバーラップがあり、かつ本提案手法によるセンサユニットの推定移動速度が大きく異なったデータから得られたモデルどうしの位置合わせを行った。

図 14 は、推定移動速度がそれぞれ  $0.3504 \text{ m/s}$ 、 $0.4081 \text{ m/s}$  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  $0.4167 \text{ m/s}$  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。

## 6 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



|            | 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 14 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

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。

## 参考文献

- [1] P.J. Besl and N.D. McKay. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence (PAMI)*, 1992.
- [2] Daisuke Miyazaki et al. The Great Buddha Project: Modelling Cultural Heritage through Observation. In *Proc. International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, 2000.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Yuichiro Hirota et al. Flying Laser Range Finder and its data registration. In *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2004.
- [7] Christian Früh and Avidah Zakhor. Fast 3D Model Generation in Urban Environments. In *International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, 2001.
- [8] Christian Früh and Avidah Zakhor. Constructing 3d city models by merging ground-based and airborne views. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2003.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Leica Geosystems HDS. Cyrax 2500. [http://hds.leica-geosystems.com/products/cyrax2500\\_specs\\_CE.html](http://hds.leica-geosystems.com/products/cyrax2500_specs_CE.html).
- [12] M. Levoy. The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues. In *SIGGRAPH*, 2000.
- [13] Medicom Corporation. Nobitec Lift NP-4200. <http://www.kss-co.jp/nobitec/lift>.
- [14] Ryan Miller and Omead Amidi. 3-D Site Mapping with the CMU Autonomous Helicopter. In *The 5th International Conference on Intelligent Autonomous Systems*, 1998.
- [15] M. Self R. Smith and P. Cheeseman. *Estimating uncertain spatial relationships in robotics*. Springer-Verlag New York, Inc.
- [16] SICK AG. LMS200. <http://www.sick.de/de/en.html>.
- [17] Zhengyou Zhang. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, 13:119–152, 1995.
- [18] 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.
- [19] Zoller+Fröhlich. IMAGER 5003. <http://www.zf-laser.com/e-produktvorteile.hw.html>.