

浮遊型レーザーレンジセンサから得られた距離画像の変形位置合わせ

増田 智仁[†] 廣田祐一郎[†] 長谷川一英[†] 池内 克史[†]

[†] 東京大学生産技術研究所 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

E-mail: [†]{tom,yerhrt,k-hase,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし 本論文では、大規模な物体を地上から効率よく高精度に三次元計測するために、我々の研究室で開発した浮遊型レーザーレンジセンサから得られた距離画像を位置合わせする手法を提案する。センサが計測中に動いてしまうと、得られる距離画像にはこの動きに起因する歪みが生じるため、通常の平行・回転移動による位置合わせ手法を適用することはできない。そこで本論文では地上に安定に設置されたセンサから得られる歪みのない距離画像を用いて、このような歪みを距離画像間の位置合わせの段階で同時に補正する変形位置合わせ手法を提案する。また、変形位置合わせ手法の精度評価とアルゴリズム限界を示し、実際の浮遊式レーザーレンジセンサから得られた歪みのあるデータを変形位置合わせによって補正した例を示す。

キーワード 位置合わせ, 形状合わせ, 歪み補正

Parameterized Deformation Registration of Range Data Obtained from Floating Laser Range Sensor

Tomohito MASUDA[†], Yuichiro HIROTA[†], Kazuhide HASEGAWA[†], and Katsushi IKEUCHI[†]

[†] Institute of Industrial Science, The University of Tokyo 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 105-0123, Japan

E-mail: [†]{tom,yerhrt,k-hase,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract In this paper, we propose the registration method among range images obtained from our floating laser range sensor in order to effectively and accurately measure the 3D shape of large-scale objects from the air. Moving a sensor during the scanning causes the shape distortion of its range image, so the conventional registration (rigid-body transformation) cannot be applied to their range images. Therefore, we propose the deformation registration method which can simultaneously correct the shape distortion at the registration step by using undistorted images obtained from the sensor stably set on the ground. We describe the accuracy and limitation of our proposed method, as well as the example of the distortion correction of corrupted range images obtained from the floating laser range sensor.

Key words rigid-body transformation, registration, shape fitting, distortion correction

1. はじめに

我々はこれまでに奈良、鎌倉大仏、カンボジアのバイヨン寺院などの大規模な文化財をモデリングしてきた [1]。これらの物体を計測するときは、地上の安定した地点に設置した三脚の上に、センサを取り付けて行うのが通常の方法であるが、対象物が大規模であれば、地上から見えない屋根の頂上等、計測不可能な箇所が存在する。このような場合、足場を組むなどして、地上から計測できない部分を計測するが、この方法は多大なコストを要するだけでなく、設置スペースの問題や文化財の保全上の理由から現実的な手法ではない。そこで我々は時間と場所の制約を受けることなく地上から計測できない部分を効率よく計測するために、気球に搭載された浮遊型センサーを開発している [2]。この浮遊型センサは空中から効率的に物体表面を計測できるが、計測途中でセンサが動いてしまうと、得られた距離画像には歪みが生じてしまう。本研究では、センサの運動の情報を取得する

特別なデバイスなどを必要とすることのない、距離画像間における歪みの補正を考慮した位置合わせ手法を提案する。提案手法は、従来の平行・回転移動による位置合わせ手法を拡張して、同時に形状の変形も可能にするものである。

変形位置合わせについては既に多くの研究がなされており、Feldmar らはアフィン変換を用いて形状の変形を行っている [3]。これらの研究は主に、形状の一致しない距離画像同士の位置・姿勢・形状合わせを行うことのみ主眼を置いている。しかし、変形が厳密にはアフィン変換によって規定されない場合は、この手法における歪みの補正は近似的なものでしかない。本研究では、距離画像の歪みがセンサの計測中の運動に起因することに着目し、センサの運動に基づいて、距離画像の変形をパラメタ表現することにした。この利点として、距離画像のパラメタ化を正確に表現できれば、歪んだ形状はパラメタを操作することによって厳密に補正することが可能である。また、正確に変形パラメタが求まった場合、このパラメタは重要な意味を持つ。

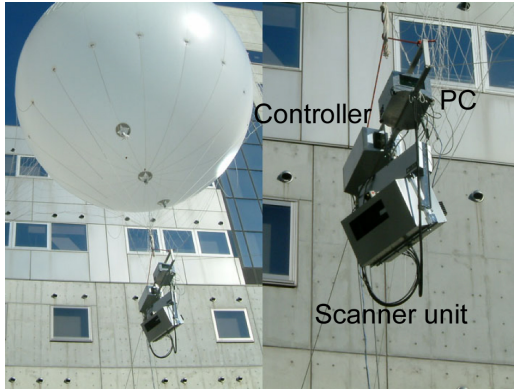


図1 浮遊型センサ外観

本研究において変形位置合わせがなされた時に求まる変形パラメタは、計測中のセンサの運動を表す。センサの運動を仮定して人工的に変形した距離画像を、再び変形位置合わせによって補正するシミュレーション実験を行えば、センサの変位の仕方(大きさ等)による提案手法のアルゴリズム限界を知ることができ、移動機構を含めたハードウェア構成の改善や、計測の際に満たすべき条件等を知り得る上での有効な情報となりうる。

また、空中からの三次元計測についても既に多くの研究事例があり、ヘリ搭載型のセンサ [4] ~ [7] や気球搭載型のステレオカメラ [8] などが開発されている。しかし、ヘリ搭載型のセンシングシステムにおける変形のパラメタ表現は非常に複雑なものとなり得る。ソフトウェアにおける形状の歪み補正を行う場合、変形式はできるだけ少ないパラメタで定式化することが望まれるため、我々のセンシングシステムはこのような要件を見越して作られている。すなわち、移動機構に気球を採用し、汎用のレーザーレンジセンサよりも短時間にステレオカメラよりも高精度に計測できるハードウェア構成となっている。我々が開発している浮遊型センサの外観とユニット内部を図1, 2に示す。

本論文における変形位置合わせの概要を図3に示す。浮遊型センサにより空中から得られた歪みを持つ距離画像(モデル画像)は、地上からCYRAX2500によって計測して得られた歪みのない距離画像(シーン画像)に対して、位置・姿勢・形状を合わせる。つまり、提案手法はモデル画像の位置・姿勢パラメタと浮遊型センサの計測中の運動を記述するパラメタを同時推定する。

以降本論文では、変形位置合わせの基礎となる平行・回転移動による位置合わせについて先行研究を示し、それらの精度を検討する。最もロバストな位置合わせのフレームワークを基本に、提案手法である変形位置合わせを定式化し、その精度評価を行う。また、実際に提案手法を適用した例を示し、全体の結論を述べてまとめとする。

2. 変形位置合わせアルゴリズム

2.1 関連研究

三次元位置合わせの最も基本的なものとして Iterative Closest Point(ICP) アルゴリズムがある [9], [10]。これは対応点間の距離の総和を誤差関数とし、繰り返し計算により最小化することで三次元データ間の位置・姿勢を合わせるアルゴリズムである。ICP アルゴリズムを基本とした位置合わせの手法は現在、さまざまに拡張されているが、これらは主に (1) 位置合わせ順序, (2) 対応要素, (3) 誤差尺度の三つの観点から分類できる。

三次元データの位置合わせにはデータ処理の順序の観点から、逐次位置合わせと同時位置合わせが提案されている。逐次位置合わせは、対応する2枚の距離画像間の位置合わせを逐次繰り返して全体の位置合わせとする方法であるが、全体の位置合

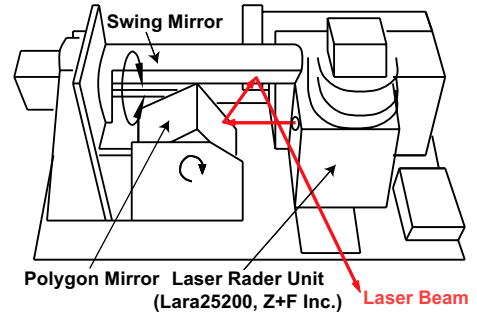
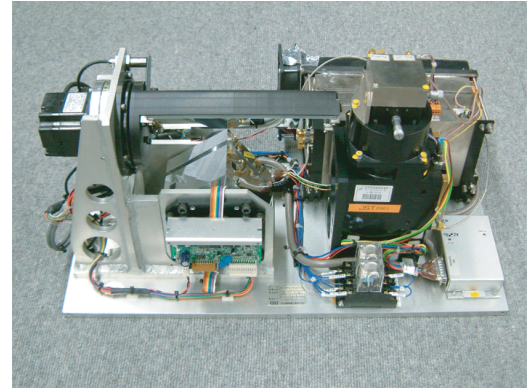


図2 センサユニット内部

せが終了した際に、位置合わせ誤差が局所的に蓄積される [11]。同時位置合わせは、一斉に全ての距離画像の位置合わせを行うので、逐次位置合わせのように誤差が局所的に蓄積することなく、整合性の取れた位置合わせが可能となる。

ICP アルゴリズムにおける誤差関数の対象として、距離画像の幾何学的な特徴点を用いる方法 [12], [13] と、全ての三次元点を用いる方法 [9], [14] がある。特徴点を用いる位置合わせは、全ての特徴点に一对一対応が得られることを前提とし、この対応を収束の各段階で変化させずに誤差関数を最小化するため、常に正しい対応が得られない場合は正確な位置合わせができない。三次元点を用いる場合は、収束の各段階において対応関係をより確からしいものに更新するので、特徴点を用いる手法よりもより正確に位置合わせが行われることが報告されている [15]。

各対応点間の誤差尺度として、距離画像間の点と点、あるいは点と面との距離が主に用いられている [16], [17]。このようなユークリッド距離以外の尺度を用いる方法として、レーザーレンジセンサから副次的に得られるリフレクタンス(レーザーの反射率)や色情報の値を用いる位置合わせ手法も提案されている [18]。

2.2 誤差関数の設定

本研究における最終的な目的は、位置・姿勢のパラメタと同時に浮遊型センサの計測中の運動パラメタを推定することである。従来の平行・回転移動による位置合わせよりも推定するパラメタが増えるので、本研究における位置合わせ戦略は最もロバストなフレームワークを基本とすることが望ましい。そこで本研究では対応点として最近傍点を採用し、さらにその対応点間距離にローレンツ関数を乗じてロバスト性を高めた西野らの同時位置合わせ手法 [19] をベースにして、本研究における形状パラメタを同時に推定する位置合わせ手法を考える。

ある歪みを補正する距離画像(モデル画像)を X 、この位置・姿勢・形状を合致させる相手の距離画像(シーン画像)を Y とおく。また、 X の位置・姿勢・形状を規定するパラメタ群 p を並進ベクトル t と回転をあらわすクォータニオン q 、形状パラメタ v からなるベクトルとする。すなわち、

$$p = (t, q, v). \quad (1)$$

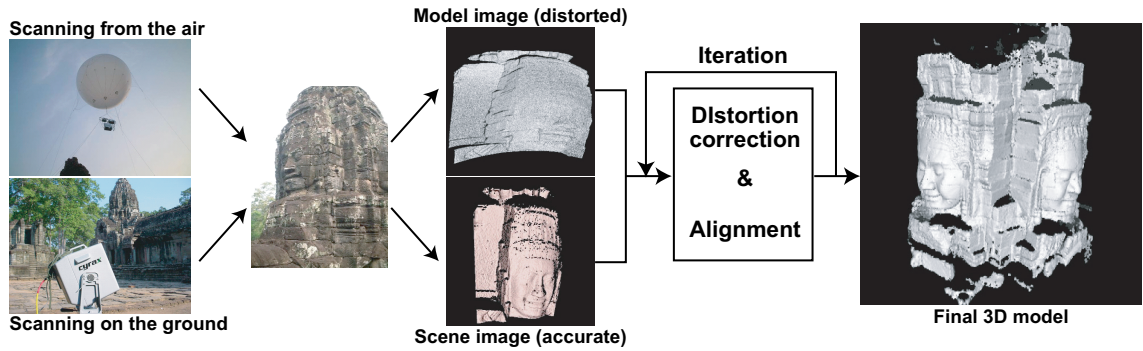


図3 データ処理の流れ

ここで、任意のパラメタベクトル \mathbf{p} によって位置・姿勢・形状が規定された X 上の点を \mathbf{x}_i 、シーン画像 Y 上の \mathbf{x}_i の最近傍点を \mathbf{y}_i とすると、これらの間の誤差関数はユークリッド距離の二乗として、

$$z_i(\mathbf{p}) = \|\mathbf{R}(\mathbf{q})\mathbf{g}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}) + \mathbf{t} - \mathbf{y}_i\|^2 \quad (2)$$

と表され、モデル画像とシーン画像の一对の位置合わせは、この誤差関数の最小化問題に帰着する。ここで $\mathbf{R}(\mathbf{q})$ はクォータニオン \mathbf{q} より導かれた回転行列、 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v})$ はモデル画像上の点 \mathbf{x}_i を、計測中のセンサの運動パラメタ \mathbf{v} によって歪みを補正する関数である。

位置合わせする一对の画像の誤差関数は式 (2) の総和として表されるが、このような誤差関数だと初期的な位置・姿勢・形状があまりにも離れていたり、計測誤差が大きい場合には正確な位置合わせをすることは出来ないため、適切に重み付けされた総和として誤差関数を設定する。この重み付けには閾値処理や統計的な手法が用いられるが、距離画像の位置合わせにおいてはローレンツ関数による M 推定法が最も適切な振舞いをする事が報告されている [20]。よって、誤差関数 (2) をローレンツ関数による M 推定法により重み付けを行う。すなわち、

$$\rho(z_i(\mathbf{p})) = \log\left(1 + \frac{1}{2}z_i^2(\mathbf{p})\right). \quad (3)$$

一对の画像全体の誤差関数 $E(\mathbf{p})$ は $\rho(z_i(\mathbf{p}))$ の x 上の全ての点の総和の平均として、次の式によって定義される。

$$E(\mathbf{p}) = \frac{1}{N} \sum_i \rho(z_i(\mathbf{p})) \quad (4)$$

但し、 N : モデル画像上の点数。

位置合わせを行うということは、誤差関数 $E(\mathbf{p})$ を最小とするようなパラメタ群 \mathbf{p} を見つけることである。すなわち、

$$\mathbf{p}_{opt} = \arg \min_{\mathbf{p}} E(\mathbf{p}). \quad (5)$$

本論文においては、式 (5) を最急降下法で解く。次節 2.3 では形状を変形させる関数 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v})$ の詳細について述べる。さらに 2.4 では式 (5) の具体的な解法について述べる。

2.3 変形の定式化

本節では浮遊型センサより得られた距離画像の歪みを補正するために、位置合わせで用いる形状変形関数 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v})$ を定義する。

浮遊型センサの計測中の運動 (変位) は次の要素により決定

される。

- 初期速度
- 初期角速度
- 外力による並進加速度
- 外力が発生させるモーメントによる角加速度

本研究で用いる浮遊型センサは 1 回につき 1 秒間という短い時間で計測することが出来るため、これらの要素のうち、加速度に関するものは無視できる。さらに角速度が微小な場合、計測される距離画像に及ぼす変形は並進運動に起因するものと近似することができる。以上の理由から我々は浮遊型センサの運動を等速直線運動として運動パラメタ \mathbf{v} を等速度ベクトルとしてひとまず定義する。すなわち、

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v})_i = \mathbf{x}_i - \tau_i \mathbf{v}. \quad (6)$$

ここで τ_i はスキャンを開始してから点 \mathbf{x}_i が計測されたときに経過していた時間である。この値はミラーの回転速度等の既知の情報から計算できる。

ここで、変形式 (6) を用いた時の位置合わせの様子を考えてみる。図 4 に示すような 4 点からなる (歪みのない) モデル画像 (破線) があるとする。センサが運動パラメタ \mathbf{v} に従って計測中に動いた時は式 (6) に従い、図 4 の実線のように変形することになる。このとき各点で定義されているスキャン開始からの経過時間 τ が 0 である左下の点は位置変化がない。

図 5 左で示すような歪んだモデル画像をシーン画像に変形位置合わせする場合を考える。モデル画像は実線で、シーン画像は破線で表す。ここでは簡単のためモデル画像が正しく位置合わせされた場合、シーン画像に完全に重なる事とし、さらにモデル画像とシーン画像の対応点は正しく与えられているとする。このときシーン画像は、対応点の距離の二乗和を最小化するために、図 5 右上の淡い実線で示される位置に移動する。しかし、この位置において同時に推定される変形パラメタ \mathbf{v} にしたがって歪みを補正すると、シーン画像を離れてしまう。 \mathbf{v} によって歪み補正することにより位置合わせが収束する平行・回転移動位置は、モデル画像において $\tau = 0$ である左下の点がシーン画像における対応点と重なる図 5 右下に示す位置である。このように、単に式 (5) に基づいて位置・姿勢・変形パラメタを求めようとすると、互いに悪影響を及ぼしあっていることが分かる。

そこで、この悪影響を最小に抑える方法を考える。上記の例でもしモデル画像が図 5 右上にある位置から即座にシーン画像の形状に変形できるとすれば、 \mathbf{v} はより正確に推定できる。そこで、モデル画像に座標変換 $\mathbf{R}_o(\mathbf{v}), \mathbf{t}_o(\mathbf{v})$ を施し、式 (6) に替わって図 4 右下に示すような変形を実現させることを考える。このとき、 \mathbf{v} を反映させる式は、

$$\mathbf{x}'_i = \mathbf{R}_o(\mathbf{x}_i - \tau_i \mathbf{v}) + \mathbf{t}_o \quad (7)$$

となる。ここで浮遊型センサの運動パラメタを等速度で定義した性質上、回転移動成分は平行移動に比べて変形への影響を無

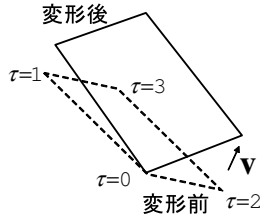


図4 v による形状変形

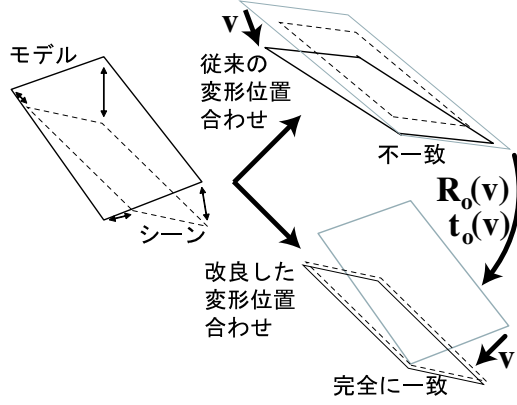


図5 変形位置合わせの誤差関数の改善

視できる。よって最終的に \mathbf{v} を反映させる式は、

$$\mathbf{x}'_i = \mathbf{x}_i - \tau_i \mathbf{v} + \mathbf{t}_o \quad (8)$$

となる。

ここで ε_i を

$$\varepsilon_i = \|\mathbf{x}'_i - \mathbf{x}_i\|, \quad (9)$$

とおき、 \mathbf{t}_o を

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_o &= \arg \min_{\mathbf{t}} \sum_i^N \varepsilon_i^2 \\ &= \arg \min_{\mathbf{t}} \sum_i^N \|\mathbf{x}_i - \tau_i \mathbf{v} + \mathbf{t} - \mathbf{x}_i\|^2, \end{aligned} \quad (10)$$

と定義すると、変形位置合わせの反復で振動することを防ぐことができる。以降、 $\mathbf{t}_o(\mathbf{v})$ が具体的にどのように \mathbf{v} によって表されるのかを導出する。

\mathbf{t}_o を、

$$\mathbf{t}_o = \begin{bmatrix} t_{o1} & t_{o2} & t_{o3} \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

とすると、式 (10) を満たす式 \mathbf{t}_o は、

$$\frac{\partial \sum_i^N \varepsilon_i^2}{\partial \mathbf{t}_o} = \sum_i^N 2\varepsilon_i \cdot \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial \mathbf{t}_o} = 0 \quad (12)$$

ここで、

$$\varepsilon_i = \mathbf{x}'_i - \mathbf{x}_i = -\tau_i \mathbf{v} + \mathbf{t}_o \quad (13)$$

より、式 (12) から、

$$\mathbf{t}_o = \frac{\sum_i^N \tau_i}{N} \mathbf{v} \quad (14)$$

となる。この結果を用いると式 (8) は、

$$\mathbf{x}'_i = \mathbf{x}_i - \left(\tau_i - \frac{\sum_i^N \tau_i}{N} \right) \mathbf{v} \quad (15)$$

となる。

2.4 誤差関数の最小化

誤差関数 $E(\mathbf{p})$ についてこれを最小とする式 (5) を満たすパラメタ \mathbf{p}_{opt} の導出方法について述べる。この非線形最小化問題は最急降下法をベースに解かれる。誤差関数の7次元空間での最急勾配は、以下のように計算される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \mathbf{p}} &= \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{\partial \rho(z_i)}{\partial z_i} \cdot \frac{\partial z_i}{\partial \mathbf{p}} \\ &= \frac{1}{N} \sum_i^N w(z_i) z_i \frac{\partial z_i}{\partial \mathbf{p}} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{但し、} \quad w(z_i) = \frac{1}{z_i} \cdot \frac{\partial \rho(z_i)}{\partial z_i}.$$

\mathbf{p} の最急勾配は以下のように計算できる。

$$\frac{\partial z_i(\mathbf{p})}{\partial \mathbf{p}} = \begin{bmatrix} 2(\mathbf{g}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}) + \mathbf{t} - \mathbf{y}_i) \\ -4\mathbf{g}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}) \times (\mathbf{t} - \mathbf{y}_i) \\ 2(\mathbf{g}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}) + \mathbf{t} - \mathbf{y}_i) \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{v})_i}{\partial \mathbf{v}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

但し、

$$\frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{v})_i}{\partial \mathbf{v}} = - \begin{bmatrix} \left(\left(\tau_i - \frac{\sum_i^N \tau_i}{N} \right) 0 0 \right)^T \\ \left(0 \left(\tau_i - \frac{\sum_i^N \tau_i}{N} \right) 0 \right)^T \\ \left(0 0 \left(\tau_i - \frac{\sum_i^N \tau_i}{N} \right) \right)^T \end{bmatrix}. \quad (18)$$

最急勾配の求め方の詳細は [21] を参考にされたい。実際には最小化を効率的に行うために、Fletcher-Reeves法、Polak-Riviere法による共役勾配法 [22] ~ [24] を用いている。勾配方向に対する移動量は、黄金分割による囲い込み手法によって決定される。

3. 実験と評価

本章では前節で述べた位置合わせ手法を実際に浮遊型センサから得られたデータに適用した結果を示すと共に、人工的に合成されたデータを用いて様々な条件下で実験を行い本手法の精度と限界を定量的に評価する。

本節では位置合わせ精度を定量的に評価するためにCYRAX2500で得た計測データ (図6) と、それを既知のパラメタで移動変形させてできた人工データを用いて実験を行う。基本的な合成手順は以下のとおりである。

- (1) 一つの距離画像とそのコピーを用意する。
- (2) 片方の画像の左端から20%の点を取り除きもう一方の画像は右端から同様に20%の点を取り除く (結果として2枚のデータの重なる領域は中央の60%の領域となる)。
- (3) 2枚の画像の点をランダムにそれぞれ間引く。
- (4) 位置合わせによって推定するパラメタ ($\mathbf{t}, \mathbf{q}, \mathbf{v}$) を設定しこのパラメタによって片方の画像を移動・変形する。



図 6 評価に用いるデータ

パラメタ	設定値
$R(q)$	3 deg along X axis
t	0.1 m along X axis
v	0.00-3.00 m/s along X axis (0.01 m/s 刻み)

(5) 移動・変形させた画像をモデル画像, もう片方をシーン画像として変形位置合わせした結果を記録する。

(6) 設定する真値を必要に応じて変える。

(7) 手順 (4)-(6) を必要回数, 繰り返す。

本実験では, 表 1 に示す条件を初期パラメタとして v を変動させ, これに対する推定パラメタとの誤差を調べる。実験結果を図 7,8,9 に示す。実験は点の間引きによる偶然性を極力排除するためにそれぞれの設定値 v で位置合わせを 5 回行いそれぞれの誤差パラメタの最低値と最高値を切り捨て中央の 3 データについて平均をとったもので結果を作成した。

まず, 本手法が正確なパラメタ値を推定できる限界について見る。図 7,8,9 に共通して言えることは設定 velocity が 1.6[m/s] 付近まではどれも大きな収束誤差はない。しかしこの付近を超えると誤差は急激に増大し正しい解に収束することができなくなっている。本手法でデータ補正できる条件として, 計測中の浮遊型センサの速度の限界は 1.6[m/s] 程度であると結論付けられる。

次に正確なパラメタを推定しているセンサ速度 2.1[m/s] 以下の領域におけるパラメタ推定精度について見る。図 7 より t に関しては平均的な誤差は 0.005[m] 以下である。図 8 より $R(q)$ に関しては平均的な誤差は 0.1[deg] 以下である。図 9 より v に関しては平均的な誤差は 0.008[m/s] 以下である。

また, 最後に実際の FLRS で取得した (歪んだ) データと, CYRAX2500 で取得した (歪みのない) データを位置合わせした結果を示す。図 10 に示す黄色と紫色のデータはカンボジアのバイヨン寺院の距離画像で, 黄色の点群が浮遊型センサにより計測された距離画像を示し, 紫色の点群が地上に設定された CYRAX2500 により得られた距離画像を示す。紫色のデータをシーン画像, 黄色のデータをモデル画像として前章で述べた変形位置合わせを行った結果を図 11 に示す。二つの図を見比べて分かるように黄色いデータは紫色のデータに位置・姿勢が正確に合っていると同時に, その形状も正確に変形している。

4. ま と め

本論文では, 浮遊型レーザーレンジセンサを用いて得られた画像の歪みを補正する, 位置・姿勢・運動パラメタに関する変形位置合わせ手法を開発した。提案手法により, 地上からの計測ではオクルージョンになってしまう領域を空中からの計測により高精度かつ効率的に補うことが可能となった。計測中のセン

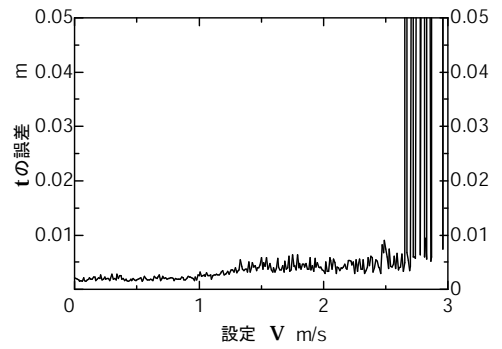


図 7 位置合わせ精度 (t)

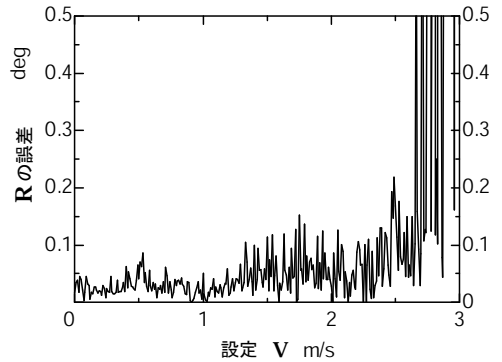


図 8 位置合わせ精度 ($R(q)$)

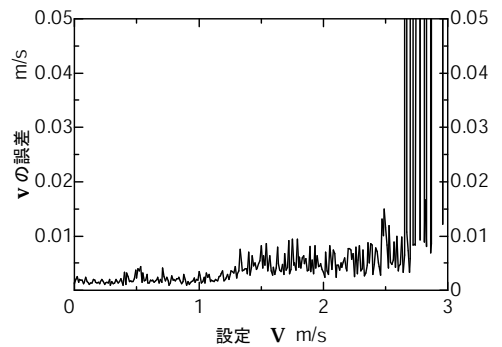


図 9 位置合わせ精度 (v)

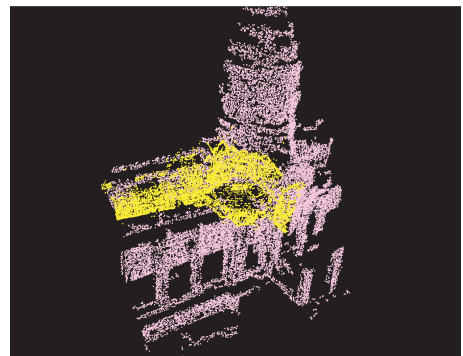


図 10 実データ (位置合わせ前)

サの運動に起因する距離画像の歪みを, センサの運動に関して広い許容範囲の中で高精度に補正することを可能にした。

本研究では浮遊型センサの運動を等速度運動と仮定して変形位置合わせを行ったが, 今後この仮定で十分に歪みが補正されるか検討するつもりである。さらにセンサーの運動をより自由度の高いものとしてパラメタ表現し, 最終的にどのような運動

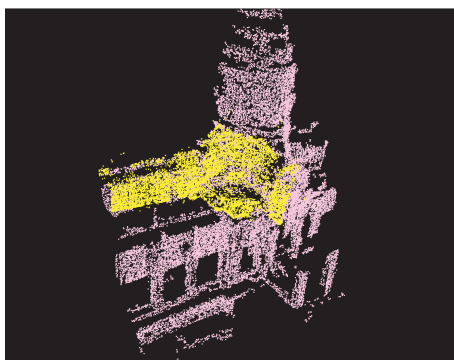


図 11 実データ (位置合わせ後)

パラメタが適切であるかを考えることによって、浮遊型センサから得られる距離画像を高精度にモデリングすることを考えていく予定である。

謝 辞

本研究は科学技術振興機構・池内 CREST プロジェクトによりサポートされている。また、カンボジア・パイヨン寺院の三次元計測は、日本国政府アンコール遺跡救済チームと共同で行っている。

文 献

- [1] D. Miyazaki, T. Oishi, T. Nishikawa, R. Sagawa, K. Nishino, T. Tomomatsu, Y. Yakase, and K. Ikeuchi. The great buddha project: Modelling cultural heritage through observation. In *Proc. of the 6th Int. Conf. on Virtual Systems and MultiMedia*, pp. 138–145, October 2000.
- [2] K. Hasegawa, Y. Hirota, K. Ogawara, R. Kurazume, and K. Ikeuchi. 気球搭載型レーザーレンジセンサ -flrs (flying laser range sensor)-. 投稿中.
- [3] J. Feldmar and N. Ayache. Rigid, affine and locally affine registration of free-form surfaces. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 18, No. 2, pp. 99–119, May 1996.
- [4] Mark Daniel Sebastian Thrun and Dirk H ahnel. Scan alignment and 3-d surface modelling with a helicopter platform. In *The 4th Int. Conf. on Field and Service Robotics*, July 14–16, 2003.
- [5] Ryan Miller and Omead Amidi. 3-d site mapping with the cmu autonomous helicopter. June 1998.
- [6] Tianen Chen and Ryosuke Shibasaki. Ground truth measurement system using rc helicopter. In *Proc. Asian Conf. on Remote Sensing*. Chiba University, 1999.
- [7] Xinhua Wang Armin Gruenl, Zhang Lil. 3d city modelling with tls (three-line scanner) data. In *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV-5/W10.
- [8] Jana Visnovcova, Li Zhang, and Armin Gruen. Generating a 3d model of a bayon tower using non-metric imagery. In *Proc. of Int. Workshop Recreating the Past - Visualization and Animation of Cultural Heritage*, 2001.
- [9] P.J. Besl and N.D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, February 1992.
- [10] Z.Y. Zhang. Iterative point matching for registration of free form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 13, No. 2, pp. 119–152, October 1994.
- [11] G. Turk and M. Levoy. Zipped polygon meshes from range images. In *ACM SIGGRAPH Proceedings*, pp. 311–318, July 1994.
- [12] K. Higuchi, M. Herbert, and K. Ikeuchi. Building 3-d models from unregistered range images. In *Graphical Models*

- and *Image Processing*, Vol. 57, pp. 315–333, July 1995.
- [13] A.E. Johnson and M. Herbert. Surface matching for object recognition in complex 3-dimensional scenes. *Image and Vision Computing*, Vol. 16, No. 9/10, pp. 635–651, July 1998.
- [14] David Simon. *Fast and Accurate Shape-Based Registration*. PhD thesis, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1996.
- [15] Szymon Rusinkiewicz and Marc Levoy. Efficient variants of the icp algorithm. In *Proc. of the 3rd Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*, pp. 145–152, May 2001.
- [16] Y. Chen and G. Medioni. Object modelling by registration of multiple range image. In *Image and Vision Computing*, Vol. 10(3), pp. 145–155, Apr 1992.
- [17] P. Neugebauer. Geometrical cloning of 3d objects via simultaneous registration of multiple range images. In *Proc. Int. Conf. On Proc. Int. Conf. on Shape Modeling and Application*, pp. 130–139, Mar 1997.
- [18] A.E. Johnson and S. Kang. Registration and integration of textured 3-d data. In *Proc. of Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*, pp. 234–241, May 1997.
- [19] K. Nishino and K. Ikeuchi. Robust simultaneous registration of multiple range images. In *Proc. of the 5th Asian Conf. on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 455–461, January 2002.
- [20] Mark D. Wheeler. *Automatic Modeling and Localization for Object Recognition*. PhD thesis, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1996.
- [21] T. Masuda. 3d shape restoration and comparison through simultaneous registration. Master's thesis, Department of Computer Science, Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo, 2003.
- [22] E. Polak. *Computational Methods in Optimization*. New York: Academic Press, 1971.
- [23] David A.H. Jacobs. *The State of the Art in Numerical Analysis*. London: Academic Press, 1977.
- [24] J. Stoer and R. Bulirsch. *Introduction to Numerical Analysis*. New York: Springer-Verlag, 1980.
- [25] J. L. Bentley J. H. Friedman and R. A. Finkel. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time. *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 3, No. 3, September 1977.
- [26] J.L. Bentley. K-d trees for semidynamic point sets. In *Proc. of the 6th Annual Symposium on Computational Geometry*, pp. 187–197, 1990.