

# 移動型レンジセンサによる歪み補正 ICP アルゴリズム

阪野 貴彦<sup>†</sup> 池内 克史<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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: †{vanno,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし 大規模実物体の形状取得では、車両や浮遊体などの移動体にレンジセンサを搭載して計測をしなければならないような場面がある。ところが、計測プロセス中に運動するレンジセンサの場合、得られる形状データが歪んでしまう問題が発生する。本研究では、移動型のレンジセンサとは別に、あらかじめ固定型のレンジセンサによって得られた不十分なモデルを利用し、歪んだ形状データを補正する手法を提案する。レンジセンサを搭載した移動体の運動が滑らかであるとの仮定のもと、運動パラメータを時間の連続関数として近似し、拡張した ICP アルゴリズムを用いて位置合わせすることで、歪みの除去をおこなう。また、この拡張型 ICP アルゴリズムの高精度化・高速化をおこなったうえで、人工データを仮想計測することで、本手法の精度や有効性を評価する。最後に、実計測によるデータを用いて、屋外環境でも本手法が有効であることを示す。

キーワード 移動型レンジセンサ, パラメータ付き位置合わせ, 拡張型 ICP アルゴリズム

## An ICP Algorithm for Rectification of Distorted Shapes by a Moving Range Sensor

Atsuhiko BANNO<sup>†</sup> and Katsushi IKEUCHI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

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

E-mail: †{vanno,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

**Abstract** In data acquisition of large objects, scanning by a moving range sensor would be one of the most effective methods. The obtained data, however, have some distortion due to movement during the scanning process. On the other side, there should be some available range data sets taken by other range sensors fixed on the ground. Based on the overlapping regions which are taken by the moving range sensor and the fixed one, we propose an extended ICP algorithm to rectify the distorted range data. By using CAD model, we estimate the accuracy and effectiveness for our algorithm. Then we apply it to actual data sets to prove the effectiveness of our proposed method.

**Key words** Moving Range Sensor, Parameterized Registration, Extended ICP Algorithm

### 1. はじめに

3次元形状計測機器の発達によって、実物体を計測・モデル化し、物体の形状そのものをデータ化する動きが近年高まってきた。この動きは、PCの性能向上、容量の増大に伴ない、モデルのますますの高精度化・大規模化へと向かっている。

対象物体の大規模化において問題となるのは、物体上部など地上に固定して設置されたレンジセンサからは計測できない個所の存在である。そこで、飛行機や浮遊体などを用いた空中からの計測や、車両などの移動体にレンジセンサを搭載しての計測が必要になる場合がある。ただし、これら移動体からの計測

では、計測処理中にレンジセンサが移動して、計測結果として歪んだ形状が得られることになる。

移動型レンジセンサによる歪んだ形状の補正に関する研究として、文献[5]では、移動型レンジセンサと同時に搭載したビデオカメラからの映像に対し、ウィンドウマッチングを施すことで、近似的な形状補正がおこなわれた。文献[1]では、ビデオカメラによる画像列から Structure from Motion の手法を用いて、歪んだレンジセンサとの複合的な形状補正がおこなわれた。これらの手法は、計測時に取得した画像列を用いており、レンジセンサとビデオカメラとのキャリブレーションや同期をとる必要がある。

一方、固定型のレンジセンサから取得した歪みのない形状を用いて、変形位置合わせをおこなう手法も提案された[6]。この手法では、等速直線運動をおこなう移動体によって計測された形状データの復元と位置合わせが、ICP アルゴリズム [2] [3] [12] を用いて同時におこなわれた。さらに、文献 [7] では移動体の運動として、等速直線運動と一定軸周りの等角速度運動に拡張された。これらの手法は、移動型レンジセンサ以外の固定型レンジセンサから得られた形状を必要とし、画像を必要としない。実際問題として、大規模物体といえども、形状のある程度の部分は固定して設置したレンジセンサによって計測可能である。したがって、固定型レンジセンサの結果を利用して、移動型レンジセンサの結果を補正することは現実的であると言える。

そこで、本研究では固定型レンジセンサの結果を利用し、文献 [7] よりもさらに一般的な運動に対して適用可能な手法を提案する。本手法では、計測プロセス中の動きが緩やかで、レンジセンサの運動パラメータの時間遷移が連続関数によって近似できる、と仮定している。このような近似関数でモデル化された動きに起因するレンジデータの歪みを、あらかじめ取得された固定型レンジセンサの結果と重なり合った領域を利用して補正する。このとき、運動に対する近似関数を考慮した変形位置合わせを基本としている。また、このように多くのパラメータを含んだ位置合わせでは、処理時間の増加や精度の低下を招くが、本研究では、処理の高速化、復元形状の高精度化のための工夫を施し、その有効性についても示す。

## 2. 拡張型 ICP アルゴリズム

本章ではまず、本手法の基本的なアイデアとなっている、3次元形状の位置合わせするため ICP アルゴリズム [2] [3] [12] について説明する。ICP アルゴリズムは、複数枚のレンジデータを合わせることが可能であるが [8]、提案手法の出発点となる 2つの形状データの合わせについてのみ述べる。本章後半では、一方の形状データが移動型レンジセンサによって計測されている場合に適用するための ICP アルゴリズムの拡張方法について述べ、さらにその高精度化と高速化の手法について述べる。

### 2.1 ICP アルゴリズム

ICP アルゴリズムは、2つの3次元形状を合わせるために提案されたものである。レンジセンサによって、物体表面上の点は、レンジセンサを原点とした局所座標系で記述されている。したがって、異なる位置に設置されたレンジセンサの出力どうしは、記述される座標系が異なっているので、2つの形状を1つに合わせるためには、2つのレンジデータを同一の座標系で記述しなおすことが必要である。そこで、2つの形状で重なりあっている部分を一致させるように座標変換を施すことにより、2つの座標系を同一にする。

この座標変換を簡単にするため、一方の形状の座標系を固定し、もう一方の形状に座標変換を施すことにする。このとき、固定する形状を”モデル形状”、座標変換を施す形状を”データ形状”と呼ぶことにする。両モデルの重なりあっている領域では、データ形状上のある点  $\vec{x}$  に対して、モデル形状上に対応する対応点  $\vec{y}$  が存在する。したがって、領域全体の点に対して、

これらの対応点間で定義される総距離（ユークリッド距離）を最小化するような座標変換を施せば、2つの形状を重ね合わせることができる。

データ形状に施すための回転行列を  $R$ 、並進ベクトルを  $\vec{T}$  と置くことで、データ形状上の点  $\vec{x}_i$  と、それに対応するモデル形状上の点  $\vec{y}_i$  の総距離は次のように定義できる。

$$f(R, \vec{T}) = f(\mathbf{q}, \vec{T}) = \sum_i \|R(\mathbf{q})\vec{x}_i + \vec{T} - \vec{y}_i\|^2 \quad (1)$$

ここで  $\mathbf{q}$  は回転行列  $R$  を表わす単位クォータニオンである。

したがって、両モデルを一致させるためには、 $f(\mathbf{q}, \vec{T})$  を最小化する  $\mathbf{q}$  と  $\vec{T}$  を求めればよい。

$$\{\mathbf{q}, \vec{T}\} = \arg \min_{\mathbf{q}, \vec{T}} f(\mathbf{q}, \vec{T}) = \sum_i \|R(\mathbf{q})\vec{x}_i + \vec{T} - \vec{y}_i\|^2 \quad (2)$$

なお、ICP アルゴリズムにはさまざまな実装方法があり [10]、対応点の選び方、最小化すべき関数の設定方法にはいろいろなバリエーションがある。本研究では、対応点として最近傍点を採用し、対応点間のユークリッド距離を指標とする。設定するコスト関数には、後述するようにロバスト推定 [11] を組みこむ。

### 2.2 拡張型 ICP アルゴリズム

以上述べた ICP アルゴリズムは、2つの形状がともに固定されたレンジセンサによって計測されていることが前提となっている。ところが、一方の形状が移動型のレンジセンサによって計測されている場合、従来の ICP アルゴリズムでは歪みが残ってしまい、形状を一致させることができない。そこで、レンジセンサの運動を考慮した ICP アルゴリズムを構築することが必要となる。

このとき、レンジセンサの運動が計測時間に対して十分なめらかであると仮定できる場合においては、運動を記述するパラメータが連続関数によって近似できる、と考えることができる。そこで、レンジセンサの位置・姿勢の時間遷移は、時間  $t$  に関する多項式によって近似できる、とする。すなわち、6つのパラメータ（並進 3、回転 3）の時間による変化を次の多項式によってモデル化する。

$$\vec{T}(t) = \vec{T}_0 + t\vec{T}_1 + t^2\vec{T}_2 + \dots = \sum_{n=0}^N t^n \vec{T}_n \quad (3)$$

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{q}_0 + t\mathbf{q}_1 + t^2\mathbf{q}_2 + \dots = \sum_{n=0}^N t^n \mathbf{q}_n \quad (4)$$

$\vec{T}(t)$  は、時刻  $t$  におけるセンサの位置を 3次元ベクトルで表わしており、 $(N+1)$  個の 3次元ベクトル  $(\vec{T}_0, \vec{T}_1, \dots, \vec{T}_N)$  と時間  $t$  の多項式で表現している。 $\mathbf{q}(t)$  は、時刻  $t$  におけるセンサの姿勢を単位クォータニオンで表わしている。クォータニオンは本来 4つの変数を持っているが、独立な変数は 3つのみであるため、各係数にあたるクォータニオン  $(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_N)$  は 3次元ベクトルとして扱っている。

さらに、計測原理が time-of-flight であるレンジセンサについては、一定の順序によって計測点を測定しており、多くの場合、距離画像を得ることで、どの点が計測期間中のどの時点で

スキャンされたかが分かる．たとえばわれわれの使用している計測システムの場合，計測用レーザーはラスタスキャン順に照射されており，そのサンプリング周波数が既知であることから，距離画像中のあるピクセルがスキャンされた相対時刻は，その画像座標値から容易に計算することができる．そのため，式 (1) におけるデータ形状の点  $\vec{x}_i$  はインデックス  $i$  の代わりに，時間  $t$  の関数  $\vec{x}(t)$  として特定することができる．また，点  $\vec{x}(t)$  に対応するモデル形状上の最近傍点  $\vec{y}_i$  を  $\vec{y}(\vec{x}(t))$  として表記すれば，最小化すべきコスト関数式 (1) は，式 (3)，(4) を考慮して次のように書き換えられる．

$$f(\vec{T}_0, \vec{T}_1, \dots, \vec{T}_N, \mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_N) = \sum_{\tau} \|R(\mathbf{q}(\tau))\vec{x}(\tau) + \vec{T}(\tau) - \vec{y}(\vec{x}(\tau))\|^2 \quad (5)$$

ここで，記号  $\tau$  は，レンジセンサが実際に計測をおこなったサンプリング時刻を表している．

式 (5) によって定義されたコスト関数  $f$  を係数ベクトル群  $(\vec{T}_0, \vec{T}_1, \dots, \vec{T}_N)$ ，係数クォータニオン群  $(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_N)$  について最小化することで，モデル形状に近づくような変形パラメータを推定することができる．

$$\{\vec{T}_0, \vec{T}_1, \dots, \vec{T}_N, \mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_N\} = \arg \min_{\vec{T}_0, \vec{T}_1, \dots, \vec{T}_N, \mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_N} f(\vec{T}_0, \vec{T}_1, \dots, \vec{T}_N, \mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_N) \quad (6)$$

したがって，各多項式を  $N$  次式でモデル化した場合，推定すべきパラメータの数は  $6(N+1)$  になる．

ただし，実際には，レンジセンサによる計測結果には計測誤差が含まれたり，計測データの欠損によって間違った対応点を選ばれたり等の問題が発生する．そこで，誤対応による脆弱性を補うため，ロバスト推定を導入する [11]．

$$\sum_t \log \left( 1 + \frac{1}{2\sigma^2} z_t^2 \right) \quad (7)$$

ただし，

$$z_t = R(\mathbf{q}(t))\vec{x}(t) + \vec{T}(t) - \vec{y}(\vec{x}(t)) \quad (8)$$

このように，レンジセンサの計測期間中の運動を考慮した ICP アルゴリズムを構築することができ，コスト関数 (7) を最小化することで，歪みを取り除いたデータ形状を復元することができる．本研究では，式 (7) の最小化に共役勾配法 [9] を用い，対応点としての最近傍点を数回のイタレーション毎に更新するようにしている．

### 2.3 収束性の向上化と高速化

以上述べた手法を実装してみたところ，良好に復元できるデータセットが多かったものの，変型データ形状がモデル形状に良好に収束しないデータセットがかなりの割合で存在することがわかった．これは対応点を最近傍探索によって選んでおり，真に正しい対応点が採用されない場合が発生するためである．

また，多大な処理時間を要することも判明した．主な原因は両形状を構成する点群の数が膨大であり，最近傍探索の処理に

手間がかかるためである．

そのため，提案手法の高精度化と高速化をおこなった．本手法では，優先的に一致させたい対応点ペア (アンカーペア) を，手動によって抽出できるようにした．この操作は，GUI を用いて容易におこなうことができる．手動で抽出したアンカーペア間距離を優先的に最小化させるため，式 (7) の各項に重みを付けたコスト関数を次のように設定した．

$$\sum_t w_t \log \left( 1 + \frac{1}{2\sigma^2} z_t^2 \right) \quad (9)$$

アンカーペアにかかる重み係数  $w$  として一律の値をとるようにし，アンカーペア以外のものに関しては重み係数を 1 としている．

ICP アルゴリズムにおいて，対応点を最近傍点で選ぶ場合に，多大の処理時間が費やされるが，本手法ではモデル形状の頂点に対して kd-tree [4] を構築することで，最近傍探索の高速化を図った．また，移動型レンジセンサから得られるデータ形状の全ての点を用いるのではなく，一定の割合の数の点をランダムに選ぶようにした．この場合，繰り返し計算において最近傍探索をおこなう度に，あらたにサンプリングし直すようにした．

### 3. CAD モデルによる手法の評価

ここでは，本手法の有効性と精度を調べるため，形状が既知である CAD モデルを用いてのシミュレーションをおこなった．数種類のセンサの動きを設定し，提案手法で用いているパラメータを変化させることによって，補正形状の精度を検証する．

#### 3.1 実験条件

シミュレーションでは，図 1(a) のような評価用形状を用い，仮想的なレンジセンサによる計測をおこなった．この仮想レンジセンサは，単位時間あたりで  $640 \times 120$  の距離画像 1 枚を計測するものとする．また，ロバスト推定で用いるパラメータ  $\sigma$  は全ての場合において，0.1 に固定した．なお，本研究では，式 (3)，(4) における時間の多項式を  $t$  の 7 次までをとることにした．したがって，求めるべき未知数は 48 個となる．

シミュレーションのためのレンジセンサの動きとして，次の 4 つの運動を用意した (図 1(b)) ．

- Case 1 : X 方向のみの等速直線運動 (回転成分なし)
- Case 2 : -Z 方向のみの等速直線運動 (回転成分なし)
- Case 3 : Y 軸まわりの等角速度運動 (並進成分なし)
- Case 4 : 上記 3 パターンを混合した運動

また，仮想レンジセンサによって得られたデータ形状と補正形状の例 (Case 2) を図 2 に示す．なお，本章において精度として数値化されているものは，データ形状の全頂点とモデル形状を構成するパッチとの距離の平均である．また，固定した仮想レンジセンサによるデータ形状 (歪みのないデータ形状) とモデル形状とでは，精度として 0.00227539 が得られている．

#### 3.2 アンカーによる影響の精度評価

ここでは，補正形状の精度を高めるために導入したアンカーペアによって，精度がどのような影響を受けるかを調べる．表 1 は，形状補正において，手動によるアンカーペアの抽出の有無による補正形状の精度を示している．なお，本実験では，デー

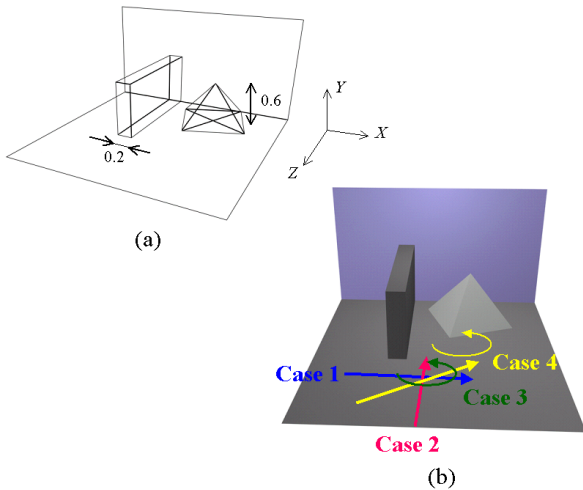


図 1 (a):評価用 CAD モデル . (b):仮想レンジセンサの運動 .

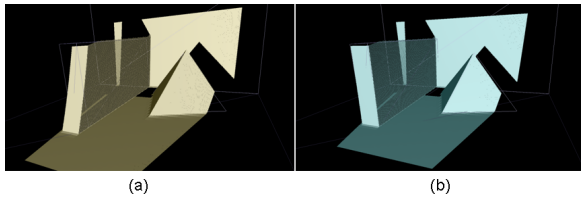


図 2 (a):Case 2 での歪んだデータ形状の例 . (b):補正されたデータ形状 .

タ形状の全ての頂点を用いて計算をおこなっており、アンカーペアに対する重み係数は全て  $10^4$  に固定した . また、アンカーペアの抽出は各ケースで同一の組み合わせ (5~8 組) を選んだ .

Case 1, 2 および 4 で、アンカーありの方が、精度良く形状を復元できていることがわかる . 特に、Case 2 においては、アンカーペアによる高精度化の効果が顕著である . Case 3 においてのみ、アンカーなしの方が若干良好な精度を示しているが、アンカーの有無にかかわらず高精度に復元できており、これは、もともとの歪みの度合いが低かったためだと考えられる .

表 1 アンカーペアの有無による復元形状の精度

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
アンカーなし	0.00391395	0.0191189	0.00313407	0.00741958
アンカーあり	0.00332324	0.0032771	0.00334904	0.00531869
初期状態	0.0134202	0.066315	0.0458285	0.0310331

### 3.3 間引きによる精度評価と処理時間

高速化のために、アンカーペア以外に利用するデータ形状の頂点数の影響について評価した . 利用するデータ形状の点数の割合は、100%、50%、10%、5%の4通りである .

このときの、復元形状の精度および処理時間 (Pentium4, 3.0GHz を使用) のグラフを図 3 に示す . 結果より、形状復元に利用した点数が少なくなっても、アンカーありの精度 (ピンク色・棒グラフ) はさほど変化しておらず、安定した性能を示していることがわかる . また、精度があまり変化しない反面、点数を間引くことによる処理時間の短縮は顕著であり、アンカー

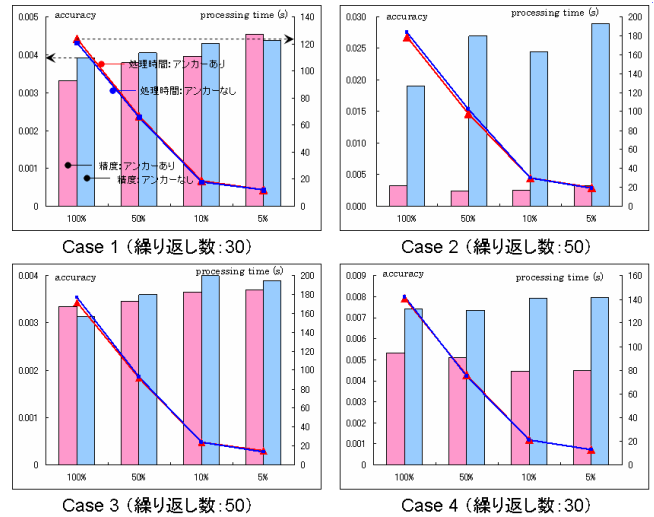


図 3 間引きによる復元形状精度と処理時間

ペアによる高速化とデータ形状の頂点を間引くことによる高速化が両立していることを示している .

なお、アンカーペアのみを用いた処理も考えられるが、その場合、収束させるためには多くのアンカーペアの指定しなければならず、かえって手動による抽出処理が煩雑になるので、本研究では採用していない .

### 3.4 アンカーの重みによる影響の精度評価

つぎに、コスト関数 (9) において設定される重み係数  $w$  に関する評価をおこなった . ここでは、アンカーペアにかかる重みは一定として、 $10^0$  から  $10^7$  まで変化させて、Case 2 での 10%点群における場合について、復元形状の精度を評価した . 図 4 に重み係数と精度の関係を示す . この結果より、重み係数には最適値が存在し、係数の値が復元形状の精度に大きく影響を与えていることがわかる .

この実験に用いたデータ形状は 76,529 点の頂点から構成されており、その 10%を用いているため、およそ 7,500 点の頂点に対して、モデル形状から対応点を得ていることになる . また、本実験ではアンカーペアとして 7 組を抽出しており、重み係数を  $10^4$  とすれば、コスト関数 (9) において、アンカーペア分の値が、それ以外のペア分比べておよそ 10 倍程度重くなっていることがわかる .

ここで、復元形状の精度にとって重要なのは、重み係数の絶対的な値ではなく、相対的な重みであると考えられたため、重

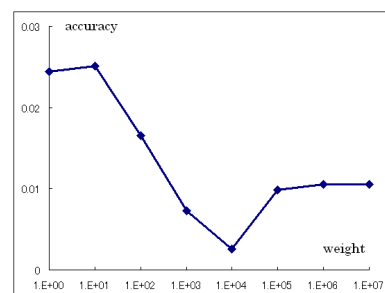


図 4 重み係数 - 補正形状精度

み係数の相対的な比重を等しくしての実験をおこなった。表2に結果を示す。「同一絶対比重」は、重み係数の値を一律に  $10^4$  としたものである。「同一相対比重」では、10%の頂点を利用したときには重みは  $10^4$  だが、100%の頂点を利用したときは  $10^5$  とし、1%のときには  $10^3$  と、コスト関数におけるアンカーペアの占める比重が同じになるようにした。

この結果より、絶対比重を同じにするよりも、相対比重を同じにした方が復元形状の精度が良く、重み係数の値は、アンカーペアとそれ以外の対応点ペアの比重を考慮して決定すべきであることがわかる。

表2 重み係数の比重による復元形状の精度 (Case 2)

	100 %	10 %	1 %
同一絶対比重	0.0032771	0.00256203	0.00319917
同一相対比重	0.00260996	0.00256203	0.00276614

### 3.5 センサの移動速度による精度評価

本章の最後では、レンジセンサの移動速度の違いが、補正形状の精度にどのように影響を与えるかについて調べた。ここでは、Case 1 において移動速度を変化させることで、復元形状の精度を評価した。本実験では、Case 1 で 10%のデータ形状頂点を用いており、全ての速度において同一のアンカーペア (7組) を使用している。

図5に結果を示す。この結果より、おおよその傾向として、移動速度が大きくなるにつれ、補正形状の精度が低下していることがわかる。アンカーペアによって、数組の対応点ペアが適切に抽出されたとはいえ、それ以外の対応点ペアが最近傍探索によって決定されていることから、歪みの度合いが小さいデータ形状の方が補正精度が良くなるため、と考えられる。したがって、形状にもよるが、データ形状の歪みが小さい方が復元した形状の精度が良くなる、と言える。

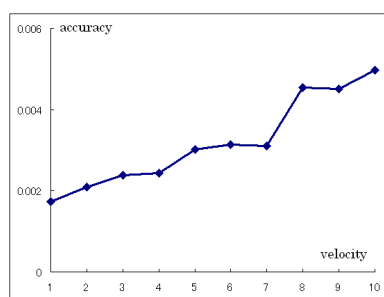


図5 センサ移動速度 - 補正形状精度

## 4. 実データによる実験

本章では、提案手法を屋外環境下での実験に適用した例とその結果について述べ、本手法の有効性を示す。また前章では、手法評価のため、モデル形状として完全データを扱っていたが、実際の固定式のレンジセンサから得られるモデル形状は、欠損した部分が存在する。そのため、実データによる実験では、欠損箇所を含むモデル形状によっても、歪んだデータ形状が適正

に復元されていることを示す。なお、本章で扱っている実データは、気球に吊り下げられたプラットフォームに搭載されたレンジセンサによって得られており、レンジセンサの運動は滑らかで、時間  $t$  の多項式によって充分近似できるものと考えられる。

図6で、計測時の対象シーンと移動型レンジセンサによって得られたデータ形状、および形状復元に利用したモデル形状と形状補正されたデータ形状を示す。このデータ形状は計測時間に1秒を要しており、この期間中に1m程度の移動をおこない、微小なゆれも伴っている。また、2つの形状を見てみると、データ形状には人物のデータも含まれており、両形状間で適切な対応点ペアが存在しない箇所もある。このとき、柱の根元の角や矩形窓の角といった特徴的で抽出しやすい頂点を11点採取し、アンカーとした。

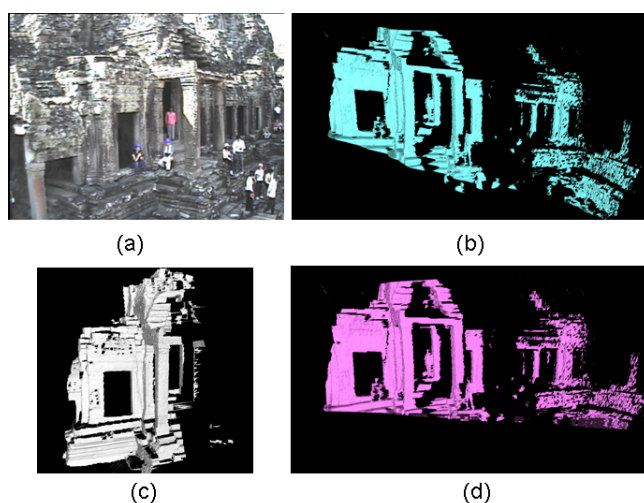


図6 (a):計測時の対象シーン。(b):移動型レンジセンサによって得られたデータ形状。(c):形状補正に利用したモデル形状。(d):形状補正されたデータ形状。

固定型レンジセンサから得られた大規模なテクスチャ付きモデルに対して復元前のデータ形状および復元形状を位置合わせしたものを図7に示す。

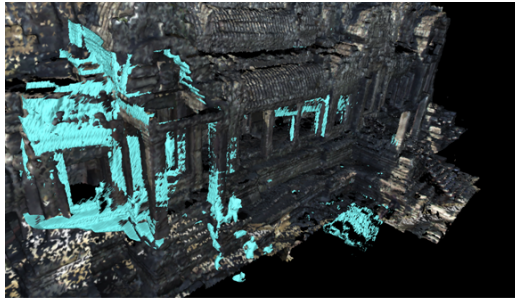
図7より、移動型レンジセンサによって取得された歪んだ実データに対して、適切に形状補正がなされていることがわかる。モデル形状(図7(c))と重なり合っている部分のみを利用して補正していても、重なりあっていない部分(レンジセンサから遠方になる部分:図7(b)の右側の領域)が良好に補正されている。また、人物などモデル形状との間に正しい対応関係がない部分が存在しても、適切に補正できていることがわかる。

最後に、運動量そのものは小さいが、計測時間に5秒要し、結果的に非常に大きな歪みを受けたデータセットを図8に示す。

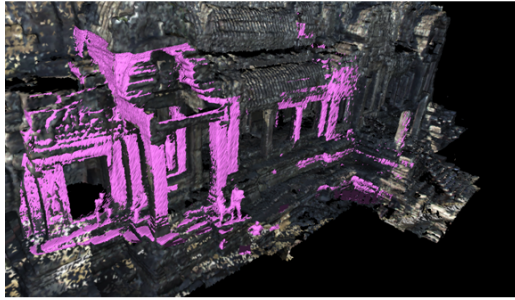
これらの結果より、本手法が屋外環境の実計測に対しても有効であることが示された。

## 5. まとめ

本研究では、計測処理中に運動するレンジセンサによって取得される形状を補正する手法について述べた。移動型レンジセ



(a)

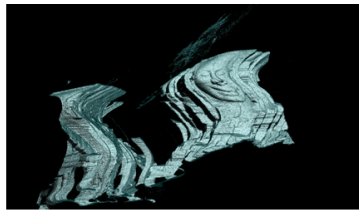


(b)

図 7 (a):歪んだデータ形状と大規模モデルとの位置合わせ。(b):補正したデータ形状。



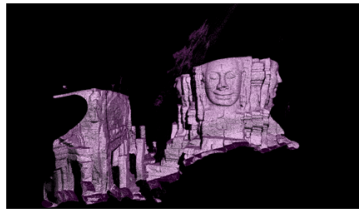
(a)



(b)



(c)



(d)

図 8 (a):計測時の対象シーン。(b):移動型レンジセンサによって得られたデータ形状。(c):形状補正に利用したモデル形状。(d):形状補正されたデータ形状。

ンサの動きを連続関数によってモデル化し、固定して設置されたレンジセンサの結果との拡張型 ICP アルゴリズムを適用することで、歪んだ形状の補正をおこなった。さらに、本手法の高精度化のために、優先的に合わせる対応点ペアを抽出し、高速化のために、データ形状頂点をランダムにサンプリングした。

このような提案手法の有効性を評価し、本アルゴリズムの特性を調べるため、CAD モデルを用いた擬似計測をおこなった。その結果、優先的に位置合わせをおこなうアンカーペアを導入したことにより補正形状の精度が改善し、ランダムサンプリングに関しても、適切な重み係数を選ぶことで、精度を維持したまま処理時間の短縮が可能であることが示された。

さらに、ノイズや欠損データの存在する実データを用いた実

験においても、提案手法の有効性を示すことができた。

今後の課題として、アンカーを自動的に抽出するとともに、さらに巨大な計測データや、複数個のデータ形状に対する同時補正について適用していきたいと考えている。

#### 謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学技術振興調整費リーディングプロジェクト「大型有形・無形文化財の高精度デジタル化ソフトウェアの開発」および文部科学省科学研究費補助金(特別研究員奨励費 1711280)による支援を受けている。

#### 文 献

- [1] A. Banno and K. Ikeuchi, Shape recovery of 3D data obtained from a moving range sensor by using image sequences, Proc. of ICCV2005, vol. 1, pp. 792-799, 2005.
- [2] P. J. Besl and N. D. McKay, A method for registration of 3-D shapes, IEEE Trans. on PAMI, vol. 14, pp. 239-256, 1992.
- [3] Y. Chen and G. Medioni, Object modeling by registration of multiple range images, Image and Vision Computing, vol. 10, no. 3, pp. 145-155, 1992.
- [4] J. H. Friedman, J. L. Bentley and R. A. Finkel, An algorithm for finding best-matches in logarithmic time, ACM Transactions on Mathematical Software, vol. 3, no. 3, pp. 209-226, 1977.
- [5] 長谷川一英, 廣田祐一郎, 小川原光一, 倉爪亮, 池内克史, 気球搭載型レーザーレンジセンサ, 信学論 (D-II), vol. J88-D-II, no. 8, pp. 1499-1507, 2005.
- [6] Y. Hirota, T. Masuda, R. Kurazume, K. Ogawara, K. Hasegawa and K. Ikeuchi, Flying Laser Range Finder and its data registration algorithm, Proc. of ICRA2004, pp. 3155-3160, 2004.
- [7] T. Masuda, Y. Hirota, K. Nishino and K. Ikeuchi, Simultaneous determination of registration and deformation parameters among 3D range images, Proc. of 3DIM2005, pp. 369-376, 2005.
- [8] P. Neugebauer, Geometrical cloning of 3D objects via simultaneous registration of multiple range images, Proce. of the International Conference on Shape Modeling and Application, pp. 130-139, 1997.
- [9] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling, Numerical Recipes in C, Cambridge University Press, 1988.
- [10] S. Rusinkiewicz and M. Levoy, Efficient variant of the ICP algorithm, Proc. 3DIM2001, pp. 145-152, 2001.
- [11] E. Walter and L. Prontazo, Identification of Parametric Models from Experimental Data, Springer, 1997.
- [12] Z. Zhang, Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces, International Journal of Computer Vision, vol. 13, pp. 119-152, 1994.