

距離画像の誤差分布方向を考慮した反復計算による精度向上手法

大石岳史[†] 佐川立昌[†] 中澤篤志[†] 倉爪 亮[‡] 池内克史[†]

[†] 東京大学 [‡] 九州大学

本論文では複数方向から測定された距離画像間の対応関係を利用して、各距離データの精度を向上させる手法を提案する。この手法ではレーザレンジファインダなどによって得られる距離データの誤差が光線方向にのみ分布していると仮定し、この方向に誤差補正をすることによってその精度向上を図る。基準となる距離画像と重なり合う他の全ての距離画像間の対応点を探索し、それらの対応点間距離が小さくなるように各頂点を光線方向に移動させていく。このとき各距離画像は異方向の誤差を持つため正確な対応点は求められず、誤差推定の計算は非線形となる。そこで本手法では反復計算により徐々に誤差を減少させることによって、各頂点のより正確な位置を推定する。実験では奈良飛鳥大仏の距離画像データに対して本手法を適用し、その有効性を確認する。また平滑化フィルタを適用した場合と比べて、本手法では誤差を軽減すると同時に形状情報を十分に保存できることを示す。

Iterative Refinement of Range-Measurement Accuracy by Considering the Direction of Error of Range Images

Takeshi Oishi[†] Ryusuke Sagawa[†] Atsushi Nakazawa[†]

Ryo Kurazume[‡] Katsushi Ikeuchi[†]

[†]The University of Tokyo [‡]Kyushu University

We propose the method which refines the range measurement of range finders by taking consensus of multiple range images acquired from various viewpoints. Our method assumes that the error of range data acquired by laser range finders is the normal distribution along with the view direction. Thus, we find corresponding points of range images along with the view direction. We iteratively converge range images to minimize the distance of corresponding points. We describe the effectiveness of our method by the experimental result of the Nara Asuka Great Buddha. Also we show our method refines a 3D shape more accurately comparing with the Gaussian filter.

1 はじめに

近年のレーザレンジファインダの性能向上と低価格化により、特に文化財のデジタルアーカイブや工場プラントの現況図作成などの分野で、レーザ光を利用した実物体の非接触三次元形状計測が可能になりつつある。レーザレンジファインダやデジタルカメラなどを用いて実物体の仮想現実モデルを観察に基づき効率的に自動作成する手法が提案され、その具体的なアプリケーションとして、大規模文化遺産や美術品などをデジタル化するプロジェクトが行わ

れている。

さて通常、実物体の三次元形状のレーザ計測作業は、(1) メッシュ生成 (スキャニング)、(2) 位置合わせ (アラインメント)、(3) 統合 (マージング) の3つの過程により処理される。スキャニング作業では、対象物の全表面を残すところなく測定できるように、その対象物の周囲の複数地点から、レーザレンジファインダによって各距離画像が重なり合うように複数枚の距離画像を取得する。対象物が小型の場合には、マニピュレータや回転テーブル上に対象

物を設置し、対象物側を正確に移動させることで(2)のアラインメント作業を補助する場合も多い。

次に、得られた部分的な距離画像を同一の座標系で表現するために距離画像同士のアラインメント作業が行われる。これには、特徴量ベースの手法や点群同士の対応を考えるもの [1]、あるいは点と面の対応を考える手法 [2] など様々な手法が提案されている。またこれらの手法で複数枚の距離画像をペアワイズに位置合わせした場合にはアラインメント誤差が蓄積するという問題があるため、それを解決するための同時位置合わせ手法 [7, 8] も提案されている。またペアワイズな手法ではあるが計測誤差を視線方向に仮定して、より正確に位置合わせする手法 [13] も提案されている。

最後に位置合わせされた複数枚の距離画像を統合して、単一の面から構成される三次元形状を得るためにマージング処理が行われる。このマージングには面の境界を繋ぎ合わせる手法 [11]、Deformable surface を用いる手法 [5]、陰関数を用いる方法 [3, 12] などが提案されている。陰関数を用いる Wheeler らの手法(コンセンサスサーフェス)ではマージングの際に距離画像の誤差を考慮し、距離画像間でコンセンサスをとることによって外れ値を排除している。

さて、これらの過程を経て作成された三次元形状の精度について考えてみる。最終的に生成された形状に含まれる誤差の要因としては(1)スキャニング時の距離画像の含まれる測定誤差、(2)アラインメント誤差、(3)マージング作業での量子化誤差や平均化による誤差などが考えられる。このうち形状精度を決定する最も基本的要因である距離画像そのものに含まれる測定誤差については、小型の対象物に限られるが、光切断法 [6] などの方法で 0.1mm 以下の高精度な三次元計測が可能になってきている。しかし、10m を超えるような大型の対象物に対しては、高精度な Time-of-flight 式のレーザレンジファインダを用いても数 mm 程度の測定誤差は避けられないのが現状である。この測定誤差を低減するために、空間フィルタを用いて局所的平滑化を行う手法 [10] や、同一の点を繰り返し測定する手法も考えられるが、重要な幾何形状であるエッジ(曲率の大きな箇所)が平滑化してしまう可能性や測定時間の増加も予想される。

我々がマージング過程において応用している Wheeler らの手法 [12] では、メッシュモデルの法線方向を利用してコンセンサスをとることにより、アライメン

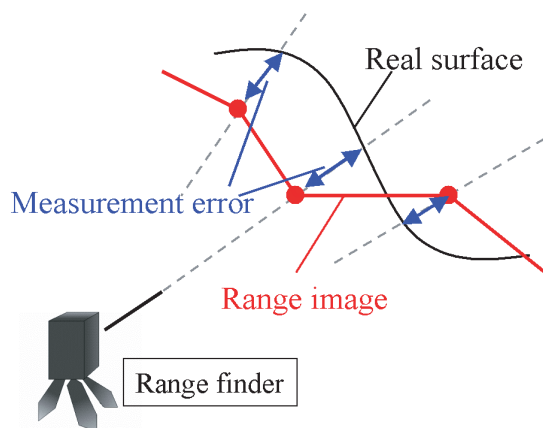


図 1: Measurement error

ト誤差や測定誤差を軽減している。しかし、距離画像の測定誤差に比べて距離を測定する点の密度が高い場合には、距離画像から作られるメッシュモデルは凹凸が激しくなるため法線方向の信頼性が低い。したがって、マージング結果において測定誤差の影響が少なからず残ってしまう。

そこで本論文では、位置合わせされた複数距離画像間の重複領域に対して、各々が持つ固有の誤差特性を考慮して距離画像を補正することで、より高精度の 3D モデルを獲得する手法を提案する。ガウシアンフィルタなどの空間フィルタを用いた場合、滑らかな面が得られるのと同時にエッジ等の細かな特徴も消えてしまうが、本手法を用いるとフィルタ処理では消えてしまう細かな特徴も残したモデルを生成することが可能である。また、この処理は距離画像間のコンセンサスをとる新たな手法であるとも位置付けられ、この手法を用いてコンセンサスをとることによって、従来のコンセンサスサーフェスではマージングが難しかった凹凸の激しい距離画像の統合処理が可能になる。

以下、2 で提案する測定誤差の推定、補正手法を示す。3 で飛鳥大仏のモデリングに本手法を適用した結果を示し、4 はまとめである。

2 提案する手法

この手法では ICP[1] などの位置あわせ手法と同様に繰り返し計算によって誤差を補正していく。基準と

なる距離画像をモデル画像とし対象となる距離画像をシーン画像とすると、まずモデル画像上の頂点に対して全てのシーン画像上の対応点を探索する．そしてこの全ての対応点間誤差を減少させるように頂点を移動させ、誤差が十分小さくなるまでこれらの処理を繰り返す．この手法の手順を簡単化して以下に示す．

Algorithm *Procedure of Correct Errors*
while (error > threshold){
 for (i = 0; i < nImage; ++i){
 for (j = 0; j < nImage; ++j){
 /* Search corresponding points */
 /* for all vertices */
 if (i != j) CorrespondenceSearch(i, j);
 }
 /* Compute the next position of vertices */
 MoveVertex(i);
 }
 /* Update the motion of all vertices */
 UpdateVertex(all);
}

2.1 距離計測誤差モデル

我々はレーザレンジファインダによって得られる距離データの誤差が、レーザの光線方向にのみ分布すると仮定している (図 1)．レーザレンジファインダでは放射されたレーザが物体表面で反射し戻ってくる光を解析して距離が求められる．求められた距離はレーザの光線方向ベクトルに掛けられて、3次元空間上の座標に変換される．測定誤差はこの距離の測定精度に大きく依存しており、光線方向に垂直な方向の誤差はレンジファインダの機構によって生じるが、これに比べて非常に小さいと言える．そのため本論文では測定誤差が光線方向にのみ分布していると仮定する．

2.2 対応点探索

誤差がレーザの光線方向にのみ存在する事と、各距離画像が正確に位置合わせされている事を仮定して対応点はレーザの光線方向に探索する．モデル画像上の頂点を通り光線方向に平行な直線とシーン画像上のメッシュとの交点を対応点とする．つまりセンサの中心からモデル画像上の頂点までのベクトルを $\vec{x}$ としシーン画像上の対応点までのベクトルを

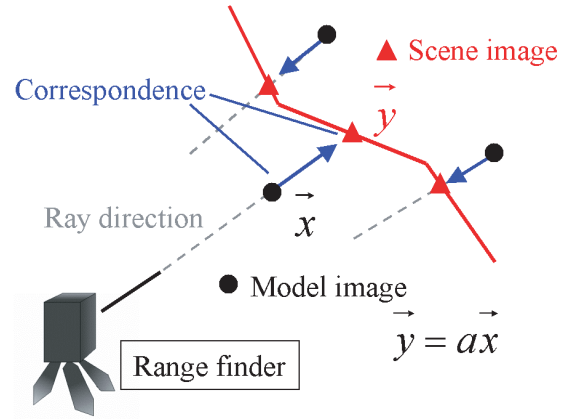


図 2: Search correspondence

$\vec{y}$ とすると、

$$\vec{y} = a\vec{x} \quad (1)$$

となり同一直線上にある (図 2)．ここで a は距離の比を表す実数である．

このとき明らかな誤対応を除去するために対応点間の距離が閾値以上の点を外れ値として計算に用いない事とする．この閾値には使用したレンジファインダの実際の最大測定誤差を用いる．そして各距離画像の全ての組合せに対して対応点を探索する．

2.3 誤差補正

モデル画像上の頂点を対応点から推定される位置に移動することによって誤差補正を行う．対応するシーン画像上のメッシュはモデル画像とは異なる方向の測定誤差を有しているため、探索された全ての対応点は正しい対応点ではない．図 3 に示すように、測定誤差によって局所的なオクルージョンが発生し、明らかな誤対応となる場合も考えられる．つまりこれらの対応点から導き出される推定点は測定誤差が大きいほど不正確となる．また距離画像間の重なりが少ない場合は、サンプル数が少ないために正確な推定点を得ることはより難しくなる．そこでこれらの理由を考慮して穏やかに収束させるために、全ての対応点との重み付き平均の位置に頂点を移動させる． i 番目の距離画像上の k 番目の頂点 $\vec{x}_{ik}$ は、その対応点 $\vec{y}_{jk}$ との重み付き平均に移動される．

$$\vec{x}'_{ik} = (1 - w) \cdot \vec{x}_{ik} + w \cdot \frac{1}{n_{ik} - 1} \sum_{j \neq i} \vec{y}_{jk} \quad (2)$$

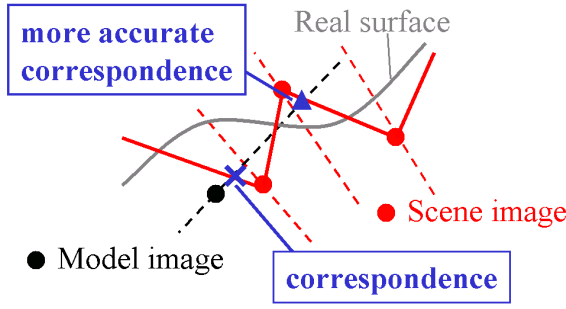


図 3: Local occlusion

ここで n_{ik} はモデル画像上の頂点に対して得られた対応点数である． w は重みであり，今回の実験においては $w = 0.5$ としている．そしてこの処理を各距離画像の全ての点に対して行う．対応点探索及び誤差補正による頂点の移動を一つの処理として，誤差が十分小さくなるまでこれを反復して計算する．

2.4 対応点間誤差の考察

対応点間の誤差は測定誤差と表面形状と測定解像度に依存する離散サンプリングによる誤差の2つから生じる．対応点間誤差 ε は測定誤差 $\varepsilon_{Measure}$ と離散サンプリングによる誤差 $\varepsilon_{Geometry}$ の和によって表される．

$$\varepsilon = \varepsilon_{Measure} + \varepsilon_{Geometry} \quad (3)$$

$\varepsilon_{Measure}$ は反復計算によって補正できるが，離散サンプリングによる誤差 $\varepsilon_{Geometry}$ はメッシュ上の点が線形補間されることに起因するもので，その大きさは距離データの精度に関係なく物体表面の曲率や距離画像の解像度などに依存している．

図 4 では各距離画像の頂点が物体表面上に存在する（すなわち $\varepsilon_{Measure} = 0$ ）にも関わらず対応点 $\vec{x}$ と $\vec{y}$ の間には誤差が生じている．対象物体が平面でない限り ε は 0 にはならない．

$$\varepsilon \begin{cases} = 0 & \text{planar area} \\ > 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

補正のために頂点を移動させる際には各距離画像の相互関係を利用するため，間接的にはあるが移動させる頂点にその頂点を含む距離画像上の他の頂点の情報が伝播するためガウシアンフィルタなどのよ

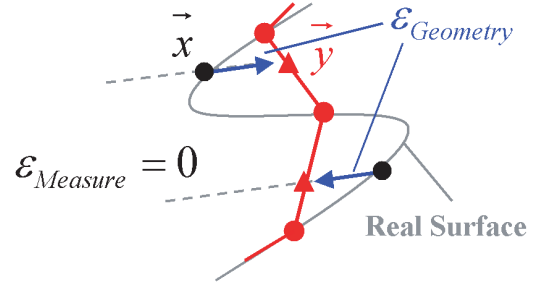


図 4: Error by resolution and geometry

うに平滑化が起こってしまう．しかしガウシアンフィルタと異なるのは，周囲の頂点との関係を直接用いない点であり，一回の処理によって起こる平滑化は非常に遅い．これに対して測定誤差の補正は，より直接的に行われる．つまり離散サンプリングに起因する誤差の収束度は測定誤差のそれに比べて十分小さいと考えられる．この理由から，我々の手法では形状をほとんど平滑化することなく誤差を補正することが可能である．ただし繰り返し計算することによって $\varepsilon_{Geometry}$ による平滑化は常に起こっているので，測定誤差が十分補正された時点で繰り返し処理を終了しなければならない．現在は，表面形状を人間が目で見ても終了の判断をしている．

3 三次元形状の補正実験

3.1 レーザレンジファインダの誤差特性

レーザレンジファインダにも様々な方式があるが，遠距離で高精度な距離画像を得られるレンジファインダとしては Time-of-Flight 方式が一般的である．そこで我々が主に用いている Cyra Technologies, Inc. 製の Time-of-Flight 方式レーザレンジファインダ Cyrax2500 [4] の誤差特性について実験した結果を示す．実験では Cyrax2500 をコンクリート壁面に正対させ，壁面までの距離を繰り返し測定し，測定距離と誤差の解析を行った．測定した壁面までの距離は推奨距離 50m を超える遠距離（約 67m）と中距離（約 20m），近距離（約 2m）の 3 点である．それぞれの測定結果を図 5 に，求めた平均，分散，標準偏差の値を表 1 に示す．これらの結果から，測定距離は測定点が近いほど誤差の分布が広がるものの，標準偏差 3mm 程度の

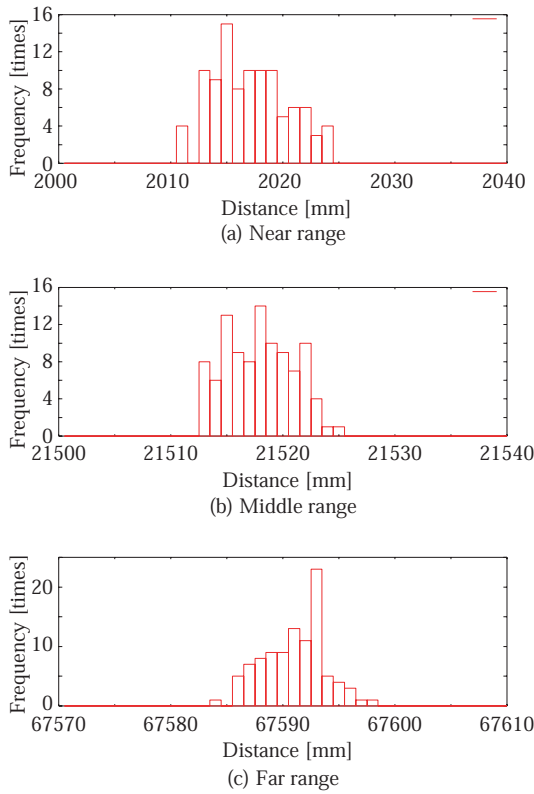


図 5: Distribution of errors of Cyrax2500

表 1: Distance measurement error of Cyrax 2500

Average distance [mm]	Var. [mm^2]	STD. [mm]
2017.2 (near)	11.0	3.3
21518.0 (middle)	9.1	3.0
67591.1 (far)	7.7	2.8

正規分布となることが分かった．また最大測定誤差は7～8mm程度であり，公称の精度6mm（推奨距離50m）という数字よりはわずかに大きい，同程度の精度を得られることも確認した．

水平，垂直方向の精度は実験では確認していないが，Cyrax2500の仕様から50m先で0.25mm（0.0003度，1秒）以内とされており，光線方向に比べて非常に小さいことが分かる．つまり本センサで測定した距離画像の誤差は，光線方向への誤差が大きな要因であると考えることができる．

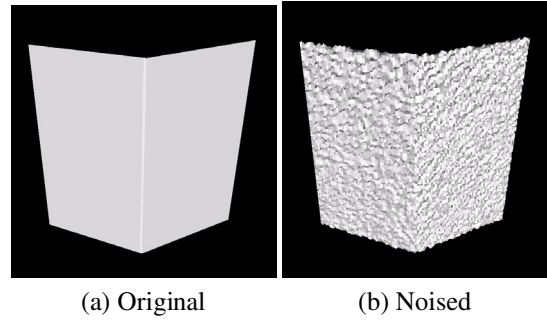


図 6: Artificially created model

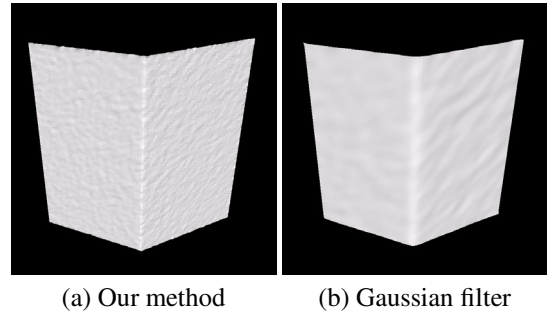


図 7: Refined model

3.2 人工データの補正実験

まず仮想的に作成した距離データにランダムな誤差を与え，その誤差の補正実験を行った．図 6(a) にこの実験に用いたモデルを示す．このモデルは縦横40cm，奥行き20cmからなると設定し，100x100頂点でサンプリングされている．このモデルに任意の光線方向から最大6mmでランダムな誤差を与えたのが図 6(b)である．異なる光線方向から誤差を与えた距離画像を合計10枚作成して誤差補正を行った結果を図 7(a)に示す．また誤差を与えた距離画像の一枚にガウシアンフィルタを適用したモデルを図 7(b)に示す．これらの結果から，本手法では平面形状が十分に得られていると同時にガウシアンフィルタをかけた場合と比較してエッジが正確に保存されている．これら2つの方法で誤差補正した結果の一部を抜き出して比較したものを図 8に示す．

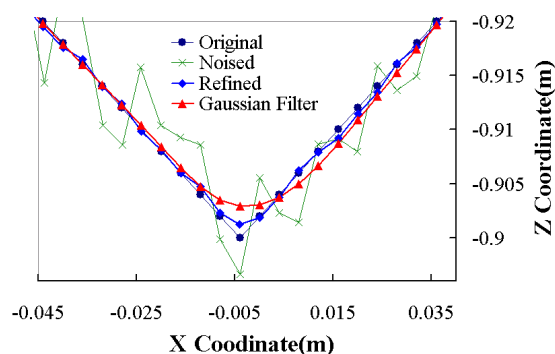


図 8: Compare our method and Gaussian filter



図 10: Original range images



図 9: Great Buddha at Asuka temple



図 11: Refined range images

3.3 実測データの補正実験

本手法の有効性を示すために、実際にレーザレンジファインダを用いて測定したデータを補正する実験を行った。使用したレーザレンジファインダはCyrax2400であり、その能力はCyrax2500と同等である。

測定対象は日本最古の仏像といわれる奈良飛鳥寺の国宝釈迦如来坐像（飛鳥大仏）（図 9）で、全長は 2.7m 程度である。Cyrax2400 は遠距離用レンジファインダであるため、この飛鳥大仏のような大きさの物体を測定するには適していない。しかし測定条件が悪く近距離で高精度なレンジファインダを使用することが出来なかったため少し離れた位置からCyrax2400 を使って形状を測定した。

測定は大仏正面方向から行い、合計 9 枚の距離画像を取得した。これらの距離画像を非常に口バストな位置合わせ手法 [8] で同時位置合わせした結果を図 10 に示す。対象物体が比較的小さい事と測定距離が短い事から、取得した距離画像には測定誤差が

顕著に表れている。

これを我々が提案する手法で補正した結果を図 11 に示す。誤差が軽減され表面形状が非常に滑らかになっている事が分かる。またガウシアンフィルタのような平滑化ではないため補正後においてもエッジは正確に保存されている。

図 12 には、この補正の回数に対する全体誤差の平均値の推移を示す。5 回程度の反復回数までは急激に誤差が減少し、その後は緩やかに 0 に向かって収束していく様子が見て取れる。始めのうちは測定誤差の減少が大きく、測定誤差が小さくなると形状と距離画像解像度による誤差の減少が観測されるようになる。

また、元の距離画像を用いた統合結果と誤差補正した距離画像を用いた統合結果を図 13 に示す。統合には Sagawa らの手法 [9] を用いた。統合の処理では距離画像間の法線方向や距離のコンセンサスを取ることによって [12]、位置合わせや距離画像の誤

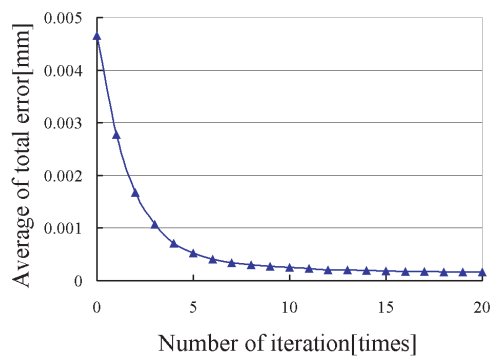
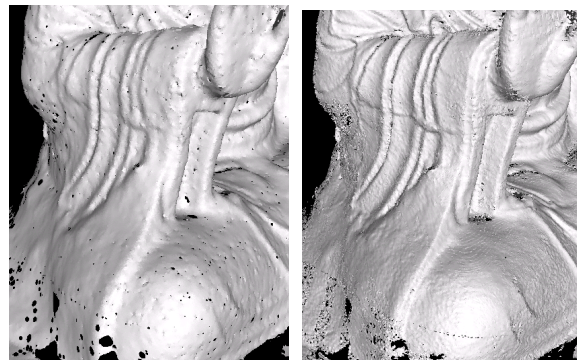


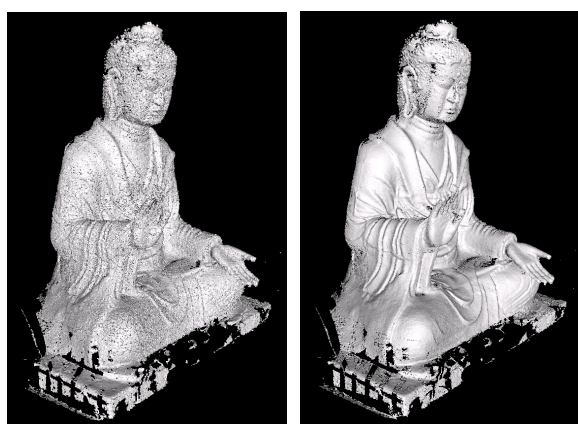
図 12: Convergence of error



(a) Gaussian filter

(b) Our method

図 14: Compare with Gaussian filter



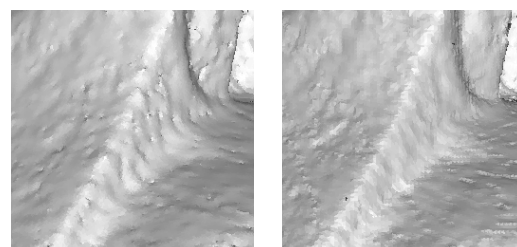
(a) Original

(b) Refined

図 13: Results of merging

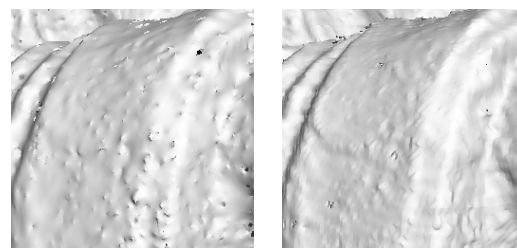
差を軽減することができる。しかしこの実験で用いたデータのように測定誤差が相対的に大きく分布している場合は、法線方向を利用しているために細部の形状を維持しながら誤差を軽減することは難しい。図 13 からは補正されていない距離画像を用いた場合は、誤差をほとんど軽減できていない事が分かる。一方、我々の手法で補正した距離画像を用いた場合は正確な形状モデルが生成されている。ただし頭部側面など距離画像が重複していない部分では誤差を補正することはできていない。

正規分布する誤差はガウシアンフィルタによって除去することが可能である。そこで手法を適用していないモデルに空間ガウシアンフィルタを適用して我々の手法と比較した。図 14 にマージ後にガウシアンフィルタを適用したモデルと、我々の手法を適用したモデルのマージ結果の一部分を示す。また、拡



(a) Gaussian Filter

(b) Our method



(c) Gaussian Filter

(d) Our method

図 15: Enlargement of results

大して比較した図を図 15 に示す。これらの結果からガウシアンフィルタをかけた場合は形状が平滑化されるが、我々の手法では誤差のみが軽減されエッジは正確に残されている事が分かる。またマージングの課程において誤ったメッシュが生成される事もなくなっている。

4 おわりに

本論文ではレンジファインダによって取得される距離データの誤差が光線方向に正規分布しているという特性を生かして、複数距離画像を用いた効果的な

誤差軽減手法を提案した．また実際に Time-of-Flight 方式のレーザレンジファインダを用いて測定した距離データにこの手法を適用し，その有効性を確かめた．またガウシアンフィルタを適用した場合と我々の手法を用いた場合とを比較し，我々の手法が誤差を軽減すると同時に形状情報を十分に保存できることを示した．

謝辞

本研究は科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業（CREST）高度メディア社会の生活情報技術の支援を受けて行われました．また飛鳥大仏の計測にご協力頂いた奈良飛鳥寺の方々に感謝の意を申し上げます．

参考文献

- [1] P. J. Besl and N. D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 14(2):239–256, 1992.
- [2] Y. Chen and G. Medioni. Object modelling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing*, 10(3):145–155, 1992.
- [3] Brian Curless and Marc Levoy. A volumetric method for building complex models from range images. In *Proc. SIGGRAPH'96*, pages 303–312. ACM, 1996.
- [4] <http://www.cyra.com>.
- [5] Martial Hebert, Katsushi Ikeuchi, and Herve Delingette. A spherical representation for recognition of free-form surfaces. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(7):681–690, 1995.
- [6] Minolta. Vivid 900 non-contact digitizer. <http://www.minoltausa.com/vivid/>.
- [7] P. J. Neugebauer. Geometrical cloning of 3d objects via simultaneous registration of multiple range image. In *Proc. of the 1997 Int. Conf. on Shape Modeling and Application (SMA'97)*, pages 130–139, 1997.
- [8] K. Nishino and K. Ikeuchi. Robust simultaneous registration of multiple range images. In *Proc. of Fifth Asian Conference on Computer Vision ACCV '02*, pages 454–461, 2002.
- [9] R. Sagawa, K. Nishino, and K. Ikeuchi. Robust and adaptive integration of multiple range images with photometric attributes. In *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2001*, volume 2, pages 172–179, December 2001.
- [10] Gabriel Taubin. A signal processing approach to fair surface design. *Computer Graphics*, 29(Annual Conference Series):351–358, 1995.
- [11] G. Turk and M. Levoy. Zippered polygon meshes from range images. In *SIGGRAPH 94*, pages 311–318, Jul 1994.
- [12] M.D. Wheeler, Y. Sato, and K. Ikeuchi. Consensus surfaces for modeling 3d objects from multiple range images. In *Proc. International Conference on Computer Vision*, January 1998.
- [13] 清水 郁子 and 出口 光一郎. 計測誤差を考慮した距離画像の重ね合わせ手法. *情報処理学会論文誌*, 40(11):4097–4105, 1999.