

文化遺産における壁面画の測定に伴う歪み補正

松井 健[†], 長谷川 一英^{††}, 池内 克史^{†††}

[†] 東京大学大学院 情報理工学系研究科 電子情報学専攻

^{††} 東京大学 生産技術研究所

^{†††} 東京大学大学院 情報学環

〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 第3部 池内研究室 03-5452-6242
matsu-ken@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

概要 本稿ではレンジセンサ内で行われる補正が不十分である際に、距離画像に生じる微小な歪みを容易に補正する手法を提案する。我々の研究室では歴史的建造物のデジタル保存化の一環としてカンボジアのバイヨン寺院をレンジセンサにより計測してきた。その中でも壁面に描かれた浮き彫りを測定する際に、得られる距離画像を位置合わせ(アラインメント)すると微小なセンサの測定歪みが蓄積し、例えば平面が歪曲するという問題に直面してきた。本稿で、個々の距離画像の微小な歪みを補正し、アラインメントを行った結果としてモデルが補正される手法を提案する。

キーワード 歴史的文化遺産 レーザレンジファインダ キャリブレーション

Geometric Correction of Deformed Range Data towards Cultural Heritage Preservation

Ken MATSUI[†], Kazuhide HASEGAWA^{††}, and Katsushi IKEUCHI^{†††}

[†] Department of Information and Communication Engineering,
Graduate School of Information Science and Technology,
The University of Tokyo

^{††} Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

^{†††} Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 3rd Dept. Ikeuchi Laboratory 4-6-1 Komaba,
Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, JAPAN
+81-3-5452-6242
matsu-ken@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract In this paper, we propose a handy method which corrects the distortion found in data obtained from a miscalibrated range sensor. We have been measuring the Bayon Temple in Cambodia as a part of digital archive project of cultural heritages. When measuring a large area, such as relief engravings, we have been confronted with a problem of big distortion accumulated in the whole model. To obtain a model of an object with a large area, one must measure a portion of the whole data and align the range data. The big distortion in the model of the large object can be thought of as a result of the accumulation of the small distortion found in the range data. Using this proposed method, the small distortion in the range data can be easily corrected, and we will present the result of the correction.

Keywords cultural heritage, laser range finder, calibration

1 はじめに

近年，計算機の処理能力が飛躍的に向上し，画像処理やコンピュータビジョンの研究が盛んに行われている．そのなかでも，実世界の物体を計測し3次元モデルに変換することはコンピュータビジョンの最も知られた応用例である．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実効率が非常に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．我々池内研究室では，貴重な文化財の状態を記録し保存しておくニーズに応えるべく，歴史的建造物のデジタル保存化の一環として，今まで奈良，鎌倉大仏そしてカンボジアのバイヨン寺院といったような大規模文化財をモデリングしてきた [6]．

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た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際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，個々の距離画像を一枚ずつ，逐次的に位置合わせし [2]，その後全体位置合わせする手法が取られる [7]．

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．

既存のアライ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．

我々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メントすると，一部分のみを見れば図1の上図のように歪みが目立たないが，全体としては図1の下図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．そこで，本論分では，歪んでいる距離画像を容易に補正する手法を提案し，歪曲した大規模モデルが補正される様子を示す．論文の構成は以下の通りである．

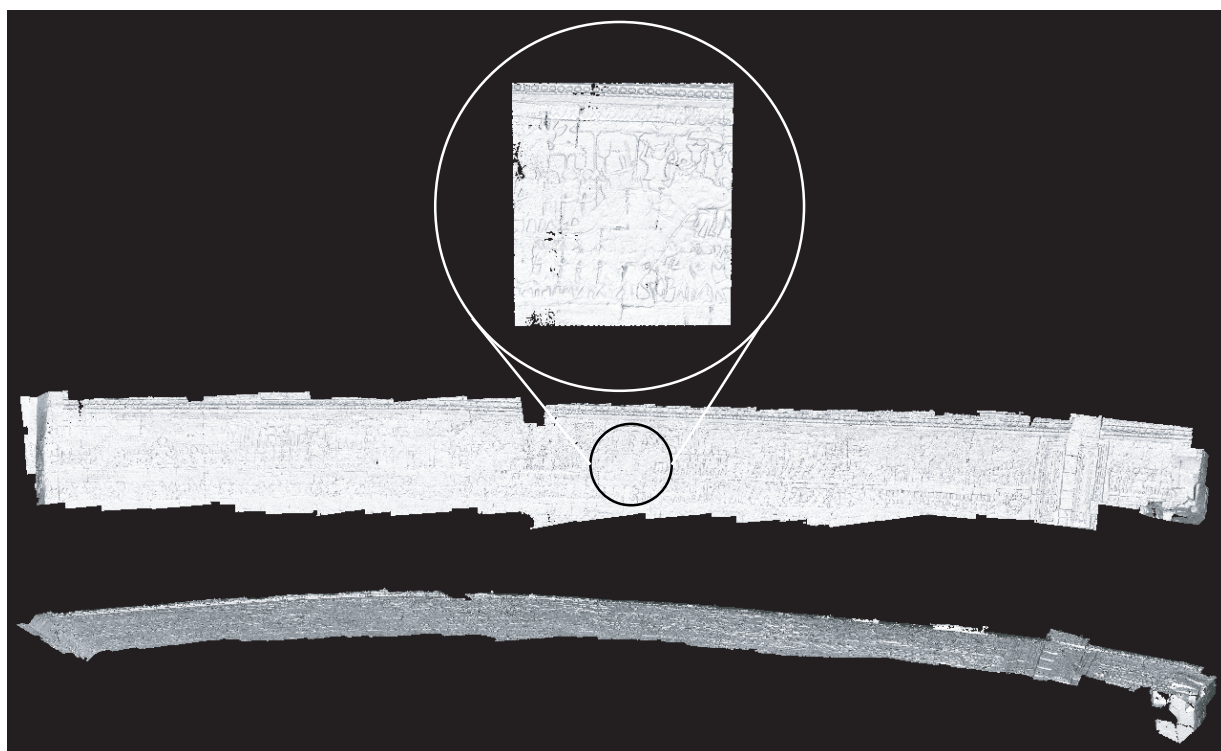


図 1: 壁面画の全体図とその一部分

る．まず，第2章において関連研究について述べ，第3章で測定の際に使用されるレーザレンジファインダについて簡単に述べる．次に第4章で本提案手法を述べ，最後に第5章で結論と今後の課題を述べる．

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現れないようになっている．そこで歪みの問題を解決する必要が生じるが，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，理想的であると言える．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，その仕様が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．さらに，この解決法の一つの問題として，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 [9]．しかし，このような手法では新たな高次元な自由度を与えてしまうため，制御が困難であると考えられる．また，補正関数を求める際の計算コストが高いといった問題点も持ち合わせている．さらに，この手法では特定の距離画像に対してのみに有効な補正関数を計算しているため，同性質の歪みを保有する多数の距離画像の補正を行う手法としては不適切である．

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 [3]．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．

3 レーザレンジファインダ

レーザレンジファインダはレーザ光源とカメラからなる．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がある．このような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．この章では一般的なパラメータとそのキャリブレーション手法について簡単にまとめる [10]．

3.1 カメラパラメータと プロジェクタパラメータ

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．これにより，透視変換は 4×4 の行列演算により表される．

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

物体座標系とカメラ座標系は異なるため，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表す．よってカメラから得られる結像面上の二次元座標 (X_c, Y_c) は，変換 T を用いた式を変形することにより，点 $P(X, Y, Z)$ を用いて次式で表される．

$$\begin{bmatrix} H_c X_c \\ H_c Y_c \\ H_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

また，スポット光をガルバノミラーなどで偏向し投影するとき，ミラーの回転中心に原点を置いた座標系で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，結合面における座標が2次元でなく1次元になっている点であり，式 (2) とほぼ同じ式を得るが， 4×4 ではなく， 2×4 の変換行列となる．

$$\begin{bmatrix} H_p X_p \\ H_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

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，ほかにも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(2)と式(3)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 $P(X, Y, Z)$ が求めることができる．

3.2 キャリブレーション

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) が分かっている場合，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分かれば良い．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り， 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 $C_{34} = 1$ とし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 δ_X, δ_Y は多くの場合，次式のように半径方向の歪みによって表される．

$$\delta_X = \kappa_1 X_c (X_c^2 + Y_c^2) \quad (4)$$

$$\delta_Y = \kappa_1 Y_c (X_c^2 + Y_c^2) \quad (5)$$

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．

$$\begin{aligned} d_Y(Y_c - C_Y) + d_Y(Y_c - C_Y)(\kappa_1(X_c^2 + Y_c^2)) \\ = f \frac{T_{21}X_i + T_{22}Y_i + T_{23}Z_i + T_{24}}{T_{31}X_i + T_{32}Y_i + T_{33}Z_i + T_{34}} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで， d_Y は Y 方向の CCD の素子間隔を表し， C_Y は画像上の原点座標を表す．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 [1][4]．

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 [5][8]．

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，そのために歪んだ距離画像を得ることとなる(図1)．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．

4 提案手法

正確にキャリブレーションを行うことが困難であるため，本論分では容易に歪みを補正する手法を提案する．

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光切断方式を用い，三角測量で距離を獲得する．測定入力対象設置範囲は0.6~1.2m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．我々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1の測定には VIVID910，受光レンズは WIDE が用いられた．

4.2 歪み特性

図1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1のような結果を得たと考えられる．

そこで，我々はまず，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．我々研究室は 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2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分かる．左の結果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，右側の結果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、他方は微弱であると考えられる。

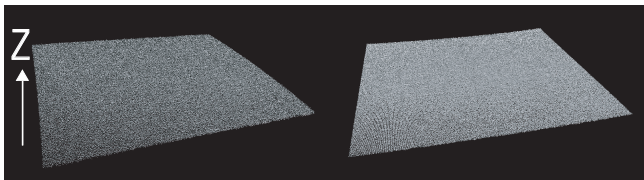


図 2: 平面測定結果 左:VIVID_1 右:VIVID_2

上の平面の測定のみ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。

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 2 の左側で使用した VIVID に関しては $2.407 \times 10^2 \text{mm}$ となり、右側で使用した 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 $\pm 0.01 \text{mm}$ 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分かる。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 から分かった。

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 2 の左側で使用した 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、奥行き方向の歪みに比べると約 $\frac{1}{25}$ となり、十分小さいとみなすことができる。

4.3 補正手法

距離画像の歪みの多く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分かった。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。

図 2 の歪みの特徴として、まず、画像原点を中心に半径方向に歪みが增大していることが分かった。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取れた。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によって表すことができるため、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、 640×480 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、 640×480 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表す。画像原点を中心とし歪みが增大しているため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き方向成分に現れるようになる。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、上記の歪みは奥行き方向のみでなく、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き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 次スプライン補間法とは、ある区間毎に分けてその区間ごとに式を求めることで全ての点を通る式を構成する手法で、ある区間 $[x_i, x_{i+1}]$ を通る関数は次式のように表すことができる。

$$S_i(x) = a_i + b_i x + c_i x^2 + d_i x^3 \quad (7)$$

この式の条件として、補関関数、および、その 1 次微分、2 次微分がつなぎ目で滑らかになるということを満

たす必要がある．こ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. 距離画像から主成分分析で平面の法線方向を検出する
2. 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
3. 640×480 の点を 64×48 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
4. スプライン補間法により再度 640×480 のデータに拡張する
5. 1 から 4 をすべての平面に対し行う
6. 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
7. 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
8. 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

処理の 1~4 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、当然であるが、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 6 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 640×480 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．この区分的多項式近似より、補正すべき距離画像において、原点からすべての方向に対し距離を求めることにより、角度ごとのスプライン曲線から歪みを獲得できる．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．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、すべての点で補正を行うと、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．この際には、距離が獲得されていない方向に対するデータをどのように取り扱うかに注意せねばならない．

5 実験結果

我々は本手法を用いて歪んでいる距離画像の補正される様子を実験により確認した．

5.1 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 1 のようになった．それと同時に、得られた距離画像を図 3 に示す．左側が補正前の距離画像で右側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 4 に示す．壁面の右側をし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 1 を見て分かる通り、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分かる．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．

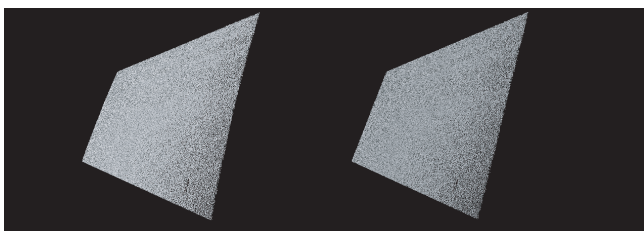


図 3: 評価実験結果 左:補正前 右:補正後

表 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

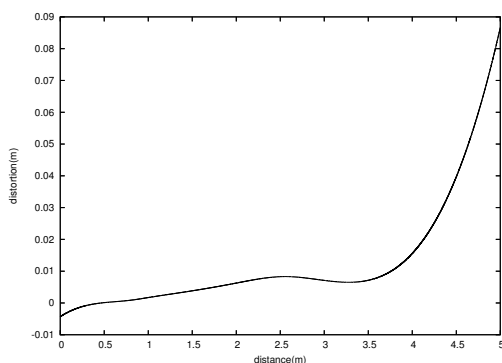


図 4: 特定角度における距離に応じた歪み値

5.2 既存データの補正

第 1 章で述べたとおり，我々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 1 のように大きく歪んでいる．そこで，我々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．得られた結果を図 5 に示す．なお，下の結果が本手法を適用した後の結果である．また，他の歪んだ平面モデルも補正前と補正後の結果を図 6 に示す．こちらも下の図が本手法を適用した結果である．どちらの図も同じ視点から壁面画を見た結果である．見て分かる通り，歪みが除去され，モデルが平面に近づいている．

図 5 の補正前のモデルの方が大きく歪んでいることが分かるが，図の尺度を見ると図 5 の方がモデル全体として大きいことが分かる．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 では 1.45m 程度であったのに対し，図 6 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．

6 まとめと考察

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分かった．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現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分かった．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後からでも作成することが可能になっている．

最後に，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．今後の課題とする．

参考文献

- [1] M. Ahmed and A. Farag. Non-Metric Calibration of Camera Lens Distortion. In *IEEE Int'l Conf. on Image Processing*, pages 157–160, 2001.
- [2] P.J. Besl and N.D. McKay. A Method for Registration of 3-D Shapes. In *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, pages 239–256, 1992.
- [3] L.Ikemoto, N.Gelfand, and M.Levoy. A Hierarchical Method for Aligning Warped Meshes. In *4th Int'l Conf. on 3D Imaging and Modeling (3DIM)*, pages 434–441, 2003.
- [4] L. Lucchese and S.K. Mitra. Correction of Geometric Lens Distortion Through Image Warping. In *3rd Int'l Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, pages 516–521, 2003.
- [5] A.M. McIvor. Calibration of a Laser Stripe Profiler. In *2nd Int'l Conf. on 3-D Imaging and Modeling (3DIM)*, pages 92–98, 1999.
- [6] D. Miyazaki, T. Ooishi, T. Nishikawa, R. Sagawa, K. Nishino, T. Tomomatsu, Y. Takase, and K. Ikeuchi. The Great Buddha Project:Modelling Cultural Heritage through Observation. In *Proc. Int'l Conf. on Virtual Systems and Multimedia(VSMM)*, pages 138–145, 2000.
- [7] K. Pulli. Multiview Registration for Large Data Sets. In *Proc. 2nd Int'l Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pages 160–168, 1999.
- [8] I.D. Reid. Projective calibration of a laser-stripe range finder. In *Image and Vision Computing*, pages 659–666, 1996.
- [9] R. Szeliski and S. Lavellée. Matching 3-D Anatomical Surfaces with Non-Rigid Deformations using Octree-Splines. In *International Journal of Computer Vision*, pages 171–186, 1996.
- [10] 佐藤 宏介 井口 征士. 三次元画像計測, chapter 4. 昭晃堂, 1990.



図 5: 壁面画の補正の様子 (1)

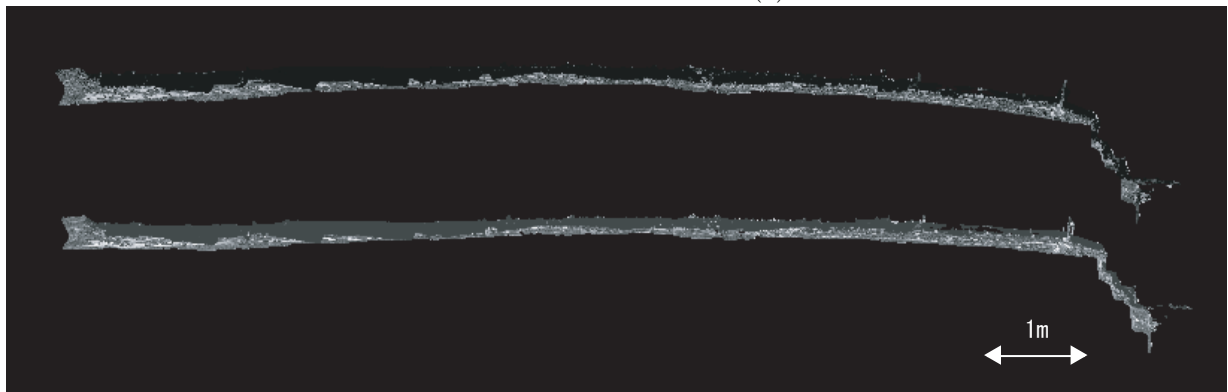


図 6: 壁面画の補正の様子 (2)