

CREST 池内プロジェクト概要 - 観察に基づく文化財のデジタル保存 -

池内 克史

東京大学大学院情報学環

〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 駒場 II キャンパス E 棟

東京大学生産技術研究所 第3部 池内研究室

03-5452-6242

ki@iis.u-tokyo.ac.jp

概要

本稿では、文化財のデジタル保存を目的とする我々のプロジェクトのうち、特に有形文化財の幾何・光学情報の保存および生成当時の状態のデジタル復元に関する研究の概要を述べる。幾何情報のモデル化は、対象の3次元計測・複数距離画像の位置合せおよび統合の3段階によって行われる。このために、我々は複数距離画像の頑健な同時位置合せ手法およびボクセルを使用した効率の良い並列統合手法を開発した。光学情報に関しては、カラーカメラから得られるテクスチャ画像を幾何情報モデルの上に正確にマッピングする必要があるため、我々は2つのテクスチャマッピング手法を開発した。また、歴史的な有形文化財の建立当時の状態を復元する試みとして、再建されたために元の形状が失われている仏像および建造物に対して仮想空間上での復元を行った。本稿では、これらの手法の概略を説明するとともに、提案手法を実在する文化財に適用した結果を紹介する。

キーワード 文化財 仮想現実 モデリング 幾何情報 光学情報

Overview of CREST Ikeuchi Project - Digital Archiving of Cultural Heritages through Observation -

Katsushi IKEUCHI

Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 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

ki@iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract

This paper presents an overview of our project to construct a digital archive of cultural heritage objects. Among the efforts in our project, we briefly overview our research on geometric preservation of cultural assets and the restoration of their original appearance. Digital geometric modeling is achieved through a pipeline consisting of scanning, registering and merging multiple range images. For these purposes, we have developed a robust simultaneous registration method and an efficient and robust voxel-based integration method. On top of the geometric model, we have to align texture images acquired from a color camera. We have developed two texture mapping methods. In an attempt to restore the original appearance of historical heritage objects, we have reconstructed several buildings and statues that had been lost in the past. In this paper, we present these techniques and show several results of applying the proposed methods to existing ancestral assets.

Keywords Cultural Heritage, Virtual Reality, Modeling, Geometry, Photometry

1 はじめに

世界中に点在する多くの有形文化財は、現在風雨による自然な劣化や、自然もしくは人為的な災害による破壊にさらされている。その中でも日本の文化財は、その多くが木や紙によって構築されているという点において著しく耐久性に欠けている。この状況をふまえ、我々はコンピュータビジョンとコンピュータグラフィックスの手法を用いて、可能な限り正確にこれらの文化財の状態をデジタル保存するためのプロジェクトを開始している [1]。一度デジタルデータが獲得できれば、この情報は恒久的に保存されることになり、未来の世代へと安全に受け継ぐことが可能になる。さらに我々の手法は、シミュレーション・復元・マルチメディアコンテンツの作成といった多くの用途に適用すること可能であり、またその成果物に対して、Internet を通じて世界中のどこからでもアクセスすることが可能である。

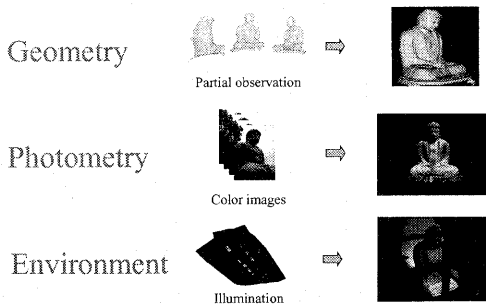


図 1: プロジェクトの3つの構成要素

同様のプロジェクトとして、例えばスタンフォード大学のミケランジェロプロジェクト [2]、IBM のピエタプロジェクト [3]、およびコロニア大学のプロジェクト [4] などが存在するが、我々のプロジェクトの特徴として、鎌倉大仏やアンコールトムのバイヨン遺跡（カンボジア）などの比較的大規模な屋外の物体のデジタル保存が可能である点、幾何情報のみではなく光学情報や環境情報をも同時に保存する点などがあげられる (図 1)。

2 章では、頑健な同時位置合せ手法、およびボクセルを使用した並列統合手法について概要を述べる。3 章では、デジタルカメラから得られるテクスチャ画像と幾何情報との位置合せを行いテクスチャマッピングを行う手法について述べる。4 章では、現存する文化財と建立時の状態を記述した文献資料を元に、文化財の当初の状態を復元する試みについて述べる。

2 幾何情報のモデリング

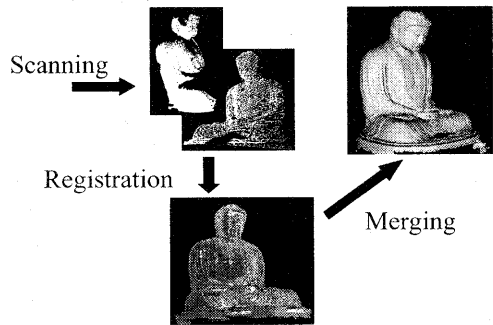


図 2: 幾何形状モデリングのための3手順

Shape from X や 2 眼ステレオに代表されるコンピュータビジョンの手法、もしくは近年のレンジセンサによって、計測対象の 3 次元点群情報は容易に獲得することができる。しかし、点群情報には点間の接続関係といった構造に関する情報が無いため、幾何情報モデリングにおいては点群情報をメッシュモデルなどの面情報に変換することがまず必要となる。次に、一回の計測から得られるデータは対象の一部であるため、複数の部分メッシュモデルを位置合わせし、さらに対応する個所が重なるように 1 つのメッシュモデルに変換する手法 (マーキング) が必要となる。図 2 にこの 3 つの手順を示す。このために、我々は従来のペアワイズ手法で問題となる累積誤差を解消した同時位置合せ手法を開発し [10]、位置合わせされた複数のメッシュモデルを統合し単一の幾何モデルを生成するマーキング手法を開発した [14]。

2.1 同時位置合せ手法

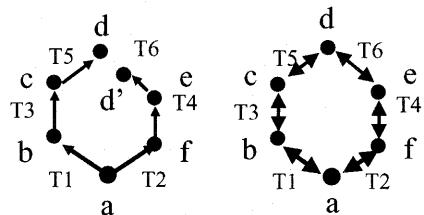


図 3: 逐次位置合わせ (左)、同時位置合わせ (右: 累積誤差が生じない)

Iterative Closest Point(ICP) に代表される従来の逐



図 4: 同時位置合わせの結果

次的な位置合わせ手法 [5, 8, 9] においては、位置合わせ済みの部分メッシュモデル群に対して、1つずつ新たな部分メッシュモデルが追加され、逐次的に位置合わせが進行していた (図 3)。物体を構成する部分メッシュモデルの数が少ない場合には、逐次位置合わせによる累積誤差は比較的小さく無視することが可能であるが、大規模な文化財になると 100 を越える数の部分メッシュモデルを位置合わせする必要があり、逐次位置合わせ手法では累積誤差が非常に大きくなる。そこで、全ての部分メッシュモデルのペアの位置合わせを同時に行い、合わせて全てのペア間の位置合わせ誤差を低減する手法を開発した [7, 10]。

我々の手法では、部分メッシュモデル間の距離の指標として、Chen と Medioni の手法 [8] と同様に点と面との距離を用いる。さらに、外れ値の影響を低減するために M 推定法を用い、誤差の確率分布には Lorentian 関数を用いた [11]。また、処理の高速化を図るため、対応点探索のためにグラフィックスハードウェアの機能を利用した。さらに、より大規模なデータ集合を位置合わせすることが可能な並列同時位置合わせ手法を現在開発中である。この手法を用いることで、100 以上の部分メッシュモデルで構成された奈良大仏の幾何情報モデルを 10 分程で位置合わせをすることが可能になった。図 4 に、全てのデータを同時位置合わせした結果を示す。図中の異なる色は異なる部分メッシュモデルを表す。

2.2 ボクセルを使用したマーキング手法

全ての部分メッシュモデルの位置合わせが終了すると、その結果を元に物体の合致面 (Consensus surface) を生成する。我々の手法では、部分メッシュモデルの集合から 3 次元空間中の陰表面関数表現を導出し、この関数が 0 となる同位面を局所的に細分化された 3 次元ボクセル表現によって表現し、これをマーキングキューブ法 [12] の一種によって単一のメッシュモデルに変換す

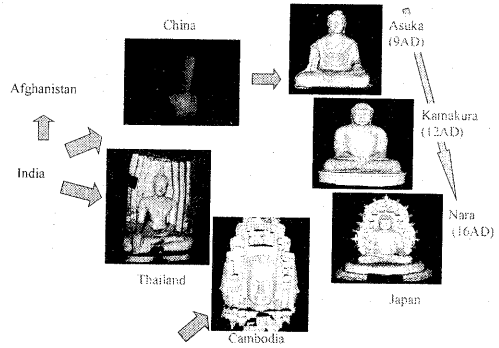


図 5: 世界規模での仏像の変遷ライブラリ (現段階)

る。従来の陰表面関数表現に基づく手法と異なり、我々の手法では局所的に同一の面を構成する重なりあった複数の部分メッシュモデルを全て用いて物体表面までの符合付き距離を計算し、その平均値を用いる [13, 14]。

このとき、octree を用いてボクセルを再帰的に分割することにより、物体表面付近のみ高分解能な表現を行うことが可能になる。これにより、生成される面の復元精度を落とすことなく、ボリューム表現を生成するための計算コストとメモリ使用量を低減することが可能になった。また、本研究においては一般に入力データ量が非常に大きくなるため、PC クラスタ上でマーキングを並列処理可能なソフトウェアを開発した。このソフトウェアを利用し、PC クラスタ上で大仏のうち 1 体のマーキングを試みた。データの総量は頂点数 330 万点、ポリゴン数 500 万であり、所要時間は 8 台の PC クラスタを使用して約 20 分であった。

我々は既に、鎌倉、奈良、ワットスリチャム (タイ) の大仏の幾何情報モデルをデジタル保存しており、現在図 5 に示す世界規模での仏像の歴史的な変遷を網羅したデジタルライブラリを構築中である。

3 光学情報のモデリング: テクスチャマッピング

幾何情報モデルは文化財の形状の詳細を保存する上で重要な情報であるが、それに加えて物体表面の色分布の情報 (テクスチャ) もある種の文化財にとっては非常に重要である。図 6 に示すのは、国宝である広目天像である。この像の場合、作成当時に像表面に塗られた塗料の色がまだよく残っている。このような文化財に対しては、幾何形状とそれに対応するテクスチャの情報とを関連付けて保存する必要がある。このとき、形状とテクスチャは異なるセンサによって計測される

ため、計測後に両者の位置合わせを行うことが必要となる。このために、我々は2つのテクスチャマッピング手法を開発した。1つは、キャリブレーションに基づく方法であり、もう1つはリフレクタンスエッジに基づく方法である。

3.1 キャリブレーションに基づく方法

テクスチャマッピングを行う上での問題の1つに、いかにしてレンジセンサからの情報と画像センサからの情報との対応をとるのかという問題がある。このとき、図6に示すように対象が近距離にあり、近距離用のレンジセンサを使用する場合には、レンジセンサに画像センサを固定し、レンジセンサと画像センサとのキャリブレーションを行うことが最もよい方法である。

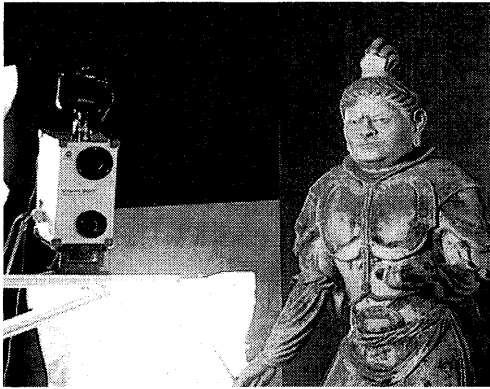


図6: 国宝「広目天」像の計測

画像センサ上の点を (x_c, y_c) とし、対応する距離データを (X, Y, Z) とする。このとき、両者の関係は次のように記述される。

$$\begin{bmatrix} hx_c \\ hy_c \\ h \end{bmatrix} = C_{34} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = P_{34} \begin{bmatrix} R_{33} & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

行列 C_{34} は画像座標系と世界座標系との関係を表し、キャリブレーションボックスを使用した標準的なキャリブレーション手順によって求められる。幾何情報モデルの3角パッチに対応するテクスチャ画像は、3角パッチの各頂点 (X_i, Y_i, Z_i) を上式にしたがってテクスチャ画像上の点 (x_{ci}, y_{ci}) に変換することにより、テクスチャ画像上の3角形領域として求まる。

広目天像をモデル化するために、我々は60組の対応する距離画像とカラー画像を計測によって得た。図7

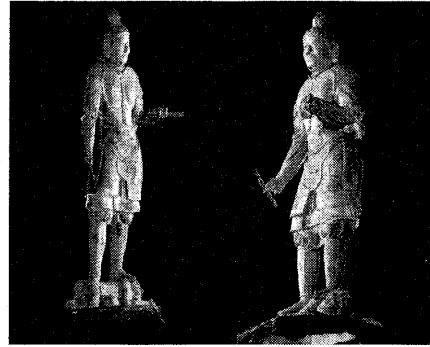
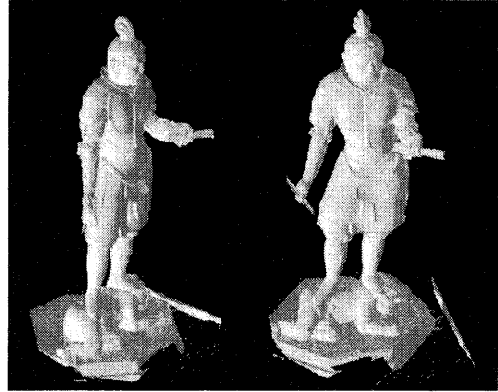


図7: 広目天像の幾何形状モデルとテクスチャ付きモデル

の上部に幾何情報モデル、下部に幾何情報モデルにテクスチャを貼り付けたモデルを示す。また、図8に、異なる光源環境下での像の見えの生成結果を示す。

3.2 リフレクタンスエッジに基づく方法

前節のキャリブレーションに基づく方法は、レンジセンサと画像センサが一旦キャリブレーションされた

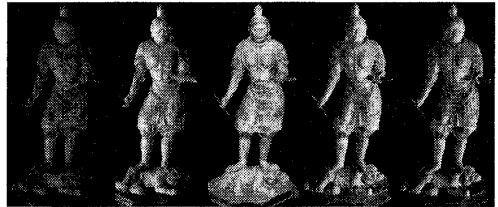


図8: 異なる光源環境下での見えの生成(日の出・昼間・日の入り)

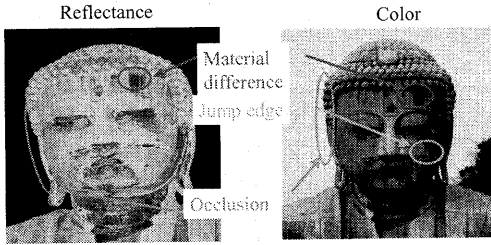


図 9: リフレクタンスとカラーエッジ: 同じ特徴を持つ

後はその相対関係を固定しておかなければならないという制約があり、またキャリブレーションボックスが置かれていた空間周辺の対応関係の正確さのみが保証される。そのため、対象物体が遠距離にあり非常に大きい場合にはこの手法を適用することは難しい。そのため、キャリブレーションに依存しない手法が必要となる。

一般にレンジセンサでは、距離画像の他に副産物としてリフレクタンス画像を生成することが可能である。リフレクタンス画像とは、各計測点におけるレーザの反射強度を表し、距離の情報とリフレクタンスの情報は同一のレーザによって同時に計測されるため、2つの画像は正確に一致している。リフレクタンス画像は、ERIM, Preceptron, そして我々の主要なセンサであるCYRAX を含む多くのレンジセンサにおいて利用可能である。

我々は、このリフレクタンス画像の情報をカラー画像と距離画像との位置合わせのために用いた [15, 16]. リフレクタンス画像とカラー画像は、図 9 に示すようにいずれも物体表面の材質・形状・色の影響を受けるという点で同様の特性を有する。我々の CYRAX レンジキャナは緑色レーザダイオードを使用しており、この波長においては、異なる表面色もしくは異なる材質において強度が変化するため、その境界は画像上のエッジとなって現れる。また、異なる材質は一般に異なる表面色を持つため、カラー画像においても同様の境界が現れる。同様に、ジャンプエッジや輪郭線も双方の画像に現れる。

位置合わせの手順は次の通りである。まず、輪郭線に基づくリフレクタンスエッジの出現位置は視線方向に強く依存するため、カラー画像上のエッジとの対応を取る上で信頼性がない。どのリフレクタンスエッジが輪郭線に基づくのかについては、3次元幾何形状モデルとその位置・姿勢 P および視線方向から自動推定することが可能であるため、これを事前に除去する。ただし、 P の初期値については、何らかの方法によって既知であるとする。

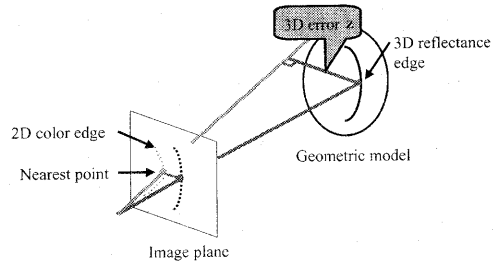


図 10: 3次元リフレクタンスエッジと2次元カラーエッジとの対応

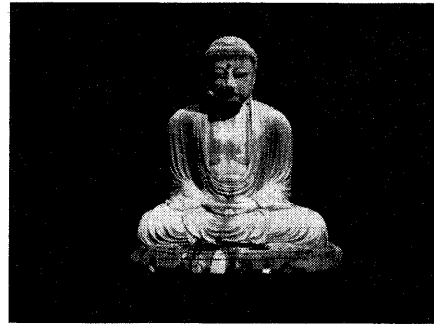


図 11: テクスチャを貼った鎌倉大仏

次に、有効なリフレクタンスエッジと対応するカラー画像上のエッジについて、3次元空間中での両者の距離が最小になるように繰り返し計算によって P を更新し、位置合わせを行う。

エッジはそれを構成する点群として表現される。ある3次元リフレクタンスエッジ点に対応するカラー画像上のエッジ点は、図 10 に示すように姿勢 P の3次元幾何情報モデル上にある3次元リフレクタンスエッジ点をカラー画像上に投影したときに、その点から最近傍にあるカラー画像エッジ点となる。このカラー画像エッジ点を3次元空間中視線方向に延ばし、3次元リフレクタンスエッジ点との距離が最小になる位置に逆投影した点が、画像エッジ点の推定3次元位置となる。

位置合わせは、この3次元空間上でのエッジ点間の距離を M 推定法を用いて漸的に最小化することによってなされる。エッジ点間の3次元距離 ϵ_i は次の式で表される。

$$\epsilon_i = Z_i \sin \theta \quad (2)$$

ここで、 Z_i は光学中心から3次元リフレクタンスエッジ点までの距離であり、 θ はカラー画像上のエッジ点と

リフレクタンスエッジ点との間の角度である。

位置合わせは以下の $E(P)$ を最小に P を求めることと定式化される。

$$E(P) = \sum_i \rho(\epsilon_i) \quad (3)$$

ここで、 ρ は M 推定における誤差の確率分布関数である。 $E(P)$ は以下の式から求められる。

$$\frac{\delta E}{\delta P} = \sum_i \frac{\delta \rho(\epsilon_i)}{\delta \epsilon_i} \frac{\delta \epsilon_i}{\delta P} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $w(\epsilon)$ を誤差項を評価するための重み関数とし、次のように定義する。

$$w(\epsilon) = \frac{1}{\epsilon} \frac{\delta \rho}{\delta \epsilon} \quad (5)$$

これより、式 (4) は式 (6) のように表すことができ、 $w(\epsilon)$ が ϵ の関数であることを無視すれば、これは重み付き最小二乗法を表す式である。

$$\frac{\delta E}{\delta P} = \sum_i w(\epsilon_i) \epsilon_i \frac{\delta \epsilon_i}{\delta P} = 0 \quad (6)$$

本研究では、外れ値の影響を除去するため誤差の確率分布として Lorentz 分布を用い、重み関数を以下のように定めた。

$$w(\epsilon) = \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon}{\sigma}\right)^2\right)^{-1} \quad (7)$$

共役勾配法を用いて式 (4) を解くことによって誤差を最小にする P が求まり、これがカラーカメラとレンジセンサとの位置合わせを行った結果となる。図 11 に、この手法を用いて鎌倉大仏にテクスチャマッピングを行った結果を示す。

4 文化財の初期状態の復元

文化財の現在の正確な幾何情報と光学情報が得られると、これを元に文化財生成当時の状態（見え）を復元することが可能になる。本章では、奈良大仏と大仏殿の復元例について述べる。

4.1 奈良大仏の復元

奈良大仏は、東大寺の擁する主要な仏像であるが、現在の大仏は再建されたものであり、本来の大仏は数度の内乱の際に焼失している。そのため、現在の大仏は当初の大仏と形状が異なっており、我々は以下の方法で建立当時の大仏の 3 次元幾何モデルを再構成した。

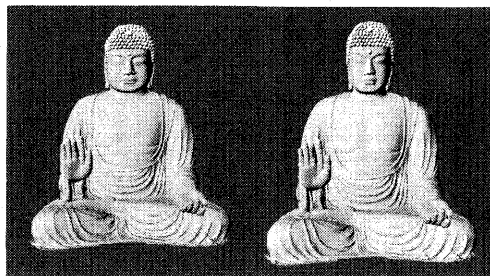


図 12: 奈良大仏 : (a) 現在, (b) 建立当初



図 13: 建立当時の東大寺大仏殿のミニチュア模型と 3 次元モデル

まず 2 章で述べた手法により、現在の大仏の完全な 3 次元幾何情報モデルを獲得する。このモデルに対して 3 次元モーフィングをほどこすことにより、元の大仏像を再構成する。寺院に残されている文献より、当初の大仏の鼻や口といった顔の様々な部位の寸法を知ることが可能である。この資料を元に、2 段階のモーフィングアルゴリズムを開発した。

まず 1 段階目においては、座高・顔の長さ・鼻梁の長さといった文献上の値を元に、大仏全体の比率を変更する。2 段階目では、表面の滑らかさおよび点密度の一樣さの 2 つの拘束条件を課した状態で、モデルの各頂点の一つずつ再帰的に動かす。これにより、元の大仏の完全なモデルを再構成することが可能になる。図 12 に (a) 現在と (b) 当初の大仏のモデルを示す。この結果から、当初の大仏が現在のものと比較してより大きく細身であったことが視覚的にはっきりと分かる。

4.2 東大寺大仏殿の復元

東大寺大仏殿も、大仏と同じ時期（8 世紀）に建立されたが、12 世紀と 18 世紀の 2 度に渡って再建されている。12 世紀は天竺文化が中国から輸入された時期であり、このとき大仏殿は全く異なる様式で再建された。18 世紀における再建もこの新しい様式を踏襲したものである。このため、現在に残る大仏殿は、建

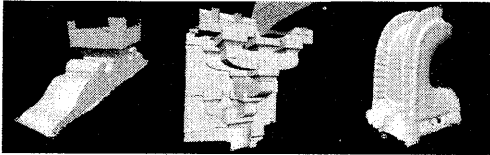
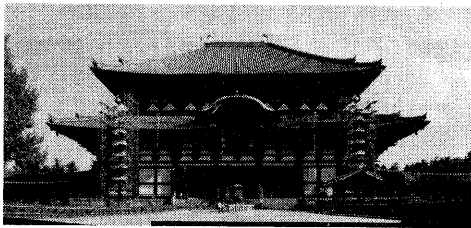


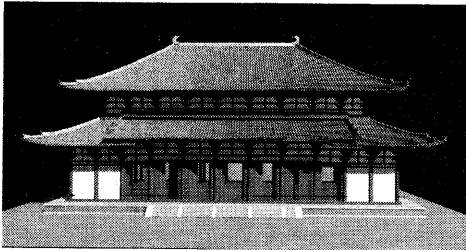
図 14: 唐招提寺の部材の 3次元モデル

立当時の大仏殿とは大きく異なるものとなっている。

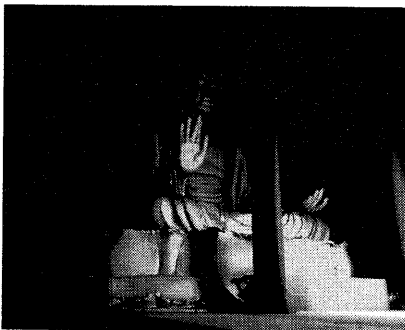
幸い東大寺には、1900年のパリ博覧会のために作成された当初の大仏殿のミニチュア模型(図13(a))が存



(a) Current main hall of Todaji (16AD)



(b) Original main hall (8AD)



(c) Nara Buddha in the main hall (8AD)

図 15: 復元された奈良大仏と東大寺大仏殿

在する。我々は、この模型をPulsteck TDS-1500を用いて3次元計測し、得られた3次元モデルを図13(b)に示すように本来の大きさに拡大した。しかし、建物全体の概要は得られたものの、模型から建築部材の細かい形状を正確に得ることは不可能であった。

一方、東大建築学科藤井教授によると、東大寺と唐招提寺は同じ様式の建築物であり、実際唐招提寺は8世紀の同時期に建立されている。唐招提寺は現存するため、我々は唐招提寺を構成する主要な部材を3次元計測し(図14)、東大寺大仏殿の対応する部材の大きさに合うようにモデルの比率を変更した。この比率の変更は、比率を表すパラメータを追加した拡張位置合わせ手法を用いて自動的に計算される。図15に、現在の東大寺大仏殿と、我々の手法によって復元された当初の大仏殿を示す。

5 結論

本稿では、文化財のデジタル保存と、仮想空間中における文化財の復元を目指す我々のプロジェクトについて紹介した。我々のプロジェクトの最終目標は、文化財の様々な属性・情報を種々の観測手法を通してデジタルモデル化する”Modeling from Reality”のための手法を開発することである。幾何情報に関しては、レーザレンジファインダを計測装置として用い、データ処理のための位置合わせ手法とマージング手法を開発した。光学情報に関しては、テクスチャ情報と幾何情報の位置合わせのために、2つのテクスチャマッピング手法を開発した。近距離用のレンジセンサに対しては、レンジセンサと画像センサとのキャリブレーションに基づきマッピングを行った。遠距離用のレンジセンサに対しては、キャリブレーションがなされていないテクスチャ画像とリフレクタンス画像に対して、画像上の共通する特徴点を利用して位置合わせをする手法を開発した。初期の状態が失われてしまった文化財のデジタル復元は、現存する文化財に物理的な変更を加えることなく様々な仮説を検証することができるという点において、他の復元方法と比較して大きな優位点がある。我々は、この有効性を、奈良大仏とその大仏殿を復元することによって示した。具体的には、現状の幾何情報モデルに対して、建立当時の状態を記述した文献を元に再構築を行い、建立時の状態が現在のものと大きく異なることを視覚的に提示した。これらの技術を基礎に、我々は世界の中でも特にアジアに点在する有形文化財のデジタル保存に力を入れており、これらを収集したデジタルライブラリを構築中である。これまでに構築したモデルおよび復元結果は、下記のwebページから参照することができる。

参考文献

- [1] K. Ikeuchi and Y. Sato: "Modeling from reality," *Kluwer Academic Press*, 2001.
- [2] M. Levoy et. al.: "The digital Michelangelo project," *SIGGRAPH 2000*, New Orleans.
- [3] J. Wasserman: "Michelangelo's Florence Pieta," *Princeton University Press 2003*.
- [4] I. Stamos and P. Allen: "Automatic registration of 2-D with 3-D imagery in urban environments," *ICCV2001*, Vancouver.
- [5] P.J. Besl and N.D. McKay: "A method for registration of 3-d shapes," *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, 14(2):239-256, 1992.
- [6] R. Benjemma and F. Schmitt: "Fast global registration of 3D sample surfaces using a multiple-z-buffer technique," *Int. Conf on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 113-120, May 1997.
- [7] P. Neugebauer: "Geometrical cloning of 3D objects via simultaneous registration of multiple range images," *Int. Conf on Shape Modeling and Application*, pp.130-139, March 1997.
- [8] Y. Chen and G. Medioni: "Object modeling by registration of multiple range images", *Image and Vision Computing*, 10(3):145-155, April 1992.
- [9] S. Rusinkiewicz and M. Levoy: "Efficient variants of the IPC algorithm," *Int. Conf 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp.145-152, May 2001.
- [10] K. Nishino and K. Ikeuchi: "Robust Simultaneous Registration of Multiple Range Images," *Fifth Asian Conference on Computer Vision ACCV '02*, pp454-461, 2002.
- [11] M. D. Wheeler and K. Ikeuchi: "Sensor Modeling, Probablistic Hypothesis Generation, and Robust Localization for Object Recognition", *IEEE PAMI*, 17(3): 252-265, 1995.
- [12] B. Curless and M. Levoy: "A volumetric method for building complex models from range images," *SIGGRAPH 96*, New Orleans, LA.
- [13] M. Wheeler, Y. Sato, and K. Ikeuchi: "Consensus surfaces for modeling 3D object from multiple range images," *ICCV98*.
- [14] R. Sagawa, K. Nishino, M.D. Wheeler and K. Ikeuchi: "Parallel Processing of Range Data Merging", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp577-583, 2001
- [15] R. Kurazume, M. D. Wheeler, and K. Ikeuchi: "Mapping textures on 3D geometric model using reflectance image," *Data Fusion Workshop in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2001.
- [16] R. Kurazume, K. Nishino, Z. Zhang, and K. Ikeuchi: "Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute," *Fifth Asian Conference on Computer Vision*, 2002.