

The Great Buddha Project

- 大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化 -

倉爪 亮^{*1}
大石岳史^{*2}

西野 恒^{*2}
高瀬 裕^{*3}

佐川立昌^{*2}
池内克史^{*2}

^{*1} 科学技術振興事業団

^{*2} 東大

^{*3} (株) キャドセンタ -

バーチャルリアリティ(VR)で用いられる様々なモデルの作成作業は、現在その大部分をオペレータの手に頼っている。このためコンテンツの製作に多くの時間と多額の費用が必要であり、これがVRシステムの普及を妨げる一因となっていると考えられる。従ってこのモデル作成作業を自動化、効率化できれば、仮想現実システムの低価格化が可能となり、より一層の普及が期待される。この問題に対し、我々はこれまでに、実物体の観察に基づき仮想現実モデルを効率的に作成する手法として、(1)メッシュ生成(スキャニング)、(2)位置合わせ(アライメント)、(3)統合(マージング)からなる”modeling-from-reality (MFR)”の概念を提案している。本報告では、鎌倉高德院阿弥陀如来像(鎌倉大仏)のデジタル化を例に、これまでに我々が開発した大規模文化遺産のデジタル化に対する様々な手法を紹介する。

The Great Buddha Project

Digital archive of large-scale cultural heritage

Ryo Kurazume^{*1}
Takeshi Oishi^{*2}

Ko Nishino^{*2}
Yutaka Takase^{*3}

Ryusuke Sagawa^{*2}
Katsushi Ikeuchi^{*2}

^{*1} Japan Science and
Technology Corporation

^{*2} The University of Tokyo

^{*3} CADCENTER, Inc

This paper presents an overview of our efforts in modeling the Great Buddha of Kamakura through observation. The Kamakura Great Buddha, built in the 13th Century, is one of the national treasures of Japan; of its height is about 12.4m, including its pedestal. Currently, the Buddha is standing in the open air. We have started this modeling as the kick-off step of our project to model Japanese cultural heritages by using the modeling-from-reality techniques that make virtual models of real objects through observing the real objects. Due to the size and the circumstance concerning the great Buddha, we have encountered several research issues. For geometric modeling, we have developed a simultaneous registration and parallel volumetric merging algorithms. We have constructed a CG model of the Main Hall of the Great Buddha, widely briefed its existence from the literature survey, and created a video of the Buddha, measured and constructed with our techniques, in the virtual Main Hall created through the literature survey. We have demonstrated the effectiveness of the algorithms as well as the importance of restoring cultural heritage through these techniques.

1 はじめに

我々は現在、鎌倉大仏や奈良大仏、あるいは唐招提寺金堂などの国宝級美術工芸品や建造物、あるいは重要無形文化財保持者の卓越した技といった後世に伝えるべき貴重な文化遺産を、近年のエレクトロニクス技術の急激な発達により利用可能となった3次元高精度距離センサや高分解能テレビカメラ等を用いて観測し、その3次元形状や見え、あるいは動きなどの時系列データをデジタルデータとして半永久的に保存する研究を推進している。現在、このような文化遺産のデジタル保存の重要性が一般に広く認識され、実際に一部ではデジタル化が試みられている。しかしこれらの作業の多くはオペレータの手作業により行われているため、一対象のコンテンツ化に多くの時間と労力、多額の費用が必要となっている。このコンテンツ化作業が自動化できれば、より多くの文化遺産を、短期間に安価にデジタルコンテンツ化することが可能となる。そこで我々は、文化遺産のデジタル化作業の自動化手法を確立することを目指し、

1. 距離センサやテレビカメラからの部分情報を統合して建造物などの文化財の全体的な3次元形状を得る幾何情報取得の研究 [14],[15]
2. 色・艶といった文化財の表面反射特性等を得る光学情報取得の研究 [6],[10]
3. 複合的な見えを生成する文化財建造物や周辺状況の光学条件をモデル化する環境情報取得の研究 [11],[12]
4. 建造物等の文化財に限らず、人間国宝のような匠の技の保存も目指す時系列情報取得の研究 [18]

の4要素について研究を進めている。本報告ではこれまでに我々の行った鎌倉高徳院阿弥陀如来像（鎌倉大仏）のデジタル化を例に、特に幾何モデリングおよび環境モデリングに関してこれまでに開発した様々な手法を紹介する。

2 鎌倉大仏のデジタル化

鎌倉高徳院の鎌倉大仏（図1）は12世紀中頃に造立された全高約12.4mの青銅製の仏像であり、現在国宝に指定されている。造立当初は木製であったが、その後、日本中から集められた鑄造師（いもじ）により青銅製の仏像が新たに造立された。当時はこれほど大きな大仏を一度に鑄造する技術がなかったため、鑄造師らはまず全体を8分割し、下部から上部へ8回にわたり積み重ねて製作したと考えられており、この時にできた大仏表面の接合部

（いばり）は現在でも大仏表面に確認できる。また史料によると、造立当初、大仏表面は金箔で覆われており、1264年までに現在の姿で完成したと伝えられている。



Figure 1: 鎌倉高徳院阿弥陀如来像（鎌倉大仏）

歴史的にみると、日本ではこれまでに7世紀に飛鳥大仏、8世紀に奈良大仏、13世紀に鎌倉大仏の3体の主要な大仏が造立されている。このうち飛鳥大仏は落雷による火災のために大部分が焼失し、奈良大仏も日本国内の内乱のために2度破壊され、その都度新たに鑄造されている。このため飛鳥大仏も奈良大仏も現在では造立当時の原形を留めておらず、鎌倉大仏はこれらのうち造立当時の姿を保つ現存する唯一の大仏像となっている。一方、鎌倉大仏も、造立当初は同時期に建立された大仏殿内部に安置されていたが、1498年の大津波による大仏殿流失以降は屋外に置かれているため、雨や直射日光による腐食、塩害のために表面の損傷が激しい。1960年代の調査では、首部に重大な亀裂が見つかり、関東大震災時に破損した台座部分とともにカーボンファイバーによる補強がなされている。また同地域には相模湾沖を震源とする大規模地震の危険性も指摘されていることから、デジタルコンテンツ化による鎌倉大仏の永久保存は急務であった。鎌倉大仏の形状を計測した例としては、これまでに丸安ら [17] が1950年代の昭和の大修理の際に写真測量の技術を利用し、7枚の表面形状図を作成している。しかしこの手法は2枚の写真画像の対応点を人手により選択し、正確に測定された撮影点の位置情報を用いて対応点までの距離を計算するものであり、測定間隔は25mm（一部12.5mm）であった。

一方、我々はこれまでに実物体の観察に基づき仮想現実モデルを効率的に作成する手法として、(1)メッシュ生成（スキャニング）、(2)位置合わせ（アライメント）、(3)統合（マーキング）からなる”modeling-from-reality (MFR)”の概念を提案している [14],[15]。そこで今回、これまでに開発したMFRの様々な手法を利用して、より詳細な鎌倉大仏のデジタルコンテンツ化を試みた。本プロジェクトと同様に、レーザスキャナにより文化遺産をデジタル化する計画には、Stanford大のミケランジェロ・プロジェクト [8] やIBMのピエタ・プロジェクト [3] などがある。Levoyらは、ミケランジェロによって製作された複数

の彫像をデジタル化した。Bernardini と Rushmeier も文化遺産を測定し、モデルを構築した。しかしこれらの彫像は大仏に比べると全高 5m 程度と比較的小さく、また屋内に据えられており、測定時の日光の影響が少ない。一方、鎌倉大仏の台座を含む高さは約 15m であり、さらに直射日光に日々曝される屋外に据えられている。このため、予備実験を行った結果、これまでに開発した MFR 手法では解決困難な様々な問題点が明らかとなった。そこで我々は今回、新たに

1. 幾何モデル作成のための同時位置合わせ法
2. 幾何モデル作成のための並列マーキング法

を開発し、これにより鎌倉大仏のデジタルコンテンツ化に成功した。以降の章ではこれらの手法を紹介し、幾何データ取得から CG 映像作成までの一連の鎌倉大仏のデジタルコンテンツ化プロセスについて概説する。

3 鎌倉大仏の幾何モデリング

鎌倉大仏の幾何モデリングは、レーザスキャナを用いた大仏のスキャンニング作業と複数の部分的な距離データの位置合わせ作業、そして 1 つの幾何モデルへのマーキング作業からなる。

3.1 スキャンニング

鎌倉大仏のような大型対象物の幾何形状を屋外環境で測定するには、高出力なレンジセンサが必要である。我々の所有する Cyrax 2400(図 2) は、100m までのデータ点を数 mm 精度で測定することが可能であることから、このレーザスキャナを用いて大仏周囲の複数の観測点から大仏距離画像を採取することにした。Cyrax 2400 の諸元を表 1 に示す。なお高出力レーザによる測定は、観光客を避けるために夜間に行われ、また図 3 に示すように大仏の上部を測定するために足場を組み、その上にセンサを設置することで、できる限りオクリューション領域が発生しないように測定を行った。図 4 に得られた距離画像を示す。このようにして約一週間で合計 24 枚の大仏距離画像を取得した。

Table 1: Cyrax 2400 の仕様

Range	100[m]
Accuracy	6 [mm]
Resolution	0.25 [mm] at 50[m]
N. of points	1000×1000



Figure 2: Cyrax 2400

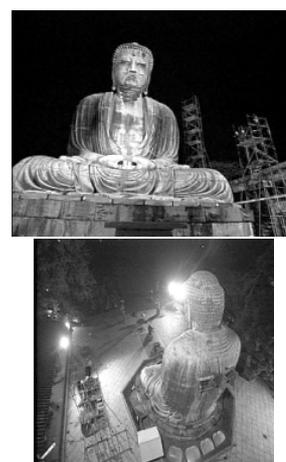


Figure 3: 鎌倉大仏の測定の様子

3.2 同時位置合わせ

複数の距離画像の位置合わせは 3 次元レーザ計測の分野で近年注目されている研究課題の一つである。これまでに様々な手法が提案されているが、それらは大きく次の 3 つの要素で整理することができる。

1. 複数画像の取り扱い手法：逐次的、または同時的
2. 対応成分：特徴量ベース、または点ベース
3. 誤差基準：点と点、または点と面

複数画像の取り扱い手法：複数の距離画像の位置合わせは (a) 逐次的、あるいは (b) 同時的な手法によって実現可能である (a) 逐次的手法とは、それぞれの距離画像に対して他の全ての距離画像との対応を順々に考え、その対応ごとに誤差最小化問題を解くものである [13]。この手法は、それぞれの位置合わせ時には 2 つの距離画像を比較するだけであるから、メモリ消費量、計算量ともに少なく済む。しかしそれぞれの組の位置合わせ時に発生する誤差が蓄積され、最終的には大きな位置合わせ誤



Figure 4: 計測されたレンジデータ

差を生じる可能性がある。一方、(b) 同時位置合わせ法は、全ての距離画像を一度に位置合わせすることで誤差の蓄積を回避する方法である [2]。この方法はまず全ての距離画像間に共通な誤差量を定義し、全ての距離画像を同時に比較して誤差最小化問題を解くことにより、位置合わせ誤差を全ての距離画像の組に均等に分散させることが可能である。

対応成分: 特徴量ベースの方法は Euclidian 変換に不変ないくつかの特徴量を距離画像から抽出し、それら特徴量間の対応問題を解く方法である [7]。もし距離画像から十分な量の特徴量の対応関係が得られれば、位置合わせ計算は closed form で解析的に行うことができる。一方、点ベースの方法は距離画像を構成する 3 次元の点座標を直接用いるもので、点の組、例えば最もユークリッド距離の小さい点の組を動的に更新し、距離画像間の位置合わせのための変換を繰り返し求める方法である。しかし点ベースの方法は通常、特徴ベースの方法と異なり、距離画像の位置合わせ計算の開始時にある程度正確な初期位置を与える必要がある。

誤差基準: 点ベースの方法は、Besl と Kay の ICP アルゴリズム [4] のように、ある基準、例えば点間のユークリッド距離などに従って距離画像間の点の対応を決定する。しかし、この基準は距離画像内の表面の情報をも全く考慮していないため、表面に沿った平行移動を補正する能力が低い。この問題を解決する方法の 1 つは、点と点の対応ではなく、点と対応する面素間のユークリッド距離を用いる方法である [5]。このように面の情報を誤差量へ反映させることで、点と面間の距離を用いる点ベースの方法は局所解に対してロバストになり、収束も早い。しかし点と面素間の距離の計算は、点と点間の距離に比べて計算量が多く、効率よく対応関係を見つけるために視線方向の情報を用いる方法も提案されている [1]。

提案手法: これまでの議論から、我々は今回、1) 同時位置合わせ法を基本とし、2) 対応成分として点ベースの手法を用い、3) 点と点の距離を誤差基準として用いる位置合わせ手法を開発した。これはまず鎌倉大仏は大型の対象であり、1 回に測定される

距離画像は全体の表面領域のごく一部分であることから、誤差の蓄積を避けることができる同時位置合わせ法を採用した。また使用した Cyrax レンジスキャナは高精度であるが、今回の計測では対象物までの距離が大きく、屋外環境や大仏表面の錆など測定条件も良くない。このため測定された距離画像はノイズを含み、それから計算された情報はさらに不正確である。従って直接的に得られた距離データから面素などの二次的な特徴を計算することは避け、データ点そのものを対応成分として用いることにした。さらに誤差基準として点と面の距離を用いた場合、表面法線方向成分の計算が必要であるが、この計算は上述したノイズのために不正確であることから、本位置合わせ手法では点と点の距離を用いることとした。さらに、点と点の距離の計算は点と面に比べて計算量が少なく、大仏像のような大量のデータを扱う場合には有利である。開発したアルゴリズムの概略は以下のようになる。

```

for(each model){
  for(eachmodel point){
    for(each scene){
      scene point = findpointmate(modelpoint);
      dist += computedist (model point, scene point);
    }
  }
  step[model] = computestep(dist);
}
for(each model){
  transform(model,step[model]);
}

```

ここで“model”は注目する距離画像であり、“scene”は他の全ての距離画像である。また“step”は 1 回の繰り返し計算終了後の各距離画像に対する変換である。また最小化する誤差量を注目する距離画像以外の全ての距離画像間の誤差の総和として定義することで、同時位置合わせを実現している。

ローレンツ関数を用いたロバスト推定
我々は computestep 関数でロバスト推定法の一手法である M 推定法を用いた [14]。屋外での測定で得られた大仏形状データなど、ノイズを含むデータを用いる場合、それぞれの繰り返しステップにおいて距離画像の変換量は極めて小さいと仮定し、対応付けに失敗したデータを計算から除外しなければならぬ。採用した M 推定法は、対応点間の距離に応じて誤差量を変化させることで、誤対応の収束計算全体への影響を自動的に減らすことができる。ComputeStep 関数では、次式を最小化する。

$$E(P) = \frac{1}{N} \sum_{i \in N} \rho(z_i(P)) \quad (1)$$

ここで P は、model の位置 t と 4 元数で表される姿勢 q を要素にもつ姿勢パラメータ $P = (t, q)^T$ 、 N は対応点の数、 $z_i(P)$ は i 番目の対応点の 3 次

元ユークリッド距離, ρ は誤差関数である. $E(P)$ を最小化するためには, $E(P)$ の微分を 0 にすればよい.

$$\frac{\partial E(P)}{\partial P} = \sum_{i \in N} \frac{\partial \rho}{\partial z_i} \frac{\partial z_i(P)}{\partial P} = 0 \quad (2)$$

ここで $w(z_i)$ を次式で定義する.

$$w(z_i) = \frac{1}{z_i} \frac{\partial \rho}{\partial z_i} \quad (3)$$

これにより以下の重みつき最小二乗法を得る.

$$\frac{\partial E(P)}{\partial P} = \sum_{i \in N} w(z_i) z_i \frac{\partial z_i(P)}{\partial P} \quad (4)$$

本アルゴリズムでは, この誤差関数を共役勾配法を用いて最小化する. 単純なロバスト推定, 例えば random sample consensus を利用する方法 [16] は, 誤差基準に対して固定された閾値を設定しなければならない. しかしこのような閾値は強い非線形性を有するため, 本アルゴリズムのような繰り返し計算には適していない. そこで本アルゴリズムでは $w(z_i)$ として, 次式で与えられる連続なローレンツ関数を用いることにする.

$$w(z) = \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{z}{\sigma} \right)^2 \right)^{-1} \quad (5)$$

z_i を以下のように定義する

$$z_i(P) = |R(q)x_i + t - y_i| \quad (6)$$

ここで $R(q)$ は P の回転成分, t は並進成分であり, x_i と y_i はそれぞれ model と scene の点である. 回転行列を 4 元数で表すと, z_i の P についての微分は次式で計算できる.

$$\frac{\partial z_i(P)}{\partial P} = \begin{pmatrix} 2(x_i + t - y) \\ 4x_i \times (t - y) \end{pmatrix} \quad (7)$$

位置合わせ結果

提案したアルゴリズムを実装し, 鎌倉大仏の距離画像の位置合わせを行った. 初期位置を求めるために, まずそれぞれの距離画像の組に対して逐次比較的方法でアルゴリズムを実行した. これは実装したアルゴリズムを, 単に各々1つの組だけを用いて変換を計算するように変更するだけで実現できる. このアルゴリズムでは, 視点位置などの付加的な情報を必要としない点と点の誤差を用いるので, ユーザが指示しなくとも比較的良い初期位置合わせを行うことができる. 全ての測定データを用い, 同時位置合わせ法によって得られた最終結果を図5に示す.

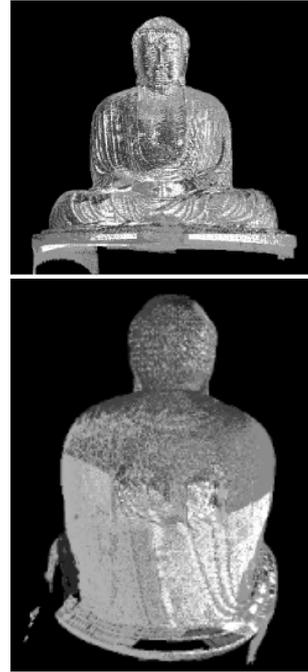


Figure 5: 位置合わせ結果

3.3 並列マーキング

全ての距離画像の位置合わせを行った後, ボリューム表現に基づいた距離画像の統合アルゴリズムにより大仏の表面形状を統合する. この方法は,

1. 空間に全ての距離データ点を内包する十分大きなボクセルを設定する.
2. 注目しているボクセル中心からの全ての距離データ点までの距離を計算し, 最も近い点までの距離をボクセルに保存する. ただしこの距離は各測定毎に規定される面素の方向を考慮し, ボクセル中心が面素の外側にある場合には正, 内側の場合には負の値を与える符号付距離である. またこの際, 選択された近傍点の面素の方向が, 他の選択されなかった近傍点の面素の方向と大きく食い違う場合には, この選択を棄却し新たな最近傍点を探索する (consensus の計算 [14]).
3. 求められた最近傍点までの距離の絶対値が現時点のボクセルの大きさから決定される, あるしきい値以上であれば, そのボクセルを8分割する. しきい値以下であれば, 符号付距離をボクセルに割り当てて終了する.
4. 2,3 を分割されるボクセルがなくなるまで繰り返す.

5. 分割すべきボクセルが無くなったら、隣り合う 8 個のボクセルに marching-cubes algorithm[9] を適用し、ボクセル内に面を貼る。

となる。

さて、これまでに開発したマーキングアルゴリズム [14] を用いて大仏の全距離画像のマーキングを試みたところ、データ量が莫大であるため通常の計算機ではメモリ量の制約から計算が実行できないことがわかった。そこで大量のデータを高速に処理するために、Dual Pentium III 800MHz と 1GB のメモリを有する 8 台の PC (CPU 数は 16) から構成される PC クラスタを構築し、開発したマーキングアルゴリズムを PC クラスタ上で動作するように並列化した。

開発した並列化ソフトウェアは以下の 2 つの手法からなる。

1. 距離データの分散配置と最近傍点の並列探索
2. 分割, 探索処理の並列化

距離データの分散配置と最近傍点の並列探索

手順 2 で、あるボクセルに蓄えられる符号付距離を計算するには、全ての観測で得られた距離画像点とそのボクセルの中心位置との距離を求め、最も近い距離を選択する必要がある。このため各距離画像に大量のデータが含まれ、さらに距離画像自体の数も多い場合には、単一プロセッサで全ての距離情報を保持するのは困難となる。そこで本アルゴリズムでは、これらの距離データ点の情報を複数台の PC に分散し、並列的に符号付距離を計算することにした。具体的には、手順 2 の代わりに、

2. 最近傍点の符号付距離の計算

- (2-1) 各 PC に距離データを分散配置する。
- (2-2) 各 PC に、それぞれが保持しているデータの中から、注目しているボクセル中心からの最近傍となる距離データ点までの距離を求めるように指示を出し、それらを比較して最近傍距離データ点を求める。

となる。図 6 に一例を示す。データ 1,2,3 が PC1,2,3 にそれぞれ保持されている場合、点 x からデータ 1 への符号付距離は PC1 により計算され、同様にデータ 2 までの距離は PC2 により求められる。これらの計算はお互いに独立であるから並列化処理が可能である。しかし計算時間は PC 間で異なるため、符号付距離の計算後に同期を取るために処理を中断する必要がある。

分割, 探索処理の並列化

手順 3 でボクセルを分割した後、生成された新たなボクセルにおける符号付距離の計算やボクセルの再分割などの一連の処理は、同時に分割されたそ

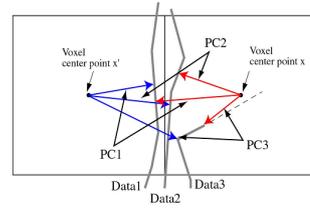


Figure 6: 符号付距離の並列計算

れぞれのボクセルの計算とは無関係に独立に行うことができる。そこで図 7 に示すように、分割されたボクセルのその後処理をそれぞれ別の PC に割り当て、並列処理を行った。この処理では他の PC と同期を取る必要がなく、PC の台数が多いほど少ない計算時間で実行できる。具体的には、手順 3 の代わりに、

3. ボクセルの分割

(3-1) 符号付距離の絶対値が現時点のボクセルの大きさから決定される、あるしきい値以上であれば、そのボクセルを 8 分割する。しきい値以下であれば、符号付距離をボクセルに割り当てて終了する。

(3-1) 分割したボクセルのそれ以降の処理を各 PC に割り振り、それぞれの PC で 2,3 を繰り返す新たなプロセスを実行する。

とした。

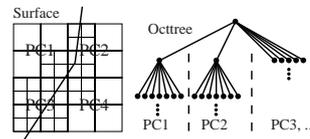


Figure 7: 分割, 探索処理の並列化

並列化手法の統合

符号付距離の計算は「分割, 探索処理の並列化」で分割されたそれぞれのプロセスで非同期的に発生するので、処理効率を高めるにはこの符号付距離の計算を各プロセスが独立して実行する必要がある。そこで、PC クラスタの PC をまずいくつかのグループに分け「分割, 探索処理の並列化」で分割されたプロセスをそれぞれのグループに 1 つずつ割り当てた。また全てのグループにそれぞれ全ての距離データ点を与え、それぞれのグループで独立して「距離データの分散配置と最近傍点の並列探索」を行うことにした。

ここで全体の計算性能は分割されるグループ数(プロセス数)が多くなるほど向上するが、グループ数が多いと各グループに含まれる PC の数が減り、グループ内で全ての距離データ点を分散配置できな

くなる．そこで統合化の手順として，まず距離データ点を分散配置できる最低限の台数を求め，その台数毎に全ての PC をグループ化した．具体的には，まず 8 台の PC を 2 台 (CPU 数は 4) ずつ 4 つのグループに分け，それぞれのグループの 2 台の PC に距離データ点を分散配置した．したがって「分割，探索処理の並列化」で並列に実行されるプロセス数は最大 4 つである．

マーキング結果

これらの手法を実装し，大仏のデジタルモデルを製作した．図 8 に 300 万点と 550 万個の三角形からなる鎌倉大仏の幾何モデルを示す．計算時間は 550 万個の場合で約 59 時間であった．これら一連の作業の結果，鎌倉大仏の表面積は 272 平方メートルと求められたが，この数字はこれまでに大仏表面を覆うために使用された金の量から推定された表面積 (263 平方メートル) に非常に近い値であった．



Figure 8: マーキング結果

4 大仏の環境モデリング

鎌倉大仏は現在は屋外に置かれているが，史料によるとこれまでに少なくとも 3 回，大仏殿が建造されている．最後の大仏殿は 1498 年の大津波によって流失し，それ以降は再建されていない．鎌倉大仏の大仏殿は，13 世紀に建立された奈良東大寺の大仏殿と同様に大仏様と呼ばれる様式で設計されたと考えられる¹．東大寺の大仏殿はその後の内戦で焼失したが，その復元図が大岡實氏により作成されている (図 9 参照)．また兵庫浄土寺の浄土堂も，大仏様を採用した現存する建造物である (図 10 参照)．そこで我々は歴史的建造物の権威である東京工業大学の平井聖名誉教授にご協力いただき，3D

¹東京工業大学平井聖名誉教授の説による

CAD を用いてこれらの設計図を元に 30 万ポリゴンからなる大仏殿の CG データを作成した．そして造立当時の金箔で覆われた大仏を，復元された大仏殿の CG モデルの内部に安置した (図 11 参照)．

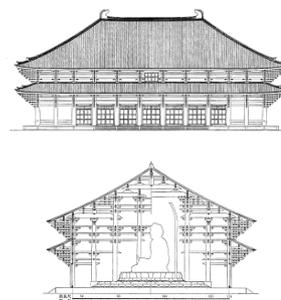


Figure 9: 東大寺大仏殿復原図 (大岡實氏による)

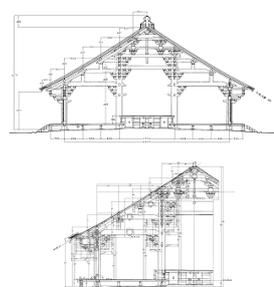


Figure 10: 浄土寺浄土堂

5 結論

本論文では，我々が実施した国宝・鎌倉大仏のデジタルコンテンツ化について概説した．このコンテンツ化作業は次の 3 つの過程からなる．

1. 大仏の幾何モデルの製作
2. 仮想大仏殿の製作
3. 仮想大仏殿と大仏幾何モデルの統合

またコンテンツ化の過程で明らかとなった，大仏のサイズや屋外測定環境に起因する様々な問題を解決するために，

1. 幾何モデル作成のための同時位置合わせ法
2. 幾何モデル作成のための並列マーキング法

を新たに開発し，鎌倉大仏のデジタルコンテンツ化に成功した．我々は今後も，アルゴリズムの更なる改良や新たなセンサの開発を行い，日本国内に残さ



Figure 11: 鎌倉時代の大仏殿と大仏

れた数多くの文化遺産のデジタル化を推進していく予定である。

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。

References

- [1] R. Benjemma and F. Schmitt. Fast global registration of 3D sampled surfaces using a multi-z-buffer technique. In Proc. Int. Conf. On Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, pp 113-120, May 1997.
- [2] R. Bergevin, M. Soucy, H. Gagnon and D. Laurendeau. Towards a general multi-view registration technique. IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., 18(5)540-547, May. 1996.
- [3] F. Bernardini and H. Rushmeier, "The 3D Model Acquisition Pipeline" Eurographics 2000.

- [4] 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, Feb. 1992.
- [5] Y. Chen and G. Medioni. Object modeling by registration of multiple range images. Image and Vision Computing, 10(3):145-155, Apr. 1992.
- [6] Y. Sato, M. D. Wheeler, and K. Ikeuchi, "Object shape and reflectance modeling from observation", Proceedings of ACM SIGGRAPH 97, In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series 1997, ACM SIGGRAPH, pp.379-387, August 1997.
- [7] A. Johnson and M. Hebert. Surface registration by matching oriented points. In Proc. Int. Conf. on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, pp. 121-128, May 1997.
- [8] M. Levoy et. al. The Digital Michelangelo Project. In Proc. SIGGRAPH 00, pp.131-144.
- [9] W.E. Lorensen, W.E. and H.E. Cline. Marching Cubes: a high resolution 3D surface reconstruction algorithm. In Proc. SIGGRAPH96, pp 163-169.
- [10] K.Nishino, Y.Sato and K.Ikeuchi, "Eigen-Texture Method: Appearance Compression based on 3D Model", in Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition '99, vol.1, pp.618-624, Jun., 1999.
- [11] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene," IEEE Trans Visualization and Computer Graphics, Vol. 5, No. 1, pp.1-12, January 1999.
- [12] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Illumination distribution from brightness in shadows: adaptive estimation of illumination distribution with unknown reflectance properties in shadow regions," Proceedings of IEEE ICCV'99, pp.875-882, September 1999.
- [13] G. Turk and M. Levoy. Zippered polygon meshes from range images. In Proc. of SIGGRAPH 94, pp. 311-318, Jul. 1994.
- [14] M. Wheeler, Y. Sato, and K. Ikeuchi, Consensus surfaces for modeling 3D objects from multiple range images, Proc. ICCV pp.917-923, Jan, 1997.
- [15] M. D. Wheeler and Katsushi Ikeuchi, "Sensor Modeling, Probabilistic Hypothesis Generation, and Robust Localization for Object Recognition", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 17, No. 3, March 1995.
- [16] M.A. Fischler and R.C. Bolles, Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, Communications of the ACM, Vol.16, No.24, 1981.
- [17] 丸安, 大島, 薦岡, 津田, 写真測量を利用した三次元の精密測定-鎌倉大仏の測定を例にとって-, 生産研究, Vol.12, No.6, pp.271-275, 1960
- [18] 中澤, 中岡, 池内, 動きのデジタル保存 - 舞踊動作のプリミティブ化 -, 人文科学とコンピュータシンポジウム じんもんこん:-)2001,1-B-(4),2001