

創建期奈良大仏及び大仏殿のデジタル復元

大石 岳史*¹ 増田 智仁*² 倉爪 亮*³ 池内 克史*⁴

Digital Restoration of The Original Great Buddha and Main Hall of Todaiji Temple

Takeshi Oishi*¹ Tomohito Masuda*² Ryo Kurazume*³ and Katsushi Ikeuchi*⁴

Abstract – We digitally restored the original Great Buddha and the main hall of Todaiji temple. Todaiji temple has been destroyed by natural and artificial disasters and rebuilt for a number of times. As a result, the shapes of the current Great Buddha and its main hall are slightly different from the original states. We reconstructed the 3D models of the original Great Buddha and its main hall. The 3D model of the original Great Buddha was reconstructed by morphing the 3D model of the current Great Buddha, which was obtained by laser scanning and Modeling-from-Reality techniques. The 3D model of the original main hall was reconstructed by assembling the partial 3D models of the main hall of Toshodaiji temple. We combined these models and visualized the original state of Todaiji temple by Computer Graphics techniques.

Keywords : 3D shape modeling, cultural heritage, digital archive, digital restoration

1. はじめに

現在の奈良東大寺大仏（奈良大仏：図1）及び大仏殿は、創建当時とは姿かたちが異なっているとされる。東大寺は8世紀に建立されたが、度重なる地震や戦火の被害に遭い、再建や修造が繰返されてきた。その結果、現在と創建期では形状が少なからず変化している。

我々の目的は、この大仏及び大仏殿の創建期の状態を復元し検証する事である。東大寺のように失われた文化財は世界各地に存在し、これらを復元する事は重要と考えられる。特に、考古学や建築学或いは教育の分野において様々な応用が期待できる。

ただし失われた建造物などを現実世界に復元する事は望ましいとは言えない。巨大な建造物を復元するためには、莫大な費用と長い時間が必要である。また、一度建てられた建造物を修正する事は更に困難な作業である。復元が誤りであった場合などは、多くの費用と時間が浪費される事となる。

そこで、近年CGによって失われた文化財を再現する試みが広く行われている[1],[2]。これらの研究では、失われた文化財の3次元モデルをCADによって復元



図1 奈良大仏
Fig.1 Nara Great Buddha

し、VRやARシステムによって臨場感のある再現を可能にしている。

ただし、CGを用いた文化財の復元にもいくつかの問題がある。例えば、再現に用いられる3次元モデルの作成には、高度な専門技術が必要である。一般に3次元CADの扱いは難しく、専門の技術者でも長い時間を掛けてモデルを作成しているのが現状である。また、CADによって作成されたモデルは写実性に欠けるという問題もある。特に、仏像などの複雑な表面形状を持つ物体を、CADによって正確にモデル化する事は難しい。

こういった問題を解決するために、現実物体から3次元モデルを自動生成する（Modeling From Reality）研究が盛んに行われている[3],[4]。これらの研究では、文化遺産をレンジセンサによって計測し、対象の3次元モデルを自動的に生成する手法を提案している。た

*1: 東京大学 生産技術研究所

*2: 東京大学 大学院 情報理工学研究所

*3: 九州大学 大学院 システム情報科学研究院

*4: 東京大学 大学院 情報学環

*1: Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

*2: Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

*3: Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

*4: Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

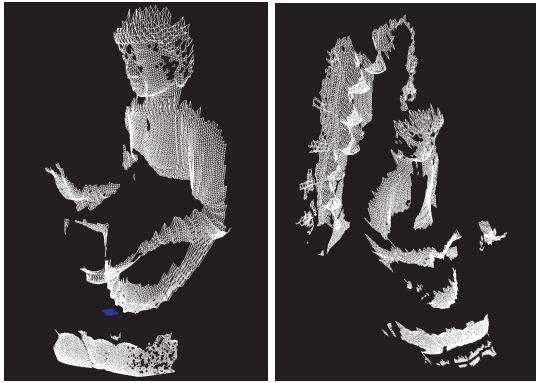


図2 奈良大仏を測定した距離画像
Fig.2 Range images of Nara Great Buddha

だし、このような手法によって得られるのは、現実に存在する物体のモデルだけである。つまり、失われた文化財のモデルを自動生成する事はできない。

そこで、本論文では実物体から得られたモデルを変形或いは組み合わせる事によって、創建期奈良大仏及び大仏殿を復元する事にする。実物体から得られたモデルを利用する事によって、CADの扱いに慣れていない者でも写実的なモデルを生成する事ができると考えられる。

まず、本論文の第2章では、現存の奈良大仏を例として、現実物体の3次元形状モデルを取得する方法について説明する。そして、第3章では創建期奈良大仏の復元について、第4章では大仏殿の復元について説明する。第5章では、生成したモデルを用いて、創建期奈良大仏及び大仏殿の様子をCGによって再現する。また、大仏に施された鍍金について考察を行う。第6章はまとめである。

2. 幾何形状のモデル化

物体の表面形状モデルを取得するためには、(1) 距離画像の取得 (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) という大まかに3つの過程が必要である。これらの処理を経て得られた3次元モデルは、頂点群とそれらの接続関係を示すメッシュモデルとして表される。本章では、現在の奈良大仏を例にして、上記のモデル生成過程についてそれぞれ説明していく。

2.1 距離画像の取得 (スキャニング)

まず、物体の表面形状をレンジセンサを用いて複数方向から測定する。一般に、静止物体の計測には、高い精度を持つレーザレンジセンサが適している。近年、このレーザレンジセンサの性能向上は著しく、近距離 (1m ~ 2m) では誤差が0.1mm以下、また遠距離 (50m ~ 100m) においても数mm程度の誤差で測定が可能となっている。奈良大仏の測定には、Time-of-Flight

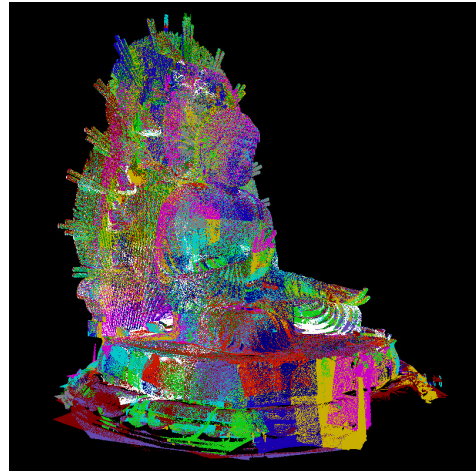


図3 位置合わせ結果
Fig.3 Alignment result

方式の長距離用センサであるCyrax2400 [5] を用いた。通常、レーザレンジセンサによる測定では、物体の一側面の表面形状しか得られない。そのため、物体全体を余すところなくモデル化するためには、異なる方向から複数回の測定を行う必要がある。

奈良大仏の場合には114の異なる方向から測定を行った。図2に、実際に取得した距離画像の一部を示す。レーザレンジセンサから得られるデータは、格子状に並んだ頂点群のみである。そこで、これらのデータは前処理によってメッシュモデルに変換されている。また、不要なデータは予め除去してある。前処理後の全距離画像に含まれる頂点数は36,299,982点、メッシュ数は69,162,112であった。

2.2 位置合わせ (アライメント)

次に、各距離画像間の相対位置姿勢を求める位置合わせ処理を行う。レンジセンサによって得られた複数枚の距離画像は、測定された位置姿勢によってそれぞれ異なる座標系で記述されている。そのため、これらの座標系を統一する位置合わせ処理が必要である。

2枚の距離画像の相対位置姿勢を推定する手法としては、Beslらが提案したIterative Closest Point (ICP) [6] やChenらの手法 [7] が最も広く知られている。これらの手法では、2枚の距離画像に含まれる頂点間の対応点を探索し、対応点間距離が最小となるような相対位置姿勢を求める。そして、この処理を繰り返す事によって最適解を求める。ただし、多数の距離画像を順次位置合わせしていく場合には、誤差の蓄積が問題となる。これを避けるためには、全ての距離画像の相対位置を同時に推定する手法が有効である [8], [9]。

我々は、この同時位置合わせ手法を用いて、奈良大仏の測定データの位置合わせを行った。図3に全ての



図4 統合結果
Fig. 4 Merging result

表1 奈良大仏の創建期及び現在の寸法（部位別抜粋）

部位名	現在 [m]	創建期 [m]
結跏趺坐高	14.98	15.85
御目長	1.02	1.16
御面径	3.20	2.82
御耳長	2.54	2.52
掌長	1.48	1.66
足心長	3.74	3.56
膝厚	2.23	2.07
面長	5.33	4.74
鼻高	0.50	0.47
口長	1.33	1.10

距離画像を位置合わせした結果を示す。図中の異なる色は、異なった位置姿勢から測定された距離画像である事を示している。

2.3 統合（マーキング）

最後に、位置合わせされた複数枚の距離画像を一元化して、統合されたメッシュモデルを生成する。統合手法としては、Zipper法[10]やポリュメトリックな手法[11],[12]がある。この中でも我々は、Wheelerらのコンセンサスサーフェスを用いている。ポリュメトリックな手法では、複数の距離画像を或る一つのボクセル空間内に投影し、陰関数表現する事で統合を行う。各ボクセルの値は、それぞれ距離画像表面までの符号付距離によって表される。Wheelerらの手法では、符号付距離を計算する際に、表面法線のコンセンサスを考慮する事によって、効果的に外れ値の除去を行っている。ただし、コンセンサスを求める計算は計算量が多いため、多数の距離画像を扱うには適していない。そこで、我々はPCクラスタによる並列手法[13]を用いた。

図4に統合によって得られた奈良大仏の3次元モデルを示す。統合処理によって得られたポリュメデー



図5 現在の大仏の3次元モデル
Fig. 5 3D model of current Great Buddha



図6 創建期大仏の3次元モデル
Fig. 6 3D model of original Great Buddha

タは、マーキングキューブ法[14]によってメッシュデータに変換されている。このモデルには1,560,000の頂点と3,000,000の三角パッチが含まれている。

3. 創建期奈良大仏の復元

本章では、創建期奈良大仏の3次元モデルの復元について説明する。前述のように、度重なる修造によって現在の大仏は創建当時と姿かたちが異なっている。そこで、創建当時の奈良大仏の3次元モデルを復元する。

復元は、現在の奈良大仏から取得したモデルを変形する事によって行う。前述のようにCADによって大仏モデルを作成するのは非常に困難である。そこで、現在の大仏から得られたモデルを利用する事にする。創建期の大仏の絵画資料はほとんど残されていないが、寸法を記した文献は多く存在する。これらの文献値を基にして現大仏のモデルを変形させ、創建期奈良大仏モデルの復元を行う。

3.1 創建期及び現在の大仏の寸法比較

創建期大仏の寸法は、複数の文献に記されている値の中から選択して用いた。創建期大仏の寸法は数多くの文献中に記されている。しかし、値は文献によって異なっている場合がある。そこで、いくつかの文献の

値を比較し、正しいと思われるものを選んで用いる事にした。「延暦寺僧録文」と「大仏殿碑文」に記されている値を参考にして、創建期の大仏の図面を推定復元した研究が報告されている [15]。そこで、本研究でもこれら二つの文献に記述された値を用いる事にした。ただし、この二つの文献中でも異なった値が記されている場合がある。そこで、「七大寺日記」や「護国寺本緒寺録起集」なども参考にして、最も記述が多い値を用いた。

現大仏の 3 次元モデルを変形するに当たって、創建期と現在の大仏の寸法を比較する。表 1 に、選択した創建期大仏の寸法と現在の大仏の寸法の一部を示す。文献に残されている創建期の寸法の単位は尺で記述されているため、これを天平尺であるとみなしてメートル法に換算してある (1 尺 = 0.2964 メートル)。また、現在の寸法とは公称されている測定値である。この表から、像高などが少なからず異なっている事が見て取れる。

3.2 創建期奈良大仏のモデル作成

モデルの変形は (1) 全体、(2) 細部の 2 段階で処理を行った。まず、結跏趺坐高や御面長などの全体的な寸法を変化させた。これらの部位は単純に拡大縮小を行った。そして次に、目長や鼻の高さなど細かな部分の頂点を移動し変形させていった。このとき、文献に記された寸法と各部位の対応付けは [15] で作成された復元図を参考にした。ただし、眉長など寸法に明らかな矛盾がある部分には訂正を加えつつ造作を変えていった。変形処理は我々が作製したソフトウェアを用いて行った。

このようにして作成した創建期奈良大仏の 3 次元モデルを図 6 に示す。また、比較のために現在の奈良大仏のモデルも示す (図 5)。見た目にも、創建期と現在の大仏の形状が大きく異なっている事が分かる。創建期大仏の方が、現在の大仏より像高が高く細面である。

4. 大仏殿の復元

次に、創建期東大寺大仏殿の 3 次元モデルを復元する。2 度の戦火によって焼失した大仏殿は、12 世紀と 18 世紀に再建された。創建期大仏殿の建築様式は天平様式であったが、12 世紀の再建時には、宋から伝えられた天竺様が用いられた。また、18 世紀の再建時にも 12 世紀と同様に天竺様が用いられている。つまり、現在と創建期では建築様式が異なっている。創建当時の建物の様子は、柱や間口の寸法などがいくつかの文献に記されている。しかし図面自体は残されていないため、創建期大仏殿に対しては様々な推定が存在する。またこれらの真偽を確かめる事は難しい。そこで、歴史的建築の専門家である東京大学大学院工学系



図 7 推定模型

Fig. 7 Presumed miniature

研究科、藤井恵介博士に助言を頂いた。藤井博士によれば、

1. 大仏殿内に安置されている復元模型は信頼できる推定の一つである。
2. 建築様式は同年代の建築である唐招提寺金堂を参考にするのがよい。

という事であった。

そこで、我々は以下に示すような方針で 3 次元モデルの復元を行う事にした。

1. 全体の形状は推定復元模型から取得した 3 次元モデルを参考にする。
2. 細部の形状には唐招提寺金堂の部分モデルを用いる。

復元模型は、天沼俊一博士の指導のもとで博覧会のために造られた、創建期大仏殿の推定復元模型である。現在、この模型は東大寺大仏殿内部に安置されている (図 7)。そこで、この模型の 3 次元モデルを取得し、全体の図面として用いる事にした。また、唐招提寺金堂は東大寺と同時代に建立され、当時の建築様式をほぼそのまま現在に伝えている。そこで、唐招提寺金堂の部分モデル取得し、これらを組み合わせる事によって、創建期東大寺大仏殿を復元する事にした。

4.1 復元模型の 3 次元モデルの取得

まず、推定復元模型の 3 次元モデルを取得した。測定には、パルステック社製のステレオ式レーザレンジセンサ TDS-130L を使用した。TDS-130L の性能はスキャン深度 3.5m ~ 10m で分解能は 0.5mm ~ 5mm 程度である。測定解像度は 400x280 で、複数の異なる方向から 12 枚の距離画像を取得した。これらの距離画像から得られた 3 次元モデルを図 8 に示す。また、同図にこのモデルの軒下部分を拡大した画像を示す。この図から明らかなように、模型の細部の形状はほとんどモデル化できていない。しかし、柱や組物の位置を知るための図面として使用するには十分である。この模型は実寸の 50 分の 1 の大きさで造られている。そ

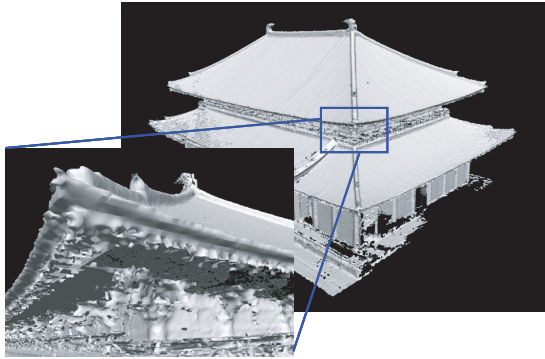


図 8 推定模型の 3 次元モデル
Fig. 8 3D model of presumed miniature

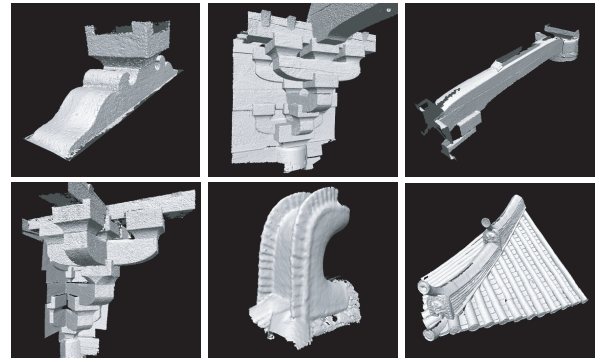


図 10 唐招提寺金堂の部分モデル
Fig. 10 Partial 3D models of Toshodaiji Temple



図 9 唐招提寺金堂の測定部位
Fig. 9 Measured Parts of Toshodaiji Temple

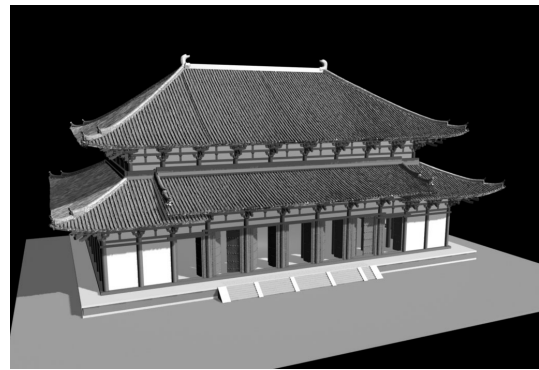


図 11 創建期大仏殿の 3 次元モデル
Fig. 11 3D model of original main hall of Toudaiji Temple

ここで、得られたモデルを 50 倍に拡大して使用した。

4.2 唐招提寺金堂の部分モデル取得

次に、細部の復元に必要となる唐招提寺金堂の部位モデルを取得した。まず、建物全体をいくつかの部位に分けて、主要な部位を選択して 20 箇所を測定を行った。図 9 に測定対象とした主要部位の一部を示す。測定に用いたレンジセンサは Cyrax2400 及びパルスステック社製の TDS-1500 と TDS-3100 である。TDS-1500 の性能はスキャン深度 0.5m ~ 1m で分解能 0.23mm ~ 0.83mm である。また、TDS-3100 はスキャン深度 1.0m ~ 3m で分解能は 0.83mm ~ 6.7mm である。屋根や柱、扉などの大きな部位は Cyrax2400 を用いて測定を行った。また、組物や軒先、風鐸など近距離でしか測定できないものは TDS-1500 と TDS-3100 を用いた。この測定によって計 780 枚の距離画像を取得した。図 10 に、これらの距離画像から得られた 3 次元モデルの一部を示す。

4.3 創建期大仏殿の復元

最後に、得られた部位モデルを組み合わせる事によって創建期大仏殿モデルの復元を行った。各部位モデルは、予め編集しやすいようにメッシュ数を減少させてある [16]。また、唐招提寺金堂と東大寺大仏殿は規模が異なるため、取得した各部位モデルを拡大する必要が

あった。模型モデルと部位モデルの寸法を比較すると、ほぼ全ての部位は 2.3 倍にすれば良いことが分かった。正確には、組物の肘木の大きさは軒の深さによって寸法を変える必要があり、斗の大きさも柱の太さや屋根の重さによって異なってくる。しかし、本研究は見えの生成が主な目的であるため、各部位を単純拡大するだけに留めた。ただし、扉などは高さや幅の縮尺が異なるため、必要に応じて調整を行った。また、壁や一部の柱などの単純な部位は、直方体や円筒のモデルを組み合わせた。このとき、柱の太さは七大寺巡禮私記の本口三尺八寸、末口三尺という値に合わせた [17]。図 11 に、完成した創建期大仏殿の 3 次元モデルを示す。

5. 創建期東大寺の再現及び鍍金に関する考察

本章では、復元したモデルを組合せて、創建期奈良大仏及び大仏殿の様子を CG によって再現する。また、復元モデルの表面積から、大仏に施された鍍金について考察する。

5.1 創建期奈良大仏及び大仏殿の再現

復元した奈良大仏及び大仏殿を用いて、CG による創建当時の様子の再現を行った。柱や扉などの色は丹土色とした。また、鴟尾と大仏本尊の表面には鍍金が施

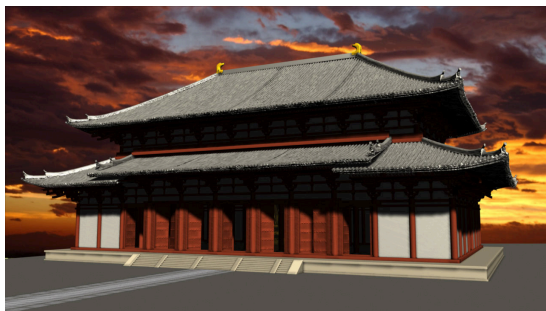


図 12 創建期大仏殿の再現 CG
Fig. 12 Original main hall of Todaiji Temple(CG)



図 13 創建期奈良大仏の再現 CG
Fig. 13 Original Nara Great Buddha in the original main hall of Todaiji Temple(CG)

されていたものとして、金色を用いた。壁や屋根などの色は適度に調整した。レンダリングには Alias® 社の MAYA® を用いた。光源は任意に配置し、陰影付けは Blinn シェーディング及びシャドウマップによって行った。

図 12 は大仏殿を遠景から眺めたものである。創建期の大仏殿は現在と比べると間口が大きく重厚な構えであった事が分かる。また、柱の太さは唐招提寺金堂に対して約 1.5 倍であり、建物の規模に比べるとかなり細い事が分かった。

大仏殿内に安置された創建期奈良大仏の様子を図 13 に示す。この図からは、鍍金を施された当時の大仏の荘厳さを窺い知る事ができる。また、大仏の表面全体に鍍金を施すために、非常に多くの金がいれた事は想像に難くない。

表 2 鍍金の量と厚さ(大仏本体)

文献名	鍍金の量 [kg]	鍍金の厚さ [μm]
大佛殿碑文	227.0 (大両)	19.69
	75.67 (小両)	6.563
延暦僧録文	175.6 (大両)	15.23
	58.54 (小両)	5.077

5.2 大仏に施された鍍金に関して

ここで、実際に奈良大仏の表面に施された鍍金について考察してみる。用いられた金の量は、当時の社会の状況を知る上でも重要な要素の一つである。大佛殿碑文によれば、鍍金に用いられた金の量は 10446 両とされている。また、延暦僧録文によれば大仏本体に用いられた金の量は 4187 両である。ただし、これらの記述では単位が大両であるか、小両であるかは明らかにされていない。この問題に対しては、延暦僧録文に記述された表面積と鍍金の厚さから、小両換算すべきであるという結果が得られている [18]。

しかし、延暦僧録文に記述された大仏の表面積には疑問が残る。この値をメートル法に換算すると $506m^2$ であり、本研究で生成したモデルから求めた表面積は $597m^2$ である。これらの値には誤差と言えない程の大きな差異がある。また、このような複雑な物体の表面積を求める事は困難であったと考えられる。そこで、復元モデルから求めた表面積を用いて鍍金の厚さを求め再検証を行う。

鍍金の厚さに関しては大仏本体のみについて考える。取得したモデルから計算した蓮華座の表面積は $556m^2$ であり、大仏本体の表面積に対する比は 0.931 である。鍍金の厚さは大仏本体も蓮華座も同じものとする、大佛殿碑文から得られる大仏本体に用いられた鍍金の量は 5412 両である。

大仏本体の表面積と用いられた金の量から鍍金の厚さを求める。ここで、大 1 両 = $41.94g$ 、小 1 両 = $13.98g$ とした。また、金の密度は $19300kg/m^3$ とした。表 2 に鍍金厚さを計算した結果を示す。大仏の鍍金に用いられたアマルガム法では、鍍金の厚さは $1\mu m \sim 10\mu m$ とされている [18]。これを考慮すると、大佛殿碑文及び延暦僧録文に記された鍍金の量は、やはり小両換算である事が分かる。

また、延暦僧録文に記述された大仏の表面積を用いた場合、鍍金の厚さは $6.0\mu m$ と少し厚いが [18]、復元モデルから求めた表面積を用いた場合は $5.0\mu m$ という、より尤もらしい値になる。つまり、復元モデルから得られた表面積は、延暦僧録文に記述された表面積より正しいと考える事ができる。

6. おわりに

本論文では現存の文化遺産から取得した3次元モデルを用いて、創建期奈良大仏及び大仏殿の3次元モデルの復元を行った。創建期奈良大仏のモデルは、現在の奈良大仏のモデルを文献値に基づいて変形させることによって作成した。また大仏殿の復元には、同時代に建立された唐招提寺金堂の部位モデルを用いた。このとき、全体の形状は、推定復元モデルから取得したモデルを参考にした。また、これらの復元モデルを組合せて、創建期奈良大仏及び大仏殿の様子をCGによって再現した。

この復元結果から幾つかの事柄が明らかとなった。まず創建期奈良大仏の顔は現在より細面であった事が分かった。この事から、仏像の顔、或いは人々の顔に対する価値観が時代とともにどのように変遷するかという点に関して、一つの解釈を与える事ができると考えられる。また、創建期大仏殿の柱は建物の規模に対して比較的細い事なども分かった。この事は当時の建築様式や、文献の大仏殿に関する記述の信頼性を検証する上で大きな役割を持つものと考えられる。大仏本体の鍍金に用いられた金の量は文献中に小両で記されており、 $58.54kg$ 程度である事を再確認した。また大仏に施された鍍金の厚さが $5\mu m$ 程度であった事も明らかとなった。大仏殿碑文と延暦僧録文を比較した場合、延暦僧録文に記されている値の方が信頼性が高い事も確認する事ができた。

今後はモデル編集ソフトウェアの改良を行う必要がある。本研究では復元モデルの生成には我々が作製したソフトウェアを使用した。このソフトウェアでは機能不足の面もあり、モデル復元には2ヶ月程度と多くの作業時間が必要であった。また、多量のデータを扱う事が困難であったためデータ量を大幅に削減している。そのためモデルの解像度が低くなっている点も問題である。今後は多量のデータを容易に扱えるソフトウェアが必要である。

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構戦略的基礎研究事業(CREST)高度メディア社会の生活情報技術、又他の一部は、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」の支援を受けて行われました。東大寺大仏殿復元にあたって多くの貴重な助言を頂いた東京大学大学院工学系研究科の藤井恵介助教授、藤井研究室の方々、特に計測を手伝って頂いた松本祐介氏に厚く感謝申し上げます。また計測にご協力頂いた奈良東大寺、唐招提寺の方々及び、奈良文化財研究所の方々に感謝の意を申し上げます。

参考文献

- [1] 安藤真, 吉田和弘, 谷川智洋, 王燕康, 山下淳, 葛岡英明, 廣瀬通孝: スケーラブル VR システムを用いた教育用コンテンツの試作 - マヤ文明コパン遺跡における歴史教育 -, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 1, pp.65-74, 2003.
- [2] R. Tenmoku, Y. Nakazato, A. Anabuki, M. Kanbara, and N. Yokoya: Nara palace site navigator: Device-independent human navigation using a networked shared database, Proc.10th Int. Conf. on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004), pp. 1234-1242, Nov. 2004.
- [3] M. Levoy: The Digital Michelangelo Project, Proc. SIGGRAPH 2000, pp. 131-144, 2000.
- [4] K. Ikeuchi: Modeling from Reality, Proc. Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM'01), 2001.
- [5] <http://www.cyra.com>.
- [6] P. Besl and N. McKay: A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE Trans. PAMI, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256, February 1992.
- [7] Y. Chen and G. Medioni: Object modelling by registration of multiple range images, Image and Vision Computing, Vol. 10, No. 3, pp. 145-155, 1992.
- [8] P.J. Neugebauer: Reconstruction of Real-World Objects via Simultaneous Registration and Robust Combination of Multiple Range Images. International Journal of Shape Modeling, 3(1&2):71-90, Mar 1997.
- [9] 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.
- [10] G. Turk and M. Levoy: Zippered polygon meshes from range images. In Proceedings of SIGGRAPH'94, pages 311-318, July 1994.
- [11] B. Curless and M. Levoy: A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images, Proc. SIGGRAPH'96, ACM, pp. 303-312, 1996.
- [12] M. Wheeler, Y. Sato and K. Ikeuchi: Consensus surfaces for modeling 3D objects from multiple range images, Proc. 6th Int. Conf. Comp. Vision, pp. 917-924, 1998.
- [13] R. Sagawa and K. Nishino and M.D. Wheeler and K. Ikeuchi: Parallel Processing of Range Data Merging Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol.1, pp.577-583, 2001.
- [14] W. Lorensen and H. Cline: Marching cubes: a high resolution 3d surface construction algorithm. In Proc. SIGGRAPH'87, pp. 163-170, ACM, 1987.
- [15] 長谷川誠: 創建期東大寺大仏の比例的復元, 美術工芸研究室関係調査研究, 奈良国立文化財研究所年報, 1971.
- [16] M. Garland and P. Heckbert: Surface Simplification Using Quadric Error Metrics, In Proc. SIGGRAPH'97, ACM, 1997.
- [17] 福山敏男: 東大寺大佛殿の第一期形態, 佛教藝術 15, 佛教藝術学会(編), pp.14-34, 毎日新聞社, 東京, 1953.
- [18] 小西正彦: 創建時東大寺大佛の鍍金に使われた金と水銀の量について, 日本計量史学会誌計量史研究, Vol. 24, No.2, (No. 16), 2002.

[著者紹介]

大石 岳史



1999年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。2002年東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻修士課程修了。2005年東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻博士課程修了。現在、東京大学生産技術研究所特任助手。実物体の形状モデリングの研究に従事。博士（学際情報学）。

増田 智仁



2003年東京大学大学院情報理工学系研究科修士課程終了。同年同大学院博士課程入学。現在に至る。物体の三次元形状の表現・認識・復元に関する研究、及びこれを応用した文化財の解析に関する研究に従事。

倉爪 亮



1967年2月4日生。1991年東京工業大学機械物理工学専攻修士課程修了。同年（株）富士通研究所入社。1995年同学機械宇宙学科助手。2000年スタンフォード大客員研究員。同年東京大学生産技術研究所博士研究員。2002年より九州大学システム情報科学研究院助教授。現在に至る。群ロボット、歩行機械、レーザ計測、医用ロボットの研究に従事。博士（工学）。

池内 克史（正会員）



1973年京都大学工学部機械工学科卒業。1978年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。MIT人工知能研究所、電総研、CMU 計算機科学科を経て、1996年より東京大学生産技術研究所教授。2000年より東京大学大学院情報学環教授兼任。人間の視覚機能、明るさ解析、物体認識、人間行動観察学習ロボット、高度交通システムなどの研究に従事。工学博士。D.Marr 賞（ICCV:1990年）、IEEE 優秀論文賞（CVPR:1991年）、最多引用論文賞（AI Journal:1992年）Fu 記念優秀論文賞（IEEE Trans. R&A, 1998年）等受賞。IEEE Distinguished Lecturer（SPS 2000 - 2001, CS 2004 - 2006）、IEEE Fellow。