〔特別講演Ⅱ〕

観察に基づく文化遺産のデジタル保存

池内克史（東京大学） 中澤篤志（科学技術振興事業団／東京大学）

Digital Archive of Cultural Heritage through Observation

Katsushi Ikeuchi Atsushi Nakazawa

ABSTRACT

This paper overviews our project to develop techniques for modeling and conservation of cultural heritage through observation. Main research area of this project includes: reconstruction of geometric model, photometric model through observation, automatic creation of virtual and mixed reality model, and modeling and conservation of prominent skill of living national treasure. On top of this component development, we have been developing a digital archive of heritage objects.

Keywords:geometric modeling, photometric modeling, digital archive, Buddha stature

1. はじめに

我々は、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歴史的建造物や、人間国宝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技術を開発している[1, 2]。

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、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、

- 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
- 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
- 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

- 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

の4要素について研究を進めており、そのためのセンサ系、処理アルゴリズムの開発、およびデジタルコンテンツのパッケージ化に関する研究を行っている。

このプロジェクトの成果により文化遺産のコンテンツ化を進めることで、

- 紛失、焼失、後継者難による断絶といった危険にさらされている文化遺産の高度メディア空間での永久保存
- 一部失われた文化遺産の高度メディア空間でのデジタル的修復
- 多くにユーザが、その自宅を離れることなく、文化遺産に日常的に接することができ、情報弱者の軽減につながり、社会全体に高度な満足が与えられる

といった社会的に大きな効果が期待される。

研究題目としては、大きく幾何情報取得、光学情報取得、環境情報取得、時系列情報取得に分類できる。以下では、おもに前3者について、現在までの研究成果を概要する。さらに、これらの手法により得られたメディアコンテンツについても述べる。

2. 幾何情報取得

文化財を各種の方向から観察した場合、これらの情報をつなぎ合わせて、1つの統合的なデータとすることが必要である。このため、Fig.1 に示すように、距離点群のメッシュ化、メッシュ間の位置合わせ、統合という3つのステップが必要になる。ここでは、位置合わせと統合に関しての新しいアルゴリズムについて説明する。

Fig. 1 Three Steps in Geometric Modeling

2.1 位置合わせ

位置合わせ問題とは、複数枚の距離データが与えられたとき、これから各データの視点の相対位置関係を求めるものである。この位置合わせ問題に関して、これまで ICP をはじめとする各種の手法が提案されてきた。しかしこれらは、2-3 枚の距離データといった比較的小規模のデータを対象としていた。我々が対象とする文化財では、時には 100 枚を超えるデータを扱う必要がある。このため、アルゴリズムは高速である必要がある。さらに、通常の ICP ではペアワイズに位置合わせを行うため、多くの距離画像をつなぎ合わせてゆくためには、位置合わせ操作を繰り返すを行う必要がある。このため、多数のデータを処理するため操作繰り返して行くと、徐々に誤差が蓄積するという問題があった。これらの問題を解決するために、我々は、高速に全ての距離画像を同時に位置合わせするアルゴリズムを開発した[3]。

本手法では、距離情報間の対応として平行移動などにもロバストな点とメッシュ上の対応を用いる。また、2枚の距離画像を順次位置合わせする手法では誤差の蓄積がおこるため複数枚同時位置合わせも基本的な戦略として用いている。さらに、高速性のため、通常的位置合わせ手法で多くの時間を必要とする対応点探索に、少ない計算量で位置合わせする事が可能するアルゴリズムを開発した。この対応点探索に、OpenGL によるハードウェアアクセラレーションを用いることができるように改善した。この結果、既存手法に比して、約 1000 倍の改善が見られた。

2.2 距離情報の統合

レンジセンサによって取得した距離データを統合して観測対象全体のモデルを生成する必要がある。上記の位置合わせ結果より得られるのは、座標系が一致したデータ点の集合となる。これらデータ点の集合から面表現を得る必要がある。我々（佐川、山崎、西野、池内）は体積表現法を用いて距離画像を統合する手法を開発している[4]。この体積表現法は、空間をセルに分割する。各セル内で、近傍に存在する点の状況から面がはれた場合のその面からこのセルまでの推定距離を計算し、符号付き距離場を得る。この符号付き距離場の中で、ゼロ点を結んでゆくことにより面表現を得る。

文化遺産には巨大でかつ形状が複雑なものがある。さらにたとえば奈良の大仏の計測では、100枚といったように精密に測定するため、巨大なデータ量を扱う必要がある。このため、

1. PC クラスタを用いた並列計算、
2. 適応的な解像度による統合処理、

という2つのアプローチによる手法を開発し、それらのモデルを生成を可能にした。Fig.2 は得られた鎌倉大仏の面表現であり、500万ポリゴンからなっている。これを得るのに16台の並列ペンティアム4のPCクラスターで20分程度であった。

Fig. 2 Merged Result

3. 光学情報取得

幾何形状だけでは、メディアコンテンツ表現としては不十分である。色とか艶といった見え（光学）の情報が必要であることは結うまでもない。従来の手法は、幾何表現の上に一枚のテクスチャーを張るだけのものが多かった。しかし、美術品等は、見る方向に応じて、ハイライトの位置が変わり、微妙に色彩が変化する。この見えの変化こそが、美術品の命であり、これを表現することはメディアコンテンツとしては必須である。このため、従来より、モデルベース法[5]や固有テクスチャー法[6]といったテクスチャー表現法を開発してきた。ここでは、とくに、偏光を用いたモデルベース法について概説する[7]。

3.1 偏光を用いた成分分離による手法

物体の反射光は、ハイライトと呼ばれる表面反射成分と地の色と呼ばれる内部反射成分からなるものが多い。こういった物体表面の解析のため、物体の反射光を内部反射成分と表面反射成分に分離し、各成分ごとに反射パラメータを推定する手法を開発している。以前から、我々のグループでは、表面反射成分と内部反射成分の色の違いからこれを行う手法を開発してきた。しかし、文化財の中には、白色光源下での白い能面のように、光源色とおなじような色をもったものも多々存在する。我々（高橋、佐藤、池内）は、こういった物体でも分離が簡単に扱えるように、偏光を用いて反射成分分離を行い、各反射成分ごとに各反射パラメータを推定する手法を開発した。

本手法は、光源として直線偏光を用いる。直線偏光を照射されると、物体の表面反射光は偏光したままであるのに対し、内部反射光は物体内部での散乱により偏光状態がくずれてしまう。すなわち非偏光となる。この現象を利用して、CCDカメラの前に偏光板をおいて、それを回転させながら物体の撮影を行う。偏光成分の強度が表面反射成分の強さ、非偏光部分の強度が内部反射成分のこれとなる。この手法を用いて表面反射光からなる画像と内部反射光からなる画像を得ることができる。これら分離された反射成分画像を用いて各反射成分ごとに反射パラメータの推定を行い、推定されたパラメータからFig.3 に示す仮想画像を生成した。

Fig. 3 Modeling based on Polarization

3.2 偏光度に基づく透明物体解析

美術品の中には、ペルシャガラスや宝石といった透明な表面を持つものも多い。レーザー光等はこの表面を透過するため、これら透明物体の表面形状を測定する光学的な手法は存在しない。我々（宮崎、斎藤、佐藤、池内）は、物体の偏光特性の解析に基づく、透明物体の形状を計測する手法を開発している [7]。透明物体の表面にも表面反射成分は存在する。透明物体の表面でも、表面反射成分は部分偏光する。さらに、この偏光度合いは、面の傾きに依存関係がある。本手法は、この偏光度合いに基づき、各部分での面の傾きさらに

は、形状を測定する。

偏光の度合いを表す偏光度の値は、上にも述べたように入射角に依存する。ハイライトは入射角と反射角が等しい。そこで、偏光度を測定すれば反射角、すなわち物体表面の法線が視線となす角が測定できる。しかし、偏光度と法線の関係は1対1にはなっておらず、偏光解析を基に透明物体の形状を計測しようとする2つの法線の候補が現れてしまう。正しい表面法線を得るためには、この曖昧性の問題を解決しなければならない。

この問題を解決するために、物体を微小な角度だけ回転させる事によりこの問題を解決した。物体のデータとこれを少し傾けて取得した2組の偏光度を取得し、これらを比較する事により曖昧性を除去する。その際、物体表面上の同一点で、2つのデータを比較する必要がある。微分幾何学的な解析を行い、物体表面上の幾何学的不変量を導き、これに基に物体表面上の同一点を探し出した。これにより見つけられた対応する2点で偏光度の値を比較する。この比較から曖昧性を除去し、安定に透明物体の表面形状を測定する手法を開発した。

実際の透明物体に本手法を適用し、透明物体の表面形状を計測した結果をFig.4に示した。左がこの物体の写真であり、右が得られた物体の表面形状である。

Fig. 4 Shape of a Transparent Object

4. 環境情報取得

文化財を取り巻く環境のモデル化も重要な課題である。本年度は、画像中の情報を用いて光源方向を推定する手法や光源スペクトルの解析法を解析した。

光源方向推定に関して、従来より、影を用いてこれを行う手法を開発してきた [8, 9]。画像のある点での明るさは、特定の方向の光源の強さを未知数、隠蔽関係を既知のパラメータとする線形方程式で表現できる。画像の各点でこの隠蔽関係が異なるため、画像中から線形独立な1次線形連立方程式が立てられる。既知形状物体の周辺の明るさに基づいて、線形方程式を解くことで、光源環境を得ることができる。以前の手法では、空間を等間隔で分割していたために、方程式の未知数が

非常に多く、解くのに長時間かかっていた。これをアダプティブに行うことで、効率の良いアルゴリズムを得ることができた。

一般に、光源方向、反射率、形状と3つの未知数が考えられる。上記の手法はこのうち光源方向のみを未知数としたものであった。本年度、我々（西野、池内）は、比較的少ない枚数の画像から、画像中のハイライトの形状から、光源状況と物体表面反射特性を同時に推定する手法を開発した[10]。従来の inverse rendering の手法とは異なり、光源状況、反射特性、テクスチャの全てを未知とし、それらを推定するのが特徴である。Fig.5に示す結果が得られた。

Fig.5 Simultaneous determination of light source direction and surface roughness

5. デジタルコンテンツ

上記で説明してきた手法により、デジタルコンテンツを作成してきた。Table 1 に、これまでにコンテンツ化作業を行った文化遺産の一覧を示す。

Table 1 Digital Contents Acquired

醍醐寺五重塔	1999 年 5 月
横浜司教館	1999 年 5 月
高徳院国宝阿弥陀仏像（鎌倉大仏）	1999 年 10 月
東大寺国宝盧舎那仏坐像（奈良大仏）	2000 年 10 月
生産技術研究所六本木校舎	2001 年 4 月
奈良東大寺大仏殿	2001 年 5 月
奈良明日香村 石舞台古墳	2001 年 5 月
奈良明日香村 酒船石遺跡	2001 年 5 月
奈良唐招提寺金堂	2001 年 7 月
東京大学駒場寮	2001 年 9 月
中国龍門石窟寶冠如來坐像	2001 年 11 月
大分県臼杵市古園磨崖仏	2001 年 12 月
奈良明日香村 飛鳥大仏	2002 年 2 月

6. まとめ

本論文では、文化財のデジタル化プロジェクトの成果について概要説明した。技術開発項目としては、幾何情報、光学情報、環境情報、時系列情報の収集手法の開発である。さらにこれらの手法を用いたデジタルコンテンツの生成も行った。

今後は、幾何情報に関しては、移動距離センサーの開発やロバストな形状生成法の開発

光学・環境情報に関しては、太陽光の影響の除去法、時系列情報に関しては、ロバストな動きの実演を目指している。デジタルコンテンツに関しては、タイのスコタイ遺跡やカンボジアのアンコールワット遺跡など海外の遺跡にも目を向けたいと考えている。

参考文献

- [1] K. Ikeuchi and Y. Sato, Modeling from reality, Kluwer Academic, Nov 2001.
- [2] 池内 克史 他 「The Great Buddha Project -大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化」日本バーチャルリアリティー学会 論文誌, 7(1):pp. 103-113, 2002. 1
- [3] K. Nishino and K. Ikeuchi, "Robust Simultaneous Registration of Multiple Range Images," Proc. Fifth Asian Conf. Computer Vision, Jan., 2002.
- [4] R. Sagawa, et. al., "Parallel Processing of Range Data Merging", IROS, 2001.
- [5] Y. Sato, et. al., "Object shape and reflectance modeling from observation", Proc. SIGGRAPH 97, pp.379-387.
- [6] K. Nishino, Y. Sato and K. Ikeuchi "Eigen-Texture Method" IEEE Trans. PAMI 23(11): 1257-1265, 2001.
- [6] 高橋 徹 他「偏光による反射成分の分離および反射パラメータの決定」情報処理学会CVIM研究報告 2000-CVIM-124.
- [7] D. Miyazaki, et. al., "Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degrees in visible and infrared wavelengths,"JOSA A 19 (4):687-694, 2002.
- [8] 佐藤 いまり 他 「物体の陰影に基づく光源環境の推定」, 情報処理学会論文誌, 41(SIG 10):31-40, 2000.
- [9] I. Sato, et. al., "Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene," IEEE Trans. VCG 5(1):1-12, 1999.
- [10] K. Nishino, et. al., "Determining Reflectance Parameters and Illumination Distribution from a Sparse Set of Images for View-dependent Image Synthesis", Proc. ICCV, pp. 599-606, 2001.