

分光情報に基づいた 文化財展示システムの開発

A Development of Tangible Cultural Properties Exhibition System
Based on Multi-Spectral Information

田中法博・望月宏祐・宮下朋也
村田良二・鈴木卓治

TANAKA Norihiro, MOCHIZUKI Kosuke, MIYASHITA Tomoya,
MURATA Ryoji and SUZUKI Takuzi

①はじめに

②分光的な光反射モデルに基づいた有形文化財のデジタルアーカイブ

③シーン照明環境の計測とCG再現

④分光情報に基づいた文化財展示システム

⑤実験

⑥おわりに

【論文要旨】

本研究では、博物館などで使用することを目的とした分光情報に基づいた文化財展示システムを開発する。このシステムは3次元コンピュータグラフィックス(3DCG)技術と分光画像計測によるデジタルアーカイブ手法に基づいている。この手法の特徴的な点は、カメラ特性や照明条件などの撮影環境に依存せずにデジタルアーカイブが可能なことであり、また、分光的な光反射モデルを用いて正確なCG再現が可能なことである。本稿では金属物体と不均質誘電体の光反射モデルを示し、そのモデルパラメータは物体表面上の光反射分布の計測データから定量的に求める。デジタルアーカイブと3DCGレンダリングに必要なモデルパラメータは、変角分光画像計測の計測結果から推定する。このことから本手法は、様々なシーン照明下で陰影や光沢のレンダリングが可能となる。本論文では、第1に、計測やレンダリングのために物体表面の反射特性を分光的な光反射モデルとして記述する。第2にシーン照明環境の全方位分光画像を計測する手法を提案する。ここでは東京国立博物館の応挙館と庭園、そして信州大学の講堂をシーン照明の空間分布推定のためにRGBカメラと魚眼レンズで計測する。第3に文化財のレンダリングのために分光CG再現システムを開発する。ここでは宮入小左衛門行平刀匠の日本刀を様々なシーン照明の下でCG再現する。第4に、このレンダリングシステム用のマイクロソフト社のKinectセンサを用いた非接触型ユーザインタフェースシステムを開発する。このシステムではボーンと呼ばれる人間の仮想骨格を認識して、人の様々な姿勢を推定することが可能である。このシステムを使うことで、一般ユーザが身振りで正確に本レンダリングシステムを操作することができる。本稿では、この3DCGデジタルアーカイブシステムとユーザインタフェースを統合したものを文化財展示システムと呼ぶ。最後に本研究で開発した文化財展示システムの有用性を検証するために、国立歴史民俗博物館のエントランスホールで本システムを展示した。

【キーワード】 デジタルアーカイブ、文化財、コンピュータグラフィックス、分光情報、シーン照明計測

①……………はじめに

文化財をデジタルデータとして記録するデジタルアーカイブの研究は様々な課題を抱えている。これまでのデジタルアーカイブ研究は、文化財情報を正確に保存する技術の開発が主たるものであったが、さらに、その記録情報を有効に活用するための技術も同時に求められている。

我々は、デジタルアーカイブ技術ならびに3次元コンピュータグラフィックス(3DCG)技術を用いた、博物館・美術館での実用に耐える文化財展示システムの開発を目標としている。ここでいう文化財展示システムとは、多くの文化財資料がその保存のため実際の展示が制限されることを踏まえて、資料をなるべく自由に、かつ、その資料を観賞するにふさわしい情景のもとで、心ゆくまで観賞する機能を提供するシステムをいう。人類共有の文化的財産である文化財の保存と活用の両立のために、文化財展示システムの実用化がおおいに期待される。文化財展示システムが満たすべき技術的要件および課題は大きく以下の4点にまとめることができる。

- (1) カメラ特性や照明条件などの撮影環境に依存しない資料の光反射特性が計測・記録されること。
- (2) 資料が置かれる環境の照明状況が計測・記録されること。
- (3) 資料を実際の照明環境に置いたときの資料の見え方が正確に再現されること。
- (4) 展示の文脈に沿って適切に設計された利用者インターフェイスが提供されること。

本稿では、我々が上記の4つの課題についてそれぞれ具体的な解法を示して開発した文化財展示システムについて述べる。

対象をデジタルアーカイブする技術として、これまで我々は様々な有形文化財を対象に、見る角度や物体の姿勢・位置、さらには3DCG生成時の仮想空間内で照明光源の入射角度が変化したときに刻一刻と変化する光沢や色を忠実に記録・3DCG再現できる手法を開発した[2]。従来のデジタルアーカイブ技術は主に写真やビデオ撮影に基づくものであったため、記録される情報が撮影時の条件に固定されるという問題がある[1]。つまり、撮影時と異なる照明環境や視点位置での物体の再現が難しい。本研究では自由な視点自由な照明環境での物体のCG再現を目指す。これまでも有形文化財を自由な視点で鑑賞できるように3DCG技術に基づいたデジタルアーカイブ手法も提案されている[3]。しかし、物体の見え方は周囲の照明環境に大きく依存するという課題がある[4][5]。また、文献[3]の手法はRGB色の三原色に基づいているため複雑な照明環境下での文化財の3DCG再現が難しい。

この問題に対し、本研究では、対象物体を直接画像として記録するのではなく、分光情報と光反射モデルに基づいて物体の反射特性を記録する手法を提案する。まず複雑な照明環境下での文化財の3DCG再現が困難であるという課題を解決するために本研究では、2つの対象をデジタルアーカイブする手法を提案する。1つ目は我々が文化財展示システムに求める(1)の課題であるが、美術品などの有形文化財そのものである[6]。そして、2つ目は、我々が文化財展示システムに求める(2)の課題に対応するもので、その有形文化財を配置するシーン内の照明光源の色、方向、光源位置の空間分布等の照明環境の情報[7]である。そしてこれらの2つの計測されたデジタルアーカイブ情報の組み合わせから、様々なシーンの中で有形文化財を3DCGとして表示が可能となる。

この手法の利点は、一度ある有形文化財情報を記録すれば、その有形文化財は別の任意の照明環境下で、しかも自由な視点で鑑賞できることである。この3DCG表示が文化財展示システムの(3)の課題に対応する。このように新たな3DCGを用いたデジタルアーカイブ技術が開発されてきているが、次なる文化財展示システムの(4)の課題は、この3DCG技術に基づいたデジタルアーカイブ技術をどのように有効利用していくのかという点である。そこで本論文は周囲の照明環境場を用いる光反射モデルに基づいた3次元デジタルアーカイブ技術を実用するための手法を提案する。

3次元デジタルアーカイブ技術の実用面における最も重要な課題としては、使用者が自分の好みの鑑賞状態(視点や照明の位置など)にするために物体の向きや照明環境を適切に設定するといったシステム操作の難易度を軽減することが考えられる。実際に、これまでも新しく登場したデジタルアーカイブ技術は一般には使用される機会が少ない。その理由は、一般の人々が何らかの新しい技術に基づいたデジタルアーカイブシステムを使用するには、操作上の特殊性や難易度が大きな問題となっているからである。特に美術館や博物館での使用を想定した場合、小さな子供からお年寄りまで様々な入館者が想定できるため、全ての入館者に対して高度なコンピュータ操作ができることを期待できない。

特に我々が提案する3次元CG技術に基づいたデジタルアーカイブシステムの操作を難しくする理由は、利用者が3次元空間中に存在する文化財の位置や向きを、マウスやキーボードなどの入力機器の操作に直観的かつ適切に反映させることが難しいからである。そこで本研究では、これまで我々が開発してきた3DCGと分光情報に基づいたデジタルアーカイブシステムを統合して、レンダリング部のユーザインタフェースを開発し、統合することで博物館や美術館で実用可能な文化財展示システムを開発する。また、実際の美術品としては長野県坂城町の宮入小左衛門行平刀匠の日本刀、美術品の再現環境として東京国立博物館の応挙館と庭園をデジタルアーカイブし、それを本研究で提案する文化財展示システムでCG再現する。最後に、2012年春に国立歴史民俗博物館エントランスホールにおいて実施した本システムの展示試験公開について合わせて述べる。デジタルアーカイブした美術品を国立歴史民俗博物館で展示し、入館者に使用していただくことで提案システムの実用性を検証する。

②……………分光的な光反射モデルに基づいた有形文化財のデジタルアーカイブ

2.1. 分光情報と光反射モデルに基づいたデジタルアーカイブ

本研究では、美術品などの有形文化財を分光的な光反射モデルに基づいて記録し3DCG再現する。光反射モデルは物体表面の反射のプロセスを幾何条件や表面状態に基づいて数学的に記述したモデルである(たとえば、文献[8])。

まず一般的にはRGB三原色に基づいた画像の記録や3DCG生成が行われるが、美術品等を精密に色再現するためには、RGBカラー情報は、単純に情報量が不足するという問題だけでなく、照明光やカメラの感度特性などの撮影環境の影響を大きく受けるという問題が生じるが、分光情報は

それぞれの物体や光源に対する固有の物理情報であるため光源や機器の特性には依存しないという利点がある[9]。

次に物体表面の陰影や光沢といった対象物体の質感は、視点、物体、光源の3者の幾何条件と物体の材質の特性から光反射のプロセスを数学モデルで記述する。この数学モデルは光反射モデルと呼ばれている。このとき物体の反射特性は、この光反射モデルとそのモデルパラメータで定量的に記述できる[6]。

2.2. 光反射モデル

本論文では光反射モデルを分光的に拡張し、任意の照明環境で有形文化財をCG再現できるようにする。これまで本研究では物体表面の光反射を物理的に詳細に記述した Torrance-Sparrow モデル[10]をベースとして分光的な反射モデルを構築した[2][6]。本研究ではさらに文献[2]および文献[6]で開発した光反射モデルや反射特性推定手法を有形文化財のデジタル展示システムに適用する。

図1は光反射モデルを構築するための幾何的な条件を示したモデルである。 \mathbf{V} は視線方向ベクトル、 \mathbf{N} は物体の法線ベクトル、 \mathbf{L} は照明方向ベクトルである。 \mathbf{N} と \mathbf{L} のなす角は θ_l 、 \mathbf{N} と \mathbf{V} のなす角は θ_r となる。このモデルは表面粗さを表現するため物体表面が微小面で構成されていると仮定している。この微小面の法線ベクトルは \mathbf{H} である。 \mathbf{L} と \mathbf{H} のなす角は θ_h であり、 \mathbf{N} と \mathbf{H} のなす角が φ である。プラスチック、塗料などの不均質誘電体の表面反射は、物体色として見える拡散反射成分とハイライトとして見える鏡面反射成分によって構成されている。拡散反射成分は光源から到達した光が一度物体表面内部に入り込み乱反射をしながら特定の光の波長成分が内部の色素などに吸収されて発生する。また、鏡面反射は物体表面で反射した光が直接視覚系に到達する。不均質誘電体の物体表面の光反射のプロセスを分光関数として記述すれば視覚系に入射する色信号 $C(\lambda)$ は光の波長 λ の関数として次式のようにモデル化できる。

$$C(\lambda) = \alpha \cos \theta_l S(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{F(n, \theta_h) D(\mu_0, \varphi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_l} E(\lambda) + \chi D(\mu_1, \varphi) F(n, \theta_l) E(\lambda) \quad (1)$$

右辺第1項は拡散反射成分、第2項は gloss 反射成分、第3項は perfect mirror 成分を示す。 α, β, χ はそれぞれ拡散反射、gloss、perfect mirrorの項の重み係数である。ここでこれら3つの重み係数は、個々の材質によって異なる物体固有のパラメータとなる。

$S(\lambda)$ は物体表面の分光反射率、 $E(\lambda)$ は光源の分光分布である。 F は Fresnel 関数である。 n は物体表面の屈折率である。一般に不均質誘電体の屈折率は波長に依存しない定数として記述できることが知られている。 D は物体表面の滑らかさを表す微小面の分布関数であり、分布係数パラメータ μ_0, μ_1 によって滑らかさを決める。 G は物体表面の微小な凹凸により生じる微細な影をモデル化した幾何的減衰係数である。

次に金属の光反射モデルを示す。金属は不均質誘電体とは異なり鏡面反射成分のみを持つ1色性の反射特性を持つ。このため不均質誘電体は拡散反射成分で物体色が決まるが、金属は鏡面反射で色が決まる。金属は高い反射率を持ち、さらに入射する光の角度により色が変位するカラーシフトと呼ばれる現象が発生する。金属光沢の波長依存性は Fresnel 反射モデルに与える波長毎の複素屈

折率で記述する。屈折率の実数項は波長 λ の関数として $n(\lambda)$ として記述する。また、虚数項は同様に $k(\lambda)$ として示す。このときの金属表面で光が反射され視覚系に到達したときの色信号 $C(\lambda)$ は次式のように記述できる。

$$C(\lambda) = \beta \frac{F(n(\lambda), k(\lambda), \theta_H) D(\mu_0, \varphi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_r} E(\lambda) + \chi D(\mu_1, \varphi) F(n(\lambda), k(\lambda), \theta_1) E(\lambda) \quad (2)$$

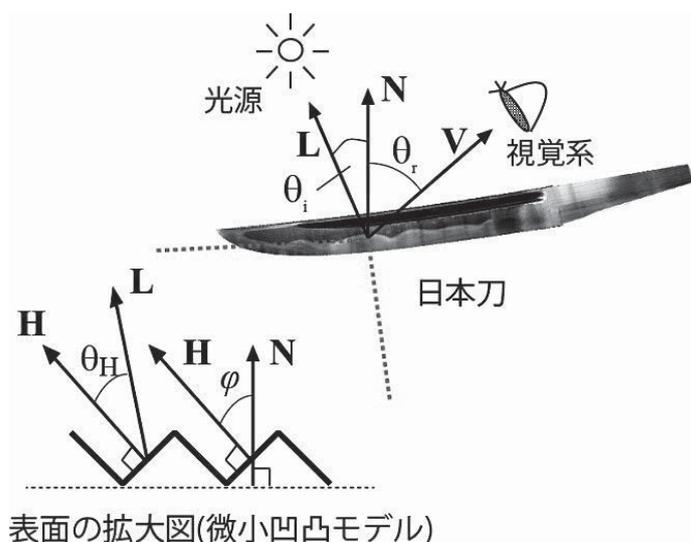


図1 光反射の幾何モデル(光反射モデルを構築するための幾何)
* 論文末にカラーにて掲載 (以降～図20同様)

2.3. 光反射モデルに基づいたデジタルアーカイブ

本研究では光反射モデルに基づいた物体をデジタルアーカイブする。本手法の特徴は、画像情報を直接的に使用するのではなく、画像から対象物体の反射モデルのモデルパラメータを推定し、その反射特性が定量的に求まることである。この手法では様々な幾何条件のもと物体表面の反射光強度分布を計測し、その計測データとモデルをフィッティングすることによりモデルパラメータの推定を行う。反射光強度分布の計測は本研究で試作した光反射計測系を用いる。この計測系の詳細は文献[6]に記載されているので、ここではその要約を示す。この計測系では任意の照明光の入射角度とカメラの受光角度で対象物体を画像計測することで、光反射モデル推定に必要な幾何条件と反射光強度の関係を計測する。この計測系ではカメラ部分にはデジタルカメラ(Canon EOS 40D)、カメラの方向を制御するために全周囲計測装置(Texnai AUTO QTVR RC5P-3)、照明光の方向を制御するために撮影用クレーン(Libec SK-1000A)、そしてカメラ本体の撮影制御と位置制御を統合して行うためのPCから構成されている。この計測系では垂直方向に対してカメラの光軸方向を0度から140度までの範囲で、光源の光軸方向を角度35度から125度までの範囲で設定可能である。ただし、計測物体を設置する計測テーブルは、垂直方向に対して10度から45度程度まで傾斜させることが可能なので物体に対して照明光の入射角度0度(垂直入射)からの計測が可能である。照明光の

入射角度は0.5度単位、カメラの受光角度は0.1度単位で設定可能である。この計測系では、それぞれの入射角と受光角に対応する1010万画素の解像度、各画素14bitのダイナミックレンジの画像が計測可能である。

この計測系と提案手法を用いて本稿で新たに提案した反射モデルに対してモデルパラメータ推定を行う。ここで用いた計測系は、これは図2(左)のような構造になっており、任意の入射角度、受光角度で物体表面の反射光分布を画像計測できる。物体表面には微細な凹凸があるため一定の入射光に対して反射光の広がり(分布)が見られる。図2(右)は、この光反射計測系を用いた計測シーンである。この反射光の分布の形状が光反射の重要な特性の1つとなる。この計測系を用いて本稿で新たに示した光反射モデルのパラメータを推定する。ここでは未知変数は α , β , μ_0 , μ_1 の4つであり、文献[6]の手法で求める。

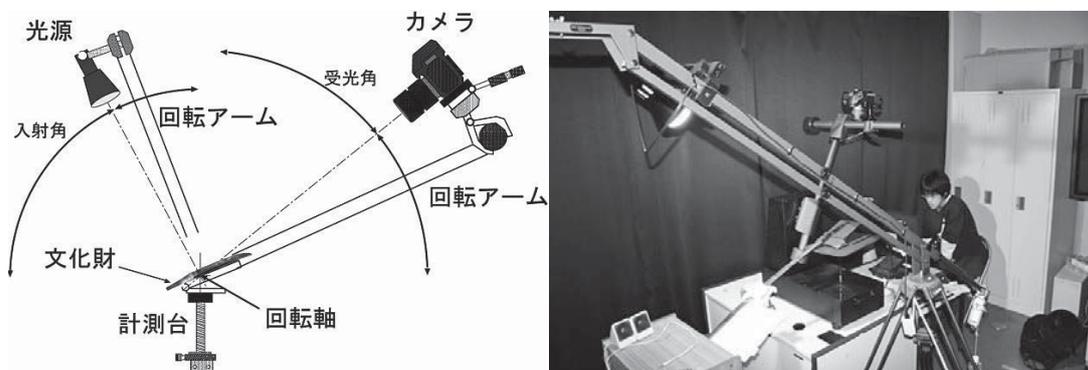


図2 光反射計測系の概略図(左)と実際の計測風景(右)

③……………シーン照明環境の計測とCG再現

物体の見え方は物体そのものの特性だけでなく、その周囲の照明環境に大きく依存するため、実シーンを照明する光源環境を知ることは重要である[5]。実際に美術品を鑑賞する場所そのものが伝統的な建造物内であったり、歴史的に重要な場所であったりした場合、美術品鑑賞とは、その対象となる美術品だけでなく、そのシーン全体の影響を含んだ鑑賞となることに注意する必要がある[7]。つまり、ある絵画を鑑賞する場合、その絵画が描かれた場所、たとえばフィレンツェの風景のもとで鑑賞するのか、あるいはアカデミア美術館の館内で鑑賞するのかで、その絵画の印象は大きく異なる。

そこで本研究では、実際の屋外シーンや建造物内等の照明環境を画像計測する。その上で、そのシーン内で対象となる文化財をCG再現する。任意のシーン内で物体を精密にCG再現するためには、そのシーン内の様々な方向から到達する複雑な照明情報を知ることが必要である。この照明情報獲得の問題に対してコンピュータグラフィックス(CG)の分野においてはImage Based Lighting (IBL) [11]と呼ばれる手法が一般的に使われている。この手法はあるシーン内で全方位を撮影した画像を直接的に光源の空間分布として利用するものであるため、照明光源の空間分布を高い空間解像度で

使用することができる。しかし、一般に用いられる RGB ベースの IBL 手法では、全方位画像(光源環境)と仮想物体(CGで再現する物体)の RGB 値が計測時のカメラの特性やそれぞれの計測環境に依存することで、機器依存による正しい色が得られないという問題とシーン照明情報と仮想物体との間で色の整合性がとれず精密に色再現ができないという問題がある[7]。そこで本研究では文献[7]のシーン照明の全方位分光画像計測手法を用いて、様々なシーンの照明環境を計測する。

3.1. シーン照明光源の分光分布の推定

図3は、全方位のシーン照明環境を計測している様子である。ここでは RGB カメラと魚眼レンズを用いて、全方位分光画像計測を行う。全方位の照明環境は魚眼レンズで計測した円形画像から経度と緯度の座標系の全方位画像に変換する。ただし、魚眼レンズで計測した円形画像は撮影範囲の問題から1枚だけでは全方位を計測することできない。また、円形画像は周辺部での歪みが大きいため歪みの少ない中心部分を主に使いたいため複数枚の円形画像を計測しそれを合成する。

魚眼レンズの幾何について述べる。このとき画像中の長さを r 、レンズの焦点距離を f 、方位角を θ 、仰角を φ とすると、等距離射影の魚眼レンズの射影は $r = f\theta$ と記述される。この式で射影された画像は円形の画像として得られる。画像中の距離がカメラから見た角度と対応しているため画像からは容易に、照明方向角度 θ と φ を推定することができる。これにより魚眼レンズで全方位の画像が計測できれば、横 $\theta 360$ 度、縦 $\varphi 180$ 度の全方位画像を生成することができるため、画像上の位置と照明方向の対応付けが容易になる。そして各画素に光源の分光分布 $E(\lambda)$ を持つことで全方位の分光画像となる。

撮影画像は、太陽光などの明るい光源を含んでいる場合、シャッター速度を変えながら撮影した画像を合成してダイナミックレンジの拡張を行う。このとき得られた画像の RGB 情報から光源の分光分布 $E(\lambda)$ を推定する。しかしながら、カメラ出力 RGB 情報は低次元情報であるが、この低次元情報から高次元情報である分光情報を推定することは、何らかの拘束条件がなければ数学的に解けない問題である。そこで分光情報の統計的性質を拘束条件として RGB 値から分光分布を推定する[7]。この方法では、まず分光関数が少数の基底関数の線形結合で得られるという知見[12]に基づいて、カメラに入射する色信号からカメラ系のシステム変換マトリックスを推定する。本研究では蛍光灯などにも適用できるように分光情報は可視波長域(400nm-700nm)を5nm間隔でサンプリングし、61次元のベクトルとして扱う。カメラに入射する色信号は 61×1 の行列 \mathbf{c} と示す。カメラの分光応答は RGB 3つの感度関数を持つ場合 61×3 の行列 \mathbf{t} 、カメラ出力は 3×1 の行列 \mathbf{p} とする。 \mathbf{c} 、 \mathbf{t} 、 \mathbf{p} の3者の関係は直接光と間接光を区別せずに同じ色信号として扱うことを前提条件とすることで、次のように単純化できる。カメラの色信号は分光分布と等しいとすると、光源分光分布の行列 61×1 の \mathbf{e} は $\mathbf{e} = \mathbf{c}$ であるのでカメラ出力 \mathbf{p} と分光応答関数 \mathbf{t} の一般化逆行列 \mathbf{t}^{\dagger} を用いて次式のように単純な式で求めることができる。

$$\mathbf{e}^{\dagger} = \mathbf{p}^{\dagger} \mathbf{t} \quad (3)$$

このとき \mathbf{t}^{\dagger} が基準カメラのカメラ出力から分光分布へ変換するためのシステム変換マトリックスとなる。

3.2. 実際のシーン照明下での物体の3DCG再現手法

本研究では、(1)式および(2)式のような光反射モデルを用いて物体を3DCGで再現する。このとき対象の有形文化財の材質によって光反射モデルを切り替え、計測データから推定されたモデルパラメータを与える。この光反射モデルから物体表面から視覚系に到達する色信号 $C(\lambda)$ を計算する(図4)。

ただし、(1)式や(2)式では任意のシーンにおける照明光の空間分布に適用することができない。そこで光源の分光分布 $E(\lambda)$ は光源の空間分布として考えるため波長 λ だけでなく照明方向角度 θ と φ の関数として、 $E(\lambda, \theta, \varphi)$ と記述する。そうすると物体表面から得られる色信号は $C(\lambda)$ ではなく、 θ と φ を含む関数として $C(\lambda, \theta, \varphi)$ と記述する。このようにして照明光の空間分布に適用できるように改良した不均質誘電体の光反射モデルは(1)式から次式で記述する。

$$C(\lambda, \theta, \varphi) = \left\{ \alpha \cos \theta_i S(\lambda) + \beta \frac{F(n, \theta_H) D(\mu_0, \varphi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_r} + \chi D(\mu_1, \varphi) F(n, \theta_i) \right\} E(\lambda, \theta, \varphi) \quad (4)$$

また、金属物体の光反射モデルは(2)式から次のように記述される。

$$C(\lambda, \theta, \varphi) = \left\{ \beta \frac{F(n(\lambda), k(\lambda), \theta_H) D(\mu_0, \varphi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_r} E(\lambda) + \chi D(\mu_1, \varphi) F(n(\lambda), k(\lambda), \theta_i) \right\} E(\lambda, \theta, \varphi) \quad (5)$$

ここで視覚系に入射する色信号 $C(\lambda, \theta, \varphi)$ から等色関数 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ を用いて三刺激値 CIE-XYZ を求める。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} C(\lambda, \theta, \varphi) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (6)$$

このとき計算される色情報は表示するデバイスの色空間上の色ではなくデバイスに依存しない情報として計算する。ディスプレイに表示する RGB 値は、個々のデバイス特性に合わせて変換マトリックスを構築し、さらに非線形な入出力に関してはトーンカーブ補正を行う。これらの手法は Graphics Processing Unit (GPU) 上に実装してレンダリングを行う[13]。

ここで(6)式までに示した提案手法を用いて同じ物体の光反射モデルを切り替えてレンダリングした例を図5に示す。実際の屋外シーンを計測したシーン照明下で同じ形状の物体に対して、金属物体と不均質誘電体としてCG生成した。金属物体の材質は金属の反射モデルを用いて、鉄の複素屈折率を与え、不均質誘電体の物体は、不均質誘電体の反射モデルを用いた上で、赤色のアクリル塗料の分光反射率と反射特性(モデルパラメータ)を与えている。このように同じ形状の物体でも与える光反射モデルやモデルパラメータを与えることで物体の質感が大きく変わっていることがわかる。

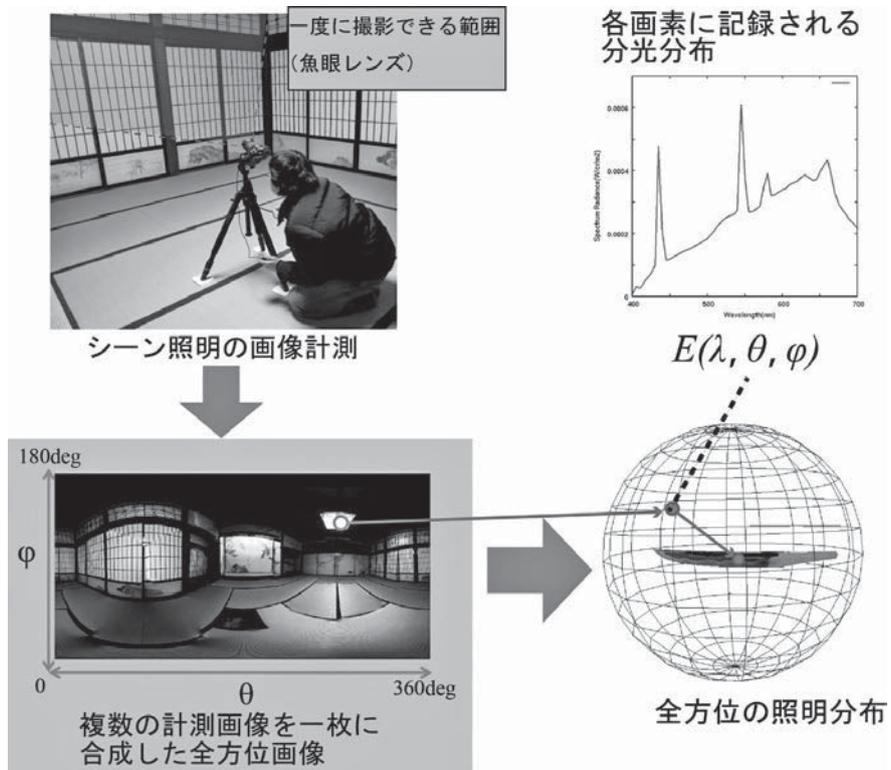


図3 シーン照明の全方位分光画像計測と照明光の空間分布

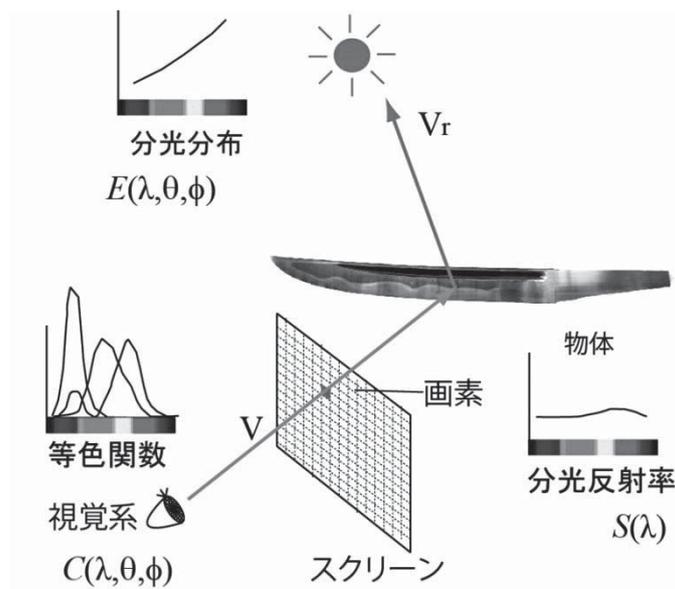
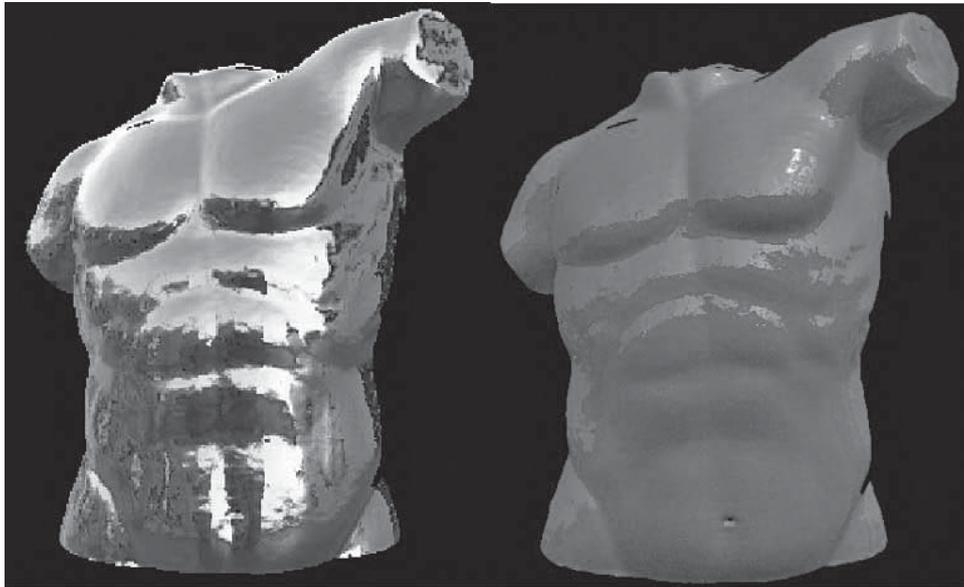


図4 分光ベースレンダリングの概念図



金属（鉄） 不均質誘電体（アクリル塗料）

図5 人の上半身像の仮想物体(形状データ)に金属物体(鉄)と不均質誘電体(赤のアクリル塗料)の材質の反射特性を与えてCG生成した例

④……………分光情報に基づいた文化財展示システム

本研究ではこれまで述べた分光情報に基づいたデジタルアーカイブ手法を用いて、文化財デジタル展示システムを開発する。このシステムでは、本研究で開発したデジタルアーカイブ手法の利点を活かして、様々なシーン、視点位置、物体の姿勢や位置などを自由に選択や設定できるようにする。さらに、本システムで実現したCG再現の仮想空間内では視点位置や方向と物体の位置や姿勢の関係を保ったまま周囲のシーン照明方向を変化させることができる。仮に同じことを現実の空間内で行うとすれば、鑑賞者と物体の位置関係を保持したまま物体の位置や姿勢を変化させなければならないため、一般には実現が難しい。これまで開発したデジタルアーカイブシステムと本研究で開発する文化財展示システムの関係を図6に示す。ここで示すように有形文化財の形状情報、光反射特性、照明環境光源を計測してデジタルアーカイブし、そこから得られた情報を統合して対象の有形文化財を3DCGで再現する。

このとき本研究で用いるデジタルアーカイブ手法の特徴は、照明環境、視点、物体の向きなどをユーザが自由に設定できることである。しかし、操作したり設定したりすべき項目が多いため、それらの利点を活かしながら直観的に本システムを操作できるように、3DCGの再現部分のユーザインタフェースを新たに開発する必要がある。デジタルアーカイブシステムに対してユーザインタフェースの実装することにより、本システムの実用性を高めることで、博物館などの来館者が容易にデジタルアーカイブされた文化財を自由に鑑賞できるようにする。

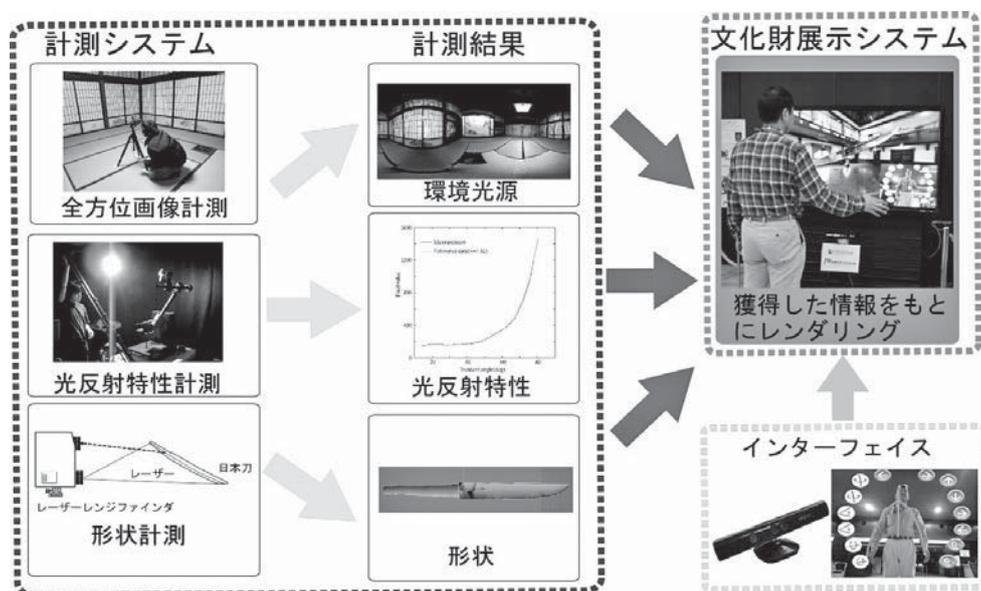


図6 本研究で提案する文化財展示システムの概要図

4.1. 文化財展示システムのユーザインタフェース

文化財展示という観点から考えるとキーボードやマウスといったコンピュータ用の入力装置は、操作の難易度や操作感といった点で文化財展示システムのユーザインタフェースとしては適切とは言えない。本稿では非接触型のゲーム用コントローラである Microsoft 社製の XBOX360 Kinect センサ(以下、「Kinect センサ」と記載)をユーザインタフェースとして用いる。図7は本研究で用いた Kinect センサである。このデバイスはオーディオや赤外線カメラ、RGB カメラを搭載し、これらの複数のセンサの情報を統合して非接触で人間等の対象物体までの距離や形状を認識する。

図8は本システムで認識した人の姿勢を可視化している。このシステムは Kinect センサから得られた人体の画像情報(赤外線画像、RGB 画像、距離画像)から、人体の姿勢を検出し、ボーンと呼ばれる人体の仮想骨格情報として連続的に取得する。このボーンは関節ごとに3次元空間上の座標情報を持ち、関節と関節との間は人体の構造に基づいて連結関係が決まっている。なお、図8では画像内で人体の像を認識できた領域を人間のシルエットとして表示している。

図9は本研究のユーザインタフェースのディスプレイ部である。このようにユーザは自分自身の姿をディスプレイ上に映し出し、そのユーザ自身の姿勢がコンピュータ上にどのように認識されているかを確認することができる。そして、その姿を見ながらユーザの周囲の空間に仮想的に存在するボタン(コントローラ)に触れるジェスチャを行うことでユーザの意図をシステムに伝える。このシステムでは利用者のボーンを認識すると、頭と両手に緑色の円、骨格に赤色の線を描写する。人物のまわりのアイコンは視点や照明環境を変更するための仮想のボタンである。このボタンには、それぞれシーンの種類(どの場所で鑑賞するのか)、シーン照明の向き(ユーザの視点)、物体の回転や移動といった機能が割り当てられている。



図7 実験に用いた Microsoft 社 Kinect センサ

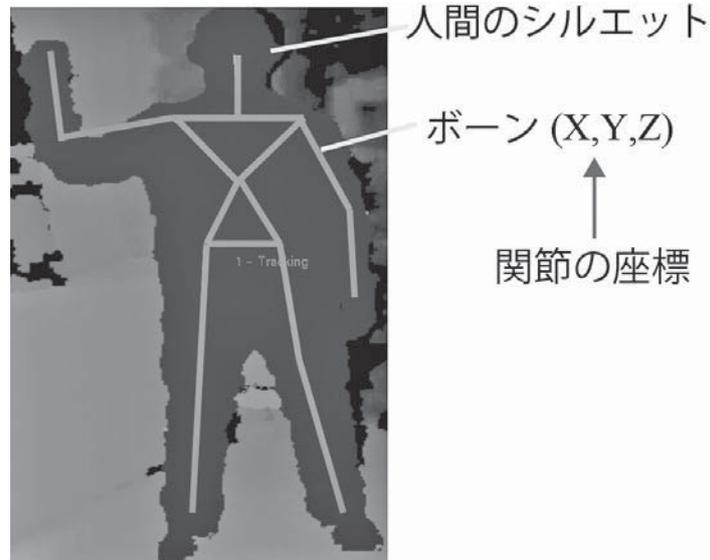


図8 人間の姿勢をボーン(仮想骨格)として認識している様子



図9 本研究で開発したユーザインタフェースの表示部

4.2. ユーザインタフェースとレンダリングシステム

図 10 は本論文で示すユーザインタフェース機能を実装したレンダリングシステムの概略図である。レンダリング部分は OpenGL と呼ばれるグラフィックス Application Program Interface (API) で実装し、本研究で開発した光反射モデルを用いた文化財の CG 再現を行う。この OpenGL 部分を核として、Kinect センサ制御用の API である Nui API を通して Kinect センサを制御したり、画像情報ははじめ様々な情報を獲得したりする。

次に本システムの処理フローを図 11 に示す。本システムでは GPU 上で実際の有形文化財を表示するレンダリング処理とユーザインタフェース処理・表示の 2 つのパスで処理を行う。いずれのパスも GPU 上のフラグメントシェーダを使って画面上に映像を出力する。

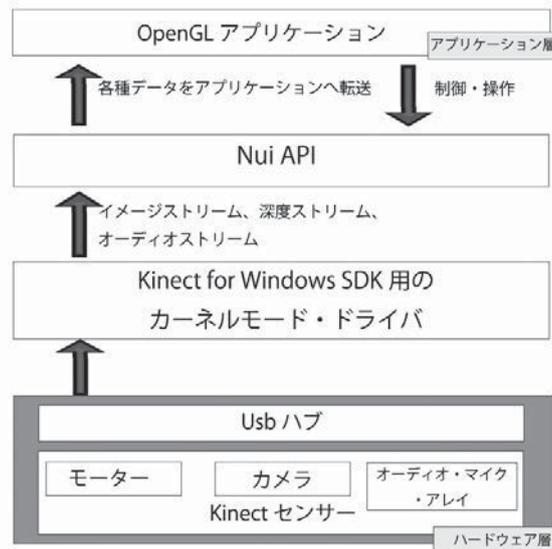


図 10 Kinect センサのレンダリングシステムへの実装方法

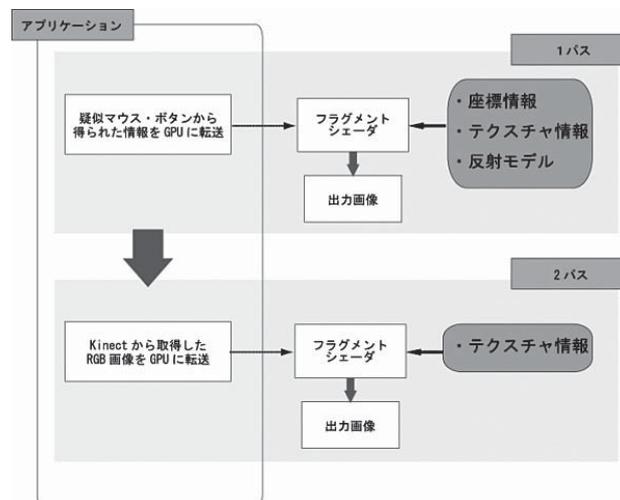


図 11 文化財展示システムの処理の流れを示したフローチャート

⑤……………実験

本研究では、事前にデジタルアーカイブをした長野県坂城町の宮入小左衛門行平刀匠の日本刀を対象としてCG再現を行った。日本刀は武器としての価値だけでなく、その刀身の美術的価値が高いことが一般に知られている。この刀身の美しさは、形状、光沢、表面テクスチャなどで決まる。日本刀の鑑賞者は「光をいただく」という表現を使って刀身表面に光をあて、光沢や色の変化を鑑賞する。このように日本刀は独特の金属光沢を持ち、それが美術品としての特徴となっている。刀身の光沢が照明方向や見る位置によって刻一刻と変化するため、本研究の実験対象として適切であると判断した。

実験で使用したデジタルアーカイブデータについては、日本刀の形状を計測し、光反射モデルに図12に示す鉄の複素屈折率を与えてレンダーリングをした。なお、日本刀の形状は強い金属光沢を持つため、拡散面を仮定するレーザー光による形状計測ができない。一般にレーザーレンジファインダ

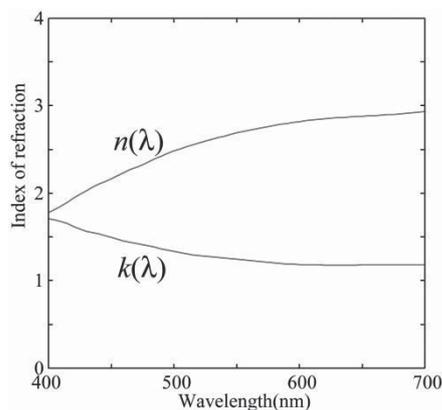


図12 鉄の複素屈折率

でこういった物体を計測するときには艶消しの白色塗料を用いる。日本刀の場合では、奉納刀など長期間保存しなければならない場合には、一般に刀身に漆を塗り込んでいることからわかるとおり、刀身表面に錆や腐食が生じないような塗料であれば、刀身に塗布することが可能である。そこで、本研究では日本刀の刀身表面に油性の艶消し白色塗料を塗布してレーザー光が拡散するようにしてレーザーレンジファインダで日本刀の形状計測をした。ただし、この方法は学芸員や刀匠等の専門化の指導のもとで行ったとしても、刀身の傷みが心配されるため、今後は、非接触の日本刀の形状計測法の開発が必要である。

5.1. シーン照明環境の計測と文化財のCG再現結果

日本刀の「光をいただく」という言葉は光源からの光を刀身に反射させながら、刀身の光沢やテクスチャの美しさを鑑賞することであるが、日本刀の鑑賞時には、シーン内の光源と刀身の反射のさせかたの関係の重要性を示している。従来の写真や動画によりデジタルアーカイブでは、「光をいただく」というような自由に刀身表面に光を当てて鑑賞することができない。そこで本研究で提案するデジタルアーカイブシステムでは、3DCGによる日本刀を鑑賞するために、そのシーン照明も合わせて再現することが重要となる。そこで、日本刀を3DCG再現するためのシーン照明情報として文化的に価値の高い建造物内やロケーションを対象にシーン照明環境を計測した。今回は東京国立博物館に所蔵されている応挙館内の茶室内、同博物館の庭園、信州大学繊維学部講堂内(文化財指定)を対象にシーン照明の計測を行った。応挙館は江戸時代中期の絵師 円山応挙の襖絵が飾られた茶室である。現在応挙館内に飾られている襖絵はインクジェットプリンタにより出力された

複製品であるが、当時の茶室の様子が精密に再現されている。東京国立博物館の庭園は、池を中心に5棟の茶室が存在し、珍しい樹木や野草が植えられているのが特徴である。この庭園には5代將軍徳川綱吉が法隆寺に献納した五重塔や石碑や燈籠などが配置されている。信州大学繊維学部の講堂は昭和4年(1929)に建造された木造の2階建、切妻造、瓦棒鉄板葺、下見板張りの建物であり、蚕糸に関わる歴史から長野県上田市の文化財となっている。

計測には Canon EOS 5D Mark II と魚眼レンズ(SIGMA 8mm F3.5)を用いた。図13は、東京国立博物館の応挙館、東京国立博物館の庭園、信州大学繊維学部の講堂、それぞれの全方位画像を計測した結果である。実際には分光画像として計測されているため、各画素にはその方向の分光分布情報が入っている。図14は、その分光分布の推定結果の例を示したものである。それぞれ Area1 から4に対応する床の間の襖、天井、畳、襖から到達する間接光の分光分布を示している。

照明光源の推定精度の検証は、シーン内の分光分布を分光放射輝度計とカメラからの推定値を比較することで行う。日本刀表面は金属の鏡面反射であるため少しの角度変化で大きく反射光の強さや映りこみが変化するため推定精度の検証は難しい。そこでカラーチャート用いて照明光源の分光分布の推定精度の検証を行った。応挙館の照明下でカラーチャートとして Gretag Macbeth カラーチェッカー SG を計測した。図15は分光分布の推定精度の検証実験の様子である。図16は検証実験で使用したカラーチャートである。このカラーチャートは同色のものを除くと96色となる。この96色について推定精度を検証したが、本稿では図中に示す代表的な4色(①青、②緑、③赤、④白色)の検証結果を示す。図17は、その分光分布の推定精度を比較したグラフであるが実線が分光放射輝度計(トプコンテクノハウス SR-3A-L1)で直接計測した値であり、破線がカメラから推定した値である。

それから、本研究で開発したレンダリングシステムのレンダリングの正しさは、前報[7]において不均質誘電体を対象に色再現精度として調べた。その結果、蛍光灯照明下において、実物とCGの色差がCIE-L*a*b*値で、 ΔE が4.0以下になっていることがわかった[7]。図18は推定した各シーン内で日本刀をCG再現した結果である。日本刀表面に各シーンの周囲の情報が映りこんでいることがわかる。また、日本刀全体の色の見え方もシーンによって異なることも確認できた。

表1は本研究でCG再現に使ったシステムの環境である。図19は、本研究で開発した文化財展示システムを実際に使用している画像である。ここではCG表示部とユーザインタフェース部の両方を表示させている。ユーザインタフェース部の赤いラインは、人体から認識したボーンを示している。図左側はデジタルアーカイブした物体をCG再現している。図右側はそれを操作しているユーザである。このシステムではユーザは自分の姿を見ながら美術品や背景の向きを操作できる。

表1 CG再現に使ったPC環境

CPU	AMD Phenom II X4 940 3.0GHz
メモリ	8GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 580
OS	Windows 7 64bit
グラフィックス API	OpenGL 4.1
シェーディング言語	GLSL 4.1



(a) 東京国立博物館 応挙館の全方位画像



(b) 東京国立博物館 庭園の全方位画像



(c) 信州大学 繊維学部講堂

図13 計測した全方位分光画像（仮想的にRGB表示したもの）

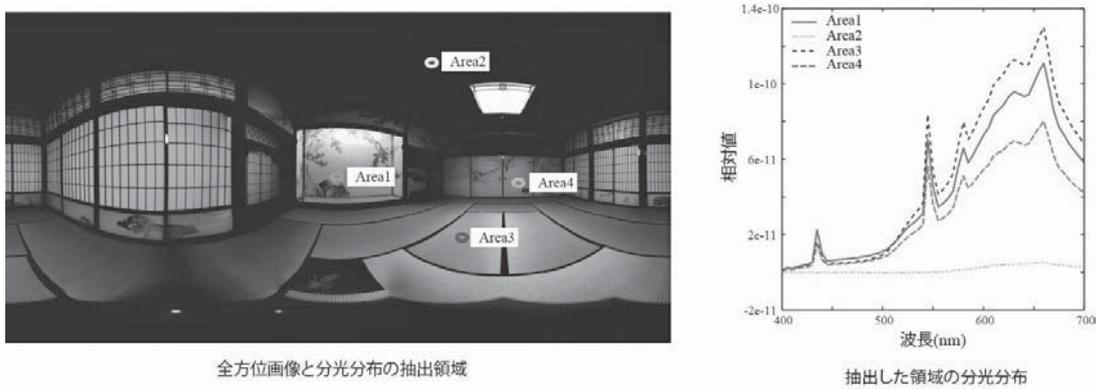


図 14 分光分布の推定結果の例

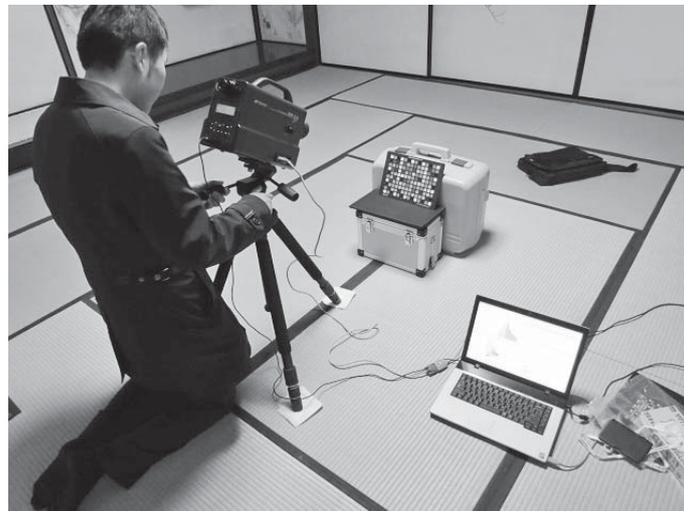


図 15 カラーチャートの計測シーン

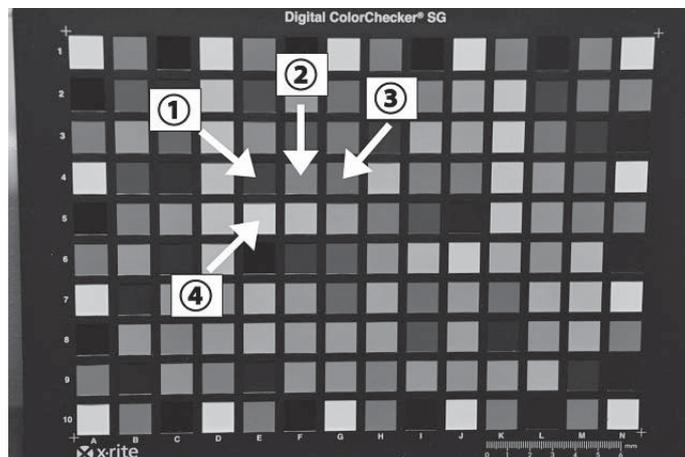


図 16 精度検証に使用したカラーチャート(Gretag Macbeth SG) :
①から④は精度検証に使用したカラーパッチ

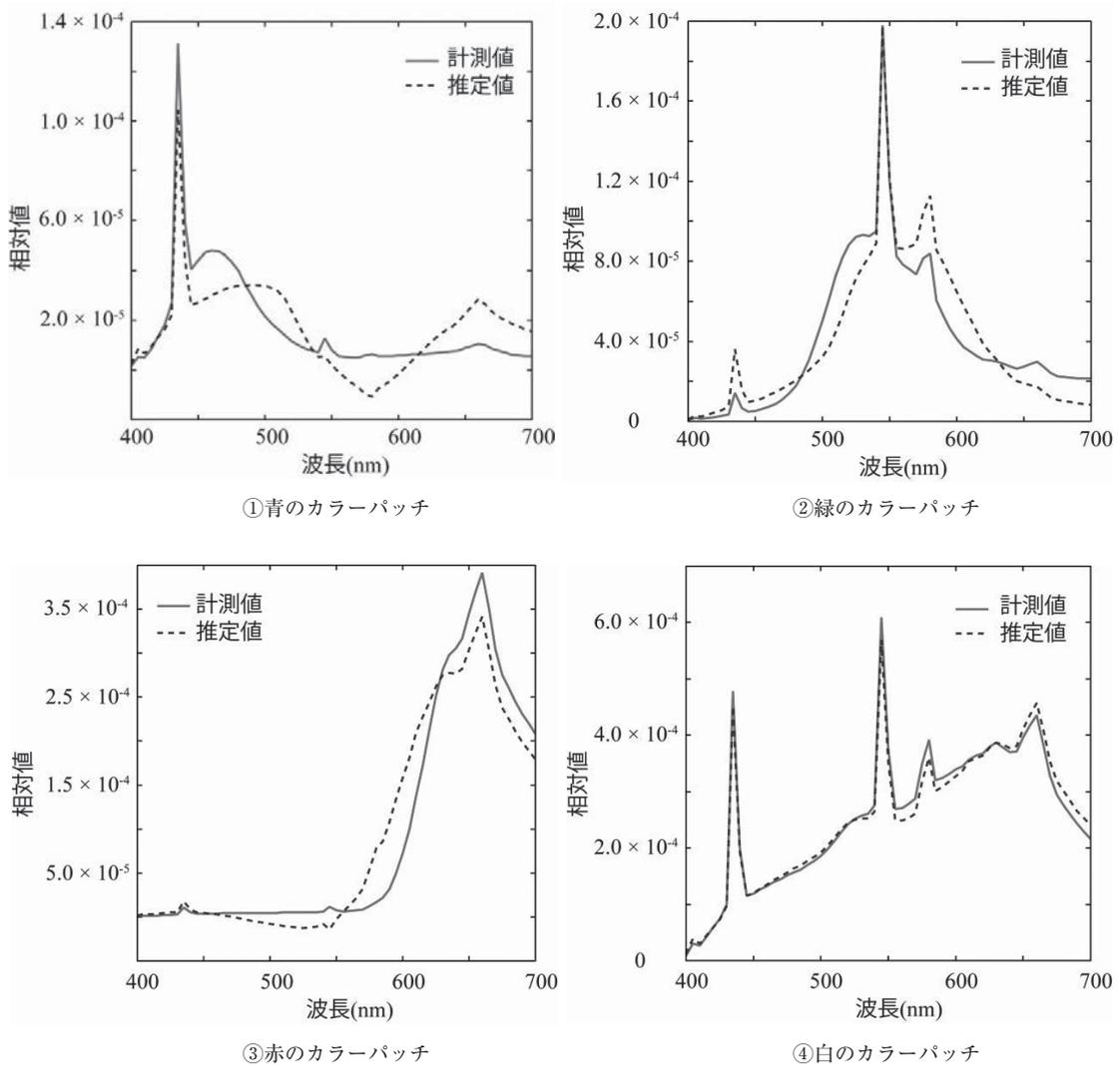


図17 カラーパッチから得られた応挙館内の分光分布の推定結果
(図16の①から④のカラーパッチに対応)

5.2. 試作したシステムの展示

本研究で試作したデジタル展示システムを用いて、千葉県佐倉市にある国立歴史民俗博物館のエントランスホールにて、2012年3月24日から4月8日までの16日間にわたり、デジタル展示試験公開を実施した。

図20は、ここで開発した文化財展示システムを国立歴史民俗博物館のエントランスホールで展示している様子である。この図のように本システムは小さい子供でも容易に操作できた。ゲーム等で体感的な操作に慣れている来館者は、こちらの説明がなくても、自分の動きと操作アイコンの関係を理解し、システムを操作することができた。また、Kinectを知らない来館者でも、他の来館者が操作しているようすを観察することで、自然と操作方法を理解できるようになる場面もみられた。本実験からKinectセンサを利用したユーザインタフェースは有効であることがわかった。

ディスプレイ上に再現された有形文化財についての来場者の反応を見てみると、3DCG 再現された画像については、まわりの風景の映り込みを実時間で計算して出力していることが評価される一方、「なぜ刀が宙に浮いているのか」など、画面に再現された画像の“意味付け”にとまどう声が聞かれた。実世界の撮影画像とそんな色のない品質の画像が再現されることによって、何をどのように示すべきか、という展示本来の目的を達成するためのハードルもまた高くなる、ということに気付かされた。



(a) 東京国立博物館 応挙館でのCG再現結果



(b) 東京国立博物館 庭園でのCG再現結果



(c) 信州大学 繊維学部講堂でのCG再現結果

図18 計測した各シーンでの有形文化財のCG再現結果

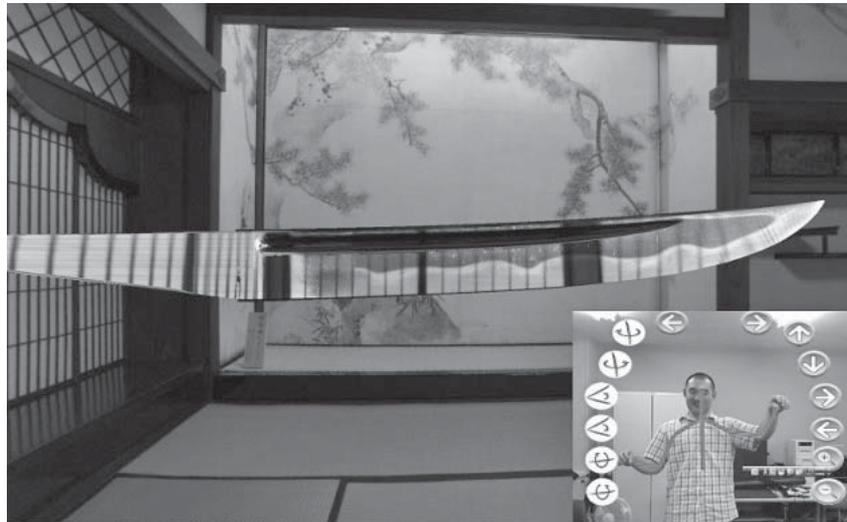


図 19 提案システムによる有形文化財の CG 再現結果(2) :
3DCG が表示された鑑賞部(左)と利用者が操作する操作部(右下)で構成



図 20 試作したシステムを国立歴史民俗博物館
エントランスホールで展示している様子：
一般来館者の子供が本システムを使用している。

⑥……………おわりに

本研究では、分光情報に基づいたデジタルアーカイブシステムの 3DCG のレンダリング部のユーザインタフェースを開発し、博物館や美術館で実用可能な文化財展示システムを開発した。本研究のデジタルアーカイブ手法は照明環境や視点を自由に設定して対象の文化財を鑑賞できるため、その利点を活かすために簡便に操作できるように一般の利用者を対象に複雑な機器操作を伴わない非接触で操作者のジェスチャでシステムを操作できるユーザインタフェースを開発した。

実際の美術品としては長野県坂城町の宮入小左衛門行平刀匠の日本刀を CG で再現し、美術品の

再現環境として東京国立博物館の応挙館、庭園、そして信州大学繊維学部講堂をデジタルアーカイブし、それを本研究で提案する文化財展示システムでCG再現した。最後に、デジタルアーカイブした美術品を国立歴史民俗博物館で展示し、入館者に使用していただくことで提案システムの実用性を検証した。

謝辞

本発表は、国立歴史民俗博物館共同研究「デジタル化された歴史研究情報の高度利用に関する研究」(平成22年度～平成24年度)における研究成果を含んでいる。

参考文献

- [1] A. Ide, K. Manabe, H. Shimizu, M. Sunaga, K. Fujiwara, T. Aoki and H. Yasuda: Technology for Digitalizing Pictorial Data of Japanese Swords., Hawaii International Conference on System Sciences-2005 (IEEE) pp.102-108, . 2005.
- [2] 田中法博, 禹在勇, 更科友啓, 望月宏祐: 分光的な光反射計測に基づいた物体の表面反射特性推定, 日本感性工学会論文誌, Vol. 8, No. 3, pp. 943-950, 2009.
- [3] M. Levoy: The Digital Michelangelo Project. In Proc.SIGGRAPH 2000, pp.131-144, 2000.
- [4] 池内克史, 倉爪亮, 西野恒, 佐川立昌, 大石岳史, 高瀬裕, 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学会論文誌, Vol.7, No.1, pp.103-113, 2002.
- [5] C. C. Chiao, T. W. Cronin, D. Osorio: Color signals in natural scenes: Characteristics of reflectance spectra and effects of natural illuminants, Journal of the Optical Society of America A, Vol. 17, No. 2, pp. 218-224, 2000.
- [6] 田中法博, 望月宏祐, 禹在勇: 物体表面の反射特性と分光反射モデルに基づいたリアルタイムレンダリング手法, 日本感性工学会論文誌, Vol.9, No. 2, pp.311-322, 2010.
- [7] 田中法博, 望月宏祐: RGBカメラによる全方位分光画像計測とIBLへの応用, 画像電子学会誌, Vol.42, No.4, pp. 466-476, 2013.
- [8] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, T. Kanade: Surface reflection: physical and geometrical perspectives IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.13, Issue 7, pp.611- 634, 1991.
- [9] Y. Miyake, Y. Yokoyama, N. Tsumura.: Development of multiband color imaging systems for recording of art paintings, Proc. SPIE: Color Imaging, Vol.3648, pp.218-225, 1999.
- [10] K. E. Torrance and E. M. Sparrow: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, J. of Optical Society of America A, Vol.57, No.9, pp.1105-1114, 1967.
- [11] P. Debevec: Image based lighting, Journal IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 22, Issue 2, pp. 26-34, 2002.
- [12] M.J Vrhel, R. Gershon and L.S Iwan: Measurement and analysis of object reflectance spectra, Color Research and Application, Vol.19, pp.4-9. 1994.
- [13] R. Fernando, GPU Gems: Programming Techniques, Tips and Tricks for Real-Time Graphics, Addison-Wesley Professional, 2004.

田中法博 (長野大学企業情報学部, 国立歴史民俗博物館共同研究員)

望月宏祐 (信州大学大学院総合工学系研究科)

宮下朋也 (長野大学企業情報学部)

村田良二 (東京国立博物館, 国立歴史民俗博物館共同研究員)

鈴木卓治 (国立歴史民俗博物館研究部)

(2014年1月7日受付, 2014年5月26日審査終了)

A Development of Tangible Cultural Properties Exhibition System Based on Multi-spectral Information

TANAKA Norihiro, MOCHIZUKI Kosuke, MIYASHITA Tomoya,
MURATA Ryoji and SUZUKI Takuzi

In this paper, we develop a tangible cultural properties exhibition system based on multi-spectral information for using in a museum. The system is based on a digital archive method of 3 dimensional computer graphics (3DCG) and multi-spectral imaging. The feature of the method is independent of photographing environment such as device characteristics and illumination environment. The system can render precise reproduction CG of an object using multi-spectral reflection model. The models are provided for metal and inhomogeneous dielectric material. The parameters of the models are derived from the RGB camera and a device measuring the distribution of light reflection intensity on the object surface. The model parameters for digital archiving and computer graphics rendering, multispectral reflection properties of the object are estimated from multi-spectral imaging of goniometric measurements. Then the method can render object including shade and gloss under any scene illuminations. First, we describe multi-spectral reflection model for measuring and rendering of reflection properties of the object. Second, the method is proposed for measuring of multi-spectral omni-directional image of scene illumination environment. Multi-spectral omni-directional images of Oukyo-kan and garden of Tokyo National Museum and auditorium of Shinshu university are measured using RGB color camera and fish-eye lens for estimating spatial distribution of illumination in the scenes. Third, we develop multi-spectral CG reproduction system for rendering tangible cultural properties. A Japanese-sword which made by Miyairi Kozaemon Yukihiro sword smith is rendered under measuring scene illumination. Fourth, non-contact user interface system is developed for the rendering system with Microsoft Kinect sensor. The system can detect any pose of user from images as Bone which is virtual motion framework of the human body. Because the system can be given command by gesture of user, even a general user can exactly operate the rendering system. In this paper, the system which integrated the multi-spectral 3DCG digital archive system and user interface is called the tangible cultural properties exhibition system. Finally, to confirm availability of the tangible cultural properties exhibition system, the system was demonstrated in entrance hall of National Museum of Japanese History.

Key words: digital archive, tangible cultural properties, computer graphics, multi-spectral information, measurement of scene illumination

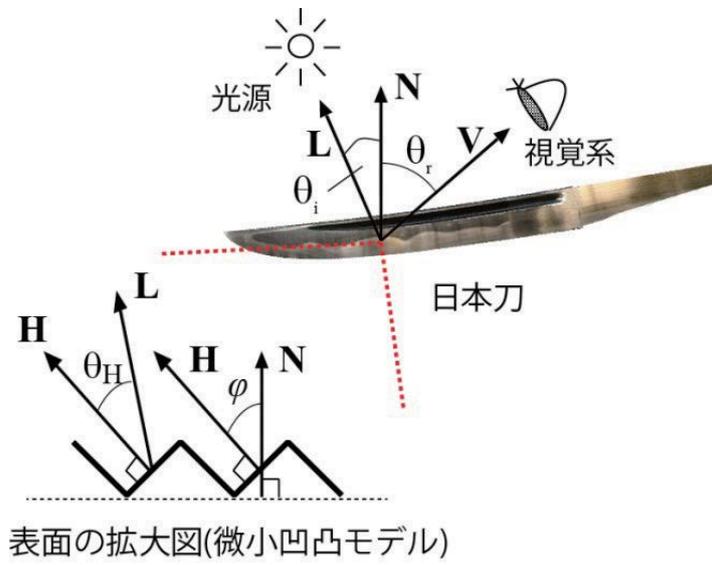


図1 光反射の幾何モデル (光反射モデルを構築するための幾何)

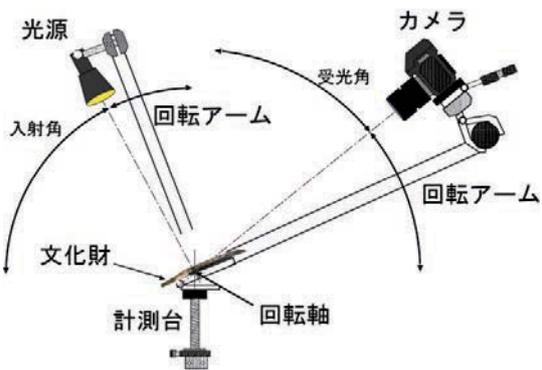


図2 光反射計測系の概略図 (左) と実際の計測風景 (右)

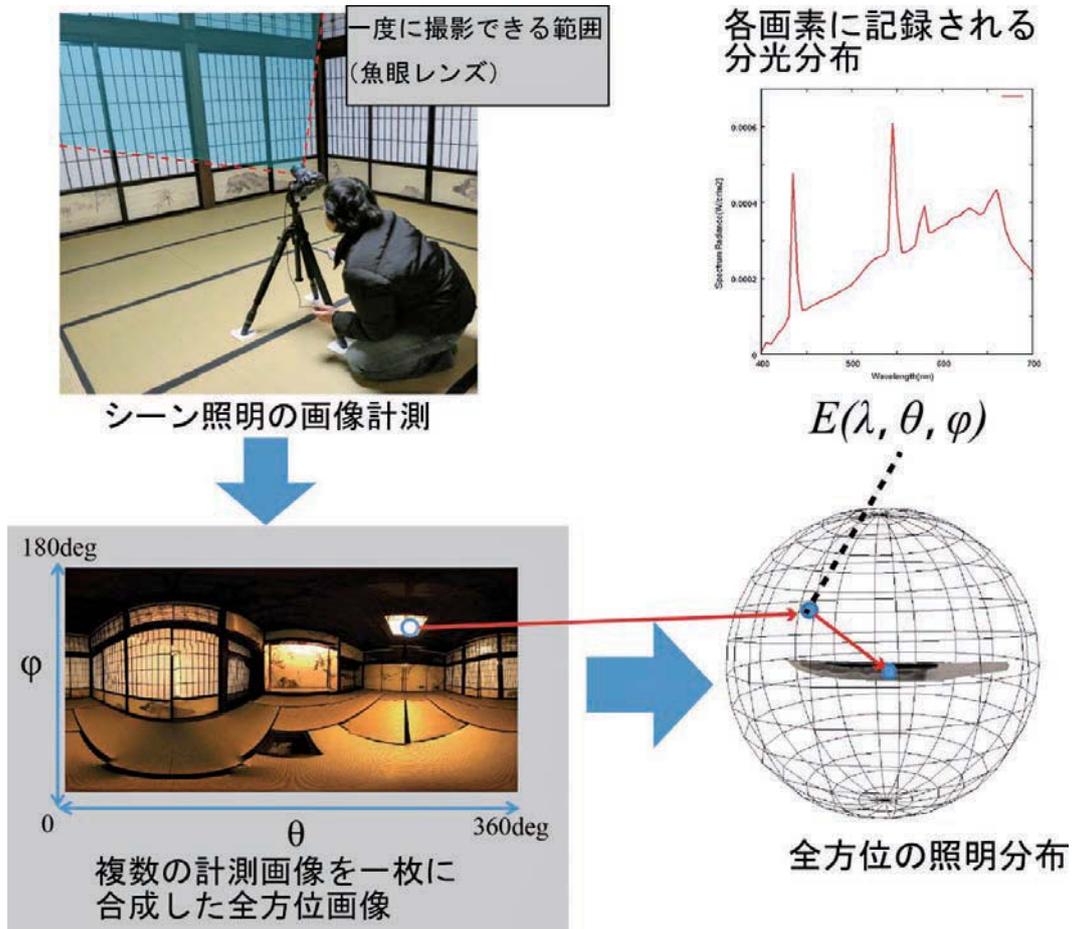


図3 シーン照明の全方位分光画像計測と照明光の空間分布

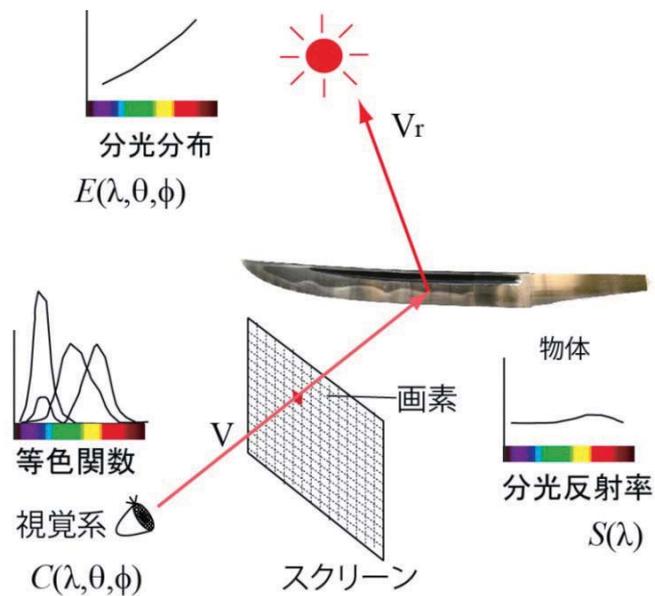


図4 分光ベースレンダリングの概念図



金属（鉄） 不均質誘電体（アクリル塗料）

図5 人の上半身像の仮想物体（形状データ）に金属物体（鉄）と不均質誘電体（赤のアクリル塗料）の材質の反射特性を与えてCG生成した例

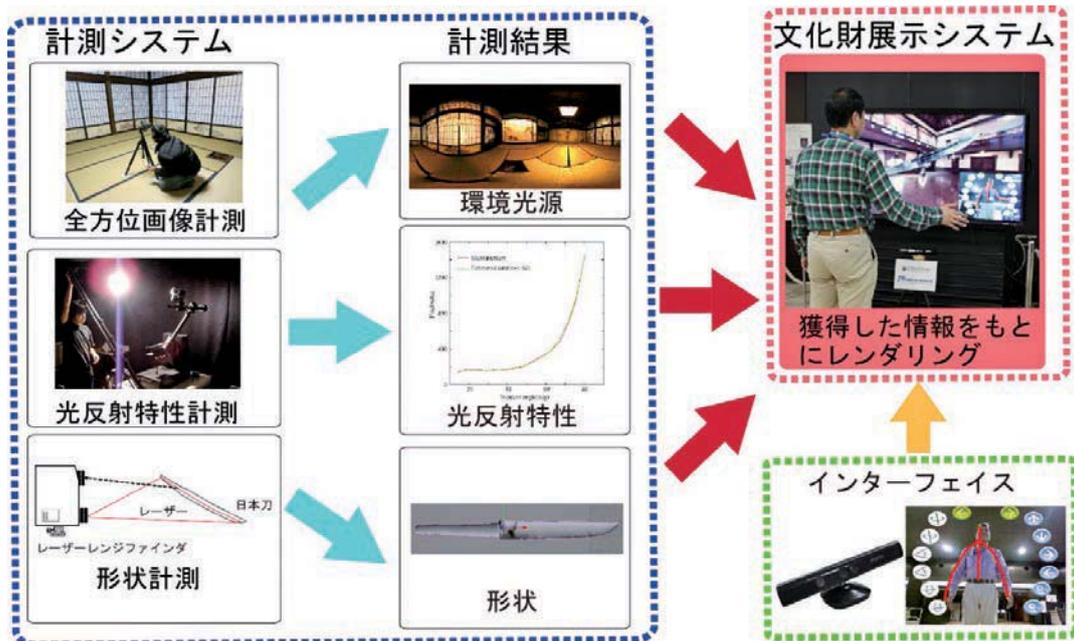


図6 本研究で提案する文化財展示システムの概要図



図7 実験に用いた Microsoft 社 Kinect センサ

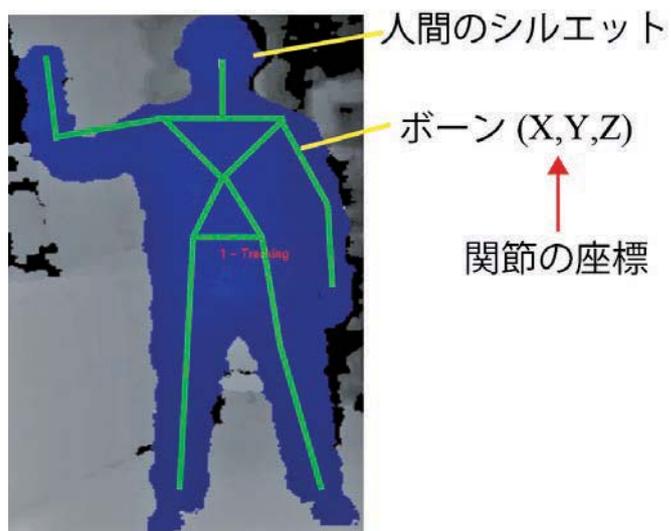


図8 人間の姿勢をボーン（仮想骨格）として認識している様子



図 9 本研究で開発したユーザインタフェースの表示部

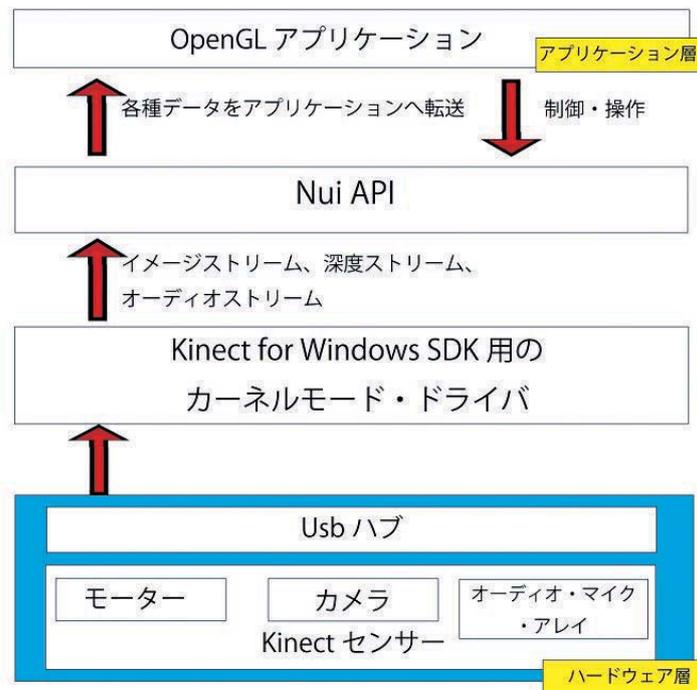


図 10 Kinect センサのレンダリングシステムへの実装方法

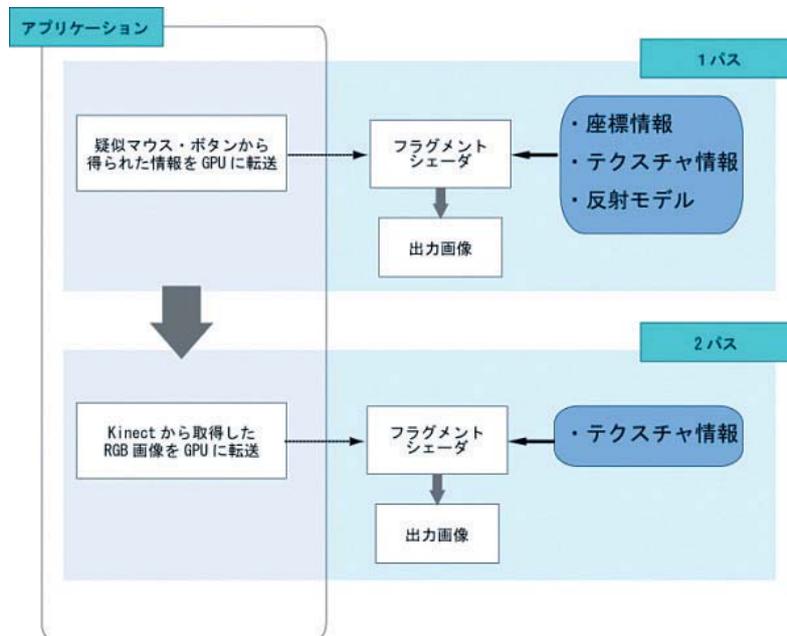


図 11 文化財展示システムの処理の流れを示したフローチャート

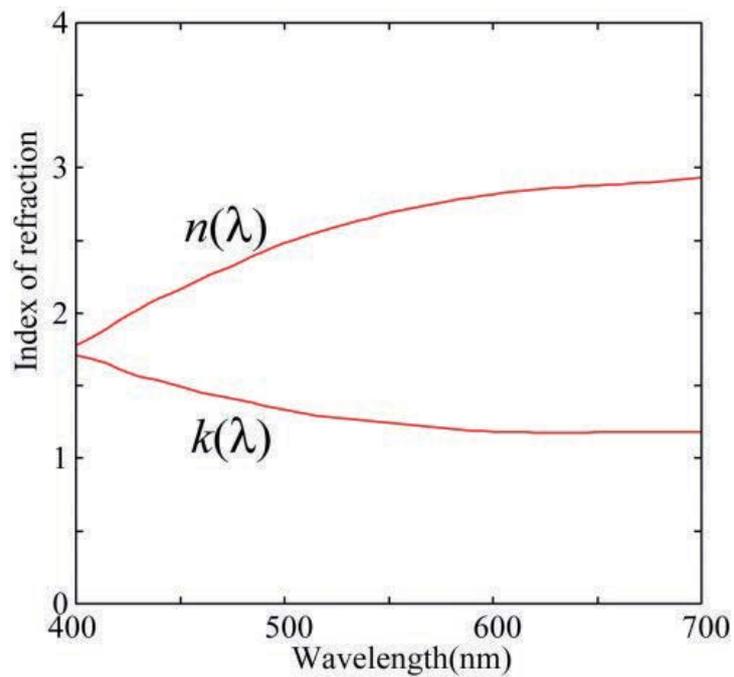


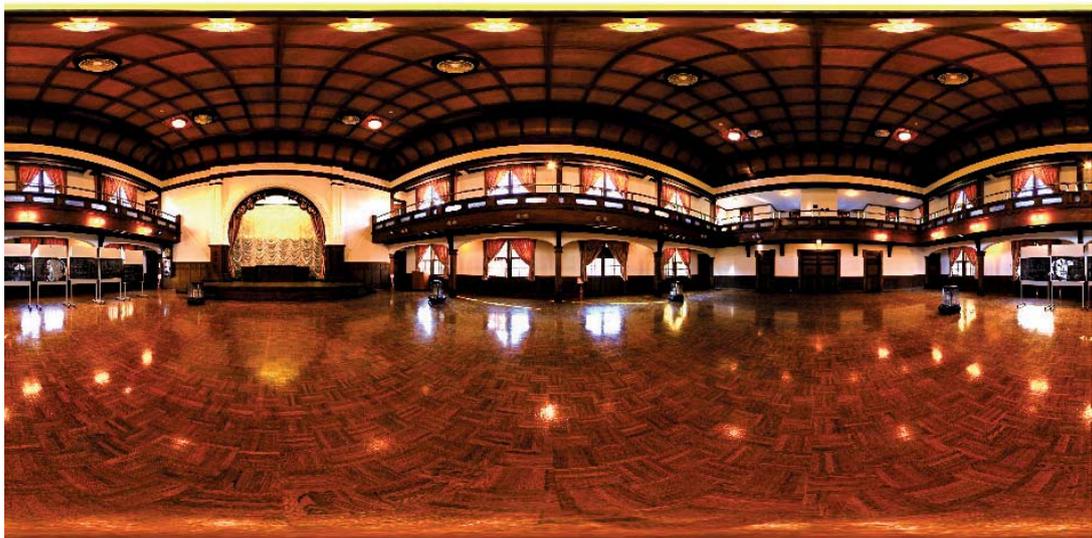
図 12 鉄の複素屈折率



(a) 東京国立博物館 応挙館の全方位画像

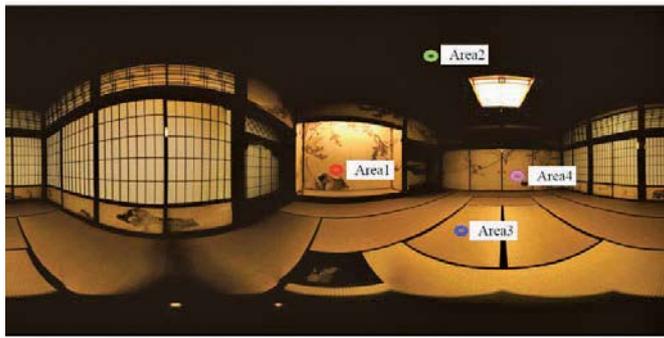


(b) 東京国立博物館 庭園の全方位画像

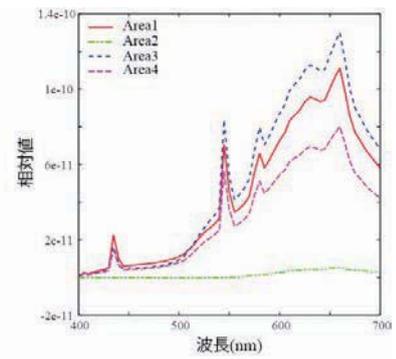


(c) 信州大学 繊維学部講堂

図 13 計測した全方位分光画像（仮想的に RGB 表示したもの）



全方位画像と分光分布の抽出領域



抽出した領域の分光分布

図 14 分光分布の推定結果の例

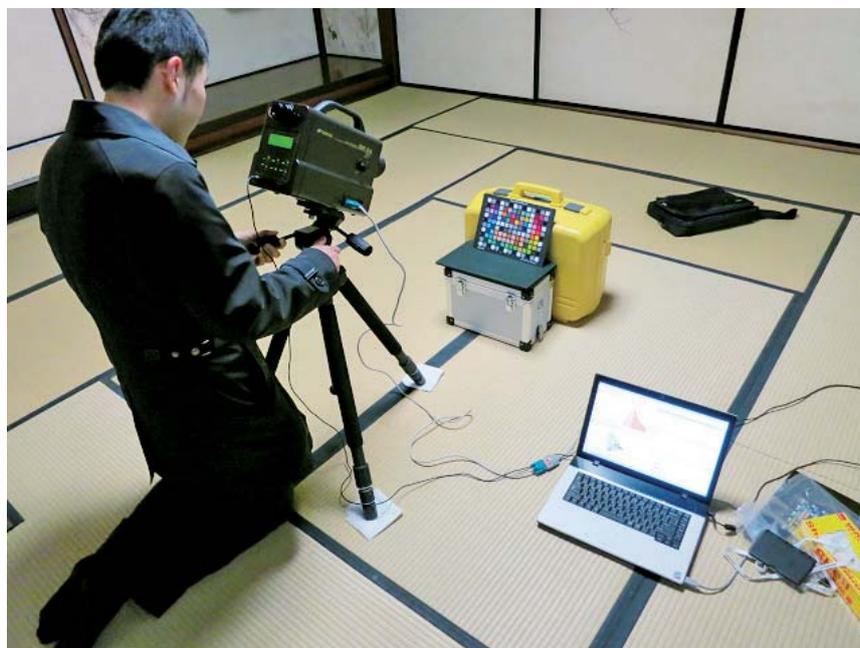


図 15 カラーチャートの計測シーン

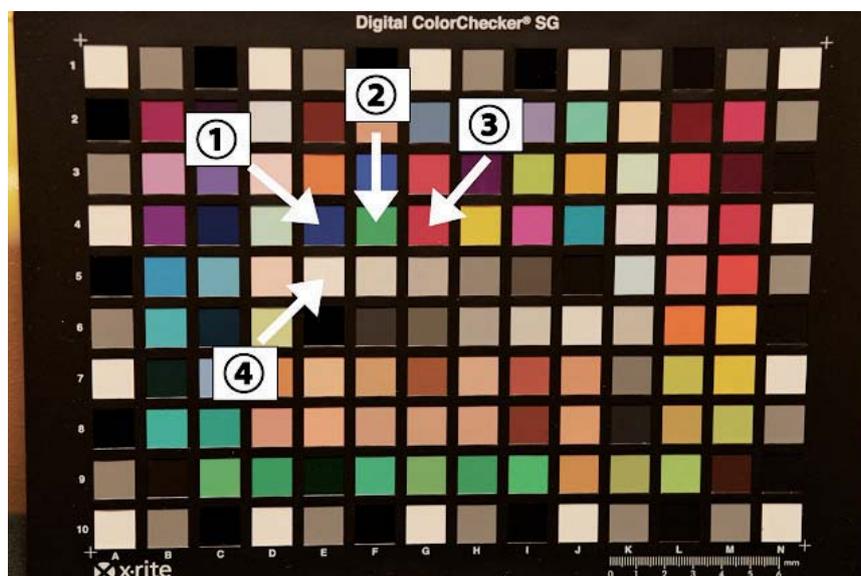
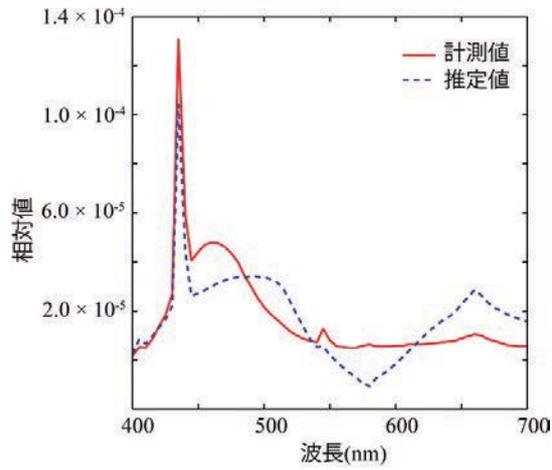
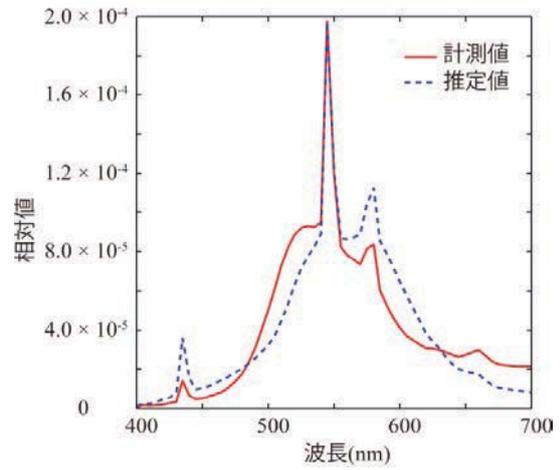


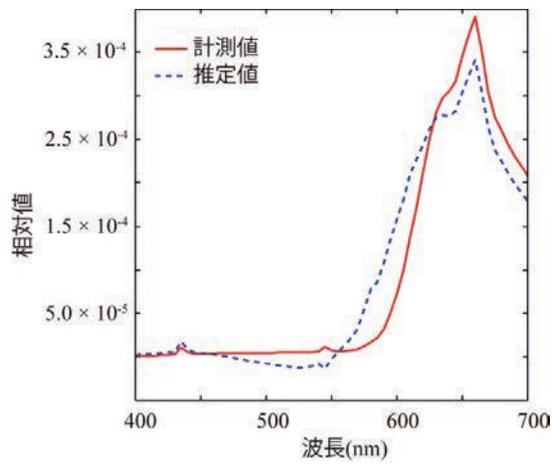
図 16 精度検証に使用したカラーチャート (Gretag Macbeth SG) :
①から④は精度検証に使用したカラーパッチ



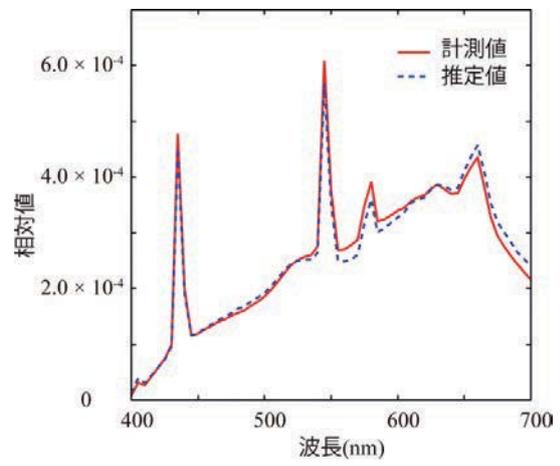
①青のカラーパッチ



②緑のカラーパッチ

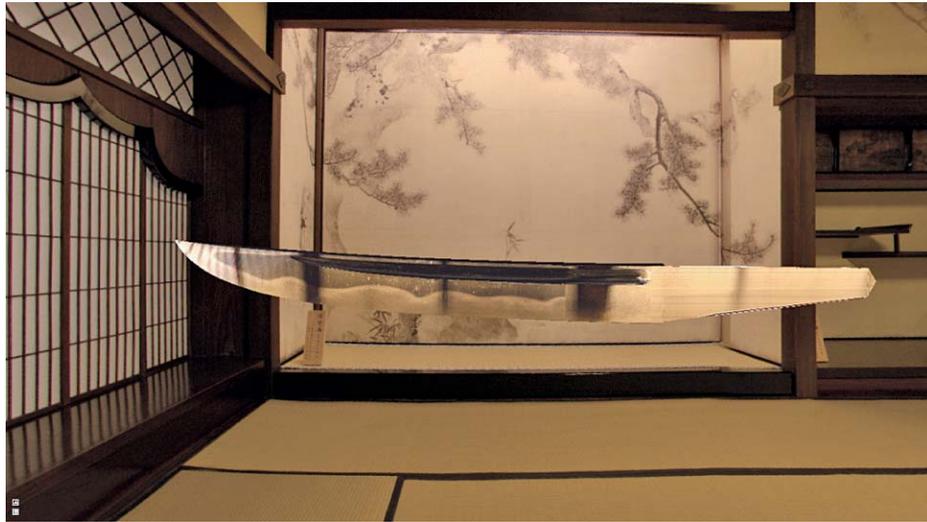


③赤のカラーパッチ



④白のカラーパッチ

図 17 カラーパッチから得られた応挙館内の分光分布の推定結果
(図 16 の①から④のカラーパッチに対応)



(a) 東京国立博物館 応挙館でのCG再現結果



(b) 東京国立博物館 庭園でのCG再現結果



(c) 信州大学 繊維学部講堂でのCG再現結果

図 18 計測した各シーンでの有形文化財のCG再現結果



図 19 提案システムによる有形文化財のCG再現結果(2)：
3DCGが表示された鑑賞部(左)と利用者が操作する操作部(右下)で構成



図 20 試作したシステムを国立歴史民俗博物館エントランスホールで展示している様子：
一般来館者の子供が本システムを使用している。