

超高精細分光撮影による祇園祭・山鉾懸装品の デジタルアーカイブ

橋本勝^{1,2} 村田正浩³ 鳥居悠人³ 永野遼³ 田中弘美³ 矢野桂司⁴

1 日本電信電話株式会社, 2 立命館大学 衣笠総合研究機構, 3 立命館大学 情報理工学部,
4 立命館大学 文学部

文化財のデジタルアーカイブでは、高解像度な画像を撮影することに加えて、その色や形状、さらには物理特性も可能な限り詳細に記録できることが望まれる。本論文では、京都・祇園祭の山鉾の装飾品（懸装品など）を対象に行った6バンド、約1~5億画素でマルチバンド撮影作業とその結果について報告を行う。

Digital archive of Gion-matsuri using high-resolution multiband imaging camera

Masaru Hashimoto^{1,2}, Masahiro Murata², Yuuto Torii², Ryo Nagano², Hiromi Tanaka²,

Keiji Yano²

¹ NTT Corporation, ² Ritsumeikan University

In order to archive high quality digital archives for cultural assets, accurate recording and reproduction of shape, color and physical properties are very important. In this paper, the archiving project of Gion-matsuri using high-resolution multiband imaging camera is reported. This camera system can obtain over 1000MPixel, 16bit, 6band images. Accurate color and spectral reflectance are reproduced using the captured 6band image.

1. まえがき

デジタル写真技術の発達に伴い、文化財の記録・分析現場においてもデジタル画像システムの導入が進みつつある。現在のデジタル画像撮影システム開発の流れとしては、立体化・動画化を除けば次の5つの技術が非常に重要と考えられている。

- (1)高解像度（画素数）化
現状では数千万~1億画素程度の画像撮影が可能なカメラが入手可能になっている。
- (2)高ダイナミックレンジ化・高感度化
市販の中級機種以上のデジタルカメラでは12~14bitでの記録が可能であり、また暗部でのノイズ抑制技術も進歩している。
- (3)広色域化
市販の中級機種以上のデジタルカメラではAdobeRGB対応が標準になりつつある。
- (4)高い色再現性（正確な色情報の記録）
- (5)可視光以外の情報の可視化

上述の5つの技術のうち(1)(2)(5)に関しては、デバイスの製造技術に大きく依存していると考えられる。一方で(3)(4)に関しては、赤・青・緑の3原色で色を記録・表現する現在の画像システム自体が制限となっていると考えられる。特に、照明光に依存した見た目の色しか記録できないことは、撮影時の照明条件が大きく制限される文化財の記録においては、非常に不便と言える。

この制限の打破が期待できる技術の一つとして、マルチバンド画像を用いた分光の色再現技術の開発がすすめられている[1]。先に述べたとおり通常はR,G,Bの3バンドで色の記録を行っているが、これを4色以上での記録に拡張する。たとえば2倍の6色での記録の場合、3バンド撮影時と比較して2倍以上の色再現精度の実現でき、またAdobeRGBを超える広い記録色域が実現されることが報告されている。さらに画像中の各画素には、スペクトルメータでの計測時に得られる分光反射率の精度に匹敵するに、分光反射率に相当する情報が記録されている（画素値からの推定が可能）。分光反射率は材質固有の物理量であり、撮影時の照明環境に依存しない。したがって撮影時とは異なる照明下での色の見えを物理モデルに基づいてシミュレートすることも可能である。さらにデータベースなどに蓄積された先見情報と組み合わせることで、製作技術や材質の同定・解析・復元などにおいても有益な知見が得られる可能性がある。

この可能性を実証するための第一歩として今回、京都・祇園祭の山鉾の装飾品（懸装品など）を対象に撮影実験を行った。撮影した画像は6バンド、約1~5億画素である。本論文では撮影システムの紹介と、得られた画像を用いての評価結果の一部について報告を行う。

2. 撮影方式と原理

2.1 マルチバンド画像とは

一般的なカメラシステムでは、可視光波長域の一部 400~700nm の範囲を概ね 3 分割し、それぞれ短波長側から青・緑・赤の各色として記録する。この方式では、見た目に異なる色であっても同じ色として記録されてしまう場合があり、色を正確に記録できるとは限らない。また同様の理由から、鮮やかな（純度が高い）色の記録は困難である。

可視光波長域を 4 分割以上に分け 4 色以上の画像として記録したのがマルチバンド画像である。図 1 に 3 バンド、6 バンド、スペクトル画像での記録における概念図を示す。これまでの先行研究では、9 バンド程度あれば十分な色再現性が得られるとの報告例もある[1]。また紫外、近赤外・赤外の不可視光波長域も記録することができれば、分光スペクトルレベルでの組成分析にも使える可能性がある。

実現方法としては、白黒センサと複数の狭帯域カラーフィルタを組み合わせ、フィルタを変えながら時分割でそれぞれの画像を撮影する方式が一般的である[2]。ただこの方式の場合、特殊な撮影装置が必要であり、また高解像度な白黒カメラの入手も現状では困難である（せいぜい 200 万画素）。そこで市販の高解像度デジタルカメラ（3 バンド）と特殊なフィルタを用いて、2 ショットで 6 バンド画像を取得する方法も開発が進められている[3]。図 2 に 2 ショット型 6 バンド方式の概略を示す。1 ショット目は通常と同じ撮影、2 ショット目は 6 バンド撮影用に設計したフィルタをレンズの前に装着して撮影する。ここで使用するフィルタの分光特性を図 3 に示す。フィルタは楕型の透過特性を持っており、カメラ内のセンサ面に取り付けられている青・緑・赤の各色フィルタの超波長側、もしくは短波長側の半分のみを透過するよう設計されている。この方式のメリットは、比較的低価格で入手可能な高性能・高解像度（10~20MPixel）デジタルカメラが利用可能であり、操作性やレンズ群を含めカメラ自体の完成度が非常に高いシステムが容易に構築できることにある。またデジタルカメラの中には通常、近赤外光（700nm）以上の波長をカットするフィルターが組み込まれているが、一部の機種では取り外すことも可能である。この様なカメラを用いれば、9 バンド程度までバンド数を増やせる可能性があり、色だけではなく分光スペクトルの形状推定精度の向上も期待できる。

2.2 マルチバンド画像を用いた色再現処理

マルチバンド画像から分光反射率を推定する際には、以下の情報が必要となる。

- ・カメラの分光感度、トーンカーブ
- ・撮影時の照明光スペクトル
- ・被写体の分光特性に関する統計情報

分光撮影の原理イメージ

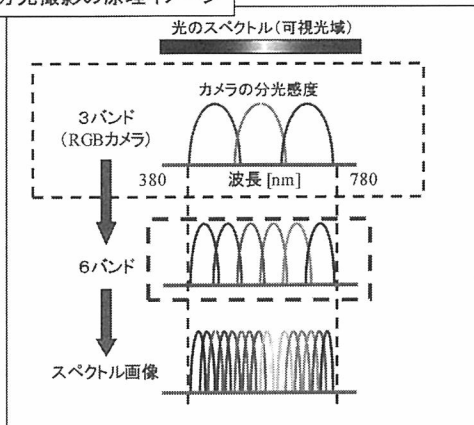


図 1 分光撮影の原理

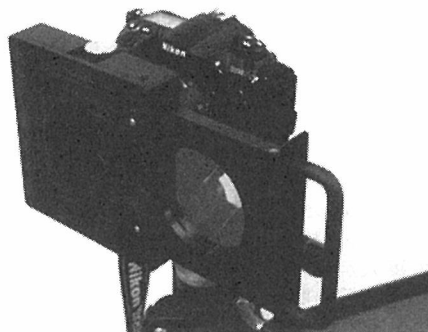


図 2 2 ショット型 6 バンドカメラ

今回の撮影システム

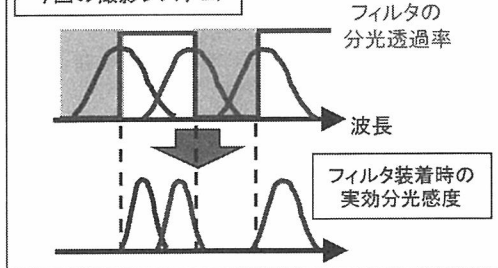


図 3 6 バンド撮影の原理

「被写体の分光特性に関する統計情報」とは、たとえば分光反射率の教師データから算出した共分散行列や主成分等を指す。この統計情報は

特に、少ないバンド数の画像を用いるときに重要となる。

以下ではマルチバンド画像からの分光反射率推定方法について述べる。詳細に関しては参考文献[4]等を参照されたし。なお以降の説明では簡単のため、カメラのトーンカーブ（入出力信号の関係）は線形であると仮定する。

被写体の分光反射率を \mathbf{f} 、照明光スペクトルを E 、カメラの分光感度を S とすると、カメラからの出力信号 \mathbf{g} は次式のように表される。

$$\mathbf{g} = SE\mathbf{f} \quad (1)$$

式(1)はカメラの順モデルを記述したものであり、カメラからの出力信号からの分光反射率の推定は、式(1)の逆モデルに相当する。分光反射率の推定結果を $\hat{\mathbf{f}}$ は式(2)のように表すことが出来る。

$$\hat{\mathbf{f}} = M\mathbf{g} \quad (2)$$

ここで行列 M は次式に基づき計算される。

$$M = R_f H' \{HR_f H'\}^{-1} \quad (3)$$

$$(R_f = \mathbf{f}\mathbf{f}', H = SE)$$

R_f は分光反射率の相関行列、 H はカメラのシステム関数に相当する。この行列 M は Wiener 推定行列とも呼ばれ、適当な行列 M を算出することにより、マルチバンドデータから分光反射率の推定が可能となる。

3. 撮影実験

3.1 撮影対象

船鉾の懸装品や神功皇后の衣装などを撮影した。撮影の目的は、懸装品等の現在の状況（色を含む）を記録することと、織りの様子などの表面の微細な構造を記録することである。船鉾の懸装品の特徴としては、図柄が最大で 10cm 程度の凹凸がある 3 次元的な形状を持つ点にある。今回の報告では割愛するが、対象の一部に関しては立体形状の計測も行っている。懸装品の大きさは概ね、縦 1m、幅 2~5m で、これらをつなぎ合わせる形で鉾へ取り付けられる。撮影は 7 月と 9 月の 2 回行った。7 月は祇園祭の最中の町屋内で、9 月は立命館大学アトリサーチセンタ内にて行った。撮影した被写体は合計で 23 点（一部は表裏の両方を撮影）であった。

3.2 撮影システム

画像センサには、pioneer 製のデジタルスキャニング・バックを使用した。最大で 1.8 億画素 (17600 x 10600) の画像の取り込みが可能であり、16bit の RAW 画像 (tiff 形式) として出力される。このセンサを 4x5 の大判カメラに装着して撮影を行った (図 4)。このスキャナータイプの画像センサの特徴としては、(1)平面状のイメージ型センサのように R,G,B に相当する各色

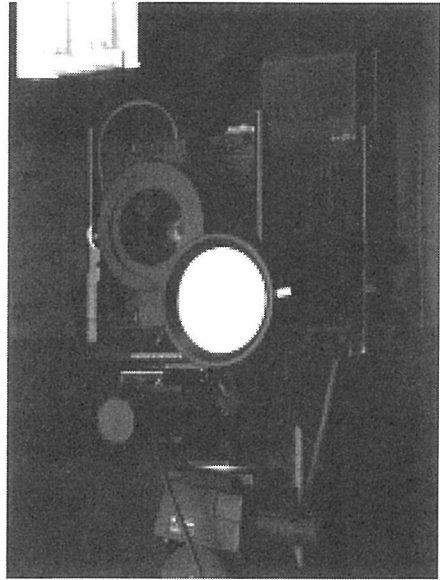


図 4 実験で使用したカメラシステム

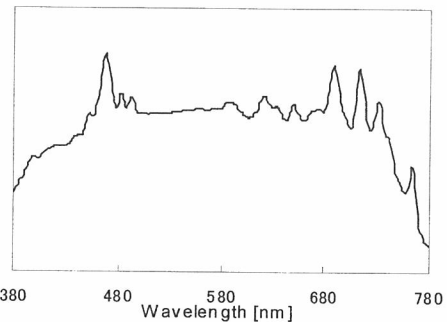


図 5 照明光の分光スペクトル

のセンサが空間的にモザイク状に配置されていないために画素の補間が不要で、より高い解像力が得られる、(2)各チャンネルのゲインが独立に制御できるため平面状のイメージセンサより S/N 比が高い画像が得られる、といった点があげられる。一方で 1 回の画像の撮影に 5~20 分（露出条件に依存）程度を要するため動く被写体の撮影には適さないが、今回のような静止物の撮影には問題ない。今回の被写体は全体的に細長いものが多いため、2~3 回に分割して撮影を行い、画像処理後に貼合せ合成して 1 枚の高精細画像を生成した。分割撮影方法は、イメージサークルが十分に大きいレンズを使用し、センサをイメージ面上で上下左右に平行移動させそれぞれの位置での画像を取得した。この撮影方法のメリットはレンズを移動させないため、画像合成時に光学収差による歪の影響がない点

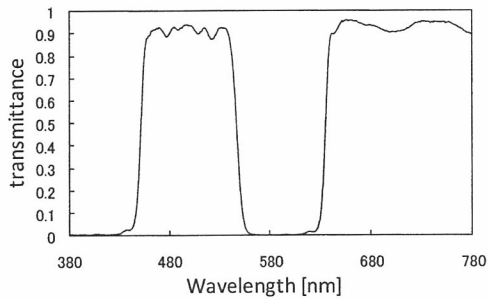


図6 フィルタの分光透過率

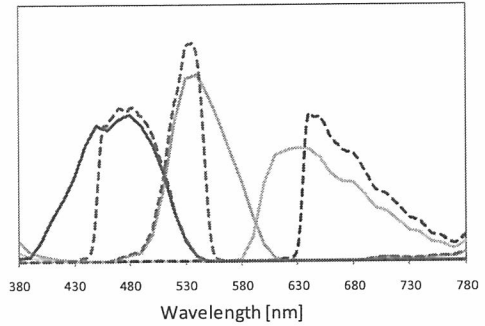


図7 カメラの分光感度

である。画像の貼合せ合成には Adobe Photoshop の Photomerge という機能を使用した。なお今回は 0.1mm/pixel 相当で撮影を行った。撮影時の照明としては色（分光反射率）の記録を重視して、太陽光とほぼ同じ分光スペクトル分布を持つ人工太陽照明灯（seric 社製）を使用した。人工太陽照明灯の分光スペクトルを図 5 に示す。今回の撮影では念のため、紫外光と赤外光をカットするフィルタ（ディフューザ）を光源の前に挿入した。

次に 6 バンド画像の撮影方法について説明する。今回は、2.1 で説明したような 2 ショット型の撮影方式を採用した。図 6 に分光撮影用のフィルタの透過特性を示す。このフィルタは青チャンネルの長波長側、緑チャンネルの短波長側、赤チャンネルの長波長側のみを透過する。なお、今回は近赤外波長領域の情報の記録を目的に、センサの前に付いていた赤外カットフィルタを 800nm 付近までの光を透過するものに取り換え、撮影を行った。図 7 に各チャンネルの分光感度（実測値）を示す。実線がフィルタ無しの場合、波線がフィルタ有りである。なおフィルタ有り/無しのそれぞれである程度ホワイトバランスがとれるよう、各チャンネルのゲイン値を調整してある。またフィルタ有り/無しで撮影した 2 枚の画像間には、カメラの振動やフィルタの厚みによる画像間での位置ずれが生じる。これに関しては、位相限定相関法（POC）[5]を用いることで、位置ずれ・回転量・拡大縮小率を 0.1pixel 程度の精度での補正を実現している。色再現処理はカメラの分光感度、照明光スペクトル等を使用し、wiener 推定法により行った。

撮影風景を図 8 および図 9 に示す。7 月の町屋での撮影では作業スペースの関係上、比較的小さな被写体を選択し、床置きもしくは天井からぶら下げ四隅を綱で張る形で実施した。9 月の撮影では被写体の重量が数十 kg あるものも多く、綱で棒から吊るした壁に貼り付けると破損の危険があるため、大きなものに関しては被写体を床置きにし、カメラは大型の撮影台に取り付け、被写体を真上から見下ろす状態で撮影を行った。なお撮影に際し、色再現結果の確認・補正用と

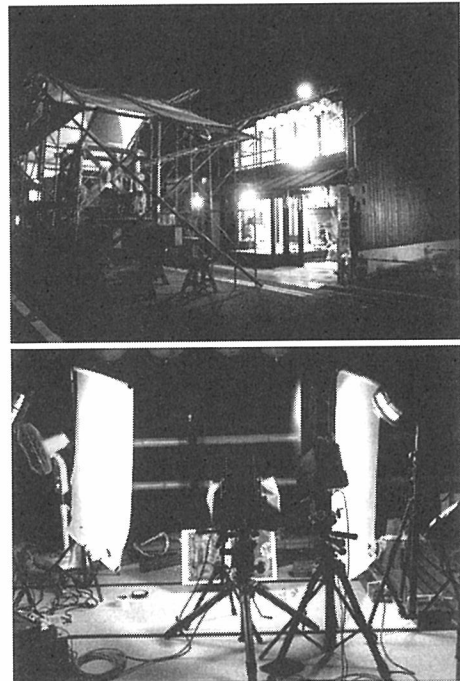


図8 船鉾町 町屋での撮影風景

して画像の隅に、Macbeth ColorChecker を切って 1 列に配列しなおしたカラーチャートを入れて撮影を行った。

3.3 撮影結果

はじめに A4 サイズ程度の御神体の古い衣装の端切れの撮影結果を図 10 に示す。画像サイズは 9000 x 13000pixel で概ね 0.02mm/pixel 程度の分解能を有している。これにより端切れの織りの構造などが鮮明に確認することができる。

次に懸装品の撮影結果の一例を図 11 に示す。左上図は画像全体 (35000 x 17000pixel) を、右下図はその一部分を拡大したものである。この画像は横方向に 3 分割で撮影したのちに 1 枚の画像に合成した。拡大図では糸の太さ・より方

や織り方が画像から識別できることを確認した。また、微妙な色の違いや糸の太さなどから、過去の修復箇所と思われる個所が目視により確認できた。

今回撮影した高精細画像そのままでは、そのファイルサイズや画素数の問題から一般的な性能の PC 上での閲覧が困難である。そこで Microsoft 社が公開している silverlight という技術の中の deepzoom の機能を利用して、汎用的な性能の PC 上の web ブラウザで画像が見れるよう、ファイル形式の変換を行った。撮影ごとに、実物とモニタ上に表示した色再現結果の画像を目視にて比較したところ、見た目には実物とまったく同じ色であることが確認できた。

4. 考察

今回撮影した高精細画像を織物技術の専門家などに見て頂き、いくつかのコメントを頂戴した。現状ではポジフィルムで必要部分を接写し、ルーペで拡大して分析を行っているとのことである。また照明は 2 方向（縦と横）から照射し、それぞれについて撮影しているとのことである（縦糸と横糸の様子を見るため）。解像力的には図 10 程度のものが得られれば、それなりの知識を持った技術者であれば判別できるとのことである（現実にはすでに失われた技法が多く、また資料も残されていないため、判別できる有識者が激減しているとのこと）。図 11 での解像力ではまだ不十分で、かなりの経験を持った技術者でないと、正確に判別するのは難しい（経験と知識に基づいた推測が必要）。以上の聞き取り調査から、0.01mm 程度の分解能が織物のアーカイブでは必要とされていることが分かった。また今回のように被写体全体を超高解像度画像として撮影し、また軽快に動くビューソフトと組み合わせることで、被写体全体と拡大部分との対応付けが容易になり、研究用の素材・ツールとしても有益であるとのコメントも頂戴した。

0.01mm/pixel 程度の分解能を有する画像の撮影だが、実現可能と考えている。今回のような平面上とはいえないかなりの凹凸がある被写体の場合には、フラットベッド型のスキャナは適さないと考えられるので、やはり今回のようなカメラによる非接触での撮影が現実的であると考ええる。カメラでの撮影には照明条件をある程度自由に設定できるというメリットもある。今回の撮影実験では被写体とカメラの間は数十 cm から数 m 確保することができた。ただし使用するレンズの選択（解像力）、耐震性には慎重を期する必要がある。特に耐震性に関しては、高分解能になるほど振動によるブレの影響が大きく、可能であれば体育館にや会議室のような板張りではなく、カメラスタジオのようなコンクリートである程度の振動が抑制されているような場

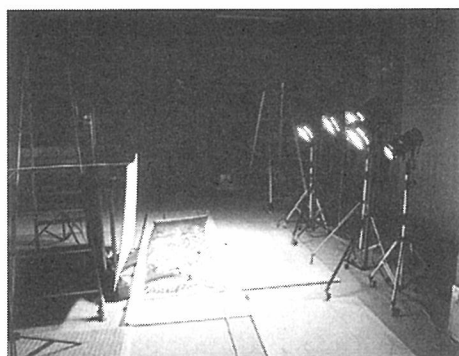


図 9 立命館アートサーチセンターでの撮影風景

所での撮影が好ましい。9月に撮影で使用した多目的ホール（板張り）でも、被写体およびカメラ周辺への立ち入りは制限したうえで撮影を実施した。これはスキャニングタイプのカメラだけではなく、ワンショット型のカメラに関しても同様のことが当てはまる。さらにワンショット型のカメラの場合、カラーフィルターがモセンサ上にザイク状に配列されており（ベイヤー配列）、各色の画素間の補完処理により画像が生成されているので、仕様上の画素数と実際の分解能の関係には注意が必要である。

5. おわりに

今回の撮影実験により、撮影方法と、得られる画像の質に関して確認ができた。特に撮影画像の分解能と色再現性にはある程度の成果が得られたので、今後は織りや染めの専門家による評価を行い、そのその有意性を明らかにしていく予定である。なお今回は 0.02~0.1mm/pixel 程度の分解能でのぞき込みを行ったが、まだ余力はあると考える。

今回の撮影方法は 3 次元的な形状・構造をもつ被写体の高精細画像の撮影が可能であり、将来的には取得画像の CG テクスチャへの適用や、ステレオ画像を撮影することでの立体像表示への適用も期待でき、こちらに関しても今後検討

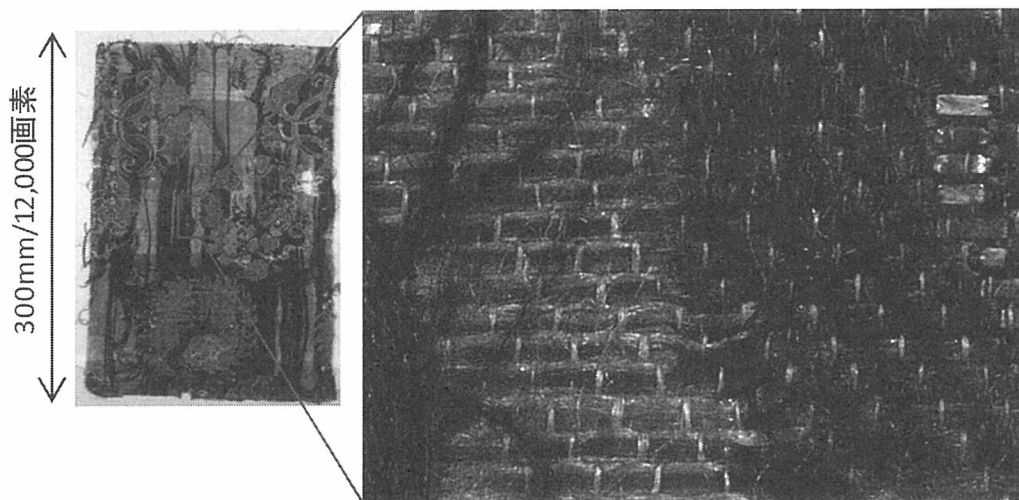


図 10 撮影結果の例 1 (御神体の旧衣装の端切れ)

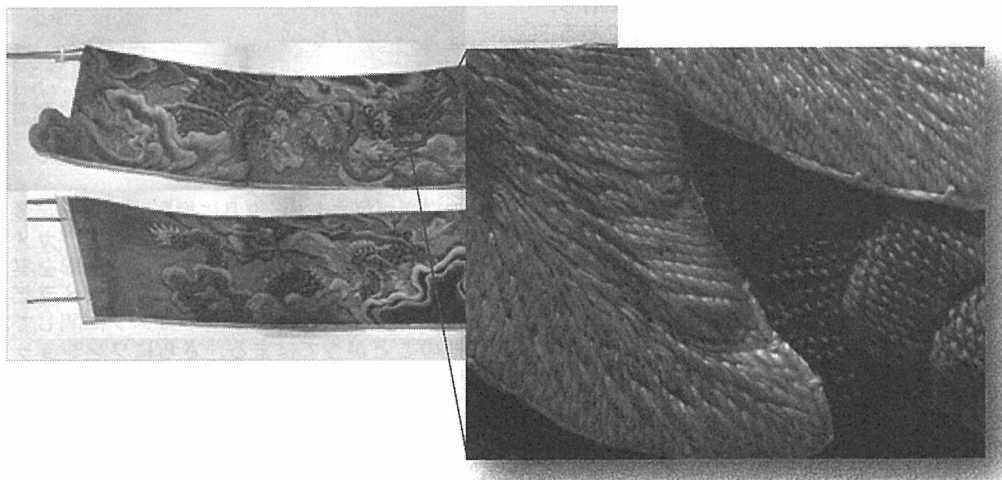


図 11 撮影結果の例 2 (下水引 雲龍文様 肉入刺繍 西村楠亭下絵)

を進めていく予定である。

謝辞

今回の撮影は、財団法人祇園祭船鉾保存会の協力により実施された。また本研究の一部は、文部科学省 平成 21 年度「デジタル・ミュージアム実現のための研究開発に向けた要素技術及びシステムに関する調査検討」事業の一環として実施された。

参考文献

[1] T. Uchiyama, et al. "A Method for the Unified Representation of Multispectral Images with Different

Number of Bands", Journal of Imaging Science and Technology, Vol.48, No.2, pp.120-124, 2004

[2] M. Yamaguchi, et al. "Natural Vision: Visual Telecommunication based on Multispectral Technology," IDW '00, pp.1115-1118, 2000

[3] 橋本勝, "6 バンド分光画像による浮世絵のアーカイブと高精度色再現", 情報処理学会: 人文科学とコンピュータシンポジウム論文集, 2008

[4] 村上百合, "分光反射率の推定理論", 日本写真学会誌, 第 65 巻, 第 4 号, pp.234-239, 2002

[5] H. Takita, et al. "High-accuracy image registration based on phase-only correlation," IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E86-A, no.8, pp.1925-1934, 2003