

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

橋本 勝

株式会社 NTT データ

文化財のデジタルアーカイブにおいて、対象の色を正確に記録することは「見た目の色」の記録に留まらず、使われている塗料や材質の分析の質を上げ、複製や再現、また劣化・破損の修復作業の精度を高める可能性がある。筆者らはこれまでに市販のデジタル一眼レフカメラとカラーフィルタを組み合わせた2ショット型6バンド撮影システムを開発し、工業デザインや医療分野などの様々な場面で性能評価を行ってきた。今回は文化財のデジタルアーカイブへの展開を念頭に、浮世絵を被写体とした撮影・色再現実験を行なった。同時に検証用データとして分光放射輝度計による分光反射率の計測も行なった。

Digital archiving and accurate color reproduction of Ukiyo-e using 6-and multispectral image

Masaru Hashimoto

NTT DATA Corporation

6-band image capturing and measurement of spectral reflectance of Ukiyo-e has been done. The 6-band images were captured by using two-shot type 6-band camera consists of a custom color filter and a digital camera. 56 sheets of original Ukiyo-e (printed in middle of 19th century) are used as subject in the experiments, and 6-band images and 3500 samples of spectral reflectance were obtained.

1. まえがき

文化財のデジタルアーカイブにおいて、対象の色を正確に記録することは「見た目の色」の記録に留まらず、使われている塗料や材質の分析の質を上げ、複製や再現、また劣化・破損の修復作業の精度を高める可能性がある。色情報の計測は分光放射輝度計によるスポット計測が一般的だが、近年の画像センサの高性能化に伴い、分光（マルチバンド）画像として記録する技術の開発も進められている[1-4]。これまでに様々なタイプのマルチバンドカメラが開発されてきたが、現場では普及が進んでいない。その一因と考えられるのが、高い導入コストと画素数が既存のデジタルカメラより少ない点である。

筆者らはこれまでに市販のデジタル一眼レフカメラとカラーフィルタを組み合わせた2ショット型6バンド撮影システム[5]を開発し、工業デザイン分野や製造流通分野、医療分野などの様々な場面で性能評価を行ってきた。今回は文化財のデジタルアーカイブへの展開を念頭に、浮世絵を被写体とした撮影・色再現実験を行なった。同時に検証用データとして分光放射輝度計による分光反射率の計測も行なった。

浮世絵は江戸時代1750年頃から広まり明治時代まで流行した風俗画であり、主に多色刷りによる木版画（錦絵）を指す。江戸時代後期以降には海外から鮮やかな顔料が輸入され使用されたが、当初は植物性、鉱物性の染料・顔料が用いられていたため非常に褪色しやすく、印刷当時の色を残すものは極めて稀である。当時日本

では美術品としてはほとんど評価されず、現在の新聞やグラビア雑誌のように扱われたため、保存状態が良いものはボストン美術館のコレクションなど国内よりも海外に多く存在している。古美術店においても海外からの買い付けが多いと聞く。褪色の主な原因は光と考えられ、そのために保存状態が良いオリジナルが一般に公開されることは少ない。わが国固有の芸術品（浮世絵の彫りや刷りの技術の中には海外の版画には見られない高度なものもある）の一つともいえる浮世絵を、よりオリジナルに近い状態で一般にも公開でき、また研究素材として研究間で広く共有できる環境を作りたいというのが、浮世絵を対象に選んだ理由である。

2. 本研究で目指す色再現とは

「色」というと、観察環境の照明光に依存する「見た目の色」と、照明光に依存しない物体固有の色すなわち「被写体の反射率」がある。本研究で目指す色再現とは、「被写体の反射率」を画像情報から正確に推定し、その上で「見た目の色」をモニタ上や印刷物として再現することである。「被写体の反射率」を精度良く推定できれば、撮影時とは異なる任意の光源下での「見た目の色」もシミュレーション可能である。また「被写体の反射率」は、塗料や材質の分析・同定にも利用可能である。

センサに色が記録される過程を図1に示す。光源から出た照明光が被写体表面で反射し、その反射光をカメラのセンサが受光し電気信号に変換する。光を物理量として表現する場合、波

長ごとのエネルギー分布、すなわち分光スペクトルとして記述できる。同様に、被写体表面の反射率も波長ごとの反射率の分布（以下、分光反射率とする）で記述できる。つまり、カメラの出力信号から被写体の分光反射率を精度良く推定する事が本研究における課題である。一般にカメラからの出力信号は赤・青・緑の3バンドだが、これから分光反射率を推定することは、3次元信号から401次元信号（可視光域を1nm間隔で表現する場合）の推定に相当し、十分な精度を得ることは非常に難しい。もし、より多くのバンド数の画像が取得できれば、分光反射率の推定精度は向上すると考えられる。この考えに基づき、様々なマルチバンド画像撮影システムや分光反射率の推定方法も考案されている[1-4]。本研究では、一般のカメラの2倍の色情報を持つ6バンド画像を入力とし、Wiener推定法を用いて分光反射率の推定を行なう。

なお撮影システムだが、フラットベッドタイプのスキャナではなく、デジタルカメラをベースに構築を行なう。先にも述べたが浮世絵の特徴は、その独特な図柄や色使いはもちろん、加えて、彫りや刷りの技術と考えられる。その一例が雲母摺り（きらざり）や空摺り（からざり）で、細かな凹凸などにより見る向きや光の当て方によって、模様が浮かび上がってきたりする（図2）。その他にも、版木の木目を生かした作品も多く見られる。これらの状態も含めて記録するためには、光源と観察方向が限定されるフラットベッド・スキャナよりは、レイアウトの自由度が高いカメラ（ラインセンサタイプのもを含む）の方が好ましいと考えられる。近年の技術の発達により、デジタルカメラでも1億画素超の画素数を持つものも入手可能な状態になりつつあり、スキャナに匹敵する解像度の画像も得ることが可能である。さらにカメラによる撮影であれば、現在、各現場で使われているデジタルカメラに、文献[5]で述べているようなフィルタを取り付けることで、既存の設備を利用しつつ、容易にマルチバンド化が実現できる。

3. 6バンド色再現システム

3-1 2ショット型6バンド画像撮影システム

図3にカメラシステムの外観を示す。デジタルカメラのレンズの前にカラーフィルタを取り付け、フィルタ有り/無しの状態でそれぞれ3バンド画像を撮影し、得られた2枚の3バンド画像を合わせて1枚の6バンド画像とする（図4）。動いている被写体の撮影には適さないが、絵画や彫刻等の静止している被写体に関しては有効である。なお、フィルタの抜き差しの際にカメラがわずかに動き、2枚の画像の間で数画素の位置ずれが生じるが、これはソフトウェア上で画像処理にて補正している。

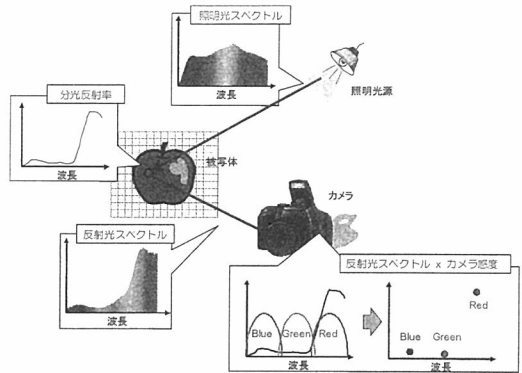


図1 センサに色が記録される過程



図2 雲母摺りの例

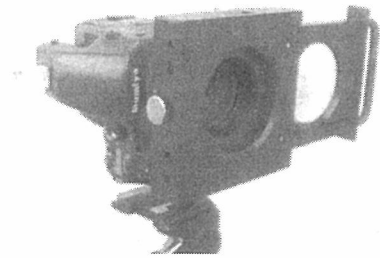


図3 カメラシステムの外観

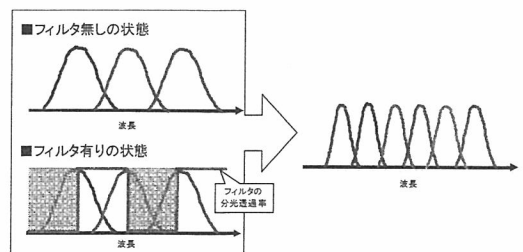


図4 6バンド化の原理

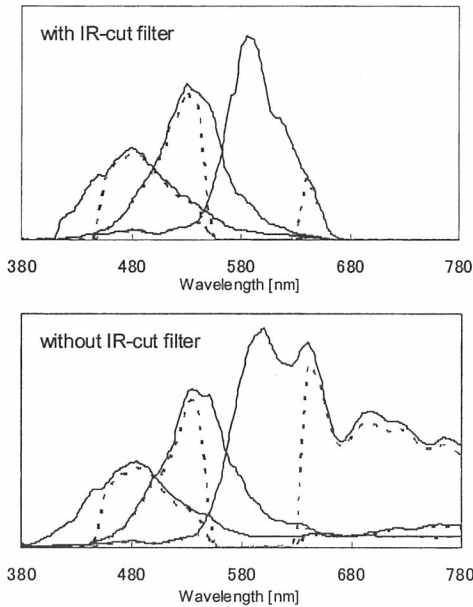


図5 カメラの分光感度
 上図：赤外カットフィルタ有り
 下図：赤外カットフィルタ無し

文献[5]などでは、いわゆる 35mm 型の一眼レフデジタルカメラを使用していたが、今回は中判デジタルカメラ (Mamiya 645AFD III + Mamiya ZD Back) を使用する。該当カメラを選んだ理由は以下のとおりである。

一つ目の理由は、赤外 (IR) カットフィルタの脱着が容易に出来ることである。図5に IR カットフィルタ有りとし無しの状態におけるシステムの分光感度 (6 バンド撮影時) を示す。一般的にデジタルカメラには IR カットフィルタが組み込まれており、700nm 以上の近赤外波長領域の情報を記録することが出来ない。そのため、色再現結果での色差への影響は少ないものの、分光反射率の推定結果では近赤外波長域において推定誤差が大きくなっている。加えて、6 バンド撮影を行なう際に、赤の長波長側に対応するバンドの信号値の S/N が他のバンドに比べて悪いという状態であった。分光撮影用のフィルタを再設計する必要が出てくる可能性があるものの、IR カットフィルタを外すことにより、前述の問題は改善されると考えられる。

二つ目の理由だが、今回使用するカメラセンサの画素数は 22Mpixel であるが、ビューカメラと呼ばれる大判カメラに取り付け、センサの位置をずらしながら撮影した複数枚の画像を貼り合わせることで、比較的容易に高解像度の画像が得られる点にある。

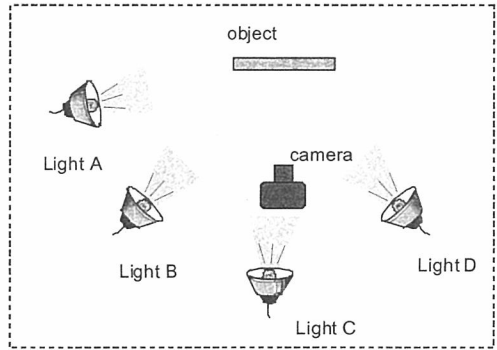


図6 照明の配置

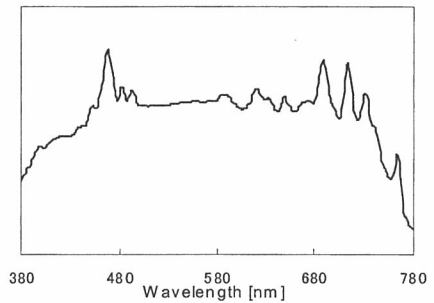


図7 照明光スペクトル

三つ目の理由は、その効果については未検証だが、センサの開口率が上がることにより画像の S/N および画像のダイナミックレンジが向上することが期待できる点である。こちらは今後の検証課題とする。

3-2 色再現の原理

マルチバンドデータから分光反射率を推定する手法の概略について述べる。詳細に関しては、参考文献[1]等を参照されたい。

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。

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

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

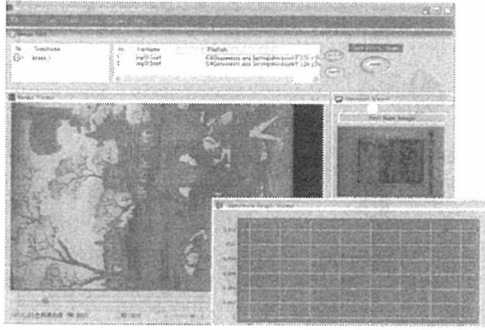


図8 色再現ソフトウェアのGUI

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.

なお本撮影システムでの色再現精度だが, 人工太陽照明灯下で Macbeth Color Checker を被写体とし実物と色再現結果の画像を比較した場合, CIE の $L^*a^*b^*$ 平均色差で 1.19, 最大色差 3.01 (液晶モニターへの表示結果では平均色差 2.17, 最大色差 5.06) といった色再現性が得られている.

3-3 照明環境

被写体表面の凹凸の様子も含めて記録するため, カメラの位置は固定した状態で, 3種類の照明環境において画像を撮影した(図6). パターン1(光源 B+D)は反射を抑えた状態でより均一に被写体を照明することを目的に, パターン2(光源 C)は雲母摺り等の反射により浮かび上がる模様を記録を目的に, パターン3(光源 A)は凹凸の様子を際立たせた状態を記録することが目的である. なお光源には図7に示すスペクトル分布を持つ人工太陽照明灯(SERIC社製 SOLAX)を使用した.

2-4 色再現ソフトウェア

本ソフトウェアは, カメラから出力される RAW 画像2枚(フィルタ有り・無しの状態それぞれ撮影)と色再現パラメータ設定画面(分光反射率推定行列, 再現する環境の照明光スペクトル, モニタの原色とトーンカーブ, 明るさ補正係数)を入力とし, PCのグラフィックカード上の GPU(Graphics Processing Unit)を用いてリアルタイムに処理結果をモニター上で確認するプレビューモードと, CPUを用いて高精度に計算した結果を表示画像やファイルとして出力する詳細モードを有している. 色再現結果は BMP, JPEG, TIFF といった一般的なファイル形式のほか, CIE-XYZ や Lab, マルチバンド画像(汎



図9 被写体を使用した東海道五十三対の一部

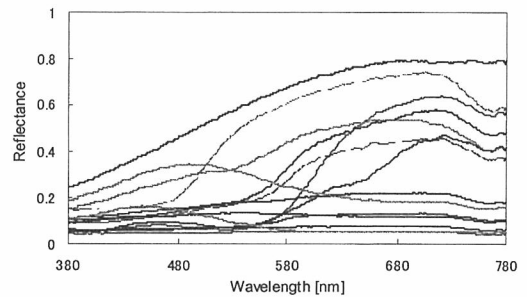


図10 計測した分光反射率の例

用 RAW 形式)として 16bit 画像データとしてのファイル出力も可能である.

また画像解析機能として, (a)画像上で指定した箇所の分光反射率グラフの表示とファイル出力(図8), (b)特定の波長成分に相当する画像の生成, (c)特定の波長成分を強調した画像の生成, 等の機能を実装している. 生成された色再現画像は ICC プロファイル付の TIFF や JPEG として保存することで Adobe Photoshop 上でも扱え, 正しい色でのプリンタへの出力も可能となる.

3-1 で述べた 2 枚の画像間での倍率や位置ズレを補正する機能も実装してある. 前者は主にフィルタを抜き差しする際に生じるカメラ位置のずれに起因し, 後者はフィルタの有無による光路の違いに起因する. 画像の倍率は, 被写体とカメラの距離や使用するレンズにも依存するが, 0.05~0.1%程度生じる事が実験的に分かっている. これは 20MPixel (5000x4000Pixel) の画像の場合で中心を基準にすると画像の両端で, 10~20 画素ほどのズレが生じることとなる. 今

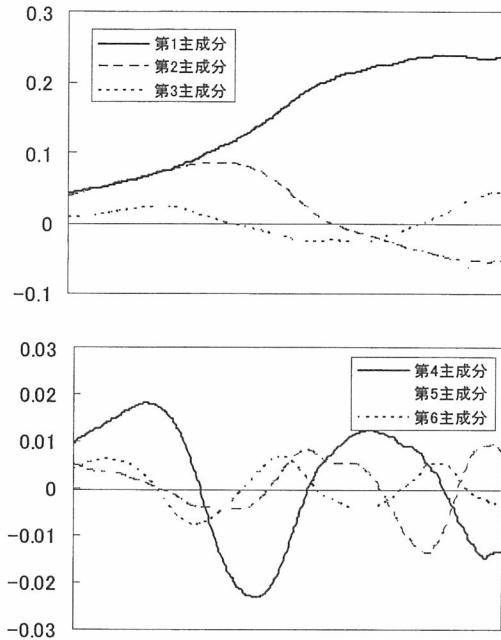


図 11 算出した主成分（第 1～6 主成分）

	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
累積寄与率(%)	88.69	97.92	99.25	99.77	99.88	99.93

図 12 主成分の累積寄与率

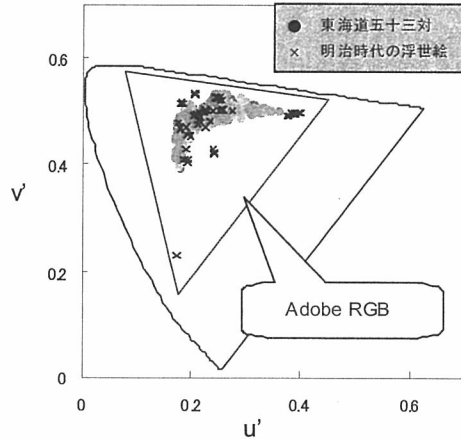


図 13 u' - v' 色度図上での分布

回は位相限定相関法[6]等を組み合わせてこれらの補正機能を実装している。

4. 実験

今回の実験では「東海道五十三対」（国芳・広重・国貞：55 枚）に江戸時代後期から明治時代中期にかけてのものを加えた計 61 枚の浮世絵を 6 バンドで撮影した。また検証用データとして分光放射輝度計（TOPCON SR-3）による計測も同時に行なった。図 9 に今回の実験で使用した画像の一例を示す。

4-1 分光反射率の計測

画像毎に 50～90 点の計測を行い、合計で約 3500 サンプルの分光反射率を取得した。分光放射輝度計の計測精度は 1nm で 380～780nm の波長範囲のスペクトルデータが出力される。図 10 に計測した分光反射率の一例を示す。

次に、得られた分光反射率データを主成分展開し、第 1～第 6 主成分とそれぞれの累積寄与率を算出した。これらのデータは、6 バンド画像からの分光反射率推定時の Wiener 推定行列生成時にも利用される。図 11 に各主成分を、図 12 に各主成分での累積寄与率を示す。第 6 主成分までの累積寄与率が 99.93%となっており、6 バンドの撮影データからでも、高い精度で分光反射率が推定できる可能性を示している。

図 13 には、計測された反射スペクトルから測色値を算出し、 u' - v' 色度図上にプロットした色

の分布を示す。参考までに、Adobe RGB の色域も実線で示す。東海道五十三対に関してはそれほど彩度が高い色は使われていなかった。明治時代のものには鮮やかな赤色と青色が使われているものもあったが、Adobe RGB の色空間に収まっていた。これらの結果から、画像の表示に関しては Adobe RGB 相当の色表示能力を持つモニターであれば十分であると考えられる。

4-2 6 バンド画像からの分光反射率の推定

分光反射率の推定結果の一例を図 14 に示す。参考までに、IR カットフィルタをつけた状態での推定結果もグラフ上に示した。IR カットフィルタ有りの状態では 650nm 以上の近赤外光領域において推定誤差が大きくなっているが、IR カットフィルタを外した状態での推定結果では、この領域の推定精度が向上していることが確認できる。この近赤外波長領域は人間の目の感度が低いため「見た目の色」や色差での評価結果への影響は小さいが、塗料の同定等の分析用途には特に有益であると思われる。

5. まとめ

61 枚の浮世絵を被写体に、分光放射輝度計による分光反射率の計測、および近赤外波長領域までも含めた 6 バンド画像の撮影を行った。また、6 バンド画像から分光反射率の推定を行った。同じ 6 バンド画像でも、カメラから IR カットフィルタを外し、近赤外波長領域を含めて

撮影することで、分光反射率の推定精度が向上することを確認した。図 10 に示す分光反射率の実測値を見ても、680nm 以下の波長領域では同じようなスペクトル分布を持っているが、680nm 以上で形状に差が生じているものが確認できる。近赤外波長領域は人間の目の感度が低いため、見た目や色差等の定量的指標では推定誤差の影響があまり現れない。しかしスペクトル分析においては、この近赤外波長領域での推定誤差が分析結果に影響を与えると予想される。このことの実証については、今後の課題とする。

今回の画像撮影は 6 バンドで実施した。ただ図 5 のカメラの分光感度を見ると、最も長波長側のバンドのように、他のバンドと比べて含まれる波長範囲が大きい部分が見られる。この領域を更に細かく分光することが出来れば、分光反射率の推定精度は更に向上すると考えられる。今後は、3 ショットで 9 バンド撮影が可能なフィルタの設計・実装についても検討を進めていく予定である。

最後に、高解像度デジタルカメラでなくても、数億画素クラスの画像の撮影が比較的容易に出き、また 6 バンド撮影にも拡張可能な方法の一例を図 14 に紹介する。カメラ本体としては大判写真撮影用のビューカメラを使用し、そのフィルム面に一眼レフカメラを取り付ける。被写体とカメラ本体は固定した状態で、一眼レフカメラのみを垂直・水平方向に移動させ、1 つの像をタイル状に分割した画像を取得する。その後、画像処理によりこれらの画像を張り合わせることで、既存の一眼レフカメラを使いながらも、スキャナ並みの解像度をもつ画像の記録が可能となる。レンズ等の光学系の位置は動かさないため画像間での光学歪の影響は無く、非常に精度良く画像の貼り合わせが可能である。

謝辞

本研究成果の一部には、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「マルチスペクトル映像収集・伝送技術の研究開発」における研究成果が含まれる。

参考文献

- [1] M. Yamaguchi, et al. "Natural Vision: Visual Telecommunication based on Multispectral Technology," IDW '00, 1115-1118 (2000)
- [2] S. Tominaga, et al. "Object Recognition by Multi-Spectral Imaging with a Liquid Crystal Filter", Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition (2000)
- [3] K. Ohsawa, et al., "Six-band HDTV camera system for spectrum-based color reproduction," J. Imag. Sci. and Tech., 48, 2, 85-92 (2004).
- [4] H. Fukuda, et al., "Development of 16-bands multispectral image archiving system," Proc. SPIE, 5667, pp. 136-14, (2005)
- [5] 橋本 勝, 他 "市販デジタルカメラを利用した 2 ショット型 6 バンド静止画像撮影システムによる色再現", カラーフォーラム JAPAN, 384-391 (2007)
- [6] H. Takita, et al. "High-accuracy image registration based on phase-only correlation," IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E86-A, no.8, 1925-1934, (2003)

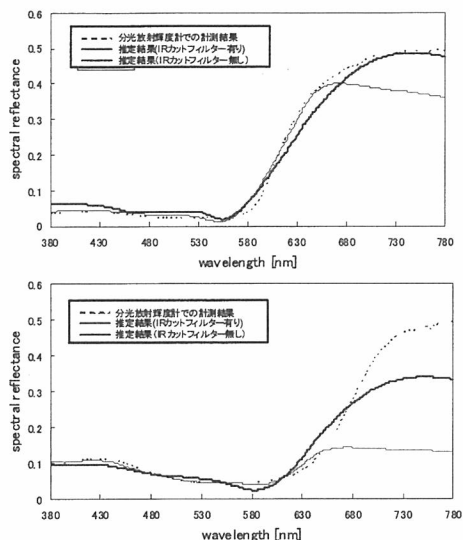


図 13 分光反射率の推定結果の一例

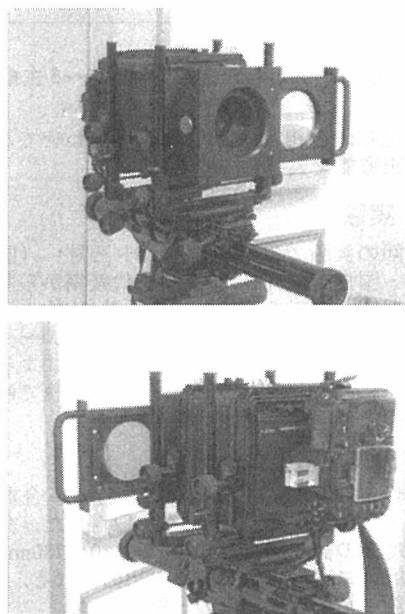


図 14 高解像度画像撮影システムの一部