色を忠実に再現する高精細分光画像撮影技術

NTTコミュニケーション科学基礎研究所では，超高精細の色表現を持つ画像撮影技術（分光画像撮影技術）を研究しています．本稿では，まず分光画像撮影技術を説明し，屋外の文化財を対象にした20億画素超の高精細分光画像の撮影例を述べ，最後に最新の研究成果である分光動画の撮影に向けた取り組みを紹介します．

土田　勝（つちだ まさる）／川西　隆仁（かわにし たかひと）
大和　淳司（やまと じゅんじ）
NTTコミュニケーション科学基礎研究所

色の忠実な再現への期待の高まり

商品や美術品を直接見るのではなく，ネットワークを介して，ディスプレイ上の画像を見て購入したり楽しんだりする機会が増えています．ネットワークのさらなる広帯域化やデジタルカメラの進歩や低価格化により，遠隔医療や電子美術館といった応用も現実的になってきていますが，今後は高解像度化以上に色の忠実性もますます重要になっていきます．例えば，医療では，血管の色（動脈と静脈の色の違いなど）はとても重要ですが，現在のデジタルカメラやディスプレイでは十分に判別できる性能がないのが現状です．

これまで映像の高品質化の試みは，フルハイビジョン（1 920×1 080画素），4K（4 096×2 160画素），あるいは倍速液晶（60フレーム/s）などの解像度やフレームレートの改善といった量の観点に重きが置かれる状況でしたが，最近では，3D表示や4原色表示などの質への転換が始まっており，将来的にはさらなる色の情報の広域化や高精細化も期待されています．色情報の忠実な再現技術は高品質な映像を実現するキーとなる技術の1つであり，広帯域ネットワーク上の映像利用の高度化に大きく貢献できると考えています．

色とは何か？

色は，照明光が物体表面で反射した光の波長のスペクトルを人の眼が認識した結果です．このため，人間の視覚特性に大きく依存していますが，一方でカメラやディスプレイで表現される色は，人間が視認できる色をすべて表現しているわけではありません．

通常のカメラで撮影できる色域と，Adobe RGBの規格で表現できる色域，人間が知覚できる色域を図1に示します．Adobe RGBは通常のモニタ標準のsRGBに比べ緑の色域が広く，印刷物などへの適合度が高い規格です．通常のカメラで撮影できる色域は人間が知覚できる色域に比べ圧倒的に小さく，Adobe RGBで表現できる色域よりも小さいことを示しています．市販カメラではAdobe RGBの95％程度であるのに比べ，印刷やAdobe RGB対応ディスプレイではほぼ100％の色域を表現できるものも多いので，印刷やAdobe RGB対応ディスプレイ用途

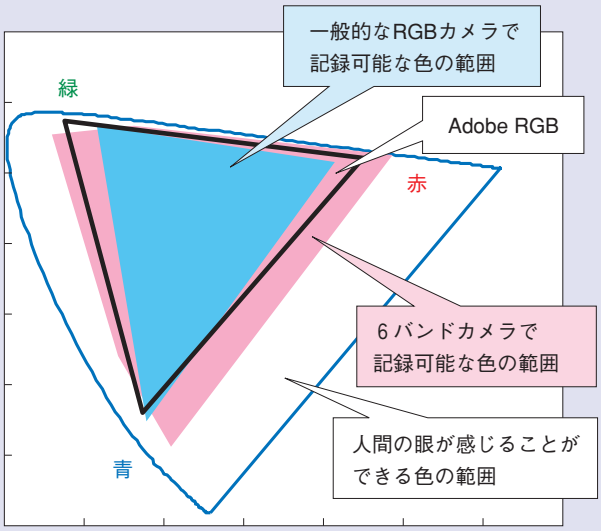


図1　撮影・表示可能な色域

でも市販カメラより広い色域が求められるといえます．

またAdobe RGBの色域が広いとはいえ，現実にはAdobe RGBの色域の外側の色も存在し，このような色はAdobe RGBの色域内の色に縮退して判別できなくなります．例えば動脈血と静脈血の違い，自動車のフェラーリの赤，モルフォチョウの青，サンゴ礁のエメラルドグリーン，ルビー等の宝石の色などはAdobe RGB色域の外側にあり，実際に眼で見た色合いと，ディスプレイを通して見た色合いが異なります．

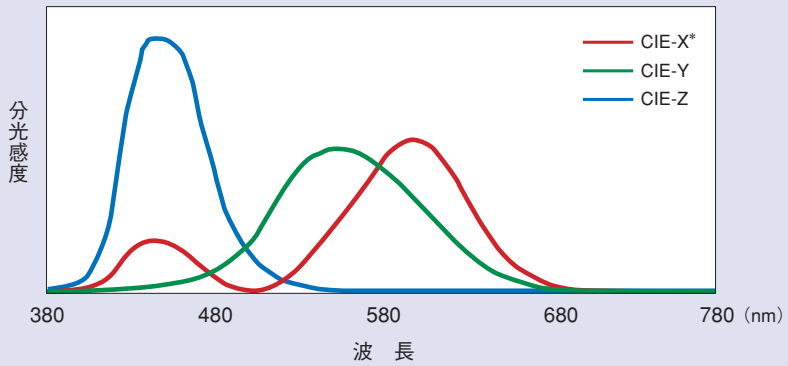
市販カメラで撮影できる色域の中でさえ，正しく表現できない色も多くあります．これは人間の眼の分光感度（**図 2**（a））と，カメラ上のCCD素子の分光感度（図 2（b））が異なるためです．人間の視覚やカメラの色感度の違いにより正しい記録が難しい色には，例えば，淡いヨモギ色やグラスグリーン等の緑色系の色のほか，あずき色，オリーブ色，金色などがあります．

さらに，人間が色を理解する過程では，色順応と呼ばれる人の視覚特性の影響を受けるため，画像中の物体の色を正しく知覚するのは困難です．眼で物体を見る場合には，人間の視覚・認識系が周囲の照明環境に順応（色順応）するため，実際には照明光の色の違いによって人間の眼に入力される色が異なっていても，観察者は常に同じ色として物体の色を知覚します（色恒常性）．しかしながら，ディスプレイや印刷物上の表示結果を見て物体の色を認識する過程では，眼が順応している観察環境下における照明光と，撮影時の照明光が異なる場合に，物体本来の色が誤って知覚され得る状況になります．人間の視覚認知の観点からは，画像に表示される色も，観察時の照明条件に合った色を提示することが重要になります．

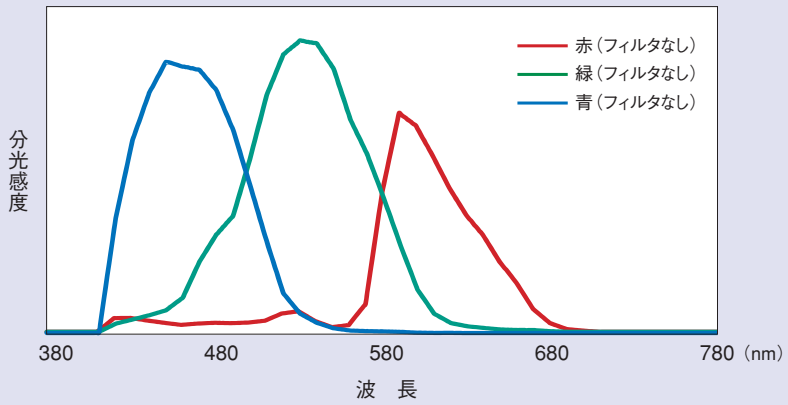
＊ CIE-XYZ：CIE（国際照明委員会）がヤング－ヘルムホルツの光の三原色説を基に1931年に発表した，心理物理的な光の演色実験に基づく混色系のカラーオーダーシステム．

色の撮影・再現の原理

次に，色を実際に撮影し，再現する過程を説明します（**図 3**）．ここで重要なのは，物理的な光とはRGBのような3次元の信号で表されるのではなく，虹のように各波長のエネルギーの分布（分光スペクトル）であることです．照明光が物体に当たると，物体表面の各波長の反射特性（分光反射率）に基づき，それぞれの波長ごとに反射・吸収が行われます．すなわち，照明光スペクトルと分光反射率を掛け



(a) 人間の眼の分光感度



(b) カメラの分光感度

図 2　人間の眼とカメラの感度

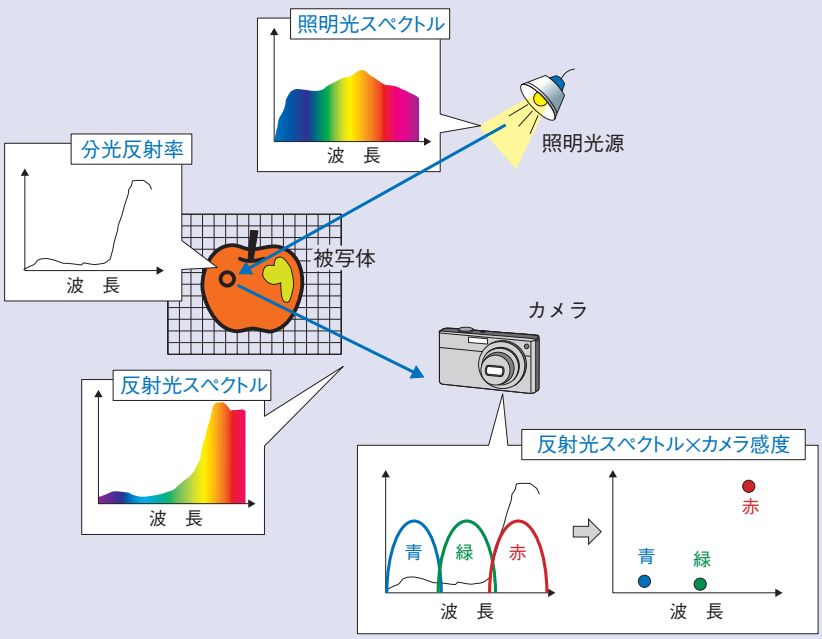


図 3　色の撮影の原理

合わせた結果得られる反射光スペクトルが眼を通して人間の視覚系に入力されます．人間の場合，L，M，Sの3つの錐体の反応とその後の認識系により色を感じます．一方でカメラの場合，R，G，Bの3つのセンサ素子からの出力信号が色として記録されます．前述のとおり，通常のカメラの受光素子の分光特性は人間の視覚系の分光特性と異なるため，撮影時と観察時の照明環境が同じだとしても，人間が知覚する色とカメラに記録される色との間には差異が生じます．

これらを回避するアプローチとしては次の2つの方法が考えられます．1つはカメラの受光素子をRGBではなく人間の眼の感度特性と同じものにする方法です．しかしながら人間の眼と同じ感度を得るためのカラーフィルタ製造の困難さや，先に述べた色順応への対応ができないことから実用には至っていません．もう1つは，人間の眼に入力される反射光スペクトルをできるだけそのままカメラで記録しようとする方法で，分光画像撮影技術と呼ばれています．これはRGBなどの3つの素子の反応で色を記録するのではなく，多様な波長感度を持つセンサを用いて，反射光スペクトルをより正確に記録する方法です．多様なセンサから得られる多くのバンドの画像情報を分光画像と呼びます．観察される物体からの反射光スペクトルと，ディスプレイの特性が分かればディスプレイの性能の範囲で誤差の少ない色の表示が可能になります．この方法では，反射光スペクトルを物体表面の分光反射率と照明光スペクトルに分離することもできるので，撮影した照明光ではなく，観察時の照明光のスペクトルでの画像を再現することもできます．

分光画像の撮影方法

反射光スペクトルを正確に撮影するための方法には，狭帯域の波長のみを透過するフィルタを多数使って画像を撮影し，各波長での信号値を組み合わせ，反射光スペクトルを再現する方法があります[(1)]．この方法には，多数の撮影が必要になることや，データ量が大きくなるなどの課題があります．そこで比較的広帯域の波長情報を6～10バンド程度を組み合わせて反射光スペクトルを計測・推定する方法が注目されています．

私たちは，簡便な分光撮影方法として，著者土田がNTTデータ在籍時に開発した2ショット型分光撮影システム[(3)]を活用しています（**図 4** (a)）．

2ショット型分光撮影システムは，市販のRGBカメラで一回撮影し，さらにこのカメラに各RGB素子の反応する帯域の約半分ずつを透過させるフィルタ（図4 (b)）を装着して再度撮影します．フィルタ装着後のカメラの分光感度は，図4 (c) になります．得られた2つの3バンド画像，計6バンドの情報から，分光反射率を推定します．分光反射率と照明スペクトルを掛け合わせた反射光スペクトルをカメラの各チャネルの感度で計測する過程を線形の行列計算にモデル化し，逆行列を求める問題として定式化して，分光反射率を計算しています．

図1にこの6バンドで取得できる色

域を記載しています．図1に示すとおり，Adobe RGBで表示できる色ほぼすべてを記録することができます．

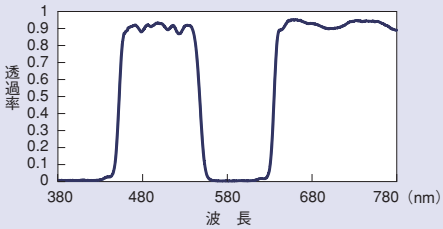
高精細分光画像の応用例

まず，文化財の屋外での撮影例として，長崎県波佐見町のやきもの公園内にある壁画『陶磁の路』（第1回グッドデザイン賞受賞デザイナーの故 森正洋氏が制作）の撮影を紹介します[3]．この壁画は，素焼から白磁器，七宝焼きなど過去から現在に至るさまざまな技術で作成された焼き物の破片を，時系列にモザイク状に壁へ貼りつけたもので，技術史的に大きな価値があるとされています．大きさは横幅が約50 m，高さ4 mでした．得られた合成画像全体および数段階に拡大した画像を**図5**に示します．この撮影にあたっては，撮影場所1カ所に付き，デジタルカメラバックを垂直方向に3回，水平方向に2回の計6枚（実際には2ショット6バンド撮影を行ったので12枚）の画像を撮影しました．カメラを等間隔に移動させながら24カ所でこの撮影を行いました．撮影した画像に対し，レンズの歪補正処理等や貼合せ処理を行い，最終的に生成した画像サイズは約22万×1万画素（約22億画素）にも達し，解像度は約0.15 mm/pixelの細やかさでした．この極めて高い表現力への好意的なコメントを数多くいただいています．

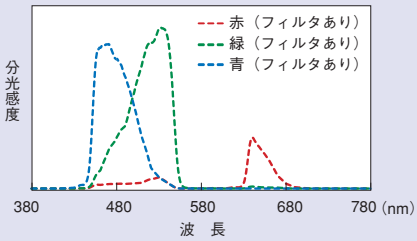
次に医療での応用例を紹介します．乳幼児の病気の1つに，胆道閉鎖症があります．この病気は，死亡率が高いものの，早期に発見すれば治癒する可能性が高くなります．検査の際には，便の色で判別しますが，この色は通常のカメラで撮影できない色でした．そこで2ショット型分光カメラにより撮影した分光画像を大量に集積し，専門でない医師でもその便の色で胆道閉鎖症かどうか判断するためのカラーチャートを作成しました．本カラーチャートが実際の診断でも有効であるという報告が得られています．

上記のような応用のために，20億画素を超えるサイズの画像の閲覧を，普通のPCやディスプレイで可能にするために，軽い処理で，注視エリアの移動や拡大・縮小をインタラクティブに行うことのできるビューワソフトウェアを開発しました．これは実際にWebブラウザから閲覧いただけます[4]．

(b) フィルタ

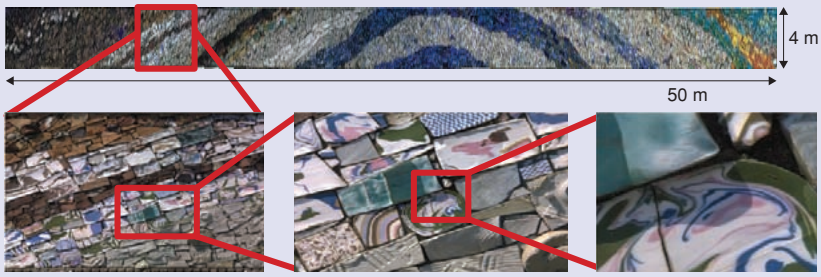


(a) フィルタの分光透過率



(c) フィルタ装着後の分光感度

図4　2ショット型分光撮影システム



拡大画像1　拡大画像2　拡大画像3

図5　『陶磁の路』の撮影

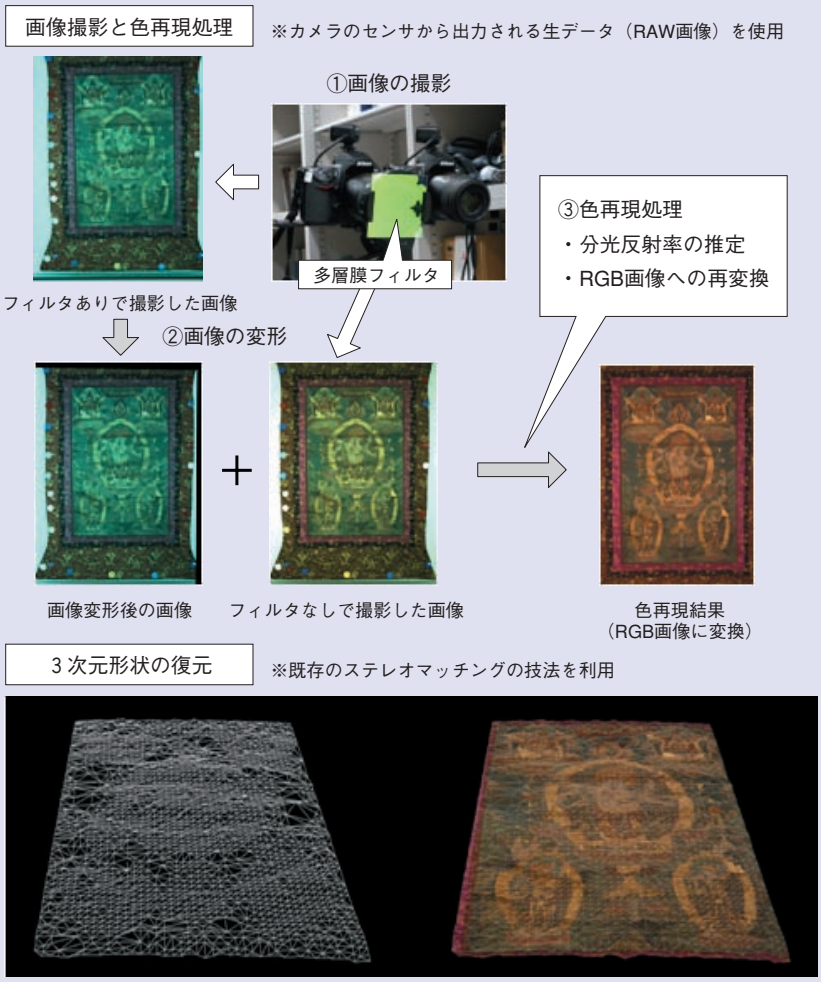


図6　ステレオ式1ショット分光画像撮影方法

今後の展開

これまで紹介した方法は，複数回撮影して高精細な分光画像を取得します．このため，動くものの静止画撮影や，動画の撮影ができないという問題がありました．そこで現在では分光感度の異なる複数のカメラを用い，ステレオ画像処理を使って同じ視点の画像を生成する方法で分光画像を取得する検討を行っています[5]（**図6**）．一方のカメラはそのまま撮影し，もう一方のカメラは多層膜フィルタを使って色感度を変えています．この2つの画像を同一視点となるように変形し，同一視点での6バンド情報を取得します．平面状の物体を被写体とする場合，これまでの2ショット6バンド撮影と同等の色再現ができることを確認するとともに，ステレオ法により得られる奥行き情報から，さらに臨場感のある画像を作成することができました．

今後は，ステレオ画像処理を高度にし，また多くのカメラを使うことで，より多彩な被写体に対して高精細な分光動画を取得する研究に取り組んでいきます．

■参考文献

(1) “平成11～15年度「ナチュラルビジョンの研究開発プロジェクト」成果報告書,” 通信・放送機構情報通信研究機構，2000-2004.
(2) 橋本・岸本：“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JAPAN2007，pp.384-391，2007.
(3) 土田：“超高精細度画像－10億画素で歴史的工芸品を記録する－,” O plus E，Vol.32，No.7，pp.805-809，2010.
(4) http://www.brl.ntt.co.jp/people/tsuchida/index.html
(5) 土田・川西・大和・伊藤・青木：“色再現を目的としたステレオ式ワンショット6バンド撮影システム,” 画像の認識・理解シンポジウムMIRU2010，DS-1，2010.

（左から）大和　淳司/ 土田　勝/ 川西　隆仁

デジタル映像の色の忠実性を向上し，高品質映像コミュニケーションを利用した新しいサービスの創造に取り組みます．

◆問い合わせ先
NTTコミュニケーション科学基礎研究所
メディア情報研究部
メディア認識研究グループ
TEL　046-240-3572
FAX　046-240-4708
E-mail　tsuchida@cs.brl.ntt.co.jp