

第22回医療情報学連合大会
2002年11月16日、博多

3-F-2-5

RGB処理系と
マルチスペクトルイメージングを
橋渡しする医用画像技術の開発

西堀真弘

mn.mlab@tmd.ac.jp

東京医科歯科大学医学部附属病院

デジタルバイオカラー研究会
(<http://biocolor.umin.ac.jp/>)

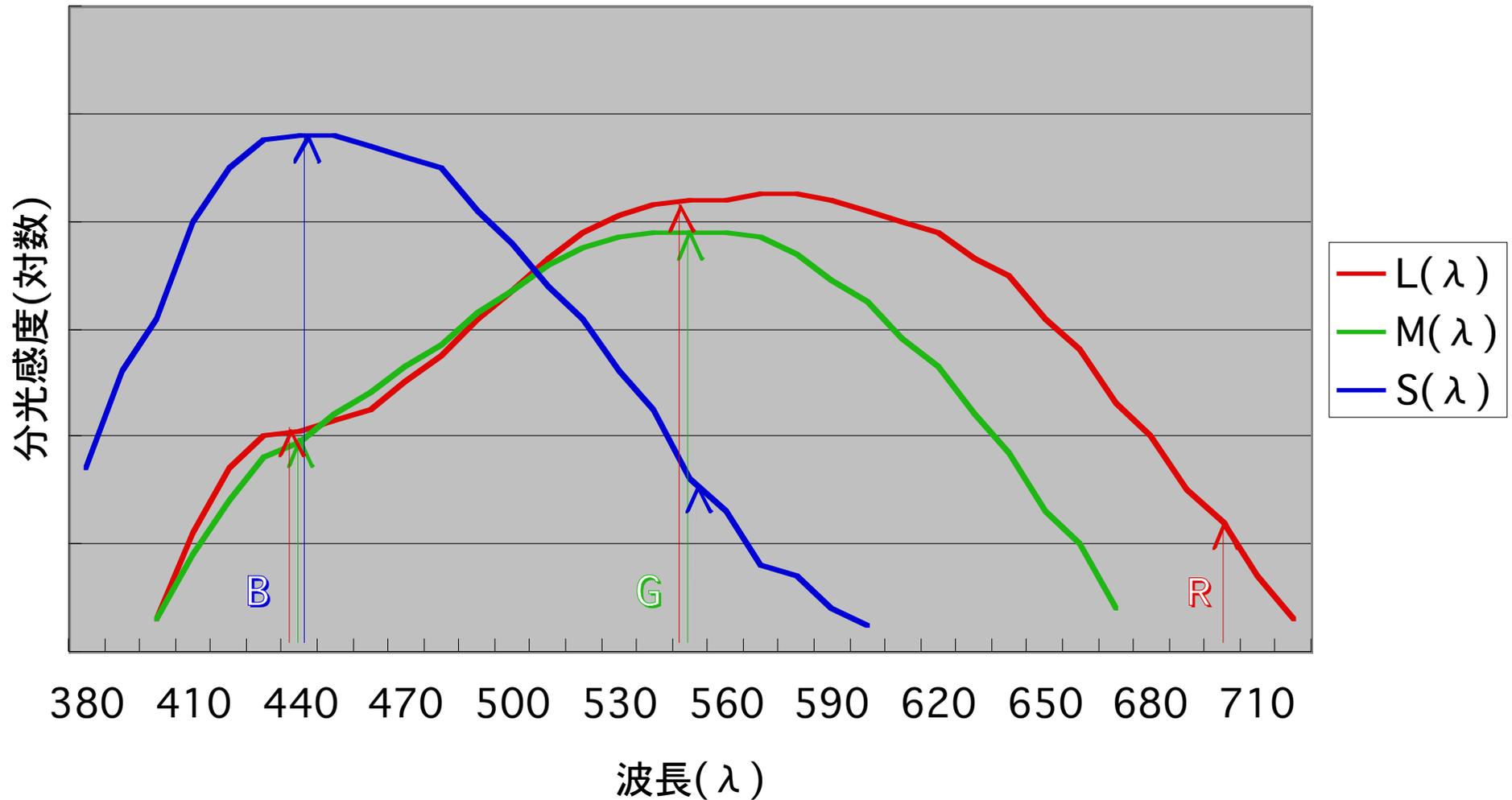
デジタル医用画像と診断の信頼性

- アナログ画像と異なり、保存、転送および複製による劣化がない
- いつでもどこでも、電子カルテやネットを介して全く同一の画像が得られる
- カラーマネジメント技術により色再現性の問題はほぼ解決できる
- したがって、医師はいつでもどこでも同じ画像で診断ができる…というのは**本当であろうか？**

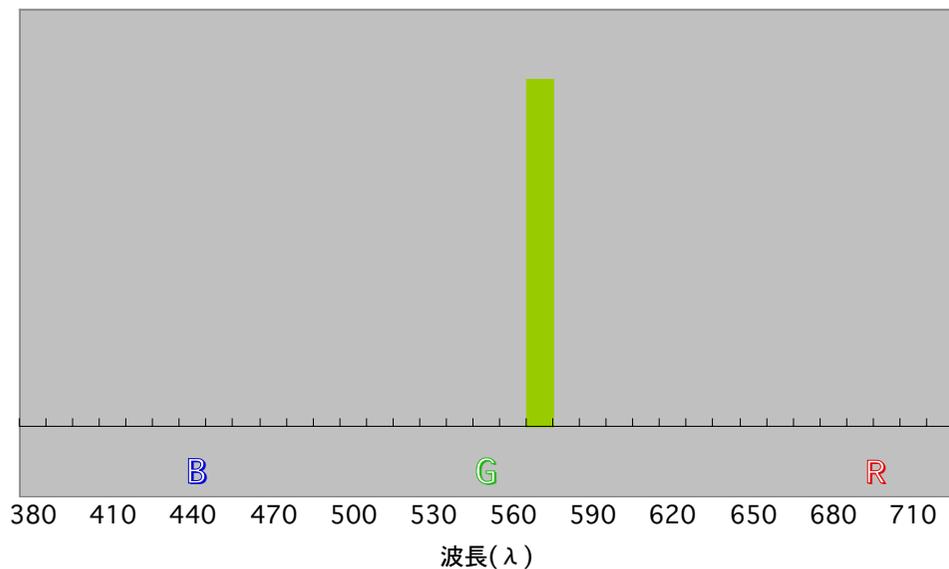
色についての誤解

- センサーである錐体細胞は3種類しかないので、RGB3原色ですべての色を再現できる
- 【本当は】 3種類の錐体細胞の分光感度曲線は広い帯域に渡って重なっており、等色関数のRGB値に負の値が生ずるために、理論的に再現できない色が存在する

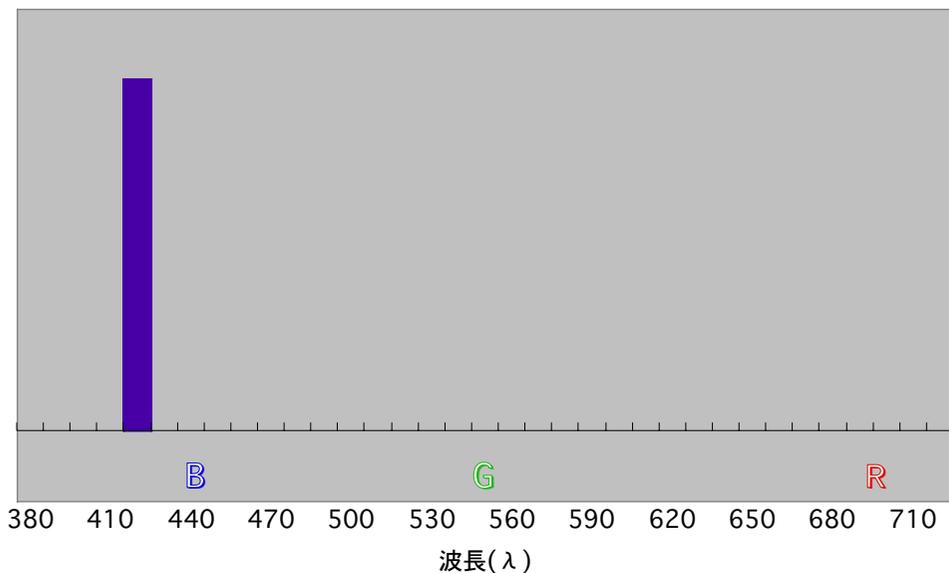
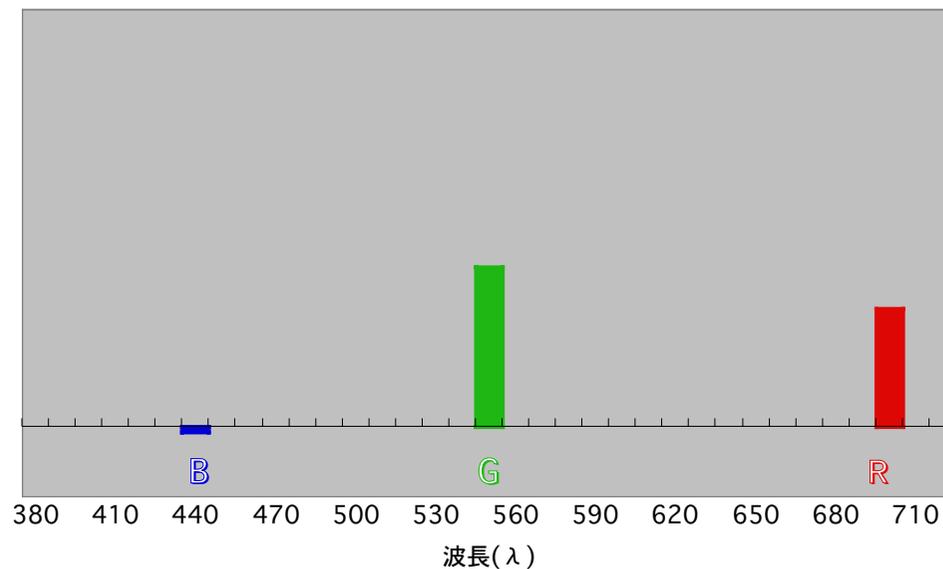
錐体細胞の分光感度



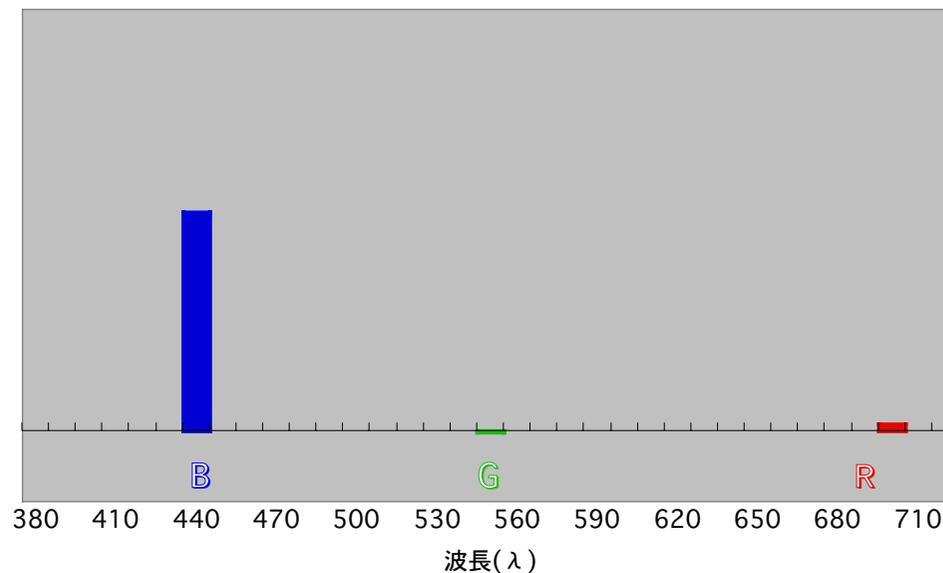
**単色光により複数の錐体細胞が
広い波長帯域に渡って同時に刺激される**



=

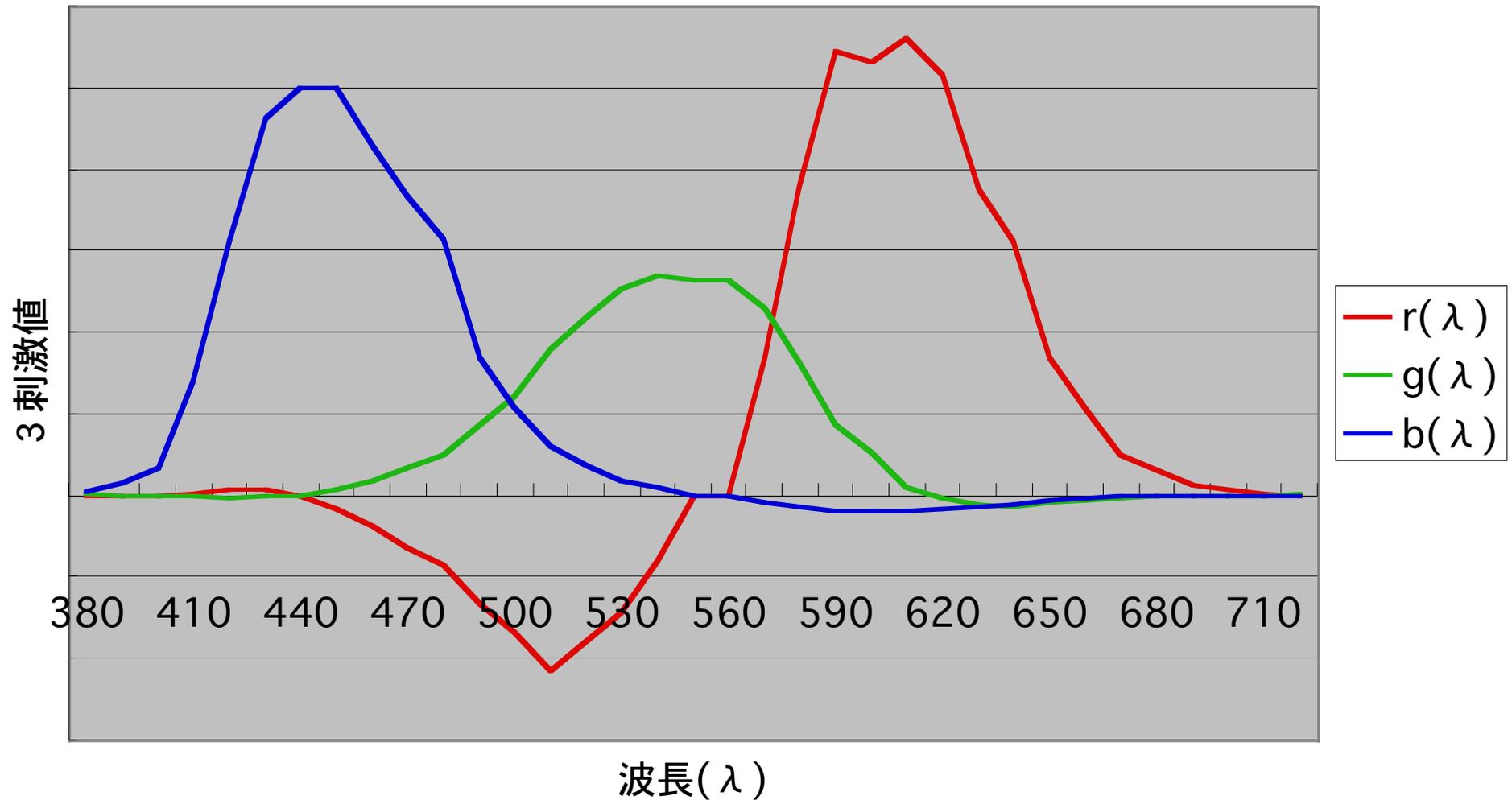


=



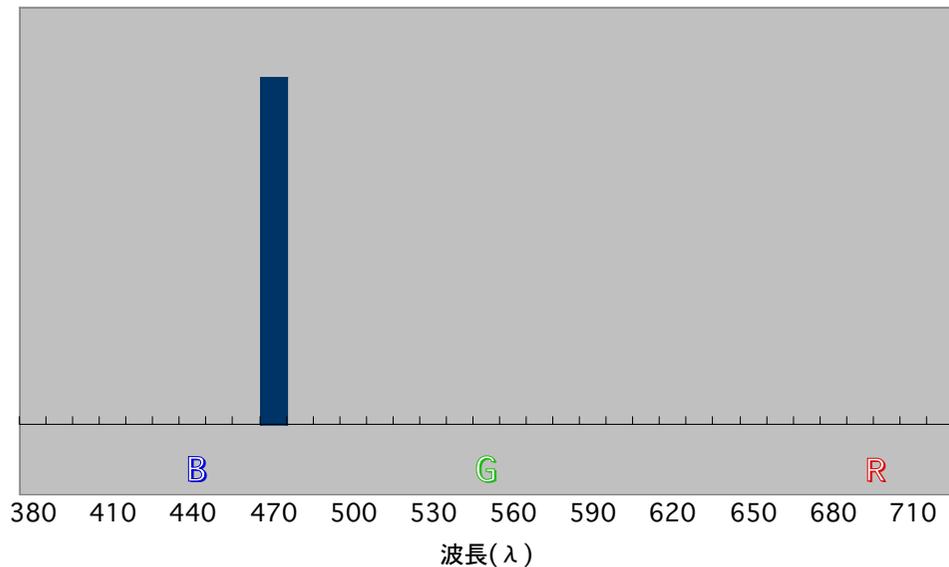
**単色光とそれと同じ色知覚を与えるRGB
3種類の光の混合比との関係を等色関数という**

等色関数理論値

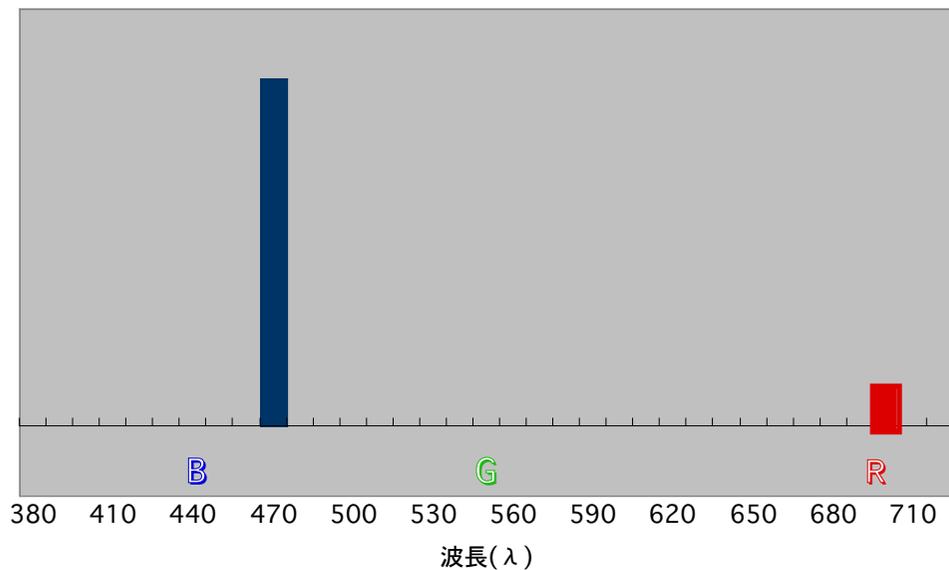
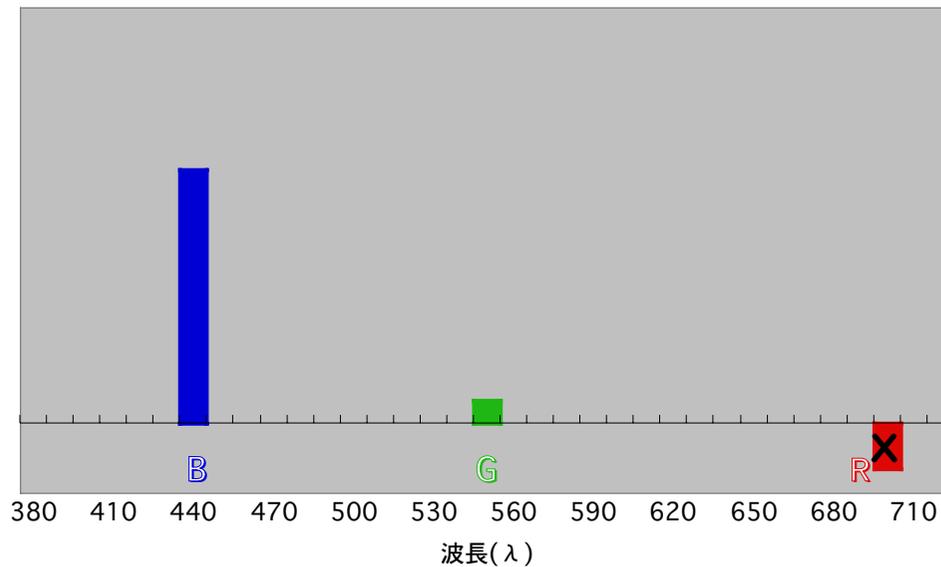


↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑

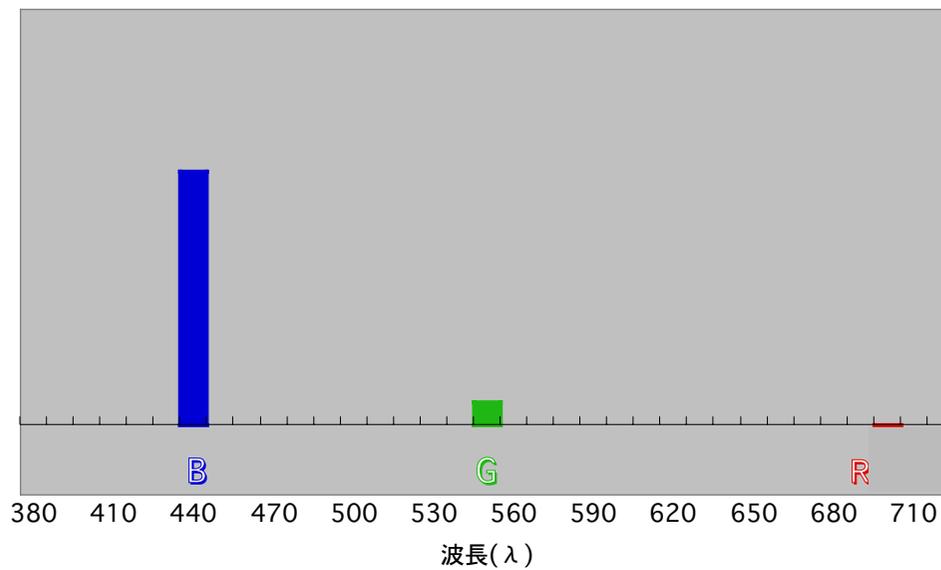
RGB三原色では再現不可能な色がある



≠



=

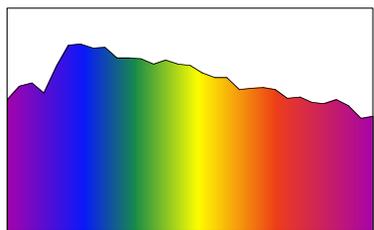


RGB値のどれかが負になるときは、単色光の側にその光を加えて同じ色に見えるようにする

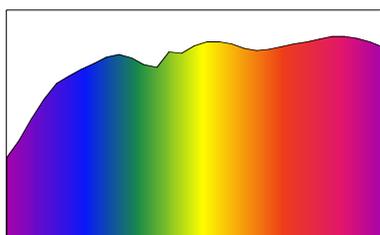
マルチスペクトルイメージング

- 対象物表面の**スペクトル反射率**（単色光の反射率を各波長順に並べたもの、分光反射率）を1画素毎にまるごと**圧縮記録**
- 照明光の**スペクトル放射率**（照明光の強さを各波長順に並べたもの、分光放射率または分光放射輝度）と**スペクトル反射率**から反射光のスペクトルを再現
- 撮像装置、表示装置および照明に**依存せず**に、極めて正確に対象物の色を記録・再現できる

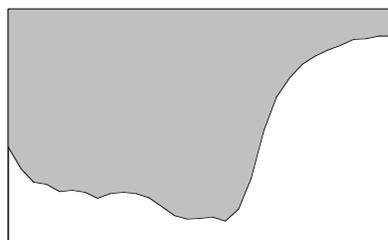
照明の
分光
放射率



↕



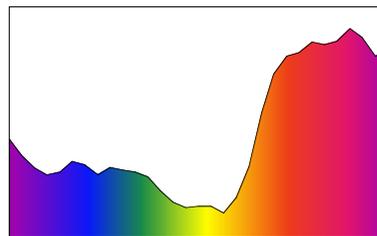
物体の
分光
反射率



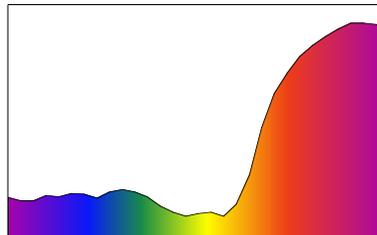
×

=

反射光の
スペクトル
(色)

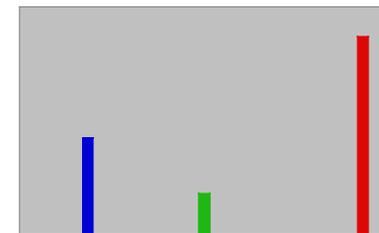


↕

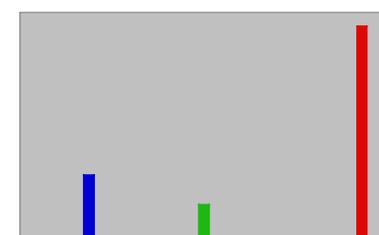


→

RGB



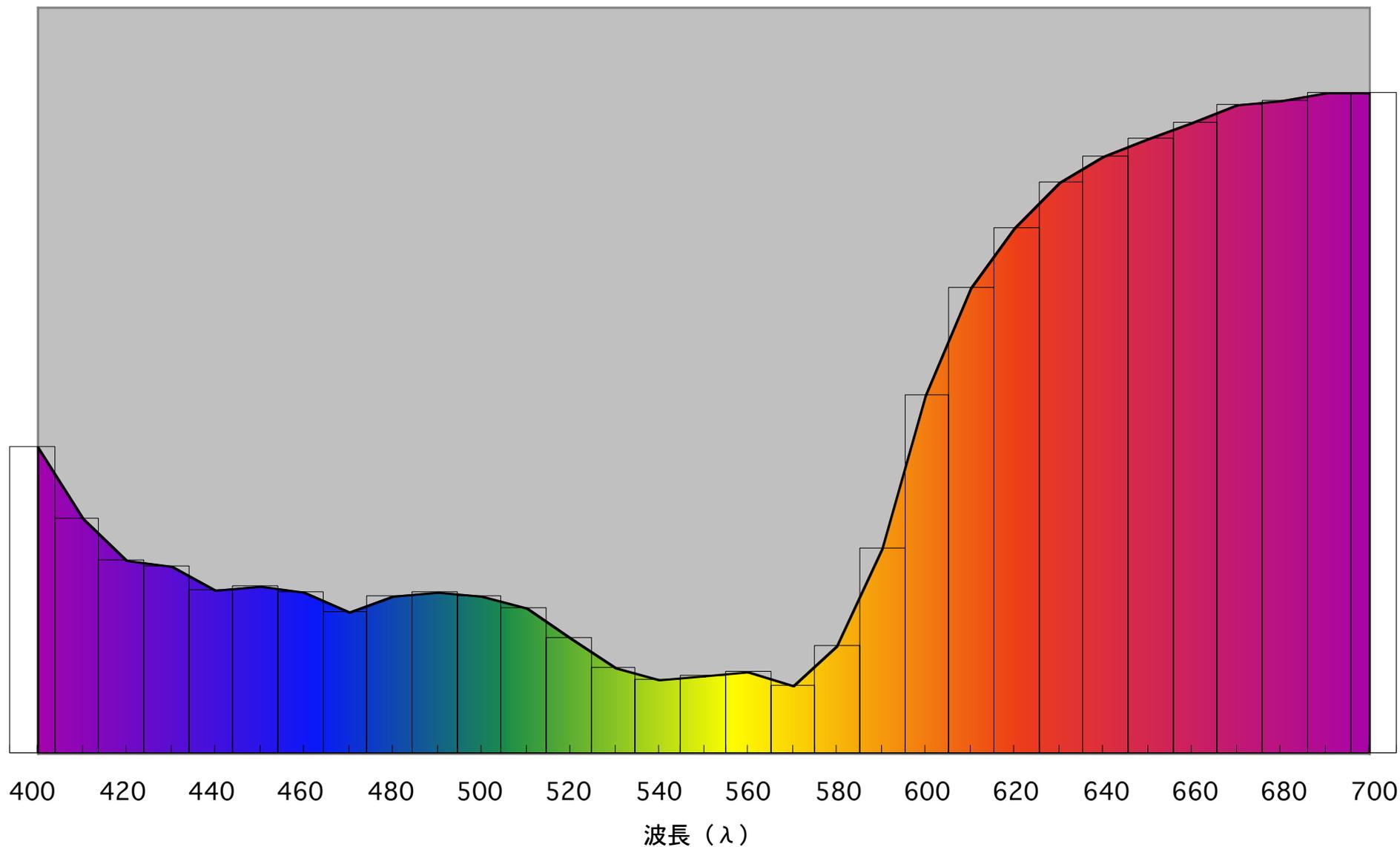
∩



分光反射率が分かれば照明が変わっても色を正確に再現できるが、RGBでは不可能である

色刺激と色認知

- 網膜に同じ色刺激が加わっても、同じ色に見えるとは限らない
 - **色順応**の効果：照明が変わって対象物由来の色刺激が変化しても、同じ色に見えるよう照明光に応じて色認知機構が変化する→同じ色刺激でも異なる照明下では違う色に見える
 - 等色関数の個人差：スペクトルを持つ元の色と、平均的な等色関数を用いて近似再現された色が、**同じに見えない**人が存在しうる



**分光反射率の記録や計算は
可視領域の波長を一定間隔で分割して扱う**

スペクトル圧縮記録の基礎(1)

- 単色の撮像装置の出力 v は次の式で決定される

$$\begin{aligned} v = & e_{400} \cdot o_{400} \cdot l_{400} \cdot f_{400} \cdot s_{400} \\ & + e_{410} \cdot o_{410} \cdot l_{410} \cdot f_{410} \cdot s_{410} \\ & \vdots \\ & + e_{700} \cdot o_{700} \cdot l_{700} \cdot f_{700} \cdot s_{700} \end{aligned} \quad (\text{式1})$$

ただし、 $e_{400\sim700}$: 照明光の分光放射率を等分割したものの
 $o_{400\sim700}$: 対象物表面の分光反射率を等分割したものの
 $l_{400\sim700}$: レンズ等の光学系の分光透過率を等分割したものの
 $f_{400\sim700}$: カラーフィルターの分光透過率を等分割したものの
 $s_{400\sim700}$: CCDセンサー等の分光感度を等分割したものの

スペクトル圧縮記録の基礎(2)

- 多原色の撮像装置の出力は**行列**で表せる

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{1 \cdot 400} & F_{1 \cdot 410} & F_{1 \cdot 420} & \cdots & F_{1 \cdot 700} \\ F_{2 \cdot 400} & F_{2 \cdot 410} & F_{2 \cdot 420} & \cdots & F_{2 \cdot 700} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{n \cdot 400} & F_{n \cdot 410} & F_{n \cdot 420} & \cdots & F_{n \cdot 700} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} o_{400} \\ o_{410} \\ o_{420} \\ \vdots \\ o_{700} \end{bmatrix} \quad (\text{式2})$$

即ち、 $F_{i \cdot 400} = e_{400} \cdot l_{400} \cdot f_{i \cdot 400} \cdot s_{400}$ (i は色フィルター番号)

とおくと前スライドの (式1) は

$$v_i = F_{i \cdot 400} \cdot o_{400} + F_{i \cdot 410} \cdot o_{410} + \cdots + F_{i \cdot 700} \cdot o_{700}$$

となり、iを1からnについて並べると (式2) となる

スペクトル圧縮記録の基礎(3)

- 式2は**逆行列**を使って次の形に変形でき、撮像装置の出力 $v_{1\sim n}$ から分光反射率 $o_{400\sim 700}$ が求まる

$$\begin{bmatrix} o_{400} \\ o_{410} \\ o_{420} \\ \vdots \\ o_{700} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{1\cdot 400} & G_{2\cdot 400} & \cdots & G_{n\cdot 400} \\ G_{1\cdot 410} & G_{2\cdot 410} & \cdots & G_{n\cdot 410} \\ G_{1\cdot 420} & G_{2\cdot 420} & \cdots & G_{n\cdot 420} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{1\cdot 700} & G_{2\cdot 700} & \cdots & G_{n\cdot 700} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (\text{式3})$$

ただし、通常スペクトルの分割数と等しい n は確保できず、逆行列は計算出来ないので、**Wiener推定**という方法が用いられる。即ち、分光反射率の実測値と推定値との最小自乗誤差が最小になるような行列を求める。

主成分分析による圧縮記録(1)

- 主成分分析は高次元のデータを低次元データの線形和として近似する手法である
- これを分光反射率に応用すると、網羅的な色見本であるマンセル色票では8種類、油絵の具では5種類、**粘膜や皮膚ではわずか3種類**の主成分スペクトルで近似できる
- その**主成分数と同じバンド数**で撮像すると元の分光反射率が計算により推定できる

主成分分析による圧縮記録(2)

- 3バンドの場合、**主成分スペクトル**を用いて次のように展開でき、**分光反射率 $O_{400\sim 700}$** が求まる

$$\begin{bmatrix} O_{400} \\ O_{410} \\ O_{420} \\ \vdots \\ O_{700} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1\cdot 400} \\ u_{1\cdot 410} \\ u_{1\cdot 420} \\ \vdots \\ u_{1\cdot 700} \end{bmatrix} \cdot \alpha_1 + \begin{bmatrix} u_{2\cdot 400} \\ u_{2\cdot 410} \\ u_{2\cdot 420} \\ \vdots \\ u_{2\cdot 700} \end{bmatrix} \cdot \alpha_2 + \begin{bmatrix} u_{3\cdot 400} \\ u_{3\cdot 410} \\ u_{3\cdot 420} \\ \vdots \\ u_{3\cdot 700} \end{bmatrix} \cdot \alpha_3 + \begin{bmatrix} m_{400} \\ m_{410} \\ m_{420} \\ \vdots \\ m_{700} \end{bmatrix} \quad (\text{式4})$$

ただし、 u_1 の列：第1主成分

u_2 の列：第2主成分

u_3 の列：第3主成分

m の列：平均値スペクトル

α_1 、 α_2 、 α_3 ：展開係数

(各主成分、 m および(式2)における F から計算できる)

主成分分析による圧縮記録(3)

• 展開係数は次の手順で計算する

3つのバンドをRGBとした場合 (式2) は次の形に書ける

$$\begin{bmatrix} v_R \\ v_G \\ v_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{R \cdot 400} & F_{R \cdot 410} & F_{R \cdot 420} & \cdots & F_{R \cdot 700} \\ F_{G \cdot 400} & F_{G \cdot 410} & F_{G \cdot 420} & \cdots & F_{G \cdot 700} \\ F_{B \cdot 400} & F_{B \cdot 410} & F_{B \cdot 420} & \cdots & F_{B \cdot 700} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} o_{400} \\ o_{410} \\ o_{420} \\ \vdots \\ o_{700} \end{bmatrix} \quad (\text{式5})$$

(式4) の右辺を $o_{400 \sim 700}$ に代入して行列演算すると次の形になる。

$$\alpha_{1 \sim 3} = G_{1 \sim 3 \cdot R} v_R + G_{1 \sim 3 \cdot G} v_G + G_{1 \sim 3 \cdot B} v_B - K_{1 \sim 3}$$

ただし G は F および主成分から、 K は G 、 F および m から計算できる。

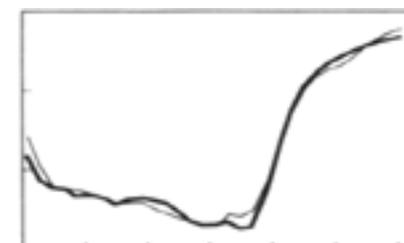
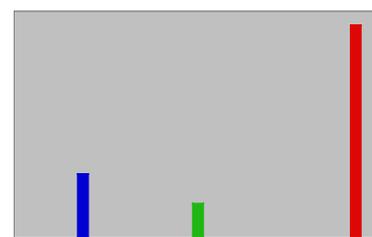
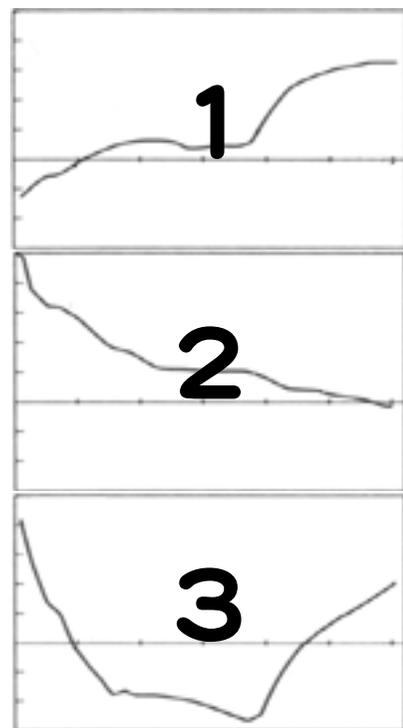
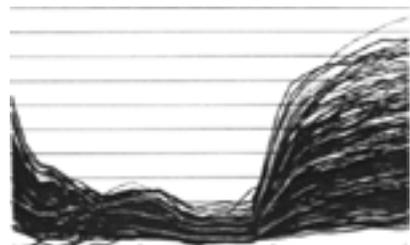
主成分分析による分光反射率の推定

胃粘膜の
分光反射率

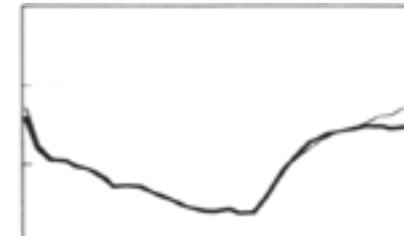
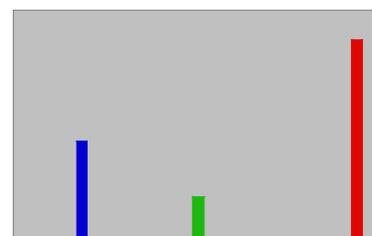
主成分
スペクトル

RGB
出力

分光反射率
測定値:細線



× [行列演算] → 推定(太線)



(310例)

【出典】 三宅洋一：デジタルカラー画像の解析・評価、東京大学出版会、2000年

分光反射率画像の生物医学応用

- 人間の視覚認知能を超える診断技術の開発
 - 癌組織や色素沈着の領域描出
 - 生体色素成分量の推定→健常皮膚粘膜の主要3色素（メラニン、酸化／還元Hb）の含有量はRGB画像で推定した分光反射率から推定可能
- 極めて正確な色の画像記録／再現方法の開発
 - 撮像／表示機器の機種間差の解消
 - 照明条件による色再現差の解消
 - 等色関数の個人差の解消

分光反射率画像の普及の課題

- 不十分な色再現によって生じる不都合が医療現場であまり問題視されていない
- 分光反射率の記録による画期的メリットを実感できる機会がない
- RGBベースのインフラストラクチャーが既に普及しているので、新しい方式に入れ替えるには余程大きな動機付けが必要となる

溝を埋めるキープロダクトは何か

- 新しい色記録方式で得られる画像を実際に見てみなければ、どのくらいのメリットが得られるのか分からない
- そこで医療従事者がRGB方式との違いを実際に見比べることができるようにすれば、膨大な潜在ニーズが顕在化する可能性が高い

→ 既存のデジタル撮像・表示機器を用いた
マルチスペクトルイメージング
近似体験システム

システムの基本設計

- ビデオやスチルカメラ等の3チャンネルのCCDの出力画像から、Wiener推定や主成分分析によって対象物の各画素の分光反射率を推定する
- 推定した分光反射率から各画素の生体色素成分量の推定や3チャンネルのCRTや液晶パネルによる正確な色の近似再現を行う
- 計算は機種、照明条件、対象物毎に予め用意したルックアップテーブルを用いて高速化しリアルタイムに表示できるようにする

システムのフローチャート

⇒対象物からの反射光→RGB撮像装置の出力

対象物・撮像装置・照明毎の演算テーブル→

↓
各画素の分光反射率の推定

☆生体色素成分量や酸素飽和度の推定←

表示装置・観察照明毎の演算テーブル→

☆RGB表示装置による正確な色再現←

ご静聴ありがとうございました

ご連絡先

mn.mlab@tmd.ac.jp

詳しい参考資料入手先

デジタルバイオカラー研究会ホームページ

(<http://biocolor.umin.ac.jp/>)