

# 時間相関イメージセンサーに基づくスペクトル 整合イメージング

来 海 暁

## Spectral Matching Imaging with Correlation Image Sensor

Akira KIMACHI

This article reviews the theory, implementation, and applications of spectral matching imaging, which is proposed and developed by the author. Spectral matching imaging is realized with the correlation image sensor (CIS) and modulated spectral illumination. Firstly, the illumination modulates the spectrum of the object to time-varying light intensity signals. Then, the CIS produces the temporal correlations between the light intensity signals and global reference signals generated from known spectra at each pixel in every frame. In contrast to conventional spectral imaging, which requires multiple frames for spectral measurement of one scene, spectral matching imaging enables real-time operation while achieving high spectral resolution in spectral correlation. Spectral matching imaging is expected to be useful to object detection, visual inspection of industrial products, growth monitoring of agricultural products, biomedical diagnosis of living tissue, and counterfeit detection of art objects, especially when the objects are under motion or deformation.

**Key words:** spectral matching, correlation image sensor, quadrature detection, material identification, growth monitoring, tissue diagnosis, counterfeit detection

本稿では筆者らが実現を目指しているスペクトル整合イメージングの理論、実現方法、および応用例を述べる。スペクトルあるいは分光特性は、反射率や透過率などの光学特性を波長に対する分布として表したものであり、人間にとって可視領域のスペクトルは色覚の元になる重要な情報である。分光反射率や分光透過率などのスペクトルは、物体の微細構造や化学組成と密接に関連しており、したがって物体を特定する重要な手掛かりを与える。また物体同士の色が非常によく似ていてもスペクトルが異なる場合は、スペクトルを手掛かりとすればこれらの物体を識別することができる。

スペクトルに基づく物体の検出や識別はリモートセンシングにおいて従来から行われてきた<sup>1-4)</sup>が、マシンビジョンにおいても分光イメージング<sup>5-11)</sup>の広まりとともに利用されつつある<sup>12)</sup>。しかし、分光イメージングでは波長を変

えながら多数の画像を獲得したり、撮像面の1軸を波長軸として利用する代わりに対象を一次元走査して画像を獲得したりするため、実時間での実現は困難である。

これに対し筆者らは、時間相関イメージセンサー (correlation image sensor, CIS)<sup>13)</sup> とよばれる独自の撮像素子を用いることによって、対象のスペクトルそのものを計測するのではなく、それが既知の参照スペクトルとどれだけ類似しているかを各画素独立に出力するスペクトル整合イメージングを提案している<sup>14-16)</sup>。この手法により、スペクトルという高次元の情報を高い波長分解能のまま二次元程度に圧縮し、実時間で画像として出力することが可能になる。それにより物体検出をはじめ、工業製品の目視検査、生体組織の病理診断、農産物の生育判定、美術品の真贋鑑定などさまざまな応用が実時間で可能になり、しかも運動や変形を伴う対象にも適用できるようになると期待される。

## 1. スペクトル整合

スペクトル整合とは、既知のスペクトル  $R_0(\lambda)$  ( $\lambda$ は波長) に対し、対象物体のスペクトル (分光反射率または分光透過率)  $R_{ij}(\lambda)$  との相関をとることをいう。本稿では  $R_0(\lambda)$  ではなく、参照スペクトルに次式で与えられる  $\psi_0(\lambda)$  を用いる。

$$\psi_0(\lambda) = \frac{\tilde{R}_0(\lambda)}{\|\tilde{R}_0(\lambda)\|} \quad (1)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \tilde{R}_0(\lambda) &\stackrel{\text{def}}{=} R_0(\lambda) - \overline{R_0(\lambda)} \\ \overline{R_0(\lambda)} &\stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R_0(\lambda) d\lambda \\ \|\tilde{R}_0(\lambda)\| &\stackrel{\text{def}}{=} \left\{ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [\tilde{R}_0(\lambda)]^2 d\lambda \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

であり、以下でも同様の記法を用いる。 $\psi_0(\lambda)$  は平均が  $\overline{\psi_0(\lambda)} = 0$ 、二乗ノルムが  $\|\psi_0(\lambda)\| = 1$  であり、 $R_0(\lambda)$  の交流成分  $\tilde{R}_0(\lambda)$  (平均  $\overline{R_0(\lambda)}$  からの変動成分) のみに相似な波形をもつ。 $\psi_0(\lambda)$  に対する  $R_{ij}(\lambda)$  のスペクトル整合は相関

$$\begin{aligned} C(R_{ij}(\lambda), \psi_0(\lambda)) &\stackrel{\text{def}}{=} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R_{ij}(\lambda) \psi_0(\lambda) d\lambda \\ &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \tilde{R}_{ij}(\lambda) \psi_0(\lambda) d\lambda \\ &= C(\tilde{R}_{ij}(\lambda), \psi_0(\lambda)) \\ &= \|\tilde{R}_{ij}(\lambda)\| \cos \theta_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

として与えられ、 $R_{ij}(\lambda)$  の交流成分  $\tilde{R}_{ij}(\lambda)$  と  $\psi_0(\lambda)$  との相関  $C(\tilde{R}_{ij}(\lambda), \psi_0(\lambda))$  に帰着する。画素座標 ( $i, j$ ) が添字となっているのは、後述のように撮像素子上でのスペクトル整合を想定していることによる。 $\cos \theta_{ij}$  は

$$\begin{aligned} \cos \theta_{ij} &= \frac{C(\tilde{R}_{ij}(\lambda), \psi_0(\lambda))}{\|\tilde{R}_{ij}(\lambda)\|} \\ &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{\tilde{R}_{ij}(\lambda)}{\|\tilde{R}_{ij}(\lambda)\|} \psi_0(\lambda) d\lambda \\ &= \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \tilde{R}_{ij}(\lambda) \tilde{R}_0(\lambda) d\lambda}{\|\tilde{R}_{ij}(\lambda)\| \cdot \|\tilde{R}_0(\lambda)\|} \end{aligned} \quad (3)$$

で与えられ、 $\tilde{R}_{ij}(\lambda)$  と  $\psi_0(\lambda)$  あるいは  $\tilde{R}_0(\lambda)$  との間の相関係数すなわち類似度 (整合度, 一致度) を表す。ベクトルの解釈では、図1に示す通り、 $C(\tilde{R}_{ij}(\lambda), \psi_0(\lambda))$  は  $\tilde{R}_{ij}(\lambda)$  を  $\psi_0(\lambda)$  方向に射影した成分の長さを表し、 $\theta_{ij}$  は  $\psi_0(\lambda)$  に対する  $\tilde{R}_{ij}(\lambda)$  の開き角を意味する。 $C(\tilde{R}_{ij}(\lambda), \psi_0(\lambda))$  は  $\tilde{R}_{ij}(\lambda)$  の波形が  $\psi_0(\lambda)$  に近づくほど、最大値  $\|\tilde{R}_{ij}(\lambda)\|$  ( $\cos \theta_{ij} = 1, \theta_{ij} = 0$ ) に近づく。したがって  $C(\tilde{R}_{ij}(\lambda), \psi_0(\lambda))$  の値により、対象スペクトルの交流成分  $\tilde{R}_{ij}(\lambda)$  が参照スペクトル

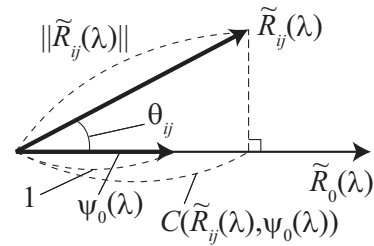


図1 スペクトル整合のベクトルの解釈。

$\psi_0(\lambda)$  にどの程度一致するかがわかる。

参照スペクトルを  $R_0(\lambda)$  ではなく交流化した  $\psi_0(\lambda)$  とする理由は、無彩色への感度を犠牲にすることによって有彩色への感度を高めるためである。直感的には無彩色は直流成分すなわち平坦なスペクトルに対応し、有彩色は交流成分すなわちスペクトルの変動成分に対応する。参照スペクトルが直流成分  $\overline{R_0(\lambda)}$  を含むと、それだけで対象スペクトルの直流成分  $\overline{R_{ij}(\lambda)}$  と相関をもってしまふ。いいかえれば有彩色成分の類似度にかかわらず、白っぽい対象ほど相関が高くなってしまふ。この問題を回避するために  $\psi_0(\lambda)$  を用いる。

## 2. スペクトル整合イメージング

スペクトル整合イメージングとは、式(2)のスペクトル整合を撮像素子上で行うことを指す。その実現方法として筆者らは CIS を用いた手法を提案しており<sup>14-16)</sup>、その要点は次の2点にある。

1. スペクトル変調光源…対象スペクトル  $R_{ij}(\lambda)$  を入射光強度信号  $f_{ij}(t)$  に変調
2. CIS… $f_{ij}(t)$  に対して各画素並列に  $\psi_0(\lambda)$  とのスペクトル整合を実行し、結果を画像として毎フレーム出力

$f_{ij}(t)$  の変調方法により、スペクトル整合イメージングは波長掃引型<sup>14,16)</sup> と波長多重型<sup>15)</sup> に大別される。本章では波長掃引型に絞って原理を述べるとともに、検出能力を向上させる手法として直交検出法を示す。

### 2.1 時間相関イメージセンサー

CIS はスペクトル整合イメージングにおいて最も重要な要素である。CIS の回路構成を図2に示す。フォトダイオード PD は入射する光強度信号をそれに比例する光電流  $I(t)$  に変換し、 $I(t)$  は3個の MOSFET  $Q_k$  ( $k=1, 2, 3$ ) のドレイン電流  $I_k(t)$  に分割される。このとき  $Q_k$  のゲートには電圧  $V_k(t)$  を

$$V_k(t) = v_k(t) + \bar{V} \quad (k=1, 2, 3) \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^3 v_k(t) = 0 \quad (5)$$

となるように印加しておく ( $\bar{V} = (1/3) \sum_{k=1}^3 V_k(t)$  は定数)。

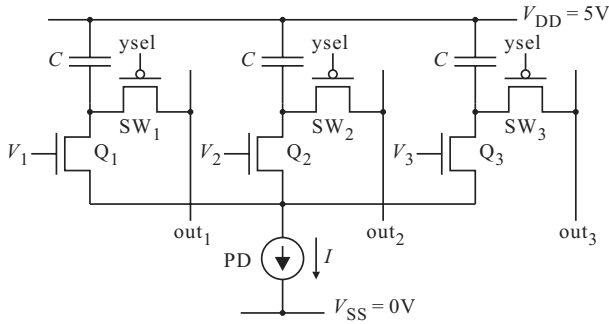


図2 CIS 画素回路.

すると  $I_k(t)$  は

$$I_k(t) = \frac{1}{3}I(t) + \rho I(t)v_k(t) \quad (6)$$

となるように按分される ( $\rho$  は比例係数). よって, 1 フレーム後にコンデンサー  $C_k$  において蓄積される電荷  $q_k = \langle I_k(t) \rangle$  ( $\langle \rangle$  はフレーム間積分) は

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \langle I(t) \rangle \\ \frac{1}{3} \langle I(t) \rangle \\ \frac{1}{3} \langle I(t) \rangle \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho \langle I(t)v_1(t) \rangle \\ \rho \langle I(t)v_2(t) \rangle \\ \rho \langle I(t)v_3(t) \rangle \end{bmatrix} \quad (7)$$

となる. すなわち  $q_k$  には入射光の平均強度に比例する成分  $\langle I(t) \rangle / 3$  に加え,  $I(t)$  と参照信号  $v_k(t)$  との時間相関成分  $\langle I(t)v_k(t) \rangle$  が生じる.  $q_k$  は 1 フレーム終了後に読み出しスイッチ  $SW_k$  を通じてチップ外に出力される.  $\langle I(t) \rangle$ ,  $\langle I(t)v_k(t) \rangle$  はチップ外でそれぞれ  $\langle I(t) \rangle = \sum_{k=1}^3 q_k$ ,  $\langle I(t)v_k(t) \rangle = q_k - \langle I(t) \rangle / 3$  により分離できる.

以上より, CIS は各画素への入射光強度信号  $f_{ij}(t)$  に対し, 1 フレームの平均強度画像  $g_0(i, j)$ , および参照信号  $v_k(t)$  との時間相関画像  $g_k(i, j)$

$$g_0(i, j) = \langle f_{ij}(t) \rangle \quad (8)$$

$$g_k(i, j) = \langle f_{ij}(t)v_k(t) \rangle \quad (k = 1, 2, 3) \quad (9)$$

( $\sum_{k=1}^3 g_k(i, j) = 0$ ) を出力する. 図 3 に  $390 \times 366$  画素 CIS カメラを示す. 現在は  $704 \times 512$  画素の CIS チップが開発されている.

## 2.2 波長掃引型スペクトル整合イメージング

図 4 に波長掃引型スペクトル整合イメージングの構成を示す. 波長掃引型では, 対象スペクトル  $R_{ij}(\lambda)$  の波形をそのままの形で時間信号に変調する. それにはスペクトル幅の非常に狭い光 (単色光) を照明に用い, かつそのスペクトルのピーク波長  $\lambda_0(t)$  を時刻  $t$  とともに掃引することができればよい. この照明 (以下, 波長掃引単色照明) の分光分布  $E(\lambda, t)$  は, 各ピーク波長での強度分布を  $E_0(\lambda)$  と



図3  $390 \times 366$  画素 CIS カメラ.

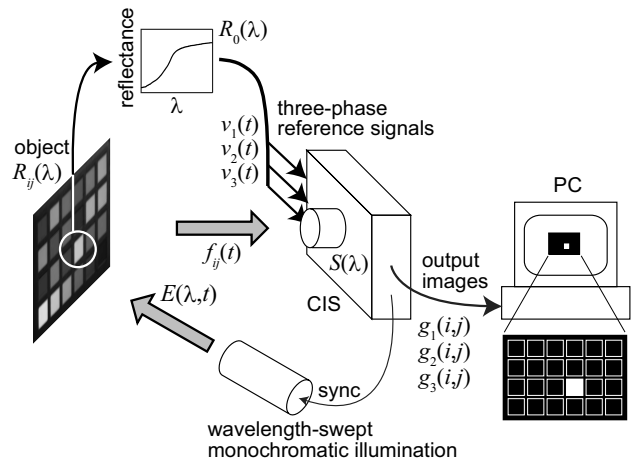


図4 波長掃引型スペクトル整合イメージングの構成.

すると次式で表される ( $\delta(\lambda)$  はディラックのデルタ関数).

$$E(\lambda, t) = E_0(\lambda) \delta(\lambda - \lambda_0(t)) \quad (10)$$

$\lambda_0(t)$  が  $t$  に対し線形 ( $\lambda_0(t) = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})t/T + \lambda_{\min}$ ,  $T$  はフレーム時間) であるとし, さらに  $E_0(\lambda)$  が CIS の分光感度  $S(\lambda)$  に反比例する ( $E_0(\lambda) \propto 1/S(\lambda)$ ) ようにしておくと, CIS の各画素  $(i, j)$  で検出される光強度信号  $f_{ij}(t)$  は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} f_{ij}(t) &= \int [I_{ij}E(\lambda, t) + B_{ij}(\lambda, t)] R_{ij}(\lambda) S(\lambda) d\lambda \\ &= I_{ij}R_{ij}(\lambda_0(t)) + n_{ij}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

ただし  $I_{ij}$  は波長掃引単色照明の各画素での強度分布,  $B_{ij}(\lambda, t)$  は外乱光の強度を表し,  $n_{ij}(t) = \int B_{ij}(\lambda, t) R_{ij}(\lambda) S(\lambda) d\lambda$  とおいた. すなわち  $f_{ij}(t)$  は対象スペクトル  $R_{ij}(\lambda)$  を波長掃引  $\lambda_0(t)$  に従って時間信号に置き換えたものとなっている.

この  $f_{ij}(t)$  に対し, 式 (1) の参照スペクトル  $\psi_0(\lambda)$  から参照信号  $\psi_0(\lambda_0(t))$  を生成し CIS に入力する. 外乱光による項  $n_{ij}(t)$  は  $\psi_0(\lambda_0(t))$  とは無相関と考えられるので, 時間相関により 0 になるとみなせる. よって CIS の 1 フレーム出力  $g(i, j)$  は

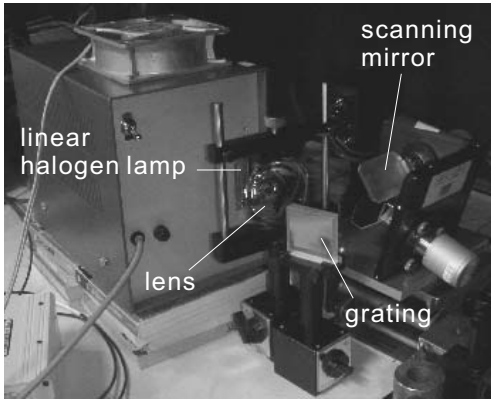


図5 線状ハロゲンランプ，回折格子，および走査鏡を用いた波長掃引単色照明。



図6 波長掃引単色照明の生成に用いた波長プログラマブル光源。

$$\begin{aligned}
 g(i, j) &= \int_0^T f_{ij}(t) \psi_0(\lambda_0(t)) dt \\
 &= \int_0^T [I_{ij} R_{ij}(\lambda_0(t)) + n_{ij}(t)] \psi_0(\lambda_0(t)) dt \\
 &\approx \frac{TI_{ij}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} C(\tilde{R}_{ij}(\lambda), \psi_0(\lambda)) \quad (12)
 \end{aligned}$$

となり，対象スペクトルの交流成分  $\tilde{R}_{ij}(\lambda)$  と  $\psi_0(\lambda)$  とのスペクトル整合そのものが得られる。

スペクトル整合イメージングの実現上の要点はスペクトル変調光源にある。波長掃引型における波長掃引単色照明は，初めは図5に示すように線状ハロゲンランプ，回折格子，および走査鏡を用いて構築された<sup>14)</sup>。半値幅は400～700 nmの間で約15 nmを達成したが，ピーク波長における照明強度  $E_0(\lambda)$  を CIS カメラの分光感度  $S(\lambda)$  に反比例 ( $E_0(\lambda) \propto 1/S(\lambda)$ ) するように調整できない問題があった。その後，図6に示す波長プログラマブル光源<sup>17)</sup>を用いることにより， $E_0(\lambda) \propto S(\lambda)$  の条件を満たす理想的な波長掃引単色照明が実現された<sup>16)</sup>。この照明は分光分布が毎秒7,591回切り替わることにより，CISのフレーム時間  $T = 1/15$  [s]の間に半値幅10 nmの単色光のピーク波長を450～700 nmの範囲で1 nmずつ往復掃引する。

### 2.3 直交検出法

スペクトル整合イメージングにおいて検出能力を向上させる手法のひとつに直交検出型スペクトル整合法<sup>16)</sup>がある

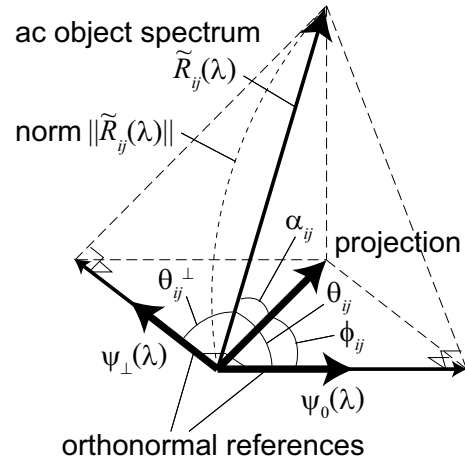


図7 直交検出型スペクトル整合法。

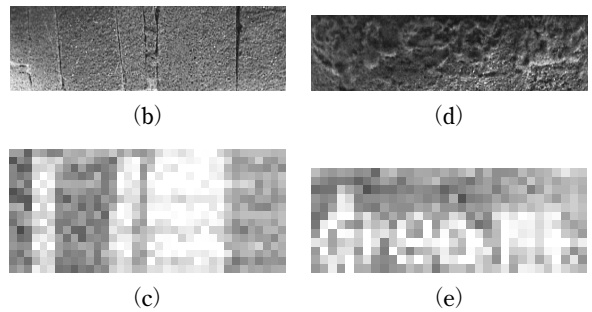
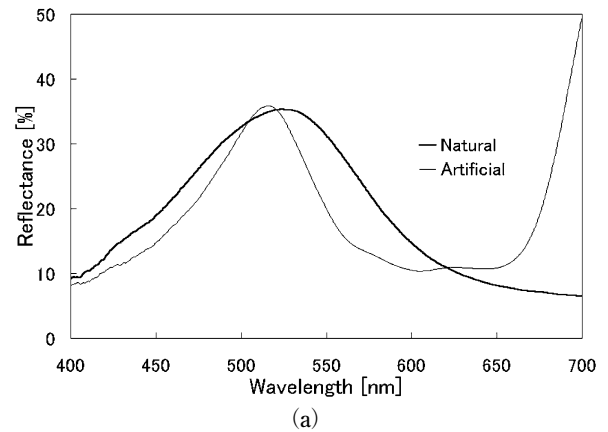


図8 岩絵具による秘匿パターンの検出。(a) 岩絵具の分光反射率。(b) バーコードと (c) その CIS 出力画像。(d) 隠し文字 (“dream”) と (e) その CIS 出力画像。

り，標的と背景，正常部と異常部など，2つのスペクトルを区別したい場合に有力である。またこの方法を用いることにより，式(12)の出力  $g(i, j)$  が， $C(\tilde{R}_{ij}(\lambda), \psi_0(\lambda))$  に含まれる二乗ノルム  $\|\tilde{R}_{ij}(\lambda)\|$  (対象スペクトルの平均凹凸に相当) および波長掃引単色照明の強度分布  $I_{ij}$  に依存する問題を解消することができる。

図7に直交検出法の概念図を示す。要点は，参照スペクトルに  $\psi_0(\lambda)$  だけでなくそれと直交するもう1つのスペクトル  $\psi_{\perp}(\lambda)$  を用いるところにある。図7より直交検出法で



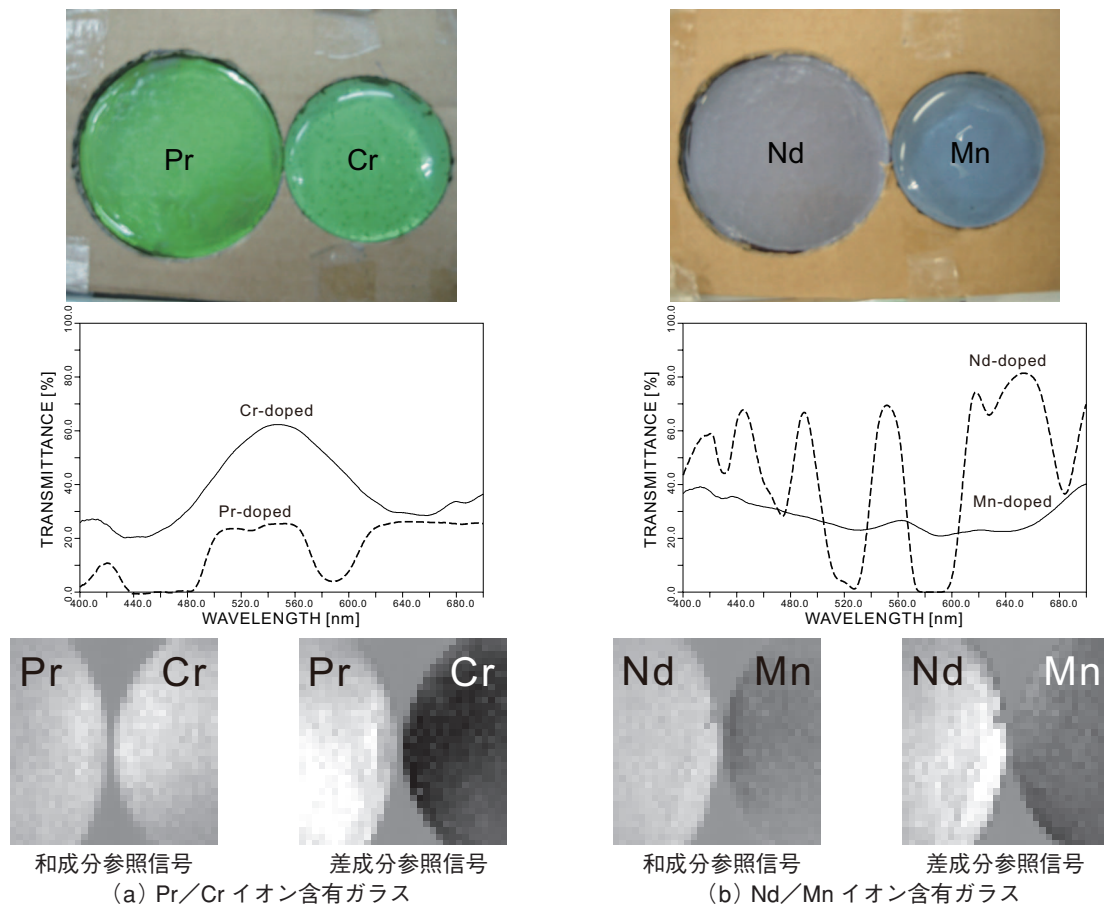


図9 類似色のガラスの識別結果. 上: 撮像対象, 中: 分光反射率, 下: CIS 出力画像.

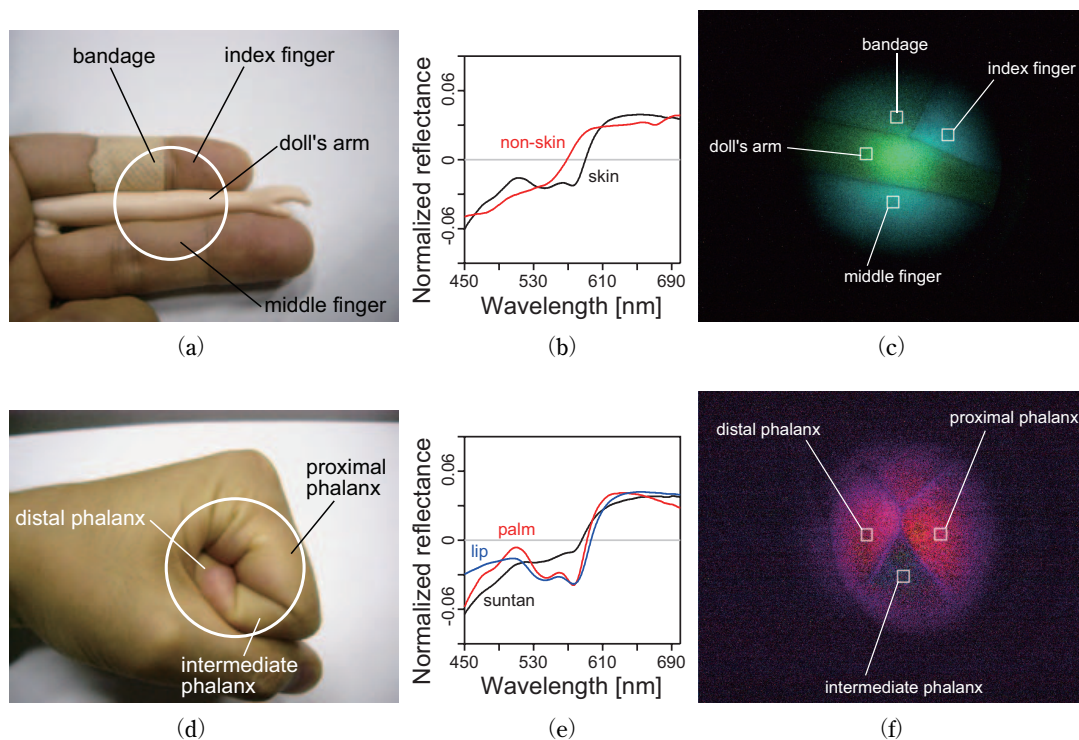


図10 皮膚の検出/識別実験の結果. (a) 対象1—皮膚と非皮膚. (b) 皮膚と非皮膚の平均的な分光反射率(交流成分). (c) (b) から生成した直交参照スペクトル対を用いて (a) を撮影した出力画像. (d) 対象2—日焼け/充血/虚血した皮膚. (e) 唇/掌/日焼け部の平均的な分光反射率(交流成分). (f) (e) から生成した直交参照スペクトル対を用いて (d) を撮影した出力画像.

は、対象スペクトルの交流成分  $\tilde{R}_{ij}(\lambda)$  を  $\psi_0(\lambda)$ ,  $\psi_{\perp}(\lambda)$  のなす部分空間 (平面) に射影していると解釈できる。よって  $\tilde{R}_{ij}(\lambda)$  が参照スペクトルにどの程度一致するかは、射影成分の方位角  $\phi_{ij}$  によって見積られる。 $\tilde{R}_{ij}(\lambda)$  は  $\phi_{ij}$  が 0 に近いほど  $\psi_0(\lambda)$  に、 $\pi/2$  に近いほど  $\psi_{\perp}(\lambda)$  にそれぞれよく類似する。 $\phi_{ij}$  は対象スペクトルの平均凹凸を意味する二乗ノルム  $\|\tilde{R}_{ij}(\lambda)\|$ 、および波長掃引単色照明の強度分布  $I_{ij}$  には依存しないことに注意されたい。

異なるスペクトル  $R_1(\lambda)$ ,  $R_2(\lambda)$  を有する 2 物体を区別したい場合、 $R_1(\lambda)$ ,  $R_2(\lambda)$  を交流化、規格化したスペクトルの和および差成分を参照スペクトル直交対  $\psi_0(\lambda)$ ,  $\psi_{\perp}(\lambda)$  とすればよい。 $\psi_0(\lambda)$ ,  $\psi_{\perp}(\lambda)$  を CIS への参照信号として与えるには、それらの線形和が部分空間内で互いに  $2\pi/3$  ずつ方向の異なる 3 本のスペクトルを用いる。

なお、検出能力向上のための他の手法としては、わずかにスペクトルの異なる 2 物体に対するスペクトル整合イメージングの応答の差を拡大することを目的として、波長掃引単色照明のピーク波長  $\lambda_0(t)$  を時刻  $t$  に対し非線形に掃引する手法が提案されている<sup>18)</sup>。

### 3. 応用例

スペクトル整合イメージングの実例を以下に示す。

#### 3.1 秘匿パターンの検出

秘匿パターンをスペクトル整合イメージングにより検出した結果を図 8 に示す。秘匿パターンは天然および人工の岩絵具を用いて作製した。これらはきわめて類似した緑色を呈するが、図 8 (a) に示す通り分光反射率は特に長波長側で著しい差異を示す。図 8 (b), (d) のパターンを図 5 の波長掃引単色照明下で撮影した結果を図 8 (c), (e) に示す。天然の岩絵具によるバーコードや隠し文字のパターンが検出されている。

#### 3.2 類似色物体の識別

波長多重型スペクトル整合イメージングにより類似色のガラスを識別する実験を行っている。対象は図 9 上段に示すような、希土類元素イオン (Pr, Nd) あるいは通常の金属 (Cr, Mn) イオンを含有する類似色のガラスの対である。Pr-Cr 対 (図 9 (a)) は緑色、Nd-Mn 対 (図 9 (b)) は紫色をそれぞれ呈するが、分光透過率は図 9 中段のように大きく異なり、特に希土類元素イオンにおいて特徴的な激しい凹凸がみられる。2.3 節に述べたスペクトルの和/差成分を単独に参照信号として用いた場合の CIS 出力画像を図 9 下段に示す。差成分では 2 つの対象スペクトルに対して異なる符号で相関が生成されるため、出力画像においてガラス対が白/黒で対照的に表示されている。

### 3.3 皮膚の検出と識別

直交検出法に基づく波長掃引型スペクトル整合イメージングを用いて皮膚の検出や状態の識別を試みている<sup>19)</sup>。図 10 にその結果を示す。撮像対象は、図 10 (a) では皮膚 (左手指) と非皮膚物体、図 10 (d) では日焼け/充血/虚血の異なる状態を呈する皮膚 (左手指) である。各部位の平均的な分光反射率を図 10 (b), (e) のように求め、そこから直交参照スペクトル対を生成して撮影したときの CIS 出力画像をそれぞれ図 10 (c), (f) に示す。皮膚と非皮膚物体、皮膚の虚血部と充血部では異なる方位角が得られ、それらが識別できていることを確認している。

スペクトル整合イメージングの理論、実現方法、および応用例を述べた。現在は原理的な検証が終わり、波長掃引単色照明の出力増強、スペクトルのわずかに異なる対象に適用する際の感度向上など、応用展開を進める上で解決しなければいけない問題に取り組んでいる。これらを解決することによって幅広い応用展開を進め、特に従来は分光イメージングの適用が困難とされた運動や変形を伴う対象の検出や識別を実現したいと考えている。

### 文 献

- 1) R. C. Olsen, S. Bergman, and R. G. Resmini: "Target detection in a forest environment using spectral imagery," *Proc. SPIE*, **3118** (1997) 46-56.
- 2) B. Kalaçali and W. Snyder: "Automatic target detection using multispectral imaging," *Proc. 31th Appl. Image Patt. Recog. Workshop* (IEEE Computer Society, 2002) pp. 55-59.
- 3) F. van der Meer: "The effectiveness of spectral similarity measures for the analysis of hyperspectral imagery," *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, **8** (2006) 3-17.
- 4) J. Chen, X. Jia, W. Yang and B. Matsushita: "Generalization of subpixel analysis for hyperspectral data with flexibility in spectral similarity measures," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **47** (2009) 2165-2171.
- 5) G. H. Gao and Z. Lin: "Acousto-optic supermultispectral imaging," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 3081-3086.
- 6) S. Tominaga: "Multichannel vision system for estimating surface and illuminant functions," *J. Opt. Soc. Am. A*, **13** (1996) 2163-2173.
- 7) S. Tominaga: "Spectral imaging by a multi-channel camera," *J. Electron. Imaging*, **8** (1999) 332-341.
- 8) N. Gat: "Imaging spectroscopy using tunable filters: A review (invited)," *Proc. SPIE*, **4056** (2000) 50-64.
- 9) H. Haneishi, T. Hasegawa, A. Hosoi, Y. Yokoyama, N. Tsumura and Y. Miyake: "System design for accurately estimating the spectral reflectance of art paintings," *Appl. Opt.*, **39** (2000) 6621-6632.
- 10) H. M. G. Stokman, T. Gevers and J. J. Koenderink: "Color measurement by imaging spectrometry," *Comput. Vis. Image Underst.*, **79** (2000) 236-249.
- 11) J. Y. Hardeberg, F. Schmitt and H. Brettel: "Multispectral color image capture using a liquid crystal tunable filter," *Opt. Eng.*, **41** (2002) 2532-2548.

- 12) A. Ibrahim, S. Tominaga and T. Horiuchi: "Spectral imaging method for material classification and inspection of printed circuit boards," *Opt. Eng.*, **49** (2010) 057201.
- 13) S. Ando and A. Kimachi: "Correlation image sensor: Two-dimensional matched detection of amplitude-modulated light," *IEEE Trans. Electron Devices*, **50** (2003) 2059–2066.
- 14) A. Kimachi, T. Imaizumi, A. Kato and S. Ando: "Spectral matching imager using correlation image sensor," *Trans. IEE Japan*, **122-E** (2002) 200–206.
- 15) A. Kimachi, H. Ikuta, Y. Fujiwara, M. Masumoto and H. Matsuyama: "Spectral matching imager using amplitude-modulation-coded multispectral light-emitting diode illumination," *Opt. Eng.*, **43** (2004) 975–985.
- 16) A. Kimachi, S. Ando, M. Doi and S. Nishi: "Three-phase quadrature spectral matching imager using correlation image sensor and wavelength-swept monochromatic illumination," *Opt. Eng.*, **50** (2011) 127208.
- 17) A. Fong, B. Bronson and E. Wachman: "Advanced photonic tools for hyperspectral imaging in the life sciences," *SPIE Newsroom* (April, 2008) (<http://spie.org/x23847.xml>).
- 18) 来海 暁, 土居元紀, 西 省吾: "非線形波長—時間変換に基づくスペクトル整合イメージャ", *Optics & Photonics Japan*, 25pD5 (2012) .
- 19) 来海 暁, 安藤 繁, 土居元紀, 西 省吾: "三相スペクトル整合イメージャを用いた皮膚の状態識別", *Optics & Photonics Japan*, 30aF4 (2011).

(2013年3月21日受理)