

液晶チューナブルフィルターを用いた分光透過率を自由に書き換えられる広帯域カラーフィルター

宮澤 佳苗^{***}・蔵敷 和彦^{*}・豊岡 了^{*}

^{*}埼玉大学大学院理工学研究科 〒338-8570 さいたま市下大久保 255

^{**}現在：ヨensuu大学コンピュータサイエンス学科，フィンランド

Implementation of Rewritable Broadband Color Filters with Arbitrary Spectral Transmittance Using a Liquid Crystal Tunable Filter

Kanae MIYAZAWA^{***}, Kazuhiko KURASHIKI^{*} and Satoru TOYOOKA^{*}

^{*}Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, 255, Shimo-okubo, Saitama 338-8570

^{**}Present address: Department of Computer Science, University of Joensuu, P.O. Box 111, FIN-80101 Joensuu, Finland

We propose a rewritable broadband color filter system for multispectral image acquisition. The spectral transmittance of the system can be changed arbitrarily using a Liquid Crystal Tunable Filter (LCTF). Transmittance of an LCTF used is Gaussian shape with the bandwidth of 5 nm and the LCTF is usually used as electrically controllable narrowband filter. In this paper, we control an exposure time for each narrowband of the LCTF and acquire a time-integrated intensity image while the LCTF is scanning through the visible range of wavelengths. The image acquired corresponds to that obtained through a broadband color filter. The optically implemented color filters and computationally designed ones almost coincided. The system can be applied to spectral image estimation and classification.

Key words: spectral imaging system, rewritable broadband color filter, liquid crystal tunable filter

1. はじめに

物体の分光情報を画像各点について取り扱う分光画像解析が現在さかんに研究され、マシンビジョン¹⁾、医療診断²⁾、美術品³⁻⁵⁾、リモートセンシング^{6,7)}など幅広い分野に応用されている。分光情報は従来のRGBなど3バンドから得られる色情報とは異なり、光源の影響を取り除いた物体固有の情報を詳細に知ることができるため、照明光の影響を考慮したカラー画像表示や、物体に含まれる成分の分析などに用いられる。一般に分光画像は、狭帯域干渉フィルター⁸⁾、音響光学チューナブルフィルター (AOTF)⁹⁾、狭帯域型の液晶チューナブルフィルター (LCTF)¹⁰⁾などを通してモノクロカメラで撮像される。これら狭帯域フィルターを用いる場合、各帯域での分光画像が詳細に得られる反面、多量のデータを獲得、処理、保存する必要が生じる。

近年、狭帯域フィルターの代わりに、少数枚の広帯域カ

ラーフィルターを通して得た強度画像から、各帯域の分光画像を推定する手法が研究されている^{4,11-18)}。推定方法として低次元線形近似法¹¹⁻¹⁵⁾、疑似逆行列法¹⁶⁻¹⁸⁾、Wiener推定法⁴⁾などが挙げられる。低次元線形近似法である主成分分析¹⁹⁾において、分光分布はそれ自身を含む多数の分光データから計算される主成分ベクトルで張られる部分空間に展開できる。つまり物体の分光分布は、それ自身と主成分ベクトルとの間の内積値を重みとする主成分ベクトルの線形結合によって表せるといえる。したがって、内積値さえ求めれば物体の分光分布が推定できるので、狭帯域フィルターを用いて分光分布を測定する場合に比べ、獲得、処理、保存するデータ量は大幅に減少する。また、内積値はすでに対象とする物体の特徴を反映しているため、物体の識別・分類に直接用いることも可能である。

広帯域フィルターの設計法として主成分分析を一例に挙

E-mail: kanae@cs.joensuu.fi

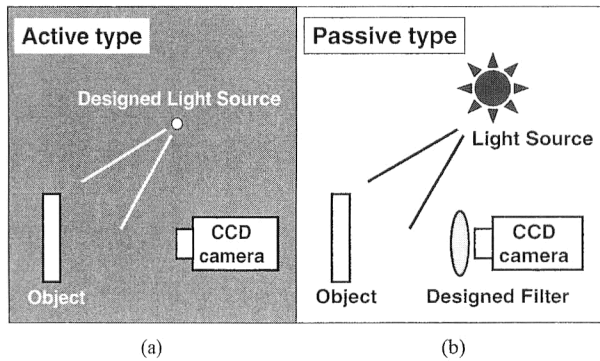


Fig.1 Two ways to obtain inner products optically between a spectrum of an object and computationally designed broadband color filter functions: (a) active type, (b) passive type.

げたが、主成分ベクトルはその直交性により必ず負の値をもつため、フィルターとして光学系に直接導入することは難しい。そのため、筆者らはこれまで、主成分ベクトルと同様、分光分布の推定に用いることができ、かつ負の値をもたない広帯域フィルターを設計し²⁰⁾使用してきた^{16,17)}。フィルター設計法は2章2節で簡単に紹介する。いずれの設計法を用いる場合も、コンピューターで設計した広帯域フィルターを光学的に実現することができれば、それを通して観察した強度画像は、物体の分光分布と広帯域フィルターとの間の内積値に相当する。

物体の分光分布とコンピューターで設計した広帯域フィルターとの間の内積値を光学的に得るためには、Fig. 1に示す2つの方法が考えられる。Fig. 1(a)のアクティブ型では、設計したフィルターに相当する放射輝度分布をもつ光を合成し、その光で対象物体を照射したときの強度画像をモノクロカメラで撮像する¹⁴⁻¹⁶⁾。各ピクセルの強度値が内積値に相当する。この方法は顕微鏡画像など屋内での測定には有用であるが、太陽光照明下など任意の光源下にある物体や自発光物体の観察には不向きである。これらの場合はFig. 1(b)のパッシブ型を用いる必要がある。この方法では、設計したフィルターに相当する分光透過率をもつ光学フィルターを物理的に作製し、そのフィルターを通して対象物体の強度画像をモノクロカメラで撮像する。アクティブ型と同様、各ピクセルの強度値が内積値に相当する。

現在、パッシブ型広帯域フィルターとして、色素フィルター^{21,22)}、広帯域型の液晶チューナブルフィルター(LCTF)²³⁾などが分光画像取得に用いられている。しかし、これらの分光透過率は固定されており、目的や対象に応じて自由に書き換えることは一般に困難である。それに対して筆者らは、分光透過率を自由に書き換えられるパッシブ型広帯域フィルターシステムをこれまで提案してきた¹⁷⁾。このシステムは、位置に対応して透過波長が線形的に変化する linear variable filter (LVF) と液晶空間光変調素子 (LCSLM) を密着した接合フィルターを、移動ステージによりカメラの開口部を一定速度で掃引し、その間の時間積分強度画像を撮像することで、広帯域フィルターを通したものと同等の強度画像を得るしくみである。LCSLMの濃淡パターンを書き換えることで何度でも望みのフィルターをつくることができる。このLVF-LCSLMパッシブ型広帯域フィルターシステムは文献16)のアクティブ型と同程度の精度で、望みのフィルターを通した画像を得ることができる。しかしながら、機械的可動部分があり、かつデバイスの特性による制限から測定波長域は可視光に限られていた。

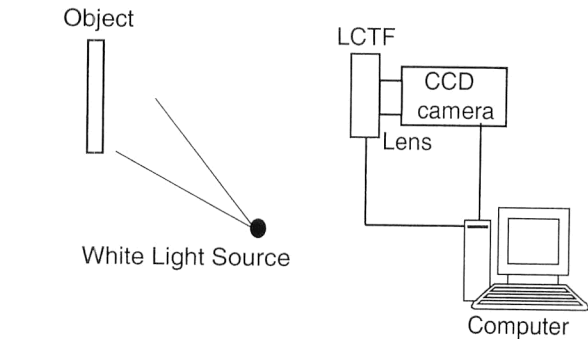


Fig. 2 Experimental setup.

これらの問題に対処するため本論文では、分光透過率が自由に書き換え可能で、機械的可動部分がなく、かつ近赤外領域まで測定レンジが拡張可能な、LCTFを用いた新しいパッシブ型広帯域フィルターシステムを提案する。上記のLVF-LCSLMパッシブ型広帯域フィルターシステムでは、狭帯域フィルターを空間的に波長走査することで広帯域フィルターを実現したが、提案するLCTFパッシブ型広帯域フィルターシステムでは狭帯域フィルターを時間的に波長走査することで広帯域フィルターを実現する。2章に市販の狭帯域型LCTFの紹介とそれを用いた広帯域フィルターの実現法、3章に光学的に実現したフィルターと目標値との比較、その結果に対する考察を行い、4章にまとめを行う。

2. 実験装置

実験装置の概略をFig. 2に示す。白色光源で照射された被測定物体の強度画像は、LCTF(米国CRI社VariSpec™ VIS3型)を通してモノクロCCDカメラ(SONY XC-73, 768×494ピクセル)で撮像されコンピューターに取り込まれる。LCTFはCCDカメラのレンズに密着して取り付け

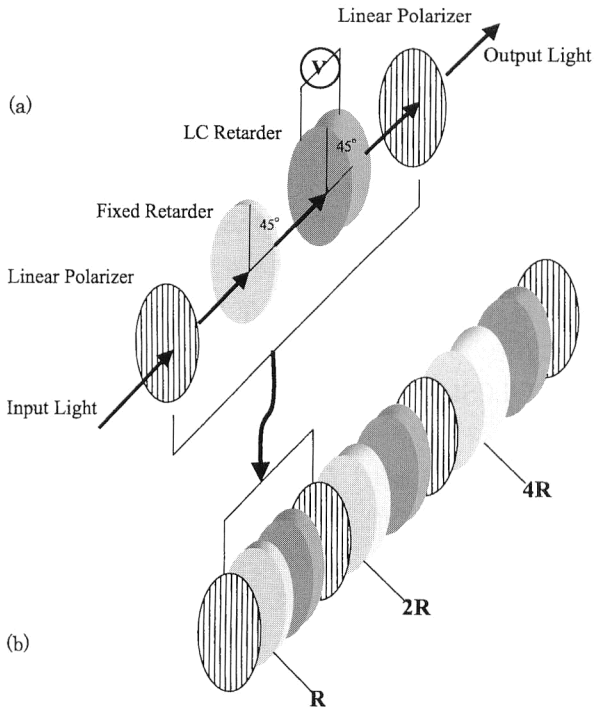


Fig. 3 The structure of the LCTF: (a) 1-stage LCTF, (b) 3-stage LCTF.

られている。次節に LCTF のしくみや特性を述べる。

2.1 LCTF

LCTF とは、コンピューターからの制御により任意の波長のみを透過させ、他の波長をカットするチューナブルフィルターである。カメラと組み合わせて分光画像取得に用いたり、白色光源と組み合わせてモノクロメーターとして用いることができる。LCTF の構造は Fig. 3(a) に示すように、平行する偏光子 (linear polarizer) の間に固定リターダー (fixed retarder) を挟んだ古典的なりオ (Lyot) フィルター内に液晶リターダー (liquid crystal retarder) を組み込んだユニットを、Fig. 3(b) に示すように数～十数段カスケードに並べたものである²⁴⁾。このとき固定リターダー、液晶リターダーともに、それぞれの光学軸が偏光子の振動方向に対して 45° 回転した角度に設置されている。各層の固定リターダーの厚さは R , $2R$, $4R$ と 2 倍ずつ増加する構造になっており、各層の透過波長は Fig. 4(a) のようになる。そのため全層を透過する光は Fig. 4(b) に示すように特定の波長のみを選択し他をカットする。また、液晶リターダーへの印加電圧を変えることで透過光の中心波長をシフトさせることができる。結果として、LCTF はコンピューター制御により任意の波長のみを透過させるフィルターとなる。

Table 1 に使用した LCTF の主な仕様と、Fig. 5(a), (b) に透過特性、それを波長ごとに積分した値をそれぞれ

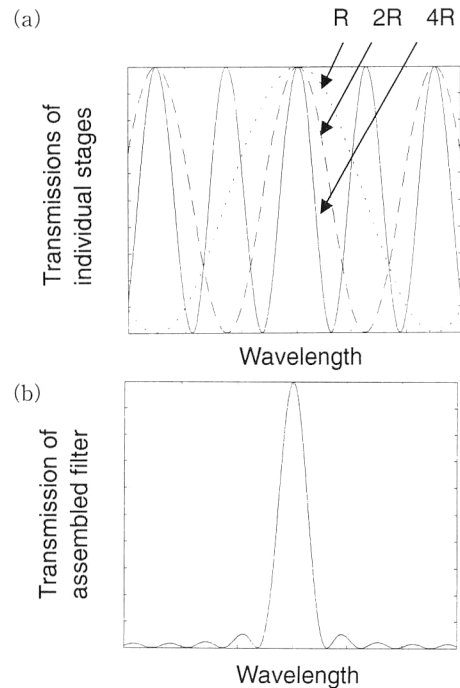


Fig. 4 The transmission of 3-stage LCTF: (a) individual stages, (b) assembled filter.

Table 1 The specifications for the LCTF.

Product	VariSpec
Model	VIS3
Aperture	35 mm
Wavelength range	425-750 nm at 1 nm interval
Nominal bandwidth (FWHM)	5 nm at 550 nm
Response time (@25°C)	50 ms (random access)

示す。透過特性は中心波長のまわりでガウス分布をもち、長波長側に行くほど半値幅とピークは大きくなる。本 LCTF は 425 nm から 750 nm まで 1 nm 間隔で制御可能であるが、短波長側の透過率が極端に低いこと、また本論文の目的である、狭帯域型 LCTF を用いて広帯域フィルターが実現できることを示すためには、すべての波長領域を使用する必要はないと判断し、本論文では 450 nm から 650 nm まで 10 nm 間隔で使用した。

2.2 広帯域フィルター実現法

任意の分光透過率をもつ広帯域フィルターを実現するために、目標とする広帯域フィルターの各波長ごとの透過率の大きさを、LCTF が各波長の光を透過させる時間、つまり露光時間に置き換える。フィルターの透過率をある波長で大きくしたければ、LCTF がその波長の光を通す時間を長くすればよい。帯域全体の時間積分画像を CCD カメラで取り込むことにより、望む分光透過率をもつカラーフィルターを物理的に通したものと同等の強度画像が得られる。

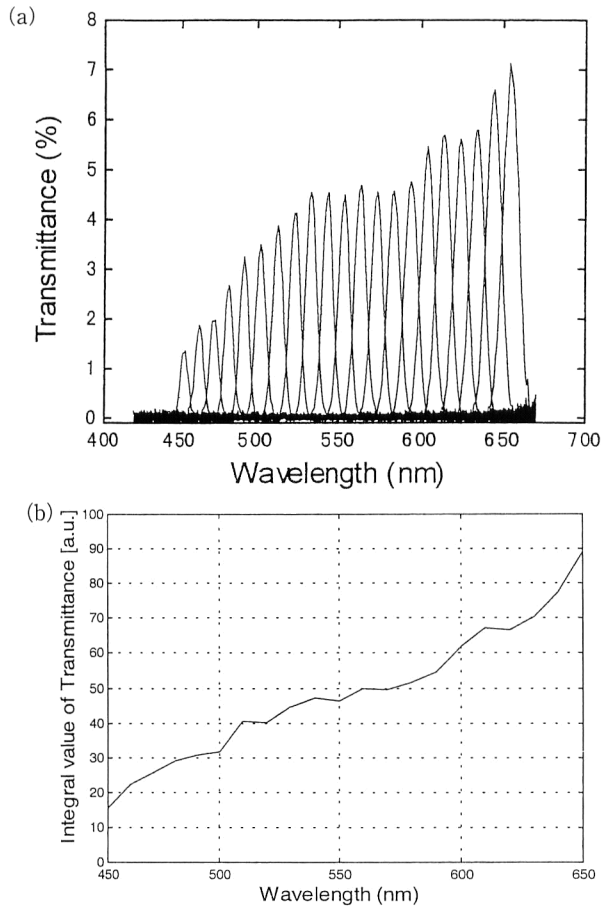


Fig. 5 (a) The transmittance of the LCTF in each narrowband. (b) Integral value of the transmittance of the LCTF.

Fig. 6 に例として用いた 4 つのフィルターを示す。これらは、Munsell カラーチップ 1269 色²⁵⁾ の分光反射率データを教師なしニューラルネットワーク (unsupervised neural network) で 4 つにクラスタリングすることによって得たものであり²⁰⁾、主成分分析によって計算した主成分ベクトルと同様、分光分布推定に用いることができる。主成分ベクトルとは異なり、負の値をもたないため光学系にそのまま導入できる利点がある。筆者らはこれまでの研究で、これらのフィルターをアクティブ型フィルターシステム、LVF-LCSLM パッシブ型フィルターシステムでそれぞれ実現し、フィルターを通して得た強度画像から自然界の物体の分光分布を推定した^{16,17)}。また、強度画像から直接、物体の分類を試みた²⁶⁾。そこで、本論文でも同じフィルターを用いて、提案するシステムの精度確認を行った。

LCTF の透過特性は波長ごとに変化するため、Fig. 6 の縦軸をそのまま露光時間に置き換えることはできない。そのため、Fig. 6 を LCTF の透過特性の積分値 Fig. 5(b) でそれぞれ割ることにより、露光時間に重みづけを行った。LCTF のチューニング速度も考慮して決定した露光時間を Fig. 7 に示す。

LCTF の具体的な制御法を Fig. 6(a) のフィルターを例に説明する。はじめに、LCTF の中心波長を 450 nm にセットし 14 秒露光する。続けて 460 nm で 10 秒露光する。Fig. 7(a) に従い、この操作を 650 nm まで続ける。CCD カ

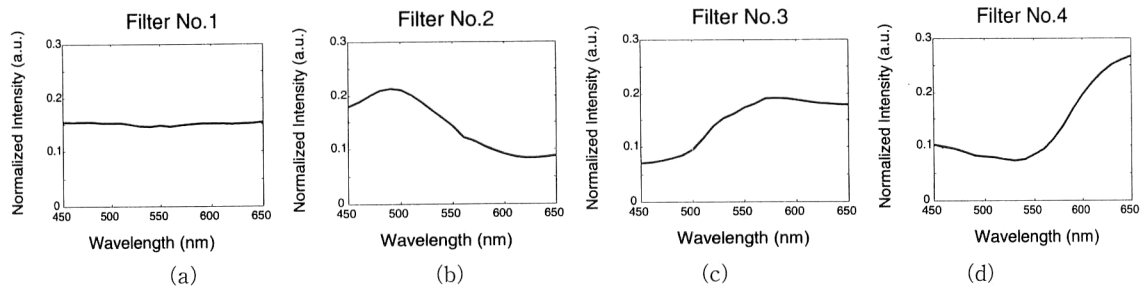


Fig. 6 Test filter functions.

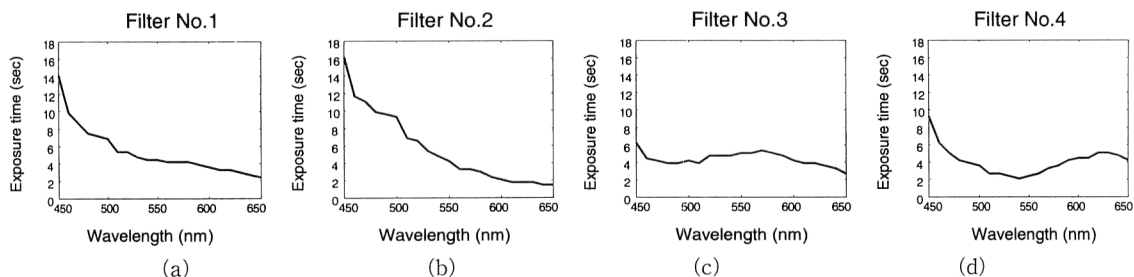


Fig. 7 Exposure time distributions.

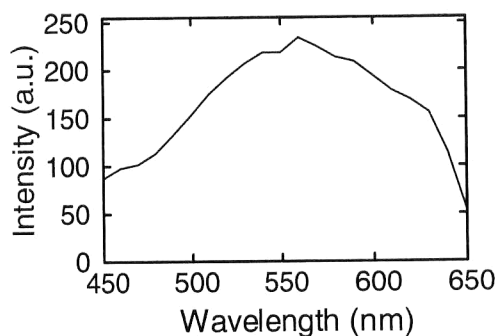


Fig. 8 The spectral intensity of the white light source.

メラのシャッターはこの間、開いたままである。650 nm の露光を終えた時点でシャッターは閉じ、1枚の強度画像が得られる。Fig. 6(b)~(d)のフィルターについても、Fig. 7(b)~(d)に従い同様の操作を行う。露光時間の合計は、フィルター1枚につき本実験では約120秒であった。

3. 実験結果と考察

本システムで撮像した強度画像が、望むフィルターを通じたものであるか確かめる実験を行った。Fig. 2中のobjectの位置に標準白色板(Labsphere製SRT-99-050テフロン)を置き、白色光源には可視領域で輝線を含まずなだらかな放射特性をもつハロゲンランプを用いた。まず、光源の分光放射特性を調べるため、標準白色板に照射したハロゲンランプの強度画像を、LCTFを通してCCDカメラで撮像した。このときLCTFは狭帯域フィルターとして使用し、450 nmから650 nmまで10 nmごとに透過中心波長を変化させ、21枚の強度画像を得た。各強度画像について10×10ピクセルのウィンドウ内の平均強度値を計算し、Fig. 5(b)に示す透過率の積分値で割り、光源の分光放射特性とした。Fig. 8に得られた結果を示す。450 nmと650 nm付近の強度が弱いのは、光源が本来もつ放射特性、CCDカメラの感度特性、CCDカメラ内部に取り付けられた近赤外カットフィルターの影響などが考えられる。

次にLCTFの広帯域フィルターとしての精度を調べるため、LCTFを透過する光の分光分布を以下のように測定した。まず、Fig. 7に従い露光時間を変化させ広帯域フィルターを実現した。このとき、半値幅が5 nmの狭帯域干渉フィルターを450 nmから650 nmまで10 nm間隔で21枚用意し、LCTFの前に1枚ずつ設置し、帯域ごとの強度画像21枚をCCDカメラで取り込んだ。各画像につき10×10ピクセルのウィンドウ内の平均強度値を計算し、これを狭帯域干渉フィルター透過率の各波長の積分値で割ることにより、広帯域フィルターを透過する光の分光分布とした。この作業を4枚の広帯域フィルターについて同様に行

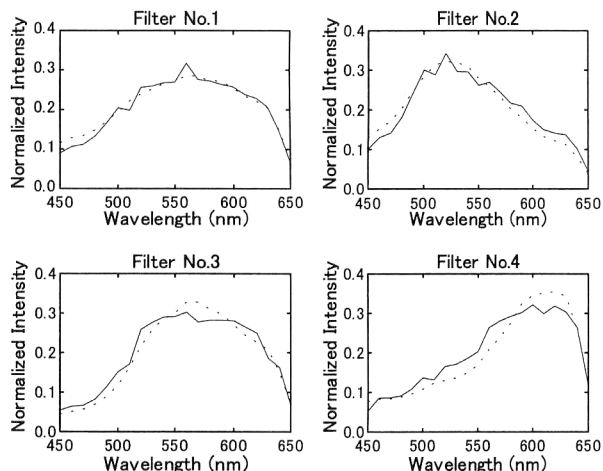


Fig. 9. Experimental results. Solid lines: the normalized spectral intensity of the light through the optically implemented filters. Dotted lines: the normalized expected filter functions that are the products between the four color filter functions and the spectral intensity of the white light source.

Table 2. Norm errors over four samples for the normalized expected filters and the normalized spectral intensities of the light through the implemented filters.

Sample number	Norm error (%)
1	6.39
2	9.28
3	10.26
4	13.62
Average	9.89

った。

Fig. 9に結果を示す。実線は本システムで実現した広帯域フィルターを通った光の分光分布、点線は目標とするフィルター、すなわちFig. 6のコンピューターで設計したフィルターに、Fig. 8の白色光源の分光放射特性を掛け合わせたものである。両者ともベクトルの長さが1になるように規格化した。この結果より、コンピューターで設計した広帯域フィルターが、本システムによって物理的にフィルターとして実現できることがわかった。

4つのフィルターについて式(1)で示されるノルム誤差(norm error)を計算した。

$$\text{norm error}(\%) = \|\mathbf{p} - \mathbf{o}\| \times 100 \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{p} は目標とするフィルターの分光分布ベクトル、 \mathbf{o} は本システムで実現した広帯域フィルターを通った光の分光分布ベクトルである。また $\|\cdot\|$ はユークリッドノルム演算を表す。計算結果をTable 2に示す。4枚のフィルターの平均ノルム誤差は10%程度であった。4番目のフィルターの誤差が他に比べて比較的大きくなった原因は、コンピューターで設計した元来のフィルターの強度が低波長側で

低く、また近赤外カットフィルターを含む CCD カメラの感度が長波長側で低かったため、帯域全体で S/N 比が下がったものと思われる。

筆者らがこれまでに提案したアクティブ型フィルターシステム¹⁶⁾、LVF-LCSLM パッシブ型フィルターシステム¹⁷⁾の場合、実現したフィルターの平均ノルム誤差はそれぞれ約 7%、約 6%程度であった。それらに比べると、本システムは多少誤差が大きい。その原因としては、CCD カメラを長時間露光したことによるノイズが考えられる。現段階では、LCTF の性能上、これ以上露光時間を短くすることは広帯域フィルターの精度を下げることにつながる。冷却 CCD カメラを用いるか、高速で制御できるチューナブルフィルターが開発されれば、より精度の高い広帯域フィルターの実現が期待できる。

4. ま と め

LCTF を用いた分光透過率を、何度でも自由に書き換えられるパッシブ型広帯域カラーフィルターシステムを提案した。コンピューターで設計した広帯域フィルターの透過率に応じて、狭帯域 LCTF を透過する光の露光時間を制御し、帯域全体の時間積分画像をカメラで取り込むことで、広帯域フィルターを通したものと同等の強度画像が得られた。コンピューターからの電氣的な制御でフィルターを何度でもつくりかえることができた。例として、作製した 4 つのフィルターの平均ノルム誤差は約 10% であり、本手法により広帯域フィルターが実現できることが示された。本システムの問題点である露光時間の長さはデバイスの性能に起因する。今後、高性能デバイスの開発が望まれる。

LCTF の代わりに AOTF¹⁰⁾ を用いて広帯域フィルターを作製することも可能である。しかしながら、AOTF は LCTF に比べて開口が小さいため、カメラレンズ前に取り付けて分光画像を取得することは難しい。そのため、レンズとカメラの間に結像系とともに挟み込む必要がある。その点で LCTF のほうが利用しやすいと考えられる。

今回使用した LCTF は可視域用であったが、現在すでに 1700 nm までカバーする製品が市販されている。本手法を適用することで、近赤外領域まで拡張した、分光透過率を自由に書き換えられる広帯域フィルターが実現できるであろう。

本研究は文部省科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)「ニューラルネットワークを用いた分光学的カラー画像理解のための光並列処理システム—その植生モニタへの応用—」(No. 10555013)の援助を得て行われた。Munsell カラーチ

ップの分光反射率データはヨエンスウ大学(フィンランド)から提供されている (<http://cs.joensuu.fi/~spectral/>)。

文 献

- 1) T. Hyvarinen, E. Herrala and A. Dall'Ava: "Direct sight imaging spectrograph: A unique add-on component brings spectral imaging to industrial applications," *IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging*, Proc. SPIE, **3302-21** (1998) 165-175.
- 2) M. Yamaguchi, R. Iwama, Y. Ohya, T. Obi, N. Ohya and Y. Komiya: "Natural color reproduction in the television system for telemedicine," *Medical Imaging 1997: Image Display*, ed. Y. Kim, Proc. SPIE, **3031** (1997) 482-489.
- 3) S. Baronti, A. Casini, F. Lotti and S. Porcinai: "Multispectral imaging system for the mapping of pigments in works of art by use of principal-component analysis," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 1299-1309.
- 4) N. Tsumura, H. Sato, T. Hasegawa, H. Haneishi and Y. Miyake: "Limitation of color samples for spectral estimation from sensor responses in fine art painting," *Opt. Rev.*, **6** (1999) 57-61.
- 5) H. Maitre, F. Schmitt, J.-P. Crettez, Y. Wu and J. Y. Hardeberg: "Spectrophotometric image analysis of fine art paintings," *Proceedings of the 4th Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications* (Society for Imaging Science and Technology and Society for Information Display, Scottsdale, Ariz., 1996), pp. 50-53.
- 6) B. N. Rock, J. E. Vogelmann, D. L. Williams, A. F. Vogelmann and T. Hoshizaki: "Remote detection of forest damage: Plant responses to stress may have spectral "signatures" that could be used to map, monitor and measure forest damage," *BioScience*, **36** (1986) 439-445.
- 7) E. J. Ainsworth and I. S. F. Jones: "Radiance spectra classification from the ocean color and temperature scanner on ADEOS," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **37** (1999) 1645-1656.
- 8) S. Kawata, K. Sasaki and S. Minami: "Component analysis of spatial and spectral patterns in multispectral images. I. Basis," *J. Opt. Soc. Am. A*, **4** (1987) 2101-2106.
- 9) J. Hallikainen, J. P. S. Parkkinen and T. Jaaskelainen: "Color image processing with AOTF," *Proceedings of the 6th Scandinavian Conference on Image Analysis*, eds. M. Pietikäinen and J. Röning (Pattern Recognition Society of Finland, Oulu, Finland, 1989), pp. 294-300.
- 10) C. C. Hoyt: "Toward higher res, lower cost quality color and multispectral imaging," *Advanced Imaging*, April (1995).
- 11) M. J. Vrhel and H. J. Trussell: "Color correction using principal components," *Color Res. Appl.*, **17** (1992) 328-338.
- 12) J. P. S. Parkkinen, J. Hallikainen and T. Jaaskelainen: "Characteristic spectra of Munsell colors," *J. Opt. Soc. Am. A*, **6** (1989) 318-322.
- 13) T. Jaaskelainen, J. Parkkinen and S. Toyooka: "Vector-subspace model for color representation," *J. Opt. Soc. Am. A*, **7** (1990) 725-730.
- 14) T. Jaaskelainen, S. Toyooka, S. Izawa and H. Kadono: "Color classification by vector subspace method and its optical implementation using liquid crystal spatial light

- modulator,” *Opt. Commun.*, **89** (1992) 23-29.
- 15) N. Hayasaka, S. Toyooka and T. Jaaskelainen: “Iterative feedback method to make a spatial filter on a liquid crystal spatial light modulator for 2D spectroscopic pattern recognition,” *Opt. Commun.*, **119** (1995) 643-651.
 - 16) M. Hauta-Kasari, K. Miyazawa, S. Toyooka and J. Parkkinen: “Spectral vision system for measuring color images,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **16** (1999) 2352-2362.
 - 17) K. Miyazawa, M. Hauta-Kasari and S. Toyooka: “Rewritable broad-band color filters for spectral image analysis,” *Opt. Rev.*, **8** (2001) 112-119.
 - 18) J. Y. Hardeberg, H. Brettel and F. Schmitt: “Spectral characterisation of electronic cameras,” *Electronic Imaging: Printing and Publishing in Color*, Proc. SPIE, **3409** (1998) 100-109.
 - 19) E. Oja: *Subspace Methods of Pattern Recognition* (Research Studies Press, Letchworth, UK, 1983).
 - 20) M. Hauta-Kasari, W. Wang, S. Toyooka, J. Parkkinen and R. Lenz: “Unsupervised filtering of Munsell spectra,” *Proceedings of the 3rd Asian Conference on Computer Vision, ACCV '98*, Vol. 1351 of Lecture Notes in Computer Science, eds. R. Chin and T. -C. Pong (Springer-Verlag, Berlin, 1998), pp. 248-255.
 - 21) S. Tominaga: “Multichannel vision system for estimating surface and illumination functions,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **13** (1996) 2163-2173.
 - 22) P. L. Vora and H. J. Trussell: “Mathematical methods for the design of color scanning filters,” *IEEE Trans. Image Process.*, **6** (1997) 312-320.
 - 23) S. Tominaga: “Multi-channel cameras and spectral image processing,” *Proceedings of International Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives* (Society of Multispectral Imaging of Japan, Chiba, Japan, 1999), pp. 18-25.
 - 24) 逸見 登: “VariSpec™ 液晶チューナブルフィルター”, *光アライアンス*, **7** (1995) 49-52.
 - 25) *Munsell Book of Color-Matte Finish Collection* (Munsell Color, Baltimore, Md., 1976).
 - 26) M. Hauta-Kasari, K. Miyazawa, S. Toyooka, J. Lehtonen, J. Parkkinen and T. Jaaskelainen: “Spectral based color image acquisition and analysis,” *カラーフォーラム JAPAN2000 論文集*, 東京 (2000) pp. 59-66.