

多重像フーリエ分光映像法とその時系列分光画像計測への応用

平井亜紀子*・伊東 一良*・一岡 芳樹**

大阪大学大学院工学研究科*応用物理学専攻, **物質生命工学専攻 〒565 吹田市山田丘 2-1

Multiple-Image Fourier Transform Spectral Imaging and Its Application to Time-Sequential Measurement of Spectral Images

Akiko HIRAI*, Kazuyoshi ITOH* and Yoshiki ICHIOKA**

Graduate Course of *Applied Physics, **Material and Life Science, Osaka University, 2-1, Yamadaoka, Suita 565

The spatial and spectral resolution limits and signal-to-noise ratio of a novel technique for fast spectral imaging are experimentally studied. A pair of two-dimensional arrays of images are formed and superposed to produce interference signals. Each image in the matrix is provided with a varied path difference to generate the interference signals, which include all the information necessary to reconstruct a spectral image. A time-sequence of spectral images of an object whose spectral reflectance varies in time and space is reconstructed.

1. はじめに

分光計測で得られる光のスペクトルは、物質と光の相互作用に関する様々な情報を含んでいる。光のスペクトルの空間的な分布情報と同時に、時間的な変動の情報までも得ることができると、その利用分野は大きく広がる。光の空間情報と分光情報とを同時に合わせもつ情報は分光画像と呼ばれ、リモートセンシング¹⁾、医療²⁾、天体観測、環境調査など、多岐にわたる分野で利用されている。従来から、分光画像計測法(分光映像法)には、帯域選択フィルターを用いる方法³⁾、分散素子を用いる方法³⁾、物体上の各点に対してフーリエ分光を並列に行う方法^{4,5)}など、様々な手法が考案されている。一方、時間情報と分光情報を合わせもつ情報を得るために、時間分解分光法が広く用いられている。空間情報、分光情報をもつ分光画像が、さらに時間情報まで含んでいると、燃焼計測^{6,7)}、生体計測など、多くの分野で新たな知見が得られることが期待される。時間情報を得るためには、分光画像の計測が短時間でなければならぬ。しかし、従来の分光映像法は測定に時間がかかるものが多かった。

筆者らは瞬時に分光画像計測を行うことを目的として多重像フーリエ分光映像法(multiple-image Fourier transform spectral imaging; MI-FTSI)を提案し

た⁸⁾。MI-FTSIではレンズアレイによって物体の多重像を作り、この多重像を光学的に重ね合わせる際に、各像に対してそれぞれ異なる光路差を与えて干渉させる。これは、物体上の各点でのインターフェログラムを、空間的に展開することに相当する。このことにより、分光画像を再生するために必要なすべてのデータを一度に取り込むことができる。たとえば、過渡現象などの高速現象の分光画像の瞬時計測も可能である⁸⁾。

本論文では、MI-FTSIの空間分解能とスペクトル分解能、および信号対雑音比を求め、それらを実験的に検証した。また、本手法を用いて時間的、空間的に分光反射率が変化する物体の時系列分光画像を測定した結果についても報告する。

2. 多重像フーリエ分光映像法(MI-FTSI)⁸⁾

MI-FTSIの原理を説明するために、Fig. 1にマイケルソン干渉計を用いた光学系の例を示す。レンズアレイ、ビームスプリッターを用いて、マイケルソン干渉計内の2つの平面鏡上に物体の多重像を結像する。片方の鏡を傾けることにより、位置に依存した光路差を多重像に与える。多重像は後ろ側のレンズによってイメージセンサー上に結像され、光路差に応じた干渉強度分布をもつ。この干渉した多重像を干渉像マトリクスと呼ぶこと

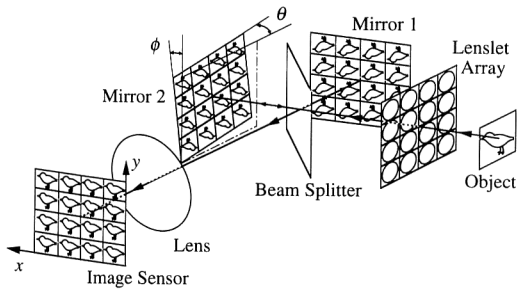


Fig. 1. Schematic of an optical system for the multiple-image Fourier transform spectral imaging based on a Michelson interferometer.

にする。理想的な光学系の場合、イメージセンサー上の位置 (x, y) における、波数 ν の光に対する光路差 $\delta(x, y)$ は、

$$\delta(x, y) = 2n(\nu)(x \tan \theta + y \tan \phi) + \delta_0 \quad (1)$$

と書ける。ここで、 θ と ϕ は Fig. 1 に示すように、光軸に垂直な平面に対する鏡 (Mirror 2) の、それぞれ、 x 軸および y 軸方向の傾き角を表し、 δ_0 は原点での光路差、 $n(\nu)$ は媒質 (Fig. 1 では空気) の屈折率を意味する。

干渉像マトリクスが $M(=M_x \times M_y)$ 枚の干渉像より構成されているとし、各干渉像の空間的な大きさを $X \times Y$ とする。また、干渉像マトリクス中の m_x 列 m_y 行 ($m_x=0, \dots, M_x-1, m_y=0, \dots, M_y-1$) に位置する干渉像が、インターフェログラム画像の光路差に関する i 枚目の断面になるとする ($i=m_x M_y + m_y$)。Fig. 2 に示すような方法で干渉像マトリクスから各干渉像を切り出し、新たな座標系 (ξ, η) をとり、光路差の小さい順に積み重ねたものを、インターフェログラム画像と呼ぶことにする。インターフェログラム画像は、空間に関する 2 つの次元、つまり ξ, η と、光路差に関する 1 つの次元、つまり l をもつ 3 次元データである。インターフェログラム画像の光路差に関する i 枚目の断面内の位置 (ξ, η) における光路差 $l_i(\xi, \eta)$ は、

$$l_i(\xi, \eta) = 2n(\nu)\{(m_x X + \xi)\tan \theta + (m_y Y + \eta)\tan \phi\} + \delta_0 \quad (2)$$

と書ける。ただし、 $i=m_x M_y + m_y$ ($m_x=0, \dots, M_x-1, m_y=0, \dots, M_y-1$) である。

インターフェログラム画像中のある空間位置において光路差方向に抜き出した強度分布は、通常のフーリエ分光法におけるインターフェログラムに相当する。インターフェログラムを等光路差でサンプリングするためには、 θ, ϕ は、

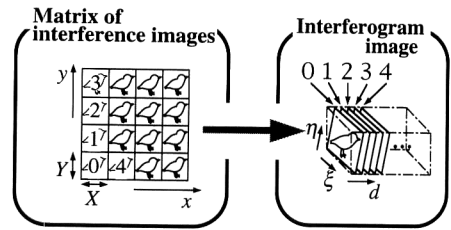


Fig. 2. Relationship between a matrix of interference images and an interferogram image. Numbers given to small images in the matrix and the cross-sections of interferogram image identify the image and indicate the lengths of the path differences.

$$X \tan \theta = M_y Y \tan \phi \quad (3)$$

を満たさなければならない。光路差 l_i が i に関して等間隔であれば、各点でのインターフェログラムを光路差に関して離散フーリエ逆変換することにより、物体上の各点でのスペクトル分布が得られる。実際には光学系の収差等により光路差は等間隔にはならない。また、空気以外の媒質で光路差が生じる場合には、屈折率分散により、光路差が波長に依存する。そのような場合には、スペクトル再生の際に、あらかじめ複数の単色光で一樣に照明された物体の干渉像マトリクスから光路差分布を推定し、光路差のサンプリング誤差を補正する⁸⁾。同時に、コーシーの分散式を用いて、媒質の屈折率分散の補正も行う。

3. 空間分解能およびスペクトル分解能

まず、空間分解能について考える。ここでは、レンズアレイを構成する各レンズの空間分解能が無視できるほど高い場合を想定する。イメージセンサーは $H_x \times H_y$ 個の要素からなり、干渉像マトリクスは $M(=M_x \times M_y)$ 枚の干渉像より構成されているものとする。分光画像の空間チャンネル数は、干渉像のそれと等しく、 $(H_x/M_x) \times (H_y/M_y) = H_x H_y / M$ となる。したがって、この場合、空間チャンネル数はイメージセンサーの要素数とレンズアレイの規模で決まる。

つぎにスペクトル分解能について考える。MI-FTSI はフーリエ分光法の原理に基づいている。光路差が等間隔であると仮定し、光路差のサンプリング間隔を Δl とする。光路差が正、負の部分を含む両側インターフェログラムを測定すると仮定すると、測定可能な最大波数 ν_{\max} は、 $\nu_{\max} = 1/(2\Delta l)$ 、波数に関する分解能の限界 $\Delta \nu$ は、 $\Delta \nu = 1/(M\Delta l)$ となる。したがって本手法の測定可能なスペクトルチャンネル数は、

$$\nu_{\max}/\Delta\nu = M/2 \quad (4)$$

となる。すなわち、スペクトルチャンネル数は、イメージセンサーの要素数には依存せず、レンズの個数 M で決まる。先ほどの議論より、分光画像の空間チャンネル数とスペクトルチャンネル数との積は、 $H_x H_y / 2$ となることから、レンズの個数には依存せず、イメージセンサーの全要素数によって決まる。

4. 信号対雑音比

つぎに信号対雑音比について調べる。ここでは、光子雑音が支配的な測定と、検出器雑音が支配的な測定の場合における、MI-FTSIの信号対雑音比を求め、従来の分光映像法と比較する。比較対象として、像面フーリエ分光映像法⁴⁾ (Fourier transform spectral imaging in image plane; FTSI)、帯域選択型の分光映像法 (band-selective spectral imaging; BSSI) を取り上げた。帯域選択型分光映像法は、帯域選択フィルターを透過した2次元画像を測定する方法である。必要なスペクトルチャンネル数だけ、順次フィルターを交換する。また、高速計測が可能な手法として、物体の多重像を作り、各像に対して帯域選択フィルターを配置する、多重像帯域選択型の分光映像法 (multiple-image band-selective spectral imaging; MI-BSSI) の信号対雑音比を求め、比較した。

ここでは、雑音の取扱いについては、文献9)の仮定を用いる。光子雑音が支配的な場合は、検出される光電子の数はポアソン分布に従い、時間的に無相関とする。また、検出器雑音が支配的な場合は、雑音源として暗電流のゆらぎのみを考え、これについてもサンプルされた信号は時間的に無相関とする。

分光画像の測定は、Fig. 3に示すように、空間 (ξ, η) 方向、波数 (ν) 方向にそれぞれ N_ξ, N_η, N_ν 点のサンプリングを行うと考える。測定物体の分光画像は、 ξ, η, ν 方向にそれぞれ K_ξ, K_η, K_ν 点からなる直方体の領域内で一様なパワースペクトル密度をもち、それ以外の領域ではパワースペクトル密度はゼロとする。光学系の瞳に入射する単位時間当りの平均光子数を P とし、全観測時間を T とする。すべての場合について、 P と T が一定であるものとして、信号対雑音比を比較する。

イメージセンサーの信号対雑音比は、検出される光電子数の平均と、その統計的変動の標準偏差との比で与えられるものとする。光学像が存在する領域で検出される光電子数の平均は、その単位時間当りの平均光電子数 I_0 と、1画素当りの観測時間 T_0 との積で表される。光子

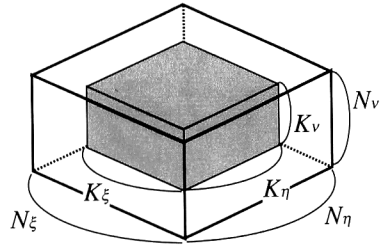


Fig. 3. Model of a spectral image used for the present analysis. The volume for the spectral image data is filled with $N_\xi N_\eta N_\nu$ sampling elements. The object occupies a rectangular prism consisting of $K_\xi K_\eta K_\nu$ sampling elements.

雑音が支配的な場合の検出画像の信号対雑音比は、光電子数がポアソン過程に従うことから、

$$\rho_p = \sqrt{I_0 T_0} \quad (5)$$

で与えられる。検出器雑音が支配的な場合の検出画像の信号対雑音比は、

$$\rho_d = \frac{I_0 \sqrt{T_0}}{n_0} \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 n_0 は各検出器要素での暗電流に寄与する電子の単位時間当りのゆらぎ (標準偏差) である。また、フーリエ分光映像法においては、検出されたインターフェログラム画像の信号対雑音比 $\rho^{(i)}$ と再構成される分光画像の信号対雑音比 $\rho^{(s)}$ は、

$$\rho^{(s)} = \frac{\sqrt{N_\nu}}{K_\nu} \rho^{(i)} \quad (7)$$

の関係式で結び付けられる¹⁰⁾。

4.1 多重像フーリエ分光映像法 (MI-FTSI) の信号対雑音比

両側インターフェログラムを用いてスペクトルチャンネル数 N_ν の分光画像を計測する場合には、インターフェログラムのサンプリング点数は $2N_\nu$ 点必要である。検出器まで到達した光束は $2N_\nu$ 個の多重像に分配され、さらに、それぞれが $K_\xi K_\eta$ 個の検出器要素に一樣に広がる。光学系の強度透過率を t_{MF} 、検出器の量子効率を α とすると、光学像が存在する領域での単位時間当りの平均検出光電子数は、

$$I_0[\text{MF}] = \frac{\alpha t_{MF} P}{2K_\xi K_\eta N_\nu} \quad (8)$$

となる。MI-FTSIでは光路差の走査が不要で、各画素とも全観測時間をかけて観測できるので、1画素当りの観測時間も、

$$T_0[\text{MF}] = T \quad (9)$$

である。

A. 光子雑音が支配的な場合

インターフェログラム画像の信号対雑音比は、式(5), (8), (9)から、

$$\rho_p^{(i)}[\text{MF}] = \sqrt{\frac{\alpha t_{\text{MF}} P T}{2 K_\varepsilon K_\eta K_\nu N_\nu}} \quad (10)$$

となる。分光画像の信号対雑音比は、これを式(7)に代入して、

$$\rho_p^{(s)}[\text{MF}] = \frac{\sqrt{\alpha t_{\text{MF}} P T}}{K_\nu \sqrt{2 K_\varepsilon K_\eta}} \quad (11)$$

と求められる。

B. 検出器雑音が支配的な場合

インターフェログラム画像の信号対雑音比は、式(6), (8), (9)から、

$$\rho_d^{(i)}[\text{MF}] = \frac{\alpha t_{\text{MF}} P \sqrt{T}}{2 n_0 K_\varepsilon K_\eta N_\nu} \quad (12)$$

となる。分光画像の信号対雑音比は、これを式(7)に代入して、

$$\rho_d^{(s)}[\text{MF}] = \frac{\alpha t_{\text{MF}} P \sqrt{T}}{2 n_0 K_\varepsilon K_\eta K_\nu \sqrt{N_\nu}} \quad (13)$$

と求められる。

4.2 多重像帯域選択型分光映像法 (MI-BSSI) の信号対雑音比

MI-BSSIでは、レンズアレイの後ろに帯域選択フィルターをアレイ状に並べ、物体の多重像を各フィルターに入射させる。まず、入射光束は N_ν 個の多重像に分配され、それぞれの $1/K_\nu$ の光量がフィルターを透過して検出器に到達し、さらに $K_\varepsilon K_\eta$ 個の検出器要素に広がる。光学系の強度透過率を t_{MB} とすると、検出器要素の単位時間当りの平均検出光電子数は、

$$I_0[\text{MB}] = \frac{\alpha t_{\text{MB}} P}{K_\varepsilon K_\eta K_\nu N_\nu} \quad (14)$$

となる。MI-BSSIでも走査が不要なので、1画素当りの検出時間は式(9)で与えられる。

A. 光子雑音が支配的な場合

分光画像の信号対雑音比は、式(5), (9), (14)から、

$$\rho_p[\text{MB}] = \sqrt{\frac{\alpha t_{\text{MB}} P T}{K_\varepsilon K_\eta K_\nu N_\nu}} \quad (15)$$

と求められる。

B. 検出器雑音が支配的な場合

分光画像の信号対雑音比は、式(6), (9), (14)から、

$$\rho_d[\text{MB}] = \frac{\alpha t_{\text{MB}} P \sqrt{T}}{n_0 K_\varepsilon K_\eta K_\nu N_\nu} \quad (16)$$

と求められる。

4.3 信号対雑音比の比較

MI-FTSIの信号対雑音比が1となるように規格化された各分光映像法の信号対雑音比を Table 1 に示す。ここで、FTSI, BSSIの光学系の強度透過率をそれぞれ t_F, t_B としている。単純化された理想的な光学系では、 $t_F = t_{\text{MF}} = 0.5$, $t_B = t_{\text{MB}} = 1$ と考えてよい。 $t_F = t_{\text{MF}} = 0.5$ となるのは、干渉計により入射光の半分が光源側に戻るからである。実際の光学系では、光束のロス、光学部品による反射や吸収がある。また、帯域選択型の場合には、帯域選択フィルターの透過率で制限される。狭帯域のフィルターになるほど透過率は低くなる。

A. 光子雑音が支配的な場合

光子雑音が支配的な場合、 $t_F = t_{\text{MF}}$, $t_B = t_{\text{MB}}$ という条件の下では、MI-FTSIとFTSI (FTSI系), MI-BSSIとBSSI (BSSI系)は、それぞれ同じ信号対雑音比をもつ。(1) $K_\nu/N_\nu > t_F/(2t_B)$ の場合にはBSSI系が、(2) $K_\nu/N_\nu < t_F/(2t_B)$ の場合にはFTSI系が有利である。つまり、BSSI系は物体光のスペクトル幅が広くて観測帯域幅に近い場合、FTSI系は物体光のスペクトル幅が観測帯域幅に比べて狭い場合にそれぞれ有利である。 $t_F = t_{\text{MF}} = 0.5$, $t_B = t_{\text{MB}} = 1$ の理想的な光学系では、 $K_\nu/N_\nu < 1/4$ の場合にFTSI系が有利である。

B. 検出器雑音が支配的な場合

検出器雑音が支配的な場合、 $t_F = t_{\text{MF}}$ のときにはMI-FTSIはFTSIより信号対雑音比が悪い。BSSI系についても同様である。高速計測が可能なMI-FTSIと

Table 1. Comparison of signal-to-noise ratios for four spectral imaging techniques.

Dominant noise	FTSI	BSSI	MI-FTSI	MI-BSSI
Photon noise	$\sqrt{\frac{t_F}{t_{\text{MF}}}}$	$\sqrt{\frac{2t_B K_\nu}{t_{\text{MF}} N_\nu}}$	1	$\sqrt{\frac{2t_{\text{MB}} K_\nu}{t_{\text{MF}} N_\nu}}$
Detector noise	$\frac{t_F \sqrt{2N_\nu}}{t_{\text{MF}}}$	$\frac{2t_B}{t_{\text{MF}}}$	1	$\frac{2t_{\text{MB}}}{t_{\text{MF}} \sqrt{N_\nu}}$

N_ν : number of spectral channels is measurement; K_ν : number of non-zero spectral elements of light from object; t_F, t_B, t_{MF} and t_{MB} : transmittances of optical systems for FTSI, BSSI, MI-FTSI and MI-BSSI, respectively.

MI-BSSI とを比較すると、 $N_v > 4(t_{MB}/t_{MF})^2$ の場合は MI-FTSI の方が有利となる。多くの場合、 N_v は 1 より十分大きいので、MI-FTSI の方が有利であると考えてよく、一般的に MI-FTSI は、スペクトルチャンネル数が大きい高速現象の測定に適しているといえることができる。

5. 実験

5.1 光学系

実験では、マイケルソン干渉計の代りに、くさび型液晶偏光干渉計¹¹⁾を用いた。くさび型液晶偏光干渉計はマイケルソン干渉計よりも光路差の誤差が小さく、大面積が利用できるため、大規模なレンズアレイを用いることができる。くさび型液晶偏光干渉計を用いた光学系を Fig. 4 に示す。干渉計は 2 つのくさび型液晶セルと、互いに直交する偏光子と検光子からなっている。2 つのくさび型液晶セルは稜線が互いに平行で、厚みの変化する方向が逆になるように配置されている。前側の液晶セルでは液晶分子の光学軸とセルの稜線が平行になるように液晶分子が配向されており、後ろ側のセルでは垂直となるように配向されている。また、偏光子の方向は液晶分子の光学軸と 45 度の角度をなすように配置されている。偏光子を透過した直線偏光には、前側のセルの液晶分子の複屈折性により、常光成分と異常光成分との間に液晶層の厚さに対応した光路差が与えられる。後ろ側のセルでは常光と異常光が逆転し、前側のセルと符号が逆の光路差が与えられる。常光と異常光は偏光方向が直交しているため、そのままでは干渉しないが、それぞれに対し 45 度傾いた検光子を透過させることによって光路差に応じた干渉光強度が得られる。光路差は液晶層の厚さで決まるが、適当に座標軸を決めれば、式(1)と同様に与えることができる。

レンズアレイによって物体の多重像を液晶セル内に結像し、多重像を後ろ側レンズでイメージセンサー上に結像すると、干渉像マトリクスが得られる。この後の処理

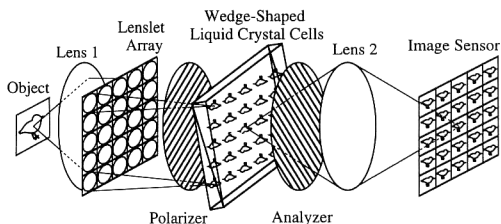


Fig. 4. Schematic of an optical system using a wedge-shaped liquid-crystal polarization interferometer.

はすでに 2 章に示した。

以下の実験で用いたレンズアレイは、4 mm×4 mm の矩形の入射面をもつ焦点距離 78 mm のアクロマートレンズを 9×9 個並べたものであり、干渉像の枚数 M の値は 81 である。光路差のサンプリング間隔は、レンズアレイ中のレンズの結像位置が若干ばらついているため、等間隔ではない。平均するとサンプリング間隔は、 $\Delta l = 0.2 \mu\text{m}$ であった。

5.2 空間分解能およびスペクトル分解能

本手法の空間分解能およびスペクトル分解能を確認する実験を行った。この実験で用いた画像取込み系の空間チャンネル数は、512×486 点である。測定対象物体として、白いコピー用紙の 23 mm×23 mm の領域を、(1) He-Ne レーザー光 (波長 632.8 nm) で一様に照明したもの、中心波長がそれぞれ、(2) 500, (3) 550, (4) 600 nm で半値全幅が約 10 nm の干渉フィルターを透過した準単色光で一様に照明したものを用いた。得られた分光画像の空間チャンネル数は 53×50 点で、空間分解能は 0.535 mm である。この実験ではレンズによる回折や収差の影響はみられなかった。

波数チャンネル数はレンズの数 ($M=81$) と式(4)より 40 点となる。波数チャンネルの間隔はサンプリング定理を考慮して 565.3 cm^{-1} とした。サンプリング間隔に誤差が含まれず、分散をもつ光学素子による位相誤差がなければスペクトル分解能は、500 nm で約 14 nm, 600 nm で約 20 nm になることが予想される。実験データから再生されたスペクトルを Fig. 5 に示す。Fig. 5 に示されている曲線は、マークで示されている再生分光画像のデータを 3 次スプライン補間したものである。Fig. 5 より、中心波長が 500, 550, 600 nm の干渉フィルターの

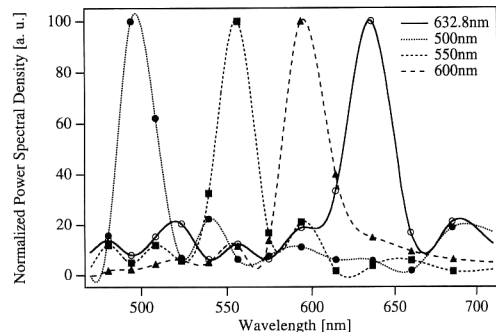


Fig. 5. Spectra of quasi-monochromatic and He-Ne laser light measured by the technique of multiple-image Fourier transform spectral imaging. Marks indicate measured values, while curves show the values interpolated with the cubic spline functions.

透過光については、半値全幅がそれぞれ、22, 25, 28 nm となった。また、He-Ne レーザ光のスペクトルの半値全幅は 31 nm となった。理論上予想される分解能に比べて各々の半値全幅が広いのは、レンズの大きさの不揃いによる不等間隔サンプリングの影響と考えられる。

5.3 信号対雑音比

つぎに信号対雑音比を調べる実験を行った。MI-FTSI と MI-BSSI とを可視光領域の中央付近にあたる波長 550 nm での画像の信号対雑音比で比較した。測定対象物体は、黄緑色の折り紙の 23 mm×23 mm の領域をタングステンハロゲンランプで一様に照明したものである。

A. 光子雑音が支配的な場合

まず初めに検出器の雑音特性を調べた。検出器は画素数 1035×1320 点の濃度階調 12 bits の CCD (charge coupled device) デジタルカメラ (xillix 社, Micro-Imager 1400) を用いた。同じ入射光強度で 100 枚の画像を測定し、その標準偏差を調べ雑音成分とした。ND

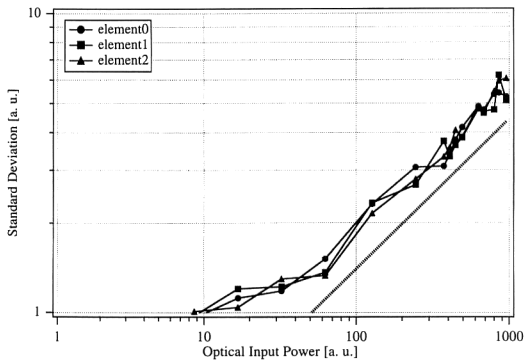


Fig. 6. Dependence of the noise component on the signal level. The dotted line indicates $n \propto \sqrt{I}$, where n is standard deviation and I is optical input power.

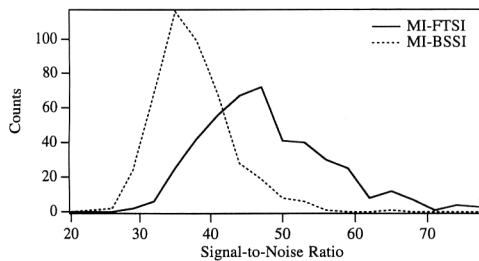


Fig. 7. Histogram of signal-to-noise ratios at various pixel positions at 550 nm of spectral images when the noise is dominated by the photon noise.

(neutral density) フィルターを用いて入射光強度を変化させ、それぞれの入射光強度での標準偏差を調べた。その結果を Fig. 6 に示す。図中の点線は $n \propto \sqrt{I}$ の直線 (ここで、 n は雑音成分、 I は入力光強度) である。図より、入射光強度が小さいところを除いて、標準偏差は入射光強度の平方根にほぼ比例していることがわかる。このことから、この検出器は光子雑音が支配的とみなすことができる。この検出器を用いて、MI-FTSI と MI-BSSI の方法で、物体の分光画像を 20 枚測定した。MI-BSSI は 550 nm 付近での波長分解能が MI-FTSI とほぼ等しい干渉フィルターを用い、このフィルターを透過した多重像のうちの一つを、3次元データとしての分光画像の 550 nm における 2次元の断面と想定した。波長 550 nm での各空間画素において、20 回の測定の平均強度を信号成分とし、その標準偏差を雑音成分として信号対雑音比を求めた。物体上で 21×21 点の領域内の各点における信号対雑音比のヒストグラムを Fig. 7 に示す。MI-FTSI の信号対雑音比の平均は 49.1、MI-BSSI の信号対雑音比の平均は 38.9 となり、MI-FTSI の方が約 1.26 倍高いことがわかった。この測定の条件下では、 $N_v=40$ 、 $K_v=12$ 、 $t_{MF}/t_{MB}=0.86$ であり、Table 1 からは、MI-FTSI の信号対雑音比は MI-BSSI の 1.20 倍になるはずである。実験の結果は、この値にほぼ等しいといえることができる。

B. 検出器雑音が支配的な場合

つぎに異なる検出器 (CCD カメラ, NEC 製, TI-22 P) を用いて検出器雑音が支配的な場合の測定を行った。入射光強度を小さくして、検出器雑音が支配的になるような強度範囲で用いた。この検出器の雑音特性を 5.3 節の A と同様の手順で調べた結果を Fig. 8 に示す。

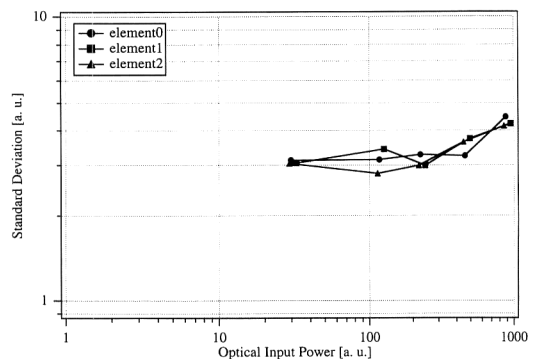


Fig. 8. Dependence of the noise component on the signal level.

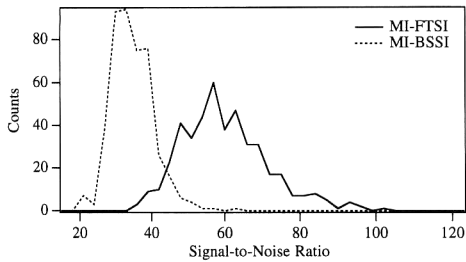


Fig. 9. Histogram of signal-to-noise ratios at various pixel positions at 550 nm of spectral images when the noise is dominated by the detector noise.

入射光強度の変化に対して標準偏差はほとんど変化していないことがわかる。この検出器は検出器雑音が支配的とみなし、この検出器を用いて物体の分光画像を20枚測定した。物体上で21×21点の領域内の各点における信号対雑音比のヒストグラムをFig. 9に示す。MI-FTSIの信号対雑音比の平均は61.4、MI-BSSIの信号対雑音比の平均は36.2となり、MI-FTSIの方が約1.70倍高かった。Table 1より導かれる値は2.71倍である。この結果は、MI-FTSIの方がMI-BSSIよりも信号対雑音比の点で優れているという意味で一致しているが、実験で得られた倍率は理論上の倍率よりもかなり小さかった。この原因のひとつは、用いた検出器の雑音のすべてが検出器雑音ではなく、雑音の大きさの入射光強度依存性が残っていたことであると考えられる。

5.4 加熱された液晶シートの時系列分光画像の測定

本手法は分光画像の瞬時計測を可能とする。この特長をいかして、温度によって色が変化する液晶シートの時系列分光画像を測定した。

コレステリック液晶のヘリカルピッチは、温度によって大きく変化するため、その選択散乱光の波長も温度によって変化する¹²⁾。この原理を利用した液晶温度センサーは広い分野で実用化されている¹³⁾。実験で用いた液晶シートは約20°Cから35°Cの範囲で、温度が上がるに従い、茶色、オレンジ色、黄色、緑色、青色、濃紺とその色が変化する。大きさ23 mm×23 mmの液晶シートの中心付近の直径10 mmの円形領域を裏側からヒーターで加熱した。加熱開始から色が変化し始めるまで遅延があるため、加熱開始10 s後から測定を開始した。熱が周囲に伝わるに従って色の空間分布が変化する様子を、時系列の分光画像として測定した。照明にはキセノンフラッシュランプを繰り返し発光させて用いた。キセノンフラッシュランプの発光持続時間は約1 μsである。CCDカメラから画像を読み出すのに時間が必要なため、

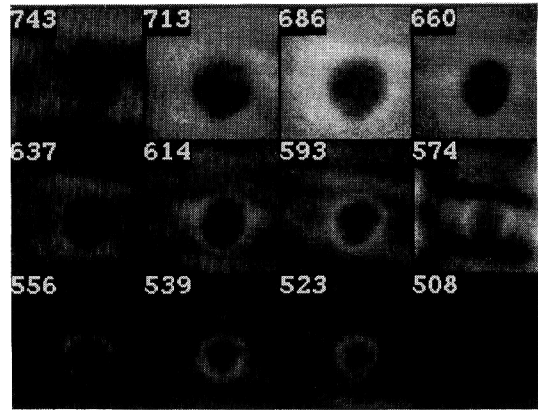


Fig. 10. Cross-sections of the spectral image perpendicular to the wavenumber axis. The numbers in each cross-section denote the respective wavelengths in nm. The spectral image was taken 13 second after the start of heating.

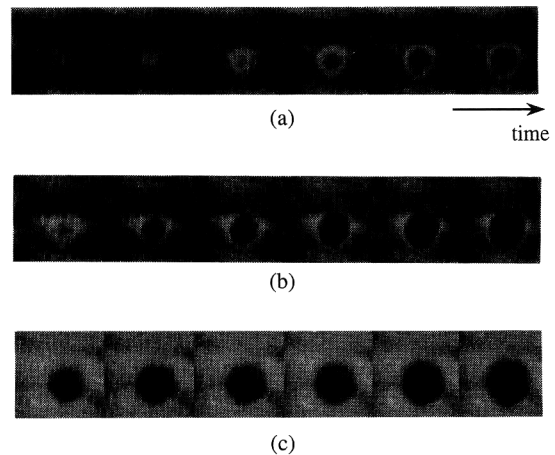


Fig. 11. Time series of intensity variations at (a) 523 nm, (b) 614 nm, (c) 713 nm, respectively.

キセノンフラッシュランプの発光間隔を1 sとして、連続的に分光画像を測定した。

測定した液晶シートの、加熱開始から13 s後の分光画像をFig. 10に示す。Fig. 10は分光画像の波数に関する断面を並べたもので、図中の数字は波長(単位はnm)を示す。シートの中心部は短波長領域の強度が大きいことから温度が高く、周囲は長波長領域の強度が大きいことから温度が低いことがわかる。再生された各時系列分光画像の空間チャンネル数は95×105点、スペクトルチャンネル数は40点である。画像中に縞がみえるが、これは光路差誤差が完全に補正しきれなかったためと考えられる。各分光画像の、加熱開始10 s後から15 s後

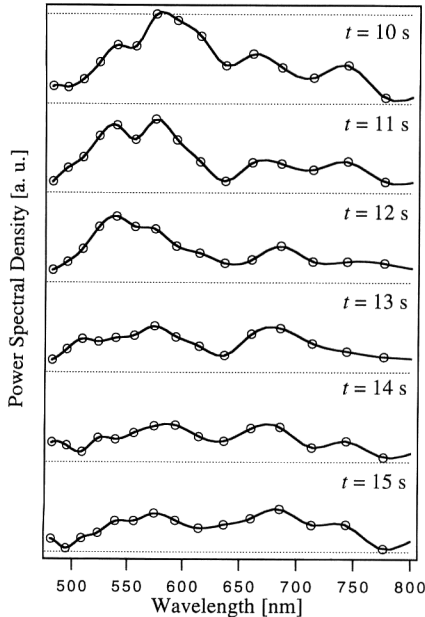


Fig. 12. Time series of spectra at the center of the object. Marks indicate measured values, while curves show the values interpolated with the cubic spline functions.

までの、波長 523 nm, 614 nm, 713 nm での強度分布の時間変化を Fig. 11 に示す。時間の経過に従い、中心から周囲に向かって短波長の領域、つまり温度の高い領域が広がっていく様子がわかる。これらの分光画像から熱の伝播の様子を知ることができる。また、画像の中心付近のスペクトルの時間変化を Fig. 12 に示す。10 s 経過後の初めの 2~3 s の間は時間とともにスペクトルのピーク位置が短波長側にシフトしていくことがわかる。13 s を過ぎると液晶シートの色が濃紺になり、反射光が少なく、全体の強度が小さくなっている。

6. ま と め

MI-FTSI における空間分解能とスペクトル分解能の限界、および信号対雑音比を求め、他の方法との比較を行い、それらの一部を実験的に検証した。その結果、多くの場合 MI-FTSI は信号対雑音比の点で MI-BSSI よりも有利であり、特に、1) 光子雑音が支配的な場合は、物体光のスペクトル幅が観測帯域幅に比べて狭いとき、

2) 検出器雑音が支配的な場合は、スペクトルチャネル数が大きい測定のとくに有利であることがわかった。また、本手法を用いて、時間的、空間的に分光反射率が変化する物体の時系列分光画像を測定した。温度によって色が変わる液晶シートを加熱し、色の空間分布の時間的変化が観測できた。この方法は、燃焼や爆発、レーザーアブレーション¹⁴⁾等の、スペクトル分布が短時間で変化する対象の観測に適用することが可能である。

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金により行われた。

文 献

- 1) 土屋 清：“宇宙からのリモートセンシング”，スペクトラム，**1** (1988) 84-90.
- 2) S. Andersson-Engels, J. Johansson and S. Svanberg: “Medical diagnostic system based on simultaneous multispectral fluorescence imaging,” *Appl. Opt.*, **33** (1994) 8022-8029.
- 3) N. A. Page, S. T. Smith, C. A. Sepulveda and M. L. White: “Shuttle imaging spectrometer optics,” *Proc. SPIE*, **810** (1987) 112-116.
- 4) T. Inoue, K. Itoh and Y. Ichioka: “Fourier-transform spectral imaging near the image plane,” *Opt. Lett.*, **16** (1991) 934-936.
- 5) K. Itoh, T. Inoue, T. Ohta and Y. Ichioka: “Liquid-crystal imaging Fourier-spectrometer array,” *Opt. Lett.*, **15** (1991) 652-654.
- 6) A. Arnold, W. Ketterle, H. Becker and J. Wolfrum: “Simultaneous single-shot imaging of OH and O₂ using a two-wavelength excimer laser,” *Appl. Phys. B*, **51** (1990) 99-102.
- 7) M. Namazian, R. L. Schmitt and M. B. Long: “Two-wavelength single laser CH and CH₂ imaging in a lifted turbulent diffusion flame,” *Appl. Opt.*, **27** (1988) 3597-3600.
- 8) A. Hirai, T. Inoue, K. Itoh and Y. Ichioka: “Application of multiple-image Fourier transform spectral imaging to measurement of fast phenomena,” *Opt. Rev.*, **1** (1994) 205-207.
- 9) T. Inoue, K. Itoh and Y. Ichioka: “Comparative study of signal-to-noise ratio of Fourier transform spectral imaging in the image plane,” *Optik*, **98** (1995) 175.
- 10) L. Mertz: *Transformations in Optics* (Wiley, New York, 1965) pp. 27-29.
- 11) T. Inoue, A. Hirai, K. Itoh and Y. Ichioka: “Compact spectral imaging system using liquid crystal for fast measurement,” *Opt. Rev.*, **1** (1994) 129-131.
- 12) 松本正一：液晶エレクトロニクス（オーム社，1986）。
- 13) 角田市良：“液晶サーモグラフィの原理と応用”，日経エレクトロニクス，1971.8.16 (1971) 50-57.
- 14) 坪井泰之，増原 宏：“液体のレーザー誘起形態変化のダイナミクス Part I, Part II”，レーザー研究，**23** (1995) 2-15.