

分 光 画 像

伊 東 一 良

20 世紀の後半に生まれた“computer”は、マイクロエレクトロニクスの発展を背景に“communication”技術と融合し急速に発展した。20 世紀の終わりには光ファイバーによる地球規模の高速大容量情報通信の時代が始まり、いままさに地球規模の“.com”の世界が広がろうとしている。“com-”は「ともに」、「まったく」の意味の接頭辞である。地球上の人類がひとつになり、ともに明るくいきいきと生活していくためにも、グローバルなネットワークは今後ますますその重要性を増していくものと思われる。また、21 世紀には、そのインフラストラクチャーの整備、管理・運営の問題と効率のよい情報交換のためのコンテンツにも話題が移ってくるであろう。動画、立体画の後に控えた分光画像もこのコンテンツの候補にあがってくるのではないかと考えられる。分光画像は古くから天文学、最近ではリモートセンシングや生体・医用の分野の基本的な観察の方法として利用されてきたが、データの量が多く、扱いが厄介であったので、多方面で利用されることはなかった。昨今の情報機器の高性能化と今後の高速ネットワークの普及によって、分光画像を含めた多次元情報の利用が一段と進展するものと考えられる。ここでは、分光画像を扱う上で必要と思われる基礎知識を整理しまとめてみた。

1. 分光画像—分光画像とは何か—

分光画像とは、カラー画像と同様に色のついた絵の集まりである。しかし、人の感覚に基礎をおくカラー画像に比べると、分光画像はより一般的な利用が想定されており、スペクトルの帯域の数も多い。筆者は一時、空間分解能に近いスペクトル分解能をもつことが分光画像の特徴である

と考えたこともあるが、最近はそれほどの分解能は必要ないと考えている。人工の色見本の主成分分析の結果から、さまざまな色表も 8 次元程度の空間で分類できるという報告もある¹⁾。ともあれ、分光画像の意義は基本的にスペクトル帯域の数にある。このことにより、人の感覚とは異なる高い次元の空間で色を扱うことが可能になる。すなわち、帯域の数の次元をもつ空間内で、例えば、照明光のスペクトルの変化による表面色の変化などの推定を行うことが可能である。カラー画像だけでは、照明光のスペクトルの変化による表面色の微妙な変化を推定することは不可能に近い。この意味で、分光画像は人から 1 歩離れ、画像から 1 歩物体に近づいた情報をもたらしてくれるものである。天体や生体のみには利用するのではなく、自然環境や人間により近い室内のさまざまな要因の評価や、テキスタイルや工芸品の評価やアーカイブに利用できる。しかし、残念ながら後述べる理由から、分光画像は物体そのものの情報は与えてはいない。物体そのものの情報を捕えるには、物体表面の光散乱特性を正確に把握する必要がある。

ここでは色のついた画像を定量的に扱う枠組みとして放射測光学²⁻⁴⁾を選び、その中の分光放射輝度(spectral radiance)によって、物体表面から散乱される光を定量的に記述することから話を進めていく。

1.1 分光画像としての分光放射輝度

物体表面は一般にフラクタルな形状をとることが多い。このような場合、空間分解能を決めずにこれらを議論するのは困難である。ここでは可視光の波長に比べて十分大きなマクロなスケールを考えることにする。このことによって、平均的な物体表面やその法線を考えることができる。図 1 のような物体から出る放射束の一部が観測者(装置)の瞳を通過し、像が結ばれるものとする。表面の凹凸によるデフォーカスを無視し、瞳が作る立体角が十分小さいものとする。その像の輝度は物体表面の分光放射輝度 B_{λ}

大阪大学工学研究科応用物理学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)
E-mail: itoh@ap.eng.osaka-u.ac.jp

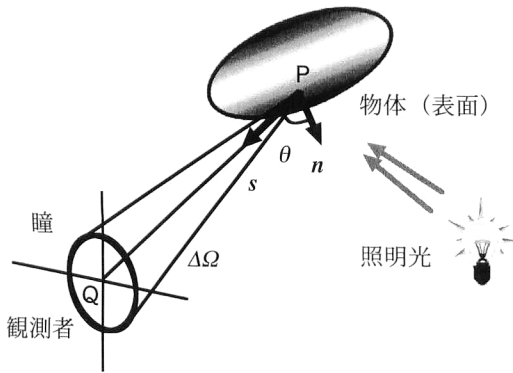


図1 分光画像の観測.

$(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \omega)$ に比例すると考えてよい。観測の方向 \mathbf{s} と表面の法線 \mathbf{n} のなす角を θ とし、瞳の作る立体角を $\Delta\Omega$ 、微小面積要素 $d\sigma = dx dy$ から放射され瞳を通過する微小角周波数帯域 $d\omega$ あたりの放射束 (分光放射束, ワット) は、

$$\Delta F_{\omega} = B_{cl}(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \omega) \cos \theta \Delta\Omega d\sigma d\omega \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 \mathbf{r} は注目する観測点 P の位置を示す。観測の中心 Q を固定すると、観測の方向 \mathbf{s} と物体表面の位置 \mathbf{r} は、1対1に対応するので、分光放射束は角度 (2次元) の関数 (画像) となる。

物体表面の分光放射輝度がどのように決定されるかは、物体をどのように記述するかという問題に関連する重要な問題である。分光画像の空間分解能についてはすでに触れたが、必要な情報量を考えれば、物体の表面形状をマイクロに記述することはほぼ不可能である。しかし、物体表面をマクロにみた上で、少なくとも入射束と射出束の関係を記述する必要がある。物体表面がいろいろな方法で照明された場合、これにより分光放射輝度を再現、または推定することができる。建築物のアーカイブを作るような場合、建築物の表面に関する散乱特性を把握することにより、いろいろな時刻、シーズンに建物がどのようにみえるかを再現できる。コンピューター内の3次元の世界 (サイバースペース) を構築するための言語である VRML (virtual reality modeling language) においても、このような物体表面の記述がある程度可能になっている。本講義ではスペースの関係から、このアーカイブの問題、分光放射輝度の合成、推定の問題には、これ以上触れないことにする。同様に、物体表面における散乱と部分的な透過によってどのように光のスペクトルが変化するかという表面色のメカニズムについても触れず、もっぱら物体表面の分光放射輝度に注目する。

1.2 一般化放射輝度とコヒーレンス

以上の議論から分光画像を計測するには、分光放射輝度を測ることになる。もっとも簡単な方法は、図1の中の観

測者の瞳に適当な帯域通過色フィルターを順次挿入していく方法である。測定時間に制限がなければこれで十分である。しかし、多くの場合は、対象とする光が微弱であったり、計測時間に制限が加えられたりする。また、スペクトルや像の分解能を十分に高める必要がある。そこで、いくつかの方法が干渉法を利用することを提案している。これらの方法を説明するためには、幾何光学に基づく分光放射輝度に代えて、波動光学に基づく一般化放射輝度を導入する必要がある。一般化放射輝度と分光画像との関係については、解説等を参照していただくことにして⁹⁾、ここでは、一般化放射輝度について簡単に説明する。

一般化放射輝度は、はじめ Walther により提案され^{6,7)}、Wolf を中心とする研究者らによって詳しく調べられている^{4,8)}。波動光学に基づく測光学的物理量として注目されているが、放射輝度のもつべき性質をすべて備えているわけではない。特に、エネルギーの流れと理解したいにもかかわらず、負の値をとりうるという問題をもっている。しかし、波長が十分短く物体光がインコヒーレントな場合や実際の測光の際には、負の値が観測されることはないといわれている⁹⁾。明るさの分布をもつインコヒーレント光源および一般の部分コヒーレント光源の表面、またはそれらから離れた位置での一般化放射輝度については、波動光学に基づいた計算が可能である⁵⁾。また、放射測光学と干渉法との関係については、文献¹⁰⁾に詳しく述べられている。ここでは、一般化放射輝度 $B(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \omega)$ と空間コヒーレンスを表す相互強度 $\Gamma(\mathbf{r} - \boldsymbol{\rho}/2, \mathbf{r} + \boldsymbol{\rho}/2)$ との関係を示しておく。

$$B(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \omega) = \{c^{-1}k^2(2\pi)^{-3}\} \int \Gamma(\mathbf{r} - \boldsymbol{\rho}/2, \mathbf{r} + \boldsymbol{\rho}/2) \exp(-i\mathbf{k} \cdot \boldsymbol{\rho}) d^3\boldsymbol{\rho} \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{k} = k\mathbf{s}$ 、 k は波数、 c は光速である。上式は、空間コヒーレンスを調べることにより、その場の一般化放射輝度、すなわち分光画像が計測できることを示している。マイケルソン天体干渉計の原理から空間コヒーレンスが像情報を含んでいること、また、フーリエ分光法の原理から時間コヒーレンスがスペクトル情報を含んでいることはよく知られている。上式はこれらを統合した表現になっている。

つぎに明るさと色の分布をもつ光源からの一般化放射輝度の伝搬について説明しておく。このことは、逆問題、すなわち観測位置で計測した一般化放射輝度と光源表面での一般化放射輝度との関係を知る上で重要である。ここで明るさと色の分布をもつ光源として、準均一光源を用いる。準均一光源とは、光源上の2点から出る光のコヒーレンスが保たれる距離に比べ、その強度分布の変化のスケールが十分緩やかな光源をいう。実質的にインコヒーレントな光

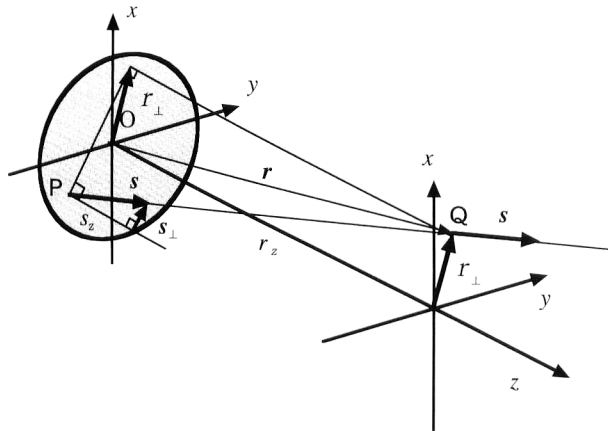


図2 分光画像の伝搬.

源やインコヒーレントに照明された散乱物体表面からの光は、準均一光源として扱うことができる。簡単のために、図2のような配置を考え、物体面上に平面状の物体が存在し、インコヒーレントに照明されているものとする。この物体面から参照面までの一般化放射輝度の伝搬については、波動光学に基づく計算の結果⁵⁾から、光線の方向に沿って一般化放射輝度は保存することがわかっている。すなわち、 $\mathbf{r} = (r_{\perp}, r_z)$ 、 $\mathbf{s} = (s_{\perp}, s_z)$ を用いて、

$$B(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \omega) = B^{(e)}(\mathbf{r}_{\perp} - \mathbf{s}_{\perp} r_z / s_z, \mathbf{s}, \omega) \quad (3)$$

となり、光源面上の点Pでの一般化放射輝度 $B^{(e)}(\mathbf{r}_{\perp} - \mathbf{s}_{\perp} r_z / s_z, \mathbf{s}, \omega)$ は、光線 \mathbf{s} に沿って、観測面上の点Qでの一般化放射輝度 $B(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \omega)$ と一致する。この場合、 \mathbf{r} を固定し、 $r_{\perp} = 0$ の場合を考えるとわかりやすい。 \mathbf{s} の方向の変化に応じて、光源面上の位置が変化するので方向の関数として分光画像が得られる。

いままで、光の伝搬に関して順方向の議論を進めてきたが、光伝搬の相反性を考えれば、逆に観測面上の一般化放射輝度から光源面の一般化放射輝度を推定することができる。レンズなどによる結像装置の能力を考えると、このこと自体は特に不思議なことではないが、瞳面に相当する面上の情報から、像情報が取り出せる点に注目する必要がある。詳しくは述べないが、上の事柄はインコヒーレントホログラフィーの原理と共通している。3次元空間コヒーレンスの計測方法についてはつぎの章で説明する。

2. 分光画像の計測

分光画像の計測にはいままで、さまざまな方法が試みられている。分光画像計測法の分類とそれらの概略については、すでに別の機会にまとめているので^{11,12)}ここでは割愛し、空間コヒーレンスの計測に基づく分光画像または分光断層像の再生方法について述べる。

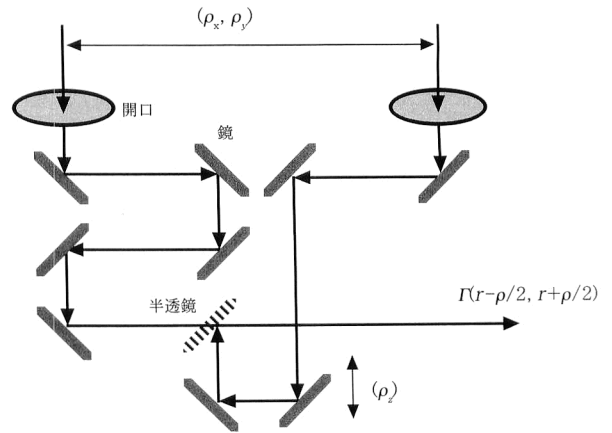


図3 ダブルフーリエ空間-スペクトル干渉計.

2.1 干渉分光映像法

ここでは、筆者らが進めてきた光のコヒーレンスに基づく分光画像の計測法について説明する。空間情報とスペクトル情報とともに多重化して計測する方法である。色フィルターと結像系を用いる単純な方法に比べると、多少複雑な印象を受けるが、電波干渉計やフーリエ分光器、放射測光学とも関連しており、光計測のひとつの基本事項とも考えられる。

空間コヒーレンスの計測は、Fizeau の提案と Michelson の実験に始まる¹³⁾。効率的な測定法として、さまざまなシアリング干渉法¹⁴⁾が提案されている。ここでは空間を3次元的に折り畳み、3次元コヒーレンスを計測する手法¹⁵⁾とより基本的な空間-スペクトル干渉法¹⁵⁾を概観する。

2.1.1 ダブルフーリエ空間-スペクトル干渉法

構成の簡単さから、ダブルフーリエ空間-スペクトル干渉法から先に説明する。ダブルフーリエ空間-スペクトル干渉法¹⁶⁾は1988年に、Mariotti と Ridgway によって提案された方法である。ただし、これに類似した2次元空間と時間軸を組み合わせるアイデアが、これよりも先に電波干渉計での分光画像形成の方法として提案されている。NRAO (national radio astronomy observatory) の Clark により、1985年にNRAOのサマースクールで紹介された¹⁷⁾。

ダブルフーリエ空間-スペクトル干渉法の光学系を、図3に示す。2つの開口は図のように適当な大きさの望遠鏡でもよく、1つの大きな望遠鏡の瞳面に配置されていてもよい。ふたつの開口により光軸に垂直な方向のずれが導入され、後段のマイケルソン干渉計の部分で、光軸方向の空間のずれが導入される。マイケルソンの名のついた2つの干渉計が組み合わされている。後段のずれを時間のずれとみることができなくはないが、入射光の傾きに依存した時間

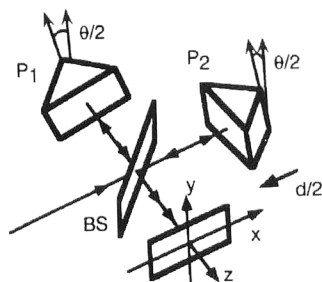


図4 体積干渉計.

差が導入されることを考えると、空間のずれとみるのが正しいし、解析の上でも正確である。2つの開口の相対的な位置を変えながら、光軸方向のずれを順次導入し、干渉信号を蓄積していく。最終的に $\Gamma(\mathbf{r}-\boldsymbol{\rho}/2, \mathbf{r}+\boldsymbol{\rho}/2)$ の実数部分に相当する信号を得る。この方法の利点は、2つの開口を用いて開口合成が可能である点である。地上の望遠鏡を光ファイバーで結合し分光画像を再生する研究が進められている¹⁸⁾。宇宙空間での開口合成の研究も進んでいる¹⁹⁾。

2.1.2 体積干渉計

3次元空間コヒーレンスを短時間で計測するために Itoh と Ohtsuka により 1986 年に提案された体積干渉計¹⁵⁾を図4に示す。マイケルソン干渉計の鏡を直角プリズムで置き換えたものである。各々の直角プリズムは光軸を中心にわずかに回転させてあるので、反射された光は、その2倍の角度だけ回転する。ビームスプリッターにより2つに分けられた入射光は結果として互いに逆の角度だけ回転し、再びビームスプリッター上で重ね合わされる。このとき、一方のアームの長さを順次変えながら2次元の干渉信号を記録していく。いま、図のように直交座標系をとり、各々の方向の単位ベクトルを $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ とし、直角プリズムの回転角を θ とすると、観測面上の $(x, y, 0)$ の位置でアームの長さの差が (z) のときに記録されていく信号は、

$$I(x, y, z) = \Gamma(\mathbf{r}\theta, \mathbf{r}\theta) + \Gamma(\mathbf{r}-\theta, \mathbf{r}-\theta) + \Gamma(\mathbf{r}\theta, \mathbf{r}-\theta) + \Gamma^*(\mathbf{r}\theta, \mathbf{r}-\theta) \quad (4)$$

となる。ただし、

$$\mathbf{r}\theta = (-y\mathbf{e}_x + x\mathbf{e}_y)\sin\theta + z\mathbf{e}_z, \quad \mathbf{r}-\theta = -\mathbf{r}\theta \quad (5)$$

結果として、 $\boldsymbol{\rho}=2\mathbf{r}\theta$ に相当する3次元空間コヒーレンスが計測されることがわかる。光軸方向とそれ以外の方向でスケールが異なるが、 z 軸方向の1回の空間走査で3次元空間コヒーレンスが計測される。観測の中心は検出器面と光軸が交わる点である。

2.1.3 像面フーリエ分光映像法

いままでは、瞳面での空間コヒーレンスから一般化放射輝度を求める方法を説明してきた。この方法は理論がすっかりしており開口合成と組み合わせることができるなどの

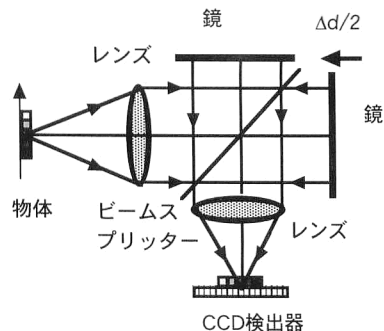


図5 像面フーリエ分光映像法.

利点をもつ。しかし、同じ物体を同じ開口を用いて同じ測定時間内に測定する場合、信号対雑音比に関してはつぎに述べる像面フーリエ分光映像法のほうがすぐれている²⁰⁾。この方法は、Ridgway¹²⁾とSimonら²¹⁾が最初に天体観測に利用している。像面フーリエ分光映像法は、結像系を備えたマイケルソン干渉計などを用いて、干渉計内で2光束間に光路差を与え、その状態で2つの像を重ね合わせる。分光情報の再生に関しては、従来のフーリエ分光を行う。マイケルソン干渉計を用いたシステム²²⁾や、液晶偏光干渉計を用いたシステム²³⁾が提案されている。

像面フーリエ分光映像法の原理を、図5を用いて説明する。物体を出た光は入射側のレンズでコリメートされビームスプリッターで分割された後、各々の鏡で反射され光路差を与えられ、再びビームスプリッター上で重ね合わされる。物体の1点から出た光は互いに独立に伝搬し検出器面上の1点で重ね合わされ干渉する。したがって、CCD (charge coupled device) 検出器中の要素の数だけフーリエ分光器が独立に働いていることになる。最近では、100万個以上の画素をもつCCDも多いので、100万台以上のフーリエ分光器を同時に働かせることが可能である。問題は干渉信号のダイナミックレンジをどう確保するかである。いま、物体から空間的にインコヒーレントな光が発せられているものと考え、その表面の一般化放射輝度は $B^{(o)}(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \omega) = k^2 S^{(o)}(\mathbf{r}_\perp, \omega) \cos\theta$ と表すことができる⁶⁾。ここで、 $S^{(o)}(\mathbf{r}_\perp, \omega)$ は物体光のスペクトル密度を意味し、分光画像と考えてよい。 θ は \mathbf{s} が面の法線となす角である。簡単のため、波数と角度への輝度の依存性を無視し、2つの像の光路差を d とすると、像面上での位置 \mathbf{r}_\perp における検出器の出力 $I(\mathbf{r}_\perp, d)$ は、

$$I(\mathbf{r}_\perp, d) = \int S^{(o)}(\mathbf{r}_\perp, \omega) \{1 + \cos(\omega d/c)\} d\omega \quad (6)$$

に比例する。 $I(\mathbf{r}_\perp, d)$ はインターフェログラムとよばれ、これを光路差 d に関して逆フーリエ余弦変換することにより、物体光のスペクトル密度(分光画像)が得られる。

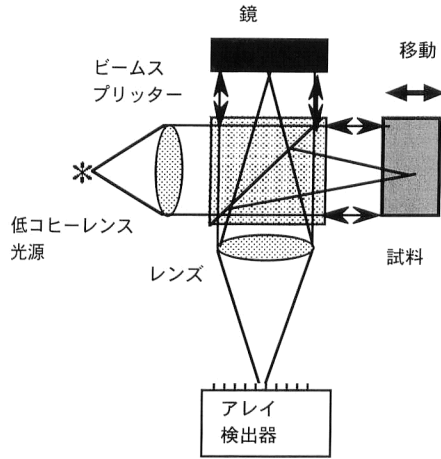


図6 干渉分光映像法。

2.2 分光断層映像法

物体表面からの散乱光の空間コヒーレンスを用いて分光画像を計測する方法について述べてきたが、物体内部についても分光情報と空間情報を同時に計測する方法が提案されている^{24,25}。光学干渉断層映像法 (OCT: optical coherence tomography) で得られる干渉信号と同じ信号を数値的に分光することにより、分光された断層像を得る。ハロゲンランプのような低コヒーレンス光を用いる方法が1994年²⁴)に提案されているが、超短光パルスを用いる同じ原理の手法が最近、OCTの研究を進めているグループから提案されている²⁶。

干渉分光断層映像法(コヒーレンス分光トモグラフィ)の原理を図6をもとに説明する。ここでは、媒質中の光を散乱を受けずに直進する光と散乱された光の2種類に分ける。つぎに、簡単のために、散乱による効果を直進光の減衰と媒質による1回の散乱だけに限定し、他を無視する。このような仮定は、散乱の少ない媒質中や奥行き短い媒質中で成立するものと考えられる。入射光には、帯域の広い白色の光を仮定する。入射光はマイケルソン干渉計に入射し、ビームスプリッターにより2光束に分けられる。測定対象からの反射光または後方散乱光は、参照面からの反射光と重ね合わされる。参照ミラーまたは試料を光軸に沿って駆動することにより、時系列データを得る。時間を t 、試料の移動距離を z とし、 $V_r(t)$ と $V(t, z)$ がそれぞれ、参照光と試料からの後方散乱光の振幅を表すものとする、検出器面上の光の強度は、 z の関数として次のように与えられる。

$$I(z) = \langle |V_r(t)|^2 \rangle + \langle |V(t, z)|^2 \rangle + 2\text{Re}[\Gamma(z)] \quad (7)$$

ただし、

$$\Gamma(z) = \langle V_r(t) V^*(t, z) \rangle = \int G(\sigma) \exp(2\pi i \sigma z) d\sigma \quad (8)$$

ここで、 $\langle \rangle$ は時間または集合平均を表し、 $\text{Re}[\]$ は実数部を、 $*$ は複素共役を意味するものとする。 σ は波数、 $G(\sigma)$ は散乱光の相互スペクトル密度である。いま、光源を出た光のスペクトル密度を $S(\sigma)$ 、試料の厚さを d 、試料中の深さ ξ において、反射あるいは後方散乱される波数 σ の光の振幅の反射率を $H(\xi, \sigma)$ とすると、 $G(\sigma)$ はつぎのように与えられる^{27,28}。

$$G(\sigma) = S(\sigma) \int_0^d H^*(\xi, \sigma) \exp(-2\pi i \sigma \xi) d\xi \quad (9)$$

式(8)、(9)は干渉信号の中にどのように試料内部の空間とスペクトルの情報が含まれているかを表している。もっともわかりやすい例として、非常に小さな領域の比較的大きな屈折率変化を想定してみよう。このような場合は、 $H(\xi, \sigma)$ が σ に関して一定で、 ξ に関してデルタ関数であるような場合に相当するので、 $G(\sigma) \propto S(\sigma)$ となり、 $\Gamma(z)$ は光源のスペクトル(コヒーレンス)で決まる最高の分解能で位置の情報を与えることになる。

式(10)の相互スペクトル密度にはスペクトルに関する情報が含まれていることがわかるが、このままではこれを利用することができない。同様に式(9)のコヒーレンス関数は明示的には、位置の情報のみをもっている。これらから、位置とスペクトルに関する情報を引き出すには、Wigner分布関数を利用するか、ウェーブレット変換またはGabor変換等を利用することが考えられる。もっとも簡単な方法として、波数領域で中心波数の異なる連続した矩形のフィルター関数群による干渉信号のフィルタリング処理を行ってもよい。いま、等しい通過帯域幅をもつ N 個の連続した帯域通過フィルター $W_n(\sigma)$ ($n=1, 2, \dots, N$) が用意されているものとする。このとき、この中の n 番目のフィルターによって処理した信号は、

$$G_n(\sigma) = G(\sigma) W_n(\sigma) \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

で与えられる。 $G_n(\sigma)$ をフーリエ逆変換し $\Gamma_n(z)$ を再生すると、帯域内のスペクトルのみによる干渉信号、すなわち色分けされた干渉信号が得られることになる。

生体内部の分光情報を得ることは、大きな意義がある。より深い部分の観察を可能にするために、超短光パルスを用いて得られる輝度の高い広帯域光、white-light continuum (または、supercontinuum) を光源に利用する方法が試みられている^{27,28}。また、超短光パルス自体の広帯域化も進められている。このような新しい輝度の高い低コヒーレンス光を利用した分光断層映像法の研究²⁹が今後も進

んでいくものと思われる。

3. 分光画像の利用

冒頭でも述べたが、分光画像は今後、動画、立体画などととも高度情報通信社会において、効率のよいコミュニケーションのために多用されていくことになろう。このとき、許容される情報の量は、ますます増大すると考えられるが、それ以上の需要が常に生まれてくることは、いままでの歴史が証明している。そこで、これも常に行われていることであるが、必要な情報に絞る方法が求められる。情報量を絞るということは、認知・認識にもつながる重要な観点であるので、分光画像データ処理の基本になると考えられる主成分分析と最近話題になっている独立成分分析を取り上げその概要を述べる。

3.1 分光画像の解析

分光画像の画像（空間）軸に関しては、非常に一般的なパターンが現れるので、この軸に関して特徴のある情報を絞り込むことは難しい。特別な画像のみの世界に視野を限定しないかぎり不可能である。事実、現行の JPEG (joint photographic experts group) の圧縮方式は、離散余弦変換という非常に一般的な圧縮法に基づいている。この点、スペクトル軸は物体の表面との光の相互作用に基づくため、自然に物理的な制限が加わっており、容易に情報の圧縮率を高めることが可能である。また、状況によっては対象に自然な制限が加わることにより、対象の存在する部分空間を強く限定することが可能になる場合が多いと考えられる。

3.1.1 主成分分析

すでによく知られている多変量解析における次元削減のための手法である。ランダムベクトル \mathbf{x} (この場合、分光画像中の各画素位置におけるスペクトル) の集合 $\{\mathbf{x}\}$ が与えられたときに、 \mathbf{x} の共分散行列 R の最大固有値に対応する固有ベクトルを正規化したものが、第1主成分ベクトルである。第2主成分ベクトルは、第2番目に大きな固有値に対応する固有ベクトルを規格化したものである。順次このように主成分が決まり、許容可能な残差を決めれば、主成分の数が決まる。共分散行列 R が実対称行列なので、各主成分は正規直交系となる。いま p 個の主成分 $\mathbf{u}_n (n=1, 2, \dots, p)$ が決まったとすると、これらから正規直交基底が得られるので、 \mathbf{x} は以下のように展開される。

$$\mathbf{x} - \langle \mathbf{x} \rangle = \sum_{n=1}^p c_n \mathbf{u}_n + r \quad (11)$$

ここで、 c_n は展開係数でランダム変数、 r は残差、 $\langle \mathbf{x} \rangle$ は平均値である。 $\{\mathbf{x}\}$ の分布にも依るが、極端に偏った分布

をしている場合は、非常に少ない数の成分ベクトルで正確に \mathbf{x} を表現することができる。Parkkinen らはマンセルの色票が8個の主成分で比較的正確に表現でき、天然のスペクトルもこれらを用いて表現可能であることを示している¹⁾。

3.1.2 独立成分分析

独立成分分析が分光画像の解析に利用されるようになったのは、最近のことである³⁰⁾。独立成分分析はもともと、混合されて信号の分離への応用が検討されており、最近分光画像の中の混合されたスペクトルの分離に利用されようとしている。また、特徴抽出の能力にも期待がかかっている。信号分離の例を挙げて説明する。簡単のために統計的に独立な2つの信号 x と y があり、これらがある一定の割合で混合され、2つ混合信号 u と v が得られているものとする。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \alpha \\ \beta & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (12)$$

ここで、 u, v, x, y はすべてランダム変数であり、 α と β は未知の定数である。独立成分分析法は、元信号 x と y の統計的独立性のみから、 α と β を推定する方法である。観測される u と v から逆に x と y を再生する。独立性から、 x と y の結合密度関数がそれぞれの周辺密度関数の積になっているので、推定されるべき x と y が互いに相関や高次の相関をもたないことを利用し、 x と y を u と v の線形結合として再生する。元信号の統計的独立性のみから信号分離がなされるのが興味深い。いままでにいろいろな手法が提案されているが、最近のアプローチにはニューラルネットワークの学習のような適応的手法を利用しているものがある。詳しくは、Cardoso の解説³¹⁾等を参照していただきたい。

はじめに述べたように、分光画像は人の感覚を超えており、人には瞬時に把握できない情報をもっている。しかし、これは人に対する3次元空間と同様の意味をもつものであって、把握が本質的に困難であることを意味しているわけではない。人は両眼視によって、大まかな立体情報を得るが、あくまで2枚の投影像が与えられているのみであるから、ひとつの視点からでは十分な空間の把握は不可能である。視点の動きによって人は3次元空間を正確に把握することができる。一方で、瞬時には2次元の画像しか与えられないコンピューター画面でも、時間軸を利用してもうひとつの次元を付け加えるだけで、仮想的3次元空間を非常に豊かにすることができる。分光画像もさまざまな演出に

よって、仮想空間を豊かにする可能性を秘めていると思われる。生体や産業応用以外にもこのような新しい分野が広がることを期待している。このとき、先に述べた、物体表面の光散乱特性と分光画像の情報を統合していくことが今後重要になってくるとされる。特に、散乱特性の把握には多くの次元が必要となるので、これの効率的な削減が必須である。

文 献

- 1) J. P. S. Parkkinen, J. Hallikainen and T. Cohe: "Characteristic spectra of Munsell colors," *J. Opt. Soc. Am. A*, **6** (1989) 318-322.
- 2) 龍岡静夫: 光工学の基礎 (昭晃堂, 1984) pp. 43-67.
- 3) 鶴田匡夫: 応用光学 I (培風館, 1990) pp. 122-136.
- 4) L. Mandel and E. Wolf: "Foundations of radiometry," *Optical Coherence and Quantum Optics* (Cambridge University Press, 1995) pp. 287-307.
- 5) 伊東一良, 平井亜紀子, 吉森 久: "干渉分光映像法の進展と超高速並列システム", *応用物理*, **66** (1997) 426-436.
- 6) A. Walther: "Radiometry and coherence," *J. Opt. Soc. Am.*, **58** (1968) 1256-1259.
- 7) A. Walther: "Radiometry and coherence," *J. Opt. Soc. Am.*, **63** (1973) 1622-1623.
- 8) E. Wolf: "Coherence and radiometry," *J. Opt. Soc. Am.*, **68** (1978) 6-17.
- 9) R. G. Littlejohn and R. Winston: "Generalized radiance and measurement," *J. Opt. Soc. Am. A*, **12** (1995) 2736-2743.
- 10) K. Yoshimori and K. Itoh: "Interferometry and radiometry," *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 3379-3387.
- 11) 伊東一良: "多重化分光映像法—フーリエ変換分光映像法—", *レーザー研究*, **15** (1987) 21-30.
- 12) K. Itoh: "Interferometric multispectral imaging," *Progress in Optics XXXV*, ed. E. Wolf (Elsevier Science B. V., Amsterdam, 1996) pp. 145-196.
- 13) M. Born and E. Wolf: "Two-beam interference: Division of amplitude," *Principles of Optics*, 4th Ed. (Pergamon, London, 1970) pp. 275-277.
- 14) F. Roddier: "Interferometric imaging in optical astronomy," *Phys. Rep.*, **170** (1988) 97-166.
- 15) K. Itoh and Y. Ohtsuka: "Fourier-transform spectral imaging; retrieval of source information from three dimensional spatial coherence," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 94-99.
- 16) J. -M. Mariotti and S. T. Ridgway: "Double Fourier spectro-spatial interferometry: Combining high spectral and spatial resolution in the near infrared," *Astron. Astrophys.*, **195** (1988) 350-363.
- 17) B. G. Clark: *Course Notes, NRAO Summer School*, eds. R. A. Perley, F. F. Schwab and A. H. Bridle (New Mexico, Socorro, 1985) p. 1.
- 18) P. Zhao, J. -M. Mariotti, V. C. du Foresto and P. Lena: "Infrared single-mode fiber-optic Fourier-transform spectrometry and double Fourier interferometry," *Appl. Opt.*, **35** (1996) 2897-2901.
- 19) L. Delage, F. Reynaud and A. Lannes: "Laboratory imaging stellar interferometer with fiber links," *Appl. Opt.*, **39** (2000) 6406-6420.
- 20) K. Itoh, T. Inoue and Y. Ichioka: "Comparison of interferometric spectral imaging techniques near the pupil plane and image plane," *Proc. 15th Congress of International Commission for Optics, Optics in Complex Systems*, eds. F. Lanzl, H. J. Preuss and G. Weigelt (SPIE, Bellingham, Washington, D. C., 1990) pp. 370-371.
- 21) D. Simons, J. P. Mailard and L. Cowie: "Update on the 2D FTS project," *CHFT Information Bulletin No. 24* (Canada-France-Hawaii Telescope Corporation, Kamuela, Hawaii, 1991), p. 8.
- 22) T. Inoue, K. Itoh and Y. Ichioka: "Fourier-transform spectral imaging near the image plane," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 934-936.
- 23) K. Itoh, T. Inoue, T. Ohta and Y. Ichioka: "Liquid-crystal imaging Fourier-spectrometer array," *Opt. Lett.*, **15** (1990) 652-654.
- 24) K. Minami, T. Inoue, K. Itoh and Y. Ichioka: "Coherence spectrometry with reflected light from colored layers," *Post-Deadline Papers of Topical Meeting of the International Commission for Optics, Frontiers in Information Optics*, Kyoto (1994) p. 7P-PD-7.
- 25) 南 浩治, 菅 武志, 井上 卓, 伊東一良, 一岡芳樹: "コヒーレンス・スペクトロトモグラフィ", *光学*, **25** (1996) 156-160.
- 26) U. Morgner, W. Drexler, F. X. Kärtner, X. D. Li, C. Pitris, E. I. Ippen and J. G. Fujimoto: "Spectroscopic optical coherence tomography," *Opt. Lett.*, **25** (2000) 111-113.
- 27) 伊東一良, 渡辺 歴: "高輝度広帯域光源による低コヒーレンス干渉計", *光学*, **29** (2000) 608-614.
- 28) W. Watanabe and K. Itoh: "Coherence spectrometry: Optical spectroscopic tomography with low-coherence interferometry," *Opt. Rev.*, **7** (2000) 406-414.
- 29) 渡辺 歴, 伊東一良: "分散型干渉分光トモグラフィ", *応用物理*, **56** (2001) (印刷中).
- 30) J. D. Bayliss, J. A. Gualtieri and R. F. Crompt: "Analyzing hyperspectral data with independent component analysis," *Proc. SPIE* (1997) 133-143.
- 31) J. -F. Cardoso: "Blind signal separation: Statistical principles," *Proc. IEEE*, **86** (1998) 2009-2025.

(2001年3月7日受理)