



分光・映像技術の統合化

伊 東 一 良*

人の目の内部では、物の色と形に関する情報が同時・並列的に処理されているようである。これは、能率良く外界を認識する上で都合が良い。元来、色に関する情報は入射光を波数ベクトルの長さ（光の周波数に比例する）に関して整理することにより、また、形に関する情報は波数ベクトルの方向（光の来る方向）について整理することによって得られるのであるから、入射光を波数ベクトルの長さ（波数）と方向の3成分について整理すれば、一度に色と形の情報をまとめることができる。このように、分光と映像化とを統合した光学技術を分光映像法と呼ぶことにする。

カラー写真技術とカラーテレビジョンシステムとは最も初歩的な分光映像システムと見ることができる。しかし、残念なことにこれらのシステムは分光情報を光の3原色に限定した、人の感覚に基礎を置くものであって、科学計測には不向きである。リモートセンシングや天文学、そして生物学や医学の分野で十分な空間分解能とスペクトル分解能を持つ分光映像システムが望まれているが、現在使われているものは、分光器と結像系とを単に組合わせただけのあまり効率の良くないシステムが大半を占めている。以下に、著者等によって最近提案された分光映像法¹⁾について、その原理と基礎的な実験の結果について説明する。

フーリエ変換分光映像法の原理

図1のような配置を考える。話を簡単にするために、物体Oは発光体であると仮定し、その各点から様々な周波数成分を持つ光が四方に発せられているものとする。この光の一部が観測

領域Dに達する。もし、観測領域が十分狭く且つ光源から十分離れているものとする、光源内の1点から発せられ、領域D内に達する光は、ある一定の方向に進む様々な波長の平面波の集まりとして表現できる。このような平面波の集まりを、光源内の各点について（即ち、光の進む方向について）加え合わせると、領域D内の光の場は、

$$V(\mathbf{r}) = (2\pi)^{-3/2} \int A(\mathbf{k}) \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{k} \quad (1)$$

と書くことができる。ここで $A(\mathbf{k}) \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ は波数ベクトル $\mathbf{k}$ の方向に進む波長 $\lambda = 2\pi / |\mathbf{k}|$ の平面波を意味しており、 $A(\mathbf{k})$ は、 $\mathbf{k}$ の方向 $\mathbf{n} = \mathbf{k} / |\mathbf{k}|$ で指定できる光源上の1点から発せられる波長 λ の成分の振幅に比例する量である。もし、領域D内で光の場 $V(\mathbf{r})$ が測定可能であれば（電波のように）、この $A(\mathbf{k})$ を(1)式の逆の関係を用いて求めることができる。しかし、実際は、 $A(\mathbf{k})$ も $V(\mathbf{r})$ も時間的に非常に高い周波数で、尚且つランダムに、変動している。したがって、これらは単独では測定できず、また統計的に扱

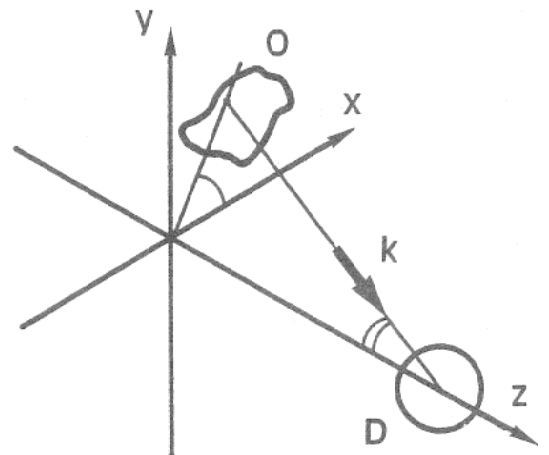


図1. 光学的配置。多色の発光体Oから観測領域D内へ入射してくる光の性質を基に、光源Oの光学的性質を推定したい。光源の性質は波数ベクトル $\mathbf{k}$ の関数としてまとめられる。

*伊東一良 (Kazuyoshi ITOH), 大阪大学, 工学部, 応用物理学科, 一岡研究室, 助手, 工学博士, 応用光学・光情報処理

う必要がある。以下で、この $A(\mathbf{k})$ の測定可能な統計量、即ち、相関関数の性質について説明する。重要な性質は、領域 D 内における異なる2つの波数ベクトル $\mathbf{k}_1$ と $\mathbf{k}_2$ とに対する $A(\mathbf{k}_1)$ と $A(\mathbf{k}_2)$ の統計的な相関の有無である。

まず、 $\mathbf{k}_1$ と $\mathbf{k}_2$ の方向が異なる場合を考えよう。この場合は明らかに $A(\mathbf{k}_1)$ と $A(\mathbf{k}_2)$ とは位置的に異なった光源要素に起因するものなので、統計的に独立である。次に、 $\mathbf{k}_1$ と $\mathbf{k}_2$ の方向が同じで大きさが異なる場合を考える。このときは、互いに独立である保証はない。しかし、実際これらの成分が干渉し合う場合を考えると、周波数の違いによる時間的なビートが現われるため、実質的に無相関と見做すことができる。結局、 $A(\mathbf{k})$ の相関関数について、次のよう仮定することができる。

$$\langle A(\mathbf{k}_1)A^*(\mathbf{k}_2) \rangle = G(\mathbf{k}_1)\delta(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \quad (2)$$

ここで、 $\langle \rangle$ は統計平均を、 $\delta(\)$ はディラックの δ 関数を意味する。 $G(\mathbf{k})$ は $\langle |A(\mathbf{k})|^2 \rangle$ と等価であり、 $A(\mathbf{k})$ と同様に光源の分光映像情報を全て含んでおり、光の場 $V(\mathbf{r})$ の3次元空間周波数パワースペクトル²になっている。

次に、光の場 $V(\mathbf{r})$ についても同様に相関関数

$$\Gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle V(\mathbf{r}_1)V^*(\mathbf{r}_2) \rangle \quad (3)$$

を求めてみよう。(1),(2)式より、 $\Gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ は、 $\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ のみの関数となり、

$$\Gamma(\Delta\mathbf{r}) = (2\pi)^{-3/2} \int G(\mathbf{k}) \exp(-i\mathbf{k} \cdot \Delta\mathbf{r}) d\mathbf{k} \quad (4)$$

で表わされる。上式の逆の関係から、 $\Gamma(\Delta\mathbf{r})$ が測定できれば、 $G(\mathbf{k})$ を求めることができる。この手法は、(4)式で示されるフーリエ変換の関係に基づいているので、フーリエ変換分光映像法と呼ばれる。

(3)式で定義される量は空間コヒーレンス関数と呼ばれる量で、古くからその性質や測定法の研究が行われているが、殆どの場合、 $\Delta\mathbf{r}$ が光の伝播方向に垂直な面内の2次元ベクトルに限られていた³。次に3次元の $\Delta\mathbf{r}$ に対する $\Gamma(\Delta\mathbf{r})$ の測定法とそれによる $G(\mathbf{k})$ の再生法に

ついて述べる。

フーリエ変換分光映像法

光学系を図2に示す。入射光はビームスプリッタ BS により2光束に分割され、各々直角プリズム P_1 , P_2 で反射される。2つのプリズムは光軸の回りに互いに 90° 回転しているので、反射される2つの光束は互いに 180° 回転している。この2光束が再びビームスプリッタ上で重ねられ、検出器アレー A に入射する。この状態でプリズムの一方を光軸の方向に d だけ移動させる。このときの検出面上の点 (x, y) での光の強度は、

$$\begin{aligned} I(x, y, d) = & \langle |V(x, y, z)/2 \\ & + V(-x, -y, -2d)/2|^2 \rangle \\ = & \Gamma(0)/2 + \Gamma(2x, 2y, 2d)/4 + \\ & \Gamma^*(2x, 2y, 2d)/4 \end{aligned} \quad (5)$$

で与えられる。即ち、 $\Delta\mathbf{r} = (2x, 2y, 2d)$ だけ離れた2点での光の場の相関関数が測定されることになる。 $G(\mathbf{k})$ は、この強度分布を3次元フーリエ逆変換することによって得られる。表現を簡潔にするために d を z で置換えて、(5)式の逆フーリエ変換をとると、

$$\tilde{I}(\mathbf{k}) = \{\delta(\mathbf{k}) + G(\mathbf{k})/8 + G(-\mathbf{k}/2)/8\}/2 \quad (6)$$

を得る。再生結果には、2倍に拡大された分光

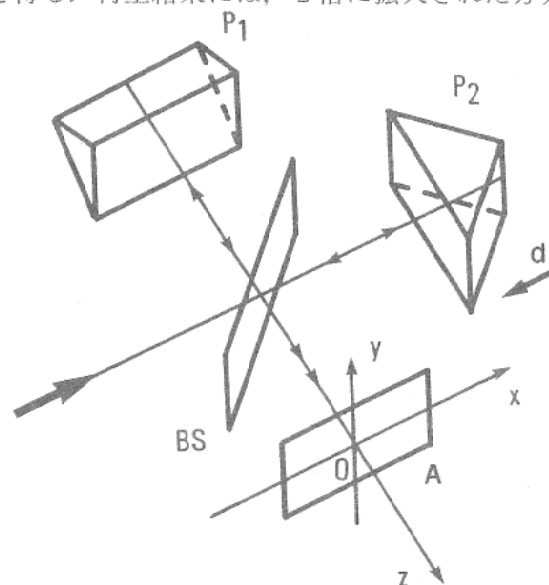


図2. 干渉計。ビームスプリッタ BS により分割され、2つの直角プリズム P_1 と P_2 によって反射された光は、再び BS 上で重ねられる。この2つの光束は互いに 180° 回転しており、 $2d$ の光路差がつけられている。

映像と中心のピーク，そしてその反対側に3次元的に裏返された鏡像が含まれることがわかる。

図3に原理を確かめるための基礎的な実験の結果^{1,4}を示す。He-Ne レーザ (6328Å) と He-Cd レーザ (4416Å) を用いて，2つの周波数スペクトル成分を持つ空間的には1つの点光源を作り，本手法で分光映像を再生した結果である。3次元の実験は装置も大掛りになるので，測定領域を $x-z$ 平面内，分光映像を $u-w$ 平面内に限定した実験を行なった ($\mathbf{k}=(u, v, w)$)。したがって，図3では光源の位置は $u-w$ 平面内の w 軸からの角度に表われている。2つの周波数スペクトル成分は空間的には1つ

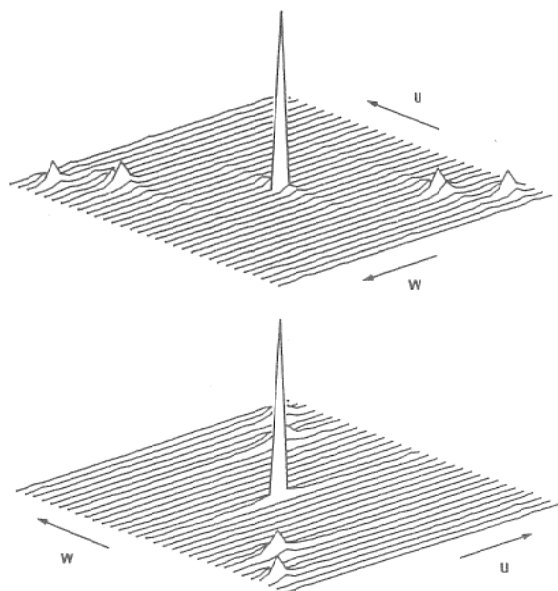


図3. 2つの周波数スペクトル成分を持つ点光源の再生実験結果. 2つの角度から見た図が示されている. 小さな一対のピークが1つの点光源に対応する. 原点上の高いピークと鏡像も同時に再生されている. 一対のピークは同一の位置にあるので，原点を通る同じ直線上に再生される。

の位置を占めているので，同じ角度に再生されているが，周波数の差により原点からの距離が異っているのが分る. 原点上のピークを中心に鏡像 ($G(-\mathbf{k}/2)$) も同時に再生されている。

おわりに

分光と映像技術の統合化手法の1つ，フーリエ分光映像法について説明し，基礎的な実験結果を紹介した. 本手法の特徴がその能率の良さにあるため， S/N 比の検討結果や分解能の議論にも触れたかったが，紙面の制約で出来なかった. このあたりは，すでによく知られているフーリエ分光法と本手法との類似性から類推していただきたい. 本手法は，フーリエ分光法の映像化への拡張版と見ることもできる⁵.

また，本稿では説明を簡単にするため，干渉計の中の2つのプリズムの角度を 90° にセットした配置を用いたが，この角度を 90° 以下に設定し，必要以上の空間分解能を犠牲にすることにより，より高い S/N 比または，より短い測定時間を実現することも可能である. 現在，この手法を実験的に検討するため，生体計測用分光映像システムの実験準備を進めている。

参考文献

1. K. Itoh and Y. Ohtsuka, J. Opt. Soc. Am. A 3, 94 (1986).
2. S.W. Lang and T. L. Marzetta, in Digital Image Processing Techniques, M. P. Ekstrom, ed. (Academic, New York, 1984), Chap. 6.
3. M. Born and E. Wolf, Principles of Optics (Pergamon, London, 1970), Chap. 10.
4. K. Itoh and Y. Ohtsuka, in Conference Digest of the ICO - 13 (Organizing Committee of ICO - 13, Sapporo, 1984), p. 600.
5. K. Itoh and Y. Ohtsuka, J. Opt. Soc. Am. A 3, 1239 (1986).