

## 25aB16 フラクタル的スペckルを用いた物体移動計測 Measurement of object motion using fractal speckles

○宮坂英太, 魚住 純\*  
Eita Miyasaka and Jun Uozumi\*

北海道大学電子科学研究所, 北海学園大学工学部\*  
Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University  
Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University\*

Speckle patterns having fractal properties were generated in the image plane experimentally using a certain spatial frequency filter. Because of the property of fractal, the intensity correlation function exhibits a long correlation tail. To take advantage of this behavior, we propose an application of such a pattern to the measurement of object motion on the basis of imaging geometry.

### 1. はじめに

フラクタル構造は、粒子の凝集などの物理現象や、血管・神経などの生体構造など、自然界に多く見られる構造である。この構造の特徴として、観測領域の大きさを変化させてもその構造や関数形が変化しないスケール不変性があり、その相関特性はべき関数となる。このような構造を光計測などの光学技術に適用することを考えた場合、その相関特性を知ることは重要なテーマであり、本研究もその一環である<sup>1)2)</sup>。

光の場にフラクタル構造を導入する方法として、フラクタル性を有するスペckルを物体の像面に生成することが可能であることを示した<sup>3)</sup>。このスペckルの相関特性は、前述したように相関長の長いべき関数的特性を示し、測定レンジの広いスペckル相関法への応用に有効であると考えられる。そこで、このスペckルを用いた物体の移動計測法について実験的に検討を行った。

### 2. 理論

ランダムなフラクタル性を有する物体からのフラウンホーファ回折パターンは、その平均強度分布において、

$$I(q) \propto q^{-D} \quad (1)$$

で与えられるべき関数的特性を示す。ここで  $q$  は観測面での中心からの距離、 $D$  はフラクタル次元である。この散乱光を粗面など通常の2次元散乱体に照射すると、その遠方場において生成するスペckルパターンの強度相関は、二点間の変位ベクトルを  $\mathbf{r}$  として、

$$C_I(\mathbf{r}) = \frac{\langle I(\mathbf{r}')I(\mathbf{r}'+\mathbf{r}) \rangle - \langle I(\mathbf{r}') \rangle \langle I(\mathbf{r}'+\mathbf{r}) \rangle}{\langle I(\mathbf{r}') \rangle \langle I(\mathbf{r}'+\mathbf{r}) \rangle} \propto \left( \frac{r}{MR} \right)^{2(D-2)} \quad (1 < D < 2, r \ll MR) \quad (2)$$

というべき則に従う。ここで  $M$  はフラクタル物体から観測面までを1つの結像系と見なしたときの結像倍率、 $R$  はフラクタル物体の最大スケールである<sup>4)</sup>。

一方、粗面の光学的フーリエ変換場に、透過率が動径方向にべき的に変化する空間周波数フィルタを設置すると、(1)式で示したべき関数的な強度により照射された粗面直後の場と等価な場を生成することができ、その回折場、すなわち粗面の像面に(2)式と同様の強度相関を有するスペckルパターンを生成することが可能である。すなわち、この方法により、通常の粗面の像面に、フラクタル性を有するスペckルパターンを生成することができる。

### 3. 実験

実験系を fig.1 に示す。前節で述べたように、図の  $P_2$  面にべき関数に従う空間周波数フィルタ

を設置することにより、 $P_3$ 面にフラクタルスペックル(fig.2)が生成する。このパターンの特徴は(2)式で示したべき関数となり、両対数表示において直線となる(fig.3)。

実験では、スペックル相関法

を用い、 $P_1$ 面に置かれた物体の移動を測定した。物体の変位が0の状態のスペックルパターンを $P_3$ 面で写真フィルムに記録し、そのポジフィルムを同面に設置する。物体が移動すると $P_3$ 面におけるスペックルも並進運動し、 $P_3$ 面の直後には初期状態のスペックル強度を記録したフィルムと物体の移動により生成するスペックル強度の積が生じる。その積分強度を $P_4$ 面において検出

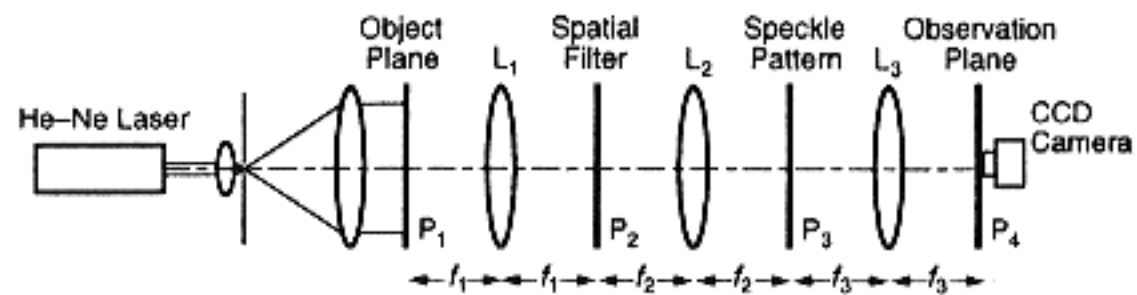


fig.1 Experimental setup

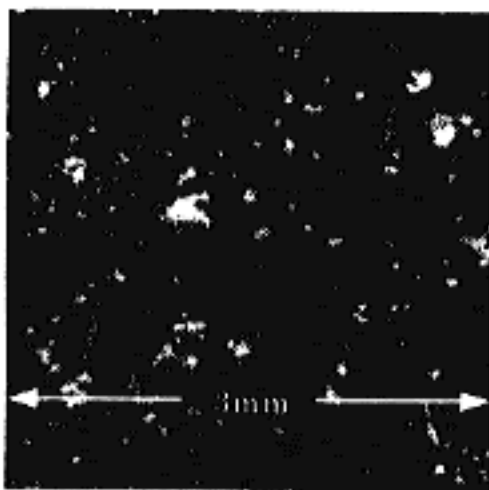


fig.2 Fractal speckle on image plane

することにより2つのパターンの相互相関関数が得られる。この相互相関は、fig.3で示した自己相関関数に等しいはずであり、そのべき関数から物体の移動距離が求まる<sup>5)</sup>。

CCDカメラにより $P_4$ 面で検出した相互相関関数をfig.4に示す。この関数のべき特性はfig.3のそれと概ね一致しており、この方法による移動計測が可能であることを示している。相関関数の値が $10^{-2}$ 前後になると揺らぎが大きくなるが、この理由としては、1)レーザー光の時間的変動による測定強度の変動、2)空間周波数フィルタ及び写真フィルムに記録したスペックルからのバックグラウンド透過光の影響、3)相関長の長いスペックル成分による統計的な揺らぎ(fig.3の自己相関関数は角度平均を取っている)、などが挙げられる。

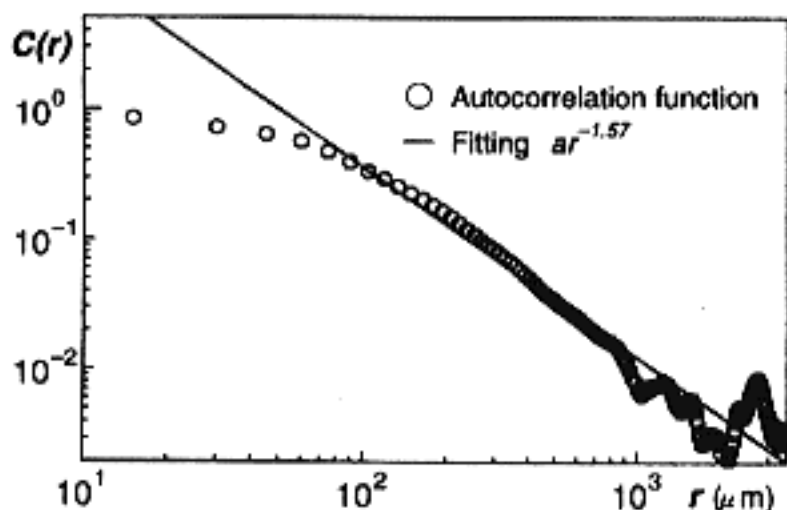


fig.3 Autocorrelation function of fractal speckle

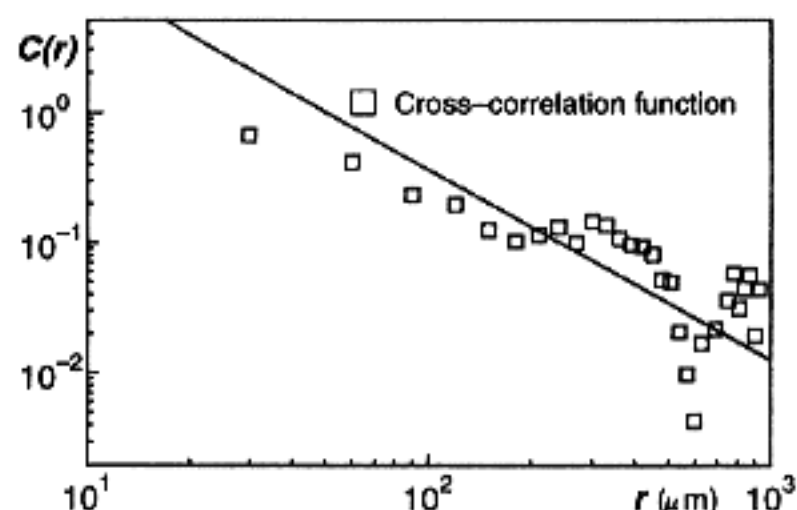


fig.4 Cross-correlation function

#### 4. おわりに

物体の像面に生じるフラクタルスペックルを用いることにより、測定レンジの広い物体移動計測が可能であることを示した。スペックルの最大・最小サイズは、べき関数的フィルタの特性によって決まる結像系のポイントスプレッド関数に依存するため、フィルタの精度を向上させることにより、極めて微細な領域から長距離までを測定し得るものと期待できる。今後はフィルタの改良などによる測定精度の向上や、LCDを用いた実時間での移動測定に取り組む予定である。

#### 参考文献

- 1) J. Uozumi, M. Ibrahim and T. Asakura, Opt. Commun., 350,156 (1998)
- 2) 魚住 純, 応用物理, 67,1270 (1998)
- 3) 宮坂 英太, 魚住 純, 第46回応用物理学関係連合講演会 28p-ZN-2(1999)
- 4) K. Uno, J. Uozumi and T. Asakura, Opt. Commun., 124,16 (1996)
- 5) G.P.Weigelt, in: Speckle metrology, ed. R.K. Erf (Academic press, New York, 1978)