

スペックル相関法による層構造の厚さ推定

松村 隆弘¹ 向川 康博² 松下 康之³ 八木 康史¹

1. 概要

光はほとんどの物体に対して、表面で反射するだけではなく物体内部にも光が到達する性質をもつ。近年この性質を利用して、外側から物体の内部を解析する研究が盛んに行なわれている。特に可視光や近赤外光を用いた解析は、被曝の危険がない安全な光源であるために、応用できる分野は多岐にわたる [1][2]。多くの物体では、その内部は層構造になっている。例えば、人の皮膚は一番外側の層として皮脂腺や汗腺などがある表皮があり、その奥に毛細血管やリンパ管が通っている真皮がある。物体を切ることなく、非破壊的にこれらの層構造の解析を行なうことは、様々な分野において応用できると期待される。

光学的な解析技術の1つとして、スペックルを用いたものがある。スペックルとは、図 1(a) のように物体にレーザーを照射した時に、散乱した光の干渉現象によって現れる図 1(b) の斑点模様のことである。物体の微細な動きでさえスペックル変化に寄与するという性質から、レーザーを用いてシーンのわずかな変化を検出する研究が行なわれている [3]。また、Zizka ら [4] は、レーザースペックルを用いたより正確で高速なモーションセンシング技術を開発している。さらに、スペックルが動的な部分のみで変化するという性質を利用した技術として、血流を測定して画像化する研究が行われている [5][6]。本研究では、レーザー光源によるスペックルを物体内部の解析に適用し、物体の層構造を推定するスペックル相関法を提案する。最も外側に動きのない静止層があり、その内側に動きがある物体を対象とし、静止層のみで反射した光のスペックルは時間的に安定し、動的な領域まで達した光のスペックルは変化するという性質を用いて、連続画像の相関値を計算することで表面の静止層の厚さを推定できることを示す。

2. スペックル相関による厚さ推定

2.1 光の到達深度

物体表面におけるスペックルパターンの様子を観測するために図 2 に示すように地点 A,B,C にレーザー光を照射

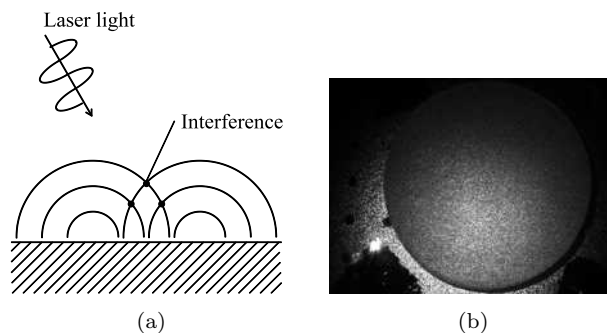


図 1: スペックルの原理

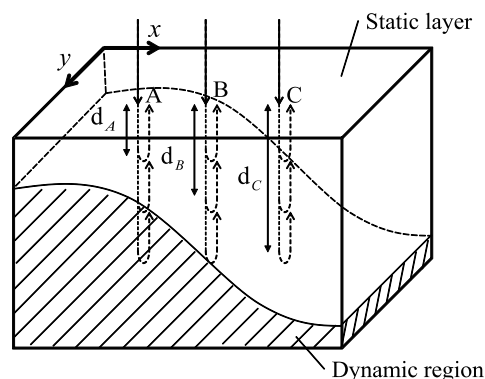


図 2: 静止層の厚さの 2 次元分布

する場合を考える。地点 A,B,C における静止層の厚さをそれぞれ d_A, d_B, d_C とし、それぞれの地点における物体内部への光路の様子を示している。地点 A,B,C を比較すると、A のほうが B よりも多くの光が動的領域へと達しているため、時間的に変化する光の量の増加に対応して大きなスペックル変化が観測され、C においては動的領域まで光が達していないため、静止層のみを通ってきた光は時間的に安定しているため、スペックルに変化を生じさせない。

2.2 スペックル相関

前節で説明した通り、静止層の厚さによってスペックルの変化量に違いが生じる。この性質を利用して、測定したスペックルの変化から物体の各地点における静止層の厚さを推定する。まず、物体にレーザー光を照射した状態で、連続で 2 枚の画像を撮影する。次にそれらの 2 枚の画像の各画素について設定したウィンドウでの相関値を求める。

¹ 大阪大学 産業科学研究所

² 奈良先端科学技術大学院大学

³ マイクロソフトリサーチアジア

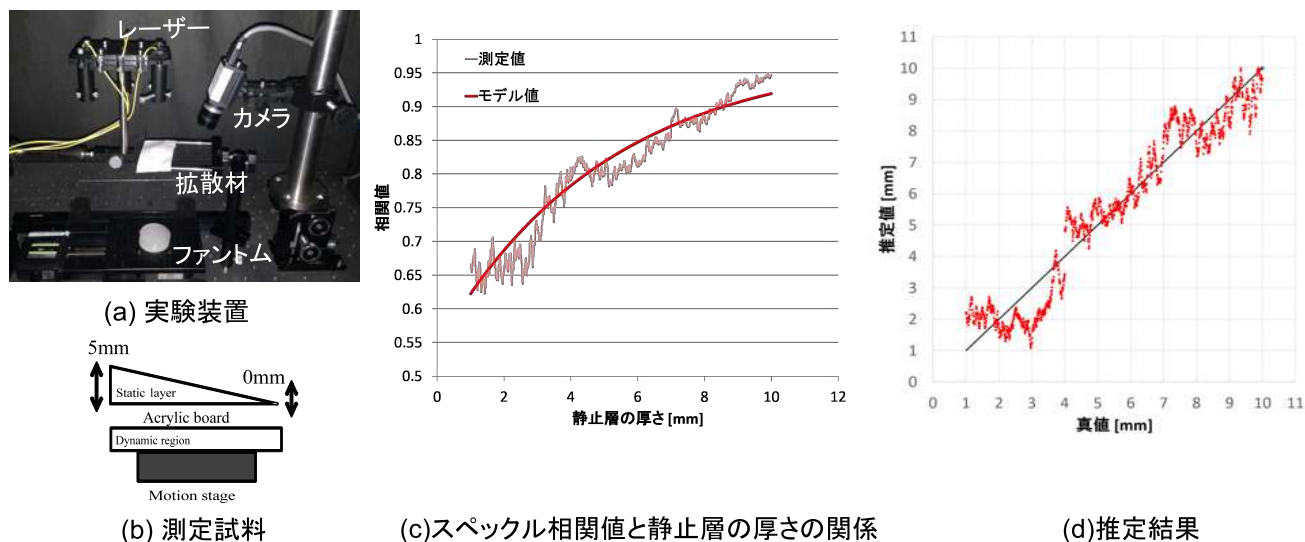


図 3: ファントムを用いた推定実験と結果

静止層の厚みが増すほどスペックルの変化量が小さくなることから、それに応じて 2 枚の画像の相関値も高くなる。つまり、静止層の厚さとスペックル相関値には単調増加の関係があると考えられる。そのため、物体表面上の各地点で計算されたスペックル相関値の分布から、静止層の相対的な厚みを推定することができる。さらに、静止層の光学的性質が特定できる場合には、あらかじめ静止層の厚さ d とスペックル相関値 $C(d)$ の関係をモデル化しておくことで、実際に計算した相関値から、各地点の静止層の厚さを推定することも可能となる。

3. ファントムを用いた厚さ推定実験

図 3(a) に示す装置を用いて、試料に対して上部からレーザー光を照射し、それによって生じたスペックルを同じく上部からカメラで撮影した。測定試料として、図 3(b) のような皮膚の構造を模したファントムを作成した。このファントムでは、ポリプロピレン円盤を上下に配置し、下の円盤のみを動かすことで静止層と動的領域を再現している。また、静止層の円盤に厚さが 3[mm], 6[mm] の一定なポリプロピレン円盤を重ねることで、推定できる静止層の厚さを 1[mm]~ 10[mm] と変化させた。

本実験では、可視領域の 670[nm] の波長のレーザー光を試料に照射し、連続して撮影した画像のスペックル相関値を計算した。得られたスペックル相関値と実際の静止層の厚さの関係と、本研究で式 (1) のようにモデル化したモデルに当てはめたものを図 3(c) に示す。静止層を模した物体の構造が変化する 4[mm], 7[mm] 付近の相関値は多少のずれがあるが、理論通り、静止層の厚さと相関値の間に単調増加の関係が見られる。

$$C(x) = \frac{v_T + (1 - \exp(-2\sigma d))v_S}{v_{12}} \quad (1)$$

v_T, v_S はそれぞれ鏡面反射によるスペックル、静止層のみ

で反射した光によるスペックルの分散、 v_{12} は連続撮影したそれぞれの画像中のスペックルの標準偏差の積である。 σ は散乱物体中の光の減衰を表す Lambert-Beer の法則 [7] における吸収係数を示す。次に、このモデルを用いて、別に計測したファントムの静止層の厚さ推定を行なった。モデルに基づいて、実測値から最近傍探索によって静止層の厚さを推定した結果を図 3(d) に示す。また、真値との誤差 (RMSE) は 0.56[mm] であった。この結果から、実際の厚さと推定した厚さには高い相関関係が見られ、本研究で提案するスペックル相関法による静止層の厚さ推定の有効性が認められる。

参考文献

- [1] Yasunori Ishii, Toshiya Arai, Yasuhiro Mukaigawa, Jun'ichi Tagawa, and Yasushi Yagi. Scattering tomography by monte carlo voting. In *Proc. MVA2013*, 2013.
- [2] Kenichiro Tanaka, Yasuhiro Mukaigawa, Yasuyuki Matsushita, and Yasushi Yagi. Descattering of transmissive observation using parallel high-frequency illumination. In *Proc. ICCP2013*, 2013.
- [3] Yi Chang Shih, A Davis, SW Hasinoff, F Durand, and WT Freeman. Laser speckle photography for surface tampering detection. In *Proc. CVPR2012*, pp. 33–40. IEEE, 2012.
- [4] Jan Zizka, Alex Olwal, and Ramesh Raskar. Specklesense: fast, precise, low-cost and compact motion sensing using laser speckle. In *Proc. ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '11, pp. 489–498, 2011.
- [5] 藤居仁, 小西直樹, 李旻哲. レーザー散乱を利用した血流画像化法. *日本レーザー医学会誌*, Vol. 26, No. 3, pp. 266–271, 2005.
- [6] Guy Satat, Christopher Barsi, Ramesh Raskar. Skin Perfusion Photography. In *Proc. ICCP2014*, 2014.
- [7] A. Beer. Bestimmung der absorption des rothen lichts in farbigen flussigkeiten. *Annalen der Physik und Chemie*, Vol. 86, pp. 78–88, 1852.