

デジタル分光ホログラフィーの 3D 再生空間におけるスペックル統計

Speckle statistics in 3D image space of digital holographic 3D imaging spectrometry

○ 齋藤崇浩, 吉森久

○ Takahiro Saito*, Kyu Yoshimori*

岩大院工

*Graduate School of Eng., Iwate Univ.

キーワード：3次元イメージング(3-D imaging), デジタルホログラフィ(Digital holography), 干渉計測(Interferometric measurement), スペックル(Speckle), 統計的解析(Statistical analysis)

連絡先；〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5 岩手大学 工学研究科 電気電子・情報システム
工学専攻 吉森研究室 齋藤崇浩, Tel.: 019-621-6485, E-mail: saitou@ql.cis.iwate-u.ac.jp

1. はじめに

われわれが研究・開発している 3次元(3D)イメージング分光法は、一般的な 3次元多色物体から伝搬する光波に対して、干渉計測と計算処理をおこない、スペクトル成分ごとの 3D 像(分光立体画像)セットを一挙に取得するものである。この研究に関し、これまで 4つの手法を提案している¹⁻⁴⁾。

干渉計測を用いて物体情報を計測した際、再生像に明暗のある斑点模様が現れ、像のコントラストが低下することがある。この斑点模様は干渉雑音(スペックル)と呼ばれ、測定対象の表面粗さなどが原因で発生する。このスペックルのように、再生像を劣化させる要因を雑音という。その他の雑音の要因として、光子雑音や検出器雑音、空気の擾乱、迷光、干渉計の振動などがあるが、これらの問題は注意深くシステムを設計することで無視できるほど小さくすることが可能である

と考えられる。

本稿では、これまでに提案された 3手法²⁻⁴⁾それぞれにおいて取得した分光立体画像内に現れる雑音の統計的性質と、各手法間における雑音の相関関係について評価した結果を報告する。また、それぞれの手法における信号対雑音比(SNR)についても述べる。

2. 原理

本手法の実験系である 2 光波折り畳み干渉計の概念を図 1 に示す。

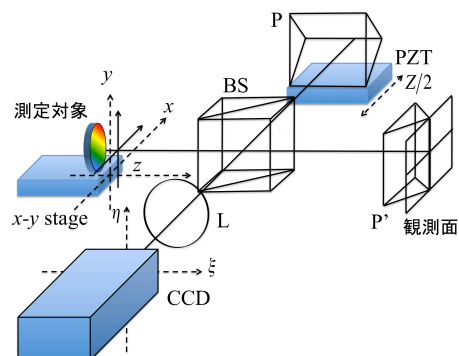


図 1：2 光波折り畳み干渉計の概念

3D イメージング分光法は、まず、2 光波折り畳み干渉計を用いて干渉計測を行い、得られた多量のデータセットから体積型インターフェログラムを生成する。この体積型インターフェログラムに記録された干渉縞の形状により、球面型(Spherical-type: S-type)²⁾、双曲面型(Hyperbolic-type: H-type)³⁾、回転双曲面型(Rotated-Hyperbolic-type: RH-type)⁴⁾の 3 つの手法に分類される。そしてこれらの体積型インターフェログラムに対して、分光処理及び 3D 画像の再生処理を行い、スペクトル成分ごとの 3D 像を得る。

分光立体画像内に現れる雑音について調べるために、得られた再生画像を、まず、再生された測定対象の部分である信号領域と背景領域に分割する。その際、信号領域と背景領域の境界領域を除く。このとき、信号領域—境界領域間、境界領域—背景領域間それぞれにしきい値を設定し、この値と再生画像の画素値を比較することで、信号領域と背景領域を切り出す。

次に、背景領域内の雑音成分の統計的性質を調べるためにガンマ分布を当てはめる。ガンマ分布の確率密度関数は次式で与えられる:

$$P_{I_0}(I_0) \equiv \frac{\left(\frac{m}{\langle I \rangle}\right)^m I_0^{m-1} \exp\left(-m \frac{I_0}{\langle I \rangle}\right)}{\Gamma(m)} \quad (1)$$

式(1)において、 Γ はガンマ関数であり、 I_0 は雑音強度に関する確率変数を、 $\langle I \rangle$ は雑音強度の平均を表す。この式における平均は各領域における画素値 x_i から次式のように与えられる:

$$\langle I \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i = \langle x \rangle \quad (2)$$

ここで n は各領域の画素数である。また、 m はガンマ分布の自由度であり、自由度 m と雑音平均強度 $\langle I \rangle$ が決まればガンマ分布は決定される。自由度 m は以下の式から求めることができる:

$$m = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

式(3)において、 σ^2 は雑音強度の分散を表し、各領域の画素値から次式により求められる:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (x_i - \langle x \rangle)^2 \\ &= \langle (\Delta x)^2 \rangle \end{aligned} \quad (4)$$

次に、3 つの手法によって取得した再生画像に現れる雑音の相関関係を調べるために、各手法間の背景領域に現れる雑音の相関係数を計算する。比較する 2 つの手法の画素値を x_i 、 y_i とすると、相関係数 ρ_{xy} は次式により求められる:

$$\rho_{xy} = \frac{\langle \Delta x \Delta y \rangle}{\sqrt{\langle (\Delta x)^2 \rangle \langle (\Delta y)^2 \rangle}} \quad (5)$$

最後に SNR は次式により求められる:

$$\text{SNR} = \frac{\text{signal}}{\text{noise}} \quad (6)$$

ここで signal は信号強度の平均、noise は σ である。

3. 実験

雑音の統計的性質を調べるために用いたサンプルについて説明する。これらは、LED の光を三角形の端面をもつアクリル棒に導波して作成した面光源を測定対象とし、各手法により取得された再生波長 560 nm における 3 枚のインフォーカス像である。これらの画像を図 2 に示す。

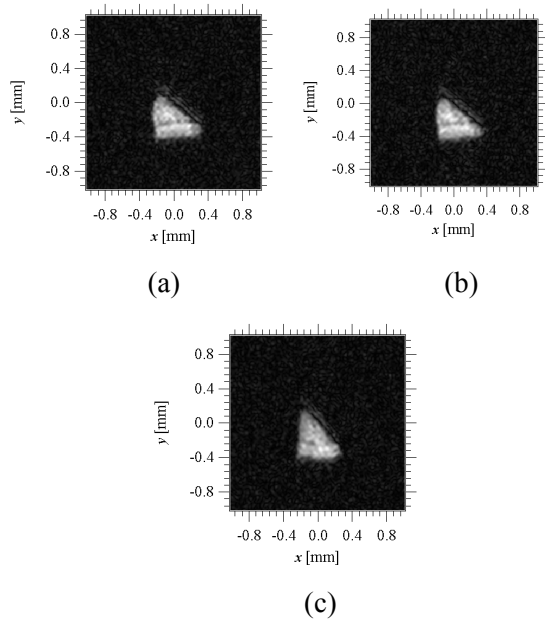


図 2 : 再生波長 560 nm における
インフォーカス像：
(a) S-type 法, (b) H-type 法, (c) RH-type 法

各手法において測定対象の三角形状が再生
できていることがわかる。

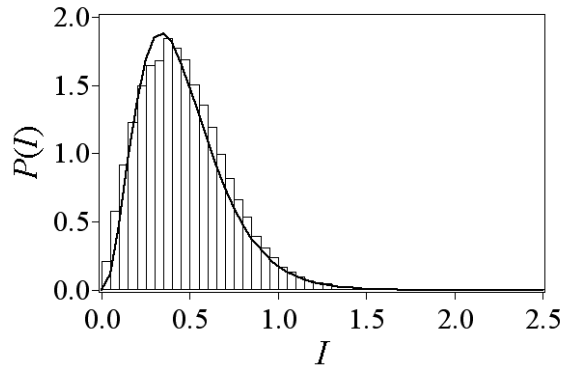
4. 雑音の統計的解析

図 2 で示した各手法の分光立体画像に現
れる雑音について統計的解析を行った結果
を示す。まず各手法において背景領域の雑音
平均強度 $\langle I \rangle$, 分散 σ^2 , 自由度 m を計算した
結果を表 1 に示す。

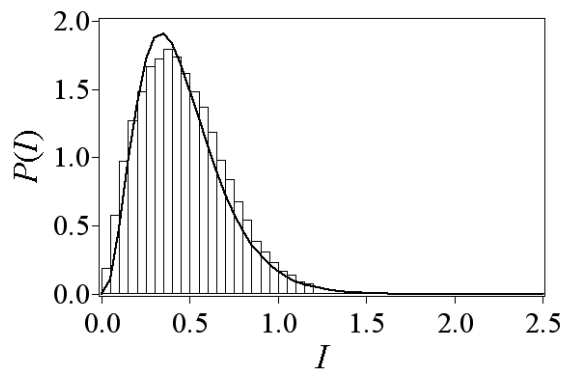
表 1 : 各手法の背景領域における計算結果

手法	平均 $\langle I \rangle$	分散 σ^2	自由度 m
S-type	0.462	0.058	3.69
H-type	0.458	0.056	3.755
RH-type	0.463	0.062	3.45

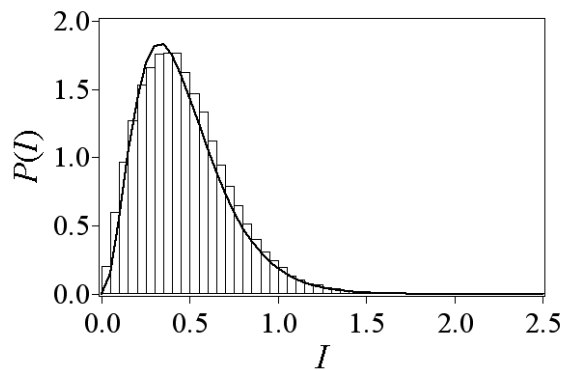
表 1 のパラメータを用いて決定したガンマ
分布の確率密度関数 $P_0(I_0)$ と, 背景領域にお
ける雑音のヒストグラムを比較した結果を
図 3 に示す。



(a)



(b)



(c)

図 3 : 図 2 の分光立体画像の背景領域の雑音
分布のヒストグラムと

フィットしたガンマ分布の比較：

(a)S-type 法, (b)H-type 法, (c)RH-type 法

図 3 より, 両者は良く一致していることか
ら, 背景領域における雑音の統計性はガンマ
分布に従うとみなせることがわかった. 一方,
スペックル強度の統計は, 一般にガンマ分布

に従うことがわかっている⁵⁾。以上のことから、雑音成分の主要因はスペックルと同様な統計的性質をもつことがわかった。

次に、各手法間の背景領域における雑音の相関関係について調べる。各手法間の背景領域における相関係数を表2に示す。

表2：各手法間の背景領域における相関係数

手法	S-type	H-type	RH-type
S-type	1	0.028	0.046
H-type	0.028	1	0.008
RH-type	0.046	0.008	1

表2の結果から各手法間の背景領域における相関係数は 10^{-2} のオーダーであるので、無相関とみなせることがわかった。この結果は、各手法で取得された分光立体画像の平均をとることにより、雑音の低減とそれに伴うSNRの向上が見込めることを示唆する。

最後に各手法のSNRを評価した結果を表3に示す。

表3：各手法におけるSNR

手法	S-type	H-type	RH-type
SNR	6.952	7.42	7.252

表3からSNRは、いずれの手法においても同じオーダーであることがわかった。

5. まとめ

3Dイメージング分光法を用いて取得した分光立体画像の背景領域に現れる雑音の統計的性質を調べた。背景領域における雑音の平均と分散及び自由度から決定されるガンマ分布の確率密度関数と、背景領域における雑音のヒストグラムを比較したところ良い

一致がみられた。このことから、背景領域に現れた雑音はスペックルと同様な統計的性質をもつことがわかった。また、各手法間の背景領域に相関はほとんどみられないことがわかった。このことは、各手法で取得された分光立体画像の平均をとることにより、雑音の低減とそれに伴うSNRの向上が見込めることを示唆する。最後に、それぞれの手法におけるSNRを求めた。その結果SNRは、いずれの手法においても同じオーダーであることがわかった。

本研究の一部は、科学研究費基盤研究(c)25390087の助成を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) K. Yoshimori: Interferometric spectral imaging for three-dimensional objects illuminated by a natural light source, *J. Opt. Soc. Am.* **A18**, 765/770 (2001)
- 2) S. Teeranutrannont and K. Yoshimori: Digital holographic three-dimensional imaging spectrometry, *Appl. Opt.* **52**, A388/A396 (2013)
- 3) T. Hashimoto, A. Hirai, K. Yoshimori: Fullyinterferometric three-dimensional imaging spectrometry using hyperbolic-type volume interferogram, *Appl. Opt.* **52**, 1497/1504 (2013)
- 4) M. Obara and K. Yoshimori: Coherence Three-Dimensional Imaging Spectrometry Based on Measurement of Rotated-Hyperbolic Volume Interferograms, *Opt. Rev.* **21**, 479/485 (2014)
- 5) J.C.Dainty(ed.): *Topics in Applied physics: Laser Speckle and Related phenomena*, 2nd ed., 51/54, Springer-Verlag Berlin Germany (1984).