

## 双曲線型体積インターフェログラムに基づく

### 3次元干渉分光イメージングの検討

## A study of interferometric, 3-D imaging spectroscopy based on hyperbolic-type volume interferogram

小原正樹, 吉森久

Masaki Obara, Kyu Yosimori

岩手大学大学院 工学研究科 情報システム工学専攻

Graduate School of Engineering, Iwate University

キーワード: 3次元分光イメージング(3-D imaging spectroscopy),

双曲線型インターフェログラム(hyperbolic-type interferogram),

空間コヒーレンス関数(spatial coherence function), 合成開口(aperture synthesis technique)

連絡先: 〒020-8551 盛岡市上田 4 3 5 岩手大学 情報システム工学科 吉森研究室  
吉森久, Tel.: (019) 621-6485, Fax.: (019)621-6485, E-mail.: yosimori@cis.iwate-u.ac.jp

#### 1. はじめに

光の干渉計測によって物体の情報取得を行うコヒーレンスイメージングの分野において、われわれは特別な光源や結像素子を用いず、光の干渉現象のみを利用して、空間的にインコヒーレントな物体の3次元形状と物体上の各点における連続スペクトルを同時に再生することが可能な光干渉イメージングを実現するための研究を進めてきた。従来のわれわれの研究<sup>1)</sup>では、2光波折り畳み干渉計から合成開口処理により同心円状のインターフェログラム取得し光源像の再生を行ってきたが、今回は合成開口の手法を変え、双曲線型のインターフェログラム<sup>2)</sup>を取得し、そこから光源像を再生可能であることを計算機実験によって確認できたので報告する。

#### 2. 原理

3次元情報と分光情報を同時に取得するための概念図を図1に示す。

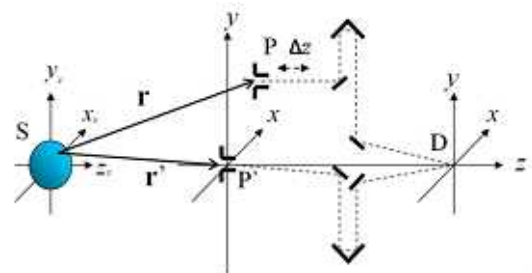


図1. 概念図

光源分布  $S$  は奥行きを有する多色光源分布である。この光源分布の1点から放たれる光が2つのピンホール  $P, P'$  それぞれを通過し、観測点  $D$  において重ね合わせられて観測される。また、ピンホール  $P, P'$  は3次元空間を自由に移動可能であり、ピンホール  $P$  から観測点  $D$  までの距離およびピンホール  $P'$  から観測点  $D$  までの距離はそれぞれ等しいとする。

ここで、光源分布のある 1 点  $\mathbf{r}_s$  に着目し、各ピンホールは  $P: (x, y, z_0 + \Delta z)$ ,  $P': (0, 0, z_0)$  の位置にあるとする。このとき観測面 D において観測される空間コヒーレンス関数  $\Gamma(P', P)$  は、

$$\begin{aligned} \Gamma(P', P) &= \Gamma(0, 0, z_0; x, y, z_0 + \Delta z) \\ &\propto \exp[ik\Delta z] \exp[ik_x x + ik_y y] \\ &\quad \times \exp\left[ik \frac{x^2 + y^2}{2z}\right] d^3 r_s \end{aligned} \quad (2.1)$$

である。

式(2.1)の空間コヒーレンス関数  $\Gamma(P', P)$  は Winner-Khinchine の定理より相互スペクトル密度  $W(P', P; \omega)$  を用いて、

$$\Gamma(P', P) = \int_0^\infty W(P', P; \omega) d\omega \quad (2.2)$$

と表わされる。ここで、 $z_s \ll z_0$  と仮定すると相互スペクトル密度  $W(P', P; \omega)$  は、光路差  $\Delta z = 0$  でのピンホール位置を表わす  $P'': (x, y, z_0)$  を用いて、

$$W(P', P; \omega) = \exp[ik\Delta z] W(P', P''; \omega) \quad (2.3)$$

と表わされる。ここで、 $\omega = ck$  である。この相互スペクトル密度  $W(P', P; \omega)$  は光源の 3 次元スペクトル強度分布  $I(\mathbf{r}_s; \omega)$  を用いて、

$$\begin{aligned} W(P', P; \omega) &= \int I(\mathbf{r}_s; \omega) \exp[ik\Delta z] \\ &\quad \times \exp[ik_x x + ik_y y] \\ &\quad \times \exp\left[ik \frac{x^2 + y^2}{2z}\right] d^3 r_s \end{aligned} \quad (2.4)$$

と表わされる。式(2.3)を式(2.2)に代入することにより空間コヒーレンス関数と相互スペクトル密度の関係は、

$$\begin{aligned} \Gamma(0, 0, z_0; x, y, z_0 + \Delta z) &= \int_0^\infty W(P', P''; \omega) \exp[ik\Delta z] d\omega \end{aligned} \quad (2.5)$$

と表わされる。取得されたインターフェロ

グラムを光路差  $\Delta z$  に関してフーリエ変換すればスペクトルごとの相互スペクトル密度を得ることができる。次に、取得した相互スペクトル密度から光源像を再生するためには再生する距離  $z$  を指定して次の関数、

$$Y(x, y, z; k) = \exp\left[-ik \frac{x^2 + y^2}{2z}\right] \quad (2.6)$$

を乗算する。これは式(2.4)の第 4 項をキャンセルする。そして、式(2.4)と式(2.6)の関数の積を  $x$  および  $y$  に関してフーリエ変換することで、光源のスペクトル強度分布  $I(\mathbf{r}_s; \omega)$  を回復する。これらの手順をスペクトル  $k$  および距離  $z$  を変えながら行うことにより、測定対象である多色光源分布の多重分光立体映像を取得することができる。

### 3. 実験系への適用

次に、空間コヒーレンス関数を測定するために利用する 2 光波折り畳み干渉計について説明する。今回想定した 2 光波折り畳み干渉計を図 2 に示す。

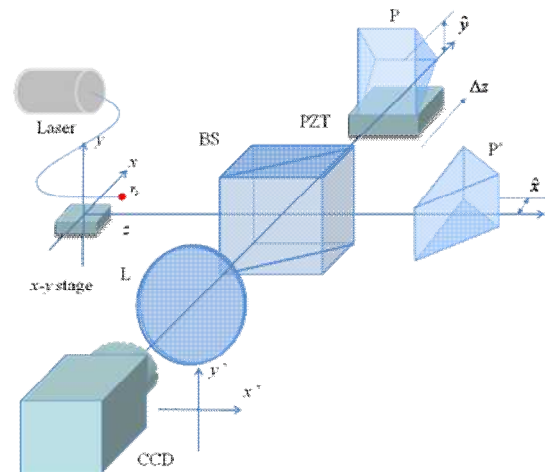


図 2.2 光波折り畳み干渉計

プリズム P と P' はたがいに直交しており、CCD は lens によってプリズムのエッジに焦点が合わされているとする。また piezoアクチュエーター (PZT) はプリズム P

方向に伝搬した光波に、光路差  $\Delta z$  を生じさせるために用いられる。光路差  $\Delta z = 0$  の時、光源からの距離が等しいとする。また、測定対象である光源分布  $S$  は  $x-y$  stage に乗せ、 $x$  軸方向および  $y$  軸方向に移動させることで、各ステップのインターフェログラムを測定する。

図 2 の 2 光波折り畳み干渉計ではプリズムにより光波が反射反転される。このことにより  $x-y$  stage の移動により入射光と反転され返される光波は等価ではなくなる。 $x-y$  stage の光軸から  $x$  軸方向に  $\hat{x}$  移動したとすると、 $(x, y)$  に入射した光波は図 3(a) のようになり、 $(2\hat{x} - x, y)$  の位置に反転され返される。 $x-y$  stage の光軸から  $y$  軸方向に  $\hat{y}$  移動したとすると、 $(x, y)$  に入射した光波は図 3(b) のように  $(x, 2\hat{y} - y)$  の位置に反転され返される。

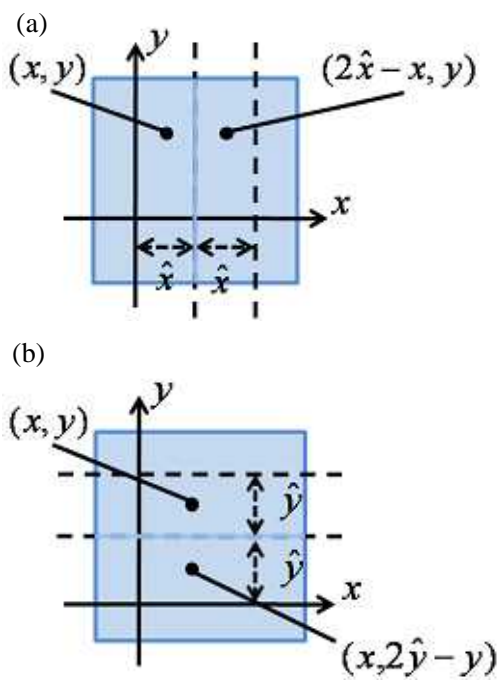


図 3.  $x-y$  stage の移動とプリズムにより反転される波面の関係  
しかし、CCD で観測される座標軸はプリ

ズム  $P'$  においては地面と垂直なエッジにより  $x$  軸に反転、プリズム  $P$  においては地面と平行なエッジにより  $y$  軸に反転している。

従って、CCD 面での座標軸と一致させるためプリズム  $P'$  においては、

$$P': (2\hat{x} - x, y) \rightarrow (x - 2\hat{x}, y)$$

プリズム  $P$  においては、

$$P: (x, 2\hat{y} - y) \rightarrow (x, y - 2\hat{y})$$

と変化する。これが 2 光波折り畳み干渉計におけるピンホールの位置に該当する。

したがって図 2 の 2 光波折り畳み干渉計において CCD で測定される空間コヒーレンス関数は、

$$\begin{aligned} \Gamma(x - 2\hat{x}, y, z_0; x, y - 2\hat{y}, z_0 + \Delta z) \\ \propto A \exp[ik\Delta z] \exp\left[ik \frac{2\hat{x}(x - x_s) - 2\hat{y}(y - y_s)}{z}\right] \\ \times \exp\left[-ik \frac{2\hat{x}^2 - 2\hat{y}^2}{z}\right] \end{aligned} \quad (3.1)$$

この測定される空間コヒーレンス関数は  $x-y$  stage 上に固定された基準座標系から見たものである。CCD 面ではインターフェログラムとして観測しているため CCD 面に新たに座標系  $(x', y')$  を取った方がデータ処理上便利である。よって、座標変換の条件式  $(x', y') = (x - \hat{x}, y - \hat{y})$  を用いることにより式(3.1)は、

$$\begin{aligned} \Gamma(x' - \hat{x}, y' + \hat{y}, z_0; x' + \hat{x}, y' - \hat{y}, z_0 + \Delta z) \\ \propto A \exp[ik\Delta z] \exp\left[ik \frac{2\hat{x}(x' - x_s) - 2\hat{y}(y' + y_s)}{z}\right] \end{aligned} \quad (3.2)$$

と表わされ、これがインターフェログラムとして観測された空間コヒーレンス関数である。

式(3.2)は 5 つの変数を有する 5 次元のインターフェログラムである。5 次元のインターフェログラムでは扱いはらうので次元を

下げるために合成開口処理を導入する.

$x = \hat{x}, y = -\hat{y}$ に対応する位置の画素値を取得し, $2\hat{x} = X, -2\hat{y} = Y$ に対応した位置へ配列すると,

$$\Gamma(0, 0, z_0; X, Y, z_0 + \Delta z) \propto A \exp[ik \Delta z] \exp[ik_x X + ik_y Y] \times \exp\left[ik \frac{X^2 + Y^2}{2z}\right] \quad (3.3)$$

となり,式(2.10)と等価で図 4(a)のようなインターフェログラムとなる. また, $x = \hat{x}, y = \hat{y}$ に対応する位置の画素値を取得し, $2\hat{x} = X, 2\hat{y} = Y$ に対応した位置へ配列すると,

$$\Gamma(0, -Y, z_0; X, 0, z_0 + \Delta z) \propto A \exp[ik \Delta z] \exp[ik_x X - ik_y Y] \times \exp\left[ik \frac{X^2 - Y^2}{2z}\right] \quad (3.4)$$

となり図 4(b)のようなインターフェログラムとなる.

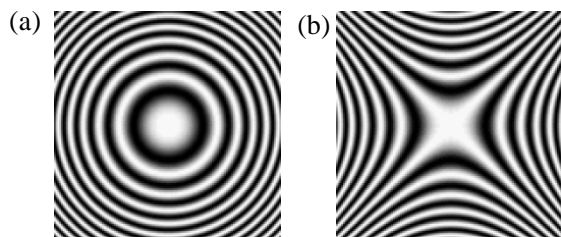


図 4. 単色点光源を用いた場合:

- (a)同心円状のインターフェログラム
- (b)双曲線型のインターフェログラム

式(3.3)と式(3.4)は第 4 因子の符号が異なっているだけでどちらも光源の情報を含んでいるので双曲線型のインターフェログラムから再生が可能であると考えられる.

#### 4. 数値計算

本報告では 2 光波折り畳み干渉計を使用したと想定して数値計算を行った.図 5 は今回想定した実験系のモデルである.CCD か

ら  $z=100\text{mm}$  の位置に図 6(a)を, $z=130\text{mm}$  の位置に図 6(b)を設置した.また,各点光源のスペクトルは,赤色の点光源を  $\lambda_1=640\text{nm}$ ,緑色の点光源を  $\lambda_2=543.5\text{nm}$  として設定した.また光源分布は  $4\text{mm} \times 4\text{mm}$  で,各点はそれぞれ中心から右もしくは左へ  $0.15\text{mm}$ ,上もしくは下へ  $0.15\text{mm}$  ずれており,横または縦に並んだ点同士の距離は  $0.3\text{mm}$  である.

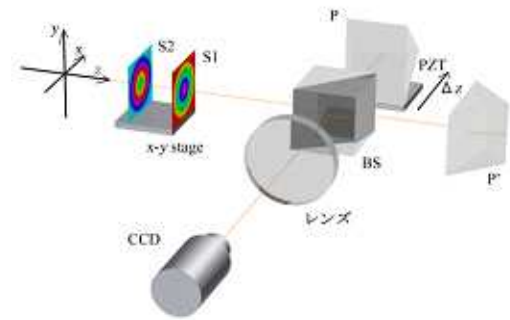
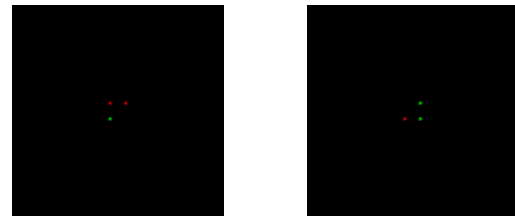


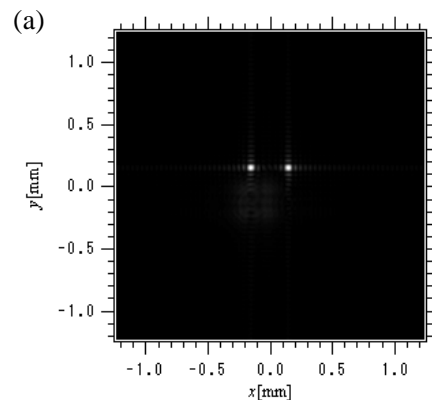
図 5. 計算機実験にて想定した実験系のモデル



(a)  $S_1$  の光源分布 (b)  $S_2$  の光源分布

図 6. 設定した光源分布

そして,図 7 は距離  $z=100\text{mm}$ ,波長  $\lambda_1=640\text{nm}$  で再生したものである.どちらも指定した波長および再生距離において正確に再生されている.



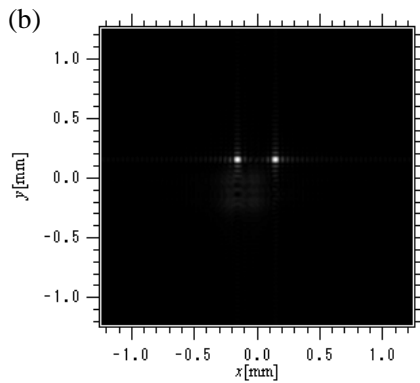


図 7.  $z=100\text{mm}$ ,  $\lambda_1=640\text{nm}$  での再生結果  
 (a)同心円状インターフェログラムから再生  
 (b)双曲線型インターフェログラムから再生  
 次に,図 7(b)の再生像における各方向の分解能を図 8 に示す.どの分解能も点光源がある位置においてピークがあらわれている.

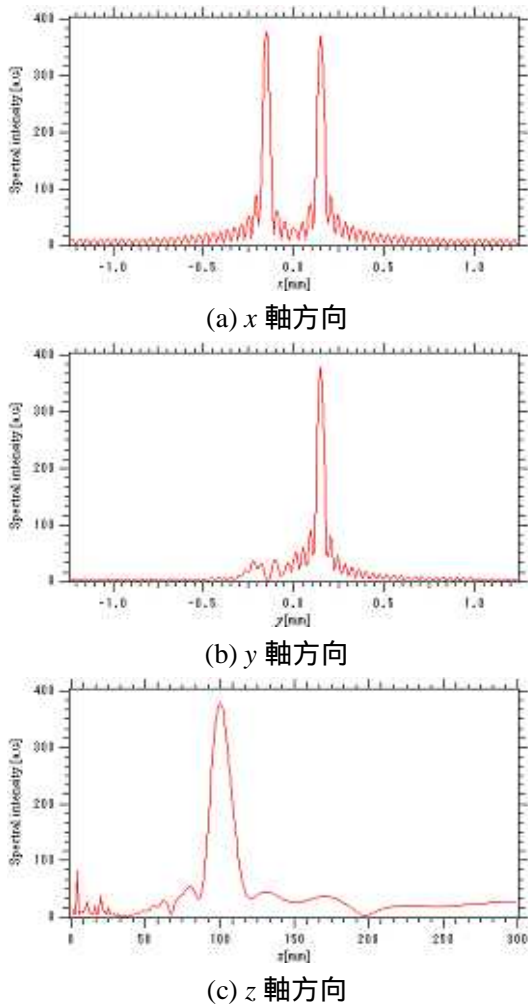


図 8. 図 7(b)の再生結果に関する分解能

## 5.まとめ

本報告では,2 光波折り畳み干渉計を利用して双曲線型インターフェログラムを取得し,それをういて光源像が再生可能であることを計算機による数値計算により確認した.再生結果においても従来の方法と同様な結果が取得可能であることがわかった.

このことから,双曲線型インターフェログラムは従来の伝搬光の波面形状が記録されたインターフェログラムと同様の情報を含んでいることがわかる.

そこで,今後の課題は本手法の実験的確認である.

## 謝辞

本研究の一部は,光科学技術研究振興財団の平成 13 年から 14 年の研究助成事業および文部科学省の科学研究費補助金(15360024)により助成され行われました.ここに感謝の意を表します.

## 参考文献

- 1) Kyu Yoshimori, "Passive digital multispectral holography based on synthesis of coherence function," Proc. of SPIE Holography 2005 **6252** pp.625221-1- 625221-4(2005)
- 2)小原正樹,吉森久:"双曲線型インターフェログラムからの分光立体映像再生" Optics & Photonics Japan 日本光学会年次学術講演予稿集,pp.90-91(2007)