

H26 journal seminar

6/25 Ogawa

Klaus Körner, Giancarlo Pedrini, Igor Alexeenko, Tilo Steinmetz, R. Holzwarth, and W. Osten, “Short temporal coherence digital holography with a femtosecond frequency comb laser for multi-level optical sectioning”, Optics Express **20**, 7237 (2012)

ホログラフィ

①記録

2つの光(物体光 O と参照光 R)の干渉縞を記録

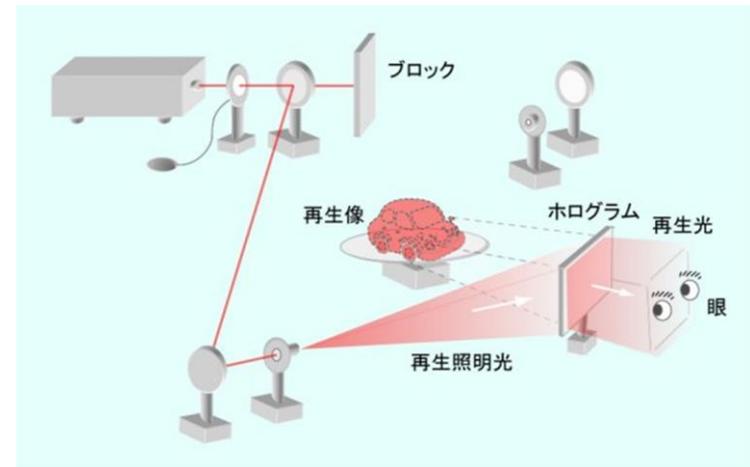
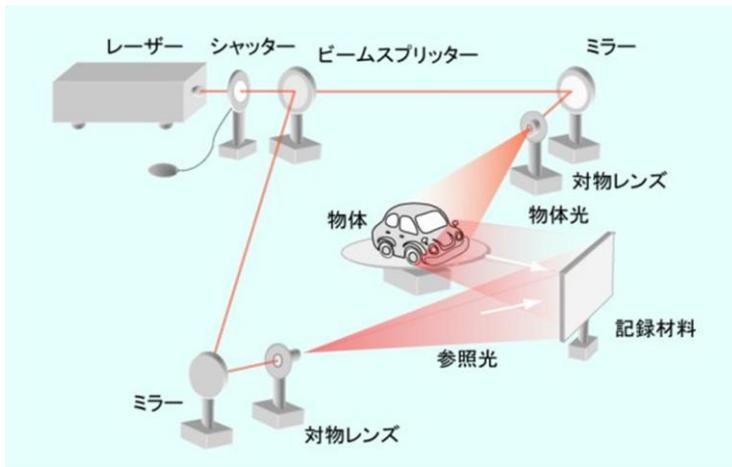
$$I = (O + R)^2 = |O|^2 + |R|^2 + 2RO$$

②再生

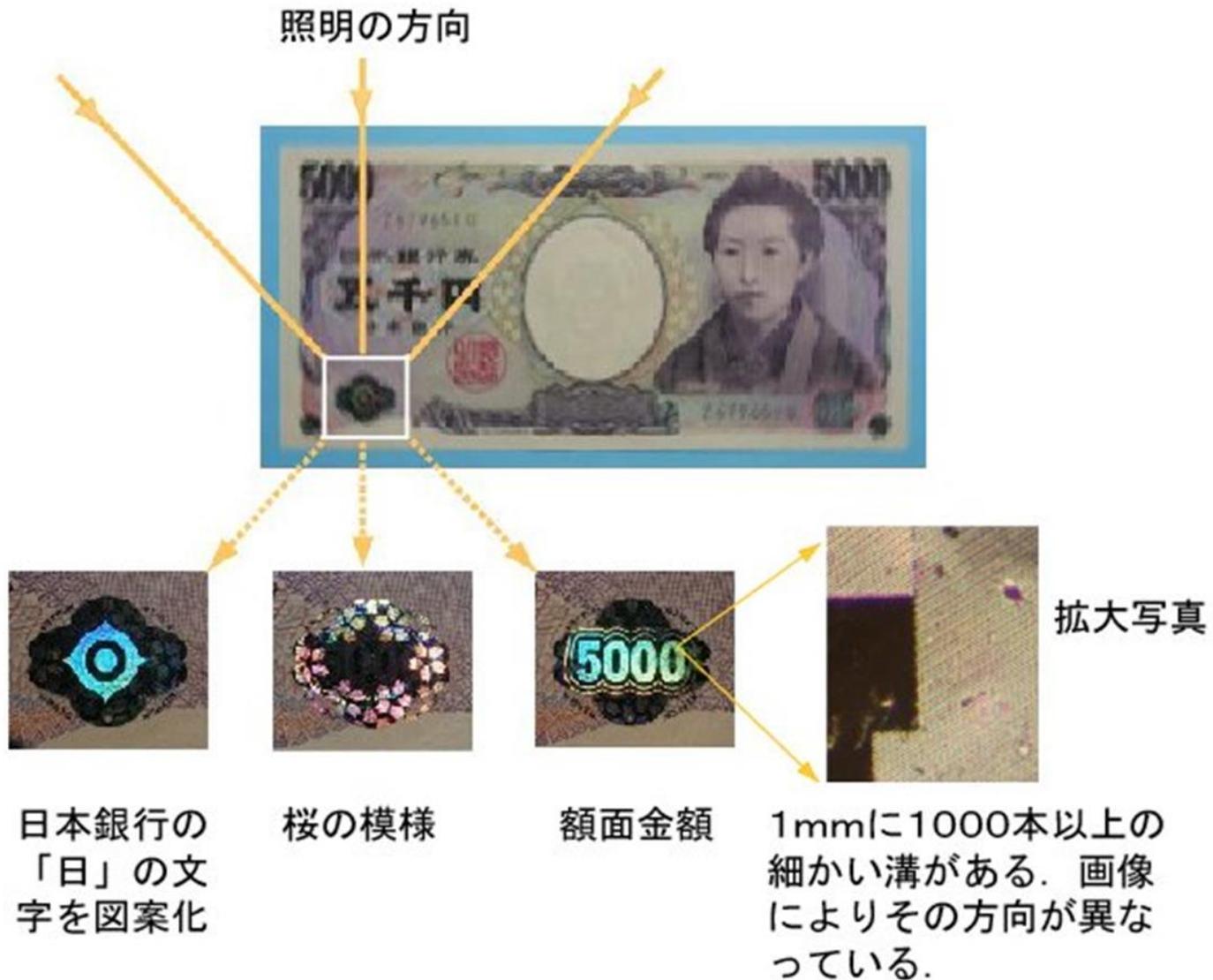
レイリーゾンマーフェルトの式

$$\iint g(x', y', 0) \frac{1}{r'} e^{\frac{i2\pi r'}{\lambda} z} \left(\frac{1}{2\pi r'} + \frac{1}{i\lambda} \right) dx' dy' \text{ をもとに}$$

$$g(x, y, z) = F^{-1}\{G(u, v; 0)\exp[i2\pi w(u, v)z]\}$$



ホログラフィ

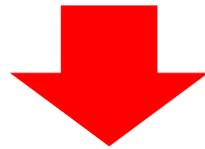


イントロダクション

＜デジタルホログラフィによる形状測定＞

低コヒーレンスレーザーを用いた場合

1枚のホログラムから1枚の断面画像しか得られない



FC-レーザーを用いると・・・

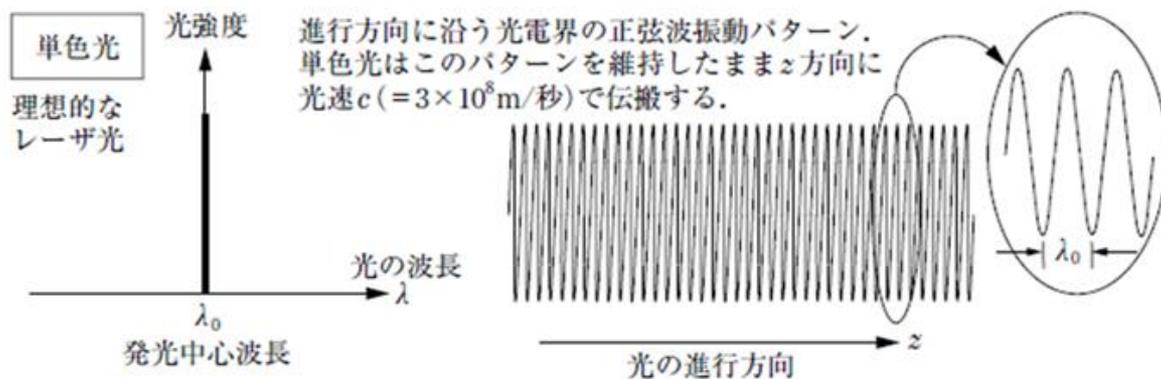
1枚のホログラムから複数の断面画像が得られる

基礎知識

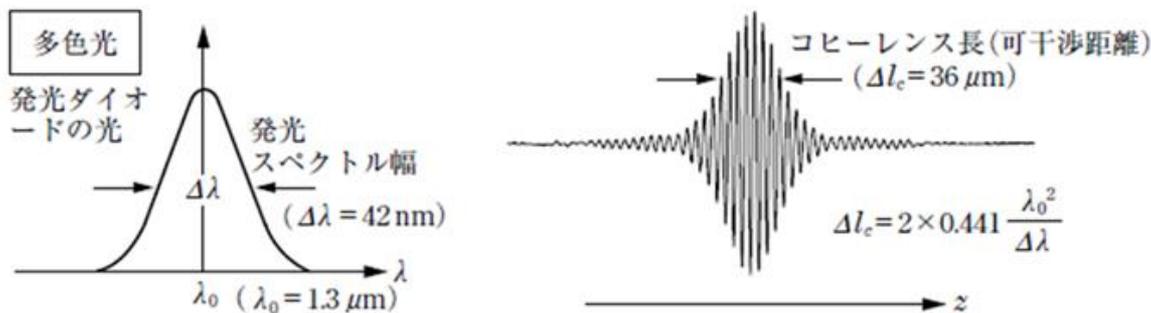
<低コヒーレンスレーザーとは>

コヒーレンス長
干渉縞を得ることが
できる最大の光路差

コヒーレンス長が長い
= 大きな光路差でも
鮮明な干渉縞が得ら
れる。



(a) 理想的なレーザー光(単色光)



(b) 多色光(時間コヒーレンスの低い光)

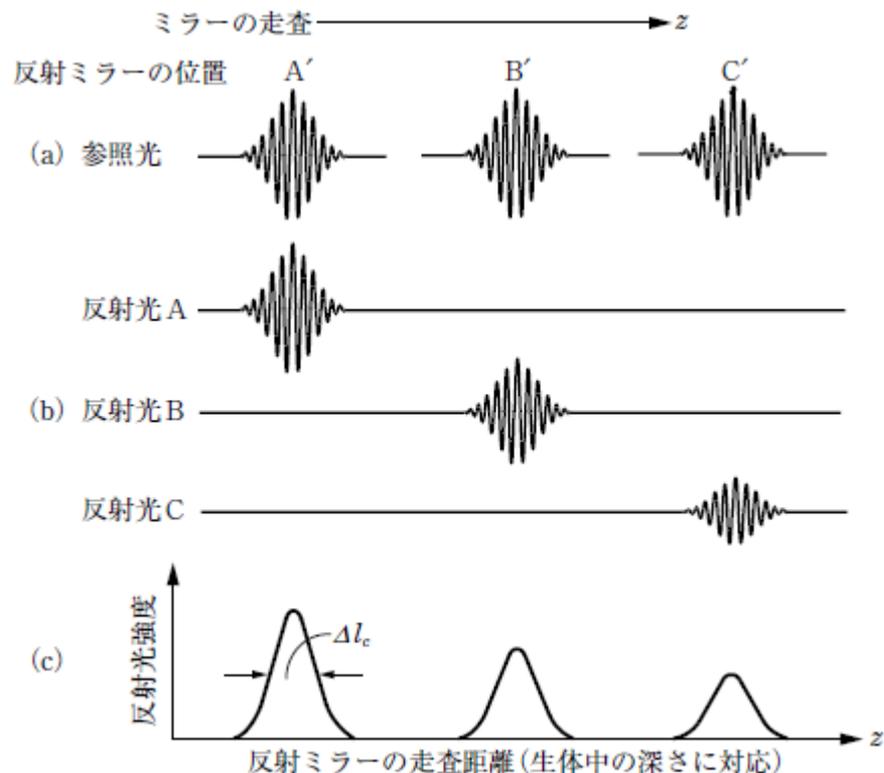
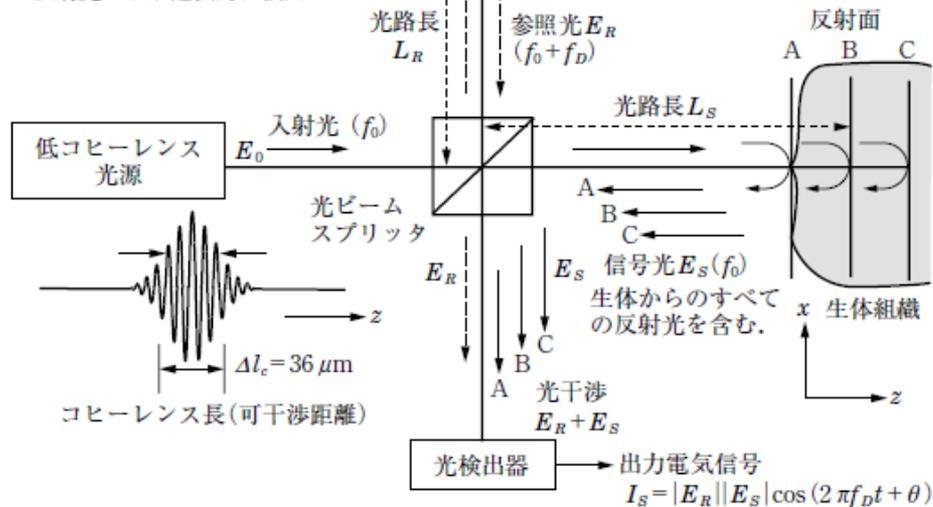
低コヒーレンス光干渉計

ミラーを速度 v で移動する。
 参照光が受ける
 トップラシフト周波数

$$f_D = \frac{2v}{\lambda_0}$$

低コヒーレンス光干渉の特長

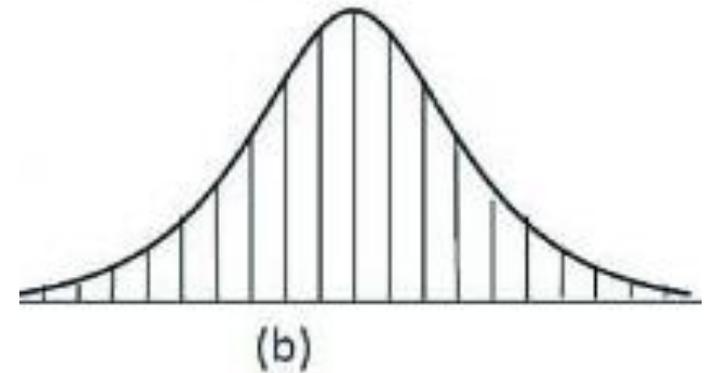
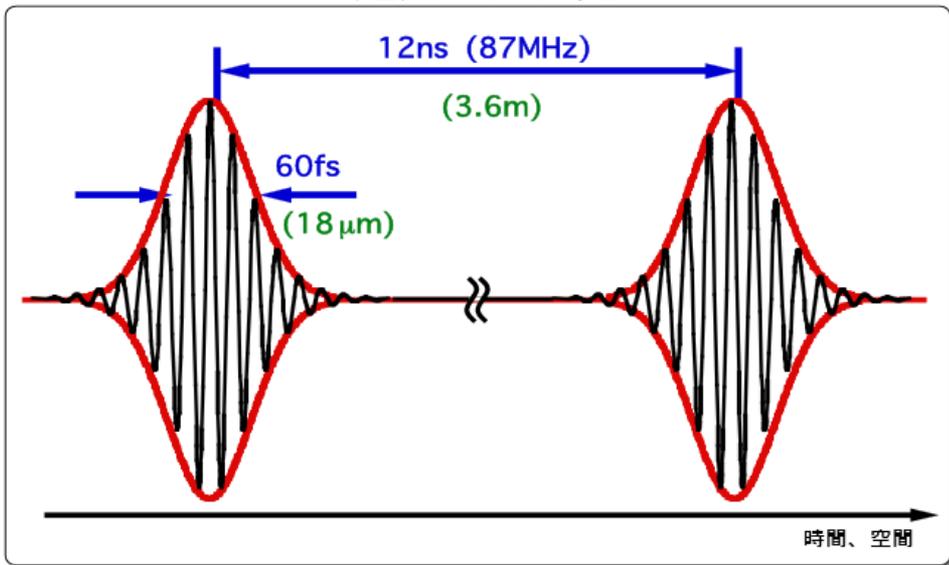
反射ミラーが位置 B' にあり、 $|L_R - L_S| < \Delta l_c$ であれば、生体組織中の反射面 B からの反射光のみが選択的に検出される。



FC-レーザー

FC-レーザーから出力されるレーザー光は、時間領域において非常に安定した高繰返しのモード同期超短光パルス列を示す。一方、周波数領域では、多数の安定な光周波数モード列がモード同期周波数の間隔で規則的に並んだ離散スペクトル構造を有しています。

超短パルス光



セットアップ

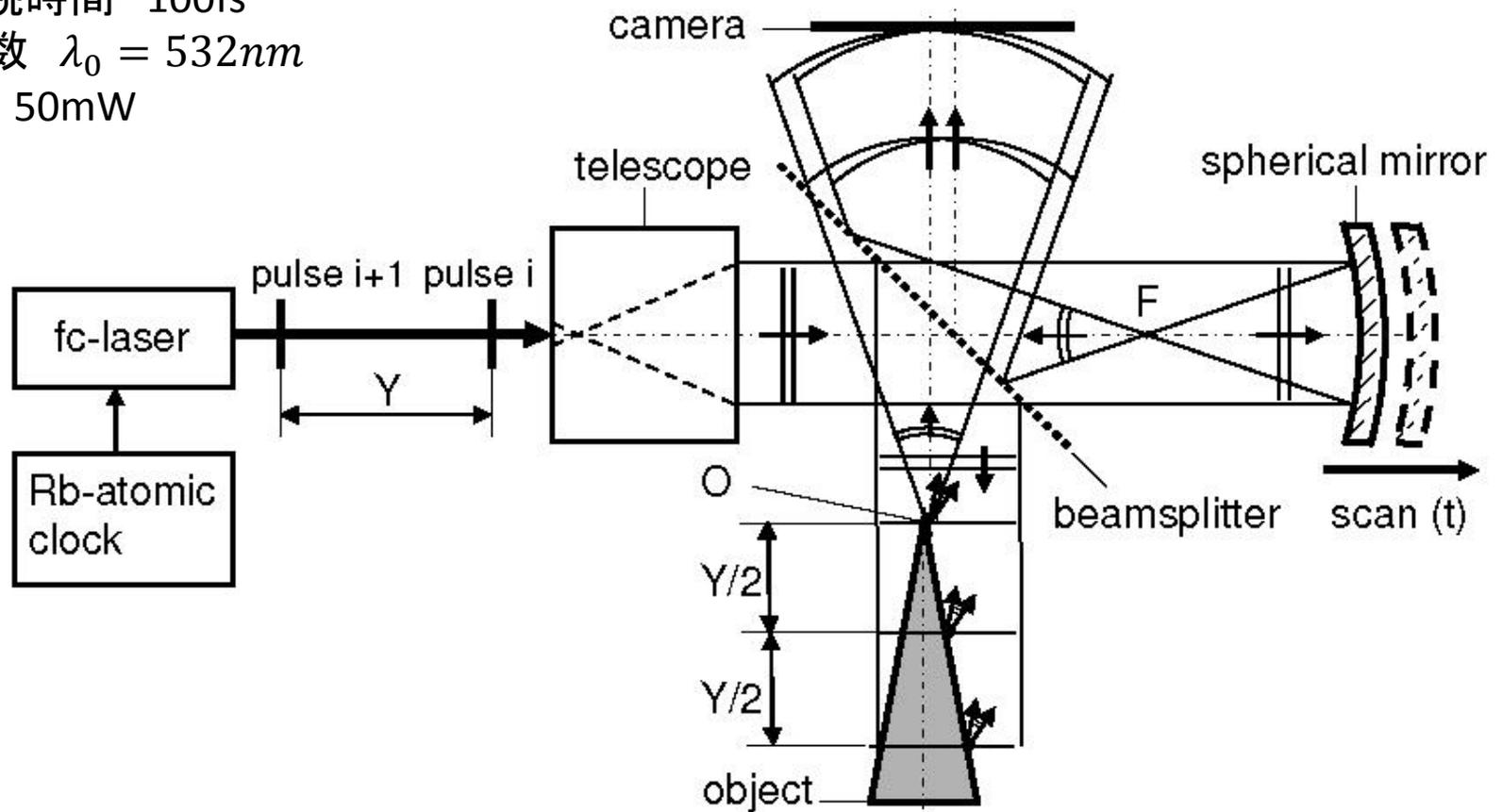
パルス間隔 $\Delta\nu_{fc} = 5.994\text{GHz}$ ($Y = 50\text{mm}$)

パルス幅 $\Delta\nu = 10\text{THz}$ ($\Delta\lambda \approx 10\text{nm}$)

パルス持続時間 100fs

中心周波数 $\lambda_0 = 532\text{nm}$

出力電力 50mW



検出位置での強度

$$\begin{aligned} I(Q) &= I_R(Q) + 2 \int_{A,A'} \sqrt{I(P,Q)} \sqrt{I(P',Q)} \operatorname{Re}\{\gamma[(d_{SPQ} - d_{SP'Q})/c]\} dA dA' \\ &+ 2\sqrt{I_R(Q)} \int_A \sqrt{I(P,Q)} \operatorname{Re}\{\gamma[(d_{SRQ} - d_{SPQ})/c]\} dA \end{aligned} \quad (1)$$

P: 物体面上の点

Q: CCD面上の点

$I_R(Q)$: Qでの参照波の強度

第2項: 物体の異なる点PとP'からくる光の干渉

$d_{SPQ} - d_{SP'Q}$: PとP'で反射された2つの光の光路差

$\operatorname{Re}\{\gamma\}$: 複素コヒーレンス度の実部

dA, dA' : PとP'上の微小面積

第3項: 物体光と参照光との干渉

$\operatorname{Re}\{\gamma\} \neq 0$ のとき干渉する

ホログラフィの再構成には第3項のみが関係

複素コヒーレンス度

$$\text{Re}\{\gamma(\tau)\} = |\gamma(\tau)| \cos\{\alpha(\tau) - 2\pi(d_{SRQ} - d_{SPQ})/\lambda_0\} \quad (2)$$

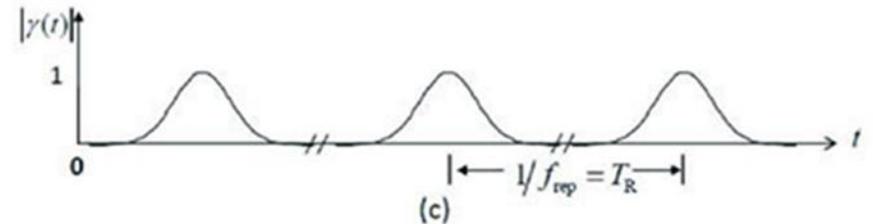
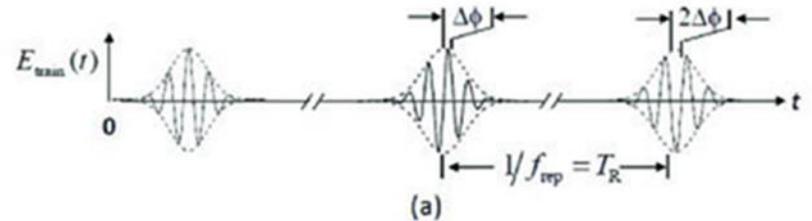
$$\tau = (d_{SRQ} - d_{SPQ})/c$$

$|\gamma(\tau)|$: 干渉縞のコントラスト

$2\pi(d_{SRQ} - d_{SPQ})/\lambda_0$: 光路差による位相

λ_0 : 中心波長

$|\gamma(\tau)| \neq 0$ のとき干渉する



干渉縞のコントラスト

$$|\gamma(\tau)| \propto |FT\{S(\nu)\}| = \left| FT\{E(\nu - \nu_0)\} \otimes \sum_{n=-N}^N \delta\left(\tau - \frac{n}{\Delta\nu_{fc}}\right) \right| \quad (3)$$

$E(\nu - \nu_0)$: スペクトル幅のエンベロープ

$\nu_0 = c/\lambda_0$: 中心周波数

$\Delta\nu_{fc}$: FC-レーザーのコム間隔

n : 整数

パルス間では $|\gamma(\tau)| = 0$

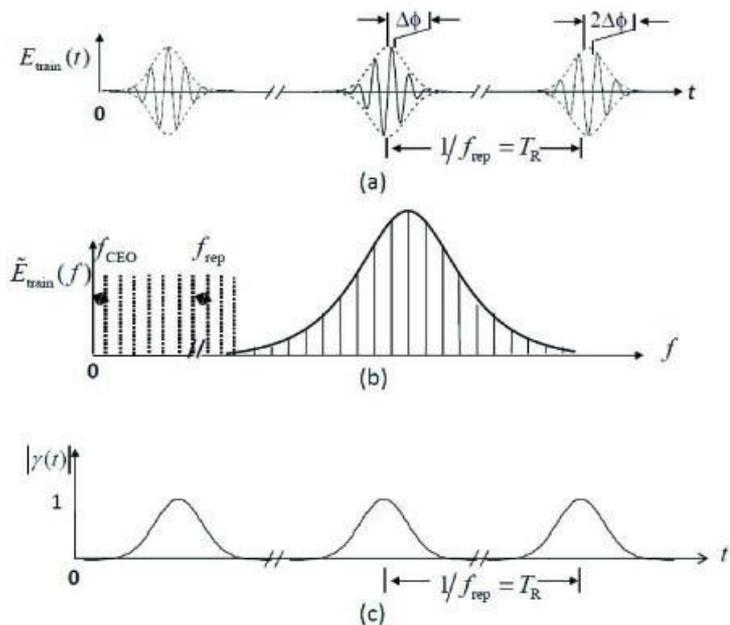
空間パルス間隔を $Y = c/\Delta\nu_{fc}$ とすると、

$\delta(0)$ となる条件(干渉が起こる条件)は

$$\tau = n/\Delta\nu_{fc}$$

$\tau = (d_{SRQ} - d_{SPQ})/c$ より

$$d_{SRQ} - d_{SPQ} = nY$$



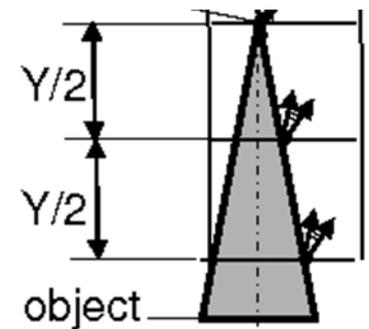
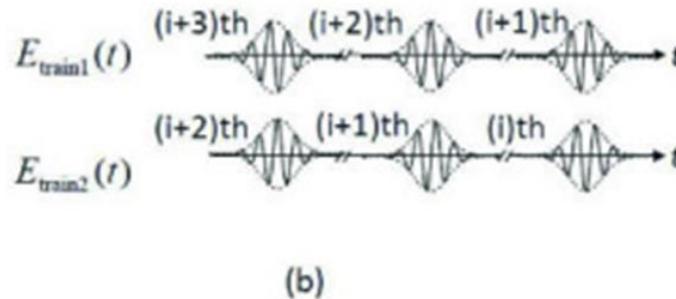
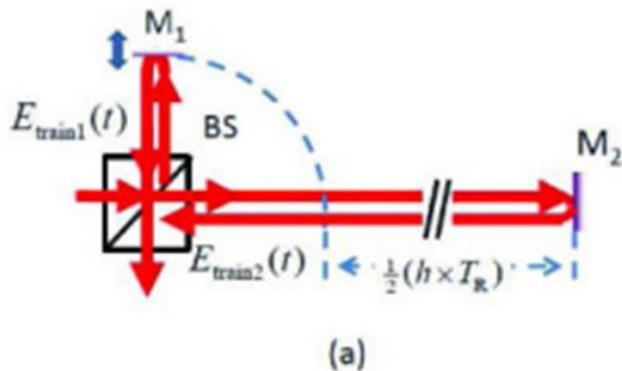
光路差が nY のときのみ干渉が起こる

原理のまとめ

FC-レーザーを用いると、光路差が0のときだけでなく nY のときも干渉が起こる。



1つのホログラムを再構成することで軸方向に $nY/2$ だけ離れた別の部分の画像も得られる。



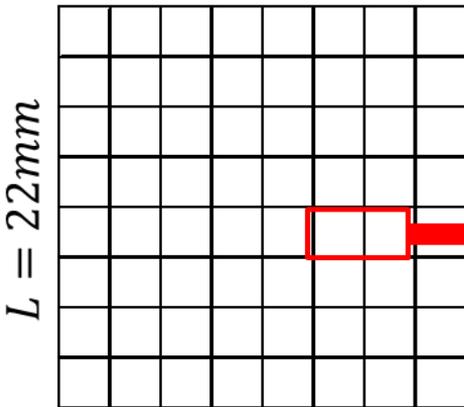
検出器条件

開口数 $NA = L/z = 0.044$

横方向の分解能 $R_L = \lambda_0/NA = 12\mu m$

深さ方向の分解能 $DF = \lambda_0/NA^2 = 274\mu m$

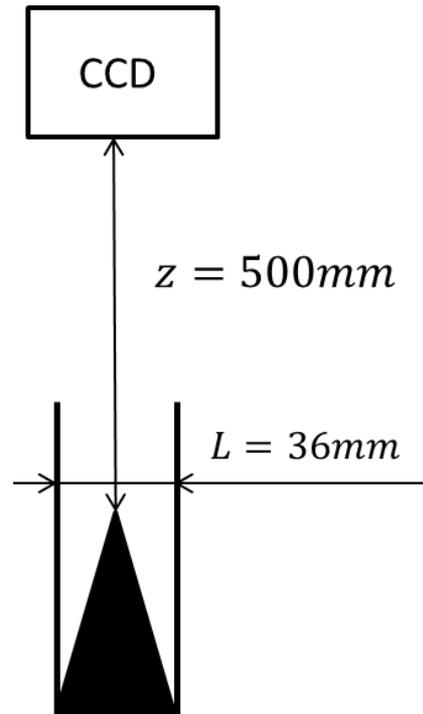
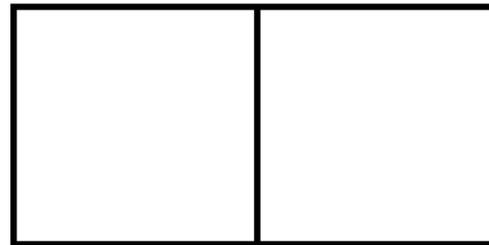
CCDカメラ (SVS16000)
4896 × 3280画素



$L = 22mm$

$\Delta = 7.4\mu m$

$\Delta = 7.4\mu m$



エイリアシングのない再構成が可能

(サンプリング定理を満たすあまりの無い画像)

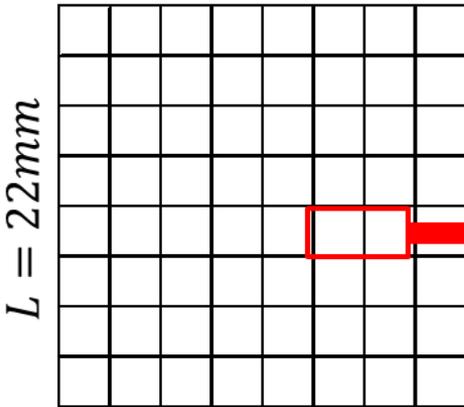
検出器条件

開口数 $NA = L/z = 0.044$

横方向の分解能 $R_L = \lambda_0/NA = 12\mu m$

深さ方向の分解能 $DF = \lambda_0/NA^2 = 274\mu m$

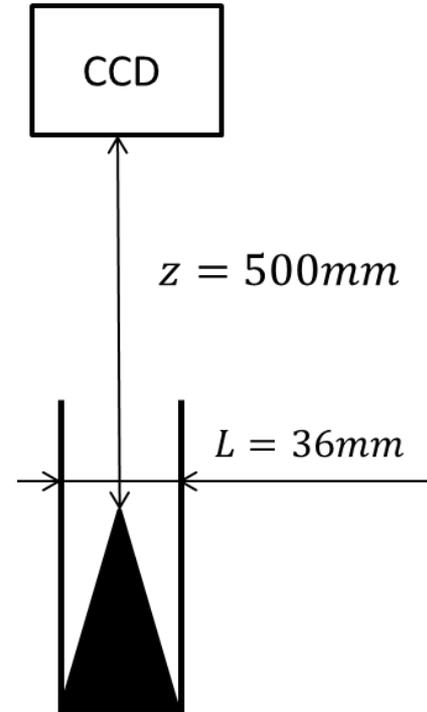
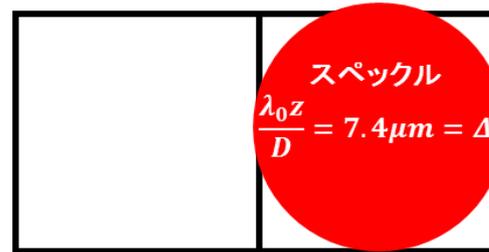
CCDカメラ (SVS16000)
4896 × 3280画素



$L = 22mm$

$\Delta = 7.4\mu m$

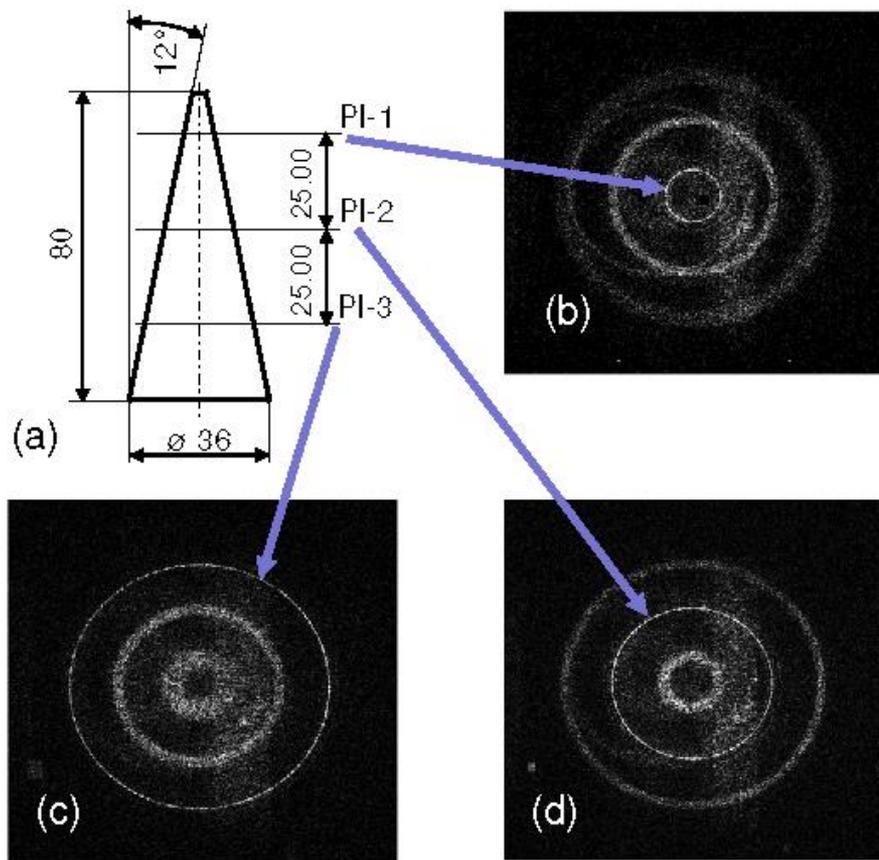
$\Delta = 7.4\mu m$



エイリアシングのない再構成が可能

(サンプリング定理を満たすあまりの無い画像)

1個のホログラムの再構成により 得られた3つの画像

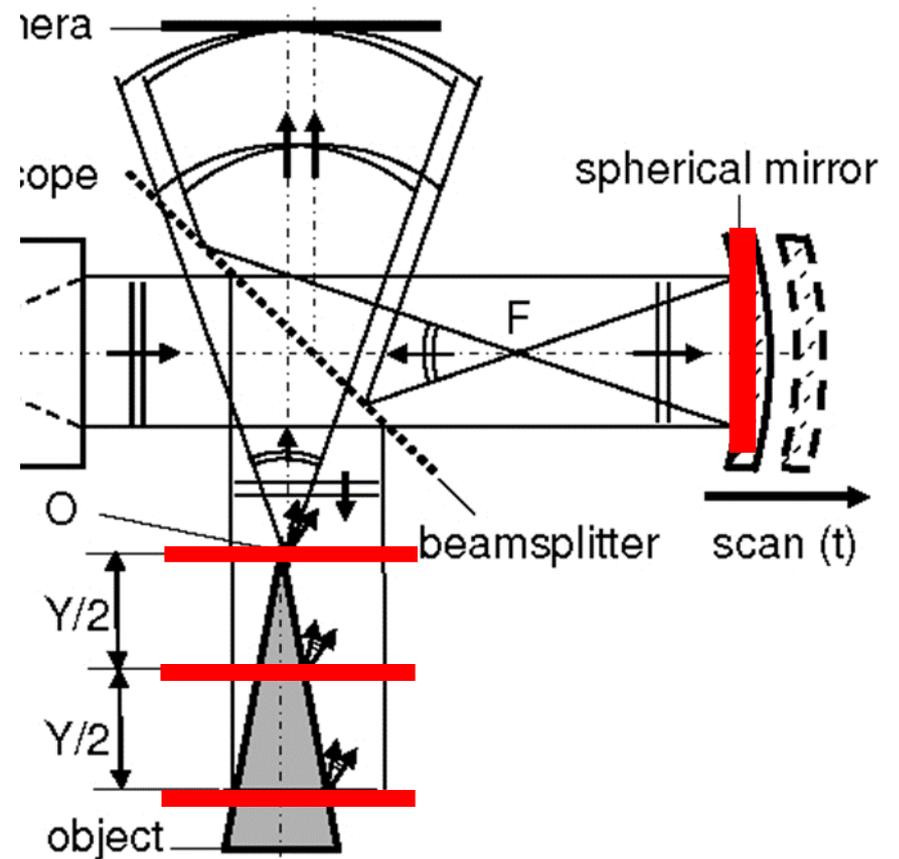
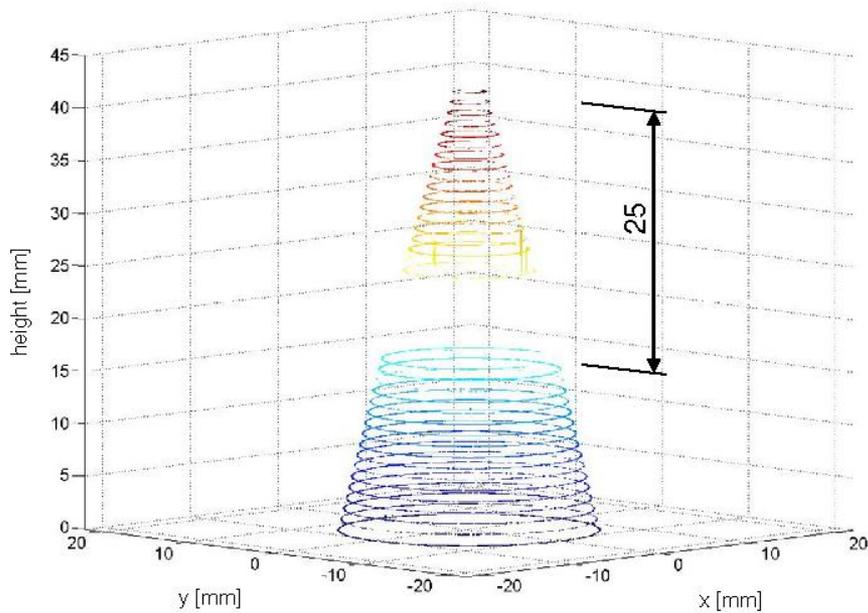


$Y/2=25\text{mm}$ 間隔

指定した平面の像だけシャープな輪郭になる

FC-レーザーを用いることで
1つのホログラムから複数の
断面画像が取得可能

17枚のホログラムの再構成により 得られた物体の3次元形状



まとめ

- FC-レーザーを用いたデジタルホログラフィでは同時に複数の断面画像を得ることができる
- 測定時間が短縮される
- マイクロレゾネータを用いて周波数間隔を大きくすることで $\gamma/2=100\mu\text{m}$ の範囲にできる
- 周波数間隔が変更できればミラーの走査が不要なくなる