

入射ビーム方向可変干渉計による 光学トモグラフィの データ取得時間短縮

北海道大学工学部機械知能工学科
プラズマ応用工学研究室
川幡 紀恵

研究の背景

プラズマの電子密度・気体の温度分布の
3次元計測

- 屈折率: プラズマの電子密度・気体の温度に依存
- 光は屈折率分布により位相が変化
- 位相変化量: 2本のビームの重ね合わせで発生する干渉縞より求められる

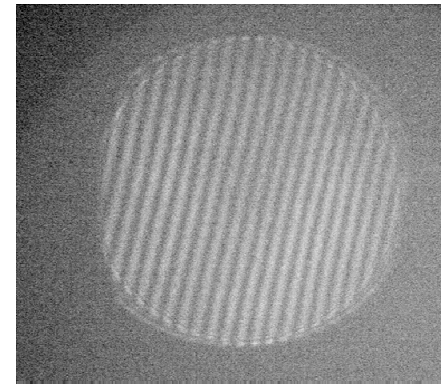


測定対象を通過したビームの干渉縞画像から
位相変化量 → 屈折率分布 → 密度・温度分布

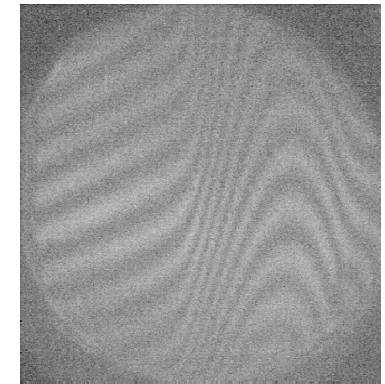
ステージを設置してビームを様々な方向から
入射



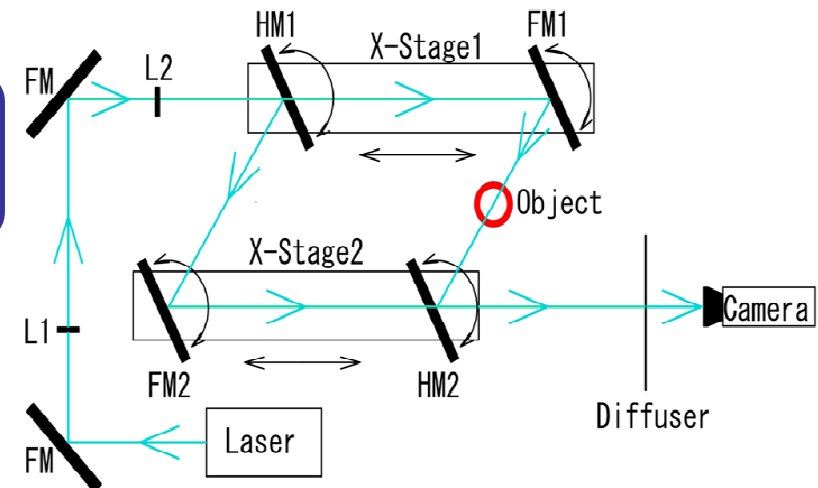
3次元測定



測定対象無し時の
干渉縞



測定対象有り時の
干渉縞



入射ビーム方向可変干渉計

研究の目的

プラズマ・気体の分布：時間変化 ➡ 短時間でデータ取得
従来：振動の影響を避けるためステージの移動、静止、
データ取得を繰り返す

ステージを動かしながらデータ取得

問題点：振動による影響

➡ 解決策：露光時間の短縮



画像が暗くなる

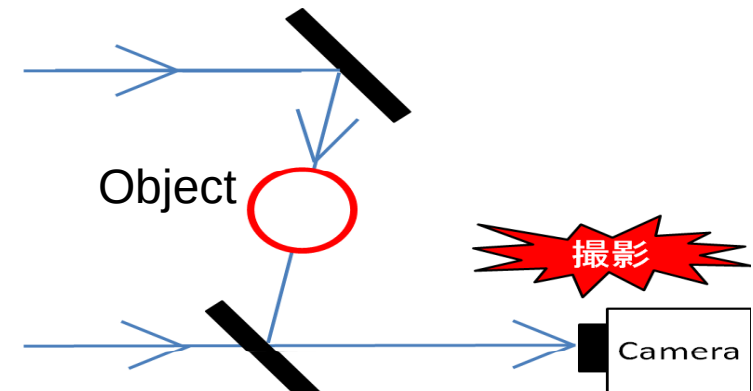
➡ ゲインを上げる



新たな問題点：画像がノイジーになる

対策1：より明るい画像取得

対策2：フィルターによる雑音除去

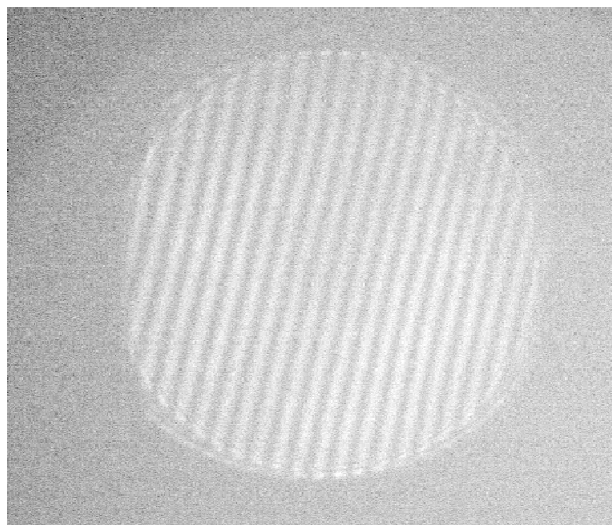
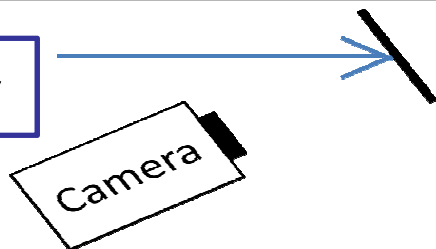


ステージを動かしたままデータ取得

干渉縞撮影

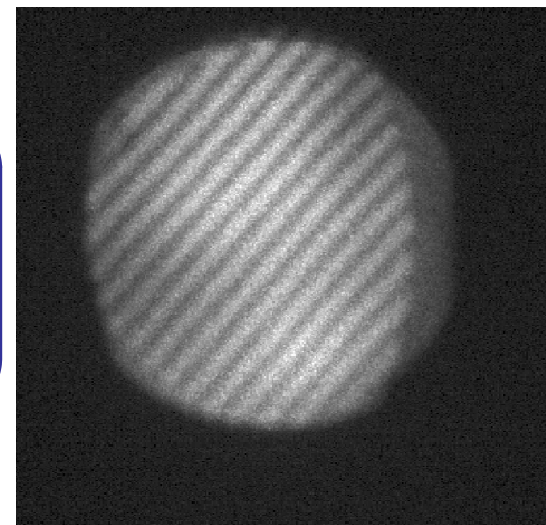
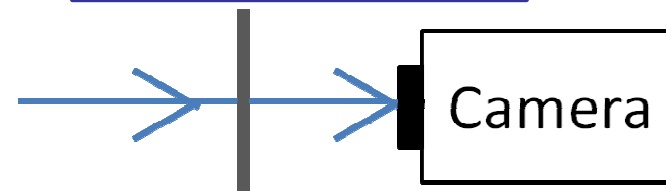
目的: より明るい干渉画像撮影

反射スクリーン



X-Stage: 速度0.4mm/sで一定
カメラの設定: 露光時間: 1ms
ゲイン: 17.7dB

透過スクリーン



右の方が理想的な
条件でかつ干渉縞が
はっきりと撮影
できている

X-Stage

低速: 0.4mm/s
高速: 12.8mm/s

加減速時間: 100ms

カメラの設定

露光時間: 0.04ms
ゲイン: 0dB

雑音除去①

目的: 画像に残った雑音を除去

➡ Non-local Means法(NLM)とGaussian Filter

求める画素値 $F(i) = \sum_j w(i, j)v(j)$

$w(i, j)$: 重み関数 $v(j)$: j 番目の画素値

NLM

$$w(i, j) = \frac{1}{C(i)} \exp\left(-\frac{\|v(N_i) - v(N_j)\|_\sigma^2}{\alpha \cdot \{v(j)\}^2}\right)$$
$$C(i) = \sum_j \exp\left(-\frac{\|v(N_i) - v(N_j)\|_\sigma^2}{\alpha \cdot \{v(j)\}^2}\right)$$

i : 注目画素

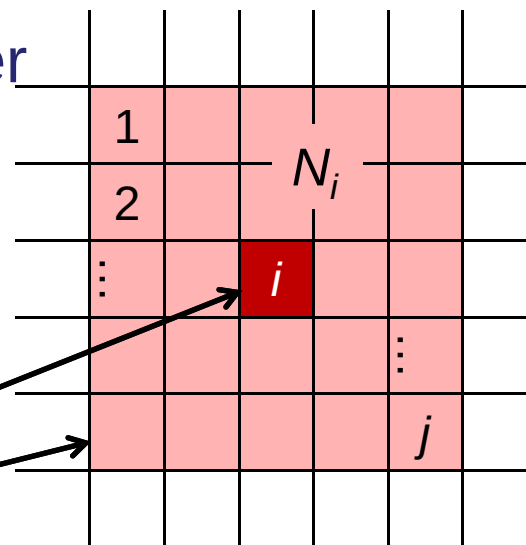
j : 比較画素

注目画素 i 近傍の画素値の集合 $v(N_i)$ と
比較画素 j 近傍の画素値の集合 $v(N_j)$ の
パターンが似ているほど計算に
与える影響が大きい

Gaussian Filter

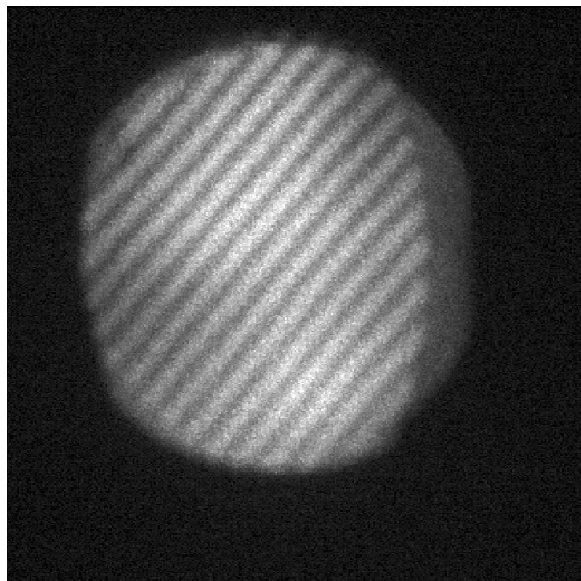
$$w(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$$

画素 i と j の空間的距離 r が近いほど
計算に与える影響が大きい

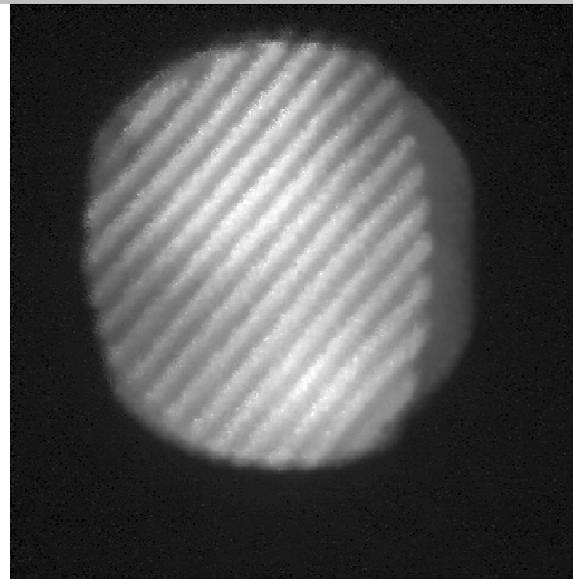


雑音除去②

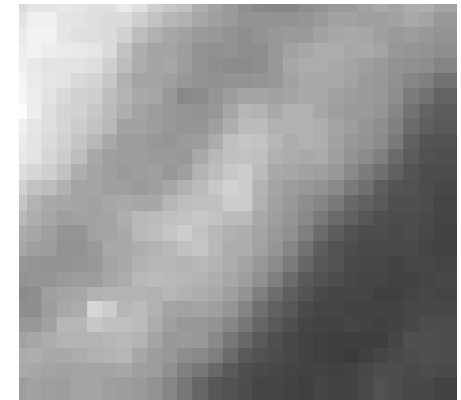
元画像



NLM

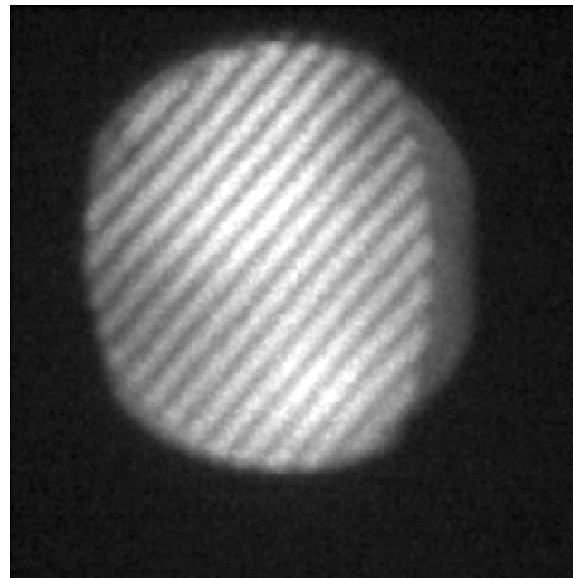


拡大

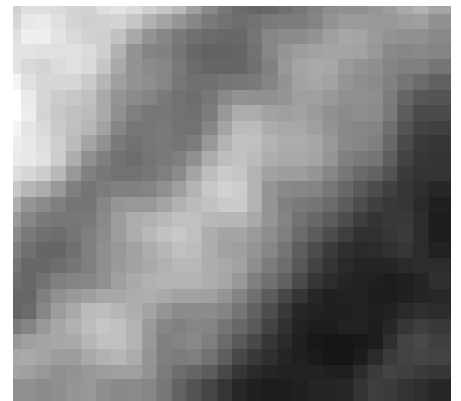


NLMの方が縞の
ノイズが少ない

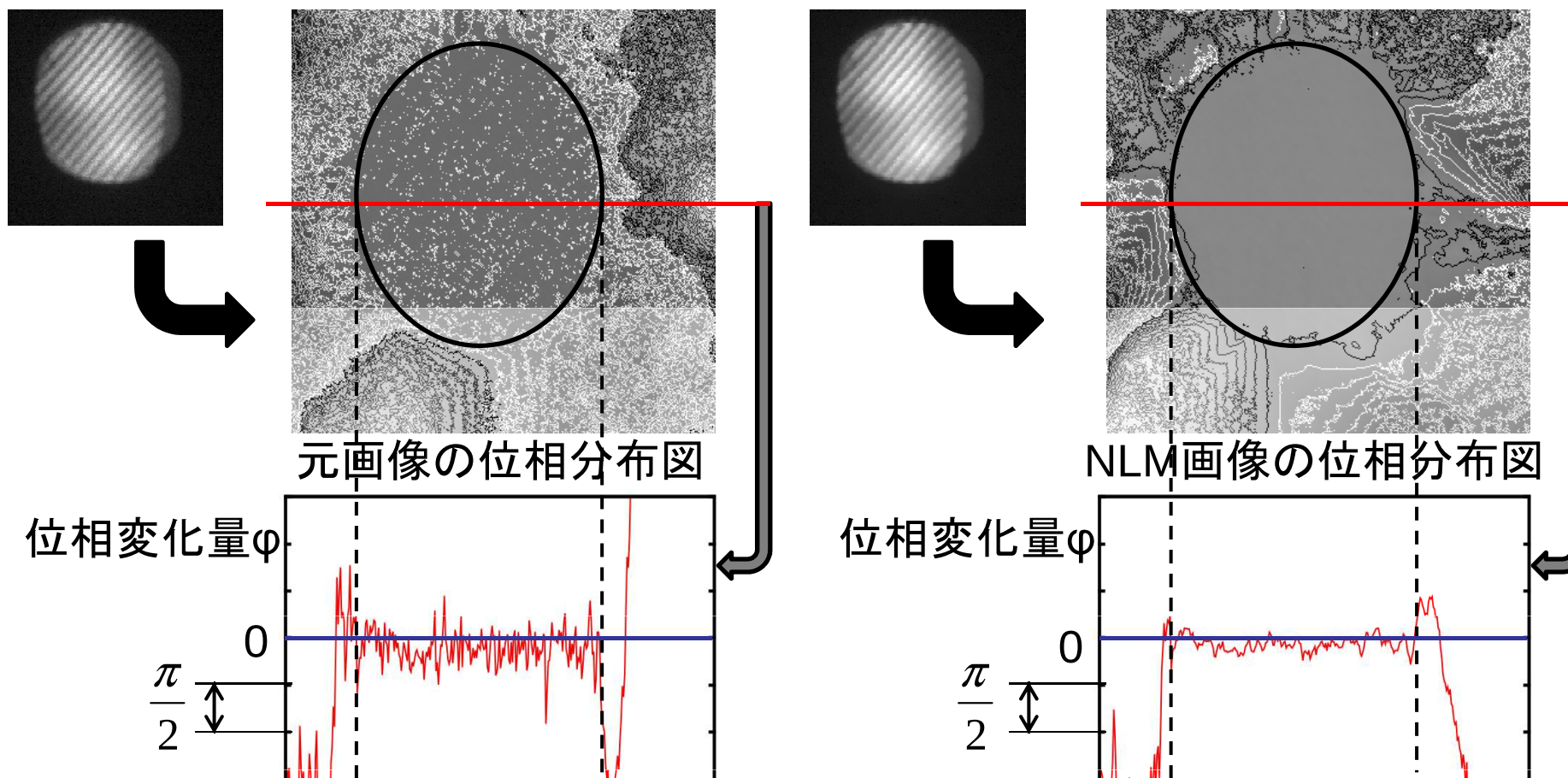
Gaussian Filter



拡大



結果



NLM画像は干渉縞部分の位相変化量が一樣

NLMによって雑音が除去できた

まとめ

データ取得時間短縮

干渉計のステージを動かしながらデータを取得
透過スクリーンを用いて撮影することで、カメラの露光時間を
短くしても(40 μ s) 撮影できるほど明るい画像



測定時間: 約25分→約11.7秒

雑音除去

NLMとGaussian Filterで干渉画像から雑音除去
雑音除去後の干渉画像を比較してNLMの方が良いと判断



位相分布図からNLMは雑音除去に有効であることを確認



屈折率分布と位相変化量の関係式

$$\underbrace{\varphi(\vec{r})}_{\text{位相変化量}} = \int \underbrace{N(r)}_{\eta \text{ 屈折率}} \underbrace{\vec{k}_o}_{\substack{\text{波数ベクトル} \\ \uparrow}} \bullet \underbrace{\vec{e}_\eta}_{\text{光路}d\eta\text{方向の単位ベクトル}} d\eta$$

光の強度の式

$$I(x, y) = \underbrace{I_o}_{\substack{\uparrow \\ \text{ビームの初期の強度}}} + \frac{1}{2} \underbrace{I_1}_{\substack{\uparrow \\ \text{測定対象通過後のビームの強度}}} e^{j[\vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi(\vec{r})]} + \frac{1}{2} I_1 e^{-j[\vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi(\vec{r})]}$$

位相分布の求め方

$$I(x, y) = I_o + \frac{1}{2} I_1 e^{j[\vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi(\vec{r})]} + \frac{1}{2} I_1 e^{-j[\vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi(\vec{r})]}$$



離散フーリエ変換→逆離散フーリエ変換

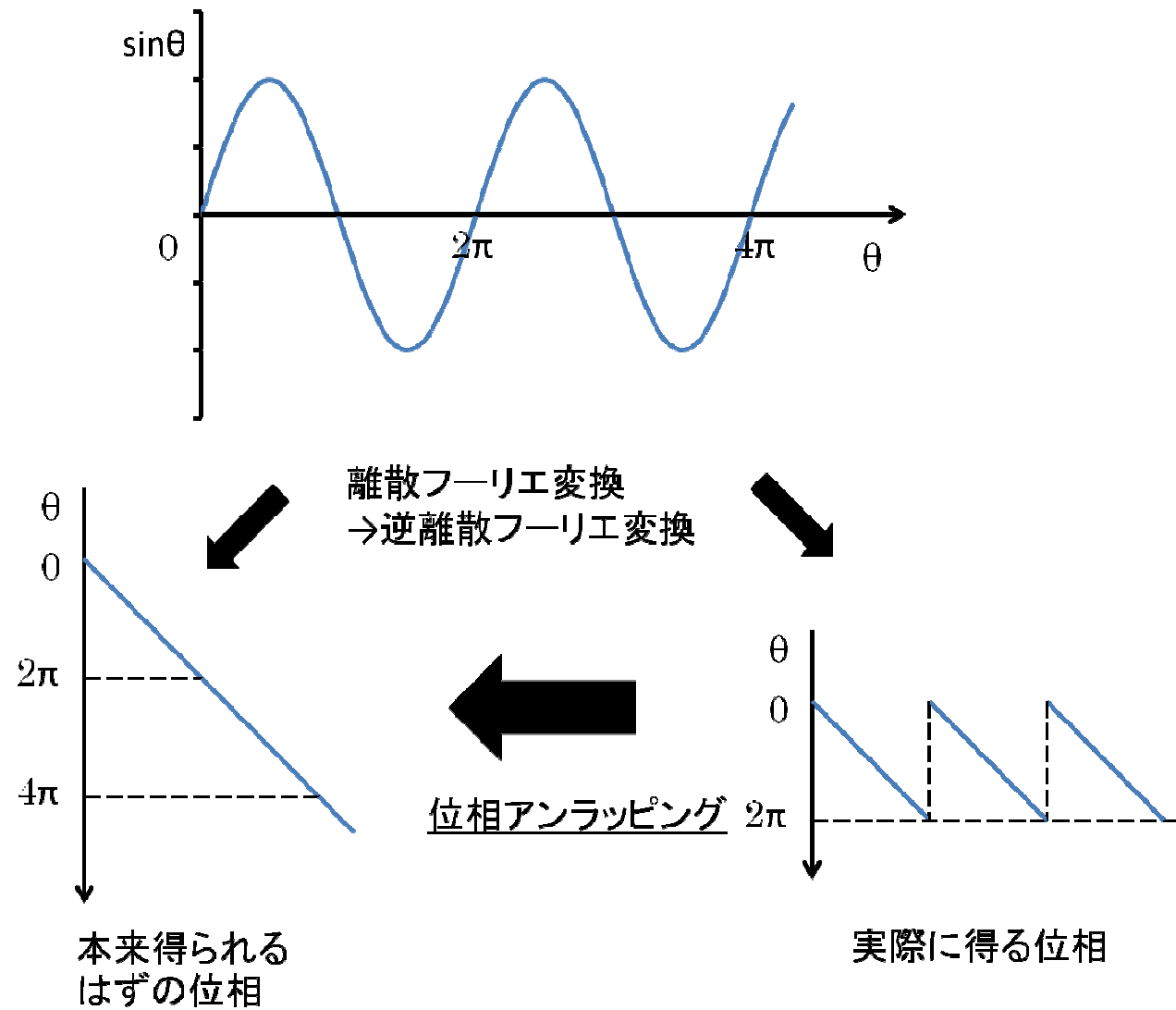
$$I(x, y) = I_\varphi = \frac{1}{2} I_1 e^{j[\vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi(\vec{r})]}$$



両辺に自然対数を取り、虚数部を取る

$$\underline{\text{Im}\{\ln(I_\varphi)\} = \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi(\vec{r})}$$

位相アンラッピング



Non-local Means法

$$w(i, j) = \frac{1}{C(i)} \exp \left(- \frac{\|v(N_i) - v(N_j)\|_\sigma^2}{\alpha \cdot \{v(j)\}^2} \right) \quad \text{—— ユークリッド距離}$$

$$\|v(N_i) - v(N_j)\|_\sigma^2 = \sum_k^{n \times n} f_\sigma \cdot |v[N_i](k) - v[N_j](k)|^2$$

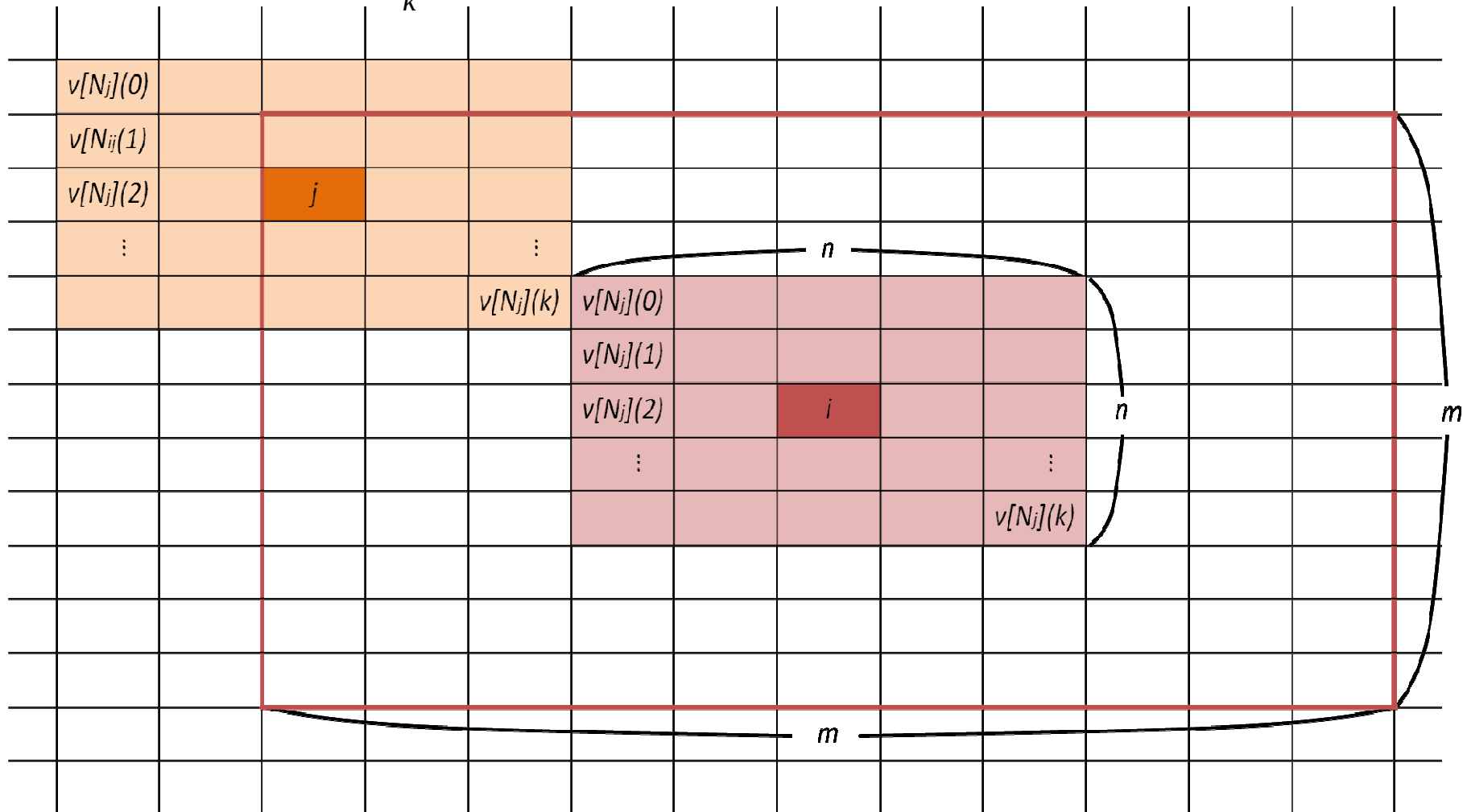
$$f_\sigma = A \exp \left(- \frac{r^2}{\sigma^2} \right)$$

$$A = \sum_k^{n \times n} f_\sigma = 1$$

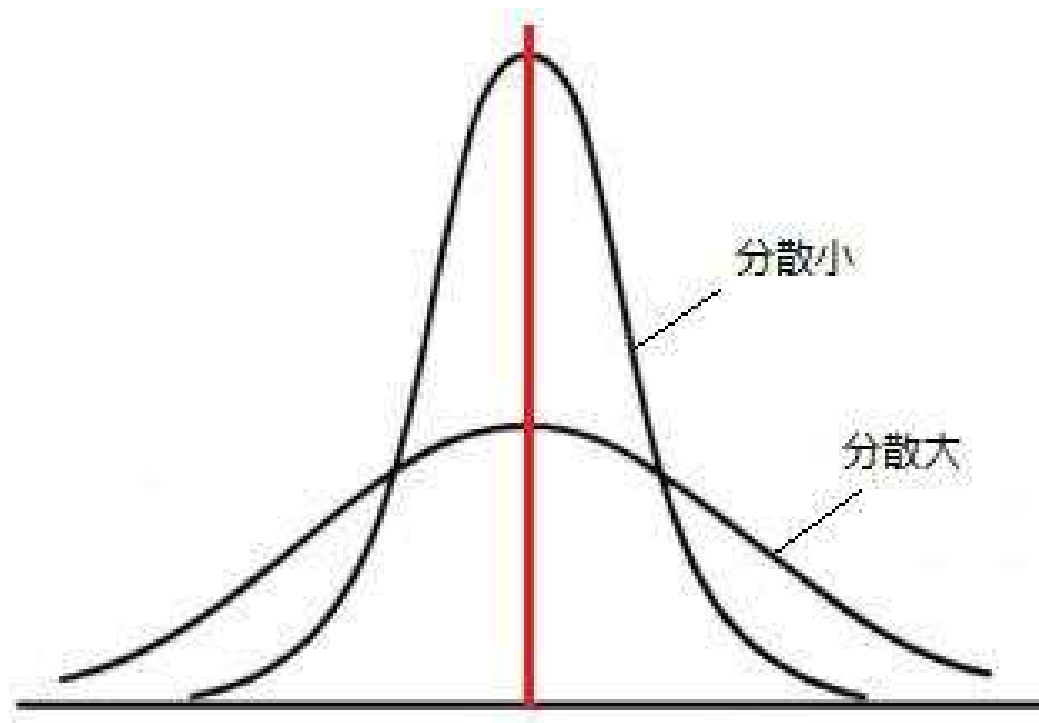
r : 注目画素と比較画素の距離
 σ^2 : 分散

ユークリッド距離

$$\|v(N_i) - v(N_j)\|_{\sigma}^2 = \sum_k^{n \times n} f_{\sigma} \cdot |v[N_i](k) - v[N_j](k)|^2$$

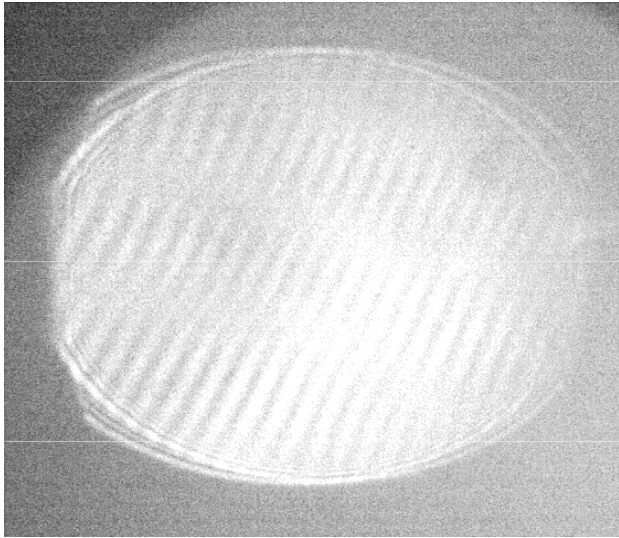


ガウス分布



- 中心の影響が大きく、離れるに従って小さくなっていく
- 分散が大きいほど中心の影響は小さくなるが計算対象となる範囲が広がる

干渉画像



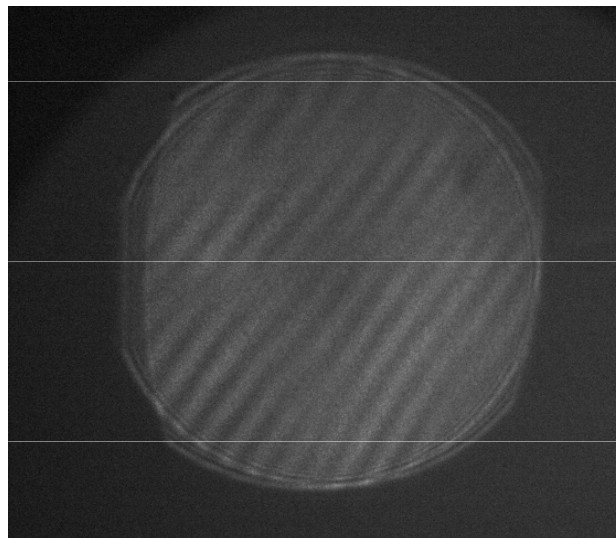
X-Stage

速度: 0.4mm/s

カメラの設定

露光時間: 4ms

ゲイン: 17.7dB



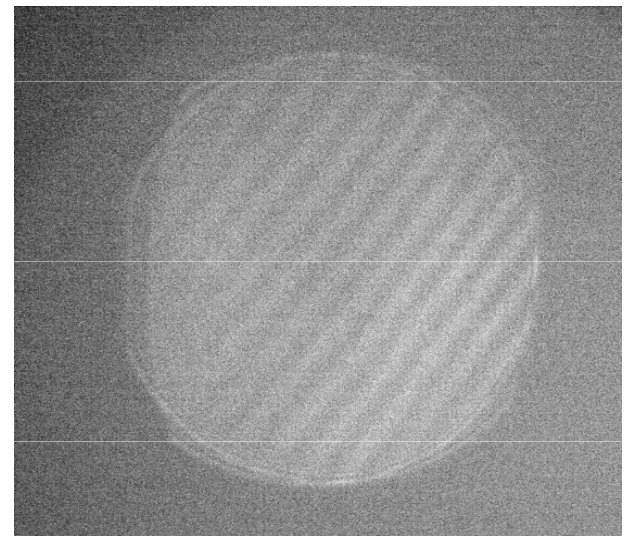
X-Stage

速度: 0.4mm/s

カメラの設定

露光時間: 4ms

ゲイン: 13.8dB



X-Stage

速度: 0.4mm/s

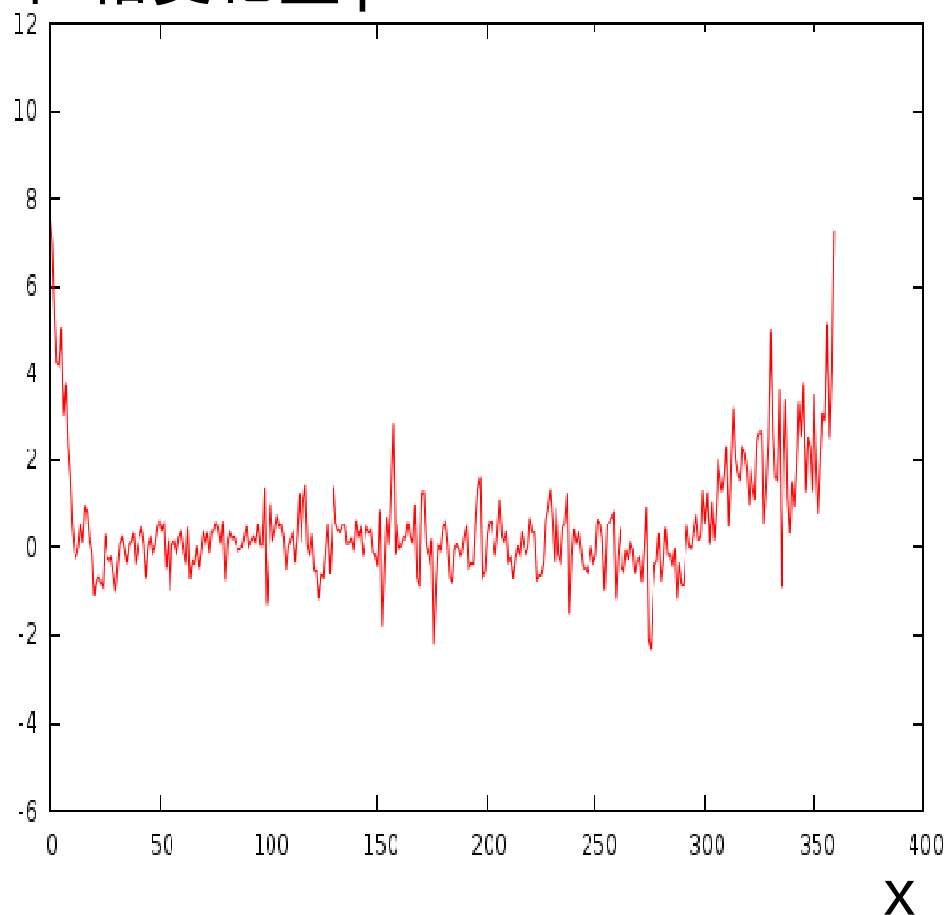
カメラの設定

露光時間: 1ms

ゲイン: 17.7dB

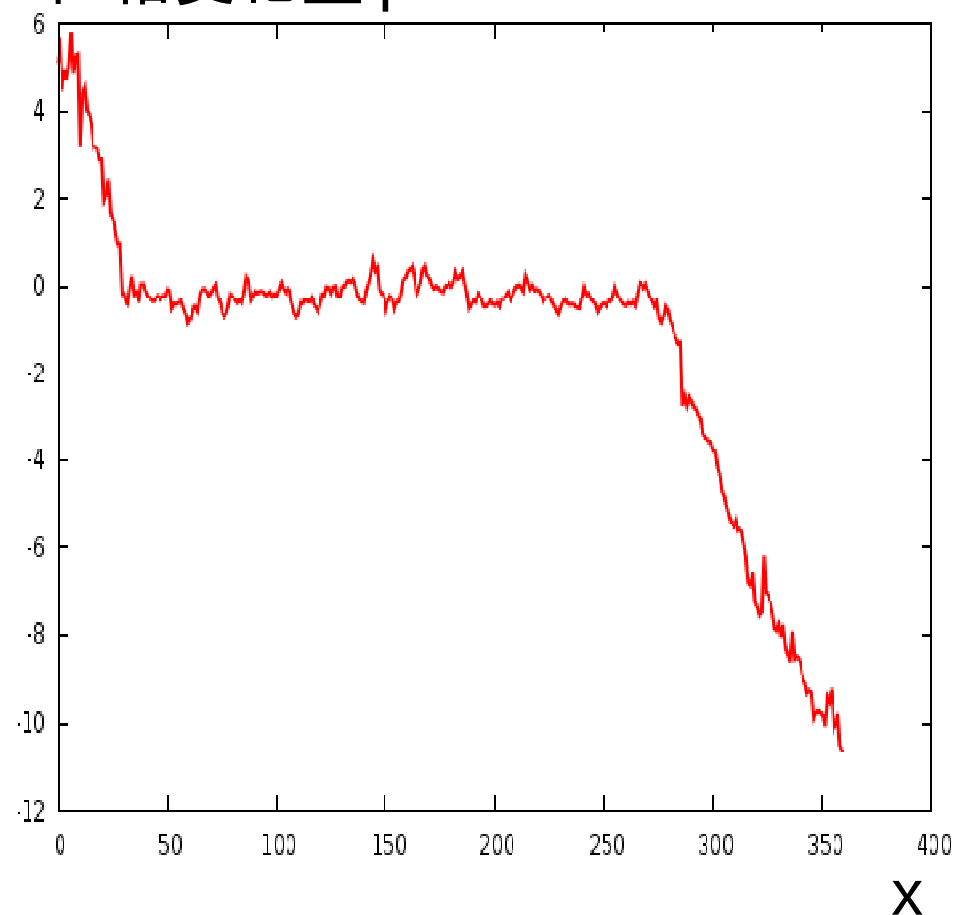
位相変化量

位相変化量 ϕ



元画像の位相変化量グラフ

位相変化量 ϕ



NLM画像の位相変化量グラフ

取得した干渉画像

