

事例ベース超解像技術を用いた光学顕微鏡

Optical microscope using the example-based super-resolution method

○石川慎二, 早崎芳夫 (宇都宮大学オプティクス教育研究センター)

○Shinji Ishikawa and Yoshio Hayasaki

(Center for Optical Research & Education, Utsunomiya Univ.)

E-mail: ishikawa_s@opt.utsunomiya-u.ac.jp

光学顕微鏡の分解能は、光の波長の半分程度に制限される。これは回折限界と呼ばれ、光学顕微鏡によるサブ波長の構造の観察に限界を与える。これに対し、近年では、試料にダメージの少ない光でナノスケールの構造を見るべく、回折限界を超えた分解能を得る超解像顕微鏡法が開発されている。

本研究では、新たな超解像顕微鏡法のアプローチとして、デジタル画像超解像の一手法である、事例ベース超解像法 [W. T. Freeman et al., IEEE Comput. Graph. Appl. 2, 56-65 (2002).] を用いた顕微鏡手法を提案する。デジタル画像超解像とは、少ない画素の画像を補間処理によって拡大された低解像画像に、失われた高周波成分を回復し、高解像画像を作成する技術である。事例ベース超解像法は、既に存在する高解像画像と、高解像画像から計算された低解像画像の相関関係を事例としたデータベースを作成し、観測された低解像画像を、事例データベースを参照することにより、高解像画像に再構成する手法である。我々は、この事例ベース超解像アルゴリズムを顕微鏡に適用し、回折限界により失われる高周波情報を回復する超解像顕微鏡手法を提案し、フーリエ光学に基づく計算機シミュレーションにより検証した。

Fig. 1 に想定する実験光学系と事例ベース超解像による画像再構成を示す。対物レンズによって集光された照明光は、サンプルの構造により回折・散乱し、顕微鏡光学系を通して撮像素子に拡大結像される。本手法では、結像された集光点の歪みを $N \times N$ 画素の低解像画像として取得し、事例データベースをパターンマッチングにより参照することで $M \times M$ 画素のサブ波長構造を高解像画像として推定する。事例データベースは予め、同様の光学系によって、既知のサブ波長構造と結像された集光点を、実験系もしくは計算機シミュレーションにより作成する。

Fig. 2 にシミュレーション結果を示す。サンプルは標準画像 Lenna (8bit, 256×256 画素) を使用し、画素サイズ 100 nm の透過率分布を持つ構造として扱った。事例データベース作成用の画像には標準画像 Barbara (8bit, 256×256 画素) を使用し、 $256 \times 256 = 65336$ の結像事例を作成した。光源波長を $\lambda = 405$ nm, 照明用と結像用の対物レンズの開口数を $NA = 0.85$ とした。取得する結像点画像は実空間画素サイズ 100nm の 9×9 画素 ($900\text{nm} \times 900\text{nm}$), 推定する高解像画像は 3×3 画素 ($300\text{nm} \times 300\text{nm}$) とした。Fig. 2(a)は元の高解像透過率分布 (真値), Fig. 2(b) は事例作成に使用した画像, Fig. 2(c) は提案手法による超解像再構成画像, Fig. 2(d) は、比較のために計算した共焦点顕微鏡像である。共焦点顕微鏡像は、同様の光学系における結像点の中心ピクセル値をピンホールにより抽出し検出したものとした。SNR (signal to noise ratio)を用いて真値との差を評価した結果、共焦点顕微鏡像の $SNR = 27.7\text{dB}$ に対して、提案手法による超解像再構成画像は、 $SNR = 31.7\text{dB}$ を達成し、4.0dB の改善を示した。

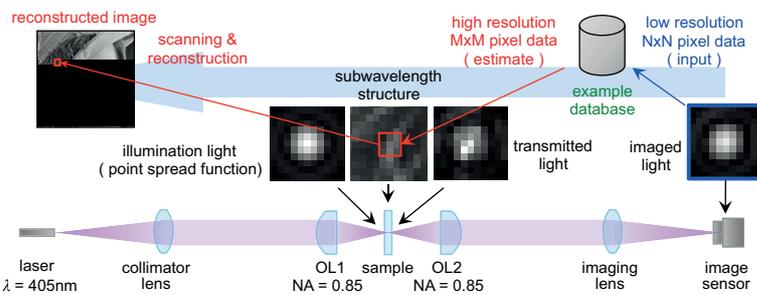


Fig. 1 Optical setup and image reconstruction method. The high resolution $M \times M$ image is estimated by referencing the observed low resolution $N \times N$ image to the example database.



Fig. 2 (a) Original sample image, (b) example image, (c) reconstructed image and (d) confocal image.