

## ウェーブレット隠れマルコフモデルを用いた 電子線ホログラムの雑音低減

Noise reduction of electron holograms using wavelet hidden Markov model

阪大情報科<sup>1</sup>, 九大工<sup>2</sup> ○御堂義博<sup>1</sup>, 三浦克介<sup>1</sup>, 村上恭和<sup>2</sup>, 中前幸治<sup>1</sup>

Osaka Univ.<sup>1</sup>, Kyushu Univ.<sup>2</sup>,

○Yoshihiro Midoh<sup>1</sup>, Katsuyoshi Miura<sup>1</sup>, Yasukazu Murakami<sup>2</sup>, Koji Nakamae<sup>1</sup>

E-mail: midoh@ist.osaka-u.ac.jp

電子材料や磁性材料の微小な電磁場分布を観察するために電子線ホログラフィーが用いられている[1],[2]。電子線ホログラム(干渉縞)から微小な位相変化を計測するためには雑音を低減する必要がある。

本報では、電子線ホログラムに対してウェーブレット隠れマルコフモデルを用いた雑音低減手法[3],[4]の適用を試みる。図1(a)に電子線ホログラムの一部を示す。図1(b)は垂直方向の平均プロファイルから推定された干渉縞パターンを表す。図1(a)にメディアンフィルタと本手法(Symlets-4 wavelet を利用)を適用した結果をそれぞれ図1(c),(d)に示す。

干渉縞強度分布  $I(x, y)$  は一般に次式で表される。

$$I(x, y) = B(x, y) + 2A(x, y) \cos \theta(x, y)$$

図1(c),(d)に対して、干渉縞の極大値・極小値の点群からそれぞれ  $B(x, y)$  と  $A(x, y)$  を推定し[5]、 $\cos \theta(x, y)$  を算出した。その結果を図2(a),(c)に示す。図2(b),(d)は垂直方向に平均化したプロファイルを示す。さらに、図1(b)の干渉縞パターンを正解としたときの平均二乗誤差(MSE)を算出した。メディアンフィルタ  $MSE=0.247$  (図1(b)と図2(a)) に対して、本手法は  $MSE=0.097$  (図1(b)と図2(c)) となった。ウェーブレット隠れマルコフモデルによる雑音低減が有効であることが確認できた。

### 謝辞

本研究は、JST CREST の支援を受けたものである。関係各位に感謝申し上げる。

### 参考文献

- [1] T. Tanigaki et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 49, 244001 (2016).
- [2] E. Voelkl and D. Tang, Ultramicroscopy, 110, pp. 447–459 (2010).
- [3] J. K. Romberg et al., IEEE Trans. Image Processing, 10, 7, pp. 1056–1068 (2001).
- [4] 岡本直幸他, NANOTS2015, pp. 117–121 (2015).
- [5] T. Fujita et al., Ultramicroscopy, 106, pp. 486–491 (2006).

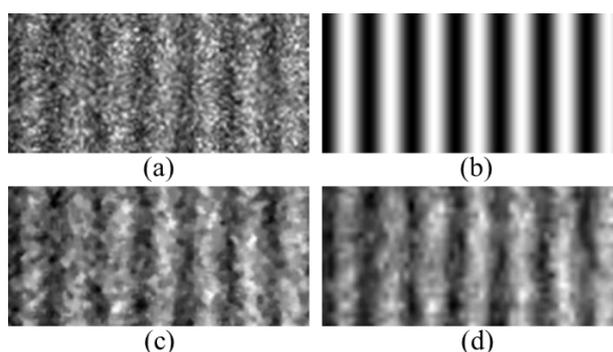


Figure 1. Experimental results: (a) an electron hologram image, (b) estimated interference fringe pattern, (c) the denoised image by median filtering and (d) the denoised image using wavelet hidden Markov model.

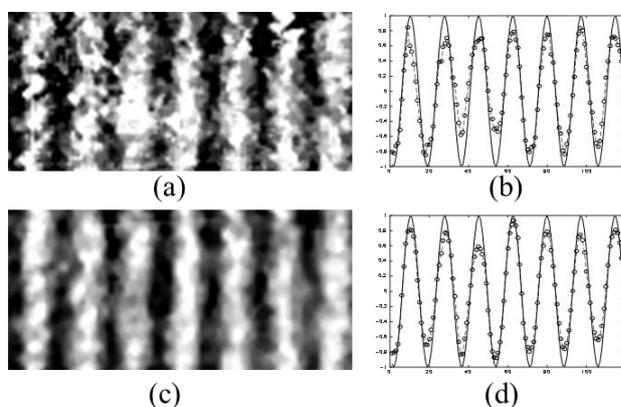


Figure 2. (a) Estimated  $\cos \theta(x, y)$  and (b) the vertical averaged profiles (dot) for median filter, figure 1 (c). (c) Estimated  $\cos \theta(x, y)$  and (d) the vertical averaged profiles for wavelet hidden Markov model, figure 1 (d).