

疑似逆行列を用いたサブピクセルシフト巡回型アダマールイメージング

Subpixel-shifted cyclic-Hadamard imaging using a pseudo-inverse-matrix procedure

○鉄野 翔太, 澁谷 九輝, 岩田 哲郎 (徳島大)

○Shota Tetsuno, Kyuki Shibuya, Tetsuo Iwata (Tokushima Univ.)

E-mail: c501532038@tokushima-u.ac.jp

生体試料のイメージングや半導体などの微細欠陥検査において、高感度で高解像度のイメージングが求められる場合が多い。通常は2次元検出器を用いたマルチチャネルイメージングを行うが、様々な理由で2次元検出器が利用しにくい場合もある。そのような場合に適用できる手法として、点検出器と構造化照明を用いて2次元画像を復元するシングルピクセルイメージング (SPI; single pixel imaging) がある。代表的な例は、計算機ゴーストイメージング (CGI; computational ghost imaging) とアダマールイメージング (HI; Hadamard imaging) である^{1,2,3}。これらは、時空間的に変調された光強度分布をもつ一連の照明マスクパターン光を用い、物体 (試料) を透過または反射した光を点検出器で一度に検出し、数値計算により物体像を再構成する手法である。光電子増倍管のような高感度な検出器を用いることができ、微弱光環境下での高感度イメージングが行える。

本研究では、SPIで投影するマスクとして巡回型アダマール行列に基づく巡回型アダマールマスク (CHM; cyclic Hadamard mask) を用いた2種類のサブピクセルシフト (SPS; subpixel shift) 法の提案を行う。CHMの採用は、パターンを単に巡回させることで容易に照射が行えるため、投影の高速化が期待できるためであり、Walsh型アダマール直交行列に基づくマスクと比較して検出器の応答速度の面で有利であるという装置構成上の理由からである。しかし、再構成像の空間分解能はマスクの1画素のサイズで決まってしまう。空間分解能を上げるためにはマスクの1画素のサイズを小さくすればよいが、マスクの作成や駆動機構などの面で物理的な限界がある。この問題を解決する手法の1つとしてSPS法を導入する⁴。この手法は、マスクまたは試料をサブピクセルシフト量 q [pixel] ($0 < q < 1.0$) で複数回シフトさせて測定を行う。この操作によって空間分解能の向上が期待できる。ここで、画像の復元にはHIの場合、アダマール逆変換が用いられる。しかし、図1の概要図にも示すように、SPSを行うと画像復元に使用する行列 Ψ が長方形行列になってしまう。すなわち、逆行列を解くことができず、画像の復元ができなくなってしまう。そこで、そのような場合でも対応できる一般化疑似逆行列 Ψ^\dagger による画像復元を行う。この手法は、最小二乗法による画像復元と等価であり、その意味で測定精度の向上も図れる。

今回、ノーマル (normal) 方式サブピクセルシフト (NSPS) 法およびインターリーブ (interleave) 方式サブピクセルシフト (ISPS) 法を提案し、それらの有用性を数値計算で確認した。図2に数値計算結果を示す。(a)は試料として用いた線幅0.1 [pixel]、ピッチ0.2 [pixel]の格子状パターンである。このとき、計 $N=35$ 枚 (5×7 [pixel]) の巡回型アダマールマスクを順番に投影し、 x, y の2次元方向にそれぞれSPSさせた時の再構成像を計算した。(b)に示したSPSなしの再構成像は、空間分解能が1.0 [pixel]であるため元の格子を分解できない。これに対して、(c)の $q=0.1$ [pixel]で1画素分シフトさせて取得したNSPSでの再構成像は、分解能が0.1 [pixel]で、元の格子を解像できている。これより、NSPSで空間分解能が10倍向上することが確認できた。(d)は、2.0画素の範囲を $q=0.2$ [pixel]でSPSさせた場合である。この場合、分解能が0.2 [pixel]となるため格子が解像できていない。それに対して、マスクを3.0画素の範囲にわたって、 $q=0.3$ [pixel]で粗くSPSさせて再構成像を取得したISPSの結果を(e)に示す。この場合、0.1 [pixel]の空間分解能が確保できていることが確認できた。

CHMを用いて、少なくともマスクの1画素以上の範囲にわたってNSPSもしくはISPSを行えば、装置構成上の精度的な問題を緩和しつつ高解像能化が図れることを提案した。

参考文献

- 1) J. H. Shapiro, Phys. Rev. A **78**, 061802 (2008).
- 2) M. Harwit and N. J. A. Sloane, Hadamard transform optics (Academic Press, 1979).
- 3) J. A. Decker, Appl. Opt. **9**, 6, 1932 (1970).
- 4) D. Casasent, et. al., Appl. Opt. **28**, 13 (1989).

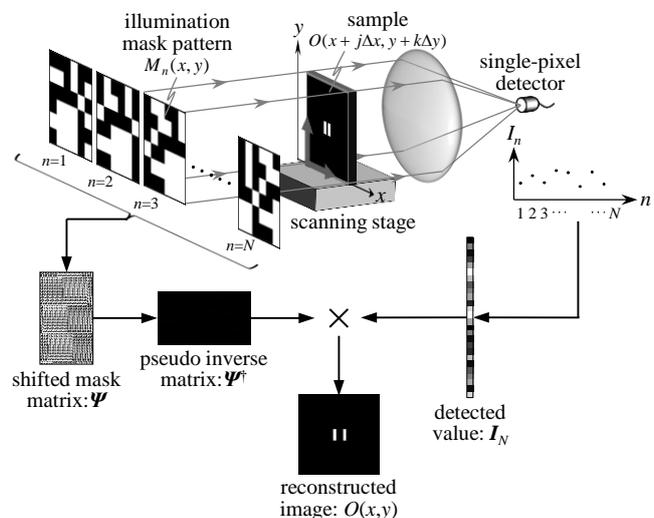


Fig.1 Schematic diagram explaining subpixel-shifted (SPS) cyclic-Hadamard imaging (CHI) using a pseudo-inverse-matrix procedure.

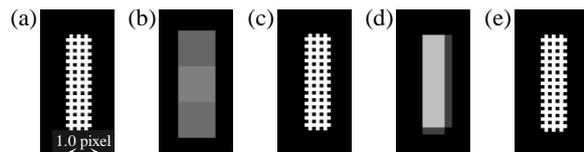


Fig.2 Numerical simulation results for a grid sample shown in (a); (b) the reconstructed image by the conventional CHI with no subpixel-shifting ($N=35$); (c) the reconstructed image by the NSPS with $q=0.1$ for a 1.0-pixel range ($N=3,500$), (d) that by the NSPS with $q=0.2$ for 2.0-pixel range ($N=3,500$) and (e) that by the ISPS with $q=0.3$ for 3.0-pixel range ($N=3,500$).