

FE-SEM による複数焦点画像の合成手法の開発

○蟹屋敷 祐介^{a)} 今村 幸祐^{b)} 杉山 博則^{c)}

^{a)} 金沢大学総合技術部情報部門 ^{b)} 金沢大学理工研究域電子情報通信学系

^{c)} 金沢大学総合技術部機器分析部門

1. 概要

FE-SEM（電界放出形走査電子顕微鏡）は、電子ビームの照射による二次電子や反射電子により撮像を行う。その際、低加速では物体表面、高加速では内部の観察が可能となる。本検討では、電子加速度の異なる複数の画像から、物体表面と内部の両方を観察できる画像を合成する手法を開発した。開発した手法は、画像のエッジ検出と焦点合成の技術を用いている。実際に表面・内部両方を良好に観察できる合成画像が生成できることを主観的に確認し、実用のための GUI も作成した。

2. 開発環境

表 1 に開発環境の詳細を示す。画像を合成するソフトウェアは、プログラミング言語の Python を用いて実装した。画像の入出力のため、画像処理ライブラリの OpenCV[1]を使用している。また、GUI を実装するため Python に標準でインストールされている tkinter を使用した。

表 1 開発環境

OS	Windows11
開発環境	Anaconda3[2]
プログラミング言語	Python 3.8
ライブラリ	OpenCV 4.0.1, tkinter

3. 複数焦点画像の合成アルゴリズム

開発をおこなった FE-SEM による焦点が異なる複数の画像を合成する手法について、そのアルゴリズムを説明する。

入力画像には電子加速度の異なる複数の画像を扱うが、加速電圧を変えただけの同じ撮影対象であっても微小な位置のずれが発生する。また、異なる位置の画素との輝度値相対関係も大きく変化する。そのためアルゴリズムの主な流れは、それらを補正しつつ、画像の合成を行うことになる。

まず、エッジ画像に基づくテンプレートマッチングにより大まかな整数画素制度での位置ずれを算出し、それを用いてサブピクセル精度での位置補正をパラボラフィッティング[3]で行う。次に画像全体の輝度値の違いを補正するため、ポアソンエディッティング[4]で二つの画像の輝度値の差を小さくし、全

焦点[5]の技術を応用した手法を用いて二つの画像の特徴を反映した画像合成を行う。

各処理の詳細を説明する。まず、エッジ画像に基づくテンプレートマッチングでは、それぞれの画像からソーベルフィルタによりエッジ画像を作成する。ソーベルフィルタは画像のエッジを強調する空間フィルタとなっており、フィルタ処理を行う際は周囲の画素からカーネル係数を用いて、フィルタ適用後の画素値を算出する。カーネル係数を図 1 に示す。

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

-1	-2	-1
0	0	0
-1	2	1

横方向

縦方向

図 1 ソーベルフィルタのカーネル係数

図 1 のカーネル係数を用いて求めるフィルタ適用後の画素値の算出式を式(1)に示す。

$$T = \frac{1}{2} |g_x + g_y| \quad (1)$$

g_x , g_y はそれぞれ横方向、縦方向のカーネル係数から算出したフィルタ適用後の画素値である。また、ソーベルフィルタによるエッジ画像を図 2 に示す。

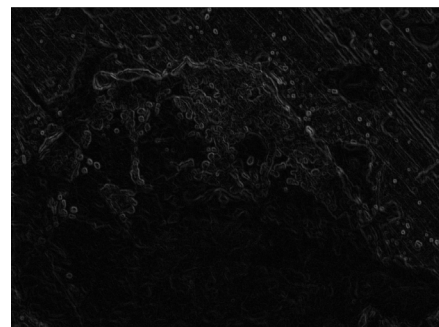


図 2 ソーベルフィルタによるエッジ画像

位置合わせの基準として画像中央の 512×512 画素を基準テンプレートとする。位置補正する対象画像は式(2)に示す。アフィン変換を適用した後、画像中央 512×512 画素に対してテンプレートマッチングで整数画素精度の位置ずれ量を推定する。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} \quad (2)$$

θ は回転補正する角度であり、 (dx, dy) は水平、垂直方向の位置補正值である。テンプレートの類似性を評価する評価関数は、式(3)に示す画素値の2乗誤差である。

$$\arg \min_{i,j} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} \{I'(x+i, y+j) - T'(x, y)\}^2 \quad (3)$$

ここで、 $I'(x, y)$ が対象画像の画素値、 $T'(x, y)$ が基準テンプレートの画素値、 N, M がテンプレートのサイズ、 i, j が位置ずれ量を表す。今回、補正範囲は $-5 \leq \theta \leq 5$ 、 $-40 \leq dx, dy \leq 40$ に設定した。

パラボラフィッティング[3]はテンプレートマッチングによる整数画素精度の評価関数値に2次の対象関数をフィッティングすることで、サブピクセル精度の最小値位置を推定する手法である。概要を図3に、サブピクセル位置の算出式を式(4)に示す。

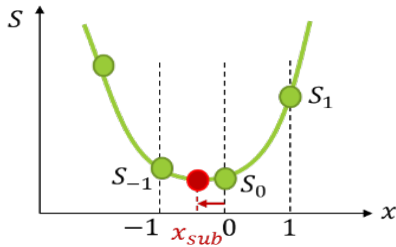


図3 パラボラフィッティング

$$x_{sub} = \frac{S_{-1} - S_1}{2 \cdot S_{-1} - 4 \cdot S_0 + 2 \cdot S_1} \quad (4)$$

図1および式(4)において、 S_i が整数画素評価値であり、 x_{sub} が推定値である。得られた推定値により、サブピクセル精度の総合的な位置ずれ量 x_{diff} は、式(5)で得られる。

$$x_{diff} = x_{min} + x_{sub} \quad (5)$$

x_{min} は先に推定された整数画素精度の位置ずれ量である。これを各座標軸方向に行うことで、2次元座標上のサブピクセル位置ずれ量の推定を行う。サブピクセル位置ずれ量が得られた後、位置の補正を適用する。

次のポアソンエディッティング[4]は画像の一部を別の画像に合成する際に境界を滑らかにする手法で、画像間の輝度値の差が小さくなる。今回は合成前に対象画像の画素値を基準画像の画素に近く補正することで、自然な合成結果となるようにする。画素の補正は式(6)の画素更新式を繰り返し適用することで行われる。

$$f_p = \frac{(\sum_{q \in N_p} f_p + \sum_{q \in N_p} (g_p - g_q))}{|N_p|} \quad (6)$$

ここで f は求める画像、 g は貼り付ける画像、 p は注目画素を示し、 N_p は隣接画素の集合、 q は隣接画素である。

最後に全焦点による合成を行う。文献[5]の手法では評価関数により二つの画像のうちより鮮明な画素を選択して合成画像を作成する。評価関数を式(7)に示す。

$$r_p = \frac{f_p}{Ave_p} \quad (7)$$

f_p 注目画素の輝度値、 Ave_p 注目画素周囲の平均輝度値である。

これをそのまま適用したところ、今回扱う二つの画像では、特徴が違いすぎていることから、うまく合成画像が作成できなかったため、ソーベルフィルタによるエッジ強度の比率に基づくアルファブレンディングによる重み付き和で合成後の画素値を算出した。合成する画素の算出式を式(8)に示す。

$$f'_{(x)} = \alpha \cdot f_{1(x)} + (1 - \alpha) \cdot f_{2(x)} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{|S_{1(x)}|}{|S_{1(x)}| + |S_{2(x)}|}$$

f_1, f_2 はそれぞれの画像、 x は注目位置、 S はソーベルフィルタによるエッジ強度である。

5. 評価

評価として、電圧加速度の違う二つの画像と合成画像との主観による比較を行った。電圧加速度の違う画像と合成画像の比較を図4に示す。図4より、低加速度の画像では、溶媒由来の汚れを観測しており、汚れの表面形状を観察できる。高加速度の画像では、汚れの内部に存在している金粒子を観測できている。また、合成画像では汚れの表面形状を観測しつつ、金粒子も観察できる画像となっている。

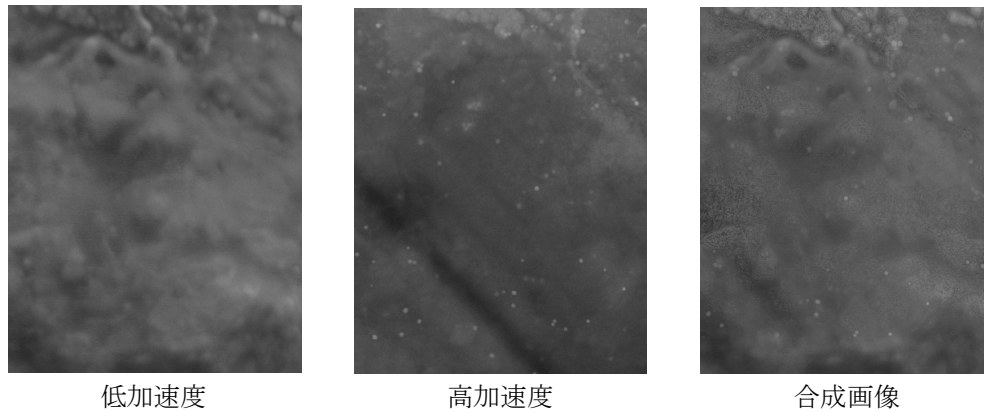


図 4 電圧加速度の異なる FE-SEM 画像

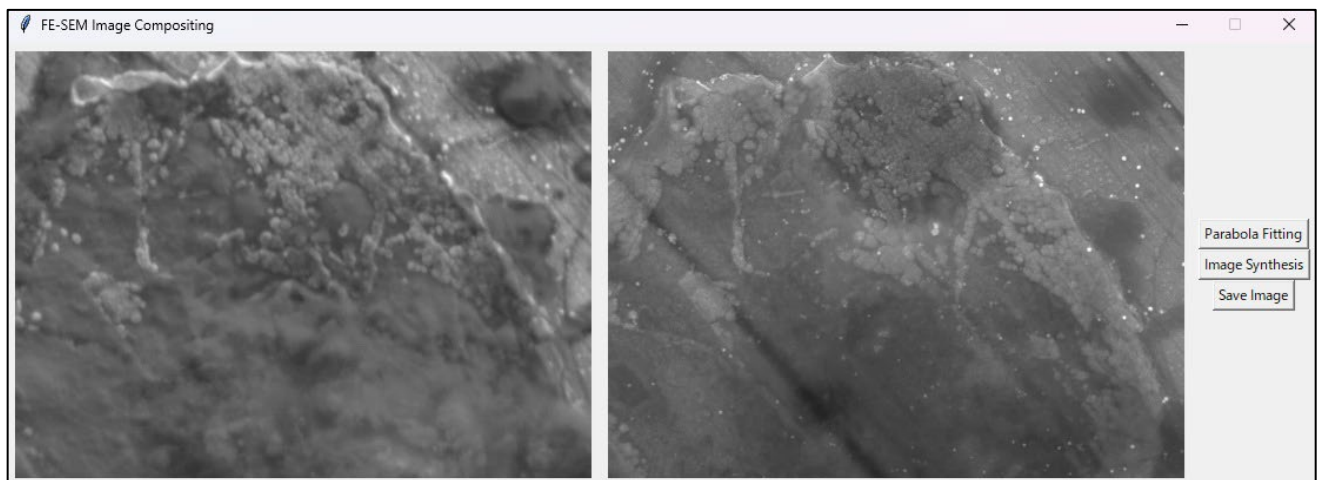


図 5 GUI ソフトウェア外観

4. GUI の実装

合成画像を作成するソフトウェアの外観を図 5 に示す。パラボラフィッティングによる位置補正に掛かる時間が大きいため、パラボラフィッティングとポアソンエディッティングを含めた画像合成を別の処理として実装した。

6. まとめ

FE-SEM による複数焦点画像の合成手法の開発を行った。主観的な評価により、電圧加速度の違うそれぞれの画像の特徴を観察できる合成画像を作成することができた。また、ソフトウェアとして GUI で実装し、問題なく動作することを確認した。

参考文献

- [1] OpenCV, <https://opencv.org/>
- [2] Anaconda3, <https://www.anaconda.com/>
- [3] デジタル画像処理委員会, “デジタル画像処理 改訂第二版”, 画像情報教育振興協会, 2020.
- [4] P. P_rez, M. Gangnet and A. Blake: "Poisson image editing", Proc.SIGGRAPH, 22 (3), pp.313-318 (2003)
- [5] 川本章太, 佐藤和弘: "複数の同一被写体画像を用いた全焦点画像の生成", 画像電子学会誌 35 (5), 576-581, 2006