

審査の結果の要旨

氏名 金 甫 映

本論文は「Blind Deconvolution of 3D Fluorescence Microscopy using Depth-variant Asymmetric PSF（奥行き可変非対称PSFを用いた3次元蛍光顕微鏡画像のブラインドデコンボリューション）」と題し、3次元蛍光顕微鏡で撮影された画像の光学的なボケを除去して鮮明な画像を復元する手法について論じたものであり、全体で6章からなり、英文で記述されている。具体的には、ポアソン分布に従って光が到来する光量の限られた状況を想定し、実験的に得られた点拡がり関数（Point Spread Function: PSF）にPSFの理論モデルをフィッティングさせることで、奥行きに応じたPSFを生成し、画像復元の品質を改善する手法を提案している。安定して収束が保証されているGEM（Generalized Expectation-Maximization）アルゴリズムの導入、PSFに関する事前知識を前提としない方法（Blind Deconvolution）の提案、光学レンズの非対称性を考慮した改良手法の提案を、それぞれ行っている。

第1章は「Introduction（序論）」であり、3次元蛍光顕微鏡画像の復元における課題として、実践的なアルゴリズムの必要性和PSF推定の高精度化を挙げている。前者では、適切な雑音モデルにおいて、収束が保証されたアルゴリズムを一般的なコンピュータで実装することを本論文の貢献としている。後者に関しては、PSFを奥行きに応じて変化させること、PSFの事前知識を前提としないこと、光学レンズの非対称性まで考慮することを本論文の貢献としている。

第2章は「Related Works（関連研究）」であり、従来の3次元蛍光顕微鏡画像に対する画像復元研究を、PSFモデルの次元の観点から整理することで、本論文の位置付けを明らかにしている。また、ポアソン分布で光が到来する場合の画像復元手法や、PSFの実験・理論モデルについて俯瞰している。

第3章は「Depth-variant Deconvolution（奥行き可変画像復元）」と題し、ビーズを撮影することで実験的に得られたPSF画像に対してGibsonのPSF理論モデルをフィッティングすることで、ノイズを除去するとともに奥行きに応じたPSFを生成する手法を提案している。特に、画像復元の過程において、GEMアルゴリズムを導入することで、画像復元精度が向上することを示している。実験では、直径 $0.2\mu\text{m}$ のビーズをPSF画像として撮影してPSFを推定し、直径 $20\mu\text{m}$ のビーズを想定してノイズとボケを付与した画像に対して画像復元のシミュレーションを行った。正解画像に対する相関係数を算出することで、提案手法の有効性を示している。

第4章は「Blind Deconvolution using Depth-variant PSF (奥行き可変PSFを用いたブラインド画像復元)」と題し、ビーズなどを用いてPSFを別途事前に推定するのではなく、細胞などの被写体を撮影した画像からPSFを推定するとともに、画像復元を行う手法を提案している。まず、被写体の奥行き中央位置を推定し、その位置におけるPSFを反復的な手法で推定する。これにGibsonのPSF理論モデルをフィッティングして、第3章において提案した手法で画像復元を行う。実験は、EPFL Biomedical Imaging Group (BIG)が公開している3次元蛍光顕微鏡画像を用いて行った。直径 $2.5\mu\text{m}$ のビーズ画像に対して、復元画像の直径とコントラストを従来手法と比較することで、特に奥行き方向における復元精度が改善されるとともに、最も高いコントラストが得られることを示している。また、カラーの細胞画像の復元においては、鮮明な画像が復元できることを示している。しかし、ビーズ画像の復元結果が真円にならず歪んだ形状になるという問題点が残った。

第5章は「Blind Deconvolution using Depth-variant Asymmetric PSF (奥行き可変非対称PSFを用いたブラインド画像復元)」と題し、光学レンズの非対称性を考慮した改善手法について提案するとともに、画像復元に必要なメモリ量などについて論じている。PSF理論モデルを、対称性を前提としたGibsonモデルから、非対称性を記述できるHanserモデルに切り替え、その際にパラメータ数が増えることを抑える方法を提案している。実験は、第3章と同様に行い、ビーズ画像の復元結果における真円性を、XYZ各方向への直径の分散値で評価した結果、第3章よりも優れた結果が得られた。また、カラーの細胞画像の復元においても、構造的な歪が除去されていることが確認された。提案手法は、PSFの次元が従来手法に比べて高くなるため、必要となるメモリ容量が増える。カラーの細胞画像では、 $712\times 672\times 214$ の解像度に対して現在のパーソナルコンピュータに実装できる512GBのメモリがあれば十分に処理できることが、理論的にも実験的にも示された。

第6章は「Conclusion (結論)」であり、本論文の主たる貢献をまとめ、今後の展望について述べている。

以上を要するに、本論文は、3次元蛍光顕微鏡で撮影された画像の光学的なボケを除去して鮮明な画像を復元する手法について論じたものであり、PSFの事前知識を前提とせず奥行きに応じて非対称性を有するPSFを推定することで、画像復元の精度が改善されることを示しており、電子情報学の各分野の今後の進展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士 (情報理工学) の学位請求論文として合格と認められる。