

氏名（本籍）	齋藤 雄太（千葉県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 248 号
学位授与の日付	令和 3 年 9 月 16 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	統計的性質を考慮したテクスチャ復元によるノイズ除去画像の質感向上
論文審査委員	(主査) 教授 宮田 高道 (副査) 教授 中静 真 教授 飯田 一博 教授 菅木 禎史 教授 今野 将

学位論文の要旨

統計的性質を考慮したテクスチャ復元によるノイズ除去画像の質感向上

本論文は、画像ノイズ除去の性能向上を図るため、一般的なノイズ除去の際に失われる画像の質感を表すテクスチャに着目し、Stein の補題といくつかの仮定を用いてこのテクスチャを推定する方法を提案し、その有効性を示したものである。

スマートフォンなどで画像を撮影した際、カメラ内部で生じる熱雑音や暗電流などに起因するノイズが不可避免的に発生し、このノイズによって画像の品質が大きく低下するという問題が存在する。この問題の解決のため、このノイズが付加された画像（観測画像）からノイズのない真の画像（原画像）を推定する画像ノイズ除去が古くから研究されている。

近年では医用画像の再構成や、暗所などの劣悪な撮像環境で得られた画像を入力とする画像認識の精度を上げることに応用されていることから、より精度の高いノイズ除去手法を実現することは社会の様々な分野に貢献することを意味する。多くのノイズ除去手法は自然画像が持つ特有の性質（事前情報）を利用して原画像の推定を行う。自然画像の事前情報を利用した多くの既存手法のなかでも、画像の局所的な領域（パッチ）が他のパッチと類似すると仮定する非局所自己類似性を用いた手法は、他のノイズ除去手法と比較して高いノイズ除去性能を持つことが知られている。

しかしながら、非局所自己類似性を利用したノイズ除去手法を含む一般の画像ノイズ除去手法は、ノイズを除去する際に、ノイズとともに画像の質感を表すテクスチャを過剰に平滑化すると

いう問題が存在する。テクスチャは画像の特定の部分にある素材の特徴（砂や毛皮、木の皮の感触など）を表す重要な情報であり、テクスチャの損失は画像の主観的な品質を著しく低下させる。

この問題を解決するためには、テクスチャを十分に表現できる事前情報（テクスチャモデル）と、このテクスチャモデルのパラメータの推定法を検討する必要がある。

本研究では、原画像と既存のノイズ除去手法の出力画像（ノイズ除去画像）の差分、つまりノイズ除去で失われた成分について着目し、残差テクスチャと定義した。この残差テクスチャを、観測画像とノイズ除去画像の差分（残差ノイズとテクスチャが混ざったもの）から推定することが本研究の目的である。また、残差テクスチャの共分散行列および残差テクスチャとノイズの共分散を要素とする行列（残差テクスチャとノイズの共分散行列）を前述のテクスチャモデルとして採用した。さらに、Stein の補題といくつかの仮定を用いることで、これらの共分散行列を観測画像並びにノイズ除去画像から推定する手法を提案した。また、推定した共分散行列を用いた線形最小平均二乗誤差フィルタ（LMMSE フィルタ）による残差テクスチャの推定法も併せて提案した。これにより、既存のノイズ除去の際に失われた残差テクスチャの復元を実現した。また本研究では、提案手法の有効性や推定したテクスチャモデルのパラメータの推定精度についても検証を行った。

本研究により画像をノイズ除去する際のテクスチャ復元が可能になった。また本研究を応用することで、一般的な画像のテクスチャ復元のみならず、映画のデジタルリマスターの際の質感復元や、ノイズが付加された画像を画像認識する際の認識精度の向上、医療用画像の画像復元にも応用することが可能であると考えられる。さらに、本研究は、信号の推定において推定しきれなかった残差成分を、推定手法と残差成分の統計的性質に着目して復元する手法であると一般化でき、画像ノイズ除去以外にも様々な応用が得られる可能性があることから、広く画像処理の研究分野に寄与する研究であるといえる。

本論文は以下の5つの章から構成されている。

第1章では、研究の背景や画像ノイズ除去の研究動向、テクスチャ推定における問題点について解説した。また本研究の研究目的と方法について紹介した。

第2章では、本論文での記号の定義と、本研究で重要となる既存手法である Wiener フィルタと Stein の補題について解説した。

第3章では、非学習系の最先端のノイズ除去手法であり、本研究でノイズ除去画像を得るために用いた weighted nuclear norm minimization (WNNM) の解説を行った。また既存のテクスチャを考慮したノイズ除去手法についても解説を行い、それらの用いたテクスチャモデルとパラメータの推定法を考察した。

第4章では既存のノイズ除去の際に失われたテクスチャの復元手法の提案を行った。まず残差テクスチャの定義と、本研究で用いるテクスチャモデルである残差テクスチャおよび残差テクスチャとノイズの共分散行列について解説した。次にテクスチャモデルの共分散行列を推定するために、Stein の補題といくつかの仮定を用いることを提案した。また Stein の補題を用いるために、WNNM の線形近似を行うことを提案した。さらに、推定した共分散行列を適用した LMMSE フィ

ルタを用いることによる残差テクスチャの推定法を提案した。ほか、推定した残差テクスチャを適切な強度で強調することによる知覚的品質の向上法についても提案を行った。

第5章ではまず第4章で用いた仮定の正当性を予備実験によって確認した。次に本研究の有効性を評価する実験を行った。実験により、提案手法のノイズ除去性能が既存の非学習系の手法と比較して高いことが確認された。また、残差テクスチャを付加する際に付加する強度を変化させた際の知覚的品質の変化を観察し、適切な強度で残差テクスチャを付加した場合知覚的品質がさらに向上することを示した。さらに、Fréchet 距離を用いて、推定した共分散行列の推定精度を単純な共分散行列の推定法と比較することで、提案した推定法の有効性が確認された。

第6章では、本論文の統括を行った。

審査結果の要旨

本論文は、画像ノイズ除去の性能向上を図るため、一般的なノイズ除去の際に失われる画像の質感を表すテクスチャに着目し、Stein の補題といくつかの仮定を用いてこのテクスチャを推定する方法を提案し、その有効性を示したものである。

スマートフォンなどで画像を撮影した際、カメラ内部で生じる熱雑音や暗電流などに起因するノイズが不可避免的に発生し、このノイズによって画像の品質が大きく低下するという問題が存在する。この問題の解決のため、このノイズが付加された画像（観測画像）からノイズのない真の画像（原画像）を推定する画像ノイズ除去が古くから研究されている。

近年では医用画像の再構成や、暗所などの劣悪な撮像環境で得られた画像を入力とする画像認識の精度を上げることに応用されていることから、より精度の高いノイズ除去手法を実現することは社会の様々な分野に貢献することを意味する。多くのノイズ除去手法は自然画像が持つ特有の性質（事前情報）を利用して原画像の推定を行う。自然画像の事前情報を利用した多くの既存手法のなかでも、画像の局所的な領域（パッチ）が他のパッチと類似すると仮定する非局所自己類似性を用いた手法は、他のノイズ除去手法と比較して高いノイズ除去性能を持つことが知られている。

しかしながら、非局所自己類似性を利用したノイズ除去手法を含む一般の画像ノイズ除去手法は、ノイズを除去する際に、ノイズとともに画像の質感を表すテクスチャを過剰に平滑化するという問題が存在する。テクスチャは画像の特定の部分にある素材の特徴（砂や毛皮、木の皮の感触など）を表す重要な情報であり、テクスチャの損失は画像の主観的な品質を著しく低下させる。

この問題を解決するためには、テクスチャを十分に表現できる事前情報（テクスチャモデル）と、このテクスチャモデルのパラメータの推定法を検討する必要がある。本研究では、原画像と既存のノイズ除去手法の出力画像（ノイズ除去画像）の差分、つまりノイズ除去で失われた成分について着目し、残差テクスチャと定義した。この残差テクスチャを、観測画像とノイズ除去画像の差分（残差ノイズとテクスチャが混ざったもの）から推定することが本研究の目的である。

また、残差テクスチャの共分散行列および残差テクスチャとノイズの共分散を要素とする行列(残差テクスチャとノイズの共分散行列)を前述のテクスチャモデルとして採用した。さらに、Steinの補題といくつかの仮定を用いることで、これらの共分散行列を観測画像並びにノイズ除去画像から推定する手法を提案した。また、推定した共分散行列を用いた線形最小平均二乗誤差フィルタ(LMMSEフィルタ)による残差テクスチャの推定法も併せて提案した。これにより、既存のノイズ除去の際に失われた残差テクスチャの復元を実現した。また本研究では、提案手法の有効性や推定したテクスチャモデルのパラメータの推定精度についても検証を行った。

本研究により画像をノイズ除去する際のテクスチャ復元が可能になった。また本研究を応用することで、一般的な画像のテクスチャ復元のみならず、映画のデジタルリマスターの際の質感復元や、ノイズが付加された画像を画像認識する際の認識精度の向上、医療用画像の画像復元にも応用することが可能であると考えられる。さらに、本研究は、信号の推定において推定しきれなかった残差成分を、推定手法と残差成分の統計的性質に着目して復元する手法であると一般化でき、画像ノイズ除去以外にも様々な応用が得られる可能性があることから、広く画像処理の研究分野に寄与する研究であるといえる。

本論文は以下の5つの章から構成されている。第1章では、研究の背景や画像ノイズ除去の研究動向、テクスチャ推定における問題点について解説した。また本研究の研究目的と方法について紹介した。第2章では、本論文での記号の定義と、本研究で重要となる既存手法であるWienerフィルタとSteinの補題について解説した。第3章では、非学習系の最先端のノイズ除去手法であり、本研究でノイズ除去画像を得るために用いたweighted nuclear norm minimization(WNNM)の解説を行った。また既存のテクスチャを考慮したノイズ除去手法についても解説を行い、それらの用いたテクスチャモデルとパラメータの推定法を考察した。第4章では既存のノイズ除去の際に失われたテクスチャの復元手法の提案を行った。まず残差テクスチャの定義と、本研究で用いるテクスチャモデルである残差テクスチャおよび残差テクスチャとノイズの共分散行列について解説した。次にテクスチャモデルの共分散行列を推定するために、Steinの補題といくつかの仮定を用いることを提案した。またSteinの補題を用いるために、WNNMの線形近似を行うことを提案した。さらに、推定した共分散行列を適用したLMMSEフィルタを用いることによる残差テクスチャの推定法を提案した。ほか、推定した残差テクスチャを適当な強度で強調することによる知覚的品質の向上法についても提案を行った。第5章ではまず第4章で用いた仮定の正当性を予備実験によって確認した。次に本研究の有効性を評価する実験を行った。実験により、提案手法のノイズ除去性能が既存の非学習系の手法と比較して高いことが確認された。また、残差テクスチャを付加する際に付加する強度を変化させた際の知覚的品質の変化を観察し、適当な強度で残差テクスチャを付加した場合知覚的品質がさらに向上することを示した。さらに、Fréchet距離を用いて、推定した共分散行列の推定精度を単純な共分散行列の推定法と比較することで、提案した推定法の有効性が確認された。第6章では、本論文の統括を行った。

本論文は画像ノイズ除去によって失われた残差テクスチャの復元手法について研究したものであり、残差テクスチャ信号のモデル化方法ならびにモデルパラメータの推定手法を提案し、ノイ

ズ除去画像の品質改善について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。従って、学位申請者の齋藤雄太は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。