

# 令和 3 年度 学 位 論 文 （ 博 士 ） 要 旨

玉川大学大学院工学研究科

論文題目 自己相似性およびチャネル間相関を考慮したデモザイキングに関する研究

氏 名 入山太嗣

## 論文要旨

近年、デジタルカメラ、携帯情報端末、携帯電話などのデジタル画像を撮影できる民生用電子機器が広く普及しており、デジタル画像の利用が日常生活へ浸透している。このようなデジタル画像の大きな普及を可能にしたのは、カラー画像取得技術の急速な発展である。実際に、デジタル画像を撮影できる電子機器が、多くの用途に利用できるようになっている。例えば、映像監視システムは、大規模な範囲を一括管理することができ、交通機関や公共施設での利便性や安全性を向上させる。また、画像処理を利用した多くの医療アプリケーションでは、診断をはじめとする様々な医療機能を向上させている。さらに、写真を撮影することは、写真愛好家だけでなく、一般消費者にとっても趣味や娯楽としての定着を見ている。

多くの民生用デジタルカメラでは、カラーフィルタアレイ(CFA)が搭載された単板式のイメージセンサによって光を電気信号へ変換し、画像データが取得される。CFA は、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) のうち 1 色の情報のみを、周期的なパターンにしたがって各画素にサンプリングする。イメージセンサによって観測された生の画像データは、カメラ内部の画像処理エンジンによってカラー画像に再構成される。画像処理エンジンにおいて最も重要な処理は、各画素に観測された 1 つの色情報から不足している 2 つの色情報を推定する処理であり、CFA 補間またはデモザイキングと呼ばれる。最も単純なデモザイキング手法は、バイリニア補間などの空間的に不変な補間処理を各チャネルにそれぞれ適用することである。しかしながら、空間不変な補間処理を用いたデモザイキングでは、高空間周波数成分の欠落や各色成分間のずれにより、知覚的品質を低下させる特有のアーティファクトが発生する。

復元された画像の品質を向上させるために、チャネル間相関や自己相似性といった画像の特性が考慮されており、多くの文献においてその有効性が示されている。チャネル間相関は、ある物体内の色相の差や比率が一定であり、隣接する画素間で色相が急激に変化することは少ないという性質である。この性質に基づき、色比(R-G, B-G)や色比(R/G, B/G)を導入し、滑らかな色相平面の補間値を利用して R および B チャネルの色情報を推定することで、補間精度が向上する。また、自己相似性は、自然画像において、局所的に類似したパッチが画像の異なる位置で観測されるという性質である。この性質に基づき、既知の画素値を未知の画素に移送し補間のために利用することで、アーティファクトの抑制や微細な周期構造が復元される。しかしながら、チャネル間相関に基づく手法は、飽和色やそれらをまたぐエッジなどのチャネル間相関が低い画像に対して有効ではなく、知覚的アーティファクトが残存する。また、自己相似性に基づく手法では、適用する画像に含まれる空間周波数や強い有彩色のオブジェクトの有無に強く依存するため、さまざまな画像に一般化することが困難である。

近年、より高い精度を追求するために、生体の持つ高度で複雑な情報処理機能を組み込むことによる、知的情報処理システムを用いた画像処理手法が活発に検討されている。特に、人間の網膜系情報処理に着目した、セルラーニューラルネットワーク(CeNN: Cellular Neural Network)や畳み込みニューラルネットワーク(CoNN: Convolutional Neural Network)を応用したアプローチは、様々な画像処理問題に応用されており、超解像やデモザイキングなどの画素補間手法においても高い性能を提供している。しかしながら、知的情報処理を応用したデモザイキング手法は、客観的および主観的に従来手法の性能を大きく凌駕して

いるものの、知覚的アーティファクトを完全に除去できるまでには至っていない。また、CoNN による推論システムでは、巨大なデータセットを利用することにより、高い精度の補間や汎化性能を得ることができるが、計算コストとの間のトレードオフを考慮する必要がある。これらの未解決の問題を解決するために、学術的な観点からより優れたデモザイキング手法について検討し、さらなる開発や発展に貢献する戦略を提供することは興味深い課題である。

本論文は、デジタルスチルカメラおよびデジタルビデオカメラのカラー画像取得技術の向上を目的とし、デモザイキングの性能を阻害する未解決の問題点に対して、いくつかの解決策を提案する。デモザイキングにおける問題点であるアーティファクトや誤った補間構造に対して、画像のエッジ部に自己合同性が成り立つことを仮定し、既知の画素情報を移送することによりエッジ部における画素密度を高めることで本来の画像構造を復元する。また、知的情報処理システムを応用したデモザイキング手法の構築を目的として、色差補間手法における未知の色差の予測に、離散時間型 CeNN の非線形内挿効果を利用した予測器を導入する。さらに、一般化されたデモザイキング性能を得るために、自己合同性に基づくエッジ復元およびチャネル間相関を考慮した残差補間法を組み合わせ、異なる特性を持つデータセットに対処する。最後に、より精度の高いデモザイキングを実現するために、色差補間法および非局所フィルタリングを CoNN でモデル化することで、チャネル間相関および自己相似性の特性を考慮した知的画像復元システムを体現化する。本論文は、提案手法の成果に基づき、チャネル間相関および自己相似性を考慮したデモザイキング手法が、アーティファクトの抑制や正しい画像構造を復元するために効果的であることを明らかにする。

本論文の第 4 章では、単板式デジタルカメラによる画像取得技術の一部であるデモザイキング処理に関して、画像のエッジ部における本質的な特性である自己合同性に基づく新しいデモザイキング手法を提案する。本提案手法は、ブロックマッチングおよびサブピクセルマッチングを用いて予測した画素間変位に基づき、補間対象画素の近傍に標本画素値を追加することで画素密度を高め、鮮鋭なエッジ構造が復元される。実験では、ジッターエフェクトおよび誤った画像構造を抑制し、知覚的品質が向上することが示された。このことから、第 4 章では、デモザイキングにおける問題点であるエッジや周期的なパターンを含む画像構造における知覚的アーティファクトの抑制に関して、自己合同性の利用が有効であることを明らかにした。

本論文の第 5 章では、人工網膜ネットワークの 1 種である CeNN を応用した、新しい色差補間法を提案する。本提案手法は、色差補間法における欠落した色差情報の予測に 2 層の DT-CeNN 予測器を導入し、最適な高精度予測色差画像を取得する。実験では、提案手法がジッターノイズや偽色などのアーティファクトの抑制に対して有効であり、一部の画像に対して、既存の色差補間法より優れていることが示された。このことから、第 5 章では、色差補間法における欠落した色差情報の予測に関して、2 層の DT-CeNN 予測器を利用することが効果的であり、自己合同性に基づくエッジ復元手法を組み合わせることで、従来手法の問題点であるエッジ周辺の平滑化問題が改善されることを明らかにした。





本論文の第 6 章では、自己合同性に基づいて推定した暫定的な仮補間画像と観測された CFA 画像から残差 CFA を算出し、残差 CFA に対する色差補間によって推定した残差画像を利用して輝度値の補償を行う、新しいデモザイキング手法を提案した。また、本提案手法における自己合同性に基づくデモザイキング手法は、第 4 章で提案した手法を改良し、2 次元同時サブピクセル推定法を利用することで画像構造をより効果的に復元した。実験では、従来手法が特定のデータセットに対して特化した性能を示すのに対し、提案手法は 2 つのデータセットの平均評価指標で従来手法の性能を上回る結果が示された。このことから、第 6 章では、画像の自己合同性とチャネル間相関の両方を効果的に考慮し、自己合同性を考慮した仮補間画像の生成および残差空間における色差補間法を利用することで、異なる特性を持つデータセットに一般化できることを明らかにした。

本論文の第 7 章では、人間の神経回路を模したニューラルネットワークである CoNN を利用し、チャネル間相関および自己相似性の両方を効果的に考慮した、新しいデモザイキング手法を提案する。本提案手法は、CoNN による各色成分の輝度値の予測問題を、色差空間を予測する問題に置き換え、チャネル間の相関関係を捉えるための CoNN フレームワークを設計した。さらに、ネットワーク内の高レベル特徴マップに非局所ブロックを適用することで、色差予測の特徴マップにおける自己相似性を考慮した。実験では、提案手法は、用意したすべてのテストデータセットに対する客観的評価および主観的評価の両方において、最先端の CoNN に基づくデモザイキング手法の性能を大幅に上回ることが示された。

モデルサイズの比較では，提案手法の軽量化モデルは，同程度のモデルサイズを持つ従来のデモザイキング手法よりも大きく優れた性能が示された．また，**Ablation study** では，提案した色差フレームワークおよび色差推定ネットワークに組み込まれた非局所ブロックの両方が，デモザイキング性能の向上のために効果的に活用されていることが示された．さらに，他の **CFA** パターンに対する適用の実験から，提案手法がさまざまな **CFA** パターンに対して高い普遍性を持つことを確認した．このことから，第 7 章では，**CoNN** を利用した推論システムにおいて，チャンネル間相関および自己相似性の両方を効果的に組み合わせて考慮することが，高精度なデモザイキング手法のために有効であることを明らかにした．

これらの結果から，本論文では，画像処理エンジンの一部であるデモザイキング処理に関して，より優れた手法について検討し，未解決の問題点に対していくつかの解決策を提案することで，目的とするカラー画像取得技術の向上を達成したと考える．

令和3年度 学位論文（博士）審査票

玉川大学大学院 工学研究科 システム科学専攻 博士課程後期			
氏 名	入山 太嗣		
論文題目	自己相似性およびチャネル間相関を考慮したデモザイキングに関する研究		
<p>審査要旨</p> <p>多くの民生用デジタルカメラでは、各画素において赤（R）、緑（G）、青（B）のうちのどれか1色のみ情報を観測しそこから他の2色の情報を推定する。この処理はデモザイキングと呼ばれ、カメラの性能を決める最も重要な処理である。本研究ではこのデモザイキングの性能を向上させる手法の確立を目指し様々な角度から解析が行われている。</p> <p>従来研究より、デモザイキングの性能を向上させるにはチャネル間相関や自己相似性といった画像の特性を考慮することが有効であることが知られていた。また、セルラーニューラルネットワーク(CeNN) や畳み込みニューラルネットワーク(CoNN) を応用したアプローチも試みられてきている。本研究ではこのような従来研究の成果をさらに発展させ、CoNNによってチャネル間相関および自己相似性の両方を効果的に考慮することを可能にした新しいデモザイキング手法を提案している。この手法は、用意したすべてのテストデータセットに対する客観的評価および主観的評価の両方において、最先端の CoNN に基づくデモザイキング手法の性能を大幅に上回っている。また、モデルサイズの比較では、提案手法の軽量化モデルは同程度のモデルサイズを持つ従来のデモザイキング手法よりも大きく優れた性能を示している。さらに、本論文では自己合同性に基づくエッジ復元手法、CeNN を応用した色差補間手法などに関する研究成果についてもまとめられており、これまで入山氏が取り組んできたデモザイキングに関する研究の集大成として位置づけることができる。</p> <p>以上のことより、論文提出者入山太嗣は、博士(工学)の学位を受けるにふさわしい十分な資格があると認める。</p>			
審査委員	主査	相馬 正宜	
	副査	中平 健治	
	副査	大森 隆司	
	副査	相原 威	
	副査	田中 衛	