

氏名（本籍）	岡田 剛季（茨城県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 262 号
学位授与の日付	令和 6 年 3 月 22 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	モフォロジカルネットワークの構成と画像処理への応用に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 中静 真 (副査) 教授 菅原 真司 教授 三浦 元喜 教授 藤原 明広 教授 宮田 高道

学位論文の要旨

モフォロジカルネットワークの構成と画像処理への応用に関する研究

本論文は、計算資源の少ないデバイス上における高画質で高速な画像処理を目的として、画像処理体系の一つであるマセマティカルモフォロジーを用いたネットワークの提案とその実装の研究について述べたものである。

インターネットに接続されている IoT (Internet of Things) デバイスの増加にしたがって、通信路の圧迫や送信されたデータを処理するサーバーの負荷の更なる増加が予想される。その解決策の一つとして、センサなどの近くに配置された、複数の計算資源の少ない小型デバイス内での分散処理が考えられる。そして、画像においては、これらのデバイスで高レベルの画像処理の前処理が実行される。画像データの前処理は特徴抽出やエッジ検出、劣化箇所の復元など多様な処理が存在し、計算時間の多さと引き換えに、より高画質な処理結果を得られる手法も存在する。しかしながら、価格コストを抑えた計算資源の少ない小型デバイス上で、計算時間の多い画像処理をリアルタイムで行い、遅延を防ぐために画像の取得頻度を下げる事で対応した場合、システムの性能が抑えられる。よって、計算資源の少ない小型デバイス上でも高速に動作し、計算時間の多い画像処理に画質が匹敵する画像処理が可能であれば、画像の取得頻度を上げ、システムの性能の向上が実現できる。

高速な画像処理の実現のためにマセマティカルモフォロジーを採用する。マセマティカルモフォロジーは加減算と最大・最小の計算だけで実現が可能で、マセマティカルモフォロジーの演算

を実装したモフォロジカルフィルタは、内部の計算において数値のビット長を広げずに低精度の数値表現のまま処理を行うことができる。したがって、モフォロジカルフィルタを構成要素として採用した画像処理ネットワークは、デバイス内のデータ転送の回数の減少や SIMD (Single instruction, multiple data) などを利用した並列処理により、既存のネットワークよりも高速な処理が期待できる。また、ネットワーク全体の処理速度や出力画像の画質に影響を及ぼす要因は、ネットワーク内のモフォロジカルフィルタの配置する数や位置などの構成の形や、モフォロジカルフィルタ内部の構造要素と呼ばれるパラメータである。したがって、画像処理を行うネットワークを効果的に構成し、フィルタ内部の構造要素を最適化することにより、高画質で高速な画像処理手法としてモフォロジカルネットワークを提案し研究を行った。

本研究では、グレースケール画像における画像処理の中で、画像復元の問題である画像のノイズ除去と欠損部分をうめる画像補完に対して、提案手法を適用して実験を行った。ノイズ除去では白点ノイズなどの単極性ノイズやガウス性ノイズの除去、画像補完では位置が既知で画素値が未知な画素の復元を行い結果を比較した。本研究は二つの研究から構成される。一つ目の研究から、グレースケール画像全般に対して特定の処理に対する構造要素を最適化することで高画質化が可能であること、また、モフォロジカルフィルタが確率的勾配降下法で大量の画像データから最適化できること、ビット長を抑えた計算をすることで処理速度が向上することを示した。二つ目の研究から、拡散プロセスのモデルに対してモフォロジカルラプラシアンと深層展開を適用することで、モフォロジカルネットワークの構成を決定できることを示した。また、そのネットワーク全体の最適化された構造要素の値のビット長を抑えることで、各モフォロジカルフィルタ部で整数演算が可能となり、計算資源の少ないデバイス上において高速で高画質な画像処理が実現できることを示した。

本論文は、以下の6つの章から構成されている。第1章では、本研究の背景と目的について述べる。第2章では、マセマティカルモフォロジーを紹介する。第3章では、本研究における学習法と画質の評価指標を紹介する。第4章では、大量の画像データを用いて基本的なモフォロジカルフィルタの最適化を行えること、ビット長を抑えることで高速にフィルタが動作することを示す。第5章では、拡散プロセスのモデルに対してモフォロジカルラプラシアンと深層展開を適用することで、モフォロジカルネットワークの構成が決まり計算資源の少ないデバイス上で高速で高画質な画像処理が実現できることを示す。第6章では、本研究の結論を述べる。

審査結果の要旨

本論文は、計算資源の少ないデバイス上における高画質で高速な画像処理を目的として、画像処理体系の一つであるマセマティカルモフォロジーを用いたネットワークの提案とその実装の研究について述べたものである。

インターネットに接続されている IoT(Internet of Things)デバイスの増加にしたがって、通信

路の圧迫や送信されたデータを処理するサーバーの負荷の更なる増加が予想される。その解決策の一つとして、センサなどの近くに配置された、複数の計算資源の少ない小型デバイス内での分散処理が考えられる。そして、画像応用分野では、これらのデバイスで高レベルの画像処理の前処理が実行されることが予想される。画像データの前処理は特徴抽出やエッジ検出、劣化箇所の復元など多様な処理が存在し、計算時間の多さと引き換えに、より高画質な処理結果を得られる手法も存在する。計算資源の少ない小型デバイス上でも高速に動作し、計算時間の多い画像処理に画質が匹敵する画像処理が可能であれば、画像の取得頻度を上げ、システムの性能の向上が実現できる。

本論文では、低演算量で高速画像処理の実現のためにマセマティカルモフォロジーを採用する。マセマティカルモフォロジーは加減算と最大・最小の計算だけで実現が可能で、マセマティカルモフォロジーの演算を実装したモフォロジカルフィルタは、内部の計算において数値のビット長を広げずに低精度の数値表現のまま処理を行うことができる。したがって、モフォロジカルフィルタを構成要素として採用した画像処理ネットワークは、デバイス内のデータ転送の回数の減少や SIMD (Single instruction, multiple data) などを利用した並列処理により、既存のネットワークよりも高速な処理が期待できる。また、ネットワーク全体の処理速度や出力画像の画質に影響を及ぼす要因は、ネットワーク内のモフォロジカルフィルタの配置する数や位置などの構成の形や、モフォロジカルフィルタ内部の構造要素と呼ばれるパラメータである。したがって、画像処理を行うネットワークを効果的に構成し、フィルタ内部の構造要素を最適化することにより、高画質で高速な画像処理手法としてモフォロジカルネットワークを提案し研究を行った。

第 1 章では、本研究の背景と目的について述べる。近年のネットワーク環境および画像処理、深層ネットワークの発展について概説し、本研究の立場と意味を述べる。

第 2 章では、古典的な画像処理手法であるマセマティカルモフォロジーと、その実現であるモフォロジー演算を説明する。この章では集合演算としてのモフォロジーから、多値画像を 3 次元空間中の集合としてモフォロジーを適用する多値モフォロジー演算への拡張を示す。さらに、モフォロジカル演算で導出される特徴量として、モフォロジカル勾配とモフォロジカルラプラシアンを導出する。

第 3 章では、本研究における学習法と画質の評価指標を示す。モフォロジカル演算は最大と最小に基づく計算であるため、最適化において目的関数の不連続が発生し、勾配法の適用は困難である。この不連続の影響を考慮して勾配降下法を定義、さらに大量の訓練事例を利用してパラメータの更新を行うために、確率的勾配降下法を導入する。

第 4 章では、大量の画像データを用いて基本的なモフォロジカルフィルタの最適化を行えること、データを低精度で表現することにより高速にフィルタが動作することを示す。例としてオープニング/クロージングフィルタを、ビット誤りから発生するインパルス性ノイズ除去、欠損補間へ応用し、有効性を確認した。欠損補間の例では、画像復元法として広く用いられている全変動ノルム最小化に基づく欠損補間法と比較し、同程度の復元精度で、10 倍以上の高速演算が達成できることを示した。

第5章では、拡散プロセスのモデルに対してモフォロジカルラプリアンと深層展開を適用することで、モフォロジカルネットワークの構成が決まり計算資源の少ないデバイス上で高速で高画質な画像処理が実現できることを示した。この章では、熱拡散のモデルとして知られるラプリアンに基づく時間発展方程式の反復演算から深層ネットワークを構成した。これは、それぞれの反復を一つの層(ステージ)として、独立に実現し、そのステージにおける計算で用いられるパラメータを逆誤差伝播により最適化する方法である。ラプリアンを第2章で定義した2種のモフォロジカル勾配の差分から定義し、モフォロジカル勾配のパラメータを最適化することで、ガウス性ノイズ除去、画像補完(Image Completion)へ応用した。さらにノイズ除去および補完の精度と向上させるために、複数のラプリアンを統合する二つの方法を提案した。

提案した深層ネットワークの計算は、ほぼ最大と最小演算から構成され、乗算による数値の桁の増加が起こらない。そのため、処理全体を8ビット符号無し整数のみで実現することができ、SIMD命令による並列処理を適用することができた。この利点から、組み込み用マイクロプロセッサを用いて、高速な画像処理を実現した。また、パラメータの数も深層ニューラルネットワークの1/20以下であり、低容量・低速な計算環境で画像処理が実現できることを示した。

第6章では、本研究の結論を述べ、今後の展望を示した。本研究では、画像処理をターゲットとして深層ネットワークを構築したが、モフォロジカル演算のフレームワークを利用することで、低演算量かつ高速なパターン認識を実現し、産業へ応用することも期待できる。

以上、本論文は、低演算量かつ高速処理が要求されるエッジコンピューティングにおいて、組み込みプロセッサに好適な画像処理アルゴリズムを提案しており、この提案法は新規性、実用性共に高いと判断できる。また、この論文で得られた知見は、今後のエッジコンピューティング、AIへ活用することも可能であり、価値が高い。従って、学位申請者の岡田剛季は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。