



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	A Study on Acceleration of Image Smoothing and FPGA Implementation of Image Enhancement and Haze Removal as an Application of Image Smoothing [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	Dabwitso, Kasauka
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第13701号
Issue Date	2019-06-28
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74981
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Dabwitso_Kasauka_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (情報科学) 氏名 Dabwitso Kasauka

審査担当者 主 査 教 授 宮永 喜一
副 査 教 授 大鐘 武雄
副 査 教 授 齊藤 晋聖
副 査 准教授 筒井 弘

学位論文題名

A Study on Acceleration of Image Smoothing and FPGA Implementation of Image Enhancement and Haze Removal as an Application of Image Smoothing

(画像平滑化の高速化ならびにその応用としての画像輝度補正およびヘイズ除去の FPGA 実装に関する研究)

本論文では、コスト関数最適化に基づく画像平滑化の高速化手法を検討し、反復法に基づく空間領域での高速かつ高品質な画像平滑化手法を提案し、その有効性評価を行っている。加えて、画像平滑化のアプリケーションとして画像輝度補正およびヘイズ除去を統一的行うフレームワークを提案するとともに、リアルタイム動画像処理可能な FPGA 実装方式を提案し、その有効性評価を行っている。

近年、デジタル画像および動画像処理に関して様々観点で研究開発されている。その中でも本論文は画像平滑化、画像階調補正、ヘイズ除去に焦点をあてる。画像取得および動画像ストリーミング可能な携帯端末の継続的な発展に伴い、リアルタイム処理が可能な画像処理技術の必要性がますます高まっている。このような背景のもと、リアルタイム処理可能な画像平滑化技術、ならびにその応用として、Retinex 理論に基づく画像階調補正ならびにヘイズ除去手法の検討を行う。加えて、効率的なリアルタイム処理を実現する FPGA アーキテクチャを提案する。本研究は (1) 画像平滑化の高速化手法、(2) 画像輝度補正およびヘイズ除去の FPGA 実装、の 2 つから構成される。前者は後者を補完するものである。

本論文は 4 章で構成される。

序論である第 1 章では本論文の背景および全体の概要が述べられている。

第 2 章では画像平滑化およびその高速化手法、特に画像平滑化を連立方程式 $Ax=b$ を解く形式に定式化し、それを反復法で高速に解く既存手法を述べ、そのうえで高速化手法を提案している。

画像平滑化は、デジタル画像をその構造的要素とテクスチャ要素に分離するものであると解釈できる。これは、平滑化が画像の細部を除去し画像の構造的要素のみを残すためである。構造的要素とテクスチャ要素に画像を分割する画像平滑化技術は、エッジ検出、細部強調、画像トーンマッピング、ノイズ除去などの様々な画像処理アプリケーションおよび、コンピュータビジョン、ロボット工学分野に応用される。本論文では、広く使用されている高速フーリエ変換 (FFT) 実装に基づく画像平滑化に代わるものとして、空間領域での反復法に基づく画像平滑化実装について検討する。マルチグリッド、共役勾配法、前処理付き共役勾配法などの反復法を使用した画像平滑化手法を提案手法に対するベースライン手法として述べる。FFT 実装の代替としてのみならず、よりスケーラブルなアプローチ

を提案することも本論文の目的である。厳密解の計算を必要としないアプリケーションでは、FFT とは対照的に提案手法では、収束条件をユーザーが与えることが可能であるため、低コストでスケラブルな実現が可能である。これはハードウェアリソースが限られる状況下では非常に効率的なアプローチである。第一に、マルチグリッドを利用する場合、前処理として共役勾配を適用し、許容誤差を緩和し、グリッド数を最適化することにより、フル HD 画像の画像平滑化計算コストを 185.7 秒から 17.18 秒に削減した。次に、共役勾配のみを使用して、条件を最適化することにより、フル HD 画像に対して 9 秒で平滑化を実現した。さらに前処理を適用することにより、不完全コレスキー分解プレコンディショニング (ICCG) およびマルチグリッドプレコンディショニング (MGCG) の場合に、それぞれ 5.7 秒および 3.4 秒で収束が達成され、共役勾配の性能がさらに向上することを確認した。これらから、MGCG は他の反復法と比較して最も良い性能を実現することを明らかにした。同時に、計算時間と品質の両面で、FFT の対応する実装と同等程度の性能が実現かのうであることを示した。収束条件を緩和可能なアプリケーションの場合、MGCG は FFT ソルバよりも高速に処理が可能である。また、カラー画像の場合、各色成分を並列に平滑化することにより、全体の処理時間が 31 %短縮される。さらに、画像の解像度が一定であることが想定可能なビデオストリーミング等のアプリケーションにおいて、提案方法は、計算集約的なコンポーネントの事前計算が可能である。

第 3 章では画像平滑化のアプリケーションとして画像輝度補正およびヘイズ除去を統一的行うフレームワークを提案するとともに、リアルタイム動画像処理可能な FPGA 実装方式を提案し、その有効性評価を行っている。

輝度補正とヘイズ除去は、情報収集・分類における重要な研究テーマである。屋外で撮影された画像は、光がカメラのセンサに到達するまでの間に光の散乱の影響を受ける。散乱量は被写体との距離に依存し、従って散乱による画像劣化は空間的に変化する。また霧や靄の天候では、水滴などの大気粒子の存在が増えるため散乱量が多くなり、コントラストと色の忠実度が低い画像が取得されることになる。こういった劣化を除去するヘイズ除去技術は、コンピュータビジョン用途において渴望されるものであり、視認性を大幅に向上し、カラーシフトを補正するだけでなく、多くのビジョナルゴリズムや高度な画像編集の前処理として利用可能なものである。ヘイズ除去は Retinex 理論に基づく輝度補正とともに計算コストが必要な処理であり、監視カメラ、自律走行車、およびライブストリーミングなどのアプリケーションでのリアルタイム処理を考慮すると、輝度補正およびヘイズ除去の効率的かつ統一的なハードウェア実装は、非常に有用なものであると考えられる。このような背景のもと、単一のモジュールを利用して低メモリ・低プロセスオーバーヘッドで、リアルタイムに輝度補正とヘイズ除去の両方をサポートするアーキテクチャを提案する。実装結果から、Retinex 理論に基づく輝度補正のハードウェアと基本として、それに対してヘイズ除去をサポートする機能を含めるには、わずか 1 %の回路オーバーヘッドで十分であることがわかった。単一のモジュールを使用することによる計算の複雑さの低減は、異なるモジュールを使用してそれらを個別に実装するのと比較して、特に組み込みシステムにおける処理およびメモリ使用量の低減を可能にする。5.67 Mbit の総メモリサイズで 125 MHz の周波数で動作する提案 FPGA 実装は、WUXGA (1,920 × 1,200) 60 fps および 1080p60 カラー入力をサポートする。240 MHz で動作させる場合は、30 fps で 4K ビデオも処理することも可能である。また、既存アルゴリズムと定量的・定性的評価を実施し、PSNR および SSIM を用いた画質評価の結果、平均して提案手法の方が良い結果を与えることがわかった。

そして第 4 章では、全体のまとめが述べられている。

これを要するに、筆者は、実用的かつ汎用性を有する画像平滑化に基づくアプリケーション実現に関して、その方式提案・開発・実現・評価を行った。これにより、動画画像処理技術ならびにその実装に関する多くの有益な知見を得ており、情報科学の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって筆者は、北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める。