

信号適応性を有する統計的画像復元法に関する研究

学位論文内容の要旨

画像復元問題は、何らかの観測系の出力として得られた画像を基に、未知である真の画像を推定する問題である。この枠組に属する工学的問題としては、大気の影響により劣化を受けた天体画像の復元をはじめとし、焦点ずれによるボケ画像の復元、CT(Computer Tomography)の画像再構成などが挙げられる。また、画像のみならず、例えば通信システムにおける伝送系の同定などに対しても同様の数学的枠組が適用され得ることから、復元は多岐に渡る分野で必要不可欠な要素技術であると言える。

復元手法が持つべき性質としては、

- (1) 未知の原画像が属する空間上で最良の画像を推定できる。
- (2) 観測過程で混入する雑音などの対処も、未知の原画像が属する空間上で行なうことができる。
- (3) 画像に関する事前知識がある場合には、それを有効に活用することができる。

などが重要である。古典的な手法である一般逆フィルタをはじめとする既存の復元手法の多くは、上記性質のうち(1)については考慮がなされている。しかし、拘束条件付き最小二乗フィルタや、それを改良した復元手法においては性質(3)に特化し、性質(2)に関する考慮がなされていない。一方、射影フィルタ族やパラメトリック射影フィルタ族などの統計的画像復元法においては性質(2)に対する保証はあるものの、性質(3)に関しては、画像の存在範囲を線形部分空間に限定したり、原画像空間の計量を画像の母集団の分散構造から決定するなどの大域的な情報以外は活用できない。従って、上で述べたような性質全てを満たす復元法の枠組は与えられていないというのが現状である。

本論文では、上で述べたような現状に照らし、性質(1)と(2)を適切に考慮することが可能なパラメトリック射影フィルタ族の最適化基準の改良に基づき、未知の原画像が属する空間上で最良の画像を推定でき、かつ、雑音に適切に対処できるという性質を有するとともに、画像に関する局所的な情報なども効率的に利用することが可能な復元フィルタ族を構成する。また、同様の方法論を用いることにより、正則化の効果を有する復元法を構成できることを示し、更に、この二つの考え方を同時に適用することにより、双方の長所を有する新しい復元法を構成する。当該復元法に用いる画像の特徴記述には、近年、主に信号処理の分野で盛んに研究が行なわれているウェーブレット理論を採用し、これに基づき、逐次適応的に画像信号の特徴を記述し復元を行なうアルゴリズムを提案する。最後に、これら提案手法の有効性を数値実験により検証する。

本論文は、全9章から構成される。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景及び目的、結果の概要について述べている。

第2章では、本来2次元的な広がりを持つ画像信号を、ベクトルとして扱うための枠組を与え、それに基づいた観測過程及び復元過程について数学的な定式化を行なっている。また、復元フィ

ルタの構成に用いる統計的な情報として、画像や雑音に関する相関作用素などについても定義を与えている。本論文では、観測過程は既知であり、かつ、線形であることを仮定しているが、観測過程が未知である復元問題や非線形な観測過程に対する復元問題も存在する。本章では、そのような復元法などについても概括している。

第3章では、復元過程の構成に際し、統計的な性質を利用しないものについて概括している。具体的には、一般逆フィルタや拘束条件付き最小二乗フィルタ、及びその改良手法を取り上げ、その定義、特徴、問題点などについて述べている。

第4章では、画像や雑音に関する統計的な性質を利用する統計的画像復元法について概括している。具体的には、古典的な手法であるウィナーフィルタや、比較的新しい手法である射影フィルタ族、パラメトリック射影フィルタ族を取り上げ、その定義、特徴、問題点などについて述べている。また、本論文の目的の一つである復元フィルタの正則化を別なアプローチで実現している正則化パラメトリック射影フィルタ族についても述べている。最後に、前述の正則化パラメトリック射影フィルタ族が有する、正則化操作がフィルタの最適性に及ぼす影響が明確でないという問題点を解決した「ノルム拘束型パラメトリック射影フィルタ族」を提案し、その性質について定量的な解析を行なっている。その結果から、このフィルタ族が正則化パラメトリック射影フィルタ族と同等以上の性能を有することを示している。

第5章では、信号適応性を有する統計的画像復元法について論じている。第4章において、統計的画像復元法には個々の画像の特徴を有効に利用する枠組が与えられていないという問題があることを指摘している。本章では、この問題に対処すべく、統計的画像復元法の中でも比較的有効な手法であるパラメトリック射影フィルタ族の最適化基準に個々の画像の特徴を記述する項を付加することにより、この情報を有効に活用できるよう改良した「信号適応型パラメトリック射影フィルタ族」を導出し、フィルタの具体形、数値解法を与えることによって、個々の画像の特徴を利用することが可能である統計的画像復元法を構成できることを示している。また、このフィルタ族と第4章で提案した「ノルム拘束型パラメトリック射影フィルタ族」双方の考え方を同時に適用した「ノルム拘束信号適応型パラメトリック射影フィルタ族」を導出し、個々の画像の特徴を利用することが可能であり、かつ正則化効果を有する第二の統計的画像復元法を構成できることを示している。また、これらの提案フィルタ族と既存手法の関係について定量的な解析を行ない、上記提案フィルタ族が既存手法の多くを包括していることを示している。

第6章では、第7章において画像の特徴を記述する際に用いるウェーブレット理論と、フィルタバンクを用いたデジタル信号に対する多重解像度解析について概括するとともに、いくつかのウェーブレットの例を示している。

第7章では、ウェーブレット変換画像の性質について考察し、画像復元問題への適用可能性について論じている。具体的には、変換成分間に存在するある種の相関構造を用いて画像に関する情報を逐次的に構成し、第5章で提案した「ノルム拘束信号適応型パラメトリック射影フィルタ族」等に適用することにより高精度に復元を行なうアルゴリズムや、ウェーブレット変換成分係数のエネルギー分布を用いて画像が存在し得る領域を記述し復元に利用する方法などについて述べている。最後に、その他の画像処理に対するウェーブレット理論の応用例として、画像拡大手法について述べている。

第8章では、前章までで述べた提案手法及びアルゴリズムについて、その有効性を数値実験によって検証している。具体的には、画像の特徴を効果的に利用し得ることの検証、提案フィルタ族の正則化効果の検証などを行ない、提案法の有効性を確認している。

最後に第9章で、本論文の総括を行なうとともに、課題及び今後の展望について述べている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	宮腰政明
副査	教授	新保勝
副査	教授	伊達惇
副査	教授	北島秀夫
副査	助教授	今井英幸

学位論文題名

信号適応性を有する統計的画像復元法に関する研究

画像復元問題は、何らかの劣化や雑音の影響を受けた観測画像を基に未知である真の原画像を推定する問題であり、復元手法に関し数多くの研究が行われている。

近年、画像復元手法の研究の中で、線形な劣化の場合に対し、推定した原画像と未知である真の原画像との近さの評価と原画像の推定精度に対する雑音の影響の評価を指針とする復元手法の研究が行われ、射影フィルタ族等が提案されている。この研究動向に沿って、線形推定理論を背景とする統計的画像復元法としてパラメトリック射影フィルタ族や正則化パラメトリック射影フィルタ族が提案され、高精度の復元画像の実現や雑音抑制の機序、復元手法の安定性等に関する理論的な解明と相俟ってその有用性が注目されている。

特に、画像復元問題において、原画像が持つべき性質に関し何らかの情報が事前に知られている場合があり、これらの事前知識を復元過程に反映することが出来れば、結果として原画像の推定精度を向上させることが可能である。前述した統計的画像復元法では、原画像の母集団の分散構造から空間の計量を決定する等、事前知識に関しては大域的な情報のみを用いている。この復元法に原画像空間の局所的情報を反映することは新たな復元法の構築の可能性を示唆するが、このような研究は未だ行われていない。また、統計的画像復元法がある意味で原画像空間で最良の画像を推定することや、雑音の復元過程による原画像の推定精度への影響を最小にすることを勘案して構築されている点に鑑み、画像に関する事前知識を反映することが、この点とどう関連するかを理論的に解明することが重要である。

本論文において、著者は、以上のような現状に照らし、統計的画像復元法に画像の事前知識を反映した画像復元手法を論じ、新たに三つの画像復元フィルタ族を理論的に導出し、前述の問題点に関して三つのフィルタ族がある意味でパレート最適解となることやこれらのフィルタ族による復元法の安定性を論じ、更に、これらのフィルタ族による画像復元の有効性を数値実験により検証している。

本論文の主要な成果は以下の四点に要約される。

(1) 統計的画像復元法を総括し、既存のフィルタ族について問題点を論じた。特に、

統計的画像復元法の中で有効な手法である正則化パラメトリック射影フィルタ族に関し、最適性に関する正則化操作の影響が明確でないことを指摘し、フィルタの最適化基準の検討を行い、新たにノルム拘束型パラメトリック射影フィルタ族を提案し、その具体形や存在条件等を明らかにした。また、このフィルタ族が既存のフィルタ族への収束に関し、正則化パラメトリック射影フィルタ族と同等以上の収束性能を持つことを理論的に明らかにした。

- (2) 統計的画像復元法が画像に関する情報を有効に利用する枠組を持たないことを指摘し、信号適応性を有する統計的画像復元法について論じた。特に、パラメトリック射影フィルタ族に対し、その最適化基準に画像情報を反映するように基準の再構成を行い、新たに信号適応型パラメトリック射影フィルタ族を提案し、その具体形と存在条件を明らかにした。また、大規模画像に対応するための数値解法を与え、数値実験によりこのフィルタ族の有効性を検証した。
- (3) 画像に関する情報を利用し、かつ、正則化効果を持つ統計的画像復元法を構成するため、ノルム拘束型と信号適応型の双方の考え方をを用いたノルム拘束信号適応型パラメトリック射影フィルタ族を新たに提案し、その具体形と存在条件を明らかにした。また、このフィルタ族と既存の統計的画像復元法の相互関係について理論的な解析を行ない、このフィルタ族が前述の二つのフィルタ族を含む統計的画像復元法の各フィルタ族に収束するための条件を明らかにした。
- (4) ウェーブレット変換画像の画像復元問題への適用可能性について論じ、変換成分間に存在する相関構造を用いて画像に関する情報を逐次的に構成し、ノルム拘束信号適応型パラメトリック射影フィルタ族等に適用して、高精度に復元を行なうアルゴリズムを提案した。また、ウェーブレット変換成分係数のエネルギー分布を用いて画像が存在し得る領域を記述し、復元に利用する方法を提案した。さらに、数値実験によりこれらのアルゴリズムの有効性を検証した。

これを要するに、著者は、従来の統計的画像復元手法に対し、画像に関する事前知識を反映した復元手法の構築について理論的検討を行い、信号適応型の画像復元手法に関して新知見を得たものであり、数理情報工学及び像情報工学の進歩に寄与するところ大である。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。