

学位論文題名

線形推定理論に基づく画像復元法とその安定性に関する研究

学位論文内容の要旨

コンピュータの性能が向上したことにより、多くの場面でデジタル画像処理が用いられるようになった。例えば、医療画像処理におけるCT(コンピュータ断層法)は、コンピュータによる画像処理の好例である。今後、コンピュータの性能が上がるにつれて、より多くの場面で画像処理が用いられるようになると思われる。現実には扱われる画像は、何らかの原因による劣化を受けていることが多い。CT画像では、検査対象が動くことによるぶれが、画像の劣化の一例である。また、有限の素子で計測することによる離散化も劣化の要因になり得る。さらに、劣化した画像には雑音による汚れが加わる場合が多い。離散化の過程はコンピュータによる画像処理では避けられないこともあり、劣化を受けた上に雑音による汚れが加わった画像から、原画像を忠実に復元することは、画像処理において重要な問題である。これまでにも、劣化と加法的雑音による影響を画像観測モデルとして数学的に定式化し、その定式化のもとで、より原画像に近いものを求める画像復元に関する研究が数多く行われている。

画像復元においては、観測過程に関して観測画像の他にどのような情報を利用できるかによってさまざまな復元手法が提案されている。観測画像以外の知識をほとんど仮定しない手法は多くの場合に適用可能である反面、高精度の復元は困難である。一方、雑音及び原画像の統計的性質や劣化の性質に関する知識があれば、より精度の高い復元が可能である。しかし、現実の画像観測においては、観測過程が正確にわかっている場合は少ないため、先験的な知識や事前に行う予備的な観測によって観測過程に関する情報を得ることが多い。このようにして得られた観測過程に関する知識は多くの場合、原画像が実際に受けたものとは必ずしも一致しない。

本論文においては、復元に用いられる劣化、雑音及び原画像の統計的な性質が真のものと異なっている場合に、その相違が復元画像に及ぼす影響に関する考察を行い、その結果に基づいて、観測過程に関する知識の微少な相違に対して頑健な画像復元手法を提案する。

本論文は2部からなっている。第一部は第2章から第5章により構成される。第一部においては、これまでに提案されてきた最適画像復元フィルタである一般逆フィルタ及び射影フィルタ族、パラメトリック射影フィルタ族の統一的な導出方法とそれらの諸性質を明らかにしている。第二部は第6章から第9章により構成される。第二部においては、第一部で述べた各種の最適画像復元フィルタに対して、観測過程に関する知識の微少な相違がどのような影響を与えるかを考察し、その結果に基づいて、観測過程に関する知識の微少な相違に対して頑健な画像復元手法を提案する。各章の概要は以下の通りである。

第1章は前書きであり、本研究の目的と、得られた結果の概要を述べる。

第2章では、画像観測に伴う諸概念の説明を行い、それらに基づいて画像観測モデルの定式化を行う。本論文で扱う劣化は線形のを仮定するが、現実の画像観測で大部分を占める非線形の劣化を受けた画像復元手法についても記述した。

第3章では線形推定理論に基づく画像復元の基礎となる作用素の一般逆と、擬ノルム最小の最小二乗型一般逆に関する諸性質を述べた。これらの性質は以下の章の基本となるものである。

第4章では、一般逆フィルタと射影フィルタ族の導出方法と性質を述べた。従来の研究においてはこれらの最適画像復元フィルタはある作用素方程式を満たすものとして統一的な導出方法が示されていたが、本論文においてはこれらのフィルタが第2章でのべた一般逆及び擬ノルム最小の最小二乗型一般逆として解釈できることを示した。また、共通部分をもつ複数の観測画像の復元問題に部分射影フィルタを適用できることを示し、その有効性を数値例により確認した。航空写真など、複数の画像の中に共通部分が存在することは実用上少なくないので、部分射影フィルタを用いることで、より高い精度の復元ができることを示したことは応用上有用である。

第5章では、パラメトリック一般逆フィルタ及びパラメトリックフィルタ族の導出方法とその性質を述べた。パラメトリック射影フィルタ族は従来、個別に議論されてきたが第5章ではそれらがある作用素方程式を満たすものとして統一的に導出することができることを示した。このような導出方法により、パラメトリック射影フィルタに属する最適画像復元フィルタの共通の性質を明らかにすることが可能になった。

第6章では、画像観測モデルについて、劣化や原画像及び雑音の統計的性質に関する知識がない場合の復元手法と、以下の章で前提とする画像観測モデルの性質をまとめた。

第7章では、一般逆フィルタと射影フィルタ族について、画像観測モデルとして仮定した劣化や原画像及び雑音の統計的性質に関する知識が、真のものと微少に異なっている場合に、その差異が復元画像に及ぼす影響について考察し、真のものととの差異が微少であっても復元画像には大きな影響を及ぼす条件を明らかにした。条件は、例えば計算機の数値計算誤差によっても満たされる場合がある。さらに、数値実験によってこれらの結果を検証し、実際に観測過程の知識の微少な差異によって復元画像が大きく異なることを示した。

第8章では、パラメトリック射影フィルタ族について同様の考察を行い、画像観測モデルの微少な差異がパラメトリック射影フィルタ族に属する最適画像復元フィルタによる復元画像に大きな影響を与える条件を求めた。また、数値実験によってこれらの結果を検証した。

第9章では、第7章と第8章で示された結果に基づいて、正則化手法を取り入れた画像復元フィルタである正則化パラメトリック射影フィルタ族を用いた画像復元法を提案した。また、適切な正則化パラメータを選ぶことによって、正則化パラメトリック射影フィルタが射影フィルタ族及びパラメトリック射影フィルタ族のよい近似となることを示した。このフィルタ族を用いることにより、画像観測モデルに真のものととの微少な差異がある場合においても、真の画像観測モデルに基づく復元画像に十分に近い復元画像を得ることができる。さらにその有用性を数値実験により確認し、正則化パラメトリック射影フィルタ族を用いた画像復元法が観測モデルの微少な差異に対して安定であることを示した。

第10章では、本論文で得られた結果のまとめを行った。また、残された解決すべき課題について述べた。

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

学 位 論 文 題 名

線形推定理論に基づく画像復元法とその安定性に関する研究

画像処理において、何らかの原因による劣化と雑音が加わった観測画像から、原画像を忠実に復元することは重要な問題の一つであり、劣化と加法的雑音による影響を画像観測モデルとして数学的に定式化し、その定式化のもとで、より原画像に近いものを復元する画像復元フィルタに関する研究が数多くなされている。

画像復元問題では、観測過程に関してどのような情報が利用可能かによって種々の復元手法があり、劣化の性質や雑音及び原画像の統計的性質に関する知識を仮定する手法は、より精度の高い原画像の復元が可能であることから、主要な画像復元手法の一つとなっている。このような手法の中で、線形な劣化による画像観測モデルに基づき、高精度の復元画像を実現する画像復元フィルタとして一般逆フィルタ及び射影フィルタ族等が知られているが、これらのフィルタ族に対し、画像観測モデル上での観測過程に関する知識と真のものとの差異が復元画像に及ぼす影響は未だ明らかにされていない。

本論文において、著者は画像復元問題が推測統計学の回帰モデルと密接に関連し、線形な劣化の場合の画像復元問題が線形回帰モデルに関わる線形推定問題と本質的に同等であるとの立場から、一般逆フィルタ及び射影フィルタ族を対象として、このフィルタ族の性質やこのフィルタ族による画像復元手法の安定性を論じている。また、新たにパラメトリック射影フィルタ族と正則化手法を用いた正則化パラメトリック射影フィルタ族を提案し、これらのフィルタ族による画像復元手法の安定性とその有用性について論じている。その主要な成果は以下の四つに要約される。

- (1) 線形推定理論に基づき、画像復元の基礎となる作用素の一般逆の理論を拡張し、擬ノルム最小の最小二乗型解を与える作用素に関する理論を展開し、その諸性質を理論的に証明した。また、与えられた連立作用素方程式や作用素方程式に対し、擬ノルム最小の最小二乗型解を与える作用素が存在するための条件を明らかにした。
- (2) 一般逆フィルタと射影フィルタ族の導出方法とその性質を論じ、また、従来、個

別に議論されてきた各種のパラメトリックフィルタをある共通の作用素方程式を満たすものとして統一的に導出できることを証明し、より包括的なパラメトリック射影フィルタ族を定式化した。これらにより、一般逆フィルタと射影フィルタ族、パラメトリック射影フィルタ族に属する画像復元フィルタの相互関係と共通の性質を明らかにした。

- (3) 画像観測モデルで仮定した観測過程に関する知識と真のものとの微小な差異が復元画像に及ぼす影響は実用上の重要な問題である。これらの微小な差異に対する一般逆フィルタと射影フィルタ族、パラメトリック射影フィルタ族による復元画像の安定性を論じるため、擬ノルム最小の最小二乗型解を与える作用素に摂動法を適用し、微小な差異に対する各種フィルタ族の復元画像の安定性に関する条件を明らかにした。さらに、数値実験によってこれらの結果を検証した。
- (4) 新たに正則化手法に基づく正則化パラメトリック射影フィルタ族を用いた画像復元法を提案し、このフィルタ族が射影フィルタ族及びパラメトリック射影フィルタ族のよい近似となる正則化パラメータに関する条件を明らかにした。また、適切な正則化パラメータを選択することにより、このフィルタ族が画像観測モデルの仮定と真のものとの微小な差異に起因して射影フィルタ族及びパラメトリック射影フィルタ族によって望ましい復元画像が得られない場合でも、真の画像観測モデルに基づく復元画像に十分に近い復元画像を得ることが可能であることを証明した。さらに、数値実験によりこれらの結果を検証し、正則化パラメトリック射影フィルタ族の有用性を確認した。

これを要するに、著者は、従来の画像復元法について線形推定理論に基づき、統合的検討を行い、画像復元法とその安定性に関して新知見を得たものであり、数理情報工学及び画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。