

(論文内容の要旨)

デジタル画像処理は、観測画像から様々な情報を抽出することで実世界における問題の解決に役立ち、その果たす役割は今なお拡大し続けている。画像推定問題、すなわち観測には直接含まれない情報を抽出する問題は、統計学の立場からは、確率モデルに基づく推定問題として定式化され、観測と所望の情報とに応じて様々な確率モデルが提案されている。階層ベイズ統計の枠組みは、問題に関する事前知識を確率分布として表現し、確率分布を連鎖させることで、フレキシブルなモデル設計が可能である一方、しばしば推論が計算量的に困難となる。画像の持つ統計的な性質や目的とする情報に応じて柔軟なモデルを採用しつつ、効率的に推論をおこなう方法論が求められている。

本論文は、画像の解像度向上を具体的な問題として、自然画像の特徴や観測過程の特性に着目した画像推定のための方法を提案している。画像に関する事前知識と観測過程が確率分布を用いて表現される。モデル化の方向に着目することで確率モデルを大きく逆転的方法と合成的方法の2種類に分け、それぞれの方法論の特長を生かした画像推定が可能であることが示唆されている。本論文では、特に、階層ベイズの枠組みに基づいたアプローチを、想定する状況に応じたモデルの適切さや推定された高解像度画像の精度評価を通じて検討している。

第1章では本論文の研究の背景と概要を述べている。第2章は文献調査に充てられ、画像の解像度向上に関する基礎事項と従来研究が概説されている。第3章ではベイズ統計的な定式化に基づく超解像法の具体的な描写がなされている。

第4章では、互いに異なる位置ずれを持つ複数枚の低解像度画像を統合して、エッジ構造を保存しつつ高解像度画像を推定する「エッジ保存超解像法」について検討している。画像に関する事前知識として、撮影された物同士の境界では、画素値が急激に変化することを利用する。本論文で提案されたエッジ保存超解像法によれば、この事前知識を積極的に利用するものとして、エッジを明に表現する隠れ変数を導入した上で、位置あわせと高解像度化を同時実行する。エッジの存在する事後確率がベイズ推定され、非エッジ領域における強い平滑化とエッジのある場所における平滑化の抑制とが、エッジ存在確率に基づく局所的な平滑化制約の制御により実現される。厳密なベイズ推定は計算量的に困難であるため、変分法に基づく近似計算法が利用され、効率的なアルゴリズムが導出されている。多数のデータセットを用いた計算機実験により、提案手法の有効性を示している。

第5章では、エッジ保存超解像法におけるハイパーパラメタの適応的な調節手法について検討している。超解像アルゴリズムは、一般に正則化パラメタのような調節可能なハイパーパラメタを持ち、その最適な値は与えられる観測画像によって大きく異なりうる。たとえば、ノイズの強い画像に対しては、正則化を強く働かせ平滑化効果を強くすることで、ノイズ除去効果が大きくなると期待される。本論文では、エッジ保存超解像法であって、ハイパーパラメタをベイズ推定することで観測画像に応じたハイパーパラメタ値が利用できる手法を提案している。提案法では、ハイパーパラメタの上には自然共役事前分布が設定され、変分法に基づく近似ベイズ推定アルゴリズムが導出されている。異なる画像・ノイズ条件・画像枚数の下で計算機実験を行い、提案手法の有効性を示している。

第6章では、複数枚の低解像度画像の一部が遮蔽されている場合の超解像法について検討している。衛星写真中の雲や、観光地における人影など、観測が遮蔽されている場合は多い。そのような状況では、遮蔽に影響されないで高解像度画像を推定することが望ましい。本章では、観測画像中の遮蔽を同定しその影響を軽減した上で、高解像度画像推定が可能な超解像法を提案している。提案法では、遮蔽を表現する隠れ変数が導入され、そのベイズ推定を通じて画素ごとの遮蔽確率が計算される。遮蔽領域では観測の信頼度が低下しているものとみなされ高解像度画像推定に用いる際の重みが小さくされる、というように、推定された遮蔽の有無に応じて観測の重みが調節される。遮蔽が各観測画像で同一の場合と観測画像ごとに異なる場合とで、計算機実験により提案手法の有効性を示している。

第7章では、解像度向上のためのコンパクトかつ高性能なフィルタを、低解像度・高解像度画像のペアからなるデータに基づき学習する手法について検討している。解像度向上のための多くの画像補間法は、低解像度画像に線形フィルタをほどこして高解像度画像を出力するものと解釈することができる。フィルタ係数を低解像度・高解像度画像のペアからなるデータに基づき学習する際には、フィルタのサポートをどれほど大きくとればよいかが分からない。本論文では、解像度向上性能を落さずに、一方でサポートが小さくなるように、フィルタおよびサポートをデータから自動的に決定する手法を提案している。提案法では、フィルタ係数の上にその高解像度化における重要性を制御する連続パラメタが置かれ、スパースベイズ学習を通じて不要な係数は0に縮退するものとして推定されることで、サポートの大きさが決定されている。テストデータに対する高解像度化の性能を評価することで、提案手法の有効性を示している。

第8章の結論では、本論文の学術的貢献のまとめと今後の発展可能性が述べられている。

氏 名

兼村厚範

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、画像の解像度向上を具体的な問題として、自然画像の特徴や観測過程の特性に応じた適切な画像推定を実行するための方法論に関する研究をとりまとめたものである。得られた主な成果は以下の通りである。

1. 互いに異なる位置ずれを持つ複数枚の低解像度画像を統合して、エッジ構造を保存しつつ高解像度画像を推定する方法について検討し、エッジを陽に表現する隠れ変数を導入した上で、位置合わせと高解像度化を同時実行するエッジ保存超解像法を階層ベイズ推定の枠組みを用いて提案した。多数のデータセットを用いた計算機実験により、提案手法の有効性を示した。

2. エッジ保存超解像法におけるハイパーパラメタの適応的な調節手法について検討し、変分ベイズ推定により観測画像に応じてハイパーパラメタを調節して用いる手法を提案した。異なる画像・ノイズ条件・画像枚数の下で計算機実験を行い、提案手法の有効性を示している。

3. 複数枚の低解像度画像の一部が遮蔽されている場合の超解像法について検討し、観測画像中の遮蔽を同定し、その影響を軽減した高解像度画像推定が可能な超解像法を階層ベイズ推定の枠組みを用いて提案した。遮蔽が各観測画像で同一の場合と観測画像ごとに異なる場合とで、計算機実験により提案手法の有効性を示した。

4. 解像度向上のためのフィルタを、低解像度・高解像度画像のペアからなるデータに基づき学習する手法について検討し、フィルタ係数の事前分布のパラメタのスパースベイズ学習によりコンパクトかつ高性能なフィルタを獲得する方法を提案した。テストデータに対する高解像度化の性能を評価することで、提案手法の有効性を示した。

以上のように本論文は、自然画像の性質、観測過程の特徴を表現した階層的確率モデルに基づき、画像超解像・解像度向上のためのベイズ推定法を提案し、計算機実験を通じてその有効性を評価したものであり、画像推定に対するベイズ統計手法の整備に寄与するものである。よって、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成21年8月21日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。