

カワムラ ナオキ

氏名	河村 直輝
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博第1149号
学位授与の日付	平成31年3月27日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	Super-Resolution and Reconstruction of Medical Images (医用画像の超解像と再構成)

論文審査委員	主査	教授	本谷 秀堅
		教授	梅崎 太造
		教授	佐藤 淳

論文内容の要旨

本論文は、医用画像の再構成及び超解像における新規モデルの考案と、それらを最適化問題として解くための枠組みに関して論じたものである。医用画像の再構成及び超解像による体機能の可視化やその高解像度化は、診断や臨床研究のほか、計算機による診断支援や画像解析を行う上でも重要な課題である。一般的に、画像再構成や超解像は不良設定な逆問題として定式化される。不良設定問題を解くには、解となる画像に対してユーザーが持つ事前知識を導入する事で解空間を拘束することが重要である。この事前知識としては、昨今では深層学習を用いた手法が非常に効果的であり、医用画像分野においても深層学習を応用した研究が活発に取り組まれている。しかしながら、深層学習を医用画像に適用する事は挑戦的であるとされる。というのも、医用画像処理においては腫瘍や病変など、統計上稀なケースを注意深く扱いたい場合が多いが、学習によるバイアスが掛かると、それらの稀なケースに対応できなくなる可能性がある。

そこで本論文では、構成すべき画像の観測過程や特性に応じて事前知識を設定し、数理モデルとして導入する手法について論ずる。具体的には、次の3種類の画像の再構成及び超解像課題について、それぞれの画像モダリティの特性に応じた事前知識を最適化問題へと定式化し、それらの解法の枠組みを提案する。

(1)Magnetic Resonance (MR)画像の物体超解像

(2)無採血による頭部 Positron Emission Tomography (PET)画像の再構成

(3)試料の連続する切片から撮影された病理顕微鏡画像の Blind Deconvolution

(1)ではMR画像の背景画素値が本来ゼロである事を事前知識とする。観測過程と背景の画素値ゼロである事が既知である時、効果的な従来法として Gerchberg 法が利用できる。しかしながら Gerchberg 法は観測過程においてノイズの存在を考慮しておらず、また実応用上アーチファクトが発生することが知られる。そこで特徴量のスパース正則化の導入により、この問題に対処する。提案法ではまず、アルゴリズム形式の Gerchberg 法を最適化問題として再解釈・定式化する。この問題を Total Variation と核ノルムで正則化することで、ノイズやアーチファクトに頑健な超解像モデルへと拡張する。

(2)では、PET 画像の再構成問題において、(i)PET 画像の観測モデル、(ii)画像空間が従うモデル、(iii)時間変化が従うモデル、の 3 つをそれぞれ導入する。(i)では、PET 観測時におけるポアソン過程に基づき、観測データとの整合性を KL ダイバージェンスで評価する。(ii)では PET 画像の背景がゼロである事、画素値が非ゼロである事を基底ベクトルにより表現する。(iii)では PET の動態解析に用いられるコンパートメントモデルを導入する。PET のコンパートメントモデルは撮影時に体内に注射した薬剤濃度の時間変化による動態を表現した数理モデルであり、これを PET 画像の時間変化における解の拘束条件として利用する。

(3)では、病理顕微鏡画像を撮影した際の、試料切片の起伏などによって生じるぼけの復元を目的とする。対象となる病理画像群は、一つの染色試料を薄く輪切り状にして、各切片を一枚ずつ顕微鏡画像で撮影したものである。また、これらの画像群は互いに位置合わせされているものとする。解の拘束式としてはぼけカーネルに対する事前知識のほか、大変形微分同相写像(LDDMM)により試料切片の連続性をモデル化し、高解像なテクスチャとの整合性を組み込む。また、画像の滑らかさに基づく事前知識を勾配の L_0 ノルム制約で記述する。

以上の各課題において、最適化問題の定式化及び解法を提案した。性能値実験においては、人工・ファントム画像による定量評価のほか実臨床画像を用いて報告する。また、提案法の挙動や、画像再構成・超解像モデルとして従来法と比較した立ち位置などについて考察する。

論文審査結果の要旨

本論文は、医用画像の再構成及び超解像における新規モデルの考案と、それらを最適化問題として解くための枠組みに関して論じたものである。医用画像の再構成及び超解像による体機能の可視化やその高解像度化は、診断や臨床研究のほか、計算機による診断支援や画像解析を行う上でも重要な課題である。一般的に、画像再構成や超解像は不良設定な逆問題として定式化される。不良設定問題を解くには、解となる画像に対してユーザーが持つ事前知識を導入する事で解空間を拘束することが重要である。この事前知識としては、昨今では深層学習を用いた手法が非常に効果的であり、医用画像分野においても深層学習を応用した研究が活発に取り組まれている。しかしながら、深層学習を医用画像に適用する事は挑戦的であるとされる。というのも、医用画像処理においては腫瘍や病変など、統計上稀なケースを注意深く扱いたい場合が多いが、学習によるバイアスが掛かると、それらの稀なケースに対応できなくなる可能性がある。

そこで本論文では、構成すべき画像の観測過程や特性に応じて事前知識を設定し、数理モデルとして導入する手法について論ずる。具体的には、次の3種類の画像の再構成及び超解像課題について、それぞれの画像モダリティの特性に応じた事前知識を最適化問題へと定式化し、それらの解法の枠組みを提案する。

(1)Magnetic Resonance (MR)画像の物体超解像

(2)無採血による頭部Positron Emission Tomography (PET)画像の再構成

(3)試料の連続する切片から撮影された病理顕微鏡画像のBlind Deconvolution

(1)ではMR画像の背景画素値が本来ゼロである事を事前知識とする。観測過程と背景の画素値ゼロである事が既知である時、効果的な従来法としてGerchberg法が利用できる。しかしながらGerchberg法は観測過程においてノイズの存在を考慮しておらず、また実用上アーチファクトが発生することが知られる。そこで特徴量のスパース正則化の導入により、この問題に対処する。提案法ではまず、アルゴリズム形式のGerchberg法を最適化問題として再解釈・定式化する。この問題をTotal Variationと核ノルムで正則化することで、ノイズやアーチファクトに頑健な超解像モデルへと拡張する。

(2)では、PET画像の再構成問題において、(i)PET画像の観測モデル、(ii)画像空間が従うモデル、(iii)時間変化が従うモデル、の3つをそれぞれ導入する。(i)では、PET観測時におけるポアソン過程に基づき、観測データとの整合性をKLダイバージェンスで評価する。(ii)ではPET画像の背景がゼロである事、画素値が非ゼロである事を基底ベクトルにより表現する。(iii)ではPETの動態解析に用いられるコンパートメントモデルを導入する。PETのコンパートメントモデルは撮影時に体内に注射した薬剤濃度の時間変化による動態を表現した数理モデルであり、これをPET画像の時間変化における解の拘束条件として利用する。

(3)では、病理顕微鏡画像を撮影した際の、試料切片の起伏などによって生じるぼけの復元を目的とする。対象となる病理画像群は、一つの染色試料を薄く輪切り状にして、各切片を一枚ずつ顕微鏡画像で撮影したものである。また、これらの画像群は互いに位置合わせされているものとする。解の拘束式としてはぼけカーネルに対する事前知識のほか、大変形微分同相写像(LDDMM)により試料切片の連続性をモデル化し、高解像なテクスチャとの整合性を組み込む。また、画像の滑らかさに基づく事前知識を勾配のL0ノルム制約で記述する。上記の各課題において、最適化問題の定式化及び解法を提案した。性能値実験においては、人工・ファントム画像による定量評価のほか実臨床画像を用いて報告する。また、提案法の挙動や、画像再構成・超解像モデルとして従来法と比較した立ち位置などについて考察する。

以上の成果は学術論文2編、査読有りの国際会議1編などで発表した。以上の事柄に基づき、慎重な審査の結果、本論文は博士(工学)に値すると判断する。