

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 23 年 5 月 31 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21500214

研究課題名（和文） 3次元画像再構成アルゴリズムへの情報統計力学的アプローチ

研究課題名（英文） Statistical Mechanical Approach to the 3-Dimensional Medical Image Reconstruction

研究代表者

庄野 逸（SHOUNO HAYARU）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：) \$&^* & %

研究成果の概要（和文）：

医療診断などで用いられる断層画像の画像再構成問題において、情報統計力学的なアプローチに基づいたベイズ画像推定法を提案し、画質による性能評価を行った。ベイズ推定を行う際には、観測データと事前情報の強度比を推定した上で行うようなアルゴリズムを提案し、ノイズ除去の意味で良好な結果を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：

We introduce a Bayes inference method, which is a kind of statistical mechanical approach, into the medical tomography image reconstruction that is frequently used in the diagnosis. Applying the Bayes inference, we provide an inference algorithm for the strength ratio between prior knowledge and the observed data. In the result, we confirm our algorithm shows better results in almost all the cases rather than that of the conventional method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：CT画像, Radon変換, ハイパーパラメータ推定, ベイズ推定, 画像修復

1. 研究開始当初の背景

医用画像などで用いられるCT画像などの投影断層画像は、構造物内部の診断などにおいて有用な情報源である。CT画像は、観測対象を透過するX線を観測対象外部に設置したセンサで観測し、得られたデータを計算機で再構成処理することで得られる。CT断層画像の取得にはX線による被爆の影響などが懸念されるため、より低侵襲な観測が望まれているが、この場合X線の透過率が低下し、観

測信号のS/N比が悪くなるため、再構成画像の画質の低下が発生することが知られている。医療画像などで用いられるX線CT画像やPET画像などの3次元断層画像は、体内を透過する信号を測定し、計算機を用いて3次元的な画像を再構成する。この再構成手法としては、フーリエ変換に基づいたFBP法や、最尤推定を用いたML法が用いられる。FBP法は現在のCT画像再構成手法の主要な手法であり、観測過程の逆過程である逆

Radon 変換をフーリエ空間上で行うことで画像を再構成する手法である。この手法はフーリエ空間で再構成を行う為、観測ノイズの影響が再構成画像の広範囲の領域に広がるアーチファクトを発生させることがあった。

一方、ベイズ推定の研究分野では 90 年代後半から 2000 年代に掛けて、計算機の能力向上、近似アルゴリズム理論の進展、多分野間での研究連携の発足などがあり、実アプリケーションに対するベイズアプローチを用いた解法が広く認知され用いられるようになった。特に画像処理分野などにおいては、画像修復などの研究が、統計力学などのツールを用いて解釈されるようになった。

このような研究背景の下、本研究では画像再構成アルゴリズムとベイズ推定の近年得られた知見を融合させることによって、あらたな画像再構成アルゴリズムを構成することは比較的自然的な拡張であるように考えられた。

2. 研究の目的

本研究では、本研究計画では、画像再構成の分野に対して、ベイズ的アプローチを用いたアルゴリズムを開発することが目的である。ベイズ的アプローチでは、画像を再構成する際に、観測過程を確率モデルで表し、その上で、事前情報を付加することによって、観測過程で劣化した情報を補う。すなわち S/N 比が悪い画像からでも、より良い画質の画像を再構成することを目的としている。この手法を積極的に援用することにより、低侵襲で高解像な再構成画像を得ることが期待できる。低照射線量下の環境では観測信号の S/N 比が悪くなるが、事前分布を導入した効果がどの程度の S/N 比の信号に対してまで有効かをベイズ的なアプローチで検討する。特に事前情報をどの程度の強度で用いるかによって観測画像の画質は大きく変わってくる。この強度評価は比較的難しく、事前情報の強度をパラメータ化し（ハイパーパラメータ）、複数の画像を用いたシミュレーションなどで評価することが一般的であった。これに対しベイズ的なアプローチでは、ハイパーパラメータを画像から推定する手法（周辺対数尤度最大化手法）を提供しているため、これを用いて評価を行うことを考え、どの程度の S/N 比の信号に対して、どのくらいの画質が提供できるのかを定量的に評価していく。

3. 研究の方法

研究の方法としては、再構成の理論にベイズアプローチを行う段階、近似アルゴリズムを導入する段階、シミュレーションによる評価という 3 段階で研究を行なっていくものとした。

再構成理論の作成と確認ではベイズ法を再構成モデルにする作業を行った。断層画像の撮像原理の適切なモデル化を行い、ノイズの発生源などの定式化を行った。これには Shepp & Logan らが用いたモデルに様々な観測ノイズを付加した形で考えるものとした。モデルにおける理論作成の初期段階ではモデルを複雑にしすぎると見通しが悪くなるため、必要最小限の見極めを行った。特にノイズの導入においてポアソン分布を用いた場合、連続近似が困難になる場合も予想されたので、数理モデルを構築する段階ではガウス分布などの扱いやすい分布を用いてモデル化を行い、制限ガウス分布モデルやポアソン分布モデルに順次拡張していく方針であった。ベイズ的アプローチにおいては、観測過程だけでなく事前分布を導入することが重要であった。CT 画像は、通常の 2 次元画像と異なり 3 次元の立体的な画像として捉えることができる。従来の手法では平面断層画像を再構成した後で 3 次元的な立体画像を得るというプロセスで再構成することが多いが、最初から 3 次元的な立体画像であると仮定して再構成を行う方が自然な形である。この為、解析を行う為の MRF も 3 次元的な場として考えた。具体的な事前分布の形状としては、情報統計力学の応用として研究されてきた MRF モデルを 3 次元に拡張したものを導入した。さらに、余力があれば、MRF を時間方向にも拡張した 4 次元の MRF とし、時空間再構成アルゴリズムとして定式化をおこなうといった方針を立てた。

再構成モデルを定式化した後は、画像推定アルゴリズムをどのように行うかを研究した。従来の画像修復の場合、事後確率最大化 (Maximum A Posteriori: MAP) 法などが主流であったが、ノイズとしてガウス分布を導入しているため、事後確率による期待値

(Posterior Mean: PM) を推定画素として求めるアルゴリズムを導入した。まず基盤となるアルゴリズムは、観測の物理的な意味が解釈しやすい FBP 法を元に拡張した。FBP 法はフーリエ空間での観測データの表現を考え、再構成手法をある種のフィルタとして考える手法である。フーリエ空間と実空間はパーセバルの定理が成立するため、2 乗誤差で考えるようなガウスノイズは解析計算のモデルとして取り扱いやすい。そこでフーリエ空間でのフィルタ設計を目標として観測モデル、事前分布である MRF の定式化を行った。MRF も隣接画素間の 2 乗誤差の和をエネルギー関数としたためフーリエ空間において解析的な記述が可能となる。このためベイズアプローチを用いた事後分布も解析的に求めることが可能となった。

事後分布を解析的に記述した後で、事前情報とデータ観測をどの程度信頼するかを制御

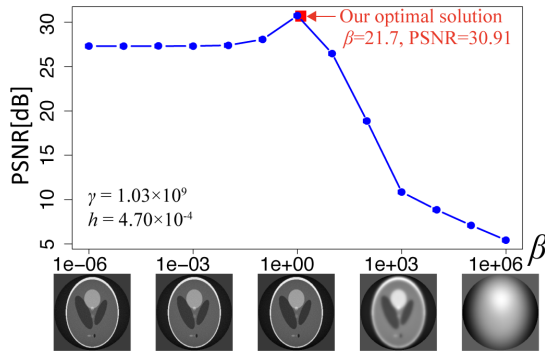


図 1. ハイパーパラメータと修復画像の精度

するハイパーパラメータを導入し、この推定を観測データから行うようなアルゴリズムを導入した。ハイパーパラメータは画質を左右させる重要なパラメータで、通常の MAP 法の枠組からは導出が困難であるが、ベイズアプローチを用いた場合、第 2 種の最尤推定、もしくは周辺対数尤度最大化を行うことによって導出可能である。ただしハイパーパラメータ推定を行なっても、画質に対してどのように影響するかは不明であるため、ハイパーパラメータ推定と画質の関係を定量的に評価した。

また実際の X 線 CT 画像や、PET 画像において、ノイズが重畳する現象は、ポアソンノイズとして表現されることが多く、構築した理論とのズレも予想された。したがってポアソンノイズを重畳した撮像データと、ガウスノイズの元に提案した再構成アルゴリズムとのズレを評価した。

4. 研究成果

構築したアルゴリズムはハイパーパラメータ推定を行う段階と、画像修復を行う段階に分けられる。最終的には 4 次元の MRF を用いた時空間画像に対して適用し、その有効性が確認された。

まず事前分布と観測過程の強度を決定するハイパーパラメータ推定であるが、これに関しては本研究で提案したアルゴリズムが有効であることが明らかとなった。図 1 はハイパーパラメータと修復画像の精度に関する結果である。図中横軸がハイパーパラメータ β の大きさを表し、縦軸が画像の再構成精度を表す PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) で表している。PSNR は高いほど精度がよい再構成が行われていることを表す指標である。図中青の先が、ハイパーパラメータ β を網羅的に変化させて得た結果であり、図中の赤点の部分が我々のハイパーパラメータ推定アルゴリズムによって得られた PSNR 値を表している。図より、周辺対数尤度最大化によるハイパーパラメータ推定は良好に動いており、ほぼ最適な値を推定できているこ

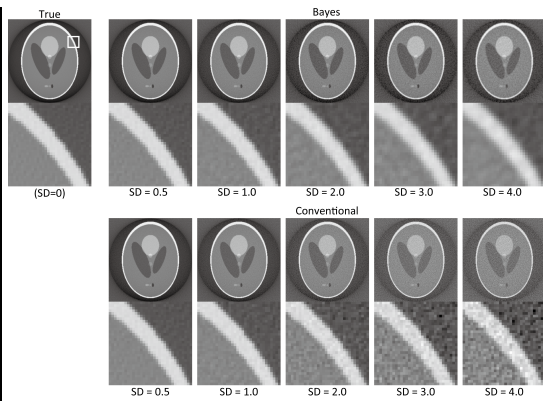


図 2. ベイズ手法と従来手法の比較

Reconstruction Performance for Gaussian Noise

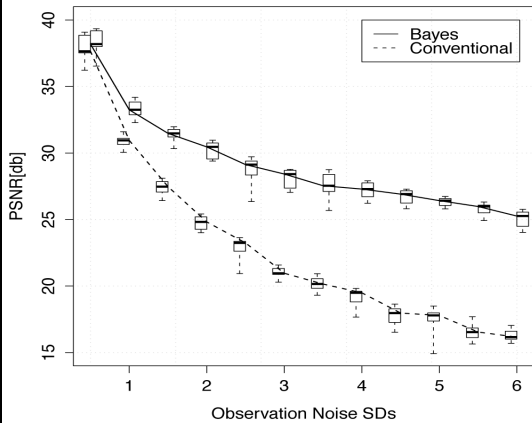


図 3. ガウスノイズ強度に対する PSNR 評価

とがわかる。なお図中横軸に示した画像は、数値ファントムと呼ばれる画像で、人体の断面図を模した数値画像である。目視で見ても明らかであると思われるが、最適なパラメータである $\beta=21.7$ 付近が最も綺麗に画像再構成を行なっているように見える。これより小さいパラメータでは、画像の細かいノイズが増えてきて、大きなパラメータでは画像がぼやけるといった現象が観測された。

再構成アルゴリズムは、FBP 法を拡張した形で記述でき、従来のアルゴリズムにたいしてフィルタの形状を若干修正することで記述できることが判明した。この結果は事後分布による期待値操作を行うことで得られている (PM 解) が、ガウス分布の対称性より事後分布の最大化 (MAP 解) で得られる結果と等価であることを示した。詳しい数式に関しては参考文献を参照されたい。図 2. は、観測モデルにおけるノイズ強度を変化させていった時の再構成画像の例である。図は Shepp & Logan の数値ファントムを用いており、これに対してノイズ強度 (SD として記載) を変化させた時のベイズ手法 (図中上段) と従来手法である FBP 法 (図中下段) とを比較したものである。図はわかりやすくするために一部

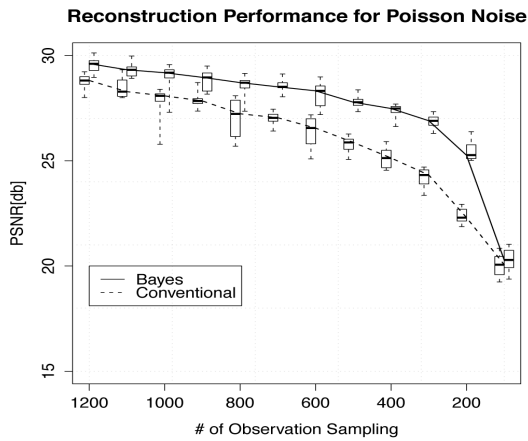


図 3. ポアソンノイズ強度に対する PSNR 評価

の拡大を表示している。ベイズ手法では輪郭がぼやけるもののコントラストが保持できているのが判る。さらに定量評価として PSNR 値を用いた評価を図 3 として示す。図中横軸が重畳したノイズ量であり、縦軸が画質評価を表す PSNR 値となっている。FBP 法に比べてベイズ手法を用いた方が、精度を維持出来ていることがわかる。

実画像においては、観測過程がポアソンノイズの重畳であるため、構築したアルゴリズムが上手く働かない可能性もあるため、これに対しても、実験を行った。図 4 は、図 3 と同様のグラフであり、曲線の形状が異なるものの、定性的には FBP 法よりもよりよい画質を保持することが出来ていると思われる。なお、図中横軸はポアソン過程におけるサンプル数を表しており、サンプルが多いほどノイズが少なくなるためサンプルが多い方を低ノイズ画像として定義している。

本研究では数値ファントムに対する評価だけでなく、実画像に対する評価も行った。実画像は再構成された CT 画像に対してガウスノイズを付与したデータを観測データとして、実験を行った。図 4 が重畳したノイズ強度に対する再構成画像をベイズ手法と従来手法とで並べたものである。拡大図は大動脈周辺の画像であり、SD=5.0 付近では、ベイズ手法では判別可能であるが、従来手法では判別不能であることがわかる。

さらに本研究では 3 次元並びに 4 次元拡張した MRF でも実験を行い、従来手法と比較して PSNR 値の意味で良い結果が得られることを示した。図 5 に 3 次元と 4 次元 MRF を適用した際の PSNR 値のグラフを表す。図中緑の先が 3 次元の MRF を適用した結果、ピンクの先が 4 次元の MRF を適用した結果である。この結果から次元が上がる毎に画質が維持されていることがわかる。4 次元 X 線 CT は現在も開発が続けられている手法であり、この再構成に対しても本研究で提案したベイズ

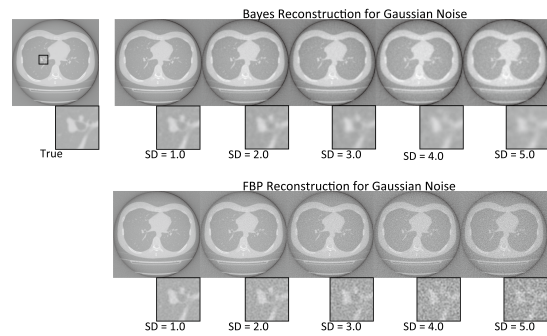


図 4. 実画像に対する適用例

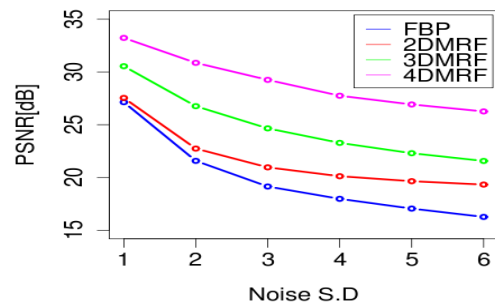


図 5. 拡張 MRF の推定画質精度

アプローチの可能性を示したと考えられる。これらの研究成果から、本研究で提案した 3 次元情報を考慮した MRF は従来の FBP 法など比べて対ノイズ性が向上していることがわかる。現実の撮像システムを考えた場合、ややモデルが単純すぎる傾向にあるが、本研究で提案したアルゴリズムは、画質の維持、もしくは低侵襲型の CT 再構成に有効であると考えられる。これが本研究プロジェクトで得られた結論である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 山崎窓未, 庄野 逸, 岡田真人. 4 次元 MRF を利用した事前分布による Bayes 断層画像再構成法, 電子情報通信学会論文誌, Vol. 96-D, No. 4, pp. 791-802, (2013), 査読有, http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j96-d_4_791&category=D&year=2013&lang=J&abst
- ② Y. Arakaki, H. Shouno, K. Takahashi,

T. Morie. A hierarchical extension of the HOG model implemented in the convolutional-net for human detection, 情報処理学会論文誌: 数理解モデル化と応用, Vol.5(3), pp.54-62, (2012), 査読有, doi: 10.1143/JPSJ.81.064006

- ③ Y. Ohno, K. Nagata, T. Kuwatani, H. Shouno, M. Okada. Deterministic Algorithm for Nonlinear Markov Random Field Model, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.81 (2012) 064006 (6 pages), 査読有, 10.1143/JPSJ.81.064006
- ④ H. Shouno, M. Yamasaki, M. Okada, A Bayesian hyper-parameter inference for Radon transformed image reconstruction, International Journal of Biomedical Imaging, Vol. 2011 (2011), ID 870252, 10 pages, 査読有, doi: 10.1155/2011/870252
- ⑤ H. Shouno, M. Okada. Bayesian Image Restoration for Medical Images using Radon Transform. Journal of the Physical Society of Japan, 79(7), 074004(6 pages), (2010), 査読有, doi: 10.1143/JPSJ.79.074004

[学会発表] (計 18 件)

- ① M. Wada, H. Shouno, S. Kido, An idiopathic interstitial pneumonia classification for CT image by use of a semi-supervised learning, Proceedings of International Forum on Medical Imaging in Asia (IFMIA) 2012, P1-34, Nov. 15-17. (2012), Daejong, Korea.
- ② H. Sasaki, M.U. Gutmann, H. Shouno, A. Hyvärinen, 'Topographic Analysis of Correlated Components' in Asian Conference on Machine Learning (ACML), Nov. 4-7. (2012), Singapore.
- ③ 庄野逸, 瀧山健, 岡田真人 Poisson ノイズ画像に対する局所変分法を用いた画像修復 日本物理学会春季大会, Mar. 24-27. (2012), 関西学院大学
- ④ H. Sasaki, A. Hyvarinen, M. Gutmann, H. Shouno. Topographic Representations for Linearly

Correlated Components, NIPS 2011 workshop. Dec.12-15. (2011), Granada, Spain.

- ⑤ 大野義典, 永田賢二, 庄野逸, 岡田真人. 非線形マルコフ確率場モデルのハイパーパラメータ推定における決定的アルゴリズム. 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, NC2011-74, pp. 17-22, Nov. 24-25. (2011), 東北大学
- ⑥ 庄野逸, 瀧山健, 岡田真人. 局所変分法を用いた Poisson 過程観測下における画像修復. 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会. NC2011-73, pp. 11-16, Nov. 24-25. (2011), 東北大学
- ⑦ 庄野逸, 岡田真人. 局所変分法を用いた Total Variation の近似とノイズ除去. 電子情報通信学会 IBISML 研究会. IBISML2011-74, pp. 217-222, Nov. 9-11. (2011), 奈良女子大学
- ⑧ T. Inagaki, H. Shouno, S. Kido, Classification of Idiopathic Interstitial Pneumonia CT Images using Convolutional-net with Sparse Feature Extractors. In Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications 2011 (PDPTA' 11), Vol.2 pp.699-705, Jul.18-21. (2011), Las Vegas, USA.
- ⑨ 川人翔平, 山崎窓未, 庄野逸, 岡田真人. 3次元 MRF を用いた Bayes 断層画像再構成法. 電子情報通信学会 IE2011-17, PRMU2011-9, MI2011-9, pp. 45-50, May. 19-20. (2011), 名古屋大学
- ⑩ M. Yamasaki, H. Shouno, M. Okada, Inference for Radon Transformed Image Reconstruction using Bayesian Inference. In Proceedings of Machine Learning in Medical Imaging 2010 (MLMI' 10), LNCS 6357 pp.26-33, Sep. 20. (2010), Beijing, China.
- ⑪ H. Shouno, M. Okada. A Hyper-parameter 庄野逸, 岡田真人. Radon 変換画像におけるハイパーパラメータ推定. 第 13 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010). IS2-49, Jul. 27-29. (2010), 釧路

- ⑫ Y. Tanaka, H. Shouno, S. Kido. Classification of Idiopathic Interstitial Pneumonia on High-resolution CT Images using Counter Propagation Network. In Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications 2010 (PDPTA' 10), Vol. 2 pp. 652-657, Jul. 12-15. (2010), Las Vegas, USA.
- ⑬ 植木淳太, 庄野逸. ベイズアプローチに基づいた断層画像における画像修復. NC2010-189, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, pp. 367-372, Mar. 9-11. (2011), 玉川大学
- ⑭ 庄野逸, 岡田真人. Bayes 推定を用いた Radon 変換画像の再構成. MI2009-78, 電子情報通信学会医用画像研究会, pp. 19-24, Jan. 28-29. (2010), 沖縄
- ⑮ 山本翔, 庄野逸. ベイズアプローチに基づいた断層画像の再構成, MPS76-36. 情報処理学会数理モデル化と問題解決研究会, Dec. 17-18. (2009), 電気通信大学
- ⑯ 庄野逸, 岡田真人. Radon 変換を介した医用画像再構成における画像修復. 第 12 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2009). P071, Oct. 19-21. (2009), 九州大学
- ⑰ 庄野逸, 岡田真人. 医用画像再構成におけるハイパーパラメータ推定. 日本神経回路学会全国大会講演論文集. pp. 48-49. Sep. 24-26. (2009), 東北大学
- ⑱ 庄野逸, 岡田真人. 医療画像再構成問題における画像修復. 科研費特定領域研究「情報統計力学の深化と展開」発表会「情報統計力学の広がり: 量子・画像・そして展開」 pp. 49-60, Jul. 6-7. (2009), 北海道大学

[その他]

ホームページ等

<http://daemon.inf.uec.ac.jp/ja/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

庄野 逸 (SHOUNO HAYARU)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・
准教授

研究者番号 : 50253231