

極値統計学を用いたビームハードニングアーチファクト評価法の考案

A New Method for Evaluating Beam-Hardening Artifacts in X-ray Computed Tomography Using Stochastics of Extremes

森 政樹[†] 今井 國治[‡] 五十嵐 健悟[‡] 川浦 稚代[‡] 藤井 啓輔[‡] 池田 充[‡]
Masaki Mori Kuniharu Imai Kengo Igarashi Chiyo Kawaura Keisuke Fujii Mitsuru Ikeda

遠地 志太[§] 西本 卓矢[†] 米田 和夫[†]
Yukihiko Enchi Takuya Nishimoto Kazuo Yoneda

1. はじめに

X線 Computed Tomography (CT)は、本質的にアーチファクトが発生しやすいと言われており、画像上には、様々な原因により多種多様なアーチファクトが出現することが知られている。[1] 画像上のアーチファクトは、画質の劣化、すなわち、画像診断能を低下させる重大な要因の 1 つであり、このことから、CT 画像において、アーチファクトの低減対策は極めて重要な課題とされている。その中でも、ビームハードニング現象 (X 線が物質を透過する際の X 線線質の変化により、物質の質量減弱係数に線形性が失われる現象) に起因するアーチファクト (ビームハードニングアーチファクト) は、CT 開発当初から問題視されており、これまでに数多くの低減方法が開発されてきた。[2] しかし従来、それら方法を適用した際のアーチファクト低減効果に対しては、視覚による評価しか行われていない。その理由として、ビームハードニングアーチファクトが、どの程度低減したかを定量的に評価する方法が存在していないことが挙げられる。その評価法は、未だ提案もされておらず、それ故、視覚と類似した評価結果を与える定量的な評価法の考案は、臨床上、非常に重要であると考えられる。そこで本研究では、新たに、極値統計学に基づくビームハードニングアーチファクトの定量的な評価法を考案した。さらに、この評価法を、頭部 CT 画像上のビームハードニングアーチファクトに適用し、その妥当性について検証したので報告する。

2. 解析対象画像

本研究では、人体頭部の解剖学的構造を模擬したファントムを被検体として用いることにした。このファントムは、頭蓋骨と脳実質部から構成されており、頭蓋骨は骨等価材である石膏、脳実質部には生体軟組織等価材であるウレタン樹脂 (リン酸カルシウム混合) がそれぞれ用いられている。今回、解析対象画像を取得するため、このファントムを X線管電圧: 80~140 kV、管電流: 250~400 mA の撮像条件でスキャンし、Filtered Back Projection (FBP)法、及び、逐次近似法 (Adaptive Statistical Iterative Reconstruction; ASIR)法を用いて画像再構成した。また、得られた画像は、本提案法による解析ができるように DICOM 形式のファイルに変換した。

3. ビームハードニングアーチファクト評価法の原理

図 1 (a), (b)に、解析対象画像を示す。いずれの画像にも、頭蓋骨近傍の脳実質部に、ビームハードニング現象による CT 値上昇を原因とした白く淡い陰影 (ビームハードニン

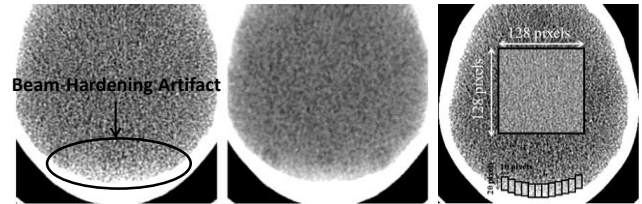


図 1. 解析対象画像及び関心領域

グアーチファクト) が発生していることが分かる。このアーチファクトに起因する CT 値変動を脳実質部全体で見た場合、それら CT 値は、基本分布 (本研究では、脳実質部は均一な構造であることから、ノイズとビームハードニングアーチファクトに起因する CT 値で構成される分布) の裾野部分を支配していることは明らかである。それ故、ビームハードニングアーチファクトを評価する方法として、極値統計学を用いた解析が応用可能ではないかと考えられる。そこで本提案法では、まず、解析対象とするビームハードニングアーチファクト部に、12 箇所の関心領域 (ROI)を設定した (図 1 (c))。次に、これらの ROI を用いて CT 値の最大値をブロックサンプリングし、これを特徴量 x とした。

一般に、あるサンプル内における最大値や最小値を解析対象とする場合、極値統計解析がよく用いられている。その解析法の一つとして、Gumbel 解析がある。[3]この方法は、最大値が極値漸近分布の一つである Gumbel 分布に従う (Gumbel 性をもつ) という統計学的性質を利用した方法であり、最大値、すなわち特徴量 x がこの分布に従う時、(1)式で特徴付けられる。

$$-\ln[-\ln F(x)] = \frac{x - \beta}{\gamma} \quad (1)$$

$F(x)$: 特徴量 x に対する累積確率

β, γ : 位置パラメータ、及び、尺度パラメータ

ここで、この解析方法で問題となるのは、各特徴量 x に対する累積確率 $F(x)$ の求め方である。一般に、極値を用いて解析を行う際、順序統計学に基づいて導出されるミーンランク法 (2式) により、その累積確率は推定されている。このことから本研究においても、ミーンランク法を用いて累積確率を推定することにした。

$$F(x_i) = \frac{i}{n+1} \quad (2)$$

$F(x_i)$: i 番目に大きい確率変数に対する累積確率

n : サンプルサイズ

また、 β と γ は、位置パラメータ、及び、尺度パラメータと呼ばれる統計学的指標で、これらは各々、Gumbel 分布のモード値、及び、ばらつきを表している。そこで本研究では、二重対数グラフ (Gumbel 確率紙) 上に特徴量 x をプロット (Gumbel プロット)

[†] 名古屋大学医学部附属病院,

Nagoya University Hospital

[‡] 名古屋大学医学部保健学科,

Nagoya University School of Health Sciences

[§] 大阪大学医学部附属病院,

Osaka University Hospital

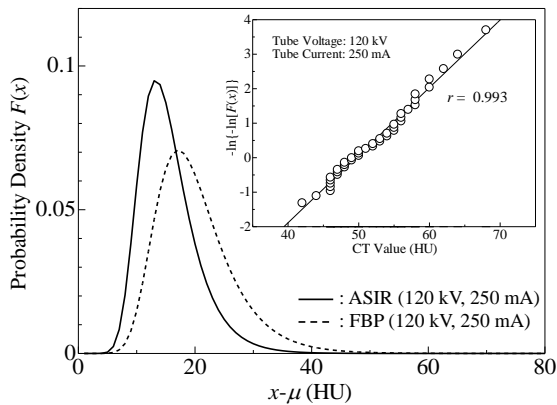


図2. Beam-Hardening Artifacts の確率密度関数

し、その直線の傾きと切片から位置、及び、尺度パラメータを求めた。さらに、本解析では、画像中心部分に設定した ROI の平均値 (μ) と位置パラメータの差をビームハードニングアーチファクトの強度と定義し、これに基づく検討を行った。

4. 結果および考察

ビームハードニングアーチファクトの評価が Gumbel 解析で行えるか否かを検討するため、特徴量 x を Gumbel プロットした (図2内の右上図)。その結果、特徴量 x は Gumbel 確率紙上で直線的に分布し、その相関係数も $r > 0.993$ と 1 に近い値を示した。このことから、特徴量 x には Gumbel 性があることが明らかとなり、本提案法により、ビームハードニングアーチファクトの解析が行えるのではないかと考えられる。

では、この Gumbel 性に基づいて、ビームハードニングアーチファクトの評価を行うことにする。はじめに、画像再構成法の違いが、アーチファクトへ及ぼす影響について検討する。図1(a, b)より、FBP画像、及び、ASIR画像の、どちらの画像にも頭蓋骨近傍にビームハードニングアーチファクトが発生しているが、アーチファクトの強度は、FBP画像の方が高いことが分かる。一方、ASIR画像では、その強度がFBP画像よりも低下しているものの、アーチファクト自体が信号的に際立っているように見える。そこで、これら画像におけるビームハードニングアーチファクトの発生状況を評価するため、Gumbel 確率密度関数を求めた。その結果を図2に示す。この図から分かるように、ASIR画像の確率密度関数はFBP画像よりも、若干、最頻値が小さく、また、その形状は尖っていることが示された。この結果は、ASIR画像では、FBP画像よりも低い強度を持ったビームハードニングアーチファクトが最頻値付近により多く存在していることを表しており、上述したような、視覚的印象を反映しているものと考えられる。次に、撮像条件がビームハードニングアーチファクトの発生に及ぼす影響について検討する。図3に、X線管電流 (X線線量) とビームハードニングアーチファクトの強度との関係を示す。この図より、どのX線管電圧 (X線エネルギー) においても管電流の変化に対してビームハードニングアーチファクトの強度は、ほぼ一定の値を示しており、このことから、このアーチファクトはX線線量の影響を受けないことが分かる。一方、図4は、X線管電流をパラメータとした場合の、ビームハードニングアーチファクトの管電圧依存性を示したものであり、特性を明らかにするため両対数プロットした。この図から分かるように、ビームハードニングアーチファクトは、X線管電圧の増加とともに減少することが示された。これらの結果は、一般的に知られているビームハードニングアーチファクトの性質と同じ傾向を示しており、実際に評価対象

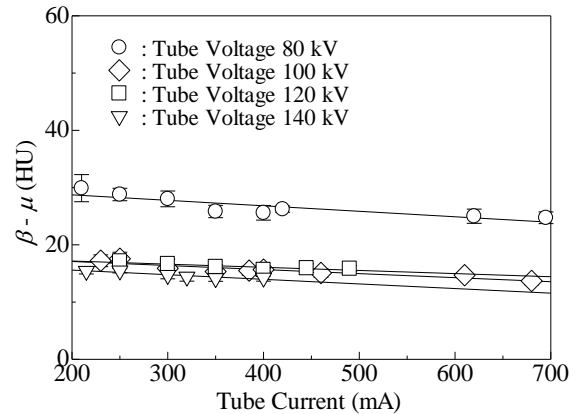


図3. Beam-Hardening Artifacts と X 線線量との関係

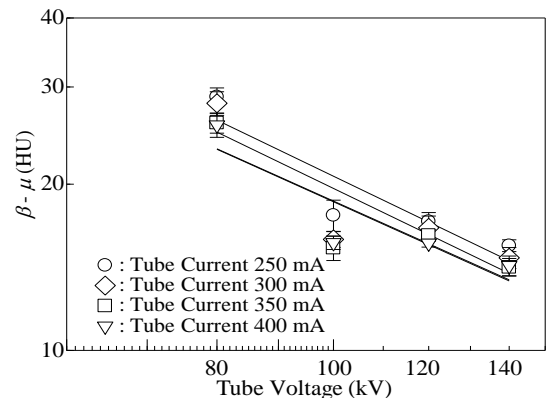


図4. Beam-Hardening Artifacts のエネルギー依存性

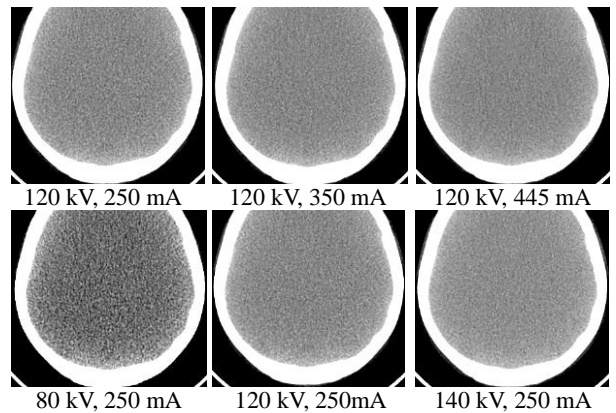


図5. 各撮像条件における頭部 CT 画像

とした各画像 (図5) から受けるアーチファクト強度の視覚的印象とよく一致している。さらに、管電圧とビームハードニングアーチファクトとの関係を検討するため、管電圧依存性における結果を直線近似したところ、その傾きはどの管電流においても約 -1 となった。このことから、ビームハードニングアーチファクトは管電圧の逆数に比例することが確認されたが、その詳細については、今後の検討課題としたい。

以上の結果から、本研究で提案したビームハードニングアーチファクト評価法による評価結果には妥当性があり、臨床的に有益な方法であることが示された。最後に本研究は、日本学術振興会 (基盤研究(C)) の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] Furlia F. Barrett, et al, Radio Graphics, Vol. 24, No. 6, p1679 (2004)
- [2] G. Van Gompel, et al, Medical Physics, Vol. 38, No. 7, p36 (2011).
- [3] Kuniharu Imai et al, Medical Physics, Vol. 36, No. 2, p492 (2009).