原 著

サブトラクション処理を用いた
ヘリカルアーチファクトの新しい評価法

西丸英治・宇都宮律子・西江亨文・二野宮祐司・友重之宏

論文受付
2004年 8月20日論文受理
2005年 4月18日

Code No. 251

広島市立広島市民病院放射線科

緒 言

1989年、スリップリング機構を搭載するhelical computed tomography (CT)の登場は、目的部位の連続的なvolume dataの収集を可能にした。volume dataの取得は、これまで二次元画像が主流であった放射線画像診断において、三次元画像中心の時代へと導き、総合的な診断能の向上に大きく貢献している。ヘリカルスキャンは、X線管が被写体の周りを回転しながらテーブルが連続的に移動するため、被写体が静止していると考えれば見かけ上、X線管が螺旋状に移動しながら投影データを収集することになる。そのため、投影データが一行に並ぶノンヘリカルスキャンとは異なり、ヘリカルスキャンは目的とする断面を通る投影データは一つしか存在しない。したがって、目的とする断面の画像を再構成するためには、異なる位置を通過

してきた投影データを使用して、必要な投影データをそろえなければならない。このような画像再構成法では、テーブル移動量が大きくなるとテーブル移動距離内で投影形状の変化が大きくなり、rotation effectが発生する¹⁾。このrotation effectは、二次元画像において風車状のヘリカルアーチファクトとして現れ¹⁾、被写体形状の歪みを引き起こし、画像診断の妨げになることがある。理論上、ヘリカルアーチファクトは、スライス厚の増加とヘリカルピッチの上昇に伴って増加する¹⁾。よって、われわれが日常使用しているCT装置のヘリカルアーチファクトの評価は、撮影技術において重要であると考えられる。

ヘリカルアーチファクトの評価を大別すると、視覚的な評価と定量的な評価があり、視覚的な評価は、ファントム撮影したCT画像の視覚的な形状の変化を捉

A New Method of Evaluating Helical Artifact by Image Subtraction Technique

EIJI NISHIMARU, RITSUKO UTSUNOMIYA, AKIFUMI NISHIE, YUUJI NINOMIYA,
and YUKIHIRO TOMOSHIGE

Department of Radiology, Hiroshima City Hospital

Received August 20, 2004; Revision accepted April 18, 2005; Code No. 251

Summary

This paper proposes a new quantitative method of appraising the helical artifact generated by computed tomography (CT) images by helical scan. The quantities-appraisal method of the helical artifact uses as a sample image, the binarization image, which performs the threshold operation. Therefore, results may differ among observers and are lacking in objectivity. We devised a procedure (subtraction technique) that uses the subtraction process as a method of appraising the helical artifact that does not perform a threshold operation, and evaluated this procedure. As compared with an area technique, a subtraction technique can divide a helical artifact into a plus CT value (Over Level) and a minus CT value (Under Level) and can evaluate them. This provides excellent repeatability and objectivity. Moreover, since CT value data are maintained, the quality of an artifact can also be evaluated, making this a very useful procedure. By using the subtraction technique, new information will be found by evaluating helical artifacts.

Key words: Computed tomography (CT), Helical scan, Helical artifact, Subtraction technique

別刷資料請求先: 〒730-0011 広島市中区基町7-33 広島市立広島市民病院 放射線科 西丸英治 宛

える方法²⁾が一般的に使用される。定量的な評価については現在、確立された評価法はなく、ファントム画像の面積を測定する方法や視覚的な形状の変化をより定量的に捉える方法(重心点からの距離を測定する方法、フラクタル次元解析を利用する方法²⁾)など学会等で多数報告されている。しかし、これらの定量的な評価方法は、しきい値操作を行った二値化画像を試料画像とするため、観察者の主観によって解析結果が大きく異なる可能性を有している。よって、二値化画像を試料画像とするヘリカルアーチファクトの評価法は、再現性、客観性に乏しく適切な方法であるとはいえない。そこで今回われわれは、しきい値操作を行わない評価法として、サブトラクション処理を用いた方法(サブトラクション法)を提案し、single detector-row CT(SDCT)のヘリカルアーチファクトについて評価を行った。解析結果より、ヘリカルアーチファクト評価に対する新しい知見、また現在報告されているヘリカルアーチファクトの定量的な評価法のなかで、最も一般的な方法である面積法と比較し、それぞれの結果ならびに評価方法について考察する。

1. 方法

1-1 使用装置

CT装置は、Hispeed Advantage SG Ver4.0(GE横河メディカルシステム株式会社製:SDCT)を使用し、ファントムは、底面の直径25mm、高さ25mmの円錐型アクリルファントム(CT値120HU)を使用した(Fig. 1)。

1-2 試料画像作成

試料画像作成における留意点として、まずマスク画像については、可能な限りヘリカルアーチファクト以外のアーチファクトを除外する必要がある。そのため、使用するCT装置の最高の画質と考えられる撮影条件を選択する必要がある。最大のview数、最小のfield of view(FOV)を使用し、さらにバックグラウンドのノイズの影響を可能な限り低減するため、空气中に留置したファントムを最大mAsにて撮影した。また、撮像領域位置によって撮影対象物の形状再現性が変化することから^{3, 4)}、isocenterにてスキャンした。ヘリカルアーチファクトは、X線照射開始位置により発生機構が異なるため^{3, 5)}、実験に際してはX線照射開始位置をそろえる同期スキャンが望ましい。しかし、当施設のCT装置は同期スキャンができないため、X線照射開始位置での影響を除外する目的で、ノンヘリカルスキャン、ヘリカルスキャンとも本実験に使用する画像は、すべて同一のテーブルポジションで、20回撮影した画像の加算平均したものを使用した。加算平均することによって、バックグラウンドの

ランダムに出現するノイズの統計的変動もほぼ均一になる。20枚の試料画像の加算平均したマスク画像およびヘリカルアーチファクトを含んだ画像におけるバックグラウンドのstandard deviation(SD)は、100ピクセル以上を含んだregion of interest(ROI)で1.0未満となる。よってわれわれは、バックグラウンドのノイズの影響が、本研究の結果に大きく関与しないと判断し、実験を行った。

1-3 試料画像の取得および解析方法

CT画像をDICOM Formatで装置本体よりon-lineにてPersonal computer(PC)に取り込み、C言語にて自作したプログラムを用いて試料画像の作成および解析を施行した。

1-3-1 マスク画像の取得

撮影条件は120kvp, 440mA, スライス厚 5mm, FOV9.6cm, rotation speed 4.0sec/rot.でノンヘリカルスキャンを行った。再構成関数は、腹部標準関数を使用した。

1-3-2 ヘリカルアーチファクトを含む画像の取得

撮影条件120kvp, 300mA, スライス厚 5mm, FOV9.6cm, rotation speed 0.8sec/rot., ヘリカルピッチ1.0~2.0(0.1ステップ)でヘリカルスキャンを行った。再構成関数は、腹部標準関数を使用した。

1-4 検討項目と試料画像の解析方法

ヘリカルアーチファクトの定量的な評価法として最も一般的な方法である面積法と、今回提案するサブトラクション法について、それぞれのヘリカルアーチファクト評価結果ならびに評価方法を比較検討する。両方法の結果を比較するため、それぞれ最大値を1.0に正規化して検討した。

1-4-1 面積法によるヘリカルアーチファクト評価

ヘリカルスキャンした画像を、視覚的に適切と思われる2種類の下限值(88HU, 92HU)にて二値化画像を作成し、総ピクセル数を面積とした。評価位置はisocenterで行った。

1-4-2 サブトラクション法によるヘリカルアーチファクト評価

ヘリカルアーチファクトを含む画像から、ガントリに表示される同一のテーブルポジションにて撮影したマスク像で、サブトラクション処理を行う(Fig. 2)。Fig. 2で示したサブトラクション画像は、この方法を理解しやすくするため1枚の画像のみを使用した結果であるが、実際の実験では20枚の加算平均した画像を用いて検討を行っている。得られたサブトラクション画像512×512ピクセルの画像領域を、選択的に256×256ピクセルの試料画像として切り出し、ヒスト

Fig. 1 Figure shows a conic phantom.

Fig. 2 Concept of the subtraction technique.

In order to make it easier to understand, the result of one sample CT image is shown with a figure.

グラムを求めて正のCT値(Over Level), 負のCT値(Under Level)に分け, 総ピクセル数を面積として算出, さらにCT値情報を活用するため, ヒストグラムの各母集団(ピクセル数)とその母集団に対応するCT値を乗じて数値化を行い, その数値を合計したピクセル値と比較検討した. 評価位置は, isocenterおよびCT画像の有効視野を240mmと定義し⁶⁾, その辺縁における影響を検討するためFOV中心から120mm外側(off-center)で実施した.

2. 結果

面積法によるヘリカルアーチファクトの評価結果をFig. 3に示す. ヘリカルピッチが上昇するとともにファントムの面積も増加する傾向であったが, 試料画像のしきい値(下限値)を変化させると, 結果が大きく異なった.

サブトラクション法によるisocenterとoff-centerにおける面積を算出した結果をFig. 4に示す. isocenterにおいてOver Levelの面積はヘリカルピッチの上昇に伴い増加したが, Under Levelは減少した(Fig. 4a). off-centerではOver Level, Under Levelともにヘリカルピッチの上昇による面積の大きな変化は認められなかったが, サブトラクション画像はOver Levelのピクセル

が大部分を占め, Under Levelのピクセルは少なかった(Fig. 4b). 次に数値化した結果をFig. 5に示す. isocenterでは, Over Levelのピクセル値がヘリカルピッチ1.1, 1.3, 1.5の奇数ピッチにおいて特異的に増加し, Under Levelのピクセル値はヘリカルピッチの上昇に伴って増加した(Fig. 5a). off-centerではOver Level, Under Levelともに, ヘリカルピッチの上昇によるピクセル値の大きな変化は認められなかった(Fig. 5b). 本法と面積法とを比較すると, ヘリカルピッチ1.0~1.2および1.6~1.9の低いピッチ領域と高いピッチ領域において結果に差が認められた(Fig. 6).

3. 考察

ヘリカルアーチファクトの発生をヘリカル補間再構成の原理から考えると, ヘリカルスキャンでは寝台を動かしながら投影データの収集を行っているため, 投影データの始点と終点のズレによりアーチファクトが生じ, そのアーチファクトを補正するために使用される補間法⁷⁻⁹⁾(現在では180°補間法が主流)によって, アーチファクトは低減される. しかし, 重畳積分による重み付け係数の分布によって, 体軸方向のsection sensitive profilesの形状は矩形から裾野の広がった山形となり, この時の投影データのズレを補正しきれなか

Fig. 3 Result of changing the threshold (lower threshold) of the sample image in area technique. Although area also tended to increase with the elevation of helical pitch, the result changed greatly when a lower threshold was set.

Fig. 5 (a) Result of having added pixel data (isocenter). The pixel value of the Over Level increased specifically in the odd number helical pitches of 1.1, 1.3, and 1.5. The pixel value of the Under Level increased with the elevation of helical pitch. (b) Result of having added pixel data (off-center). A large change in pixel value according to the elevation of helical pitch in Over Level and Under Level was not acceptable.

Fig. 4 (a) Area of a helical artifact and the relation of helical pitch to a subtraction technique (isocenter). Over Level increased so that helical pitch went up, but Under Level decreased. (b) The area of a helical artifact and relation of helical pitch to a subtraction technique (off-center). In off-center, a large change in area according to the elevation of helical pitch in Over Level and Under Level was not acceptable. However, the Over Level pixels predominate, and the subtraction CT image has few Under Level pixels.

Fig. 6 Comparison of the results of an area technique and a subtraction technique. The difference was acceptable at a low helical pitch of 1.0-1.2 and a high pitch of 1.6-1.9.

ったものが、ヘリカルアーチファクトとして画像上に現れる¹⁰⁾。よって、180°補間法の実データと対向データの距離は、重畳積分に付随した重み付け係数の分布に影響し、ヘリカルアーチファクトと密接な関係であると考えられ、二次元および三次元再構成画像の画質に大きく影響する^{1, 4, 6, 11)}。本論文においては、このヘリカルアーチファクトをサブトラクション処理という新しい方法によって解析し、研究したものである。

ヘリカルアーチファクトの影響を受けたピクセル数(面積)は、isocenterではヘリカルピッチの上昇に伴ってOver Levelの増加が認められた。ヘリカルピッチの上昇(寝台移動距離の増加)は、実データと対向データの距離を大きくして、重畳積分による重み付け係数の分布形状を変化させ、Over Levelのピクセルを増加させたと考えられる。off-centerでは、Over Level, Under Levelとも大きな変化は認められなかった。その原因として、isocenterに比較してサンプリング間隔、すなわちviewの密度が粗くなり、逆投影演算を有限個の投影データの加算平均値で近似する際に生じる、角度方向のaliasingによる影響¹²⁻¹⁴⁾、さらに非線形のpartial volume effectの影響^{1, 4)}等、総合的な作用によりヘリカルピッチの影響よりもFOV辺縁部の影響が上回ったためと考えられる。面積の結果にCT値情報を反映させると、isocenterでは、ヘリカルピッチ1.1, 1.3, 1.5の奇数ピッチにおいて特異的にピクセル値が増加する結果となった。本実験に使用したCT装置の画像再構成法は、180°補間であるhalf-scan extrapolation(HE)法を採用しており、すべて内挿法によって再構成するhalf-scan interpolation(HI)法とは異なる補間方法の特徴を持つ。このHE法は、1回転のみの投影データにより補間を行うため、補間データをオリジナルデータの内と外から取得する内挿法を基礎にした一部外挿法を用いる補間法で^{7, 8)}、ヘリカルピッチによって補間データの位置が変化する場合がある。よって、奇数ピッチの特異的なピクセル値の上昇は、この画像補間法に起因する結果であると考えられる。off-centerではOver Level, Under Levelとも大きな変化は認められず、面積の結果と同様にFOV辺縁部の影響であると考えられる。サブトラクション法と面積法とを比較すると、低いヘリカルピッチ領域と高いヘリカルピッチ領域において面積の数値に差が認められ、この結果は面積法よりもサブトラクション法を用いた方が、ヘリカルピッチごとのヘリカルアーチファクトの差を、より詳細に評価することが可能であることを示唆している。

サブトラクション法の最大の利点は、ヘリカルアーチファクト評価の試料画像に、二値化画像を用いない点にある。二値化画像を用いないということは、CT装置が持つCT値情報を保持しているということであ

り、これまでのヘリカルアーチファクトの評価の結果に新たな見解をもたらすと考える。試料画像にしきい値処理を行うヘリカルアーチファクト評価法では、Over Levelのピクセルのみの評価しかできないが、本法ではUnder Levelのピクセルの評価も可能である。Under Levelのピクセルの評価は、ヘリカルピッチに伴う被写体のCT値の変化を捉えると考えられ、Fig. 5aのようにSDCTでは、ヘリカルピッチが上昇するとUnder Levelのピクセル値が増加し、対象物のCT値が低下していることが確認できる。ヘリカルピッチの上昇は、臨床においてCT値の信頼性を低下させ、病変部の性状判断を困難にする恐れがあり、Under Levelのピクセルの評価は重要であると考えられる。また、Over Levelにおいては、Fig. 4aに示すようにヘリカルピッチが上昇するに伴い、ヘリカルアーチファクトのピクセル数(面積)は増加したが、数値化するとヘリカルピッチ1.1, 1.3, 1.5の奇数ピッチにおいて特異的にピクセル値が増加した(Fig. 5a)。この結果は、臨床においてヘリカルピッチ1.1, 1.3, 1.5の撮影条件で撮像した場合、読影者にヘリカルアーチファクトとして認識する可能性が高いことを示唆している。すなわち、臨床で通常使用するwindow width(WW)とwindow level(WL)の範囲内で画像を観察したとき、ヘリカルアーチファクトとして認識しなければ、ピクセル数(面積)がいくら増加しようが診断に問題はない。しかし、CT値が高ければ使用するWWとWLの範囲内で、ヘリカルアーチファクトとして認識する可能性が高くなる。よって数値化した結果は、読影者に対して視覚的にヘリカルアーチファクトとして認識させる度合い、つまりアーチファクトの程度(質)を表現していると推測する。これらを踏まえると本実験に使用したCT装置の補間法では、ヘリカルピッチが1.6以下の場合、ヘリカルアーチファクトの視覚的な認識を抑えるという目的では、偶数ピッチを選択すべきであると考えられる。このようにサブトラクション法を使用することによって、ヘリカルアーチファクトのピクセル数(面積)だけでなく、その視覚的な認識度(アーチファクトの質)も把握することが可能である。また、しきい値操作を行わない他の利点として、観察者の主観による結果の相違がなく、再現性が高いことが挙げられる。

それでは、サブトラクション法の欠点はどうか。本法は、ヘリカルアーチファクトを含む画像から、アーチファクトを含まないマスク像を差し引くというサブトラクション処理を利用するため、被写体の形状変化やヘリカルアーチファクトの発生する方向を把握することができない。これらの欠点を補う目的で、加算平均する前のファントム画像を視覚的に評価することが必須となる。さらに、視覚的な形状の変化

をより定量的に評価したい場合は、重心点からの距離を測定する方法やフラクタル次元解析を利用する方法²⁾との併用が望ましい。実際われわれがヘリカルアーチファクトの評価を行う場合には、本法に視覚的な評価を組み合わせることで、良好な結果を得ている。このように、目的に応じて本法に他の方法を組み合わせることで、より精度の高い総合的なヘリカルアーチファクトの評価が実現できると考える。

4. 結 語

しきい値操作を行わない新しいヘリカルアーチファクトの評価法として、サブトラクション処理を用いる方法を提案し、この方法によるSDCTを用いたヘリカルアーチファクトの評価および本法の有用性について

提言した。サブトラクション法は、今までにない正(Over Level)と負(Under Level)両方のヘリカルアーチファクトに分けて評価が可能で、客観性、再現性に優れており、有用性の高い方法である。また、他の方法と組み合わせることで、より詳細にヘリカルアーチファクトの評価が実現でき、その結果は臨床における撮影プロトコル決定の指標となる。本法は、ヘリカルアーチファクトをこれまでの方法とは異なった視点から評価が可能であるため、さらなる新しい知見が加わることになるであろう。

なお、本論文の要旨は、日本放射線技術学会第31回秋季学術大会(2003年10月、秋田市)にて発表した。

参考文献

- 1) Wang G, and Vannier MW: Stair-Step Artifacts in Three-dimensional Helical CT: An Experimental Study. *Radiology*, 191(1), 79-83, (1994).
- 2) 原 孝則, 加藤秀記, 津坂昌利: フラクタル次元解析を用いた4Row Multislice Spiral CTにおけるZ方向のデータ乗換えの複雑性評価. *日放技学誌*, 59(4), 494-499, (2003).
- 3) 勝田昭一, 花井耕造, 国井岳夫, 他: ヘリカルCTにおけるスライス感度プロフィールの撮像領域内位置依存性. *日放技学誌*, 55(11), 1109-1114, (1999).
- 4) Yen SY, Yan CH, Rubin GD, et al.: Longitudinal Sampling and Aliasing in Spiral CT. *IEEE Trans Med Imaging*, 18(1), 43-58, (1999).
- 5) 山口 功, 森本 章: X線CTにおけるX線管回転速度の高速化が画質に与える影響. *日放技学誌*, 60(1), 79-86, (2004).
- 6) Yen SY, Rubin GD, and Napel S: Spatially varying longitudinal aliasing and resolution in spiral computed tomography. *Med Phys*, 26(12), 2617-2625, (1999).
- 7) Wang G, and Vannier MW: Helical CT image noise—analytical results. *Med Phys*, 20(6), 1635-1640, (1993).
- 8) Crawford CR, and King KF: Computed tomography scanning with simultaneous patient translation. *Med Phys*, 17(6), 967-982, (1990).
- 9) 辻岡勝美: CT自由自在. メジカルビュー社, pp.46-47, 東京, (2001).
- 10) 辻岡勝美: X線CT装置の機器工学(5) アーチファクト. *日放技学誌*, 58(6), 733-739, (2002).
- 11) La Riviere PJ, and Pan X: Longitudinal Aliasing in Multislice Helical Computed Tomography: Sampling and Cone-Beam Effects. *IEEE Trans Med Imaging*, 21(11), 1366-1373, (2002).
- 12) Bushberg JT, Seibert JA, Boone JM, et al.: *The Essential Physics of Medical Imaging*. Williams & Wilkins, 239-290, (1994).
- 13) Crawford CR, and Kak AC: Aliasing artifacts in computerized tomography. *Applied Optics*, 18(21), 3704-3711, (1979).
- 14) 工藤博幸, 斎藤恒雄: 少数方向投影からのCT画像再構成. *信学論*, J71-D(8), 1335-1337, (1988).

図表の説明

- Fig. 1 円錐型ファントムの概観図
- Fig. 2 サブトラクション法の概念
理解しやすくするため、図では試料画像一枚のみの結果を示す。
- Fig. 3 面積法における試料画像のしきい値(下限値)を変化させたときの結果
ヘリカルピッチの上昇に伴って面積も増加する傾向にあったが、下限値の設定によって結果が大きく異なる。
- Fig. 4 (a)サブトラクション法におけるヘリカルアーチファクトの面積とヘリカルピッチとの関係(isocenter)
Over Levelは、ヘリカルピッチの上昇に伴って増加したが、Under Levelは減少した。
(b)サブトラクション法におけるヘリカルアーチファクトの面積とヘリカルピッチとの関係(off-center)
off-centerでは、Over Level, Under Levelともに、ヘリカルピッチの上昇による面積の大きな変化は認められなかったが、サブトラクション画像はOver Levelのピクセルが大部分を占め、Under Levelのピクセルが少ない。
- Fig. 5 (a)各ピクセルにピクセル情報を加えた結果(isocenter)
Over Levelのピクセル値は、ヘリカルピッチ1.1, 1.3, 1.5の奇数のヘリカルピッチにおいて特異的に増加した。Under Levelのピクセル値は、ヘリカルピッチの上昇に伴って増加した。
(b)各ピクセルにピクセル情報を加えた結果(off-center)
Over Level, Under Levelともに、ヘリカルピッチの上昇によるピクセル値の大きな変化は認められなかった。
- Fig. 6 面積法とサブトラクション法における結果の比較
ヘリカルピッチ1.0~1.2および1.6~1.9の低いヘリカルピッチ領域と高いヘリカルピッチ領域において差が認められた。