速報

CTにおける時間分解能の新しい測定法

市川勝弘・高田忠徳¹⁾・原 孝則²⁾・大橋一也³⁾・丹羽伸次²⁾論文受付
2008年6月10日論文受理
2008年6月20日

Code No. 251

金沢大学医薬保健研究域保健学系

1) 金沢大学附属病院放射線部

2) 総合病院中津川市民病院放射線技術科

3) 名古屋市立大学病院中央放射線部

緒言

コンピュータ断層撮影(computed tomography: CT)における主な画像特性の項目として、解像特性、ノイズ特性、およびスライス厚がある。解像特性は、ワイヤ法を用いてmodulation transfer function (MTF)によって¹⁻³⁾、ノイズ特性は、水ファントムによる均一画像からSD値やnoise power spectrum (NPS)によって⁴⁻⁷⁾、そして、スライス厚は、コインファントム、微小球体ファントム、および微小コインファントムによって評価されることが多い⁸⁻¹⁰⁾。CT装置は、ヘリカル機構の開発以来、飛躍的に高速化を遂げ、今や多列化に

よってさらに高速化されたmulti detector-row CT (MDCT)がめざましい普及を遂げている。そのなかで、もう一つの画像特性である時間分解能の概念が注目され、その評価法が提案された。Taguchiらは、この時間分解能について、スライス方向の感度分布であるsection sensitivity profile (SSP)と同じようにtemporal sensitivity profile (TSP)による評価法を提案し、スライス面と平行に配置した薄い円盤をヘリカル機構にてスキャンして、細かく再構成した画像からTSPを得る方法を発表した¹¹⁾。しかし、この方法は、その研究での目的は達したものの、測定方法自体が

A New Method of Measuring Temporal Resolution for Computed Tomography

Katsuhiro Ichikawa, Tadanori Takada,¹⁾ Takanori Hara,²⁾ Kazuya Ohashi,³⁾ and Shinji Niwa²⁾

Graduate School of Medical Science, Kanazawa University

1) Department of Radiology, Kanazawa University Hospital

2) Department of Radiology, Nakatsugawa Municipal General Hospital

3) Central Department of Radiology, Nagoya City University Hospital

Received June 10, 2008; Revision accepted June 20, 2008; Code No. 251

Summary

In this study, we proposed a new method of measuring temporal resolution using an impulse signal in the time domain in computed tomography (CT). We employed a metal ball with a diameter of 11 mm as the source of the impulse signal, which was shot to a slice plane at a very fast speed during scanning, along the perpendicular direction to the plane. A 4-slice multi detector-row CT (MDCT) system was employed to evaluate the new method, and images for region of interest (ROI) measurement were reconstructed with a z-increment corresponding to a very short time (≤ 0.03 sec). Temporal sensitivity profiles (TSPs) for various helical beam-pitches were obtained by plotting averaged CT values within the ROIs against the temporal axis. The accuracy of the method was examined by comparing the measured TSPs with theoretical TSPs corresponding to respective helical beam-pitches. As a result, the theoretical TSPs and measured TSPs demonstrated high coincidence in all beam-pitches. Since the TSPs indicated the profiles with sharp shapes faithful to the theoretical TSPs, it was proved that the new method had sufficient inherent temporal resolution. It was indicated that the new method we proposed would be an effective method for evaluating temporal resolution in CT.

Key words: computed tomography (CT), temporal resolution, temporal sensitivity profile (TSP), section sensitivity profile (SSP)

別刷資料請求先: 〒920-0942

石川県金沢市小立野5-11-80

金沢大学医薬保健研究域保健学系 市川勝弘 宛

Fig. 1 Impulse signal in the time domain (a) and an example of output response function against the impulse signal (b).

SSPの測定と相違なく、TSPの結果に SSPが影響することが避けられず、汎用的な方法ではない。また、辻岡らは、回転するアクリルロッドを用いて、移動アーチファクトの軌跡の信号強度からTSPを測定する方法を試みた¹²⁾。しかし、移動アーチファクトを利用するため、自ずと測定法自体の時間分解能が劣り、精度の良い方法であるとは考えにくい。そこでわれわれは時間領域のインパルス信号をCTの撮像時に与え、その応答によってTSPを測定するという新しい方法を試み、非常に精度の良いTSPを得ることに成功した。この方法は極めて基本的な原理に基づく方法であり、測定器具や方法も簡単である。本報告ではこの新しい測定法と、その測定結果について述べる。

1. 測定原理

時間分解能は、時間領域のインパルス信号に対する応答から測定できることは、信号伝達の基本的理論から明らかである。われわれは、この原理に忠実な測定法を考案した。Fig. 1は、時間領域のインパルス信号(Fig. 1a)とそれに対する出力信号の時間応答の例(Fig. 1b)を示したものである。この関係は、体軸方向の空間領域におけるインパルス信号(薄い円盤や微小球体)と、SSPとの関係に等しい。よってTSPの測定のためには、インパルス信号源として、スキャン面に一瞬だけ現れる高吸収物体が必要である。これを実現するために、われわれの考案した方法では、スキャン面と垂直方向に高速に通過する高吸収物体(金属球)を用いた。与えたインパルスの時刻とその前後の時刻における再構成画像は、インパルス信号が寝台移動とは無関係であるため、SSPと同様に微小なスライス間隔で再構成することで、微小な時間間隔の画像として取得可能である。その後、物体部分のCT値を測定して、時間との関係を求めることでTSPを作成可能である。

2. 方法

測定原理にもとづき金属球を用いたファントムを作製した。Fig. 2に用いたファントムと、それによる測定の概要を示した。この図は、ガントリを横から見た状態を表し、金属球(直径11mm、鋼製)は、発射台からスライス面の直前位置から高速に打ち出され、CTの回転中心にてスライス面と垂直方向に高速に突き抜ける。金属球は、発射台上のレールに沿って打ち出され、スライス面と正確に垂直に通過するように工夫した。発射速度は、6~8m/sec程度であり、64列MDCTを想定してビーム幅を40mmとした場合であっても、その範囲を0.008sec以下で通過し、この通過時間がインパルス信号の時間幅に相当する。最近のCT装置における心臓CT以外の回転速度が0.5sec/rot.以下であることを考慮して、求めたいTSPの最小の半値幅を0.5sec程度とするならば、この時間幅は十分に短いと考えられる。

金属球は、高速にスライス面を通過するため、材質が金属であってもCT値が低下してTSPの測定精度低下を招きかねない。そこでCT値計測のためのregion of interest (ROI)に十分な面積を得るために、金属球の直径はある程度の大きさが必要であり、インパルス信号の時間幅への影響を考慮して10mm程度が妥当であると考えられた。そこで適当な対象として、本邦で非常に多く流通する遊技用の直径11mmの金属球が材質および形状の安定性に優れ、予備実験でも十分なCT値コントラストが得られたため、以後の計測に用いた。またMDCTにおける各検出器列を通り過ぎる時間にはわずかな時間差は生じるものの速度が速いために無視可能である。発射速度の精度に関しては、インパルス信号が十分に短時間となるように、金属球がある速度以上で通過すればよい。よってその精度を要しない。よってゴムベルトを用いた簡単な機構により、一定のゴムの伸張状態からの反発力により金属球を発射するようにして、必要な速度を下

Fig. 2 Schematic diagram (side view) of the measurement method for temporal resolution in CT. The metal ball was shot to the slice plane at a very fast speed along the perpendicular direction to the plane.

回らないようにした。

実際の測定では、TSPの測定対象とするスキャン条件でスキャン中に、この金属球を発射し、そのローデータから、0.02sec以下の時間間隔に相当するスライス間隔にて画像再構成する。スライス間隔SIから、時間間隔TIへの変換式は以下に示した。

$$TI = \frac{SI}{(N \cdot C \cdot BR) / R} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(ただし、N：MDCTの使用検出器列数、C：1 検出器列の幅、BP：ビームピッチ、R：回転速度)

再構成された画像は、金属球が一瞬にスライス面を通過するため、球の直径にほぼ等しい帯状の画像となる。この画像から回転中心付近で帯の内側に納まるROIにて平均CT値を測定し、対応する時間との関係からTSPを得る。

測定の対象のCTには、4 列のMDCTであるシーメンス旭メディテック社製、Somatom Volume Zoom (Somatom)を用いた。スキャン条件は、120kV、100mA、0.75sec/rot.、スライスコリメーション=1mm×4、再構成スライス厚=1.25mmとして、ビームピッチを0.675、0.75、1.0、1.5と変化させた。再構成FOVは100mmとし、15×15ピクセルのROIを用いた。再構成間隔は(1)式によって時間間隔が0.03sec以下となるように、0.1mmとした。

この測定法の精度を検証するには、各スキャン条件における理論的なTSPを算出し、それと比較することが有効である。Somatomは、再構成における補間法がSchallerらによる論文¹³⁾によってほぼ明らかとなっているため、その情報を元に、理論的なTSPを求

めることが可能であった。理論値の計算に用いたヘリカル補間のための重み付け関数の形状は三角形とし、その底辺の幅は1 検出器列の幅の2 倍に設定した。この場合に再構成スライス厚は、理論的に約1.2mmとなり、実測とほぼ一致する。

3. 結 果

Fig. 3に、各ビームピッチにおけるTSP測定結果と理論値との比較を示す。実測のTSPは、各レベルの横幅、変曲点の形状やその高さなど、ほぼ正確に理論値との一致を示した。

4. 考 察

実測値と理論値は、各ピッチにおいて非常に正確に一致したことによって、測定法としての信頼性の高さが示された。理論値の計算に用いたパラメータは、実機と若干違う可能性があるが、次に述べるFig. 4の結果より、その違いは問題にならないと考える。Fig. 4は、ビームピッチ1.5において、Schallerらの論文に示された重み付け関数の3 種類の形状である三角形、コサイン関数、台形(上底幅=下底幅/2)にて算出した理論的TSPの比較である。このように形状を変化させても、TSPへの影響がわずかであるという性質によって、理論値の信用性が担保されるものと考えられ、よってこの理論値との一致をもって測定結果の精度は支持されるものと考えられた。

実測による結果から、ビームピッチが大きくなると時間分解能が高くなる性質が分かり、MDCTにおける再構成理論とも一致した結果となった。そしてTSPの形状を急峻な変曲点を含めて測ることができたこと

Fig. 3 Comparison of measured TSP and theoretical TSP for beam-pitches of (a) 0.675, (b) 0.75, (c) 1.0, and (d) 1.5. The measured TSPs were obtained from a 4-slice multi detector-row CT.

Fig. 4 Theoretical TSPs in case of beam-pitch=1.5 for three different shapes of weighting function for multi-slice helical interpolation.

から、この測定法が非常に高い時間分解能を持つことが明らかとなった。この時間分解能に対しては、金属球の直径と速度が影響因子となるが、この結果によって、本実験で用いた直径と速度による影響は、ほとんどないことが確認された。今後のこの測定法によるTSPを用いての周波数応答評価などの発展した応用が期待される。

5. 結 語

金属球をスライス面と垂直方向に高速に通過させて、時間領域のインパルス信号を生成して、その再構成画像からTSPを測定する新しい手法を提案した。本測定法が高い精度を有することが、実測と理論値の正確な一致により明らかとなった。本測定法によってCTの時間分解能の評価に関する詳細な研究が進むことを期待する。

参考文献

- 1) Bischof CJ, Ehrhardt JC. Modulation transfer function of the EMI CT head scanner. *Med Phys* 1977; 4(2): 163-167.
- 2) 遠藤真広, 飯沼 武, 竹中栄一. ワイヤによるCT像の分解能の測定. *日本医放会誌* 1980; 40(1): 43-51.
- 3) Nickoloff EL. Measurement of the PSF for a CT scanner: appropriate wire diameter and pixel size. *Phys Med Biol* 1988; 33(1): 149-155.
- 4) 竹中栄一, 飯沼 武, 遠藤真広, 他. X線コンピュータ断層撮影装置の性能評価に関する基準(第2次勧告). *日本医師会誌* 1979; 82(6): 1175-1185.
- 5) Hanson KM. Detectability in computed tomographic images. *Med Phys* 1979; 6(5): 441-451.
- 6) Kijewski MF, Judy PF. The noise power spectrum of CT images. *Phys Med Biol* 1987; 32(5): 565-575.
- 7) Boedeker KL, Cooper VN, McNitt-Gray MF. Application of the noise power spectrum in modern diagnostic MDCT: part I. Measurement of noise power spectra and noise equivalent quanta. *Phys Med Biol* 2007; 52(14): 4027-4046.
- 8) Polacin A, Kalender WA, Brink J, et al. Measurement of slice sensitivity profiles in spiral CT. *Med Phys* 1994; 21(1): 133-140.
- 9) 花井耕造, 石田智広, 井田義宏, 他. ラセンCTの物理的な画像特性の評価と測定法に関する報告. *日放技学誌* 1997; 53(11): 1714-1732.
- 10) 原 孝則, 桜井直之, 津坂昌利. マイクロディスク法によるMultislice spiralCTの体軸方向のMTF測定: ビーズ法との比較と幾何学的な影響に関する検討(第31回秋季学術大会 一般研究発表 CT検査 性能評価 I). *日放技学誌* 2003; 59(9): 1057-1058.
- 11) Taguchi K, Anno H. High temporal resolution for multislice helical computed tomography. *Med Phys* 2000; 27(5): 861-872.
- 12) 辻岡勝美, 井田義宏, 大坪寛知, 他. X線CTにおけるtime sensitivity profile (TSP)の考案と測定法の開発—non helical scan, single slice helical scan, multi slice helical scanの比較. *日放技学誌* 2000; 56(12): 1461-1469.
- 13) Schaller S, Flohr T, Klingenberg K, et al. Spiral interpolation algorithm for multislice spiral CT—part I: theory. *IEEE Trans Med Imaging* 2000; 19(9): 822-834.

図表の説明

- Fig. 1 時間領域のインパルス信号(a)とそれに対する出力信号の時間応答(b)
- Fig. 2 CTにおける時間分解能測定の概要(サイドビュー)
金属球体は、スライス面と垂直方向に高速に打ち出される。
- Fig. 3 ビームピッチ(a)0.675, (b)0.75, (c)1.0, (d)1.5におけるTSPの実測値と理論値の比較
- Fig. 4 ビームピッチ1.5におけるMDCTのヘリカル補間の重み付け関数の形状によるTSPの理論値