

令和 2 年 5 月 14 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K16431

研究課題名(和文) 近接ジオメトリ型超高解像度CTの開発

研究課題名(英文) Development of ultra-high-resolution CT with contact geometry

研究代表者

川嶋 広貴 (Kawashima, Hiroki)

金沢大学・保健学系・助教

研究者番号：70775577

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：コンピュータ断層撮影(CT)の空間分解能は、主に検出器ピッチ、焦点サイズ、焦点-検出器間距離などの幾何学的配置によって決定される。そのため、臨床で使用されている汎用型CTの解像度は限られる。一方で四肢専用のCTは、高解像画像が得られるものの、撮像時間の延長やCT値精度の低下が懸念される。これらの問題を解決し、CTの解像度を飛躍的に改善するため、高精細検出器システムを既存のCT検出器の上に構築し、近接ジオメトリとした超高解像度CTシステムの基礎的技術を開発した。この高解像度CTは、汎用型CTと比べ、明らかに優れた画質特性を示し、骨梁など微細構造を明瞭に描出することができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CTの高解像化に関する研究発表が報告されているが、高速かつCT値精度を担保しながら人体の微小構造を描出し得る技術開発は無い。本研究は、汎用型CTの利点である大容量のX線出力を活用しつつ、高精細検出器を用いて近接ジオメトリとすることで高解像度化する新たな試みである。撮像範囲が6.8 mmと限定的であるものの、顕著な解像度の向上に成功し、0.2 mm程度の大きさである骨梁構造の描出が可能となった。今後、骨髄レベルでの画像観察により、四肢疾患の新たな画像所見の発見や治療効果を可視化できる可能性があり、臨床応用されることで医療の質の向上に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：The spatial resolution of a CT system is predominantly determined by the scanner's geometric design including detector pitch, focal spot size, focus-isocenter distance, and focus-detector distance. Therefore, a conventional CT, which is now clinically available, has a limited resolution. On the other hand, although a micro CT significantly improved the resolution, extension of the scanning time and in-accurate CT number were concerns. In order to improve the spatial resolution and overcome these shortcomings, we developed an ultrahigh-resolution (UHR) CT system constructed by adding a high-resolution CMOS detector with a 0.1-mm pixel pitch to a 16-row multislice CT scanner. This UHR-CT with contact geometry showed superior performance than conventional CT. It is expected that fine anatomical structures of bones and inner ear, which have not been sufficiently visualized by conventional CT scanners, can be clearly visualized by this system.

研究分野：放射線技術

キーワード：X線CT 高解像度 四肢

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1)人体内の多岐に渡る組織コントラストを視覚化するコンピュータ断層撮影(CT)画像において、微小構造を有する高コントラスト物体の視認性は主に空間分解能に依存することが知られている。例えば、海綿骨で形成される骨梁は、その大きさが0.15 - 0.25 mm程度とされている。これらを臨床で観察する際には、高周波強調関数による再構成画像を用いることが一般的となっており、骨折等の病態による変化が評価されている。しかし、汎用型CTの解像度は、その構成上0.4 - 0.5 mmに留まり、これらの微小構造を完全に描出することは困難である。

(2)CT画像の空間分解能は、検出器ピッチ、焦点サイズ、焦点 - 回転中心間距離、焦点 - 検出器間といった幾何学的配置によって表現可能な最高周波数が決定される。一般的な汎用型のCT装置は、大電流に対応するため比較的大きなX線焦点(0.8 - 2.0 mm)を搭載し、かつ効率よくX線を検出するため検出器の開口幅は回転中心で0.5 - 0.6 mmとなっている。さらに、全身の検査を想定しているため、直径700 mm程度のボア内のほぼ中心に成人の人体を収容し、X線源と人体は、500 - 600 mm、人体と検出器は400 - 500 mm離れることから1.7 - 1.8倍の拡大ジオメトリのX線投影となる。このような拡大投影では、焦点起因のボケにより顕著に解像度は低下し、検出器の素子サイズや構造など複合的な要因により解像度は限られる。

(3)空間分解能を向上するためには、超高解像度CT装置として販売されている四肢専用機のように、近接ジオメトリとし、高精細検出器によるピクセルピッチの縮小化、0.3 mm以下の極小焦点の使用が有用となる。このCT画像は、撮像視野が限られるものの、汎用型CTでは実現不可能な、極めて高い空間分解能を理論的には実現することができる。しかし、問題点として、焦点サイズを小さくしているため、X線出力が限られることが挙げられる。そのため、X線出力を担保するために、照射時間を延長せざる負えない。さらに、四肢の加重時検査などを重視したコンパクトな装置構成としたコーンビームCTが主流であるが、コーン角の拡大は散乱X線の増加を招き、正確なCT値を得ることができない。

(4)上述したように、既存のCTシステムにおいては、高速に人体の微小構造を描出し得る技術は無く、正確なCT値を有した再現性の高い高解像度CTが開発されれば、より細かなものまで正確に診断することが可能となり、様々な臨床応用が考えられる。

### 2. 研究の目的

(1)汎用型CTの利点である大容量のX線出力を活用しつつ、近接ジオメトリとすることで高解像度化する手法に着目した。汎用型CTにおいて検出器を被写体に近づけることができれば、X線焦点の半影は限りなく小さくすることができるため、焦点起因の不鋭を軽減することができる。そのため、大焦点を用いることも可能となり、十分な線量が確保される。さらに、検出器を高精細なものに変更することで、大幅な解像度の向上が期待できる。そこで、本研究の目的は、100  $\mu\text{m}$ 以下のピクセルピッチを持つCMOS型検出器システムを既存の16列のマルチスライスCT(MSCT)上に構築し、近接ジオメトリとする超高解像度CT(UHR-CT)の基礎的技術を開発することである。

(2)構築した超高解像度CTシステムの物理特性(解像度・ノイズ特性・被ばく線量)を測定し、汎用型CT装置(MSCT)と比較を行う。また最適な撮影条件を検討するため、再構成アルゴリズムの使用や被ばく線量との関係も明らかにする。

(3)超高解像度CTの基礎的技術開発による臨床応用の可能性を探るため、人体模擬ファントムによる、骨梁や軟骨の描出能を評価する。また骨髓レベルで画像診断を行うことや超高解像度造影CT検査により皮膚に分布する微細な穿通枝の描出可能性に関して検討する。

### 3. 研究の方法

(1)16列MSCTの検出器上に専用に製作した木製のマウントを装着し、その上にX線CMOS型検出器(Xineos 501, Teledine DALSA)を設置した。検出器の構成は、ピクセルピッチ0.1 mm、マトリックスサイズ1536  $\times$  68 pixels、シンチレータ塩化セシウム(CsI)であり、1秒間に300フレームのデータを収集することができる。X線の出力は既存のCT装置から行い、管電圧=80 kV、管電流時間積=60 mAs、設定スライス厚=1.0 mm(10列加算)、焦点サイズ=0.8  $\times$  0.5 mm、焦点回転中心間距離=535 mm、回転中心 - 検出器間距離=100 mm(拡大率=1.19倍)、回転速度=1.5 s/rot。(450フレーム)とした。取得したデータは有線で接続されたノートパソコンに転送される。画像再構成には、filtered back projection (FBP)法を用い、エッジ強調を行わないロールオフタイプのフィルタ関数により再構成画像を作成した。

(2)解像度の測定として、ワイヤ法によるmodulation transfer function (MTF)の測定を行った。0.12 mmの銅製ワイヤを直径が50 mmの円筒型水ファントム内に封入し使用した。ファントムは、CTの回転中心から10 mm下方にオフセットし、正確に中心軸と平行になるように設置した。取得したファントム画像から、ワイヤを中心とした256  $\times$  256 pixelsに対して、2次元フー

リ工変換を行い、その結果を同心円状に平均化することで最終的な1次元MTFを得た。

(3)ノイズ特性として、noise power spectrum (NPS)の測定を行った。直径110 mmの水ファントム画像を上述した撮影条件で取得した。ファントム中心における均一な領域(256×256 pixels)に対して2次元フーリエ変換により2次元NPSを取得した。得られた結果から、同心円状に平均化し、1次元NPSを得た。また測定誤差を低減するため、50枚の連続するスライスの結果を平均化した。システム感度は、 $SPF(f)^2 = MTF^2(f) / NPS(f)$ で算出される system performance function (SPF)により評価した。SPF<sup>2</sup>は、CT特有の空間周波数特性をキャンセルしたシステムの感度を示す指標であり、各周波数における比較が可能となる。

(4)被ばく線量の測定として、CT dose indexの測定を行った。測定には直径16 cmのアクリル円筒型ファントムとCT用電離箱線量計を用いた。

(5)微小構造の描出能を評価するために、人体模倣足部ファントムの撮像を行った。さらに、成人男性2名の右手手根骨も撮像した(本学の医学倫理審査委員会の承認を得て行った)。ファントム画像では骨梁構造の観察、手根骨画像については骨梁構造および軟部組織の観察を行った。なお、穿通枝のような微細な造影血管の評価は造影剤を用いず、軟部組織観察条件の画像から考察することとした。

#### 4. 研究成果

(1)臨床使用されている汎用型CTの検出器の上に、高精細検出器システムを構築する近接ジオメトリ型高解像度CTを開発した。従来型CTのX線出力を活かしつつ、高解像度化する新たな手法であると言える。この研究を通じて、近年注目されている汎用型CTの高解像度モードについても調査を行った。高精細検出器を搭載したCTや金属フィルタによって検出器の開口幅を狭める技術があり、従来型CTに比べ、飛躍的な解像度の改善が確認された。しかし、本研究で開発されたUHR-CTと比較すると、その解像度は劣り、拡大ジオメトリによる高解像度CT技術開発には限界があると考えられた。また、前述したようにコーンビームCTによる四肢専用機は、近接ジオメトリとしているものの、極小焦点を使用しているため、X線光子数を稼ぐ必要があり、撮像時間が延長する。これに加えコーン角が広く、散乱線の混入を防ぐことが極めて難しいことから再構成画像はCT値を正確に反映することができない。これに対して、我々の提案するUHR-CTは、今後ヘリカルスキャンなどの技術開発により、四肢全体を高速にスキャンできる可能性がある。さらに、散乱線含有率は、ビーム幅の狭小化および四肢の撮像を想定しているため、少ないことが予想され、高いCT値精度が期待できる。

(2)開発したUHR-CTの物理的画質評価を行った。解像度の指標として測定したMTFについては、50%MTFがUHR-CTおよびMSCTそれぞれにおいて1.14 mm<sup>-1</sup>、0.80 mm<sup>-1</sup>、5%MTFは3.05 mm<sup>-1</sup>、1.02 mm<sup>-1</sup>であった(図1)。開発したUHR-CTの5%MTFは、MSCTと比較し、約3倍高くなっていた。これは、近接ジオメトリと0.1 mmピクセルピッチの検出器による効果であると考えられた。このCT画像が弁別可能な最小径を算出すると、UHR-CTの分解能は0.164 mmとなり、0.2 mm程度とされる骨梁構造を表現可能であると考えられた。

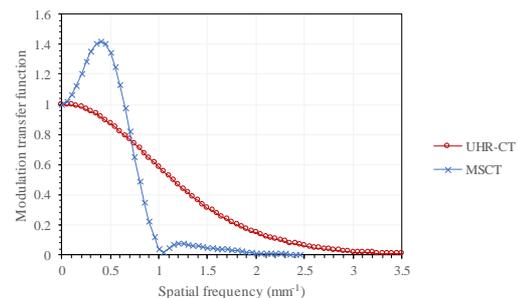


図1 UHR-CTと汎用型CT(MSCT)の解像度比較

(3)システム感度の指標として測定したSPF<sup>2</sup>の値は低周波領域において、MSCTが上回り、最低周波数では約17%高くなった(図2)。これは検出器の感度特性に起因するものであると考えられる。MSCTで使用されている検出器は、X線光子の利用効率が最大限となるように設計されている。それに対して、我々の使用した検出器はCsIの間接変換型のフラットパネルであり、その検出量子効率から考えても感度には限界があった。しかし、MSCTのSPF<sup>2</sup>の値は周波数の増加とともに急激に低下し、0.4 mm<sup>-1</sup>付近でUHR-CTが上回った。これより、UHR-CTは高解像特性に優れ、より細かなものを描出できる可能性が示された。

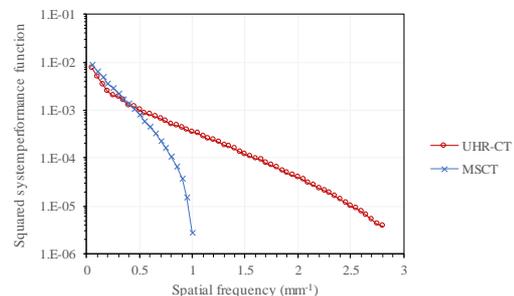


図2 UHR-CTとMSCTのシステム感度比較

(4)測定したCTDI<sub>w</sub>は、4.03 mGyであり、四肢用CTとして十分に低い被ばく線量となっていることが確認された。

(5)足部ファントムによる骨梁構造の描出について、MSCTと比較を行った(図3)。MSCTは臨床使用と同様にエッジ強調型のフィルタ関数を用いているものの、骨梁構造がぼかされ、明瞭に観察することができなかった。一方で、UHR-CT画像は、微細な骨梁構造を視認することができていた。しかし、ファントム画像では、骨周辺の組織が無く、CT値精度が重要な軟部組織や脂肪などを確かめることができなかった。そこで、倫理委員会の承認を得て、人体手根骨画像を取得した。

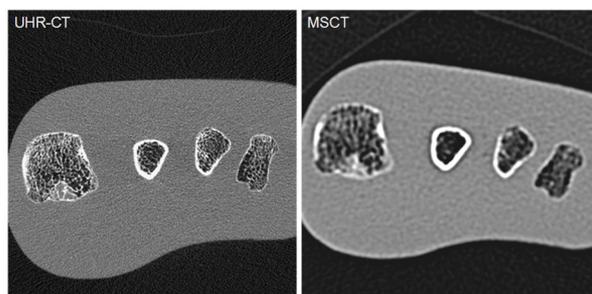


図3 UHR-CTとMSCTの足部ファントム画像比較

その結果、ファントム画像と同様に骨梁構造を明瞭に描出できているだけでなく、冠状断や矢状断にしても、画質劣化は目立たなかった。これより高精度な3次元画像を提供できる可能性が示された。さらに、軟部組織の観察については、微細な血管や骨周囲の軟部組織および脂肪を十分なコントラストで表現することができていた。本研究による基礎技術開発では、撮像範囲が6.8 mmの1断面のみであり、この撮像範囲では臨床的な有用性が低い。次のステップとしては臨床応用が考えられるが、そのためには撮像範囲の拡大を可能とする技術開発が必要である。

#### <引用文献>

Lin PJ, Beck TJ, Borrás C, et al. AAPM Report No. 39: specification and acceptance testing of computed tomography scanners. American Institute of Physics, New York; 1993.

Chiba K, Burghardt A, Osaki M, et al. Heterogeneity of bone microstructure in the femoral head in patients with osteoporosis: An ex vivo HR-pQCT study. *Bone*. 2013;56(1):139-146.

Zbijewski, Jean D, Prakash, et al. A dedicated cone beam CT system for musculoskeletal extremities imaging: Design, optimization, and initial performance characterization. *Med Phys*. 2011;38(8):4700-4713.

Boone JM, Geraghty EM, Seibert JA, et al. Dose reduction in pediatric CT: A rational approach. *Radiology*. 2003;228:352-360.

Boedeker KL, Cooper VN, McNitt-Gray MF. Application of the noise power spectrum in modern diagnostic MDCT: part . Measurement of noise power spectra and noise equivalent quanta. *Phys Med Biol*. 2007;52(14):4027-4046.

Kawashima H, Ichikawa K, Takata T, Nagata H, Hoshika M, Akagi N. Technical Note: Performance comparison of ultra high resolution scan modes of two clinical computed tomography systems. *Med Phys*. 2020;47(2):488-497.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Kawashima Hiroki, Ichikawa Katsuhiko, Takata Tadanori, Nagata Hiroji, Hoshika Minori, Akagi Noriaki                     | 4. 巻<br>47              |
| 2. 論文標題<br>Technical Note: Performance comparison of ultra high resolution scan modes of two clinical computed tomography systems | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>Medical Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>488 ~ 497 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1002/mp.13949  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-               |

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>五十嵐洗汰, 市川勝弘, 川嶋広貴, 尾鼻伸記       |
| 2. 発表標題<br>Built-on型検出器による超高解像度CTシステムの開発 |
| 3. 学会等名<br>第75回日本放射線技術学会総会学術大会           |
| 4. 発表年<br>2019年                          |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kawashima H, Ichikawa K, Takata T, Kobayashi S   |
| 2. 発表標題<br>Novel Ultrahigh-Resolution CT Using a CMOS Detector Built on a Conventional Multislice CT Scanner's Detector |
| 3. 学会等名<br>RSNA 2019: 105rd Scientific Assembly and Annual Meeting (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>下川蒼永, 市川勝弘, 川嶋広貴, 五十嵐洗汰         |
| 2. 発表標題<br>Built-on型検出器による超高解像度CTシステムの性能改善 |
| 3. 学会等名<br>第47回日本放射線技術学会秋季学術大会             |
| 4. 発表年<br>2019年                            |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>川嶋広貴, 市川勝弘, 高田忠徳, 三井渉                   |
| 2. 発表標題<br>新たなコンセプトの超高解像度CTの開発: 近接ジオメトリと高精細CMOS検出器 |
| 3. 学会等名<br>日本CT技術学会第7回学術大会                         |
| 4. 発表年<br>2019年                                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>谷村優花, 市川勝弘, 川嶋広貴, 名和蓮           |
| 2. 発表標題<br>四肢用超高解像度CTの実現に向けた実験システムの構築と画質計測 |
| 3. 学会等名<br>第46回日本放射線技術学会秋季学術大会             |
| 4. 発表年<br>2018年                            |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroki Kawashima, Katsuhiro Ichikawa, Satoshi Kobayashi, Noriaki Akagi, Hiroji Nagata                                 |
| 2. 発表標題<br>System Performance Comparison of Ultra-High-Resolution Scans Using Two Clinically Available Multi-Detector CT Systems |
| 3. 学会等名<br>RSNA2018: 104th Scientific assembly and annual meeting (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hiroki Kawashima, Katsuhiro Ichikawa, Tadanori Takata  |
| 2. 発表標題<br>Arm Artifact Reduction Techniques for Computed Tomographic Images: Has the Problem Been Overcome by Existing Techniques? |
| 3. 学会等名<br>RSNA 2017: 103rd Scientific assembly and annual meeting (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hiroki Kawashima, Katsuhiro Ichikawa, Tadanori Takata, Kosuke Matsubara, Satoshi Kobayashi |
| 2. 発表標題<br>A novel reconstruction algorithm for arm-artifact reduction in computed tomography         |
| 3. 学会等名<br>SPIE 2018: Medical imaging (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2018年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|