

令和 6 年 5 月 26 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K16694

研究課題名（和文）近接ジオメトリ方式による超高解像度CTの応用技術開発

研究課題名（英文）Development of application technology for ultra-high-resolution CT using a low magnification 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） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：被写体に検出器を近づける“近接ジオメトリ”を採用した四肢専用高解像度CT装置を臨床応用につなげる技術開発を行った。汎用型CTを利用した手法では、ヘリカルスキャンにより、撮像範囲を拡大した。一方で、今後の発展を考慮し、より現実的な手法として、独立型の四肢専用CTの開発およびその性能評価を行い、従来法よりも優れた性能を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高速かつ高解像度な四肢のCT画像を得るための工夫として、幾何学的配置の変更を利用した。最終的に開発した独立型の近接ジオメトリCTは、骨梁の微小構造を描出できる解像度を有し、かつ、6.5秒間で50 mmの範囲を検査できる。これにより、骨折の治癒過程や骨粗鬆症の進行による骨梁構造の変化を描出できる可能性がある。今後、開発システムが、四肢の画像診断に変革をもたらすことを期待したい。

研究成果の概要（英文）：We have developed a high-resolution CT system constructed by adding a high-resolution detector to a conventional CT scanner. In order to extend the scan range of this method, helical scanning was performed using table movement of the base CT system. On the other hand, considering future development, a new stand-alone high-resolution CT system was developed, and its imaging performance was evaluated. The major advantage of the developed system was that it was capable of high-resolution CT imaging at 130 μm covering 50 mm in the Z-direction with an imaging time as short as 6.5 seconds. A foot phantom, including a dry bone, was also scanned using the developed CT system. The trabecular bone structure was clearly visualized. It showed the potential to visualize the changes that occur in bone. I hope this technique will be a new one to obtain the high-resolution imaging for human extremities with clinical feasibility.

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 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1)

コンピュータ断層撮影 (CT) 検査は、人体内部を X 線の減弱に基づき、定量的な値 (CT 値) として画像化することが可能であり、医用画像診断の中心的な役割を担っている。CT 画像の解像度 (どれだけ細かなものを描出できるか) は、X 線管の焦点サイズと検出器の開口幅およびそれらの幾何学的な配置によって決定されるため、汎用型のシステムにおいて、解像度を向上させるには、いくつかの障壁が存在する [1]。その中でも、被写体と検出器が離れる“拡大ジオメトリ”では、X 線焦点由来の不鋭が大きくなり、高解像度化の妨げとなっている。

(2)

解像度の高い CT 画像が得られれば、人体の微細な構造を可視化することが可能となる。微細構造の描出が求められる人体構造の一つに、骨梁が挙げられる。四肢の画像診断において、骨折の治癒過程や骨粗鬆症の進行により、その構造に変化を生じることが予想されるが、その大きさは、約 0.2 mm 前後とされており、通常診療に用いられている臨床用の CT 装置では、明瞭に描出することは困難である。

(3)

そこで、撮像視野が限られるものの、被写体と検出器を近づけ、拡大率を小さくした“近接ジオメトリ型の高解像度 CT”の開発に取り組んできた。これまでの基礎技術開発では、汎用型 CT 装置の検出器の上に、高精細検出器を取り付けることによって、“近接ジオメトリ”を実現した。この方法では、足ファントムの高解像度画像の取得に成功したが、1 度の撮像で得られる範囲は 6.8 mm に限られ、四肢を対象とした高解像度 CT システムとしては、さらなる技術開発が必要であった。そこで、ヘリカルスキャン等の技術を応用し、臨床応用に向けて更なる発展を目指すこととした。

2. 研究の目的

CT システムの解像度を向上させる上で問題となる課題を克服し、被写体に検出器を近づける“近接ジオメトリ”を採用した四肢専用高解像度 CT 装置を臨床応用につなげる技術開発が本研究の最終目標である。研究開始当初は、上述した「マウント型の近接ジオメトリ CT」における応用技術開発を目的としていたが、その過程において、より現実的な発展を目指し、「独立型の近接ジオメトリ CT」の開発およびその性能を評価することとした。

3. 研究の方法

(1) マウント型の近接ジオメトリ CT の応用技術

専用に製作した木製の台の上にピクセルピッチ 0.099 mm の X 線検出器およびデータ収集用の PC を乗せ、その台を既存の CT 装置の検出器の上に固定した。この際、回転による脱落等が無いことを十分に注意した。検出器の前面には、専用の散乱 X 線除去用グリッドを配置した。グリッドを配置することによって、信号対雑音比の低下が懸念されるものの、散乱 X 線を低減することによって、より正確な CT 値の取得が期待できる。

実際のスキャンは、既存の CT 装置の寝台に人体足部模擬物体 (乾燥骨を含んだファントム) を固定し、ベースとした汎用型 CT 装置のヘリカルスキャンによるベッド移動を利用した。スキャン条件：管電圧 80 kV、X 線管の回転速度 1.5 秒、ピッチファクタ 0.74。CT 装置の X 線出力に合わせて、高精細検出器のデータを取得した。また、取り付けられた検出器等は、回転部分がむき出しとなるため、アクリル製の保護板を製作し、ベースとした CT 装置に取り付け、安全に検査を行えるように配慮した。

得られた投影データを用いて、補間計算により、CT 画像を生成した。画像再構成には、filtered back projection 法を用い、マトリックスサイズは、512×512、エッジ強調等は行わなかった。

(2) 独立型の近接ジオメトリ CT の開発

近接ジオメトリ型の高解像度 CT を臨床応用するために、より現実的な手法として、独立型の CT システムを構築した (図 1)。ガントリーには、高さ 1200 mm、幅 1200 mm、奥行き 650 mm のアルミフレームを用いた。ガントリー前面のアルミフレームに、小型の X 線管 (焦点サイズ 0.8 mm) と X 線検出器 (検出器構成 660×0.099 mm) を金属製のリングレール上に対向に配置したものを取り付けた。また、検出器の上には、散乱 X 線除去用グリッドを配置した。幾何学的配置については、いくつか検討を行った上で、最終的に以下の条件：焦点—回転中心間距離 465 mm、焦点—検出器間距離 565 mm (拡大率 1.22 倍)、回転中心における画素サイズ 0.082 mm、実効焦点サイズ 0.14 mm、最大撮像視野 125 mm とした。

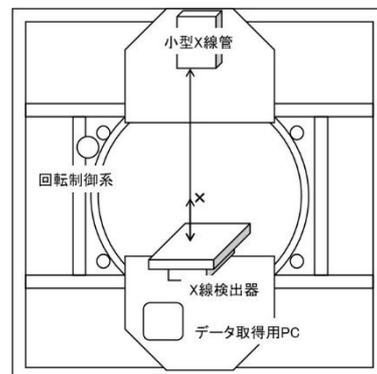


図 1 独立型の近接ジオメトリ CT の模式図

また、回転の安定性を考慮し、リングレールの支持は4点とした。

装置の回転制御については、ステッピングモータを用いた。X線管が真上の位置を0度とし、1周目を助走、2周目に既定速度へ到達するように回転を調節した。2周目の0度位置に到達したところで、X線を出力し、1回転6.5秒のアキシャルスキャンを行い、520の投影データを取得した。(1)の実験に用いたものよりも、検出器面が大きな検出器を使用できたため、体軸方向の撮像範囲は、1回転で約50mmとなった。管電圧を80kV、管電流を5mAとし、CT線量指数は約8.4mGyであった。画像再構成には、filtered back projection法を用い、マトリックスサイズは、512×512、エッジ強調等は行わなかった。

(3) 独立型の近接ジオメトリCTの性能評価

解像特性については、modulation transfer function (MTF)の測定を行った。水で満たされた直径50mmのシリンジ内に、金属製のワイヤーを張ったワイヤーファントムをスキャンした。得られた点状の画像から、MTFを計測した。MTFが5%となる空間周波数の値から、識別可能な最小径を推定した。ノイズ特性については、小型の水ファントムをスキャンし、得られた均一水部分から、noise power spectrum (NPS)の測定を行った[2]。システムの感度特性を評価するため、得られたMTFとNPSを用いて、system performance function (SPF)を $MTF^2(f)/NPS(f)$ より算出した。ここで、 f は空間周波数(mm^{-1})を示す。さらに、足部ファントムも撮像し、その画像を観察評価した。

4. 研究成果

(1) マウント型の近接ジオメトリCTの応用技術

図2に、足部ファントムのCT画像を示す。横断像では、乾燥骨の骨梁構造が明瞭に描出されていた。基礎実験の結果より、解像度は約0.16mmと推定され、画像ノイズは骨の信号に比べ十分に小さく、信号対雑音比は十分に高いと考えられた。また、体軸方向の画像(矢状断)では、若干解像度の低下があるようにも観察されたが、従来よりも広い範囲のデータを1度のスキャンで取得することが可能となった。しかし、この手法の発展・応用を検討してきたが、既存の装置への改良が必要となることや2つの装置(汎用型CTおよび高精細検出器システム)を同時に制御する必要があること、不測の事態への対応等、汎用性が低く、今後の発展が見込めないと判断した。

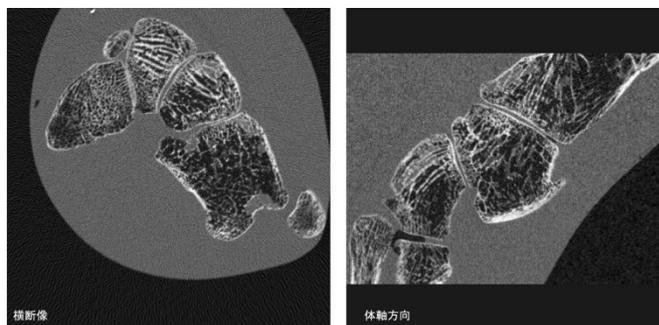


図2 マウント型の近接ジオメトリCTによるヘリカルスキャン画像

また、検討予定であったデュアルエネルギー技術については、基礎実験として、ベースとしたCTシステムの画像から、解析可能であることを確認していた。しかし、解析画像では、ノイズの増加が顕著であった。最終的に、開発した独立型のCT装置では、現状、デュアルエネルギー撮像に必要な管電圧を設定することはできず、さらに、高解像度画像では、ノイズの増加が問題となるため、これに関しては今後の課題とすることとした。

(2) 独立型の近接ジオメトリCTの性能

5%MTFの測定結果は、 3.88 mm^{-1} となり、推定された識別最小径は、0.13mmであった。これは、臨床で使われている高解像度CTよりも明らかに小さく、骨梁構造の明瞭な描出が期待できる。さらに、SPFの結果より、高空間周波数において、性能(信号対雑音比)を保つ傾向にあることが確認できた。

足部ファントムの画像(図3)では、乾燥骨の骨梁構造がより明瞭に描出されていた。6.5秒間の撮像時間で50mm幅の高解像度画像が得られることは、臨床応用においても価値が高いと考えられる。なお、本システムは、安全性を確認した上で、現在、臨床における評価を進めている。

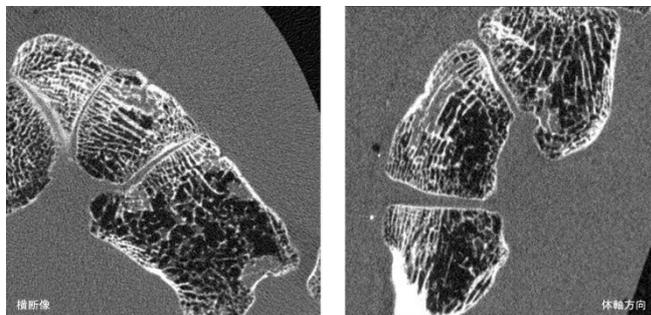


図3 独立型の近接ジオメトリCTによる足部ファントム画像

参考文献

- [1] 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.
- [2] Inoue T, Ichikawa K, Hara T, Ohashi K, Sato K, Kawashima H. Validating computer applications for

calculating spatial resolution and noise property in CT using simulated images with known properties.
Radiol Phys Technol. 2024;17(1):238-247.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Kawashima Hiroki, Ichikawa Katsuhiko, Ueta Hiroshi, Takata Tadanori, Mitsui Wataru, Nagata Hiroji	4. 巻 33
2. 論文標題 Virtual monochromatic images of dual-energy CT as an alternative to single-energy CT: performance comparison using a detectability index for different acquisition techniques	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 European Radiology	6. 最初と最後の頁 5752-5760
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00330-023-09491-6	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Kawashima Hiroki, Ichikawa Katsuhiko, Iida Yasuko	4. 巻 48
2. 論文標題 A new stationary grid, with grid lines aligned to pixel lines with submicron order precision, to suppress grid artifacts	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Medical Physics	6. 最初と最後の頁 4935-4943
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/mp.15099	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Kawashima Hiroki, Ichikawa Katsuhiko, Takata Tadanori, Mitsui Wataru, Ueta Hiroshi, Yoneda Norihide, Kobayashi Satoshi	4. 巻 7
2. 論文標題 Performance of clinically available deep learning image reconstruction in computed tomography: a phantom study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Medical Imaging	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/1.jmi.7.6.063503	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shimokawa Soei, Ichikawa Katsuhiko, Kawashima Hiroki
2. 発表標題 A prototype ultra-high-resolution CT for extremities with 89- μ m detector pitch: design and performance
3. 学会等名 RSNA 2021: 107th Scientific Assembly and Annual Meeting（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川嶋 広貴、市川 勝弘、高田 忠徳、三井 渉、上江田 博、長田 弘二
2. 発表標題 Single-energy CTの代替画像としての仮想単色X線CT画像の性能:異なる撮像方式での比較
3. 学会等名 第77回日本放射線技術学会総会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下川 蒼永、市川 勝弘、川嶋 広貴、豊原 勇理
2. 発表標題 CMOS型検出器を用いた四肢専用超高解像度CTの開発:デザインと初期性能評価
3. 学会等名 第77回日本放射線技術学会総会学術大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------