

心臓4次元CTのデータ効率化に向けた取り組み： マトリクスサイズと再構成条件の最適化

Toward Data-efficient Four-dimensional Cardiac CT: Optimization of Matrix Size and Reconstruction Parameters

奥山 舜^{1)*}, 西井 達矢²⁾, 田中 俊光¹⁾, 中嶋 啓貴¹⁾, 関谷 俊範^{1,3)}, 福田 哲也²⁾

1) (診療放射線技師) 国立循環器病研究センター 放射線部

2) (医師) 国立循環器病研究センター 放射線部

3) 大阪ハイテクノロジー専門学校 診療放射線技師学科

Key words: X-Ray Computed Tomography, Cardiac Imaging Techniques, Four-Dimensional Computed Tomography, Sustainability, Data Footprint

【Abstract】

To enhance sustainability and reduce the substantial data volume associated with 4D cardiac CT (TAVR-CT) during pre-procedural planning for transcatheter aortic valve replacement (TAVR), we developed a matrix reconstruction technique (256 × 256) that offers improved spatial resolution and edge enhancement. We compared this method to the traditional 512 × 512 reconstruction. Phantom experiments identified optimal conditions, and clinical validation involved analyzing TAVR-CT images from 50 cases. The results showed that our method achieved image quality on par with the conventional technique, evaluated through a 10% task transfer function and visual assessment, and it demonstrated high accuracy for aortic annulus measurements and reliable valve size selection (96%, Kappa = 0.94). Our approach effectively decreases the data volume by 25% while preserving measurement accuracy, making it a viable solution for sustainable cardiac imaging in TAVR planning.

【抄 録】

経カテーテルの大動脈弁置換術前計画に用いる4次元心臓CTのデータ量削減を目指して、高周波関数および高い逐次近似応用再構成強度を利用した256×256マトリクス再構成法（提案法）を考案し、ファントムを用いた基礎検討で最適な再構成条件を決定し、臨床データの50例を後方視的に従来法（512×512）と比較検討した。提案法は、10% task transfer functionおよび視覚評価で従来法と同等の画質を維持し、大動脈弁輪測定精度と弁サイズ選択の一致度（96%、Cohen's $\kappa=0.94$ ）の高さを示した。提案法により、データ容量を25%に削減しながら測定精度を維持できることを確認した。

背 景

経カテーテルの大動脈弁置換術（Transcatheter Aortic Valve Replacement [TAVR]）の術前計画に用いる4次元心臓CT（TAVR-CT）では、正確な弁サイズ選択のため複数心位相の画像計測が推奨される¹⁾。しかし、標準的再構成マトリクスサイズ（512×512）を用いた4次元CTでは、1症例当たり約6,000枚（3 GB）ものデータが生成され、保存容量や処理時間の増大に加え、サーバー管理やネットワーク負荷、環境への影響も

懸念される²⁾。さらに構造的心疾患の低侵襲治療が増えるにつれ、今後、4次元心臓CT検査はますます増加し、現行のデータ管理体制の維持が困難になりつつある。

近年、TAVR-CTでの再構成マトリクスサイズを512×512から256×256に縮小し³⁾、データ量を25%に削減する方法が検討されている。しかし、空間分解能の低下や輪郭の鈍化によって、大動脈弁輪測定の精度が損なわれる可能性がある。そこで本研究では、高周波関数および高い逐次近似応用再構成強度の組み合わせを利用して、空間分解能向上と輪郭強調を付加した256×256マトリクスサイズ再構成法（提案法）を開発し、従来法（512×512）と比較してデータ容量を削減した上で、TAVR-CTとしての測定精度を維持できるかの検証を目的とした。

OKUYAMA Shun^{1)*}, NISHII Tatsuya, M.D., Ph.D.²⁾, TANAKA Toshimitsu, RT.¹⁾, NAKAJIMA Hiroki, RT.¹⁾, SEKITANI Toshinori, RT., M.S.^{1,3)}, FUKUDA Tetsuya, M.D., Ph.D.²⁾

1) Department of Radiology, National Cerebral and Cardiovascular Center

2) Department of Radiology, National Cerebral and Cardiovascular Center

3) Department of Radiological Technologist, Osaka College of High Technology, Department of Radiology

* E-mail : tyenbalo@ncvc.go.jp

Received February 16, 2025; accepted May 10, 2025

方 法

倫理的配慮

本研究は「世界医師会ヘルシンキ宣言」および「人を対象とする医学系研究に関する倫理指針」に準拠し、当施設
の倫理委員会承認下（承認番号R19039-3）に実施した。

使用機器および計測機器

CT装置は、192列Dual-source CT (SOMATOM Force, Siemens healthineers, Erlangen, Germany)を使用した。ファントムによる基礎的検討には、Catphan700 (CTP682モジュール)を用い、Task transfer function (TTF)の測定にはCT measure (ver.098, 日本CT技術学会, 東京)を使用した。臨床データによる検証においては、3Dワークステーションとしてsyngo.via (CT TAVI Planning, VB30A, Siemens healthineers)を使用した。

ファントムによる基礎的検討

192列Dual-source CTで、当院の実臨床で使用している撮影条件に準拠し、管電圧100 kV、スライス厚0.6 mm、回転速度250 msec、pitch 0.15、管電流自動調節機構 (CARE dose 4D, Quality ref.300 mAs with120 kV)を用いて、Catphan700 (CTP682モジュール)を5回撮影した。マトリクスサイズが512×512である従来法 (スライス厚1.0 mm, スライス間隔1.0 mm, FOV 200 mm, Bv40, 逐次近似画像再構成法 (以下, IR) である Advanced Modeled Iterative Reconstruction (以下, ADMIRE) 強度3)の画像に加えて、マトリクスサイズを256×256に変更し、FOV (200, 160, 120 mm)、再構成関数 (Bv40, Bv44)、ADMIRE強度 (3, 4, 5)の組み合わせで計18通りの画像を作成した。CT measureで、造影された左室流出路を想定し、デルリン円柱外周に接する矩形ROIを設定して円形エッジ法で計測し、5回撮影の結果を平均化したものを各再構成条件のTTFと規定した。なお、デルリン円柱は338 HU、およびデルリン円柱に隣接したバックグラウンドは48 HUであり、バックグラウンドの標準偏差は12 HUであった。さらに従来法との視覚的類似性に関して、診療放射線技師5人が、256×256画像および再構成条件を変更した3種類の256×256画像について評価を行った。従来法 (512×512)と合わせた4種類の画像をランダムに配置し、エッジ、ノイズ、全体的な印象の3項目について、それぞれ従来法に近いと感じられる順に順位付けを実施した。これらの評価結果に基づき、視覚的に従来法に最も類似すると判断された再構成条件を、後述する臨床データを用いた検証における256×256画像の提案法として採用した。

臨床データによる検証

2023年3月から8月までに本院の192列Dual-source CTにおいて施行された、TAVR-CT連続56症

例を後方視的に収集した。Retrospective心電図同期法を用いた心臓造影CTを撮影し、全心位相 (RR間隔5%ステップ, 20位相)の4次元画像を再構成した。放射線科診断専門医が大動脈弁輪の最大拡張かつ静止している心位相を選定し、その位相のみを従来法と提案法で再構成した。提案法の再構成条件は上記のファントムによる基礎的検討の結果を基に設定した。再構成画像を3Dワークステーションへ転送し、弁輪面積の自動計測を行った。なお、自動計測エラーが生じた症例は、以降の検討から除外した。得られた計測値を基に、SAPIEN 3 (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA)のサイズを選択した。

統計解析

統計解析にはJMP (18.0.1, SAS Institute, Cary, NC, USA)を使用し、 $P < 0.05$ を統計学的有意とした。各再構成条件の10%TTFはTukey法で評価した。主観的類似度評価における手法間の差は、Wilcoxon signed-rank test (Holm補正)で解析した。提案法と従来法による計測値の相関および誤差は、Pearsonの積率相関係数とBland-Altman解析を用い、弁サイズ選択の一致度にはCohenの κ 係数を用いた。

結果

分解能の評価において、再構成マトリクスサイズだけ変更したときの10%TTFは、従来法 (512×512)での0.96 cycles/mmから0.72 cycles/mmとなり有意に低下した ($p < 0.001$)。再構成条件を変化させた際の分解能評価は、FOVを小さく、より高周波成分を強調した再構成関数を選択しIR強度を上げると、いずれも10%TTFは上昇した (Table 1)。マトリクスサイズを256×256にした場合、従来法と同程度の10%TTFを示した再構成条件は、(1)FOV 200 mm・Bv44・IR強度5、(2)FOV 160 mm・Bv44・IR強度4、(3)FOV 160 mm・Bv44・IR強度5であった。

視覚類似度評価では、エッジ、ノイズ、全体の評価、いずれにおいても有意に条件(2)が最も従来法に類似していた (Table 2)。Fig.1に、従来法、マトリクスサイズのみ256×256とした場合、および条件(2)のTTF曲線を示す。

臨床研究では、256×256再構成に条件(2):FOV 160 mm・Bv44・IR強度4を用いた。自動計測エラーが生じた6例を除く50例 (女性32人 [64%])、年齢中央値84歳 [四分位75-88])の弁輪面積は平均414.0

Table 1 The results of the 10% task transfer function in each reconstruction method

Variables	Bv40 IR strength 3	Bv40 IR strength 4	Bv40 IR strength 5	Bv44 IR strength 3	Bv44 IR strength 4	Bv44 IR strength 5
<i>Matrix size 512 × 512</i>						
FOV 200 mm	0.96±0.01	—	—	—	—	—
<i>Matrix size 256 × 256</i>						
FOV 200 mm	0.72±0.02 [#]	0.77±0.02	0.83±0.01	0.80±0.02	0.86±0.01	0.94±0.03 [†]
FOV 160 mm	0.79±0.01	0.84±0.02	0.90±0.02	0.85±0.03	0.92±0.03 [†]	0.98±0.03 [†]
FOV 120 mm	0.90±0.02	0.97±0.03	1.04±0.02	1.02±0.02	1.09±0.03	1.14±0.03

Note.— FOV = field of view, IR = iterative reconstruction.

[#] $P < .0001$, [†] $P > 0.05$

Table 2 The results of the subjective ranking of image similarity to the reference 512×512 images

Variables	Simple matrix reduction FOV 200, Bv40 IR strength 3	Modified method #1 FOV 200, Bv44 IR strength 5	Modified method #2 FOV 160, Bv44 IR strength 4	Modified method #3 FOV 160, Bv44 IR strength 5
Edge	3 (3, 4)	4 (3, 4)	1 (1, 2) [#]	2 (1, 2) [#]
Noise	2 (2, 3) [†]	4 (4, 4)	1 (1, 1) [†]	3 (2, 3)
Total	3 (3, 4)	4 (3, 4)	1 (1, 1) [‡]	2 (2, 2) [‡]

Note.— FOV = field of view, IR = iterative reconstruction.

[#] $P = 0.38$, [†], [‡] $P < .001$

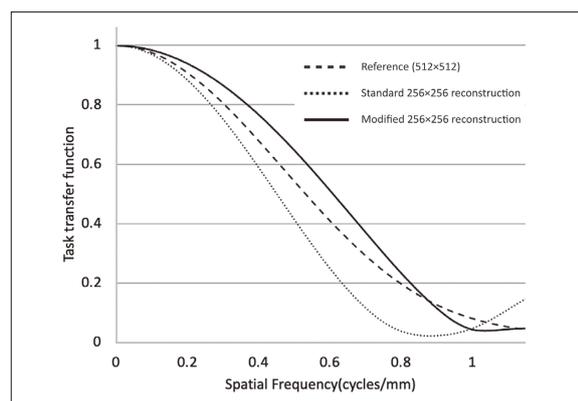


Fig.1 The task transfer function curves of each reconstruction method.

±108.5 mm²であった (Fig.2)。提案法による弁輪面積は従来法と高い相関 ($r=0.99$) を示し、両者の差の平均は−0.4 mm² (95%信頼区間: −2.0~1.2) (最小値および最大値: −11.0~16.1) であった。また誤差の許容範囲は−11.5~10.6 mm²であり、弁選択は48例 (96%) で一致し、 κ 係数は0.94と高い一致度を示した (Fig.3, Fig.4)。

考察

本研究では、256×256マトリクスサイズを用いた TAVR-CT 画像において、再構成条件を最適化することで、512×512画像と同等の画質・計測精度および高いデバイス選択の一致率が得られることを示した。TAVR-CTでは、解剖学的構造の精密な描出が求めら

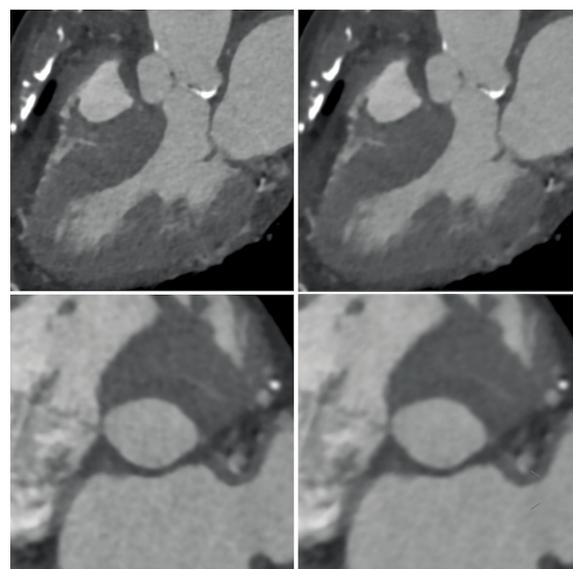


Fig.2 The left column displays the reference 512 × 512 image, while the right column presents the 256 × 256 image of the proposed method as representative case images.

れることから、現行のガイドラインでは512×512マトリクスサイズと心臓領域に絞ったFOVの使用が推奨されている¹⁾。一方、近年の報告では、256×256マトリクスサイズでも大動脈弁輪面積の測定に有意な差がないとする報告³⁾もあり、再構成条件の柔軟化が期待されている。本研究のファントム実験では、マトリクスサイズの低下のみでは輪郭の鈍化によりTTFが低下し、視覚的解像度も劣化した。しかし、再構成関数・IR強度・FOVなどのパラメーターを工夫することで、512×512画像と同等の空間分解能と視認性の確保が可能であることが示された。臨床検証において

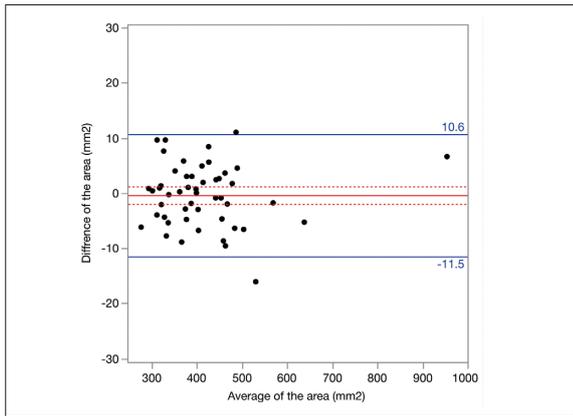


Fig.3 The Bland-Altman plot compares reference 512×512 and 256×256 images of the proposed method.

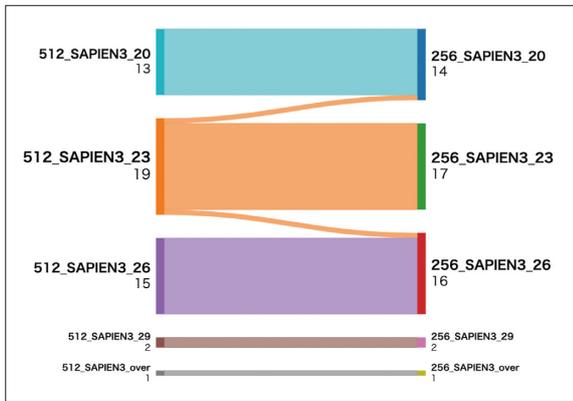


Fig.4 Sanky diagram of transcatheter heart valve selection between 512×512 (left) and 256×256 images of the proposed method (right).

も、本提案法による大動脈弁輪面積測定の誤差範囲は $-11.5\sim 10.6\text{ mm}^2$ であり、過去に報告された検者間誤差³⁻⁵⁾を8~83%下回った。またデバイス選択の一致率も高く、実用上問題ない精度が確保されたと考える。

本提案法により、TAVR-CTのデータ容量は約3 GBから約750 MB (25%)へと大幅に削減可能である。これは、画像処理や転送の効率向上、ストレージ管理コストの軽減、さらには転送時の電力消費削減を通じて、医療現場の業務効率および環境負荷の低減にも寄与し得る。またマトリクスサイズの最適化に加え、スライス厚、撮影範囲、再構成位相の削減といった他のパラメーターの工夫も組み合わせることで、今後、さらなる持続可能な循環器画像診断への発展が期待される。

一方、本研究は単一施設・単一装置による後方視的検討であり、再構成条件の一般化には慎重な検討を要する。患者背景や装置特性の違いによる影響も考慮しつつ、今後は他施設・多装置を含む前向き研究による検証が求められる。

結 論

TAVR術前計画に用いる4次元心臓CTにおいて、データ容量を25%に削減可能な空間分解能の向上と輪郭強調を組み合わせた256×256マトリクスサイズ画像再構成の提案法は、従来法(512×512)と比較してTAVR-CTにおける大動脈弁輪測定の精度が維持可能であった。

謝 辞

本研究は、2023年度公益社団法人日本診療放射線技師会の学術研究助成金を受けて実施し、日本放射線技術学会第80回総会学術大会および第98回日本心臓血管放射線研究会で学会発表しました。併せて本研究にご協力いただいた国立循環器病研究センター放射線部の皆さまに感謝申し上げます。

表の説明

Table 1 各再構成条件における10% task transfer function
Table 2 従来法(512×512)に対する画像類似度評価の結果

図の説明

- Fig.1 各手法のTask transfer function曲線 (5回平均)
- Fig.2 実際画像の比較 (左が通常512×512画像, 右が提案手法である256×256画像)
- Fig.3 通常512×512画像と提案手法である256×256画像間のBland-Altman plot
- Fig.4 人工弁選択におけるSanky diagram

参考文献

- 1) Blanke P, et al.: Computed tomography imaging in the context of transcatheter aortic valve implantation (TAVI) / transcatheter aortic valve replacement (TAVR): An expert consensus document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography. J Cardiovasc Comput Tomogr, 13, 1-20, 2019.
- 2) Doo FX, et al.: Environmental Sustainability and AI in Radiology: A Double-Edged Sword. Radiology, 310, e232030, 2024.
- 3) Hell MM, et al.: Analysis of left ventricular function, left ventricular outflow tract and aortic valve area using computed tomography: Influence of reconstruction parameters on measurement accuracy. Br J Radiol, 94, 20201306, 2021.
- 4) Blanke P, et al.: Combined assessment of aortic root anatomy and aortoiliac vasculature with dual-source CT as a screening tool in patients evaluated for transcatheter aortic valve implantation. AJR Am J Roentgenol, 195, 872-81, 2010.
- 5) Knobloch G, et al.: Inter- and intra-observer repeatability of aortic annulus measurements on screening CT for transcatheter aortic valve replacement (TAVR): Implications for appropriate device sizing. Eur J Radiol, 105, 209-215, 2018.