

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：32651

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2023

課題番号：21K20920

研究課題名（和文）AIによるTAVI術前CT解析技術開発

研究課題名（英文）Development of methods for automated preprocedural CT assessment for TAVR by artificial intelligence

研究代表者

宮坂 政紀（Miyasaka, Masaki）

東京慈恵会医科大学・医学部・助教

研究者番号：60911154

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではTranscatheter aortic valve implantation (TAVI)の術前評価の心臓CT解析に人工知能（AI）を応用し、3次元画像モダリティへのAIの応用の基盤を確立することを目指した。開発にあたり、3次元データから正確に平面推定を行うステップは応用範囲が広く価値がある一方で難易度が高かったが、最適輸送距離問題を応用したアルゴリズムの開発により、高精度の平面推定が可能になった。本法では粗い解像度のCT画像からでも、CT画像解析の専門家と同等の精度でランドマークを局在化でき、既存AI技術と比較して高精度な結果を得た。本成果については現在論文投稿準備中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2次元画像に比べて3次元画像のAI開発は難しいとされるが、本研究は同分野に進展をもたらした。本研究で提唱したUNET-GIIPにより、ヒートマップ回帰における学習の安定性と予測精度のトレードオフを緩和し、粗い解像度の1.6mm立方ボクセルのCT画像からランドマークを高精度で検出することに成功した。この技術は、TAVI術前CT解析にとどまらず、僧帽弁逆流症などの他の構造的な心疾患の診断、手術プランニング、さらにMRIや心臓超音波検査などの異なる3次元画像モダリティへの応用基盤としての可能性を秘めており、診断精度向上、診療負担軽減、医用画像解析研究の発展に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to establish a foundation for the application of artificial intelligence (AI) to three-dimensional imaging modalities by applying AI to cardiac CT analysis for preoperative evaluation of Transcatheter Aortic Valve Implantation (TAVI). During development, the step of accurately estimating planes from three-dimensional data was highly valuable due to its broad applicability but also posed significant challenges. By developing an algorithm based on the optimal transport distance, we achieved high-precision plane estimation. This method allows for the localization of landmarks with accuracy comparable to CT image analysis experts, even from low-resolution CT images, while yielding higher accuracy compared to existing AI technologies. A manuscript on these findings for publication has been prepared.

研究分野：Cardiology

キーワード：AI TAVI TAVR CT landmark detection 3D segmentation

1. 研究開始当初の背景

(1) 心疾患及び心疾患の画像評価の必要性の増加

人口の高齢化に伴い、大動脈弁狭窄症や僧帽弁逆流症などの構造的な心疾患 (Structural Heart Disease: SHD) を有する患者数が増加している。これらの疾患の根治治療には多くの場合、開胸手術が必要だが、高齢者は侵襲的治療に耐えられない場合がある。そのため、外科手術の代替治療としてカテーテルを用いた治療法の需要が増加している。特に、この 10 年間で技術の発展により、SHD に対するカテーテル治療の数が増加してきた。

それに伴い、SHD に対する病態把握や侵襲的治療前のリスク評価の重要性が増し、これらの分野の発展が著しい。しかし、その病態把握やリスク評価方法は依然として発展途上であり、特に評価技術や知識の普及が十分ではない。例えば、SHD へのカテーテル治療の一つである経カテーテル的大動脈弁置換術 (transcatheter aortic valve implantation: TAVI) の手術プランニング、合併症リスク評価には、術前心臓 CT (コンピュータ断層撮影) が用いられるが、その CT 解析や解釈には習熟が必要で、実施可能施設の拡大に比して熟練の CT 解析者が相対的に不足している。

(2) 人工知能 (Artificial Intelligence: AI) の発展

一方、この 10 年間でコンピューターサイエンス分野では深層学習により人工知能 (Artificial Intelligence: AI) が飛躍的に発展した。特に画像認識能力は向上し、応用研究も発展し、医療分野への応用も進められてきた。しかしながら、CT を含む 3 次元画像に対する AI の研究や臨床応用は不十分であった。特に、SHD の画像評価に関する AI の応用は依然として発展途上である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、画像認識に優れた AI・深層学習を用いて、新たな TAVI 術前の CT 解析プログラムを開発し、CT などの医療用 3 次元画像モダリティに対する解析法の基盤を確立することである。これにより、大動脈弁狭窄症や僧帽弁逆流症を始めとした構造的な心疾患に対する新たな画像解析法の確立を目指す。

3. 研究の方法

(1) 大動脈弁輪平面の推定のアルゴリズム

3 次元 CT データから正確に大動脈弁輪平面を推定することは、本研究で最も重要かつ難度の高いタスクであると考えた。研究開始当初に想定していた方法では実現困難であることが判明したため、方向転換を行い、独自のアルゴリズムを開発する方針とした。

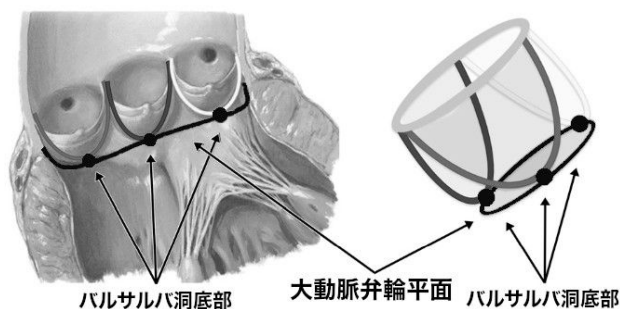
(2) 教師データ (Ground Truth) の作成

AI を学習させるための教師データ (Ground Truth: GT) を作成した。

TAVI 術前の手術プランニングのために撮影された心臓 CT データを使用した。CT の DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) データを既存の DICOM 解析ソフトウェアを用いて、標準的な TAVI 術前 CT 解析を行う要領で大動脈弁輪平面を決定した。

図 1 に示すように、バルサルバ洞の底部 (= 大動脈弁のヒンジポイント) をランドマークとした。大動脈無冠尖 (Non-Coronary Cusp: NCC)、右冠尖 (Right Coronary Cusp: RCC)、左冠尖 (Left Coronary Cusp: LCC) それぞれのヒンジポイントを同定し、GT とした。

図 1



(3) CT 解析者の質

CT 解析者は 1000 例を超える TAVI 術前の CT 解析の経験を有している。

(4) CT 画像の質の評価

ぼやけた写真から物体を判別することが難しいのと同様に、CT 画像が患者の体動や不整脈によって質が悪い場合、ヒンジポイントのランドマーク決定は困難になる。これは教師データを生成する際にも困難であり、AI によるランドマーク推定も難しくなることが予想される。そこで、本研究では CT 画像の質を半定量的に評価し、画像の質によって平面推定結果が異なるかどうかを評価した。

4. 研究成果

(1) 主な研究成果

GT と AI による推定の間誤差の評価を行った。以下の①～③の評価指標に関して、先行研究の方法との比較を行った。

ランドマークの距離：教師データとして与えたヒンジポイントのランドマークを示す点と、AI によって推定されたランドマークの点との空間上のユークリッド距離を求めた。

平面間の距離：GT の 3 点がなす平面と、AI によって推定された 3 点がなす平面との間の距離を測定した。

平面間の角度：GT の平面と AI の平面との間の角度を評価した。

図 2 に示すように、 のランドマークの距離に関しては、既存研究と比べ、いずれのランドマークにおいても最小であった。距離が最小であるということは誤差が最小であるということであり、最も高い精度でランドマークを推定できているということである。さらに、 の平面間の距離に関しても、 の平面間の角度に関しても、先行研究や既存の損失関数との組み合わせと比較して、本研究が提案する方法が最も誤差が小さく、正確にランドマーク及び大動脈弁輪平面を推定できていることを示すことができた。

図 3 は GT 大動脈弁輪平面と AI によって予想された平面の 1 例を示している。また水色は GT のランドマークを赤色は予想されたランドマークを示している。数字は のユークリッド距離である。

図 5 は、CT 画像そのものの質が低いことが予測誤算影響を与えるかどうかを示している。予想された通り、画像の質が悪い場合には、誤差が増す傾向が確認された。

(2) 本研究で提案されたアルゴリズム

本研究では、解剖学的ランドマーク予測のための新しい方法を提示することができた。U-Net を使用してヒートマップ予測を行ったが、ヒートマップ回帰に適した新しい損失関数を導入することで既存の方法や他の損失関数よりも予測誤差が小さいことを確認できた。特に、粗い解像度 1.6 mm の画像からでも中央値誤差 2.0 mm 未満を達成しており、専門家による CT 解析に匹敵する精度であった。

(2) 今後の展望

TAVI の CT 解析アルゴリズムの発展研究：本研究で提案されたアルゴリズム及び開発スキームを用いて、TAVI の術前、術後の CT 解析アルゴリズムを進化させる。

高精度ランドマークディテクション AI を用いた応用：本研究は、大動脈弁のヒンジポイントおよび大動脈弁輪の平面の学習および推定を行ったが、この方法は他のさまざまな解剖学的ランドマークにも応用可能である。その応用範囲は、既に試みられている冠動脈などの解剖学的ランドマークに限らず、これまで用いられてこなかった解剖学的ランドマークの空間的な位置を定量化することも含まれる。さらに、得られたデータを手術プランニング、診断、予後予測などに用いることで、臨床における 3 次元モデルの利用価値をさらに高めることが期待される。

本研究で提案された方法は、小規模データセットに対しても高精度なランドマーク検出を実現するため、データが限られている環境でも有用である。これにより、多くの病院や研究機関での応用が可能となり、データのプライバシーを保護しながら研究を進めることができる。また、提案されたアルゴリズムは他の医用画像解析タスクにも適用可能であり、今後の研究において多様な応用分野での展開が期待される。

図 2

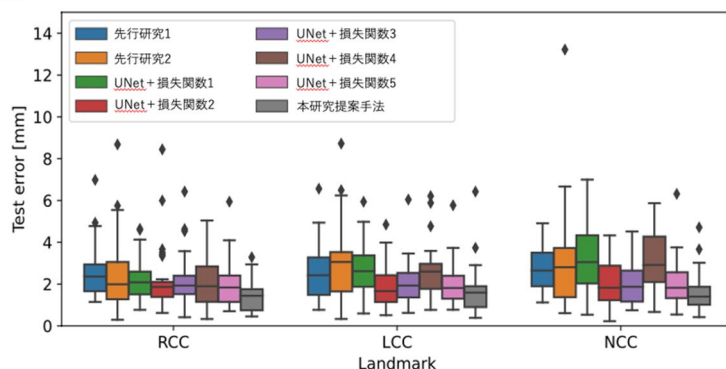
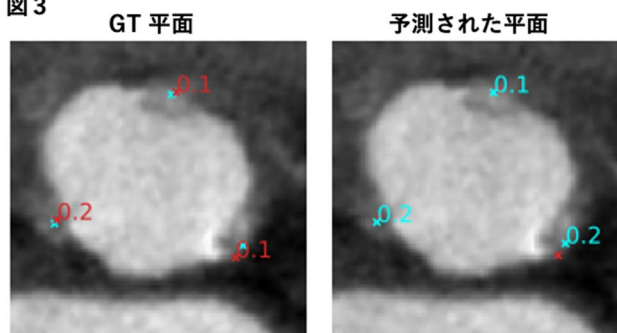
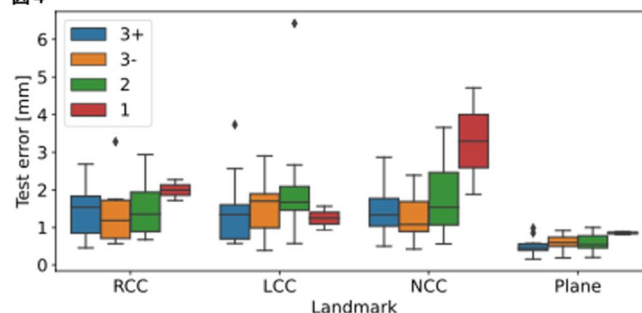


図 3



水色：GTのランドマーク、赤色：予測されたランドマーク

図 4



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 Miyasaka Masaki, Tada Norio, on behalf of the OCEAN-SHD family	4. 巻 37
2. 論文標題 Prosthesis-patient mismatch after transcatheter aortic valve implantation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cardiovascular Intervention and Therapeutics	6. 最初と最後の頁 615 ~ 625
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12928-022-00865-z	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0件

〔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
研究協力者	越智 小枝 (Ochi Sae) (20811904)	東京慈恵会医科大学・臨床検査医学講座・教授 (32651)	
研究協力者	中村 和幸 (Nakamura Kazuyuki) (40462171)	明治大学・総合数理学部・教授 (32682)	
研究協力者	石曽根 毅 (Ishizone Tsuyoshi)	明治大学・総合数理学部 (32682)	

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
---------	---------