

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名	吉田 皓文
学位	博士 (保健学)
学位記番号	新大院博 (保) 第51号
学位授与の日付	令和5年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
博士論文名	小児心臓奇形診療における心臓CT画像解析のためのワークフロー支援システムの開発に関する研究
論文審査委員	主査 大久保 真樹 副査 笹本 龍太 副査 近藤 世範

博士論文の要旨

小児先天性心疾患のほとんどを占める心臓奇形は患児個人によって多様な状態を示すため、その診断においては検査画像から心臓血管の立体構造を読み解くことが難しい。特に、外科手術の対象となる複雑心臓奇形例では、奇形である異常部位と、その周囲の正常部位との立体的関係を断層画像から判断する必要がある。このような複雑な病変を直感的に理解するための診療補助として、コンピュータ断層画像を用いた三次元画像構築が有用であり、臨床で用いられている。しかし、この三次元画像を構築するには、複雑心臓奇形のような難解な症例の画像から心臓内の正常部位および異常部位それぞれの領域を指定する画像処理が必要であり、数時間から一日単位の長い時間と労力を要する。そのため緊急時の画像作成ができない点や、診療の効率化の観点から課題となっている。このような課題を解決するため、申請者らは近年画像認識で高い性能が示されている深層学習に着目した。画像を対象とした深層学習は画像から画像特徴量を自動的に抽出し、画像に写る物体の意味を判別したり、画像中の物体の座標や領域情報を推定したりするタスクなどに用いられている。

本研究の目的は、心臓内に奇形のある小児の X 線コンピュータ断層画像から心臓の各部位を自動で領域分割する深層学習ベースの画像処理アルゴリズムを開発するための要素技術として、深層学習による小児心臓コンピュータ断層画像における心臓部位をそれぞれ領域分割する手法や、心房心室数の異常有無を自動で判別する手法を調査・開発し、これらを精度良く行える深層学習アルゴリズムを提案することにある。

本論文は全4章から構成されている。

第1章では、緒論として本研究の背景、意義、目的について論じた。

第2章では、小児の心臓コンピュータ断層画像から全心臓領域および各心房心室領域を精度良く自動領域分割する深層学習アルゴリズムの開発および評価を行った。心臓内に奇形のない20例の心臓 X 線コンピュータ断層画像 (約 7,500 枚) を用いた。U-Net ベースの深層学習モデルに、まず全心臓領域を学習させ全心臓領域分割画像を出力させた。この画像を用い、次に各心房心室領域を学習させ、各心房心室の領域分割画像を出力させた。評価指標に Dice 類似度係数を用い、マスク画像と推定ラベル画像との一致度を

評価した。その結果、全心臓領域分割では平均 0.954 ± 0.013 と高い Dice 類似度係数が得られた。年齢カテゴリごとの Dice 類似度係数はいずれも 0.94 以上であった。心房心室領域分割では、4つの心房心室いずれも 0.80 以上の Dice 類似度係数が得られ、左心室では 0.854 ± 0.079 と最も高い値を示した。全心臓領域分割では被検者の年齢カテゴリに関わらず高い領域分割精度が得られ、年齢カテゴリ間に有意差は見られなかった。心房心室領域分割では、一部の年齢カテゴリにおける Dice 係数は有意に低い値を示した。小児心臓コンピュータ断層画像ではその造影手技および撮像手技が年齢によって異なる傾向があり、画像の造影効果が異なることによりモデル性能が変化した可能性が考えられた。よりパラメータ数の多いモデルの利用や、異なるウィンドウ設定を用いることにより、さらなる性能向上が可能と考える。本章では深層学習を用いる自動領域分割アルゴリズムを開発し、小児の造影コンピュータ断層画像から全心臓領域および心房心室領域をそれぞれ高い精度で領域分割できることを示した。

第3章では、心房心室数が正常である例と、心房心室数が異常である単心房例および単心室例とを自動判別する手法の調査開発および評価を行った。本章では、パラメータ数の異なる複数の深層学習モデルの比較、深層学習モデルの ImageNet 事前学習有無による比較、学習条件（学習率、全結合層の学習率に対する重み係数）の比較、全心臓領域分割によるデータ前処理有無の比較を行った。深層学習モデルには ResNet および Inception-ResNet-V2 を用いた。その結果、深層学習モデル Inception-ResNet-V2、学習率は 10^{-3} 、全結合層の学習率への重み係数 10、ImageNet 事前学習あり、全心臓領域分割による前処理ありの条件で最も高い性能が得られ、そのとき正解率 99.02%、Az 値 0.9997 であった。デファクトスタンダード手法をパラメータ調整し、領域分割処理を用いることで非常に高い精度が得られた。提案法により心房心室数の異常有無を自動判別できる可能性を示した。

第4章では、本研究を総括し、今後の展望について述べた。

審査結果の要旨

学位申請論文は、主査1名、副査2名の計3名で審査を行った。

1. 保健学における研究の価値と貢献

本論文は、新規性（学術的・技術的観点からの新規性、あるいは適用対象が新しい、など）、有効性（評価方法・基準が適切であることを含めた論文趣旨全体の有効性、など）、信頼性（記述の客観性や論理性、手法の評価の適切さ、など）のいずれも秀でており、保健学（特に放射線技術科学分野）に貢献する優れた論文であると、判断する。

2. 論文構成と内容に関する審査

本論文は、第1章 緒論、第2章 深層学習ネットワークを用いた小児心臓 CT 画像における全心臓領域および心房心室領域の自動セグメンテーション手法の開発、第3章 心房心室数の異常有無を自動判別する深層学習アルゴリズムの開発と評価、第4章 結論で構成されており、論文の趣旨を把握するために、各章の内容は十分に詳細に書かれている。また、以下の点を全て満たしている。

・タイトルが、論文の趣旨を捉えており明解で簡潔である。

- 目的と背景が、明解かつ簡潔に記されている。
- 理論／方法が、正しく論理的であり、客観的に明解に記述されている。
- 結果が、正当で、図、写真、表が適切であり、客観的・論理的に記述されている。
- 考察が、正当で客観的・論理的であり、著者の主張や結論を支持するデータが十分である。
- 結論が、目的に対応して適切に導かれており、記述が簡潔である。
- 引用文献が、本文中に現れた順に適切に参照されている。
- 表が、見やすく、数や表現が適切である。
- 図、写真が、見やすく、数や表現が適切である。
- キャプションが、明解で適切である。
- 書式が、適切である（誤字脱字がない、文体が統一されている、用語が適切である、など）

よって、論文構成およびその内容は学位論文としての要件を満たすものであると判断する。

3. 総括

審査の結果、本論文は博士(保健学)の学位論文として十分な価値を有するものとする。