

論文内容の要旨

博士論文題目

Preoperative assessment of vessel-to-acetabular rim distances
in non-contrast CT images for total hip arthroplasty
(非造影 CT 画像を用いた人工股関節全置換術のための
血管－寛骨臼縁距離の術前評価)

氏 名

Yingdong Chen

(論文内容の要旨)

人工股関節全置換術 (THA) における血管や神経の損傷は、生命を脅かすリスクがある。本研究の目的は、手術計画のために術前の CT 画像を用いて、血管から手術箇所である骨盤表面上の寛骨臼リムまでの距離を評価する手法を開発することである。提案手法は、2つの主要なステップから構成されている：1) 非造影 CT 画像からの骨盤骨 (寛骨臼リムを含む)、血管 (外腸骨動脈と静脈)、神経の自動領域抽出、2) 高リスク部位内の血管と寛骨臼リム間の距離評価。非造影 CT 画像を選択した理由は、THA 手術計画では、健康に悪影響を与えうる造影剤を伴う血管造影 CT 撮影は行われず、非造影 CT が広く採用されているためである。加えて、神経の領域抽出の見通しを得ることも目的とする。

変形性股関節症 (OA) 患者の非造影 CT 画像 36 例と、股関節に疾患は認められないが血管治療のために撮影された非 OA 患者の造影／非造影 CT 画像 18 組を、領域抽出 AI の学習／検証に使用した (これらを内部データベースと呼ぶ)。公開データベースから収集した非 OA CT 画像 10 例を、AI の学習にいつさい関与しない外部データベースによる検証に使用した。股関節 OA の内部データベースでは、ground truth (GT) ラベルは手動でアノテーションされた。一方、股関節 OA でない内部データベースの動脈 GT ラベルの作成は、股関節手術用ではなく、血管治療用に撮影されたもので、動脈が明瞭に撮像された造影 CT と非造影 CT から作成された。具体的には、造影 CT を非造影 CT に非剛体位置合わせを行い、造影 CT で正確に抽出された血管の CT ラベルを非造影 CT にマッピングした。神経 GT ラベルは、内部データベース OA 患者の非造影 CT 画像の中で 20 例に対し

て、手動でアノテーションされた。領域抽出精度の評価には、Dice 係数 (DC) と平均距離誤差 (ASD) を用いた。血管と寛骨臼リム間の距離評価の精度は、平均絶対誤差 (MAE) とピアソン相関係数 (PCC) を用いて評価した。

3次元 nnU-Net モデルを用いた内部データベースの股関節 OA 患者の DC は、動脈と静脈でそれぞれ 0.877 と 0.892、股関節 OA でない患者の DC は 0.901 と 0.909、検証用の外部データベースの股関節 OA でない患者の DC は 0.846 と 0.858 であった。さらに、2次元 U-Net モデルと比べて 3次元 nnU-Net モデルを用いることで、領域抽出精度が有意に向上することを示した。GT と自動領域抽出により計測された血管-リム距離の間の PCC は 0.97 より大きく、高リスク部位における平均 MAE は 0.5mm より小さかった。神経の領域抽出結果については、予備実験を行い、DC は、0.42~0.45 であったが、ASD は 3mm 以下であり、存在位置の検出には、一定の有用性が示された。

結論として、本研究は、非造影 CT 画像における血管-リム間距離を評価するための術前アプローチを提示し、自動血管領域抽出と距離評価において高い精度を示した。神経についても応用可能性の見通しを得た。提案法は、非造影 CT 画像に基づく THA 手術計画における血管損傷のリスク評価の実行可能性を示している。

(論文審査結果の要旨)

令和 5 年 7 月 21 日に公聴会を開催し、その結果を踏まえ令和 6 月 2 月 21 日に本博士論文の最終審査を実施した。

本論文では、手術計画のために血管から手術箇所である骨盤の寛骨臼リムまでの距離を評価する術前アプローチの開発を目的としている。目的の達成に必要なとなる、1) CT 画像からの血管と骨盤の領域の自動抽出法の開発、2) 抽出された血管と骨盤表面上の寛骨臼リムまでの距離の計測と表示システムの開発、3) これらの方法・システムの検証という 3 つの課題に取り組んでいる。本論文の貢献は以下のように要約される。

1. 整形外科手術では、血管造影 CT 撮影は行わず、非造影 CT 画像から血管領域を抽出する必要がある。股関節周辺の血管を、非造影 CT 画像から認識した例はこれまでなかったが、それが深層学習で臨床応用する上で十分な精度で可能になることを示した。検証データとして、専門家のアノテーションのみでなく、血管造影 CT 画像から得られた医学的にも信頼性の高い血管領域と比較しても、一致度 0.9 以上であることが確かめられた。さらに、2 次元スライス単位の認識ではなく、3 次元パッチ単位の認識により、血管領域の抽出精度が有意に向上することを示した。
2. 非造影 CT 画像を用いた血管から骨盤の寛骨臼リムまでの距離計測の平均誤差は、0.5mm 以下であり、臨床的に有用な方法となる可能性を示した。
3. 深層学習の訓練データと完全に切り離された外部の CT 画像を用いた評価においても、臨床的に利用可能な精度（一致度 0.85 程度）を達成し、提案手法の汎用性を示した。

これらの内容は、医用画像処理と手術支援の分野において、学術面での貢献が認められ、本論文の主要な部分は、学術論文誌および査読付き国際会議で公表されている。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。