

博士論文（要約）

血管形状の 3 次元形状モデリングと  
パラメータ化に関する研究

小林匡治

循環器疾患は、2019年度の日本人の総死亡者数において1/4を占めている。循環器疾患の2大死因は、脳血管疾患と腹部大動脈瘤である。脳血管疾患においては脳動脈瘤破裂の致死率が非常に高く、脳動脈瘤の発生・成長に関する研究が血流シミュレーションの観点からも盛んに行われている。医療現場での血流シミュレーションの導入も進んでいるが、動脈瘤の大きさやアスペクト比などの形状由来の定量値が手術を行うかどうかの基準として現在も用いられている。腹部大動脈瘤においては、患者への負担の少ないEVAR（血管内動脈瘤修復術）が導入され、短期・中期成績では開腹手術よりも高くなっている。一方、長期成績においてはステントグラフトのマイグレーションを含めた有害事象があり、腹部大動脈瘤の形状やネック部の血管の曲がりなどの血管形状要因が指摘されている。

CTやMRI画像などの医用画像は、脳動脈瘤や腹部大動脈瘤などの検査や手術計画において使用され、3次元形状抽出にも利用される。CTやMRI画像を撮影する機器に関して、日本では100万人あたりの保有台数は世界トップであり、術前・術後の検査において医用画像の蓄積が行われているため、医用画像の研究には世界に対してアドバンテージを持つ。

医用画像を用いた患者固有の血管形状の研究は、医用画像に対する血管の3次元形状モデリング処理を行うことから始まる。3次元形状モデリング処理は、CT画像に対して血管内腔領域の3次元セグメンテーションを行い、セグメンテーション領域に対して中心線を求め、セグメンテーション領域の表面をMarching Cubes法で再構築することで実現する。CT画像においては、骨、銀歯、アテローム性動脈硬化症による石灰化などの影響によってノイズが生じ、血管内腔内のCT値が一定とはならないため、再構築した血管内腔曲面には凹凸が生じる。この凹凸を除去するためには平滑化処理を行う必要があるが、Laplacian Smoothing 平滑化手法ではshrink問題が発生し、Taubin Smoothing 平滑化手法はshrink問題は回避されるが、凹凸が取り切れず定量化の障害となる。また、血管中心線においてもセグメンテーション形状に由来する高周波の波が出現するが、どの程度平滑化をすべきかについての指標はない。

本研究の目的は、循環器疾患において、脳動脈瘤の発生位置に関して血管の屈曲に関するリスク要因と、腹部大動脈瘤の血管内治療におけるステントグラフト留置術の経過観察期におけるリスク要因を探るため、医用画像（CT/MRI）から血管の3次元形状モデリングを行うシステムの開発を行い、血管の3次元形状として、血管中心線と血管内腔曲面の定量化を行う手法を提案することにある。

血管中心線においては、曲率・捩れ率の定量化を行うスプラインフィッティング手法を提案する。曲率や捩れ率の精度検証を通して、スプラインフィッティング手法で使用されるスプライン基底関数次数、ペナルティ項の微分次数、ペナルティ項の係数決めに関して見直しを行うことで、曲率・捩れ率の適切な定量化に関する知見を与えることに新規性がある。医用画像から取得した血管中心線の捩れ率について、今まではその利用方法と特徴

がわかりにくかったが、本手法を用いることで血管形状の特徴が反映された定量値として使用可能となる。

血管内腔曲面においては、任意トポロジー形状に対応可能な 3 角形型スプライン曲面を用いて関数化し、Gauss 曲率を用いた定量化を行う。3 角形パッチで構成される血管内腔曲面データに対して、3 角形型スプライン曲面を用いることで曲面を貼りなおすことなくスプライン関数化を行い、Gauss 曲率の計測へつなげる手法を提示する。また、血管中心線と血管内腔曲面の連結手法と、連結手法を利用した血管内腔曲面の凹凸の平滑化手法を提案する。Laplacian smoothing 処理の繰り返しによって生じる shrink 現象を回避し、Taubin 手法よりも凹凸の制御が可能となる点に新規性がある。また、連結手法によって、血管中心線と血管内腔曲面の定量化される形状パラメータを関連づけることも可能となる。

本研究の成果である血管の 3 次元形状モデリング手法のプラットフォーム「V-Modeler」は、Region Growing 法によるセグメンテーション、3 次元細線化による中心線抽出、Marching Cubes 法による表面形状の再構築、血管中心線と血管内腔曲面のスプライン関数化、血管中心線と血管内腔曲面の連結機能、連結機能を用いた血管内腔曲面の平滑化、血管中心線と血管内腔曲面の定量化、の機能構成を持ち、アプリケーションソフトウェアとして広く利用することが可能である。