

# 血管形状記述のための枝ベース木構造モデル構築の試み

小林 大祐<sup>†‡</sup>, 横田 秀夫<sup>‡</sup>, 森下 壮一郎<sup>†‡</sup>, 中村 佐紀子<sup>‡</sup>, 姫野 龍太郎<sup>‡</sup>, 三島 健稔<sup>†‡</sup>

<sup>†</sup>埼玉大学大学院 理工学研究科  
埼玉県さいたま市桜区下大久保 255  
e-mail: {koba, mori, mishima}@me.ics.saitama-u.ac.jp

<sup>‡</sup>独立行政法人 理化学研究所 生体力学シミュレーション特別研究ユニット  
埼玉県和光市広沢 2-1  
e-mail: {hyokota, sakiko, himeno}@riken.jp

## 1. 始めに

現在、理化学研究所では生体の力学モデルを計算機内に構築する生体力学シミュレーション研究が行われている。生体の構造と機能について厳密な力学モデルを構築することにより、疾病や障害の過程を目に見えるかたちで捉えることが可能になる。このシステムにより、新しい治療方法の開発を実際の患者に負担をかけることなく計算機上で行えるようになる。また、生体の複雑な運動動作のシミュレーションはスポーツ工学等の分野において非常に有用である。

生体の力学モデルを計算機内に構築するには、生体の形状を計算機で扱うための数値データ化と取得したデータを比較・検索する手法が必要不可欠である。我々は前記の生体形状の数値化研究を行っている。

生体形状の数値化は次の4つの工程で行う。

- ① 生体画像の取得
- ② 画像からの特徴部位の抽出
- ③ 形状情報の数値化
- ④ 取得情報の圧縮・可視化

①は生体の画像データ取得のための技術に関する研究であり、CTやMRIなどの既存の技術を利用するほか、理化学研究所では三次元内部構造顕微鏡[7,8]の開発も行われている。②は①で取得した画像から数値化に必要な特徴部位の抽出手法に関するであり、過去に島井らの手法[5]などが提案されている。③は、②で抽出した特徴部位から特徴量を数値データとして抽出し、それに基づいた特徴部位の構造を比較および検索する手法の開発を行う。④は、①～③で取得した生体情報のデータベースを構築することを目的とする。取得した情報は膨大な量となるため、有効な圧縮手法が必要となる。また、構造の違いを見るための可視化手法も必要であり、現在は、RVエディタ[6]の開発などが行われている。

これまでの研究から①、②に関してはある程度の成果が得られている。しかし、生体形状の数値化において最も重要な③に関しては、ほとんど研究が為されていなかった。そこで本研究は、③の形状情報の数値化を目指す。

本研究で提案する形状情報の数値化手法は以下の手順で行う。

1. 特徴部位から特徴量を抽出
2. 抽出した特徴量に基づいて構造モデルを構築
3. 構築した構造モデルの可視化

これらの手順の中で最も重要なものは、特徴部位の記述のための構造モデルの構築である。

現在、本研究で具体的な対象としているのは血管系である。脳血管では脳梗塞や脳動脈瘤など死亡率の高い疾患が発生する。血管の形状を記述することで、これらの疾患の早期発見や治療法の開発などが期待される。そこで血管形状の数値化のため構造モデルの構築手法を検討する。

血管は心臓を入り口とし、太い血管から細い血管に枝分かれした構造になっている。このことから、血管を表現するための構造モデルは木構造が妥当であると考えられる。過去に我々は、血管の構造モデルとして分岐点ごとにノードを作成する木構造構築手法を提案したが[4]、本研究ではそれに加えて、太い重要な血管から細い血管への枝分かれ構造をベースとした木構造を作成する。これは分岐点ごとにノードを作成した木構造は、直感的に理解しやすいが、構造が複雑になるため比較や検索には適していない。そこで、太い主要な血管からの枝分かれ構造を木構造の階層に対応させることで構造を簡略化し、比較や検索をやすくする。

本論文では血管系の形状情報の数値化を目指し、血管の太さと枝分かれ構造をベースとした木構造の構築手法を提案し、手法の検討を行う。

## 2. 特徴量の数値データ化

血管の構造モデル構築のためには画像から血管を抽出し、さらにそこから特徴量を数値データとして抽出しなければならない。本節では血管の特徴量の抽出方法について述べる。血管構造において重要だと考えられるものとして、血管の長さ、太さ、各血管の接続関係などが挙げられるので、血管の特徴量として抽出する。血管の特徴量の抽出は以下の手順で行う。

1. 細線化処理
2. 分岐の抽出
3. 太さの抽出
4. 長さの抽出

以下にそれぞれの手順の詳細を述べる。

### ・ 前処理としての細線化

MRI などから得た脳血管連続断面画像から血管を抽出する。血管の抽出には2値化や島井らの手法[5]などを用いる。次に、細線化処理[1,2]を施して線図形を得る（図

1)。細線化とは図形のトポロジーを保存したまま、太さが1の線図形にする処理で、これにより血管の分岐や接続が理解しやすくなり特徴量を抽出しやすい。

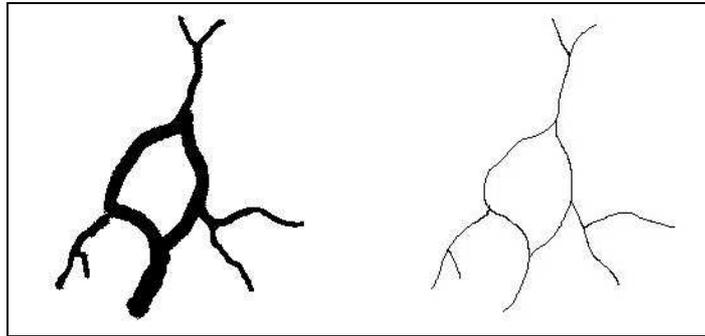


図 1 細線化イメージ図 (左: 細線化前 右: 細線化後)

### ・ 分岐の抽出

取得した線図形上の画素のうち、 $3 \times 3 \times 3$  近傍に画素が存在する場合はその画素を隣接しているとし、互いに隣接するものは接続されていると見なす。隣接する画素の数によって線図形上の全ての画素を以下のように分類する。

1. 隣接する画素数 1・・・端点
2. 隣接する画素数 2・・・エッジ (辺) を構成する内部の点
3. 隣接する画素数 3以上・・・分岐点

このとき1つの分岐点とすべきものが、複数の分岐点が接続しているものとして検出される場合がある (図 2)。この場合は1つの分岐点に集約する。以上の処理により、血管のエッジを定義でき、また各血管の接続関係を得ることが出来る。

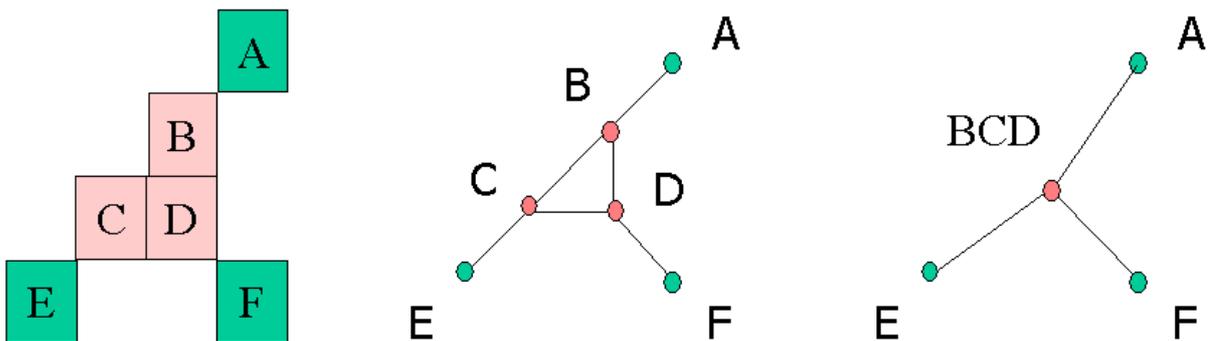


図 2 分岐点集約イメージ図

### ・ 太さの抽出

細線化後の線図形上の各画素において、最も近い血管壁までの距離をその点の太さとする。血管を進行方向に直行する断面で切断し、断面積を求めることにより太さと

定義することも考えられるが、分岐点上ではこれは行えない。そこで全ての点において太さを定義できる本手法を用いる。

#### ・ 長さの抽出

取得した線図形上の各画素において、 $3 \times 3 \times 3$ 近傍にある線図形上の画素との距離を以下のように定義する。

1. 2点が6近傍で接続している場合... 1
2. 2点が6近傍を除く18近傍で接続している場合...  $\sqrt{2}$
3. 2点が18近傍を除く26近傍で接続している場合...  $\sqrt{3}$

血管のエッジの長さは、エッジに含まれる全ての画素について、 $3 \times 3 \times 3$ 近傍にある同じエッジに含まれる画素との距離を求め、それらの総和を取ることで抽出できる。

### 3. 枝ベースの木構造モデル構築

本節ではこれまでに述べた手続きで抽出した特徴量に基づき、太さと枝分かれ構造をベースとした木構造の構築手法について述べる。

本論文で目的とする木構造は枝分かれ構造をベースにしている。これは、分岐点ごとにノードを作成するのではなく、端点から端点、もしくは分岐点から端点までの経路ごとにノードを作成するものである。これによりノードの分岐が経路の枝分かれを表す。また、太い血管ほど重要な経路と考えられるため、太い血管を親とするようにノードを接続する。

以上により、各ノードの作成方法と接続方法は定義されるが、血管には閉路が存在するためにこのままでは木構造を構築することは出来ない。本手法では閉路を検出して一つのエッジとすることでこの問題を解決する。本手法の木構造構築の具体的な手順は、以下の(a)~(e)となる(図3)。

- a. エッジの検出: 分岐点、端点によって構成されるエッジを列挙し、各エッジについて太さの平均値と全長を求める。
- b. 閉路の集約: 閉路検出により得られた閉路を1つのエッジとして集約する[3,4]。このとき閉路の太さの平均値と全長を求める。
- c. 木構造のルートの決定: 端点を含むエッジから任意のエッジを選ぶ。次に、このエッジに接続している他のエッジの中で太さが最大のものを選ぶ。これを端点に至るまで繰り返し、この経路をルートとする。このとき、一度参照したエッジは参照しない。
- d. 木構造のノードの作成: ルートに接続している各エッジからルート決定時と同様にして端点に到達するまでエッジを辿り、この経路をノードとする。この手続き

を再帰的に繰り返し、すべてのエッジについてそれが属するノードを決定する。各ノードには経路の全長と、ルートに最も近いエッジの太さを格納する。

- e. 木構造のノードの接続: ルートからの枝分かれ回数が少ないものを親として各ノードを接続する。

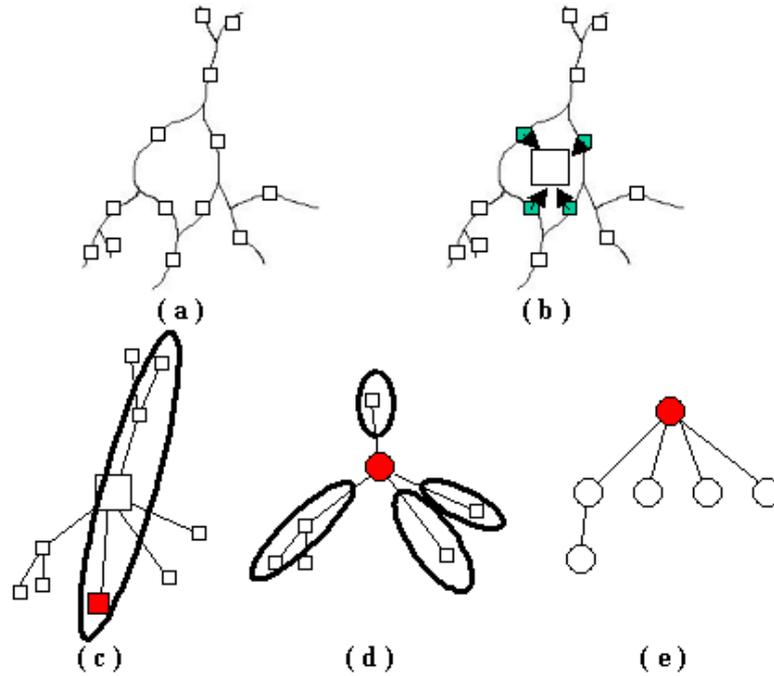


図 3 枝ベースの木構造構築手順

この手法により作成された木では、最も大きい太さを持つ経路がルートとなり、ルートからの枝分かれ回数が木の階層の深さになっている。つまり、階層の浅い部分が木の概略を、深い部分が木の細部を表す。したがって木の階層を指定することにより、任意の尺度で血管の構造を扱うことができる。

#### 4. 実験

提案手法の有効性を確認するために、ヒトの頭部MRI画像を用いて実験を行った。前処理としてMRIで撮影した頭部連続断面画像(表1、Fig.1)からRVエディタを用いて血管抽出を行い(Fig.2)、細線化処理を施した(Fig.3)。

その後、取得した線画像(Fig.3)に対し提案手法により特徴量を抽出した(表2)。このとき、血管の概略のみを見るために全体の平均の太さよりも細かいエッジを除き、残ったエッジから辺ベースと枝ベースの木構造を作成した。辺ベースの木構造は[4]を用いて構築した。具体的には提案手法と同様に閉路の集約を行い、次にエッジをノードとし、各分岐点周りのノードについてルートに近いものが親となるようにノードを接続することにより作成した。結果の確認のためにFig.4で強調している部分のみを抽出し(Fig.5, Fig.6)、辺ベースと枝ベースによる木構造をグラフで出力した(Fig.7, Fig.8)。

表1 入力画像のパラメータ

縦(Pixels)	横(Pixels)	階調	総枚数
512	512	256	253

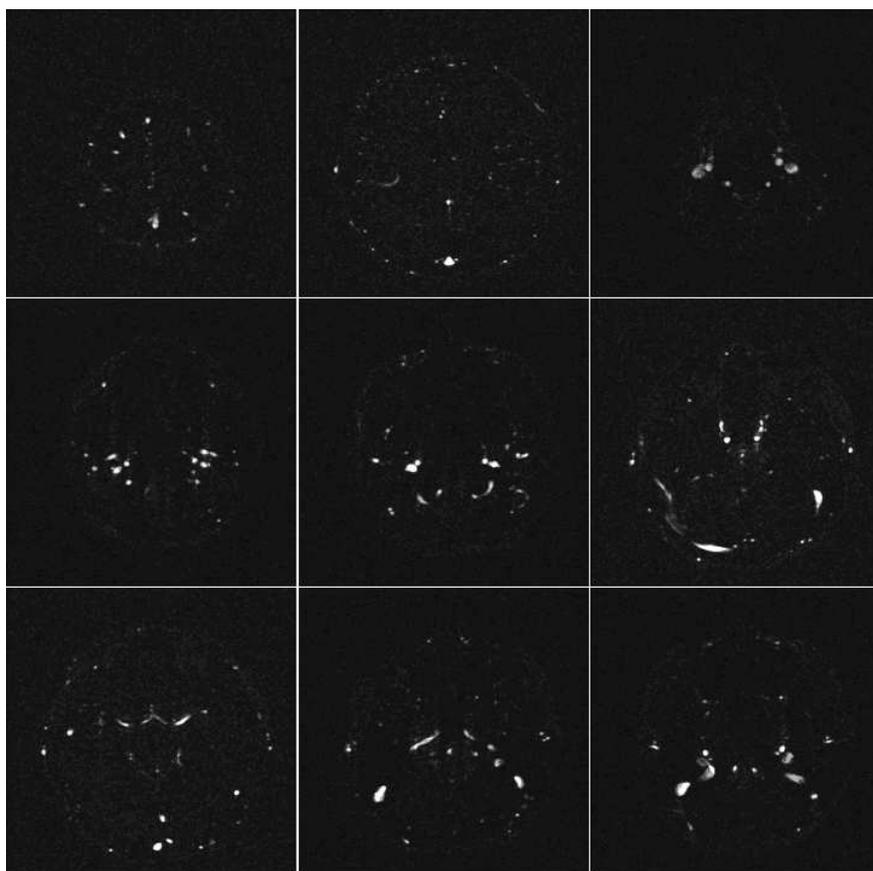


Fig.1 頭部MRI連続断面画像

## 実験結果

表 2 抽出した特徴量

平均の太さ(Pixels)	全長(Pixels)	分岐点数 (個)
3.89	5758.95	553

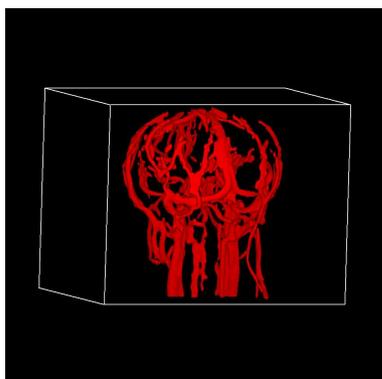


Fig. 2 頭部血管画像

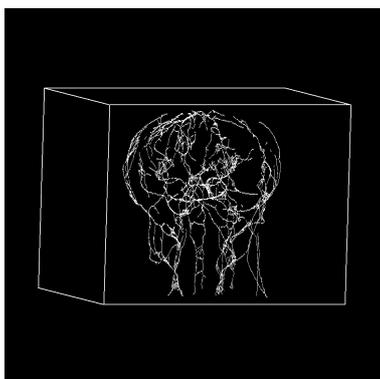


Fig. 3 頭部血管細線化画像

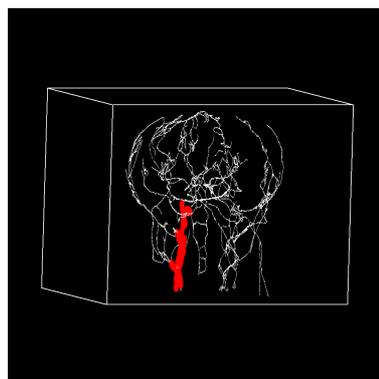


Fig. 4 対象領域

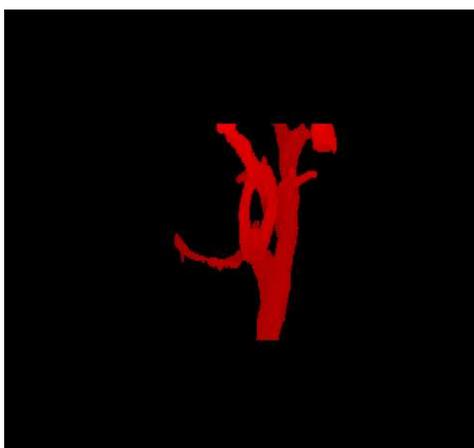


Fig. 5 対象領域に対応する血管

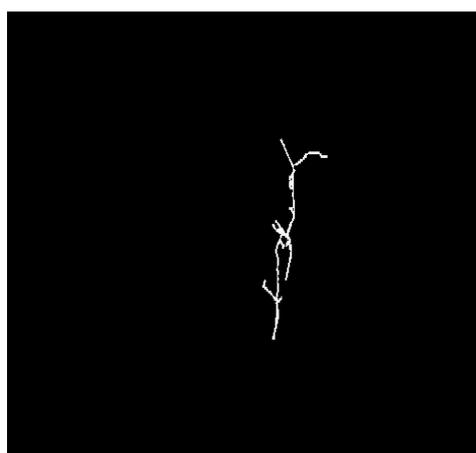


Fig. 6 細線化後

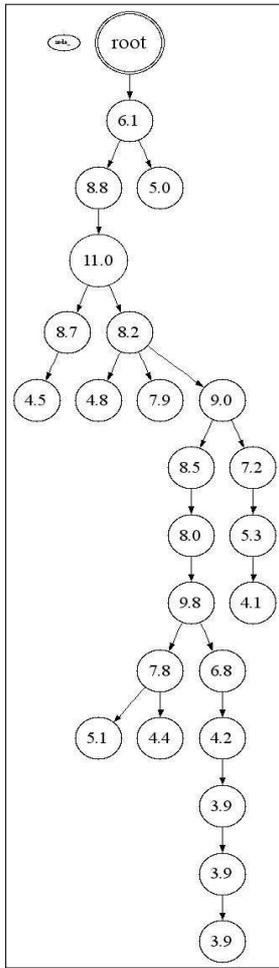


Fig. 7 辺ベースの木構造

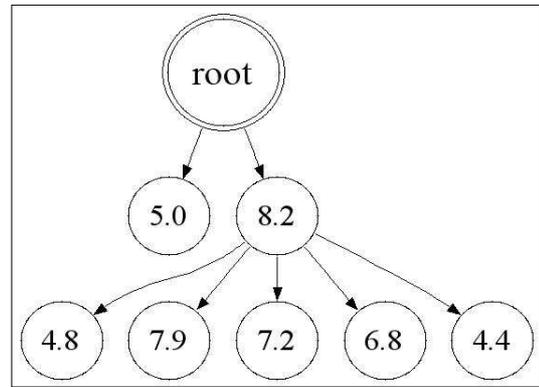


Fig. 8 枝ベースの木構造

### 考察

特徴量の抽出の結果、血管の長さ、太さ、分岐点数が数値データとして得られた。取得した数値データを用いることにより、計算機で最も太い血管の特定や血管の全長、閉路の特定などが可能となる。

次に、対象領域と作成した二つの木構造を比較すると、辺ベースの木構造は対象領域の構造を直感で理解しやすく、構造もより細部まで表現されている。一方、枝ベースのものは簡潔な構造になっており、血管構造の概略を表している。これらの木により、構造の概略を枝ベースで比較・探索し、細部は辺ベースで参照することが可能になる。

本実験により、生体形状の数値化における血管構造モデル構築法としての本手法の有効性を確認することができた。

## 5. まとめ

本稿では、生体形状の数値化研究において最も重要である形状情報の数値化を目的とし、血管系を対象とした特徴量の抽出と構造モデル構築手法について述べた。血管の特徴量としては、太さ、長さ、分岐を抽出した。構造モデルとしては血管の太さと枝分かれ構造をベースとした木構造を構築した。そして、ヒトの頭部 MRI 画像に提案手法を適用する実験を行って、辺ベースと枝ベースの木構造を比較し、提案手法の有効性を確認した。

本手法により血管の構造を階層的に表現し、太さや長さ、接続関係を計算機で扱えるようになった。これにより、計算機で血管の太さ比較や、血液の流れや分岐の追従などが可能になる。これは、生体形状の数値化において非常に有用であると考えられる。

本手法の応用としては、動脈瘤や狭窄部など極端に血管の太さが変わる病理などの検出や、計算機で血液の流れや分岐などを追従することによるカテーテル手術や血流解析などが考えられる。

今後は、提案手法によって得られた木構造を動的計画法や遺伝的アルゴリズムなどにより比較する手法を検討する。

## 参考文献

- [1] 齋藤 豊文, 森 健策, 鳥脇 純一郎: “ユークリッド距離変換を用いた 3 次元 デジタル画像の薄面化および細線化の逐次型アルゴリズムとその諸性質,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J79-D-II, No.10, pp.1675-1685, Oct. 1996.
- [2] 齋藤 豊文, 番正 聡志, 鳥脇 純一郎: “ユークリッド距離に基づくスケルトンを用いた 3 次元細線化手法の改善——ひげの発生を制御できる一手法——,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J84-D-II, No.8, pp.1628-1635, Aug. 2001.
- [3] 小林 大祐, 横田 秀夫, 森下 壮一郎, 中村佐紀子, 姫野龍太郎, 三島健稔: “血管の 3 次元形状の数値化に向けた閉路検出による特徴量抽出の試み,” 形の科学会誌(第 57 回形の科学シンポジウム予稿), pp.105-106, 2004.
- [4] 小林 大祐, 横田 秀夫, 森下 壮一郎, 中村 佐紀子, 姫野 龍太郎, 三島 健稔: “血管形状の比較に向けた木構造モデル構築の試み,” 電子情報通信学会 2004 年ソサイエティ大会講演論文集, p. 95, 2004.
- [5] SHIMAI Hiroyuki, YOKOTA Hideo, NAKAMURA Sakiko, TAKEMOTO Satoko, MISHIMA Taketoshi, and MAKINOUCI Akitake: "Extraction Method of the Interest Region with Intensity Change from Biological Volume Data," RIKEN SYMPOSIUM, COMPUTATIONAL BIOMECHANICS, pp.33-44, 2002.
- [6] 横田 秀夫, 覚正 信徳, 中村 佐紀子, 西村 将臣, 姫野 龍太郎, 牧野内 昭武: “ボクセルエディタを用いた生物内部の 3 次元構造解析,” 第 13 回日本バイオイメージング学会抄録集, pp.103-104, 2004.
- [7] 横田秀夫, 工藤謙一, 樋口俊郎 他, "3 次元内部構造顕微鏡による凍結生体試料の観察と計測," 低温生物工学会誌 Cryobiology and Cryotechnology, Vol.44, No.1, pp.1-9, 1998.
- [8] 横田秀夫, 中村佐紀子, 川口龍平 他, "3 次元内部構造顕微鏡による生体の侵襲的イメージング," Med. Image. Tech. 20(6), pp.660-665, 2002.