

X線CT画像を用いた 腸間膜形状推定のための 放射基底関数による曲面再構成

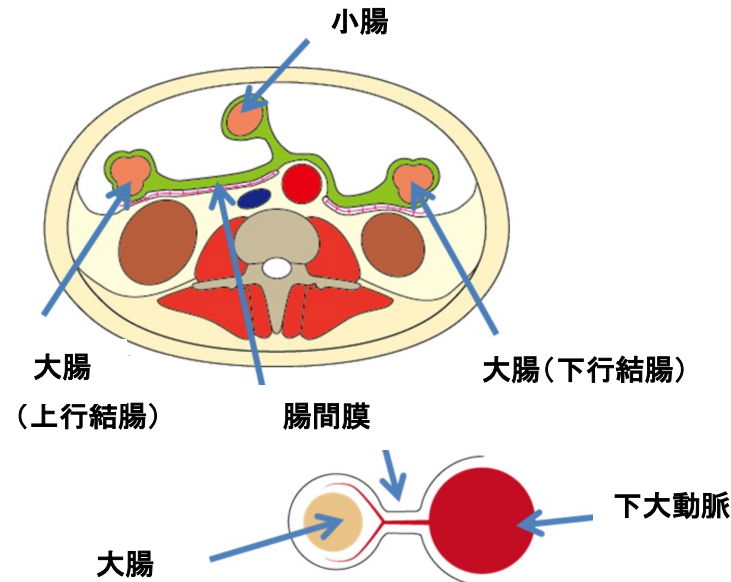
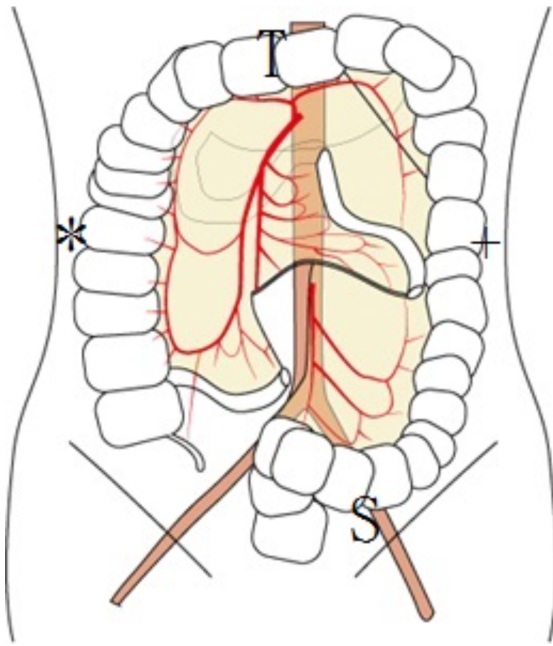
増谷佳孝(広島市立大学),
鈴木宗村(スズキメディカルイメージングラボ),
青山正人(広島市立大学), 阿原一志(明治大学),
植田琢也(千葉メディカルセンター)

はじめに

- 腸間膜は、大腸などの腹部臓器を包み込む膜組織であり、2枚の薄い膜組織が血管を挟み込むような構造である
- 開腹および内視鏡下の手術では対象臓器へのアクセス時に必ず切開するため、事前にその構造を把握しておくことが重要である
- X線CT画像では、他の軟部組織とのコントラストがつかず、また画像の分解能に対して薄く、明確な構造が分かりにくい
- 造影剤を使用したCT画像（造影CT画像）においては、膜内の血管が造影されるため、医師は周辺の構造物との位置関係などの解剖学的知識と合わせて大まかな形状を推定している
- 造影CT画像における血管などの周辺情報より腸間膜の形状を推定し、3次元表示することが本研究の目的である

腸間膜の形状・位置・周辺構造

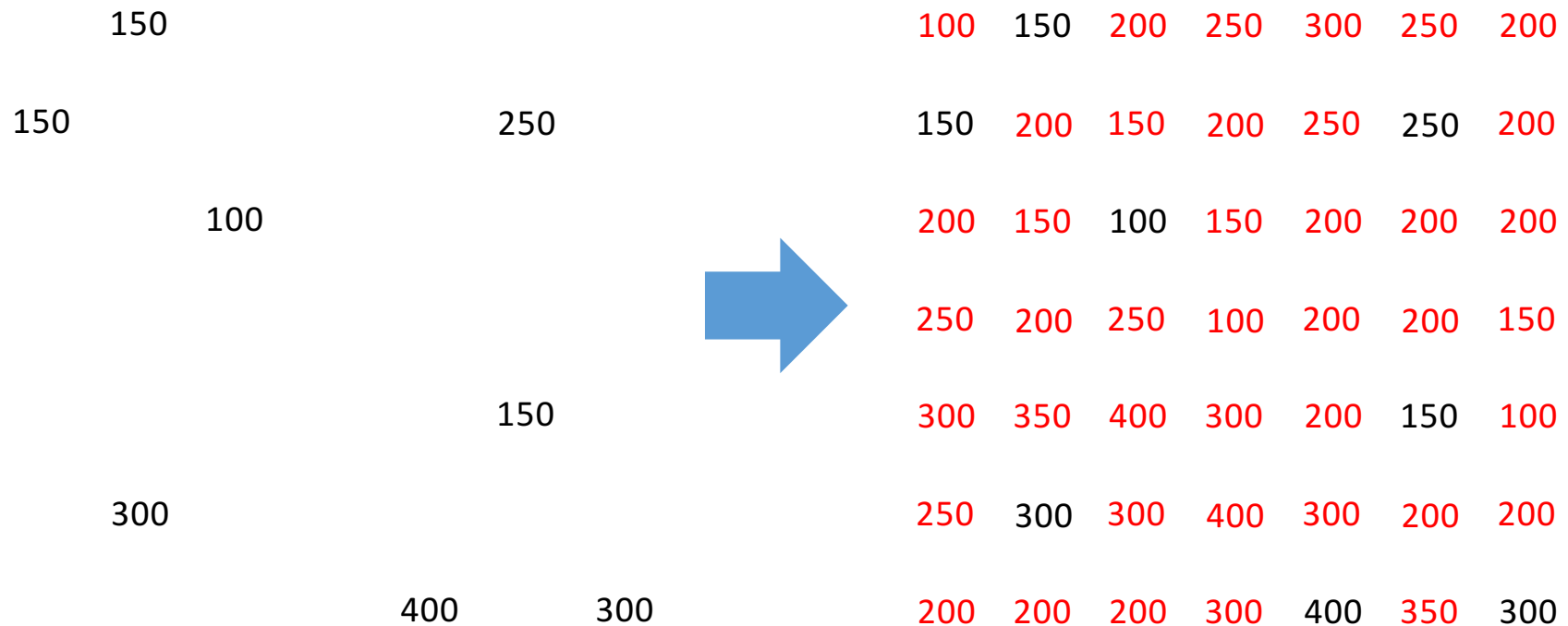
- 血管や大腸を巻き込む複雑な形状と周辺構造を呈しているが、造影CT画像では腸間膜の周辺血管以外ほとんどわからない



造影CT画像

放射基底関数 : Radial Basis Functions (RBF)とは

- 点群と各点における数値群に対して、点群を構造化することなく数値を補間し、任意位置での数値を得ることが可能
- 疎な点群データからスカラ場を再構成



構造化されていない点群と各点での数値

補間された数値群

RBFにおける計算の概要

- N 個の点群(制御点と呼ぶ)の座標: $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ および \mathbf{x}_i におけるスカラー値: s_i に対して $s(\mathbf{x}_i) = s_i$ となるような関数 $s(\mathbf{x})$ を考える

$$s(\mathbf{x}) = p(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^N \lambda_i \phi(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|)$$

$$p(\mathbf{x}) = c_1 + c_2 x + c_3 y + c_4 z$$

$$\phi(r) = r \quad \text{bi-harmonic 基底関数の例}$$

- N 個の λ および 4つの c を決定すれば $s(\mathbf{x})$ は決定されるが、このままでは under-determined な問題なので

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\Lambda} + \mathbf{P}^T \mathbf{c} = \mathbf{S}$$

$$A_{i,j} = \phi(|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|) = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| \quad \boldsymbol{\Lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_N)^T$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ & & \vdots & \\ 1 & x_N & y_N & z_N \end{pmatrix} \quad \mathbf{c} = (c_1, c_2, c_3, c_4)^T$$

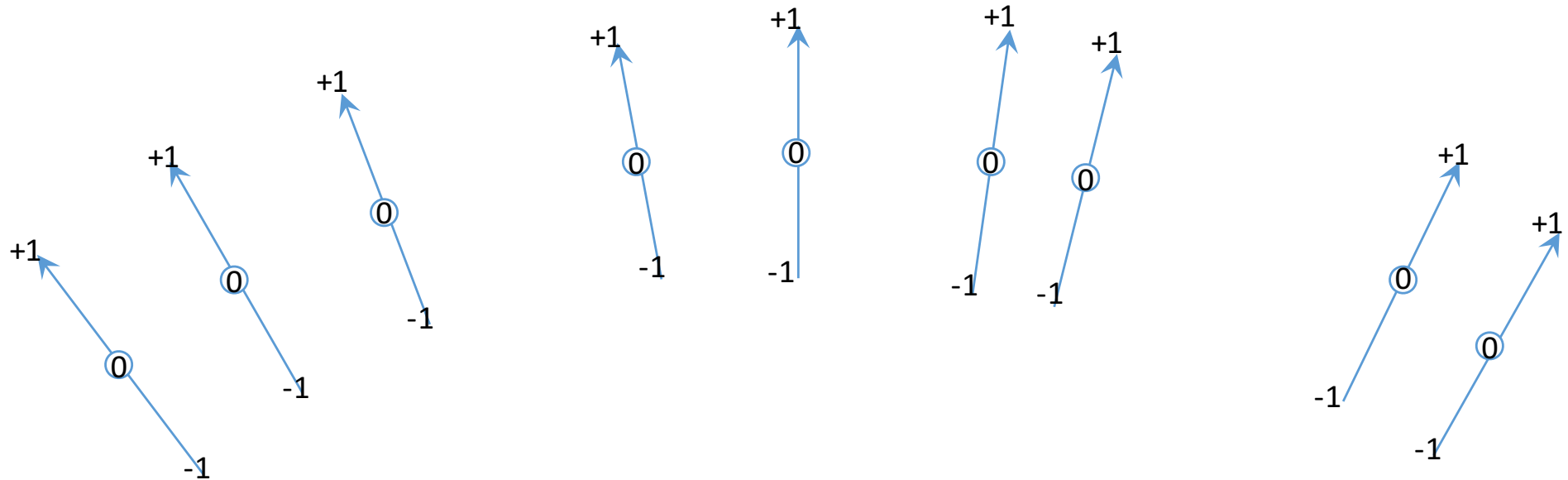
$$\mathbf{S} = (s_1, \dots, s_N)^T$$

- 以下の拘束条件(直交性)を追加して線形方程式を解く

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = \sum_{i=1}^N \lambda_i x_i = \sum_{i=1}^N \lambda_i y_i = \sum_{i=1}^N \lambda_i z_i = 0 \quad (\mathbf{P}^T \boldsymbol{\Lambda} = \mathbf{0}) \quad \longrightarrow \quad \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{P} \\ \mathbf{P}^T & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Lambda} \\ \mathbf{c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}$$

点群とその法線方向ベクトルによる 曲面再構成(1)

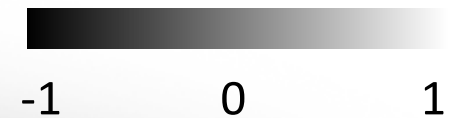
- 再構成対象の曲面上に存在し、かつその法線方向が与えられた点群に対して、点群の位置に0、各点から法線の正負方向にシフトした位置に ± 1 の値を持つような3Dスカラ場を再構成する



※元の点群の3倍の制御点を使用してスカラ場を再構成することになる

点群とその法線方向ベクトルによる 曲面再構成(2)

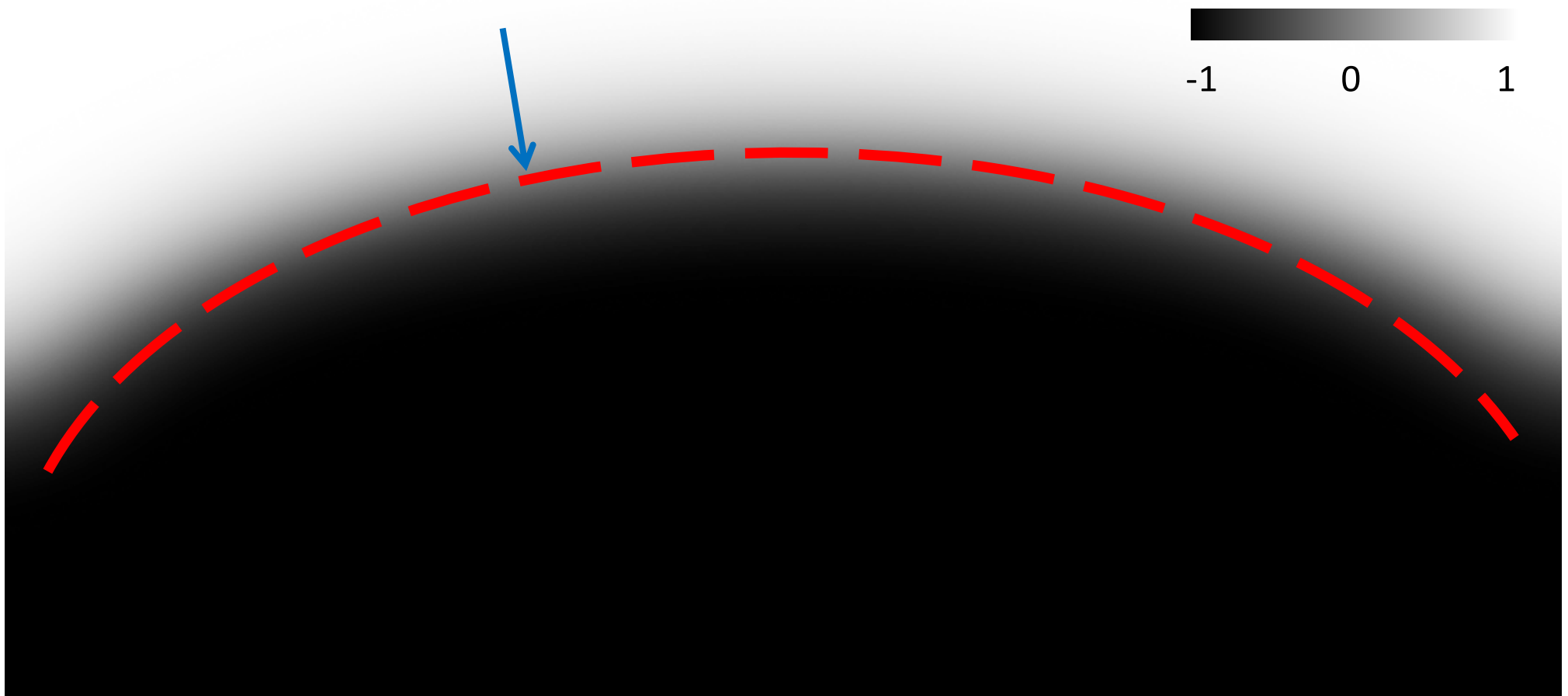
- RBFにより3Dスカラ場(陰関数)を再構成する
 - 以下の図はスカラ場を画像で表したもの



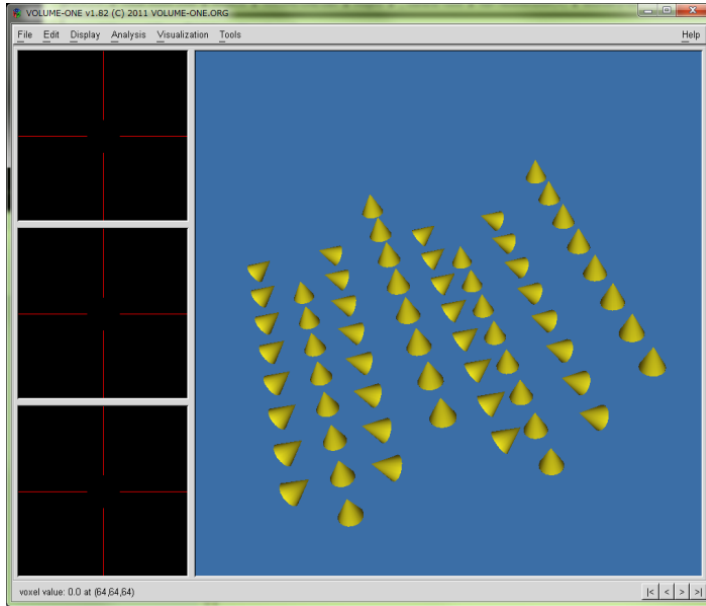
点群とその法線方向ベクトルによる 曲面再構成(3)

- スカラ場の等値面: $s(\mathbf{x})=0$ を出力する曲面とする

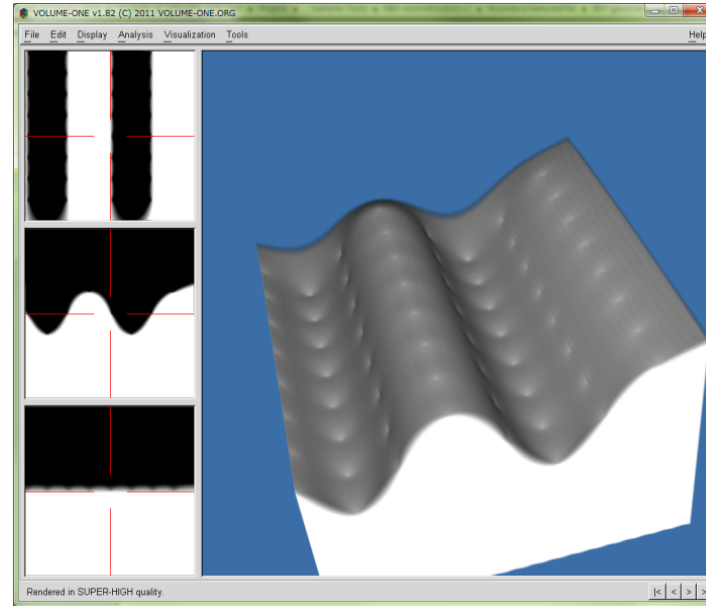
$s(\mathbf{x})=0$ の等値面



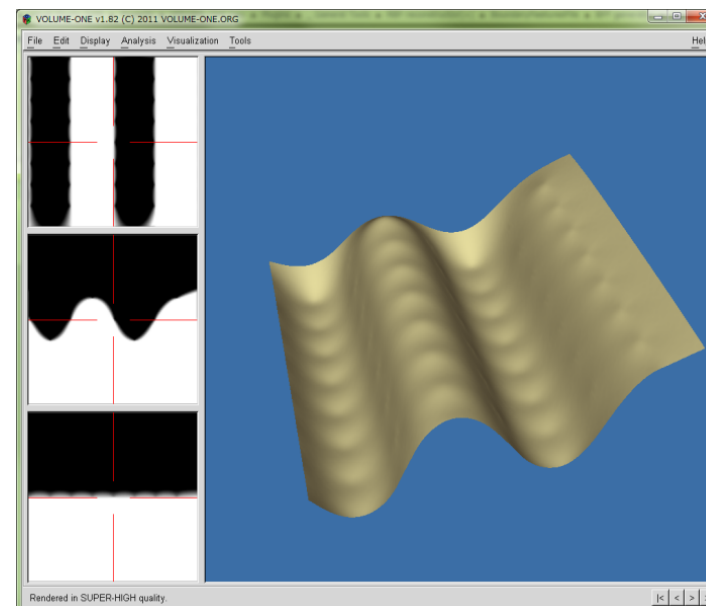
Toy-Examplesによる実例



法線方向つき点群
円錐底面の中心位置=点の位置
円錐の向き=法線方向



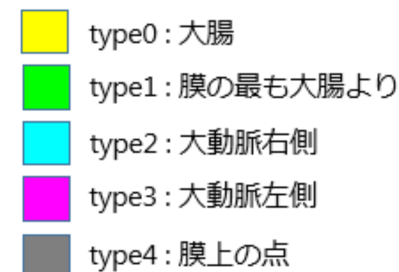
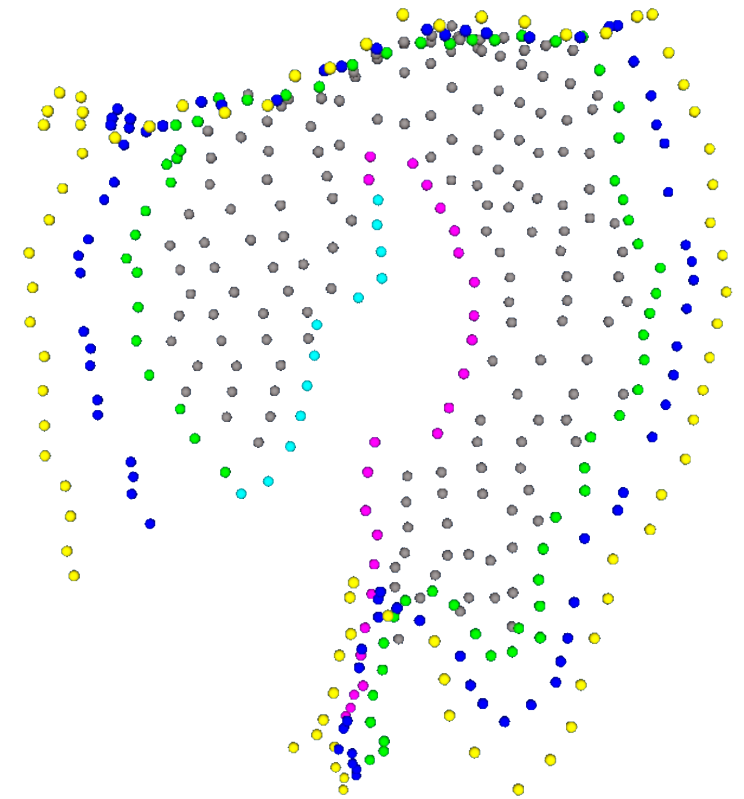
$s(\mathbf{x})$ の再構成結果
(スカラ場を表す
ボリュームデータ)



$s(\mathbf{x})=0$
(等値面)

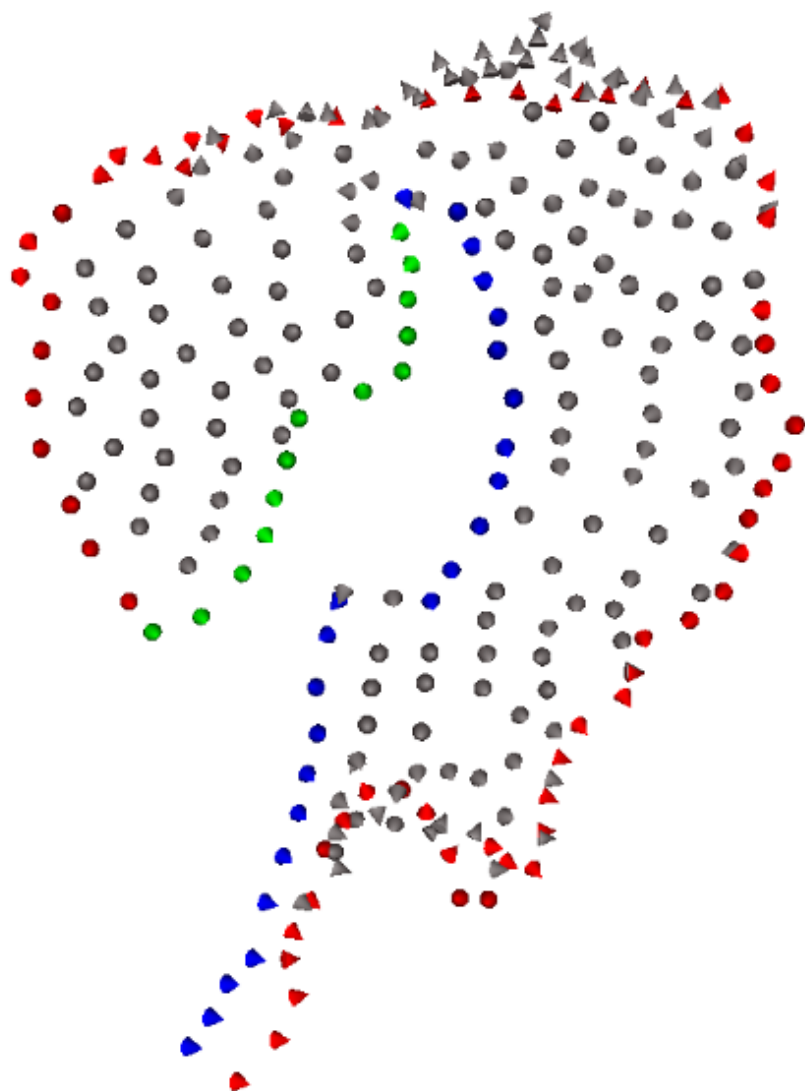
造影CT画像による入力点

- 医師が血管などの情報を参考に画像上で手入力
 - 解剖学的分類により5種を入力
 - 以下の2グループに分類
 - 膜の外輪郭(Type1~3)
 - 膜内部(Type4)
- 他の点群との位置関係より各点での膜の法線方向を決定
- 2つのスカラ場をRBFで再構成
 - 膜形状のスカラ場(Type1~4)
 - 膜の法線を使用
 - 膜を切り取るスカラ場(Type1~3)
 - 輪郭の接線と面の法線から切り取り面の法線を決定して使用



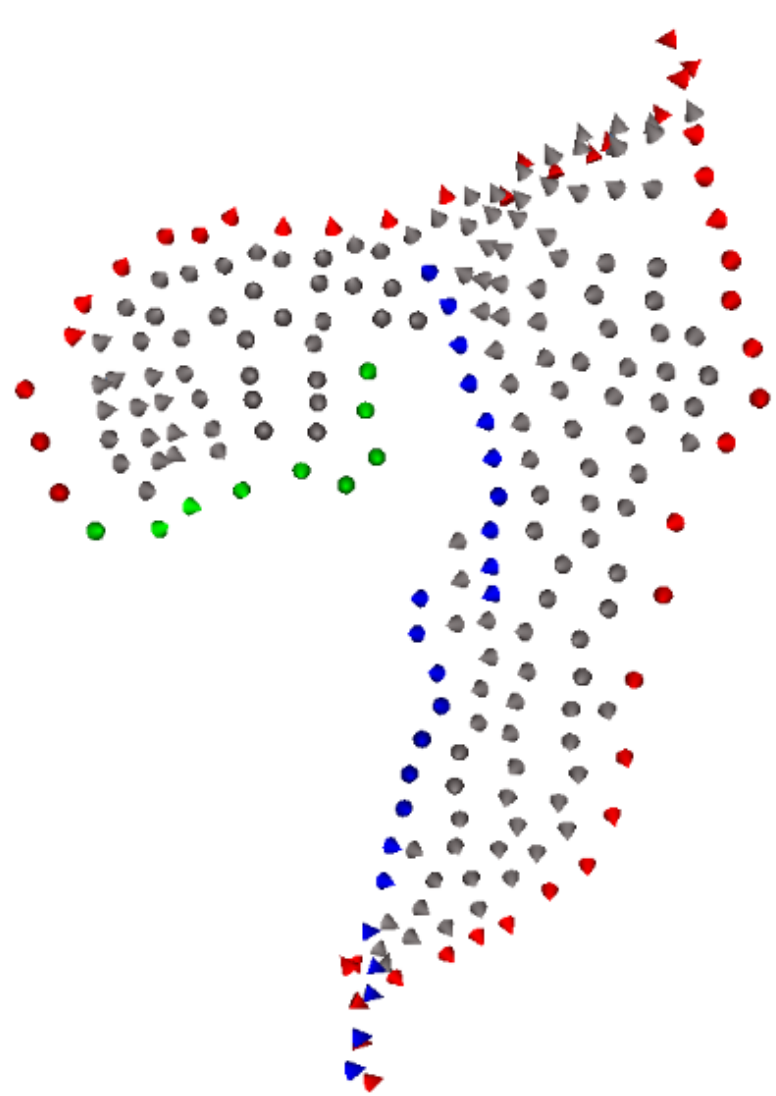
結果1

(左:円錐で表現した入力点群の位置とその法線方向, 右:腸管膜再構成結果)



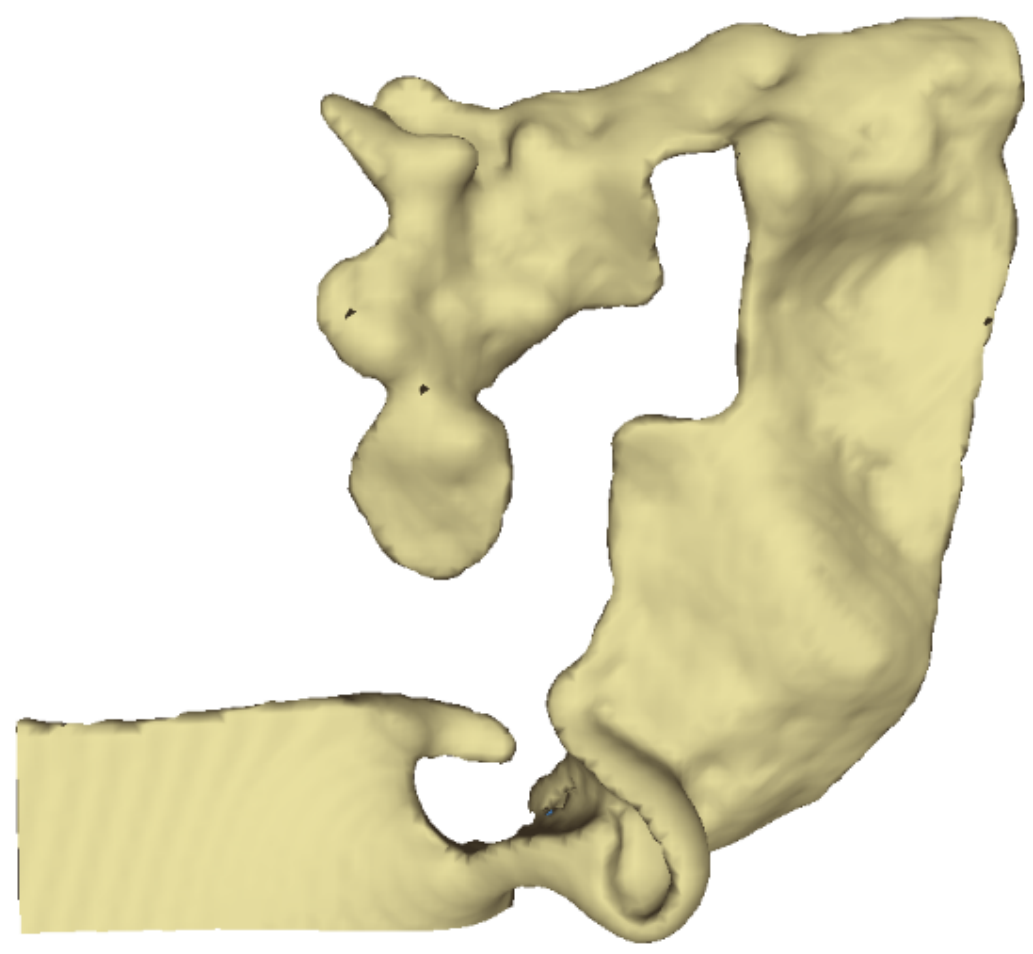
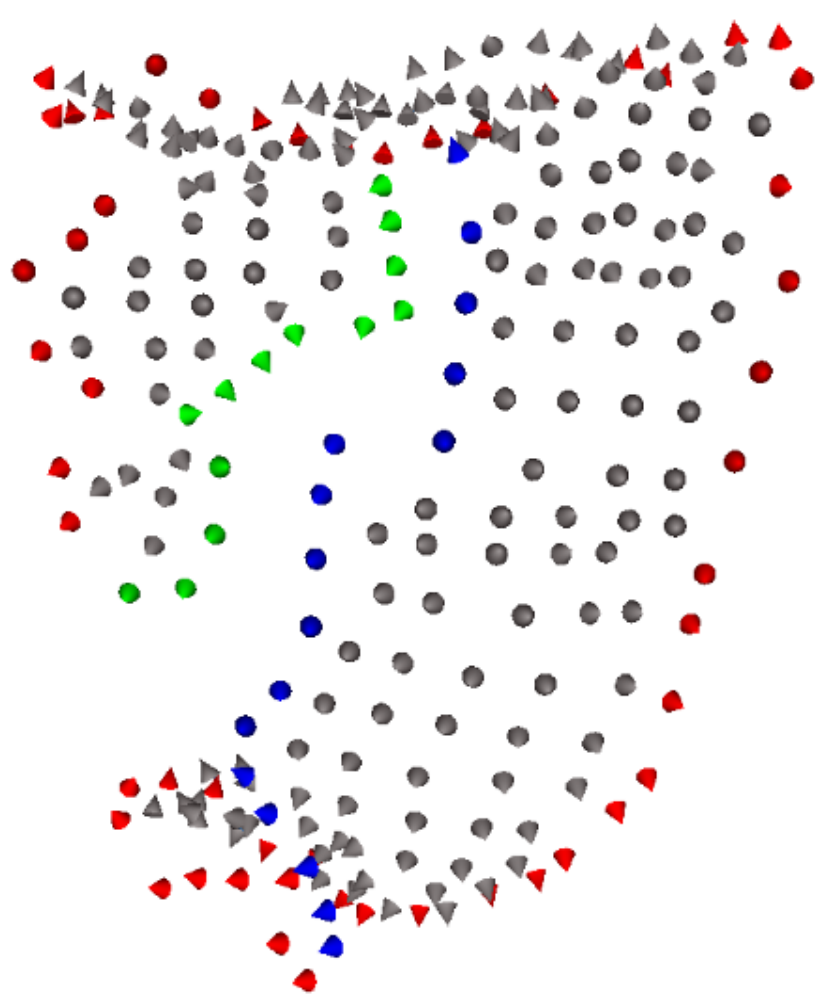
結果2

(左:円錐で表現した入力点群の位置とその法線方向, 右:腸管膜再構成結果)



結果3

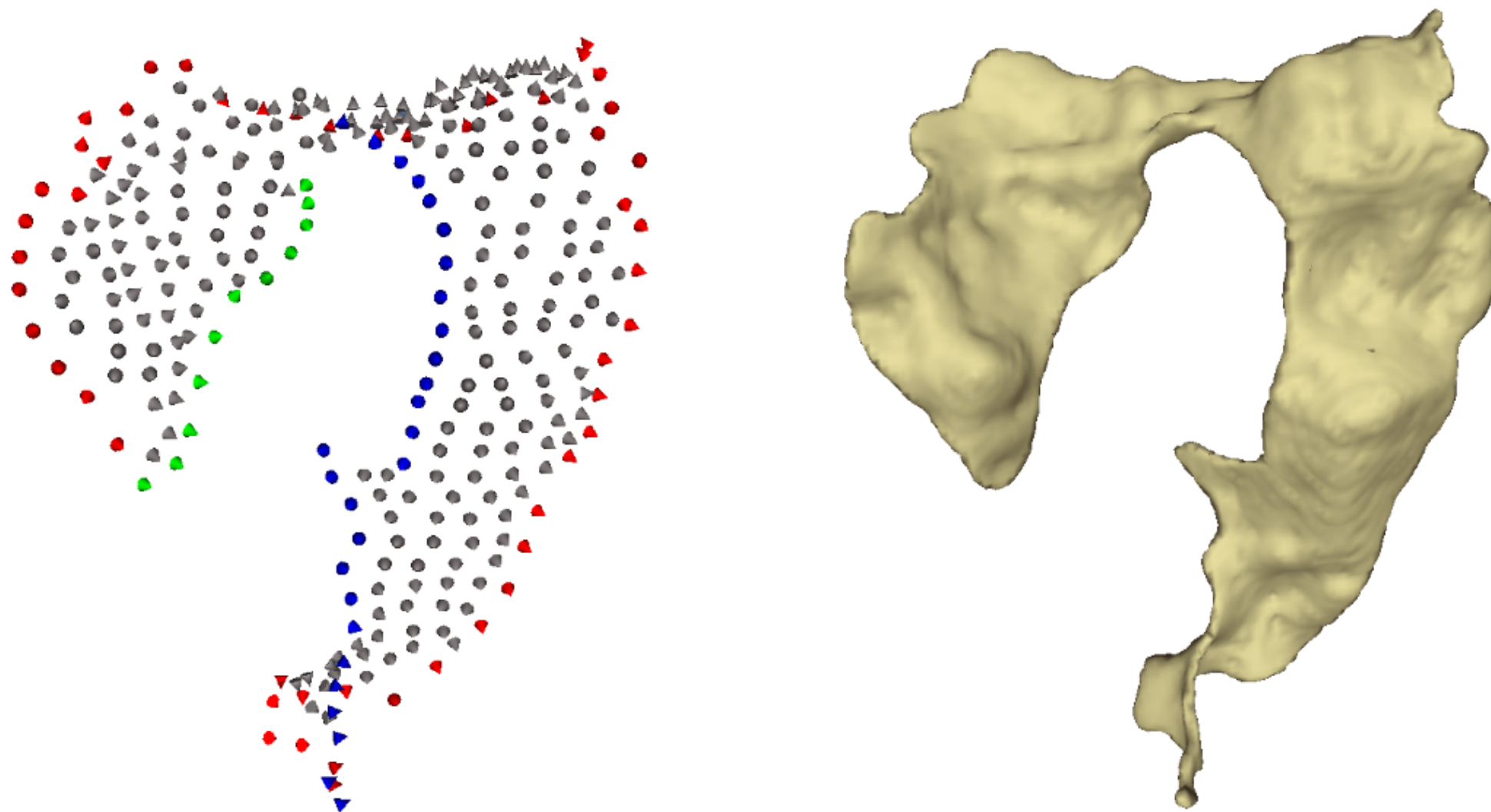
(左:円錐で表現した入力点群の位置とその法線方向, 右:腸管膜再構成結果)



切り出しの不正

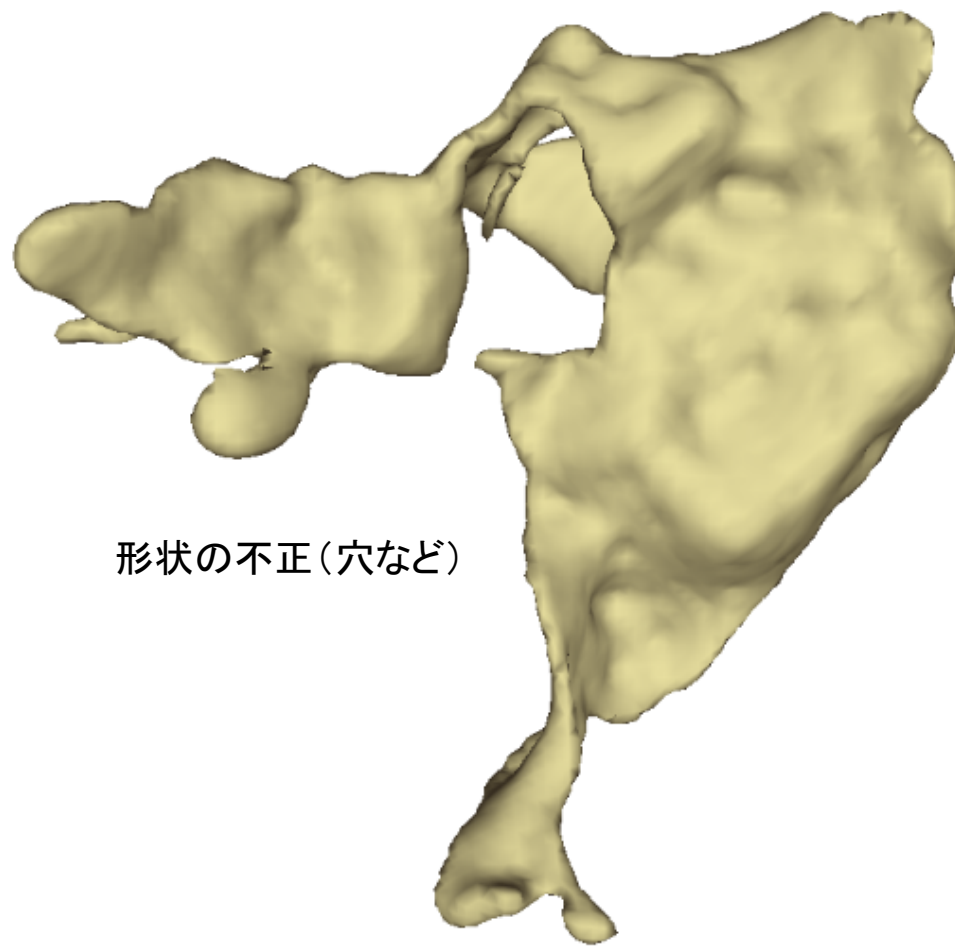
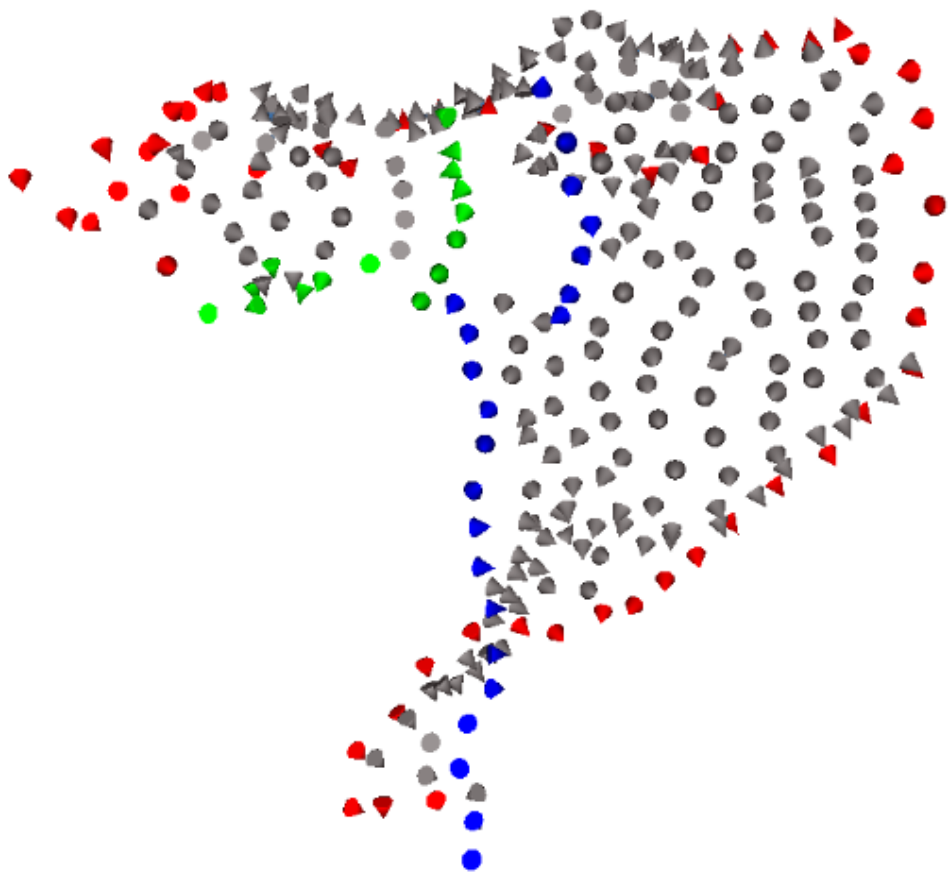
結果4

(左:円錐で表現した入力点群の位置とその法線方向, 右:腸管膜再構成結果)



結果5

(左:円錐で表現した入力点群の位置とその法線方向, 右:腸管膜再構成結果)



形状の不正(穴など)

まとめ

- 再構成の結果に影響を与えるのは入力点群に与える法線方向であり、また法線方向も局所的な入力点群の密度によって影響を受ける
- 現時点では完全な自動処理には程遠いが、対話的な入力インターフェイスにより効率化できる可能性がある
- 造影された血管については自動、半自動の抽出処理が適用可能である