

輪郭線制約を用いた4次元CT画像の領域分割結果の修正手法

木村 優希^{1,a)} 内田 裕也¹ 菊地 貴博² 稲本 陽子³ 橋本 卓弥⁴ 道脇 幸博⁵ 井尻 敬^{1,b)}

概要：深層学習の発展に伴い、医用CT画像の高精度な自動領域分割が可能となってきた。しかし、誤りの全くない分割結果を自動で得ることは未だ難しく、専門家による確認と修正作業が必要である。本研究では、人体内部を時空間的に撮影した4次元CT(4DCT)画像に着目し、深層学習を用いて得られた領域分割結果を効率的に修正できる手法を提案する。提案手法において、ユーザは、4DCT画像と深層学習により推論された関心領域を入力し、関心領域の正しい境界形状を曲線制約を複数配置することで指定する。すると提案手法は、ユーザの配置した曲線制約にフィットするように、かつ、局所形状となるべく維持するように関心領域を変形する。また、4DCT画像において効率的な曲線制約指定を支援するため、全フレームで共有され、時間に沿って補間される共有曲線制約も提案する。

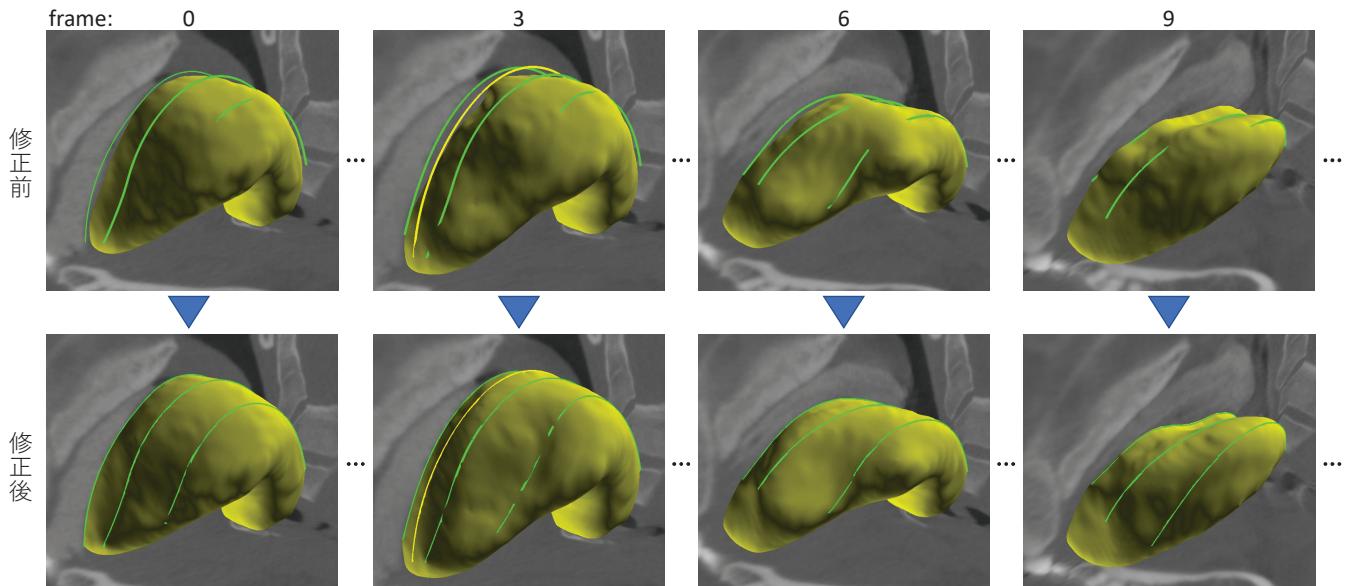


図1：提案手法により舌領域を修正した結果。

1. はじめに

X線Computed Tomography(CT)装置により撮像を繰り返すことにより、対象を時空間的に計測し4DCT画像(時間+3D画像)として取得できる技術が確立されている。

この4DCTは、人体内部の動的な動きや機能を分析するために用いられてきた[1,2,3]。特に本研究では、口腔から胃へ食物を輸送する『嚥下』の4DCT画像の領域分割に着目する。嚥下機能の低下は誤嚥性肺炎等の深刻な病気の原因となりうるため、嚥下する様子を4DCTにより撮影し、得られた4DCT画像から嚥下に関連する器官を領域分割することで、嚥下動作を解析する試みが行われてきた[4,5,6,7]。しかし、嚥下4DCT画像から特定の組織を領域分割するには多大な手作業が必要となる。

医用画像の領域分割は活発な研究領域であり、多くの全自动領域分割手法が提案されている[8,9,10,11,12,13,14]。

¹ 芝浦工業大学

² (株)明治

³ 藤田医科大学

⁴ 東京理科大学

⁵ 東邦大学

a) ma23071@shibaura-it.ac.jp

b) ijiri@shibaura-it.ac.jp

全自動の領域分割法は、ユーザの作業を要せずに領域分割を行えるという利点を有する一方で、エラーの全くない結果を得るのは困難であるという課題がある。加えて、嚥下4DCT画像では、十分な訓練用データを用意することが難しいという課題もある。また、ユーザが、関心領域の内外や境界を指定できる対話的な領域分割法も提案されている[15, 16, 17, 18]。しかし、既存手法を利用する場合、多くのフレーム（時相）を含む4DCT画像の各フレームに対してゼロから関心領域を分割する必要があり、多大な手作業が必要となる。

本研究では、嚥下4DCT画像の効率的な領域分割法の確立を目的とし、深層学習によって得られた領域分割結果を修正できる手法を提案する。ユーザは、4DCT画像と深層学習により推論された関心領域のマスク画像を入力し、複数の曲線制約を3D空間に配置することで関心領域の正しい境界を指定する。曲線制約の配置後に変形開始ボタンを押すと、関心領域が、曲線制約に沿うように、かつ、元の局所形状を維持するように変形される（図1）。本研究が対象とする嚥下4DCT画像では、すばやく変形する組織の境界が不明瞭になることがある。提案手法を利用すると、ユーザが画像を注意深く観察しながら関心領域の形状を指定できる。加えて、4DCT画像における効率的な曲線指定をサポートするため、時間軸方向にその形状が補間される共有曲線制約も提案する。

提案手法の使いやすさを評価するため、学生5名に舌の形状修正を行ってもらうユーザスタディを実施した。その結果、提案手法を利用することで、1フレームあたり9分程度の十分に短い作業時間で舌の形状修正を行えることを確認した。また、提案手法の有用性を確認するため、著者の1人が提案手法を用いて舌・軟口蓋の形状修正を実施した。その結果、1フレームあたり約90秒と非常に短い時間で修正を完了できることを確認した。一方、軟口蓋の修正において、薄い形状の部分に曲線制約を配置すると変形が上手くいかない場合があるなどの問題があることも確認された。

2. 関連研究

医用画像の領域分割は活発な研究分野であり、多くの研究が行われている。この章では、本研究に関連の深い全自动および対話的な領域分割法について紹介する。

2.1 全自動の領域分割手法

完全畳み込みニューラルネットワーク[8]やU-Net[9]といったディープニューラルネットワーク(DNN)を医用画像の領域分割に適用する研究が数多く報告されている。特に、U-Netは少量のデータセットから高精度な推論が可能であると報告されており、大規模データセットを集めるのが難しい医用画像に広く適用され、数多くの派生モデル

の基盤となっている。例えば、U-Netに3D畳み込みを導入した3D U-Net[10]やV-Net[11]、データセットやハードウェアからネットワークパラメータを自動で最適化するnnU-Net[12]などがその例として挙げられる。

嚥下4DCT画像の領域分割にDNNを適用した報告もある。中谷ら[13]や内田ら[14]は、nnU-NetやnnU-Netを拡張したモデルを用いて、嚥下4DCT画像から舌・軟口蓋・喉頭蓋等の領域分割を実施し、比較的精度の高い分割結果を得られることを報告した。しかし、DNNベースの手法では比較的高精度な分割結果が得られる一方で、エラーの全くない結果を得るのは未だ困難であり、正確な分割結果が必要とされる場合は、専門家による確認と修正が必要不可欠である。

2.2 対話的な領域分割手法

ユーザが関心領域の内外や境界を指定することで対話的に領域分割を行う手法が提案されている。例えば、ユーザが指定したシード画素から領域拡張を計算する手法[19, 20]、ユーザが荒く指定した内部領域・外部領域を利用してグラフカット法により領域を計算する手法[15, 16]、3D空間に局所的に変化する閾値をペイントする手法[21]等が挙げられる。

また、ユーザが関心領域の境界を曲線制約により指定する手法も提案されている。Ju et al.[22]およびLiu et al.[23]は、3次元空間に配置された複数の閉曲線からサーフェスモデルを構築する手法を提案し、これを領域分割に応用了した。Heckel et al.[24]やIjiri et al.[17]は、陰関数曲面再構成法を活用することで、曲線制約を通る領域境界面を生成する手法を提案した。また、既存の関心領域の境界面上に曲線を配置し、この曲線をハンドルとして利用し関心領域の形状を編集する手法も提案されている[25]。しかし、これらの対話的な領域分割法は、3D画像のために開発されたもので、本研究が対象とする4DCT画像の領域分割や領域形状変形へそのまま利用できるものではない。

3. 提案手法

本研究の目的は、全自动の手法により得られた関心領域の形状を効率的に修正できる手法の実現である。そのため、ユーザが、対話的に曲線制約を配置することで関心領域の正しい境界を指定できる手法を提案する。特に本研究では、嚥下に関連の深い、舌領域と軟口蓋領域の分割に着目する。

提案手法の入力は、嚥下4DCT画像と舌・軟口蓋領域の4Dマスク画像である。嚥下4DCTは、造影剤を含むとろみの付いた液体を嚥下する様子を、320列CT装置により1秒間に10回の速度で3秒程度撮影した画像である。その解像度はおよそ $512 \times 512 \times 320 \times 30$ である。図2(上)に嚥下4DCTの代表的なフレームを示す。また、深層学習

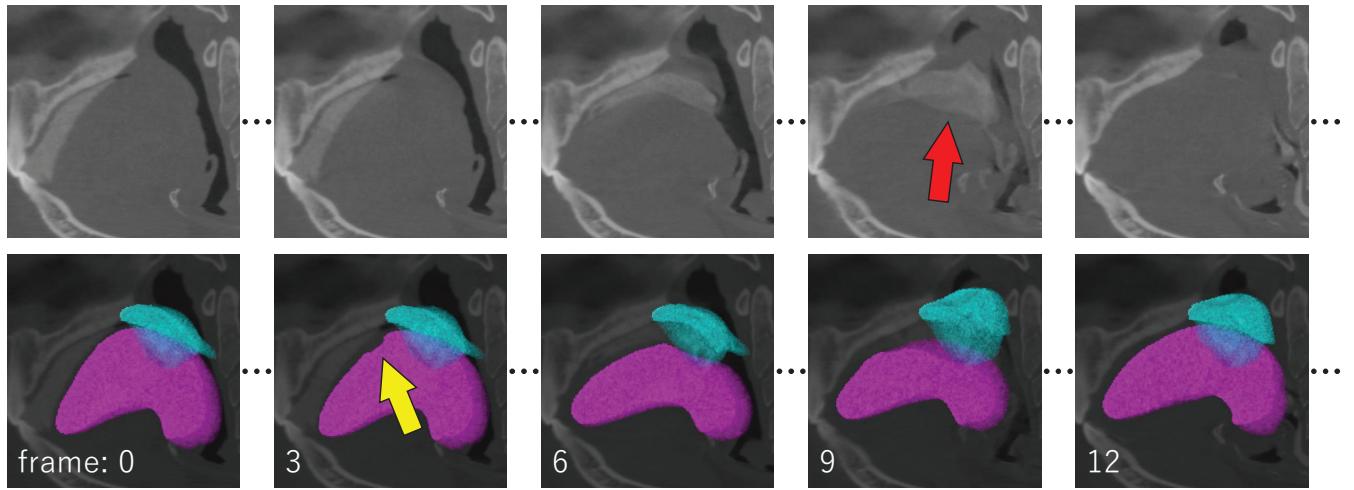


図 2: 嘸下 4DCT 画像 (上) と既存手法 [12] により自動分割された舌・軟口蓋領域 (下). 嘴下中に舌・軟口蓋の境界が不明瞭になる部分 (赤矢印) があることや、自動分割結果には不正確な部分 (黄矢印) があることが観察できる.

を用いた全自動領域分割法を適用することでこの 4DCT 画像から舌・軟口蓋領域を分割することが可能である. 図 2 (下) に既存手法 [12] により分割した舌領域と軟口蓋領域を示す. この分割結果には、不正確な部分が含まれるため、ユーザによる確認と修正が必要である.

提案手法のプロトタイプのスクリーンショットを図 3 に示す. メインウィンドウは、4DCT 画像の観察、曲線制約の指定、および、修正結果の確認に使用される. 可視化ダイアログは、可視化関連のパラメータの指定や、シークバーによる着目フレームの指定に利用される. また、UI ダイアログには、共有曲線を生成するためのボタンや、変形処理を開始するためのボタンなど、提案手法の操作に関わる UI が配置される. なお、提案手法はオープンソースソフトウェア RoiPainter4D の一部の機能として実装されており、ソースコードは <https://github.com/InteractiveGraphicsLab/RoiPainter/> より取得可能である.

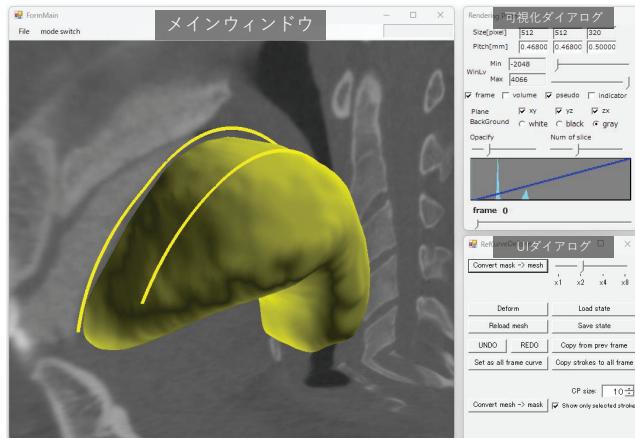


図 3: 提案システムのスクリーンショット.

3.1 曲線配置と形状変形インターフェース

図 4 に提案手法を用いた変形作業の流れを示す. 提案手法を起動し 4DCT 画像とマスク画像を読み込むと、Marching Cubes 法 [26] により関心領域のメッシュモデルが生成される (図 4a). ユーザは必要に応じて UI ダイアログより Marching Cubes 法を適用する際の解像度を変更できる.

次にユーザは、3 つの直交する平面断面 (XY・YZ・ZX) やフレームを移動させながら関心領域を観察し、修正が必要な部分において平面断面を連続的にクリックする. するとクリックした位置に制御点が配置される. 3 つ以上の制御点が配置されると、提案手法は、全制御点を滑らかに補間する曲線を生成する (図 4b). この補間には κ -Curves [27] を応用した. ユーザが平面断面の外をクリックすると選択中の曲線の編集が中断され、また、ユーザが既存の制御点をクリックするとその曲線の編集が再開される.

複数の曲線制約を配置した後、ユーザが、UI ダイアログ中の Deform ボタンを押すと、配置された曲線制約に沿うように領域形状が変形される (図 4c). なお、提案手法では、編集中に関心領域形状の表示・非表示を切り替えることや、変形前後の関心領域形状を比較することも可能である. 最後に、修正作業が完了したら、変形された関心領域内部を新たなマスク領域として登録する (図 4d).

3.2 共有曲線制約

本研究が分割対象とする舌と軟口蓋は、時間経過に応じて移動や変形はするものの、そのトポロジーは変化しない. このような関心領域に対して効率的に曲線制約を配置するため、本研究では全フレームにて共有される『共有曲線制約』を提供する.

ユーザがある曲線を編集中に、UI ダイアログ内の Set as all frame curve ボタンを押すと、編集中の曲線が共有曲線制約に変換され、全フレームにその曲線のコピーが配置

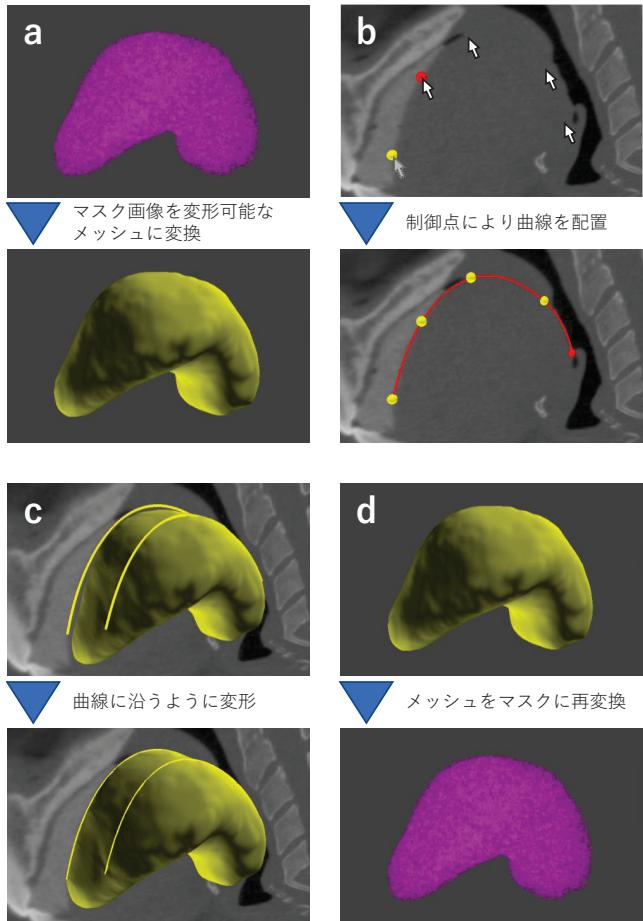


図 4: 提案手法を用いた関心領域編集の流れ.

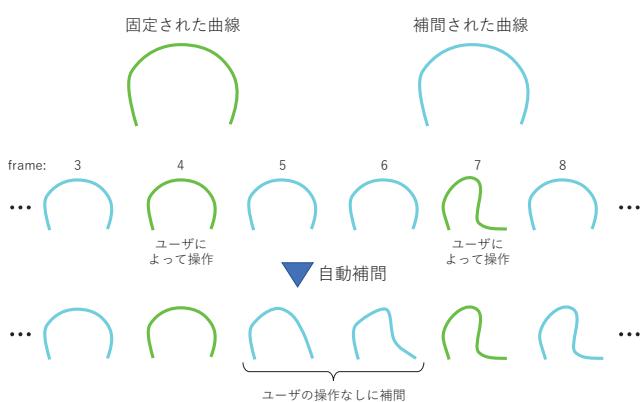


図 5: 共有曲線制約が時間軸方向に補間される様子.

される。ユーザは、任意のフレームにて、制御点をドラッグすることで共有曲線制約の形状を修正できる。共有曲線制約は、ユーザが修正を加えたフレームでは緑色でハイライトされる、また、ユーザが修正を加えなかったフレームでは、共有曲線制約は淡青色でハイライトされ、その形状は、ユーザが修正を加えたフレームを用いて線形補間される（図 5）。

3.3 変形アルゴリズム

本節では、複数の曲線制約にフィットするように関心

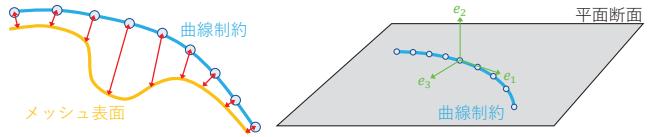


図 6: マハラノビス距離を用いた曲線上のサンプリング点と三角形メッシュ頂点とのマッチング.

領域を変形する手法について解説する。関心領域は三角形メッシュにて、曲線制約はポリラインにて表現される。我々は、フレームごとに独立して形状変形を計算する。変形処理は、曲線制約とメッシュ頂点との対応付けと、メッシュ変形の 2 ステップより構成される。

曲線制約とメッシュ頂点群の対応付け。我々は、まず、各曲線制約を等間隔にサンプリングし、曲線制約ごとに N 個の制約点 $\mathbf{c}_i \in R^3$ を取得する。続いて、各制約点 \mathbf{c}_i から最も近いメッシュ頂点 $\mathbf{p}_j \in R^3$ を探索し、制約点 \mathbf{c}_i と頂点 \mathbf{p}_j を対応付ける。

ここで、制約曲線は平面断面上に配置されるため、対応付けるメッシュ頂点も同じ平面断面上に位置することが望ましい。また、図 6a のように、メッシュ形状が凹んだ部分に滑らかな曲線制約を配置した場合に、ユークリッド距離を用いて最近傍探索をすると正しい対応を行えない。そこで我々は、制約点 \mathbf{c} と頂点 \mathbf{p} の距離を計算する際に、マハラノビス距離 $D = \sqrt{(\mathbf{c} - \mathbf{p})^T \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{c} - \mathbf{p})}$ を利用する。ただし、分散共分散行列 \mathbf{S} は、

$$A = (\mathbf{e}_1 \quad \mathbf{e}_2 \quad \mathbf{e}_3) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 \end{pmatrix} (\mathbf{e}_1 \quad \mathbf{e}_2 \quad \mathbf{e}_3)^T. \quad (1)$$

とする。ここで、 \mathbf{e}_1 は曲線の接線に並行な単位ベクトル、 \mathbf{e}_2 は曲線の配置された断面の法線ベクトル、 $\mathbf{e}_3 = \mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2$ 、 a は \mathbf{e}_3 方向の距離を補正するための係数である。このように定義されたマハラノビス距離は \mathbf{e}_3 方向に位置する頂点への距離を短く評価する効果を持つため、曲線の描かれた平面断面に近く、曲線の接線方向に位置する頂点が対応付きやすくなる。なお本研究では、 $N = 200$ 、 $a = 5$ を利用した。

メッシュの変形。我々は、対応付けられた頂点が制約点位置に移動するように、かつ、元の局所形状をなるべく維持するようにメッシュを変形する。この変形アルゴリズムには Laplacian Surface Editing [28] を応用する。具体的には、次の最適化により変形後の頂点位置 \mathbf{p}'_i を計算する、

$$\min_{\mathbf{p}'_i} \sum_{i \in V} \|\mathcal{L}(\mathbf{p}'_i) - \delta_i\|^2 + \lambda_1 \sum_{(i,j) \in C} \|\mathbf{p}'_i - \mathbf{c}_j\|^2 + \lambda_2 \sum_{i \in V'} \|\mathbf{p}'_i - \mathbf{p}_i\|^2. \quad (2)$$

ここで、 V は全頂点の添字集合、 C は対応付けられた制約

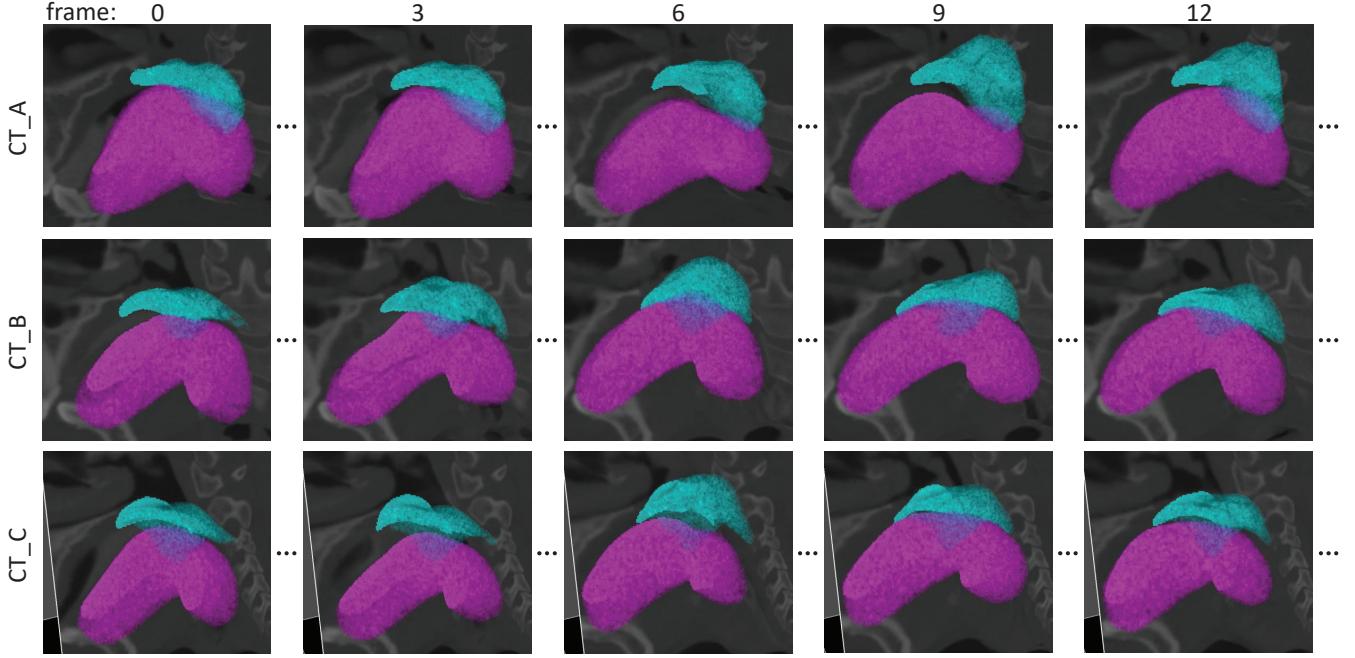


図 7: 著者による関心領域の修正結果.

点とメッシュ頂点の添字集合, V' は C に含まれない頂点の添字集合, $\mathcal{L}(\cdot)$ はラプラシアン演算子, $\delta_i \in R^3$ は変形前のラプラシアンベクトル, p_i は変形前の頂点位置, λ_1 , λ_2 は重み係数である. 第 1 項は変形前後の局所形状を保持する効果を持ち, 第 2 項は対応付けられた頂点を制約点に移動させる効果を持ち, 第 3 項は対応付けられていない頂点を元の位置に拘束する効果を持つ. なお本研究では, $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0.0001$ を利用した.

4. 結果と考察

提案手法の実用性を確認するため, 3 症例分の 4DCT 画像より舌および軟口蓋領域を提案手法により分割する実験を実施した. 加えて, 提案手法のユーザビリティを評価するためユーザスタディを実施した.

4.1 データセット

本研究では, 3 症例分の嚥下 4DCT 画像 (CT_A, CT_B, CT_C) を用意した. これらの 4DCT 画像は, 320 列の面検出器 CT (Aquilion ONE, Canon Medical Systems) を用いて嚥下動作を約 2 ~ 3 秒間撮影したものである. 各フレームの解像度は $512 \times 512 \times 320$ であり, フレーム数は, CT_A が 29, CT_B が 25, CT_C が 20 であった.

提案手法では, 入力として全自動の手法により分割された関心領域データが必要となる. そこで, 上記の 4DCT とは別に, 訓練用に領域分割済み 4DCT データを 4 症例分用意した. このデータは, 既存研究 [13] にて利用されたもので, 専門家により作成された 8 領域 (食塊, 軟口蓋, 舌, 頭蓋骨, 下顎骨, 頸椎, 舌骨, 甲状腺) のマスク画像を

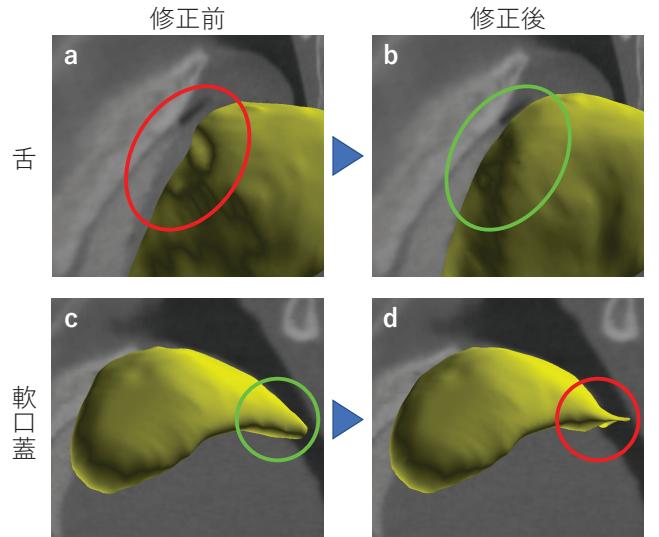


図 8: 修正前後の形状比較. 深層学習を用いて CT_A を自動分割した結果 (a : 舌, c : 軟口蓋) と, 提案手法により修正を行った結果 (舌 : b, 軟口蓋 : d).

含む. 我々は, 既存研究 [13] と同様にこの訓練データを用いて nnU-Net を訓練し, 前述の 3 症例分の 4DCT 画像に対して推論を実施した. 8 種類の領域を推論できるよう nnU-Net を訓練したが, 本研究では, 舌・軟口蓋領域のみを利用する. 図 8a および図 8c に, 自動領域分割結果の一部を示す. 分割結果は概ね良好であるが, エラーを含む部分があることもわかる.

4.2 領域分割結果の修正

提案手法の実用性を確認するため, 3 症例分のデータにおいて, 舌領域および軟口蓋領域を著者の 1 人が提案手法

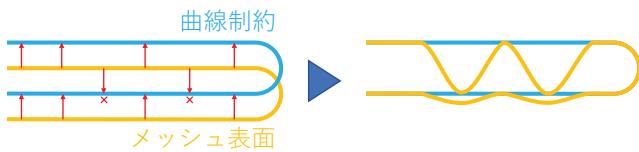


図 9: 制約点とメッシュ頂点との対応付けが失敗する例.

を用いて修正した。図 7 および図 8 に、関心領域の編集結果を示す。舌の修正結果は良好で、図 8b に示す通り、不正確な境界や関心領域の凹凸を修正できていることが分かる。また、表 1 に、3 症例分の関心領域の修正にかかった時間と、配置した曲線制約の数を示す。舌領域の修正には 1 フレームあたり平均で約 83 秒、軟口蓋の修正には 1 フレームあたり約 93 秒の時間を要した。これは、テンプレート変形を利用した嚥下 4DCT 分割手法 [18] と比べ、非常に短い作業時間である。

表 1: 3 つの 4DCT 画像の修正にかかった時間と配置した曲線制約の数。

4DCT	フレーム数	舌		軟口蓋	
		時間 [分]	曲線数	時間 [分]	曲線数
CT_A	29	38	150	41	178
CT_B	25	34	84	38	152
CT_C	20	30	63	36	122

一方、軟口蓋の修正において、変形中の形状がつぶれてしまう問題が観察された（図 8d）。これは、曲線制約とメッシュ頂点との対応付けに起因する問題であると考えられる。具体的には、図 9 に示す通り、薄い構造に対して曲線制約を描いた場合、最近傍探索時に曲線上の制約点が想定した面とは逆の面と対応づいてしまい、結果として構造全体が潰れてしまったと考えられる。この問題を回避するために曲線制約とメッシュ頂点との対応付けアルゴリズムを改良することは将来課題の一つである。

4.3 ユーザスタディ

提案手法の使いやすさを評価するためユーザスタディを実施した。参加者は工学部の大学生 5 名であり、嚥下 4DCT 画像に関する知識や領域分割の経験が無かった。実験参加者は、嚥下 4DCT 画像における舌領域の形状と提案手法の使い方を学ぶ約 10 分のチュートリアルに参加した。その後、参加者は、CT_A の 3 つのフレーム（第 3, 8, 13 フレーム）において、舌領域の編集作業を実施した。この 3 フレームは、4DCT 画像において舌領域が顕著に動くことより選択した。各参加者には、修正結果が十分であると自分が判断するまで修正作業を行うように依頼した。

図 10 は、各参加者が CT_A の舌領域を編集した結果の一部である。どの参加者も、舌と食塊の境界を正確に編集できていることがわかる。また、表 2 は、本手法を用いて

領域分割結果を修正するのにかかった時間を各参加者ごとにまとめたものである。全参加者は、画像領域分割に関する経験が無いにも関わらず十分に短い時間で修正を完了できたことがわかる。

表 2: 各参加者が 3 フレーム分の舌領域の修正にかかった時間と配置した曲線制約の数。

ユーザ	UserA	UserB	UserC	UserD	UserE
時間 [分]	37	22	23	35	13
曲線数	12	24	9	29	21

5. まとめ

本研究では、深層学習によって推論された領域分割結果の効率的な修正手法の確立を目的とし、曲線制約により領域形状を変形できる手法を提案した。提案手法では、ユーザが 3 次元空間に複数の曲線制約を配置すると、関心領域がその曲線にフィットするように、かつ、元の局所形状がなるべく維持されるように変形される。加えて、4DCT 画像中に効率的に曲線制約を配置するため、全フレームで共有され、その形状が時間方向に補間される共有曲線制約も提案した。提案手法の実用性を確認するため、3 症例分の嚥下 4DCT 画像において、舌領域と軟口蓋領域を修正する実験を実施した。その結果、舌領域については効率的な修正が行えたものの、軟口蓋の修正において課題が確認された。また、提案手法の使いやすさを評価するためユーザスタディを実施した。結果、領域分割の経験のない実験参加者でも、提案手法により比較的短時間で舌領域の形状を修正できることが確認された。

提案手法の課題の一つは、薄い構造の編集を行った際に、曲線制約と 3 次元メッシュ頂点との対応付けが正しく行われず、期待した変形結果が得られないことである（図 9）。今後、曲線制約と 3 次元メッシュの形状を考慮することで、より正しい対応付けができる手法を開発したい。また、提案手法では、深層学習により推論された関心領域の精度が高いほど効率的な修正作業が可能になる。今後、提案手法を用いて多くの領域分割データを作成し、これを正解データとして深層学習のネットワークを訓練することで、より高精度な自動分割手法の構築も目指したい。

Acknowledgement

本研究は JSPS 科研費 23K25199 の助成を受けて実施されたものである。また、本研究は、芝浦工業大学生命工学研究倫理審査委員会の承認 (22 - 007) を受けて実施されたものである。

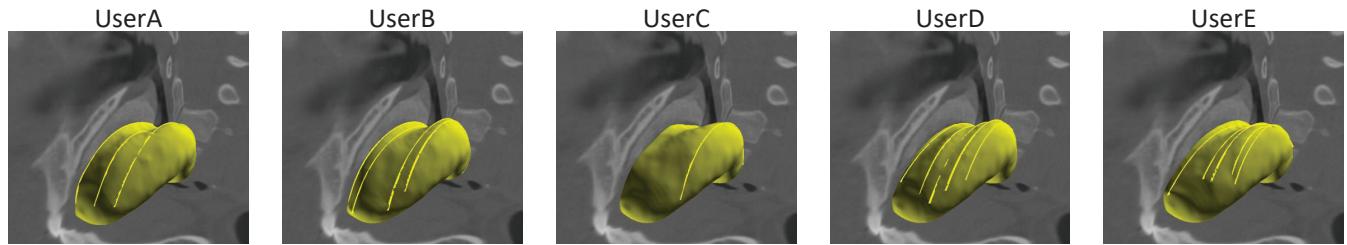


図 10: 各参加者が CT_A の第 8 フレームにおいて舌領域を編集した結果。

参考文献

- [1] Mihalef, V., Ionasec, R., Wang, Y., Zheng, Y., Georgescu, B. and Comaniciu, D.: Patient-specific modeling of left heart anatomy, dynamics and hemodynamics from high resolution 4D CT, *2010 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro*, pp. 504–507 (2010).
- [2] Jahani, N., Choi, S., Choi, J., Iyer, K., Hoffman, E. and Lin, C.: Assessment of regional ventilation and deformation using 4D-CT imaging for healthy human lungs during tidal breathing, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 119, No. 10, pp. 1064–1074 (online), DOI: 10.1152/japplphysiol.00339.2015 (2015).
- [3] Brinkhorst, M., Foumani, M., van Rosmalen, J., Selles, R., Hovius, S., Strackee, S. and et al.: Four-dimensional CT analysis of carpal kinematics: An explorative study on the effect of sex and hand-dominance, *Journal of Biomechanics*, Vol. 139, p. 110870 (2022).
- [4] Fujii, N., Inamoto, Y., Saitoh, E., Baba, M., Okada, S., Yoshioka, S. and et al.: Evaluation of swallowing using 320-detector-row multislice CT. Part I: Single- and multiphase volume scanning for three-dimensional morphological and kinematic analysis, *Dysphagia*, Vol. 26, No. 2, pp. 99–107 (online), DOI: 10.1007/s00455-009-9268-2 (2011).
- [5] Michiwaki, Y., Kamiya, T., Kikuchi, T., Toyama, Y., Takai, M., Hanyu, K. and et al.: Realistic computer simulation of bolus flow during swallowing, *Food Hydrocolloids*, Vol. 108, p. 106040 (2020).
- [6] Inamoto, Y., González-Fernández, M. and Saitoh, E.: 3D-CT Evaluation of Swallowing: Metrics of the Swallowing Response Using Swallowing CT, *Dysphagia*, Vol. 37, No. 2, pp. 237–249 (online), DOI: 10.1007/s00455-021-10288-2 (2022).
- [7] Kikuchi, T., Michiwaki, Y. and Azegami, H.: Identification of muscle activities involved in hyoid bone movement during swallowing using computer simulation, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, Vol. 0, No. 0, pp. 1–12 (online), DOI: 10.1080/21681163.2023.2189486 (2023).
- [8] Long, J., Shelhamer, E. and Darrell, T.: Fully convolutional networks for semantic segmentation, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3431–3440 (2015).
- [9] Ronneberger, O., Fischer, P. and Brox, T.: U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation, *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2015*, Springer, pp. 234–241 (2015).
- [10] Çiçek, Ö., Abdulkadir, A., Lienkamp, S. S., Brox, T. and Ronneberger, O.: 3D U-Net: learning dense volumetric segmentation from sparse annotation, *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2016*, Springer, pp. 424–432 (2016).
- [11] Milletari, F., Navab, N. and Ahmadi, S.-A.: V-Net: Fully convolutional neural networks for volumetric medical image segmentation, *2016 fourth international conference on 3D vision (3DV)*, IEEE, pp. 565–571 (2016).
- [12] Isensee, F., Jäger, P. F., Kohl, S. A. A., Petersen, J. and Maier-Hein, K. H.: Automated design of deep learning methods for biomedical image segmentation, *arXiv preprint arXiv:1904.08128* (2019).
- [13] 中谷亮太, 政木勇人, 大竹義人, Yi, G., Soufi, M., 菊地貴博, 井尻敬, 道脇幸博, 佐藤嘉伸: 被験者個別の嚥下動態解析を目的とした4DCTの自動セグメンテーション, 日本コンピュータ外科学会誌, Vol. 25, No. 3, p. 237 (2023).
- [14] 内田裕也, 大竹義人, 佐藤嘉伸, 菊地貴博, 道脇幸博, 井尻 敬: Attention 機構を用いた深層学習による嚥下4次元CTの自動領域分割手法, 研究報告コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学(CG), Vol. 2024-CG-196, No. 15, pp. 1–8 (2024).
- [15] Boykov, Y. and Jolly, M.: Interactive graph cuts for optimal boundary & region segmentation of objects in ND images, *Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol. 1, pp. 105–112 (2001).
- [16] Li, Y., Sun, J., Tang, C. and Shum, H.: Lazy Snapping, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 303–308 (online), DOI: 10.1145/1015706.1015719 (2004).
- [17] Ijiri, T., Yoshizawa, S., Sato, Y., Ito, M. and Yokota, H.: Bilateral Hermite Radial Basis Functions for Contour-based Volume Segmentation, *Computer Graphics Forum*, Vol. 32, No. 2pt1, pp. 123–132 (2013).
- [18] Kimura, Y., Ijiri, T., Inamoto, Y., Hashimoto, T. and Michiwaki, Y.: Interactive segmentation with curve-based template deformation for spatiotemporal computed tomography of swallowing motion, *PLOS ONE*, Vol. 19, No. 10, pp. 1–16 (online), DOI: 10.1371/journal.pone.0309379 (2024).
- [19] Adams, R. and Bischof, L.: Seeded region growing, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 6, pp. 641–647 (1994).
- [20] Vezhnevets, V. and Konouchine, V.: GrowCut: Interactive multi-label ND image segmentation by cellular automata, *Proceedings of Graphicon*, pp. 150–156 (2005).
- [21] Igarashi, T., Shono, N., Kin, T. and Saito, T.: Interactive Volume Segmentation with Threshold Field Painting, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 403–413 (2016).
- [22] Ju, T., Warren, J., Carson, J., Eichele, G., Thaller, C., Chiu, W. and et al.: Building 3D surface networks from 2D curve networks with application to anatomical modeling, *Visual Computer*, Vol. 21, No. 8–10, pp. 764–773 (online), DOI: 10.1007/s00371-005-0321-3 (2005).
- [23] Liu, L., Bajaj, C., Deasy, J., Low, D. and Ju, T.: Surface Reconstruction From Non-parallel Curve Networks, *Computer Graphics Forum*, Vol. 27, No. 2, pp. 155–163

(2008).

- [24] Heckel, F., Konrad, O., Hahn, H. and Peitgen, H.: Interactive 3D medical image segmentation with energy-minimizing implicit functions, *Computers & Graphics*, Vol. 35, No. 2, pp. 275–287 (2011).
- [25] Ijiri, T. and Yokota, H.: Contour-based Interface for Refining Volume Segmentation, *Computer Graphics Forum*, Vol. 29, No. 7, pp. 2153–2160 (2010).
- [26] Lorensen, W. E. and Cline, H. E.: Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm, *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol. 21, No. 4, p. 163–169 (online), DOI: 10.1145/37402.37422 (1987).
- [27] Yan, Z., Schiller, S., Wilensky, G., Carr, N. and Schaefer, S.: K-Curves: Interpolation at Local Maximum Curvature, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 36, No. 4 (online), DOI: 10.1145/3072959.3073692 (2017).
- [28] Sorkine, O., Cohen-Or, D., Lipman, Y., Alexa, M., Rössl, C. and Seidel, H.-P.: Laplacian surface editing, SGP '04, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 175–184 (online), DOI: 10.1145/1057432.1057456 (2004).