

γ -15 凸多面体近似による肝臓部分切除領域推定の探索効率化に関する研究

麦倉 柊太

(指導教員：小林康浩)

1. 研究背景

肝臓外科手術の手術計画では、臓器・腫瘍の形状や大きさを確認し、実際に手術で切除する領域を推定する。特に部分切除を行う場合には、腫瘍からある程度余裕を持たせた領域を切除することが一般的であり、切除領域は医師の裁量に任されていた。そのため、腫瘍に栄養を与えている血管を完全に取り切れないことがあり、再発のリスクが高くなる可能性があった。われわれは「100%切除領域」を含む放物曲面で部分切除することを想定し、切除体積が最小となる最適な部分切除領域を推定する手法について研究している。

従来手法では探索に膨大な時間が必要であり、探索によって得られた解の妥当性について十分な検証が行えていない。本研究では、「100%切除領域」を凸多面体に変換して探索の効率化を行う。

2. 探索処理の改善

最適な放物面は、100%切除領域を完全に包含し、切除体積が最小になる8個のパラメータの組み合わせを探索することで得られる。従来手法[1]からの改善点は次の3点である。

手法① 切除体積算出処理の改善

手法② 包含判定高速化

手法③ 肝臓と100%切除領域との位置関係による判定基準の導入

手法①は、無駄な切除体積算出処理を途中終了させるための処理である。従来の手法では、各パラメータの組み合わせにおける切除体積を正確に算出してから暫定値との大小比較を行っていた。提案手法では、切除体積算出中でも暫定値を超えた段階で算出処理を終了させる。

また、切除領域は100%切除領域を完全に包含していることが前提となっている。そのため、切除領域の大きさを計算する際には、肝臓内かつ100%切除領域でない部分のみを判定するだけで良い。

手法②は、100%切除領域を凸多面体に近似することによる包含チェックの高速化である。従来手法では、100%切除領域が放物面に完全に包含されているかの判定は、100%切除領域の境界面を用いている。提案手法では、その境界面を凸包点に変換し判定に用いる点数を減らすことで、探索時間短縮を図る。

凸包点とは、任意の数の点が与えられた時、その点をすべて内包することが出来る点集合である(図1)。凸包化のアルゴリズムと

して、QuickHull[2]を用いた。

手法③は、肝臓と切除領域の位置関係による推測である。100%切除領域と肝臓の重心の位置関係により、最適な放物面を推定することが出来る。図2の例では、100%切除領域の重心より、肝臓の重心の方が右下にある場合を考える。この場合は、左上が開いた放物面を考えた方が、肝臓の切除体積は小さくなる可能性が高くなる。

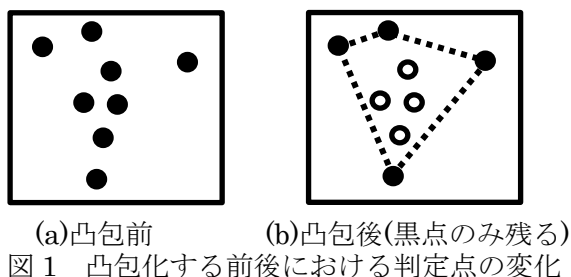


図1 凸包化する前後における判定点の変化

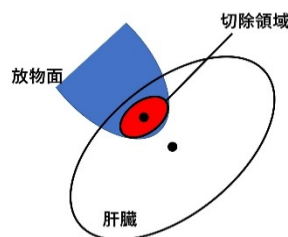


図2 重心位置関係による放物面推定

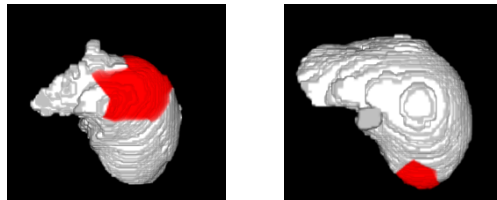
3. 探索結果

探索には、図3(a)の画像群(170[Pixel]×170[Pixel]×128[枚])を用いた。提案手法①②③を用いた探索時間の比較結果を表1に示す。なお、探索の精度パラメータは以下を用いている。

- ・角度間隔：30[°]
- ・シフト間隔：10
- ・焦点範囲：1/50～8/50

従来手法と比較した探索時間削減率は、手法①のみ、手法①と②、手法①～③を適用した場合でそれぞれ約98.58%、約99.34%、約99.41%となった。

しかしながら、手法③を加えても、元サイズの画像群(341[Pixel]×341[Pixel]×257[枚])の画像では約1時間を要する。また、画像3(b)のように、肝臓に対して切除領域が小さい画像では、想定される妥当解のパラメータ数が増えるため、探索時間が膨大になる。この画像群でも探索時間を短縮させることが、今後の課題となってくる。



(a) 画像 1 (b) 画像 2
図 3 探索対象画像の肝臓形状

表 1 探索時間比較(単位[ms])

	探索時間
従来手法	15, 165, 211
①有②無③無	215, 877
①有②有③無	100, 697
①有②有③有	89, 672

4. 凸多面体を用いた楕円体近似

第 2 節では、従来手法の 8 個のパラメータの組み合わせに対する判定処理内を改善した。しかしながら、画像 2 のように 100% 切除領域が小さいほど、判定処理対象となるパラメータの組み合わせ数は増大する。得られた凸多面体から最適解に近い放物面を推定することができれば、推定された放物面のパラメータの周辺を中心に探索することで探索範囲を限定することが期待できる。しかしながら、凸多面体から直接放物面を近似することが難しいため、本稿では前段階として凸多面体から楕円体を近似することを検討する。

4.1 楕円体の近似手法

処理手順は、軸の選定処理と、切除領域を xyz 軸上に置き換えた場合の楕円体近似処理の 2 つに分けられる。

軸の選定処理では、凸多面体から楕円体の軸を求める。この処理には、主成分分析を用いる。主成分分析とは、 n 次元のデータに対して以下の手順を用いて特徴的な軸を求める処理である。

1. データで分散が最大となる軸を求める
2. これまでの計算結果の軸すべてに直交し、かつ分散が最大となる軸を求める
3. 2 の処理を繰り返し、 n 個の軸を計算する出力される軸の順に、第 1 主成分、第 2 主成分、第 3 主成分と呼ばれ、 n 次元では第 n 主成分まで出力される。

今回の CT 画像は 3 次元となるため、主成分分析の解としては第 3 主成分までが出力される。第 1 主成分は、データ群の中で最も分散が大きい軸を表している為、楕円体近似の楕円体における、長軸として考えることが出来る。第 2 主成分は第 1 主成分に、第 3 主成分は第 1 主成分と第 2 主成分に直交しながら、分散が最も大きくなる軸のことである。つまりこのデータを用いることで、楕円体における短軸を考えることが出来る。

この処理は今回のプログラムに実装しており、OpenCV[3]を用いている。なお、主成分分析を行う時間は画像 1 において 805[ms]を要した。主成分分析の結果は、下記の様になる。
第 1 主成分 (-0.292, -0.547, 0.784)
第 2 主成分 (0.951, -0.251, 0.179)
第 3 主成分 (0.0987, 0.798, 0.594)

次に、切除領域を xyz 軸上に置き換えた場合の楕円体近似処理である。先ほど計算した軸上で最小二乗法を用いて、限定した楕円体近似処理を行う。主成分分析により出力された軸を元に、100%切除領域を z 軸に長軸、xy 軸に短軸が当てはまる様に置き換え、式(1)を用いて最小二乗法を行う。

$$A(x^2 + y^2) + Bz^2 = 1 \quad (1)$$

求められた A, B から次式を用いて焦点距離が得られる。

$$\text{焦点距離} = \sqrt{A^2 - B^2} \quad (2)$$

4.2 楕円体近似における焦点距離の利用

100%切除領域の焦点距離より小さい焦点距離をもつ放物面は、最適解として適さない可能性が高い。なぜなら、そのような放物面は 100%切除領域すべてを包含することが出来ない、もし出来たとしても、肝臓の切除領域が大きくなることが想定される為である。

そのため、探索時の放物面の焦点距離を式(2)の出力結果からはじめることで、探索時間の短縮を図る。

5. まとめ

提案手法により探索時間は大幅に減少した。今後は複数の画像群を用いて探索評価を行い、いずれの画像群でも探索時間を現実的なものとしていくことが必要である。そのためには、第 4 節で述べた放物面近似処理を実装し、効果的に探索を行う手法を検討する必要がある。

また今後は、探索の精度を階層的に変化させていくことも検討する。現在、探索パラメータの変化量は最小値である精度パラメータを用いて行っている。この処理を、最初は荒い変化量で探索を行い、その結果によって細かい変化量でパラメータを絞っていくことで、徐々に細かい探索をさせていく方法に変更する。しかしこの処理の追加により、真の最適解を探索することが出来なくなる可能性があり、それに対する処理を検討する必要がある。

参考文献

- [1] 小野翔平：平成 29 年度卒業論文「肝臓外科手術における最適部分切除領域推定に関する研究」
- [2] A Robust 3D Convex Hull Algorithm in Java, <https://github.com/Quickhull3d/quickhull3d> (2018/10/15)
- [3] OpenCV library, <https://opencv.org> (2019/1/11)