

肝臓部分切除領域推定における効率的探索手法の評価

Evaluation of efficient search method for partial resection area estimation in liver surgery

○小林正宗*, 小林康浩*, 張山昌論**, 下田貢***

○Masamune Kobayashi*, Yasuhiro Kobayashi*, Masanori Hariyama**, Mitsugi Shimoda***

*小山工業高等専門学校, **東北大学, ***東京医科大学茨城医療センター 消化器外科

*National Institute of Technology (KOSEN), Oyama College, **Tohoku University,
***Department of Gastroenterological Surgery, Tokyo Medical University,

キーワード: 肝切除 (liver resection), 医用画像 (medical image), 楕円放物面 (ellipsoid paraboloid), 勾配法 (gradient method), 効率的探索 (efficient search),

連絡先: 〒 323-0806 小山市中久喜 771 小山工業高等専門学校 電気電子創造工学科 知能集積システム研究室

小林正宗, Tel.: (0285)20-2100, Fax.: (0285)20-2885, E-mail: s2021se04@oyama.kosen-ac.jp

1. はじめに

肝臓外科手術において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る。切除領域は医師の裁量に任されており、腫瘍に栄養を与えている血管を含んだ領域（支配領域）を完全に切り切れない可能性があった。先行研究として、腫瘍と門脈の位置関係から支配領域を推定する手法が提案されている^{1, 2, 3}。われわれはこの推定領域を含む楕円放物面で部分切除することを想定し、切除体積が最小となる切除領域推定手法について研究を行っている^{4, 5}。しかしながら、全探索を前提とした場合、現状で 10 時間～1 日程度の時間を必要とする。本研究では、切除領域の位置および形状に基づいて、探索の基準となる楕円放物面の初期形状を設定したうえで効率的に切除面を推定する手法を提案し評価を行う。

2. 肝腫瘍の切除方法

現在の腫瘍の切除方法は、部分切除と系統的切除に分類される。肝臓内の血管は中心から枝分かれしており、それぞれの血管が担当する領域によって区域が分類されている。この区域ごとに肝臓を切除するやり方が系統的切除である。腫瘍に栄養を与えている血管を含んだ領域（支配領域）を完全に切除することで切除領域を明確にして再発のリスクを抑えることができると考えられる。

本研究で対象としているのは部分切除である。部分切除は腫瘍から 1～2cm 程度余裕をもたせて切除する手法であり、腫瘍が小さい場合に有効である。この手法では、腫瘍と切除曲面の距離が医師の裁量に任されている。また、切除領域に明確な指標がないため再発のリスクが高くなる可能性があった。再発のリスクを低くする

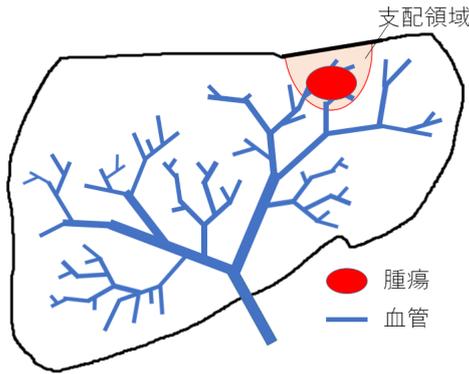


Fig. 1 支配領域

ために、腫瘍と門脈の位置関係から支配領域を求める(図1)。支配領域から推定した切除領域に対して部分切除を行う。

3. 従来の探索手法

先行研究では、部分切除の場合の切除面は、「スプーンですくうような曲線」が想定されている⁶⁾。そのため先行研究では、切除面として楕円放物面が用いられている。楕円放物面の表現には、以下の合計8個のパラメータが必要となる。

- 回転角度 (ロール・ピッチ・ヨー) : α, β, γ
- 平行移動 : x_0, y_0, z_0
- 焦点距離 : A_y, A_z

ただし、回転は各軸の回転角度、平行移動は原点から頂点までの距離、焦点距離は放物面の広がり度合いを表す。回転を含まない楕円放物面は、一般的に式1で表現できる。

$$x - x_0 = \frac{(y - y_0)^2}{A_y} - \frac{(z - z_0)^2}{A_z} \quad (1)$$

ロール・ピッチ・ヨーは図形を X, Y, Z の順番に軸を回転させる3次元回転の手法である。回転前の座標を (X, Y, Z) としたとき回転後の座標 (X', Y', Z') は式2で表現できる。

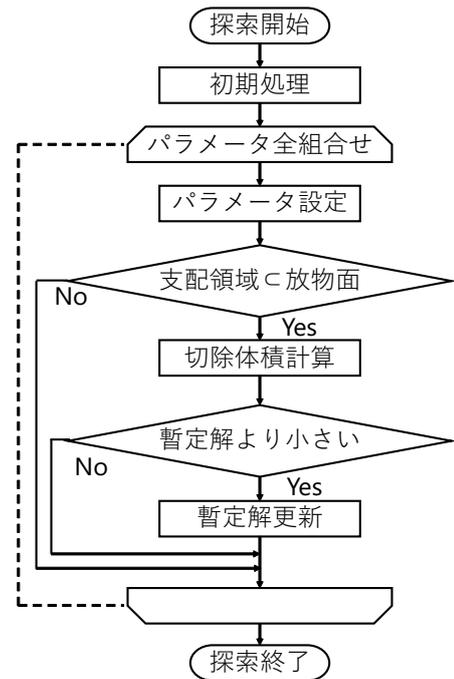


Fig. 2 従来手法フローチャート

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

ロールは放物面の軸での回転を表し、ピッチとヨーで軸の傾きを表している。焦点距離は Y 軸, Z 軸方向それぞれの広がり度合いを表している。焦点距離が大きいくほど放物面は広がる。楕円放物面による最適な部分切除面を求めることは、最適化問題として扱うことができる。変数は楕円放物面の形状を決定する8個のパラメータであり、目的関数は楕円放物面による肝臓切除体積の最小化である。このときの制約は、切除領域を楕円放物面によってすべて切除すること(以下、包含制約と呼ぶ)である。

図2に示す従来手法では、8個の変数のすべての組合せを総当たりで最適解を探索していた。ある探索範囲内のすべてのパラメータの組合せに対して、切除体積が最も少なくなるパラメータを求める探索方法である。しかしながら、全探索は組み合わせ数に比例して探索時間がかか

Table 1 探索パラメータ設定

| パラメータ | 範囲 | 間隔 | 組合せ数 |
|-----------------|--|--------|-----------------|
| α | 0~180[°] | 5[°] | 36 |
| β, γ | 0~360[°] | 5[°] | 72 ² |
| x_0, y_0, z_0 | -50~50[pix] | 5[pix] | 20 ³ |
| A_y, A_z | $\frac{1}{70}, \frac{1}{60}, \frac{1}{50}, \frac{1}{40}, \frac{1}{30}$ | | 5 ² |

る。また、組み合わせ数は探索の精度を高くしようとする著しく増大する。表1に具体的な全探索のパラメータの設定を示す。この場合、総組合せ数が37,324,800通りになる。

従来手法では処理時間削減のため、以下の改善を行っている。従来探索手法では切除体積を計算する処理に時間がかかっていることが分かっていたため、あるパラメータの組合せにおいて明らかに最適解ではないことが分かった時点で切除体積計算処理を省略するようにした。省略条件は以下の2条件である。

- 包含制約を満たさない
- 切除体積計算処理中に、探索途中における切除体積最小値（暫定解）を超える

以上の処理を組み込んだうえで探索時間は平均36時間となっている。

4. 本提案の探索手法

提案手法では、基準となる楕円放物面の初期形状を求めたうえで、形状を変化させながらより小さな切除体積となるように効率的に探索を行う。総当たり探索に比べて探索範囲を限定できるため、計算時間が短くなると考えられる。探索時間の目標値は実用性を考慮して1時間以内とする。

図3に提案手法の処理概要を示す。処理は大きく初期形状設定と探索処理に分類される。

初期形状は、切除領域と肝臓領域の位置関係から決定される。楕円放物面の形状は、頂点が肝臓内部に位置し、かつ肝臓表面に向かって開

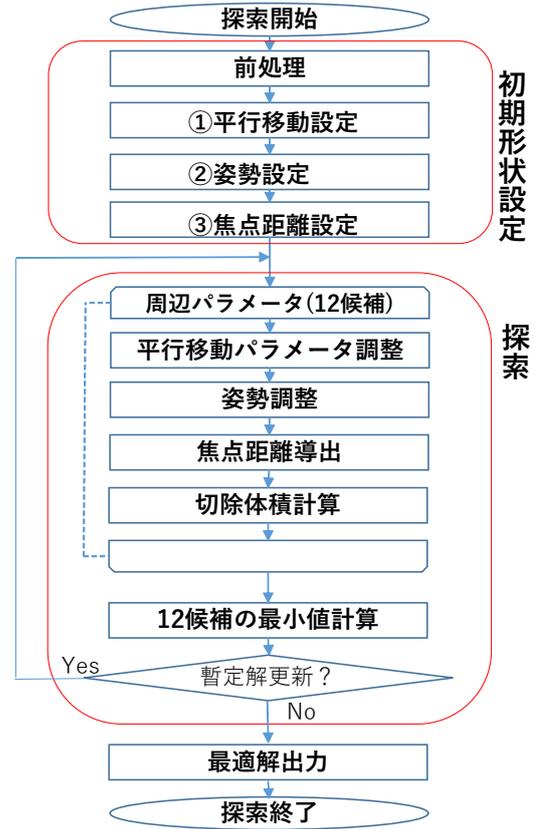


Fig. 3 提案手法フローチャート

いていくものが切除面としては望ましいことが経験的に分かっている。図4は初期形状の設定方法を示している。図4の①は楕円放物面の頂点を示しており、初期形状設定では肝臓の重心に設定する。頂点座標は楕円放物面の平行移動量(x_0, y_0, z_0)に相当する。次に、切除領域と肝臓の重心を結ぶ軸を放物面のX軸と設定する(図4②)。ここから回転角度(α, β, γ)を算出する。焦点距離は、平行移動量と回転角度から、切除領域を包含する条件下で線形計画法により求められる(図4③)。

初期設定では、頂点を肝臓重心に設定することを基本としているが、肝臓重心が除領域内部に含まれている場合は包含制約を満たさないため頂点座標を変更する必要がある。その場合は以下の手順で頂点座標を変更する。図5の例では、肝臓の重心点 L_0 に頂点が設定されたが、切除領域に L_0 が含まれているため包含制約を満たさない。そこで、切除領域の重心点 R から肝

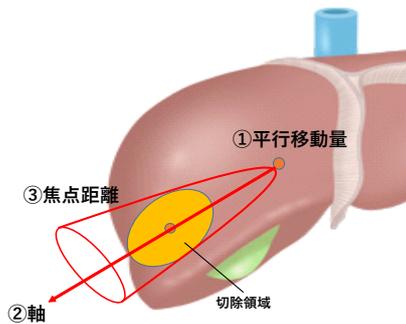


Fig. 4 初期形状設定

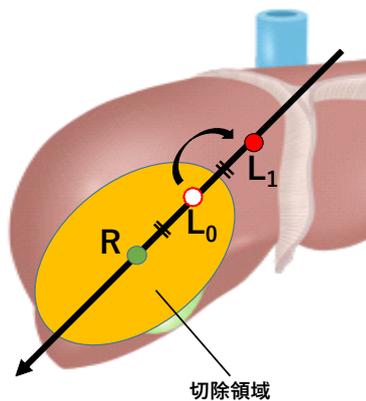


Fig. 5 頂点座標の移動

臓の重心方向に向かって、頂点座標を切除領域外部に出るまで移動を繰り返す。移動距離は肝臓と切除領域の重心間距離を基準とする。

図3の探索処理では、初期形状のパラメータを基準として、パラメータに変更を加えながらより良い解を探索する。8個のパラメータのうち、焦点距離については平行移動量と回転角度から線形計画法によって求めることができるので、探索時に変更するパラメータは6個である。平行移動量と回転角度の6パラメータについて、適切量増減させた12組のパラメータの組み合わせを候補として切除体積計算を行い、最小値と暫定解との比較を行い更新処理を行う。以降同様にして、暫定解のパラメータを基準として、候補パラメータの中で切除体積最小値の更新を繰り返す。

5. 処理結果

15種類の画像に対して探索結果の評価を行った。各画像では、肝臓領域および切除領域情報があらかじめ与えられているものとする。提案手法では、6個のパラメータの変化量について固定と可変の2手法で評価を行った。理由は、変化量を固定にした際に、局所解に陥ることがあったためである。変化量固定の場合は、平行移動の変化量を20、回転角度の変化量を1として探索を行った。

変化量可変の場合は、変化量の初期値を設定したうえで、探索時の暫定解更新が行われなくなったタイミングで段階的に変化量を小さくする。回転角度の変化量は初期値を6とし、最小値1まで段階的に1ずつ減少する。平行移動の変化量は、回転角度の変化量 n をもとに 2^{n-1} と設定した。具体的には、初期値は32、最小値は1となる。

評価環境は以下のとおりである。

- OS: Windows 10 Home
- CPU: 11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-11700 @ 2.50GHz 2.50 GHz
- メモリ : 16.0 GB

変化量固定の場合の切除体積と探索時間の結果を表2, 3にそれぞれ示す。表2に示す従来手法との体積比では、平均値が約101%であり、大きな違いは生じていないことがわかる。しかしながら、画像12の場合に体積比が146%と大きい。これは勾配法の探索で局所解に陥っているためと考えられる。表3に示す探索時間比を見ると、従来手法と比較して12%程度と探索時間を大幅に削減できていることが分かる。探索時間の平均値も325秒となっており、実務で使用可能なものとなっている。画像4や6のように、従来手法の時点で探索時間が短いものについても、時間短縮ができています。

Table 2 切除体積比較 (変化量固定)

| 画像 | 切除体積(cc) | | 体積比(%) (提案/従来) |
|----|----------|---------|-------------------|
| | 従来手法 | 提案手法 | |
| 1 | 435843 | 439998 | 100.95 |
| 2 | 124225 | 127379 | 102.54 |
| 3 | 1071554 | 1071554 | 100.00 |
| 4 | 122152 | 103762 | 84.94 |
| 5 | 699578 | 707740 | 101.17 |
| 6 | 1215780 | 1214885 | 99.93 |
| 7 | 666176 | 660530 | 99.15 |
| 8 | 122054 | 113042 | 92.62 |
| 9 | 671897 | 661030 | 98.38 |
| 10 | 162412 | 167634 | 103.22 |
| 11 | 348847 | 339859 | 97.42 |
| 12 | 47837 | 70138 | 146.62 |
| 13 | 195458 | 207898 | 106.36 |
| 14 | 396170 | 424248 | 107.09 |
| 15 | 191160 | 167349 | 87.54 |

変化量可変の場合の切除体積と探索時間の結果と先行研究との比較を表4, 5にそれぞれ示す。表4に示す従来手法との体積比では、平均値が約99%であり、すべての画像で従来手法とほぼ等しい解を得ることが出来た。勾配法の変化量を可変にすることで、局所解に陥ることが少なくなったと判断できる。また、表5の結果から、測定時間比の平均が7%と小さくなったことがわかる。実際に得られた切除面の例を図6に示す。図6(a)の従来手法で得られた切除面は、支配領域を楕円放物面の側面で切除していることが分かる。これは従来手法における焦点距離の値の範囲(1/70~1/30)が適したものでなかったため、想定外の解が得られたと考えられる。一方で提案手法では、支配領域を楕円放物面の頂点から切除している。本研究は、スプーンでスクレーパーのような曲面を想定しているため、想定通りの形状であるといえる。

6. おわりに

本研究では、肝臓部分切除領域推定に対する効率的な探索手法の提案および評価を行った。探索時間については、先行研究に対して平均90勾配法で探索する際、平行移動と焦点距離の変化量を変えることで、切除体積の精度と探索時間

Table 3 探索時間比較 (変化量固定)

| 画像 | 探索時間(s) | | 時間比(%) (提案/従来) |
|----|---------|------|-------------------|
| | 従来手法 | 提案手法 | |
| 1 | 922681 | 565 | 0.06 |
| 2 | 219411 | 202 | 0.09 |
| 3 | 151 | 67 | 44.13 |
| 4 | 1648 | 360 | 21.82 |
| 5 | 56046 | 226 | 0.40 |
| 6 | 1287 | 835 | 64.89 |
| 7 | 31897 | 400 | 1.25 |
| 8 | 16180 | 338 | 2.09 |
| 9 | 2274 | 384 | 16.87 |
| 10 | 3519 | 242 | 6.88 |
| 11 | 44521 | 251 | 0.56 |
| 12 | 6310 | 291 | 4.61 |
| 13 | 496230 | 139 | 0.03 |
| 14 | 180241 | 258 | 0.14 |
| 15 | 1922 | 317 | 16.50 |

Table 4 切除体積比較 (変化量可変)

| 画像 | 切除体積(cc) | | 体積比(%) (提案/従来) |
|----|----------|---------|-------------------|
| | 従来手法 | 提案手法 | |
| 1 | 435843 | 446881 | 102.53 |
| 2 | 124225 | 127971 | 103.02 |
| 3 | 1071554 | 1071554 | 100.00 |
| 4 | 122152 | 106789 | 87.42 |
| 5 | 699578 | 721414 | 103.12 |
| 6 | 1215780 | 1217200 | 100.12 |
| 7 | 666176 | 644030 | 96.68 |
| 8 | 122054 | 109119 | 89.40 |
| 9 | 671897 | 661030 | 98.38 |
| 10 | 162412 | 156543 | 96.39 |
| 11 | 348847 | 342374 | 98.14 |
| 12 | 47837 | 51422 | 107.49 |
| 13 | 195458 | 209311 | 107.09 |
| 14 | 396170 | 387743 | 97.87 |
| 15 | 191160 | 182532 | 95.49 |

Table 5 探索時間比較 (変化量可変)

| 画像 | 探索時間(s) | | 時間比(%) (提案/従来) |
|----|---------|------|-------------------|
| | 従来手法 | 提案手法 | |
| 1 | 922681 | 283 | 0.03 |
| 2 | 219411 | 236 | 0.11 |
| 3 | 151 | 79 | 52.38 |
| 4 | 1648 | 160 | 9.69 |
| 5 | 56046 | 172 | 0.31 |
| 6 | 1287 | 218 | 16.94 |
| 7 | 31897 | 162 | 0.51 |
| 8 | 16180 | 213 | 1.32 |
| 9 | 2274 | 159 | 7.01 |
| 10 | 3519 | 93 | 2.65 |
| 11 | 44521 | 140 | 0.31 |
| 12 | 6310 | 562 | 8.91 |
| 13 | 496230 | 112 | 0.02 |
| 14 | 180241 | 125 | 0.07 |
| 15 | 1922 | 103 | 5.38 |

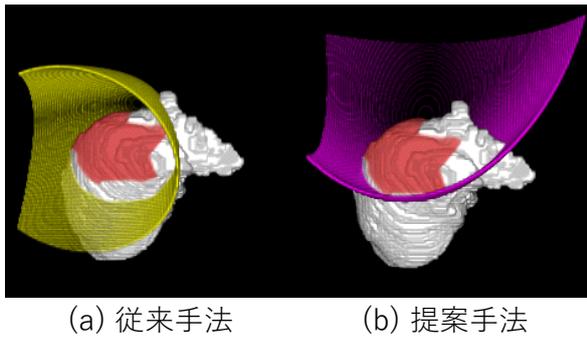


Fig. 6 切除面の比較

が変わってくる。今後、適切な変化量を設定できるように調査を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 岡田萌, 張山昌論, 亀山充隆, 下田貢, 小林康浩: 高精度血管抽出に基づく門脈支配領域推定, 電気関係学会東北支部連合大会, Oct(2012)
- 2) 岡田萌, 張山昌論, 亀山充隆, 下田貢: 腫瘍領域情報に基づく肝臓切除容量最小化のための門脈切除点計算, 計測自動制御学会東北支部第 279 回研究集会, 279-3(2013)
- 3) 鈴木健明, 張山昌論, 亀山充隆, 下田貢, 窪田敬一: 肝臓手術における実用的な制約条件を考慮した最適切除領域推定, 計測自動制御学会東北支部第 295 回研究集会, 295-1(2015)
- 4) 小野翔平: 平成 29 年度小山高専卒業論文「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」
- 5) 麦倉柊太: 平成 30 年度小山高専卒業論文「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」
- 6) 高本健史ほか: えぐる肝切除の default 設定 (非解剖学的肝切除の標準化の提案), 第 7 回肝癌治療シミュレーション研究会 (2012)