

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

Estimation of an Optimal Resected Region Considering Practical Constraints in Liver Surgery

○鈴木 健明*, 張山 昌論*, 亀山 充隆*, 下田 貢**, 窪田 敬一**

○Takeaki Suzuki*, Masanori Hariyama*, Michitaka Kameyama*,
Mitsugi Shimoda**, Keiichi Kubota**

*東北大学, **獨協医科大学

*Tohoku University, **Dokkyo Medical University

キーワード : 3次元画像処理 (3D image processing), 肝臓手術 (liver surgery), ボロノイ図 (voronoi diagram), 腫瘍支配率 (tumor domination ratio), 最適領域推定 (estimation of an optimal region)

連絡先 : 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05
東北大学大学院 情報科学研究科 情報基礎科学専攻 亀山・張山研究室 鈴木健明,
Tel: (022)795-7155, Fax: (022)263-9167, E-mail: t.suzuki@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

手術前に CT/MRI 画像から患部の 3 次元構造を構築し、手術計画を行う事が重要となってきた。しかしながら、肝臓のように複雑な構造を有する臓器の 3 次元構築においては、現状の画像処理ソフトウェアの抽出性能が低いため、手動により多数の修正を行う必要があり、その作業時間が膨大となるという問題がある。また、作業者の熟練度により構築結果がばらつくなどの問題がある。

これらの問題を解決するために、本研究グループでは、肝臓外科手術を対象として、精度の高い臓器抽出、血管抽出、術式を考慮した切除領域推定等の自動化に向けて研究を行っている^{1, 2, 3)}。その中でも本稿は、術式を考慮した切除領域推定に関して述べたものである。

肝臓外科手術における切除領域は、腫瘍の成長と転移の要因である門脈 (Portal vein) を基準として決定する。腫瘍は、その腫瘍に最も近い門脈から栄養の供給を受け成長し、また、腫瘍は栄養の供給を受けた門脈の下流方向へ転移するためである。以上の理由から、腫瘍に栄養を供給している門脈の最上流を切除点とし、そこから下流へ向けた領域を切除領域として決定する (Fig.1)。

従来の切除領域決定手法は、SYNAPSE VINCENT⁴⁾などのソフトウェアを用いて、CT 画像から抽出された門脈情報から切除点を指定し、その切除点における切除領域を表示し、その領域が腫瘍を被覆するまで繰り返すといった作業を手動で繰り返し行っていた。しかしこの手法は多くの作業時間を必要とし、また医師の熟練

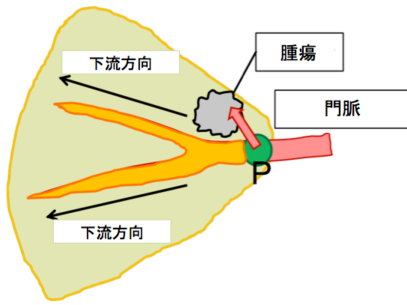


Fig. 1 門脈を基準とした切除領域の決定

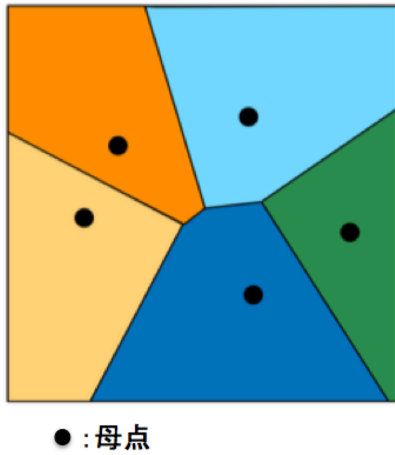


Fig. 2 ボロノイ図

度により結果にばらつきがあり最適化が保証されていないという問題がある。本稿の提案手法は、短時間で最適な切除領域を自動的に推定することを可能とする。

2. 腫瘍支配率を用いた切除領域自動推定

門脈点の支配領域とは、各門脈点が栄養を供給する肝臓の領域のことである。支配領域の推定には、ボロノイ図の考え方をを用いる。

ボロノイ図とは、空間中に配置された複数個の母点に対し、それぞれの母点までの距離が最も近い領域 (ボロノイ領域) に分割した図である (Fig.2)。各門脈点の支配領域は、ボロノイ図における母点とボロノイ領域に一致する (Fig.3)。ここで、点 P における腫瘍支配率 TDR (Tumor

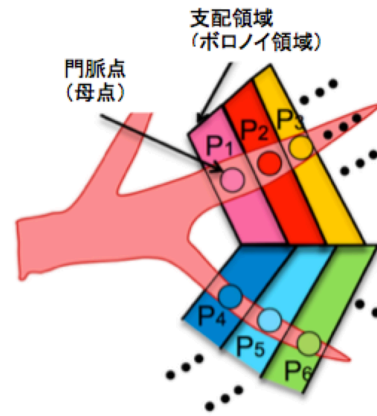


Fig. 3 門脈点と支配領域

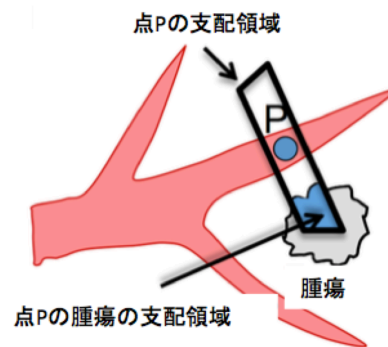


Fig. 4 腫瘍内の支配領域

Domination Ratio) を以下のように定義する。

$$TDR = \frac{\text{点 } P \text{ が腫瘍を支配している体積}}{\text{腫瘍全体の体積}} * 100[\%] \quad (1)$$

式 (1) の分子は、Fig. (4) に示した点 P の腫瘍の支配領域の体積である。TDR は各門脈が腫瘍に供給する栄養と、腫瘍から受ける影響の度合いを表す。

腫瘍と門脈の位置から TDR を用いて、以下の手順で理想的な切除領域を算出することができる。理想的な切除領域とは、腫瘍と関連する全ての門脈点の支配領域を網羅する最小の切除領域を指す。Fig.5-Fig8 は切除領域算出の例を示した図である。

【手順 1】:各枝の TDR が 0 よりも大きい門脈点の中から、最も門脈の根本に近い門脈点を選び、その点を切除点とする。(例) Fig.5 において、TDR が 0 よりも大きい門脈点は $P_i (i = 1, 2, \dots$

,6)であり、根本に近い P_1 , P_4 をそれぞれ、枝 B_1 , B_2 の切除点とする。

【手順2】それぞれの枝について、切除点よりも下流にある門脈点をリージョンング法を用いて算出し (Fig.6), 算出された全ての門脈点の支配領域を算出する (Fig.7)。

【手順3】理想的な切除領域は、切除点より下流にある全ての門脈点の支配領域を統合して求められる (Fig.8)。

以上の手順により、理想的な切除領域が求められる。ただし、ここで求められた切除領域は理想的なものである。上記の手法は門脈と腫瘍の位置のみを用いて算出したが、実際の手術前プランニングでは門脈の太さ・分岐, 切除体積など実用的な制約条件の下で切除領域を決定する。上記の手法を拡張し、これらの制約条件を満たすような切除領域を自動的に算出する手法を次章で述べる。

3. 実用的な制約条件を考慮した最適切除領域推定

3.1 太さ・分岐を考慮した切除点の設定

実際の肝臓外科手術において切除点を決定する際は、門脈の太さと分岐の有無を考慮する。

2章で述べた手法は実際の手術に適用することが難しい。CT画像上で算出された切除点, 実際の手術中(超音波画像で門脈や腫瘍の位置を認識する)に確認することができないような細かい門脈に設定されている場合があるためである。従って、切除点を手術中に確認できる太さまで遡って設定する必要がある。

また、切除点が門脈の枝の中間点にある場合、手術中に正確な位置を確認することが難しいため、切除位置の目安として切除点を分岐点に設定する必要がある。

この、太さ・分岐に関する制約を満たしながら切除点を自動設定できるよう、2章の手法を拡張する。設定された切除点が Fig.9 の左図の

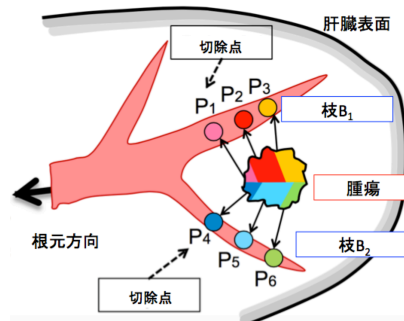


Fig. 5 切除点の設定

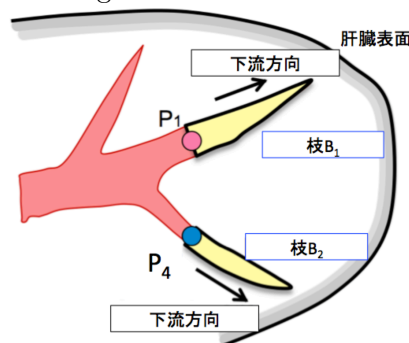


Fig. 6 切除血管の算出

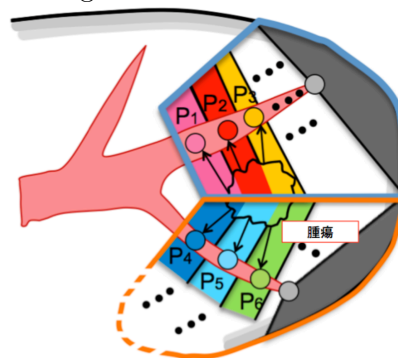


Fig. 7 各門脈点の支配領域の算出

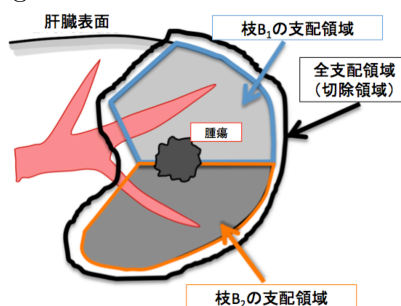


Fig. 8 切除領域の算出

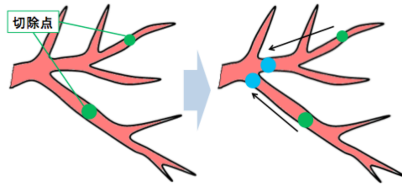


Fig. 9 太さ・分岐を考慮した切除点の設定

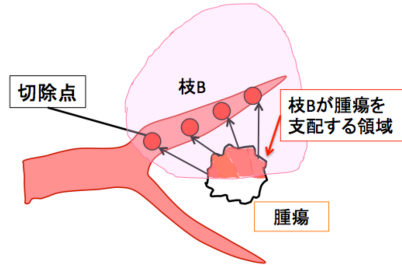


Fig. 10 枝 B の支配領域

ように細い血管や分岐でない位置である場合に、Fig.9 の右図のように太さ・分岐の条件を満たすよう遡って再設定する。

3.2 切除許容体積を考慮した切除領域の自動算出

肝臓外科手術における実用的な制約条件に体積制約がある。肝機能の弱っている患者の肝臓を大きく切りすぎると、肝不全を引き起こし死亡する可能性があるからである。よって、切除体積が切除許容体積以内になる、かつ切除する枝に含まれる TDR の合計が最大になるような切除点の組み合わせを決定するよう提案手法を更に拡張する。

ここで、枝の腫瘍支配率 $TDRB$ (Tumor Domination Ratio of Branch) を以下のように定義する。

$$TDRB = \frac{\text{枝 } B \text{ が腫瘍を支配している体積}}{\text{腫瘍全体の体積}} * 100[\%] \quad (2)$$

式 (2) の分子は、Fig. (10) に示した枝 B の腫瘍の支配領域の体積である。

切除許容体積を V' とし、切除する枝の候補、その枝の体積、腫瘍支配率をそれぞれ B_i , V_i , $TDRB_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$) とすると (N は切除す

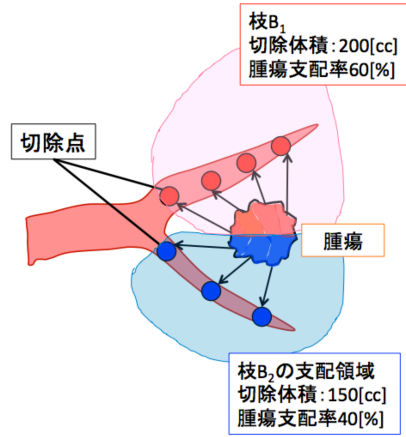


Fig. 11 体積制約下での切除点の算出

る枝の候補数), V_i の総和が V' 以下となるような制約の下で, $TDRB_i$ の総和が最大となるような B_i の組み合わせを選ぶことで、体積制約を考慮した際の最適な切除点を選ぶことができる。

例えば、Fig.11 のように切除候補の枝 B_1 , B_2 があり、切除体積、腫瘍支配率がそれぞれ $V_1 = 200[cc]$, $TDRB_1 = 60[\%]$, $V_2 = 150[cc]$, $TDRB_2 = 40[\%]$ であるとき、切除許容体積を $V' = 300[cc]$ と与えれば、枝 B_1 のみを選んだ支配領域を最適切除領域として推定する。また、切除許容体積を $V' \geq 350[cc]$ と与えれば、枝 B_1, B_2 の両方を選んだ支配領域を最適切除領域として推定する。

4. 評価

従来手法における切除領域と提案手法を用いた際の切除領域の比較評価を行った。従来手法における切除領域とは、SYNAPSE VINCENT を用いて医師が手動で設定した領域を指す。また、比較には 3 章で述べた 2 つの提案手法を用いる。太さ・分岐を考慮し、腫瘍を 100% 切除する手法と、太さ・分岐の考慮後、更に切除許容体積を考慮し、体積制約を用いて最適な切除領域を求める手法の 2 つである。なお、切除する血管の太さは 6mm に設定した。

Table 1 Sample の比較評価

	(a) 従来手法	(b) 提案手法 (太さ・分岐考慮)	(c) 提案手法 (体積制約考慮)
切除体積 [cc]	203.858	308.714	203.858
切除点数	4	6	4

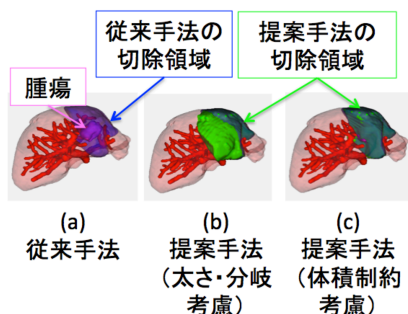


Fig. 12 Sample

Fig.12 と Table1 に比較評価を行った結果を示す。Fig.12(a) は Sample1 に対し、医師が手動で設定した領域である。この従来手法で医師が構築した切除領域は、腫瘍を完全に被覆していない。腫瘍支配領域を 100%切除しようとする、患者の切除許容量を超えてしまうので、医師が切除体積に制限を設けたためである。Fig.12(b) は、門脈の太さ・分岐を考慮した提案手法を用いて腫瘍に関連する領域を 100%切除するように推定を行った結果である。腫瘍を完全に被覆するように推定を行っているため、切除体積は従来手法よりも大きくなる。Fig.12(c) は、体積制約を考慮した提案手法により最適な切除領域を自動推定した結果である。切除許容体積は医師が決定した 203.858[cc] と設定した。切除領域、切除体積共に医師が手動で構築したものと一致している。

5. まとめ

本稿で提案した手法を用いることにより、肝臓外科手術における最適な切除領域を自動的に算出できることを示した。今後は、更に制約条件を追加していくことや、医師が操作しやすいインターフェースを構築することなどが必要となる。

参考文献

- 1) 尾形吉隆, 張山昌論, 亀山充隆, 下田貢, “グラフ構造解析に基づく肝臓血管の自動抽出”, 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, 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
- 3) 谷澤理一:人体解剖モデルを用いた CT 画像からの自動肝臓抽出,(2013.5.29)
- 4) 河野 安宏, 大島 俊介, ”(1) ボリュームアナライザー「SYNAPSE VINCENT」の紹介”, 公益社団法人日本放射線技術学会, 画像通信 32(2),pp.33-37, Oct.2009