

特異点理論に基づく医療用画像処理技術の研究開発

東京大学大学院理学系研究科 品川 嘉久

1 はじめに

本研究開発では、CTやMRIなどの医用断層画像から、臓器など三次元物体を復元し可視化する際、特異点フィルターを用いる新しい手法によるシステムを開発した。

特異点フィルター(Critical-Point Filter: CPF)を用いると、任意のデジタル画像を完全に自動でマッチング(一方の画像のどの部分がもう一方の画像のどの部分に対応するか)を計算できる。本研究開発では、それを医用断層画像に応用し、精密なボリュームレンダリングや、物体表面の自動抽出を可能にするものである。

2 医用断層画像からの三次元体復元・可視化

人体を、CTやMRIなどで撮影すると、人体を異なる高さで切った断面画像が得られる。たくさんの画像を並べて観察し、臓器などの立体構造を把握するには、専門知識と熟練が必要である。そこで、たくさんの断面画像から、立体を復元し、三次元で画面に表示する需要が増加してきた。そのための技術として、ボリュームレンダリングとサーフェスレンダリングがある。

ボリュームレンダリングとは、断面画像を上下に積み重ねて、半透明表示することにより、立体を復元する方法である。この方法では、上下の画像の同じ位置を占める画素が対応づけられる。画像と画像の高さ間隔が大きくあいている場合、不鮮明で誤った立体が復元されてしまう。

一方、サーフェスレンダリングでは、一枚一枚の画像に写っている物体の輪郭線を曲線として取りだし、得られたたくさんの曲線の間に面を張ることにより、立体を復元する。輪郭線を等高線と考えることもできる。高さ間隔が大きくあいている場合でも精密に立体を表現できるが、物体内部の濃淡情報は表現できない。サーフェスレンダリングの大きな問題は、輪郭線抽出が自動でできないことである。人手で一枚一枚の画像から輪郭線を抽出すると、膨大な作業が必要になる。しかし、エッジ抽出などの自動画像処理では、正しく輪郭線が抽出できない。

本研究開発では、代表研究者が開発したCPF[1]を応用することにより、これらの問題を克服し、より自然で鮮明な立体を自動的に再現することを可能にした。CPFは、画像と画像の間のマッチング(画素の対応関係)を完全に自動的に計算する。高さ間隔が大きくあいている画像でボリュームレンダリングする際、画像と画像の間に、この対応関係に従って中間画像を生成することによって、鮮明な立体画像が生成できる。また、サーフェスレンダリングにおいても、どれか一枚の画像で人手や画像処理で輪郭線を指定すれば、CPFの対応関係によって、他の画像での輪郭線を求めることができる。

3 特異点フィルター(CPF)

代表研究者は、与えられた二つの画像を完全に自動的にマッチングする方法を開発した[1]。画像で、明るさ(輝度)が最も明るい点を頂上点、最も暗い点を谷底点と呼ぶことにする。これらは、輝度関数の特異点である。特異点はこの他に鞍点が2種類あり、先の二つと合わせて4種類ある。これを、下記のような非線形フィルタによって多重解像度画像を構築すると、より強い特異点ほど、階層の上の部分に生き残る。このフィルタは、1次元の頂上点を保存するフィルタ、谷底点を保存するフィルタの2次元テンソル積として、

$$p^{(m,0)} = (x)(y)p^{(m+1,0)}, p^{(m,1)} = (x)B(y)p^{(m+1,1)}, p^{(m,2)} = B(x)(y)p^{(m+1,2)}, p^{(m,3)} = B(x)B(y)p^{(m+1,3)}$$

の4種類ある。ここで、 $p^{(m,i)}$ は、解像度レベル m のフィルタ i の適用結果である。これらのフィルタは、画像の大きさを1/4に縮小する性質を持つ。次に、その各階層の間の

$$C = |V|^2 + |D_0|^2 + |D_1|$$

の値を計算し、これを最小化するマッチングを求めている。ここで、 V は輝度値の差、 D_0 は階層間の画素の距離、 D_1 は画像の変形度である。この値も最適なものも理論的に自動的に定まる[1]。

既存の方法で、画像のマッチングが困難であった理由は、ウェーブレットなど階層的線形フィルタは、階層上位ほど、輝度と位置の情報を失うためである。上記の非線形な特異点フィルタは、その情報を保存するため、完全な自動マッチングが可能となった。これを用いれば、完全自動モーフィング、動画像圧縮、ステレオ画像からの立体形状復元、モーションキャプチャなどに応用できる。

4 サーフェスレンダリングにおけるホモトピー変形

サーフェスレンダリングにおいては、前述のように、抽出した輪郭線(等高線)の間に曲面を張る必要がある。これを、代表研究者は等高線を別の等高線に変形させる軌跡として表す方法を開発した[2]。これは、ホモトピーによる連続的変形と呼ばれる。この方法を用いて、CT画像や標本切片などから物体を再構築すると、画像間で輪郭線の形の変化が激しい場合でも歪んだ物体表面が構成されるのを避けられる。その考え方は以下の通りである。二つの隣合った輪郭線の間に張られる物体表面は、一方の輪郭線が他方の輪郭線へホモトピーによって変形される軌跡だと考えるのである。つまり、二つの輪郭線が、媒介変数表示によって各々

$$f: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^3, g: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^3$$

で表されるとき、この両者の間に張られる曲線は f から g へのホモトピー G

$$G: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^3, G(x, 0) = f, G(x, 1) = g$$

で表される。 f, g への媒介変数の入れ方については、我々は連続的トロイダル・グラフを用いて決める方法を開発した[2]。

5 結果

おわりに、開発したシステムで、医用断層画像データから、三次元立体をボリュームレンダリングした例と、サーフェスレンダリングした例を図1に示す。本システムでは、CPFを用いることにより、ボリュームレンダリングとサーフェスレンダリングを統合し、精緻にすることができる。

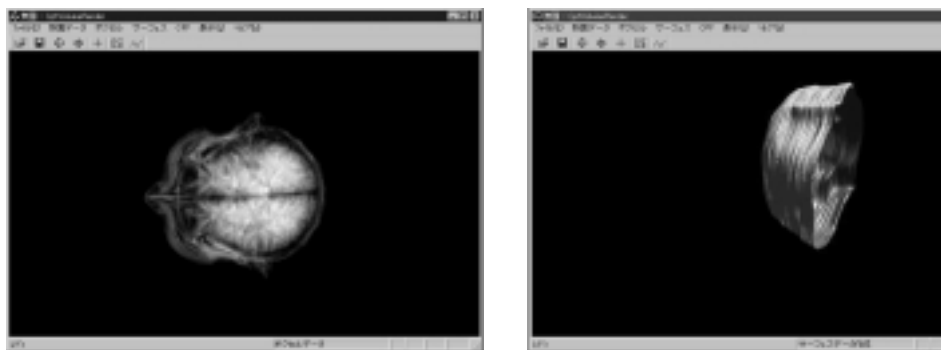


図1：本システムにより三次元物体を(右)ボリュームレンダリング(左)サーフェスレンダリングで再構築した例
(カラー図は巻末資料参照)

参考文献

- [1]Yoshihisa Shinagawa and Toshiyasu L. Kunii.Unconstrained Automatic Image MatchingUsing Multiresolutional Critical-Point Filters. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(9),pp. 994-1010,September 1998.
- [2]Yoshihisa Shinagawa and Toshiyasu L. Kunii.The homotopy model: a generalized model for smooth surface generation from cross sectional data. *The Visual Computer*, 7(2-3):72-86, 1990.