

小児先天性心疾患のリアルタイム 3DCG 可視化

—GPU 搭載の一般的な PC を用いて医師自身が 3DCG を作れる世界へ—

1. 背景

(小児) 先天性心疾患とは、生まれたときから心臓や心臓の周りの血管の形（構造）に異常がある状態の総称であり、日本では約 100 人の赤ちゃんに 1 人、世界でも 1,000 人中 8 人程度で発生する。割合としては 1%前後だが、患者数に換算すると国内だけでも 100 万人以上に上る。約 70 種類前後の細かい病名に分類され (The Society of Thoracic Surgeons Congenital Heart Surgery Database)、それぞれ構造の異常が異なる。このうち 3 種類（心室中隔欠損症、Fallot 四徴症、心房中隔欠損症）が先天性心疾患全体の半数近くを占め、その他の異常は 5%~1%以下でしか発生しない。同じ病名でも一人ひとり異なる心臓であり、無数の差異がある他、複数の先天性心疾患が組み合わさっている場合もあり、個性の強い疾患である。

外科的手術を要することも多く、2008 年から 2012 年の 5 年間に国内で行われた先天性心疾患の手術は 29,087 件に上る (日本心臓血管外科手術データベースより)。子どもの心臓はとても小さく、手術中は視野が限られる上、人工心肺や侵襲性の観点から手術可能な時間数が厳密に決まっていることも多いため、病気の心臓の複雑な立体構造を十分に観察するだけの空間も時間も確保出来ないことが少なくない。多くの制限がある中で手術成績や安全性を高めるためには、手術前に立体構造を可能な限り細かく把握し、十分な手術計画を立案出来ることが極めて重要である。

先天性心疾患の検査や手術に際して、立体構造を少しでも詳しく把握するために、ほぼ全ての病院において造影 CT という医用画像を患者ごとに撮影している。CT とは、X 線を用いて患者の身体の断面を身体の外側から撮影する検査であり、少しずつ位置をずらして生成された何枚もの画像（連続断層画像）から、身体の内部を把握する。造影剤という薬剤を血管（静脈）内に注射した状態で撮る CT を造影 CT と呼び、血液が充満している部分が造影剤によって CT 画像で白く写るようになることで、それ以外の部分との区別が圧倒的につきやすくなる。しかし、連続断層画像のみから立体構造を把握することは容易ではないため、多くの病院では撮影された造影 CT からさらに心臓内腔（血液が充満している空間）を抽出して立体再構成を行っている。

神奈川県立こども医療センターを含む一部の病院ではさらに、心臓内腔 3DCG データの 3D プリンタ出力を試みている。データの外側に強制的に若干の厚みを持たせて内部をくり抜くと、心臓の疑似表面を作ることが出来る。造影 CT から画像処理で心臓表面を正しく抽出することは難しく、疑似表面は実際の心臓表面とは大きく異なるが、医師が見たい情報はあくまでも心臓内腔であるため、実用的には全く問題ない (医師のニーズの本質を見抜くことも本プロジェクトにおいて欠かせない

要件である)。予めデータ上で切断しておけば断面模型を作ることも出来る。但し、3D プリンタ出力後の切断は物理的に困難である。

造影 CT 画像から閾値による領域抽出、及び不要領域の削除を行い、外側に厚みを付けて中空の 3DCG データを作ることは、市販のソフトウェアで可能であるが、3D プリンタ出力と併せて一般的に以下のような問題点がある。

- ① 抽出のための閾値を入力してから 3DCG データが生成されるまでに数秒～10 秒程度の待ち時間がかかり、リアルタイムでの閾値の調整が出来ないため、微妙な調整を行うために 30 分以上かかってしまうことも少なくない
- ② 操作性の問題で、抽出された 3DCG データを画面上で直感的に確認することが難しい
- ③ 心臓においては、特に断面を自由に動かしながら確認したいが、リアルタイムでの操作が出来ない
- ④ 1 回の 3D プリンタ出力に 7～10 時間かかるため、データ生成から確認までの待ち時間を無視できない
- ⑤ 3D プリンタ出力に失敗することも少なくなく、故障時の修理費用が 20 万円近くになることもある
- ⑥ 3D プリンタ出力後のサポート材除去時に若干残る跡が、サポート材由来のものなのか、血管の一部が抽出されたものなのか区別が難しく判断に迷うことがある
- ⑦ 構造の確認のためには断面の生成が必要不可欠だが、(3D プリンタ出力) 模型では一度切断してしまうと、断面の角度を微妙に変えたり、他の断面を作ったりすることは物理的に絶対に出来ない
- ⑧ 心臓内腔の部位 (右心系、左心系など) によって、最も良く抽出出来る閾値が若干異なる場合が多いため、見る場所によってその場で閾値を変化させて立体再構成を行いたい、3D プリンタ出力後に変えることは絶対に出来ない
- ⑨ 模型として出力した場合、模型の保管場所、保管方法や、患者 ID との紐づけの問題が発生する。模型に患者 ID や名前などを書き込んだ場合には、個人情報としての慎重な扱いも必要となる

これらは 3D データを適切に扱うことで、3D プリンタを用いることなく画面内で全て解決出来、GPU など適切な技術を用いることでリアルタイム性もある程度解決することが出来ると考えられる。図 1、図 2 は同じ心臓データを 3D プリンタ出力したものと 3DCG として表示したものである。



図1 3Dプリンタ出力

図2 3DCGによる可視化

コントラストを強めることで現実世界よりも凹凸がわかりやすくなったり、影を意図的に消すことで奥まった部分が暗く潰れてしまうことを防ぐなど、3DCGを適切に用いることで、3DCG以外では実現不可能な可視化を行うことが出来るようになる。

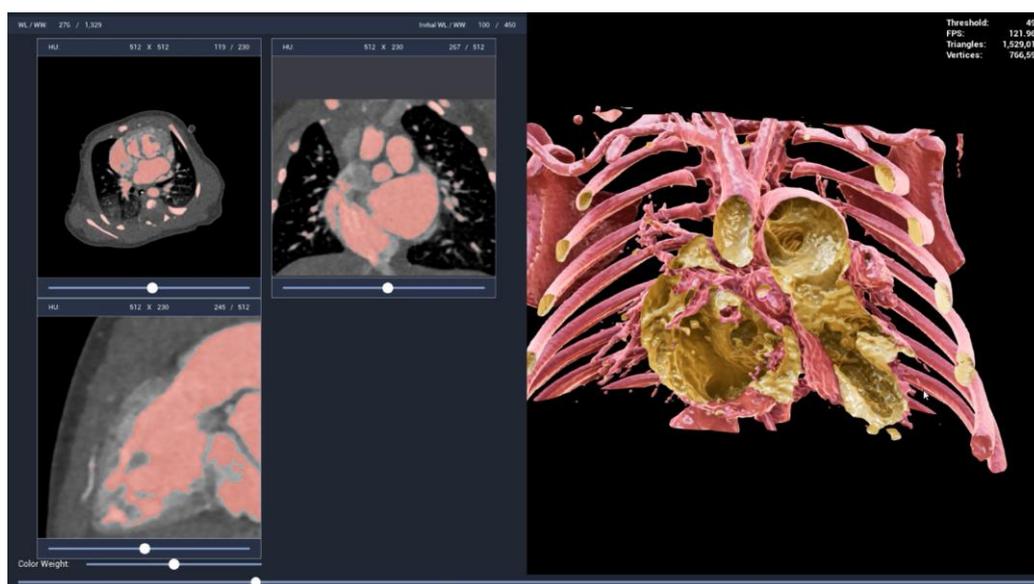
2. 目的

本プロジェクトでは、3DCGならではの強みを最大限に活かすことで、小児先天性心疾患の複雑な立体構造把握を医師自身が簡単に行えるようにすることを最大の目的としている。医師自身が簡単且つ気軽に3DCG心臓を作れるようにするためには、一般的に手に入る性能のPC上で各機能を実現出来るようにする必要があるため、20~30万円前後で購入できるGPU搭載ゲーミングPC上で全ての作業を遅延なく行えるシステムを作ることを目標とした。

3. 製品・サービスの内容

Windows 10をOSとし、GPUとしてNVIDIA GeForceシリーズを搭載しているPC上で動作するソフトウェアを開発した。

DICOM形式の連続CTまたは連続MRI画像を読み込み、画像表示と閾値による表面メッシュ生成とを同時且つ高速に行えるソフトウェアを開発した。表面メッシュは任意の平面にてリアルタイムに断面生成を行える他、表面メッシュ上の任意の2点間の距離の計測や、表面メッシュ上の点と医用画像との位置関係の対応付けも行えるようにした。



本プロジェクトにて開発したソフトウェアのスクリーンショット画像

本ソフトウェアはゲームエンジンである Unreal Engine 4 を用いて開発したことにより、最新のゲームで用いられている高速で美しい 3DCG 表示が可能になった。

また、多くの処理を可能な限り GPU 実装としたことにより、リアルタイムでの表面メッシュ生成及び微調整が出来るようになった。医用画像を 3D Texture として扱うことで、水平断、矢状断、冠状断のいずれも GPU 処理による高速生成や画像補間が可能となったほか、画像の拡大縮小などの操作も極めて高速に行えるようになった。GPU 処理と Unreal Engine 4 との間のデータのやり取りも、CPU メモリを介さずに GPU メモリを直接相互にやり取り出来るような実装を行ったことで、GPU 処理結果を遅延なく美しく 3DCG 表示出来るシステムにすることが出来た。

4. 新規性・優位性

各種処理を可能な限り GPU 上で行うようにした結果、既存のどの医用画像 viewer よりも高速でストレスなく医用画像表示の操作が出来るようになった他、閾値を用いて医用画像からリアルタイムに臓器の 3DCG データを作れるようになった。

臓器の細かい部分を観察したいような場合、特定のある 1 つの閾値で固定するのではなく、閾値を微妙にずらしながら 3DCG データを都度再構築して注目箇所を確認したいというニーズが医療現場では多くあるが、従来の可視化 viewer では 3DCG 可視化の計算負荷が高く、10 秒から 1 分近くの待ち時間を経てようやく 3DCG が表示されたり、回転や拡大縮小などの処理中は非常に粗い解像度での簡易 3DCG しが表示されなかったりと、速度面での使いにくさが課題の 1 つであった。

本ソフトウェアでは多くの場合 0.05~0.1 秒以内に処理が完了し、複雑な 3DCG データでも概ね 0.2 秒以内に生成出来ることから、医師がリアルタイムに閾値を微妙に調整しながら、自分が見たい部分を自由に観察することが出来る。

また、本ソフトウェアはゲームエンジンである Unreal Engine 4 を土台として開発されているため、最新のゲームで用いられているハイクオリティな 3DCG 表示を行うことも可能となっている。

さらに、医用画像から臓器 3DCG データを生成する場合、これまでは専用の高価なワークステーションが必要となることがほとんどであったが、本ソフトウェアは NVIDIA 製 GPU を搭載した 20~30 万円前後の PC であればノート PC でもストレスなく動作するため、医師個人が自分の PC に本ソフトウェアを導入し、自由に立体構造把握や、CT 及び MRI 画像の学習などに用いることが出来るようになった。

本ソフトウェアは、高速且つ美しさ、そして一般に手に入る PC で動作可能という 3 本立てで新規性及び優位性を有している。

5. 事業普及（または活用）の見通し

本ソフトウェアは閲覧専用の簡易版ソフトウェア（プロトタイプ）が既に神奈川県立こども医療センターの 6 症例、及び都立小児総合医療センターの 1 症例に対して試用され、2020 年中に国内外の学会及び論文誌に症例報告がなされる予定である。

小児心臓の複数の医師から高評価を頂いており、今後さらに開発を進めながら実症例を用いたフィードバックを頂き、正式な製品化を行う予定である。

6. 期待される波及効果

本ソフトウェアは小児先天性心疾患への活用を目的としているが、医用画像からの抽出が比較的容易な骨を扱う領域への応用は行いやすい。顔面骨の骨切り術を行う小児形成外科や、交通外傷を扱う救急医学分野の医師からの関心もある。

また、比較的大きな血管であれば、造影 CT を用いることによって血管を抽出しやすいことから、血管外科や心臓外科の一部での活用も期待される。

医用画像からの臓器抽出は一般的に難易度が高いために、現状では活用分野が限定されてしまうが、昨今の発展が著しい機械学習を用いた画像認識技術と組み合わせることであらゆる臓器について本ソフトウェアを用いてリアルタイムに 3DCG 可視化を行える可能性がある他、リアルタイムでの 3DCG 可視化という特徴を活かし、可視化によって得られる知見（一部が不正確に抽出されている、抽出が不足している、など）を画面上で書き込んだり、3 次元的な塗り絵などを行って機械学習の結果に人間が手を加えたものを機械学習に取り入れるなど、人間とコンピュータとの間を繋ぐツールとしての活用も期待される。

CT は医療のみでなく工業分野でも用いられているため、領域抽出が可能な分野であれば、工業分野での活用も期待される。

7. イノベータ名（所属）

瀬尾 拓史（株式会社サイアメント 代表取締役社長）