

ワークステーションの最新技術 ～心臓 CT を中心に～

富士フイルムメディカル株式会社 IT ソリューション事業本部

事業推進部 3D 営業技術グループ

小林 良一

斎藤 志帆

長谷川 由香

川口 裕之

● はじめに

2007年7月に富士フイルム株式会社から Volume Analyzer SYNAPSE VINCENT(以下、VINCENT)の販売を開始しました。販売開始当初は放射線科、循環器内科、消化器外科領域を主とした解析アプリケーションの開発、販売をおこなってきましたが、販売時から現在に至るまでに、胸腔鏡下手術(以下、VATS)に代表される低侵襲治療の発達、前立腺がんの全摘出手術といった特定の条件下に対する医療用ロボットを利用した手術手技に保険収載が認められるなど、医療業界における動向の変化や、VINCENTの導入台数の増加により、お客様からのVINCENTに対する要望も多岐に渡るようになりました。

このような背景から、最新のバージョンまでに上記領域以外にも呼吸器外科、呼吸器内科、脳神経外科、泌尿器科領域などで有用なアプリケーションを開発、販売しています。

本稿でははじめに、各解析アプリケーションに搭載しているVINCENTの核となる画像処理技術の紹介をおこない、続けて、販売開始当初から多くの御施設の診療放射線技師が処理することが多い循環器領域アプリケーション、および最新技術を紹介します。

● 画像処理技術「Image Intelligence」

Computed Tomography(以下、CT)、Magnetic Resonance Imaging(以下、MRI)などを画像処理する場合、作成者(診療放射線技師)は第三者(読影医師、外科医師)が各症例に対する病変部を視認しやすいように、画像処理ワークステーション上で部位毎の解析アプリケーション、様々な編集ツールを利用して処理することが多いかとおもいます。

日常の臨床現場では診療放射線技師が術前シミュレーション用に動脈、門脈、静脈、病変部を各々分離し病変部と血管構造の位置関係を把握できる画像、冠動脈領域では狭窄部の評価用として、右冠動脈、左冠動脈を各々抽出し、Curved Planar Reformation(以下、CPR)画像の作成をおこなっています。

画像処理をする上で重要なポイントとして、領域の分割(セグメンテーション)が挙げられますが、処理する部位、モダリティ、造影剤投与の有無、患者様の状態などは、セグメンテーションの結果の良不良、処理時間に大きく影響します。

通常、診療放射線技師はCT、MRI撮影と並行して、限られた時間内で医師などから依頼された画像処理をおこないます。また救急指定病院では、通常画像処理をおこなう機会が少ない医療従事者が通常診療時間外で画像処理をおこなうこともあります。

我々は、1. 画像処理に要する時間の短縮、2. 安定した抽出結果の提供、により診療放射線技師、および患者様に寄与できるのではないかと考えました。この2つの課題を解決するため、富士フイル

ムのデジタルカメラの顔認識技術に利用されている技術である「Image Intelligence」を用いた高速、高精度な画像処理アルゴリズムを開発しました。

一般的にセグメンテーションをするためには、領域間で異なる濃度(画素値)分布を呈する画像から、領域間の境界を設定し、抽出、非抽出領域を分離する必要があります。CT 画像の冠動脈においては、造影剤、石灰化、ソフトプラーク領域などが存在し、かつソフトプラーク領域とその周辺にある脂肪、筋肉領域の間には画素値に対する差が少ないことがあります。このような濃度分布を有する領域に対して、画素の閾値処理のみのセグメンテーションでは、画像ノイズ、画素値のコントラスト、設定した閾値のバラつきなどで抽出結果が一意に定まらないことがあります。このような不確定要素が抽出結果に極力影響しないように、臓器の濃淡モデル、形状モデル等を事前学習し、自動抽出対象の画像に対して当てはめることで、様々な濃度分布を呈する画像に対し、短時間、かつ安定した抽出結果を提供できるようになりました。

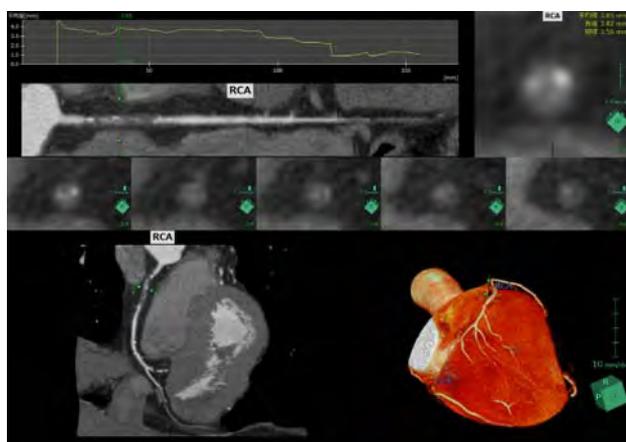


図1 RCA#3 Subtotal Stenosis 症例

このような高速、高精度な画像処理アルゴリズムを循環器領域をはじめとする様々な解析アプリケーションに組み込んでいます。これから、製品販売当初から診療放射線技師に利用されている循環器アプリケーション、その他の解析アプリケーションの紹介をおこないます。

● 循環器アプリケーションの紹介

CT 撮影について施設基準に適合している保険医療機関において、冠動脈の CT 撮影をおこなった場合、所定点数に冠動脈 CT 撮影加算を保険収載できるようになり数年が経過しました。多くの施設で多列検出器 CT 装置を利用して心臓 CT 撮影をおこない、冠動脈、心機能を評価する機会が増えています。

VINCENT を導入している御施設では主に以下の解析アプリケーションを利用しています。

- ・ 冠動脈解析 (CT)
- ・ 心機能解析 (CT)
- ・ 心臓フュージョン

この章では上記解析アプリケーションの紹介をおこないます。

・ 冠動脈解析 (CT)、心臓フュージョン

心電図同期下で撮影した心臓 CT 画像から自動的に心臓領域、右冠動脈、左前下行枝、左回旋枝を含む冠動脈を抽出します。様々な濃度分布を呈する画像に対して安定した抽出結果を提供することができるため、手動修正に要する処理時間の短縮に寄与できると考えています。

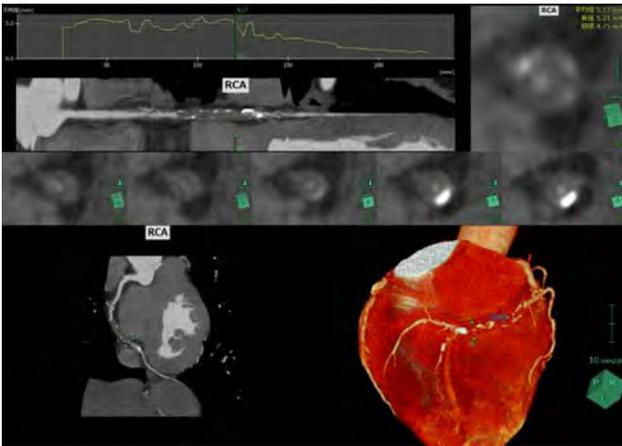


図2 冠動脈解析 (CT) の[標準観察]ステージ

また、心臓 CT 画像と同一患者様の心筋 SPECT 画像とのフュージョン画像の生成も簡便におこなえます。冠動脈解析 (CT) で心臓、冠動脈を抽出後、心臓フュージョンを起動することにより、簡易的に CT と心筋 SPECT 画像を位置あわせたフュージョン画像を表示します。

形態情報の観察に適している CT 画像と心機能を観察する SPECT 画像の両画像の長所を合成した画像を表示でき、全体像の把握をおこなえる 3D 表示や、血管毎のフュージョンをおこなうストレート CPR、ストレッチ CPR 表示に対応しています。

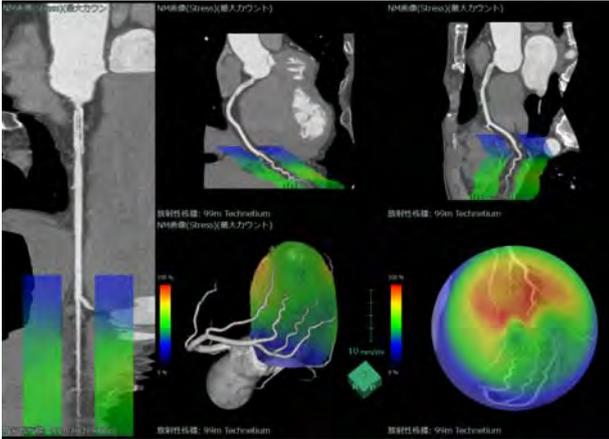


図3 心臓フュージョンの[CPR 観察]ステージ

- 心機能解析 (CT)

心電図同期下で、かつレトロスペクティブ撮影法を用いると1心拍内の複数の心位相を持つデータを再構成できます。心機能解析 (CT) ではそれらの画像から心室、心筋を自動的に抽出し、各心位相の体積の算出、最大拡張末期、最大収縮末期を自動的に検出して、駆出率の算出をおこないます。以前のバージョンでは心機能解析 (CT) の心室、心筋境界の抽出精度が低かったのですが、最新バージョンでは画像処理技術「Image Intelligence」の搭載により、造影効果、画像ノイズの影響を受けず、安定した結果を提供できるようになりました。

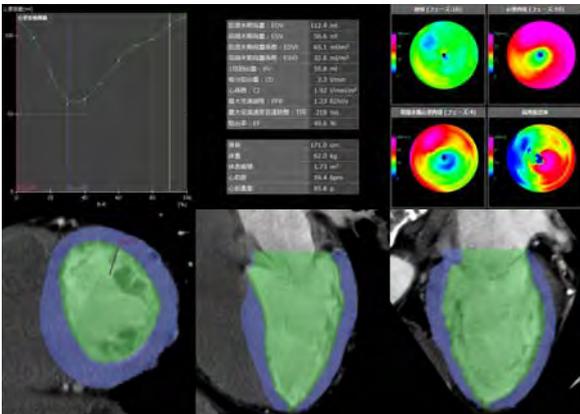


図4 心機能解析 (CT) の解析結果画面。乳頭筋を含めた心室の輪郭抽出を精度良く抽出

● 最新技術の紹介

この章以降は、心臓 CT 以外で解析アプリケーションの紹介を診療科別におこないます。

○ 診療放射線技師領域における最新技術

多くの御施設では画像解剖学、撮影技術、情報技術分野などに知見がある診療放射線技師が様々な診療科から画像処理を依頼されることが多いとおもいます。このような背景をもとに VINCENT の最新バージョンでは、診療放射線技師に対して画像処理における負担軽減に寄与できると考える機能を搭載しました。この章では処理件数の多い MRI の冠動脈、大血管、整形領域に対して有用な機能を紹介します。

・ 冠動脈解析 (MR)

冠動脈疾患を有する患者様が、腎機能の低下、および様々な理由により造影剤を用いた冠動脈 CT 検査をおこなえないことがあります。その場合、冠動脈の形態を観察するために Whole Heart Coronary MRA を撮像し、診療放射線技師が画像処理することがありますが、VINCENT の以前のバージョンでは心臓領域、冠動脈の抽出の自動抽出精度が低く、VINCENT 導入施設ではあまり利用されていなかったのが現状でした。

様々な御施設から頂いた画像を利用し、最新のバージョンでは画像認識技術「Image Intelligence」を利用した心臓領域、冠動脈の抽出の自動抽出に対応しました。(図 5)

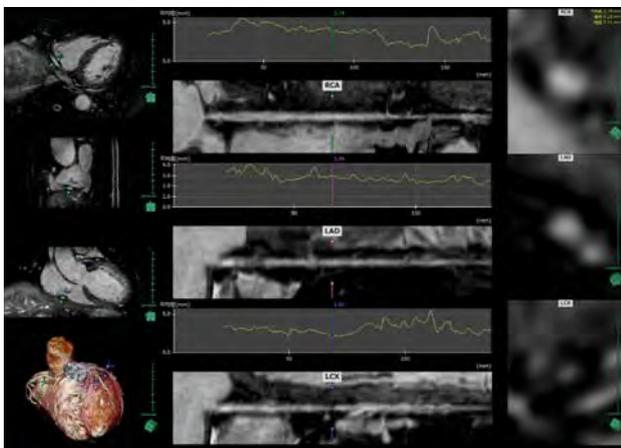


図 5 冠動脈解析 (MR) で処理した結果の画像例

また、撮影範囲が体軸方向に広範囲な大血管の 3D 表示を画像サーバー上で解像度を落とさずに観察できるようにするため、体軸方向に対して分割して保存する、という作業をおこなうことがあります。

前バージョンでは分割と画像保存操作を手動で交互に繰り返し実施する必要がありましたが、最新バージョンでは、分割、画像保存操作などの操作履歴を登録する、というマクロ機能 (図 6) を 3D ビューアに搭載しました。登録された操作履歴はリストで管理されており、別検査を 3D ビューアで起動後、該当のリスト (例えば、骨盤 大腿 膝部分割保存というマクロ名を登録) を選択することで、自動的に分割、画像保存をおこなうことができます。

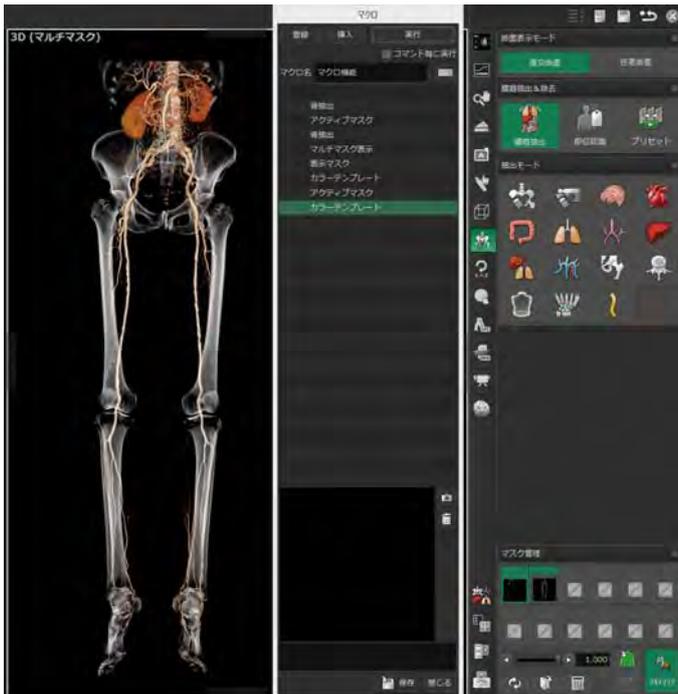


図6 マクロ作成時の操作画面

- ・ 整形領域

骨折、亀裂骨折が関節面に到達している（関節内骨折）場合、関節面がずれた状態で自然融合すると、関節の変形、不安定性、軟骨表面の損傷などによる後遺症が残ることがあるため、2D、3D表示で、関節面における骨折線の確認は整復手術の要不要を判断する上で重要になります。

従来の方法では、骨折周囲の骨を抽出、削除するために、不透明度の調整をおこない、必要、不必要な領域を分離した状態で領域拡張法などの画像処理アルゴリズムを利用して抽出作業をおこなっていましたが、骨粗しょう症が顕著、単純骨折により骨片が分離している症例などでは、画像処理時間が延長することがあります。

VINCENT では標準機能に搭載している骨分離機能を利用することで、画質や疾患の状態に影響せず、簡便に3D表示を作成できる骨分離（図7）を追加しました。

膝関節の高原骨折、手関節の舟状骨骨折など、骨領域が密接している関節部に対する画像処理には特に有用な機能になります。

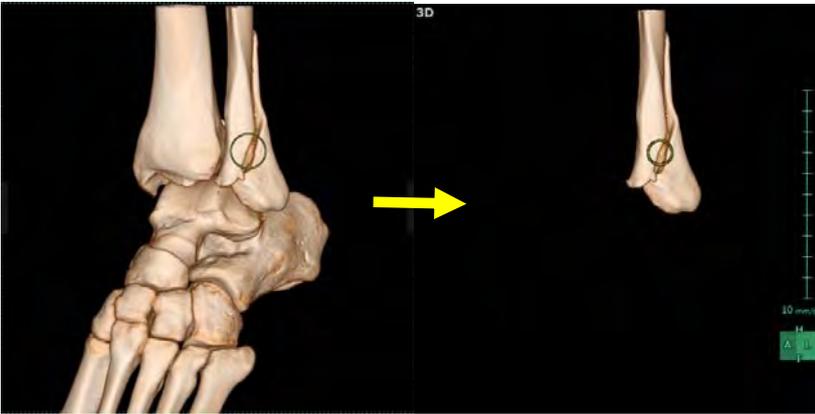


図7 骨折症例における骨分離の抽出結果

また、肋骨骨折疑いの患者様に対して、肋骨の一覧を一画面で表示できるようになりました。[パノラマ CPR]ステージでは観察したい箇所に沿った制御点を指定することでパノラマビューを容易に作成できます。（図8）

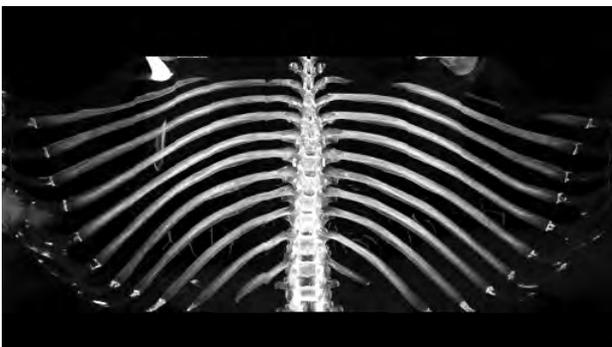


図8 [パノラマ CPR]ステージ

○ 頭頸部領域における最新技術

近年、MRI の撮像方法のひとつである Diffusion Weighted Imaging (以下 DWI) を利用した Diffusion Tensor Imaging (以下 DTI) の発展により、従来視認が困難であった脳の白質線維の可視化が可能になりました。そして、この DTI 画像をもとに描出される神経線維束画像 (トラクトグラフィ) が臨床導入され、脳神経外科・神経内科領域において幅広く利用されています。

最近、トラクトグラフィの結果と CT 画像、MRI の他シーケンスで撮像した画像との合成画像を病変周囲の神経走行を確認する目的で利用することがあります。

トラクトグラフィの作成は MRI 装置本体、汎用パソコンにインストールできるフリーのソフトウェアでおこなうことができますが、撮影業務と並行して画像処理する時間がない、また、フリーソフトの操作性の面で容易にトラクトグラフィを作成できない現状があると思います。

そのような課題を解決するべく、VINCENT では tractography を容易に作成できる開頭シミュレータ/テンソル解析をリリースしました。

弊社の商品構成の一つであるサーバー・クライアント型を導入することで、診療放射線技師がトラクトグラフィ、CT 画像、T1 強調画像などから手術に必要な臓器の抽出をおこない、それらを合成した画像を医師が医局、病棟、手術室など必要な場所で簡便に観察できる環境を提供できます。

この章では「開頭シミュレータ/テンソル解析」の各機能を紹介します。

・トラクトグラフィー

トラクトグラフィーは、複数の DWI 画像から得られた DTI 画像から FA 値、及び異方性拡散の方向を計算し神経線維を描出します（図9）。

VINCENT の最新バージョンでは、ROI または VOI を設定するとリアルタイムにトラクトグラフィーを描出できる機能を搭載しました。このことにより、視放線等の限局的な神経線維の描出がおこないやすいようになりました（図10）。

さらにトラクトグラフィーの結果を参照画像に埋め込んでDICOM画像保存できるトラクトグラフィー画像保存機能を追加しました。この画像を手術ナビゲーション装置などに取り込み、トラクトグラフィーの結果を3D構築することにより、さらに安全な手術に寄与できると考えております（図11）。

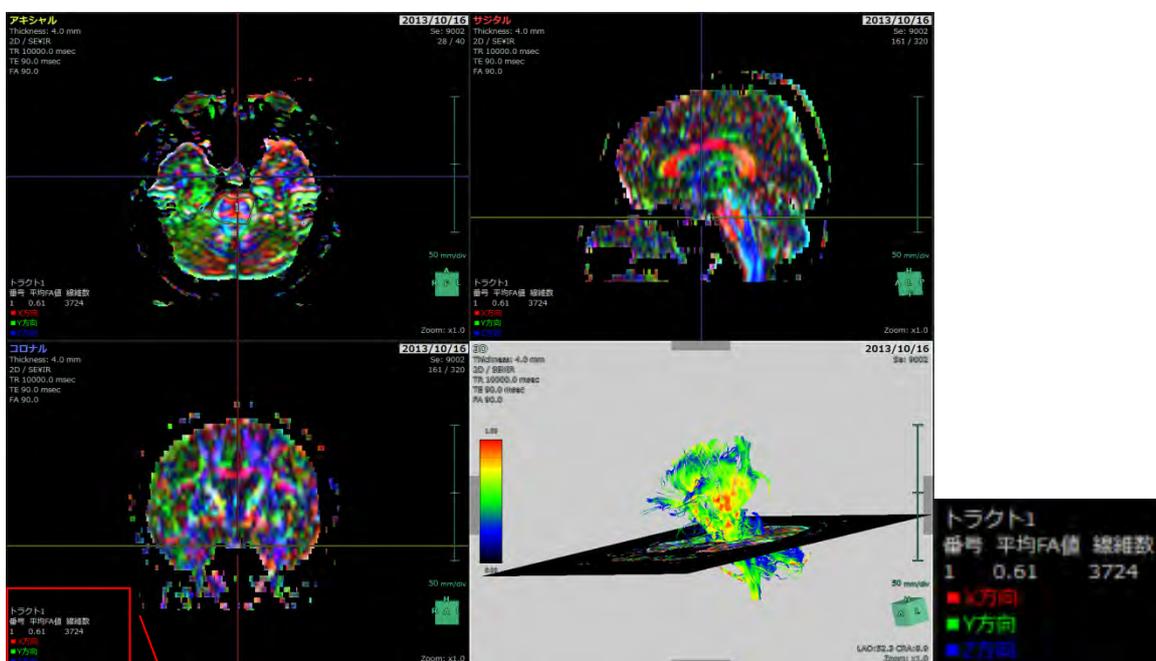


図9 [トラクトグラフィー]ステージの操作画面

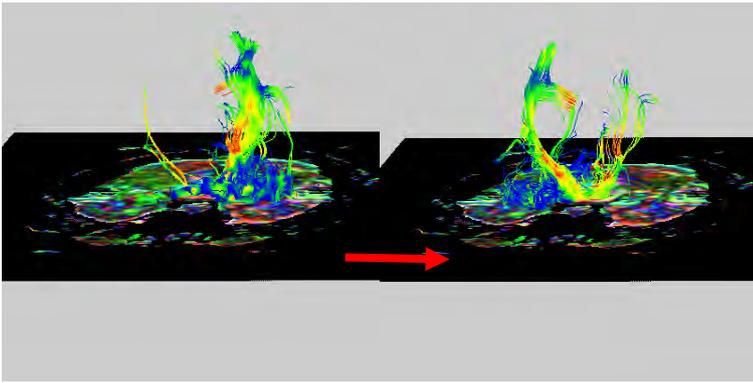


図 1 0 リアルタイムに神経線維を描出した画像例

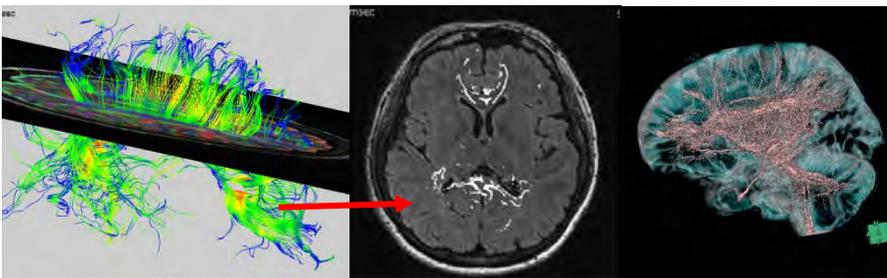


図 1 1 トラクトグラフィー画像保存

・シミュレーション

現在、脳神経外科領域において、トラクトグラフィーはもちろんのこと、CT・MRI 画像から抽出した各臓器との合成画像は術前シミュレーションとして必要不可欠なものになりつつありますが、それらの 3D 画像の構築に莫大な時間を要しているのが現状です。

開頭シミュレータ/テンソル解析の臓器抽出ステージでは、それらの課題を解決するべく、皮膚・骨・脳表・血管等の抽出に、前述した画像認識技術「Image Intelligence」を利用しています。

脳表は CT 画像、MRI の T1 強調画像に対して、富士フィルム独自の画像認識技術による自動抽出に対応しています。MRI 画像を用いることで MRI 画像の特性である低コントラスト分解能を生かし、脳溝を高精細に表現できることで、より手術シミュレーションに有用な画像作成がおこなえます。

各臓器をセグメンテーションした後、これらを合成した画像を用いて皮膚切開・骨削除・病変へのアプローチ等、実際の開頭手術に即したシミュレーションをおこなうことができます。(図 1 2)

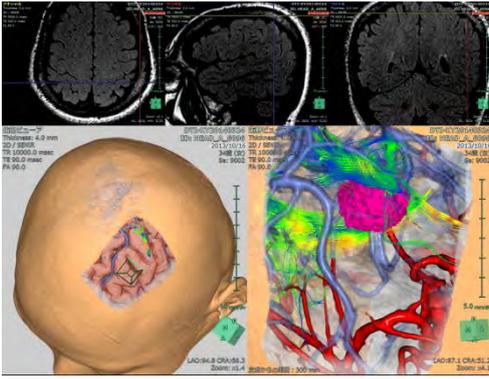


図 1 2 骨削除後、俯瞰ビューアで全体像を把握しながら、術野ビューアで脳表を掘り進める距離を設定し、血管・神経線維・病変の位置関係を確認（グリオーマ症例）

○呼吸器領域における最新技術の紹介

呼吸器領域の解析機能として、肺がんの術前画像を簡便に作成する肺切除解析、容易に仮想気管支鏡画像を作成する気管支鏡シミュレータ、COPDなどの診断に有用な情報を提供する肺解析などの解析アプリケーションをリリースしています。

この章では、その中から VINCENT を導入していただいている御施設の中で特に診療放射線技師が利用する頻度の高い肺切除解析、気管支鏡シミュレータに関する最新技術を紹介いたします。

・ 肺切除解析

画像処理においては、気管支、肺動脈、肺静脈を色分けした術前画像を作成することは容易ではなく、診療放射線技師の先生方にかかる負荷が多い作業でした。また、撮影、造影技術においては、各々を簡便に分離する目的で肺動脈相、肺静脈相を分けて撮影するなど、被ばく線量の問題、撮影、造影方法の検討なども様々な学会などで発表、議論されてきました。

これらの課題を解決すべく、画像認識技術「Image Intelligence」を肺切除解析に搭載しました。肺動脈、肺静脈が造影されている1シリーズの画像から肺野、肺葉、気管支、肺動脈、肺静脈の自動抽出をおこないます。1相のみの画像から必要な各臓器を抽出することが出来るため呼吸による各臓器のずれは生じず、患者様の被ばくの低減にも貢献できると考えます。

各臓器を抽出した後、これらを合成した手術シミュレーション画像を作成することが可能です。(図13) VINCENT の標準機能の一つである作業状態の保存を併用することで、開頭シミュレータ/テンソル解析と同様に臓器の抽出、編集を診療放射線技師がおこない、その後、手術シミュレーションは執刀医がおこなうなど、院内で作業を分担することも可能となっています。また、腫瘍からシミュレーション画像上で作成した離断面までの最短距離や、VATS のポート位置の同定のため骨性胸郭の情報も表示することが可能です。(図14)

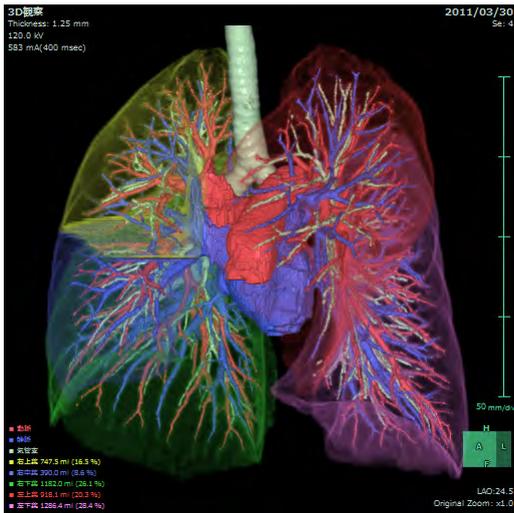


図 1 3 各臓器を合成した手術シミュレーション画像の全体画像例

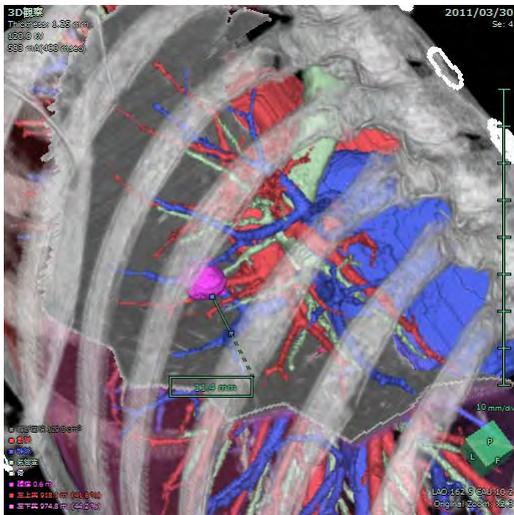


図 1 4 手術シミュレーションの詳細画像例

※ 肺動脈、肺静脈ともに 200HU 以上の CT 値であれば分離可能です。

- ・ 気管支鏡シミュレータ

気管支の解剖学的構造が複雑であるため気管支鏡検査の前に、CT 画像から仮想気管支鏡画像を作成することが一般的になりました。VINCENT では画像認識技術に基づいた高精度な気管支抽出、また、腫瘍へ到達する最短経路の自動検出機能を搭載した気管支鏡シミュレータで非常に簡便に、且つ、高精度なナビゲーションをおこなえます。(図 1 5)。

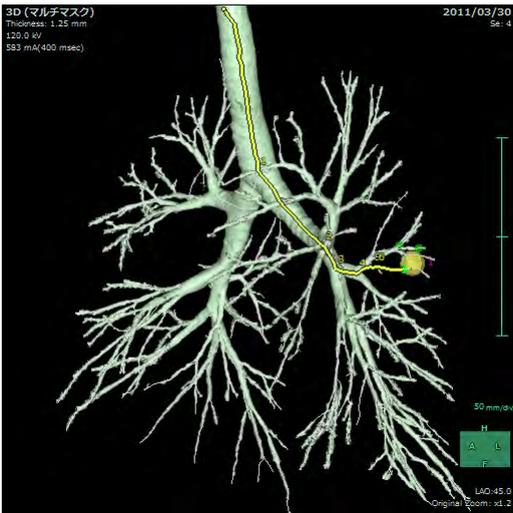


図 1 5 気道の開始点から腫瘍までの最短経路検出後の画像例

また、気管支壁は末梢へ向かうほど薄くなるため、従来のボリュームレンダリングにおける単一の閾値設定では、末梢付近における気管支壁が描画されないため手動での閾値調整が必要でしたが、気管支鏡シミュレータでは気管支壁厚に対応したカラーテンプレート自動調整機能を有しており、気道から末梢の気管支まで気管支壁が描画されるため、手動の閾値調整をおこなうことなく、簡便に仮想気管支鏡画像を作成できます。(図 1 6)。また、造影 CT 画像を用いることにより仮想内視鏡画像に肺動脈、肺静脈を合成する画像を作成できるようになりました (図 1 7)。経路に沿った DICOM 画像の作成機能も有しているので、臨床に役立つ画像を短時間で作成することが可能です。

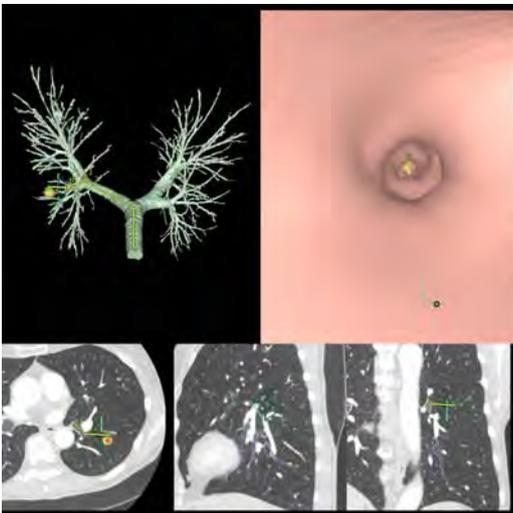


図 1 6 カラーテンプレート自動調整機能を利用した末梢気管支壁の画像表示例

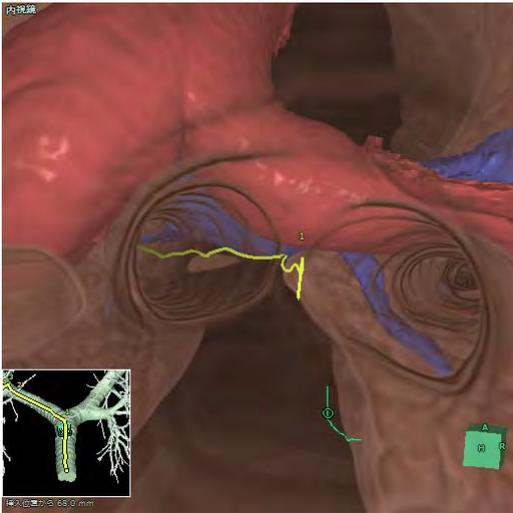


図 1 7 仮想気管支鏡画像と肺血管の合成画像例

○ 泌尿器領域における最新技術

現在、腎部分切除術は TNM 分類における T1a の小径腎癌に対する標準的治療として位置付けられています。例えばロボット支援下腎部分切除術は開腹術、腹腔鏡下手術などに比べ、きめ細かい手術が可能であると言われていますが、きめ細かい手術には綿密な術前シミュレーションが必要になると考え、腎臓解析アプリケーションをリリースしました。この章では腎臓解析の各機能について紹介します。

・各臓器の抽出(セグメンテーション)

造影 CT 画像から作成するボリュームレンダリング画像は全体の立体構造把握に有用ですが、各臓器間の画素値のコントラスト差の少ない泌尿器領域の造影 CT 画像では、画素値の閾値処理における手動によるセグメンテーションは作成時間の延長につながります。腎臓解析では前述した画像認識技術「Image Intelligence」を利用して腎臓、腎動脈など、腎部分切除に必要な各臓器を自動、半自動で短時間、高精度にセグメンテーションをおこないます。(図 1 8)

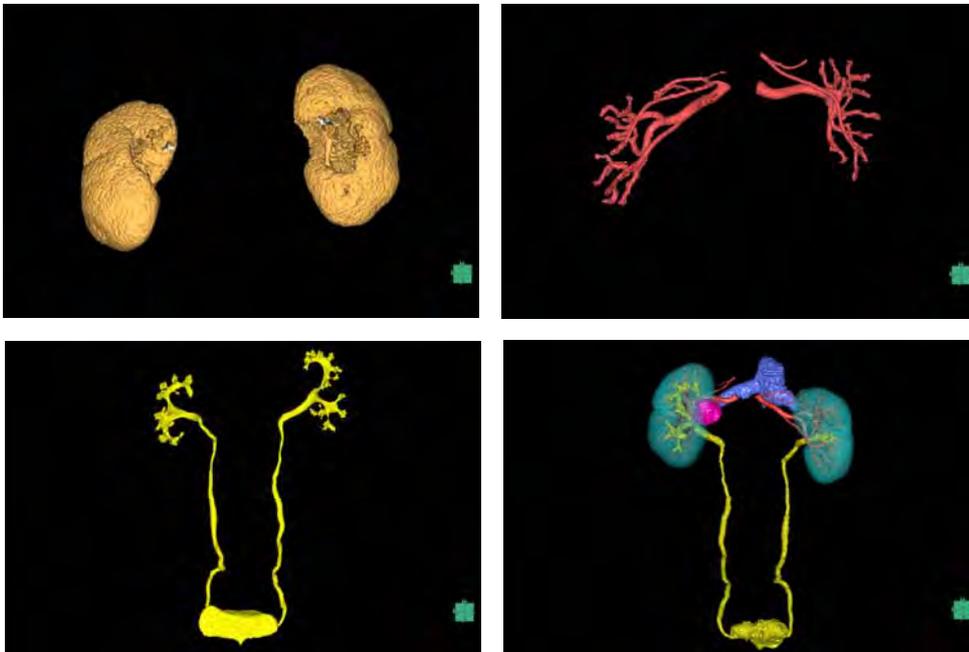


図 1 8 左上：腎臓 右上：腎動脈 左下：尿管、膀胱 右下：各臓器を合成した画像例

・部分切除シミュレーション

部分切除シミュレーションでは、実際に2D、3D表示上で部分切除領域を作成します。作成方法は任意の境界線の作成、腫瘍に対するマージンを指定したくりぬき領域の作成、動脈の支配領域の算出など手技ごとにシミュレーションの方法を選ぶことができます。

くりぬき領域の作成は抽出領域が比較的太い動脈や尿管に接しているかどうかの判別に利用し、動脈の支配領域は、選択的腎動脈クランプ時の血流支配領域の判断に利用する目的で開発しました。(図19)

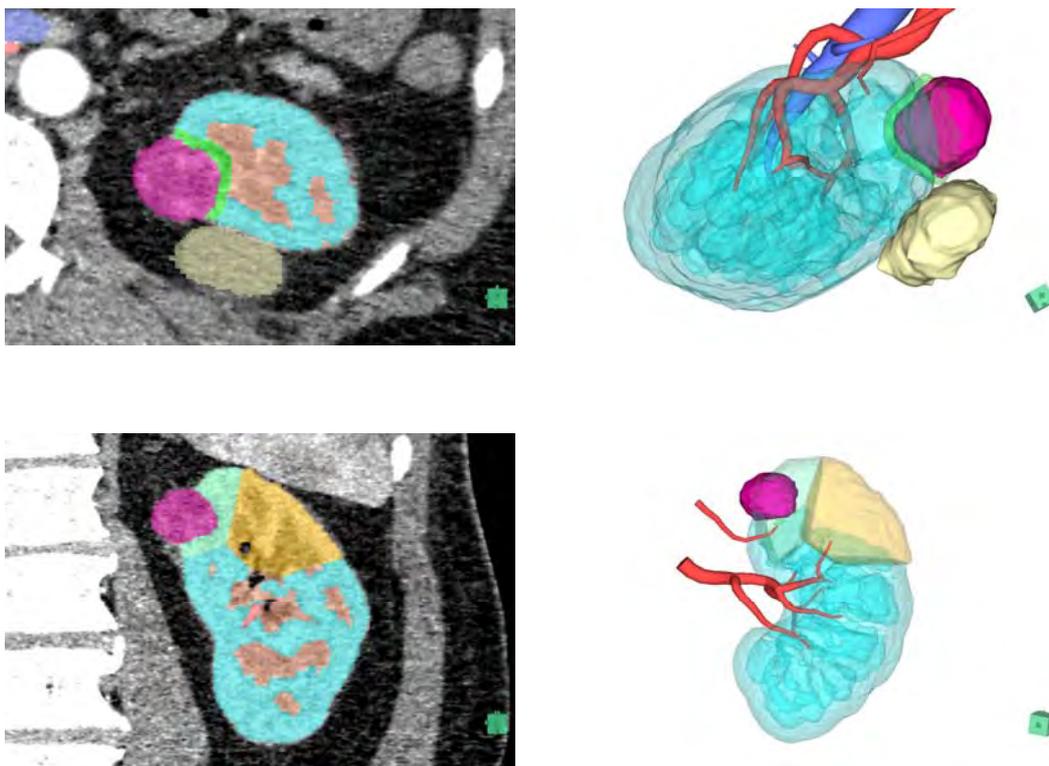


図19 左上 右上：マージンを指定したくりぬき領域の2D表示、3D表示
左下 右下：腎動脈の血流支配領域の2D、3D表示

・シミュレーションに適した表示方法

シミュレーションで利用する画像はボリュームレンダリング、サーフェス表示のいずれかを選択できます。サーフェス表示は表面を強調し、かつなめらかに表示するため、各臓器の前後関係を明瞭に表示できます。また領域内の血管を色分け表示する領域マップ表示が可能です。(図20)

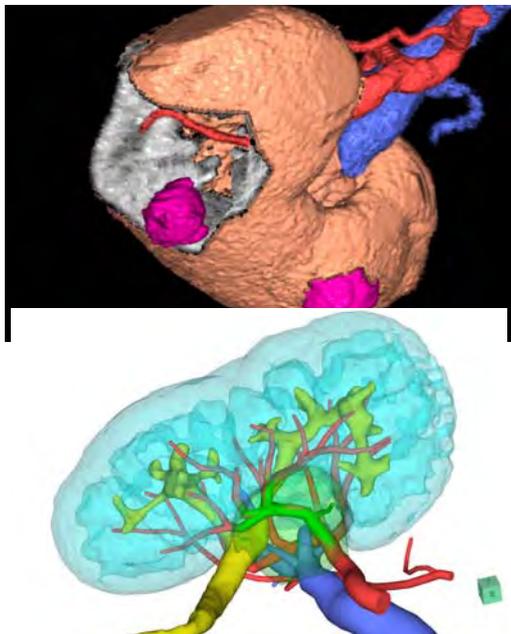


図20

左上：ボリュームレンダリング表示

右上：サーフェス表示

左下：領域マップ表示

・鏡視下シミュレータへのリンク

別機能である鏡視下シミュレータを追加で起動することで、腎臓解析で抽出した各臓器のセグメンテーション結果をそのまま利用し、鏡視下手術用のポートプランニングをおこなえます。(図21)

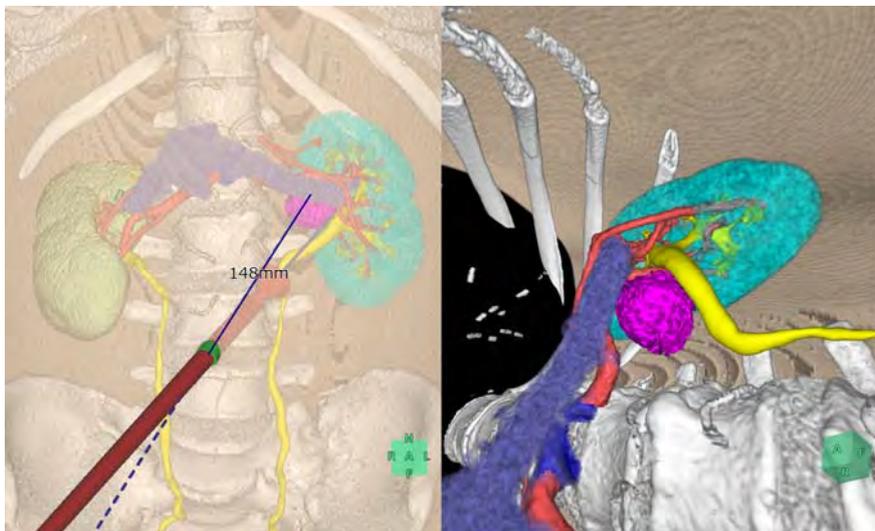


図21 鏡視下手術用のポートプランニング画像例