

Virtual Endoscopy

○森健策

名古屋大学大学院工学研究科

Virtual Endoscopy

Kensaku Mori

Graduate School of Engineering, Nagoya University

1. はじめに

仮想化内視鏡システム (Virtualized Endoscope System: VES)[1-6] は 3次元医用画像の新しい観察法の一つとして幅広く利用されるようになった。VES は 3次元医用画像に基づきあたかも実際の内視鏡で観察しているかのような画像を生成するシステムであり、実際の内視鏡と比較し、(1)患者に苦痛を与えない観察が可能、(2)時間的・場所的制約がない、(3)特徴量計測が可能、といった数多くの利点を持つ。また、3次元医用画像を用いた診断のみならず、インフォームドコンセント、手術計画立案、教育応用、検査・手術ナビゲーションなど種々の目的に利用可能である。

医用画像のコンピュータ診断支援 (Computer Aided Diagnosis; CAD) システムを考えた場合、次の2つのタイプのシステム、(a)異常と思われる部位をマーキングし医師に提示するシステム (検出型 CAD)、(b)イメージング装置により撮影された医用画像をわかりやすく医師に提示することで診断を支援するタイプのシステム (表示型 CAD)、が存在する。VES が開発された当初は後者のタイプのシステムであったが、最近では大腸ポリープ検出といった機能[7]などと組み合わせることで、(a)(b)両者を含む高度な CAD システム (統合型 CAD) へと発展している。また新しい試みとして実内視鏡と VES の融合も検討されており、CAD システムとしての新しい利用法が期待されている[8-10]。本稿では VES の構成について簡単に述べ、最近の VES に関する研究動向から今後の展望を探る。

2. VES の基本構成

VES は基本的に、(1)前処理部、(2)描画部、(3)ユーザインタフェース部の3つから構成され、これに加えて、特徴量計測機能、自動ナビゲーション機能などといった付加機能が用意される。

(1) 前処理部

原画像を読み込み、対象となる臓器のセグメンテーション

を行う。得られた領域に Marching Cubes 法を適用することで臓器形状を表す三角形パッチ群を得る。次の描画部で用いるレンダリング法がボリュームレンダリング法の場合、原画像の濃度値に対応する色と不透明度を定めればよく (この作業がセグメンテーションに相当する)、明示的に臓器領域を取り出す必要はない。

(2) 描画部

仮想化内視鏡像 (VE 像) を生成する部分である。通常、サーフェスレンダリング法とボリュームレンダリング法 [12,13] の2つが用いられる。いずれの場合でも臓器内部に視点位置を設定し、透視投影、スポットライト光源を用いる。サーフェスレンダリング法を用いる場合、前処理部で得られた三角形パッチ群をグラフィックシステムに送信することで VE 像が得られる。ボリュームレンダリングの場合は、原画像の濃度値に対応する色・不透明度テーブルを基に入力画像から直接的に VE 像を生成する。これらの描画はユーザの操作に応じて直ちに実行される。

(3) ユーザインタフェース部

臓器内部を自由に探索するための仕組みが用意される。ユーザはマウスを操作することで、任意方向への連続的な前進・後退、視線方向を軸としたひねり、仮想内視鏡挿入経路にそった後進が可能である。

(4) その他機能

特徴量計測機能 VE 像上での長さ、壁面に沿った長さ、角度、体積、表面積といった特徴量の計測機能が用意されている。

自動ナビゲーション機能 臓器の芯線を自動抽出しそれに沿った自動ナビゲーションを行う。

気管支枝名自動表示機能 対象とする領域が気管支である場合、VE 像上に気管支各枝の枝名を表示可能である。

教育応用機能 気管支枝名に関するクイズを自動的に提示する。

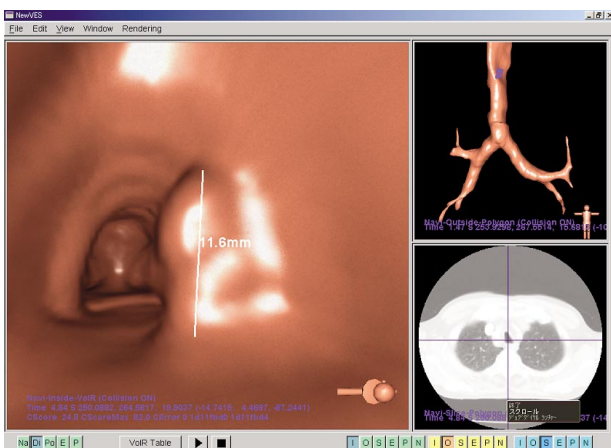


図1 VES の画面例と特徴量計測機能の実行例。左:仮想化内視鏡像と気管腫瘍径計測例。右上:外形像、右下:スライス像、

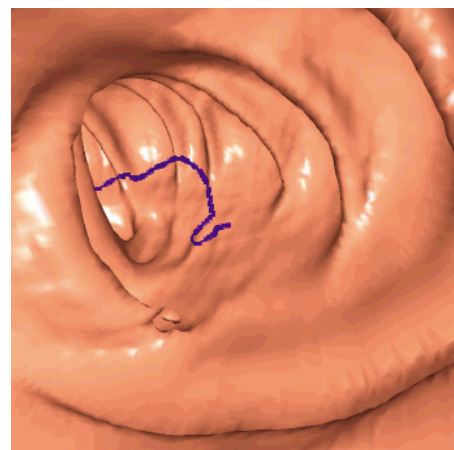


図2 大腸芯線に沿った自動ナビゲーション例。図中黒線が自動フライスルー経路を示す。

3. VES の応用例

(1) 実内視鏡検査

仮想化内視鏡システムの応用の一つとして最近注目されているものの一つに、実際の内視鏡検査を VES によりナビゲーションするシステムの開発が挙げられる。代表的な研究としては、文献[8] [9] [10]などがある。このシステムの基本的なコンセプトは、実際の内視鏡による観察中、現在の観察位置、腫瘍存在位置までの誘導、壁面下の存在する重要臓器、などを検査医師に対して提示することである。実内視鏡を用いた検査時には、医師は対象とする臓器の壁面のみしか観察することができず、腫瘍の大きさ計測なども不可能である。また、現在の厳密な観察位置を知ることも難しい。一方 VES では、これらの情報を容易に取得可能である。実内視鏡検査中に VES を利用することができるのであれば、実内視鏡検査をより効果的に行うことが可能となる。このようなシステムを構築するには、(a) 現在の実内視鏡位置の取得、(b) 検査支援情報の提示、の 2 つの基本機能が必要となる。そこで筆者の研究グループでは、前者の問題に対して Image-based registration 手法を、後者には Augmented Reality 技術を利用することで解決を計っている。

気管支鏡のような先端径の細い内視鏡の場合、場所的制約からその先端に位置センサを取り付けることは難しい。また、内視鏡自体自由に曲げることができるため、内視鏡外部に装着した位置センサから内視鏡先端位置の測定を行うことも困難である。そこで、VES の視点位置・方向パラメータを様々に変化させ、現時点における実内視鏡画像に最も類似する VE 像を求め、その時の VES の視点位置・視線方向を実内視鏡の現在の観察位置・観察方向とみなす。これを実内視鏡ビデオ画像全フレームに対して実行することで内視鏡先端位置をトラッキングすることが可能となる。実内視鏡ビデオ画像に対して観察位置推定処理を行った結果の一例を図 3 に示す。

検査情報の提示方法としては、内視鏡先端位置推定結果を基に VES で得られる情報を実内視鏡画像上にマッピングすることで、穿針危険領域の提示、現在観察を行っている部位の解剖学的名称の表示、CT 画像上での観察位置マーキングなどが試みられている。

(2) 大腸ポリープ CAD

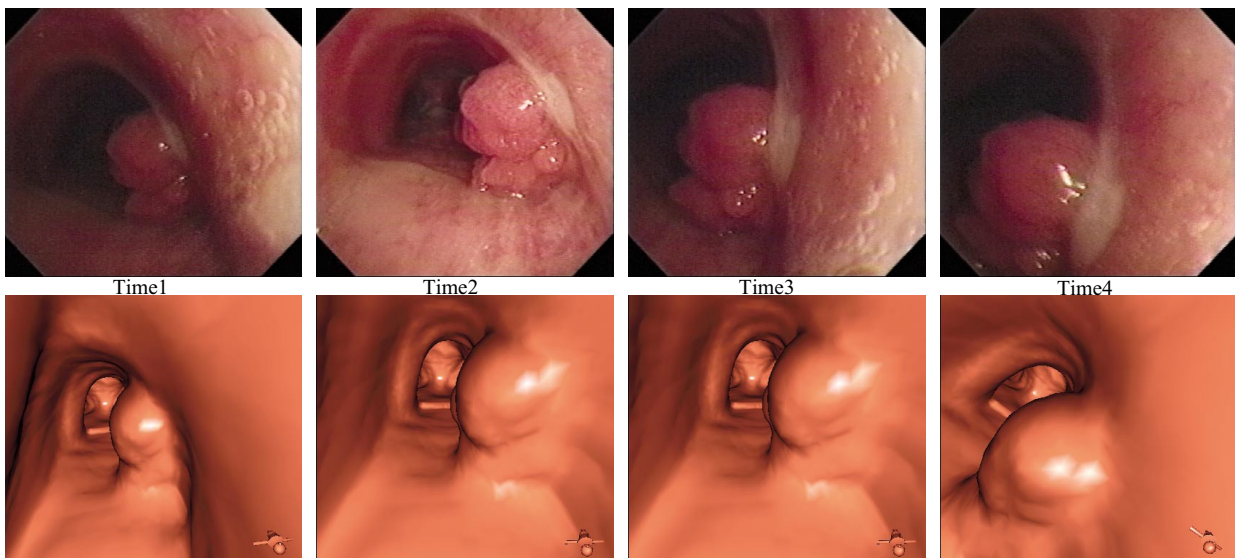


図 3 Image-based registration に基づく実内視鏡カメラトラッキング結果。上段左から時間順に並べられた実内視鏡画像を示す。下段は上段実内視鏡画像に対応するカメラ位置推定結果に基づき仮想化内視鏡画像を生成し、上下段の画像を比較することで概ね正しく実内視鏡カメラ位置のトラッキングが行われていることがわかる。

VES 開発当初からの応用分野の一つとして大腸ポリープ検出があげられる (図 4)。検査医師は VES を自ら操作することで大腸内部を探索しポリープの発見を行う。特に米国では大腸がんの割合が高く、数多くの研究が進められている。大腸検査専用の VES も商品化されている。最近では局率情報を利用して大腸ポリープを自動検出する CAD システムが注目されている。文献[7]のシステムでは、大腸ポリープ候補領域抽出処理後、VE 像上に抽出結果を重ね合わせた画像をユーザに提示する。ユーザは大腸内部全体を探索する必要はなく、自動検出されたポリープ候補領域付近の VE 像を観察すればよいので、読影医師の負担を大幅に削減することが可能となる。

(3) 臓器変形と VES

従来の VES では実内視鏡に類似した画像を生成することに重きが置かれていた。しかしながら胃・大腸などのような内部に大きな空洞領域を持つ臓器を VES で観察する場合、数多くの視点位置・視線方向変更操作を繰り返す必要がある。これを解決する方法として仮想的に臓器を切開・展開した状態で提示する手法の開発が進められている (図 5)。このような展開画像を用いることより 1 枚の画像を観察するのみで臓器壁面形状を容易に観察することが可能となる。大腸領域の場合、前述の大腸がん候補領域自動抽出手順と組み合わせることで、新しいスクリーングツールとなり得る可能性を持つ。

(4) 流体力学と VES

VES の新しい利用法として、気管支内部のエアフロー解析と VES を組み合わせる研究があげられる[12]。ここでは、VE 像生成のために抽出された気管領域から計算流体力学シミュレーションのためのモデルを生成し、呼吸時における気管支内部でのエアフロー解析を行っている。計算結果は VE 像上に重畳表示され、狭窄部分などでのエアフローを容易に確認することができ、気管支にどの程度の負荷が生じているかを把握可能である。将来的にはステント選択・留置のシミュレーションシステムへの発展が期待されている。

(5) 未観察領域検出と CAD

VES を病変部検出 CAD として利用する場合、医師は見落としなく臓器内部を全て観察する必要がある。一般的に臓器は複雑な形状を持つため、未観察領域なくフル

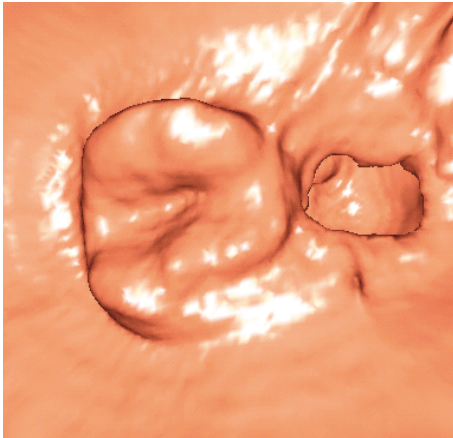


図4 直腸がんのVESによる観察例.

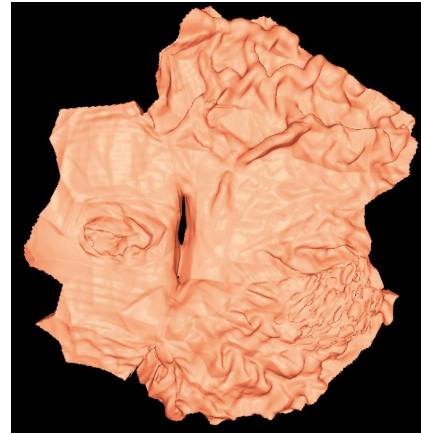


図5 胃領域の仮想展開像. この画像1枚を観察するのみで胃壁ひだの走行状況を把握することが可能である.

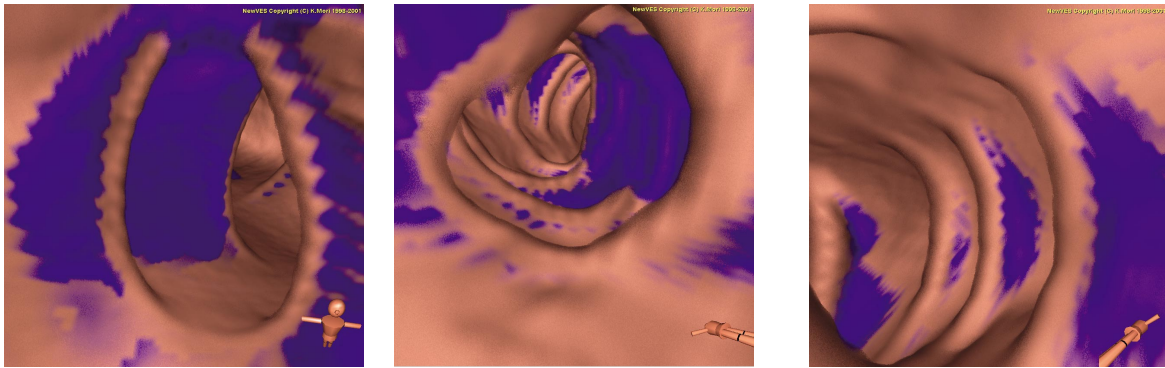


図6 フライスルー中未観察であった領域の提示例. ユーザは大腸内を自由にフライスルーを行い, その最中に未観察領域の記録を行った. 濃い色で示されている領域が未観察領域である. 3枚の図ではそれぞれ異なった視点位置での未観察領域を示している. これらの図からわかるようにひだの領域の裏側に数多くの未観察領域が存在する.

スルーすることは困難である. そこで, VESを用いた臓器内部のフライスルー中観察を行った領域を記録し, フライスルー終了後未観察であった領域を提示する手法が報告されている[13] (図6). 本手法を用いることで, 単なる観察忘れによる病変部の見落としを防ぐことが可能となる.

3. NewVES

VESがCADシステムとして定着するには, 安価かつ使いやすいシステムに改善する必要がある. 従来はVESは非常に高価なグラフィックスマシン上でのみ動作していたが, 近年のPCの計算能力向上に伴い, 安価なPC上でも実用上十分な速度でVESが動作するようになった. また, 膨大な量の計算量を要すボリュームレンダリング法もソフトウェアのみでリアルタイムに実行することが可能となってきた. ここでは, VESがCADシステムとして幅広く利用されるために筆者ら開発を進めている新しい世代の仮想化内視鏡システム“NewVES”を紹介する (図7). NewVESにはソフトウェアによる高速ボリュームレンダリング法が実装されており[14], 原画像を読み込むのみで人体内部の自由なナビゲーションが可能となる. 以下, NewVESが備える機能を紹介する.

- ・生成画像
 - 仮想化内視鏡画像 (内形像), 外形像,
 - スライス画像, 任意断面像
- ・3次元レンダリング機能
 - ポリゴンレンダリング機能
 - 任意色設定, スポットライト光源,
 - OpenGL ハードウェアによる高速描画

ボリュームレンダリング機能

ソフトウェアによる高速レンダリング,
スポットライト光源,
色・不透明度のダイナミックな変更,
環境光, 拡散反射光, 鏡面反射光計算,
ラベルされた部位の別色表示,
表示 VOI 設定 (図8)

- ・VolR 画像上における関心領域指定
 - 点指定, 面指定, 塊指定
- ・仮想化内視鏡モード
 - マウスカーソルでの指示方向への前・後進
 - 前・後進速度は3段階,
 - 自動後退 (軌跡の逆トレース), ひねり,
 - 視線方向変更,
 - 壁面との衝突判定 (警告, 速度ダウン)
- ・外形モード
 - 回転・拡大縮小,
 - 外形モードから内視鏡モードへの直接移行
- ・原画像読み込み機能
 - 汎用形式, DICOM 形式
- ・スライス画像表示専用ウィンドウ
 - スライス送り, 表示条件変更,
 - 画像の任意倍率の拡大,
 - マウスによる画像スクロール,
 - スライス画像上でのマーキング, 同解除
- ・画像処理機能
 - 領域拡張法, 気管支領域自動抽出機能,
 - 三角形パッチ生成, ボクセルパッチ生成

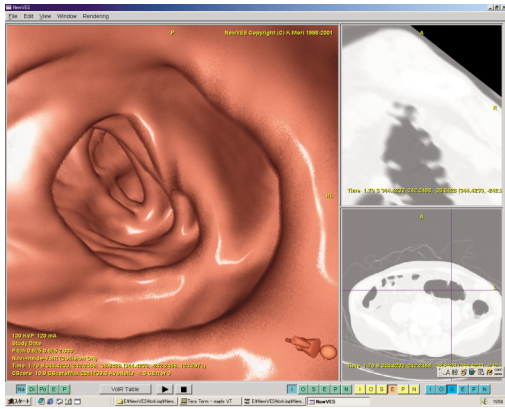


図7 NewVESの画面例。画面左:仮想内視鏡像, 右上:壁面下情報画面, 右下:スライス像

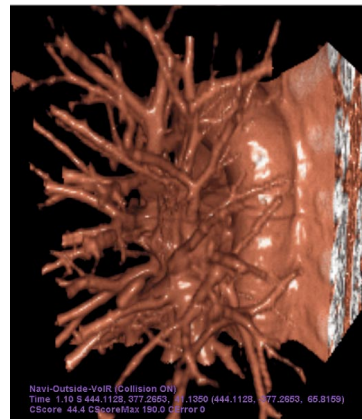


図8 外形像表示モード, VOI設定機能を利用して胸部血管系の一部を観察した例。ボリュームレンダリング方により描画されている。

(1- ボクセルを6面体として表現),
単純平滑化

- 表示ウインドウ
3画面同時表示(連携, 独立表示共可能),
ウインドウサイズ可変,
各ウインドウで以下のモードが選択可
内視鏡, 外形像, Axial像,
壁面下情報像, 視線方向垂直像
- 計測機能
2点間の直線距離, 体積, 表面積
- 観察部位対応づけ機能
仮想内視鏡像(外形像上でマウスカーソル
をドラッグするとAxial画像上にその位置
をクロスカーソルで表示)
- 観察履歴記録・再生機能
- 教育用モード
気管支枝名自動表示, クイズ表示

4. むすび

本稿では新しい画像観察法であるVirtual Endoscopy Systemの紹介を行い, その応用例を示した。VESは当初は人体内部の可視化ツールとして開発されたが, 病変部自動検出機能, 実内視鏡との連動運用などと組み合わせることで応用分野がますます広がっている。今後は3次元医用画像のCADシステムのベースシステムとしてより幅広く利用されることが期待される。

謝辞

VES開発にあたりご指導いただいた藤田保健衛生大学片田和廣博士, 日頃ご討論いただく名古屋大学鳥脇・末永研究室諸氏に感謝します。本研究の一部は文部省・日本学術振興会科学研究費補助金, 厚生省がん研究助成金によった。

参考文献

- [1] 森健策, 長谷川純一, 鳥脇純一郎, 他, 医用3次元画像における管状図形抽出と気管支内視鏡画像のシミュレーション. 3次元画像コンファレンス94講演論文集: 269-274, 1994.
- [2] D.Vinning, R. Shitrit, E. Haponik et al.: Virtual Bronchoscopy. Radiology, 193(P) (RSNA Scientific Program): 261, 1994.
- [3] K.Mori, J.Hasegawa, J.Toriwaki et al: Extraction and visualization of bronchus from 3D CT images of lung. Lecture Notes in Computer Science 905:, 542-548, 1995.
- [4] B. Geiger and R. Kikinis: Simulation of Endoscopy. Lecture

Notes in Computer Science, 905: 277-281, 1995.

- [5] G.Rubin, C.Beaulieu, V.Argiro, et al: Perspective volume rendering of CT and MR images: applications for endoscopic imaging. Radiology, 199: 321-330, 1996.
- [6] K.Mori, A.Urano, J.Hasegawa, et al: Virtualized endoscope system - an application of virtual reality technology to diagnostic aid. IEICE Trans. Inf.& Sys., E79-D: pp.809-819 1996.
- [7] H.Yoshida, Y.Masutani, O.MacEneaney, et al: Detection of colonic polyps in CT colonography based on geometric features. Radiology, 217(P): 582, 2000.
- [8] K.Mori, Y.Suenaga, J.Toriwaki, et al: A method for tracking camera motion of real endoscope by using virtual endoscopy system. Proc. of SPIE, 3978: 122-133, 2000.
- [9] J.Helferty, A.Sherbondy, E.Hoffman, et al: Experiments in virtual endoscopic guidance of bronchoscopy, Proc. of SPIE, 4321 (in print)
- [10] I.Bricault, G.Ferretti, P.Cinquin, et al: Registration real and CT-derived virtual bronchoscopic images to assist transbronchial biopsy, IEEE Trans. on Medical Imaging, 17: 703-714, 1998
- [11] W.Lorensen and H.Cline: Marching Cubes - A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm. Computer Graphics, 21: 163-169, 1987.
- [12] M.Levoy: Volume Rendering - Display of Surfaces from Volume Data. IEEE Computer Graphics & Applications, 8: 29-37, 1988.
- [13] R.Drebin: Volume Rendering. Computer Graphics, 22: 65-74, 1988.
- [14] K.Mori, J.Hasegawa, Y.Suenaga, et al: Automated anatomical labeling of the bronchial branch and its application to the Virtualized Bronchoscopy System. IEEE Transactions on Medical Imaging, 19: 103-114, 2000.
- [15] K.Mori, Y.Suenaga, J.Toriwaki, et al: Automated display of the anatomical name of bronchial branches in a virtual bronchoscopy system and its application as a training tool for medical students. Proc. of SPIE, 3660: 301-312, 1999.
- [16] R.Summers, J.Cebral: Tracheal and central bronchial aerodynamics using virtual bronchoscopy, Proc. of SPIE, 4321 (in print)
- [17] 吉岡政洋, 森健策, 末永康仁, 他: ソフトウェアによる高速ボリュームレンダリング手法とその仮想化内視鏡システムへの応用. 電子情報通信学会技術研究報告(医用画像工学研究会資料), MI2000-85: 2001.