ミニ講座

バーチャルエンドスコープ

名古屋大学大学院工学研究科 森 健策・鳥脇純一郎

はじめに

バーチャルエンドスコープ(virtual endoscopy: 以下, VE)は, 三次元医用画像に基づき, 仮想的な内視鏡像を生成する手法を指す。この手法を用いることで, 人体に対して非接触で人体内部の様子を, あたかも仮想的な内視鏡で観察するかのようにして観察を行い, 診断情報を得ることができる。VEを実現するためのシステムは, 「仮想内視鏡システム(virtual endoscope system: VES)」あるいは「仮想化内視鏡システム(virtualized endoscope system: VES)」^{脚注)}と呼ばれており, 三次元医用画像の新しい観察システムのひとつとなった。VESにより, 人体内部の自由な視点位置から臓器を観察することができ(ナビゲーション診断と呼ばれる¹⁾), 診断, 手術計画, 検査支援, インフォームド・コンセントなどさまざまな目的に使用可能である。筆者らは, 1994年頃より仮想化内視鏡システムの開発に取り組み, その実用化を進めてきた^{2, 3)}。また, VESに対して各種機能を付加することで, 臨床的, および, 医学教育的価値のより高いシステムの実現を目指している。そこで本稿では, 筆者らが開発したVESを基に, その基本的な仕組みについて触れ, そこで実現されている種々の機能について概説する。また, VESの応用事例についても述べる。

1. VES

1-1 概要

VESは三次元医用画像(たとえば, X線CT像, MR像など)に基づき人体内部を可視化することで, 仮想化内視鏡像(VE像)を得るものである。VE像を生成するには, 人体内部(たとえば気管支内部)に視点位置を置き, 視点位置から観察される人体内部の様子を, 三次元画像からコンピュータグラフィックスの技術(computer graphics: 以下, CG)を用いて描画すれば

よい。また, 人体内部を自由に連続的に移動できるように, マウスなどの入力デバイスからのユーザの操作情報を視点位置の連続的変更に変換する仕組みも用意する。「三次元画像からの対象臓器の認識」, 「人体内部の描画処理」, 「ユーザからの操作情報入力に基づく視点位置変更」を行うことがVESの基本的な動作の枠組みとなる。Fig.1にVESの画面構成の例を, Fig.2にシステム構成を示す。ユーザは通常Main windowで観察を行う。マウス入力に応じた画像が直ちに生成され, Main windowに表示される。また, さまざまな補助ウィンドが用意され, これらのウィンドを観察しながら実際の観察を行う。

なお, 以下の説明では「三次元画像」とは基となる三次元濃淡画像(三次元空間の各格子点上で濃度値が定義される画像)のことを指し, 「三次元像」とは, 三次元濃淡画像をさまざまな手法により画面上に投影することで得られる“三次元的な”画像(実際には二次元画像)のことを指す。

1-2 基本機能

1-2-1 対象臓器の認識

CGにより対象となる臓器を表示するには, あらかじめ原画像から臓器領域を抽出する必要がある(セグメンテーション処理と呼ばれる)。VESではおもに, しきい値処理と領域拡張法により対象臓器の認識を行う。次に得られた臓器領域を基に, 臓器形状を三角形パッチの集合として幾何学的に表現する。これは, 既存のコンピュータグラフィックスハードウェアによって三角形パッチを陰影付けして高速に表示することができるためである。ボクセル表現の三次元画像を三角形パッチの集合に変換する手法としては, 通常Marching Cubes法が用いられる⁴⁾。

筆者らのVESでは, ボリュームレンダリング法によ

脚注) VESにより得られる画像は, すべてが仮想ではなく, 個々の実際の被検者の人体を計算機上に仮想化したものであることから, 筆者らは「仮想化内視鏡システム(virtualized endoscope system)」と呼んでいる。なお, 学会のセッション名などでは, 単に仮想内視鏡, virtual endoscopy (バーチャルエンドスコープ)などと呼ばれていることも多い。

Fig.1 VESの画面構成.

Fig.2 VESの構成.

Fig.3 レンダリング結果の比較.

る表示(詳しくは後述)も可能であるが、この場合は対象臓器を領域として明に抽出するのではなく、画像の各画素に対して色・透明度を割り当てる必要があり、これがセグメンテーション処理に相当する。

1-2-2 描画

前述のように、VESでは二つの表示法によりVE像を生成することができる。一つは三角形パッチの集合を描画するものであり、他方は、三次元画像から直接三次元像を生成するボリュームレンダリング法を用いるものである。Fig.3にVES上で実行可能な描画手法により得られたVE像を示す。

三角形パッチにより仮想化内視鏡像を描画する場合、現在の視点位置から観察されるパッチ群に対し、頂点計算処理、陰影付け処理(色付け、照明処理)、および隠面消去処理を施し、透視投影法を用いて画面上に表示する。照明処理では、実際の内視鏡を模して光源位置を仮想化内視鏡先端(視点位置)に設定し、スポットライト状に三角形パッチを照らす。また、照明光の減衰効果もシミュレート可能である。これらの処理はCGハードウェアにより行われるため、非常に高速に描画される。

一方のボリュームレンダリング法³⁾によるVE像生成は、指定位置から三次元画像に対してray tracing(視点位置からrayを投げるように計算を実行することからray castingとも呼ばれる)を行うことで、三次元像を得るものである。視点位置から視平面(画面)の1点を通

Fig.4 VESにおけるバーチャルリアリティデバイスの利用。(a)位置センサを装着したヘッドマウンテッドディスプレイ(ゴーグル型)、(b)ディスプレイ内に表示されている画像。後側に見える画像が実際にゴーグル内に表示されている、(c)実際の操作風景。

a | b | c

Fig.5 解剖学的名称自動表示機能による気管支枝名表示結果。

るrayを三次元画像に対して投げ、そのray上の色・透明度の重み付け積算値により、画面1点の輝度値を求める。この操作を画面上すべての点に対して行うことで、最終的な三次元像が生成される。VE像を得るためには、視点位置が臓器内部に設定され、視点位置から四角錐状にrayを投げる(透視投影)が必要となる。照明処理は三角形パッチ表示と同様のことを行うことも可能であるが、通常は処理速度を向上させるために、位置固定平行光源とする。ボリュームレンダリング法を用いると、画像に含まれる全成分を容易に表示可能であるが、アルゴリズムの性格上、非常に細い部位を観察すると、ぼやけた画像になる。

1-2-3 人体内部のナビゲーション

VEを行うには、ユーザに対して人体内部を自由に移動できる仕組み、あるいは、自由な方向を向くための仕組みを提供しなければならない。そのために、ここではマウスを用いた通常型操作系とバーチャルリアリティデバイスを用いた没入型操作系の二つが用意される。

先述のマウスによる操作では、ユーザはマウスのボタンを押すことで前進・後退の動作を、マウスの指示する位置により進む方向を、それぞれ容易にコントロ

ールすることができる。ボタンを押し続けられれば前後進動作は継続的に行われ、臓器内部をフライスルーする感覚が得られる。また、マウスポインタを画面中央部におけば、現在の観察方向に向かって、画面右に位置をとれば右方向へ、画面の上方におけば上方向へ、前(後)進する。さらに、画面の視線方向に関する回転動作(ひねり動作)も用意されている。

後述の没入型操作系では、ユーザの体の向きに応じた画面が提供される。ここでは、ユーザは、頭部の位置・方向をセンシング可能なセンサを装備したヘッドマウンテッドディスプレイを装着する(Fig.4a)。システムは、センサにより得られる位置・向き情報を基に、VE像を生成し、ヘッドマウンテッドディスプレイを介してユーザに提示する(Fig.4b)。ユーザは左側の様子を知りたい場合、左を向けば、左側を向いたときの様子を観察することができ、頭の振りに応じた画像が連続して表示される。この動作は、上下左右どの方向にも可能である。また、前・後進するには、そのまま体を前・後ろに移動させればよい。これによって、ユーザは臓器内部に没入した感覚を得ながら、直感的に内部を移動することができる。

1-3 補助機能

ここでは、VESに備えられている各種機能を列挙する。機能の詳しい説明については、文献6, 9)などを参照されたい。

- (1)計測機能：VE像上に直接計測点を指定することで、VESの操作中に長さ、角度、面積、体積の計測を行うことができる。
- (2)スライス像表示：現在の視点位置におけるスライス像が表示される。十字マークによりスライス像上に現在位置が示される(Fig.1参照)。
- (3)臓器変形シミュレーション：管腔臓器の狭窄部にステントを挿入した際の変形をシミュレートする

Fig.6 VESによる観察例。(a)気管支、(b)胃、(c)頸静脈、(d)大腸。

a	b
c	d

ことができる。

- (4)解剖学的名称自動表示機能：気管支内部を観察する場合、各枝に対して自動的に解剖学的名称(RB1aなど)を対応付け、VE像上に表示することが可能である。この名称は気管支枝上に表示され、視点位置が移動するにつれて、表示位置も移動する仕組みが用意されている(Fig.5)。
- (5)立体視機能：液晶シャッターを利用したステレオ視メガネを用いることで、ユーザはVE像を立体的に観察することができる。ここではVESは、立体視用に左右眼用の画像を生成する。
- (6)観察履歴記録機能：ユーザの観察経路(観察方向も含む)を記録し、保存可能である。また、測定履歴も記録可能である。一連の観察が終わった後、これらの履歴を参照しながら、再度VE像表示を行うこともできる。
- (7)外形像表示機能：仮想化内視鏡モードで観察を行

っている場合、現在どの部位を観察しているのか分からなくなることが多い。そこで、VE像を提示すると同時に、対象となる臓器の全体を外側から観察した像(外形像)も同時に表示し、さらにVE像での視点位置を外形像にマークする(Fig.1)。

- (8)展開像表示機能：内部に比較的大きな空洞を持つ臓器(胃など)を観察する場合、臓器内壁そのままの形をVESで観察するよりも、臓器を切り開き、平面上に展開した形で表示する方が、観察しやすい場合がある。そのために、臓器の仮想展開像生成機能を呼び出すことができる。

1-4 実例

筆者らが開発したVESを用いて臓器の観察を行った例をFig.6に示す。これらの図は、それぞれ、気管支領域、胃領域、大腸領域、頸静脈領域に対して適用した結果である。原画像はすべてヘリカル型X線CT装置

により撮影されたものであり、気管支領域の場合、画像サイズ512×512画素、スライス数112枚、X線ビーム幅2mm、再構成間隔1mmの設定で撮影されている。VE像を生成するには、一般的には解像度は細かい方がよい。また、対象領域が大きく(胃、大腸など)、撮影範囲の都合上、X線ビーム幅を大きくしなければならない場合でも(5mm、10mm)、再構成間隔は1mmで生成した画像を用いる。

VESはグラフィックスワークステーション(SGI Octane MXE)、およびPC(PentiumIII 600MHz Dual Processor)に実現されており、どちらの計算機環境を用いても、臓器内部を自由に移動しながら観察することが可能である。

2. 応用例

VESは診断、観察、手術計画立案、インフォームド・コンセント、医学教育、検査支援など、さまざまな分野に応用可能である。ここでは、最近のVESの応

用事例を紹介する。

2-1 医学教育用ツールとしての応用

VESは人体内部を、自由な位置・方向から何度でも観察することができるため、医学教育ツールとしても有用である。札幌医科大学ではVESを実習コースに取り入れ、実際の学生がVESを操作することで気管支分岐構造の学習を行っている。また、教育用として特に、気管支枝名に関する質問を自動的に提示する機能を組み込み、学生が自由に気管支内部を移動する最中に解剖学的名称を問うことで、教育効果の向上を狙っている⁷⁾。Fig.7は、本システムを用いて実習を行っている様子であり、Fig.8はVES上に表示されている解剖学的名称の質問の一例である。

2-2 実内視鏡を補助するためのVES

実内視鏡(本物の内視鏡、気管支鏡など)とVESを比較した場合、VESは対象となる臓器のみならずその外側の臓器までの情報をも表示することができる。これは、VE像が三次元医用画像から構築されており、この画像には直接の観察対象以外の臓器も同時に撮影されているためである。一方、実内視鏡はそれが入りこんでいる臓器の内側壁面の様子しか観察することができず、壁面の外側にある血管などの走行状況を把握することは難しい。壁面下の状況を把握することは、経内視鏡biopsyを実施するうえで重要であり、この状況把握に仮想内視鏡システムを利用することができよう。

Fig.7 札幌医科大学におけるVESを用いた実習風景。

Fig.8 気管支枝名に関する自動質問機能により生成された画像。

Fig.9 VESを用いた医用内視鏡ナビゲーションシステムの予備的実験結果。(a)実内視鏡の1フレーム、(b)(a)の実内視鏡像に対応付けられたVE像、(c)VESに生成された(a)の位置における壁面下情報、(d)最終的に生成された画像。

a	b
c	d

そこで、筆者らは実内視鏡での観察中に、VESから得られる情報を自動的に重畳して提示するシステムの開発を進めている⁸⁾。ここでは、実内視鏡のビデオ画像が入力されると、ビデオ画像の各フレームでの観察位置がVESにおけるどの視点位置かを自動的に求め、その視点位置における壁面下情報を表示する。Fig.9は、このシステムの予備的実験結果であり、実内視鏡ビデオ画像が与えられると、自動的にVESでの視点位置が求められ、対応する壁面下情報が生成されていることが分かる。

3. VESの長所・短所と注意事項

最後にVESによる観察の長所、短所を簡単にまとめておく⁹⁾。まず、長所として挙げられるのは、次の点である。

- ・ 患者に苦痛を与えることがない
- ・ 時間的制約にとらわれない(いつでも、何度でも観察可能)
- ・ 空間的制約にとらわれない(実内視鏡が入りこむことのできない場所も観察できる)
- ・ 定量的計測が可能

逆に短所として挙げられるのは、以下の点である。

- ・ 壁面の実際の色が得られない
- ・ 形状情報しか得られない

色情報を今のX線CT、MRIのような仕組みで得ることは非常に難しく、これを解決することは困難である。

最後にVESを利用するうえでユーザが必ず知っておかなければならないことがある。第一にVE像の解像度は、原画像の解像度を超えることはできないことである。特に、原画像の解像度に近いような管腔を観察するような場合(画素サイズで2~3画素程度の内腔)、その形状には表示アルゴリズムの性質が現れて

しまう。たとえば、VE像を三角形パッチを描画することで生成する場合、原画像で1画素の内腔は、ひし形として描画される。この「ひし形」は、表示アルゴリズムの性質から来るものであり、実際の形状ではないことに注意すべきである。2番目に、画像を表示する時の設定条件(特に臓器領域認識のセグメンテーションに用いるしきい値など)によって、VESにより観察される形状が大きく実際と異なる場合がある。したがって、VESの特性を知ったうえで、慎重にパラメータを設定しなければならない。

4. むすび

本稿ではVESの仕組みを概説し、各種機能について実例を交えて述べた。また、最近のVESの応用例について取り上げ、VESの利点・欠点、利用するうえでの注意事項についても述べた。VESはごく最近開発された新しい観察ツールの一つである。その活用により、内視鏡検査の苦痛や労力の一部は減らすことができる。また、今後新しい可能性が開かれる余地も大きい。

謝 辞

日頃貴重な実験試料を提供いただき、また医学的見地からご助言いただく、藤田保健衛生大学 片田和廣博士、札幌医科大学 名取 博博士、九州大学医学部 橋爪 誠博士、埼玉医科大学 橋本大定博士、東京警察病院 外科 篠原一彦博士に深謝いたします。また、日頃ご指導、ご討論いただく名古屋大学 末永康仁博士、中京大学 長谷川純一博士、名古屋大学 鳥脇・末永研究室諸氏に感謝します。

なお、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) 鳥脇純一郎：仮想化された人体とナビゲーション診断。日本ME学会雑誌(BME), 11(8), 24-35, (1997)。
- 2) 森 健策, 長谷川純一, 鳥脇純一郎, 他：三次元胸部CT像に基づく気管支内視鏡シミュレーションシステム(仮想化気管支内視鏡システム)。医用電子と生体工学, 33(4), 343-351, (1995)。
- 3) Mori K, Urano A, Hasegawa J, et al.: Virtualized endoscope system-an application of virtual reality technology to diagnostic aid. IEICE Trans. Inf & Sys, E79-D(6), 809-819, (1996)。
- 4) Lorensen WE and Cline HE: Marching Cubes-A high resolution 3D surface construction algorithm. Computer Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH 1987), 21(4), 163-169, (1986)。
- 5) Drebin RA, Carpenter L, and Hanrahan P: Volume rendering. Computer Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH 1988), 22(3), 65-74, (1988)。
- 6) 森 健策, 鳥脇純一郎, 長谷川純一, 他：仮想化気管支内視鏡システム。臨床放射線, 41(11), 1385-1391, (1996)。
- 7) Mori K, Suenaga Y, Toriwaki J, 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)。
- 8) 中島弘倫, 森 健策, 末永康仁, 他：医用内視鏡ナビゲーションシステム実現のための内視鏡カメラ動きの推定法。電子情報通信学会技術研究報告(医用画像), MI99-51, (2000)。
- 9) 鳥脇純一郎：仮想化内視鏡システムの開発。INNER-VISION, 14(10), 78-82, (1999)。