超音波による生体組織の3次元表示

伊 東 正 安[†]

1. ま え が き

物体には微視的な面から巨視的な面まで様々な情報がある。生体組織の診断には、生検による組織そのものの組成や構造分析から、超音波、X線、NMR等による組織の可視化法によるもの、触診や動態観察によるものなどがある。このように臨床的には、細かい組織の構造から大雑把な形状まで種々の情報が必要とされている。また可視化の手段も、単なる信号の表示から、コンピュータグラフィックスやバーチャルリアリティのような高度な映像を扱うものまである。

ここでは、画像診断の中の超音波を応用した生体組織の可視化において、3次元診断情報およびその3次元表示の現状と動向を述べる。この分野の重要性が認識されるにつれて進展も速く¹⁾、最近の話題も入れて解説したい。

2. 超音波を利用した組織の3次元映像化

2.1 歴史的背景

超音波による可視化は、生体に対する超音波の物理現象を電気信号として捉え、それを映像化するものである。特に組織の音響インピーダンスの差による反射波が利用され、一般に普及している超音波診断装置は走査面の信号を断層像という形に画像化し、組織を無侵襲的に診断している。しかし、これは組織の割面に対応する断層像を表示するものであり、組織の一部を表示しているに過ぎない。組織の空間的な情報を理解できるように組織全体を視野にいれようとするのが、超音波による3次元表示のねらいである。

最初の頃(1950年代)は、複数の断面で走査して得

られた種々の断層像のデータを2次元平面に投影することから始まり、さらにCRTのX-Y偏向に視線方向の角度を入力することで即時性と立体感を高めた²⁾。

1960年から70年代前半になると、超音波ビームの方向と位置を利用した反射波または透過信号の表示がメモリーやデジタル操作によって進歩し、超音波映像法が急速に進歩した。このような計算しやすい技術環境により、3次元データを得るための3次元走査と3次元データの表示が容易になった。これはまた、超音波映像法とX線映像法の接近を意味している。1972年にはEMI社から「X線CT」の発表があり、信号や画像のデジタル化が加速された。1970年代には超音波による3次元形状の抽出や表示の研究が進み、80年代に3次元データを用いた3次元表示が各専門領域で研究・開発されるようになった。

2.2 3D Echographyの目的

超音波診断の発達からもまた診断領域から見ても、組織の性状や臓器の機能を診断するには、1次元から2次元、2次元から3次元、それから時間を加えた4次元へと向かうのは自然であり、当然のことである。これに伴い、診断情報が豊富になる半面、データ量も膨大になっており、診断情報の抽出と効率的計算や視認性の高い表示法などが求められている。

他の医用画像、例えばX線像と同様に超音波3次元表示の目的も、基本的には3次元計測と画像診断である。具体的な項目を列挙すると

・構 造

幾何学的特徴：体積、面積、長さ、位置、角度

形態的特徴：形状、位相、解剖学的所見と病理組織との関係、領域における空間または位置的関係

・機 能

形態と組織における空間・時間的關係

がある。

[†] 東京農工大学 工学部電子情報工学科

“Three-Dimensional Display of Tissue by Ultrasound” by Masayasu Ito (Department of Electronic Information Engineering, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology Tokyo)

超音波は軟部組織の映像化に優れていること、また動態観察やドプラ信号の検出など、他の映像化手法と異なる特徴があるので、これらの特性を活かす3次元表示が研究・開発されている。

超音波で得られる情報をもう少し詳しく分類すると、次のようになる。

- ・質的情報(Qualitative Information)
 - 形状、組織特性、性状
- ・量的情報(Quantitative Information) — Measurable
 - 幾何学的特性
 - 音響特性(Tissue Properties)：減衰係数、音速、屈折など
- ・機能情報(Functional Information)
 - 動態(例えば心臓などの)観察

これらの質および量的情報と機能情報を、できるだけ3次元表示に反映させるように研究が進められている。例えば、形状と組織性状の同時表示等がある。分解能については、超音波の散乱、波長や走査機構の限度があるので、超音波画像はX線像には及ばない。しかし、超音波特有の組織や動態の映像が可能であり、これらの特徴を活用した画像診断が有効である。また、超音波映像は個人差が多く、現在絶対的な計測は困難とされている。したがって、再現可能性、正確性の究極的な問題も残されており、研究の進展も期待されている。

2.3 超音波による生体の診断情報

生体に対する超音波走査により、反射波(または透過波)の位置とその大きさ(振幅)が3次元超音波データとなる。現在の探触子と診断装置の技術から考えて、超音波を3次元的に走査するには、電子走査と機械走査を組合せて多断層を3次元超音波データとして使用するのが一般的である。

すべての診断領域において、形状(shape)は重要な情報である。例えば、胎児や肝臓の血管走行、頸動脈、腫瘍の3次元表示が行われており、疾病の観察に有効である。また腫瘍の辺縁の凹凸の様子が良性・悪性の鑑別のひとつの基準になるので、異常組織の全体像、例えば乳腺・甲状腺の腫瘍や肝(臓)腫瘍の3次元像の研究が多い^{3)~5)}。

正常組織と異常組織の鑑別や臓器の識別には、濃淡(輝度)やテクスチャによる画像上での識別が行われ、これを利用したり目的とした表示もある。

臓器の計測、特に大きさの計測は従来からよく行われ、胎児の体重推定や肝臓、脾臓などの容積計測がある。

血流の観察には、カラードプラがよく使われている。従来のドプラでは断面の状態しかわからず、したがって血流の連続性が明瞭でなかった。そのため、奥行きとか血管の走行状態や血行状態を3次元的に理解できるような表示法が研究されている。血流の観察は心臓だけではなく種々の臓器にも有効であり、将来血管造影の代用になるかも知れない。

超音波の電子スキャンにより心臓の動態観察が飛躍的に進歩した。さらに、縦断と横断の断層像を組合せて多面的に観察できるようになった⁶⁾。一般に臓器や特定組織の形状とその時間的变化を表示するのが3次元動画である。生体における超音波応用では、3次元的に心臓の動きを観察する研究が最も盛んである。例えば、僧帽弁の形態とその動きなどの機能観察を目的として、血流と組合せた3次元カラードプラ法がある(例えば、7)~10)。データとしては、心周期に同期させた心エコー図と血流のドプラ信号が使われる。

対象部位の表面形状と内部構造がリアルタイムで観察できるようになれば、3次元表示は手術支援システムとして重要な役割を果たすことになるだろう。そのため基礎研究も進んでいる¹²⁾。

3. 組織の3次元データ

3.1 超音波信号の入力と3次元データの预处理

超音波の送受信に使われるトランスデューサ(探触子)は、高速走査の面からシングルトランスデューサよりリニアアレイやアニュラーアレイのような電子走査型のトランスデューサが圧倒的に多い。組織の減衰には周波数依存性があり、領域や、どの情報をどのように表示するかにより、診断装置の感度や分解能も考慮する必要がある。3次元データを取得する超音波走査を、ここでは3次元走査と呼ぶことにすると、その3次元走査には種々の方法が考えられる。現在では断層像のデータを取るアレイ型探触子を機械的に動かす方法が一般的であり、実際は探触子を平行に移動するか、回転させるか、セクタ状に動かしている。現在ではこのように電子走査と機械走査を組合せているが、理想的には電子制御により任意の方向に超音波ビームを放射し、3次元走査の可能な2次元アレイトランスデューサの実用化が早急に望まれる¹³⁾¹⁴⁾。

位置と位置に関する診断情報からなる3次元データは、超音波の信号をA/D変換した後、直接画像メモリ(フレームメモリ)に格納されたり、いったんビデオテープに録画後、処理されることもある。超音波による3次元表示で使用されるデータは128×128×128×8ビット(2Mバイト)から256×256×256×8(16

M バイト) 程度であり、ハードディスクや光ディスクなどの外部記憶装置も活用されている。

超音波診断装置で得られる断層像は走査断面の組織像であるから、いくつかの断面の断層像をずらして表示すれば立体感が得られる¹⁵⁾¹⁶⁾。超音波は組織境界や内部の散乱体から反射され、それらが複雑に影響し合うので、断層像は鮮明な境界を持つ画像にならないことが多い。一般に超音波像はこのようなスペckルノイズや電子的または量子化雑音などを含むので、輪郭や形状を抽出する前に雑音を除去する。一方、画像において濃度(輝度)差のあるエッジは高周波成分を有するので、単なるローパスフィルタではエッジも平滑されてしまう。輪郭抽出にはエッジを保存した雑音除去が望ましい。例えば、断面上に垂直に細い形の高濃度の領域(物体)があるとき、断面上だけでの処理では、この小さな領域は雑音として処理される場合がある。また、断面の輪郭は滑らかでも断面と直角方向は凹凸であったり、この逆の場合もある。したがって、超音波のデータは2次元よりも3次元的に処理する方が視認性の良い3次元データになる。3次元的な処理方法には方向性を考慮したメディアンフィルタ^{17)~19)}や、断層像間の相関性や類似性を考慮した輪郭抽出²⁰⁾が提案されている。

軟部組織の曖昧な境界像から輪郭を抽出するのにニューラルネットを用いる方法もある。これは断層像において注目点の周辺領域を考慮した濃度ヒストグラムに着目し、その形をニューラルネットワークに入力し対象部位の属性を判別して境界を抽出するもので、羊水と胎児(母体)の識別と、胎児の3次元表示が報告されている²¹⁾。

一般には、対象の表面から超音波が完全に反射するか、これに近いときには、画像の濃度値に明らかな差が生じ、濃度の閾値で識別できる。例えば、硝子体中の異物や異常組織、羊水中の胎児などがこれに当たる。このような場合、特に計算機を使用せず立体視を簡単に行う実用的な方法も考案されている。羊水と胎児の境界が明瞭であるときの例であるが、音響レンズを使ってビームを広げ、反射により境界を検出しプローブを回転させながら同時に得られる表面を表示している²²⁾。胎児や胎児の骨格表示を目的に同じような手法をKossoff からも発表しており、超音波による thick slice imaging による3次元表示と呼んでいる²³⁾。組織内にある硬い骨などは超音波ビーム方向に最大エコー値を検出すればよいので、組織の形状と位置関係を観察できるように工夫した3次元表示手法がある²⁴⁾。

一方、エコー信号に余り差がないことがある。例え

ば、肝臓内の腫瘍と周辺組織においては明確な濃度差がない画像になることも多く、このような濃度のみでは識別が困難な組織に対してテクスチャを基に抽出することが考えられる²⁵⁾。さらに、テクスチャの特徴量にファジィ推論を導入し、個人の特性にあまり依存しない方法も発表されている²⁶⁾²⁷⁾。

3.2 超音波データの可視化と3次元診断情報

今までに述べたように、超音波で得られる診断情報は組織のどのような情報を扱い、どのような手法で形状を抽出するかによって、それらの映像化の手法も異なる。一般には3次元データを表示すれば、なんらかの3次元情報が得られる。実際にコンピュータグラフィックスなどの高度な手法を用いて形を表示しなくても、目の残像効果や視差などを利用した立体視も有効である。例えば、A モード信号(受信した超音波信号を検波し、振幅に応じて輝度を与える)を超音波のビーム方向に立体的に並べると、組織の硬軟が立体的にわかる(これはD モード法ともいわれる)²⁸⁾。

本来、超音波断層像は断面(割面)の組織情報を持っており、いくつかの断層像よりその組織の3次元構造を頭の中で構築できる。断層像を増やし多断層像として表示すれば、3次元組織データの表示になる。Robinson²⁹⁾らは、多数枚の断層像を3次元超音波データとし、それらを表示したり任意の断面を再構成し表示する方法を述べ、臨床の有効性を示した。この考え方は、組織の空間情報を把握する3次元表示の重要性を示唆している。超音波3次元走査が線形ではなく特殊な走査、例えばスパイラル走査の場合の断層像の再構成とその3次元表示については文献30)にその手法が述べられている。視点を変えて組織を観察することは3次元画像を回転表示させることで実行できる³²⁾³³⁾。

超音波のビーム方向と直角な面の断層像はC モード像と呼ばれ、多断層像から構成される。任意の断層像とC モード像を計算機で構成し、これらの2断面の像を同時に表示したり³⁴⁾³⁵⁾、互いに直角な3断面を同時に表示する方法も考えられる。明らかにこの種の手法は組織の位置的関係が明確になる効果がある。

さらに、複数の断層像をディスプレイに表示し、断面を連続的に変化させることにより、組織の内部構造を3次元的に理解できるようにする手法もある³⁶⁾。これは目の残像効果を利用した3次元映像である。

より良い精度の計測には再現性が要求される。3次元的に走査して得られる3次元超音波データから組織の性状と形状を分離した形でそれらの情報を表示するシステムが、形と組織性状の関係が明らかになる点で

臨床上効果的と考えられる。例えば、これには抽出した輪郭形状を白黒の濃淡画像で表し、任意に指定した断面の断層像をカラー化して、形状に重ねて表示する方法がある³⁷⁾³⁸⁾。また、各断層像を適当な閾値で2値化して形状(表面)を擬似的に作成し、指示断面に多譜調の断層像を重ねることにより、形状と内部構造を観察する比較的高速なシステムが報告されている³⁹⁾。

3次元データにおいて、ある視線方向から見た視線上にあるデータを積算し表示すると、超音波画像に多いノイズを軽減でき、また、輪郭や辺縁の不鮮明さを先鋭化したり強調する処理効果もある⁴⁰⁾。超音波ビーム方向に最大エコー値を検出し表示すると、骨などの硬い組織の形状と周辺組織の位置関係が観察できる⁴¹⁾。

このような装置の試作や研究だけでなく、具体的に3次元超音波診断装置の開発へと動いているのが現状である⁴²⁾。

4. 3次元画像の表示法

前節で説明したように、特異組織や臓器などの輪郭が抽出されれば、目的、処理時間などに応じてフレーム表示、距離画像(視点からの距離に応じて各断面に輝度付けし、断面輪郭の重ね合わせと陰面処理を施し奥行きを与える方法)、光線追跡による陰影法、さらに高度なグラフィックス手法を応用した陰影法⁴³⁾など、通常の3次元表示法が適用される。視認性、立体らしさを増すためには、補間などの画像処理を施すことも多い。

次に、超音波の特徴を考慮した具体的な3次元表示の現状を述べる。

4.1 透視図法

2次元ディスプレイ上に物体を3次元的に表示する方法の基本は、3次元物体を2次元座標に投影する透視図法である。物体表面を構成する方法は前述のように、ワイヤフレーム表示、ボクセル(画素)表現、輪郭線掃引、三角面素構成法、任意面構成法などがある⁴⁴⁾。最近、サーフェスモデルと呼ばれているものがあるが、これは抽出した表面に色、光沢、陰影などを与えて物体のように表示する方法であり、基本的には前述の組合せ手法である。物体の表示画面への投影は、通常は物体から画面へ平行に行われる。これは視点を無限に置いたのと同じであり、断面の大きさなどを縮小することなく処理できるからである。

超音波3次元データは、現状では多断層像より構成することが多いので、形状表示の際にはデータの処理を考えると、断面の輪郭を抽出するか、表面を簡単に

ボクセルで与えるようにするかのどちらかである。臓器や特異組織の形状があらかじめわかっている場合や形状が複雑でない場合には、ワイヤフレームなどの簡易手法が取られることが多く、面積や容積の計測などにも便利である。この表示は例えば、心臓、胎児、脾臓、前立腺などへ適用されている。

4.2 ステレオ(立体)視

2つの方向から撮った断層像を投影すると、視差により立体視が実現できる⁴⁵⁾。積分(積算)像はレントゲン像に類似しており、この積分像と従来の断層像の同時表示にステレオスコープを応用した報告がある⁴⁶⁾。これは視点から放射状に延びる視線上に各ボクセルを積分し、全体の積分像を作成し、断層像を重ねて表示する。さらに、視点を変えて同様の重ねた画像を作り、ステレオスコープでこの2つの画像を分離して観察できるようにしている。

眼鏡や特殊な装置を使えば、絵が飛び出したり、さらに立体感のある画像ができるが、装置が複雑になり、臨床用の装置としては実用域に達していない。

4.3 ホログラフィ

これは干渉縞の記録されたホログラムを同一波長の光で照明し物体の像を再生する方法であり、すでに物理的には確立されている⁴⁷⁾。超音波を照射した微細組織の透過波または反射波の振幅と位相を完全に検出し、その点(面)の音圧分布を光情報として表示できれば、ホログラム手法は理想的な3次元表示になり、動態観察にもよい。しかし現実には、超音波の散乱、反射、屈折、回折、吸収等により透過能や分解能が充分上がらず、音響-光変換における波長の差やノイズの問題があり、実現が困難である。

しかし秋山ら⁴⁸⁾は、直接超音波信号を使うのではなく、断層像にホログラフィックステレオグラム⁴⁹⁾を応用した方法を提案した。これは多断層像から計算機内で画像処理的に得た輪郭像を2次元面に投影してCGの3次元像を作り、視点を平行に動かしたときの多数枚の3次元像を1枚のホログラムとして合成し記録している。

4.4 複合

物体や組織の形状だけではなく、内部構造や内部の組織像を形状と共に表示する手法をここでは、形状のみの3次元表示と区別する意味で、複合表示と呼ぶことにした。例えば前述の37)38)がその例である。この複合表示は、互いに異なる2つの情報を識別できるように表示する必要がある。写真1は37)38)に基づき新しくワークステーションで行った豚肉の形状と断層像の3次元表示であり、全体の形状を白黒階調で表

し、ダイナミックレンジの大きい階調をもつ断層像をカラーで示している。また、次に述べるドブラ像と断層像または輪郭の同時表示も発表されている¹¹⁾⁵⁰⁾。写真2は頸部の断層像とドブラ像の同時表示を示す。(a)は中央から両側に膨らむ甲状腺の様子がわかる。(b)はドブラ像で、両側で上下に流れる血流が観察され、(c)では甲状腺と血流の位置関係がわかる。

4.5 3次元ドブラ

これは他の映像化にない超音波映像の特徴である。3次元ドブラとは、ドブラ断層法から得られる血流信号にカラーをもたせ、複数のドブラ断層から得た血流情報を視覚的に立体感を持たせるように3次元表示する手法である。血管の表示は奥行きにより色を変える(遠近法を用いた擬似立体)方法や、抽出した血管像と周囲の組織像を回転させながら表示する回転表示法が試みられている⁵¹⁾。この表示により、血管の位置関係がわかり、臓器や腫瘍内外の血管走行状態や血行動態が観察できるようになった⁵²⁾。

4.6 3次元動画像

超音波による3次元の大きな目的は、心臓などのように時間と共に形状が変わる動体の3次元リアルタイム表示である。循環器領域における形態異常の診断に有効である。これを実現するためには、膨大な4次元データを高速に処理するハードウェアシステムが必要である。動きを考えない組織の3次元データの高速処理ですら相当な計算を要するので、時間まで導入すると簡易なシステムでは容易には実現できない。心臓の3次元動的動きを観察するためには、形状表示ができるように多断面の断層像を少なくとも1心拍周期にわたって撮る必要がある。現在では心電図(または心拍同期)と共にVTRなどに上記のような断層像を記録し、1周期の各時点での3次元像をワークステーションなどで作成している(1心拍周期につき20~30枚の3次元像)⁵³⁾⁵⁴⁾。

4.7 各領域別にみた3次元表示の現状

乳腺・甲状腺では腫瘍の辺縁の形が良性・悪性の重要な判断基準になるので、形状の3次元表示が多く³⁾、立体的な質的診断には断層像と再構成したC-モード断層像の同時表示⁴⁾や、互いに断面が直交する3断層像表示などがある。甲状腺の体積計測や3次元カラードブラ表示の報告があり、血流情報の表示が研究されている。産婦人科領域では、羊水の中の胎児像は超音波像から比較的抽出し易いことから、胎児の3次元表示の研究が盛んであり、胎児の顔の表情が見えそうな状況である。計測では胎児体重の自動推定が行われている。写真3は胎児の3次元表示例であり、顔

の表情がわかる。表面は光の入射、面の法線、面の反射、視線方向を考慮した陰影づけを行っている。

肝臓や脾臓では大きさ(体積)の計測もあるが、肝臓内の血管走行や肝腫瘍の3次元表示、3次元カラードブラ表示に関心が移りつつあり、それらの研究発表が多い。写真4は肝臓内血管(肝静脈、門脈)の3次元像であり、ファジィ推論により輪郭の抽出を行ったものである⁵⁵⁾。この写真において、灰色、茶色は各々血管の内、外を表している。なお(a)は術中超音波によるデータからの構成であり、(b)は体表走査による取得データからの3次元構築像であり、血管の走行が理解し易い。写真5(a)は肝細胞癌の周囲の血管を3次元表示したもので、実際は回転することで立体感を描出している。(b)は(a)に肝細胞癌の表面を同時に表示したもので、腫瘍と血管の関係がわかりやすい。

頭部では脳血管系の3次元表示、眼科領域では網膜剝離、硝子体出血などの表示はすでに行われ、もっと細部の表示が求められている。比較的血管の太い頸動脈に対して、フレーム表示や陰影法で視認性の高い病変表示が行われている。

写真6は胃癌の切除標本の超音波データからの3次元表示を示す。表示手法は写真3と同様な方法をとっている。変異した部分の様子がよくわかる。

泌尿器科領域では前立腺の表示⁵⁶⁾、大きさの計測が行われている。この領域は3次元走査があまり容易ではないので、その工夫が必要である。

循環器領域では3次元カラードブラ表示が主であり、今後、血流分布や機能観察と共に、動態観察として3次元動画像が期待されている。

5. む す び

以上、超音波を利用した生体の3次元表示法について、現状を含めて概説した。3次元表示を進展させるためには、他の医用画像と同様に、いろいろな問題や手法の選択がある⁵⁷⁾⁵⁸⁾。異常組織の自動抽出、臓器容積の自動計測、超音波による血管造影、3次元動画像表示など、興味のある研究がある。

今後の問題としては、特に超音波では機械や患者に依存しない正確で再生可能な超音波画像の造影(データの取得)が求められよう。また、そのための基準となる組織上の位置および量的なマーカーが設定できるのか、設定できるとしたらどこにどのようなにするのがキーポイントである。

最後に、臨床3次元像を提供して頂いた日立メディコ(株)佐藤雅文、佐々木明両氏、東京大学医学部産婦人科教室岡井崇助先生、アロカ(株)望月剛氏、慶

応大学理工学部 中島研究室, 慶応大学医学部外科学教室, 横河メディカルシステムの各先生, 自治医大大宮医療センター 山中恒夫先生および, 東芝医用機器技術研究所研究所 佐藤武史, 佐々木博両氏に感謝申し上げます。またテレビジョン学会の編集の方にはご無理を申し上げた。関係の方々に厚くお礼申し上げます。

〔参 考 文 献〕

- 1) 伊東正安: “超音波による生体組織の3次元表示”, 日本ME学会誌, 特集 最近の超音波医学, **5**, 7, pp. 17-23 (1991)
- 2) Douglas H. Howry, Gerald Posakony, C. Richard Cushman and Joseph H. Hoomes: “Three-Dimensional and Stereoscopic Observation of Body Structure by Ultrasound”, *J. Appl. Physics.*, **9**, p. 304-306 (Sep. 1956)
- 3) 小林正幸, 高田伸, 来住野修, 島田明子, 馬場一憲, 小高明雄, 村田戒, 高木俊二, 藤岡正志: “乳腺腫瘍の超音波3次元画像”, *Jpn J. Med. Ultrasonics*, **20**, 3, p. 167-171 (1993)
- 4) 高田悦雄, 伊藤勇, 藤田満, 森久保寛, 信田重光: “乳腺超音波3次元表示”, 日本超音波医学会講演論文集, 60-38, pp. 131-132 (May 1992)
- 5) 鈴木直樹, 岡村哲夫: “超音波断層像およびX線CT像から構築した肝腫瘍3次元像の特長の比較”, 日本超音波医学会講演論文集, pp. 507-508 (June 1988)
- 6) Hugh A. McCann, Joseph C. Shapp, Thomas M. Kinter, Christopher Neill McEwan, Christian Barillot, and James F. Greenleaf: “Multidimensional Ultrasonic Imaging for Cardiology”, *Proc. IEEE*, **76**, 9, pp. 1063-1071 (Sep. 1988)
- 7) 中谷義明, 坂田圭司, 赤松信男, 関場香, 本谷猛, 江尻昭, 藤井村雅彦, 宮川毅: “3Dカラードブラ法の試み”, 日本超音波医学会講演論文集, 57 V-12, pp. 781-782 (Oct. 1990)
- 8) 佐藤武史, 佐々木博, 住野洋一, 土子正良: “カラードブラによる血管の3次元立体視表示”, 日本超音波医学会講演論文集, 59 V-12, pp. 929-930 (Nov. 1991)
- 9) 笹原修, 佐藤一弘, 小川俊雄, 榊原一洋, 坪井晃, 田辺浩二, 佐々木博, 佐藤裕: “3次元カラードブラ血流表示法”, 日本超音波医学会講演論文集, 60-40, pp. 135-136 (May 1992)
- 10) 田野茂夫, 上野規男, 佐々木厚博, 富山剛, 木村健, 佐々木博, 平間信, 佐藤武史, 佐藤昭洋: “3次元カラードブラ法の臨床応用”, 日本超音波医学会講演論文集, 62-352 (May 1993)
- 11) 佐藤武史, 平間信, 佐々木博: “3次元カラードブラ像とBモード像の合成”, 日本超音波医学会講演論文集, 61-239, pp. 541-542 (Nov. 1992)
- 12) 鈴木直樹, 岡村哲夫: “超音波断層法と非接触計測法を併用した三次元術中支援システムの開発”, 日本超音波医学会講演論文集, 55-306, pp. 673-674 (Oct. 1989)
- 13) 小島正, 中村孝, 志村勇: “11/2-Dおよび2-Dアレー探触子”, 超音波医学会基礎技術研究部会資料, **94**, 1, pp. 1-6 (1994)
- 14) 竹内康人: “2次元アレー探触子”, 超音波医学会基礎技術研究部会資料, **94**, 1, pp. 7-10 (1994)
- 15) M. Ito and H. Yokoi: “A Computer-Aided Three-Dimensional Display System for Ultrasonic Diagnosis of a Breast Tumour”, *Ultrasonics*, Nov., pp. 261-268 (1979)
- 16) 伊東, 井上, 山本: “生体組織の濃淡面画による高速3次元表示システム”, 信学論誌, **J-66-D**, 9, pp. 1031-1038 (1983)
- 17) T. Mochizuki, M. Ito, and K. Tachikawa: “Ultrasonic Image Processing Using a Three-Dimensional Median Filter”, *Jap. Jour. of Allied Physics*, **30**, pp. 228-230 (1991)
- 18) 望月剛, 伊東正安: “超音波3次元データのテクスチャ情報を用いた組織像の抽出”, 電学論C, **112-C**, 8, pp. 507-515 (1992)
- 19) 望月剛, 伊東正安: “超音波による生体組織データの3次元表示のための平滑化処理—3次元メジアン/メジアンフィルター”, 信学論誌, **J76-D-II**, 11, pp. 2304-2315 (1993)
- 20) 伊東正安, 栗原啓明, 椎名毅: “3次元表示を目的とする輪郭抽出手法の検討”, 日本超音波医学会講演論文集, pp. 549-550 (Apr. 1991)
- 21) 大橋剛介, 大矢晃久, 程相勇, 秋山いわき, 伊藤貴司, 名取道也, 中島真人: 日本超音波医学会講演論文集, pp. 479-480 (May 1992)
- 22) 千葉善英, 山崎聡, 高見沢欣也, 佐々木博, 村上典正, 林公弘, 伊藤茂, 神崎徹, 高橋俊一, 小林秀樹: “Z軸方向音響レンズを用いた胎児像の立体視”, 日本超音波医学会講演論文集, pp. 611-612 (May 1993)
- 23) G. Kossoff, K. A. Griffiths and P. S. Warren: “Three Dimensional Imaging in Sonography with Thick Slice Imaging”, *Ultrasound in Medicine and Biology*, **20**, Suppl. 1, S 94 (1994)
- 24) 望月剛, 笠原英司, 広瀬昌紀, 赤羽睦宏, 伊東正安, 岡井崇: “超音波ビーム方向に最大エコー値検出処理を行う3次元超音波画像の表示法”, 日本超音波医学会講演論文集, pp. 527-528 (Nov. 1992)
- 25) 望月剛, 伊東正安: “超音波3次元データのテクスチャ情報を用いた組織像の抽出”, 電学論C, **112**, 8, pp. 507-515 (1992)
- 26) 望月剛, 笠原英司, 赤羽睦宏, 広瀬昌紀, 伊東正安: “超音波3次元表示を目的としたファジー推論による画像の抽出法”, 日本超音波医学会講演論文集, pp. 483-484 (May 1992)
- 27) 望月剛, 伊東正安: “テクスチャ特徴量を用いたファジー推論と空間平滑化効果による医用超音波像の識別”, 信学論誌, **J77A**, 10, pp. 1315-1326 (1994)
- 28) S. Tane, N. Takahashi, J. Suzuki and Y. Kimura: “The Clinical Application of the New Versatile High-Powered Ophthalmic Contact A-, B-scan Equipment”, *Ophthalmic Echography*, pp. 195-197, Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers (1987)
- 29) D. E. Robinson: “Display of Three-Dimensional Ultrasonic Data for Medical Diagnosis”, *J. Acoustical Soc. America*, **52**, 2, pp. 673-687 (1972)
- 30) 伊東, 山本: “スパイラル走査による組織断層像の構成と立体表示”, 医用電子と生体工学, **24**, 7, pp. 43-47 (Dec. 1986)
- 31) 田村, 田中: “断層像を用いた立体視”, 情報処理, **20**, 12, pp. 1066-1073 (1979)
- 32) 伊東, 椎名, 菅田, 山本: “生体組織の立体表示と回転”, 日超医講演論文集, pp. 275-276 (Nov. 1988)
- 33) 中村智法, 釣部智行, 椎名毅, 伊東正安, 菅田安男: “超音波による3次元像のリアルタイム回転表示”, 信学論誌, **J73-D-II**, 9, pp. 1578-1584 (1990)
- 34) 福島祐一, 高田悦雄, 伊藤嘉唯, 森久保寛, 信田重光: “乳腺超音波像の3次元表示”, 日超医講演論文集, 53-134, pp. 373-374 (Nov. 1988)
- 35) 高田悦雄, 伊藤勇, 藤田満, 森久保寛, 信田重光: “乳腺超音波像の3次元表示”, 日超医学会講演論文集, 60-38, pp. 131-132 (May 1992)
- 36) 程相勇, 大矢晃久, 秋山いわき, 伊藤貴司, 名取道也, 田中守, 中島真人: “3次元構造理解のための多断層表示法”, 日超医学会講演論文集, 56 V-13, pp. 71-72 (May 1990)
- 37) 伊東正安: “超音波による生体組織の3次元表示と断層像の再構成”, 第16回画像工学コンファレンス, 8-3, pp. 141-144 (Dec. 1985)
- 38) 伊東, 山本: “色彩指定による高階調処理超音波断層像表示”, 医用電子と生体工学, **21**, 1, pp. 31-35 (1983)
- 39) 程相勇, 大矢晃久, 秋山いわき, 伊藤貴司, 名取道也, 田中守, 中島真人: “3次元構造理解のための多断層表示法(第

写真1 形状と組織性状の同時表示例（豚肉と内部の組織）

写真3 30週の妊産婦から得た胎児像
(東京大学医学部産婦人科教室 岡井崇助先生、アロカ(株) 望月剛氏ご提供)

(a) 頸部 B モード像

(b) 頸部ドブラ像

(c) 頸部におけるドブラ像と断層像の合成像

写真2 頸部の断層像と3次元超音波ドブラ像の同時表示
(日立メディコ(株)佐藤雅文、佐々木明両氏のご提供)

(a) 術中超音波データによる血管の3次元表示

(b) 体表走査によるデータからの血管の3次元表示

写真4 肝臓内血管の3次元表示

(慶大理工中島研究室、慶大医外科学教室、横河メディカルシステムのご提供)

(a)

(b)

写真5 肝癌の輪郭と3次元超音波ドブラによる血管の3次元表示

(自治医大大宮医療センター、山中恒夫先生および、東芝医用機器技術研究所研究所 佐藤武史、佐々木博両氏のご提供)

写真6 切除標本における胃癌の3次元表示

(東京大学医学部産婦人科教室 岡井崇助先生、アロカ(株)望月剛氏ご提供)

- 2 報)”, 日超医学会講演論文集, 57 V-13, pp. 783-784 (Oct. 1990)
- 40) 望月剛, 河西千広, 立川憲吉: “超音波エコー積算表示の研究”, 日超医学会講演論文集, 57-278, pp. 605-606 (Oct. 1990)
- 41) 笠原英司, 望月剛, 広瀬昌紀, 赤羽睦弘, 伊東紘一, 岡井崇: “超音波ビーム方向に最大エコー値検出処理を行う 3 次元超音波画像の表示法”, 日超医学会講演論文集, 61-232, pp. 527-528 (Nov. 1992)
- 42) 伊東紘一, 谷口信行, 望月剛, 広瀬昌紀, 赤羽睦弘, 笠原英司, 入江喬介, 河西千広: “三次元超音波診断装置の開発”, 日超医学会講演論文集, 60-39, pp. 133-134 (May 1992)
- 43) Bui Tuong Phong: “Illumination for Computer Generated Pictures”, Communications of the ACM, 18, 6, pp. 311-317 (June 1975)
- 44) 鳥脇純一郎: “最近の医用画像三次元表示の基本手法”, 医用電子と生体工学, 24, 5, pp. 1-11 (Sep. 1986)
- 45) 岡本貴史, 中橋彌光, 垣内孟, 青木正, 山下正人, 坂崎富夫, 沖史也: “リニア電子スキャン装置による立体写真撮影装置作成の試み”, 243-C-66, pp. 483-484 (Dec. 1983)
- 46) 秋山いわき, 大矢晃久: “断層画像と積分画像を同時に表示するステレオスコープの開発”, 日超医学会講演論文集, 62-138, pp. 295-296 (May 1993 年)
- 47) 桑山哲郎: “ホログラフィによる三次元画像表示”, 電学論 C, 112, 6, pp. 327-339 (1992)
- 48) 秋山いわき, 佐藤甲斐, 伊東紘一: “ホログラフィによる超音波像の 3 次元表示”, 日本超音波医学会誌, 19, 9, pp. 8-15 (1992)
- 49) J. T. McCrickerd and N. George: “Holographic Stereogram from Sequential Component photographs”, Applied Physics Letter, 12, pp. 10-12 (1968)
- 50) 神山卓也, 伴秀行, 橋詰明英, 石川謙: “3 次元超音波ドブラ像・B モード像の合成表示”, 第 33 回日本 ME 学会大会, p. 336 (May 1994)
- 51) 石井誠, 広石和正, 三田村圭二, 伊藤洋二, 上出和光, 川内章祐, 佐々木博, 平間信, 佐藤武史, 佐藤昭洋: “腫瘍血流の観察における 3 次元立体視カラー Doppler の有用性”, 日超医学会講演論文集, 62-255, pp. 529-530 (May 1993)
- 52) 二村貢, 山中恒夫, 秋池功, 井上裕美子, 湯舟憲雄, 佐々木博, 平間信, 佐藤武史, 佐野昭洋: “3 次元カラー Doppler 法の臨床応用”, 日超医学会講演論文集, 63 V-12, pp. 665-666 (Nov. 1993)
- 53) 程相勇, 大矢晃久, 尾本良三, 中島真人: “循環器領域における超音波エコー画像の 3 次元動画像表示法”, 日超医学会講演論文集, 60-211 (May 1992)
- 54) 三神大世, 寺西純一, 宮本憲行, 高辻浩也, 福田洋之, 北畠顕: “経食道心エコー図縦方向断層像を用いた三次元動画像の再構成: 僧帽弁と左房の観察”, 日超医学会講演論文集, 61-277, pp. 617-618 (May 1992)
- 55) 程相勇, 大矢晃久, 名取道也, 中島真人: “3 次元超音波イメージングのためのフジイ推論を用いた境界抽出法”, 信学技報, US 93-60, pp. 17-24 (Oct. 1993)
- 56) Y. Takaoka and Y. Tanahashi: “Three Dimensional Display of Intrauterine Ultrasound Images”, Ultrasound in Medicine and Biology, 20, Suppl. 1, p. S 94 (1994)
- 57) G. T. Herman: “A Survey of 3 D Medical Imaging Technologies”, IEEE Engr. in Med. & Bio., pp. 15-23 (Dec. 1990)
- 58) J. L. Coatrieux, C. Toumoulin, C. Hamon, L. Luo: “Future Trends in 3 D Medical Imaging”, IEEE Engr. in Medicine and Bio., pp. 33-39 (1990)

いとうまさやす

伊東正安 昭和 48 年, イリノイ大学大学院電気工学専攻博士課程修了。昭和 49 年, 東京農工大学工学部電子工学科講師。昭和 50 年, 同助教授, 昭和 61 年, 同教授。以来, グラフ理論, 生体組織の可視化, 特に超音波による生体組織の 3 次元表示, 回路図面およびプリント基板の光学的認識, アナログ回路の CAD に関する研究に従事。昭和 57~58 年, メキシコ国立大学院 (INAOE) 客員教授。現在, 東京農工大学電子情報工学科教授。工学博士