

3次元骨形態計測を目的としたコンピュータグラフィクス 手法による3次元再構成コンピュータシステムの開発

鳥取大学医学部法医学教室 (主任 岡田吉郎教授)
鳥取大学医学部整形外科学教室 (主任 山本吉蔵教授)*

井上 仁, 井上晃孝, 岡田吉郎
滝田寿彦*, 山本吉蔵*

Development of three-dimensional reconstruction system based on the computer graphics technique for the three-dimensional bone histomorphometry.

Masashi INOUE, Terutaka INOUE, Kichiro OKADA,
Toshihiko TAKITA* and Kichizo YAMAMOTO*

Department of Legal Medicine and Orthopedic Surgery,
Faculty of Medicine, Tottori University Yonago 683, Japan*

ABSTRACT

We have developed a new computer system to research the metabolic bone disorders and the age estimation of skeletal remains. This system includes the following functions: the reconstruction of three-dimensional bone structure from a series of bone sections and the three-dimensional bone histomorphometry. We have employed the voxel model for the reconstruction and three parameters (tissue volume, area of surface and Euler number) for the bone histomorphometry. The observer can place the eye anywhere in object space to selectively view a portion of the structure reconstructed from any angle. By using the iliac bone and clavicle samples, we have confirmed the effectiveness of this system as a tool for analysis of the three-dimensional bone structure.

(Accepted on February 6, 1992)

近年高齢化人口の増加に伴って骨粗鬆症が注目されている。骨粗鬆症は骨量が減少した状態であり、その診断を正しく行うためには、骨量を正しく計測することが重要である。代謝性骨疾患の診断法としては非侵襲的骨量計測法と組織学的骨形態計測法の2つがある。非侵襲的骨量計測法は放射線を用いて行う方法³⁾⁴⁾が開発されているが、

得られる骨量は器官レベルでのマクロな値であり、骨動態を間接的に反映したものでしかない。組織学的骨形態計測法⁵⁾は骨生検した組織を直接観察して定量的に評価するもので、骨の質的变化に対してより詳細な情報を提供してくれる。しかし、観察は適当な断面の2次元像に対して行なわれており、計測パラメータも2次元的に測定でき

るものでしかない。そこで、3次元構造そのものを計測することができれば、2次元像からでは得られない貴重な情報が得られるものと期待できる。

また正常な成人の骨においても、一生涯を通じて吸収と形成とが繰り返されており、その構造は年齢と共に変化していく。我々は鎖骨横断面の構造と年齢との関係を調べ、身許不明の白骨死体の年齢推定への可能性について既に報告した⁸⁾。しかしながら、観察の対象はあくまでも2次元の断面像でしかなかった。そこで、3次元構造そのものを計測することができればより普遍的であり、年齢推定の精度が向上するものと期待できる。

以上のような整形外科領域、法医学領域の要求に答えるために、コンピュータを用いた骨3次元形態計測システムを作成した。このシステムは骨の計測を目的として作成されたが、他の組織や断層像に対しても適用が可能である。

システムの構成

1. ハードウェア構成

本システムのハードウェア構成を図1に示す。ホストコンピュータとしてはUNIXワークス

テーションであるソニーのNEWS1460（メインメモリ12Mバイト、ハードディスク240Mバイト、3.5インチ2HDフロッピードライブ）を用いた。ディスプレイはソニーのNWP515を用いた。このディスプレイは1024×768の画素を持ちNEWS1460と接続することによって1670万色中256色を同時に表示できる。画像入力装置はフォトロンのFDM98-RGBを用いた。この装置は256×256画素でRGB各6ビットの分解能を持っている。画像入力装置とホストコンピュータとの間は専用のインターフェイスである東通産業のCOM98-BUSを用いて接続した。TVカメラはソニーのCCD-V900を用い、撮影中の画像はモニターTVで随時確認が行える。

2. ソフトウェア構成

本システムのソフトウェア構成を図2に示す。TVカメラで撮影した像をコンピュータに入力する画像入力ルーチン、入力された2次元像を重ね合わせて3次元構造を再構成する3次元像作成ルーチン、再構成した像を人間に分り易い様に表示する再構成像表示ルーチン、3次元の形態を計測する3次元形態計測ルーチンとそれらをコントロールするメインルーチンの5つのルーチンから成

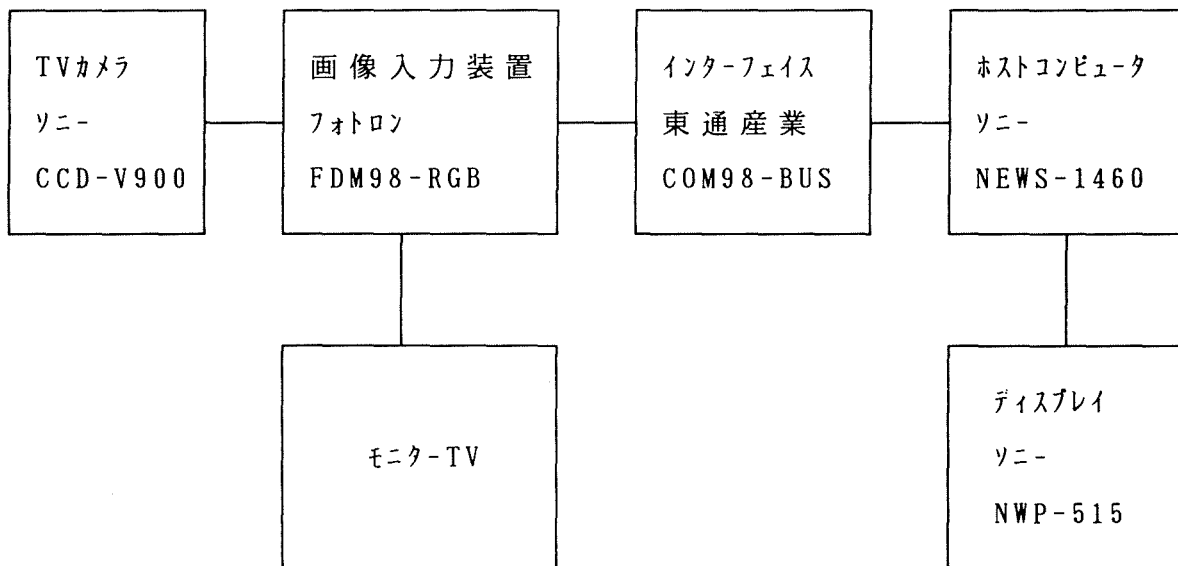


図1. ハードウェアの構成

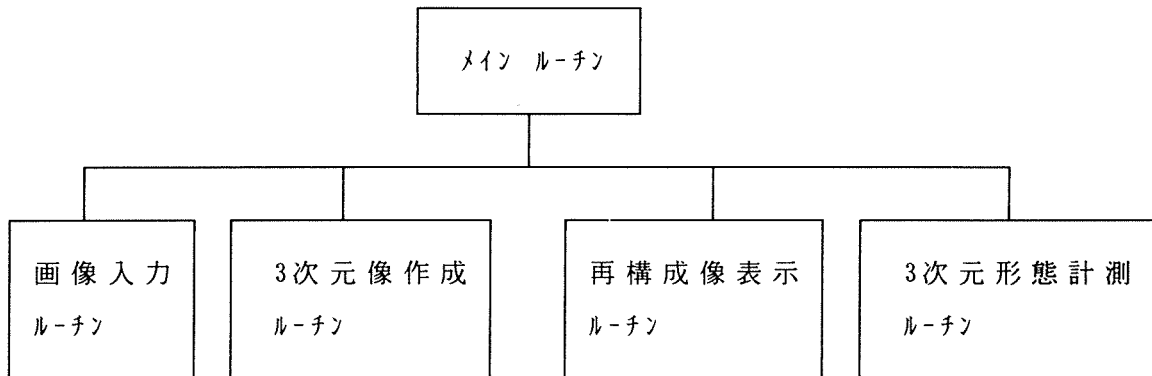


図2. ソフトウェアの構成

る。全てのルーチンともUNIXのC言語を用いて作成した。

処理手順

1. 連続切片の作成

本システムは連続する2次元像を積み重ねて3次元構造を再構成するものである。そのために2次元像には次の様な条件が要求される。

- 1) 対象とする物体とそれ以外の物体あるいは背景とが識別可能であること。
- 2) 連続する2次元像を正しい位置で重ね合わせることができること。

今回対象とした骨組織の連続切片において、上記の条件を満足するために次の様な処理を行った。

- 1) 骨のみを容易に識別できるように、軟部組織と骨髄組織を除去してから包埋ブロックを作成した。
- 2) 重ね合せの目印になるように、包埋ブロックに細い棒を埋め込んだ。

2. 画像の入力

今回の骨切片資料の大きさは約1 cm × 1 cmであり、そのままTVカメラで撮影するには小さすぎる。そこで、一旦写真撮影によって手札サイズのプリントに拡大し、その像をTVカメラで撮影してコンピュータに入力した。画像入力装置の分解能は256 × 256画素であるので、1画素1バイトとすると1枚の切片像に対して65536バイトのコンピュータファイル容量が必要となる。

3. 再構成像の作成

再構成の手法としてボクセルモデル²⁾を採用した。ボクセルモデルは物体を微小な立方体(ボクセル)で組み立てる手法である。まず、入力され

た各2次元画像に対して適当なしきい値で二値化処理を行い、骨と背景とを分離する。抽出された各切片上の骨組織は位置合せの目印に基づいて自動的に移動、回転が行われ、正しい位置で重なりあった3次元データが作成される。

4. 再構成像の表示

コンピュータ上で再構成された物体は、表示されて初めて確認が行われる。それゆえ、認識しやすい形で表示することは重要なことである。本システムでは表示法としてGordon等の方法¹⁾と田山等の方法¹⁰⁾の2種類の表示法を選択できる。前者は比較的短時間に質の良い画像を作成できる。後者は前者に比べると表示に要する計算時間は多いものの、よりリアルな画像を表示することができる。表示に際しては、再構成した物体を任意な角度から見た像を表示できる。

5. 3次元形態計測

3次元形態計測用のパラメータとして次の4つを用いた。

- 1) 物体表面積
- 2) 物体体積
- 3) 物体表面積/物体体積
- 4) 3次元オイラー数⁶⁾

物体表面積は物体を構成するボクセルの六面のうち、他のボクセルと接していない面の総数である。物体の体積は物体を構成するボクセルの総数である。表面積/体積は上で求めた表面積と体積の値を用いて計算される。その値は一般に複雑な物体ほど大きく、単純な物体ほど小さい。3次元オイラー数は物体の連結性を表す尺度である。簡単に言えば、1からその物体に貫通している穴の数を引いた値として定義され、一般に負の値で表される。物体に穴がない場合のオイラー数は1、

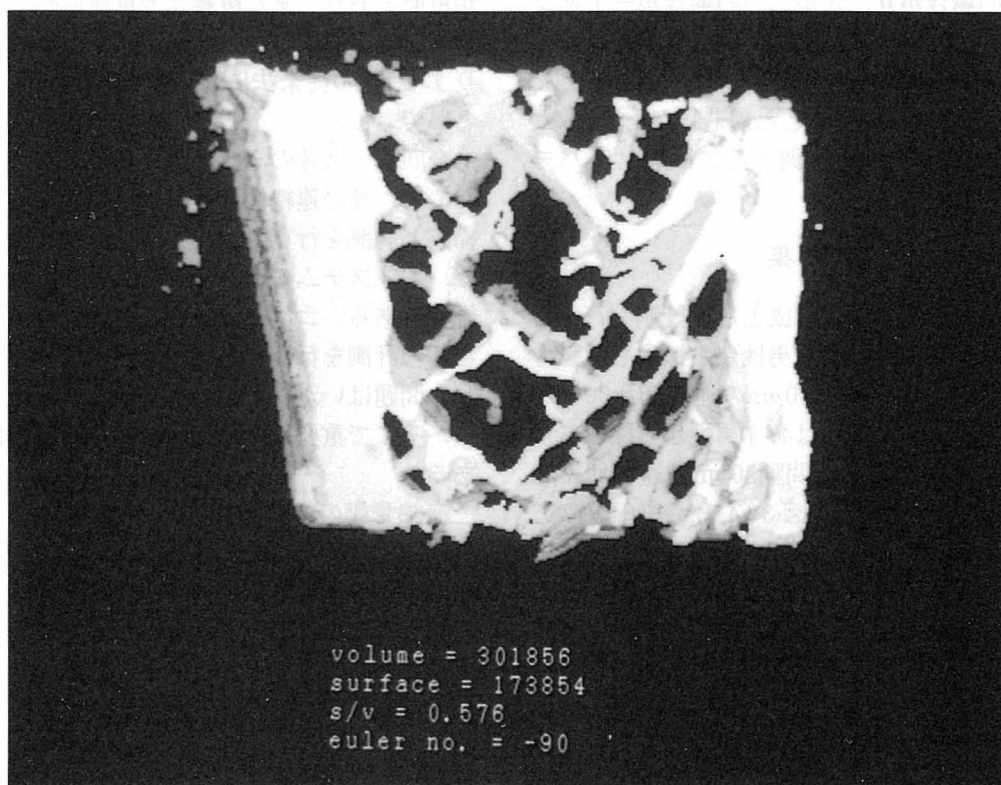


図3. 腸骨の再構成像と計測結果
20 μ m厚の連続切片30枚から再構成を行った.

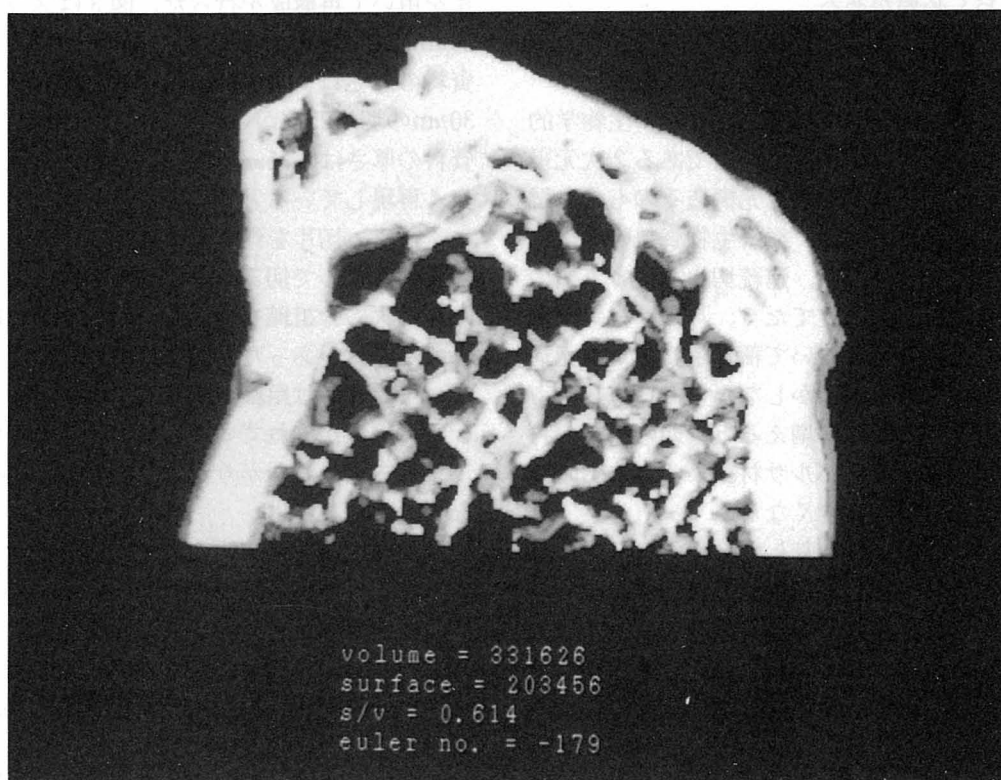


図4. 鎖骨の再構成像と計測結果
30 μ m厚の連続切片25枚から再構成を行った.

穴が一つの場合が0, 穴が二つの場合が-1となる。オイラー数は絶対値が大きくなればなるだけ, その物体には沢山の穴が貫通していることとなり, その物体は複雑に連結した構造物だと言える。これは海綿骨の連結性を調べるには適したパラメータだと思われる。

結 果

本システムを用いて再構成と形態計測を行った例を2例示す。図3は83才男性から採取した腸骨像である。スライス間隔 $20\mu\text{m}$ の連続切片30枚から再構成を行った。図4は47才男性から採取した鎖骨像である。スライス間隔 $30\mu\text{m}$ の連続切片25枚から再構成を行った。図3, 4とも田山等の方法による表示である。

計測パラメータのうち, 表面積と体積は切片を写真撮影する際の倍率によって変るもので, 相対的なものである。例に示した腸骨と鎖骨は倍率もスライス間隔も異なるため, 上記の2つのパラメータでの比較は意味がない。表面積/体積を比較すると鎖骨の方が値が大きく, より複雑な形態であると言える。本システムを用いて形態の比較を行う際には, 同一の拡大率で入力するか倍率を確認しておく必要がある。

考 察

本来的に3次元構造をしている医学・生物学的資料の形態を解析するには, 断面である2次元平面の形態だけではなく, 3次元構造そのものを解析できることが望ましい。従来生物資料の3次元構造を把握するためには, 連続切片を用いて頭の中で3次元構造を組み立てたり, パルサ材等を対象の輪郭にそって切り抜いて積み重ねて3次元構造を再構成していた。しかしながら, これらの方法では連続切片の枚数が増えると, 頭の中での再構成は不可能となり, パルサ材による方法も時間的, 労力的に負担は大きくなる。

一方, CT, MRIを代表とするイメージング技術の進歩によって, 容易に生体の断面像が得られるようになると, 自由に3次元構造を観察・計測したいという要求が高まった。この要求を背景として, コンピュータを用いて連続2次元画像から3次元像を再構成する, コンピュータグラフィックスの技法(CG法)²⁾が開発された。CG法は人間の労力を軽減するだけでなく, 定量的な計測

が可能であり, また複雑な多重構造物では手前の物体を半透明に表示して構造の理解を容易にしたりする³⁾等の従来法にないサービスを提供することができる。

今回我々は骨の3次元構造を定量的に解析するために, 骨の連続切片資料からの3次元構造の再構成と計測を行うコンピュータシステムを開発した。本システムの第一の目的は骨形態の3次元計測である。コンピュータ上では, 再構成された物体の計測を行うことはさほど困難な問題ではない。問題はいかに正確な再構成像ができるかである。そこで重要になるのは, 切片資料の作成法である。

海綿骨梁の幅は約 $100\mu\text{m}$ と言われている⁴⁾。それゆえ, $100\mu\text{m}$ 以上のスライス間隔で切片を作成していたのでは, 1枚の切片の中に骨梁の変化が埋れてしまう。スライス間隔を狭くすると, 微妙な変化を検出できるが, 同じ厚さの物体ならばスライス間隔が狭くなるほど切片の枚数は多くなる。また計測に当っては, 組織の平均的な構造が計測できることが望ましいため, 適当な厚さの領域を計測する必要がある。以上の点を考慮して, 今回は $20\mu\text{m}$ と $30\mu\text{m}$ の二通りのスライス間隔の切片を用いて再構成を行った。図3はスライス間隔 $20\mu\text{m}$ の切片30枚から再構成を行ったものであり, 資料の厚さは 0.6mm である。図4はスライス間隔 $30\mu\text{m}$ の切片25枚から再構成を行ったものであり, 資料の厚さは 0.75mm である。両者とも元の形態を良く再現していると思われる。

さらに, 切片を作る際に注意すべきことは, 組織を壊さないで切ることである。今回用いた資料は非脱灰の骨組織であるため, 切る際に組織が損傷することがあった。海綿部ではさほどでもないが, 皮質骨では組織が裂けることがあった。オリジナルの像が壊れていたのでは, 正しい位置に積み重ねても, つながりが誤った像しか再構成されないことになる。

本システムを使用する上で, けっこう手間がかかることは写真処理が介入することである。それは, 今回用いたTVカメラが写真撮影装置に取り付けられないからであり, 写真撮影装置に取り付けられるTVカメラを用いれば処理は格段に簡易化できる。

今後はより使い易いシステムに改良していくと同時に, 骨の形態を計測して骨粗鬆症の診断や白

骨の年齢推定に役立てたい。

結 語

骨の連続切片から3次元構造を再構成し3次元の形態計測を行うコンピュータシステムを作成した。本システムは骨粗鬆症の診断や白骨の年齢推定の研究に有効である。

本論文の要旨は電気・情報関連学会中国支部第42回連合大会（広島，1991年）において発表した。

文 献

- 1) Gordon,D. and Reynolds,R.A.(1985). Image space shading of 3-dimensional objects. *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 29, 361-376.
- 2) Herman,G.T. and Liu,H.K.(1979). Three-dimensional display of human organs from computer tomograms. *Computer Graphics and Image processing* 9, 1-21.
- 3) 井上哲郎, 串田一博, 宮本繁仁, 矢島秀世, 伊丹康人, 山下源太郎 (1980). X線像による骨萎縮度判定の試み. *骨代謝* 13, 187-195.
- 4) 岸本英彰 (1983). 代謝性骨疾患の骨動態に関する研究-¹²⁵I-Photon absorptiometryによる骨塩定量. *日本整形外科学会雑誌* 57, 1699-1715.
- 5) 今野俊幸 (1987). 人腸骨の組織形態計測学的研究. *日本整形外科学会雑誌* 61, 1081-1091.
- 6) Lobregt,S.,Verbeek,P.W. and Groen,F.C.A. (1980). Three-dimensional skeletonization: Principle and algorithm.IEEE Trans. PAMI PAMI-2, 75-77.
- 7) 中前栄一郎, 原田耕一, 金田和文, 安田峯生, 佐藤明直 (1985). 多重構造物の断面輪郭線からの再構成と半透明手法による内部構造のステレオ表示. *情報処理学会論文誌* 26, 181-188.
- 8) 岡田吉郎, 井上 仁 (1991). 鎖骨横断面組織像よりの年齢推定. *病態生理* 10, 659-661.
- 9) Singh,I.(1978) . The architecture of cancellous bone. *J. Anat.* 127, 305-310.
- 10) 田山典男, 清水則明, 千葉則茂, 太田原功 (1989). 切出し立体画像を高速に生成するボクセル追跡法. *電子情報通信学会論文誌D-2 J72-D-2*, 1332-1340.