

## 3次元画像処理を用いた 頭蓋内容積の計測の自動化に関する研究

○原田浩二<sup>+</sup> 安田孝美<sup>+</sup>  
横井茂樹<sup>+</sup> 鳥脇純一郎<sup>+</sup> 藤岡睦久<sup>++</sup>

<sup>+</sup> 名古屋大学工学部 <sup>++</sup> 独協医科大学

あらまし 頭蓋形成手術におけるX線CT像から頭蓋内領域を自動的に抽出し、その容積を計測する方法について述べる。頭蓋形成手術は変形した頭蓋をいくつかの小片に切断した後、それらを組み合わせて正常な形に修復するものであり、手術計画の際、術後に予想される頭蓋内容積の増加量を知ることは手術の有効性を評価する1つの重要な基準となる。そこで今回、3次元画像処理及び形状補間法を用いることにより、頭蓋内領域を自動的に抽出しその容積を計測する方法を考案したので、処理方法と計測結果を報告する。本方法は術前像、術後像に加え、我々のグループで開発中の手術計画システム(NUCSS)による計画像に対して頭蓋内容積の計測が可能である。これにより実際に行われた手術に対する有効性の術後評価や、手術の計画段階における評価をより定量的に行うことができるようになるものと考えられる。

### An automatic measurement of inner volume of skull using 3-D image processing

Koji HARADA<sup>+</sup> Takami YASUDA<sup>+</sup>  
Sigeiki YOKOI<sup>+</sup> Jun-ichiro TORIWAKI<sup>+</sup> Mutuhisa FUJIOKA<sup>++</sup>

<sup>+</sup> Dept. of Information Eng., School of Eng., Nagoya University

<sup>++</sup> Dept. of Radiology, Dokkyo University School of Medicine

Abstract This paper describes an automatic extraction and measurement of the inner part of the skull volume from X-ray CT images for craniofacial surgeries.

Craniofacial surgery is a surgery which cuts a deformed skull into small pieces of bony blocks and rearranges them to make more suitable shape. One of the important criterion of the skull in estimating the effectiveness of the surgery is to know the expected increase in the inner volume of the skull after the operation. Using 3-D image processing techniques and shape interpolation, we succeeded in extracting inner region of the skull and calculating the volume automatically. The proposed method can calculate the volume of not only (1) the pre-operative skull, but also (2) the post-operative one and (3) the surgical planned one which have many holes due to the surgery. In practical use, this function might be used for quantitative estimation of the post-operative follow up and the pre-operative planning.

## 1. ま え が き

近年、画像処理及びコンピュータ・グラフィックス技術の医学への応用が非常に盛んである。特に、断層像計測装置（X線、MRI、ポジトロン等のCT装置、超音波断層装置など）の普及により、容易に人体断層像が得られるようになった。現在、デジタルデータとしてのこれらの画像を計算機により処理して診断、治療に有効な形で医師に提示できれば、工学技術の医学への大きな貢献となるであろう。これらの断層像は、従来のX線単純撮影のように3次元の物体である人体を2次元のフィルムの上に透過像として表示するのではなく、人体を仮想的に輪切りにした断面として提示するので、診断に際して重複効果によるいわゆる迷妄現象をなくすことに役立っている。更に、連続した一連の断層像をまとめて3次元情報として考えることにより、計算機を用いた様々な応用が期待され、CT像から3次元表示のための研究が活発に行われている<sup>(1)</sup>。筆者らは表示にとどまらず、グラフィック・ターミナル上から対話的に表示像に手を加えることを可能にし、これを手術計画に利用しようとする頭蓋形成手術プランニングシステム NUCSS (Nagoya University Craniofacial Surgical-planning System) の開発を1985年頃より行っており、これまでに十数例の症例に対して外科医による手術計画を行い、十分に実用であるとの評価を得ている<sup>(2)(3)</sup>。この頭蓋形成手術では形状の修復に加えて、頭蓋内容積を増加させることが重要な目標である場合が多い。術後に予想される頭蓋内容積が術前と比べてどの程度増加するかが手術計画時に提示できれば、その計画が妥当なものかどうかを事前に評価することができ、最適な手術を十分に検討して立案することが可能となる。

従来、筆者らは各スライス上での2次元画像処理による頭蓋内領域の自動抽出を試みたが、2次元画像処理では上下に位置するスライス間での領域の隣接関係が反映されないため、特に頭蓋底部において正しい領域抽出が出来なかった。そのため、便宜的に全スライスについて頭蓋内領域を手入力でトレースしていき、容積を計測して手術計画の評価に用

いていた。しかしながら通常の頭蓋形成用に撮られるCT断面は60~100枚にも及び、これをすべて手入力によって処理することは過大な労力と時間（実際には5~6時間）を要し、多忙な外科医からはこれを軽減することが求められていた。

このような背景のもとで、今回3次元画像処理を用いた頭蓋内の領域の自動抽出法と容積の計測方法を開発し、ほぼ満足のいく結果が得られたので報告する。計測対象の頭蓋像は、①術前、②術後、③NUCSSによる手術計画後、の3種類である。

従来、頭蓋内容積の計測は通常のX線透過像を用いる方法により近似的に求めていたが、最近、自動的に比較的精度よく測定する方法を川崎らが報告しているが<sup>(4)</sup>、これは投影面上での各画素のスクリーンから骨までの距離を加算する方法がとられており、術後の穴の開いている頭蓋には適用することが出来ず、また術前の頭蓋においても、投影方向から隠れている部分は測定されないことからある誤差を伴うのは避けられない。

## 2 使用したCT画像の濃度値特徴

本研究で用いた原画像は、図1に示されるように体軸方向に等間隔に連続して撮られた一連の頭部X線CT像である。スライス間隔は2mmであり、スライス数は約100枚である。スライスの解像度は、256×256画素で、各画素の大きさは、約0.7mm×0.8mmである。

通常のX線CT像のCT値は、Hounsfield値(H.U)、またはEMI値(E.U)のいずれかを使用する。

しかし、本研究で用いるCT像は、あらかじめ頭蓋全体の3次元再構成を目的として撮られており、また正確な計測が求められていることからスライス間隔もできるだけ狭くする必要があるのでスライス総数が60~100枚とかなり多くなる。これを通常のX線CT装置で撮影することは患者への被ばく量が問題となる。そこでX線を減衰させるフィルタを用いて撮影を行った。この処理によりCT値の持つ意味は大きく異なってくるが、総

数100スライスに対する被爆量を一般のX線直接撮影の十数枚程度に抑えることができる。その結果、X線が非常に弱いため軟部組織の境界が不明瞭となり、本研究の目的である頭蓋内領域を抽出するには、骨領域のみをたよりに行わなければならないことになる(図3)。

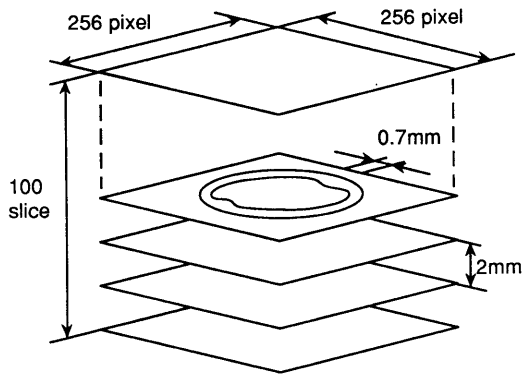


Fig.1 Original image data.

\* ) X線の減衰係数の値を水を0とした相対値で表す。-1000から1000の値をとるHounsfield値と-500~500の値をとるEMI値が用いられる。

### 3 術前の頭蓋内領域の抽出及び容積計測

自動抽出処理に入る前に不必要な処理を避けるため、あらかじめ計測に不要なスライス(下から30スライス程度は頭蓋内領域の含まれない)を指定して、その部分の処理は行わないことにする。この指定はグラフィックディスプレイ上に3次元画像を表示して、医師が対話的に行う。

術前の頭蓋骨は穴がほとんどなく、比較的単純な処理手順で、頭蓋内領域を抽出することが可能である(図2)。抽出手順を以下に示す。

① しきい値処理により頭蓋内部のおおまかな抽出を行う。今回の画像のCT値を細かく調べたところ、CT値が1010~125

0の間を1、その他を0とするようなしきい値が最もよく頭蓋内領域を表すことが確認できた。ここでCT値1010という値は脳組織のとりCT値の下限であり、1250という値は骨領域のとりCT値の下限である。この値は多数の症例で確認することが出来た。このしきい値処理により、大まかな頭蓋内領域が抽出でき、不要領域としては主に、眼球、皮膚等が残る。眼球は細い視神経で頭蓋内部と接続しており、皮膚は頭蓋骨の表面の部分に薄く付着した形で存在することが多い。

② 3次元図形収縮により頭蓋内部と眼球の切り離しを行う。スライス毎の2次元画像処理では、収縮をかなり多数回実行しなければ領域の分離が出来ず、形状が大きく変化するという欠点があったが、3次元処理を採用することにより、2回の反復で十分切り離せた。これは、視神経の直径が約4mmであるのに対して、スライス間隔が2mmであり、3次元収縮を2回行うことでZ軸方向には8~10mm縮退するためである。この段階で頭蓋内領域は他の領域(主に眼球と皮膚)から分離される。

③ 頭蓋周辺の不要領域を除去するため、ラベリングを行い、ボクセル数の小さい連結成分を消去し、頭蓋内領域成分のみを抽出する。

④ 図形収縮を行った回数(本研究では2回)だけ図形拡散を行い、最終的な頭蓋内領域を決定する。

こうして抽出された領域を構成するボクセルの総数を求め、これにボクセルの体積を乗じて頭蓋内容積とする。1ボクセルの体積は、撮影時の条件によって異なる。

処理結果は、スライス毎の画像、及びNUSCSを利用して3次元化した画像により視覚的に確認する。

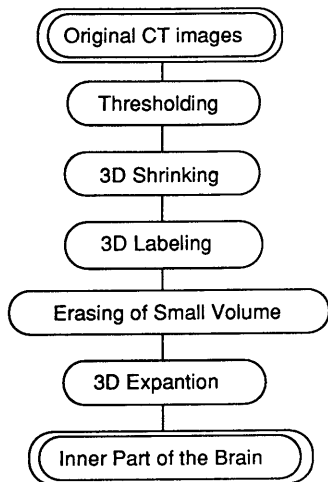


Fig.2 Processing flow for extraction of inner part of the pre-operative skull.

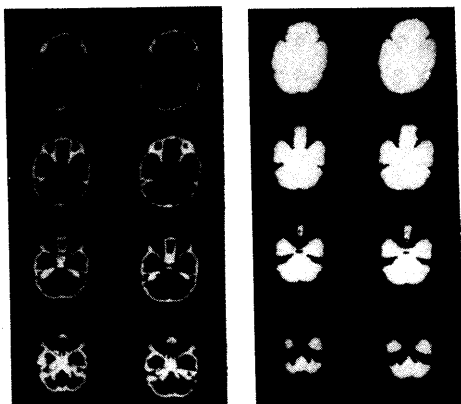


Fig.3 Original image and processing image(alice).

#### 4 手術計画後及び術後の頭蓋内領域の抽出及び容積計測

頭蓋形成手術では頭蓋を小さなブロックに切断し、それらを全体が適切な形状になるように再建する方法がとられるため、術後及び計画後の頭蓋骨には数箇所から数十箇所の隙間があいている(図4)。したがって前章の方法では適切な頭蓋内領域を抽出することが出来ない。これは、本文で使用しているCT画像は(2章参照)X線量を少なくして撮影しているため、本来存在すべき脳と頭蓋骨内壁の間の境界が明確に識別できず、前節の方法では骨の隙間の部分で頭蓋内領域と外部とが分離不可能となるためである。そこで、いくつかの穴があいた頭蓋骨から疑似的な頭蓋内壁を推定して頭蓋内容積を自動的に計測する方法を開発した。全体の処理手順と処理の概要を図5, 6に各々示す。これは大別して以下の3段階の処理により実行される。

- (1) 頭蓋疑似内壁の生成(隙間の補間)
- (2) 頭蓋疑似内壁の補正
- (3) 頭蓋内領域の抽出及び容積計測

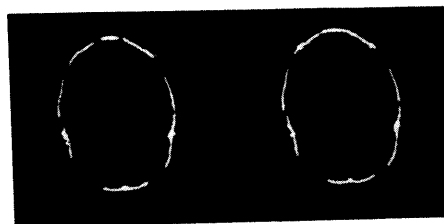


Fig.4 Post-operative image of skull (slice).

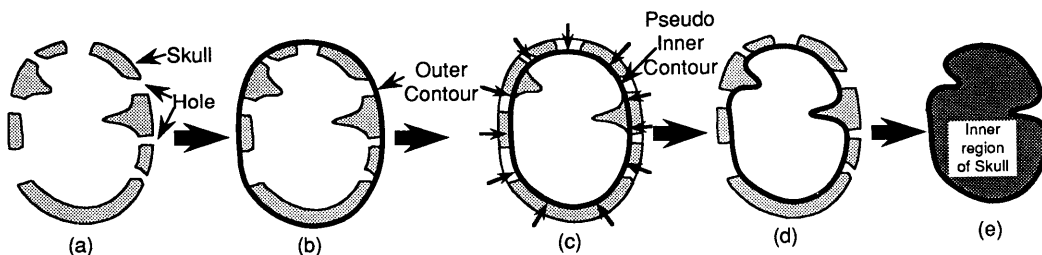


Fig.5 Processing flow. (a) Skull surgical planned skull (b) Outer contour of the skull (c) Pseudo inner skull contour (d) Final inner skull contour (e) Extracted inner region of the skull

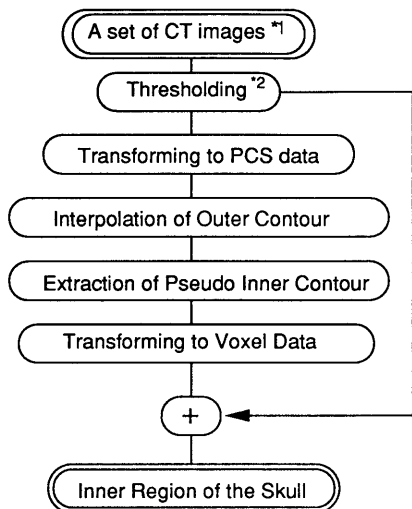


Fig. 6 Processing flow of the system.  
 \*1 Skull images in planning case  
 \*2 Skipped in the planning case

#### 4. 1 頭蓋疑似内壁の抽出（隙間の補間）

(1) 大まかな頭蓋内壁の極座標系表現と隙間の補間

頭蓋内領域を抽出するためには、まず手術のためにできた頭蓋骨の隙間をうめなければならない。本文では、まず頭蓋骨画像からそのおおまかな内壁を極座標系（Polar Coordinate System-PCS）表現し、これを補間することによって隙間をなくす方法を用いた。

PCS表現は、3次元形状をPCSの原点からの基準線に対して、 $\theta$ 、 $\phi$ 方向への距離 $r$ によって式(1)のように表現するものである。(図7(a))

$$r = PCS(\theta, \phi) \quad (1)$$

但し $\theta$ 、 $\phi$ は適当なサンプル間隔でとられるので、PCSにより表現されるのは離散的な点の集合となる。ここで、厳密な頭蓋骨内壁のPCSデータを直接得るのは現時点では不可能である。というのは内壁のPCSデータを得るためには、ある $\theta$ 、 $\phi$ 方向に骨領域を探索（スキャン）して一番近いデータを拾

うことになるが、 $\theta$ 、 $\phi$ について $r$ が一意に決定できない場合、つまり頭蓋骨内壁の突起などにより、スキャンしている直線と骨の交点が複数ある場合、内壁の判断が難しいからである(図7(b))。一方、頭蓋骨の外側は突起などはなく、その輪郭は比較的単純な形状となっていることから、かなり正確な形状の取得が期待される。そこで、比較的容易に得られる外壁から疑似的に内壁を推定する。

外壁のPCSはスキャンした方向で原点から最も遠い交点として得られる。次に頭蓋骨の厚さはほぼ一定であることを利用して、この外壁のPCS表現された点列の $r$ から頭蓋骨の厚みを引いたものを疑似内壁の大まかな位置を表す点列とする。頭蓋骨の厚みは形成手術を受ける幼年期においてはほぼ一定であり、本文では5mmとしている。より正確な値を必要とする場合は、各症例に対してCT像をスライス像のままディスプレイに表示し、その上で計測をおこなって、厚みを求めればよい。

また、PCS表現された点列は頭蓋骨内壁の全ての点を表現したのではなく、 $\theta$ 、 $\phi$ のサンプリング角度(本文では $2^\circ$ )により等間隔にサンプリングした点のみを表現したものとなっている。当然のことであるが、ある $\theta$ 、 $\phi$ の方向では骨の隙間となり骨領域が全く存在しないこともある。このような方向については近隣の点列からの線形補間により値を決定しているが、詳細については文献(6)にゆずる。外壁は比較的単純な形状をしているのでこのような形状補間によってもかなり正確な形状を推定することができる。これにより骨の隙間を埋めることが可能となる。

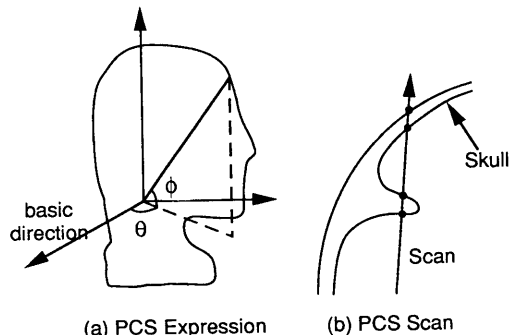


Fig.7 PCS Expression

(2) 頭蓋内壁上のボクセルの抽出

PCS 表現された内壁点列を3次元デカルト座標系に変換する。この際、PCS データから変換された離散点列に基づいて、連続的な頭蓋骨内壁を構成するボクセル群を求める必要がある。

頭蓋内壁面を構成するボクセル群は、PCS 表現における(隣接する3つの)頭蓋骨内壁を表す輪郭点列の隣接3点を頂点とする微小三角形と交わるボクセルとして求められる(図8)。具体的には、まずPCS 表現された輪郭点A ( $\theta_n, \phi_k$ ) に注目し、点B ( $\theta_{n+1}, \phi_k$ )、点C ( $\theta_n, \phi_{k+1}$ )、および点D ( $\theta_{n+1}, \phi_{k+1}$ ) の4点をデカルト座標に変換する。変換された4点A'、B'、C'、D' を頂点とする2つの三角形  $\Delta A' C' D'$  及び  $\Delta A' B' D'$  を求め、それらと交わるボクセルを内壁を構成するものとする。これを全ての  $\theta, \phi$  について行えば頭蓋内壁のボクセル群が求められる。

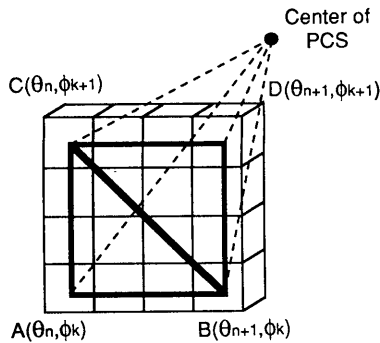


Fig.8 Construction of Voxel Data with a triangular patch.

ここで、PCS 表現された隣接する3点により構成される三角形の内部に含まれるボクセル群を求める方法について述べる。まず3点の中の任意の1点から他の2点へ向かう2つのベクトル  $\vec{a}$ 、 $\vec{b}$  を考える。これら2つのベクトルから三角形の内部点の位置  $\vec{p}$  は次式で与えられる。

$$\vec{p} = \alpha \vec{a} + \beta \vec{b}, \quad (0 \leq \alpha, \beta \leq 1, \alpha + \beta \leq 1)$$

- (2)

上式により決定される三角形内部に位置するボクセルを壁面を構成するものとして抽出する。(図9) これをすべての輪郭点列について行うことによって、連続した穴のない頭蓋疑似内壁を生成する。

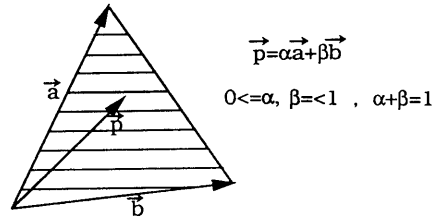


Fig.9 Arbitrary position  $\vec{p}$  in a triangle.

4.2 頭蓋疑似内壁の補正

前節の手順で求めた疑似内壁は、外壁から推定されているため内壁の突起部が含まれていないことから、これだけで正確な頭蓋内領域を抽出することはできない。そこで、元の頭蓋骨と、疑似内壁とを合成することにより頭蓋骨の隙間の部分が疑似内壁データにより埋まることになる。(図5(d))

4.3 頭蓋内領域の抽出及び容積計測

以上の方法で得られた頭蓋骨内壁から、頭蓋内領域を抽出する。まず、補正後の内壁に存在する小さい穴(例えば、眼球部の視神経の通る穴)を埋めるために3次元図形拡散を行う。次に濃度値反転を行い、背景及び頭蓋内領域を1とする。その後3次元ラベリングを行い、体積が最大となる頭蓋内領域のラベルを1、その他の領域を0とし、最後に上記の拡散と同じ回数拡散を行うことで頭蓋内領域を抽出する。その後術前の場合と同様の方法で容積を計測する。

\* ) 濃度値反転をしているのでここでは拡散となる。

5 結果及び考察

5.1 術前像

(a) 頭蓋内領域の抽出

術前の症例5例の全てにおいて成功した。これは処理結果をスライス毎にグラフィック

ディスプレイ上に表示して視覚的に確認した。この際の判定基準として以下の評価を行った。

- ① 眼球は残っていないか
- ② 不要領域は残っていないか
- ③ 必要な領域が削除されていないか
- ④ 形状は正しいか

これらの確認は医師がスライス毎の手入力で行った。これらの確認は医師がスライス毎の手入力で行った。これらの確認は医師がスライス毎の手入力で行った。これらの確認は医師がスライス毎の手入力で行った。

(b) 容積の計測結果

表1に各術前症例に対する頭蓋内容積の計測結果を示す。

Table.1 Results of processing (pre-operative data).

Data Name	Number of Voxels	Volume of Inner Region
PRE1	697666	915.5cc
PRE2	1113340	1029.6cc
PRE3	1036409	958.5cc
PRE4	1229804	1137.3cc
PRE5	922619	1210.7cc

Table.2 Comparison of AUTO(automatic processing data) with MANUAL(manual input data) in pre-operative data(POST1).

	PRE1	PRE5
AUTO	915.5cc	1210.7cc
MANUAL	927.5cc	1223.9cc
ERROR RATE	-1.3%	-1.1%

このうち2例について医師の手入力結果と比較すると、かなり精度のよい計測結果であるといえる(表2)。本文で述べた自動抽出法による領域と手入力によるものをディスプレイ上にスライス毎に重ねて表示することにより、形状の正当性も視覚的に確認した(図10)。

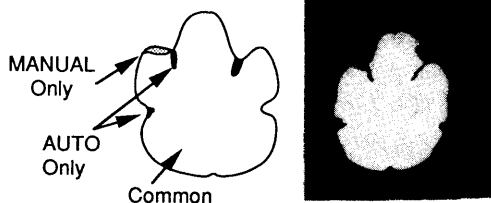


Fig.10 Differences between MANUAL and AUTO.

White :Common Region  
Green : Manual Input Only  
Red : Auto Only

5. 2 計画像及び術後像

前節の方法によって生成される内壁は目の位置よりも上部においてはかなり正しい形状となっているが、眼球を含むような比較的低い位置においては必ずしも正しい形状にはならなかった。これはスライス下部では頭蓋骨が複雑に入り組んでいるのだと考えられる。よって現段階では、補間の失敗したスライス下部では手入力で行った。手入力の必要なスライス数は、典型的な症例について全スライス数60の中の12スライスであった。表3に術後及び計画後の頭蓋内容積の計測結果を示す。

Table.3 Results of processing (post-operation data and planning data).

Data Name	Number of Voxels	Volume of Inner Region
POST1	701689	1062.2cc
PLAN6	1184005	1095.0cc

また表4に同一患者の術前、術後の容積変化についての自動計測結果、及び手入力による容積との比較を示す。表より、この手術による患者の頭蓋内容積の増加量を知ることができる。ここで、術後の結果が自動の場合と手入力とで5%異なるのは入力を比較的粗く行ったためと考えられる。また、この結果を医師に提示した結果、正しく計算されているとの評価を得た。

先に述べた川崎らの方法では、術前での誤差が数%であると報告されているのに対して、今回開発した方法では約1%であった。また、

川崎らの方法では術後の頭蓋内容積を計測することが出来ないと思われる。

なお使用したハードウェアは、名大大型計算機センターのFACOM M-780、グラフィックディスプレイGráfica M-1008、またソフトウェアは、Fortranを用い、一部3次元画像処理パッケージSLIP-3Dを使用した。

Table.4 Comparison of AUTO(automatic processing data) with MANUAL(manual input data) in pre-operative data and post-operative data (using PRE1 and POST1).

	Pre-Operation	Post-Operation	Increase Rate
AUTO	915.5cc	1062.2cc	+16.0%
MANUAL	927.5cc	1121.3cc	+20.9%
ERROR RATE	-1.3%	-5.6%	

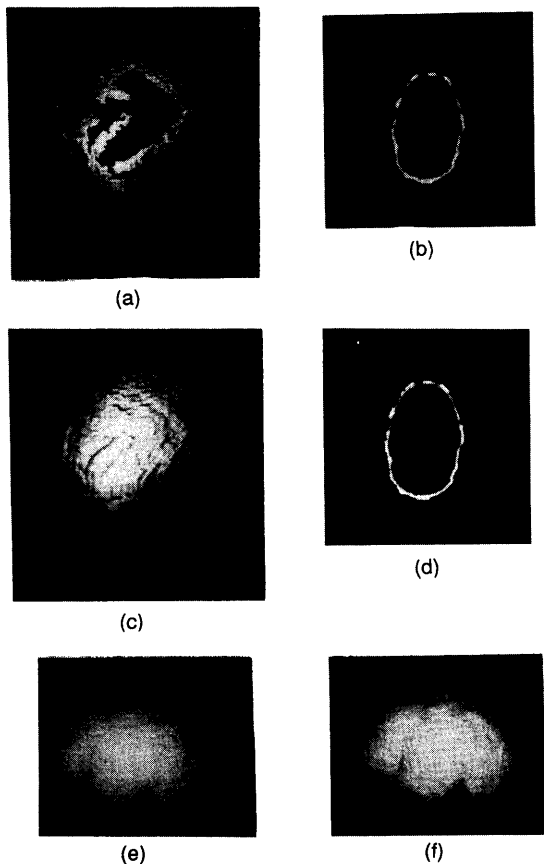


Fig.11 (a) Original post-operative skull image (3-D)  
 (b) (slice) (c) Interpolated one (3-D) (d) (slice)  
 (e) Extracted inner region of the skull (MANUAL) (3-D)  
 (f) (AUTO) (3-D)

## 6 むすび

頭部X線CT画像から、3次元画像処理及び形状補間法を用いることで、頭蓋内容積を自動計測する方法について述べた。本方法により、頭蓋骨を小片に切断した後正常な形に再構築する頭蓋形成手術における術前、術後及びNUCSSによる計画後の頭蓋内容積を抽出することに成功した。計測結果も医師からはほぼ満足との評価を得ている。今後は現段階で一部手入力が必要な処理を全自動にする検討を行っていく予定である。

最後に医学面から有益な御助言を賜り、貴重なCT画像を提供して頂いた慶応義塾大学医学部形成外科中嶋英雄助教授と栗原卓也博士に感謝する。また本システムの開発に努力頂いた井上基晴氏(株)日本IBMに感謝する。なお、本研究の一部は、文部省科研費(一般(c)N0.63633009)による。

## 参考文献

- (1) 特集“医用3次元画像処理の技法と応用—現状と展望”、BME誌, Vol. 3, No. 8, 1989.
- (2) 橋本、安田、横井、鳥脇：“CT画像を用いた頭蓋形成手術プランニングシステムの開発” 信学技報, PRU87-4 (1987.5)
- (3) 安田、橋本、横井、鳥脇：“CT画像を用いた外科手術計画支援システム” 信学論(D), Vol. J70-D, No. 11, pp. 2134-2140 (1987.11)
- (4) 川崎、松田、松本ほか：“頭蓋顔面形成手術のための頭蓋内容積測定法の検討” 映像情報(M), Vol. 20, No. 20 pp. 1114-1117, (1988.10)
- (5) M. Fujioka, S. Yokoi, T. Yasuda, et. al.: “Computer-Aided Interactive Surgical Simulation for Craniofacial Anomalies Based on 3-D Surface Reconstruction CT Images.”, Radiation Medicine, Vol. 6, No. 5, pp. 204-212, 1988
- (6) 萬、横井、鶴岡、三宅：“頭部CT像の三次元表示の一方法” 医用電子と生体工学, Vol. 21, No. 6, pp. 439-444, (1983.10)