

三次元画像を利用した 股関節手術計画支援システム

A Hip Joint Surgical Planning System Using 3-D Images

曾山豊 安田孝美 横井茂樹 鳥脇純一郎
Yutaka SOYAMA Takami YASUDA Shigeki YOKOI Jun-ichiro TORIWAKI

名古屋大学工学部情報工学科

Department of Information Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya University

あらまし 3次元画像(X線CT画像)を用いた股関節部手術シミュレーション・システムについて報告する。本システムは整形外科医と協力して臨床の現場で使われることを目的として開発したもので、既に数例の臨床例がある。本システムの特徴は、ほとんどの股関節手術がシミュレーション可能であること、また移動後の骨片の干渉チェック・接触面の表示を行っている点など実用的に重要な機能を備えている点に特徴がある。また、本システムにより整形外科医が行った手術計画例を示す。

Abstract This paper describes a hip joint surgical simulation system using a three-dimensional image (X-ray CT images). We developed this system in cooperation with surgeons, and we have already applied it to several clinical examples. According to a surgeon who used our system for actual surgical plannings, most of hip joint surgeries operated at the present time can be simulated. Our system has useful functions in order to plan surgeries such as interference check in movement of a bone. We show an actual surgical planning process performed by the surgeon with our system.

1. まえがき

股関節部整形手術は股関節の骨の形態異常(先天的あるいは病気)のため股関節の機能が悪くなったものを修復するための手術である。本研究では、コンピュータ・トモグラフィ(CT)装置によって連続的に撮影(計測)された断層像(以下CT画像)を用いて股関節部整形手術シミュレーション・システムを開発した。

本システムは我々のグループで既に開発した頭蓋形成手術計画システムNUCSS(Nagoya University Craniofacial Surgical-planning System)⁽¹⁾をベースにしている。NUCSSは頭蓋の形成手術シミュレーションを行うものであり、このような手術はそれほど症例数が多いとは言えなかった。股関節手術はこれに比べてかなり行われている手術であり、この意味で本システムの開発は3次

元画像を利用した手術計画システムの実用性を高める点で意義が深いと考えられる。股関節部の手術は頭蓋形成手術と異なる関節部特有の性質を持つため、処理・表示に工夫を要する他、システムの目的が手術後の形の修復というよりも、安定性・動きの良さといった機能的な意味での修復の評価にあるという新しい側面が生じる。そこで、今回股関節部手術計画のために以下の諸機能を開発した。

- 《1》骨盤・大腿骨の自動分離
- 《2》骨盤ソケット部切断シミュレーション機能
- 《3》骨片移動時の干渉チェック
- 《4》半透明表示法
- 《5》接触面表示機能

今回はこれら諸機能について説明し、実際の手術計画例について報告する。

2. 股関節部整形手術シミュレーション・システムの概要

ここでは、システム全体の概要について述べる。まず、システムの概要を図1に示す。

(1) 骨盤・大腿骨の自動分離

股関節部連続CT像に対して、前処理として3次元画像処理を用いた骨盤・大腿骨の自動分離を施す。この結果は、それぞれが別のラベルを割り当てたボクセルデータとして表現され、NUCSSに入力される。

(2) 3次元像生成

任意方向から見た3次元像生成には2つの手法を用意した。1つは従来のNUCSSが行っている投影変換法である。これは、本来は立方体であるボクセルを球と見なし、Z-Buffer法(Z-Buffer上のsmoothing及びgradient-shading法を伴う)によりスクリーン上の輝度値計算を行う。また、股関節部において大腿骨頭は骨盤ソケット部の中に潜り込

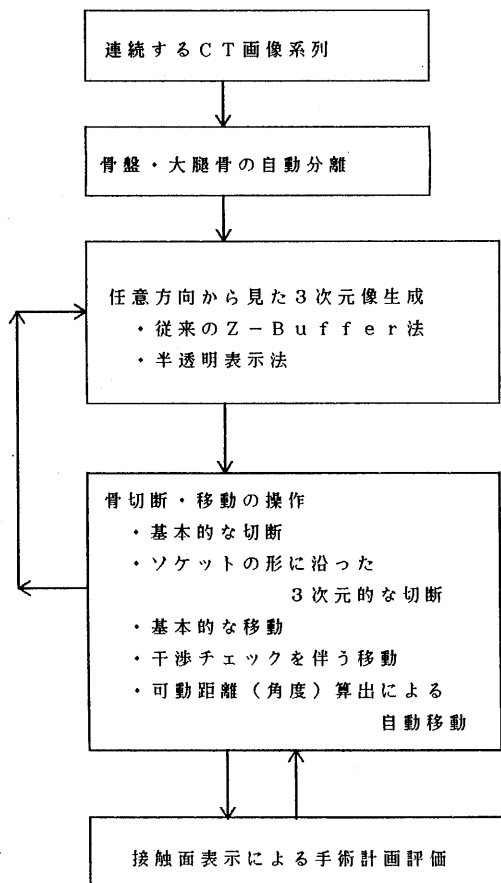


図1 システム概要図

でいるので直接観察することができない。そこで骨盤・大腿骨双方の表面形状と相互位置関係を把握し易くするため、新たな機能として半透明表示法を開発した。

(3) 骨切断・移動の操作

NUCSSでは任意方向からの切断・移動を行いその結果にまた別方向からの切断・移動を行うという操作を幾つも組み合わせることが可能である。

『曲面による切断』 現在、股関節部の整形手術は骨盤部を手術する方法と、大腿骨を手術する方法に大別され、数通りの術式に分けられる。これらのほとんどは平面で切断する手術を行うため、NUCSSでシミュレートすることが可能であることが知られた。しかし、股関節に関して最近開発された有効な手術方法として、股関節ソケット部をソケットの形に沿って曲面的に切断する方法があるが、この方法には従来のNUCSSではシミュレートできない。そこで、ソケット部が浅い患者に対して、ソケットの一部をその形に沿って切断し、外側へ移動させることによりソケット部を深くする症例に適用可能な機能(図2)を開発した。

『干渉チェック』 また、従来のNUCSSは骨片移動時において骨片どうしの干渉チェックを行っていなかったため、移動後の骨どうしが互いに交差する(めり込む)ことが生じた。頭蓋形成手術の場合は骨を曲げたり、削ったりして形を整えることが目的のため問題は無かったが、股関節部では正確な接合判定を必要とするため問題になる。そこで、必要時には干渉チェックが出来るような機能を新たに開発した。さらに、これを骨移動・回転シミュレーション機能の中に盛り込み、ある骨片が他の骨片と干渉するまで、指定された方向あるいは回転の向きに可動距離(角度)を自動算出して移動させる機能を開発した。

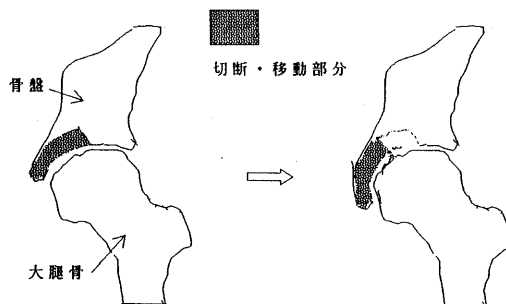


図2 曲面的切断を伴う手術の概念図

(4) 接触面表示機能

術後の大腿骨の荷重が安定して骨盤ソケットにかかるためには、両者が互いに広い面積で接触している必要がある。NUC S Sを用いた従来のシミュレーションにおいては、この点の評価は、任意方向から見た3次元投影像により医師が経験的に行っていた。今回、これに加えて、指定された骨片と他の骨片との距離がある値以下の領域を指定された骨片にマッピングすることにより手術計画の評価を定量的に行える機能を開発した。

3. 骨盤・大腿骨の自動分離

骨盤と大腿骨はCT値の差が無く、単純にしきい値処理で二値化するだけでは接続してしまう場合が多い。従って、原断層像から人手によって分離・抽出することになるが、断面の数が多くなるとこれには多大な労力を必要とする。

そこで本研究では3次元画像処理を利用した骨盤・大腿骨の有効な分離方法を開発した⁽²⁾。

3-1 処理手順

骨盤・大腿骨の分離手順を図3に示す。

処理対象が3次元デジタル画像データとして与えられるため、差分、ラベル付け、拡散などは全て3次元的なものである⁽³⁾。なお、スライス毎に2次元画像処理を行った場合と3次元画像処理を比較すると、3次元差分フィルタではスライス面に対して平行に存在するエッジも他の方向と同様に出力されるが、2次元差分フィルタではこのようなエッジは出力されない。また、連結成分のラベル付けにおいても、スライス毎の2次元ラベリングでは別々のラベルになるが3次元ラベリングでは同一ラベルとなる(1個の連結成分である)ことはしばしば生じる。

本システムにおいては、これら3次元画像処理には我々の研究グループで開発した3次元画像処理パッケージS L I P - 3 D⁽⁴⁾を利用している。

I. 骨盤及び大腿骨候補領域の抽出

①差分フィルタを利用して骨盤及び大腿骨部の大まかな境界面を出す。三次元差分フィルタとして、1階、2階、ラプラシアン、局所最小値差分、P r e w i t tの方法、S o b e lの方法、レンジフィルタを比較した結果、本研究では最も良く境界面部分を強調出来た18近傍型の局所最小値差分を用いることにした。その具体的内容は下記の通りである。

【18近傍型局所最小値差分の

アルゴリズムについて】

{ I A (i , j , k) } : 入力画像

{ I B (i , j , k) } : 出力画像

$I B (i , j , k) = I A (i , j , k) -$
 $\{ I A (i , j , k) \}$ を除く、 $I A (i , j , k)$ を中心とする3行3列3段の18近傍の点の濃度値の最小値)

(近傍は図4参照)

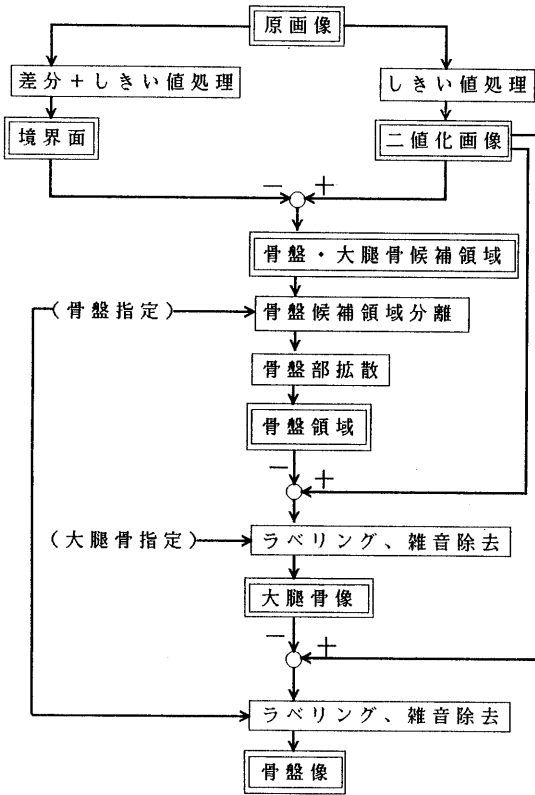
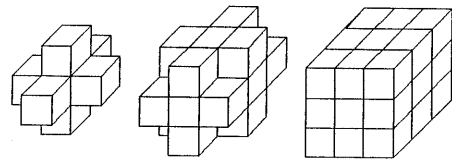


図3 処理手順



6近傍 18近傍 26近傍

図4 3次元デジタル画像の近傍について

②原画像をしきい値処理で二値化した結果（二値化画像と呼ぶ）より、差分フィルタ出力が一定値以上の画素（境界面画像）を消去する。

これにより大まかな骨盤領域と大腿骨領域の候補が分離して得られる。また、骨盤領域・大腿骨領域の判別には、それぞれのボクセル数により、自動的に判断している。

II. 骨盤及び大腿骨候補領域の補正

Iの結果の骨盤及び大腿骨候補領域は共に境界面の部分が削られたものになっているので、次の手順により補正する。

①分離された骨盤部を2回拡散させ、境界面画像との論理積を行う。その結果を二値化画像から差し引くことにより大腿骨像を抽出する。

②二値化画像から上の大腿骨像を差し引くことにより骨盤像を抽出する。

3-2 抽出結果

1人の患者のCT画像に対して本方法を設計し、他の患者のCT画像（7人分：14例）に対して抽出実験を行った結果、1例を除いて全て正しく抽出が出来た。失敗した1例はその差分出力が思わしくなかったのが、失敗の理由と思われる。また、成功した13例中、1例は原画像をしきい値処理し、その後ラベル付けするだけで骨盤と大腿骨の分離が可能なものであった。しかし、この例に対して本処理手順による骨盤と大腿骨の分離を行っても骨盤・大腿骨双方とも形状変化など殆ど起こらないことが確かめられた。

本方法は他の様々な部分の関節部、例えば頭部CT像における顎の関節部の分離などに応用出来ると考えられる。

なお、本方法は我々が昨年文献（2）等に発表済みであるが、同様な手順が最近Juha Ylä-Jääskiらにより報告されている⁽⁵⁾。

4. 骨盤ソケット部切断機能

4-1 ソケット部中心の抽出

ソケット部はおおよそ球形をしているという特徴を使い、ソケット部の中心点を自動抽出する。

①骨盤部の3次元境界面追跡を行う。

②ソケットの大まかな中心点Pを与え、点Pより放射状にサーチして骨盤部の境界面からソケット部の境界面を抽出する。

③点Pとソケット部境界面上の各点との距離の分散を求める。

④点Pの6近傍の点も同様にして距離の分散を求め、近傍内で分散最小となる点を点P'とする。

⑤点P'を次の注目点としてその近傍での距離の分散を調べ、注目点を分散が最小な点へと移動させる。

⑥注目点の距離の分散がその6近傍の点に於ける距離の分散のどれよりも小さい時処理を終了し、その時の注目点をソケットの中心点とする。

この様にして、順次、注目点の近傍の分散を調べながら、hill-climbing法によって分散が最小となる点を求め、ソケットの中心点とする。hill-climbing法では、真の解が求まるかどうかは初期値の取り方に大きく影響される。本方法では初期値（②の大まかな中心点P）をソケットの中にある大腿骨頭の特長スライス上の重心として与えている。これにより比較的安定に真の解へ収束する。

なお、ソケットの中心点を求めることは関節部の動きを解析する問題にも応用が考えられる。

4-2 ソケット部の切断・移動

中心点の算出と同時に求められている半径を使い、ソケット部を中心点より等距離（半径+ α ）の所で切断する。次に切断された骨片をソケット中心点を中心にして外側に回転移動してソケットを深くする。（図2参照）

5. 骨片移動時の干渉チェック

股関節部整形外科手術において大腿骨をはずしてソケットの形を整え、大腿骨をはめ直すときに、従来のNUCSSでは骨片の重なりを許して移動させていたため、正しくはめられるのかどうかの判断は医師の経験に任されていた。今回、骨どうしの干渉チェックを行うことにより、指定した骨片の移動が物理的に可能であるかどうかをシステムが自動的にチェックする機能を開発した。

5-1 干渉チェックの手法

CADの分野などにおいては、これまでに干渉チェックの種々の手法が考えられてきた。例えば、良く知られた手法として、ソリッドモデルのCSG（Constructive Solid Geometry）方式において、論理演算のうち共通領域を算出する機能を用いるものがある。これは干渉位置、干渉量のほか、干渉して

いる形状まで正確に求めることが可能である。また、本システムが扱っているようなボクセル・データに対する干渉チェックの手法としてオクトリー（Octree）法⁽⁶⁾がある。オクトリー法は空間の8等分を再帰的に繰り返すことにより、部分空間を表現するものである。

ここでは実際にシミュレーション・システムに組み込むことを考え、判定の高速化及び記憶容量の削減を計り、次のようなアルゴリズムを用いた。

本システムでは、三次元画像を表すためボクセル・データを三次元座標リストとそのボクセルのラベル値で表し、また各ラベル値に対するアフィン変換行列として骨領域の情報を有している。そして骨片移動はアフィン変換行列を書き換えることにより表現している。

このデータ表現に基づき干渉チェックは以下のアルゴリズムで行っている。

①注目ラベル（移動させたい骨片）の座標リストと移動後のアフィン変換行列により、骨片を3次元配列中へ変換する。

②指定回数だけ収縮または拡散を施す。

③注目ラベル以外の座標リストとアフィン変換により他の骨片を3次元配列へ変換する。この時、

- (1) 既に注目ラベルが変換先にあれば、干渉していると判定する。
- (2) 全ての点が(1)以外なら干渉していないと判定する。

* 骨どうしの重なり合いをどこまで許すかによって収縮の回数が決まる。または骨どうしが近づくことをどこまで許すかによって拡散の回数が決まる。

5-2 自動可動距離（角度）算出について

骨の干渉（重なり合い）を許さない手術シミュレーションにおいては、骨片の移動（回転）操作を行うとき、骨がぶつかるまで最大距離移動（回転）さ

せることが望まれる。そのためには従来の移動機能を用いて骨片を動かし、上で開発した干渉チェックにより移動可能か判定すれば良いが、この操作を繰り返すのは煩わしい。そこで、新機能として、骨どうしが干渉しあうまで指定された方向あるいは回転の向き（時計まわり、または反時計まわり）へ、その距離あるいは角度を算出して移動させるという機能を開発した。

この機能により大腿骨をはめ直す作業等がある程度自動化出来る。

1 自動可動距離算出について

図5は骨片1を、他の骨片と干渉するまで矢印の方向に移動させるという例である。この場合、システムは、骨片1が骨片2と干渉するまでの移動距離 d （骨片1'の位置）を算出する。

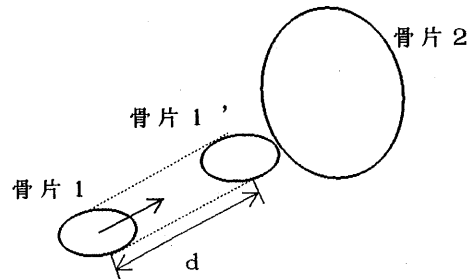


図5

以下に可動距離算出のアルゴリズムを示す。

①移動指定方向がデカルト座標系でz軸正方向になるように全てのボクセル位置を座標変換し、ラベル値を新座標位置に書き込む。（参照図6）

②全ての x , y について注目ラベル（移動させる骨片のラベル）を検出してからz軸正方向にサーチして注目ラベル以外のラベルが検出されるまでの距離を算出する。この距離の最小値を求めれば、それが可動距離となる。

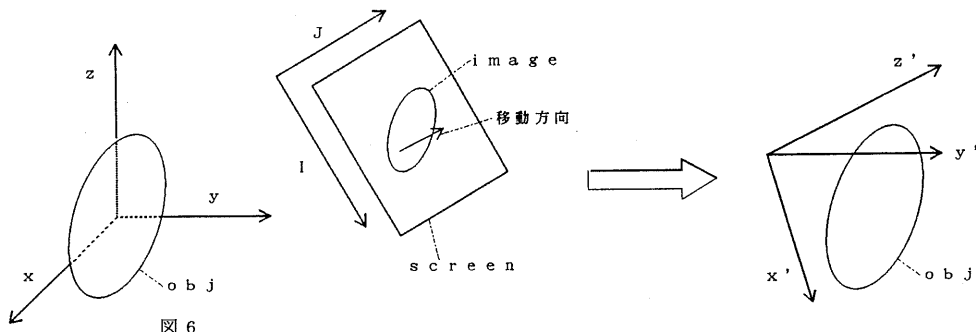


図6

II 自動可動角度算出について

以下に可動角度算出のアルゴリズムを示す。

① 指定した回転の中心軸が円筒座標系の z 軸正方向になるように全てのボクセル位置を座標変換し、新座標位置にラベル値を書き込む。

② 円筒座標系の全ての r (半径方向), z (高さ方向) について注目ラベルを検出してから θ 正方向 (回転方向) にサーチして注目ラベル以外のラベルが検出されるまでの角度を算出する。この角度の最小値が可動角度となる。

6. 半透明表示法

股関節部において大腿骨頭は骨盤ソケット部の中に潜り込んでいるので直接観察することができない。そこで、骨盤を半透明物体、大腿骨を不透明物体とし、以下の工夫を加えて表示することにより、骨盤・大腿骨双方の表面形状と相互位置関係を把握し易くした。以下の投影像の輝度計算は3つの場合 (参照図7) に分けて行う。

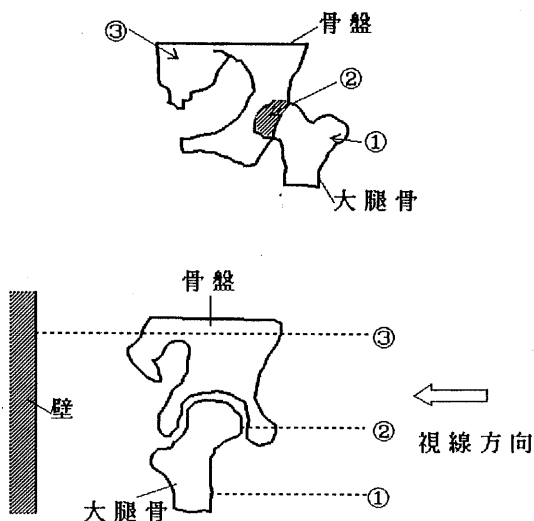


図7 半透明表示法の場合分けについて

① 大腿骨が直接観察できる部位: Z-Buffer法 (Z-Buffer上のsmoothing及びgradient-shading法を伴う) により輝度を求める。(図7①)

② 大腿骨が骨盤の中に潜り込んでいる部位: 骨盤表面の鏡面反射成分を強調したものに①と同様に求めた大腿骨の輝度を骨盤の厚さに応じて減衰させたものを加える。(図7②)

③ 骨盤のみの部位: 骨盤表面の鏡面反射成分を強調したものに背景の壁の輝度を骨盤の厚さに応じて減衰させたものを加える。(図7③)

図8に表示例を示す。

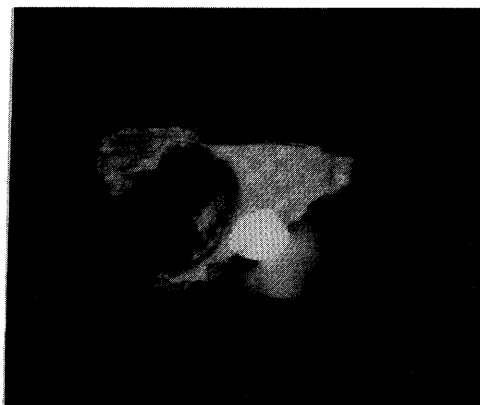


図8 半透明表示法の例

7. 接触面表示機能

指定された注目骨片と他の骨片との距離を算出し指定された距離以下の部分を注目骨片にマッピングする。この注目骨片に対して任意の方向から3次元投影像を作成する。これにより術前の接触面とシミュレーション後の接触面との位置や面積などを比較することが出来る。大腿骨を注目骨片とした場合は、基本的には接触面が大腿骨頭上部に位置し、かつ接触面がある程度大きい方が良くとされている。また今まで医師の経験のみによりシミュレーションの評価を行っていたが、これによって定量的な評価も加えられるようになった。

なお、接触面の表示については文献(7)(8)(9)の研究が報告されている。彼らは各スライス上で境界が近くにある場合を接触部分と判定し、各スライスの接触部分を面パッチ構成技術を使って表面表現に変換して表示している。本文の方法は3次元的に判定しているので接触部の判定がより正確になり、移動後の骨片の接触部の判定も可能となった。さらに、判定のための計算及び接触面の表示も非常に簡単に行える利点がある。

図9に接触面表示例を示す。

8. 手術計画例

本システムを用いて、整形外科医が実際に行った手術計画例は5例ほどある。その1例を図10に示す。

9. むすび

本文では股関節部整形外科手術計画システムの諸機能について述べた。具体的には《1》骨盤・大腿骨の自動分離 《2》骨盤ソケット部切断シミュレーション機能 《3》骨片移動時の干渉チェック 《4》半透明表示法 《5》接触面表示機能 など股関節部整形外科手術のシミュレーションの実用において重要な機能の開発を行った。本システムによってほぼ全ての手術方法に対してシミュレーションが可能である。上記《3》《4》《5》の諸機能は股関節部以外の部位の骨の手術に対しても応用可能であると考えられる。

また、本システム以外の会話型の手術計画システムとして文献(10)の研究が報告されている。これは簡単な骨切断の機能を開発しているが、実際に複雑なシミュレーション機能までは至っていない。

今後の問題としては手術シミュレーションに伴って、運動機能や強度等の力学的解析などが重要と考えられる。

最後に医学面から有益な御助言を賜り、貴重なCT像を提供して頂いた独協医大藤岡陸久助教授並びに埼玉医科大学整形外科泉田良一博士、東教授に深謝する。また日頃熱心に御討論頂く本研究室の方々に感謝する。なお、本研究の一部は文部省科研費によった。

<参考文献>

(1) 安田、橋本、後藤、横井、鳥脇：“CT画像を用いた頭蓋形成手術計画支援システムの機能強化” 信学技法 PRU88-8, pp. 23-30, (1988-05)

(2) 曾山、安田、横井、鳥脇：“股関節部3次元CT像における骨盤・大腿骨の分離方法について” 第27回日本ME学会大会論文集、p. 427 (1988-05)

(3) 鳥脇、横井：“3次元デジタル画像処理アルゴリズムの基礎” 電子通信学会論文誌 Vol. J68-D NO. 4, pp. 426-433, 1985-04

(4) 鳥脇、鈴木：“画像処理用言語システムHILL-S-DIPおよび3次元画像処理パッケージSLIP-3D” (1987-02)

(5) J. Ylä-Jääski and O. Kübler : “Segmentation and Analysis of 3D Volume Images”, IEEE 9th International Conference on Pattern Recognition, pp. 951-953, 1988. 11

(6) K. Yamaguchi, T. L. Kunii, K. Fujimura and

H. Toriya: “Octree-Related Data Structures and Algorithms”, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 4, No. 1, pp. 53-59, 1984. 1

(7) A. Wallin, K. Klaue, R. Ganz, S. M. Perren: “Three-Dimensional Evaluation of Pathological Joints and Simulation of Corrective Surgical Procedures”, Proc. NCGA 88, pp. 198-207

(8) K. Klaue, A. Wallin and R. Ganz: “CT Evaluation of Coverage and Congruency of the Hip Prior to Osteotomy”, Clinical Orthopaedics and Related Research, pp. 15-25, 1988. 7

(9) D. Roberts, J. K. Udupa, E. Christiansen and H. M. Chiang: “Joint Surface Congruency and Loading Investigated ‘In Vivo’ Via Quantified, Interactive, 3-D Imaging”, Proc. NCGA 87, pp. 138-151

(10) L. L. Pellingham, J. Vogel, C. Lau, P. Dev: “Interactive Graphics and 3-D Modelling for Surgical Planning and Prosthesis and Implant Design”, Proc. NCGA 86, pp. 132-142

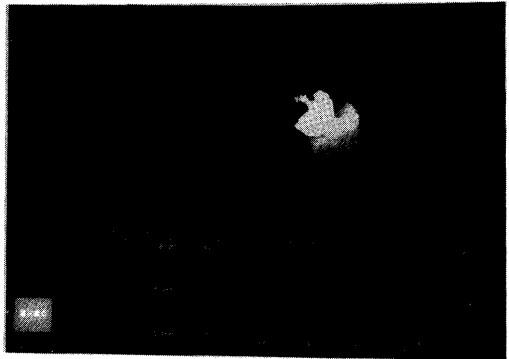
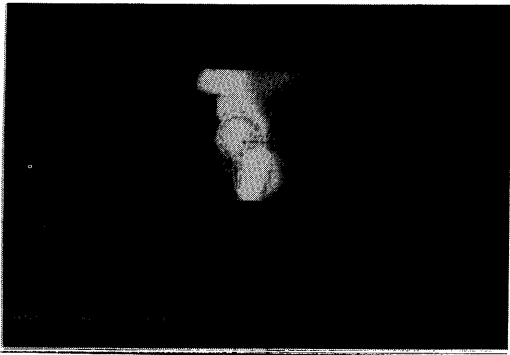


図9 接触面表示例



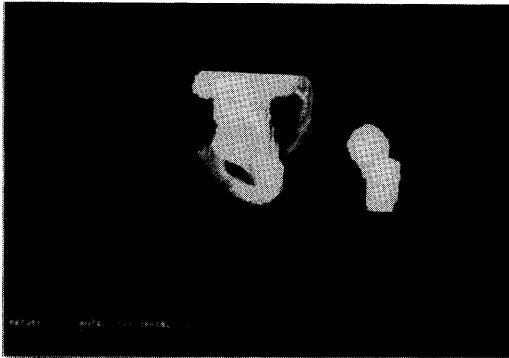
(a)



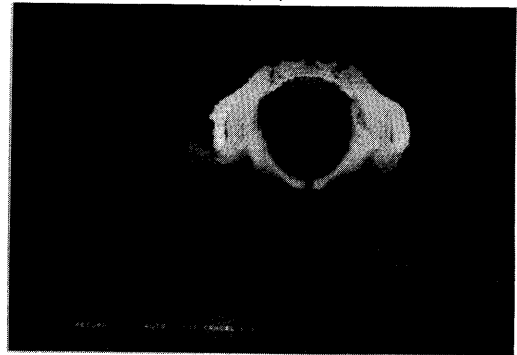
(b)



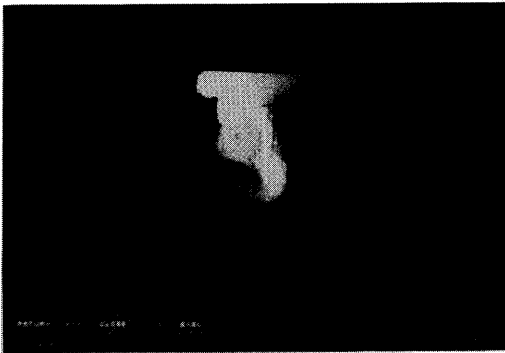
(f)



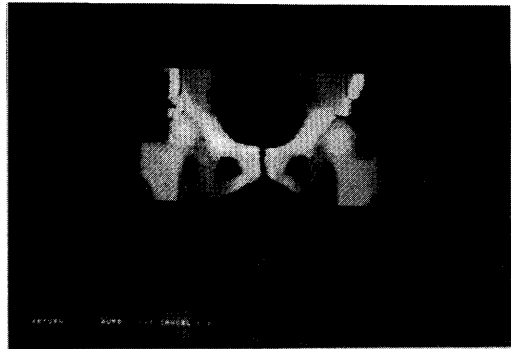
(c)



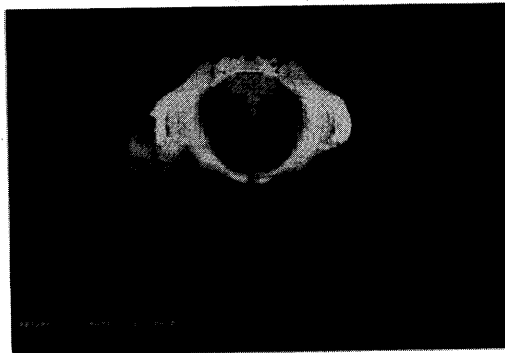
(g)



(d)



(h)



(e)

図10 手術計画例

(a) 初期画面。下段はコマンド群である。前処理により骨盤と両大腿骨はすでに分離されている。

(b) (c) 視線方向を変え、MOVEコマンドにより左大腿骨をはずす。

(d) CUTコマンドにより骨片の切断。

(e) 切断した骨片を再度視線方向を変えROTATEコマンドにより回転させる。

(f) 大腿骨をはめ直す。この際干渉チェックを行い物理的に可能であるか確認する。

(g) (h) 種々の方向より大腿骨の位置など再確認する。