

手術計画支援システムにおける対話機能の強化
～三面図入力機能及び履歴記録機能～

加藤 憲* 安田 孝美*

横井 茂樹* 鳥脇 純一郎* 藤岡 睦久**

* 名古屋大学工学部情報工学科

** 独協医科大学

あらまし 頭蓋形成外科手術計画支援システムNUCSS (Nagoya University Craniofacial Surgical-planning System) における対話機能を改善したので報告する。具体的には、(1)行われた操作の履歴記録、及び、(2)三面図からの骨片操作、を可能にした。これらは共に、外科医によるNUCSSの使用経験から生まれた要求であり、将来この種のシステムが臨床へ実用化されるに当たって不可欠の機能と考えられる。

Improved Interface Functions
in a Computer-aided
Surgical-planning System
～ Manipulation on Three Views Images
and Recording History of Operations. ～

Ken KATOH* Takami YASUDA*

Shigeki YOKOI* Jun-ichiro TORIWAKI* Mutsuhisa FUJIOKA**

* Dept. of Information Eng., School of Eng., Nagoya University

** Dept. of Radiology, Dokkyo University School of Medicine

Abstract This paper describes improved interface functions in a Craniofacial Surgical-planning System(NUCSS). They are (1)recording function for each interactive operations, and (2)manipulate function on three images projected from differnt directions. Both of them are developed based on the demands by surgeons who have used NUCSS. Therefore, they should be indispensable functions in a surgical simulation system for clinical use.

1. はじめに

連続したX線CT像は本質的に人体内部の三次元情報を有するものであり、これから元の三次元像を再構成し、手術計画の立案に用いようとする研究は、コンピュータ・グラフィックス及び画像処理の実用的応用が期待されている分野の一つである。最近、X線CTに代表される医用3次元画像を立体表示して、診断や治療計画に利用するための技法が工学、医学の両面から活発に報告されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。これに対して筆者らも、5年程前より臨床での実用化を目指して、頭蓋形成手術の計画支援システムNUCSS (Nagoya University Craniofacial Surgical-planning System)の開発を進めている。

頭蓋形成手術とは、先天的、あるいは事故などによる後天的な理由による頭蓋の変形を修復する手術で、変形が著しいときには、骨片をいったん数十個の小片に分割した後、全体が適切な形になるように再構築して接合する大規模で複雑困難な手術になる。したがって、手術の安全のためには、術前に最適な手術計画を十分に検討しておくことが重要である。

NUCSSは、このような手術計画をグラフィック・ディスプレイ上で対話的に立案していくもので、既に骨片の切断や移動等の基本的な機能については報告している⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。また、実際に本システムは外科医により既に数十例の症例に対して試験的に用いられており、その結果、機能的にはほぼ実用のレベルに達していると考えられるが、より充実した対話機能が望まれるとの評価を得ている。

そこで、本文では、対話機能の高度強化を目的に、履歴記録機能と三面図入力機能を新たに開発したので報告する。

2. 高度対話機能の概要

今回開発した機能のシステム全体における位置づけは図1のようになる。以下では、これらの機能の概要について説明する。

(1) 履歴記録機能

NUCSSのような手術のシミュレーション用のシステムにおいては、計画がどのような手順で行われたのかを記録したものは、計画を再検討して完全なものにするための重要な情報となる。しかし、従来のシステムでは、指定された一状態しか記録されないため、計画の経過を順次再現していくことが不可能であり、また、

計画の途中で不都合が生じたために計画を中断した場合、初めからやり直さねばならなかった。この履歴記録機能では、全ての操作を記録することにより計画段階での任意の状態が再現可能となるため、シミュレーション後の計画の確認、妥当性の検討や、一連の計画の途中から新たな別の計画を立案していくことが可能となった。更に、典型的な症例に対する模範的な計画例に関しては、これを記録して、経験の浅い医師の教育などにも利用することが可能と考えられる。

(2) 三面図入力機能

従来のNUCSSにおいては、まず、与えられたCT画像系列より任意方向からの投影像を作り、それに対して新たに骨片を作りたい場合は切断を行い、骨片を動かしたい場合は移動を行っていた。次に別の任意方向の投影像に対しても同様に切断・移動を行い、この多方向からの操作をいくつも繰り返すことによって、これらの組合せとして複雑な手術計画を実現していた。しかし、移動の際、一方向の投影像のみでは、骨片の空間的な位置や、骨片と骨片の間の位置関係が把握しにくく、計画立案に多大な労力と時間が必要となっていた。三面図入力機能は、任意の三方向から投影された像を同時にディスプレイ上に表示することによって空間的な位置の把握を容易にし、これらの問題を解決するものである。

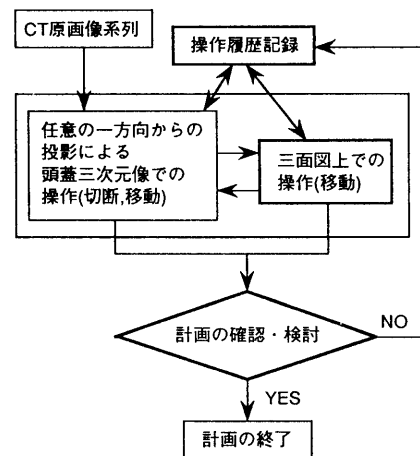


図1. 全体の処理の流れ

3. 履歴記録機能

本機能によって、計画の確認・検討および計画途中からの再計画が可能となり、システムの

機能性が一層充実した。

工業用 C A D 等においては試行錯誤的な設計支援のために操作の履歴情報を管理して、操作の取り消し、再現、やり直し等が実現されている⁽⁸⁾。ここで、操作はいくつかの基本的な操作から構成されており、これを基本的な部品に対して行っていくことで設計がなされる。このような操作はすべて数学的に明示することができ、その逆オペレーションも容易に求められる。

一方、本システムでは、三次元形状は上述のように多数のボクセルの集合として与えられており、切断・移動等の操作は投影面上での対話的操作により自由に指示される。これらの操作は、各ボクセル群に付けられたラベルにより管理されており、ラベルを考慮した履歴管理が必要となる。

3. 1 操作の記録

切断された骨片は各々、その骨片を構成するボクセル群の初期座標と骨片毎に付けられたラベルにより以下のように表現されている。(画像の大きさを $128 \times 128 \times 200$ とする)

$$\begin{aligned} X & (n) = i \quad (i=1, 2, 3, \dots, 128) \\ Y & (n) = j \quad (j=1, 2, 3, \dots, 128) \\ Z & (n) = k \quad (k=1, 2, 3, \dots, 200) \\ \text{L A B E L} & (n) = l \quad (l=1, 2, 3, \dots, N) \end{aligned}$$

ここで、 i, j, k は $(128, 128, 200)$ の座標空間における骨を構成する n 番目のボクセルの初期座標、 N は骨領域のボクセル総数、L A B E L にはラベルの初期状態として値 1 がすべてのボクセルに与えられており、切断操作により新たな骨片が生成される毎に、新たな骨片に含まれるボクセルのラベルが新しく生成される。

各骨片に対する平行移動又は回転は骨片毎に現在の位置まで変換するためのアフィン変換行列のパラメータとして順次記録されており、対応するラベルにより参照され、座標変換が行われる。

このため、履歴の記録においては、単純に切断や骨片移動などの操作を記録するのみでは不十分であり、ラベルの親子関係やマージ(骨片と骨片の融合)の関係などに対応するラベル管理を考慮した記録が必要となる。

図 3 に履歴記録の概要を示す。図中、↓は操作を、○は操作後の状態を表している。計画は試行錯誤的に実施され、途中で中断する計画案

も含めていくつかの操作例が作られる。この一連の操作列をここでは手順と呼ぶ。

ここで、3. 3 節で述べるように、マージによって起こる複雑な状況に対処することを考えると、マージを考慮する場合と考慮しない場合では、記録及び再現の方法が異なってくる。そこで、まず単純なマージを考慮しない場合について考える。マージを考慮する場合については、3. 3 節で述べる。

この場合には操作として、切断、移動の 2 種類のものを用意し、各操作を実行するための情報と関連するラベル値を記録する。具体的には、以下の情報を操作ごとに記録する。また、ここでは操作を施す前の状態に戻るための操作(操作のキャンセル)を行う逆操作も併記する。

(1) 切断: $i \rightarrow j$

ラベル i の骨片を切断して新たにラベル j の骨片を生成する。ラベル i の骨片に属するボクセルの内、切断して生成される骨片に属するボクセルのラベル i に変更する。

履歴のための記録情報

- ・切断という操作を示す識別番号
- ・切断される骨片のラベル番号
- ・切断によって新たに生じる骨片のラベル番号

逆操作

L A B E L テーブルの中のラベル j をすべてラベル i に書き換える。

(2) 移動: k

ラベル k の骨片を平行あるいは回転移動する。このとき、ラベル k の骨片に対するアフィン変換行列を指定された移動を考慮して更新しておく。

履歴のための記録情報

- ・移動という操作を示す識別番号
- ・移動が行われた骨片のラベル番号
- ・その骨片に対する今回の移動操作を施す前のアフィン変換行列

逆操作

ラベル k のアフィン変換行列を、履歴情報として記録されたアフィン変換行列に戻す。

(1), (2) とともに操作を受けたときの視線方向を併せて記憶している。

いま、図 2 で手順 I の操作 a, b, c を順次

行ったとする。

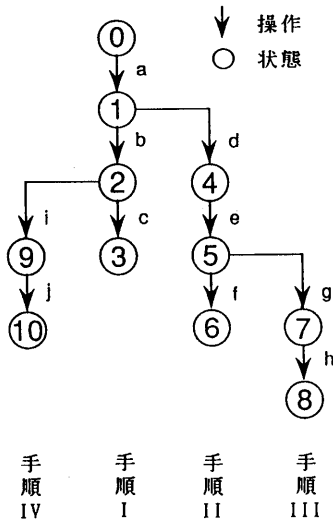


図 2. 履歴の記録

ここで、手順 I の状態 1 から新たに別の手順で計画を続行したい場合は、上記した逆操作によって状態 1 まで戻った後、例えば操作 d - e - f という手順 II の操作を続けていく。このとき、手順 I を保存したい場合には、各操作における記録情報を主記憶から外部ファイルに移す。手順は、保存した順に I, II, III... と番号を付けていく。

同様にして手順 III, IV のように試行錯誤的に新たな計画を立案していくことが可能である。

ここで、実際に立案される手術操作は 200 ステップくらいであり、1 ステップ操作を戻すには計算時間 7 ~ 8 (秒) くらい (履歴情報の検索に 1 秒位、表示用の計算に 6 秒位) がかかる (使用計算機は 6 章参照)。また必要なメモリは 1 ステップにつき 70 byte 程度であり、履歴情報の全体を主記憶に入れても大したことはない。

3. 2 操作手順の再現

3. 1 節で述べたように記録された切断、移動等の履歴情報を使用して以下のように各状態を再現していく。

(1) 再現したい手順番号を入力し、外部ファイルから主記憶に読み込む (ここで、各手順において行われている計画は、user が覚えておく必要がある)。

(2) 読み込んだ手順中の各操作の記録を用いて計算機内で逆操作を行っていき、再現したい手順の最初の状態まで戻す。

(3) 履歴情報を用い先頭の手順から順次処理していく。

3. 3 マージを考慮した場合の記録と再現
マージを考慮する場合は以下の情報を記録する。

(1) 切断: $l \rightarrow j$

マージを考慮しない場合と同様
履歴のための記録情報

- ・ マージを考慮しない場合と同様
- ・ 切断線を指定する頂点座標列

(2) 移動: k

履歴のための記録情報
マージを考慮しない場合と同様

(3) マージ: $l \rightarrow m$

ラベル l の骨片をラベル m の骨片に融合させ、ラベル l を消去する。

履歴のための記録情報

- ・ マージという操作を示す識別番号
- ・ マージされる骨片のラベル番号
- ・ マージ先の骨片のラベル番号

(1), (2), (3) とも操作を受けたときの視線方向を併せて記憶している。

記録の方法はマージを考慮しない場合とほとんど同じであるが、逆操作によって変更を行いたい状態に戻ることはできず、初期状態からその状態まで計算機内で再度操作を行っていかねばならない。

この場合、初期状態から 1 ステップ後の状態を求めるのに計算時間のみで 0.2 (秒) 位であるため、n ステップでは 0.2 × n (秒) 位の計算時間になる。

ここで逆操作が行えないのは、例えば、次のような理由による。

図 3 のような操作を行った場合、操作 d でラベル 4 の骨片をラベル 1 の骨片にマージしているため、操作 d 実行後のラベルデータには、ラベル 4 のボクセルは存在しない。ここで、状態 3 を再現するためには、状態 2 から記録されている操作 c の切断の情報を使ってラベル 4 の骨片を生成すればよいと考えられるが、先の操作 c でラベル 3 の骨片から切断したラベル 4 の骨片が操作 d でラベル 1 の骨片にマージされている

るため、ラベル3の骨片は状態2'のようにラベル4の骨片部分を含まないものになってしまう（操作の記録は残るが状態そのものの記録はないことに注意）。ゆえにラベル3の骨片からラベル4の骨片を作るのは不可能である。状態1でのラベル2の骨片（これは、ラベル3の骨片を切断の情報を使って表示上ラベル2にすることによって実現される）も同様な状態であるから、結局、初期状態からラベル2の骨片を作る操作から始めなければならない。

このように、マージによって起こる様々な複雑な状況に対処するためには、ラベルデータ及び各ラベルに対するアフィン変換を初期状態から順次各状態について作っていく必要がある。

4. 三面図入力機能

従来、骨片の切断、移動といった操作は一方からの投影像上で行っていたため、特に切断

- <操作 a> 切断 : 1 → 2
- <操作 b> 切断 : 2 → 3
- <操作 c> 切断 : 3 → 4
- <操作 d> マージ : 4 → 1

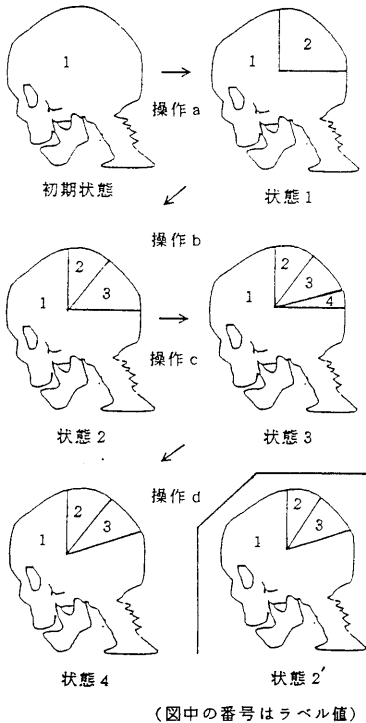


図3. 操作例

された骨片を空間的に適切な位置へ移動させるのに多くの時間を要していた。本機能は、グラフィック・ディスプレイ上に同時に三方向からの投影像を表示し、この3つの像を参照しながら対話的処理を行っていくものである。

4. 1 表示方式

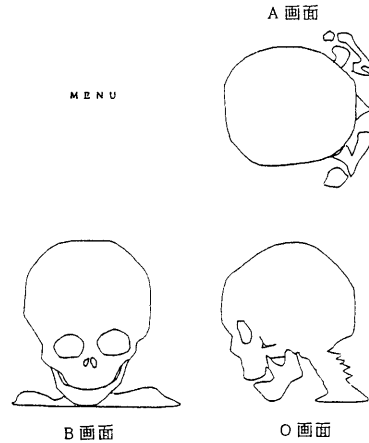


図4. 三面図の基本設定

インターフェイス画面の機能を図4に示す。

三方向から投影された画像は、各々画面右下、右上、左下にO（基本）画面、A画面、B画面として表示され、A画面、B画面は各々O画面を90°上方、及び、90°左方から観察したものを表示する。また、画面左上にはコマンドメニューが表示され、各機能を選択実行する。O画面の投影方向はオペレータが任意に選ぶことができ、これによりA、B両画面が自動的に表示される。この三面図の設定機能をここでは基本設定機能と呼ぶ。

基本設定では、互いに直交している3方向からの投影像を表示しており、自由な移動を行うことが可能となるが、計画時においては医学的に意味のある任意の多方向の像を同時に観察して、骨片の移動方向や量を決定することがある。そこで、各画面において各々独立に、任意の方向からの投影像を設定して表示することを可能にした（独立設定機能）。独立に設定された投影像は再び、コマンドにより三画面の中の1つを指定することで、その画面を基準にして、他の2画面を直交関係を保つように設定し直すことができる。

また、詳細な操作を必要とする場合や骨片の切断を行う場合、三画面の中から一画面を指定

し、ディスプレイ・スクリーン中央に拡大表示して、従来のシステムと同様な操作を行うことも可能である（一面表示機能）。

4. 2 三面図による骨片移動

三面図での骨片移動の過程は以下のような（切断については4. 4節参照）。

(1) 三面図のうちある画面内で移動したい骨片を選ぶ。これにより、その画面上で選んだ骨片の輪郭線が表示されるとともに、他の2画面でもそれぞれの画面におけるその骨片の輪郭線が表示される。

(2) 骨片を選んだ画面内で移動後の骨片の位置を指定すると、その位置に骨片の輪郭線を表示するとともに、他の2画面でも対応する位置に輪郭線を描く。この移動位置は試行錯誤的に何度も繰り返して最適な位置を三面図を参照しながら決定することができる。

(3) 最適な位置を決定後、実行処理により、三面図すべてにおいて決定された位置に骨片が移動される。

4. 3 高速化

3つの画像を生成して表示するためには、単純に考えても1画面図の時に比べて3倍の時間が必要になる。表1には、一面図と三面図における実行時間の比較を示す。実際には、画像を作る時間のみ3倍になり、表示に必要な時間については一面図の1画面と三面図の3画面ではほぼ同じと考えてよいため3倍よりは少し短くなるが、全体的に必要な実行時間は長く、使用者の精神的な負担は避けられない。

表1. 一面図と三面図の実行時間(CPU TIME)

一面図	三面図
約6.5秒	約15秒

表2. 標準表示とROUGH表示の実行時間

(CPU TIME)

標準表示	ROUGH表示
約15秒	約4.5秒

そこで、画質を少々落としても応答性を良くする目的でROUGH表示機能を設けた。これは、通常三面図では512×512画素の画像を作成して解像度512×512のディスプレイ領域に表示しているものを、256×256画素の画像を作成し

て、これを4倍拡大してスクリーンの512×512の領域に表示するものである。これにより、表示の際の平滑化、レンダリングに要する時間が4分の1になり、全体としてもかなりの時間短縮が得られた(表2)。しかし、作成された画像は画質が粗いものになってしまうため、随時高解像度のもと切り換えながら計画を立案していく。

4. 4 問題点

現在、三面図内では骨片を切断することができない。そのため、切断を行う場合は、一度一面表示に切り換えて、その中で切断を行い、再び三面図に戻るといった操作を行わなければならない。これは、切断を行っている画面での切断線が他の2画面でも矛盾のないように描かれなければならないからである。例えば、図5において、O画面で切断のため2点を指定し、これを端点に持つような線分でO画面を切断しようとした場合、2点の3次元座標をA、B両画面に投影して、その間を線分で結んだのでは必ずしも実際の切断線とはず、点線のように描かれなくてはならないのが普通である。実際には、実線のように描かれてしまう。

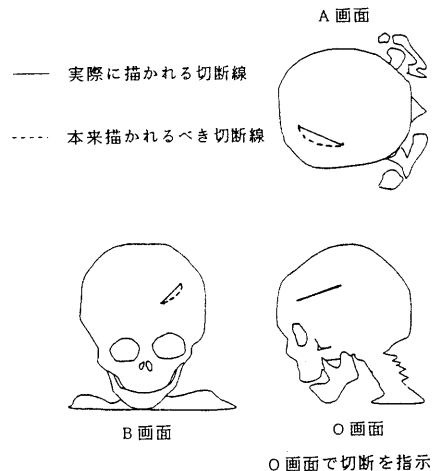


図5. 三面図による切断が問題となる例

5. 実験例

図6, 7に実験例を示す。

図6は履歴記録機能の例である。図中色が濃くなっている部分が指定した操作順の時に何らかの操作が行われた骨片、輪郭線で囲まれている骨片は次に操作をうける骨片である。a)で

輪郭線で囲まれている頭蓋上部の骨片が b) では移動している。

図 7 は三面図入力機能の例である。a) は計画面前の頭蓋を三面図の基本設定により画面に表示したもの。b) は同じものを別の角度を基準に 90° ごとに見たもの。c) は三面図のそれぞれの画面を任意に設定したもの。d) は c) の A 画面を基準にして再び直行する画面に設定し直したもの。e) は計画後の頭蓋を三面図の基本設定により画面に表示したものを示す。f) は三面図による移動のために対応する骨片についてそれぞれの画面で輪郭線を描いている。g) は f) によって決定された位置に移動を実行したもの、h) は計画面前の頭蓋の ROUGH 表示である。a) と h) を比較すれば画像の画質の違いがわかる。

実験に用いた入力画像は、1 スライス 256×256 画素 (画素間隔 0.7mm)、スライス間隔約 2mm の X 線 CT 画像約 100 枚である。使用計算機は名古屋大学大型計算機センターの FACOM M-780、表示装置は GRAPHICA M-1008 (1,024×1,024 画素、R、G、B 各 8 ビット)、プログラム言語は FORTRAN 77 である。また、システムサイズはおよそ 7000 ステップである。

6. むすび

本文では、形成外科手術計画支援システム NUCSS においての対話機能の強化について述べた。具体的には新たに開発した、1) 履歴記録機能、2) 三面図入力機能について、その処理方法について述べた。特に 1) の実現のためにボックス型データ特有の処理方法を考案した。

三面図入力機能によって骨片の空間的把握が容易になり操作性が向上した。また、履歴記録機能によって、計画を再検討、修正することを容易に行うことが可能となった。

これらの機能は、実際に使用した医師より、より使い易いものになったとの評価を得ることができた。

今後の課題として、より効率的な履歴機能の実現及び、三面図からの切断機能を含んだ計画時におけるヒューマン・インターフェイス機能の更なる充実を計り、外科医にとって扱い易いシステムにしていきたい。

最後に、有益な御助言を賜るとともに貴重な CT 像を提供頂いた慶応大学形成外科中嶋英雄助教授に深謝する。また、日頃から御討論を頂

く研究室の皆様へ感謝する。なお、本研究の一部は文部省科研費 (一般 (C) NO. 63633009) による。

文 献

- (1) G. T. Herman and K. Liu: "Three dimensional display of human organ from computed tomograms", CGIP, 9, 1/21(1979)
- (2) 安田, 萬, 横井, 鳥脇, 片田: "三次元グラフィックスを用いた頭部 CT 像三次元表示の手術計画への応用", 医用電子と生体工学, 24-1, 22/27 (1986)
- (3) J. K. Udupa: "Computer Graphics in Surgical Planning", Proc. NCGA' 88, 67/77(1988)
- (4) A. Wakkin, K. Klau, R. Ganz, and S. M. Perren: "Three-Dimensional Evaluation of Pathological Joints and Simulation of Corrective Surgical Procedures", Proc. NCGA' 88, 198/207(1988)
- (5) 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, Vol. 87 No. 38, 21/28 (1987)
- (6) 安田, 橋本, 横井, 鳥脇: "CT 画像を用いた形成外科手術計画支援システム", 信学論(D), J70-D, 11, 2134/2140(1987)
- (7) 安田, 橋本, 後藤, 横井, 鳥脇: "CT 画像を用いた頭蓋形成外科手術計画支援システムの機能強化", 信学技報, Vol. 88, No. 24, 23/30(1988)
- (8) 佐藤, 鳥谷, 植田, 千代倉: "履歴情報管理による試行錯誤的な設計環境の支援", NICOGRAPH' 88 論文コンテスト論文集, 49/56(1988)

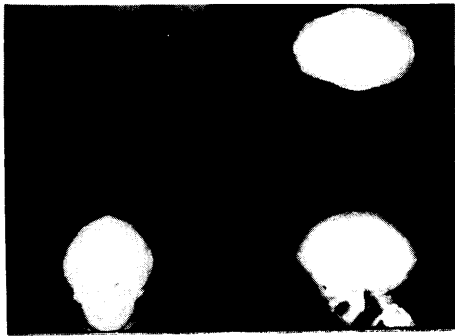


(b)

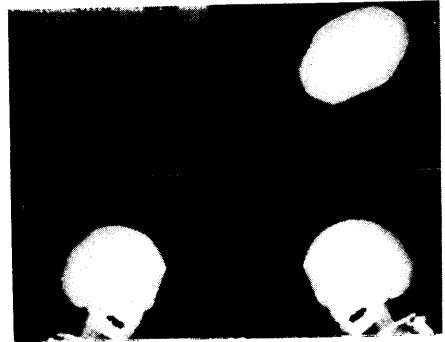


(a)

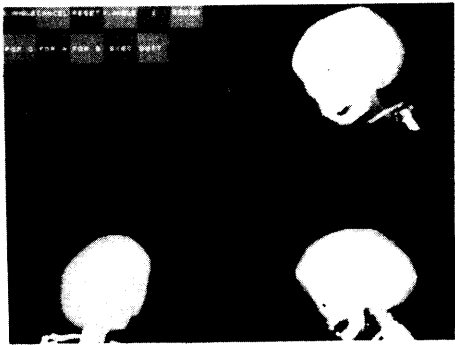
図 6. 履歴記録機能の例



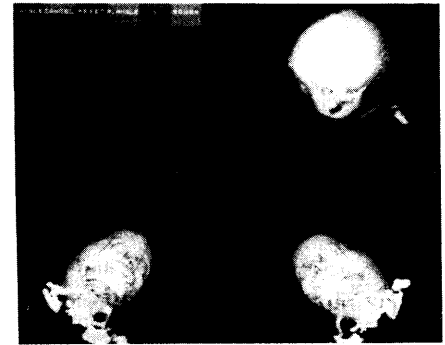
(a)



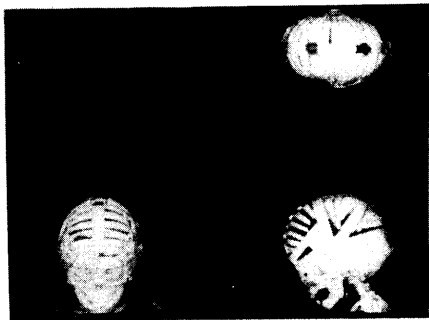
(b)



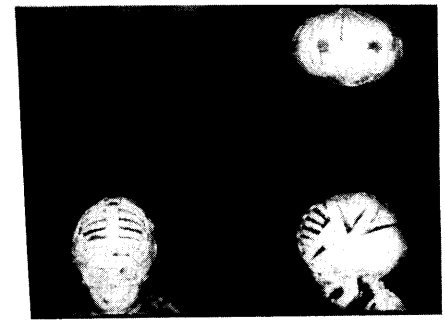
(c)



(d)



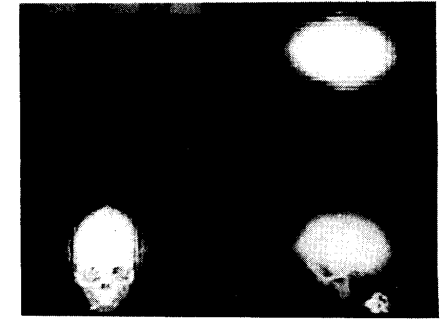
(e)



(f)



(g)



(h)

图 7. 三面図入力機能の例

盛光印刷所