



Title	テンプレート法を応用した頭部X線規格写真による顎顔面形態の立体表示
Author(s)	河上, 宗博
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(歯学)
Dissertation Number	乙第4137号
Issue Date	1992-09-30
DOI	<a href="https://doi.org/10.11501/3090807">https://doi.org/10.11501/3090807</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/51170">https://hdl.handle.net/2115/51170</a>
Type	doctoral thesis
File Information	000000255478.pdf



---

テンプレート法を応用した頭部 X 線規格写真による  
顎顔面形態の立体表示

Three-dimensional display of maxillo-facial  
structures using cephalograms with the aid of  
template technique

河上宗博

北海道大学歯学部歯科矯正学講座

---

①

テンプレート法を応用した頭部 X 線規格写真による  
顎顔面形態の立体表示

Three-dimensional display of maxillo-facial  
structures using cephalograms with the aid of  
template technique

河上宗博

北海道大学歯学部歯科矯正学講座

主任指導 北海道大学歯学部  
歯科矯正学講座

中村進治教授

## 目次

- 1 緒言
- 2 研究資料およびシステム構成
  - 2 - 1 研究資料
  - 2 - 2 システム構成
- 3 頭部 X 線規格写真を用いた顎顔面形態の立体表示方法の開発
  - 3 - 1 一次計測点の抽出
  - 3 - 2 二次計測点の設定
  - 3 - 3 断面形態の構成と三次元表示
- 4 結果および考察
  - 4 - 1 顎顔面形態の三次元構築について
  - 4 - 2 方法について
  - 4 - 3 一次計測点に関して
  - 4 - 4 二次計測点と断面パターンに関して
  - 4 - 5 代数的テンプレート法について
  - 4 - 6 立体表示画像について
  - 4 - 7 臨床応用の一例
  - 4 - 8 将来の展望
- 5 まとめ

謝辞

参考文献

図表

## 1 緒言

頭部 X 線規格写真を用いた顎顔面の分析法については、Broadbent(1931)<sup>1)</sup>により同撮影法が導入されて以来数多くの報告がなされている。特に側面頭部 X 線規格写真では、種々の分析法<sup>2, 3, 4, 5, 6)</sup>が確立されており、矯正診断や矯正治療による顎顔面の形態の変化の評価、あるいは経年的成長発育に関する研究などにおいて広く応用されるに至っている。

しかしながら頭部 X 線規格写真は単純撮影であり、X 線管焦点から照射される X 線は平行でなく拡散するため、投影像はすべて実際の被写体よりも拡大され、さらに構造物の部位によって拡大率も異なるため歪みも生じている<sup>7)</sup>。このため従来から用いられている分析法は、このような誤差を含んだ二次元的な角度、距離などの計測結果に基づくものであった。それゆえこのような一方向の頭部 X 線規格写真では、治療や成長発育にともなう複雑な形態変化をとらえることは極めて難しいと言える。

一方、Savara(1965)<sup>8)</sup>は、コンピュータを用い正面および側面頭部 X 線規格写真から得られる計測点の二次元座標を組み合わせて計測点の三次元座標を算出し、拡大や歪みの影響を受けずに計測を行う方法を発表した。以後二次元的情報である頭部 X 線規格写真を複数組み合わせることで、頭部を立体的に診断する試み<sup>9)</sup>、頭部における下顎の立体的位置と形態についての研究<sup>10)</sup>、計測点

間を直線で結んだワイヤースケッチモデルや多面体モデルでの立体的評価<sup>11, 12, 13)</sup>など、拡大や歪みを修正した三次元的計測点を用いた分析法がいくつか報告されている。しかしながら、いずれも計測点数が限られているため、解剖学的形態の十分な立体表示には至っていない。

そこで本研究では、顎顔面の骨格の解剖学的形態をより実体に近い状態にとらえるために、複数方向の頭部 X 線規格写真のトレースを画像入力し、画像処理により従来では扱うことのできなかつた大量の計測点に基づく顎顔面形態の立体表示方法を開発することを目的に実験を行い、さらにその臨床応用として外科矯正治療を行った顎変形症患者の術前術後の三次元的形態変化についての評価を試みた。

## 2 研究資料およびシステム構成

### 2-1 研究資料

研究資料として顎顔面の骨格形態に特に異常が認められず、かつ正常な咬合を有する成人男女各三名の正面、側面、第一、第二斜位の4方向の頭部X線規格写真および頭部のX線CT画像を用い、両者から骨辺縁のトレースを行った。

撮影に際しては、後の位置合わせのため各被験者の口腔内に直径1mmの金属球を埋め込んだレジン製の頬面部コアを装着した。コアには正中、左右小臼歯部、および左右大臼歯部の歯槽相当部にあわせて7個から10個の金属球を埋め込んだ。なお頬面部コアは咬頭嵌合位にて作製してある。図1にコア装着時の口腔内を、図2にコアを装着して撮影した頭部X線規格写真およびX線CT画像を示す。X線CTについては、各断層面が被験者のフランクフルト水平面に平行でかつ顔面正中に直交するように設定し、被験者のオトガイから眼窩上方前頭結節付近まで断層幅2mm(1ボクセル0.73×0.73×2.0mm)で約80枚の断層写真を撮影した。

### 2-2 システム構成

図3に本研究で用いた装置のシステム構成を示す。頭

部 X 線規格写真および X 線 C T 画像両トレースの画像入力は、イメージスキャナ（NEC 社製 PC-IN506）を用いてサンプリングを行い、各々デジタル画像に変換した。演算はすべて 32 ビットパーソナルコンピュータ（NEC 社製 PC-98DA）にて行い、外部記憶装置として 40MB のハードディスクを使用した。演算結果はグラフィックディスプレイ（NEC 社製 N5924）、X-Y プロッタ（ROLAND 社製 X-Y PLOTTER DXY-1100）およびハードコピー（三菱電気社製 COLOR VIDEO COPY PROCESSOR SCT-CP200）に出力した。

### 3 頭部 X 線規格写真を用いた顎顔面形態の立体表示方法の開発

本研究では顎顔面の骨格の三次元形態を再現するため、以下の手順にて実験を行った。

1. 頭部 X 線規格写真のトレース画像から、線画像を構成する点についての三次元座標値（一次計測点）を抽出する。

2. 各断面における形態を再現するために必要な点（二次計測点）を検索し、これを一次計測点を用いて算出する方法（代数学的テンプレート法）を開発する。

3. 各断面ごとに一次、二次両計測点間をスプライン補間し、これらを三次元構築し立体表示する。

#### 3-1 一次計測点の抽出

4 方向の頭部 X 線規格写真のトレース画像を用いて、顎顔面形態を立体表示するための第一段階として、以下の方法により一次計測点の抽出を行った。

まず頭部 X 線規格写真のトレースについては、図 4 に示すように行った。正面、側面では頭蓋冠外形線、眼窩、頬骨、梨状孔、頬骨下稜、上顎骨歯槽突起後縁、正中線、下顎骨外形線を、第一第二斜位では頬骨前縁、上下顎犬歯歯冠、同歯槽部をトレースした。このうち丸点線で示したところは顎顔面部の解剖学的形態をより詳細にとら

えるため、日常頭部 X 線規格写真分析を行うときにトレースする部位に加えて、新たに設定した部位である。すなわち正面頭部 X 線規格写真では正中線および上顎第一大臼歯舌側咬頭頂から上方に延ばした上顎骨齒槽突起後縁相当部、側面頭部 X 線規格写真では側頭窩近心壁相当部（蝶形骨大翼）、頬骨下稜相当部、乳様突起よりフランクフルト水平面に垂直に上方へ延ばした側頭部頭蓋冠外形線、および下顎骨外斜線から下方へ延ばした延長線、また斜位頭部 X 線規格写真で頬骨前縁、上下左右犬歯齒冠とその齒槽部である。この中には、実際にその形態をトレースすることが困難な部位もある。このような場合は同定の容易な計測点から便宜的に設定したり、また周囲の解剖学的形態を参考に設定した。例えば正面頭部 X 線規格写真の正中線は、鶏冠頸部から鼻骨間縫合最下点、前鼻棘からプロスチオン、インフラデンターレからメントン（オトガイ棘）の各計測点間をそれぞれ直線にて結び、さらにこれらを延長することで設定した。

次に各トレースをそれぞれ、イメージスキャナーを用いて 0.5 mm のピッチでサンプリングし、512 × 512 画素のデジタル画像に変換した。入力後これを細線化し、正面と側面および第一斜位と第二斜位の二つの組み合わせにより、それぞれの線画像を構成する点の三次元座標値を算出した。

図 5 に 2 方向の頭部 X 線規格写真より、三次元座標値を算出するアルゴリズムの模式図を示す。頭部 X 線規格

写真の撮影条件により、空間の座標系ならびに X 線の照射方向を規格した場合、トレースした任意の点は、空間上のある点から投影された二次元座標値として定義される。この場合空間上のある点に対しては、同時に二組の二次元座標値が存在する。そこで、この 2 点から幾何学的に 2 本の直線を逆投影するとき、それらが空間上で交わる点を、その点の三次元座標値として算出することができる。なお本研究では図 6 のように 2 本の直線が空間上である距離を持って交差するとき、直線間の距離が 1 mm 以内である場合には、2 本の直線は交わるものと定義し、直線上で最も近接する 2 点の中点を三次元座標として算出した。

正面、側面および第一、第二斜位の二組の頭部 X 線規格写真のトレース画像から得られた三次元データを合成し、立体表示を行った結果の 1 例を図 7 に示す。トレースした部位のほとんどが三次元座標値をもつ点として出力されたが、その形態が水平方向に延びた部位では出力された点が少ない傾向にあった。出力点数はどの症例も約 3600 点前後であった。

さらに、抽出された一次計測点の妥当性を検討するために X 線 CT 画像より作成した各断面形態のトレース画像との重ね合わせを行った。なお X 線 CT 画像のトレースの画像入力には頭部 X 線規格写真のトレースと同様の方法で行った。また両者の重ね合わせのために前述のコアに装着した金属球のうち頭部 X 線規格写真および X 線 C

T画像の両方で同一と判定できるもの3個を用い、頭部X線規格写真の座表系における金属球がX線CT座標系の同一の金属球に重なるように、全ての一次計測点を座標変換した。

図8はある断面において、X線CT画像外形線と一次計測点を重ねて表示した模式図である。両者の位置関係を評価するために、各断面ごとにその距離を実測した。計測結果を頭部X線規格写真のサンプリング単位の2画素以内、4画素以内、6画素以内、6画素以上の4つに分類し、これを色分け表示した例を図9に示す。2画素以内を黄色、4画素以内を白、6画素以内を青、6画素以上を赤で表示した。6症例いずれも2画素以内に一次計測点の約半数が含まれ、4画素以内には7割以上と大多数の点が含まれていた。

### 3-2 二次計測点の設定

以上のように一次計測点を用いて骨辺縁に関する立体表示を行うことは可能であるが、顎顔面形態をより実体に近く立体表示するためには各断面形態を用いた三次元構築が望ましい。しかし、一次計測点のみでは断面形態の再現が困難である。そこでまず、各断面形態の構成にさらに必要と思われる計測点(二次計測点)の位置を検索した。X線CT画像における各断面を解剖学的部位、外形線の形態、さらに重ね合わせた一次計測点の数およ

び位置をもとに分類したところ、下顎骨下縁より眼窩上方までを12のパターンに分類することができた(図10)。各パターンにおける二次計測点の位置については、X線CT画像外形線と一次計測点の位置を検討し、補間により断面形態の再現が良好となるように外形線の変曲点等に相当する点をパターン別(1~12)に設定した(図11)。さらに多変量解析法を用いて、各断面における一次計測点と二次計測点に相当する位置の関係をまとめ、一次計測点から二次計測点を抽出する方法を開発した。これは、パターン別に設定した二次計測点と一次計測点の座標をデジタイザーを用いて入力し、二次計測点を目的変数、一次計測点を説明変数とした重回帰方程式として両者の関係を求めることにより行った。この場合1パターンは約4スライスから7スライスにより構成されるので、ある二次計測点についての重回帰方程式は、6症例合わせて約25断面から40断面により得られることになる。以上から求められた重回帰方程式の例(代数的テンプレートと呼ぶ)を図12に示す。

### 3-3 断面形態の構成

以上より求めた一次、二次両計測点間を三次元スプラインを用いて補間し、これにより各断面形態を再構成することとした。図13は補間後の下顎骨断面構成の1例である。白はX線CT画像外形線で、黄色は本法により

再構成した外形線である。さらにこのように再構成した各断面形態を上下的に積み重ねていくことで三次元構築し、顎顔面の骨格を立体表示した。図14左側にその1例を示す。また、比較のため同症例のX線CT画像のトレース画像を立体構築し立体表示したものを右側に示す。

## 4 結果および考察

### 4-1 顎顔面形態の三次元構築について

Savaraら<sup>8)</sup>は、顎顔面各部に立体座標系を設定し、正面および側面頭部 X線規格写真から得られる計測点の二次元座標を組み合わせ、三角法を応用して三次元座標を算出し計測点間距離を測定している。その後この手法を応用し、下顎骨の成長発育の経年的な観察<sup>14)</sup>、撮影方向を増やし、立体座標値から空間距離を求め顔面頭蓋を多面的に観察する方法についての検討<sup>9)</sup>、計測点間の立体算出距離、立体算出角度による下顎骨の立体的位置と形態の評価<sup>10)</sup>、計測点間を直線で結び多面体による顎顔面の表示と下顎形態の立体評価<sup>13)</sup>、さらにこのような多面体モデルによる外科矯正における手術シュミレーションへの応用<sup>15) 16)</sup>などについて多数報告されている。

しかしながら計測点数や部位が限られているために、これらを用いた三次元計測は行えるものの、その表示に関しては幾何学モデルの域を出ず、視覚的に十分な解剖学的形態を再現しているとはいえなかった。

一方画像診断の進歩、特に X線 CT とイメージング技術の進歩による三次元表示 CT の出現により、人体組織の立体構造を視覚的に直接とらえることができるようになってきている<sup>17)</sup>。中でも先天奇形など、頭蓋全体に広く形態的問題があるような症例に対する複雑な立体構造

の把握には非常に有用であり<sup>18, 19)</sup>、これに対する解析法も開発されている<sup>20)</sup>。しかしながら装置の規模が非常に大きく撮影に時間を要すること、また撮影操作の複雑さ、処理速度、被曝の問題、汎用性等の面から、日常の臨床において頻繁に使用することには無理がある。

そこで撮影が比較的容易で日常の臨床にもよく用いられており、またその空間分解能はX線CTに勝る頭部X線規格写真を用いて、顎顔面形態を可能な限り実体に近く立体表示することを試みた。この背景としては、最近の画像処理技術の進歩およびパーソナルコンピュータと周辺機器の高性能化により、容量の大きい画像データも手軽に処理できるようになってきたことがあげられる。本実験においてもトレースを画像入力し、これをデジタル情報として処理することで、大量の計測点を三次元座標として引き出し、これにより立体構築することが可能となっている。

本法では、矯正臨床において日常撮影される頭部X線規格写真とパーソナルコンピュータを中心とした簡便なシステムを用いて、顎顔面の三次元情報を算出し、これより同部を立体的に観察解析することが可能である。このため将来は治療前後の形態変化や顎骨の経年的成長変化の分析など、日常の臨床において広く簡便に応用していくことができるものと思われる。

## 4 - 2 方法について

### 1) トレース方法について

頭部 X 線規格写真における計測誤差にはさまざまな要因が関与しているが、これについては多数の報告がある(21, 22, 23)。

本研究において大きな問題となるのはトレースの段階における誤差である。すなわち、2枚のフィルム上に正確に同じ解剖学的構造を設定することが難しい点である。これは、①頭部 X 線規格写真において、認識が困難であるためにトレースした部位の再現性に問題がある。②二方向の X 線写真それぞれで容易に認識できるが、両者の骨辺縁が同一の部位ではないなどの場合が考えられる。後者については、厚みのある構造物の投影像では、その形態と投影方向によっては実際の辺縁の位置と、投影像の骨辺縁がずれている場合がある。本法においてもあらかじめずれが予想される部位では、そのトレース部位を投影像の骨辺縁ではなくより実体に近い部位になるように設定した方が、良好に三次元座標が抽出される場合があった。例えば正面頭部 X 線規格写真での下顎枝後縁は、投影像と実際の辺縁で約 3 mm 前後のずれが認められる。そこで下顎枝後縁部については最外側縁よりもやや内側にトレースを行った。これについては現在のところ、立体表示した形態への影響は少ないものと思われるが、今

後さらに検討を加えていきたい。

また、将来は人為的誤差を無くすために、トレースを用いることなくX線写真そのものを画像入力し、客観的に骨輪郭のエッジおよび計測点を抽出する方法<sup>24)</sup>の応用も考えられる。これは立体表示の再現性の向上をはかるばかりでなく、本法による三次元計測の実用化にも有効な手段と思われる。

## 2) 便宜的に設定した部位について

トレース時に便宜的に設定した部位のうち、正面頭部X線規格写真の上顎骨齒槽突起後縁相当部、正中線、側面頭部X線規格写真の側頭部頭蓋冠外形線、頬骨下稜相当部、下顎骨外斜線から下方へ延ばした延長線については、いずれの部位も直線で設定している。これらはそれぞれの頭部X線規格写真上で認識が困難であるが、顎顔面形態の実体に近い三次元構築には設定が不可欠であった。そこで、設定にあたっての再現性を考慮し、認識の容易な計測点や解剖学的形態を利用して直線で表現することとした。実際の立体表示の結果からは顎顔面形態の視覚的評価に対して特に支障はないものと考えられた。

一方、斜位撮影における犬歯部は、側方歯部がフィルム面と平行になるために、他の構造物と重なることなく<sup>25)</sup>、認識、トレースが容易であった。また犬歯部が齒列の隅角部に相当するため、もう一方の斜位において最も

突出する位置にあたり、犬歯歯冠および同歯槽部の設定が容易であった。このことから特に犬歯の位置異常がない場合には解剖学的に誤差が少ないものと考えられた。

#### 4 - 3 一次計測点に関して

##### 1) 出力部位と出力点数

一次計測点の位置、点数については、6症例いずれにおいてもトレースした部位のほとんどが三次元座標をもつ点として出力されていたが、水平方向に延びた部位（例えば眼窩上下縁、頬骨弓など）では、三次元座標として算出された点数が少ない傾向にあった。これは、線画像がお互いに上下方向の誤差を生じやすい部位すなわち水平方向に延びた骨辺縁については、トレース画像上のある点から線源に逆投影した2本の直線どうしが交差しづらいこと、あるいは2枚のトレース画像上で情報量に著しい差があるために出力点数が少なかったものと考えられる。例えば、頬骨弓では正面頭部X線規格写真トレース画像でのデータ数は側面頭部X線規格写真に比べ著しく少ない。しかしながらこのような傾向は後の各断面形態再現に際しては、ほとんど問題となるものではなかった。

## 2) 位置的評価

出力された一次計測点の位置について評価するため、一次計測点とX線CTトレース画像とのマッチングを行った。両者の重ね合わせのために、口腔内に装着した7個から10個の金属球のなかから、頭部X線規格写真およびX線CT画像の両方で同一と判定できるものを3個選び、これを基準に一次計測点の座標変換を行った。

このマッチングにおける誤差について検討すると、まず骨辺縁をあらわす一次計測点の配列が、図15に示すように断層面に対し45度の角度をなす場合を考えた時、頭部X線規格写真のトレース画像のサンプリングピッチが0.5mm、X線CT画像の断層幅が2mmであるので、X線CT一断層面につき4画素分の頭部X線規格写真からの情報が含まれる。このとき両者のマッチングの際に最も誤差を生じやすいのはX線CTの分解能の関係上、上下方向のずれである。すなわちX線CTの断層幅が2mm(4画素分)であるから、断層面のずれによって上下的に±1mm(2画素分)の範囲で誤差が生ずることが考えられる。この場合、頭部X線規格写真の三次元構築画像とX線CT画像のあらわす骨辺縁の間には水平方向で最大4画素の誤差が存在することとなる(図15)。

今回の結果では上顎骨、下顎骨など治療で大きく変化する部位については、大多数の計測点が4画素以内であり上記の誤差の範囲内にあった。さらに5画素以上のず

れをもつ一次計測点でも最大14画素で7mm以下の誤差であるので、顎顔面形態の表示に際しては、視覚的に大きな影響は無いものと思われた。

#### 4-4 二次計測点と断面パターンに関して

二次計測点の設定に際しては、個体差によらず共通した解剖学的特徴点であること、外形線の変曲点等で形態再現に効果的であることなどを考慮した。また形態変化を観察する上であまり問題にならない部位（頭蓋冠など）については、比較的簡単な形で断面を再現することとし、二次計測点数も必要最小限とした。

パターン1、2はオトガイと下顎骨体を含む部分で、二次計測点を設定することなく一次計測点のみで断面形態の再現を行った。これは同部位の断面が放物線形に近く凹凸の無い比較的単純な形態のためである。

パターン3は下顎骨歯槽部、下顎骨体、および下顎枝を含む部分で、下顎体から下顎枝移行部に左右1点ずつ計2点に二次計測点を設定した。

パターン4は下顎枝をあらわす部分で、下顎枝の厚みを表現するために同部の内側辺縁に左右計2点の二次計測点を設定した。

パターン5は上顎骨歯槽部と下顎枝を含む部分で、上顎歯槽骨隅角部（犬歯歯根相当部）と下顎枝内側辺縁に左右計4点の二次計測点を設定した。

パターン 6 は上顎骨と下顎枝を含む部分で、上顎歯槽骨隅角部と下顎枝内側辺縁に左右計 4 点の二次計測点を設定した。

パターン 7 は上顎骨（梨状口下部）、頬骨、下顎枝、および後頭骨を含む部分で、犬歯窩相当部と後頭骨隅角部に左右計 4 点の二次計測点を設定した。

パターン 8 は上顎骨（梨状口上部）、頬骨、および後頭骨を含む部分で、眼窩下部と後頭骨隅角部に左右計 4 点の二次計測点を設定した。

パターン 9 は、鼻骨（下部）、頬骨、側頭骨、および後頭骨を含む部分で、鼻骨先端と眼窩内側縁の中点、および後頭骨隅角部に左右計 4 点の二次計測点を設定した。

パターン 10 は、鼻骨（上部）、頬骨、側頭骨、および後頭骨を含む部分で、鼻骨先端と眼窩内側縁の中点、蝶形骨側頭骨間、および後頭骨隅角部に左右計 6 点の二次計測点を設定した。

パターン 11 は、前頭骨、頬骨弓、側頭骨、および後頭骨を含む部分で蝶形骨側頭骨間、頭蓋冠後方隅角部に左右計 4 点の二次計測点を設定した。

パターン 12 は、頭蓋冠（前頭骨、頭頂骨）をあらわす部分で側頭骨前方隅角部と頭蓋冠後方隅角部に左右計 4 点の二次計測点を設定した。

以上 12 種類の代数的テンプレートを用いることにより、6 症例の全てにおいて顎顔面形態の三次元構築を行うことができた。この際、特にパターンとパターンの

間については、一次計測点の一部が三次元座標として算出されない不完全型あるいは隣接する2つのパターンの移行型と思われる断面が存在する場合もあった。このような場合は、算出された一次計測点のみをスプライン関数にて結ぶこととしたが、立体表示に対する視覚的影響はほとんどなかった。

#### 4-5 代数学的テンプレートについて

一般的に使われるテンプレート(template)とは、本来は型、あるいは型板という意味で、大きさや形があらかじめ決められたものである。Baum<sup>26)</sup>はダウンス法の分析のために頭部X線規格写真上に直接のせるテンプレートを考案し、その後Harrisら<sup>27)</sup>やAckermanら<sup>28)</sup>は、成長パターンなどの視覚的な表示や顎顔面形態の視覚的な評価等にこれを応用した。さらに顔面の成長変化の評価と成長の予測<sup>29, 30)</sup>、矯正治療の結果の評価<sup>31)</sup>、顔面形態の分析や遺伝的類似性の研究<sup>32)</sup>などにも適用されている。

本研究における代数学的テンプレート法とは、これらとは異なりある特定の型を用いるわけではなく、頭部X線規格写真より求めた一次計測点を用いて、断面形態を再現するために必要な二次計測点を求めるための手法を意味する。二次計測点の算出のために多変量解析法を用い、各二次計測点に応じた重回帰方程式が用意された。

これにより大きさや幅、奥行き（深さ）について個体間変動がある場合にもそれに対応して二次計測点を求めることができる。すなわち個体に合わせて調整が可能なテンプレートとしてとらえられるものである。

#### 4 - 6 立体表示画像について

X線CT画像トレースからの立体表示と本法による頭部X線規格写真からの立体表示（図14）より、両者の違いを比較検討したところ、頭蓋冠については後方部でややずれが大きくなっていたが、上顎骨、下顎骨など矯正治療前後の変化を視覚的に把握する上で重要な部位については、特に形態の再現性の高いことが確認され、日常の臨床に応用するには十分な結果が得られた。

また、人体構造をスライス（互いに平行な断面の二次元画像）の輪郭線データを用いて三次元物体表面を再構成するにはワイヤースケルトン表現、輪郭線掃引法および三角形面素構成法があるが、本実験においてはワイヤースケルトン表現を用いて三次元画像表示を行った。ワイヤースケルトン表現の利点は、他の手法に比べデータ量を少なくできることである。このためパソコンにても処理可能であり、骨を画像上で三次元的に高速に移動することも可能となる。特に任意の方向から観察したいときには、立体表示結果を自由に回転することもできる。将来は、見やすさあるいは三次元形態の理解のしやすさの点での

表示効果を高め、さらに画像のリアリティを出すために、濃淡情報の付与も有効であると思われる。

#### 4 - 7 臨床応用の一例

本研究の臨床応用として、顎変形症患者の外科矯正治療前後の顎顔面立体表示を行った。今回応用した例は、19歳の女性で下顎の右方偏位による顔面非対称を伴う骨格性反対咬合の症例である。

図16は手術前の立体表示で、図17は術前の顎顔面に術後の下顎骨をスーパーインポーズしたものである。

従来このような症例に対しては、側面頭部X線規格写真を用いた分析法に加え、正面頭部X線規格写真を用いて顔面の非対称性に関する分析も行われていた<sup>33, 34, 35, 36, 37, 38, 39</sup>。しかし二次元的な分析であるために、下顎骨の複雑な異常を下顎骨自体の変形の問題あるいは位置的な問題として評価することは困難であった。本症例ではさらに本法を用いることにより、下顎骨の変形の問題として顎角部形態および下顎骨体長の左右差を容易にとらえることができた。さらに位置的な問題として左右顎角部の前後的なズレおよびオトガイ部の右方への偏位が明らかに示されていた。また手術前後の分析においても、下顎骨体が左側への回転を伴って後方へ移動した結果左右の長さが均等となり、偏位したオトガイの位置も改善されたことが明瞭に示されていた。以上より術前の

下顎骨の変形の状態や位置的問題を容易にとらえることができた。また同部の手術による三次元的変化を視覚的に把握することも可能であった。

顎変形症の場合、多くは下顎骨そのものが非対称性を有し、その変形が下顎骨体部にある場合、片側の下顎支部にある場合、あるいは両者に及ぶ場合が考えられる。本法で用いた重回帰方程式はもとより正常人より作成したものであり、このため断面形態が左右非対称である場合に少なからず問題があるものと思われた。しかし実際に構成された断面では、下顎骨の変形を適切に再現するような左右非対称を示す形態となっていた。これは、一次計測点が個体本来の情報であることと、さらに二次計測点がこの情報に基づいて代数的テンプレートより算出されたことによるものと考えられる。

#### 4 - 8 将来の展望

今回開発したテンプレートは成人を対象としたものであるが、今後は各成長段階に応じたテンプレートを作成することにより、成長発育に伴う顎顔面の三次元的形態変化を詳細に把握することも可能になると考えられる。

また本学歯学部歯科矯正学講座で開発した歯列模型形状測定装置<sup>40)</sup>から得られた歯列の三次元情報を本法にマッチングすることで、顎顔面および歯列の経年的成長変化について両者の相互関係を解明する有効な手段になる

ものと思われる。さらにこれは外科矯正治療に対して顎顔面形態の変化と咬合の変化についての総合的な三次元的シミュレーションを可能とするものであり、術前後の変化を立体的イメージとしてとらえることができるばかりでなく、治療計画の立案あるいは患者との良好なコミュニケーションの確立に有効な手段となることが期待される。

## 5 まとめ

本研究では、顎顔面の骨格の解剖学的形態をより実体に近い状態でとらえるために、複数方向の頭部 X 線規格写真のトレースを画像入力し、画像処理により従来では扱うことのできなかつた大量の計測点に基づく顎顔面形態の立体表示方法を開発することを目的に実験を行い、さらにその臨床応用として外科矯正治療を行った顎変形症患者の術前術後の三次元的形態変化についての評価を試みた。

本法の手順は以下のとおりである。

- ① 頭部 X 線規格写真のトレース画像から、線画像を構成する点についての三次元座標値（一次計測点）を抽出する。
- ② 各断面形態を再現するために必要な点（二次計測点）を代数的テンプレート法により抽出する。
- ③ 各断面ごとに一次、二次両計測点間をスプライン補間する。
- ④ これらを三次元構築し立体表示する。

立体表示の結果より、上顎骨、下顎骨など矯正治療前後の変化を視覚的に把握する上で重要な部位については、特に形態の再現性の高いことが確認され、日常の臨床の応用が十分可能であると思われた。

また顎変形症患者に対しての臨床応用の結果から、下顎骨の変形の状態や位置的問題を容易にとらえることが

できた。さらに同部の手術による三次元的変化を視覚的に把握することが可能であった。

## 謝 辞

本研究は本学歯科矯正学講座において行ったものであり、その間終始御指導と御援助を頂いた本学歯科矯正学講座中村進治教授に深く感謝いたします。また、本学歯科矯正学講座石川博之講師ならびに山村雅彦助手には研究の細部にわたり直接御指導を賜り、終始適切な御助言を頂きましたことに、心より感謝いたします。また研究資料の作成に当たり、快く御協力頂きました本学附属病院放射線技術部門徳井満技師長はじめ技師の皆様には深く感謝いたします。さらにX線CT撮影にあたり御協力頂きました北海道大学医学部形成外科大浦武彦教授ならびに井川浩晴助手、北海道大学医学部附属病院放射線部渡辺良晴技官に深く感謝いたします。最後に、種々の御協力を頂いた矯正学教室の教室員の皆様に謝意を表します。

稿を終えるにあたり、これらの各位の多大なる御援助と御協力に、あらためて感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Broadbent, B.H.: A new X-ray technique and its application to orthodontics, Angle Orthodont. 1:45-66, 1931.
- 2) Downs, W.B.: Variations in facial relationship: Their significance in treatment and prognosis, Am. J. Orthod. 34:812-840, 1948.
- 3) Graber, T.M.: New horizons in case analysis - clinical cephalometrics, Am. J. Orthodont. 38: 603-624, 1952.
- 4) Tweed, C.H.: The Frankfort-mandibular plane angle in orthodontic diagnosis, classification, treatment planning and prognosis, Am. J. Orthod. 32:175-230, 1946.
- 5) Ricketts, R.M.: Cephalometric synthesis: An exercise in stating objectives and planning treatment with tracing of the head roentgenogram, Am. J. Orthod. 46:647-673, 1960.
- 6) 飯塚哲夫, 石川富士郎: 頭部 X線規格写真による症例分析法の基準値について, 日本人成人男女正常咬合群, 日矯歯誌 16:4-12, 1957.
- 7) 山崎岐男: 臨床歯科放射線学, 鳳鳴堂書店, 1981.
- 8) Savara, B.S.: A method for measuring facial bone growth in three dimension, Hum. Biol. 37:245-255, 1965.
- 9) 石川雅章, 中田 稔: 顔面頭蓋の3次元計測法に関する研究, 小児歯誌 15:1-8, 1977.

- 10) 山崎俊恒 : 頭部における下顎の立体的位置および形態の研究, 日矯歯誌 40:205-227, 1981.
- 11) 本吉 満 : 上下顎形態の立体的評価に関する研究, 日矯歯誌 45:181-195, 1986.
- 12) Brown, T, Abbott, A.H: Copmputer-assisted location of refernce points in three dimensions for radiographic cephalometry, Am. J. Orthod. 95:490-498, 1989.
- 13) Grayson, B, Cutting, C, Bookstein, F.L, Kim, H., McCarthy, J.G: The three-dimensional cephalogram: Theory, technique, and clinical application, Am. J. Orthod. 94:327-337, 1988.
- 14) Tracy, W.E., et al.: Norms of size and annual increments of five anatomical measures of the mandible in girls from 3 to 16 years of age, Archs.oral Biol. 11:587-598, 1966.
- 15) 井上貴一郎、山崎俊恒 ほか: 外科矯正における術後の3次元的予測に関する研究, 日矯歯誌 45 :658-666, 1986.
- 16) Cutting, C., Bookstein, F, Grayson, B., Fellingham, L. & McCarthy, J.G. : Three-dimensional computer-assisted design of cranio-facial surgical procedures: optimization and interaction with cephalometric and CT-based models, Plast.reconstr.Surg. 77:877-885, 1986.
- 17) 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 24:1-11, 1986.

- 18) 桜井信彰,新橋武:X線CT画像を用いた三次元画像表示に関する臨床応用について,慈恵医大誌 103:473-483, 1988.
- 19) 藤岡睦久:Surface Reconstruction CT Imaging の臨床応用,映像情報 19:965-969, 1987.
- 20) 松野功,河上宗博 ほか:頭蓋顎顔面変形症例に対する三次元形態分析法,日矯歯誌, 49,219-301, 1990.
- 21) Baumrind, S.and Frantz, R.C.:The reliability of head film measurements. 1. Landmark identification, Am.J.Orthod.60:111-127, 1971.
- 22) Baumrind, S.and Frantz, R.C.:The reliability of head film measurements. 2. Conventional angular and linear measures, Am.J.Orthod. 60:505-517, 1971.
- 23) Midtgard, J., Bjork, G. and Aronson, S.L.:Reproducibility of cephalometric landmarks and errors of measurements of cephalometric cranial distances, Angle Orthodont. 44: 56-62, 1974.
- 24) 石川博之:画像処理による頭部X線規格写真の自動分析方法の開発に関する研究,日矯歯誌 46:32-49, 1987.
- 25) 亀谷哲也:頭部X線規格写真撮影法(45°斜位)による犬歯、小臼歯、大臼歯の位置関係に関する研究,日矯歯誌 32:23-46, 1973.
- 26) Baum, A.T.: Downs' analysis template transparencies for application directly to cephalo-

metric x-ray films, Angle Orthod. 22:142-145, 1952.

- 27) Harris, J.E., Johnston, L., and Moyers, R.E. : Cephalometric template: Its construction and clinical significance, Am. J. Orthod. 49:249-263, 1963.
- 28) Ackerman, J.L., and Proffit, W.R.: The characteristics of malocclusion: a modern approach to classification and diagnosis, Am. J. Orthod. 56:443, 1969.
- 29) Schulof, R.J., and Bagha, L.: A statistical evaluation of Ricketts and Johnston growth forecasting methods, Am. J. Orthod. 67:258-276, 1975.
- 30) Johnston, L.E.: A simplified approach to prediction. Am. J. Orthod. 67:253-257, 1975.
- 31) Hideshi, I., Shuichi, M., Yutaka, T., and Shinji, N.: Treatment effect of combined maxillary protraction and chin cap appliance in severe skeletal Class III cases, Am. J. Orthod. 92:304-312, 1987.
- 32) Moorrees, C.F.A., and Le Bret, L.: Mesh diagram and cephalometrics, Angle Orthod. 32:214-231, 1962.
- 33) Harvold, E.: Cleft lip and palate; morphologic study of the facial skeleton, Am. J. Orthod. 40:493-506, 1954.

- 34) Johnston, M.C.: Orthodontic treatment for the cleft palate patient, Am. J. Orthod. 44:750-763, 1958.
- 35) Sassoni, V.: Diagnosis and the treatment planning via roentgenographic cephalometry, Am. J. Orthod. 44:433-463, 1958.
- 36) Yen, J.K.: Identification of landmarks in cephalometric radiographs, Angle Orthod. 30:35-41, 1960.
- 37) Chebib, F.S., Chamma, A.M.: Indices of Craniofacial Asymmetry, Angle Orthod. 51:214-226, 1981.
- 38) 中後忠男, 石沢命久 ほか: 頭部 X 線規格正貌写真分析法に関する正中線の決定について, 日矯歯誌 20:151-157, 1961.
- 39) 近藤悦子: 日本人生人男女についての頭部 X 線規格正貌写真法による検討, 日矯歯誌 31:117-136, 1972.
- 40) 原田良一: 歯列模型形状測定装置を用いた歯の三次元移動量計測, 日矯歯誌 44:50-58, 1985.

图 表

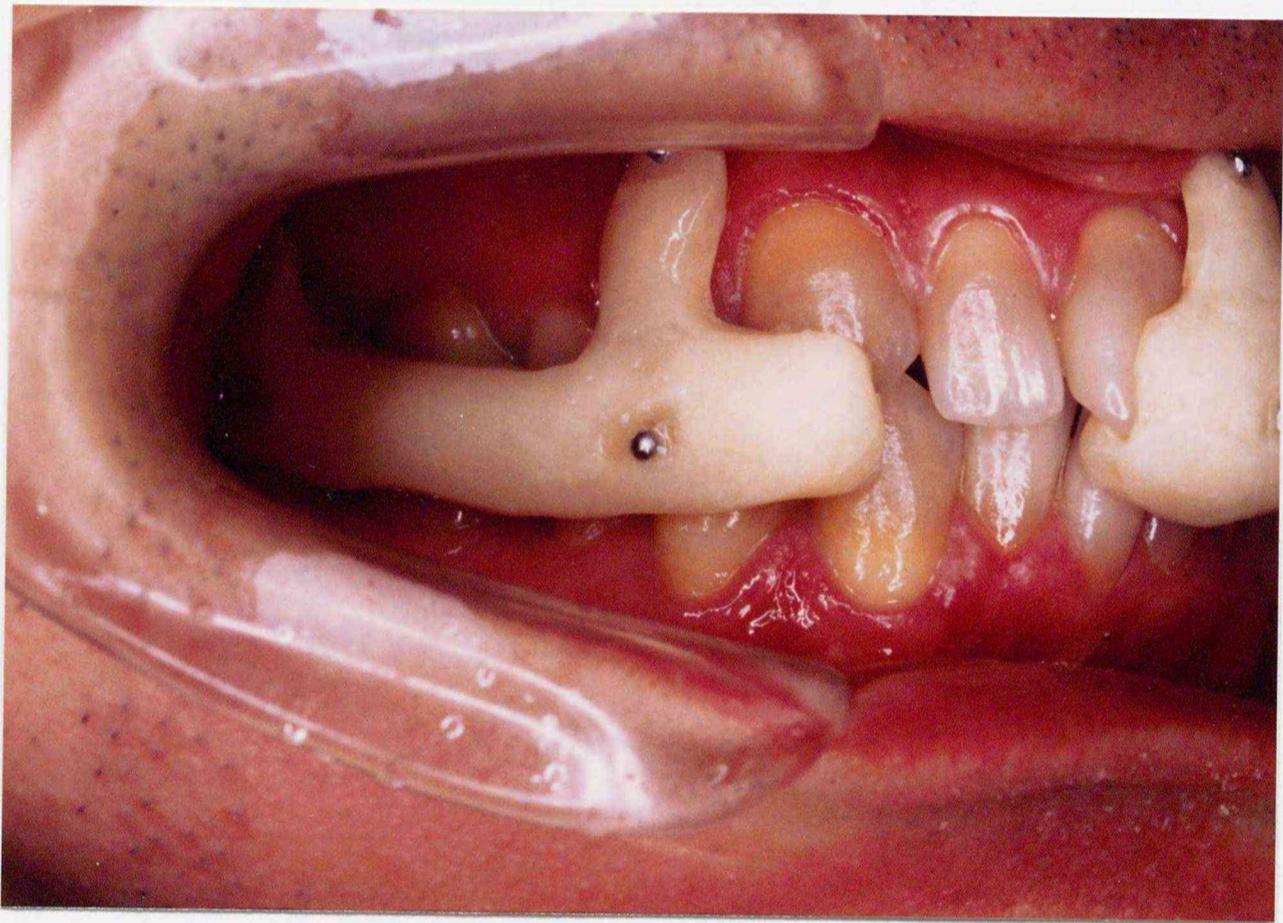


図 1 コア装着時の口腔内

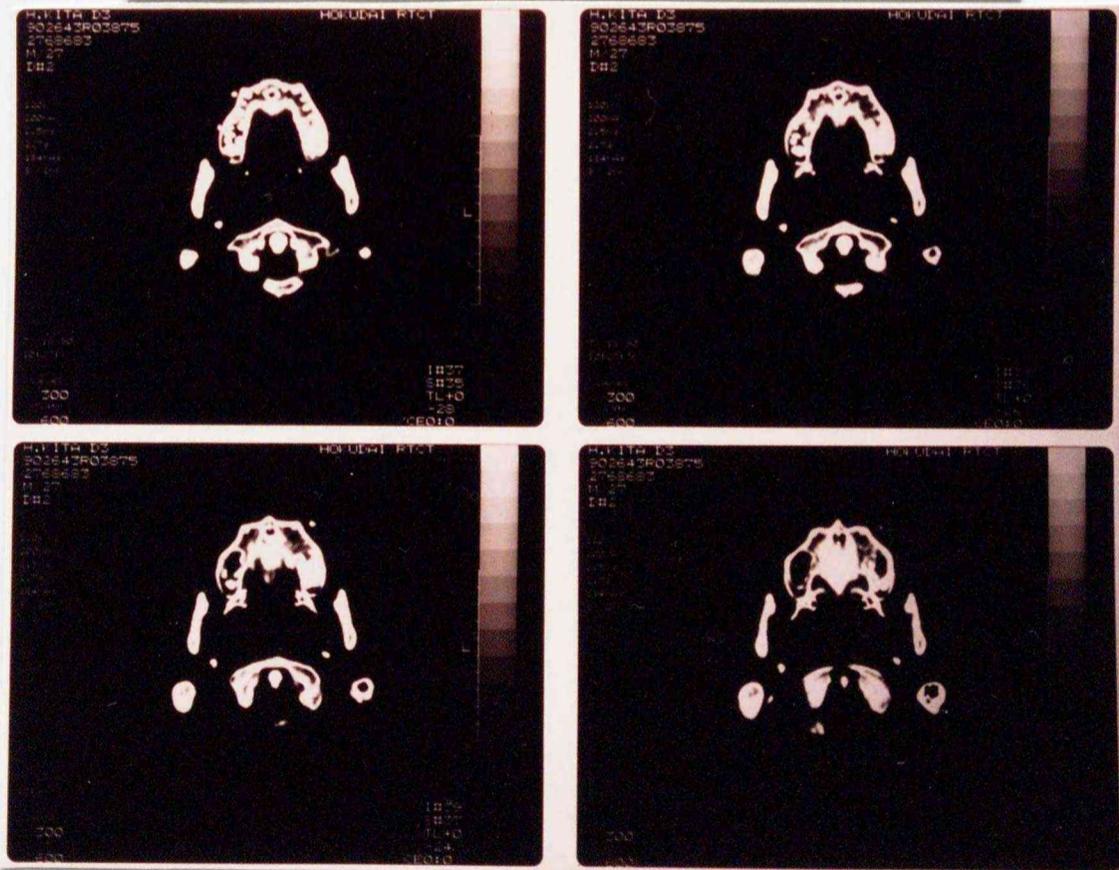
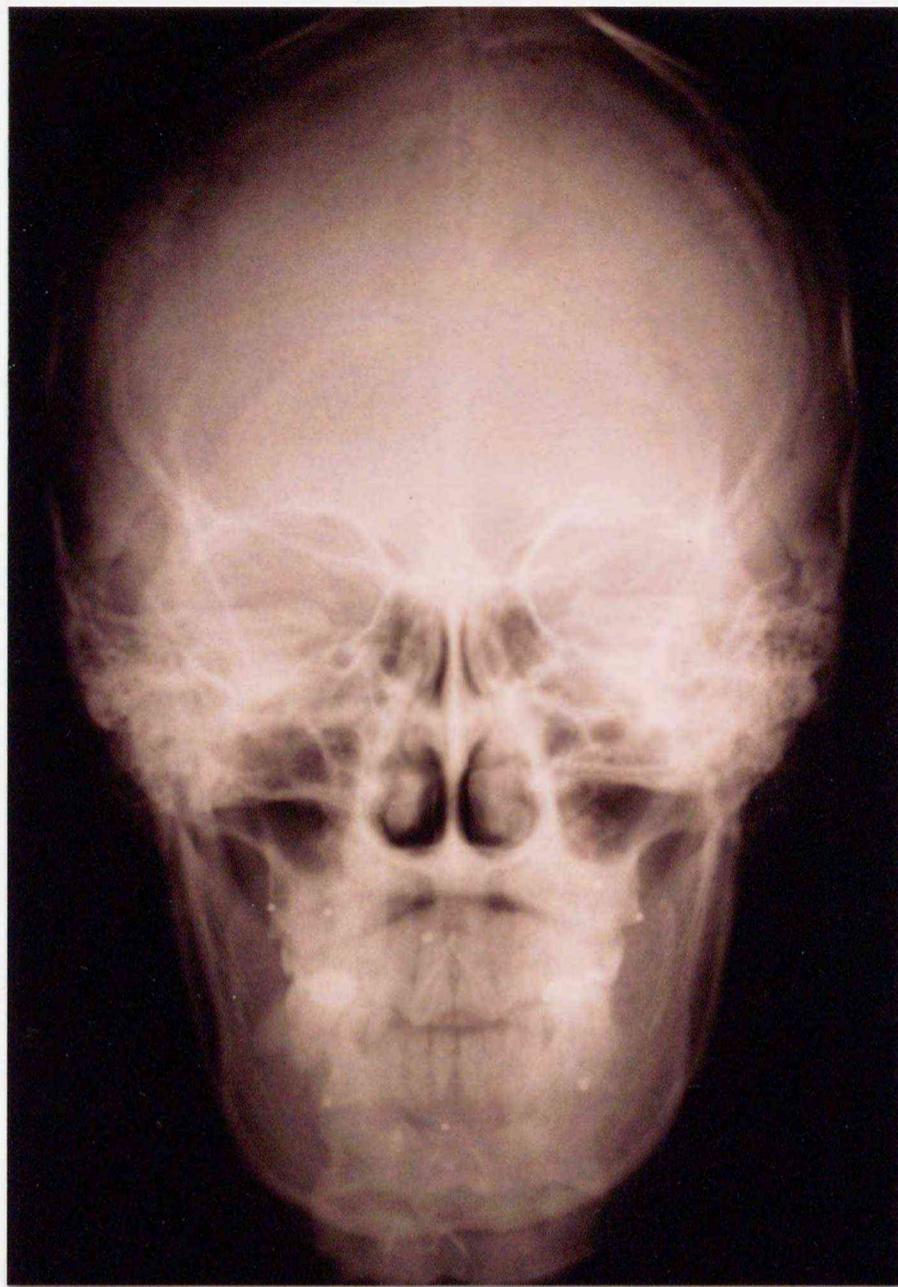


図 2 頭部 X 線規格写真および X 線 C T 画像

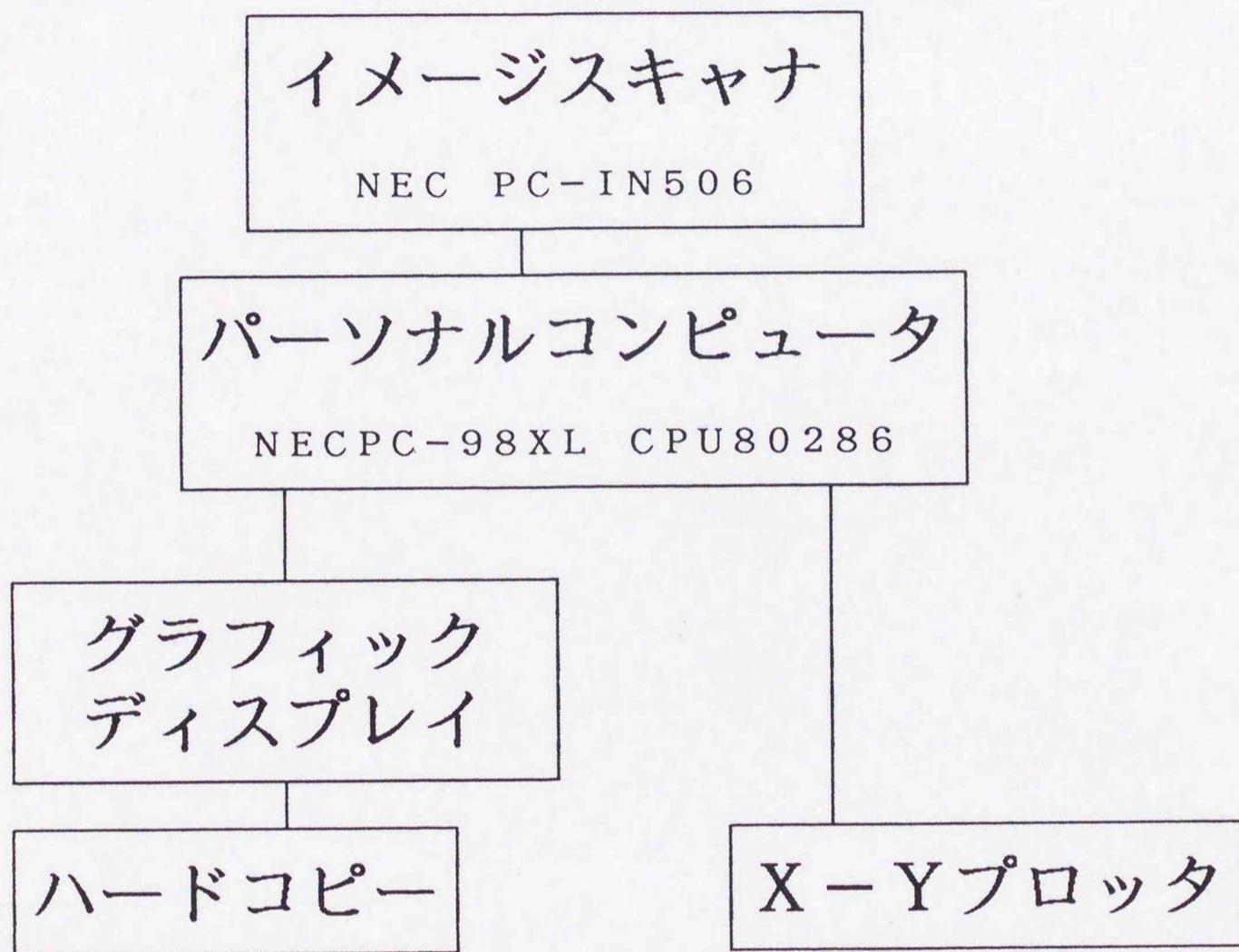
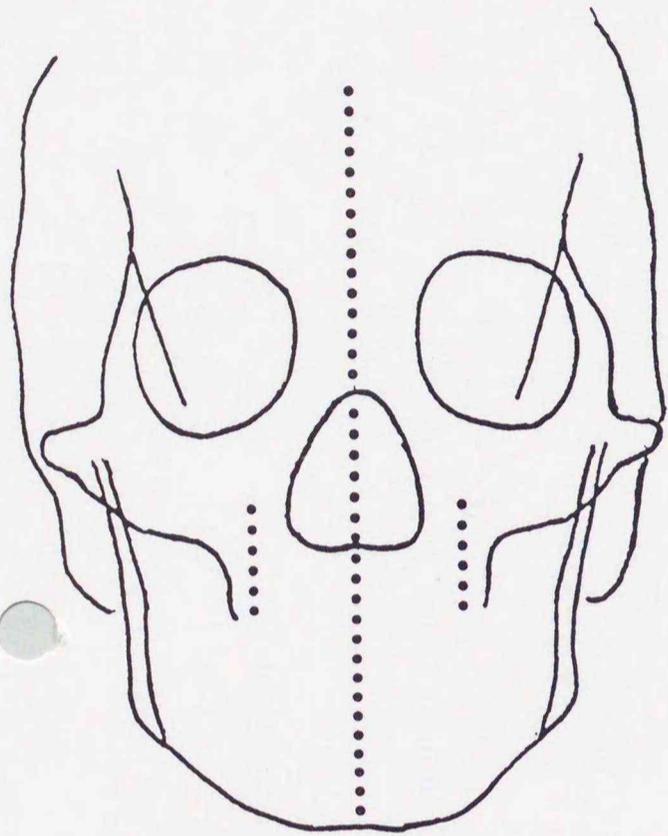
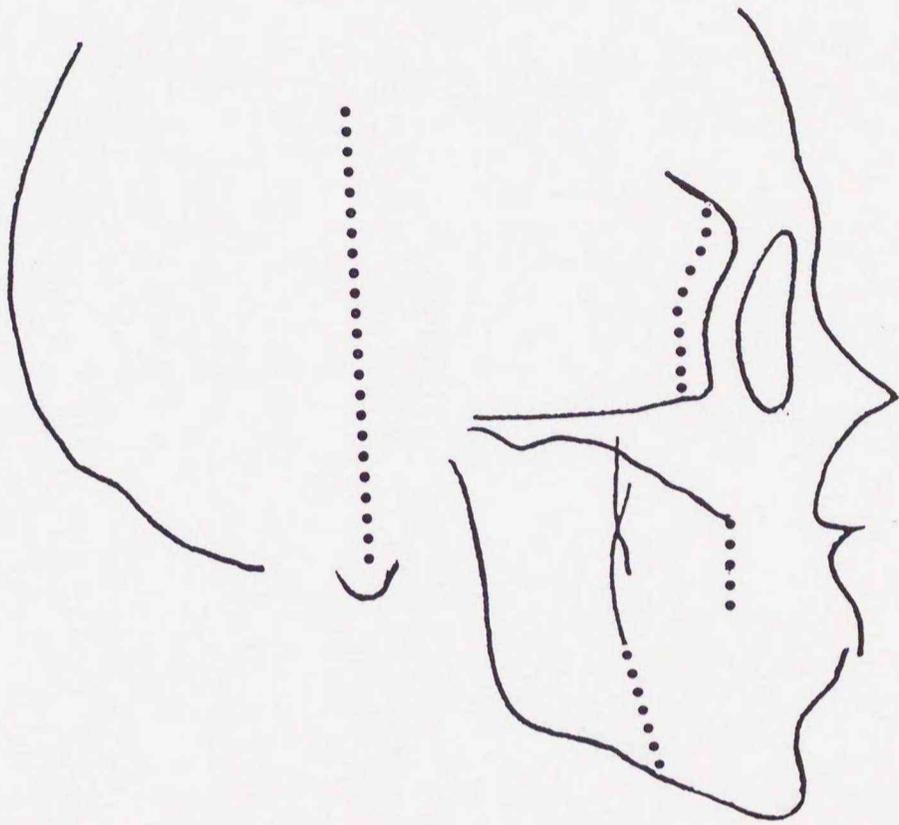


図3 システム構成

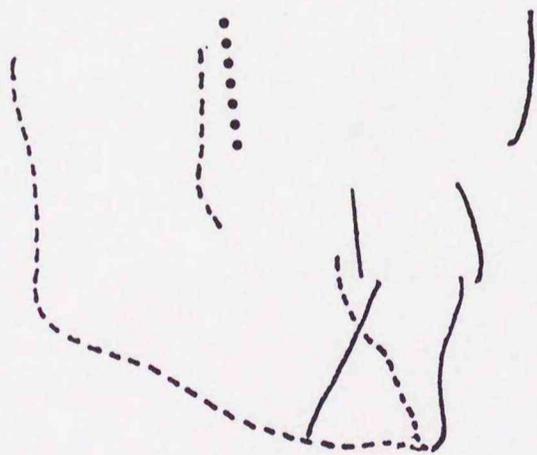
PA



LR



RO



LO

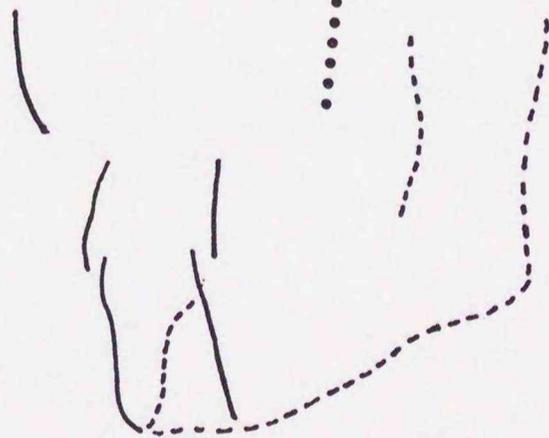


図 4 頭部 X 線規格写真トレースの模式図

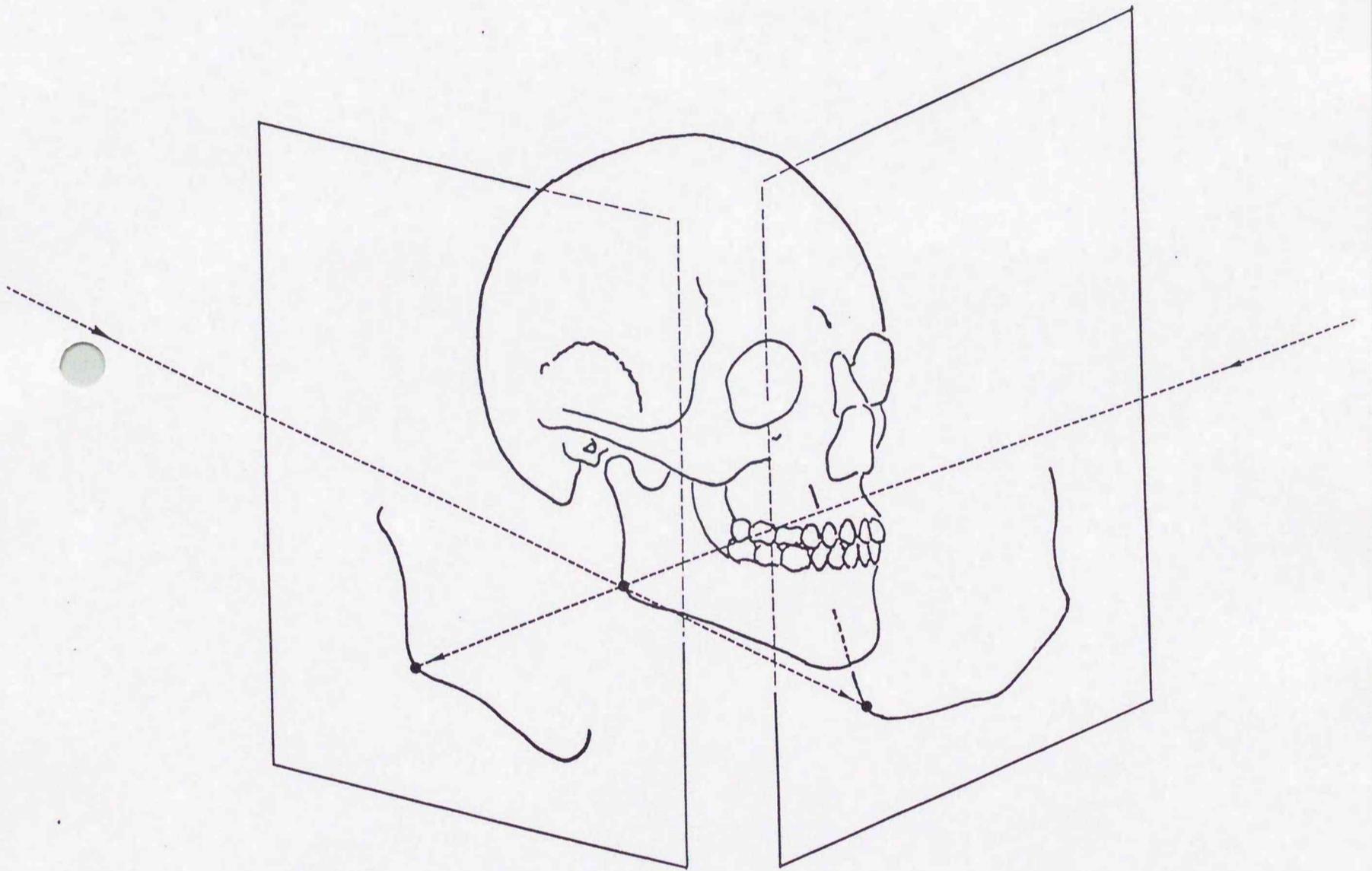
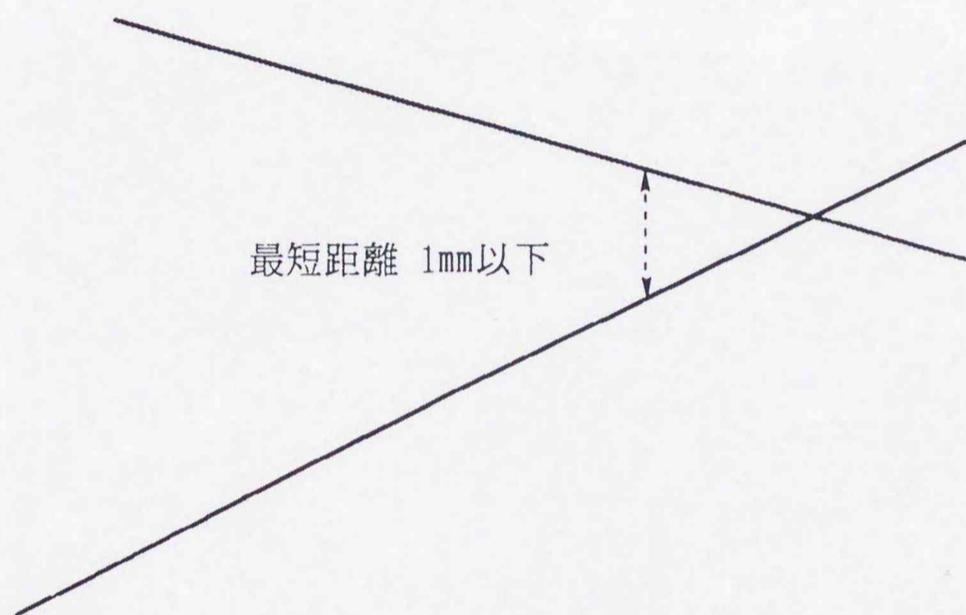


図 5 三次元座標値算出のアルゴリズム



最短距離 1mm以下

図6 空間上で近接する2直線

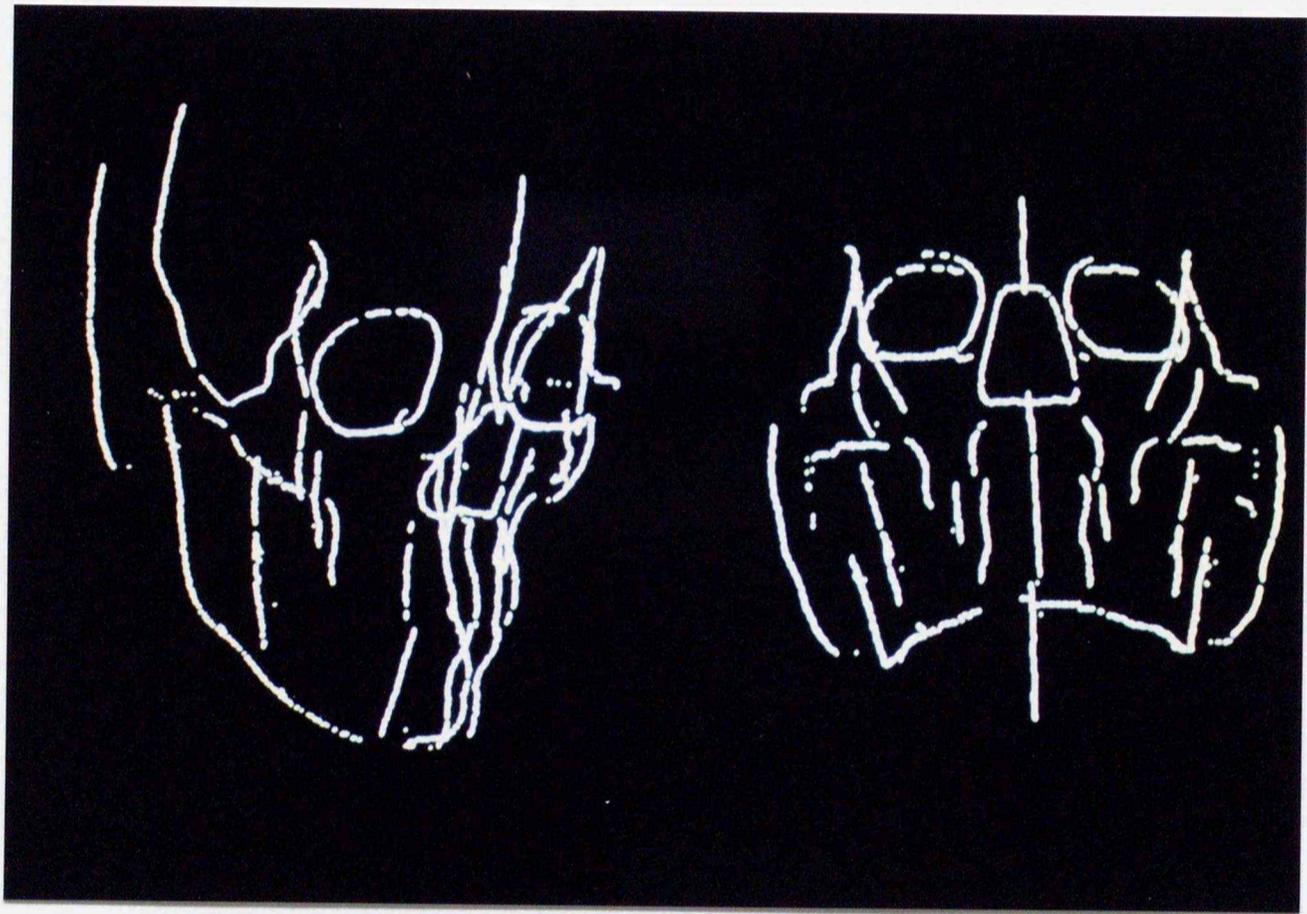


図 7 トレース画像の三次元合成（一次計測点）の一例

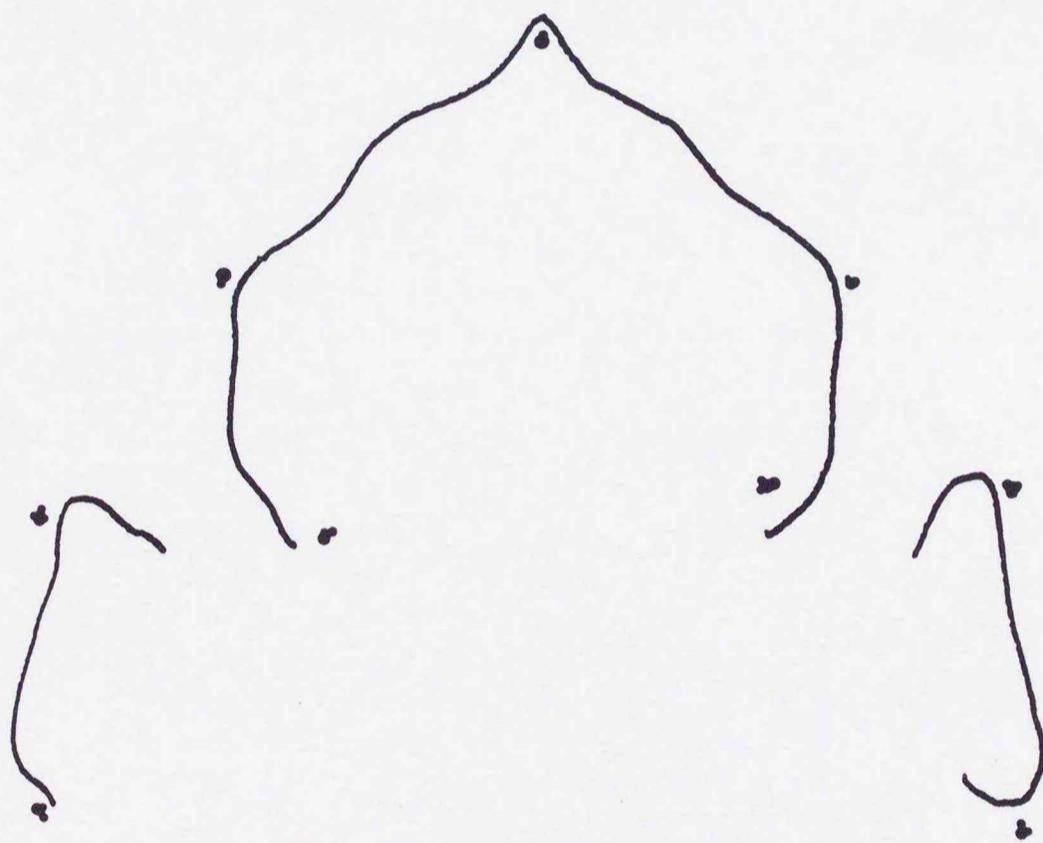


図 8 X線CT画像外形線と一次計測点

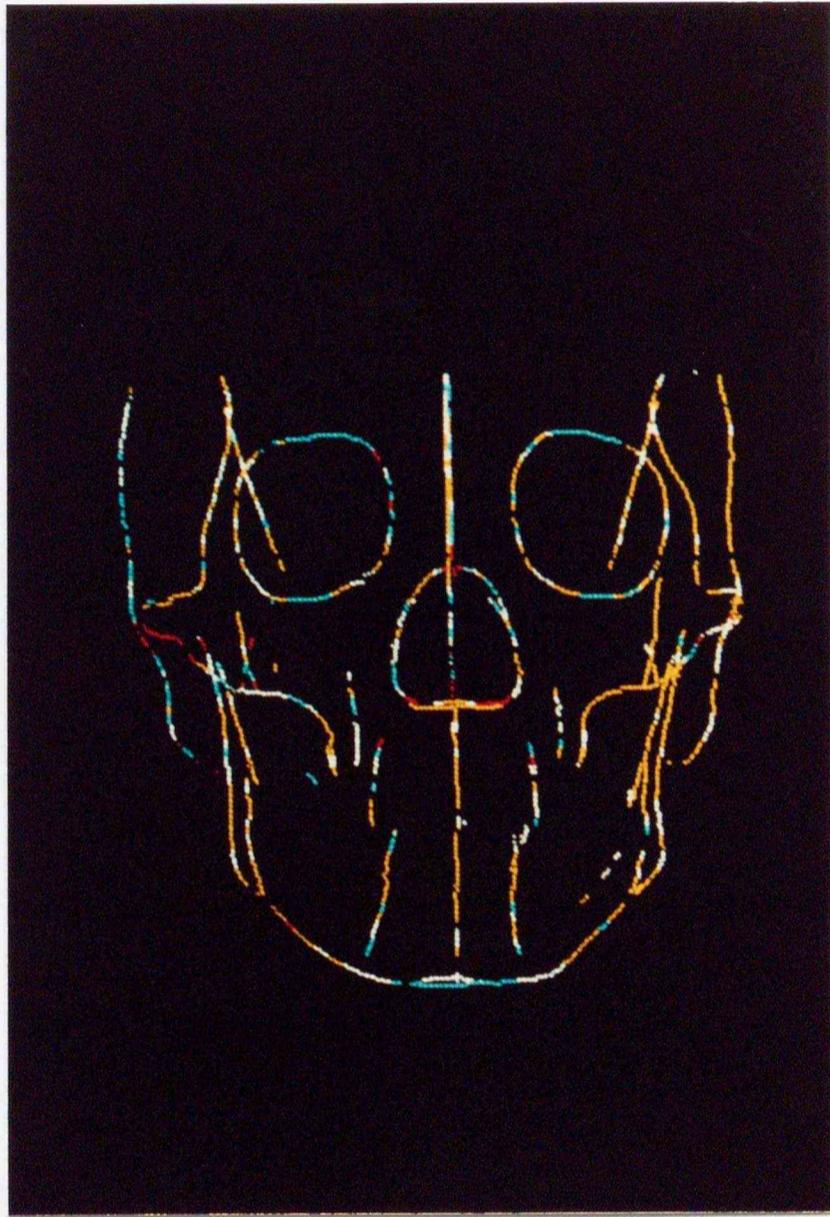


図 9 X線CT画像の外形線と一次計測点の位置関係  
2画素以内:黄色、4画素以内:白色  
6画素以内:青色、6画素以上:赤色

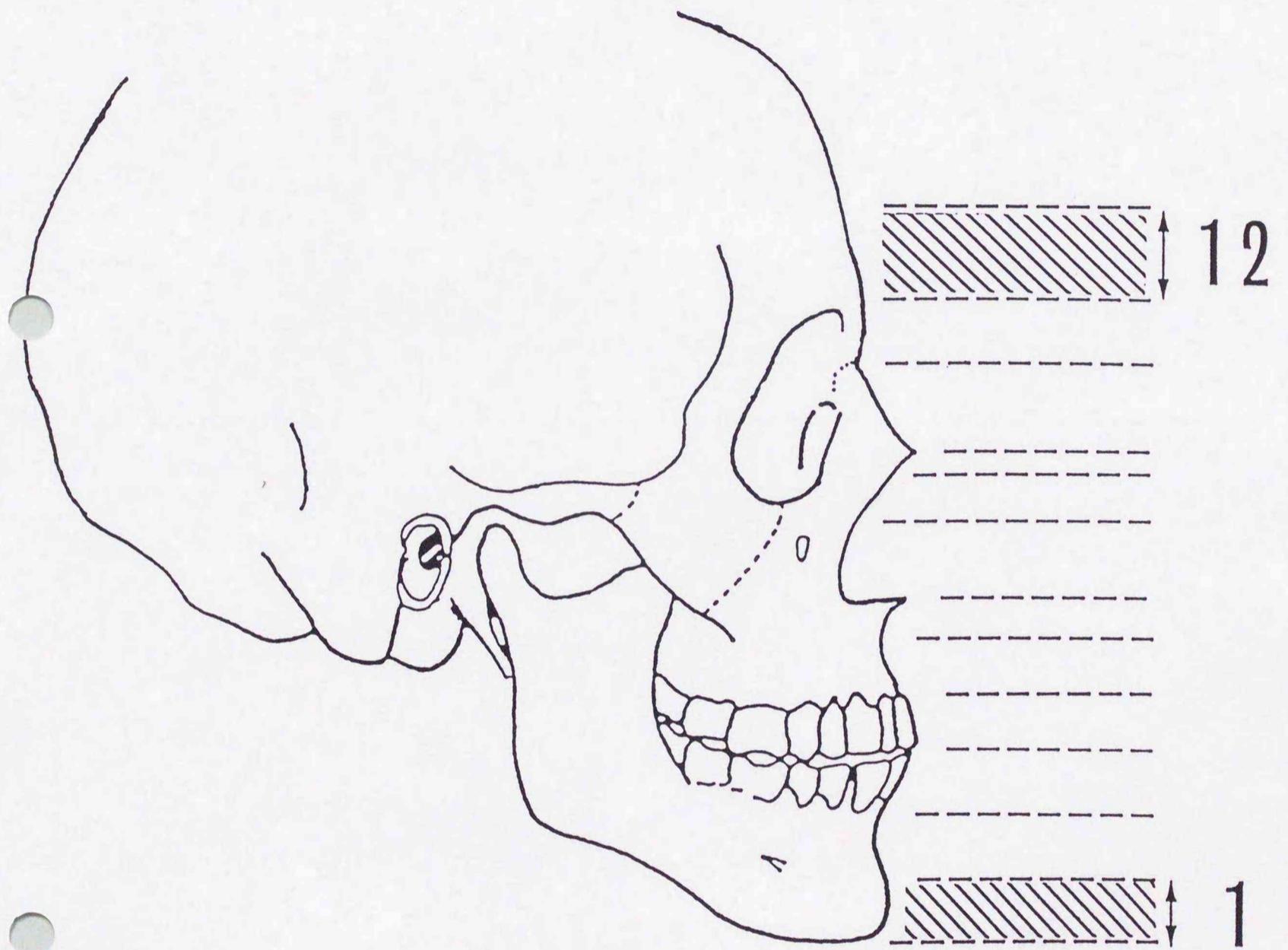


図 1 0 断面パターンの分類

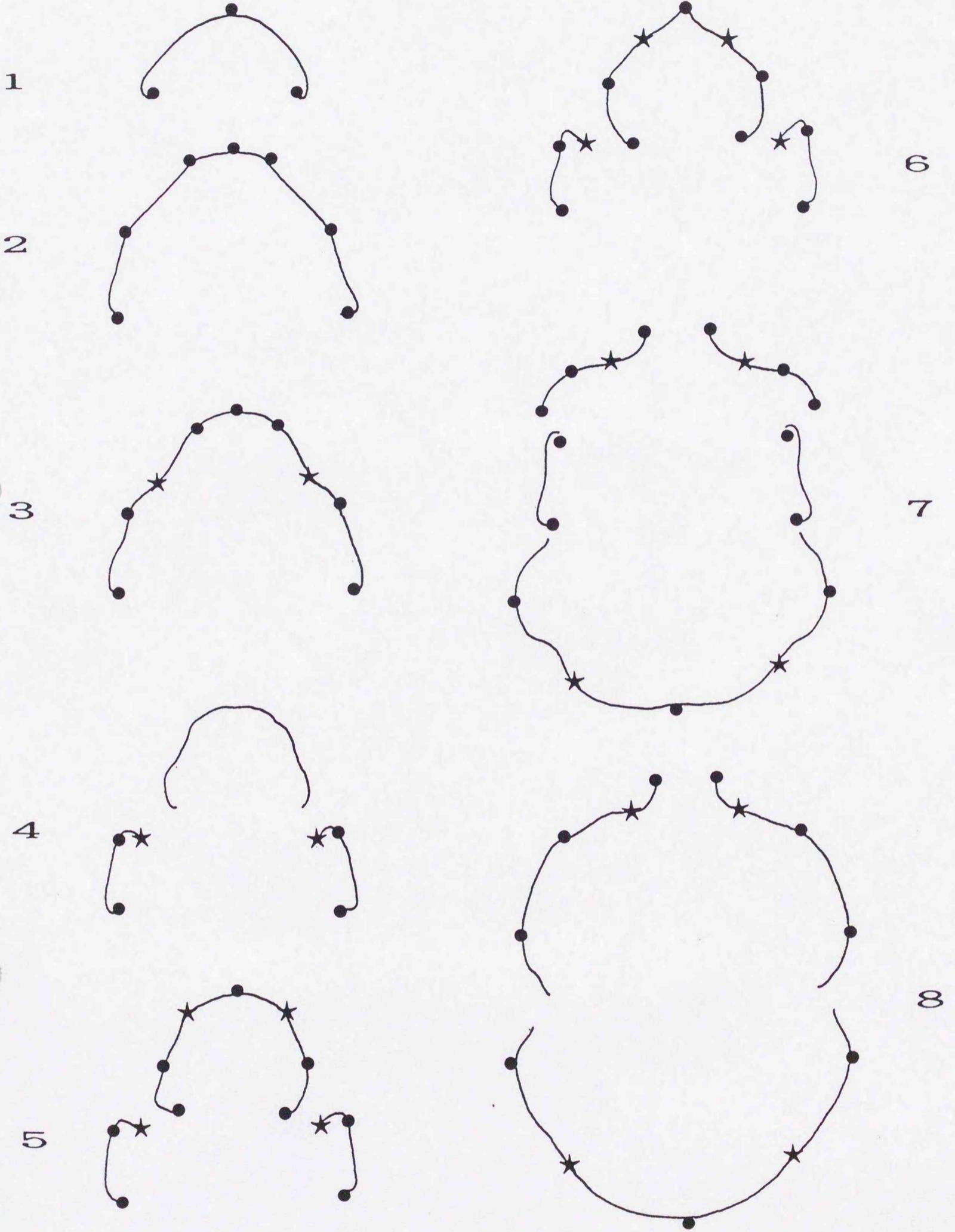


図 1 1 - 1 各パターンにおける二次計測点の部位  
( P 1 ~ P 8 )

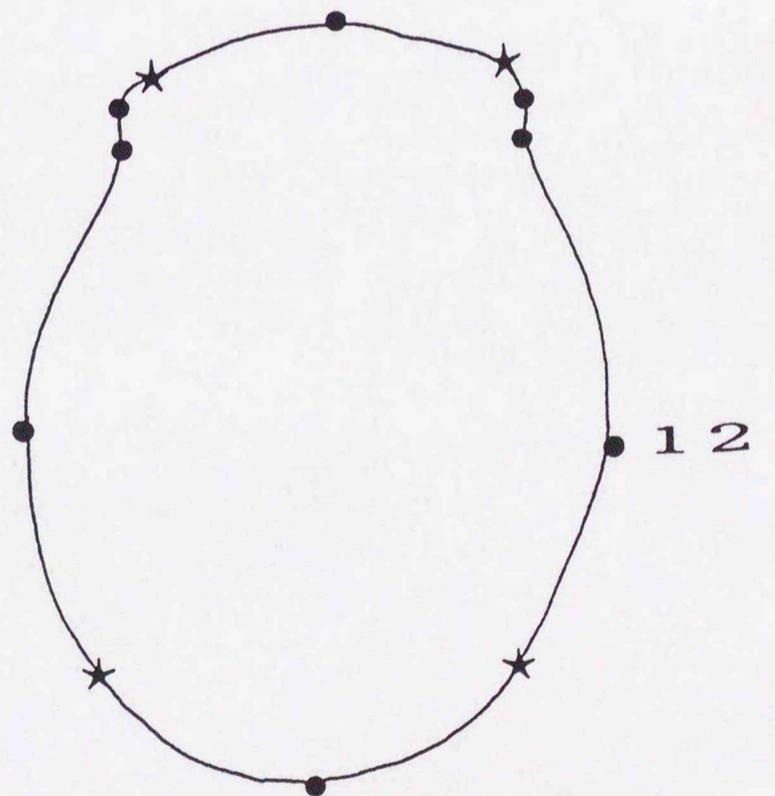
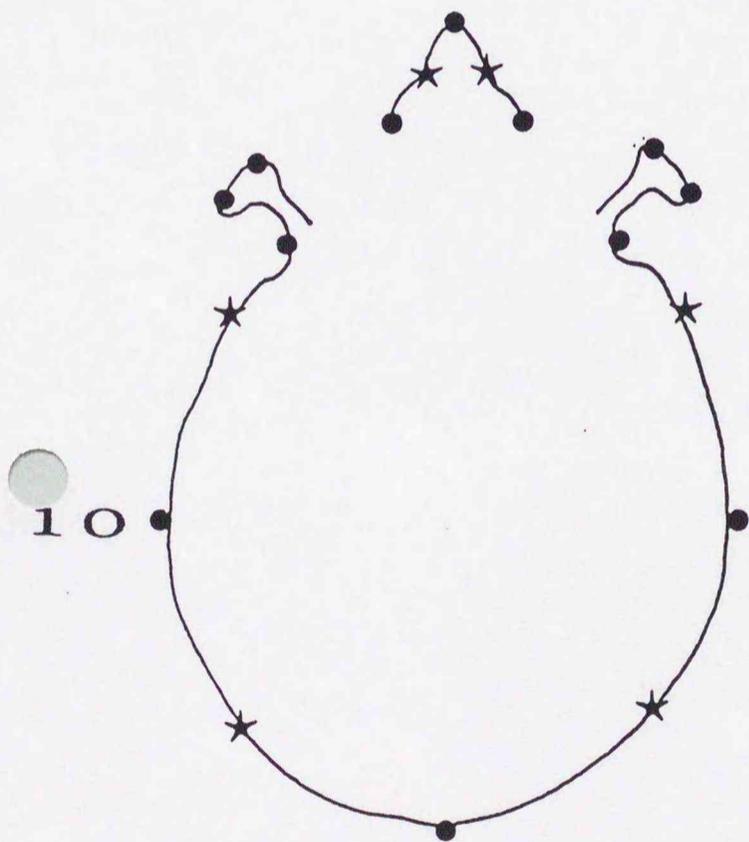
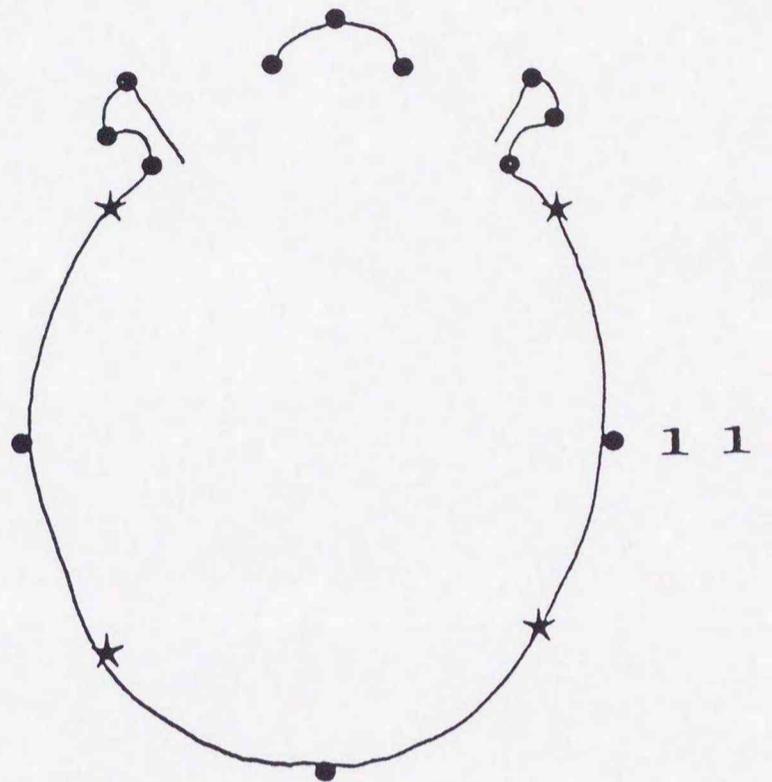
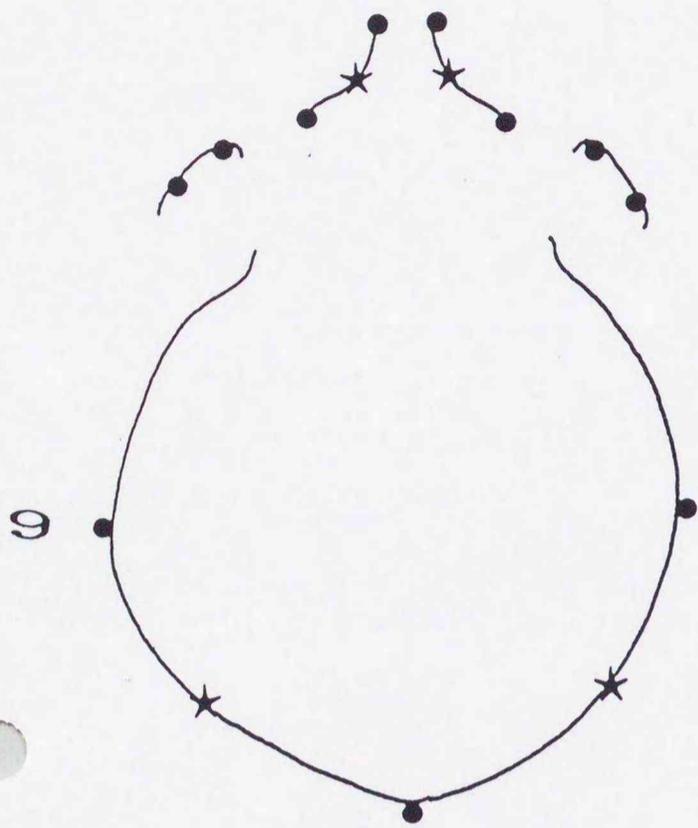


図 1 1 - 2 各パターンにおける二次計測点の部位  
( P 9 ~ P 1 2 )

$$S1X = 0.04(X1) + 0.72(X2) + 0.36(X3) - 0.01(X4) - 0.06(X5) - 0.13(X6) + 0.06(X7) + 26.95$$

$$S1Y = 0.01(Y1) + 1.08(Y2) + 0.21(Y3) - 0.07(Y4) - 0.47(Y5) + 0.19(Y6) + 0.01(Y7) + 97.33$$

$$S2X = 0.16(X1) - 0.31(X2) + 0.23(X3) - 0.02(X4) + 0.09(X5) + 0.73(X6) + 0.11(X7) - 27.33$$

$$S2Y = 0.10(Y1) + 0.27(Y2) + 0.13(Y3) - 0.11(Y4) - 0.25(Y5) + 0.84(Y6) - 0.02(Y7) + 93.65$$

一次計測点

$$P_n(X_n, Y_n) = \{P_1(X_1, Y_1) \cdots P_7(X_7, Y_7)\}$$

二次計測点

$$S1; (S1X, S1Y)$$

$$S2; (S2X, S2Y)$$

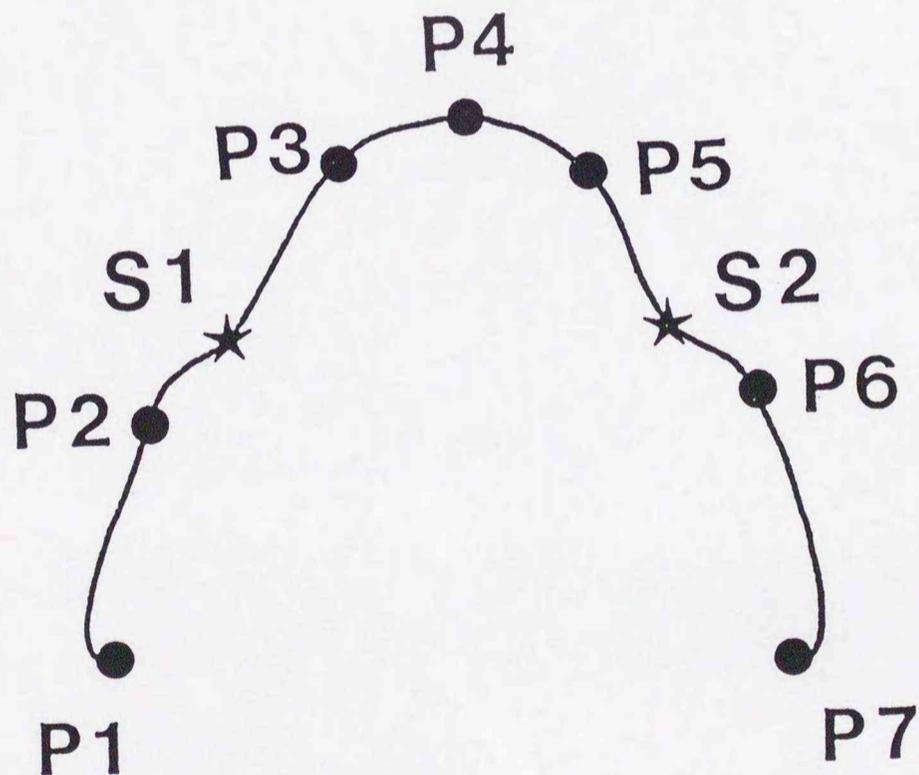


図 1 2 二次計測点を求める重回帰方程式の一例  
(パターン 3、 S1 S2)

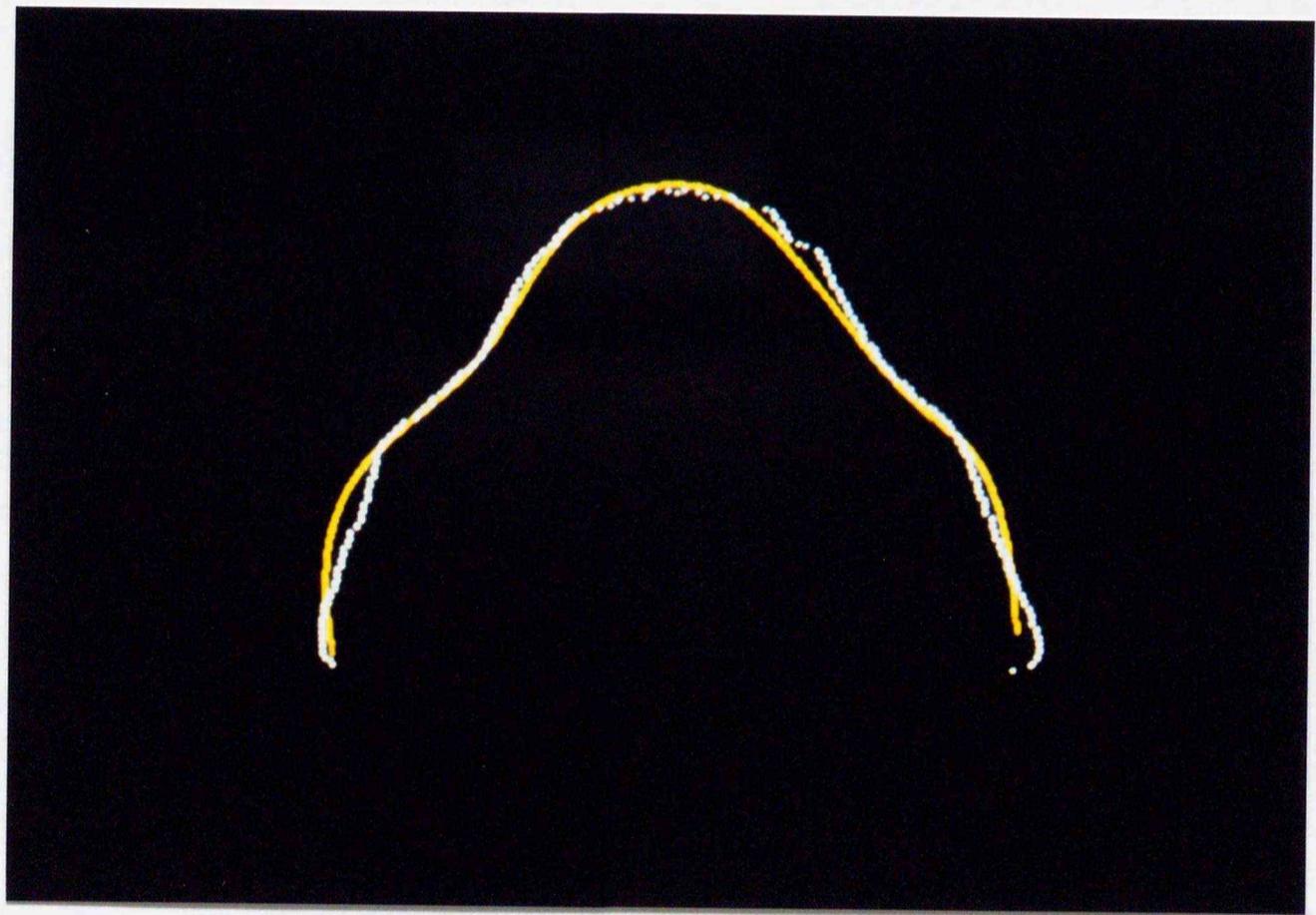
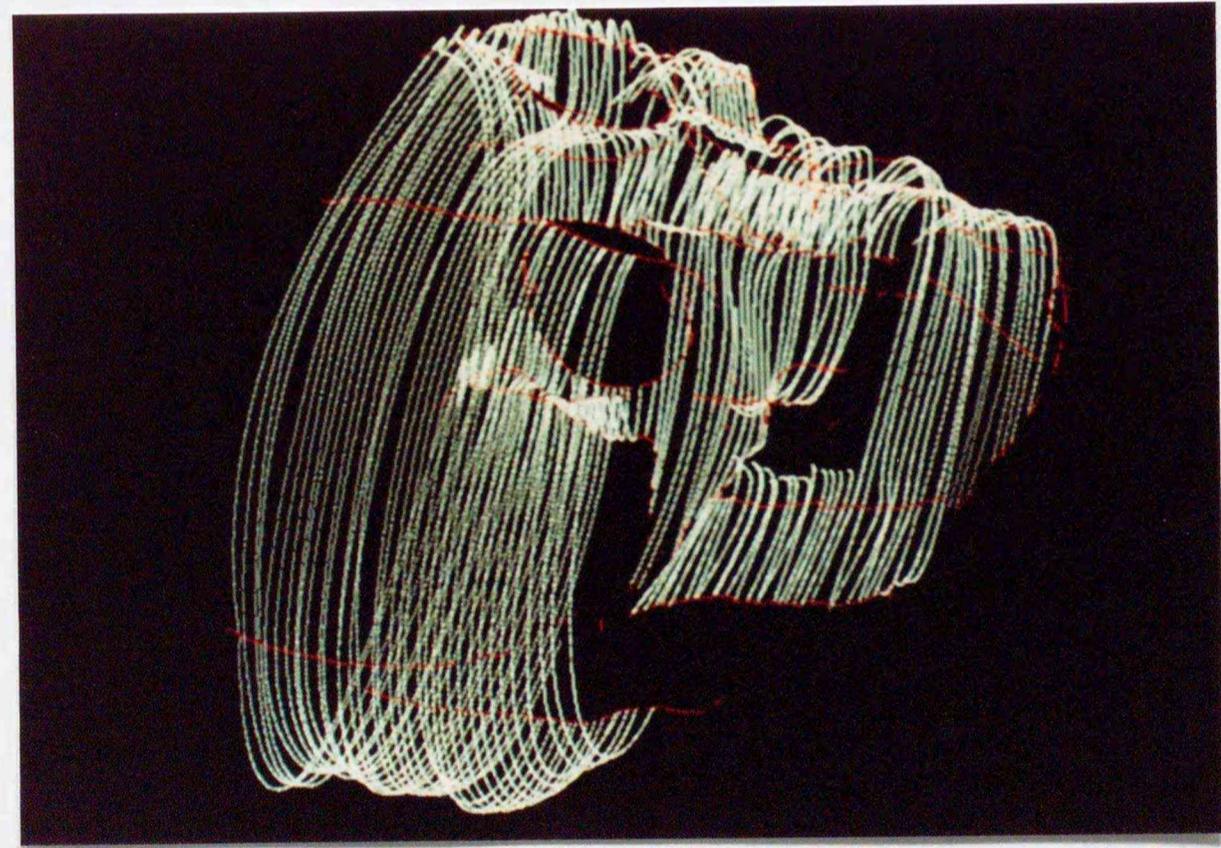
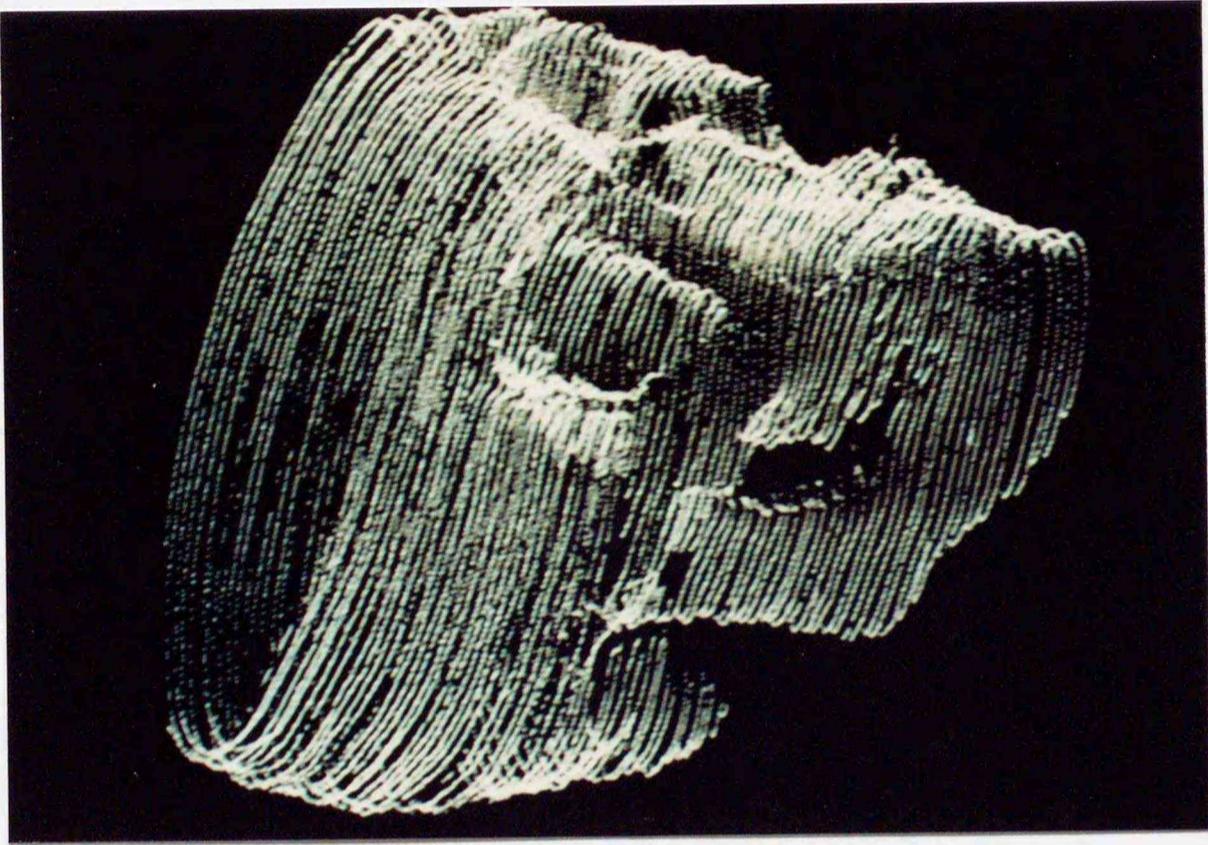


図 1 3 スプライン補間による下顎骨断面構成の一例



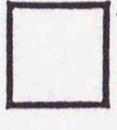
A



B

図 1 4 頭部 X 線規格写真(A)および X 線 C T 画像(B)からの顎顔面部立体表示

頭部 X線規格写真  
画素



X線CT  
ボクセル

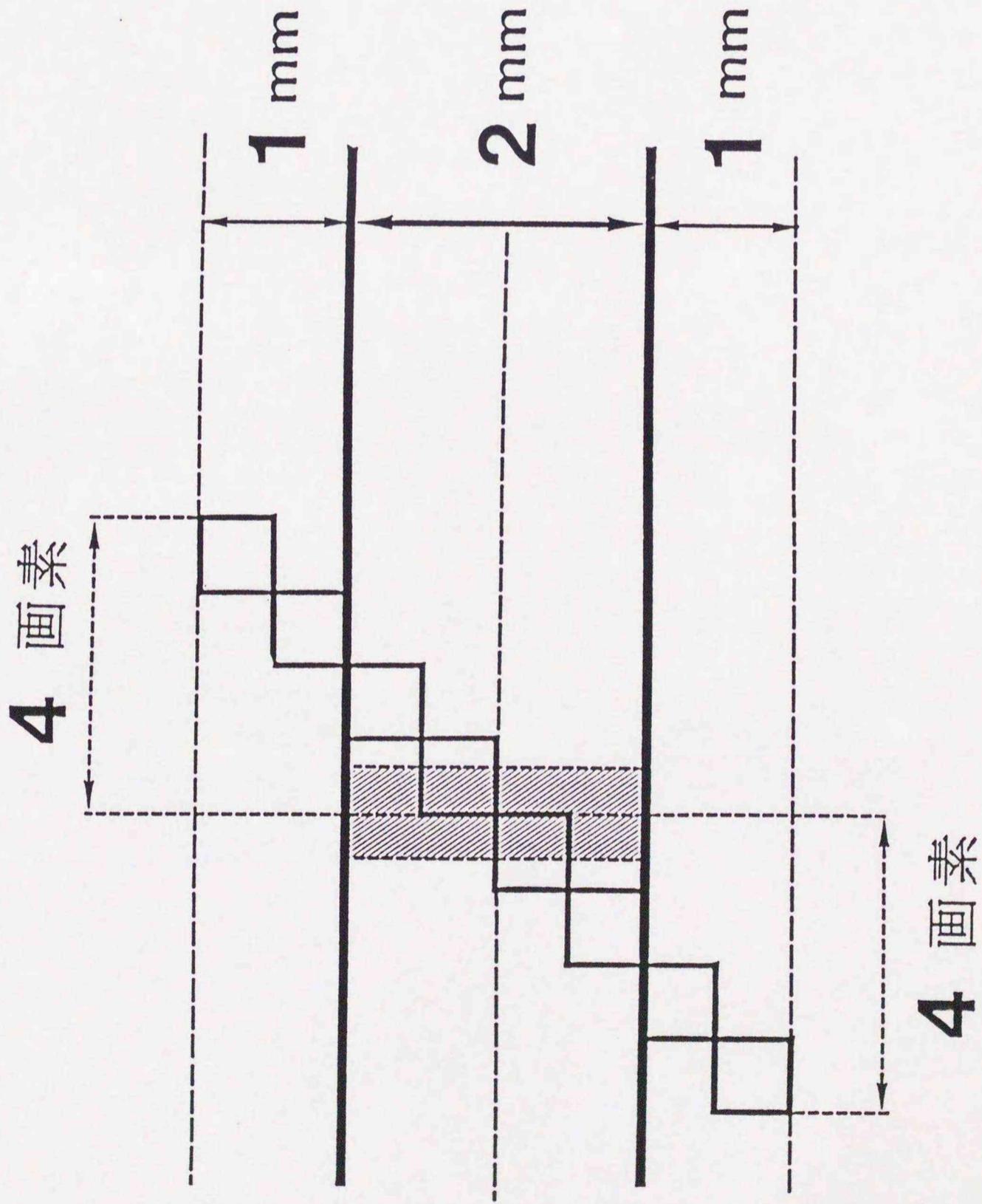
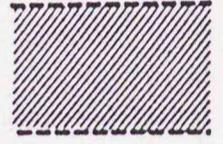


図 1 5 マッチングにおける誤差について検討

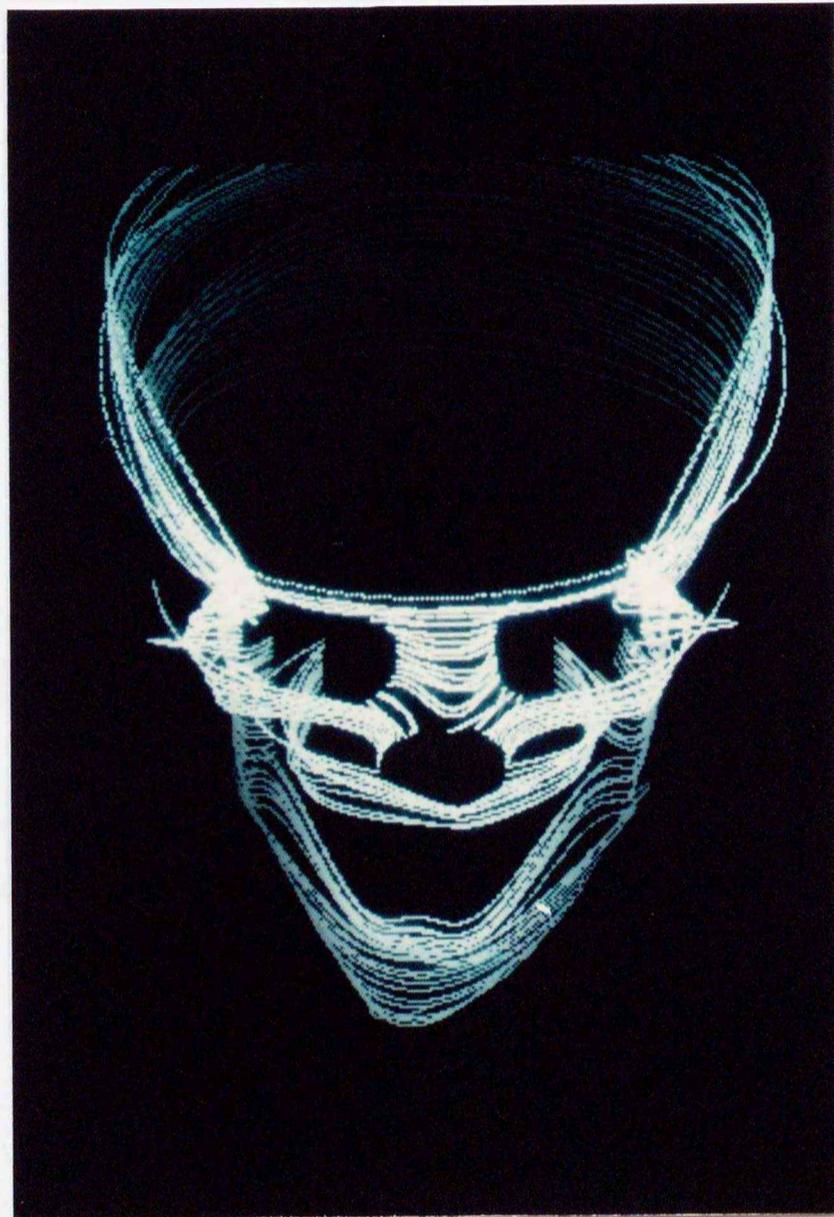


図 1 6 手術前の顎顔面立体表示

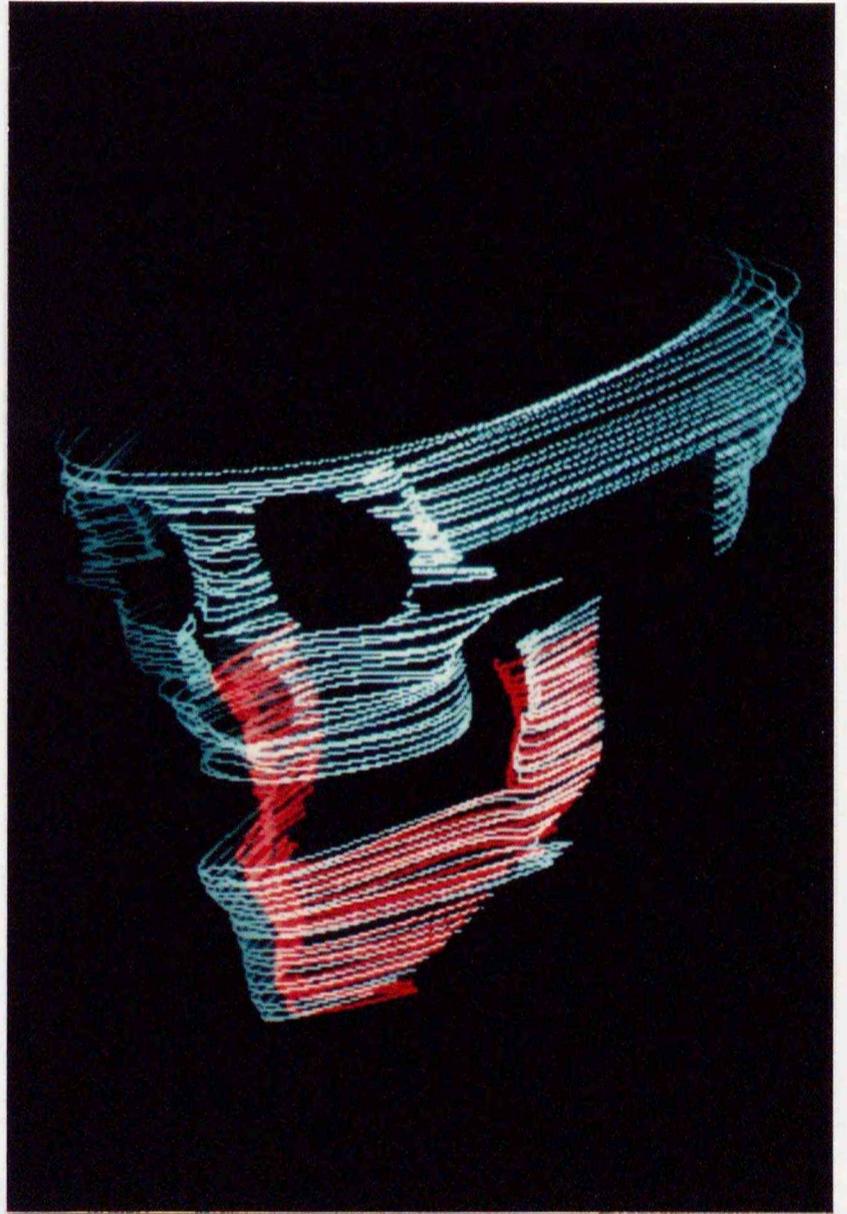
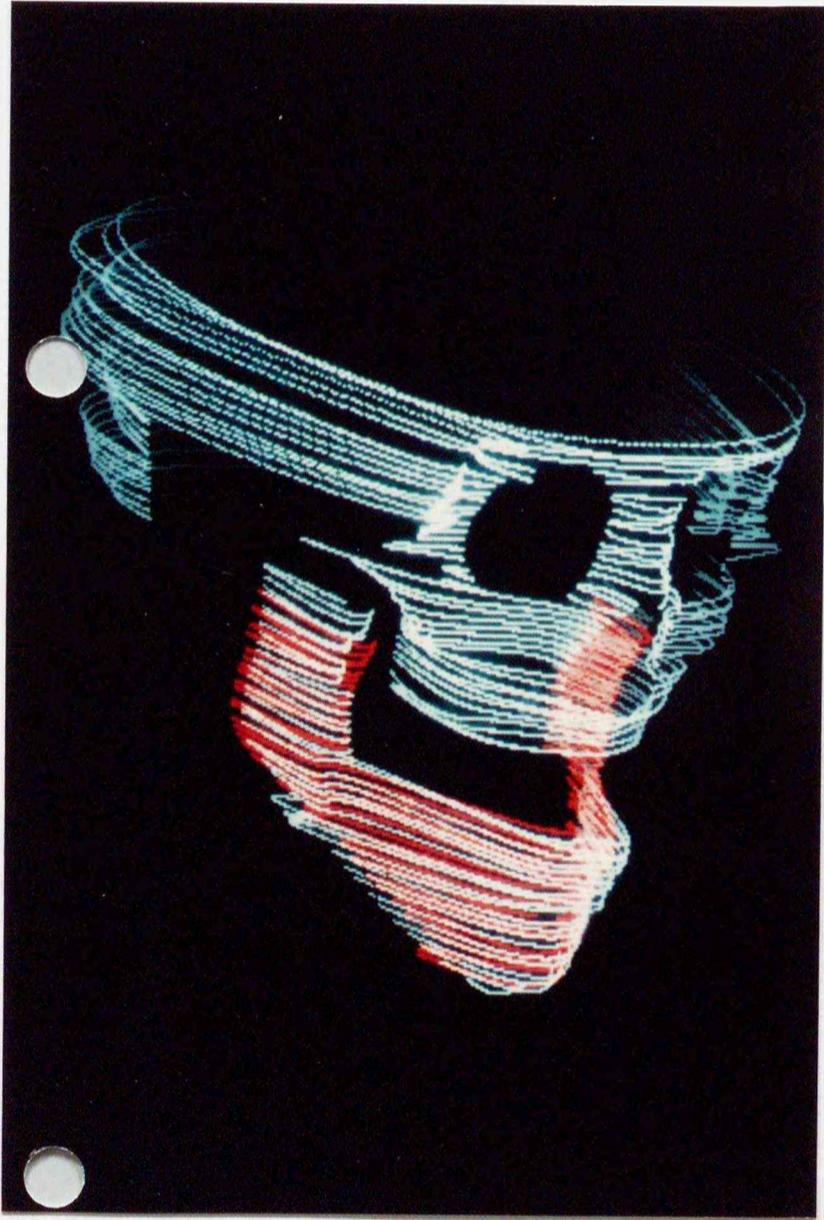


図 1 7 - 1 術前の顎顔面と術後の下顎骨の  
スーパーインポーズ

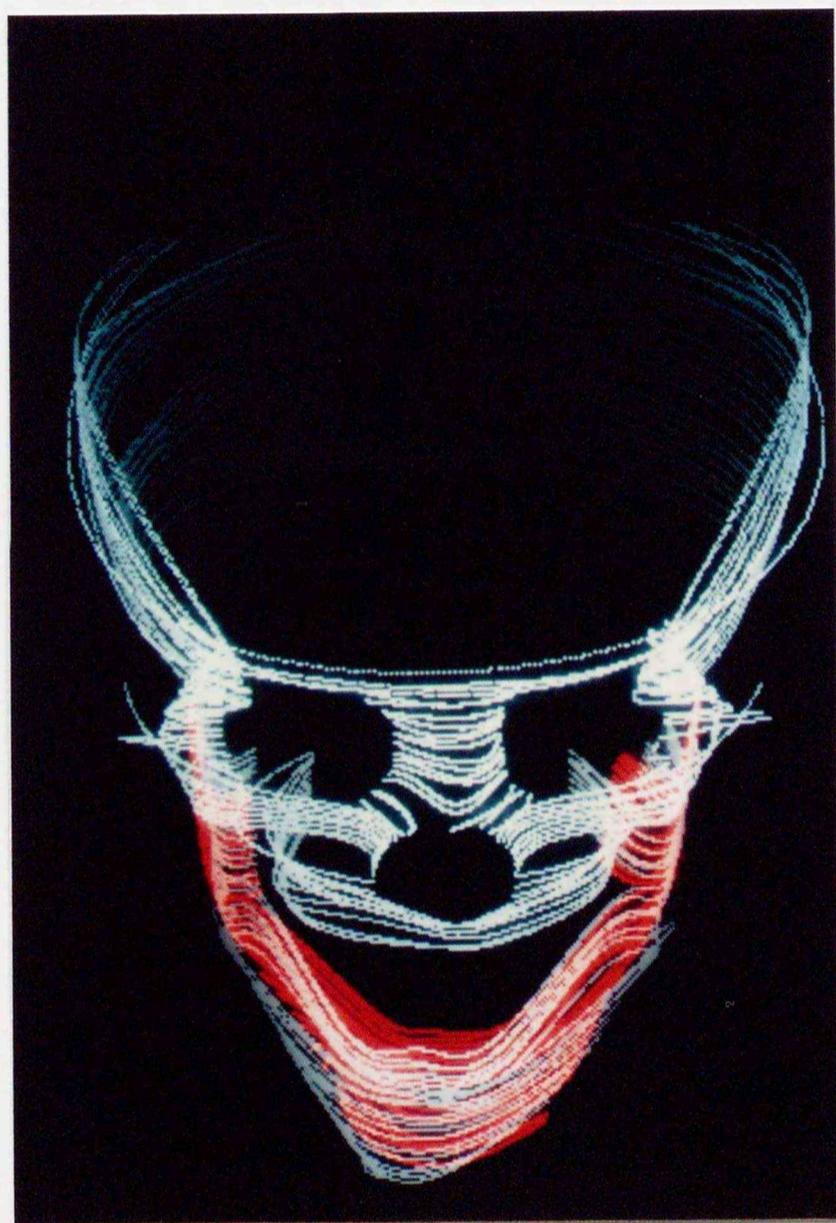


図 1 7 - 2 術前の顎顔面と術後の下顎骨の  
スーパーインポーズ

---

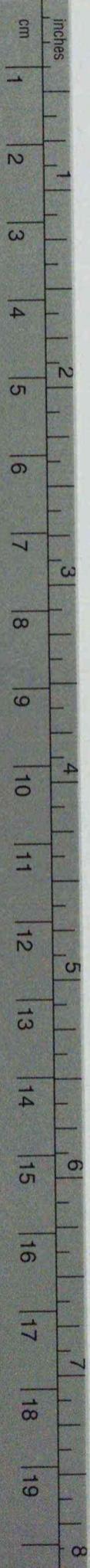
---

---

---

4 903331 100387





# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

# Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

