

三角形メッシュモデリングの考古学への応用

－ デデリエネアンデルタールの復活 －

鈴木宏正, 金井崇, 寺沢幹雄, 木村文彦

suzuki@cim.pe.u-tokyo.ac.jp

東京大学工学系研究科精密機械工学専攻

〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

1993年に東京大学赤澤威教授らの日本・シリア合同調査によって、シリアのデデリエ洞窟からネアンデルタール人の幼児の人骨が発掘された [1, 2]。そこで、このネアンデルタール人を復元させる共同研究プロジェクトが同教授を中心として行なわれた [8]。このプロジェクトにおける筆者らの課題は、骨の形状を測定して、その3次元形状データベースを構築し、それを考古学的な解析に適用することであった。ここでは、測定データからの三角形メッシュデータの生成法とメッシュデータの簡略化について述べ、さらに応用として、骨のメッシュモデルから交連骨格モデルの生成、骨の欠損部分の復元、歩行シミュレーション、成長シミュレーション、そして迅速試作技術による骨のレプリカの作成について述べる。

Triangular Mesh Modelling for Archaeological Applications

－ Revival of Dederiyeh Neanderthal －

H.Suzuki, T.Kanai, M.Terasawa and F.Kimura

suzuki@cim.pe.u-tokyo.ac.jp

Department of Precision Machinery Engineering, The University of Tokyo

Hongo 7-3-1, Bunkyo, Tokyo 113, Japan

This paper describes methods for generating triangular mesh models from unorganized measured data points, and also for simplifying the mesh models. These methods are used in the course of a joint research project conducted for “Revival of Neanderthal” at The University of Tokyo for creating three dimensional data base of bones of a Neanderthal man. Using this data base, we also tried many applications for archaeological analyses; assembly of mesh models into a skeleton, bone restoration, gait simulation, growth simulation, and creation of bone replicas with a rapid prototyping technology.

1 はじめに

1993年に、東京大学赤澤威教授らの日本・シリア合同調査によって、シリアのデデリエ洞窟からネアンデルタール人の幼児の人骨が発掘された [1, 2]. その骨の状態は非常に良く、また全身に渡って約200個の人骨が残されていた (図1). そこで、このネアンデルタール人を復元させる共同研究プロジェクトが同教授を中心として行なわれた [8]. 特に、コンピュータグラフィクスや精密工学を駆使して、このネアンデルタール人を”復活”させることが一つの大きなテーマとなった. これは、考古学における形態の解析にコンピュータグラフィクスを応用する試みである.

筆者らのグループの一つの課題は、骨の形状を測定して、その3次元形状データベースを構築することであった. この3次元形状データベースでは、発掘されたすべての人骨の形状を三角形メッシュデータとして表現した. 問題点は、人骨の測定データからの三角形メッシュデータの生成法とメッシュデータの簡略化である. 簡略化は、できるだけ元の形が残るようにして三角形メッシュモデルの面の数を減らし、データ量を低減化するものである. これは、応用によって必要なメッシュの詳細度が異なるために必要なもので、測定はできるだけ細かく行ない、それに対して詳細なメッシュモデルを生成し、応用に必要なところまでメッシュを簡略化しようとするものである.

さらに、このデータベースを使って、骨のメッシュモデルから交連骨格モデルの生成、骨の欠損部分の復元、歩行シミュレーション、成長シミュレーション、そして迅速試作技術による骨のレプリカの作成などの応用を行なった.

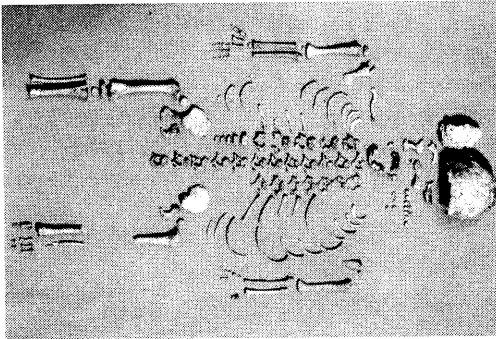


図1: Bones of Dederiyeh Neanderthal Man (Courtesy of Prof. Akazawa, The Univ. of Tokyo, Japan)

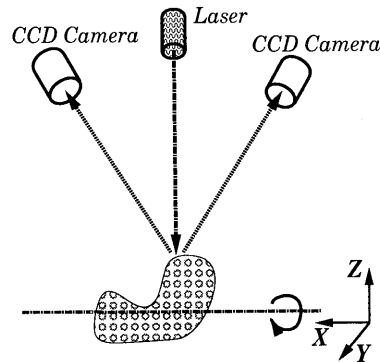


図2: Measurement with 3D Laser Scanning Measuring Machine

2 メッシュモデルの生成

2.1 測定法

本研究では、図2に示すようなレーザー走査 / 非接触型の測定機を用いて、人骨の形状を測定した. 測定物の骨はX軸方向にクランプされ、X方向にある指定されたピッチでステップ移動する. それぞれのステップで、Z+方向からレーザー光が測定物の表面に照射され、CCDカメラによってその反射線を観測することによって、Y方向断面のZ+側の部分が測定される. X方向のスキャンが終了すると、物体は原点に復帰し、X軸周りに60度回転してから再度X方向のスキャンを行なう. これを6回繰り返すことによって全周をスキャンすることができる. 物体が大きく、レーザーの照射範囲を越えている場合には、プラットフォームはY方向にも移動できる.

この測定は自動で行なわれ、結果として、各X方向スキャン毎のデータと、それらをマージした全周のデータが得られる. 測定上の問題点としては、レーザーが物体の一部によって遮られて到達しない部分や、またはCCDカメラが観測出来ない部分は測定不可能であるので、できるだけそのような部分が無いような物体の固定姿勢を選ぶ必要がある. また、人骨 (あるいはそのレプリカ) は大変貴重なので、それを傷付けず、かつなるべく骨を覆わないように取り付けるためにも様々な工夫が必要であった.

2.2 メッシュ生成

測定によって得られるのは、基本的に点群である (測定機には各スキャン毎に断面データを生成する機能がついていたが、本研究では利用しなかった). この点群データから、三角形メッシュモデルを生成する. この問題については、様々な方法が提案されているが、本研究では、Hoppe[4]の提案する方法に基づいた. 彼の方法は、次の三つの手続きからなる.

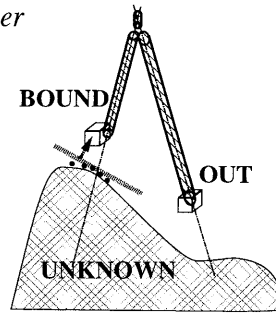
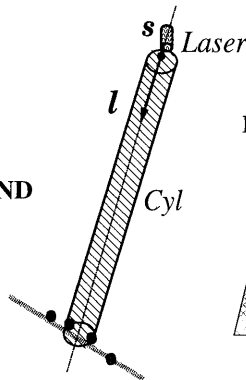
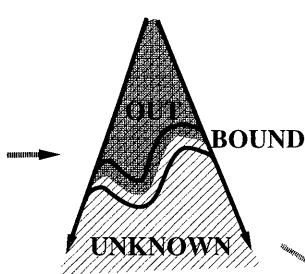
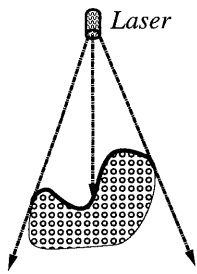


図 3: Classification of Lattice Points

図 4: Potential Field Computation

1. データ点を含む空間にポテンシャル場を生成.
2. マーチングキューブアルゴリズム [7] によってそのポテンシャル場の 0 曲面 (ポテンシャルの値が 0 の点からなる曲面) として, 三角形メッシュを生成.
3. そのメッシュをデータ点に近付けるように修正.

我々の方法 [9] でも, まず, データ点を含むような, ボクセルからなる 3 次元格子を考え, そして, 各ボクセルにおいて, それが物体の内部ならば負, 物体の外部では正になるようなポテンシャル値を定義する. Hoppe のポテンシャルを計算する方法は安定で多くの場合うまくいくが, 物体にナイフの歯のような薄く鋭い部分があると, その部分での計算が困難となった.

我々の提案する方法は, Curless ら [6] からヒントを得たもので, 測定機の光学系の構造に関する情報を利用するものである. 図 3 は, X 方向スキャンを表しているが, この状態において, レーザー光源から照射された光線は物体の表面まで到達し, そこで反射し, 測定される. よって, 光線が通過する, 光源と測定された物体表面の点との間の空間には物体は存在しないので, この空間にあるボクセルは物体の外部と判定できる. さらに, 光線を延長した空間には, 物体があるかもしれないし, ないかもしれない. そこで, 図 4 に示すように, 一つの X 方向スキャンに対して, 光源から光線を表す円柱を伸ばし, ボクセルをスキャンして行き, それがデータ点にヒットするかどうかをしらべ, それによって各ボクセルに OUT, BOUND, UNKNOWN のラベルを付加する. さらに OUT のボクセルに対しては, 測定点からの距離をポテンシャル値として与える.

前に述べたように, X 方向スキャンは 6 回繰り返されるので, 図 5 に示すように, それぞれのスキャンに対してポテンシャル場を計算し, それを統合して全周に対するポテンシャル場を求める. このポテンシャル場に対してマーチングキューブアルゴリズムを適用し, 三角形メッシュを生成する. 図 6, 7, 8 に例を示す. 格子は $56 \times 67 \times 64$ で, その間隔は 2.5mm である. 図 6 の左は, 頭骨を正面から計った場合の測定点を示す. 点数は 10,463 である. 右はボクセルを示している. 図 7 は, 全周の測定点とボクセルを示す. このポテンシャル場からマーチングキューブアルゴリズムによって生成した三角形メッシュを図 8 に示す. このメッシュには, マーチングキューブアルゴリズムによる不連続性 (aliasing artifact) が見られる. これは, ボクセルの大きさを小さくすることによっても改善されるが, ここではメッシュの面がデータ点に近付くように, メッシュの頂点位置を修正した. それを図 9 に示す. 測定点を得られてから, ここまでの計算時間は, Sun SparcStation 20 で約 2 分であり, その大半はポテンシャル場の計算時間である.

2.3 メッシュの簡略化

上記のようにして得られた人骨のメッシュは, 一般に 10^4 から 10^5 個程度の面を含んでいる. 我々が測定した骨の個数は約 80 個あるので (元々の 200 個の骨の内のいくつかは接合されていた), 全身では 10^6 個を越えてしまう. そこで, メッシュ精度の不要なアプリケーションのために, メッシュを簡略化する. これに対しても多くの方法があるが, ここでは Hoppe [5] の方法を用いた. Hoppe の方法では, メッシュに対して次のようなエネルギー関数 $E = E_{dist} + E_{spring} + E_{rep}$ を定義し, それを最小化することによってメッシュを簡略化する.

ここで, E_{dist} はメッシュとデータ点との距離の総和で, E_{spring} はメッシュの頂点間をつなぐバネエネルギー, さらに E_{rep} は, 頂点数に比例するエネルギー, すなわち $C_{rep} \times \text{頂点数}$ (C_{rep} は定数) である.

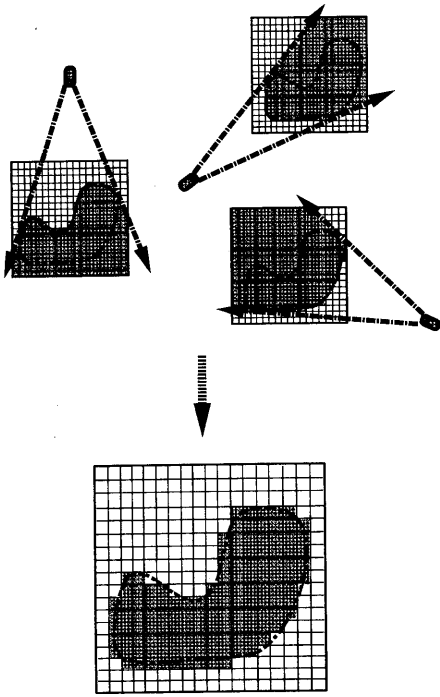


図 5: Merging Potential Fields of Multiple X-Scans

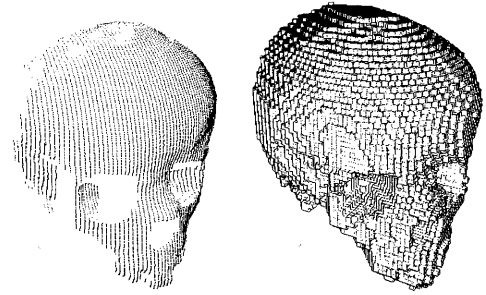


図 6: Left: Data Points for a Single Scan (10,463 points) and Right: Voxels with Positive Potential Value

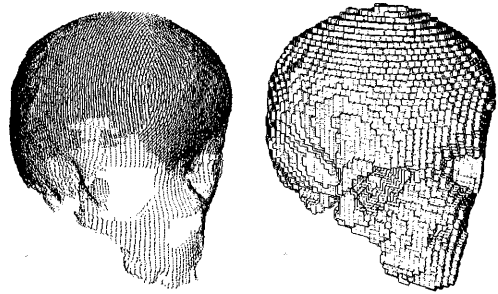


図 7: Left: The Whole Data Points (36,722 points) and Right: Voxels with Positive Potential Value

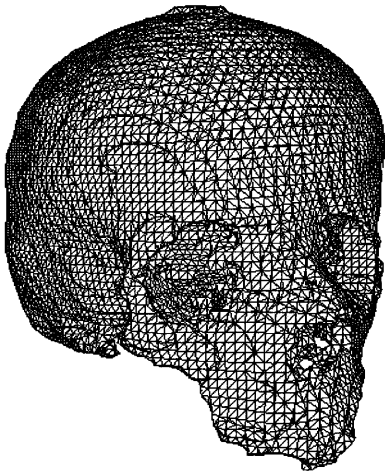


図 8: Triangular Mesh Generated with Marching Cube Algorithm (45,384 faces)

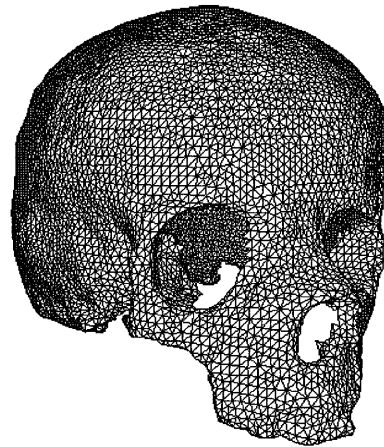


図 9: Refined Mesh Model

最小化は、頂点座標を変更し、さらには、図 10 に示すような位相操作をメッシュに対して加えながら行なう。位相操作を行なうのは、頂点位置を移動してエネルギーを停留させ、そのエネルギーが元のものより少ないかどうかを確かめながら最小化を進めていく。計算時間は要するが、角などの元の形状の特徴が良く保存され、しかも大幅に頂点数を減らすことができる優れた方法である。

我々はこの方法を実装すると共に、3.1 節で述べる骨格組立のための拡張を行なった。それは、骨格を組み立てる

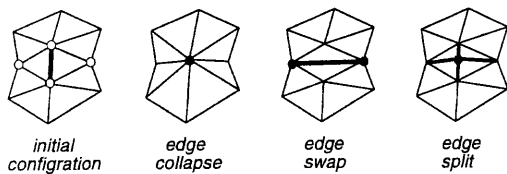


図 10: Local Edge Operations[5]

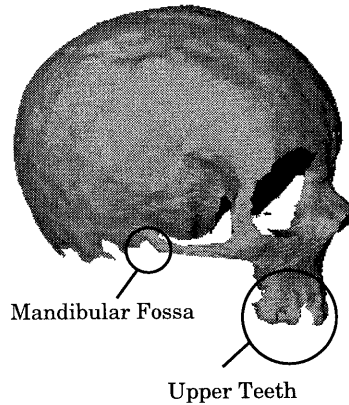


図 11: Key Features for Assembling Skull and Jaw

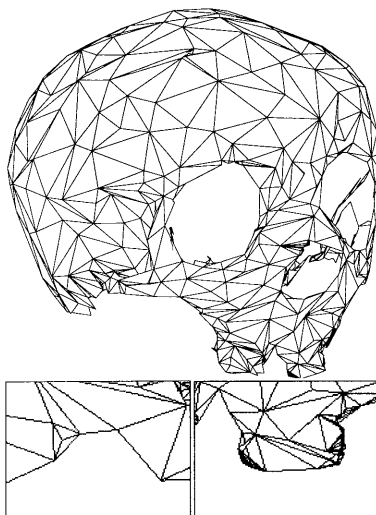


図 12: Mesh Simplification with Equal Weights (874 faces). Bottom: Magnified View of the Triangles in the Circles of Figure 11.

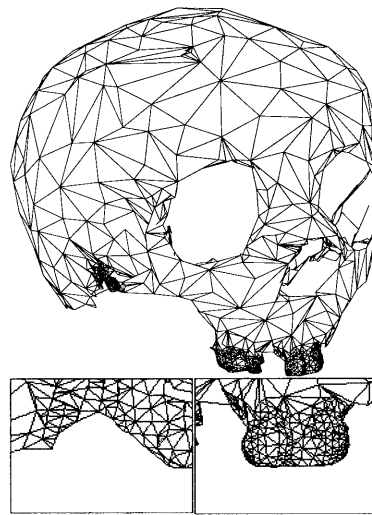


図 13: Local Control of Mesh Simplification (1,397 faces). Bottom: Magnified View of the Triangles in the Circles of Figure 11.

時には、図 11 に示すような骨の局所的な特徴が重要となる。Hoppe の方法では一様に簡略化が行なわれるので、このような特徴も消失する。そこで、各頂点に重み $w_i (0 \leq w_i \leq 1)$ を定義し、 E_{rep} を $E_{rep} = C_{rep} \sum_i w_i$ のように書き換えることによって、重みの小さい頂点を保存するようにした。

図 12 は、図 9 に示したモデルの Hoppe の方法による簡略化の結果であり、面数が約 2% まで減少している。さらに、図 11 の丸で囲ったところの頂点を保存するようにして簡略化を行なったのが図 12 である。計算時間は約 8 時間であった。

3 考古学的応用

生成したメッシュデータを用いて、いくつかの応用を試みた。応用は、他分野の専門家との協同で行なわれた。ここでは筆者らの貢献部分を中心に述べるので、詳しくは文献 [8] を参考にされたい。

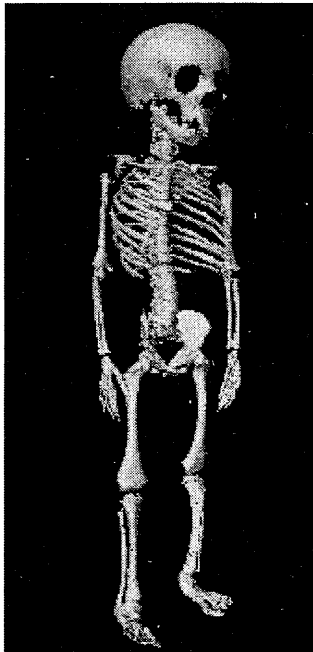


図 14: Complete Skeleton (78 bone mesh models of 140,512 faces)

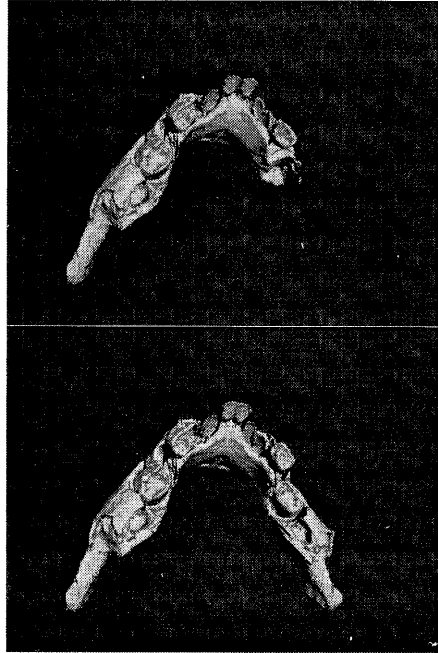


図 15: Restoration of Lower Jaw Bone. Upper: Broken Bone and Lower: Restoration by Mirroring

3.1 交連骨格の組立

簡略化された人骨のモデルを組み立てて、骨格を作成した。プロジェクトにおいて実物の骨格復元を進めていた東北大学近藤修助手が、SGI Inventor を利用して組立を行なった。作業は試行錯誤で行なわれるが、簡略化によってデータ量が抑えられているために、比較的良好なレスポンスが得られた。図 14 が完成した骨格である。

3.2 形状復元

発掘された人骨の中には、破損したものや、消失してしまったものがあった。そこで、そのような部分を回復する処理を行なった。ここでは、局所的な傷などを回復するのではなく、大きく破損した部分や、完全に失われていた骨を復元することを目的とした。基本的な考え方は、鏡像の作成である。すなわち、人体は左右対象であるから、右か左の部分の骨があれば、その鏡像を作成することによって復元した。図 15 は顎の骨の復元の例である。

3.3 歩行シミュレーション

歩行シミュレーションは、骨格に歩行データをマッピングすることによって行なった。歩行データは、慶應大学山崎信寿教授によって計算された。計算にはこの骨格とは異なる構造のモデルが使われたので、この骨格モデルをその構造に適合させた。

3.4 成長シミュレーション

このネアンデルタール人は、推定 1.7 才であり、その人骨を 20 才まで成長させてみようというのが目的である。計算は頭部だけで行なうことにした。基本的には、この幼児の頭骨の形状データを変形して 20 才の形状にすることである。変形は、モーフィング [3] を 3 次元に拡張して行なった。

形状を変形するには、三角形メッシュモデルの頂点を移動すればよいが、移動は図 17 に示すような制御線の列によって定義する。まず、各制御線 l_i に対して原点が q_i で XYZ 軸が x_i, y_i, z_i となる局所座標系を定義し、各点 p の

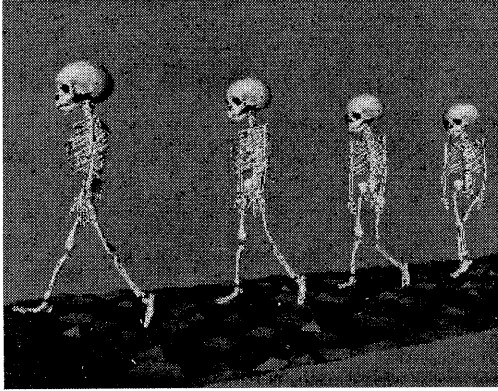


図 16: Gait Simulation

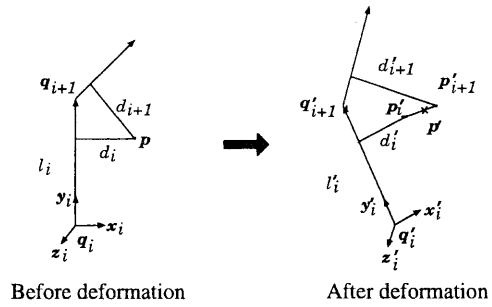


図 17: Control Lines for 3D Morphing

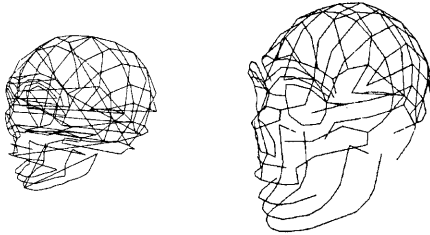


図 18: Control Polylines for Dederiyeh Neanderthal (left) man and Amud (right)

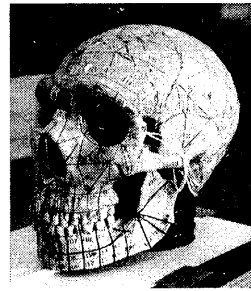


図 19: Characteristic Points Specified for Amud (Courtesy of Dr. M. Kouchi, National Institute of Bioscience and Human-Technology, Japan)

局所座標 u_i を計算する。軸の向きは相前後する制御線を用いて決めている。制御線を l_i から l'_i に移動することによって、 p の l_i に関する新座標 p'_i をそれぞれ求め、新座標 p' は、それらの重み付き平均で求める。

実際に成長のための制御線のデータ (図 18) は、工技院生命工学工業技術研究所の河内まき子博士によって測定、計算されたものを利用して定義した。そこでは、この幼児の頭骨と、成人のネアンデルタールの骨 (図 19) に対して特徴点を定義・測定し、さらにその間の成長過程の特徴点を、現代人のデータを元に計算した。制御線は特徴点を結ぶことによって定義した。図 20 にシミュレーションの結果を示す。ネアンデルタールの特徴の一つは、発達した眼窩上隆起であるが、その発達の様子がわかる。

3.5 迅速試作による複製

光硬化性の樹脂を用いたステレオリソグラフィ装置に、三角形メッシュデータを与えることにより、樹脂の複製を作成した (図 21)。従来、複製も作成するのに時間と費用を要し、それ自体が貴重なものであった。ステレオリソグラフィによる試作は、形状精度上は問題になるが、短時間で繰り返し作成できるという点で優れている。この度のプロジェクトでは、骨格モデルの組立や、粘土を貼りつける影像製作などにも利用された。

4 さいごに

ここでは、東京大学東京大学総合研究資料館の赤澤威教授を中心に行なわれたネアンデルタールの復活プロジェクトにおいて、我々が行なった人骨の 3 次元形状データベース構築とその応用について報告した。プロジェクトは、人類学を中心として、CG、精密工学などの様々な分野の協同によって行なわれた点に特徴があり、特に、これらの試みは人類学者の興味を喚起したようだ。

現在、このプロジェクトの成果をより広く利用してもらえるような環境の整備と、さらなる課題への取り組みを続けている。また同時に、このような形状復元の技術を工業製品にも適用すべく研究を進めている。



図 20: Growth Simulation (from left to right, top to bottom, ages of every 2 years from 2 to 20)

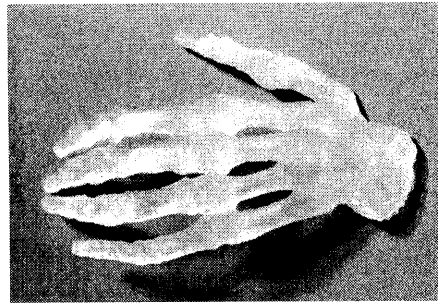


図 21: Rapid Prototyping with Stereolithography

参考文献

- [1] Akazawa, T. et al. (1995a) Neanderthal infant burial, *Nature*, Vol. 377, pp. 585-586.
- [2] Akazawa, T. et al. (1995b) Neanderthal infant burial from the Dederiyeh cave in Syria, *Paléorient*, Vol. 21/2, pp. 77-86.
- [3] Beier, T. and Neely S. (1992) Feature-based Image Metamorphosis, *ACM Computer Graphics*, Vol. 26, No.2, pp.35-42.
- [4] Hoppe, H. et al. (1992) Surface Reconstruction from unorganized points, *ACM Computer Graphics*, Vol. 26, No. 2, pp. 71-78.
- [5] Hoppe, H. et al (1993) Mesh Optimization, *Proc. of ACM SIGGRAPH '93*, pp.19-26.
- [6] Curless, B. and Levoy, M. (1996) A Volumetric Method for Building Complex Meshes from Range Images, *Proc. ACM SIGGRAPH '96* pp.303-312.
- [7] Lorensen, W.E. et al. (1987) Marching Cubes: 3D Surface Construction Algorithm, *ACM Computer Graphics*, Vol. 21, No.4, pp.163-169.
- [8] ネアンデルタールの復活, 新館展示ホール竣工記念特別展示カタログ, 東京大学総合研究資料館, (1996).
- [9] 神鳥泰章, 3次元測定点群からの多面体モデルの生成手法, 東京大学工学系研究科修士論文 (1996).
- [10] ホームページ: <http://www.cim.pe.u-tokyo.ac.jp/>