

メディアデータ型としての 3 次元モデルとその電子透かし技術

大淵 竜太郎

山梨大学工学部コンピュータメディア工学科

ohbuchi@acm.org

1. 始めに

音、文字、静止画像、動画像などのメディアデータ型は、いわゆる「マルチメディア」コンテンツの構成要素として広く使われてきた。ここ数年、これらのデータ型に加え、3 次元モデルもひとつのメディアデータ型として認知され、他のデータ型と組み合わせて使用される機会が増えつつある。これは、PC の性能向上と、インターネットにおける VRML の普及によるところが大きい。

テキスト、静止画像、音、動画像などのマルチメディアデータのデータ型を抽象データ型として見ると、それぞれに対応する操作の集合が用意されていることに気づく。これらの操作には、例えば、入力、出力、編集、圧縮、索引付け、ハイパーリンク付加、内容による類似検索、内容証明、さらには何らかの知的所有権管理メカニズム等が考えられる。(図1参照)最初の 2 つの操作はデータ型として最低限必要なものであり、また何らかの編集操作もほとんどの場合に要求される。それ以外の操作はデータが流通するとき、つまり、蓄積され、共有され、転送され、あるいは所有権が移るときなどに重要となる。圧縮やハイパーリンクは無論のこと、内容証明や知的所有権管理無しにはネット主導の協業や商取引などは存在し得ない。

これらの操作はテキストに対してはかなりよく理解されており、著作権のような社会的・法的インフラストラクチャを要する仕組みも実際に運用されている。しかし、テキスト以外のデータ型においてこれらの操作の集合が理解され用意されているとはいえない。例えば静止画像の場合、圧縮や入出力、編集は実用になっているが、その内容による検索は研究から実用に踏み出したばかりだ。音や動画像のような時間変化するデータはハイパーリンクや検索、編集などにおいて困難が生じる。例えば、「この動画の何時の何(領域や物体)から何時の何へ」のようにリンクを指定するのは容易ではないし、「こんな形がこんな風に動くシーン」の検索も困難な問題を含んでいる。

私は近年、3 次元モデルをマルチメディアデータ型として見つめなおし、「入力、出力、編集」以外の、これまであまり研究されてこなかった操作を用意すること、改良すること、を目指している。過去数年間は、3 次元モデルを対象として知的所有権管理を行うための基礎技術のひとつである電子透かし技術と、3 次元モデルの圧縮の技術が研究テーマであった。

3 次元モデルの電子透かしは私が日本 IBM 東京基礎研究所在籍中に、当時の同僚であった増田 宏氏(現在東京大学)と青野 雅樹氏(現在も IBM)との 3 人で研究を始めた。1997 年の 9 月ごろ、3 人一緒に昼食の後、会社の食堂の庭でアイスコーヒーなどを飲みながら雑談していたときに一緒にこのアイデアを思いついた。最初の発表は 1997 年 6 月の情報処理学会・画像電子学会共催の Visual Computing 97 シンポジウムで、以後、ACM Multimedia 97 等の学会や論文誌などでも発表した。結果的に我々はこのテーマを世界で初めて研究・発表したグループだった。以後、世界的にも注目を浴びたのか、他グループも 1999 年の IEEE Computer Graphics and Applications 誌や ACM SIGGRAPH '99 等において同テーマの論文を発表している。我々の研究の先進性が認められたのか、1999 年 10 月に、Visual Computing 97 の発表に対し、情報処理学会木下記念研究賞というものをいただいた。発表したのは大淵であるが、もちろん 3 人全員の功績である。(いただいたお祝い金は仲良く 3 等分した。)

次節ではまず、メディアデータ型としての 3 次元モデルに要求される種々の操作を概観し、ついで、特に電子透かし技術についてその研究の現状を紹介する。

2. メディアデータ型としての 3 次元モデル

3 次元モデルとは何だろう。3 次元形状モデルの最も重要な性質はその 3 次元の形状であろう。形状は、多くの場合、点、線、面、ソリッド(中身の詰まった立体)などの形状プリミティブの組み合わせで定義される。形状プリミティブには Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) 曲線や曲面、ポリゴン(多角形)、ポリヘドロン(多面体)、ボクセルなど各種が存在する。形状には、しばしばそれに付随する属性が付けられていることが多い。頂点色、頂点法線ベクタのような写真光学的属性に加え、温度やヤング率等の物理的属性が付随する場合もある。

3 次元モデルにも、画像と同様、時間に依存する動的なものとそうでない静的なものとの 2 種類が存在する。例えばいわゆるポリゴンゲームで使われるのは、多面体の集合が格闘技等の動きをする動的 3 次元モデルである。動的 3 次元形状データにも何種類か有り、例えば MPEG4 の Face Animation のように幾何形状を持つ部品が位置パラメタの時間系列で動くものから、VRML に見られるようにメッシュの頂点座標を変化させてメッシュの移動や変形を行うもの、さらには Michael Deering の提唱する HoloFlick [Rossignac99b] のように映画の駒のような頻度(例えば 30 コマ/秒)で動的に全ての形状(位相と座標値)を入れ替えるものなどがある。もちろん、形状だけでなく色や透明度などの形状に

付随する属性も動的、静的なものに分類できる。動的な 3 次元モデルでは、その時間依存性ゆえに、音や動画像と同様、内容による類似検索やリンク付けなどの操作には困難が予想される。(ただ、まだこういった研究はほとんど無いため、はっきりしたことは言えないが)。今後動的な 3 次元モデルはますます重要になることは確かで、たくさん研究のテーマが潜在している。

これまで 3 次元モデルデータの操作は入力、出力、編集が中心であった。しかしコンピュータの性能向上とインターネットに代表される通信の普及が自体を変えつつある。インターネットの普及をきっかけに急速に重要になってきた操作が圧縮、出自認証、そして知的所有権 (Intellectual Property; IP) 管理などの技術と、それに伴って必要な社会的・法的仕組みである。これらの操作の重要性は、MPEG4 による「ポリゴン放送」や、会社間協業による 3 次元 CAD 設計などの局面を考えるとわかるだろう。圧縮は蓄積や通信の効率化に重要だし、データの出所や改ざんの有無の確認なしにはそのデータを信用して作業することはできない。知的所有権の管理、例えば不正使用の牽制、検出、阻止なども重要である。こうした目的の技術としては各種の暗号、電子署名や認証の技術があるが、これらに加えて注目されているのが電子透かしである。

3. 電子透かし

電子透かしまたはデータ埋め込みと呼ばれる技術は、watermark(透かし)と呼ばれる何らかの構造体を、その存在が埋め込み対象となるコンテンツ本来の目的(例えば人による表示や鑑賞)を阻害しないようコンテンツに付加する。例えばすかしの対象が画像なら、それを見た人が透かしの存在に気づいてはいけなく、音楽なら透かしを入れた結果音に人が聞き取れる差異が生じてはいけなく。透かしをコンテンツに追加することを(データ)埋め込みと呼び、また埋め込まれた情報を目的に応じて取り出すことを取り出しと呼ぶ。説明の付加、改ざんの検出、あるいは正規の購入者の認証など、そのコンテンツを何らかの形で管理する目的で用いることが出来る。電子透かし技術に関しては、例えば松井の解説書がある[松井 98]ので参考にさせていただきたい。

3.1 3 次元モデルの電子透かし

これまでのデータ埋め込みの研究の多くは「古典的」マルチメディアデータ型、例えば文字文書、静止画像、動画像、および音声データに対する埋め込みを中心としていたが、最近、我々の研究をきっかけに、3D モデルに対する埋め込みアルゴリズムがいくつか発表されている。以下、3 次元モデルに対する透かしをその埋め込みの対象で分類し紹介しよう。

まず、3 次元形状を表現するために最も広く用いられているポリゴン(多角形)メッシュへとその属性への透かしの埋め込み法を中心に紹介する。ポリゴンメッシュには頂点座標、頂点接続関係、属性、の 3 種の構成要素があり、これら全てが電子透かし埋め込み対象となる。ついで、自動車などの形状設計 CAD で多用されるパラメトリック曲線・曲面に対する透かしの埋め込み手法についても述べる。

3.1.1 ポリゴンメッシュの形状への埋め込み

座標値の変更による埋め込み：我々が提案したアルゴリズムのうち幾つかは、ポリゴンメッシュによって定義された形状の座標値を埋め込みの対象とする。座標値そのままでは、たとえば平行移動や回転で消えてしまう。そこで我々はあるクラスの幾何変換、たとえば相似変換やアフィン変換に対する不変量を利用して透かしの埋め込み[Ohbuchi97, Ohbuchi98a, Ohbuchi98b]。この不変量は頂点座標から誘導されたもので、例えばアフィン変換不変量の一例としては 4 面体の体積の比がある。幾何変換不変量を用いたことで、3D モデルが日常的にさらされる可能性のある幾何変換、例えばアフィン変換をかけられても透かしは壊れない。ただ、この手法による透かしは頂点座標へのノイズの重畳により破壊されやすい。図 3 は 3 角形の相似比を元に透かしの埋め込みの例である。2 つの恐竜のモデルにはそれぞれ異なる電子透かしが埋め込んであり、いずれかをクリックすると対応する透かし情報が取り出され表示される。図 4 は著作権の告知の例である。

Minerva Yeung らは 2 次元の静止画像を対象として、fragile watermark(脆い透かし)の概念を、初めて提唱した。脆い透かしとは、透かしの埋め込みデータに手を加えると透かしが壊れ、そのデータの改ざんを検出し、またはその部位を同定する、というものである。この脆い透かしの Yeo や Yeung らが 3D モデルに適用した例が[Yeo99]に述べられている。

頂点座標値への変換領域での埋め込み：金井らは 3 角形メッシュをウェーブレット変換し、その変換領域の係数を操作して情報を埋め込む手法を提案した[Kanai98]。変換領域で操作した係数を逆変換すると透かしの埋め込み 3 角形メッシュが得られる。彼らの透かしはアフィン変換に耐え、かつ頂点座標に重畳されたランダムノイズに対してもある程度の頑強性を有した。Praunらの手法[Praun99]も Kanai らの手法同様に変換領域で透かしを入れるが、メッシュを直接ウェーブレット変換するのではなく、与えられたメッシュ上に多重解像度の基底関数(正規性や直交性は持たない)を立て、その係数を変更することで透かしの埋め込みを行う。Benedensら[Benedens99]は 3D モデルの形状から求

めた法線ベクタの集合を対象として、あるクラスの座標変換に対し頑強性を持つ透かしの埋め込み手法を述べた。これも一種の変換領域での埋め込みと言えるだろう。

位相の変更による埋め込み：3D モデルのトポロジ、つまり頂点の結合関係を変更して埋め込む透かしもある。単純には、文字パターンの形にメッシュの大きさを変え、あるいはメッシュを切り絵のように文字などのパターンに切り抜くこともできる。また、3 角ストリップを切り、その三角形の隣接関係にビット列を埋め込むこともできる [Ohbuchi98a, Ohbuchi98b]。

3.1.2 ポリゴンメッシュの形状属性への埋め込み

ポリゴンメッシュの形状に付随する属性、例えば頂点に付随する法線ベクトル、色、テクスチャ座標などや、面に付随する透明度、四面体に付随する温度や透明度などが埋め込みの対象となる。われわれはその一つのテクスチャ座標を変更してデータを埋め込む手法を提案した [Ohbuchi98b]。

3.1.3 ポリゴンのアニメーションデータへの埋め込み

MPEG-4 の Facial Animation Parameters (顔アニメーションパラメタ群, FAPs) は顔全体で 66 自由度あり、たとえば上唇や目じりの位置などを小さな整数(4-6bit)でパラメタ化して表現し、圧縮して転送することであらかじめ用意した顔の部品を動かすものである。Hartung ら [Hartung98] はこの FAPs のストリームの位相成分を変調することで透かしの埋め込んだ。この手法で大変興味深いのは、透かしの埋め込んだ顔アニメーションをレンダリングして得られた 2 次元動画 (MPEG2 圧縮) を FAPs 抽出用の画像処理プログラムに入力し FAPs を抽出することで、レンダリング後の 2 次元動画画像から透かしの情報を取り出すことに成功した点である。

3.2 パラメトリック曲線・曲面への埋め込み

CAD モデルの多くは、その形状の定義にポリゴンメッシュではなくパラメトリック曲線や曲面を用いる。また、殆どの CAD モデルはその幾何形状やトポロジの変更を許さない。従って、ポリゴンメッシュを対象とし、形や位相を変える上述の電子透かし手法をそのまま CAD モデルに適用することは難しい。そこで我々は CAD モデルのパラメトリック曲面・曲線に対して形状を変えずに透かしの埋め込み手法を開発している。以下、説明のため主に曲線を対象に話しを進めるが、テンソル積曲面への拡張も容易に可能である。

形状もデータ量も保存する手法：NURBS 曲面・曲線を対象として、有理線形関数による再パラメタ化を用いて透かしを入れる手法が [Ohbuchi99] に述べられている。パラメトリック曲線・曲面に対する透かしの埋め込みに関してはこれが世界初の論文である。この手法は厳密に幾何形状を保存し、データ量も保存するが、再パラメタ化を加えられると透かしが消える。従って脆い透かしとして改ざんの検出等に使うことが考えられる。図 4 はこの手法で NURBS 曲面に情報を埋め込んだ例である。

形状は保存するがデータ量は増える手法：冗長性を付加することで、データ量は増加するものの形状を厳密に保存する埋め込みが実現できる。例えば、複数の区間からなる非有理 B-Spline 曲線や NURBS 曲線に節点を挿入し、その節点の値に情報を符号化し埋め込むことが出来る。このほか、非有理な Bezier や B-spline 曲線の次数上げや、有理 Bezier や NURBS の次数上げを伴う再パラメタ化により情報を埋め込むことができる。形状の厳密な保存は形状 CAD のほとんど用途で要求される (さもないと製造したエンジンが回らないかもしれない!)。形状保存の条件を満たしつつ上記の手法で導入された節点や制御点を除去することは困難であり、従ってここで述べた透かし手法は形状 CAD データ向けの妨害に強い透かしとして期待できる。

4. まとめ

本論分では、まず、3 次元モデルをメディアデータ型としてみたときに用意されるべき操作群について概観し、その中で特に電子透かしについてその研究と実用化の現状を紹介した。3 次元モデルの電子透かしはまだまだ新しい研究テーマであるが、研究開発は急速に進むと思われ、目の離せない分野である。

参考文献

[Benedens99] O. Benedens, Geometry-Based Watermarking of 3D Models, IEEE CG&A, pp. 46-55, January/February 1999.

[Hartung98] F. Hartung, P. Eisert, and B. Girod, Digital Watermarking of MPEG-4 Facial Animation Parameters, Computer and Graphics, Vol. 22, No. 4, pp. 425-435, Elsevier, 1998.

[VRML] ISO/IEC 14772-1 Virtual Reality Model Language (VRML).

[MPEG4] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG-4 Visual and MPEG 4 SNHC.

[Kanai98] S. Kanai, H. Date, and T. Kishinami, Digital Watermarking for 3D Polygons using Multiresolution Wavelet Decomposition, Proc. of the Sixth IFIP WG 5.2 International Workshop on Geometric Modeling: Fundamentals and Applications (GEO-6), pp. 296-307, Tokyo, Japan, December 1998.

[松井98] 松井 甲子雄, 電子透かしの基礎, 森北出版, 東京都, 1998年8月.

[大淵 97a] 大淵 竜太郎, 増田 宏, 青野 雅樹, 3次元データへの情報の埋め込み, Visual Computing '97, (画像電子学会, 情報処理学会グラフィクスとCAD研究会共催), pp. 53-60, 東京, 1997年6月.

[Ohbuchi97b] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models, Proceedings of the ACM Multimedia '97, pp. 261-272, 1997.

[Ohbuchi98a] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models Through Geometric and Topological Modifications, pp. 551-560, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, May 1998.

[Ohbuchi98b] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, Geometrical and Non-geometrical Targets for Data Embedding in Three-Dimensional Polygonal Models, Computer Communications, Vol. 21, pp. 1344-1354, Elsevier (1998).

[Ohbuchi99] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, A Shape-Preserving Data Embedding Algorithm for NURBS Curves and Surfaces, Proc. Computer Graphics International '99, pp. 180-187, 1999.

[Praun99] Emil Praun, Hugues Hoppe, Adam Finkelstein, Robust Mesh Watermarking, Proc. ACM SIGGRAPH '99, pp. 49-56, 1999.

[Yeo99] B-L. Yeo and M. M. Yeung, Watermarking 3D Objects for Verification, IEEE CG&A, pp. 36-45, January/February 1999.

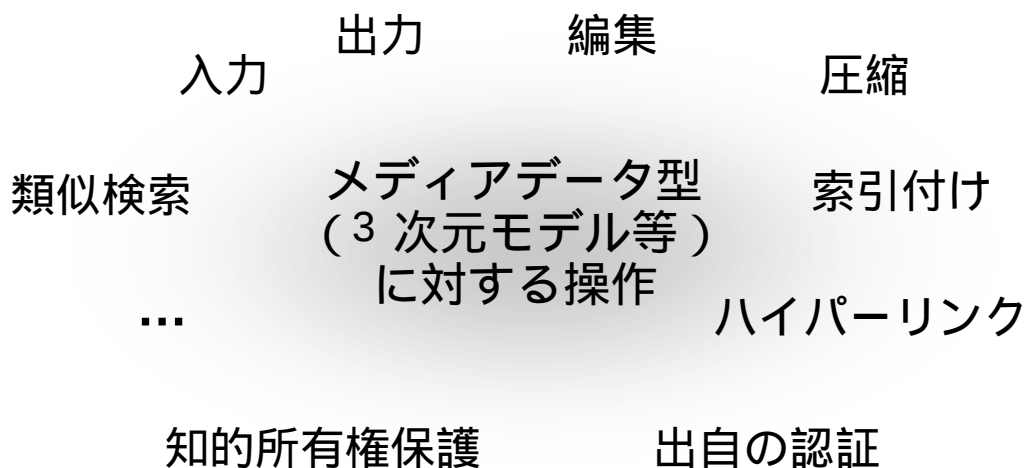


図1．文字文書，音声，画像，3次元モデルなどのメディアデータ型に用意される操作の例．

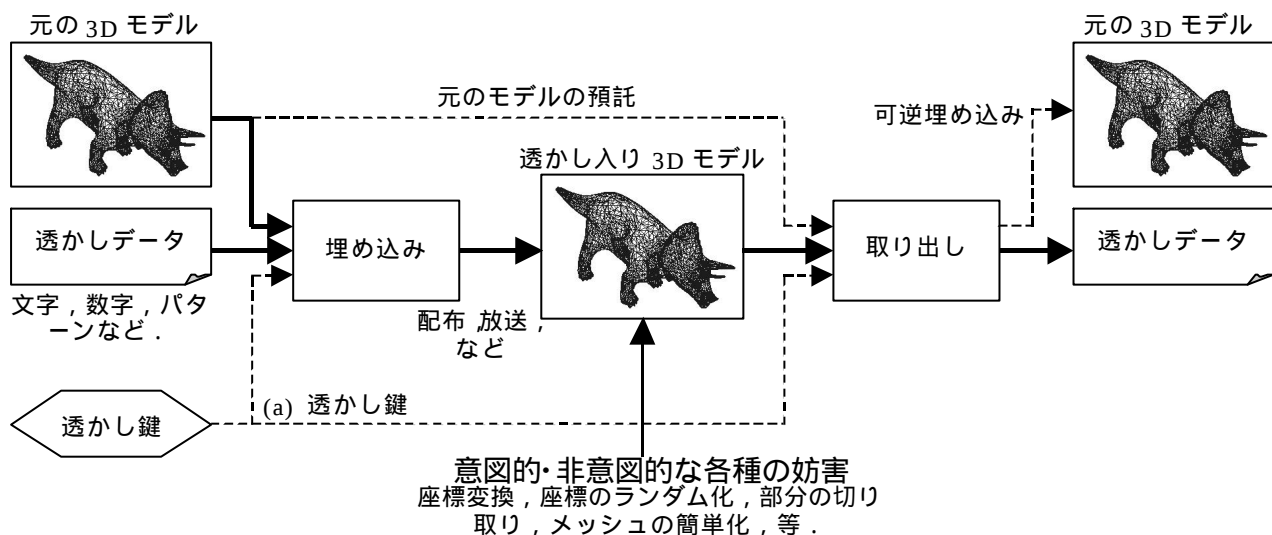


図2．3次元モデルの電子透かしの流れ．実線が一般の場合だが，元のモデルを預託して取り出しに使ったり，透かし埋め込みに透かし鍵を使って透かしデータの保全を図る等も考えられる．



図 3. ポリゴンメッシュからなる 2 つの恐竜のモデルにはそれぞれ異なる電子透かしが埋め込んであり、いずれかをクリックすると対応する透かし情報が取り出され表示される。

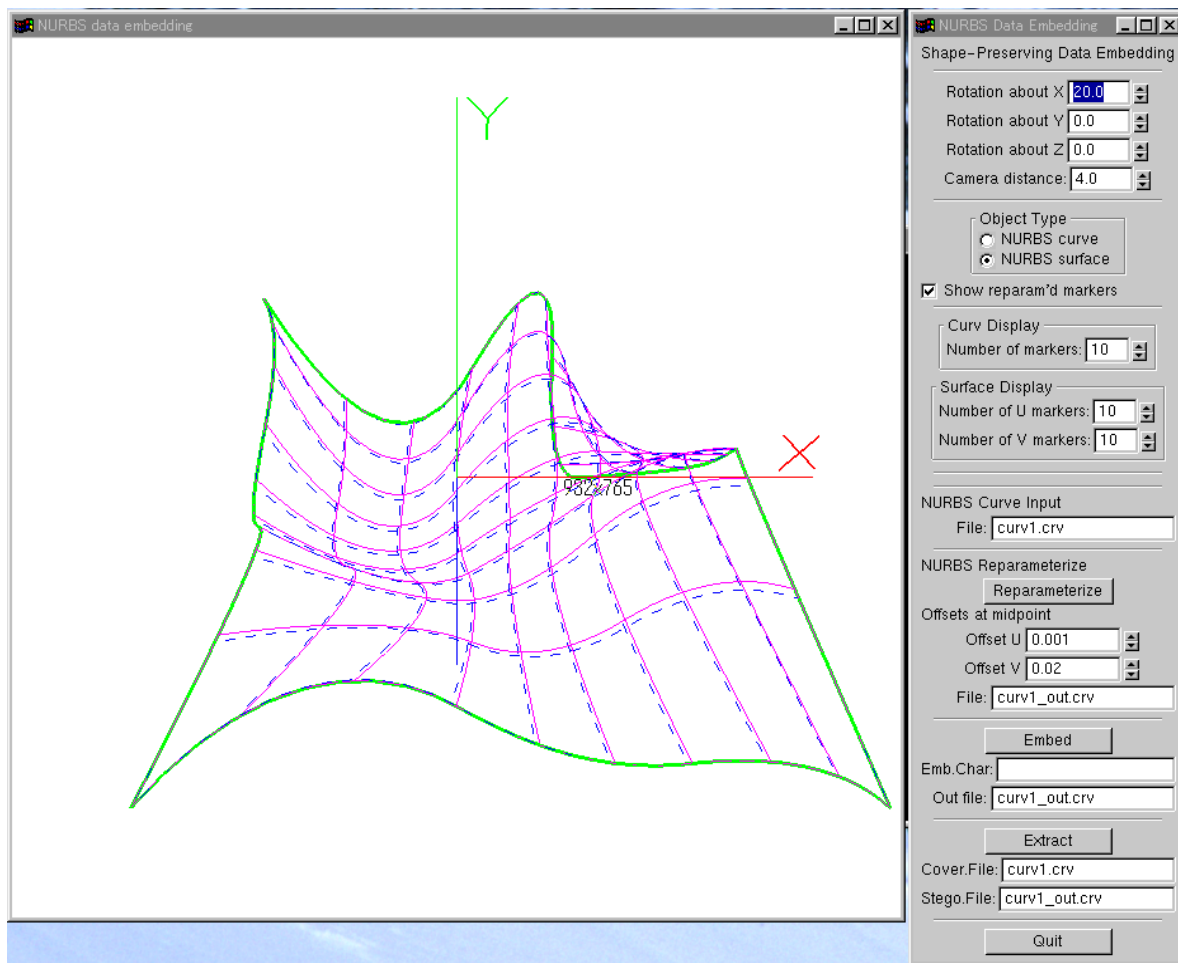


図 4. NURBS 曲面に有理線形再パラメタ化を用いて透かしを埋め込む。