

## XVL: ラティス構造に基づく軽量で高品質な Web3D データ表現

脇田 玲\* 矢島 誠\*\* 原田 毅士\*\* 鳥谷 浩志\*\* 千代倉 弘明\*

\*慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

\*\*ラティス・テクノロジー (株) インターネットグラフィックス事業部

{wakita, chiyo}@sfc.keio.ac.jp {yajima, harada, toriya}@lattice.co.jp

VRML はポリゴンメッシュに基づく形状表現を採用しているため、データサイズが膨大になり、データ転送に多くの時間を要する。そこで、本論文では軽量で高品質な 3D データの転送を可能にする XVL (eXtended VRML with Lattice) を提案する。自由曲面データを転送することで、少ないデータサイズで形状を転送すること、高品質なレンダリングが実現される。自由曲面は、自身と同一位相を持つ単純なポリゴンとその付加情報としてデータを管理するラティス構造に変換される。ポリゴンとして扱えるために VRML ファイルへの組み込みも可能である。ラティス構造はモデリング手法としても有用であり、ポリゴンモデルの操作を通して、容易にかつ直感的に曲面モデルを生成することが可能である。

## XVL : A Compact and Qualified Web3D Representation Based on Lattice Structure

Akira Wakita\* Makoto Yajima\*\* Tsuyoshi Harada\*\*

Hiroshi Toriya\*\* Hiroaki Chiyokura\*

\*Keio University, Graduate School of Media and Governance

\*\*Lattice Technology, Inc.

This paper proposes XVL (eXtended VRML with Lattice), a new framework for compact 3D representation with high quality surface shape. By utilizing a free-form surface technique, qualified surfaces are transferred with limited amount of data size and rendered. Free-form surfaces are transferred by lattice structure, an efficient data structure which can be regarded as both polygon meshes and free-form surfaces. Therefore, it can be easily integrated to a VRML file. Lattice structure also enables modeling free-form surface shapes intuitively with polygon modeling-like operations.

### 1. はじめに

VRML (Virtual Reality Modeling Language) はインターネット上での 3D データ活用を実現化した。しかし、VRML は大規模な普及には至らず、インターネット上での 3D データ利用は一般的なものにはなっていない。原因の 1 つはデータサイズにある。CAD システムで作成したモデルを VRML フォーマットに変換し、インターネットで転送する際には膨大な時間を必要とする。安価な CG システムやミッドレンジ CAD の普及により、様々な分野からの 3D データが溢れている一方で、それらのデータをインターネット上で効果的に利用する術はまだ存在しない。

VRML が広く一般に受け入れられなかったも

う 1 つの理由に、形状表現の乏しさがある。ポリゴンメッシュに基づく形状表現では、複雑な曲面形状をもつ現実的なモデルを表現するのは困難である。多くのモデリングシステムは NURBS などの自由曲面に基づくモデリングが中心となっている。NURBS によってモデリングした形状を VRML によってデータ転送、活用するためには、必ずポリゴンメッシュとして分割近似したデータに変換されなければならない。CAD/CAM などの自由曲面を用いる分野でも利用可能な一般化された形状表現が求められている。

このような現状の下で、ポリゴンメッシュに階層性を付加する手法や、データサイズを圧縮する手法の研究が盛んである。Hoppe[7]は、エネルギー

一関数の最小化により単純化した形状から、オリジナルの高精度なメッシュを再構築する手法を提案した。Lounsbery ら[8]と Eck ら[6]は多重階層分析によりメッシュの精度を任意のものに変更する手法を開発した。彼らの手法は任意位相を持つメッシュに対して有効である。Taubin と Rossignac[9]は VRML のバイナリフォーマットを提案した。彼らの手法はポリゴンメッシュをツリー状の位相要素に分解することでデータ圧縮を実現している。Abadjev ら[1]らは、3D データとその付加情報を階層的に管理することで、3D データのストリーミングを実現した。以上のようにインターネット上でポリゴンメッシュを効率的に扱うための様々なアプローチが提案されているが、データの軽量性と形状品質保持の両方の要求を満たす手法は提案されていないのが現状である。

一方、細分割曲面を用いるアプローチが、近年注目を集めている。細分割曲面とは単純なポリゴン形状から曲面形状を生成する手法である。Doq と Sabin[5]、Catmull と Clark[2]はこの手法の基本的な理論を構築した。DeRose ら[4]は Catmull と Clark の手法をアニメーション分野で現実的に応用することを試みた。彼らは複数の曲面形状をブレンドすることで、様々な曲面形状の作成を可能にしている。細分割曲面は任意の位相を持つポリゴン形状に適用することが可能であるため汎用性が高い。また、データサイズの小さい初期形状から複雑な曲面形状を構築することが可能であるため、インターネット利用に適した形状表現である。一方で、最終的な生成形状を確認するためには複数のフィルタリングが必要である。また、既存の CAD/CG システムが認識可能な曲面情報を保持していないという問題もある。

我々の研究目的の1つはインターネットを利用したデータ転送に適した軽量で高品質な3D データを作成することである。この目的を達成するために XVL(extended VRML with Lattice) というフレームワークを提案する。XVL はラティス構造という 3D データ表現によって実現される。ラティス構造は Gregory パッチ[3]によって構築

される自由曲面データ、及びその自由曲面データと同一位相を保持するポリゴンデータから構成される。このポリゴンデータ(以後、概形ポリゴン)は自由曲面データを構築するための位相情報、頂点情報および重み付け情報を保持しており、高速に自由曲面形状を生成することが可能である。また、自由曲面データから概形ポリゴンを再構築することも可能である。XVL では自由曲面データではなく、概形ポリゴンをデータ転送の際に用いる。転送先では自由曲面を概形ポリゴンから生成することが可能であるため、高品質なデータを効果的に転送することができる。概形ポリゴンはデータサイズが非常に小さいために、ポリゴンメッシュを転送する場合と比較すると、大幅な転送時間の短縮が実現される。一方、概形ポリゴンの操作を通して自由曲面を直感的に操作することが可能であるため、ラティス構造はモデリングにも応用できる。更に、Gregory パッチを用いることで、曲面データはソリッドモデルとして扱うことができる。これにより CAD/CAM システムでデータを利用することも可能である。

本論文では、まず第2章で軽量性を実現するデータフォーマットについて述べる。第3章では、自由曲面の構築、及び外形ポリゴンの再構築アルゴリズムを解説する。また、重み付けにより様々な形状生成を実現する手法についても述べる。続く第4章では応用例を紹介し、第5章で検証及び考察を行う。最終章では、結論及び今後の展望を述べる。

## 2. ラティス構造

### 2.1 ラティス構造

XVL の特徴の1つは軽量性と自由曲面データの保持である。3D 形状の表現にポリゴンメッシュを用いた場合、高品質な形状のデータサイズは膨大になる。データサイズを削減するためにはポリゴン数を削減せざるを得ず、その結果、形状の歪みが生じ、使用用途が著しく限られてしまう。自由曲面を用いることでこの問題は解決される。自由曲面は複雑な曲面形状をわずかな数の制御点

で表現することができる。これによりデータサイズは小さくなり、リアリティのある曲面形状を表現することが可能になる。我々は自由曲面とポリゴンの両方の特性を持つ新しいデータ表現であるラティス構造を提案する。ラティス構造を用いることで、曲面形状を表現するために必要なデータサイズは格段に小さくなる。また、ポリゴンデータとして保存することが可能であるため、VRMLに組み込むことが可能である。XVL(extended VRML with Lattice) とは、ラティス構造により拡張された VRML のことである。

ラティス構造は自由曲面データと概形ポリゴンデータにより構築される。自由曲面データは Gregory パッチ[3]により表現される。Gregory パッチは連続性に優れた曲面表現であり、NURBS にも変換可能なことから CAD/CAM システムとのデータ交換が可能になる。図 1 にラティス構造を示す。右が自由曲面データであり、左がそれに対応する概形ポリゴンデータである。概形ポリゴンデータは自由曲面データと同一位相であり、自由曲面を構築するための属性情報を保持している。自由曲面と概形ポリゴンは相互に変換することが可能である。

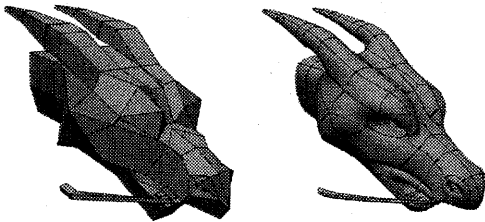


図 1: ラティス構造  
左が概形ポリゴン、右が自由曲面。同一の位相を保持している。

## 2.2 VRML への組み込み

図 2 に示すように、概形ポリゴンの情報を VRML に組み込むことが可能である。ポリゴンとして扱うことにより、ラティス構造をあらゆる VRML ブラウザで読み込むことが可能になる。もしブラウザが XVL をサポートするものであれば、概形ポリゴンから自由曲面データを構築し、

```
#VRML V2.0 utf8

#### 重み付け情報ノード
PROTO XVL_EDGE [
    field SFFloat round_val 0
    field SFVec3f round_str 0 0 0
    field SFVec3f round_end 0 0 0
]
{Text { string [ "weight of edge" ]}}

#### 丸めフラグノード
PROTO XVL_STATUS [
    field SFString status "XVL_LATTICE"
]
{Text { string [ "status of shape" ]}}

Group(
    children [

        #### 概形ポリゴン情報
        Group {
            children [
                Shape {
                    geometry IndexedFaceSet {
                        #####
                        ## 概形ポリゴンの幾何、位相情報
                        #####
                    }
                }
            ],
        },

        #### 自由曲面モデルの重み付け情報
        Switch {
            choice [
                XVL_STATUS {
                    status "XVL_GREGORY"
                }
                XVL_EDGE {
                    round_val 0.5
                    round_str 0 1 1
                    round_end 0.2 0.3 1
                }
                IndexedLineSet {
                    coordIndex [ 24 103 ]
                }
            ]
            whichChoice -1
        }
    ]
}
```

図 2: VRML への組み込み

滑らかな曲面形状が描画される。図 2 にあるように、XVL は Group ノードと Switch ノードの 2 つのパートから構成される。Group ノードには概形ポリゴンの幾何情報が保存される。Switch ノードには自由曲面を構築するために必要な属性情報が保存される。Switch ノードの whichChoice フィールドが 0 になっているために、XVL を認識できないブラウザはこの情報を無視することが

できる。この場合は概形ポリゴンの形状が描画されることになる。XVL を認識する場合は、choice フィールドから必要な情報を取得し、自由曲面を生成する。XVL ファイルを自由曲面として表示するか、もしくはポリゴンメッシュとして表示するかは XVL\_STATUS ノードによって決定される。status フィールドが XVL\_GREGORY であれば自由曲面を、XVL\_LATTICE であれば概形ポリゴンを描画する。図 2 の場合は自由曲面を描画する。自由曲面を生成する際には、頂点と稜線に重み付けをすることで様々な形状を生成することができる。重み付け情報は XVL\_EDGE ノード及び XVL\_VERTEX ノードに保存される。図 2 の場合はある 1 つの稜線について重み付けがされることになる。稜線は IndexedLineSet ノードにより記述される。座標値は概形ポリゴン情報が記述されている Group ノードに用いたものを使用し、稜線を構成する 2 つの頂点インデックスのペアを記述することで稜線情報を記述する。図 2 の場合は、概形ポリゴンで用いられている 24 番目と 103 番目の頂点により構成される稜線に重み付けをすることになる。

### 3. 曲面モデル生成と格子モデル再構成

#### 3.1 曲面モデル生成

曲面モデルは丸め操作によって生成される。本手法の丸め操作は Doo-Sabin[5]の細分割曲面生成手法を利用して、概形ポリゴンの各頂点に対応する曲面モデルの頂点を計算している。概形ポリゴンが Doo-Sabin 曲面の初期メッシュに相当し、曲面モデルが収束曲面に対応する。生成される形状は同一のものではないが、初期多角形の各頂点が収束する座標値は同一のものになる。本丸め手法は以下の 3 つのステップにより構成される。

##### ステップ 1

概形ポリゴンの頂点に対応する、曲面モデルの頂点の座標値を計算する。曲面モデルの頂点座標値は概形ポリゴンの頂点座標値の線形変換によって取得することができる。

図 3 に示すように、概形ポリゴンを細分割曲面の初期メッシュ( $M_0$ )とする。 $M_0$  に Doo-Sabin 分割を 1 回施し、分割されたメッシュ  $M_1$  を得る。更に  $M_1$  の各面について重心( $P_0$ )を求める。この  $P_0$  が概形ポリゴンの各頂点に対応する曲面上的の頂点になる。

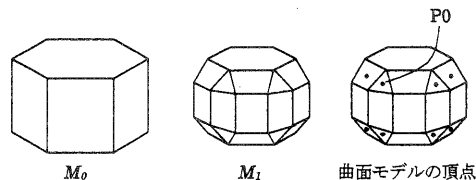


図 3: 曲面モデルの頂点計算

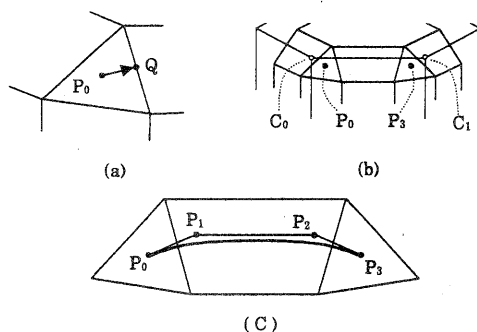


図 4: 曲面モデルの曲線計算

##### ステップ 2

概形ポリゴンの線分に対応する、曲面モデルの曲線分を計算する。曲面モデルの曲線分は 3 次 Bézier 曲線として表現する。図 4 (b)に示すように、概形ポリゴンの線分  $C_0C_1$  に対応する曲線を求めるとする。まず図 4 (a)に示すように、 $M_1$  の稜線の中点( $Q$ )と  $P_0$  によって生成されるベクトルを定義する。このベクトルが曲線の始点における接線ベクトルになる。図 4 (b)に示すように、曲線の始点( $P_0$ )と終点( $P_3$ )はステップ 1 で計算済みであるため、3 次 Bézier 曲線を定義するには内側の 2 つの制御点( $P_1, P_2$ )を求めればよい。制御点 ( $P_1, P_2$ )は以下の式によって定義する。

$$P_0P_1 = \frac{4}{3}P_0Q \quad P_3P_2 = \frac{4}{3}P_3R$$

### ステップ 3

3 次 Bézier 曲線により囲まれる領域に千代倉と木村[3]の手法を用いて双 3 次 Gregory パッチを内挿する。曲面モデルの位相は概形ポリゴンの位相と等しくなる。

### 3.2 重み付け

重み付けを用いることで、様々な形状を柔軟に生成することが可能になる。重み付けは概形ポリゴンの頂点及び稜線に設定可能である。重み値を大きくすれば、生成される曲面形状は概形ポリゴン形状に近づく。これは曲面モデルを構成する曲線の始点と終点を、それぞれに対応する概形ポリゴンの頂点座標値に近づけることで実現される。

### 3.3 逆丸め

曲面モデルの制御点は概形ポリゴンモデルの頂点の線形変換によって計算される。この線形変換の逆変換を用いることで、曲面モデルの制御点から概形ポリゴンの各頂点を再計算することができる。曲面モデルの各曲線の始点と終点を逆変換によって取得した座標値に移動し、更に曲線を直線に変換することで、概形ポリゴンモデルが再構築される。

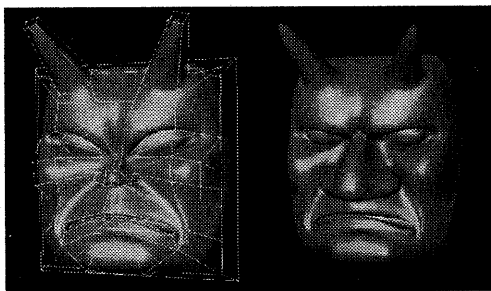


図 5: ラティスマデリング  
概形ポリゴンの操作により内部の自由曲面を変形した例。

## 4. 応用事例

### 4.1 ラティスマデリング

XVL では、概形ポリゴンを通して自由曲面を直感的に操作することが可能であるため、ラティスマデリングはモデリングにも応用できる。このことは、

ポリゴンモデリングの操作感によって自由曲面モデル生成を実現することを意味する。曲面データは NURBS にも変換できるため、他の曲面モデリングシステムにデータをインポートすることも可能である。図 5 にこのモデリング手法による例を示す。

### 4.2 CAD/CAM システムとのデータ交換

XVL は曲面表現に Gregory パッチを用いている。そのため、曲面間の連続性に優れておりソリッドモデルを扱うことも可能である。形状をソリッドモデルとして扱うことで、XVL を直接 CAD/CAM システムにインポートすることが実現される。図 6 に XVL ファイルをもとに、CAM システムで生成した実モデルを示す。また曲面モデルから STL フォーマットなどのポリゴンメッシュを生成することで、ラピッドプロトタイプングシステムでの利用も実現される。一般に、STL フォーマットはデータサイズが大きく、ネットワーク転送は困難である。XVL を用いることで、ラピッドプロトタイプングシステムにネットワークを用いたソリューションを提供することができる。



図 6: CAM システムによって生成した実モデル

## 5. 結果と考察

表 1 は XVL のデータサイズと曲面モデル生成に費やした時間を示している。各モデルについて、ポリゴン数(Polygon)、VRML フォーマットでのデータサイズ(VRML)、XVL フォーマットでのデータサイズ(XVL)、曲面モデル生成と描画に費や

した時間(Surf. Gen.)を測定した。ポリゴン数は曲面モデルを8分割したポリゴンメッシュから測定した。VRML, XVL のデータサイズはそれぞれテキストフォーマットでの比較である。曲面モデルの生成時間は、概形ポリゴンモデルから曲面モデルを生成、描画するまでの時間(秒)を測定した。測定には PentiumIII 500MHz のPCを用いた。データサイズ比較では、XVL が VRML の10%以下のファイルサイズで表現可能なことが分かる。

表1：データサイズ比較と曲面生成時間

Data	Result			
	Polygon	VRML	XVL	Surf. Gen.
hand	27126	1813	73	2.3
dolphin	24992	1647	128	2.1
raptor	68325	4343	434	3.4

## 6. 結論と展望

本稿では、軽量で高品質な曲面形状を表現できる Web3D 表現を提案した。自由曲面に基づく形状表現を採用することで、ポリゴンメッシュと比較して大幅なデータサイズの縮小と高品質なレンダリングイメージの取得が可能であることを示した。データ構造に曲面モデルとポリゴンモデルの2重性を持たせることで VRML ファイルに組み込むことを可能にした。ソリッドモデルに基づく形状表現を採用することにより、CAD/CAM 分野でのインターネット利用に有用なことを示した。更に、ラティス構造のモデリング手法としての有用性を示した。今後は、XML に基づくデータフォーマットの実現、トリム曲面を扱える枠組みの構築を目指していきたい。

## 参考文献

- [1] Abadjev, A., Rosario, M. del., Lebedev, A. Migdal, A., and Paskhaver. V.: MetaStream, VRML'99, 1999.
- [2] Catmull, E., and Clark, J.: Recursively Generated B-Spline Surfaces on Arbitrary Topological Meshes, Computer Aided Design, pp.350-355, 1978.
- [3] Chiyokura, H. and Kimura, F.: Design of Solids with Free-form Surfaces. Computer Graphics, pp289-298, 1983.
- [4] DeRose, T., Kass, M. and Truong, T.: Subdivision Surfaces in Character Animation, Computer Graphics, pp85-94, 1998.
- [5] Doo, D. and Sabin, M.: Behavior of Recursive Division Surfaces Near Extraordinary Points, Computer Aided Design, pp356-360, 1978.
- [6] Eck, M., DeRose, T., Duchamp, T., Hoppe, H., Lounsbery M. and Stuetzle. W.: Multiresolution Analysis of Arbitrary Meshes, Computer Graphics, pp173-182, 1995.
- [7] Hoppe, H.: Progressive Meshes, Computer Graphics, pp99-108, 1996.
- [8] Lounsbery, M., DeRose, T. and Warren, J.: Multiresolution Analysis for Surfaces of Arbitrary Topological Type, Technical Report 93-10-05b, Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, 1994.
- [9] Taubin, G. and Rossignac, J.: Geometric Compression Through Topological Surgery, ACM Transaction on Graphics, pp84-115, 1998.