

周波数領域での曲面データの圧縮と転送

増田 宏[†] 大淵 竜太郎^{††} 青野 雅 樹^{††}

本研究の目的は、CAD で用いられる曲面データを効果的に圧縮し、データ転送を高速化することである。近年、データ量の大きい CAD モデルをネットワークを介して短時間で閲覧したいという要求が強まっており、曲面のデータ圧縮はそのための要素技術として重要である。本論文では、曲面表示においては厳密な精度が要求されないことを考慮し、曲面の制御点座標を周波数領域に変換して損失のある圧縮処理を行う方法を提案する。周波数領域への変換には離散コサイン変換を用い、データ圧縮には周波数成分に対する量子化とエントロピー符号化を用いる。意匠設計などでは滑らかな曲面が多いため、本手法によって高周波成分が効果的に削減でき、非常に高い圧縮率を得ることができる。また、量子化の幅を数通り用意してそれらを差分転送することでプログレッシブ転送を実現する方法についても示す。

Frequency Domain Compression and Progressive Transmission of Parametric Surfaces

HIROSHI MASUDA,[†] RYUTAROU OHBUCHI^{††} and MASAKI AONO^{††}

This paper discusses methods to compress free-form surface data used in Computer Aided Design (CAD) applications so that they can be transferred quickly through network. Compression of curved surfaces for communication is becoming more important due to increasing demand to share and view large 3D CAD models often over a long distance. The algorithm proposed in this paper transforms control points of curved surfaces into frequency domain, by using Discrete Cosine Transform (DCT), for lossy compression. The DCT coefficients are quantized and entropy coded to realize lossy data compression. The algorithm achieves high compression ratios since most of the surfaces used in industrial applications are smooth so that their control points can be approximated well by using only the low frequency components of the transform. The algorithm also allows for progressive transmission of the compressed data by using multi-level quantization of the coefficients.

1. はじめに

近年、製造業などにおいて、設計や生産などの作業を支援するために 3 次元形状モデルが広く用いられるようになってきた。また、社内ネットワークや Internet などの社外ネットワークも急速に整備されつつある。その結果、設計の段階で作成された CAD モデルを複数の部門間や会社間で共有し、開発中開発後を問わず、随時、製品データとして参照したいという要求が強まっている。こういった応用で重要なのは、大量の形状データを高速に転送する技術、そしてこれを高速に表示する技術である。また、コストや移動先での参照容易性などから、特別なハードウェアを用い

ず、パーソナルコンピュータなどの比較的廉価なコンピュータを用いてそのような機能を実現することが望まれている。

CAD モデルでは形の表現にしばしば曲面が用いられる。その中でも特に意匠性が重視されるスタイリング CAD では、非常に多数の制御点を持った曲面が多く用いられる。このため、たとえば、自動車のボディ設計などで用いられる曲面データは全体で数十 M バイト以上になることも多い。複雑な曲面データは、表示に時間を要するのみならず、格納にディスク容量を消費し、データ転送に時間を要する。転送の問題は、比較的高速なネットワークでつながれた同一事業所の同一部門内であっても発生するが、物理的に離れた事業所間、あるいは会社間でデータをやりとりする場合には非常に深刻な問題となる。

本研究では、曲面モデルのデータを圧縮することにより転送を高速化することを目的とする。本論文の

[†] 東京大学大学院工学系研究科

School of Engineering, The University of Tokyo

^{††} 日本アイ・ビー・エム東京基礎研究所

IBM Research, Tokyo Research Laboratory

手法の第1の特徴は、曲面を決める制御点などのパラメータを規則性のある数値列として扱い、周波数領域に変換することで圧縮効率を高めることである。制御点座標のような浮動小数点値は、下位の桁にいくほど規則性がなくなることが多く、一般には、エントロピー符号化による圧縮がしにくいという特徴を持つ。したがって、ここでは近似的な表現としてJPEG画像圧縮に類似した情報の損失がある圧縮方法を用いることで高い圧縮率を実現することを考える。本手法は厳密な精度が要求されない応用に適しており、本研究では特にCADモデルのデータ閲覧を対象として考える。圧縮においては、元の曲面データと圧縮したデータをレンダリングして比較してもその差異を知覚できないよう誤差を制御することが可能である。第2の特徴は、圧縮に際して、形状の概形を先に転送し、後から漸進的に詳細なデータを転送する、いわゆるプログレッシブ転送が実現できることである。プログレッシブ転送を用いると、曲面データ全体の到着を待たずにそのデータの概略形状を掴むことができるので、複数のモデルから希望するものを選択するような作業を段階に効率化する。

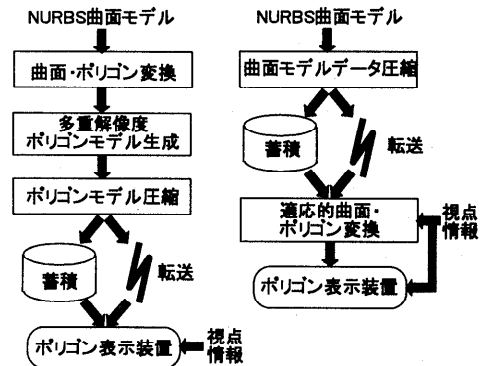
以下、本論文では、まず、2章で従来の研究について概観し、3章で本手法の基本的な考え方と全体構成を説明する。4章では本研究で用いた手法について説明し、曲面データの離散コサイン変換、量子化、エントロピー圧縮、プログレッシブ転送の方法について述べる。5章では本論文の手法を実験により評価した結果を示し、最後にまとめを述べる。

2. 従来の研究

2.1 曲面表示の研究

CADモデルでは曲面が使われることが多いが、表示の際には曲面データはポリゴン（多角形）で近似されたポリゴンデータに変換される。これは、現在のほとんどすべてのグラフィックス表示ハードウェアが、効率良く扱える幾何プリミティブをポリゴン、特に三角形に限定しているためである。したがって、曲面データ表示手法は、曲面からポリゴンへの変換をいつ行うかで図1に示すような2種類の方法に分類できる。図1(a)では、あらかじめ曲面をポリゴンモデルに変換しておき、それを蓄積・転送して表示する方法を示している。一方、図1(b)の方法では、曲面のまま蓄積・転送し、受取り側でポリゴンモデルに変換する。必要に応じて、視点情報に応じた適応的ポリゴン化などの手法⁸⁾を用いることもできる。

現在は前者の、あらかじめポリゴンに変換しておく



(a) 早期に曲面データからポリゴンデータに変換 (b) 表示時に適応的にポリゴンデータに変換

図1 曲面表示の2つの手法

Fig. 1 Two approaches for displaying curved surfaces.

方法が一般的である。しかしこの方法には、曲面データを近似度の高いポリゴンデータに変換するとデータ量が非常に大きくなり、表示や転送に時間がかかるという欠点がある。この問題に対処するためにポリゴンモデルのポリゴン数を減らすポリゴン単純化手法^{2)~4)}が提案されている。しかし、ポリゴン単純化でデータ量を大幅に削減しようとすると、データの品質が著しく損なわれるという問題が生じる。また、複数の解像度（Levels Of Detail）を持つモデルを作り、視点情報に適應して、精細なポリゴンモデルと粗いポリゴンモデルを入れ換える方法や、ポリゴンモデルの一部分だけを再メッシュして詳細度を変更する手法^{5)~7)}も提案されている。しかしこれらの方法では、表示の高速化には有効であるが、複数のLODや詳細なポリゴンデータを保持することが必要となるため、転送時間がかかるという問題は解決しない。

後者の、曲面データのままで蓄積、転送し、受取り側でポリゴンモデルに変換するやり方は、実時間性を要求される表示においては一見不利に見える。しかし、アルゴリズムを工夫すれば、この手法が十分有効なことをUNCのKumarら⁸⁾が示した。一般に曲面データはそれを近似するポリゴンデータよりデータ量が小さくてすみ、蓄積・転送の点で有利である。また、視点位置や画面の解像度にあわせて必要十分な精度で適応的に曲面/ポリゴン変換することができるので、表示品質を落とさずに高速な表示ができる。近年では、ネットワーク速度の向上に比べて、CPU処理速度の向上が著しいという傾向が顕著であり、少なくとも当面はこの関係が続くとみられるため、表示側で処理が増えても転送すべきデータ量の少ない曲面データによる転送が有利になると考えられる。本論文では後者の

アプローチ, すなわち曲面のまま蓄積や転送をして表示することを仮定し, そのアプローチを支援するための曲面データの圧縮技術を考える。

2.2 形状データ圧縮の研究

Deering⁹⁾はその先駆的研究で, 三角メッシュを対象とした圧縮手法を提案し, 座標値, 法線ベクトル, 位相などの圧縮法を示した。座標値はメッシュごとに正規化し, 座標値の各成分を通常の表示で十分な精度(たとえば 12 bit)で量子化することでデータ量を削減した。また, 法線ベクトルも表示精度を考慮して量子化を行い, 三角形メッシュの位相は三角形ストリップを拡張した表現形式を用いることで圧縮を行った。しかし, この方法ではデータ量は半分から数分の1程度にしか削減できず, 大きな圧縮効果は望めない。

Taubin ら¹⁰⁾は, 同じく三角形メッシュを対象に, 頂点を覆う展開木 (spanning tree) を元にして位相データを効率良く圧縮する手法を提案した。この手法による位相情報の圧縮率は Deering の方法に比べ格段に高くなる。頂点座標の圧縮には, 展開木を利用した1次元の順序付けを行い, 線形予測の残差をエントロピー符号化する手法を用いた。しかし, この座標値圧縮手法は1次元化した点列を対象としており, メッシュ上の座標値の持つ2次元の規則性を必ずしも十分に利用しているとはいえない。

Hoppe^{5),6)}は, ポリゴンを単純化していく操作を記録し, それらの逆操作を逐次転送することで形状を次第に詳細化していく手法を示した。操作列は符号化して転送するので, データ量も元のメッシュデータよりも小さくできる。また, Li ら¹¹⁾も位相操作を用いた手法を提案し, ある頂点に連結する頂点集合の2次元の規則性を用いて座標値を圧縮し, プログレッシブな転送を実現するアルゴリズムを示した。しかし, これらの手法ではそれほど高い圧縮率は望めず, また圧縮の際の計算量が大きいという問題がある。

与えられた曲面を近似表現し, できるだけ少ないデータ量で曲面を記述する研究もなされている。DeVore ら¹²⁾は, 陰関数表現の曲面を wavelet 基底に基づく曲面の重ね合わせとして近似し, その係数を転送する圧縮・転送方法を示した。この方法を用いれば段階的に表示を詳細化していくプログレッシブ表示も可能である。しかし, 非線形最適化を必要とするため, 圧縮に多くの計算量を必要とし, 頻繁にモデルの変更, 表示を繰り返すような場合には適していない。本研究でも, 曲面を対象とし, 曲面の近似表現によりデータ圧縮を行うが, 圧縮や復元に複雑な計算を必要としない方法を考える。

3. 基本的な考え方

ここでは, 曲面データとして NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 曲面を考える。NURBS 曲面では, データ量の多くは曲面とトリム曲線の制御点座標によって占められるので, 効果的な圧縮を行うには, これらの制御点の性質をうまく利用した圧縮方法が必要である。

図2は, 11×14 の制御点を持つ NURBS 曲面をレンダリングしたものである。曲面そのものに加え, その制御点網もワイヤフレームで重ねて表示した。自動車の外板のような工業製品に用いられる曲面は, この例またはそれ以上に滑らかであることが多い。図3はこの曲面の制御点の x 座標を $u-v$ に対してプロットしたものである。これを見ると制御点の値の規則性が見てとれ, この規則性を利用した圧縮が期待できる。

3.1 曲面データの圧縮方法

効果的な圧縮を行うためには, この規則性を顕在化させるような形式に曲面データを変換することが望ましい。そこで, 本研究では座標値列を周波数領域に変換することを考え, そのために離散コサイン変換 (DCT: Discrete Cosine Transform) を用いることにする。DCT を用いることで, 図2の例の曲面における 11×14 の制御点は, その座標 x, y, z と重み w のそれぞれにつき, 11×14 の DCT 係数行列に変換される。元の制御点を得るためには, 係数行列に対して逆変換を施せばよい。図4は図3の係数行列をプロットしたものである。(0,0)が直流成分で, そこに近い係数が低周波成分である。この図から, ほとんど

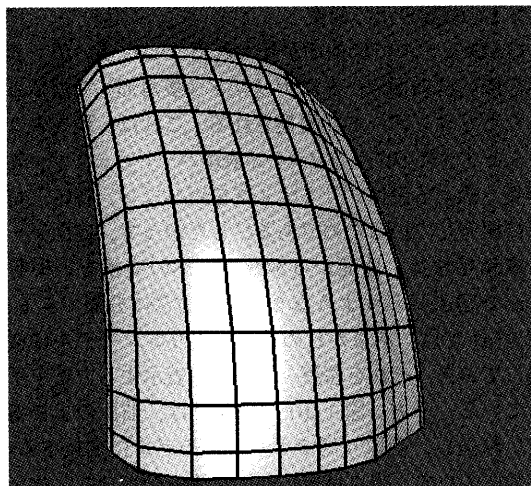


図2 NURBS 曲面の例

Fig. 2 An example of NURBS surface.

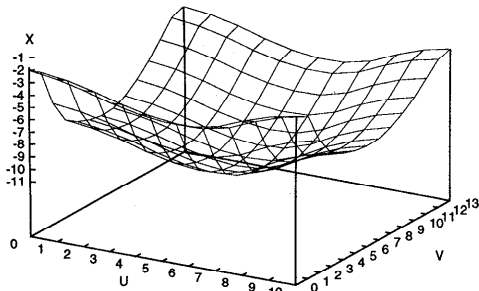


図 3 NURBS 曲面制御点 x 値の u - v プロット
Fig. 3 A plot of x coordinates of NURBS surface control points.

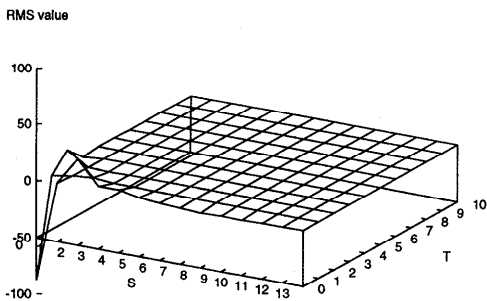


図 4 NURBS 曲面制御点の x 値の周波数成分
Fig. 4 A plot of frequency components of x values of the NURBS surface.

のエネルギーが低周波成分に集中していることが見てとれる。高周波成分は低周波成分に比べると極端に小さいので、適当な量子化を施すと多くの成分が 0 になる。図 4 の場合では、 $[-2048, 2048]$ で量子化すると、82% の係数が 0 となり、曲面の品質をある程度保持したままで大きな圧縮効果が得られる。

また、量子化においては、細かい量子化ほど曲面の精度が良くなる反面、データ量は増大する。そこで、量子化の幅を数通り用意してそれらの差分を順次転送することにすれば、初期データの品質が不十分な場合に、差分転送によって表示データを詳細化していくプログレッシブ転送が効果的に実現できる。

3.2 処理の手順

本研究では、元の曲面形状をできるだけ保持し、かつ高い圧縮率を実現するために、制御点座標に対して離散コサイン変換を施して周波数成分に分解し、それらの係数行列を量子化する。量子化したデータは、ランレングス符号化とハフマン符号化により圧縮する。

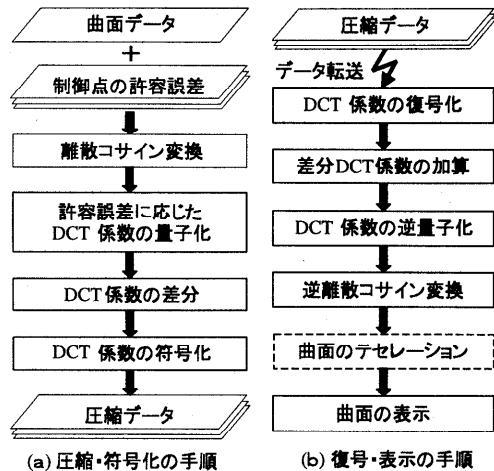


図 5 圧縮処理と復元処理の手順
Fig. 5 Processes of encoding and decoding.

また、データの受取り側では、これらの逆変換を施してデータの復元を行う。

図 5 (a) に処理の流れを示す。また、この図に対応した処理を以下に示す。

- (1) 入力データとして、曲面データと、制御点座標の許容誤差が与えられるものとする。また、プログレッシブ転送の場合には、各段階の許容誤差を与える。
- (2) 制御点座標を離散コサイン変換によって DCT 係数行列に変換する。
- (3) DCT 係数の最大値が 2^n になるように各係数を量子化する。その際、 n の値は、制御点座標を逆変換したときの誤差が、与えられた許容誤差を超えないように選ばれる。また、高周波成分ほど量子化が粗くなるような重み付けを行う。
- (4) プログレッシブ転送を行う場合には、複数の許容誤差に対応した量子化を行った後で DCT 係数の差分をとる。
- (5) 量子化した DCT 係数行列は高周波成分に 0 が多くなる傾向がある。そこで、行列要素を周波数が低い順に 1 次元に並べ、連続する 0 に対しランレングス符号化を行う。さらに、これら全体をハフマン符号化し、圧縮データを得る。

復号に関しては、図 5 (b) に示すように、これらの逆操作を行う。

- (1) 圧縮データが転送されると、ハフマン圧縮とランレングス圧縮の復号化処理を行い、量子化された DCT 係数行列を復元する。
- (2) プログレッシブ転送の場合には、これらを順次、以前受け取った量子化 DCT 行列に加算するこ

- とで、より精度の高い量子化 DCT 行列を得る。
- (3) 次に逆量子化を行って浮動小数点の DCT 係数を得る。
 - (4) 逆離散コサイン変換を用いて、元の制御点座標を復元する。
 - (5) 復元された曲面データはテセレーションによりポリゴンモデルに変換され、レンダリングされて画面に表示される。

4. 周波数領域への変換と符号化

本章では、制御点座標を周波数領域に変換し、さらに量子化してエントロピー符号化を施す手法について説明する。また、プログレッシブ転送を実現する方法についても述べる。

4.1 制御点座標の離散コサイン変換

まず曲面の制御点である P_{ij} を周波数領域に変換する方法について述べ、次に、トリム曲線に関する uv 空間の制御点列 P_i を変換する方法について述べる。

曲面が $N \times M$ 個の制御点を持つとき、これらを $P_{ij} = [P_{ij}^x, P_{ij}^y, P_{ij}^z]$ ($0 \leq i \leq N-1, 0 \leq j \leq M-1$) と書くことにする。変換は、 x, y, z に個別に施すものとし、 α を x, y, z のいずれかとする、 $\{P_{ij}^\alpha\}$ の離散コサイン変換 $\{D_{ij}^\alpha\}$ は以下のように記述できる。

$$D_{ij}^\alpha = \sqrt{\frac{2}{N}} \sqrt{\frac{2}{M}} C_i C_j \sum_{p=0}^{N-1} \sum_{q=0}^{M-1} \left[P_{pq}^\alpha \cos \frac{(2p+1)i\pi}{2N} \cos \frac{(2q+1)j\pi}{2M} \right]$$

ただし、 $C_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}$, $C_i = 1$ ($i \neq 0$) とする。

この式は、コサイン変換行列 X, Y を用いて、

$$D^\alpha = X P^\alpha Y$$

と書き直すことができ、 X, Y の各要素は以下のように書ける。

$$[X_{ip}] = \left[\sqrt{\frac{2}{N}} C_i \cos \frac{(2p+1)i\pi}{2N} \right] \quad (0 \leq i, p \leq N-1)$$

$$[Y_{qj}] = \left[\sqrt{\frac{2}{M}} C_j \cos \frac{(2q+1)j\pi}{2M} \right] \quad (0 \leq q, j \leq M-1)$$

逆変換により元の座標値を復元するためには、転置行列 X^T, Y^T を用いて以下の計算を行えばよい。

$$P^\alpha = X^T D^\alpha Y^T$$

一方、トリム曲面では、さらにトリム曲線のデータ

を持つ。ここで、 uv 空間における曲線の制御点座標を $[P_i^u, P_i^v]$ ($0 \leq i \leq N-1$) とし、 u, v それぞれについて離散コサイン変換を算出する。トリム曲線の離散コサイン変換は、 α を u, v のいずれかとして、以下の式により計算できる。

$$D_i^\alpha = \sqrt{\frac{2}{N}} C_i \sum_{p=0}^{N-1} P_p^\alpha \cos \frac{(2p+1)i\pi}{2N}$$

ただし、トリム曲線は C^1 連続でない場合がある。ここで、ノットベクトルの重複度などを調べて、必要があれば C^1 連続な曲線の集合に分割する。これは滑らかに接続していない場合には高周波成分が大きくなり、近似精度も落ちるからである。

4.2 DCT 係数の量子化

DCT 係数の量子化 \overline{D}^α は、量子化行列 Q_{ij} を用いて、以下の式によって行う。Round は、最も近い整数を返す関数とする。

$$\overline{D}_{ij}^\alpha = \text{Round} \left(\frac{D_{ij}^\alpha}{Q_{ij}} \right)$$

ここで、量子化行列 Q_{ij} を以下の式で定義する。 $(1+i+j)$ は、高周波成分の量子化を粗くするため、 2^n は D_{00}^α を n ビット整数に量子化するために用いた。

$$Q_{ij} = \frac{(1+i+j) \cdot D_{00}^\alpha}{2^n}$$

データを転送する際には、 Q_{00} の値と $\{\overline{D}_{ij}^\alpha\}$ ($0 \leq i \leq N-1, 0 \leq j \leq M-1$) を転送する。受け手側では、DCT 係数 D_{ij}^α を以下の式で計算することができる。

$$D_{ij}^\alpha = (1+i+j) \cdot Q_{00} \cdot \overline{D}_{ij}^\alpha$$

なお、トリム曲線は、上記で $M=1$ とした場合に相当するので、同様の処理により量子化することができる。

4.3 エントロピー符号化

滑らかな曲面においては、量子化された DCT 係数 \overline{D}_{ij}^α は、高周波成分になるほど 0 の比率が多くなるという性質を持っている。そこで、図 6 のように係数を並べ変え、0 についてののみランレングス符号化を行い、 n 個の連続した 0 を $0n$ のように書くことでデータ量を削減する。

次に、制御点の大きさ N, M 、量子化パラメータ Q_{ij} 、ランレングス符号化を施した DCT 係数に対してハフマン符号化を施してデータ圧縮を行う。この処理は制御点座標 x, y, z 、トリム曲線の制御点 u, v のそれぞれに対して行う。

ハフマン符号化は、出現頻度の高いシンボルに短いビット列を、低いシンボルに長いビット列を割り当て

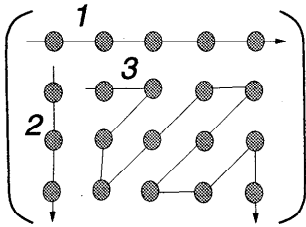


図 6 DCT 係数行列の走査順序付け

Fig. 6 Scanning order of the DCT coefficient matrix.

ることで、全体としてデータ量を減らす方法である。シンボルの出現頻度表があれば各シンボルに対応するビット列を一意に決めることができる。ここでは、データに現れる「0...9」,「-」,「.」, 区切り記号の 13 シンボルについての出現頻度を 256 段階に正規化し、13 バイトの頻度表としてファイルの先頭に付加した。そのうえで、この頻度表に基づいてハフマン符号化データをファイルに格納し、曲面の圧縮データとする。

4.4 プロGRESSIVE 転送

本手法は、損失のある圧縮なので、元の曲面とのずれが生じる。一方、始めから高い精度で一括してデータ転送しようとするれば、大きいデータ量の転送が終わるまで表示を待たなければならない。そこで、高精度の表示を必要とする場合には、逐次的にデータを差分転送して徐々に精度を高めていくプロGRESSIVE 転送の手段が有効である。本手法は、曲面の本質的な部分である低周波成分を優先的に送り、始めの少ないデータ量である程度の精度で表示を行うことができる。また徐々に詳細化に必要な差分情報を追加し、逐次的に近似精度を向上させることもできる。すなわち、プロGRESSIVE 転送に適している。

表示精度は、DCT 係数を何ビットで量子化するかのパラメータ n によって決まる。 n ビットで量子化した後に逆変換で復元した制御点座標を $P_{ij}^{(n)}$ とするとき、制御点の誤差が eps 以内になるように、量子化ビット数 n を以下の式を満たすように決める。

$$\max_{i,j} \left| P_{ij}^{(n)} - P_{ij} \right| \leq eps < \max_{i,j} \left| P_{ij}^{(n-1)} - P_{ij} \right|$$

データ転送においては、制御点の許容誤差 eps の値を数段階用意しておき、それに応じた DCT 係数行列の量子化を行う。2 回目以降の量子化 DCT 係数の転送においては、上位の桁はすでに送っているので差分のみをエントロピー符号化して転送すればよい。復元は、量子化 DCT 行列を順次加算していくことで行う。

5. 評 価

本手法を用いて NURBS 曲面データの圧縮と復元

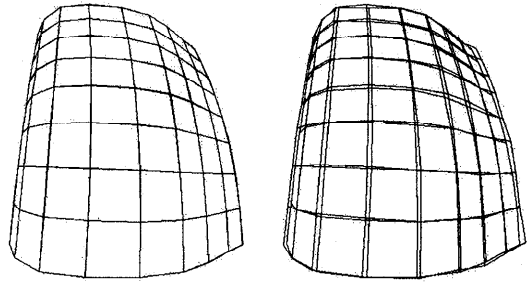


図 7 0.5% の許容誤差を持った曲面と元の曲面の重ね合わせ。左は誤差値そのまま、右は、誤差値を 10 倍に拡大して表示した
Fig. 7 Original and approximated (0.5% error) are overlaid for comparison. The error magnitude is not modified in the left figure. Figure on the right emphasized the error by 10 times for visualization.

を行い、表示精度と圧縮率の関係を調べた。まず、圧縮による表示のずれについて示す。図 7 (左) は、図 2 に示した曲面の制御点を許容相対誤差 0.5% で量子化した形状を元の形状と重ね合わせて表示したものである。左は誤差によるずれの大きさをそのまま、右は、参考のために、ずれを 10 倍に拡大して表示したものである。ここで、相対誤差は制御点座標のずれの最大値と曲面を囲む矩形領域の大きさとの比とした。この図から、誤差を 10 倍に拡大したときにはずれが確認できるものの、0.5% 程度の相対誤差では表示上の差はわずかで、目視による比較では誤差によるずれを認識できないことが分かる。

次に、自動車外板の設計部門で実際に利用されていた曲面データに本手法による圧縮処理を適用し、圧縮率の評価を行った結果を表 1 に示す。評価は、トリムでない曲面群 A とトリム曲面群 B の 2 通りに分けて行った。A の各曲面は、平均 356 個の制御点を持ち、B は 411 個の制御点を持つ。また、B においてトリム曲線の平均の制御点の個数は 95 個である。量子化は、相対誤差 0.5%、0.05%、0.005% の場合について行い、それぞれでデータ量と圧縮率を調べた。データ量に関しては、プロGRESSIVE 転送のための差分データを KB で示し、圧縮率に関しては、転送される累積のデータ量が元データの何% であることを示した。また、比較のために、バイナリデータを汎用の圧縮ツールである gzip で圧縮した場合についても示した。

この結果から、相対誤差 0.05% 程度の場合には、汎用の圧縮ツールに比べて高い圧縮率が実現できることが確認できた。特に、相対誤差 0.5% 程度の場合には、曲面群 A で圧縮率が 3.0%、曲面群 B で 5.3% と、比較的高性能の圧縮ツールである gzip に比べて、格段に高い圧縮率が実現できていることが分かる。表示に

表 1 2つの曲面データの集合 A (トリムなし, 71 パッチ) と B (トリムあり, 93 パッチ) の圧縮率

Table 1 Compression ratios for two sets of NURBS surfaces, set A (not trimmed, 73 patches) and set B (trimmed, 91 patches).

Data	Original data size	Error tolerance	Compressed data size (Compression ratio)	Gzip'd data size (Compression ratio)
Set A	394.7 KB	0.5%	11.7 KB (3.0%)	73.0 KB (18.5%)
		0.05%	20.0 KB (8.1%)	
		0.005%	51.5 KB (21.2%)	
Set B	459.3 KB	0.5%	24.3 KB (5.3%)	89.8 KB (19.6%)
		0.05%	28.1 KB (11.4%)	
		0.005%	45.0 KB (21.2%)	

おいてはこの程度の精度で十分に実用に耐えるので、厳密な精度が要求されない応用においては、本手法により優れた圧縮率が実現できることが分かる。

一方、本手法の特徴として、精度を向上させていくほど高周波成分の影響が無視できなくなり、データ量が增大していく傾向も確認できた。この例では、相対誤差 0.005% 程度の精度が要求されると、gzip より圧縮率がやや悪くなるという結果となった。したがって、高精度な曲面が必要となる応用分野においては、転送データ全体の圧縮率において、必ずしも汎用ツールに比べて有利にはならないことが分かる。ただし、転送の目的がデータ閲覧であれば、このような高精度が必要になることはまず考えられないので、本研究の目的においては問題は生じないと思われる。

6. まとめ

本論文では、曲面の制御点座標を周波数領域に変換して量子化し、エントロピー符号化を施すことで、曲面のデータ量を圧縮する手法を示した。本手法は、厳密な精度を要求されない応用分野で有用であり、特に表示で要求される程度の精度では高い圧縮率を実現できるために、大規模化しつつある CAD データの WWW による閲覧などに有効であると思われる。ネットワーク性能の向上に比べて CPU 性能の向上が著しいことを考えれば、将来的には、曲面データで転送を行い、クライアント側でポリゴン分割する方式が有利になっていくと思われる。現在の VRML はポリゴンのみに対応しているが、今後ネットワークで曲面を転送し表示するアプリケーションが増え、転送ファイル

の標準も現れるであろう。

今後は、曲面データの視点適応ポリゴン分割に基づいた高速表示手法⁸⁾などと組み合わせることによって、狭い帯域幅の回線でも高速な表示が可能なシステムを構築していく予定である。また、位相データと組み合わせることで、粗い精度であっても曲面間に隙間が生じないようにテセレーション手法も検討していく予定である。

参考文献

- 1) 増田 宏, 大淵竜太郎, 青野正樹: 位相操作を用いた 3 次元形状モデルのデータ圧縮法, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.7, pp.2189-2195 (1998).
- 2) Schroeder, W.J., Zarge, J.A. and Lorensen W.E.: Decimation of Triangle Meshes, *Proc. ACM SIGGRAPH '92*, Chicago, IL, U.S.A., pp.55-64 (1992).
- 3) Turk, G.: Re-Tiling Polygonal Surfaces, *Proc. ACM SIGGRAPH '92*, Chicago, IL, U.S.A., pp.55-64 (1992).
- 4) Cohen, J., Varshney, A., Manocha, D., Turk, G., Weber, H., Agarwal, P., Brooks, F.P. and Wright, W.: Simplification Envelopes, *Proc. ACM SIGGRAPH '96*, New Orleans, U.S.A., pp.119-128 (1996).
- 5) Hoppe, H.: Progressive Meshes, *Proc. ACM SIGGRAPH '96*, New Orleans, U.S.A., pp.99-108 (1996).
- 6) Hoppe, H.: View-Dependent Refinement of Progressive Meshes, *Proc. ACM SIGGRAPH '97*, Los Angeles, U.S.A., pp.189-198 (1997).
- 7) Lubke, D. and Erikson, C.: View-Dependent Simplification of Arbitrary Polygonal Environments, *Proc. ACM SIGGRAPH '97*, Los Angeles, U.S.A., pp.199-208 (1997).
- 8) Kumar, S., Manocha, D. and Lastra, A.: Interactive Display of Large NURBS Models, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.2, No.4, pp.323-335 (1996).
- 9) Deering, M.: Geometry Compression, *Proc. ACM SIGGRAPH '95*, pp.13-20 (1995).
- 10) Taubin, G. and Rossignac, J.: Geometry Compression Through Topological Surgery, *ACM Trans. Graphics*, Vol.17, No.2, pp.84-115 (1998).
- 11) Li, J.-K., Li, J. and Jay Kuo, C.-C.: Progressive Compression of 3D Graphic Models, *Proc. IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems*, Ottawa, Canada (1997).
- 12) Devore, R.A., Bjorn, J. and Lucier, B.J.: Surface Compression, *Computer Aided Geometric*

Design 9, pp.219-239 (1992).

- 13) Nelson, M. and Gally, J-L: データ圧縮ハンドブック 第2版, トップラン (1996).

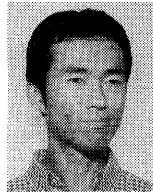
(平成 10 年 6 月 26 日受付)

(平成 10 年 11 月 9 日採録)



増田 宏 (正会員)

1961 年生。1985 年東京大学工学部精密機械工学科卒業。1987 年同大学院工学系研究科修士課程修了。同年日本アイ・ピー・エム (株) 入社, 東京基礎研究所に勤務。1998 年より東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻助教授。3 次元形状処理, CG, 設計支援システムに関する研究に従事。工学博士。IEEE, 人工知能学会, 精密工学会, 日本造船学会各会員。



大淵竜太郎 (正会員)

1981 年上智大学理工学部電気電子工学科卒業。1983 年電気通信大学計算機科学科修士課程修了。1994 年 University of North Carolina at Chapel Hill Computer Science Department より Ph.D. 取得。1994 年より日本アイ・ピー・エム (株) 東京基礎研究所所属。インタラクティブコンピュータグラフィクス全般, 特に augmented reality とその医療への応用に興味を持つ。ACM, IEEE, 日本ソフトウェア科学会各会員。



青野 雅樹 (正会員)

1957 年生。1981 年東京大学理学部情報科学科卒業。1984 年同大学院理学系研究科修士課程修了。同年日本アイ・ピー・エム (株) 入社。1990 年より米国ニューヨーク州レンセラー総合工科大学計算機科学科に留学し, 1994 年に Ph.D. 取得。同年より日本アイ・ピー・エム (株) 東京基礎研究所所属。ACM, IEEE 各会員。