

不規則点群の周波数解析

岡根慎治* 金谷一朗† 安室喜弘* 井村誠孝* 眞鍋佳嗣* 千原國宏*

* 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 † 大阪大学大学院基礎工学研究科

E-mail: {shinji-o,yasumuro,imura,manabe,chiyara}@is.aist-nara.ac.jp,
kanaya@computer.org

近年、三次元形状計測装置により物体の形状を高精度に計測することが可能となった。これらから三次元点群の状態では物体表面の形状を得ることができ、従来は主にポリゴンモデルを用いたサーフェスレンダリングによって可視化が行われて来た。しかし、点の数が多くなるとポリゴンモデルの生成が高コストとなるため、ポイントレンダリングなどの非サーフェスレンダリングが注目されている。ポイントレンダリングを行う際には、点密度が一様であることが望ましいが、三次元形状計測装置から得られる点群データは、物体の形状や計測位置によっては、一般に得られる点の並びが不規則であり、また計測ノイズが混入することがあるために、単純なポイントレンダリングには適さない。さらに、異なる計測装置での計測結果を統合した異なる解像度の点群が混在するデータもポイントレンダリングには適さない。そこで本研究では、これらの点群データに対し、リサンプリングと周波数解析を施すことによって、ノイズに強く形状操作も可能な新たな点群モデルを構築する。

Frequency Analysis for Unorganized Point Clouds

OKANE SHINJI* KANAYA ICHIROH† YASUMURO YOSHIHIRO* IMURA
MASATAKA* MANABE YOSHITSUGU* CHIHARA KUNIHIRO*

*Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

†Graduate School of Engineering Science, Osaka University

E-mail: {shinji-o,yasumuro,imura,manabe,chiyara}@is.aist-nara.ac.jp,
kanaya@computer.org

We propose a new filtering method to achieve real-time computer graphics of precise 3D shapes. By recent 3D scanning systems, it becomes possible to measure 3D shape of objects with high precision. Normally these scanners sample 3D positions of points (point clouds) on the surface of objects so that we must build polygon model before synthesizing surface-rendered computer graphics. Increase of measurement data by progress of recent 3D scanning systems, however, makes cost of creation of polygon model higher. Thus non-surface rendering including point rendering techniques are focused on. To achieve high-quality point rendering of objects scanned by such 3D scanners, we must perform some kind of filtering on obtained data since point data obtained by 3D scanner is often irregularly formed and also has non-uniform density. We have achieved one of such filtering by applying resampling and frequency analysis on point clouds.

1 はじめに

近年のレンジスキャナ的发展は、物体の3次元形状を高精度に計測することを可能にした。これらから、物体表面の形状が3次元空間上に分布する点群として得られる。

従来からこれら3次元計測データの可視化には、主にポリゴンモデルによるサーフェスレンダリングが盛んに行われてきた。また、これらのモデルの簡単化、形状操作、表示に関する研究 [1] も盛んに行われ

ている。しかし、ポリゴンモデルによる物体形状の近似は、少ない頂点数で物体を表現する際には有効であるが、高密度な点群データに対してこの表現や形状操作などを行うことはコストの面で非常に高くなる。このため、近年ポイントレンダリング [2][3][4] が注目されている。

ポイントレンダリングとは、プリミティブとしてポイントを用いてレンダリングを行う手法である。一般に互いの位相情報が不明な点群に対して用いられるが、このようなデータは接続情報が不明のため、計

測ノイズの除去, 特徴点の抽出, 形状の変形などの操作を施すのが困難である。

そこで本研究では, 計測装置から得られる接続情報が不明の点群 (不規則点群) に対して周波数解析を行い, 周波数領域において操作することで, 物体の表面形状のノイズ除去, 形状の変形操作を行う手法を提案する。

まず得られた接続情報不明の点群の各点に対し法線情報を推定する。次に, その法線情報をもとに, 点群が全単写できる平面を作成し, その平面上に2次元格子を生成する。各格子セル値として, 面から点までの距離を格納し, その値をフーリエ変換によって周波数領域に変換する。周波数領域において, フィルタを用いて周波数分布を操作し, 再び空間領域に戻す。

2 周波数解析

点群に対し, それらの点群がすべて全単射できる平面を求める。その平面上に2次元格子を作成し, 各格子セル値として, その平面と各点の距離を格納する。そのグリッド値に対して周波数解析を行う。本章ではこれらの手順について記述する。

2.1 基準平面の法線決定

点群に対し, それらの点群がすべて全単射できる平面の法線を決定する。表面形状を表す点群は2.5次元で分布しているものとする。以下の手順を行う。

1. 点群中の任意の点 p_i に対して, 近傍点 p_j, p_k を探索する。
2. p_i, p_j, p_k で形成される平面の法線を計算する。
3. 1, 2 の手順を任意回数繰り返し, 得られた法線の平均値を平面の法線 $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ とする。

計算の簡略化のため, 1 の手順で p_j, p_k を任意に選んでも良い (ただし, $i \neq j, j \neq k, i \neq k$) が, その場合は3の手順を多めに設定する。

2.2 基準平面作成

前節で述べた方法で平面の法線を用いて, 対象とする点群がすべて全単射できるような平面 (図1) を作成する。空間上の原点 $P_0 = (0, 0, 0)$ を通り, 法線 $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ をもつ平面の方程式は以下の式で表される。

$$n_x x + n_y y + n_z z = 0 \quad (1)$$

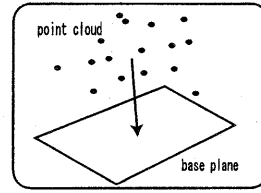


図1: 基準平面

また, 平面の法線に直行する平面上の2つのベクトル \mathbf{u}, \mathbf{v} を定めて, 平面の方向を決める必要がある。 \mathbf{u} は, 上記の平面の方程式から, 任意に定めることができる。ここでは

$$\mathbf{u} = \left(0, 1, -\frac{n_y}{n_z} \right) \quad (2)$$

とする。 \mathbf{v} は \mathbf{n} と \mathbf{u} に直交しているので,

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle &= 0 \\ \langle \mathbf{n}, \mathbf{v} \rangle &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

と, \mathbf{v} は単位ベクトルであるとした

$$\|\mathbf{v}\| = 1 \quad (4)$$

の条件から連立方程式を解き,

$$\mathbf{v} = \left(-\frac{n_y^2 + n_z^2}{n_x n_z} v_3, \frac{n_y}{n_z} v_3, \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{n_y^2 + n_z^2}{n_x n_z}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{n_z}\right)^2 + 1}} \right) \quad (5)$$

とする。

2.3 格子生成

xyz 座標系に分布している点群を, 前節で定めた平面を基準とした uvh 座標系に変換する (図2)。変換式は以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 & v_2 & v_3 \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (6)$$

uvh 座標系において uv 方向にそれぞれ平行な辺をもつ, 分布している点群を囲む最小の長方形を求める (図3)。この長方形の uv 方向に格子を設定する。ここで, 格子の分割数は後述する高速フーリエ変換が適用できるように, 2 の $2N$ 乗にする (N は自然数)。 N の値はあらかじめ実験的に決定する。次に, uvh 座標系に分布する各点から平面までの距離を, 格子セルの (i, j) 番目要素に格納する。これらの値は

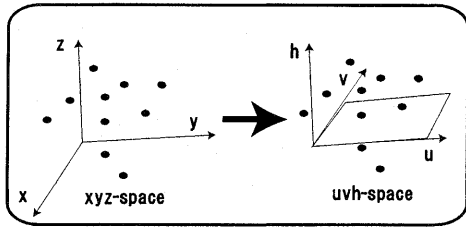


図 2: u-v-h 座標系への変換

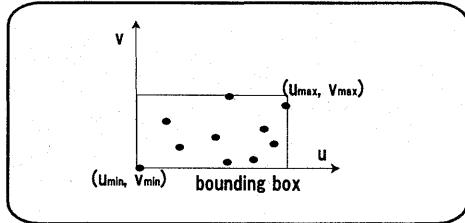


図 3: uv 平面における点群のバウンディングボックス

$$i = (u_i - u_{min}) / \text{gridwidth} \quad (7)$$

$$j = (v_i - v_{min}) / \text{gridwidth} \quad (8)$$

$$\text{grid}[i][j] = h_i \quad (9)$$

である。ここで、 gridwidth は格子の幅、 u_{min} 、 v_{min} はそれぞれ、 uv 空間上における点群の u 方向と v 方向での最小値である。平面の算出方法や、格子幅の設定によってはひとつの格子セルに複数の点を投影する必要がある場合が生じるが、その場合は平均を取る。

2.4 格子セル値の補間

点群を格子セルに格納するさいのサンプリング漏れや、計測ノイズ等による穴を埋めるために、格子セル値にたいして補間を行う。ここでは、簡単のためデータ数 n_0 の 1 次元データの補間アルゴリズム [5] に関する概略を述べる。

この手法ではデータの解像度を変化させながら、補間を行う。元データがもっとも解像度が高く、解像度が高い順に $r = 0, 1, 2, 3, \dots$ とし、また、そのときのデータ数を $n_0, n_1, n_2, n_3, \dots$ とする。解像度が $r = i$ のデータのときのデータ数は $n_i = \frac{n_0}{2^i}$ となる。

まず、高解像度データの重みつき平均をとり、低解像度データを作成する。これを繰り返し、任意の解像

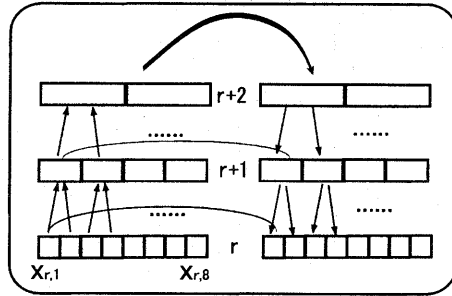


図 4: 補間アルゴリズム

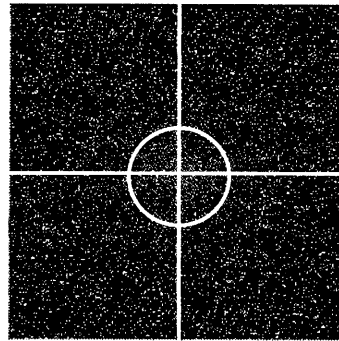


図 5: 周波数スペクトルの一例

度まで計算する。次に、作成した低解像度データの重みつき平均を用いて高解像度データを計算しなおす。この過程を $r = 0$ になるまで繰り返し、補間を行う (図 4)。

2.5 周波数解析

前節までで 2 次元格子に各値が格納されたので、それらの値に対して 2 次元高速フーリエ変換 [6] を施す。2 次元配列値の周波数スペクトルの一例を図 5 にしめす。スペクトルの中心付近が低周波成分であり、端に行くほど高周波成分となる。

次に、得られた周波数領域での値を操作し、逆変換を行うことで形状を操作する。平面に対する点の高さの変化情報を周波数領域で表現しているので、低周波成分は形状のおおまかな高低、高周波成分は形状の細かな変動部分を表していると考えられる。周波数領域での操作を行うために、以下の 2 種

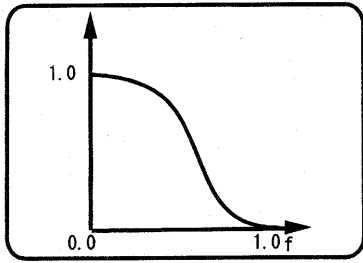


図 6: ガウスフィルタ

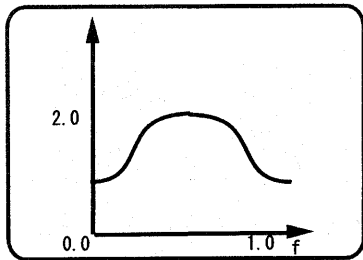


図 7: エンハンスメントフィルタ

類の周波数フィルタを用いた。

ガウスフィルタ

$$y = e^{-param \cdot x^2} \quad (10)$$

高周波成分を抑えるフィルタである図 6, param の値が大きいほど, 高周波成分を抑える度合いが大きい。

エンハンスメントフィルタ

$$y = e^{-param(x-0.5)^2} + 1.0 \quad (11)$$

図 7 のような周波数特性を持っている。凹凸を強調することを目的としたフィルタである。param の値が大きいほど, 低周波成分と高周波成分を抑える度合いが大きい。

3 実験と結果

提案手法を検証するために, 以下の実験を行った。

基準平面, バウンディングボックス生成 図 8 は, 入力された点群に対し基準平面を決定し, その平面上での点群のバウンディングボックスを作成したものである。

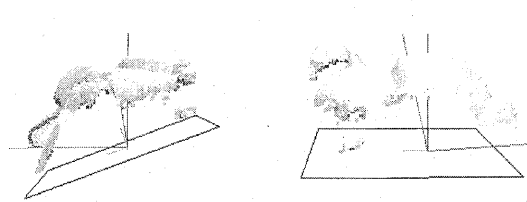


図 8: 点群に対する基準平面作成 (面は点群のバウンディングボックス)

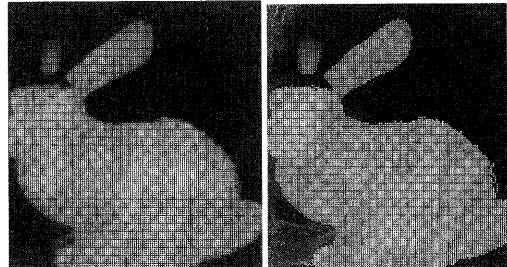


図 9: 補間を施した結果 (左が補間前, 右が補間後)

格子セル値補間 図 9 は, 格子セルにサンプリングした点群に対して補間を施した結果である。特に, 点密度の薄い物体淵付近の穴が埋められている様子がわかる。

周波数解析 図 10 は, 実験に使用したデータをポイントレンダリングしたものである。これに周波数領域でガウスフィルタを適用した結果が図 11, エンハンスメントフィルタをつけた結果が図 12 である。また, 図 13 は一部分の拡大図である。

エンハンスメントフィルタを適用した場合, 初期データに比べて凹凸が強調され, 陰影が強くなっているのがわかる。一方ガウスフィルタを適用した場合は, 凹凸がなくなり, 滑らかになっている。

また, ガウスフィルタにおいて式 (10) の param を変えた結果が図 14 である。基本的な形状を保持しつつ, 局所的な凹凸が取り除かれ, 滑らかになっている。

4 考察と今後の展望

基準平面作成とバウンディングボックス生成 本実験では計算の簡略化のため, 基準平面の法線を点群中の任意の三点からなる平面の法線の平均で求める方法をとった。計算の繰り返し回数を

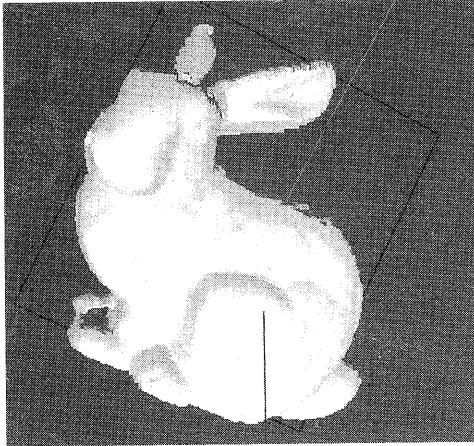


図 10: 元データをポイントレンダリングしたもの

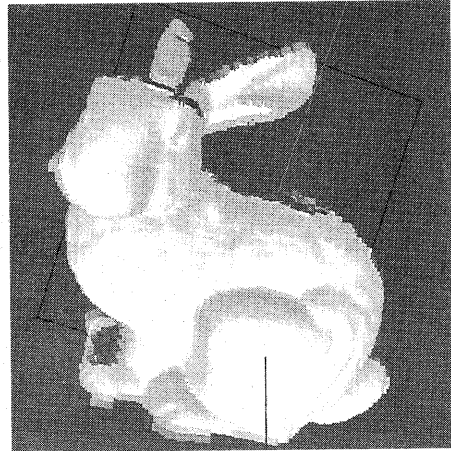


図 12: エンハンスメントフィルタを適用



図 11: ガウスフィルタを適用

多く (1000 回程度) すれば、最終的に得られる平面の法線はほぼ一定となる。

補間 補間によって、計測誤差や、格子セルへのサンプリングによる穴が埋まることが実験的に確かめられた。しかし、今回用いた補間は一種のスムージングであるので、補間によって周波数特性が変化していることに注意する必要がある。

周波数解析 高さの変化情報を周波数領域で操作することにより、形状を操作できた。高周波成分をカットすれば、点群のおおまかな形状を保存したまま局所的な凹凸を滑らかにすることができた。また、中周波成分を持ち上げることで、局所的な凹凸を強調することができた。ただし、補間の部



図 13: 左から、エンハンスメントフィルタ、元データ、ガウスフィルタを適用

分で述べたように、補間によって高周波成分がある程度失われていると考えられるので、より深い検討が必要である。

計算時間 本実験で用いたデータ (点数 40256) に、平面作成、格子セルへのサンプリング、補間、フーリエ変換、周波数フィルタ適用、フーリエ逆変換を行った場合の計算時間は約 250[ms]であった。使用した計算機は、Intel Celeron CPU 1066MHz 128MB メモリの PC である。

今回の実験では入力データは 2.5 次元であることを仮定していたが、最終的な目標は 3 次元空間上に分布する点群への拡張を目指している。具体的には計測装置複数視点から物体を計測し、統合されたデータが該当する。

そのために、

- 統合済み点群データの各点の法線推定。
 - 法線情報を元に、点群を複数の 2.5 次元領域に分割
 - 各領域を再統合
- を行う必要があると考えている。

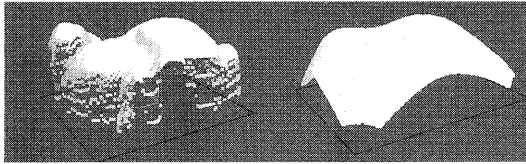
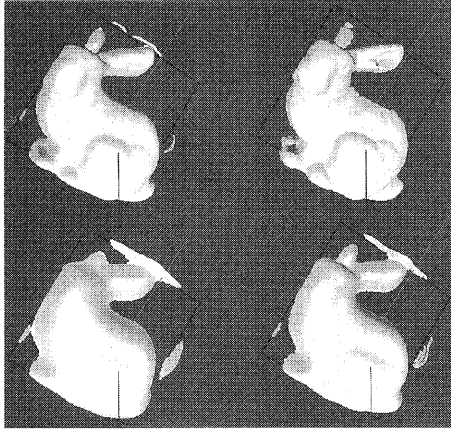


図 14: ガウスフィルタの係数を変えた場合

5 おわりに

位相情報が不明の点群は形状を変形させるなどの操作が困難であるという問題に対し,本研究では周波数領域での操作によるアプローチを試みた. するために,

- 入力点群を2次元の平面に投影し,点群の位置情報を平面からの高さ情報に変換
- 平面からの高さ情報を周波数領域に変換し,周波数領域にてフィルタ操作を行い,再び空間領域に戻す

ことによって,形状のおおまかな形を損なわずに局所的な凹凸を滑らかにしたり,凹凸を強調することができた.

今後は,入力点群が3次元に分布している場合に対してもこの手法を拡張していく予定である.

参考文献

- [1] Hugues Hoppe, Progressive Meshes, Siggraph 1996, Computer Graphics Proceedings, 1996.
- [2] Marc Alexa, Markus Gross, Mark Pauly, Hanspeter Pfister, Marc Stamminger, Matthias Zwicker ,

Point-Based Computer Graphics, Eurographics 2002 Tutorial Notes, 2002.

- [3] Szymon Rusinkiewicz, Marc Levoy, QSplat: A Multiresolution Point Rendering System for Large Meshes, Siggraph 2000, Computer Graphics Proceedings, 2000.
- [4] Mark Pauly, Markus Gross, Spectral Processing of Point-Sampled Geometry, Siggraph2001, Computer Graphics Proceedings, 2001.
- [5] S. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, and M. Cohen. The Lumigraph., Siggraph 1996, Computer Graphics Proceedings, 1996.
- [6] W.H.Press 他著, 丹慶勝市 他訳, Numerical Recipe in C(日本語版), 技術評論社, 1993.