

法線マップ直接編集による流線型形状曲面の設計

蓼沼周^{1,a)} 前川卓^{1,b)}

B-spline で表現された既存の曲面を編集して新たな曲面を設計する際、制御点を直接操作する方法が一般的である。しかし自動車、飛行機、船など流線型を有する曲面を編集するには、制御点を編集するより、法線を直接編集する方がよりよい品質の曲面を得やすいことが知られている。そこで、本研究では流線型を有する B-spline 曲面の面法線を局所的あるいは全体的に編集する対話システムを構築し、高品質な曲面を生成する手法を提案する。

Direct normal map editing for streamlined surface design

HIROSHI TADENUMA^{1,a)} TAKASHI MAEKAWA^{1,b)}

If the existing designs of streamlined B-spline/NURBS surfaces are available from previous designs, in whole or part, we are able to generate new designs through the direct editing of normal vectors of the input surface. In other words, we extract unit normal vectors at the grid points of the input B-spline/NURBS surface, and modify them to generate a new design by computing the height field function. In this paper, we introduce an interactive system to edit the normal vectors. Complex examples are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

1. はじめに

近年、CAD 技術の発達によりコンピュータによる 3 次元形状のモデリングが容易になった。一般に 3 次元形状は 3 角形メッシュや細分割曲面、B-spline/NURBS 曲面等で表現されている。特に、自由曲面においては B-spline/ NURBS 曲面を用いたモデリングが一般的である。曲面を編集する際には多数存在する制御点を一つ一つ手作業で調整していくこととなるが、ある程度熟練したデザイナーでないと意図する形状となるように制御点を操作することは難しい。そこで、本研究では法線に基づく曲面編集手法を提案する。

コンピュータビジョンの分野において照度差ステレオ法等により得られた法線情報から曲面形状を推定する手法は古くから研究されている。2015 年には山浦らにより、法線マップから 2.5 次元形状を一樣双二次 B-spline で復元する手法が提案された[1]。この手法では正則な曲面であることを仮定し、照度差ステレオ法から取得した法線を基に 2.5 次元復元を行っている。そこで本研究では山浦らの手法を一樣双 3 次 B-spline 曲面へ拡張した上で、法線に基づく新たな曲面編集手法を提案する。

2. 法線編集

法線編集は既存の曲面から面法線を算出し法線マップを作成したうえで行う。このとき入力曲面は、高さ関数で表される正則な曲面とする。また法線マップは通常、画像データのように法線ベクトルが画素ごとに与えられるため、4 境界曲線が xy 平面で長方形となることが望ましい。

法線の編集は法線マップの任意の領域に対して行う。そのため局所のおよび曲面全体の法線編集を行うことが可能となる。法線編集は、基本的に元の曲面の法線成分を編集することで行う。また、異なる形状を持つ法線マップの一部から法線情報を抽出し、貼り付けることでより複雑な法線編集を可能とする。

・2.1 法線編集手法

本手法では法線編集を行う際ある領域を指定し、領域内の法線に対して変更を加える。ここで、いくつかの編集手法を提案する。

(1) 法線ベクトルの z 成分の操作

ある領域内において一律に法線の z 成分を変更すると、領域内の傾きを変更することができる。球面の一部に

1 横浜国立大学
Yokohama National University
a) tadenuma-hiroshi-mb@ynu.jp
b) maekawa@ynu.ac.jp

対して z 方向を変更した例を図 1 に示す。

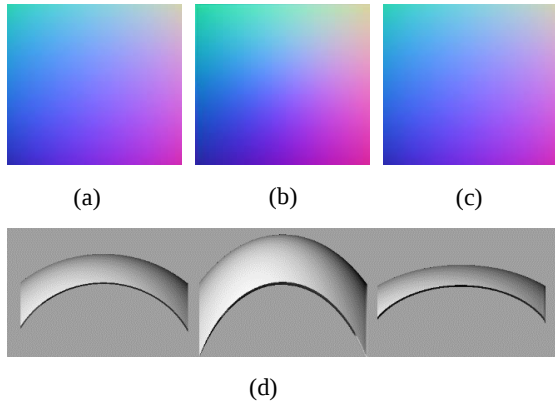


図 1 法線の z 成分編集結果：(a)元曲面，(b)法線の z 成分を小さくしたもの，(c)法線の z 成分を大きくしたもの，(d)B-spline 曲面

(2)法線ベクトル x,y 成分の操作

法線ベクトルの x,y 成分を変更することで法線ベクトルを編集する。図 2 は球の一部分の領域に対して y 成分を大きくさせたものと、符号を逆にした例である。 y 成分を大きくした場合では編集した領域が膨らみ、符号を逆にした部分では凸形状が凹形状になることがわかる。

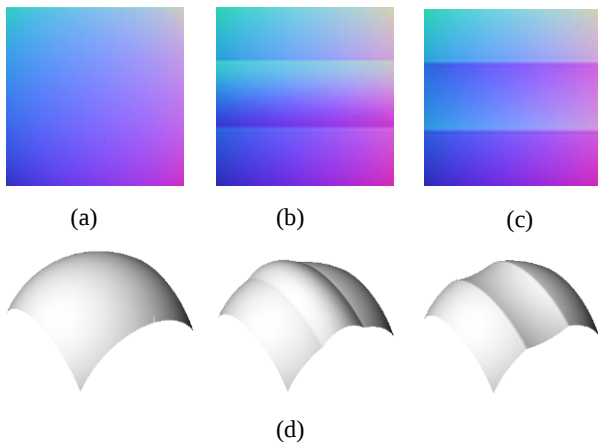


図 2 法線の y 成分編集結果：(a)基曲面，(b) y 成分を大きくしたもの，(c) y 成分の符号を逆にしたもの，(d) (a)，(b)，(c)の法線マップから生成された双三次 B-spline 曲面形状

(1) 法線マップの貼り付け

法線マップは法線ベクトルの各成分をピクセルごとに RGB で可視化したものであるため、画像の合成のように法線を合成することも可能となる[2]。以下に曲面に対して立体的な文字の法線マップを貼り付けた例を示す。

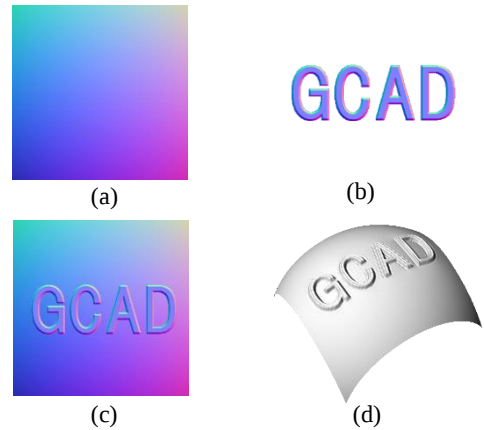


図 3 法線マップの貼り付け：(a)基の法線，(b)貼り付ける法線，(c)(a)に(b)を貼り付けた結果，(d)生成された双三次 B-spline 曲面形状

3. 法線マップからの曲面生成

3.1 法線マップからの形状復元手法

ここでは、法線マップから一様双三次 B-spline 曲面で復元する手法について説明する。B-spline 曲面は法線マップの 3×3 ピクセルに対し 1 パッチを対応させることで復元を行う。

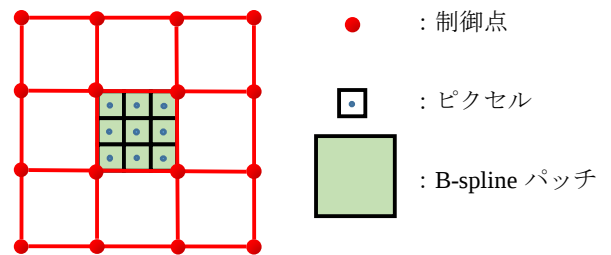


図 4 B-spline のパッチと法線の対応

このとき高さ関数を一様双三次 B-spline 曲面で表すと

$$z = h(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 h_{ij} N_i(u) N_j(v) \quad (1)$$

となる。ここで h_{ij} は制御点の z 座標であり $N_0(t)$, $N_1(t)$, $N_2(t)$, $N_3(t)$ は一様双三次 B-spline 曲面の基底関数である。このとき区間は法線マップの画素と対応させるため $[0,3]$ とする。このとき基底関数はそれぞれ以下の通りである。

$$\begin{aligned} N_0(t) &= \frac{1}{6} \left(1 - t + \frac{1}{3} t^2 - \frac{1}{27} t^3 \right) \\ N_1(t) &= \frac{1}{6} \left(4 - \frac{2}{3} t^2 + \frac{1}{9} t^3 \right) \\ N_2(t) &= \frac{1}{6} \left(1 + t + \frac{1}{3} t^2 - \frac{1}{9} t^3 \right) \\ N_3(t) &= \frac{1}{162} t^3 \end{aligned} \quad (2)$$

このとき、B-spline 曲面の面法線は

$$\mathbf{N}(u, v) = \mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v = (-h_u(u, v), -h_v(u, v), 1)^T \\ = \left(-\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 h_{ij} \dot{N}_i(u) N_j(v), -\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 h_{ij} N_i(u) \dot{N}_j(v), 1 \right)^T \quad (3)$$

となる。一方で法線ベクトルは

$$\mathbf{N} = (n_x, n_y, n_z)^T \quad (4)$$

であり各成分を z 成分で割ると ($n_z \neq 0$)

$$\hat{\mathbf{N}} = \begin{pmatrix} \frac{n_x}{n_z} & \frac{n_y}{n_z} & 1 \end{pmatrix}^T \quad (5)$$

となる. よって以下の 2 つの等式が成り立つ.

$$-\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 h_{ij} \dot{N}_i(u) \dot{N}_j(v) = \frac{n_x}{n_z} \quad (6)$$

$$-\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 h_{ij} N_i(u) \dot{N}_j(v) = \frac{n_y}{n_z} \quad (7)$$

(6), (7) 式を全ての法線において展開し, 曲面全体に対し線形システムを構築することで法線に基づいた曲面を生成する.

3.2 可積分性について

法線マップから曲面を復元する際に重要となるのが可積分性である. 法線編集を行う際, 編集前と編集後で部分的に大きく変更を加えると現実には存在しえない曲面の法線マップが生成されることがある. そこで, 復元する際にはこのことを考慮する必要がある.

3.3 編集領域を無視した復元

形状復元を行う際, 編集後の法線マップ全ピクセルに対し B-spline 曲面の制御点との関係式を用いて線形システムを構築している. そのため, 法線編集の結果, 現実には存在し得ない法線情報となる場合でも曲面を復元することは可能である. 図 6 は図 5 に示す平面の法線マップの一部を編集し B-spline 曲面で復元したものである. このとき, 曲面形状は図 6 に示すように編集していない領域部分も歪んでいる. また, 生成された曲面の法線マップは図 7 に示すようになり, 図 6(a) の法線マップとは大きく変化してしまっていることがわかる. これは, 可積分性が失われた法線マップを強制的に復元したためである.

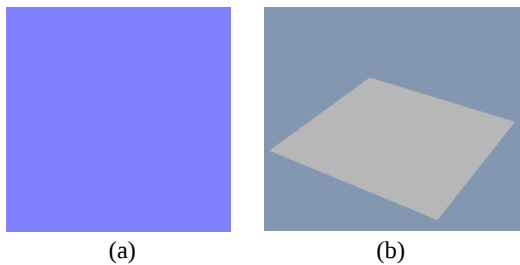


図 5 編集前の平面の法線マップと平面形状: (a) 平面の法線マップ, (b) 平面形状

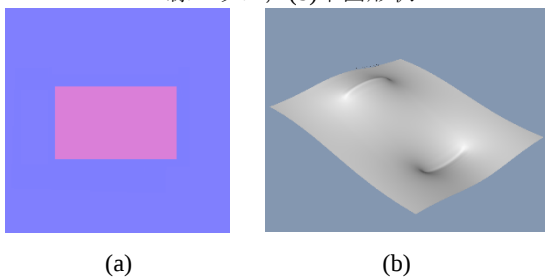


図 6 編集領域を無視した曲面生成: (a) 編集後法線マップ, (b) 生成された双三次 B-spline 曲面形状

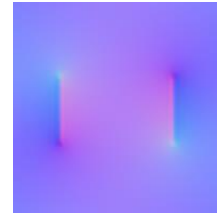


図 7 生成した曲面の法線マップ

3.4 編集領域を考慮した曲面生成

次に, 曲面の法線編集後, 編集した領域と編集していない領域を区別し, 曲面を生成する手法を示す. この手法は編集領域と, 未編集部分を区別して復元することで, 元の曲面形状を全く歪めることなく, 編集領域の曲面形状を変更することを可能とする. しかし, 法線の変更方法によっては領域の境界において大きな段差ができてしまうことがある. 図 8 は図 5 に示す平面の法線マップの一部を編集し B-spline 曲面を生成したものである. 編集した領域が勾配となっている. このとき, 編集領域の境界部分において段差ができていくことがわかる.

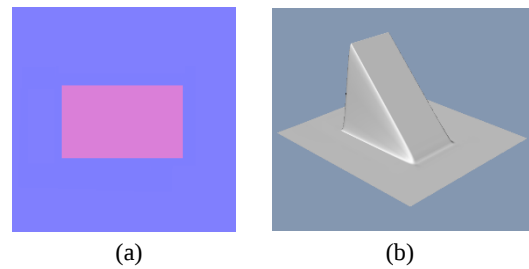


図 8 編集領域を考慮した曲面生成

4. 編集結果

以下に今回作成した法線エディタを用いた曲面の編集例を示す. 以下の曲面は, 図 9 に示す半球の一部の法線情報を編集することによって得られた曲面である.

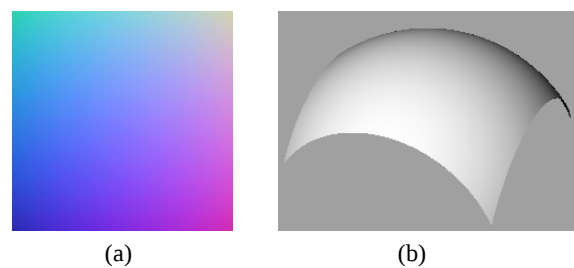


図 9 編集前の法線マップと曲面: (a) 編集前の法線マップ, (b) 生成された双三次 B-spline 曲面

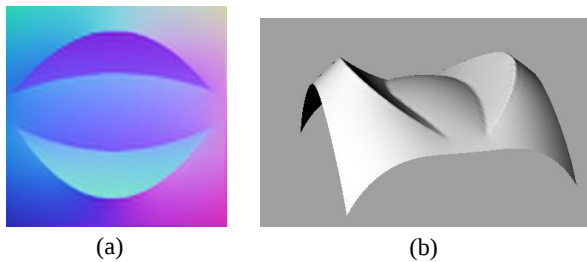


図 10 編集結果：(a)編集後法線マップ，
(b) 生成された双三次 B-spline 曲面

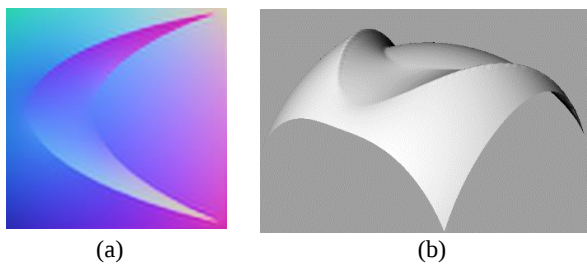


図 11 編集結果：(a)編集後法線マップ，
(b) 生成された双三次 B-spline 曲面

図 10，図 11 はある領域内の法線ベクトルの y 成分の符号を逆に変更したものである．球面の形状の形状から複雑な流線型を作り出すことができている．

5. 結論と今後の展望

本研究では曲面から法線マップを作成し，法線を編集することで曲面形状を変化させる手法を提案した．編集された法線マップから曲面を生成する際には一様双三次 B-spline 曲面を用いることで CAD システムに導入可能な曲面編集手法とした．これにより，従来では設計が難しかった形状の設計が可能となった．

しかし，生成された曲面の制御点数は一般に元の曲面に対し数が多いほか，曲面の 4 境界曲線が xy 平面において長方形であるという課題が残る．また，法線編集方法においても，編集方法によっては歪みの大きい曲面が生成されてしまうことがある．そこで今後はユーザが直感的に扱える法線編集手法，ならびに曲面の可積分性を保った法線の編集手法を考案していきたい．

参考文献

- [1] Yamaura, Y., Nanya, T., Imoto, H., & Maekawa, T. (2015). Shape reconstruction from a normal map in terms of uniform bi-quadratic B-spline surfaces. *Computer-Aided Design*, 63, 129-140.
- [2] Pereira, Thiago, and Luiz Velho. "RGBN image editing." *Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI)*, 2009 XXII Brazilian Symposium on. IEEE, 2009.