

曲面の流れを考慮したトリム曲面の推定手法

木下 勉¹⁾ (正会員) 松山 克胤²⁾ (正会員) 今野 晃市²⁾ (正会員)

1) 福井工業大学 2) 岩手大学大学院

An Estimation of Trimed Surface Using Directional Derivative

Tsutomu Kinoshita¹⁾(Member) Katsutugu Matsuyama²⁾(Member)

Kouichi Konno²⁾(Member)

1) Fukui University of Technology 2) Graduate School of Engineering, Iwate University

pxw05066@nifty.com, {matsuyama,konno} @eecs.iwate-u.ac.jp

アブストラクト

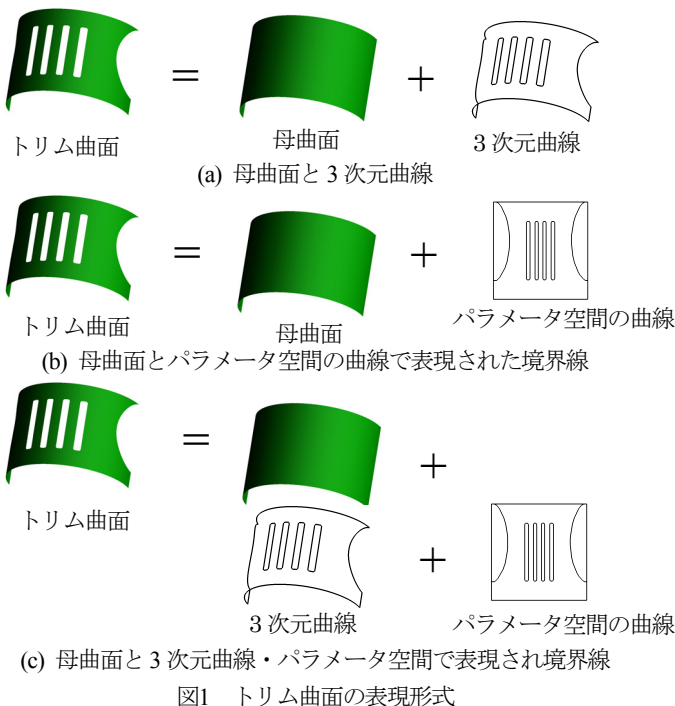
3次元CADシステムにおいて、トリム曲面の表現方法はCADシステム間で統一されていないため、異なるCADシステム間におけるデータ交換で、意図する形状として受け渡しされないことがある。そのため、受け取り側でトリム曲面データの修正が必要であるが、修正のために考慮すべき問題は多い。一つの解決方法としては、曲面情報を破棄し、境界線のみから曲面を生成することが有効な手段である。しかし、境界線のみから曲面を推定すると、元曲面の特徴量が少ないため、意図した形状を推定できないことがある。また、曲面の推定が可能であっても、推定される曲面の品質が低いといった問題がある。本論文では、境界線上における母曲面の u 、 v 方向の接ベクトルに着目し、境界線と母曲面の特徴量の両方を用いて、母曲面を推定する新たな手法について提案する。本手法では、まず境界線の始点、終点および曲線セグメント分割点に対し、推定元の母曲面の u 、 v 方向1次微分ベクトルをそれぞれ算出する。つぎに、 uv 空間における境界線の最大、最小点を通過点とし、通過点における母曲面の接ベクトルを、法線ベクトルとする投影面(平面)を定義する。さらに、各境界線において u 、 v 方向1次微分ベクトルを補間することで、オフセット方向を定義し、投影面に境界線をオフセットする。最後に、オフセットされた境界線から、閉領域を生成し、内部をB-spline曲面で内挿することで母曲面を生成する。

Abstract

In 3D CAD systems, it is not always possible to convert trimmed surfaces to the intended shapes upon data exchange between different CAD systems because the definition of trimmed surfaces is not unified among the CAD systems. If a shape can not import to a CAD system, the shape should be modified to suit to the system. But many problems to improve the shape arise. To solve the problems, it is effective to generate a new surface from the boundary curves and delete the invalid one. If insufficient information on the features of the original trimmed surface is applied, the intended surface cannot be estimated from the boundary curves. Even if surface can be estimated, the quality of the surface is low. We, therefore, focus on the tangent vectors of the original source surface in the U and V directions on the boundary curves of the trimed surface. In this paper, we present a new method to generate the new source surface by using the boundary curves and the features of the original source surface. In our method, at first, the first derivative vectors are calculated at the start and end points of each boundary curve and the division points on the curve segment of the source surface in the U and V directions. Next, the projection plane is defined whose origin is the maximum and minimum points of a boundary curve in the UV space and normal vector at the origin is the tangent vector of the original source surface. The offset direction is calculated by linear interpolation of the first derivative vectors in the U and V directions for each boundary curve, and the boundary curves are offset to the projection plane. Finally, a region enclosed by the offset four free-form curves is interpolated by a B-spline surface to create the new source surface.

1. はじめに

ダイレクトモデリング[1]を用いる3次元CADシステムにおいて、トリム曲面[2]と呼ばれる表現形式で表面を定義することが一般的である。トリム曲面は、曲面から形状として有効な部分を切り取った曲面表現である。元になる曲面を母曲面、有効な閉領域の境界を表す曲線を境界線と呼ぶ。一般にトリム曲面は、母曲面と境界線のペアで表現される。しかし、境界線は、3次元曲線として表現される場合や、母曲面のパラメータ空間で2次元の曲線で表現される場合、あるいはその両方で表現される場合があり、表現形式はCADシステムで統一されていない。図1はCADシステムごとに、異なることのあるトリム曲面の表現を、示した図である。図1(a)は、母曲面と3次元曲線の境界線で、トリム曲面を表現する例であり、図1(b)は、母曲面と母曲面のパラメータ空間の曲線で表現された境界線で、トリム曲面を表す例である。また、図1(c)は、母曲面と3次元曲線の境界線および、母曲面のパラメータ空間の曲線で表現された境界線の両方で、トリム曲面を表現する例である。

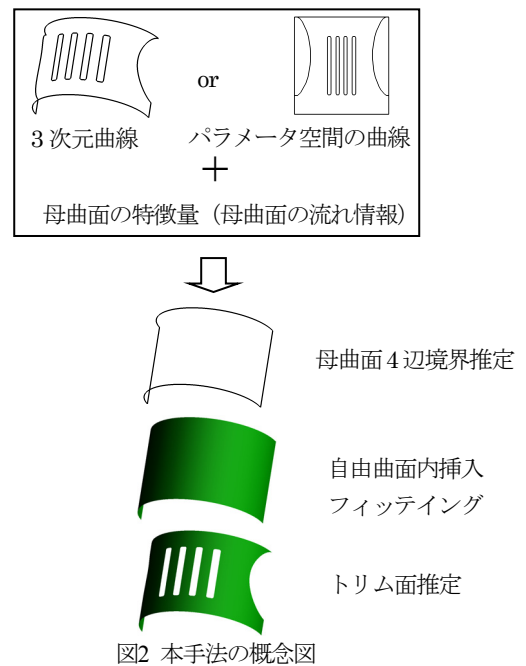


また、境界線は、母曲面上に許容誤差範囲内で乗っていることが要求される。しかし、許容誤差は、CADシステムで異なるため、異なるCADシステム間におけるデータ交換で、意図する形状として受け渡しされないことがある。そのため、受け取り側で、トリム曲面データの修正が必要であり、ダイレクトモデリングなどを利用して形状を変形・修正することが行われる。ダイレクトモデリングで、トリム曲面の修正を行う際、母曲面と境界線を別々に修正すると、曲面と曲線の整合性や接続している他の面との連続性などが崩れる。一つの解決方法として、曲面情報を破棄し、境界情報のみから曲面を生成したり、隣接曲面から境界線を再生成したりすることは有効な手段である。

しかし、境界線のみから曲面を推定する場合、元曲面の傾きなどの特徴量を境界線から推定することは困難なため、境界線の形状や母曲面上の位置に依存して、正しく推定できないことがある。

そこで、本論文では、トリム曲面の境界線上における母曲面の流れの方向を利用し、母曲面を推定する手法を提案する。図2は、本手法を示す概念図である。本手法において、母曲面の流れの方向とは、母曲面のアイソパラメトリック曲線の方向と定義する。アイソパラメトリック曲線とは、自由曲面の u 、 v パラメータのいずれか一方を固定することで算出される、自由曲面上の面上線の一種である。

本手法において、まずは、トリム曲面の境界線の端点と、曲線セグメントの端点における、母曲面のアイソパラメトリック曲線の接線方向を示す、母曲面の偏微分ベクトルを抽出する。つぎに、トリム曲面の境界線を、母曲面のアイソパラメトリック曲線の接線方向に沿ってオフセットした曲線を生成する。その後、オフセットされた曲線群から、推定する母曲面の4辺の境界線を求める。最後に、4辺の境界線をB-spline曲面で内挿し、トリム曲面の境界線の位置を利用して曲面フィッティングすることで、母曲面を推定する手法である。本手法により、トリム曲面の有効な閉領域を示す境界線の形状や、母曲面上の位置に依存しない、母曲面を算出することが可能である。



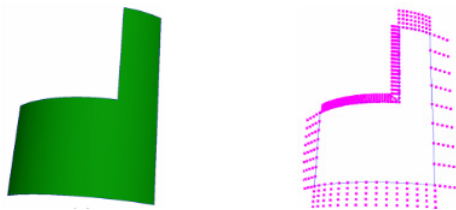
2. 関連研究

関連研究の詳細に入る前に、本論文で利用する用語を定義する。まず、境界箱とは、座標系の各軸に沿った辺のみを持ち、要素を囲むことが可能な最小の直方体である。また、境界横断導関数[5]とは、境界線を横切る方向の1階微分ベクトルを示す。

2.1 境界箱を利用する母曲面推定手法

N 辺の自由曲線で囲まれている閉領域に、B-spline曲面を当てはめる手法として、徳山らが提案した手法[3]がある。徳山らの手法は、まず、トリム曲面の境界線を囲む境界箱の側面に、トリム曲面の境界線における接平面を利用してB-spline曲面の境界線を定義する。次に、トリム境界線の外側に接平面に基づいた点群を発生し、B-spline曲面の境界線と点群を利用して、曲面を推定する手法である。徳山らの手法では、当てはめたい領域の外側に、サンプル点を生成する必要があるが、境界横断導関数を凹形状に適用すると、境界横断導関数の方向が、トリム境界線の内側に向かった方向に、求まることもある。

そこで、徳山らの手法における問題点に対応した、村木らの手法[1,4]がある。村木らの手法では、境界線上の点を境界線の外側に移動した点群を生成した後、移動した点群を補間するオフセット曲線を生成することで、領域の外側にサンプル点を生成するようにしたものである。図3(a)は村木らの提案手法により、生成された曲面である。また、図3(b)は、境界横断導関数の方向に延長した線分上に、サンプル点を生成したものである。曲面の外側に向かって、境界横断導関数が正しく求まっている。



(a) 凹形状を含むトリム曲面 (b) 境界線と点サンプル点
図3 凹形状への曲面内挿

2.2 境界箱を利用する母曲面推定手法の問題点

徳山らおよび村木らの手法は、境界線の形状から境界箱を定義し、さらに境界横断導関数を求め、投影面に投影する手法である。徳山らおよび村木らの手法における投影面とは、対象となる曲面を囲む、境界箱の4つの側面のことである。

具体例を、図4で示すと、青色の平面1、黄色の平面2、橙色の平面3、緑色の平面4が投影面ということなる。図4に示すように、投影面として境界箱の側面を利用するため、円筒のような曲面が与えられた場合には、境界箱の側面へ投影が不可能な境界線が現れ、母曲面の推定に失敗する。そのため、複雑な境界線からは、延長した線分同士が交差してしまうなど、意図した方向に投影ができない場合がある。更に、推定された曲面は、推定元の曲面とは曲面の uv 方向が異なる可能性があり、 uv 方向を利用したCADの機能などを利用したときに、結果が変わってしまう可能性がある。

図4は、円筒に対して、村木らの手法を適用した結果である。境界箱から定義される投影面を、青の平面1、黄色の平面2、橙色の平面3、緑の平面4と表し、境界横断導関数から求まる投影方向を、赤色で表現している。黄色の平面2と緑色の平面4へは投影が可能であるが、青色の平面1と橙色の平面3 に向かっては、赤い線と投影面の交点が求まらず、投影ができない様子を示し

ている。

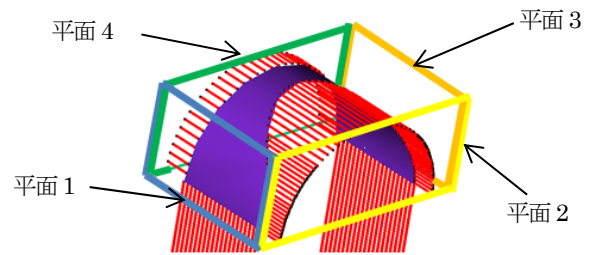


図4 村木らの手法では対応できない形状

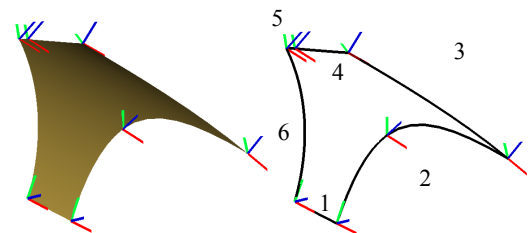
3. 提案手法

3.1 境界線の点における曲面の微分ベクトル

本手法においては、曲面の特徴量として、母曲面の流れを示す曲面の u 、 v 方向の偏微分ベクトルを利用する。ベジエ、B-spline、グレゴリに代表される自由曲面は、 u 、 v の2つのパラメータから定義され、 u 、 v の定義域において2次微分を計算できる。

母曲面の特徴量として、トリム面の境界線が端点となる位置で、偏微分ベクトルを求める。また、B-spline 曲線のように、複数のセグメントに区分できる境界線については、セグメントが分割される位置の偏微分ベクトルも求めておく。また、本手法では、 u 、 v 方向の1次偏微分ベクトルを正規化したものを用いることにする。

図5(a)は、境界線における偏微分ベクトルを図にしたものである。 u 方向微分ベクトルを赤、 v 方向微分ベクトルを緑、 u 微分ベクトルと v 微分ベクトルの外積により定義可能な曲面の法線ベクトルを、青で示している。トリム曲面の境界線は、図5(b)のように6本から構成されている。そのうち、2番の曲線が2セグメントで構成されているため、 u 、 v の微分ベクトルを計算する位置は、全部で7箇所である。



(a) トリム曲面と単位微分ベクトル (b) トリム面の境界線
図5 境界線上の偏微分ベクトル

本手法は、母曲面の流れる方向に境界線上の点を移動し、移動した点を補間して、推定する母面曲の4辺の境界線を求める手法である。まずは、トリム面の境界線上において、任意の位置を通る線分を定義する。線分方向ベクトルは、境界線の端点などで算出している u もしくは v 微分ベクトルを、補間した方向とする。 u もしくは v 微分ベクトルのどちらかを、補間の対象とするかの判断は、3.2.1節で算出する延長方向の判定に従うものとする。その後、トリム面の境界線上において、任意の位置を通る線分と、3.3節で算出する投影面との交点を求め、その交

点をそれぞれの平面上において補間する。つまり、境界線上の任意の点を、アイソパラメトリック曲線の向きに、移動した曲線を定義する。

図6は、図5(b)の境界線2に着目し、 u 微分ベクトルとともに拡大表示したものである。まず、延長する方向を求める位置を延長線の起点と定義し、延長線の起点を挟む2つの微分ベクトルを V_0, V_1 とする。尚、 V_0, V_1 を u 微分ベクトルとするか、もしくは v 微分ベクトルとするかの判断については、3.2節で述べる延長方向の設定に従うものとする。図5(b)の境界線2は、2つのセグメントから構成されるため、延長線の起点を挟む2つのベクトルの1つは、曲線の端点におけるベクトル V_0 であり、もう1つは、セグメントの端点における、ベクトル V_1 である。次に、微分ベクトルの位置における弧長パラメータをそれぞれ t_0, t_1 、延長線の起点における境界線の弧長パラメータをとすると、任意の延長線の起点における、延長方向を示すベクトル $N(t)$ は、式(1)のように、曲線の長さ按比例した線形補間を用いて計算される。

$$N(t) = (t - t_0)/(t_1 - t_0)V_1 + (t_1 - t)/(t_1 - t_0)V_0 \quad (1)$$

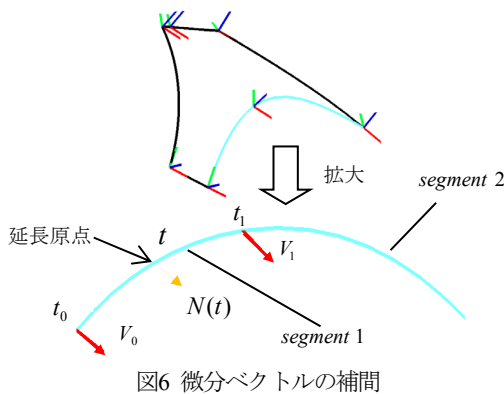


図6 微分ベクトルの補間

3.2 延長する曲線の選定と区間の設定

3.1節で述べた手法により、各境界線上の任意の位置における、延長方向ベクトル $N(t)$ を定義可能である。ここで、境界線上的の点を起点として、 $N(t)$ を方向ベクトルとする半直線を延長線と呼ぶことにする。複雑な図形の場合には、境界線上のある点を起点とした延長線と投影面と交点が、意図した位置に求まらない場合がある。本手法の目的は、母曲面のアイソパラメトリック曲線の方向を維持した曲面推定である。すなわち、母曲面のアイソパラメトリック曲線の方向を維持するために、母曲面の4辺となる境界線を、元形状に近い形状として推定したい。

具体的には、母曲面の境界線上からアイソパラメトリック曲線に沿って、最初に干渉するトリム境界線を利用して推定を行う。アイソパラメトリック曲線に沿って、最初に干渉するかどうかの判断は、 u, v それぞれの方向に対し、独立に判定されるため、境界線のある区間は、 u 方向のみ延長したり、 v 方向のみ延長したり、 u, v の両方で延長することがある。また、すべての方向で延長しない区間も存在する。

図7は、 u 方向微分ベクトルを、複数の境界線から延長した様子を示している。図7のように、延長線が境界線と交差する場合、母曲面の境界線か

ら、アイソパラメトリック曲線に沿って、最初に干渉する緑色の延長線から、母曲面の4辺境界線を推定する必要がある。つまり、境界線上の複数の位置から、同じアイソパラメトリック曲線に沿った延長線が存在する場合、母曲面の境界線から、アイソパラメトリック曲線に沿って、最初に干渉するトリム境界線を対象として、延長線を求める。

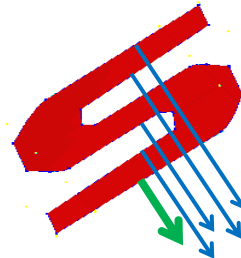
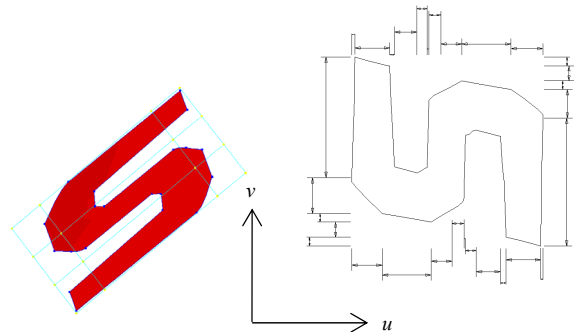


図7 u 方微分ベクトルの延長線

図7のような交差を防ぐための方法として、3.2.1項で、各曲線に対する、延長方向の定義方法について述べる。また、3次元空間における投影面を求めるために、3.2.2項でパラメトリック空間における投影面の通過点の定義方法を述べる。

図8(a)は、トリム曲面の境界線が、 u 方向のみ、もしくは v 方向のみの延長となる曲線を持つトリム曲面である。また、曲線の延長区間が、その曲線の全区間ではなく、一部の区間において延長する曲面の例でもある。図8(b)は、本節の手法により、パラメトリック空間において、トリム面の境界線ごとに延長する区間を u, v 方向に分けて定義したものである。



(a) 複雑な境界線をもつ曲面 (b) 境界線ごとの延長する区間

図8 区分的に延長可能な境界線を含むトリム曲面

3.2.1 パラメトリック空間における延長方向の判定

曲線上の任意の点から、母曲面のいずれの方向に向かって延長するかは、パラメトリック空間で判定することが有効である。なぜならば、パラメトリック空間における曲面の定義域の矩形 $[0,1] \times [0,1]$ は、母曲面の4辺に相当する。また、パラメトリック空間での、境界線上の任意の点における延長方向ベクトルを、以下で定義する $+v, -v, +u, -u$ の4つの方向ベクトルとすることによって、パラメトリック空間における境界線の任意の点を起点とする半直線が、定義域を示す矩形以外に干渉しなければ、その点において、該当方向に延長すると判断することが可能である。

以降、アルゴリズムを述べる。まず、説明で用いる方向ベクトルとして、 $+v, -v, +u, -u$ 方向のベクトルを以下のように定義する。

- + v 方向ベクトル $(u, v) = (0, 1)$
- v 方向ベクトル $(u, v) = (0, -1)$
- + u 方向ベクトル $(u, v) = (1, 0)$
- u 方向ベクトル $(u, v) = (-1, 0)$

Step 1: 母曲面と境界線から、パラメトリック空間曲線を、ポリラインで求める。

Step 2: 延長の評価対象となるポリラインについて、適当なセグメントに注目する。セグメントの始点 $\mathbf{p}_0(x_0, y_0)$ 終点 $\mathbf{p}_1(x_1, y_1)$ に対し、セグメントを1辺とする4辺形を、以下のように4方向で定義する。

- + v 方向: $\mathbf{p}_0 \mathbf{p}_1 (x_0, 1) (x_1, 1)$ で定義される4辺形
- v 方向: $\mathbf{p}_0 \mathbf{p}_1 (x_0, 0) (x_1, 0)$ で定義される4辺形
- + u 方向: $\mathbf{p}_0 \mathbf{p}_1 (1, y_0) (1, y_1)$ で定義される4辺形
- u 方向: $\mathbf{p}_0 \mathbf{p}_1 (0, y_0) (0, y_1)$ で定義される4辺形

図9は、パラメトリック空間における曲面の定義域を示す矩形を黒で示しており、赤色の線分で評価対象となるポリライン L を示している。また、マゼンタ色の線と赤で定義される4辺形 Rvp が、+ v 方向に延長するかどうかを評価するための4辺形である。同様に、緑色の4辺形 Rvn が- v 方向、橙色の4辺形 Rup が+ u 方向、青色の4辺形 Run が- u 方向を評価するための4辺形である。

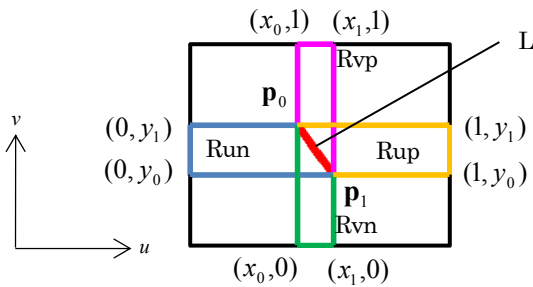


図9 延長可能方向の評価

Step 3: Step2で定義する4種類の4辺形と、全ポリラインとを内外判定計算し、干渉もしくは内包されるポリラインがある場合は、4辺形の内部に存在する部分だけを残して、ポリラインをカットする。図10(a)は、ポリラインと、延長するかどうかを評価する4辺形の関係を、示した図である。この図では、水色のポリラインは、延長するかどうかの評価対象となっているポリライン L を示しており、 L の第1セグメント L_0 を赤色で表示している。また、青で表示している4辺形 Run は、第1セグメントを含む Step2で定義した- u 方向の4辺形であり、緑で表示している4辺形 Rvn は- v 方向の4辺形である。図10(b)は L の第1セグメント L_0 と、図10(a)の2つの4辺形 Run, Rvn に含まれるポリラインの拡大図である。

Step 4: Step 3をすべてのポリラインの全セグメントに対して実行し、セグメントごとに4方向の4辺形に内包されるポリラインを求める。図10(a)では+ v 、+ u 方向の4辺形に内包されるポリラインは存在しないため、+ v 、+ u 方向に延長すると判断する。つぎに、それぞれの4辺形において、隠面除去の一般的な手法である、スキャンライン法を応用して、延長するかどうかを評価する。

具体的には、4辺形の評価対象セグメントの対辺をスクリーンとし、内包されるポリラインをスキャンライン法における走査面との交線と考えて、スクリーンから見える線を判断する。つまり、スクリーンから見える区間は、延長する区間と判断する。図10(b)において、スクリーンと考える辺は、 Ev および Eu である。 L_0 の一部がスクリーンから見える場合、見えている区間は、延長する区間と判断する。図10(b)においては、 Ev, Eu からは L_0 は全く見えないため、- u 、- v 方向には、延長しないと判断する。

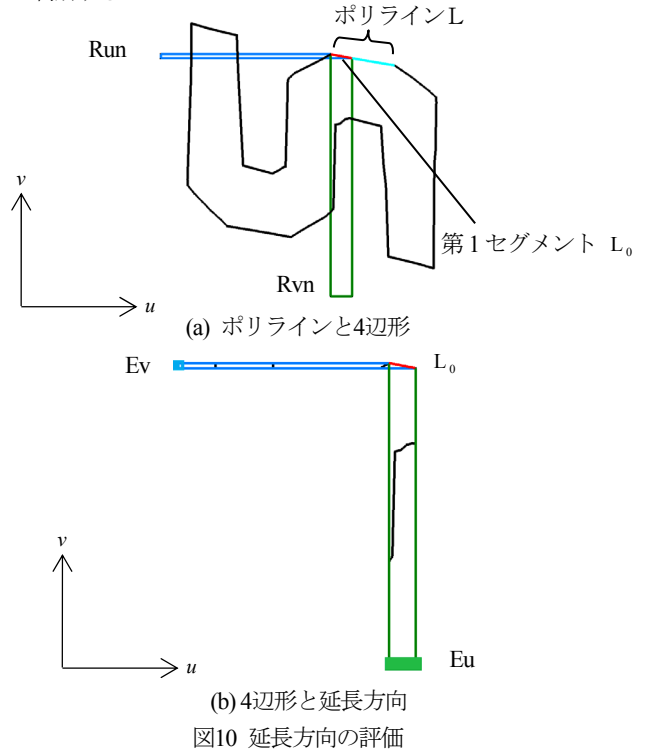


図10 延長方向の評価

図11は、3.1節で説明に用いた、曲面の境界線のパラメトリック空間における延長方向の判定を行ったイメージ図である。上部にある橙色の区間が、+ v 方向に延長する区間を示し、下部にある水色の区間が、- v 方向に延長する区間を示している。同様に、右のマゼンタ色の区間は、+ u 方向に延長する区間を示し、左の青色の区間が、- u 方向に延長する区間を示している。3.1節のデータの場合、すべての曲線の全区間で延長する。また、中央の下部から右上に向かう曲線 Cv などは、+ u 、- v の両方に延長する。

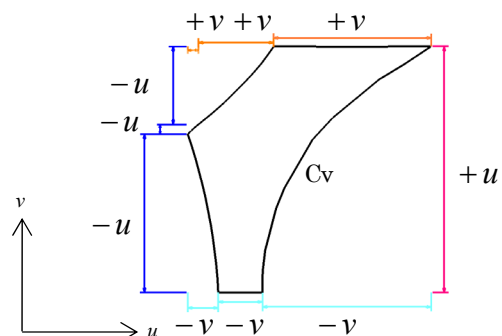


図11 パラメトリック空間における境界線と延長方向

3.2.2 パラメトリック空間における投影面の通過点

3.2.1項において、パラメトリック空間で、各曲線上の点を起点とする延長方向は、決定されている。本項では、3次元空間に投影面を定義するために、パラメトリック空間において、投影面の通過点を求める。投影面とは3次元空間において、境界線上の任意の点を、それぞれの延長線方向に投影する平面である。しかし、パラメトリック空間とは異なり、3次元空間では延長方向と投影面の法線は、曲線上のすべての位置で、必ずしも一致しない。また、投影面は $+u$ 、 $+v$ 、 $-u$ 、 $-v$ の4平面とする必要があるため、本手法ではパラメトリック空間における境界線の境界箱と境界線が接する位置を、平面の通過点として、4つ定義する。

具体例を、図12を用いて説明する。図12の Lun, Lvn, Lup, Lvp は、パラメトリック空間における、トリム面の境界線の境界箱を示している。マゼンタ色の線分 Lup は $+u$ 方向投影面の通過点を通り、同様に、橙色の線分 Lvp は $+v$ 方向投影面の通過点を通り、青色の線分 Lvn は $-u$ 方向投影面の通過点を通り、水色の線分 Lun は $-v$ 方向投影面の通過点を通っている。また、詳細は3.3節で述べるが、投影面の法線ベクトルは、投影面の通過点における u もしくは v 微分ベクトルとする。境界箱を示す各辺に接する点は、各辺に対し、最低でも1点は存在するはずであり、それぞれを通過点とすることで、4枚の平面が定義可能となる。もし、1辺上に複数の接点が存在した場合には、辺の中心に一番近い点を用いることにする。

3.3 投影面の定義

3.2.2項で述べた手法により、パラメトリック空間の境界箱と接するトリム曲面の境界線上の4点が、パラメトリック空間において、決定されている。この位置に対応する3次元座標を、母曲面の情報を用いて算出する。また、通過点となる位置は、パラメトリック空間において、境界線の上から選択されるため、対応する3次元位置も、必ず境界線上に存在する。そこで、パラメトリック空間における境界線の u 方向の最小値 u_{min} 、 u 方向の最大値 u_{max} 、 v 方向の最小値 v_{min} 、 v 方向の最大値 v_{max} とし、各平面の法線ベクトルを、式(1)を用いて以下のように決定する。

- v_{max} を取る頂点 頂点における $+v$ 方向微分ベクトル
- v_{min} を取る頂点 頂点における $-v$ 方向微分ベクトル
- u_{max} を取る頂点 頂点における $+u$ 方向微分ベクトル
- u_{min} を取る頂点 頂点における $-u$ 方向微分ベクトル

図12は、パラメトリック空間における境界線と、投影面を図示したものであり、黒い線はパラメトリック空間の定義域を示している。また、橙色の線分 Lvp は v_{max} により定義される平面、水色の線分 Lvn は v_{min} により定義される平面、マゼンタ色の線分 Lup は u_{max} により定義される平面、青色の線分 Lun は u_{min} により定義される平面を示している。このように投影面の法線を定義すると、平面の表現に必要なデータは、平面の通過点を示すための、 u もしくは v に対応する曲線のパラメータ t のみである。曲線のパラメータ t により、通過点位置は計算可能であり、法線ベクトルも上記の定義に従い計算可能である。図13(a)は、 u 方向の最大、最小に対応する投影面

を示しており、向かって左が u_{min} を取る点を通る点とし、その点における $-u$ 方向微分ベクトルを法線とする平面である。また、向かって右が u_{max} を取る点を通る点とし、その点における $+u$ 方向微分ベクトルを、法線とする平面である。図13(b)は同じく、 v_{min} 、 v_{max} に対応する投影面である。

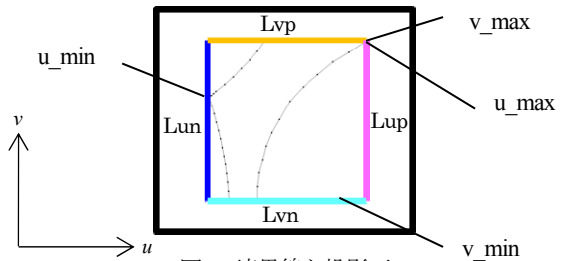
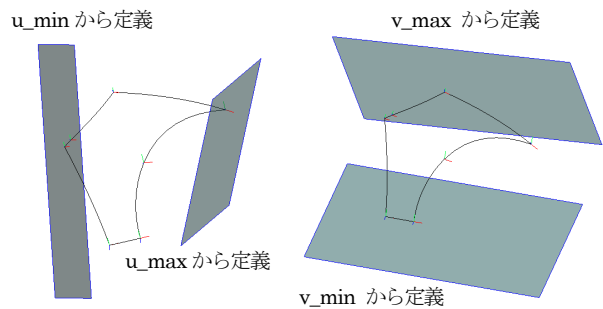


図12 境界線と投影面



(a) $\pm u$ 方向の投影面 (b) v 方向の投影面

図13 境界線と投影面

3.4 投影面への境界線の投影

3.2節までに述べた手法により、境界線上の任意の点から延長線は定義可能であり、また、延長区間および、投影面は既知である。しかし、境界線上の任意点について定義される延長線と、投影面の交点を投影点としても、投影された点列が母曲面から大きく離れていることがある。このような点列を補間して、母曲面の4辺としても、形状によっては、母曲面の位置が実際の位置とは異なり、トリム境界線と母曲面が離れてしまうことがある。そこで、本節では、本来の境界線と大きくずれのないような、延長位置から投影面までの延長形状の生成について述べる。

3.4.1 直線延長

境界線上の任意の点を、式(1)から求まる方向に投影し、投影面との交点を求める。ここで、境界線上における延長位置を、3.1節同様に延長線の起点と呼ぶと、最も短いトリム面の境界曲線の長さの20分の1の間隔で、延長線の起点を境界曲線上に配置する。

図14では、延長線の起点は赤でマーキングした円の中にある黒点、延長線は青い線分で表現している。また、延長線と投影面との交点が、母曲面と大きく離れていないか判定するためは、延長線と、推定元の母曲面の境界線との距離を算出する。つまり、延長線と母曲面の境界線の最短距離が、許容誤差以下であれば、延長線は適切とみなす。許容誤差は、母曲面の境界線4本のなかで、長さが最大の辺の3%~5%の長さに設定した。図15において、母曲面の境界線を赤い線で示し、延長線を青い線

分で表現しており、赤線と青線の最短距離で、延長線が適切かどうかを判定する。

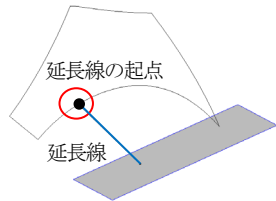


図 14 延長線の起点と延長線

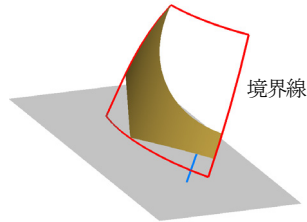
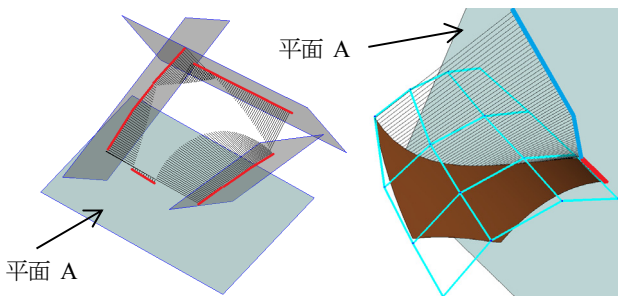


図 15 延長線と母曲面の境界線

図 16(a)は延長線と投影面、および投影点の様子を示しており、赤い線で示した場所は、平面への投影方法として、直線延長で問題なしと判断された投影点である。最終的には、直線延長で問題なしと判断された投影点を、最小二乗法により曲線補間するため、曲線の全区間において、直線延長が可能である必要はない。しかし、図 16(a)の手前の平面 A については、延長線と母曲面の境界線との最短距離が、許容誤差以内となる投影点の数がかなり少ない。

図 16(b)は、図 16(a)の平面 A に対し、延長線を平面との交点で切断したものと、母曲面の制御ポリゴンを同時に表示したものである。なお、茶色の曲面は推定元の曲面を示す。図 16(a)において手前の平面 A の上で、赤く表示されている投影点を、図 16(b)でも同様に赤く示してある。図 16(b)において、青で表示した点は、直線延長ができないと判断されている延長線と、投影面の交点である。青い投影点と、隣接する赤い投影点がつながる部位に着目すると、傾きが急激に変化している。また、青い点は、曲面の制御ポリゴンと比較しても、大きくずれており、このままでは母曲面の境界線を推定不可能である。



(a) 延長線と交点 (b) 延長線と母曲面の位置

図 16 直線による延長

3.4.2 補間点を用いた曲線定義と延長

直線延長で問題なしと判断された投影点が少ないため、トリ

ム曲面の境界線を囲む、4本の境界線の生成ができないことがある。本節では、3.2.1項の判断により、境界線が u 、 v の2方向とも延長が必要な曲線であり、 u 、 v のどちらか片方向の直線延長は成功し、もう片方向は失敗した場合に、成功した方向の延長線を用いて、失敗した方向に曲線を用いた延長を試みる手法について述べる。なお、境界線ごとの判断で、延長区間の80%以上において、投影点が許容誤差以内で求まる曲線は延長が成功と判断する。図 17は、 $+u$ 方向に直線延長が成功し、 $-v$ 方向に直線延長が失敗するデータであり、図 17(a)は、成功した $+u$ 方向の直線を青色で示している。

具体的な手法の概要は以下である。

Step1: 成功した方向の延長線の延長線の起点を通過点とし、成功した延長線の方向ベクトルを法線ベクトルとする平面を定義する。図 17(b)において黄色い線は、図 17(a)において青色で示す $+u$ 方向の直線延長線のひとつであり、Step1で定義した平面との関係を示している。

Step2: 処理対象となる境界線上に、延長線の起点を持つ、成功した延長線を対象に、Step1の平面と交点を求め最小二乗法により3次ベジェ曲線を生成する。投影面に届かない場合は、曲線を延長[6]する。図 17(b)の黒い線分は、図 17(a)の青い直線のなかで、図 17(b)の黄色い直線を法線ベクトルする平面と干渉する線を示している。また、図 17(c)の赤い曲線が、3次ベジェ曲線を示している。

Step3: Step2の3次ベジェ曲線と、推定元の母曲面の境界線の距離を、3.4.1項と同様に判断し、曲線延長が適切かを判断する。

以上の処理を、失敗した方向のすべての延長線の起点について実行することで、曲線延長による投影点を定義することが可能である。また、図 17(d)は、本節で述べる手法により、 $-v$ 方向に生成される延長曲線である。

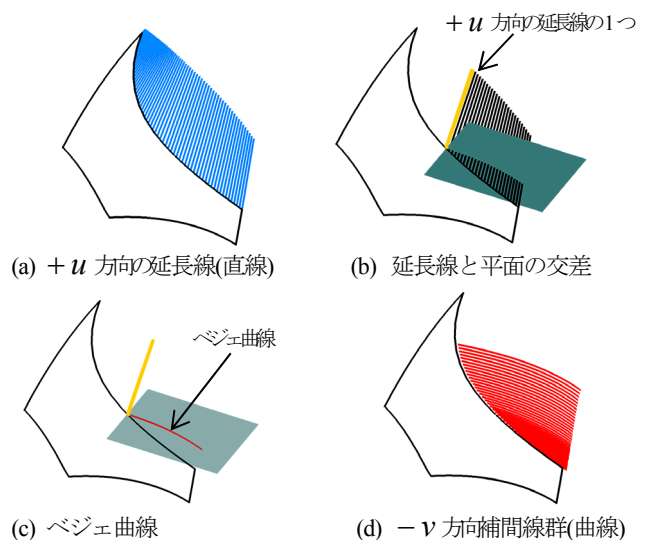


図 17 曲線延長による交点の算出

3.5 投影点からの曲線生成

3.4節にて4辺となる境界線を表わす点列が得られている。そこで、点列に対し最小二乗法を利用して、B-spline 曲線を生成する。なお、許容誤差を満たすまで、B-spline 曲線にノットの

挿入を行い、セグメント分割するため、生成される B-spline 曲線は、多くの場合は複数セグメントになる。

図 18(a)は 3.4 節で算出した点列を示しており、図 18(b)のマゼンタ色の曲線は、点列を最小二乗法にて補間した B-spline 曲線である。図 18(b)のように 4 本の B-spline 曲線は定義可能であるが、端点で非連続となることがある。そのため、B-spline 曲線の端点を接続する。具体的には、各境界線の端点において、曲線の方向ベクトルに沿って延長し、延長した曲線上で、それぞれの延長線上に存在する最近点の midpoint に端点を移動し、曲線全体を再度最小二乗法でフィッティングする。図 18(c)は 4 本の曲線の端点を移動し、閉曲線にした図である。

3.6 仮想曲面の定義と境界線を用いたフィッティング

3.5 節における境界線で囲まれる領域を、B-spline 曲面で内挿するための準備として、4 辺の閉曲線をそれぞれ 3 次ベジェ曲線で補間し、3 次ベジェ曲線を境界線とするグレゴリ曲面[7]を定義する。グレゴリ曲面に、トリム曲面の境界線上の点および、投影面に向かって延長した直線上の点を投影した点を初期値として与え、最小二乗法により B-spline 曲面として、母曲面を求める。図 18(d)はフィッティングにより求めた B-spline 曲面である。

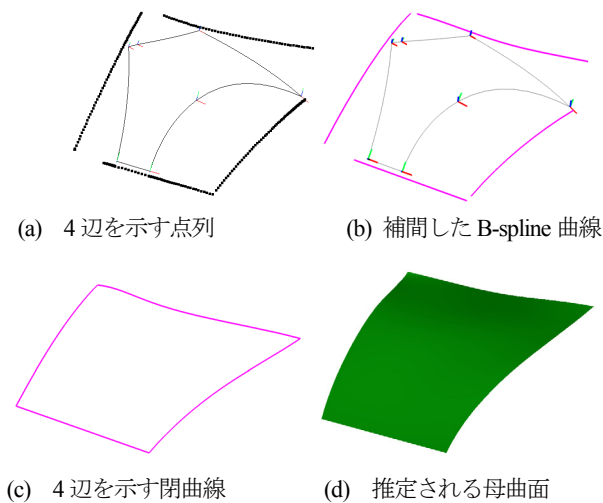


図 18 投影点の補間と曲面生成

4. 実験結果

本手法を複数のデータで実験した結果を示す。図 19(a)左図は、本手法の説明に利用したデータであり、右図が本手法の適用結果を示す。モデルの境界箱のサイズは幅 10.8mm、高さ 6.2mm、奥行き 7.0mm である。

1つ目の評価として、距離の比較を行った。最大距離位置は、図 19(a)右図の赤くマーキングした位置であり、0.07mm であった。また、平均距離は、0.02mm であった。最大距離を境界箱の最小辺となる 6.2mm と比較して 1.2% 程度の距離であり、十分な精度での推定ができたといえる。

2つ目の評価として、ガウス曲率の比較を行った。図 19(b)のガウス曲率の表示について、赤はガウス曲率が正の部分を示し、

緑はガウス曲率がゼロの部分を示し、青の部分はガウス曲率が負の部分を示している。なお、ガウス曲率の範囲を ± 0.003 で、カラーマップを生成した。図 19 のデータは線織面であり、図 19(b)の左図における対象形状の曲面が、全域でガウス曲率が 0 なのに対し、図 19(b)右図の推定結果の曲面は、境界線に近い一部の領域で負を示しているため、鞍形になっている部分が存在する。

3つ目の評価として、アイソパラメトリック曲線の比較を行った。図 19(c)左図は、対象形状の曲面のアイソパラメトリック曲線であり、右図は推定結果のアイソパラメトリック曲線を示す。図 19 のデータは、母曲面の対辺の距離の比が大きい境界をもつ曲面である。図 19(c)右図と左図を比較すると、アイソパラメトリック曲線の方向自体に大きな差はないが、後述する他の比較データよりは、ずれている。このように母曲面の対辺の距離の比が大きい境界をもつ曲面の推定は、今後の課題である。なお、図 19 のデータは、村木らの手法[1]では、母曲面の境界線の生成に失敗するため、推定不可能である。

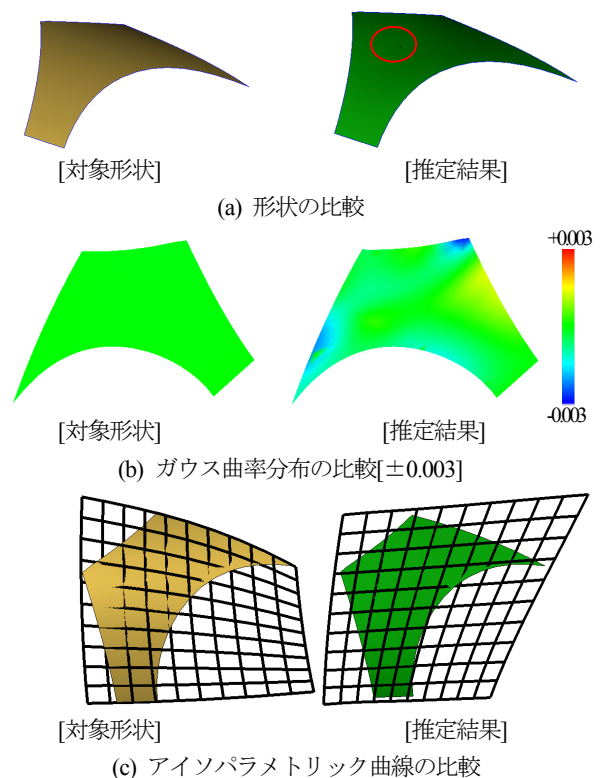
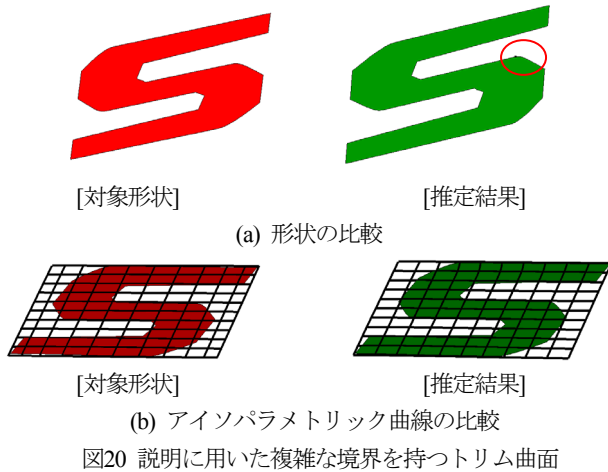


図 19 説明に用いたトリム曲面

次に、3章で説明に用いたデータについて、本手法を適用することで、境界線から母曲面を推定し、トリム曲面を推定できることを示す。モデルの境界箱のサイズは幅 73.5mm、高さ 9.0mm、奥行き 34.0mm である。

1つ目の評価として、距離の比較を行った。最大距離位置は、図 20(a)右図の赤くマーキングした位置であり、0.05mm であった。また、平均距離は、0.02mm であった。最大距離を境界箱の最小辺となる 9.0mm と比較して 0.6% 程度の距離であり、十分な精度での推定ができたといえる。

2つ目の評価として、アイソパラメトリック曲線の比較を行った。図20(c)左図は、対象形状の曲面のアイソパラメトリック曲線であり、右図は推定結果のアイソパラメトリック曲線を示す。 u 、 v の2方向とも、ほぼ対象形状の方向を維持していることが分かる。なお、ガウス曲率については、対象形状の曲面と、本手法においてほぼ一致した。



さらに、1章で述べたデータ交換の問題点に対する適用例として、トリム曲面の境界線と、母曲面の離れについての許容誤差がCADシステム間で異なり、トリム曲面が受け取り側のCADシステムに正しく伝わらないデータについて、本手法を適用することで境界線から母曲面を推定し、トリム曲面を推定できることを示す。図21(a)左図は、円筒を母曲面とするトリム曲面であり、商用の3次元 CADソフト Rhinoceros 3D では、母曲面とトリム面の境界線との距離が、母曲面の一部において指定の許容誤差を超えているため、境界線が母曲面上には存在しないとみなされる。そのため、トリム曲面としては変換されず、母曲面と境界線がそれぞれ別のデータとして変換されてしまうデータである。また、図21 (a)右図が本手法の適用結果である。このモデルの境界箱のサイズは幅30.0mm、高さ15.0mm、奥行き16.7mmである。

図19のデータと同様に、1つ目の評価として、距離の比較を行った。最大距離位置は、図21(a)右図において赤くマーキングした位置であり、0.15mmであった。また、平均距離は、0.04mmであった。最大距離を境界箱の最小辺となる 15.0mm と比較して1.0%程度の距離であり、十分な精度での推定ができたといえる。

2つ目の評価として、ガウス曲率の比較を行った。なお、図21(b)下図において、ガウス曲率の範囲を ± 0.003 、 ± 0.006 、 ± 0.03 と3種類のカラーマップを生成した。図21(b)上図の対象形状の曲面が全域でガウス曲率が0なのに対し、推定結果の曲面は、 ± 0.03 の範囲にガウス曲率は収まっているものの、一部の領域で正を示しているため、鉢形になっている部分が存在する。

3つ目の評価として、アイソパラメトリック曲線の比較を行った。図21(c)左図は、対象形状の曲面のアイソパラメトリック曲線であり、右図は推定結果のアイソパラメトリック曲線を示す。曲面の一部では、うねっているが、 u 、 v の方向は大きくずれ

てはない。なお、図21のデータも、村木らの手法[1]では、母曲面の境界線の生成に失敗するため、推定不可能である。

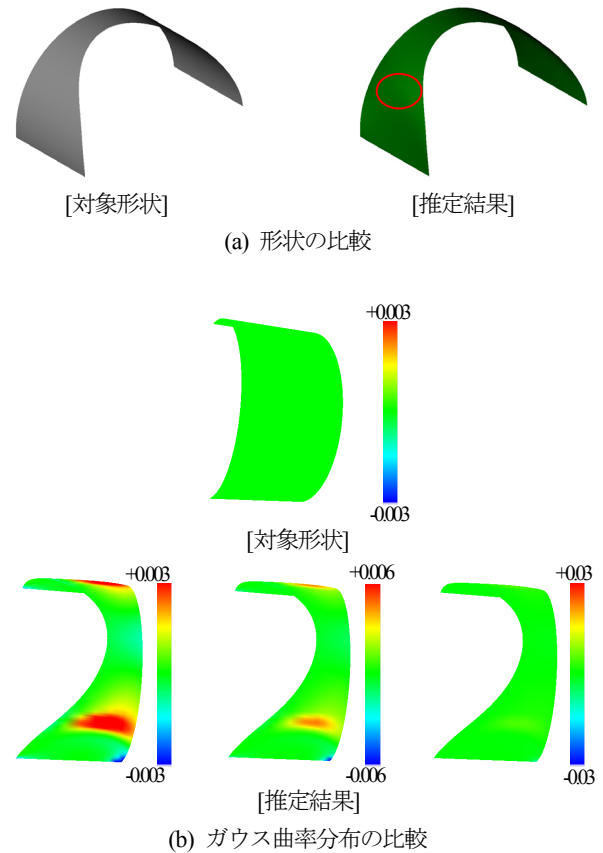
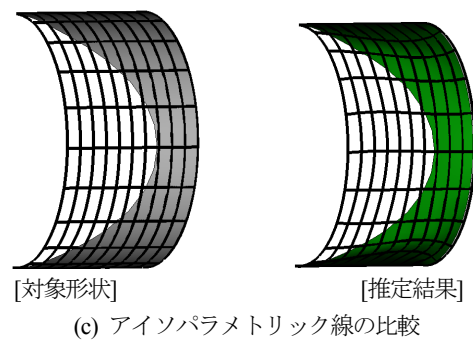


図21 トリム解除が発生するデータ



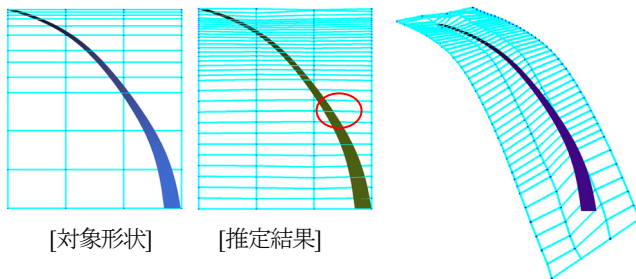
最後に、村木らの手法と、本手法の結果を比較した。図22(a)左図は、トリム曲面の境界線と、母曲面の境界線の位置が大きく離れている曲面である。このモデルの境界箱のサイズは幅188.5mm、高さ112.7mm、奥行き162.7mmである。

最大離れ位置は、図22(a)中央図の赤くマーキングした位置であり、0.04mmであった。また、平均離れ距離は、0.01mmであった。最大距離を境界箱の最小辺となる 112.7mmと比較して0.004%程度の距離であり、十分な精度での推定ができたといえる。一方、村木らの手法を用いて推定した曲面は、図22(a)右図である。最大距離は、0.35mm、平均距離は0.14mmであり、平均距離で14倍、最大距離で9倍程度、本手法にくらべて精度が低い。また、図22(a)はすべて同様の方向から形状を表示しているが、村木らの手法では、母曲面の方向が変わっている様子が

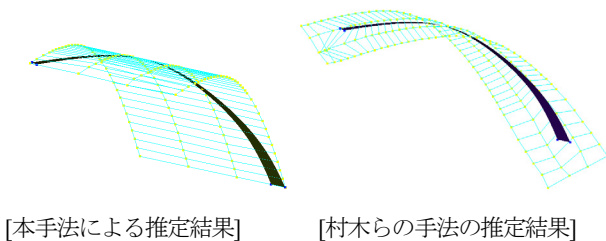
わかる。

図22(b)左図は、別の角度から、本手法の適用結果を表示した様子である。また、図22(b)右図は、村木らの手法の適用結果を表示した図である。村木らの手法により生成される曲面は、途中から大きくねじれていることがわかる。

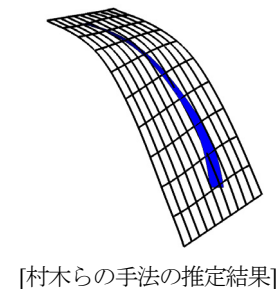
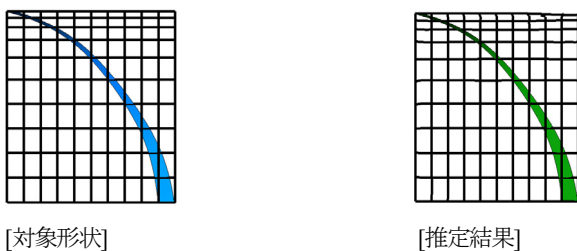
さらに、図22(c)左図は、対象形状の曲面のアイソパラメトリック曲線であり、右図は本手法により推定された曲面のアイソパラメトリック曲線を示し、下図は村木らの手法により推定された曲面のアイソパラメトリック曲線を示す。対象形状の曲面と、本手法の適用結果はほぼ一致している。一方、村木らの手法の結果は、アイソパラメトリック曲線の方向が、対象形状の曲面とは異なっている様子が示されている。なお、ガウス曲率については、対象形状の曲面と、本手法および村木らの手法においてほぼ一致した。



(a) 形状の比較1



(b) 形状の比較2



(c) アイソパラメトリック線の比較

図22 村木らの手法との比較

5. まとめと今後の展開

本論文では、曲面の流れを考慮した曲面推定のために、曲面の u 、 v 方向の偏微分ベクトルを用い、トリム面の境界線上の点を、曲面の流れに沿って、投影面に投影することで、投影面上に母曲面推定のための点列を算出した。さらに、投影された点列を補間した曲線を算出し、補間曲線を境界線とする曲面を求め、曲面をサンプル点にフィッティングすることで、母曲面を求める手法について述べた。今後は、曲率を含めた品質の向上や、さらなる延長方法の検討および、データ圧縮に向けたデータ構造についても検討する。

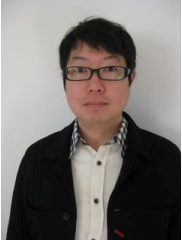
本研究の検証には、ラティス・テクノロジー社のXVL Kernel およびXVL Assistantを利用している。

なお、本論文は NICOGRAPH2014 で発表した論文[8] に加筆したものである。論文査読者からの有益なご指摘に深謝する。

参考文献

- [1] Y.Muraki, K.Konno, Y.Tokuyama, Curve Mesh Modeling Method of Trimmed Surfaces for Direct Modeling, The Journal of Art and Science, Vol.10, No.1, pp.12-27, 2011.
- [2] G. Farin, Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design A Practical Guide, Academic Press, 1996.
- [3] Y. Tokuyama, K. Konno, Filling N-sided Region with a B-spline Surface, Information Processing, Society of Japan, Vol.43, No.10, pp.3209-3218, 2002.
- [4] Y. Muraki, K. Konno, Y. Tokuyama, A STUDY OF SUBDIVISION METHOD TO THREE AND FIVE SIDED FACES BASED ON REGULAR POLYGON, Proc. of IWAIT 2009, 2009.
- [5] 今野 晃市, 3次元形状処理入門, サイエンス社, 2003.
- [6] S. Shetty, PR White, Curvature-continuous extensions for rational B-spline curves and surfaces. Computer-Aided Design, Vol. 23, No.7, pp. 484-491, 1991.
- [7] H.Chiyokura and F.Kimura, Design of Solids with Free-form Surfaces, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 83), Vol. 17, No 3, pp. 289-298, 1983.
- [8] 木下 勉, 松山 克胤, 今野 晃市, 曲面の流れを考慮したトリム曲面の推定手法, NICOGRAPH 2014, pp.25-32, 2014.

木下 勉



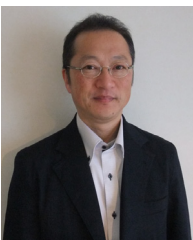
1993年東京理科大学理学数学科卒業。2013年、岩手大学大学院工学研究科博士後期課程修了。トヨタ自動車(株)、ラティス・テクノロジー(株)を経て、現在、福井工業大学環境情報学部准教授。3次元形状研究に興味を持つ。博士(工学)。芸術科学会会員。

松山 克胤



1999年、岩手大学工学部情報工学科卒業。2001年、同大学院工学研究科博士前期課程修了。2005年、同大学院工学研究科博士後期課程修了。公立ほこだて未来大学を経て、現在、岩手大学工学部助教。CG、情報可視化、インタラクティブシステムなどの研究に従事。博士(工学)

今野 晃市



1985年、筑波大学第三学群情報学類卒業。(株)リコーソフトウェア研究所、ラティス・テクノロジー(株)を経て、現在、岩手大学工学部教授。CG、CAD、VR、遺物計測などの研究に従事。著書に「3次元形状処理入門」がある。博士(工学)。芸術科学会、映像情報メディア学会、日本情報考古学会、情報処理学会、IEEEの会員。