

進化的計算による自由曲面の領域分割

Curved Surface Segmentation Using Evolutionary Computation

柘井大亮*¹
MASUI Daisuke

島田哲夫*²
SHIMDA Tetsuo

*¹ 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

*² 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

This paper describes a computer oriented method to transform an arbitrary region on a curved surface into a flattened form. The strategy is based upon a modification of the truss structure problem of the Finite Element Method. And the use of curved surface segmentation raises transformation accuracy of large curvature curved surface. A pattern shell is presented as a typical application, which has traditionally been used by footwear pattern engineers.

1. はじめに

本研究では自由曲面を平面上に展開する問題を扱う。一般に自由曲面は、変形することなく平面展開することが不可能なため、近似的手法をとらざるを得ない。自由曲面をメッシュ分割し、トラス構造体とみなして平面展開を行う手法では、切込みを必要最低限に抑え、許容範囲内のひずみを考慮しながら展開形状を作成する。しかし、曲率の大きな曲面の展開には複数領域に分割し、領域ごとに展開を行うことで展開精度を向上させる必要がある。

2. トラスによる平面展開と再構成

2.1 トラス有限要素法

有限要素法では力を f 、要素の体積を V とするとき、以下の方程式を解くことによって変位 d を求めることができる。

$$\{f\} = V[B]^T [D][B]\{d\} \quad (1)$$

$[B]$ とは要素の形状やひずみの分布の仮定などによって決まるマトリクスで、 $[D]$ とは素材定数 (各種弾性係数, ポアソン比) で構成される。トラスにおける $[B]$ は要素の水平方向の傾き q と長さ l から、

$$[B] = \frac{1}{l} \begin{bmatrix} -\cos q & -\sin q & \cos q & \sin q \end{bmatrix} \quad (2)$$

となり、 $[D]$ はひずみが均一であるため、ヤング係数 E となる。

2.2 トラスによる平面展開

平面展開の手順を以下に示す。まず曲面を三角形メッシュに分割し、トラス構造体とみなす。次にメッシュ分割を行った曲面と位相的に等しい平面形状 (初期形状) を想定する。次に等価力 f_i を算出し節点力 f を求める。次に平面形状の要素剛性マトリクスを算出し、変位 u を求め、さらに全体系に組み立てることにより、新たな変位 U を求める。この一連の操作を繰り返すことにより得られた最終形状を平面展開形状とする。

等価力 f_i は次のようにして求める。トラスにおけるひずみ e と応力 s の関係は、トラスにおけるひずみの分布は一樣であるため、要素の長さを l 、変形後の長さを l' 、ヤング係数を E とおくと、

$$\{s\} = [D] \cdot \{e\} = E \frac{l' - l}{l} \quad (3)$$

と表すことができる。 l, l' をそれぞれ平面上の要素の長さ l' 、曲面上の要素の長さ l と仮定し、応力 s を等価力 f_i とする。よって、

$$\{f_i\} = E \cdot \frac{L - L'}{L'} \quad (4)$$

となる。本研究では、より計算しやすくするため、ヤング係数 E を 1 と仮定した。

2.3 平面展開形状の再構成

自由曲面の三次元トラス化を行い、次に自由曲面と平面展開形状の対応する要素の長さの比より等価力を算出し、曲面の節点力として組み込む。さらに全体系に組み込むことで節点力を算出し、三次元トラス有限要素法に当てはめることで、ひずみを求める。求められたひずみの大きさを以下の式を用いて定める。

$$EPS = \sqrt{e \cdot e} \quad (5)$$

シミュレーションでは節点数 330 個の靴曲面を用いた。結果は以下の図 1, 2 のようになった。踵とつま先にひずみの大きな部位が集中していることが分かる。踵とつま先のひずみが大きい理由として、しわ (展開における近似誤差) が発生したためと考えられる。

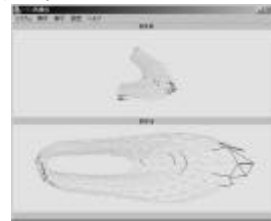


図1 ひずみが大きい部分

($EPS = 0.00079$)

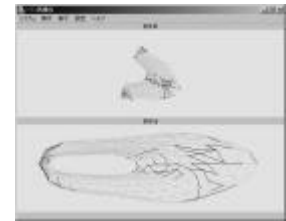


図2 ひずみが大きい部分

($0.00079 > EPS = 0.000263$)

3. 領域分割

2.3 の再構成を行った際のひずみの状態をあらわした図 1, 2 から分かるように、トラスによる平面展開では、展開精度が低い部位が存在する。この問題点を解決するために、本研究では最適な領域分割を行う方法を提案する。三次元物体の展開面を作成するのに領域分割を行うのは一般的な手法で、主にアパレルにおけるパターンメイキングや自動車シート設計などで用

いられており、この手法を用いることで精度の高い展開面を作成できると考えられる。

本研究では、固定した領域数において最もひずみの少なくなる領域分割を行い、その領域ごとの展開面を作成する。領域分割の方法として以下の方法を用いる。

3.1 要素結合による領域分割

三次元メッシュ曲面において、隣接する要素間の傾きの差に着目した手法である。傾きの差が小さいほどひずみなく平面に展開し易いと考え、それらのメッシュ要素を結合していくことで領域分割を行う。手順を以下に示す。

- (1) 三次元メッシュ曲面の要素に、端から順にナンバリング。
- (2) 要素番号が小さいものから順に走査し、隣接要素との傾きの差を求め、同一領域とするかどうかの判断を行う。比較を行うのは隣接要素のうち要素番号が大きいものとのみで、ある一定値以下の傾きの差である場合に同一領域とする。

- (3) (2)の操作で生成された領域について、隣接する領域同士の傾きの差により統合を行う。

領域の傾きは、その領域に属するメッシュ要素の傾きの平均値とする。以下に傾きの平均を求める式を示す。

$$\left(\overline{x_k}, \overline{y_k}, \overline{z_k} \right) = \frac{1}{n_k} \left(\sum_{i=1}^{n_k} \overline{x_i}, \sum_{i=1}^{n_k} \overline{y_i}, \sum_{i=1}^{n_k} \overline{z_i} \right) \quad (6)$$

$\overline{x_k}, \overline{y_k}, \overline{z_k}$: k 番目の領域の傾きの平均

n_k : k 番目の領域の要素数

- (2)と同様により小さな要素番号を含む領域から操作していく、傾きの差により領域を統合するかどうかの判断を行う。統合の際の傾きの差の閾値を徐々に大きくし、領域を統合する。

以上の手順で領域分割した結果を以下の図3,4に示す。

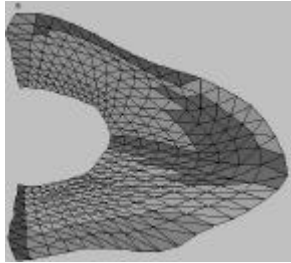


図3 領域数9

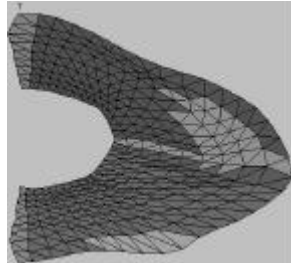


図4 領域数7

この手法適用の結果、踵とつま先を中心に領域の分割線があらわれた。2.3の再構成の図でひずみが大きいとされる部分で領域が分断されていることがわかる。

3.2 k 平均法を用いた領域分割

三次元メッシュ曲面の各要素を点データととらえ、全点データを、 k 平均法クラスタリングを用いて領域分割を行う手法である。領域数4の場合の手順を以下に示す。

- (1) 三次元メッシュ曲面上の要素をランダムに4つ選択する。
- (2) (1)で選択された要素を各領域の中心とする。
- (3) 曲面上の全ての要素が、選択された4つの領域中心のうちどの領域に属するかを判定する。その際の評価式を以下に示す。評価値が最大になる領域に属することにする。

$$H = k_1 \frac{1}{\text{angle}} + k_2 \frac{1}{\text{distance}} \quad (7)$$

k_1, k_2 : 角度と距離それぞれの評価値の重み付け

angle : 領域中心との角度の差

distance : 領域中心との距離の差

- (4) (3)の領域分割結果における各領域の重心を求め、新しい領域中心とする。

- (5) (3),(4)の操作を繰り返し、領域中心の移動量が0もしくは限りなく0に近づいたところで、計算終了。

以上の手順で領域分割した結果を以下の図5,6に示す。

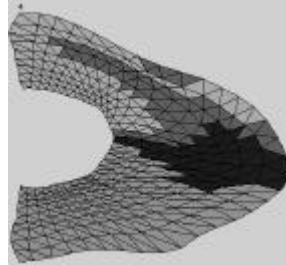


図5 領域数4

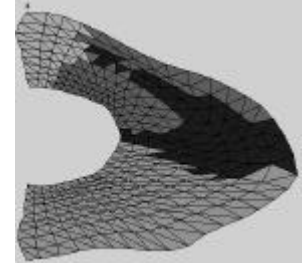


図6 領域数4

この手法適用の結果、つま先と靴内側の側面を中心に領域の分割線があらわれた。図5,6の結果の違いは、操作(1)における領域中心要素の選択方法によるものと思われる。

3.3 進化的計算を用いた領域分割

上記の2手法では各メッシュ要素の傾きに注目した領域分割であり、局所的な解の探索を行っている。そこで、進化的計算を用いることで大域的に最適な領域分割を探索する。

規則的に並んだメッシュを要素番号の小さなものから走査し、隣接するメッシュ要素のうち、傾きがほぼ一定であるものを同一領域とする。次にそれらの領域を進化的計算に基づいて統合。

- (1) 初期集団の生成 : (操作(1)での領域数) × 2bit の遺伝子を生じ、ランダムに0 or 1 をたてる。
- (2) 評価 : 遺伝子の先頭から2bit ごとに10進数表現に直し、0~3の数字が領域数個並ぶ数字列を作成する。0~3の数字に従い、それぞれの領域を操作する。
 - 0 のとき : その領域はどの領域も取り込まない。
 - 1 のとき : その領域と隣接する領域のうち、最も傾きの近いものをその領域に取り込む。
 - 2 のとき : その領域と隣接する領域のうち、2番目に傾きの近いものをその領域に取り込む。
 - 3 のとき : その領域と隣接する領域のうち、3番目に傾きの近いものをその領域に取り込む。

この操作でできた領域を、それぞれ有限要素法を用いて展開し、そのひずみエネルギーの和を評価値とする。

- (3) 選択 : 交叉
- (4) 評価値が一定値に達するまで(2),(3)の操作を繰り返す。
- (5) 最大評価値を得たときの領域分割結果をもとに(1)から(4)の操作を繰り返す。
- (6) 領域数が一定値になったところで(5)の繰り返し操作を終了し、最大評価値を得た領域分割の結果とする。

参考文献

- [窄口 '03] 窄口: 2003年度和歌山大学卒業論文。
- [島田 '88] 島田・多田・阪本・村上: 有限要素法による自由曲面の展開問題, 日本機械学会論文集(C 編)54 巻 498 号, 1988。
- [武久 '01] 武久・藤原: 遺伝的アルゴリズムを用いた濃淡画像の領域分割法, 長野県情報技術試験場研究報告 No.17, 2001。