

レーザ計測を用いた大型鋼板の曲率評価

電気通信大学 ○董 盈希, 千田 暁慧, 増田 宏

Curvature Evaluation of Large Steel Plates using Laser Scanning Data

The University of Electro-Communications: Yingxi Dong, Akisato Chida, Hiroshi Masuda

Large-scale structures, such as ships and storage tanks, consist of a lot of steel plates. Since steel plates are manufactured by bending flat plates, the estimation of their curvature is very important for improving quality and process time. We consider evaluating curvature of steel plates using large-scale point-clouds captured by laser scanners. In this research, we calculate the curvature of plates by fitting bi-cubic polynomial surfaces. Since efficiency and accuracy are highly required for supporting bending processes, we first discuss an efficient method for calculating curvature of plates, and then evaluate accuracy of local curvature.

Keyword: point-cloud, curvature, surface fitting, steel plate bending

1. はじめに

貯蔵タンクなどの大型構造物は、多数の曲面板を溶接することによって製造される。曲面板は、加工装置や人手で平面板を徐々に曲げながら所定の形状に近づけていくが、その際、加工精度が不十分であると、溶接の際の手間が増えるだけでなく、接合部での応力集中の原因となる。そのため、曲面板の精度管理は重要な課題である。

近年のレーザスキャナによる3次元計測技術の発達により、大型構造物の大規模点群を短時間で取得できるようになってきた。曲面板の形状判定が短時間で正確に行えるのであれば、板曲げの加工工程が支援できると考えられる。

板曲げにおいては、繰り返し曲げ加工を行うため、形状の一部に歪みが出るという問題がある。そのため、形状全体の大域的な曲率分布に加えて、局所的な曲率についても把握する必要がある。

そこで、本研究では、大規模点群の大域的な曲率と局所的な曲率を効率的に算出手法について検討する。

2. 曲率計算

曲面の曲率は、点群に曲面式を当てはめて計算した。曲率の計算では、ガウス曲率 K と平均曲率 H を、第一基本量 E, F, G と第二基本量 L, M, N に基づいて以下の式で算出した。

$$\begin{aligned} K &= (LN - M^2)/(EG - F^2) \\ H &= (EN - 2FM + GL)/2(EG - F^2) \end{aligned} \quad (1)$$

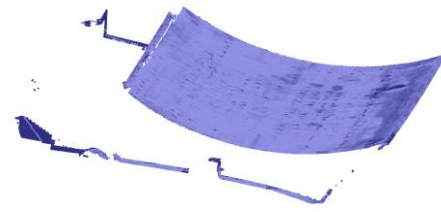
このとき、主曲率 κ は以下の式で算出できる。

$$\kappa = H \pm \sqrt{H^2 - K} \quad (2)$$

3. 大域的な曲率計算

平面板から徐々に曲げていく課程では、板全体の曲率を把握することが必要である。そこで、本研究では、大規模点群に B スプライン曲面をフィッティングすることを考える。

計測は Faro Focus 3D を用い、 0.036° ピッチで行った。板のサイズは、一辺が約 4m で、レーザ光源から板の中心部までの距離は約 6m である。図 1 に曲げ板を計測した点群、図 1(b) に点群から作成したメッシュを示す。中・長距離スキャナの計測では、格子状に並ん



(a) 点群



(b) メッシュ

図 1. 曲げ板の計測データ



(a) 元のメッシュ

(b) 平滑化メッシュ

(c) 差分

図 2. メッシュの平滑化

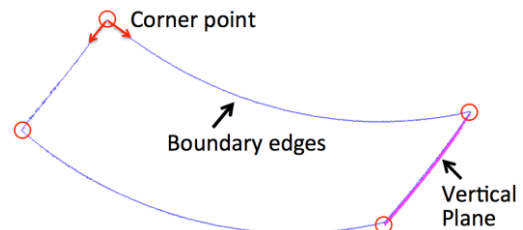


図 3. 境界抽出

だ点群が得られる。点群からメッシュへの変換は容易である。ここでは、点群からメッシュ生成を行って、最大の連結成分を曲げ板として抽出した。

曲率計算はノイズや異常値を受けやすいと考えられるので、前処理としてメッシュ平滑化を行った。メッシュを平滑化では、移動最小 2 乗法がよく知られているが、非線形最適化を行うために計算時間がか

かるため、作業工程の支援としては適切ではない。そこで、処理が高速な Taubin フィルタ¹⁾を用いることにした。図 2 に平滑化した結果を示す。Taubin フィルタは、三角形が小さいときは頂点座標の変化量が小さくなるため、高密度の点群から生成されたメッシュにおいては、曲面形状を大きく変えることはない。図 2(c) に平滑化の前後のメッシュを重ねて表示した図を示す。この図に示すように平滑化によって、大域的な曲面形状が保存されていることがわかる。

また、点群計測では、図 3 に示したように、板厚部分の点群も取得されているので、それらを除去する。板厚部分ほぼ垂直な平面となっているので、境界近くの点に対して RANSAC 法を適用して平面検出を行い、垂直に近い平面があれば平面上の点を除去する。

曲げ板を構成する点群 $\{p_k\}$ ($k=1, \dots, n$) が得られたら、これらに対して一般的な 3 次 B スプライン曲面を当てはめる。その計算式は、以下に示す通りである。 N_i は基底関数、 $Q_{i,j}$ は制御点である。

$$\sum_{k=1}^n \left\{ p_k - \sum_{i=0}^r \sum_{j=0}^s N_i(u_k) N_j(v_k) Q_{i,j} \right\}^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

点 p_k のパラメータ (u_k, v_k) が得られているときは、式(3)の最小化は疎行列の線形システムを解く問題に帰着する。疎な線形システムでは、制御点の個数が数万程度であれば、高速に解くことが出来る。

曲げ板は、元々が長方形の板なので、各点でのパラメータを計算においては、曲げ板の点群を境界が長方形になるように平面上に写像し、矩形内の座標をパラメータとして算出する。

そのためにまず、曲げ板の境界点とコーナ点を検出する。図 3 に示すように、境界上の点に対して近傍点の主成分分析を行ない、境界点の前後で最大主成分方向が直角に近い点をコーナ点として検出する。

4 個のコーナ点が検出できたら、コーナ点が長方形の頂点となるように、境界点を平面上の長方形の辺上に写像する。その際、境界上の各点は、端点からの長さによってパラメータ化する。境界以外の点については、歪みを最小化するように長方形内部に写像する。そのための写像としては、Harmonic Map や Laplacian 変形が知られている。いずれの場合も、境界以外の点を未知数とした疎な線形システムを解く必要がある。ここでは、Harmonic Map²⁾ を用いた。

我々の実験では、コレスキー分解を用いた疎行列計算により、50,000 点程度のパラメータ計算は 2 秒程度で算出できているが、大規模点群をそのまま計算すると非現実的な計算時間とメモリを必要とする。実用的には、点群を階層化する方法と間引く方法が考えられるが、ここでは平滑化メッシュされた曲面の曲率計算を行うことから、曲げ板上の点群を点間隔が約 2cm となるように 200×200 個程度に間引いて B スプラインを算出する。

3. 局所的な曲率の算出

3.1 点群の作成

次に局所的な曲率計算を考える。ここでは、局所的な領域に双 3 次曲面を当てはめて曲率を計算する。ここで、現実の点群においては、ノイズレベルやサンプリング間隔によって、算出される曲率の精度が影響を受けると考えられる。

そこで、本研究では、正解の分かっている仮想的な曲げ板に対して、光源から等角度で座標をサンプリングしてノイズを加えた点群を作成し、曲率計算の評価を行った。なお、我々の実験では、白色の平面にレーザをほぼ垂直に照射した場合で、計測誤差は約 0.8mm であっ

た。今回計測した曲げ板では、色は黒に近く、また照射角度も垂直ではないので、誤差はこれよりも大きい。

ここでは、以下の式で表される多項式曲面にフィッティングする。

$$Z(x, y) = (0.1 \sin(10x + \pi/2) - 5, y) \quad (4)$$

点群データは、実装のレーザスキャナと同様に、光源から緯度経度に沿ってレーザ光を照射し、曲面との交点を求めることで点群データを生成した。また、点群の密度は 360° 回転するごとに 5000 点を取得するように設定した。また、局所的な曲率を計算することから、板の幅 30cm、長さは 40cm に設定した。

3.2 局所的な曲率の計算

次に点群に対して、局所的に多項式曲面を当てはめる。点 (x_i, y_i, z_i) ($i=1, \dots, N$) が与えられたときを考える。ここでは、以下のように定義される曲面に当てはめて、曲率を計算した。

$$\begin{aligned} A &= (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10})^T \\ Z &= (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_{N-1}, Z_N)^T \\ X &= \begin{bmatrix} x_1^3, x_1^2 y_1, x_1^2, x_1 y_1^2, x_1 y_1, x_1, y_1^3, y_1^2, y_1, 1 \\ \vdots \\ x_N^3, x_N^2 y_N, x_N^2, \dots, y_N^2, y_N, 1 \end{bmatrix} \\ Z(x, y) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & a_2 & a_3 \\ 0 & a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 & a_{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y^3 \\ y^2 \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

このとき、曲面の係数は以下の式で計算される。

$$A = (X^T * X)^{-1} * X^T * Z \quad (6)$$

3.2 評価実験

ここでは、板の中心点から 3cm の範囲内の点を抽出し、式(6)を用いて曲面式を計算した。また、式(2)を用いて最大主曲率を計算した。その際、点群生成では、ノイズの標準偏差を 1mm と設定した。その結果、式(4)から計算される真の曲率との誤差は約 14% となった。

なお、必要な精度については、現実の曲げ板の歪みがどの程度のサイズであるかに依存する。その評価については今後の課題である。

4. まとめ

本研究では、曲げ板の曲率評価を行うために、大域的な曲率計算の効率化と局所的な曲率について検討した。大域的な曲率計算では、曲げ板上の点をパラメータ化し、B スプライン曲面で近似して曲率を計算した。局所的な曲率では、小さい範囲の点群を双 3 次多項式曲面に当てはめることで曲率を算出した。

今後は、実際の点群データを用いて、手法の評価を行う必要がある。大域的な曲率計算では、実用的な精度で曲率計算できる制御点の個数を検討する必要がある。また、局所的な曲率計算では、実際の点群の誤差はレーザ照射角度や反射強度に依存する。曲率が既知の規格部材などの計測点群によって計算精度を検証することが必要である。

-
- [1] G. Taubin: A signal processing approach to fair surface design, SIGGRAPH, 1995, 351-358.
 [2] M. Eck, et al.: Multiresolution analysis of arbitrary meshes, SIGGRAPH, 1995, 173-182.