

レーザ計測を用いた大型鋼板の工程の支援

電気通信大学 董 盈希, 千田 暁慧, 増田 宏

Support to process of Large Steel Plates using Laser Scanning Data

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

Curved steel plates, which are often used for ships and storage tanks, are manufactured from flat plates. The estimation of their curvature is very important for improving quality and reducing process time. Laser scanners are useful for densely measuring points on plates and estimating their preciseness. In this paper, we consider evaluating curvature of steel plates using large-scale point-clouds. One problem is to identify specific positions on plates while the plates are bending. We solve this problem by mapping a bended plate onto the original flat plate by using method of ABF++ and tracking the predetermined positions on the plate.

Keyword: point-cloud, 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。曲面板が設計通りの形状になったかどうかは、木型などを用いて逐次検証され、その結果に基づいて次に曲げる箇所を決めていく。このようなプロセスは経験や勘による部分が大きいため、作業工による精度のばらつきや、高齢化した熟練工の技術継承が大きな問題になっている。

本研究では、このような問題を3次元計測による点群データ処理によって支援することを目的とする。大型構造物は、全体で数十mになり、個々の板も数m四方に及ぶため、その計測には、広域を計測できるレーザスキャナが必要になる。近年では、広域の範囲を短時間かつ十分な精度で計測できるレーザスキャナが市販されており、こうしたスキャナで得られた点群を用いて、板曲げのプロセスをモニタリングできるのであれば、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、従来、所定の箇所を木型で計測することで精度を管理してきた。このプロセスを点群データによって代替するためには、平面から逐次変形していく板の所定位置を追跡していくことが必要となる。そこで、本研究では、そのための手法について検討する。

2. 提案手法の流れ

平面板から徐々に曲げていく課程では、次の要加工箇所を把握する必要がある。板曲げを行なうときには、あらかじめ、精度管理する箇所が決められている。典型的には、最終形状に基準ラインが設定されており、そのラインが規定通りの曲線になるように加工することが求められる。

本研究で提案する精度管理の流れを図1に示す。板曲げ加工が行なわれた後、レーザスキャナで板の3次元計測を行なう。得られた点群から、板の部分を抽出してメッシュモデルを作成する。次に、基準ラインの位置をメッシュモデル上で求め、規定の曲線からどの程度ずれているかを計算する。その結果を作業工に提示することで、次の加工作業に反映させる。

ここで問題になるのは、逐次加工されて変化していく板形状から、基準ラインを追跡することである。図2に基本的な考え方を示す。最初の平面板には、精度管理すべきラインが規定されているものとする。加工された板形状において、このラインを追跡する。本研究においては、板は加工される度にレーザスキャナで計測されるので、曲げ板のメッシュモデルの位相構造はその都度異なっている。そこで、すべての曲げ板のメッシュモデルを同一の

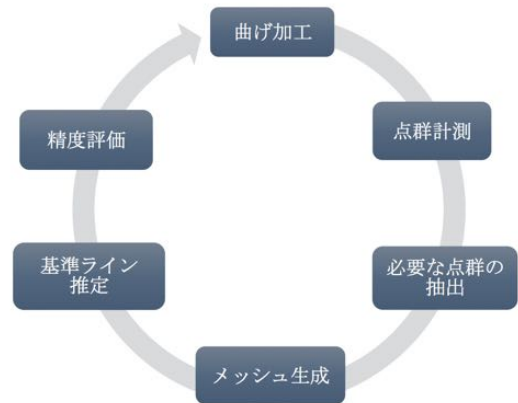


図1. 提案手法の流れ

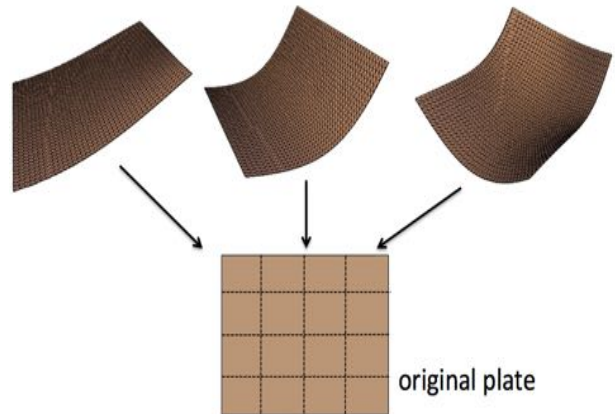


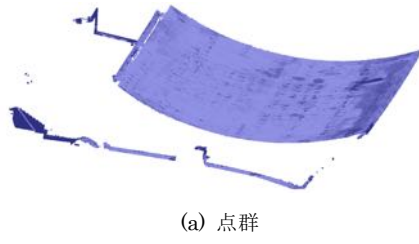
図2. 平面化によるライン位置の同定

平面形状に写像し、それによって、個々の曲げ板上での基準ラインの位置を同定することにする。

3. 点群からのメッシュ生成

本研究では、計測はFaro Focus 3Dを用いて点群計測を行なった。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3に曲げ板を計測した点群と作成されたメッシュを示す。

中・長距離スキャナの計測では、格子状に並んだ点群が得られるので、格子の近傍点を用いてメッシュを生成し、連結成分を曲



(a) 点群



(b) メッシュ

図3. 点群のメッシュ化

げ板として抽出することができる。ただし、点群計測では、板厚部分の点群も取得されている。板厚部は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、垂直に近い平面を板厚部として除去する。

4. ABF++ を用いた曲面の平面化

4.1 平面化されたメッシュの角度計算

本研究では ABF++ [1] を用いて、曲げ板のメッシュモデルを平面形状に写像することを考える。

この手法では、まず、メッシュを平面化したときの角度を算出する。メッシュが図4のように平面化されたとすると、頂点 V に連結する辺の成す角度の比が出来る限り保存するような写像を考える。 T を三角形の集合、 i をその要素番号とする。また、 α_k^i ($k=1,2,3$) を平面化したメッシュの角度、また、元のメッシュの頂点周りの角度を $\beta^i = 2\pi\beta^i / \sum_i \beta^i$ で正規化する。このとき、以下の最適化式を計算する。

$$\sum_{i \in T} \sum_{k=1}^3 \frac{1}{(\beta_k^i)^2} (\alpha_k^i - \beta_k^i)^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

ただし、 $\{\alpha_k^i\}$ は、次を満たすことが必要である。

- (条件1) 三角形の内角の和は π である。
- (条件2) 頂点周りの角度の和は 2π である。
- (条件3) 二つの三角形に共有されるエッジの長さは等しい。

ABF++ では、条件1~3を制約として満たすような $\{\alpha_k^i\}$ をラグランジェの未定定数法を用いて計算する。この問題は、疎な線形システムの解法問題に帰着する。ここでは、疎行列の LU 分解を用いて解の算出を行なった。

4.2 平面化されたメッシュの座標計算

次に、算出された角度を用いて、平面化された点の座標を計算する。三角形の頂点 (P_1, P_2, P_3) と角度 $(\alpha_1^i, \alpha_2^i, \alpha_3^i)$ に関して、以下の式が成り立つ。

$$\overrightarrow{P_1 P_3} = \frac{\sin \alpha_2^i}{\sin \alpha_3^i} \begin{pmatrix} \cos(\alpha_1^i) & \sin(\alpha_1^i) \\ -\sin(\alpha_1^i) & \cos(\alpha_1^i) \end{pmatrix} \overrightarrow{P_1 P_2} = M_1^i \overrightarrow{P_1 P_2} \quad (2)$$

頂点座標は、この関係をできるだけ満たすように決められる。最適化計算は以下に示す式を解くことで行なうことができる。

$$\sum_{i=(j,k,l) \in T} \| M_j^i (P_j - P_k) + P_l - P_j \|^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

本研究の場合、平面化された形状は、元の平板に等しくなることが求められる。そこで、図3(b)のメッシュから境界を抽出する。ここでは、図5に示すコーナ点と境界線を、元の平板の境界と一致させる。また、境界線に代表点を取り、その点の端点か

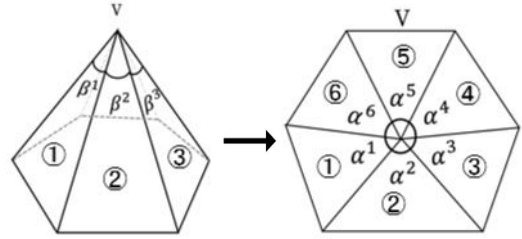


図4. メッシュの平面化

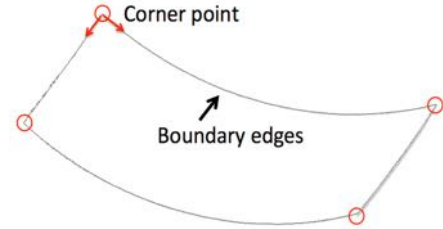


図5. 境界抽出

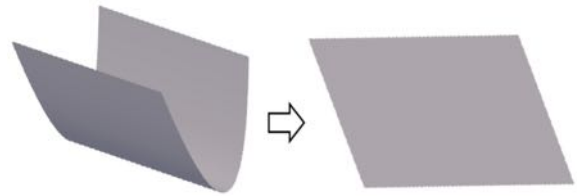


図6. ABF++による平面化

らの長さに応じて、平板の境界線上の座標を割り当てる。平面上の座標が割り当てられた点については、式(3)では定数として扱う。式(3)は疎な正定値対称行列の線形システムを解く問題に帰着する。ここでは、コレスキ分解を用いて解を算出した。

図6に、メッシュモデルを平面化した例を示す。最適化の計算時間を評価するために、異なる頂点数のメッシュの平面化を行なった。検証においては、16GBのメモリを持ち、クロック周波数3.10HzのCPUを持つ64bit PCを用いた。計算時間を表1に示す。連立方程式を解いているために、点の個数が増えるに従って計算時間が増大する。ここでの目的は、基準線を求めることにあるので、すべての点を用いる必要はない。10000点程度の点であれば十分高速に計算できるので、本研究で用いた4m四方の板であれば4cmピッチで点をサンプリングすればよい。

平面化された形状においては、基準線とメッシュのエッジとの交点を求める。その交点を結ぶ線分列を基準線として出力する。

表1. 三角形の頂点数と ABF 関数の計算時間

三角形の頂点数	1,000	5,000	10,000	20,000	30,000
三角形の数	2756	9716	19182	38642	64496
計算時間(s)	0.2	1.2	1.7	5.0	8.8

5. まとめ

本研究では加工された曲げ板上の基準線を追跡する方法を示し、ABF++ 用いることで十分高速に計算できることを示した。今後の課題として、基準線の精度検証を行なっていくことが必要である。また、基準線上の点に関して、最終形状との差分を評価するシステムを構築する予定である。

[1] A. Sheffer: ABF++ Fast and Robust Angle Based Flattening, ACM TOG, 24(2), 311-330, 2005.