

三次元計測点群を用いた大型構造物の劣化診断（第2報）

電気通信大学 ○篠崎 有希, 小平 圭祐, 鈴木 晶也, 増田 宏

Diagnosing Deterioration of Large Structure Using Point-Clouds

The University of Electro-Communications: Yuki SHINOZAKI, Keisuke KOHIRA, Masaya SUZUKI, Hiroshi MASUDA

Large-scale infrastructures, such as furnaces, have to be repeatedly maintained in their long lifecycle. In conventional diagnosis for furnaces, inspectors visually estimate the amount of scaffold and wear, and decide whether restoration is required. If dense point-clouds can be captured from on furnace walls, the amount of scaffold and wear can be precisely estimated. In this paper, we propose methods for detecting scaffolding and wearing areas on furnace walls using point-clouds. To obtain the amount of deterioration, we have to estimate the reference surface, which is the original wall shape with no scaffold and wear. We calculate reference surfaces using constrained B-spline surface fitting. Then we detect scaffolding and wearing areas as differences between the reference surface and the current wall surface.

Key words: point-cloud, maintenance, point processing, deterioration diagnosis, terrestrial laser scanner.

1. 緒言

長年運用された燃焼炉などの大型構造物の壁面には、付着物や損耗が発生する。その劣化診断は主に目視によって行われることが多いが、作業者の勘や経験に依存し、損耗の度合いも定量的に計測されていないという問題がある。三次元点群データからの付着物や損耗の箇所や量が算出できるならば、劣化状況の定量的判断が可能になり、正確な劣化診断と適切な修復作業計画が可能になると考えられる。

点群を用いた壁面の付着物や損耗の検出には、基準となる面を定め、実際の点群との差分を検出することが必要である。しかしながら、大型構造物においては、設計上は壁面が平面や円柱であったとしても、建造された構造物では図面とのずれが発生することが多い。そのため、基準面を平面や円柱によって定めた場合、建造時に生じた壁面のうねりや歪みを、付着物や損耗による劣化と誤検出する可能性がある。

本研究では、地上型レーザスキャナで計測された点群から、燃焼炉の壁面の付着物と損耗を検出することを目的とする。

前報では、計測点群を円筒座標系に変換した上で、移動重さを用いて、平面集合として基準面を生成し、基準面と計測点群の差分をとることで劣化検出を行う手法について報告した[1]。しかしその結果、計測位置からの距離による点密度の差によって、系統誤差が発生するという問題が生じていた。本報では、自由曲面を用いて基準面を推定し、点密度の差による影響を小さくする手法を提案する。

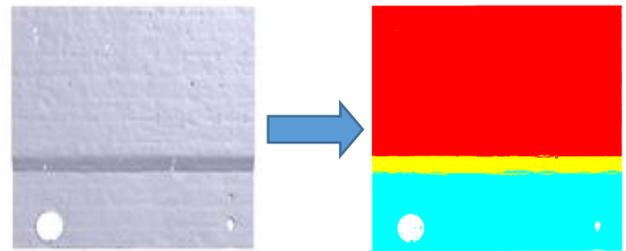


図2. モデルの分離

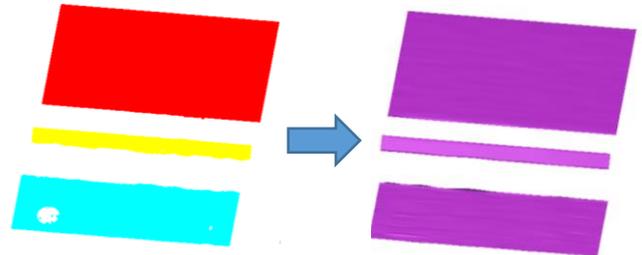


図3. B-Spline 曲面の生成

2. 概要

手法の概要を図1に示す。本研究では、燃焼炉が近似的に回転体であると仮定する。まず計測点群(図1(a))から構造物の最も外側の壁面を抽出し(図1(b))、その中心軸を推定する。次に、その中心軸を用いて円柱座標系 (θ, ζ, r) を定義し、壁面上の点群をこの座標系に変換する。このとき、壁面が近似的に回転体であれば、 θ - ζ - r 空間において近似的に平面になる(図1(c))。基準面の推定は θ - ζ - r 空間で行う(図1(d))。本研究では、基準面推定に B スプライン曲面フィッティングの3通りの手法を用いる。付着物・損耗の量は、計測点を円柱座標 (θ, ζ, r) に変換し、基準面上の (θ, ζ) における r 値の差分として算出される(図1(e))。

3. B-Spline 曲面を基準面とした差分検出

本報では、円筒座標系に変換後の点群モデルを用い、B-Spline 曲面を生成する。まず、点群を各円柱と円錐に分離する。円柱は θ - ζ 平面に平行な平面、円錐は傾きを持った平面となる。平面は、RANSAC 法を用いて検出する。図2は実際に分離を行った図である。次に、各部に対して、それぞれ制御点を設定し B-Spline 曲面を生成する(図3)。このとき、建造時の歪みは大局的なスケールであ

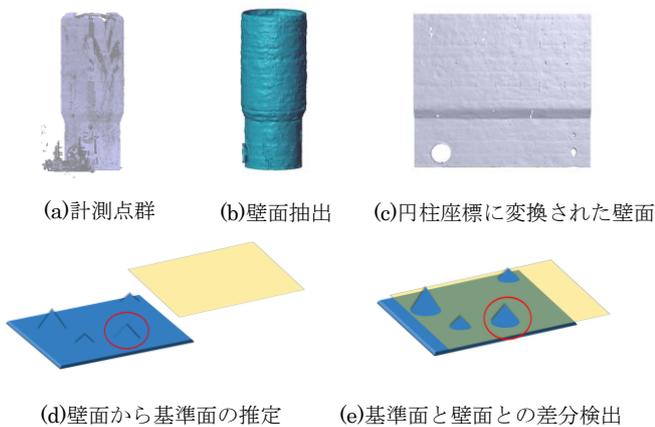


図1. 処理の概要

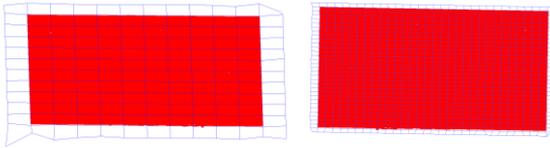


図4. 基準面 (左) と劣化面 (右) のための制御点

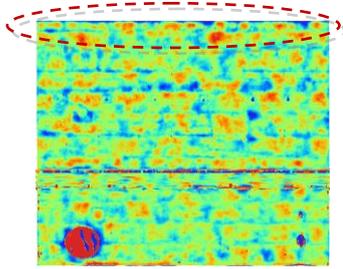


図5. 高さ方向の硬さを大きくした場合の差分分布

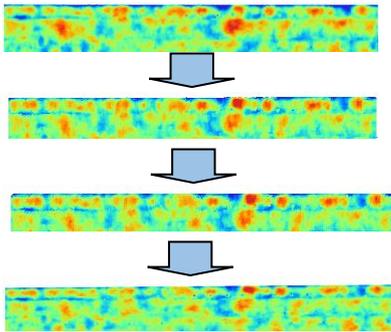


図6. 硬さを小さくした場合の差分分布

るのに対し、劣化は比較的局所的なスケールである。大局的なうねりを検出するために、基準面生成の際の制御点数は小さく設定した(図5)。一方、制御点数を大きくした B-Spline 曲面も生成し、これらの曲面どうしの差分を取ることで劣化検出を行った。

ただし、壁面の穴や、他の装置の背後の領域では点群が取得できないため、それらの領域で曲面計算の解が不定になる。そこで、本研究では、下記の式を最小化する曲面 $S(u, v)$ の制御点 $\{q_{ij}\}$ を求めた。 n は計測点 $\{p_{i0}\}$ の個数、 m_u, m_v は制御点の個数である。また、計測点 p_i のパラメータ (u_i, v_i) は、円柱座標系の (θ, ζ) の値を用いた。

$$\sum_{i=0}^{n-1} |s(u_i, v_i) - p_i|^2 + \frac{n}{m_u m_v} \left\{ k_u \sum_{i=0}^{m_u-3} \sum_{j=0}^{m_v-1} |q_{i,j} - 2q_{i+1,j} + q_{i+2,j}|^2 + k_v \sum_{i=0}^{m_u-1} \sum_{j=0}^{m_v-3} |q_{i,j} - 2q_{i,j+1} + q_{i,j+2}|^2 \right\}$$

この式において、変数 k_u, k_v は、半径方向と高さ方向の硬さを表しており、値が大きいほど平面性を維持しやすくなる。

まず、建築時のズレは縦方向には小さく、半径方向に大きいと仮定し、高さ方向に硬さ k_v を大きくして曲面計算を行った。この場合、縦方向には直線性を保ちやすくなることから、擬似的に円柱や円錐などの線織面の当てはめと見做すことができる。図5はその差分分布を示しており、赤色が損耗部、青色が付着物を示している。この図をみると、図上で点線で囲まれている壁面の上部に帯状の青い領域が発生している。これは、計測位置の関係から、構造物の上部で点の密度が小さくなっている影響であると考えられる。

次に、 k_u, k_v に徐々に小さい値を与えて制御点を算出した(図6)。その結果、上部での大きな差分が解消している。このことから、円柱や円錐当てはめにおいて、高さ方向の点の粗密の影響を受ける問題が、自由曲面当てはめでは解消できていることがわかる。

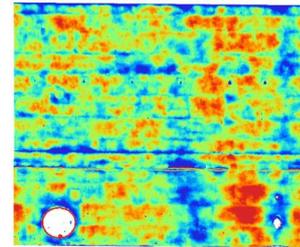


図6. 移動重さによる差分検出

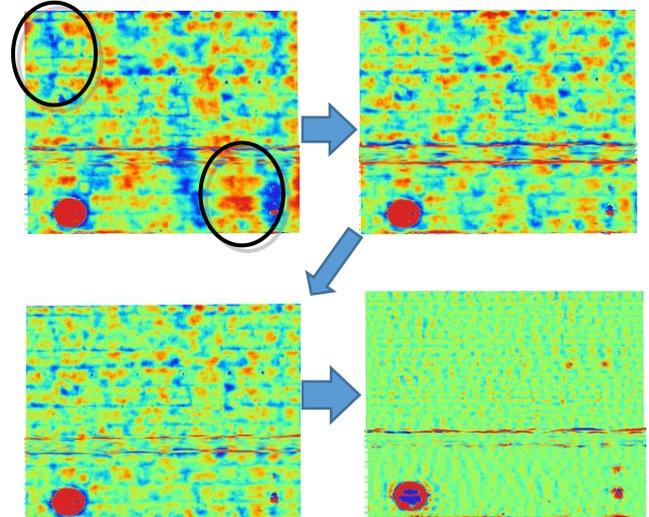


図7. 制御点数を大きくしていった場合の差分分布の変化

4. 評価実験

まず、前報にて提案した、移動重さによる平面検出を用いた差分検出手法と、B-Spline 曲面の推定を用いた差分検出手法についての比較を行った。図7に前報の手法による差分分布を示す。移動重さを用いた手法では、上部に帯状の青い領域が発生していた。一方、B-Spline 曲面を用いた手法では青い領域が緩和されているのが確認できる(図6)。これは、B-Spline 曲面の方が高い局所性を持つため、高さ方向での点密度の差の影響が少なかったからであると考えられる。

次に、基準面生成の際の制御点数を徐々に大きくした際の結果の変化を図7に示す。矢印を追うごとに制御点数が大きくなった。最初は青い領域、赤い領域が、系統的に縦方向に表れている。これは、建造時の半径方向の歪みであると考えられる。制御点数が増えていくに従って、赤と青の領域は小さくなっていき、最終的には細かい凹凸が離散的に現れてくる。これらは、より小さいスケールの付着物や損耗であると考えられる。本手法において、制御点の個数を制御することで解像度の制御が行え、様々なスケールでの劣化検出が行えると考えられる。

5. 結論

本研究では、B-Spline 曲面を基準面として用い、点群から大型構造物の劣化診断を行うための手法を提案した。基準面の算出において、線織面の当てはめでは、計測位置との距離による点密度の影響を受けやすいが、制約付きの B-Spline 曲面当てはめを行うことで、点密度の影響を小さくできることを確認した。

なお、形状が変化する境界部で不連続性が確認される。境界部のオーバーラップ方法については現在検討を行っている。また、劣化検出の正確さについても、今後検討していく予定である。

参考文献

[1] 篠崎 有希, 鈴木 晶也, 増田 宏: 三次元計測点群を用いた大型構造物の劣化診断, 精密工学会秋季講演会 2016