

# 三次元計測点群を用いた大型構造物の劣化診断

電気通信大学 ○篠崎 有希, 鈴木 晶也, 増田 宏

## Detection of Deterioration on Furnace Walls Using Point-Clouds

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

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 determine whether to restore the facility. If dense point-clouds could be captured from on furnace walls, the amount of scaffold and wear would 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 a reference surface, which is the original wall shape with no scaffold and wear. We discuss two methods to calculating reference surfaces; one is the moving-weighted least-square method, and the other is based on B-spline surface fitting. Then we detect scaffolding and wearing areas using 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

燃焼炉などの大型構造物は、長年の運用により壁面に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ており、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。レーザ計測で取得された点群データから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、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。まず、設計上は円柱と円錐で構成されている燃焼炉を例にとり、設計データを基準面とすると、付着物と損耗が誤って検出されることを示す。その問題を解決するために、(1) 移動重みによる局所的平面検出、(2) B-スプライン曲面当てはめの二通りの基準面推定手法を提案する。

### 2. 手法の概要

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

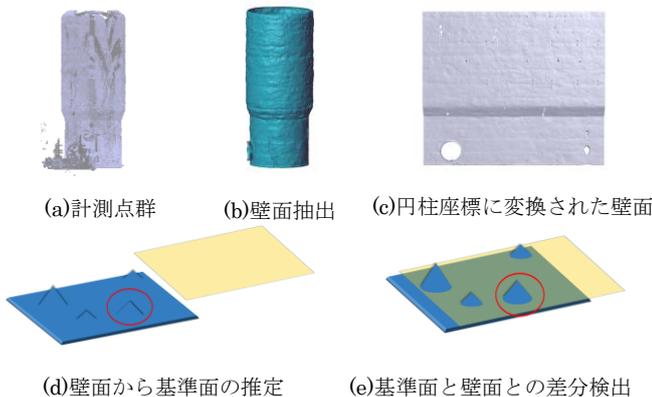


図1 差分検出手順

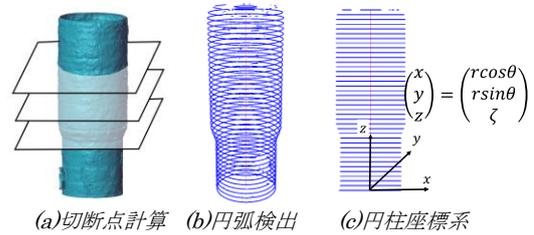


図2 壁面の中心軸の算出

面を抽出し(図1(b)), その中心軸を推定する。次に、中心軸を用いて円柱座標系  $(\theta, \zeta, r)$  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、 $\theta-\zeta-r$ 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  $\theta-\zeta-r$ 空間で行う(図1(d))。本研究では、基準面推定に、(1) 平面検出、(2) 移動重みによる局所平面検出、(3) B-スプライン曲面フィッティングの3通りの手法を用いて、それらの結果を比較する。付着物・損耗の量は、計測点を円柱座標  $(\theta, \zeta, r)$  に変換し、基準面上の  $(\theta, \zeta)$  における  $r$  値の差分として算出される(図1(e))。

### 3. 円柱座標系への変換

点群は、距離画像形式である PTX フォーマットで得られているものとし、点群データには、レジストレーションのための変換行列が与えられているものとする。本稿で例題として用いたのは、12箇所から計測した点群ファイルで、総計で約4億4660万点である。

まず、点群ファイルごとに、距離画像上の隣接点をエッジで連結したワイヤフレームモデルを生成する。次に、図2(a)に示すように、このモデルを一定間隔ごとに水平面で切断し、交点を算出する[1]。この操作をすべての点群ファイルに対して施し、切断面ごとに交点集合を併合する。燃焼炉が近似的に回転体である場合を考えているので、外壁の切断線は近似的に円弧となる。そこで、図2(b)に示すように、各切断面から RANSAC 法により円弧検出し、その中心を通る直線を中心軸とする。直線は、RANSAC 法で計算する。

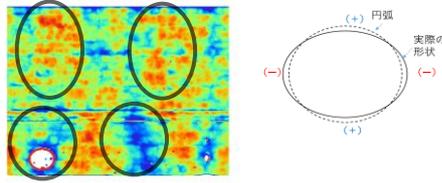
ここで、図2(c)のように、中心軸を  $z$  軸とする直交座標系を定義し、その座標系に基づいて円柱座標系  $(\theta, \zeta, r)$  を定義する。ここで、 $(x, y, z) = (r \cos \theta, r \sin \theta, \zeta)$  と定義する。外壁の切断線を円柱座標系に変換することにより、壁面は、図1(c)のように、近似的に平面となる。

### 4. 壁面を完全な回転体とした場合の差分検出

図2の燃焼炉の壁面は、設計上は円柱と円錐で構成されているた



図4 RANSAC法により検出された平面



(a)差分検出結果 (b)円弧と実際の形状の差異

図5 RANSAC法を用いた差分検出

め、 $\theta$ - $\zeta$ - $r$  空間では近似的に平面となる。まず比較のために、この形状から検出される平面を基準面とした差分解析を試みる。

平面検出は RANSAC 法を用いて行う。この例題では、図4に示すように、2個の円柱と1個の円錐に対応した3枚の平面が検出される。これらを基準面と見做す。

次に、壁面上のすべての点を円柱座標系に変換し、各点と基準面との最小距離を差分として算出する。図5(a)は、差分を RGB に変換して可視化を行った図である。赤の部位が損耗のある部位、青の部位が付着物、それ以外は正常面である。

この図では、赤と青の密集した領域が、交互に現れていることがわかる。この原因としては、実際の燃焼炉が完全な回転体ではないため、図5(b)のように建造時に生じた系統誤差を検出してしまっているためと考えられる。それにより、目的とする壁面の付着物と損耗が正しく検出できていないという問題が生じている。

### 5. 移動重さによる局所的平面検出を用いた差分検出

建造時の系統誤差に対応するために、平面を局所的に当てはめることを考える。ただし、狭い範囲で平面当てはめを行うと、付着物や損耗の影響を受けやすくなり、基準面算出が不安定になる。そこで、平面算出はすべての点を用いて行う一方で、局所的に重みを大きくすることを考える。それにより、局所的な付着物や損耗の影響を軽減できると考えられる。

まず、前章で示した平面検出により、点群を平面ごとに分割する。次に、図6に示すように、平面状に展開された点群モデルを帯状に分割する。更に、燃焼炉の上部は下部より点の密度が小さくなり、円柱との誤差が発生しやすくなるため、上下方向に、点の個数が同等程度になるように分割する。

分割したそれぞれの区画に相対的に大きい重みを与え、最小2乗法を用いて平面計算を行う。基準面としては、大きな重みを与えた区画のみを採用する。これを全ての区画に対し行うことで、区分的に平面となる基準面が算出できる。

ただし、この方法では各区画の境界で基準面が不連続になる。そこで、図7のように、区画を重複するように設定し、重複した部分においては、以下の式によって線形補間する。

$$\delta = \frac{a\delta_b + b\delta_a}{a + b}$$

ここで、ある点 P が区画 A, B の重複した区間にあるとし、 $\delta_a, \delta_b$  を区画 A, B の基準平面と点 P との距離、 $a, b$  を区画 A, B の境界からの  $\theta$  方向の距離とする。同様の線形補間処理を  $\zeta$  方向に対しても行うことで、区画境界の不連続性をなくすることができる。

図8は、本手法を用いて算出した、実際の点群と基準面との差分である。この例では、各区画の重みを100倍とした。この結果では、図5(a)のような明確な系統的な差分はなくなっている。

この手法においては、円柱部、円錐部の各曲面において、妥当な差分検出ができていない。一方で、図8の矢印部において、大きな不



(a)左右方向の分割 (b)上下方向の分割

図6 帯状に区分けしたモデル

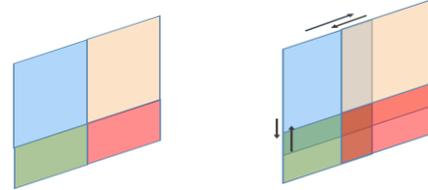


図7 重複を許した区間分割

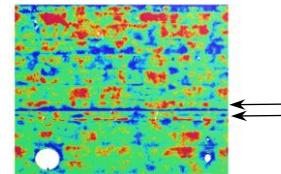


図8 移動重みを用いて算出された基準面での差分検出



(a) 10 x 10 (b) 20 x 20 (c) 30 x 30  
図9 セグメント数に応じた B スプラインフィッティング

連続性が発生している。この部位は、燃焼炉の形状が円柱状と円錐状で変化する部位である。本手法においては、この部分での不連続性が発生することが問題となる。

### 6. B-スプライン曲面を用いた差分検出

付着物や損耗は局所的であるのに対して、壁面の建造時のずれは比較的大局的であるという特徴がある。そこで、B スプライン曲面の自由度を制御することで、大局的な形状と局所的な凹凸を分離することを考える。

図9は、平面状の形状に B スプライン曲面を当てはめたものである。ここでは、詳細度を  $u$  方向、 $v$  方向のセグメント数によって制御した。この図に示すように、セグメント数を増加させることで、詳細な凹凸が再現されていく。この方法では、全体を単一の曲面として計算しているため、曲面境界で明示的な不連続性は発生しない。

ただし、円柱と円錐の境界部では曲率が大きくなるため、その部分において、制御点を密にすることが必要である。差分検出に適した制御点の配置方法とその評価については、現在、検討作業を行っているところである。

### 7. まとめ

本研究では、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。壁面が完全な円柱と円錐であると仮定して、基準面との差分を求めると、建造時での設計とのずれによって適切に劣化箇所を同定できなかったが、移動重みによって局所的な曲面当てはめを行うことで、劣化が適切に検出できることを確認した。一方で、円柱部と円錐部の境界で劣化の誤検出が発生するという問題も明らかになった。また、B-スプライン曲面を用いた基準面生成手法についても示した。その評価については現在作業中である。

### 参考文献

- [1] 齋藤 和人, 丹羽 健, 増田 宏: 三次元大規模点群に基づく樹木の形状再構成, 精密工学会秋季講演会 2015