

三次元計測点群を用いた大型構造物の劣化診断 ～検出精度と信頼性の評価～

電気通信大学 ○篠崎 有希, 増田 宏

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。そのような劣化の診断は主に目視によって行われているが、劣化の度合いの判定が定量的ではなく、作業者の経験に依存するという問題がある。

三次元計測点群から劣化箇所やその量が算出できるならば、劣化について定量的な判断が可能となる。本研究では、地上型レーザスキャナより計測された点群から、大型構造物の壁面の劣化を検出することを目的とする。

点群を用いた壁面の劣化の検出には、建築時の壁面の形状を表した基準面を推定し、実際の点群との差分を算出することが求められる。燃焼炉のような大型構造物においては、平面や円柱のような形状で設計されていた場合でも、建築された構造物には図面とのズレが生じることが多い。したがって、基準面を理想的な平面や円柱として定めた場合、建築時に壁面に発生したうねりや歪みを、劣化として誤検出してしまうことがある。

これまでの我々の研究では、基準面を自由曲面として算出し、計測点群と算出した基準面の差分を求めることによって劣化診断を行う手法を提案した[1]。検査したい領域を細分化し、劣化検出の結果を統合することで、レジストレーションによる誤差の影響をなくした。制御点数を大きくした自由曲面を基準面として用いることで、亀裂のように微小な劣化の検出が可能であることを示した。

ただし、現物の燃焼炉においては、正解値がわからないため、定量的な精度評価はなされていなかった。そこで、本報では、劣化した壁面の模型を作成することで、点群に基づく劣化検出に関して、定量的な精度検証と信頼性評価を行う。また、その結果に基づいて、様々な計測条件下における劣化検出のためのパラメータについて検討する。

2. 劣化検出手法

図1のような燃焼炉の壁面から微小な劣化を検出する手法について説明する。この燃焼炉は円筒部と円錐部によって構成される。この点群データは12箇所から計測され、点の総数は約4億5000万点である。

劣化検出においては、まず、点群から壁面部のみを抽出し、レジストレーションを行なったあとと図2のように壁面の点群を円柱座標に変換する。このとき、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(図3)。次に、RANSAC法を用いて点群から平面検出を行い、円柱部と円錐部に分割する。その後、亀裂の検出を行う。この際、微小な劣化はレジストレーション誤差より小さい場合があり、検出できなくなるケースがあるため、各点群から亀裂を検出し、それらを最終的にマージして視覚化する。

劣化を検出するために、円柱座標で表現された円筒部と円錐部にB-Spline曲面を当てはめる。点が欠落している箇所が平坦に補間されるように、以下の式を最小化する制御点を算出した。

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

劣化は、この曲面と実際の点群との差分として算出される。

亀裂のような微小な劣化の検出には、B-Spline曲面の制御点数を多くする。B-Spline曲面は制御点の数が増えるほど、元の点群の再現度が高くなるため、付着物や損耗のような比較的大きな劣化は基準面に吸収され、微小な劣化と基準面との差分のみが検出できる。亀裂として検出された点同士の間隔が閾値以下であればそれらは繋がった劣化であるとみなしエッジを生成する。ここでは、円柱座標系に変換した点群を格子状の領域に分割し、各格子に含まれる点の個数が十分に大きい点群からの劣化検出の結果を該当領域の結果とする。

劣化診断を行なった結果を図5に示す。図4(b)は図4(a)の一部を拡大したものである。長方形で囲んだ箇所は、目視での確認との比較である。この図より、点群から亀裂が正しく検出できていることが確認できる。

3. 劣化した壁面の模型による評価

検出手法の評価を行うために、壁面の模型を作成した。図5よう



図1 燃焼炉の点群

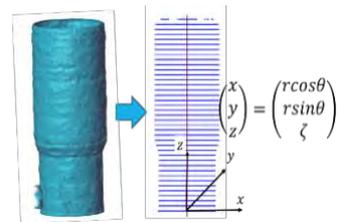


図2 座標の変換

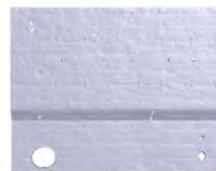
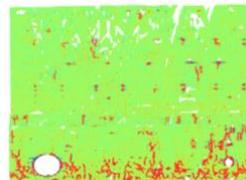
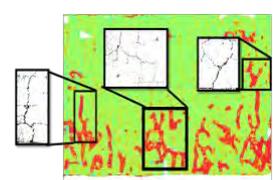


図3 平面状への写像



(a) 検出結果



(b) 結果の拡大・検証図

図4 亀裂の検出

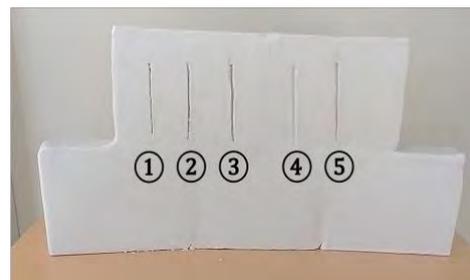


図5 壁面の模型

に、ブロック状の油粘土を複数使用し、レンガの壁面を模して積み上げた。積み上げた粘土の幅は約48cm、高さは約18cmである。また、粘土に、幅と深さの異なる複数の亀裂を加えた。それぞれの亀裂の幅と深さは表1の通りである。

この粘土に対し、レーザスキャナ Faro Focus 3D X330 を用い、2億点を計測するモードで点群を取得した。検証の際、基準面との差分が1.7mm以上の点を劣化であるとみなし、エッジの生成を行った。

まず B-Spline 曲面の制御点数を変更した場合について検証した。2m の距離で計測した点群を用いた。粘土の点群は約77万点である。制御点数は粘土の模型の幅と高さの比を保存するように、8×3、16×6、24×9、32×12 の 4 通りの場合で劣化検出を行った。結果を図7に示す。図6(a)については、劣化自体は正常に検出できているが、右下部にも比較的大きな劣化箇所が検出された。誤検出が起きた箇所は粘土のブロックのつなぎ目部分であり、制御点数が小さすぎたため、基準曲面がその箇所にフィットできていなかった。図6(b), (c), (d)においては、継ぎ目部分にフィットした基準面が生成され、正しく亀裂を検出している。

次に、計測距離を変更して亀裂検出の検証を行なった。点群の計測は2m、4m、6m、8m と距離を変えて行った。各計測において、壁面上の点の個数を表2に示す。制御点数は32×12とした。10m先での点間隔が 3.14 mm になるモードで計測しているため、各距離でのおおよその点間隔は、表2に示す通りである。

各点群に対して手法を適用した際の結果を図7に示す。ここでは、スキャナに位置を変えて 3回ずつ計測をして再現性を調べた。計測距離 2m の点群では、全ての亀裂が正しく検出できた。2m の距離では、点間隔が 0.6 mm なので、1mm の幅の亀裂を安定して検出できていると考えられる。一方、4m の距離で計測した点群では、1mm 幅の亀裂①と深さ 2mm の亀裂④で一部欠落が見られた。6m の距離では、①②④の亀裂検出が不安定になった。8m の距離では、③以外の亀裂検出が不安定になった。以上の結果から、安定した亀裂検出には、亀裂の幅よりも小さい点間隔で計測する必要があることが明らかになった。

次に深さに注目すると、2m の亀裂では全ての亀裂を検出できているが、4m 以上の距離では、深さ2mm の亀裂④の検出が不安定となった。深さが浅い箇所においては、点密度が小さいと基準面がその部分にフィットしてしまい、基準面と点群の差分が小さくなってしまふことが原因であると考えられる。

また、亀裂の長さについても検証を行なった。今回亀裂の長さは壁面の上部に一番近い点から底面に一番近い点までの距離とした。ここでは、3回計測した亀裂長さの中央値を用いた。結果を表3に示す。ここでは、実測値との差を符号付きで示している。亀裂②③⑤のように、幅が広く深さが深い亀裂については6m までであれば、亀裂のほぼ全体が安定して検出され、2mm 以内の誤差で長さが算出できた。一方、①や④のように幅が狭かったり浅すぎたりする亀裂では、計測距離が長いと全体が検出できずに誤差が大きくなる結果となった。

4. 結言

本研究では B-Spline 曲面を用いた劣化検出において、微小な劣化を検出する手法について検討し、壁面を模した模型を使用して精度の検証を行なった。曲面生成の際の制御点数を変更して検証を行うことで制御点数が小さすぎた場合、微小な劣化のない箇所も劣化であると誤検出することがあることを示した。また、計測距離を変更して検証を行うことで点群の計測距離が大きい場合、劣化が検出できない場合があることを確認した。

今後、付着物や損耗のような比較的大きい劣化に対して、体積などの精度検証を行う予定である。

表1 微小な劣化の大きさ

	①	②	③	④	⑤
幅	1mm	2mm	3mm	3mm	3mm
深さ	6mm	6mm	6mm	2mm	4mm

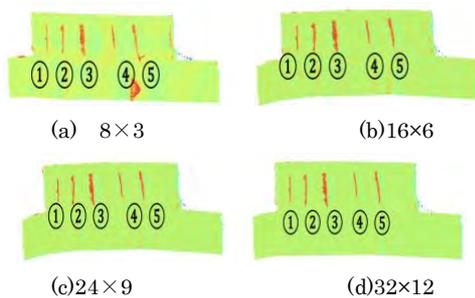


図6 制御点数の影響

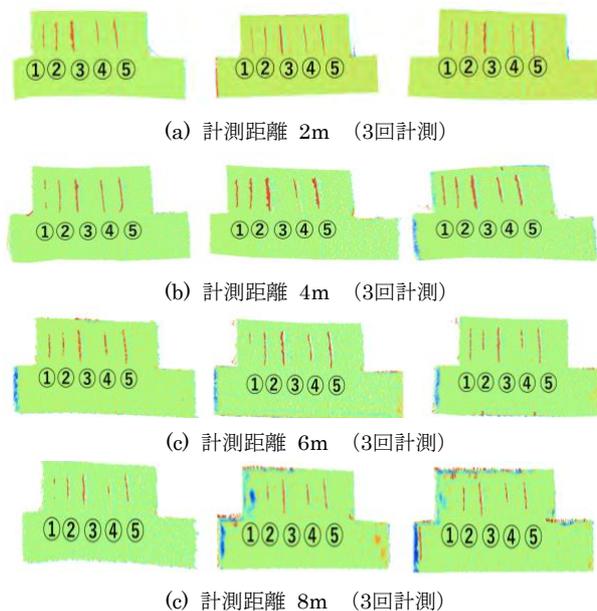


図7 異なる計測距離での亀裂検出

表2 異なる計測距離での壁面上の点の個数

	2m	4m	6m	8m
1回目	771755	188531	87115	45907
2回目	775020	188201	86795	46302
3回目	774259	193800	86049	46745
点間隔	0.6 mm	1.6 mm	1.9 mm	2.5 mm

表3 亀裂の長さの実測値との比較 (mm)

亀裂	①	②	③	④	⑤
実測	60	62	62	60	65
2m	-4	-2	-0	-2	-1
4m	-10	-6	-1	-14	-8
6m	-12	-18	-2	-20	+4
8m	-58	-24	-5	-29	-10

参考文献

[1] 篠崎有希, 小平圭祐, 増田宏. "三次元計測点群を用いた大型建造物の劣化診断 (第 3 報)." 2017 年度精密工学会学術講演会講演論文集, 2017.