

大規模環境のデジタル化技術とその問題点

東京大学大学院工学系研究科 増田 宏

1. 緒言

老朽化した設備の改修による長寿命化、迅速な設備更新は多くの企業において重要な課題となっている。そうした作業を短期間・低コストで行うためには、アズビルトモデリングが有効である。アズビルトモデリングとは、既存の大型設備の3次元計測に基づいて3Dモデルを作成する技術の総称である。モデルベースで作業工程、干渉、改修部品の検討を行った後に実作業を行うため、作業が短期間で確実に進め、設備の停止期間も短縮することができる。

大型設備の3次元計測を行う手段としては、(1) 伝統的な手測り、(2) フォトグラメトリ、(3) 点群計測がある。土木測量分野では計測は日常的に行われており、そのための装置も多数開発されているが、ここでは特に3次元モデルを作成するための計測手段について考える。

フォトグラメトリは、複数のデジタル画像から3次元モデルを作成する手法である。ユーザが複数の画像から対応する特徴点を指示し、三角測量の原理に基づいて3次元座標を計算する。ユーザが適当な基本立体を選択すると、ペア画像に合った位置と形状パラメータが決定される。この方法は確実性が高いが、多数のペア画像から線分を逐次3次元化することが必要なため、作業に熟練が必要で、部品点数の多いプラントなどの3次元化には膨大な工数がかかる。そのため、モデリングコストが非常に高くなることが多い。

一方、近年では、レーザスキャニングによる点群計測に基づいたアズビルトモデリングが注目されている。点群処理では、フォトグラメトリと異なり、処理の大部分が自動化できる可能性があるため、今後点群処理技術が成熟してくれば、アズビルトモデリングにおいて主流となってくると思われる。

大型設備のアズビルトモデリングに用いられる計測装置は、小型部品用の点群計測装置とは計測原理が異なることに注意を要する。小型部品の点群計測では、レーザ出力装置と CCD カメラを用いて三角測量を行うのが一般的であるが、この方法では対象物のサイズが大きくなるに従って装置も巨大化する。また、小型部品の計測では、計測される点群はせいぜい数百万点程度であることが多いが、大型設備の場合には、モデル化に大量の点群を必要とする。大雑把に言って、10cmの製品計測と同等の点群密度を得るためには、10mの設備では10,000倍の点群が必要である。実際には、大型設備のアズビルトモデリングで必要とされる精度は高くないので、点群密度を粗くして計測するが、それでも、小型部品の場合の100倍程度、数千万から数億点の点群データが効率的に取得することが必要である。そのため、大型設備の計測では三角測量に基づく方法はあまり使われない。

現状では、大型設備の計測では位相差方式のレーザスキャン方式が効率的である。この方法は、対象物にレーザ光を照射し、反射波の位相のずれから距離を計測する。大量の点群を短時間で計測でき、数千万点を数分で計測することが可能

である。我々が実験で用いている点群データは、Z+F社のImager5003によって計測されたものである。この装置は位相差方式を用いており、計測距離が1.0~53.5m、計測範囲は水平方向に360°、垂直方向に310°、10m先を3.1mmピッチで計測でき、2億点の点群計測を約6分で行うことができる。

ただし、位相差方式による計測では、誤差がかなり大きい。我々の用いた計測装置では、奥行き方向3mmから5mmを超える誤差が生じる。また、測定値には大量の異常値が含まれる。異常値とは、通常の誤差分布とはかけ離れた計測値のことである。特に対象物の境界上ではスポット光が分断され、極端に値がずれる異常値が多数観測される。これらの特徴は、小型部品のリバースエンジニアリングのための3次元計測とは大きく異なるため、それらの手法をそのまま適用することはできない。

2. 点群データの特徴

位相差方式による計測で取得された点群がどのようなものであるかを示しておく。計測においては、計測原点はほぼ固定され、レーザ光の照射角度が緯度と経度の2自由度で制御される。照射角度が決まると、レーザ光の反射波からその方向での距離が計測される。すなわち、計測点を球面座標 (r, θ, ϕ) として表現すると、計測点は $\theta-\phi$ 平面上に規則的に分布する。そのため、計測点の表示は、 $\theta-\phi$ 平面上に投影して行うことが多い。図1はその一例である。

図1では、各画素が奥行き情報を持った距離画像であり、3次元座標と角度座標 (θ, ϕ) は1対1で対応する。点群をメッシュに変換するには、画像上での隣接関係を用いて面を生成していけばよいので、メッシュ化の処理は単純である。図2は、点群から変換された3次元メッシュモデルを示している。

XYZ座標を用いてメッシュを生成するための手法は多く提案されているが、位相差方式で取得された点群データには、大きなノイズや大量の異常値が含まれる。そのため、そうした手法が簡単には適用できない。そのことを考えれば、計測方式の特徴から、距離画像を用いてメッシュ生成が簡単に行えることの意義は非常に大きい。

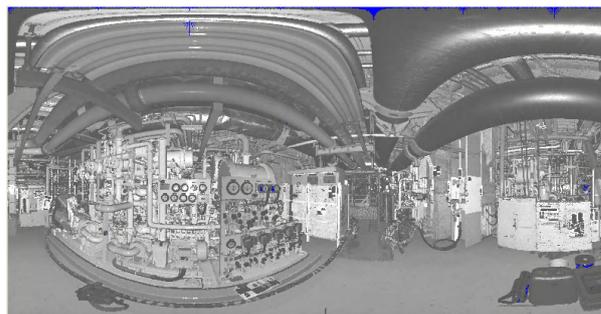


図1. $\theta-\phi$ 平面上に投影した点群データ



図2. メッシュに変換された点群データ

3. 大型設備のアズビルトモデリングの課題

現時点で、大型設備の点群計測データから、少ない手間でも効率的に3次元モデルを作成するツールは知られていない。小型部品の点群計測データからNURBS曲面を含むCADモデルを生成するためのツールが成熟しつつあるのと対照的である。この差はどこから来るのであろうか。理由として以下のことが挙げられる。

(1) 膨大な点群

数千万から数億点の点群は、32ビットPCで扱える限界を超えている。そのため、必要なデータだけをRAM上に展開して処理するOut-of-Core手法が必要とされる。アルゴリズムは煩雑になる。

(2) 大きいノイズ、大量の異常値

スキャン間隔に比べて、奥行き方向の誤差が非常に大きい。そのため、生成されたメッシュ（たとえば図2）の表面は大きく波打っている。さらにやっかいなのは、大量の異常値の存在である。レーザのスポット光が、物体の境界付近では分断され、物体が存在しない部分にも点群を発生させる。その個数は非常に多い。小型部品の計測では、計測精度が十分高いので、こうした問題はあまりない。

(3) 巨大なメッシュモデル

点群から生成されたメッシュモデルはそのままではあまりに巨大であり、利用が難しい。そのため、平滑化をして、簡略化を行う必要がある。さらに望ましいのは、円筒や平面など、単純な曲面の集合に置き換えることであるが、現時点では、あまり研究が進んでいない。点群処理の研究が盛んなCG分野ではそもそもそうしたニーズはないし、機械系CAD分野で開発された手法は高精度な点群の存在を前提にしているためそのままでは適用できない。

(4) 多数の部品の存在

大型設備は非常に多数の部品が組み合わされている。工学的な応用では、そうした部品の切り分けが必要になることが多い。部品への切り分け手法については、研究事例があまりない。

(5) 産業分野の違い

小型部品のモデリングについては、機械系CADの長い歴史があり、CG分野との交流も盛んで専門家も多い。一方、大型設備のモデリングのニーズは土木や重工、プラント分野から来ることが多いが、形状処理の専門家はそうした分野になじみがない。

これらの問題のうち、最初に問題になるのは、(1) 膨大な点群の処理と、(2) ノイズと異常値の問題であろう。我々はこれらに関しては、ある程度策を見出しているため、本稿ではこれらの問題について論じる。

実際のところ、熟練した作業者が十分な時間をかければこれらの問題に対処することは可能である。しかし、美術品や遺跡のモデリングと異なり、エンジニアリング分野での利用には高い経済性が要求される。点群計測装置が非常に高価であることを考えれば、代替手段である手測りやフォトグラメトリに比べて、圧倒的に簡単で効率的なモデル生成処理が必要となる。

4. Out-of-Core な点群処理

通常の安価なPCが実メモリ内で処理できるのは、数百万点程度である。数千万から数億点の点群データでは、外部記憶装置から必要なデータを適宜読み出して処理することが必要である。このような処理はOut-of-Coreと呼ばれるが、ランダムアクセスができないために、処理に特別な工夫を要することが多い。

ただし、図1に示したように、点群データが平面上に写像できる場合には簡単な方法がある。 $\theta-\phi$ 平面は角度の範囲が $[0^\circ, 360^\circ]$ の範囲であるから、この区間を格子に分割し、点群を分割して処理すればよい。適当なサイズの矩形に分割すれば、個々の矩形領域に入る点の個数を実メモリに収まる程度に減らすことができる。多くの点群処理やメッシュ処理のアルゴリズムでは、ある点の近傍点が取得できれば十分なことが多いので、矩形の境界付近の処理さえ注意すれば、このような分割を行っても本質的な問題は生じない。

図3の例では、約600万点を8分割して処理している。これは、次章で述べる平滑化を行った後、頂点数を約10分の1に簡略化したメッシュモデルである。

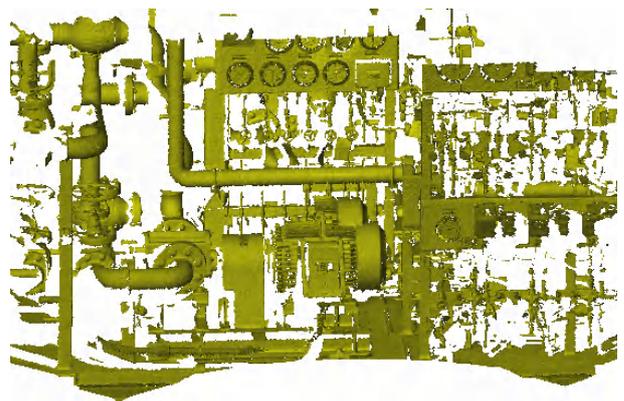


図3. 分割処理して生成されたメッシュモデル

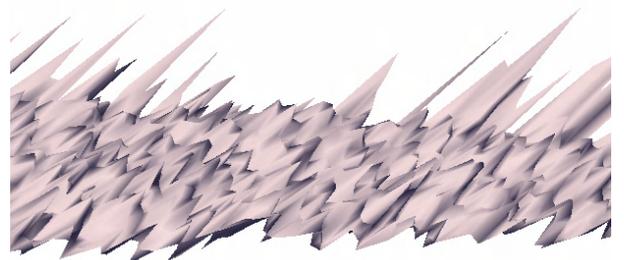


図4. 計測点のノイズ

5. 形状データの平滑化

5.1. 計測点のノイズ

位相差方式で取得された点群データはノイズが大きく、異常値も多い。そのため、そのままではほとんど使い物にならない。たとえば、図2で距離画像から生成されたメッシュモデルは、局所的にみると、平面部を計測したデータであっても図4に示すように凹凸が非常に激しい。境界部の鋭いスパイクはスポット割れによる異常値である。

誤差がこれだけ激しいと、多くのアルゴリズムは正常に動作しない。たとえば、図3で示したメッシュでは、平坦な部分で頂点を間引くポリゴン簡略化処理を行っているが、こうしたデータでは正常に動作しない。

そこで、なんらかの手段で平滑化を行うことが必要になる。点群処理でしばしば行われるのは、ある点の近傍の点を用いて2次曲面当てはめを行い、その曲面上に点を投影することで、滑らかにする方法である。しかし、図4のような大きなノイズと多くの異常値を持ったデータに対しては、十分な注意が必要である。これは重要な点なので、詳細に述べておく。

5.2. 誤差や異常値に強い処理手法

形状処理においては、最小二乗法がよく用いられている。しかし、最小二乗法はノイズや異常値に非常に弱いということを十分認識する必要がある。最小二乗法が尤もな解を算出するのは、誤差が正規分布と見做せる場合だけである。

その理由を、計測点 (x_i, y_i, z_i) が得られたときに、平面式 $S(x, y, z) = a_1x + a_2y + a_3z - 1 = 0$ を当てはめる問題の例で考えてみる。計測値が誤差を含む場合、平面式に厳密には乗らないので、各点は残差 $r_i = S(x_i, y_i, z_i)$ を持つ。最小二乗法では目的関数 $\sum r_i^2$ が最小になるように平面式の係数 $\{a_i\}$ を決めるので、 $\{a_i\}$ で目的関数を偏微分すれば、以下の連立方程式を解く問題に帰着する。

$$\sum r_i x_i = 0, \quad \sum r_i y_i = 0, \quad \sum r_i z_i = 0 \quad (1)$$

この式では、計測点 (x_i, y_i, z_i) に残差 r_i が重みとして掛けられている。これが意味するのは、異常値であるほど重みが大きくなり、係数 $\{a_i\}$ の決定に大きく寄与するということである。その結果、最小二乗法で得られる結果は、異常値に大きく引っ張られる。したがって、ノイズが正規分布に従わないと判断されるときは、最小二乗法を用いてはならない。

最小二乗法が適用できないとき、代わりに用いられる手法としては、移動最小二乗法もしくはローレンツ関数が適している。これらは非線形の最適化を用いるため計算時間がかかるが、安定した解を算出するためには必要となる処理である。ここでは、それらについて簡単に述べておく。

Levin [1] は点群に平面と二次曲面を当てはめるために、移動最小二乗法を用いた。移動最小二乗法では、基準点 p_0 からの距離が大きくなると急激に減衰する関数を重みとして用いる。Levin は、残差の二乗にガウス関数を掛けた以下の式を用いた。 p_0 は未知数として計算される。

$$\sum r_i^2 \exp(-|p_i - p_0|^2 / h^2) \rightarrow \min \quad (2)$$

この式では、計測点 p_i と基準点 p_0 の距離が定数 h に比べて十分小さければガウス関数は1に近くなり、 r_i^2 が優勢となるので最小二乗法と同等の結果を出力する。計測点 p_i が異常値であれば、ガウス関数が0に近い値に減衰するので、計算上無視される。この方法は、点群処理では、大変よく用いら

れている方法で、多くの研究論文が発表されている。

もう一つの方法は、ローレンツ関数を用いる方法で、以下の式を計算する[2]。

$$\sum \log(1 + r_i^2 / 2) \rightarrow \min \quad (3)$$

この目的関数はノイズや異常値に強い。たとえば、この式を用いて、上で述べた平面当てはめを行うと、以下の式が得られる。

$$\sum \frac{r_i}{1 + r_i^2 / 2} x_i = 0, \quad \sum \frac{r_i}{1 + r_i^2 / 2} y_i = 0, \quad \sum \frac{r_i}{1 + r_i^2 / 2} z_i = 0 \quad (4)$$

式(1)と比較して明らかのように、この式では残差 r_i が十分大きいとき、重みが0に近づくので、 (x_i, y_i, z_i) の寄与は実質的に無視できる。

移動最小二乗法とローレンツ関数を比較すると、われわれの実験では、式(2)で適切なパラメータ h を選択できれば、式(2)(3)はどちらもメッシュの平滑化ができ、結果は大差ない。図5に図4のメッシュを平滑化した結果を示す。

ただし、式(2)のパラメータ h の選択はノイズレベルに依存し、その選択を誤ると式(2)は発散する。大型設備の計測では、計測距離が大きくなるほど誤差が大きくなるので、 h の値を距離に応じて制御する必要がある。それに対して、式(3)ではそうした面倒なパラメータがないので、より安定した手法であるといえる。



図5. 平滑化されたメッシュ

6. その他の課題

点群から質のよいメッシュを生成することは大変重要であるが、まだ解決すべき課題は多い。それらを以下に示す。

(1) セグメンテーション

メッシュデータを類似した部分に分割することをセグメンテーションと呼ぶ。点群が精度よく計測できているのであれば曲率分布を利用したセグメンテーションが可能となるが、それは期待できない。誤差に強いセグメンテーション手法が必要である。

(2) 曲面抽出

プラントなどの設備では、自由曲面はそれほどなく、円柱などの幾何曲面が多い。こうした曲面を抽出し、曲面パラメータをできるだけ高い精度で算出することが必要である。ただし、部品は規格品が多く、パイプの半径などは規格で定められた飛び飛びの値しか取らない。そうした制約を活用しながら、信頼度を向上させていく必要がある。また、現状のアズビルモデリングがCSGを用いていることを考えれば、基本立体の自動抽出機能があると有益である。

(3) レジストレーション

点群計測では、レーザが直接あたらない箇所は計測できない。そのため、複数箇所から計測したデータをマージする必要がある。そのための手法をレジストレーションと呼ぶ。ノイズや異常値に強い手法を用いる必要がある。

(4) 物体認識

大型設備には多数の部品が含まれているため、部品の切り分けや同定を自動で行うことが望ましい。規格品が多いことを考えれば、自動化できる可能性は十分ある。

(5) データの補修操作. 対称化操作など

3D モデルをすべて自動的に作成することは簡単ではない。最終段階では人手が必要になると考えられるが、その際、モデルを容易に修復できるための操作が必要である。特に、プラントでは対称部品が多いため、部品の性質に合わせて欠損部分を修復するようなツールが望ましい。

7. まとめ

本稿では、大型設備のアズビルトモデリングのための手法と解決すべき課題について述べた。大型設備のアズビルトモデリングでボトルネックとなっているのは、効率的な点群処理手法である。現在のところ、大きなノイズと大量の異常値を含む大規模データが扱える商用システムは見当たらない。

幸い、基礎研究の分野では、活発な研究が進められており、点群処理に特化した国際シンポジウムも開催されている。ここ何年か、優れた研究成果が毎年いくつも発表されており、点群処理技術は日進月歩といえる。今後、そうした成果を取り込み、現場のニーズに合った商用システムを開発してく努力が必要であろう。

参考文献

- [1] D. Levin. Mesh-independent surface interpolation. Geometric Modeling for Scientific Visualization, 2003, 37-49.
- [2] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery. Numerical recipes in C++ Second Edition, Cambridge University Press 2002.
- [3] 増田宏, 村上健治, 藤井智: 既設プラントモデリングのための点群データ平滑化と曲面生成, 2007 年度精密工学会秋季大会講演論文集.