

対象物の制約を用いた点群データからの幾何曲面抽出

東京大学 増田宏

Extraction of Surface Primitives from Incomplete Point Data

The University of Tokyo, Hiroshi Masuda

3D models of engineering facilities are useful to simulate maintenance tasks. Laser scanning is effective to capture as-is shapes, but it is difficult for large facilities to obtain complete point data, because the positions of the scanner are limited to specific areas in facilities. Therefore, it is required to create 3D models using incomplete point data. In this research, we investigate methods for detecting surface equations of parts from incomplete point data as precisely as possible. We use various types of geometric constraints to increase the accuracy of detected data. In addition, we study interactive techniques to make up for missing information.

1. 目的

工場などの大規模設備の3Dモデルは、設備の改修や撤収作業の検討を計算機で行う上で重要である。現況を忠実な3Dモデルを作成するには、レーザ計測による点群データの活用が有効である。レーザ計測装置は近年急激に進歩しており、最速のレーザ計測装置(FARO Photon120)では、125mの範囲を毎秒97万6千点取得できる。そのため、停止時間が限定されている工場などでも効率的に点群計測が行えるようになってきた。

一方で、大規模点群を活用したモデリングでは、小型部品で用いられてきたリバースエンジニアリングシステムが利用できないことが多い。大規模設備の計測では、点群の個数が数千万から数億点になるほか、レーザ計測装置を設置できる場所が限定されており、裏側のデータを取得できないことも問題となる。また、多くの部材が入り組んでいるために、他の部材の陰になって計測できない箇所も多く発生する。さらに、大規模設備用の計測装置は相対的に精度が低い。誤差が3mm~6mm程度と大きく、異常値も非常に多い。

本研究では、こうした点群データから正確な部材パラメータを抽出することを考える。生産設備においては、構成部品の多くが標準品であり、平面、円柱、トーラス面が多い。したがって、点群から3Dモデルを作成するためには、これらの曲面要素を精度良く抽出することが必要となる。点群に対して曲面式を当てはめる方法は一般に広く用いられているが、現実的には不正確な値しか得られなかったり、計算が破綻したりすることが頻繁に生じる。そこで、本研究では、標準部材の制約や、インタラクティブな操作によって、正しい部材パラメータを計算する方法について考える。

2. 大規模点群からの曲面抽出

2.1 曲面抽出の方法

大規模点群から、平滑なメッシュモデルを生成する手法については、ロバスト推定を用いた平滑化と、ストリーミング方式を用いた大規模点群処理手法を報告した[1]。この手法を用いることによって、5000万点程度の点群から、平滑化されたメッシュモデルを生成した。本研究では、平滑化後に頂点数を約4分の1に簡略化した1000万頂点程度のメッシュモデルを用いる。

点群への2次曲面へのフィッティングは、Lukacsらのfaithful surface fittingの手法[3]を用いる。この方法では、曲面式を $S(\mathbf{x};\mathbf{s})=0$ と表現したとき、修正距離関数の2乗和を最小化するよう

に曲面式を決定する。この方法は真の距離関数よりも安定して高精度の当てはめができる。修正距離関数とは、真の距離関数を $d(\mathbf{x};\mathbf{s})$ とすると、 $d(\mathbf{x};\mathbf{s})=0$ ならば $\tilde{d}(\mathbf{x};\mathbf{s})=0$ かつ $\partial\tilde{d}/\partial\mathbf{x}=\partial d/\partial\mathbf{x}$ となる関数 $\tilde{d}$ である。Lukacsらは、2次曲面とトーラス面の修正距離関数を提案しており、本研究でも同様の方法を用いた。初期値については、メッシュモデルから法線が得られるため、座標と法線を用いて推定した。

2.2 曲面抽出の問題点

平滑化されたメッシュを用いて曲面抽出を行う場合、平面領域の抽出は良好に行える。しかし、円柱や円錐などの曲面データに関しては、多変数の非線形最適化問題を解くことが必要となるため、しばしば誤差が異常に大きくなったり、計算が破綻したりする。特に、小さい半径においては、半径に比べてノイズの大きさが相対的に大きくなるため、曲率計算で破綻しやすい。こうした問題に対応するために、本研究では、点群の座標以外の補助的な情報を用いることによって、計算の安定性を確保することを考える。

3. 画像を利用したインタフェース

2.1 反射強度の球面画像と透視投影画像

大規模な設備のモデリングにおいては、全方位から計測された完全な点群データを取得することが難しい。そこで、ユーザとのインタラクションによって対象物に関する知識を利用することが必要となる。ここでは、点群計測において、レーザ光の反射強度が得られていることから、このデータを画像として利用し、イメージベースモデリングの手法を利用することを考える。

まず、点群から画像を作成する。レーザ計測装置では角度 θ 、 ϕ を制御してレーザの照射方向を決め、対象物までの距離を計測する(図1)。そのため、計測点を球面座標 (r, θ, ϕ) で記述すると、図1右のように θ - ϕ 平面上に展開できる。ただし、球面画像を矩形に展開すると、図2aに示すように直線が歪むので、直線が保存するように、透視投影画像に変換する。ユーザが図2aの球面画像上でモデリング領域を矩形で指定すると、視線方向と投影範囲が計算されて図2cのような画像が生成される。透視投影画像上の点と球面画像上の点は一対一対応であり、相互に変換が可能である。また、球面画像は、メッシュモデルと関連付けられている。本システムでは、ユーザは、透視投影画像上で補助的な情報を指定する。

3.2 メッシュモデルと球面画像との関連付け

大規模点群から生成されるメッシュモデルは非常に大きいために多くのメモリを必要とし、また、読み込みにも非常に時間がかかる。そこで、out-of-core 法によって、必要な部分のメッシュだけをメモリ上に展開することを考える。点群データは、図1の θ 、 ϕ を用いて平面上に展開できるので、矩形領域を格子上に分割し、小さいセルに分割する。メッシュの頂点は、セルの単位でハードディスクに格納し、頂点間の隣接関係を示すポインタは、セル番号とセル内での頂点番号によって記述する。メッシュモデルの頂点座標は、球面座標に変換することにより、対応する球面画像の画素を得ることができ、また、球面画像の各画素は、対応するメッシュの頂点が含まれるセルをただちに得ることができる。なお本研究では、約1000万頂点のメッシュに対して、20000個のセルに分割して保持した。

3.3 領域成長法による曲面抽出

この仕組みを用いて、曲面抽出のための領域成長法を実装する。まず、図3右に示すように、ユーザは透視投影画像上で矩形領域を選択する。それにより、対応する球面画像上の画素が計算され、メッシュモデルのセルが読み込まれる。そして図3右の矩形内の頂点をシード領域とする。シード領域の頂点に対して曲面当てはめが行われると、メッシュモデルの隣接する頂点群を調べ、曲面上に乗っていたらそれらの頂点を曲面領域として追加する。その際、隣接頂点がまだメモリに展開されていないならば、その頂点を含むセルをハードディスクから読み込む。この操作を繰り返すことで、図3左に示すような曲面領域が抽出される。

4. 曲面抽出の精度向上のためのインタラクティブモデリング

生産設備やプラント施設では、標準部品が多く使われているため、フィーチャベースのシステムが有用である。そこで、フィーチャメニューを用意し、部材の種類を指定した上で曲面抽出を行うこととする。標準品であれば、取りうる寸法は規格に定められたものに限定される。たとえば、パイプであれば、半径は飛び飛びの値しか取ることができない。そこで、曲面フィッティングにおいては、まず、制約なしで曲面の方程式を計算し、最も近いパラメータを規格表から選択して、半径などを同定する。次に、一部の 변수を固定して再計算する。この方法により大きな計測誤差の問題を解決する。

ただし、レーザ光を吸収しやすい黒い部材や、半径が小さい部材では、誤差が非常に大きくなり計算が破綻しやすくなる。その場合には、上記の方法では半径の推定すら行うことができない。そうした場合には以下の二つの方法を取ることにした。

- (1) イメージベースモデリングでしばしば行われるように、ユーザが画像にドローイングを行い、その情報を補助的に用いる。
- (2) 既に確定した部材との接続関係を制約として用いる。

図3に、ユーザが透視投影画面上で母線を描画した例を示す。この直線は半径の推定に用いるだけなので、正確である必要はない。母線が指定されると、円柱は図4右のように、2枚の平面に接するので、この制約下で曲面当てはめを行い、半径を推定する。その上で、半径固定での曲面当てはめを行い、軸を再計算する。母線は円錐に対しても同様に指定でき、また、一本だけ指定してもよい。

また、他の部材との関係からも、半径や軸が同定できる。たとえば、フランジという部材は、接続するパイプと同軸となる(図5a)。エルボと呼ばれる部材は、接続する2本のパイプから、トーラスの径が決まる(図5b)。こうした部材間の接続関係によって、曲面計算の自由度を減らし、非線形最適化問題の安定性を高めることができる。特にトーラス面では変数が多いため、ほとんどのケースで計算が破綻するため、この方法が現実的である。図6に、パイプ、フランジ、エルボをモデリングした例を示す。

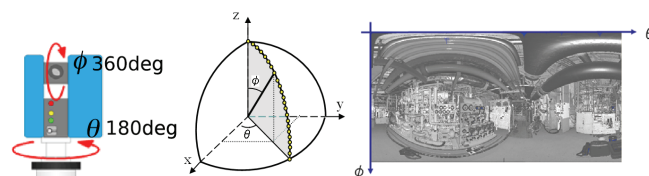


Fig1 Projection onto a θ ϕ plane.

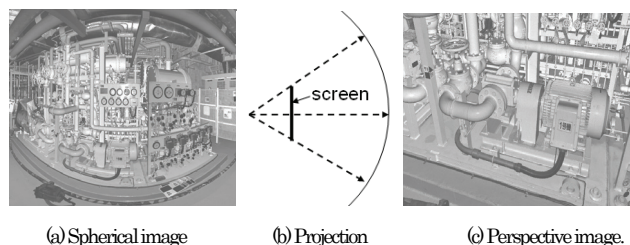


Fig2 Projection onto a sphere.



Fig3 A seed region and the detected region by region growing.

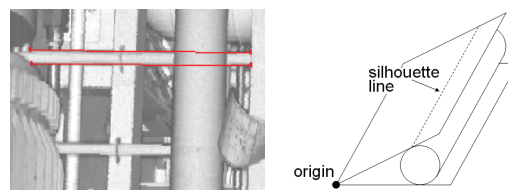


Fig4. Constraints of silhouette lines.

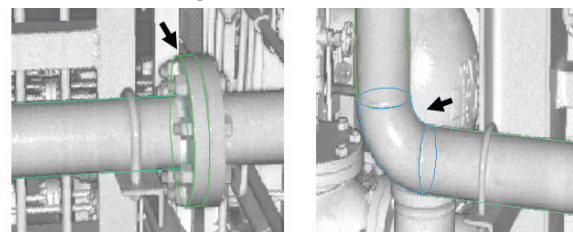


Fig5. Geometric features that are connected to other parts.

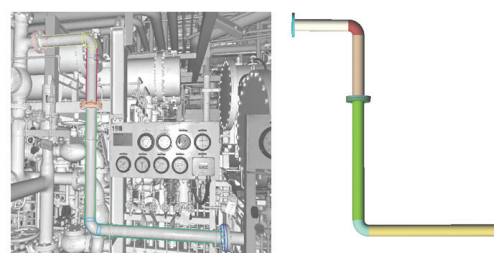


Fig6. Generated 3D models.

5. まとめ

本研究では、実用上必要な精度を確保するために、ユーザとのインタラクションを含む曲面抽出システムについて述べた。本手法はフィーチャベースであるため、汎用性を高めるためにはフィーチャの種類を増やすことが必要である。また、母線などはユーザが指定しているが、距離画像から自動抽出することも可能である。今後はこうした拡張を行っていきたい。

参考文献

- [1] H.Masuda, I.Tanaka: *Extraction of Surface Primitives from Noisy Large-Scale Point-Clouds*, CAD&A, 6(3), 2009.
- [2] G. Lukacs et al: *Geometric least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori*, RECCAD, Computer and Automation Institute, Budapest, 1997.