

計測点群からの対称性を利用した鋼橋の高品質かつ軽量な 3Dモデル構築手法

Method for constructing high-quality and lightweight 3D model of steel bridge
using symmetry from scanned point cloud

○鈴木卓也*, 溝口知広*
○Takuya Suzuki*, Tomohiro Mizoguchi*

*日本大学
*Nihon University

キーワード：アズビルトモデリング(As-Built Modeling), 対称性(Symmetry), 鋼橋(Steel bridge),
計測点群(Scanned point cloud)

連絡先：〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1
日本大学 工学部 情報工学科 生産システム工学研究室
鈴木卓也, Tel.: 024-956-8825, E-mail: cctk17012@g.nihon-u.ac.jp

1. 緒 言

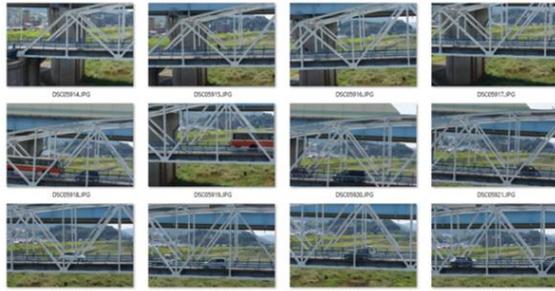
高度経済成長期に一斉建設されたインフラ構造物の一斉老朽化に伴い、インフラ維持管理の需要が高まっている。これに伴い、点検者による5年に1回の近接目視点検が義務化された。しかしながら国内の橋梁数は約70万と多い一方で、予算や点検技術者は不足しており、点検を支援する様々な情報技術の開発が求められている。その1つとして、構造物の現況を反映したアズビルトモデリングがあげられる。これは、ドローンやレーザスキャナ等により取得した点群から、3Dモデルを構築する技術である。作成した3Dモデルは、点検前のスケジューリング、点検作業中の現場の確認、点検後の点検結果の3次元的な記録など、点検業務の様々な段階で有効活用できる。

本研究では、橋梁の中でも3次元モデル化

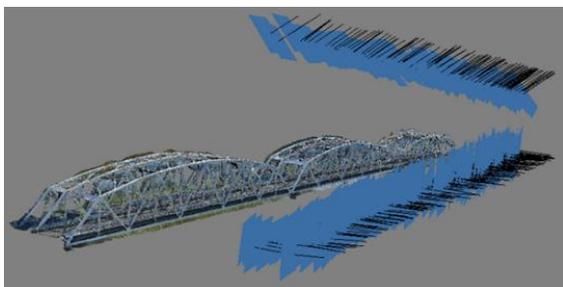
が困難とされるトラス橋等の鋼橋を対象とする。鋼橋は桁橋などと比べ、多くの鉄骨部材が複雑に配置されている。しかしながらその機能の観点から、例えば鉛直方向を向く鉄骨は水平方向には一定間隔で配置され、また道路の左右、前後に対称に配置されるなど、設計者の定めるルールに従い設計される。そこで点群中からこのような対称性を認識することができれば、各鉄骨を個別にモデル化する従来法と比べ、モデリングの効率化や、構築される3Dモデルの品質向上が期待できる。また点群が欠損しモデル構築が困難な部分に対しても、対称性を考慮し欠損部の形状を推定することで構築が可能となる。さらに、作成するモデルは点群に比べてデータ量が小さいため、タブレット等でのスムーズな表示が可能となる。

本研究では、ドローンやレーザスキャナ等で取得した3次元点群より、鋼橋中の対称性

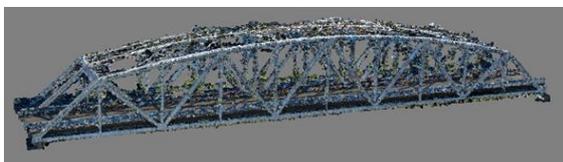
を検出し、これを利用して鋼橋の実態を反映した高品質かつ軽量の3Dモデルを構築する手法の開発を目的とする。本報では、点群中の鉄骨部材の抽出手法、点群中の対称性の認識、及び対称性を用いた部材のグルーピング手法について述べる。



(a) ドローンで撮影した画像



(b) 作成した点群とカメラの位置・姿勢



(c) 本研究で使用する点群

Fig.1 使用するデータ

2. 使用するデータ

本研究では、広島市にある安佐大橋（全長314m、本研究で対象とする部分は約225m）をドローンにて撮影した画像を使用する。画像枚数は356枚である。Fig.1に使用したデータを示す。Fig.1(a)の複数画像から商用ソフトPhotoScanにて点群を作成した。Fig.1(b)には作成した点群とカメラの撮影位置・姿勢を示す。点数は15,856,599である。このうち本研究では、Fig.1(c)にあるように、全体のおよそ1/3を切り取った点群を対象とする。点数は5,902,266である。

3. 提案手法

本手法では、まず入力点群から鉄骨部材の抽出を行い(Step1)、抽出した鉄骨部材の点群から対称性の認識を行う(Step2)。その後、対称性を用いたグルーピングを行い(Step3)、最後にグループごとにプレートモデルを当てはめることでモデリングを行う(Step4)。本報ではこのうちStep3までを述べる。

3.1 鉄骨部材の抽出(Step1)

鉄骨部材は直線に近い形状をしている。この部材を入力点群中からそれぞれ抽出するため、まず各点ごとにkd木を用いてその近傍点集合を探索し、主成分分析を行う。また得られる固有値から直線度を計算し、閾値処理により直線度の高い点のみを抽出する。その後、抽出した点群をボクセル化し、直線度の高い点が含まれる連結ボクセルを1つとするクラスタリングを行うことで、部材を抽出する。以下に抽出手法の詳細を述べる。

3.1.1 kd木を用いた近傍探索(Step1-1)

まず、各点 x_i に対し、kd木を用いて近傍点集合を探索する。鉄骨部材とそれらの接続部材を適切に区別できるように、近傍サイズは実験より2.0mに設定した。

3.1.2 主成分分析による直線度の計算(Step1-2)

次に、近傍点集合に対して主成分分析を行う。得られた固有値から、直線度 k_i を式(1)で計算する。

$$k_i = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (1)$$

ここで $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ は固有値であり、 λ_{\max} はそのうちの最大値である。

直線度 k_i は、その値が大きいほど点群が直線状に分布することを示す。 $k=1.00$ なら直線、 $k=0.50$ なら平面、 $k=0.33$ なら球となる。

求めた直線度を色分けして表示した結果を Fig.2 に示す. さらに閾値 th_{line} を用い, 直線度が th_{line} 以上の点のみを抽出した結果を Fig.3 に示す. 実験より $th_{line} = 0.75$ に設定した. th_{line} 以上の点数は 1,283,751 であった.

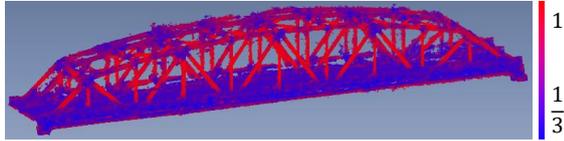


Fig.2 直線度の算出結果



Fig.3 直線度が閾値以上の点の抽出結果

3.1.3 ボクセル化(Step1-3)

次に, 閾値処理により抽出した点群に対してボクセル化を行う. ボクセルとは, 2次元画像ではピクセルに相当するものであり, 3辺の長さが等しいセルの集合からなるモデルである. ボクセル化を行うことで, その隣接関係を用いた処理が可能となる. ボクセルの1辺は 0.075m とした. ボクセル数はおよそ $1,200 \times 200 \times 500$ となる.

3.1.4 クラスタリング(Step1-4)

ボクセルを再帰的に探索し, 連結する有効セル集合を1つとするクラスタリングを行い, 各クラスタに固有のラベルを割り当てる. Fig.4 にクラスタリングの概要を示す. 本手法では注目ボクセルの6近傍を探索した. またクラスタ内の有効セル数が100未満の場合は除外した. 最後に, ボクセルに割り当てたラベルを点群に対応させる. Fig.5 にクラスタリングの結果を示す.

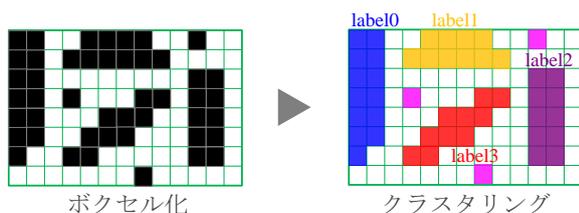


Fig.4 クラスタリングの概要

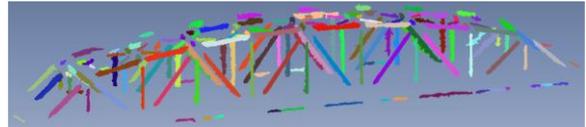


Fig.5 クラスタリングの結果

3.2 対称性の認識(Step2)

次に, 抽出した部材の点群を用い, 鋼橋中に存在する対称性を認識する. Fig.6 に対称性の認識手法の概要を示す. まず, 元の点群 M を任意平面で反射した点群 O を作成する. その後, 点群 M と O を位置合わせするため, 点群 O に平行移動と回転を適用し, O' へと座標変換する. その後, M と O' の対応点ペア集合を求める. ここで対応点ペアとは, その点間距離が閾値以下となるペアを指す. Fig.6 の例では, M の p_1 と O' の q_3 が対応している. O' は元々 M を反射した点群であるので, O' の q_3 は M の p_3 と等しい. この関係から M の p_1 と p_3 が対応点ペアであるということがわかる. この対応点ペアの midpoint 集合は, 反射平面上に分布するため, これに最小二乗平面を当てはめることで反射平面を抽出できる.

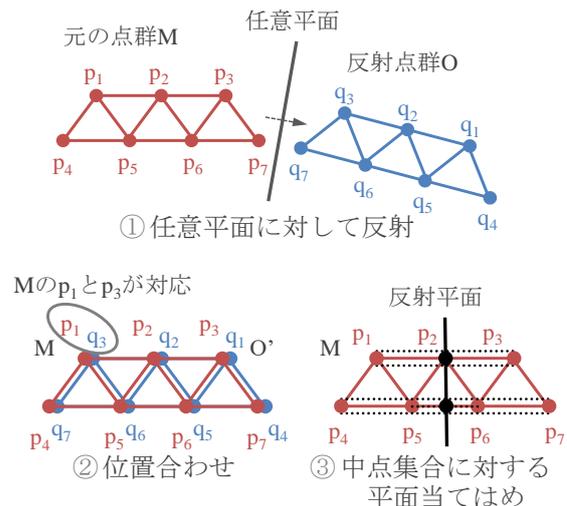


Fig.6 対称性の認識手法の概要

3.2.1 点群の位置合わせ(Step2-1)

位置合わせは、おおよその整列をさせる初期位置合わせと、精密に整列させる最終位置合わせに分類される。本手法では、初期位置合わせに商用ソフト Rapidform XOR3 を用い、最終位置合わせに ICP 法を用いる。Fig.7 に ICP 法の例を示す。ICP 法では、2つの点群間で最近点の探索と対応点間距離の最小化を繰り返し行い、高精度な位置合わせを行う。

本手法では、各ペアに対しまず、一方からランダムに 10,000 点をサンプリングする。次に他方のすべての点のうち、サンプリング点から距離 d 以内にある点を探索する。繰り返しの前半ではクラスタペアの距離が離れているため、距離 d は大きめに設定する。後半ではおおよその整列が行えているので小さめに設定する。処理の繰り返しの前半の距離 d_1 は 0.5m、後半の距離 d_2 は 0.4m に設定した。また、繰り返し回数は 50 回に設定した。Fig.8 に点群の位置合わせ結果を示す。ここで、赤色の点群が元の点群、青色の点群が任意平面で反射した点群を表す。

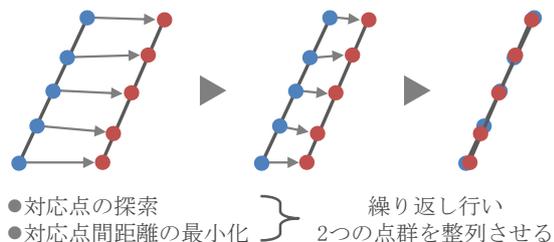


Fig.7 ICP 法の概要



(a)初期位置合わせ後



(b)最終位置合わせ後

Fig.8 位置合わせ結果

3.2.2 反射平面の抽出(Step2-2)

次に、求めた点の対応を用いて中点集合を作成する。作成した中点集合に対し、最小二乗法により平面を当てはめ、これを反射平面として抽出する²⁾。

本手法では、橋梁の進行方向に対し前後、左右の2つの反射平面 p_1 , p_2 を抽出した。この処理の概要を Fig.9 に、また抽出した2つの反射平面を Fig.10 に示す。ここで、Fig.10 の青色と緑色の部分は、それぞれの反射平面の抽出に使用した中点集合を表す。なお、平面 p_1 と平面 p_2 は互いに直交するように微調整を行った。

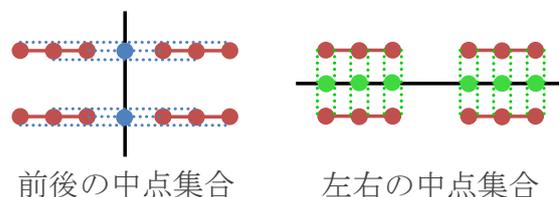


Fig.9 反射平面抽出の概要

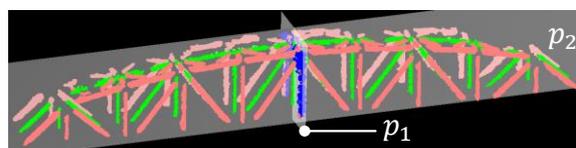


Fig.10 中点集合と反射平面

3.3 対称性を用いたグルーピング(Step3)

次に、対称性を用いて鉄骨部材のグルーピングを行う。Fig.11 にこの処理の概要を示す。まず、元の点群 M を反射平面で反射した点群 M' を作成する。その後、 M と M' 内の全クラスタペアに対し、その平均最近点間距離を計算する。これが閾値以下のペアは、同一グループとして認識する。この処理を平面 p_1 , p_2 に対して行う。

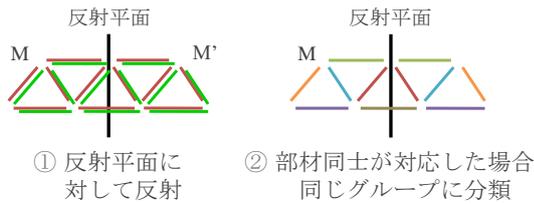


Fig.11 対称性を用いたグルーピングの概要

Fig.12 にグルーピングの例を示す。クラスターペア $\langle c_i, c_j \rangle$ のうち、一方 c_i を反射平面に対して c'_i と座標変換する。その後、クラスター内の点の平均最近点間距離 e を式(2)で計算する。

$$e = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sqrt{(\mathbf{x}_k^{i_i} - \mathbf{x}_{c(k)}^j)^2} \quad (2)$$

ここで N は対応点ペア数である。また $\mathbf{x}_k^{i_i}$ は c'_i 内の k 番目の点であり、 $\mathbf{x}_{c(k)}^j$ は c_j 内の $\mathbf{x}_k^{i_i}$ に対応する点である。これが閾値 th_{group} 以下の場合、1つのグループに分類する。 th_{group} は 0.3m に設定した。この処理を2つの反射平面に対して行う。

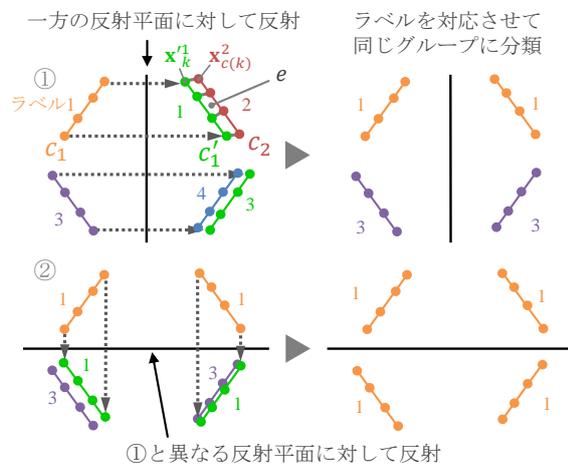


Fig.12 グルーピングの例

4. 実験結果

本章では実験結果について述べる。Step1 の鉄骨部材の抽出結果を Fig.13 に示す。この点群中には 187 本の鉄骨部材があり、本手法によりそのうちの 118 本の抽出に成功した。抽出に成功した部分は、橋梁側面の長い鉄骨

部材や、車道側上部の鉄骨部材であった。Fig.14 に抽出に失敗した鉄骨部材を示す。Fig.14 は抽出結果の上部と入力点群を上から見た図であり、赤色の線を引いた部分が抽出失敗部分を表す。また青色の線は入力データの欠損部を表す。抽出に失敗した部分は、主に歩道側上部の短い鉄骨部材、及びデータ欠損が大きな部材であった。失敗した理由として、kd 木のサイズに対して小さいために除外されたと考えられる。また入力データの欠損が挙げられる。計算時間はトータルで約 53 分であり、その大半を kd 木を用いた近傍探索と直線度計算に要した。

対称性を用いたグルーピング結果を Fig.15 に示す。目視で確認した限りはすべての鉄骨部材を正しくグルーピングできた。

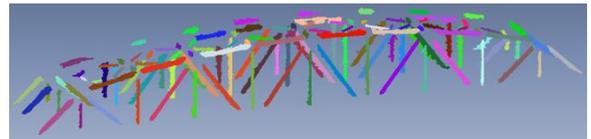


Fig.13 抽出に成功した鉄骨部材

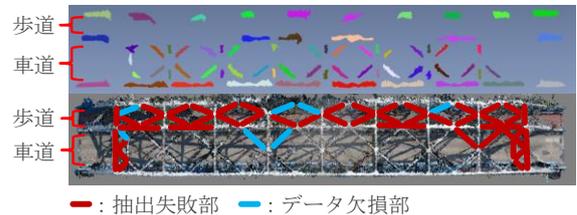


Fig.14 抽出に失敗した鉄骨部材

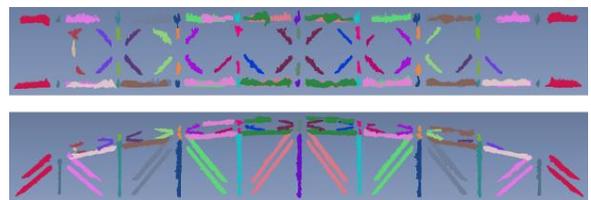


Fig.15 グルーピング結果

5. 結言と今後の課題

本報では、対称性を利用した鋼橋の高品質かつ軽量の 3D モデル構築のため、点群からの鉄骨部材の抽出手法、対称性の認識、およ

び対称性を用いたグルーピング手法について述べた。

今後の課題として、点群細線化処理の導入による鉄骨部材の高精度な抽出、及び対称性を利用したテンプレートモデルの当てはめによる 3D モデルの作成が挙げられる。

謝 辞

本研究で使用した UAV 画像は、(株)計測リサーチコンサルタント様よりご提供いただきました。

参考文献

- 1) H. Lin, *et al.*, “Semantic Decomposition and Reconstruction of Residential Scenes from LiDAR Data,” Proc. ACM Trans. Graph, pp.1-10 2013.
- 2) Craig M. Shakarji, “Least-Squares Fitting Algorithms of the NIST Algorithm Testing System,” Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 103, Number 6, pp.633-641 1998.