

点群の平面性に基づく領域分割による稜線抽出法

金野哲士 今野晃市
岩手大学

著者らは、これまで、レンジセンサを用いて近代的な建造物を仮想空間上に復元するために、特徴線の一致を利用した点群位置合わせ手法を提案してきた。本稿では、既存の提案手法を拡張し、建造物の稜線を表す特徴線抽出法を提案する。本手法では、点群から抽出した平面性を利用して、同一平面に含まれる点群を抽出することで、領域分割する。次に、隣接する領域の境界線として線分を生成することで、稜線を表す特徴線を抽出する。稜線を抽出することにより、従来必要とされた建造物の測定条件が緩和され、測定の自由度が増加する。

Ridge Lines Extraction Based on Flatness of Point Cloud

Tetsuji KONNO Kouichi KONNO
Iwate University

To restore a modern building in a virtual space using the range sensor, we have proposed a point cloud registration method that based on a feature-line-matching approach. In this paper, we extend our previous method to extract not only silhouette line but also ridge line of a modern building as well. First a point cloud is classified to the points belonging to some areas with satisfying the flatness, and then ridge line is calculated from intersection of adjacent planes. As a result, our extended method has improved the restoring building and the strong constraint measurement conditions, compared to previous method.

1 はじめに

実空間の建造物を仮想空間上に復元するモデリング技術は、仮想現実感 (VR) や複合現実感 (MR) を伴ったコンテンツの重要な作成手段の一つである。このようなコンテンツでは、現実感を増加させるために、建造物の幾何学的な形状に基づいたモデルの生成が有効である。一般的に、レンジセンサは、建造物を測定することにより、建造物の幾何学的な情報を点群として出力する。その幾何学的な情報に基づいて建造物モデルを生成することにより、現実感が増加したコンテンツの作成が可能となる。以下では、一つの方向から測定して得られた点群を単位点群と呼び、図 1 に単位点群の例を示す。

建造物モデルを生成する場合、一つの単位点群だけでは、実空間に存在する建造物全体の幾何学的な情報が不足しているため、異なる複数の方向から建造物を測定し、建造物モデルの生成に必要な単位点群を複数取得する必要がある。仮に、複数の単位点群を、同一の空間に適切に配置することができれば、建造物全体の表

面を覆うような点群を獲得することが可能となる。このような処理を効率化するものとして、複数の単位点群を自動的に配置する点群位置合わせ手法が挙げられる。

点群位置合わせ手法は点ベースと特徴量ベースの手法に分類される。点ベースの代表的な手法として、Besl らの Iterative Closest Point(ICP) アルゴリズムを用いた位置合わせ手法が挙げられる [1]。ICP アルゴリズムは、二つの単位点群に属する点と点の距離を基に誤差評価関数を定義し、その誤差評価値が最小となるような幾何変換を求める手法である。一般的に、ICP アルゴリズムは単位点群に属する全ての点を誤差評価基準とするために、計算時間が膨大となる場合が多い。そのため、Ikeuchi らは、複数の単位点群を同時に位置合わせ処理する手法を提案し、膨大な点群を高速で位置合わせ処理することが可能となった [2]。

一方、点群位置合わせ処理の計算時間を短縮するものとして、特徴量ベースの手法が挙げられる。Acka らは、特徴点を誤差評価基準とした位置合わせ手法を提案した [3]。Acka らの手法では、建造物に貼付したマーカーを特徴

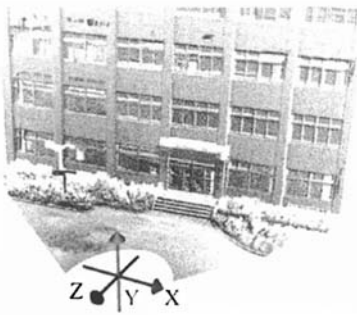


図1 単位点群の例

点として単位点群から抽出し、その特徴点に基づいて位置合わせ処理する手法である。また、Stamosらは単位点群から抽出した特徴線を誤差評価基準とした位置合わせ手法を提案した[4]。Stamosらの手法では、単位点群を領域分割し、その領域を含有する平面を作成する。そして、隣接する平面の干渉計算を用いて特徴線を生成した。本手法も特徴量ベースの手法に基づいて、単位点群から特徴線を抽出し、その特徴線を誤差評価基準とした位置合わせ処理を行う。本手法では、Stamosらの手法と異なるプロセスで領域分割を行う。

著者らは、これまで、近代的な建造物を復元対象として、特徴線の一致を利用した点群位置合わせ手法を提案してきた[5]。既存の提案手法では、デプスエッジを基に線分を生成することにより特徴線を抽出する。特に、建造物のシルエットのような、奥行き方向で大きな差分が発生する特徴部分を特徴線として抽出することが可能となった。既存手法では、単位点群から抽出した長い特徴線を位置合わせ処理に有効なものとして使用した。しかし、長い特徴線を安定的に抽出するために、厳しい測定条件を設ける必要があった。また、論文[5]の実験では、位置合わせ処理に有効な特徴線が少なく、位置合わせ処理が破綻してしまうことがあった。

本稿では、このような問題を解決するために、既存の提案手法を拡張し、稜線という新たな特徴線を抽出する手法を提案する。本手法では、建造物の平面性に着目し、既存の提案手法で抽出した特徴線を基に単位点群を領域分割する。一度の領域分割により、単位点群は、各特徴線

を包含する平面に属する点群と、それ以外の残存点群に分けられる。既存手法を用いて、残存点群に対する特徴線抽出と領域分割を繰り返す。また、各領域に属する点群に対しても既存手法を適用し、領域のシルエットを表す特徴線を抽出する。隣接する二つの領域間で、シルエットを表す特徴線が一致した場合は、各領域を包含する二つの無限平面を定義し、その二つの無限平面の交線を求めることにより稜線を生成することができる。本手法では、建造物の平面性という新たな着眼点を追加することにより、従来必要であった建造物の測定条件が緩和される。また、領域のシルエットを表す特徴線や稜線を抽出することにより、位置合わせ処理に有効な特徴線が増加し、位置合わせ処理の安定性も増加する。

2 既存手法

本章では、著者らが、これまで提案した、特徴線の一致を用いた点群位置合わせ手法の概要を述べる。一般的に、近代的な建造物は直線的な特徴を多数保持しており、その特徴を表すような特徴線が容易に得られれば、安定した位置合わせ処理を行うことができる。既存手法は、この点に着目して、デプスエッジを用いた特徴線抽出を行った。ただし、デプスエッジは奥行き方向の差分を利用して抽出するため、その特徴が顕著に現れるように、以下に述べる建造物の測定条件を定義する必要があった。

- 建造物の特徴部分の近辺が、奥行き方向で大きく変化するようにレンジセンサを配置する。
- 建造物上の特徴部分が、二つの測定方向で障害物に遮られず、点群として得られるようにレンジセンサを配置する。

既存手法では、上記の測定条件に基づいて建造物を測定し、得られた複数の単位点群について位置合わせ処理を行う。既存手法は、特徴線の抽出処理と特徴線のマッチング処理に分けられる。はじめに、特徴線の抽出処理を単位点群ごとに行う。次に、特徴線のマッチング処理を、

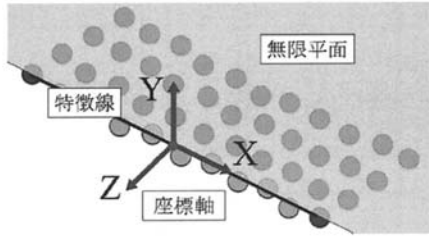
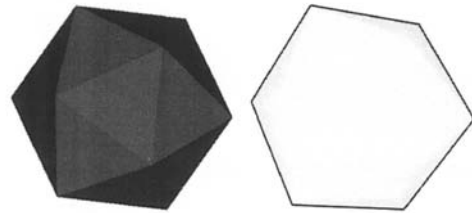


図2 線分上の局所的な座標軸

ユーザが選択した二つの単位点群ごとに行う。このとき、その二つの単位点群は、単位点群間で一致する特徴線のペアを持つものを選ぶ。

特徴線の抽出処理では、はじめに、建造物の特徴部分を表す点列を抽出するために、隣接する二点間の奥行き値の差分が大きい点列を抽出する。抽出した点列を直線的な特徴量ごとに複数のセグメントに分割し、各セグメントを線分で近似することで、特徴線を生成する。本稿では、単位点群から抽出した複数の特徴線を**特徴線群**と呼ぶ。特徴線のマッチング処理では、RANSAC アルゴリズム [6] に基づいて、二つの特徴線群間で一致した特徴線ペアが最大となるような幾何変換を算出する。ただし、単位点群は測定誤差を含んでいるため、建造物の幾何学的な特徴を顕著に表した長い特徴線を用いて幾何変換を算出する。また、効率的に特徴線ペアを選出するために、前処理として、図2に示すような局所的な座標軸を各特徴線上に設定し、マッチング処理に使用する。局所的な座標軸は、特徴線を包含するような無限平面が存在すると仮定し、その平面の単位法線ベクトルに基づいて設定する。

図3(a)に示す二十面体のポリゴンから単位点群を擬似的に生成し、既存の提案手法で抽出した特徴線群を図3(b)に示す。図3(b)の太線が抽出した特徴線であり、微小な点は単位点群を表す。図3(b)から分かるように、ポリゴンのシルエットを表すような、外側の特徴線が抽出されているが、稜線を表す内側の特徴線は全く抽出されていない。本稿では、既存の手法で抽出できなかった稜線のような、内側に存在する特徴線を抽出する方法を提案する。



(a) ポリゴン

(b) 特徴線群

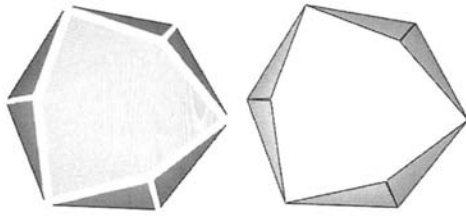
図3 ポリゴンと特徴線群

3 拡張手法

既存手法では奥行き方向の差分に基づいて特徴線を抽出したが、本稿では、新たな特徴量として建造物の平面性に着目する。一般的に、建造物の表面形状は平面で構成されており、測定して得られた単位点群も、その平面性に基づいて配置されている。本手法では、この平面性を利用して、建造物の表面形状を平面で分割するように単位点群を領域分割する。そして、既存手法を用いて、各領域のシルエットを表すような特徴線を抽出することで、建造物の内側に存在する特徴線を抽出する。また、隣接する二つの領域において、そのシルエットを表す特徴線が重なる場合、二つの領域の交線として稜線を生成する。

3.1 領域分割

一般的に、一つの無限平面上に配置された点群は、各点の接平面を表す単位法線ベクトルが全て同じ方向となる。また、既存手法では、特徴線とその近傍の点群を包含するような無限平面が存在すると仮定し、無限平面の法線ベクトルに基づいて、特徴線上の局所的な Y 軸を設定した。そのため、特徴線上の局所的な Y 軸方向と、特徴線の近傍に存在する点群の接平面を表す単位法線ベクトルの方向は、ほぼ等しいと考えられる。本手法では、特徴線上の局所的な Y 軸と、点の接平面を表す単位法線ベクトルがなす角度に基づいて領域分割の判定を行う。具体



(a) 領域分割の結果 (b) 新たな特徴線群

図4 領域分割結果と新たな特徴線群

的には、以下の手順で領域分割を行う。

1. 特徴線を構成する点列から領域の作成を開始する。仮にこの点列を G とし、点列 G を含む領域を A とする。
2. 点列 G に隣接する点群 P_i に対して、特徴線上の局所的な Y 軸と、隣接点 P_i の接平面を表す単位法線ベクトルがなす角度 θ_i を求める。もしも、角度 θ_i が閾値 δ よりも小さい場合、隣接点 P_i を領域 A に含める。
3. 領域 A に新たに含まれた点群を点列 G として処理2を繰り返し行い、領域 A を拡張していく。

図3(b)に示した特徴線群を基に領域分割を行った結果を図4(a)に示す。図4(a)では、各領域に属する点群を濃色で表しており、中央の薄色部分は領域に属さない残存点群を表す。図4(a)から分かるように、一度の領域分割では、全ての点群を領域分割することができない。そのため、領域分割されなかった残存点群の境界線をデブスエッジとみなして、既存手法を用いて新たな特徴線を抽出する。抽出した特徴線に対して処理1～処理3を再度適用し、新たな領域分割を行う。以上のように、残存点群に対する特徴線抽出と領域分割を繰り返し行うことで、単位点群が平面性に基づいて領域分割される。

図4(b)では、図4(a)の濃色で表した領域に対して、既存の特徴線抽出法を適用した結果を示す。図4(b)の太線は、抽出した特徴線を表している。図4(b)において、隣接する二つの領域の境界部分では、そのシルエットを表す特徴線

が重なっている。特徴線のマッチング処理の計算コストを減少させるためには、重なっている二つの特徴線を一つの稜線にまとめる必要がある。次節では、各領域のシルエットを表す特徴線が重なっている部分から稜線を生成する手法を述べる。

3.2 稜線生成

本手法では、隣接する二つの領域の交線として稜線を求める。説明のために、隣接する二つの領域 A, B に含まれる点群を G_a, G_b とする。はじめに、稜線の方方向ベクトルを定めるために、領域 A, B の交線を表すような無限直線を算出する。次に、点群 G_a, G_b を用いて無限直線上に稜線の端点を生成し、その端点を連結した線分を稜線とする。以下では、各処理を詳細に述べる。

3.2.1 無限直線の算出

本手法では、隣接する領域 A, B をそれぞれ包含するような、二つの無限平面の交線を無限直線として算出し稜線を生成する。二つの領域 A, B の境界線となるような、最適な無限直線を求めるためには、無限平面の法線ベクトル N_a の向きと原点 P_g の位置が重要となる。よって、領域に含まれる点群を用いて、その無限平面を最適化する。

例えば、領域 A を包含するような無限平面の単位法線ベクトル N_a と原点 P_g を算出する場合を考える。このとき、単位法線ベクトル N_a は、点群 G_a において、各点の接平面を表す単位法線ベクトル N_i の平均とする。つまり、単位法線ベクトル N_a は式(1)で表される。

$$N_a = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} N_i \quad (1)$$

n は点群 G_a を構成する点の数である。また、点群 G_a の重心を無限平面の原点 P_g とする。隣接する領域 B に対しても同様の最適化を行い、二つの無限平面の交線を求めることで、稜線の方方向ベクトルを表す無限直線を算出する。

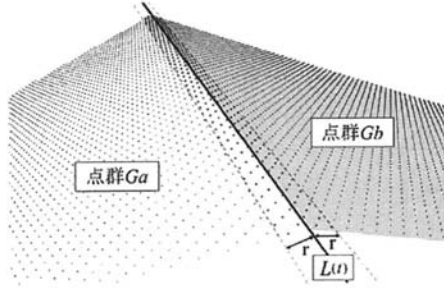


図5 端点候補の絞込み

3.2.2 無限直線の線分化

前節では、隣接する二つの領域 A , B の境界線として、最適な無限直線を求めた。本節では、この無限直線を線分化するために、無限直線上に二つの端点を定義する。そして、二つの端点を連結した線分を稜線とする。

本手法で求める稜線は、隣接する二つの領域の幾何学的な境界線となるため、二つの領域 A , B の共有境界稜線となる必要がある。一般的に、隣接する二つの領域 A , B のシルエットを表す特徴線は一致しないが、共有境界稜線を求めるために、点群 G_a , G_b の中から稜線の端点となる二点を検出する。

稜線の端点となる二点を検出する前に、点群 G_a , G_b から端点の候補を絞り込む。本手法では二つの領域の境界部分に稜線を生成するため、稜線の端点となる可能性が高い二点は、その境界部分に生成した無限直線の近傍に存在すると考える。よって、図5に示すように、点群 G_a , G_b に対して無限直線 $L(t)$ から距離 r 内に存在する点列を探索することで、端点候補の絞込みを行う。

既存手法では、建造物の幾何学的な特徴を顕著に表した長い特徴線が、マッチング処理に有効であるとした。本手法では、算出した稜線をマッチング処理に有効な特徴線とするために、稜線の長さが最大となるように端点を検出する。図6に示すように、点群 G_a , G_b から探索した点列 P_i , Q_j を無限直線 $L(t)$ に射影し、無限直線上の位置を表すパラメータ t を算出する。ただし、無限直線 $L(t)$ の方向ベクトルを \mathbf{v} とし、 $L(t)$ が通る一点を \mathbf{p} とすると、パラメー

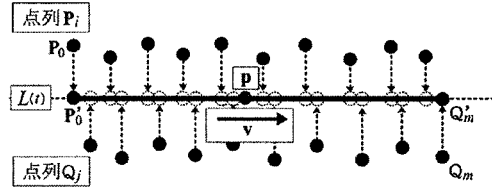


図6 端点の検出

タ t は式 (2) で表される。

$$t = \frac{(\mathbf{P}_i - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{v}}{|\mathbf{v}|^2} \quad (2)$$

パラメータ t が最大、最小となるような二つの射影点を稜線の端点とする。例えば、図6では、点 \mathbf{P}_0 と点 \mathbf{Q}_m を無限直線 $L(t)$ に射影した二点 \mathbf{P}'_0 , \mathbf{Q}'_m が稜線の端点となる。

4 実験

4.1 仮想物体に対する実験

図3(a)に示した二十面体ポリゴンから単位点群を生成し、全ての領域分割を行った結果を図7(a)に示す。図4(a)に示した残存点群が領域分割されているのが分かる。また、領域分割を行った単位点群から、全ての特徴線を抽出した結果を図7(b)に示す。図7(b)では、稜線を表す内側の特徴線が抽出されているのが分かる。

4.2 建造物に対する実験

著者らが論文 [5] で行った実験と同様の単位点群に対して本手法を適用した結果を図8と図9に示す。また、図8と図9に示した特徴線群を用いてマッチング処理を行った結果を図10に示す。図8と図9上の太線はマッチング処理で一致した特徴線である。

論文 [5] の実験で抽出した特徴線群では、この二つの単位点群だけで位置合わせ処理することができなかった。しかし、本手法を適用したことでマッチング処理に有効な特徴線が増加し、図10に示すような位置合わせ処理が可能となった。このように、マッチング処理に有効な特徴線が増加することにより、既存手法の測定条件を緩和することが可能となった。

5 まとめ

本稿では、既存の提案手法を拡張し、建造物の稜線を表す特徴線の抽出手法を提案した。はじめに、既存手法で抽出した特徴線を基に単位点群を領域分割した。次に、各領域に既存手法を適用することで、領域のシルエットを表す特徴線を抽出した。隣接する二つの領域で特徴線が重なった場合、その二つの領域の交線として稜線を生成した。稜線を表す特徴線が抽出可能となったことで、既存手法で述べた測定条件が緩和され、点群位置合わせ処理の安定性が増加する。今後の課題として、オクルージョンによって発生した単位点群上の欠落部分を充填する手法を開発する必要がある。

謝辞

本研究の一部は JST サテライト岩手実用化可能性試験、および科学研究費補助金（基盤研究(B)16300021）の支援による。

参考文献

- [1] P. Besl and N. McKay, "A Method for Registration of 3-D Shapes", IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell. Vol.14. No.2. pp.239-256, 1992.
- [2] K. Ikeuchi, A. Nakazawa, K. Hasegawa and T. Ohishi, "The Great Buddha Project: Modeling Cultural Heritage for VR Systems through Observation", IEEE ISMAR03 pp.7-17, Tokyo, Japan, Nov. 2003.
- [3] D. Akca, "Full Automatic Registration of Laser Scanner Point Clouds", Optical 3-D Measurement Techniques VI, Vol.1, pp.330-337, Zurich, Switzerland, 2003.
- [4] I. Stamos and M. Leordeanu, "Automated Feature-Based Range Registration of Urban Scenes of Large Scale", IEEE International Conference of Computer Vision and Pattern Recognition 2003, WI, Vol.2, pp.555-561, June 16-22 2003.
- [5] 金野哲士, 今野晃市, 藤本忠博, 千葉則茂, "測定点群を用いた建造物モデリングのための特徴線抽出法と特徴線マッチング法", 芸術科学会論文誌, Vol.5, No.3, pp.80-91, 2006.
- [6] M.A. Fischler and R.C. Bolles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography", Communications of the ACM, vol.6, no.24, pp.381-395, 1981.

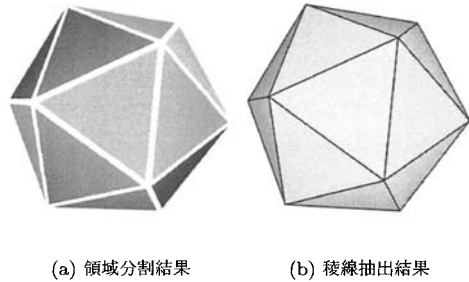


図7 領域分割と稜線抽出結果

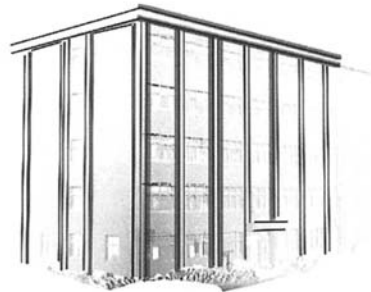


図8 建造物に対する結果1

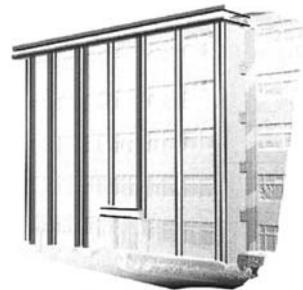


図9 建造物に対する結果2

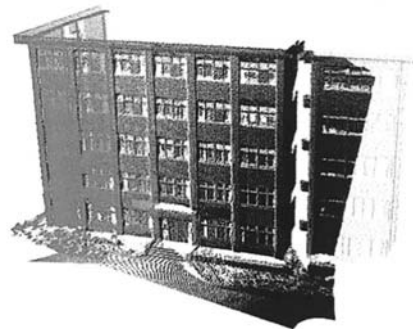


図10 点群位置合わせ処理結果