

平面性に基づいた測定点群の 階層的な領域分割による稜線抽出法

金野哲士 今野晃市 千葉則茂
岩手大学

Ridge Lines Extraction by Hierarchical Planer Segmentation of Measured Point Clouds

Tetsuji KONNO Kouichi KONNO Norishige CHIBA
Iwate University

E-mail: {kontetsu, konno, nchiba}@cis.iwate-u.ac.jp

アブストラクト

レンジセンサを使用することで、建造物の幾何情報が点群として得られる。建造物全体の幾何情報を得るためには、複数の点群を統合する位置合わせ処理が必要である。著者らは、これまで特徴線の一致を利用した位置合わせ手法を提案してきた。しかし、従来手法では、位置合わせ処理に有効な特徴線を安定的に抽出するために、厳しい測定条件が必要であった。また、有効な特徴線数が少ないため、制限された位置から建造物を測定し、得られた全ての点群を位置合わせ処理する必要があった。本論文では、従来必要であった測定条件を緩和するために、建造物の稜線を表す特徴線の抽出法を提案する。本手法は、従来手法で抽出した特徴線を用いて、測定点群を階層的に領域分割する。そして、隣接する二つの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。実験では、測定して得られた点群から稜線を抽出し位置合わせ処理を行い、従来手法との比較を行った。その結果、本手法の有効性が確認された。

Abstract

Registration method unifies some point clouds measured by range sensor in order to get geometric information of whole building. In our previous method we use feature-line matching approach to get geometric information of a building but the result is not good enough because of the limited number of feature lines. In this paper, we extract ridge line to increase the number of feature lines. First, we applied the hierarchical crusting method which based on flatness of building to measured point clouds, then made a boundary line of adjacent two regions as a ridge line. As a result, our extended method has improved the restoring building and the strong constraint measurement conditions, compared to previous method.

キーワード：位置合わせ，特徴線，稜線，領域分割，平面性

Keywords : Registration, Feature Lines, Ridge Lines, Clustering, Flatness

1 はじめに

近年、レンジセンサから得られた建造物の幾何情報からポリゴンモデルを作成し、そのポリゴンモデルで構成された都市空間をウォークスルーするような VR コンテンツが増加している。レンジセンサを使用することで、建造物の幾何学的な情報が点群として得られる。得られた点群に基づいてモデリングを行うことにより、建造物との幾何学的な整合性を保持したポリゴンモデルが生成可能となる。以下では、一つの方向から測定して得られた点群を

単位点群と呼ぶ。図 1 に単位点群の例を示す。図 1 に示すような一つの単位点群だけでは、建造物全体をモデリングするための幾何情報が不足している。そのため、建造物を複数の方向から測定し、得られた複数の単位点群を同一の空間に適切に配置することにより、不足した幾何情報を補うことが可能となる。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位置合わせ手法が挙げられる。

位置合わせ手法は、主に点ベース [1~6] と特徴量ベース [7~13] 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

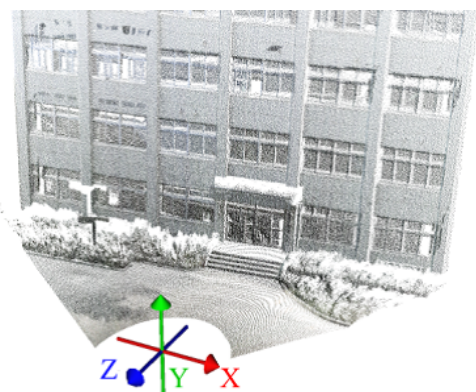


図1 単位点群の例

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, 二つの単位点群にそれぞれ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. また, Ikeuchiらは, PC クラスタを用いて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 [5].

一方, 位置合わせ処理の計算時間を短縮する別のアプローチとして, 特徴量ベースの手法が挙げられる. Akcaらは, 建造物に貼付したマーカーを特徴点として単位点群から抽出し, 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 [9]. また, Stamosらは, 単位点群を平面で領域分割することで特徴線を抽出し, その特徴線と平面を誤差評価基準とした位置合わせ手法を提案した [10]. 本手法では, Stamosらの手法と異なるプロセスで単位点群を領域分割し, 稜線を抽出する.

著者らも, これまで, 近代的な建造物を対象として, 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 [13]. 文献 [13] の手法では, はじめに, デプスエッジを基に線分を生成することにより, 単位点群から特徴線を抽出した. その結果, 建造物のシルエットを表すような特徴線が安定的に抽出可能となった. 次に, 二つの単位点群からそれぞれ抽出した特徴線を適切に配置するような幾何変換を算出し, 単位点群に適用することで位置合わせ処理を行った. 文献 [13] の手法では, 長い特徴線が建造物の特徴を顕著に表していると仮定し, 位置合わせ処理に有効な特徴線として使用した. 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, 有効な特徴線数が少ないため, 建造物全体の幾何情報を表す

点群を得るためには, 厳しい測定条件の下で複数の方向から建造物を測定して単位点群を蓄積し, 全ての単位点群を位置合わせ処理する必要があった.

本論文では, 文献 [13] で述べた測定条件を緩和し, より安定的な位置合わせ処理を行うために, 文献 [13] の拡張手法を提案する. 本手法では, 点の接平面を表す法線ベクトルが等しい点の集合が一つの平面領域を構成するものとして, 単位点群を階層的に領域分割する. そして, 隣接する二つの平面領域の境界部分から稜線を算出する. 以上のように, 建造物の平面性という着眼点を文献 [13] の手法に加えることにより, 従来の測定条件が緩和される. また, 稜線を表す特徴線を抽出し, 位置合わせ処理に有効な特徴線数が増加することにより, 位置合わせ処理の安定性が向上する.

2 関連研究

2.1 領域分割手法

本手法では, 建造物の平面性に基づいて単位点群を領域分割し, 隣接する二つの領域の境界線を稜線として抽出する. このような稜線が抽出される位置は, 領域分割の結果に依存する. よって, 実際の建造物の稜線を表すような特徴線を求めるためには, 適切な領域分割結果が得られる必要がある. 一般的に, 単位点群の領域分割手法は, プリミティブベース [14~16], エッジベース [17~19], リージョンベース [20~22] の3種類に分類される.

プリミティブベースは, 平面や球といった単純なモデルを単位点群にあてはめ, そのモデルと一致するような点群を一つの領域として抽出する手法である. Wangらは, Adaptive Scale Sample Consensus (ASSC) と呼ばれる評価アルゴリズムを提案し, 測定誤差を含んだ単位点群を領域分割可能とした [14]. プリミティブベースの手法では, 単位点群に対して, モデルの適切な初期位置を求める必要がある.

エッジベースは, 輝度画像のような, 測定時に得られた2次元画像上でエッジ検出を行い, 複数のエッジに囲まれる点群を一つの領域として抽出する手法である. Zhangらは, 測定時に得られた輝度画像と距離画像から3種類のエッジを検出した [18]. そして, 3種類のエッジを統合し, 単位点群の領域分割を行った. エッジベースの手法では, ノ

イズ除去のために、平滑化のような前処理を伴ったエッジ検出が必要である。

リージョンベースは、領域分割の開始点として単位点群上の一点を指定し、法線ベクトルや二点間の距離といった局所的な幾何情報が等しい点をグループ化する手法である。リージョンベースの手法では、適切な開始点を指定できれば、前処理を必要とせずに領域分割が容易にできる利点がある。本手法も、このような利点を有用するため、リージョンベースの手法に基づいて領域分割を行う。Stamosらは、単位点群上の一点を一つの平面として定義し、お互いに包含する平面同士をグループ化することで領域分割を行った [10]。しかし、Stamosの手法では、領域分割の開始点を無作為に指定した場合、意図する領域分割結果が得られない可能性がある。よって本手法では、文献 [13] の特徴線抽出処理で使用した点列を開始点の集合として、領域分割を行う。

単位点群上の一点は、3次元空間上の座標値で表されているため、その点がどのような面情報に基づいて配置されているのか不明である。したがって、リージョンベースの手法では、領域分割の適切な開始点を指定することが容易ではない。本手法では、リージョンベースの問題点を解決するために、文献 [13] の手法で抽出した特徴線を構成する点列を開始点の集合とした領域分割を行う。

2.2 従来手法

本節では、著者らが文献 [13] 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。文献 [13] では、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満足する必要があった。

- 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

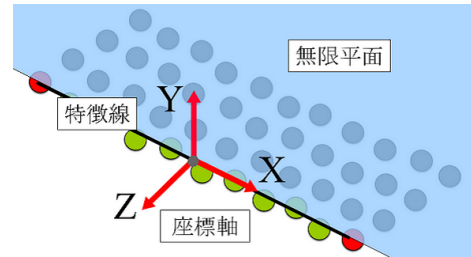


図2 線分上の局所的な座標軸

レンジセンサを配置する。

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。特徴線の一致を用いた点群位置合わせ処理は、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。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、隣接する二点間で奥行き方向の差分が大きい点列をデプスエッジとして抽出する。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。本論文では、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 [23] に基づいた特徴線の組み合わせを行い、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。仮に、二つの特徴線の端点間距離が、 $\epsilon_{distance}$ よりも小さい場合、二つの特徴線は一致すると判断する。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、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。はじめに、特徴線と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、その無限平面の単位法線ベクトルを近似的に算出する。そして、無限平面の単位法線ベクトルに基づいて局所的な座標軸を設定する。

図3(a)に示す正二十面体ポリゴンから単位点群を擬似的に生成し、文献 [13] の手法で抽出した特徴線群を図3(b)に示す。図3(b)の青い太線が抽出した特徴線であり、灰色の領域は単位点群を表す。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。こ

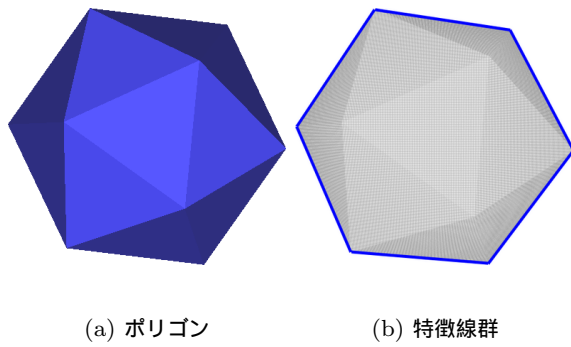


図3 ポリゴンと特徴線群

れは、奥行き方向の差分が大きい部分のみを、特徴線の抽出対象としたことが原因である。本手法では、文献 [13] で提案した手法を拡張し、稜線を表す内側の特徴線を抽出する。

3 拡張手法

文献 [13] の手法では奥行き方向の差分に着目して特徴線を抽出したが、本手法では、新たな特徴量として建造物の平面性に注目する。一般的に、建造物の表面形状は平面を多用しており、測定して得られた単位点群も、その平面に基づいて配置されている。本手法では、建造物の表面形状を複数の平面で領域分割するように、単位点群を複数の平面領域に分割する。このとき、各平面領域に属する点群が取り出される。そして、取り出した点群に文献 [13] の手法を適用し、特徴線を抽出する。その結果、抽出した特徴線は、各平面領域のシルエットを表す特徴線となる。このように、平面領域に属する点群から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、隣接する二つの平面領域において、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し、特徴線を最適化する。

3.1 領域分割

リージョンベースの領域分割結果は、開始点の局所的な幾何情報に依存する。正しい領域分割結果を得るためには、一つの平面領域に属する可能性が高い一点を開始点とする必要がある。しかし、2.1 節で述べたように、適切な開始点を指定することは容易でない。このような問題点を解決するために、

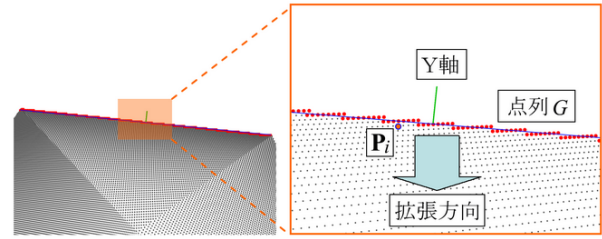


図4 局所的な Y 軸に基づいた領域分割

本手法では特徴線を構成する点列を開始点とする。文献 [13] では、隣接点との奥行き方向の差分が大きい点列をデプスエッジとして抽出し、特徴線を生成した。そのため、一つの平面領域に属する点群が特徴線の片側に存在し、特徴線を構成する点列も、そのような平面領域に属している可能性が高い。また、2.2 節で述べたように、文献 [13] の手法でも、特徴線の近傍にある点群を包含するような無限平面を想定し、局所的な座標軸を設置した。よって本手法では、特徴線を構成する点列が、一つの平面領域に属する可能性が高い開始点の集合であるとして、以下の手順で領域分割を行う。

1. 特徴線抽出

入力された単位点群に文献 [13] の手法を適用し、特徴線を抽出する。ただし、2.2 節で述べたように、建造物の幾何学的な特徴を顕著に表すような、長い特徴線を後述の処理に使用する。

2. 単位点群の探索

特徴線を構成する点列を開始点として、一つの平面領域に属する点群を探索する。文献 [13] の手法では、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、近似的に求めた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、無限平面に包含される点群の接平面を表す単位法線ベクトルの方向が、ほぼ等しい可能性が高い。よって、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、以下の手順で点群を探索する。

- (a) 特徴線を構成する点列から、一つの平面領域を構築する。仮に、この点列を G とし、点列 G が属する平面領域を A と

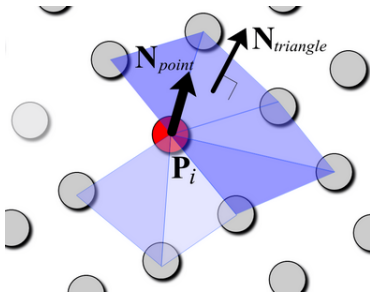


図 5 点の接平面を表す単位法線ベクトル

する．図 4 では，図 3(b) に示した特徴線から領域分割を行う場合の，特徴線付近の拡大図を示す．図 4 において，赤い点列で表されたものを点列 G とする．

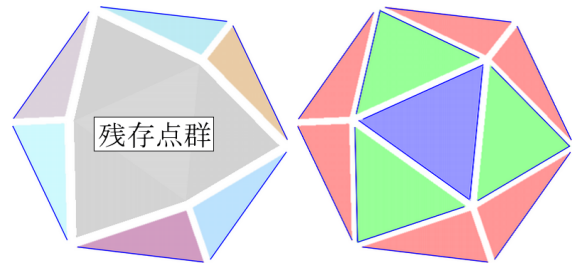
(b) 図 4 の緑線で示すような特徴線上の局所的な Y 軸と，点列 G に隣接する点群 P_i の接平面を表す単位法線ベクトル N_{point} がなす角度 θ_i を求める．ここで，単位法線ベクトル N_{point} は，図 5 に示すように，点 P_i の周囲 1 近傍に隣接する点を用いて算出する．点 P_i と，その周囲 1 近傍に隣接する 2 点で構成される三角形面の法線ベクトルを $N_{triangle}$ とすると， N_{point} は式 (1) で表される．

$$N_{point} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} N_{triangle}^i \quad (1)$$

ただし， n は三角形面の総数とする．仮に角度 θ_i が閾値 σ_{min} から σ_{max} の範囲内となる場合，隣接点 P_i を平面領域 A に含める．ただし，閾値 σ_{min} ， σ_{max} は局所的な Y 軸との最小角度，および最大角度とする．閾値の調整は，許容誤差の設定と等価であることから，測定誤差を含んだ単位点群を適切に領域分割することができる．

(c) 平面領域 A に新たに属した点群を点列 G として処理 (b) を繰り返し行い，平面領域 A を拡張していく．

処理 (a) ~ (c) を行った結果，特徴線が境界線の一つとなるような平面領域に属する点群が得られる．



(a) 一回目 (b) 最終結果

図 6 領域分割の結果

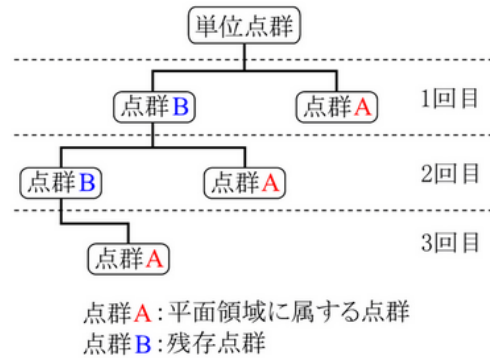


図 7 二分木で表されるデータ構造

図 3(b) に示した青色の特徴線を使用して，領域分割を行った結果を図 6(a) に示す．図 6(a) では，各平面領域に属する点群を異なる色で表しており，中央の灰色部分は領域に属さない残存点群を表す．図 6(a) から分かるように，一回の領域分割では，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に文献 [13] の手法を適用し，新たな特徴線を抽出する．そして，抽出した新たな特徴線を用いて処理 (a) ~ (c) を再度適用し，領域分割を繰り返す．最終的な領域分割結果を図 6(b) に示す．最終的な領域分割回数は 3 回であったため，図 6(b) では，赤色の平面領域を 1 回目，緑色の平面領域を 2 回目，青色の平面領域を 3 回目に領域分割されたものとして表している．また，図 6(b) に示した最終的な領域分割後のデータ構造は，図 7 に示すような二分木で表される．図 7 では，一回目の領域分割によって，単位点群は平面領域に属する点群と平面領域に属さない残存点群に分割され，二回目の領域分割結果も同様となる．以上のように，残存点群に対する特徴線抽出と，平面領域に属する点群の探索を繰り返し行うことで，単位点群が階層的に領域分割される．

3.2 稜線生成

稜線のような対象物の内側に存在する特徴線を得るために、文献 [13] で提案した手法を平面領域に属する点群に適用し、平面領域のシルエットを表す特徴線を改めて抽出する。ただし、3.1 節で述べたように、建造物の幾何学的な特徴を顕著に表すものとして、長い特徴線を稜線生成に使用する。隣接する二つの平面領域の境界部分では、抽出した特徴線が重なる場合がある。2.2 節で述べたように、文献 [13] で提案したマッチング処理では特徴線の組み合わせを用いて幾何変換を求めている。マッチング処理の計算コストを減少させるためには、重複している二つの特徴線を一つにまとめる必要がある。よって本手法では、重複した二つの特徴線を一つの稜線に最適化する。次項では、重複した二つの特徴線の探索方法を述べる。

3.2.1 重複した特徴線の探索

重複している二つの特徴線を探し出すために、二つの平面領域ごとに特徴線の一致判定を行う。図 7 に示すように、領域分割された単位点群のデータ構造は二分木で表される。本手法では、深さ優先探索を用いて二つの平面領域を組み合わせ、平面領域のシルエットを表す特徴線の一致判定を行う。ただし、単位点群は測定誤差を含んでいるため、二つの特徴線の端点が完全に一致する可能性は低い。よって、文献 [13] で定義したように、二つの特徴線の端点間距離が、 $\varepsilon_{distance}$ よりも小さい場合、二つの特徴線が一致していると判定する。

重複した特徴線を発見した後に、二つの特徴線を一つの稜線に最適化する。説明のために、隣接する二つの平面領域 A, B に含まれる点群を G_a, G_b とする。はじめに、稜線方向ベクトルを定めるために、平面領域 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。次項では、各処理を詳細に述べる。

3.2.2 無限直線の算出

本手法では、隣接する二つの平面領域 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。二つの平面

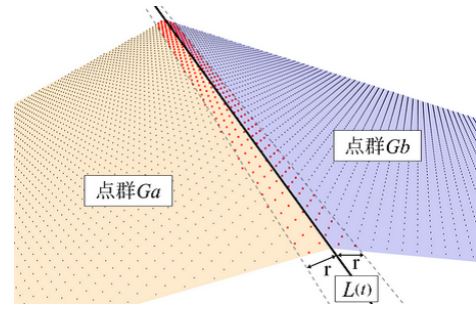


図 8 端点候補の絞込み

領域 A, B の境界線となるような、最適な無限直線は、無限平面の法線ベクトルの向きと原点の位置に依存する。よって、平面領域に属する点群を用いて、その無限平面を最適化する。

例えば、平面領域 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、平面領域 A に属する点群 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。また、無限平面の原点 P_g は点群 G_a の重心とする。隣接する平面領域 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、稜線方向ベクトルを表す無限直線を算出する。

3.2.3 無限直線の線分化

3.2.2 項では、隣接する二つの平面領域 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、隣接する二つの平面領域の境界線となるため、二つの平面領域 A, B で共有する境界稜線となる必要がある。よって、境界稜線を求めるために、点群 G_a, G_b から稜線の端点となる可能性が高い二点を検出する。

はじめに、稜線の端点となる可能性が高い複数の候補点を点群 G_a, G_b から探索する。本手法では二つの平面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られる。よって、図 8 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。ただし、境界部分で重複している二本の特徴線におい

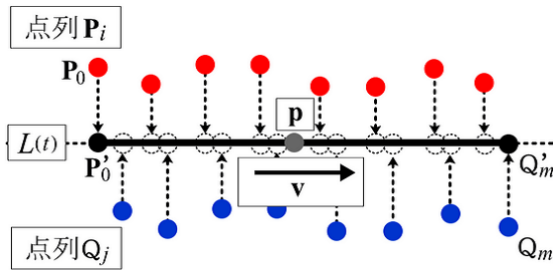


図9 端点の検出

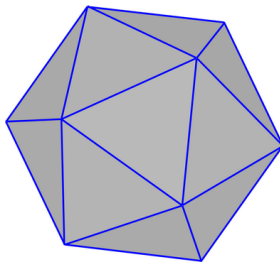


図10 稜線抽出結果



図11 測定対象の建造物

て、各特徴線を構成している点から無限直線 $L(t)$ までの最大距離を r とする。

2.2 節で述べたように、文献 [13] 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な特徴線であるとした。そのため、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 9 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わすパラメータ t を算出する。ただし、無限直線 $L(t)$ の方向ベクトルを v とし、 $L(t)$ が通る一点を p とすると、パラメータ t は式 (2) で表される。

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

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 9 では、点 P_0 と点 Q_m を無限直線 $L(t)$ に射影した二点 P'_0, Q'_m が稜線の端点となる。図 6(b) に示した領域分割結果を用いて、稜線を抽出した結果を図 10 に示す。図 3(b) と比較すると、内側の稜線が抽出されているのが分かる。

4 実験

本章では、建造物を測定して得られた単位点群に対して、本手法を適用した結果を示す。また、文献 [13] の実験結果に対する比較と検討を行い、本手法の有効性を示す。文献 [13] の実験では、図 11 に示した建造物を測定し、位置合わせ処理を行った。しかし、文献 [13] の手法では、位置合わせ処理に有効な特徴線を安定的に抽出するために、厳しい測定条件が必要であった。また、位置合わせ処理に有効な特徴線数が少なかったため、建造物全体の幾何情報を表す点群を得るには、厳しい測定条件の下で、複数の位置から建造物を測定し、単位点群を蓄積する必要があった。図 12 では、文献 [13] の手法を用いて抽出した、位置合わせ処理に有効な特徴線群を示す。ただし、文献 [13] の実験と同様の条件の下で有効な特徴線を選出した。図の青線は特徴線を表し、赤い太線 A, B は二つの特徴線群で、それぞれ一致した特徴線を表す。また、黒い微小な点群は測定して得られた単位点群を表す。一般的に、特徴線を利用して二つの単位点群を位置合わせ処理するためには、少なくとも二組の特徴線が一致する幾何変換を算出する必要がある。しかし、図 12 に示した特徴線群では、それぞれ一組の特徴線しか一致せず、正しい位置合わせ処理結果が得られなかった。

図 12 に示した特徴線群を用いて、本論文で提案した拡張手法を適用した結果を図 13 に示す。図 13 の赤い太線は後述のマッチング処理で一致した特徴線である。本実験で設定した閾値は、文献 [13] の実験結果を参考にして、 $\varepsilon_{distance} = 0.1(m)$ とした。図 12 と比較すると、図 13 では、建造物の稜線

を表す特徴線が抽出されているのが分かる。また、図 14 は、図 13 に示した稜線抽出の基となる平面領域を示す。同一色の領域が一つの平面領域を示す。隣接する平面領域の境界線として、稜線が生成されていることが分かる。本実験では、図 12 に示したような、建造物のシルエットを表す特徴線が得られれば、稜線を表す特徴線の抽出が容易となった。よって、測定時には、建造物の内側で奥行き方向の大きな差分が顕著に現れるような、従来必要であった測定条件を緩和できる。

図 13 に示した特徴線群をマッチング処理した後の点群を図 15(a) に示し、特徴線を図 15(b) に示す。図 15 では、測定方向ごとに単位点群と特徴線群を異なる色で表す。本実験では、図 13(b) の特徴線群に対して、はじめに図 13(c) の特徴線群をマッチング処理した。次に、その統合した特徴線群に対して、図 13(a) の特徴線群をマッチング処理した。ただし、文献 [13] の実験と同様の条件の下でマッチング処理を行った。表 1 に本実験のマッチング処理の推移を示す。表 1 では単位点群ごとに、測定方向、点の数、マッチング処理に有効な特徴線数、一致した特徴線のペア数および平均誤差値 E を示す。平均誤差値 E は、一致した特徴線のペアにおいて、その端点間の距離の加算を平均したものである。表 1 の括弧内の数字は、文献 [13] の手法を適用したときの値である。表 2 では、各マッチング処理に要した特徴線の組合せ数、計算時間および消費メモリ量を示す。表 1 や表 2 から分かるように、文献 [13] の実験結果と比較すると、組合せ数に応じた計算時間や、点の数に応じた消費メモリ量が同等であるにもかかわらず、有効な特徴線数や一致した特徴線ペア数が増加している。また、文献 [13] の実験結果では、一致した特徴線のペア数が少なく、その平均誤差値が $0.10 \sim 0.21(m)$ であった。しかし、表 1 では、一致した特徴線のペア数が増加したにもかかわらず、平均誤差値が $0.01 \sim 0.02(m)$ となり、文献 [13] の手法よりも厳密な位置合わせ処理を行うことができた。本実験では、本論文で提案した拡張手法を適用することにより、文献 [13] の手法で抽出できなかった稜線が新たに抽出された。その結果、文献 [13] の手法では位置合わせ処理できなかった単位点群も位置合わせ処理が可能となり、位置合わせ処理の安定性が増加した。

表 1 マッチング処理の推移

回数	方向	点	特徴線	合致数	誤差 (m)
-	2	362112	27(9)	-	-
1	3	403803	21(3)	8(1)	0.02
2	1	355221	18(6)	4(1)	0.01

表 2 計算時間とメモリ量

回数	組数	時間 (s)	点群と特徴線群 (MB)
1	114	2.52	114.29
2	50	0.42	178.32

5 まとめ

本論文では、文献 [13] で定義した建造物の測定条件を緩和するために、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、建造物の平面性に基いて単位点群を階層的に領域分割し、平面領域に属する点群を抽出した。次に、平面領域に属する点群に文献 [13] の手法を適用することで、平面領域のシルエットを表す特徴線を抽出した。隣接する二つの平面領域で特徴線が重複した場合、その二つの平面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、従来必要であった測定条件が緩和され、位置合わせ処理の安定性が増加した。今後の課題として、オクルージョンの発生によって断片化した特徴線を最適化する手法を開発する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、平成 18 年度 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] Y. Chen and G. Medioni, "Object Modeling by Registration of Multiple Range Images," Image and Vision Computing, Vol.10, issue 3, pp.145-155, 1992.
- [3] Turk G. and M. Levoy, "Zippered Polygon Meshes from Range Images," SIGGRAPH'94, pp.311-318, 1994.
- [4] B. Curless et al. "From Range Scans to 3D Models," Appears in Computer Graphics Vol.33. No.4, 1999.

- [5] 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.
- [6] N. J. Mitra, N. Gelfand, H. Pottmann and L. Guibas, "Registration of Point Cloud Data from a Geometric Optimization Perspective," In Proc. Symposium on Geometry Processing 2004, pp.23-32, 2004.
- [7] V. Sequeira, J. Goncalves and M. Isabel Ribeiro, "3D Scene Modelling from Multiple Range Views," In Proc. SPIE Conference Videometrics IV (part of Photonics East '95), Vol.2598, pp.114-127, 1995.
- [8] A. Johnson and M. Hebert, "Surface Registration by Matching Oriented Points," In Proc. Int. Conf. on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, pp.121-128, May 1997.
- [9] D. Akca, "Full Automatic Registration of Laser Scanner Point Clouds," Optical 3-D Measurement Techniques VI, Vol. I, pp.330-337, Zurich, Switzerland, 2003.
- [10] 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. II, pp.555-561, June 16-22 2003.
- [11] Y. Sun, J. Paik, A. Koschan and M. Abidi, "Surface Modeling Using Multi-View Range and Color Images," Integrated Computer Aided Engineering, Special Issue on Multi-Sensor Image Processing Techniques and Systems Vol.10 No.1 pp.37-50, 2003.
- [12] Kwang-Ho Bae and Derek D. Lichti, "Automated Registration of Unorganised Point Clouds From Terrestrial Laser Scanners," ISPRS 2004, pp.222-227, Istanbul, Turkey, 2004.
- [13] 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.
- [14] H. Wang and D. Suter, "A model-based range image segmentation algorithm using a novel robust estimator," In Proc. 3rd International Workshop on SCTV, 2003.
- [15] G. Taylor and L. Kleeman, "Robust range data segmentation using geometric primitives for robotic applications," In Proc. 9th IASTED International Conference on Signal and Image Processing (SIP2003), pp.467-472, Honolulu, 2003.
- [16] J. Min and Kevin W. Bowyer, "Improved range image segmentation by analyzing surface fit patterns," Computer Vision and Image Understanding, Vol.97, Issue 2, pp.242-258, 2005.
- [17] Wani, M.A. and B.G. Batchelor, "Edge Region Based Segmentation of Range images," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.16, Issue 3, pp.314-319, 1994.
- [18] Y. Zhang, Y. Sun, H. Sari-Sarraf, M. Abidi, "Impact of Intensity Edge Map on Segmentation of Noisy Range Images," In Proc. SPIE Conf. on Three-Dimensional Image Capture and Applications III, Vol.3958, pp.260-269, San Jose, CA, 2000.
- [19] A. D. Sappa and M. Devy, "Fast Range Image Segmentation by an Edge Detection Strategy," In Proc. 3rd International Conference on 3-D digital Imaging and Modeling (3DIM'2001), pp.292-299, Quebec, Canada, 2001.
- [20] Jiang, X.Y. and H. Bunke, "Fast Segmentation of Range Images into Planar Regions by Scan Line Grouping," Machine Vision and Applications, Vol.7, Issue 2, pp.115-122, 1994.
- [21] Fitzgibbon, A.W., D.W. Eggert, and R.B. Fisher, "High-Level CAD Model Acquisition from Range Images," Technical Report, Dept. of Artificial Intelligence, Univ. of Edinburgh., 1995.
- [22] Y. Yu, A. Ferencz and J. Malik, "Extracting objects from range and radiance images," IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, Vol.7, No.4, pp.351-364, 2001.
- [23] 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.

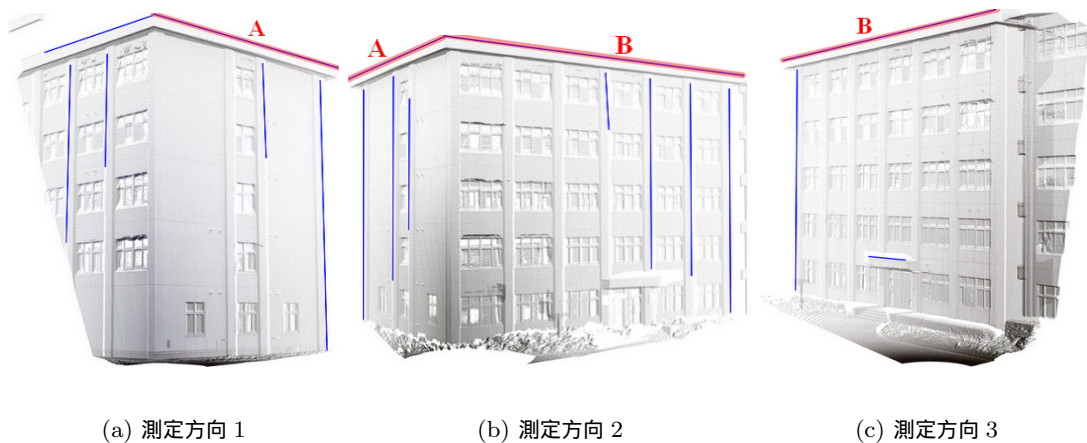


図 12 文献 [13] の手法による特徴線抽出結果

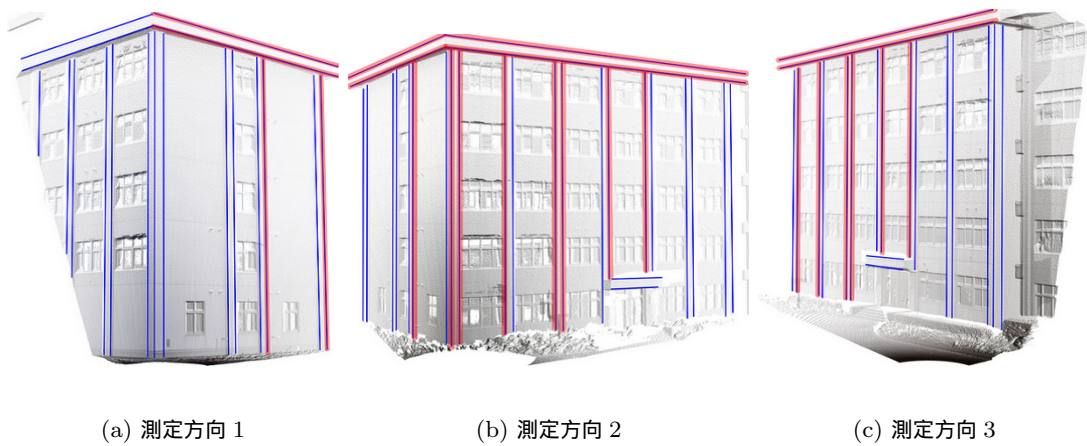


図 13 本手法による特徴線抽出結果

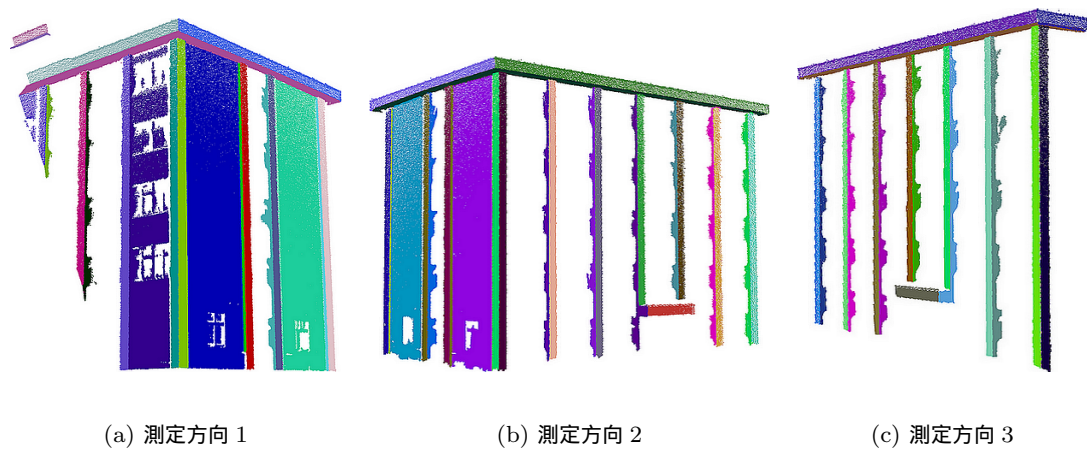


図 14 稜線生成に使用した平面領域

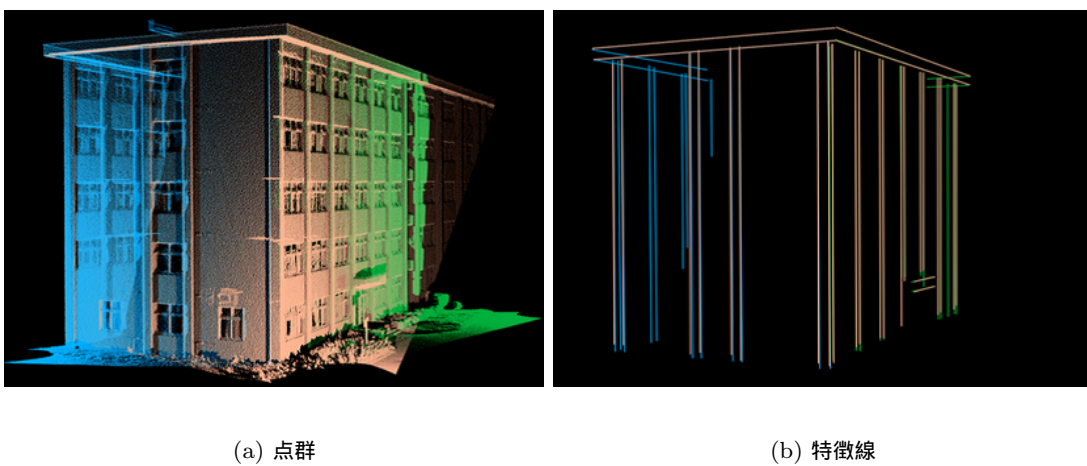


図 15 位置合わせ処理後の点群と特徴線