

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

金野哲士 今野晃市 藤本忠博 千葉則茂

岩手大学

Feature Line Extraction and Matching for Modeling Artificial Buildings Using Measured Point Clouds

Tetsuji KONNO Kouichi KONNO Tadahiro FUJIMOTO Norishige CHIBA

Iwate University

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

アブストラクト

仮想空間上に実空間の建造物をモデリングする手段として、建造物の形状を表す複数の測定点群を、自動的に配置する位置合わせ手法がある。点群位置合わせ手法は、点ベースの手法と特徴量ベースの手法に分類される。点ベースの手法は、位置合わせの精度が高いという利点があるが、計算量が膨大である。一方、特徴量ベースの手法は、点ベースの手法よりも計算量が圧倒的に少ないが、位置が合う特徴量を抽出するのが困難である。本論文では、位置合わせに有効な特徴量を安定的に抽出し、複数の方向から測定した点群を同一の3次元空間へ配置するための手法を提案する。本研究では、建造物の直線的な特徴に着目し、測定点群から直線的な特徴線を抽出する。複数の測定点群に対して、効率的なマッチング手法を用いて、特徴線同士が一致するような幾何変換を求めることで、点群位置合わせを行う。大型レンジセンサを用いて測定された実際の建造物の点群に対して、本手法を適用し有効性を確認した。

Abstract

As one of modeling methods of representing the real world into virtual space, registration methods that automatically match a set of measured point clouds have been proposed. Point cloud registration methods are classified into point-based methods and feature extraction methods. Although the point-based methods are more accurate than the feature extraction methods, the calculation cost of the registration is large. The feature extraction methods have a lower calculation cost, but the extraction of the coincident features is very difficult. In this paper, we propose a registration method that extracts feature lines and matches point clouds measured from different directions. Because feature lines are extracted, this method is suitable to model buildings, since they naturally unveil linear features. After the extraction, our method efficiently matches a set of measured point clouds by applying the geometrical transformation, so that the feature lines coincide. We demonstrate that our method works well for point clouds obtained by measuring real buildings using a range sensor.

キーワード：位置合わせ，単位点群，特徴線群，3次元デプスエッジ，点列セグメント

Keywords : Registration, Unit Point Cloud, Feature Lines Group, 3D Depth Edge, Segment of Points

1 はじめに

仮想現実感 (VR) や複合現実感 (MR) を伴ったコンテンツを作成する基盤技術に、実空間の建造物の形状を3次元空間上に復元するモデリング技術が挙げられる。このようなモデリング技術の一つとして、レンジセンサを使用して建造物の形状を3次元空間上に取り込み、その幾何学的な情報に基づいてモデルを生成する方法がある。レンジセンサは、レンジセンサの位置を中心とし

て、建造物の表面にレーザーを等角度で上下左右に照射し、対象物までの距離を測定する装置である。測定の結果、レーザーの照射点が3次元空間上の1点として自動生成され、レーザーの照射範囲に応じて格子状に並んだ点群が得られる。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。建造物を3次元空間上に復元する場合、一つの単位点群だけでは、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、建造物を復元するの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。しかし、複数の単位点群を適切に配置する場合、ユーザーが手動で配置するのでは非常に手間がかかる。このような処理を効率化するために、複数の単位点群を自動的に配置する位置合わせ手法が必要である。

位置合わせ手法は一般的に大きく 2 種類に分類される。一つ目の手法として、点ベースの手法が挙げられる [1~6]。点ベースの手法では、二つの単位点群を総当りで組み合わせながら、二つの単位点群の点同士が可能な限り多く一致するような幾何変換を求め、単位点群に適用する。点ベースの手法では、点の座標値のみを用いて位置合わせ処理を行うため、復元対象物を制限せず汎用性が高い。しかし、点の数が膨大なため、位置合わせ処理に要する計算量や、計算に必要なメモリ量が膨大となる。このような問題を解決するものとして、高速な同時位置合わせ手法が提案されている [5]。論文 [5] では、PC を 8 台用いて PC クラスタを構築し、位置合わせ処理を同時に行うことにより高速化を実現した。

前述したような、点ベース位置合わせ手法の計算に要するコストを削減する手法として、特徴量ベースの手法が挙げられる [7~14]。特徴量ベースの手法では、各単位点群から建造物の特徴部分を表す、特徴点や特徴線のような特徴量を抽出する。そして、抽出した特徴量を総当りで組み合わせ、一致した特徴量の割合が最大となるような幾何変換を求め、単位点群に適用する。一般的に特徴量ベースの手法では、マーカーを設置して測定を行う。また、得られた単位点群から、マーカーの位置に対応する特徴点を抽出し、その特徴点に基づいて位置合わせ処理を行う場合が多い。しかし測定環境や対象物によってマーカーを設置できない場合があるため、マーカーの代わりとなる有意な特徴量を単位点群から抽出する手法が有効である。一般的に、我々の生活圏に多数存在する近代的な建造物は、直方体を組み合わせたような形をしており、建造物全体の輪郭が直線的である。このような輪郭から、直線的な特徴量を抽出し、位置合わせ処理に用いることが可能ならば、マーカーを設置する必要がない。

本論文では、直線的な特徴を持った近代的な建造物を対象に、特徴線の一致による位置合わせ手法を提案する。本手法で用いる特徴線は、建造物の直線的な特徴量を線分で表したものである。本手法では、以下の手順で複数の単位点群を位置合わせ処理する。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 2 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。次に、二つの単位点群間で、線分の長さが同じ特徴線のペアを全て求め、ペアが一致するような幾何変換を算出する。ペアに対する幾何変換が適切であるか評

価し、最適な幾何変換を求め単位点群に適用する。本手法では、奥行き値の差分を用いて特徴線を求めており、アルゴリズムが単純であるため、実装が容易である。また、同様の理由により、奥行き方向で大きな差分が発生する特徴部分を持つ建造物から、必ず特徴線が抽出される。よって、仮に、建造物の輪郭が障害物で隠れたとしても、出窓のような壁面の大きな凹凸部分を持つ建造物では、その特徴部分の輪郭を表す特徴線を用いて、点群の位置合わせ処理が可能である。

本論文の構成は以下の通りである。2 章では特徴量ベースの位置合わせ手法に関連する研究を述べる。3 章では本手法の概要を、4 章では特徴線の抽出方法を、5 章では抽出した特徴線が一致するためのマッチング手法を述べる。6 章では実際に測定し出力された複数の単位点群に本手法を適用した実験結果を示す。7 章では本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2 関連研究

特徴量ベースの位置合わせ手法として、Acka による、特徴点を用いた位置合わせ手法 [11] がある。この手法では、マーカーを建造物に直接貼付し、測定を行う。そして、マーカーに対応する点を特徴点とし、特徴点同士の一致を利用した位置合わせ処理を行う。文献 [11] の実験結果に示すように、マーカーを建造物に直接貼付できる場合、彼らの手法は有効である。しかし、重要文化財に指定されるような貴重な建造物では、マーカーを貼付できない場合がほとんどである。このような場合、Acka が提案する位置合わせ手法は、適用することができない。

特徴量ベースの位置合わせ手法の二つ目の例として、Stamos らによる、平面と特徴線を用いた位置合わせ手法 [9] がある。この手法では、許容誤差を含んだ平面で単位点群を領域分けし、隣接する領域の平面同士の交線の特徴線として抽出する。そして、二つの単位点群で共通する平面と、その平面から抽出した特徴線が、それぞれ一致するような幾何変換を算出した。文献 [9] の実験結果では、稜線のような建造物の内側にある特徴線と平面を多数抽出することにより、位置合わせ処理が可能となった。本手法は、奥行き値の差分に基づいて、建造物の輪郭線のような外側にある特徴線を抽出するため、Stamos らが提案する手法とアプローチが異なる。また、Stamos らの手法では特徴線と平面を用いて位置合わせ処理を行うが、本手法では特徴線だけを用いる。そのため、Stamos らの手法よりも、位置合わせ処理の幾何計算モデルが単純であり、実装が容易である。

筆者らはこれまで、単位点群から有意な特徴線が得られると仮定し、特徴線の一致による位置合わせ手法を提案してきた [13,14]。文献 [13] の方法は、単位点群から、

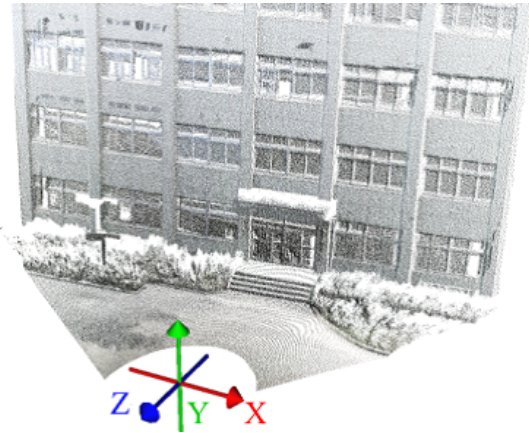


図1 得られた単位点群

許容誤差を含んだ特徴線となる線分を抽出する．そして、二つの単位点群で一致する特徴線のペアは、その特徴線の近傍に存在する面の法線ベクトルの方向が等しいと想定して、手動で二組の特徴線を選択することで、位置合わせ処理が可能となる．しかし、位置合わせ処理を行うごとに、手動で特徴線を選択するためユーザーに多大な負担がかかる．

文献 [14] では、特徴線の近傍に想定される面の法線ベクトルを基に、一致する特徴線のペアを自動選択する手法を提案している．具体的には、3次元空間上に仮想的な建造物モデルを構築し、そのモデルから求めた複数の単位点群を用いて位置合わせ処理を行う．その結果、有意な特徴線が得られるような理想的な点群に対しては、手法の有効性が示された．しかし、実測した複数の単位点群に対して、論文 [13,14] の手法を適用し、理論を検証したところ、次のような問題点が発生した．

- 線分の許容誤差と、測定した単位点群によっては、一致する特徴線が抽出できない場合がある．
- 抽出した特徴線の近傍に想定される面の精度が低いため、論文 [14] の方法では、誤った位置合わせ結果が得られる場合がある．

本論文では、論文 [13,14] で提案した手法を拡張し、上記の問題点を解決する位置合わせ手法を提案する．

3 本手法の概要

3.1 測定条件および単位点群の性質

本手法における、建造物の測定条件を述べる．本手法では、奥行き値の差分を用いて特徴線を抽出するため、建造物の直線的な特徴部分の近辺が、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．また、本手法では、二つの単位点群で同じ長さの特徴線のペアを一致させるように、幾何変換を算出する．そのため、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必要がある．

本手法で用いる単位点群は、以下のような性質を持つ．

1. 図1に示すように、格子状の単位点群はレンジセンサの位置を原点とし、水平方向がX軸、垂直方向がY軸、奥行き方向がZ軸となるワールド座標系に生成される．
2. 各点は、建造物の実際の寸法に基づいた座標値となる．しかし、測定時における物理的な誤差や、桁落ち等の変換誤差が発生するため、建造物の特徴部分を表す点は、その特徴部分の近傍の位置を表しているにすぎない．
3. 空などの背景のように、レンジセンサの測定可能な距離の範囲外に存在する対象物は、3次元空間上の点として得られない．
4. 建造物の輪郭や、壁面の大きな凹凸部分の輪郭といった特徴部分は、隣接する2点間でZ値の差分が大きい点列で表される．

3.2 提案手法の概要

本論文で提案する位置合わせ手法は、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．本手法では、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、ユーザー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．以下に各処理の概要を述べる．

(1) 特徴線の抽出処理

3.1節の性質4で述べた特徴部分に含まれる、直線的な特徴量を線分で表すために、三つの処理を適用する．

1. 3次元デプスエッジの抽出

単位点群から、隣接点との奥行き値の差分が大きい点列を抽出する．本論文では、このような点列を3次元デプスエッジと呼ぶ．

2. 3次元デプスエッジのセグメント化

建造物の直線的な特徴量として、3次元デプスエッジを複数のセグメントに分割する．各セグメントは3次元デプスエッジ上の点列となり、セグメントの端点を分割点とする．本論文では、二つの分割点間に存在する3次元デプスエッジを点列セグメントと呼ぶ．

3. 点列セグメントの線分化

点列セグメントを無限直線で近似し、点列セグメント上の二つの分割点を無限直線上に投影する．投影した2点を連結し線分を生成することで、特徴線が得られる．本論文では、単位点群から抽出した複数の特徴線の特徴線群と呼ぶ．

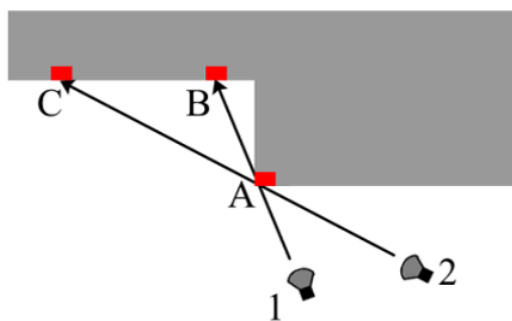


図2 凸形状を上から見た図

(2) 特徴線群のマッチング処理

本論文で提案するマッチング処理は、文献 [14] に基づいており、二つの特徴線群ごとに行う。マッチング処理は以下で述べる三つの処理で構成される。

1. マッチングの前処理

マッチング処理に有効な特徴線を選出する。また、特徴線群を一致させるために、局所的な座標軸を、各特徴線上に設定する。

2. 最適な特徴線ペアを選出

二つの特徴線群間で、同じ長さを持った特徴線のペアを組み合わせる。そして、各特徴線のペアにおいて、二つの特徴線がそれぞれ持つ局所的な座標軸を一致させるように、特徴線群を幾何変換する。このとき、幾何変換を適用した後に、一致した特徴線の数が最大となるような特徴線のペアを、最適な特徴線ペアとして選出する。

3. 幾何変換の最適化

処理 2 で選出した最適な特徴線ペアを、厳密に一致させるために、幾何変換の最適化を繰り返す。

4 特徴線の抽出処理

4.1 3次元デプスエッジの抽出

本節では、3次元デプスエッジを抽出する手法について説明する。抽出したい特徴部分は、隣接する点との奥行き値の差分が大きい点の集合として表現されている。つまり、式 (1) に示すように、単位点群上の点 P の奥行き値 d と、その上下左右 1 近傍に隣接する点 P_i の奥行き値 d_i との差分が、閾値 δ よりも大きい点が一つでも存在する場合、点 P が特徴部分を表す。

$$|d - d_i| > \delta \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

ただし、 i は上下左右 1 近傍に隣接する点と対応する。ここで、特徴部分として、奥行き方向の手前の点と奥側の点のどちらを選択するかが問題となる。

例えば図 2 は、建造物の表面上で凸になった部分を、位置 1 と位置 2 の 2 方向から測定したときの模式図で

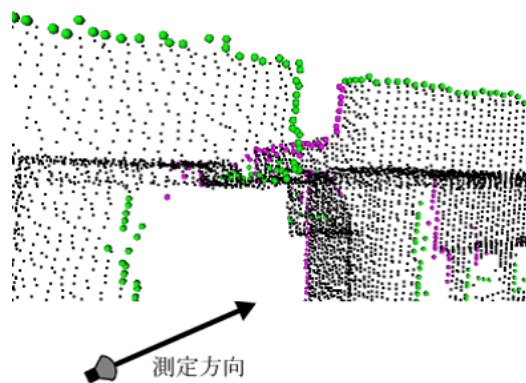


図3 3次元デプスエッジの拡大図

ある。測定の結果、位置 1 からは、3次元デプスエッジ上の手前の点列 A と奥側の点列 B が得られ、位置 2 から手前の点列 A と奥側の点列 C が得られたと仮定する。このとき、手前の点列 A は、位置 1 と位置 2 から抽出されているため、建造物の特徴部分に相当すると考えられ、後のマッチング処理に有効に使用できる。一方で、奥側の点列 B と C は明らかに建造物の実際の特徴を表すものではない。そのため、奥側の点列 B と C から作成した特徴線は、位置 1 と位置 2 のマッチング処理では一致しない。また、他の単位点群から抽出した特徴線とも一致しないと考えられる。そこで、奥側の点列 B や C のような、不要な特徴線を生む 3次元デプスエッジ上の点列は抽出せず、手前の点列 A のような、マッチング処理に有効な点列のみを抽出する必要がある。よって、本手法では、奥行き方向で手前にある点列のみを 3次元デプスエッジとして抽出する。

実空間の建造物を測定して得られた単位点群に対して、3次元デプスエッジ抽出を行った結果を図 3 に示す。図 3 の矢印は測定方向を示す。そして、図 3 の緑球は、奥行き方向で手前の点として抽出された 3次元デプスエッジであり、紫球は奥側の点である。前述したように、本手法では図 3 の緑球のみを特徴線抽出に用いる。

4.2 3次元デプスエッジのセグメント化

本節では、3次元デプスエッジの直線的な特徴量を線分として表すために、3次元デプスエッジを複数のセグメントに分割する。本手法では、セグメントの端点を、3次元デプスエッジ上の分割点とするため、分割点を検出する必要がある。3.1 節の性質 1 で述べたように、単位点群は格子状に並んでいるため、3次元デプスエッジ上の 1 点 P は、隣接する他の 3次元デプスエッジ上の点を参照可能である。仮に、建造物のコーナーのように、ある点 P で二つの直線的な特徴量が大きく変化する場合、点 P の近傍に存在する 2 本の点列を表す単位方向ベクトルがなす角度も大きく変化する。よって本手法では、点 P の近傍に n 本の 3次元デプスエッジ上の点列

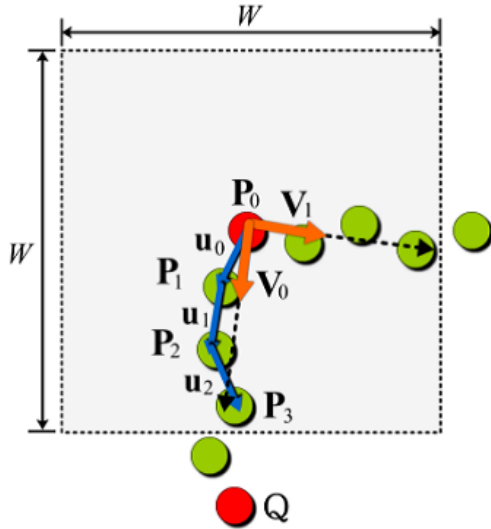


図4 分割点検出の模式図

が存在すると仮定し、その点列を表す単位方向ベクトルがなす角度を基に分割点を検出する．以下では、分割点の検出法を詳細に述べる．

(1) 単位方向ベクトルの算出

3次元デプスエッジ上の点の近傍に存在する、1本の点列を表す単位方向ベクトルの算出法を述べる．例えば、図4は、3次元デプスエッジ上の点 P_0 の近傍に点列が2本存在する場合の模式図である．図4において、点 P_0 を中心とした、点列の範囲 $W \times W$ の内側に存在する、1本の点列を表す単位方向ベクトル V_0 を算出する．ただし、点 P_0 から点 P_3 までは、連続した点列であると仮定する．はじめに、点 P_0 から P_3 までの隣接間の単位方向ベクトル u_i を求める． u_i は式(2)で表される．

$$u_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{|P_{i+1} - P_i|} \quad (2)$$

次に、単位方向ベクトル V_0 を、各隣接点間の単位方向ベクトルの平均として算出する．すなわち、 V_0 は式(3)で表される．ただし、 n は算出した単位方向ベクトルの数であり、図4の場合では $n = 3$ となる．

$$V_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} u_i \quad (3)$$

(2) 分割候補点の判定

3次元デプスエッジ上の点を持つ単位方向ベクトルに基づいて、その点が分割候補点になるかどうかを判定する．図4において、点 P_0 を中心として、左回りに単位方向ベクトル V_i を算出する．次に、隣接する二つの単位方向ベクトル V_i, V_{i+1} がなす角度のうちで、最小の角度 θ_{min} が閾値 σ_{max} よりも小さい場合、 P_0 を分割候補点と判定する．

$$\theta_{min} = \min(\arccos(V_i \cdot V_{i+1})) \quad (4)$$

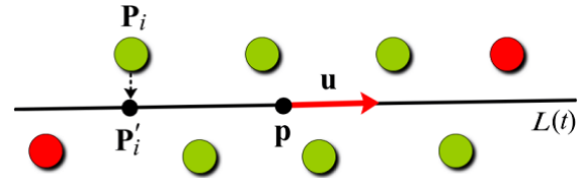


図5 点列セグメントの無限直線近似

ただし、図4の点 Q のように、近傍にある点列セグメントが1本のみ存在する場合、点 Q を分割点とする．また、近傍に点列が一つも存在しない場合は、通常の3次元デプスエッジ上の点とみなされる．

(3) 分割点の判定

処理2で算出した角度を基に、全ての分割候補点を昇順に並べ、角度の小さい候補点から順に分割点判定を行う．仮に、図4の分割候補点 P_0 を注目点とする．もしも、範囲 $W \times W$ の内側で、点 P_0 の近傍に存在する3次元デプスエッジ上の点列において、既に分割点と判定された点が存在しない場合、点 P_0 を分割点とする．ただし3.1節の性質2で述べたように、測定誤差により分割点が大きすぎる場合がある．そこで本手法では、分割点の近傍の点を考慮して線分化を行う．線分化手法については、次節で述べる．分割点と判断されなかった分割候補点は、通常の3次元デプスエッジ上の点とみなされる．

分割点を検出した後に、二つの分割点間に存在する3次元デプスエッジを点列セグメントとする．例えば図4において、二つの分割点 P_0 と Q を連結する3次元デプスエッジを点列セグメントとする．

4.3 点列セグメントの線分化

本節では、4.2節で求めた点列セグメントを線分で近似する方法を述べる．3.1節の性質2で述べたように、単位点群が生成される場合、測定誤差が発生する．そのため、建造物の直線的な特徴部分の近傍の位置を表す点列として、3次元デプスエッジが抽出される．このような3次元デプスエッジ上の、点列セグメントを線分で近似する場合、二つの分割点を連結して作成された線分は、建造物の特徴部分と一致しない可能性が高い．よって、点列セグメントに含まれる全ての点を用いて、建造物の特徴部分を線分で近似する．

本手法では、点列セグメント上の、各点からの距離が最短となるような無限直線で点列セグメントを近似し、線分を作成する．式(5)に示すように、無限直線 $L(t)$ は単位方向ベクトル u と、 $L(t)$ が通る点 p で表される．

$$L(t) = ut + p \quad (5)$$

図5では、点 p を通り、単位方向ベクトル u を持つ無限直線 $L(t)$ で点列セグメントを近似した模式図を示す．図5の赤点は分割点を表し、緑点は点列セグメントを構

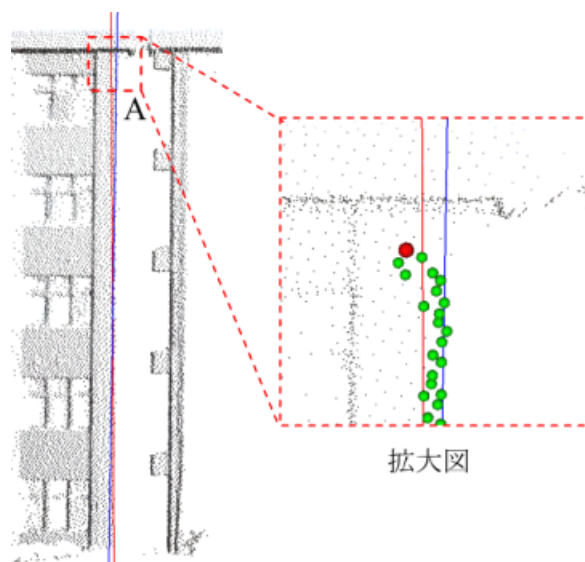


図6 分割点の影響を受けた無限直線近似

成する点 P_i を表す．点 P_i から無限直線 $L(t)$ 上へ射影した点 P'_i は式 (6) で表される．

$$P'_i = ((P_i - p) \cdot u)u + p \quad (6)$$

ここで，点列セグメントを構成する点 P_i から，無限直線 $L(t)$ 上へ射影した点 P'_i までの距離を基にした誤差評価式 E_L を定義し，式 (7) に示す．ただし， n は，点列セグメントを構成する点の数である．

$$E_L = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |P'_i - P_i|^2 \quad (7)$$

点列セグメントを近似する最適な無限直線 $L(t)$ を求めるために，最小二乗法を用いて E_L が最小となるように u と p を近似する．また， u と p を近似する場合，初期値によっては解が発散する場合がある．本論文では，点列セグメントを構成する点の平均値を p の初期値とする．そして，点列セグメントの二つの分割点を連結し，算出した単位方向ベクトルを u の初期値とする．

図6は，単位点群から抽出した一つの点列セグメントを用いて，無限直線近似を行った例である．図6の赤線は，点列セグメントを構成する全ての点を用いて近似した無限直線を表し，青線は同様の点列セグメントに対して，後述の手法を用いて近似した無限直線である．また，図6の領域Aを拡大した図では，赤球は分割点を表し，緑球は点列セグメントを構成する点を表す．3.1節の性質2で述べたように，単位点群には測定誤差が含まれているため，分割点が，建造物の特徴部分を表す特徴線の交差部分と正確に一致しない．そのため，図6の赤線で示すように，分割点やその近傍の点の影響で，近似した無限直線が建造物の特徴部分を表す特徴線と一致しない場合がある．このような問題を避けるために，我々は，分割点や，その近傍の点を近似する対象から外して，近似直線を生成する．

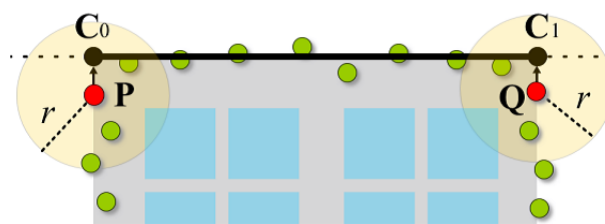


図7 線分の模式図

本手法では，図7に示すように，二つの分割点から半径 r 内に存在する点は無限直線の近似に用いないこととする．このとき，二つの分割点間の距離が r よりも小さい場合には，マッチング処理に用いる特徴線として有効な線分とはならないと考えられるため，線分の生成は行わない．図6の青線は，赤線の近似で用いた点列セグメントに対して，二つの分割点から半径 r 内に存在する点を除いて，直線で近似した結果を示す．図6の拡大図では，青線が分割点の影響を受けずに，建造物の特徴部分を正確に表しているのが分かる．直線で近似した後は，図7に示すように，二つの分割点 P, Q を，近似した直線上にそれぞれ射影した2点 (C_0, C_1) を連結し線分を作成する．上記のように，分割点と，その近傍の点を外して無限直線を近似し，線分を作成することにより，2章で述べた論文 [13,14] で提案した特徴線抽出処理の問題点を解決する．

5 特徴線群のマッチング処理

本論文で提案するマッチング処理は，二つの特徴線群ごとに行う．説明のために，位置合わせ処理を行う二つの単位点群を G_a, G_b とする．以下では， G_a を G_b に位置合わせ処理すると仮定し， G_a と G_b から抽出した二つの特徴線群のマッチング処理を述べる．

5.1 マッチングの前処理

二つの特徴線群を一致させる幾何変換を求める前に，以下に述べる二つの処理を行う．

(1) 特徴線の選出

一般的に，建造物の特徴部分を表す長い特徴線は，二つの特徴線群間で一致する可能性が高く，二つの特徴線群を一致させる幾何変換を求める場合，非常に有効であると考えられる．本手法では，幾何変換の算出に有効な特徴線として，単位点群 G_a と G_b から抽出した二つの特徴線群のなかから，閾値 λ よりも長い特徴線を選出する．

(2) 局所的な座標軸の設定

処理 (1) で選出した特徴線群を一致させるために，論文 [14] で述べた手法を用いて，各特徴線上に図8に示すような局所的な座標軸を設定する．局所的な座標軸は，

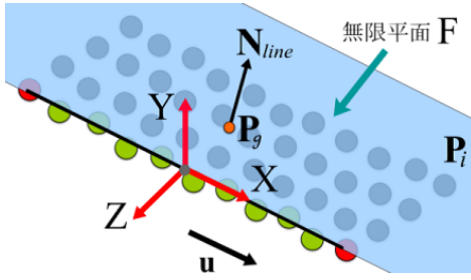


図 8 線分上の局所的な座標軸

特徴線として作成した線分 L の近傍で、線分 L の作成に用いた点列セグメントを含んだ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。

はじめに、線分 L の中点を、局所的な座標軸の原点とする。次に、線分 L の単位方向ベクトル u を局所的な座標軸の X 軸とする。そして、線分 L の近傍に想定される無限平面 F の単位法線ベクトルを N_{line} とすると、 N_{line} と X 軸との外積を Z 軸とする。最後に、上記で求めた Z 軸と X 軸との外積を、局所的な座標軸の Y 軸とする。

ここで、単位法線ベクトル N_{line} の算出法について述べる。図 8 に示すように、 N_{line} は、線分 L の作成に用いた点列セグメントと、その点列セグメントに隣接する点がかかる無限平面 F の単位法線ベクトルである。無限平面 F に乗る点 P_i の重心を P_g とすると、点 P_i を F に射影した距離を用いた、誤差評価式 E_F は式 (8) となる。

$$E_F = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |(P_i - P_g) \cdot N_{line}|^2 \quad (8)$$

ただし、 n は平面 F に乗る点 P_i の数である。本手法では、最小二乗法を用いて、誤差評価式 E_F が最小かつ、無限平面 F に乗る点 P_i が多くなるように、単位法線ベクトル N_{line} を近似する。

後述の説明のために、二つの単位点群 G_a と G_b において、前処理を行った特徴線群と特徴線を、 $L_a, \{L_{a_i} | i = 0, 1, \dots, m-1\}$ 、および $L_b, \{L_{b_j} | j = 0, 1, \dots, n-1\}$ とする。

5.2 最適な特徴線ペアを選出

特徴線群 L_b に対して、 L_a を適切な位置へ移動させるためには、一致する可能性があるすべての特徴線のペアを L_a, L_b から選出し、特徴線ペアを一致させる幾何変換を L_a に適用すればよい。説明を容易にするため、マッチング処理の後で一致する可能性がある特徴線ペア (L_{a_i}, L_{b_j}) を、合致線分対と呼ぶ。

本手法では、各合致線分対 (L_{a_i}, L_{b_j}) に対して、合致線分対が一致するように L_a を幾何変換し、 L_a と L_b がどの程度一致しているかを評価するマッチングスコアを算出する。マッチングスコアとは、合致線分対 (L_{a_i}, L_{b_j})

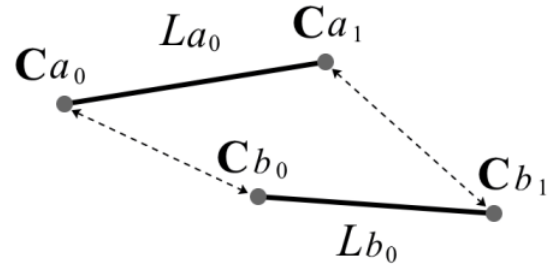


図 9 一組の特徴線

を一致させる幾何変換を L_a に適用したとき、 L_a と L_b の特徴線が何本一致するかをカウントした値である。最終的に、マッチングスコアが最大となる合致線分対を求めた幾何変換が、 L_b に対して L_a を適切な位置に移動させた、最適な幾何変換であるとする。以下では、マッチングスコアが最大となるような、最適な合致線分対を求める方法について述べる。

5.2.1 マッチングスコアの算出

合致線分対数は、マッチングスコアとしてカウントされた値である。後述の組み合わせを用いて一組の特徴線を選出し、その一組の特徴線ごとに一致判定を行うことで、マッチングスコアを算出する。本手法では、図 9 に示すような、一組の特徴線 (L_{a0}, L_{b0}) の端点ペア $(C_{a0}, C_{b0}), (C_{a1}, C_{b1})$ 間の距離が、式 (9) で表されるように、共に $\varepsilon_{distance}$ よりも小さい場合、一組の特徴線が一致していると判断する。

$$\begin{cases} |C_{b0} - C_{a0}| \leq \varepsilon_{distance} \\ |C_{b1} - C_{a1}| \leq \varepsilon_{distance} \end{cases} \quad (9)$$

5.2.2 長さを基準とする特徴線の組み合わせ

文献 [14] では、二つの特徴線群 L_a と L_b を総当りで組み合わせることにより、複数の合致線分対を選出した。しかし、一致する可能性がある特徴線のペアは、線分の長さが等しい特徴線ペアである。そのため、 L_a と L_b を総当りで組み合わせる必要はなく、長さが等しい二本の特徴線がペアとなる組み合わせだけを抽出すれば十分である。そこで、本手法では、二つの特徴線群 L_a と L_b の長さの差分が、閾値 ε_{length} 以下となるペアを組み合わせる。説明のために、組み合わせに基づいて選出された一組の特徴線を試行線分対と呼ぶ。

5.2.3 試行線分対の一致

5.2.2 項で述べた手法により、2 組の特徴線群から、 n 個の試行線分対が得られる。ここでは、 n 個の試行線分対 (L_{a_i}, L_{b_j}) から、2 組の試行線分対 $(L_{a0}, L_{b0}), (L_{a1}, L_{b1})$ を取り出し、 L_{a0} が L_{b0} と、 L_{a1} が L_{b1} とそれぞれ一致するような幾何変換を求める。そして、その幾何変換を L_a に適用し、マッチングスコアを計算す

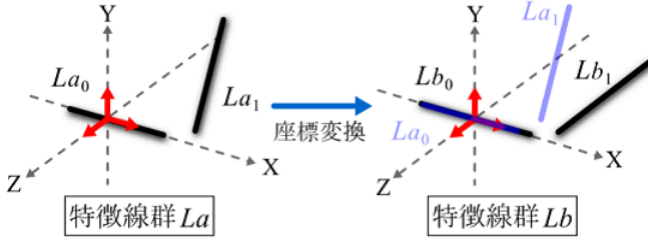


図 10 局所的な座標軸の座標変換

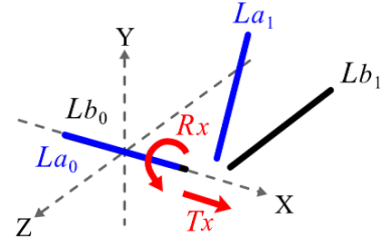


図 11 二つの自由度を伴った幾何変換

る．全ての試行線分対の組み合わせに対して，上記の操作を行い，各組み合わせに対するマッチングスコアを得る．最終的に，マッチングスコアが最大となる幾何変換を行った，試行線分対と，幾何変換により一致した特徴線ペアを，最適な合致線分対として選出する．以下では，2組の試行線分対が，それぞれ一致するような幾何変換を求める手順について述べる．

(1) 座標変換行列の算出

一組目の試行線分対が一致するような座標変換を求める．具体的には，図 10 に示すように，特徴線 La_0 の局所的な座標軸が， Lb_0 の局所的な座標軸と一致するようなアフィン変換行列を算出し，特徴線群 La に適用する．

(2) 二つの自由度を伴った幾何変換行列の算出

一組目の試行線分対を拘束したまま，二組目の試行線分対を一致させる．仮に，その二組を均等に一致させるために，既に一致している一組目の特徴線 Lb_0 上の，三つの局所的な座標軸における回転移動と平行移動の六つの自由度を与えると，二組とも一致しない場合がある．よって本手法では， Lb_0 の局所的な X 軸まわりの回転移動と，X 軸方向の平行移動をした La_0 と La_1 の端点が，それぞれ Lb_0 と Lb_1 の端点に一致するような幾何変換を算出し，特徴線群 La に適用する．具体的には，図 11 に示すように， Lb_0 の局所的な X 軸まわりの回転移動量と，X 軸方向の平行移動量を R_x , T_x として，幾何変換行列 M を算出する．ただし，式 (10) に示すような，試行線分対における端点間の距離を評価した値 E_X が最小となるように，最小二乗法を用いて R_x と T_x を近似する．

$$E_X = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 |Cb_j^i - Ca_j^i M|^2 \quad (10)$$

式 (10) の i は試行線分対のペア数に対応する．また， Cb_j^i を特徴線 Lb_0, Lb_1 の端点とし， Ca_j^i を特徴線 La_0, La_1 の端点とする．

5.3 幾何変換の最適化

5.2 節では，二組の試行線分対を一致させる幾何変換を求めることで，マッチングスコアが最大となる幾何変換を算出し，最適な合致線分対を選出した．本節では，

特徴線群 Lb に対して La を，より適切な位置に移動させるために，マッチングスコアが最大となった幾何変換を最適化する．具体的には，全ての最適な合致線分対が，より厳密に一致するような幾何変換を近似することで最適化を行う．そのため，より多くの合致線分対を用いて，幾何変換の最適化を行った方がよい．よって，幾何変換を最適化した後に，最適な合致線群対のマッチングスコアを再び算出する．そして，マッチングスコアが増加するか，マッチングスコアが変化しない場合には，式 (9) で表されるような二組の端点間の距離が減少し続けるまで，幾何変換の最適化を繰り返す．以下では，最適化の手順を述べる．

最適な合致線分対の選出に用いた，試行線分対の特徴線 Lb_0 上の局所的な座標軸のまわりで，三つの自由度を持った回転移動量 (R_x, R_y, R_z) を表す行列を R とし，平行移動量 (T_x, T_y, T_z) を表す行列を T とする．5.2 節で選出された最適な合致線分対のペア数は，抽出された特徴線の数に依存するため，合致線分対を用いて回転移動量と平行移動量を求める式は非線形となる．本手法では，最小二乗法を用いて，回転移動行列 R と平行移動行列 T を近似する．5.2.1 項で述べたように，本手法では，二本の特徴線の端点の位置が等しい場合，2 本の特徴線が一致していると判断する．よって，選出された合致線分対が一致するためには，合致線分対における特徴線の端点間の距離を減少させる必要がある．図 9 に示すように，仮に一組の合致線分対を (La_0, Lb_0) とし，その端点のペアを (Ca_0, Cb_0), (Ca_1, Cb_1) とすると，特徴線群 La を回転移動と平行移動した後の端点 $C'a_0, C'a_1$ は式 (11) で表される．

$$\begin{cases} C'a_0 = Ca_0 R + T \\ C'a_1 = Ca_1 R + T \end{cases} \quad (11)$$

よって，選出された最適な合致線分対のペア数を n とすると，端点間の距離を基にした，一致関係を評価する誤差評価式 E_C は式 (12) で表される．

$$E_C = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^1 |Cb_j^i - C'a_j^i|^2 \quad (12)$$

そして，最小二乗法を用いて，誤差評価式 E_C が最小となるように回転移動量 R と平行移動量 T を近似する．



図 12 建造物 A



図 13 建造物 B

6 結果と考察

本章では、近代的な建造物を測定して得られた複数の単位点群に対して、位置合わせ処理を行った結果を述べる。測定対象を、図 12 と図 13 に示すような、岩手大学の構内にある二つの建造物 A と B とした。実験では、測定機器 (LMS-Z210) [15] を使用した。LMS-Z210 の測定可能な距離は $2m \sim 350m$ であり、測定誤差は $\pm 2.5cm$ である。また、位置合わせ処理は CPU が Pentium IV 3.4GHz、物理メモリが 1GB の PC を使用した。

(1) 特徴線抽出の結果

図 14 と図 15 に、特徴線の抽出処理を行った結果を示す。図中の各方向が単位点群を表し、黒線は抽出した特徴線を表す。また、図中の赤い太線は、特徴線群のマッチング処理で選出された最適な合致線分対である。図 14 では特徴線 a, b, c のような輪郭線が抽出され、図 15 では特徴線 d, e, f, g, h のような壁面の大きな凹凸部分から特徴線が抽出されている。

表 1 では、図 14 と図 15 に示した各方向の単位点群に対して、特徴線抽出に使用した閾値を示す。レンジセンサと測定面がなす角度や、レンジセンサから対象物までの距離によって、単位点群中の奥行き値の差分や点の密度が異なる。複数の単位点群から同一の特徴線を抽出するためには、単位点群ごとに、奥行き値の差分から 3

表 1 特徴線抽出に使用した閾値

方向	δ (m)	W	σ_{max} (rad)	r (m)
建造物 A				
1	0.33	12	1.9	0.5
2	0.33	12	1.8	0.2
3	0.4	12	1.8	0.4
4	0.6	12	1.95	0.2
5	0.6	12	1.8	0.25
建造物 B				
1	0.5	16	1.9	0.15
2	0.13	16	1.9	0.2

表 2 図面上の長さとの比較

特徴線	平均誤差 (m)	割合 (%)
建造物 A		
a	0.08	0.28
b	1.34	6.84
c	1.54	7.86
建造物 B		
d	0.08	1.86
e	0.04	1.02
f	0.07	1.55
g	0.08	1.84
h	0.21	4.58

次元デプスエッジが適切に抽出できるように閾値 δ を設定する必要がある。同様に、点の密度に応じて線分が適切に生成されるように W, σ_{max}, r を設定する必要がある。よって実験では、初めに、方向 1 の単位点群に対して、奥行き値の差分と点の密度に基づいて初期値を $\delta = 0.3(m), W = 12, \sigma_{max} = 1.8(rad), r = 0.3(m)$ とし、その値を微調整しながら適切な閾値を設定した。次に、方向 2 以降の閾値を、方向 1 の閾値に基づいて微調整した。

表 2 では、図 14 の特徴線 a, b, c, 図 15 の特徴線 d, e, f, g, h の計算上の長さ、対応する特徴部分の図面上の長さについて比較している。表 2 では、各測定方向で得られた同一の特徴線の長さ、対応する図面上の長さとの誤差の平均値を示す。また、各特徴線の図面上の長さに対する、平均誤差の割合を示す。表 2 の特徴線 a や、特徴線 d, e, f, g は、平均誤差の割合が少ないため、建造物の特徴を正確に表すものとして抽出されている。このことから、本手法は、奥行き値の差分や点の密度に依存した閾値を設定することにより、上記の 4 本の特徴線のような、建造物の直線的な特徴部分を表す特徴線を抽出可能となる。

(2) マッチング処理の結果

図 16 と図 17 では、実験 (1) で抽出した特徴線に対して、マッチング処理を行い統合した特徴線と点群を示す。各図では、測定した単位点群ごとに、異なる色で表す。図 16 では建造物 A の輪郭線が一致し、図 17 では建造物の壁面の大きな凹凸部分から抽出された特徴線が一致した。

表 3 マッチング処理に使用した閾値

回数	λ (m)	ε_{length} (m)	$\varepsilon_{distance}$ (m)
建造物 A			
1	4.0	0.4	0.5
2	4.0	0.4	0.5
3	4.0	0.4	0.5
4	4.0	0.7	0.7
建造物 B			
1	4.0	0.3	0.3

表 4 マッチング処理の推移

回数	方向	点	特徴線	組数	合致数	誤差 (m)
建造物 A						
-	1	502935	6	-	-	-
1	2	362112	14	8	2	0.17
2	3	509256	3	29	5	0.10
3	4	403803	3	46	5	0.19
4	5	381706	10	555	5	0.21
建造物 B						
-	1	328814	13	-	-	-
1	2	343766	7	644	5	0.11

表 5 計算時間と消費メモリ量

回数	時間 (s)	点群 (MB)	特徴線群 (MB)
建造物 A			
1	0.10	133.86	14.86
2	0.36	203.44	15.07
3	0.56	259.24	15.19
4	6.75	311.74	15.58
建造物 B			
1	7.78	106.96	14.82

表 3 では、マッチング処理に使用した閾値を示す。単位点群ごとに抽出される特徴線の数異なり、その特徴線の長さも測定誤差によって僅かに異なるため、二つの特徴線群間で、長い特徴線ができるだけ多く一致するように、適切な閾値を設定する必要がある。 λ の値は、最小の長さの有意な特徴線をマッチング処理で利用できるように設定する。また、 ε_{length} 、 $\varepsilon_{distance}$ は、最大の長さの特徴線の数 % 程度の値を設定する。実験 (1) で抽出した特徴線から、初期値を $\lambda = 4.0(m)$ 、 $\varepsilon_{length} = 0.4(m)$ 、 $\varepsilon_{distance} = 0.4(m)$ とし、微調整しながら適切な閾値を設定した。2 回目以降は、1 回目に設定した閾値を微調整した。

図 18 では、文献 [14] で提案した手法を用いた失敗例を示す。2 章で述べた理由により合致線分対の探索が不十分であったため、点群の位置が合わなかった。しかし図 16 と図 17 に示すように、5.2 節で述べた合致線分対の探索方法を用いることで、点群の位置合わせが可能となる。

(3) 計算コストの比較

表 4 に、建造物 A と B の単位点群に対するマッチング処理の推移を示す。表 4 では単位点群ごとに、測定方

向、点の数、閾値 λ よりも長い特徴線の数、試行線分対の組み合わせ数、最適な合致線分対数、その合致線分対同士の平均誤差を示す。はじめに、図 14 に示す方向 1 と 2 の単位点群に対してマッチング処理による統合化を行い、次に、その統合した特徴線群 (方向 1+2) と、方向 3 のマッチング処理による統合化を行う、という手順で逐次的に処理を行った。文献 [13] ではマッチング処理を行うたびに、一致すると想定される特徴線のペアを手動で選択した。しかし、表 4 に示した数十～数百の組み合わせ数から、適切な合致線分対を選択する必要があるため、非常に手間がかかる。本手法では、最適な合致線分対を自動で選択することにより、文献 [13] の問題を解決した。

表 5 に、マッチング処理の計算時間、点群および特徴線群の幾何変換の算出に消費したメモリ量をそれぞれ示す。表 5 の計算時間に示すように、特徴線を用いた位置合わせ手法にかかる計算時間は非常に少ない。また、点ベース位置合わせ手法では、一致する点のペアを用いて幾何変換を算出するために、点のペア数に依存した情報を、メモリ上に確保する必要がある。幾何変換を算出するために必要なメモリ使用量を比較すると、特徴量ベースの本手法では、点ベース手法よりも一桁少ないことが分かる。

7 まとめ

本論文では、測定で得られた単位点群から直線的な特徴線を抽出する手法と、抽出された特徴線を利用して複数の単位点群の位置合わせを行う手法について提案した。本手法は、直線的な特徴を有する近代的な建造物を対象としており、建造物を複数の方向から測定した各単位点群において、同一の長さを持つ特徴線ペアが一致するように位置合わせを行う。特徴線抽出は、測定点の奥行き値の差分が大きい部分の探索に基づいており、アルゴリズムが単純であるため、実装も容易である。同様の理由により、奥行き方向で大きな差分が発生する特徴部分を持つ建造物から、必ず特徴線が抽出される。

今後の課題としては、障害物により情報の欠落がある測定点群に対しても、位置合わせできるように、手法を改良していくことが挙げられる。また、Stamos らの手法のように、稜線のような別の観点で得られる特徴線を抽出できるように手法を拡張していく必要がある。

謝辞

本研究の一部は、夢県土いわて戦略的研究推進事業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 the proceedings of 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, "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] 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.
- [10] 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.
- [11] D. Akca, "Full Automatic Registration of Laser Scanner Point Clouds, "Optical 3-D Measurement Techniques VI, Vol. I, pp.330-337, Zurich, Switzerland, 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] T. Konno, K. Konno, T. Fujimoto and N. Chiba, "Point Cloud Registration Based on Feature Lines Derived from Depth Difference, "International Workshop on Advanced Image Technology 2005, pp.499-504, Jeju, Korea, 2005.
- [14] T. Konno, K. Konno, T. Fujimoto and N. Chiba, "Automatic Point Cloud Registration Based on Feature Lines, "NICOGRAPH International 2005, pp.141-146, Morioka, Japan, April and May 2005.
- [15] <http://www.rieggl.com/>

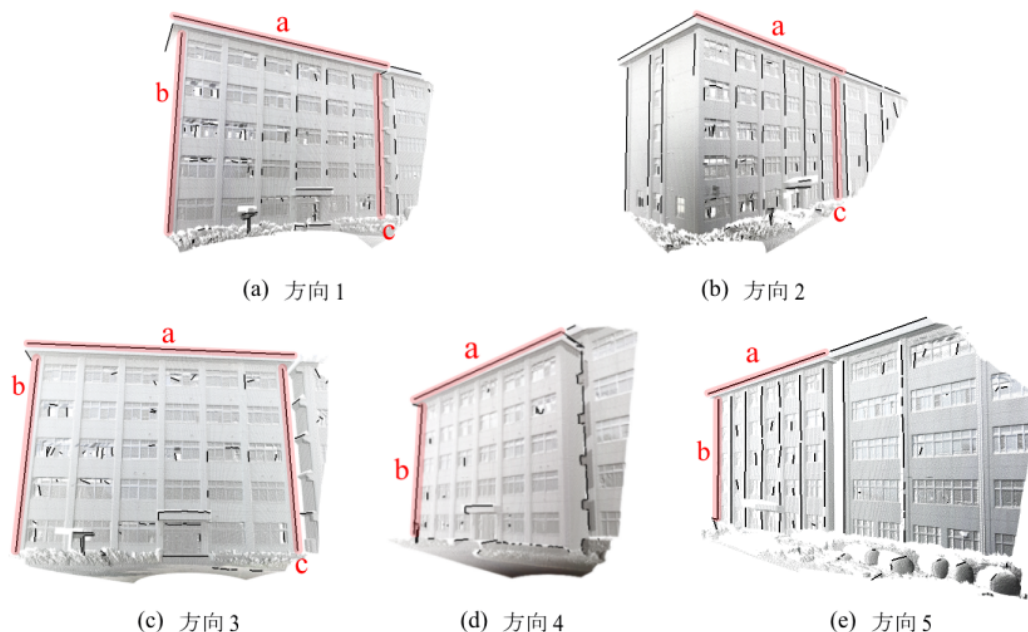


図 14 五つの単位点群と特徴線群 (建造物 A)

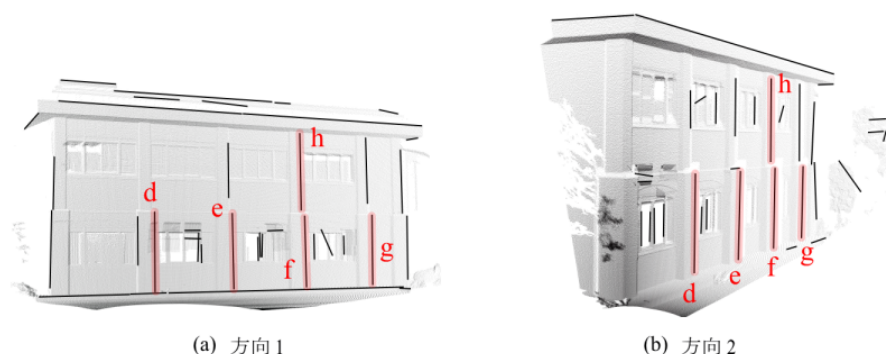
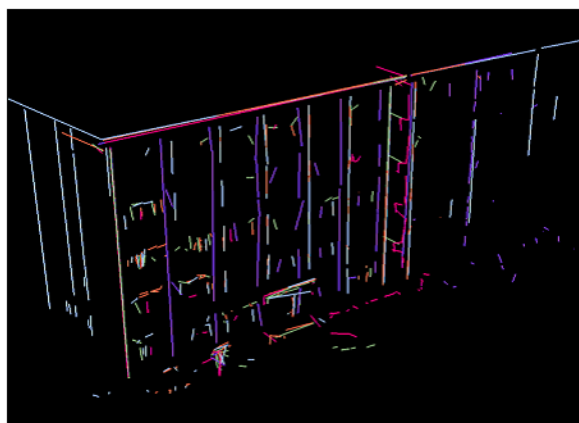
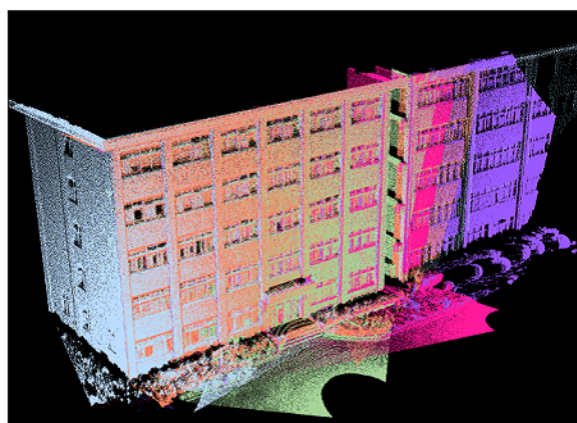


図 15 二つの単位点群と特徴線群 (建造物 B)

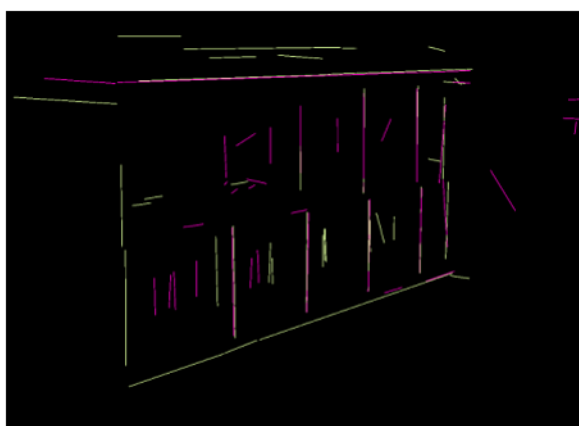


(a) 特徴線

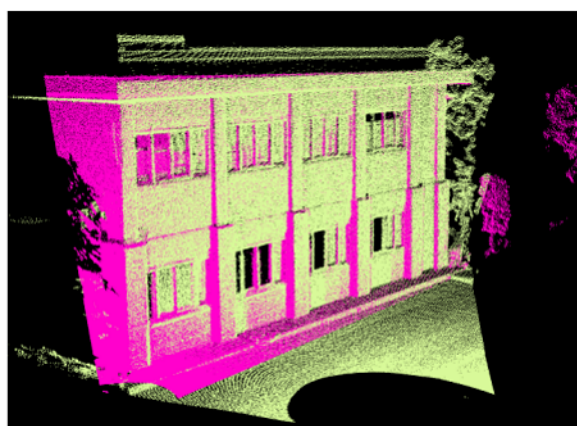


(b) 点群

図 16 マッチング処理後の特徴線と点群 (建造物 A)



(a) 特徴線



(b) 点群

図 17 マッチング処理後の特徴線と点群 (建造物 B)

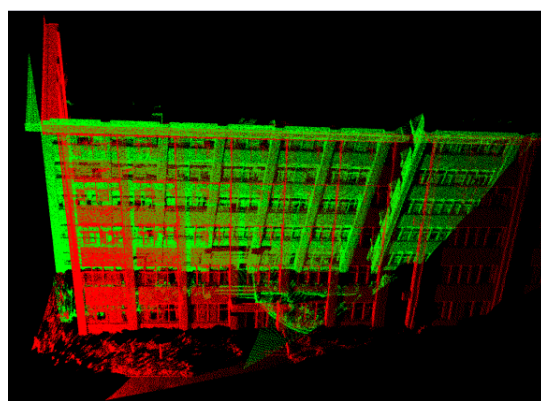


図 18 文献 [14] の手法を用いた失敗例