2004－CG－116　(12)
2004／8／19

最適化された特徴線を用いた点群の位置合わせ手法

金野 哲士　今野 晃市　藤本 忠博　千葉 則茂
岩手大学工学部

複数点群を位置合わせする手法の一つとして，点群から特徴量を抽出して位置合わせする手法がある．このような手法では，測定時にマーカーを配置する必要がないため，建造物などの大型の実空間の復元には有効である．しかし，位置合わせの処理に時間がかかったり，処理するための拘束条件が厳しいといった問題がある．本研究では，大型の建造物を復元するために，最適化した特徴線に基づく位置合わせ手法を提案する．本手法では，点群の情報を利用し，高速かつ容易に位置合わせすることが可能である．

Point Clouds Registration by Using Optimized Feature Line Segments

Tetsuji Konno　Kouichi Konno　Tadahiro Fujimoto　Norishige Chiba
Faculty of Engineering, Iwate University

In this paper, we present an efficient algorithm for the registration of multiple *"point cloud data"* obtained by scanning a real object from different views. This algorithm is based on a *"feature-line-matching"* approach that evaluates the distance between a pair of feature lines. Thus, our proposed algorithm works well for scanned data such as of artificial buildings. In our algorithm, the feature lines are detected efficiently by using the coordinate values of *"point cloud data"*.

1. はじめに

実空間の建造物を仮想空間上に復元する有効な手段の一つとして，レンジセンサの利用が挙げられる．レンジセンサは，センサ位置から物体表面までの奥行き値をデジタルデータとして測定するための測定装置である．レンジセンサから距離画像を得ることで，物体形状を3次元空間上の点群として獲得することができる．一般に，レンジセンサから得られた点群には，オクルージョンに関する問題があることが知られている．オクルージョンの問題を解決するための一つの考え方として，複数のセンサ位置から距離画像の測定を行い，それらを3次元空間上で位置合わせすることにより統合することが考えられる．

位置合わせの手法として，得られた点群の座標を直接利用して，点群間の最適な位置を計算し位置を合わせる手法と，特徴点や特徴線を用いて間接的に位置計算を適用して位置を合わせる手法が提案されている．

点群を直接利用し，位置を計算する手法としては，文献[1～6]が挙げられる．点群の座標を直接計算して最適な位置合わせを行う際には，点や面等のように位置合わせの基準になるものが必要である．そこで，通常は基準点としてマーカーを配置して測定を行い，他の方向から測定した同一のマーカー同士が一致するように条件を課し，位置を計算する．

一方，特徴量に基づいた位置合わせを行う手法としては文献[7～10]が挙げられる．Stamos [9]らは，許容誤差を持った同一平面上にのる点群をグループ化して点群を領域分けし，平面同士の交線から幾何学的な特徴線を抽出した．そして，平面の法線ベクトルと特徴線を用いて位置合わせを行った．Stamos らが提案した手法のように特徴量を用いて位置合わせを行う場合は，基準点として方向ベクトルや特徴線等を用いる．特徴量に基づいた位置合わせではマーカーを必要としないために，マーカーを配置できない場所や対象物を復元する際に有効である．また，特徴線を用いた位置合わせは，直線的な特徴を持つ建造物に有効である．

Stamos らが提案した手法では，点群の測定誤差が大きい場合や，サンプリング間隔が広い場合など，意図した平面形状が得られないときには，領域の分け方が変化し，その結果得られる特徴線も変化してしまう．そのため，複数の方向から取得した点群から特徴線を求めた場合，それぞれの点群から得られる特徴線が 3 次元空間上で一致するものとはならない可能性がある．例えば測定した方向のサンプリング間隔が広い場合，実際の表面形状にある細かな凹凸の部分が領域分けされず，抽出される特徴線が少なくなる．このまま位置合わせを行うと，一致する特徴線が少なくなり，位置合わせが不可能になる場合がある．

本論文では，Stamos らの手法とは異なる手法によって特徴量を抽出することによって，前述の問題点を解決する新しい手法を提案する．本手法ではまず初めに，測定して得られる距離画像の各ピクセルとの対応関係を持った 3 次元座標値である点群から，エッジ検出した画像を作成し特徴線を抽出する．次に，抽出した特徴線を 3 次元空間上で線分化する．最終的な位置合わせでは，異なる方向から得られた互いに対応する線分どうしが 3 次元空間上で重なるようなペアを選択し，最適な幾何変換を誤差評価により求める．

本手法では形状の表面が粗い建造物や，精度の悪いデータに対しても位置合わせ可能とするために，許容誤差を考慮するトレラントモデリング手法で線分化した特徴線を用いる．また本手法では，サンプリング間隔が広い場合でも多くの特徴線を抽出可能であり，位置合わせも可能である．そのため，広範囲にわたって測定可能であることや，測定データが少なくて済む等の利点がある．

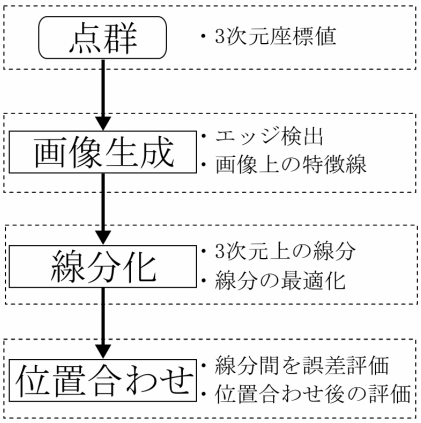


図 1　提案手法の概要

2.　提案手法の概要

図 1 に示すように，本システムは以下の手順で位置合わせを行う．

(1)　レンジセンサを用いて，ある方向を測定し点群を得る．点群は，レンジセンサから得られる距離画像の各ピクセルと 3 次元座標値との対応関係を持つ．

(2)　(1)で得られた点群からエッジ検出を行った画像を作成する．さらに各画像のエッジ部分を特徴線とし，3 次元空間上の線分に変換する．

(3)　(1)，(2)の操作を，複数方向から測定した点群についてそれぞれ行い，位置合わせを実行する．この位置合わせは，逐次的に二組の線分群の間で行う．各位置合わせでは，二組の線分群間で対応する，すなわち，位置が一致する可能性のある線分同士を選択し，それらの誤差評価値が最小となるような幾何変換を求める．

3.　特徴線の抽出と線分化

3. 1 特徴線の抽出

特徴線をもとに位置合わせを行う場合，測定したそれぞれの方向から，3次元空間上で一致する特徴線ができるだけ多く得られることが望ましい．しかし，単に距離画像等に対してエッジ検出を行うことで特徴線を抽出した場合，形状の表面にある細かな凹凸等により，その形状を特徴付ける特徴線にノイズが発生するため，必要な特徴線がうまく抽出されない場合も生じる．エッジ検出は閾値を調整することで行うが，このとき，閾値を調整して多くの特徴線を抽出するようにするほど，ノイズの発生は顕著となる．また，閾値を小さくするなどして逆にノイズの発生を抑えるようにした場合には，抽出される特徴線の数が減少し，異なる方向からの特徴線で一致するものが得られる可能性が低くなってしまう．

本手法では，ノイズの発生をできるだけ抑え，かつ，異なる方向からの特徴線で一致するもの，特に，位置合わせに有用なものができるだけ多く得られるよう，点群の情報を用いて特徴線を求める．そこで本研究では，Depth Edgeを定義する．Depth Edgeは隣接するピクセルの奥行き値の差分が大きな部分に対応する特徴線である．ピクセルの位置(ix, jy)は点群の1点(x, y, z)に対応している．よって，各ピクセルは3次元空間上の座標値を持つ．そこで，2次元濃度画像のエッジ検出で使用される1次微分オペレータ[11]を，ピクセルが持つz値に対して適用する．Depth Edgeの例を図2に示した．

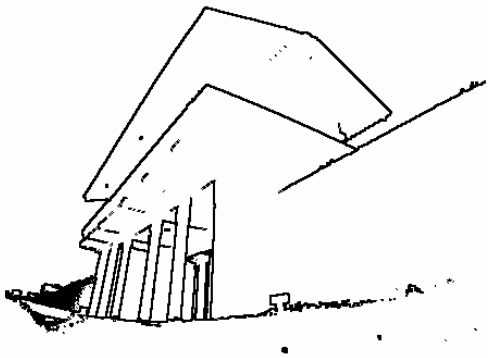


図 2　Depth Edge 画像

3. 2 特徴線の線分化

3.1節で述べたように，点群から抽出した特徴線は，画像上のピクセルを単位として表現されている．そこで，以下に述べる手法により，この特徴線を3次元空間上での線分に変換する．

ここでは，線分を決定する要素として四方向の連結ピクセル数C_d $(1 \leqq d \leqq 4)$を各ピクセルに与える．四方向とは図3に示すように，2次元画像上での右方向から左斜め下まで45度づつ回転した方向である．各方向d に対するC_d は，その方向に連続するピクセルの数であり，線分を構成する点の数となる．次のアルゴリズムを適用することにより，各ピクセルのCdを決定する．

(1) 初めにC_d の初期化を行う．あるピクセル$P(ix, jy)$がエッジ部分であれば，そのすべての方向dについて$C_d = 1$とし，そうでなければ$C_d = 0$とする．

(2) 画像の左上隅のピクセルからC_dを探索する．例えば$d = 1$，つまり探索方向を右側としたときに，あるピクセル$P(ix, jy)$から線分L_1の作成を開始し，線分の端点とする．そして$P(ix, jy)$の右側に隣接するピクセル$P(ix+1, jy)$の連結成分数をC'_1とする．このとき，C'_1の数が1であり，3次元空間上での2点間の距離D_vが閾値Disよりも短い場合，$C'_1 = 1 + C_1$とし，着目しているピクセル$P(ix, jy)$のC_1を0とする．

(3) 次に参照するピクセルを$P(ix+1, jy)$とし，同様に右隣ピクセルの連結成分数と3次元空間上での2点間距離を判定していく．もし，注目しているピクセル$P(ix+n, jy)$の右隣ピクセルの連結成分数が0だったり，2点間の距離D_vが閾値Disよりも大きい場合には，連結成分数の加算は行わず，線分作成も終了する．このとき点$P(ix, jy)$，$P(ix + n, jy)$を線分L_1の端点とする．また，線分を構成する点の数は$P(ix + n, jy)$の連結成分数となり，この場合は$(n + 1)$個となる．そして，新たなエッジ部分のピクセルを探索し，同様の処理を繰り返し行う．

以下同様に，(1)，(2)，(3)で述べた一方向での線分化アルゴリズムを四方向全てに適用することで，特徴線の線分化を行う．

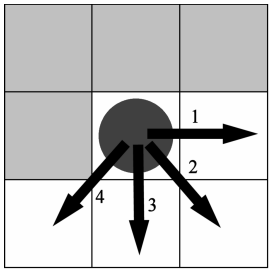


図 3　連結ピクセルの方向

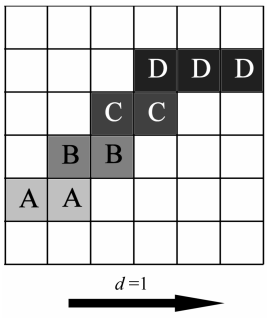


図 4　不連続な線分

3. 3 線分の統合化

線分の統合化を，特徴線から変換した線分に適用する．3.2節で作成した線分は，画像上において一定方向の成分しか抽出されないので, 図4に示した線分*A*, *B*, *C*, *D*のような場合に不連続な線分として作成されてしまう．線分*A*，*B*，*C*，*D*を統合して一つの線分とするために，線分がのる3次元空間上の無限直線を導出し，次に述べる二つの条件を同時に満たす二つの線分ごとに統合する．

(1) 二つの線分 L_1, L_2 について，一方の線分を構成する点 P_i が他方のいずれかの点と画像上で 8 近傍に隣接し，さらに 3 次元空間上での 2 点間の距離が閾値 *Dis* よりも小さい．

(2) 図5に示すように，3次元空間上で二つの線分をまとめた新たな線分がのる無限直線$L_{12}(t)$から半径*R*内に線分L_1とL_2を構成する全ての点が存在する．

ここで, 3次元空間上の無限直線を導出する手法について述べる．線分上の点がのる無限直線を$L(t)$とし，線分を構成する任意の点P_i から$L(t)$までの距離を$d(P_i, L(t))$とする．そして，無限直線$L(t)$と誤差のある点群P_iとの距離が最小になるような無限直線を定義する．そのため，無限直線と点群の距離の二乗和を表す評価式を導入する．式(1)は評価式E_Lを表す．ただし，*n*は線分を構成する点の数である．

$$E_L = \sum_{i=0}^{n-1} d\left(P_i, L(t)\right)^2 \qquad (1)$$

E_L を最小にする無限直線$L(t)$を決定するために，最小二乗法により近似解を算出する．$L(t)$の初期値は線分の中点と，線分の端点を結んだ直線の傾きを用いる．

線分を統合化した後には，構成する点の数が非常に少ない線分も多数存在する．この場合，位置合わせに有効な線分であるか，または無効なノイズであるかの判断が難しい．そこで本研究では，線分を構成する点の数を基準として，線分を降順に並べ，上位の数十個を位置合わせに用いる．

3.4 線分の最適化

本研究で提案する位置合わせ手法では，線分群の中から選択した幾つかの線分が，より正確に形状の特徴を表していることが求められる．そこで本節では，位置合わせに用いる線分について，隣接する他のエッジ部分の点との統合化により, 線分の最適化を実現する．線分を最適化した後には，線分を構成する頂点数が増加する．具体的には以下の手順で最適化を行う．

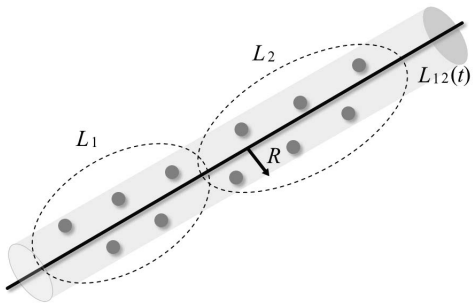


図 5　線分の統合化

(1) Depth Edge画像上で線分Lを構成する全ての点P_iに隣接するエッジ部分の中で, 2点間の距離が最も近い点P'を探索する．

(2) 点P'を含めた新しい線分L'がのる無限直線L'(*t*)から，半径R内にL'を構成する全ての点が存在するならば，点P'を線分Lに加える．

(1), (2)の操作を隣接するエッジ部分が無くなるまで線分毎に繰り返し行う．

4. 位置合わせ

本章では, 3章で述べた手法で得られる線分を利用し, 複数のセンサ位置から獲得した点群どうしの相対的な位置関係を導出する位置合わせアルゴリズムについて述べる．

4. 1 位置合わせアルゴリズムの概要

位置合わせは，逐次的に二組の線分群の間で行う．はじめに任意の二方向から得られる線分群間で位置合わせを行い，その二つの線分群を合成し，その後，残りの方向の線分群から一つずつを選び，位置合わせと合成を行っていく．

二方向からの線分群に関する位置合わせでは，一方の座標系を他方の座標系に移す3次元幾何変換を考え，二方向からの線分群間で対応する線分同士が3次元空間上でできるだけ一致するような最適な幾何変換を求める．具体的には，線分ペアに対する誤差評価関数を定義し，その値が最小となる幾何変換を最小二乗法により求める．このとき，一般には，できるだけ多くの線分ペアを選んだほうが精度の高い位置合わせが可能であると言える．

しかし，先に述べたように，各方向から得られる線分群が許容誤差を含み，かつ，十分な数の線分が得られない場合には，二方向からの線分群間でうまく対応する線分ペアを見つけること自体が困難である場合が多い．そこで本手法では，選択する線分のペアを最低二組選択する．ただし，ペア同士が平行にならないように選択する．また，例えば，太い円柱の中心軸方向のシルエットに対応する線分のように，測定方向によって出現の仕方が異なる線分は，位置合わせの対象としては用いないようにする．

次に, 選択した線分ペア以外の線分間の3次元空間上での対応関係に基づく評価値も算出し，その値も考慮に入れた幾何変換の決定を行う．本論文の位置合わせアルゴリズムでは，選択した線分ペアの最適な幾何変換を以下の4段階のステップを繰り返すことにより決定する．

STEP1　初期位置設定
STEP2　回転移動変換の決定
STEP3　平行移動変換の決定
STEP4　位置合わせ後の評価

また，STEP1，2，3では重み付けのパラメータ（後述）を持つ．STEP4の評価に基づき，STEP1からSTEP3を繰り返すことで最適な重み付けのパラメータを求める．全ての幾何変換を決定した後はその幾何変換を用いて，二方向からの線分群の位置合わせを行う．

4.2 初期位置設定

本論文で最小二乗法を用いる際にはNewton 法を利用する．しかしNewton 法では，初期値によっては解が発散してしまうことがある．そこで本ステップでは，回転移動，及び平行移動の変換を決定する前処理としてN 個のペアから二組選び，それらが近づくように初期位置を設定する．初期位置を設定することによって，解の発散を防ぐ．初期位置を設定するアルゴリズムは，二つの測定方向にそれぞれ右手系の座標軸を決定し，アフィン変換を適用して二つの座標軸を一致させる．座標軸の決定手法を以下のように定義する．

一つの方向から測定した位置合わせに用いる二組の線分ペアDL_1，DL_2がそれぞれのる無限直線を$DL_1(t)$, $DL_2(t)$とする．このとき，座標軸の原点Gを2直線の交点，または最近点とする．そして，Y軸を直線$DL_1(t)$の傾きv_1とする．次にv_1と直線$DL_2(t)$の傾きv_2の外積の方向をZ軸とし，最後にv_1とZ軸との外積の方向をX 軸とする．

以上の操作を，もう一方の方向から得られた二つの線分に対しても行い，最後に各座標軸が一致するようにアフィン変換を行う．

4.3 回転移動変換の決定

本ステップでは，位置合わせに選択した線分の各ペアがそれぞれ平行となるような変換を決定する．一方から測定したときのセンサの位置を原点とした座標系において，各軸の回転角度をR_x，R_y，R_zとし，それぞれの回転行列を用いて回転移動を行う．

選択した複数の線分ペアにおいて，一組の線分がのる無限直線を$L_1(t)$，$L_2(t)$とし，無限直線L_1が通る点をPとする．無限直線$L_1(t)$と$L_2(t)$を平行にする場合を考える．3.3節で述べたように，無限直線$L_1(t)$上の点Pから$L_2(t)$までの距離はd(P, L(t))で表される．よって，回転後の線分の端点P'$_1$，P'$_2$から$L_2(t)$までの距離，及び点P'$_0$から遠くに離れた点P'$_3$，P'$_4$から$L_2(t)$までの距離を用いて式(2)，(3)を定義する．図6より二つの無限直線が平行である条件式は式(4)となる．

$$D_1 = \left| d(P'_3, L_2(t)) - d(P'_1, L_2(t)) \right| \tag{2}$$

$$D_2 = \left| d(P'_4, L_2(t)) - d(P'_2, L_2(t)) \right| \tag{3}$$

$$DR = D_1 - D_2 = 0 \tag{4}$$

よって，誤差評価関数E_Rは式(5)となる．

$$E_R = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \alpha_j \left\{ DR_j \right\}^2 \tag{5}$$

ただし，重み付けのパラメータαは式(6)を満たす．

$$\sum_{j=0}^{N-1} \alpha_j = 1 \qquad (0 \le \alpha_j \le 1) \tag{6}$$

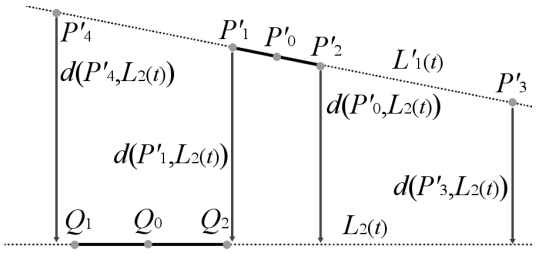


図 6　二つの線分を位置合わせ

式(4) を最小にする変換を最小二乗法により求める．平行移動の変換を決定する場合にも，誤差評価関数を用いて同様に求める．

4.4 平行移動変換の決定

本ステップでは平行移動を行い，線分L_1，L_2がそれぞれのる無限直線$L_1(t)$，$L_2(t)$間の距離を最短にするような変換を決定する．平行移動量をT_x, T_y, T_zとすると，変換後の点P'は次のようになる．

$$P' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} P \tag{7}$$

図6に示すように，線分L_1を平行移動した後の無限直線を$L'_1(t)$とする．4.3節と同様に，$L'_1(t)$上の点P'$_1$, P'$_2$, P'$_3$, P'$_4$を用いて，位置合わせに選択したペア間の距離が最小となる条件式は式(10)となる．

$$D_1 = \left| d(P'_1, L_2(t)) + d(P'_2, L_2(t)) \right| \tag{8}$$

$$D_2 = \left| d(P'_3, L_2(t)) + d(P'_4, L_2(t)) \right| \tag{9}$$

$$DT = D_1 + D_2 = 0 \tag{10}$$

よって，誤差評価関数E_Tは式(11)となる．

$$E_T = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \beta_j \left\{ DT_j \right\}^2 \tag{11}$$

ただし，重み付けのパラメータβは式(12)を満たす．

$$\sum_{j=0}^{N-1} \beta_j = 1 \qquad (0 \le \beta_j \le 1) \tag{12}$$

4.5 位置合わせ後の評価

位置合わせの各ステップでは重み付けのパラメータを用いており，位置合わせ後の線分を評価することにより設定する．本節では位置合わせ後の線分の評価手法について述べる．まず初めに，位置合わせを行う二つの線分群から考えうる全てのペアについて，一組ずつ線分間を誤差評価する．このとき，各ステップで求めた幾何変換に対応する誤差評価値の総和を，式(13)で定義されるEとする．

$$E = E_R + E_T \tag{13}$$

そして，誤差評価値の総和Eを基に，以下の二つの基準値を用いて位置合わせ後の線分を評価する．

(1) 考えうる全てのペアにおいて，一致するペアの総数(cnt)．ただし，ある一組のペアに対する誤差評価の総和E'が閾値E_{max}以下であれば，そのペアが一致していると判断する．

(2) 4.3節，4.4節で幾何変換を決定する際に，式(13)で

定義される，位置合わせに用いたN 組の線分ペアを誤差評価した総和E.

4.6 重み付けパラメータの設定法

4.3節, 4.4節では重み付けのパラメータα, βを用いた．本節ではパラメータの具体的な設定法について述べる．まず始めに，初期値として全パラメータの値を0.5とする．次に，パラメータα，βの順に，以下のアルゴリズムを繰り返し適用することにより，最適なパラメータ値を決定していく．なお，以下の文中では，パラメータαについて表記している．

(1) $\alpha = 0.5$ として4.1節で述べたSTEP1からSTEP4を一度行い，初期値となるE_0とcnt_0を導出する．

(2) 式(14)，及び式(15)で定義されるα_1とα_2について，一致するペア数cnt_1，cnt_2及び誤差評価値の総和E_1，E_2を求める．ただし，$\Delta\alpha$を刻み幅とし，kは反復回数である．

$$\alpha_1 = \alpha + (\Delta\alpha)^k \qquad (14)$$

$$\alpha_2 = \alpha - (\Delta\alpha)^k \qquad (15)$$

(3) 初期値であるcnt_0と，(2)で求めたcnt_1，cnt_2を比較し，最もペア数が多い場合のパラメータを選び，その値を新たな初期値とする．

(4) もしも，初期値が更新されないか，α_1，α_2について式(16)を満たす場合は終了し，そうでなければkを一つ増やし本節の処理(2)へ進む．

$$|E_2 - E_1| \le \sigma \qquad (16)$$

ただし，σは微小値とする．

5. 結果と考察

5.1 計測環境

計測対象は，岩手県盛岡市志波城跡にある，平成9年に復元が完成した外郭南門を計測した．復元された外郭南門は，奈良県奈良市にある平城身や跡朱雀門に次ぐ大規模な門であり，間口が15m，高さが11.1mある．使用機器は図7に示した，RIEGL社製のLMS-Z210を用いた．LMS-Z210の主なスペックは以下の通りである．

測定距離範囲 ： 2m ～ 350m

ラインスキャニング範囲 ： ±40 度

フレームスキャニング範囲 ： 0 度～ 333 度

5.2 測定データ

レンジセンサは3種類の画像を出力することができる．レンジセンサから建造物までの距離をRGBで表示した距離画像．レーザを照射した点の光度反射強度をグレースケールで表示した受光強度画像．レーザ照射点のRGBを表示したカラー画像．また，レンジセンサは画像の各ピクセルに対応した3次元座標値を点群として出力することができる．

5.3 実験結果

図8と図9では，外郭南門の表側を正面と右側から測定し，本論文で提案した特徴線を線分化する手法を適用した結果をそれぞれ示す. 図中の黒線は線分である．線分化に用いた閾値は，$Dis = 2.0$，$R = 1.0$とした．図から分かるように，形状の輪郭や壁の端などのはっきりとした特徴線が線分化されている．

図10では，図2の特徴線を線分化した際に，最適化を適用する前後の例を示す．ただし，各線分は2次元画像上に逆変換した．図10(b)の点線で囲まれた領域に注目すると，線分の長さが増加しているのが分かる．

図 7　レンジセンサ（RIEGL 社製 LMS-Z210）

図8と図9に示した線分を用いて，位置合わせを行った結果を図11，図12に示す．ただし，一致すると予想されるペアが少なかったために，幾何変換を決定する際に用いたペアを二組とし，手動で選択した．図11では位置合わせ後の線分を示し，黒い線分，白い線分はそれぞれ正面と右側から測定したときの線分である．また，線が太い部分は選択した線分である．図12では位置合わせ後の点群を示した．位置合わせが完了するまでに約9秒かかった．

6. むすび

本論文では，複数方向から測定して得られた点群を位置合わせする手法を提案した．まず，点群を用いてエッジ検出を行い，特徴線をエッジ部分として抽出した．そして，その特徴線を3次元空間上で閾値を用いることにより，許容誤差を考慮した線分に変換した．また，線分はエッジ検出画像を用いて最適化した．最後に，位置が合うと予想される線分のペアを選択し，それらが最適な位置に移されるような幾何変換を自動的に求めることで位置合わせを実現した．位置合わせのアルゴリズムは初期位置設定，回転移動変換の決定，平行移動変換の決定, 位置合わせ後の評価の4段階に分けられる．

今後の課題として，線分ペアの自動選択が挙げられる．今回の実験では位置合わせを行う特徴線となる線分を手動で決定した．しかし，測定する方向が非常に多い場合は，位置合わせを行うたびにユーザが毎回手動で選択するので，ユーザに負担がかかる．そこでユーザにかかる負担を減らすために，位置が合うと予想される線分ペアを自動選択する手法を開発する必要がある．

謝辞

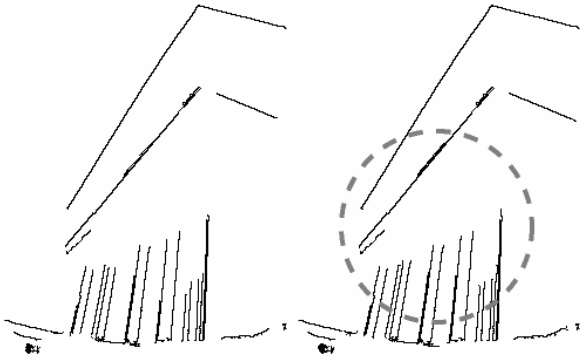
志波城の計測にご協力を頂いた，盛岡市教育委員会に深く感謝する．また，本研究の一部は，夢県土いわて戦略的研究推進事業および科学研究費補助金（基盤研究(B)16300021）の支援による．

〔文献〕

1）P. Besl, N. McKay : *"A Method for Registration of 3-D Shapes"*, IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., 14, 2, pp.239-256, 1992.

2）Turk G., M.Levoy : *"Zippered Polygon Meshes from Range*

Images", Comput. Graphics, pp.311-318, 1994.
3）B. Curless：*"From Range Scans to 3D Models"*, Appears in Comput. Graphics, 33, 4, 1999.
4）M. Levoy et. al.：*"The Digital Michelangelo Project"*, Comput. Graphics, pp.131-144, (2000.
5）Y. Sun, J. Paik, A. Koschan and M. Abidi：*"Surface Modeling Using Multi-View Range and Color Images"*, Integrated Computer Aided Engineering, 4, pp. 37-50, 2003.
6）池内克史， 倉爪亮， 西野恒，佐川立昌，大石岳史，高瀬裕：*"The Great Buddha Project* －大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化－*"*, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 7, 1, pp.103-113, 2002.
7）Vitor Sequeira, Joao G. M. Goncalves, M. Isabel Ribeiro：*"3D Scene Modelling from Multiple Range Views"*, Proc. SPIE Conference Videometrics IV (part of Photonics East'95), 2598, pp.114-127 , Oct. 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, Madison, WI.
10）國井洋一，近津博文："オプティカルフローによる建造物の自動*3D* モデリングに関する研究"，日本写真測量学会平成12 年度秋季学術講演会論文集, pp.263-268, 2000.
11）村上伸一："画像処理工学"，東京電機大学出版局, 2000.



(a) 最適化前　　(b) 最適化後

図 10　線分の最適化

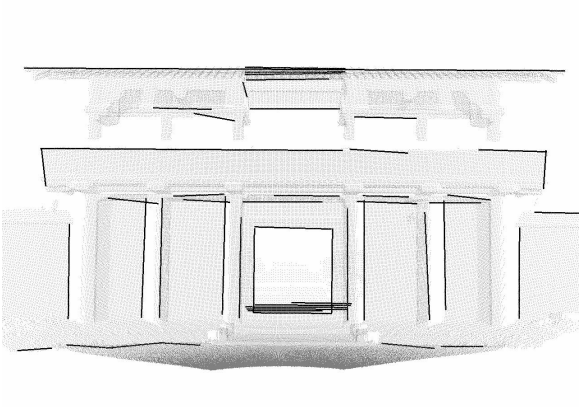


図 8　特徴線の線分化（正面）

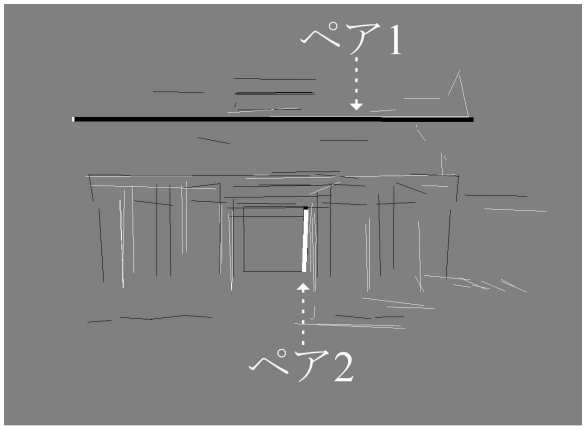


図 11　位置合わせ後の線分

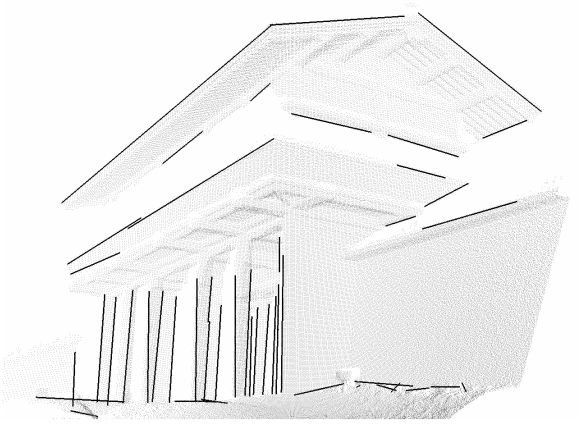


図 9　特徴線の線分化（右側）

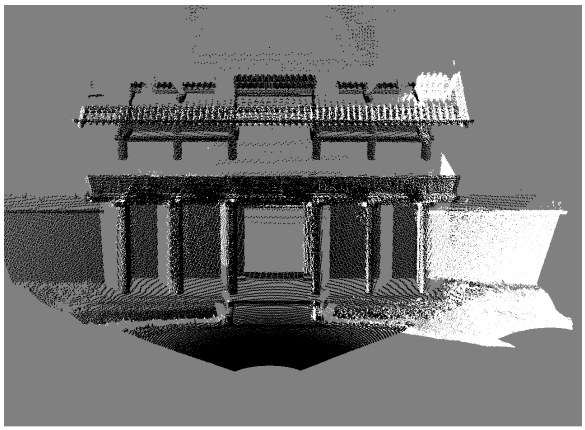


図 12　位置合わせ後の点群