

平面交線を用いた3次元点群データの位置合わせ手法の開発

北川 悦司^{1,a)} 加藤 諒² 安彦 智史³ 吉永 京平⁴ 津村 拓実⁴

受付日 2019年3月26日, 採録日 2019年10月3日

概要: 近年の技術の進歩により, 3次元点群データは, 地上レーザスキャナや距離画像センサ, MMS (Mobile Mapping System) といった様々なセンサ機器を利用して, 容易に取得できるようになった. この3次元点群データは, 自動運転や構造物の維持管理, 災害時の状況把握など多岐にわたる利用用途がある点で非常に注目されている. これらの分野で効果的に3次元点群データを活用するには, 撮影視点や取得時間の異なるデータを1つにまとめる位置合わせ (レジストレーション) の処理が重要である. 3次元点群データの位置合わせ手法の現状は, ICP (Iterative Closest Point) を利用した事例や研究が大半である. ただし, これらの手法は, 点と点を誤差なく一致させるパターンマッチング手法の延長であるため, 計測箇所や点群密度などが異なると, 同じ撮影方法で点群の密度が非常に多いデータなどでしかうまく位置合わせできないのが現状である. そこで, 本研究では, 既存の課題を解決する手法を構築するために3次元点群データから平面を抽出し, 平面と平面の交線を用いて位置合わせする手法を提案する. この手法は, 点と点をマッチングしないため, 計測箇所の問題や点群密度の問題の影響は受けないという利点がある.

キーワード: 位置合わせ, 3次元点群データ, MMS, ICP

Development of Registration Method of 3D Point Cloud Data Using Planar Intersection Lines

ETSUJI KITAGAWA^{1,a)} RYO KATO² SATOSHI ABIKO³ KYOHEI YOSHINAGA⁴ TAKUMI TSUMURA⁴

Received: March 26, 2019, Accepted: October 3, 2019

Abstract: 3D point cloud data can be easily acquired using various sensor devices such as a terrestrial laser scanner, depth sensor, and MMS (Mobile Mapping System). These data are attracting attention because they can be used for automatic operation, maintenance of structures, and grasping of disaster situations. Registration of 3D point cloud data is necessary to use 3D point cloud data in these fields. This registration generally uses ICP (Iterative Closest Point). However, ICP is an extension of the pattern matching method that matches points without errors. Therefore, this method cannot be registered when measurement points and point cloud density are different. In this research, we propose a registration method using planar intersection lines from 3D point cloud data. This method is characterized in that it is not affected by the problem of measurement points and the problem of point cloud density because it does not match points to points.

Keywords: registration, 3D point cloud data, MMS, ICP

¹ 阪南大学経営情報学部
Faculty of Management Information, Hannan University,
Matsubara, Osaka 580-8502, Japan
² 京都橋大学現代ビジネス学部
Faculty of Contemporary Business, Kyoto Tachibana Uni-
versity, Kyoto 607-8175, Japan
³ 仁愛大学人間学部
Faculty of Human Studies, Jin-ai University, Echizen, Fukui
915-8586, Japan
⁴ 阪南大学大学院企業情報研究科
Graduate School of Management & Information Technology,
Hannan University, Matsubara, Osaka 580-8502, Japan
a) kitagawa@hannan-u.ac.jp

1. はじめに

3次元点群データは, 自動運転やVR (Virtual Reality), 地図更新, 構造物の維持管理, 災害時の状況把握, 機械製造など多岐にわたる利用用途がある点で非常に注目されている. 特に国土交通省では, ICT (Information and Communication Technology) を用いて建設生産システム全体の生産性向上を目指す「i-Construction」[1]が進められており, 3次元点群データを利活用することが, よりいっそうの生産性向上に不可欠であるといわれている. 近年の

技術進歩により、比較的容易に取得できるようになった3次元点群データを様々な分野で活用する際、位置合わせの処理が重要である。たとえば、自動車のような物体全体を1つの3次元点群データとして作成するには、複数の視点から点群を取得し、それらを結合する必要がある。施工現場や店舗などの空間を3次元化して仮想空間上で現状確認を行うといった事例 [2] も増加しており、このような際にも複数視点から作成した点群データの結合が不可欠である。構造物に限らず、人体の点群を部分ごとに取得し、外科診断や脳機能、手術シミュレーションに活用 [3] することも可能である。しかし、結合を行うための点群は、取得した視点がデータごとに異なり、座標系も同様に異なる場合が多いため、座標系を統一する位置合わせ手法が必須である。また、取得時間の異なる3次元点群データから、時系列変化を把握する場合にも位置合わせの処理が必要となる。近年、高度経済成長期に建設された土木構造物が劣化しており、構造物の長寿命化が社会インフラ維持における重要な問題となっている。その解決のために過去に取得した構造物の点群データと新しく取得した点群データの位置合わせを行い、比較することで形状の変化を可視化できれば、効率的な構造物の維持管理が可能となる。また、災害前後での形状の時系列変化の比較においても非常に期待されている [4]。

点群データの位置合わせに関する既存研究では、ICP (Iterative Closest Point) [5] が一般的に利用されている。しかし、ICPは、対応点が存在しないノイズがある場合や、同じ位置に点がない場合、点群密度が異なる場合などで正確な位置合わせができないという課題がある。そのため、本研究では、「点群間の共通した平面の交線は点群の位置や密度に関係なく共通の対応箇所となる」ということに着目し、これらの課題を解決することを目的とする。

2. 既存研究

点群データの位置合わせに関する既存研究では、点群間の特徴点に対応付ける手法が一般的であった。この特徴点は、マーカを利用する方法が用いられることも多いが、人手での作業が必要となるため、マーカなしに自動で特徴点を抽出する手法 [6], [7], [8], [9] が提案されている。しかし、点群の形状によって特徴点が抽出できない場合があるため、特定条件下の点群間でのみ位置合わせが可能となる。また、点群と距離画像をあわせて利用する手法 [10] や、同じ位置から取得した2次元画像を利用する手法 [11] が研究されている。しかし、3次元点群データの結合や比較が社会で実用される場合、過去に取得した点群は、それ以外のデータを保持していない場合が多い。そのため、新しく取得した点群との位置合わせを行うには、点群データ以外の入力が必要とせず、点群データのみで位置合わせができることが望ましい。

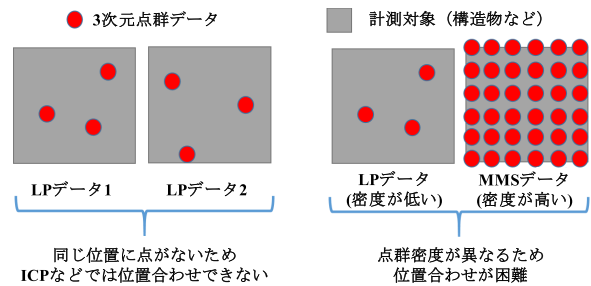


図 1 既存手法の課題

Fig. 1 Problems of existing method.

近年では、点群間の特徴点や点群データ以外の入力を必要とせずに自動で位置合わせを行う手法である ICP (Iterative Closest Point) が広く利用されている。ICPは、2つの点群間の点ごとに最近傍を発見し、対応点とする。そして、各対応点の距離が最小になるように変換行列を計算し、収束するまで処理を繰り返す手法である。しかし、ICPは、形状が同じであり各点に対応点が存在することが前提となっている手法のため、対応点が存在しないノイズがある場合や、同じ位置に点がない場合 (図 1 左)、点群密度が異なる場合 (図 1 右) などで正確な位置合わせができないという課題がある。そのため、CAD データや距離画像などの点群以外のデータを利用する手法 [12], [13], [14] が存在するが、汎用的とはいえない。また、点と面を位置合わせする手法 [15] や位置合わせに重み付けをする手法 [16], [17] が存在するが、図 1 の課題などには十分に対応できていない。一般的な ICP の課題を下記にまとめる。

- 点群間の共通部分以外の点群がノイズになるという課題

ICPによる位置合わせは、3次元点群データの全点から対応点を見つける手法である。そのため、異なる視点や共通部分が少ないデータから点群を生成した場合、図 1 左の点群の位置やノイズなどの影響で、正確な位置合わせが実現できない。

- 点群間の点群密度が異なると位置合わせできないという課題

点群密度の異なる点群間 (図 1 右) では、点と点で対応点を探索する ICP の特性上、位置合わせが困難になる。たとえば、航空レーザ測量により取得した LP (Laser Profiler) データと車載レーザ測量により取得した MMS (Mobile Mapping System) データでは、測量時の高度が異なるため、点群の密度に差異が生じる。そのため、3次元点群データの取得に使用したセンサ機器や環境が異なる場合、ICPを適用することができない。

- 点群規模が大きいと処理時間が膨大になるという課題

ICPの既存手法では、すべての3次元点群データから対応点を探索するため、点群規模が大きくなるほど処理時間が膨大になるという課題がある。

3. 研究の概要

3.1 研究の目的

本研究では、「点群間の共通した平面の交線は点群の位置や密度に関係なく共通の対応箇所となる」ということに着目し、上記の課題を解決する手法を提案する。具体的には、既存手法のように点と点を位置合わせするのではなく、点群間の共通した平面を検出し、その交線を利用して位置合わせを行う。本手法の類似研究としては、点と点や、点と面を位置合わせするのではなく、平面の法線方向の共分散を用いて面と面を位置合わせする手法 [18] が存在する。この手法は、点と点、点と面を位置合わせする手法より上記の課題に対応できると報告されている。そのため、本論文では、3種類のICP（点と点、点と面、面と面）と本手法とを比較し、提案手法の有用性を示す。また、位置合わせの既存研究では、同一のセンサ機器で取得した3次元点群データを対象としている。しかし、時々刻々と技術が進歩する実社会では、異なる機器で取得した点群が対象になる場合が多く、この位置合わせは特に誤差が大きい。そのため、本研究では、異なるセンサ機器で取得した3次元点群データを対象としても正確な位置合わせが実現できることを確認する。さらに、既存手法よりも高速な位置合わせの処理が可能であることも検証する。

3.2 提案手法の概要

本研究で開発したシステムの処理の流れを説明する。また、本システムで重要となる平面抽出の手法について記載する。

3.2.1 提案手法の概要

本システムの処理の流れを図2に示す。入力、位置合わせの対象となる2つの3次元点群データ、出力は、位置合わせされた3次元点群データである。基準平面抽出処理では、点群をZ軸上に合わせるために利用する平面を抽出する。基準平面位置合わせ処理では、基準平面をX、Y平面に合わせるための角度算出と回転を行う。その他平面の抽出処理では、基準平面以外の一定サイズ以上の平面を抽出する。交線作成および交点点群作成処理では、基準平面とその他平面の交線を作成し、各交線間の交点を作成する。交点マッチング処理では、作成した交点点群に対してICPを利用して変換行列を求める。回転結合処理では、求めた変換行列を点群に適用することで両点群が同角度、同位置になるように変換され位置合わせが完了する。

提案手法は、計測対象から基準平面1つとその他平面3つの計4つ以上の平面が必要になることを前提条件としている。具体的には、平面交線を用いるという手法の特性上、曲面や直方体、凹凸の激しい面などでのみで構成される対象に関しては、適用することができない。また、各平面が平行でないことも条件である。ただし、地上の構造物を対

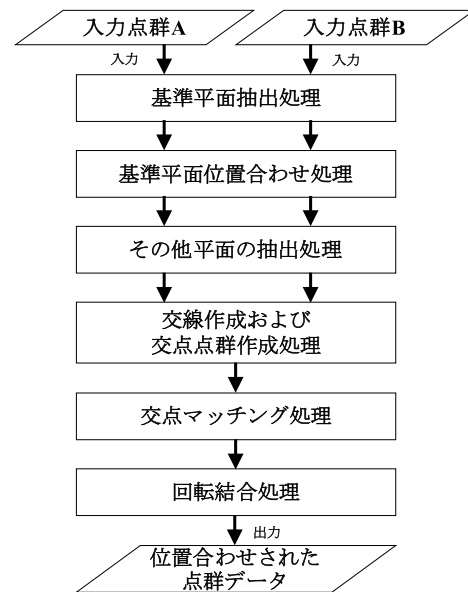


図2 処理の流れ

Fig. 2 Flow of process.

象としている場合、UAV 測量や航空測量では、多くの平面が存在するため、問題なく適用できると考えている。

3.2.2 平面抽出手法

本システムでは、点群から平面を抽出する処理を基準平面抽出処理とその他平面抽出処理で実施する。そのため、あらかじめ本システムの平面抽出手法の詳細を示す。

点群から平面を抽出する手法には、LMS（最小二乗法）[19]やM-estimation（M推定法）[20]、RANSAC[21]などがある。LMSによる平面抽出は、二乗誤差を最小化する手法である。しかし、点群中の平面以外の外れ値に影響を受けやすい。M-estimationによる平面抽出は、LMSの誤差による影響を最小にすることを目的とした手法である。この手法は、近似した平面をいくつか推定して重み付けを行い、誤差の影響が少ない1つの平面を抽出する。しかし、いくつかの平面を推定するための処理時間が必要になることや、少なからず外れ値の影響を受けるという課題がある。一方、RANSACは、点群からいくつかの点をサンプルとして繰り返し抽出し、点が最も多く平面方程式上に存在するものを平面として抽出する手法である。この手法は、外れ値の影響を受けないため、点群処理での平面抽出時に広く利用されている。

本システムでは、PointCloudLibrary (PCL) [22]で提供されているSACSegmentationクラスを利用してRANSACによる平面抽出を行う。しかし、MMSやKinectなどのセンサ機器を用いて作成した点群は、その性質上、機器から近い位置の点群密度が濃くなり、機器から離れるほどに密度が下がっていくという特徴がある。そのため、RANSACによる平面抽出を点群密度が一定でないデータに対して実行すると、点群密度が濃い箇所に平面が誤抽出される場合がある。そこで、本システムでは、事前にPCLのVoxelGrid

Filter クラスを用いてダウンサンプリング処理を行うことにより、点群全体の密度を均一にする。なお、ダウンサンプリングは、平面抽出により平面係数を算出する際にのみ実行するため、オリジナルの点群データに影響はない。

4. システムの詳細

4.1 基準平面抽出処理

本研究では、点群間で共通の基準平面を定め、その平面を利用して位置合わせを行う。基準平面抽出処理では、点群の最も大きな平面（点数が多い平面）を抽出して、基準平面として定める。この理由としては、面積が大きい平面が複数の点群に最も存在している可能性が高いためである。

4.2 基準平面位置合わせ処理

基準平面位置合わせ処理では、基準平面を $Z = 0$ の X, Y 平面上に重なるように点群を回転する。点群間の位置合わせを実現するには、 X, Y, Z の回転角 ω, ϕ, κ と移動量 tx, ty, tz の 6 つのパラメータを算出する必要がある。しかし、この処理を行うことにより、位置合わせを行う両点群の基準平面の位置が統一されるため、 X 軸の回転角 ω, Y 軸の ϕ と移動量 tz のパラメータを求める必要がなくなる。

4.2.1 原点移動処理

原点移動処理は、回転の中心となる原点を基準平面上に移動する必要があるために行う。移動先の原点は、基準平面を構成する全点から算出した重心を利用する。

4.2.2 回転処理

回転処理では、原点移動した点群の基準平面が X, Y 平面上に重なるように回転する。まず、基準平面の法線ベクトル (a, b, c) と Z 軸 $(0, 0, 1)$ の外積を計算し、回転軸を算出する。次に、三角関数の atan2 を用いて、回転軸と X 軸 $(1, 0, 0)$ のなす角と回転方向を算出する。そして、算出した角度で全点を回転することで、回転軸を X 軸上に重ねる。また、基準平面の法線ベクトルも同様に回転させ (a', b', c') とする。最後に、 atan2 を用いて、 (a', b', c') と Z 軸 $(0, 0, 1)$ のなす角と回転方向を算出する。この角度で X 軸周りに回転させることで X, Y 平面上に基準平面が重なる。

4.3 その他平面の抽出処理

その他平面の抽出処理では、基準平面以外の平面をその他平面として抽出する。本研究では、基準平面とそれ以外の平面の交線を用いて位置合わせを実現するため、この処理が必要となる。RANSAC により抽出した一定点数以上の平面をその他平面として定める。なお、基準平面と平行な平面は、交線が作成されないため抽出しない。

4.4 交線作成および交点点群作成処理

交線作成および交点点群作成処理では、抽出した基準平

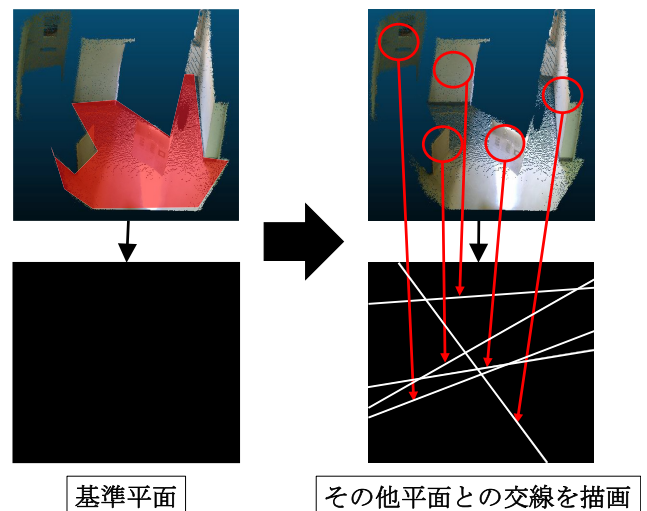


図 3 平面交線のイメージ

Fig. 3 Image of planar intersection lines.

面とその他平面の交線を作成する処理と交線どうしの交点点群を作成する処理を行う。交線作成の処理では、基準平面とその他平面の交線を求める。平面交線のイメージを図 3 に示す。平面どうしの交線は、各平面の延長線上に作成されるため、基準平面に接していない平面の交線も算出する。交点点群作成処理では、交線どうしの交点を求めて交点点群として作成する。基準平面位置合わせ処理で、基準平面を $Z = 0$ になるように回転させているため、交点点群の Z 座標の値はすべて 0 となる。

4.5 交点マッチング処理

交点マッチング処理では、作成した交点点群をマッチングするための回転角 (κ) と平行移動量 (tx, ty) を求める。本システムでは、作成した各交点点群に対して ICP を用いて位置合わせすることで、変換行列 R, T を算出し、回転角と平行移動量を求める。交点点群は、その他平面から作成した交線間の交点を点群データ化したものであるため、図 1 左の課題が解決できる。交点点群は、 Z がすべて 0 であるため、事実上 2 次元での位置合わせ処理となる。よって、通常の ICP と比較して処理時間が短縮される。

4.6 回転結合処理

回転結合処理では、交点マッチング処理で算出した変換行列 R, T を点群に適用することで位置合わせを行う。

5. 実証実験

実証実験では、RANSAC を用いた平面抽出に関する事前実験、ICP を用いた既存手法との比較実験と多様なデータにおける本システムの適用実験を行う。なお、本実験では、提案手法の特性上、平行でない 4 つ以上の平面が存在するデータを対象に行う。

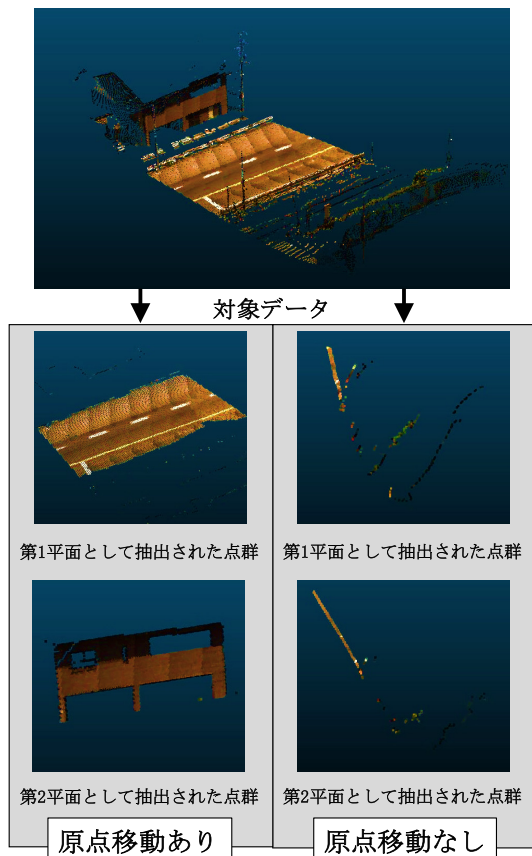


図 4 原点移動に関する比較実験
Fig. 4 Result of origin translation.

5.1 RANSAC を用いた平面抽出に関する事前実験

平面抽出に関する事前実験では、各処理の有効性を検証するために原点移動に関する比較実験と点群密度の異なるデータの比較実験を行う。

5.1.1 原点移動に関する比較実験

本実験では、基準平面位置合わせ処理において、点群全体の重心を原点として移動させた場合と移動させていない場合の平面抽出精度について比較する。実験データには、MMS で取得した 3 次元点群データ（測地座標）を用いた。実験結果を図 4 に示す。図 4 に示すように原点移動ありの場合は、面積が大きい順に第 1 平面、第 2 平面と抽出できている。しかし、原点移動なしの場合は、図 4 のように目視でも平面でないと判断できる点群が抽出されている。この理由は、X, Y の座標値が非常に大きな値となり、RANSAC による抽出がうまく行っていないためである。

5.1.2 点群密度の異なるデータの比較実験

本実験では、平面抽出時のダウンサンプリングの必要性に関して、比較実験を行う。実験データには、Kinect で取得した 3 次元点群データを用いた。実験結果を図 5 に示す。図 5 の結果を確認すると、ダウンサンプリング適用無の場合は、第 1 平面として撮影場所から近い床面の一部が抽出されているのに対し、ダウンサンプリング適用有の場合には、点群の密度が均一化され、正確に全体の床面が

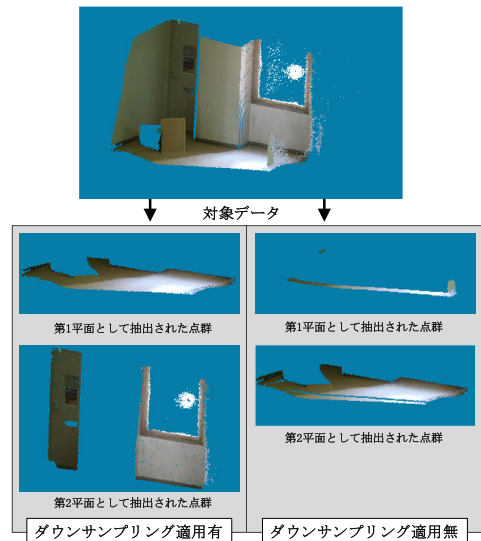


図 5 ダウンサンプリングに関する実験結果
Fig. 5 Result of downsampling.

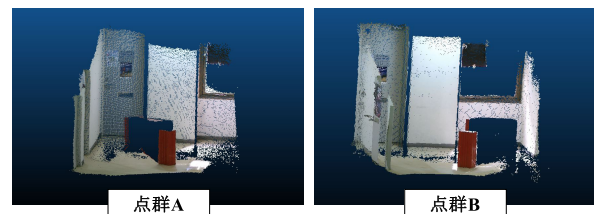


図 6 既存手法との比較に関する実験データ
Fig. 6 Experimental data of comparison with existing method.

抽出されていることが分かる。この理由は、センサ機器を用いて作成した点群は、機器から近い位置の点群密度が濃くなり、遠い位置の密度が下がるという特徴があるためである。

5.2 位置合わせに関する既存手法との比較実験

位置合わせに関する既存手法との比較実験では、ICP を用いた既存手法と本手法との位置合わせ精度の比較を行う。

5.2.1 既存手法との精度比較に関する実験

本実験では、ICP を用いた既存手法（点と点、点と面、面と面）と提案手法の精度を比較することで、提案手法の有用性を評価する。具体的には、同一データに対し初期位置を移動させた場合の位置合わせの精度、異なる視点から作成したデータを対象とした場合の位置合わせの精度に関して、実験を実施する。点と点、点と面、面と面の各既存手法は、PCL の IterativeClosestPoint クラス、IterativeClosestPointWithNormals クラス、GeneralizedIterativeClosestPoint クラスをそれぞれ使用する。

(1) 同一データを対象とした実験

本実験では、同一データを対象として、手法ごと（点と点、点と面、面と面、提案手法）の位置合わせの精度を検証する。実験データには、Kinect で取得した 3 次元点群データ（図 6 左）と、このデータに対し X 軸に 40 cm, Y

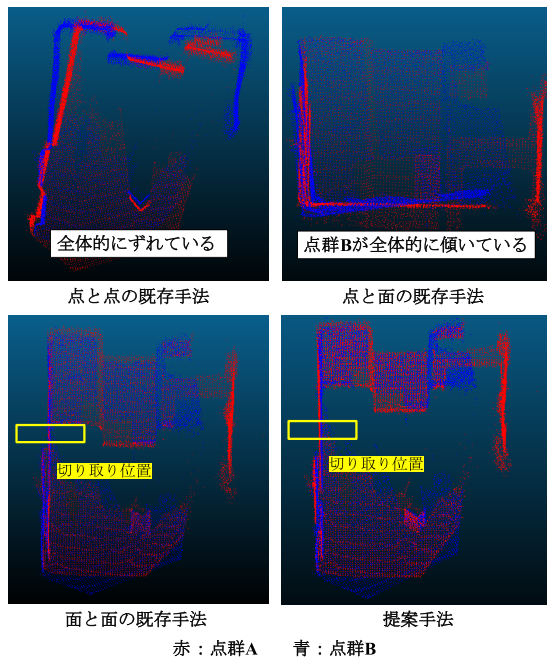


図 7 既存手法との比較に関する実験結果

Fig. 7 Result of comparison with existing methods.

軸に 5 cm 移動させたデータを用いた。位置合わせの精度は、ランダムに取得した 10 点に対し、各点の座標の残差を算出し、その平均値で評価する。

実験の結果、各手法とも 0.1 ミリ以下の精度ですべての点が一貫していた。このことから、初期位置が異なる同一データを対象とした場合、いずれの手法でも位置合わせが実現できることが分かった。

(2) 異なる視点から作成したデータを対象とした実験

同一データを対象とした実験では、手法ごとの位置合わせ精度に大きな差異が生じないことが分かった。そのため、本実験では、異なる視点から作成したデータを対象に実施する。実験データには、前実験で用いたデータ (図 6 左) と他視点から Kinect により取得したデータ (図 6 右) を用いる。点群 B は、撮影位置から X 軸方向に約 80 cm 移動し、地面に垂直な Y 軸周りに 45 度回転、撮影方向である Z 軸周りに 20 度回転させた撮影位置から作成した。

位置合わせ結果を図 7 に示す。図 7 を確認すると、点と点の既存手法と点と面の既存手法では、正確な位置合わせが実現できないことが分かった。これは、対応点が存在しないノイズや、同じ位置に点がないことが原因でうまく位置合わせができていないと考えられる。一方、面と面の既存手法と提案手法では、位置合わせが明らかにずれている箇所は目視で確認できなかった。面と面の既存手法と提案手法の精度を詳細に確認するため、図 7 の位置で切り取った断面図を作成した。その結果を図 8 に示す。図 8 より、提案手法では、X 軸方向に約 2~3 センチの誤差があることが分かった。その原因を調査したところ、提案手法は平面の交線のみを利用するため、平面抽出時に誤差が

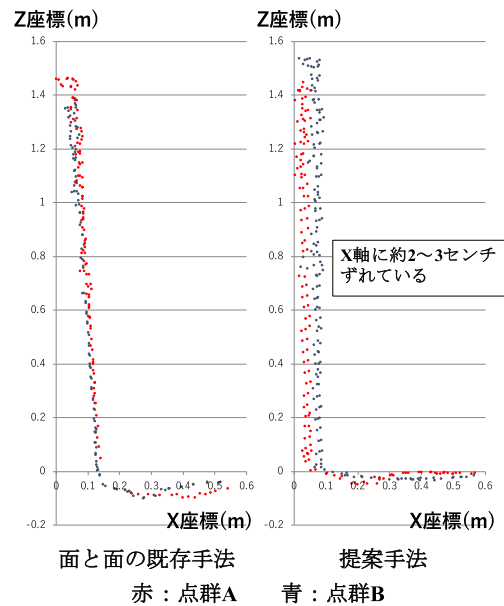


図 8 断面図 (既存手法と提案手法)

Fig. 8 Cross section (existing method and proposed method).

あると、その誤差による影響が大きいことが分かった。具体的には、点群作成に用いた Kinect の特性上、撮影位置に近い点は精度が高いが、遠いと精度が低く、その精度の低い点群を利用して平面を抽出するとその誤差の影響で位置合わせがずれることが分かった。実際に本実験で用いた点群の平面部分にも、Kinect 自体の精度が原因で約 6 センチ揺れている箇所が存在した。この課題に対しては、精度の高い平面のみを抽出し、その交線だけを位置合わせに使用する仕組みが必要になると考える。

同一データを対象とした実験では、4 つの手法とも数秒以内の処理時間で、差異は出なかった。本項の異なる視点から作成したデータを対象とした実験においては、位置合わせが実現できた面と面の既存手法と提案手法で処理時間を比較した。その結果、既存手法の処理時間が 80 分 9 秒、提案手法の処理時間が 8 秒となり、提案手法の方が高速に処理できることが分かった。

本実験により、同一データの位置合わせに関しては、4 手法とも差異がないことが分かった。しかし、異なる視点から作成したデータを対象とした場合は、提案手法が ICP を用いた既存の 2 手法 (点と点、点と面) より優れていることが分かった。面と面の既存手法に関しては、データによって提案手法の精度が劣る場合があるが、処理速度は優れていることが分かった。

5.2.2 共通部分以外の箇所が多いデータを対象とした実験

本実験では、既存手法の「点群間の共通部分以外の点群がノイズになるという課題」を解決できるかを検証する。5.2.1 項の既存手法と提案手法の比較結果から、本実験では、面と面の既存手法と提案手法の比較を行う。実験データを図 9 に示す。実験データには、オーバーラップ率ごと (90%, 70%と 50%) の点群を作成し、精度を比較する。こ

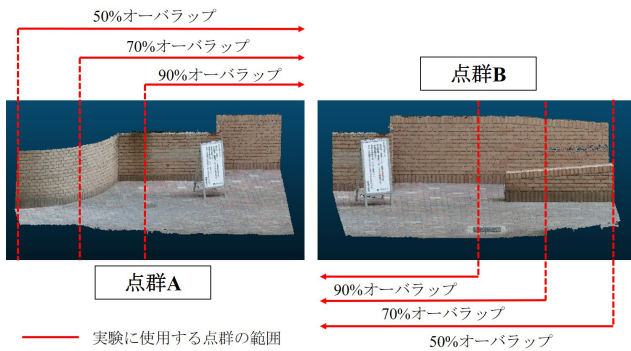


図 9 オーバラップ率に関する実験データ
Fig. 9 Experimental data of the overlap rate.

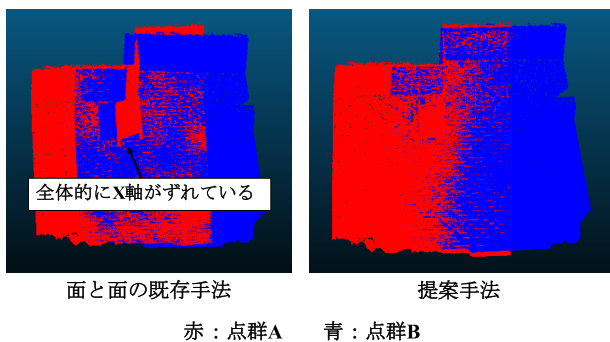


図 10 70%オーバーラップデータの実験結果 (上面)
Fig. 10 Result of 70% overlap data.

これらのデータは SfM/MVS ソフトの Pix4D [23] より作成した点群を用いる。

実験の結果、オーバーラップ率 90% の場合は両手法とも正確な位置合わせが実現できた。そこで、オーバーラップ率が 70% の場合で実験を実施したところ、面と面の既存手法より提案手法の位置合わせ精度が高いことが分かった。オーバーラップ率が 70% の場合の実験結果を図 10 に示す。図 10 に示すように面と面の既存手法では、共通部分以外の箇所がノイズになり、正確に位置合わせできない。一方、提案手法では、平面交線のみを用いるため、高い精度で位置合わせできることが分かった。また、本実験では SfM/MVS ソフトを使用して実験データを作成した。そのため、Kinect を用いた前項の実験より点群データが揺れておらず、高精度な位置合わせが実現できた。

しかし、オーバーラップ率が 50% の場合は、提案手法でも位置合わせできなかった。この原因を調査したところ、オーバーラップ率 70% の場合、点群 A と B に共通している平面が 4 つ、共通していない平面が 1 つであったのに対し、オーバーラップ率 50% の場合では、共通している平面が 4 つ、共通していない平面も 4 つ存在した。このことから、オーバーラップ率が下がると共通していない平面が多くなり、その平面がノイズとなって位置合わせが困難になると推測できる。この解決策としては、各平面の位置関係などから平面に重み付けし、位置合わせする方法などが考えられる。

表 1 処理時間の比較結果
Table 1 Processing time.

比較項目	点数：約 1 千万点	点数：約 500 万点	点数：約 50 万点
点と点の既存手法	1h7m39s	25m27s	50s
点と面の既存手法	1h3m37s	23m16s	39s
面と面の既存手法	1h46m39s	45m14s	41s
提案手法	7m45s	4m7s	23s

5.2.3 点群密度が異なるデータを対象とした実験

本実験では、既存手法の「点群間の点群密度が異なると位置合わせできないという課題」を解決できるかを検証する。実験データには、5.2.1 項で対象とした点群 A と B (図 6) を用いる。密度比ごとの精度を検証するため、ダウンサンプリングを用いて点群数が異なる B' を 3 データ (1/10, 1/50 と 1/100) 作成し、A との比較実験を行う。また、点群 A に関しても点群数が異なる A' を 3 データ (1/10, 1/50 と 1/100) 作成し、ダウンサンプリングしたデータどうし (A' の 1/10 と B' の 1/10, A' の 1/50 と B' の 1/50, A' の 1/100 と B' の 1/100) の比較実験も行う。本実験においても、共通部分以外の箇所が存在しても位置合わせが実現できた面と面の既存手法と提案手法で比較する。

実験の結果、面と面の既存手法では、A と B', A' と B' のいずれの組合せに対しても位置合わせが実現できた。一方、提案手法では、A と B', A' と B' の実験において、1/50 の密度までは正常に位置合わせできた。しかし、1/100 までダウンサンプリングすると A と B', A' と B' の実験において、位置合わせにずれが生じる結果となった。この原因として、提案手法は、必ず 4 つの平面が必要になるが、1/100 までダウンサンプリングすると、実験データのうち最も小さい平面が 1 つ抽出されなくなり、提案手法では位置合わせできないことが分かった。このことから、提案手法は、機器特性などで点群密度が異なることによる影響はないが、ダウンサンプリングにより密度を小さくしすぎるとデータによって平面が抽出できなくなるため、注意する必要があることが分かった。

5.2.4 処理時間の比較実験

本実験では、点数が約 1,000 万点、約 500 万点と約 50 万点の点群データを作成し、既存手法 (点と点、点と面、面と面) と提案手法を実行した際の処理速度を比較する。処理時間の比較結果を表 1 に示す。表 1 に示すように提案手法は、いずれの点群数においても既存手法より高速に位置合わせできることが分かった。

5.3 多様なデータにおける本システムの適用実験

多様なデータにおける本システムの適用実験では、実社会で本手法が利用されることを想定し、既存研究では行われていない、異なる SfM/MVS ソフトでの位置合わせ実

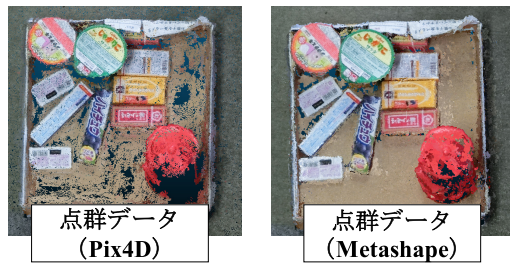
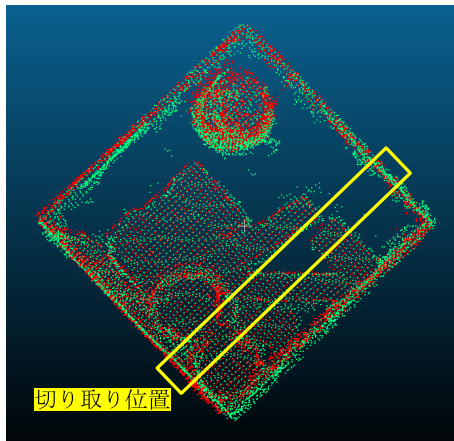


図 11 Pix4D と Metashape で作成した実験データ
Fig. 11 Point clouds made by Pix4D and Metashape.



緑 : Pix4D 赤 : Metashape

図 12 実験結果 (Pix4D と Metashape)

Fig. 12 Result of experiment (Pix4D and Metashape).

験, 異なるセンサ機器での位置合わせ実験と MMS データの位置合わせ実験を行う。

5.3.1 異なる SfM/MVS ソフトでの位置合わせ実験

実社会では, 様々なソフトウェアを利用して 3次元点群データが作成されている。しかし, 3次元点群データは, ソフトウェアが異なると点群の密度や発生箇所などが異なり, 既存手法では位置合わせが困難である。そこで, 本実験では, 点群作成方法が異なる [24] 2つの SfM/MVS ソフトから作成した点群間でも位置合わせが可能であるかを検証する。実験データとしては, Z 値が若干揺れるが形状を正しく表現できる Pix4D と, 点群を平面上に近似して多くの点群を生成する Metashape [25] により作成した点群を用いる (図 11)。

位置合わせ結果を図 12 に示す。図 12 に示すように異なる SfM/MVS ソフトにより作成した 3次元点群データにおいても高精度に位置合わせができることが分かった。また, 図 12 の位置で切り取った点群の断面図を図 13 に示す。図 13 を確認すると, 一方のセンサのみで取得された点に左右されず, 全体的に正確な位置合わせが実現できていることが分かる。

5.3.2 異なるセンサ機器での位置合わせ実験

実社会では, カメラや地上レーザスキャナ, 距離画像センサなど様々な機器で 3次元点群データが作成されている。

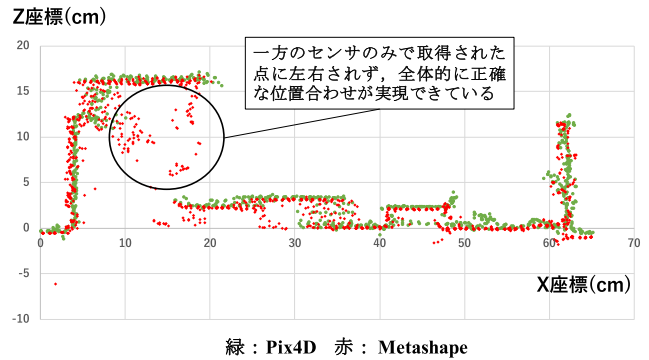


図 13 断面図 (Pix4D と Metashape)

Fig. 13 Cross section (Pix4D and Metashape).

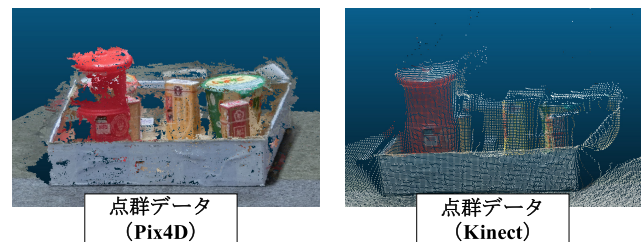
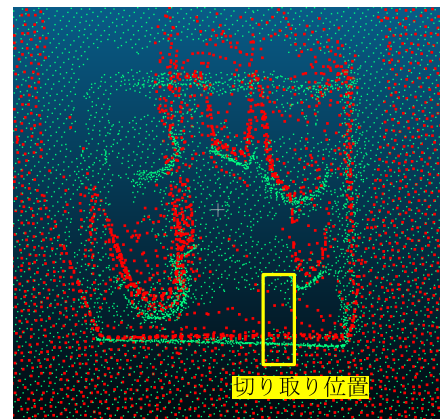


図 14 Pix4D と Kinect で作成した実験データ

Fig. 14 Point clouds made by Pix4D and Kinect.

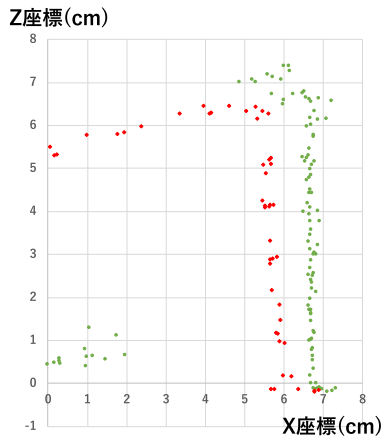


緑 : Pix4D 赤 : Kinect

図 15 実験結果 (Pix4D と Kinect)

Fig. 15 Result of experiment (Pix4D and Kinect).

しかし, 機器が異なる 3次元データは, ソフトウェアが異なる以上に点群の密度や発生箇所などが異なり, 既存手法では位置合わせが困難である。そこで, 本実験では, 異なるセンサ機器から作成した点群間でも位置合わせが可能であるかを検証する。実験データは, 複数写真を SfM/MVS ソフトに適用して作成した点群と赤外線を用いた深度センサにより作成した点群を用いる (図 14)。なお, SfM/MVS ソフトは Pix4D, 深度センサは Kinect を利用して作成した。両点群はスケールが異なるため, 事前に統一する処理を実施した。位置合わせ結果を図 15 に示す。また, 図 15 の位置で切り取った点群の断面図を図 16 に示す。図 15, 図 16 に示すように異なるセンサ機器により作成した 3次



緑： Pix4D 赤： Kinect

図 16 断面図 (Pix4D と Kinect)

Fig. 16 Cross section (Pix4D and Kinect).

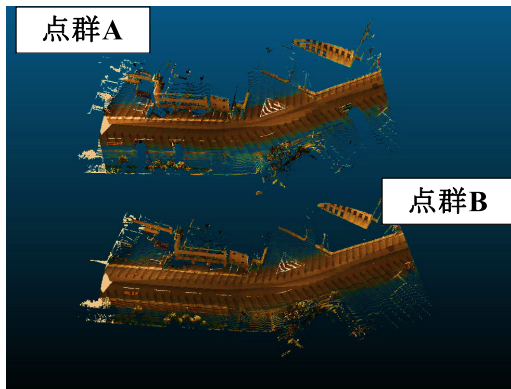


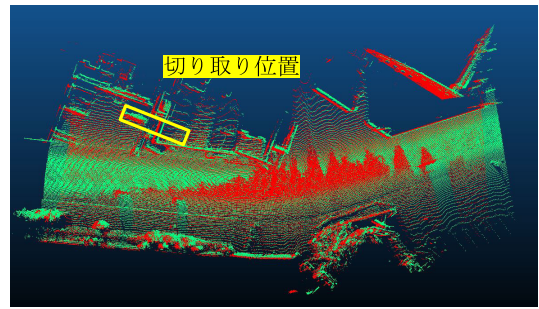
図 17 MMS で作成した実験データ

Fig. 17 Point clouds made with different driving lanes using MMS.

元点群データにおいて、約 1cm の誤差が生じた。この 1cm の誤差については、位置合わせ手法の問題ではなく計測機器間の誤差であると考えているが、原因や解決策に関しては今後の課題とする。

5.3.3 MMS データの位置合わせ実験

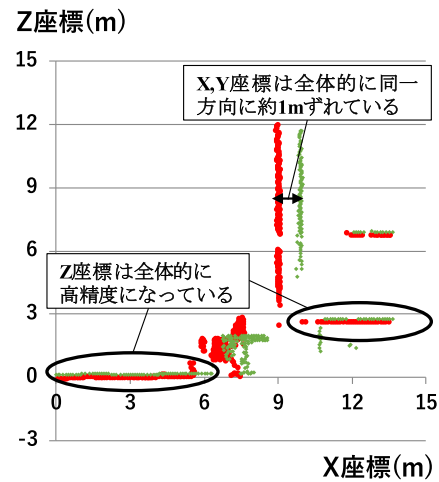
MMS データは、走行車線ごとに 3次元点群データを取得し、後処理として GPS から取得した位置情報をもとに手作業ですべての走行車線のデータを位置合わせすることが一般的である。そこで、本実験では、MMS によって作成した点群 A と点群 B (図 17) の位置合わせに関する精度検証を実施する。これらの点群は、同一道路の別車線を走行して作成したデータである。位置合わせ結果を図 18 に示す。この結果からは、MMS により作成した 3次元点群データにおいても精度の良い位置合わせが実現できているように見える。しかし、図 18 の位置で切り取った点群の断面図 (図 19) を確認すると、X、Y 座標は全体的に同一方向に約 1m の誤差が生じることが分かった。この理由は、ビルの窓ガラスなどが原因で高精度に抽出できていない平面を位置合わせに利用していたことが原因であった。



緑： 点群A 赤： 点群B

図 18 実験結果 (MMS)

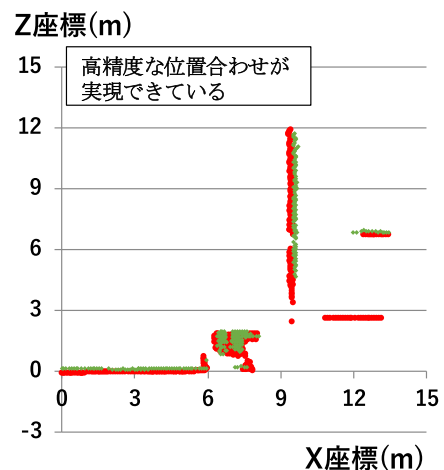
Fig. 18 Result of experiment (MMS).



緑： 点群A 赤： 点群B

図 19 断面図 (MMS)

Fig. 19 Cross section (MMS).



緑： 点群A 赤： 点群B

図 20 再実験の断面図 (MMS)

Fig. 20 Cross section of re-experiment (MMS).

そこで、その他平面の抽出結果から、目視で高精度な平面のみ位置合わせに利用した結果の断面図を図 20 に示す。この結果を確認すると、明らかに精度が向上していることが分かる。このことから、今後は、高精度な平面のみを

用いて位置合わせを行う手法の適用を検討する必要があると考える。

6. おわりに

本研究では、「点群間の共通した平面の交線は点群の位置や密度に関係なく共通の対応箇所となる」ということに着目し、平面交線を用いて位置合わせする新しい手法を提案した。提案手法と既存手法との比較実験では、ICPを用いた既存手法の課題を解決し、提案手法の有用性を証明した。さらに、実社会で本手法が利用されることを想定した実験においても、様々な環境下で高精度な位置合わせが実現できることが分かった。今後は、より正確な位置合わせを実現するため、実験で明らかになった平面交線のマッチング処理の改良を行う予定である。

参考文献

- [1] 国土交通省：i-Construction, 入手先 (<http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>) (参照 2019-03-29).
- [2] 最新技術トレンドみら☆どほ：未来を照らす土木建築テクノロジー, 日経コンストラクション, No.704, pp.38-43 (2019).
- [3] 黒田嘉宏, 金守恒志, 滝内秀和, 田ノ岡征雄, 井村誠考, 黒田知宏, 大城 理：AR手術のための直線対応体内レジストレーション, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.14, No.4, pp.435-444, 日本バーチャルリアリティ学会 (2009).
- [4] 国土交通省：災害復旧等の迅速化・効率化に関する ICT の活用 (2018).
- [5] Besl, P.J. and McKay, N.D.: A Method for Registration of 3-D Shapes, *Proc. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp.239-256, IEEE (1992).
- [6] Steder, B., Rusu, R.B., Konolige, K. and Burgard, W.: Point Feature Extraction on 3D Range Scans Taking into Account Object Boundaries, *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, pp.261-268, IEEE (2011).
- [7] 小野竜志, 小野景子：特徴点を用いた 3 次元点群データ位置合わせ法の検討, 第 77 回全国大会講演論文集, 情報処理学会, pp.271-272 (2015).
- [8] Rusu, R.B., Blodow, N. and Beetz, M.: Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D Registration, *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, pp.1848-1853, IEEE (2009).
- [9] Rusu, R.B., Bradski, G., Thibaux, R. and Hsu, J.: Fast 3D Recognition and Pose Using the Viewpoint Feature Histogram, *Proc. International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2155-2162, IEEE (2010).
- [10] 中川陽介, 内山英昭, 長原 一, 谷口倫一郎：距離画像の勾配に基づいたサンプリングによる 3 次元点群の位置合わせの高速化, 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, 情報処理学会, Vol.2015-CVIM-197, No.20, pp.1-6 (2015).
- [11] 池上史郎, 石田将吾, 川口敦生：パーツ定位を用いた三次元位置合わせ, 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, 情報処理学会, Vol.2015-CVIM-196, No.6, pp.1-5 (2015).
- [12] Neugebauer, P.J.: Reconstruction of Real-World Objects via Simultaneous Registration and Robust Combination of Multiple Range Images, *Proc. International Journal of Shape Modeling*, Vol.3, No.01n02, pp.71-90 (1997).
- [13] Horn, B.K.P. and Harris, J.G.: Rigid Body Motion from Range Image Sequences, *Proc. Image Understanding, CVGIP*, Vol.53, No.1, pp.1-13 (1991).
- [14] Menq, C.-H., Yau, H.-T. and Lai, G.-Y.: Automated Precision Measurement of Surface Profile in CAD-Directed Inspection, *Proc. Trans. Robotics and Automation*, Vol.8, No.2, pp.268-278 (1992).
- [15] Chen, Y. and Medioni, G.: Object Modeling by Registration of Multiple Range Images, *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, Vol.10, No.3, pp.145-155, IEEE (1991).
- [16] Mavridis, P., Andreadis, A. and Papaioannou, G.: Efficient Sparse ICP, *Proc. Computer Aided Geometric Design*, Vol.35, No.C, pp.16-26, ACM (2015).
- [17] Tamaki, T., Abe, M., Raychev, B. and Kaneda, K.: Softassign and EM-ICP on GPU, *Proc. 1st International Conference on Networking and Computing*, pp.179-183, IEEE (2010).
- [18] Segal, A., Hahnel, D. and Thrun, S.: Generalized-ICP, *Proc. Robotics: Science and Systems* (2009).
- [19] Rousseeuw, P.J.: Least Median of Squares Regression, *ASA*, Vol.79, No.388 (1984).
- [20] Bai, Z.D. and Wu, Y.: General M-Estimation, pp.119-135 (1997).
- [21] Raguram, R., Chum, O., Pollefeys, M., Matas, J. and Frahm, J.M.: USAC: A Universal Framework for Random Sample Consensus, *Proc. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.35, No.8, pp.2022-2038, IEEE (2013).
- [22] Point Cloud Library, available from (<http://pointclouds.org>) (accessed 2019-03-29).
- [23] Pix4D: Professional photogrammetry and drone-mapping: available from (<http://www.pix4d.com>) (accessed 2019-3-29).
- [24] 北川悦司, 村木広和, 吉永京平, 山岸潤紀, 津村拓実：UAV空撮画像における 3 次元モデリング (SfM/MVS) ソフトウェアの形状特性比較に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.74, No.2, pp.II.143-II.148, 土木学会 (2019).
- [25] Agisoft: Metashape, available from (<https://oakcorp.net/agisoft>) (accessed 2019-03-29).



北川 悦司 (正会員)

1977 年生。2005 年関西大学大学院総合情報学研究科博士課程後期課程修了。博士 (情報学)。同年阪南大学経営情報学部専任講師。2007 年准教授。2013 年教授, 現在に至る。2014 年カナダブリティッシュコロンビア大学 (UBC) 客員准教授。写真測量や画像処理, 3 次元点群処理に関する研究に従事。土木学会, 日本写真測量学会, 日本知能情報ファジィ学会各会員。



加藤 諒 (正会員)

1989年生。2017年関西大学大学院総合情報学研究科総合情報学専攻博士課程後期課程修了。博士(情報学)。同年京都橘大学現代ビジネス学部助教、現在に至る。知識情報処理, Webマイニング等の研究に従事。電子情報通

信学会会員。



安彦 智史 (正会員)

1985年生。2013年関西大学大学院総合情報学研究科博士課程後期課程修了。博士(情報学)。同年青山学院大学情報メディアセンター助手。2016年仁愛大学人間学部コミュニケーション学科講師、現在に至る。画像処理,

Webマイニング, 子ども学に関連する研究に従事。情報システム学会, 土木学会各会員。



吉永 京平

1997年生。2019年阪南大学経営情報学部卒業, 同年阪南大学大学院企業情報研究科入学。3次元点群処理や画像処理の研究に従事。



津村 拓実

1996年生。2019年阪南大学経営情報学部卒業, 同年阪南大学大学院企業情報研究科入学。3次元点群処理や画像処理の研究に従事。