

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420073

研究課題名(和文)複数種の3Dスキャナを用いた大規模環境の高品質点群生成

研究課題名(英文)High quality point cloud generation of large-scale environments using various 3D scanners

研究代表者

伊達 宏昭 (Date, Hiroaki)

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：20374605

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大規模環境や大型構造物の高品質な3次元計測データを取得するための、様々な計測システムで得られた計測データの合成技術ならびに計測最適化技術の開発を行った。計測データ合成技術として、固定式レーザスキャナ、車載型レーザスキャナ、ハンディスキャナや、Structure from Motionで得られた3次元計測データの、効率的な自動位置合せ(レジストレーション)手法を開発した。計測最適化技術として、計測対象の計測重要度と計測特性を配慮して、少ない回数で対象を高精度に計測するための固定式レーザスキャナの最適設置位置を自動推定する方法を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this research, some methods for combining several 3D scan data from various 3D scanning systems and optimized scanning in order to obtain high quality 3D scan data of large-scale environments and structures. For combining several 3D scan data, efficient automatic registration methods for 3D scan data acquired from terrestrial laser scanner, mobile laser scanner, handy scanner, and structure from motion are developed. For optimized scanning, methods to estimate best laser-scanner positions which allow us to acquire high quality point clouds with a smaller number of scanning, considering scanning importance of the objects and laser-scanning properties, are developed.

研究分野：形状処理工学

キーワード：レーザ計測 点群 Structure from Motion メッシュ 位置合せ 最適計測方式

1. 研究開始当初の背景

数十メートルから数キロメートル先の物体の形状を、非接触で高精度に3次元計測可能な中・長距離レーザ計測技術、および、SfM (Structure from Motion) や従来の写真測量などのデジタル画像に基づく3次元計測技術が、プラント、土木、建築、測量など幅広い分野で用いられてきている。取得した3次元計測データは、各種検査や計画、As-Built モデル生成、維持管理、シミュレーションなど幅広い用途で利用されている。計測データを有効に活用するためには、高い計測精度と十分な計測密度を持ち、更には計測時の遮蔽等による計測抜けのない、高品質な計測データが必要である。

現在利用可能な様々な3次元計測システムは、計測が得意な環境や対象物、および取得される計測データの質に違いがある。例えば、固定式レーザ計測システム (TLS) は、大型構造物や施設の3次元計測に向いている。車載型レーザ計測システム (MLS/MMS) はシステムが走行した道路周辺の環境に限定されるが、市街地等の広範囲にわたるレーザ計測が可能である。ハンディスキヤナは、TLS等で計測が困難な、複雑環境の細部の計測に適している。また、レーザ計測は、高精度で比較的密な点群が取得可能であるが、色情報は乏しい (各点が色情報を持つのみであり、場合によっては不正確な色情報が点に割り当てられている)。一方で、SfM から得られるデータは、計測精度と密度は低いものの、高品質で正確なテクスチャを持った計測データ (メッシュ) を得ることが可能である。

これら様々な3次元計測システムから得られる計測データは、相補的な性質を持っているため、異なる計測システムから得られる計測データを合成することによって高品質な計測データを生成することが可能である。計測データを合成するためには、計測データの位置合せ (レジストレーション) 処理が必要であるが、計測範囲や性質の大きく異なる計測データ間の位置合せ手法の確立はまだなされておらず、現状、TLS 点群同士の位置合せでさえも、効率や頑健さの面から課題が残っている。また、計測時に計測対象環境に応じた最適計測方法を自動決定することは、計測データの合成と併せて高品質な計測データを得るために必要不可欠である。しかしながら、大規模環境を対象とした研究例は少なく、現状、計測作業者の経験に頼っている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、様々な3次元計測システムから得られた3次元計測データを自動で効率よく合成するための位置合せ技術、ならびに、高品質な計測データを取得するための最適計測位置自動推定技術を確立し、様々なアプリケーションにおいて、大規模環境や大型構造物の高品質3次元計測データを利用可能にすることである。

3. 研究の方法

2 節で述べた目的を達成するために、本研

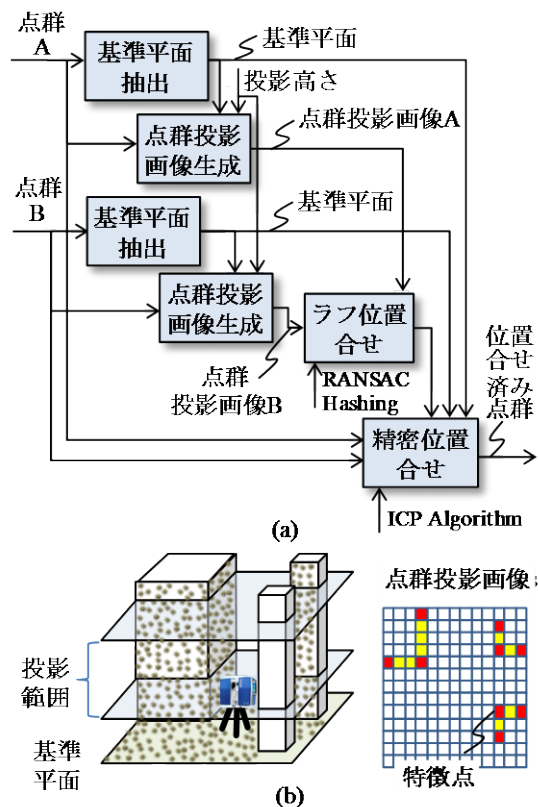


図1 点群投影画像に基づく点群位置合せアルゴリズム

究では、以下の技術に関する理論、アルゴリズムおよびソフトウェアの開発、ならびにこれらの性能検証を行った。

- (1) TLS 点群の効率的自動位置合せ
点群から抽出した2次元特徴点等を利用して、TLS 点群を頑健、効率的かつ高精度に位置合せする複数の手法を開発した。
- (2) 異種計測システムで取得した計測データの自動位置合せ
TLS とハンディスキヤナにより計測された点群や、MLS で計測した点群と SfM で得られた計測メッシュとを自動で位置合せするための手法を開発した。
- (3) 最適 TLS 計測位置推定
少ない計測回数で質の高い計測点群を取得可能とするための、最適な TLS 計測位置を自動推定する手法を開発した。

4. 研究成果

- (1) TLS 点群の効率的自動位置合せ
 - ① 点群投影画像を用いた点群位置合せ
本手法は、単一の平坦な地面や床面を有する環境の計測点群のペア位置合せに有用である。開発手法のアルゴリズムを図1(a)に示す。本手法では、まず、点群から、基準平面 (地面や床面) を抽出し、基準平面から一定高さ範囲に存在する点群を基準平面へ投影することにより、点群投影画像を生成する (図1(b))。次に、画像中の図形のコーナー点と端点を特徴点として検出する。そして、特徴点ペアを利用した RANSAC により、点群ペアを効率よくラフ位置合せする。最後に、ICP アルゴリズムにより、高精度な位置合せ

を実施する。なお、基準平面抽出の際には、TLS 点群を方位角と仰角の平面上へ展開して構造化することで処理効率化を図っており、画像中の特徴点抽出にはポリゴン近似手法である Douglas-Peucker 法を利用した。また、位置合せにおいて対応する特徴点ペアを効率よく見つけるために、特徴点間距離をキーとするハッシュ表を用いた。

本手法をレーザ計測点群に適用した結果を図 2 に示す。図 2 (a) は、熱源機械室の 2 つの TLS 点群 (各約 1 千万点) の位置合せ結果、同図 (b) は屋外環境の MLS 点群 (約 330 万点) と TLS 点群 (約 50 万点) の位置合せ結果である。両データ共に正しい位置合せが行えていることがわかる。ラフ位置合せの処理時間はそれぞれ、2.6 秒と 3.1 秒 (使用計算機: CPU Intel Core i7 3960X, RAM 32GB) であり、開発法により高速な位置合せを行えることが確認できた。

② 直線エッジを利用した点群位置合せ

本手法は、直線エッジを含む環境や構造物の計測点群のペア位置合せに有用である。開発手法のアルゴリズムを図 3 に示す。本手法では、まず、点群から、領域成長法により平面領域を抽出し、隣接する平面間の交差ならびに単独直線境界を成す直線エッジの集合を抽出する。そして、直線エッジペアを利用した RANSAC により、点群ペアを効率よくラフ位置合せする。最後に、ICP アルゴリズムにより高精度に点群の位置を合わせる。

平面領域抽出では、①と同様に、点群構造化を利用して効率よく処理を行っている。エッジペアを利用した RANSAC による位置合せ処理では、エッジの方向ベクトル間の角度、ならびにエッジ間距離をキーとする 2 次元のハッシュ表を利用して、効率よくマッチする可能性のあるエッジペアを選択可能にしている。

本手法を、直線エッジを含む構造物である橋梁の複数 TLS 点群に適用した結果を図 4 に示す。図の例では、ターゲット (固定) 点群を任意に選び、ターゲットとその他の点群との総当たりのペア位置合せの実施と、最もよく位置が合った点群のターゲットへの統合を反復することにより、複数点群の位置合せを実施している。図より、①の方法では扱えなかった平坦な地面を持たない環境のレーザ計測点群の位置合せが可能であることがわかる。約 400 万~1 千万個の点を含む 19 個の TLS 点群のうち 17 個の点群の正しい位置合せが行え、ラフ位置合せの処理時間は計 66 秒、精密位置合せの処理時間が約 5 分であった (計算機: CPU Intel Core i7 5960X, RAM 32GB)。また、約 500 万点と 900 万点の 2 点群のラフ位置合せが 3.6 秒で行え、本手法でも効率の良い点群位置合せが行えることを確認した。

③ 複数点群位置合せ

上述①②のペア位置合せ手法を利用した、複数 TLS 点群の効率的、かつ高精度な位置合せ手法を開発した。本手法は、各点群をノードとし、妥当な位置合せ結果をもたらす点群

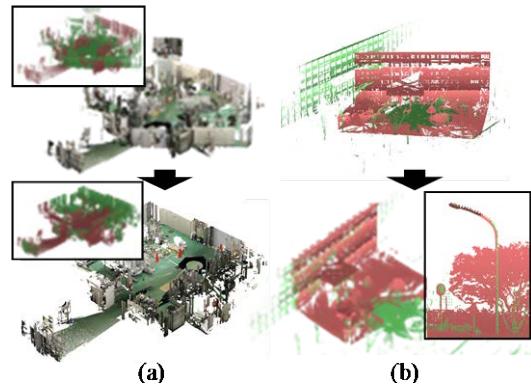


図 2 点群投影画像を利用した点群位置合せ結果

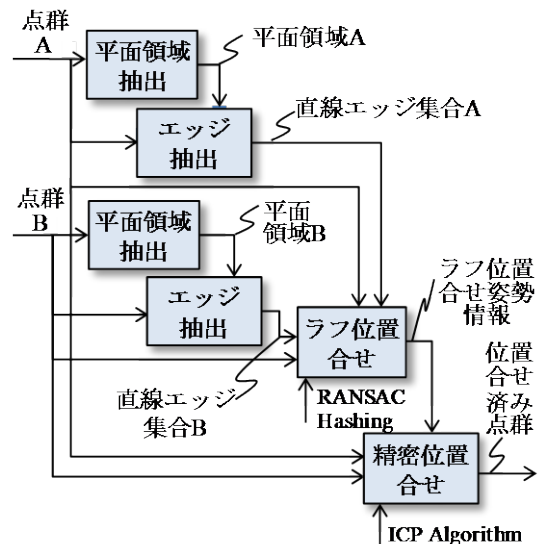


図 3 直線エッジを利用した点群位置合せアルゴリズム

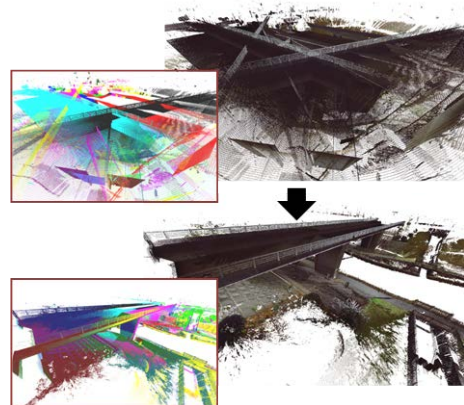


図 4 直線エッジを利用した点群位置合せ結果

間にエッジを定義する点群隣接グラフを用いている (図 5)。本グラフの構築では、まず、任意の点群をターゲット点群とし、グラフに初期ノードとして加える。その後、グラフに新たにノードとして追加された点群と残りの全点群とのペア位置合せを行い、位置合せ結果が妥当と判定された点群をエッジとともにグラフに追加する処理を反復する。そして、全ての点群がグラフに追加された後に、推定された TLS 設置位置間距離が一定以下の点群のノード間に更にエッジを追加する。最後に、グラフより得られる点群の隣接関係を利用した位置合せ誤差の緩和処理により、

点群全体の精密な位置合せ処理を行う。

以上の処理において、①の手法をペア位置合せに利用するために、位置合せ後の点群投影画像の重なり具合の適切さを点群位置合せの妥当性として評価する指標を開発した。更に、ペア位置合せ計算の効率化のために、点群投影画像の拡張（画像への点群の高さ情報の付与）を行った。

ビルを含む屋外環境を 39 か所から TLS で計測した点群に対して、①の手法をペア位置合せに用いて、開発法を適用した。生成された点群隣接グラフを図 5、点群の位置合せ結果を図 6 に示す。本実験では、39 点群全ての正確な位置合せが行えた。本手法は、②で述べた逐次的なターゲット点群への点群合成法に比べ、ターゲット点群の選び方に位置合せ結果が依存しないという良好な性質を確認した。39 点群（計約 3 億 3 千万点）のラフ・精密位置合せに要した処理時間は約 15 分（計算機：CPU Intel Core i7 5960X, RAM 64GB）であった。ある 1 つの点群の平面領域に最小自乗フィットした平面と、その平面領域に含まれる別の点群の点との距離を位置合せ誤差とし、点群内の複数個所で評価した結果、位置合せ誤差は 3~8mm であった。

④ 円筒一致制約を利用した高精度位置合せ

本手法は、円筒オブジェクトが複数存在するプラント等の環境の複数計測点群の高精度な位置合せに有用である。開発手法のアルゴリズムを図 7 に示す。本手法では、まず、MSAC により各点群へ円筒フィッティングを行う。次に、円筒軸を用いた②の方法により、点群のラフ位置合せを実施する。そして、計測器・点群の位置姿勢ならびに円筒のパラメータを、対応する円筒が一致する制約式を解くことにより求めることで、高精度な点群の位置合せを行う。

本手法を、プラントの配管系統を模擬した 3D モデルに対するレーザ計測シミュレーションにより生成した擬似計測点群へ適用した結果を図 8 に示す。開発法により、配管系統の計測点群を正確に位置合せできることを確認した。また、従来の ICP アルゴリズムでは正確な位置合せが行えなかった、重複度が低い点群同士も正確に位置合せできることを確認した。位置合せ処理の結果として得られた円筒の、真値からの軸の距離誤差ならびに半径誤差はともに 1mm 以下であり、高精度な位置合せが可能であることを確認した。実計測点群への適用と評価が課題である。

(2) 異種計測システムで取得した計測データの自動位置合せ

① TLS-ハンディスキャナ計測点群位置合せ

TLS 点群の未計測部を、ハンディスキャナ計測点群で補完することを目的として、(1)①で説明した点群投影画像に基づく手法を拡張した。ハンディスキャナ計測点群を TLS 点群へ位置合せするために、(1)①の手法に対し、図 9(a)に示す、ユーザの現在の注目領域を用いた位置合せ処理範囲の絞り込み、ならびに、図 9(b)に示す、複数レイヤ点群投影画像を利用した位置合せ処理の 2 点の拡張を行

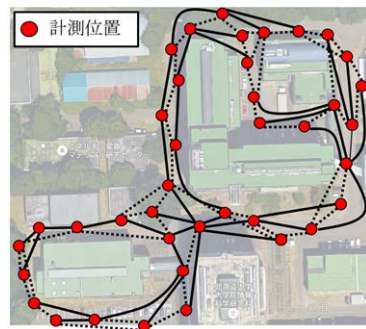


図 5 屋外環境の計測位置と点群隣接グラフ



図 6 点群隣接グラフを用いた屋外環境の複数 TLS 点群の位置合せ結果

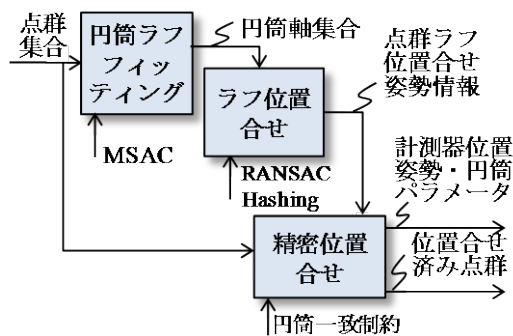


図 7 円筒一致制約を利用した点群位置合せアルゴリズム

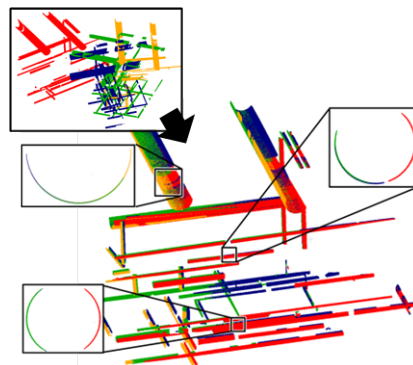


図 8 円筒一致制約を利用した点群位置合せ結果

った。これらの拡張により、計測範囲が極端に異なる 2 つの計測点群間の位置合せ、ならびに計測範囲が狭いことによる比較的特徴の少ないハンディスキャナ計測点群の位置合せという課題を解決した。

本手法を適用した結果を図 10 に示す。図 10(a)は安価なハンディスキャナ (RGB-D カメラ) により取得した点群を利用した TLS 点

群の未計測領域の補完結果, 同図(b)は高精度なハンディレーザスキャナを利用した結果である. いずれの結果においても TLS では計測しきれなかった屋内環境の未計測領域が, ハンディスキャナの点群により補完できていることがわかる. 図 10(a)の例において, 計測重複領域における位置合せ誤差 (最近点間距離平均) は約 20mm, 位置合せの処理時間は 1 秒程度であった.

② 市街地を計測した MLS 点群と SfM メッシュとの位置合せ

本手法は, 市街地を MLS (車載型レーザスキャナ) で計測した点群と, 航空写真を用いた SfM で取得した市街地のメッシュモデルの合成に有用である. 本手法では, SfM メッシュのスケール調整も行う. 開発手法のアルゴリズムを図 11(a)に示す. 本手法では, まず, 各データから領域成長法により平面領域を求め, 最大の水平面を地面平面, および, 隣接する鉛直平面の交差線としてビルの鉛直エッジ集合を抽出する. 次に, 鉛直エッジと地面平面との交点集合を 2 次元特徴点として求める (図 11(b)). そして, 3 つの特徴点を用いた RANSAC に基づき, スケール調整を伴うラフ位置合せを行う. 最後に, スケール調整を伴う ICP アルゴリズムにより, 精密に位置姿勢を合わせる. ラフ位置合せにおいて, 対応する可能性を持つ 3 つの特徴点の探索では, スケールに依存しない特徴量を用いている. 具体的には, 3 特徴点のうち 2 点を結ぶことで生成した 2 線分の長さの比, ならびにそれらの角度に基づく 2 次元ハッシュ表を用いて, 対応可能性を有する 3 点を効率よく見つける.

本手法を市街地の MLS 点群と SfM メッシュに適用した結果を図 12 に示す. 図より, SfM メッシュの位置姿勢, ならびにスケールが MLS 点群に合うように調整されていることがわかる. 約 49 万三角形の SfM メッシュと, 約 3,300 万点の MLS 点群のラフ位置合せの処理時間が 11 秒, 精密位置合せの処理時間が約 50 秒 (計算機: CPU Intel Core i7 3960X, RAM 32GB) であり, 効率の良い位置合せが可能であることがわかった. 点群とメッシュの重複部における最近点間距離の平均は約 0.5m であり, スケール誤差は 0.25% であった.

(3) 最適 TLS 計測位置推定

① 環境の事前知識を利用しない最適 TLS 計測位置推定

本手法は, 計測した点群から次の計測で重要となる部分を抽出し, その部分の計測に最適な TLS の設置個所を求めるものである. 具体的手法として, プラント配管系統の高品質計測を目的とした最適 TLS 計測位置推定法を開発した. 手法の概要を図 13(a)に示す. 本手法では, まず, レーザ計測点群から既存のアルゴリズムを用いて配管系統の認識を行う. 次に, 認識した配管情報を用いて, 計測重要箇所 (配管の計測被覆率を目標値まで高められる部分, もしくは, 配管が存在すると推定される部分) を求める. 最後に, 計測

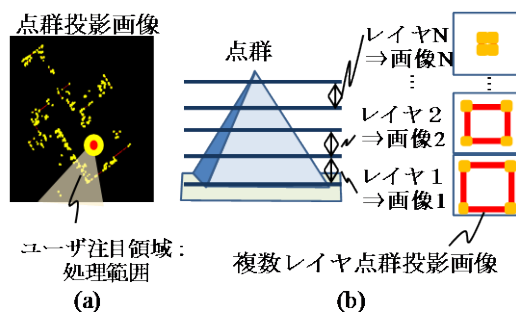


図 9 点群投影画像の複数レイヤ化と位置合せ処理範囲絞り込み

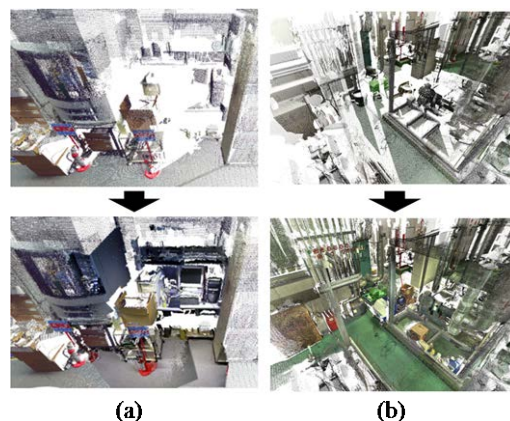


図 10 ハンディスキャナ計測点群を用いた TLS 点群の未計測領域の補完

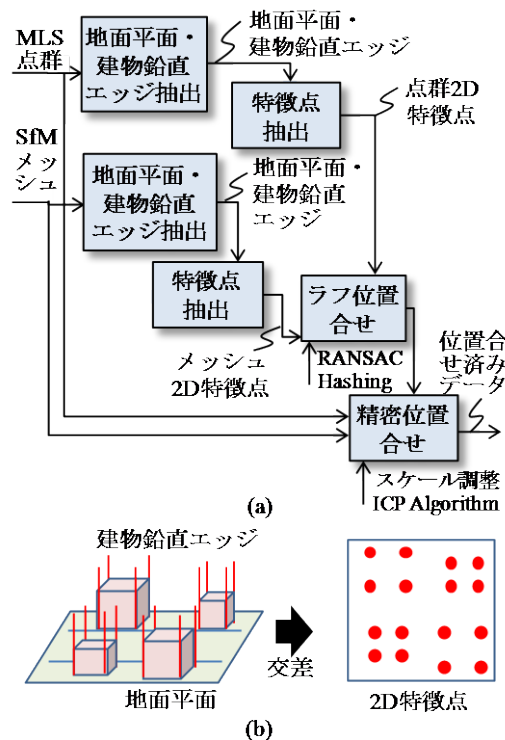


図 11 市街地の MLS 点群と SfM メッシュの位置合せアルゴリズム

重要箇所を最もよく計測できる計測位置の推定を行う. 最適計測位置は, 空間のボクセル分割を利用した計測シミュレーションにより, 計測重要箇所の計測確率を算出して推定する. また点群から地面平面を抽出し, 計測位置は, 地面上の TLS が設置できる箇所の候補から推定する.

図 13(b)に, 既存の未計測領域を最小化する

る計測位置決定法を用いた場合と、本手法を用いた場合の、計測回数と配管（直進パイプ）の認識率を比較したグラフを示す。点群からの配管認識と計測重要箇所を導入した本手法は、既存手法より少ない計測回数で配管を100%認識できる点群が取得できていることがわかる。なお、本実験では、点群取得においても計測シミュレーションを用いており、実計測への適用と評価は今後の課題である。

② 環境の事前知識を利用した最適 TLS 計測位置推定

本手法は、計測対象環境の SfM メッシュを事前知識とし、さらに計測精度や位置合せ処理を配慮した最適 TLS 計測位置を推定するものである。計測位置推定には、SfM メッシュ上でユーザが指定した計測対象の重要度に応じたレーザの入射角と計測距離、ならびに、位置合せ処理を考慮した計測重複率を、計測の質の評価に用いている。なお、①と同様に空間のボクセル分割と計測シミュレーションを通して最適計測位置を求めている。

実現場における実験を通して、熟練計測作業者の作業と比較して、開発法は、より少ない計測回数で重要部を高精度に計測できる最適計測位置を推定できることを確認した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Reiji Yoshimura, Hiroaki Date, Satoshi Kanai, Ryohei Honma, Kazuo Oda, Tatsuya Ikeda, Automatic registration of MLS point clouds and SfM meshes of urban area, Geo-spatial Information Science, 査読有, Vol.19, No.3, 2016, pp. 171-181, DOI: 10.1080/10095020.2016.1212517
- ② Kazuaki Kawashima, Shinya Yamanishi, Satoshi Kanai, Hiroaki Date, Finding the next-best scanner position for as-built modeling of piping systems, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 査読有, Vol.XL-5, 2014, pp. 313-320, DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-313-2014

[学会発表] (計 2 8 件)

- ① 角太樹, 伊達宏昭, 金井理, 点群投影画像に基づく大規模環境レーザ計測点群の自動位置合せ, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2017 年 3 月 13 日, 慶応義塾大学 (神奈川県・横浜市)
- ② 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 渡辺正浩, 中野隆宏, 山内雄太, 円筒オブジェクト一致制約を利用したプラント配管システムレーザスキャン点群データの高精度レジストレーション, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2017 年 3 月 13 日, 慶応義塾大学 (神奈川県・横浜市)
- ③ Hiroaki Date, Takahito Yokoyama, Satoshi Kanai, Yoshiro Hada, Manabu Nakao, Toshiya Sugawara, Automatic Registration of Laser-Scanned Point Clouds of Bridges using Linear Features, Asian Conference on Design and Digital Engineering, 2016 年 10 月 27 日, Jeju (Republic of Korea)
- ④ 伊達宏昭, 異種計測システムで取得した大規模環境計測データのレジストレーション, 3D レーザスキャンニング&イメージングシンポジウ

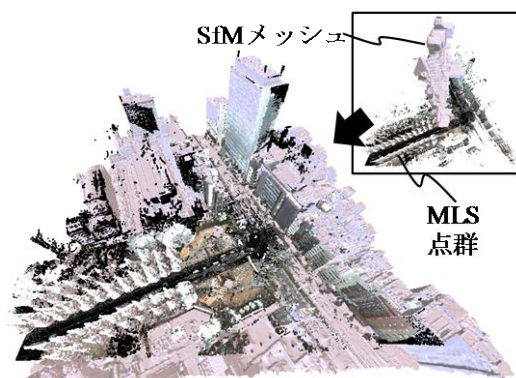


図 12 SfM メッシュと MLS 点群の位置合せ結果

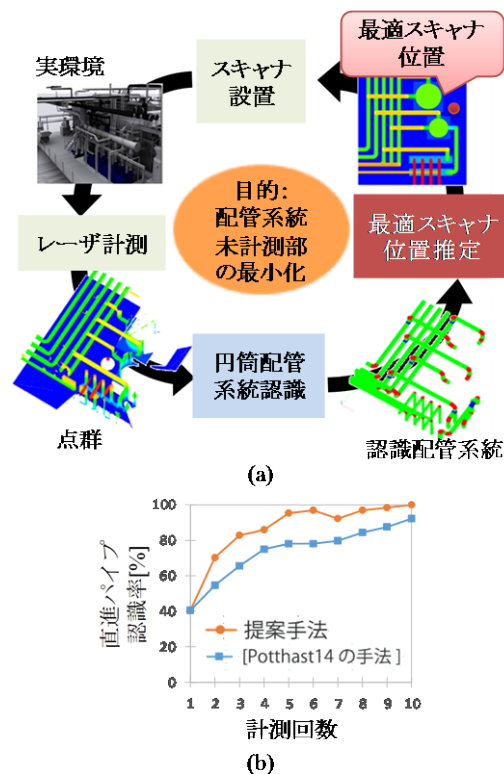


図 13 最適 TLS 計測位置推定の概要と適用結果

ム 2015, 2015 年 11 月 20 日, 東京大学 (東京都・文京区)

- ⑤ Satoshi Kanai, Shinya Yamanishi, Hiroaki Date, Optimal Setup of a Terrestrial Laser Scanner for Capturing Piping Objects in Plants, 2nd International Conference on Civil and Building Engineering Informatics, 2015 年 4 月 23 日, 東京コンベンションホール (東京都・中央区)

[その他]

ホームページ等

<http://sdmwww.ssi.ist.hokudai.ac.jp>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
伊達 宏昭 (DATE HIROAKI)
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号：20374605
- (2) 研究分担者
金井 理 (KANAI SATOSHI)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：90194878