

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760114

研究課題名(和文) レーザ計測点群の高精度認識に基づく大規模環境自動メッシュモデリング

研究課題名(英文) Automatic Mesh Modeling of Large-Scale Environments based on Accurate Recognition of Laser-Scanned Point Clouds

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) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大規模環境のレーザ計測点群から環境のメッシュモデルを自動生成する一連のデータ処理技術の開発を行った。具体的には、次の5つのデータ処理アルゴリズムの開発を行った：大規模環境レーザ計測点群の効率的レジストレーション(位置合せ)、計測した環境の視認性改善のための効果的点群表示、市街地計測点群のセグメンテーション、市街地環境における柱状物体の自動認識・分類、市街地環境の地物(街路樹・柱状物体)のメッシュモデリング。実計測点群への開発アルゴリズムの適用実験を通して、各アルゴリズムの性能を評価するとともに、市街地環境の柱状物体や街路樹のメッシュモデル生成が可能なことを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, a set of point cloud data processing algorithms for generating mesh models of large-scale environments from point clouds acquired by laser scanning was developed. In particular, the following algorithms were developed: (1) efficient registration algorithms of point clouds of large-scale environments, (2) an effective point cloud rendering algorithm to support easy visual understanding of the scanned environments, (3) a segmentation algorithm of point clouds of urban environments, (4) pole-like object recognition and classification algorithms from point clouds, and (5) mesh modeling algorithms of the objects in urban environments. The effectiveness of each algorithm was evaluated through the experiments using several point clouds, and it was confirmed that the mesh models of the pole-like objects and street trees could be generated efficiently from point clouds of urban environments using the developed algorithms.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：レーザ計測 点群 メッシュモデル レジストレーション セグメンテーション 物体認識

### 1. 研究開始当初の背景

数十メートル先から数キロメートル先の物体形状を非接触で計測できる、中・長距離レーザ計測技術が注目を集めており、大規模設備工場、建築・土木現場、市街地や都市部といった広範囲にわたる環境の非接触3次元形状計測が行われている。しかしながら、計測データ(点群)処理技術は、効率や性能、自動化の面で課題が多く残されており、現状では、計測点群の活用に人手による莫大な労力と時間を要している。この計測点群処理の高度化が計測データを有効活用した環境・設備の設計・生産・保守・管理の業務革新にとって重要である。

大規模環境のレーザ計測点群処理に関する研究は、複数計測点群の位置合せを行うレジストレーション、ノイズ除去などのフィルタリング、物体認識、モデリング等を対象としてこの10年で数多く行われてきている。特に点群からの環境自動モデリング技術は計測点群の有効活用において重要な技術であり、このための基礎的な点群処理技術を含めた点群からの環境・物体モデリング技術の確立への要求が強まっている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、様々な計測方式で得られたレーザ計測点群を用いて大規模環境(特に複雑市街地の地物等)のメッシュモデルを自動生成する技術の開発である。得られた大規模環境のメッシュモデルは、物体ごとの意味がつけられたモデルであり、環境認識や各種シミュレーション等で利用可能である。

### 3. 研究の方法

2節で述べた研究目的を達成するために、本研究では、以下の5つの技術開発を行った。

- (1) 大規模環境レーザ計測点群の効率的レジストレーション(位置合せ)
- (2) 計測した環境の視認性改善のための効果的的点群表示
- (3) 市街地計測点群のセグメンテーション
- (4) 市街地環境における柱状物体の自動認識・分類
- (5) 市街地環境における地物(街路樹・柱状物体)メッシュモデリング

### 4. 研究成果

#### (1) 点群の効率的レジストレーション

##### ① TLS点群間のレジストレーション

大規模環境や大型構造物を計測する際には、異なる地点からレーザ計測を行い、得られたデータの位置を合わせるレジストレーションが行われる。本研究では、点群投影画像を用いたTLS(Terrestrial Laser Scanning, 地上レーザ計測)点群間の高速なラフレジストレーション法を開発した。本手法では、各スキャン内の地面や床面(基準平面)が一致するという条件を導入することにより、点群位置合せの座標変換を2次元平面

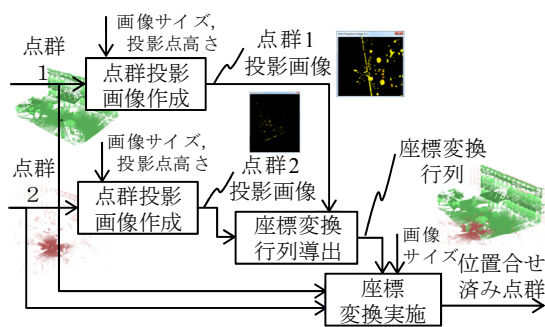


図1 開発した大規模環境レーザ計測点群レジストレーションアルゴリズム

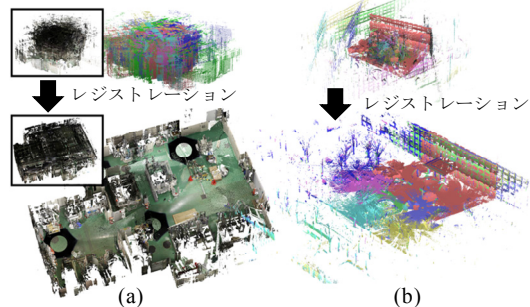


図2 大規模環境計測点群のレジストレーション結果

上の並進と回転に限定し、更に点群間の対応付け問題を画像の対応付け問題に帰着することにより高速な点群レジストレーション処理を実現している。

開発したアルゴリズムを図1に示す。本手法では、まず点群内の基準平面を、法線を用いた領域成長法により抽出する。次に基準面から一定の高さ範囲にある点群を基準面へ投影して、点を含むピクセルが値を持つ点群投影画像(2値画像)を生成する。そして、点群投影画像内の図形のコーナー点や端点を特徴点として抽出し、与えられた点群ペアの画像の特徴点を合わせる座標変換をRANSACにより求める。最後に、基準面を一致させる座標変換と、RANSACに求めた座標変換を適用することで点群ペア間の位置合せを行う。また、点群投影画像の各セルを、物体が存在しないFreeセル、物体表面であるOccupiedセル、状態が不明なUnknownセルに分け、RANSACによる画像ペアの位置合せ結果においてOccupiedセルとFreeセルが一定割合以上重なった場合には、それら点群の位置合せは不適と判断する点群間の位置合せ妥当性評価法を開発し、これを用いたペア位置合せの反復による複数点群自動レジストレーション法を開発した。

本手法を、屋内環境(熱源機械室)を計測した8つの点群(それぞれ約1千万点)、ならびに大学構内の屋外環境を計測した1つのMMS(Mobile Mapping System, 移動計測システム)点群(約300万点)と6つのTLS点群(各約50万点)へ適用した結果を図2に示す。本手法により妥当な点群レジストレーション結果が得られることが確認できた。処理時間は約15秒(計算機: Intel Core i7

3.5GHz CPU, 32GB RAM) であり、従来手法（ペア位置合せ処理で数十秒から数分）に比べ短時間で大規模環境計測点群のレジストレーションが行えることを確認した。

## ② MMS 点群のレジストレーション

MMS による計測では GPS の誤差や IMU のドリフトにより、同じ個所を計測した点群にずれが生じる場合がある。このずれ量は 1m を超える場合もあり、図化やモデリングで点群を利用するためにその修正は必須である。本研究では、MMS の軌跡データを用いた高精度な MLS 点群のレジストレーション手法を開発した。MMS の軌跡データは、システムの位置と姿勢、点群の点の計測時刻と同期された取得時刻を含む点列である。

開発した手法の概要を図 3 に示す。まず、ずれ量を算出するための軌跡点を代表軌跡点として求める。代表軌跡点は、ずれ発生可能性が高いと予測される MMS の加速度・姿勢急変箇所ならびにずれ修正処理が必要な軌跡交差箇所周辺の軌跡点として求めた。次に、各代表軌跡点における、ずれ修正量を求める。このずれ修正量（座標変換）は、代表軌跡点近傍の点群に対する拡張型 ICP により導出する。拡張型 ICP では、主成分分析による点分類結果に基づく誤対応点の除去と、点-点間距離と点-平面間距離を併用した誤差関数最小化により、高精度な位置合せ処理（ずれ修正の座標変換導出）を実現している。その後、軌跡が重複する個所の代表軌跡点において求めたずれ修正量から、他の代表軌跡点におけるずれ修正量を算出する。各代表軌跡点のずれ修正量は、各点における元の位置の維持、隣接軌跡点との差分ベクトルの維持、ずれの修正に関する 3 つの制約に対する最小自乗解として求める。最後に、時刻情報による補間を用いて点群の各点におけるずれ修正量を求め、点の位置を修正する。

図 4 に本手法の適用結果を示す。実験には軌跡点数 2,192、点群点数 139,390,404 の約 3km の市街地計測データを用いた。図より本手法により点群間のずれが修正されていることが視覚的に分かる。元の点群では平均約 0.17m のずれが観測されていたが、本処理後はずれが平均約 0.014m 以下となることを確認した。また、ずれ修正の処理時間は約 160 秒であり、実用上十分な処理速度で MMS 点群内のずれ修正を自動で行えることを確認した。

## (2) 効果的的点群表示

大規模環境の計測点群データは、様々なアプリケーションにおいて計測した環境の目視による理解のためにディスプレイに表示される。しかし、点の描画による単純な表示では面的な情報が得られないため、計測した環境の理解が困難である場合が多い（図 6）。

本研究では、点の局所的な分布状態を評価可能な主成分分析を用いて、各点を線状・柱状物体上の点、平面物体上の点、その他複雑形状上の点に分類し、分類結果に合わせて表

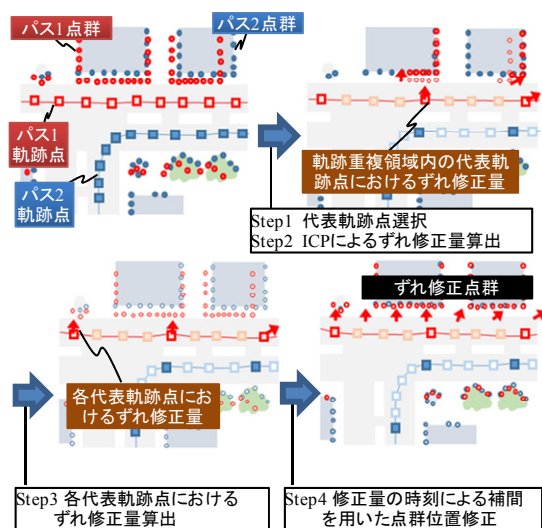


図3 走行軌跡を用いたMMS点群ずれ修正手法

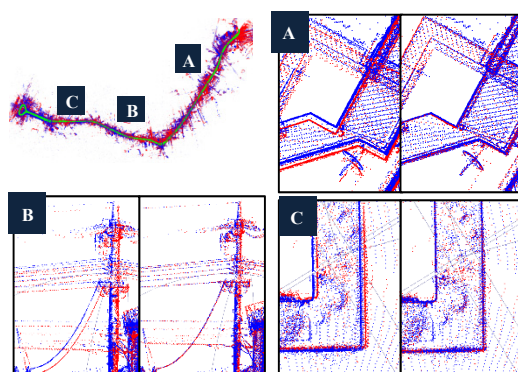


図4 MMS点群レジストレーション結果  
(左：入力点群，右：レジストレーション後点群)

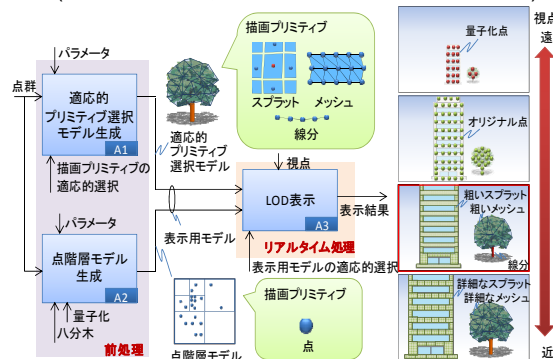


図5 開発した点群表示システムの概要

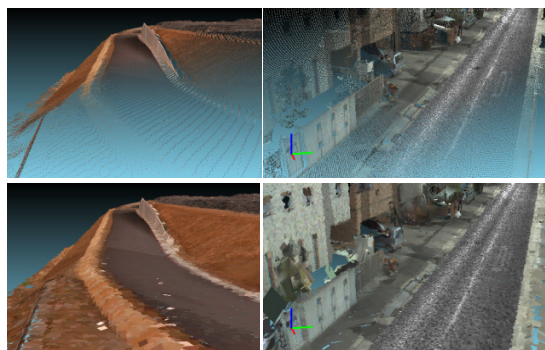


図6 点群の点表示（上）と本手法による表示（下）

示のための要素（プリミティブ）を選択的に適用する表示用モデル生成手法を開発した（図 5）。本手法では、電線等の線状物体は直線分の系列、道路や壁面等の平面物体は四辺

形スプラット（ポリゴン）の集合，樹木などの立体複雑形状は三角形メッシュで表現される。また，空間の再帰的分割と八分木表現に基づく点のダウンサンプリングを行い，視点からの距離に応じて，表示用モデル，粗い表示用モデル，オリジナル点群，ダウンサンプリング点を切り替えて表示する LOD (Level of Detail) 手法を開発した。

図6に本手法と点の直接表示による点群データの表示結果を示す。本手法により点群の点間の隙間が埋められた表示が実現され，点の直接表示に比べ，計測した環境の視覚的理解が容易となることを確認した。

### (3) 市街地計測点群のセグメンテーション

点群のセグメンテーションは，物体認識やモデリング等のアプリケーションにおいて大規模な点群から処理対象物の点集合を見つけるために必須の処理であり，後に続く処理の精度に影響を与えるため高い正確さが求められる。市街地環境や構造物，屋内環境のレーザ計測点群のセグメンテーションのために，法線や主成分分析結果に基づく領域成長法や，グラフカット等を用いた手法が提案されているが，複雑環境・物体に対するオーバー・アンダーセグメンテーション，精度や処理時間に課題が残っている。

本研究では，柱状物や家屋等の特定の構造物は，比較的大きな特定形状から構成される土台（支柱や壁面）を有するという仮定の下で，この土台を中心とする市街地計測点群のセグメンテーション法を開発した。本アプローチは中央分離帯やガードレールなどと物体が近接している場合にも，土台を基礎としてセグメントを生成することにより，物体ごと個別のセグメントを生成できるという特徴を有する（図8）。

開発手法の概要を図7に示す。まず点群のスムージング（点分類精度改善）と主成分分析により，各点を，棒状物体上の点，面状物体上の点，その他の点に分類する。次に，同じ点分類結果の近接点を領域成長法によりまとめ，物体の基本構成要素集合を見つける。そして，各要素に対する形状種類（棒，面，立体），高さ，面積，主軸方向等を用いたルールベース認識（面積が一定以上の鉛直平面は壁面とする等）により，地面ならびに物体の土台となる支柱と壁面を見つける。最後に，各土台から要素間の結合強さを評価しながら上方の構成要素を結合していくことにより物体ごとのセグメントを取得する。

図8(a)のMMS点群に本手法を適用した結果を同図(b)に示す。電柱や街灯，建物などの物体ごとのセグメントが良好に生成されていることが確認できる。また，図8(c)に示すように，近接した電柱と樹木，縁石上の樹木，ガードレール傍の標識なども個々の物体が単一のセグメントとなっていることがわかる。東京調布地区と北海道伊達市のMMS計測点群における柱状物体（228本）のセグメ

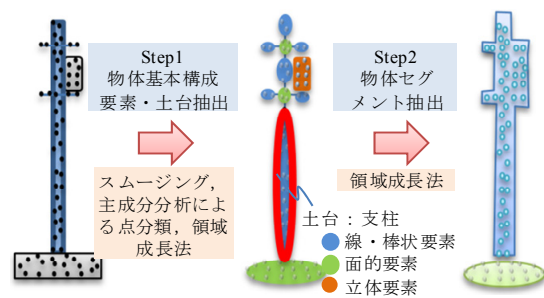
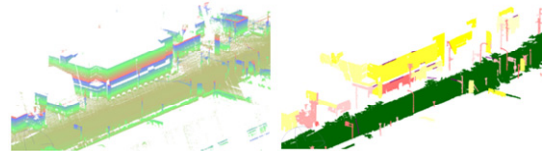
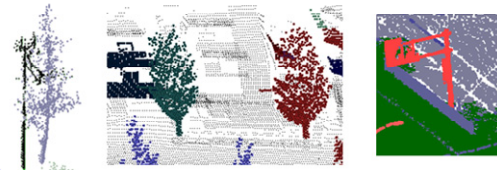


図7 主成分分析と領域成長法を用いた市街地計測点群のセグメンテーション法



(a) MLS計測市街地点群 (b) セグメンテーション結果



(c) セグメンテーション結果（物体近接部拡大表示）

図8 市街地計測点群のセグメンテーション結果

ンテーション精度は93.3%であり，高精度なセグメント生成が行えることを確認した。

### (4) 柱状物体の自動認識と分類

大規模環境の計測点群に対する物体認識は，建物や柱状物体，樹木，プラント配管系統など様々な対象の研究が行われている。本研究では，効率的な設備管理とモデリングを目的とした市街地計測点群からの柱状物体認識・分類法を開発した。本手法は，市街地計測点群の物体ごとのセグメントの集合を入力とし，柱状物体のセグメントのみを取り出す柱状物体抽出機能と，抽出した柱状物体を管理団体の異なる電柱，街灯，標識のいずれかに分類する柱状物体分類機能からなる。本手法の特徴は，傾斜や任意太さを持つ柱状物体を頑健に抽出できること，複数の共架物（部品）を持つ柱状物体を3クラスに分類可能なことである。

本研究では，柱状物体の点群ではその大部分において局所点集合が1次元（線・棒）的に分布していることに注目した柱状物体抽出手法を開発した（図9）。まず，各点をその近傍点集合を用いた主成分分析により，線・棒上点，面上点，その他点に分類する。その後，微小な不適セグメント除去のために，点数と高さに基づくセグメントのフィルタリングを実施し，最後に，セグメント内の線・棒上点の割合に対する閾値処理により柱状物体を抽出する。

図10に，市街地計測点群からの柱状物体抽出結果を示す。3つの異なる地域の計測点群に適用した結果，正しくセグメント化されている柱状物体が約98%（124/126）の精度で抽出できることを確認した。

柱状物体分類では、各クラスの柱状物体はその役割から寸法（高さ）やパーツの種類にある一定の傾向がみられることに注目した。例えば、電柱は比較的高く複数の複雑パーツを持ち、標識は比較的低く少数の平坦パーツを持つ傾向がある。この観点から、パーツ情報と寸法に基づく帰属度評価を用いた柱状物体分類法を開発した（図 11）。本手法ではまず、スムージング後の線・棒上点に対する RANSAC を用いた直線フィッティングによる支柱構成点抽出と、支柱構成点以外の点に対する Euclidean クラスタリングにより柱状物のパーツを認識する。次に、各パーツを構成する点の種類に応じて、棒状パーツ、平坦パーツ、立体パーツ等の形状種類分類を行う。最後に、各セグメントに対し、高さ、支柱径、パーツ数、パーツ形状種類を用いた各クラスへの帰属度を計算する。帰属度関数は、例えば、背が高く支柱径が大きく多くの複雑部品からなる場合は電柱の帰属度が高くなるように、各物体の規格や点群内のオブジェクトの観察により定義した。更に、周辺柱状物体の配置からその物体の種類を推定するコンテキスト特微量評価手法を開発し、帰属度と併用した柱状物体分類を行った。3つの地域で計測した点群に含まれる電柱 43 本、街灯 25 本、標識 9 本のテストデータで分類を行った結果、それぞれ分類精度は 74.4% (32/43)、68.0% (17/25)、88.9% (8/9) であった。

#### (5) 地物メッシュモデリング

市街地環境のモデリング対象は、建物、道路、柱状物体、樹木、線路など様々であり、各々のモデリング手法が提案されてきている。本研究では図 12 に示すように、計測点群や設計データから得られる対象物の 3D モデルとのマッチングに基づき、任意形状の物体やパーツを認識、モデル化する手法を開発した。市街地環境は地域によって同クラスの物体やパーツでも形状が異なることが多く、また類似した形状の物体が多く見られる。このような環境ではサンプルの 3D モデルを用いる手法が有効と言える。

#### ① 柱状物体のメッシュモデリング

市街地における電柱や標識などの柱状物体は、支柱や標識板といった特定種の部品から構成されているものが多い。そこで、部品のメッシュモデルデータベース（DB）を作成し、点群とのマッチングにより柱状物体をメッシュモデル化する方法を開発した（図 13）。本手法は柱状物体セグメントを入力とし、まず、主成分分析と領域成長法による平面領域分割と、領域の OBB アスペクト比評価による平面・円柱領域の抽出を行う。次に、平面領域はハフ変換による輪廓検出、円柱領域へは RANSAC による円柱パラメータ抽出を行い、DB 内の該当メッシュモデル（多角形平面や円柱）を点群から抽出した寸法情報に基づいてパラメトリックに変形し、点群へフィッティングする。

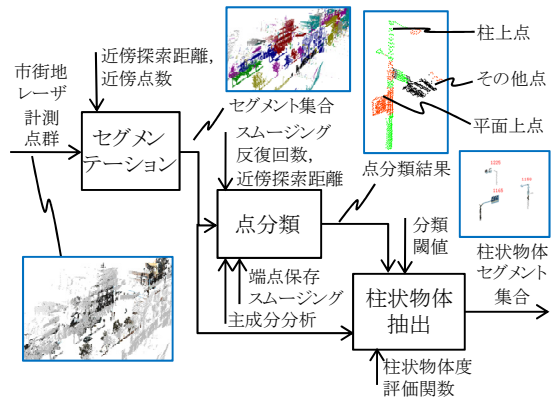


図9 柱状物体抽出アルゴリズム

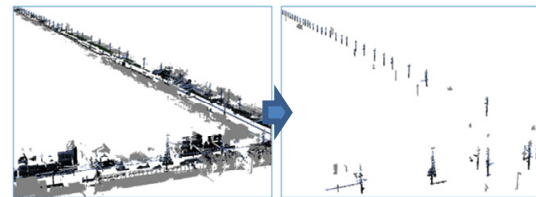


図10 市街地計測点群からの柱状物体抽出結果

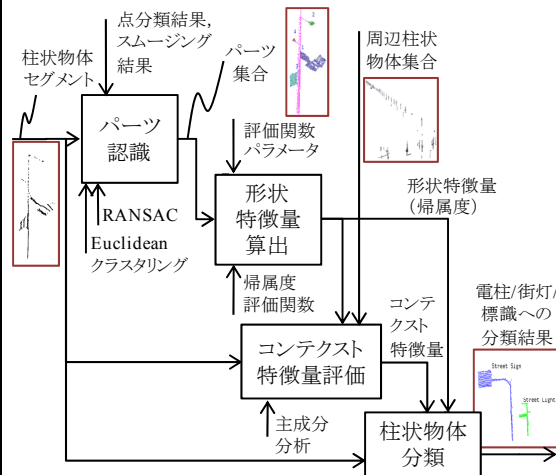


図11 柱状物体分類アルゴリズム

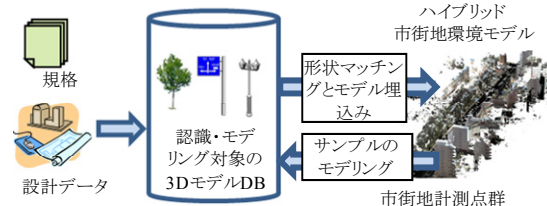


図12 形状マッチングを用いた市街地環境モデリング

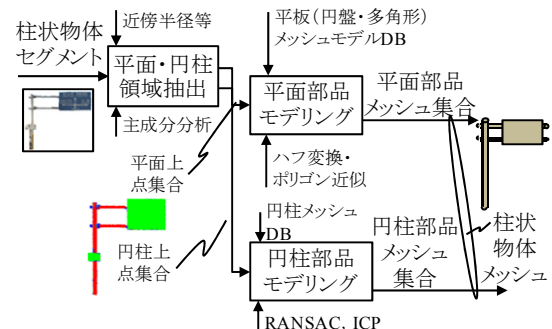


図13 部品メッシュのフィッティングによる柱状物体メッシュモデル生成

開発手法の適用結果を図 14 に示す。あらかじめ用意した DB 内の部品メッシュが、点

群内の電柱、標識等の柱状物体へ合うように調整・配置され、柱状物体のメッシュモデルが得られることを確認した。

## ② 街路樹のメッシュモデリング

市街地における街路樹は、同じ樹種の類似した形状の樹木が多数見られる。そこで、計測データ表示品質の改善ならびに点群への意味付けを目的として、サンプルメッシュを用いた街路樹のメッシュモデリング法を開発した。本手法では、まず点群内からサンプルの樹木セグメントを抽出し、樹冠の形状タイプに従ってモデリングソフトでサンプル樹木メッシュモデルを生成する。そして、一定間隔の水平スライス面内の断面積比較により、サンプルと類似したセグメントを点群内から見つけ、最後にメッシュ形状変形手法を用いて、樹木モデルを類似セグメントの点群へフィッティングする。

本手法の適用結果を図15に示す。約1,600万点の市街地点群からサンプル街路樹を手動で抽出して生成したサンプル街路樹メッシュが同図内に示されている。結果よりサンプルメッシュが点群内の類似街路樹の形状にあわせて変形され、市街地計測点群内に埋め込まれることを確認した。本実装では、一つの類似セグメント抽出とメッシュフィッティングが0.65秒で行われた。これらの埋め込まれたメッシュモデルに物体種類等の属性情報を付与しておくことにより、各物体情報が関連付けられた、現況を忠実に反映した市街地環境モデル生成が可能となる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- ① Hiroaki Date, Takashi Maeno, Satoshi Kanai, A Rendering Method of Laser Scanned Point Clouds of Large Scale Environments by Adaptive Graphic Primitive Selection, CAD and Applications, 11(6), 685-693 (2014) (査読有)
- ② Hiroki Yokoyama, Hiroaki Date, Satoshi Kanai, Hiroshi Takeda, Detection and Classification of Pole-like Objects from Mobile Laser Scanning Data of Urban Environments, International Journal of CAD/CAM, 13(2), 31-40 (2013) (査読有)
- ③ S. Takai, H. Date, S. Kanai, Y.Niina, K. Oda, T. Ikeda, Accurate registration of MMS point clouds of urban areas using trajectory, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, II-5/W2, 277-282 (2013) (査読有)

〔学会発表〕(計21件)

- ① 新田一馬, 伊達宏昭, 金井理, レーザ計測点群からの市街地環境メッシュモデリングに関する研究, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会, 2014.3.19, 東京大学(文京区)
- ② 松山雄介, 伊達宏昭, 金井理, 大規模環

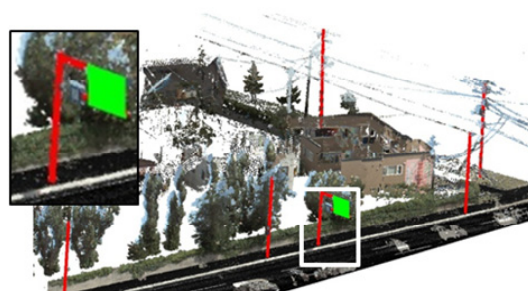


図14 柱状物体メッシュモデル生成結果

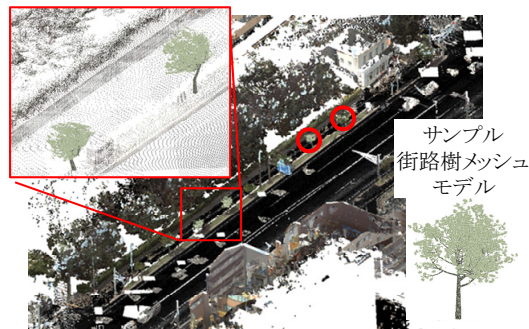


図15 街路樹メッシュモデリング結果

境の統合点群モデルの自動生成, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会, 2014.3.19, 東京大学(文京区)

- ③ 高井俊吾, 伊達宏昭, 金井理, 新名恭人, 織田和夫, 池田辰也, 走行軌跡を用いた市街地 MMS 計測点群の高精度レジストレーション, 2013年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2013.9.12, 関西大学(吹田市)
- ④ 前野峻, 伊達宏昭, 金井理, 適応的描画プリミティブ選択とLODによる大規模環境レーザ計測点群の効果的表示手法, 2013年度精密工学会春季大会学術講演会, 2013.3.14, 東京工業大学(目黒区)
- ⑤ 横山博貴, 伊達宏昭, 金井理, 武田浩志, 高密度市街地レーザ計測点群からの柱状物体認識と分類, 2013年度精密工学会春季大会学術講演会, 2013.3.14, 東京工業大学(目黒区)

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 柱状物体抽出方法、柱状物体抽出プログラム、および柱状物体抽出装置

発明者: 金井理, 伊達宏昭, 横山博貴, 森哲平, 武田浩志

権利者: 国際航業株式会社, 北海道大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-186830

出願年月日: 平成 24 年 8 月 27 日

国内外の別: 国内

## 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