3次元計測に基づく大規模点群処理の課題と技術動向*

Current Status of Large-Scale Point Processing Captured by Terrestrial Laser Scanner

増田 宏**
Hiroshi MASUDA

Key words point-cloud, geometry processing, laser scanner, LIDAR, mobile mapping

1. はじめに

長距離が計測できるレーザスキャナはこれまで測量の分野で用いられることが多かった。しかし、計測技術の進歩によって非常に高密度な点群を容易に取得できるようになり、生産、土木、建築、林業、地図、サービスなど、多岐にわたる分野での活用が検討されるようになってきた。

日本では生産設備や社会インフラの老朽化が急速に進み、その一方で財政的な制約から新規建造が難しくなっている。そうした状況を考えると、今後、わが国はメンテナンス社会に突入せざるをえない。3次元計測と大規模点群処理は、メンテナンスを支援するための有望な技術である。現況の正確な3次元情報に基づいてさまざまな検計作業が計算機上で行えるので、信頼性の高い作業計画や工程管理、コスト管理ができ、作業効率が大きく向上できることが期待できる。

広範囲を高密度に計測できるレーザスキャナが一般に利用できるようになったのは比較的最近のことで、工学的に応用しようとする研究はまだ始まったばかりである。大規模点群処理のキラーアプリケーションもまだ確立しておらず、研究者にとって魅力的な分野といえる。

工学分野で、大規模点群処理が有用と考えられるのは、以下に示すような応用分野である。

- ・ 工場やプラントの大規模設備の保守や改修の支援
- ・ 電力、通信、交通などの広域な設備の保守と管理
- ・ 現況（現物、現場、資材など）の管理と保全

図1に、基盤技術から応用に至る大規模点群処理技術の発展の段階を示す。離散的な点集合を扱うための汎用的な数値手法や情報技術については、これまで多くの研究がなされてきた。そうした技術は、コンピュータグラフィックスやコンピュータビジョンなどの情報科学分野での汎用手法として発展し、技術的蓄積が豊富である。

しかし、汎用手法を現実問題に適用しようとする、前

提条件、効率、安定性などの点で十分でないことが多い。そのため、現実問題との適合性を考慮した技術開発や、ニーズに合わせた最適化が必要となる。さらにその次のフェーズとして、特定の工学領域における問題解決のための情報システムの開発が必要となる。それが達成できれば、多くの工学分野にとって不可欠なツールとして業務プロセスに組み込まれていくことになるであろう。この最終フェーズへの橋渡しをするための技術の開発がわれわれの考える研究のスコープである。

こうした研究では、複数の研究分野の技術や知識を融合する必要があるが、そのための研究組織は国内には存在していなかった。そこで、形状処理技術の研究者が主体となり、精密工学会において2010年に「サイバーフィールド構築技術研究分科会」を立ち上げ、2012年からは「大規模環境の3次元計測と認識・モデル化技術専門委員会」として、産学連携のための組織を運営している。学術講演会でも定期的にオーガナイズドセッションを企画し、学術面でも研究を促進する役割を果たしている。

本稿では、こうした取り組みを継続してきた結果として、現在までに何がどこまでできたのかについて論じる。

図1 研究の位置付け

*原稿受付 平成25年2月22日

**正会員 電気通信大学知能機械工学専攻（東京都調布市調布ヶ丘1-5-1）

2. 大規模環境のための点群処理

2.1 固定式レーザスキャナ

最新のレーザスキャナでは毎秒 100 万点が計測できる。図 2 左に Leicageosystem 社の HDS7000 を示す¹⁾。この装置は、対象物にレーザを照射し、その反射光が戻るまでの時間と光の速度から距離を計測する。また、図 2 右のように、ミラーを高速回転させてレーザの照射方向を振らせ、ミラーが一周した後に本体を微小角度ずつ回転させて全方位を計測する。ミラーの回数数を Hz で表現しており、図 2 右の計測装置では最大 50 Hz である。その場合、5000 万点の点群を得る時間は 100 秒となる。計測方式としては、パルス発光させたレーザ光を用いる飛行伝搬時間方式と、変調させたレーザ光を連続的に照射して距離を計測する位相差方式がよく用いられる。一般に後者の方式が高速であるが、最近では飛行伝搬時間方式でも毎秒 100 万点規模の計測ができるものが現れている。

図 3 は、建物を計測した例である。左の図はスキャナ原点に視点を置いた図であり、右の図は上方から見た図である。計測原点から可視となる部分の点群だけが得られるので、計測できない点が必ず発生する。また、この例のように、機種によっては、各点にレーザ反射強度や RGB 値をもたせることができる。計測速度の向上とともに、計測精度も改善されている。初期のレーザスキャナでは 10 m 先の平面計測で 6 mm 程度のばらつきが発生していたが、最近のものでは 1 mm 以下に収まっている²⁾。

2.2 移動計測

近年では、レーザスキャナを移動体に搭載して広域なエリアを計測する移動計測が注目されている。図 4 に車載式の移動計測装置を示す。車載式の移動計測では、レーザスキャナが時速 40 km 程度で移動する。そのため、車両の位置と姿勢を GPS と IMU で計測し、レーザスキャナで計測した座標を、緯度経度や平面直角座標系などの大域的な座標系に変換する。各点は GPS 時刻を属性としてもつ。また、機種によっては、レーザ反射強度や RGB を点の属性としてもたせることができる。

図 5 は、100 Hz のスキャナを用いて市街地を計測した例である。最新の移動計測用のレーザスキャナでは毎秒 100 万点が計測でき、1 時間の走行で得られるデータは 36 億点となる。1 時間の計測で数十 km にも及ぶため手動による処理は現実的ではなく、自動処理が強く求められる。

3. 工場・プラントを対象とした点群処理

3.1 研究の方向性

固定式レーザスキャナは、プラントや工場の高密度点群を取得するために有効である。現在では、生産設備を新規に立ち上げるよりも、既存設備を改修しながら使うことが多くなっている。工場やプラントの設計でも 3D CAD を用いるようになってきたが、現況がモデルと同じである保証はなく、また改修が必要な古い設備には 3D モデルが存

図 2 レーザスキャナ (左: 本体, 右: 原理)²⁾³⁾

図 3 3次元の点群データ (安田講堂)

図 4 移動計測装置

図 5 移動計測による市街地の高密度な点群

在しないことも多い。そのため、現況を計測して作成した 3 次元モデルに基づいた検討作業が重要になっている。

製造業においては既に CAD/CAM/CAE が広く用いられているので、研究の方向としては二つの立場がある。

- (1) 既存の CAD/CAM/CAE の入力になるように点群データを面モデルや立体モデルに変換し、作業検討のシミュレーションなどは既存システムに任せる。
- (2) 高密度な点群による形状表現に基づいた新しい生産支援システムを構築する。

これまでの研究では、(1) のアプローチに基づくものが多かったが、高密度点群が簡単に取得できるようになってきた現状を考えれば、(2) のアプローチも重要である。

なお、製造業においては、点群から CAD モデルを作成

するリバースエンジニアリング技術が古くから研究されてきた。しかし、大規模点群処理においては、大雑把にいつて、計測範囲のサイズが100倍、点群の個数が100倍、ノイズレベルが10倍の点群を扱う必要がある。また、点の欠落が多く、非常に多数の物体が混在する点群を処理しなければならない。そのため、大規模点群処理で解決すべき問題の設定はかなり異なっている。

3.2 研究の現状

大規模点群処理では、近傍探索、前処理、セグメンテーション、曲面計算が主たる要素技術である。ここでは、有効性が確認されている手法について解説する。

(1) 近傍探索

近傍にある点の探索は最も基本的な処理であり、KDツリーやオクトツリーを用いるのが定石である。しかし、点の個数が数千万から数億点規模になるとツリーの階層が深くなり、探索に計算時間がかかる。その場合でも、図2右に示す順に点が取得されていることを利用すれば、非常に高速に4近傍または8近傍の点を得ることができる。

(2) 前処理

点の精度が低く異常値が多い場合、前処理として点群の平滑化が必要となることがある。点群処理では、移動最小2乗法による平滑化などが定石であるが、こうした方法は異常値に弱い。異常値の多い大規模点群では、Tukeyバイウエイト法などのロバスト推定を用いることで安定した平滑化が実現できる³⁾。

(3) セグメンテーション

大規模点群処理では、複数の物体が混在した点群データを対象物ごとにグループ化することが重要である。

古典的な手法としては、近傍点の集合に対して主成分分析を施し、主成分方向と固有値の比を用いて点群をグループ化する方法がよく用いられる。

連結成分を用いる方法では、近傍点との距離が閾値以内なら同じグループとする。点群はレーザの照射角度が等間隔になるようにサンプリングされるので、隣の点との距離は、レーザ照射方向、対象面までの距離と法線によって決まる。実際の点間距離がこれと同等の値なら同一面上、そうでないなら異なる面上にあるとしてグループ化できる。

曲面検出を用いる方法では、RANSAC法などを用いる。一般に、RANSAC法は大きな面の検出は高速であるが、小さい面の検出は非効率である。しかし、大規模環境においては、大きな平面として地面や床や壁が存在し、多くの物体はこれらに接しているので、大きな面を除去して連結成分を検出すれば、多くの物体を分離できる。この操作を再帰的に繰り返せば、小さい構成面も分離できる。

(4) 曲面検出

平面と円柱の検出がよく行われている。手法としては、領域成長法とRANSAC法が定石である。ただし、裏面が計測できないことが多く、また計測精度も高くないので、十分な計算精度が得られないことが問題となる。精度を確保する方法として、規格表を保持しておき、規格値に合わ

せて寸法値を調整する方法⁴⁾や工場やプラントの部材が床に対して垂直または平行に配置されることが多いという前提⁵⁾などを用いることができる。

3.3 今後の研究課題

これまでの研究は、図1において、技術の適合化のフェーズのものが多く、適合化が必要な技術はまだ多く、統合的な点群処理システムを構築するためにはまだ不十分である。技術を統合していく作業も必要である。

これまでの研究で開発されたシステムとしては、レーザ反射強度画像を用いて、ユーザが画面上で対話的に配管等のモデルを作成していくフィーチャベースシステムが提案されている⁴⁾。しかし、部材のモデリングを自動化する実用的なシステムはまだ発展途上である。

今後研究すべき技術としては以下のものが挙げられる。

(1) 面の連結による形状再構成

平面や円柱については、相当程度まで自動検出できるようになってきた。しかし、それらを組み合わせて、元の物体の形状を再構成する手法はまだ確立していない。配管を対象として接続条件を分類し、配管のモデル化を試みている研究⁶⁾や、単一の物体に限定した手法であるが、機械部品で一般的な平行や直角などの制約を導出して、矛盾のない形状モデリングを行う手法⁷⁾などが提案されている。

(2) 形状の規則性を利用した形状再構成

計測点の欠落を補うために、対称性の利用⁸⁾や、繰り返しパターンの利用⁹⁾などが提案されている。このアプローチは有用であるが、いまのところ対象物が非常に限定されており、工場やプラントへの適用はまだ難しい。

(3) パターン認識を用いた形状再構成

組立工場など多様な装置が設置されている環境では、汎用的なテンプレートによる形状再構成手法が望ましい。これまでに提案されている手法は、直方体の集合でモデリングする手法⁹⁾、テーブルや椅子などの室内空間の認識とモデル化手法¹⁰⁾¹¹⁾などがある。しかし、少数の限られた対象物に限定されており、誤認識も多いので、特定の工学ニーズに合わせた適合化が必要である。

(4) レジストレーション

レーザスキャナで計測された点は、計測装置を基準とした座標系によって記述されるので、座標変換を行って点群を併合する必要がある。この処理をレジストレーションと呼ぶ。レジストレーション手法は多くの研究がなされてきたが、大規模な点群を短時間、高精度、全自動で位置合わせすることは、一般にはまだ難しい。大規模環境の計測データの特徴を利用した手法などを検討する必要がある。

4. 移動計測による広域設備の点群処理

4.1 研究の方向性

移動計測においては、路面・トンネル・橋などの保守、電力・通信設備の保守管理、標識・信号などの保守管理、また3次元地図作成、Webでのサービスなどが主たる応用分野となる。こうしたインフラ設備でも、近年老朽化が

図6 地物ごとに分離された点群

大きな社会問題となっている。そのための支援技術として、3次元計測によって現況を把握し、データベース化することが求められている。保守管理においては、移動計測によって以下のような情報を取得することが求められる。

- (1) 道路周辺の地物の種別と位置。
- (2) 路面やトンネルなどの現況や劣化。
- (3) ガードレールや標識などの現況や劣化。

移動計測用のレーザスキャナはまだ十分に高速とはいえず、小さい凹みやクラックなどを検出するには低速での走行が必要である。また、高性能のスキャナはまだ非常に高価で利用が限られている。そのため、現状では、路面と地物の抽出に関する研究がほとんどである。

4.2 研究の現状と研究課題

移動計測で得られた点群は、大別して、路面と地物に分けられる。路面は、ほぼ平坦であり、端に行くほど徐々に低くなる性質がある。これに基づいて点群のZ座標の変化を調べることで、路面抽出は比較的容易に行える¹²⁾。路面が分離できれば、それ以外の点群に対してKD ツリーを用いて近傍探索し、点群を地物ごとに分離することができる。図6は、地物ごとに分離した点群を示している。

分離した点群から地物の種別を同定するためには、点群から柱状部分や平面部分を検出して対象物を推定したり¹³⁾、また特徴量ベクトルに変換してパターン認識を行う¹⁴⁾。パターン認識では、点群から複数の特徴量を抽出し、サポートベクターマシンやランダムフォレストが用いられる¹¹⁾¹⁴⁾。どのような特徴量が有効かについてはまだ研究の余地がある。また、画像と併用することで認識率を向上させられると考えられるが、まだ研究例は少ない。

形状の種類が同定できれば、次に、点群に適合するように、形状を再構成する。柱状物体、ガードレール、標識については研究がなされているが¹⁵⁾、成功率はまだ高いとはいえず、信頼度の高い手法の開発が必要である。

また、移動計測においても、レジストレーションの問題が存在する。移動計測では、点群の座標を絶対座標で出力する。しかし、実際には複数のスキャナからの点群を重ね合わせると、キャリブレーションや位置決め誤差などにより、かなり大きなずれが発生することが多い。座標値や特徴量などに基づいて、点群位置を補正する手法はまだ提案されていないので、今後の研究が必要である。

5. さ い ご に

本稿では、大規模環境の点群処理に関して問題設定を行い、研究の現状と今後の課題を説明した。分野融合的な新

しい研究分野であるので、研究対象として興味をもっていただければ幸いである。なお、大規模環境の点群データについては、研究機関の専門委員会の委員であれば、HP からダウンロードできるようになっている。興味のある研究者の方は問い合わせをいただきたい¹⁶⁾。

なお、図4、図5は、アイサンテクノロジー(株)より提供いただいたものである。感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Leica-geosystem: <http://www.leica-geosystems.co.jp/>
- 2) 榎本昌一, 小栗昇悟, 増田宏, 田中一郎: 複数のレーザスキャナによる平面計測精度の比較, 精密工学会秋季講演会, (2012)。
- 3) 増田宏, 村上健治: 大規模点群データの平滑化手法に関する研究 (第1報), ロバスト推定に基づく平滑化手法, 精密工学会, **76**, 5 (2010) 582。
- 4) 増田宏: 画像インタフェースを用いた大規模点群からのソリッドモデリングシステム, 日本機械学会, **76**, 771, C (2010) 2748。
- 5) T. Mizoguchi, T. Kuma, Y. Kobayashi and K. Shirai: Manhattan-World Assumption for As-Built Modeling Industrial Plant, Key Engineering Materials, **523** (2012) 350。
- 6) K. Kawashima, S. Kanai, H. Date and T. Kim: Automatic Recognition and Modeling of Piping System from Large-scale Terrestrial Laser Scanned Point Cloud, ACDDE (2012)。
- 7) Y. Li, X. Wu, Y. Chrysathou, A. Sharf, D. Cohen-Or and N.J. Mitra: GlobFit: Consistently Fitting Primitives by Discovering Global Relations, Transactions on Graphics, **30**, 4 (2011) Article 52。
- 8) N.J. Mitra, M. Pauly, M. Wand and D. Ceylan: Symmetry in 3D Geometry: Extraction and Applications, EUROGRAPHICS State-of-the-art Report, (2012)。
- 9) L. Nan, A. Sharf, H. Zhang, D. Cohen-Or and B. Chen: SmartBoxes for Interactive Urban Reconstruction, Transactions on Graphics, **29**, 4 (2010) Article 93。
- 10) Y.M. Kim, N.J. Mitra, D. Yan and L. Guibas: Acquiring 3D Indoor Environments with Variability and Repetition, Transactions on Graphics, **31**, 6 (2012) Article 138。
- 11) L. Nan, K. Xie and A. Sharf: A Search-Classify Approach for Cluttered Indoor Scene Understanding, Transactions on Graphics, **31**, 6 (2012) Article 137。
- 12) J. He and H. Masuda: Reconstruction of Roadways and Walkways Using Point-Clouds from Mobile Mapping System, ACDDE (2012)。
- 13) H. Yokoyama, H. Date, S. Kanai and H. Takeda: Pole-like Objects Recognition from Mobile Laser Scanning Data Using Smoothing and Principal Component Analysis, ISPRS Workshop Laser Scanning, (2011)。
- 14) A. Golovinskiy, V.G. Kim and T. Funkhouser: Shape-based Recognition of 3D Point Clouds in Urban Environments, ICCV (2009)。
- 15) 池田邦彦, 山下沙綾, 増田宏: 移動計測データのセグメンテーションと地物形状抽出, 精密工学会秋季講演会, (2011)。
- 16) 大規模環境の3次元計測と認識・モデル化技術専門委員会: <http://srm3d.jspe.or.jp/>

増田 宏

1987年東京大学大学院修士課程修了, 日本IBM東京基礎研究所入社。1998年東京大学人工物工学研究センター助教授, 2003年工学系研究科助教授。2013年より電気通信大学知能機械工学専攻教授。工学博士。研究分野は形状処理, 点群処理。