

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360057

研究課題名(和文) レーザスキャンによる3次元as-built設備モデルの全自動構築・更新技術の開発

研究課題名(英文) Fully-automatic build and update technology of 3D as-built equipment model by laser scanning

研究代表者

金井 理 (Kanai, Satoshi)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90194878

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：社会インフラに用いられる大型設備の現況を反映し、設備の意味情報が付加された3次元モデルである「as-built設備モデル」を、レーザスキャナによる現況設備の計測点群から全自動で構築でき、かつ長期に渡り、モデル情報を最小限の追加レーザスキャン作業で継続的に更新可能な、高い自動化レベルをもつ形状認識・モデリング処理のソフトウェアを開発する。また、化学プラント・大型ビル・発電施設などのように、モデル化すべき設備のクラスが変わっても、認識やモデリングの基本処理が不変性・共通性をもつアルゴリズムを考案することが、本研究の目的である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop advanced and fully-automated software for object recognition and modeling from massive laser scanned point clouds captured from large-scale equipment with current status to automatically construct “as-built equipment model” where each object in the equipment is semantically annotated. The software also aims for updating the as-built model continuously over time with minimum effort of additional laser scanning operation over long term, and for proposing a set of common and invariant primitive point clouds processing algorithms to support the recognition and modeling chemical plants, large-buildings, electric power plants etc.

研究分野：CAD, デジタルエンジニアリング

キーワード：形状モデリング CAD 安心・安全設計 建設マネジメント 維持管理工学 レーザスキャン MLS

### 1. 研究開始当初の背景

我が国の産業プラント・発電所などの社会インフラ設備は、高度経済成長期に建設されたものが多く、急速にその設備の老朽化が進んでおり、今後は、既存設備に改修を施しながら、長期間使い続けなければならない状況が増えると予測されている。このような大型設備の改修や維持管理を、信頼性を確保しつつ低コストに実施するには、設備の現況を反映し、設備としての意味情報が付加された3次元モデルである「as-built 設備モデル」(図1)を構築し、さらにこのモデル情報を長期間、コストをかけずに常に最新データに更新してゆくことが極めて重要となる。

このため、近年、レーザスキャナによる既存設備の3次元計測点群データから as-built 設備モデルを作成する需要が急速に高まっている。しかし現状技術では、点群からの形状認識やモデリングに多くの対話処理が必要で、モデル作成に数カ月もの時間を要してしまう。またこのコストのため、一旦 as-built 設備モデルが作られても、その後の改修作業を反映したモデル情報の更新が実際には行えないといった問題が生じている。

### 2. 研究の目的

上記問題を解決するため、本研究では、大型設備の現況を反映し、その管理に必須な意

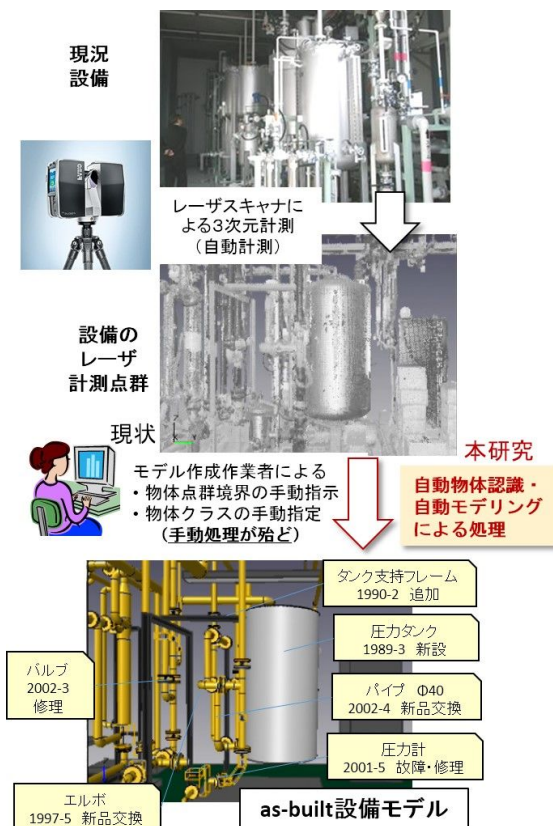


図1 As-built 設備モデル

味情報が付加された3次元モデルである

「as-built 設備モデル」を、レーザスキャナによる計測点群から全自動で構築でき、かつそのモデル情報を必要最小限の追加レーザスキャンで更新できる、高い自動化レベルをもつ形状認識・モデリング処理のソフトウェアを開発する。また処理対象となる設備の種類が変わっても、認識やモデリングの処理の基本構造が不変性・共通性をもつアルゴリズムを考案する。さらに、生成された as-built 設備モデルの精度や品質、処理時間が、実用に耐えうるかを実験的に検証する。

### 3. 研究の方法

この目的達成のため、本研究では、大規模な設備や環境を3次元レーザスキャンで計測した点群データに対する形状認識・モデリング処理に関する以下の(1)～(4)のアルゴリズム開発を行うと共に、そのプロトタイプソフトウェアを試作し、実計測データを入力とした計算機実験により、処理結果の精度、品質、処理時間を評価した。

- (1) 計測対象に依存しない大規模環境レーザ計測点群処理の共通の処理アルゴリズム群の開発、具体的には、異なるスキャン点群間の高速度レジストレーション(位置合わせ)、CADモデルと点群間のレジストレーション、点群内の対称性の網羅的認識処理の開発。
- (2) 大規模プラント設備を対象とした地上型レーザスキャナ計測点群からの配管系統自動認識アルゴリズム、および最適スキャナ配置アルゴリズムの開発
- (3) 市街地を対象とした車載型MLS(Mobile Laser Scanner)計測点群からの柱状物(電柱、街灯、標識)の自動認識アルゴリズムの開発
- (4) コンクリート構造物(橋梁)を対象とした地上型レーザスキャナ計測点群からの損傷・経年劣化の自動認識と定量評価アルゴリズムの開発

### 4. 研究成果

- (1) 大規模環境レーザ計測点群処理の共通の処理アルゴリズム群の開発
  - ・ 近傍点群の分散共分散行列の固有値解析と局所陽関数フィッティングを用いて、点群の局所的な分布形状を高速に求める手法を考案した。また法線テンソルの固有値解析と領域成長法により、複雑な計測点群を単純な平面や円筒面の領域へ高精度に自動分割する手法を開発した。
  - ・ 3次元計測点群の表示における環境視認性改善を目的とし、主成分分析に基づく描画プリミティブの選択的生成を用いた、点群の点間の隙間を埋める新しい点群表示手法を開発した。

- 地上型レーザスキャナから得られる大規模環境の複数計測点群を、点群内の地面一致制約と点群投影画像を用いたマッチングにより、既存手法に比較し極めて高速にレジストレーションするシステムを開発した。また地上型レーザスキャナによる未計測部を補完するため、大規模環境のT地上型レーザスキャナ計測点群とハンディ型デプスカメラにより得られた局所計測点群のラフレジストレーションアルゴリズムを開発し、10秒程度の極めて高速な処理でレジストレーションを完了できることを実証した。
- Building Information ModelのISO標準であるIFC2x3形式のCADデータに対し、屋内環境のas-built形状をレーザ計測した点群データを、特徴点間RANSACにより短時間で自動レジストレーションし、かつCADデータと点群間の差分形状を自動抽出できるシステムを開発した。
- ランダムサンプリング、ICPに基づく形状合同性評価、及び合同領域ペア同時拡大法を組み合わせた、計測データからの対称性認識アルゴリズムを新たに考案した。小型オブジェクトのレーザ計測点群に対する様々な実験より、計測ノイズに対して極めて頑健に、かつ形状中に存在するユークリッド対称性を網羅的に認識可能であることを確認した。

(2) 大規模プラント設備を対象とした地上型レーザスキャナ計測点群からの配管系統自動認識アルゴリズム、および最適スキャナ配置アルゴリズムの開発

複雑な配管系統をもつプラントの地上型レーザ計測点群から、離散的陽曲面フィットによる高速法線計算、領域成長法、領域アスペクト比分析により配管系統上の点群のみを高速にクラスタ化し、さらに配管点群への円筒面フィッティング、軸点列最適推定、空間コンテキストによる軸線補完を行うアルゴリズムならびに配管系統自動認識ソフトウェアを開発した。

さらに、数100万点の中規模な石油プラントのレーザ点群に対し、本ソフトウェアでの自動認識を行った。その認識結果を図2に示す。直進パイプ・ジャンクション・エルボの自動認識率はそれぞれ86%、88%、71%を達成し、これらが類似研究における物体認識アルゴリズムを凌駕することを実証した。

さらに図3のとおり、約1億点の大規模化学プラント計測点群から、9時間の処理により、直進パイプ・ジャンクション・エルボの認識率が約80%程度で、配管系統を全自動で認識可能なことを実証した。

またオクルジョンによるプラント設備内の物体認識性能の低下を防止するため、配管系統認識に特化した効果的オクルジョン領域解消ができる最適スキャナ配置をレ

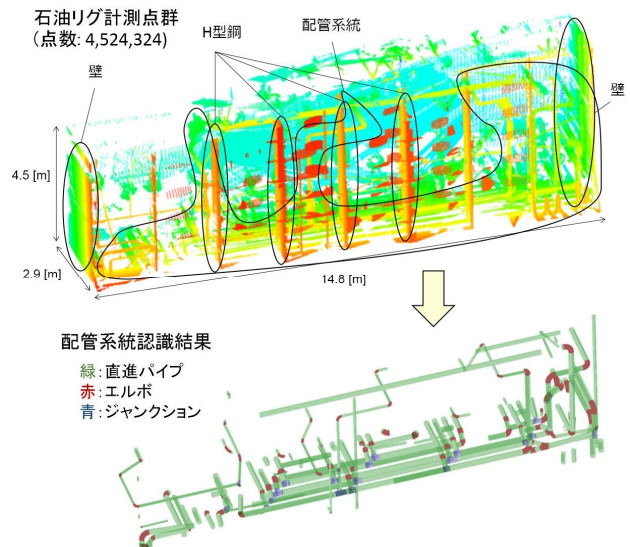


図2 石油プラントのレーザ計測点群からの配管系統自動認識結果

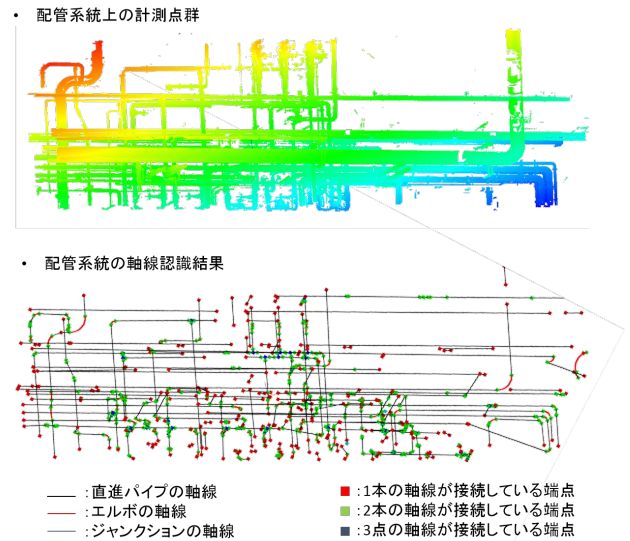


図3 大規模化学プラントのレーザ計測点群からの配管系統自動認識結果

イトレーシングにより推定できるシステムを開発した。図4のように、この推定アルゴリズムでは、レーザスキャンされた部分的な設備の計測点群とスキャナ位置から、計測空間をFree(物体無し)、Occupied(物体有り)、Unknown(未計測で要計測)の3クラスにVoxelを用いて分類すると共に、上記で開発したアルゴリズムによる配管系統の自動認識を実施し、その認識結果から未計測領域内における配管要素の存在確率を反映した観測スコアを予測し、Free空間内で未計測領域にある配管要素の観測スコア期待値が最大となる位置を、次スキャンでスキャナを設置すべき最適位置として推定するアルゴリズムを開発した。この最適スキャナ配置計画のプロトタイプソフトウェアを開発し、計算機シミュレーションによりその効果を評価した結果、図5のように、従来の未計測領域最小化戦略に基づく

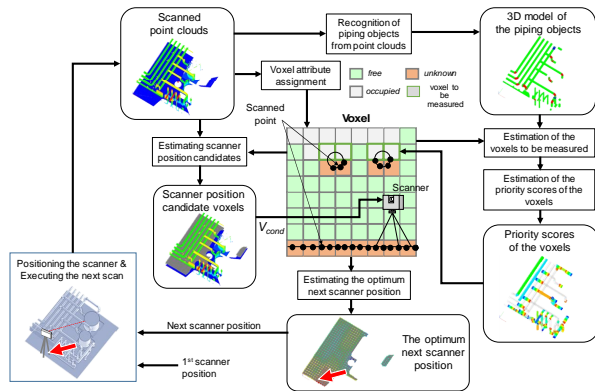


図4 最適レーザスキャナ配置計画の処理概要

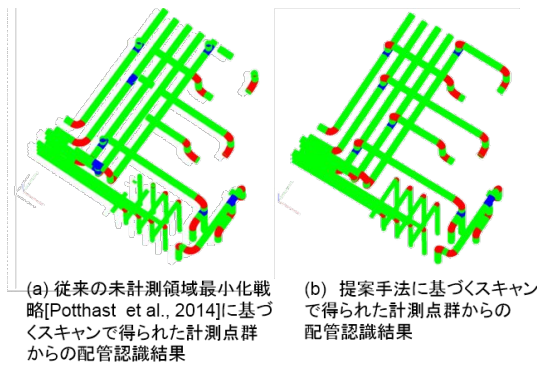


図5 提案する最適レーザスキャナ配置計画に基づいた配管系統認識結果 (8回スキャン後)

NBV (Next Best View) 問題の解法を用いた場合に比べ、少ないスキャン回数で、配管系統の認識率 100%を達成でき、また1回の最適スキャナ位置推定を 2 - 3 分で終了できることを確認した。

(3) 市街地を対象とした車載型 MLS 計測点群からの柱状物体 (電柱, 街灯, 標識) の自動認識アルゴリズムの開発

近年, 車載型 MLS (Mobile Laser Scanner) による道路周辺の市街地の高密度なレーザ計測が徐々に導入されており, その計測結果を用いて, インフラ設備である街灯や電柱, 標識といった柱状物体の管理データベースを構築することが期待されている。

本研究では, この MLS による市街地レーザ計測点群から, 様々な傾き, 太さをもった柱状物体を自動で認識し, 更に, 柱状物体の形状特徴, コンテキスト特徴に基づいて, 様々なパーツ・多数のパーツをもつ柱状物体を自動で分類する図6のような手法を開発した。

まず前処理として, 点群セグメンテーションを行い, MLS 計測点群を街灯・標識等の物体ごとの複数のグループに分割する。次に, 点の分類精度を高めるためのスムージング

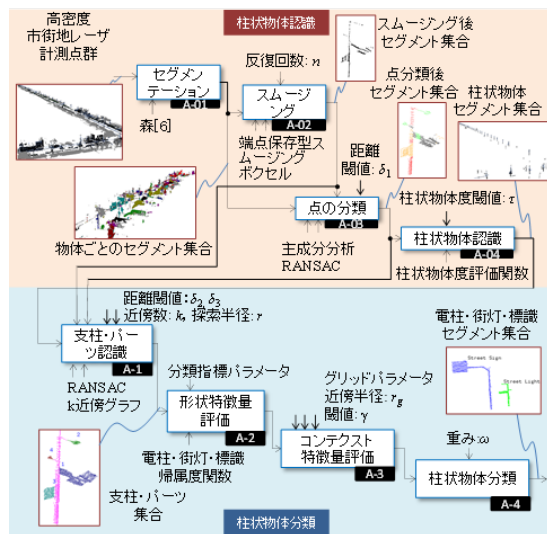


図6 市街地 MMS 計測点群からの柱状物体認識分類処理の概要

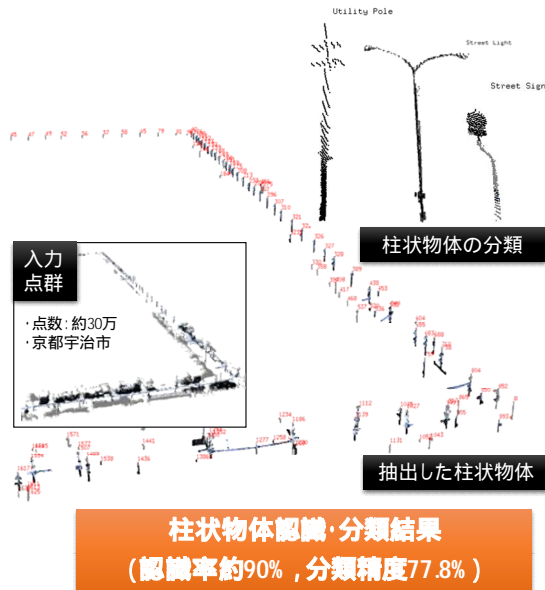


図7 市街地 MMS 計測点群からの柱状物体認識分類結果の例

を行い, 主成分分析と次元特徴量, ならびに RANSAC を用いて点を柱状物体上, 鉛直な柱状物体上, 平面上, その他物体上の点の 4 種類に分類する。この点分類結果に基づいてセグメントごとに柱状物体度を評価し, 閾値以上のセグメントを柱状物体と認識して柱状物体セグメント集合を得る。分類ステップでは最初に, RANSAC ならびに k 近傍グラフを利用して柱状物体の支柱の認識とパーツの認識を行う。次に, 柱状物体の高さ, 支柱外径, パーツ数, パーツタイプの 4 つの形状特徴量を評価する。そして周辺柱状物体との相対的な位置関係から求まるコンテキスト特徴量を算出し, 最後に電柱, 街灯, 標識の 3 クラスへ分類を行う。



橋台① 橋台②  
 図8 スケーリングが顕著な橋脚例

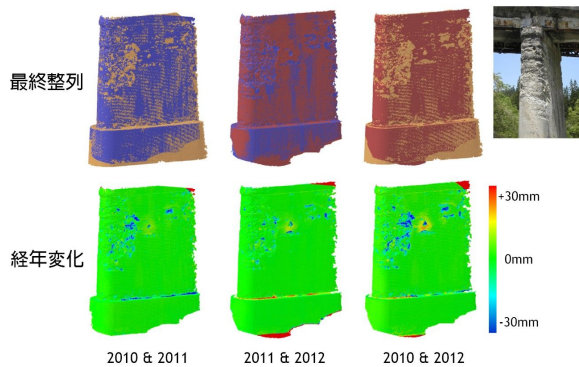


図9 多時期レーザ計測点群の重ね合わせによるスケーリング箇所と深さの定量評価例

本アルゴリズムを都心市街地の MMS レーザ計測点群に対し適用した結果、正しくセグメント化された柱状物体を 94.2%の精度で認識できることを確認した。更に、形状特徴量とコンテキスト特徴量に基づく柱状物体の分類手法を開発した。形状特徴には、柱状物体の高さ、支柱外径、パーツ数、パーツタイプの 4 つを利用した。コンテキスト特徴は、分類したい柱状物体の周辺柱状物体分布が、どのクラスの標準分布に近いかの類似度として定義して算出した。その結果、図 7 に示されるとおり、柱状物体を電柱、街灯、標識へそれぞれ 100%、75.6%、77.4%の精度で分類できることを確認した。

- (4) コンクリート構造物（橋梁）を対象とした地上型レーザスキャナ計測点群からの損傷・経年劣化の自動認識と定量評価アルゴリズムの開発

寒冷地におけるコンクリート構造物は凍害が生じやすい環境下であり、図 8 のようなスケーリングが顕在化している構造物も少なくはない。スケーリングとは、凍結融解の繰り返しと凍結防止剤の大量散布が起因となり、構造物表面のコンクリートがフレーク状に剥離・剥落する劣化現象である。レーザスキャナによる 3 次元計測点群に基づいたスケーリング評価が実現できれば、定量評価が可能となるだけでなく、評価に伴う点検者のリスクを軽減でき、なおかつこれまで点検者が近づくことさえできなかった構造物に対する評価も可能となる。

そこで本研究では、地上型レーザスキャナにより取得したコンクリート構造物表面の 3 次元計測点群データから、スケーリングを定量的に評価する手法の開発を行った。まず、領域成長法をベースとし、構造物の竣工時から現在までの合計スケーリング深さを定量的かつ直観的に評価可能な手法を開発した。次に、ICP (Iterative Closest Point) 法に点群表面の特徴サンプリングを統合し、スケーリング深さの経年変化を定量的かつ高精度に評価可能な手法を開発した。また開発した手法を複数のスケーリングした実際のコンクリート道路橋計測データに適用し、その有効性を評価した。

その結果、図 9 のように各年で計測された点群間のマッチングにより、mm オーダ深さのスケーリング箇所の可視化が可能であることを確認した。さらに検証のため、他の精密変位計によりコンクリート構造物のスケーリング表面までの奥行きを 0.01mm の精度で 2 次元的に測定した結果と、レーザスキャン点群上で評価した結果のうちの該当箇所とを比較した。その結果、本手法では約 2mm の精度でスケーリングを評価できていることが確認できた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 20 件)

- (1) Kazuaki Kawashima, Shinnya Yamanishi, Satoshi Kanai and Hiroaki Date: "Finding the next-best scanner position for as-built modeling of piping systems", *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5, pp.313-320, (2014) [査読有]  
 DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-313-2014
- (2) Hiroaki Date, Takashi Maeno, and Satoshi Kanai: "A Rendering Method of Laser Scanned Point Clouds of Large Scale Environments by Adaptive Graphic Primitive Selection", *Computer-Aided Design and Applications*, 11(6), pp.685-693, (2014) [査読有]  
 DOI: 10.1080/16864360.2014.914386
- (3) Tomohiro Mizoguchi and Yoshikazu Kobayashi: "Interactive Trunk Extraction from Forest Point Cloud", *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5, pp.433-436, (2014) [査読有]  
 DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-433-2014
- (4) Kazuaki Kawashima, Satoshi Kanai and Hiroaki Date: "As-built modeling of piping system from terrestrial laser-scanned point clouds using normal-based region growing", *Journal of Computational Design and Engineering*, 1(1), pp.13-26 (2014) [査読有]  
 DOI: 10.7315/JCDE.2014.002
- (5) Hiroki Yokoyama, Hiroaki Date, Satoshi Kanai, and Hiroshi Takeda: "Detection and Classification of Pole-like Objects from Mobile Laser Scanning Data of Urban Environments", *International Journal of CAD/CAM*, 13(2),

pp.31-40 (2013) [査読有]  
<http://www.ijcc.org/ojs/index.php/ijcc/article/view/247>

- (6) Tomohiro Mizoguchi, Yasuhiro Koda, Ichiro Iwaki, Hiroyuki Wakabayashi, Yoshikazu Kobayashi, Kenji Shirai, Yasuhiko Hara, Hwa-Soo Lee: "Quantitative scaling evaluation of concrete structures based on terrestrial laser scanning", *Automation in Construction*, 35, pp.263-274 (2013)  
DOI: 10.1016/j.autcon.2013.05.022
- (7) Kazuaki Kawashima, Satoshi Kanai and Hiroaki Date: "Automatic recognition of piping system from laser scanned point clouds using normal-based region growing", *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-5/W2, pp.121-126, (2013) [査読有]  
DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W2-121-2013
- (8) Tomohiro Mizoguchi, Satoshi Kanai, Hiroaki Date and Hiroyuki Tanaka: "Robust and Exhaustive Method for Symmetry Detection from Scanned Meshes", *JSME J. of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 7(5), pp.862-875 (2013) [査読有]  
DOI: 10.1299/jamdsm.7.862
- (9) 川島千明, 金井理, 伊達宏昭: 「大規模環境レーザ計測点群からの配管システムの自動認識」, *精密工学会誌*, 78(8), pp.722-729 (2012) [査読有] DOI: 10.2493/jjspe.78.722
- (10) Satoshi Kanai, Daisuke Iyoda, Yui Endo, Hideki Sakamoto and Naoki Kanatani: "Appearance preserving simplification of 3D CAD model with large-scale assembly structures", *Int. J. Interactive Design and Manufacturing*, 6(3), pp.139-154, (2012) [査読有]  
DOI: 10.1007/s12008-012-0145-0

#### 〔学会発表〕(計 68 件)

- (1) 山西伸哉, 金井理, 伊達宏昭: 「配管システムのレーザ計測とモデル化のための最適スキャナ位置推定(第1報)」, 2015年度精密工学会春季大会学術講演会, 2015年3月19日, 東洋大学, 東京都
- (2) Hiroaki Date: "Registration of Point Clouds of Large-Scale Environments using Point Projection Images", [招待講演] 3D レーザスキャニング&イメージングシンポジウム2014, 2014年9月26日, 東京大学, 東京都
- (3) Tomohiro Mizoguchi: "Applying Geometry Processing Techniques to Civil Engineering Applications", [招待講演] 3D レーザスキャニング&イメージングシンポジウム2014, 2014年9月26日, 東京大学, 東京都
- (4) 松山雄介, 伊達宏昭, 金井理: 「大規模環境の統合点群モデルの自動生成(第3報)」, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会, 2014年3月18日, 東京大学, 東京都
- (5) 江戸大樹, 伊達宏昭, 金井理: 「パーツ分析に基づいた市街地レーザ計測点群からの柱状物体役割認識」, 2014年度精密工学会春季

大会学術講演会, 2014年3月18日, 東京大学, 東京都

- (6) 川島千明, 伊達宏昭, 金井理: 「大規模環境レーザ計測点群からの配管システムの自動認識(第5報)」, 2013年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2013年9月13日, 関西大学, 吹田市
- (7) Kazuaki Kawashima, Satoshi Kanai, Hiroaki Date and Tae-wan Kim "Automatic Recognition and Modeling of Piping System from Large-scale Terrestrial Laser Scanned Point Cloud", 2012 Asian Conference on Design and Digital Engineering, 2012年12月7日, ヒルトンニセコビレッジ, 北海道

#### 〔図書〕(計 0 件)

#### 〔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 号  
出願年月日: 平成 24 年 8 月 27 日  
国内外の別: 国内

##### 取得状況(計 0 件)

#### 〔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

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

##### (2) 研究分担者

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

溝口知広 (MIZOGUCHI TOMOHIRO)

日本大学・工学部・准教授  
研究者番号: 30547831