

# 大規模点群を用いた生産ラインの改修支援システム

増田 宏<sup>\*1</sup>, 平岡 美那子<sup>\*2</sup>, 松岡 諒<sup>\*2</sup>

## A Renovation Support System for Manufacturing Plants Based on Point-Clouds Processing

Hiroshi MASUDA <sup>\*1</sup>, Minako HIRAOKA and Ryo MATSUOKA

<sup>\*1</sup>The University of Electro-Communications, Dept. of Mechanical Engineering and Intelligent Systems  
1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585

Mid-range and long-range laser scanners are useful to create point-based 3D models of manufacturing plants. Although point-based representation is promising for simulating renovation tasks of manufacturing plants, its discrete and unstructured nature prevents the user to efficiently edit point-clouds. Editing capability, such as deletion, displacement and addition of components and equipment, is very important for efficiently supporting renovation tasks. In this paper, we describe two editing technologies for point-clouds. First, we introduce a method for grouping points into meaningful sets. Our method consists of three stages; segmentation by continuous surfaces, segmentation by surface detection, and segmentation by object recognition. These techniques make it possible to efficiently edit point-cloud data. Then we introduce a new collision detection method for large-scale point-clouds. This technique is useful for simulating how to carry equipments out of or into a factory. For realizing efficient collision detection, we convert a point-cloud into a 2D depth map. Objects are projected into the depth map and are evaluated collisions by depth values on the depth map. We use multi-resolution depth maps in an out-of-core manner for handling large-scale point-clouds. In our experiments, our method enables to detect collisions in real time even when point-clouds are incomplete.

**Key Words** : Point-Cloud, Point Processing, Geometric Modeling, Collision, Shape Reconstruction

### 1. 緒 言

生産設備やプラント設備は、改修を行いながら長期間に渡って利用される。そのため、新製品開発や市場の変化に応じた設備の改修作業を迅速に手戻りなく行うことは非常に重要な課題である。近年、そうした作業を支援するための手段として、中距離用のレーザスキャナによる点群データを用いた作業検証が注目されている。従来は、工場などの設備の 3D CAD モデルに基づくシミュレーションによる検討が行われてきたが、工場の 3D モデルを手で作成するには多大なコストと時間がかかる。また、生産現場ではしばしば設備の変更が行われるが、その変更を適切に 3D モデルに反映させることは容易ではない。

中・長距離を計測できるレーザスキャナを用いることで、こうした問題が解決できると考えられる。近年、工場計測でよく用いられているレーザスキャナでは、10m 先で 6mm~10mm ピッチの点を計測でき、一回のスキャンで 1000 万から 5000 万点の点群を 1 分程度で取得することが出来る。このような高密度の点群は、点を適切な大きさで描画すれば、面の表示と同等の高品質な表示が得られ、また対象物の寸法を得ることも可能である。

しかしながら、レーザスキャナで得られるデータは離散的な点群で構造化されていないため、そのままでは作業が点群を選別することが必要で、負担が非常に大きくなる。効率的に編集作業を行うためには、点群が工学的に意味のある単位にグループ化され、その単位で、削除、移動が行えることが求められる。また、新規の設備や部品を追加するときには、既存設備との干渉の有無が検出できることが必要である。

本稿では、点群データに基づく設備改修支援システムを実現するための基盤技術として、点群のセグメンテーション手法と、点群ベースの干渉計算法を提案する。点群セグメンテーションは、点群を意味のある単位でグル

ープ化し、その単位で削除や移動を行うために用いる。また、干渉計算は、新規の部材や装置を追加したり、装置が工場内を移動したりするときに、既存設備との干渉の有無や、製品が既存の生産ラインを干渉せずに流れるかどうかの検証に用いる。

本稿で提案する点群を意味のある単位にグルーピングするために、三段階のセグメンテーションを行う。まず、連結な面の単位で点群をグループ化する。次に生産設備で一般的である平面と円柱を検出し、それらに対応した点をグループ化する。さらに、検出された平面と円柱を手がかりにして、工学的に意味のある形状を抽出して点群をグループ化する。

干渉計算では、大規模点群に対応でき、また未計測エリアを含む不完全な点群に対応できる手法を考える。大規模環境の計測では、レーザが照射できない領域が生じるために面の欠落が発生することが避けられない。また、細かいワイヤなどでは、安定して面モデルを生成することが難しい。そのようなケースにおいては、干渉が生じていても非干渉と判定される恐れがある。また、工場などの計測データは数十億点になることが多く、それらを統合して単一のメッシュモデルを生成する計算はコストが高い。また、生成できたとしても、メモリ容量の限られている通常のPCでリアルタイムに干渉判定をすることは簡単ではない。本研究ではこれらの問題が解決できる手法を提案する。

以下、第2章においては点群セグメンテーションの手法を示し、第3章では、点群ベースの干渉計算法を示す。

## 2. 点群のセグメンテーション

### 2.1 連結な面によるセグメンテーション

本研究では、三段階のセグメンテーションを行うが、最初に、点群を連結な面に乗っているかどうかでグループ化する。点群をグループ化するときに重要となるのは、2点が連続的な面に乗っているのか、非連結な面に乗っているのかの判定である。従来手法では、 $k$ -近傍距離を計算し、その距離から連結な面上の点かどうかの判定する手法が知られている。しかしながら、この方法は疎密に大きな差が発生する大規模設備の計測データでは不安定であるため、より確実な判定方法を考える。

ここでは、点群を計測した際の光源位置が既知であるとする。中・長距離のレーザスキャナでは、レーザの光源を原点とした座標系で記述された点群が出力される。また、点群のレジストレーションを行い、統一的な座標系に変換するときにおいては、ヘッダとして変換行列を付加し、スキャナ原点の座標はそのままファイルに保持しておく表現も一般的に広く用いられている。本研究ではそのように記述された点群を対象としている。

中・長距離のレーザスキャナでは、同一面上の隣接点の距離は、照射角度と光源からの距離に依存する。大規模環境の計測においては、光源からの距離が近い面と遠い面では点間距離が大きく異なるため、2点が連続な面上に乗っているかの判定に単一の閾値を用いることは適切ではない。点群が十分に密なとき、ある点の近傍点が微小な平面に乗っているならば、点  $p_i$  における隣接点との距離  $d_i$  は以下の式で求めることができる<sup>(1)</sup>。ただし、微小平面的法線を  $n_i$ 、また  $\Delta\phi$  を点群計測における角度ピッチとする。原点は光源であり、法線は近傍点の主成分分析により算出できる。

$$d_i = \frac{|\mathbf{p}_i|^2 \Delta\phi}{(\mathbf{p}_i, \mathbf{n}_i)} \quad (1)$$

隣接点との距離がこの値よりも十分に大きいならば、2点は異なる面上に存在するとする。ここでは、ノイズの影響を考慮して、点間距離が (1) で計算される距離の 1.2 倍より大きいときに非連結とした。また、連結な近傍点が存在しない孤立点は異常値として除去する。

図1は、距離画像を連結面上でグループ化された点群を異なる色で描画したものである。この例では、全体が約 13000 個の領域に分割されている。この例題では、手前の部材は 2m 程度、遠方の部材は 15m 程度であるが、距離が大きく異なる場合でも適切にセグメンテーションされていることがわかる。

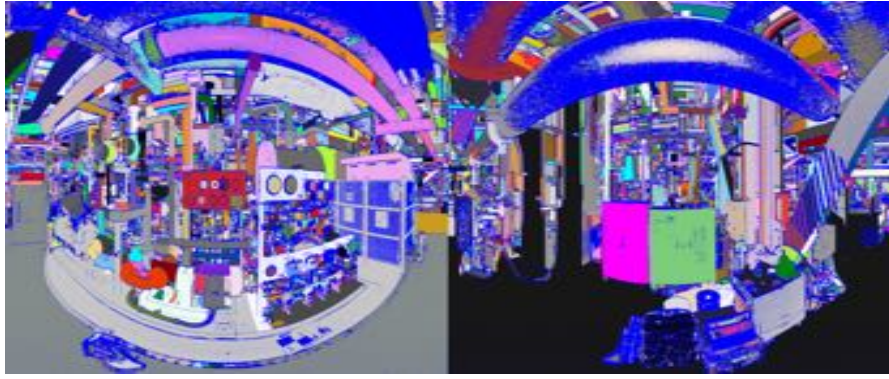


Fig.1 Segmentation by continuous surfaces



Fig. 2 Segmentation result of surface extraction

## 2・2 曲面検出によるセグメンテーション

次に、連結領域から平面と円柱を構成する点群を検出する。平面検出には、領域成長法を利用することもできるが、質の良いシード点を検出することが必要である。一方、RANSAC法はシード点が必要なく、より汎用的な手法であるが、大きな領域から小さい曲面を検出するには非常に多くの試行が必要となり、実用的な時間で検出することは難しい。単一の物体については、RANSAC法を高速に適用する方法<sup>(3)</sup>が提案されているが、ここでは生産設備の特徴を考慮した別の方法でRANSACを高速化して曲面検出を行う。

なお、RANSAC法では、少数の点をランダムに選択して曲面の方程式を計算し、計算された曲面式から十分近い点の個数  $N$  を求める。多数回の試行を繰り返して  $N$  が最大となる面の方程式を解とする。ここでは、平面では3個の点、円柱では2個の法線付きの点を用いて曲面式を計算した<sup>(3)</sup>。

生産設備のように多数の部材や装置が置かれている場合は、図1に示したように、非常に多くの連結面に分割することができる。連続な曲面は連結成分の中に存在するので、連結領域ごとにRANSAC法を適用することで計算量を抑えることができる。さらに、RANSAC法では、確率的に、面積が大きい面が優先して検出される。そこで、面が検出される度に連結性の判定を行い、再帰的に領域分割を行う。生産設備やプラントでは多くの面が平面と円柱であることから、検出が進むに従って領域分割されて探索領域が小さくなっていき、結果として、小

さい面積の面でも検出が可能になる。図1の例では、床面や壁を介して部材が連結したときに大きな連結領域が得られているが、床面や壁面は少ない試行回数で優先的に検出されるので、それらを除外することで多数の小さい連結領域に分割されていく。

図2は曲面検出によって得られたセグメンテーション結果である。約4000万点の点群データから、3981個の平面と1141個の円柱が得られた。曲面の最小点数は300点と設定した。計算時間は、3GHzのCPU、12GBのメモリを搭載した64bit PCで4分50秒であった。図2(上)は、曲面ごとに異なる色で点群を表示したもので、点が存在しないところは黒で、平面か円筒と認識されなかったところは白で示している。上部の配管が白くなっているのは、保温材が巻かれていたためである。下の図は、検出された曲面を表示したものである。

### 2・3 対象物の認識によるセグメンテーション

ここで検出された曲面は平面と円柱のみであるが、生産設備やプラントには、他にもエルボ、バルブなどがあり、これらはトーラスと楕円体となる。また、単一の部材の面でも、他の面に隠されて複数に分断されることもある。そこで、近傍の曲面を調べ、連結していると判定されれば、それらをグループ化する。また、曲面の接続関係から部材の種類を認識する。

まず、床と壁を認識する。これらは比較的大きい平面で構成され、床はほぼ水平面で、壁は床に対してほぼ垂直となる。また、床や壁を構成する平面より遠い位置には他の物体は存在しない。それに該当する平面に関して、同一平面と判定される平面をグループ化して、水平ならば床、垂直ならば壁としてラベルを付ける。

次に、平面のグルーピングを行う。まず、平面の内外判定を行い、ある平面と式(1)の基準で空間的に連結し、外側境界の内部にあるときは同じグループにする。また、二つの平面が空間的に連結し、凸に直交するときも同じグループとする。この基準でグルーピングを行うと、図3に示すような直方体形状が同一のグループとなる。

円柱に関しては、中心軸が同軸の場合と交わる場合を考える。生産設備においては、配管が多く配置されるが、配管であれば、軸が同軸、直交または45度に交差する円柱から構成されるので、その条件を満たして隣接する円柱群を検出する。また、配管は、フランジ、エルボ、バルブなどの部材によって接続されることが多い。そこで、同軸もしくは軸が交差する円柱が検出されたときは、接続部材の有無を検証する。図4(a)(b)に示すように、フランジとエルボは円柱の径が決まれば、規格によって径や長さが決まるので、それに該当する形状が点群データに存在するかを確認する。また、バルブについては、円柱と同軸の楕円体を仮定し、楕円体が検出できるかどうかを確認する(図4(c))。軸が直交するときは、ティーと仮定する(図4(d))。もし接続する部材が検出されないときは、同軸で径が同じで、他の物体に隠されていると判定されるならば、同一直線上のパイプとする(図4(e))。

以上のようなグルーピングを行うことで、点群は階層的にグループ化される。配管もしくは接続部材と認識されたときは、点群のグループに対して、部材の種類に応じたラベルを付与する。図5に直方体と配管のための構造を示す。これ以外のラベルとしては、床と壁がある。また、ラベルが付与されなかった面については、円柱、平面として保持しておく。

なお、どのような構造物をグループ化するかは、計測対象に依存する。ここでは、典型的な生産設備で共通に見られる対象物を示したが、オフィスでは机や椅子などが主要な構造物となると考えられる。直方体と配管以外については、面の組み合わせの規則を追加する必要がある。

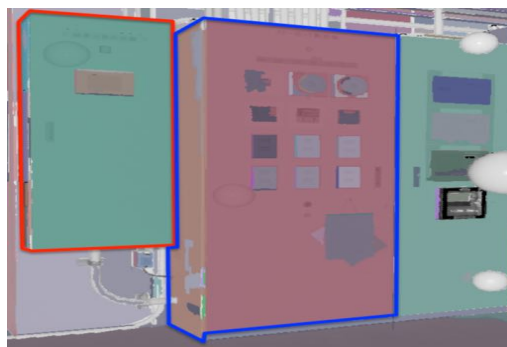


Fig. 3 Grouping of planes

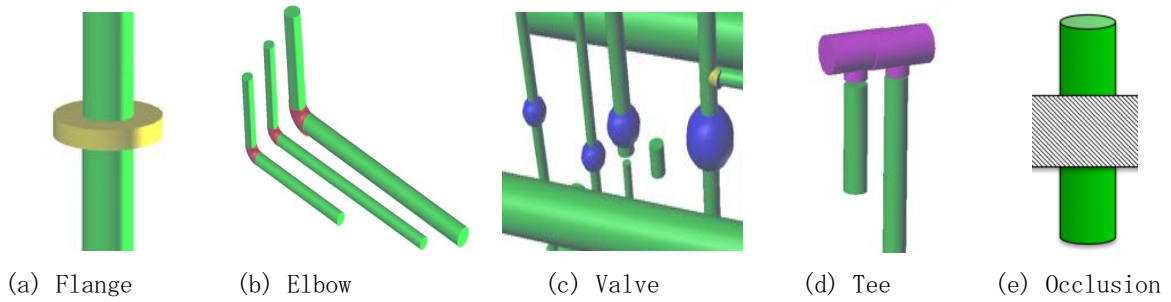


Fig. 4 Detection of connected components

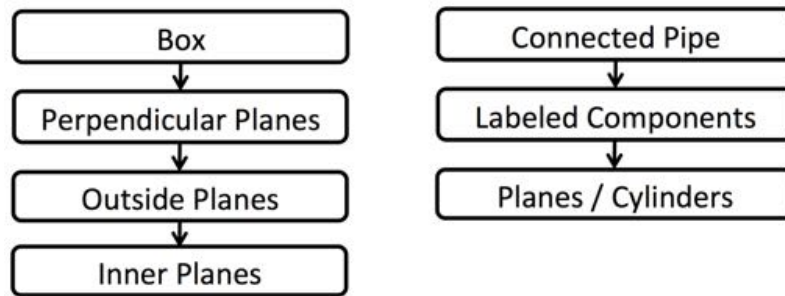


Fig. 5 Structure of Surfaces

### 3. 大規模点群のための干渉計算

#### 3・1 未計測エリアを考慮した干渉計算

点群データで記述された設備に、新規の物体を配置することを考える。新規の物体は、閉じたメッシュモデルで表現されているものとする。ここでは、レーザスキャナで得られた点群データとメッシュデータとの干渉計算を高速に行うことによって、対象物が配置可能かを判定することを考える。

点群と閉じたメッシュモデルが干渉するかどうかを判定するには、メッシュモデル内部に計測点が存在するかどうかを判定すればよいのであるが、ここで問題となるのは、大規模点群への対応と、大規模設備の計測では未計測エリアが発生することが避けられないことである。未計測エリアが存在する場合、ポリゴン内部に点が存在しないことが、必ずしも干渉しないことを意味しない。図6は、レーザ光が到達しないエリアに対象物が置かれた例を示している。メッシュモデル内部に計測点が存在しないが、この場合は、「干渉しない」と判定するのではなく、「この点群データでは干渉の有無は不明」と判定されるべきである。不明と判定されれば、追加の計測を行って点群を追加する、もしくは、人が現場に行って確認する、といった対応が必要であることが示唆される。

本研究では、「干渉」「非干渉」「不明」の三通りの判定ができる干渉計算法を提案する。基本的な考え方を図7に示す。レーザの光源位置が既知だとすると、対象物が計測点より手前にあれば、この物体は干渉しないと判定できる。物体の内部に計測点が存在するならば、この物体は干渉すると判定できる。一方で、対象物のすべての点が計測点よりも遠い位置にあるならば、この物体は未計測エリアに存在し、干渉の有無は不明であると判定する。干渉する場合の判定については、図8のように、光源から見て、対象物の表面と裏面に挟まれた範囲に計測点が存在するかどうかを判定する。表面は、レーザ光と逆向きの法線を持つ面とする。

この判定を高速に行うために、計測点をデプスマップで記述する。デプスマップは2次元格子であり、各点には距離の最大値と最小値が記述されている。デプスマップの解像度は、計測点の解像度より小さくなるように作成する。デプスマップの作成では、レーザ光源を原点とする球面座標系  $(r, \theta, \phi)$  に計測点の座標値を変換し、格子点  $(\theta, \phi)$  の距離値の最大値と最小値を更新することで作成する。

メッシュモデルの干渉計算では、メッシュモデルの表面と裏面をデプスマップ上に投影し、格子点の距離と比較する。メッシュモデルのすべての投影点が計測点の最小値よりも小さいならば、「干渉しない」と判定される。また、最大値よりも大きい場合には、「不明」と判定される。それ以外の場合には、干渉している可能性がある。

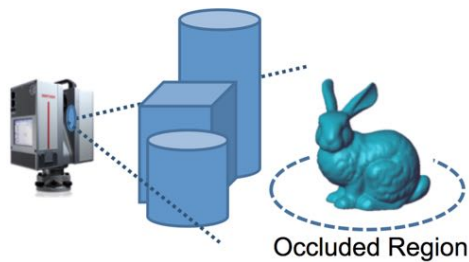


Fig. 6 Collision check in occluded region

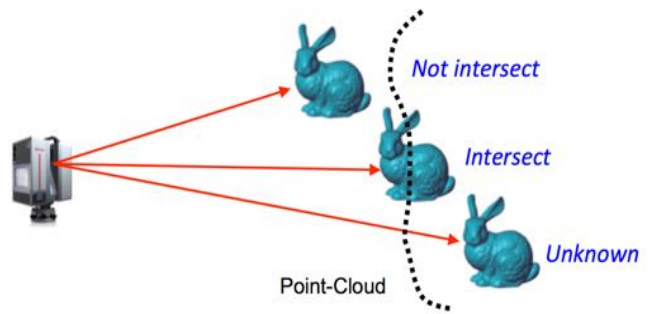


Fig. 7 Collision check by depth

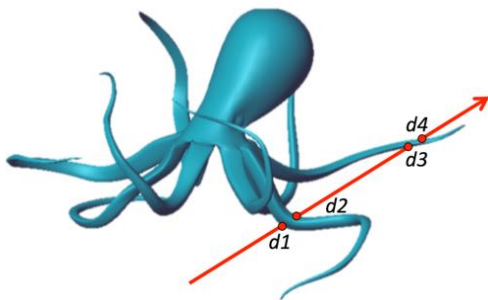


Fig. 8 Collision Check

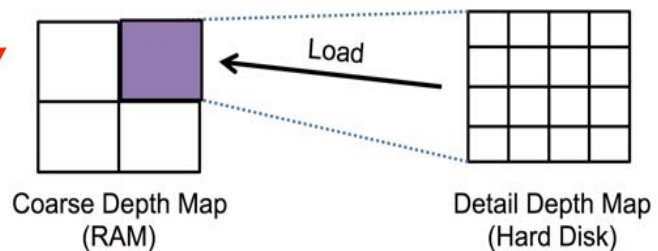


Fig. 9 Hierarchical Collision Check

### 3・2 複数の点群データ

単一のデプスマップでは、計測されていない領域が大きく、衝突不明と判定される場合が多くなる。一般には、未計測点ができるだけ少なくなるように、複数地点から多数の点群データが取得される。

本稿で述べた手法においては、N 個のデプスマップが存在する場合、その中の少なくとも 1 つに対して衝突の有無が判定できればよい。また、すべてのデプスマップに対して衝突不明となった場合は、「このデータセットでは判定ができない」という結果を返せばよい。

N 個のデプスマップが存在する場合、デプスマップを適用する順序は、物体位置と計測点との距離に近い順とし、一旦、衝突の有無が判定できるデプスマップが見つければ、それ以降はそのデプスマップで判定不能となるまで、同じデプスマップを使い続けるものとする。

### 3・3 アウト・オブ・コアによる階層的なデプスマップ

一般に大規模設備の計測データは非常に大きく、また全体を計測するために複数位置から計測された多数の点群データが取得される。そのような点群データをすべて RAM 上に展開することは通常の PC では無理である。そこで、本手法では、粗いデプスマップと詳細デプスマップを用意しておく。前者は RAM 上に保持しておき、後者はハードディスク上に保持しておく。点群データが大きいときは、複数階層の詳細デプスマップを用意する。

粗いデプスマップにおいて、「干渉しない」もしくは「不明」と判定されたときは、そのデプスマップに関しては判定を確定させる。「干渉の可能性がある」と判定されたときは、干渉する可能性のある範囲を含む領域を詳細デプスマップから読み込んで RAM 上に展開し、詳細データで干渉の有無を判定する (図 9)。

本手法を大規模点群に適用した結果を表 1 に示すデプスマップは 3 階層とし、最も粗い第 1 層デプスマップは  $360 \times 180$ 、またハードディスク上に解像度を 16 倍した第 2 層とさらに 16 倍した第 3 層を保持する。最も詳細度の高いデプスマップでは、ピクセル間隔は 10m の距離で 2.1cm、格子数は約 1660 万点である。また干渉計算に用いたメッシュモデルは図 6 で示した bunny であり、デプス判定はメッシュモデルを 5000 個の点に離散化して行った。表 1 の結果から、階層デプスマップを用いた場合でも、リアルタイム処理がある程度可能な時間で干渉判定ができていることがわかる。

Table 1 Average time for collision cases

Resolution	Layer 1 (360 x 180)	Layer 2 (720 x 360)	Layer 3 (1440 x 720)
Timing for Collision Cases	15 msec	35 msec	48 msec

#### 4. 結 語

本稿では、点群データに基づく設備改修支援システムを実現するための基盤技術として、点群のセグメンテーション手法と、点群ベースの干渉計算法について提案した。点群セグメンテーションは、連結成分、曲面当てはめ、対象物の認識の三段階で点群をグループ化する方法を示した。干渉計算では、デプスマップを用いた階層化によって、大規模点群での干渉計算を実用的な計算時間で行う方法を示した。

なお、本稿で述べた方法においては、いくつかの解決すべき課題が残されている。点群セグメンテーションでは、対象物を認識する方法は、どのようなクラスの物体が点群モデルに存在するかに依存する。現状では、物体のクラスごとにアルゴリズムを開発しているが、そのような方法では多様なクラスへの対応は容易ではなく、また拡張性に乏しい。候補となる対象物のCADモデルが存在する場合においては、より汎用的な手法が考えられるので、そうした場合に対応できる方法を考えていきたい。干渉計算においては、データ量と計算時間が問題となる。デプスマップと曲面抽出とを関連付ける方法についても検討しているが、粗いデプスマップでは各画素が単一の曲面式に対応する比率が高くないため、効率化を実現するためには何らかの工夫が必要である。そうした手法についても検討していきたい。また、点群セグメンテーションと干渉計算を含む統合的な改修支援システムについては、今後システム化をしていきたいと考えている。

#### 文 献

- (1) Masuda, H., Tanaka, I., Enomoto, M., “Reliable Surface Extraction from Point-Clouds using Scanner-Dependent Parameters”, *Computer-Aided Design and Applications*, Vol. 10, No. 2 (2012), pp.265-277.
- (2) Masuda, H., Tanaka, “Extraction of Surface Primitives from Noisy Large-Scale Point-Clouds”, *Computer-Aided Design and Applications*, Vol.6, No.3 (2009), pp.387-398.
- (3) Schnabel, R., Wahl, R., Klein, R., “Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection”, *Computer Graphics Forum*, Vol. 26, No. 2 (2007), 214-226.
- (4) J. Klein, J., Zachmann, G., “Point Cloud Collision Detection”, *Computer Graphics Forum*, Vol. 23, No. 3 (2004), pp. 567–576.
- (5) Pan, J., Chitta, S., Manocha, D., “Probabilistic Collision Detection between Noisy Point Clouds using Robust Classification”, *International Symposium on Robotics Research* (2011).