

# ドロネー四面体分割を用いた三次元点群からの 凸物体の形状認識と復元に関する基礎研究

阿部真之<sup>†1</sup> 鉢呂隆太朗<sup>†1</sup> 森博志<sup>†1</sup> 外山史<sup>†1</sup> 東海林健二<sup>†1</sup>

我々は、三次元計測により得られる三次元の点群情報のみから、凸物体の形状認識および復元を行う新たな手法として、ドロネー四面体分割を用いる手法を検討している。これは、取得した三次元点群に対してドロネー四面体分割を適用した際にできる、他の四面体と全ての面を共有する四面体の個数に着目した手法である。本手法は、形状認識において基準となるモデルが不要であり、また点群から対象の凸物体の辺や面などの幾何学的な情報を求める必要もないという特長を持つ。さらに、認識結果を用いて点群から凸物体の形状をコンピュータ上で容易に復元可能である。本稿では、基礎研究として単純な凸多面体の三次元幾何モデルを用いて行ったシミュレーション実験の結果を報告する。

## Shape Recognition and Reconstruction of Three-Dimensional Convex Objects Using Delaunay Tetrahedralization

SADAYUKI ABE<sup>†1</sup> RYUTARO HACHIRO<sup>†1</sup> HIROSHI MORI<sup>†1</sup>  
FUBITO TOYAMA<sup>†1</sup> KENJI SHOJI<sup>†1</sup>

We are considering a new method for shape recognition and reconstruction of three-dimensional convex objects using Delaunay tetrahedralization. This is a method that focuses on the number of the tetrahedrons which shares all faces with other tetrahedrons when applying the Delaunay tetrahedralization to the obtained point clouds. Our method has a feature that the base model and the calculation of vertices, edges, and faces are needless in the shape recognition. Furthermore, it is easily being able to reconstruct the shape of the convex object from point clouds on the computer by using the shape recognition results. In this paper, we reports experimental results using some CG models of the simple convex polyhedron as the basic research.

### 1. はじめに

シーン中の物体を認識することは、コンピュータビジョンの分野において必須かつ重要な課題の1つである。特に、私たちが普段生活している実世界と同様の空間を対象とする三次元物体認識の研究[1][2][3][4]は多岐に渡り、その応用範囲は広い。中でも、私たちの身の回りに存在する人工物の多くは、幾何学的に単純な形をしていることから、凸物体の形状を認識する重要性は高い。これまで三次元物体認識は、物体の見えに基づくアピアランススペースの手法[5][6]が主流であった。しかし、近年、三次元計測技術の発展により、物体の三次元形状を容易に計測することが可能となりつつある。三次元計測で得られる情報は、基本的に物体表面上の三次元の点群である。そのため、点群情報のみから素早く凸物体の形状を認識、および復元する手法の需要が高まっている。

現在、三次元点群から物体形状を認識する一般的な手法は、主に2つある。1つは、事前に用意したモデルの三次元点群と、計測によって得た三次元点群とを、ICP アルゴリズム等の点群マッチング手法を用いて位置合わせを行い、評価関数にてモデルと一致するか否かを判別する手法[7][8]で

ある。これは、モデルベースドマッチングと呼ばれ、物体の位置、姿勢、大きさに依存しないため、多くの研究で用いられている。しかしながらこの手法には、認識対象とする物体の数だけモデルが必要であること、事前にモデルの三次元点群を取得する必要があること、探索空間が広いため処理コストが膨大であること、モデルと同一形状の物体しか認識できないこと、などの多くの課題がある。もう1つは、三次元点群から物体の頂点、稜線、面を求め、それらの大きさ、角度といった幾何学的な特徴から総合的に物体形状を認識する手法[9][10]である。これは、モデルを必要とせず、認識対象がモデルに依存しないため、より汎用性の高い手法と言える。ただし、三次元計測で得られる膨大な数の点群から、頂点や稜線を正確に求めることは容易ではない。また、計算コストが大きいという課題もある。

そこで本研究では、ドロネー四面体分割[11][12]を用い、三次元点群から直接凸物体の形状を認識する新たな手法の確立を目指している。本手法は、三次元計測にて取得した点群に対して、ドロネー四面体分割を適用した際にできる、他の四面体と全ての面を共有する四面体の個数により、凸物体の形状を特定の凸多面体として認識するものである。形状認識にモデルは不要であるため、認識対象はモデルに依存しないという汎用性と、形状認識に計算コストが大きな位置合わせ、または頂点、稜線、面を求めるといった処

<sup>†1</sup> 宇都宮大学 工学研究科  
Graduate School of Engineering, Utsunomiya University.

理が不要であるため、既存手法と比べてより高速な三次元凸物体の認識が期待できる。

本稿では、本手法の基本的な考え方と、基礎研究として行った正多面体の三次元幾何学モデルを用いた検証実験の結果を述べる。なお、本手法による三次元凸物体の形状復元は、形状認識の結果を用いて行うものであるが、現状、形状認識の方法を検討している段階である。したがって、本稿では形状復元方法の説明は簡単に述べるにとどめ、主に形状認識の方法について説明する。以下、まず 2.では、本手法の基礎となるドロネー三角形分割を用いた二次元凸物体の形状認識の方法を述べる。次に、3.で二次元凸物体の形状認識の概念を三次元へと拡張した本手法について述べ、4.で検証実験の結果を示す。最後に 5.でまとめと今後の展望について述べる。

## 2. 二次元凸物体の形状認識と復元

三次元凸物体を対象とする本手法の説明に先立ち、まずその基礎となる二次元平面上の凸物体の形状を認識する方法について述べる。我々は二次元凸物体の形状認識と復元手法として、ドロネー三角形分割を用いた手法[13]を提案している。これは、平面凸物体のエッジ上の点群に対して、ドロネー三角形分割を適用した際にできる、他の三角形と全ての辺を共有する三角形（以下、Tri0）の個数に着目した手法である。我々は、 $n \geq 3$  の凸  $n$  角形において、Tri0 の個数が  $n-2$  個となる性質を見出し、この性質を平面凸物体の形状認識に利用した。図 1 に、二次元における平面凸物体の形状認識の概要を示す。まず、入力平面凸物体（図 1 (a)）の輪郭上の点群を適当な間隔でサンプリングする（図 1 (b)）。次に、サンプリングした点群に対してドロネー三角形分割を適用する（図 1 (c)）。その後、生成された三角形群から Tri0 を抽出し（図 1 (d)）、その個数が  $k$  であれば、凸物体の形状は  $k+2$  角形として認識する（図 1 (d)）。

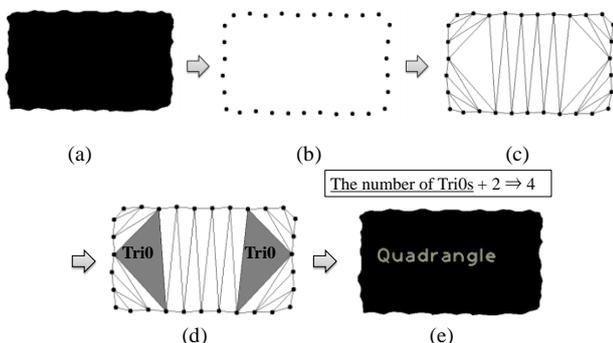


図 1 二次元凸物体の形状認識の概要。(a) 入力平面凸物体。(b) エッジ上の点群。(c) ドロネー三角形分割。(d) Tri0 の抽出。(e) 形状認識結果。

Figure 1 A brief outline of shape recognition in 2D. (a) The input plane convex object. (b) Point cloud on the edge of an object. (c) Delaunay Triangulation. (d) Classification of triangles. (e) Shape recognition result.

また、本稿での詳しい説明は割愛するが、認識結果と抽出した Tri0 を用いて、平面凸物体の形状を復元できることも確認している。図 2 に形状復元の例を示す。図 2 (a)は入力凸物体であり、ノイズに対する頑健性を検証するため輪郭上にノイズを加えている。図 2 (b)は Tri0 抽出結果である。なお、入力凸物体と形状が異なるのは、細長い形状の凸物体に対応するため、入力凸物体の輪郭を正規化（伸縮）しているためである。図 2 (c)が形状復元結果である。

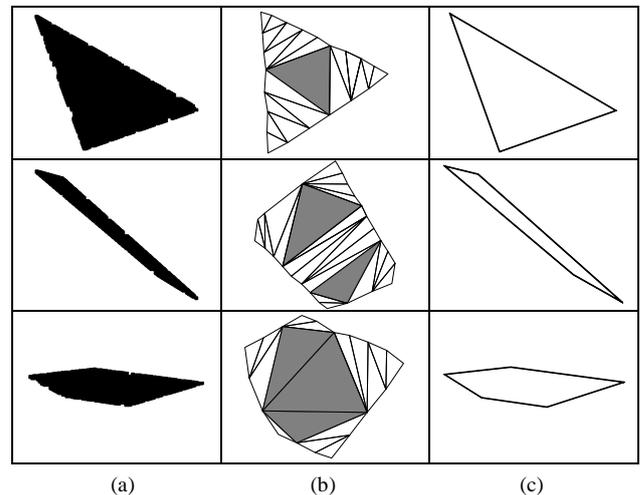


図 2 二次元における凸物体の形状復元の例。(a) 入力凸物体。(b) Tri0 抽出結果。(c) 形状復元結果。

Figure 2 Examples of shape reconstruction in 2D. (a) Input convex object. (b) Results of Tri0 Extraction. (c) Results of shape reconstruction.

## 3. 三次元凸物体の形状認識と復元への拡張

本手法は、前節にて述べた二次元凸物体に対する形状認識と復元の考え方を三次元へと拡張したものである。すなわち、三次元凸物体の表面上に配置された三次元点群に対してドロネー四面体分割を適用した際にできる、全ての面を他の四面体と共有する四面体（以下、Tet0）の個数を用いて認識を行う。ただし三次元の場合、例えば六面体という凸多面体のクラスには直方体や五角錐などが所属するように、同一面数であるが形状が大きく異なる多面体が存在し、それらにおける Tet0 の個数は異なる可能性が高い。よって本手法は、点群から直接、三次元凸物体の形状を特定の凸多面体として認識し、復元を行うものとする。

本手法による三次元凸物体の形状認識手順は、以下に示す 3 つのステップからなる（図 3）。入力は三次元計測により取得した凸物体の表面上の点群、出力は凸物体の形状（凸多面体）である。

- {Step1} ドロネー四面体分割
- {Step2} Tet0 の抽出
- {Step3} 形状認識

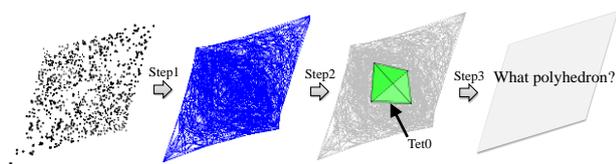


図 3 三次元凸物体の形状認識の概要.

Figure 3 A brief outline of shape recognition in 3D.

まず Step1 にて、三次元計測により取得した点群を三次元空間に配置し、ドロネー四面体分割を行う。この処理により、入力点群を頂点とした、互いに重ならない四面体群が生成される。次に Step2 では、ドロネー四面体分割により生成された四面体のうち、4つの面全てに他の四面体が隣接している四面体を Tet0 として抽出する。最後に Step3 にて、Tet0 の個数により、凸物体の形状を特定の凸多面体と判定する。

以上が本手法における三次元凸物体の形状認識方法である。なお、復元に関しては二次元の場合と同様に形状認識結果と抽出した Tet0 を用いて行うことを考えている。前述のように、本手法では Step3 にて Tet0 の個数から入力凸物体の形状を特定の凸多面体として認識するが、そのためには Tet0 の個数と特定の凸多面体との関係性が既知である必要があり、事前に調査する必要がある。次節にて、その調査結果の一部を報告する。

#### 4. 検証実験

凸多面体における Tet0 の個数を確認するため、三次元幾何学モデルを用いて実験を行う。本稿では、全 5 種の正多面体（正四面体、正六面体、正八面体、正十二面体、正二十面体）に対する実験結果を報告する。なお、本実験で用いる各幾何モデルは、三次元ユークリッド空間において頂点間の最大の距離が 1 となる大きさとする。実験手順を図 4 に示す。まず、幾何モデルの各面上にランダム点を  $p$  個発生させ、疑似的に三次元点群を生成する。次に、生成した点群に対して、ドロネー四面体分割を適用する。この時、図 5 中黒色にて示されているような、厚みが小さい四面体（以下、TetS）が生成されることがある。我々はこの TetS を四面体分割におけるノイズと考え、Tet0 抽出前に除去する操作を行うとした。本実験では、各四面体における体積/表面積（表面積に対する体積の大きさ）を算出し、その大きさが実験的に求めた閾値 0.002 以下の四面体を TetS として除去した。その後、各四面体に対して、他の四面体と共有する面の数の調査を行い、全ての面を他の四面体と共有する（すなわち、共有面の数が 4 の）四面体を Tet0 として抽出する。最後に、Tet0 の総数を算出する。本実験では、 $p = 100, 500, 1000$  の各条件下にて、上記操作を各モデルに対

して 1000 回ずつ実施した。以降、各正多面体における実験結果と考察を述べる。

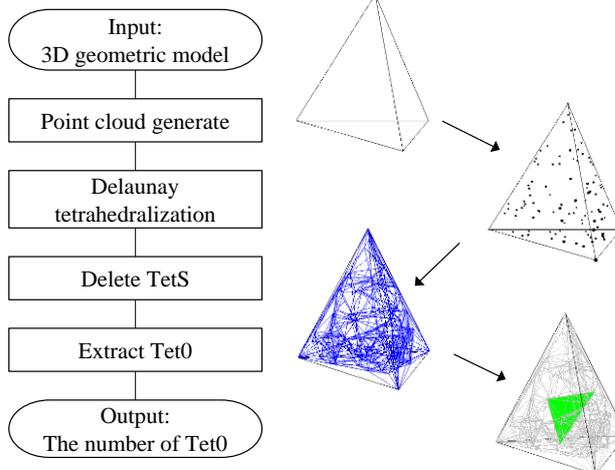


図 4 検証実験の手順.

Figure 4 Experimental procedure.

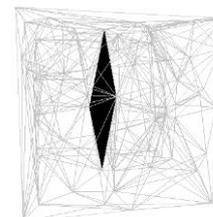


図 5 TetS の例.

Figure 5 Example of TetS.

##### 4.1 正四面体

$p = 100, 500, 1000$  の各条件下での全試行において、正四面体における Tet0 の個数は 1 となった。図 6 に、正四面体における Tet0 の抽出例を示す。

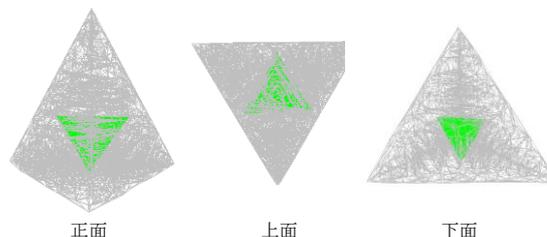


図 6 正四面体における Tet0 抽出結果の例 ( $p = 1000$ ).

Figure 6 An example of extraction result of Tet0 in regular tetrahedron ( $p = 1000$ ).

##### 4.2 正六面体

正六面体に対する実験結果を図 7 に示す。 $p = 100$  という点群数が少ない条件下では Tet0 の個数に多少の変動があるものの、 $p = 500$  以上であれば、正六面体における Tet0 の個数が一定の値となることが分かった。図 8 に、正六面体における Tet0 の抽出例を示す。

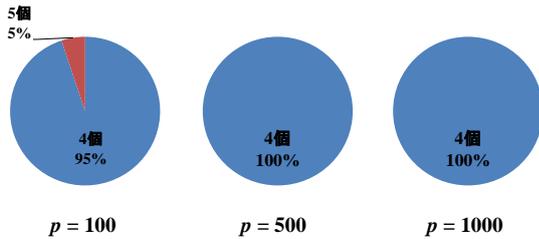


図 7 正六面体における Tet0 の個数.

Figure 7 The number of Tet0s in regular hexahedron.

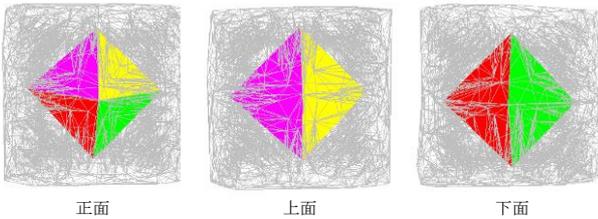


図 8 正六面体における Tet0 抽出結果の例 ( $p = 1000$ ).

Figure 8 An example of extraction result of Tet0 in regular hexahedron ( $p = 1000$ ).

#### 4.3 正八面体

正八面体に対する実験結果を図 9 に示す. 点群数が少ない場合は Tet0 の個数が定まらない状態となるが, 点群数が増えるに従い Tet0 の個数が一定の値に近づくことが確認できた. 図 10 に, 正八面体における Tet0 の抽出例を示す. なお, 本実験では点群数  $p$  の上限を 1000 としたが,  $p > 1000$  の条件下で Tet0 の個数が収束するのかわを確認する必要がある.

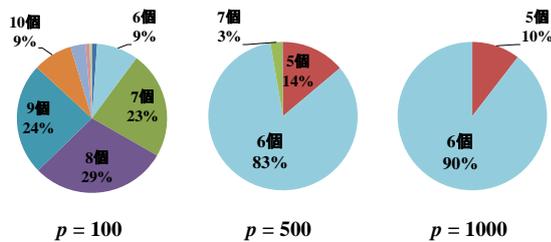


図 9 正八面体における Tet0 の個数.

Figure 9 The number of Tet0s in regular octahedron.

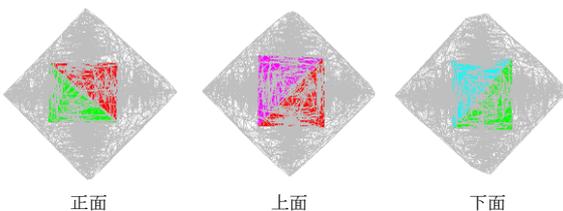


図 10 正八面体における Tet0 抽出結果の例 ( $p = 1000$ ).

Figure 10 An example of extraction result of Tet0 in regular octahedron ( $p = 1000$ ).

#### 4.4 正十二面体

正十二面体に対する実験結果を図 11 に, Tet0 抽出例を図 12 に示す. 正四面体, 正六面体および正八面体の実験結果とは異なり,  $p = 1000$  の条件下においても正十二面体では Tet0 の個数がある値に急速に収束する傾向は見られなかった. ただし, 点群数が増えるに従い Tet0 の個数が 16 となる割合が少しずつではあるが大きくなっているため,  $p > 1000$  の条件下における Tet0 の個数を調査する必要がある. また,  $p > 1000$  で Tet0 の個数が収束しない場合でも, 正十二面体における Tet0 の個数は 9 割以上の割合で 16 もしくは 17 となることから, 少なくとも Tet0 の個数を形状推定に用いることは可能であると考えられる.

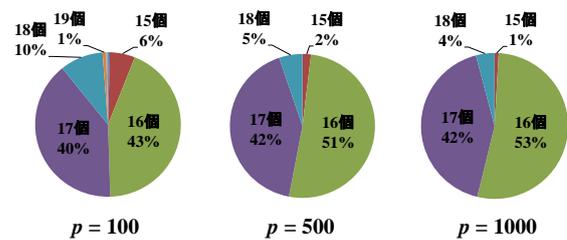


図 11 正十二面体における Tet0 の個数.

Figure 11 The number of Tet0s in regular dodecahedron.

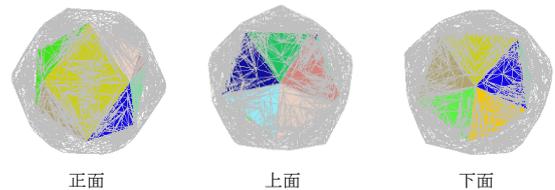


図 12 正十二面体における Tet0 抽出結果の例 ( $p = 1000$ ).

Figure 12 An example of extraction result of Tet0 in regular dodecahedron ( $p = 1000$ ).

#### 4.5 正二十面体

正二十面体に対する実験結果を図 13 に, Tet0 抽出例を図 14 に示す. 正二十面体においても正十二面体と同様に, Tet0 の個数の一定値への収束は見られなかった. また,  $p = 1000$  の条件下にて, 正十二面体では Tet0 の個数が 2 通りになる割合が大きかったのに対して, 正二十面体では 24, 25, 26 の 3 通りとなることが分かった. この結果より, 入力凸物体の面数が増えるほど, Tet0 の個数のパターンも増加する可能性があると考えられるため, この点についても調査する必要がある. また, 正十二面体も同様であるが, Tet0 の個数が一定の値に収束しない原因の調査も必須となる.

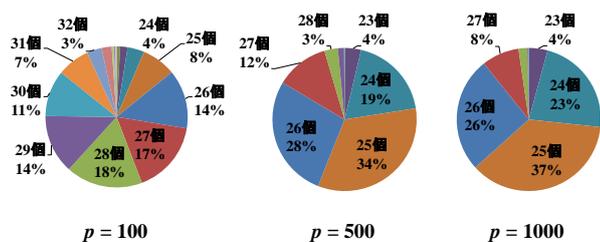


図 13 正二十面体における Tet0 の個数.

Figure 13 The number of Tet0s in regular icosahedron.

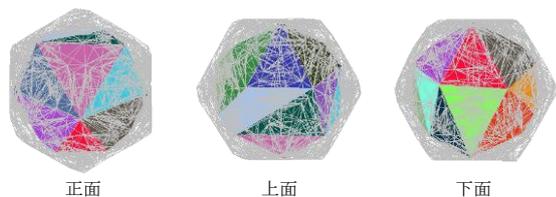


図 14 正二十面体における Tet0 抽出結果の例 (p = 1000).

Figure 14 An example of extraction result of Tet0 in regular icosahedron (p = 1000).

#### 4.6 実験のまとめ

実験の結果、点群数の上限を 1000 個とした条件下では、与える点群の数が増加するに従い、各正多面体における Tet0 の個数は表 1 に記載の値へと収束すること、正四面体、正六面体および正八面体においては 9 割以上の割合で Tet0 の個数は一定となるが、正十二面体および正二十面体では一定とならないことが明らかとなった。ただし、より点群数を増やした追加実験を行い判断する必要がある。

表 1 正多面体の頂点、辺、面の数と Tet0 の個数一覧。

Table 1 List of the number of vertices, edges, faces, and Tet0s in regular polyhedron.

名称	頂点数	辺数	面数	Tet0 の個数
正四面体	4	6	4	1
正六面体	8	12	6	4
正八面体	6	12	8	6
正十二面体	20	30	12	16 or 17
正二十面体	12	30	20	24 or 25 or 26

#### 5. まとめ

三次元計測により取得した三次元点群から、ドロネー四面体分割を用いて直接凸物体の形状認識と復元を行う新たな手法の概念と、本手法の確立に向けて行った単純な凸多面体の CG モデルを用いた検証実験について述べた。本実験の結果では、凸多面体と Tet0 の個数の間に一対一の対応関係は見られなかったが、Tet0 の個数により所属する凸多面体のクラスを認識できる可能性が示された。

今後は、まず前述の通り、より点群数を増やした正多面体に対する実験を行い、引き続き Tet0 の個数を検証する。また同時に、正多面体以外の様々な凸多面体における Tet0 の個数の調査を行い、本手法の確立可能性や利用方法の検討を行う。また、本稿では簡単な説明をするに留めたが、三次元形状復元に関しても二次元の方法の三次元への拡張を検討する。その後、実物体を三次元計測して得た点群を用いて形状の認識、および復元の実験を行い、その精度を検証する。

#### 参考文献

- [1] BESL P. J. "Three-dimensional object recognition", ACM Computing Surveys 17(1), 75-145, 1985.
- [2] H. Lee, D. Sim, and R. Park, "ONE-DIMENSIONAL SIGNATURE REPRESENTATION FOR THREE-DIMENSIONAL CONVEX OBJECT RECOGNITION", IJCGA, Vol.3, No.2, April 2013.
- [3] Selinger, A. and R. Nelson: 1999, A Perceptual Grouping Hierarchy for Appearance-Based 3D Object Recognition. Computer Vision and Image Understanding 76(1), 83-92.
- [4] J. Bielicki, R. Sitnik, "A method of 3D object recognition and localization in a cloud of points", EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2013.
- [5] Murase, H. and S. K. Nayar: 1995, Visual Learning and Recognition of 3-D Objects from Appearance. International Journal of Computer Vision 14, 5-24.
- [6] Rothganger, F; S. Lazebnik, C. Schmid, and J. Ponce: 2004. 3D Object Modeling and Recognition Using Local Affine-Invariant Image Descriptors and Multi-View Spatial Constraints, ICCV.
- [7] P. J. Besl and N. D. McKay, "A Method for Registration of 3-D Shapes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Vol.14 No.2 (1992. 2) pp239-256.
- [8] H. Fukai, J. Takagi, and G. xu, "Robust and Fast 3D Object Recognition by Exhaustive Matching of Range Data", IEICE Technical Report, PP. 429-434, January 2011.
- [9] M. Hofer, B. Odehnl, H. Pottmann, T. Steiner, J. Wallner, "3D shape recognition and reconstruction based on line element geometry", Tenth IEEE International Conference on Computer Vision, 2005.
- [10] H. Potmman, S. Leopoldseeder, J. Waller, M. Peternell, "RECOGNITION AND RECONSTRUCTION OF SPECIAL SURFACES FROM POINT CLOUDS", Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIV, part 3A, commission III:271-276, 2002.
- [11] Øyvind Hjellev, Morten Dæhlen: "Triangulations and Applications", Springer, Berlin, 2006.
- [12] H. L, "Computing the 3D Voronoi Diagram Robustly: An Easy Explanation", 4th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering (ISVD 2007).
- [13] S. Abe, H. Mori, F. Toyama, K. Shoji, "Shape Recognition of Plane Convex Objects Using Delaunay Triangulation", Society for Science on Form, Vol.28, No.1, pp58-59, 2013.