

平成 30 年度卒業論文

複数の 2 次曲面で構成された物体の
3 次元モデリングと整形

宮崎大学 工学部 情報システム工学科

宮本 遥

指導教員 椋木雅之

目次

1	はじめに.....	2
2	3次元モデリング.....	3
2.1	3次元モデリングとは	3
2.2	従来の3次元モデリング手法.....	3
2.3	複数曲面で構成された物体の3次元モデリング.....	4
3	3次元モデリングの処理.....	5
3.1	処理手順.....	5
3.2	点群を近似する平面の推定.....	5
3.3	推定曲面での分割.....	7
3.4	2次曲面上への投影.....	8
3.5	3角面の生成.....	9
3.6	2次曲面と点群との距離.....	10
4	実験.....	12
4.1	実験手順.....	12
4.2	2つの円柱の3次元モデリング.....	12
4.3	円柱と球の3次元モデリング.....	17
5	おわりに.....	21
	謝辞.....	22
	参考文献.....	22

1 はじめに

近年、個人向け 3D プリンターの普及や企業による 3D プリント委託事業、コンピュータの高性能化によって、個人でも 3 次元データを扱う機会が増加している。

3D プリンターの利用方法のひとつとして、器や機械の部品などの現実に存在する物体の再現が挙げられる。3 次元スキャナ等で実物体の形状データを取得し、3 次元モデルを作成して 3D プリンターに与えることで、実物体を再現できる。形状データは、3 次元点群で取得されることが多い。実物体の形状データを 3D プリンターで利用するには、3 次元点群から、面で構成された 3 次元モデルを作成する 3 次元モデリングを行う必要がある。また、取得した形状データには少なからずノイズが含まれており、再現を行うためには元々の物体に沿ったデータに整形する必要がある。

3 次元点群から 3 次元モデリングを行う研究はいくつかあるが、形状計測時のノイズを考慮していないものが多い。本論文の先行研究である[1]では、平面で構成された実物体の 3 次元点群に対して、3 次元モデリングと整形を行っているが、実物体が曲面で構成されている場合は対処できない。そこで本研究では、複数の曲面で構成された物体の点群に対して、ノイズを低減した 3 次元モデルを生成する手法を提案する。

2 3次元モデリング

2.1 3次元モデリングとは

本研究では、点群からサーフェイスモデルの作成を行うことを3次元モデリングとする。サーフェイスモデルは広く用いられている3次元形状データの表現方法で、3次元空間上の点、点同士をつなぐ線分、複数の線分によって構成される面で構成される。

また、最終的な形として求められる3次元モデルは、ノイズの影響が少ない過度な凹凸がない3次元モデルである。本研究においては、3次元モデリングの際にサーフェイスモデルの表面上の凹凸が低減されるよう調整することを整形とする。

2.2 従来の3次元モデリング手法

3次元モデリングの手法として、点群に対してサーフェイスを作成するものがある。Bras-Mehlmanら[2]は、点群を三角形の網状に繋ぐことで3次元モデルを作成している。LorenzenとCline[3]は、点群を格子状に区切ったボクセルとしたのち、点の密度の等値面を繋いで3次元モデルを作成している。これらの手法で点群から3次元モデルを作成することは可能ではあるものの、計測時のノイズの入った3次元モデルとなってしまうおそれがある。二宮[1]は平面で構成された物体に対して3次元モデリングと整形を行っているが、曲面で構成された物体の3次元モデリングは行っていなかった。

2.3 複数曲面で構成された物体の 3 次元モデリング

本研究では複数の曲面で構成された物体の 3 次元モデリングと整形の手法を提案する。計測したデータから 3 次元モデリングを行う際、すべての点が元々の物体から取得される事は稀であり、ノイズが含まれることが大半である。また、ノイズの影響で曲面同士が接する部分の境界が曖昧になりやすい。よって本研究では、ノイズを含んだ点群から、3 次元モデリングを行うと同時にノイズの影響を抑える整形処理を行う。

本研究では、物体を構成する曲面を 2 次曲面と仮定する。点群に最もよく当てはまる 2 次曲面のパラメータを順次求めることで、物体を近似する。また、得られた 2 次曲面上に点群を投影することで、ノイズの影響を抑える。そうして得られた点群に面をはることで、3 次元モデルを生成する。

3 3次元モデリングの処理

3.1 3次元モデリングの処理

3次元モデリングを行うために以下の手順で処理を行う。

- ① 点群を近似する曲面の推定
- ② 推定曲面での分割
- ③ 2次曲面上への投影
- ④ 3角面の生成

3.2 点群を近似する曲面の推定

点群から、物体を構成する曲面を取得するため、RANSAC アルゴリズム [4] を用いて、近似曲面を推定する。

RANSAC とは、Random Sample Consensus の略であり、構成の単純さから、コンピュータビジョン技術として広く活用されている。自然界から取得されたデータには、ノイズが含まれることがほとんどである。データ内にノイズが含まれていると、データの法則性や規則性を見出す障害となりうる。データのノイズの内、想定内の誤差のものをインライア、想定外の誤差のものをアウトライアもしくは外れ値と呼ぶ。このアウトライアによる悪影響を低減する手法としてロバスト推定が存在し、RANSAC アルゴリズムはその1種である。

一般的な RANSAC アルゴリズムは以下の手順で行われる

1. 計測されたすべてのデータからランダムに少数のサンプルを抽出し、パラメータを求める。
2. 求めたパラメータを用いて、すべてのデータを式に当てはめて誤差を計算し、誤差が許容範囲内となるデータ数をカウントする。
3. 1, 2 を一定回数繰り返し、カウントされたデータ数が最大のときのパラメータを仮パラメータとして、誤差が許容範囲内となるデータを抽出する。
4. 抽出したデータをもとに最小二乗法などを用いて、最終的なパラメータを決定する。

本手法では、複数の曲面を順次推定する。ある曲面を推定する場合、他の曲面は外れ値とみなせる。本手法における曲面推定法の流れを図 1 に示す。

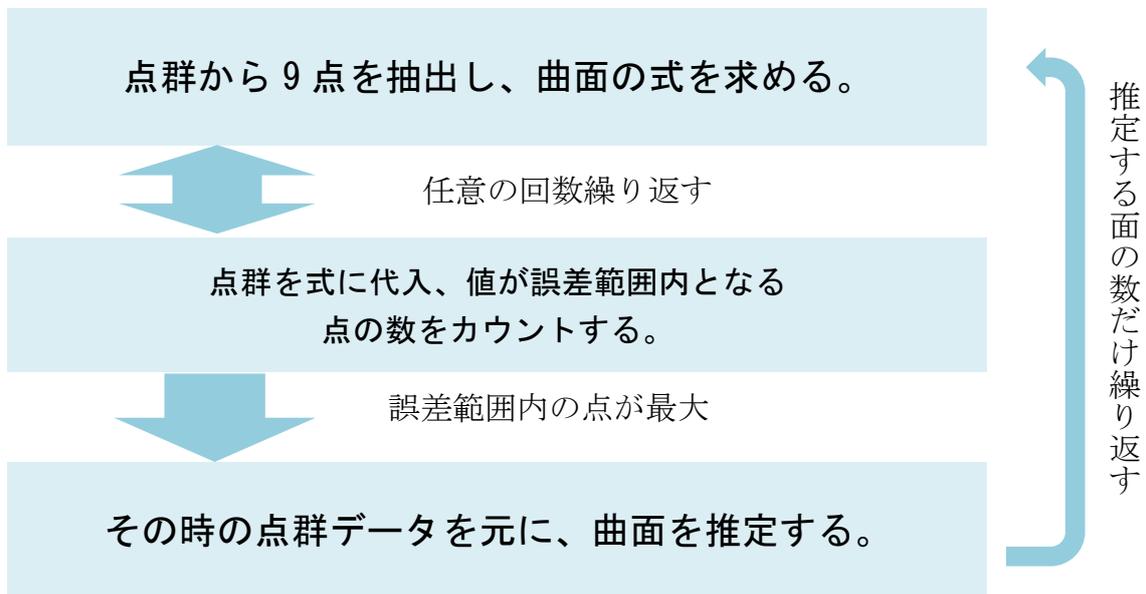


図1. 本手法における曲面推定の流れ

3次元点群のデータから、9点の座標をランダムに抽出し曲面のパラメータを求める。求めた曲面と点群内の各点との距離を求めた後、その値が閾値 ϵ_p 以下となる点を求めた曲面上の点と扱う。この処理を本研究では10000回繰り返し、得られた曲面の中で、曲面上の点の数が最大となる推定曲面を求める。推定曲面上の点を用いて、最小2乗法で2次曲面のパラメータを再度求め、推定曲面のパラメータとする。

元の3次元点群から推定曲面上の点を削除し、残りの点群に対して再度推定を行う。物体を構成する曲面の数だけこの処理を繰り返すことで、点群を近似する複数の推定曲面のパラメータを求める。

3.3 推定曲面での分割

前節では3次元点群を推定曲面上に逐次分割していたため、各点が最も近い推定曲面上にあると判定されていない場合がある。よって、物体を構成する曲面の数だけ推定曲面が得られた後、点群の各点について各推定曲面との距離を計算し、最も近い推定曲面に分類する(図2, 3)。

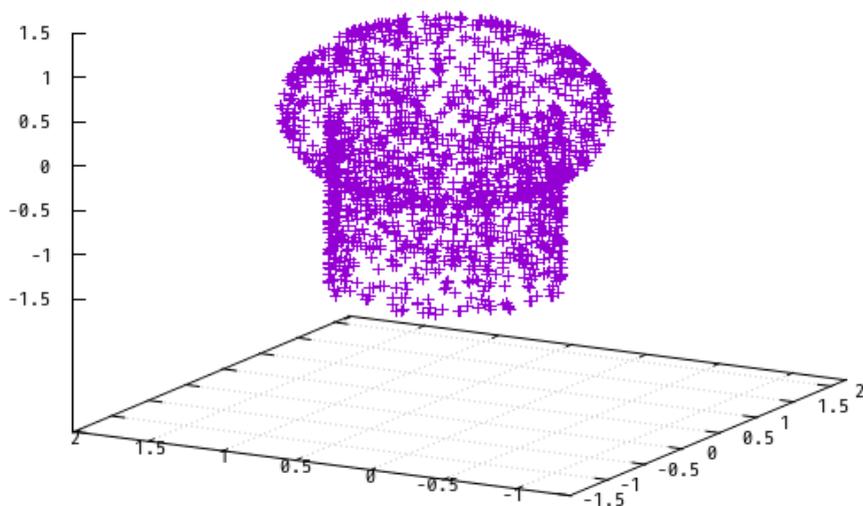


図2. 分割前の点群

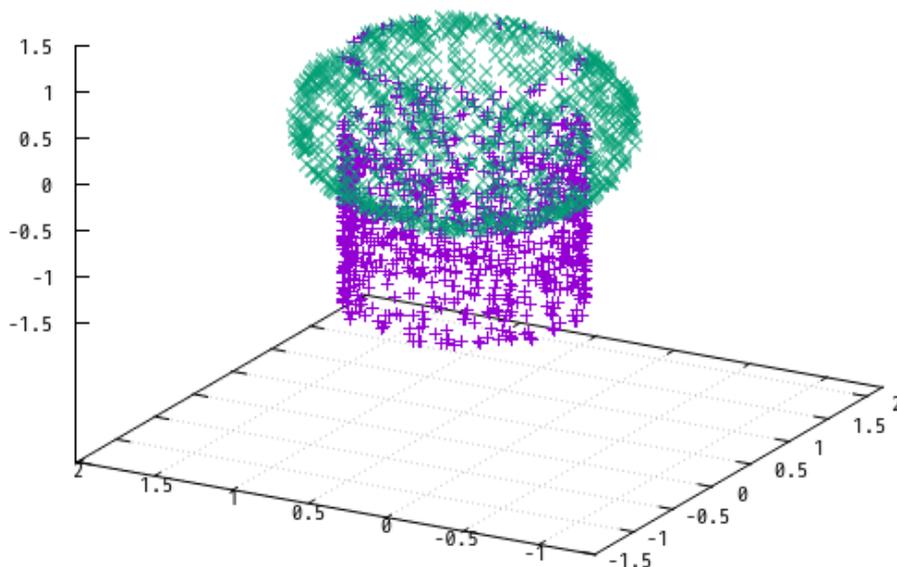


図3. 分割後の点群

3.4 2次曲面上への投影

推定曲面毎に、分割された各点を推定曲面上に投影する。これによって、点群はいずれかの推定曲面上に移動するため、ノイズによる凹凸を軽減できる(図4, 5)。

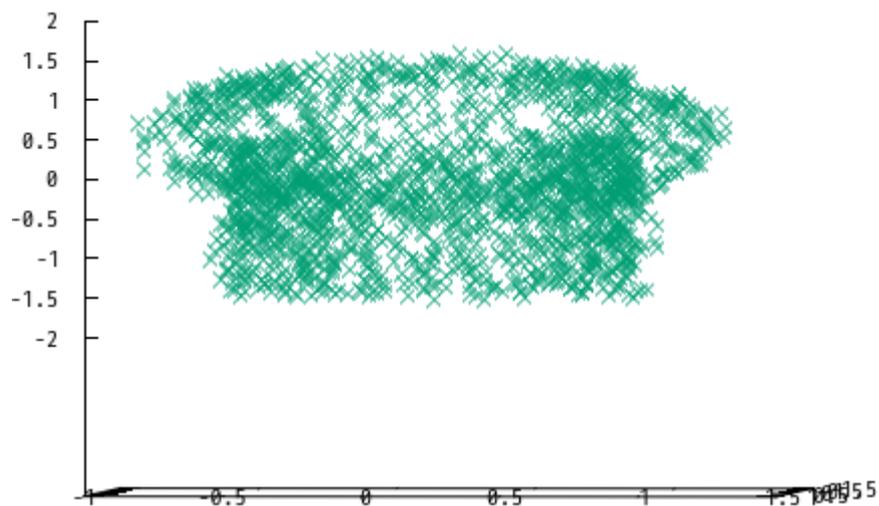


図4. 投影前の点群

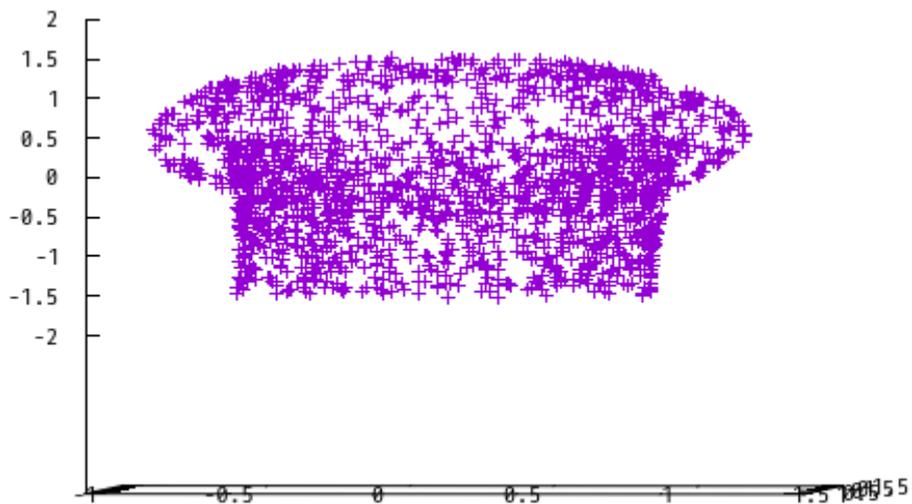


図5. 投影後の点群

3.5 3角面の生成

3次元点群データを球面に投影し、投影した平面上で2次元のDelaunay法[1]を用いて3角面を構成する。球面に投影するため、物体の重心を座標の原点に定める。また球面座標 (θ, φ) 上に投影した際に、適切な3角面を構成するように各軸は正規化されているとする。

まず、3次元空間上の物体を形成する*i*番目の点 (x_i, y_i, z_i) を、球面の座標 (θ_i, φ_i) で表す。

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{z_i}, \quad \varphi_i = \tan^{-1} \frac{y_i}{x_i}$$

ここで、 φ_i は $[-\pi, \pi]$ の値を取るが、3次元空間では $\varphi_i = -\pi$ と $\varphi_i = \pi$ は同じ位置を表しているため、 $\varphi_i = -\pi$ 付近に投影された点を $\varphi_i = \pi$ 付近に、 $\varphi_i = \pi$ 付近に投影された点を $\varphi_i = -\pi$ 付近にも投影する。続いて、この面に対してDelaunay法により3角面を作成する。この際に、 $\varphi_i = \pi, -\pi$ 付近の重複した点は削除する。この処理によって構成された点の接続関係を、3次元空間の点群にあてはめることによって3角面の構成を行う。

3.6 2次曲面と点群の距離

3.2節から3.4節の処理において、3次元点群の点 $(\alpha_j, \beta_j, \gamma_j)$ に対して最小距離を持つ2次曲面上の点 (x_j, y_j, z_j) を求める必要がある。以下に概略を示す。

2次曲面の式を

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + dxy + eyz + fzx + gx + hy + iz - 1 = 0$$

と置く。a~iが2次曲面のパラメータである。

$$A = \begin{pmatrix} a & \frac{d}{2} & \frac{e}{2} \\ \frac{d}{2} & b & \frac{f}{2} \\ \frac{e}{2} & \frac{f}{2} & c \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} g \\ h \\ i \end{pmatrix}$$

と置くと2次曲面の式は2次形式を用いて、

$$(x \ y \ z)A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + B^T \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - 1 = 0$$

と書ける。行列Aに対して座標系回転によって対角化を行うことでd,e,fを0にできる。

この時、 (x_j, y_j, z_j) を求めるには、ラグランジュの未定乗数法を用いて次式を最小にすればよい。

$$f_j(x, y, z, \lambda) = (x - \alpha_j)^2 + (y - \beta_j)^2 + (z - \gamma_j)^2 + \lambda(ax^2 + by^2 + cz^2 + gx + hy + iz - 1)$$

$f_j(x, y, z, \lambda)$ を x, y, z, λ それぞれで微分したものを0とすると、

$$2(x - \alpha_j) + \lambda(2ax + g) = 0$$

$$2(y - \beta_j) + \lambda(2by + h) = 0$$

$$2(z - \gamma_j) + \lambda(2cz + i) = 0$$

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + gx + hy + iz - 1 = 0$$

を得る。この連立方程式の解 (x_j, y_j, z_j) が求める2次曲面上の候補点である。 $\lambda \neq -1/g, \lambda \neq -1/h, \lambda \neq -1/i$ と仮定すると、

$$x = \frac{2\alpha_j - g\lambda}{2(1 + a\lambda)}, \quad y = \frac{2\beta_j - h\lambda}{2(1 + b\lambda)}, \quad z = \frac{2\gamma_j - i\lambda}{2(1 + c\lambda)}$$

が得られる。これを $ax^2 + by^2 + cz^2 + gx + hy + iz - 1 = 0$ に代入すると λ の方程式となる。この方程式をニュートン法により解くことで (x_j, y_j, z_j) の値が定まる。

4 実験

提案手法による3次元モデリングによって、モデルが作成可能かどうかの確認、および整形の効果を確認するために、合成した3次元点群に対して3次元モデリングする実験を行った。

4.1 実験手順

既知のパラメータを持つ2次曲面上の点群を生成し、3次元モデリングを行う。点群はノイズなし、分散0.05、0.1の正規分布ノイズを加えたものの3パターンを生成する。これらに対して、提案手法で3次元モデリングと整形を行う。RANSACアルゴリズムに用いる閾値 ϵ_p は0.001,0.01,0.05,0.1,0.2の計5つを用いた。

比較のため整形を行わず、3次元点群に直接3角面を生成した結果も示す。

4.2 2つの円柱の3次元モデリング

円柱形の2つの点群モデルを重なるよう交差させたモデルに対して3次元モデリングと整形を行った。物体の点群の総点数は1386点となった。用いた3次元点群を図8から図10に示す。また、3次元モデリングの結果を図11から図14に示す。

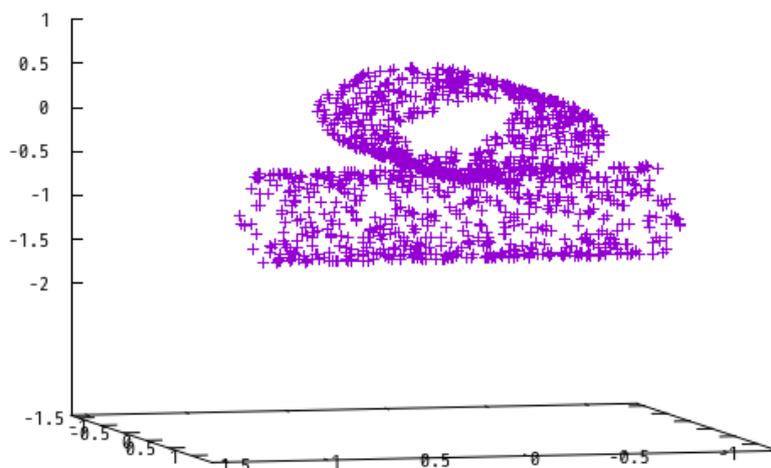


図8. 合成した3次元点群

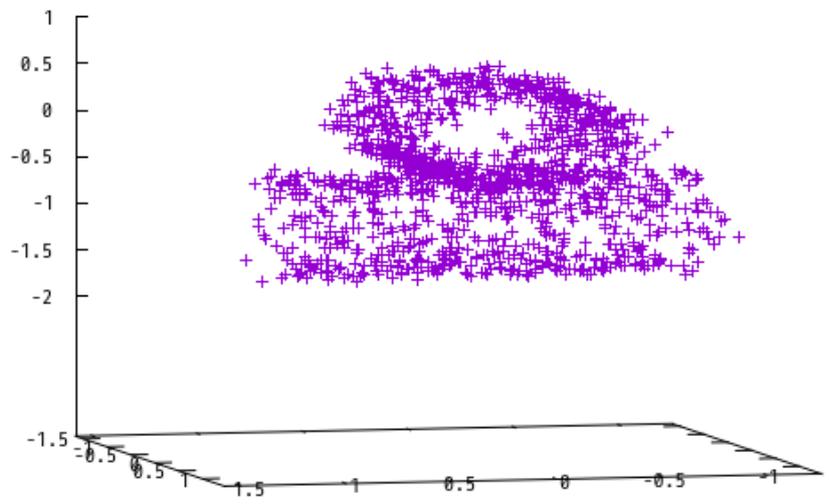


図 9 . 分散 0.05 による正規分布ノイズを加えた点群

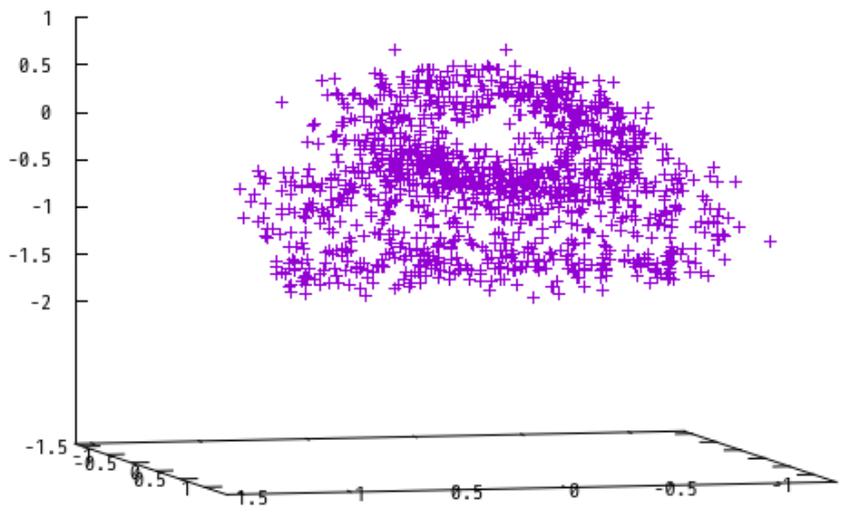


図 10 . 分散 0.1 による正規分布ノイズを加えた点群

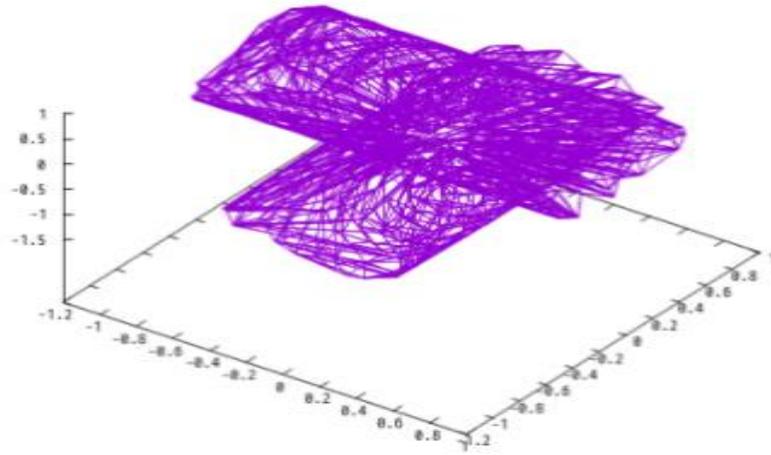


図 11 . ノイズなしの点群に対しての 3 次元モデリング

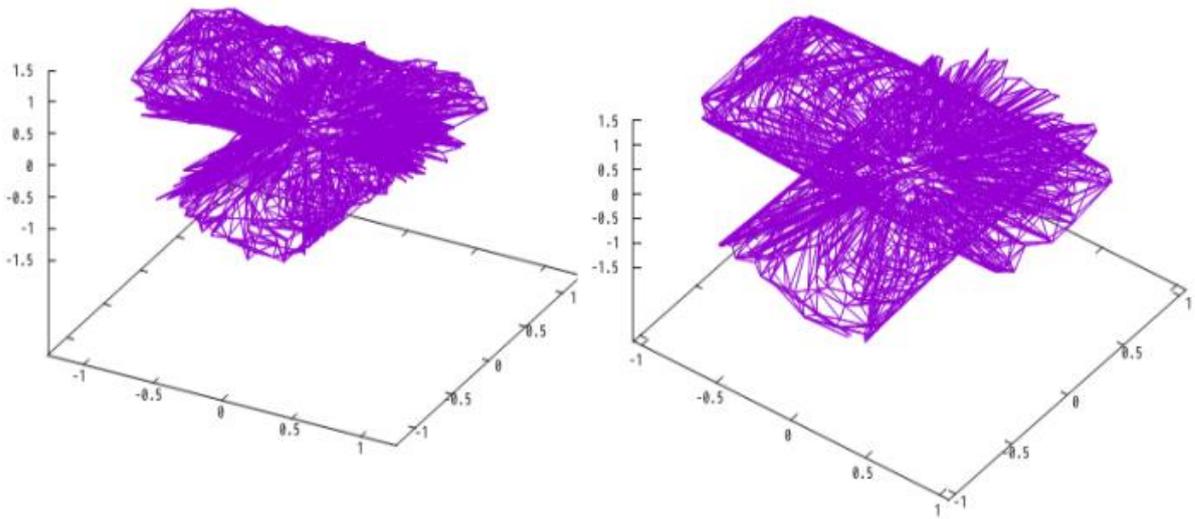


図 12 . 分散 0.05 のノイズにおける結果(左: 手法未適用 右: 閾値 $\epsilon_p = 0.01$)

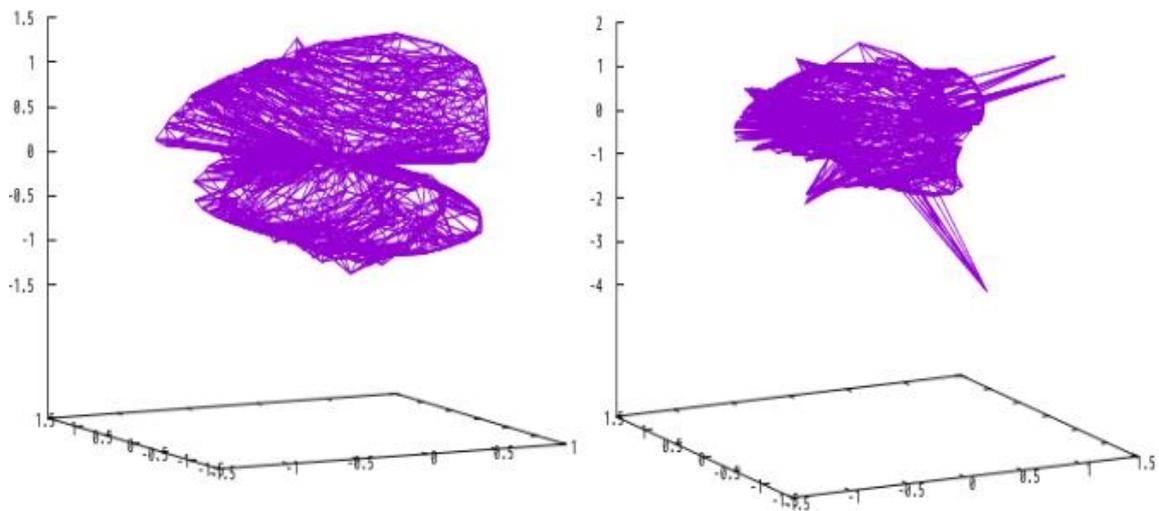


図 13. 分散 0.05 のノイズにおける結果(左: 閾値 $\epsilon_p = 0.05$ 右: 閾値 $\epsilon_p = 0.1$)

表 1. ノイズ 0.05 における、閾値別の推定パラメータ (円柱部の一部を抜粋)

	a	b	c	g	h	i
正解値	0.000	4.000	4.000	0.000	0.000	0.000
0.001	0.157	4.128	4.250	0.075	-0.201	-0.063
0.01	0.087	3.779	3.869	-0.015	0.050	0.027
0.05	0.725	2.542	0.661	0.205	-0.013	0.657
0.1	1.182	1.625	0.541	0.178	0.069	0.398
0.2	4.911	2.431	1.183	0.188	0.068	0.046

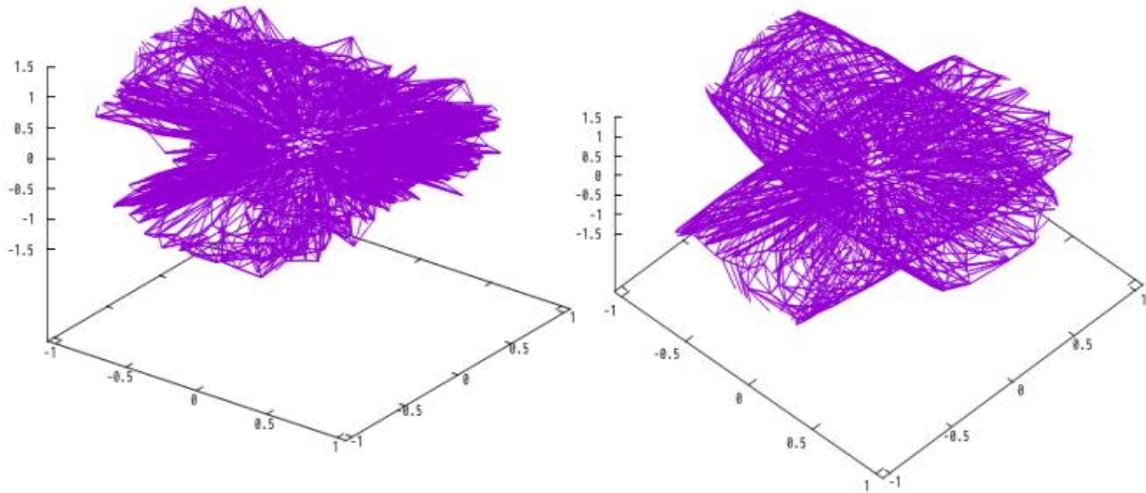


図 14. 分散 0.1 のノイズにおける結果(左: 手法未適用 右: 閾値 $\epsilon_p = 0.01$)

図 11 は、ノイズがない点群に対して手法を適用したモデルである。この場合では、RANSAC により正しいパラメータが得られた。図 12, 図 13 は、分散 0.05 の正規分布ノイズを加えた場合である。RANSAC のパラメータが $\epsilon_p = 0.01$ (図 12) では、円柱に近い 2 次曲面のパラメータが得られたが、 $\epsilon_p = 0.05, 0.1$ (図 13) では、円柱から外れた 2 次曲面となった。これは、RANSAC の閾値が大きくなったことで、別の曲面の点を含むパラメータで多く点が取得されてしまったためと考えられる。表 1 に RANSAC の閾値別の得られたパラメータを示す。 ϵ_p の値によりパラメータの推定結果が大きく異なることがわかる。ノイズのある場合には、RANSAC の閾値を適切に定める必要がある。

図 12 の左は、分散 0.05 の正規分布ノイズを加えた点群に直接 3 角面の生成を行った結果である。図 12 の左右を比較すると、手法適用前のモデルではノイズの影響によって凹凸が強く表れたが、手法適用後は整形の効果によりなめらかな曲線を描いており、整形は成功したと言える。

3 角面の生成については、図 12 右図で顕著であるように、円柱端に凹凸が見られ、このような図形に対して Delaunay 法による 3 角面生成は向いていないことが分かる。

図 14 ではより誤差が大きい分散ノイズ 0.1 の正規分布ノイズの場合の処理結果を示している。パラメータ推定では正解値とは別の結果が得られているが、整形についてはノイズが 0.05 の結果と同様に滑らかな曲面を得ることができた。

4.3 円柱と球の3次元モデリング

球状のモデルに円柱のモデルを貫いたような点群モデルに対して前節と同様に3次元モデリングと整形を行った。物体の点群の総点数は1526点である。用いた3次元点群を図15から図17に示す。また、3次元モデリングの結果を図18から図22に示す。

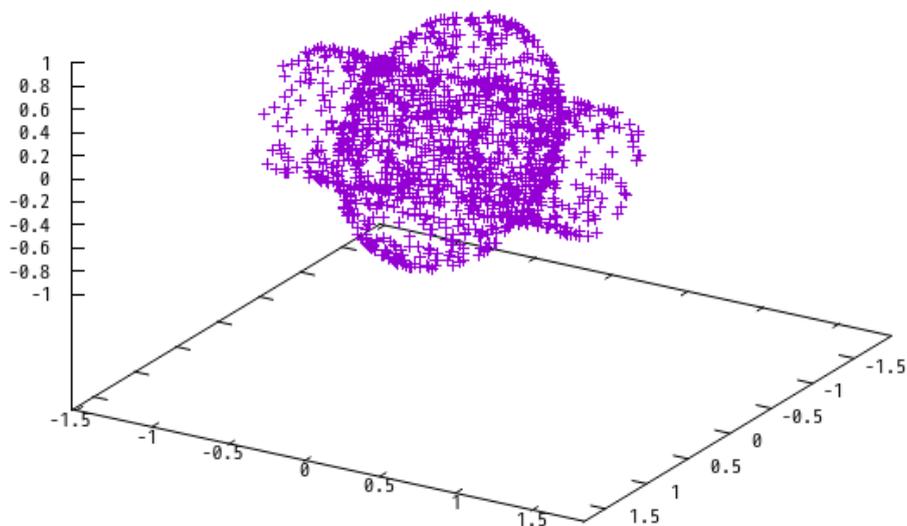


図15. 合成した3次元点群

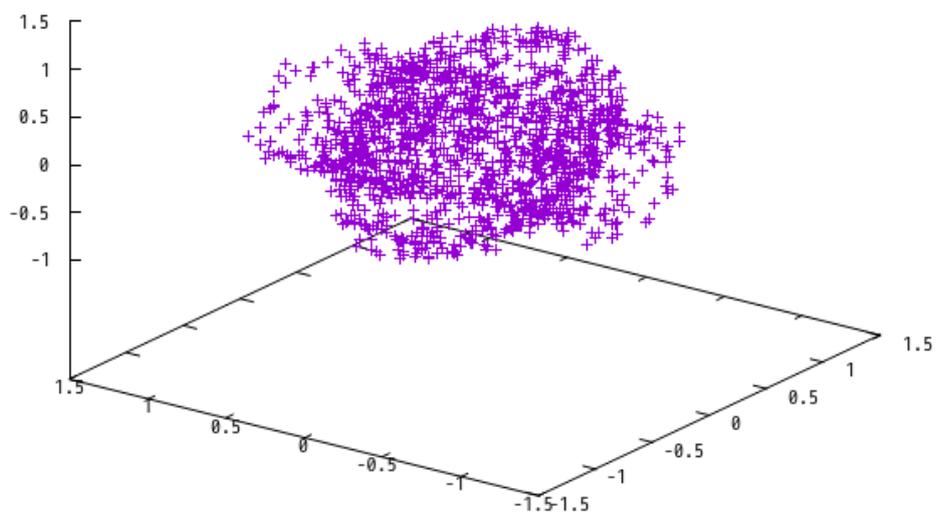


図16. 分散0.05による正規分布ノイズを加えた点群

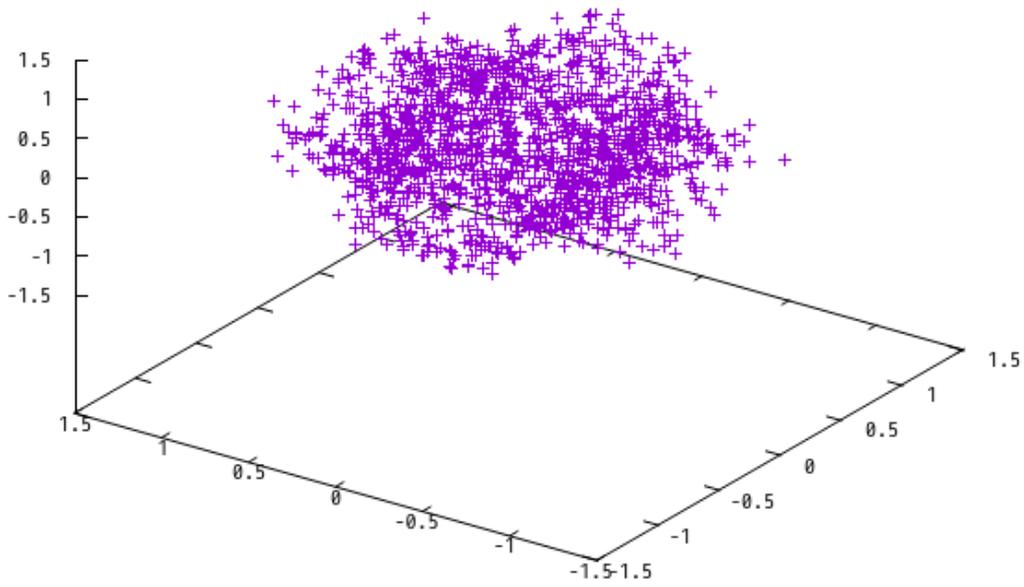


図 17. 分散 0.1 による正規分布ノイズを加えた点群

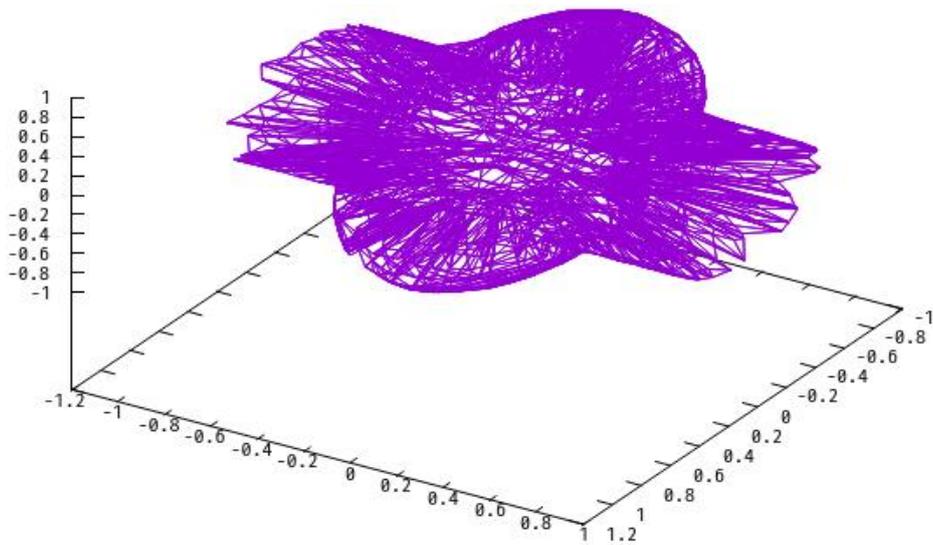


図 18. ノイズなしの点群に対しての 3 次元モデリング

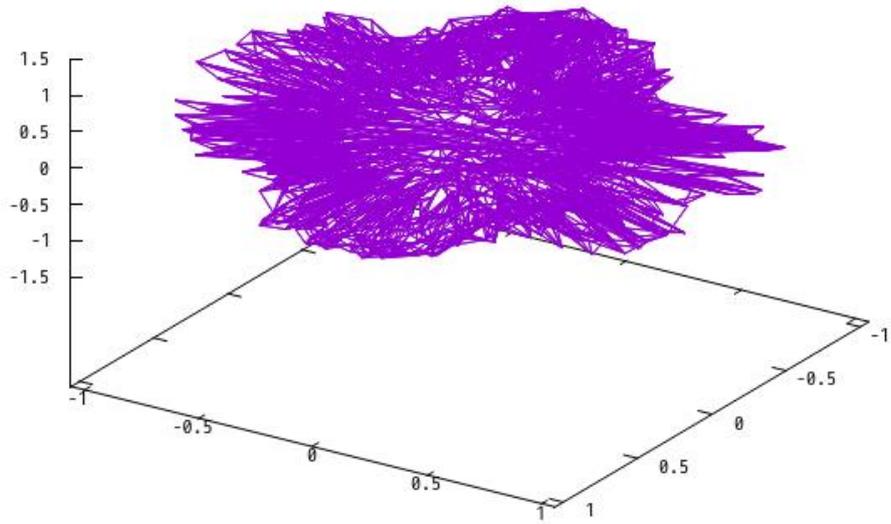


図 19. 点群に分散 0.05 による正規分布ノイズを加え、3 角面を生成したモデル。

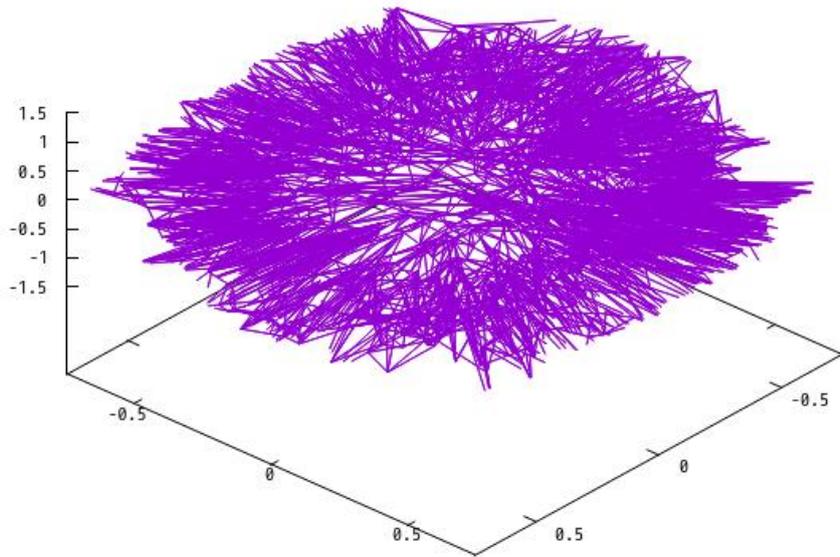


図 20. 点群に分散 0.1 による正規分布ノイズを加え、3 角面を生成したモデル。

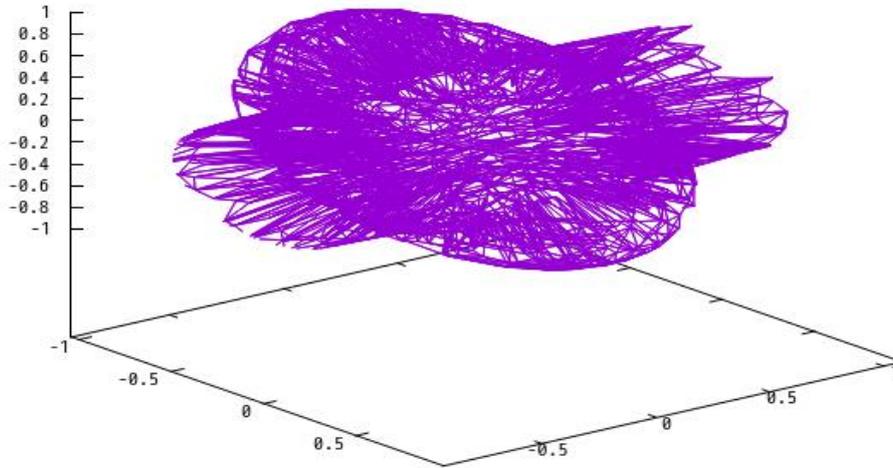


図 21 . 分散 0.05 のノイズにおける結果(閾値 $\varepsilon_p = 0.01$)

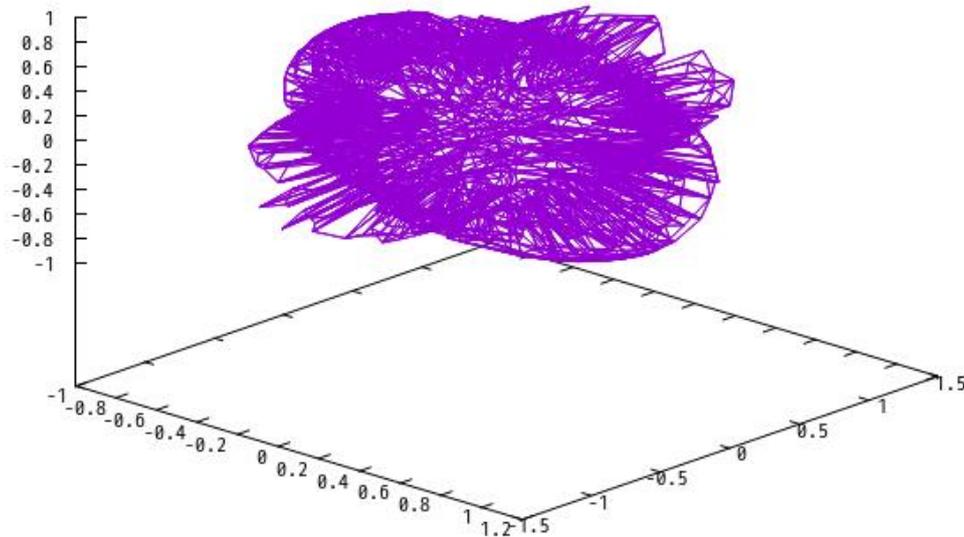


図 22 . 分散 0.1 のノイズにおける結果(閾値 $\varepsilon_p = 0.01$)

図 20 では 2 次曲面のパラメータ推定の点においては円柱と推定すべき曲面を楕円体様に推定してしまっているものの、図 19 と図 20 を比較すると整形の効果によってノイズの影響を大きく低減したなめらかな曲面を得られた。3 角面の当てはめに関しては、円柱の円側から見た中心を重心と定めたため、球と円柱の両方の点を採用した 3 角面が生成されている。このため、このモデルに対しては、4.2 節同様 Delaunay 法による 3 角面生成には向いていないことが分かる。

5 おわりに

本研究では、複数曲面で構成された物体の3次元モデリングを行った。2次元面上の点にノイズを加えて合成した3次元点群に提案手法を適用する実験を行い、本手法がノイズの影響を低減可能であることを示した。

提案手法では、RANSACの閾値と分散ノイズの大きさが結果が大きく変わることが示された。分散ノイズとRANSAC閾値の2つの数値の影響を考察し、関係を明らかにすることが今後の課題である。

謝辞

最後に、本研究を行うにあたり実験に関するアドバイスや、論文を始めとする研究全般に関するご指導を頂いた指導教員の椋木雅之教授に深く感謝いたします。また、本研究の先行研究である[1]を提案された二宮龍之介さんをはじめとする研究者の皆さんに感謝します。そして、日常での議論やアドバイスを頂いた椋木研究室の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- [1]二宮龍之介“平面で構成された実物体の3次元モデリングと整形”,平成27年度宮崎大学工学部情報システム工学科卒業論文(2016)
- [2] E. L. Bras-Mhlman, M. Schmitt, O. D. Faugeras, J. D. Boissonnat, “How the Delaunay triangulation can be used for representing stereo Data”, Proc. ICCV, pp. 54-63 (1988)
- [3] W. E. Lorensen, H. E. Cline: “Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm”, Computer Graphics, Vol. 21, No. 4, pp.163-169 (1992)
- [4] M. A. FISCHLER, R. C. Bolles, "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography", Comm. ACM, Vol.24, No.6, pp.346-359 (1981)