

# 卒業論文概要書

Summary of Bachelor's Thesis

(2017/01/30)

学科名 Department	情報通信	氏名 Name	赤塚紘輝	指導員 Advisor	渡辺 裕 印 Seal
研究指導 Research guidance	オーディオビジュアル情報処理研究	学籍番号 Student ID number	1w142341-1 CD		
研究題目 Title	没入型 3次元シーン再構成のための点群ノイズ整形 Noise Shaping of Point Clouds for Immersive 3D Scene Reconstruction				

## 1. まえがき

近年、全天球カメラの増加により全天球画像が広く扱われており、それを用いた画像処理が行われている。また、点群取得デバイスの増加により点群処理も注目を集めている。3次元再構成はこの二つの分野から行われている研究である。点群と画像を組み合わせた提案もされている[1]が、点群のノイズ評価は行われていない。複数存在するノイズ処理法について比較・検討を行い、より有効な手法を選択することによって高精度で再現性の高い3次元再構成が可能である。3次元再構成の高精度化により、災害場所の屋内の被害状況把握や避難経路の設定に活用できると考えられる。本研究では、屋内による3次元再構成を仮定し、移動最小二乗法およびガウシアンフィルタによる二つの点群処理について比較・検討を行い、より再現性の高い3次元再構成の手法を提案する。

## 2. 3次元再構成および点群ノイズ処理の比較

取得された点群を点群ノイズ処理により補正し、ポリゴン化を行うことで3Dモデルを生成する。ポリゴン化する上で、データ数削減による処理時間短縮のためダウンサンプリングを行う。生成された3Dモデルに全天球画像をテクスチャマッピングすることにより3次元再構成を行う。点群ノイズ処理の比較においては、移動最小二乗法、ガウシアンフィルタの二つの手法について点群比較およびポリゴン比較を行い、それぞれ角による評価および面による評価の検討を行う。また、没入型テクスチャマッピングによる位置合わせ手法を提案する。

## 3. 実験結果評価

実験により、移動最小二乗法は面におけるノイズ処理に優れており、ガウシアンフィルタは角におけるノイズ処理に優れているという結果が得られた。ガウシアンフィルタは面のノイズ処理においては移動最小二乗法に劣るが、テクスチャマッピングが行えるほど滑らかな整形が可能である。したがって、室内における点群処理としてはガウシアンフィルタを用いることが有用であると結論付けられた。また、ダウンサンプリングではデータ数削減によるポリゴン化処理時間短縮だけでなく、ポリゴン化の精度向上にも有用であることが確認できた。テクスチャマッピングによる3次元再構成の可視化実現に成功したため没入型テクスチャマッピング手法の有用性を確認した。

## 4. まとめ

室内における点群ノイズ処理の比較、検討および3次元再構成の手法を提案し、ダウンサンプリングの有用性および没入型テクスチャマッピング手法の有用性、また、点群ノイズ処理として移動最小二乗法よりガウシアンフィルタのほうが再現性の高い結果が得られることを確認した。本研究では相対評価することで点群ノイズ比較を行ったが、より良い手法の検討のために絶対評価手法の提案が必要であると考えられる。さらに、より再現性の高い3次元再構成の実現には、角保存が可能な移動最小二乗法の検討や、テクスチャマッピングにおける自動位置補正を行う方法が必要であると考えられる。

## 参考文献

[1] 浅井俊弘, “全方位レンジデータと全方位画像の統合による屋外環境の三次元モデル化”, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士論文, Feb 2004

## 研究業績

赤塚紘輝, 原潤一, 渡辺裕, “LiDARと全天球画像を用いた3次元再構成”, 情報処理学会第80回全国大会, 2018年3月13日発表予定

2017 年度 卒業論文

没入型 3 次元シーン再構成のための点群ノイズ整形

Noise Shaping of Point Clouds  
for Immersive 3D Scene Reconstruction

指導教員 渡辺 裕 教授

早稲田大学 基幹理工学部

情報通信学科

1W142341-1

赤塚紘輝

# 目次

第 1 章	序論 .....	1
1.1	研究の背景 .....	1
1.2	本研究の目的 .....	1
1.3	関連研究 .....	2
1.4	本論文の構成 .....	2
第 2 章	全方位カメラと LiDAR .....	3
2.1	はじめに .....	3
2.2	全方位カメラの特性 .....	3
2.2.1	構造 .....	3
2.2.2	全方位画像 .....	3
2.3	LiDAR の特性 .....	5
2.3.1	構造 .....	5
2.3.2	3D Scanner Kit .....	5
第 3 章	3次元再構成と点群ノイズ整形 .....	8
3.1	はじめに .....	8
3.2	点群ノイズ処理 .....	8
3.2.1	移動最小二乗法 .....	8
3.2.2	ガウシアンフィルタ .....	9
3.2.3	ダウンサンプリング .....	9
3.3	ポリゴン化 .....	10
3.4	テクスチャマッピング .....	11
第 4 章	比較実験および結果・考察 .....	13
4.1	はじめに .....	13
4.2	データ計測 .....	13
4.2.1	全方位点群データの取得 .....	13
4.2.2	全方位画像の取得 .....	14
4.3	点群ノイズ整形比較 .....	14
4.3.1	点群による比較 .....	14
4.3.2	ポリゴン化による比較 .....	17
4.4	テクスチャマッピング .....	20

第5章 結論と今後の課題 .....	23
5.1 結論 .....	23
5.2 今後の課題 .....	23
謝辞 .....	24
参考文献 .....	25
図一覧 .....	26
表一覧 .....	27
研究業績 .....	28

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

近年，研究者ではない一般人の間においても全方位の画像や映像が広く扱われるようになってきている．YouTube や Facebook など全方位の画像や動画を投稿，再生が可能であり，容易に全方位の画像や映像を楽しめる．これは全方位撮影が可能でデバイスが増加傾向にあり，その多くが手頃に入手できる価格で販売されているからである．それにより全方位画像の撮影や閲覧だけでなく，全方位画像を用いた研究も多く行われている．

また，近年では画像処理に対して点群処理という処理がある．Microsoft 社の Kinect を始めとする安価な点群を取得できるセンサの登場により点群処理は注目を集めている．距離を扱うような画像では難しい処理でも点群データを用いた処理を用いることで容易に解析が可能となる[1]．

3次元再構成は測量や地図作成，医療の3D スキャンや機械搭載型3D 情報獲得システムなどに活用でき，画像処理および点群処理の二つの分野から研究が行われている．通常画像処理から3次元再構成を行う場合，距離データがないため別角度から撮影した複数枚以上の画像を用いなければならない[2]．それに対し点群処理から3次元再構成を行う場合，距離情報があるため容易に3次元再構成が行うことが可能である．しかし，色情報が与えられていない場合がほとんどである．そのため点群データと画像の色情報の二つを用いた3次元再構成が行われている[3]．また，点群データにはノイズが存在するため点群処理方法についても研究が行われている．

本論文では室内における全方位点群データを取得し，同一地点からの全方位画像の撮影を行う．取得点群データに平滑化，ダウンサンプリングを行い，点群ノイズ整形を行う．ノイズ整形された点群をポリゴン化し，全方位画像をテクスチャとして使い，組み合わせることで3次元再構成を行う．

以上の手法を行うとともに，実験により点群ノイズ整形手法の比較，検討を行う．

## 1.2 本研究の目的

周囲の現実世界のデータを点群データで取得し，適切なノイズ整形を行うことにより，より再現性の高い3次元再構成が得られる．その3次元再構成を用いることにより，3D 地図マップの作成や，車搭載3D 情報獲得による自動運転システムへの応用が可能となる．特に本研究では室内における3次元再構成に注目しているため，例えば自然災害により人が進入できない場合や放射線事故による原子力発電所内への立ち入りが困難な場合，内部の避

難経路の設定や被害状況の把握確認などが容易に行うことができる。そのため、点群ノイズ整形による、より正確な3次元再構成が必要となる。

### 1.3 関連研究

全方位点群データと全方位画像を用いた3次元再構成の研究として、Michiel Vlamincxらの研究[4]が挙げられる。Michiel Vlamincxらは点群の不均一な密度を明示的に取り扱うことで点群の精度の向上を図った。しかし全方位画像をドリフト補正のためだけに用いており、点群データと全方位画像を組み合わせた3次元再構成は行っていない。また浅井らの研究[5]では、全方位レンジデータと全方位画像を組み合わせた3次元再構成を行っており、平面検出を行い平面上に存在するデータを削減することで形状を損なわずにデータ量の削減も可能にしている。しかし屋外での広い範囲での測定であるため点群データの補正などは行われていない。

本研究においては、室内での計測を仮定しており、比較的狭い範囲であるためノイズの補正を考えなければならない。そこで取得点群データのノイズ整形方法について比較、検討し、ノイズ整形を行った点群と全方位画像を組み合わせることで、より再現性の高い3次元モデルを生成する。

### 1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第1章は本章であり、本研究の背景や目的、関連研究について述べる。

第2章では本研究で用いる全方位カメラとLiDARの性質について述べる。

第3章では3次元再構成の提案手法および点群ノイズ処理法について述べる。

第4章では手法の比較実験および結果、考察について述べる。

第5章では本論文の結論と今後の課題について述べる。

## 第2章 全方位カメラと LiDAR

### 2.1 はじめに

本章では本研究で用いる RICOH 社製品の全方位カメラである Theta S と Scanse 社製品の LiDAR である sweep について述べる。

### 2.2 全方位カメラの特性[6][7]

#### 2.2.1 構造

Theta S は一回のシャッターで撮影者を取り囲む  $360^\circ$  全方位の景色を撮影することができる。前後に取り付けられた 2 枚の魚眼レンズがそれを可能にしている。Theta S には屈曲光学系が対称に配置され、プリズムが内蔵されている。このプリズムを用いて 2 枚の魚眼レンズから入射した光がそれぞれ  $90^\circ$  曲げられ、二つの画像素子で受光される構造になっている。そうすることで二つのレンズ間の視差を大幅に減らすことが可能となり、幅 44mm、高さ 130mm、奥行き 22.9mm、レンズ部分を除いた奥行きは 17.9mm と小型化に成功した。

撮影はカメラにあるシャッターボタンを押下するか、無線機能である Wi-Fi を用いてスマートフォンからの遠隔操作で撮影可能である。静止画だけでなく動画も撮影可能であり、USB 接続や HDMI 接続によるライブストリーミングも可能である。静止画解像度は  $5376 \times 2688$  であり、動画解像度およびフレームレート、ビットレートは  $1920 \times 1080$ , 30fps, 16Mbps である。また、静止画フォーマットは JPEG (Exif Ver2.3) であり、動画フォーマットは MP4 である。

#### 2.2.2 全方位画像

Theta S は 1 回のシャッターで全方位画像を取得することができるが、表示形式として Sphere 形式と Equirectangular 形式の二つが主に用いられている。

通常、Theta S で撮影した画像を PC に保存すると Equirectangular 形式で保存される。その Equirectangular 形式の画像を RICOH THETA の専用アプリケーションで開くことにより Sphere 形式での表示が可能となる。

Equirectangular 形式では、中心の Theta S から見た景色の緯度線と経度線が等間隔に直交するように表示される。よく見る世界地図はこの形式で描かれており、この形式で描く図法を正距円筒図法という。図 2.2 のように Equirectangular 形式で表示される景色は実際の形ではなく、画像の上部と下部が横に引き伸ばされたような形になる。



図 2.1 Theta S で得られる Equirectangular 形式の全方位画像

Sphere 形式とは Equirectangular 形式の画像を球面に貼り付けることで表示される画像のことである。Theta S では前後の 2 枚の魚眼レンズで得られた画像をつなぎ合わせることで Sphere 形式の全方位画像を生成している。カーソル移動により自由な視点変化が行えることが特徴である。専用アプリケーションを用いることで図 2.3 のような Sphere 形式での画像を表示することができる。

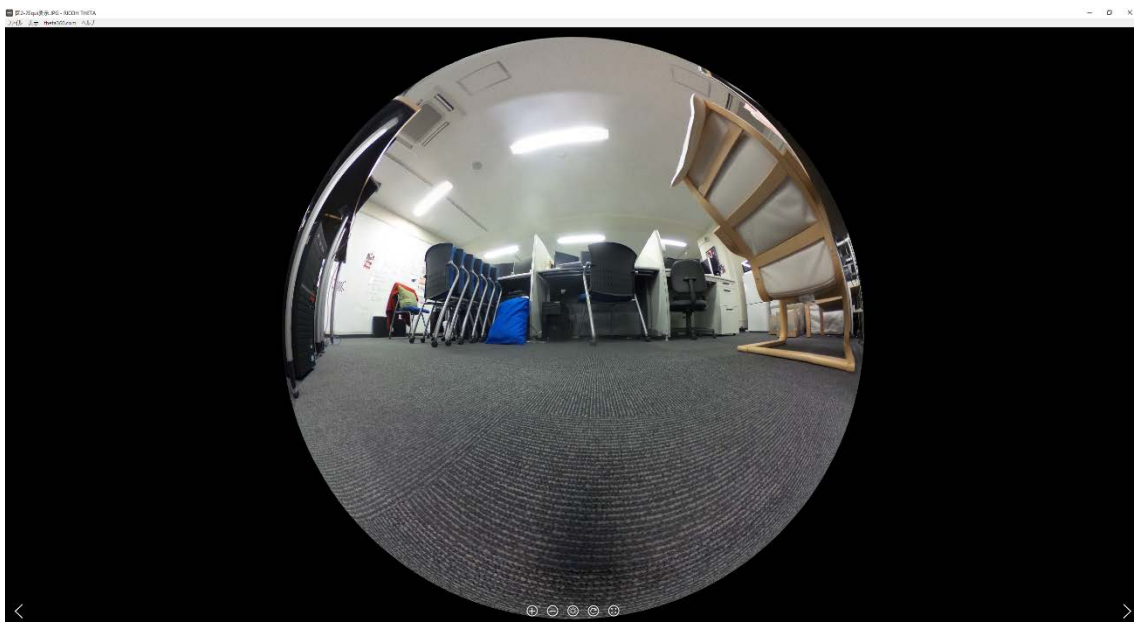


図 2.2 Theta S で得られる Sphere 形式の全方位画像

Theta S で撮影された全方位画像は完全な全方位画像ではない。前後の魚眼レンズの間に



は機器本体が存在するため、正確に全方位画像を取得することができない。そのため、Theta S では 2 枚の魚眼レンズで得られた画像それぞれにおいてパターンマッチング処理で繋ぎ位置検出を行うことで、2 枚の画像の繋ぎ画像処理を行っている。したがって Theta S によって撮影された全方位画像は、2 枚の画像を繋ぎ合わせている付近においてありのままの景色を表示してはいない。

## 2.3 LiDAR の特性[9]

LiDAR とは Light Detection and Ranging (光による検知と測距) の略語であり、レーザーを照射し、物体に反射して戻ってくるまでの時間を測定することによって対象物までの距離を測定する機器である。通常 XYZ などのデータを持つ点群データとして得られる。

### 2.3.1 構造

sweep は水平面  $360^\circ$  のスキャンが可能な直径 65mm, 高さ 61.9mm, 重さ 120g という小型で軽量な LiDAR である。サンプリングレートは 1000sample/sec, 回転周波数は 1-10Hz (Adj.) で最大全方位 40m までの測定が可能である。専用の USB 接続ケーブルで PC につなげることで電源供給および sweep の制御を行う。リアルタイムで測定することができ、測定結果は csv データとして出力される。測定データは専用ソフトウェア Scansense Visualizer で可視化できるほか、ROS (Robot Operating System) や SDK (ソフトウェア開発キット) も用意されており、SDK では Python や JavaScript, C/C++に対応している。

sweep の User's Manual[10]によると、測定データは測定位置から遠い範囲での誤差率は 1%未満と小さいが、140cm 付近以下の近い範囲では近ければ近いほど誤差が大きくなっており、50cm ほどで最大 25%の誤差が生じてしまう。

このように sweep では広範囲の測定は誤差を考慮する必要性はないが、約 140cm 以下に物体が存在するような範囲での測定では誤差を考慮する必要があると考えられる。

### 2.3.2 3D Scanner Kit

sweep はそれ単体では水平面  $360^\circ$  のスキャンのみ可能だが、図 2.5 のように 3D Scanner Kit を用いて組み立てることによって全方位のスキャンが可能となる。sweep を地面と垂直に立て作動させ、それを地面と垂直な軸に回転させていき、各角度でのデータを蓄積させていくことで 3D スキャンを可能にしている。つまり、通常の sweep はリアルタイムでの計測が可能だったが、3D 用に組み立てた sweep では回転計測させながらデータを蓄積させていくことで 3D スキャンを行っているため、リアルタイムで計測することは不可能となる。3D スキャンされたデータは専用のソフトウェア Sweep Visualizer を用いて図 2.6 のように 3 次元可視化表示される。スキャンデータは通常の sweep 同様 csv デ

ータとして得られるが，内蔵の Raspberry Pi 内で ply や xyz 形式のデータに変換可能である．



図 2.3 3D Scanner Kit を用いて組み立てた sweep

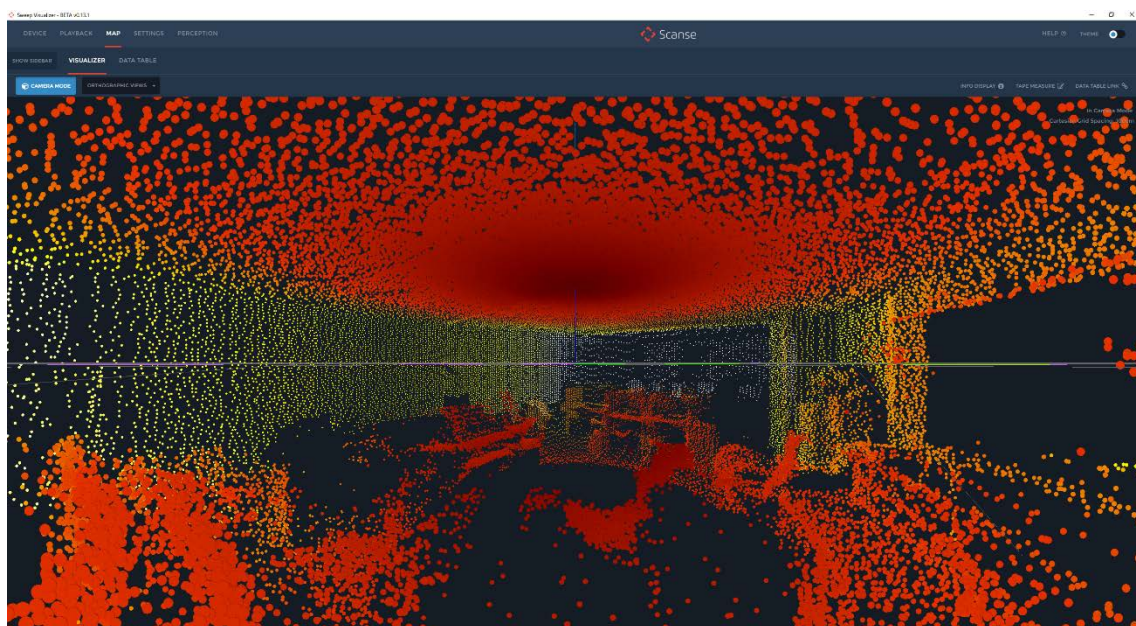


図 2.4 3D スキャンデータの 3 次元可視化

3D Scanner Kit 内蔵の Raspberry Pi を利用することで Wi-Fi 接続したスマートフォンや PC から遠隔でスキャン制御することが可能である。

モータ速度は 1Hz か 2Hz の二段階、サンプリングレートは 500Hz, 750Hz, 1000Hz の三段階での設定が可能である。スキャンに要する時間はモータ速度 1Hz, サンプリングレート 500Hz で 268 秒, モータ速度 1Hz, サンプリングレート 1000Hz で 535 秒, モータ速度 2Hz, サンプリングレート 1000Hz で 134 秒である。モータ速度, サンプリングレートが高いとスキャンに要する時間は短縮するが, モータ速度, サンプリングレートが低い場合に比べてスキャンのエラー率は高くなってしまう。つまり, モータ速度とサンプリングレートの 1Hz, 500Hz の組み合わせは 2Hz, 1000Hz の組み合わせと同じ最終解像度が得られるが, より長いスキャン時間を要してより正確なデータが得られる。

## 第3章 3次元再構成と点群ノイズ整形

### 3.1 はじめに

本章では本研究で用いる3次元再構成の手法について述べるとともに二つの点群ノイズ整形法について述べる。3次元再構成は点群ノイズ処理、ポリゴン化、テクスチャマッピングの三つのステップを踏む。

### 3.2 点群ノイズ処理

2.3.1節でも述べたように、sweepは全方位140cm以下の距離においては計測エラーが発生する確率が高い。本研究では室内での計測を仮定しているため、計測エラーを考慮して正しい値にできるだけ近づけるノイズ整形処理を行う必要がある。

点群ノイズ整形法として移動最小二乗法とガウシアンフィルタの二つの手法について述べる。

#### 3.2.1 移動最小二乗法

移動最小二乗法はばらつきのある点サンプルの集合から連続関数を再構成する方法であり、点群処理で最も広く用いられている手法の一つである。

注目点  $x$  を補正するために任意の  $N$  個の近傍点  $\{p_i\}$  ( $i = 1, \dots, N$ ) を得る。近傍点の近似平面  $H$  を算出し、近傍点を平面  $H$  に投影することで各点を平面  $H$  の座標系  $u, v$  を用いてパラメータ化する。近傍点を2次多項式曲面  $S(u, v) = 0$  で近似し、点  $x$  を曲面  $S(u, v) = 0$  に投影する。以上の操作をすべての点に対して行うことで点群の整形を行う[11]。

2次多項式曲面は点  $x$  のパラメータを  $m = (u, v)$  とおいて

$$S(m; \mathbf{a}) = a_1 u^2 + a_2 v^2 + a_3 uv + a_4 u + a_5 v + a_6 \quad (3.1)$$

と表現できる。ここで  $\mathbf{a} = \{a_k\}$  ( $k = 1, \dots, 6$ ) は2次多項式曲面のパラメータであり、計算は以下の式で行う。

$$\operatorname{argmin}_a \left[ \sum_{i=1}^N S(m_i; \mathbf{a})^2 \chi(|p_i - q|) \right] \quad (3.2)$$

$q$  は点  $x$  を平面  $H$  に投影した基準点であり、関数  $\chi$  は単調減少関数であるガウス関数

$$\chi(x, y, z) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{h^2}\right) \quad (3.3)$$

を用いることで、基準点  $q$  より遠くなるほど重みが小さくなるようにしている。

### 3.2.2 ガウシアンフィルタ

2次元画像におけるガウシアンフィルタと同様に、距離の閾値を設定し、注目点を閾値内の近傍点の局所的な平均値に置き換えることでノイズ整形を行う。平均値を計算する上で3次元ガウス分布関数

$$G(x, y, z, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}^3 \sigma^3} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.4)$$

を用いることで、注目点と近いほど平均値化の重みを大きく、遠いほど重みを小さくしている。

### 3.2.3 ダウンサンプリング

上記の点群処理を行うことで点群が滑らかな平面上あるいは曲面上に整形される。その整形によって元の点群よりも隣接点間の距離が非常に近くなる部分が生じ、図 3.1 のように点の疎密が顕著に表れる。点が密になっている部分は代表点に置き換えても点群の 3D モデルの形状はほとんど変化しない。また、代表点に置き換えることでポリゴン化において処理の簡素化による処理エラー減少や処理時間の短縮を可能にする。



図 3.1 整形点群の拡大図

Voxel Grid によるダウンサンプリングを行う。図 3.2 のように点群データに単位立方体 Voxel を配置し、その Voxel 内に存在する点を Voxel の重心点一つに置き換える。Voxel の大きさを設定できるため、点の疎密の関係により点群データに合わせたダウンサンプリングが可能となる。

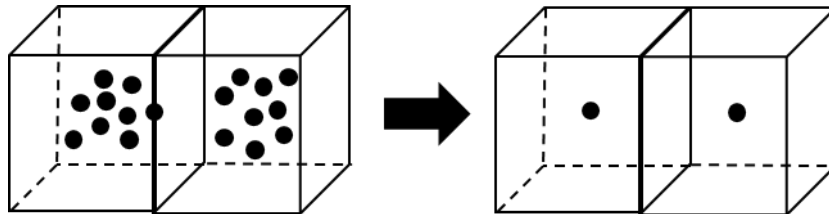


図 3.2 Voxel Grid によるダウンサンプリング

### 3.3 ポリゴン化

点群に何も処理をせず 3 次元表示するだけでも 3 次元再構成と言えるが、現実世界では点だけで存在するものは少なく、ほとんどのものが面を持っている。つまり、より写実的な 3 次元再構成を行うためには与えられた点群を用いて面を構成することが必要となる。

点群から面を構成する手法の一つとしてポリゴン化が挙げられる。ポリゴンとは多角形のことであり、ポリゴン化とは図 3.3 のように点群を多角形で結び、その多角形に面を持たせることにより、点群から面の構成を可能とする。多角形での面の構成には通常三角形を用いる。これは角数が少ないほどより細かな描写が可能であるからである。

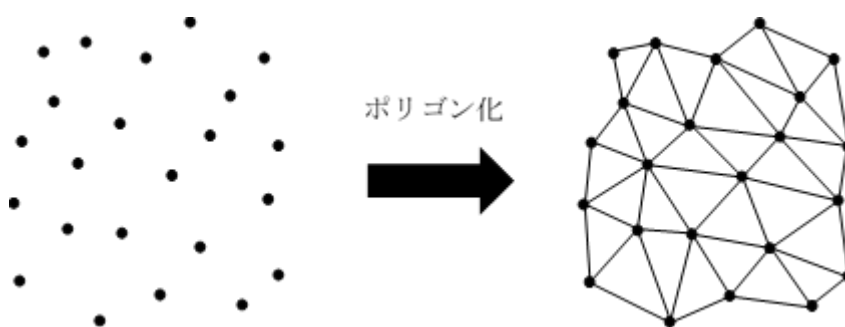


図 3.3 三角形による点群のポリゴン化

このように点群を多角形で結ぶことでより写実的な 3 次元再構成を可能にするが、すべての点群を結ぶことが正しいとは限らない。ある物体の前にそれよりも小さな物体が存在する場合、図 3.4 のように手前の物体を表す点群と背後に存在する点群は不連続箇所であり、ポリゴンで結び付けると実際のモデルとは異なってしまふ。

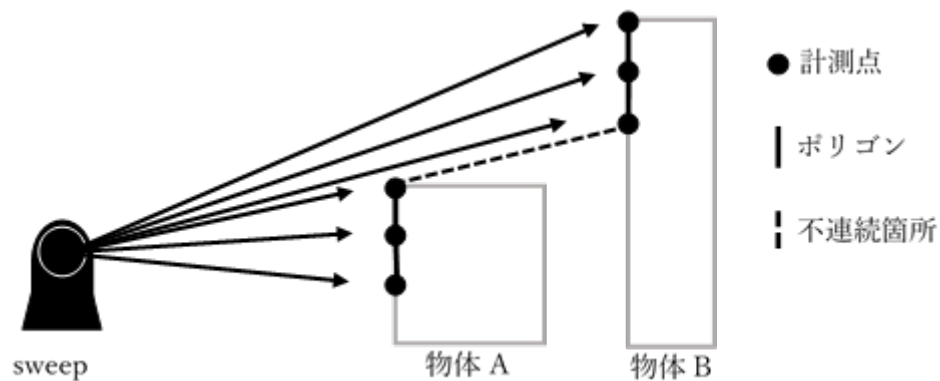


図 3.4 オクルージョンによる不連続箇所

その不連続箇所ではポリゴンで結び付けないようにするために、点と点を結ぶ最大距離や多角形の一つの角度の最大最小角度の設定など、計測場所に応じた点群のポリゴン化条件が必要であると考えられる。

### 3.4 テクスチャマッピング

点群をポリゴン化することによって面が構成されるため、全天球画像をテクスチャとして貼り付けることが可能となる。2.2.2 節で述べたように全天球画像には **Equirectangular** 形式と **Sphere** 形式がある。**Sphere** 形式の画像は球面の画像になるが、**Equirectangular** 形式の画像は正距円筒図法で表現された高さで表される画像である。つまり、**Equirectangular** 形式の全天球画像は一般の画像と同じように扱うことができ、緯度と経度に対する画素値の取得が可能である。したがって、図 3.5 のように **Equirectangular** 形式の全天球画像の画素値を、同じ緯度と経度に対応する 3D モデルの面に対して貼り付けを行うことでテクスチャマッピングを行う。それにより再現性の高い 3 次元再構成が可能であると考えられる。

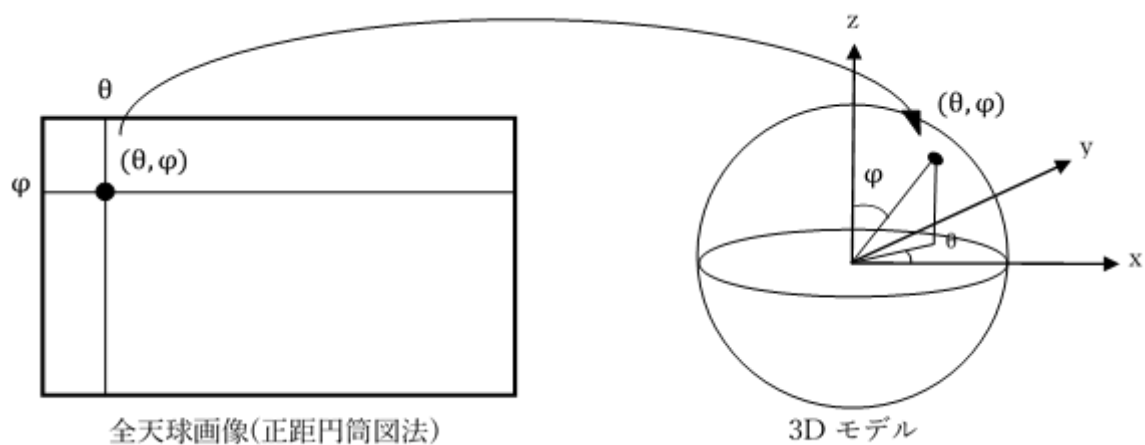


図 3.5 テクスチャマッピング方法

しかし、全天球画像は観測点から外側に対しての景色であるのに対して、3Dモデルへのテクスチャマッピングは3Dモデルの外側からしか貼り付けることができない。そこで全天球画像を左右反転させることにより、表裏が反転しないテクスチャマッピングが可能であると考えられる。



## 第4章 比較実験および結果・考察

### 4.1 はじめに

本章では、実際に取得したデータを用いて 3 次元再構成の手法を行う上で、移動最小二乗法およびガウシアンフィルタの二つの点群ノイズ処理方法の比較を行うとともに結果、考察を述べる。

### 4.2 データ計測

早稲田大学西早稲田キャンパス 66 号館 4 階の廊下にてデータの取得を行う。

#### 4.2.1 全方位点群データの取得

可能な限りノイズの少ないデータを取得するため、`sweep` をモータ速度 1Hz、サンプリングレート 500Hz に設定し、データの取得を行う。得られた点群データの 3 次元表示を図 4.1 に示す。

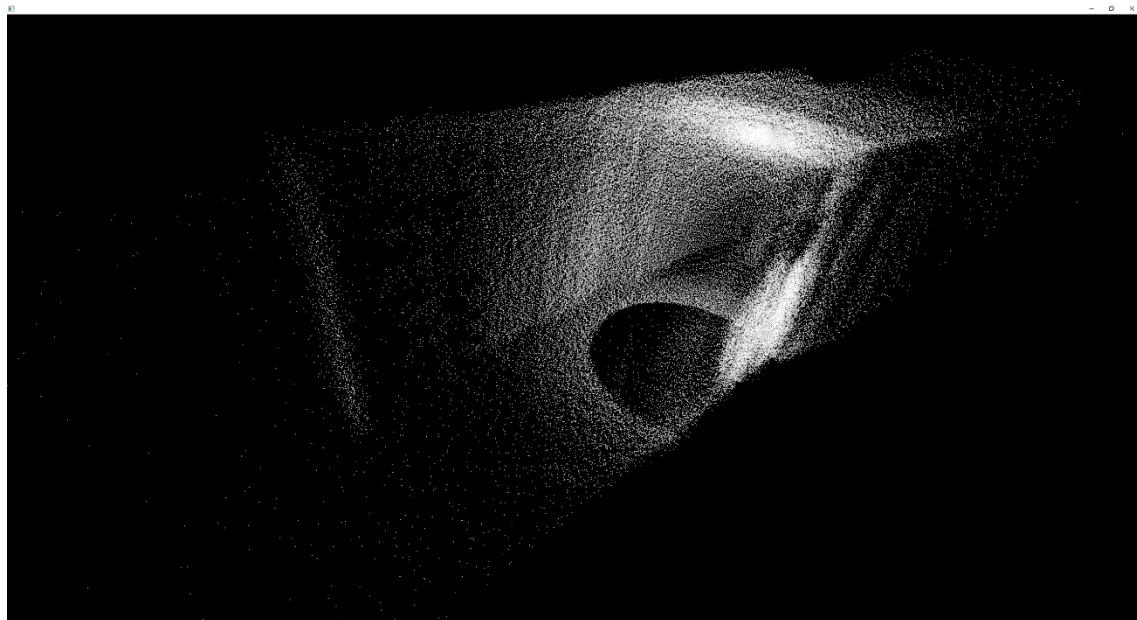


図 4.1 `sweep` により取得された点群データの 3 次元表示

点群中央下部に点群が表示されていない。これは、`sweep` がレーザー照射部の下側に制御部が存在するため、その制御部の部分は点群を取得できないように制御されている。

## 4.2.2 全方位画像の取得

全方位点群データの取得と同じ位置で撮影を行う。撮影された全方位画像を図 4.2 に示す。



図 4.2 Theta S により取得した全方位画像

## 4.3 点群ノイズ整形比較

### 4.3.1 点群による比較

元の点群と移動最小二乗法によるノイズ整形を行った点群とガウシアンフィルタによるノイズ整形を行った点群の比較画像を図 4.3 および図 4.4 に示す。

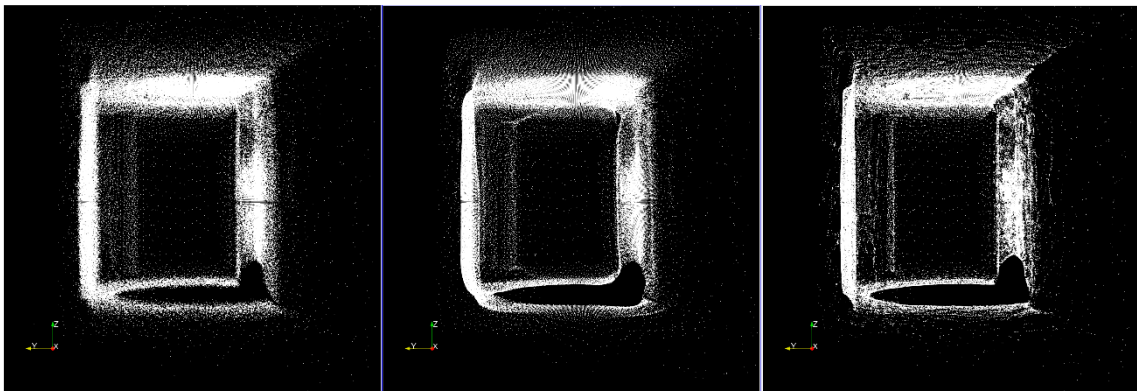


図 4.3 取得した点群 (左) と移動最小二乗法による整形点群 (中央) とガウシアンフィルタによる整形点群 (右) の比較画像 1

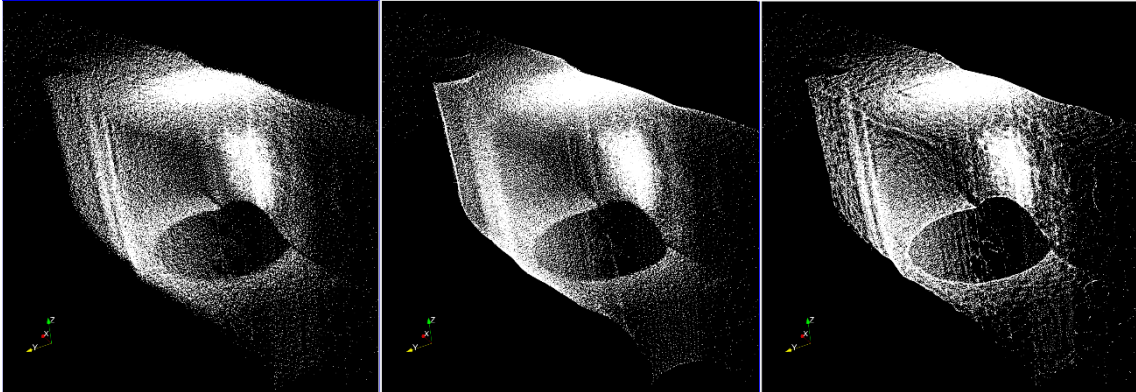


図 4.4 取得した点群 (左) と移動最小二乗法による整形点群 (中央) とガウシアンフィルタによる整形点群 (右) の比較画像 2

図 4.3 および図 4.4 より，移動最小二乗法によるノイズ整形を行った点群，ガウシアンフィルタによるノイズ整形を行った点群ともに元の取得点群よりも整形されていることがわかる．移動最小二乗法では点群が均一に配置されているように滑らかであるが，本来角であるような部分も滑らかに処理を行っており，丸まってしまうている．対してガウシアンフィルタでは点群が不均一に配置されており，点群は滑らかではないが本来角であるような部分も角を保存し形成している．

点群の角がどれほど丸まっているか検証する上で，3D 点群データと 3D 座標軸との関係に注目する必要がある．その関係を調べたところ， $z$  軸は床と垂直の位置関係にあったが， $x$  軸  $y$  軸ともに 3D 点群の壁と平行の位置関係にはなく，壁と  $x$  軸には約  $8^\circ$  の回転関係にあった．壁と  $x$  軸が平行であれば， $y$  軸に沿って点群を分割させ，その分割された点群の表面を  $x$  軸から見ることで角の状態を調べることが可能であると考えられる．したがって  $8^\circ$  の回転を考慮し，経度  $98^\circ$  および  $278^\circ$  に位置する点群を選択して  $y-z$  平面にプロットすることで角の状態を調べる．点群処理により正確に  $98^\circ$  に位置する点群は少ないため，経度  $97-98^\circ$  および  $277-278^\circ$  に位置する点群を選択して  $y-z$  平面にプロットすることにする．その結果を図 4.5 に示す．

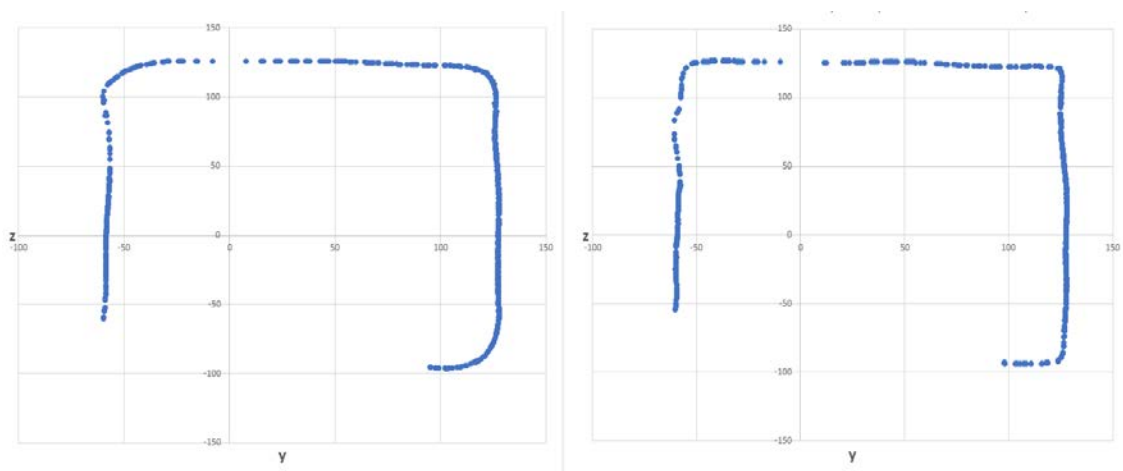


図 4.5 移動最小二乗法による点群整形 (左) とガウシアンフィルタによる点群整形 (右) の  $y$ - $z$  平面 (経度  $97$ - $98^\circ$  および  $277$ - $278^\circ$ )

図 4.5 の壁と床を表す各点群に対して近似直線を記述し、その直線と点群間の面積の大きさを角がどれほど丸まっているかが表現可能であると考えられる。つまり、その面積が小さいほど角がとがっており、より正確な角表現が行えていると言える。今回は図に近似直線を貼り付け、直線と点群間の面積を画像の画素数で求めることにする。近似直線を赤線、直線と点群間の面積部分を黄色で表現した図を図 4.6 に示す。

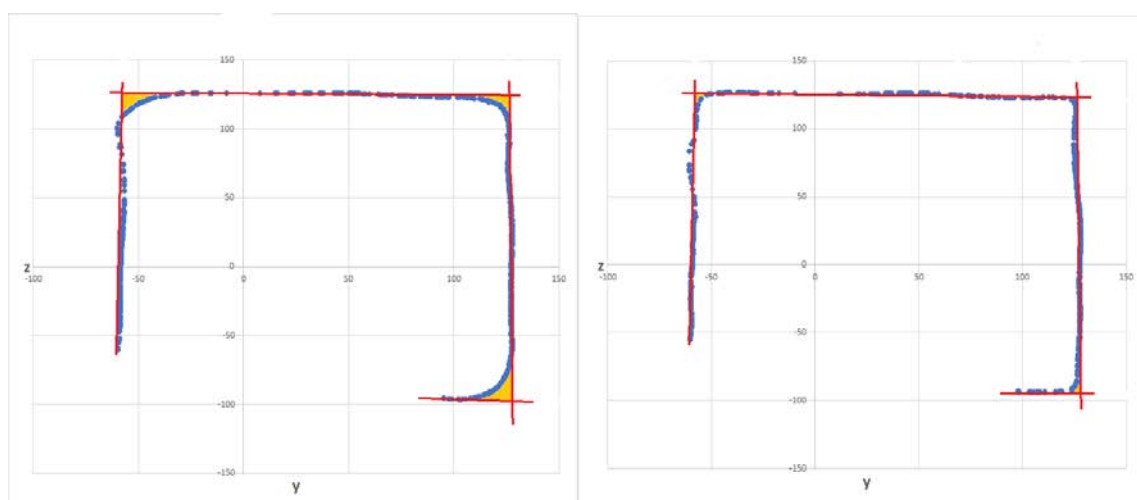


図 4.6 移動最小二乗法による点群整形の (左) とガウシアンフィルタによる点群整形 (右) の  $y$ - $z$  平面および角表現 (経度  $97$ - $98^\circ$  および  $277$ - $278^\circ$ )

面積を計算した結果、移動最小二乗法による点群整形では  $1044.9$  画素、ガウシアンフィルタによる点群整形では  $72.8$  画素であった。この結果から、角表現においてガウシアンフィルタのほうがより再現性の高い点群処理が行うことが可能であると考えられる。



### 4.3.2 ポリゴン化による比較

点群だけでは面がどのように表現されるかわからないため、ポリゴン化による面の描写を行う。まず、ポリゴン化を行う上で処理時間短縮のため、Voxel Gridによるダウンサンプリングを行う。ダウンサンプリングによる処理時間の変化および点群数の変化を表 4.1, 表 4.2 に示す。

表 4.1 ポリゴン化処理時間

	処理時間[s]	ダウンサンプリング後処理時間[s]
移動最小二乗法	363.851	154.370
ガウシアンフィルタ	378.765	133.548

表 4.2 ダウンサンプリングによる点群数の変化

	取得点群数 [点]	点群処理後 [点]	ダウンサンプリング後 [点]	削減率[%]
移動最小二乗法	106714	106704	81616	23.51
ガウシアンフィルタ		106712	79475	25.52

次にダウンサンプリングによる 3D モデルに変化が生じるか確認する。ダウンサンプリング前のポリゴン化とダウンサンプリング後のポリゴン化の比較を、移動最小二乗法、ガウシアンフィルタそれぞれにおいて図 4.7, 図 4.8 および図 4.9, 図 4.10 に示す。

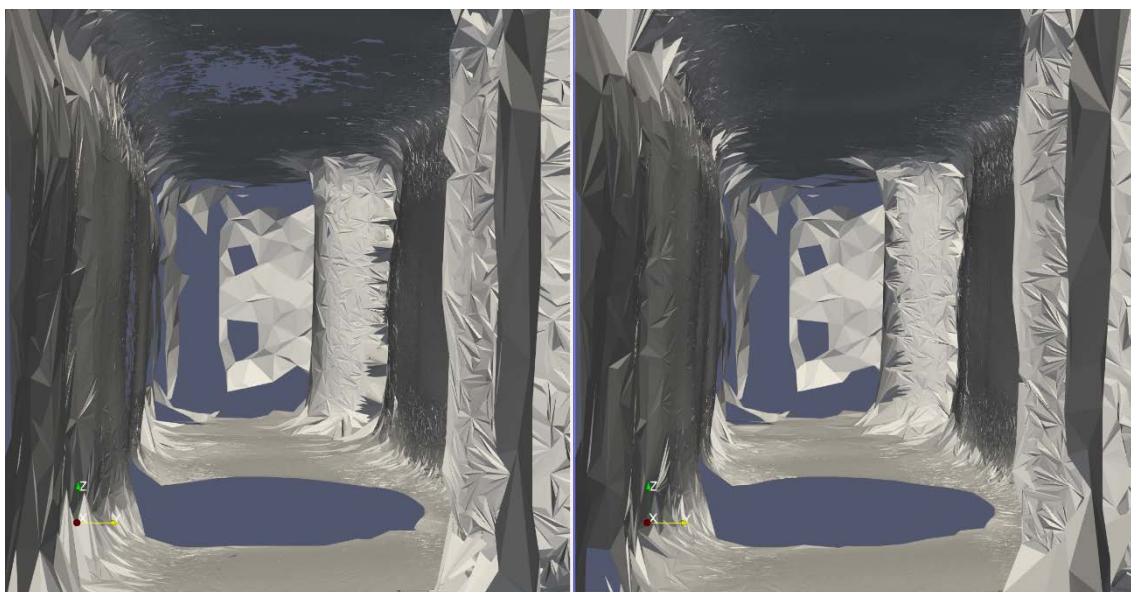


図 4.7 移動最小二乗法処理を行った点群のダウンサンプリング前のポリゴン化 (左) とダウンサンプリング後のポリゴン化 (右) 比較画像 1

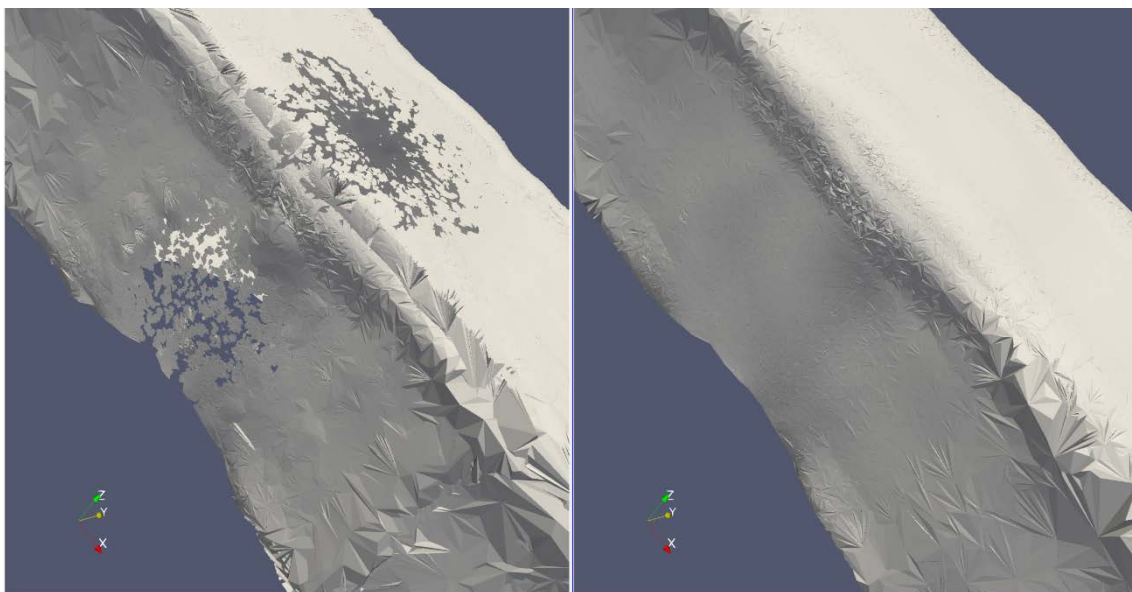


図 4.8 移動最小二乗法処理を行った点群のダウンサンプリング前のポリゴン化 (左) とダウンサンプリング後のポリゴン化 (右) 比較画像 2

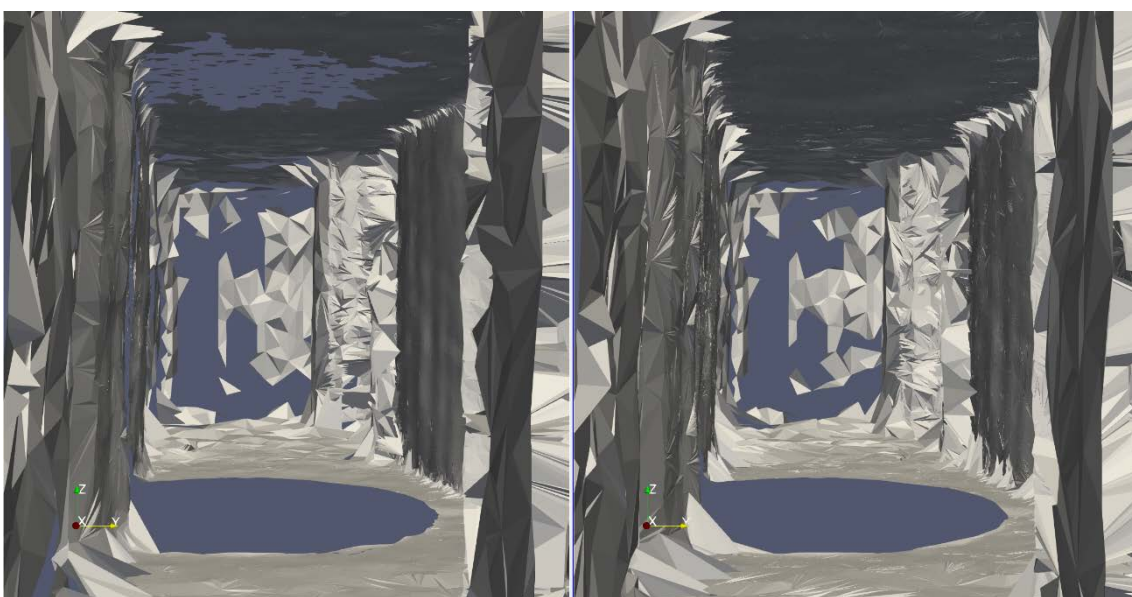


図 4.9 ガウシアンフィルタ処理を行った点群のダウンサンプリング前のポリゴン化 (左) とダウンサンプリング後のポリゴン化 (右) 比較画像 1

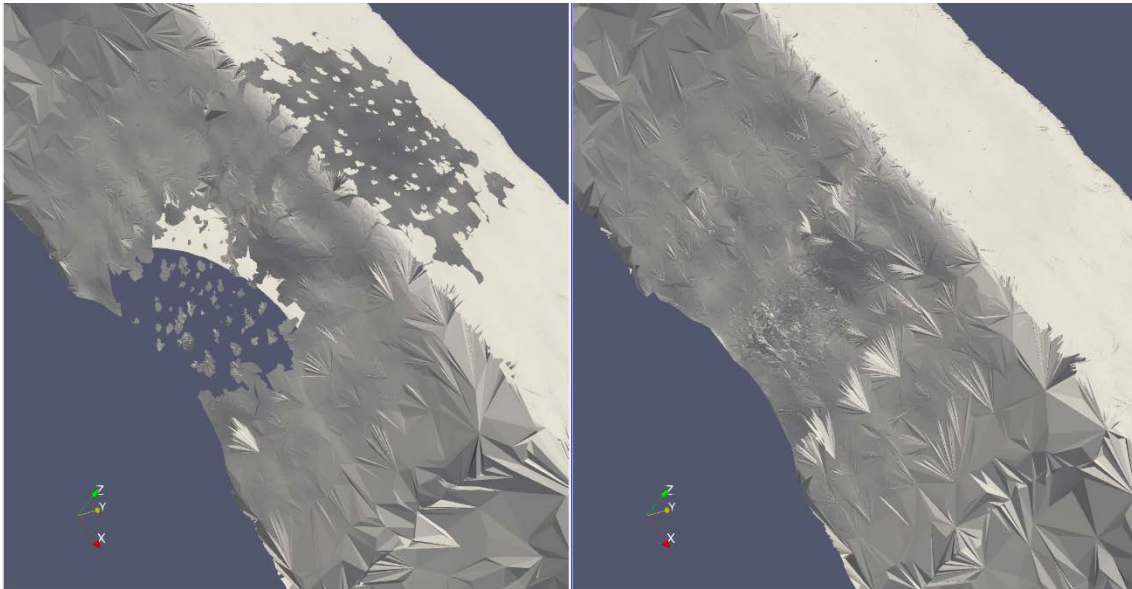


図 4.10 ガウシアンフィルタ処理を行った点群のダウンサンプリング前のポリゴン化 (左) とダウンサンプリング後のポリゴン化 (右) 比較画像 2

表 4.1, 表 4.2 より, ダウンサンプリングによって点群数が減少し, 移動最小二乗法では 57.6%, ガウシアンフィルタでは 64.7%のポリゴン化における処理時間の短縮に成功した. 処理前後に形状変化が起これなければダウンサンプリングは有効である. 図 4.7, 図 4.9 よりダウンサンプリングによる形状変化はほとんど生じていないことがわかるため, Voxel Grid のダウンサンプリングによる処理時間短縮は有用であると考えられる. また, 図 4.8, 図 4.10 より, ダウンサンプリング前のポリゴン化では一部の壁と床にポリゴン化処理が行えていない部分が発生している. 移動最小二乗法, ガウシアンフィルタの処理とともに同じ結果が得られ, ダウンサンプリング後のポリゴン化には見られない結果である. これは移動最小二乗法およびガウシアンフィルタによるものだと考えられる. ノイズ整形によって点群は滑らかに整形されるが, 3.2.3 節の図 3.1 のように隣接点間が非常に近くなる部分が発生する. それにより点が近すぎてどの点と結べばよいか判明がつかなくなるため, 多角形で結ぶことができずにポリゴン化ができないと考えられる. したがって, ダウンサンプリングはノイズ整形を行う際, 必要な処理であると考えられる.

最後に, 元の点群と移動最小二乗法処理を行った点群とガウシアンフィルタ処理を行った点群のポリゴン化の比較画像を図 4.11 および図 4.12 に示す.



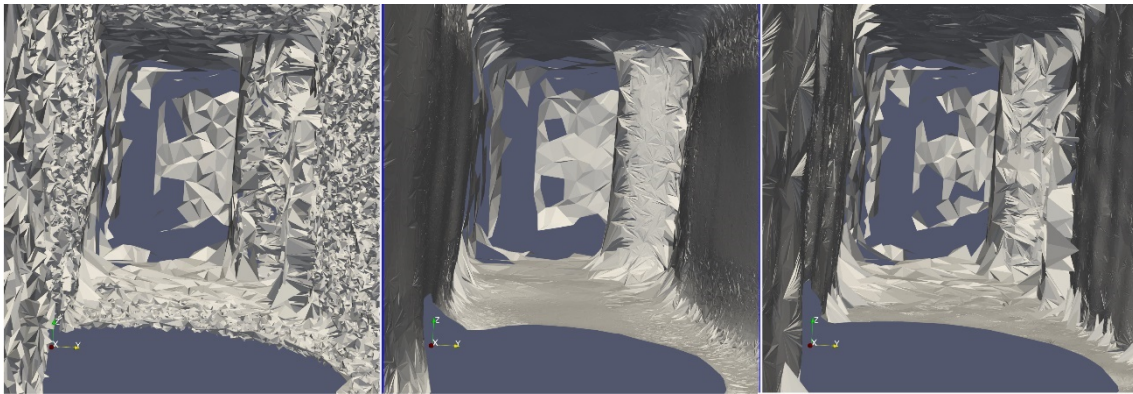


図 4.11 取得点群 3D モデル (左) と移動最小二乗法による整形点群 3D モデル (中央) とガウシアンフィルタによる整形点群 3D モデル (右) の比較画像 1

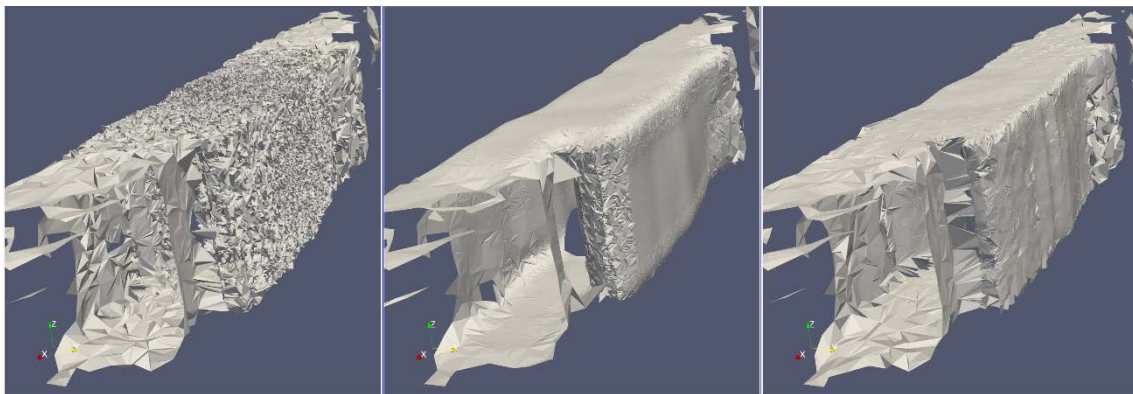


図 4.12 取得点群 3D モデル (左) と移動最小二乗法による整形 3D モデル (中央) とガウシアンフィルタによる整形 3D モデル (右) の比較画像 2

元の取得データと比べると、整形 3D モデルは面を滑らかに構成していることがわかる。ガウシアンフィルタによる整形 3D モデルは移動最小二乗法による整形 3D モデルよりも面は滑らかではないが、凹凸が激しいほどではなく、床と壁、天井と壁、棚が存在する部分など、角が存在する箇所は角を残すような整形を行っている。したがって、室内における 3 次元再構成においては、移動最小二乗法ではなく、ガウシアンフィルタによるノイズ整形を行ったほうがより再現性高い描写が可能であると考えられる。

#### 4.4 テクスチャマッピング

より再現性が高いと考えられるガウシアンフィルタによる整形 3D モデルを用いてテクスチャマッピングを行う。3.4 節で述べた通り、全方位画像は観測点から外側の景色を描写しているのに対し、テクスチャは 3D モデルの外側から貼り付けることになるので、テ



クスチャマッピングで用いる全方位画像を左右反転させる必要がある。また、4.3.1 節で述べたように 3D モデルと座標は  $8^\circ$  の回転誤差があるため、3D モデルか全方位画像を  $8^\circ$  変化させる必要がある。Equirectangular 形式の全方位画像は、幅と高さがそれぞれ経度と緯度に対応しているため、画像右部分を切り取り左に移動させることで視点を移動させることができる。左右反転させ、 $8^\circ$  移動させた画像を図 4.13 に示す。



図 4.13 左右反転および  $8^\circ$  視点移動させた取得全方位画像

この画像を用い、テクスチャマッピングを行った結果を図 4.14 および図 4.15 に示す。

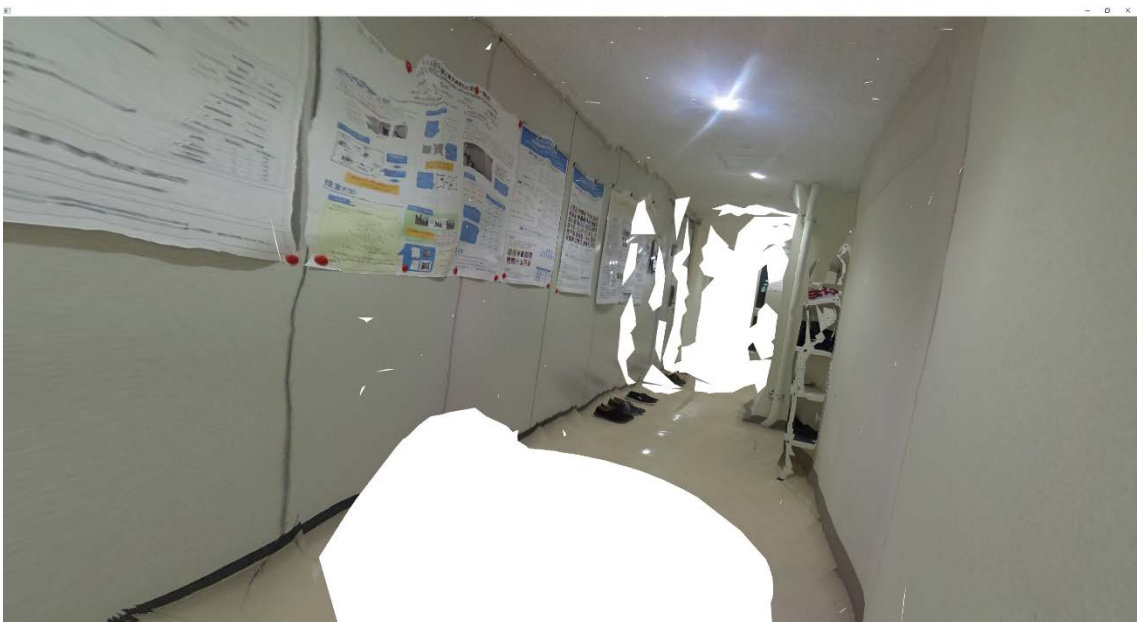


図 4.14 テクスチャマッピング結果 1



図 4.15 テクスチャマッピング結果 2

人間の視覚的に違和感が少ないように3次元再構成することに成功したが、3Dモデルは現実空間を完全に再現していないため、モデルと画像にズレが生じている。また、テクスチャマッピングにおいて、画像とモデルの座標位置合わせも手動で行っているため正確に描写できていない。したがって、その誤差を自動補正するような特徴点位置合わせ等の手法の検討が必要であると考えられる。

## 第5章 結論と今後の課題

### 5.1 結論

本研究では、取得された全方位点群データおよび全方位画像を用いた 3 次元再構成の手法を提案するとともに、点群ノイズ整形の二つの手法、移動最小二乗法およびガウシアンフィルタの比較、検討を行った。ダウンサンプリングでは、平均 24.5%のデータ数削減によって移動最小二乗法では 57.6%、ガウシアンフィルタでは 64.7%のポリゴン化における処理時間短縮だけでなく、精度の良いポリゴン化の実現も行った。点群ノイズ整形比較においては、移動最小二乗法ではより滑らかな面を構成することが可能だが、角が存在する部分も滑らかに丸めてしまうのに対し、ガウシアンフィルタでは移動最小二乗法ほど滑らかな面を形成しないが、角が存在する部分の保存が可能であった。ガウシアンフィルタにおける面形成は移動最小二乗法には劣るが、テクスチャマッピングが可能なほど滑らかであるため、室内の 3 次元再構成における点群ノイズ処理は移動最小二乗法ではなく、ガウシアンフィルタを用いた方がより再現性の高い結果が得られると結論付けられる。ガウシアンフィルタによる点群整形 3D モデルを用いることにより再現性の高い 3 次元再構成に成功した。

### 5.2 今後の課題

本研究では、点群ノイズ処理において移動最小二乗法とガウシアンフィルタによる二つの手法の比較、検討を行った。ガウシアンフィルタの方がより再現性の高いノイズ整形が行うことが可能であるという結果が得られたが、移動最小二乗法を用いて角保存が可能な処理を行うことで、さらに再現性の高い結果が得られると考えられる。よって、点群の角検出を行い、角と面を分類した上で移動最小二乗法を用いる手法などの検討を行うべきである。また、点群ノイズ処理の比較、検討を相対的に評価することでより再現性の高い手法を決定したが、実際のモデルとどれほどの誤差が生じるかなどは不明である。より良い手法を検討するために、実際のモデルとの誤差を測定する手法など絶対的な評価手法の提案が必要である。

また、テクスチャマッピングにおいて全方位点群データと全方位画像のずれを手動で補正を行ったが、手動では精度の向上が見込めないため、特徴点对応付けによる位置補正など自動補正を行うことが必要である。

**謝辞**

本研究の実験器具の準備や環境を整えてくださり、研究のテーマ設定や方向性、また問題点の提起や整理など丁寧かつ適切なお指導くださった渡辺裕教授と早稲田大学情報通信研究センター招聘研究員の原潤一博士に深く感謝申し上げます。

また、日頃から問題点解決の相談に乗っていただき、貴重なご意見をくださる研究室の皆様に熱く御礼申し上げます。

最後に、学費の工面をしていただき、学業に専念させてくださった家族に心より感謝致します。

## 参考文献

- [1]. 林昌希, コンピュータビジョンのセカイ - 今そこにあるミライ (2018年1月現在)  
[https://news.mynavi.jp/article/computer\\_vision-81/](https://news.mynavi.jp/article/computer_vision-81/)
- [2]. 関晃仁, Oliver Woodford, “単眼カメラの動画像を用いたリアルタイムで緻密な3次元再構成技術”, 東芝レビュー, Vol.98, No.5, pp.40-43, May 2013
- [3]. 宮岡伸一郎, “実写画像を用いた3D点群データ着色方式”, 情報処理学会研究報告, Vol.2008, No.27, pp.349-354, Mar 2008
- [4]. M. Vlaminck, H. Luong, W. Goemin, W. Philips, “3D Scene Reconstruction Using Omnidirectional Vision and LiDAR: A Hybrid Approach.”, MDPI, Nov 2016
- [5]. 浅井俊弘, “全方位レンジデータと全方位画像の統合による屋外環境の三次元モデル化”, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士論文, Feb 2004
- [6]. 株式会社 RICOH, RICOH THETA S (2018年1月現在)  
<https://theta360.com/ja/about/theta/s.html>
- [7]. 株式会社 RICOH, RICOH 技術紹介 (2018年1月現在)  
[https://jp.ricoh.com/technology/tech/065\\_theta.html](https://jp.ricoh.com/technology/tech/065_theta.html)
- [8]. 青木貴大, “全天球カメラを用いたステレオ距離測定”, 早稲田大学基幹理工学部情報理工学科卒業論文, Feb 2017
- [9]. Scans (2018年1月現在)  
<http://scanse.io/>
- [10]. User's Manual, sweep (2018年1月現在)  
[https://s3.amazonaws.com/scanse/Sweep\\_user\\_manual.pdf](https://s3.amazonaws.com/scanse/Sweep_user_manual.pdf)
- [11]. 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)”, 精密工学会誌, Vol.76, No.5, pp.582-586, May 2010
- [12]. Y. Ohtake, A. Belyaev, H.-P. Seidel, “Mesh Smoothing by Adaptive and Anisotropic Gaussian Filter Applied to Mesh Normals”, Proceedings of the Vision, Modeling, and Visualization, pp. 203-210, Nov 2002.

## 図一覧

図 2.1	Theta S で得られる Equirectangular 形式の全方位画像 .....	4
図 2.2	Theta S で得られる Sphere 形式の全方位画像 .....	4
図 2.3	3D Scanner Kit を用いて組み立てた sweep.....	6
図 2.4	3D スキャンデータの 3 次元可視化 .....	6
図 3.1	整形点群の拡大図 .....	9
図 3.2	Voxel Grid によるダウンサンプリング .....	10
図 3.3	三角形による点群のポリゴン化 .....	10
図 3.4	オクルージョンによる不連続箇所 .....	11
図 3.5	テクスチャマッピング方法 .....	12
図 4.1	sweep により取得された点群データの 3 次元表示 .....	13
図 4.2	Theta S により取得した全方位画像 .....	14
図 4.3	取得した点群 (左) と移動最小二乗法による整形点群 (中央) とガウシアンフィルタによる整形点群 (右) の比較画像 1.....	14
図 4.4	取得した点群 (左) と移動最小二乗法による整形点群 (中央) とガウシアンフィルタによる整形点群 (右) の比較画像 2.....	15
図 4.5	移動最小二乗法による点群整形 (左) とガウシアンフィルタによる点群整形 (右) の y-z 平面 (経度 97-98°および 277-278°).....	16
図 4.6	移動最小二乗法による点群整形の (左) とガウシアンフィルタによる点群整形 (右) の y-z 平面および角表現 (経度 97-98°および 277-278°).....	16
図 4.7	移動最小二乗法処理を行った点群のダウンサンプリング前のポリゴン化 (左) とダウンサンプリング後のポリゴン化 (右) 比較画像 1.....	17
図 4.8	移動最小二乗法処理を行った点群のダウンサンプリング前のポリゴン化 (左) とダウンサンプリング後のポリゴン化 (右) 比較画像 2.....	18
図 4.9	ガウシアンフィルタ処理を行った点群のダウンサンプリング前のポリゴン化 (左) とダウンサンプリング後のポリゴン化 (右) 比較画像 1.....	18
図 4.10	ガウシアンフィルタ処理を行った点群のダウンサンプリング前のポリゴン化 (左) とダウンサンプリング後のポリゴン化 (右) 比較画像 2.....	19
図 4.11	取得点群 3D モデル (左) と移動最小二乗法による整形点群 3D モデル (中央) とガウシアンフィルタによる整形点群 3D モデル (右) の比較画像 1.....	20
図 4.12	取得点群 3D モデル (左) と移動最小二乗法による整形 3D モデル (中央) とガウシアンフィルタによる整形 3D モデル (右) の比較画像 2.....	20
図 4.13	左右反転および 8°視点移動させた取得全方位画像 .....	21
図 4.14	テクスチャマッピング結果 1.....	21
図 4.15	テクスチャマッピング結果 2.....	22

**表一覧**

表 4.1	ポリゴン化処理時間 .....	17
表 4.2	ダウンサンプリングによる点群数の変化 .....	17

**研究業績**

1. 赤塚紘輝, 原潤一, 渡辺裕, “LiDAR と全天球画像を用いた 3 次元再構成”, 情報処理学会第 80 回全国大会, 2018 年 3 月 13 日発表予定