

卒業論文概要書

Summary of Bachelor's Thesis

Date of submission: 02/06/2019

学科名 Department	情報通信	氏名 Name	加藤裕也	指導 教員 Advisor	渡辺 裕 ⑩
研究指導名 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	1w152095-0 ^{CD}		
研究題目 Title	LSD-SLAM を用いた全天球カメラ映像からの 3 次元再構成 3D Reconstruction from Omnidirectional Video Using LSD-SLAM				

1. まえがき

近年、自動車やロボットの自動運転が注目されている。ロボットの自律移動に必要な技術として環境に対する自己位置の推定と環境地図の作成があり、これらを同時に行う技術として **Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)** がある。

SLAM のなかでも比較的安価で軽量なカメラを用いる手法として LSD-SLAM[1] が挙げられる。LSD-SLAM は輝度勾配を利用した SLAM であるため、点数の多い密な点群が取得でき、CPU 上で実行できるため入力動画に対して低遅延で高精度な点群を取得できる。しかし、LSD-SLAM の課題としてトラッキングの失敗とカメラの回転に対する脆弱性が挙げられる。特に遮蔽物が多く死角となる領域の多い屋内環境ではカメラの回転を行わずに点群を得ることが難しい。

カメラを回転させずに屋内環境の死角となる領域を減らす手段としてカメラを複数用いることが挙げられる。画角が 360°ある全天球カメラで撮影した画像を分割することで疑似的に複数台のカメラを用いて撮影した画像を取得できる。

本研究では屋内環境で点群を取得することを仮定し、全天球画像を分割して点群を取得したのち複数の点群を合成することで精度の高い点群の取得を図る。

2. 従来手法とその問題点

魚眼カメラ映像を LSD-SLAM に適用する研究として David Caruso らの研究[2]が挙げられる。David Caruso らの研究では画角 185°の魚眼カメラ映像を LSD-SLAM に適用している。しかし、画角が 360°の全天球カメラを LSD-SLAM に適用する研究は進んでいない。

3. 提案手法

本提案手法は全天球画像の分割、点群の取得、点群の合成、点群の評価の 4 手順から構成される。

はじめに全天球カメラで撮影された映像をカメラのフレームレートに従って全天球画像に分割する。各全天球画像にキューブマッピングを施すことで図 1 に示すように 1 枚の全天球画像から 6 枚の画像を取得する。この 6 枚の画像のうち撮影者の映る背面、天井の映る上面および床の映る下面の計 3 枚の画像は周辺環境の 3 次元再構成に適切でないため取り除き、カメラ正面および左右の計 3 枚の画像を用いる。また、同様の処理を取得した全天球画像すべてに対して行う。



図 1 全天球画像の分割

次に画像分割で取得した左面、正面、右面に対応する画像を LSD-SLAM の入力画像とし、三つの点群を取得する。

最後に三つの点群を一つに合成する。得られた点群はそれぞれ計測した屋内空間上の共通する領域を含んでいるため、共通領域から特徴点を 3 点選んで合成する。

点群の精度評価は計測した屋内環境の壁面と取得した点群の距離を用いて行う。評価に用いる点群は部屋の壁面に黒色テープを貼り撮影した映像から取得する。取得した点群を黒色テープが貼られた天井から 80~82cm の範囲で切り出し、図 2 に示す xy 平面上にプロットすることで距離の計算を行う。図 2 の 4 本の直線で囲まれた範囲が計測した部屋の形状である。

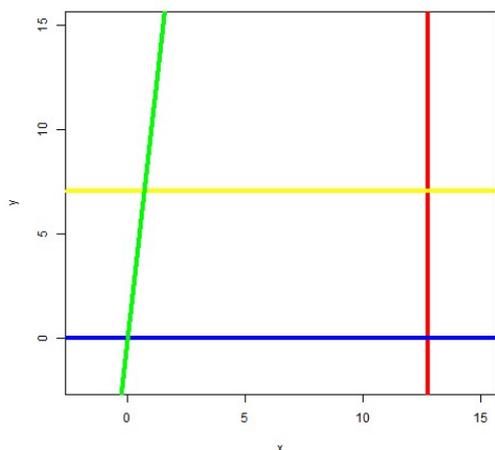


図2 計測した部屋の壁面

4. 実験

Theta V と一眼レフを用いて点群を取得し比較した。全天球カメラを用いた実験では提案手法により点群を取得した。一眼レフを用いた実験ではLSD-SLAMに撮影した映像を入力し点群を取得した。全天球カメラで撮影した動画から取得した点群を図3に示す。また一眼レフを用いて取得した点群の例を図4に示す。図4に示した点群を図2のxy平面にプロットし計算した壁面との誤差を表1に示す。

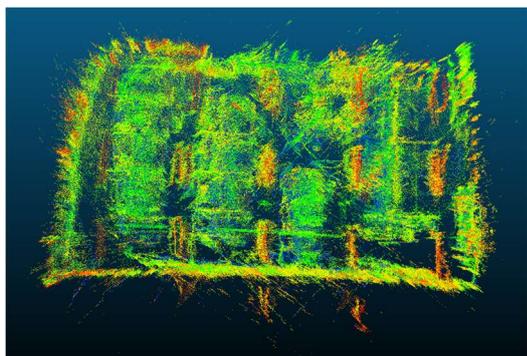


図3 全天球カメラ映像から合成した点群

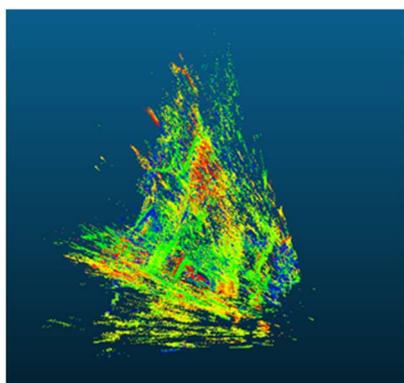


図4 一眼レフを用いて取得した点群の例

表1 壁面と点群の誤差

$y=10x$ と点群の誤差 (cm)	$y=0$ と点群の誤差 (cm)	$x=12.76$ と点群の誤差(cm)
4.827	23.21	10.50

図3に示した点群は図2に示した部屋の形状と一致する。一方、図4に示した一眼レフを用いて取得した点群は形状の復元に失敗した。全天球カメラで点群の取得が成功し、一眼レフを用いた実験で点群が破綻した理由としてカメラの最短撮影距離と画角が挙げられる。Theta Vは最短撮影距離10cm、画角は 90° である。一方、実験に使用した一眼レフは最短撮影距離40cm、画角 76° であり狭い屋内環境に適していなかったと考えられる。

表1より $y=0$ と点群の誤差が最大であった。これはLSD-SLAMではカメラの視差から距離推定を行うため平行方向への移動距離は正確に推定できるが、垂直方向への移動は移動距離が短いと視差が小さく誤差が大きいが原因であると考えられる。

5. むすび

本研究では、提案手法により1台のカメラで遮蔽物の多い屋内空間の点群を精度よく取得できることを示した。また、全天球カメラで計測した点群と一眼レフで計測した点群を比較することで屋内環境の計測に関して全天球カメラの優位性を示した。

本研究では取得した点群を全て合成したが、点群中から精度の良い範囲のみを選び出し合成することで点群の精度向上が可能である。また、フィルタによるノイズ整形や点群のマッチング手法の改善によりにより更なる精度向上が期待できる。

6. 参考文献

- [1] J. Engel, T. Schöps, and D. Cremers, "LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM," European Conference on Computer Vision (ECCV), Zurich, Switzerland, pp.834–849, Sep. 2014.
- [2] D. Caruso, J. Engel, and D. Cremers. "Large-Scale Direct SLAM for Omnidirectional Cameras," International Conference on Intelligent Robot Systems (IROS). Hamburg, Germany, pp. 141–148, Oct. 2015.

2018年度 卒業論文

LSD-SLAM を用いた全天球カメラ映像からの 3次元再構成
3D Reconstruction from Omnidirectional Video Using LSD-SLAM

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

1W152095-0

加藤裕也

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 関連研究	1
1.3 研究目的	1
1.4 本論文の構成	2
第2章 LSD-SLAM	3
2.1 まえがき	3
2.2 LSD-SLAM の概要.....	3
2.3 LSD-SLAM の利点及び課題.....	4
2.4 むすび	6
第3章 全天球カメラ.....	7
3.1 まえがき	7
3.2 Theta V	7
3.3 画像形式	7
3.3.1 スフィアマップ.....	8
3.3.2 キューブマップ.....	9
3.5 むすび	9
第4章 提案手法	10
4.1 まえがき	10
4.2 画像分割	10
4.3 点群の取得	11
4.4 点群の合成	11
4.5 評価方法	11
4.6 むすび	12
第5章 実験結果と考察.....	13
5.1 まえがき	13
5.2 実験場所	13
5.3 全天球カメラを用いた実験.....	13
5.4 全天球カメラを用いた実験の評価.....	15
5.5 一眼レフを用いた実験.....	17
5.6 一眼レフを用いた実験の評価.....	18
5.7 考察	18
5.8 むすび	18

第 6 章 結論と課題	19
6.1 結論	19
6.2 課題	19
謝辞	20
参考文献	21
表一覧	22
図一覧	23
研究業績	24

第 1 章 序論

1.1 研究背景

近年，自動車やロボットの自動運転が注目されている．ロボットの自律移動に必要な技術として環境に対する自己位置の推定と環境地図の作成があり，これらを同時に行う技術として **Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)** がある．

自己位置推定を行うために用いる計測機器として，**LiDAR** をはじめとするレーザー距離計測機，**GPS**，カメラ等が挙げられる．レーザー距離計測機は高精度であるが非常に高価な計測機器である．**GPS** も高精度ではあるが電波を受信できる屋外環境に使用が限定される．一方，カメラは比較的安価で軽く屋内環境での使用も可能であるため **SLAM** に用いる計測機器として特に注目されている．ロボットに計測機器を搭載する際価格と重量が重要であることから 1 台のカメラを用いた単眼 **SLAM** の研究が盛んに行われている．

環境地図は地図の使用法に則したものを作る必要があり，自動車のような平面を移動するロボットの場合 2 次元の地図を作成すればよい．一方，近年急速に発展してきたドローンのように飛行するロボットは，従来のような 2 次元の地図ではなく 3 次元の地図を作成する必要がある．そこで，3 次元の地図を作成する手法の研究が進められている．

本論文で用いる **LSD-SLAM** は，単眼 **SLAM** であり環境地図は点群として作成されるため 3 次元の地図として使用できる．本論文の提案手法は屋内環境で点群を取得することを仮定している．全天球画像を分割して点群を取得したのち複数の点群を合成することで，精度の高い点群の取得を図る．

1.2 関連研究

魚眼カメラ映像を **LSD-SLAM** に適用する研究として **David Caruso** らの研究[1]が挙げられる．**David Caruso** らの研究では画角 185° の魚眼カメラ映像を **LSD-SLAM** に適用している．しかし，画角が 360° の全天球カメラを **LSD-SLAM** に適用する研究は進んでいないのが現状である．

1.3 研究目的

画角が広いカメラを用いることにより 1 台のカメラで広範囲を撮影することが可能となり，点群の取得に用いるカメラ台数の削減が期待できる．画角が 360° の全天球カメラ映像を用いることでカメラの回転移動に脆弱であるという **LSD-SLAM** の欠点を補い広範囲の点群を精度よく取得することを目的とする．

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, 本論文の研究背景, 関連研究, 研究目的及び構成を述べている.

第2章では LSD-SLAM の概要及び利点と課題について述べる.

第3章では全天球カメラの概要と画像形式について述べる.

第4章では提案手法について述べる.

第5章では実験の結果, 精度評価及び通常カメラとの精度比較を示す.

第6章では本論文の結論及び課題について述べる.

第2章 LSD-SLAM

2.1 まえがき

本章ではLSD-SLAMについて述べる。LSD-SLAMはJakob Engelらによって提案された輝度勾配を利用してカメラの位置推定と環境地図作成を同時に行う手法である[2].

2.2 LSD-SLAMの概要

LSD-SLAMは特徴点を利用せず画像の輝度勾配を利用してカメラの位置推定と環境地図作成を行う単眼SLAMである。LSD-SLAMは図2.1に示すようにトラッキング、深度マップ推定、マップ最適化の3手順によって構成される。トラッキングでは新たな画像が入力されるたびキーフレームと入力フレームの2フレームから輝度値の誤差を最小化するようにカメラ位置を推定する。深度マップ推定では入力フレームから新しいキーフレームの作成または現在のキーフレームの改善を行う。入力フレームを現在のキーフレームと比較して大きく回転移動もしくは並進移動した際に入力フレームを新たなキーフレームとする。新たなキーフレームが作成されなかった場合、入力フレームを用いて現在のキーフレームの深度を改善する。マップ最適化では同じ位置を観測している2画像を検出しカメラの移動経路のループを閉じるようにキーフレーム全体の姿勢を最適化する。以上の手順により入力映像から図2.2に示すような点群が環境地図として作成される。

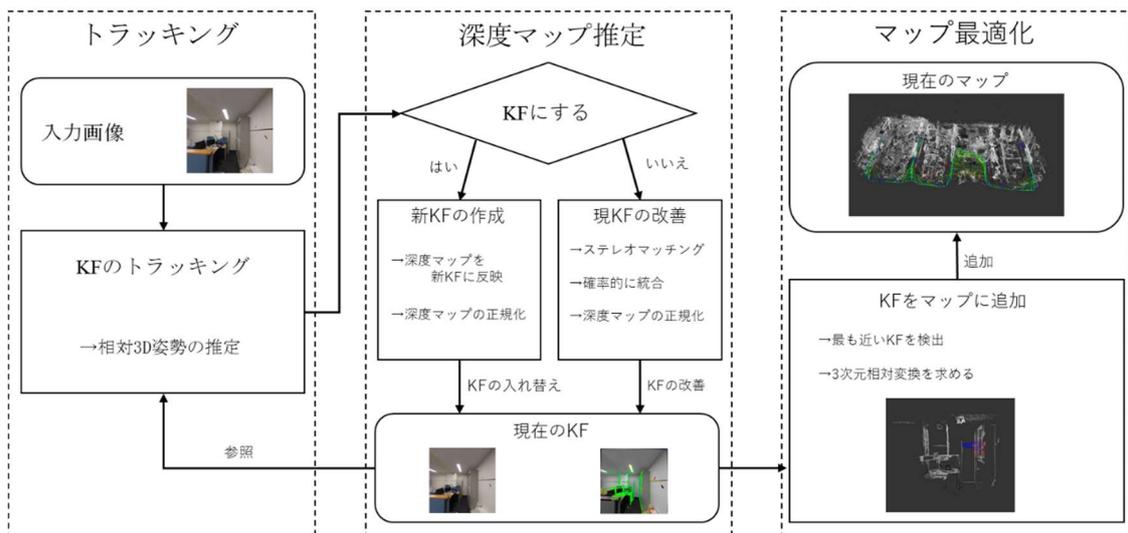


図 2.1 LSD-SLAM の概要図

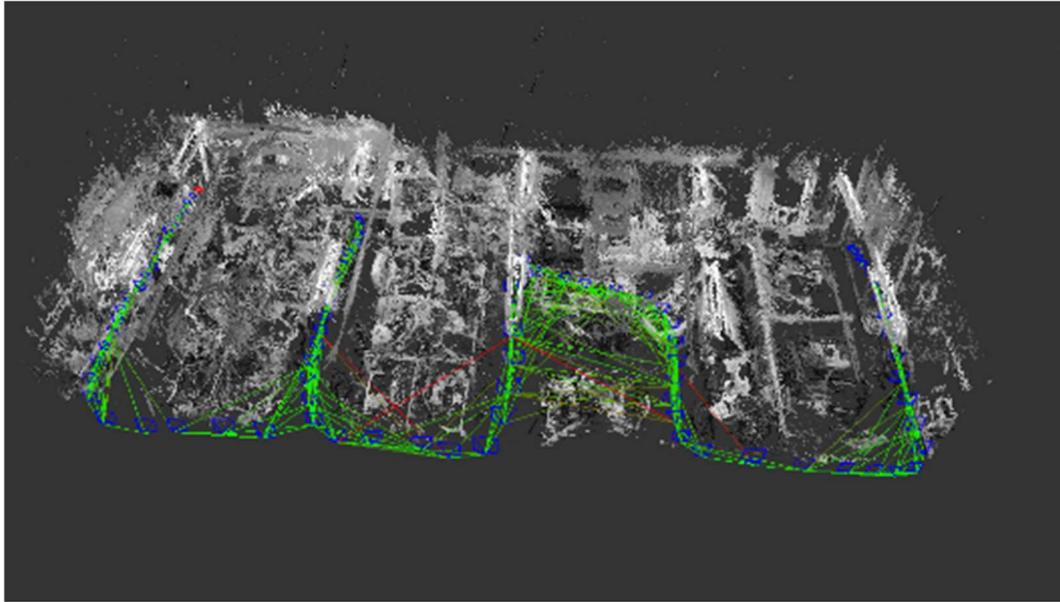


図 2.2 作成される環境地図の例

2.3 LSD-SLAM の利点及び課題

LSD-SLAM は単眼 SLAM であるため使用する計測機器が安価かつ軽量なカメラ 1 台のみである。大がかりな計測機器や計算機器を必要としないためドローン等の積載量が小さいロボットに適用できる技術である。また、CPU 上で実行できるため入力動画に対して低遅延で高精度な点群を取得できる。さらに LSD-SLAM は輝度勾配を利用した SLAM であることから、特徴点ベースの SLAM と異なり点数の多い密な点群が取得できることが利点となっている。

LSD-SLAM の課題としてトラッキングの失敗とカメラの回転に対する脆弱性が挙げられる。図 2.3 に示すような輝度差の大きい入力画像はキーフレームとの比較によってカメラ位置を推定することが容易である。一方、図 2.4 に示すような白色の壁等の輝度差の小さい物体が画像の大部分を占める入力画像はキーフレームとの比較でカメラ位置を推定することが困難である。現在のカメラ位置は直前のカメラ位置と移動量で計算されるため、一度でもカメラ位置が計測できなくなるとその地点以降のカメラの移動が認識できなくなってしまう。また、入力画像とキーフレームからステレオマッチングを行うことで 3 次元復元を行うため、並進運動を伴わない回転運動のみの映像が入力された際に図 2.5 に示すように 3 次元再構成自体が破綻してしまう。

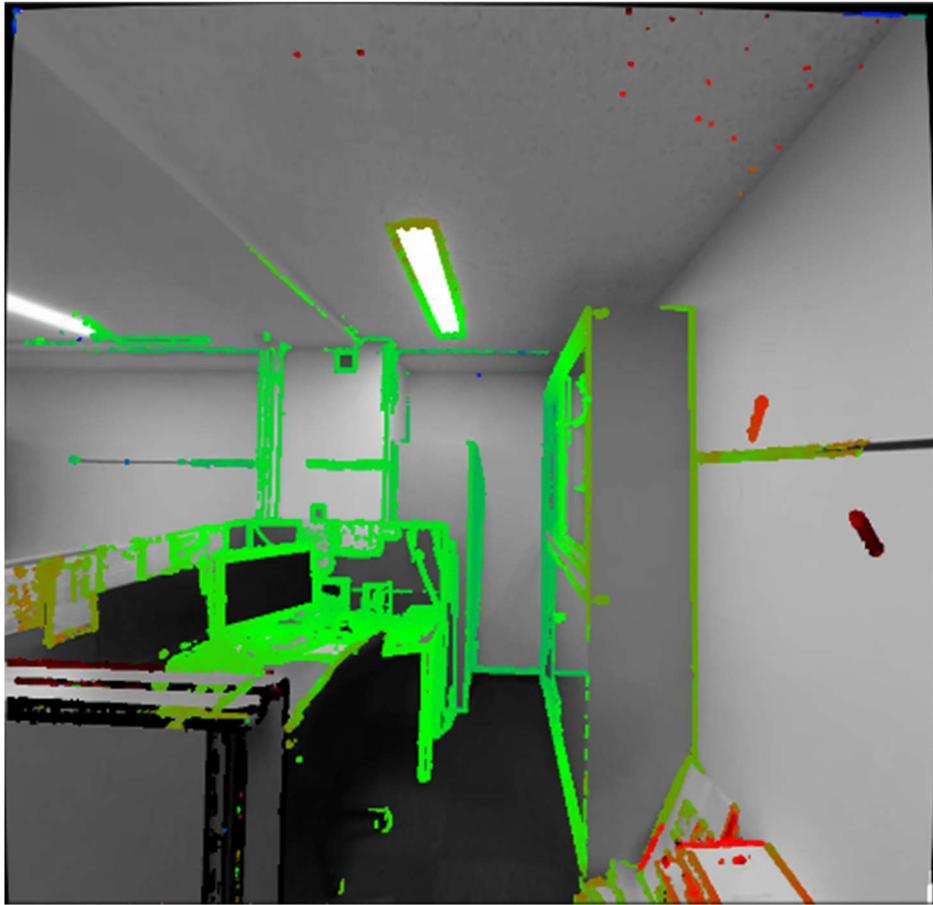


図 2.3 輝度差の大きい入力画像

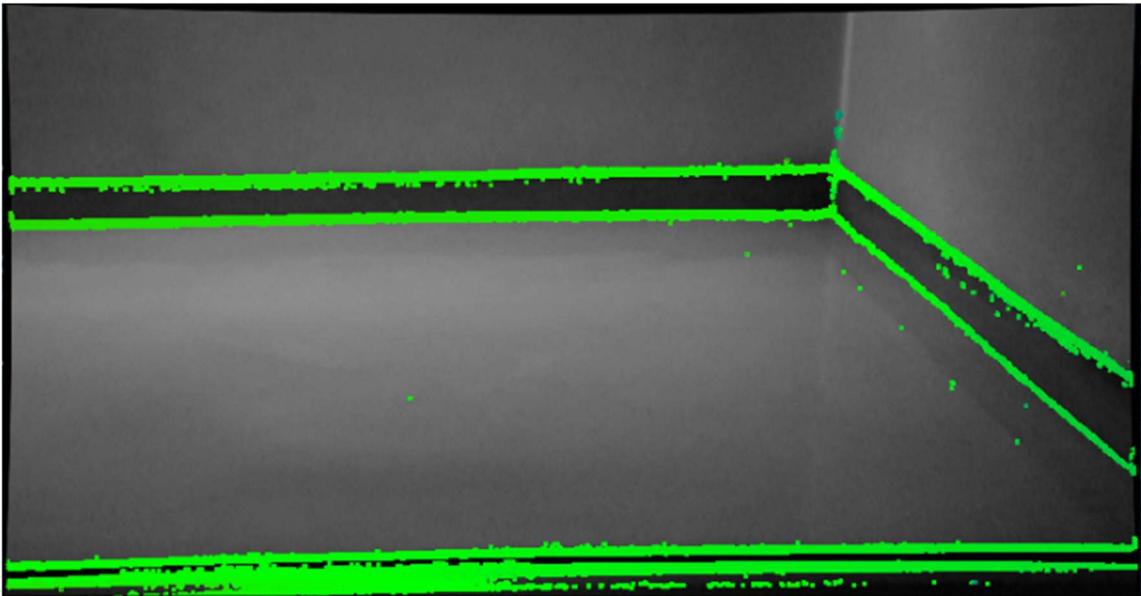


図 2.4 輝度差の小さい入力画像

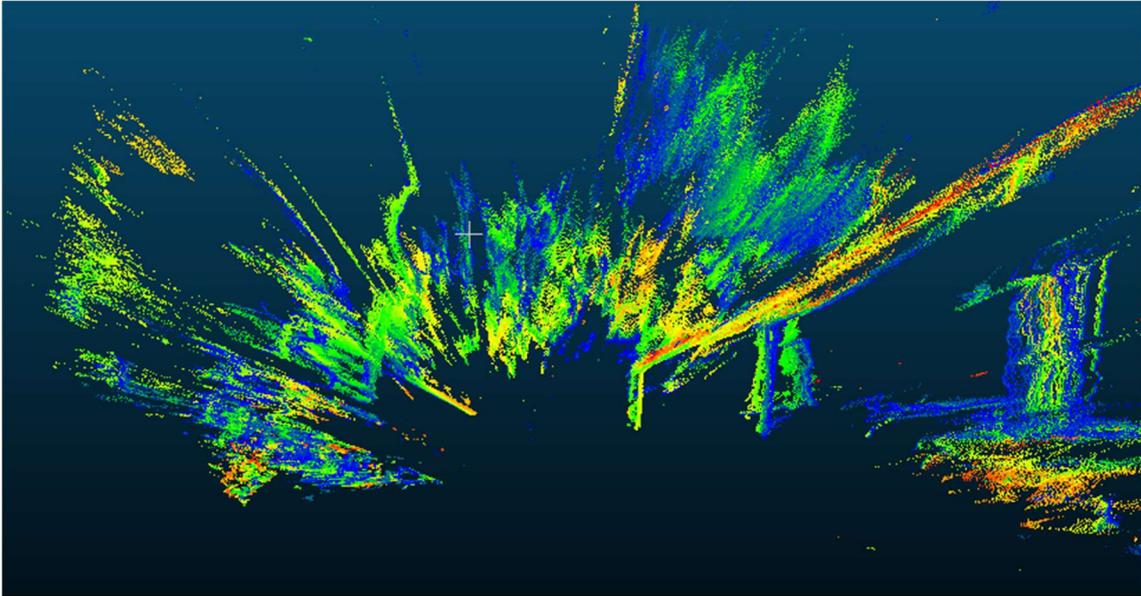


図 2.5 回転運動による 3 次元再構成の破綻

2.4 むすび

本章では, LSD-SLAM の構造について述べた. また, LSD-SLAM の利点及び課題について述べた.

第3章 全天球カメラ

3.1 まえがき

本章では本論文の実験に使用する全天球カメラ Theta V および全天球カメラの画像形式について述べる.

3.2 Theta V

Theta V は RICOH 社の提供する全天球カメラである[3]. Theta V は一度の撮影でカメラを中心とする 360° 全方位を撮影することができ, これを可能とするのは Theta V に搭載されている二つのレンズと二つのイメージセンサである. カメラの正面と後面に一つずつ搭載されたレンズから入射した光はカメラ内部にある 90° プリズムで左右のイメージセンサに振り分けられ, それぞれ独立して保存される. 2枚の画像を色味や明るさが合うように補正しつなぎ合わせつなぎ位置に歪み補正を行うことで一枚の全天球画像が得られる.

Theta V の静止画解像度は 5376×2688 [画素]である. 動画は 4K で撮影することが可能であり動画解像度, フレームレート, ビットレートはそれぞれ 3840×1920 [画素], 29.97fps, 56Mbps である. 画像ファイル形式は静止画のとき JPEG, 動画のとき MP4 であり. また, 内蔵メモリは約 19GB であり, 静止画で約 4800 枚, 4K での動画撮影の場合連続で 5 分間, 合計約 40 分間の撮影が可能である[4].

3.3 画像形式

Theta V で撮影した画像は equirectangular 形式で保存される. Theta V で撮影した画像を図 3.1 に示す. equirectangular 形式の画像は正距円筒図法で表された画像で緯線と経線が直角かつ等間隔で交わる. 図 3.1 に示すように equirectangular 形式の画像では実際の面積と画像中の面積が一致せず緯度が高い範囲は大きく引き伸ばされている. equirectangular 形式の画像を立体的に表示する方法としてスフィアマップとキューブマップがある.

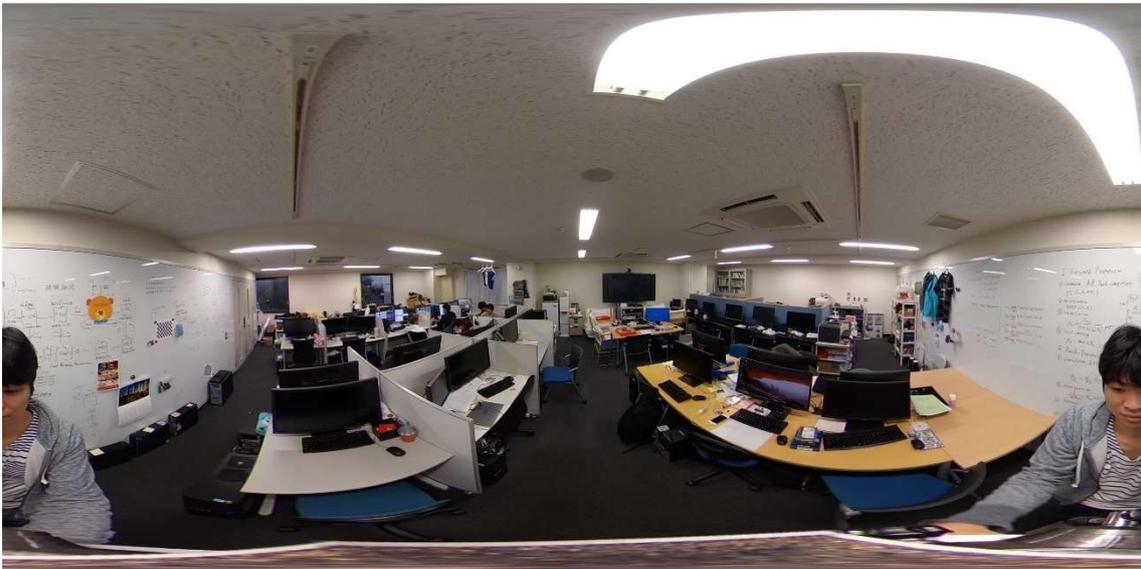


図 3.1 Theta V で撮影した画像

3.3.1 スフィアマップ

スフィアマップは equirectangular 画像の緯度と経度を球の緯度と経度に対応させ、球として表示する画像である。Theta の専用アプリケーションを用いることで図 3.2 に示すような球状の画像を表示できる。



図 3.2 スフィアマップ

3.3.2 キューブマップ

キューブマップは全天球カメラが箱の中に納まった状態で撮影を行った状態を想定した手法で全天球画像を 6 枚の画像をつなぎ合わせた立方体の展開図として表現する。equirectangular 画像とキューブマップの対応は、図 3.3 に示すような関係となっている。図 3.1 に示した equirectangular 画像をキューブマッピングしたものを図 3.4 に示す。

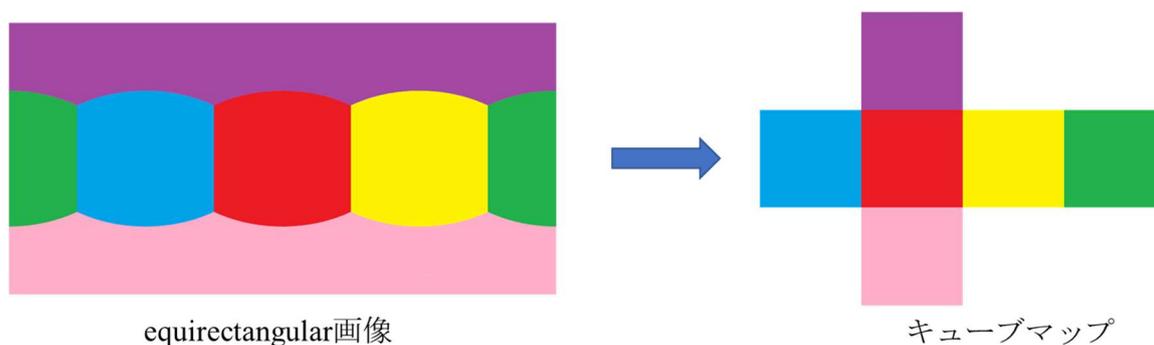


図 3.3 equirectangular 画像とキューブマップの関係

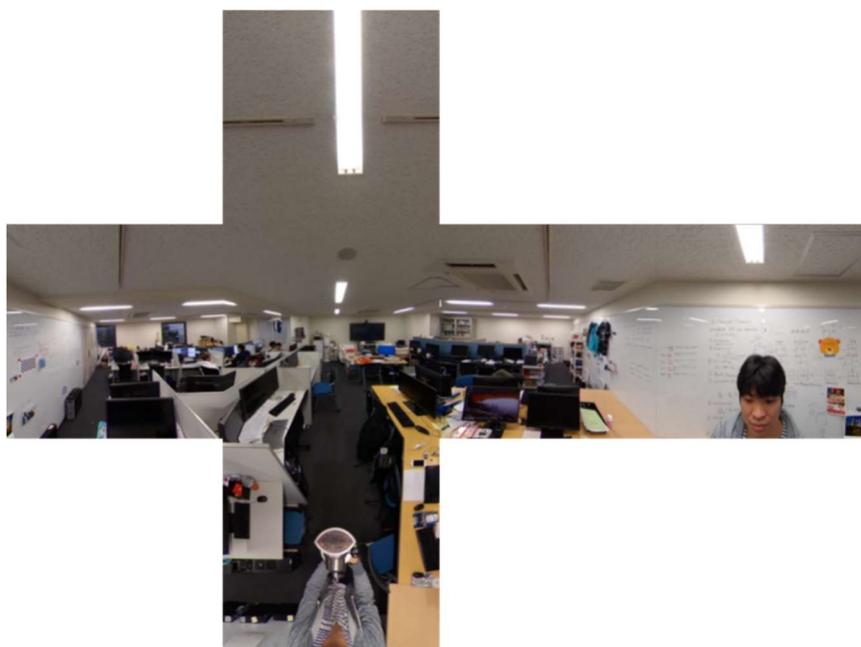


図 3.4 キューブマップ

3.5 むすび

本章では、実験に使用した Theta V の性能について述べた。また、Theta V で取得できる画像の画像形式及び変換可能な画像形式について述べた。

第4章 提案手法

4.1 まえがき

本章ではLSD-SLAMを全天球画像に適用し、点群を取得する手法を提案する。提案手法は画像分割、点群の取得、点群の合成の3手順から構成される。また、評価方法も述べる。

4.2 画像分割

LSD-SLAMはピンホールカメラモデルで構成されているため equirectangular 形式の画像を入力すると歪みが大きく正しく動作しない。このため equirectangular 画像をピンホールカメラモデルに対応する画像形式に変換する必要がある。本手法では全天球カメラで撮影された動画を画像に分割し、画像にキューブマッピングを施すことでLSD-SLAMの入力画像に適した形に変換する。Theta Vで撮影された動画を動画のフレームレートに従って分割し equirectangular 形式の全天球画像を取得する。次に equirectangular 画像にキューブマッピングを施し1枚の画像から6枚の画像を生成する。6枚の画像から構成される立方体を上方向から見た模式図を図4.1に示す。以下の文章では6枚の画像を図4.1に示すように上面、下面、正面、背面、右面、左面と呼ぶ。6枚の画像のうち上面、下面、背面に対応する3枚の画像は使用しない。上面に映るのは天井のみであり周辺環境が計測できないため3次元再構成に不適切である。同様に下面の画像も床のみが撮影されているため3次元再構成に不適切である。背面はカメラの撮影者が常に映り込み3次元再構成に支障をきたすため使用しない。以上の理由から図4.1に示した面のうち左面、正面、右面に対応する3枚の画像のみを用いる。同様の処理を取得した全ての全天球画像に対して行う。

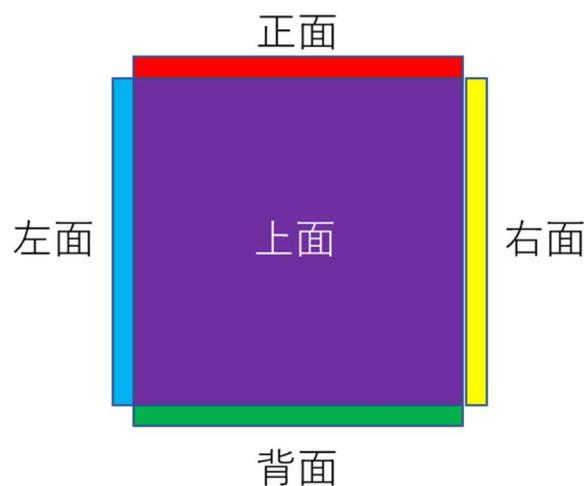


図4.1 キューブマップの模式図

4.3 点群の取得

画像分割で取得した左面，正面，右面に対応する画像群をそれぞれ LSD-SLAM に入力し三つの点群を取得する．

4.4 点群の合成

左面，正面，右面に対応する点群はそれぞれ共通した範囲が存在するため，その範囲の中から特徴点を 3 点選び出し，点群を一つに合成する．特徴点は物体の角を手動で選択する．

4.5 評価方法

点群の精度評価は計測した屋内環境の壁面と取得した点群の距離を用いて行う．計測した屋内環境の形状を図 4.2 に示す．計測した部屋は図 4.2 の 04-01 である．また，カメラの正面で撮影した方向が y 軸正の方向になるようにして xy 平面上に表したものを図 4.3 に示す．図 4.3 に示した壁面を表す直線は 4 本あり，

$$y = 10x \quad (4.1)$$

$$y = 0 \quad (4.2)$$

$$x = 12.76 \quad (4.3)$$

$$y = 7.05 \quad (4.4)$$

で表される．

評価に用いる点群は計測した部屋の天井から 80~82cm の範囲の点群を用いる．点群の取得は部屋の壁面に黒色テープを貼り撮影した映像を用いる．天井から 80~82cm の範囲は天井に近く，壁面を除く部屋に存在する物体は映り込まない．黒色テープは白色の壁面に対して輝度差が大きく点群が取得しやすいことから選択した．式(4.1)~(4.3)に対応する壁面を壁面Ⅰ，壁面Ⅱ，壁面Ⅲと名付ける．取得した点群を図 4.3 の xy 平面にプロットして点と壁面Ⅰ，壁面Ⅱ，壁面Ⅲの距離を計算することで評価する．式(4.4)で表される壁面は柱や窓，モニターなどがあるため，壁面上の点数が少なく評価に使用しない．



図 4.2 計測した屋内環境

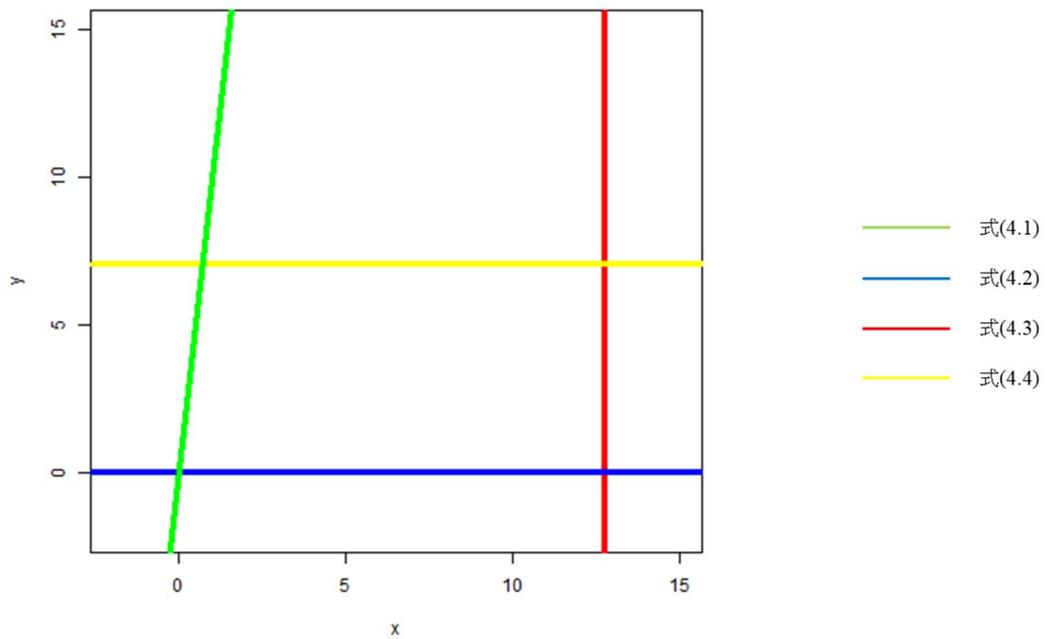


図 4.3 xy 平面上に表した計測環境の壁面

4.6 むすび

本章では，提案方式について説明した．本提案方式では全天球画像にキューブマッピングを施すことで全天球画像の LSD-SLAM への適用を可能とした．

第5章 実験結果と考察

5.1 まえがき

本章では，全天球カメラ及び一眼レフカメラを用いた点群取得実験の結果を示し，考察を述べる．全天球カメラを用いた実験では4章に示す提案手法により点群を取得した．一眼レフを用いた実験ではLSD-SLAMに撮影した映像を入力し点群を取得した．

5.2 実験場所

本実験に使用する動画は早稲田大学西早稲田キャンパス66号館401号室で撮影した．

5.3 全天球カメラを用いた実験

全天球カメラを用いて点群を取得した．Theta Vの左方向，正面方向，右方向の点群を図5.1~5.3に示す．図5.1~5.3に示した三つの点群を合成しダウンサンプリングしたものを図5.4に示す．また，各点群の点の数を表5.1に示す．

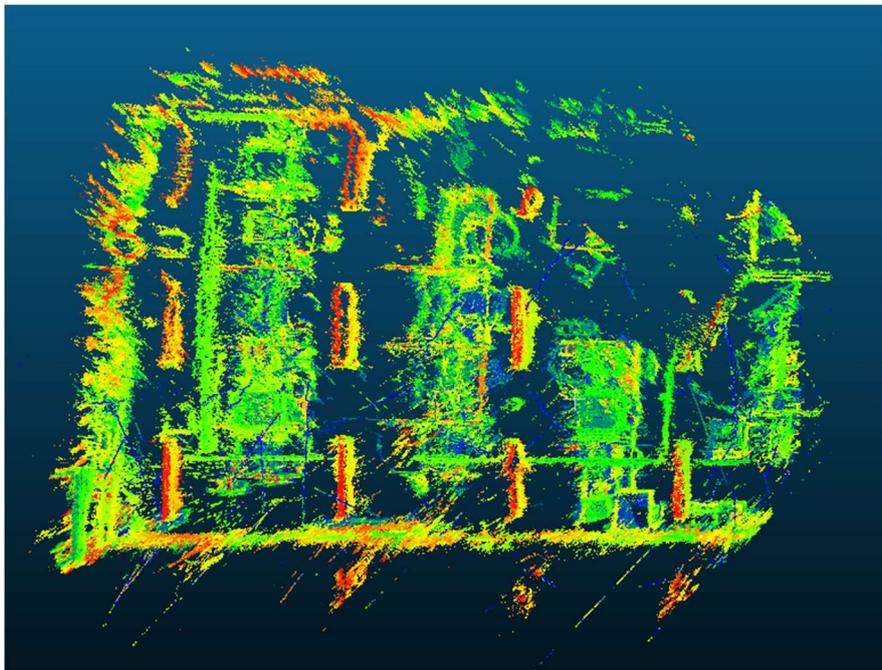


図 5.1 左方向の点群

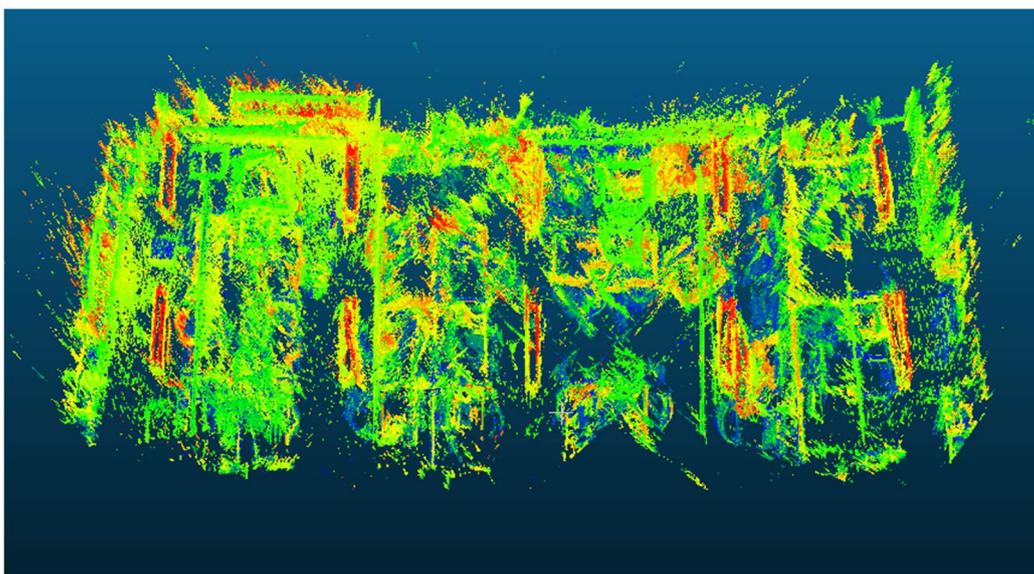


図 5.2 正面方向の点群

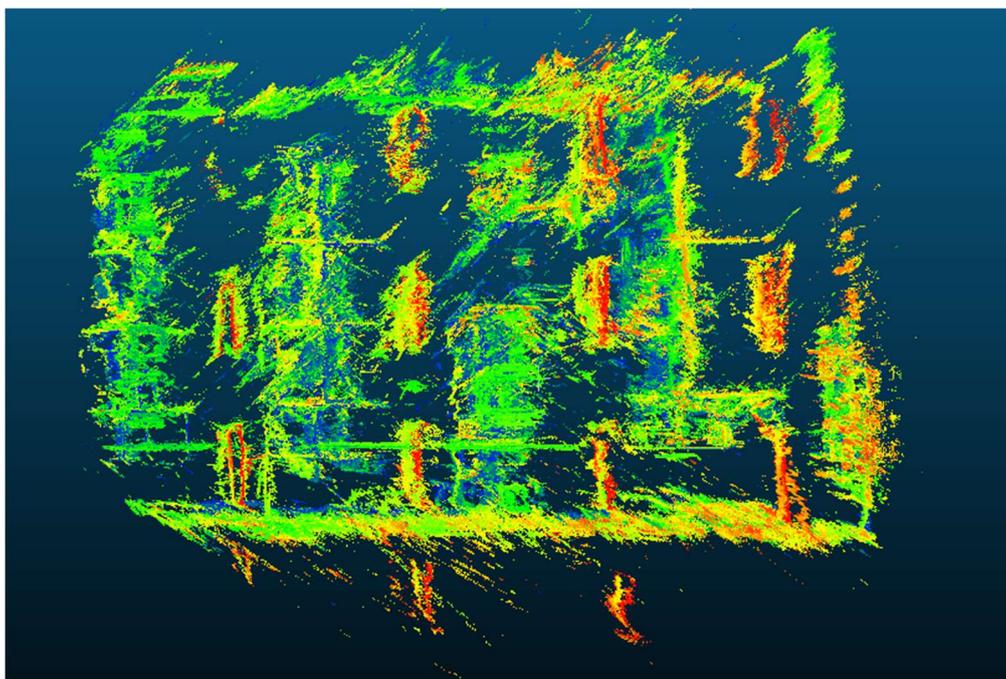


図 5.3 右方向の点群

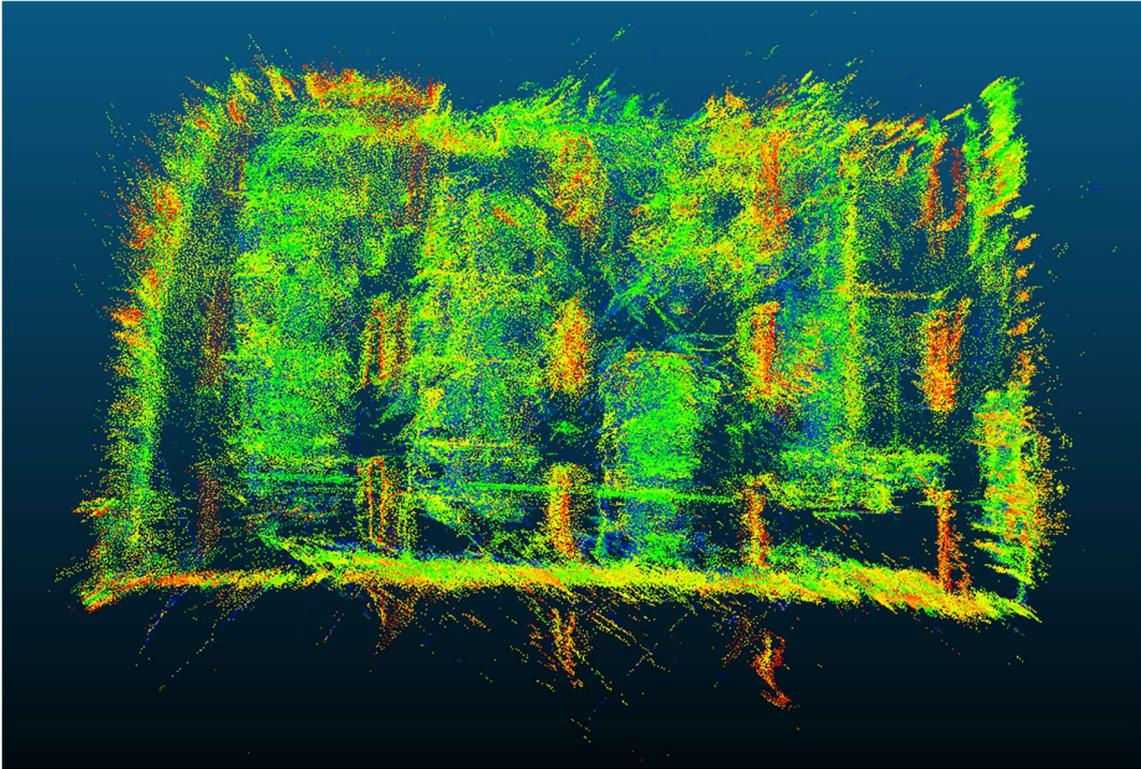


図 5.4 合成した点群

表 5.1 全天球カメラで取得した点群

	左方向 (点)	正面方向 (点)	右方向 (点)
点の数	5324182	6513432	4321876

図 5.1~5.3 から各点群には共通する範囲が存在することが見て取れる。また、図 5.4 に示した合成した点群の形状は図 4.3 に示した正解データと一致することがわかる。

5.4 全天球カメラを用いた実験の評価

図 5.1~5.3 に示した三つの点群を合成し天井から 80~82cm の範囲のみを切り取った点群を図 5.5 に示す。図 5.5 に示した点群を図 5.6 に示すように三つに分割し点群Ⅰ、点群Ⅱ、点群Ⅲと名付ける。4.5 で示した壁面Ⅰ~Ⅲと点群Ⅰ~Ⅲの誤差を表 5.2 示す。

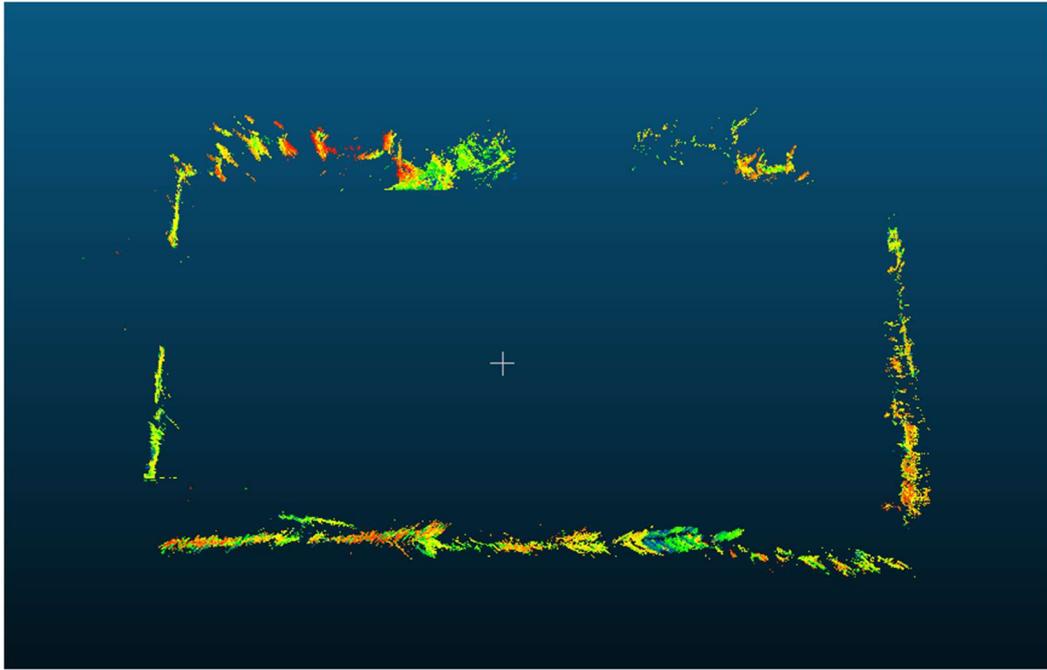


図 5.5 評価に使用した点群

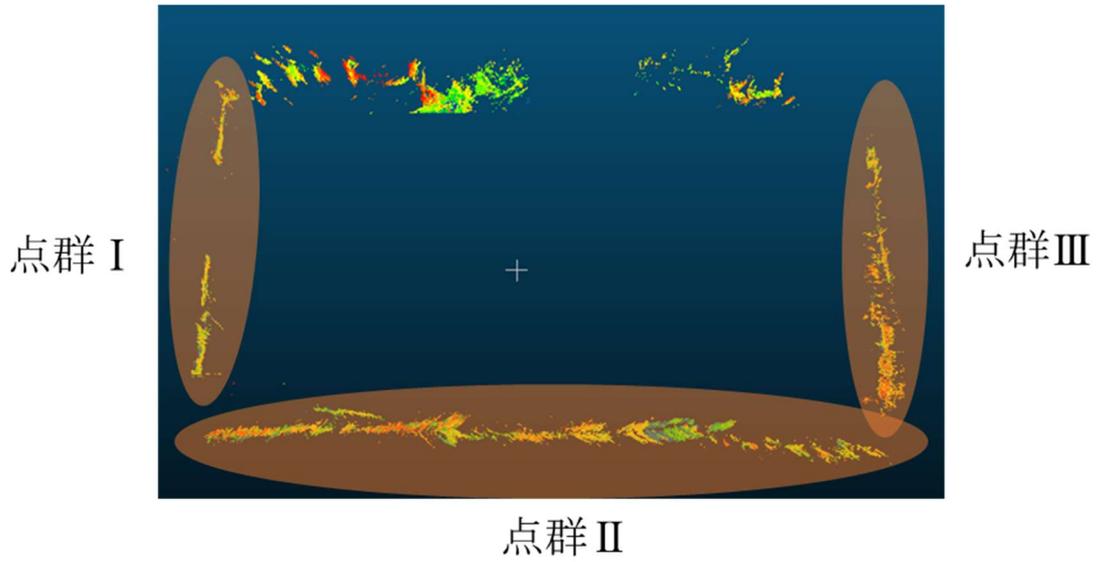


図 5.6 点群の名称

表 5.2 壁面 I~III と点群 I~III の誤差

壁面 I と点群 I の誤差 (cm)	壁面 II と点群 II の誤差 (cm)	壁面 III と点群 III の誤差 (cm)
4.827	23.21	10.50

5.5 一眼レフを用いた実験

一眼レフを用いて壁面Ⅰ～Ⅲの方向を向いてそれぞれ撮影し点群を取得した。撮影には標準レンズの smc PENTAX-DA 18-135mmF3.5-5.6ED AL[IF] DC WR を用いた[5]。取得した点群を天井方向から見たもの及び壁面Ⅰ～Ⅲが正面となる方向から見たものを図 5.7～5.9 に示す。また、図 5.7～5.9 に示した三つの点群の点の数を表 5.3 に示す。

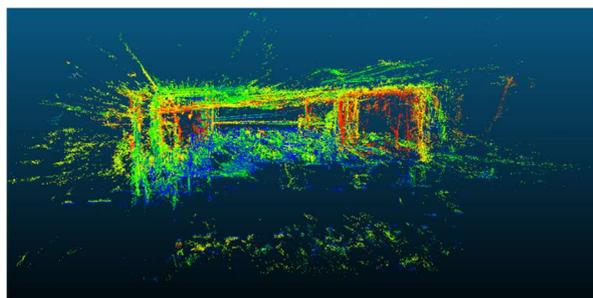
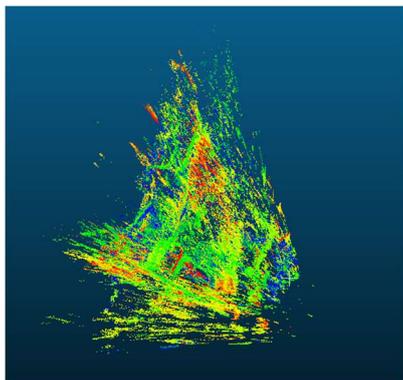


図 5.7 壁面Ⅰ方向の点群

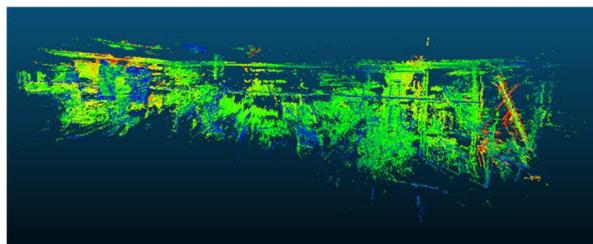
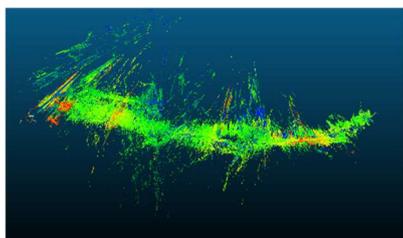


図 5.8 壁面Ⅱ方向の点群

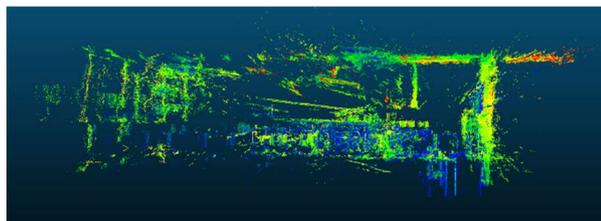
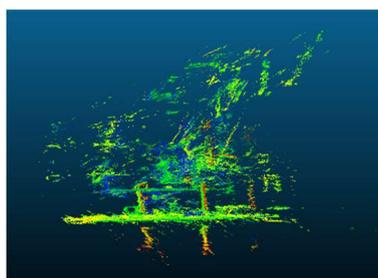


図 5.9 壁面Ⅲ方向の点群

表 5.3 一眼レフで取得した点群

	壁面Ⅰ方向 (点)	壁面Ⅱ方向 (点)	壁面Ⅲ方向 (点)
点の数	930323	2094927	537248

一眼レフで撮影した動画の移動経路及び撮影時間は全天球カメラで撮影した動画と同じであるが、取得できた点群は図 5.7~5.9 に示すように部屋の形状が正しく取得できなかった。

5.6 一眼レフを用いた実験の評価

図 5.7~5.9 に示した点群から共通する特徴点を見つけることができず合成できなかった。また、評価もできなかった。

5.7 考察

表 5.2 より壁面Ⅰ，壁面Ⅲ，壁面Ⅱの順で誤差が小さかった。特に壁面Ⅱの誤差が大きかった。これはカメラの移動量が壁面に垂直な方向に大きく，平行な方向に小さかったことが挙げられる。LSD-SLAM ではカメラの視差から距離推定を行うため平行方向への移動距離は正確に推定できるが，垂直方向への移動は移動距離が短いと視差が小さく誤差が大きい。

一眼レフを用いた実験では屋内環境の計測が正確に行えなかった。原因としてカメラの画角の小ささと最短撮影距離の大きさが挙げられる。撮影に使用したレンズの画角は左右方向に 76° であり上下方向はさらに小さい。最短撮影距離は 40cm であり狭い室内環境を撮影するには画角の小ささから映る範囲も小さく，映った範囲も最短撮影距離よりも小さい領域は正確に撮影できないことから点群が精度よく取得できなかったと考えられる。

一般的にカメラは長方形のイメージセンサを用いているため左右方向の画角に対して上下方向の画角が小さい。一方，Theta V は全天球カメラであることから 360° 全方位の画像が撮影でき，キューブマッピングした後も各面の画像は上下左右方向にそれぞれ 90° の画角で撮影される。また，Theta V は最短撮影距離が 10cm と短く，屋内環境で撮影しても最短撮影距離以下の範囲に物体が映り込むことは少ない。以上のことから屋内環境の点群取得には本論文の提案手法が適していると言える。

5.8 むすび

本章では LSD-SLAM に全天球画像を適用し取得した点群と一眼レフ画像を適用し取得した点群を比較した。また，撮影距離が短い屋内環境において提案手法が有効であることを示した。

第 6 章 結論と課題

6.1 結論

本研究では全天球カメラを用いて屋内環境を撮影した。また，撮影した動画にキューブマッピングを施し LSD-SLAM に適用した。得られた点群を合成することで屋内環境の 3 次元再構成を行った。全天球カメラで計測した点群と一眼レフで計測した点群を比較することで全天球カメラの優位性を示した。

6.2 課題

本研究の提案手法では，点群の合成は共通範囲から特徴点を見つけて合成する手法をとった。しかし，精度及び汎用性の観点から点群の合成を自動的に行う手法が求められる。

また，本手法では取得した点群をすべて合成した。しかし，カメラの向きや計測物体との距離により点群の精度にばらつきがある。合成前の各点群に対し評価を行い精度の高い範囲のみを合成することで精度を向上させることが可能である。点群の評価法及び点群の選択技術の検討が必要である。

謝辞

本論文の作成にあたり，熱心なご指導をいただいた渡辺裕教授に感謝の意を表します。また，実験手法に関し助言をくださった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感謝いたします。さいごに常日頃から相談に乗ってくださり快適な実験環境を作ってくくださった研究室の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] D. Caruso, J. Engel, and D. Cremers, “Large-Scale Direct SLAM for Omnidirectional Cameras,” International Conference on Intelligent Robot Systems (IROS), Hamburg, Germany, pp. 141-148, Oct. 2015.
- [2] J. Engel, T. Schöps, and D. Cremers, “LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM,” European Conference on Computer Vision (ECCV), Zurich, Switzerland, pp. 834-849, Sep. 2014.
- [3] 株式会社 RICOH, RICOH THETA V (2019 年 1 月現在)
<https://theta360.com/ja/about/theta/v.html>
- [4] 株式会社 RICOH, RICOH THETA TECHNOLOGY (2019 年 1 月現在)
<https://theta360.com/ja/about/theta/technology.html>
- [5] 株式会社 RICOH, K マウントレンズ (2019 年 1 月現在)
<http://www.ricoh-imaging.co.jp/japan/products/lens/k/standard/smcpentax-da18-135/>

表一覧

表 5.1	全天球カメラで取得した点群.....	15
表 5.2	壁面I~IIIと点群I~IIIの誤差.....	16
表 5.3	一眼レフで取得した点群.....	18

図一覧

図 2.1	LSD-SLAM の概要図.....	3
図 2.2	作成される環境地図の例.....	4
図 2.3	輝度差の大きい入力画像.....	5
図 2.4	輝度差の小さい入力画像.....	5
図 2.5	回転運動による 3 次元再構成の破綻.....	6
図 3.1	Theta V で撮影した画像.....	8
図 3.2	スフィアマップ.....	8
図 3.3	equirectangular 画像とキューブマップの関係.....	9
図 3.4	キューブマップ.....	9
図 4.1	キューブマップの模式図.....	10
図 4.2	計測した屋内環境.....	12
図 4.3	xy 平面上に表した計測環境の壁面.....	12
図 5.1	左方向の点群.....	13
図 5.2	正面方向の点群.....	14
図 5.3	右方向の点群.....	14
図 5.4	合成した点群.....	15
図 5.5	評価に使用した点群.....	16
図 5.6	点群の名称.....	16
図 5.7	壁面I方向の点群.....	17
図 5.8	壁面II方向の点群.....	17
図 5.9	壁面III方向の点群.....	17

研究業績

加藤裕也, 原潤一, 渡辺裕, “LSD-SLAM を用いた全天球カメラ映像からの 3 次元再構成”,
2019 年電子情報通信学会総合大会, 2019 年 3 月発表予定