

修士論文概要書

Master's Thesis Summary

Date of submission: 01/25/2021 (MM/DD/YYYY)

専攻名(専門分野) Department	情報理工・ 情報通信専攻	氏名 Name	加藤 裕也	指導 教員 Advisor	渡辺 裕 ⑧
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	5119F024-5		
研究題目 Title	全天球カメラ映像を用いた3次元地図の作成 Creation Method of 3D Maps Using Omnidirectional Camera Images				

1. まえがき

近年、自動運転に関する技術が注目を浴びている。自動運転において重要な技術は自己位置推定と環境地図の作成の二つである。これら二つの技術を同時に行う技術として Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)がある。SLAMの中でもカメラ1台の映像を用いる手法は単眼 SLAM と呼ばれ、カメラは軽く費用も少ないことから研究が進められている。SLAMを用いた点検も行われており、一度の計測で広範囲の精度のよい3次元データの取得が求められている。

本論文では全天球カメラ映像を画像変換することにより単眼 SLAM への適用を可能とする。まず、全天球カメラで撮影した映像にキューブマッピングを行い分割し、それぞれの映像を連結させることにより一つの映像から周囲 360 度を計測することを可能とする。以上の手法を提案するとともに実験により本手法の評価を行う。

2. 関連技術

2.1. ORB-SLAM

ORB-SLAM[1]は Ra'ul Mur-Artal らによって提案された画像内の特徴点を利用し自己位置推定と環境地図の作成を行う手法である。ORB-SLAM は一台のカメラ映像を用いる単眼 SLAM の一種で、カメラモデルはピンホールモデルと魚眼モデルの二種類が用意されている。これは CPU 上で実行できる手法であり、低遅延で点群を取得でき、カメラ経路が正確なことから広く利用されている。特徴点を使う手法は選択される特徴点の数が少ないことから出力された点群も疎なものとなるが、カメラの動きの変化に強く移動経路は正確に取得できる。

2.2. 全天球カメラ

全天球カメラは周囲 360 度を一度に撮影できるカメラであり、複数台のカメラを組み合わせすべての方位を撮影できるようにしたものや、魚眼カメラを前後に2台組み合わせたものがある。周囲 360 度を撮影可能なことからドローンに搭載して計測に用いるなどビジネスや学術的にも注目され始めたカメラである。画像形式は魚眼形式とエクイレクタングラー形式がある。

2.3. キューブマッピング

キューブマッピングは全天球カメラを立方体の箱の中に納めた状態で撮影したように画像変換をする手法である。画像にキューブマッピングを行うと立方体の展開図として出力される。画像変換にはエクイレクタングラー形式の映像を用い、1枚の映像が6枚の正方形の映像に分割される。全天球カメラ映像は画角が 360 度であるが、キューブマッピングを行い分割されたそれぞれの映像の画角は上下方向左右方向ともに 90 度となる。

3. 提案手法

全天球カメラで撮影した映像をエクイレクタングラー形式に変換する。エクイレクタングラー形式の映像を画像変換し画像中心が移動した映像を作成する。エクイレクタングラー形式の映像と画像中心を移動させた映像にそれぞれキューブマッピングを施し、出力された映像のうち必要な映像を選択する。選択した映像を、各映像の中心が向いている方向に従って並べ替え連結させ一本の映像に編集する。最後にこの映像を ORB-SLAM に入力することで点群を取得する。

全天球カメラ映像を映像 A とし、画像編集によりカメラ方向を 45 度回転させた映像を映像 A' とする。映像 A で全天球カメラの正面についているレンズが向いている方向を y 軸正の方向とすると、映像 A と映像 A' をキューブマッピングした際、正面方向、右方向、裏方向、左方向の映像のカメラ方向は図 1 のようになる。

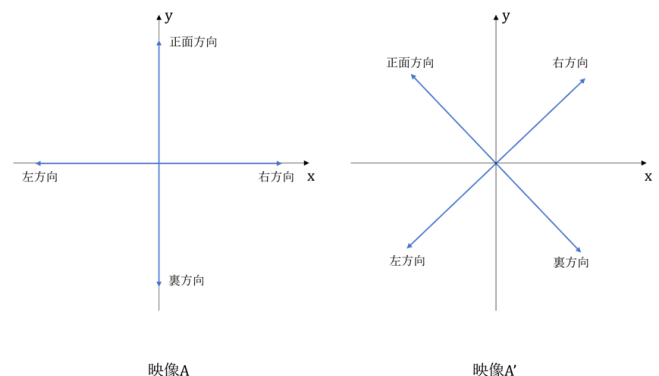


図 1 キューブマッピングした際のカメラ方向

映像Aと映像A'はカメラ方向が45度異なるため、キューブマッピングした際の各映像のカメラ方向45度ずれる。本研究ではキューブマッピングにより取得した映像のうち5本の映像を映像Aの右方向、映像A'の右方向、映像Aの正面方向、映像A'の正面方向、映像Aの左方向の順に並べ連結させる。作成した映像は周囲360度のうち270度が映り込んでいる。

4. 評価実験

評価実験はLiDARで撮った点群を正解データとし、正解データから算出された平面とORB-SLAMを用いて取得した点群の距離を評価値として用いた。カメラの移動する経路中に4か所マーカーA、マーカーB、マーカーC、マーカーDを設置した。提案手法と全天球カメラ映像のうち前面のカメラから取得された映像を魚眼モデルのORB-SLAMに入力したもの(手法1)と、キューブマッピングを行って取得した映像のうち正面方向の映像をピンホールモデルのORB-SLAMに入力したもの(手法2)を用いる。実験に使用した映像では直進してから左折して進み、再度左折したのちに直進するという経路を通った。提案手法、手法1、手法2によって作成された環境地図をそれぞれ図2、図3、図4、に示す。

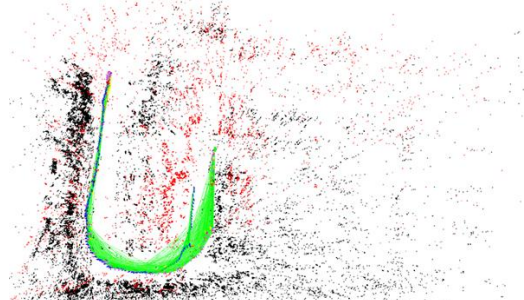


図2 提案手法により作成された環境地図

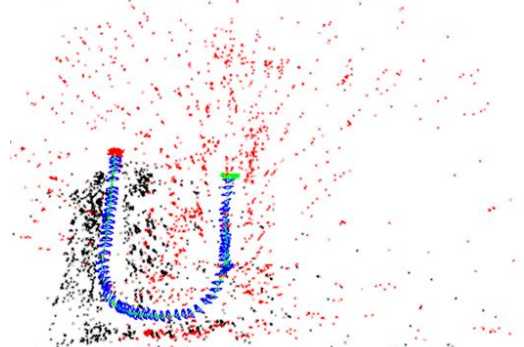


図3 手法1により作成された環境地図

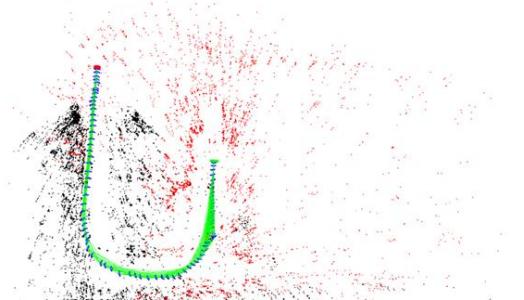


図4 手法2により作成された環境地図

カメラの移動経路が青いマークで表され、取得された点群は赤と黒の点で表されている。図2~図4より提案手法を用いることで取得できる点群の数が多くことが確認できる。提案手法ではカメラ方向を変えながら同じ経路を5回通るため、計測可能な範囲が広く取得させる点の数が多く、提案手法の課題としてカメラ経路の誤りが挙げられる。図3、図4ではカメラ経路は1本の線で表されているのに対し、図2の提案手法ではカメラの経路が一致せず途中からカメラの移動経路が二又に分岐してしまった。

撮影経路上に設置されている4つのマーカー部分の点群を切り出し、対応する平面との距離の平均を取った。ORB-SLAMを用いて取得した点群のうちマーカー部分の点群を選び出し、LiDARで取得した正解データの平面と点群の距離を取得する。提案手法、手法1、手法2で取得された点群と対応する平面の距離を表1に示す。表1で空欄となっている値は、マーカーを示す点群が取得できなかったものや、取得できた点群の数が少ないためマーカー上の特徴点を表しているか定かではないのもであり、評価ができなかったものである。

表1 平面とマーカーの距離

手法	マーカーと対応する平面の距離の平均値 [cm]			
	マーカーA	マーカーB	マーカーC	マーカーD
提案手法	1.93	8.32	0.96	3.58
手法1	-	12.03	8.57	14.24
手法2	-	13.43	-	4.50

表5.4よりマーカーAを除く3つのマーカーで提案手法の誤差が最も小さいことがわかる。また、マーカーAに関しては提案手法のみが点群を取得できたことから、提案手法は撮影条件の変化に強いことが確認できる。

5. むすび

本研究では、全天球カメラ映像にキューブマッピングを施し取得した映像を連結させてからORB-SLAMに入力することで点群を取得する手法を提案した。既存手法と提案手法を比較することにより提案手法では取得可能な点群の数が増加することが確認できた。また、マーカーを用いた評価実験により提案手法が既存の手法に比べ取得できる点群の精度も向上することが確認できた。以上より提案手法により1本の全天球カメラ映像を用いることで精度よく広範囲の点群を取得できることが示された。

参考文献

- [1] R. Mur-Artal, J. M. M. Montiel, J. D. Tardos, "ORB-SLAM: A versatile and accurate monocular SLAM system", IEEE Trans. Robot., vol. 31, no. 5, pp. 1147-1163, Aug. 2015

2020 年度

早稲田大学大学院基幹理工学研究科情報理工・情報通信専攻 修士論文

全天球カメラ映像を用いた 3 次元地図の作成

Creation Method of 3D Maps

Using Omnidirectional Camera Images

加藤 裕也

(5119F024-5)

提出日：2021.01.25

指導教員：渡辺 裕 印

研究指導名：オーディオビジュアル情報処理研究

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 本論文の構成.....	3
第2章 関連技術.....	4
2.1 まえがき.....	4
2.2 SLAM.....	4
2.2.1 LSD-SLAM.....	4
2.2.2 ORB-SLAM.....	6
2.3 全天球カメラ.....	7
2.3.1 RICOH THETA V.....	7
2.3.2 画像形式.....	8
2.3.3 キューブマッピング.....	9
2.4 LiDAR.....	9
2.5 むすび.....	10
第3章 予備実験.....	11
3.1 まえがき.....	11
3.2 実験環境.....	11
3.3 ORB-SLAM と LSD-SLAM の比較実験.....	11
3.4 ORB-SLAM のカメラモデル.....	12
3.5 ループ閉じ込み(Loop Closure).....	13
3.6 カメラ方向と特徴点.....	15
3.7 LiDAR の反射強度.....	15
3.8 予備実験の考察.....	17
3.9 むすび.....	17

第4章 提案手法.....	18
4.1 まえがき.....	18
4.2 提案手法概要.....	18
4.3 キューブマッピング.....	19
4.4 動画連結.....	20
4.5 ORB-SLAM への入力.....	21
4.6 提案手法の利点と課題.....	21
4.7 むすび.....	22
第5章 評価実験.....	23
5.1 まえがき.....	23
5.2 実験環境.....	23
5.3 評価実験の手法.....	24
5.3.1 正解データと計測データ.....	24
5.3.2 平面と点の距離.....	25
5.4 評価実験.....	27
5.4.1 映像1を用いた実験.....	28
5.4.2 映像2を用いた実験.....	30
5.5 結果.....	33
5.6 むすび.....	33
第6章 結論・今後の課題.....	34
6.1 結論.....	34
6.2 今後の課題.....	34
謝辞.....	35
参考文献.....	36
図一覧.....	37
表一覧.....	39
研究業績.....	40

第1章 序論

1.1 研究背景

近年、自動運転に関する技術が注目を浴びている。特に自動車の自動運転は官民 ITS 構想・ロードマップ 2020[1]において 2025 年度を目途に高速道路でのレベル 4 の自動運転システムの実現が明記されるなど、官民を挙げて活発な研究開発が進められている。また、自動車だけでなくロボットの制御にも自動運転技術が活用されている。例えば、一度掃除した箇所を避けて掃除するインテリジェントな自動掃除ロボットや、アクセスするのが難しい橋梁などの点検に用いられるドローン、災害現場で作業にあたる支援ロボットなど、身近な環境での IoT 社会の実現や、活動が困難な場所での労働力の代替手段として自動車やロボットの自動運転技術の研究がますます盛んになっていくことが予想される。

自動運転において重要な技術は自己位置推定と環境地図の作成の二つである。自己位置推定とは距離センサや GPS といった計測機器を用いて周辺環境を計測し、ロボットが環境内においてどの位置に存在するかを推定する技術である。一方、環境地図の作成は計測した周辺環境のデータを計算機内に地図として落とし込み、ロボット周辺の実際の地図との整合性を取りながら既に取り込んでいる地図の拡大を行う技術である。これら二つの技術を同時に行う技術として **Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)**がある。SLAM は自己位置推定と環境地図の作成を繰り返すことで、既に取り込んだ地図だけでなく地図上にない新しい領域でも利用することが可能であり、周辺環境が変化しやすい道路や屋内空間における自動運転にとって重要な技術である。また、SLAM は計測に用いるセンサによって分類され、レーザーセンサを使用する **LiDAR SLAM** やカメラ映像を利用する **Visual SLAM** 等が代表的なものとして挙げられる。これらの中でも特に 1 台のカメラのみを用いて行う単眼カメラによる **Visual SLAM** が計測機器の重量や費用の観点から注目されている。

自動運転技術が注目される理由として、特にロボットに労働を代替させる際に必要不可欠な技術であることが挙げられる。計測機器がカメラである **Visual SLAM** を利用することで自動運転のための自己位置推定が可能だけでなく、取得した映像を解析することでインフラ設備の点検作業に用いることも可能である。カメラを搭載したロボットを活用することで、作業員一人当たりが受け持つ点検箇所を増加させることも可能である。特に近年の日本の抱える課題として点検作業の効率化が挙げられる。国土交通省のインフラ長寿命化とデータ利活用に向けた取組[2]によると建築後 50 年以上経過し点検が必要な設備の増加が続き、迅速な点検および修繕を行うことが社会インフラの維持や安全な交通網を安定化させるために強く求められている。一方、増加し続ける点検箇所とは対照的に点検作業員は減

少している。点検作業には作業員の技術力が求められ容易に増員することが困難であるだけでなく、少子高齢化により労働人口が減少していく社会において作業員の確保がますます困難になっていくことが予想される。

点検作業を効率化する手段としてロボットによる点検作業の自動化が挙げられる。点検作業を自動化することで点検時間の短縮や点検箇所の増加、作業員の安全性の確保が可能になる。ドローンや自動車に取り付けたセンサから得られたデータを機械で解析することにより大量のデータを一度に処理することが可能となり点検時間の短縮と点検箇所の増加を実現することができる。また、点検箇所は高圧電線の付近や高所といった危険な場所で行われることも多いが、作業をロボットに代替することにより作業員の安全を確保することもできる。一方、課題としてロボットに搭載できる計測装置の重量が限られることが挙げられる。そのため、一つのセンサで広範囲のデータを取得することが求められる。画像処理技術の発達によりカメラ映像を用いて解析を行うケースが増えているが、なかでも全天球カメラと呼ばれる一度に周囲 360 度の映像を撮影できるカメラを用いた点検装置の開発が期待されている。

そこで、本論文では全天球カメラ映像を画像変換することにより単眼 SLAM への適用を可能とする手法について検討する。まず、全天球カメラで撮影した映像にキューブマッピングを行い分割し、それぞれの映像を連結させることにより一つの映像から周囲 360 度を計測することを可能とする。さらに、マーカーを用いて LiDAR で計測した点群との比較実験により本手法の評価を行う。

1.2 研究目的

単眼 SLAM は代表的なものとして ORB-SLAM[3]や LSD-SLAM[4]が挙げられるが、これらは一般的なカメラ映像に対応したものである。画角の広い魚眼カメラに対応した SLAM として ORB-SLAM や DSO[5]があるが、これらも全天球カメラ映像に対して使用することはできない。全天球カメラ映像を使用することが可能な SLAM として OpenVSLAM[6]があるが、360 度全体の映像を使用するため特定の位置に計測者が映り込んでしまうと計測に失敗する可能性がある。屋内環境の計測や点検を行うにあたり、カメラをロボットに搭載する場合と人間が手にもって撮影する場合があり、周辺環境に合わせて使い分けられることが望ましいと考えられる。そのため、本論文では全天球カメラ映像を分割して利用することにより特定の位置に計測者が映り込んでいる場合、その領域を使用せずに計測可能な手法を提案する。また、一度の計測で広範囲の点群をより多く取得することが可能でカメラの動きに対して頑健な手法の確立を目指す。

本研究の提案手法を実現することで様々な環境の3次元データを点群として取得することが可能となる。

1.3 本論文の構成

以下に本章以降の構成を示す。

第1章は本章であり、本論文の研究の背景および目的について述べている。全天球カメラ映像と Visual SLAM を組み合わせることで1本の映像から広範囲の点群を精度良く取得することを目的とする。

第2章では、関連技術について述べる。本研究で用いる技術として SLAM について説明し、使用する計測機器として全天球カメラと LiDAR について述べる。SLAM に関しては Visual SLAM の代表的な手法である LSD-SLAM と ORB-SLAM について述べる。

第3章では、予備実験について述べる。使用する SLAM の手法の決定や評価手法の決定のための予備実験を行った。使用する SLAM を決定するために ORB-SLAM と LSD-SLAM の比較実験について述べ、使用するカメラモデルの決定のためにカメラモデルの比較実験について述べる。また、ループ閉じ込みと特徴点に関する実験について述べる。最後に評価実験に用いる LiDAR の反射強度の実験について述べる。

第4章では、本論文で提案する手法について述べる。提案手法では全天球カメラ映像にキューブマッピングを施し取得した映像を連結させ1本の映像に編集したうえで ORB-SLAM に入力し点群を取得する。また、提案手法の利点と課題について述べる。

第5章では、評価実験について述べる。評価実験では提案手法とキューブマッピングにより取得した映像をそのまま入力した手法および全天球カメラ映像を魚眼モデルの ORB-SLAM に入力した手法の3種について比較実験を行った。

第6章では、本論文の結論と考察および今後の課題について述べる。

第2章 関連技術

2.1 まえがき

本章では本研究で利用する関連技術として SLAM と全天球カメラおよび LiDAR について述べる。SLAM は本研究で3次元データを取得するために用いる手法であり、特に代表的な LSD-SLAM と ORB-SLAM について述べる。全天球カメラは本研究で映像を取得するために用いる機器であり、画像形式および画像変換の手法について述べる。LiDAR は本研究の正解データを取得するために用いる機器であり、機器の概要について説明する。

2.2 SLAM

自己位置推定と環境地図の作成を同時に行う技術として Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)がある。SLAM は計測に使用するセンサによって分類されるが、本論文ではカメラ映像を利用した Visual SLAM を用いる。一般的に Visual SLAM ではカメラ映像の隣接するフレームの共通の範囲から移動量を計算し、この移動量やカメラの回転がある閾値を超えた場合にそのフレームをキーフレームとして選択する。移動量とキーフレームから環境地図を更新し再度キーフレームを選択することを繰り返すことによって、カメラの移動経路および環境地図を3次元データとして取得することが可能となる。カメラ映像を利用する Visual SLAM のアルゴリズムとして画像全体の輝度値を用いる手法と画像内の特徴点を用いる手法に分類することができ、前者の代表的なものとして LSD-SLAM、後者の代表的なものとして ORB-SLAM が挙げられる。

2.2.1 LSD-SLAM

LSD-SLAM は Jakob Engel らによって提案された画像全体の輝度勾配を利用し自己位置推定と環境地図の作成を行う手法である。LSD-SLAM は一台のカメラ映像を用いる単眼 SLAM の一種で、カメラモデルはピンホールモデルであることから入力映像は通常のカメラ映像である。これは CPU 上で実行できる手法であり、低遅延で密な点群を取得できることから広く利用されている。LSD-SLAM は画像全体の輝度勾配を利用するため図 2.1 に示すように画像中の物体の境界部分に強く反応が出るが、壁などの輝度差のない領域では反応が出ない。環境地図は図 2.2 に示すように出力され、図 2.1 で示すような反応が強く出た物体の境界部分が3次元の点群として表示され、カメラの移動経路も重ねて出力される。

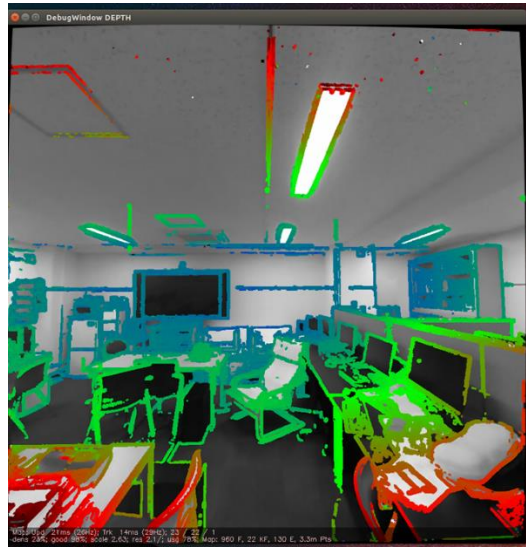


図 2.1 LSD-SLAM 実行中の様子

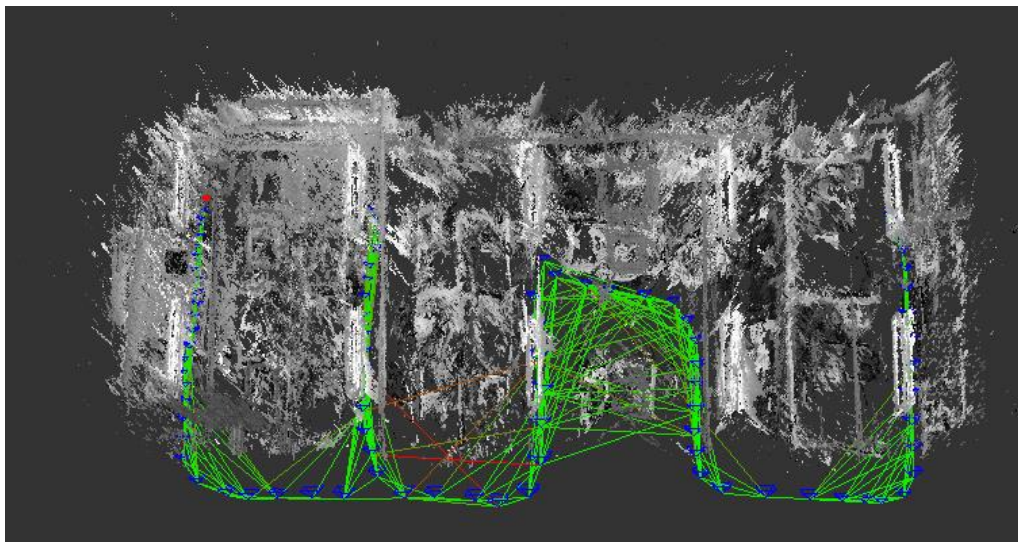


図 2.2 LSD-SLAM により作成される環境地図

一方、課題として挙げられるのはカメラの回転運動に対する脆弱性である。LSD-SLAMでは対応する画素値の移動量からカメラの移動量が計算される。そのため、カメラが並進運動せずその場で回転するような動きをする場合、カメラの移動量の計算が不安定となり自己位置推定が困難となる。実際にカメラを回転させて撮影した場合、動作中にカメラの経路が取得できなくなり、出力される環境地図も図 2.3 に示すように 3次元再構成が破綻してしまう。

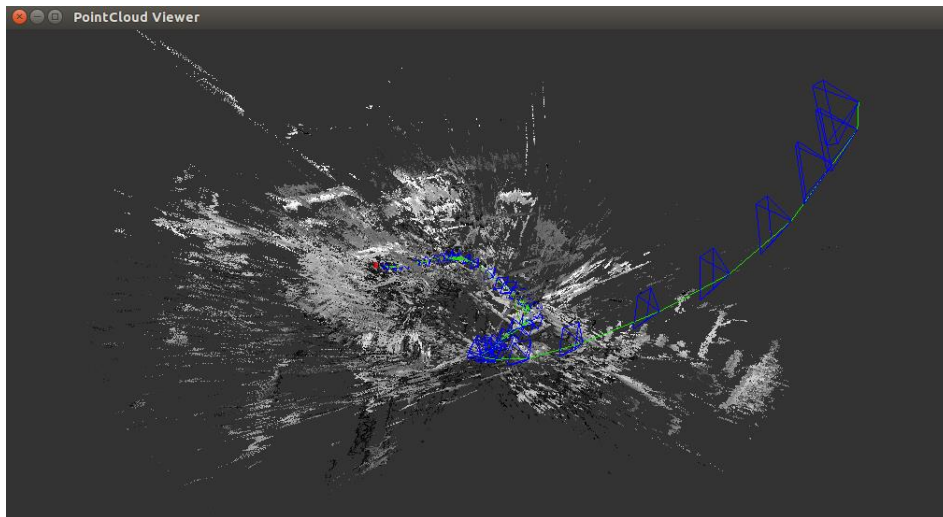


図 2.3 LSD-SLAM でカメラを回転させた場合の点群

2.2.2 ORB-SLAM

ORB-SLAM は Ra'ul Mur-Artal らによって提案された画像内の特徴点を利用し自己位置推定と環境地図の作成を行う手法である。ORB-SLAM は一台のカメラ映像を用いる単眼 SLAM の一種で、カメラモデルはピンホールモデルと魚眼モデルの二種類が用意されている。これは CPU 上で実行できる手法であり、低遅延で点群を取得でき、カメラ経路が正確なことから広く利用されている。ORB-SLAM は画像内の特徴点を利用するため図 2.4 に示すように実行中は特徴点が表示される。環境地図は図 2.5 に示すように出力され、図 2.4 で示した特徴点が 3次元の点群として表示され、カメラの移動経路も重ねて出力される。画像中の画素値をすべて使う手法と比較して、特徴点を使う手法では選択される特徴点の数が少ないことから、出力された点群も疎なものとなる。

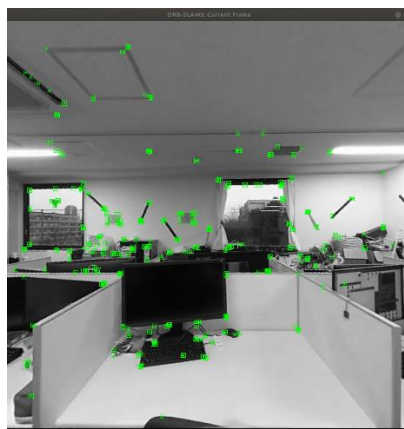


図 2.4 ORB-SLAM 実行中の様子

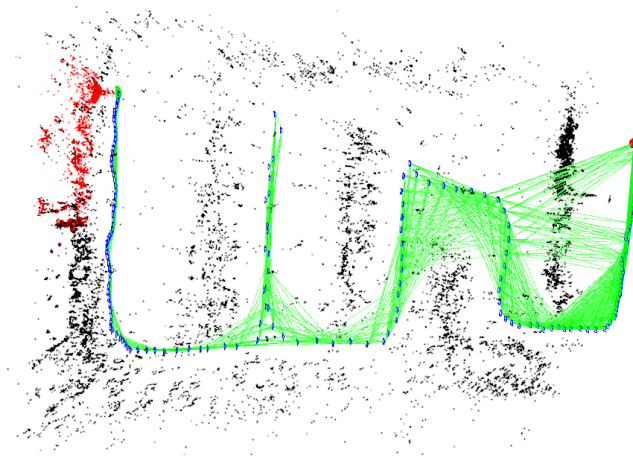


図 2.5 ORB-SLAM により作成される環境地図

ORB-SLAM は特徴点を利用した手法であるため、カメラが回転しても共通する点を同じ特徴点として追跡することが可能であり、カメラの回転に対して頑健である。実際にカメラを回転させて撮影した映像を入力した場合でも、カメラ経路を見失うこともなく環境地図が破綻してしまうこともなかった。そのため、ORB-SLAM は取得できる点の数は少ないが精度の高い手法であると言える。

2.3 全天球カメラ

全天球カメラは周囲 360 度を一度に撮影できるカメラであり、複数台のカメラを組み合わせてすべての方位を撮影できるようにしたものや、魚眼カメラを前後に 2 台組み合わせたものがある。全天球カメラ映像が Youtube にアップロードできるようになった[7]ことで多くのユーザーが使い始めたうえ、近年の VR 技術の発展に伴い全天球カメラ映像が注目されている。また、周囲 360 度を撮影可能なことからオンライン会議システムへの導入や、ドローンに搭載して計測に用いるなどビジネスや学術的にも注目され始めたカメラである。

2.3.1 RICOH THETA V

RICOH THETA V は RICOH 社の提供する全天球カメラである[8]。前後についた二つの魚眼カメラから取り込んだ画像を内部的に処理し精度よく全天球カメラ映像を作り出している。動画は 4K 画質で記録することが可能であり、画素数は 3840x1920、フレームレートは 29.97fps である。

2.3.2 画像形式

全天球カメラ映像の画像形式は魚眼形式とエクイレクタングラー形式の2種類がある。魚眼形式は2枚の魚眼レンズから取り込んだデータを連結させたものである。一方、エクイレクタングラー方式は球として表した全天球カメラ映像に緯度と経度を割り当て、正距円筒図法で表したものである。THETA Vで撮影した魚眼形式の画像を図2.6に示し、エクイレクタングラー形式の画像を図2.7に示す。

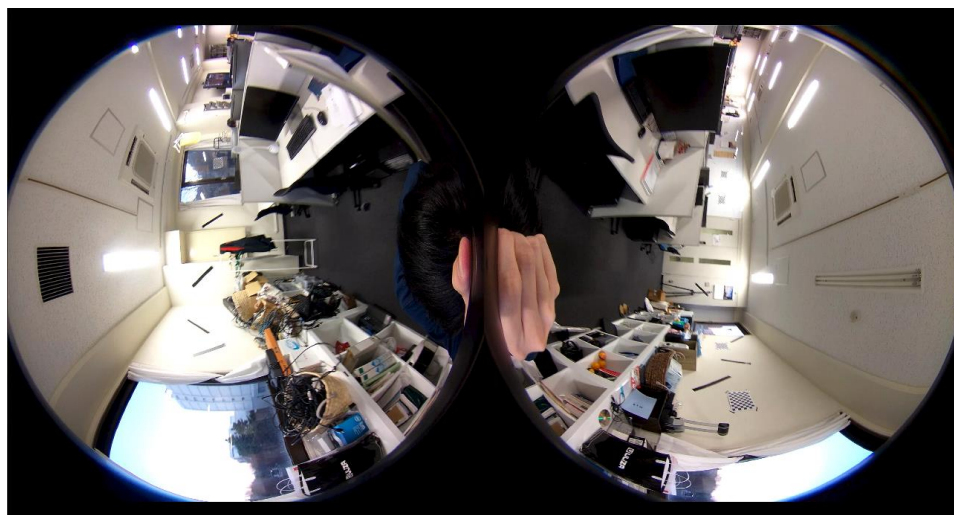


図 2.6 魚眼形式



図 2.7 エクイレクタングラー形式

2.3.3 キューブマッピング

キューブマッピングは全天球カメラを立方体の箱の中に納めた状態で撮影したように画像変換をする手法である。図 2.8 に示すようにキューブマッピングを行うと立方体の展開図として出力される。画像変換にはエクイレクタングラー形式の画像を用い、1枚の画像が6枚の正方形の画像に分割される。全天球カメラ画像は画角が 360 度であるが、キューブマッピングを行い分割されたそれぞれの画像の画角は上下方向左右方向ともに 90 度となる。

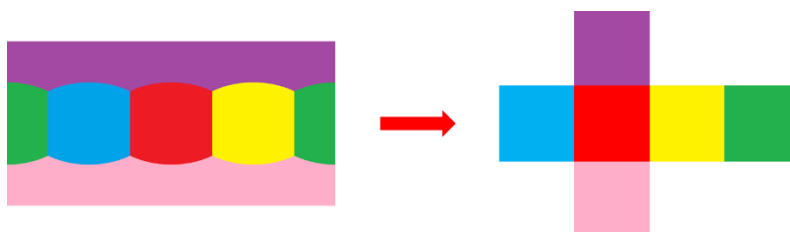


図 2.8 キューブマッピング

2.4 LiDAR

レーザーを出力し物体に当たって跳ね返ってくるまでの時間を計測することで距離と角度を計測する機器を Light Detection and Ranging(LiDAR)と言う。一般的に LiDAR は 3次元の直交座標系上に点群として物体の位置を表し、反射強度も出力する。この反射強度は物体の形状や材質などによって異なりガラスなどの物体は透過してしまう。本論文の評価実験では図 2.9 に示す Velodyne LiDAR 社製の VLP-16 を用いて取得したデータを正解データとして用いる。



図 2.9 VLP-16 の外観

2.5 むすび

本章では、本研究に関連する技術として SLAM について述べた。SLAM の中でも代表的な LSD-SLAM と ORB-SLAM について述べ、各手法における利点と課題について説明した。また、本研究で使用した機器として全天球カメラおよび LiDAR について述べた。全天球カメラ映像の画像形式としてエクイレクタングラー形式と魚眼形式について説明し、エクイレクタングラー形式の画像変換手法であるキューブマッピングについて説明をした。LiDAR は計測機器の説明および出力データについて説明した。

第3章 予備実験

3.1 まえがき

本章では、本論文の主要技術である ORB-SLAM について予備実験を行う。また、予備実験の結果から、カメラの移動に対して頑健で広範囲の点群を取得するという本論文の目的に合致した手法を選択する。

3.2 実験環境

実験で使用した PC の実行環境を示す。ORB-SLAM と LSD-SLAM は使用する OS が異なるため、ORB-SLAM の実行環境を表 3.1 に示し LSD-SLAM の実行環境を表 3.2 に示す。

表 3.1 ORB-SLAM の実行環境

OS	Ubuntu 16.04 LTS
CPU	Intel® Core™ i7-8700K 3.2GHz 12Core
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti

表 3.2 LSD-SLAM の実行環境

OS	Ubuntu 14.04 LTS
CPU	Intel® Core™ i7-8700K 3.2GHz 12Core
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti

3.3 ORB-SLAM と LSD-SLAM の比較実験

ORB-SLAM と LSD-SLAM の比較実験を行った。一般的に画像内の特徴点を用いる手法である ORB-SLAM は得られる点の数が少なく、画像全体の輝度値を用いる手法である LSD-SLAM は得られる点の数は多い。また、ORB-SLAM はカメラの回転運動に対して頑健であるが、LSD-SLAM はカメラの回転運動に対して脆弱であることが報告されている[9]。

カメラを回転させて撮影した動画 1 とカメラを回転させず常に同じ方角に向けて撮影した動画 2 をそれぞれ入力映像として実験を行った。カメラモデルはピンホールモデル結果を表 3.3 に示す。計測に失敗し点群を取得出来なかった値は空欄となっている。

表 3.3 入力映像と点群の関係

入力映像	カメラ回転	手法	点の数 [個]
動画 1	あり	ORB-SLAM	8447
動画 1	あり	LSD-SLAM	-
動画 2	なし	ORB-SLAM	13877
動画 2	なし	LSD-SLAM	6419184

表 3.3 よりカメラ回転の有無にかかわらず ORB-SLAM では計測が可能であったのに対し、LSD-SLAM ではカメラ回転がある場合には計測が失敗することが確認された。計測が成功した際には LSD-SLAM の方が取得可能な点群の数は多いが、ORB-SLAM の方が映像の撮影条件に対して頑健な手法であると言える。

3.4 ORB-SLAM のカメラモデル

ORB-SLAM で使用可能なカメラモデルはピンホールモデルと魚眼モデルの 2 種ある。全天球カメラで撮影した動画を用いてピンホールモデルと魚眼モデルの比較実験を行った。ピンホールモデルには全天球カメラ映像にキューブマッピングを施した動画を入力し、魚眼モデルには全天球カメラの片方のレンズだけで撮影した動画を入力した。どちらの動画も元となる動画は同じであり、動画の中心点は完全に一致している。実験結果を表 3.4 に示す。また、カメラの移動経路を図 3.1 に示す。

表 3.4 カメラモデルと点の数の関係

カメラモデル	入力映像の画角 [度]	点の数 [個]
ピンホールモデル	90	13802
魚眼モデル	180	5422

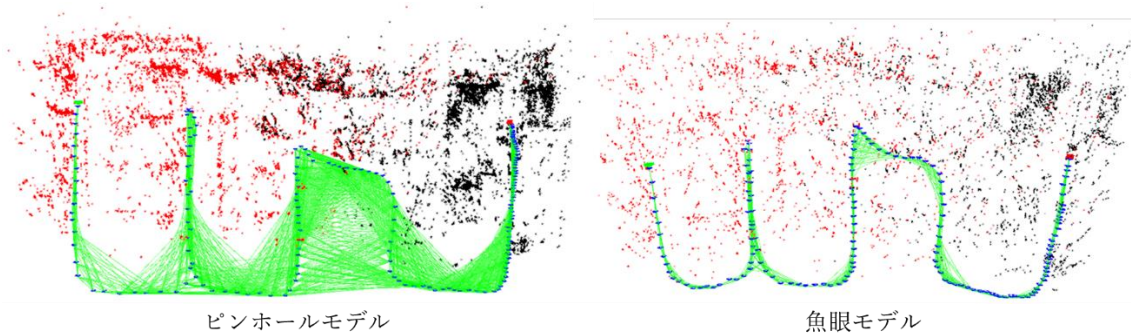


図 3.1 カメラモデルとカメラの移動経路

表 3.4 より画角が小さく映り込む範囲が狭いにもかかわらずピンホールモデルの方が取得できる点群の数が多いことが確認できる。カメラの移動経路は曲がり角がすべて 90 度のルートを進んだが, 図 3.1 より魚眼モデルよりもピンホールモデルの方が精度良く経路が取得出来ていることが確認できる。

3.5 ループ閉じ込み(Loop Closure)

ループ閉じ込みはカメラの移動経路からループを検出し移動経路を補正する手法である。ループとは一度通った場所に再度訪れるまでのカメラの経路のことである。ループ閉じ込みは図 3.2 に示すように一度通った場所に再度訪れたときカメラ位置がずれていた場合, カメラ位置が一致するようにカメラ経路全体の補正を行う。

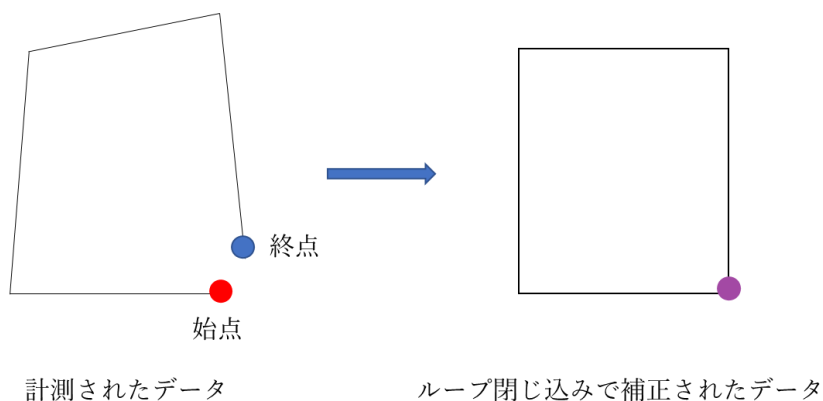


図 3.2 ループ閉じ込みの様子

動画の開始位置でループが閉じる動画 1 と、動画の開始位置とは異なる場所でループが閉じる動画 2 を用いてループ閉じ込みの実験を行った。動画 1 と動画 2 はループの始点と終点は同じであり動画の開始位置のみが異なる。カメラの移動経路の模式図を図 3.3 に示し、実際に計測したカメラの移動経路を図 3.4 に示す。

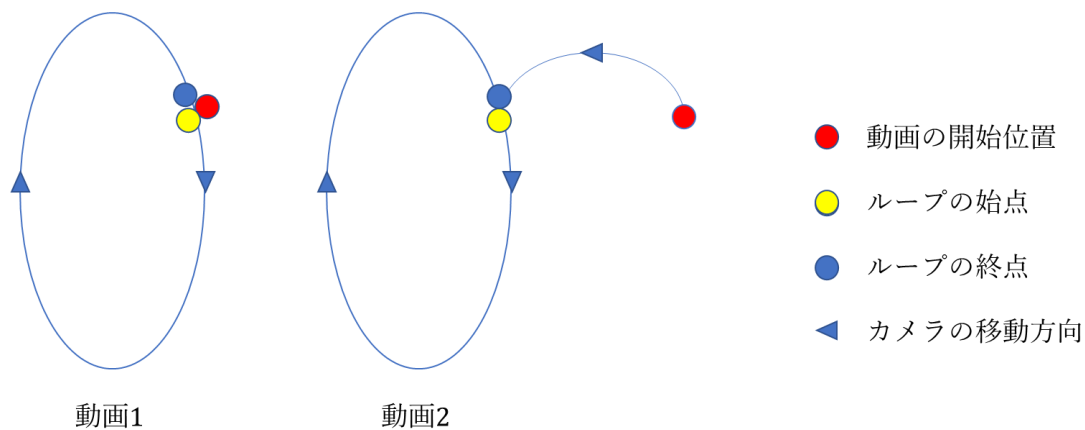


図 3.3 カメラの移動経路 (模式図)

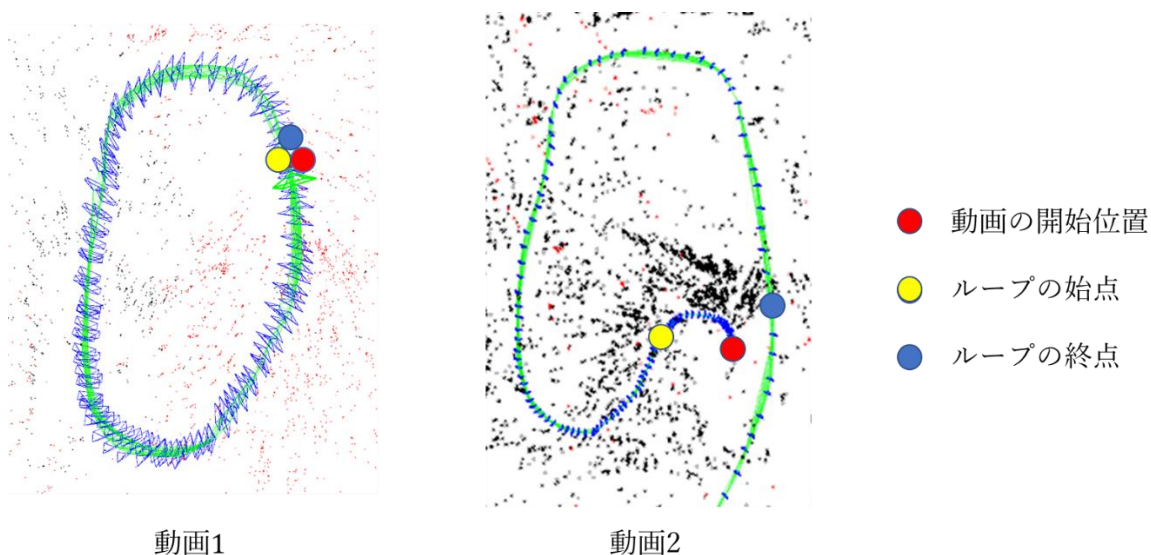


図 3.4 計測したカメラの移動経路

図 3.4 より動画の開始位置とループの始点が一致している動画 1 ではループ閉じ込みが動作していることが確認できる。一方、動画の開始位置とループの始点が一致していない動画 2 ではループの始点と終点の位置が一致せずループ閉じ込みが動作しなかった。以上より動画の開始地点付近ではカメラの自己位置推定の精度が高いと言える。

3.6 カメラ方向と特徴点

同一の物体を異なる角度から撮影した際に特徴点の分布が異なる場合がある。全天球カメラで撮影した動画にキューブマッピングを施すと各面のカメラ方向はそれぞれ 90 度異なる。二つの動画のカメラの角度を変更し同一の特徴点が現れるか確認した。実験結果を表 3.5 に示す。

表 3.5 カメラの角度と特徴点の関係

カメラのなす角 [度]	共通する特徴点の有無
135	なし
90	場合によりあり
45	あり

表 3.5 よりカメラのなす角が 45 度以下の場合には同一物体に対し同一の特徴点が計測されることが確認された。カメラのなす角が 90 度の場合には動画内で同一の特徴点が計測されることもあったが撮影条件や対象物体に依存し、撮影条件に対する頑健性の観点からカメラのなす角は 45 度以下が適切であると考えられる。

3.7 LiDAR の反射強度

LiDAR はセンサから物体までの距離と方向および信号の反射強度を出力する。信号の反射強度は物体の形状や材質、色といった条件により変化する。本実験では物体の色と信号の反射強度の関係を調べた。実験の様子を図 3.5 に示す。



図 3.5 反射強度実験の様子

実験は図 3.5 に示すように LiDAR から黒いパネルを貼った白い壁面に向かってレーザーを出力し反射強度を調査する。パネルの範囲内と周辺の反射強度を表 3.6 に示し、LiDAR の出力結果を図 3.6 に示す。反射強度は 0 から 255 までの 256 段階で表され数値が大きくなるほど反射されるレーザーが強い。

表 3.6 色と反射強度の関係

計測場所	反射強度の平均値
黒いパネル	1.25
白い壁面	89.6

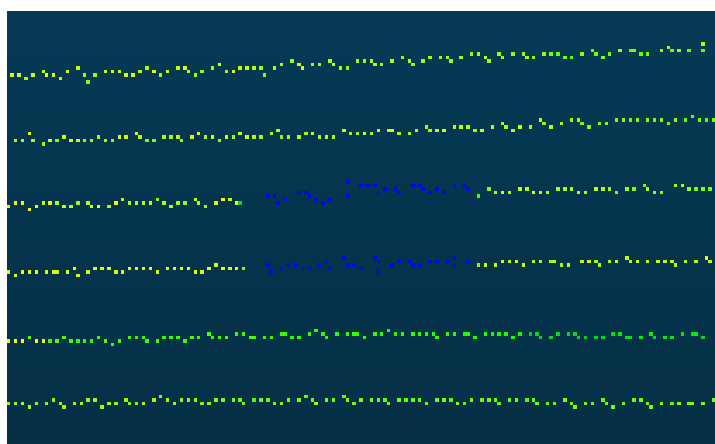


図 3.6 LiDAR の出力結果

表 3.6 より黒いパネルと白い壁面の反射強度には差があることがわかる。また、図 3.6 より LiDAR の出力結果も黒いパネルと白い壁面には差があることが確認できる。以上より、白い物体に黒いマーカを付けることにより LiDAR の出力値が変化することがわかり、評価に使用できることが確認できた。

3.8 予備実験の考察

ORB-SLAM と LSD-SLAM では ORB-SLAM の方が撮影条件に対する頑健性が高いことが 3.3 より確認できた。一方、取得可能な点群の数は少ないことが確認された。カメラモデルはピンホールモデルの方が魚眼モデルに比べ取得できる点の数が多くカメラの移動経路の精度が高いことが 3.4 より確認できたが、ピンホールモデルを利用する場合入力映像の画角が小さくなることが確認できた。また、3.5 のループ閉じ込みの実験より動画の開始位置付近でカメラの自己位置推定の精度が高いことが確認でき、3.6 から同一の特徴点を得るためのカメラの角度の条件は 45 度以下であることが確認できた。本論文の目的が全天球カメラ映像を用いて撮影条件に対して頑健であり広範囲の点群を取得する手法の提案であることから、本論文では SLAM は ORB-SLAM を用い、カメラモデルはピンホールモデルを用いることにする。取得可能な点群の数が少なく入力映像の画角が小さいという課題を解決するため入力映像は広範囲が撮影されているものを使用する必要がある。また、実験 3.7 より色の違いを利用することで LiDAR 点群内にマーカーの配置が可能であることが確認された。本論文では評価のための正解データとして LiDAR 点群を用いる。

3.9 むすび

本章では、SLAM と LiDAR に関する予備実験を行った。本論文の目的に合致する手法としてピンホールモデルの ORB-SLAM を使用することを示した。ORB-SLAM は回転に対して頑健であるが取得可能な点群の数が少ないことが確認された。カメラモデルの比較実験ではピンホールモデルを用いる場合、魚眼モデルを用いる場合よりもカメラ経路の精度が高く取得できる点群の数は多いが、入力画像の画角が小さくなることが確認された。また、ループ閉じ込みと同一特徴点を取得するためのカメラ方向の実験から、正確な自己位置推定を行うための入力映像の条件を調べた。取得できる点群を増加させるために入力映像の撮影範囲を広くする必要があることが確認された。最後に評価実験には LiDAR の点群データが使用可能であることを示した。

第4章 提案手法

4.1 まえがき

本章では，全天球画像に対してキューブマッピングと ORB-SLAM を組み合わせて広範囲の点群取得を行う手法を提案する．また，提案手法の利点と課題について述べる．使用する ORB-SLAM は入力映像のカメラの動きに対して頑健であるが，取得可能な点群の数が少ないという課題がある．一方，自己位置推定の精度が高いためカメラ方向が異なる映像を入力しても自己位置を正しく計測できる．同一のカメラ経路を通りカメラ方向が異なる複数の動画を連結させることにより，映像の画角は 90 度でありながら広範囲を撮影した映像を取得することが可能であり，取得点群を増加させることが可能となる．

4.2 提案手法概要

本論文では全天球カメラ映像を用いて広範囲の点群を取得する手法を提案する．提案手法の概要を図 4.1 に示す．

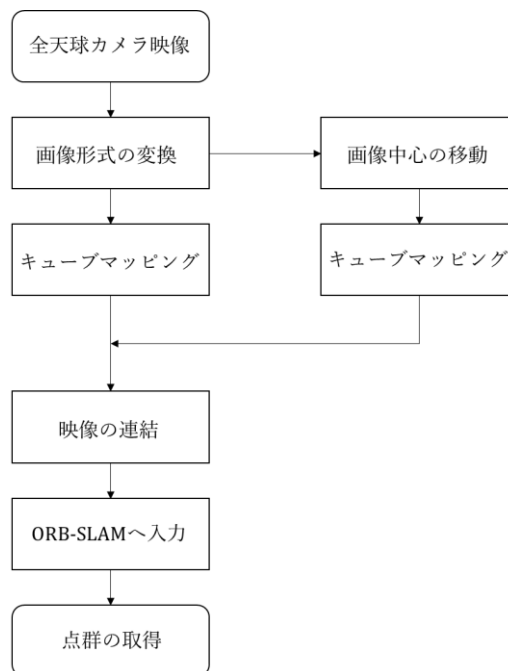


図 4.1 提案手法概要図

全天球カメラで撮影した映像をエクイレクタングラー形式に変換する。エクイレクタングラー形式の映像を画像変換し画像中心が移動した映像を作成する。エクイレクタングラー形式の映像と画像中心を移動させた映像にそれぞれキューブマッピングを施し、出力された映像のうち必要な映像を選択する。選択した映像を、各映像の中心が向いている方向に従って並べ替え連結させ一本の映像に編集する。最後にこの映像を ORB-SLAM に入力することで点群を取得する。

4.3 キューブマッピング

全天球カメラ映像にキューブマッピングを施すことでピンホールモデルの ORB-SLAM への動画の入力を可能とする。全天球カメラで撮影した映像に直接キューブマッピングを施すことは出来ないため、全天球カメラ映像をエクイレクタングラー形式に画像変換する。エクイレクタングラー形式の映像は画素の位置とカメラからの方向が対応しているため、図 4.2 に示すように映像の右端を切り出し左端に移動させる編集を行うと、カメラを傾けずに回転させた映像を取得できる。

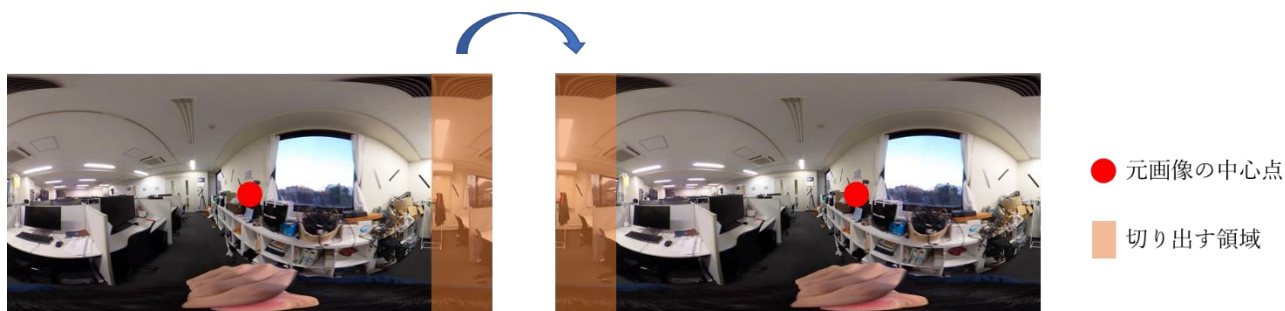


図 4.2 画像変換によるカメラの回転

THETA V で撮影した全天球カメラ映像は 4K 画質のため画素数は 3840x1920 である。映像の右端の 480x1920 の領域を切り出し映像の左端に移動させることで、カメラを 45 度左側に回転させて撮影したものと同様の映像を取得する。元の映像と編集によりカメラ方向を 45 度回転させた映像に対しそれぞれキューブマッピングを施す。全天球カメラ映像 1 本にキューブマッピングを施すと、正面方向、右方向、裏方向、左方向、上方向、下方向の 6 本の映像が取得できる。このうち上方向は天井や空が映り込み、下方向は床面が映り込むため特徴点が少なく周囲の環境も計測できないため使用しない。

4.4 動画連結

キューブマッピングを行い2本の映像から計8本の動画を取得した。この映像を並べ替え連結することにより1本の映像に編集しORB-SLAMへの入力を可能とする。

全天球カメラ映像を映像Aとし、画像編集によりカメラ方向を45度回転させた映像を映像A'とする。映像Aで全天球カメラの正面についているレンズが向いている方向をy軸正方向の方向とすると、映像Aと映像A'をキューブマッピングした際、正面方向、右方向、裏方向、左方向の映像のカメラ方向は図4.3のようになる。

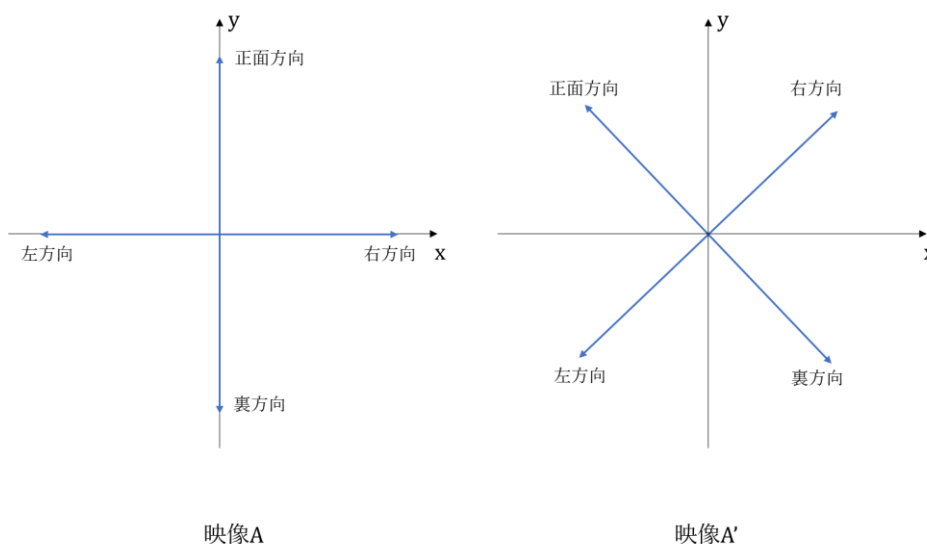


図 4.3 キューブマッピングした際の各映像のカメラ方向

映像Aと映像A'はカメラ方向が45度異なるため、キューブマッピングした際の各映像のカメラ方向45度ずれている。本研究では全天球カメラを手で持ち撮影するため映像Aの裏方向と映像A'の左方向および裏方向の映像には撮影者が映り込んでいるためこれら3本の映像は除外する。残った5本の映像を映像Aの右方向、映像A'の右方向、映像Aの正面方向、映像A'の正面方向、映像Aの左方向の順に並べ連結させる。このように並べることにより隣接する映像のカメラ方向は45度となる。キューブマッピングにより取得した映像は画角が90度であるため、作成した映像は周囲360度のうち270度が映り込んでいる。本研究では、人がカメラを手を持ち撮影するという状況を仮定し実験を行ったが、ドローンやロボットに搭載し撮影者が映像に映り込まない手法をとる場合は映像Aの裏方向と映像A'の左方向および裏方向の映像を取り除く必要はない。この場合も隣接する映像のカメラ方向が45度となるように8本の映像を並び替え連結させることで映像を作成する。

4.5 ORB-SLAM への入力

全天球カメラ映像にキューブマッピングを施し並べ替え連結させて作成した1本の映像を ORB-SLAM に入力することにより点群を取得する。ORB-SLAM のカメラモデルはピンホールモデルを使用する。作成した映像は元の全天球カメラ映像を分割し連結させたものなので、映像の撮影開始位置から撮影終了位置まで移動する映像が5回繰り返すものとなっている。映像の連結部分ではカメラの位置が撮影終了位置から撮影開始位置に瞬時に変化する。しかし、映像の開始位置付近では自己位置推定の精度が高いことと、カメラ方向の差が45度以下であれば同一の特徴点を取得できることから、カメラの自己位置を見失うことなく5回とも同一の経路を通して点群を追加していく。最終的に1本の映像から周囲の点群を取得することができる。

4.6 提案手法の利点と課題

提案手法では全天球カメラ映像にキューブマッピングを施し取得した映像を並べ替え連結させることにより1本の映像を作成し、ORB-SLAM に入力することで点群を取得する。これまでの全天球カメラ映像にキューブマッピングを施し広範囲の点群を取得する研究[9]では、キューブマッピングにより作成した複数の映像をそれぞれ SLAM に入力し複数の点群を取得したうえで、それらの点群を合成し最終的に一つの点群を取得する手法が取られてきた。一般的に距離計や GPS を用いない SLAM では物体や移動経路の長さを計測することは出来ず、同じ経路を通った映像であっても異なる映像であれば出力される点群のスケールや移動距離は異なってしまう。そのため、同じ領域を計測した複数の点群を合成するには、点群のスケール合わせをした後に合成をする必要がある。この手法ではスケール合わせの誤差と合成時の誤差を含んでしまう。一方、提案手法では映像同士を連結させ1本の映像にしてから SLAM に入力するという手法を取ったことで、点群のスケール合わせや合成を行う必要がなくなり誤差が生まれる手順が減っている。

課題としては実行時間の長さが挙げられる。全天球カメラ映像を分割し5本の映像を連結させるという手法をとるため、撮影映像に対し5倍の実行時間がかかってしまう。

4.7 むすび

本章では、提案手法の概要について述べた。カメラの動きに頑健な手法をとると取得可能な点群の数が少なくなってしまう。ORB-SLAM の自己位置推定の精度の高さに着目し、同一経路を通るカメラ方向の異なる複数の映像を連結し ORB-SLAM に入力することでカメラの動きに対する頑健性は維持しつつ広範囲の点群の取得を可能とした。また、提案手法の各手順の必要性と得られる結果を述べた。最後に提案手法の利点と課題を述べた。

第5章 評価実験

5.1 まえがき

本章では，第 4 章で提案した手法の評価実験を行う．点群の精度を評価する手法の説明を行い，提案手法の精度評価を行うことで提案手法が目的に合致した手法であることを示す．キューブマッピングにより取得した映像を連結させる提案手法を用いることにより，取得可能な点群の数が増加し，点群の精度も向上したことが確認された．

5.2 実験環境

実験で使用した PC の実行環境を表 5.1 に示す．

図 5.1 ORB-SLAM の実行環境

OS	Ubuntu 16.04 LTS
CPU	Intel® Core™ i7-8700K 3.2GHz 12Core
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti

映像の撮影に使用したカメラは RICOH 社製の THETA V である．また，評価実験の正解値となる点群は Velodyne LiDAR 社製の VLP-16 を用いた．

実験場所は早稲田大学西早稲田キャンパス 66 号館 401 号室で行った．計測場所の様子を図 5.2 に示す．

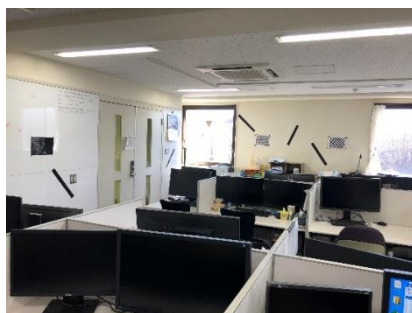


図 5.2 計測場所の様子

5.3 評価実験の手法

評価実験は LiDAR で撮った点群を正解データとし，正解データから算出された平面と ORB-SLAM を用いて取得した点群の距離を評価値として用いた。

5.3.1 正解データと計測データ

点群の正解データとして LiDAR で取得したデータを用いる。LiDAR は精度よく物体とセンサの距離および方向を計測する装置である。評価に際し LiDAR 点群と ORB-SLAM で取得した点群の位置合わせを行う必要があるため共通のマーカを設置する必要がある。LiDAR はマーカの距離や色を周辺環境と変えることで点群においてもマーカと周辺環境を区別することが可能である。本論文の 3.7 において白い壁面に黒いボードを設置すると点群の識別が可能であることが確認できたため黒いボードをマーカとして使用する。図 5.3 に使用する黒いボードと取得した点群の様子を示す。

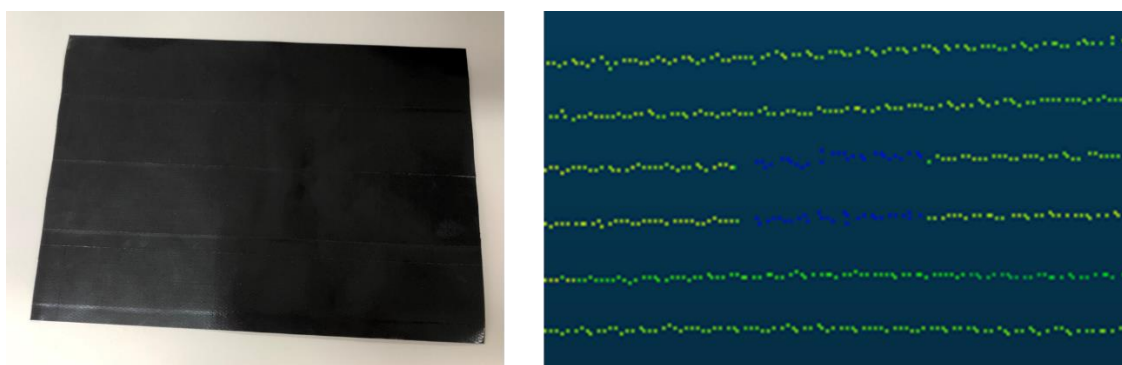


図 5.3 マーカと LiDAR 点群

一方，ORB-SLAM は画像特徴量を使用する手法のため黒いボードをマーカとするとマーカ内部に点群が取得できない。複雑な色や形状であれば多くの特徴点が現れるため，ほとんど特徴点が取得できない白い壁面にチェッカーボードを貼ることで点群を取得した。図 5.4 に使用したチェッカーボードの様子と取得した点群を示す。



図 5.4 チェッカーボードと ORB-SLAM の点群

正解データの点群と計測した点群の位置合わせを行う必要があるため、黒いボードとチェッカーボードは同じサイズでなければならない。そのため、図 5.5 に示すようにチェッカーボードの裏面に黒いテープを貼り付けたものを作成した。LiDAR でデータを取得する際には黒い面を使用し、ORB-SLAM でデータを取得する際には裏返してチェッカーボードを使用した。

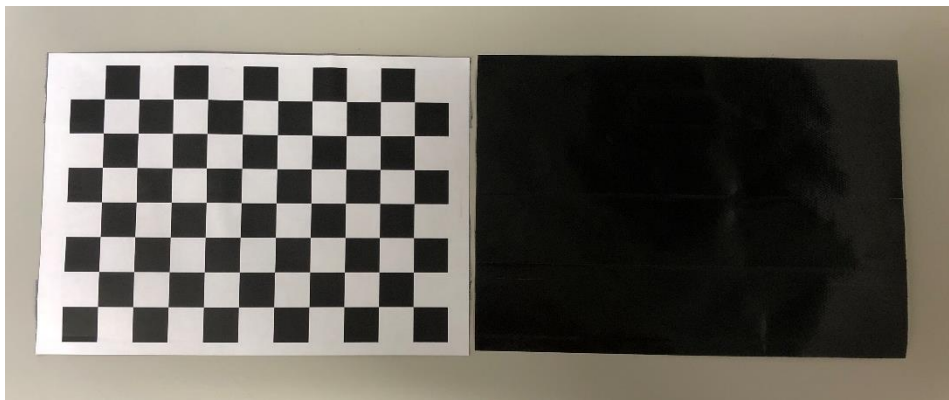


図 5.5 実験に使用したマーカー

5.3.2 平面と点の距離

LiDAR で取得した点群と ORB-SLAM で取得した点群は手法が異なるため各点を対応付けて評価を行うことは不可能である。そのため、LiDAR で取得した点群のうちマーカーに対応する点群を切り出し、その点群が乗る平面と ORB-SLAM で取得したマーカーの点の距離を用いて評価を行う。

図 5.6 に点 $P(x_0, y_0, z_0)$ を通り法線ベクトルが $\mathbf{n}=(a, b, c)$ の平面の様子を示す.

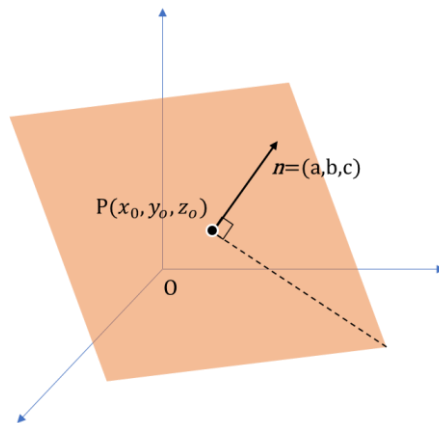


図 5.6 点 P を通る平面

図 5.6 に示す平面の方程式は,

$$\mathbf{a}(x - x_0) + \mathbf{b}(y - y_0) + \mathbf{c}(z - z_0) = 0 \quad (5.1)$$

であり, 一般形に直すと,

$$\mathbf{ax} + \mathbf{by} + \mathbf{cz} - (\mathbf{ax}_0 + \mathbf{by}_0 + \mathbf{cz}_0) = 0 \quad (5.2)$$

となる. ここで,

$$\mathbf{d} = -\mathbf{ax}_0 - \mathbf{by}_0 - \mathbf{cz}_0 \quad (5.3)$$

とおく. すると平面方程式は式(5.2)と式(5.3)より

$$\mathbf{ax} + \mathbf{by} + \mathbf{cz} + \mathbf{d} = 0 \quad (5.4)$$

と表される. 式(5.4)で表される平面と点 $A(x_a, y_a, z_a)$ の距離 D は,

$$D = \frac{|\mathbf{ax}_a + \mathbf{by}_a + \mathbf{cz}_a + \mathbf{d}|}{\sqrt{\mathbf{a}^2 + \mathbf{b}^2 + \mathbf{c}^2}} \quad (5.5)$$

となる. 式(5.5)に式(5.3)を代入すると

$$D = \frac{|\mathbf{ax}_a + \mathbf{by}_a + \mathbf{cz}_a - \mathbf{ax}_0 - \mathbf{by}_0 - \mathbf{cz}_0|}{\sqrt{\mathbf{a}^2 + \mathbf{b}^2 + \mathbf{c}^2}} \quad (5.6)$$

となる.

5.4 評価実験

提案手法の評価実験を行った. カメラの移動する経路中に 4 か所マーカーを設置し LiDAR で正解データを取得した. 取得した正解データの外観を図 5.7 に示す.

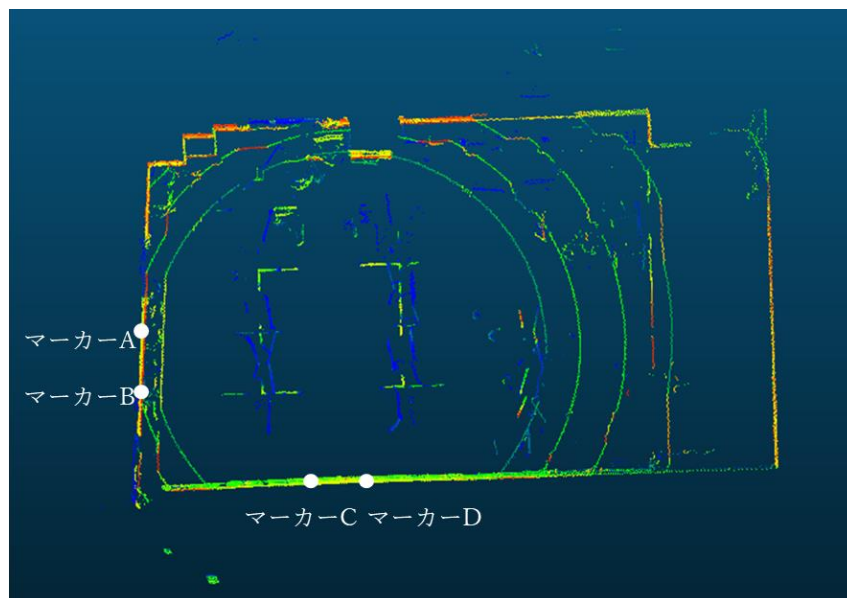


図 5.7 LiDAR で取得した正解データ

図 5.7 は撮影場所を天井方向から見たものでマーカーA, マーカーB, マーカーC, マーカーD はそれぞれ設置したマーカーの場所を示す. マーカーA とマーカーB, マーカーC とマーカーD はそれぞれ同一平面上にあり, それぞれを平面 1, 平面 2 と名付ける. 平面 1 の方程式を式(5.7)に示し, 平面 2 の方程式を式(5.8)に示す.

$$0.988x - 0.157y - 0.00393z - 3.977 = 0 \quad (5.7)$$

$$0.082x + 0.997y + 0.0078z - 2.651 = 0 \quad (5.8)$$

また, 式(5.6)より平面 1, 平面 2 と ORB-SLAM で取得したマーカー上の点 $A(x_a, y_a, z_a)$ の距離はそれぞれ,

$$D = |0.988x - 0.157y - 0.00393z - 3.977| \quad (5.9)$$

$$D = |0.082x + 0.997y + 0.0078z - 2.651| \quad (5.10)$$

と表される.

実験では2本の異なる経路を通る映像を用いた。映像の名前をそれぞれ映像1, 映像2とする。各動画に対して提案手法を用いて評価実験を行う。比較対象として全天球カメラ映像のうち前面のカメラから取得された映像を魚眼モデルの ORB-SLAM に入力したものと、キューブマッピングを行って取得した映像のうち正面方向の映像をピンホールモデルの ORB-SLAM に入力したものをを用いる。以降、全天球カメラ映像のうち前面のカメラから取得された映像を魚眼モデルの ORB-SLAM に入力する手法を手法1, キューブマッピングを行って取得した映像のうち正面方向の映像をピンホールモデルの ORB-SLAM に入力する手法を手法2と呼ぶ。

5.4.1 映像1を用いた実験

映像1では直進し一度だけ左折して直進するという経路を通った。提案手法, 手法2によって作成された環境地図をそれぞれ図5.8, 図5.9に示す。手法1は映像の途中で特徴点を計測できなくなりカメラの移動経路および点群は入手できなかった。

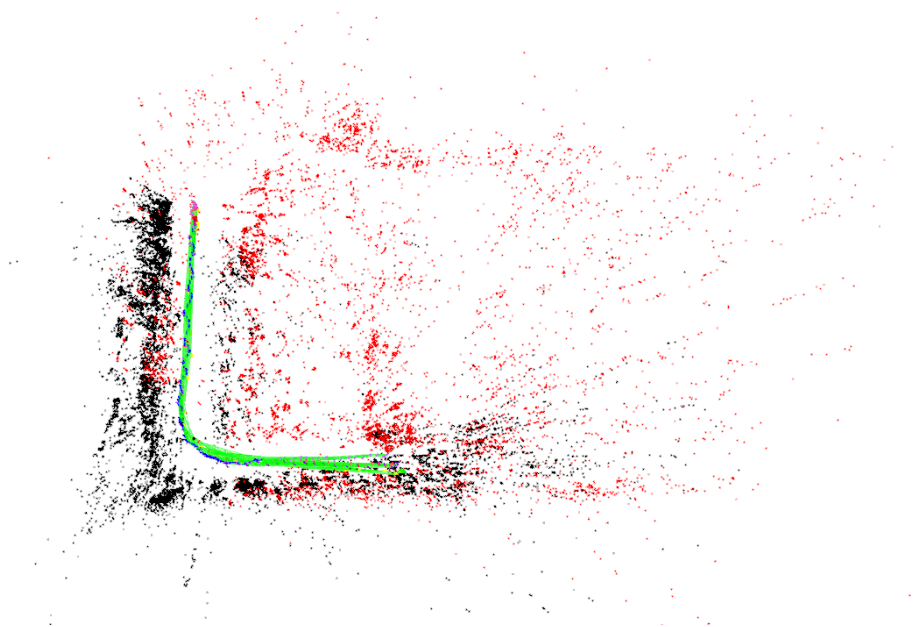


図 5.8 提案手法により作成された環境地図 (映像1)

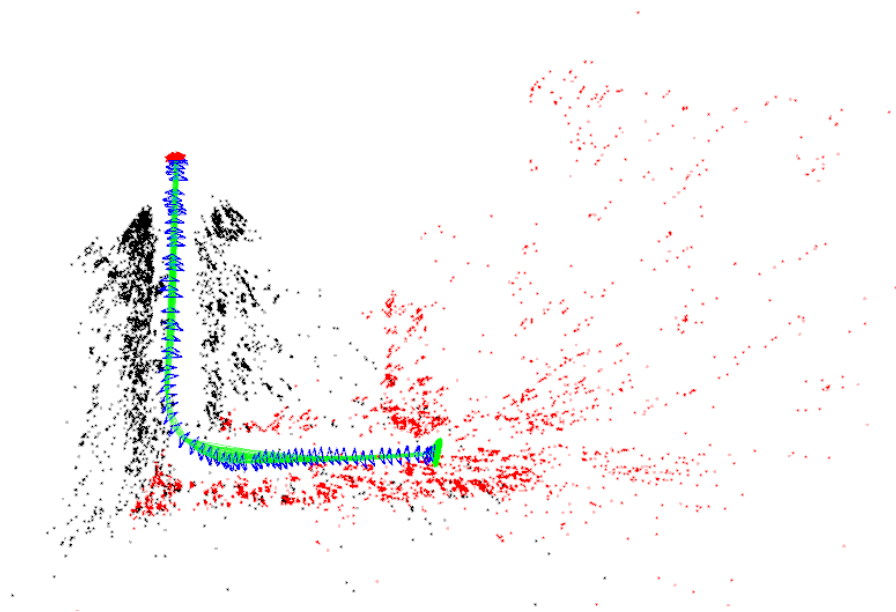


図 5.9 手法 2 により作成された環境地図 (映像 1)

図 5.8, 図 5.9 ではカメラの移動経路が青いマークで表され, 取得された点群は赤と黒の点で表されている. それぞれの手法の点の取得数を表 5.1 に示す. 手法 1 は映像の途中で特徴点を計測できなくなり点群は入手できなかったため空欄となっている.

表 5.1 各手法による点の取得数 (映像 1)

用いる手法	取得された点 [個]
提案手法	18397
手法 1	-
手法 2	7048

図 5.8, 図 5.9 および表 5.1 より提案手法を用いることで取得できる点群の数が多いことが確認できる. 提案手法ではカメラ方向を変えながら同じ経路を 5 回通るため, 計測可能な範囲が広く取得させる点の数が多い.

撮影経路上に設置されている 4 つのマーカー部分の点群を切り出し, 対応する平面との距離の平均を取った. ORB-SLAM を用いて取得した点群のうちマーカー部分の点群を選び出し, マーカー A とマーカー B の点の座標は式(5.9)に代入し, マーカー C とマーカー D の点の座標は式(5.10)に代入することで平面と点群の距離を取得する. 提案手法, 手法 1, 手法 2

で取得された点群と対応する平面の距離を表 5.2 に示す。手法 1 は点群が入手できなかったため空欄となっている。

表 5.2 平面とマーカーの距離（映像 1）

手法	マーカーと対応する平面の距離の平均値 [cm]			
	マーカーA	マーカーB	マーカーC	マーカーD
提案手法	2.14	2.44	4.03	4.07
手法 1	-	-	-	-
手法 2	6.77	3.45	5.10	6.40

表 5.2 より提案手法がすべてのマーカーに対して誤差の値が小さいことがわかる。また、提案手法と手法 2 は計測できたのに対し、手法 1 は点群の取得が出来なかったことからキューブマッピングを用いる手法は多様な環境で用いることが可能であると言える。

5.4.2 映像 2 を用いた実験

映像 2 では直進してから左折して進み、再度左折したのちに直進するという経路を通った。提案手法、手法 1、手法 2 によって作成された環境地図をそれぞれ図 5.10、図 5.11、図 5.12、に示す。

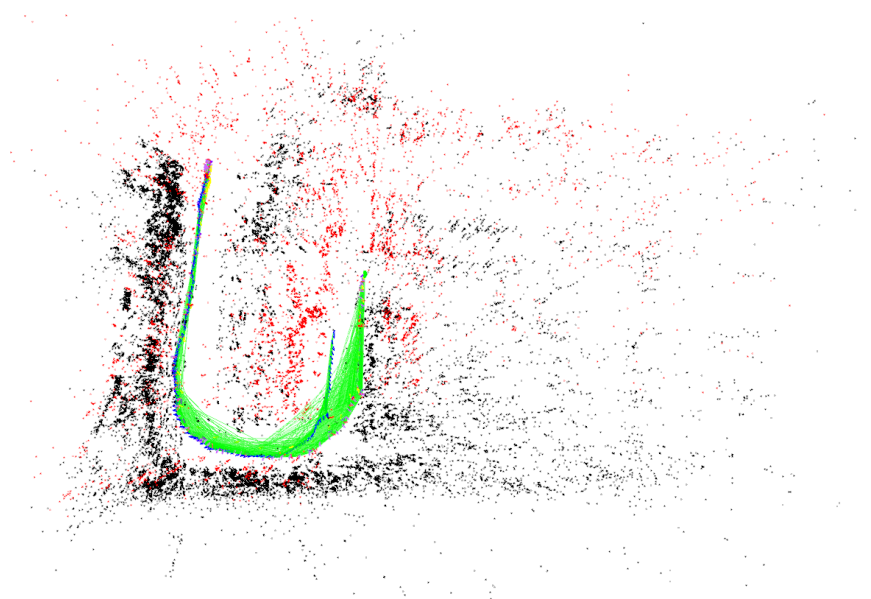


図 5.10 提案手法により作成された環境地図（映像 2）

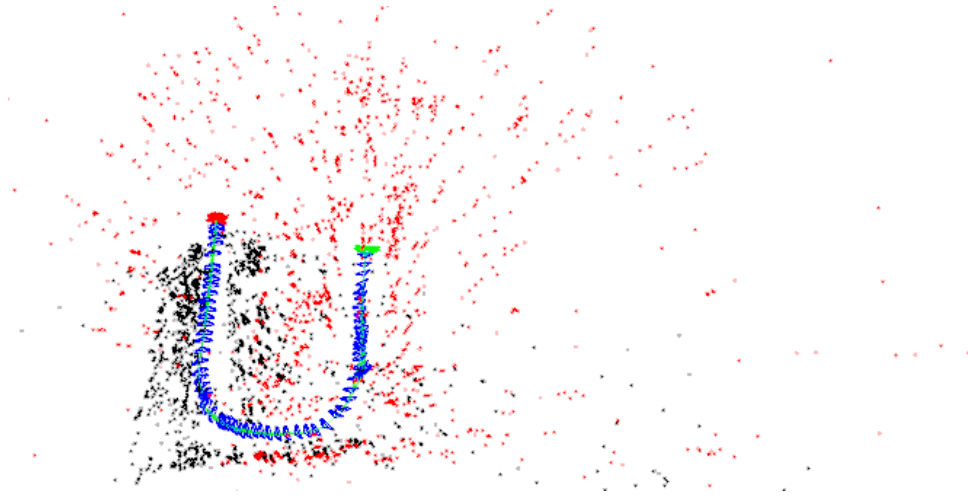


図 5.11 手法 1 により作成された環境地図 (映像 2)

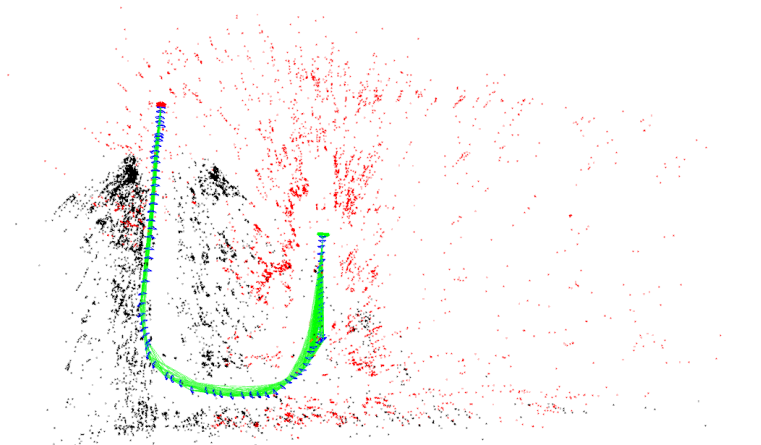


図 5.12 手法 2 により作成された環境地図 (映像 2)

図 5.11, 図 5.12, 図 5.13 ではカメラの移動経路が青いマークで表され, 取得された点群は赤と黒の点で表されている. それぞれの手法の点の取得数を表 5.3 に示す.

表 5.3 各手法による点の取得数 (映像 2)

用いる手法	取得された点 [個]
提案手法	23593
手法 1	2890
手法 2	8531

図 5.10~図 5.12 および表 5.3 より提案手法を用いることで取得できる点群の数が多いたことが確認できる。提案手法ではカメラ方向を変えながら同じ経路を 5 回通るため、計測可能な範囲が広く取得させる点の数が多。提案手法の課題としてカメラ経路の誤りが挙げられる。図 5.10 のカメラ経路の一部を拡大した図を図 5.14 に示す。映像 2 では手法 1, 手法 2 とともにカメラ経路は 1 本の線で表されているのに対し、提案手法ではカメラの経路が一致せず、図 5.14 赤い線で示すように途中からカメラの移動経路が二又に分岐してしまった。これは同じ経路を 5 回通るが映像中の物体やカメラの角度によって、カメラの曲がる角度に差が生じてしまい異なる経路を通っていると誤認識することで起こる。撮影条件や特徴点の分布によってカメラの移動経路がずれてしまう場合もあり、特徴点が少ない環境で頻繁にカメラ経路が曲がるような映像ではこのような経路の誤認識が生じやすい。

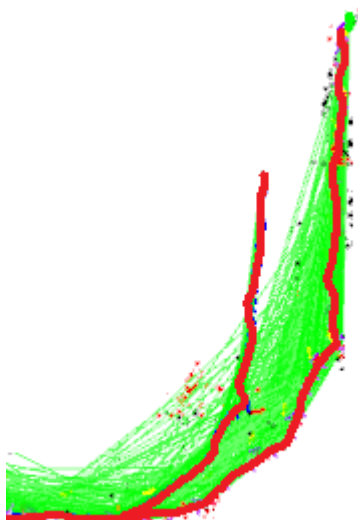


図 5.13 分岐したカメラの移動経路

撮影経路上に設置されている 4 つのマーカー部分の点群を切り出し、対応する平面との距離の平均を取った。ORB-SLAM を用いて取得した点群のうちマーカー部分の点群を選び出し、マーカー A とマーカー B の点の座標は式(5.9)に代入し、マーカー C とマーカー D の点の座標は式(5.10)に代入することで平面と点群の距離を取得する。提案手法、手法 1, 手法 2 で取得された点群と対応する平面の距離を表 5.4 に示す。表 5.4 で空欄となっている値は、マーカーを示す点群が取得できなかったものや、取得できた点群の数が少ないためマーカー上の特徴点を表しているか定かではないものであり、評価ができなかったものである。

表 5.4 平面とマーカークの距離 (映像 2)

手法	マーカークと対応する平面の距離の平均値 [cm]			
	マーカークA	マーカークB	マーカークC	マーカークD
提案手法	1.93	8.32	0.96	3.58
手法 1	-	12.03	8.57	14.24
手法 2	-	13.43	-	4.50

表 5.4 よりマーカークA を除く 3つのマーカークで提案手法の誤差が最も小さいことがわかる。また、マーカークA に関しては提案手法のみが点群を取得できたことから、提案手法は撮影条件の変化に強いことが確認できる。

5.5 結果

映像 1, 映像 2 を用いた実験により提案手法を用いると 1本の全天球カメラ映像から法範囲を計測しより多くの点群を取得できることが確認された。キューブマッピングを行い取得した映像を連結させるという手法を取ったことで、取得可能な点群の数が増加しただけでなく手法 1, 手法 2 では計測できない領域の点群も取得できることが確認された。また、マーカークを用いた精度評価により提案手法では点群の精度も向上していることが確認された。これは、同一物体に対し異なるカメラ方向から複数回の計測を行うため、点群の数が増加し平均値として精度が向上したと考えられる。一方、同一であるはずのカメラの移動経路が分岐してしまう例も確認された。

5.6 むすび

本章では、提案手法の有効性を確認するための評価実験の結果を示した。点群の取得数の比較とマーカークを用いた点群の精度比較の実験により提案手法は点群の数および精度が向上することが確認された。手法 1 や手法 2 では計測できない領域の点群も取得出来ていたことから、一度の撮影で計測できる範囲が広く本研究の提案手法は計測活動の効率化に寄与することが確認された。また、実験結果より提案手法の抱える課題を確認した。

第6章 結論・今後の課題

6.1 結論

本研究では、全天球カメラ映像にキューブマッピングを施し取得した映像を連結させてから ORB-SLAM に入力することで点群を取得する手法を提案した。既存手法と提案手法を比較することにより提案手法では取得可能な点群の数が増加することが確認できた。また、マーカーを用いた評価実験により提案手法が既存の手法に比べ取得できる点群の精度も向上することが確認できた。以上より提案手法により1本の全天球カメラ映像を用いることで精度よく広範囲の点群を取得できることが分かった。

6.2 今後の課題

提案手法では同じ経路を通る映像を5本連結して ORB-SLAM に入力している。そのため、各映像に対しカメラの移動経路の計算が行われるため、本来は完全に一致するはずの5本の経路にずれが生じており、場合によってはカメラの移動経路が分岐してしまう。カメラが回転する際に映像中に映り込んだ特徴点の数や精度の違いにより、映像ごとにカメラの回転角度や移動距離に違いが生じてしまう。元々1本の映像をキューブマッピングにより分割しているため、すべての動画において回転角度や移動距離は完全に一致しているはずであり、各映像間でカメラの移動経路を連携させ補正することにより、さらにカメラの移動経路や点群の精度が向上すると考えられる。

また、実行時間の長さも課題である。提案手法では動画を連結してから ORB-SLAM に入力するため、実行時間は撮影した映像の5倍の長さとなっており、リアルタイムでの処理が行えない。点検作業の効率化にはリアルタイム処理が求められている。リアルタイムでの処理を行うためには5本の映像を連結させるのではなく同時に並列処理させるなどの手法に変える必要があると考えられる。また、映像を高速化しても自己位置を見失わず点群を取得可能な手法を考案することで、フレームレートを5倍にしても本論文の結果と同様の結果が得られれば提案手法でもリアルタイム処理が可能となる。

謝辞

本研究の実験環境を与えてくださり、テーマの方向性の決定や手法の問題点の提示など丁寧な指導をしてくださった渡辺裕教授に深く感謝申し上げます。

また、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は、日頃から研究の疑問を解決するための助言をいただき論文執筆のスケジュール管理に関するアドバイスもいただきました。心からお礼申し上げます。

研究に関して貴重な意見をくださった研究室のメンバーには大変お世話になりました。

最後に、研究に専念させてくださり心身ともに生活のサポートをしてくださった両親には心より感謝いたします。

参考文献

- [1] 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議, "官民 ITS 構想・ロードマップ 2020" (最終検索日: 2021年1月21日)
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20200715/2020_roadmap.pdf
- [2] 国土交通省, "インフラ長寿命化とデータ利活用に向けた取組" (最終検索日: 2021年1月21日)
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/sankankyougikai/infrastructure/dai1/siryoushugi.pdf>
- [3] R. Mur-Artal, J. M. M. Montiel, J. D. Tardos, "ORB-SLAM: A versatile and accurate monocular SLAM system", *IEEE Trans. Robot.*, vol. 31, no. 5, pp. 1147-1163, Aug. 2015.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Shinya Sumikura, Mikiya Shibuya, and Ken Sakurada. "OpenVSLAM: a Versatile Visual SLAM Framework," 2019.
- [7] 株式会社 RICOH, "RICOH THETA (型番:RICOH THETA m15)が YouTube に対応しました." (最終検索日: 2021年1月21日)
<https://topics.theta360.com/ja/news/2015-03-16-2/>
- [8] 株式会社 RICOH, "RICOH THETA V" (最終検索日: 2021年1月21日)
<https://theta360.com/ja/about/theta/v.html>
- [9] 加藤裕也: "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)", 卒業論文 Feb. 2019

図一覧

図 2.1	LSD-SLAM 実行中の様子.....	5
図 2.2	LSD-SLAM により作成される環境地図.....	5
図 2.3	LSD-SLAM でカメラを回転させた場合の点群.....	6
図 2.4	ORB-SLAM 実行中の様子.....	6
図 2.5	ORB-SLAM により作成される環境地図.....	7
図 2.6	魚眼形式.....	8
図 2.7	エクイレクタングラー形式.....	8
図 2.8	キューブマッピング.....	9
図 2.9	VLP-16 の外観.....	9
図 3.1	カメラモデルとカメラの移動経路.....	13
図 3.2	ループ閉じ込みの様子.....	13
図 3.3	カメラの移動経路（模式図）.....	14
図 3.4	計測したカメラの移動経路.....	14
図 3.5	反射強度実験の様子.....	15
図 3.6	LiDAR の出力結果.....	16
図 4.1	提案手法概要図.....	18
図 4.2	画像変換によるカメラの回転.....	19
図 4.3	キューブマッピングした際の各映像のカメラ方向.....	20
図 5.1	ORB-SLAM の実行環境.....	23
図 5.2	計測場所の様子.....	23
図 5.3	マーカーと LiDAR 点群.....	24
図 5.4	チェッカーボードと ORB-SLAM の点群.....	25
図 5.5	実験に使用したマーカー.....	25
図 5.6	点 P を通る平面.....	26
図 5.7	LiDAR で取得した正解データ.....	27

図 5.8	提案手法により作成された環境地図（映像 1）	28
図 5.9	手法 2 により作成された環境地図（映像 1）	29
図 5.10	提案手法により作成された環境地図（映像 2）	30
図 5.11	手法 1 により作成された環境地図（映像 2）	31
図 5.12	手法 2 により作成された環境地図（映像 2）	31
図 5.13	分岐したカメラの移動経路.....	32

表一覧

表 3.1	ORB-SLAM の実行環境	11
表 3.2	LSD-SLAM の実行環境	11
表 3.3	入力映像と点群の関係	12
表 3.4	カメラモデルと点の数の関係	12
表 3.5	カメラの角度と特徴点の関係	15
表 3.6	色と反射強度の関係	16
表 5.1	各手法による点の取得数 (映像 1)	29
表 5.2	平面とマーカ-の距離 (映像 1)	30
表 5.3	各手法による点の取得数 (映像 2)	31
表 5.4	平面とマーカ-の距離 (映像 2)	33

研究業績

- [1] 加藤, 原, 渡辺: "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)", 電子情報通信学会総合大会, D-12-35, Mar. 2019
- [2] 加藤, 原, 渡辺: "画像変換による全天球カメラ映像の LSD-SLAM への適用と点群合成 (Application of Omnidirectional Video to LSD-SLAM by Image Conversion and Alignment)", 情報処理学会オーディオ・ビジュアル複合情報処理 (AVM) 研究会研究報告, Vol.2019-AVM105, No.14, pp.1-4, June 2019
- [3] 加藤, 原, 渡辺: "全天球カメラ映像からの 3 次元再構成と点群合成手法の一検討 (A Study on 3D Reconstruction from Omnidirectional Movie and Registration Method)", 映像情報メディア学会年次大会, 34B-3, Aug. 2019
- [4] 堀, 加藤, 渡辺: "学習型超解像と再構成型超解像の異なる組み合わせ順による時系列画像の画質改善 (Image Quality Improvement of Sequential Images by Different Combination Orders of Learning-based and Reconstruction-based Super Resolution)", 映像情報メディア学会年次大会, 32B-1, Aug. 2019
- [5] 加藤裕也, 原潤一, 渡辺裕: "全天球カメラを用いた 3 次元再構成と点群の位置合わせ手法の一検討 (A Study on 3D Reconstruction Using Omnidirectional Camera and Alignment Method)", 2019 年画像符号化シンポジウム・2019 年映像メディア処理シンポジウム (PCSJ/IMPS2019), P-2-09, Nov. 2019