

卒業論文概要書

Summary of Bachelor's Thesis

Date of submission : 02 / 01 / 2017

学科名 Department	情報理工	氏名 Name	青木貴大	指導 教員 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	1W130001-7 CD		
研究題目 Title	全天球カメラを用いたステレオ距離測定 Omnidirectional Measurement Distance Using Stereo Omnidirectional Camera				

1. まえがき

近年、全天球画像を撮影することができるデバイスが増加してきている。全天球画画像を撮影できるデバイスが増加することで安易に全天球画像を撮影できるようになってきた。一つのデバイスで全方位が映る画像が撮影できる全天球カメラは趣のある写真が撮れるため多くの人に利用されている。趣味としての写真撮影だけでなく幅広い分野で全天球画像を用いた研究が行われている。全天球画像を用いた全方位距離測定の研究はその一つである。しかし、複数のカメラレンズを用いて撮影するデバイスの場合、レンズとレンズの境界周辺の距離測定の誤差が大きくなる[1]。レンズとレンズの境界周辺の距離測定を高精度に行うことができれば、全方位距離測定を高精度に行うことができる。全方位距離測定の高精度化により、全方位の3次元再構成や全方位の物体認識の分野に活用できると考えられる。

2. 全天球画像のステレオ距離測定

本論文では、Equirectangular形式の全天球画像を用いる。全天球画像を分割し操作することでカメラの前後左右それぞれを視野の中心となる魚眼画像を4枚取得する。全天球カメラで構成したステレオカメラで撮影を行い得られた合計8枚の魚眼画像を用いて距離測定を行うことで、全方位の距離測定を行う手法を提案する。また、平行にカメラを並べるとカメラの左右を視野の中心とした魚眼画像を得た際にカメラ同士が映ってしまうため、ステレオカメラを構成する際に前後にカメラをずらす構成とする。本論文では、カメラ2台を平行に並べた場合、前後にずらした場合両方の距離導出式を提案する。また、2台のカメラが同方向を向くようにEquirectangular形式の全天球画像を用いて補正する手法も提案する。

3. 実験結果評価

実験では、まず提案手法での距離測定の結果の誤差が最大でも10%未満であることを確認した。カメラを平行に並べた場合、前後にずらした場合どちらでも精度の良い距離測定結果が確認できた。また、カメラの左右方向を視野の中心とした魚眼画像を用いた場合でも同一の導出式を用いることができることを確認した。また、従来の研究では誤差が大きかった魚眼レンズと魚眼レンズの境界周辺の距離測定も提案手法により精度のいい結果が得られた。カメラの前後左右を視野の中心とした魚眼画像はそれぞれ約100°の視野で精度よく距離測定が行えることを確認した。よって本論文の手法により全方位距離測定が行えることが確認できた。しかし、本実験によりカメラを同方向に向くように補正する手法においては有用ではないと結論付けられた。

4. まとめ

本研究では、Equirectangular形式の全天球画像を用いて全方位距離測定を行う手法を提案し、その評価を行うために5種類の実験を行った。実験の結果、本論文の提案手法により全方位距離測定を誤差10%未満で実行できることを確認した。従来手法においては精度が悪かったレンズとレンズの境界周辺においても本論文の手法では誤差は10%未満であった。今後、実用性を確認するためにカメラ間の距離をさらに離して実験を行ったり、キャリブレーションの精度を向上させたりすることで実用性を向上させることができると考えられる。

参考文献

[1] Yosuke Iguchi and Jun'ichi , Yamaguchi, "Omni-directional 3D Measurement Using Double Fish-eye Stereo Vision" IEEE, 2015

2016 年度 卒業論文

全天球カメラを用いたステレオ距離測定

Omnidirectional Measurement Distance Using Stereo

Omnidirectional Camera

指導教員 渡辺 裕 教授

早稲田大学 基幹理工学部

情報理工学科

1W130001-7

青木貴大

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	1
1.4	論文の構成	2
第2章	全天球カメラの特性	3
2.1	はじめに	3
2.2	構造	3
2.2.1	外装	3
2.2.2	内装	3
2.2.3	撮影方法	3
2.2.4	視野	3
2.3	全天球画像	6
2.3.1	全天球画像の形式	6
2.3.1.1	Equirectangular 形式	7
2.3.1.2	Sphere 形式	7
2.3.2	全天球画像の生成	8
2.3.2.1	光学技術	8
2.3.2.2	画像処理技術	9
2.4	魚眼画像	9
2.4.1	等距離射影方式	9
2.4.2	Theta S での魚眼画像の取得	12
2.4.2.1	MP4	12
2.4.2.2	JPG	13
2.4.2.3	本実験で扱う魚眼画像の取得方法	16
2.5	むすび	16
第3章	ステレオカメラによる距離測定	17
3.1	はじめに	17
3.2	カメラキャリブレーション	17
3.2.1	カメラ座標と世界座標	17
3.2.2	射影行列	17
3.2.3	内部パラメータ	18
3.2.4	外部パラメータ	19
3.2.5	全パラメータ	20

3.2.6 Homography 行列	20
3.3 Zhang によるカメラキャリブレーション法	21
3.4 三角測量の原理	22
3.4.1 2次元の三角測量	22
3.4.2 3次元の三角測量	24
3.5 SIFT 特徴量	24
3.5.1 スケールとキーポイント検出	25
3.5.2 キーポイントのローカライズ	25
3.5.3 オリエンテーションの算出	27
3.5.4 特徴量の記述	27
第4章 全天球画像を用いたステレオ距離測定	29
4.1 はじめに	29
4.2 提案手法の概要	29
4.3 カメラ前後左右それぞれを視野の中心とした魚眼画像 4 枚を得る手法	29
4.4 全天球カメラ 2 台を用いたステレオ距離測定	30
4.4.1 カメラ 2 台を平行に並べた場合	31
4.4.2 カメラ 2 台を前後にずらした場合	35
4.5 回転行列を用いたカメラ 2 台同 1 方向を向かせるための補正手法	36
4.6 むすび	37
第5章 提案手法の評価実験と結果, 考察	38
5.1 はじめに	38
5.2 実験の概要	38
5.2.1 実験 1	38
5.2.2 実験 2	38
5.2.3 実験 3	38
5.2.4 実験 4	38
5.2.5 実験 5	39
5.3 実験の条件	39
5.3.1 実験環境	39
5.3.2 カメラの配置環境	39
5.3.3 実験に用いた画像	40
5.3.3.1 実験 1 で用いた画像	40
5.3.3.2 実験 2 で用いた画像	41
5.3.3.3 実験 3 で用いた画像	43
5.3.3.4 実験 4 で用いた画像	44
5.3.3.5 実験 5 で用いた画像	45

5.4 実験結果と考察	46
5.4.1 実験1の結果	46
5.4.2 実験1の考察	48
5.4.3 実験2の結果	49
5.4.4 実験2の考察	50
5.4.5 実験3の結果	51
5.4.6 実験3の考察	52
5.4.7 実験4の結果	53
5.4.8 実験4の考察	53
5.4.9 実験5の結果	54
5.4.10 実験5の考察	55
第6章 結論と今後の課題	57
6.1 結論	57
6.2 今後の課題	57
謝辞	59
参考文献	60
図1覧	62
表1覧	64

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

近年、全天球画像を撮影することができるデバイスが増加してきている。全天球画像を撮影できるデバイスが増加することで容易に全天球画像を撮影することができる。全天球画像を撮影、閲覧する目的だけでも利用者は楽しむことができる。また、趣のある写真が撮影することができるため Instagram ではフォトコンテストが開かれるなど注目が増している。Instagram だけでなく Facebook や YouTube も全天球映像を視聴できるように適応している。VR 技術が発達することによりウェアラブルカメラを用いた全天球映像の視聴も可能になってきている。

撮影・閲覧するだけでなく全天球画像を用いた研究も数多くなされている。従来、全天球画像を用いて全方位距離測定を行う研究がされているが、 360° 正確に距離測定を行っているわけではない。カメラのレンズを複数使用し全天球画像を生成するためカメラのレンズ同士の境界で距離測定の誤差が大きくなっている[1]。また、全天球画像は歪みが発生してしまうため画像の中心から外側に向かうに連れて誤差が大きくなる。

本論文では、全天球カメラで構成したステレオカメラで撮影を行い、カメラの前後左右それぞれが視野の中心となる魚眼画像を 4 枚取得する。取得した 4 枚の画像の歪みが少ない画像中心周辺($0^\circ \sim 60^\circ$)で距離測定を行うことで全方位距離測定を行う。また、全天球画像を用いてカメラ 2 台が同方向を向くように補正する手法についても提案する。

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。

1.2 本研究の目的

カメラ 2 台が同方向を向くようにする際、従来は画像を補正する必要があり画質の劣化が生じていた。しかし、全天球画像を用いてカメラ 2 台が同方向を向くようにすることで 360° の視野のうち見る視点を変えるだけで済む。したがって、画像を補正する必要が無く、距離測定を行う際にオリジナル画像のまま扱うことができる。

カメラ 2 台を前後にずらしてステレオカメラを構成することによりカメラの前後左右それぞれが視野の中心となる魚眼画像においてお互いのカメラが映らないようにすることができる。したがって、1 度の撮影で魚眼画像の中心にお互いのカメラが映ることなくカメラの前後左右を視野の中心とした魚眼画像 4 枚取得することができる。取得した 4 枚の画像でそれぞれ 90° 以上の視野で距離測定を高精度に行うことができれば全方位距離測定を高精度に行えることになる。また、カメラの左右を視野の中心とした魚眼画像を用いることでレンズとレンズの境界においても高精度に距離測定を行える。

全方位距離測定を高精度にできるようになると全方位の 3 次元再構成が可能になる。また、物体の認識もできるようになるためロボットの自動操縦や自動車の自動運転にも応用することができると考えられる。

1.3 関連研究

距離測定の従来の研究では全天球画像を生成するために魚眼レンズを二つ用いる。二つの魚眼カメラで得られた画像から一つの全天球画像を生成している。したがって、二つの画像の境界が魚眼画像の縁にあたるため、当該部分においては距離測定の誤差が大きい問題がある[3]。また、距離測定の際に対応点を検出する必要がある。対応点を検出するために特徴量検出として SIFT(Scale-invariant Feature Transform) が使われることが多い[13]。しかし、魚眼画像のように歪みのある画像においては MSER(Maximally Stable Extremal Regions)と ASIRT(Affine Scale Invariant Feature Transform)を組み合わせることで二つの魚眼画像で対応する特徴点の検出数が増えることが判明している[4]。また、歪みのある画像において特徴点を検出するために sRD-SIFT の有効性も示されている[5]。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。

第1章は本章であり、本研究の背景や目的について述べる。

第2章では、本論文で用いる全天球カメラの性質について述べる。併せて全天球画像、魚眼画像についても述べる。

第3章では、カメラキャリブレーションについて述べる。

第4章では、本論文で提案する手法について述べる。

第5章では、実験概要、結果および考察について述べる。

第6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 全天球カメラの特性

2.1 はじめに

本章では、本論文で用いる全天球カメラ Theta S について述べる。Theta S は RICOH の製品である。

2.2 構造

Theta S は前後につけている 2 つの魚眼レンズから全天球画像を生成している。Theta S の外装と内装、撮影についてまず説明する。

2.2.1 外装

Theta S のサイズは幅 44mm, 高さ 130mm, 奥行 22.9mm, レンズ部分を除いた奥行は 17.9mm である。マイク, スピーカもあり動画の撮影も可能。カメラの状態を示すランプが 6 個外装されている。電源が入っているかどうかを示す「電源ランプ」撮影が可能であることを示す「カメラ状態ランプ」, 無線機能が使用可能であることを示す「無線ランプ」, 撮影されるものが動画か静止画かを示す「撮影モードランプ」, 動画を撮影していることを示す「動画記録ランプ」, メモリー残量が少なくなっていることを示す「メモリー警告ランプ」である。カメラの状態を変えるボタンが 3 個外装されている。電源のオンオフを切り換える「電源ボタン」, 無線機能のオンオフを切り換える「無線ボタン」, 撮影するものが動画か静止画かを切り換える「撮影モードボタン」である。USB ケーブルで接続できるように USB 端子があり, ライブストリーミングを可能にするために HDMI 端子が外装されている。

2.2.2 内装

カメラ内にはプリズム・ミラーが内装されており 2 個の魚眼レンズから入射した光がプリズム・ミラーにより反射されて 90° 曲がられ撮像素子である CMOS センサーで受光される構造になっている。詳細は 2.3.2.1 の光学技術で述べる。

2.2.3 撮影

撮影はカメラにあるシャッターボタンを押下することで撮影ができる。また, 無線機能である Wi-Fi を用いてスマートフォンからの撮影も可能である。静止画と動画最大 25 分間の撮影が可能。記録される解像度はフル HD_(1920×1080)である。動画のフォーマットは MP4, 静止画のフォーマットは JPEG_(Exif Ver2.3)である。撮影した動画や静止画は RICOH Theta 専用のアプリケーションを使用し視聴することができる。

2.2.4 視野

Theta S で撮影される全天球画像は 360 度の視野を持っている。使用されている魚眼レンズは 180 度より多く撮影できるレンズである。前後 2 つのレンズの視野で重なる部分を

つなぎ合わせて全天球画像にしている。2つの魚眼画像をつなぎ合わせる手法は2.3.2.2 画像処理技術で述べる。Theta S のレンズ部分を除いた奥行は17.9mmあり、画像のつなぎ合わせを行うため Theta S 真横との距離が近いと映らない部分が発生する。図2.1は壁と10cm離して Theta S 正面から撮影した画像である。図2.2は壁から10cm離して縦の点線が Theta S の真横に来るように配置し撮影をした画像である。

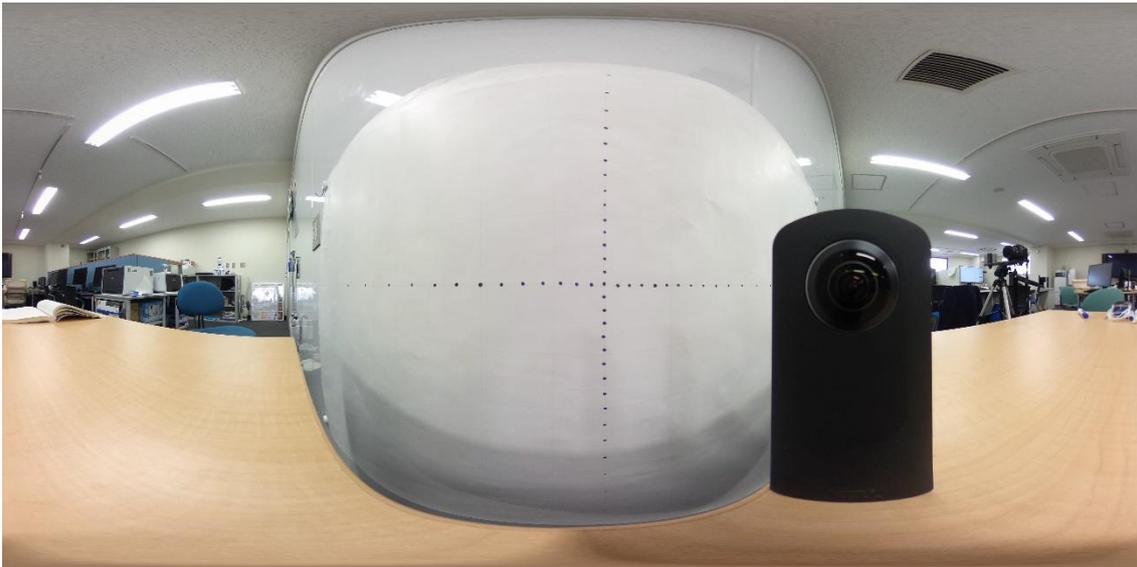


図 2.1 壁と 10cm 離して Theta S 正面から撮影した画像



図 2.2 壁と 10cm 離して Theta S 真横から撮影した画像

図2.1と図2.2から本来あるはずの縦の点線が図2.2では映っていない。つまり Theta S の真横と距離が近いと映らないものが発生することになる。本研究を行う上で、物体からどの

くらいの距離を離せば 360° 映るのかを知る必要がある。

下の図 2.3～図 2.6 は壁からの距離を 25cm, 26cm, 27cm, 27.5m と離して撮影を行った画像である。赤い四角で囲った部分が Theta S の真横に来るように配置している。

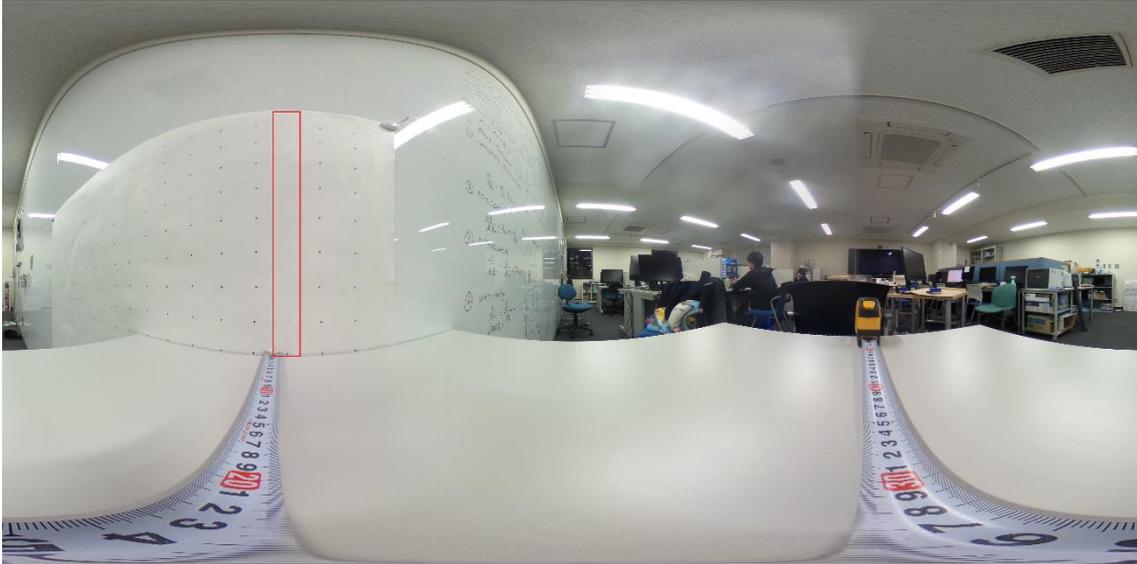


図 2.3 壁から 25cm 離して撮影を行った画像

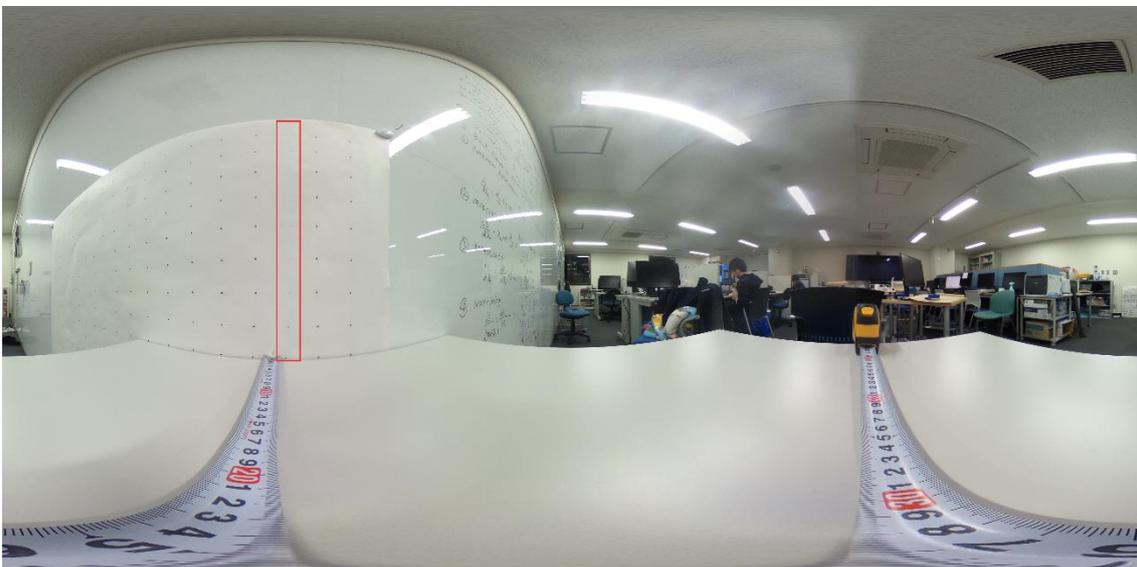


図 2.4 壁から 26cm 離して撮影を行った画像

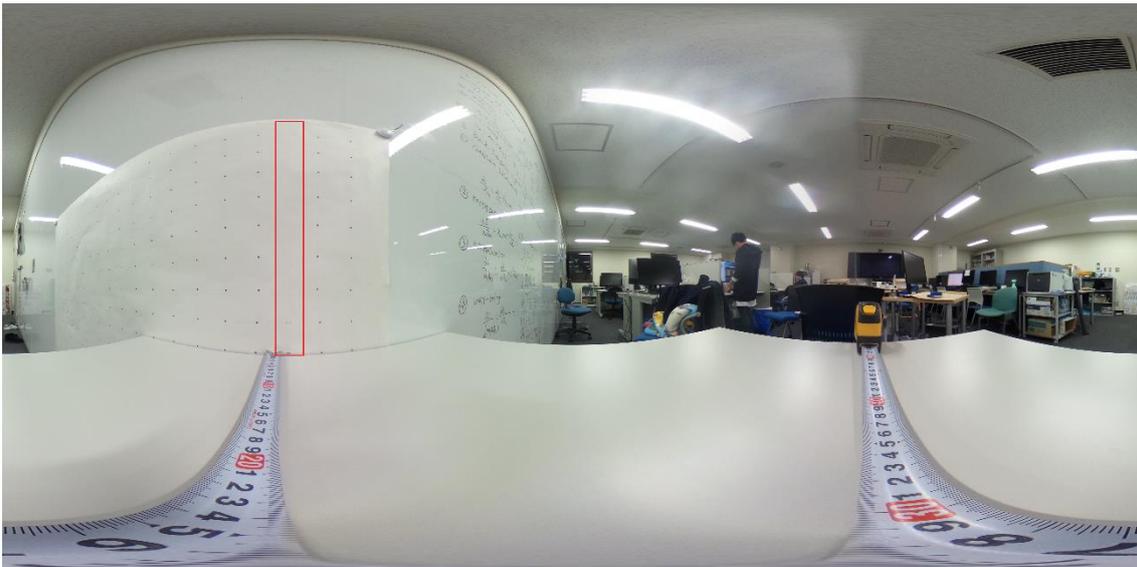


図 2.5 壁から 27cm 離して撮影を行った画像

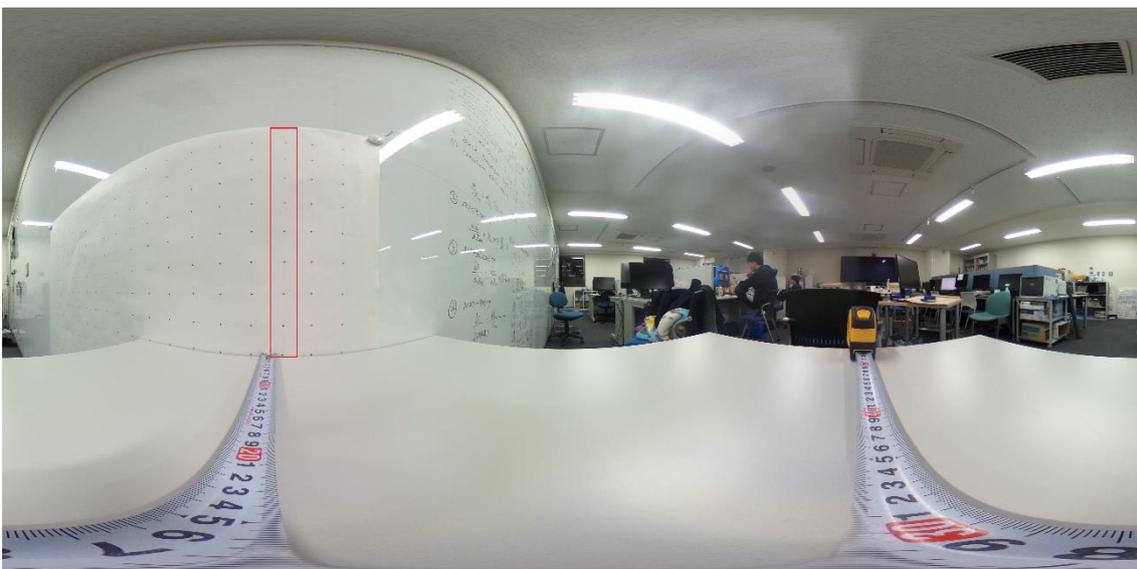


図 2.6 壁から 27.5cm 離して撮影を行った画像

図 2.3～図 2.6 から 27.5cm 壁から離せば縦の点線が映っていることが確認できる。つまり 27.5cm 以上離れていれば 360° の視野で撮影ができるということになる。

2.3 全天球画像

Theta S で撮影ができる全天球画像について述べる。

2.3.1 全天球画像の形式

全天球画像の形式にはいくつかあるがここでは Theta S で用いられている Sphere 形式

と Equirectangular 形式について述べる。

2.3.1.1 Equilectangular 形式

Theta S で撮影した画像を PC に保存すると Equirectangular 形式になる。保存された Equirectangular 形式の画像を既に述べた RICOH THETA という専用のアプリケーションで開くと Sphere 形式の全天球画像を閲覧することができる。Equirectangular 形式とは図 2.2 のように Sphere 形式の全天球画像を経度と緯度が直交する正距円筒図法のように展開した画像である。



図 2.7 Theta S で得られる Equirectangular 形式の全天球画像

2.3.1.2 Sphere 形式

Theta S では前後に取り付けられた 2 つの魚眼レンズで得られた画像を球面につなぎ合わせることで Sphere 形式の全天球画像を生成している。Sphere 形式の全天球画像は RICOH THETA という専用のアプリケーションのみで閲覧ができる。カーソルを移動させることで視野を変更させることができるのが特徴である。RICOH THETA のアプリケーションで閲覧した全天球画像を下の図 2.8 に示す。

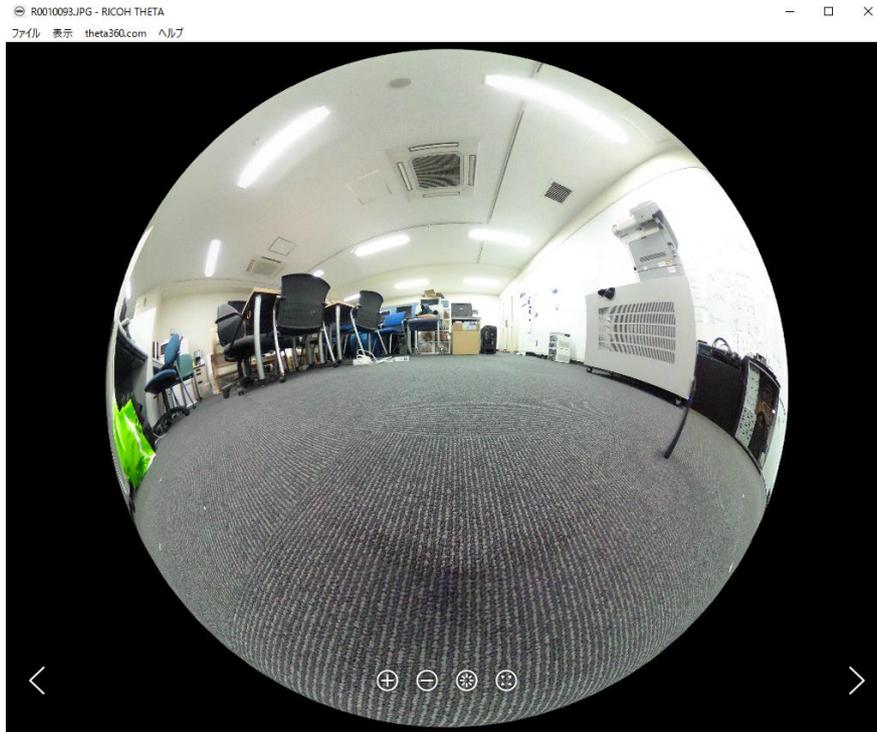


図 2.8 Theta S で得られる Sphere 形式の全天球画像

2.3.2 全天球画像の生成

RICOH がホームページで公表している全天球画像を生成するため Theta S で用いられている技術について述べる。

2.3.2.1 光学技術

Theta S には図 2.9 のように屈曲光学系がありその内部にプリズムが内蔵されている。

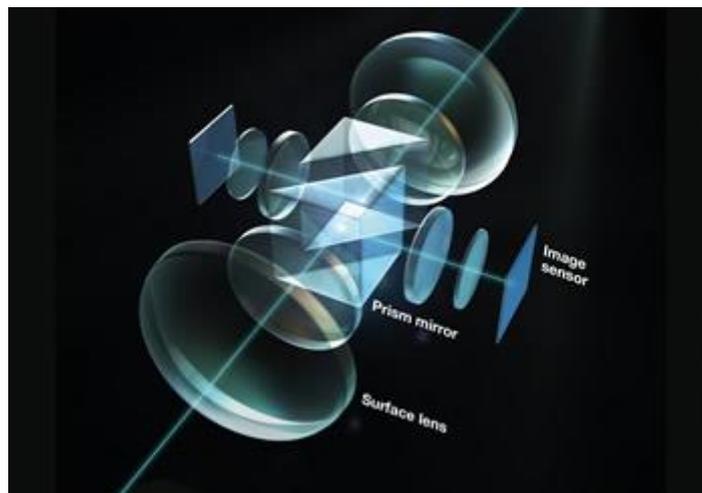


図 2.9 対称に配置された屈曲光学系[1]

2 個の魚眼レンズから入射した光がプリズム・ミラーで反射されて 90° 曲げられる。 90° 曲げられた光が撮像素子に入射する仕組みになっている。撮像素子で得られた魚眼画像 2 枚を合成して一つの全天球画像を生成する。光学系の内部でプリズムを貼り合わせることで 2 個のレンズの視差の影響を減らすことができ、これは RICOH による独自技術で光学系の小型化もされている。この技術の元コンパクトなサイズで Theta S が製造されている。

2.3.2.2 画像処理技術

Theta S で全天球画像を生成する画像処理の流れについて述べる。2 つの魚眼レンズで得られる魚眼画像を明るさや色味が合った画像が得られるような処理をする。撮像素子の個体差を補正したり、露出制御を行っている。

2 枚の魚眼画像をつなぎ合わせるつなぎ画像処理を行う。2 枚の画像でパターンマッチングを行い、エリアごとに基準画像と比較画像のずれの量を算出しつなぎ合わせる位置を検出する。つなぎ合わせた画像を正距円筒図法の **Equirectangular** 形式の全天球画像を生成。生成された **Equirectangular** の画像を球面に貼り付けて **Sphere** 形式の全天球画像が生成される。

2.4 魚眼画像

ここでは Theta S で用いられている魚眼画像について述べる。

2.4.1 等距離射影方式

等距離射影方式とは魚眼画像の射影方式の一つで魚眼レンズに入射する角度の間隔と画像平面上での間隔が等距離になる射影方式である。図 2.10 のようにカメラとの距離を d 、カメラに入射する角度を θ とする。

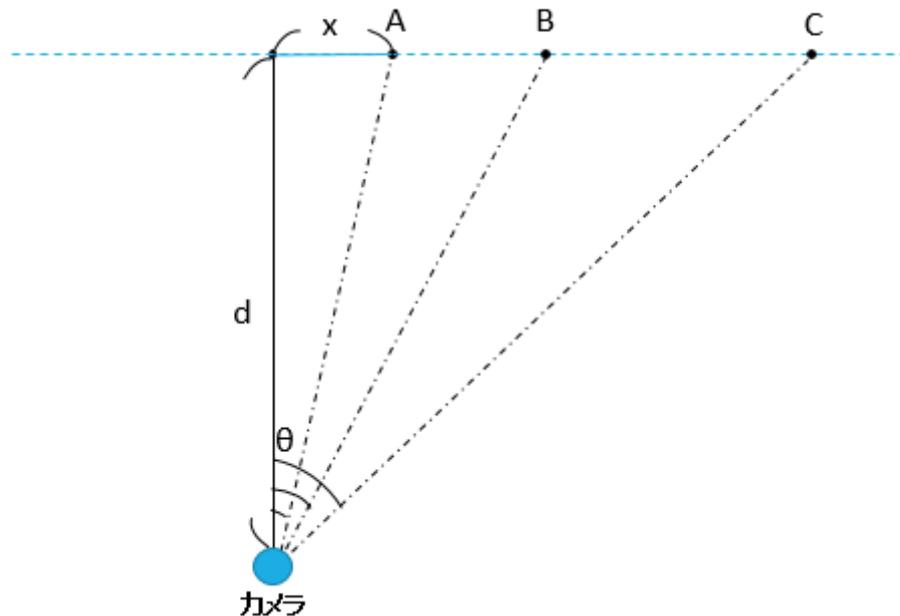


図 2.10 カメラに入射する点の位置関係

カメラの正面方向を Y 軸，カメラの横方向を X 軸とすると $y=d$ の X 平面上から θ の角度でカメラに入射する点の x 座標は

$$x = d \tan \theta \quad (2.1)$$

となる． $y=d$ の X 平面上に点 A, B, C があつたとする．それぞれの点からカメラに入射する角度を $1 \times \theta$, $2 \times \theta$, $3 \times \theta$ とする．また，このとき画像平面上で A, B, C が A', B', C' に射影されたとする．A', B', C' の x 座標を x_1 , x_2 , x_3 とすると等距離射影方式の場合，入射角が 2 倍，3 倍となつたとしても画像平面上での各点の x 座標の差 $x_2 - x_1 = x_3 - x_2$ は等間隔になる．

Theta S で使われている魚眼レンズは等距離射影方式である．次に，実際に Theta S で撮影した場合どのように射影されるかを示す．まず撮影した環境について述べる．壁から 10cm 離れた位置に Theta S を配置し壁に点を描画した模造紙を貼り付ける．Theta S からみて上下左右に入射角 θ を $0^\circ \sim 70^\circ$ まで 5° 毎増やし $x = d \tan \theta$ の式で算出した x の距離の位置に点を描画した．点を描画した模造紙のイメージ図を図 2.11 に示す． 0° の点の正面に Theta S のレンズが中心に来るように配置し，撮影をした．撮影により得られた魚眼画像を図 2.12 に示す．

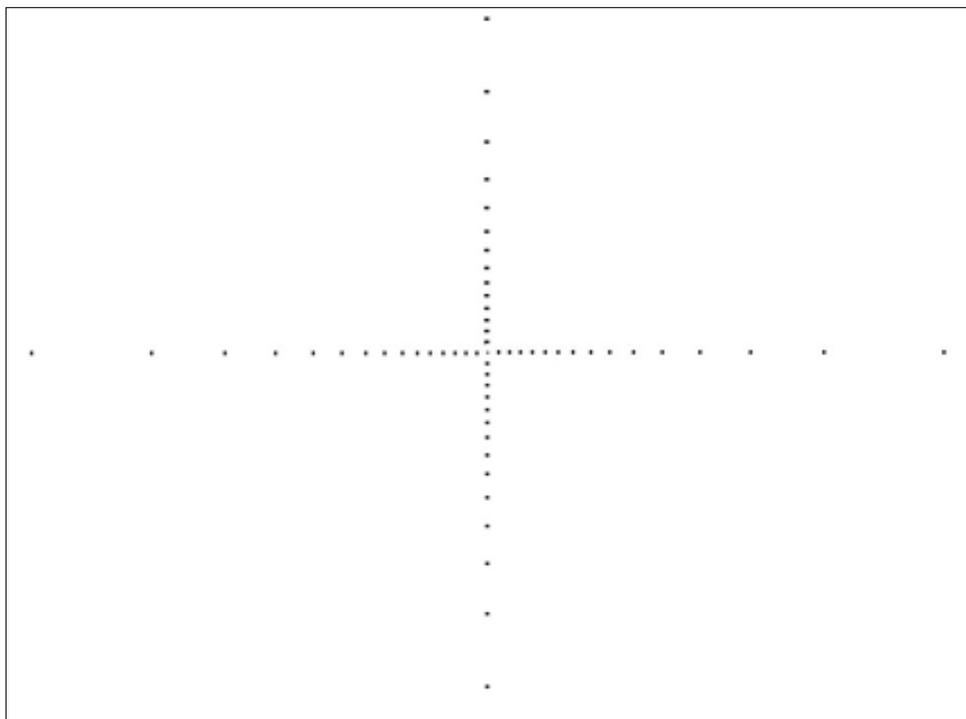


図 2.11 点を描画した模造紙イメージ図

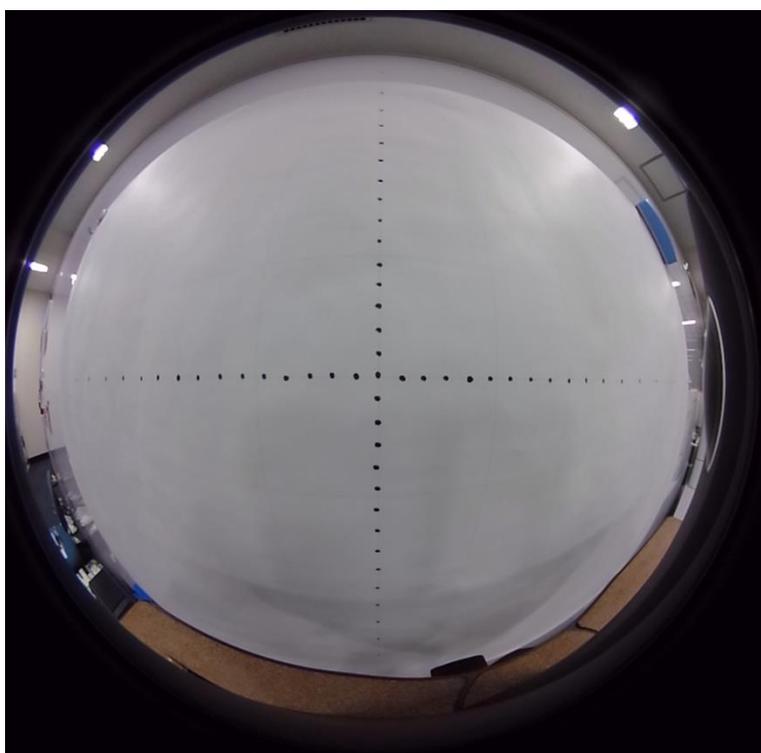


図 2.12 Theta S で撮影し得られた魚眼画像

実際には各点は図 2.11 のように等間隔に描画されていないが Theta S で撮影すると図 2.12 のように等間隔に写っている。これが等距離射影方式の魚眼レンズの特徴である。

2.4.2 Theta S での魚眼画像の取得

既に述べたように動画では MP4、静止画では JPEG のフォーマットで全天球画像を得ることができる。ここでは Theta S で撮影を行った後 2 つのフォーマットからどのようにして魚眼画像を得ることができるかを述べる。

2.4.2.1 MP4

Theta S で動画を撮影すると MP4 のフォーマットで得られる。MP4 ファイルを Windows Media Player で再生した画面をスクリーンショットした画像が図 2.13 である。

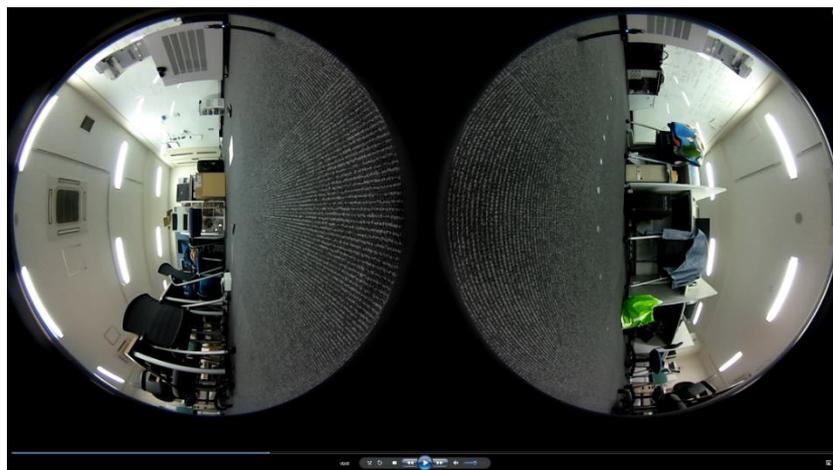


図 2.13 Windows Media Player で再生した画面をスクリーンショットした画像

Theta S 前後の魚眼レンズで撮影された動画が魚眼イメージで再生させる。スクリーンショットの画像をトリミングし 90° 回転させ図 2.14 のような魚眼画像が得られる。



図 2.14 MP4 ファイルを再生しスクリーンショット行いトリミングした魚眼画像

スクリーンショットした画像を左右2つ分トリミングするので魚眼画像の中心が画像平面上のどこにあたるかが分かりにくい。また画質も悪い。また画像の円の縁に霧がかかった光のようなものがあり、どこまでが魚眼レンズで撮影された画像なのか判断が難しい。

2.4.2.2 JPEG

Theta S で静止画を撮影すると JPEG のフォーマットで得られる。撮影した JPEG ファイルは図 2.15 のような Equilerctangular 形式の全天球画像で得られる。

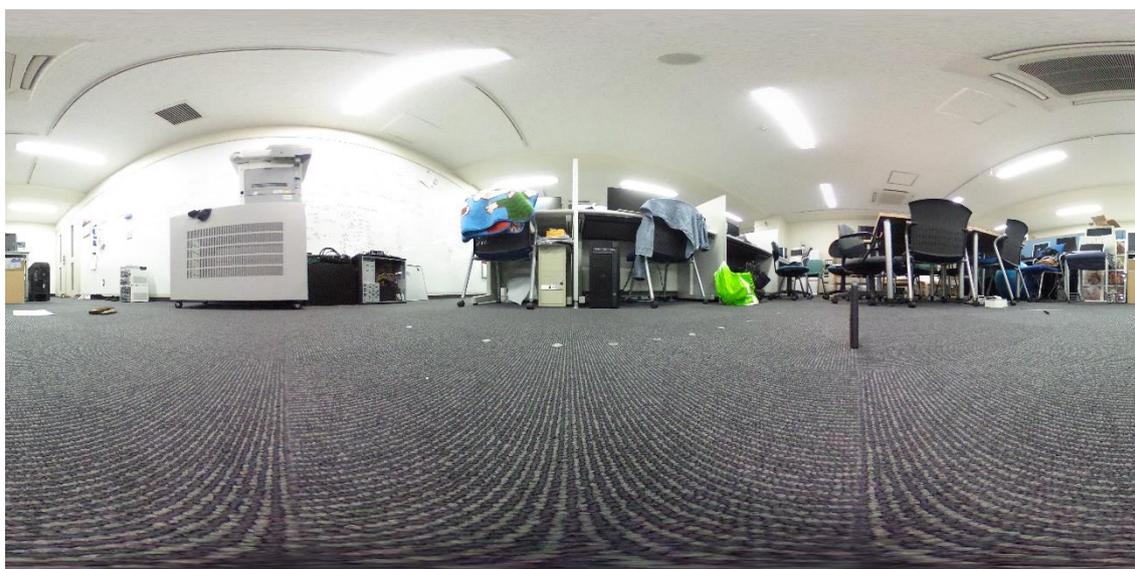


図 2.15 JPEG ファイルとして得られる Equilerctangular 形式の全天球画像

この JPEG ファイルを RICOH THETA 専用のアプリケーションで開くと図 2.16 のように閲覧できる。

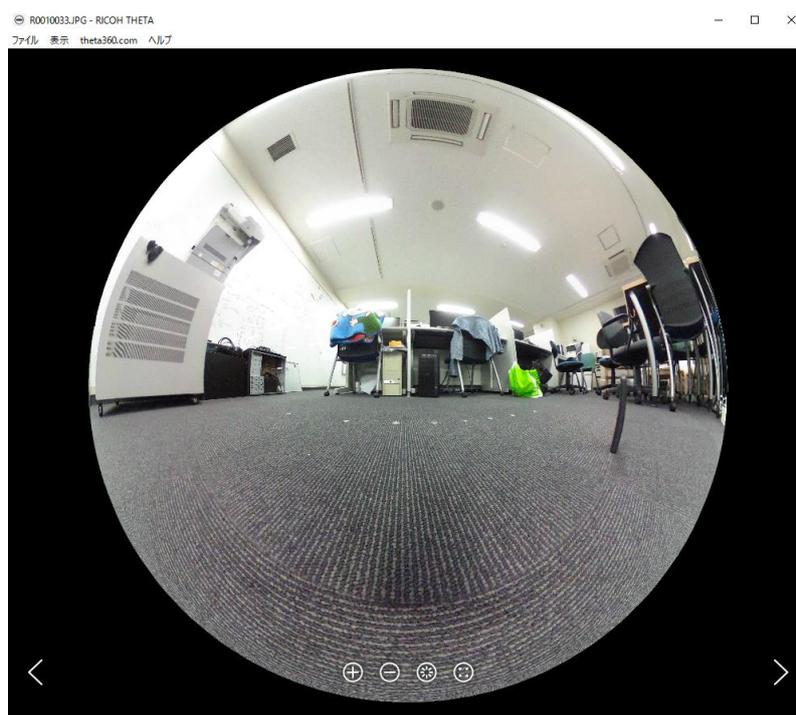


図 2.16 RICOH THETA 専用アプリで展開した画像

図 2.16 は片側の魚眼レンズの視野（ 180° ）以上の部分が映っているので片側の魚眼レンズで得られた画像ではない．図 2.15 において片側のレンズの視野（ 180° ）は図 2.15 の画像を横方向で 4 分割したときの中心二つ分である．よって横方向で 4 分割したときの左右 2 つ分を黒く塗りつぶすことで片側のレンズの視野（ 180° ）のみになる．そのような処理を図 2.15 で行った画像が図 2.17 である．

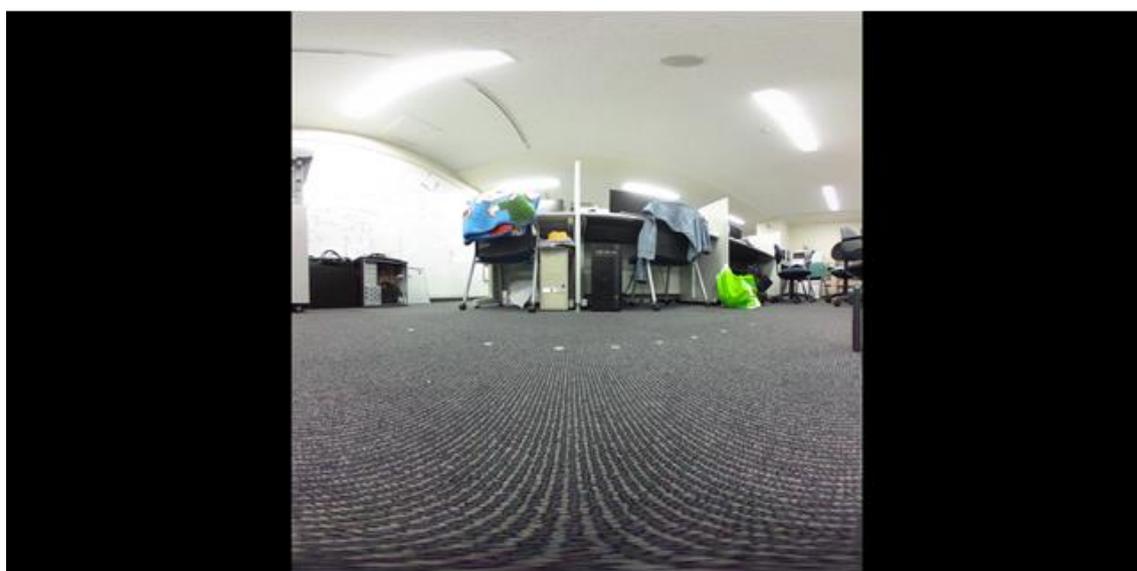


図 2.17 図 2.15 の画像の横方向 4 分割したうち左右 2 つ分を黒く塗りつぶした画像

図 2.17 を RICOH THETA 専用アプリで開き全画面表示をし、スクリーンショットした画像が図 2.16 である。

図 2.18 図 2.17 を RICOH THETA 専用アプリで展開した画像

図 2.18 をトリミングした画像が図 2.19 である。

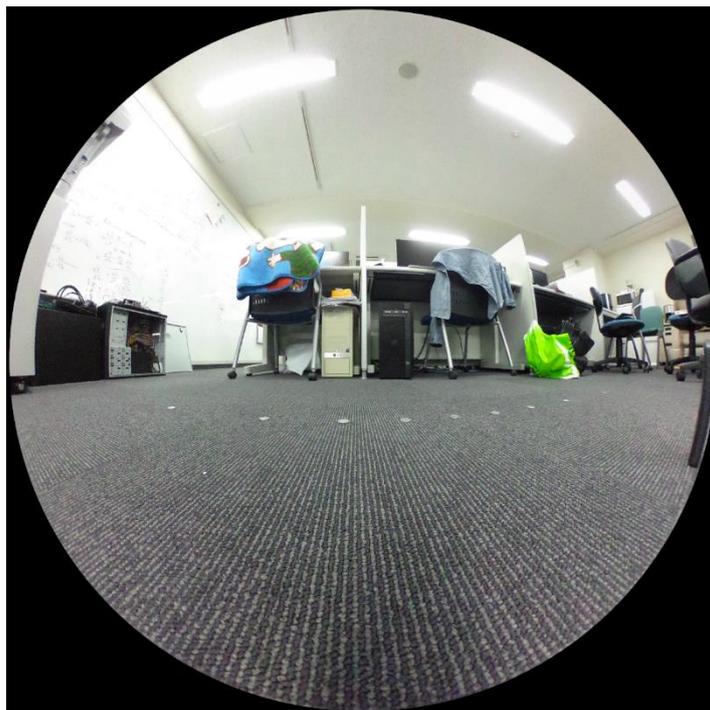


図 2.19 図 2.18 をトリミングした画像

このようにして図 2.19 のような魚眼画像を得ることができる。この方法であれば MP4 ファイルから魚眼画像を得る場合と異なり、スクリーンショット画像の中心が魚眼画像の中心にもなるので本実験で扱いやすい。また画質が良いという利点もある。

2.4.2.3 本実験で扱う魚眼画像の取得方法

等距離射影方式について述べた図 2.12 は MP4 ファイルから魚眼画像を得る方法を行った。JPEG ファイルから得る方法でも行い両者を比較してみた。

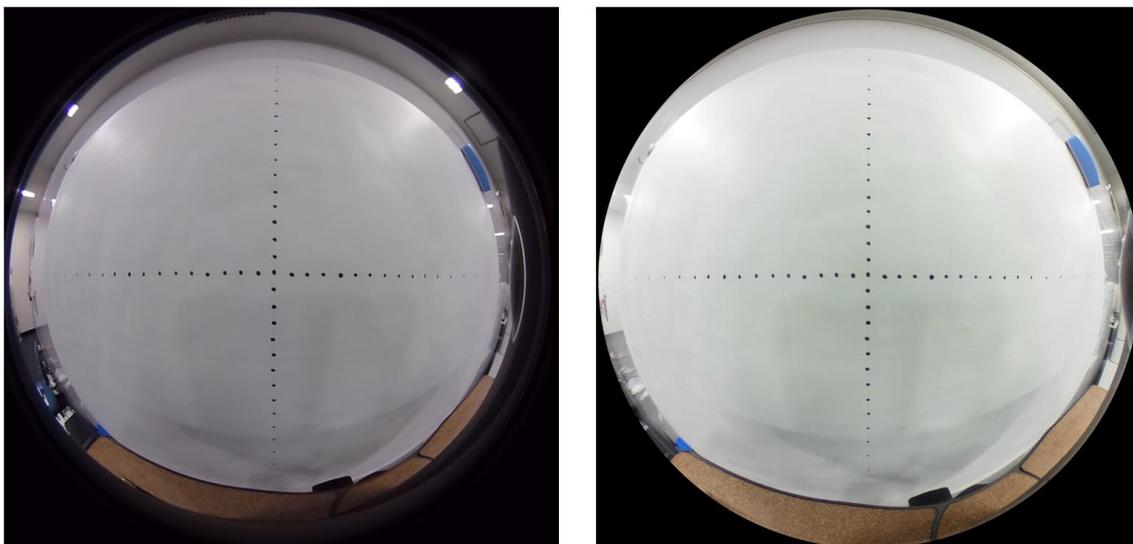


図 2.20 MP4 で得られる魚眼画像(左)と JPEG ファイルで得られる魚眼画像(右)

図 2.10 をみるとどちらも同じような画像が得られている。2.4.2.3 でも述べたように JPEG ファイルから魚眼画像を得たほうが魚眼画像の中心が分かりやすく、画質もよいので本研究において扱いやすい。よって本論文では今後魚眼画像を得る際には JPEG ファイルから得る方法を用いる。

2.5 むすび

本章では、本論文で扱う Theta S について述べた。

第 3 章ではステレオカメラの距離測定について述べる。

第3章 ステレオカメラによる距離測定

3.1 はじめに

本章では一般的なステレオカメラの理論と手法について述べる.

3.2 カメラキャリブレーション

一般的なカメラであるピンホールカメラは光軸点や焦点距離などの内部パラメータ, 世界座標から見た光軸の位置座標や回転を表す外部パラメータを持つ. カメラキャリブレーションとはこの内部パラメータや外部パラメータを求めることである. ここでは各パラメータや座標系について述べた後, キャリブレーションの手法について述べる.

3.2.1 カメラ座標と世界座標

一般的なピンホールカメラモデルの場合, カメラ座標と世界座標の関係は図 3.1 のようになる.

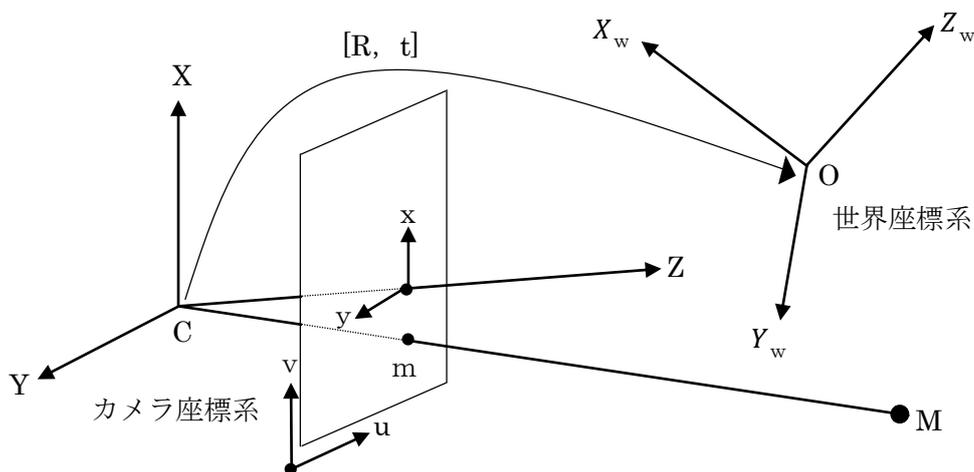


図 3.1 カメラ座標と世界座標の関係

また, 3次元空間中の点は次式のように画像平面に投影される. このときの f はレンズ中心から画像平面までの距離であり, レンズの焦点距離である.

$$x = f \frac{X}{Z} \quad (3.1)$$

$$y = f \frac{Y}{Z} \quad (3.2)$$

3.2.2 射影行列

式(3.1)と式(3.2)は非線形の線形近似の式であるが次のように線形表現することができる.

これは式(3.1)を透視変換の座標表現を行っていることになる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

式(3.2)の射影行列はレンズの中心が世界座標の原点になる。光軸は Z 軸に平行になっている。

3.2.3 内部パラメータ

図 3.1 の図に画像平面上のピクセルサイズ k_x , k_y , 画像平面の中心 o_x , o_y を考慮する。考慮した図を図 3.2 に示す。内部パラメータはピクセルサイズ k_x , k_y , 画像平面の中心 o_x , o_y , 焦点距離を表している。

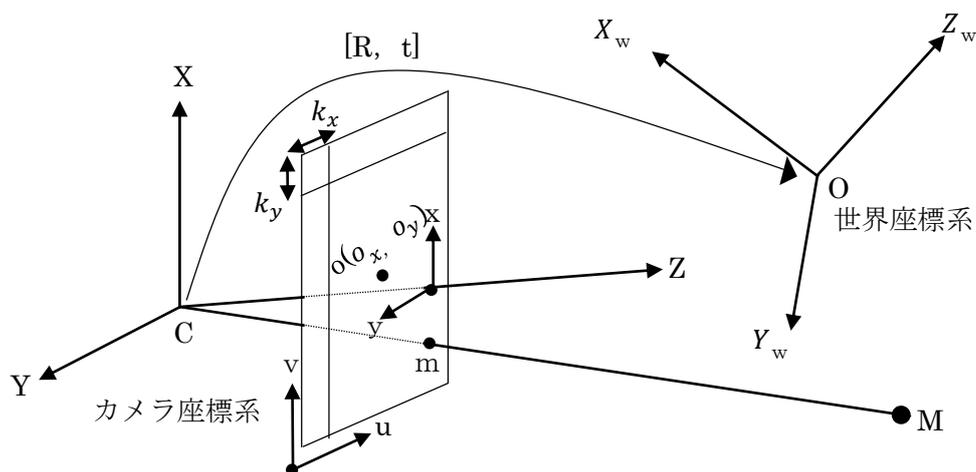


図 3.2 図 3.1 にピクセルサイズ k_x , k_y 画像平面の中心 o_x , o_y を考慮した図

図 3.2 から式(3.1), 式(3.2)は

$$x = \frac{f}{k_x} \frac{X}{Z} + o_x \quad (3.4)$$

$$y = \frac{f}{k_y} \frac{Y}{Z} + o_y \quad (3.5)$$

と表せる。このとき、射影行列は

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & o_x \\ 0 & k_y & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} k_x f & 0 & o_x & 0 \\ 0 & k_y f & o_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

と式(3.6)で表すことができ一般的に

$$A = \begin{bmatrix} k_x f & 0 & o_x \\ 0 & k_y f & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

で内部パラメータ行列は表されている。

3.2.4 外部パラメータ

外部パラメータはカメラ座標と世界座標の関係を表すパラメータであり、図 3.1 と図 3.2 では $[\mathbf{R}, \mathbf{t}]$ でされている。 \mathbf{R} はカメラ座標軸が世界座標軸からみてどのように回転しているかを表し、 \mathbf{t} は世界座標から見たカメラ光心の位置座標である。すなわち

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} + t \quad (3.8)$$

あるいは

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

で表される。このときの D は

$$D = \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{0}^T = [0 \quad 0 \quad 0] \quad (3.11)$$

とする。この D が外部パラメータ行列である。また式(3.9)は

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & t_1 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & t_2 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

とも表すことができる。一般的に回転行列 \mathbf{R} を

$$R = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

並進ベクトル t を

$$t = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

で表記する.

3.2.5 全パラメータ

すでに述べた内部パラメータ行列 A と外部パラメータ行列 $[R, t]$ を用いれば世界座標 X と画像座標 x の関係は

$$x = A[R, t]X \quad (3.15)$$

で表され、行列で表記すると

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x f & 0 & o_x \\ 0 & k_y f & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & t_1 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & t_2 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

と書ける. この時内部パラメータと外部パラメータ 2 つの行列を乗算すると 3×4 の行列が生まれる. この行列を P とし全パラメータ, カメラパラメータ行列と呼ぶ. また P を

$$P = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

と表す.

3.2.5 Homography 行列

3次元空間中の点がある平面に属し, $z=0$ として考えると式(3.16)の式は

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x f & 0 & o_x \\ 0 & k_y f & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & t_1 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & t_2 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

となりこれが成り立つ. このとき

$$\begin{aligned}
H &= \begin{bmatrix} k_x f & 0 & o_x \\ 0 & k_y f & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & t_1 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & t_2 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & t_3 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{34} \end{bmatrix} \tag{3.19}
\end{aligned}$$

の 3×3 の行列が Homography 行列である. この行列の 1 列目 2 列目 3 列目をそれぞれ \widetilde{h}_1 , \widetilde{h}_2 , \widetilde{h}_3 とする. また, Homography 行列は式(3.12)のカメラパラメータ行列の 3 列目がないものと同一である.

3.3 Zhang によるカメラキャリブレーション法

Zhang により提案されたキャリブレーション法では世界座標系の Z 座標を $Z=0$ としている. これはチェッカーボードを撮影し対応点を見つけることにより, チェッカーボードが平面になっているため $Z=0$ として考えることができる.

このとき内部パラメータ行列と Homography 行列の関係は

$$A^{-1}H = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & t_1 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & t_2 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & t_3 \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

である. X 軸と Y 軸は直交しているため外部パラメータ行列の 1 列目と 2 列目の内積は 0 になる. つまり

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} \\ r_{2,1} \\ r_{3,1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{1,2} \\ r_{2,2} \\ r_{3,2} \end{bmatrix} = 0 \tag{3.21}$$

である. また式(3.20)から

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} \\ r_{2,1} \\ r_{3,1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{1,2} \\ r_{2,2} \\ r_{3,2} \end{bmatrix} = [A^{-1} \cdot \widetilde{h}_1] \cdot [A^{-1} \cdot \widetilde{h}_2] = 0 \tag{3.22}$$

したがって

$$\widetilde{h}_1^T A^{-T} A^{-1} \widetilde{h}_1 - \widetilde{h}_2^T A^{-T} A^{-1} \widetilde{h}_2 = 0 \tag{3.23}$$

$$\widetilde{h}_1^T A^{-T} A^{-1} \widetilde{h}_2 = 0 \tag{3.24}$$

この式(3.24)から焦点距離を次式のように算出する.

$$f^2 = \frac{(h_{11} - c_x h_{31})(h_{12} - c_x h_{32}) + (h_{21} - c_y h_{31})(h_{22} - c_y h_{32})}{-h_{31} h_{31}} \quad (3.25)$$

また、5点以上の対応点があれば特異値分解と呼ばれる計算により Homography 行列を求められる。したがって式(3.25)で行列 A が求められれば式(3.20)から行列 $[R, t]$ の $\tilde{r}_1, \tilde{r}_2, \tilde{t}$ が求められる。残る \tilde{r}_3 は \tilde{r}_1 と \tilde{r}_2 の外積になるので回転行列 R は

$$R = [\tilde{r}_1 \tilde{r}_2 (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)] \quad (3.26)$$

と求めることができる。これにより、Homography 行列から内部パラメータ、外部パラメータを求めることができる。

3.4 三角測量の原理

1 一般的な三角測量の原理について述べる。一般的な三角測量はステレオカメラでの距離測定に用いられる原理である。カメラ間の距離である基線長と視差から三角形の相似関係で基線長から対象物までの距離を測定する。

3.4.1 2次元の三角測量

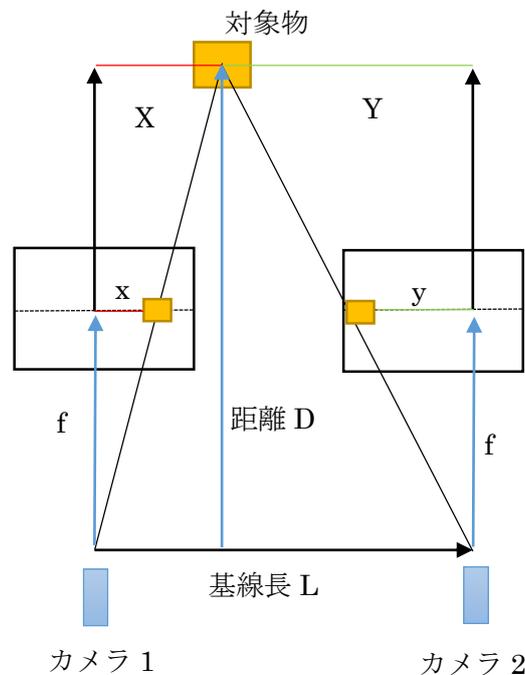


図 3.3 三角測量でのカメラと対象物の関係図

2つのカメラで同方向を撮影した場合、対象物がお互いのカメラで撮った画像において映っている箇所はずれが生じている。これが図 3.3 は x と y で表され視差と呼ぶ。視差を d とすると

$$d = x + y \quad (3.27)$$

である。また、カメラ間の距離を基線長 L とし、 Y を X で表すと

$$Y = L - X \quad (3.28)$$

となる。三角形の相似を考えると焦点距離 f , x , X , D の比とは f , y , Y , D の比は

$$\begin{aligned} X : x &= D : f \\ Y : y &= D : f \end{aligned} \quad (3.29)$$

である。式(3.24)から x , y を求めると、

$$\begin{aligned} x &= \frac{Xf}{D} \\ y &= \frac{Yf}{D} \end{aligned} \quad (3.30)$$

式(3.22)と式(3.23), 式(3.25)から

$$\begin{aligned} d &= \frac{Xf}{D} + \frac{Yf}{D} \\ d &= \frac{Xf}{D} + \frac{(L-X)f}{D} \\ D &= \frac{fL}{d} \end{aligned} \quad (3.31)$$

以上のようにして三角測量の原理でカメラと対象物との距離を測定することができる。

3.4.2 3次元の三角測量

三次元で三角測量を考えるときは座標関係をわかりやすくするために世界座標系で考える。今回は左側のカメラの中心を世界座標の原点とする。

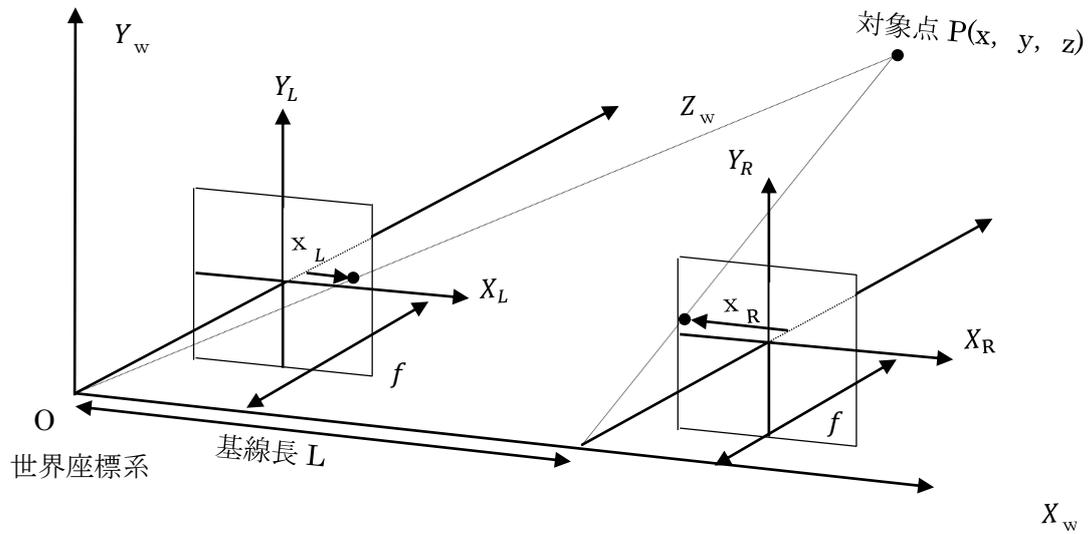


図 3.4 3次元空間でのカメラ2台と対象点との関係

視差 d は x_L と x_R で式(3.27)と同じように

$$d = x_L + x_R \quad (3.32)$$

と表せる.

よって式(3.31)の D が 3次元空間で考えたときの対象点 P の Z 座標になる. よって,

$$z = \frac{fL}{d} \quad (3.33)$$

P の x 座標, y 座標はそれぞれ次のようになる.

$$x = \frac{x_L L}{d} \quad (3.34)$$

$$y = \frac{y_L L}{d} \quad (3.35)$$

3.5 SIFT 特徴量

SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)は画像内の特徴点を検出するアルゴリズムの一つである. ステレオカメラで撮影した 2 枚の画像において対応点を検出するために用いられる. スケールスペースを使った回転や拡大縮小, 照明変化にも対応できる特徴量である. 画像一つから 128 次元の特徴量が取得できる.

3.5.1 スケールとキーポイント検出

特徴点のスケール探索には, ガウス関数が有効である. ガウシアンカーネルを用いたスケ

ールスペースとして LoG(Scale-normalized Laplacian-of-Gaussian)が提案されている.

$$LoG = f(\sigma) = -\frac{x^2 + y^2 - 2\sigma^2}{2\pi\sigma^6} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.36)$$

x と y は扱っている画像の画素からの距離, σ はガウシアンフィルタのスケールである. LoG は計算コストが高い. よってより効率的な DoG(Difference-of-Gaussian)が提案されている. DoG と LoG の関係は

$$\frac{\partial G}{\partial \sigma} = \sigma \nabla^2 G \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial G}{\partial \sigma} \approx \frac{G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)}{k\sigma - \sigma} \quad (3.38)$$

の拡散方程式から関係づけられる. 式(3.31)と式(3.32)から

$$(k-1)\sigma \nabla^2 G \approx G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma) \quad (3.39)$$

計算効率が良いのは DoG であるため SIFT ではスケール探索に DoG が用いられている.

3.5.2 キーポイントのローカライズ

3.5.1 において検出した特徴点には, DoG 出力値が小さい点が含まれる. またエッジ上の点も含まれており, ノイズや開口問題に影響しやすい. したがって, 安定な特徴点をさらに検出する必要がある.

2次元ヘッセ行列 H を次式(3.34)のように計算し, 主曲率をまず求める.

$$H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

式(3.34)の行列の第 1 固有値と第 2 固有値を求め 2 つの固有値の関係からエッジ上の点を判別することができる. また, 行列の対角成分の和 $\text{Tr}(H)$ と行列式 $\text{Det}(H)$ は

$$\text{Tr}(H) = D_{xx} + D_{yy} \quad (3.41)$$

$$\text{Det}(H) = D_{xx}D_{yy} - (D_{xy})^2 \quad (3.42)$$

で計算できる。ただこれは第 1 固有値の方が第 2 固有値より大きい場合である。第 1 固有値と第 2 固有値の比率を γ とし第 1 固有値 α をと第 2 固有値 β とすると

$$\frac{\text{Tr}(\mathbf{H})^2}{\text{Det}(\mathbf{H})} = \frac{(\alpha + \beta)^2}{\alpha\beta} = \frac{(\gamma\beta + \beta)^2}{\gamma\beta^2} = \frac{(\gamma + 1)^2}{\gamma} \quad (3.43)$$

と関係づけられる。

$$\frac{\text{Tr}(\mathbf{H})^2}{\text{Det}(\mathbf{H})} < \frac{(\gamma + 1)^2}{\gamma} \quad (3.44)$$

のしきい値以上であるとき比率が大きいのでエッジ上の点、しきい値未満の時比率が小さいのでキーポイント候補点であるとわかる。

コントラストによってもキーポイント候補の絞り込みを行う。

$$D(\hat{x}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial x} \hat{x} \quad (3.45)$$

の式が得ることができ、DoG 出力のしきい値が小さいとコントラストが低いということになる。コントラスト低いとノイズに影響するため消去する。

以上のようにしてキーポイントを絞り込む。

3.5.3 オリエンテーションの算出

オリエンテーションは特徴点の方向を表し、向きを正規化することで回転に不変になる。平滑化画像 $L(u, v)$ の勾配強度 $m(u, v)$ と勾配方向 $\theta(u, v)$ を次式で求める。

$$m(u, v) = \sqrt{f_u(u, v)^2 + f_v(u, v)^2} \quad (3.46)$$

$$\theta(u, v) = \tan^{-1} \frac{f_v(u, v)}{f_u(u, v)} \quad (3.47)$$

式(3.40)と式(3.41)から重み付きヒストグラムを作成する。全方向 36 方向に離散化するヒストグラムでこのヒストグラムの最大値が 80%以上のものをキーポイントとして割り当てる。

3.5.4 特徴量の記述

検出したオリエンテーションを基に、128次元の特徴量を記述する。画像を1辺4ブロックの計16ブロックに分割。分割したブロックごとに8方向45°毎の勾配方向ヒストグラムを作成する。つまり4ブロック×4ブロック×8方向で128次元を持つ。

キーポイントがもつオリエンテーション方向に座標軸を合わせて特徴点の記述を行うので回転に頑強な特徴点になる。

第4章 全天球画像を用いたステレオ距離測定

4.1 はじめに

本章では, Equirectangular 形式の全天球画像からカメラの前後左右それぞれが視野の中心となるような魚眼画像 4 枚を得て, それらを用いたステレオカメラによる距離測定を行う手法について提案する. その詳細について本章で述べる.

4.2 提案手法の概要

本論文の提案手法は Theta S 2 台で構成されたステレオカメラによる距離測定方法である. Theta S で得られる Equirectangular 形式の全天球画像のままではなく魚眼画像を用いる. 視野の中心がカメラの前後左右 4 方向になる魚眼画像 4 枚から距離測定を行うことで 360° の視野での距離測定を可能にする手法である.

360° の視野を確保したいだけであれば, 魚眼画像は 180° の視野を持つのでカメラの前後が視野の中心となる魚眼画像 2 枚で済む. しかし, 2 個の魚眼レンズの境界の部分では魚眼画像の歪みが大きいため精度の高い距離測定が困難であった. したがって, カメラの前後を視野とした 2 個の魚眼画像において境界にあたる部分が視野の中心となる魚眼画像を得ることで距離測定の精度を上げることが本手法の目的である. そのため, カメラの前後を視野の中心とした魚眼画像 2 枚に加えて, 新たにカメラの左右を視野の中心とした魚眼画像を 2 枚得て距離測定を行う.

また, 通常のスレオカメラと異なり, Theta S 2 台を前後にずらして構成することで. カメラの前後左右それぞれが視野の中心となる魚眼画像 4 枚を得る際にお互いのカメラが魚眼画像の中心部に写ることを避けている.

ここではまずカメラの前後左右それぞれが視野の中心となる魚眼画像 4 枚を得る方法を述べる. その後, 距離測定を行う導出式の理論について, さらに Equilectangular 形式の全天球画像を用いて Theta S 2 台が同方向を向くように補正する手法について述べる.

4.3 カメラ前後左右それぞれを視野の中心とした魚眼画像 4 枚を得る手法

Equilectangular 形式の全天球画像は既に述べた通り緯度経度を持つような正距円筒図法の画像である. 横のピクセルサイズを 4 分割すると図 4.1 のようになる.

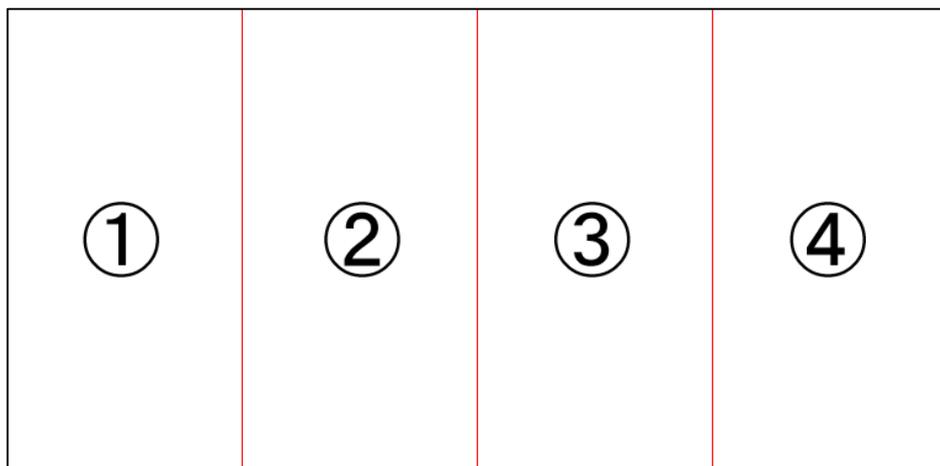


図 4.1 Equilectangular 画像を 4 等分し線を描画したイメージ図

図 4.1 の②と③の部分がカメラの正面 180 度の視野であり，①と④がカメラの背面 180 度の視野である．Theta S で言うと②と③が前後に取り付けられている魚眼カメラのうち前の魚眼カメラで撮られた視野．①と④は後ろの魚眼カメラで撮られた視野ということになる．

既に 2.4.2.2 で述べたような方法で魚眼画像を得るとすると図 4.1 の①と④の部分は黒く塗りつぶされ魚眼画像としてはカメラ正面を視野の中心とした魚眼画像が得られる．図 4.1 の①②③④を並び替え，2.4.2.2 で述べた手法で魚眼画像を得る際に視野の中心になる部分を変更する．つまりは

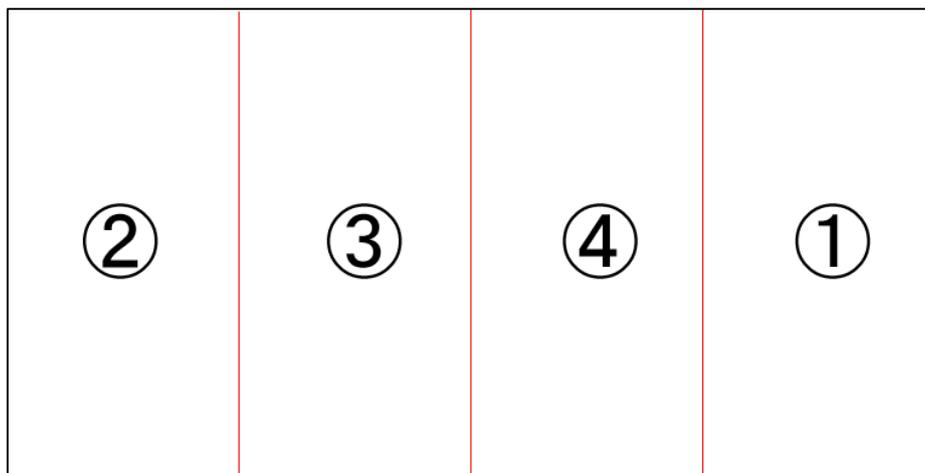


図 4.2 Equilectangular 画像を 4 等分し並び替えて視野を変更その 1

図 4.2 のように並び替えて 2.4.2.2 のように魚眼画像を得るとカメラ左方を視野の中心とした魚眼画像が得られる．同様に

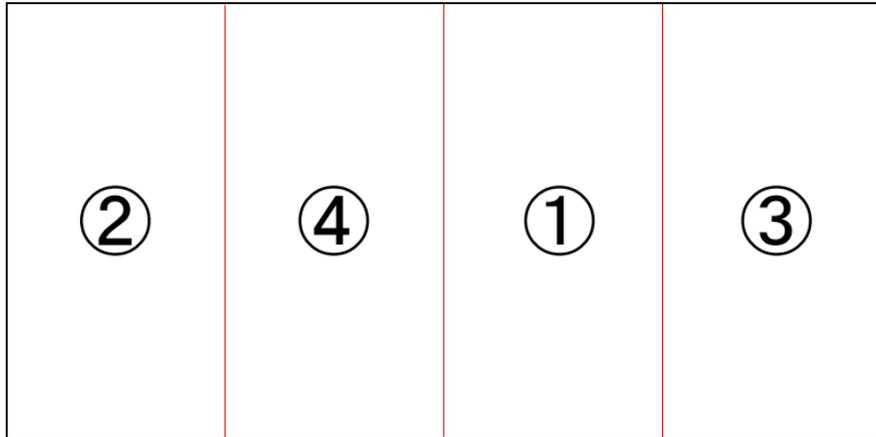


図 4.3 Equilectangular 画像を 4 等分し並び替えて視野を変更その 2

図 4.3 のように並び替えて 2.4.2.2 のように魚眼画像を得るとカメラ背面を視野の中心とした魚眼画像が得られる. さらに

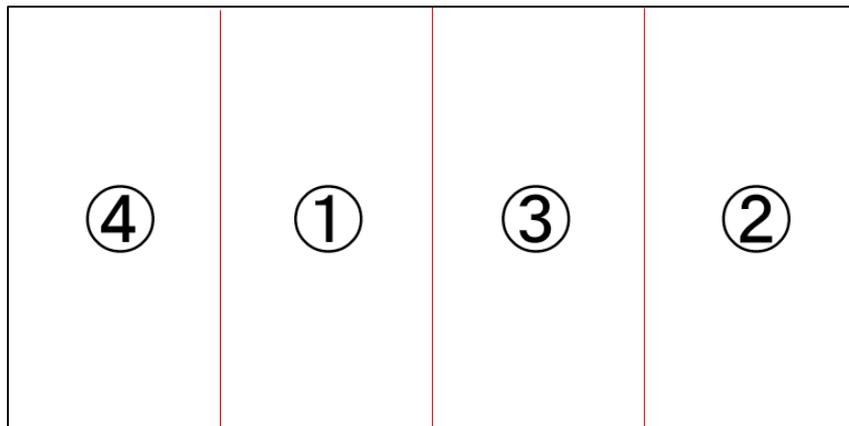


図 4.4 Equilectangular 画像を 4 等分し並び替えて視野を変更その 3

図 4.4 のように並び替えて 2.4.2.2 のように魚眼画像を得るとカメラ右方を視野の中心とした魚眼画像が得られる. このようにしてカメラの前後左右を視野の中心とした魚眼画像 4 枚を得ることができる.

4.4 全天球カメラ 2 台を用いたステレオ距離測定

基本となる導出式の理論は 3.4 の三角測量の原理で述べたものである. 三角測量の原理を用いるが魚眼画像を用いる場合, 魚眼画像で射影される点は実際の位置とは異なる. その問題点を考慮する必要がある. そこで, 対象点と対象点が魚眼レンズで射影される画像平面との座標関係をまず述べる.

4.4.1 カメラ 2 台を平行に並べた場合

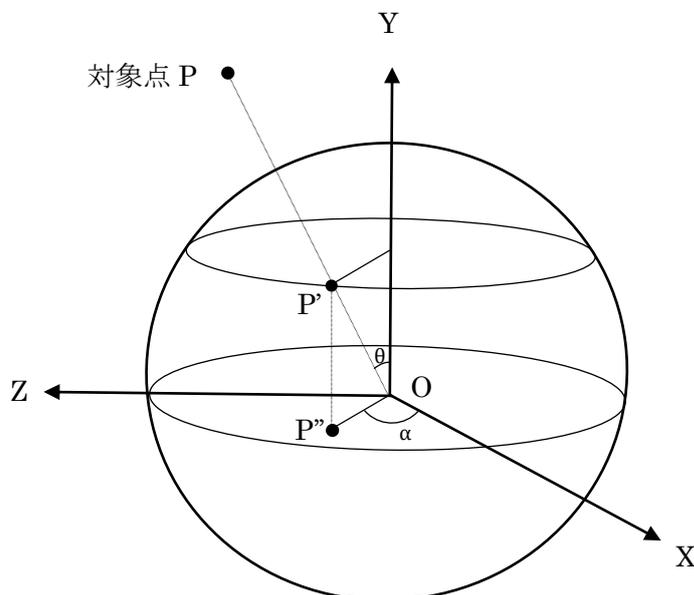


図 4.5 魚眼レンズと対象物，射影された対象物との座標関係

図 4.5 のように対象点を P ，魚眼レンズに対象点の光線が入射する点を P' ， P' が魚眼画像に射影される点を P'' とする． Z 軸と対象点の光線がなす角度を θ ， X 軸と対象点が画像平面へ射影された点がなす角度を α とする．このとき P' は次のような座標で表される．座標の原点はカメラの中心 O とする．また，魚眼レンズの球の半径は 1 として考える．

$$P' = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \sin \theta \\ \cos \theta \\ \sin \alpha \cos \theta \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

P'' の座標は

$$P'' = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

よって α は

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{y}{x} \quad (4.3)$$

となる． θ は対象点が魚眼レンズからどの角度から入射しているかを表している．本研究で用いる Theta S の魚眼レンズで得られる魚眼画像の最大の縦 pixel と最大の横 pixel は同一である．画像中心からの距離が最大 pixel となる点が入射角 90° である．魚眼レンズは等距

離射影方式であるので画像平面最大 pixel を L とすると θ は

$$\theta = \frac{\pi}{2} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{L} \quad (4.4)$$

で算出される。

次に三角測量の原理を用いて魚眼レンズ 2 個から得る魚眼画像を用いた距離測定の手法を述べる。

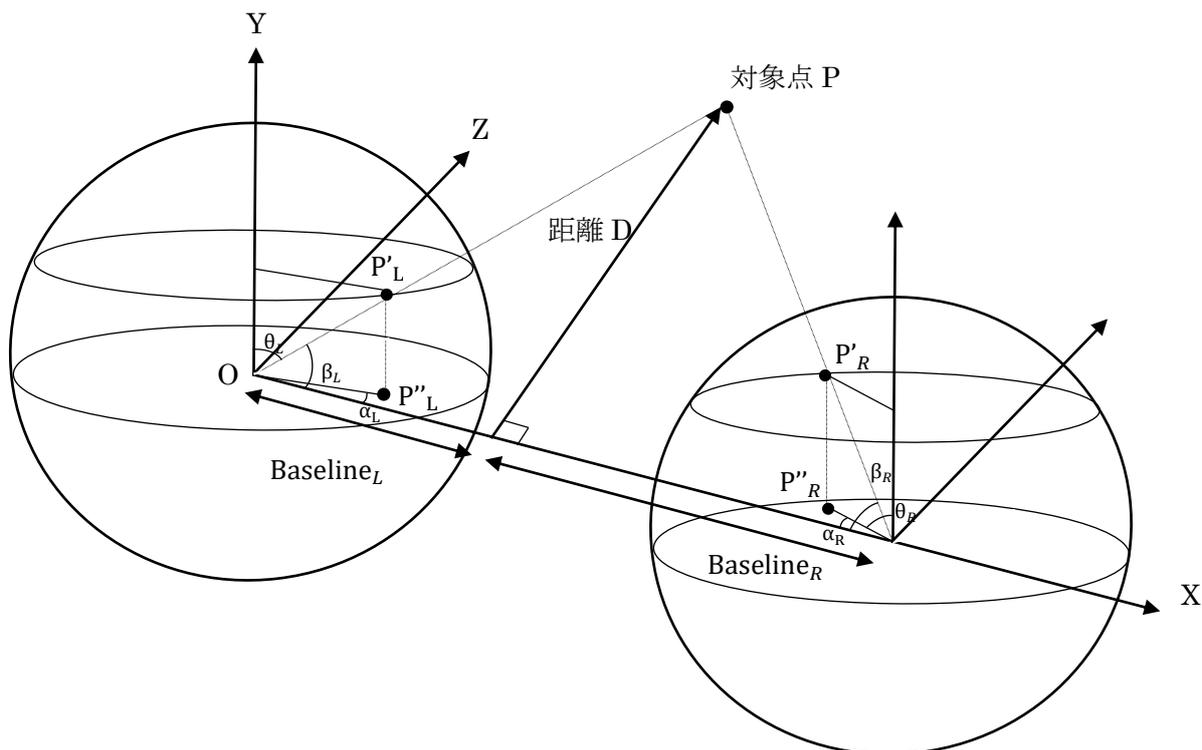


図 4.6 2 台の魚眼レンズと対象点との関係

三角測量を行うためには基線長と対象点 P でなす三角形を考える必要がある。基線長は図 4.6 では X 軸にしている。 X 軸と対象点からの光線がなす角 β_L , β_R を求める必要がある。この両者が求められれば基線長からの距離 D が求められる。 $\cos\beta_L$, $\cos\beta_R$ はそれぞれ P'_L と P'_R の x 座標を表している。 よって

$$\beta_L = \cos^{-1}(\cos\alpha_L \sin\theta_L) \quad (4.5)$$

$$\beta_R = \cos^{-1}(\cos\alpha_R \sin\theta_R) \quad (4.6)$$

で計算することができる。この式(4.5)と式(4.6)から β_L と β_R が求まる。また、 β_L と β_R とを用いれば Baseline_L と Baseline_R はそれぞれ

$$\text{Baseline}_L = \frac{D}{\tan \beta_L} \quad (4.7)$$

$$\text{Baseline}_R = \frac{D}{\tan \beta_R} \quad (4.8)$$

と計算することができる。 $\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R$ は基線長なので

$$\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R = \frac{D}{\tan \beta_L} + \frac{D}{\tan \beta_R} \quad (4.9)$$

$$D = \frac{\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R}{\left(\frac{1}{\tan \beta_L} + \frac{1}{\tan \beta_R}\right)} \quad (4.10)$$

で距離 D を計算することができる。ここから次は対象点 P の三次元座標 (x, y, z) を求める。座標を求めるうえで、原点は左のカメラの中心を原点にしている。すると P の x 座標は Baseline_L になる。したがって

$$x = \text{Baseline}_L = \frac{D}{\tan \beta_L} \quad (4.11)$$

となる。

次に奥行 Z を求める。 Z を求める基線長つまりはカメラから対象点を見上げる角度 γ を求める。 γ が算出されれば Z 座標は

$$z = D \cos(\gamma) \quad (4.12)$$

で求まる。

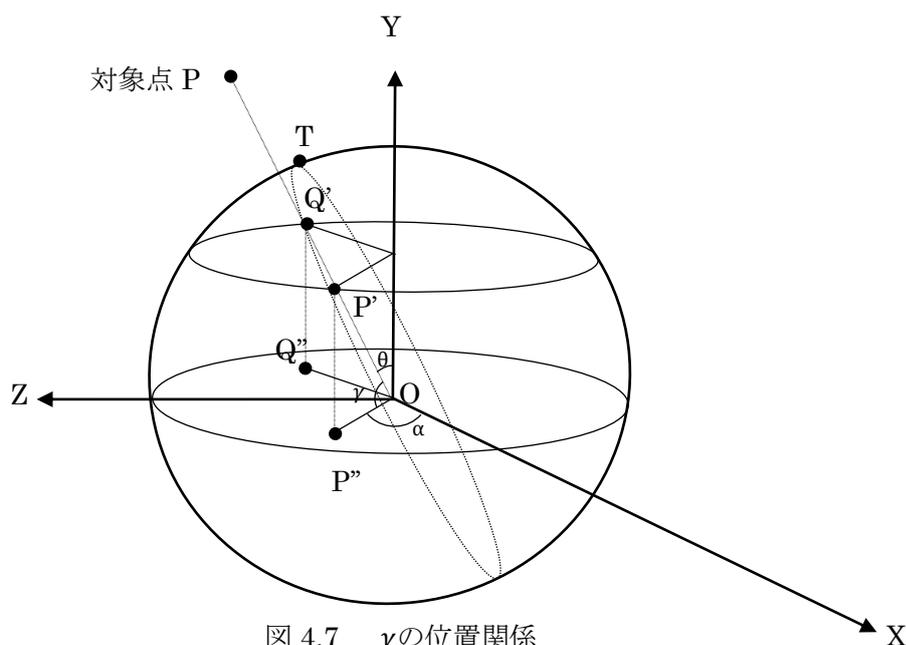


図 4.7 γ の位置関係

対象点 P が魚眼レンズに入射する点 P' と ZY 平面から対称な点を Q' とする。また、カメラ中心 O と P', Q' を通る平面と魚眼レンズの球面の接点を T とする。 T は Z 軸上にある点であり Z 軸から点 T を見上げる角度は γ に等しい。点 T は Z 軸上から見上げている角度になるので点 T は ZY 平面上にある。今考えている魚眼レンズの球の半径を r とすると魚眼レンズ中心から点 T までの距離は r 。つまり点 T の Z 座標は

$$z_T = r \cos(\gamma) \quad (4.13)$$

と算出することができる。よって z_T が求まれば γ は

$$\gamma = \cos^{-1} \frac{z_T}{r} \quad (4.14)$$

と求まる。

したがってまず点 T の座標を求める必要がある。座標原点はカメラの中心 O である。式 (4.1) から P' の座標は算出されている。 Q' は P' と ZY 平面で対象であるので

$$Q' = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \alpha \sin \theta \\ \cos \theta \\ \sin \alpha \cos \theta \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

である。中心 O と P', Q' を通る平面と魚眼レンズの球面の方程式を

$$ax + by + cz = 0 \quad (4.16)$$

とおくと定数 a, b, c は点 P' と点 Q' の外積で求まる。よって

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} &= P' \times Q' = \begin{pmatrix} \cos \alpha \sin \theta \\ \cos \theta \\ \sin \alpha \cos \theta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -\cos \alpha \sin \theta \\ \cos \theta \\ \sin \alpha \cos \theta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \theta \sin \alpha \cos \theta - \sin \alpha \cos \theta \cos \theta \\ -\sin \alpha \cos \theta \cos \alpha \sin \theta - \cos \alpha \sin \theta \sin \alpha \cos \theta \\ \cos \alpha \sin \theta \cos \theta + \cos \theta \cos \alpha \sin \theta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ -2\sin \alpha \cos \theta \cos \alpha \sin \theta \\ 2\cos \alpha \sin \theta \cos \theta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.17)$$

と算出することができる。 $a = 0$ であるので中心 O と P', Q' を通る平面は ZY 平面上のいることが分かる。魚眼レンズの球面は中心 O 半径 r の球なので

$$x + y + z = r^2 \quad (4.18)$$

である．よって両者の交点の座標 $T(x_T, y_T, z_T)$ はまず ZY 平面上の点なので $x_T = 0$ ．式(4.16)と式(4.18)から

$$z_T = r \frac{|b|}{\sqrt{b^2 + c^2}} \quad (4.19)$$

$$y_T = \pm \sqrt{r^2 - z_T^2} \quad (4.20)$$

式(4.19)で z_T が算出されるので式(4.14)により γ が求まる．よって対象点 P の z 座標が式(4.12)から算出される．これで対象点 P の x 座標と z 座標が既知となったので y 座標は

$$y = \pm \sqrt{z^2 - x^2} \quad (4.20)$$

にて求まる．

4.4.2 カメラ 2 台を前後にずらした場合

基本的な理論は 3.4.1 と同様である．本論文での主な提案手法はカメラ 2 台を前後にずらした場合の距離測定であるので理論をここで述べる

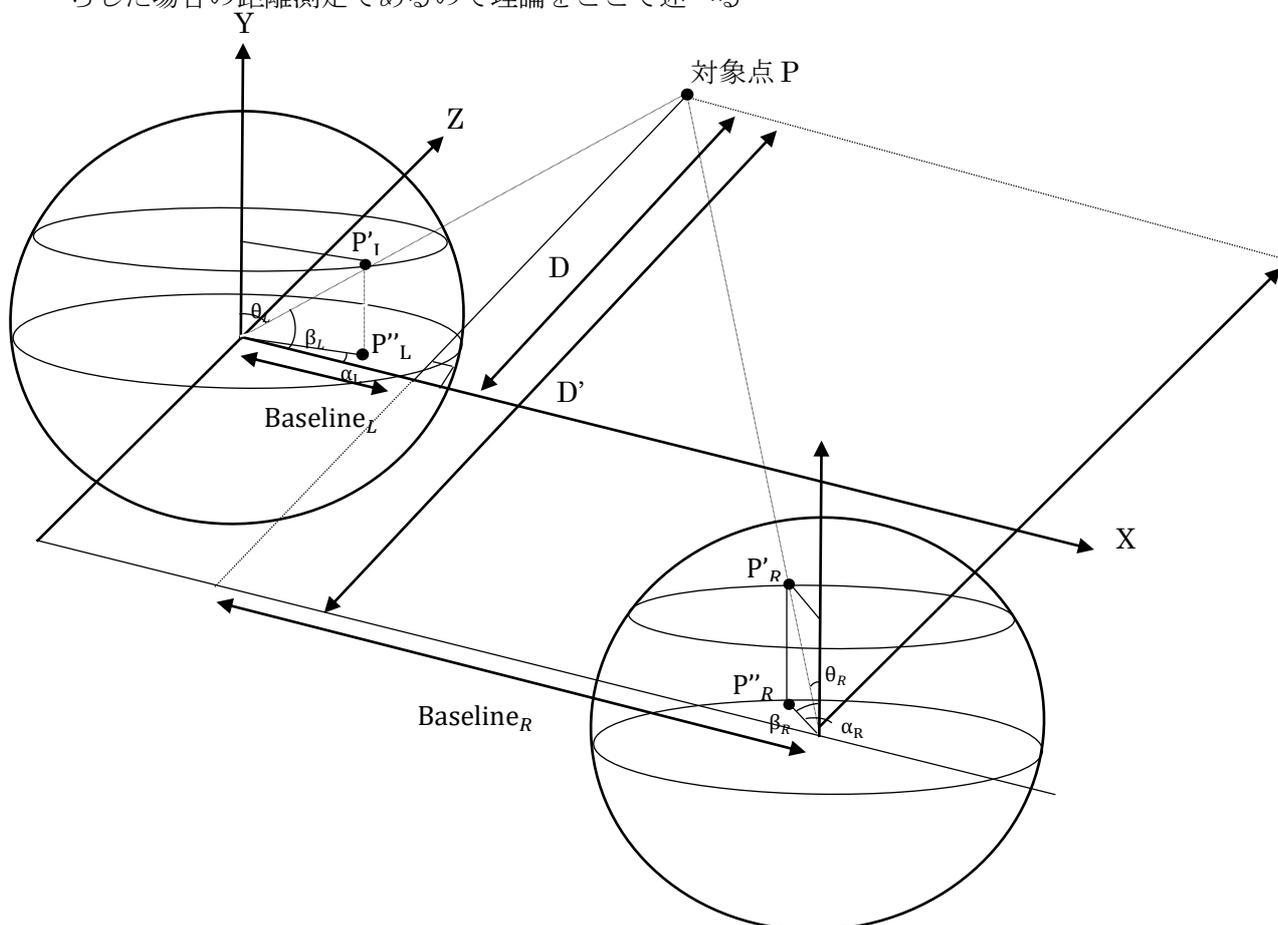


図 4.8 全天球カメラ 2 台を前後にずらした場合のモデル

図 4.8 のような場合でも基本的な式は式(4.9)と同様で

$$\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R = \frac{D}{\tan \beta_L} + \frac{D'}{\tan \beta_R} \quad (4.21)$$

となる. このとき D と D' の関係式を求める必要がある.

図 4.8 を YZ 平面からみると図 4.9 のようになる.

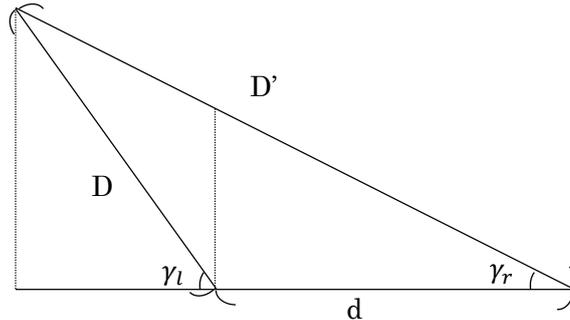


図 4.9 図 4.8 を YZ 平面から見た図

図 4.9 から D と D' は

$$D \cos(\gamma_L) + d = D' \cos(\gamma_R) \quad (4.22)$$

$$D' = \frac{D \cos(\gamma_L) + d}{\cos(\gamma_R)} \quad (4.23)$$

という関係式が導かれる. また式(4.21)と式(4.23)から

$$\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R = \frac{D}{\tan \beta_L} + \frac{\frac{D \cos(\gamma_L) + d}{\cos(\gamma_R)}}{\tan \beta_R} \quad (4.24)$$

$$D = \frac{\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R - \frac{d}{\cos(\gamma_R) \tan \beta_R}}{\frac{1}{\tan \beta_L} + \frac{\cos(\gamma_R)}{\cos(\gamma_R) \tan \beta_R}} \quad (4.25)$$

と算出することができる. ここで扱った $\gamma_r, \gamma_l, \beta_L, \beta_R$ の導出は 3.4.2 と同一の手法を用いる.

4.5 回転行列を用いたカメラ 2 台同 1 方向を向かせるための補正手法

キャリブレーションを行うと外部パラメータが得られ, 外部パラメータの中に含まれる回転行列を用いてカメラ 2 台の向きを補正する. 回転行列は既に述べたようにカメラがどのくらい回転しているかを表している. 回転行列は以下のように得られる.

$$R = \begin{bmatrix} 0.999 & -0.003 & 0.0839 \\ 0.003 & 0.999 & -0.0002 \\ -0.001 & 0.0005 & 0.996 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

この R 行列の 1 行 1 列目の要素が回転している角度の \cos がとられている。3 行 1 列目の要素がマイナスの時はカメラが左に回転していることを表しプラスの時は右に回転していることを表す。この行列から何度カメラが回転しているかがわかる。その角度を元に Equirectangular 形式の全天球画像を用いて向きを修正する。全天球画像の横 pixel サイズを L とする。修正する角度数を a とし、修正する角度分のピクセルサイズを l とすると

$$l = a \frac{2\pi}{L} \quad (4.27)$$

式(4.27)でもちいた値の関係を図で表すと次の図 4.10 のようになる。

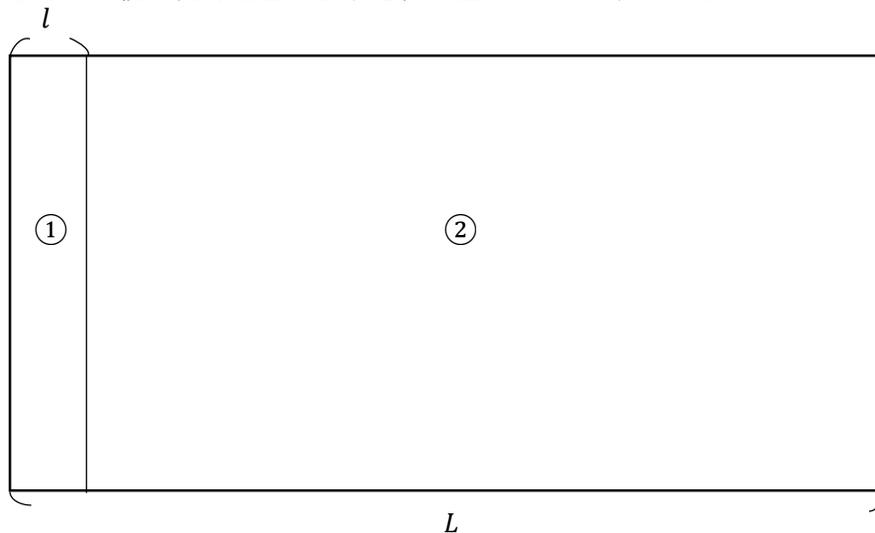


図 4.10 Equirectangular 形式の全天球画像を並び替えてカメラの向きを補正

図 4.10 の①を②の右隣に移動することで向きを a 度分補正することができる。

4.6 むすび

本章では、本論文で提案する全天球画像 2 枚を用いて距離測定を行う手法と、Equirectangular 形式の全天球画像を用いカメラの向きを補正する手法について述べた。第 5 章では、本章で述べた提案手法の評価実験を行う。

第5章 提案手法の評価実験と結果, 考察

5.1 はじめに

本章では, 実際に撮影した写真を用いて第4章で説明した手法の評価実験を行う。

5.2 実験の概要

提案手法の評価実験として, 5種類の実験を行う。一つ目の実験ではカメラを平行に並べてカメラの正面が視野の中心となる魚眼画像を用いて距離測定を行う。二つ目はカメラを横向きに平行にならべてカメラの右方向を視野の中心とした魚眼画像を用いて距離測定を行う。三つ目はカメラを前後にずらしてカメラの正面が視野の中心となった魚眼画像を用いて距離測定を行う。四つ目はカメラを前後にずらしてカメラの右方向が視野の中心となる魚眼画像を用いて距離測定を行う。最後に **Equirectangular** 形式の全天球画像を用いて2台のカメラ撮影した向きを同一方向に補正する実験を行った。

5.2.1 実験1

実験1では, カメラを平行に並べてカメラの正面が視野の中心となる魚眼画像を用いて距離測定を行った。提案手法で述べた式(4.10)が正しい導出式であることを評価するために実際にカメラから対象点までの距離を既知である条件下で実験を行った。提案しているカメラ2台が同方向を向くように補正する手法は本実験では用いていない。

5.2.2 実験2

実験2では, カメラを横向きに平行に並べてカメラの右方向を視野の中心とした魚眼画像を用いて距離測定を行った。提案手法で述べた式(4.10)がカメラの左右横方向を視野の中心とした魚眼画像を用いても有用であることを評価する実験を行った。実際にカメラから対象点までの距離を既知である条件下であることも実験1と同様である。また, 提案しているカメラ2台が同方向を向くように補正する手法は本実験では用いていない。

5.2.3 実験3

実験3では, カメラを前後にずらしてカメラの正面が視野の中心となった魚眼画像を用いて距離測定を行った。提案手法で述べた式(4.25)が正しい導出式であることを評価するために実際にカメラから対象点までの距離を既知である条件下で実験を行った。提案しているカメラ2台が同方向を向くように補正する手法は本実験では用いていない。

5.2.4 実験4

実験4では, カメラを前後にずらしてカメラの右方向が視野の中心となる魚眼画像を用いて距離測定を行った。提案手法で述べた式(4.25)がカメラの左右横方向を視野の中心とした魚眼画像を用いても有用であることを評価する実験を行った。実際にカメラから対象

点までの距離を既知である条件下であることも実験 3 と同様である。また、提案しているカメラ 2 台が同方向を向くように補正する手法は本実験では用いていない。

5.2.5 実験 5

実験 5 では、Equirectangular 形式の全天球画像を用いて 2 台のカメラ撮影した向きを同 1 方向に補正する実験を行った。カメラ 2 台をあえて同方向を向かせず、向きがずれた状態で実験を行った。提案した手法でカメラ 2 台が同方向を向くように補正できているかどうかを評価する。

5.3 実験の条件

実験 1 から実験 5 を行った環境や条件を以下に示す。

5.3.1 実験環境

実験 1 から実験 5 を行った環境を以下の表 5.1 に示す。

表 5.1 実験環境

OS	Windows 10 pro 1607
CPU	Intel Core i7 860 2.8GHz 4Core
GPU	NVIDIA GeForce GTX 950

5.3.2 カメラの配置環境

実験 1 から実験 4 まではカメラの配置は手作業でカメラ 2 台が可能な限り同方向を向くように配置した。実験 5 ではカメラ 2 台をお互い内側を向くように回転させた。実験 1 と実験 2 で配置したカメラ間の距離、カメラと対象点までの距離を以下の表 5.2 に示す。カメラ間の距離とは式(4.10)と式(4.25)で用いた $Baseline_L + Baseline_R$ である。また、本実験で用いた対象点は距離測定の精度を評価しやすいように壁に描画された点を用いている。つまりカメラと対象点までの距離はカメラから壁までの距離である。

表 5.2 実験 1 と実験 2 のカメラの配置環境

	カメラ間の距離 [mm]	カメラと壁の距離 [mm]
実験 1	44	102.5
実験 2	110	322

実験 3 と実験 4 ではカメラ 2 台を前後にずらしているためカメラ間の距離、左のカメラと壁の距離、右カメラと壁との距離を以下の表 5.3 に示す。

表 5.3 実験 3 と実験 4 のカメラの配置環境

	カメラ間の距離 [mm]	左カメラと壁の距離 [mm]	右カメラと壁の距離 [mm]
実験 3	44	102.5	142.5
実験 4	155	322	162

実験 5 では壁を向いて左のカメラは右に 13.6° , 右のカメラは左に 19.4° の向をずらして配置した. ここで述べたずらした角度は手作業で測定した.

5.3.3 実験に用いた画像

実験 1 から実験 5 を行う上で用いた画像を以下で示す.

5.3.3.1 実験 1 で用いた画像

実験 1 で使用した画像である図 5.1 は 2.4.2.2 で述べた手法で得られた魚眼画像である. 図 5.2 は図 5.1 の画像の SIFT 特徴量を検出した画像である.

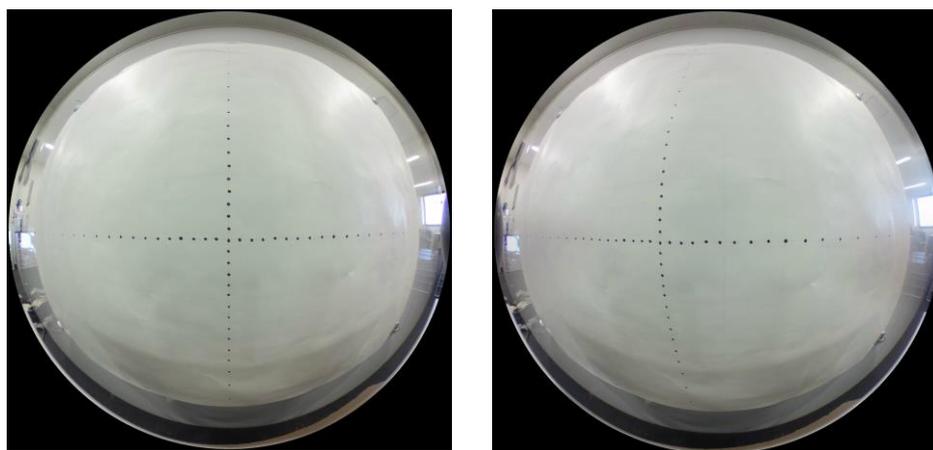


図 5.1 実験 1 で用いた左のカメラで得た画像(左)と右のカメラで得た画像(右)

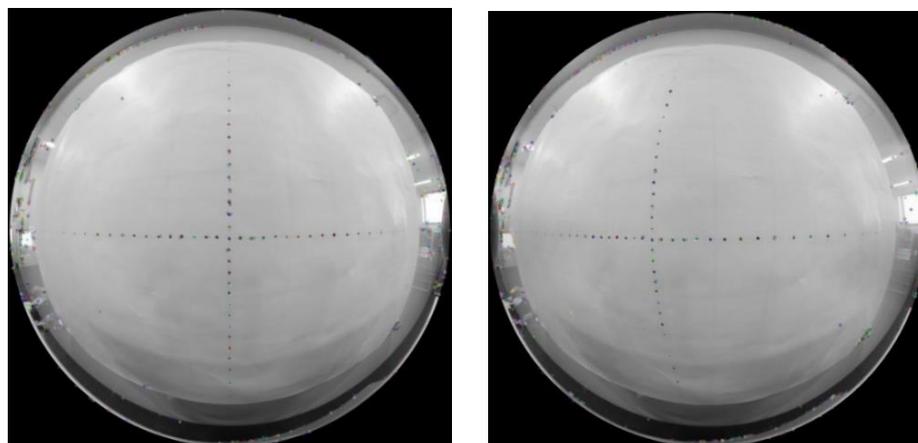


図 5.2 図 5.1 の画像を SIFT 特徴量検出した画像

5.3.3.1 実験2で用いた画像

実験2で使用した画像である図5.3, 図5.4は左のカメラと右のカメラで撮影して得られた Equirectangular 形式の全天球画像である.



図 5.3 左のカメラで得られた Equirectangular 形式の全天球画像



図 5.4 右のカメラで得られた Equirectangular 形式の全天球画像

次に示す図5.5, 図5.6は図5.3, 図5.4を4.3で述べた手法でカメラの右側を視野の中心となるように変換した Equirectangular 形式の全天球画像である.

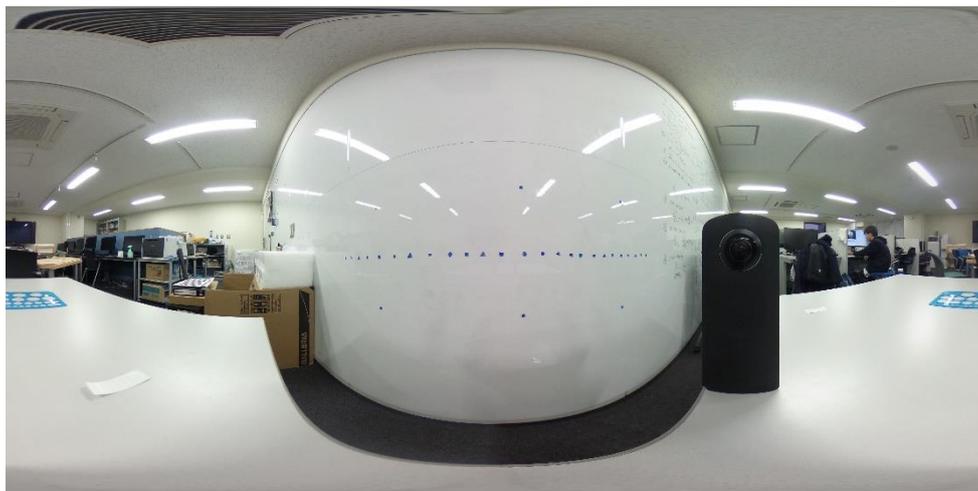


図 5.5 向きを変換した左カメラの Equirectangular 形式の全天球画像

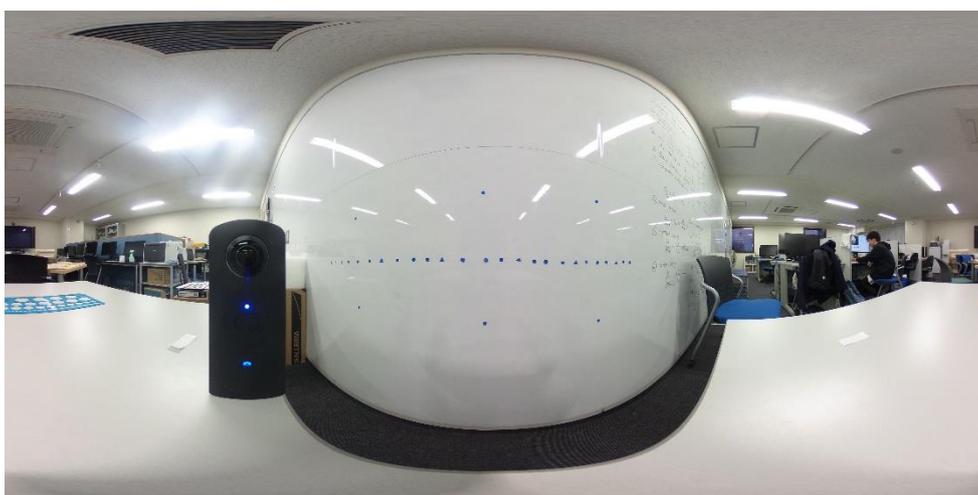


図 5.6 向きを変換した右カメラの Equirectangular 形式の全天球画像

次に図 5.5 と図 5.6 を 2.4.2.2 で述べた手法を用いて得た魚眼画像を図 5.7 として示す。また、図 5.8 は図 5.7 の画像を SIFT 特徴量検出した画像である。

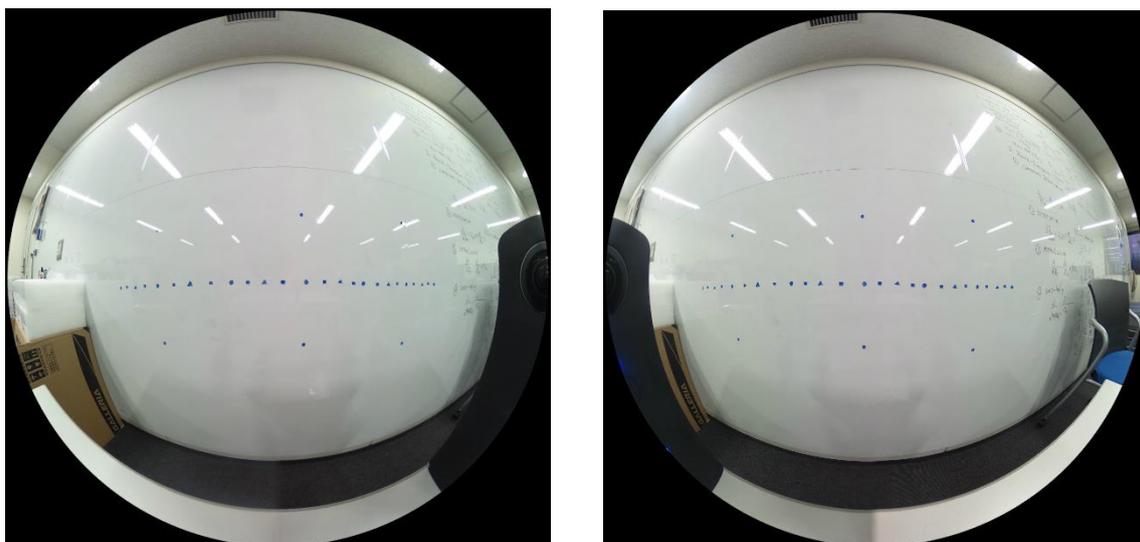


図 5.7 実験 2 で用いた左のカメラで得た画像(左)と右のカメラで得た画像(右)

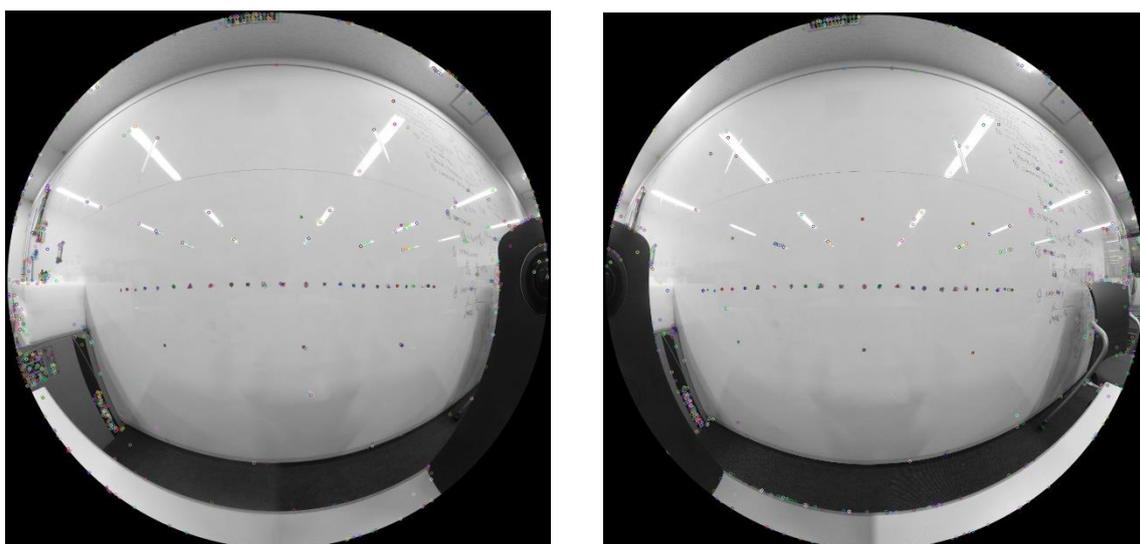


図 5.8 図 5.7 の画像を SIFT 特徴量検出した画像

5.3.3.3 実験 3 で用いた画像

実験 3 で使用した画像である図 5.9 は 2.4.2.2 で述べた手法で得られた魚眼画像である。図 5.10 は図 5.9 の画像の SIFT 特徴量を検出した画像である。実験 3 では実験 1 とは違いはカメラを前後にずらして撮影を行っている。

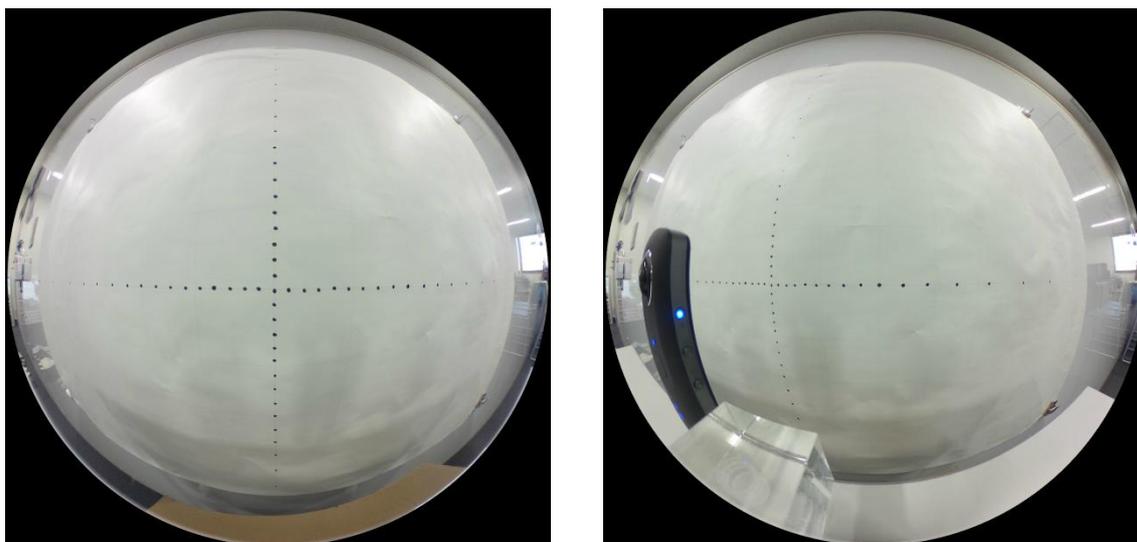


図 5.9 実験 3 で用いた左のカメラで得た画像(左)と右のカメラで得た画像(右)

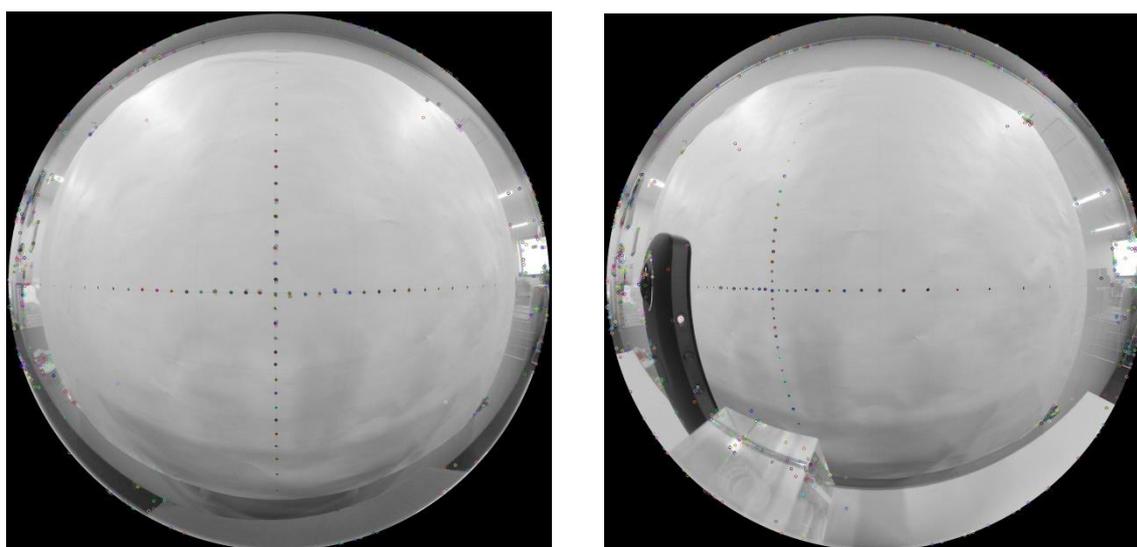


図 5.10 図 5.9 の画像を SIFT 特徴量検出した画像

5.3.3.4 実験 4 で用いた画像

実験 4 では実験 2 と同様にカメラ 2 台を壁に対して横向きにして撮影を行っている。実験 4 では実験 2 とは違いカメラを前後にずらして撮影を行った。撮影した画像をカメラの右方向を視野の中心とする魚眼画像を得る手法は 4.3 で提案した手法を用いている。ここでは距離測定に用いた 2 枚の魚眼画像を図 5.11 に示す。また、図 5.11 の画像を SIFT 特徴点検出した画像を図 5.12 に示す。

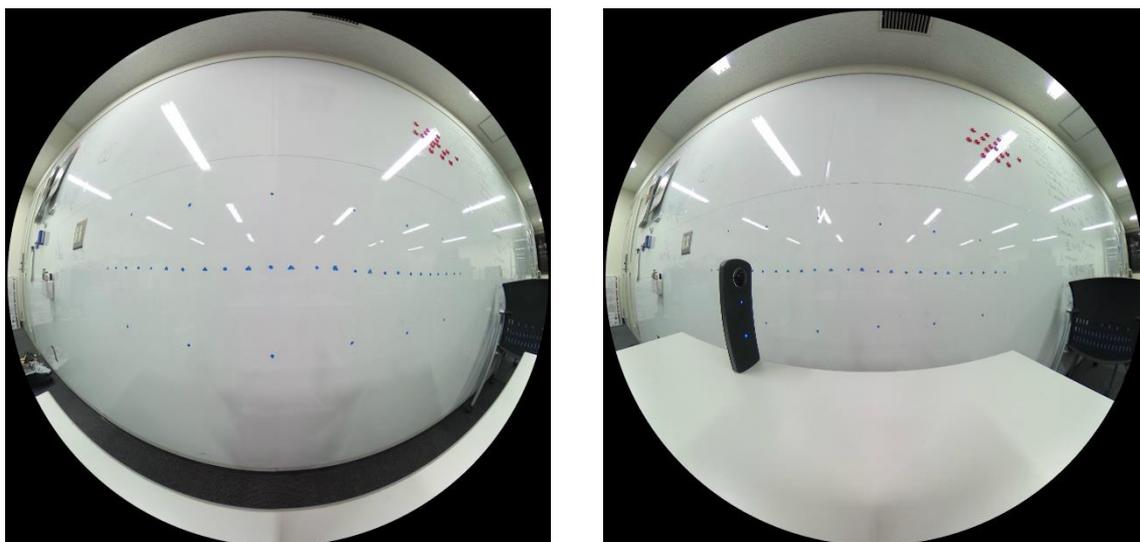


図 5.11 実験 4 で用いた左のカメラで得た画像(左)と右のカメラで得た画像(右)

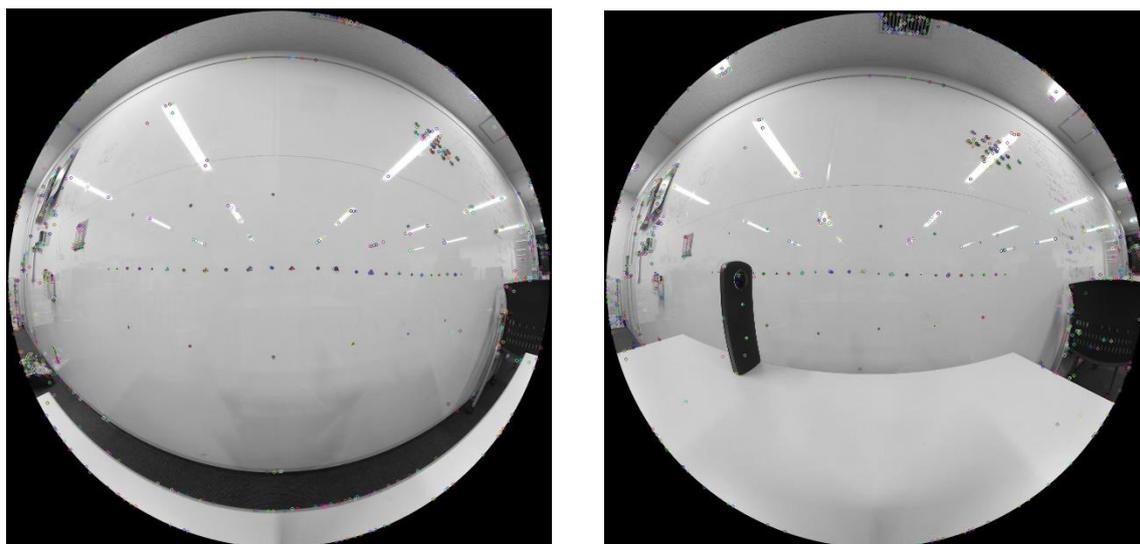


図 5.12 図 5.11 の画像を SIFT 特徴量検出した画像

5.3.3.5 実験 5 で用いた画像

実験 5 ではカメラのキャリブレーションを行った。キャリブレーションに用いた画像を下の図 5.13 に示す。

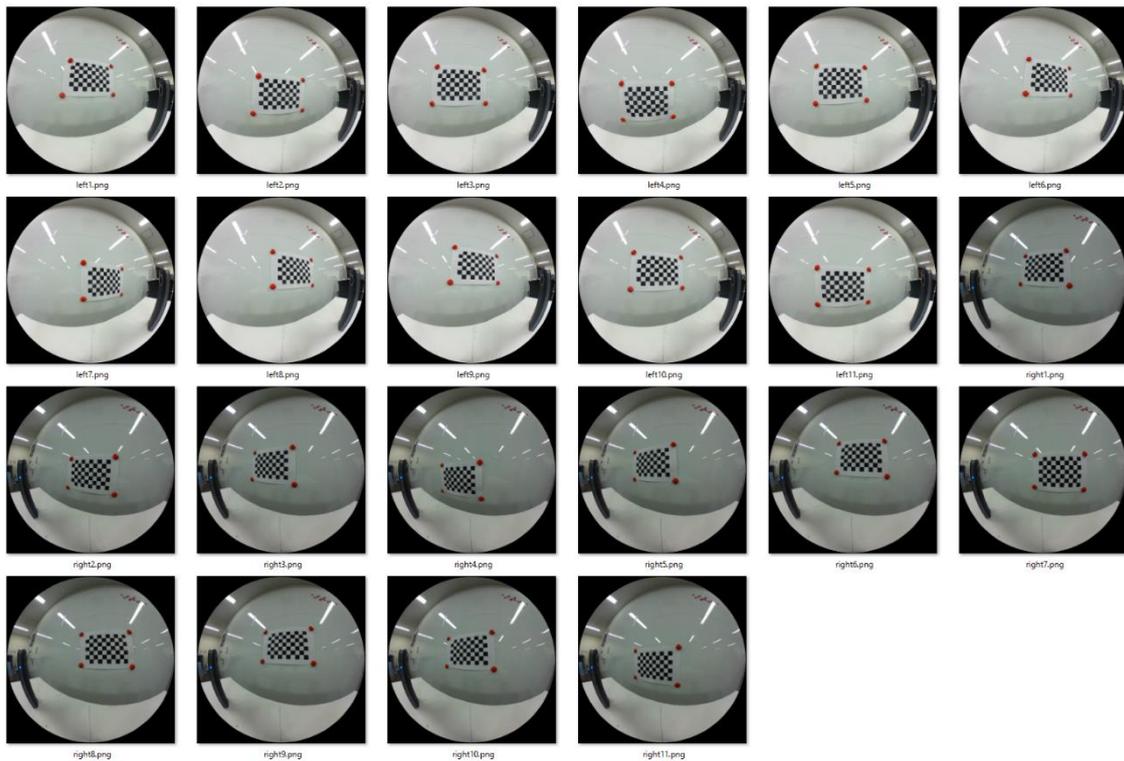


図 5.13 実験 5 で用いた画像

5.4 実験結果と考察

実験 1 から実験 5 までの実験結果を示す。

5.4.1 実験 1 の結果

図 5.2 の画像で検出された特徴点で対応するもの同士を選び距離測定を行った。表 5.2 で示されている実験 1 の「カメラ間の距離」はすでに述べたが式(4.10)の $Baseline_L + Baseline_R$ を表し、「カメラと壁の距離」は対象点 P の z 座標を指している。

図 5.2 の点を左から右へ順に選び距離測定した結果を以下の表 5.4 に示す。

表 5.4 実験 1 横方向の点の距離測定結果

θ_l [度]	θ_r [度]	対象点 P の y 座標[mm]	誤差[%]
39.283	50.82	107.383	4.7639
34.378	47.604	106.746	4.1424
29.32	44.237	106.378	3.7834
24.62	40.992	106.583	3.9834
20.047	37.79	106.54	3.9415
14.96	34.11	106.133	3.5444
10.391	30.701	105.268	2.7005
6.432	27.415	104.5	1.9512
4.289	23.556	103.761	1.2302
5.765	19.743	103.536	1.0107
10.016	15.313	103.66	1.1317
14.219	10.945	104.079	1.5405
18.929	5.93	104.889	2.3307
23.507	4.065	105.977	3.3922
28.059	7.792	106.989	4.3795
32.937	13.888	108.051	5.4156
37.9	20.706	108.969	6.3112
42.647	27.537	109.471	6.801
47.96	35.402	109.987	7.3044

次に図 5.2 の点を上から下へ順に選び距離測定した結果を以下の表 5.5 に示す.

表 5.5 実験 1 縦方向の点の距離測定結果

θ_l [度]	θ_r [度]	対象点 P の z 座標[mm]	誤差[%]
26.418	33.112	102.239	0.2546
21.076	29.94	102.624	0.121
15.961	27.091	102.724	0.2185
10.195	25.239	105.676	3.0985
5.775	23.889	103.211	0.6937
0.648	23.203	103.552	1.0263
4.289	23.556	103.761	1.2302
8.656	24.566	104.027	1.4898
12.908	26.162	102.9	0.3902
18.223	30.258	109.276	6.6107
22.577	30.745	105.18	2.6146
26.53	33.233	105.689	3.1112
31.406	36.535	105.995	3.4098
40.496	43.528	107.126	4.5132
44.583	46.923	108.199	5.56
49.25	50.91	109.388	6.72

表 5.4 と表 5.5 で示された θ_l, θ_r は式(4.4)によって算出された値であり、実験によって得たものである。

5.4.2 実験 1 の考察

表 5.4 では θ_l が大きくなると誤差も大きくなっている。これは魚眼画像の場合、歪みがあり中心から外側に広がるにつれて歪みの影響を受けやすいからだと考えられる。表 5.5 では対象点 P の z 座標の項目で下にいくにつれて誤差が大きくなっている。これはカメラ 2 台が完全に同方向を向いておらず右のカメラの方がやや上を向いていることが原因だと考えられる。

また、表 5.5 の距離測定結果が 109.276 になった点はその前後に比べても大きい値になっている。特徴点を検出する際に、左側のカメラで撮影された魚眼画像ではその描画した一つの点で複数特徴点が検出されていた。特徴点を選んで計測を行う際に完全に右のカメラで撮影された魚眼画像と対応する点を選べなかったことが原因だと考えられる。

測定した結果の平均誤差は 3.163%である。したがって精度よく距離の測定が行えていると考えられる。また、提案した式(4.10)の有用性も示されたと考えられる。本実験では上下左右約 50° まで距離測定が高精度に行えることが分かった。つまり 100° の視野まで

距離測定を高精度に行えることになる。図 5.2 で計測できなかった点があるがこれは SIFT の特徴点検出において特徴点として検出されなかったため距離測定をすることができなかった。

5.4.3 実験 2 の結果

図 5.8 の画像で検出された特徴点で対応するもの同士を選び距離測定を行った。表 5.2 で示されている実験 2 の「カメラ間の距離」は実験 1 と同様に式(4.25)の $Baseline_L + Baseline_R$ を表し、「カメラと壁の距離」は対象点 P の z 座標を指している。

実験 1 と異なり距離を 30cm 以上離れたのは 2.2.4 で述べたように 27.5cm 以上壁から離さないと映らない部分が出てしまうからである。カメラの正面が壁になるように撮影した画像とカメラの右方向が壁になる画像を示し、両者を比較する。

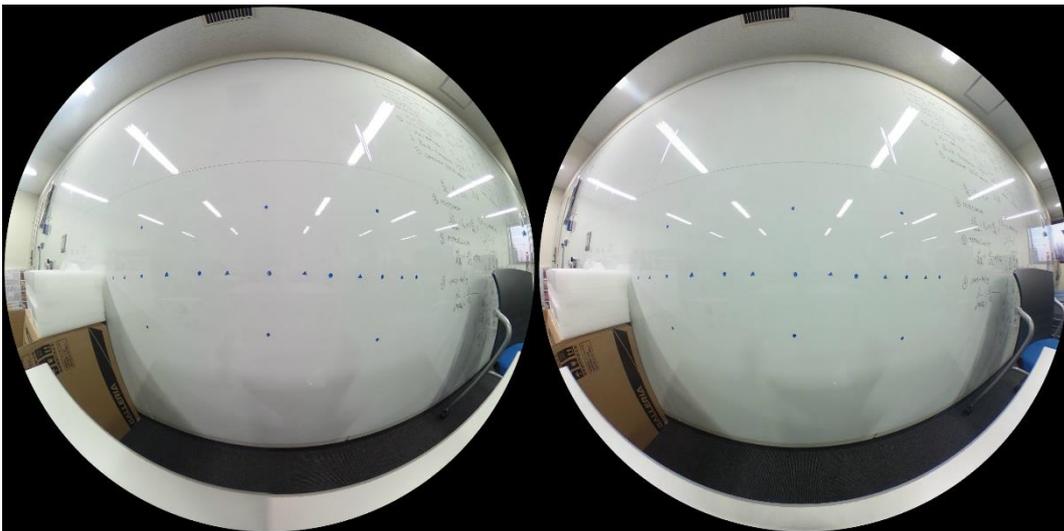


図 5.14 カメラの正面方向から得た画像(左)とカメラ右方向から得た画像(右)

図 5.14 をみると両者は同様に映っているため実験 2 でも距離測定の式は実験 1 と同じ式 (4.10) の式を用いる。

図 5.8 の点を左から右へ順に選び距離測定した結果を以下の表 5.6 に示す。

表 5.6 実験 2 の距離測定結果

θ_l [度]	θ_r [度]	対象点 P の z 座標[mm]	誤差[%]
50.323	55.905	286.847	10.9171
47.509	53.638	292.696	9.1006
44.358	51.156	295.591	8.2016
40.093	47.763	300.691	6.6177
34.847	43.505	309.24	3.9627
29.351	39.166	308.573	4.1699
22.422	33.866	301.506	6.3646
15.591	27.963	309.61	3.8478
4.693	18.304	311.583	3.2351
1.984	11.41	341.856	6.1665
9.464	3.783	344.718	7.0553
15.464	2.099	307.597	4.473
20.689	7.529	316.276	1.7776
25.143	12.7	318.099	1.2115
28.415	16.599	319.844	0.6696
36.737	26.748	320.688	0.4075
39.634	30.378	321.452	0.1702
45.142	37.332	321.096	0.2807
47.978	40.899	319.172	0.8783
49.909	43.357	319.252	0.8534
51.842	45.773	316.884	1.5888

表 5.6 で示された θ_l, θ_r は式(4.4)によって算出された値であり、実験によって得たものである。

5.4.4 実験 2 の考察

表 5.6 をみると左から横に計測する点が動くとき誤差が小さくなっていることが分かる。これは左のカメラの方がやや後ろにずれてしまっているため基線長が壁に対して斜めになってしまっていることが原因であると考えられる。実験 2 ではカメラ 2 台の前後のずれは導出式に考慮していないためこのような結果となった。

実験 1 と異なり縦の点を計測できなかったのは、30cm 壁から離して魚眼レンズの上部に点が映るような点を描画するとなるとかなりの高さが必要となるためである。そのよう

な実験環境を整えることが困難であったため実験 1 と異なる実験結果となった。

実験結果を見ると平均誤差は 3.902% であるため式(4.10)は実験 2 のような場合でも有用であるといえる。また、カメラの左右方向が視野の中心となる魚眼画像を得る手法も有用であることが示された。

また、左右約 50° まで距離測定が高精度に行えることが分かった。つまり実験 1 と同様に 100° の視野まで距離測定を高精度に行えることになる。実験 1 と実験 2 の双方で互い 100° の範囲で距離測定を行えるということは、双方で 10° 分同じ箇所を高精度に計測できるということである。したがって、本手法を用いれば前後にある魚眼レンズの境界周辺においても高精度に距離測定を行うことができることがわかった。

5.4.5 実験 3 の結果

図 5.10 の画像で検出された特徴点で対応するもの同士を選び距離測定を行った。表 5.3 で示されている「カメラ間の距離」は式(4.25)の $Baseline_L + Baseline_R$ を表し、「左カメラと壁の距離」が対象点 P の z 座標を指している。

図 5.10 の点を左から右へ順に選び距離測定した結果を以下の表 5.7 に示す。

表 5.7 実験 3 横方向の点の距離測定結果

θ_l [度]	θ_r [度]	対象点 P の y 座標[mm]	誤差[%]
45.585	54.122	106.668	4.0663
40.703	51.802	104.831	2.2741
30.894	47.398	102.805	0.2976
21.532	43.274	102.418	0.08
11.556	38.938	100.895	1.5659
7.301	37.009	99.848	2.5873
4.335	34.683	99.116	3.3015
5.225	32.427	98.717	3.6907
9.617	29.7	98.648	3.758
14.043	26.892	98.959	3.4546
23.758	19.748	100.723	1.7337
28.438	15.669	101.775	0.7073
38.467	5.28	103.55	1.0244
43.267	2.73	103.815	1.2829
48.58	9.679	104.058	1.52

次に図 5.10 の点を上から下へ順に選び距離測定した結果を以下の表 5.8 に示す。

表 5.8 実験 3 縦方向の点の距離測定結果

θ_l [度]	θ_r [度]	対象点 P の z 座標[mm]	誤差[%]
44.017	44.415	97.012	5.3541
38.8	42.02	97.366	5.0088
27.589	38.154	97.899	4.4888
22.167	36.937	98.275	4.122
16.131	35.868	98.439	3.962
10.716	35.355	97.828	4.558
6.451	34.895	98.695	3.7122
4.335	34.683	99.116	3.3015
8.861	34.956	99.339	3.0839
13.811	35.354	99.781	2.6527
23.403	36.795	100.602	1.8517
27.532	37.763	101.028	1.4361
32.615	39.183	101.114	1.3522
41.979	42.804	102.401	0.0966
46.126	44.891	103.357	0.8361
50.809	47.611	104.4	1.8537

表 5.7 と表 5.8 で示された θ_l, θ_r は式(4.4)によって算出された値であり、実験によって得たものである。

5.4.6 実験 3 の考察

表 5.7 では実験 1 と同様に θ_l が大きくなると測定結果も大きくなっている。原因についても実験 1 と同様と考えられる。また、 θ_l が最も小さいときに誤差が小さくなるのが理想的である。しかし、今回の実験結果ではそのようになっていない。これは「カメラ間の距離」や「右カメラと壁の距離」を手作業で計測しているため表 5.3 の値に誤差が生じていることが原因だと考えられる。

表 5.8 でも対象点 P の z 座標の項目で下に辿っていくにつれて測定結果が大きくなっている。これも実験 1 と同様にカメラ 2 台が完全に平行に並んでおらず右のカメラの方がやや上を向いていることが原因だと考えられる。

測定した結果の平均誤差は 2.9794%である。したがって実験 3 においても精度よく距離の測定が行えていると考えられる。また、提案した式(4.25)の有用性も示されたと考えら

れる。本実験においても上下左右約 50° まで距離測定が高精度に行えることが分かった。つまり約 100° の視野まで距離測定を高精度に行えることになる。図 5.10 においても計測できなかった点があるが原因は実験 1 と同様で SIFT の特徴点検出において特徴点として検出されなかったため距離測定をすることができなかった。

5.4.7 実験 4 の結果

図 5.12 の画像で検出された特徴点で対応するもの同士を選び距離測定を行った。表 5.3 で示されている「カメラ間の距離」は式(4.25)の $\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R$ を表し、「左カメラと壁の距離」が対象点 P の z 座標を指している。

図 5.12 の点を左から右へ順に選び距離測定した結果を以下の表 5.9 に示す。

表 5.9 実験 4 の距離測定結果

θ_l [度]	θ_r [度]	対象点 P の y 座標[mm]	誤差[%]
31.841	37.547	319.014	0.9273
17.92	29.186	322.675	0.2096
10.417	24.687	320.716	0.3988
4.55	20.308	319.213	0.8655
5.632	15.605	334.508	3.8845
13.43	9.358	344.826	7.0888
19.308	5.26	342.214	6.2776
25.819	2.443	339.21	5.3447
30.634	5.831	339.398	5.4031
35.621	10.577	339.933	5.5693
39.976	15.289	340.64	5.7888
47.521	24.081	336.346	4.4553
50.668	28.643	342.902	6.4913
53.209	32.265	344.408	6.959
55.946	36.229	344.581	7.0127
58.601	40.24	344.943	7.1252

表 5.9 で示された θ_l, θ_r は式(4.4)によって算出された値であり、実験によって得たものである。

5.4.8 実験 4 の考察

表 5.9 では計測する点が左から右へ行くにつれて測定結果が大きくなっており誤差も

大きくなっている。これは $\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R$ となる線が壁に対して平行になっていないことが原因だと考えられる。これは右のカメラの方がやや後ろにずれたものとして計算をされていることになる。つまり手作業によって計測した「右カメラと壁の距離」が実際はもっと小さい値であったためこのような実験結果になったと考えられる。また、カメラが正確に同方向を向いていることは本実験では保証できないためカメラの向きが2台のカメラで異なることも原因として考えられる。

測定した結果の平均誤差は4.6126%である。したがって実験4においても精度よく距離の測定が行えていると考えられる。また、提案した式(4.25)はカメラの横方向を視野の中心とした魚眼レンズを用いた場合でも有用性があると示された。本実験において左右約 50° まで距離測定が高精度に行えることが分かった。つまり約 100° の視野まで距離測定を高精度に行えることになる。実験1と実験2と同様に実験3と実験4によってお互い 10° 毎同じ箇所を高精度に距離測定を行うことができる。よって式(4.25)を用いた場合で 360° の視野で距離測定を高精度に行うことができ、前後に取り付けた魚眼レンズの境界周辺においてもある程度高精度に距離測定を行えることが分かった。

5.4.9 実験5の結果

実験5ではキャリブレーションを行った。キャリブレーションによって得られた左のカメラの回転行列 R_1 と右カメラの回転行列 R_2 を以下に示す。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.9441 & 0.00 & 0.329 \\ -0.0009 & 1 & -0.0004 \\ -0.3297 & 0.0001 & 0.9441 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.9904 & 0.0003 & -0.1383 \\ -0.0003 & 1 & 0.0003 \\ 0.1383 & -0.0003 & 0.9904 \end{bmatrix}$$

ここで示した値は角度の \cos をとっている。したがって \cos^{-1} をとってどのくらいの角度ずれているかを確認した。すると左のカメラは右に 19.251° 、右のカメラは左に 7.946° ずれているという結果になった。この角度を元に補正を行った画像と補正前の画像を左側のカメラ、右側のカメラそれぞれ図5.8と図5.9に示す。

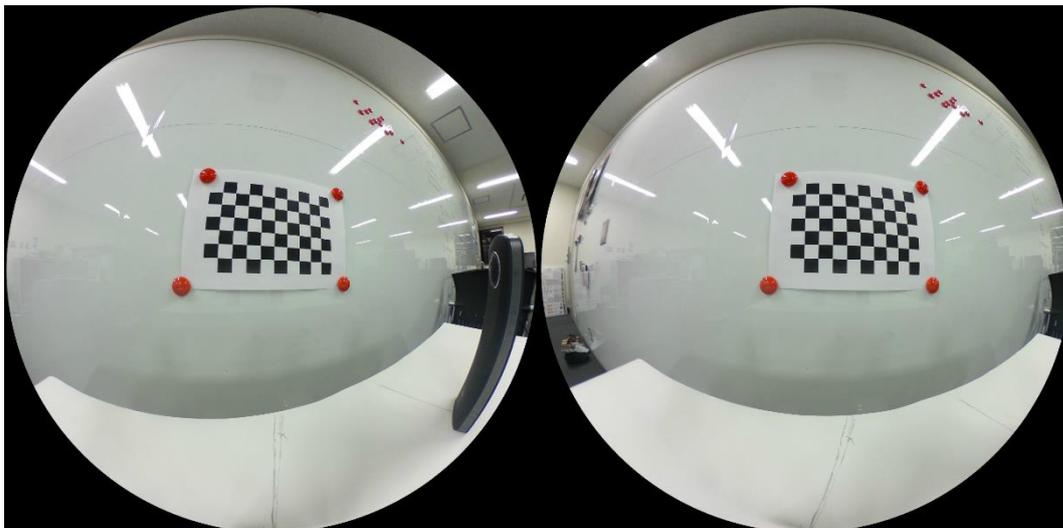


図 5.15 補正を後画像と補正前の画像(左カメラ)

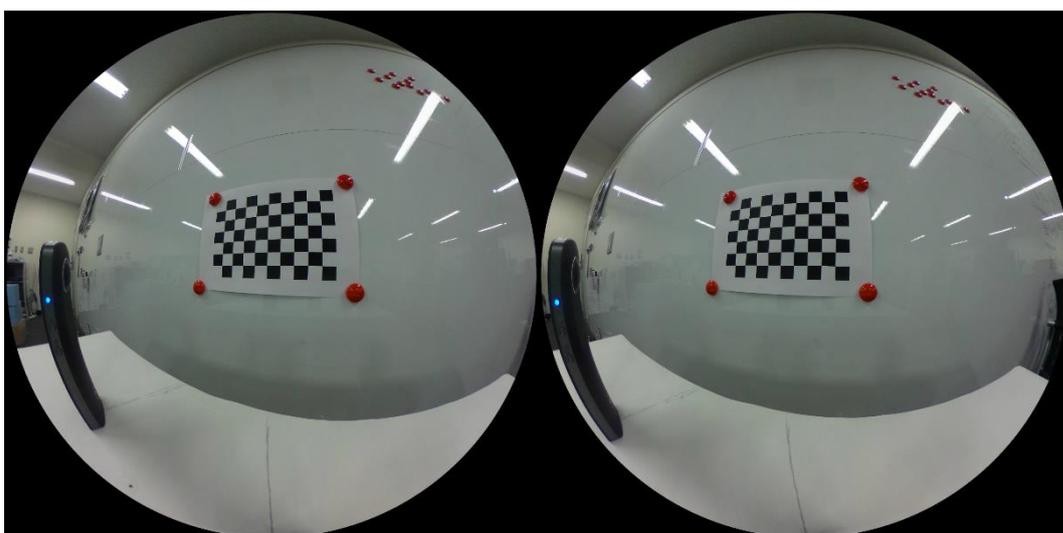


図 5.16 補正を後画像と補正前の画像(右カメラ)

5.4.10 実験5の考察

図 5.8 と図 5.9 を見てみると向きが補正されていることが分かる。向きを補正する手法として提案手法は有用であると考えられる。

しかし、実験5の結果はキャリブレーション時の世界座標からどのくらいの角度がずれているかを表す。したがってあらかじめ手作業にて計測したずらした角度は壁に対してどのくらい向きがずれているかを表しているため両者が一致しない。

また本実験の結果を図に表すと以下の図 5.10 のようになる。図 5.10 では実際に計測したずれた角度を左カメラ右カメラそれぞれ R_l, R_r とし、実験によって得られたカメラの回転角度を R'_l, R'_r としている。

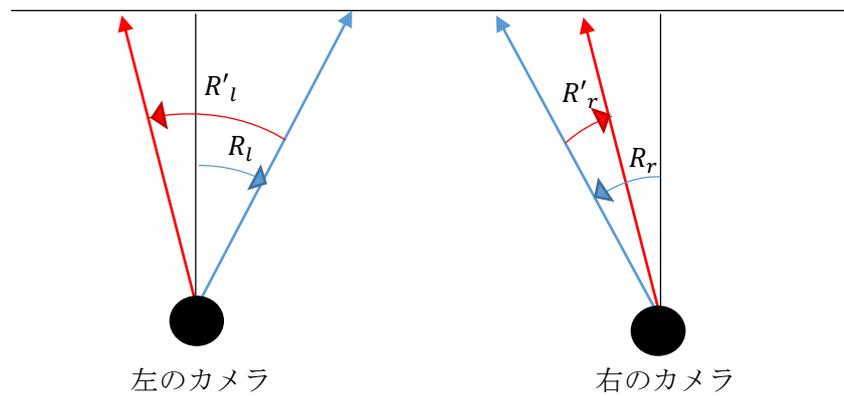


図 5.17 実験 5 の結果を表した図

この際、 $R'_l - R_l$ と $R_r - R'_r$ が同じ値になることが理想である。この両者の値はそれぞれ 5.651 と 11.954 となり一致していない。これはキャリブレーションによる誤差が大きいことが原因だと考えられる。誤差が大きくなってしまった原因はキャリブレーションに用いた画像枚数が少なかったことが原因との一つとして考えられる。

これらの結果から本手法は向きを補正する手法としては有用であるが、正確に向きを補正できるわけではないと結論づけられる。したがって向きを正確に補正する手法として提案手法は有用ではないといえる。

第6章 結論と今後の課題

6.1 結論

本研究では、Equirectangular形式の全天球画像を用いてカメラの前後左右4方向を視野の中心とした魚眼画像を得る手法、カメラを平行に並べた場合のステレオ距離測定の計算手法、カメラを前後にずらしてステレオ距離測定を行う手法を提案した。これらを合わせることで 360° の視野全方向のステレオ距離測定を高精度に行う手法を提案した。平均誤差は実験1から実験4において10%未満であった。したがって本手法の有用性が示されたと考えられる。また左方向を視野の中心とした魚眼画像、背面を視野の中心とした魚眼画像においては実験を行っていないが、右方向を視野の中心とした魚眼画像の場合と、正面を視野の中心とした魚眼画像の場合と同様であるので問題はないと考えられる。

また、それぞれ4方向の視野で約 100° 毎高精度に距離測定ができることが本研究において分かった。つまり考察でも述べたように 360° の距離測定ができるということになる。

Equirectangular形式の全天球画像を用いたカメラ2台が同方向を向くように補正する手法は向きを補正するだけなら有用である。しかし、正確に向きを補正することはできていないため本手法は有用ではないと結論付けられる。

6.2 今後の課題

今後の課題として以下の5項目が挙げられる。

- ・カメラ間の距離、カメラから対象点までの距離をさらに離れた場合の距離測定

本研究では、カメラ間の距離を20cm以上離していない。測定した距離も30cm程度であるため実用化にはまだ課題が残る。したがって今後はカメラ間の距離をさらに離して距離測定を行う実験や、カメラから対象点までの距離をさらに離して距離測定を行う必要がある。

- ・ 360° の3次元再構成を行う実験

本研究では提案手法を評価するための実験は行ったが実用に向けた実験は行っていない。正面を視野とした魚眼画像を用いた実験と、右方向を視野の中心とした魚眼画像を用いた実験ではそれぞれ別に撮影を行っている。今後は1度の撮影で 360° の距離測定を行う実験をする必要がある。また、本研究で算出している対象点の座標は左のカメラの中心を原点としている。 360° 距離測定を行う場合には、前後左右の視野方向において左のカメラの位置が異なる。したがって3次元再構成を行うことができない。また、それぞれの視野で距離測定を行える範囲が 10° 重なるという結果に本研究にはなったが、3次元再構成を行う際にこの重なった 10° 分の距離をどのように扱うか検討する必要もある。

- ・遠い視野における特徴点検出精度の向上

本研究では SIFT を用いて特徴点検出を行うとともに検出できた特徴点のみしか距離測定を行えていない。したがって特徴点検出が難しい魚眼画像の外側では距離測定結果が出ていない。この問題点に関しては sRD-SIFT という画像の歪み頑強な特徴点検出があるため sRD-SIFT を用いて実験を行いたい。この実験により、本研究の結論よりもさらに広い視野範囲で距離測定を高精度に行うことができるようになる可能性がある。

- ・左右のカメラがお互いの撮影範囲に写りこんでしまう問題点への対策

左右のカメラを前後にずらして撮影を行った際、後ろにずらしているカメラで撮影すると前方向にあるカメラが映りこんでしまう。カメラが映ってしまうとその範囲の距離測定は行えなくなるため対策が必要である。本研究ではカメラを離す距離が短かったため実験 3、実験 4 のようにカメラが映りこんだ範囲が広くその箇所については距離測定が行えなかった。しかし、カメラを離す距離を大きくすることによりカメラが映りこんではしまうかもしれないが映りこむ範囲は狭くなり影響が少なくなると考えられる。

- ・カメラ 2 台の配置環境の正確さとキャリブレーション精度の向上

本研究でカメラ 2 台の配置環境を手作業で測定していたため距離測定の精度が正確にカメラを配置できるかどうか依存している。キャリブレーションの精度がよいと確認できれば外部パラメータを用いてカメラ 2 台の配置環境が手作業でなく得ることができる。また、本研究では Equirectangular 形式の全天球画像を用いてカメラ 2 台が同一方向を向くように補正する手法は有用でなかった。しかし、キャリブレーション精度が上がれば有用となる可能性もある。向きを補正した後、カメラ 2 台が同一方向を向いているかどうか評価する方法についても検討する必要がある。

謝辞

本研究の実験に必要な道具を整えていただき実験環境を整えてくださったり、研究の方向性や研究の過程で発生した問題点を解決するために丁寧かつ熱心なご指導を頂いたりした渡辺裕教授と早稲田大学国際情報通信研究センター招聘研究員の原潤一博士に心から感謝いたします。

日ごろ問題点ができたときや研究に行き詰った際に気軽に相談に乗ってくださったり、アドバイスをくださったりした研究室の皆様にお礼申し上げます。

最後に、私をここまで育ててくださった家族に感謝いたします。

参考文献

- [1] RICOH 全天球カメラ(平成 29 年(2017 年)1 月現在),
http://jp.ricoh.com/technology/tech/065_theta.html
- [2] パースフリークス透視図法を徹底的に解剖するサイト(平成 29 年(2017 年)1 月現在)
<http://www.persfreaks.jp/main/aov/fisheye/>
- [3] Yosuke Iguchi and Jun'ichi, Yamaguchi, "Omni-directional 3D Measurement Using Double Fish-eye Stereo Vision", Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision(FCV), 21st, pp.1-6, May 2015
- [4] Baofeng Zhang, Na Liu, Yingkui Jiao, Yongchen Li, Junchao Zhu, "Research on Image Matching Technology for the Spherical Stereo Vision", International Conference on Mechatronics and Automation(ICMA), pp.2402-2407, Aug 2015
- [5] Miguel Lourenc,o, Joao P. Barreto, and Francisco Vasconcelos, "sRD-SIFT: Keypoint Detection and Matching in Images With Radial Distortion" IEEE Transactions on Robotics, Vol. 28, No. 3, pp.752-760, June 2012
- [6] Akira Takeuchi, Hiromitsu Fujii, Atsushi Ymashita, Masayuki Tanaka, Ryuho Kataoka, Yoshizumi Miyoshi, Masatoshi Okutomi and Hajime Asmaa, "Aurora 3d-measurement from whole-sky time series image using fish-eye stereo camera", Transactions of the JSME, vol.82, No.834, pp.15-32, Jan 2016
- [7] Shota Kase, Ryota Okutsu, Hisanori Mitsumoto (Chuo University) Yohei Aragaki, Noriko Shimomura (Nissan Motor Co.,Ltd.) Kenji Terabayashi, Kazunori Umeda (Chuo University), "Construction of Overhead View Images by Estimating Intrinsic and Extrinsic Camera Parameters of Multiple Fish-Eye Cameras", IP-08-21 IIS-08-46, July 2008
- [8] 鳥取大学大学院 工学研究科 秦 学斌 "全天周画像における特徴点追跡及び離散球面画像における特徴抽出", 2013 年 1 月, 博士論文
- [9] 中部大学大学院 工学研究科 水野 宏基, "マルチカメラを用いた 3 次元シーンフロー推定に関する研究", 2006 年度修士論文

[10]谷川智洋, 鳴海拓志, 中垣好之, “メディアインタフェース (2) カメラと AR の基礎”, 東京大学機械情報工学科 演習, 2011 年 11 月 25 日,

[11] 植芝 俊夫, 富田 文明, 産業技術総合研究所, “平面パターンを用いた複数カメラシステムのキャリブレーション”, コンピュータビジョンとイメージメディア, 情報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア, vol44, pp.89-99, Dec 2003

[12] Zhengyou Zhang, Microsoft Research, ne Microsoft Way, Redmond, WA 98052-6399, USA, “Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations”, IEEE International Conference on Computer Vision, Vol.1, pp.666-673, Sept 1999

[13]藤吉 弘亘 中部大学 工学部 情報工学科, “Gradient ベースの特徴抽出 -SIFT と HOG-, 電子情報通信学会技術研究報告.PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol.107, pp.211-224, Aug 2007

図一覧

図 2.1	壁と 10cm 離して Theta S 正面から撮影した画像	6
図 2.2	壁と 10cm 離して Theta S 真横から撮影した画像	6
図 2.3	壁から 25cm 離して撮影を行った画像	7
図 2.4	壁から 26cm 離して撮影を行った画像	7
図 2.5	壁から 27cm 離して撮影を行った画像	8
図 2.6	壁から 27.5cm 離して撮影を行った画像	8
図 2.7	Theta S で得られる Equirectangular 形式の全天球画像	9
図 2.8	Theta S で得られる Sphere 形式の全天球画像	10
図 2.9	対称に配置された屈曲光学系	10
図 2.10	カメラに入射する点の位置関係	12
図 2.11	点を描画した模造紙イメージ図	13
図 2.12	Theta S で撮影し得られた魚眼画像	13
図 2.13	Windows Media Player で再生した画面をスクリーンショットした画像	14
図 2.14	MP4 ファイルを再生しスクリーンショット行いトリミングした魚眼画像	14
図 2.15	JPEG ファイルとして得られる Equilectangular 形式の全天球画像	15
図 2.16	RICOH THETA 専用アプリで展開した画像	16
図 2.17	図 2.15 の画像の横方向 4 分割したうち左右 2 つ分を黒く塗りつぶした画像	16
図 2.18	図 2.17 を RICOH THETA 専用アプリで展開した画像	17
図 2.19	図 2.18 をトリミングした画像	17
図 2.20	MP4 から得られる魚眼画像(左)と JPEG ファイルで得られる魚眼画像(右)	18
図 3.1	カメラ座標と世界座標の関係	19
図 3.2	図 3.1 にピクセルサイズ k_x, k_y 画像平面の中心 o_x, o_y を考慮した図	20
図 3.3	三角測量でのカメラと対象物の関係図	24
図 3.4	三次元空間でのカメラ 2 台と対象点との関係	26
図 4.1	Equilectangular 画像を 4 等分し線を描画したイメージ図	31
図 4.2	Equilectangular 画像を 4 等分し並び替えて視野を変更その 1	31
図 4.3	Equilectangular 画像を 4 等分し並び替えて視野を変更その 2	32
図 4.4	Equilectangular 画像を 4 等分し並び替えて視野を変更その 3	32
図 4.5	魚眼レンズと対象物, 射影された対象物との座標関係	33
図 4.6	2 台の魚眼レンズと対象点との関係	34
図 4.7	γ の位置関係	35
図 4.8	全天球カメラ 2 台を前後にずらした場合のモデル	37
図 4.9	図 4.8 を YZ 平面から見た図	38

図 4.10	Equirectangular 形式の全天球画像を並び替えてカメラの向きを補正-----	39
図 5.1	実験 1 で用いた左のカメラで得た画像(左)と右のカメラで得た画像(右)-----	43
図 5.2	図 5.1 の画像を SIFT 特徴量検出した画像-----	43
図 5.3	左のカメラで得られた Equirectangular 形式の全天球画像-----	43
図 5.4	右のカメラで得られた Equirectangular 形式の全天球画像-----	43
図 5.5	向きを変換した左カメラの Equirectangular 形式の全天球画像-----	44
図 5.6	向きを変換した右カメラの Equirectangular 形式の全天球画像-----	44
図 5.7	実験 2 で用いた左のカメラで得た画像(左)と右のカメラで得た画像(右)-----	45
図 5.8	図 5.7 の画像を SIFT 特徴量検出した画像-----	45
図 5.9	実験 3 で用いた左のカメラで得た画像(左)と右のカメラで得た画像(右)-----	46
図 5.10	図 5.9 の画像を SIFT 特徴量検出した画像-----	46
図 5.11	実験 4 で用いた左のカメラで得た画像(左)と右のカメラで得た画像(右)-----	47
図 5.12	図 5.11 の画像を SIFT 特徴量検出した画像-----	47
図 5.13	実験 5 で用いた画像-----	48
図 5.14	カメラの正面方向から得た画像(左)とカメラ右方向から得た画像(右)-----	51
図 5.15	補正を後画像と補正前の画像(左カメラ)-----	57
図 5.16	補正を後画像と補正前の画像(右カメラ)-----	57
図 5.17	実験 5 の結果を表した図-----	58

表一覧

表 5.1	実験環境-----	41
表 5.2	実験 1 と実験 2 のカメラの配置環境-----	41
表 5.3	実験 3 と実験 4 のカメラの配置環境-----	42
表 5.4	実験 1 横方向の点の距離測定結果-----	49
表 5.5	実験 1 縦方向の点の距離測定結果-----	50
表 5.6	実験 2 の距離測定結果-----	52
表 5.7	実験 3 横方向の点の距離測定結果-----	53
表 5.8	実験 3 縦方向の点の距離測定結果-----	54
表 5.9	実験 4 の距離測定結果-----	55