

# 修士論文概要書

Summary of Master's Thesis

Date of submission: 02/01/2019 (MM/DD/YYYY)

専攻名 (専門分野) Department	情報理工・情報通信専攻	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	CD 5117F001-1		
研究題目 Title	全天球カメラを用いたカメラ自己位置推定と環境地図作成 Simultaneous Localization and Mapping Using 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いる。全天球画像は  $360^\circ$  全方位の情報を得ることができるため全天球画像を用いて 3 次元再構成を行うことができれば自動走行技術や環境地図作成、全方位の物体認識の分野に活用できると考えられる。三次元再構成を行う上で重要となる自己位置推定に従来は内部パラメータを用いて推定を行ってきた。しかし、全天球画像は歪みが大きく内部パラメータを正確に測定することが難しい。そこで本研究ではジャイロセンサ付きの全天球カメラで撮影した二つの全天球画像から対応直線を検出し、検出した対応直線をもとに全天球カメラの自己位置推定を行う手法、推定した自己位置をもとに 3 次元再構成を行う手法を提案する。提案手法の有効性を CG 画像と実画像で確認した。

## 2. 全天球画像における対応直線検出

二つの全天球画像間において対応する直線を検出する手法のフローチャートを図 2.1 に示す。

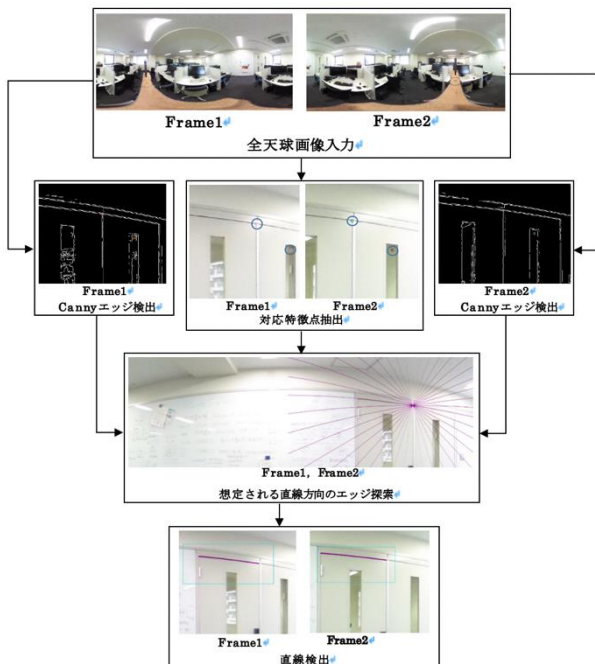


図 2.1 全天球画像における対応直線検出手法のフローチャート

「想定される直線方向のエッジ探索」について補足を行う。検出した特徴点を中心に  $360^\circ$  方向に直線が伸びている可能性がある。そのため  $0 < \alpha \leq 360^\circ$  の整数の範囲でエッジを探索する。閾値以上の長さエッジが検出された場合おおまかな直線とする。

## 3. 対応直線を用いた全天球カメラの自己位置推定

対応直線とカメラの Y 軸がなす角を  $\varphi_l$ ,  $\varphi_r$  としたとき対象点 P1 に関して次の式が成り立つ。

$$P1 = \begin{bmatrix} P1_x \\ P1_y \\ P1_z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 \cos(\alpha_{l1} + \varphi_l) \sin \theta_{l1} \\ l_1 \sin(\alpha_{l1} + \varphi_l) \sin \theta_{l1} \\ l_1 \cos \theta_{l1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s + r_1 \cos(\alpha_{r1} + \varphi_r) \sin \theta_{r1} \\ t + r_1 \sin(\alpha_{r1} + \varphi_r) \sin \theta_{r1} \\ u + r_1 \cos \theta_{r1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

この式が三点に対して成り立ったとき  $\varphi_l$ ,  $\varphi_r$  が求まっていれば  $(l_1, r_1, l_2, r_2, l_3, r_3, s, t, u)$  の 9 つの変数に対して方程式の数も 9 つになるため方程式を解くことができる。前提としておいていた  $\varphi_l$ ,  $\varphi_r$  の求め方について述べる。対応直線の左端 L1 各座標は次のようになる。

$$L1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 \cos(\alpha_{l1} + \varphi_l) \sin \theta_{l1} \\ l_1 \sin(\alpha_{l1} + \varphi_l) \sin \theta_{l1} \\ l_1 \cos \theta_{l1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

対応直線の右端 L2 についても(2)のような座標関係が決まる。水平な直線であれば L1 と L2 の  $x/y$  の比は一致することから次の式(4)のように  $\varphi_l$  が求まる。

$$\varphi_l = \tan^{-1} \frac{\sin \theta_{l1} \sin(\alpha_{l1} + \varphi_l) - \frac{\cos \theta_{l1}}{\cos \theta_{l2}} \sin \theta_{l2} \sin(\alpha_{l2} + \varphi_l)}{\sin \theta_{l1} \cos(\alpha_{l1} + \varphi_l) - \frac{\cos \theta_{l1}}{\cos \theta_{l2}} \sin \theta_{l2} \cos(\alpha_{l2} + \varphi_l)} \quad (3)$$

同様に  $\varphi_r$  も求まり  $l_1 = 1$  として連立方程式を解けば全天球カメラの相対的な位置関係が求まる

## 4. 全天球カメラを用いた 3 次元再構成

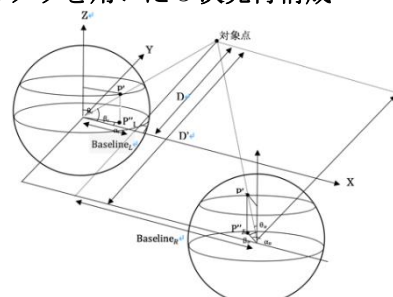


図 4.1 全天球カメラ 2 台と対象点の関係

図 4.1 のように対象点が全天球カメラに入射した際、全天球カメラの球面状に接する点 P' の座標は  $(x, y, z) = (\sin \theta \cos \alpha, \sin \theta \sin \alpha, \sin \theta)$  である。また、図 4.1 の  $\beta_L, \gamma_L$  を算出し、カメラ間の X 軸に関する距離を  $\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R$ 、カメラ間の Y 軸に関する距離を  $d$  とすると距離 D は

$$D = \frac{\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R - \frac{d}{\cos(\gamma_r) \tan \beta_R}}{\frac{1}{\tan \beta_L} + \frac{\cos(\gamma_r)}{\cos(\gamma_r) \tan \beta_R}} \quad (4)$$

となる。求めた距離 D から三次元座標を求めると、

$$(x, y, z) = \left( \frac{D}{\tan \beta_L}, D \cos(\gamma_r), \pm \sqrt{y^2 - x^2} \right) \quad (5)$$

以上で 3 次元再構成を行うことができる。

## 5. 実験と考察

提案した手法の有効性を確認するために実験を行った。まず実験に用いた画像を図 5.1 に示す。

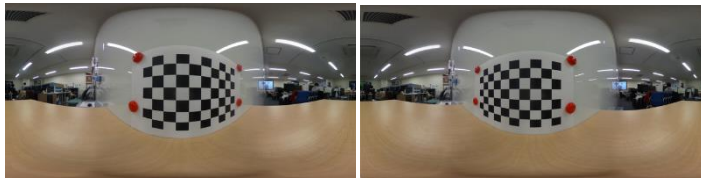


図 5.1 実験に用いた全天球画像

直線検出の結果で一部を拡大した画像を図 5.2 に示す。



図 5.2 直線検出を行なった結果

図 5.2 でわかる通り対応する直線が正しく検出できている。次に自己位置推定を行った結果を表 5.1 に示す。

表 5.1 自己位置推定を行った結果

	s	t	u	$\varphi_l$	$\varphi_r$
	[cm]	[cm]	[cm]	[degree]	[degree]
理想値	32	-18.5	0	-	-
実験結果	32	-13.975	-0.196	75.521	79.054
誤差	-	-4.525	-0.196	-	-

自己位置推定で得られる情報は相対的な位置関係である

ため実験の精度確認する上で s が理想値になるように定数倍している。撮影を行う際、カメラが同方向を向くように設置したため  $\varphi_l, \varphi_r$  の値は同一になることが理想である。結果から t の誤差が少しあるもののある程度正しく自己位置を推定できていることがわかる。

最後に 3 次元再構成を行った結果を表 5.2 に示す。

表 5.2 3 次元再構成を行った結果 1 (一部)

	D cm	x cm	y cm	x の誤差%	y の誤差%
1 行目	12.189	2.277	9.694	3.489	1.444
2 行目	11.099	2.295	9.823	4.305	1.522
3 行目	10.223	2.283	9.808	3.775	0.936
4 行目	9.849	2.292	9.831	4.173	1.078
5 列目	9.968	2.278	9.824	3.552	0.922

表 5.3 3 次元再構成を行った結果 2 (一部)

	D cm	y cm	z cm	y の誤差%	z の誤差%
1 列目	10.835	10.094	2.331	5.940	3.038
2 列目	11.259	9.983	2.306	4.798	1.912
3 列目	11.156	9.891	2.282	3.733	0.965
4 列目	11.069	9.801	2.281	3.686	0.046
5 列目	10.978	9.712	2.272	3.295	0.857

表 5.2 と表 5.3 から 3 次元再構成を 10%未満の誤差で行えていることがわかる。x 座標の誤差は小さいが y 座標と z 座標の誤差が大きくなってしまっているのは自己位置推定において t が実際の値より負に大きくなっていることが原因として考えられる。

## 6. むすび

本研究において提案した手法で対応直線検出、カメラ自己位置推定、3 次元再構成が可能であることがわかった。

## 参考文献

- [1] Y. Iguchi and J. 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
- [2] D.Caruso, J.Engel, and D.Cremers, "LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM", ECCV In European Conference on Computer Vision, pp 834-849, Oct. 2014.

2018 年度 修士論文

全天球カメラを用いたカメラ自己位置推定と  
環境地図作成

Simultaneous Localization and Mapping Using  
Omnidirectional Camera

指導教員 渡辺 裕 教授

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

5117F001-1

青木貴大

## 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b> .....	<b>1</b>
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	本論文の構成 .....	2
<b>第 2 章</b>	<b>ステレオカメラによる距離測定</b> .....	<b>3</b>
2.1	まえがき .....	3
2.2	カメラキャリブレーション .....	3
2.2.1	カメラ座標と世界座標 .....	3
2.2.2	射影行列 .....	3
2.2.3	内部パラメータ .....	4
2.2.4	外部パラメータ .....	5
2.2.5	全パラメータ .....	6
2.2.6	Homography 行列 .....	6
2.3	Zhang によるカメラキャリブレーション法 .....	7
2.4	三角測量の原理 .....	8
2.4.1	2次元の三角測量 .....	8
2.4.2	3次元の三角測量 .....	9
2.5	SIFT 特徴量 .....	10
2.5.1	スケールとキーポイント検出 .....	10
2.5.2	キーポイントのローカライズ .....	11
2.5.3	オリエンテーションの算出 .....	12
2.5.4	特徴量の記述 .....	13
2.6	むすび .....	13
<b>第 3 章</b>	<b>全天球画像を用いた自己位置推定と 3次元再構成</b> .....	<b>14</b>
3.1	まえがき .....	14
3.2	提案手法の概要 .....	14
3.3	全天球カメラ 2 台を用いたステレオ距離測定による三次元再構成 .....	14

3.3.1	カメラ 2 台を平行に並べた場合 .....	15
3.3.2	カメラ 2 台を前後にずらした場合 .....	19
3.4	全天球画像における対応直線検出手法 .....	21
3.5	対応直線を用いた全天球カメラの自己位置推定手法 .....	27
3.6	むすび .....	30
<b>第 4 章</b>	<b>提案手法の評価実験と結果, 考察 .....</b>	<b>31</b>
4.1	まえがき .....	31
4.2	実験の概要 .....	31
4.2.1	実験 1 .....	31
4.2.2	実験 2 .....	31
4.2.3	実験 3 .....	31
4.3	実験の条件 .....	31
4.3.1	実験環境 .....	31
4.3.2	カメラの配置環境 .....	32
4.3.2.1	CG 画像で作成した画像のカメラ配置環境 .....	32
4.3.2.2	実際に撮影した全天球カメラの配置環境 .....	32
4.3.3	実験に用いた画像 .....	33
4.3.3.1	CG で作成した画像 .....	33
4.3.3.2	実際に撮影した画像 .....	33
4.4	実験結果と考察 .....	35
4.4.1	実験 1 の結果 .....	35
4.4.1.1	CG 画像での実験結果 .....	35
4.4.1.2	実際に撮影した画像での実験結果 .....	35
4.4.2	実験 1 の考察 .....	38
4.4.3	実験 2 の結果 .....	38
4.4.3.1	CG 画像での実験結果 .....	38
4.4.3.2	実際に撮影した画像 B での実験結果 .....	39
4.4.3.3	実際に撮影した画像 C での実験結果 .....	41
4.4.3.4	実際に撮影した画像 D での実験結果 .....	43
4.4.4	実験 2 の考察 .....	44
4.4.5	実験 3 の結果 .....	44
4.4.5.1	CG 画像での実験結果 .....	44
4.4.5.2	実際に撮影した画像 D での実験結果 .....	46

4.4.6	実験 3 の考察.....	47
4.5	むすび.....	47
第 5 章	結論と今後の課題.....	48
5.1	結論.....	48
5.2	今後の課題.....	48
	謝辞.....	50
	参考文献.....	51
	図一覧.....	53
	表一覧.....	55
	研究業績.....	56

## 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容易に全天球画像を撮影することができ、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おり、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、 $360^\circ$  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従って誤差が大きくなる。

本論文では、ジャイロセンサが搭載された全天球カメラで撮影された二つの画像間における対応直線を検出する手法を提案する。次に検出した対応直線を用いてカメラの自己位置推定を行う手法を提案する。最後に推定した自己位置の情報を用いて 3次元再構成を行う手法を提案する。

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設置する際、従来は画像を較正する必要があり画質の劣化が生じていた。しかし、全天球画像を用いれば、カメラ 2 台が同方向を向くようにすることで  $360^\circ$  の視野のうち切り取る位置を変えるだけで済む利点がある。したがって、画像を較正する必要が無く、距離測定を行う際に原画像のまま扱うことができる。

全天球カメラは歪みが大きく内部パラメータを正確に測定することが難しい。したがってジャイロセンサを使用することで推定する変数を減らし、対応直線を用いることで内部パラメータを用いず自己位置推定を行う。撮影して得られた画像から自己位置推定を行うことで、3次元再構成を行うこともできる。

全方位の 3次元再構成が可能になると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[1].

従来の研究で行われている自己位置推定と3次元再構成の技術としてはSLAMがある。SLAMは画像の輝度差が最小となる移動量を推定することで自己位置推定を行い、準深度マップから密な3次元再構成を行うLarge-Scale Direct SLAM (LSD-SLAM) [2]がある。しかしLSD-SLAMはカメラの回転に弱い。Oriented FAST and Rotated BRIEF (ORB) 特徴量から特徴点を抽出し、対応する特徴点の移動量から自己位置推定と3次元再構成を行うORB-SLAM [3]がある。これはカメラの回転に強いが得られる点群が疎である。全天球カメラを用いたSLAMの研究としてはLSD-SLAM for omnidirectional camera [4]とDSO-SLAM for omnidirectional camera [5]がある。これら二つは魚眼画像を用いてSLAMを行っている。

また、カメラの自己位置推定を行う手法では、一般的にカメラの基礎行列 $E$ を5点法などで求めた後、内部行列と外部行列に分解する。得られた外部行列の情報は内部行列の情報に依存し、正確に内部行列を取得しておく必要がある。しかし、全天球カメラは歪みが大きく正確に内部行列を得ることが難しい。

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Scale-invariant Feature Transform (SIFT) が使われることが多い[6]。しかし、魚眼画像のように歪みのある画像においてはMaximally Stable Extremal Regions (MSER) とAffine Scale Invariant Feature Transform (ASIRT) 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[7].

#### 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、カメラキャリブレーションについて述べる。

第3章では、本論文で提案する手法について述べる。

第4章では、実験概要、結果および考察について述べる。

第5章では、本論文の結論と今後の課題について述べる。



## 第2章 ステレオカメラによる距離測定

### 2.1 まえがき

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.

### 2.2 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.

#### 2.2.1 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 2.1 のようになる.

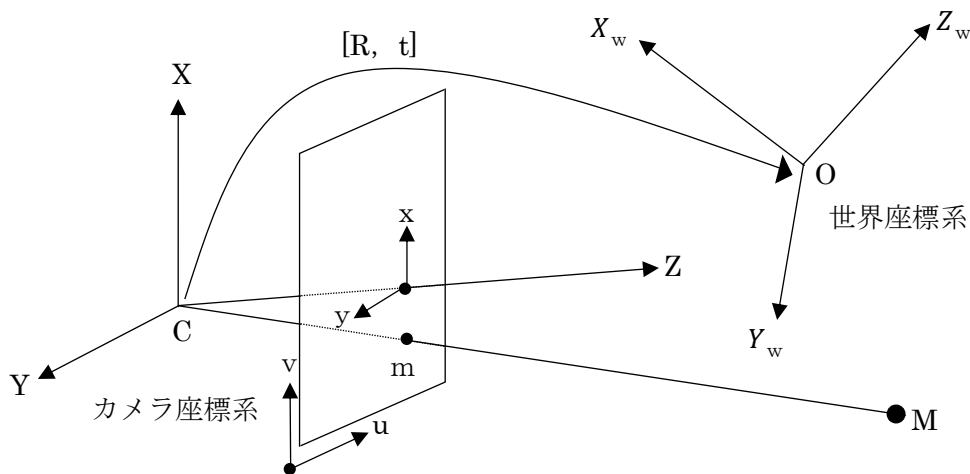


図 2.1 カメラ座標と世界座標の関係

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.

$$x = f \frac{X}{Z} \quad (2.1)$$

$$y = f \frac{Y}{Z} \quad (2.2)$$

#### 2.2.2 射影行列

式(2.1)と式(2.2)は非線形の近似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(2.1)を透視変換の座標表現を行っていることになる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

式(2.2)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。

### 2.2.3 内部パラメータ

図 2.1 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 2.2 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。

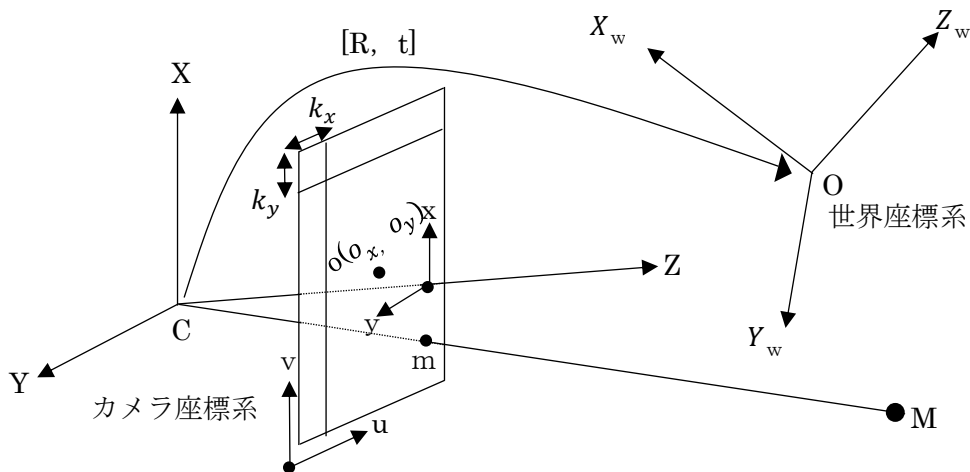


図 2.2 図 2.1 にピクセルサイズ  $k_x$ ,  $k_y$  画像平面の中心  $o_x$ ,  $o_y$  を考慮した図

図 2.2 から式(2.1), 式(2.2)は

$$x = \frac{f}{k_x} \frac{X}{Z} + o_x \quad (2.4)$$

$$y = \frac{f}{k_y} \frac{Y}{Z} + o_y \quad (2.5)$$

と表せる。このとき、射影行列は

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

$$= \begin{bmatrix} k_x f & 0 & o_x & 0 \\ 0 & k_y f & o_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

と式(2.6)で表すことができ一般的に

$$A = \begin{bmatrix} k_x f & 0 & o_x \\ 0 & k_y f & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

で内部パラメータ行列は表されている。

### 2.2.4 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 2.1 と図 2.2 では  $[R, t]$  でされている。  $R$  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、  $t$  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

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} + t \quad (2.8)$$

あるいは

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

で表される。 このときの  $D$  は

$$D = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$0^T = [0 \ 0 \ 0] \quad (2.11)$$

とする。 この  $D$  が外部パラメータ行列である。 また式(2.9)は

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & t_1 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & t_2 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

とも表すことができる。 一般的に回転行列  $R$  を

$$R = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

並進ベクトル  $t$  を

$$t = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

で表記する.

### 2.2.5 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

$$x = A[R, t]X \quad (2.15)$$

で表され、行列で表記すると

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x f & 0 & o_x \\ 0 & k_y f & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & t_1 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & t_2 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

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  $3 \times 4$  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

$$P = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

と表す.

### 2.2.6 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(2.16)の式は

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x f & 0 & o_x \\ 0 & k_y f & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & t_1 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & t_2 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

となりこれが成り立つ. このとき

$$\begin{aligned}
H &= \begin{bmatrix} k_x f & 0 & o_x \\ 0 & k_y f & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & t_1 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & t_2 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & t_3 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{34} \end{bmatrix} \tag{2.19}
\end{aligned}$$

の  $3 \times 3$  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(2.12)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.

### 2.3 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

$$A^{-1}H = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & t_1 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & t_2 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & t_3 \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

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

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} \\ r_{2,1} \\ r_{3,1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{1,2} \\ r_{2,2} \\ r_{3,2} \end{bmatrix} = 0 \tag{2.21}$$

である. また式(3.20)から

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} \\ r_{2,1} \\ r_{3,1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{1,2} \\ r_{2,2} \\ r_{3,2} \end{bmatrix} = [A^{-1} \cdot \widetilde{h}_1] \cdot [A^{-1} \cdot \widetilde{h}_2] = 0 \tag{2.22}$$

したがって

$$\widetilde{h}_1^T A^{-T} A^{-1} \widetilde{h}_1 - \widetilde{h}_2^T A^{-T} A^{-1} \widetilde{h}_2 = 0 \tag{2.23}$$

$$\widetilde{h}_1^T A^{-T} A^{-1} \widetilde{h}_2 = 0 \tag{2.24}$$

この式(2.24)から焦点距離を次式のように算出する.

$$f^2 = \frac{(h_{11} - c_x h_{31})(h_{12} - c_x h_{32}) + (h_{21} - c_y h_{31})(h_{22} - c_y h_{32})}{-h_{31} h_{31}} \quad (2.25)$$

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(2.25)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

$$R = [\tilde{r}_1 \tilde{r}_2 (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)] \quad (2.26)$$

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．

## 2.4 三角測量の原理

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．

### 2.4.1 2次元の三角測量

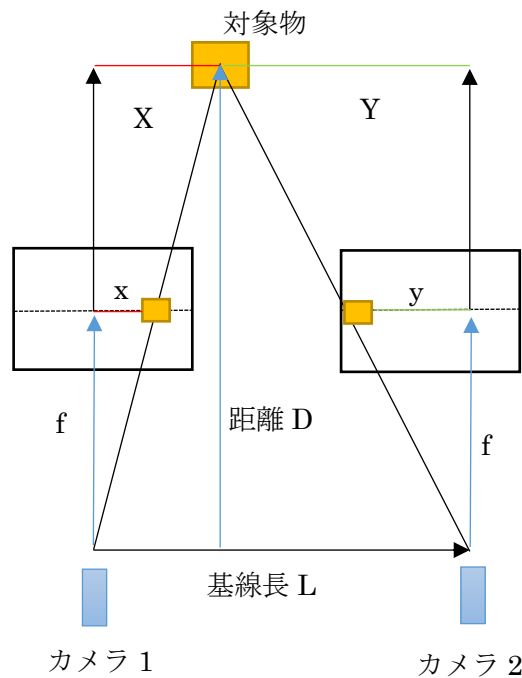


図 2.3 三角測量でのカメラと対象物の関係図

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 2.3 は  $x$  と  $y$  で表され視差と呼ぶ。視差を  $d$  とすると

$$d = x + y \quad (2.27)$$

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

$$Y = L - X \quad (2.28)$$

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

$$\begin{aligned} X : x &= D : f \\ Y : y &= D : f \end{aligned} \quad (2.29)$$

である。式(2.24)から  $x$ ,  $y$  を求めると、

$$\begin{aligned} x &= \frac{Xf}{D} \\ y &= \frac{Yf}{D} \end{aligned} \quad (2.30)$$

式(2.22)と式(2.23), 式(2.25)から

$$\begin{aligned} d &= \frac{Xf}{D} + \frac{Yf}{D} \\ d &= \frac{Xf}{D} + \frac{(L - X)f}{D} \\ D &= \frac{fL}{d} \end{aligned} \quad (2.31)$$

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。

### 2.4.2 3次元の三角測量

3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。

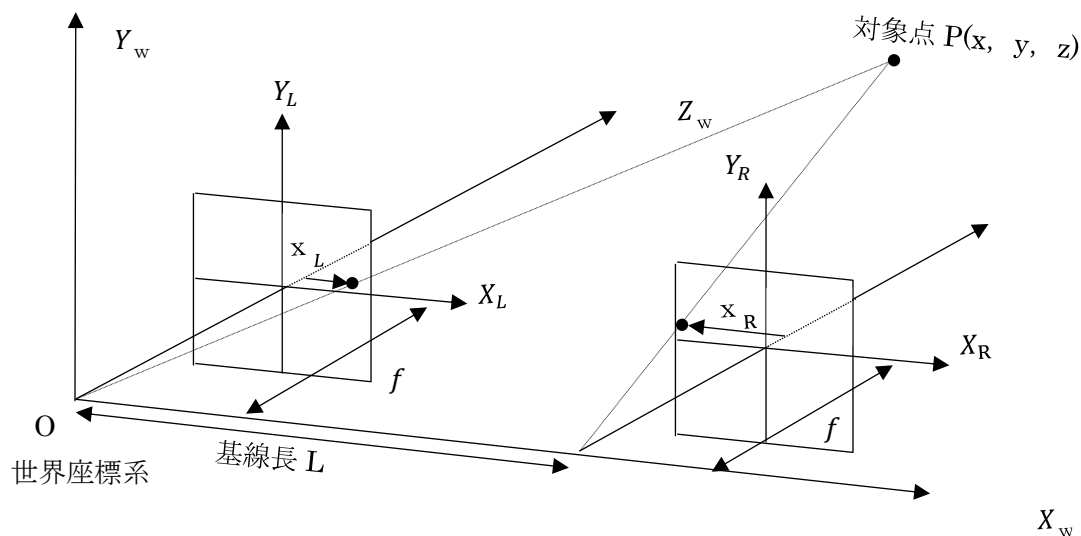


図 2.4 3次元空間でのカメラ 2 台と対象点との関係

視差  $d$  は  $x_L$  と  $x_R$  で式(3.27)と同じように

$$d = x_L + x_R \quad (2.32)$$

と表せる.

よって式(2.31)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,

$$z = \frac{fL}{d} \quad (2.33)$$

$P$  の  $x$  座標,  $y$  座標はそれぞれ次のようになる.

$$x = \frac{x_L L}{d} \quad (2.34)$$

$$y = \frac{y_L L}{d} \quad (2.35)$$

## 2.5 SIFT 特徴量

Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) 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.

### 2.5.1 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 Scale-normalized Laplacian-of-Gaussian (LoG) が提案されている.

$$LoG = f(\sigma) = -\frac{x^2 + y^2 - 2\sigma^2}{2\pi\sigma^6} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.36)$$

$x$  と  $y$  は扱っている画像の画素からの距離,  $\sigma$  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 Difference-of-Gaussian (DoG) が提案されている. DoG と LoG の関係は

$$\frac{\partial G}{\partial \sigma} = \sigma \nabla^2 G \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial G}{\partial \sigma} \approx \frac{G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)}{k\sigma - \sigma} \quad (2.38)$$

の拡散方程式から関係づけられる. 式(2.31)と式(2.32)から

$$(k-1)\sigma \nabla^2 G \approx G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma) \quad (2.39)$$

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.

## 2.5.2 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(2.34)のように計算し, 主曲率をまず求める.

$$H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

式(2.34)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

$$\text{Tr}(H) = D_{xx} + D_{yy} \quad (2.41)$$

$$\text{Det}(H) = D_{xx}D_{yy} - (D_{xy})^2 \quad (2.42)$$

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 $\gamma$ とし第 1 固有値 $\alpha$ をと第 2 固有値 $\beta$ とすると

$$\frac{\text{Tr}(\mathbf{H})^2}{\text{Det}(\mathbf{H})} = \frac{(\alpha + \beta)^2}{\alpha\beta} = \frac{(\gamma\beta + \beta)^2}{\gamma\beta^2} = \frac{(\gamma + 1)^2}{\gamma} \quad (2.43)$$

と関係づけられる。

$$\frac{\text{Tr}(\mathbf{H})^2}{\text{Det}(\mathbf{H})} < \frac{(\gamma + 1)^2}{\gamma} \quad (2.44)$$

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。

$$D(\hat{x}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial x} \hat{x} \quad (2.45)$$

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。コントラストが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。

### 2.5.3 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。

$$m(u, v) = \sqrt{f_u(u, v)^2 + f_v(u, v)^2} \quad (2.46)$$

$$\theta(u, v) = \tan^{-1} \frac{f_v(u, v)}{f_u(u, v)} \quad (2.47)$$

式(2.40)と式(2.41)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。

#### 2.5.4 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。

#### 2.6 むすび

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た。第3章では、本研究における提案手法について述べる。

## 第3章 全天球画像を用いた自己位置推定と 3次元再構成

### 3.1 まえがき

本章では, Equirectangular 形式の全天球画像を用いて用いた自己位置推定と 3次元再構成を行う手法について提案する. その後, 全天球画像における対応直線検出を行う手法を提案し, 最後に検出した対応直線を用いて全天球カメラの自己位置推定を行う手法を提案する. 本章ではこれらの詳細について述べる.

### 3.2 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 形式の全天球画像を用いる. 全天球画像を用いて距離測定を行うことで  $360^\circ$  の視野での距離測定を可能にする手法である. また, 測定した距離から対象点の 3次元座標を測定する.

ステレオカメラによる距離測定を行うためにはカメラの位置情報を得る必要がある. カメラカリブレーションによって得られる外部パラメータからカメラの位置情報を得る方法があるが, この方法を行うためには内部パラメータを正確に求める必要がある. 歪みの大きい全天球カメラの場合, 正確に内部パラメータを求めることが困難である. したがって, ジャイロセンサを用いることで求める必要がある変数を二つ減らし, 対応直線を用いることで内部パラメータを用いずにカメラの自己位置推定を行う.

対応直線を検出するためにまず対応する特徴点を求め, 画像のエッジ検出を行う. 対応する特徴点から考えられる直線方向を全て探索し, 探索する直線上にエッジが存在しているかを測定する.

ここではまず距離測定を行う導出式の理論について述べる. その後, Equilectangular 形式の全天球画像から対応直線を検出する手法について述べる. 最後に, 対応直線を用いた自己位置推定を行う手法について述べる.

### 3.3 全天球カメラ 2 台を用いたステレオ距離測定による三次元再構成

基本となる導出式の理論は 2.4 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全天球画像を用いる場合, 全天球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, 対象点が全天球カメラによって画像平面に射影される点と全天球カメラの球体との関係についてまずは述べる.

### 3.3.1 カメラ 2 台を平行に並べた場合

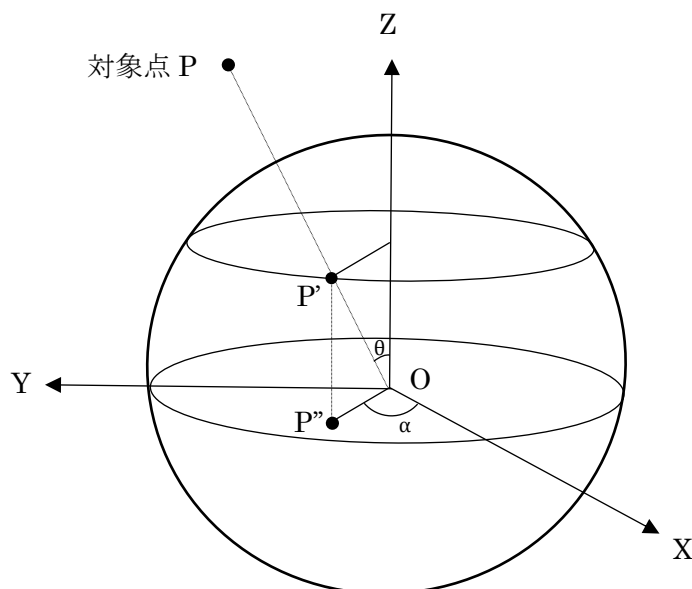


図 3.1 全天球カメラと対象点 P, 射影された対象点 P'' との座標関係

図 3.1 のように対象点を P, 全天球カメラに対象点 P の光線が入射する点を P', P' が球体の  $z = 0$  における XY 平面に射影される点を P'' とする. Z 軸と対象点の光線がなす角度を  $\theta$ , X 軸と P'' がなす角度を  $\alpha$  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, 全天球カメラの球の半径は 1 として考える.

$$P' = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \alpha \\ \sin \theta \sin \alpha \\ \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

P'' の座標は

$$P'' = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

とする. 角度  $\theta$  は対象点が全天球カメラから見てどの角度から入射しているかを表している. 本研究で用いる全天球画像は正距円筒図法であるため画像平面の縦 pixel が角度  $\theta$ , 横 pixel が角度  $\alpha$  を表す. つまり, 画像平面においての P'' の y 座標が 0 [pixel] の時  $\theta = 0^\circ$ , y 座標が最大 pixel の時  $\theta = 180^\circ$  を表す. 同様に像平面においての P'' の x 座標が 0 [pixel] の時  $\alpha = 0^\circ$ ,

$x$ 座標が最大 pixel の時  $\alpha = 360^\circ$ を表す. これを数式で表すとき画像平面最大縦 pixel を  $L_{height}$ , 画像平面最大横 pixel を  $L_{width}$ とすると,

$$\theta = \frac{\pi}{2} \frac{y}{L_{height}} \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \quad (3.3)$$

$$\alpha = \pi \frac{x}{L_{width}} \quad (0 \leq \alpha \leq 2\pi) \quad (3.4)$$

で算出される.

次に三角測量の原理を用いて全天球カメラ 2 台から得られる全天球画像を用いた距離測定の手法を述べる.

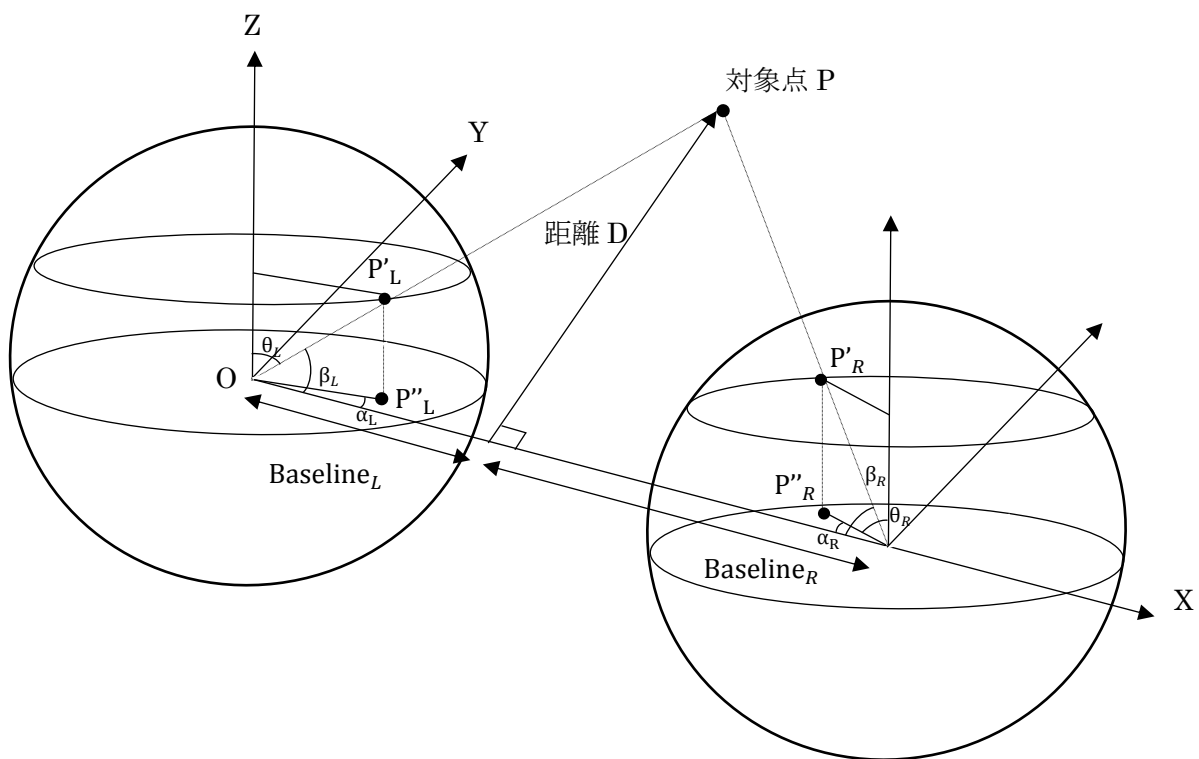


図 3.2 2 台の全天球カメラと対象点 P との関係

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 3.2 では X 軸にしている. X 軸と対象点からの光線がなす角  $\beta_L$ ,  $\beta_R$  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

$$\beta_L = \cos^{-1}(\sin\theta_L \cos\alpha_L) \quad (3.5)$$

$$\beta_R = \cos^{-1}(\sin\theta_R \cos\alpha_R) \quad (3.6)$$

で計算することができる。この式(3.5)と式(3.6)から $\beta_L$ と $\beta_R$ が求まる。  
また、 $\beta_L$ と $\beta_R$ を用いれば $\text{Baseline}_L$ と $\text{Baseline}_R$ はそれぞれ

$$\text{Baseline}_L = \frac{D}{\tan \beta_L} \quad (3.7)$$

$$\text{Baseline}_R = \frac{D}{\tan \beta_R} \quad (3.8)$$

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

$$\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R = \frac{D}{\tan \beta_L} + \frac{D}{\tan \beta_R} \quad (3.9)$$

$$D = \frac{\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R}{\left(\frac{1}{\tan \beta_L} + \frac{1}{\tan \beta_R}\right)} \quad (3.10)$$

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  $\text{Baseline}_L$  になる。したがって

$$x = \text{Baseline}_L = \frac{D}{\tan \beta_L} \quad (3.11)$$

となる。

次に奥行  $Y$  を求める。 $Y$  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  $\gamma$  を求める。 $\gamma$  が算出されれば  $Y$  座標は

$$y = D \cos(\gamma) \quad (3.12)$$

で求まる。

次に  $\gamma$  を算出する方法について述べる。

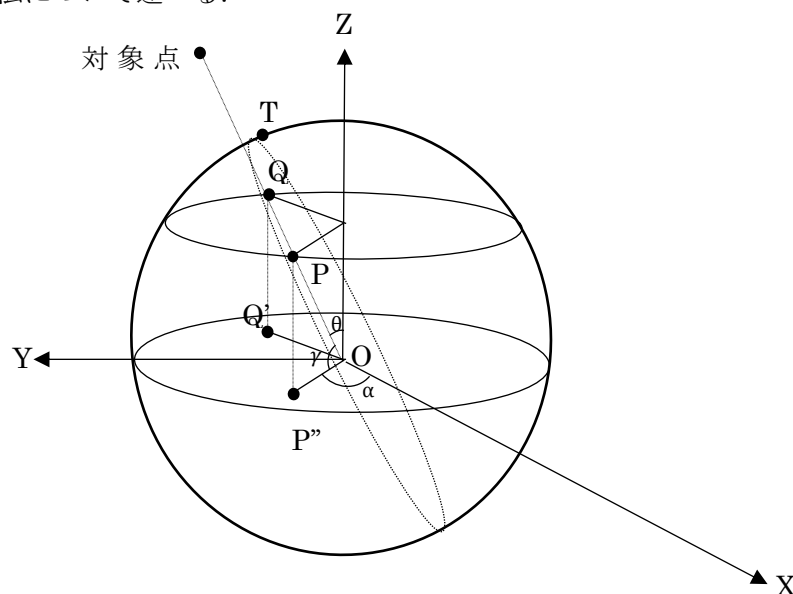


図 3.3  $\gamma$  の位置関係

対象点  $P$  が全天球カメラに入射する点  $P'$  と  $ZY$  平面から対称な点を  $Q'$  とする。また、カメラ中心  $O$  と  $P', Q'$  を通る平面と全天球カメラの球面の接点を  $T$  とする。  $T$  は  $Y$  軸上にある点であり  $Y$  軸から点  $T$  を見上げる角度は  $\gamma$  に等しい。点  $T$  は  $Y$  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。今考えている全天球カメラの球の半径を  $r$  とすると全天球カメラの中心から点  $T$  までの距離は  $r$  である。つまり点  $T$  の  $Y$  座標は

$$y_T = r \cos(\gamma) \quad (3.13)$$

と算出することができる。よって  $y_T$  が求まれば  $\gamma$  は

$$\gamma = \cos^{-1} \frac{y_T}{r} \quad (3.14)$$

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 (3.1) 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

$$Q' = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \theta \cos \alpha \\ \sin \alpha \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

である。中心  $O$  と  $P', Q'$  を通る平面と全天球カメラの球面の方程式を

$$ax + by + cz = 0 \quad (3.16)$$

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

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} &= P' \times Q' = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -\sin \theta \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \theta \sin \alpha \cos \theta - \sin \alpha \cos \theta \cos \theta \\ \cos \alpha \sin \theta \cos \theta + \cos \theta \cos \alpha \sin \theta \\ -\sin \alpha \cos \theta \cos \alpha \sin \theta - \cos \alpha \sin \theta \sin \alpha \cos \theta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ 2\cos \alpha \sin \theta \cos \theta \\ -2\sin \alpha \cos \theta \cos \alpha \sin \theta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.17)$$

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。全天球カメラの球面は中心  $O$  半径  $r$  の球なので



$$x + y + z = r^2 \quad (3.18)$$

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(3.16)と式(3.18)から

$$y_T = r \frac{|b|}{\sqrt{b^2 + c^2}} \quad (3.19)$$

$$z_T = \pm \sqrt{r^2 - y_T^2} \quad (3.20)$$

式(3.19)で  $y_T$  が算出されるので式(3.14)により  $\gamma$  が求まる. よって対象点  $P$  の  $y$  座標が式(3.12)から算出される. これで対象点  $P$  の  $x$  座標と  $y$  座標が既知となったので  $z$  座標は

$$z = \pm \sqrt{y^2 - x^2} \quad (3.21)$$

にて求まる.

また,  $\gamma$  は対象点を **Baseline** から見上げる角度であるため

$$\gamma = \frac{z}{y} = \frac{\cos \theta}{\sin \alpha \cos \theta} \quad (3.22)$$

でも求めることができる.

### 3.3.2 カメラ 2 台を前後にずらした場合

基本的な理論は 3.3.1 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

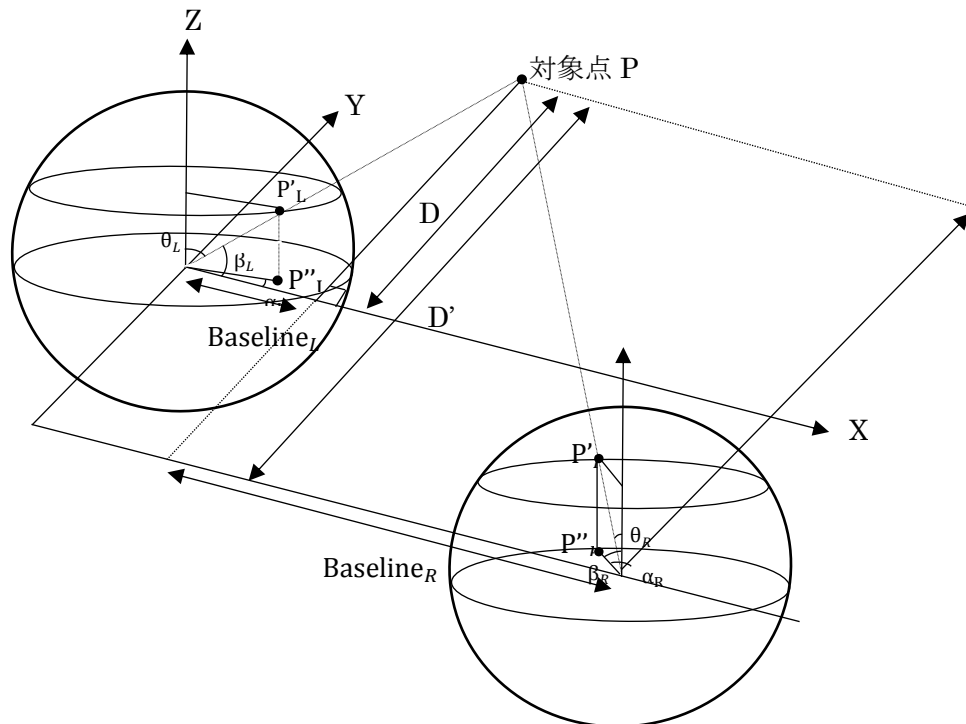


図 3.4 全天球カメラ 2 台を前後にずらした場合のモデル

図 3.4 のような場合でも基本的な式は式(3.19)と同様で

$$\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R = \frac{D}{\tan \beta_L} + \frac{D'}{\tan \beta_R} \quad (3.23)$$

となる. このとき  $D$  と  $D'$  の関係式を求める必要がある.

図 3.4 を YZ 平面からみると図 3.5 のようになる.

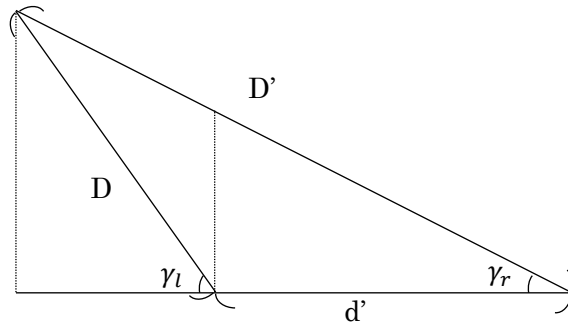


図 3.5 図 3.4 を YZ 平面から見た図

図 3.5 から  $D$  と  $D'$  は

$$D \cos(\gamma_l) + d = D' \cos(\gamma_r) \quad (3.24)$$

$$D' = \frac{D \cos(\gamma_l) + d}{\cos(\gamma_r)} \quad (3.25)$$

という関係式が導かれる. また式(4.21)と式(4.23)から

$$\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R = \frac{D}{\tan \beta_L} + \frac{\frac{D \cos(\gamma_l) + d}{\cos(\gamma_r)}}{\tan \beta_R} \quad (3.26)$$

$$D = \frac{\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R - \frac{d}{\cos(\gamma_r) \tan \beta_R}}{\frac{1}{\tan \beta_L} + \frac{\cos(\gamma_r)}{\cos(\gamma_r) \tan \beta_R}} \quad (3.27)$$

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 3.3.1 と同一の手法を用いる.

### 3.4 全天球画像における対応直線検出手法

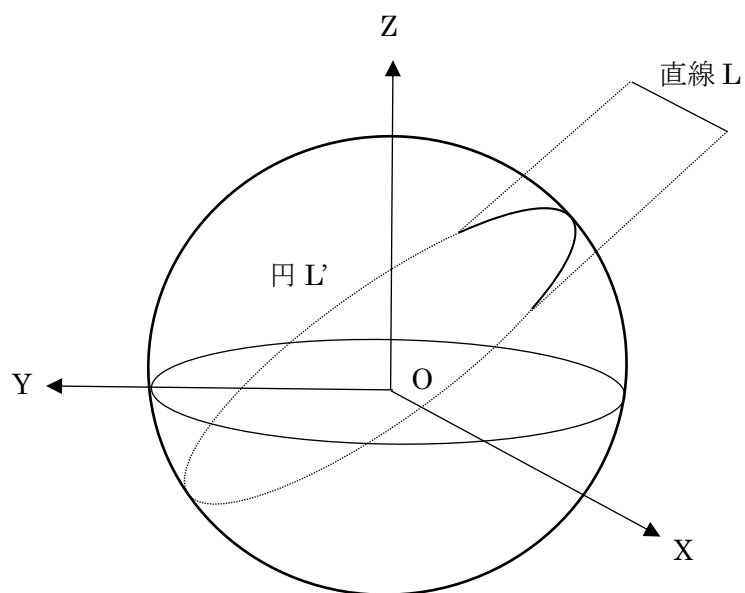


図 3.6 全天球カメラと直線の関係

まず全天球カメラと直線の関係について述べる．図 3.6 のように直線  $L$  が全天球カメラの中心  $O$  へ入射する平面と全天球カメラが交わる円を円  $L'$  とする．円  $L'$  上の実線で示した部分に画像平面では射影される．自明のことではあるが同一平面上の二点からなる法線ベクトルは平行である．この法線ベクトルが平行であることを用いて対応直線を検出する．全天球画像における対応直線検出手法のフローチャートを下の図 3.7 に示す．

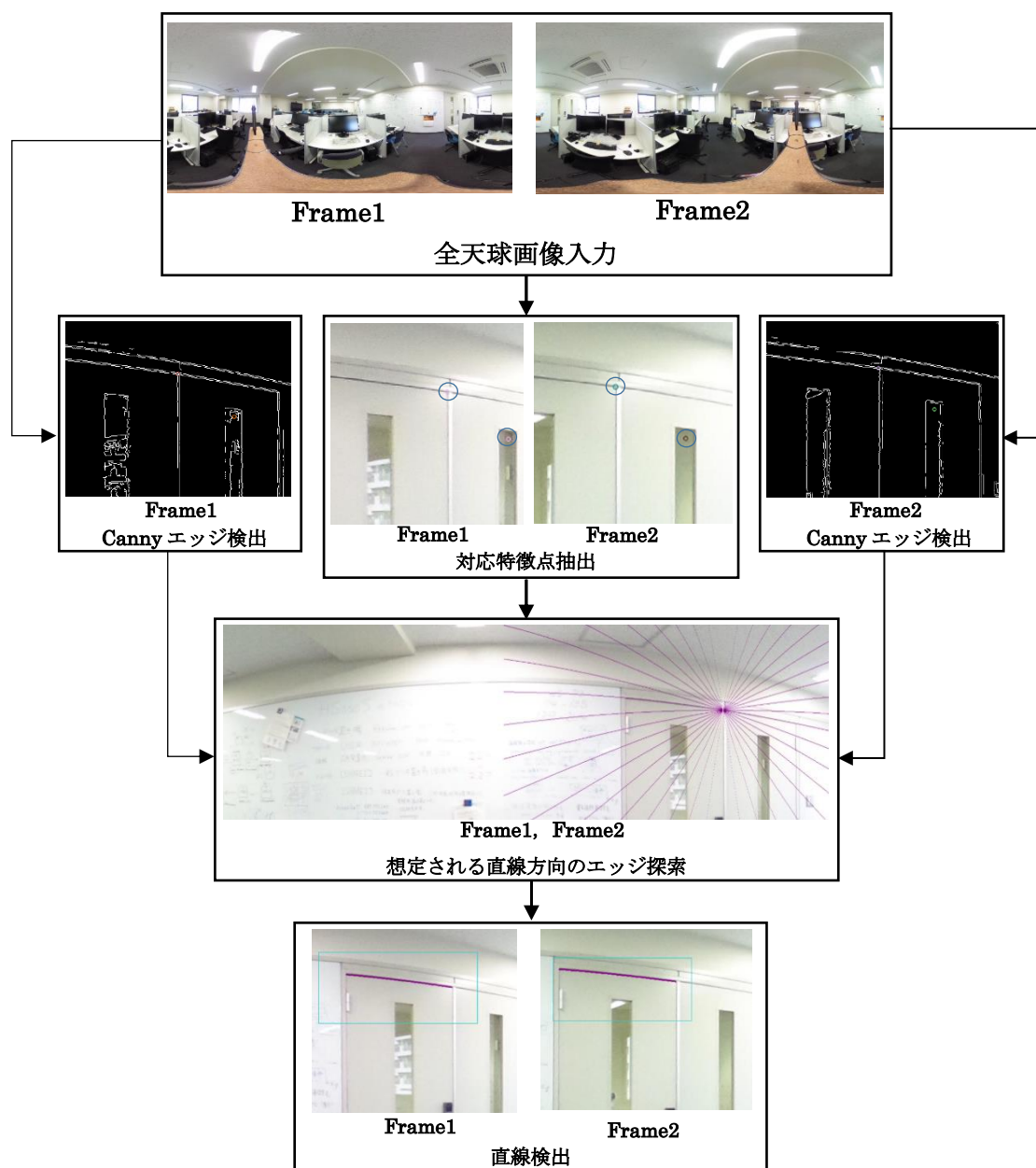


図 3.7 全天球画像における対応直線検出手法のフローチャート

図 3.7 について詳しく述べる。全天球画像二枚を入力後、対応特徴点を抽出すると同時にそれぞれの画像のエッジを検出する。その後、想定される直線方向のエッジを探索する。このエッジを探索手法について次に述べる。

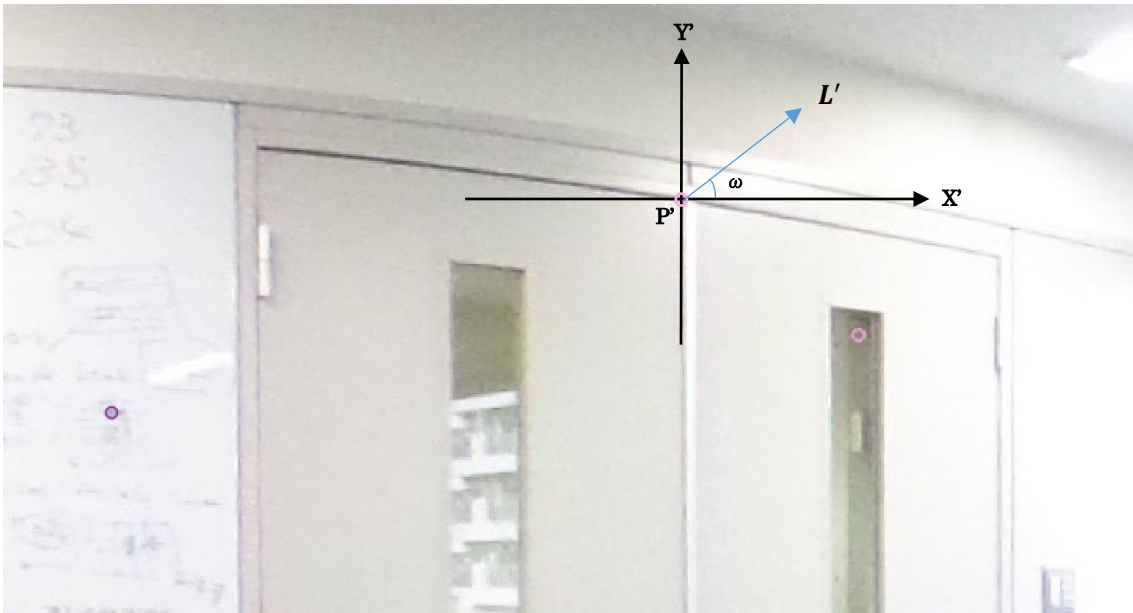


図 3.8 特徴点と想定される直線方向のベクトル

図 3.8 のように特徴点  $P'$  を中心として  $X'$  軸と  $Y'$  軸をとった時に想定される直線方向のベクトル  $L'$  と  $X'$  軸とのなす角度を  $\omega$  とする.  $\omega$  は  $0^\circ \leq \omega \leq 360^\circ$  の値の範囲をとる. 特徴点  $P'$  の座標を  $(x', y')$  とすると  $\omega$  を用いて正規化したベクトル  $L'$  は

$$L' = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' + \cos(\omega) \\ y' + \sin(\omega) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

と表せられる.

既に述べたように同一直線上のある二点をとったとき法線ベクトルは全て平行になる. 特徴点  $P'$  と想定される直線方向のベクトル  $L'$  からなる法線ベクトルを求める. 特徴点の全天球カメラ上での座標  $P''$  は式(3.3), 式(3.)から  $\alpha_{P'}$  と  $\theta_{P'}$  を求める. すると式(3.1)より

$$P'' = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_{P'} \cos \alpha_{P'} \\ \sin \theta_{P'} \sin \alpha_{P'} \\ \cos \theta_{P'} \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

ベクトル  $L'$  の終点の全天球カメラ上での座標を  $L''$  としたとき,  $P''$  と同様に

$$L'' = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_{L'} \cos \alpha_{L'} \\ \sin \theta_{L'} \sin \alpha_{L'} \\ \cos \theta_{L'} \end{pmatrix} \quad (3.30)$$

と表される.

次に  $P''$  と  $L''$  の外積を計算し法線ベクトル  $N$  を求める. 式(3.17)より

$$\begin{aligned}
\mathbf{N} &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{P}'' \times \mathbf{L}'' \\
&= \begin{pmatrix} \sin \theta_{P'} \cos \alpha_{P'} \\ \sin \theta_{P'} \sin \alpha_{P'} \\ \cos \theta_{P'} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \sin \theta_{L'} \cos \alpha_{L'} \\ \sin \theta_{L'} \sin \alpha_{L'} \\ \cos \theta_{L'} \end{pmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos \theta_{L'} \sin \theta_{P'} \sin \alpha_{P'} - \cos \theta_{P'} \sin \theta_{L'} \sin \alpha_{L'} \\ \cos \theta_{L'} \sin \theta_{P'} \cos \alpha_{P'} - \cos \theta_{P'} \sin \theta_{L'} \cos \alpha_{L'} \\ \sin \theta_{P'} \cos \alpha_{P'} \sin \theta_{L'} \sin \alpha_{L'} - \sin \theta_{P'} \sin \alpha_{P'} \sin \theta_{L'} \cos \alpha_{L'} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.31}$$

$\mathbf{L}'$ の1 pixel 横にあり全天球カメラ上の座標と  $\mathbf{L}''$ の法線ベクトルが  $\mathbf{N}$ と平行になる点を  $\mathbf{K}'$ とする。  $\mathbf{K}'$ の  $X'$ 座標  $K'_x$ は

$$\begin{aligned}
K'_x &= x' + \cos(\omega) + 1 \quad (\cos(\omega) \geq 0 \text{ のとき}) \\
K'_x &= x' + \cos(\omega) - 1 \quad (\cos(\omega) < 0 \text{ のとき})
\end{aligned} \tag{3.32}$$

である。

直線検出をするためには  $\mathbf{K}'$ の  $Y'$ 座標  $K'_y$ を求める必要がある。画像平面上にある  $\mathbf{K}'$ は全天球カメラ上では式(3.1)より

$$\mathbf{K}'' = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_{K'} \cos \alpha_{K'} \\ \sin \theta_{K'} \sin \alpha_{K'} \\ \cos \theta_{K'} \end{pmatrix} \tag{3.33}$$

である。式(3.33)において式(3.3)と式(3.32)から  $\alpha_{K'}$ は

求まるが  $\theta_{K'}$ は未知数である。  $\mathbf{K}''$ と  $\mathbf{L}''$ の法線ベクトルは  $\mathbf{N}$ と平行になるため  $\mathbf{K}''$ と  $\mathbf{L}''$ の外積から求めた法線ベクトルを  $\mathbf{M}$ とすると式(3.31)と同様に

$$\begin{aligned}
\mathbf{M} &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{L}'' \times \mathbf{K}'' \\
&= \begin{bmatrix} \cos \theta_{L'} \sin \theta_{K'} \sin \alpha_{K'} - \cos \theta_{K'} \sin \theta_{L'} \sin \alpha_{L'} \\ \cos \theta_{L'} \sin \theta_{K'} \cos \alpha_{K'} - \cos \theta_{K'} \sin \theta_{L'} \cos \alpha_{L'} \\ \sin \theta_{K'} \cos \alpha_{K'} \sin \theta_{L'} \sin \alpha_{L'} - \sin \theta_{K'} \sin \alpha_{K'} \sin \theta_{L'} \cos \alpha_{L'} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.34}$$

式(3.31)の  $\mathbf{N}$ と式(3.34)の  $\mathbf{M}$ が平行であるため

$$N_x M_y = N_y M_x \tag{3.35}$$

という方程式が成り立つ。これを  $\theta_{K'}$ について解くと

$$\theta_{K'} = \tan^{-1} \frac{N_x \sin \theta_{L'} \cos \alpha_{L'} + N_y \sin \theta_{L'} \sin \alpha_{L'}}{N_x \cos \theta_{L'} \cos \alpha_{K'} + N_y \cos \theta_{L'} \sin \alpha_{K'}} \tag{3.36}$$

式(3.36)から $\theta_{K'}$ が求まったことから式(3.4)から  $K'$ の Y座標 $K'_y$ が

$$K'_y = \frac{2 \theta_{K'} L_{height}}{\pi} \quad (3.36)$$

と求まる.

式(3.32)と式(3.36)から  $K'$ が求まった. この  $K'$ 上にエッジが存在しているかエッジ検出画像から判断する. その後  $K'$ を  $L'$ として同様に新しい  $K'$ を求め, 想定される直線をエッジ検出画像から辿っていく. エッジが存在しない  $K'$ が連続して複数点存在した場合直線が終了したと判断しある値の  $\omega$ に関する探索を終了する.  $0^\circ \leq \omega \leq 360^\circ$ の値の範囲で  $\omega$ を変動させ上記の探索を行う. 探索される全直線を図示したものを図 3.9 に示す.

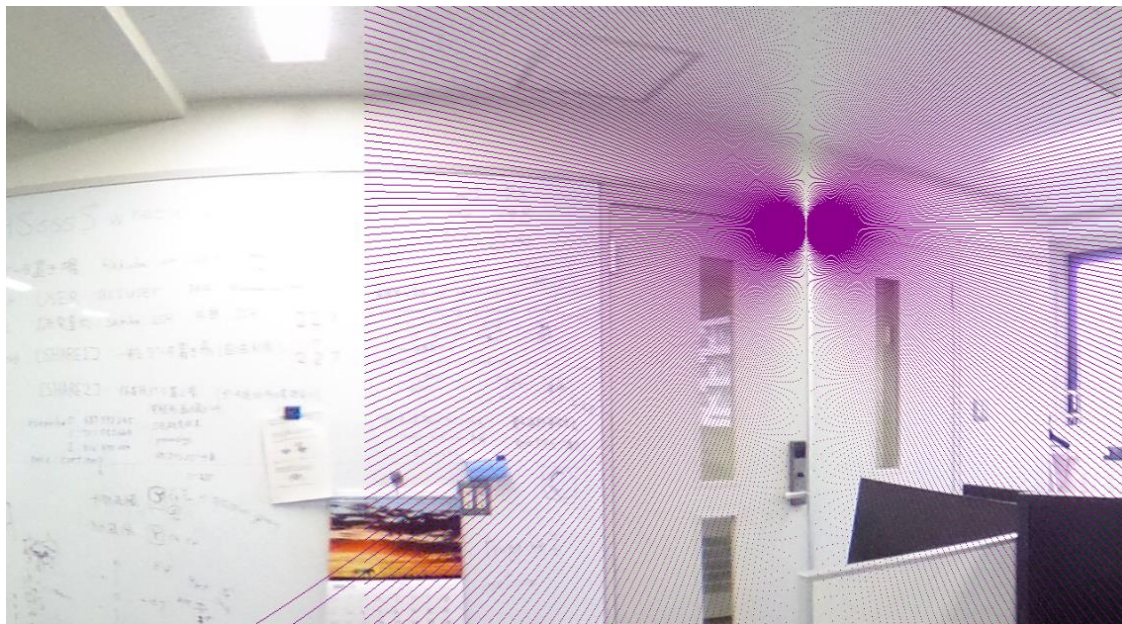


図 3.9  $0^\circ \leq \omega \leq 360^\circ$ で変動させたときの探索する曲線 1

図 3.9 はエッジにおける探索終了条件を設定しないで探索する曲線を全て図示したものである. 図 3.9 の特徴点から始まる曲線が実空間において想定される直線方向である. 図 3.9 は曲線が多く見づらいため曲線を減らしたものを図 3.10 に示す.



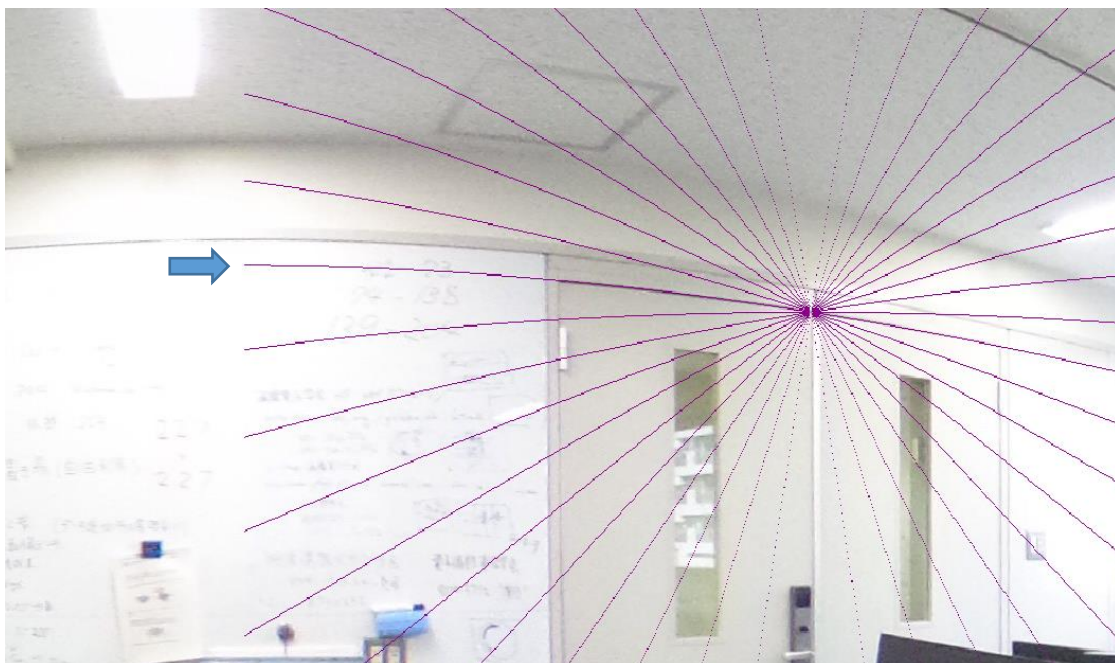


図 3.10  $0^\circ \leq \omega \leq 360^\circ$  で変動させたときの探索する曲線 2

図 3.10 の矢印で示した曲線がドアの上部の部分に乗っていることが分かる．つまりこの曲線が特徴点 P の乗っている実空間の直線である．図 3.9 で示した曲線上にエッジが連続で何点存在しているかを探索し，一番長く連続点が存在している曲線を求める．ただし，曲線上にエッジが連続で何点存在しているかを探索するが連続点の数が極端に少ない曲線(10点未満)は連続点の数が 0 と処理する．

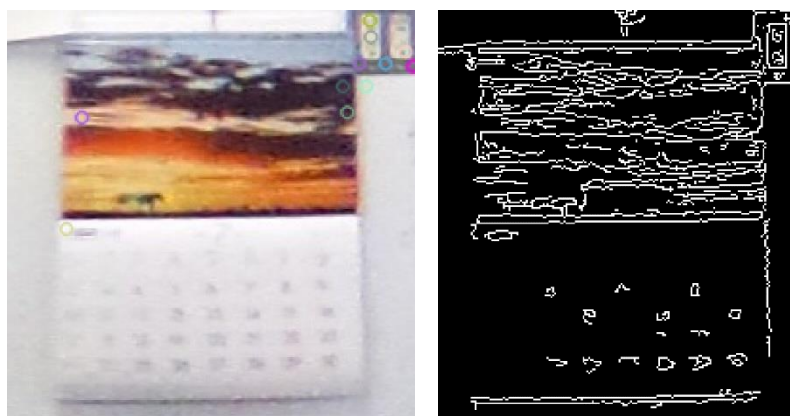


図 3.11 エッジ検出前とエッジ検出後の画像

連続点の数が極端に少ない曲線(10点未満)は連続点の数が 0 とする．これは図 3.11 のようにエッジ点が集中している箇所であれば，どの曲線が正しい軸空間における直線部分なのか判断するかが難しいためである．



### 3.5 対応直線を用いた全天球カメラの自己位置推定手法

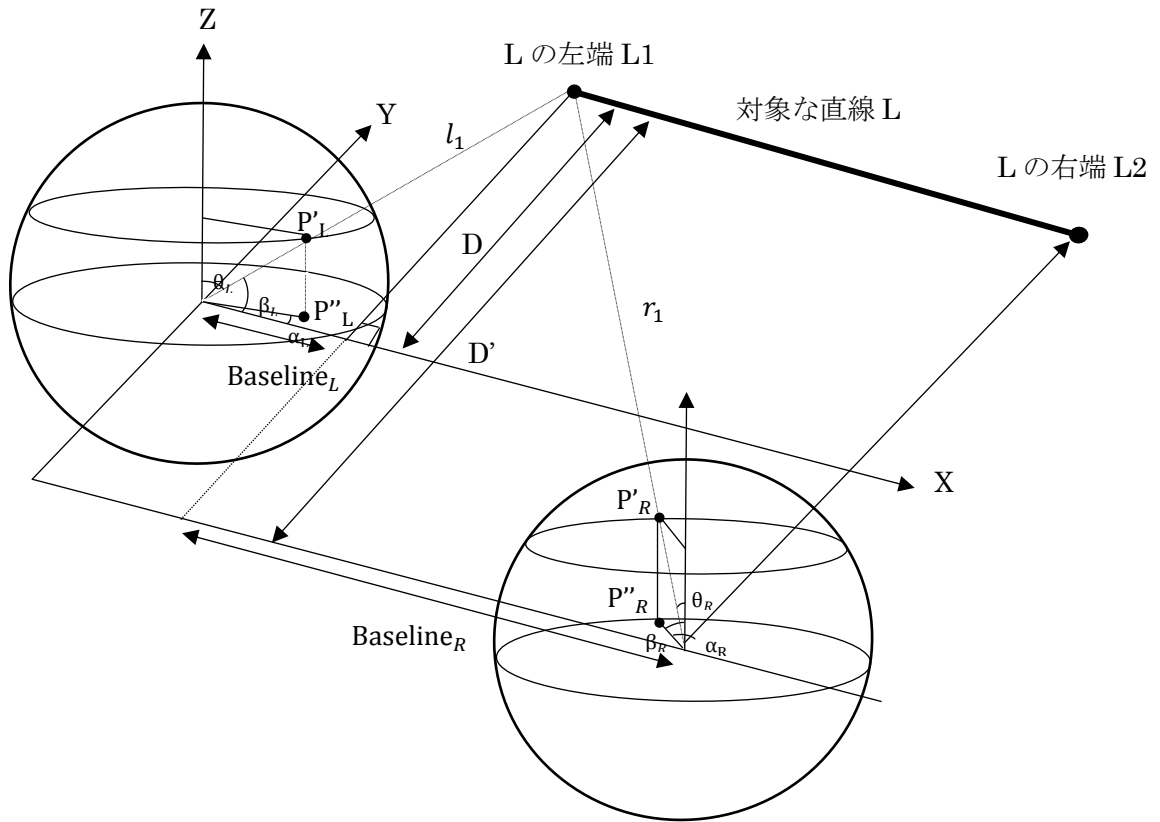


図 3.12 全天球カメラ二台と対象な直線 L の関係

図 3.12 の左側の全天球カメラの中心座標を  $(x, y, z) = (0, 0, 0)$  とし、右側のカメラの全天球カメラの中心座標を  $(x, y, z) = (s, t, u)$  とする。また、対象な直線 L の左端の点 L1 から左側の全天球カメラの中心へ入射する直線の長さを  $l_1$ 、同様に L1 から右側の全天球カメラの中心へ入射する直線の長さを  $r_1$  とする。このとき左右全天球カメラが同一方向を向いている場合の L1 の座標に関して次の式(3.37)の方程式が成り立つ。

$$L1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 \cos \alpha_{l1} \sin \theta_{l1} \\ l_1 \sin \alpha_{l1} \sin \theta_{l1} \\ l_1 \cos \theta_{l1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s + r_1 \cos \alpha_{r1} \sin \theta_{r1} \\ t + r_1 \sin \alpha_{r1} \sin \theta_{r1} \\ u + r_1 \cos \theta_{r1} \end{pmatrix} \quad (3.37)$$

対象な直線 L の右端の点 L2 から左側の全天球カメラの中心へ入射する直線の長さを  $l_2$ 、L1 から右側の全天球カメラの中心へ入射する直線の長さを  $r_2$  とすると式(3.37)と同様に

$$L2 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} l_2 \cos \alpha_{l2} \sin \theta_{l2} \\ l_2 \sin \alpha_{l2} \sin \theta_{l2} \\ l_2 \cos \theta_{l2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s + r_2 \cos \alpha_{r2} \sin \theta_{r2} \\ t + r_2 \sin \alpha_{r2} \sin \theta_{r2} \\ u + r_2 \cos \theta_{r2} \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

という方程式が成り立つ。しかし、実際の状況においてカメラが同一方向を向いていること

は考えにくい. よって左右の全天球カメラが同一方向を向いていない場合を考える. また, ジャイロセンサを用いることで  $ZY$  平面上の回転と  $XZ$  平面上の回転は考慮する必要がない. よって  $XY$  平面上の回転のみ考慮すればよい.

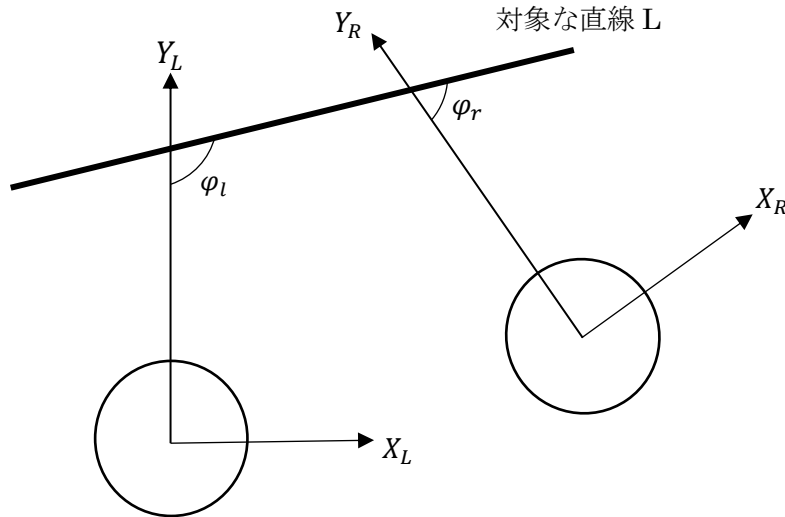


図 3.13  $XY$  平面から見た全天球カメラ二台と対象な直線  $L$  の関係

図 3.13 は図 3.12 を  $XY$  平面からみた図である. 左側の全天球カメラが向いている方向を  $Y_L$  軸とし, 右側の全天球カメラの向いている方向を  $Y_R$  軸とする. このとき  $Y_L$  軸と対象な直線  $L$  がなす角を  $\varphi_l$ ,  $Y_R$  軸と対象な直線  $L$  がなす角を  $\varphi_r$  とする.  $\varphi_l$  と  $\varphi_r$  を使って式(3.37)と式(3.38)は

$$L1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 \cos(\alpha_{l1} + \varphi_l) \sin \theta_{l1} \\ l_1 \sin(\alpha_{l1} + \varphi_l) \sin \theta_{l1} \\ l_1 \cos \theta_{l1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s + r_1 \cos(\alpha_{r1} + \varphi_r) \sin \theta_{r1} \\ t + r_1 \sin(\alpha_{r1} + \varphi_r) \sin \theta_{r1} \\ u + r_1 \cos \theta_{r1} \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

$$L2 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} l_2 \cos(\alpha_{l2} + \varphi_l) \sin \theta_{l2} \\ l_2 \sin(\alpha_{l2} + \varphi_l) \sin \theta_{l2} \\ l_2 \cos \theta_{l2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s + r_2 \cos(\alpha_{r2} + \varphi_r) \sin \theta_{r2} \\ t + r_2 \sin(\alpha_{r2} + \varphi_r) \sin \theta_{r2} \\ u + r_2 \cos \theta_{r2} \end{pmatrix} \quad (3.40)$$

と変換することができる. 式(3.39)と式(3.40)において  $\varphi_l$  と  $\varphi_r$  を求めておけば変数の数は合わせて  $(r_1, l_1, r_2, l_2, s, t, u)$  の 7 個. 方程式の数は 6 個である. あともう 1 個の対象点について方程式を立てると変数は  $(r_3, l_3)$  の 2 個増えるが方程式の数は 3 個増えるため変数の数と方程式の数が同一になる. よって方程式を解くことができ  $(r_1, l_1, r_2, l_2, r_3, l_3, s, t, u)$  の値を求められる.  $(s, t, u)$  の値が求まることで全天球カメラの自己位置推定が行えたことになる. ここで方程式を解く上で前提としておいていた  $\varphi_l$  と  $\varphi_r$  の求め方について述べる. 式(3.39)と式(3.40)の式において対象な直線が水平であったとき, 左側の全天球カメラに関して次の方程式が成り立つ.

$$\frac{L1_z}{L1_y} = \frac{L2_y}{L2_z} \quad (3.41)$$

$$\frac{l_1 \cos \theta_{l1}}{l_1 \sin(\alpha_{l1} + \varphi_l) \sin \theta_{l1}} = \frac{l_2 \cos \theta_{l2}}{l_2 \sin(\alpha_{l2} + \varphi_l) \sin \theta_{l2}}$$

同様に右側の全天球カメラに関して

$$\frac{r_1 \cos \theta_{r1}}{r_1 \sin(\alpha_{r1} + \varphi_r) \sin \theta_{r1}} = \frac{r_2 \cos \theta_{r2}}{r_2 \sin(\alpha_{r2} + \varphi_r) \sin \theta_{r2}} \quad (3.42)$$

が成り立つ。式(3.41)と式(3.42)を $l_1 = 1$ としてそれぞれ $\theta_l$ と $\theta_r$ について解くと

$$\varphi_l = \tan^{-1} \frac{\sin \theta_{l1} \sin(\alpha_{l1} + \varphi_l) - \frac{\cos \theta_{l1}}{\cos \theta_{l2}} \sin \theta_{l2} \sin(\alpha_{l2} + \varphi_l)}{\sin \theta_{l1} \cos(\alpha_{l1} + \varphi_l) - \frac{\cos \theta_{l1}}{\cos \theta_{l2}} \sin \theta_{l2} \cos(\alpha_{l2} + \varphi_l)} \quad (3.43)$$

$$\varphi_r = \tan^{-1} \frac{\sin \theta_{r1} \sin(\alpha_{r1} + \varphi_r) - \frac{\cos \theta_{r1}}{\cos \theta_{r2}} \sin \theta_{r2} \sin(\alpha_{r2} + \varphi_r)}{\sin \theta_{r1} \cos(\alpha_{r1} + \varphi_r) - \frac{\cos \theta_{r1}}{\cos \theta_{r2}} \sin \theta_{r2} \cos(\alpha_{r2} + \varphi_r)} \quad (3.44)$$

となる。

ここで $\varphi_l$ と $\varphi_r$ が求められたため既に記述したとおり式(3.39)や式(3.40)の式が三つ成り立てば全天球カメラの自己位置推定を行うことができる。具体的には対象点3点P1, P2, P3についてそれぞれ式(3.39)や式(3.40)のように方程式を立てると、

$$P1 = \begin{bmatrix} P1_x \\ P1_y \\ P1_z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 \cos(\alpha_{l1} + \varphi_l) \sin \theta_{l1} \\ l_1 \sin(\alpha_{l1} + \varphi_l) \sin \theta_{l1} \\ l_1 \cos \theta_{l1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s + r_1 \cos(\alpha_{r1} + \varphi_r) \sin \theta_{r1} \\ t + r_1 \sin(\alpha_{r1} + \varphi_r) \sin \theta_{r1} \\ u + r_1 \cos \theta_{r1} \end{pmatrix} \quad (3.45)$$

$$P2 = \begin{bmatrix} P2_x \\ P2_y \\ P2_z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} l_2 \cos(\alpha_{l2} + \varphi_l) \sin \theta_{l2} \\ l_2 \sin(\alpha_{l2} + \varphi_l) \sin \theta_{l2} \\ l_2 \cos \theta_{l2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s + r_2 \cos(\alpha_{r2} + \varphi_r) \sin \theta_{r2} \\ t + r_2 \sin(\alpha_{r2} + \varphi_r) \sin \theta_{r2} \\ u + r_2 \cos \theta_{r2} \end{pmatrix} \quad (3.46)$$

$$P3 = \begin{bmatrix} P2_x \\ P2_y \\ P2_z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} l_3 \cos(\alpha_{l3} + \varphi_l) \sin \theta_{l3} \\ l_3 \sin(\alpha_{l3} + \varphi_l) \sin \theta_{l3} \\ l_3 \cos \theta_{l3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s + r_3 \cos(\alpha_{r3} + \varphi_r) \sin \theta_{r3} \\ t + r_3 \sin(\alpha_{r3} + \varphi_r) \sin \theta_{r3} \\ u + r_3 \cos \theta_{r3} \end{pmatrix} \quad (3.47)$$

式(3.45)を $[l_1 P1_{lx}, l_1 P1_{ly}, l_1 P1_{lz}]^T = [s + r_1 P1_{rx}, t + r_1 P1_{ry}, u + r_1 P1_{rz}]^T$ とする。同様に式(3.46)を $[l_2 P2_{lx}, l_2 P2_{ly}, l_2 P2_{lz}]^T = [s + r_2 P2_{rx}, t + r_2 P2_{ry}, u + r_2 P2_{rz}]^T$ とし、式(3.47)を $[l_3 P3_{lx}, l_3 P3_{ly}, l_3 P3_{lz}]^T = [s + r_3 P3_{rx}, t + r_3 P3_{ry}, u + r_3 P3_{rz}]^T$ とする。式(3.45), 式(3.46), 式(3.47)の方程式において $l_1 = 1$ として係数行列と変数の行列に分けて連立方程式を立てると

$$\begin{bmatrix} P1_{rx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ P1_{ry} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ P1_{rz} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & P2_{lx} & P2_{rx} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & P2_{ly} & P2_{ry} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & P2_{lz} & P2_{rz} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & P3_{lx} & P3_{rx} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P3_{lx} & P3_{rx} & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ l_2 \\ r_2 \\ l_3 \\ r_3 \\ s \\ t \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P1_{lx} \\ P1_{ly} \\ P1_{lz} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

式(3.48)の行列方程式がたつたためこの方程式を解くには係数行列の逆行列を両辺にかければよい。つまり、

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ l_2 \\ r_2 \\ l_3 \\ r_3 \\ s \\ t \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P1_{rx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ P1_{ry} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ P1_{rz} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & P2_{lx} & P2_{rx} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & P2_{ly} & P2_{ry} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & P2_{lz} & P2_{rz} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & P3_{lx} & P3_{rx} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P3_{lx} & P3_{rx} & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P1_{lx} \\ P1_{ly} \\ P1_{lz} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

と方程式を解くことができる。解の行列の中の $[s, t, u]^T$ が全天球カメラの位置を表すパラメータである。今回得られた $[s, t, u]^T$ の全天球カメラの位置情報は $l_1 = 1$ として方程式を解いているため実際の位置情報を表しているわけではなく相対的な位置情報を表している。つまり得られた $[s, t, u]^T$ のパラメータの定数倍が実際の位置関係を表すことになる。

### 3.6 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、対応直線検出を行う手法、対応直線を用いた全天球カメラの自己位置推定手法について述べた。

第4章では、本章で述べた提案手法の評価実験を行う。

## 第4章 提案手法の評価実験と結果, 考察

### 4.1 まえがき

本章では, CG 画像を用いて第 3 章で説明した提案手法の評価実験を行う. さらに実際に全天球カメラで撮影した画像を用いて実験を行う.

### 4.2 実験の概要

提案手法の評価実験として, 3 種類の実験を CG 画像と実際の撮影した画像でそれぞれ行う. まず一つ目の実験では入力した二つの画像から対応直線を検出する実験を行う. 二つ目は一つ目の実験で検出した対応直線からカメラの自己位置推定を行う. 三つ目は二つ目の実験で推定したカメラの自己位置情報を元に 3 次元再構成を行う.

#### 4.2.1 実験 1

実験 1 では, 入力した二つの画像において提案手法で述べた手法を用いて対応直線を検出できるかを確認する. CG で作成した画像と実際に全天球カメラで撮影した画像を用いて実験を行った. CG で作成した画像は一種類, 実際に全天球カメラで撮影した画像は四種類用いた.

#### 4.2.2 実験 2

実験 2 では, 実験 1 で検出した対応直線を用いて提案手法で述べたカメラの自己位置推定手法の有効性を確認した. 実験 1 と同様に CG で作成した画像と実際に全天球カメラで撮影した画像を用いて実験を行った. CG で作成した画像は一種類, 実際に全天球カメラで撮影した画像は 3 種類用いた.

#### 4.2.3 実験 3

実験 3 では, 実験 2 で推定した自己位置を用いて提案手法で述べた全天球画像を用いた 3 次元再構成手法の有効性を確認した. 実験 1, 実験 2 と同様 CG で作成した画像と実際に全天球カメラで撮影した画像を用いて実験を行った. CG で作成した画像も実際に全天球カメラで撮影した画像どちらも 1 種類ずつ用いた.

### 4.3 実験の条件

実験 1 から実験 3 を行った環境や条件を以下に示す.

#### 4.3.1 実験環境

実験 1 から実験 5 を行った環境を以下の表 4.1 に示す.

表 4.1 実験環境

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

#### 4.3.2 カメラの配置環境

実験 1, 実験 2, 実験 3 で使用した画像を作成および撮影したカメラの配置環境について以下に示す.

##### 4.3.2.1 CG 画像で作成した画像のカメラ配置環境

左側の全天球カメラの中心座標を  $(x, y, z) = (0, 0, 0)$  としたとき右側の全天球カメラの中心座標  $(x, y, z) = (s, t, u)$  について以下の表 4.2 に示す. 実験 3 ではチェッカーボードを配置して距離測定手法の有効性を確認する. 表 4.2 にある  $L$  は実験 3 で配置したチェッカーボードと左側の全天球カメラとの距離,  $\varphi_l, \varphi_r$  は 3.5 で述べた直線方向を向くように補正する角度である.

表 4.2 実験 1, 実験 2, 実験 3 で使用した CG 画像の作成環境

	s [cm]	t [cm]	u [cm]	L [cm]	$\varphi_l$ [degree]	$\varphi_r$ [degree]
実験 1	9	-2	-1	-	0	30
実験 2	9	-2	-1	-	0	30
実験 3	9	-2	-1	5	0	30

##### 4.3.2.2 実際に撮影した全天球カメラの配置環境

実際に全天球カメラで撮影した画像は全部で 4 種類用いた. 直線検出のみにしか用いなかった画像を A, 直線検出と自己位置推定のみに使用した画像を B, C とする. 3 種類の実験全てに用いた画像を D とする. 4.3.2.1 と同様に左側の全天球カメラの中心座標を  $(x, y, z) = (0, 0, 0)$  としたとき右側の全天球カメラの中心座標  $(x, y, z) = (s, t, u)$  について以下の表 4.4 に示す. 表 4.3 にある  $L$  は実験 3 で配置したチェッカーボードと左側の全天球カメラとの距離,  $\varphi_l, \varphi_r$  は 3.5 で述べた直線方向を向くように補正する角度である.

表 4.3 実験 1, 実験 2, 実験 3 で使用した実際に全天球カメラで撮影した撮影環境

	s [cm]	t [cm]	u [cm]	L [cm]	$\varphi_l$ [degree]	$\varphi_r$ [degree]
A	-	-	-	-	0	30
B	32	0	0	-	-	-
C	32	-18.5	0	-	-	-
D	9.3	-1.1	0	9.7	2	0

### 4.3.3 実験に用いた画像

実験 1, 実験 2, 実験 3 で用いた画像を以下で示す.

#### 4.3.3.1 CG で作成した画像

実験 1, 実験 2, 実験 3 で使用した CG で作成した画像を図 4.1 で示す.

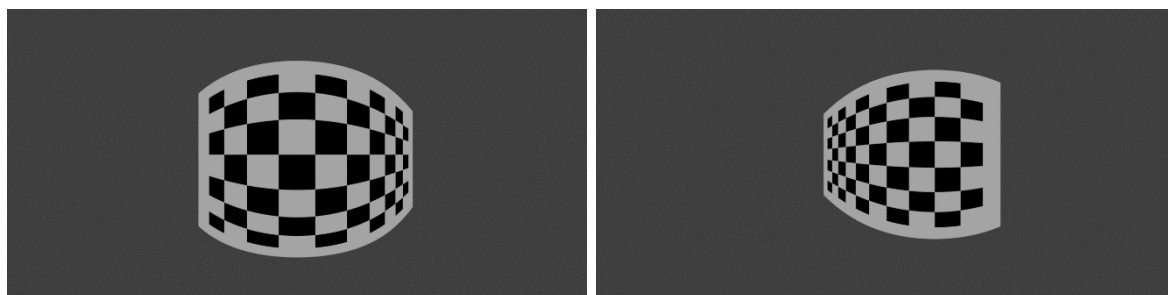


図 4.1 CG で作成した左右の全天球画像

図 4.1 の左側の画像は全天球カメラの向きがチェッカーボードに垂直になるように作成した. それに対して右側の画像は全天球カメラの向きとチェッカーボードがなす角を  $30^\circ$  になるように作成した.

#### 4.3.3.2 実際に撮影した画像

実験 1, 実験 2, 実験 3 で使用した実際に撮影した全天球画像 A を図 4.2, B を図 4.3, C を図 4.4, D を図 4.5 に示す.



図 4.2 実際に撮影した全天球画像 A



図 4.3 実際に撮影した全天球画像 B



図 4.4 実際に撮影した全天球画像 C

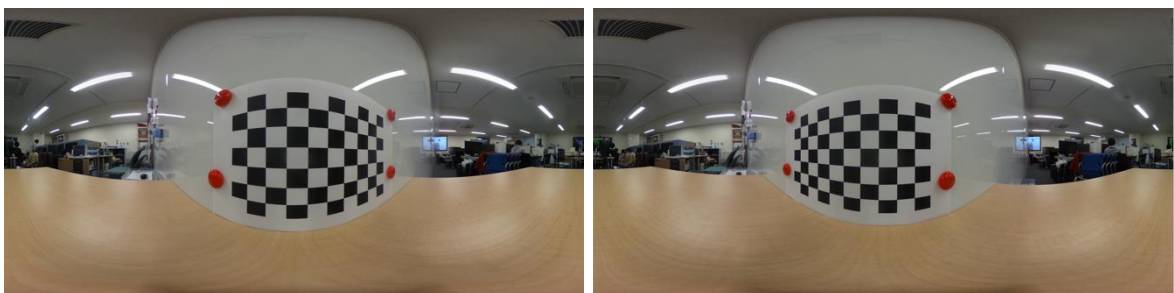


図 4.5 実際に撮影した全天球画像 D



#### 4.4 実験結果と考察

実験 1, 実験 2, 実験 3 の実験結果を示す.

##### 4.4.1 実験 1 の結果

実験 1 の対応直線検出を行う実験において図 4.1 の CG 画像を入力した際の結果, 実際に撮影した画像図 4.2, 図 4.3, 図 4.4, 図 4.5 を入力した結果を示す.

##### 4.4.1.1 CG 画像での実験結果

図 4.1 の画像で検出された対応直線を図 4.6 に示す. 図 4.6 の左右の画像において対応する直線同士を同色で示している.

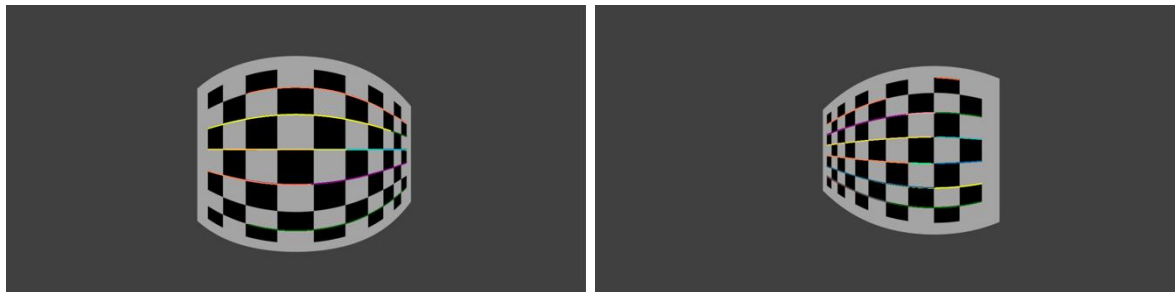


図 4.6 CG で作成した全天球画像における対応直線検出結果

##### 4.4.1.2 実際に撮影した画像での実験結果

図 4.2 の画像で検出された対応直線を図 4.7 に, 図 4.7 の画像において一部を拡大した画像を図 4.8 に示す. 同様に図 4.3, 図 4.4, 図 4.5 の画像で検出された対応直線をそれぞれ図 4.9, 図 4.11, 図 4.13 に, 図 4.9, 図 4.11, 図 4.13 の画像において一部を拡大した画像をそれぞれ図 4.10, 図 4.12, 図 4.14 に示す. 図 4.6 と同様に左右の画像において対応する直線同士を同色で示している. コメント (色がわかりにくい)



図 4.7 実際に撮影した全天球画像 A における対応直線検出結果



図 4.8 図 4.7 の一部を拡大した画像



図 4.9 実際に撮影した全天球画像 B における対応直線検出結果

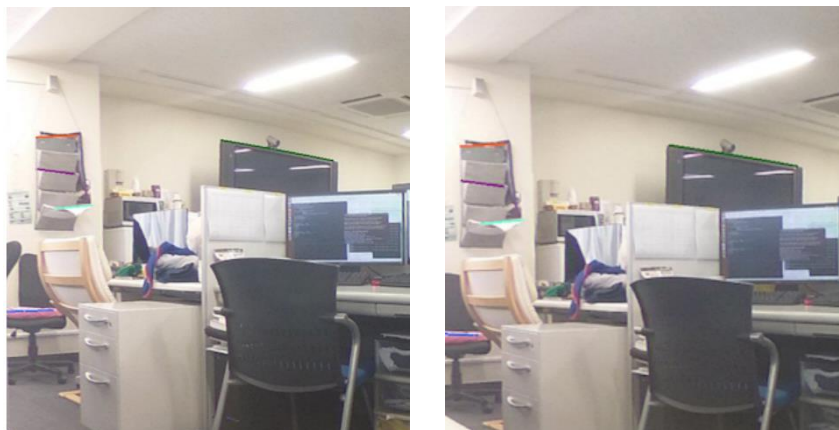


図 4.10 図 4.9 の一部を拡大した画像



図 4.11 実際に撮影した全天球画像 C における対応直線検出結果

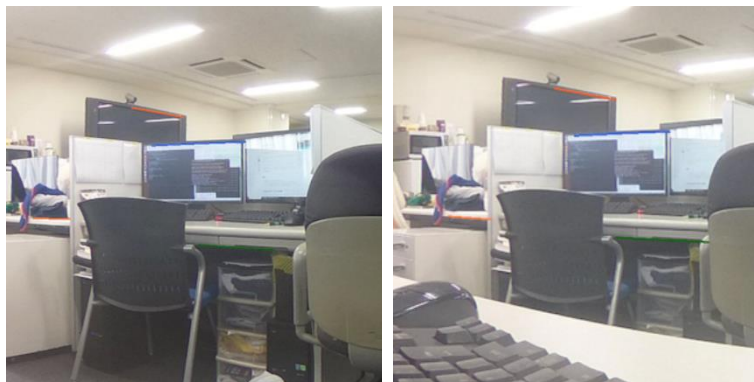


図 4.12 図 4.11 の一部を拡大した画像

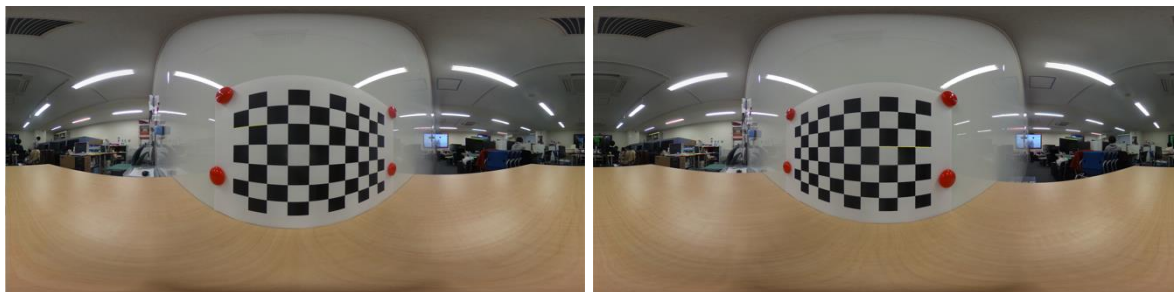


図 4.13 実際に撮影した全天球画像 D における対応直線検出結果



図 4.14 図 4.13 の一部を拡大した画像

図 4.7 から図 4.14 で検出できた対応特徴点の数と対応直線の数まとめたものを次の表 4.4 に示す.

表 4.4 検出できた対応特徴点の数と対応直線の数

画像	対応特徴点数 [個]	対応直線数[本]	処理時間[sec]
CG	39	24	15.298
A	281	34	74.938
B	66	8	30.610
C	35	6	24.733
D	607	82	124.428

#### 4.4.2 実験 1 の考察

図 4.7 から図 4.14 までに結果から対応直線が検出できていることが分かる. しかし, 画像内に存在するすべての直線が検出できているわけではない. 表 4.4 から分かるように検出できた対応特徴点の数に対して対応直線の数はかなり少ない. これは 3.4 で述べたように直線の長さがある長さに満たない場合は直線と判断しないという処理を行っているためだと考えられる. 検出できる対応直線の数に対応特徴点の数に対して少ないが, 直線が一本検出できれば実験 2 で行う自己位置推定は行えるため問題はない. また, 処理時間に関しては対応特徴点全てに関して直線検出の処理を行っているため対応特徴点の数が増えると処理時間が長くなる.

#### 4.4.3 実験 2 の結果

実験 1 で検出した対応直線を元に自己位置推定を行う. 実験 2 で用いる画像は CG 画像と実際に撮影した画像 B, C, D である. それぞれの画像において自己位置推定を行った結果を表で示す.

##### 4.4.3.1 CG 画像での実験結果

図 4.1 の画像で検出された対応直線である図 4.6 に示された直線を用いて自己位置推定を行った結果を表 4.5 に示す. 3.5 で述べた通り本手法で推定できる自己位置の情報は相対的な位置関係である. 実験によって得られた自己位置の情報が正しく推定できるかを確認するために右の全天球カメラ中心の  $x$  座標  $s$  は正しくは 9[cm]であることから, 得られた自己位置のパラメータを全て  $9/s$  倍したものを結果として示す. 表 4.5 では理想値と実験結果との誤差も示すが  $s$  に関しては理想値と一致するよう処理をしているため誤差は計算しない.

表 4.5 CG 画像で自己位置推定を行った結果

	s [cm]	t [cm]	u [cm]	$\varphi_l$ [degree]	$\varphi_r$ [degree]
理想値	9	-2	-1	0	30
実験結果	9	-1.96	-1.02	0.0803	30.289
誤差	-	0.04	-0.02	0.083	0.289

#### 4.4.3.2 実際に撮影した画像 B での実験結果

図 4.2 の実際に撮影した画像 B で検出された対応直線である図 4.7 に示された直線を用いて自己位置推定を行った結果を表 4.6 に示す. 4.4.3.1 と同様に実験によって得られた自己位置の情報が正しく推定できるかを確認するために右の全天球カメラ中心の  $x$  座標  $s$  が理想値になるように得られた自己位置のパラメータを全て定数倍したものを結果として示す.

表 4.6 実際に撮影した画像 B で自己位置推定を行った結果

	s [cm]	t [cm]	u [cm]	$\varphi_l$ [degree]	$\varphi_r$ [degree]
理想値	32	0	0	-	-
実験結果	32	2.358	-0.185	-58.537	-56.452
誤差	-	2.358	-0.185	-	-

実際に撮影した画像 B での実験では二つの全天球カメラの向きが同一方向を向くように設置して撮影を行った. よって,  $\varphi_l$  と  $\varphi_r$  の値が同一になることが理想である.

次に自己位置推定を行うために用いた検出した対応直線を図 4.15 に対応特徴点を図 4.16 に示す.



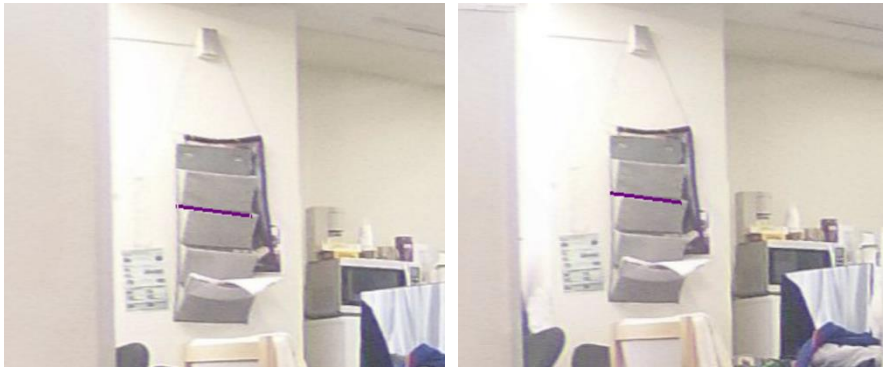


図 4.15 自己位置推定を行うために用いた検出した対応直線

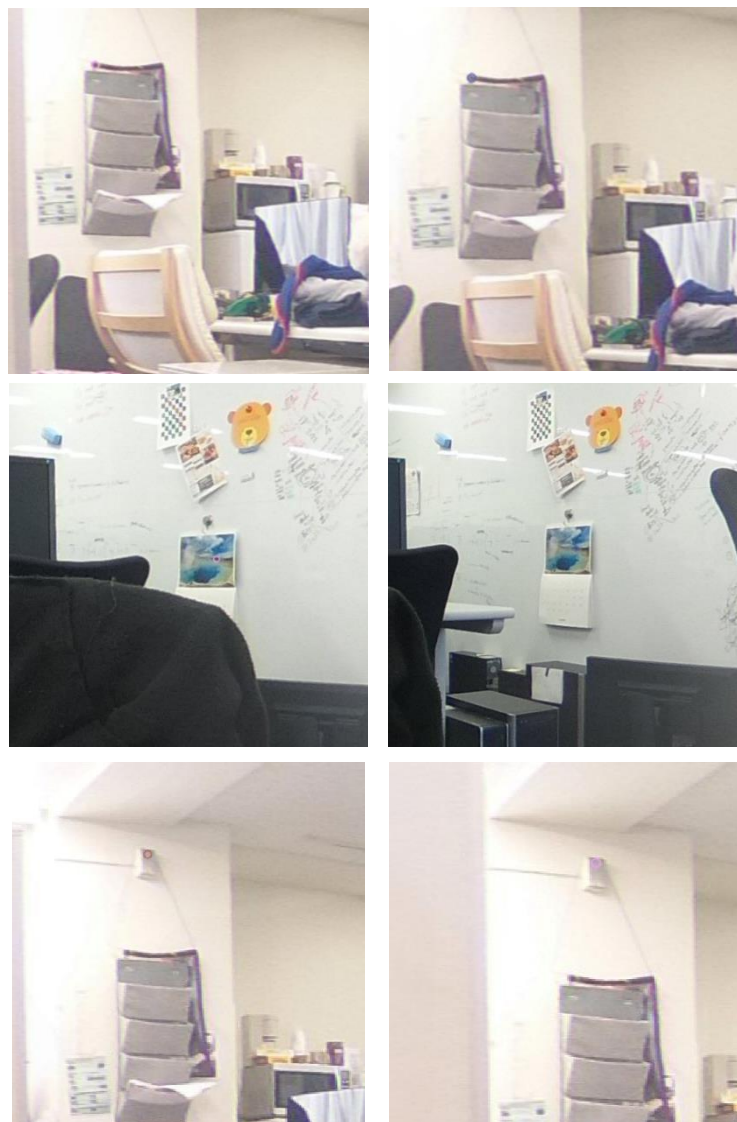


図 4.16 自己位置推定を行うために用いた対応特徴点

#### 4.4.3.3 実際に撮影した画像 C での実験結果

図 4.3 の実際に撮影した画像 C で検出された対応直線を用いて自己位置推定を行った結果を表 4.7 に示す. 右の全天球カメラ中心の  $x$  座標  $s$  が理想値になるように得られた自己位置のパラメータを全て定数倍したものを結果として示す.

表 4.7 実際に撮影した画像 C で自己位置推定を行った結果

	$s$ [cm]	$t$ [cm]	$u$ [cm]	$\varphi_l$ [degree]	$\varphi_r$ [degree]
理想値	32	-18.5	0	-	-
実験結果	32	-13.975	-0.196	75.521	79.054
誤差	-	-4.525	-0.196	-	-

実際に撮影した画像 C での実験では画像 B での実験と同様に二つの全天球カメラの向きが同一方向を向くように設置して撮影を行った. よって,  $\varphi_l$ と $\varphi_r$ の値が同一になることが理想である.

次に自己位置推定を行うために用いた検出した対応直線を図 4.17 に対応特徴点を図 4.18 に示す.

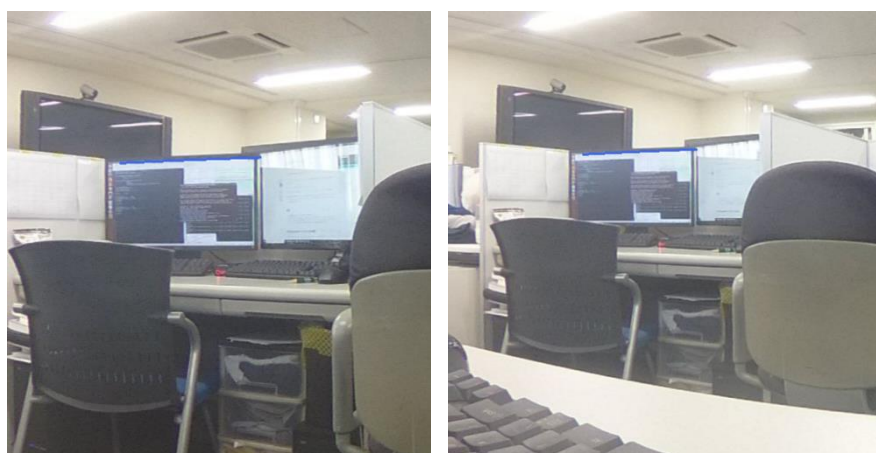


図 4.17 自己位置推定を行うために用いた検出した対応直線

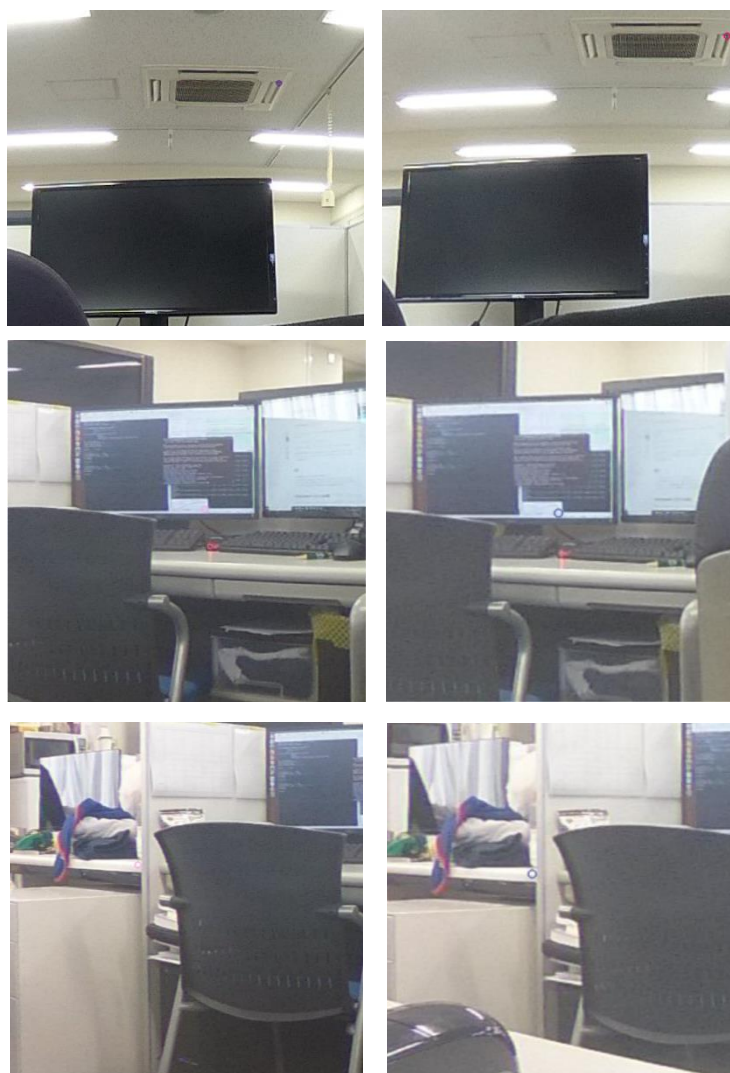


図 4.18 自己位置推定を行うために用いた対応特徴点



#### 4.4.3.4 実際に撮影した画像 D での実験結果

図 4.4 の実際に撮影した画像 D で検出された対応直線を用いて自己位置推定を行った結果を表 4.8 に示す.  $s$  が理想値になるように定数倍したものを結果として示す.

表 4.8 実際に撮影した画像 D で自己位置推定を行った結果

	$s$ [cm]	$t$ [cm]	$u$ [cm]	$\varphi_l$ [degree]	$\varphi_r$ [degree]
理想値	9.3	-1.1	0	2	0
実験結果	9.3	-1.335	0.076	2.159	0.399
誤差	-	-0.234	0.076	-	-

実際に撮影した画像 D での実験で二つの全天球カメラの向きが同一方向を向くように設置して撮影を行った. よって,  $\varphi_l$  と  $\varphi_r$  の値が同一になることが理想である.

次に自己位置推定を行うために用いた検出した対応直線を図 4.18 に対応特徴点を図 4.19 に示す.

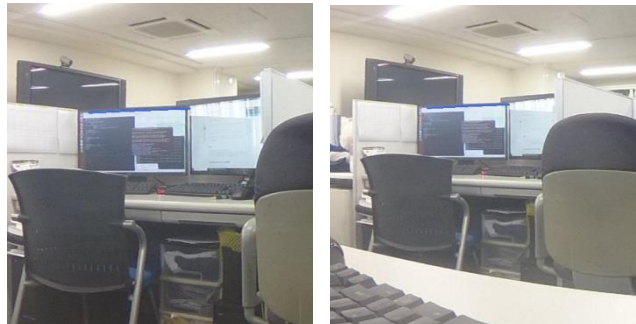


図 4.19 自己位置推定を行うために用いた検出した対応直線



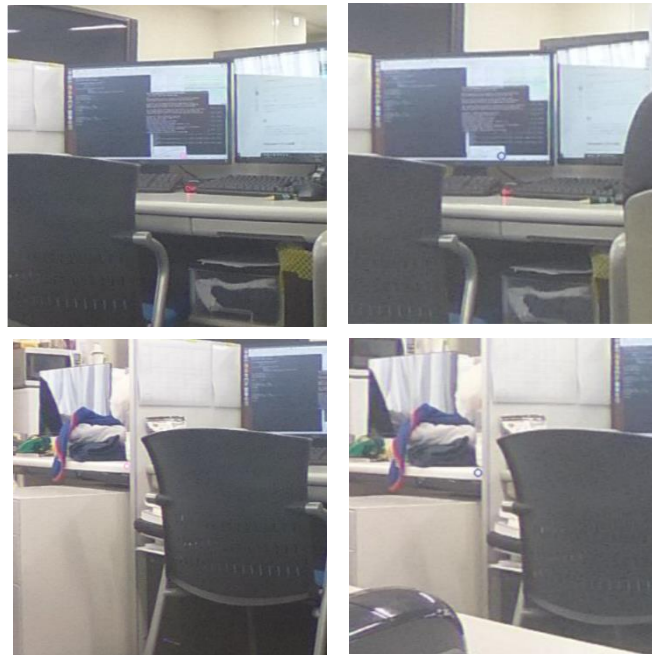


図 4.20 自己位置推定を行うために用いた対応特徴点

#### 4.4.4 実験 2 の考察

表 4.5, 表 4.6, 表 4.7, 表 4.8 の  $\varphi_l$  と  $\varphi_r$  の値を見ると対応直線を用いて二つの全天球画像は同方向を向くように補正出来ていることが分かる. 実際に撮影した画像に関してカメラの向きが同一方向を向くように撮影したが  $\varphi_l$  と  $\varphi_r$  の値が一致していない原因は全天球カメラを正確に同一方向に向くよう配置できなかったことからだと考えられる.

自己位置推定に関しても CG 画像では誤差も少なく正しく行えている. 実際に撮影した画像の場合はある程度の誤差はあるものの概ね正しく自己位置推定を行うことができた. 誤差が生じてしまう原因は全天球カメラの歪みにより理想的な正距円筒図に射影されていないことが原因として考えられる.

#### 4.4.5 実験 3 の結果

実験 2 で推定した自己位置をもとに 3 次元再構成実験を行う. 実験 3 で用いる画像は CG 画像と実際に撮影した画像 D である. それぞれの画像において 3 次元再構成を行った結果を表で示す.

##### 4.4.5.1 CG 画像での実験結果

3 次元再構成を行った箇所はチェッカーボードの全ての格子点である. まず, 一番上の行を 1 行目としたとき各行で 3 次元再構成を行った結果を表 4.9 に示す. 表 4.9 の  $x[\text{cm}]$  に示す値は各行において格子点を 3 次元再構成したとき, それぞれの格子点の  $x$  座標の差を平均した値である. 各行において格子点の  $x$  座標の差は理想的には  $2[\text{cm}]$  であることか

ら各格子点の  $x$  座標が正しく求められているかを確認する。また、 $y[\text{cm}]$ に示す値は各行において格子点を 3次元再構成したとき、 $y$  座標の平均を取った値である。 $y$  座標の理想値は  $5[\text{cm}]$ である。

表 4.9 CG 画像で 3次元再構成を行った結果 1

	D cm	x cm	y cm	x の誤差%	y の誤差%
1 行目	7.741	1.979	4.958	1.073	1.350
2 行目	6.386	1.979	4.967	1.056	0.905
3 行目	5.382	2.022	4.986	1.084	1.152
4 行目	4.965	1.984	4.965	0.806	0.926
5 行目	5.357	1.989	4.975	0.527	0.818
6 行目	6.390	1.989	4.988	0.527	0.698
7 行目	7.790	1.984	4.986	0.782	1.148
8 行目	9.273	1.983	4.951	0.850	0.981

次に一番左の列を 1 列目としたとき各列で 3次元再構成を行った結果を表 4.10 に示す。表 4.10 の  $z[\text{cm}]$ に示す値は各列において格子点を 3次元再構成したとき、それぞれの格子点の  $z$  座標の差を平均した値である。各列において格子点の  $z$  座標の差は理想的には  $2[\text{cm}]$ であることから各格子点の  $z$  座標が正しく求められているかを確認する。また、 $y[\text{cm}]$ に示す値は各行において格子点を 3次元再構成したとき、 $y$  座標の平均を取った値である。 $y$  座標の理想値は  $5[\text{cm}]$ である。

表 4.10 CG 画像で 3次元再構成を行った結果 2

	D cm	y cm	z cm	y の誤差%	z の誤差%
1 列目	6.012	4.964	1.949	1.510	2.562
2 列目	6.540	4.885	1.875	2.298	6.263
3 列目	6.580	4.933	1.997	2.003	0.144
4 列目	6.734	5.033	1.986	0.715	0.681
5 列目	6.719	5.016	2.011	0.514	0.560
6 列目	6.663	4.967	1.981	0.660	0.942
7 列目	6.658	4.964	1.969	0.726	1.566
8 列目	6.690	4.990	2.011	0.590	0.556
9 列目	6.708	4.986	1.942	0.408	2.914
10 列目	6.641	4.963	1.972	0.733	1.379

11 列目	6.697	4.993	1.992	0.832	0.375
-------	-------	-------	-------	-------	-------

#### 4.4.5.2 実際に撮影した画像 D での実験結果

3次元再構成を行った箇所はCG画像と同様にチェッカーボードの全ての格子点である。まず、一番上の行を1行目としたとき各行で3次元再構成を行った結果を表4.11に示す。表4.11のx[cm]に示す値は各行において格子点を3次元再構成したとき、それぞれの格子点のx座標の差を平均した値である。各行において格子点のx座標の差は理想的には2.2[cm]であることから各格子点のx座標が正しく求められているかを確認する。また、y[cm]に示す値は各行において格子点を3次元再構成したとき、y座標の平均を取った値である。y座標の理想値は9.796[cm]である。

表 4.11 実際に撮影した画像 D で 3次元再構成を行った結果 1

	D cm	x cm	y cm	x の誤差%	y の誤差%
1 行目	12.189	2.277	9.694	3.489	1.444
2 行目	11.099	2.295	9.823	4.305	1.522
3 行目	10.223	2.283	9.808	3.775	0.936
4 行目	9.849	2.292	9.831	4.173	1.078
5 行目	9.968	2.278	9.824	3.552	0.922
6 行目	10.601	2.276	9.830	3.463	0.816
7 行目	11.674	2.284	9.854	3.840	0.862
8 行目	12.972	2.286	9.817	3.915	0.700

次に一番左の列を1列目としたとき各列で3次元再構成を行った結果を表4.12に示す。表4.12のz[cm]に示す値は各列において格子点を3次元再構成したとき、それぞれの格子点のz座標の差を平均した値である。各列において格子点のz座標の差は理想的には2.2[cm]であることから各格子点のz座標が正しく求められているかを確認する。また、y[cm]に示す値は各行において格子点を3次元再構成したとき、y座標の平均を取った値である。y座標の理想値は9.796[cm]である。

表 4.12 実際に撮影した画像 D で 3次元再構成を行った結果 2

	D cm	y cm	z cm	z の誤差%	y の誤差%
1 列目	10.835	10.094	2.331	5.940	3.038
2 列目	11.259	9.983	2.306	4.798	1.912
3 列目	11.156	9.891	2.282	3.733	0.965
4 列目	11.069	9.801	2.281	3.686	0.046

5 列目	10.978	9.712	2.272	3.295	0.857
6 列目	10.951	9.681	2.269	3.119	1.172
7 列目	10.957	9.693	2.255	2.516	1.052
8 列目	11.008	9.755	2.247	2.123	0.421
9 列目	11.025	9.769	2.259	2.679	0.272
10 列目	11.035	9.789	2.237	1.677	0.075
11 列目	11.081	9.828	2.270	3.167	0.329

#### 4.4.6 実験3の考察

表 4.9 から表 4.12 から推定した自己位置をもとに 3 次元再構成を行えていることがわかる。CG 画像での実験では誤差が少なく正確に 3 次元再構成ができていたため提案した手法の有効性が確認できた。実際に撮影した画像での結果では少なからず誤差が生じているものの誤差は大きくても約 6%と良い結果が得られた。誤差が生じた原因として考えられるのは実験 2 で推定した自己位置で誤差が生じていたことが理由として考えられる。数パーセントの誤差が生じているものの理想値と実験値の差はわずか 0.1[mm]以内であるためよい実験結果が得られたと考える。

#### 4.5 むすび

本章では、第 3 章で説明した提案手法の評価実験を行った。実験の結果から本手法の有効性が確認できた。第 5 章では本稿のまとめを述べる。

## 第5章 結論と今後の課題

### 5.1 結論

本研究では、Equirectangular形式の全天球画像を用いて対応直線を検出する手法、検出した対応直線をもとに全天球カメラの自己位置を推定する手法、推定した自己位置をもとに3次元再構成を行う手法を提案した。これらの手法を合わせることによって全天球カメラで撮影した動画像から環境地図作成を行うことができる。

直線検出手法においては必要な直線を正しく対応する部分同士を検出することができた。

自己位置推定に関しては従来のようなカメラの内部パラメータを用いることなく自己位置推定を行うことができた。これにより内部パラメータを測定する手間を省くことができる。また、全天球カメラは全方位を撮影することができるため対応直線を用いて向きを補正して自己位置推定を行うという全天球カメラの特性を活かした手法である。したがって、全天球カメラを用いた自己位置推定手法としては有効であると考えられる。

最終的な目標であった3次元再構成を行う実験ではCG画像と実際に撮影した画像の二つの環境において良好な結果が得られた。CG画像での実験において平均の誤差が一番大きい箇所は約2.6%であり、実際に撮影した画像での実験では約6%と高精度な結果が得られた。理想値と実験値の差はCG画像の実験ではほとんどの個所で0.05[mm]であり、実際に撮影した画像でもほとんどの個所で0.1[mm]以内と極めて微小な差であった。3次元再構成の結果が良好に得られたことから提案した自己位置推定手法および3次元再構成手法が有効であると言える。

したがって、自己位置推定手法に関して多少誤差が生じたものの本研究で提案した手法を用いて全天球カメラの自己位置推定、3次元再構成を行うことができることがわかった。実際に撮影した画像では誤差が生じていたもののCG画像を用いた実験では誤差が少なく自己位置推定と3次元再構成が行えていることから本手法は有効であると考えられる。

### 5.2 今後の課題

今後の課題として以下の2項目が挙げられる。

- ・本研究で行なった実験では全て屋内で撮影を行った。しかし、屋外で実験を行っていないため屋外で撮影した画像を用いて対応直線を検出できるかどうか不明である。実験結果などから考えると建造物が画像中に写っていれば問題なく対応直線が検出できると思われる。しかし、大自然の中など建造物が映らない環境であると対応直線の検出は難しいと考えられる。

- ・本研究で行なった実験は撮影された静止画を前提としている。静止画だけでなく動画を入力してカメラの自己位置推定と3次元再構成を行えるようにしたい。また、リアルタイム処理が現状ではできていないため処理の高速化も将来の課題である。

## 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] Y. Iguchi and J. 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
- [2] D.Caruso, J.Engel, and D.Cremers, " LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM", ECCV In European Conference on Computer Vision, pp 834-849, Oct. 2014.
- [3] R.Mur-Artal, J.M.M.Montiel, and J. D. Tardos, "ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System", IEEE Transactions on Robotics, Vol.31, No.5,pp.1147-1163, Oct. 2015.
- [4] D.Caruso, J.Engel, and D.Cremers, "Large-scale direct SLAM for omnidirectional cameras", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, pp.133-148, Sep. 2015.
- [5] J. Engel, V. Koltun, and D. Cremers, "Direct Sparse Odometry", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.40, No.3, pp.611-625, Mar. 2018.
- [6] 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
- [7] B. Zhang, N. Liu, Y. Jiao, Y. Li, and J. Zhu, "Research on Image Matching Technology for the Spherical Stereo Vision", International Conference on Mechatronics and Automation(ICMA), pp.2402-2407, Aug. 2015
- [8] A. Takeuchi, H. Fujii, A. Ymashita, M. Tanaka, R. Kataoka, Y. Miyoshi, M. Okutomi and H. Asmaa, "Aurora 3D-Measurement from Whole-Sky Time Series Image Using Fsh-Eye Stereo Camera", Transactions of the JSME, vol.82, No.834, pp.15-32, Jan. 2016

- [9] S. Kase, R. Okutsu, H. Mitsumoto, Y. Aragaki, N. Shimomura, K. Terabayashi, and K. Umeda, “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
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 谷川, 鳴海, 中垣, “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,
- [13] 植芝, 富田, “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
- [14] Zhengyou Zhang, “Flexible Camera Calibration by Viewing A Plane From Unknown Orientations”, IEEE International Conference on Computer Vision, Vol.1, pp.666-673, Sep. 1999

## 図一覧

図 2.1	カメラ座標と世界座標の関係 .....	3
図 2.2	図 2.1 にピクセルサイズ $kx, ky$ 画像平面の中心 $ox, oy$ を考慮した図 .....	4
図 2.4	3次元空間でのカメラ 2 台と対象点との関係 .....	10
図 3.1	全天球カメラと対象点 P, 射影された対象点 P' との座標関係 .....	15
図 3.2	2 台の全天球カメラと対象点 P との関係 .....	16
図 3.3	$\gamma$ の位置関係 .....	エラー! ブックマークが定義されていません。
図 3.4	全天球カメラ 2 台を前後にずらした場合のモデル .....	19
図 3.5	図 3.4 を YZ 平面から見た図 .....	20
図 3.6	全天球カメラと直線の関係 .....	21
図 3.7	全天球画像における対応直線検出手法のフローチャート .....	22
図 3.8	特徴点と想定される直線方向のベクトル .....	23
図 3.9	$0^\circ \leq \omega \leq 360^\circ$ で変動させたときの探索する曲線 1 .....	25
図 3.10	$0^\circ \leq \omega \leq 360^\circ$ で変動させたときの探索する曲線 2 .....	26
図 3.11	エッジ検出前とエッジ検出後の画像 .....	26
図 3.12	全天球カメラ二台と対象な直線 L の関係 .....	27
図 3.13	XY 平面から見た全天球カメラ二台と対象な直線 L の関係 .....	28
図 4.1	CG で作成した左右の全天球画像 .....	33
図 4.2	実際に撮影した全天球画像 A .....	34
図 4.3	実際に撮影した全天球画像 B .....	34
図 4.4	実際に撮影した全天球画像 C .....	34
図 4.5	実際に撮影した全天球画像 D .....	34
図 4.6	CG で作成した全天球画像における対応直線検出結果 .....	35
図 4.7	実際に撮影した全天球画像 A における対応直線検出結果 .....	35
図 4.8	図 4.7 の一部を拡大した画像 .....	36
図 4.9	実際に撮影した全天球画像 B における対応直線検出結果 .....	36
図 4.10	図 4.9 の一部を拡大した画像 .....	36
図 4.11	実際に撮影した全天球画像 C における対応直線検出結果 .....	37
図 4.12	図 4.11 の一部を拡大した画像 .....	37
図 4.13	実際に撮影した全天球画像 D における対応直線検出結果 .....	37
図 4.14	図 4.13 の一部を拡大した画像 .....	37
図 4.15	自己位置推定を行うために用いた検出した対応直線 .....	40
図 4.16	自己位置推定を行うために用いた対応特徴点 .....	40
図 4.17	自己位置推定を行うために用いた検出した対応直線 .....	41
図 4.18	自己位置推定を行うために用いた対応特徴点 .....	42

図 4.17	自己位置推定を行うために用いた検出した対応直線 .....	43
図 4.18	自己位置推定を行うために用いた対応特徴点 .....	44

## 表一覧

表 4.1	実験環境.....	32
表 4.2	実験 1, 実験 2, 実験 3 で使用した CG 画像の作成環境 .....	32
表 4.3	実験 1, 実験 2, 実験 3 で使用した実際に全天球カメラで撮影した撮影環境.....	33
表 4.4	検出できた対応特徴点の数と対応直線の数.....	38
表 4.5	CG 画像で自己位置推定を行った結果 .....	39
表 4.6	実際に撮影した画像 B で自己位置推定を行った結果.....	39
表 4.7	実際に撮影した画像 C で自己位置推定を行った結果.....	41
表 4.8	実際に撮影した画像 D で自己位置推定を行った結果.....	43
表 4.9	CG 画像で三次元再構成を行った結果 1.....	45
表 4.10	CG 画像で三次元再構成を行った結果 2.....	45
表 4.11	実際に撮影した画像 D で三次元再構成を行った結果 1 .....	46
表 4.12	実際に撮影した画像 D で三次元再構成を行った結果 2.....	46

## 研究業績

- [1] 青木貴大: “全天球カメラを用いたステレオ距離測定(Omnidirectional Measurement Distance Using Stereo Omnidirectional Cameras)”, 卒業論文 Feb. 2017
- [2] 青木, 松田, 原, 渡辺: “ステレオ全天球カメラからの距離計測の基礎検討 (Basic Study on Distance Measurement from Stereo Omni-Image Cameras)”, 映像情報メディア学会年次大会, 33B-5, Sep. 2017
- [3] 青木, 渡辺, 宋: “全天球カメラを用いた位置推定手法及び距離測定手法の検討 (Position Estimation and Distance Measurement from Omni-directional Cameras)”, 情報処理学会全国大会, 2U-05, Mar. 2018
- [4] 青木, 渡辺, 原: “全天球カメラを用いた自己位置推定と環境地図作成の基礎検討 (Basic Study on Simultaneous Localization and Mapping Using Omnidirectional)”, 2018年画像符号化シンポジウム・2018年映像メディア処理シンポジウム (PCSJ/IMPS2018), P-4-7, Nov. 2018
- [5] 青木, 渡辺, 原: “全天球画像を用いたカメラ自己位置推定手法と環境地図作成の同時処理技術 (Simultaneous Localization and Mapping Using Omnidirectional Camera)”, 2018年映像情報メディア学会冬季大会, 11D-4, Dec. 2018