

# 卒業論文概要書

Summary of Bachelor's Thesis

Date of submission: 01 / 27 / 2017

学科名 Department	情報理工	氏名 Name	松田卓也	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	1W130519-8 CD		
研究題目 Title	魚眼カメラと通常カメラを用いた距離測定 Estimating Distance by using Fish-eye Lens Camera and Conventional Camera				

## 1. まえがき

近年自動運転技術の発展が目覚ましい。それに伴って、移動体周辺の環境認識のために距離測定が必要となってきた。従来、距離測定には、ステレオカメラや他のセンサが用いられてきた。しかし最近、360°周囲の画像を手軽に撮影できる全天球カメラが普及してきており、今後全天球カメラ用いた距離測定が注目を集めると考えられる。ところで、全天球カメラを複数用いると、物理的制約によって再構成できない領域が生じる。この問題は全天球カメラと通常カメラを組み合わせることにより解決できる。そこで本論文では、全天球カメラの一部である魚眼カメラと通常カメラを用いて距離測定を精度良く実行することを目指す。

## 2. 魚眼カメラと通常カメラを用いた距離測定

本論文では、魚眼カメラと通常カメラを用いた距離測定法を提案した。両カメラに対してチェスボードを用いてキャリブレーションを行い、得られたパラメータをもとに平行等位ステレオに配置する。その後、両画像に写るマーカの画像座標から、マーカまでの距離を測る手法を採用する。しかし、精密な配置は非常に難しく、両画像の対応点が、マーカの位置からずれる。そこで、通常画像にホモグラフィ[1]による変換を施して補正する手法を提案する。ホモグラフィとは、ある平面から別の平面へ写像する射影変換である。

## 3. 実験結果評価

実験では、まずキャリブレーションの結果に基づいて配置した両カメラが平行等位ステレオであると仮定し、距離測定を正しく行えるかを検証した。その結果、平均 10%未満の誤差で距離測定を行えることを示した。さらに、ホモグラフィ行列による補正で、誤差の軽減を行えるかを検証した。その結果、測定距離の長さによっては、より精度よく距離測定を行えることを示した。また、歪み大きい魚眼画像の周辺部では、距離測定の誤差が大きかった。

## 4. まとめ

本研究では、魚眼カメラと通常カメラを用いた距離測定法と、ホモグラフィ行列による補正を提案するとともに、実験により手法の評価を行った。評価実験を行ったところ、平均実用的な誤差の範囲内で距離測定を行えることを示した。また、ホモグラフィ行列による補正は、長さによっては精度をよくすることができることを示した。今後、魚眼画像の歪みを考慮することで、より精度の高い距離測定を行うことができると考えられる。

## 参考文献

[1] Rahul Sukthankar, Robert G. Stockton, Matthew D. Mullin, "Smarter Presentations: Exploiting Homography in Camera-Projector Systems", Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001

[2] 怡土順一, カメラキャリブレーション, [http://opencv.jp/sample/camera\\_calibration.html](http://opencv.jp/sample/camera_calibration.html)

2015 年度 卒業論文

魚眼カメラと通常カメラを用いた距離測定

Estimating Distance by using Fish-eye Lens Camera and  
Conventional 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

1W130519-8

松田卓也

## 目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	1
1.3	論文の構成	2
第2章	ステレオ距離測定	3
2.1	座標空間と射影方式	3
2.1.1	ピンホールカメラモデル	3
2.1.2	魚眼カメラ	5
2.2	カメラキャリブレーション	7
2.3	三角測量	10
第3章	提案手法	13
3.1	システムの構造	13
3.2	カメラ間の平行移動ベクトル	14
3.3	平行等位ステレオによる距離測定	14
3.4	通常画像にホモグラフィ変換を施した距離測定	16
第4章	提案手法の実験	21
4.1	実験の概要	21
4.2	カメラキャリブレーション	21
4.3	ホモグラフィ行列の算出	22
4.4	ホモグラフィ変換による誤対応の補正の検証	24
第5章	結論と今後の課題	28
5.1	結論	28
5.2	今後の課題	28
	謝辞	29
	参考文献	30
	図一覧	31
	表一覧	32

## 第1章 序論

### 1.1 研究背景

近年、自動車の自動運転技術は目覚ましい発展を遂げており、2030年までには一般公道を問題なく走行可能な技術・車両ができると考えられている[1]。自動運転を実現するにあたっていくつもの課題があるが、その中の一つに車両周辺の環境認識がある。環境認識には、物体の検出・認識と、物体までの距離測定といったテーマがある。物体までの距離を測定する手法は各種あり、レーザーレーダやミリ波レーダ、もしくは超音波レーダを用いる能動的計測と、ステレオカメラや焦点ぼけなどを利用した受動的計測がある。ステレオカメラによる距離測定は、レーザーレーダやミリ波レーダによる距離測定よりも、ロバスト性や精度で劣っているが、高密度に計測することができ、軽量である[2]。また、ステレオカメラシステムに魚眼レンズを用いることで、画角が大きくなり、より多くの情報を画像から得ることができる。

カメラ産業においては、一度に360°の背景を撮影することができる全天球カメラが誕生した。例えば、いくつもの広角レンズと魚眼レンズを組み合わせたFacebook製SURROUND360や、2つの魚眼レンズを組み合わせたRICOH製THETAなどがある。一度に360°の背景の情報が得られることから、環境認識の研究分野に大いに役立つことが予想される。

しかし、全天球カメラを2台用いてステレオカメラシステムを実現する場合、魚眼レンズが大きいということから、一方のカメラで撮影した画像に他方のカメラが写り込んでしまうという問題がある。それゆえ、撮影して得られた全天球画像を用いたい場合には、写り込んだカメラを除去しなければならない。また、距離測定を行う場合には、物理的制約によって測定できない範囲が生じてしまう。通常カメラには超小型のものがあるので、全天球カメラ1台を超小型通常カメラに替えることにより、この問題は解消される。しかし、一般的にステレオカメラシステムは同じカメラを用いることによって平行等位に配置することを容易に実現できるが、異なるカメラをステレオカメラシステムとして用いる際には、キャリブレーションを繰り返し行っても非常に難しいと考えられる。

よって本研究では、カメラの配置に誤差が生じるものと想定し、距離測定の結果をもとに、ずれの関係をホモグラフィ行列により求める。カメラの位置関係が常に同じであれば、このホモグラフィ行列を適用することで異なる位置の対象物体までの距離測定を行えるかを、実験により検証する。

### 1.2 研究目的

2台の全天球カメラを用いたステレオカメラシステムの場合、両カメラが互いのカメラに写り込んでしまうが、全天球カメラと通常カメラによる距離測定を正確に行うことができれば、全天球カメラと複数の超小型通常カメラを用いて、カメラの周り360°の距離情報を得ることができる。また、他のレーダを用いるよりもコンパクトで軽量なため、ドローンのような移動体に積むことも可能であると考えられる。

また、両カメラを平行等位に配置した場合と同程度の精度で、平行等位に配置せずに距離測定することができれば、画像の平行化処理による画質の劣化を起こさずに、さらに、繰り返しキャリブレーションを行って再配置するといった手間を省くことができる。

そこで本研究では、全天球カメラを実現するための一部となっている魚眼カメラと、通常カメラの2台を用いた距離測定を、実用的な精度で行うことを目的とする。

### 1.3 論文構成

以下に本章以降の構成を示す。

第1章 本章であり、本研究の背景と目的、構成について述べている。

第2章 ステレオ距離測定について述べる。まず、各カメラの座標空間と射影方式について述べる。次に、各カメラの校正について述べ、最後に、2台の通常カメラを用いた一般的な三角測量とその問題点について述べる。

第3章 本論文で提案する手法について述べる。

第4章 第3章で提案した手法を用いた実験を行う。

第5章 本論文の結論と今後の課題について述べる。

## 第2章 ステレオ距離測定

### 2.1 座標空間と射影方式

まず, 3次元空間中にある存在するある点の位置と, 2次元画像平面上でのその点の位置関係について, ピンホールカメラモデルを用いて述べる. さらに, 本研究で用いた魚眼レンズの射影方式である等距離射影に関して述べる.

#### 2.1.1 ピンホールカメラモデル

通常カメラによる透視投影は図のようにモデル化できる[3].

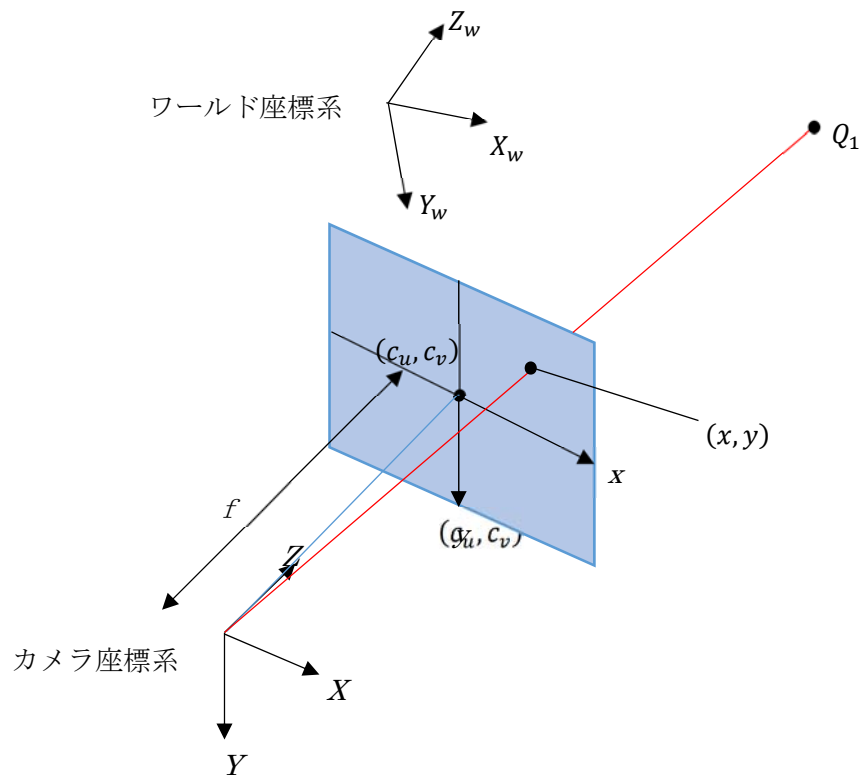


図 2.1 透視投影モデル

図 2.1 のように, 画像平面の横方向と縦方向に平行になるように  $X$  軸と  $Y$  軸をとり, 光軸方向に一致するように  $Z$  軸をとったものをカメラ座標系とし, 3次元空間中の適当な位置にとった座標系をワールド座標系とする. ワールド座標系で位置 $(X_w, Y_w, Z_w)$ にある点 $Q_1$ が, カメラ座標系において $(X, Y, Z)$ と表されるとすると, その関係式は以下のように表せる.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}\mathbf{X}_w + \mathbf{T} \quad (2.2)$$

ただし、 $\mathbf{X}$ と $\mathbf{X}_w$ はそれぞれ位置 $(X, Y, Z)$ と位置 $(X_w, Y_w, Z_w)$ をベクトルで表記したものである。また、 $\mathbf{R}$ は $3 \times 3$ の回転行列であり、 $\mathbf{T}$ は3次元の平行移動ベクトルである。

点 $Q_1$ が、焦点距離を $f$ とした画像平面中の位置 $(x, y)$ に射影されるとすると、カメラ座標 $(X, Y, Z)$ と画像座標 $(x, y)$ の間には以下の関係式が成り立つ。

$$\begin{cases} x = \frac{fX}{Z} \\ y = \frac{fY}{Z} \end{cases} \quad (2.3)$$

式(2.3)は、同次座標を用いて次のように表せる。

$$Z \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

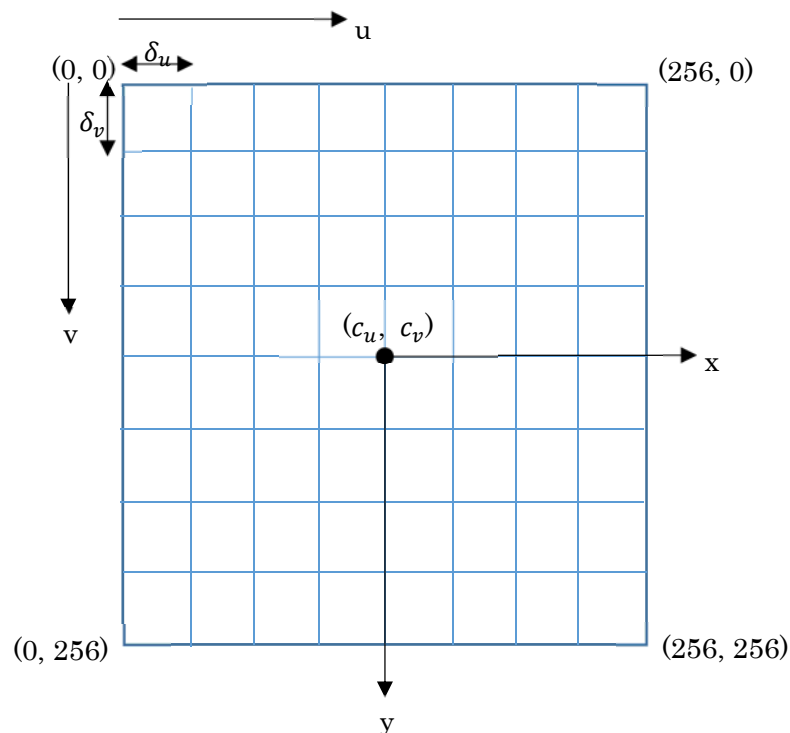


図 2.2 画像座標とピクセル座標の関係

今まで扱ってきた画像座標は、画素の大きさを考慮していない。そこで、ピクセル座標を導

入する. 図 1.2 のように左上の点を原点として  $u$  軸と  $v$  軸を取り, 横方向と縦方向の画素の物理的な間隔をそれぞれ  $\delta_u, \delta_v$  とおき, さらにピクセル座標の中心を  $(c_u, c_v)$  とおく. 画像座標とピクセル座標の関係は次のようになる.

$$\begin{cases} u = \frac{x}{\delta_u} + c_u \\ v = \frac{y}{\delta_v} + c_v \end{cases} \quad (2.5)$$

式(1.5)を, 同次座標を用いて表すと以下のようなになる.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\delta_u} & 0 & c_u \\ 0 & \frac{1}{\delta_v} & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

よって, 式(1.1), (1.4), (1.6)より, ピクセル座標とワールド座標の関係は以下のように表せる.

$$Z \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f}{\delta_u} & 0 & c_u \\ 0 & \frac{f}{\delta_v} & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

$$\tilde{\mathbf{m}} = s_1 \mathbf{A}(\mathbf{R}|\mathbf{T})\tilde{\mathbf{X}}_w \quad (2.8)$$

$$\tilde{\mathbf{m}} = s_1 \mathbf{P}\tilde{\mathbf{X}}_w \quad (2.9)$$

ただし  $\tilde{\mathbf{m}}$  と  $\tilde{\mathbf{X}}_w$  は, ピクセル座標とワールド座標を, それぞれ同次座標を用いてベクトル表

記したものであり,  $s_1$  は任意のスケール係数である. また,  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{f}{\delta_u} & 0 & c_u \\ 0 & \frac{f}{\delta_v} & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  であり, カメ

ラの内部パラメータからなる  $3 \times 3$  の行列である. さらに,  $\mathbf{P} = \mathbf{A}(\mathbf{R}|\mathbf{T})$  とおき, この行列  $\mathbf{P}$  のことをカメラ行列と呼ぶ.  $\mathbf{P}$  は  $3 \times 4$  の行列である[4].

### 2.1.2 魚眼カメラ

魚眼カメラには, 等距離射影, 等立体角射影, 立体射影, 正射影といった様々な射影方式がある. 本論文では, 本研究で用いた RICOH 製 THETA S で採用している等距離射影方式についてのみ述べる.



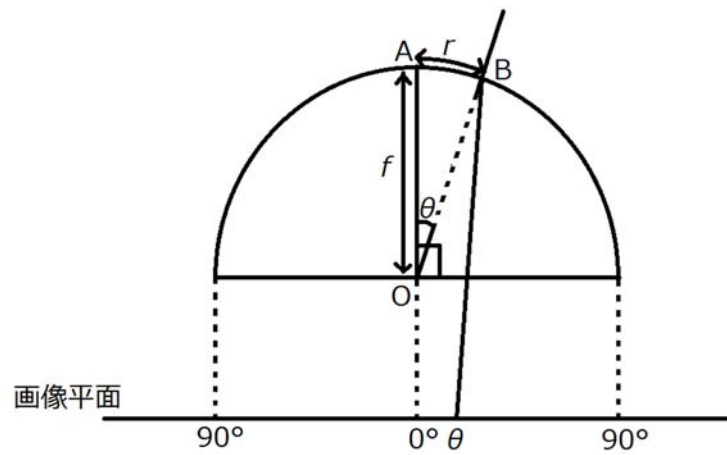


図 2.3 等距離射影方式

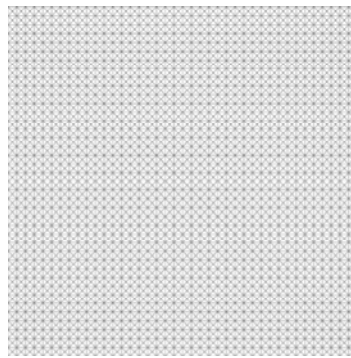


図 2.4 撮影対象の平面イメージ[5]

(出典) パースフリークス, <http://www.persfreaks.jp/main/aov/fisheye/>, 2017年1月5日  
アクセス

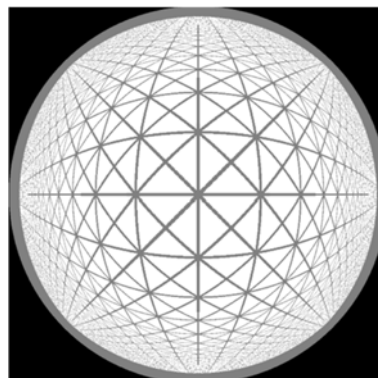


図 2.5 魚眼レンズに写る像[5]

(出典) パースフリークス, <http://www.persfreaks.jp/main/aov/fisheye/>, 2017年1月5日  
アクセス

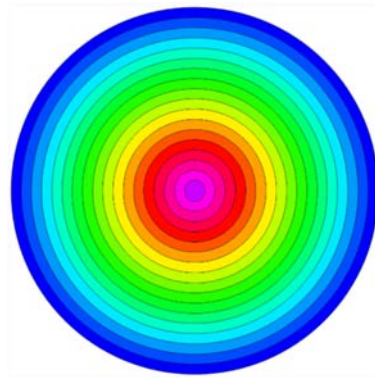


図 2.6 視円錐[5]

(出典) パースフリークス, <http://www.persfreaks.jp/main/aov/fisheye/>, 2017 年 1 月 5 日  
アクセス

図 2.3 のようにカメラの光軸とレンズの交点を点  $O$ , 点  $A$ , ある点がレンズに写る位置を点  $B$  とし, 魚眼レンズの焦点距離を  $f$ , 球面上での  $AB$  の長さを  $r$ ,  $OA$  と  $OB$  の角度を  $\theta$  とすると,  $r$  と  $\theta$  の関係式は以下のように表せる.

$$r = f\theta \quad (2.10)$$

図 2.4 を対象として魚眼カメラで撮影した時に魚眼レンズに写る像を図 2.5 に示す. また  $\theta$  が最大  $90^\circ$  の視円錐を  $5^\circ$  ごとに色分けした視円錐を図 2.6 に示す.

魚眼カメラを用いた場合の世界座標とピクセル座標の関係について述べる. まず, 世界座標とカメラ座標の関係は, 通常カメラの場合と同じである. カメラ座標と画像座標の関係が, 通常カメラの場合と異なり, 以下の関係式が成り立つ.

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \tan\theta = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{Z} \\ \frac{x}{y} = \frac{X}{Y} \end{cases} \quad (2.11)$$

画像座標とピクセル座標の関係も, 通常カメラの場合と同じである. したがって, カメラ座標と画像座標の関係式のみを反映させれば, 通常のカメラと同様に, 世界座標とピクセル座標の関係式を求めることができる.

## 2.2 カメラキャリブレーション

3次元空間中の位置と2次元画像平面上の位置は, カメラの内部パラメータと外部パラメータによって関係づけられる. これらのパラメータは用いるカメラやその位置, 姿勢によ

って決まるものであるが、具体的な値は最初から分かっているわけではない。そこで、あらかじめ位置が分かっている空間点と、その画像上への投影点を用いて、それらのパラメータを求めなければならない[4]。以下に、通常カメラと魚眼カメラそれぞれの場合について述べる。

まず、撮影された画像から、空間点の座標が容易に判別できるようなキャリブレーションターゲットを用いる。本研究で用いるキャリブレーションターゲットは図 2.7 のようなチェスボードである。

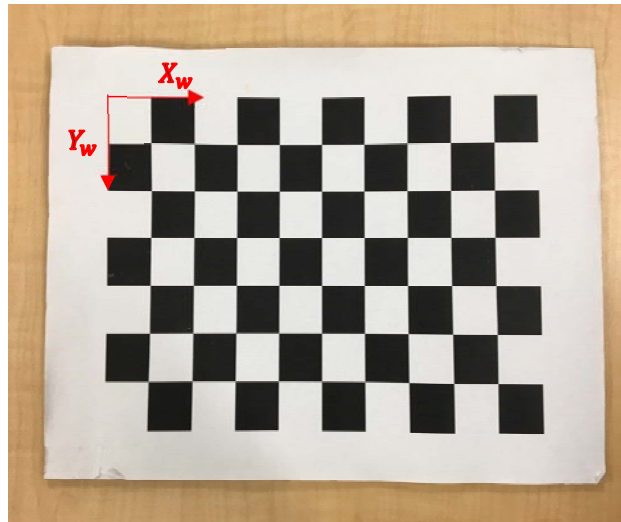


図 2.7 チェスボード(キャリブレーションターゲット)

図 2.7 のチェスボードの格子の間隔は既知であるので、各格子点に対するワールド座標  $(X_w, Y_w, Z_w)$  と、その画像中の座標  $(u, v)$  を得ることができ、それらを用いてカメラキャリブレーションを行う。カメラキャリブレーションの計算方法には様々なものが提案されているが、本論文では、OpenCV が採用している Zhang と Sturm の方法[6][7][8]について述べる。

[9]によると、まず行列  $(\mathbf{R}|\mathbf{T})$  を 4 列  $(r_1 \ r_2 \ r_3 \ \mathbf{T})$  に分解して考える。式(2.8)は以下のよう書き換えることができる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = s_2 \mathbf{A} \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & \mathbf{T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

キャリブレーションターゲットとして平面のチェスボードを用いるので、チェスボードの左上端をワールド座標系の原点として、図 2.7 のように軸をとることができ、 $Z_w = 0$  とする

ことができる.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = s_2 \mathbf{A} \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & \mathbf{T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = s_2 \mathbf{A} \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & \mathbf{T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

ただし,  $s_2$ はスケール定数である. これより, 平面オブジェクト上の撮像面に投影するホモグラフィ行列 $\mathbf{H}$ は, 以下のように表せる.

$$\mathbf{H} = (h_1 \quad h_2 \quad h_3) = s_2 \mathbf{A} \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & \mathbf{T} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

文献[6][7][8]によると, これらの式を展開すれば, 以下の式が得られる.

$$\begin{cases} r_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_1 \\ r_2 = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_2 \\ r_3 = r_1 \times r_2 \\ \mathbf{T} = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_3 \end{cases} \quad (2.16)$$

ただし,  $\lambda = \frac{1}{s_2}$ である.

文献[6][7][8]によると, スケーリングのパラメータは, 正規直交の条件 $\lambda = \frac{1}{\|\mathbf{A}^{-1} h_1\|}$ により決定される. また, 今までの話では, レンズの歪みを考慮していない, ここで, ピンホールカメラが完全な場合の点の位置を $(x_p, y_p)$ , 歪みによってずれた実際の点の位置を $(x_d, y_d)$ とする. キャリブレーションにより得られた $f_x, f_y, c_x, c_y$ を用いて, 以下の関係が成り立つ.

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x \frac{X_w}{Z_w} + c_x \\ f_y \frac{Y_w}{Z_w} + c_y \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

また, Brown[10]によると,  $(x_p, y_p)$ と $(x_d, y_d)$ には以下の関係が成り立つ.

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2p_1 x_d y_d + p_2 (r^2 + 2x_d^2) \\ p_1 (r^2 + 2y_d^2) + 2p_2 x_d y_d \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

式(2.17)により求めた $\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix}$ と、実際の点の位置 $\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix}$ を用いて、方程式(2.18)を解くことにより歪みパラメータが得られる。その後、得られた歪みパラメータを用いて再度内部パラメータと外部パラメータを推定する。

### 2.3 三角測量

2 画像間の対応点と、それを撮影した各カメラの位置や向き、内部パラメータから点の 3 次元位置を復元することができる。以下に、通常カメラを 2 台用いた時の三角測量の原理を述べる。

空間の位置 $(X_w, Y_w, Z_w)$ にある点の、2 つの画像への投影点の画像座標をそれぞれ $(u, v)$ 、 $(u', v')$ とすると、以下の関係式が得られる。

$$\tilde{\mathbf{m}} = s_3 \mathbf{P} \tilde{\mathbf{X}}_w \quad (2.19)$$

$$\tilde{\mathbf{m}}' = s_4 \mathbf{P}' \tilde{\mathbf{X}}_w \quad (2.20)$$

ただし、

$$\tilde{\mathbf{m}} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix}, \tilde{\mathbf{m}}' = \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix}, \tilde{\mathbf{X}}_w = \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{P}' = \begin{pmatrix} p'_{11} & p'_{12} & p'_{13} & p'_{14} \\ p'_{21} & p'_{22} & p'_{23} & p'_{24} \\ p'_{31} & p'_{32} & p'_{33} & p'_{34} \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

$\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{P}'$ はそれぞれのカメラに対する透視投影行列で、各要素の値はキャリブレーションにより得られる。式(2.19)を変形して空間の位置 $(X_w, Y_w, Z_w)$ を未知数とする連立方程式を作り、さらに未知数に関してまとめることにより、以下の式になる。

$$\begin{aligned}
 & \begin{pmatrix} p_{31}u - p_{11} & p_{32}u - p_{12} & p_{33}u - p_{13} \\ p_{31}v - p_{21} & p_{32}v - p_{22} & p_{33}v - p_{23} \\ p'_{31}u' - p'_{11} & p'_{32}u' - p'_{12} & p'_{33}u' - p'_{13} \\ p'_{31}v' - p'_{21} & p'_{32}v' - p'_{22} & p'_{33}v' - p'_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix} \\
 & = \begin{pmatrix} p_{14} - p_{34}u \\ p_{24} - p_{34}v \\ p'_{14} - p'_{34}u' \\ p'_{24} - p'_{34}v' \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

この方程式を解くことにより 2 画像の対応点から 3 次元空間上の位置を求めることができる。

上で述べたのは、2 台のカメラの内部パラメータが異なり、カメラの位置関係も任意の場合のことである。しかし、計算を簡単にするために、内部パラメータが全く同じ 2 台のカメラで、互いの光軸が平行であり、互いのカメラ座標系の  $X$  軸と  $X'$  軸が同一直線上になるように配置する場合を考える。このようにカメラを配置することを平行等位ステレオと言い、平行等位ステレオモデルを図 2.8 に示す。

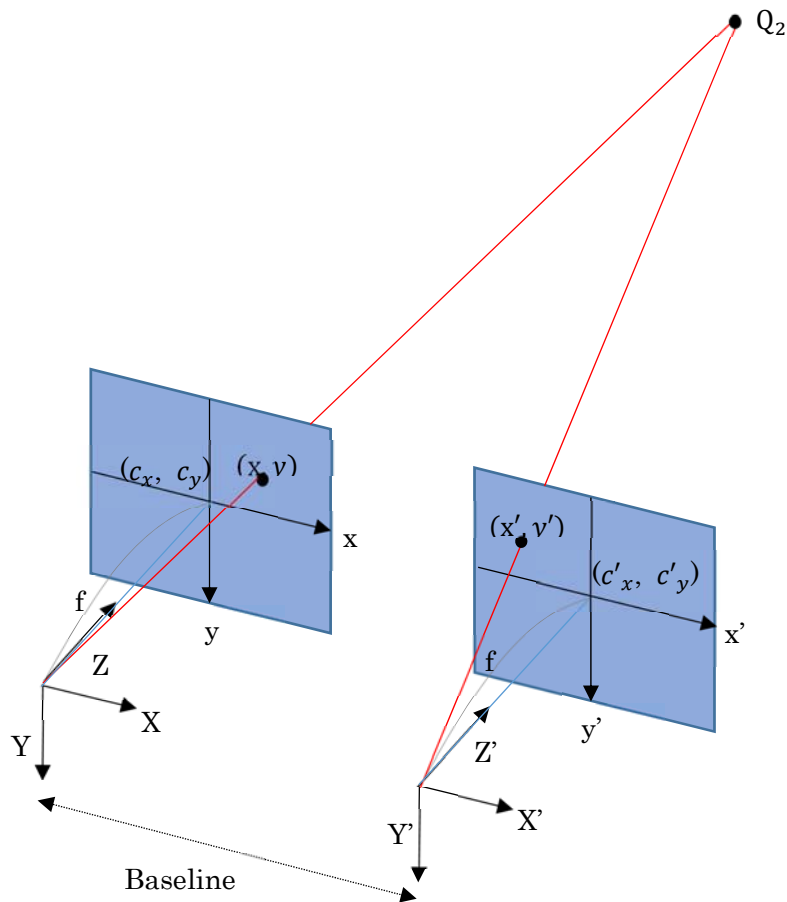


図 2.8 2 台の通常カメラによる平行等位ステレオ

点 $Q_2$ は左側のカメラ座標系において位置 $(X, Y, Z)$ であり、右側のカメラ座標系においては位置 $(X_w, Y_w, Z_w)$ である。点 $Q_1$ は左側のカメラの画像平面においては位置 $(x, y)$ に投影され、右側のカメラの画像平面においては位置 $(x', y')$ に投影されているとする。それぞれのカメラ座標と画像座標の関係は以下ようになる。

$$\begin{cases} x = f \frac{X}{Z} + c_x \\ y = f \frac{Y}{Z} + c_y \end{cases} \quad (2.25)$$

$$\begin{cases} x' = f \frac{X'}{Z'} + c_{x'} \\ y' = f \frac{Y'}{Z'} + c_{y'} \end{cases} \quad (2.26)$$

また、二つのカメラ座標系には以下の関係がある。

$$\begin{cases} X' = X - \text{Baseline} \\ Y' = Y \\ Z' = Z \end{cases} \quad (2.27)$$

式(2.27)を式(2.26)に代入して、 $X, Y, Z$ についてまとめると、以下のような式が成り立つ。

$$\begin{cases} X = \frac{\text{Baseline}(x - c_x)}{x - x' - c_x + c_{x'}} \\ Y = \frac{\text{Baseline}(y - c_y)}{x - x' - c_x + c_{x'}} \\ Z = \frac{\text{Baseline} \cdot f}{x - x' - c_x + c_{x'}} \end{cases} \quad (2.28)$$

画素の物理的な間隔  $dx, dy$  の大きさが等しく、カメラの光軸が画像平面の原点を通ると仮定すると、式(2.28)は以下のように簡単な式になる。

$$\begin{cases} X = \frac{\text{Baseline} \cdot x}{x - x'} \\ Y = \frac{\text{Baseline} \cdot y}{x - x'} \\ Z = \frac{\text{Baseline} \cdot f}{x - x'} \end{cases} \quad (2.29)$$

### 第3章 提案手法

前章で2台の通常カメラによる距離測定について述べたが、いくつか問題点がある。まず、通常カメラを2台用いても、画角が小さいので自動運転などにおいて、横から人や車が飛び出してきた場合に、距離測定をすることができない。そこで、画角が大きい全天球カメラを用いて距離測定を行うのが良いと考えられる。本論文では、全天球カメラの一部とも言える魚眼カメラを用いて距離測定を行う。また、どのように平行等位ステレオに設置するかが問題となる。実験室レベルの配置設定では、どのようにキャリブレーションを繰り返し行っても、完全に平行等位ステレオにはならない場合が多い。そのため、平行等位ステレオと仮定して方程式を立てても、算出距離に誤差が生じる。そこで、その誤差をホモグラフィ変換によって解決することを提案する。

#### 3.1 システムの構造

本研究で用いたステレオ距離測定システムを図3.1に示す。

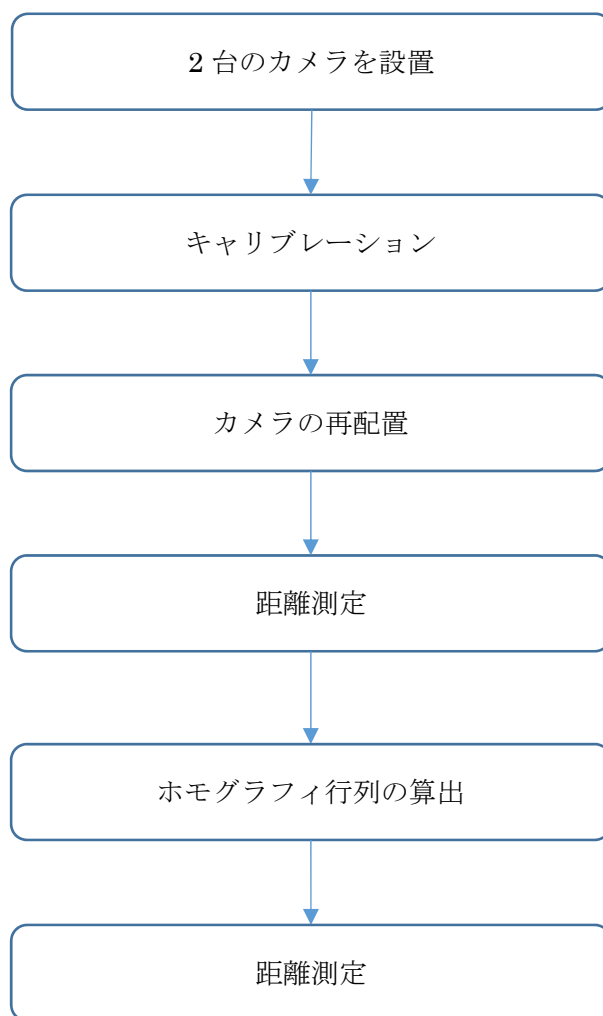


図3.1 ステレオ距離測定システム



まず、通常カメラと魚眼カメラの2台を概ね平行に設置する。キャリブレーションターゲットとしてチェスボードを用意し、それぞれのカメラでキャリブレーションを行う。キャリブレーションをすると通常カメラと魚眼カメラの位置関係を表すベクトル  $T$  が得られる。ベクトル  $T$  をもとに、2台のカメラが平行等位ステレオになるように配置し直す。カメラの再配置が終わったら距離測定を行う。距離測定を行うと、誤差が生じることがわかる。この誤差を補正するためのホモグラフィ行列を求める。一度ホモグラフィ行列を求めたら、両カメラの位置関係を変えない限り、距離測定を行うことができるシステムである。

### 3.2 カメラ間の平行移動ベクトル

チェスボードの左上端の点をワールド座標系の原点として、それぞれのカメラで同一の場所のチェスボードを撮影し、キャリブレーションを行うと、ワールド座標系からそれぞれのカメラ座標系への平行移動ベクトル  $T_1, T_2$  が得られる。 $T_1, T_2$  より、両カメラ間の相対的な位置関係を表すベクトル  $T$  を求めることができる。

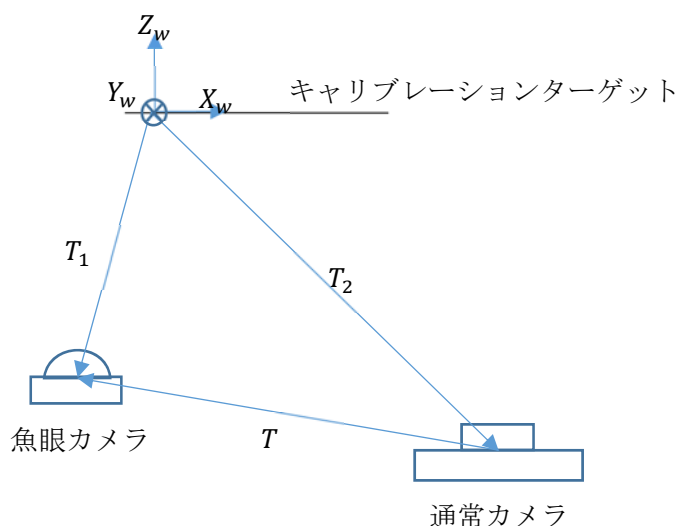


図 3.2 ワールド座標系と両カメラのカメラ座標系の関係

### 3.3 平行等位ステレオによる距離測定

ベクトル  $T$  の  $y$  成分と  $z$  成分の値がどちらも 0 になるように 2 台のカメラを配置した場合のモデルを図 3.3 に示す。この時のベースラインが、両カメラ間の平行移動ベクトル  $T$  の  $x$  成分の絶対値に等しい。また、ベクトル  $T$  の  $y$  成分はカメラの高さの差に等しく、 $y$  成分は奥行き差に等しい。

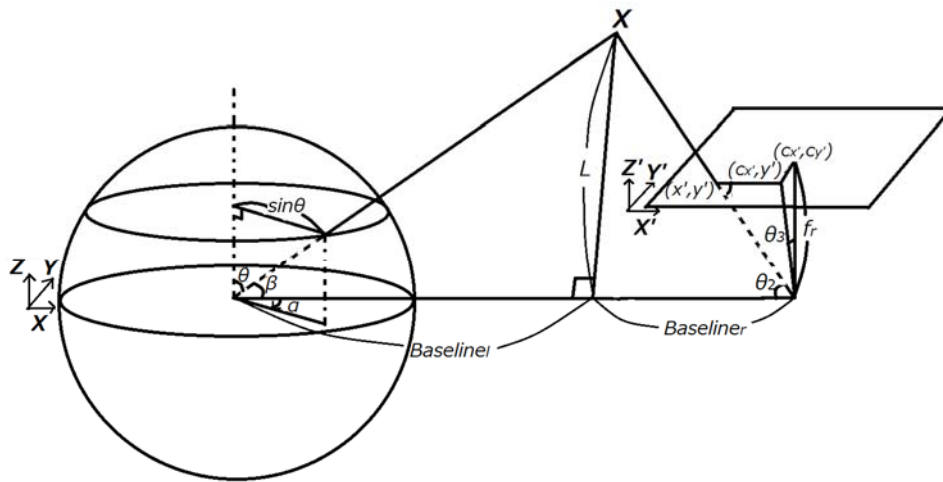


図 3.3 魚眼カメラと通常カメラによる平行等位ステレオモデル

魚眼カメラの焦点距離, すなわち図 3.3 における球体の半径を  $r$  とする. ある点  $X$  が魚眼レンズに写る点の位置を  $S$  とする. 点  $S$  の  $x$  座標は以下の 2 通りで表せられる.

$$S_x = r \cos \beta = r \cos \alpha \sin \theta \quad (3.1)$$

よって,  $\beta$  についての式ができ,  $Baseline_l$  を以下のように表すことができる.

$$\cos \beta = \cos \alpha \sin \theta \quad (3.2)$$

$$Baseline_l = \frac{L}{\tan \beta} = \begin{cases} L \sqrt{\frac{1}{(\cos \beta)^2} - 1} & (0 \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}) \\ -L \sqrt{\frac{1}{(\cos \beta)^2} - 1} & (\frac{\pi}{2} < \beta) \end{cases} \quad (3.3)$$

また, 図 3.3 において  $\theta_2$  に関する式が立てられる.

$$\tan \theta_2 = \frac{\sqrt{f(y - c_y)^2 + f_r^2}}{|f(x - c_x)|} \quad (3.4)$$

ただし,  $f(x)$  はピクセルを mm に変換する関数であるとする.

$$Baseline_l = \frac{L}{\tan \theta_2} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} Baseline &= Baseline_l + Baseline_r \\ &= L \left( \frac{1}{\tan \beta} + \frac{1}{\tan \theta_2} \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$L = \frac{Baseline}{\left( \frac{1}{\tan \beta} + \frac{1}{\tan \theta_2} \right)} \quad (3.7)$$

また、ここで通常カメラが対象物体に対して見上げる、あるいは見下ろす角度を $\theta_3$ と定義すると、以下の式が成り立つ。

$$\tan \theta_3 = f(|y' - c'_y|)/f_r$$

$$L_2 = L \cos \theta_3 \quad (3.8)$$

### 3.4 通常画像にホモグラフィ変換を施した距離測定

キャリブレーションによって得られたカメラの外部パラメータ・内部パラメータに従って、ステレオ平行等位に配置しようとしても、実際には平行等位になっていないと考えられる。そのずれをホモグラフィ変換で補正することを考える。

まず、以下の図 3.4 のように魚眼カメラを左に、通常カメラを右に置いて距離測定を行うとする。ただし、赤いマーカーはすべてホワイトボード上にあり、両カメラのベースラインからホワイトボードまでの距離は 25cm であるとする。



図 3.4 距離測定の様子

さらに、魚眼カメラで得られた画像を図 3.5 に、通常カメラで得られた画像を図 3.6 に示す。



図 3.5 魚眼カメラで得られた画像

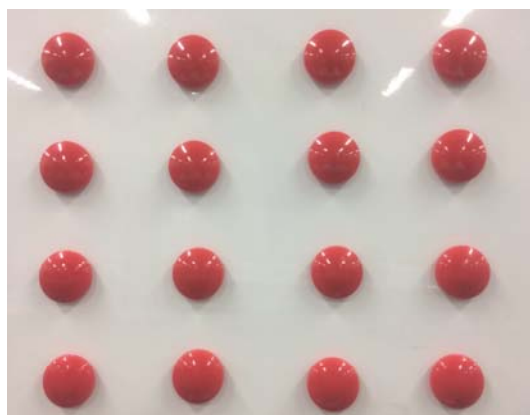


図 3.6 通常カメラで得られた画像

この時、理想的であれば、両画像の 16 個マーカーはそれぞれ対応し、3.3 節の式(3.1)~(3.8)に従って $L_2$ を求めると、16 組のどの場合でも

$$L_2 = 25cm(\text{一定}) \quad (3.9)$$

となる。しかし実際には、対応するマーカーを選んでも $L_2$ は25とはならない。そこで、どの点を選べば $L_2 = 25$ となるのか考えてみる。

まず、図 3.7 のようにマーカーに番号を振る。

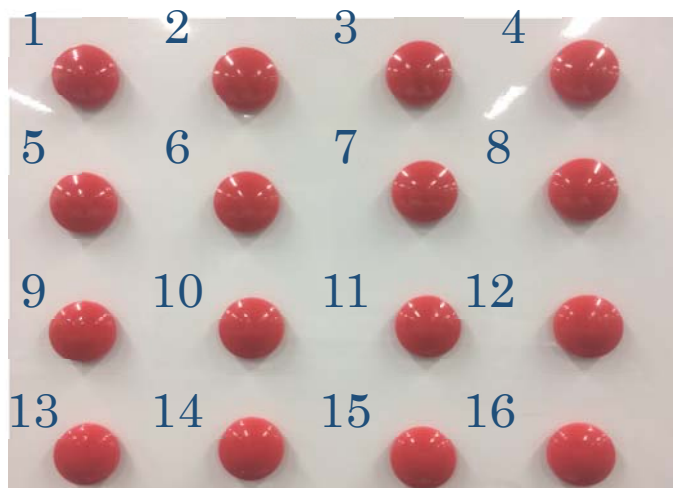


図 3.7 マーカーの番号

魚眼画像上における各番号のマーカーの中心座標と、式(3.9)から、それに対応する理想的な点の座標を通常画像上で求めると、以下のようなになった。

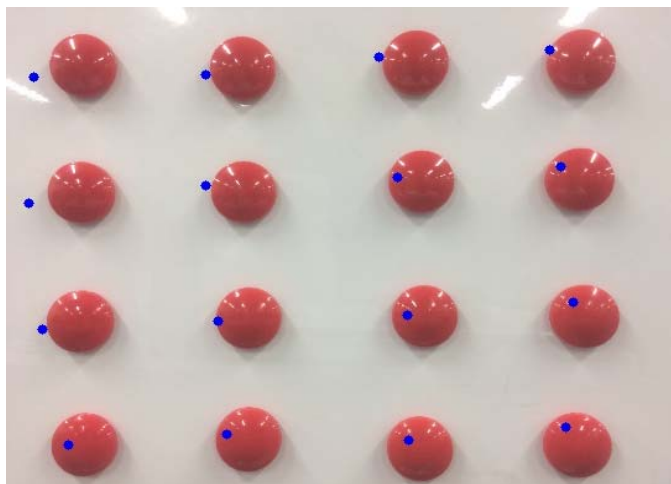


図 3.8 魚眼画像上の各マーカーに対する理想的な対応点

図 3.8において、青い点が、魚眼画像上の各マーカーに対する理想的な対応点を示している。通常画像に実際に写っている赤いマーカーは全体的に左にずれている。よって、ここで、赤いマーカーが成す平面から、青い点が成す平面へのホモグラフィを求めることにする。つまり、図 3.9 のように赤い四角形から青い四角形への射影変換である。

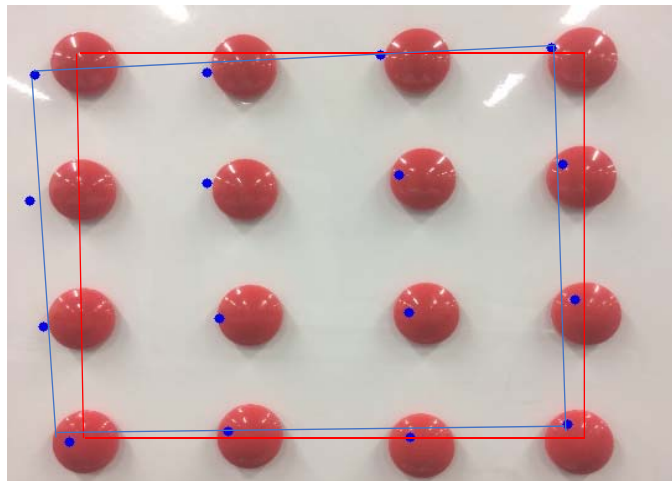


図 3.9 実際のマーカーが成す平面と理想点が成す平面

ここで、ホモグラフィ変換について考える。平面 $z = 1$ 上の点 $p$ を点 $P$ に変換すると仮定する。

$$\text{ただし, } p = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

この時、ホモグラフィ変換は行列 $H$ を用いて以下のように表せる。

$$p' = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ W' \end{pmatrix} = Hp \quad (3.10)$$

ホモグラフィ行列 $H$ は $3 \times 3$ 行列である.

[11]によると,  $P$ と $P'$ は射影変換によって同じ点になるので, 次の関係式が成り立つ.

$$P = \frac{1}{W'}P' \quad (3.11)$$

この式より, 位置ベクトル $P$ と $P'$ は平行であると言えるので, 次のように書き直せる.

$$P \times P' = P \times Hp = \begin{pmatrix} Yh^{3T}p - h^{2T}p \\ h^{1T}p - Xh^{3T}p \\ Xh^{2T}p - Yh^{1T}p \end{pmatrix} = 0 \quad (3.12)$$

ただし,  $h^{iT}$ は $H$ の行ベクトルを表す.

式(3.12)を $h^{iT}$ についてまとめると,

$$\begin{pmatrix} 0 & -p^T & Yp^T \\ p^T & 0 & -Xp^T \\ -Yp^T & Xp^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{pmatrix} = 0 \quad (3.13)$$

式を成分表示して以下のように書くことができる.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -Yx & -Yy & -Y \\ x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -Xx & -Xy & -X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{pmatrix} = 0 \quad (3.14)$$

式(3.14)より, 4点の座標が分かれば, ホモグラフィ行列を求めることができる. また, 4点以上の座標が分かれば, 式(3.14)は以下ようになり, 特異値分解を用いて, 最小二乗法によって $H$ を求めることができる.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -X_1x_1 & -Y_1y_1 & -Y_1 \\ x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -Y_1x_1 & -X_1y_1 & -X_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -X_2x_2 & -Y_2y_2 & -Y_2 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -Y_2x_2 & -X_2y_2 & -X_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{pmatrix} = 0 \quad (3.15)$$

## 第4章 提案手法の実験

### 4.1 実験の概要

まず、本研究で用いる2台のカメラが異なるため、キャリブレーションを行ってステレオ平行等位に近づく状態になるように配置する。次に、両カメラとホワイトボードとの距離を50cmにして、ホワイトボード上の各マーカーに対して距離測定を行う。この時、3.4節に於いて、ホモグラフィ行列を求める。

両カメラとホワイトボードとの距離を25cm, 100cmと変えて、ホモグラフィ変換を施した場合とそうでない場合とで、それぞれ距離測定を行う。

ただし、魚眼画像と通常画像においてのマーカーの選択は手動で行うものとする。

### 4.2 カメラキャリブレーション

本実験では、iPhone 5sを通常カメラとして使用する。まず、図3.4のように魚眼カメラを左に、通常カメラを右に設置する。この時、見ただ目で平行等位であると判断できる程度の状態になるように配置した。この配置でキャリブレーションを行う。両カメラを固定した状態で、図2.7のチェスボードを様々な向きに変えて、両カメラそれぞれ10枚ずつ撮影する。撮影するときは、両カメラから同一のキャリブレーションターゲットを撮影しなければならないので、同時にシャッターを切るようにする。両カメラでそれぞれ10枚撮影したチェスボードを、それぞれ以下の図4.2, 4.3に示す。

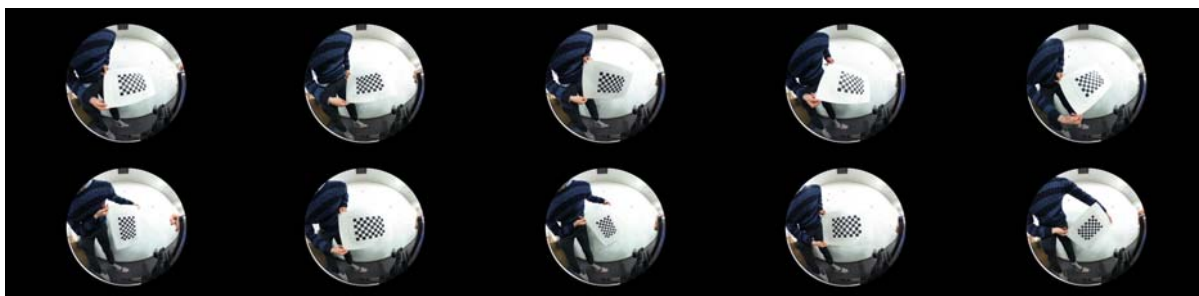


図 4.1 魚眼カメラで撮影した様々な向きのチェスボード

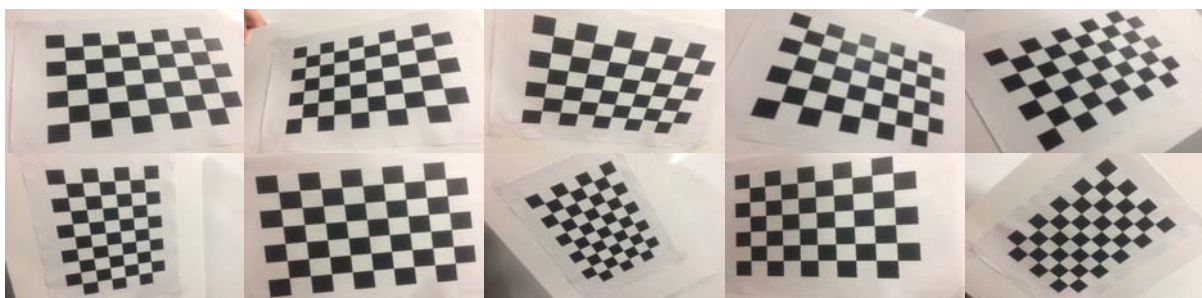


図 4.2 通常カメラで撮影した様々な向きのチェスボード



キャリブレーションをした結果、通常カメラから魚眼カメラへの平行移動ベクトル  $T$  について、以下の値が得られた。

$$T = \begin{pmatrix} -162.6 \\ -6.5 \\ 11.0 \end{pmatrix}$$

ただし、ベクトル  $T$  の各成分の値の単位は mm(ミリメートル)である。この得られたベクトル  $T$  の各成分の値をもとに、再配置した後、再度キャリブレーションを行ったところ、次のベクトル  $T$  が得られた

$$T = \begin{pmatrix} -165.0 \\ 3.5 \\ 9.1 \end{pmatrix}$$

これ以上、平行等位に近い状態に配置できないと考え、この配置で距離測定を行うこととした。

#### 4.3 ホモグラフィ行列の算出

2台のカメラを壁から 50cm 離して距離測定を行い、結果は以下の表 4.1 のようになった。ただし、マーカーの番号は、3.4 節の図 3.7 に従うものとする。

また、この時に選択したマーカーと、理想的な点の位置を用いて、ホモグラフィ行列を求めた。これ以降、表における測定距離とは、式(3.9)の  $L_2$ 、つまりベースラインから壁までの距離を意味することにする。

表 4.1 測定距離を 500mm とした時の結果

マーカー番号	測定距離(mm)	誤差(%)
1	504.8	0.96
2	521.3	4.26
3	560.3	12.06
4	582.6	16.52
5	482.5	3.5
6	509.3	1.86
7	531.4	6.28
8	577.6	15.52
9	471.6	5.68
10	487.4	2.52
11	509.6	1.92
12	544.7	8.94
13	460.6	7.88
14	475.6	4.88
15	488.9	2.22
16	515.6	3.12

マーカーの座標と、理想的な点の座標により、以下のホモグラフィ行列が得られた。

$$H = \begin{pmatrix} 1.014 & 0.030 & -14.799 \\ -0.055 & 0.980 & 18.493 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

#### 4.4 ホモグラフィ変換による誤対応の補正の検証

4.3 節で求めたホモグラフィ行列  $H$  を用いて、異なる距離の測定に対しても補正が有効であるかを検証する。

表 4.2 測定距離を 250mm とした時の結果(ホモグラフィ変換なし)

マーカー番号	測定距離(mm)	誤差(%)
1	274.6	9.84
2	271.4	8.56
3	276.6	10.64
4	278.3	11.32
5	270.5	8.2
6	271.7	8.68
7	272.5	9
8	278.9	11.56
9	263.4	5.36
10	267.7	7.08
11	266.8	6.72
12	267.6	7.04
13	261.4	4.56
14	259.9	3.96
15	263.8	5.52
16	261.4	4.56

表 4.3 測定距離を 250mm とした時の結果(ホモグラフィ変換あり)

マーカー番号	測定距離(mm)	誤差(%)
1	263.2	5.28
2	266.6	6.64
3	264.8	5.92
4	270.3	8.12
5	259.0	3.6
6	263.4	5.36
7	265.0	6
8	269.8	7.92
9	263.0	5.2
10	261.6	4.64
11	263.5	5.4
12	265.4	6.16
13	261.9	4.76
14	261.8	4.72
15	263.7	5.48
16	265.3	6.12

表 4.4 測定距離を 1000mm とした時の結果(ホモグラフィ変換なし)

マーカー番号	測定距離(mm)	誤差(%)
1	1031.8	3.18
2	1071.0	7.1
3	1128.2	12.82
4	1305.0	30.5
5	954.2	4.58
6	998.0	0.2
7	1069.9	6.99
8	1195.8	19.58
9	951.3	4.87
10	978.3	2.17
11	1028.4	2.84
12	1171.1	17.11
13	884.3	11.57
14	963.6	3.64
15	1020.5	2.05
16	1033.5	3.35

表 4.5 測定距離を 1000mm とした時の結果(ホモグラフィ変換あり)

マーカー番号	測定距離(mm)	誤差(%)
1	851.0	14.9
2	957.5	4.25
3	1021.8	2.18
4	1166.4	16.64
5	853.1	14.69
6	930.4	6.96
7	1022.9	2.29
8	1117.2	11.72
9	856.4	14.26
10	910.4	8.96
11	991.0	0.9
12	1095.7	9.57
13	874.7	12.53
14	939.9	6.01
15	969.1	3.09
16	1142.1	14.21

測定距離が 250mm の場合、ホモグラフィ変換を施さない時の誤差の平均が 7.66%であるのに対して、ホモグラフィ変換を施した時の誤差の平均は 5.71%である。よって、ホモグラフィ変換によって誤差が軽減されている。

測定距離が 1000mm の場合、ホモグラフィ変換を施さない時の誤差の平均が 8.28%であるのに対して、ホモグラフィ変換を施した時の誤差の平均は 8.95%である。よって、ホモグラフィ変換によって誤差は軽減されていない。しかし、ホモグラフィ変換を施さない時は、最大 30.5%の誤差を含むデータがあるのに対して、ホモグラフィ変換を施した時は、最も大きい誤差を持つデータでも 16.64%の誤差である。

これらのことより、どの距離においても一度求めたホモグラフィ行列で誤差が軽減されるわけではないことがわかった。

また、どの測定結果においても、4 番のマーカーのデータが一番大きい誤差を持っていることがわかる。このマーカーは、撮影した魚眼カメラから一番遠い位置にある。さらに、8 番のマーカーのデータも、表 4.5 以外の結果において、2 番目に大きい誤差を含んでいる。つまり、魚眼画像において中心から離れるほど、距離測定の誤差が大きくなることがわかった。

## 第5章 結論と今後の課題

### 5.1 結論

本研究では、魚眼カメラと通常カメラを用いた距離測定法と、ホモグラフィ行列による補正を提案するとともに、実験により手法の評価を行った。その結果、平均10%未満の誤差で距離測定を行えることを示した。また、ホモグラフィ行列を求めることにより、より良いステレオカメラシステムにすることができることを示した。魚眼画像周辺部の歪みを考慮することによって、誤差をより小さくすることができると考えられる。

### 5.2 今後の課題

自動車やドローンの自動運転の実現にステレオ距離測定が使われていることから、リアルタイム処理が必要であると考えられる。また、魚眼画像において、歪みが大きいとされる範囲では得られるデータも大きな誤差を持つことがわかったので、今後は歪みによる誤差も考慮した距離測定を行わなければならない。最後に、実験データ数が少なかった故に、ホモグラフィ変換による影響の傾向が読み取れなかったので、追加実験が必要であると考えられる。

**謝辞**

本研究を行うにあたって必要な機材と環境を与えてくださり、研究について指導してくださった渡辺裕教授に感謝致します。

日頃からアドバイスをくださった修士1年 Song Mengcheng さんにも感謝致します。



**参考文献**

- [1] NRI FinancialSolutions 自動運転技術の発展とその影響 ([http://fis.nri.co.jp/ja-JP/publication/kinyu\\_itf/backnumber/2016/12/201612\\_5.html](http://fis.nri.co.jp/ja-JP/publication/kinyu_itf/backnumber/2016/12/201612_5.html), 2017/01/23 アクセス)
- [2] 小坂谷達夫, 伊藤聡, 窪田進, 2 種類の異なる特徴を用いた特定物体検出, 東芝レビュー Vol.65 No.7, pp.33-36, 2010.
- [3] 金谷健一・菅谷保之・金澤靖, 『3次元コンピュータビジョン計算ハンドブック』森北出版株式会社, Oct. 2016
- [4] 江尻正員ほか, 『デジタル画像処理[改訂新版]』画像情報教育振興協会, Mar. 2015
- [5] パースフリークス, (<http://www.persfreaks.jp/main/aov/fisheye/>, 2017年1月5日アクセス)
- [6] Z. Zhang, “Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations”, “Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision”, pp.666-673, Corfu, Sept. 1999
- [7] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, #22, No.11, pp.1330-1334, Nov. 2000
- [8] P. F. Sturm, S. J. Maybank, “On plane-based camera calibration – A general algorithm, singularities, applications”, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol.1, pp.432-437, 1999
- [9] Gary Bradski, Adrian Kaehler 『詳解 OpenCV - コンピュータビジョンライブラリを使った画像処理・認識』松田晃一訳, 株式会社オライリー・ジャパン, Aug. 2009
- [10] D. C. Brown, “Close-range camera calibration”, Photogrammetric Engineering pp.855-866, 1971
- [11] “Shogo Computing Laboratory”, (<http://shogo82148.github.io/homepage/memo/geometry/homography/>, 2017/01/27 アクセス)

## 図一覧

図 2.1	透視投影モデル-----	3
図 2.2	画像座標とピクセル座標の関係-----	4
図 2.3	等距離射影方式-----	6
図 2.4	撮影対象の平面イメージ-----	6
図 2.5	魚眼レンズに写る像-----	6
図 2.6	視円錐-----	7
図 2.7	チェスボード(キャリブレーションターゲット)-----	8
図 2.8	2台の通常カメラによる平行等位ステレオ-----	11
図 3.1	ステレオ距離測定システム-----	13
図 3.2	ワールド座標系と両カメラのカメラ座標系の関係-----	14
図 3.3	魚眼カメラと通常カメラによる平行等位ステレオモデル-----	15
図 3.4	距離測定の様子-----	16
図 3.5	魚眼カメラで得られた画像-----	17
図 3.6	通常カメラで得られた画像-----	17
図 3.7	マーカーの番号-----	17
図 3.8	魚眼画像上の各マーカーに対する理想的な対応点-----	18
図 3.9	実際のマーカーが成す平面と理想点が成す平面-----	18
図 4.1	魚眼カメラで撮影した様々な向きチェスボード-----	21
図 4.2	通常カメラで撮影した様々な向きチェスボード-----	21

**表一覧**

表 4.1	測定距離を 500mm とした時の結果-----	23
表 4.2	測定距離を 250mm とした時の結果(ホモグラフィ変換なし) -----	24
表 4.3	測定距離を 250mm とした時の結果(ホモグラフィ変換あり)-----	25
表 4.4	測定距離を 1000mm とした時の結果(ホモグラフィ変換なし)-----	26
表 4.5	測定距離を 1000mm とした時の結果(ホモグラフィ変換あり)-----	27