#### 注意事項

実験予習書:

実験予習書の実験装置・実験方法には、下記の4.2で実施する"スポット光の投影による3次 元計測"で各パラメータを精度良く求めるための方法を各自が考え、具体的に記載すること。他の 項目の実験方法については、実験予習書に記載する必要はないが、実験の原理・内容を十分に理解 しておくこと。

※実験予習書は実験日に教員へ提出すること。

・レポート内容・採点基準:

レポートに記載すべき内容と注意点が説明されるので、適切にまとめること。

・レポート提出方法: 締切期限までに、計測工学研究室(5104A 室)設置のレポート回収ボックスへ提出すること。

## 1. 題目

3次元画像計測

## 2. 目的

物体の形状や空間情報を計測するための 3次元画像計測技術の発展が目覚ましい。 特に、画像認識技術との融合によるステレ オビジョン技術は、ロボットに代表される 自動制御の分野をはじめ、医療、交通、物 流分野などへの適用が進められている(図 1)。ここでは、カメラによって撮像された 画像から目的とする情報を抽出するための 基本的な画像処理技法と、空間情報の画像 計測原理を学ぶ。また、得られた空間情報 に含まれる誤差要因について考察する。



図1 3次元画像計測技術の応用分野

### 3. 原理

## 3.1 3次元画像計測法の分類

人間の空間認知は、網膜上の結像ボケ、両目視差、基準となる物体との大小関係、観測位置の変更 (物体の動き)等の組み合わせによって行われている。3次元画像計測法として多くの方法が提案さ れており、図2に示す受動型と能動型に分類される<sup>(1)</sup>。



図2 3次元画像計測法の分類

## 3.2 単眼視による3次元計測

人間は必ずしも両眼を使用しなくても、 基準となる物体との大小関係(見掛けの大 きさ)や位置関係を基に空間の奥行き情報 をおおよそ知覚している。例えば、カメラ から  $Z_0$  [m]の距離に置かれた半径  $R_0$  [m] の球体が画像上(画像の大きさ:w [pixel] × h [pixel]) で半径  $r_0$  [pixel]となるこ とが既知であれば、図3に示すように、取 り込まれた画像上における球体の半径 r[pixel]と座標( $C_x$ ,  $C_y$ ) [pixel]から、球 体の空間的な位置(X, Y, Z)が式(1-1)~(1-3)で求められる。





$$X = \left(C_x - \frac{w}{2}\right)\frac{R_0}{r} \quad [m] \tag{1-1}$$

$$Y = \left(C_y - \frac{h}{2}\right)\frac{R_0}{r} \quad [m] \tag{1-2}$$

$$Z = Z_0 \frac{r_0}{r} \quad [m] \tag{1-3}$$

## 3.3 ステレオ法による3次元計測

3.3.1 ピンホールカメラと透視投影

ステレオ法は、対象物体を複数の視点から観測する三角測量の原理に基づいており、カメラで撮像 された画像から物体への視線を算出して、それらの交点から物体の空間的な位置を推定する。

先ず初めに、カメラを通して見える画像を数学的に表現するために、図4(a)に示すピンホールカメ ラモデルを導入する。ピンホールカメラでは、空間上の物体から発せられた光が投影中心(ピンホー ル)を通過して画像平面(投影平面)に結像される。このとき、画像平面上における物体の大きさ *x* [m]は、カメラの焦点距離 *f* [m]を用いて式(2)で表される。

$$-x = f \frac{X}{Z} \qquad [m] \qquad (2)$$

ここで、ピンホールに対して画像平面の位置を入れ替えた投影モデル(図4(b))を用いると、画像 平面における物体の位置は、式(3-1)、(3-2)で表される。

$$x_{s} = f \frac{X}{Z} \qquad [m] \qquad (3-1)$$
$$y_{s} = f \frac{Y}{Z} \qquad [m] \qquad (3-2)$$



図4 ピンホールカメラモデル

さらに、 $(x_s, y_s)$ を $(x_s, y_s, 1)$ と表現する"同次座標(斉次座標)"を導入すると以降の行列演算の取り扱いが容易となるため、倍率(焦点距離)を考慮して式(3-1)、(3-2)を式(4)のように表す。

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$
 [m] (4)

このような同次座標で表される( $x_s$ ,  $y_s$ , f)は、画像平面における 2 次元座標( $x_s$  /f,  $y_s$  /f)を表し、 そのときの実際の物体の位置は(X/Z, Y/Z)に対応するものと定義される。ただし、式(4)の左辺を 定数倍しても同値を示すので、より一般的には式(5)のように表され、撮像された画像平面上の位 置から、物体の存在する位置(方向)が求められる。

$$\lambda \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad [m]$$
(5)

一方、画像平面に投影された物体の位置( $x_s$ ,  $y_s$ ) [m]は、画像(センサ)上では座標(u, v) [pixel] として扱われる。このとき、センサの縦方向の倍率 $\alpha_u$ と横方向の倍率 $\alpha_v$ とが異なること、センサの中

心が光軸上から( $u_0$ ,  $v_0$ ) [pixel]だけずれていることを考慮すると、両者は式(6)で関係づけられる。これを、同次座標で表現すると式(7)となる。なお、 $\beta$ は、座標軸u軸とv軸との直交度を表す。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_u & \beta \\ 0 & \alpha_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad [pixel]$$
(6)

$$f\begin{bmatrix} u\\v\\1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f\alpha_u & f\beta & u_0\\0 & f\alpha_v & v_0\\0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_s\\y_s\\f\end{bmatrix} \text{ [pixel]}$$
(7)

さらに、式(7)を式(5)に代入することで、物体の存在する位置(方向)を画像(センサ)上の座標から算出するための関係式が導出される。

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_u & \beta & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \text{ [pixel]}$$
(8)

3.3.2 スポット光の投影による3次元計測

ピンホールカメラで撮像された画像から、空間における物体の位置(方向)を定められることが 示された。しかし、物体の存在する空間上の点を一意に決定するには、視点を変えて物体を観測す る必要がある。その一つの方法として、図5に示すように対象物体にスポット光を投影して画像を 撮像することが考えられる。対象物体の位置は、画像から求められた物体の方向(視線)とスポッ ト光とが交差する点に基づいて、式(9)より求められる。





$$Z_G = \frac{B}{\tan \theta_L - \frac{x_R}{f}} \quad [m] \tag{9-1}$$

$$X_G = Z_G \tan \theta_L \quad [m] \tag{9-2}$$

$$Y_{G} = \tan \phi_{L} \sqrt{X_{G}^{2} + Z_{G}^{2}} \quad [m]$$
 (9-3)

$$\therefore$$
  

$$B_L = B + B_R$$
  

$$B_L = Z_G \tan \theta_L , \quad B_R = \frac{Z_G x_R}{f}$$

3. 3. 3 2台のカメラによる3次元計測

物体の存在する空間上の点を一意に決定する別の方法として、視点を変えて対象物体を観測する ことが考えられる。例えば、図6に示すように2台のカメラで撮像された画像から物体の方向(視 線)をそれぞれ求めることで、両者が交差する点を式(10)より算出できる。



(a) 2 台のカメラで撮像された画像平面の位置関係
 (b) XZ 平面における変数の定義
 図 6 2 台のカメラを用いた 3 次元計測の概念図

 $Z_{G} = \frac{fB}{x_{L} - x_{R}} \quad [m] \tag{10-1}$ 

$$X_{G} = \frac{x_{L}}{f} Z_{G} \quad [m] \tag{10-2}$$

$$Y_{G} = \frac{y_{L}}{\sqrt{x_{L}^{2} + f^{2}}} \sqrt{X_{G}^{2} + Z_{G}^{2}} \quad [m] \qquad (1 \ 0 - 3)$$
  
$$\therefore$$

$$\frac{B - (x_L - x_R)}{B} = \frac{Z_G - f}{Z_G}$$

3.3.4 カメラのキャリブレーション

上記までに求められた物体の位置は、カメラや光源の位置を基準としており(カメラ座標系、ある いは、ローカル座標系と呼ぶ)、これらの位置が変更されると、空間座標の定義も変化してしまう。そ こで、カメラや光源の位置に影響されない座標(ワールド座標系、あるいは、グローバル座標系と呼 ぶ)で空間の位置を一意に表すことが必要となる。

ワールド座標系における物体の位置を (X', Y', Z') [m]、カメラの位置を (X'<sub>0</sub>, Y'<sub>0</sub>, Z'<sub>0</sub>) [m]、カ メラの X 軸、 Y 軸、 Z 軸周りの回転角を  $\theta_X$ 、  $\theta_Y$ 、  $\theta_Z$  [deg]とすると、画像平面における物体の位置 ( $x_s$ ,  $y_s$ ,  $z_s$ ) [m]は、同次座標表現を用いて式 (11) で与えられる<sup>(2)</sup>。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \left\{ \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X'_0 \\ Y'_0 \\ Z'_0 \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix}$$
(11)

ここで、Rは回転マトリクスを表し、tは平行移動マトリクスを表す。

$$R = R_X R_Y R_Z \tag{12}$$

$$R_{X} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{X} & \sin\theta_{X} \\ 0 & -\sin\theta_{X} & \cos\theta_{X} \end{bmatrix}$$

$$R_{Y} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{Y} & 0 & \sin\theta_{Y} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{Y} & 0 & \cos\theta_{Y} \end{bmatrix}$$

$$R_{Z} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{Z} & \sin\theta_{Z} & 0 \\ -\sin\theta_{Z} & \cos\theta_{Z} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$t = -R \begin{bmatrix} X_{0}' \\ Y_{0}' \\ Z_{0}' \end{bmatrix}$$
(13)

式(11)を式(8)に代入することで、画像(センサ)上の座標が式(14)で求められる。

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix}$$
(14)  
$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix}$$

さらに、定数倍の効果を考慮して p34=1 とおき、整理すると最終的に次式を得る。

 $(1\ 5)$ 

したがって、画像平面における 6 個以上の点に対してワールド座標系における位置を与えれば、最 小二乗法に基づいて 11 個の未知パラメータ(キャリブレーションパラメータ *p<sub>ij</sub>*;*i*=1~3,*j*=1~4,*p*<sub>34</sub>=1) を決定できる。

3.3.5 ステレオカメラによる3次元計測

得られたカメラのキャリブレーションパラメータを用いて式(14)からλを消去すると、画像(センサ)上の座標(*u*, *v*)とワールド座標系における物体の位置(*X*', *Y*', *Z*')との関係が式(16)のように導出される。

$$\begin{bmatrix} p_{31}u - p_{11} & p_{32}u - p_{12} & p_{33}u - p_{13} \\ p_{31}v - p_{21} & p_{32}v - p_{22} & p_{33}v - p_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{14} - p_{34}u \\ p_{24} - p_{34}v \end{bmatrix}$$
(16)

しかし、2 変数(u, v)のみからでは3 変数(X', Y', Z')を一意に決定できない。そこで、視点を変 えたキャリブレーション済みのカメラ(キャリブレーションパラメータ  $q_{ij}$ ;  $i=1\sim3$ 、 $j=1\sim4$ )をもう1 台用意すれば、左右のカメラから得られた画像上の座標( $u_L$ ,  $v_L$ )、( $u_R$ ,  $v_R$ )とワールド座標系との関係 が式(17)で与えられるので、最小二乗法に基づいてワールド座標系における物体の位置を算出でき る。

$$\begin{bmatrix} p_{31}u_L - p_{11} & p_{32}u_L - p_{12} & p_{33}u_L - p_{13} \\ p_{31}v_L - p_{21} & p_{32}v_L - p_{22} & p_{33}v_L - p_{23} \\ q_{31}u_R - q_{11} & q_{32}u_R - q_{12} & q_{33}u_R - q_{13} \\ q_{31}v_R - q_{21} & q_{32}v_R - q_{22} & q_{33}v_R - q_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{14} - p_{34}u_L \\ p_{24} - p_{34}v_L \\ q_{14} - q_{34}u_R \\ q_{24} - q_{34}v_R \end{bmatrix}$$
(17)

#### 4. 実験方法

## 4.1 単眼視による3次元計測

- 図3を参考にして、USBカメラ(Microsoft LifeCam Studio, Microsoft)をスタンドに固定した 後、PCのUSBポートに接続する。
- 撮像対象として用意された数種類の球体から目的に合致した適切なものを選択し、必要箇所の 寸法を測定した後、カメラ正面に配置する(適宜、スタンド等を利用して固定すること)。
- Windows アプリケーションから『カメラ』を選択し、解像度を 1920×1080 に設定した後、明 るさ(露出補正)を適切に調節する。また、手動フォーカス(焦点距離)を選択し、これ以降の 実験において焦点距離が変更されないように注意すること(ソフトウェアの使用方法は簡易マ ニュアルを参照すること)。
- 4. 撮像対象とカメラとの距離(式(1-3)における Z<sub>0</sub>[m])をメジャー等で測定する。
- 5. 撮像対象をカメラで撮像し、PCに保存する。
- 6. 画像処理ソフトウェア (ImageJ<sup>(3)</sup>, National Institutes of Health)を用いて、撮像対象に関するパラ メータ (式 (1-3) における  $r_0$  [pixel])を計測する (ソフトウェアの使用方法は、簡易マ ニュアルを参照すること)。
- 7. 撮像対象の位置を奥行き方向に数点変えて、カメラ中心から撮像対象までの各位置をメジャー 等により測定するとともに、取り込まれた画像からパラメータ(式(1-3)におけるr [pixel]) を計測し、撮像対象の空間位置(本実験ではZ[m]のみ)を算出する。
- 8. 結果をグラフにまとめる。
- 9. 以降の実験でカメラの焦点距離 f [pixel]が必要となるため、水平に設置した指金(目盛)を画像に取り込み、式(2)を用いて焦点距離を算出する。

## 4.2 スポット光の投影による3次元計測

- 1. 図5を参考にして、USBカメラとレーザポインタ(RX-4N、サクラクレパス)をスタンドに固 定する。
- 2. 計測を目的とする 1 点にスポット光を投影し、USB カメラで取り込まれた画像にスポット光 が表示されることを確認した後、画像を取り込む。
- 3. 式(9)により3次元位置を算出するために必要なパラメータをメジャー、分度器(プロトラ クタ)等を用いて測定する。
- 4. 画像処理ソフトウェア (ImageJ)を用いて、画像上から3次元位置を算出するために必要なパラ メータを抽出する。
- 5. 計測精度を評価するために、カメラ中心からスポット光までの各位置をメジャー等により測定 する。

- 6. スポット光の位置を数点変えて、上記の手順を繰り返す。
- 7. 結果をグラフにまとめる。

## 4.3 ステレオカメラによる3次元計測

- 1. 図6を参考にして、X軸ステージ上に設置したスタンドにUSBカメラを固定する。
- カメラのキャリブレーションを行う。キャリブレーションには、表面に格子模様(格子間隔: 40 [mm])が描かれた立方体(200 [mm] × 200 [mm])を撮像対象として用いる。
- 3. カメラを X 軸方向移動し、異なる 2 カ所から撮像対象の画像を取り込む。
- 式(15)によりそれぞれの位置におけるカメラのキャリブレーションパラメータを算出する ために、キャリブレーションに必要な画像上の複数の点(少なくとも6点以上)における座標 を画像処理ソフトウェア(ImageJ)を用いて抽出する。
- 5. 画像から抽出した各点の座標と、それらに対応した空間位置を表計算ソフトウェア(Microsoft Excel)にそれぞれ入力し、式(15)に基づいて各マトリクス要素を計算する。
- 6. 式(15) 左辺の第一マトリクス、ならびに、右辺のマトリクスに対応したデータをそれぞれ テキストファイル(タブ区切り形式)として保存する。
- 式(15)に基づいて、各位置におけるカメラのキャリブレーションパラメータを数値処理ソフトウェア(Scilab<sup>(4)</sup>、Institut National de Recherche en Informatique et Automatique、École nationale des ponts et chaussées)による最小二乗法(あるいは、擬似逆行列)で算出する(サンプルプログラムは提示する。ソフトウェアの使用方法は、簡易マニュアルを参照すること)。
- 8. キャリブレーション終了後、任意に指定した格子点の座標を、式(17)に基づいて最小二乗 法(あるいは、擬似逆行列)により算出する。
- 9. 画像から算出された座標と実測値(理論値)とを比較する。

#### 5. 考察事項

- 4.1~4.3の各実験結果に対して、特に計測精度の観点から考察せよ(計測精度に影響を 及ぼす因子を具体的に挙げて、計測誤差を論じよ)。また、計測精度を改善するための方法を 提案せよ。
- 2. 画像情報に基づいて3次元計測を行う場合の長所・短所を述べよ。
- 3. ロボットビジョンとしてステレオカメラを用いた場合の問題点を述べよ。
- ステレオカメラを用いた実験では、画像平面における点の指定や座標の入力を人間が行った。
   これらの処理をはじめ、物体認識を自動的に行うために必要な画像処理手順を述べよ。
- 5. 式(15)で求められるカメラのキャリブレーションパラメータPには、カメラ固有のパラメ ータ(内部パラメータ:式(8)における α<sub>u</sub>、α<sub>v</sub>、β、u<sub>0</sub>、v<sub>0</sub>)と、カメラの位置・姿勢に関す るパラメータ(外部パラメータ:式(11)、(12)における、X'<sub>0</sub>、 Y'<sub>0</sub>、 Z'<sub>0</sub>、θ<sub>x</sub>、θ<sub>y</sub>、θ z)が含まれている。キャリブレーションパラメータPと内部パラメータとの関係を導出し、 実験結果からそれらを算出せよ。

## 6. 使用可能機器

- ・USB カメラ (Microsoft LifeCam Studio、Microsoft)
- ノート PC (HP17)
- ・X 軸ステージ (B06-1N 、駿河光機):移動量±50 [mm]
- ・レーザポインタ(RX-4N、サクラクレパス)
- ・スタンド、ムッフ、クランプ
- ・巻尺:5.5 [m]
- ・曲尺:30 [cm]
- ・プロトラクタ:全長 20 [cm]
- ・全円分度器:直径15 [cm]
- ・ディジタル角度計(76549、シンワ測定): 最小表示 0.1 [deg]
- ・下げ振り:3 [m]
- ・ガムテープ、両面テープ
- ·撮像対象

直方体アクリルケース:200 [mm]

白色スチロール球: φ30、φ70、φ100

赤色スチロール球: φ70

青色スチロール球: φ70

木製直方体ブロック:85 [mm]

## 7. 参考文献

- (1) 井口征士、佐藤宏介、三次元画像計測、昭晃堂、1996.
- (2) 佐藤 淳、コンピュータビジョン 一視覚の幾何学一、コロナ社、2006.
- (3) National Institutes of Health、"ImageJ"、http://rsb. info. nih. gov/ij/、2011.
- (4) Institut National de Recherche en Informatique et Automatique, École nationale des ponts et chaussées, "Scilab WebSite", http://www.scilab.org/, 2011.

以上