

カメラキャリブレーションにおける ランドマーク位置の高精度抽出

河合宏紀* 岡村健史郎*

Accurate Landmark Localization for Camera Calibration

Hironori KAWAI, Kenshiro OKAMURA

Abstract

In this paper, we propose an accurate landmark localization method for camera calibration. In addition to the case of the stable camera, the rotating camera has intrinsic parameters which are tilts of the camera rotation axes. Using the landmark positions on the sequential images which are taken by the camera rotating, the tilts of the camera rotation axes can be calibrated. But, in conventional methods using the binarized image, the localization error of landmark positions on the image was a big problem. In order to solve this problem, we propose new methods using the grayscale and color images. And our proposed methods are validated for the accurate camera calibration in the experiments.

Key words: landmark localization, camera calibration, line approximation of trajectory

1. はじめに

災害現場、海底調査、宇宙空間など、人間が立ち入るには困難で危険な場所においては遠隔操作や自律移動が可能なロボットによる作業を導入することが重要である[1]。このようなロボットにはある程度の自律機能が必要であり、特に作業現場での事故防止や適切な作業のため、ロボットの正確な自己位置推定が不可欠である。関連研究として、水族館などの大型水槽内で作業するロボットの位置を計測する研究がある。これは、ロボット頭部に搭載したカメラから、予め設置した LED ランドマーク(以降、LED)を撮影し、獲得した画像情報からロボットが 3 次元的な自己位置を推定するというものである[2][3]。このようなワールド座標系におけるカメラの位置や姿勢の計測のことを、カメラの外部パラメータのキャリブレーションという。

また、カメラには内部パラメータと呼ばれる「焦点距離」、「レンズ歪み係数」、「画面の縦横比」、「画像の歪み中心」などがある[4]。実際にカメラを用いて撮影実験を行うときは、事前にこの内部パラメータのキャリブレーションを行っておくことが重要である。ロボットの頭部のように回転機構をもつカメラの場合は、通常の固定カメラの内部パラメータに加えて、「回転軸の傾き」が存在する[5]。この回転軸の傾きの影響により、カメラの回転角度によっては撮影対象となる物体の画像上の位置が本来の位置から大きくずれてしまうという問題が生じる。この回転軸の傾きのキャリブレーションを行う方法として、前述の自己位置推定と同様に LED を壁面に設置し、さらにカメラを回転しながら撮影することで、その連続画像上を LED が描く軌跡を用いる方法がある[6]。この回転軸の傾きによる画像上のずれは他

の内部パラメータと比べても大きく、この回転軸の傾きをいかに正確にキャリブレーションしておくかが、撮影実験においてはより重要となる。しかし、このキャリブレーションを行う際に問題となってくるのが、デジタル画像上の LED の中心位置を画像処理で正確に抽出することが困難であることである。

そこで本研究では、カメラ回転軸のキャリブレーションをより精度向上のため、デジタル画像の解像度(ピクセル単位)以上の精度で、LED の中心位置を抽出することを目的とする。このことはさらに、前述の LED ランドマークを用いた自己位置推定のような、外部パラメータのキャリブレーションにおける精度向上にもつながるといえる。従来手法である 2 値画像を用いた中心位置の抽出方法に対し、グレースケール画像およびカラー画像の情報を用いたより安定的で高精度な方法を提案し、実際にカメラで撮影した画像を用いた実験によりその精度評価した。

2. カメラの回転軸の傾きのキャリブレーション

2.1 カメラの回転軸の傾きの種類

ロボットの頭部のようにパンおよびチルト方向に回転機構を持つカメラの場合、通常の固定カメラに加えて、「光軸に垂直な平面スクリーンの傾き角」、「スクリーンの光軸回りの回転角」の傾きに関する内部パラメータのキャリブレーションも必要となる。このような光軸に対する傾きを「スクリーンに対するパンおよびチルトの各回転軸の傾き」と考えることができる。そこで、以降の説明ではこの回転軸の傾き角度をそれぞれ、

- パンおよびチルト回転軸のロール方向傾き角度（以降、ロール方向傾き）
- パン回転軸のピッチ方向傾き角度（以降、ピッチ方向傾き）
- チルト回転軸のヨー方向傾き角度（以降、ヨー方向傾き）

とよぶことにする。図 1 にカメラ回転軸の傾きの例を示す。ここで、 ϕ はロール方向傾きであり、 ψ はピッチ方向傾き、 f はカメラの焦点距離である。この回転軸の傾きに起因する画像上の撮影物体の位置ずれを補正するために、カメラを回転させながら撮影した LED が画像上で描く軌跡を用いて回転軸の傾きのキャリブレーションを行う。

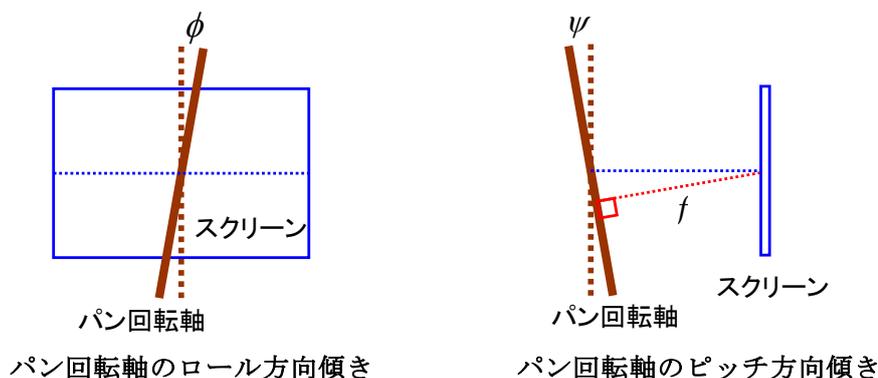


図 1 カメラ回転軸の傾きの例

2.2 カメラの回転軸の傾きのキャリブレーション

壁面に設置した LED をカメラを回転させながら撮影した連続画像上で描く軌跡を用いて、カメラ回転軸の傾きをキャリブレーションする方法について述べる。回転軸の傾きには 2.2 項で述べたように 3 種類あるが、ここではそのうち、パン回転軸のロール方向傾きとピッチ方向傾きのキャリブレーションについて述べる。他の回転軸の傾きのキャリブレーションについては、参考文献[6]を参照いただきたい。まず、カメラのパンおよびチルト角度を 0° に設定し、LED を画像中心に撮影されるようにカメラの正面に設置する。そして、画像に LED 以外のものが写らないように真っ暗な環境下で、図 2 の左図に示

すように、カメラのチルト角度を 0° に固定したままパン方向に回転させて LED を連続撮影する。図 2 の右図はこのようにして撮影した連続画像の重畳結果であり、画像上の LED が水平に軌跡を描くことが分かる。

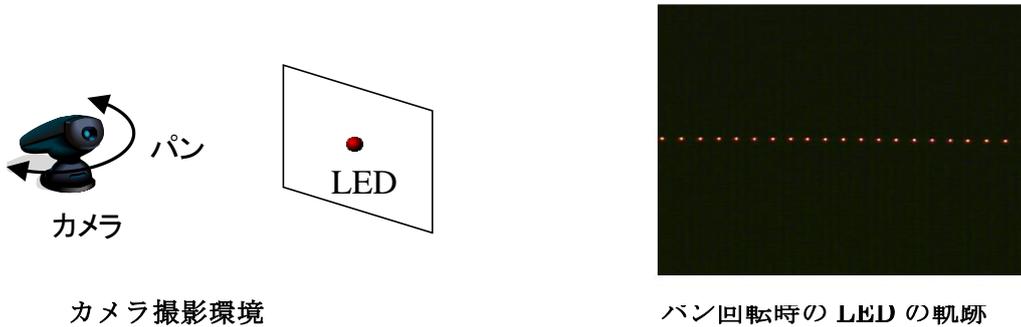


図 2 パン回転による LED の連続撮影

連続撮影によって得られた複数の画像上の LED 領域の中心位置を、3 節以降で述べる方法で各画像ごとに求める。抽出した複数の LED 領域の中心位置の座標上の点列を、最小二乗法を用いて直線で近似する。ロール方向傾きがある場合は図 3 の右図に示すような傾いた直線となる。

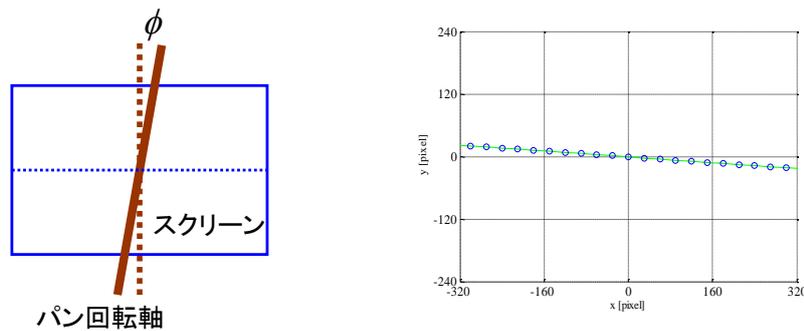


図 3 ロール方向傾きがある場合

この直線の式は、ロール方向傾き ϕ に応じて、

$$y = \tan \phi \cdot x \quad (1)$$

と表すことができる。したがって、近似直線の傾きが a であるとするとき、ロール方向傾き角度 ϕ は、

$$\phi = \tan^{-1} a \quad (2)$$

で求めることができる。

次にピッチ方向傾きのキャリブレーションについて考える。ピッチ方向の傾き ψ がある場合は、前述のように設置した LED をカメラのパン角度のみを変えながら撮影したとき、画像上の LED の軌跡は図 4 の右図に示すような円弧を描く。この円を表す式は、カメラの焦点距離 f を用いて、

$$x^2 + \left(y + \frac{f}{\sin \psi}\right)^2 = \left(\frac{f}{\sin \psi}\right)^2 \quad (3)$$

と表される。よって、連続撮影の各画像から抽出した LED の座標の点列を、

$$x^2 + (y + r)^2 = r^2 \quad (4)$$

で表される半径 r の円で最小二乗法により近似することで、ピッチ方向傾き ψ を、

$$\psi = \sin^{-1}\left(\frac{f}{r}\right) \quad (5)$$

で求めることができる.

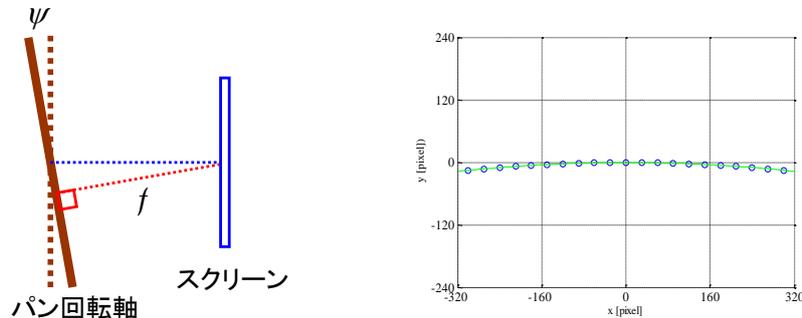


図 4 ピッチ方向傾きがある場合

2.3 デジタル画像における問題

2.2 項で述べたカメラ回転軸のキャリブレーションにおいて、また 1 節で述べたような LED ランドマークを用いたロボットの自己位置推定において、考慮すべき重要なことは、デジタル画像の解像度の問題である。これらの研究において、画像上の LED 領域の中心位置を画像処理で抽出する際には、必ず誤差が生じる。この誤差の原因は、図 5 の LED の拡大画像をみても分かるように、デジタル画像がピクセル単位以上の精細な情報を持っていないことにある。デジタル化の際にランドマークの縁がギザギザになるなどの変形が生じ、その中心位置を正確に計測できなくなるためである。この LED 領域の中心位置抽出時の誤差を低減する方法については、従来法との比較を含めて 3 節以降で説明する。

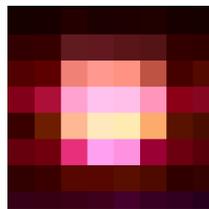


図 5 LED の拡大画像

3. LED 領域の中心位置の抽出方法

3.1 従来の 2 値画像を用いた中心位置抽出

LED のランドマークを撮影した画像から LED 領域の中心位置を抽出する方法について、まず従来の 2 値画像を用いた方法を説明する。図 6 に示すように、元のカラー画像をグレースケール画像に変換し、判別分析法[7]などを用いて 2 値化する。この 2 値画像の白領域についてラベリングを行い、ラベル付された領域の重心を LED 領域の中心位置とする。ただし、LED の撮影は真っ暗な環境で行い、2 値化した画像上で白領域となるのは発光している LED 領域のみとなることが前提である。しかし、この方法では 2 値化の際に用いられる閾値によって生成される 2 値画像が大きく変化するため、求まる LED 領域の中心位置が 2 値化結果に大きく依存してしまう。具体的には、閾値によって x 座標, y 座標それぞれ最大±1ピクセル程度の中心位置のずれを生じる。各画素のもつ濃淡値の範囲が0.0~1.0であるグレースケール画像に対し、異なる閾値で 2 値化した結果を図 7 にそれぞれ示す。この図からも、元の画像が同じであっても 2 値化結果により求まる LED 領域の中心位置が異なってしまうことは容易に想像でき

る.



図 6 LED 画像の 2 値化手順

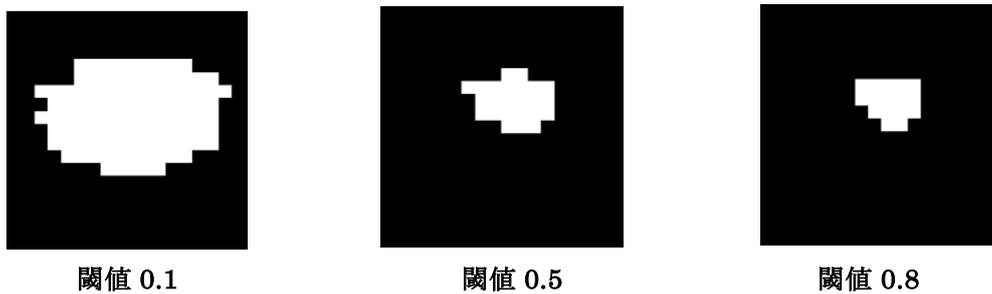


図 7 異なる閾値で 2 値化した結果

3.2 グレースケール画像を用いた中心位置抽出

3.1 項で述べたとおり, 2 値画像を用いて LED 領域の中心位置を求めると, 2 値化結果によって抽出位置が大きく異なり, 不安定で信頼性の低いものとなる. そこで, より安定的な中心位置を求めるため, グレースケール画像を用いて各画素の濃淡値を考慮した LED 領域の中心位置の抽出方法を提案する. まず, LED 領域の範囲を決定するために, 従来手法と同様に, 2 値画像を生成し, ラベリングを行う. ラベル付けされた領域を LED 領域とし, グレースケール画像における LED 領域の中心位置を, 以下の式で示すように画素の濃淡値を重みとして用いた計算によって求める. これは, LED 領域の中心に近ければ近いほど画像上は明るく写っているということを利用している. 画像座標 (i, j) における画素の濃淡値を $g(i, j)$ としたとき, LED 領域の中心位置 (x_c, y_c) は, 次の式で表すことができる.

$$x_c = \frac{\sum g(i, j) \cdot i}{\sum g(i, j)} \quad (6)$$

$$y_c = \frac{\sum g(i, j) \cdot j}{\sum g(i, j)} \quad (7)$$

3.3 カラー画像の各成分画像を用いた中心位置抽出

さらに, 中心位置の抽出精度を上げるためカラー画像の各成分画像を用いた LED 領域の中心位置の抽出方法を提案する. カラー画像の RGB 各成分画像を取り出し, 3 つの各成分画像(各画素はグレースケール画像と同様の濃淡値を持つ)に対し, 3.2 項で述べたグレースケール画像を用いた中心位置抽出の方法で, まず LED 領域の範囲を決め, さらに各成分画像ごとに LED 領域の中心位置を求める. こうして求まった 3 つの中心位置を平均した値を LED 領域の中心位置とする. グレースケール画像より情報量の多いカラー画像の情報(単純にはグレースケール画像の 3 倍の情報量)を用いたことで, より精度の

高い中心位置の抽出が期待できる。

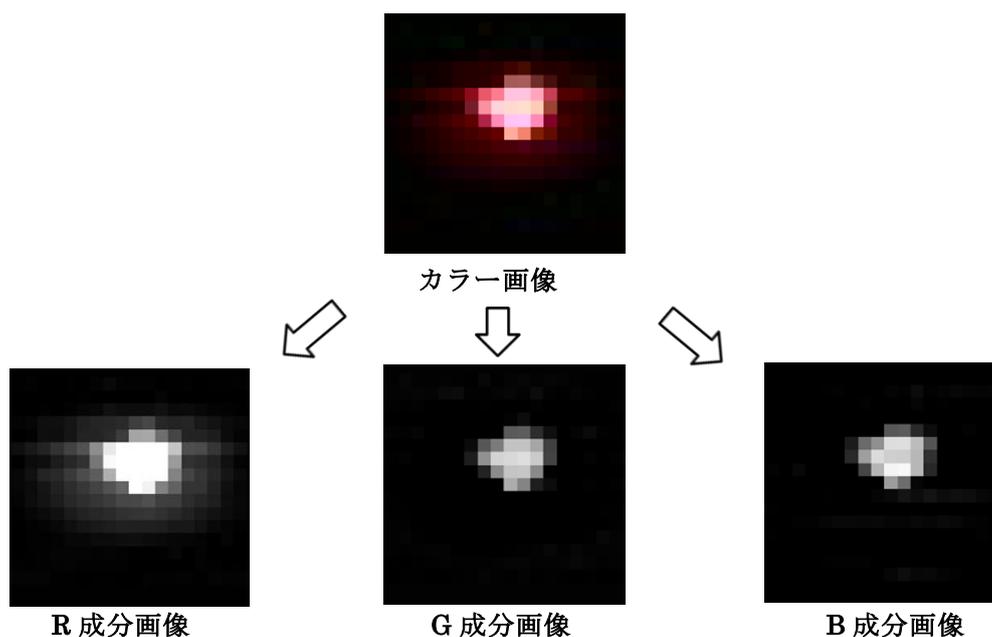


図 8 カラー画像の各成分画像

4 実験結果

4.1 実験環境および精度評価方法

LED の撮影は屋内で行い、LED 以外の、実験に用いたカメラの画角は横方向に約 40° であるので、カメラ撮影時のパン方向の回転角度は $\pm 20^\circ$ の範囲で 2° ずつ回転させながら撮影を行った。画像の解像度は 640×480 ピクセルで、RGB 各 8 ビットのカラー画像である。

LED を撮影する際、正確に画像中心に表示される位置に LED を壁面に設置することは難しい。またカメラの光軸の中心が画像中心と一致していない可能性もある。そのため、LED が中央に写っている画像 1 枚のみを用いただけでは、LED 領域の中心位置の真の値が分からないため、3 節で述べた 3 種類の方法の抽出精度を比較することはできない。そこで、2.2 項で述べたカメラ回転軸のキャリブレーションで求まる近似直線および近似円を用いる。カメラを回転しながら連続撮影した複数枚の画像から抽出された LED の中心位置と、複数の中心位置の点列から最小二乗法で求めた近似直線および近似円との間の残差をそれぞれ求め、その残差の総和を計算する。もしデジタル画像処理に伴う誤差の影響を受けずに LED の中心位置が正確に抽出できているならば、近似直線(ピッチ方向傾きが全くない場合)、または近似円からの残差が 0 になる。したがって、この残差の総和が少ないほど安定的で精度の高い LED の中心位置の抽出方法であるといえる。

4.2 精度評価(近似直線からの残差の総和)

2.2 項で述べたロール方向傾きをキャリブレーションするために、撮影した連続画像から抽出した各 LED の中心位置とそこから求めた近似直線からの残差の総和を表 1 に示す。LED 領域の範囲を決定するための 2 値化における閾値は LED 領域が小さくなりすぎないように 0.1~0.6 まで 0.1 刻みで変化させ、それぞれの閾値において、従来手法の 2 値画像を用いた中心位置抽出方法と、今回提案するグレースケール画像(表では濃淡画像)、およびカラー画像を用いた中心位置抽出方法との精度の比較結果である。表からも分かるように、従来手法では閾値変化による 2 値化結果の影響を大きく受けて中心位置がずれていることから、残差の総和が不安定になっていることが分かる。それに対し、今回の提案方法であるグレースケール画像を用いた場合もカラー画像を用いた場合も残差の総和が安定的であり、かつ従来手法よ

り残差が総じて少なくなっていることが分かる. 特にカラー画像を用いた方法では, RGB の各成分画像を用いることで濃淡画像の 3 倍の情報量を利用したことが精度向上につながっているのか, より残差が少なくなっていることが分かる. ただし, ここでの残差の総和には, まだピッチ方向の傾きの影響が考慮されていないため, これだけで提案手法の方が高精度であると結論付けることはできない.

表 1 近似直線からの残差の総和

2 値化の閾値	従来手法	提案手法	
	2 値画像	濃淡画像	カラー画像
0.1	1.93	1.59	1.47
0.2	1.77	1.53	1.44
0.3	1.63	1.49	1.43
0.4	1.53	1.44	1.42
0.5	1.42	1.36	1.36
0.6	1.41	1.38	1.29

4.3 精度評価(近似円からの残差の総和)

2.2 項にしたがって, 求めた近似直線を用いてロール方向傾き ϕ を計算し, 撮影した連続画像をそれぞれ以下の回転行列 R_t を用いて, $-\phi$ の角度で画像を回転することで補正する.

$$R_t = \begin{bmatrix} \cos(-\phi) & -\sin(-\phi) \\ \sin(-\phi) & \cos(-\phi) \end{bmatrix} \quad (8)$$

回転補正された各画像を用いて, 4.2 項の結果と同様に, ピッチ方向傾きをキャリブレーションするために求めた近似円からの残差の総和をそれぞれまとめた結果が表 2 である.

表 2 近似円からの残差の総和

2 値化の閾値	従来手法	提案手法	
	2 値画像	濃淡画像	カラー画像
0.1	0.22	0.12	0.13
0.2	0.16	0.12	0.11
0.3	0.14	0.12	0.12
0.4	0.13	0.12	0.12
0.5	0.18	0.14	0.12
0.6	0.16	0.14	0.12

ここでは, ロール方向傾きに対する画像補正が施されており, さらにピッチ方向傾きの影響を考慮した近似円からの残差となっているため, 4.2 項の表 1 と比較して, 全体的に大幅に残差の総和が少なくなっている. この表 2 においても, 従来手法の残差の総和が, 閾値の値によって不安定であることが分かる. それに対し, 提案手法は残差の総和が安定的でかつ少なくなっている. 以上のことから提案手法の方が中心位置抽出の精度が高いといえる. また, この提案手法の中心位置抽出を用いることで, 回転軸の傾きのキャリブレーションの精度向上が期待できる. なお, 提案手法における, グレースケール画像を用いた場合とカラー画像を用いた場合の結果との比較については, 表に示した 100 分の 1 ピクセルの精度では, ほとんど差が見られなかった.

5. おわりに

本研究では、回転機構をもつカメラに特有の内部パラメータである回転軸の傾きのキャリブレーションを正確に行うことを目的とし、その際に問題となる画像上の LED の中心位置抽出時の誤差を低減する方法を提案した。これは 2 値画像を用いた従来の中心位置の抽出方法に対し、グレースケール画像やカラー画像の濃淡値の情報を重みとして用いた計算を行うことにより、画像の 2 値化結果に依存しない安定的で誤差の少ない中心位置抽出の結果を得られたことを、実際の実験での精度評価により確認できた。これにより、回転軸の傾きのキャリブレーション精度の向上はもちろん、LED ランドマークを用いたロボットの自己位置推定などにも本提案手法の効果が期待できる。しかし、今回の方法により誤差をいくらか低減することはできたが、デジタル画像を扱う上では誤差を完全無くすことは不可能であると予測される。そのため、これ以上にキャリブレーションの精度を上げるためには、画像処理によって生じる誤差の傾向などを分析し[8]、その誤差を補正する方法の検討が必要と考える。

最後になりましたが、本研究の実験にご協力いただいた平成 21 年度本校情報工学科卒業生の松井愛子さんに心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] "緊急時の無人化施工ガイドブック", (財)先端建設技術センター編, 2001.
- [2] P. Zhang, E. E. Milios, and J. Gu, "Underwater robot localization using artificial visual landmarks.", In IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2004), pp.705-710, 2004.
- [3] 河合宏紀, 濱裕光: "パンチルトカメラを用いた自己位置の高精度推定法", システム制御情報学会論文誌, Vol.21. No.1, pp.1-9, 2008.
- [4] K. Nakano, M. Okutomi, and Y. Hasegawa, "Camera calibration with precise extraction of feature points using projective transformation.", In IEEE Int. Conf. on Robotics Automat. (ICRA 2002), Vol.3, pp.2532-2538, 2002.
- [5] 和田俊和, 浮田宗伯, 松山隆司, "視点固定型パンチルトズームカメラとその応用", 信学論(D-II), Vol.J81-D2, No.6, pp.1182-1193, 1998.
- [6] 河合宏紀, "ネットワークカメラを用いた 3 次元位置・姿勢の高精度推定に関する研究", 大阪市立大学博士論文, 2008.
- [7] 大津展之, "判別および最小 2 乗基準に基づく自動しきい値選定法", 信学論(D), Vol.J63-D, No.4, pp.349-356, 1980.
- [8] 河合宏紀, 濱裕光, 梅田三千雄, "パンチルトカメラの回転軸の傾きの高精度キャリブレーション法", 平成 20 年度電気学会関西支部連合大会, G13-27, 2008.