

# 既存の平面テクスチャの勾配拘束によるレジストレーション を利用したカメラキャリブレーション

田中 祐輝<sup>†</sup> 増山 岳人<sup>‡</sup> 梅田 和昇<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 中央大学大学院理工学研究科 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

<sup>‡</sup> 中央大学理工学部 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

E-mail: <sup>†</sup> y.tanaka@sensor.mech.chuo-u.ac.jp, <sup>‡</sup> {masuyama, umeda}@mech.chuo-u.ac.jp

**あらまし** カメラを用いた計測には、カメラのキャリブレーションが必要である。本研究では、特別なキャリブレーションターゲットを用いる必要のない、簡便なキャリブレーション手法を提案する。実環境に存在する平面テクスチャの3次元モデルとカメラから得られるカラー画像の位置合わせを行うことで、カメラの内部・外部パラメータを推定する。この際、2枚の画像の勾配拘束を利用する。実環境に存在する平面テクスチャを模したターゲットを用いて実験を行い、パラメータ推定を行うことができることを示す。

**キーワード** キャリブレーション, レジストレーション, 勾配拘束

## 1. 序論

近年、身の周りでカメラを用いた様々な計測が行われている。高精度の計測を行うにはカメラのキャリブレーションが必要不可欠である。そこで、これまで様々なキャリブレーション手法が研究されてきた。その多くは専用のキャリブレーションターゲットを用意したり、複数回ターゲットの提示を行う必要がある[1][2]。高精度な計測においては微小なパラメータの変化も把握する必要があり、我々の生活の中にあるカメラ計測システムにこれらの手法を適用すると、エンドユーザがその都度ターゲットを提示する必要があり、手間がかかる。また、チェッカーボードのような点を基準とした手法ではなく、エッジを利用してキャリブレーションを行う手法が提案されている[3]。この研究では連続した広範囲のエッジの1つの例としてフィールドホッケーのコートのラインを利用しているが、このようなターゲットは実環境に多く存在するものではない。そこで、本論文では意図的なターゲットの提示を必要としない、実環境に広く存在する平面テクスチャをターゲットとして用いたカメラキャリブレーションを提案する。本研究では、テクスチャの3次元モデルとカラー画像のレジストレーションを勾配拘束を用いて行う。実環境に存在するテクスチャを利用し、勾配拘束による3次元モデルとカラー画像の位置合わせを行うことで、精度良くカメラの外部・内部パラメータを推定することを本研究の目的とする。例えば車載カメラであれば、横断歩道や最高速度表示などの路面に描かれている道路標示を用いる。これらをキャリブレーションターゲットとしてカメラのパラメータ推定を行うことで簡便にキャリブレーションを行う。

## 2. カメラキャリブレーションの概要

本研究では、カメラキャリブレーションのために、ターゲットの3次元モデルとカラー画像のレジストレーションを行い、カメラの内部・外部パラメータを得る。3次元モデルはあらかじめ取得してあるものとする。さらに、キャリブレーション環境において、カメラによりターゲットが投影されたカラー画像を取得する。3次元モデルとカラー画像が一致していれば、3次元モデルとカラー画像は同一視点から撮影されたものであるといえる。そこで、3次元モデルとカラー画像の位置合わせを行うことにより、3次元モデルを記述している座標とカメラ座標の相対的な位置関係を得られることから、カメラの外部パラメータを推定する。カメラの個体値である内部パラメータもカラー画像に投影されるターゲットの写り方に影響することから、内部パラメータも含め推定を行う。

## 3. レジストレーション手法

3次元モデルとカラー画像の位置合わせを行うために、3次元モデル生成のための勾配拘束を用いた距離濃淡画像とカラー画像のレジストレーション手法[4]を利用する。距離濃淡画像とは、能動型のセンサを用いた距離画像取得時に反射強度の配列として得られる一種の濃淡画像である。本論文ではこの距離濃淡画像を3次元モデルとする。3次元モデルとカラー画像のレジストレーション手法を以下に示す。

図1のように画像平面に投影された3次元モデルとカラー画像が重複している領域において、オプティカルフローの拘束が近似的に満たされると仮定する。一般的なオプティカルフローの拘束式は次式で与えられる。

$$I_u \dot{u} + I_v \dot{v} = -I_t \quad (1)$$

$$I_u = \frac{\partial I}{\partial u}, \quad I_v = \frac{\partial I}{\partial v}, \quad I_t = \frac{\partial I}{\partial t}$$

$I$ は輝度値である。本研究ではカラー画像のある色成分と投影された3次元モデルとの差を輝度値 $I$ の微分とみなす。 $\dot{u}$ ,  $\dot{v}$ は3次元モデルからカラー画像への移動量に対応する。また、3次元空間中の点 $P$ と、その点がカラー画像平面に投影される時の画像上の点 $p$ の位置の幾何学的な関係は、図2より次式で表される。

$$u = \frac{\alpha_u X + sY}{Z} + u_0, \quad v = \frac{\alpha_v Y}{Z} + v_0 \quad (2)$$

$\alpha_u$ ,  $\alpha_v$ はそれぞれ横方向と縦方向の画素の大きさを焦点距離で除した値である。また、 $s$ は横方向のスキュー、 $u_0$ ,  $v_0$ は画像中心である。この5つの変数が内部パラメータである。式(2)を未知の変数で微分し、式(1)に代入することにより、次式の勾配拘束の式を得ることができる。

$$-av_{0x} - bv_{0y} - cv_{0z} + (bZ - cY)\omega_x + (cX - aZ)\omega_y + (aY - bX)\omega_z + I_u \frac{X}{Z} \dot{\alpha}_u + I_v \frac{Y}{Z} \dot{\alpha}_v + I_u \frac{Y}{Z} \dot{s} + I_u \dot{u}_0 + I_v \dot{v}_0 = -I_t \quad (3)$$

未知数の個数以上の勾配拘束式を求め、線形最小二乗法を適用することでカメラの外部パラメータ及び内部パラメータを求める。

また、この手法は3次元モデルとカラー画像がある程度類似していることが前提となっているため、3次元モデルとカラー画像の差異を少なくする処理を加える必要がある。そこで、Coarse-to-fineアプローチを用い、3次元モデルとカラー画像の変位が大きい場合、低解像度化された画像を用い、広い範囲で

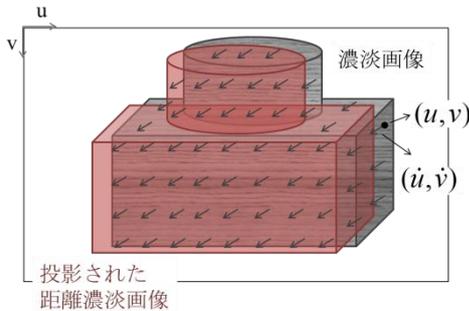


図1 両画像の輝度勾配  
レジストレーション対象

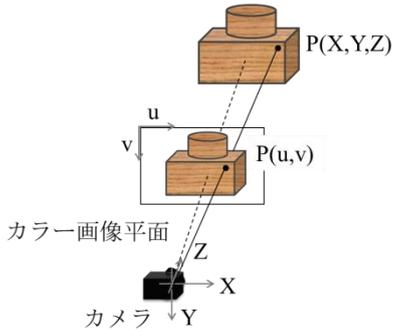


図2 画像への投影

空間微分を得て大まかな変位の算出・更新を行い、3次元モデルとカラー画像の変位が小さくなるにつれて、高解像度の画像を使用する。画像の低解像度化、および異なった標準偏差のガウシフィルタの利用により、画像の解像度を制御する。よって、パラメータ更新の反復計算は異なる解像度に対して行われる。この際、各解像度に合わせ更新を行うパラメータを制限することで計算の収束性を向上させる。また、レジストレーションの収束度評価するため、3次元モデルとカラー画像の相関係数を用いる。

## 4. 内部・外部パラメータ推定実験

道路標示を模した平面テクスチャを用いて実験を行い、本手法の有用性を検証する。

### 4.1. 実験概要

図3に示すように、ターゲットの重心位置を原点とする。ターゲットに用いた平面テクスチャを図4に示す。図5には実際の実験環境を示す。Coarse-to-fineアプローチに用いる各パラメータを表1に示す。ただし、Stage1では $\alpha_u = \alpha_v$ として計算を行っている。カメラの各パラメータの初期値を表2、3に示す。 $\alpha_u$ ,  $\alpha_v$ は105[mm]/(3.9[μm]×2)で求めた。105[mm]はカラー画像撮影時の焦点距離、3.9[μm]は撮像素子の物理的な1画素のサイズ、2は画像の縮小率である。この初期値による投影の後、テンプレートマッチングによりおおまかな位置合わせを行う。また、カメラで取得したカラー画像のサイズは6000×4000[pixel]であるが、レジストレーション時には3000×2000[pixel]に圧縮した。

表1 Coarse-to-fineアプローチのパラメータ

stage	低解像度化 比率	標準偏差	推定する 変数
1	4	2	$\alpha_u, \alpha_v, u_0, v_0$
2	4	2	$x, y, z, \psi, \theta, \phi$
3	2	1	$z, \alpha_u, \alpha_v, u_0, v_0$
4	2	1	$x, y, z, \psi, \theta, \phi$
5	1	0	$x, y, z, \alpha_u, \alpha_v, u_0, v_0$
FINAL	1	0	$x, y, z, \alpha_u, \alpha_v, u_0, v_0, s$

表2 外部パラメータ初期値

	x[mm]	y[mm]	z[mm]	$\psi$ [deg]	$\theta$ [deg]	$\phi$ [deg]
初期値	0	1500	-500	73	0	0

表3 内部パラメータ初期値

	$\alpha_u$	$\alpha_v$	s	$u_0$ [pixel]	$v_0$ [pixel]
初期値	13404	13404	0	1500	1000

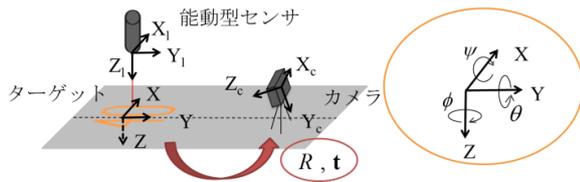


図3 実験環境座標系



図4 ターゲット



図5 実験環境稿

#### 4.2. 実験結果

前節で述べた条件でパラメータ推定を行った。その結果の1例を示す。カメラによって得られたカラー画像に3次元モデルを表2,3の初期値を用いて投影した状態を図6に示す。白色の枠内の明るくなっている部分が3次元モデルである。また、勾配拘束による位置合わせの結果を図7に示す。この位置合わせにより得られたカメラのパラメータを表4から表6に示す。設置位置の値は手動で計測したおおよその値である。図7より、位置合わせは正しく行われていることがわかる。さらに、表4,5より、大よそ正しい外部パラメータが推定される結果となった。表6より、内部パラメータが初期値と大きく異なる推定値となった。これは、例えば焦点距離を大きくして遠いものを撮影した時と焦点距離を小さくして近いものを撮影した時では、画像内のターゲットの写り方がほとんど変わらないように、内部パラメータと外部パラメータには強い相関があり、正しいパラメータを安定して求めることが困難であることが原因であると考えられる。また、3次元モデル取得時に座標軸のxy平面とターゲット平面が平行でなかった、ターゲットやカメラ設置の際にずれが生じていたなどの可能性があり、これらが外部パラメータ推定誤差に影響したと考えられる。さらに、初期値や Coarse-to-fine アプローチのパラメータ設定条件、ターゲットの種類によっては正しく位置合わせが行われない場合や、計算が収束しない場合があった。これは初期値での3次元モデルのカラー画像投影の際、ターゲットの重複部分が少ないことや最小二乗法に用いる点数が少ないことが影響していると考えられる。

#### 5. 外部パラメータ推定精度検証実験

前章より、内部・外部パラメータの同時推定を安定して行うことは困難であると考えられる。よって、内部パラメータを固定し、外部パラメータのみを推

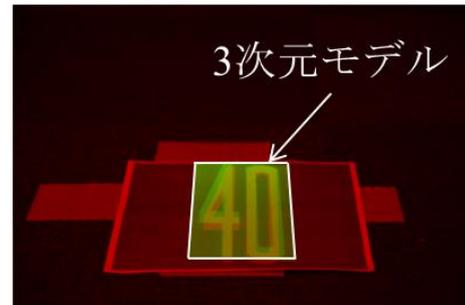


図6 初期値による3次元モデル投影

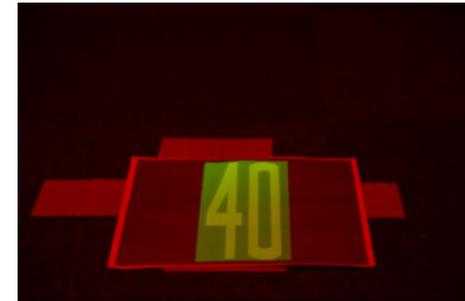


図7 位置合わせ結果

表4 カメラ位置推定結果

	x[mm]	y[mm]	z[mm]
設置位置	0	1500	-500
推定値	-24.7	1551.4	-596.0

表5 カメラ姿勢推定結果

	$\psi$ [deg]	$\theta$ [deg]	$\phi$ [deg]
設置位置	75	0	0
推定値	70.7	-2.5	-0.4

表6 内部パラメータ推定結果

	$\alpha_u$	$\alpha_v$
初期値	13404	13404
推定値	12749.3	12714.4

	s	$u_0$ [pixel]	$v_0$ [pixel]
初期値	0	1500	1000
推定値	-1649.9	994.4	1008.3

定することにより、外部パラメータ推定精度評価を行う。

#### 5.1. 実験概要

座標の設定とターゲット、画像縮小は4章と同様である。Coarse-to-fineアプローチに用いる各パラメータを表7に示す。本章の実験の初期値を表8に、固定した内部パラメータを表9に示す。また、カメラの外部パラメータの正確な真値を得ることが困難であることから、ターゲットの位置を手動で変化させカメラを移動させたとみなし、その応答によって推定精度を評価する。変位量はx軸、y軸方向にそれぞれ10[mm]ずつ最大50[mm]まで、z軸方向には

表 7 Coarse-to-fine アプローチのパラメータ

stage	低解像度化 比率	標準偏 差	推定する変数
1	4	2	x,y,z,ψ,θ,φ
2	2	1	x,y,z,ψ,θ,φ
FINAL	1	0	x,y,z,ψ,θ,φ

表 8 外部パラメータ初期値

	x[mm]	y[mm]	z[mm]	ψ[deg]	θ[deg]	φ[deg]
初期値	0	1500	-500	73	0	0

表 9 内部パラメータ

	$\alpha_u$	$\alpha_v$	s	$u_0$ [pixel]	$v_0$ [pixel]
初期値	13404	13404	0	1500	1000

5[mm]ずつ最大 20[mm]まで変位させた。

## 5.2. 実験結果

各軸にターゲットを変位させた時の、移動方向のカメラ位置変位量とその推定変位量の関係を図 8 に示す。また、その時の各外部パラメータの平均誤差と標準偏差を表 10 から表 12 に示す。ただし、x 軸方向に 50[mm]移動させた実験では、初期値での投影の際に 3 次元モデルとカラー画像内のターゲットの位置の差が大きくなりテンプレートマッチングが正しく行われなかったことから、この時の結果を除外して評価を行う。

図 8 より、カメラ変位量と推定変位量はほぼ比例しており、カメラ位置が変化しても安定した推定が行われている。また、表 10 から表 12 を見ても外部パラメータのみの推定の場合は安定的かつ高精度にパラメータ推定が行われていることがわかる。とりわけ、カメラ姿勢に関しては平均誤差、標準偏差ともに小さな値になっている。この結果からも、内部・外部パラメータ同時推定では、互いのパラメータに強い相関があり、値が一意に収束することが困難であると考えられる。よって、ターゲットを工夫するなどしてこの相関を拘束する条件を導入する必要がある。

## 6. 結論

勾配拘束による位置合わせを利用し、既存の平面テクスチャをターゲットとして用いるカメラキャリブレーション手法を提案した。また、実験により本手法の有用性を検証した。その結果、内部・外部パラメータ同時推定では、大よそ正しいパラメータを推定することができた。一方、安定性や精度に問題があることがわかった。また、外部パラメータのみの推定は安定的かつ精度良く推定が行われる結果となった。今後はターゲットの工夫などにより内部・

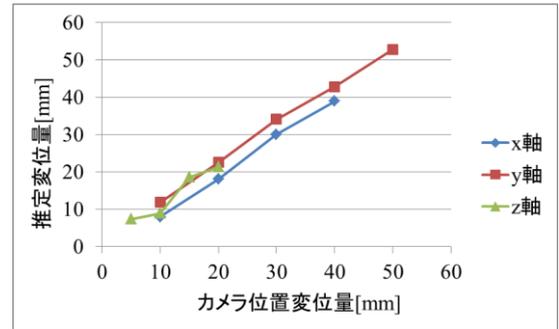


図 8 カメラ変位量と推定変位量の関係

表 10 x 軸方向のターゲット変位

	x[mm]	y[mm]	z[mm]	ψ[deg]	θ[deg]	φ[deg]
平均誤差	-1.2	-1.7	9.9	0.3	0.2	-0.1
標準偏差	1.0	2.1	4.2	0.1	0.1	0.0

表 11 y 軸方向のターゲット変位

	x[mm]	y[mm]	z[mm]	ψ[deg]	θ[deg]	φ[deg]
平均誤差	-1.8	2.8	2.8	0.2	0.2	0.0
標準偏差	1.4	0.8	2.0	0.0	0.1	0.0

表 12 z 軸方向のターゲット変位

	x[mm]	y[mm]	z[mm]	ψ[deg]	θ[deg]	φ[deg]
平均誤差	-0.4	2.3	1.6	0.1	0.3	-0.1
標準偏差	5.5	1.6	2.0	0.0	0.3	0.1

外部パラメータの相関を拘束する条件を導入することで同時推定の精度と安定性の向上を図る。また、本手法の応用として車載カメラの実車実験による精度評価や魚眼カメラのキャリブレーションへの適用を目指す。

## 謝 辞

本研究の実施にあたり、日産自動車の下村倫子氏、Abdelaziz Khat 氏に助言を頂いた。記して謝する。

## 文 献

- [1] Z. Zhang: "A Flexible New Technique for Camera Calibration", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22, 11, pp.1330-1334 (Nov. 2000)
- [2] D. Scaramuzza, A. Martinelli, R. Siewart: "A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006), pp.5695-5701 (Oct. 2006)
- [3] P. Carr, Y. Sheikh, I. Matthews: "Point-less Calibration: Camera Parameters from Gradient-Based Alignment to Edge Images", IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV), pp.377-384 (Jan. 2012)
- [4] 梅田和昇, ギーゴダン, マークリュウ: "こう配拘束と距離濃淡画像を用いた距離画像とカラー画像のレジストレーション", 電子情報通信学会論文誌 D-II, J88-D-II, 8, pp.1469-1479 (Aug. 2005)