# カメラモデルの段階的切換えによる 多視点カメラシステムのセルフキャリブレーション

# 岡 谷 貴 之<sup>†</sup> 久保田 俊作<sup>†</sup> 出口 光一郎<sup>†</sup>

多数のカメラを使用する多視点カメラシステムで,各カメラの画像情報を統合しこれを有効に利用 するためには,それぞれのカメラの内外パラメータが正確に分かっている必要がある.対象とする空 間が大きい場合,形状が正確に分かっているキャリブレーション用の参照物体を使ってパラメータを 同定する古典的なキャリブレーションは行いにくく,その場合には,画像の対応点の情報だけからカ メラの内部パラメータも含めた全パラメータを推定するセルフキャリブレーションが有効である.本 論文では,従来のセルフキャリブレーションの方法が,冗長な自由度を有する射影復元を経由してい たため,ノイズに対する脆弱さを有していたことを指摘し,内部パラメータの事前知識を活用してよ り安定にパラメータの計算を行う方法を述べる.方法は,自由度を制限した近似的なカメラモデルか ら出発し,モデルを段階的に切り換えてその近似精度を向上させつつ解を改善してゆくという手順を とる.

## Self-calibration of Multi-view Camera System by Stepwise Application of Camera Models

### TAKAYUKI OKATANI,<sup>†</sup> SHUNSAKU KUBOTA<sup>†</sup> and KOICHIRO DEGUCHI<sup>†</sup>

In an imaging system composed of multiple cameras, in order to integrate images taken by the cameras and to derive valuable information from them, both internal and external parameters of the cameras must be accurately known. When a target scene is large, conventional calibration methods, in which the camera parameters are estimated by using objects of known shape, are difficult to apply. In that case the methods of self-calibration are effective, which estimate all the parameters including the internal camera parameters from 2D point correspondences alone. In this paper we point out that previous self-calibration methods tend to be unstable under the existence of noise, since they need an intermediate step of projective reconstruction that has redundant d.o.f. In order to cope with this, we show a novel method that caluculates the parameters in a more stable manner by incorpolating prior knowledge of the internal parameters. Starting with an approximate camera model that has limited d.o.f., our method upgrades the camera model to a more accurate one in a stepwise manner and improves the accuracy of the estimation.

### 1. はじめに

多数のカメラを用いて,1つの3次元シーンを多視 点から観察し,動的な状況を理解する研究が行われて いる<sup>1)</sup>.またスポーツ中継などの目的で,球技場に多 数のカメラを配置し,自由な視点からの画像を合成す るなどの研究もさかんである<sup>2),3)</sup>.このような多視点 カメラシステムにおいて,各カメラからの画像情報を 統合し有効に利用するためには,キャリプレーション が重要となる.つまり,カメラの結像関係を決める内 部パラメータと,カメラの位置,姿勢を表す外部パラ

### メータをできるだけ正確に知る必要がある.

古典的には, 寸法や角度の正確に分かったキャリブ レーション用の参照物体を用意し, その物体の画像を用 いてカメラの内外パラメータを定める方法がある<sup>4)~6)</sup>. しかしながら, 対象とする空間が球技場のように広大 である場合には, 正確に寸法や角度が分かったキャリ ブレーション用の参照物体を用意あるいは構築するこ とは難しい.したがって古典的なキャリブレーション 手法を利用することが困難な場合がある.

この問題への1つの対処法は,システムの運用前, カメラを設置する前に,各カメラの内部パラメータを 古典的キャリブレーションによって定めておき,カメ ラを設置後,各カメラの画像間で対応点を与えて外部 パラメータを計算する方法である.これなら特別に大

<sup>†</sup> 東北大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

Dec. 2002

きなキャリプレーション用の参照物体は必要ない.しかしこのやり方では,カメラの設置中内部パラメータの変更が許されず,フォーカスやズームの調整すらできない不便さがある.

本論文では,以上の問題を解決する,セルフキャリ ブレーション<sup>6),7)</sup>の考え方に基づいた多視点カメラの キャリブレーション方法について述べる.この方法で は,参照物体を使用せず,画像間の対応点だけからカ メラの内外パラメータを推定することができる.

セルフキャリブレーションは,単一カメラを動かし て得た画像系列からカメラの内外パラメータを推定 し,対象の3次元形状を復元することを目的に研究 されてきた手法であり,90年代後半に急速な発展を とげた<sup>6)~9)</sup>.当初は面倒なカメラの事前キャリブレー ションを省略するための方法として研究され,実用性 は低かったが,後に,撮影途中で時々刻々変化する焦 点距離などの内部パラメータを知る必要性を念頭に, 全内部パラメータを推定することをあきらめ一部のパ ラメータのみを推定するようにしたことで,実用性を 高めた.

同じ方法を,多視点カメラシステムすなわち複数の 固定された異なるカメラのキャリブレーションに応用 することができる.多視点カメラシステムの場合は, カメラをそれぞれ設置前に校正し,アスペクト比やス キューなど,焦点距離(すなわちフォーカスやズーム) を変化させても不変な内部パラメータを決定してお く.そして焦点距離とそれを変えたときに変化する内 部パラメータだけを推定の対象として,セルフキャリ ブレーションを行うようにする.これによってカメラ の設置途中に焦点距離を変化させることができるよう になる.

しかしながら我々は,従来のセルフキャリブレーショ ンの方法は,特にノイズが大きくなると不安定になり, 誤った結果を算出しやすいことを確認している.これ については本論文の4章に一例を示す.

通常,セルフキャリブレーションの手続きは,まず 射影復元を行い,その結果を使ってカメラの内外パラ メータを推定するという手順を踏む<sup>6),7),10)</sup>.処理の前 半部を構成する射影復元は,未校正カメラによる射影 的不定性を残した3次元復元である.セルフキャリプ レーションとは,理論的にはこの射影的不定性を解決 することであると解釈される.

従来手法のノイズへの脆弱性は、このことすなわち 従来方法が途中で射影復元を経由することに原因があ ると我々は考えている.射影復元の段階では、最終的 に知りたいカメラの内外パラメータよりも一般に多く のパラメータが存在する.これは,射影復元の時点で データにあてはめるモデルの自由度が不必要に高く冗 長であることを意味し,このことはモデルがデータに 含まれるノイズに過度に適合してしまうことで,最終 的に誤った解を与える危険性を含んでいる.

セルフキャリブレーションを応用する実際の場面で は,各カメラの焦点距離を含む内部パラメータについ て,それなりの見積りが可能である.たとえば多視点 カメラシステムにおいて,各カメラのズームを能動的 に制御するのならば,その制御値を焦点距離の見積り として利用することが可能であろう.これを利用する と,射影復元を経由することなくセルフキャリブレー ションを実行できる可能性がある.

以上をふまえて,カメラモデルを簡単なものからよ り複雑なものへと段階的に切り換えながら非線型最小 化を繰り返すことで,事前の見積りを最大限活用しつ つ,カメラパラメータを推定する方法を考案した.従 来方法のように自由度の高い射影復元を経由し後で自 由度を落とすのではなく,最初に自由度の低いカメラ モデルでシステムを近似し,その後カメラモデルを順 に切り換えて近似の精度を上げることで徐々に解の精 度を改善してゆくという考え方であり,計算の安定性 を向上させることを狙っている.

この方法を用いて6台のカメラを用いたシステムで 実験を行った.従来手法と提案手法の性能を比較する 計算機シミュレーション実験のほか,焦点距離のほか にどの内部パラメータを定めることが現実的に可能な のかを実験により調べた.

なおここでは,室内やサッカー場のような1つの閉 じた空間に対し,それを取り囲むようにカメラが配置 されている場合を対象とする.複数のカメラを用いる が互いの視野が共有されないように配置した場合は除 外する.

2. 多視点カメラのセルフキャリブレーション

2.1 記 法

 $\mathbf{m} \propto \mathbf{P} \mathbf{M}$ 

カメラの内部,外部パラメータと結像系をここでは 以下のように記述する. 斉次ワールド座標による空間 の点を  $\mathbf{M} = [X, Y, Z, 1]^{\top}$ , 斉次カメラ座標による画 像上の点を  $\mathbf{m} = [x, y, 1]^{\top}$ とすると,  $\mathbf{M}$ と  $\mathbf{m}$ の投 影関係は次のようになる.

(1)

 $\propto$  は,定数倍を許して等しいことを表し,P は3 imes 4の射影行列である.また $\widetilde{\mathbf{M}} \equiv [X,Y,Z]$ とする.

そして,射影行列は,

 $\mathbf{P} = \mathbf{K} \left[ \left[ \mathbf{R} \right] - \mathbf{Rt} \right]$ (2)

と分解できる.ここで, R は回転行列でカメラ座標の ワールド座標に対する回転(したがって,カメラの姿 勢)を表し,tは並進移動を表す.この(R,t)の組が 外部パラメータである. K は内部パラメータで構成 される行列で,成分は次のようなものである.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & sf & u_0 \\ 0 & \alpha f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3)

ただし f は焦点距離,  $\alpha$  はアスペクト比, s はスキュー, (u<sub>0</sub>, v<sub>0</sub>) は画像中心(光軸と画像面の交点)を表す.

空間の複数の点をカメラで撮影したとき. i 番目 の画像(i = 1, ..., p)上における j 番目の点(j =1,...,n)の座標を $\mathbf{m}_{ij}$ と書くことにする.このとき (4)

 $\mathbf{m}_{ij} \propto \mathbf{P}_i \mathbf{M}_j$ 

 $= \mathbf{K}_i [\mathbf{R}_i | - \mathbf{R}_i \mathbf{t}_i] \mathbf{M}_j$ 

と書く.

2.2 セルフキャリブレーションの原理

セルフキャリブレーションでは複数の画像上で与え られた対応点を元にカメラの内外パラメータを決定す る.その原理は絶対円錐曲線の式によって次のように 説明される.

まず,画像間の対応点を元にした射影復元を考え  $\mathbf{a}^{6}$ .1 番目の画像の射影行列を  $\mathbf{P}_1 = [\mathbf{I} | \mathbf{0}]$  と なるように射影復元を行い11),各視点での射影行列  $\mathbf{P}_i$  (*i* = 1,...,*p*) が得られたとする.これらは次の絶 対円錐曲線の方程式を満たす<sup>6),7)</sup>.

$$\mathbf{K}_{i}\mathbf{K}_{i}^{\top} \propto \mathbf{P}_{i} \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{1}\mathbf{K}_{1}^{\top} & -\mathbf{K}_{1}\mathbf{K}_{1}^{\top}\mathbf{a} \\ -\mathbf{a}^{\top}\mathbf{K}_{1}\mathbf{K}_{1}^{\top} & \mathbf{a}^{\top}\mathbf{K}_{1}\mathbf{K}_{1}^{\top}\mathbf{a} \end{bmatrix} \mathbf{P}_{i}^{\top}$$

$$(5)$$

この式は各画像の K<sub>i</sub>とある共通の 3 次元ベクトル a に関する方程式である.*i* = 1 については恒等式で あるから何の条件も生まない.i > 2の各iごとに未 知数  $\mathbf{K}_i$  と a に対して独立な拘束を与える.

内部パラメータのうちどれか1つだけでも分かっ ているか,未知でもカメラ間で共通の値をとることが 分かっていれば,  $\mathbf{K}_i$ を決定できることが示されてい る<sup>9)</sup>.しかしながら,ほとんどの内部パラメータがカ メラ間で変化するとした場合に,それらを画像だけか ら安定して正確に求める方法は今のところ開発されて いない.焦点距離を中心に限られた数の内部パラメー タを推定の対象とし,それ以外は既知とするのが普通 である.

さて K1 と a を決定できたら

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1^{-1} & 0\\ \mathbf{a}^{\top} & 1 \end{bmatrix}$$
(6)

なる Tを用いて

$$\mathbf{P}_{i}^{E} = \mathbf{P}_{i}\mathbf{T}^{-1}$$
(7)  
$$\mathbf{M}_{i}^{E} = \mathbf{T}\mathbf{M}_{i}$$
(8)

のようにしてユークリッド復元を行える $^{7)}$ . $\mathbf{P}_{2}^{E}$ ... $\mathbf{P}_{v}^{E}$ を分解すれば,  $\mathbf{K}_i$ ,  $\mathbf{R}_i$ ,  $\mathbf{t}_i$   $(i = 2, \ldots, p)$  を決定できる.

以上の議論は元々は単一カメラによる画像系列に対 して開発されたものであるが,多視点カメラシステム にもほとんどそのまま応用できる.両者の間のわずか な相違として次がある.単一カメラの場合には,内部 パラメータには3種類の属性がある.すなわち,(a) 既知である,(b)未知で画像間で異なる,(c)未知だが 画像間で共通である,の3つである.このうち(c)は, 単一カメラの場合には1つの拘束を与えるものである が,多視点カメラでは意味をなさない.すなわち,多 視点カメラシステムの場合既知であるか未知であるか の2種類しかない.

2.3 バンドルアジャストメント

セルフキャリブレーションを行うとき、カメラの内 外パラメータや対象の3次元形状を決定するのに,最 終的に非線型最適化を用いるのが普通である.その ような方法は,一般にバンドルアジャストメントと呼 ばれる(詳しくは文献12)などを参照). 最適化(最 小化)の対象として,次の再投影誤差(reprojection error)が選ばれることが多い.

$$\sum_{(i,j)\in S} \left[ (x_{ij} - \hat{x}(\mathbf{K}_i, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \widetilde{\mathbf{M}}_j))^2 + (y_{ij} - \hat{y}(\mathbf{K}_i, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \widetilde{\mathbf{M}}_j))^2 \right]$$
(9)

ここで S は各画像上にとらえた空間の各点の組であ る(つまり画像上で見えない点は総和から省くという 意味). また  $(\hat{x}, \hat{y})$  は, 点  $\mathbf{M}_i$ を,  $\mathbf{K}_i$ ,  $\mathbf{R}_i$ ,  $\mathbf{t}_i$ を元 に投影した画像の点の座標である.すなわち,推定し たパラメータを元に合成した画像と,観測された画像 のずれを最小にするようにパラメータを定める.統計 的には,再投影誤差が各画像の点について独立な正規 分布に従う場合の最尤推定に相当する.

数値計算にはレベンバーグ・マーカート法などの ニュートン法系統の数値計算法がよく利用されるが, 反復計算を正しい解に収束させるためには、良い初期 値が必要となる.

3. カメラモデルの段階的切換えによる計算

### 3.1 従来方法と問題点

2.2 節で述べたように,セルフキャリプレーションとは,未校正カメラによる射影復元の不定性を,絶対円 錐曲線の式(5)によって除去することであると説明で きる.この理解に従って,従来のセルフキャリプレー ションの方法では,まずデータから射影復元をひとた び行って各カメラの射影行列 P<sub>1</sub>,..., P<sub>p</sub> を得,その 後これらを元に式(5)を何らかの方法で解いてカメラ の内外パラメータを求める,という手順が踏まれる.

たとえば Pollefeys ら<sup>7)</sup> の方法では,カメラは  $\alpha = 1$ , s = 0 とし,画像中心が既知であるとして

	$f_i$	0	0	
$\mathbf{K}_i =$	0	$f_i$	0	(10)
	0	0	1	

とし,式(5)を,K<sub>1</sub>(未知数は $f_1$ のみ)とaに関す る方程式と見て,これを5つのパラメータ $b_1,...,b_5$ を導入してこれらに関する線形方程式に直して解く. そこでは,先に求めた射影行列 $P_1,...,P_p$ が使われ る.その後式(8)のようにして $P_2^E...P_p^E$ を求め,最 後にこれらを分解し $K_i$ , $R_i$ , $t_i$ (i = 2,...,p)を決 定している.データにノイズがなければ線形計算に よって陽に解を求めることが可能であり,ノイズの存 在下では各段階で線形計算の解を初期値とした最適化 を行う.

このように,従来手法では途中で射影復元を行うこ とが必要となるが、データにノイズが含まれる場合、 特にこのことが障害になる.カメラの内部パラメータ の大部分が既知であるとするとき(たとえば焦点距離 以外は既知であるなどの場合),推定するパラメータ の総数は,射影復元で求めるパラメータの総数よりも 一般に少ない. つまり, 射影復元におけるシステムの モデルが持つ自由度は,最終的なモデルのそれよりも 高いのである.従来手法はその途中で,不要に自由度 の高い冗長なモデルを適用し,問題を解いていること になる.データにノイズがなければこのことには何の 問題もないが、ノイズの存在下ではこれは問題である。 いたずらに自由度の高いモデルはノイズに過度に適合 する危険性があるからである.後の4章の実験に示す ように,従来手法のやり方で誤った結果を得ることが あるのは、これが原因だと考えられる、

そこで,従来方法のように自由度の高い射影カメラ モデルをまず適用し次に自由度の低い透視カメラモデ ルに落とすのではなく,最初に自由度を制限した正射 影カメラモデルなどの近似的なモデルを用いて近似解 を最初に構成し,その後カメラモデルを切り換えてモ デルの近似精度を向上させ,自由度を徐々に増やしな がら解を改善する方法を考える.

詳しくは次節で述べるが,この方法は最適化計算の 繰返しによって実現され,ノイズがないときでも従来 方法のように陽に解を得ることはできないので,高い 確率で正解を導けるという意味でのロバスト性は,直 感的には従来方法よりもむしろ低下するように思える. しかしながら,正射影カメラモデルなどの自由度の低 いカメラモデルは,ノイズに過度に適応することのな い頑健さを有する.このことが解法の安定性を増すと 期待される.計算の初期段階では,パラメータ推定の 正確さよりもノイズに対する頑健さを優先することが この方法の鍵である.

次節で以上の方法を詳しく述べる.

3.2 カメラモデルの切換えアルゴリズム

計算の初期段階におけるシステムのモデルの自由度 を低くするために,最初に全カメラを正射影モデルで 近似することを考える.この近似下では $(\mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i)$ と  $\widetilde{\mathbf{M}}_j$ だけが推定の対象となる.そして正射影カメラに よる近似のおかげで,特異値分解による因子分解を行 うことができ,安定に良い推定値を得られる.次にカ メラは正射影モデルのまま,そこから初期値を作って 式 (9)の再投影誤差を最小化する.通常用いる焦点距 離域のレンズを持つカメラであれば,以上の処理はか なり安定に実行できる.

その後, 弱透視カメラモデル, 透視カメラモデル, 透視カメラモデル + レンズ歪みという順に,カメラ モデルを段階的に高度化してゆく.各段階で式(9)の 最小化を行う.段階の移行の際,前の段階で得た外部 パラメータと特徴点の座標をそのまま次のモデルでの 初期値とする.

詳しい手順は後で述べることにして,まずカメラモ デルについて説明する.どのパラメータを固定し,ど れを推定対象とするかが要点である.

3.2.1 透視力メラモデル

透視カメラモデルは式 (1) に表記したものと同じものである.あらわに書くと

$$x = \frac{fX + sfY}{Z} + u_0 \tag{11}$$

$$y = \frac{\alpha f Y}{Z} + v_0 \tag{12}$$

である.このモデルではすべての内部パラメータを推 定の対象とできる.現実的には,アスペクト比 α と スキュー s を既知とし,焦点距離 f だけか同時に画 像中心  $(u_0, v_0)$  を推定の対象とすることになる.

3.2.2 弱透視力メラモデル

弱透視カメラモデルは透視カメラモデルの分母の Zを定数  $Z_0$  で置き換えたものである.

$$x = \frac{fX + sfY}{Z_0} + u_0 \tag{13}$$

$$y = \frac{\alpha f Y}{Z_0} + v_0 \tag{14}$$

外部パラメータを含めて次のように書ける.

$$\mathbf{m} \propto \begin{vmatrix} f & sf & u_0 \\ \alpha f & v_0 \\ 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{r}_1^\top & t_1 \\ \mathbf{r}_2^\top & t_2 \\ 0 & Z_0 \end{vmatrix} \mathbf{M} (15)$$

 $\mathbf{r}_{k}$  は姿勢を表す回転行列 R の k 行ベクトルである. また  $-\mathbf{Rt}$  を  $[t_{1}, t_{2}, t_{3}]$  と置いた.このモデルでは内 部パラメータのうち  $\alpha$  と s は既知, f,  $u_{0}$ ,  $v_{0}$  には それぞれ見積り値をセットし,  $Z_{0}$  のみを推定の対象 とする.外部パラメータでは  $t_{3}$  すなわち各カメラの 位置のうち奥行き方向の成分が式に現れず,したがっ て推定されない.

3.2.3 正射影カメラモデル

弱透視カメラモデルにおいて Z<sub>0</sub> に焦点距離の見積 り値を与えて固定したものを特に正射影カメラモデル と呼ぶことにする.すなわち

$$x = X + sY + u_0 \tag{16}$$

$$y = aY + v_0 \tag{17}$$

である.このモデルではいっさいの内部パラメータを 推定対象としない.外部パラメータと特徴点の座標値 のみがパラメータとなる.

3.2.4 レンズ歪みを考慮した透視力メラモデル

透視カメラモデルをベースに,レンズ歪みを考慮し たモデルを最終的な目標とする.通常,ズームレンズ では無視できない程度のレンズ歪みが存在し,しかも 歪みの大きさはズーム値に応じて変化する.したがっ てレンズ歪みは焦点距離に連動して変化すると考える 必要がある.

歪みがない理想的な場合の正しい像の位置を (x,y)とし,観測された正しい像の位置を (x',y')とするとき,

 $x' = x + (x - u_0) [k_1 r^2 + k_2 r^4]$  $y' = y + (y - v_0) [k_1 r^2 + k_2 r^4]$ 

とする.ただし  $r^2 = (x-u_0)^2 + (y-v_0)^2$  である.こ こでは 2 次の項までとした.より高次の項を考えても あまり意味はなく,むしろ  $k_1$  に関する最初の項だけを 考えれば十分であることが多い.また,レンズ歪みと しては通常ラジアル歪みを考えれば十分である<sup>13),14)</sup>. より多くの要因を考慮したモデルもあるが<sup>15)</sup>,それら は画像の量子化誤差との比較で無意味であったり,か えって数値計算の安定性を損ねたりしかねない.

レンズ歪みの程度 |x'-x|, |y'-y| はある程度小さいと考えてよいので,このモデルが使用される際の,レンズ歪みの初期値は一律に0とする.

#### 3.3 手 順

これらのカメラモデルを用いた推定アルゴリズムの 詳細を述べる.

まず最初は全カメラに正射影カメラモデルを仮定す る.推定すべきパラメータはカメラの外部パラメータ と特徴点の3次元位置(の2成分 $t_1$ , $t_2$ )であり,内 部パラメータは推定されない.具体的には,与えられ た焦点距離の見積り値を用いて画像の大きさを正規化 し,特異値分解に基づく因子分解法を用いて,外部パ ラメータと特徴点の座標の初期値を得る.ここで得た 解のうち,各カメラの位置 $t_i$ と特徴点の座標値 $\widetilde{M}_j$ はそのまま初期値として利用可能である.姿勢 $R_i$ は, 因子分解の結果からノルムを最小にする基準によって 回転行列を構成する.以上の初期値を用いて正射影力 メラモデルを用いたバンドルアジャストメント,すな わち式(9)の最小化を行う.

正射影モデルでの反復が収束したら次に弱透視カメ ラモデルに切り換える.正射影カメラモデルとの差は 式(15)における Z<sub>0</sub>の存在である.これを推定の対 象に新たに含め,バンドルアジャストメントを行う. Z<sub>0</sub>の初期値には焦点距離の見積りとして使用してい た値を使う.

この反復が収束したら,次に透視カメラモデルに切 り換える.弱透視カメラモデルではカメラの位置の z 成分すなわち t<sub>3</sub> を推定していなかった.透視カメラ モデルではこれが推定対象となるので,その初期値と して前段階で求めた Z<sub>0</sub> を利用する.また焦点距離な ど内部パラメータもこのモデルからは推定対象となる. その初期値には以前の段階で使用していた見積りをそ のまま与える.

次章の実験結果での計算結果の途中経過の一例を 図1,図2に示す.図1は反復回数に対する再投影誤 差をプロットしたもので,正射影モデル(横軸0-10), 弱透視モデル(11-17),透視モデル(18-最後)と変 化するに従い,誤差が軽減されていく様子が分かる. 弱透視モデルから透視モデルへの切換え(17と18の 間)では誤差が一度増加しているが,これは両モデル の本質的な違いから推定量が滑らかにはつながらない ためである.



図 1 再投影誤差の変化.0から10まで:正射影モデル,11から 17まで:弱透視モデル,18から22まで:透視モデル,23 から最後まで:歪みを含む透視モデル

Fig. 1 Reprojection error vs. iteration. 0–10: Orthographic camera model, 11–17: Weak-perspective camera model, 18–22: Perspective camera model, 23–last: Perspective model with lens distortion.



- 図 2 各段階で推定したパラメータを元に再現した画像上の特徴点 の位置と観測位置とのずれの一例.左上:正射影モデル,右 上:弱透視モデル,左下:透視モデル,右下:歪みを考慮した 透視モデル
- Fig. 2 An example of the reprojection errors at each estimation step. Upper left: Orthographic camera model, Upper right: Weak-perspective camera model, Lower left: Perspective camera model, Lower right: Perspective model with lens distortion.

### 4. 実験結果

4 つの実験:(1)従来手法の性能評価,(2)提案手法の初期値依存性の評価,(3)画像中心の推定の是非を 調べる実験,(4)実画像を用いた実験,をそれぞれ行っ たのでその結果を以下に述べる.

4.1 データの作成

続いて示す3つの実験で使用したデータは,最後の 実画像による実験で推定した(我々の研究室での)カ メラ配置と点の分布を元に作成した.カメラは6台, 対応点は20点である.カメラの内外パラメータは,そ こで得たものをそのまま使用し,空間における点の分 布は,そこで3次元的に復元した分布の中心と分散を

- 表1 従来方法による計算を1,000回行ったときの失敗回数.Iは 初期値自体が計算不可能であった場合,IIは収束しなかった かもしくは正しくない解に収束した場合のそれぞれ回数
- Table 1 The number of failures by the previous method for 1,000 trials. I is the case where even initial values could not be computed. II is the case where the final minimization did not converge or converged to wrong solutions.

σ	0.1	0.2	0.5	1.0
Ι	4	30	207	322
II	0	9	8	49
Total	4 (0%)	39~(4%)	215 (22%)	371 (37%)

元に,正規分布に従う乱数によって発生させた.すな わち,我々の研究室でのカメラ配置と点のサンプルの 仕方を模擬し想定したデータとなっている.こうして 作った各点の各画像上の座標に,区間 $[-\sigma:\sigma]$ の一様 分布に従うノイズを加え,データとした.画像のサイ ズは $320 \times 240$ であり,ノイズは $\sigma = 0.1$ から1.0の オーダ(単位は画素)を考えた.以下の実験では1,000回の試行を行っているが,1回の試行のたびに点の分 布と画像のノイズをランダムに発生させている.

**4.2** 従来手法の性能

本論文の設定において従来手法がどのような性能を 示すかを評価した.テストした方法は,次のようなス テップからなる.

- 1. 数値計算の安定化のため,与えられた各画像の画 像座標を正規化(縮小)する.
- 視点1と2の間の基礎行列Fを,再投影誤差を 最小化する非線型アルゴリズムにより推定する.
   ここでは三島らのアルゴリズム<sup>16)</sup>を使用した.
- 3.  $\mathbf{P}_1 = [\mathbf{I} | \mathbf{0}]$ ,  $\mathbf{P}_2 = [\mathbf{e}'_{\times} \mathbf{F} | \mathbf{e}']$ と視点 1 と 2 の 射影行列を決定し,これを元に  $\mathbf{P}_3, \dots, \mathbf{P}_p$ と点 の射影座標  $\mathbf{M}_j$ を線形解法にて決定する.ただ し  $\mathbf{e}'$ は  $\mathbf{F}^{\top} \mathbf{e}' = 0$ なるベクトルである.
- ステップ 3 での P<sub>i</sub>, M<sub>j</sub> を初期値とし, 射影復 元におけるバンドルアジャストメントを行う.
- 5. 2.2 節と 3.1 節に述べた方法で各カメラの焦点距 離と外部パラメータを計算する.
- ステップ5の各値を初期値として、ユークリッド 復元におけるバンドルアジャストメントを行う.

ノイズレベルを  $\sigma = 0.1, 0.2, 0.5, 1.0$  と変えて,上 述のアルゴリズムを 1,000 回実行した.結果(正しい 解が求められなかった回数)を表1に示す.表中Iは ステップ 5 で計算不能となった場合を指す.これは, ステップ 5 の計算で,カメラ1の焦点距離の2乗  $f_1^2$ を線型方程式の1変数  $b_1 = f_1^2$ として方程式を解い ているが,その際の解が負( $b_1 < 0$ )となり,焦点距 離を実数として求められなかった場合に対応する.表 中 II はステップ 6 のバンドルアジャストメントが正 しくない局所解に収束した場合である.

なお,ステップ4の射影復元では,どのノイズレベ ル $\sigma$ に対しても,すべての試行で再投影誤差がそれ以 下のオーダになっていることを確認している( $\sigma = 1.0$ では数回だけの失敗があった).したがって射影復元は ほぼ正確にできたと考えられる.にもかかわらず表1 に示すように,ノイズが小さい場合にはほぼ完全だが, ノイズレベルが大きくなるに従って正解を得られない 回数が大きくなっている.

この結果は,3.1 節で述べた予想を裏付けている. すなわち,冗長な射影カメラモデルがノイズに過度に 適合してしまったため,ノイズが大きい場合に誤った 解を得る確率が高まったと想像される.

4.3 提案手法の初期値依存性

提案手法では焦点距離の見積りを与える必要がある が,その見積りが真の値からどれくらいまでずれてい ても大丈夫なのかを,計算機シミュレーションによっ て検証した.ここではカメラの内部パラメータとして 焦点距離のみを推定する場合を考える.

各カメラの焦点距離の見積り値を,真の値からラン ダムにずらして,それを提案アルゴリズムに与えた. 具体的には真の値  $f_i$  に区間  $[-\alpha f_i : \alpha f_i]$  の一様分布 に従う誤差  $\varepsilon_f$  を加えた  $f_i^{(0)} \equiv f_i + \varepsilon_f$  を,  $\alpha$  を 0.1 (±10%)から 0.8(±80%)まで変えてアルゴリズムに 与えた.このとき,正しくない局所解に収束した回数 を数えた.結果を図3に示す.図は  $\sigma = 0.1, 0.5, 1.0$ の3通りの場合をまとめて表示している.

この図から,大体 ±50%の区間内に各カメラの焦点 距離の見積りが入っていれば,ほぼ 100%の確率で正



図 3 提案アルゴリズムの初期値依存性.真の値の ± 各パーセント の幅を持つ一様乱数で初期値を摂動させたとき,正解に収束し なかった割合

Fig. 3 The dependence of the proposed algorithm on the initial estimates. The initial estimates are perturbed with a random value following a uniform distribution with a range from -x to x (%) of a true value. The plot shows the percentage of the number of the trials resulting in wrong solutions. しく収束しているのが分かる.この ±50%の区間というのは非常に緩い条件であるといえ,また ±80%程度の区間でしか予想できなかった場合でも,図のように 失敗するのは2割ほどでしかなく,本手法の実用性は高いといえる.

この結果において,推定手法の初期値への依存性が ノイズの大きさ(σ)に関係ないことは注目すべきで ある.4.2節の従来方法の結果と比較すると,このこと は,自由度を制限した正射影モデルから開始し,徐々 に解を改善することが確かに安定性に貢献することを 裏付けている.

4.4 画像中心の推定について

提案手法では,カメラの内外パラメータと特徴点の 3次元座標のうち,すべてのパラメータを推定するこ ともできるし,そのうちのいくつかが既知であるとき はその値を利用し残りを推定することもでき,柔軟な 運用が可能である.ここではカメラの内部パラメータ のうち画像中心を推定することの是非を実験によって 考察する.

データは上の実験で用いたのと同じものを用いた. 同一のカメラ配置と特徴点位置に対し,区間 [-0.5: 0.5] ( $\sigma = 0.5$ )の一様分布に従うノイズを座標値に加え,推定を100回繰り返して誤差の分散を求めた.

まず,セルフキャリブレーションの条件で(つまり キャリブレーション用の物体がなく特徴点の3次元位 置が未知),(a)内部パラメータとして焦点距離だけを 推定,(b)焦点距離と画像中心を推定,の2つを実験 した.結果を表2と表3に示す.まず,カメラごと に推定量の誤差が異なっているのは,カメラと点の空 間における配置の影響と思われる.そして表3から, 画像中心の推定精度があまり良くないことが分かる.

次に古典的キャリブレーションの条件, すなわち特 徴点の3次元座標値が既知である条件の下で, 各カメ

表 2 各カメラの焦点距離のみを推定した場合の誤差 (RMS)

Table 2 Estimation error (RMS) when only focal length is estimated.

カメラ	1	2	3	4	5	6
f	10.6	3.2	5.8	6.8	3.0	7.9

表 3 各カメラの焦点距離と画像中心を同時に推定した場合の各パ ラメータの誤差 (RMS)

Table 3 Estimation error (RMS) when focal length and principal points are estimated.

カメラ	1	2	3	4	5	6
f	11.9	4.5	8.4	10.1	4.1	9.0
$u_0$	15.4	8.8	20.5	13.7	6.7	10.9
$v_0$	16.7	12.3	26.3	14.2	6.5	16.4

- 表 4 古典的キャリブレーションで各カメラの焦点距離と画像中心 を同時に推定した場合の各パラメータの誤差 (RMS)
- Table 4 Estimation error (RMS) when focal length and principal points are estimated using known 3D point coordinates.

カメラ	1	2	3	4	5	6
f	8.8	2.7	6.1	7.9	2.3	7.6
$u_0$	10.1	5.1	17.1	9.7	4.2	8.5
$v_0$	13.0	6.9	23.5	11.3	4.0	10.8

#### 表 5 古典的キャリプレーションで各カメラの画像中心のみを推定 した場合のパラメータの誤差 (RMS)

Table 5 Estimation error (RMS) when only principal points are estimated using known 3D point coordinates.

カメラ	1	2	3	4	5	6
$u_0$	10.1	4.9	15.5	9.1	4.1	8.3
$v_0$	12.7	6.9	22.8	8.3	3.6	11.5

### 表 6 各カメラの位置,姿勢を真の位置に固定して焦点距離と画像 中心を推定した場合の各パラメータの誤差(RMS)

Table 6 Estimation error (RMS) when focal length and principal points are estimated using known camera poses.

カメラ	1	2	3	4	5	6
f	2.3	2.2	2.1	2.1	2.1	2.3
$u_0$	0.4	0.5	0.3	0.4	0.4	0.4
$v_0$	0.3	0.5	0.3	0.3	0.6	0.4

ラの焦点距離と画像中心を同時に推定する実験を行っ た.結果を表4に示す.画像中心の誤差を見ると,上 のセルフキャリブレーションの場合に比較して若干の 精度の向上が見られるが,それでも誤差の程度は大き く,古典的かセルフキャリブレーションかを問わず, 画像中心の正確な推定は難しいことが見てとれる.ま た焦点距離を固定して,画像中心のみを同条件で推定 することも行った.この結果を表5に示す.精度はほ とんど変わらないことが分かる.

最後に,カメラの位置と姿勢が既知,対象の3次元 座標は未知として焦点距離と画像中心を推定した.こ の結果を表6に示す.この実験では,上のものに比べ てはるかに良い推定精度が得られている.このことか ら,画像中心はカメラの位置や姿勢と強い相関を持っ ていることがうかがえる.

以上のことから,カメラの位置・姿勢を同時に推定 する通常の場合では,画像中心を推定してもあまり良 い結果は得られそうにないことが分かる.無理に推定 すると,画像中心の真の値とのずれがカメラの姿勢に しわ寄せされそうである.ズームレンズでは,焦点距 離の変化にともなって画像中心が変化することがよく いわれる.しかしながらその変化量はそれほど大きい



図 4 対応点を得るために用いた装置

Fig. 4 Appratus for taking point correspondences across images.

ものではない.キャリプレーションではその変化量と 同じオーダの推定精度を達成できるとは考えにくく, 画像中心は推定しないほうが良いと結論される.

### 4.5 実環境での実験

実環境でカメラを6台用いて実験を行った.用いた カメラは SONY DVW-VL500 であり,12 倍ズーム レンズが組み込まれ,最大 640 × 480 画素の画像を IEEE 1394 経由で出力するデジタルカメラである.今 回は 320 × 240 画素のモードを用いてすべての実験 を行った.

画像間の対応点は LED で発光する小型のデバイス を用いて取得した(図4). これによって対応付けの 作業を省き,高精度な画像座標の読み取りが実現され る.このデバイスは,空間内の自由な位置に持ってゆ き,その空間の点を「サンプル」する感覚で,ボタン を押すと,LED が発光すると同時にそのタイミング を計算機に伝達し,その瞬間の LED の画像座標を取 得するものである.座標値は発光部分の重心を求める ことでサブピクセルの読み取りを行った.

20 点のサンプル点の採取を 20 回行い,上述の方法 によりそれぞれのパラメータを推定した.アスペクト 比とスキューは事前に Zhang の方法<sup>17)</sup> で校正し求め ておき,それを使用した.表7に焦点距離のみを推定 した場合の結果を示す.結果にばらつきはある程度あ るが,画像のサイズが 320×200 と小さく量子化誤差 の程度が大きいこと,また 20 点しか用いていないこ とを考慮すると妥当な結果であるといえる.推定後の 式(9)の再投影誤差の総和(残差)は,画像の1点あ たり 0.5(画素)程度であった.

一方,焦点距離とレンズ歪みの第1項(k1)を同時 に推定した場合の結果を表8に示す.焦点距離のばら つきは焦点距離のみを推定した場合に比べてむしろ小 さくなっており,レンズ歪みの推定は安定に行えてい ることが分かる.また再投影誤差(の残差)は3割程 度小さくなった.推定されたカメラの位置と姿勢を3

表 7 各カメラの焦点距離のみを推定した場合(平均値 ± 標準偏差)

Table 7 Estimation error (mean  $\pm$  std. dev.) when only focal length is estimated.

カメラ ID	1	2	3	4	5	6
f	$424 \pm 9$	$392 \pm 8$	$401 \pm 11$	$394 \pm 6$	$381 \pm 4$	$408 \pm 18$

表 8 各カメラの焦点距離と歪みパラメータを推定した場合(平均値 ± 標準偏差)

Table 8 Estimation error (mean  $\pm$  std. dev.) when focal length and lens distortion are estimated.

カメラ ID	1	2	3	4	5	6
f	$434 \pm 8$	$388 \pm 4$	$387~\pm~7$	$383~\pm~7$	$385 \pm 3$	$425\pm15$
$k_1(\times 10^{-7})$	$-16.8\pm7.7$	$-16.8\pm3.5$	$-18.0\pm7.6$	$-12.4\pm5.5$	$-12.5\pm3.6$	$-18.4\pm7.5$



図 5 推定されたカメラの位置・姿勢,画像のサイズに対する焦点 距離,さらに用いた空間の点の相互の関係

Fig. 5 Recovered camera poses, focal lengths, and distribution of feature points in 3D space.



- 図 6 ユークリッド復元の実験を行った際の 6 台のカメラからの画 像.図中の空間の 3 点を,画像から復元し,同時にセオドラ イトにより 3 次元座標を測定し,両者を比較した
- Fig. 6 Images taken by 6 cameras used for the experiment of Euclidean reconstruction. Three points in the images are extracted and their 3D coordinates are recovered. Then, they are compared to the measurement by a theodolite.

次元的に表示したものを図5に示す.

また,焦点距離のみを推定した場合の結果を用いて, 簡単なユークリッド復元の実験を行った.空間にとっ たある3点A,B,Cについて,読み取った画像座標 と推定されたカメラの内外パラメータを用いてユーク リッド復元を行った(図6).同時に同じ3点について, 空間の座標をミリメートルのオーダで計測できるセオ ドライトを用いて実測し,画像による復元結果と比較 した.スケール倍や回転の不定性から比較には3角形 の頂角ABCとBACを用いた.結果の一例を表9に

表 9 セルフキャリプレーションの結果を用いて行ったユークリッ ド 復元の結果

 Table 9
 Results of Euclidean reconstruction using results

 obtained by the self-calibration.

	角 ABC	角 BAC
計測値(真値)	49.04	84.80
画像による復元	$48.98 \pm 0.13$	$84.76 \pm 0.13$

示す.かなり高い精度でユークリッド復元がなされて いることが分かる.

### 5. ま と め

本論文では,多視点カメラシステムのセルフキャリ ブレーションのための方法を示した.正射影カメラモ デルにより近似解を構築することから始め,カメラモ デルを切り換えて徐々にモデルの近似精度を向上する とともに解を改善してゆく方法とした.これによって, カメラの内部パラメータの事前知識を有効に活用して, 全パラメータを従来方法より確実に推定することがで きる.実験では,従来方法はノイズが大きいと誤った 解を得る可能性が高くなるのに比べ,提案方法はノイ ズの大きさには無関係に安定した性能を示した.提案 方法では焦点距離の見積りを必要とするが,それらは さほど正確である必要はなく許容範囲は広い.ノイズ が非常に小さい条件の下では従来方法も有効であるが, そうでない場合には総じて提案手法がより実用的であ るといえる.

本論文では多視点カメラシステムすなわち複数の固 定された異なるカメラからなるシステムにおける,カ メラパラメータの推定を中心に扱ったが,本手法を単 ーカメラとそれによって得た動画像系列に適用するこ とも十分可能だと思われる.

なお,この論文の方法をプログラムしたものは http://www.fractal.is.tohoku.ac.jp で公開している.

### 参考文献

1) 松山隆司:特集:「分散協調視覚」プロジェクト,

日本ロボット学会誌, Vol.19, No.4 (2001).

- 2) 矢口悟志,木村 誠,斎藤英雄,金出武雄:未校 正多視点カメラシステムを用いた任意視点画像生 成,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, Vol.42, No.SIG 6 (CVIM 2), pp.9–21 (2001).
- 斎藤英雄,木村 誠,矢口悟志,稲本奈穂:多 視点映像による現実シーンの仮想化,情報処理学 会 CVIM 研究会報告 131-8, pp.53-60 (2002).
- 4) 出口光一郎:カメラキャリブレーション手法の 最近の動向,情報処理学会 CV 研究会報告 82-1 (1993).
- 5) 浅田尚紀:コンピュータビジョン―技術評論と 将来展望,カメラキャリプレーション,新技術コ ミュニケーションズ (1998).
- Multi-View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press (2000).
- 7) Pollefeys, M., Koch, R. and Gool, L.V.: Selfcalibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown intrinsic camera parameters, *International Journal of Computer Vision*, Vol.32, No.1, pp.7–25 (1999).
- Heyden, A. and Astrom, K.: Euclidean reconstruction from image sequences with varying and unknown focal length and principal point, *Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.438–443 (1997).
- Heyden, A. and Astrom, K.: Flexible calibration: Minimal cases for auto-calibration, *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, pp.438–443 (1999).
- 10) Seo, Y.: A linear iterative method for autocalibration using the dac equation, *Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition* (2001).
- Luong, Q.-T. and Vieville, T.: Canonical representations for the geometries of multi projective views, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.64, No.2, pp.193–229 (1996).
- 12) Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R. and Fitzgibbon, A.: Bundle adjustment — a modern synthesis, *Vision Algorithm: Theory & Practice*, Triggs, B., Zisserman, A. and Szeliski, R. (Eds.), LNCS 1883, Springer-Verlag (2000).
- 13) Tsai, R.Y.: A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.3, No.4, pp.323–344 (1987).
- 14) Wei, G. and Ma, S.: Implicit and explicit camera calibration: Theory and experiments, *IEEE*

Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.16, No.5, pp.469–480 (1994).

- 15) Weng, J., Cohen, P. and Herniou, M.: Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation, *IEEE Trans. Pattern Anal*ysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.10, pp.965–980 (1992).
- 16) 三島 等,金谷健一:基礎行列の最適計算とその信頼性評価,情報処理学会研究報告 99-CVIM-118-10, pp.67-74 (1999).
- 17) Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration, Technical Report MSR-TR-98-71, Microsoft Research (1998).

(平成 14 年 3 月 5 日受付)(平成 14 年 9 月 12 日採録)

### (担当編集委員 斎藤 英雄)



岡谷 貴之(正会員) 1999年東京大学大学院博士課程 修了(計数工学).同年より東北大 学大学院情報科学研究科助手.2001 年東北大学大学院情報科学研究科講 師,現在に至る.コンピュータビジョ

ンの研究に従事.計測自動制御学会, IEEE 会員.



#### 久保田俊作

2001 年現在,東北大学大学院情 報科学研究科修士課程在学中.多視 点カメラを用いたシステムに興味を 持つ.



1976年東京大学大学院修士修了 (計数工学).同年より,東京大学工 学部助手,講師を経て,1984年山形 大学工学部情報工学科助教授,1988 年東京大学工学部計数工学科助教授,

出口光一郎(正会員)

1998 年東北大学大学院情報科学研究科教授,現在に 至る.この間,1991~1992 年米国ワシントン大学客 員準教授.コンピュータビジョン,画像計測の研究に 従事.計測自動制御学会,電子情報通信学会,日本ロ ボット学会,形の科学会,IEEE等の会員.