2 つの平行光の観測による内部カメラパラメータの安定な キャリブレーション

佐川 立昌 八木 康史 大阪大学 産業科学研究所

概要

本論文では,透視投影カメラの内部パラメータ推定方法を提案する.透視投影カメラの従来のキャリブレー ション法では,内部パラメータと外部パラメータを同時に推定するものであったが,実際には内部パラメー タの結果しか利用しない場合も多い.しかし画像処理における誤差は内部,外部両方のパラメータによっ て吸収されるため,内部パラメータのみしか用いない場合,十分な精度が得られない.それに対し本提案 手法は,外部パラメータを推定そのものから取り除くことにより,内部パラメータを安定に求めることが できる.本手法は,2つの平行光をどのような位置姿勢で観測しても,その光線間の相対角は不変である, という内部パラメータのみに依存する拘束条件を利用して推定を行う.実験においては内部パラメータが 安定に求まることを示し,さらに,本手法を用いると,推定結果の誤差および入力データの縮退度を可視 化することが可能であることを示す.

Robust Calibration of Intrinsic Camera Parameters by Observing Parallel Light Pairs

Ryusuke Sagawa Yasushi Yagi Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

Abstract

This study describes a method to estimate the intrinsic parameters of a perspective camera. In previous calibration methods for perspective cameras, the intrinsic and extrinsic parameters are simultaneously estimated during calibration. However, in some situations, only estimation of the intrinsic parameters is necessary as the extrinsic parameters are not used. In these cases, each intrinsic parameter, for example focal length, is not sufficiently robust to combat the image processing noise, which is absorbed by both parameter types, during calibration. Therefore, a new method is proposed that will allow the sole estimation of the intrinsic parameters. The proposed method observes parallel light pairs which are projected on different points to calibrate the intrinsic parameters. This is accomplished by applying the constraint that the relative angle of two parallel rays is constant even if they are projected on any points. This method focuses only on the intrinsic parameters and the calibrations are robust as demonstrated in this study. Moreover, our method can visualize the error of the calibrated result and the degeneracy of the input data.

1 はじめに

焦点距離や主点位置などの透視投影カメラの内部 パラメータは幾何学的な解析には重要なパラメータ である.これまで内部,外部パラメータを同時に校 正する様々な手法が提案されているが,場合によって は内部パラメータは必要であるが,外部パラメータ は必要ではないことがある.例えば,カメラを動か しながら撮影する場合,内部パラメータは前もって 校正することができるが,外部パラメータは動きに よって変化するため,事前に校正するものではない. 従来の校正手法は,3次元空間中の特徴点を観測

し,観測した座標とパラメータを用いて再投影した 点の誤差を最小化するようなパラメータを求めるも のである.特徴点の座標を再投影するためには内部 および外部パラメータの両方が必要であるため,外 部パラメータを必要としない場合でも,同時に求め る必要があった.

内部パラメータの推定誤差を最小化する方法が求 められるが,内部パラメータの推定結果は校正用マー カの画像に大きく依存する.従来手法を用いて何度 か予備実験を繰り返し,丁寧に画像処理を行ったに もかかわらず,得られた結果は大きな分散を持つも のであった.これは,従来手法が内部パラメータの 誤差を最小化するために,内部,外部パラメータ両 方の推定を必要とするからであると考えられる.

カメラの校正には,特徴点の抽出を容易にするた めにマーカ物体が良く用いられる.Tsai[7]は既知の 平行移動を行う平面物体を用いた.これは立体的な 物体を用いていることと等価である.立体的なマー カを用いたカメラ校正は,再投影誤差を最小化する ことによって行われる [1]. 一方, [6,8] では, 回転, 平行移動といった相対関係は未知である複数の平面 物体を用いた.これらの方法では,まず最小にカメ ラ画像と平面物体のホモグラフィ行列を計算し,内 部パラメータとホモグラフィ行列の間の拘束条件を 用いて,内部パラメータを推定した.その後,再投影 誤差の非線形最小化によって解の改善を行った [8] . ここで $\hat{m{m}}=(x,y,1)^T$ および $\hat{m{M}}=(X,Y,Z,1)^T$ は, マーカ物体が立体的か平面的かに関わらず,カメラ から有限な距離においてカメラパラメータの推定を 行う場合、マーカが置かれた距離に最適化した解が 得られる.そのため,観測したい物体までの距離が マーカまでの距離と異なると,投影誤差が大きくな る.したがって,内部パラメータの推定結果はマー カの配置に影響されたものとなる.

これに対し [2,5] では,マーカ間の関係が回転運 動のみで表される場合において,カメラパラメータ を求めている.この場合,カメラからマーカまでの 平行移動は最小化すべきコスト関数から取り除かれ るため,推定すべき外部パラメータの数が削減され, 推定結果はマーカまでの距離に依存しないものとな る.しかし,回転移動については推定すべきパラメー タとしてコスト関数に含まれている.

本論文では,カメラ校正精度を改善するため,外 部パラメータをまったく推定することなく内部パラ メータを推定する手法を提案する.まず2では関連 研究について述べ,次に提案手法を3で説明する. また,提案手法において用いるコスト関数に基づい た校正誤差の可視化法について述べる.4では,推

定した内部パラメータについて,最小化するコスト 関数による安定性の評価を行い,最後に5でこの論 文をまとめる.

2 内部パラメータ推定に関する関連研究

本章ではカメラ校正に関する関連研究について説 明する.まず,内部パラメータを表す行列 K を次の ように定義する.

$$K = \begin{pmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(1)

ここで f_x , f_y は焦点距離であり, アスペクト比が1で ない場合には異なる値となる . 射影の主点は (c_x, c_y) である.また, 歪み s は最近のカメラにおいては無 視できるものであるため,以下の章では0とする.

次に外部パラメータ T は次のように表される.

$$T = [R \mid t] \tag{2}$$

ここで, Rは3×3回転行列であり, tは3×1平行移動 ベクトルである.よって,3次元点 $M = (X, Y, Z)^T$ を射影して得られる画像点 $m = (x, y)^T$ は次のよう に計算される.

$$s\hat{\boldsymbol{m}} = KT\hat{\boldsymbol{M}} \tag{3}$$

それぞれ m, Mの同次座標系におけるベクトルで ある.また,*s*は任意のスケールを表す.

2.1 立体的マーカを用いたカメラ校正

立体的なマーカをカメラ校正に用いる場合,パラ メータは次のコスト関数を最小化することによって 推定される.

$$E_{3\mathbf{D}}(P) = \sum_{i} \| \frac{1}{s_i} P \hat{\boldsymbol{M}}_i - \hat{\boldsymbol{m}}_i \|^2 \qquad (4)$$

ここで P = KT であり, また M_i と m_i は画像処 理によって得られる対応点である.内部パラメータ K と外部パラメータ T は,得られた P を分解する ことによって得られる.

最適な P は $E_{3D}(P)$ を最小化することによって得 られるが,コスト関数は内部パラメータ K の誤差を 最小化するものではないため,最適なKが得られる とは限らない.また,得られたパラメータは用いた マーカに最適化されるため,マーカと異なる位置に ある対象を射影した場合の誤差は大きくなる. 2.2 平面マーカを用いたカメラ校正

次の方法は平面的なマーカを複数回観測すること によってカメラ校正を行う方法である [6,8]. 平面

マーカは複数回の観測の間に,カメラに対して異な て得られる. る平行移動,回転パラメータを持つ.この方法はま ず,マーカ上の点と,その射影された画像点を対応 関係を表すホモグラフィ行列を計算する.マーカの 平面がZ = 0で表される場合,ホモグラフィ行列Hは次のようになる.

$$H = [h_1 h_2 h_3] = K[r_1 r_2 t]$$
 (5)

ここで $h_k \ge r_k$ は, $H \ge R \otimes k$ 番目の列である. r_1 と r_2 は正規直交であるので,以下の拘束条件が得ら れる.

$$\boldsymbol{h}_{1}^{T} K^{-T} K^{-1} \boldsymbol{h}_{2} = 0$$
$$\boldsymbol{h}_{1}^{T} K^{-T} K^{-1} \boldsymbol{h}_{1} = \boldsymbol{h}_{2}^{T} K^{-T} K^{-1} \boldsymbol{h}_{2}$$
(6)

ここで $K^{-T} = (K^T)^{-1}$ である . $K^{-T}K^{-1}$ は線形 方程式の解として求められ,内部パラメータ K は $K^{-T}K^{-1}$ を分解することによって計算される.[8] において,次の非線形最適化によって K を改善する.

$$E_{\text{plane}}(K, T_1, \dots, T_n) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{n} \| \frac{1}{s_{ij}} K T_j \hat{M}_i - \hat{m}_{ij}$$
(7)

ここで n は平面マーカの画像数であり, N は一つの 画像に含まれる特徴点の数である.

立体的なマーカの場合と同様に,(7)を最適化する ことによってパラメータが推定されるため、内部パ ラメータ K が最適になるとは限らず,また結果は平 面マーカの位置に最適化されたものとなる. 2.3 回転のみを行うカメラを用いた校正

3つ目の方法は,カメラを回転させてマーカを観 測し,カメラ校正を行う方法である.カメラが回転 運動のみを行う場合,カメラからマーカまでの距離 は無関係となるため,平行移動については射影の式 から取り除かれる.j番目とk番目の画像において対 応点を見つけた場合,その対応関係はホモグラフィ 行列 H_{jk} で表される.このとき, j 番目から k 番目 への回転行列は $R_{ik} = K^{-1}H_{ik}K$ として計算され る.ここで $R_{jk} = R_{jk}^{-T}$ であるため,内部パラメー タKについて次の拘束条件が得られる[2].

$$(KK^T)H_{jk}^{-T} = H_{jk}(KK^T)$$
 (8)

 $K i K K K^T$ を分解することによって計算され,その 後以下のコスト関数を非線形最小化することによっ

$$E_{\text{rot}}(K, R_1, \dots, R_n) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{n} \| \frac{1}{s_{ij}} K R_j \hat{M}_i - \hat{m}_{ij} \|^2$$
(9)

[5] ではターンテーブルを用いて R_i は既知であると 仮定されている.平行移動を含まない回転のみの運 動を得るために、[2]では遠方のマーカ物体を用い、 [5] ではカメラとターンテーブルの回転軸を正確に合 わせている.

この方法では外部パラメータの平行移動成分が推 定すべきパラメータから取り除かれている、そのた め推定結果はマーカの位置と無関係になる.しかし, 回転については,まだパラメータとして求める必要 が残っている.

3 2つの平行光の観測による内部カメラパ ラメータの校正

本論文の目的は,コスト関数から外部パラメータ ^Ⅲを取り除き,最適な内部パラメータKを計算するこ とである. K のみをパラメータとして持つコスト関 数を得るために,(6),(8)と類似した拘束条件を用 いる.これらの場合,外部パラメータを含むホモグ ラフィ行列を計算する必要がある.しかし,提案手 法ではホモグラフィ行列を計算することなく,2つ の平行光を用いることによって直接的に拘束条件を 得る.

3.1 2つの平行光の観測によって得られるコス ト関数

(6) と(8) は,回転によって距離と角度が変化しな い,という拘束条件に基づいている.ここで2つの 平行光を観測すると,この拘束条件を直接的に用い ることができる.図1は,位置姿勢を変えたカメラ から2つの平行光を観測した状況を示している.2 つのカメラ間では外部パラメータ(平行移動,回転) が異なっているが,観測する平行光間の角度は不変 $(\alpha = \alpha')$ である.mが平行光が射影された画像点 であるとすると,光線ベクトルは $K^{-1}m$ によって 得られる.したがって,相対角αは以下の式によっ て計算される.

$$\cos \alpha = \frac{\boldsymbol{m}_{1}^{T} K^{-T} K^{-1} \boldsymbol{m}_{2}}{\| K^{-1} \boldsymbol{m}_{1} \| \| K^{-1} \boldsymbol{m}_{2} \|}$$
(10)

したがって α が既知であるとすると, コスト関数



図 1: 2 つ平行光が異なる 2 つの位置 $O \ge O'$ から観測 された場合でも,平行光間の相対角は不変 ($\alpha = \alpha'$)で ある.

は以下のようになる.

$$E_{\text{paral}}(K) = \sum_{i=1}^{N} d_{1i}^{2}$$
$$d_{1i}^{2} = \boldsymbol{m}_{i1}^{T} K^{-T} K^{-1} \boldsymbol{m}_{i2}$$
$$-\cos \alpha \parallel K^{-1} \boldsymbol{m}_{i1} \parallel \parallel K^{-1} \boldsymbol{m}_{i2} \parallel \quad (11)$$

ここで N は平行光の組の数である.平行光を用いて いるため平行移動成分はコスト関数から取り除かれ る.また,回転行列の拘束条件を直接的に用いてい るため,回転成分についても推定すべきパラメータ から取り除かれる.また,αが未知の場合にはコス ト関数は以下のようになる.

 $E_{\text{para2}}(K) = \sum_{i=1}^{N} d_{2i}^{2}$ $d_{2i}^{2} = m_{i1}^{T} K^{-T} K^{-1} m_{i2} \parallel K^{-1} m_{i1}^{\prime} \parallel \parallel K^{-1} m_{i2}^{\prime} \parallel m_{i1}^{\prime T} K^{-T} K^{-1} m_{i2}^{\prime} \parallel K^{-1} m_{i1} \parallel \parallel K^{-1} m_{i2} \parallel \quad (12)$ これらのコスト関数を非線形最小化することによっ て K を推定する .

3.2 パラメータの初期値推定

*E*_{para1} あるいは *E*_{para2} を用いた *K* の推定は,非 線形最小化によって行われるため,パラメータの初 期値が必要である.一つの画像中に4点以上の特徴 点が存在する場合には,(8)によって *K* の初期値を 求めることができるが,本論文では簡単化した内部 パラメータを仮定することによって初期値を推定す る方法を提案する.

初期値推定において,アスペクト比は1,また主 点は画像の中央にあると仮定する.すなわちw,hを画像の幅と高さとすると, $f_x = f_y$, $(c_x, c_y) =$ (w/2, h/2)と仮定する.したがって,残るパラメー 夕は f_x のみであり, $E_{\text{paral}} = 0$ は以下のように簡 単化される.

$$\sum_{i=1}^{N} A_i f_x^4 + \sum_{i=1}^{N} B_i f_x^2 + \sum_{i=1}^{N} C_i = 0$$
 (13)

ここで, A_i , B_i , C_i は m_{i1} , m_{i2} , α から計算される. (13)を解くことによって f_x の初期値を計算する. コスト関数として E_{para2} を用いる場合でも,類似の方程式を解くことによって f_x を得る.

3.3 誤差と縮退の可視化

 E_{para1} と E_{para2} のパラメータは4つの変数 (f_x, f_y, c_x, c_y)である.したがって, $d_{1i} = 0$ と $d_{2i} = 0$ は,4次元空間の曲面となる.入力画像中で 観測された平行光の各組について曲面が得られるの で,各々の曲面は E_{para1} あるいは E_{para2} の最小化 によって得られた解において互いに交差する.

この曲面を可視化するために,解における4次元 曲面の断面となる2次元曲線を用いる.曲線が1点 で交わらない場合,ノイズが含まれることを示す.す なわち,推定された解の誤差は曲線間の距離として 可視化される.また,交点付近において複数の曲線 が平行に近い場合,交点の位置はノイズに大きく依 存する.これは入力データが縮退した条件であるこ とを示している.

例えば $f_x = f_y = 900, c_x = c_y = 255$,画像サイ ズ 512 × 512 画素という状況を考える.図2は6組 の入力点の位置を示しており,各組は同じ色で表さ れている.図3及び図4は4次元曲面の2次元断面 となる曲線を示している.曲線の色は,図2中の入 力点の色と対応している.図3において,全ての曲 線は解の位置,すなわち $f_x = 900, c_x = 255$ におい て交差している.しかし,紫の線と黒の線はほぼ同 ーであり,解付近において平行である.この2つの 組が縮退した条件であることを示している.

これらの曲線を見ると,画像隅の組,例えば,赤, 緑,青の組が正確な解を得るために有効であること が分かる.1つの組から1つの式が得られるため,4 組のデータがあれば解を計算することができる.し たがって,画像の四隅で入力点の組を取得すると良 い.画像の端で立体的,あるいは平面マーカを観測 することが現実的に難しいのに対して,平行光の組 を画像の端で観測することは簡単である.

3.4 平行光の取得

提案手法では平行光線を観測することが必要である.平行光を取得するにはいかの2つの方法がある.



図 2: 入力データ点は**' で表されており, 各組は色で見分けられる.'o'は主点位置を示している.



図 3:4次元曲面の $f_y = 900$, $c_y = 255$ における断面. 各曲線は $f_x = 900$, $c_x = 255$ において交差している.

- 遠方マーカ物体の特徴点を用いる.
- コリメート光を生成する.

前者の方法では,カメラ運動に多少の平行移動成 分が含まれていたとしてもマーカまでの距離よりも ずっと小さい場合には,その平行移動を無視できる、 したがって,特徴点からの光線ベクトルはカメラが 動いた場合でも不変であるため,その光は平行光で あると見なせる.この方法にはフォーカスの問題が あるが,カメラのフォーカスが無限遠に設定されて いない場合には,絞りを最小にして,シャッター時 間を長く取ることによって,画像がぼけることを防 ぐことにより解決できる.

後者の方法は,コリメータによって平行光を生成 する方法である.コリメート光を生成する簡単な方 法としては,点光源と凹放物面鏡を用いる方法が挙 げられる.図5は,そのシステムの一例である.光 源の前にピンホールを設置して点光源とする.ピン ホールを放物面鏡の焦点位置に置くことによって,反 射光が平行光となる.光学機器が必要であるが,こ



図 4:4次元曲面の $f_y = 900$, $c_x = 255$ における断面. 各曲線は $f_x = 900$, $c_y = 255$ において交差している.



図 5:2 つのコリメータによってコリメート光が生成される.コリメータは光源,ピンホール,凹放物面鏡によって 構成される.

の方法の利点は小さなシステムを作ることができる ことである.

3.5 相対角の計測

コスト関数 E_{para1} を用いる場合, 2 つ平行光の 相対角を計測する必要がある.平行光の光源として 遠方マーカを用いる場合,相対角を求める方法とし て,1) 地図,2) カメラとターンテーブル,3) セオ ドライトを用いる方法が考えられる.最初の方法で は,建物の角などを特徴点として用いる場合などに は地図から角度を計算する方法が簡単であり, 誤差 が 0.2 度程度で計測することができる.第2の方法 はカメラをターンテーブルに設置し,2つの特徴点 が同一の画像点に射影されるようにターンテーブル を回転させ,その回転角から相対角を求める方法で ある.誤差はターンテーブルの精度によるが,実験 では 0.01 度の誤差で計測できた.第3の方法は角度 を計測する機器であるセオドライトを利用する方法 である.この場合の誤差は0.001度以下である.-方,コリメート光を用いる場合には,上述したカメ ラをターンテーブルに設置する方法を用いることが できる.

4 実験

本章では,関連研究と提案手法を比較し,提案手 法の安定性について実験する.まず,シミュレーショ ンによって比較評価を行い,次に実画像を用いてカ メラ校正を行う.

4.1 シミュレーション実験による安定性の評価

シミュレーション実験では E_{3D} , E_{plane} , E_{rot} , E_{para1} , E_{para2} をコスト関数として内部パラメータを推定し,その精度を比較する.実験においてパラメータの真値は $f_x = f_y = 900$, $c_x = c_y = 255$ であり,画像サイズは 512×512 ピクセルである.

入力として Zhang [8] によって提供されているデー タを使用した.内部パラメータの真値は提供されて いるデータと異なるため,提供されている外部パラ メータと,内部パラメータの真値を用いて射影を再 計算し,マーカの特徴点が投影される画像点を用い た.平面マーカには64点の特徴点が配置されてい る.入力データは3つの平面マーカによって得られ るため, E_{plane} には外部パラメータをそのまま用 い,他の方法には以下のように外部パラメータを変 更した.

- *E*_{3D}: 3枚の平面マーカを単一の立体マーカとして扱う.すなわち,平面マーカ同士の相対的な位置姿勢は既知と仮定する.
- *E*_{rot}, *E*_{para1}, *E*_{para2}:回転成分のみを用いる.
 1つの平面を基準として,残りの2つのマーカ に対する相対的な回転を計算する.その回転を 基準平面に適用し,特徴点を再投影して入力デー タとする.

まず,特定のパラメータを真値から変化させ,コ スト関数の変化を分析する. $\partial E/\partial f_x$ のようなコス ト関数の偏微分を解析的に計算することが難しいた め,実際にパラメータを変化させて評価を行った.図 6と図7は,それぞれ f_x あるいは c_x を変化させ,コ スト関数を最小化した後の誤差を表している.他の 内部パラメータは真値に固定している.コスト関数 の最小化においては,外部パラメータのみが推定す べきパラメータとして残っている.誤差として,二 乗平均平方根誤差(root-mean-square,RMS)である $\sqrt{E/N}$ を用いた.ここでNは拘束条件の数である. $E_{3D}, E_{\text{plane}}, E_{\text{rot}}$ ではピクセル誤差が計算される が, $E_{\text{paral}}, E_{\text{para2}}$ ではコサイン関数の誤差が計算



図 6: f_x が真値から変化した際の誤差の増加

される.ここで比較のため, E_{para1} をピクセル誤差 を計算するように次のように変更する.

$$d_1 = \min_{\boldsymbol{p}} \parallel \boldsymbol{m}_2 - \boldsymbol{p} \parallel \text{subject to}$$
$$\cos \alpha = \frac{\boldsymbol{m}_1^T K^{-T} K^{-1} \boldsymbol{p}}{\parallel K^{-1} \boldsymbol{m}_1 \parallel \parallel K^{-1} \boldsymbol{p} \parallel} \quad (14)$$

ここでpは画像点である. E_{para2} についても同様に 変更する.

図 6 と図 7 の結果はパラメータが変化したときの コスト関数の感度を示している.パラメータを真値 から変化させた際に,誤差が急激に変化する場合に は,コスト関数の極小値を安定に決定できる.すな わち,画像処理の誤差に対して安定であるというこ とである.例えば,画像点に1ピクセルの誤差があっ たとすると, E_{plane} を用いると f_x は15ピクセル変 化する可能性があることを示している.一方 Eparal を用いると, f_x は5 ピクセルしか変化しない. した がって, E_{para1} は f_x と c_x の両方に対して安定なコ スト関数であると言える.これに対し, E_{para2} は f_x に対して安定では無い.これは f_x が変化しても, α と α' が同じように変化するため, その差がほとんど 変化しないためであると考えられる.他のコスト関 数 *E*_{3D}, *E*_{plane}, *E*_{rot} については, 誤差が外部パラ メータによって吸収されるため, f_x あるいは c_x が 変化しても大きくならない.

次に,入力画像点にノイズを加えて内部パラメー タを推定する実験を行う.加えられたノイズはガウ ス分布を持ち,その標準偏差は0,0.1,0.5,1.0 ピク セルの場合について調べた. E_{para1} については平行 光の相対角が既知であるため,その相対角 α に標準 偏差0,0.1,0.5 度のガウシアンノイズを加えて実験し た.図8および図9はそれぞれ推定された f_x , c_x の



図 7: c_x が真値から変化した際の誤差の増加



図 8: 推定された f_x の誤差:標準偏差 0, 0.1, 0.5, 1.0 の ガウシアンノイズが入力画像点に加えられている.また, E_{para1} については相対角 α に標準偏差 0, 0.1,0.5 度のガ ウシアンノイズが加えられる.

RMS 誤差である. E_{para1} の誤差は α に加えられた 誤差が大きい場合でも,他のコスト関数を用いた場 合と比べて,誤差が非常に小さい.したがって,0.1 度の精度で相対角が計測された場合, E_{para1} を用い る提案手法は他の場合と比べて,良好な結果が得ら れる,と結論づけることができる.この結論は画像 の誤差が小さい場合でも当てはまり,また,相対角 の計測精度が低い場合(例えば 0.5 度精度)でも十 分正確な結果が得られる.すなわち,地図を用いて 相対角を計算するといった簡便な方法でも十分であ るといえる.

4.2 実画像を用いた実験

最後に実際のカメラを用いて実験を行う.カメラ にはビデオカメラ(SONY HDR-FX1)を用い,特徴 点として図 10 に示す遠方のビルの角を用いた.ビル までの距離は約 300m であり,カメラの位置姿勢変化 に伴う平行移動成分は無視できる.カメラのフォー カスは近距離に固定し,絞り最小,長時間露光の設定



図 9: 推定された *c_x* の誤差:図 8 と同じノイズが入力画 像点と相対角 α に加えられている.



図 10: 入力画像の例:検出された特徴点は'+'で示されて いる.

で画像を取得した.レンズ歪みについては [9,4] の手 法を用いて事前に補正した.補正後の画像サイズは 780 × 520 である.ビルの角の検出には OpenCV [3] で提供されている角検出オペレータを用いた.カメ ラをターンテーブルに設置して 2 つの特徴点の相対 角を計測し,10.38 度であった.

図 11 に示した 10 組の特徴点を用い, E_{para1} をコ スト関数としてパラメータを推定した.推定された パラメータは $f_x = 631.33$, $f_y = 747.67$, $c_x = 390.64$, $c_y = 263.45$ である.図 12 および図 13 は平行光の 組に対応する曲線を示している.図 12 において,こ れらの曲線はほぼ 1 点で交わっているため f_x , c_x が 正確に推定できているといえる.一方,図 13 におい て曲線の多くは水平に近いため, c_y の精度は c_x と 比べて低い.これは水平画角 (≈ 63 度)に比べて垂直 画角 (≈ 38 度) が狭いためであると考えられる.



図 11: '*' で示される入力画像点の組は, 色と線で識別される.'o' は推定された主点位置を表す.



図 12: 各曲線は,4次元曲面の *c_x-f_x*断面である. 色と 線種は図 11 と対応している. 推定されたパラメータは'o' で表されている.

5 おわりに

本論文では透視投影カメラの内部パラメータを推 定する手法を提案した.従来手法は再投影誤差を最 小化することによって内部パラメータを求めていた が,外部パラメータによって誤差が吸収されてしま うために,画像のノイズに対して十分に安定ではな かった.これに対し,提案手法では2つ平行光を観測 することによってコスト関数から外部パラメータを 取り除いた.これにより,推定されたパラメータの 精度を大きく改善することが可能となった.また,平 行光の組によって得られる拘束条件は4次元曲面と なるため,校正結果に含まれる誤差および入力デー タの縮退性を可視化することが可能となった. 平行 光を生成する光源として,遠方マーカあるいはコリ メート光を用いることができる.遠方マーカを用い る場合には,地図を用いて相対角を計算することに よって簡便に入力データが得られる.一方コリメー ト光を用いる場合には小型システムによってデータ が得られるという利点がある.今後の課題として,よ



図 13: 各曲線は,4次元曲面の *cy*-*f_x*断面である. 色と 線種は図 11 と対応している. 推定されたパラメータは'o' で表されている.

リー般的なカメラモデルについて校正を行うように 手法を拡張することが考えられる.

参考文献

- Olivier Faugeras. *Three-dimensional computer vision: a geometric viewpoint*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1993.
- [2] R. Hartley. Self-calibration from multiple views with a rotating camera. In *Proc. the 3rd European Conference* on Computer Vision, Vol. 1, pp. 471–478, Stocklholm, Sweden, May 1994.
- [3] Open Source Computer Vision Library. http:// www.intel.com/technology/computing/opencv/index.htm.
- [4] Ryusuke Sagawa, Masaya Takatsuji, Tomio Echigo, and Yasushi Yagi. Calibration of lens distortion by structuredlight scanning. In Proc. 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1349– 1354, Edmonton, Canada, August 2005.
- [5] G. Stein. Accurate internal camera calibration using rotation, with analysis of sources of error. In *Proc. Fifth International Conference on Computer Vision*, pp. 230– 236, Cambridge, Massachusetts, June 1995.
- [6] P. Sturm and S. Maybank. On plane-based camera calibration: A general algorithm, singularities, applications. In *Proc. the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 432–437, Fort Collins, USA, June 1999.
- [7] R.Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using offthe-shelf tv cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics* and Automation, Vol. 3, No. 4, pp. 323–344, 1987.
- [8] Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334, 2000. http://research.microsoft.com/ zhang/Calib/.
- [9] 高辻誠也, 佐川立昌, 越後富夫, 八木康史. グレイコード パターンを利用したレンズ歪みの補正手法. 画像の認 識・理解シンポジウム (MIRU2005), pp. 174–180, 7 月 2005.