移動カメラキャリブレーションの幾何学的 AIC による安定化

松永 力*　　金谷 健一†

*(株) 朋栄 放送システム開発部　† 群馬大学工学部情報工学科

物体の背後に参照板を設置し、カメラ位置やズームを変えながら物体を自由に撮影する過程でその画像を解析しながら実行する「同時校正」は複合現実感実現のための基本技術の一つであるが、その過程で解が不定となる退化や統計的なゆらぎが生じることがある。本論文ではこれが「幾何学的 AIC」によって回避できることを示す。これはカメラの移動の履歴から次のフレームでの焦点距離とカメラ位置を予測し、予測したモデルと実際に計算したモデルを幾何学的 AIC によって比較するものである。そして、その効果をシミュレーションによって確認するとともに実画像に適用した例も示す。本方法はスポーツ中継シーンからの３次元解析やＣＧと実写人物画像とを合成する「仮想スタジオ」にも有効である。

キーワード: 複合現実感、カメラキャリブレーション、射影変換、信頼性評価、モデル選択、幾何学的 AIC

Stabilizing Moving Camera Calibration by the Geometric AIC

Chikara Matsunaga* and Kenichi Kanatani†

*Broadcast Division, FOR-A Co. Ltd.
2–3–3 Ohsaku, Sakura, Chiba 285-0802 Japan
†Department of Computer Science
Gunma University, Kiryu, Gunma 376-8515 Japan

We study the scheme for "simultaneous calibration" for computing the focal length and the position of a continuously moving and continuously zooming camera from an image of a planar pattern placed behind an object. This is one of the most fundamental techniques for mixed reality applications. We first point out that this scheme entails degeneracy of the solution and statistical fluctuations of computation. We then show that these can be avoided by predicting the focal length and the position of the camera from their values in preceding frames and comparing the predicted model with the actually computed model by the geometric AIC. We confirm the effectiveness of our method by simulations and show a real image application. Our method is effective in analyzing 3-D motion from video images of live sports and stably fusing CG with real human images in "virtual studio" applications.

Key words: mixed reality, camera calibration, homography, reliability evaluation, model selection, geometric AIC

謝辞: 本研究の一部は文部省科学研究費基盤研究Ｃ (2) (No. 11680377) によった。

* 285-0802 千葉県佐倉市大作 2–3–3 (株) 朋栄 放送システム開発部, Tel: (043)498-1239, Fax: (043)498-2223
†376-8515 桐生市天神町 1–5–1 群馬大学工学部情報工学科, Tel: (0277)30-1842, Fax: (0277)30-1801
E-mail: matsunaga@for-a.co.jp, kanatani@cs.gunma-u.ac.jp

1. 序論

実在の物体の３次元表示はインターネットカタログや仮想博物館を始め、多くの応用が考えられる。また実物や実シーンから構築した３次元モデル・環境とＣＧで生成した仮想物体・仮想シーンとの融合は「複合現実感」とも呼ばれ、今日のメディア処理研究の中心テーマとなっている。このような実物や実シーンの画像からの３次元復元にはそれを撮影したカメラの位置や焦点距離などの内部パラメータを知ること (「カメラキャリブレーション」) が不可欠である。

代表的な方法はあらかじめカメラの内部パラメータを推定し、それを固定したまま撮影すること (「事前校正 (pre-calibration)」) であるが [10]、最近ではカメラの内部パラメータが未知のまま、シーンに関して何の知識も仮定せず多数の画像からカメラパラメータとシーンの３次元形状を同時に計算する「自己校正法 (self-calibration)」の進歩も著しい [6, 11]。

これに対して前報 [4] では物体の背後に物体像と分離しやすい既知のパタンを描いた参照板を設置し、1 台のカメラでズームを変えつつ連続的に移動しながら物体を撮影すると同時に、その背景パタンからカメラの位置や焦点距離を計算する方法 (「同時校正 (simultaneous calibration)」) を述べた (図 1)。この方法は特徴点が限定されているので高精度の計算が必要であり、また精度が状況ごとにフレームごとに異なるので、それを定量的に評価することが必要となる。

前報 [4] では統計的最適化理論 [1] を適用し、最適解を計算すると同時に解の信頼性評価を行う手順を記述した。また、その初期値として誤差がないとき厳密解となる解析解を導出した。そして有効性をシミュレーションおよび実画像実験によって示した。しかし、重要な問題が二つ残されていた。

- 平面パタンを用いる限り、カメラがパタンに正対したときに退化が生じて、ズームとカメラの前進とが区別できない。実際の場面では、例えばカメラの光軸をほぼ水平に保つ状況ではパタンを上向きに傾けたり、床や地面上にある物体や人物を撮影する場合はパタンを水平に置いて斜め上方から撮影したりすることにより、そのような配置を避けることができる。しかし、退化の生じる配置にカメラが移動することが絶対に起こらないとはいえない。

- カメラの移動が小さいとき統計的なゆらぎが顕著となる。例えばカメラが静止していても物体が移動すると観察される背景パタン部分も変化するので、それから計算したカメラ位置や焦点距離も微小に変化する。したがって、カメラは実際には静止していても計算上は微小な振動をしていると解釈される。

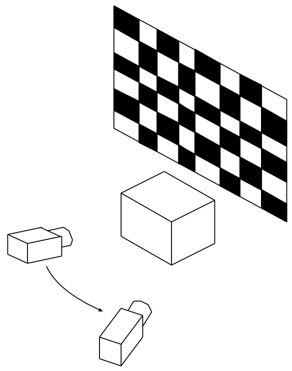

図 1: 連続的に移動するカメラの同時校正。

本論文ではこれらの問題を幾何学的 AIC[2] によって回避する試みを示す。これはカメラの移動の履歴から次のフレームでの焦点距離とカメラ位置を予測し、予測したモデルと実際に計算したモデルを幾何学的 AIC によって比較するものである。そして、その効果をシミュレーションによって確認するとともに実画像に適用した例も示す。

2. 基本原理

XYZ ワールド座標系を固定し、原点から距離 d の位置に XY 面に平行に平面パタンを置く。カメラの焦点距離以外の内部パラメータは既知で撮像が透視変換とみなせるとする。まず焦点距離を f_0 とし、レンズ中心を XYZ ワールド座標系の原点に置き、光軸を Z 軸に一致させ、画像の x, y 座標軸が X, Y 座標軸に平行になるようにカメラを仮想的に置く。この状態からカメラを回転行列 $\boldsymbol{R}$ だけ回転し、ベクトル $\boldsymbol{t}$ だけ並進し、焦点距離を f に変化させるとする。$\{\boldsymbol{t}, \boldsymbol{R}\}$ を「運動パラメータ」と呼ぶ。平面パタン上の位置 (X_α, Y_α, d) にある特徴点の画像座標がカメラの移動後に (x_α, y_α) であるとし、次のベクトルを定義する。

$$\bar{\boldsymbol{x}}_\alpha = \begin{pmatrix} X_\alpha/d \\ Y_\alpha/d \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{x} = \begin{pmatrix} x/f_0 \\ y/f_0 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{1}$$

このとき両者は次の関係で結ばれる [1]。

$$\boldsymbol{x} = Z[\boldsymbol{H}\bar{\boldsymbol{x}}] \tag{2}$$

ただし $Z[\cdot]$ は第 3 成分を 1 とする正規化作用素であり、行列 $\boldsymbol{H}$ は次のように与えられる [1]。

$$\boldsymbol{H} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & f_0/f \end{pmatrix} \boldsymbol{R}^\top \left(\boldsymbol{I} - \frac{\boldsymbol{t}\boldsymbol{k}^\top}{d} \right) \tag{3}$$

ここに $\boldsymbol{k} = (0,0,1)^\top$ である。式 (2) は「射影変換」と呼ばれる。行列 $\boldsymbol{H}$ は「射影変換行列」と呼ばれ [1]。これを最適に計算すると同時にその信頼性を評価するプログラムが公開されている [3, 9]。

特徴点のパタン上の座標 (X_α, Y_α) は既知であり、基準となるカメラとパタンとの距離 d および焦点距離 f_0 は標準的な値に設定する。データはカメラの移動後に観測する特徴点の画像座標 (x_α, y_α) であり、未知数は運動パラメータ $\{\boldsymbol{t}, \boldsymbol{R}\}$ と移動後の焦点距離 f である。回転行列は 3 自由度しかないから、未知数は合計 7 個である。したがって、 4 個以上の特徴点を観測すればこれらが定まる。

3. 最適推定

データベクトル $\boldsymbol{x}_\alpha$ の共分散行列を $V[\boldsymbol{x}_\alpha]$ とする。この絶対的な大きさをあらかじめ予測するのは困難であるので、定数倍を除いて既知であるとし、次のように置く。

$$V[\boldsymbol{x}_\alpha] = \epsilon^2 V_0[\boldsymbol{x}_\alpha] \tag{4}$$

未知の定数 ϵ を「ノイズレベル」と呼ぶ。ノイズの相対的な性質を記述する行列 $V_0[\boldsymbol{x}_\alpha]$ は既知とし、「正規化共分散行列」と呼ぶ。 $\boldsymbol{x}_\alpha$ の第 3 成分は定数 1 であるから $V_0[\boldsymbol{x}_\alpha]$ は第 3 行、第 3 列がすべて 0 のランク 2 の特異行列である。特に特徴的なノイズの現れかたをしない場合はデフォルト値 $V_0[\boldsymbol{x}_\alpha] = \mathrm{diag}(1,1,0)$ (対角要素を 1, 1, 0 の対角行列) を用いる。誤差が正規分布に従うとすると、最適な推定値は次の二乗「マハラノビス距離」の最小化によって得られる。

$$J = \frac{1}{N}\sum_{\alpha=1}^{N} (\boldsymbol{x}_\alpha - Z[\boldsymbol{H}\bar{\boldsymbol{x}}_\alpha], V_0[\boldsymbol{x}_\alpha]_2^- (\boldsymbol{x}_\alpha - Z[\boldsymbol{H}\bar{\boldsymbol{x}}_\alpha])) \tag{5}$$

ただし $(\cdot)_r^-$ は大きい r 個の固有値以外を 0 に置き換えて計算したランク r の (ムーア・ペンローズの) 一般逆行列を表す。式 (5) の最小値はニュートン法によって得られる。数値計算を安定化するために f, $\boldsymbol{t}$ の代わりに無次元変数 ϕ, $\boldsymbol{\tau}$ を導入し、次のように置く。

$$\phi = \frac{f}{f_0}, \quad \boldsymbol{\tau} = \frac{\boldsymbol{t}}{d}, \quad \boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & \phi \end{pmatrix},$$

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_\alpha = Z[\boldsymbol{H}\bar{\boldsymbol{x}}_\alpha], \quad \boldsymbol{Q}_\alpha = \boldsymbol{I} - \tilde{\boldsymbol{x}}_\alpha \boldsymbol{k}^\top, \quad \boldsymbol{e}_\alpha = \boldsymbol{x}_\alpha - \tilde{\boldsymbol{x}}_\alpha \tag{6}$$

誤差がないときは解が解析的に求まる [4]。誤差があるときはこれを初期値としてニュートン法を適用する。

4. ニュートン法

関数 J の未知数 $\phi, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{R}$ に関する勾配 ∇J とヘッセ行列 $\nabla^2 J$ を次のように置く。

$$\nabla J = \begin{pmatrix} \partial J/\partial\phi \\ \nabla_\tau J \\ \nabla_{\mathbf{R}} J \end{pmatrix} \tag{7}$$

$$\nabla^2 J = \begin{pmatrix} \partial^2 J/\partial\phi^2 & (\nabla_\tau \partial J/\partial\phi)^\top & (\nabla_{\mathbf{R}} \partial J/\partial\phi)^\top \\ \nabla_\tau \partial J/\partial\phi & \nabla^2_{\tau\tau} J & (\nabla^2_{\mathbf{R}\tau} J)^\top \\ \nabla_{\mathbf{R}} \partial J/\partial\phi & \nabla^2_{\mathbf{R}\tau} J & \nabla^2_{\mathbf{RR}} J \end{pmatrix} \tag{8}$$

ただし $\nabla^2 J$ の計算において $O(\boldsymbol{e}_\alpha)$ の項を無視する近似を行う。この近似を用いたニュートン法は「ガウス・ニュートン法」とも呼ばれる。このような近似を行ってよい理由は、ニュートン法においては勾配が精度を定めるの対してヘッセ行列は収束の速度を支配するものであり、近似を加えても解の精度に影響しないためである。勾配 ∇J およびヘッセ行列 $\nabla^2 J$ の各要素の具体的な計算式は前報 [4] に示されている。ニュートン法の手順は次のようになる。

1. $\phi, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{R}$ の初期値を与える。
2. 勾配 ∇J とヘッセ行列 $\nabla^2 J$ を計算する。
3. 更新量 $\Delta\phi, \Delta\boldsymbol{\tau}, \Delta\boldsymbol{\Omega}$ を次のように計算する。
$$\begin{pmatrix} \Delta\phi \\ \Delta\boldsymbol{\tau} \\ \Delta\boldsymbol{\Omega} \end{pmatrix} = -\left(\nabla^2 J\right)^{-1} \nabla J \tag{9}$$
4. $|\Delta\phi| < \epsilon_\phi$, $\|\Delta\boldsymbol{\tau}\| < \epsilon_\tau$, $\|\Delta\boldsymbol{\Omega}\| < \epsilon_{\mathbf{R}}$ となるまで ϕ, $\boldsymbol{\tau}$, $\boldsymbol{R}$ を次のように更新して次のように置いてステップ 3 に戻る。
$$\phi \leftarrow \phi + \Delta\phi, \quad \boldsymbol{\tau} \leftarrow \boldsymbol{\tau} + \Delta\boldsymbol{\tau}, \quad \boldsymbol{R} \leftarrow \mathcal{R}(\Delta\boldsymbol{\Omega})\boldsymbol{R} \tag{10}$$

ただし $\mathcal{R}(\Delta\boldsymbol{\Omega})$ は $\Delta\boldsymbol{\Omega}$ を回転軸、 $\|\Delta\boldsymbol{\Omega}\|$ を回転角とする回転行列であり、 ϵ_ϕ, ϵ_τ, $\epsilon_{\mathbf{R}}$ は収束判定のしきい値である。

5. 信頼性評価

収束したときの残差 $\hat{J}$ から二乗ノイズレベルが次のように推定できる。

$$\hat{\epsilon}^2 = \frac{\hat{J}}{2-7/N} \tag{11}$$

収束したときのヘッセ行列を $\nabla^2\hat{J}$ とすると、解 $\{\hat{\phi}$, $\hat{\boldsymbol{\tau}}$, $\hat{\boldsymbol{R}}\}$ の共分散行列が次のように推定できる (右辺に推定値ではなく真の値を代入すると共分散行列 $V[\hat{\phi},\hat{\boldsymbol{\tau}},\hat{\boldsymbol{R}}]$ の理論的下界となる)。

$$V[\hat{\phi},\hat{\boldsymbol{\tau}},\hat{\boldsymbol{R}}] = \frac{2\hat{\epsilon}^2}{N}\Big(\nabla^2\hat{J}\Big)^{-1} \tag{12}$$

この (11) 要素が (正規化) 焦点距離の分散 $V[\hat{\phi}]$, 第 2–4 行第 2–4 列の小行列が (正規化) 並進の共分散行列 $V[\hat{\boldsymbol{\tau}}]$、第 5–7 行第 5–7 列の小行列が回転の共分散行列 $V[\hat{\boldsymbol{R}}]$ となる [4]。例えば、誤差が正規分布をするとすれば 99.7% の信頼水準で焦点距離 f は次の範囲にある。

$$f_0(\hat{\phi}-3\sqrt{V[\hat{\phi}]}) < f < f_0(\hat{\phi}+3\sqrt{V[\hat{\phi}]}) \tag{13}$$

6. 退化の判定

序論で指摘したように、カメラがパタンに正対していると退化が生じ、誤差がなければ式 (8) のヘッセ行列 $\nabla^2 J$ の行列式は 0 となり、式 (9) の逆行列が計算できない。誤差があれば逆行列が計算できるが信頼性がなく、ニュートン法を適用する意味がない。そこで式 (13) の信頼区間が負の値を含むときは解は無意味であると判定する。したがって、その判定条件は

$$V[\hat{\phi}] > \frac{\hat{\phi}^2}{9} \tag{14}$$

となる。$V[\hat{\phi}]$ は式 (12) の (11) 要素であるから、これは $2\hat{\epsilon}^2(\nabla^2\hat{J})^\dagger_{11}/N\det(\nabla^2\hat{J})$ に等しい。ここに $(\nabla^2\hat{J})^\dagger_{11}$ はヘッセ行列 $\nabla^2\hat{J}$ の (11) 余因子 (第 1 行第 1 列を除いた行列式) である。ゆえに式 (14) は次のように書ける。

$$\frac{18\hat{\epsilon}^2}{N}\Big(\nabla^2\hat{J}\Big)^\dagger_{11} - \hat{\phi}^2\det\Big(\nabla^2\hat{J}\Big) > 0 \tag{15}$$

これは逆行列の計算を含まないので常に安定に計算できる。

7. 経路の安定化

序論で指摘したように、カメラが連続的に移動しても、画像処理がフレームごとに独立であれば統計的なゆらぎが避けられない。これは特にカメラの移動が小さいときに顕著となる。これを避けるために運動を予測し、幾何学的 AIC [2] によるカメラのモデル選択を行う。具体的には、現在の焦点距離を f_i、運動パラメータを $\{\boldsymbol{t}_i, \boldsymbol{R}_i\}$、一つ前のフレームでの値 f_{i-1}、$\{\boldsymbol{t}_{i-1}, \boldsymbol{R}_{i-1}\}$ とし、次のモデルを考える。

- 静止モデル (自由度 0): $f=f_i$, $\boldsymbol{t}=\boldsymbol{t}_i$, $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}_i$ と固定し、その残差を $\hat{J}_*$ とする。
- **t** 固定モデル (自由度 3): $f=f_i$, $\boldsymbol{t}=\boldsymbol{t}_i$ と固定し、 $\boldsymbol{R}$ を初期値 $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}_i$ からニュートン法により最適化し、その残差を $\hat{J}_{s'}$ とする。
- **t** 予測モデル (自由度 3): $f=f_i$ と固定し、 $\boldsymbol{t}=2\boldsymbol{t}_i-\boldsymbol{t}_{i-1}$ と予測し、 $\boldsymbol{R}$ を初期値 $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}_i\boldsymbol{R}_{i-1}^\top\boldsymbol{R}_i$ からニュートン法により最適化し、その残差を $\hat{J}_{p'}$ とする。
- **f** 固定モデル (自由度 6): $f=f_i$ と固定し、 $\{\boldsymbol{t}$, $\boldsymbol{R}\}$ を初期値 $\boldsymbol{t}=\boldsymbol{t}_i$, $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}_i$ からニュートン法により最適化し、その残差を $\hat{J}_s$ とする。そして、二乗ノイズレベルを次のように計算する。

$$\hat{\epsilon}_s^2 = \frac{\hat{J}_s}{2-6/N} \tag{16}$$

- **f** 予測モデル (自由度 6): $f=2f_i-f_{i-1}$ と予測し、 $\{\boldsymbol{t}$, $\boldsymbol{R}\}$ を初期値 $\boldsymbol{t}=2\boldsymbol{t}_i-\boldsymbol{t}_{i-1}$, $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}_i\boldsymbol{R}_{i-1}^\top\boldsymbol{R}_i$ からニュートン法により最適化し、その残差を $\hat{J}_p$ とする。そして、二乗ノイズレベルを次のように計算する。

$$\hat{\epsilon}_p^2 = \frac{\hat{J}_p}{2-6/N} \tag{17}$$

- 一般モデル (自由度 7): f 予測モデルの解 f, $\{\boldsymbol{t}$, $\boldsymbol{R}\}$ を初期値とし、ニュートン法により最適化し、その残差を $\hat{J}_g$ とする。

退化判定は f 予測モデルに基いて行う。すなわち、二乗ノイズレベル ϵ^2 を式 (17) によって推定し、式 (15) を評価する。

退化でないと判定されれば、静止モデル、 f 固定モデル、 f 予測モデル、および一般モデルを比較する。

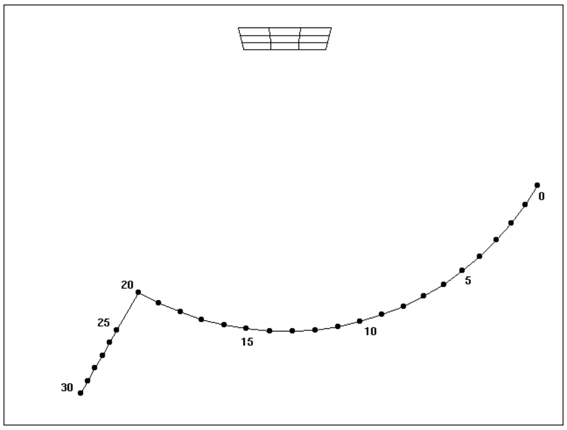

図 2: カメラの経路。

二乗ノイズレベル ϵ^2 は式 (11) で推定する。そして幾何学的 AIC を次のように評価する。

$$AIC_* = \hat{J}_*, \quad AIC_s = \hat{J}_s + \frac{12}{N}\hat{\epsilon}^2,$$

$$AIC_p = \hat{J}_p + \frac{12}{N}\hat{\epsilon}^2, \quad AIC_g = \hat{J}_g + \frac{14}{N}\hat{\epsilon}^2. \quad (18)$$

退化であると判定されれば、静止モデル、 t 固定モデル、 t 予測モデル、および f 固定モデルを比較する。二乗ノイズレベル ϵ^2 は式 (16) で推定する。そして幾何学的 AIC を次のように評価する。

$$AIC_* = \hat{J}_*, \quad AIC_{s'} = \hat{J}_{s'} + \frac{6}{N}\hat{\epsilon}_s^2,$$

$$AIC_{p'} = \hat{J}_{p'} + \frac{6}{N}\hat{\epsilon}_s^2, \quad AIC_s = \hat{J}_s + \frac{12}{N}\hat{\epsilon}_s^2. \quad (19)$$

いずれの場合も、幾何学的 AIC が最も小さい値のモデルを選択する。これによってカメラ移動の小さいときの統計的なゆらぎを除去できるだけでなく、退化が生じても解が安定に定まる。さらにフレームごとに初期値を解析的に計算する必要がない。

8. シミュレーション実験

3×3 の格子パタンと角度 β をなす平面上を、格子の中心を注視しながら端から正面に向かってカメラを円弧状に移動する。そのまま正面を通り過ぎてからカメラがしばらく停止した後、そのまま後退する (図 2)。焦点距離は次のように変化させる (単位は画素、k はステップ数)。

$$f = \begin{cases} 1200 + 100\sin 2\pi k/19 & k = 0, 1, ..., 19 \\ 1200 & k = 20, ..., 30 \end{cases} \quad (20)$$

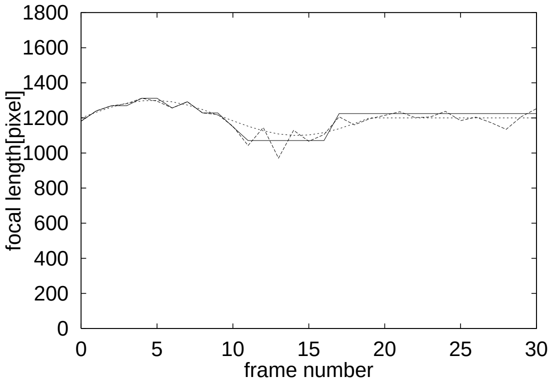

図 3: 焦点距離 ($\beta = 80°$)。本方法 (実線)、独立な推定 (破線)、真の値 (点線)。

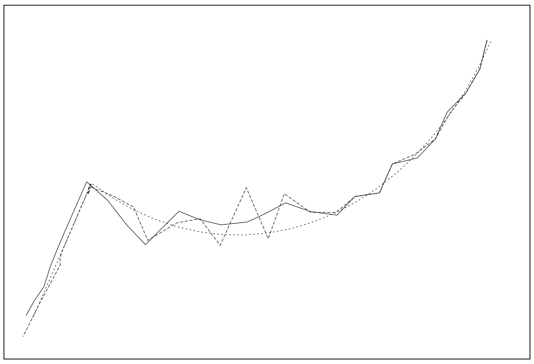

図 4: カメラの経路 ($\beta = 80°$)。本方法 (実線)、独立な推定 (破線)、真の位置 (点線)。

$k = 13$ のときカメラがパタンのほぼ正面に位置する。 $k = 20 \sim 24$ で停止し、 $k = 25 \sim 30$ で後退する。格子の頂点に標準偏差 0.5(画素) の正規分布に従う誤差を毎回独立に加えて焦点距離とカメラの経路を計算する。

図 3は $\beta = 80°$ の場合の焦点距離 f の変化を示すものである。実線は計算値、点線は真の値である。破線は前報 [4] の方法で毎回独立に計算した結果である。図 4の実線はそれぞれに対応するカメラの経路を上から見た図である。図 3、 4からわかるように、本方法によるとフレーム毎に独立に計算する場合に比べて不規則な変動が押えられている。

図 5、 6は、 $\beta = 90°$ の場合の焦点距離およびカメラの経路を図 3、 4と同様に示したものである。このとき $k = 13, 14$ で退化が生じ、前報の方法では計算が破綻している。破綻したことを見やすくするために図 5では f を ∞、図 6ではカメラ位置をパタンの中心として表示している。

図 7は $k = 20 \sim 24$ の付近を拡大した図である。このようにフレーム毎に独立に計算すると、実際にはカメラが静止していても計算値は不規則にゆらいでいる

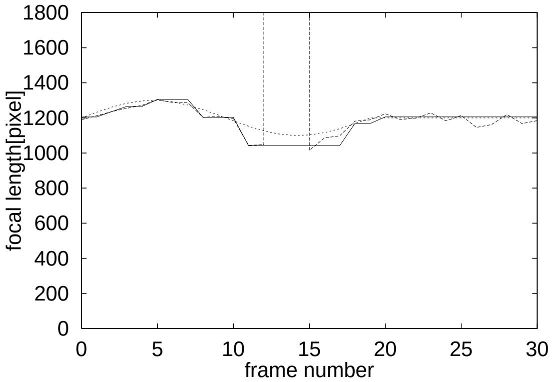

図 5: 焦点距離 ($\beta = 90^\circ$)。本方法 (実線)、独立な推定 (破線)、真の値 (点線)。

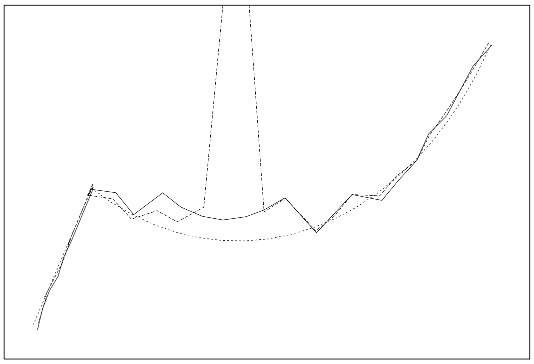

図 6: カメラの経路 ($\beta = 90^\circ$)。本方法 (実線)、独立な推定 (破線)、真の位置 (点線)。

が、本方法によるとそのゆらぎが除去されている。

9. 実画像例

図 8は焦点距離を変えながらカメラを移動させ、テニスコートを撮影した 5 枚の画像である。コートの実寸は国際規約で定まっている。これを基にカメラの位置と焦点距離が計算できる。図 9は推定した焦点距離 (単位は画素) であり、式 (13) で計算した標準偏差の 3 倍の信頼区間を表示している。図 10はカメラ位置の地面からの高さであり、同様に計算した標準偏差の 3 倍の信頼区間を表示している。図 11は地面を上から見た図であり、計算したカメラの 3 次元経路を表示するとともに、撮影位置から各画像を地面に投影して合成したものである。また、計算したカメラ位置を中心に、各方向の信頼性の標準偏差の 3 倍を示す楕円を表示している。

10. まとめ

前報 [4] では複合現実感実現のために物体の背後に参照板を設置し、カメラ位置やズームを変えながら物体を自由に撮影する過程でその画像を解析しながら実

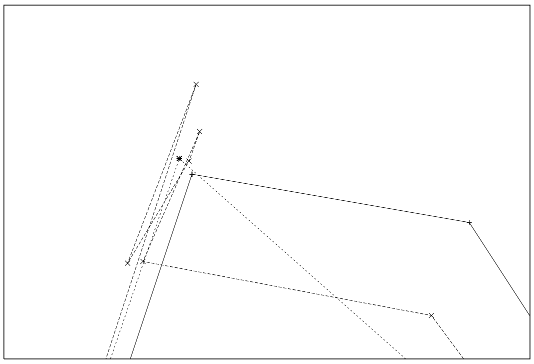

図 7: カメラの経路の拡大図 ($\beta = 90^\circ$)。本方法 (実線)、独立な推定 (破線)、真の位置 (点線)。

行する同時校正を提案した。本報ではその過程で生じるに解が不定となる退化や統計的なゆらぎが幾何学的 AIC によって回避できることを示した。これはカメラの移動の履歴から次のフレームでの焦点距離とカメラ位置を予測し、予測したモデルと実際に計算したモデルを幾何学的 AIC によって比較するものである。そして、その効果をシミュレーションによって確認するとともに実画像に適用した例も示した。

本方法を適用すればズームやカメラの向きを変えながら撮影したスポーツ中継シーンからカメラ位置や焦点距離を計算するとともにシーンや人物の 3 次元形状を計算することもできる [4, 7, 8]。また「仮想スタジオ」[5] にも応用できる。これはクロマキー技法によって人物部分とパタン部分に分離し、パタン部分からキャリブレーションを行うことにより、ＣＧと実写人物画像とを動的に合成するものである。本方法によれば退化が生じる位置にカメラを移動することができる。また統計的ゆらぎから生じるＣＧ画像の振動を除去することもできる。

参考文献

[1] K. Kanatani, *Statistical Optimization for Geometric Computation: Theory and Practice*, Elsevier Science, Amsterdam, 1996.

[2] 金谷健一, 情報量基準による幾何学的モデル選択, 情報処理学会論文誌, **37**-6 (1996), 1073–1080.

[3] 金澤靖, 太田直哉, 金谷健一, 射影変換行列の最適計算によるモザイク生成, 情報処理学会研究報告, 99-CVIM, 1999-5.

[4] 松永力, 金谷健一, 平面パタンを用いる移動カメラのキャリブレーション, 情報処理学会研究報告, 99-CVIM, 1999-5.

[5] 中島正之, ディジタル映像処理の基礎と応用 (II)— 二次元ディジタル映像処理入門 —, 電子情報通信学会誌, **18**-1 (1998), 68–75.

[6] M. Polleyfes, R. Koch and L. Van Gool, Self-calibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown internal camera prameters, *Proc. Int. Conf. Comput. Vision*, January 1998, Bombay, India, pp. 90–95.

図 8: テニスコートの実画像。

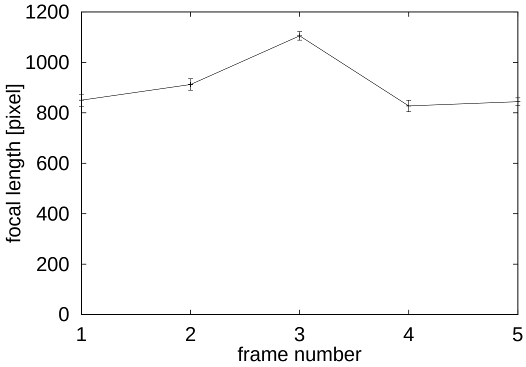

図 9: 推定した焦点距離。

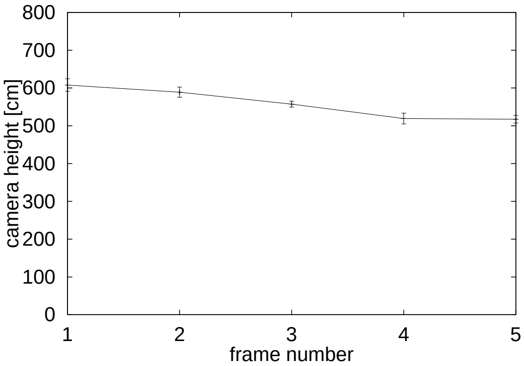

図 10: 推定したカメラ位置の地面からの高さ。

[7] I. Reid and A. Zisserman, Goal-directed video metrology, *Proc. 4th Euro. Conf. Comput. Vision*, April 1996, Cambridge, U.K., Vol. II, pp. 647–658.

[8] Y. Seo and K. S. Hong, Auto-calibration of a rotating and zooming camera, *Proc. IAPR Workshop on Machine Vision Applications*, November 1998, Makuhari, Chiba, Japan, pp. 274–277.

[9] 清水慶行, 太田直哉, 金谷健一, 信頼性評価を備えた最適な射影変換の計算プログラム, 情報処理学会研究報告, 98-CVIM-111-5, pp. 33–40, 1998-5.

[10] R. Y. Tsai, A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision methodoloty using off-the-shelf TV cameras and lenses, *IEEE J. Robotics Automation*, **3**-4 (1987), 323–344.

[11] 徐剛, 辻三郎, 「３次元ビジョン」, 共立出版, 1998.

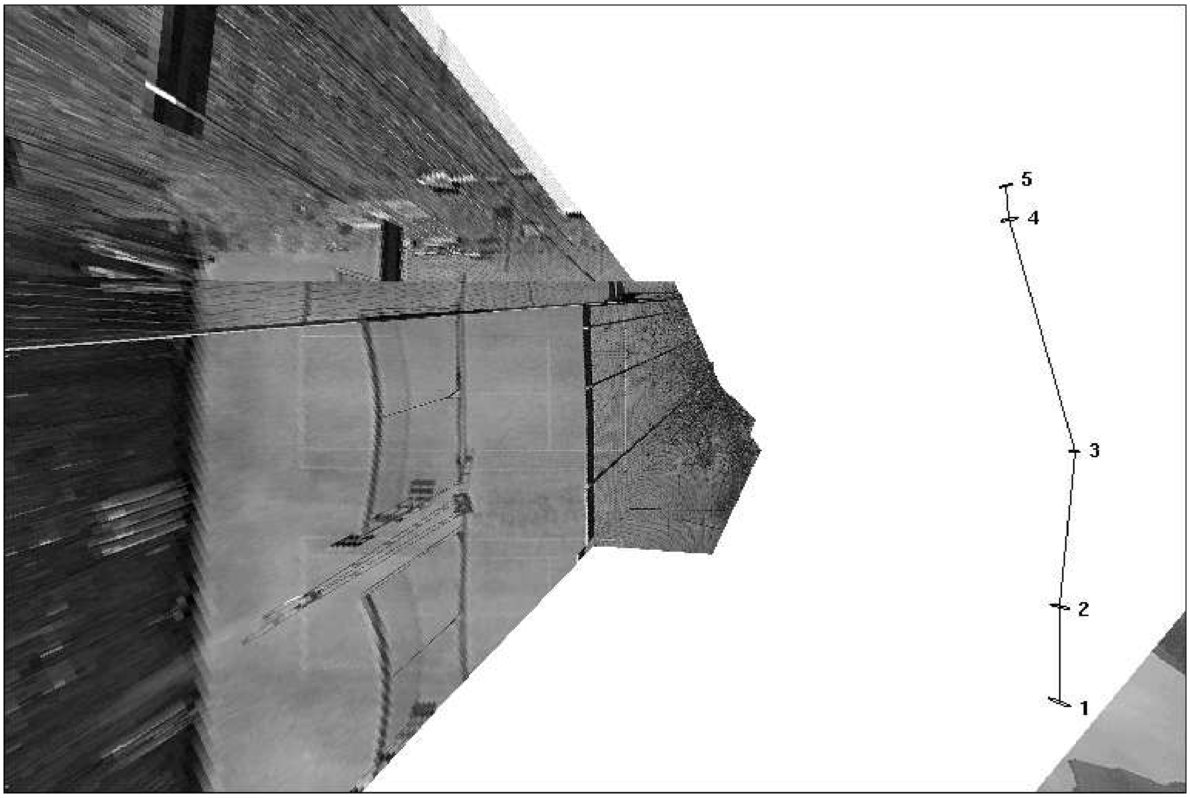

図 11: 推定したカメラの経路。