マーカの軌跡を用いた非同期カメラの幾何学的・時間的キャリブレーション

野口 真身[†]　加藤 丈和[†]

複数のカメラによって撮影された運動物体の 3 次元形状を復元するためには，カメラ間の位置・姿勢を推定する幾何学的キャリブレーションだけでなく，各カメラ間の撮影時刻のずれを推定する時間的キャリブレーションも重要となる．本論文では，撮影時刻が一致していない複数カメラに対する，幾何学的・時間的キャリブレーション手法について述べる．一般に，カメラ間の位置・姿勢を推定するには，各カメラで撮影した画像中の多数の特徴点を対応付ける必要があるが，この処理は非常に手間がかかる．そこで，本研究では多数の特徴点の代わりに，単一の移動マーカを複数カメラで観測し，マーカの軌跡を推定することで，幾何学的・時間的キャリブレーションを実現する．提案手法では，各カメラで観測したマーカの軌跡を対応付けることで，カメラ間の位置関係を推定し，またマーカの軌跡の時間的なずれから撮影時刻のずれを推定する．実験では，時刻ずれの誤差が 1 ミリ秒以下，画像上での幾何学的誤差が 1 pixel 以下となり，本手法の有効性を確認した．また，ラジコンヘリコプタの軌跡を用いて，キャリブレーションパターンの設置が困難な上空でのキャリブレーションが可能であることを確認した．

Geometric and Timing Calibration for Unsynchronized Cameras Using Trajectories of a Moving Marker

Mami Noguchi[†] and Takekazu Kato[†]

For 3D reconstruction of moving objects, timing calibration is important to compensate lags in shutter timing between cameras as well as calibrating 3D positions and poses of them. This paper presents a new method for calibrating the geometric relationship and the lags in shutter timing between unsynchronized cameras from trajectories of a moving marker. We call it geometric and timing calibration. Geometric calibration generally requires many point correspondences between images of the calibration objects. It is, however, difficult to obtain stable point correspondences from images. Furthermore, calibration using moving objects in the sky is difficult for general calibration methods. Our method does not require point correspondences. It uses, instead, a pair of trajectories of a freely moving marker. It is much easier to establish correspondences between trajectories of a single marker than those of many points. Our method estimates the fundamental matrix between two cameras by matching the trajectories and simultaneously estimates the lag in shutter timing between the unsynchronized cameras by analyzing the gap between the trajectories. In experiments, our method has attained accuracy of mean errors within 1 pixel in image coordinates and timing errors within 1 millisecond. Another experiment using a radio-controlled helicopter has shown that it works well for flying objects in the sky.

1. はじめに

近年，3 次元ビデオ[8)]や，多視点画像からの自由視点映像生成[7)]，ビデオサーベイランス[3)] など，複数のカメラで撮影された画像からの，動物体の 3 次元位置・姿勢の計測や 3 次元形状復元がさかんに研究されている．これらの研究では，各カメラの撮影時刻を一致させる必要があり，カメラ間の幾何学的関係だけでなく，撮影時刻のキャリブレーションも重要となる．通常このような目的のためには，各カメラに同期信号を与え，撮影時刻を一致させる方法がよく用いられる．しかし，**図 1**[☆]に示すように，空港周辺の飛行機を監視するなど，広い空間にカメラを配置する場合，すべてのカメラに信号線を接続し，同期信号を共有することは困難である．GPS を用いて撮影時刻を同期する

† 和歌山大学情報通信システム学科
Department of Computer and Communication Science, Wakayama University

☆ 国土地理院数値地図より抜粋.

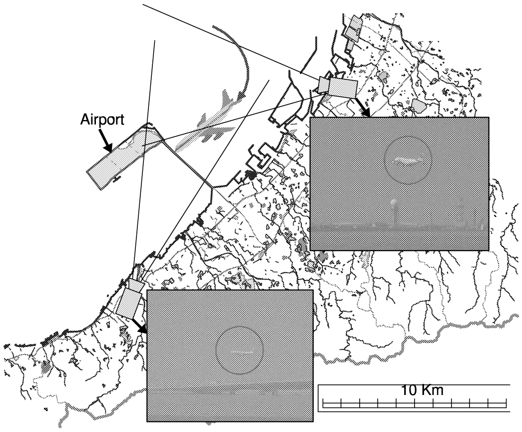


図 1　広範囲に配置されたカメラの上空にある移動物体を用いたキャリブレーションの例
Fig. 1　An example of calibration using a flying object above cameras dispersed over a wide area.

方法もあるが，一般に高価であり，遮蔽物や大気の影響を受けるため，十分な精度を出すことは難しい．

また一般に，複数カメラのキャリブレーションを行うためには，多数の対応点が必要となる．しかし，カメラ間が大きく離れている場合には，安定した対応点を自動的に与えることは容易ではなく，また，上空などキャリブレーション用の物体の設置が困難な場面では，キャリブレーションに用いる特徴点を得ることが難しい．

そこで本研究では，カメラ間の同期をとる代わりに，非同期カメラを用いて，カメラ間の位置・姿勢を推定する幾何学的キャリブレーションと，撮影時刻のずれを推定する時間的キャリブレーションを同時に行う方法を提案する．またキャリブレーション物体として，単一の移動マーカの軌跡を用いることで，対応付け問題を回避する．

Ihrke ら[5)] は，同期カメラに対する移動マーカを用いたキャリブレーション手法を提案している．この方法では，単一の移動マーカの軌跡を用いるため，複数の対応点をとる必要はない．しかし，この方法では幾何学的キャリブレーションのみを扱っており，時間的キャリブレーションは行われていない．

一方，Zhou ら[14)] は，複数の非同期カメラを用いて，撮影時刻のずれを推定し，それをもとに動的シーンの奥行き情報を求める手法を提案している．特徴点の運動を等速直線運動と仮定し，直線の軌跡上の 4 点による複比から，ロバスト推定により撮影時刻のずれを求めている．また，求めた撮影時刻のずれからフレーム間の画像情報を補完し，仮想的に同期した画像情報を得ることで，最終的に奥行き情報を求めている．しかしこの手法では，あらかじめカメラ間の幾何学的関係を求めておく必要があり，幾何学的キャリブレーションと時間的キャリブレーションを同時に扱うことはできない．

また，Chen ら[2)] は，複数の非同期カメラに対する幾何学的・時間的キャリブレーション方法を提案している．まず，一般的な structure-from-motion の手法を用いて，カメラごとに粗い姿勢推定を行う．次に，推定された粗いカメラ姿勢を用いて 3 次元の仮想物体を生成し，各カメラで生成した仮想物体を 3 次元空間中で対応付けすることにより，正確なカメラの姿勢を推定している．この手法では，幾何学的キャリブレーションと時間的キャリブレーションの両方を扱っているが，運動からの形状復元のために複数の対応点を必要とする．

同じように，Sinha ら[9)] の方法も幾何学的キャリブレーションと時間的キャリブレーションの両方を扱っている．この方法では，人物などの動的なシルエットのフロンティア点を用いて，ランダムサンプリングにより基礎行列と時刻ずれを求めている．しかし，複数のフロンティア点とその接線の対応が必要であり，対応付けの処理が複雑である．また，撮影周期以下の時刻ずれは，撮影周期の整数倍の時刻ずれを仮定したいくつかの仮説の重み付け平均として求めているので，推定精度が悪く幾何学的に最適であるとは限らない．

これらの先行研究に対し，我々はキャリブレーションパターンやその対応付けを必要とせず，自由に移動する単一のマーカの軌跡のみを用いて，非同期カメラのキャリブレーションを行う手法を提案する．本手法は，単一の移動マーカを用いているので複数の対応点をとる必要がなく，なおかつ幾何学的キャリブレーションと時間的キャリブレーションの両方を扱っている．また，撮影周期以下の時刻ずれを直接的に数値探索で求めているので，推定精度が良く幾何学的にも正しい推定が可能である．

また，本手法はカメラ間の同期を必要としないため，カメラを簡単に設置することができ，マーカの動きが既知である必要がないので，原理的には，飛行機（図 1），ヘリコプタ，フットボールなど，すでに撮影した映像に含まれるありふれた移動物体を用いてキャリブレーションを行うことができる．

2. 幾何学的・時間的キャリブレーションの理論

本章では，幾何学的キャリブレーションと時間的キャリブレーションの概要について述べる．本研究では，単一の移動マーカの軌跡を用いて，2 台のカメラ間の

基礎行列を求める幾何学的キャリブレーションと，撮影時刻のずれを求める時間的キャリブレーションを行う．まず，従来法として 2 台のカメラ間で多数の対応点がある場合の一般的な幾何学的キャリブレーション手法について述べる．次に，移動マーカの 3 次元軌跡，各カメラの撮影時刻，観測点の関係について整理し，マーカの軌跡からの 2 台のカメラ間の基礎行列と時刻ずれの推定問題を定式化する．

2.1 対応点に関するエピポーラ幾何

一般的に，2 台のカメラ間のエピポーラ幾何は各カメラの画像上の対応点によって定義される．2 台のカメラの画像点を $\{\mathbf{p}_{1,i}\}$ と $\{\mathbf{p}_{2,i}\}$ $(i = 1, \cdots, N)$ とする．$\mathbf{p}_{1,i}$，$\mathbf{p}_{2,i}$ を各画像上の対応点とすると，次式のエピポーラ拘束を満たす．

$$\tilde{\mathbf{p}}_{1,i}^T \mathbf{F} \tilde{\mathbf{p}}_{2,i} = 0 \tag{1}$$

ただし，$\tilde{\mathbf{p}}$ は $\mathbf{p}$ を同次座標で表したものであり，行列 $\mathbf{F}$ は $\det \mathbf{F} = 0$ の拘束を満たす基礎行列である．この基礎行列 $\mathbf{F}$ は，多数の対応点の組 $\{\mathbf{p}_{1,i}\}$，$\{\mathbf{p}_{2,i}\}$ を与え，$\det \mathbf{F} = 0$ を拘束とした最小 2 乗法により求めることができる．基礎行列 $\mathbf{F}$ を推定するための誤差関数として様々な手法が提案されているが，画像上での幾何学的誤差を最小化する方法[10),11)] がよく用いられ，また精度も良いことが知られている．幾何学的誤差に基づく誤差関数は次式のように定義される．

$$E(\mathbf{F}) = \frac{1}{N}\sum_i^N \left\{ d(\mathbf{p}_{1,i},\ \mathbf{F}\tilde{\mathbf{p}}_{2,i})^2 + d(\mathbf{p}_{2,i},\ \mathbf{F}^T\tilde{\mathbf{p}}_{1,i})^2 \right\} \tag{2}$$

$\mathbf{F}\tilde{\mathbf{p}}_{2,i}$ は，カメラ 2 の点 $\mathbf{p}_{2,i}$ に対応するカメラ 1 の画像上のエピポーラ線である．また，$d(\mathbf{p}_{1,i},\ \mathbf{F}\tilde{\mathbf{p}}_{2,i})$ は，点 $\mathbf{p}_{1,i}$ とエピポーラ線 $\mathbf{F}\tilde{\mathbf{p}}_{2,i}$ の距離であり，$\mathbf{l}_{1,i} = \mathbf{F}\tilde{\mathbf{p}}_{2,i} := [l_x, l_y, l_z]^T$，$\mathbf{l}_{2,i} = \mathbf{F}^T\tilde{\mathbf{p}}_{1,i} := [l'_x, l'_y, l'_z]^T$ とすると次式のように計算できる．

$$\begin{aligned} d(\mathbf{p}_{1,i},\ \mathbf{F}\tilde{\mathbf{p}}_{2,i})^2 &= \frac{(\tilde{\mathbf{p}}_{1,i}^T \mathbf{F}\tilde{\mathbf{p}}_{2,i})^2}{l_x^2 + l_y^2} \\ d(\mathbf{p}_{2,i},\ \mathbf{F}^T\tilde{\mathbf{p}}_{1,i})^2 &= \frac{(\tilde{\mathbf{p}}_{1,i}^T \mathbf{F}\tilde{\mathbf{p}}_{2,i})^2}{l_x'^2 + l_y'^2} \end{aligned} \tag{3}$$

ここで，$\det \mathbf{F} = 0$ を拘束として，誤差関数 $E(\mathbf{F})$ が最小になるような基礎行列が最適な基礎行列 $\mathbf{F}^*$ となり，次のように表される．

$$\mathbf{F}^* = \arg\min_F E(\mathbf{F}) \tag{4}$$

2.2 マーカの軌跡と観測点

提案手法では，多数の点を対応付ける代わりに，**図 2** に示すようにターゲット追跡により得られる各カメラの画像上でのマーカの軌跡を用いる．時刻 t での 3 次元空間中の点を $\mathbf{X}(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T$ とし，$\mathbf{X}(t)$ をカメラ 1 に投影した画像点を $\mathbf{m}_1(t)$，カメラ 2 に投影した画像点を $\mathbf{m}_2(t)$ とする．また，カメラ 1 とカメラ 2 の撮影周期を T_1，T_2，カメラ 1 とカメラ 2 の撮影開始時刻を $t_{1,0}$，$t_{2,0}$ とすると，カメラ 1 とカメラ 2 の i フレーム目の撮影時刻 $t_{1,i}$，$t_{2,i}$ は次のように与えられる．

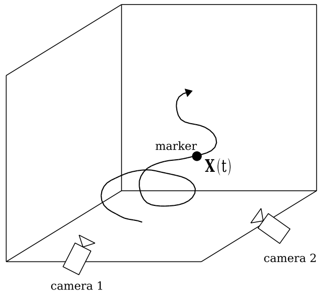


図 2 3 次元空間中のマーカの軌跡
Fig. 2 A 3D trajectory of a moving marker.

$$\begin{aligned} t_{1,i} &= t_{1,0} + iT_1 \\ t_{2,i} &= t_{2,0} + iT_2 \end{aligned} \tag{5}$$

このとき，カメラ 1 とカメラ 2 で撮影されたマーカの観測点 $\mathbf{m}_{1,i}$，$\mathbf{m}_{2,i}$ は次のように表すことができる．

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_{1,i} &= \mathbf{m}_1(t_{1,i}) \\ \mathbf{m}_{2,i} &= \mathbf{m}_2(t_{2,i}) \end{aligned} \tag{6}$$

ここで，カメラ 1 とカメラ 2 の撮影時刻の関係は次のように求められる．

$$t_{1,i} = t_{2,i} - \tau - \Delta T i \tag{7}$$

ただし，$\tau = t_{2,0} - t_{1,0}$，$\Delta T = T_2 - T_1$ とする．つまり，これらの τ と ΔT を推定することができれば，各カメラの撮影時刻のずれが計算できる．

多くの場合，各カメラの撮影周期 T_1，T_2 は一致していると見なすことができる．このとき，撮影時刻 $t_{1,i}$ と $t_{2,i}$ の関係は次のように表すことができる．

$$t_{1,i} = t_{2,i} - \tau \tag{8}$$

本研究では，各カメラの撮影周期は一致していると見なし，$T_1 = T_2 = T$ として，式 (8) の τ を推定する．

2.3 マーカの軌跡に関するエピポーラ幾何

時刻 t における 3 次元空間中の点を $\mathbf{X}(t)$ とし，$\mathbf{X}(t)$ をカメラ 1 に投影した画像点を $\mathbf{m}_1(t)$，カメラ 2 に投影した画像点を $\mathbf{m}_2(t)$ とする．画像点 $\mathbf{m}_1(t)$ と $\mathbf{m}_2(t)$ は，式 (1) と同様にエピポーラ拘束を満たし，次のように表される．

$$\tilde{\mathbf{m}}_1(t)^T \mathbf{F} \tilde{\mathbf{m}}_2(t) = 0 \tag{9}$$

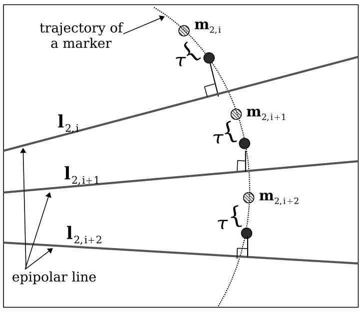


図 3 マーカの軌跡とエピポーラ線の距離
Fig. 3 Distances between a trajectory and epipolar lines.

また，各カメラの軌跡 $\mathbf{m}_1(t)$，$\mathbf{m}_2(t)$ 間の幾何学的誤差の 2 乗平均は次のように与えられる．

$$E^{'}(\mathbf{F}) = \frac{1}{t_e - t_s}\int_{t_s}^{t_e}\Big\{d(\mathbf{m}_1(t),\ \mathbf{F}\tilde{\mathbf{m}}_2(t))^2 + d(\mathbf{m}_2(t),\ \mathbf{F}^T\tilde{\mathbf{m}}_1(t))^2\Big\}\,dt \tag{10}$$

ただし，t_s と t_e は撮影開始と終了の時刻である．式 (10) をカメラ 1 の撮影時刻で離散的に計算すると，式 (8) を用いて次のように計算できる．

$$E(\mathbf{F},\tau) = \frac{1}{N}\sum_{i}^{N}\Big\{d(\mathbf{m}_{1,i},\ \mathbf{F}\tilde{\mathbf{m}}_2(t_{2,i}-\tau))^2 + d(\mathbf{m}_2(t_{2,i}-\tau),\ \mathbf{F}^T\tilde{\mathbf{m}}_{1,i})^2\Big\} \tag{11}$$

図 3 にカメラ 2 でのマーカの軌跡とエピポーラ線の関係について示す．ここで，$\tau \neq iT$ $(i = 0, 1, \cdots)$ のとき，$\mathbf{m}_2(t_{2,i} - \tau)$ はカメラ 2 の撮影時刻とずれているため観測することができない．そこで，本研究では，カメラ 2 の観測点 $\mathbf{m}_{2,i}$ から $\mathbf{m}_2(t_{2,i} - \tau)$ を推定しながら，$E(\mathbf{F},\tau)$ を最小化する $\mathbf{F}$ と τ を推定する．$\mathbf{F}$ と τ の最適解 $\mathbf{F}^*$，τ^* は次のように表される．

$$(\mathbf{F}^*, \tau^*) = \arg\min_{\mathbf{F},\tau} E(\mathbf{F},\tau) \tag{12}$$

3. アルゴリズム

本章では，幾何学的・時間的キャリブレーションのアルゴリズムについて述べる．まず，画像上での軌跡の推定方法について述べ，次に，繰返し計算による幾何学的誤差の最小化アルゴリズムを提案する．

3.1 画像上におけるマーカ軌跡の推定

式 (11) の幾何学的誤差を求めるため，まずカメラ 2 の観測点 $\mathbf{m}_{2,i}$ から，画像上のマーカの軌跡を推定する．

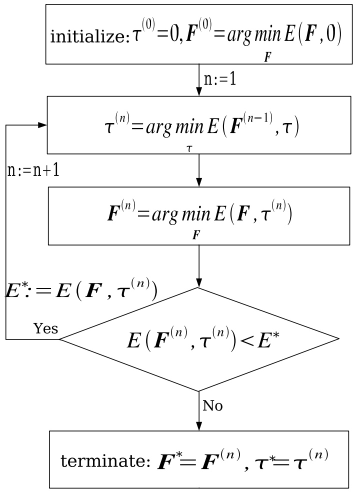


図 4 τ と $\mathbf{F}$ の推定アルゴリズム
Fig. 4 Overview of an estimation algorithm of τ and $\mathbf{F}$.

マーカの軌跡の推定方法は，マーカの動きの種類に依存する．たとえば，マーカがカメラのフレームレートに比べて十分にゆっくり動く場合，観測時刻の間の動きを等速直線運動と見なすことができ，次式のようにマーカの軌跡を線形内挿により推定できる．

$$\begin{aligned}\mathbf{m}'_{2,i} &= \mathbf{m}_2(t_{2,i} - \tau)\\ &= (1-\alpha)\mathbf{m}_{2,j} + \alpha\mathbf{m}_{2,j+1}\end{aligned} \tag{13}$$
$$\left(j = \lfloor i - \frac{\tau}{T}\rfloor,\ \ \alpha = i - \frac{\tau}{T} - j\right)$$

また，マーカの加速度が滑らかに変化する場合，マーカの軌跡は 3 次スプライン補間によって推定でき，マーカの検出位置に白色のガウシアンノイズがのっていると仮定すると，マーカの軌跡はカルマンフィルタにより推定できる．

ほとんどの場合，カメラのフレームレートはマーカの動きに対して十分速いので，式 (13) を用いて，マーカの動きを線形内挿で近似できると考えられる．実験でも軌跡の推定には線形内挿を用いた．

3.2 繰返し計算による $E(\mathbf{F},\tau)$ の最小化

$\mathbf{F}$ と τ の推定は，式 (13) で推定された軌跡から，式 (11) の幾何学的誤差 $E(\mathbf{F},\tau)$ を最小化する問題だということになる．しかし，$E(\mathbf{F},\tau)$ は非線形であり，$\mathbf{F}$ と τ の影響が複雑なため，最適な $\mathbf{F}$ と τ を同時に求めることは難しい．そこで，本研究では**図 4** に示すような繰返し計算のアルゴリズムを導入する．まず，初めに $\tau = 0$ として，初期の基礎行列 $\mathbf{F}$ を推定する．次に，初期の $\mathbf{F}$ を用いて τ を再推定する．さらに，推定された τ を用いて，次の基礎行列 $\mathbf{F}$ を再推定する．このように，τ と $\mathbf{F}$ を繰返し計算により交互に

推定する．以下，具体的なアルゴリズムを述べる．

Initialize $\tau^{(0)} = 0$ とし，初期の基礎行列 $\mathbf{F}^{(0)}$ を観測点 $\mathbf{m}_{1,i}$，$\mathbf{m}_{2,i}$ から，次式のように一般的な基礎行列の推定手法により求める．

$$\mathbf{F}^{(0)} = \arg\min_{\mathbf{F}} E(\mathbf{F}, 0), (\det \mathbf{F} = 0)$$
$$= \arg\min_{\mathbf{F}} \frac{1}{N} \sum_{i}^{N} \left\{ d(\mathbf{m}_{1,i},\ \mathbf{F}\tilde{\mathbf{m}}_{2,i})^2 + d(\mathbf{m}_{2,i},\ \mathbf{F}^T\tilde{\mathbf{m}}_{1,i})^2 \right\} \quad (14)$$

$n := 1$ とし，次のステップへ．

Step 1. 基礎行列を $\mathbf{F} = \mathbf{F}^{(n-1)}$ と固定し，次式のように $E(\mathbf{F}^{(n-1)}, \tau)$ を最小にするような時刻ずれ $\tau^{(n)}$ を推定する．

$$\tau^{(n)} = \arg\min_{\tau} E(\mathbf{F}^{(n-1)}, \tau) \quad (15)$$

Step 2. 式 (13) の線形内挿により，カメラ 1 の点 $\mathbf{m}_{1,i}$ に対応する新たな点 $\mathbf{m}_{2,i}^{(n)} = \mathbf{m}_2(t_{2,i} - \tau^{(n)})$ を求める．この点を仮対応点と呼ぶ．

Step 3. カメラ 1 の観測点 $\mathbf{m}_{1,i}$ とカメラ 2 の仮対応点 $\mathbf{m}_{2,i}^{(n)}$ の組から，次式のように次の基礎行列 $\mathbf{F}^{(n)}$ を推定する．

$$\mathbf{F}^{(n)} = \arg\min_{\mathbf{F}} E(\mathbf{F}, \tau^{(n)}) \quad (\det \mathbf{F} = 0) \quad (16)$$

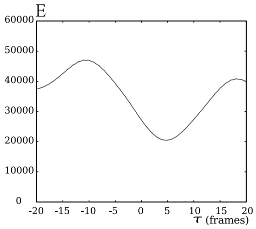
Step 4. 残差 $E^{(n)}$ を次式のように求める．

$$E^{(n)} = E(\mathbf{F}^{(n)}, \tau^{(n)}) \quad (17)$$

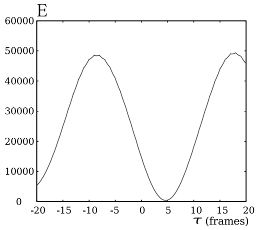
$E^{(n)} < E^{(n-1)}$ ならば，$n := n+1$ とし **Step 1.** へ．それ以外ならば，基礎行列 $\mathbf{F}^* = \mathbf{F}^{(n)}$，時刻ずれ $\tau^* = \tau^{(n)}$ とし終了する．

なお，**Step 1** 式 (15) の時刻ずれ $\tau^{(n)}$ の推定には，ニュートン法を用いた．**図 5** に示すように τ の変化に対して $E(\mathbf{F}^{(n-1)}, \tau)$ は非線形であり，滑らかに変化するため，初期値を $\tau^{(n-1)}$ と設定し，ニュートン法により $\tau^{(n)}$ を推定した．図 5 (a) は $n = 1$ のときの $E(\mathbf{F}^{(n-1)}, \tau)$ であり，(b) は数回繰返し計算を行った後の $E(\mathbf{F}^{(n-1)}, \tau)$ を示す．このように繰返しの初期の段階では，τ に対して E の変化はゆるやかであり，繰返しを行うごとに $\mathbf{F}$ が正しい値に近づくことで最小値がはっきりとなり，また最小値自体も小さくなっていることが分かる．このことより，ニュートン法で τ を安定かつ精度良く求められると考えられる．

また，実験では式 (14) および式 (16) の対応点からの基礎行列の推定には，Kanatani らの基礎行列推定プログラム[1),6)] を用いた．



(a) 初期状態



(b) 最終状態

図 5 時刻ずれ τ と幾何学的誤差 $E(\mathbf{F}^{(n-1)}, \tau)$
Fig. 5 An example of geometric errors $E(\mathbf{F}^{(n-1)}, \tau)$ for each τ.

4. 実 験 結 果

本手法でのキャリブレーションの精度と，本手法が有効な条件を検証するため，屋内でカラーマーカを用いた実験を行った．まず，実験環境について説明し，カメラ間の時刻ずれの影響，軌跡の形状の影響，マーカの速さの影響について評価する．

4.1 実 験 環 境

この実験では，**図 6** に示すように，2 台のカメラで 1 つのカラーマーカを追跡した結果によりキャリブレーションを行った．2 台は同じ種類のカメラで，カラーデジタルカメラ（Sony，DFW-VL500）を使用した．本手法では，カメラの撮影周期が一致していると仮定しているが，同じ種類のカメラであれば，同じ発振子によってカメラの内部クロックを生成するため，撮影周期がほぼ一致すると考えられる．また，マーカ検出には，和田[16)] によって提案された最近傍識別器を用いた色ターゲット検出を利用した．**図 7** は，各カメラでのマーカの検出結果である．また撮影時刻のずれの推定精度を評価するために，撮影時刻のずれ τ を設定できるトリガパルス生成器を作製し，それをカメラの外部同期として撮影を行った．それぞれのカメラの撮影周期は $\frac{1}{15}$ 秒と設定した．

幾何学的誤差を評価するために，評価点として 828

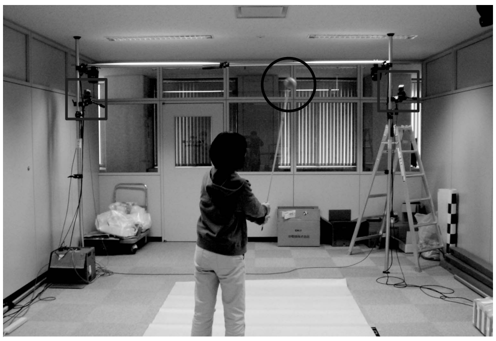
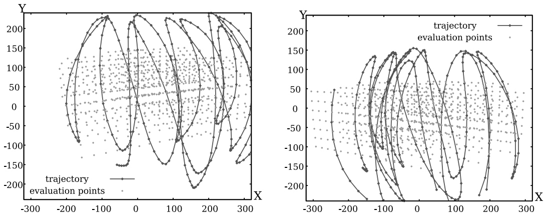


図 6 キャリブレーション風景
Fig. 6 A moving marker and cameras.

camera-1　　camera-2

図 7　マーカ検出

Fig. 7　Results of the marker detection.



camera-1　　camera-2

図 8　マーカの軌跡と評価点

Fig. 8　Trajectories and evaluation points on image-coordinates.

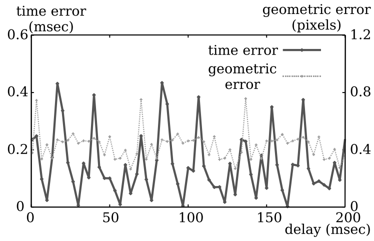
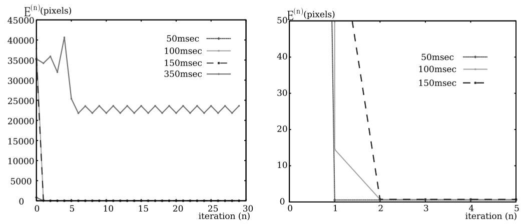


図 9　幾何学的誤差と時刻ずれの誤差

Fig. 9　Geometric and time errors for each time delay.



(a) Full scale.　　(b) Magnified.

図 10　繰返し回数と残差

Fig. 10　Residual errors for each iteration.

組の対応点を与えた．この評価点は，あらかじめチェッカボードを撮影し，そのチェッカパターンの格子点を抽出し，カメラ間で対応付けた点である．また，平均幾何学的誤差を次式のように評価した．

$$E(\mathbf{F}) = \frac{1}{N}\sum_{i}^{N}\left\{d(\mathbf{e}_{1,i},\ \mathbf{F}\tilde{\mathbf{e}}_{2,i})^2 + d(\mathbf{e}_{2,i},\ \mathbf{F}^T\tilde{\mathbf{e}}_{1,i})^2\right\} \quad (18)$$

ここで，$\mathbf{e}_{1,i}$，$\mathbf{e}_{2,i}$ は，評価点の各カメラの画像上における対応点である．**図 8** は，各カメラの画像座標上のマーカの軌跡と評価点の例を示す．

各カメラの内部パラメータ（焦点距離，画像中心，レンズ歪み）は，あらかじめ Zhang [12),13)] の手法で推定し，画像の歪みの補正を行った．

4.2　時刻ずれの影響に対する精度の評価

図 9 は，カメラ 1 に対するカメラ 2 の撮影時刻の遅延時間の変化に対する，平均幾何学的誤差と時刻ずれの誤差を示している．また，**表 1** には遅延時間が 50, 100, 150, 200, 350 ミリ秒のときの最小残差，時刻ずれの誤差，平均幾何学的誤差，幾何学的誤差の分散と最大値を示す．

結果より，遅延時間が 200 ミリ秒までは，すべての場合でキャリブレーションが成功し，このときの平均幾何学的誤差は 0.8 pixel 以下，時刻ずれの誤差は 0.5 ミリ秒以下で精度良く推定できていることが分かる．また，Sinha ら [9)] の手法では時刻ずれの誤差の平均が撮影周期の約 0.2 倍であるのに対し，この実験では，時刻ずれの誤差が撮影周期の約 0.0075 倍以下という高精度な結果が得られ，本手法がより有効であると考えられる．今回の実験で用いたマーカの移動は周期が約 2 秒であり，これに対して遅延時間が 200 ミリ秒（3 フレーム）を超えると，キャリブレーションに失敗する場合が多くなった．失敗する原因としては，図 5 に示すように時刻ずれの推定のときに，遅延時間が大きくなると，局所解に陥ることが多くなってしまうためだと考えられる．この問題の解決のためには，適切な初期値の推定方法の検討が必要である．

また，**図 10** に，繰返し回数ごとの残差（式 (17)）の変化を示す．推定が成功する場合，2 から 3 回の繰返し計算で残差が収束していることが分かる．一方，推定に失敗する場合，残差が大きいままとなっている．このことから，最小の残差を調べることで推定が成功しているかどうか判断できると考えられる．

4.3　マーカ軌跡の形状に対する精度の評価

軌跡の形状が推定精度にどのような影響を与えるか確認した．**図 11** に示すように，1 つ目の軌跡は滑らかな曲線を描いてマーカが移動する場合であり，2 つ目はほぼ同一平面上をマーカが移動する場合，3 つ目はらせんを描いてマーカが移動する場合である．**図 12** にそれぞれの軌跡について繰返しごとの残差の変化を示し，**表 2** に，最小残差，時刻ずれの誤差，平均幾何学的誤差，幾何学的誤差の分散と最大値を示す．ここで，ジグザグの軌跡は前節の図 8 の結果である．

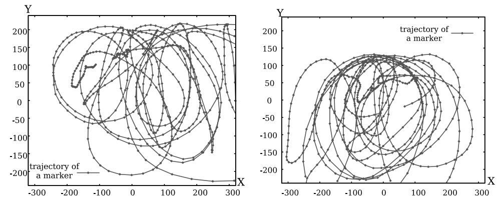
滑らかな曲線の軌跡では，ジグザグの軌跡に比べると誤差が大きくなっている．これは，軌跡を線形近似

表 1　遅延時間の変化に対する結果
Table 1　Results for time delay.

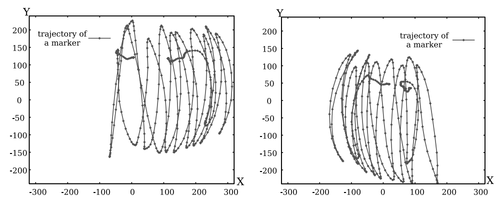
遅延時間 (msec)	50	100	150	200	350
最小残差 (pixels)	0.541	0.692	0.710	0.398	21777
時刻ずれの誤差 (msec)	0.107	0.137	0.0665	0.266	2777
平均幾何学的誤差 (pixels)	0.492	0.462	0.462	0.388	89.484
幾何学的誤差の分散	0.171	0.101	0.144	0.112	3308
幾何学的誤差の最大値 (pixels)	2.467	1.872	2.237	1.861	273.5

表 2　4 つの軌跡の結果
Table 2　Results for four types of trajectories.

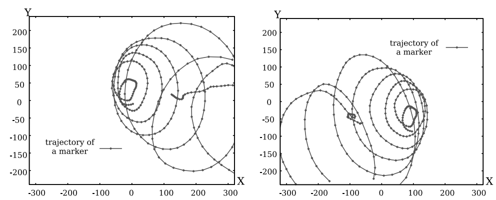
形状	ジグザグ	曲線	平面	らせん
最小残差 (pixels)	0.697	0.868	1.095	0.551
時刻ずれの誤差 (msec)	0.153	0.198	0.0223	61.436
平均幾何学的誤差 (pixels)	0.463	0.686	2.221	1.869
分散	0.102	0.356	4.506	1.538
最大値 (pixels)	1.888	4.055	17.727	6.334



(a) 滑らかな曲線の軌跡

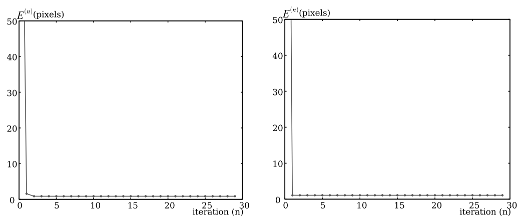


(b) 同一平面上の軌跡

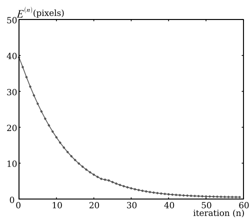


(c) らせん状の軌跡

図 11　3 つのマーカ軌跡
Fig. 11　Trajectories of three shapes.



(a) 滑らかな曲線の軌跡　(b) 同一平面上の軌跡



(c) らせん状の軌跡

図 12　残差の変化
Fig. 12　Residual errors.

で推定しているため，曲線部分で誤差が若干大きくなっているためと考えられる．同一平面上の軌跡では，平均幾何学的誤差が大きくなっているが，時刻ずれは精度良く求められている．また，らせん状の軌跡では，ジグザグや曲線の軌跡に比べると残差が小さくなっているが，どちらの誤差も大きいまま推定に失敗している．

結果より，特異な形状の軌跡では推定に失敗する場合があることが分かった．まず，1 つ目のケースとして同一平面上の軌跡のように，基礎行列の推定自体が不安定になるケースである．このような場合では，幾何学的誤差は増加するが，時刻ずれはあまり精度が低下することなく，推定することが可能である．同一平面上に近い軌跡では，基礎行列の推定が不安定になるが，時刻ずれの影響は平面内の点の移動として画像上で観測されるため，対応点の誤差が小さくなるように時刻ずれを推定することで，精度が低下することなく推定できていると考えられる．ただし，完全に平面内の動きの場合には，基礎行列自体が求まらないので，時刻ずれも推定できなくなる．

次に 2 つ目のケースとして，円やらせんのような回転する軌跡では，幾何学的誤差が増加するだけでなく，時刻ずれの推定も失敗する．失敗する原因は，推

表 3 速さの影響の結果
Table 3 Results for two different speeds of the marker.

マーカの速さ (pixels/frame)	37	5
最小残差 (pixels)	3.346	0.347
時刻ずれの誤差 (msec)	0.0976	0.233
平均幾何学的誤差 (pixels)	1.896	0.551
幾何学的誤差の分散	2.912	0.383
幾何学的誤差の最大値 (pixels)	9.453	4.346

定された τ が変化するとすべての仮対応点が回転するが，この回転を点の回転でなく，カメラが回転していると誤って推定されるためであると考えられる．このような場合では，残差が小さくなるため推定に失敗していると判断できないケースで本手法の弱点であるといえ，今後検討が必要である．

4.4 マーカの速さの影響の評価

次に，マーカの移動する速さが，推定精度にどのような影響を与えるか確認した．マーカが 1 フレーム間に約 37 pixel 移動する速い場合と，1 フレーム間に約 5 pixel 移動する遅い場合について実験を行った．

表 3 は最小残差，時刻ずれの誤差と平均幾何学的誤差，幾何学的誤差の分散と最大値を示している．2 つの速さを比べると，時刻ずれの誤差はマーカの動きが速い方が小さくなることが分かる．また，平均幾何学的誤差については，マーカの動きが遅い方が誤差が小さくなることが確認できる．これより，マーカの動きが速ければ，時間的キャリブレーションの精度は良くなり，遅ければ幾何学的キャリブレーションの精度が良くなることが確認できた．これは，マーカの動きの速い方が検出誤差が大きくなり幾何学的誤差が増すが，時間ずれに対する観測点の位置のずれが大きくなるため，時刻ずれの推定精度が向上していると考えられる．

5. ラジコンヘリコプタによる上空のキャリブレーション

ここでは，上空の 3 次元位置計測への応用例を示し，本手法の可能性を示す．

5.1 実験環境

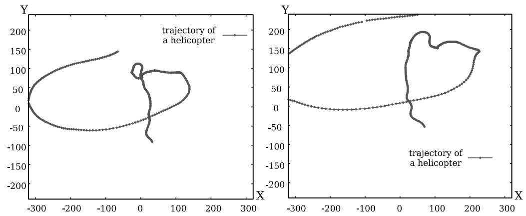
図 13 (a) に示すように 2 台のカメラで，図 13 (b) のラジコンのヘリコプタを用いて，上空で計測を行った．**図 14** に，キャリブレーションに用いたヘリコプタの軌跡を示す．また，カメラの撮影周期は $\frac{1}{30}$ 秒とした．この実験では，キャリブレーションの真値を求めることは難しく未知としている．

5.2 実験結果

図 15 に，繰返し回数と残差の変化を示す．およそ 6 回くらいの繰返し計算で，残差が収束していることが分かる．そのときの最小残差は 0.220 pixel であり，時刻ずれは 77.120 ミリ秒（=2.314 フレーム）と推定された．

(a) 実験環境 (b) ヘリコプタとマーカ

図 13 実験環境
Fig. 13 An experimental environment.



camera-1 camera-2

図 14 ヘリコプタの軌跡
Fig. 14 Trajectories of a helicopter.

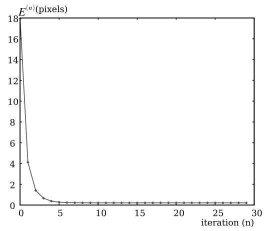
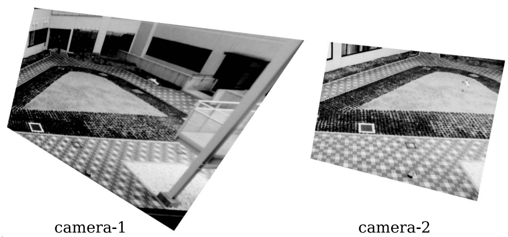


図 15 繰返し回数と残差
Fig. 15 Residual errors for each iteration.

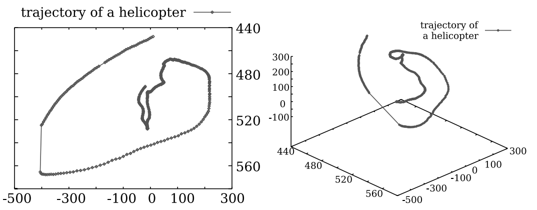


camera-1 camera-2

図 16 $\mathbf{F}^*$ による平行化
Fig. 16 Rectification images by estimated $\mathbf{F}^*$.

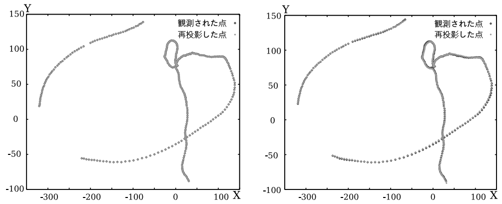
図 16 は，推定された基礎行列 $\mathbf{F}^*$ から平行化を行った画像である[4),15)]．それぞれのスキャンラインが 2 つの画像で対応していることが分かる．**図 17** は，ヘリコプタの 3 次元軌跡を復元したものを異なる角度から見たものである．

図 18 は，復元された 3 次元軌跡を基準カメラ（カ



(a) 真上から (b) 斜めから

図 17 3 次元軌跡の復元
Fig. 17 Reconstructed 3D trajectory.



(a) 観測点と $\mathbf{F}^*$ による再投影点 (b) 観測点と $\mathbf{F}^{(0)}$ による再投影点

図 18 3 次元軌跡の投影
Fig. 18 Projection of 3D trajectory.

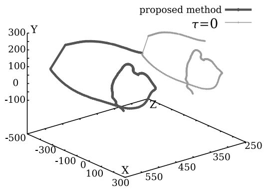


図 19 3 次元軌跡の比較
Fig. 19 Comparison of 3D trajectory.

メラ 1）の画像上に再投影したものである．図 18 (a) は，最終的に推定された基礎行列 $\mathbf{F}^*$ を用いて再投影を行った結果で，観測点と再投影された点の画像上での誤差の平均は 0.121 pixel となった．また，(b) は撮影時刻のずれを無視して，初期の基礎行列 $\mathbf{F}^{(0)}$ を用いて再投影を行った結果で，誤差の平均は 1.048 pixel となった．**図 19** に，初期の基礎行列 $\mathbf{F}^{(0)}$ と，最終的に推定された基礎行列 $\mathbf{F}^*$ から復元した 3 次元軌跡を示す．2 つの軌跡を比較すると，画像上での観測点との誤差は大きくないが，推定されるカメラの姿勢が異なっているため，図 19 に示すように 3 次元空間中では，大きく異なっており，時間的キャリブレーションの効果が確認できる．

6. ま と め

本研究では，マーカの軌跡を用いた 2 台の非同期カメラ間の幾何学的・時間的キャリブレーションの手法を提案した．ここでの幾何学的キャリブレーションは基礎行列を推定することであり，時間的キャリブレーションは，カメラ間の撮影時刻のずれを推定することである．本手法では，マーカの軌跡の幾何学的誤差から基礎行列を推定し，マーカの軌跡のずれから撮影時刻のずれの推定を行う．カメラ間で対応点を与える必要がなく，また同期をとる必要もないため，従来のキャリブレーション方法よりも，簡単にキャリブレーションを行うことができる．そのため，広い空間や上空など多くの環境で適用可能である．

実験では，様々なケースに対する本手法の精度の評価を行った．周期約 2 秒でジグザグに移動するマーカの軌跡に対して，遅延時間が 200 ミリ秒までなら平均幾何学的誤差は 0.8 pixel 以下，時刻ずれの誤差は 0.5 ミリ秒以下になることを確認した．また，同一平面上やらせん状のような特異な軌跡を除けば，軌跡の形状によらず精度良くキャリブレーション可能であることが確認できた．マーカの移動速度に対しては，遅い場合は幾何学的誤差が小さくなり，速い場合は時刻ずれの誤差が小さくなることが分かった．ラジコンのヘリコプタを用いて上空のキャリブレーションを行った結果，最小残差は 0.220 pixel となり，3 次元軌跡が復元できた．

今後の課題として次の 3 つが考えられる．1 つ目として，今回行った実験では時刻ずれ τ が 200 ミリ秒（3 フレーム）より大きくなると推定が失敗した．これは初期値が適切でないため，局所解に陥り失敗したと考えられるので，初期の基礎行列と τ の推定方法について検討する．2 つ目に，線形内挿により軌跡の近似を行っているので，今後 3 次元スプライン補間やカルマンフィルタなど他の近似方法について検討する．3 つ目に，本研究では 2 台のカメラの撮影周期が一致していると仮定したが，実際には異なるカメラの内部クロックの周期が正確に一致しない場合もあり，また多少の撮影周期の差でも，長時間撮影すると周期の差が大きくなるという問題も考えられるので，今後各カメラの撮影周期が異なる場合への拡張についても検討する．

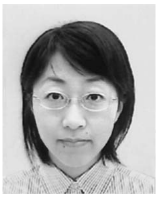
謝辞 本研究をすすめるにあたり，貴重なアドバイスをいただいた和歌山大学の和田俊和教授に感謝します．また，基礎行列の推定には，岡山大学の金谷健一教授が公開されている基礎行列推定プログラムを利用させていただきました．なお，本研究の一部は，文部科学省科学研究費補助金基盤研究（A）（2）16200014，および若手研究（B）16700143 の補助を受けている．

参 考 文 献

1) http://www.ail.cs.gunma-u.ac.jp/Labo/program.html
2) Chen, X., Davis, J. and Slusallek, P.: Wide Area Camera Calibration Using Virtual Calibration Objects, *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition* (*CVPR2000*), Vol.II, pp.II-520–527 (2000).
3) Collins, R.T., Lipton, A.J. and Kanade, T.: A Systems for Video Surveillance and Monitoring, *American Nuclear Society* (*ANS*) *8th International Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, pp.25–29 (1999).
4) Hartley, R.: Theory and practice of projective rectification, *International Journal of Computer Vision*, Vol.35, No.2, pp.115–127 (1999).
5) Ihrke, L., Ahrenberg, L. and Magnor, M.: External camera calibration for synchronized multi-video systems, *Journal of WSCG*, Vol.12, No.1-3, pp.537–544 (2004).
6) Kanatani, K.: Optimal fundamental matrix computation: algorithm and reliability analysis, *The 6th Symposium on Sensing via Imaging Information* (*SII2000*), pp.291–296 (2000).
7) Kitahara, I. and Ohta, Y.: Scalable 3D Representation for 3D video Display in a Large-scale Space, *IEEE Virtual Reality Conference* (*VR2003*), pp.45–52 (2003).
8) Matsuyama, T., Wu, X., Takai, T. and Wada, T.: Real-Time Dynamic 3-D Object Shape Reconstruction and High-Fidelity Texture Mapping for 3D Video, *IEEE Trans. Circuits and systems for Video Technology*, pp.357–369 (2004).
9) Sinha, S.N. and Pollefeys, M.: Synchronization and Calibration of Camera Networks from Silhouettes, *International Conference on Pattern Recognition* (*ICPR'04*), Vol.I, pp.116–119 (2004).
10) Torr, P. and Murray, D.: The development and comparison of robust methods for estimating the fundamental matrix, *International Journal of Computer Vision*, Vol.24, No.3, pp.271–300 (1997).
11) Zhang, Z.: Determining the epipolar geometry and its uncertainty, *International journal of Computer Vision*, Vol.27, No.2, pp.161–195 (1998).
12) Zhang, Z.: Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations, *International Conference on Computer Vision* (*ICCV'99*), pp.666–673 (1999).
13) Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.22, No.11, pp.1330–1334 (2000).
14) Zhou, C. and Tao, H.: Dynamic Depth Recovery from Unsynchronized Video Streams, *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (*CVPR'03*), Vol.II, pp.351–358 (2003).
15) 菅谷保之，金澤　靖，金谷健一：エピ極線幾何学による 2 画像間の密な点対応の生成，情報処理学会研究報告 CVIM，Vol.CVIM-148-19, pp.145–152 (2005).
16) 和田俊和：最近傍識別器を用いたカラータゲット検出—「らしさ」に基づかない識別とコンピュータビジョンへの応用，情報処理学会研究報告 CVIM，Vol.CVIM-134-3, pp.17–24 (2002).

(平成 17 年 5 月 20 日受付)
(平成 17 年 11 月 18 日採録)

(担当編集委員　岡谷 郁子)



野口　真身

2005 年和歌山大学システム工学部情報通信システム学科卒業．現在，同大学大学院システム工学研究科システム工学専攻博士前期課程在学中．コンピュータビジョンの研究に従事．

加藤　文和

1997 年岡山大学工学部情報工学科卒業．2001 年同大学大学院博士課程修了．2001 年 4 月から 2002 年 12 月まで産業技術総合研究所．2003 年 1 月より和歌山大学に勤務．コンピュータビジョン，パターン認識等の研究に従事．博士（工学）．電子情報通信学会，IEEE 各会員．