

マーカー追跡による同期のない複数カメラのキャリブレーション

野口 真身[†] 加藤 丈和[†]

[†]和歌山大学 システム工学部 情報通信システム学科

〒 640-8510 和歌山県 和歌山市 栄谷 930

E-mail : maming@vrl.sys.wakayama-u.ac.jp, t.kato@ieee.org

あ ら ま し 動 物 体 の 3 次 元 形 状 復 元 の た め に は , 複 数 の カ メ ラ 間 の 位 置 ・ 姿 勢 の キ ャ リ ブ レ ー シ ョ ン だ け で な く , 各 カ メ ラ の 撮 影 時 刻 の キ ャ リ ブ レ ー シ ョ ン が 重 要 と な る . 本 稿 で は , 撮 影 時 刻 が 同 期 し て い な い 複 数 の カ メ ラ 間 の 位 置 ・ 姿 勢 と 撮 影 時 刻 の ず れ を 推 定 す る 手 法 を 提 案 す る . 一 般 に , カ メ ラ 間 の 位 置 ・ 姿 勢 を 推 定 す る に は , 各 カ メ ラ の 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 1 つ の マ ー カ ー を 複 数 カ メ ラ で 追 跡 し , マ ー カ ー の 軌 跡 を 推 定 す る こ と で , 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 ー 位 置 の ず れ を 基 に , 繰 り 返 し 計 算 に よ っ て 撮 影 時 刻 の ず れ と カ メ ラ 間 の 位 置 関 係 を 交 互 に 推 定 す る . 実 験 で は , シ ミ ュ レ ー シ ョ ン デ ー タ に よ っ て 本 手 法 が 有 効 な 条 件 と 推 定 精 度 の 検 証 を 行 い , ま た 実 際 の カ メ ラ で 撮 影 し た 画 像 に 適 用 し て , 本 手 法 の 有 効 性 を 確 認 し た .

キ ー ワ ー ド カ メ ラ キ ャ リ ブ レ ー シ ョ ン , 撮 影 時 刻 , 基 礎 行 列 , 3 次 元 形 状 復 元

Asynchronous Multi-Camera Calibration by Marker Tracking

Mami Noguchi[†], Takekazu Kato[†]

[†]Department of Computer and Communication Science, Wakayama University,

930 Sakaedani, Wakayama, 640-8510, Japan

E-mail : maming@vrl.sys.wakayama-u.ac.jp, t.kato@ieee.org

Abstract For 3D reconstruction of moving objects, it is important to calibrate not only 3D pose but also shutter timing between the cameras. This paper describes the calibration of pose and shutter timing of multiple asynchronous cameras. Generally, the 3D pose calibration requires correspondences of many feature points between the cameras. It is, however, a time-consuming. For solving this problem, we propose a new calibration method using trajectories of a moving marker tracked by multiple asynchronous cameras. Our method alternately estimates a time lag of shutter and 3D pose between the cameras based on position-lags of the marker observed by the cameras. We verified the accuracy and available conditions by using simulation data, and confirmed the effectiveness of proposed method by using real data.

Keywords camera calibration, shutter timing, fundamental matrix, 3D reconstruction

1 ま え が き

ステレオ視や視体積交差法など、複数カメラの画像を用いた3次元形状復元や、自由視点映像の生成のためには、あらかじめカメラの3次元位置・姿勢などの外部パラメータのキャリブレーションを行う必要がある。通常このカメラキャリブレーションのためには、観測範囲内にキャリブレーション

パターンと呼ばれる特徴点を配置し、それを用いて3次元座標と画像座標、もしくは、各カメラ画像座標同士を対応付ける必要がある。

精度の良いキャリブレーションのためには、観測範囲内に偏りなく散らばった多数の特徴点の対応付けが必要であるが、これらを自動で安定に対応付けるのは困難であり、手動による対応付けは非常に手間がかかる。また大規模空間を観測範囲と

する場合 [3] や、上空を観測範囲とする場合など、キャリブレーションパターンの設置自体がコストの高い作業となる場面も多く、簡便なキャリブレーション手法の開発が望まれている。

一方、近年、3次元ビデオ [4] や、多視点画像からの自由視点映像生成 [3] などのような、動物体の形状推定や、3次元映像生成などの研究がさかに行われている。これらの研究では、各カメラのシャッターのタイミングつまり、撮影時刻も一致させる必要があり、カメラ間の位置姿勢だけでなく、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、外部から各カメラにタイミングパルスを与え、それをトリガとしてシャッターのタイミングを揃えことで、カメラの撮影時刻を一致させる方法がよく用いられる。このような方法は、室内などの狭い環境では有効であるが、屋外の広大な空間では全てのカメラに信号線を接続し、同じパルスを共有することは困難である。また、GPS や標準電波を用いる方法もあるが、一般に高価であり、遮蔽物の影響などにより、様々な環境で十分な精度を出すことは難しい。

そこで本研究では、撮影時刻の同期がとれていない複数のカメラ間に対し、外部パラメータだけでなく、撮影時刻のずれも同時に推定するキャリブレーション手法を提案する。

山添ら [6] は、複数の赤外線 LED の点滅パターンにより、時刻情報をコーディングし、それをカメラで観測することで時刻合わせを行う方法を提案している。しかし、この論文ではフレーム単位の時刻合わせを行っているが、各フレームの撮影タイミングのずれの推定に利用するには、LED 発光時間とカメラのシャッター速度を非常に小さくする必要があり、このような目的に適用するのは難しい。

また、Chen ら [2] は、複数の特徴点を持つ 3次元オブジェクトを複数台のカメラで追跡し、3D オブジェクトのフレーム間の動作を内挿することによって、観測時刻を一致させた Virtual Object を生成し、撮影時刻が同期していないカメラのキャリブレーションを行った。しかし、この手法では複数の特徴点をカメラ間で対応付ける必要があり、この対応付けの安定性にキャリブレーションの安定性も影響されてしまうという問題がある。また、カメラと 3D オブジェクトの位置関係によっては、特徴点同士が重なってしまう状況も考えられ、この場合には対応付けがさらに難しくなってしまう。

本研究では、キャリブレーションパターンとして単一のマーカーのみを用い、3次元空間中を移動するマーカーを、撮影時刻が同期していない複数のカメラで追跡し、各カメラの画像上でのマーカー軌跡を推定することで、カメラ間の外部パラメータと撮影時刻のずれを同時に推定する方法を提案する。

単一のマーカーのみを用いることで、画像間の対応付けが容易になり、マーカーの重なりも考慮する必要がなくなる。また、単に 3次元空間中でマーカー移動させるだけで良いため、キャリブレーション

パターンを設置しにくい広大な観測範囲を持つ場所や空中でも、簡単にマーカーを設置でき、簡便なキャリブレーションが実現できる。

2 マーカー追跡による時刻とカメラ姿勢のキャリブレーション

2.1 キャリブレーション方法

外部パラメータのキャリブレーションには、3次元空間中の座標と画像上の座標との対応付けから各カメラの射影行列を求める strong-calibration と、2台 (あるいはそれ以上) のカメラの画像上での対応付けから、基礎行列と呼ばれる画像間のエピポーラ拘束を求める weak-calibration があるが、本稿では画像間の対応付けのみから求めることのできる weak-calibration について議論する。

本研究では、画像間の対応付けのかわりに、図 1 に示すような観測範囲内を移動する単一のマーカーを追跡した軌跡を用いる。2台のカメラの撮影時刻が完全に同期している場合、移動マーカーを各カメラで追跡した結果から、多数の対応付けを得ることが可能である。

ただし、カメラの撮影時刻が同期していない場合は、各カメラで撮影した瞬間のマーカーの 3次元位置が一致しないため、マーカーの座標をそのまま対応点として用いることはできない。この場合でも撮影時刻のずれが既知であれば、マーカーの軌跡を撮影時刻のずれに基づいて推定することで、対応点を求めることができる。

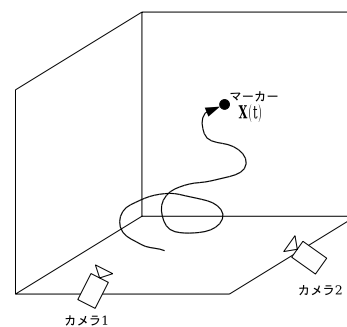


図 1: マーカーの追跡

2.2 アルゴリズムの概要

まず、2台のカメラの射影行列と基礎行列の関係を整理する。2台のカメラの射影行列をそれぞれ P_1, P_2 したとき、ある 3次元空間中の点 M を各カメラの画像座標に投影した点 m_1, m_2 は次式のように表される。

$$\begin{aligned} s\tilde{m}_1 &= P_1\tilde{M} \\ s'\tilde{m}_2 &= P_2\tilde{M} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし, $\tilde{\mathbf{m}}_1, \tilde{\mathbf{m}}_2, \tilde{\mathbf{M}}$ はそれぞれ $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \mathbf{M}$ の同次座標, s, s' はスケールファクターである。また, 各カメラの内部パラメータを A_1, A_2 , カメラ 1 からカメラ 2 への回転行列を R_{12} , 平行移動を \mathbf{t}_{12} とすると, 各カメラの射影行列 P_1, P_2 は次のように表すことができる。

$$P_1 = A_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$P_2 = A_2 \begin{bmatrix} R_{12} & \mathbf{t}_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

このとき, 基礎行列 F は次のように定義される。

$$F = A_2^{-T} [\mathbf{t}]_{\times} R A^{-1} \quad (4)$$

また, $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$ に関して, 次式が成り立つ。

$$\tilde{\mathbf{m}}_1^T F \tilde{\mathbf{m}}_2 = 0 \quad (5)$$

次に, 3次元空間中を移動するマーカーの軌跡と, 各カメラの撮影時刻について整理する。時刻 t におけるマーカー 3次元位置を $\mathbf{X}(t)$ とする。2台のカメラの撮影間隔を $\delta t_1, \delta t_2$, それぞれの1フレーム目の撮影時刻を $t_{1,0}, t_{2,0}$ とすると, 各カメラの i フレーム目の観測時刻 $t_{1,i}, t_{2,i}$ は次のように表される。

$$\begin{aligned} t_{1,i} &= t_{1,0} + i\delta t_1 \\ t_{2,i} &= t_{2,0} + i\delta t_2 \end{aligned} \quad (6)$$

ここで, 2台のカメラのフレームレートが同じ, つまり $\delta t_1 = \delta t_2 = \delta t$ と仮定し, 初期フレームにおける各カメラの撮影時刻の差を $\tau = t_{2,0} - t_{1,0}$ とすると, 各カメラの撮影時刻は次式のように表される。

$$\begin{aligned} t_{1,i} &= t_{1,0} + i\delta t \\ t_{2,i} &= t_{1,0} - \tau + i\delta t \\ &= t_{1,i} - \tau \end{aligned} \quad (7)$$

このとき, 2台のカメラで観測されるマーカー位置 $\mathbf{m}_{1,i}, \mathbf{m}_{2,i}$ は次式のように表される。

$$\begin{aligned} s\tilde{\mathbf{m}}_{1,i} &= P_1 \tilde{\mathbf{X}}(t_{1,i}) \\ s'\tilde{\mathbf{m}}_{2,i} &= P_2 \tilde{\mathbf{X}}(t_{1,i} - \tau) \\ &\quad (i = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (8)$$

本研究で扱う問題は, 画像上で観測されるマーカー位置 $\mathbf{m}_{1,i}, \mathbf{m}_{2,i}$ から, 基礎行列 F とカメラ間の撮影時刻のずれ τ を求める問題といえる。しかし, この F と τ を同時に推定することは困難である。そこで本研究では, 図 2 に示すように, まず $\tau = 0$ として初期の基礎行列 F を求め, 次にこの F を用いて, エピポーラ拘束より, カメラの撮影時刻のずれ τ を推定する。さらにこの τ を用いて F を推定するというように, τ と F を交互に繰り返し計算することによって推定する。

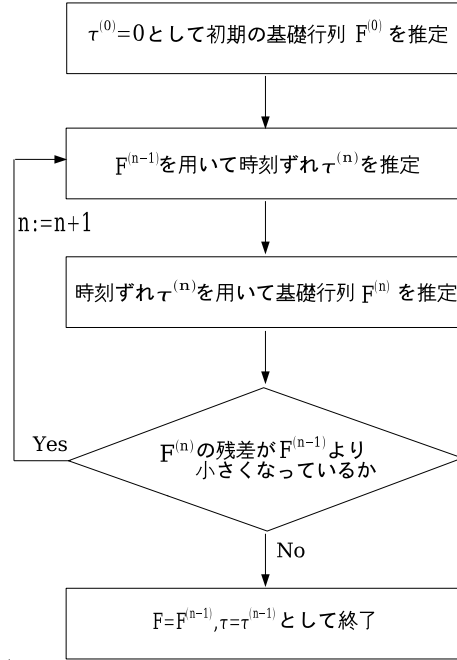


図 2: τ と F の推定アルゴリズムの概要

ここで, 初期の基礎行列 $F^{(0)}$ は, $\tau = 0$ つまり, $\mathbf{m}_{1,i}$ と $\mathbf{m}_{2,i}$ が対応づいているものとして推定する。

以下, 基礎行列 F を用いた τ の推定方法, τ を用いた基礎行列 F の推定方法, 及び, 推定結果の誤差評価とそれによるアルゴリズムの終了条件について詳しく述べる。

2.3 基礎行列 F を用いた時刻ずれ τ の推定

まず, 基礎行列を $F^{(n-1)}$ に固定したときの時刻ずれ $\tau^{(n)}$ の推定方法について述べる。

基礎行列 $F^{(n-1)}$ が正しいと仮定すると, 図 4 に示すようにカメラ 1 で観測されたマーカー位置 $\mathbf{m}_{1,i}$ に対応するエピポーラ線 $\mathbf{l}_{1,i}^{(n-1)} = F^{(n-1)T} \mathbf{m}_{1,i}$ と, カメラ 1 で観測されたマーカーの軌跡との交点 $\mathbf{m}'_{2,i}$ は, 同一の時刻のマーカー位置 $\mathbf{X}(t_{1,i})$ に対応していると考えられ, 次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} s'\tilde{\mathbf{m}}'_{2,i} &= P_2 \tilde{\mathbf{X}}(t_{1,i}) \\ \mathbf{m}_{1,i}^T F^{(n-1)} \mathbf{m}'_{2,i} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ここで, 撮影周期 δt の間の移動が等速直線運動で近似できると仮定すると, $\tilde{\mathbf{m}}'_{2,i}$ を次式のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{m}}'_{2,i} &= (1 - \alpha)\mathbf{m}_{2,[f]} + \alpha\mathbf{m}_{2,[f+1]} \\ \alpha &= f - [f] \\ f &= \frac{\tau}{\delta t} \end{aligned} \quad (10)$$

ただし, f は時刻ずれ τ をフレーム単位で表現したものであり, $[]$ は floor 関数, $\lceil \rceil$ は ceil 関数を表す。

つまり、全ての点 $m_{1,i}$ について、式 (9), (10) を満たす τ を求めることができれば、 $F^{(n-1)}$ から $\tau^{(n)}$ が推定できる。

しかし、実際には $F^{(n-1)}$ が正しく与えられているとは限らないため、全ての点に対して式 (9), (10) を満たす $\tau^{(n)}$ が存在するとは限らない。そこで、まずカメラ 1 の各点 $m_{1,i}$ に対して式 (9), (10) を満たす $\tau_i^{(n)}$ を求め、それらの平均をとることで、全体の $\tau^{(n)}$ を推定する。

2.3.1 各点に対する $\tau_i^{(n)}$ の推定

カメラ 1 の点 $m_{1,i}$ に対応するエピポーラ線 $l_{1,i}^{(n-1)}$ と、カメラ 2 のマーカーの軌跡との交点を求めることで、 $\tau_i^{(n)}$ を推定する。まずカメラ 2 の点がどのフレームの間でエピポーラ線と交わっているか調べ、これらのフレームの点間の軌跡を直線で近似して交点を求める。以下に、交点の計算とそれに基づく $\tau_i^{(n)}$ の計算方法を述べる。

初期状態 探索点の決定

交点の探索は、前回の繰り返しの結果 $\tau^{(n-1)}$ に最も近い点から開始する。つまり、 $l_{1,i}^{(n-1)}$ との交点の探索開始位置を $m_{2,i+k}$ とすると、 k を次のように決める。

$$k = \begin{cases} \lfloor f^{(n-1)} \rfloor & f^{(n-1)} \geq 0 \\ \lceil f^{(n-1)} \rceil & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

ただし、 $f^{(n-1)} = \frac{\tau^{(n-1)}}{\delta t}$ である。

Step1 探索方向の決定

探索開始位置 $m_{2,i+k}$ から前のフレームか後のフレームどちらの方へ探索を進めるか決定する。これは開始位置の前後のフレームの点 $m_{2,i+k+1}$, $m_{2,i+k-1}$ とエピポーラ線 $l_{1,i}$ との距離によって決定する。点 m とエピポーラ線 l との距離を $d(l, m)$ とすると方向 p を次式のように決定する。

$$p = \begin{cases} 1 & \text{if } d(l_i, m_{i+k-1}) \geq d(l_i, m_{i+k+1}) \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$p = 1$ のときは後フレームへ、 $p = -1$ のときは前フレームへ探索する。

Step2 交点を調べる

$m_{2,i+k}$ と $m_{2,i+k+p}$ を結ぶ線分とエピポーラ線 $l_{1,i}$ に交点があるかどうか調べる。まず、図 3 に示すように、2 点 $m_{2,i+k}$ と $m_{2,i+k+p}$ を通る直線とエピポーラ線 $l_{1,i}$ との交点 m' を求め、それが $m_{2,i+k}$ と $m_{2,i+k+p}$ の中にあれば交点があるとして Step4 へ (図 3(a))、そうでなければ交点がないとして次の Step3 へ (図 3(b))。

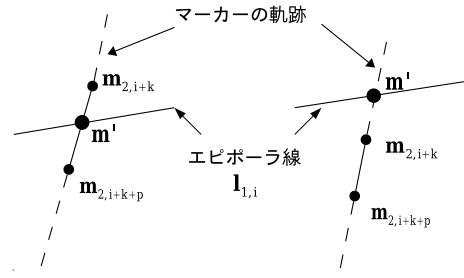


図 3: エピポーラ線の交点

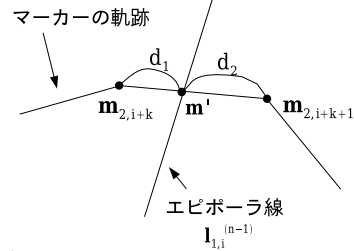


図 4: エピポーラ線と軌跡

Step3 終了判定

エピポーラ線 $l_{1,i}$ と、今の探索点 $m_{2,i+k}$ との距離 $d(l_i, m_{i+k})$ と、次の探索点 $m_{2,i+k+p}$ との距離 $d(l_i, m_{i+k+p})$ を比較し、 $d(l_i, m_{i+k+p}) < d(l_i, m_{i+k})$ なら、 $k = k + p$ とし Step2 へ。そうでなければ、交点がないものとして終了。

Step4 時刻ずれ $\tau_i^{(n)}$ の推定

図 4 のようにエピポーラ線 $l_{1,i}^{(n-1)}$ が、カメラ 2 の 2 点 $m_{2,i+k}$ と $m_{2,i+k+1}$ に挟まれ、交点 m' があるとする。 $m_{2,i+k}$ と交点までの距離を d_1 、交点と $m_{2,i+k+1}$ までの距離を d_2 としたとき、内分パラメータ α を次式のように決定する。

$$\begin{aligned} d_1 : d_2 &= \alpha : (1 - \alpha) \\ (1 - \alpha)d_1 &= \alpha d_2 \\ \alpha &= \frac{d_1}{d_1 + d_2} \end{aligned} \quad (13)$$

この点 $m_{2,i}$ に関する時刻ずれ $f_i^{(n)}$ を次のように決定する。

$$\begin{aligned} f_i^{(n)} &= k + p\alpha \\ \tau_i^{(n)} &= \delta t f_i^{(n)} \end{aligned} \quad (14)$$

2.3.2 全体の時刻ずれの推定

次に全フレームでの時刻ずれ $f^{(n)}$ を、各点のずれ $f_i^{(n)}$ の平均とすると、次のように求められる。

$$f^{(n)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i^{(n)} \quad (15)$$

しかし、 $F^{(n-1)}$ が正確でない場合には、図 5(a) に示すようにはずれ値が多く含まれてしまい、うま

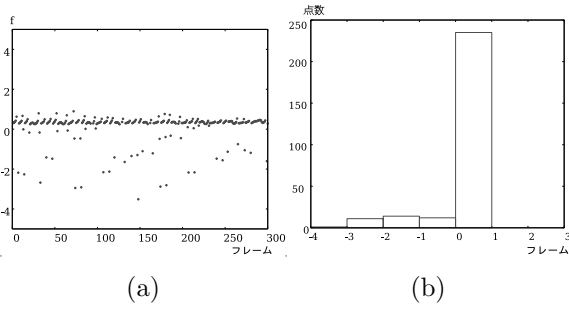


図 5: ヒストグラムの例

く $f^{(n)}$ が推定できないことがある．そこで，はずれ値の影響を減らすため，ずれのフレームごとの頻度を表すヒストグラムを作成し，ヒストグラムのピークを求める．ヒストグラム $H(I)$ は次のように計算できる．

$$H(I) = \sum_i B(f_i^{(n)}, I)$$

$$B(f_i^{(n)}, I) = \begin{cases} 1 & I \leq f_i^{(n)} < I+1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

図 5(b) にヒストグラムの例を示す．このとき，ヒストグラムのピーク I^* は次のようになる．

$$I^* = \arg \max H(I) \quad (17)$$

この I^* と $I^* + 1$ の間の平均を $f^{(n)}$ とする．

$$f^{(n)} = \frac{1}{H(I^*)} \sum_{i=0}^N (B(f_i, I^*)) f_i^{(n)} \quad (18)$$

2.4 時刻ずれ $\tau^{(n)}$ からの基礎行列 F の推定

次に，時刻ずれ $\tau^{(n)}$ を固定して，基礎行列 $F^{(n)}$ を推定する方法について述べる．

図 6 に示すように，まずカメラ 1 の点 $m_{1,i}$ に対応するカメラ 2 の点 $m_{2,i}^{(n)}$ を，エピポーラ線を挟む 2 点 $m_{2,\lfloor f^{(n)} \rfloor}, m_{2,\lceil f^{(n)} \rceil}$ の内挿によって求める．

$$m_{2,i}^{(n)} = (1 - \alpha)m_{2,i+\lfloor f^{(n)} \rfloor} + \alpha m_{2,i+\lceil f^{(n)} \rceil} \quad (19)$$

$$\alpha = f^{(n)} - \lfloor f^{(n)} \rfloor \quad (20)$$

このようにして求めた対応点の組 $m_{1,i}, m_{2,i}^{(n)}$ を用いて新しい基礎行列 $F^{(n)}$ を求める¹．

2.5 終了条件

推定された $F^{(n)}$ の残差を用いた繰り返し計算の終了条件について述べる．図 7 に示すように， $m_{1,i}$

¹対応点の組み合わせからの基礎行列の推定には金谷らの基礎行列推定プログラム [1, 5] を用いた．

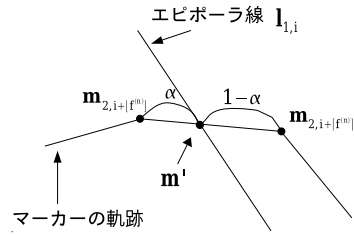


図 6: 点の内挿

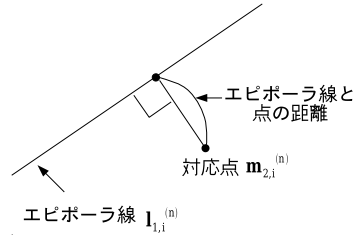


図 7: エピポーラ線と点の距離

のエピポーラ線と，それに対応するカメラ 2 の点との距離を全ての点について求め，その平均残差 $E^{(n)}$ とする．

$$E^{(n)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(l_{1,i}^{(n)}, m_{2,i}^{(n)}) \quad (21)$$

前の繰り返しの残差を $E^{(n-1)}$ としたとき，終了条件は次のようになる．

$$\begin{aligned} E^{(n-1)} \geq E^{(n)} & \quad \text{推定を続ける} \\ \text{otherwise} & \quad \text{終了} \end{aligned} \quad (22)$$

3 実験結果

3.1 シミュレーション実験

まず，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，シミュレーション実験を行った．シミュレーション実験では，2 台のカメラの内部パラメータ，撮影周期は一致しているものとし，カメラの焦点距離は 700，撮影周期は $\frac{1}{30}$ 秒とした．カメラ配置は図 8 に示すように垂直軸まわりの回転 ϕ と水平面からの回転 θ とワールド座標原点からの距離 d で表し，カメラの光軸回りの回転はないものとした．カメラ 1 は $\phi = 30, \theta = 40, d = 600$ ，カメラ 2 は $\phi = 60, \theta = 20, d = 700$ とした．

精度の比較のために，マーカーの軌跡とは別に評価用データを用意した．評価用データは，カメラ 1 とカメラ 2 で対応付けられた 281 点をランダムに生成した．評価用データから求めた基礎行列 F は次のようになった．なお，基礎行列 F はノル

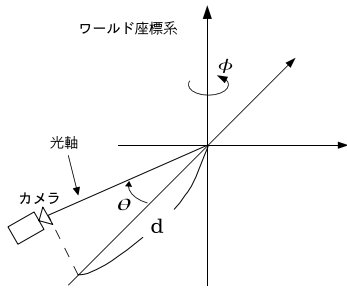


図 8: カメラの配置の模式図

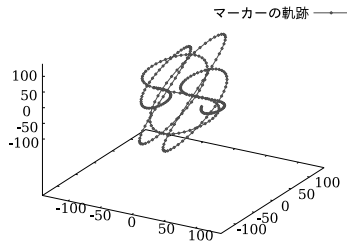


図 9: 3次元空間でのマーカーの軌跡 1

$\Delta \|F\|$ が 1 になるように正規化した。

$$F = \begin{pmatrix} 0.000166 & 0.000069 & 0.205062 \\ -0.000439 & -0.000299 & -0.617640 \\ -0.414374 & 0.636211 & 0.000007 \end{pmatrix} \quad (23)$$

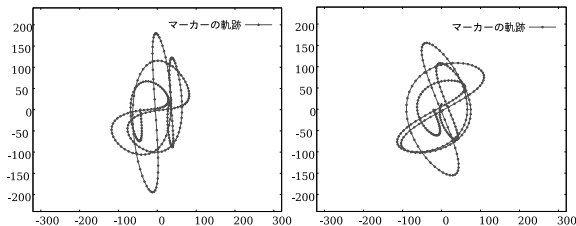
3.1.1 時刻ずれの影響の評価

まず、どのくらいの時刻ずれまでなら推定可能であるか確認した。この実験ではマーカーの 3 次元空間中の軌跡を次式のように与えた。

$$\begin{aligned} x &= 10(t - 5.5) \\ y &= 120 \sin(\pi t) \sin\left(\frac{\pi}{11}t\right) \\ z &= 100 \cos(1.5\pi t) \sin\left(\frac{\pi}{11}t\right) \end{aligned} \quad (24)$$

図 9 に、マーカーの軌跡を示す。カメラ 1 を基準として、カメラ 2 の撮影開始時刻を 0.01 秒から 0.39 秒までの間で遅延させて撮影した。図 10 に各カメラで撮影したマーカーの軌跡の例を示す。

図 11, 12 に、繰り返し計算毎の残差 $E^{(n)}$ (式 (21)) の変化を示す。図 12 は、図 11 の一部を拡大



カメラ 1 カメラ 2
図 10: 撮影されたマーカーの軌跡 1

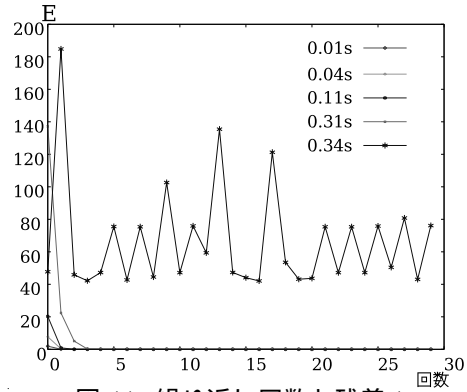


図 11: 繰り返し回数と残差 1

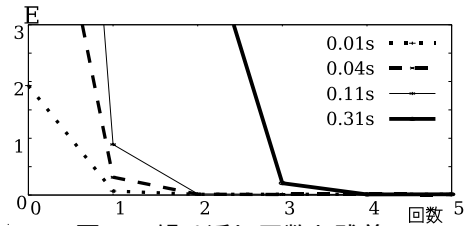


図 12: 繰り返し回数と残差 2

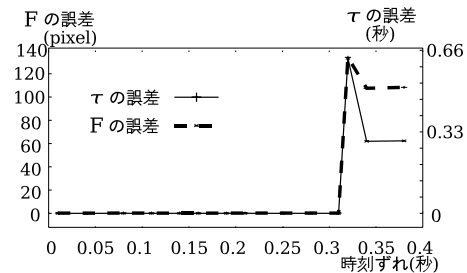


図 13: 時刻ずれと誤差

したものである。この結果より、時刻ずれが 0.31 秒までは収束しているが、0.32 秒の場合では、収束していないことが分かる。また、収束する場合には 2 から 3 回の繰り返しで収束していることが分かる。

次に時刻ずれと誤差の関係を、図 13 に示す。誤差は、推定した基礎行列 F を用いて評価用データのエピポーラ線を求め、対応点との画像上での誤差の平均値である。

この結果より、 $\tau \leq 0.31$ では 0.1 msec 以下の誤差でほぼ正しく τ が推定できていることがわかる。また F についても 0.2 pixel 以下の誤差になっていることがわかる。

以下に $\tau = 0.11$ のときの基礎行列 F' を示す。

$$F' = \begin{pmatrix} 0.000165 & 0.000064 & 0.204326 \\ -0.000432 & -0.000298 & -0.618592 \\ -0.413014 & 0.636406 & 0.001519 \end{pmatrix} \quad (25)$$

評価用データから求めた式 (23) と比べると、近い値が得られていることが分かる。

これらの結果より、時刻ずれが 0.31 秒までは収束し、真値と近い基礎行列、時刻ずれが推定できる

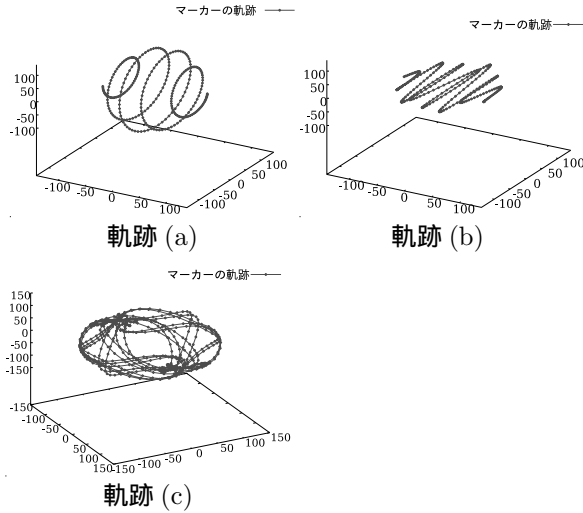


図 14: 3次元空間でのマーカの軌跡 2

が、それ以上になると発散して正しく推定できないことがわかった。これは初期値の基礎行列 $F^{(0)}$ が大きく異なるとエピポーラ線と対応する軌跡とのずれが大きくなり、 τ がうまく推定できないためであると思われる。

3.1.2 点の軌跡の影響の評価

次に、点の軌跡が結果にどのような影響を与えるかを確認する。カメラ配置、撮影周期は実験 1 と同じとし、マーカの 3 次元空間中の軌跡を次の 3 通り用意した。

$$\begin{aligned}
 (a) \quad & \begin{cases} x = 18(t - 5.5) \\ y = 140 \sin(\pi t) \sin(\frac{\pi}{11} t) \\ z = 100 \cos(\pi t) \sin(\frac{\pi}{11} t) \end{cases} \\
 (b) \quad & \begin{cases} x = 18(t - 5.5) \\ y = 20 \sin(\pi t) \sin(\frac{\pi}{11} t) \\ z = 100 \cos(1.5\pi t) \sin(\frac{\pi}{11} t) \end{cases} \\
 (c) \quad & \begin{cases} x = 120 \sin(3.9t) \\ y = 120 \cos(3.9t) \sin(3.1t) \\ z = 120 \cos(3.9t) \cos(3.1t) \cos(4.7t) \end{cases}
 \end{aligned}$$

図 14 に 3 次元空間中のマーカの軌跡を示す。2 台のカメラで撮影したマーカの軌跡は、図 15 のようになった。

軌跡 (a) は、マーカが規則的に回転する場合であるが、この場合繰り返し毎に残差は減少していくが、推定される基礎行列と時刻ずれは真値とは異なる結果となった。これはマーカが規則正しく回転しているため、時刻ずれで点がずれているのを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。

軌跡 (b) はマーカの位置の分布に偏りが生じている場合である。このとき、 F の誤差は多少大

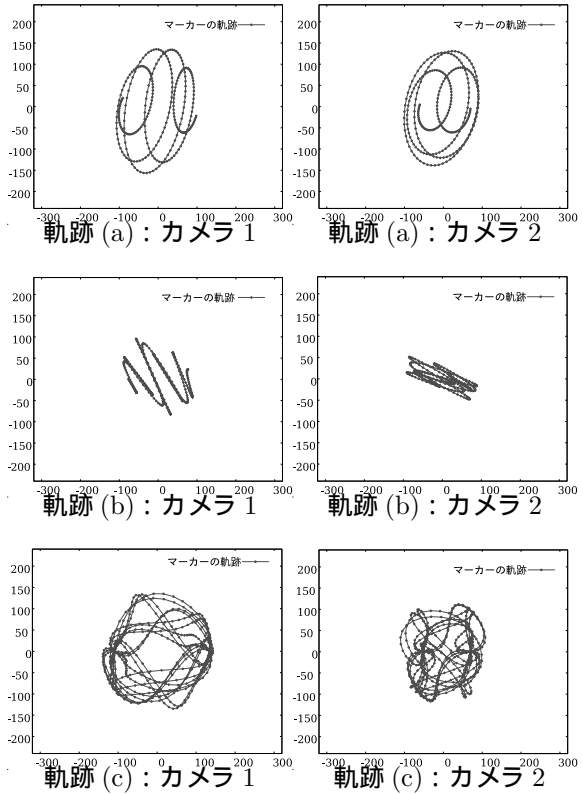


図 15: 撮影されたマーカの軌跡 2

きくなっているが、 τ は正しく推定できていることがわかる。

軌跡 (c) はどの方向にも同程度に分布している場合であるが、このとき τ 、 F とともに精度よく推定できていることがわかる。

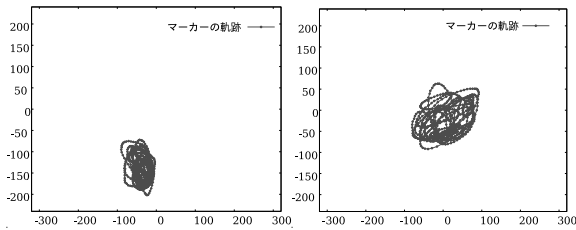
これらの結果より、点の分布は F の推定精度に影響を与えるが、 τ の推定精度にはあまり影響しないことが分かった。ただし、軌跡 (a) のように、マーカが規則的に回転している場合には F も τ も正しく推定できないことが分かった。

3.2 実データを用いた実験

この実験では、1 つのカラーマーカを追跡した結果によりカメラキャリブレーションを行った。マーカの検出には、最近傍識別器を用いた色ターゲット検出 [7] を利用した。目視による計測では、水平面からの回転について、カメラ 1 は $\theta = 0.63$ 度、カメラ 2 は $\theta = -8.32$ 度とし、カメラ 1 からカメラ 2 の垂直軸まわりの回転は、99.5 度とした。実際に撮影されたマーカの軌跡は図 16 のようになった。

繰り返し毎の 1 点 1 点の時刻ずれの推定値 $f_i^{(n)}$ を図 17 に示す。上段の図は、横軸にフレーム数、縦軸に時刻ずれ $f_i^{(n)}$ とし、下段の図にそのときのヒストグラムを示す。

この実験では基礎行列の真値がわからないため



カメラ 1 カメラ 2
 図 16: 撮影されたマーカーの軌跡 3

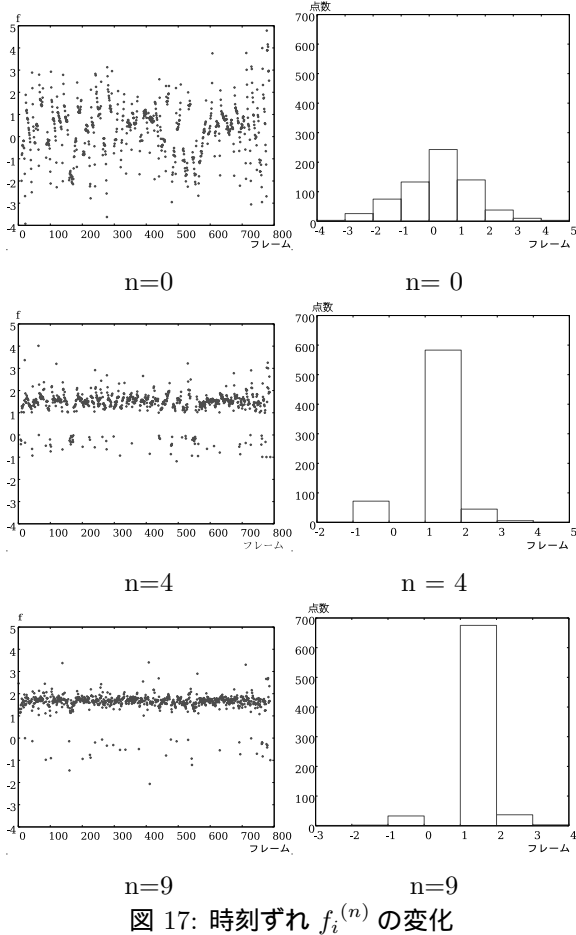


図 17: 時刻ずれ $f_i^{(n)}$ の変化

比較できないが、時刻ずれ τ が収束していくことが確認できる。最終的な時刻ずれは、 $\tau = 0.0557$ 秒と推定され、このときの実験データのタイムスタンプの平均から求めた時刻ずれは 0.0686 秒であり、誤差はおよそ 0.0129 秒であることが確認できた。

4 まとめ

本研究では、3次元空間中を移動するマーカーの軌跡を、撮影時刻が同期していない2台のカメラで撮影した軌跡から、カメラ間の位置、姿勢を表す基礎行列とともに、撮影時刻のずれを推定するキャリブレーション手法を提案した。

本手法は、単一のマーカーを2台のカメラで追

跡した軌跡のみからキャリブレーションが可能であり、また同期のないカメラ間の撮影時刻のずれも推定できるため、多くの環境で適応可能であり、またキャリブレーションパターンを配置するのに比べて少ない労力でキャリブレーションを行うことが可能である。

シミュレーション実験では、8から9フレームの時刻ずれまで推定可能であることを示した。また、実データを用いた実験によって、基礎行列については真値と比較できなかったが、時刻ずれに関しては、観測時のタイムスタンプと同等の推定ができていたことを確認した。

今後の課題として次の3点が考えられる。1つ目として、本稿で提案した手法では、初期値の時刻ずれが9フレーム以内の場合には推定可能であるが、それ以上のずれに対しては、繰り返し計算が発散して正しく推定できないという問題点がある。今後、適切な初期値の推定方法を考える必要がある。2つ目に、マーカーの軌跡を線形近似によって推定しているが、実際の軌跡により近づけるために、より精度の高い近似を行うことが挙げられる。最後に、フレームレートの異なるカメラへの適応や、画像の取り零し、追跡の失敗などへの対応など、より実用的な環境への適応が挙げられる。

謝辞

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、及び若手研究 (B)16700143の支援による。

参考文献

- [1] <http://www.ail.cs.gunma-u.ac.jp/labo/program.html>.
- [2] Xing Chen, James Davis, and Philipp Slusallek. Wide area camera calibration using virtual calibration objects. In *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2000)*, Vol. II, pp. II-520-527, 2000.
- [3] 北原格, 大田友一, 斎藤英雄, 秋道慎志, 尾野徹, 金出武雄. 大規模空間における多視点映像の撮影と自由視点映像生成. *映像情報メディア学会論文誌*, Vol. 55, No. 8, pp. 120-125, 2002.
- [4] 高井勇志, 松山隆司. 3次元ビデオ映像の高精細表示アルゴリズム. *映像情報メディア学会論文誌*, Vol. 58, No. 4, pp. 593-602, 2002.
- [5] 三島等, 金谷健一. 基礎行列の最適計算とその信頼性評価. *情処研報 99-CVIM-118-10*, pp. 67-74, May 1999.
- [6] 山添丈夫, 内海章, 鉄谷信二, 谷内田正彦. 多視点による映像生成のための赤外線マーカーを用いた多数カメラの位置・姿勢推定. *画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004)*, 第1巻, pp. I-440-I-444, 2004.
- [7] 和田俊和. 最近傍識別器を用いたカラーターゲット検出-「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*, 第CVIM-134-3巻, pp. 17-24, 2002.