

アフィン空間当てはめによる特徴点追跡の誤り検出

高田 知佳 菅谷 保之

豊橋技術科学大学情報工学系

441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

{takada,sugaya}@iim.ics.tut.ac.jp

ビデオ画像上の特徴点の軌跡から追跡を誤ったフレームを検出する手法について述べる。ビデオ画像上で特徴点を追跡し、3次元形状復元や運動物体の分離を行うには、まず追跡結果からアウトライアを検出し、これを除去する必要がある。通常はアウトライアとして除去された軌跡はその後の処理には使用されないが、軌跡から追跡を誤ったフレームを検出できれば、その部分を正しく推定し直すことで軌跡を再利用することが可能になる。本稿では、アフィンカメラのもとでは特徴点の軌跡を表すベクトルがあるアフィン空間に含まれるという拘束条件を用いてアウトライア軌跡から追跡を誤ったフレームを検出する手法を示す。これはインライアの軌跡にアフィン空間を当てはめ、誤差の統計モデルに基づいて部分軌跡の信頼性を判定することで、追跡を誤ったフレームを検出するものである。実画像を用いた実験により、提案手法の有効性を示す。

Detecting Incorrect Feature Point Tracking by Affine Space Fitting

Chika Takada and Yasuyuki Sugaya

Department of Information and Computer Sciences,
Toyohashi University of Technology, Toyohashi, Aichi 441-8580 Japan

We present a new method for detecting incorrect feature point tracking. For 3-D reconstruction and motion segmentation, we track feature points through a video sequence, then remove outlier trajectories among them. If we detect image frames in which feature point tracking fails, we can correct incorrect trajectories and reuse them. In this paper, we detect incorrect feature point tracking by imposing the constraint that under the affine camera model feature trajectories should be in an affine space in the parameter space. Introducing a statistical model of image noise, we test the partial trajectories are sufficiently reliable. Then we detect incorrect partial trajectories. Using real video images, we demonstrate that our proposed method sufficiently detects incorrect feature point tracking.

1. まえがき

ビデオ画像上で特徴点を抽出し、追跡することは多くのビデオ画像処理の基礎である。例えば、ビデオ画像上で追跡した特徴点から物体の3次元形状を復元する手法としてTomasi・Kanade [15]の「因子分解法」がよく知られている。また、ビデオ画像上を移動する特徴点の軌跡から独立な運動を分離する様々な方法が研究されている [9, 10, 13, 14]。

このためにはまずビデオ画像上で特徴点を追跡する必要がある。Tomasi・Kanade [16]は特徴点の検出とその追跡のアルゴリズム(以下「KLT法」と呼ぶ)を提供しているが、追跡結果には誤りが含まれる可能性がある。そのため、特徴点追跡結果に基づく応用ではまずアウトライアを除去しなければならない。このために市村ら [4, 5, 6]は非線形非ガウス型状態

空間に基づく特徴点軌跡のフィルタリングや特徴点追跡の改良を試みている。一方、Huynhら [3]は静止したシーンの移動カメラによる動画像系列中の特徴点履歴に対して4次元部分空間をロバストに当てはめることによって誤った追跡を排除する方法を試みている。また、菅谷・金谷 [12]はRANSAC [1, 2]を用い、実画像上の特徴点の誤差の挙動を考え、統計的な解析によって残差の規準や判定のしきい値を定めて、より性能を向上させている。

多くの応用では検出されたアウトライアは以後の処理には使用されないことが多い。しかし、アウトライアとされた追跡結果の中にも部分的には正しい追跡が含まれていることがある。図1は部分的に正しい追跡を含んだ特徴点軌跡の例である。図1(a)は追跡が途中で失敗してそれ以降追跡に失敗し続けるものである。図1(b)は途中で追跡に失敗するがその後

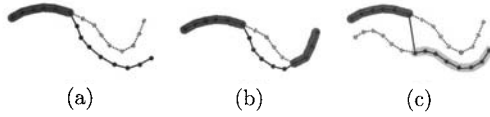


図 1: 部分的に正しい追跡を含む特徴点軌跡, 実線: 実際に追跡した軌跡, 点線: 正しい追跡をした場合の真の軌跡, (a) 途中から追跡を誤り続けた軌跡, (b) 途中から追跡を誤るがその後正しい追跡に戻った軌跡, (c) 追跡を誤った後に別の特徴点を正しく追跡した軌跡

に再び正しい追跡に戻るもの, 図 1(c) は追跡に失敗した後, 異なる特徴点を正しく追跡するものである.

これらのアウトライアの軌跡から追跡を誤った部分を検出することができれば, 正しい追跡結果から成る部分軌跡から残りの未知のデータを推定して, インライアの軌跡として再使用することが可能になる. この問題に対して上島・斎藤 [7] は消失した特徴点が見える 2 枚の画像から射影復元によってその 3 次元位置を仮に復元し, それをその点が見えないフレームへ投影することを提案している. また, 坪内ら [17] は特徴点軌跡が含まれるアフィン空間を最適化によって推定し, 部分軌跡にこの空間を当てはめることで仮の 3 次元復元を行うことなく未知の特徴点位置を推定する手法を提案している.

本論文ではアフィンカメラのもとでは特徴点の軌跡を表すベクトルがあるアフィン空間に含まれるという拘束条件を用いて, 誤差の統計モデルに基づいて部分軌跡の信頼性を判定することでアウトライア軌跡から追跡を誤ったフレームを検出する手法を示す.

以下, 2 節でアフィン空間拘束条件を説明し, 3 節でアウトライア軌跡の除去の統計的検定法を述べる. 4 節では部分軌跡の信頼性判定による特徴点追跡の誤り検出方法を述べる. そして, 5 節では提案手法を利用して同一特徴点を長く追跡したフレームを検出する方法を述べる. 6 節で実ビデオ画像による実験例を示し, 7 節に結論をまとめる.

2. 軌跡の空間

2.1 軌跡ベクトル

N 個の特徴点 p_α を M 枚の画像に渡って追跡し, 第 κ 画像における α 番目の特徴点 p_α の画像座標を $(x_{\kappa\alpha}, y_{\kappa\alpha})$, $\kappa = 1, \dots, M$, $\alpha = 1, \dots, N$ とする. そしてその運動履歴を次の $2M$ 次元ベクトルで表し, 軌跡ベクトルと呼ぶ.

$$\mathbf{p}_\alpha = (x_{1\alpha} \ y_{1\alpha} \ x_{2\alpha} \ y_{2\alpha} \ \cdots \ x_{M\alpha} \ y_{M\alpha})^\top \quad (1)$$

これによって各特徴点の軌跡を $2M$ 次元空間の 1 点と同一視できる. 便宜上, 画像番号 κ を「時刻 κ 」と呼ぶ.

本論文ではカメラの光軸を Z 軸とするカメラ XYZ 座標系をとり, これを世界座標系とする. そして静止したカメラに相対的にシーンが運動すると解釈する. シーン中に 3 次元物体座標系を任意に固定し, 特徴点 p_α のその物体座標系に関する 3 次元座標を $(a_\alpha, b_\alpha, c_\alpha)$ とする. 時刻 κ での物体座標系の原点と各座標軸の基底ベクトルを世界座標系 (= カメラ座標系) で表したものをそれぞれ $\mathbf{t}_\kappa, \{\mathbf{i}_\kappa, \mathbf{j}_\kappa, \mathbf{k}_\kappa\}$ とすると, 特徴点 p_α の時刻 κ における 3 次元位置 $\mathbf{r}_{\kappa\alpha}$ は世界座標系では次式となる.

$$\mathbf{r}_{\kappa\alpha} = \mathbf{t}_\kappa + a_\alpha \mathbf{i}_\kappa + b_\alpha \mathbf{j}_\kappa + c_\alpha \mathbf{k}_\kappa \quad (2)$$

2.2 アフィンカメラモデル

平行投影や弱透視投影や疑似透視投影を抽象化したアフィンカメラ [8] は, 3 次元点 $\mathbf{r}_{\kappa\alpha}$ が次のように画像上に投影されると仮定するものである.

$$\begin{pmatrix} x_{\kappa\alpha} \\ y_{\kappa\alpha} \end{pmatrix} = \mathbf{A}_\kappa \mathbf{r}_{\kappa\alpha} + \mathbf{b}_\kappa \quad (3)$$

ここで $\mathbf{A}_\kappa, \mathbf{b}_\kappa$ はそれぞれ時刻 κ でのカメラの位置や内部パラメータによって定まる 2×3 行列および 2 次元ベクトルである [10]. 式 (2) を代入すると, 式 (3) は次のように書ける.

$$\begin{pmatrix} x_{\kappa\alpha} \\ y_{\kappa\alpha} \end{pmatrix} = \tilde{\mathbf{m}}_{0\kappa} + a_\alpha \tilde{\mathbf{m}}_{1\kappa} + b_\alpha \tilde{\mathbf{m}}_{2\kappa} + c_\alpha \tilde{\mathbf{m}}_{3\kappa} \quad (4)$$

$\tilde{\mathbf{m}}_{0\kappa}, \tilde{\mathbf{m}}_{1\kappa}, \tilde{\mathbf{m}}_{2\kappa}, \tilde{\mathbf{m}}_{3\kappa}$ は時刻 κ でのカメラの位置や内部パラメータで決まる 2 次元ベクトルである. これを時刻 $\kappa = 1, \dots, M$ に渡って式 (1) のように縦に並べると, 式 (1) の軌跡ベクトル \mathbf{p}_α は次のように書ける.

$$\mathbf{p}_\alpha = \mathbf{m}_0 + a_\alpha \mathbf{m}_1 + b_\alpha \mathbf{m}_2 + c_\alpha \mathbf{m}_3 \quad (5)$$

$\mathbf{m}_i, i = 0, 1, 2, 3$ は $\tilde{\mathbf{m}}_{i\kappa}$ を時刻 $\kappa = 1, \dots, M$ に渡って縦に並べた $2M$ 次元ベクトルである.

2.3 アフィン空間拘束条件

式 (5) はすべての軌跡ベクトル \mathbf{p}_α が $\{\mathbf{m}_0, \mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \mathbf{m}_3\}$ の張る「4 次元部分空間」に含まれることを表している. これを部分空間拘束条件と呼ぶ [9]. しかし \mathbf{m}_0 の係数はすべての α に共通に 1 であるから, 軌跡ベクトル \mathbf{p}_α はその 4 次元部分空間内のある

「3次元アフィン空間」に含まれる。これがアフィン空間拘束条件である [10]。

すべての特徴点が完全に追跡できれば、全軌跡ベクトル \mathbf{p}_α の重心に座標原点を選び直すことにより、全軌跡ベクトル \mathbf{p}_α が「3次元アフィン空間」に含まれる。

3. アウトライア軌跡の除去

3.1 原理と方法

KLT法で追跡した特徴点の軌跡には途中から追跡を誤ったものが含まれることがある。Huyhnhら [3]は部分空間拘束条件に基づいて軌跡に最小メジアン法 [11]で4次元部分空間を当てはめ、誤った軌跡を除去している。しかし残差の規準や判定のしきい値は形式的なものであった。これに対して菅谷・金谷 [12]はRANSAC [1, 2]を用い、実画像上の特徴点の誤差の挙動を考え、統計的な解析によって残差の規準や判定のしきい値を定めて、より性能を向上させている。

本論文では菅谷・金谷 [12]の方法をアフィン空間拘束条件に適用する。すなわち、誤った少数の軌跡ベクトルは正しい軌跡ベクトルを含むアフィン空間から大きくずれていると考えられるので、RANSACの投票による多数決によって軌跡ベクトルに3次元アフィン空間を当てはめて、それからの2乗距離(残差)が大きいものをアウトライアとして除去する。その手順は次のようになる。以下、 $n = 2M$ と置く(M はフレーム数)。

3.2 計算手順

1. 軌跡ベクトル \mathbf{p}_α , $\alpha = 1, \dots, N$ からランダムに3個を取り出し、 $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$ とする。
2. 取り出したベクトルの重心を \mathbf{q}_C とし、その周りの $n \times n$ モーメント行列 \mathbf{M}_3 を次のように計算する。

$$\mathbf{M}_3 = \sum_{i=1}^3 (\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_C)(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_C)^\top \quad (6)$$

3. \mathbf{M}_3 の大きい3個の固有値 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ と対応する単位固有ベクトルの正規直交系 $\{\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3\}$ を計算する。
4. $n \times n$ 射影行列 \mathbf{P}_{n-3} を次のように計算する。

$$\mathbf{P}_{n-3} = \mathbf{I} - \sum_{i=1}^3 \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^\top \quad (7)$$

5. 全軌跡ベクトル \mathbf{p}_α のうち

$$\|\mathbf{P}_{n-3}(\mathbf{p}_\alpha - \mathbf{q}_C)\|^2 < (n-3)\sigma^2 \quad (8)$$

となるものの個数を S とする。

6. 以上の処理を反復し、 S を最大とする射影行列 \mathbf{P}_{n-3} を求める¹。
7. 次式を満たすベクトル \mathbf{p}_α をアウトライアとして除去する。

$$\|\mathbf{P}_{n-3}(\mathbf{p}_\alpha - \mathbf{q}_C)\|^2 \geq \sigma^2 \chi_{n-3,99}^2 \quad (9)$$

ただし $\chi_{r,a}^2$ は自由度 r の χ^2 分布の $a\%$ 点である。

3.3 幾何学的・統計的解釈

式 (8) 中の $\|\mathbf{P}_{n-3}(\mathbf{p}_\alpha - \mathbf{q}_C)\|^2$ は点 \mathbf{p}_α から当てはめた3次元アフィン空間までの距離の2乗である。特徴点の各座標に独立に期待値0、標準偏差 σ の正規分布に従う誤差が入るとすれば、これは3次元アフィン空間に直交する $n-3$ 個の誤差成分の2乗和であり、これを σ^2 で割ったものは自由度 $n-3$ の χ^2 分布に従う。したがって残差の期待値は $(n-3)\sigma^2$ である。上の手順ではそれ以下の軌跡ベクトルの個数が最大になるように3次元アフィン空間を当てはめ、有意水準1%でインライアと見なされないものを除去している。実験によれば、通常の動画では $\sigma = 0.5$ 程度が適当であることが確認されている [12]。

3.4 アフィン空間の当てはめ

アウトライアを除去した軌跡ベクトル \mathbf{p}_α が N 個あるとし、それに3次元アフィン空間を当てはめる。まず重心

$$\mathbf{p}_C = \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N \mathbf{p}_\alpha \quad (10)$$

を計算し、 $n \times n$ モーメント行列

$$\mathbf{M} = \sum_{\alpha=1}^N (\mathbf{p}_\alpha - \mathbf{p}_C)(\mathbf{p}_\alpha - \mathbf{p}_C)^\top \quad (11)$$

の大きい3個の固有値に対応する単位固有ベクトルを $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3$ とする。当てはめたアフィン空間は \mathbf{p}_C を始点とする方向ベクトル $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3$ の張る空間である [10]。

4. 追跡誤りフレームの検出

4.1 部分軌跡

アウトライアと判定された軌跡ベクトル \mathbf{p}_α の κ フレーム分の部分軌跡が正しいかどうか判定する。以

¹実験では200回連続して更新がないことを収束条件とした。

下, $k = 2\kappa$ と置く. 信頼性を評価する軌跡データを取り出して, 順番に並べた k 次元ベクトルを $\mathbf{p}_\alpha^{(0)}$ とし, 残りの軌跡から成る $n - k$ 次元ベクトルを $\mathbf{p}_\alpha^{(1)}$ と置く. これに対応してインライアの完全な軌跡ベクトルに当てはめた 3 次元アフィン空間を定義する重心 \mathbf{p}_C と基底ベクトル $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3$ を同様に k 個の成分 $\mathbf{p}_C^{(0)}, \mathbf{u}_1^{(0)}, \mathbf{u}_2^{(0)}, \mathbf{u}_3^{(0)}$ と残りの $n - k$ 個の成分 $\mathbf{p}_C^{(1)}, \mathbf{u}_1^{(1)}, \mathbf{u}_2^{(1)}, \mathbf{u}_3^{(1)}$ に分ける².

4.2 部分軌跡の信頼性評価

軌跡ベクトル \mathbf{p}_α の重心 \mathbf{p}_C からの差は, 誤差がなければ基底ベクトル $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3$ の線形結合で表せるので, 観測される k 個の成分もある係数 c_1, c_2, c_3 によって

$$\mathbf{p}_\alpha^{(0)} - \mathbf{p}_C^{(0)} = c_1 \mathbf{u}_1^{(0)} + c_2 \mathbf{u}_2^{(0)} + c_3 \mathbf{u}_3^{(0)} \quad (12)$$

と表せる. しかし誤差があれば等号は成立しない. $\mathbf{u}_1^{(0)}, \mathbf{u}_2^{(0)}, \mathbf{u}_3^{(0)}$ を列とする $k \times 3$ 行列を $\mathbf{U}^{(0)}$ とすると, 上式より次のように書ける.

$$\mathbf{p}_\alpha^{(0)} - \mathbf{p}_C^{(0)} \approx \mathbf{U}^{(0)} \mathbf{c} \quad (13)$$

ただし \mathbf{c} は c_1, c_2, c_3 を成分とする 3 次元ベクトルである. $k \geq 3$ として最小二乗法で \mathbf{c} を定めると, 解は次のようになる.

$$\hat{\mathbf{c}} = \mathbf{U}^{(0)-} (\mathbf{p}_\alpha^{(0)} - \mathbf{p}_C^{(0)}) \quad (14)$$

ただし $\mathbf{U}^{(0)-}$ は $\mathbf{U}^{(0)}$ の一般逆行列であり, 次のように計算できる.

$$\mathbf{U}^{(0)-} = (\mathbf{U}^{(0)\top} \mathbf{U}^{(0)})^{-1} \mathbf{U}^{(0)\top} \quad (15)$$

式 (14) を代入した $\|\mathbf{p}_\alpha^{(0)} - \mathbf{p}_C^{(0)} - \mathbf{U}^{(0)} \hat{\mathbf{c}}\|^2$ は k 次元空間の点 $\mathbf{p}_\alpha^{(0)}$ から $\mathbf{p}_C^{(0)}$ を始点とする基底ベクトル $\mathbf{u}_1^{(0)}, \mathbf{u}_2^{(0)}, \mathbf{u}_3^{(0)}$ の張る 3 次元空間までの距離の 2 乗である. 特徴点の各座標に独立に期待値 0, 標準偏差 σ の正規分布に従う誤差が入るとすれば, これを σ^2 で割ったものはこの 3 次元空間に直交する $k - 3$ 個の誤差成分の 2 乗和であるから自由度 $k - 3$ の χ^2 分布に従う, そこで部分軌跡の信頼性判定は次の有意水準 1% の χ^2 検定によって行う.

$$\|\mathbf{p}_\alpha^{(0)} - \mathbf{p}_C^{(0)} - \mathbf{U}^{(0)} \hat{\mathbf{c}}\|^2 \geq \sigma^2 \chi_{k-3, 99}^2 \quad (16)$$

²これらは説明上の便宜であり, 実際の計算では値が観測される成分に対する対角要素が 1, それ以外が 0 の対角行列を掛けて, n 次元ベクトルのままで計算している.

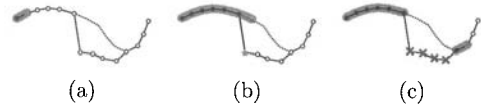


図 2: 追跡誤りフレームの検出, 実線: 信頼性を判定する部分軌跡, 破線: 実際に追跡した軌跡, 点線: 正しい追跡をした場合の真の軌跡, (a) 第 1 フレームと第 2 フレームの特徴点データから成る部分軌跡の信頼性判定 (●印は正しい追跡であることが確定した特徴点, ★印は誤追を判定する特徴点, 網掛け領域は部分軌跡に対応するインライアのアフィン空間), (b), (c) 正しい追跡と確定した特徴点のみから成る部分軌跡による信頼性の判定 (×印は誤追跡であると確定した特徴点).

4.3 追跡誤りフレームの検出

部分軌跡の中に追跡を誤ったものが含まれていればアフィン空間への当てはめ誤差が大きくなり, 式 (16) の χ^2 検定によってそれを検出できる. 第 1 フレームの特徴点データを基準として第 2 フレームの特徴点データを追加した部分軌跡の信頼性を判定する (図 2(a)). 信頼性があると判定された場合は次のフレームの特徴点データを部分軌跡に追加して同様に信頼性を判定する. これを部分軌跡の信頼性がないと判定されるまで繰り返す (図 2(b)). これにより, 追跡を誤り始めるフレームを検出することができる. さらに信頼性がないと判定されたフレームの追跡データを部分軌跡から除去し, 信頼性のあるデータのみから成る部分軌跡に対して新たなデータを追加しては信頼性を判定することを繰り返すことで, すべてのフレームで誤追跡を判定することができる (図 2(c)).

第 1 フレームで抽出した特徴点の追跡に失敗したフレームを検出するアルゴリズムを以下に示す.

アフィン空間の当てはめ

1. 特徴点の軌跡データ $\mathbf{p}_\alpha, \alpha = 1, \dots, N$ に対してアウトライア判定を行い, アウトライアを検出する.
2. インライアの軌跡に 3 次元アフィン空間を当てはめる. 式 (10), (11) により計算したモーメント行列 \mathbf{M} の大きい 3 個の固有値に対する単位固有ベクトルの正規直交系 $\{\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3\}$ を計算する.

追跡誤りの検出

アウトライアと判定された軌跡 \mathbf{p}_α に対して以下の処理を行う.

1. 第 1 フレームの特徴点データを要素とする部分軌跡 $\mathbf{p}_\alpha^{(0)}$ を用意し, 部分軌跡の長さ $k = 2$, フレーム番号 $\kappa = 2$ と初期化する.

2. 部分軌跡 $p_{\alpha}^{(0)}$ に第 κ フレーム目の特徴点データを追加し, $k \leftarrow k+2$ とする.
3. 式 (16) を用いて信頼性の判定を行い, 第 κ フレームがアウトライアと判定された場合, 部分軌跡から第 κ フレームの特徴点データを除去し, $k \leftarrow k-2$ とする.
4. $\kappa \leftarrow \kappa+1$ とし, ステップ 2 へ戻る. これをすべてのフレームを調べつくすまで繰り返す.

式 (16) の右辺は部分軌跡の長さが 4 以上, すなわち 2 フレーム以上の追跡データがあれば計算できる. 従って理論的には第 1 フレームの特徴点データと信頼性を判定したいフレームの特徴点データだけから成る部分軌跡を用いてアフィン空間への当てはまり具合を判定することができる. しかし, 部分軌跡の長さが極端に短いと誤った特徴点を追跡しているにもかかわらず, 当てはめたアフィン空間との誤差が非常に小さくなってしまふ場合がある. 上記のように信頼性があると判定された特徴点データを積み重ねた部分軌跡を用いることによりこのような誤りを低減することが期待できる.

5. 特徴点を長く追跡したフレームの検出

実際に特徴点追跡を行うと数フレームで追跡が失敗し, それ以降別の特徴点を追跡し始めることがよく起こる. 場合によってはこの途中から追跡し始めた特徴点追跡の方が正しく, より長いフレームで追跡が行われることがある. 短い部分軌跡から未知の部分を推定するとその推定精度は低くなり, その推定結果を再利用する応用に悪影響を及ぼしてしまう.

そこで, RANSAC [1, 2] の原理を利用して, アウトライアの軌跡から同一の特徴点を長く追跡したフレームを検出する. これは第 1 フレームの特徴点データの代わりにランダムに選択したフレームの特徴点データを基準として, すべてのフレームの信頼性を判定し, 得られる部分軌跡の長さが最大となるものを求めるものである. 以下にアルゴリズムを示す.

1. ランダムに 1 フレームを選択する. そして, そのフレームの特徴点データを要素とする部分軌跡 $p_{\alpha}^{(0)}$ を用意し, 部分軌跡の長さ $k=2$, フレーム番号 $\kappa=1$ と初期化する.
2. 部分軌跡 $p_{\alpha}^{(0)}$ に第 κ フレーム目の特徴点データを追加し, $k \leftarrow k+2$ とする. ただし, κ が最初に選択したフレームである場合は $\kappa \leftarrow \kappa+1$ と

し, ステップ 2 へ戻る.

3. 式 (16) を用いて信頼性の判定を行い, 第 κ フレームがアウトライアと判定された場合, 部分軌跡から第 κ フレームの特徴点データを除去し, $k \leftarrow k-2$ とする.
4. $\kappa \leftarrow \kappa+1$ とし, ステップ 2 へ戻る. これをすべてのフレームを調べつくすまで繰り返す.
5. 以上の処理を反復し, k を最大とする部分軌跡 $p_{\alpha}^{(0)}$ を求める³.

6. 実ビデオ画像実験

実ビデオ画像を用いて特徴点の追跡誤りフレームを検出する実験を行った. 図 3(a)–(c) はカメラを移動しながら静止シーンを 100 フレームに渡って撮影したビデオ画像 (320 × 240 画素) から 3 フレームを抜き出したものである. 初期フレームから 200 個の特徴点を抽出し, KLT 法で追跡した. このうち最終フレームまで追跡できた特徴点は 121 個であり, そのうち 115 個がインライア, 6 個がアウトライアと判定された. これらを図 3(a)–(c) の画像中にインライアを □印, アウトライアを ×印で示す.

図 3(d)–(f) は 6 個のアウトライアのうちの 3 個について第 1 フレームで抽出した特徴点の追跡を誤ったフレームを検出した結果である. グラフの横軸はフレーム番号, 実線は式 (16) の左辺で計算される当てはめたアフィン空間と部分軌跡との距離 (の 2 乗) を表している. 点線は式 (16) の右辺で計算される信頼性判定のしきい値である. 検出結果をわかりやすくするために, 第 1 フレームで抽出した特徴点を正しく追跡していると判定したフレームに棒グラフを示している. 実験ではフレーム検出のためのノイズレベル σ を 0.3 とした. 検出結果を目視で判定したところ, すべてのアウトライアについて特徴点追跡を誤り始めるフレームを正しく検出できていることを確認した. また, 特徴点番号 2 では, 途中から正しい追跡に戻っていることも検出できている.

図 3(g)–(i) は 5 節に示したアルゴリズムによってアウトライア軌跡から同一の特徴点を長く追跡したフレームを検出した結果である. 図 3(g) では検出もれが若干あるが検出したフレームでは同一の特徴点を正しく追跡していることを確認した. 図 3(h) では第 3 フレームから第 61 フレームまで第 1 フレームで抽出した特徴点と別の特徴点を追跡していることがわかる. また, 図 3(i) では図 3(f) と同じ結果が得

³実験では 5 回連続して更新がないことを収束条件とした.

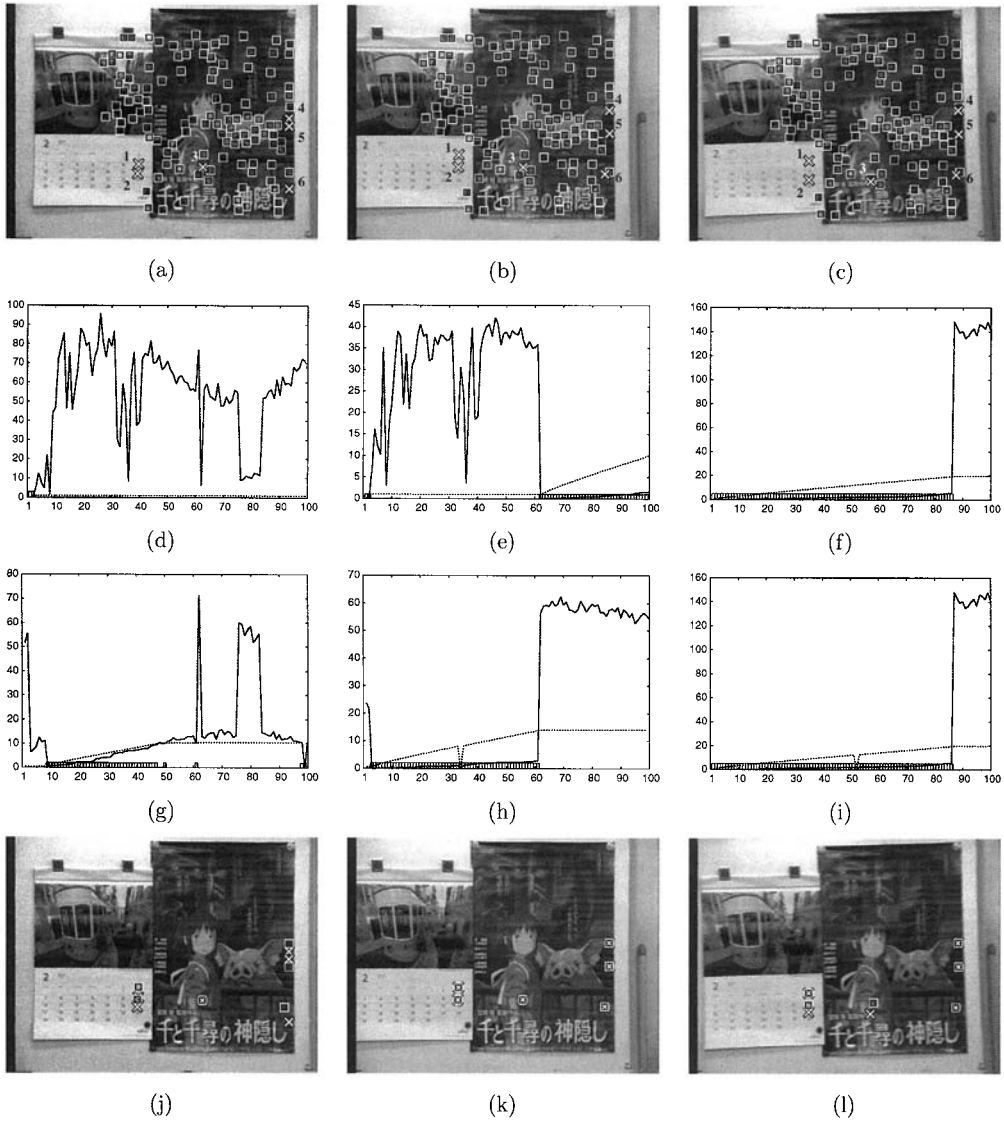


図 3: (a), (b), (c) 追跡した全特徴点 (第 1, 50, 100 フレーム), □印はインライア, ×印はアウトライアと判定された特徴点, (d), (e), (f) 第 1 フレームで抽出した特徴点の追跡を誤ったフレームの検出結果 (特徴点番号 1, 2, 3), 実線: 当てはめたアフィン空間との距離 (の 2 乗), 点線: しきい値, 棒グラフ: 正しい追跡と判定したフレーム, (g), (h), (i) 同一特徴点を長く追跡したフレームの検出結果 (特徴点番号 1, 2, 3), (j), (k), (l) 特徴点位置の修正結果, □印は部分軌跡から推定した特徴点位置, ×印は追跡した元の特徴点位置.

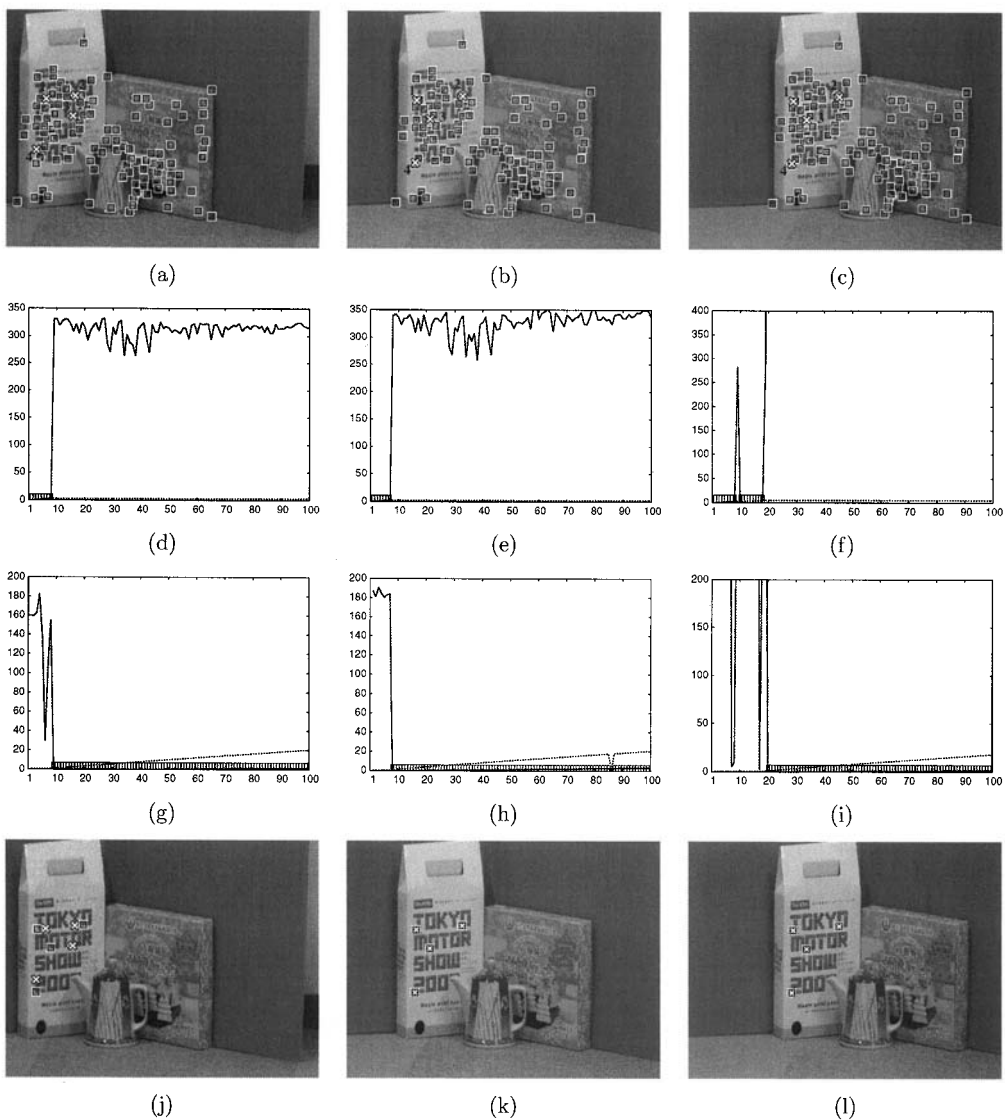


図 4: (a), (b), (c) 追跡した全特徴点 (第 1, 50, 100 フレーム), □印はインライア, ×印はアウトライアと判定された特徴点, (d), (e), (f) 第 1 フレームで抽出した特徴点の追跡を誤ったフレームの検出結果 (特徴点番号 1, 2, 3), 実線: 当てはめたアフィン空間との距離 (の 2 乗), 点線: しきい値, 棒グラフ: 正しい追跡と判定したフレーム, (g), (h), (i) 同一特徴点を長く追跡したフレームの検出結果 (特徴点番号 1, 2, 3), (j), (k), (l) 特徴点位置の修正結果, □印は部分軌跡から推定した特徴点位置, ×印は追跡した元の特徴点位置.

られている。図3(j)-(l)は図3(g)-(i)で検出した部分軌跡の未知の部分を実内ら [17] の方法で推定した結果である。すべてのフレームで正しい特徴点位置が得られていることがわかる。

また、図3(d)-(f)の誤りフレームの検出には一つのアウトライアに対して約20秒、図3(g)-(i)の同一の特徴点を長く追跡したフレームの検出には約120秒かかった。ただし、CPUにはIntel Core2Duo E6700 2.66 GHz、主メモリ4Gb、OSにはLinuxを用いた。

図4は別のビデオ画像(720×540画素)に対する結果である。初期フレームから200個の特徴点を抽出し、KLT法で追跡した。このうち最終フレームまで追跡できた特徴点は111個であり、そのうち4個がアウトライアと判定された。図4にはこのうち3個のアウトライアに対する結果のみを示しているが、検出したすべてのアウトライアに対して正しい検出結果が得られている。

7. まとめ

本論文では、3次元形状復元や運動物体の分離を目的とし、アウトライアと判定された特徴点追跡から追跡を誤ったフレームを検出する手法を提案した⁴。これはアフィンカメラのもとでは特徴点の軌跡を表すベクトルがあるアフィン空間に含まれるという拘束条件を用いて、誤差の統計モデルに基づいて部分軌跡の信頼性を判定することで追跡を誤ったフレームを検出するものである。実ビデオ画像を用いた実験により、第1フレームで抽出した特徴点の追跡に失敗したフレームの検出に提案手法が有効であることがわかった。また提案手法を利用して、複数の特徴点を追跡している軌跡から同一特徴点を長く追跡しているフレームを検出できることを確認した。

謝辞: 本研究の一部は文部科学省科学研究費若手B(No. 18700181)の助成による。岡山大学の金谷教授には有益なアドバイスを頂きましたことに感謝します。

参考文献

- [1] M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Comm. ACM*, **24-6**, pp. 381-395, June 1981.
- [2] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2000.

⁴以下にプログラムを公開している。

<http://www.iim.ics.tut.ac.jp/sugaya/public.php>

- [3] D. Q. Huynh and A. Heyden, "Outlier detection in video sequences under affine projection," *Proc. of CVPR*, pp. 695-701, Dec. 2001.
- [4] 市村直幸, "自己組織化型状態空間モデルを用いた運動軌跡のフィルタリング," 情報処理学会研究報告, 2001-CVIM-128-2, pp. 9-16, July 2001.
- [5] 市村直幸, "フレーム毎の特徴点抽出に基づく特徴点の追跡," 情報処理学会研究報告, 2001-CVIM-130-5, pp. 31-38, Nov. 2001.
- [6] 市村直幸, 生駒哲一, "非ガウス型状態空間モデルを用いた特徴点位置系列のフィルタリング," 情報処理学会研究報告, 2000-CVIM-122-3, pp. 17-24, May 2000.
- [7] 上島重治, 斎藤英雄, "射影幾何学に基づく計測行列補間を用いた因子分解法," 情報処理学会研究報告, 2002-CVIM-135-15, pp. 95-102, Nov. 2002.
- [8] 金出武雄, コンラッド・ポールマン, 森田俊彦, "因子分解法による物体形状とカメラ運動の復元," 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J76-D-II-8**, pp. 1497-1505, Aug. 1993.
- [9] 黒澤典義, 金谷健一, "部分空間分離法とモデル選択による運動物体の分離," 情報処理学会研究報告, 2000-CVIM-124-4, pp. 25-32, Nov. 2000.
- [10] 黒澤典義, 金谷健一, "アフィン空間分離法による運動物体の分離," 情報処理学会研究報告, 2001-CVIM-125-3, pp. 25-32, Jan. 2001.
- [11] P. J. Rousseeuw and A. M. Leroy, *Robust Regression and Outlier Detection*, Wiley, New York, 1987.
- [12] 菅谷保之, 金谷健一, "部分空間分離法による特徴点追跡のアウトライア除去," 情報処理学会研究報告, 2002-CVIM-133-24, pp. 177-184, May 2002.
- [13] 菅谷保之, 金谷健一, "運動物体分離のためのカメラモデルの自動選択," 情報処理学会研究報告, 2002-CVIM-134-2, pp. 9-16, Sept. 2002.
- [14] 菅谷保之, 金谷健一, "複数運動分離の教師なし学習による多段階最適化," 情報処理学会研究報告, 2003-CVIM-138-25, pp. 185-192, May 2003.
- [15] C. Tomasi and T. Kanade, "Shape and motion from image streams under orthography—A factorization method," *Int. J. Comput. Vision*, **9-2**, pp. 137-154, Nov. 1992.
- [16] C. Tomasi and T. Kanade, "Detection and Tracking of Point Features," CMU Tech. Rep. CMU-CS-91-132, Apr. 1991;
<http://vision.stanford.edu/~birch/klt/>.
- [17] 坪内貴之, 菅谷保之, 金谷健一, "3次元アフィン復元のための途切れた特徴点追跡の延長," 情報処理学会研究報告, 2003-CVIM-137-17, pp. 133-140, May 2003.