

## 平面上の不変なテンプレートによるワイドベースラインマッチング

上村幸喜 金澤 靖

豊橋技術科学大学 知識情報工学系

シーン内の平面におけるアフィン不変な記述子を用いた画像間の対応づけ法を提案する。本研究では、平面上の特徴点間の濃淡変化に対する不変性と、検出した特徴点に関する検出位置の精度の共分散行列を組み合わせたアフィン不変な記述子ベクトルを用いる。そして、それらの類似度を投票し、その得点の高いものを選ぶことにより、対応を決定する。ステレオの基線長が短い場合であれば、RANSAC等の誤対応除去をしなくても、ほぼ正対応のみを検出できるだけでなく、画像が回転していたり、カメラ間の基線長が長い場合においても、多くの正しい対応を得ることができる。提案法の有効性を実画像実験により示す。

## Wide Baseline Matching using Affine Invariant Descriptors for Planes

Koki Uemura Yasushi Kanazawa

Department of Knowledge-based Information Engineering  
Toyohashi University of Technology, Toyohashi, Aichi 441-8580 Japan

We propose an image matching method using an affine invariant descriptor for planes in a scene. In this paper, we use three affine invariant vectors for planes: a profile vector, a normalized standard region vector, and a normalized triangle region vector. Each vector is defined by the profile between two interest points, the covariance matrix of the interest point, and the inside of the triangle defined by the three interest points. We define the affine invariant descriptor combined with the first two vectors. Using the affine invariant descriptor and the normalized triangle region vector, we vote the similarities of them into each candidate correspondences. After enforcing the uniqueness of matching, we adopt RANSAC for removing outliers. By using our method, we can obtain many correct corresponding pairs on wide baseline matching problems. We show the effectiveness of our method by real image examples.

### 1. はじめに

画像間の対応を決定することは、多くのコンピュータビジョンのアプリケーションにおける最初のステップであり、従来より数多くの様々な手法が提案されている [8, 10, 11, 14, 17, 18, 19].

対応づけは、大きく分けると特徴点ベースのもの、線分ベースのもの、領域ベースのもの3つに分けられ、特徴点ベースのものは Harris オペレータ [3] や SUSAN [16] などを用いて特徴点を抽出した後、対応づけを行なっている [8, 19]. この特徴点を用いる方法は、多くの場合、特徴点の近傍の相関を元にしてマッチングを行なうため、視点の大きな移動に弱い。また線分ベースの方法は、同様に特徴点を抽出した後、その特徴点間のアフィン不変性を

用いてマッチングを行なっている [2, 17]. 領域ベースのものは、多くの場合平面に関するアフィン不変量を用いている [11, 13, 14, 18]. 線分ベースおよび領域ベースの対応づけ法は、それぞれアフィン不変量を用いているため、視点移動の大きな場合においても対応が決定できる。しかし、領域抽出に特別な処理を必要としたり、十分な数の領域を検出することが難しい。一方、線分ベースの場合、対応候補が多くなる傾向にあるため、対応づけのコストが問題となる。また、特徴点の廻りの濃淡変化のヘッセ行列を用いたアフィン不変記述子も提案されている [12, 13]. これは、その方向を決定するために画素値の勾配を用いているため、その平面上のテクスチャに大きく依存する。

Lowe [10] は SIFT オペレータと呼ぶスケール不変な特徴抽出法と、それに基づく不変記述子を用いた対応づけ法を提案している。これはステレオ画像

†441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1  
Tel: (0532)44-6888, Fax: (0532)44-6873  
E-mail: ayato55@img.tutkie.tut.ac.jp,  
kanazawa@tutkie.tut.ac.jp

だけでなく、動画にも適用でき、一般のステレオ画像においてはアウトライア除去がほとんど不要なほど精度が高い。しかし、シーン内に周期的な繰り返しパターンを持つ場合、対応づけに失敗することもある。

本論文では、特徴点間の線分上の濃淡変化と両端点の領域の不変性を組合せて、アフィン不変な記述子を定義し、それに基づくテンプレートマッチングによる対応づけ法を提案する。まず特徴抽出オペレータで特徴点を抽出し、各特徴点に対し、共分散行列を計算する。そして特徴点間を結ぶベクトルと両端点の共分散行列を用いて、方向および大きさを正規化したアフィン不変記述子(テンプレート)を定義する。画像間において、このアフィン不変記述子の類似度を計算し、候補特徴点対にその類似度を投票する。更に、3特徴点から成る三角形領域内の類似度も投票することにより、得票の最も多い対応を正しい対応とみなす。最後にRANSACにより、エッジ線拘束条件を満足していない誤対応を除去する。この提案法を用いれば、カメラ間の基線長が短い場合、ほぼ正対応のみを検出できる。加えて、画像が回転している場合やカメラ間の基線長が長い場合においても、正確な対応づけが可能となる。提案法の有効性を実画像実験により示す。

## 2. 特徴点の共分散行列を用いたアフィン不変量

一般に画像内の特徴点は、その周辺画素との濃淡変化が大きな画素として定義でき [3, 9]、その特徴点位置の不確定性は、特徴点の真の位置を  $(\bar{x}, \bar{y})$ 、観測位置を  $(x, y)$  とし、誤差を  $\Delta x = x - \bar{x}$ 、 $\Delta y = y - \bar{y}$  とすれば、次のような共分散行列  $\Sigma$  で与えられる。

$$\Sigma = \sigma^2 \Sigma^0 = \begin{pmatrix} E[\Delta x^2] & E[\Delta x \Delta y] \\ E[\Delta y \Delta x] & E[\Delta y^2] \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $E[\cdot]$  は期待値を表す。また、 $\sigma$  はノイズレベルと呼ぶ誤差の絶対的な大きさを表す定数とする。 $\Sigma^0$  は正規化共分散行列と呼ぶ誤差の相対的な大きさと方向依存性を表す行列である [5]。この正規化共分散行列  $\Sigma^0$  は以下のように計算できる [7]。

着目する特徴点  $p$  を中心とする一定の大きさの正方形格子を  $\mathcal{N}_p$  とする。 $(i, j)$  画素の濃淡値を  $I(i, j)$  とし、点  $p$  の近傍の(自己)残差を次のように定義する。

$$J(x, y) = \frac{1}{2} \sum_{(i, j) \in \mathcal{N}_p} w_{ij} \left( I(i+x, j+y) - I(i, j) \right)^2 \quad (2)$$

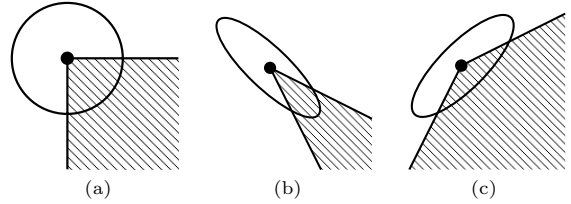


図 1: 特徴点の共分散行列

ここで、 $x, y$  は実数であり、 $w_{ij}$  は適当な(例えばガウス型)重みである。これは  $x = y = 0$  で最小値をとる非負の関数であるから、原点  $(0, 0)$  の適当な近傍  $\mathcal{X}$  で次の形の 2 次関数で近似できる。

$$\begin{aligned} g(x, y) &= \frac{1}{2} (n_1 x^2 + 2n_2 xy + n_3 y^2) \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x & y \end{pmatrix} H_e \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $2 \times 2$  行列  $H_e$  はヘッセ行列と呼ばれ、

$$H_e = \begin{pmatrix} n_1 & n_2 \\ n_2 & n_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

である。行列  $H_e$  の要素  $n_1, n_2, n_3$  は最小二乗法によって

$$\iint_{\mathcal{X}} w(x, y) \left( J(x, y) - g(x, y) \right)^2 dx dy \rightarrow \min \quad (5)$$

となるように定める [7]。ここでは、重み関数  $w(x, y)$  として、ガウス型重み  $w(x, y) = \exp(-(x^2 + y^2)/\sigma^2)$  を用いる。

この最小化 (5) の解  $(n_1, n_2, n_3)$  から、式 (4) のヘッセ行列  $H_e$  が定まる。そして、正規化共分散行列は次式で与えられる [7]。

$$\Sigma^0 = H_e^{-1} \quad (6)$$

このようにして得られた特徴点の共分散行列の傾向は標準領域 [5] を用いて図示することができる。図 1 は、特徴点 (●) を物体 (斜線部) のコーナーに設定した場合の標準領域を示す。

図 1 において、これらの図は同じ平面 (斜線部) を異なる視点から見た場合とも見なせる。そこで、計算した共分散行列を用い、式 (3) の関数  $g(x, y)$  に対する適当なスケール変換および回転を適用することにより、その標準領域を円に正規化すれば、その標準領域内のテクスチャも平面に関するアフィン不変量となる [12, 13]。この時、回転をどのように正規化するかが問題となる。一般には勾配方向が用いられるが [12, 13]、勾配を用いた場合、平面上のテクスチャに大きく依存してしまう。

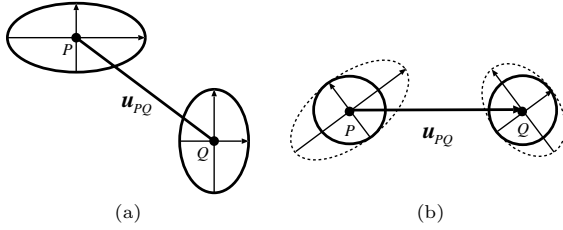


図 2: (a) 標準領域 . (b) 正規化標準領域 (実線)

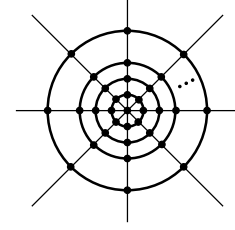


図 3: 正規化標準領域ベクトル: ●がサンプリングする点を表す .

### 3. 平面上の線分に関するアフィン不変量

シーン内に平面が存在する場合,異なる位置のカメラで観測された平面の像の間の関係は,射影変換で表される [4].もし2台のカメラがアフィンカメラである場合,射影変換の部分群である6自由度のアフィン変換となる [4].アフィン変換においては,長さの比は不変量となる .

今,シーン内のテクスチャを持つ平面に対し,異なる位置から2台のアフィンカメラで撮影した像を考える.このとき,平面上の2点間の線分の像の濃淡変化は,撮影時の照明の影響を無視すれば,アフィン不変量となる [2, 17].また平面上の3角形の部分画像も同様にアフィン不変量となる [14].

実際の透視投影カメラにおいては,これらは不変量ではなくなるが,平面がカメラに対して大きく傾いていなければ,これらはほぼ不変であると考えてよい [14].

### 4. アフィン不変記述子によるマッチング

本論文では,前述の二つのアフィン不変記述子を組み合わせた新たなアフィン記述子を定義する .

以下,まず,線分に関する不変量を表すプロファイルベクトルと,特徴点を含む領域の不変量を表す正規化標準領域ベクトルの二つを定義し,これらを組合せた三つ組ベクトル記述子を定義する.加えて,それらの対応関係をチェックするための不変記述子である正規化三角形領域ベクトルを定義する .

#### 4.1 プロファイルベクトル

画像内に2つの特徴点  $P(x, y)$  と  $Q(x', y')$  があるとき,それらを結ぶ線分間のプロファイルベクトル  $p_{PQ}$  を次のように定義する .

$$p_{PQ} = (\tilde{I}(x_0, y_0), \tilde{I}(x_1, y_1), \dots, \tilde{I}(x_N, y_N))^T \quad (7)$$

ここで,  $(x_i, y_i)$  は線分  $PQ$  を  $N$  等分したときの各点  $P_i$  の座標を表し,  $P_0=P, P_N=Q$  とする.また  $\tilde{I}(x_i, y_i)$  は,点  $P_i$  におけるガウス平滑化後の画素

値,すなわち

$$\tilde{I}(x_i, y_i) = \sum_{(k,l) \in \mathcal{N}_{P_i}} \frac{\exp(-\frac{k^2+l^2}{2\sigma^2})}{2\pi\sigma^2} I(x+k, y+l) \quad (8)$$

で計算する.ただし,  $I(x, y)$  は点  $(x, y)$  における画素値とする .

実際には,特徴点間の距離を  $d$  としたとき

$$d_{\min} \leq d \leq d_{\max} \quad (9)$$

の範囲にある特徴点对のみからプロファイルベクトルを生成する.これは,実際のシーンとその画像を考えた場合,あまり遠すぎる特徴点同士や,逆に近すぎる特徴点同士を避けるためである .

#### 4.2 正規化標準領域ベクトル

特徴点  $P, Q$  に対する正規化共分散行列を  $\Sigma_P^0, \Sigma_Q^0$  とする.これらの正規化共分散行列 (以下,単に共分散行列) は,一般に適当な回転およびスケール変換により,  $x, y$  独立かつ等方な行列

$$\Sigma_I^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

に変換できる.しかし,このように円状に正規化した領域は,回転の不定性が残るため,そのままではテンプレートマッチングに利用できない.そこで,点  $P$  から点  $Q$  への方向ベクトル  $u_{PQ}$  を用い,それを基軸として,基軸に対する楕円の主軸の角度を保ったまま,主軸方向のスケールのみ変え,基軸が横軸になるよう領域全体を回転させる (図 2) .

このように正規化された領域から,図 3 のように,半径方向に  $L$ ,角度を  $M$  等分した点  $P'_{(r,\theta)}$  を求める.これらの  $LM$  個の点の画素値を用いて,点  $P$  に関する正規化標準領域ベクトル  $r_P$  を次のように定義する .

$$r_P = \left( \begin{array}{l} \tilde{I}(P'_{(0,0)}), \dots, \tilde{I}(P'_{(Lt,0)}), \\ \tilde{I}(P'_{(0,\phi)}), \dots, \tilde{I}(P'_{(Lt,\phi)}), \\ \dots \\ \tilde{I}(P'_{(0,M\phi)}), \dots, \tilde{I}(P'_{(Lt,M\phi)}) \end{array} \right)^T \quad (11)$$

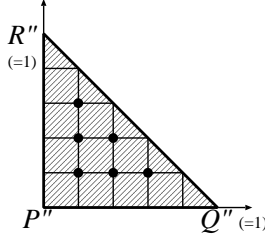


図 4: 三角形領域ベクトル .  $K=3$  の場合 .  $\bullet$  がサンプル点を表す .

ここで ,

$$t = \frac{r}{L}, \quad \phi = \frac{2\pi}{M} \quad (12)$$

とし ,  $r$  は正規化標準領域の半径とする . また  $\tilde{I}(P'_{(s,\theta)})$  は , 正規化後の領域において , 点  $P'_{(r,\theta)}$  の近傍の画素値を用いてガウス平滑化 (8) した後の点  $P'_{(r,\theta)}$  の画素値を表す . 同様に , 点  $Q$  に対する正規化標準領域ベクトル  $r_Q$  も定義する .

実際には , 標準領域の大きさは相対的なものであるため , そのスケールを合わせるために , 片方の画像における標準領域の (長径+短径) の平均を求め , それを元に , 両方の画像の標準領域の実際のスケールを決定する .

#### 4.3 三つ組ベクトル記述子

以上で定義したプロファイルベクトルと正規化標準領域ベクトルは , 共にアフィン不変な濃淡変化の領域であり , それぞれスケールおよび回転に関し , 正規化されている . そこで , これらを  $\{p_{PQ}, r_P, r_Q\}$  のような三つ組として考え , 一つの記述子として用いる . 以下 , これを三つ組ベクトル記述子と呼ぶ .

シーン内の平面に関し , これらの三つ組ベクトル記述子はアフィン不変量であるから , 画像間で独立に求めた三つ組ベクトル記述子と比較し , それらの類似度 , 例えば相関あるいは差の二乗ノルム (SSD に相当) を計算し , その類似度の高い三つ組同士を対応とすることで , 平面を含むシーンの対応づけを行うことができると考えられる .

#### 4.4 正規化三角形領域ベクトル

実際の画像においては , 前述の三つ組ベクトル記述子のみでは誤対応も数多く検出されてしまうため , ここでは , 三つ組ベクトル記述子の類似度の高い 3 組のペアがそれぞれの画像で三角形を構成する場合に , その対応する三角形内の領域についても相関を計算することを考える .

三つ組ベクトル記述子が点  $P, Q, R$  をそれぞれ共有して三角形を成すとき , その三角形を図 4 に示すような等辺の長さが 1 の直角二等辺三角形 ( $P''Q''R''$ )

に正規化し , それぞれの等辺を  $K+2$  等分した場合の内部の点のみを用いた , 次の三角形領域ベクトル  $t_{PQR}$  を考える .

$$t_{PQR} = \begin{pmatrix} \tilde{I}(P''_1) \\ \tilde{I}(P''_2) \\ \vdots \\ \tilde{I}(P''_{K(K+1)/2}) \end{pmatrix} \quad (13)$$

ここで ,  $P''_k$  は正規化された直角三角形内の点を表わし ,

$$P''_k = P''_{K(i-1)+j} = \left( \frac{i}{K}, \frac{j}{K} \right) \quad (14)$$

$$i = 1, \dots, K, \quad j = 1, \dots, K - i + 1 \quad (15)$$

とする . また ,  $\tilde{I}(P''_k)$  は , 画像内の三角形領域を正規化された直角三角形に写像し , そこでガウス関数 (8) で平滑化した  $P''_k$  の画素値を表す .

#### 4.5 マッチングの手順

以上で定義した三つ組ベクトル記述子と正規化三角形領域ベクトルを用いて , 対応を決定する . ここでは , 特徴点の対応表を用意し , これらのベクトルの類似度を計算し , 対応表内の特徴点对に対して , その類似度を投票し , 得票の多い特徴点对を抽出することにより , 対応を決定する . 以下に , そのマッチングの手順を示す .

まず , 2 枚の画像  $I, I'$  において , Harris オペレータ [3] などを用いて , 特徴点抽出を行う . 画像  $I$  における特徴点を  $P_i$  , 画像  $I'$  における特徴点を  $Q_j$  とする .

- (1) 画像  $I$  の特徴点  $P_i$  と画像  $I'$  の特徴点  $Q_j$  の対応表 (2 次元配列) を用意し , 全ての要素を 0 に初期化する .
- (2) 各  $P_i$  および  $Q_j$  に対して , 独立に共分散行列を求め , 画像  $I$  から求めた平均スケールにより , 全共分散行列のスケールを合わせる .
- (3) 各画像において , 距離  $d_{\min}$  以上  $d_{\max}$  以下の特徴点对  $P_\alpha, P_\beta$  を選び , プロファイルベクトル  $p_{P_\alpha P_\beta}$  および正規化標準領域ベクトル  $r_{P_\alpha}, r_{Q_\beta}$  を求め , 特徴点对  $\{P_\alpha, P_\beta\}$  に対し , 三つ組ベクトル記述子を計算する .
- (4) 画像間の三つ組ベクトル記述子との類似度<sup>1</sup>を調べ , しきい値以上の類似度の高いもののみ残り , その類似度に応じた得点を , 対応度表の該当する特徴点に投票する .
- (5) 三角形を構成している三つ組ベクトル記述子の 3 組の対応を選び , それぞれの標準三角形領域ベクトルによる類似度を計算し , その類似度が

<sup>1</sup>実験では SSD を用いた .

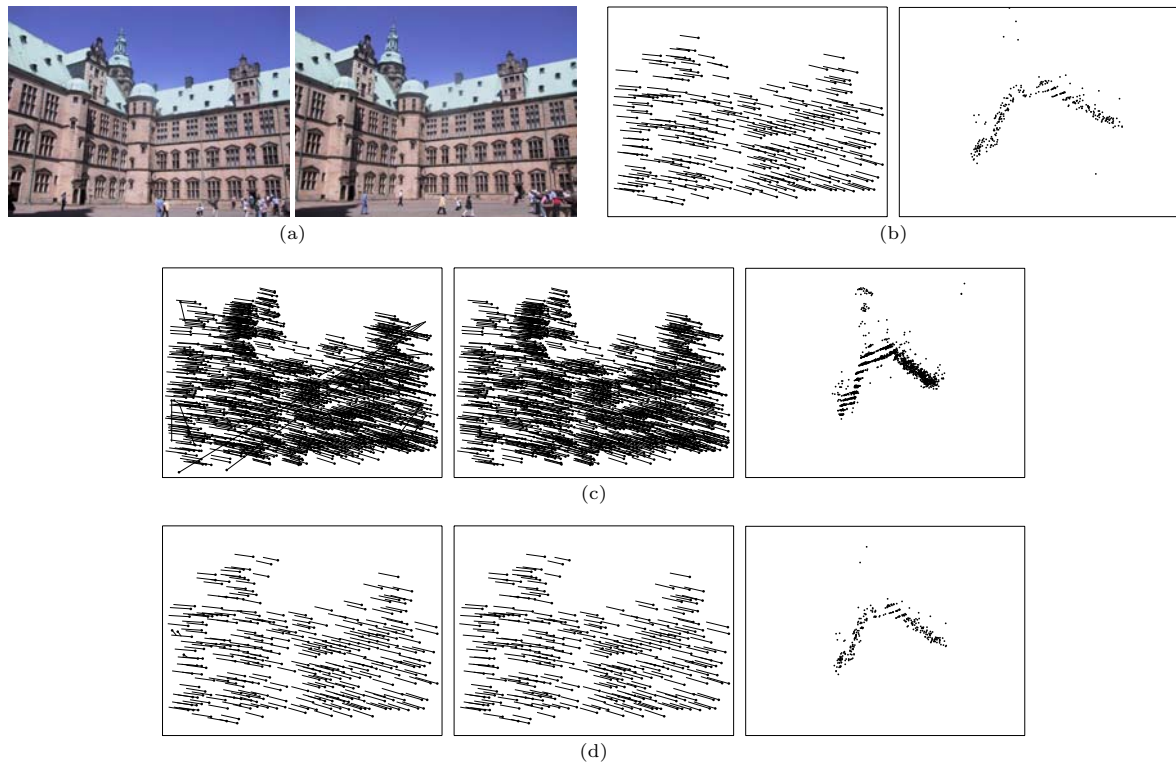


図 5: 建物のシーン . (a) 実画像 . (b) 金澤・金谷の方法による最終対応と 3 次元復元結果 (上から見た図) . (c) Lowe の方法による初期対応と RANSAC 後の対応 , 3 次元復元結果 (上から見た図) . (d) 提案法による初期対応と RANSAC 後の対応 , 3 次元復元結果 (上から見た図) .

あるしきい値を超えた場合 , その三角形を構成する特徴点に , その類似度に応じた得点を対応度表に投票する .

- (6) 対応度表から , 各点  $P_i$  に対し最も高い得点を得た対応  $Q_j$  を見つけ , その得点がしきい値以上である場合 ,  $\{P_i, Q_j\}$  を対応とみなす .
- (7) 得られた対応から , RANSAC を用いて , エピ極線拘束条件を満足する対応のみを選ぶ .

## 5. 実画像実験

提案法の有効性を確認するために , 実画像による実験を行った .

図 5 に観光地における通常のスナップ写真の例を示す . 図 5(a) は原画像 , 図 5(b) は金澤・金谷の方法<sup>2</sup> [8] により得られた対応とそれらを 3 次元復元した形状を示す . 図 5(c) の左の図は Lowe [10] による SIFT オペレータによる特徴点検出と不変記述子に基づく対応づけ<sup>3</sup>の結果であり , 図 5(c) の中央の図は得られた対応から RANSAC によりエピ極線拘束条件を満足するもののみ取り出した結果 , 図 5(c)

の右の図は , RANSAC 後の対応を 3 次元復元した形状を示す . 図 5(d) は提案法による結果であり , 左図は RANSAC 前の対応 , 中央の図は RANSAC 後の最終的な対応 , 右図はそれらを用いて復元した形状を示す .

対応を示す図において , 2 枚の画像を重ね合わせ , 対応する特徴点同士を結んだ線分 (フロー) で対応を表している . フローの両端点のうち , 黒丸 (●) の付いた特徴点が左の画像の特徴点を表す . また , 3 次元復元は , 対応から得られた基礎行列を分解して得られるカメラパラメータを用いた [6] .

提案法および金澤・金谷の方法は特徴点の抽出に Harris オペレータを用いているのに対し , Lowe の方法は SIFT オペレータにより特徴点を抽出しており , 検出された特徴点の個数だけでなく位置も異なっているため , 一概には比較できないが , 見てわかる通り , Lowe の方法は非常に多くの正確な対応を出力できていることがわかる . 一方 , 提案法は , この例においては金澤・金谷の方法とほぼ同等の結果となっていることがわかる .

図 6 はシーン内に繰り返しパターンを多く含む場合であり , Lowe の方法では , タイルの汚れた部分のようなパターンが乱れている箇所の周囲では正しい

<sup>2</sup>次の URL で公開されているプログラムを用いた .  
<http://www.img.tutkie.tut.ac.jp/programs/>

<sup>3</sup>次の URL で公開されているプログラムを用いた .  
<http://www.cs.ubc.ca/~lowe/keypoints/>

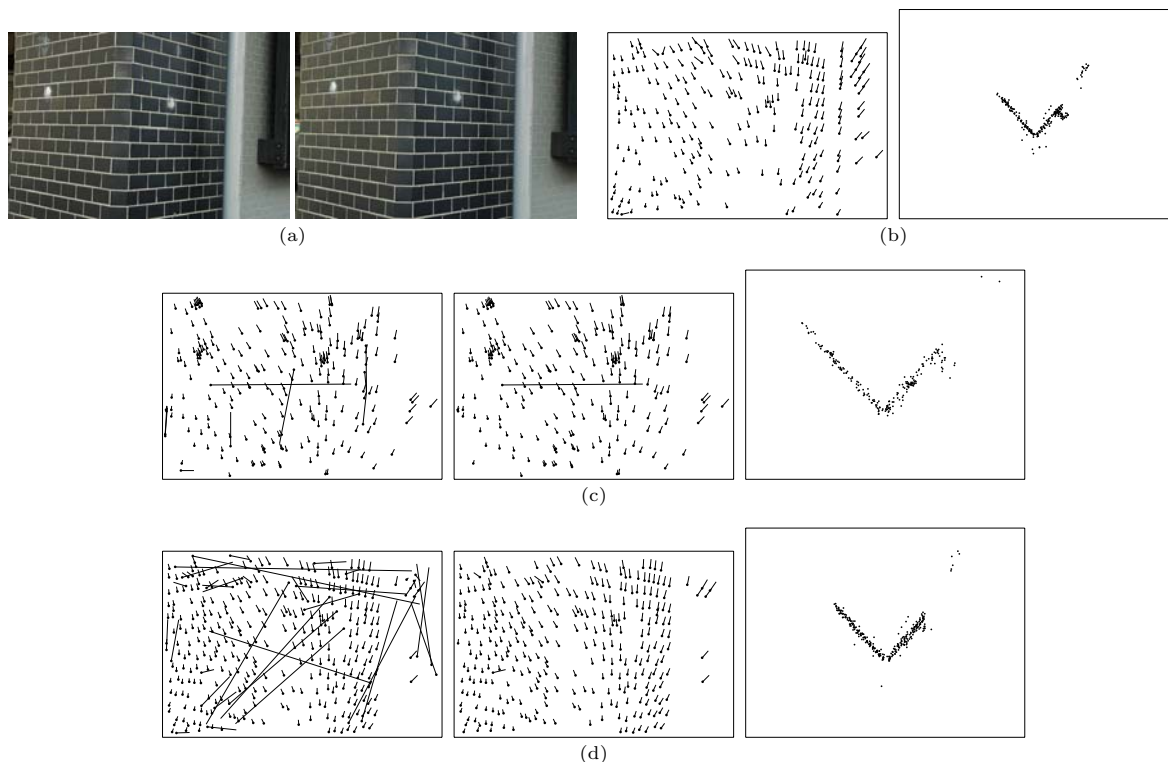


図 6: 繰り返しパターンの多いシーン . (a) 実画像 . (b) 金澤・金谷の方法による最終対応と 3 次元復元結果 (上から見た図) . (c) Lowe の方法による初期対応と RANSAC 後の対応, 3 次元復元結果 (上から見た図) . (d) 提案法による初期対応と RANSAC 後の対応, 3 次元復元結果 (上から見た図) .

対応が検出できているが、それ以外の通常のパターン内ではあまり取れていないことがわかる。これは、このような繰り返しパターンにおいては、SIFT オペレータに基づく不変記述子がほぼ同じとなってしまう、対応が決定できなかったためと考えられる。これに対し、提案法はパターン内においてほぼ一様に正しい対応が取れ、その数も多い。

図 7 はカメラ間の基線長を広くとった場合の建物シーンの例である。図中の×印は、対応や 3 次元復元が得られなかったことを示す。見て分かる通り、金澤・金谷の方法では全く対応を得ることができなかった。この例では、Lowe の方法においても、3 組の対応しか得られなかったために RANSAC を行えなかった。これらに対し、提案法では、一部誤対応があるものの、多くの正しい対応を得ることができているだけでなく、平面部分もきちんと復元できていることがわかる。

図 8 は建物のシーンであるが、片方の画像を大きく回転して撮影した場合を示す。このとき、金澤・金谷の方法は全く対応を得ることが出来なかったのに対し、Lowe の方法および提案法では正しい対応が数多く得られていることがわかる。いずれも復元

形状は横から見た図を示しており、いずれもほぼ正しく復元されていることがわかる。

提案法において、プロファイルベクトルの次元は 10、正規化標準領域の半径は 6 画素、半径の分割数は 3、角度の分割数は 4 を用いた。またプロファイルベクトルを生成する際の特徴点間の距離は 10 以上、60 以下とした。実験は Pentium IV, 3GHz の PC を用い、OS として Fedora Core 4 を用いた。各実験において、得られた対応数と処理時間の比較を表 1 に示す。検出された対応の数が異なるため、一概に処理時間を比較できないが、提案法は比較的高速に処理が可能であることがわかる。

## 6. おわりに

本論文では、線分と領域を組合せた、平面においてアフィン不変な記述子を用いたマッチングによる対応づけ法を提案した。線分としては特徴抽出オペレータで抽出した 2 つの特徴点を結ぶ線分を考慮し、領域としては抽出した特徴点を含む領域を考え、領域内の濃淡変化が不変量となるよう、特徴点の共分散行列と他の特徴点への方向を用いて、正規化を行った。これらを組合せ、更により広い領域での検定を行なうことにより、対応を決定した。実画像を



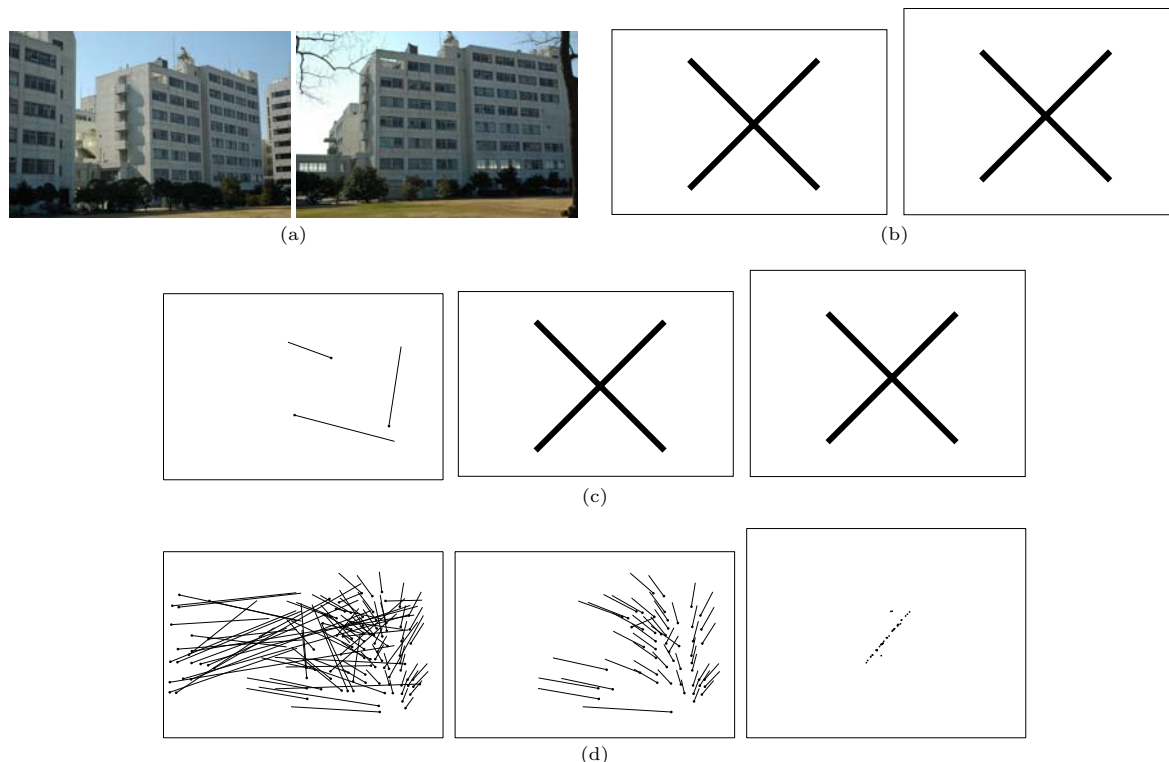


図 7: カメラ間の基線長が長い場合 . (a) 実画像 . (b) 金澤・金谷の方法による最終対応と 3 次元復元結果 . (c) Lowe の方法による初期対応と RANSAC 後の対応 , 3 次元復元結果 . (d) 提案法による初期対応と RANSAC 後の対応 , 3 次元復元結果 (上から見た図) .

用いた実験により , カメラ間の基線長が短い場合 , ほぼ正対応のみを検出できるだけでなく , 画像が大きく回転している場合や基線長が長い場合においても , 正確な対応づけが可能となることを示した .

#### 謝辞

本研究の一部は , 文部科学省 21 世紀 COE プログラム「インテリジェントヒューマンセンシング」によった .

#### 参考文献

- [1] M. A. Fischler, R. C. Bolles, Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Comm. ACM*, **24**-6, 381–395, 1981.
- [2] F. Fraundorfer, H. Bischof, Affine invariant region matching using geometric hashing of line structures, *Proc. 27th Workshop of Austrian Assoc. for Patt. Recog. (ÖAGM/AAPR)*, 2003, Laxenburg, pp. 57–64.
- [3] C. Harris, M. Stephens, A combined corner and edge detector, *Proc. 4th Alvey Vision Conf.*, August 1988, Manchester, pp. 147–151.
- [4] R. Hartley, A. Zisserman, *Multiple View Geometry*, Cambridge University press, 2000.
- [5] K. Kanatani, *Statistical Optimization for Geometric Computation: Theory and Practice*, Elsevier Science, Amsterdam, 1996.
- [6] 金谷健一, 三島 等, “未校正カメラによる 2 画像からの 3 次元復元とその信頼性評価,” 情処学論: CVIM, vol.42, no.SIG 6 (CVIM 2), pp.1–8, June 2001.
- [7] 金澤 靖, 金谷健一, 画像の特徴点に共分散行列は本当に必要か, 信学論 A, vol.J85-A, no.2, pp.231–239, Feb. 2002.
- [8] 金澤 靖, 金谷健一, 大域的な整合性を保証するロバストな画像の対応づけ, 情処学論: コンピュータビジョンとイメージメディア, vol.44, no.Sig 17 (CVIM8), pp.70–77, Dec. 2003.
- [9] 金澤 靖, 金谷健一, コンピュータビジョンのための画像の特徴点の抽出, 信学誌, vol.87, no.12, pp.1043–1048, Dec. 2004.
- [10] D.G. Lowe, Distinctive image features from scale-invariant keypoint, *Int. J. Comput. Vision*, **60**-2, 91–110, 2004.
- [11] J. Matas, O. Chum, M. Urban, and T. Pajdla, Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions, *Proc. 13th British Machine Vision Conf.*, Sept. 2002, Cardiff, U.K., pp.384–393.
- [12] K. Mikolajczyk, C. Schmid, Scale & affine invariant interest point detector, *Int. J. Comput. Vision*, **60**-1, 63–86, 2004.
- [13] K. Mikolajczyk et al., A comparizon of affine region detectors, *Int. J. Comput. Vision*, 2006, online.
- [14] F. Schaffalitzky and A. Zisserman, A viewpoint invariant texture matching and wide baseline

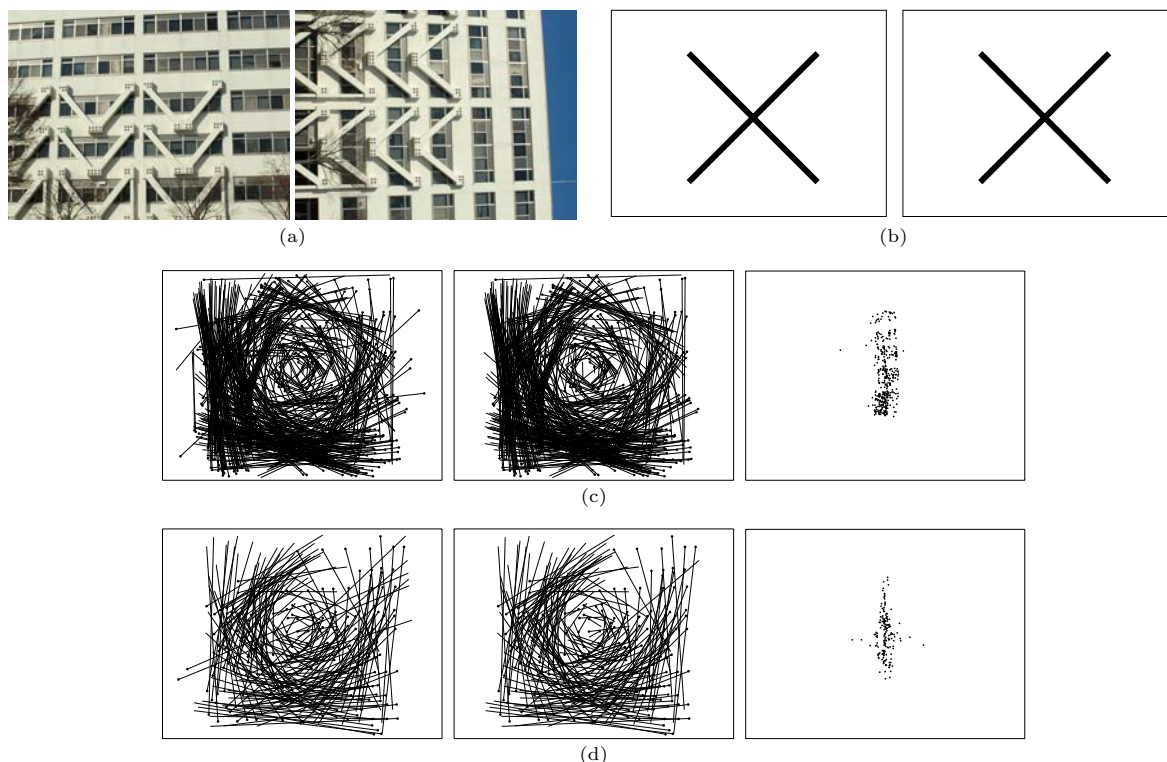


図 8: 画像が回転している場合 . (a) 実画像 . (b) 金澤・金谷の方法による最終対応と 3 次元復元結果 (上から見た図) . (c) Lowe の方法による初期対応と RANSAC 後の対応, 3 次元復元結果 (横から見た図) . (d) 提案法による初期対応と RANSAC 後の対応, 3 次元復元結果 (横から見た図) .

表 1: 各実験で得られた対応の数と処理時間

	金澤・金谷の方法		Lowe の方法		提案法	
	対応数	時間 (sec)	対応数	時間 (sec)	対応数	時間 (sec)
実験 1	308	22.65	1448	39.61	308	17.62
実験 2	235	22.78	218	20.32	304	23.27
実験 3	—	—	—	—	54	16.14
実験 4	—	—	470	43.06	200	18.39

stereo, *Proc. 8th Int. Conf. Comput. Vision*, July 2001, Vancouver, Canada, pp.636–643.

- [15] F. Schaffalitzky and A. Zisserman, Multi-view matching for unordered image sets, or “how do I organize my holiday snap?,” *Proc. 7th. European Conf. Comput. Vision*, May 2002, Copenhagen, Denmark, pp.414–431.
- [16] S.M. Smith and J.M. Brady, SUSAN — A new approach to low level image processing, *Int. J. Comput. Vision*, **23**-1, 45–78, 1997.
- [17] D. Tell and S. Carlsson, Wide baseline point matching using affine invariants computed from intensity profiles, *Proc. 6th. European Conf. Comput. Vision*, June/July 2000, Dublin, Ireland, pp. I-814–I-828.
- [18] T. Tuytelaars and L.V. Gool, Wide baseline stereo matching based on local, affinely invariant re-
- gions, *Proc. 11th British Machine Vision Conf.*, Sep. 2000, Bristol, U.K., pp.412–422.
- [19] Z. Zhang, R. Deriche, O. Faugeras and Q.-T. Luong, A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry, *Artif. Intell.*, vol.78, pp.87–119, 1995.