

陰影変化がある画像間での局所位相を用いた特徴点の対応付け

西野正彬[†] 牧淳人[†] 松山隆司[†]

概要 一定のシーンを撮影した時系列画像において特徴点の対応付けを行う際、光源や対象物体の運動などに伴い画像間で陰影変化が生じている場合には、見え方に基づく対応付けが難しくなる。この問題に対処するため、本論文では、局所的な位相情報を用いた対応付け手法を提案する。局所的な位相情報は、画像と Gabor フィルタとの畳み込みによって得ることができる。得られた局所位相に対し、位相シフトと空間シフトの関係を利用して対応付けを行う。また、対応付けの際に複数のフィルタの出力を選択的に利用することにより、位相情報が不安定になる場合の影響を軽減することを試みる。陰影変化に対する位相の振る舞いについて、特徴点近傍の領域に適当な形状モデルを定めて考察し、一定の条件下での安定性を理論的に確認した。また、実際に陰影変化がある実画像を対象として、提案手法による特徴点の対応付けを行い、その性能を評価した。

Phase-Based Feature Matching under Illumination Difference

MASAAKI NISHINO,[†] ATSUTO MAKI[†] and TAKASHI MATSUYAMA[†]

Abstract The problem of matching feature points in multiple images is difficult to solve when their appearance changes due to illumination variance, either by lighting or object motion. In this paper we tackle this ill-posed problem by using the difference of local phase which is known to be stable to some extent even under illumination difference. In order to obtain a precise matching, we basically compute the local phase by convolutions with Gabor filters which we design in multi scales. We evaluate the stability of local phase against lighting changes using a model of 1D signal. We examine the relevancy of the theoretical investigation in experiments on real images which have lighting changes.

1. はじめに

1.1 研究の背景

Structure-from-motion の問題や多視点画像からの 3 次元復元の研究では、画像間での対応付けが必要となるが、まず特徴点とよばれる対応のとりやすい点を用いるのが一般的である。多視点画像からの 3 次元形状の復元においては、視点 (カメラ) 間の厳密な位置関係を知るための様々な校正法が知られている。しかし、カメラを適当に移動させながらシーンを撮影した時系列画像を扱う場合、フレーム間の視点移動を知る手がかりとして、画像中に含まれる特徴点の検出と対応付けが不可欠となる。固定されたカメラを用いて姿勢変化する対象物体を撮影する場合の姿勢推定、3 次元復元においても同様である。

画像間の特徴点の対応付けは、(i) 特徴点の検出、(ii) 検出した特徴点の対応付け、(iii) 誤対応の除去という 3 つの手順に分けて考えることができる。

特徴点の検出は、通常、画像に適当なオペレータを

作用させることによって行われる。現在までに様々な特徴点検出オペレータが提案されてきているが¹⁾²⁾、³⁾ 代表的なものとしては、画像の一階微分に基づく Harris の作用素が挙げられる¹⁾⁴⁾。その他の特徴点検出オペレータも、輝度の勾配などの低次の特徴に基づいて特徴点を検出するものが多い。

特徴点の対応付けは、ある画像で検出された特徴点[†]が他の画像でどの特徴点に対応するかを決定する問題として解くことができる。この対応付けは、特徴点周辺の局所領域での輝度分布の比較によって行われるのが通常である。また、時系列画像 I_1, I_2, \dots において、画像間の変化が小さいならば、 k 番目の画像 I_k における、各特徴点周辺の領域の輝度分布を参照して、次の画像 I_{k+1} での対応する特徴点をテンプレートマッチングによる探索で求めることも一般的である。

上記の手順によって一応の特徴点の対応付けが得られる。しかし、すべての特徴点について正しい対応付けが行われる保証はなく、得られた対応付けの中には、様々な要因で誤対応が含まれることも多い。この問題に対しては、あらかじめ多くの特徴点の検出と対応付けを行ったのち、それらの集合としての軌跡の一貫性の解析により外れ値 (outlier) を取り除くことで、信頼性

[†] 京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University

の高い対応付けのみを選択する手法が一般に用いられる。こうした outlier 除去の手法として、RANSAC⁵⁾ が広く用いられている

1.2 研究の目的

前節で従来手法について述べたが、実際に対応付けの対象となる画像には、程度の差はあれ見え方の変化が存在する。特に、撮影対象が姿勢変化する場合には、対象と照明の位置関係が変化し、物体表面の輝度分布に変化が生じる。前節で述べた特徴点の検出および対応付け手法は、点近傍の輝度分布を何らかの形で用いているので、輝度分布が変化するとその影響を受ける。従って、特徴点の位置を定める過程（検出、探索）で検出される点にずれが生じている場合は、RANSACなどで outlier 除去を行っても、残りの対応付けも影響を免れられない。

こうした陰影変化によって引き起される問題に対処するため、本研究では画像の位相情報に着目する。Fleetらによれば、位相は振幅に対して独立であるため、画像中の一様な輝度変化に対して安定であるとされている⁷⁾。位相を用いた研究としては、局所的な位相差によるサブピクセル精度のステレオ視差の検出や⁸⁾⁹⁾、オプティカルフローの計算などが行われている¹⁰⁾。また、特徴点の対応付けに位相を用いた先行研究としては、Carneiroらによるものが挙げられる¹¹⁾。Carneiroらは、特徴点およびその近傍の点での位相情報の類似度を、検出された特徴点の対応付けに用い、その手法の陰影変化に対する有効性を実験で示している。しかし、位相を用いることの有効性に関する理論的な考察はなされていない。

以上をふまえ、本論文では、局所位相を利用した特徴点の対応付け手法について述べる。位相差を利用した特徴点の対応付けの原理に基づき、特に複数のフィルタによる位相を統合する手法を提案する一方、陰影モデルに基づいた位相の性質の解析を行い、局所位相を利用した対応付け手法の有効性について考察する。

1.3 本稿の構成

以下では、まず第2章で位相差を用いた対応付けの概念を1次元信号を対象として説明し、第3章でこれを実際に画像に適用する手法を提案する。第4章では陰影モデルに基づき陰影変化が位相に与える影響を分析する。第5章で評価実験とその結果について考察し、第6章で結論を述べる。

2. 位相差による特徴点の対応付け

本章では、提案する対応付け手法の背景となる原理を説明する。対応付けは、対応する特徴点付近の局所的な位相が等しいという仮定のもとで、局所的な位相差を利用することによって行われる。以下の説明では、まず局所位相について説明し、次いで対応付け手法の

概要について述べる。簡単のため対象を1次元信号として議論を進める。

2.1 局所位相

局所位相とは、信号中のある局所的な領域に固有な位相のことである。位相は信号をフーリエ変換することによって得ることができるが、これは信号全体としての位相であり、局所的な情報は失われている。局所的な位相を求めるためには、あらかじめ窓関数を乗じて、信号を切り出したものをフーリエ変換する必要がある。この、窓関数による信号の切り出しとフーリエ変換に相当する処理として、信号と Gabor フィルタの畳み込みが利用できる。

Gabor フィルタは、Gauss 関数と複素正弦波の積で表現される複素関数であり、

$$g(x; \sigma, \omega_0) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{4\sigma^2}} (e^{i\omega_0 x} - e^{-(\sigma\omega_0)^2}) \quad (1)$$

として表される。 σ は Gauss 関数の半値幅、 ω_0 は Gabor フィルタの中心周波数である。式中の第2項は Gabor フィルタの直流成分を除去するための要素である。直流成分を除去することにより、一様な輝度変化に対して位相による対応付けがより安定となる。

実数信号 $f(x)$ と Gabor フィルタ $g(x; \sigma, \omega_0)$ の点 x_0 を中心とした畳み込みを $c(x_0) = (f * g)(x_0; \omega_0)$ とすると、 $f(x)$ の位相は、

$$\arg [c(x_0)] = \tan^{-1} \left(\frac{\Im c(x_0)}{\Re c(x_0)} \right) \quad (2)$$

として求めることができる。このとき、 \tan^{-1} の演算を行っているため、 $c(x_0)$ の実部が虚部に比較して小さい場合には、位相が不安定になる恐れがある。

2.2 対応付け手法の概要

局所位相を利用した特徴点の対応付けは、対応する特徴点での局所位相が等しくなるよう対応点を探索する問題ととらえられる。しかし、実際には位相差と位置ずれの関係により2つの対応候補点での局所位相のみに基づいて対応点の座標を特定することが原理的に可能であり、位相を用いることの利点の一つである。

位相差と位置ずれの関係について説明するために、1次元信号 $f(x)$ に対し、そのフーリエ変換を $F(\omega)$ と定義する。このとき、空間領域で位置ずれ d を伴った信号 $f'(x) = f(x + d)$ に対し、そのフーリエ変換 $F'(\omega)$ は、

$$F'(\omega) = F(\omega) e^{i\omega d} \quad (3)$$

として、 $F(\omega)$ に複素正弦波 $e^{i\omega d}$ を乗じたものになる。つまり、フーリエ領域で周波数 ω_0 における2つの信号の位相差 $\Delta\phi(\omega_0)$ と、それらの空間領域におけるずれ d との間には、

$$d = \frac{\Delta\phi(\omega_0)}{\omega_0} \quad (4)$$

という関係が成り立つことになる。これを利用すれば、位置ずれのある2つの信号に対して、そのずれ d を

他にもその拡張として、MAPSAC⁶⁾ 等が提案されている。

以降では、 σ は $\sigma\omega_0 = \pi$ を満たす量として、 ω_0 に付随して変化させるものとする。

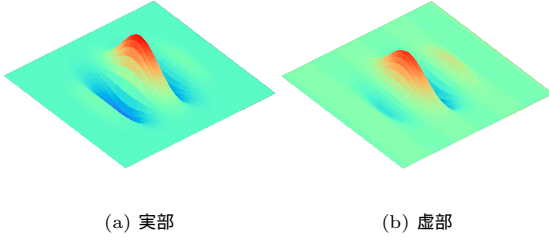


図 1 2次元の Gabor フィルタの概観

位相差 $\Delta\phi$ から直接推定することが可能である。ただし、 $-\pi \leq \Delta\phi(\omega_0) \leq \pi$ であるため、
$$-\frac{\pi}{\omega_0} \leq d \leq \frac{\pi}{\omega_0} \quad (5)$$
の範囲の信号が計算できることになる。

この関係を局所位相に適用する。局所位相とは、窓関数で切りとった局所的な信号の位相であるから、(4)により位相差から局所的な信号の位置ずれ、つまり信号の局所的な領域の位置移動を求めることができる。よって、特徴点の座標が既知である画像での特徴点の位相と、対応付けの対象となる画像での適当な対応候補点との間の局所位相の位相差を計算することによって、対象となる画像中の対応する特徴点の位置までの距離を求めることができる。つまり、特徴点の対応付けを行うことが可能となる。また、(4)の性質より、この手法によって求められる対応点の座標は、サブピクセルの精度をもつ。

以上が局所位相を用いた対応付け手法の概観となる。この手法の仮定として対応する特徴点の位相が等しいとしたが、この点については4章で考察を加える。

3. 2次元への拡張

本章では、議論を2次元画像に拡張し、実際に局所位相を利用する手法について述べる。

3.1 2次元の Gabor フィルタ

2次元画像における局所位相は、1次元の場合と同様に Gabor フィルタとの畳み込みで得ることができる。2次元画像での Gabor フィルタは、2次元 Gauss 関数と、方向 θ_0 、周波数 ω_0 をパラメータとしてもつ2次元複素正弦波の積によって、
$$g(x, y; \sigma, \omega_0, \theta_0) = \frac{1}{4\pi\sigma} e^{-\frac{1}{4\sigma^2}(x^2+y^2)} (e^{i\omega_0 x} - e^{-(\sigma\omega_0)^2}) \quad (6)$$

として表現することができる。ここで、
$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (7)$$

である。

(6)と2次元信号の畳み込みによって、周波数 ω_0 、方向 θ_0 をパラメータにもつ局所的な周波数情報を得ることができる。

3.2 位相差を用いる場合の課題

2次元画像においても、局所位相による対応付けの原理は1次元の場合と同様であり、局所的な位相が最も近い点を特徴点とする。そして、位相差と空間領域の位置ずれの関係は、

$$d = \frac{\Delta\phi(\omega_0, \phi_0)}{\omega_0} \quad (8)$$

となり、2つの点の間の距離を求めることができる。ただし、 d, ω_0 は2次元ベクトルで、それぞれ $d = (d_x, d_y)$ 、 $\omega_0 = (\omega_0 \cos \phi_0, \omega_0 \sin \phi_0)$ である。

式(8)によって位相差から空間領域のずれを求めるためには、 $\Delta\phi$ がスカラー量であり、 d が2次元ベクトルであることから、最低でも2つの異なる θ_0 を持つ周波数に対して(8)を求める必要がある。また、2.1節で述べたように、得られた周波数成分の実部が小さい場合には、位相情報は不安定となるので、この問題にも対処しなければならない。

3.3 評価関数によるフィルタの統合

前節で述べたように、2次元画像において位相差から位置ずれを求めるためには、複数のフィルタの出力を統合する必要がある。複数の Gabor フィルタの出力を統合する手法として、Wiscott らはグラフマッチングの問題において位置ずれ $d = (d_x, d_y)$ に対する評価関数を定義し、それを最小化する d を求める手法を提案した¹²⁾。ここでは、その手法を適用することにする。

まず、座標 $x_0 = (x_0, y_0)$ における、画像と Gabor フィルタの畳み込み $c(x_0)$ を、振幅成分 $\rho_{\omega_0, \theta_0}(x_0)$ と位相成分 $\phi_{\omega_0, \theta_0}(x_0)$ の積として、

$$c_{\omega_0, \theta_0}(x_0) = \phi_{\omega_0, \theta_0}(x_0) e^{\phi_{\omega_0, \theta_0}(x_0)} \quad (9)$$

と表現する。Gabor フィルタのパラメータ ω_0, θ_0 を変化させることによって、 $c(x_0)$ は異なった値をとる。

いま、点 x, x' において、 ω_0, θ_0 の組み合わせが異なる N 種類の Gabor フィルタを用いて(9)を計算したとする。このとき、2点の位相差から推定される d についての評価関数 $J_{x, x'}(d)$ を

$$J_{x, x'}(d) = \sum_{j=0}^{N-1} \rho_j(x) \rho_j(x') \cdot [\Delta\phi_j(x, x') - d \cdot \omega_j]^2 \quad (10)$$

と定義する。ここで、 $\Delta\phi_j(x, x') = \phi_j(x) - \phi_j(x')$ 、 $\omega_j = (\omega_{jx}, \omega_{jy}) = (\omega_j \cos \theta_j, \omega_j \sin \theta_j)$ である。この式は d についての2次関数であるから、 $\frac{\partial J(d)}{\partial d_x} = \frac{\partial J(d)}{\partial d_y} = 0$ となる d が評価関数を最小にする。したがって、

$$\begin{pmatrix} d_x \\ d_y \end{pmatrix} = \frac{1}{\Gamma_{xx}\Gamma_{yy} - \Gamma_{xy}\Gamma_{yx}} \times \begin{pmatrix} \Gamma_{yy} & -\Gamma_{yx} \\ -\Gamma_{xy} & \Gamma_{xx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_x \\ \Phi_y \end{pmatrix} \quad (11)$$

により、点 x, x' 間の距離 d を直接計算できる。ここで、 Γ_{xy}, Φ_x は、

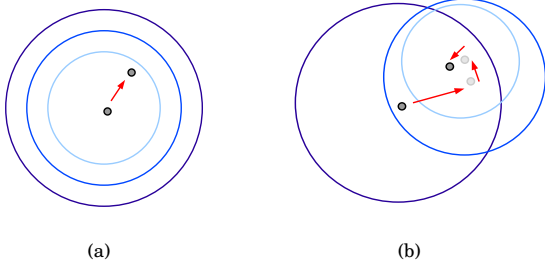


図 2 位置補正の概念図。(a) は一度で補正する手法で、(b) は段階的に補正する手法のスケッチである。各円は、フィルタで補正可能な位置ずれの範囲である。段階的なフィルタの使用によって補正範囲を広くとりながら、中心周波数が高いフィルタの情報も使用できる。

$$\Gamma_{xy} = \sum_{j=0}^{N-1} \rho_j(x) \rho_j(x') \omega_{jx} \omega_{jy} \quad (12)$$

$$\Phi_x = \sum_{j=0}^{N-1} \rho_j(x) \rho_j(x') \omega_{jx} \Delta \phi_j(x, x') \quad (13)$$

であり、 $\Gamma_{xx} \Gamma_{yy} - \Gamma_{xy} \Gamma_{yx} \neq 0$ とする。 $\Gamma_{xx}, \Gamma_{yy}, \Gamma_{yx}, \Phi_y$ は、 ω_{jx}, ω_{jy} を適宜置き換えることによって同様に表現される。

評価関数 $J(d)$ を用いてフィルタを統合することには、いくつかの利点がある。まず、評価関数を最小化するという意味で、任意のパラメータを持つフィルタの出力を統合できる点が挙げられる。また、位相だけでなく振幅成分も考慮することによって、不安定な位相の影響を小さくすることが可能となっている。

3.4 フィルタの選択

上述した統合手法を用いれば、各種位相情報を統合することが可能となる。ここで、実際に位相差による対応付けを行う際には、実際に使用する位相情報をどのようにして選択するのかという点が重要な要素となる。本論文では、以下の方針でフィルタの選択を行った。

フィルタの種類

フィルタを特徴づけるパラメータ ω_0 と θ_0 については、それぞれ 4 種類、8 種類のパラメータを用い、それらの組合せによって計 32 種類の Gabor フィルタを用いた。具体的には、 $\omega_\nu = -2^{\nu+1}\pi$ ($\nu = 0, \dots, 3$)、 $\theta_\mu = \mu\pi/8$ ($\mu = 0, \dots, 7$) という値を組み合わせで用いた。

段階的な補正

対応付けにおいて、coarse-to-fine の方略を用いることにする。まず、前述した 32 種類のフィルタを ω_ν の違いによって 4 つのグループに分類する。そして、 ω_ν が小さいグループから、順に評価関数を作成して、段階的に特徴点の対応付けおよびその補正を行う。この手法の概念図を図 2 に示す。

このような手法を用いることにより、(5) による探

索範囲の制限を緩和することができ、より信頼性の高い対応付けが得られると考察する。

3.5 対応付けアルゴリズム

前節までの内容をまとめた対応付けのアルゴリズムを示す。以下、対応付けの対象を時系列画像とし、順に I_1, I_2, \dots, I_n と表すものとする。

Step 1: I_1 に対し、特徴点検出オペレータを作用させ、特徴点群 $z_1 = (z_1^{(1)}, z_1^{(2)}, \dots, z_1^{(m)})$ を獲得する。 $k = 1$ とする。

Step 2: I_{k+1} に、 $z_k^{(1)}, z_k^{(2)}, \dots, z_k^{(m)}$ のそれぞれの対応付けの候補となる点 (以下、初期点とする) $\hat{z}_{k+1}^{(1)}, \hat{z}_{k+1}^{(2)}, \dots, \hat{z}_{k+1}^{(m)}$ を設定する。 I_k と I_{k+1} の間で画像間の位置ずれが少ないと考えられる場合は、 $\hat{z}_{k+1} = z_k$ として初期点を設定する。

Step 3: z_k, \hat{z}_{k+1} の各点に対して、Gabor フィルタとの畳み込みを計算、(11) によって I_{k+1} の特徴点群 z_{k+1} を得る。 $k = k + 1$ とし、Step2 にもどる。

4. 光源変化と位相の関係

2 章および 3 章では位相差を利用した特徴点の対応付けの手法について説明した。本章では、陰影変化がある画像における位相の振る舞いと、その安定性について考察する。

4.1 陰影モデル

物体表面の反射特性と照明の関係から、その物体が画像上でどのように見えるかを記述する陰影モデルについて述べる。ここでは Lambertian モデルを仮定する。Lambertian モデルでは、物体表面の点 p の輝度 $L(p)$ は、点 p での法線方向を表すベクトル $b(p)$ と、点 p に入射する入射光ベクトル $l(p)$ との内積によって、
$$L(p) = b(p) \cdot l(p) \quad (14)$$
 と表される。各ベクトル b, l の大きさは、それぞれ表面反射率および光源の強度に対応する。

以下の議論では、光源と物体の位置関係の変化に基づく見え方の変化を考察するが、入射光には平行光を仮定し、 $l(p) = l_0$ とする。さらに、 $b(p)$ を法線方向の単位ベクトル \hat{b} と、表面反射率を表す非負の数 $\eta(p)$ に分解すると、

$$L(p) = \eta(p) \hat{b}(p) \cdot l_0 \quad (15)$$

となる。 $\hat{b}(p)$ は法線方向であるから、点 p 近傍の領域の 3 次元形状を反映したものであり、 $\eta(p)$ は、法線方向に独立に点 p の輝度を定めるテクスチャを表す因子である。

4.2 陰影変化が特徴点に与える影響

上記より、平行光の下で Lambertian モデルに従う物体表面の輝度分布は、テクスチャ成分 η と法線方向 \hat{b} によって決定されることが明らかである。この事実は、特徴点検出オペレータによって検出される特徴点

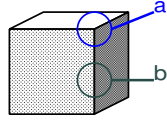


図 3 3次元形状による法線方向の分布。(a)の領域では、法線方向が3次的に変化しているが、(b)の領域では2次的にしか変化していない。特徴点が検出されるのは(a)の領域である。

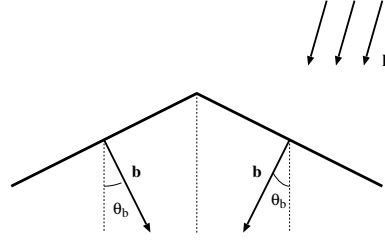


図 4 法線方向が不連続に変化する領域

の振る舞いと密接に関係する。例えば Harris¹⁾ 作用素のような一般的な特徴点検出オペレータは、その点近傍の領域において、輝度勾配が2次的に急斜である点を特徴点として検出する。つまり、

- テクスチャが2次的に変化している点
- 法線方向が3次的に変化している点

のいずれか、もしくはその両方に該当する点が検出される。ここで、後者は例えば図3の領域(a)のような、その点周辺の法線ベクトルによって3次元空間が張られる点のことである。

これら依存するパラメータの異なる特徴点は、陰影変化に対する振る舞いも異なる。いま、(15)において、入射光ベクトルが l_0 から l'_0 に変化したとする。このときの、テクスチャに基づく特徴点 p_t 近傍の領域 $\mathbb{T}(p_t)$ と、法線方向に基づく特徴点 p_s 近傍の領域 $\mathbb{S}(p_s)$ についての輝度の変化を考察する。

テクスチャに基づく特徴点 まず、 $p \in \mathbb{T}(p_t)$ なる点 p について考える。テクスチャのみの影響を考察するため、 $\mathbb{T}(p_t)$ 内では、法線方向が \hat{b}_0 で一定で平面的であるとす。入射光ベクトル l_0, l'_0 に対応する輝度値をそれぞれ $L(p), L'(p)$ とすると、

$$\begin{aligned} L'(p) &= \eta(p) \hat{b}_0 \cdot l'_0 \\ &= \alpha L(p) \end{aligned} \quad (16)$$

となる。ここで、 α は、

$$\alpha = \frac{\hat{b}_0 \cdot l'_0}{\hat{b}_0 \cdot l_0} \quad (17)$$

となる非負の定数である。つまり、領域 $\mathbb{T}(p_t)$ に含まれる点については、陰影変化による影響が、定数倍で表現できることになる。

法線方向に基づく特徴点 次に、 $p \in \mathbb{S}(p_s)$ なる点 p について考える。今度は、形状の影響を考慮するため、 $\mathbb{S}(p_s)$ 内の点の近傍ではテクスチャは存在せず、すなわち反射率が一樣に $\eta(p) = \eta_0$ であるとする。このときの陰影変化の前後の輝度値 $L(p)$ と $L'(p)$ の関係は、

$$\begin{aligned} L'(p) &= \eta_0 \hat{b}(p) \cdot l'_0 \\ &= \beta(p) L(p) \end{aligned} \quad (18)$$

となる。ここで、

$$\beta(p) = \frac{\hat{b}(p) \cdot l'_0}{\hat{b}(p) \cdot l_0} \quad (19)$$

である。

4.3 陰影変化に対する位相の安定性

式(16)と(18)を比較すると、前者では $L(p)$ と

$L'(p)$ の関係が定数倍であるのに対し、後者では $\beta(p)$ が位置 p に依存する量であるため、 $L(p)$ と $L'(p)$ の関係は定数倍で表現できない。

本節では、こうした特徴点近傍の領域での輝度変化に対する局所位相の振る舞いを、1次元信号を仮定して解析する。

4.3.1 法線方向が一樣な領域

まず、法線方向が一樣な領域について考える。この場合、点 x の輝度値 $f(x)$ は、

$$f(x) = \eta(x) \hat{b}(x) \cdot l_0 \quad (20)$$

となる。法線方向が一樣であるから、 $\hat{b}(x) = \hat{b}_0$ とおくと、(16)と同一の形式になる。よって入射光ベクトル l_0 が l'_0 へと変化したときの変化も、(16)と同様に、

$$f'(x) = \alpha f(x) \quad (21)$$

として定数倍であらわされることになる。ここで $f'(x)$ は入射光ベクトル l'_0 に対応する点 x の輝度値を表す。

$f(x), f'(x)$ のフーリエ変換をそれぞれ $F(\omega), F'(\omega)$ とすると、

$$\begin{aligned} F'(\omega) &= \alpha \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\omega x} dx \\ &= \alpha F(\omega) \end{aligned} \quad (22)$$

となり、フーリエ領域でも定数倍で表現される。さらに、 $F(\omega)$ を振幅成分 $\rho(\omega)$ と位相成分 $\phi(\omega)$ によって $F(\omega) = \rho(\omega) e^{j\phi(\omega)}$ とし、同様に $F'(\omega) = \rho'(\omega) e^{j\phi'(\omega)}$ とすると、入射光の変化によるそれぞれの变化は、

$$\rho'(\omega_0) = \alpha \rho(\omega_0) \quad (23)$$

$$\phi'(\omega_0) = \phi(\omega_0) \quad (24)$$

となる。ただし、ここで $\rho(\omega), \rho'(\omega), \alpha$ は全て非負の数である。これらの式から、入射光ベクトルの変化の影響を受けるのは振幅成分のみであり、位相成分は一定であることが分かる。このことより、1次元で考えた場合には、法線方向が一樣な領域では、位相情報は輝度変化によって影響を受けないことが分かる。

4.3.2 法線方向が不連続に変化する領域

次に、法線方向が不連続に変化する領域として、図4に示す様に、法線方向が異なる2つの面が含まれる領域を考える。一方、この領域にテクスチャは存在せず、反射率は一樣に $\eta(x) = \eta_0$ であるとする。領域の

中心を原点とすると、法線方向 $\hat{b}(x)$ は、

$$\arg \hat{b}(x) = \begin{cases} \theta_b & (x \geq 0) \\ -\theta_b & (x < 0) \end{cases} \quad (25)$$

となる．ここで θ_b は、法線方向の異なる 2 つの領域の間の角の 2 等分線 (下向き) から、各領域の内向きの法線方向を見た角度である．この関係より、点 x の輝度値 $f(x)$ を求めると、

$$f(x) = \begin{cases} \eta_0 |l_0| \cos(\theta_l - \theta_b) & (x \geq 0) \\ \eta_0 |l_0| \cos(\theta_l + \theta_b) & (x < 0) \end{cases} \quad (26)$$

として表される．ここで、 θ_l は入射光の方向を表している．この式より、 θ_l の変化によって、 $f(x)$ が非線形に変化する様子が分かる．しかし、 $f(x)$ は θ_l について非線形に変化してはいるが、それ自体はステップ関数 $u(x)$ と適当な定数 a, b を用いて、

$$f(x) = a + bu(x) \quad (27)$$

として表すことが可能である．なお、 $u(x)$ は、

$$u(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ -1 & (x < 0) \end{cases} \quad (28)$$

である． $f'(x)$ についても、同様に

$$f'(x) = a' + b'u(x) \quad (29)$$

と表される．

(27) より、 $f(x)$ のフーリエ変換 $F(\omega_0)$ は、

$$F(\omega_0) = 2\pi a\delta(\omega_0) + bU(\omega_0) \quad (30)$$

となる． $\omega_0 \neq 0$ とすれば、 $F(\omega_0) = bU(\omega_0)$ となる．

(23), (24) と同様にして、入射光ベクトルの変化による影響を振幅成分と位相成分それぞれで見ると、

$$\rho'(\omega_0) = \left| \frac{b'}{b} \right| \rho(\omega_0) \quad (31)$$

$$\phi'(\omega_0) = \begin{cases} \phi(\omega_0) & (b'/b \geq 0) \\ -\phi(\omega_0) & (b'/b < 0) \end{cases} \quad (32)$$

となる．この式より、 $b'/b \geq 0$ であるならば、変化があるのは $\rho(\omega_0)$ のみであり、位相が変化しないことが示される． $b'/b < 0$ となるのは、入射光ベクトルの角度 θ_l の符号が反転する場合、つまり入射光の方向が 2 つの領域の間の角の 2 等分線 (下向き) を越えて変化する場合である．

上記の考察より、位相は法線方向が一様である領域では陰影変化が存在しても安定であり、法線方向が不連続に変化する領域でも光源方向の変化が一定の範囲内に収まるならば安定であることが示された．ただし、これらの考察は議論の対象を 1 次元信号に限定したものである．2 次元信号についての考察は、本論文の議論の範囲を越えるが、次章では CG シミュレーション画像 (以下、CG 画像とする) を用いて、位相の振る舞いを実験的に解析する．

5. 実験

前章までに示した手法の評価のため、CG 画像および実画像を対象とした 3 種類の状況において実際に特

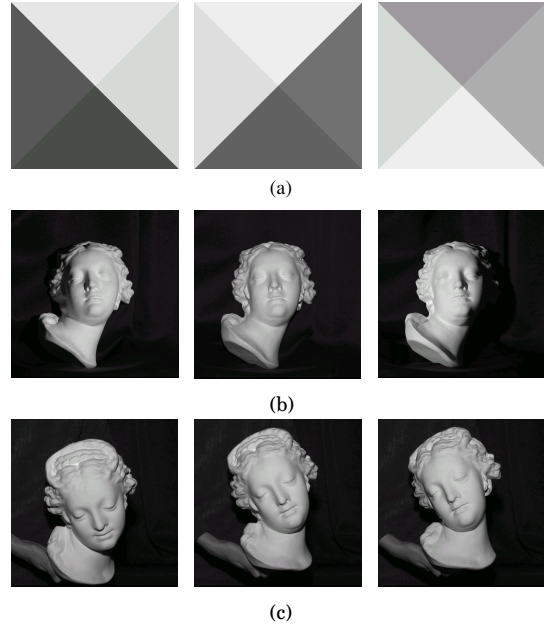


図 5 実験で使った画像．(a) は CG，(b) は光源位置が変化している実画像，(c) は対象が姿勢変化している実画像である．

徴点の対応付けを行い、テンプレートマッチングを用いた対応付け結果と比較した．

5.1 実験の概要

対応付けの対象として、(a) 鏡面反射がないピラミッド状の物体を対象とし、光源の方向を変化させながら撮影して得られた CG、(b) 石膏像を対象とし、照明を位置変化させて撮影した実画像、(c) 同様に石膏像を対象とし、撮影対象を姿勢変化させて撮影した時系列画像を用いた．それぞれの画像の例を図 5(a)-(c) に示す．画像のサイズは (a) が 400×400 画素、(b) および (c) では 810×810 画素である．局所位相による対応付けの際のフィルタの選択については、3 章で述べたとおりである．

手法の比較対象には、累積絶対誤差 (SAD) によるテンプレートマッチングを採用した．テンプレートの大きさは 9×9 画素とし、探索範囲は 21×21 画素とした．また、SAD の計算の際に、テンプレートと対応付けの対象となる画像のそれぞれから、その領域の輝度値の平均値を引いたものを用いた．この演算により、輝度の様な変化の影響が軽減されると考えられる．

5.2 結果と考察

5.2.1 CG 画像における対応付け

図 5(a) に示した CG 画像に対して特徴点の対応付けを行う．この図は四角錐を真上から撮影したものであり、四角錐の頂点は、4.2 節で説明した形状に基づく特徴点が発見されることを想定した点である．基準となる画像の頂点に特徴点を与え、平行光を仮定した光源を物体上に影が生じない範囲で変化させた．そし

て、その結果得られたそれぞれの画像に対して、基準画像との特徴点の対応付けを行った。

対応付けの結果を図 6 に示す。(a) が基準となる画像であり、(b) と (c) がそれぞれテンプレートマッチングによる対応付けの結果、提案手法による結果である。今回用いた四角錐においては、四角錐の最も明るい面が変化しない範囲では、位相による手法が安定であることが観察された。図 6(b) および (c) における左端の画像は、左右の面の輝度分布が基準画像とは正反対であるにもかかわらず、提案手法は正確な対応点を示している。この結果は、4.3.2 節における 1 次元信号での議論が反映されたものと考察される。

5.2.2 照明を変化させた実画像における対応付け

図 5(b) に示した照明の方向を変化させた実画像を対象として、特徴点の対応付けを試みる。照明の方向は、カメラ光軸の向きを基準として左右にそれぞれ 5° 、 10° 、 20° 、 30° と移動させて撮影した。これらの画像に対して、照明が正面にある画像を基準として、特徴点の対応付けを行い、照明の位置変化によって特徴点がどれだけずれた位置に対応付けられるかを調べた。基準画像の特徴点検出には Harris 演算子を用い、得られた特徴点群から、照明の角度によっては影になる領域および物体と背景の境界上に存在する特徴点を除去したものを使用した。

対応付けの結果の例と、一つの特徴点あたりに生じた平均的な位置ずれを図 7 に示す。提案手法による対応付けの結果が、テンプレートマッチングによる手法よりも位置ずれが少ないことが観察される。

5.2.3 対象の姿勢を変化させた実画像における対応付け

図 5(c) に示した、対象の姿勢を変化させた時系列画像を対象として、特徴点の対応付けを試みる。時系列画像は毎秒 30 フレーム撮影したものであり、計 40 枚の画像に対して特徴点の対応付けを行った。初期フレームには、5.2.2 節の場合と同様に、Harris 演算子で特徴点を検出したのち、背景との境界および陰影部分、そして姿勢変化によってオクルージョンが生じる部分の特徴点をあらかじめ画像から除去した。

新しい画像 I_k の特徴点を求める際には、まず画像 I_{k-1} における特徴点を初期点として与えたのち、基準画像 I_1 での対応する特徴点との比較によって、 I_k での特徴点の座標を求めることにする。常に画像 I_1 との比較を行うことによって、姿勢変化による輝度値の変化が大きい場合の性能も評価する。

対応付けの評価手法として、エピポーラ幾何を利用した。初期画像から 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 フレーム後の画像と初期画像との間の対応点群の座標を用いて F 行列を計算し、エピポーラ線を引いた上で、対応する特徴点とエピポーラ線との間の画像上での平均距離を調べた。理想的な状況ではこの値は 0 となるため、対応付けの評価基準として利用できる。なお、

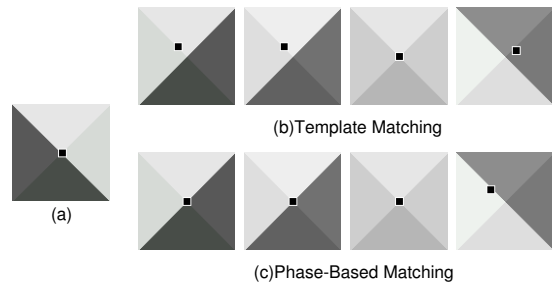


図 6 CG による対応付けの結果 (a) が基準画像、(b) がテンプレートマッチングによる結果、(c) が位相を利用した手法による結果の例である。

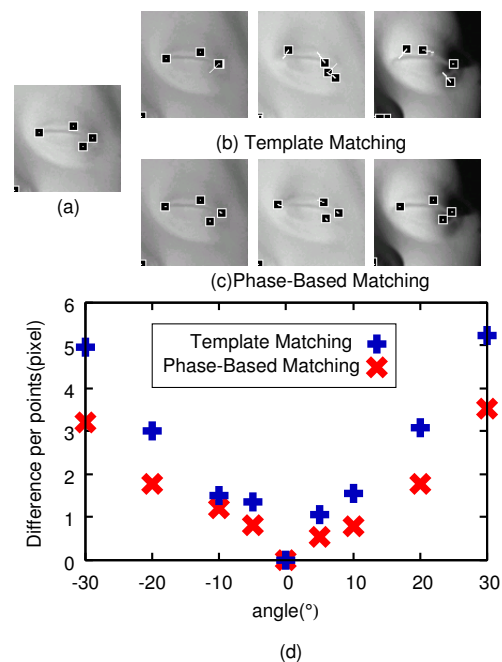


図 7 照明を変化させた画像間の対応付けの結果。(a) は基準画像、(b) がテンプレートマッチングによる対応付け、(c) が位相を利用した手法による対応付け結果の例である。(d) は光源を動かした角度と、特徴点 1 点あたりの位置ずれの関係を表す。

アファインカメラモデルを前提とした。

対応付けの結果の例とエピポーラ線から特徴点までの平均距離を、図 8 に示す。図 8(d) のグラフからは、どちらの手法も、初期フレームから離れるにつれてエピポーラ線からの距離が増加しているが、位相差を利用した手法の方が、時系列画像の対応付け全般にわたってずれが少なく、結果が改良されている様子が確認された。

6. む す び

本論文では、画像中の局所的な位相情報を用いて特徴点の対応付けを行う手法を提案した。まず、陰影変

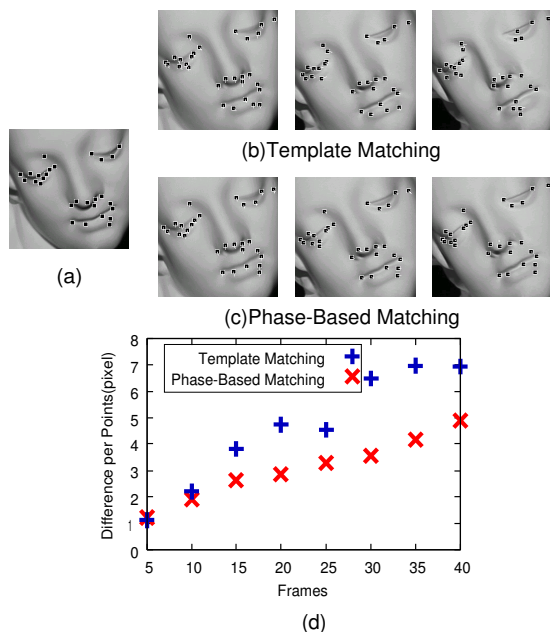


図 8 時系列画像の対応付けの結果。(a) が基準画像，(b) がテンプレートマッチングによる対応付け，(c) が位相を利用した手法による対応付けの例である。(d) は初期画像上でのエビポラ線と対応点の距離の平均を表す。

化による特徴点近傍の領域での位相の振る舞いを，1次元信号を対象として考察し，一定の条件下で陰影変化に対して位相が安定となることを示した。そして，実際に陰影変化を伴う状態で対象を撮影した画像に対し，位相差による特徴点の対応付けを行った。その結果，一般的な対応付け手法であるテンプレートマッチングを用いた場合より安定した結果が得られることを実験的に確認した。

ただし，提案手法の有効性をより一般的に論じるためには，いくつかの課題も残されている。

まず，2次元信号での陰影変化に対する位相の振る舞いについての考察を行っていきたい。陰影変化に対して局所位相が安定であることは，実験では確認できたが，その理論的な考察は十分でない。次に，陰影変化のモデルの拡張として，より一般的な形状，たとえば法線方向が部分的に連続な領域についての考察を加えたい。こうした領域に関して，近似的に位相の安定性を説明することについて，現在検討中である。また，本論文では Harris 作用素によって検出された特徴点を用いたが，陰影の影響を考慮して最近提案された作用素¹³⁾に基づいた検証も行っていきたい。最後に，利用する Gabor フィルタの選択手法にも，更に考察の余地がある。本論研究では Gabor フィルタを方向成分 θ_0 によって区別することなく使用したが，対象の運動情報などに基づいて，Gabor フィルタを選択的に使用することができるならば，対応付け精度の向上，および計算量の削減が期待される。

謝辞 研究の遂行にあたりご指導を頂いた松山研究室のスタッフの皆さまに感謝します。平山高嗣氏にはガボフィルタの実装にあたり有益なコメントを頂きました。本研究の一部は，科学研究費補助金 16680010，および文部科学省プロジェクト「知的資産の電子的な保存・活用を支援するソフトウェア技術基盤の構築」の助成を受けて行った。

参考文献

- Harris, C. and Stephens, M.: A Combined Corner and Edge Detector, *Proc. the Fourth Alvey Vision Conference*, pp.147–152 (1988).
- Shi, J. and Tomasi, C.: Good Features to Track, *IEEE CVPR'94*, Seattle (1994).
- Smith, S.M. and Brady, J.M.: SUSAN – A new approach to low level image processing, No.TR95SMS1c (1995).
- 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, 電子情報通信学会誌, Vol.87, No.12, pp.1043–1048 (2004).
- Hartley, R. I. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, second edition (2004).
- Torr, P. H. S. and Zisserman, A.: Bayesian Model Estimation and Selection for Epipolar Geometry and Generic Manifold Fitting., *IJCV*, Vol.50(1), pp.27–45 (2002).
- Fleet, D. J. and Jepson, A. D.: Stability of Phase Information, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.15, No.12, pp.1253–1268 (1993).
- Sanger, T.D.: Stereo Disparity Computation Using Gabor Filters, *Biological Cybernetics*, Vol.59, pp.405–418 (1988).
- Takita, K., Aoki, T., Sasaki, Y., Higuchi, T. and Kobayashi, K.: High-Accuracy Subpixel Image Registration Based on Phase-Only Correlation, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.86, pp.1925–1934 (2003).
- Barron, J., Fleet, D. J. and Beauchemin, S.: Performance Of Optical Flow Techniques, *IJCV*, Vol.12, pp.43–77 (1994).
- Carneiro, G. and Jepson, A. D.: Phase-Based Local Features, *ECCV '02*, London, UK, Springer-Verlag, pp.282–296 (2002).
- Wiskott, L., Fellous, J.-M., Krüger, N. and von der Malsburg, C.: Face Recognition by Elastic Bunch Graph Matching, *Intelligent Biometric Techniques in Fingerprint and Face Recognition*, CRC Press, pp.355–396 (1999).
- Wyatt, P. and Nakai, H.: Fast Feature Extraction Using Approximations to Derivatives with Summed-Area Images, *ACCV'06*, pp.776–786 (2006).