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†

対象物体と照明の位置関係が変化する状況で得られる複数の画像間では，物体表面の陰影に変化が生じ，特徴点の正確な対応付けが困難となる．この問題に対処するため，本稿では画像の局所的な位相，すなわち局所位相に着目し，これを利用した対応付け手法を提案する．局所位相は Gabor フィルタと画像の畳み込みによって計算するものとし，特に複数のフィルタを組み合わせて利用することにより対応付けの信頼性を高める手法を提案する．一方，特徴点近傍の領域での陰影変化に対する局所位相の振舞いを解析し，局所位相が安定となる照明変化の条件を確認した．実際に陰影変化をともなう画像間で対応付けを行い，従来手法に対する安定性を確認した．

Phase-based Feature Matching under Illumination Variance

Masaaki Nishino,† Atsuto Maki† and Takashi Matsuyama†

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 realize a precise matching, we basically compute the local phase by convolutions with Gabor filters which we design in multi scales. We then analyze the local phase under illumination variance and find out the condition of which for being stable. We examine the relevancy of the theoretical investigation in experiments on real images which have lighting changes.

1. はじめに

Structure-from-motion や多視点画像からの 3 次元復元の問題で必要となる画像間の対応付けには，一般に特徴点とよばれる対応付けの容易な点が用いられる．特徴点を利用した対応付けは，特徴点の検出と対応付けという 2 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)~3)]，代表的なものとしては，画像の一階微分に基づく Harris の作用素があげられる[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．一方，検出された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．この対応付けは通常，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．また時系列画像 $I^{(1)}, I^{(2)}, \ldots$ 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．

以上の手順によって一応の特徴点の対応付けを行うことができる．しかし対応付けの対象となる画像間では，程度の差こそ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，対象と照明の相対的な位置関係が変化し，対象表面の輝度分布に変化が生じる．したがって輝度分布を直接参照して特徴点の対応付けを行う手法では，正しい対応付けを得ることが困難になる．このように陰影変化をともなう画像間においても，照明変動基底の考え方を利用して画像の部分領域の追跡を可能とする手法[5),6)] が提案されているが，これらの手法でも，基底を生成するための数フレームでは輝度分布の変化する部分領域間で対応がとられていることが前提となる．

また，特徴点の対応付けの際に生じる誤りを回避する方法として，あらかじめ多くの特徴点について検出と対応付けを行ったのちに，その集合としての軌跡の一貫性の解析によって外れ値（outlier）を除去する

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

RANSAC[7] が広く用いられている☆．しかし陰影変化によって物体上の特徴点の検出位置にずれが生じている場合には，RANSAC などによって outlier 除去を行ったとしても残りの対応付けも影響を免れられない．

本研究では，こうした陰影変化によって引き起こされる問題に対処するため，特徴点の対応付け・追跡に画像の局所位相を用いる手法を提案する．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原理的に安定であるとされている[9]．また，局所的な位相差によるサブピクセル精度のステレオ精度の視差の検出や[10)~12)]，オプティカルフローの計算などにおいて位相の有用性が示されている[13]．さらに，Carneiro らの研究[14] では，特徴点の記述子としての位相に基づいた対応付けを行っており，その手法の陰影変化に対する有効性が実験的に報告されていることも，本研究の動機となっている．

局所位相を計算する方法としては画像と Gabor フィルタの畳み込みを利用し，多種類のフィルタを効果的に組み合わせることによって精度の高い対応付けを実現する．また，局所位相を利用した対応付けの妥当性について，陰影モデルに基づく考察を加える．実験として陰影変化が生じる複数の状況において従来手法としてのテンプレートマッチングと比較を行い，提案手法の性能を評価する．

以下，まず 2 章で位相差を用いた対応付けの原理を 1 次元信号を対象とした議論で説明し，3 章で 2 次元画像を対象とした実際の対応付けの手法を説明する．4 章では提案手法の妥当性を，Lambertian モデル下での陰影変化に対する局所位相の振舞いの解析から考察する．5 章で評価実験と結果についての考察を行い，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原理について説明する．対応付けは対応する特徴点近傍の局所的な位相が等しいという仮定のもとで，その位相差を利用して行われる．まず局所位相を得るために用いる Gabor フィルタについて説明したのち，対応付け手法の概要について述べる．なお，以下では簡単のため対象を 1 次元信号として議論を進める．2 次元信号を対象とした議論は 3 章で行う．

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．位相は信号のフーリエ変換より得ることができるが，こうして得られるのは信号全体としての位相であり，これから信号の局所的な領域の位相を知ることはできない．局所的な位相を求めるにはあらかじめ信号に窓関数を乗じ，信号を切り出したものをフーリエ変換すればよい．この窓関数による信号の切り出しとフーリエ変換という演算は，信号と Gabor フィルタの畳み込みに相当する．

Gabor フィルタは Gauss 関数と複素正弦波関数の積で表される複素数関数であり，座標 x において

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

と定義される．ここで，σ は Gauss 関数の広がりを表すパラメータ，ω_0 は Gabor フィルタの中心周波数である．以降 σ は ω_0 の変化に対して $\sigma\omega_0=\kappa$ を満たすように変化させる．κ は定数とし，以下では $\kappa=\pi$ とする．式 (1) の右辺第 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．この要素により信号と Gabor フィルタの畳み込みが直流成分を持たなくなるため，信号の直流変化に対する影響がなくなる．

実数信号 $f(x)$ と Gabor フィルタ $g(x;\omega_0)$ 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，$f(x)$ の点 x_0 での局所位相 $\arg[c(x_0)]$ は

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

である．同様に，局所振幅 $|c(x_0)|$ は

$$|c(x_0)|=\sqrt{(\mathrm{Re}[c(x_0)])^2+(\mathrm{Im}[c(x_0)])^2} \tag{3}$$

である．

2.2 対応付け手法の概要

画像 $I^{(1)}$ と $I^{(2)}$ について輝度値を利用した対応付けを行う際，画像 $I^{(1)}$ 上のある特徴点に対応する $I^{(2)}$ 上の点とは，その点近傍の輝度分布が最も類似している点のことである．同様に局所位相を利用した対応付けでは，対応点とは局所位相が最も近い点のことである．しかし，局所位相を利用する場合には位相差と空間領域のずれの関係を利用することによって，近傍各点の位相をすべて調べることなく，信号上の 2 点の局所位相の位相差から対応点の座標を求めることができる．さらに，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持つ．以下に位相差を利用した対応付け手法の概要を示す．

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．ある点 x における信号 $f(x)$ に対し空間領域で d だけずれた点における $f'(x)=f(x+d)$ を

☆ ほかにも，その拡張として，MAPSAC[8] などが提案されている．

考える．すると，そのフーリエ変換 $F'(\omega)$ は

$$F'(\omega) = F(\omega)e^{i\omega d} \tag{4}$$

として，$F(\omega)$ に複素正弦波 $e^{i\omega d}$ を乗じたものとなる．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

$$d = \frac{\Delta\phi(\omega_0)}{\omega_0} \tag{5}$$

という関係が成り立つ．式 (5) は，2 点の周波数 ω_0 における位相差から 2 つの信号のずれ d を直接計算できることを示している．ただし，2 点の位相差 $\Delta(\omega_0)$ は $-\pi \leq \Delta\phi(\omega_0) \leq \pi$ であるから，d が

$$\frac{-\pi}{\omega_0} \leq d \leq \frac{\pi}{\omega_0} \tag{6}$$

という範囲の値しかとりえないことに注意しなくてはならない．

式 (5) によって求められた d は，空間領域での信号間の位置ずれであった．局所位相に対して同様に位相差を計算し式 (5) を適用した場合，得られる d は信号の局所的な領域のずれに相当する．この関係を利用すれば特徴点の対応付けが行える．いま，画像 $I^{(1)}$ と $I^{(2)}$ に対し，$I^{(1)}$ のある特徴点 $a_i^{(1)}$ での局所位相と，$I^{(2)}$ の適当な点 $a_i'^{(2)}$ の局所位相が求まったとする．その位相差から式 (5) によって計算される位置ずれ d とは，点 $a_i^{(1)}$ に対応する画像 $I^{(2)}$ 上の点と点 $a_i'^{(2)}$ との間の距離に相当する．よって，$I^{(2)}$ 上で $a_i'^{(2)}$ の座標から d ずれた位置に $a_i^{(1)}$ に対応する点 $a_i^{(2)}$ を求めることができる．

本章の初めに述べたとおり，局所位相による対応付けでは画像間で局所位相が変化しないことを前提としている．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 Gabor フィルタ

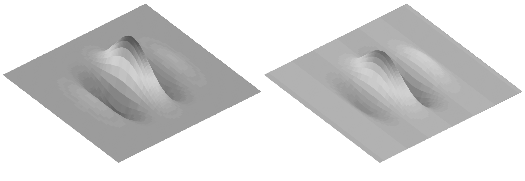
2 次元画像における局所位相は，1 次元の場合と同様に 2 次元 Gabor フィルタとの畳み込みで得ることができる．2 次元 Gabor フィルタは，2 次元 Gauss 関数と，方向 θ_0，周波数 ω_0 をパラメータとして持つ 2 次元複素正弦波の積によって

$$g(x, y; \omega_0, \theta_0) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{\frac{-1}{2\sigma^2}(\dot{x}^2+\dot{y}^2)} \left(e^{i\omega_0 \dot{x}} - e^{\frac{-(\sigma\omega_0)^2}{2}} \right) \tag{7}$$

として表される．2 次元 Gabor フィルタの概観を**図 1** に示す．ここで，$\dot{x}$，$\dot{y}$ は

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_0 & \sin\theta_0 \\ -\sin\theta_0 & \cos\theta_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \tag{8}$$

である．2 次元 Gabor フィルタと 2 次元画像の点 $\boldsymbol{x_0} = (x_0, y_0)$ を中心とした畳み込みから，点 $\boldsymbol{x_0}$ における中心周波数 ω_0 と方向 θ_0 によって決定される周波数についての局所的な振幅および位相が得られる．



(a) 実部 (b) 虚部

図 1 2 次元 Gabor フィルタの概観
Fig. 1 An overview of 2D Gabor filters.

2 次元 Gabor フィルタと 2 次元信号の畳み込みの理論的意味について解釈を与える．式 (7) は $\dot{x}$ 成分 $g_{\dot{x}}(\dot{x}; \omega_0, \theta_0)$ と $\dot{y}$ 成分 $g_{\dot{y}}(\dot{y}; \omega_0, \theta_0)$ に分解し，それらの積として表現することが可能である．$g_{\dot{x}}(\dot{x}; \omega_0, \theta_0)$，$g_{\dot{y}}(\dot{y}; \omega_0, \theta_0)$ はそれぞれ，

$$g_{\dot{x}}(\dot{x}; \omega_0, \theta_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{-\dot{x}^2}{2\sigma^2}} \left(e^{i\omega_0 \dot{x}} - e^{\frac{-(\omega_0\sigma)^2}{2}} \right) \tag{9}$$

$$g_{\dot{y}}(\dot{y}; \omega_0, \theta_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{-\dot{y}^2}{2\sigma^2}} \tag{10}$$

である．2 次元信号 $f(x, y)$ と 2 次元 Gabor フィルタ $g(x, y)$ の，点 (x_0, y_0) を中心とした畳み込みは

$$\begin{aligned} &(f * g)(x_0, y_0) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) g(x_0 - x, y_0 - y) dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{f}(\dot{x}, \dot{y}) g_{\dot{x}}(\dot{x}_0 - \dot{x}) g_{\dot{y}}(\dot{y}_0 - \dot{y}) d\dot{x} d\dot{y} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g_{\dot{x}}(\dot{x}_0 - \dot{x}) \\ &\quad \cdot \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \dot{f}(\dot{x}, \dot{y}) g_{\dot{y}}(\dot{y}_0 - \dot{y}) d\dot{y} \right\} d\dot{x} \end{aligned} \tag{11}$$

となる．ここで $(\dot{x}_0, \dot{y}_0)$ は (x_0, y_0) を $\dot{x}$，$\dot{y}$ 座標系で表現したものであり，それぞれ $\dot{x}_0 = x_0 \cos\theta_0 + y_0 \sin\theta_0$，$\dot{y}_0 = -x_0 \sin\theta_0 + y_0 \cos\theta_0$ とする．また，$\dot{f}(\dot{x}, \dot{y})$ は $\dot{f}(\dot{x}, \dot{y}) = f(\dot{x}\cos\theta_0 - \dot{y}\sin\theta_0, \dot{x}\sin\theta_0 + \dot{y}\cos\theta_0)$ として定義される関数とする．

いま，$\dot{x}$ の関数として，$\dot{f}_{\theta_0}(\dot{x})$ を

$$\dot{f}_{\theta_0}(\dot{x}) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{f}(\dot{x}, \dot{y}) g_{\dot{y}}(\dot{y}_0 - \dot{y}) d\dot{y} \tag{12}$$

として定義すると，$g_{\dot{x}}$ が 1 次元 Gabor フィルタの式 (1) に等しく，$g_{\dot{y}}$ が 1 次元 Gauss 関数であるから，式 (11) は 1 次元信号 $\dot{f}_{\theta_0}(\dot{x})$ と Gabor フィルタの畳み込みと等価であると解釈できる．以下，$\dot{f}_{\theta_0}(\dot{x})$ を方向 θ_0 への指向性関数とよぶ．$\dot{f}_{\theta_0}(\dot{x})$ は，2 次元信号 $\dot{f}(\dot{x},\dot{y})$ 上の直線 $\dot{y}=\dot{y}_0$ に対し，その各点で $\dot{y}_0$ を中心として $\dot{y}$ 方向に Gauss 関数 $g_{\dot{y}}$ を畳み込んで得られる 1 次元信号である．

3.2 位相差を用いる場合の課題

2.2 節で述べた 1 次元信号の場合と同様に，2 次元画像の対応付けにも位相差と信号のずれの関係を利用する．2 次元信号において式 (5) に対応する式は

$$\boldsymbol{d}=\frac{\Delta\phi(\boldsymbol{\omega}_0)}{\boldsymbol{\omega}_0} \tag{13}$$

である．ここで $\boldsymbol{d}$ と $\boldsymbol{\omega_0}$ は，それぞれ信号のずれと Gabor フィルタの中心周波数を表す 2 次元ベクトルで，$\boldsymbol{d}=(d_x,d_y)$，$\boldsymbol{\omega}_0=(\omega_0\cos\theta_0,\omega_0\sin\theta_0)$ である．$\boldsymbol{d}$ と $\boldsymbol{\omega}_0$ が同じ方向を向いたベクトルであるとすれば，式 (5) の 2 次元への自然な拡張となる．しかしこの場合式 (13) から実際に 2 次元画像上での位置ずれ $\boldsymbol{d}$ を求めるには，ずれ $\boldsymbol{d}$ の方向をあらかじめ知ったうえで同じ方向を持つ $\boldsymbol{\omega}_0$ についての局所位相を求めなければならない．だが一般にこの方向を事前に知ることはできないため，この前提を満たすことは困難である．

そこで，式 (13) の左辺に $\boldsymbol{d}$ のかわりに方向 $\boldsymbol{\omega}_0$ への $\boldsymbol{d}$ の射影である 2 次元ベクトル $\boldsymbol{d}'(\boldsymbol{\omega}_0)$ を用いる．2 つの方向について $\boldsymbol{d}'$ が求まれば，それから $\boldsymbol{d}$ を計算することができる．ただし，これらの位相差からずれ $\boldsymbol{d}$ の射影が求まるという解釈が必ずしも成り立つとは限らないことに注意する必要がある．

また，2 次元信号に限った話題ではないが，実際に位相差を利用する場合には，不安定な位相の影響を回避する必要がある．式 (2) に示したように，Gabor フィルタと信号の畳み込みから位相を計算する際にはその $\tan^{-1}$ をとっている．よって，実部が小さい場合には位相は不安定になる．

3.3 評価関数によるフィルタの統合

複数の Gabor フィルタの出力を統合する手法として，Wiskott らはグラフマッチングの問題において位置ずれ $\boldsymbol{d}=(d_x,d_y)$ に対する評価関数を定義し，それを最小化する $\boldsymbol{d}$ を求める手法を提案した[15)]．上記の課題に鑑み，ここではその手法を適用する．

まず，座標 $\boldsymbol{x}_0=(x_0,y_0)$ における画像と Gabor フィルタの畳み込み $c(\boldsymbol{x}_0)$ を，振幅成分 $\rho_{\omega_0,\theta_0}(\boldsymbol{x}_0)$ と位相成分 $\phi_{\omega_0,\theta_0}(\boldsymbol{x}_0)$ に分けて

$$c_{\omega_0,\theta_0}(\boldsymbol{x}_0)=\rho_{\omega_0,\theta_0}(\boldsymbol{x}_0)\exp[i\phi_{\omega_0,\theta_0}(\boldsymbol{x}_0)] \tag{14}$$

と表現する．ω_0，θ_0 は Gabor フィルタのパラメータであり，それぞれフィルタの中心周波数とその方向を表す．いま，点 $\boldsymbol{x}$ と $\boldsymbol{x}'$ において，ω_0 と θ_0 の様々な組合せによる N 種類の Gabor フィルタを用いて式 (14) を計算したとする．このとき，2 点の局所位相差を用いて，式 (13) から推定される $\boldsymbol{d}$ についての評価関数を $J_{\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}'}(\boldsymbol{d})$ とし

$$J_{\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}'}(\boldsymbol{d})=\sum_{j=1}^{N}\rho_j(\boldsymbol{x})\rho_j(\boldsymbol{x}')\cdot[\Delta\phi_j(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}')-\boldsymbol{d}\cdot\boldsymbol{\omega}_j]^2 \tag{15}$$

と定義する．ここで，$\Delta\phi_j(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}')=\phi_j(\boldsymbol{x})-\phi_j(\boldsymbol{x}')$，$\boldsymbol{\omega}_j=(\omega_{jx},\omega_{jy})=(\omega_j\cos\theta_j,\ \omega_j\sin\theta_j)$ である．式中の $\Delta\phi_j(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}')-\boldsymbol{d}\cdot\boldsymbol{\omega}_j$ という項は式 (13) が成り立つ場合に値が 0 となることは明らかである．つまり，式 (15) は異なるパラメータを持つ Gabor フィルタに対し式 (13) を連立させた式を解いているものと解釈できる．すべての Gabor フィルタに対して式 (13) が成り立つ場合には $J_{\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}'}(\boldsymbol{d})=0$ となる．よって式 (15) を最小化する $\boldsymbol{d}$ が求めるべき $\boldsymbol{d}$ である．$J(\boldsymbol{d})$ を最小化する $\boldsymbol{d}$ は，式 (15) が $\boldsymbol{d}$ についての 2 次式であることから，$\partial J/\partial d_x=0$ と $\partial J/\partial d_y=0$ の 2 つの式を $\boldsymbol{d}$ について解くことで直接求めることが可能である．詳しくは付録に示す．

評価関数 $J(\boldsymbol{d})$ を用いることにより，任意の Gabor フィルタの出力を統合して利用することが可能となる．また評価関数 $J(\boldsymbol{d})$ は振幅を重み付けに用いているため，不安定な位相の影響を軽減させることができる．

3.4 フィルタの選択

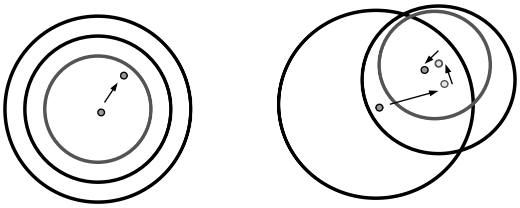
複数の Gabor フィルタの出力を統合する手法は前節に示した．しかし実際に特徴点の対応付けを行う際，どのフィルタをどういった方法で利用するかは考察の余地のあるところである．本研究では以下の方針でフィルタを選択した．また，フィルタの選択以外にも対応付けの信頼性を向上させる方略として，段階的な対応付けを導入した．

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，$\omega_\nu=2^{-(\nu+1)}\pi$ $(\nu=0,\ldots,3)$，$\theta_\mu=\mu\pi/8$ $(\mu=0,\ldots,7)$ という値を組み合わせて用いた．

段階的な対応付け

対応付けの際に複数のフィルタを用いた場合，式 (6) に示した $\boldsymbol{d}$ の有効範囲に注意する必要がある．用い



(a) (b)

図 2 段階的な対応付けの概念図．(a) は一度で対応付けを行う手法，(b) は段階的に対応付けを行う手法のスケッチである．各円は，そのフィルタが適用可能な位置ずれの範囲を表す．段階的なフィルタの使用によって適用可能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

Fig. 2 Schematics of the use of multiple filters. Each circle represents the coverage of a filter. (a) is a sketch of matching in one shot. (b) shows the iterative matching. The iterative use of filters allows a coverage for wider disparities and a more accurate matching with filters of higher frequencies.

た Gabor フィルタ群のパラメータの中で最大の中心周波数を $\omega_{\max}$ とすると，それらのフィルタ群を用いて推定可能な $\boldsymbol{d}$ の範囲は，$-\pi/\omega_{\max} \leq \boldsymbol{d} \leq \pi/\omega_{\max}$ にとどまる．よって，有効範囲を大きくとりたい場合には高い中心周波数を持った Gabor フィルタを用いることができない．

この問題に対処するため，対応付けを段階的に行うことを考える．複数の Gabor フィルタが利用できる場合，そのすべてを用いて評価関数 $J(\boldsymbol{d})$ を構成するのではなく，まずいくつかのフィルタを選択して評価関数 $J(\boldsymbol{d})$ を構成する．そして $\boldsymbol{d}$ を計算し，それに基づいて特徴点の座標を求める．しかしこの点を対応付けの最終的な答えとしては利用せずに，移動した点に対して先ほど利用しなかったフィルタを利用して $J(\boldsymbol{d})$ を構成する．この行程を複数回繰り返すことによって，最終的な対応付け結果を得る．このような段階的な対応付けに coarse-to-fine の方略をあわせて用いる．つまり，まずは低い中心周波数をパラメータに持つ Gabor フィルタのみを用いて評価関数を構成して対応付けを行ったのちに，高い中心周波数を持つ Gabor フィルタを段階的に用いて対応付けを行う．このような手法によって，式 (6) の制限の影響を軽減しつつ高い中心周波数を持つ Gabor フィルタも利用できるため，より信頼性の高い対応付けが行えると考察する．この手法の概念を**図 2** に示す．

実験では，32 種類のフィルタを中心周波数 ω_ν の違いによって 4 つのグループに分類し，周波数の低いフィルタから順にそれぞれのフィルタについて評価関数を作成して段階的な補正を行った．

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 $I^{(1)}, I^{(2)}, \cdots, I^{(n)}$ と表すものとする．

Step1: $I^{(1)}$ に対し，特徴点検出オペレータを作用させ，特徴点群 $\boldsymbol{z}^{(1)} = (z_1^{(1)}, z_2^{(1)}, \ldots, z_m^{(1)})$ を獲得する．$k = 1$ とする．

Step2: $I^{(k+1)}$ に，すでに得られている特徴点 $z_1^{(k)}, z_2^{(k)}, \ldots, z_m^{(k)}$ 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）$\grave{z}_1^{(k+1)}, \grave{z}_2^{(k+1)}, \ldots, \grave{z}_m^{(k+1)}$ 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，$\grave{\boldsymbol{z}}^{(k+1)}$ の位置は $\boldsymbol{z}^{(k)}$ と等しいものとして初期点を設定する．

Step3: $\boldsymbol{z}^{(k)}$，$\grave{\boldsymbol{z}}^{(k+1)}$ の各点に対して Gabor フィルタとの畳み込みを計算し，式 (15) を利用して $I^{(k+1)}$ の特徴点群 $\boldsymbol{z}^{(k+1)}$ を得る．段階的な補正を行う場合はここで複数回処理を繰り返す．$k = k + 1$ とし，**Step2** にもどる．

4. 光源変化と位相の関係

局所位相を利用した対応付け手法については前章までに説明した．本章では局所位相を用いた手法の妥当性を，陰影変化と位相の関係から考察する．

4.1 陰影モデル

以下の議論では，物体表面の輝度値はすべて Lambertian モデルに従うものと仮定する．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 $\boldsymbol{b}(p)$ と，点 p に入射する入射光ベクトル $\boldsymbol{l}(p)$ との内積によって

$$L(p) = \boldsymbol{b}(p) \cdot \boldsymbol{l}(p) \tag{16}$$

と表される．各ベクトル $\boldsymbol{b}$，$\boldsymbol{l}$ 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．

また，入射光に平行光を仮定し $\boldsymbol{l}(p) = \boldsymbol{l}_0$ とする．$\boldsymbol{b}(p)$ を法線方向の単位ベクトル $\hat{\boldsymbol{b}}$ と，表面反射率を表す非負の数 $\eta(p)$ との積で表すと

$$L(p) = \eta(p)\hat{\boldsymbol{b}}(p) \cdot \boldsymbol{l}_0 \tag{17}$$

である．$\hat{\boldsymbol{b}}(p)$ 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因子である．一方 $\eta(p)$ は法線方向に独立に点 p の輝度を決めるパラメータであるから，物体のテクスチャを表しているものと解釈できる．平行光の仮定のもとでは各領域の輝度はこれら 2 つのパラメータによって定まる．

4.2 陰影変化が特徴点に与える影響

実際に画像から検出される特徴点がどのような点で

あるかについて考察する．Harris 作用素[1] に代表されるような一般的な特徴点検出オペレータが，その点近傍の領域において輝度勾配が 2 次元的に急斜である点を特徴点として検出するという事実に着目すると，これらのオペレータによって検出される特徴点は

- テクスチャが 2 次元的に急峻に変化している点，
- 形状が 3 次元的に急峻に変化している点，
- テクスチャと形状がともに急峻に変化していて，結果として輝度勾配が 2 次元的に急斜である点，

のいずれかに分類できることが分かる．式 (17) の表現を用いれば，この 3 種類の特徴点はそれぞれ η，$\hat{\boldsymbol{b}}$，そして η と $\hat{\boldsymbol{b}}$ の両方に依存した点と解釈できる．これらの特徴点近傍の領域での陰影変化に対する輝度の変化について考察する．

テクスチャに基づく特徴点

テクスチャの 2 次元的な変化に基づく特徴点の近傍には，法線方向に変化はないものとする．つまり法線方向は $\hat{\boldsymbol{b}}_0$ で一定であるとする．入射光ベクトル $\boldsymbol{l}_0$，$\boldsymbol{l}'_0$ に対応する点 p の輝度値を，それぞれ $L(p)$，$L'(p)$ とすると

$$\begin{aligned} L'(p) &= \eta(p)\hat{\boldsymbol{b}}_0 \cdot \boldsymbol{l}'_0 \\ &= \alpha L(p) \end{aligned} \tag{18}$$

である．ここで，α は

$$\alpha = \frac{\hat{\boldsymbol{b}}_0 \cdot \boldsymbol{l}'_0}{\hat{\boldsymbol{b}}_0 \cdot \boldsymbol{l}_0} \tag{19}$$

として定義される非負の定数である．つまりテクスチャによる特徴点の近傍では，陰影変化による輝度値の変化が定数倍で表現できることが分かる．

形状に基づく特徴点

形状の 3 次元的な変化に基づく特徴点の近傍にはテクスチャが存在しないものとする．すなわち反射率が一様に $\eta(p) = \eta_0$ 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

$$\begin{aligned} L'(p) &= \eta_0\hat{\boldsymbol{b}}(p) \cdot \boldsymbol{l}'_0 \\ &= \beta(p) L(p) \end{aligned} \tag{20}$$

となる．$\beta(p)$ は

$$\beta(p) = \frac{\hat{\boldsymbol{b}}(p) \cdot \boldsymbol{l}'_0}{\hat{\boldsymbol{b}}(p) \cdot \boldsymbol{l}_0} \tag{21}$$

である．この式から，形状の 3 次元的な変化に基づく特徴点の近傍では陰影変化による輝度値の変化がその点での法線方向に依存し，テクスチャに基づく特徴点のように陰影変化に対して一様に変化しないことが分かる．

テクスチャと形状に基づく特徴点

テクスチャと形状がともに変化している特徴点の近傍での輝度値の変化は式 (20) と同様に表すことができる．つまり陰影変化に対して一様な変化ではない．

式 (18) と式 (20) を比較すると，前者では $L(p)$ と $L'(p)$ の関係が p に依存せず定数倍で表現できるのに対し後者では $\beta(p)$ が 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ことが分かる．

4.3 陰影変化の下での位相の振舞い

本節では，前節で示した特徴点の種類ごとに陰影変化に対する局所位相の振舞いを解析する．まずは，簡単のため 1 次元信号を対象とした解析を行う．つまり 2 次元画像の輝度値を表現する式 (17) に代わり，位置 x での単位法線ベクトルと表面反射率，入射光ベクトルからその位置での輝度を定める式

$$f(x) = \eta(x)\hat{\boldsymbol{b}}(x) \cdot \boldsymbol{l}_0 \tag{22}$$

を対象として考察を加える．2 次元画像における特徴点とは輝度勾配が 2 次元的に急斜な点のことであった．1 次元信号ではこうした点は $f(x)$ の勾配が急斜な点に対応すると考えられる．そして前節の議論と同様に，こうした点は $\eta(x)$ または $\hat{\boldsymbol{b}}(x)$ が急激に変化している点に相当する．この 2 種類の点について，局所位相の陰影変化に対する振舞いについて考察する．

4.3.1 テクスチャによる特徴点の近傍の領域

まずテクスチャによる特徴点の近傍の領域について考える．4.2 節の議論と同様に法線方向が一様であるとして，$\hat{\boldsymbol{b}}(x) = \hat{\boldsymbol{b}}_0$ とおくと

$$f(x) = \eta(x)\hat{\boldsymbol{b}}_0 \cdot \boldsymbol{l}_0 \tag{23}$$

として式 (18) とほぼ同一の形式をとる．入射光ベクトル $\boldsymbol{l}_0$ が $\boldsymbol{l}'_0$ へと変化したときの変化も同様に

$$f'(x) = \alpha f(x) \tag{24}$$

として定数倍で表される．ここで $f'(x)$ は入射光ベクトル $\boldsymbol{l}'_0$ に対応する位置 x での輝度値を表す．

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

$$\begin{aligned} F'(\omega) &= \alpha \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\omega x} dx \\ &= \alpha F(\omega) \end{aligned} \tag{25}$$

となる．つまり周波数領域でも変化が定数倍であることが分かる．このとき $F(\omega)$ を振幅を表す非負の実数 $\rho(\omega)$ と位相 $\phi(\omega)$ によって $F(\omega) = \rho(\omega)e^{i\phi(\omega)}$ と表すことにし，同様に $F'(\omega) = \rho'(\omega)e^{i\phi'(\omega)}$ とすると，入射光の変化によるそれぞれの変化は

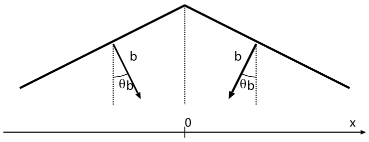


図 3 法線方向が不連続に変化する領域
Fig. 3 The area where surface normal changes discontinuously.

$$\rho'(\omega_0) = \alpha\rho(\omega_0) \tag{26}$$
$$\phi'(\omega_0) = \phi(\omega_0) \tag{27}$$

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．以上より 1 次元信号でのテクスチャによる特徴点に相当する点では，陰影変化に対して位相が変化しないことが分かる．

4.3.2 法線方向の変化による特徴点の近傍の領域

次に法線方向の変化による特徴点の近傍の領域における局所位相の振舞いについて解析する．具体的には**図 3** に示すような異なる 2 つの法線方向を持つ領域が接続されている領域を考える．この領域にテクスチャは存在せず，反射率は一様に $\eta(x) = \eta_0$ であるとする．領域の中心を $x = 0$ とすると，法線方向 $\hat{\boldsymbol{b}}(x)$ は

$$\arg \hat{\boldsymbol{b}}(x) = \begin{cases} \theta_b & (x \geq 0) \\ -\theta_b & (x < 0) \end{cases} \tag{28}$$

である．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

$$f(x) = \begin{cases} \eta_0|\boldsymbol{l}_0|\cos(\theta_l - \theta_b) & (x \geq 0) \\ \eta_0|\boldsymbol{l}_0|\cos(\theta_l + \theta_b) & (x < 0) \end{cases} \tag{29}$$

となる．θ_l は入射光ベクトル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 x の値によって異なる変化をする様子が分かる．しかし $f(x)$ 自体はステップ関数 $u(x)$ と適当な定数 a，b を用いて

$$f(x) = a + bu(x) \tag{30}$$

として表すことが可能である．なお，$u(x)$ は

$$u(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ -1 & (x < 0) \end{cases} \tag{31}$$

である．入射光ベクトルを変化させた $f'(x)$ についても同様に

$$f'(x) = a' + b'u(x) \tag{32}$$

と表される．

式 (30) より $f(x)$ のフーリエ変換 $F(\omega_0)$ は

$$F(\omega_0) = 2\pi a\delta(\omega_0) + bU(\omega_0) \tag{33}$$

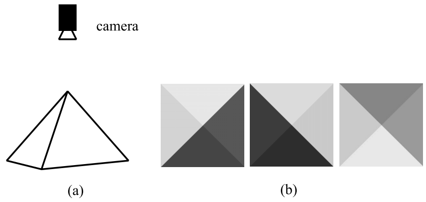


図 4 (a) CG 画像の撮影状況と，(b) 得られた画像の例
Fig. 4 (a) Assumed condition of CG images and (b) examples of the obtained images.

である．$\omega_0 \neq 0$ であるならば，$F(\omega_0) = bU(\omega_0)$ となる．2.1 節で説明したように局所位相を得るために用いる Gabor フィルタは直流成分を除去するので，この式はつねに成り立つと考えられる．

式 (26)，式 (27) と同様に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

$$\rho'(\omega_0) = \left|\frac{b'}{b}\right| \rho(\omega_0) \tag{34}$$

$$\phi'(\omega_0) = \begin{cases} \phi(\omega_0) & (b'/b \geq 0) \\ -\phi(\omega_0) & (b'/b < 0) \end{cases} \tag{35}$$

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．

4.4 2 次元信号の位相の振舞い

前節での解析の結果をふまえ，陰影変化のもとでの 2 次元信号の局所位相の振舞いについて解析する．3.1 節で述べたように，2 次元信号 $f(x, y)$ と 2 次元 Gabor フィルタ $g(x, y)$ の畳み込みは，1 次元の指向性関数 $\dot{f}_{\theta_0}(\dot{x})$ と 1 次元 Gabor フィルタ $g_{\dot{x}}(\dot{x})$ の畳み込みと等価である．以下では，指向性関数 $\dot{f}_{\theta_0}(\dot{x})$ の陰影変化のもとでの振舞いについて述べる．

まず，テクスチャに基づく特徴点については式 (18) と式 (24) を比較することによって，2 次元信号の場合でも陰影変化による信号の変化は定数倍で表現可能なことが分かる，指向性関数も定数倍の変化をするため，4.3.1 項の議論と同様に式 (27) が成り立つ．

形状に基づく特徴点，形状とテクスチャの両者の変化に基づく特徴点については，特徴点周辺の輝度分布をモデル化した 2 次元信号として，**図 4** (b) に示す画像群を例にあげて解析を行う．これらの画像は，テクスチャを持たないピラミッド状の物体を，光源の位置を変化させながら真上から撮影した CG シミュレーション画像である．物体の表面の輝度値は Lambertian モ

デルに従うものとする．状況設定を図 4 (a) に示す．

特徴点がピラミッドの頂点に検出されると仮定すると，指向性関数 $\dot{f}_{\theta_0}(\dot{x})$ は特徴点において不連続な変化をする関数になる．方向 θ_0 を，中心から水平右向きを基準の $\theta_0 = 0$ とし，反時計回りの向きを正とするパラメータであるとすると，特に $\theta_0 = \pi/4$ と $3\pi/4$，つまり輝度の異なる領域間の境界線と同じ方向への指向性関数は，特徴点において不連続なステップ関数となる．

この特徴点に対し，実際に $\theta_i = i\pi/8$ $(i = 0, \ldots, 7)$ なる 8 つの方向の Gabor フィルタを用いて特徴点の対応付けを行った結果の例を**図 5** (b) に示す．比較のため，輝度分布を利用したテンプレートマッチングの結果も同図 (c) に示す．図 5 (b)，(c) の左端の画像では，輝度分布が対応付け元の画像と大きく異なるため，テンプレートマッチングによる対応付けは失敗しているが，一方で局所位相を利用した手法では対応付けに成功している様子が観察される．図 5 (b) の中央の 2 つの例でも同様である．つまり，今回対応付けの対象とした画像群では，画像中の輝度の異なる 4 つの領域のうち最も明るい領域が，対応付け元と対応付け先で共通している場合に特徴点の対応付けに成功した．この条件は，実は $\theta_0 = \pi/4$，$3\pi/4$ への指向性関数，すなわちステップ関数の局所位相が陰影変化前後で変化しない条件に等しいことが分かる．

もちろん，これらの指向性関数の局所位相は変化しなくても，他の方向への指向性関数の局所位相が変化することは起こりうる．しかし，これらのステップ関数は，他の方向への指向性関数に比べて特徴点近傍での値の変化が大きいため，周波数領域ではより大きな振幅を持つ傾向がある．よって振幅による重み付けを行った結果，この 2 つの方向への指向性関数の影響が支配的になっていると考えられる．

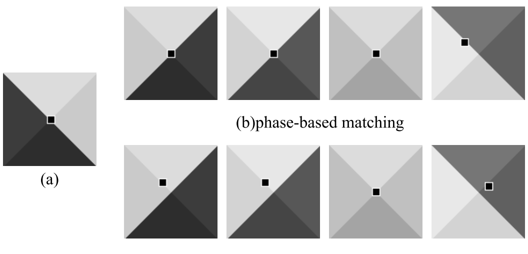


図 5 位相による対応付け結果．(a) は対応付け元の基準画像，(b) は位相を利用した結果，(c) はテンプレートマッチングによる結果の例である

Fig. 5 Matching for CG images. (a) Reference image. (b) Results by phase-based matching. (c) Results by template matching.

2 次元信号と方向成分 θ_0 をパラメータに持つ 2 次元 Gabor フィルタの畳み込みは，1 次元 Gabor フィルタと θ_0 への指向性関数の畳み込みと等価である．よって，陰影変化によって指向性関数の局所位相が変化しなければ 2 次元信号の局所位相も変化しないといえる．さらに，振幅で重み付けをして各方向へのフィルタの出力を統合することにより，振幅が相対的に大きい指向性関数の局所位相が陰影変化の影響を受けなければ，2 次元信号の対応付けは陰影変化の影響を受けずに行うことが可能である．

5. 実　　験

提案手法の評価のため，2 種類の異なる状況設定のもとで撮像した実画像群に対して実際に特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．撮影対象としてはテクスチャを持たない石膏像を選択した．これは，陰影変化が輝度分布に与える影響が顕在化した画像を用い，陰影変化に対する安定性を端的に評価するためである．

5.1 実験の概要

対応付けの対象として，**図 6** (a)，(b) に示す画像を利用した．(a) は照明位置を変化させながら石膏像を撮影した実画像，(b) は石膏像を姿勢変化させて撮影した時系列画像である．画像のサイズは (a)，(b) ともに 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正規化相関を利用した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．

図 6 実験で使用した画像例．(a) は光源位置が変化している実画像，(b) は対象が姿勢変化している実画像である

Fig. 6 Examples of images used in the experiments. (a) Real images of a statue captured under different lighting positions. (b) Real images of the statue captured in different poses.

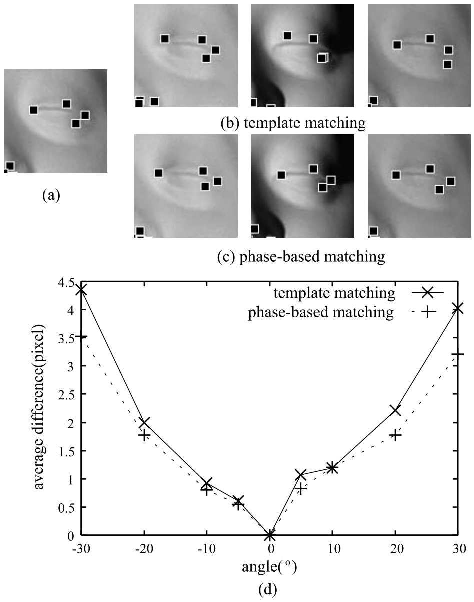


図 7　照明を変化させた画像間の対応付けの結果．(a) が基準画像，(b) がテンプレートマッチング（正規化相関）による対応付け，(c) が位相を利用した手法による対応付け結果の例である．(d) は光源を動かした角度と，特徴点 1 点あたりの位置ずれの関係を表す

Fig. 7　Matching for real images of an object captured under different lighting positions. (a) Reference image. (b) Results by template matching. (c) Results by phase-based matching. (d) Average displacements of feature points (in pixels) for different lighting positions that are defined (in angle) relative to the reference image.

正規化相関を用いることによって，累積絶対誤差などを利用する手法よりも，陰影変化の影響を軽減できることが期待される．

5.2 結果と考察

5.2.1 照明を変化させた実画像における対応付け

図 6 (a) 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，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 作用素を用いた．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 1 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．

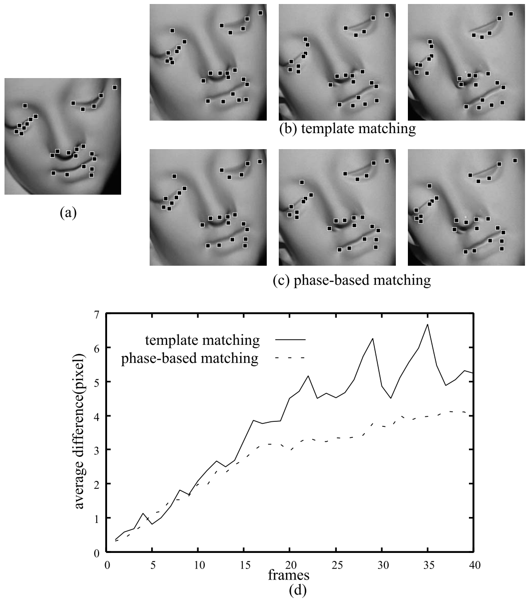


図 8　物体が姿勢変化した画像間の対応付けの結果．(a) が基準画像，(b) がテンプレートマッチング（正規化相関）による対応付け，(c) が位相を利用した手法による対応付けの例である．(d) は基準画像上でのエピポーラ線と対応点の距離の平均を表す

Fig. 8　Matching for real images of an object in different poses. (a) Reference image. (b) Results by template matching. (c) Results by phase-based matching. (d) Mean distances (in pixels) between matched points and the epipolar line.

5.2.2 対象の姿勢を変化させた実画像における対応付け

図 6 (b) に示した，対象の姿勢を変化させた時系列画像におい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．基準画像となる初期フレームには，5.2.1 項の場合と同様に Harris 作用素で検出した特徴点を与えた．背景との境界および陰影部分，姿勢変化によってオクルージョンが生じる部分に存在する特徴点はあらかじめ画像から除去した．

時系列画像を対象として対応付けを行う際，画像 $I^{(k)}$ の特徴点を求めるには，時系列上で近い画像，たとえば $I^{(k-1)}$ の特徴点での局所位相および輝度分布と比較することによって求めるのが一般的だろう．しかし今回は姿勢変化による輝度値の変化が大きい場合を想定し，画像 $I^{(k)}$ の特徴点の位置はつねに基準画像 $I^{(1)}$ 上の特徴点での局所位相および輝度分布との比較によって求めることにした．ただし，探索範囲を狭めるため $I^{(k)}$ での特徴点の初期点，つまり対応する特徴点を探索するときの中心となる点は $I^{(k-1)}$ で

の特徴点の座標とした．

対応付けの評価手法として，エピポーラ幾何を利用した．各フレームと基準画像との間で，対応する特徴点群の座標から F 行列を計算し，それを利用して基準画像上にエピポーラ線を引き，対応する特徴点とエピポーラ線との間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，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エピポーラ線からのずれが少ない様子が確認された．

6. むすび

本稿では画像中の局所的な位相を用いて特徴点の対応付けを行う手法と，その陰影変化に対する安定性について論じた．まず，陰影変化による特徴点近傍の領域での位相の振舞いを解析した．そして実際に陰影変化をともなう状況で対象を撮影した画像に対し，位相差に基づく特徴点の対応付けを行った．これにより，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．

提案手法の有効性をより一般的に論じるため，今後は以下の点について考察を進める予定である．本稿では 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，対象の運動情報に基づいて Gabor フィルタを選択的に使用することができれば，計算量の削減および対応付け精度の向上が期待される．また，より複雑なシーンへの適用についても，現在検討中である．最後に特徴点の検出に関し，Harris 作用素の代わりに陰影の影響を考慮して最近提案されたオペレータ[16] に基づいた検証も行っていきたい．

謝辞 研究の遂行にあたり，鷲見和彦氏には陰影変化と局所位相の関係の解析方針についてのアドバイスを，また平山高嗣氏からは Gabor フィルタの実装にあたり有益なコメントをいただきました．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

1) Harris, C. and Stephens, M.: A Combined Corner and Edge Detector, *Proc. 4th Alvey Vision Conference*, pp.147–152 (1988).
2) Shi, J. and Tomasi, C.: Good Features to Track, *Proc. IEEE CVPR'94*, pp.593–600 (1994).
3) Smith, S.M. and Brady, J.M.: SUSAN — A new approach to low level image processing, No.TR95SMS1c (1995).
4) 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).
5) Hager, G.D. and Belhumeur, P.N.: Efficient region tracking with parametric models of geometry and illumination, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.20, No.10, pp.1025–1039 (1998).
6) Wiles, C., Maki, A. and Matsuda, N.: Hyper-Patches for 3D Model Acquisition and Tracking, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.23, No.12, pp.1391–1403 (2001).
7) Hartley, R.I. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd edition, Cambridge University Press (2004).
8) Torr, P.H.S. and Zisserman, A.: Bayesian Model Estimation and Selection for Epipolar Geometry and Generic Manifold Fitting, *IJCV*, Vol.50, No.1, pp.27–45 (2002).
9) Fleet, D.J. and Jepson, A.D.: Stability of Phase Information, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.15, No.12, pp.1253–1268 (1993).
10) Sanger, T.D.: Stereo Disparity Computation Using Gabor Filters, *Biological Cybernetics*, Vol.59, pp.405–418 (1988).
11) Maki, A., Bretzner, L. and Eklundh, J.-O.: Local Fourier phase and disparity estimates: An analytical study, *Proc. 6th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*, pp.868–873 (1995).
12) Takita, K., Aoki, T., Saski, 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).
13) Barron, J., Fleet, D.J. and Beauchemin, S.: Performance of Optical Flow Techniques, *IJCV*, Vol.12, pp.43–77 (1994).
14) Carneiro, G. and Jepson, A.D.: Phase-Based Local Features, *Proc. ECCV '02*, pp.282–296, Springer-Verlag (2002).
15) 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, pp.355–396, CRC Press (1999).

16) Wyatt, P. and Nakai, H.: Fast Feature Extraction Using Approximations to Derivatives with Summed-Area Images, *Proc. ACCV'06*, pp.776–786 (2006).

付　録

複数フィルタの統合

式 (15) から $\partial J/\partial d_x = 0$，$\partial J/\partial d_y = 0$ として 2 つの式を連立させると

$$\begin{pmatrix} d_x \\ d_y \end{pmatrix} = \frac{1}{\Gamma_{xx}\Gamma_{yy} - \Gamma_{xy}\Gamma_{yx}} \times \begin{pmatrix} \Gamma_{yy} & -\Gamma_{yx} \\ -\Gamma_{xy} & \Gamma_{xx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_x \\ \Phi_y \end{pmatrix} \tag{36}$$

となり，点 $\boldsymbol{x}$，$\boldsymbol{x}'$ 間の距離 $\boldsymbol{d}$ を直接計算できる．このとき $\Gamma_{xx}\Gamma_{yy} - \Gamma_{xy}\Gamma_{yx} \neq 0$ が成り立たなければならない．ここで Γ_{xy}，Φ_x は

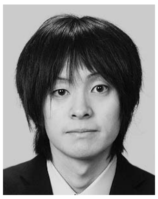
$$\Gamma_{xy} = \sum_{j=1}^{N} \rho_j(\boldsymbol{x})\rho_j(\boldsymbol{x}')\omega_{jx}\omega_{jy} \tag{37}$$

$$\Phi_x = \sum_{j=1}^{N} \rho_j(\boldsymbol{x})\rho_j(\boldsymbol{x}')\omega_{jx}\Delta\phi_j(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}') \tag{38}$$

である．Γ_{xx}，Γ_{yx}，Γ_{yy}，Φ_y は式 (37) と式 (38) において ω_{jx}，ω_{jy} を適宜置き換えたものである．

(平成 18 年 9 月 7 日受付)
(平成 19 年 3 月 20 日採録)

（担当編集委員　北原 格）



西野　正彬

2006 年京都大学工学部電気電子工学科卒業．現在，同大学院情報学研究科修士課程在学中．

牧　　淳人

京都大学情報学研究科准教授．1991 年京都大学工学部電気工学科卒業．1993 年東京大学大学院修士課程修了．1996 年スウェーデン王立工科大学（KTH）大学院博士課程修了．Ph.D. 同年（株）東芝入社．関西研究所，研究開発センターに勤務．2003 年京都大学学術情報メディアセンターを経て翌年より現所属．コンピュータビジョン，時系列画像認識の研究に従事．1995 年 SICE 学術奨励賞，2000 年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞その他受賞．IEEE，計測自動制御学会，電子情報通信学会各会員．

松山　隆司（フェロー）

1976 年京都大学大学院修士課程修了．京都大学助手，東北大学助教授，岡山大学教授を経て 1995 年より京都大学大学院電子通信工学専攻教授．現在，同大学院情報学研究科知能情報学専攻教授．2002 年学術情報メディアセンター長，京都大学評議員，2004 年情報環境機構長．工学博士．画像理解，分散協調視覚，3 次元ビデオの研究に従事．最近は「人間と共生する情報システム」の実現に興味を持っている．1980 年情報処理学会創立 20 周年記念論文賞，1990 年人工知能学会論文賞，1993 年情報処理学会論文賞，1994 年電子情報通信学会論文賞，1995 年第 5 回国際コンピュータビジョン会議 Marr Prize，1999 年電子情報通信学会論文賞，2000 年画像センシングシンポジウム優秀論文賞．2004 年，2005 年 FIT 優秀論文賞．IAPR，電子情報通信学会フェロー．日本学術会議連携会員．