

位相限定相関法に基づく高精度マシンビジョン — ピクセル分解能の壁を越える画像センシング技術を目指して —

High-Accuracy Machine Vision Using Phase-Only Correlation
— Toward Image Sensing Technology Breaking the Limit of Pixel Resolution —

青木孝文 Takafumi AOKI 伊藤康一 Koichi ITO
柴原琢磨 Takuma SHIBAHARA 長嶋 聖 Sei NAGASHIMA

アブストラクト 近年、画像センシング、映像信号処理、コンピュータビジョンなどの分野において、サブピクセル精度の位置合わせを可能にする高精度な画像マッチングへの要求が高まっている。本論文では、「位相限定相関法」と呼ぶ高精度画像マッチング手法について解説する。位相限定相関法は、フーリエ変換された信号の位相成分のみに着目する画像マッチング手法であり、その有効性は、工業用画像認識、受動型三次元計測、バイオメトリクス認証、映像信号処理などの分野において実証されつつある。本論文では、特に、二つの画像が相似変換の関係にある場合の画像レジストレーション手法、並びに、より一般的な対応点探索の手法に焦点を絞って解説する。

キーワード 画像レジストレーション、ブロックマッチング、コンピュータビジョン、ステレオビジョン、三次元計測、サブピクセル推定

1. まえがき

画像マッチングは、コンピュータによる画像の解析・認識・理解などの様々な分野で重要になる基本処理である。画像マッチングの目的は、大別して、(i) 二つの画像がどれだけ似ているかという類似度を評価する場合と、(ii) 二つの画像の間の幾何学的な変換パラメータを求める場合の二通りが考えられる。前者は「画像照合」の問題として、後者は「画像レジストレーション(位置合わせ)⁽¹⁾」の問題として理解することができる。本論文では、位相情報に基づく画像マッチング技術の基本原理と応用について解説する。この技術は「画像照合」及び「画像レジストレーション」の双方の目的に対して有効であるが⁽²⁾、本論文では、特に後者の位置合わせ性能を追求するアプローチに焦点を絞り、その基礎と応用について述べる。

近年、画像センシング、映像信号処理、コンピュータビジョンなどの分野において、サブピクセル精度の位置合わせ性能を有する画像マッチングへの要求が高まっている^{(3)–(10)}。例えば、基線長の短いステレオビジョンシステムにおいて、高い三次元計測精度を実現するためには、サブピクセル精度の

対応付けアルゴリズムが不可欠である。通常、高密度な三次元計測を行う場合、ステレオ画像の対応候補点の近傍から切り出した画像ブロックに対するマッチングが用いられる。このブロックマッチングにおいては、画像が変化しても安定的なマッチングが可能であるという意味での「ロバスト性」と、画像ブロックの「位置合わせ精度」、更に、「計算コスト」の三つの性能指標が重要である。このうち位置合わせ精度については、各種の応用においてサブピクセル分解能が求められるようになってきている。

位相情報に基づく画像マッチング手法は、「ロバスト性」と「位置合わせ精度」の観点から特に優れた特性を有している。ただし、二次元離散フーリエ変換の計算が必要であるため、「計算コスト」についてはデメリットが考えられてきた。しかし、近年のエレクトロニクス技術の急速な進展のために、計算コストに関する壁が取り除かれつつあり、コンシューマ機器を含む様々な応用への展開が可能となる下地が整いつつある。

位相情報に基づく画像マッチングの研究は、歴史的には、画像レジストレーション(位置合わせ)の観点から進められてきた。古くは、1975年のKuglinらによる位相相関に関する先駆的研究がある⁽¹¹⁾。これは、その後、振幅スペクトルの対数極座標変換(Fourier-Mellin変換)を用いた回転・拡大縮小の計測⁽¹²⁾や映像の動き推定⁽¹³⁾などに応用されている。また、関連する研究として、MACE(Minimum Average Correlation Energy)フィルタに代表される相関フィルタの研究がある⁽¹⁴⁾。なお、筆者らは、歴史的な理由から、位相限定相関(phase-only correlation)という用語を用いることが多いが、これは位相相関(phase correlation)と同義である。他にも、位相限定マッチトフィルタリング(phase-only matched filtering)など、幾つかの用語がほぼ同義で用いられている。以下、本論文では、位相限定相関という用語を統一的に用いることにする。

青木孝文 正員 東北大学 大学院情報科学研究科
E-mail aoki@ecei.tohoku.ac.jp
伊藤康一 正員 東北大学 大学院情報科学研究科
E-mail ito@aoki.ecei.tohoku.ac.jp
柴原琢磨 学生員 東北大学 大学院情報科学研究科
E-mail sibahara@aoki.ecei.tohoku.ac.jp
長嶋 聖 学生員 東北大学 大学院情報科学研究科
E-mail nagasima@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

Takafumi AOKI, Member (Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, Sendai-shi, 980-8579 Japan), Koichi ITO, Member (Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, Sendai-shi, 980-8579 Japan), Takuma SHIBAHARA, Student Member (Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, Sendai-shi, 980-8579 Japan), Sei NAGASHIMA, Student Member (Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, Sendai-shi, 980-8579 Japan).
Fundamentals Review Vol.1 No.1 pp.30-40 2007年7月

最近の理論研究としては文献(15)があり、ノイズを含む画像に対する位相限定相関関数の理論モデルを与えている。ただし、実際の応用では、ここで定義される基本的な相関関数をそのまま用いることは少なく、入力される画像の性質や用途に応じて、様々な高精度化手法を適用する必要がある。しかし、ごく最近になるまで実用的な応用を想定した系統的な研究開発が行われていなかった。これに対して筆者らは、用途に応じた様々な高精度化手法のバリエーションを体系化し、大幅な高性能化を達成している^{(16)–(20)}(この一連の高精度画像マッチング技術を総称して「位相限定相関法」と呼んでいる)。位相限定相関法の適用範囲は、工業用画像認識、顕微鏡向け画像解析、高精度三次元計測、車載カメラ、バイオメトリクス認証、映像信号処理など広範な応用をカバーしている。このうち、本論文では、特に三次元計測を含めたマシンビジョン向けアルゴリズムに焦点を絞り、総合的に解説する。

2. 位相限定相関法の基礎

2.1 技術概要

筆者らの研究グループでは、1990年代から、高精度なバイオメトリクス認証のための生体画像のマッチング技術として位相限定相関法の研究開発に着手し、これに基づく指紋照合装置を実用化している^{(20), (21)}。前章の分類によれば、バイオメトリクス認証は、「画像照合」の問題としてとらえることができる。位相限定相関法は、生体テクスチャの照合において、極めて高い識別性能を有することが実証されており、既に、指紋のほかに、虹彩、掌紋、歯科X線画像によるバイオメトリクス認証に適用されている^{(18), (22)–(24)}。

一方、上記と平行して位相限定相関法の各種画像モデルへの拡張を行い、1999年ごろより工業市場向け画像認識システムを実用するとともに⁽²¹⁾、三次元計測や映像信号処理などの分野へ応用を展開している。これらの用途では、「画像レジストレーション」の性能、すなわち、サブピクセルの位置合わせ精度が追求されている。特に、近年、位相限定相関法に基づくサブピクセル対応点探索アルゴリズムが実現され^{(16), (17), (19)}、コンピュータビジョンを含む広範な分野への応用が可能になっている。

2.2 位相限定相関関数

$N_1 \times N_2$ ピクセルの二つの画像 $f(n_1, n_2)$ 及び $g(n_1, n_2)$ が与えられたとする。ここで、二次元画像信号の離散空間インデックス(整数)を、便宜上、 $n_1 = -M_1, \dots, M_1$ 及び $n_2 = -M_2, \dots, M_2$ とする。ただし、 M_1 及び M_2 は正の整数であり、 $N_1 = 2M_1 + 1$ 及び $N_2 = 2M_2 + 1$ である。なお、ここでは説明を簡単にするために離散空間のインデックスを正負対称にとり、かつ二次元画像信号の大きさ N_1 及び N_2 を奇数にしているが、これは必須ではない。すなわち、通常よく用いられるように非負のインデックスを用い、 N_1 及び N_2 を任意

の正の整数に設定するように一般化することが可能である。

画像 $f(n_1, n_2)$ 及び $g(n_1, n_2)$ の二次元離散フーリエ変換(DFT: Discrete Fourier Transform) を次式で定義する。

$$\begin{aligned} F(k_1, k_2) &= \sum_{n_1, n_2} f(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} \\ &= A_F(k_1, k_2) e^{j\theta_F(k_1, k_2)} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} G(k_1, k_2) &= \sum_{n_1, n_2} g(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} \\ &= A_G(k_1, k_2) e^{j\theta_G(k_1, k_2)} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $k_1 = -M_1, \dots, M_1$ 及び $k_2 = -M_2, \dots, M_2$ は離散周波数インデックス(整数)であり、回転因子を $W_{N_1} = e^{-j\frac{2\pi}{N_1}}$ 及び $W_{N_2} = e^{-j\frac{2\pi}{N_2}}$ と定義する。 $A_F(k_1, k_2)$ 及び $A_G(k_1, k_2)$ は振幅スペクトルであり、 $\theta_F(k_1, k_2)$ 及び $\theta_G(k_1, k_2)$ は位相スペクトルを表す。また、 \sum_{n_1, n_2} は、インデックス全域にわたる加算 $\sum_{n_1=-M_1}^{M_1} \sum_{n_2=-M_2}^{M_2}$ を表す。このとき、 $F(k_1, k_2)$ と $G(k_1, k_2)$ の正規化相互パワースペクトルを次式で与える。

$$\begin{aligned} R(k_1, k_2) &= \frac{F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}}{|F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}|} \\ &= e^{j\{\theta_F(k_1, k_2) - \theta_G(k_1, k_2)\}} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\overline{G(k_1, k_2)}$ は $G(k_1, k_2)$ の複素共役を表す。また、 $\theta_F(k_1, k_2) - \theta_G(k_1, k_2)$ は、二つの画像の位相差スペクトルであることに注意されたい。画像マッチングにおいて、この位相差スペクトルは重要な性質を有しているが、これを直接的に利用するよりは、次のような相関関数を定義する方が便利である。

位相限定相関関数(POC関数) $r(n_1, n_2)$ を、正規化相互パワースペクトルの二次元逆離散フーリエ変換(IDFT: Inverse Discrete Fourier Transform)として定義する。

$$r(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1, k_2} R(k_1, k_2) W_{N_1}^{-k_1 n_1} W_{N_2}^{-k_2 n_2} \quad (4)$$

ここで、 \sum_{k_1, k_2} は $\sum_{k_1=-M_1}^{M_1} \sum_{k_2=-M_2}^{M_2}$ を表す。二つの画像が類似している場合、POC関数は、デルタ関数に近い極めて鋭いピークを有する。この相関ピークの高さは二つの画像の位相差スペクトルの線形性を表しており、位相差スペクトルが周波数に対して線形であれば、相関ピークの高さは1となる。この相関ピークの高さは画像の類似度の尺度として有用であり、「画像照合」の用途で用いられる。一方、相関ピークの座標は二つの画像の相対的な位置ずれに対応し、主として「画像レジストレーション」の応用で重要になる。

以下では、画像 $g(n_1, n_2)$ が画像 $f(n_1, n_2)$ を (δ_1, δ_2) だけ微小に平行移動させた画像である場合を考える。ここで、 δ_1 及び δ_2 は、それぞれ n_1 及び n_2 方向のサブピクセルレベルの移動量を表している。このとき、 $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ の

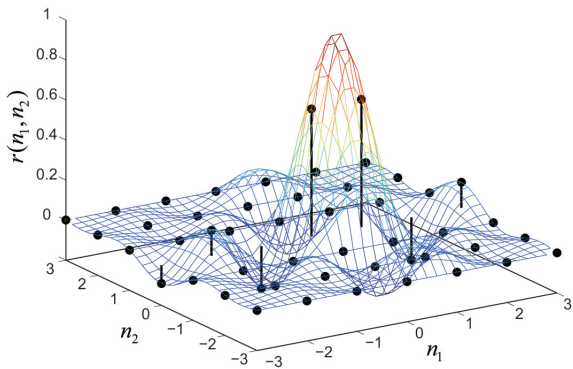


図1 相関ピークモデルのフィッティング

POC 関数は、次式で与えられる。

$$r(n_1, n_2) \simeq \frac{\alpha \sin\{\pi(n_1 + \delta_1)\} \sin\{\pi(n_2 + \delta_2)\}}{N_1 N_2 \sin\{\frac{\pi}{N_1}(n_1 + \delta_1)\} \sin\{\frac{\pi}{N_2}(n_2 + \delta_2)\}} \quad (5)$$

ここで、 $\alpha = 1$ である。上式は、画像が (δ_1, δ_2) だけ微小に平行移動した場合の POC 関数の一般形を表している。 α は、相関ピークの高さを表現するために導入されたパラメータである。画像に対して無相関なノイズが加わると α の値が減少するため、実際には $\alpha \leq 1$ となる。この相関ピークのモデルに基づく関数フィッティングにより、パラメータ $\alpha, \delta_1, \delta_2$ を推定することで、画像の類似度(位相差スペクトルの線形性)とサブピクセル精度の移動量を求めることができる。

2.3 高精度画像マッチングの基本手法

以下(A-1)～(A-3)では、まず、POC 関数を用いて、平行移動量(及び類似度)の推定を行う際に重要になる各種の高精度化手法について述べる。

(A-1) 窓関数の適用⁽¹⁶⁾

DFT では、信号が周期的に循環することを仮定するため、画像端での信号の不連続性が問題となる。この不連続性の影響を軽減するため、画像に対して窓関数を適用することが重要である。下記のハンニング窓がよく用いられる。

$$w(n_1, n_2) = \frac{1 + \cos(\frac{\pi n_1}{M_1})}{2} \frac{1 + \cos(\frac{\pi n_2}{M_2})}{2} \quad (6)$$

ハンニング窓では、画像サイズの半分が半値幅となる。窓関数を用いない通常のブロックマッチングと比較する場合、直感的には、窓関数の半値幅がブロックサイズに対応すると考えてよい。

(A-2) スペクトルの重み付け⁽¹⁶⁾

一般に、自然画像のエネルギーは低周波領域に集中し、高周波成分のエネルギーは相対的に小さいことが知られている。このため、エイリアシング、ぼけ、雑音、ひずみなどの

外乱が加わると、高周波成分の SN 比が大幅に劣化する。そこで、信頼性の低い高周波成分の影響を抑制するために、正規化相互パワースペクトル $R(k_1, k_2)$ の計算の際に、低域型のスペクトル重み付け関数 $H(k_1, k_2)$ を適用することにより、大幅な精度向上が可能である。 $H(k_1, k_2)$ の典型的な例としては、次式で与えられる方形の低域型関数が挙げられる。

$$H(k_1, k_2) = \begin{cases} 1 & |k_1| \leq U_1, |k_2| \leq U_2 \text{ のとき} \\ 0 & \text{その他のとき} \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 U_1 及び U_2 は、それぞれ $0 < U_1 \leq M_1$ 及び $0 < U_2 \leq M_2$ を満たす整数である。この場合、POC 関数は、 $H(k_1, k_2) R(k_1, k_2)$ の二次元 IDFT であり、式(5)に対応する相関ピークのモデルは、次式のように変化する。

$$r(n_1, n_2) \simeq \frac{\alpha \sin\{\frac{V_1}{N_1} \pi(n_1 + \delta_1)\} \sin\{\frac{V_2}{N_2} \pi(n_2 + \delta_2)\}}{N_1 N_2 \sin\{\frac{\pi}{N_1}(n_1 + \delta_1)\} \sin\{\frac{\pi}{N_2}(n_2 + \delta_2)\}} \quad (8)$$

ここで、 $V_1 = 2U_1 + 1$ 及び $V_2 = 2U_2 + 1$ である。このほかに、三次元計測などの応用では、 $H(k_1, k_2)$ としてガウス関数などがよく用いられる。この場合、相関ピークモデルもガウス形になる。

(A-3) 相関ピークモデルのフィッティング⁽¹⁶⁾

一般に、移動量 (δ_1, δ_2) は実数値であり、POC 関数のピーク座標がサンプリング格子点の間に存在するため、正確に移動量を推定することが困難である。そこで、相関ピークのモデルが式(5)で与えられることを考慮し、実際に計算された POC 関数の数値データに対して本モデルをフィッティングすることで、ピクセル間に存在するピークの位置を推定する(図1)。上記(A-2)のスペクトル重み付け関数 $H(k_1, k_2)$ を適用した場合は、式(8)の例のように、 $H(k_1, k_2)$ に応じた相関ピークモデルをフィッティングする必要がある。このとき、 $\alpha, \delta_1, \delta_2$ がフィッティングパラメータとなる。

なお、式(5)及び(8)の形の相関ピークモデルの場合は、POC 関数の数値データから直接的に相関ピークの座標と値を求めるピーク評価式(PEF: Peak Evaluation Formula)が導出されており⁽²⁵⁾、リアルタイム処理に寄与している。それ以外の一般的な相関ピークモデルの場合は、Levenberg-Marquardt 法などの(非線形)最小二乗法を用いる。このように、POC 関数の相関ピークモデルは、入力画像によらず、 $H(k_1, k_2)$ のみによって決定されるという特徴があるため、関数フィッティングによって高精度な移動量推定が可能である。

以上(A-1)～(A-3)を基本として、更に、用途ごとに特化した画像マッチング手法(B)～(E)が提案されている。

(B) 帯域制限位相限定相関関数(BLPOC 関数)による類似度評価⁽¹⁸⁾

これは、基本的には、「画像照合」を目的とする応用において使用される手法である。SN 比の低い画像に対して、方式(A-2)の低域型のスペクトル重み付け関数を用いると、相関

ピークのエネルギーが分散してしまうため、画像の識別性能が低下する。そこで、信頼性の低い高周波成分の影響を排除しつつ、画像の識別性能を向上させるために、帯域制限位相限定相関関数 (BLPOC 関数) が提案されている。BLPOC 関数は $R(k_1, k_2)$ の二次元 IDFT のサイズ自体を、画像テクスチャの有効帯域に制限することによって、相関ピークのエネルギーを集中させ、画像の識別性能を向上させる。BLPOC 関数は、次式で定義される。

$$r(n_1, n_2) = \frac{1}{L_1 L_2} \sum_{l_1, l_2} R(l_1, l_2) W_{L_1}^{-l_1 n_1} W_{L_2}^{-l_2 n_2} \quad (9)$$

ここで、 \sum_{l_1, l_2} は $\sum_{l_1=-K_1}^{K_1} \sum_{l_2=-K_2}^{K_2}$ を表す。ただし、 K_1 及び K_2 ($0 < K_1 \leq M_1, 0 < K_2 \leq M_2$) は二次元 IDFT の有効帯域を表し、 $L_1 = 2K_1 + 1$ 及び $L_2 = 2K_2 + 1$ である。BLPOC 関数は、低画質の画像の照合が可能であり、特に、指紋、掌紋、虹彩などの生体テクスチャ画像の照合に極めて有効である。

(C) 相似変換パラメータの推定⁽¹⁶⁾

二つの画像の幾何学的な変形が相似変換の関係にある場合は、画像を局所的なブロックに分解することなく、高精度に変換パラメータ (平行移動量、回転角度、拡大縮小率) を推定できる。具体的には、対数極座標変換された振幅スペクトルに対して上記 (A-1) ~ (A-3) の平行移動量推定手法を適用する。これは、顕微鏡や望遠鏡などの科学技術計測機器のための画像解析、並びに、工業市場向けのマシンビジョンにおいて有用である。この詳細については **3.** において議論する。

(D) サブピクセル対応点探索⁽¹⁷⁾

上記 (A-1) ~ (A-3) の平行移動量推定手法を局所的な画像ブロックのマッチングに適用し、画像ピラミッドによる粗密探索と組み合わせることにより、二つの画像の対応点をサブピクセル精度で検出できる。この手法は、画質や輝度値の変化に対してロバストであり、ステレオ画像のサブピクセル対応付けや映像のサブピクセル動き推定などに有効である。詳細については **4.** で議論する。

(E) 1次元 POC 関数の利用⁽²⁶⁾

平行化されたステレオ画像ペアにおいて視差を求める場合のように、画像ブロック間の移動ベクトルが一次元方向に制限されている場合は、一次元の POC 関数を利用することで大幅に計算量を削減することができる。式 (5) に対応する一次元 POC 関数のピークモデルは次式となる。

$$r(n) \simeq \frac{\alpha \sin\{\pi(n + \delta)\}}{N \sin\{\frac{\pi}{N}(n + \delta)\}} \quad (10)$$

なお、一次元 POC 関数においても、これまでに述べてきた種々の高精度化手法を適用することが可能である。また、任意形状の画像領域から複数の一次元画像信号を抽出して相関計算を行うとともに、これらを平均化することにより、相関ピークの SN 比を向上させ、その領域の移動量をロバストに推定することが可能である。この詳細についても **4.** において議論する。

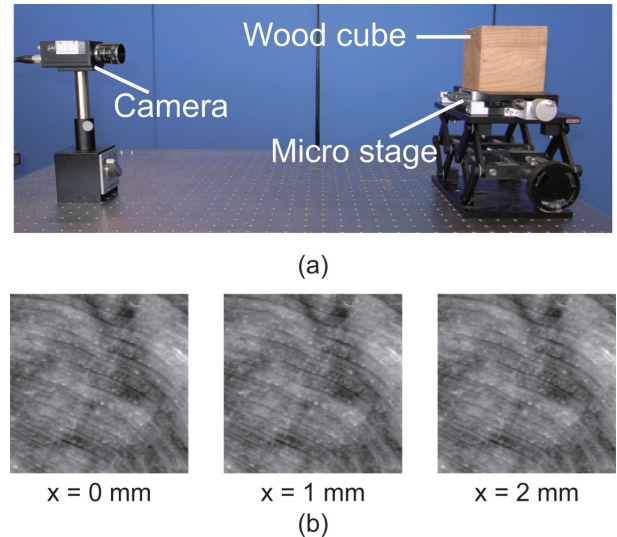


図2 平行移動量推定の精度評価実験 (a) 実験装置, (b) 実験に使用した画像の例

表1 平行移動量推定の RMS 誤差

Image size $N_1 = N_2$	16	32	64	128
RMS error [pixel]	0.047	0.018	0.010	0.006

3. 相似変換パラメータの高精度推定とマシンビジョンへの応用

3.1 平行移動量推定と性能評価

2. で述べたように、高精度化手法 (A-1) ~ (A-3) を適用することで、サブピクセル精度の平行移動量を推定することが可能である⁽¹⁶⁾。ここでは、実際にカメラで撮影した画像を用いて、位相限定相関法による平行移動量推定の精度を評価する。実験で使用した画像は、木製の立方体の表面テクスチャである。マイクロステージの上に設置された立方体を水平方向に 0.05 mm 刻みで動かしながら、それぞれの位置で立方体の表面を撮影した (図2)。マイクロステージの初期位置とそれぞれの位置で撮影した画像の間の平行移動量を推定し、実際の移動量との誤差を調べることで精度を評価した。図3 (a) に、実際の立方体の位置に対する平行移動量の推定誤差を示す。なお、マイクロステージの移動量 x (mm) と画像における移動量 δ_1 (pixel) は、次の関係にある。

$$\delta_1 = ax \quad (11)$$

ここで、 $a = 2.042$ (pixel/mm) である。実験結果より、高精度化手法 (A-1) ~ (A-3) を用いることで、極めて高精度に平行移動量を推定できることが分かる。表1 に画像サイズの変化に対する移動量推定の RMS (Root Mean Square) 誤差を示す。例えば、画像サイズ 16×16 (窓関数の半値幅が8) の場合でも RMS 誤差が 0.05 ピクセル以下であり、局所的なブロックのマッチングにおいても効果的であることが分かる。

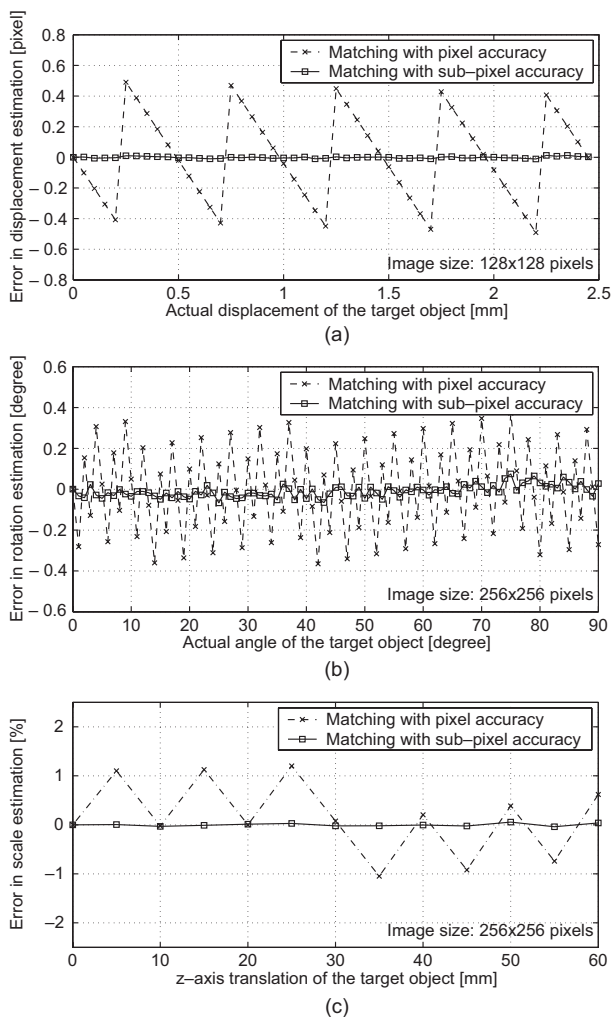


図3 相似変換パラメータ推定の精度評価 (a) 平行移動量推定, (b) 回転角度推定, (c) 拡大縮小率推定

3.2 相似変換パラメータ推定と性能評価

二つの画像が相似変換の関係にある場合は、平行移動量推定を拡張することで、高精度に変換パラメータ(平行移動量 δ_1, δ_2 , 回転角度 θ , 拡大縮小率 κ)を推定することが可能である^{(12), (16)}。

画像の回転角度と拡大縮小率は、画像の振幅スペクトルの対数極座標変換(Fourier-Mellin 変換)を利用して二次元の平行移動に置き換えて推定する(図4)。まず、二つの画像 $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ の二次元DFT $F(k_1, k_2)$ と $G(k_1, k_2)$ をそれぞれ求める。次に、それぞれの振幅スペクトル $|F(k_1, k_2)|$ と $|G(k_1, k_2)|$ を求める。振幅スペクトルは回転(θ)と拡大縮小(κ)の影響のみを受けるため、平行移動(δ_1, δ_2)の影響を排除することができる。ただし、自然画像では、そのエネルギーの大部分が低周波領域に集中し、高周波成分のエネルギーは相対的に小さいことが知られている。そのため、実際には、 $|F(k_1, k_2)|$ と $|G(k_1, k_2)|$ の代わりに、 $\log\{|F(k_1, k_2)|+1\}$ と $\log\{|G(k_1, k_2)|+1\}$ を用いて、高周波成分を強調しておく。強調された振幅スペクトルの対数極座標変換(Fourier-Mellin

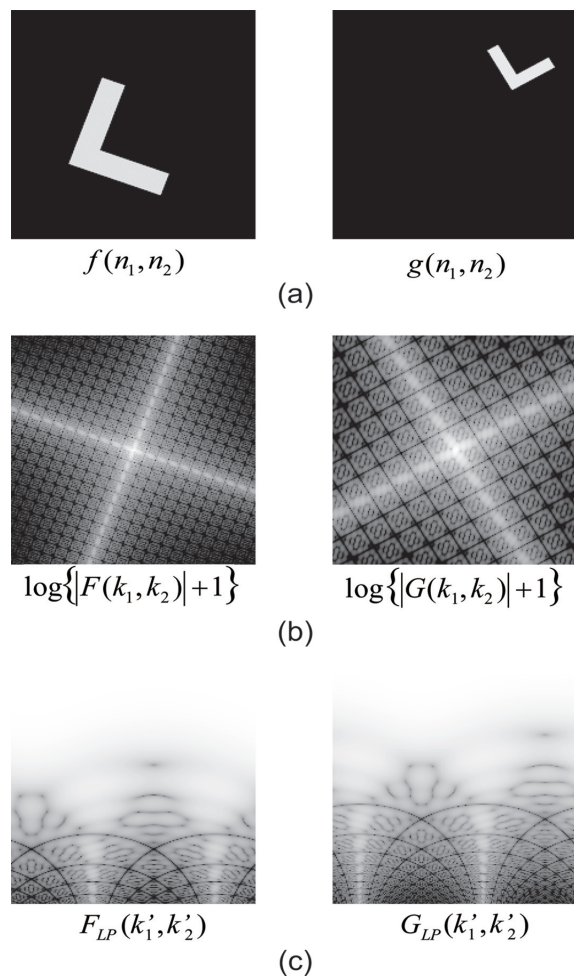


図4 回転角度及び拡大縮小率の推定 (a) 入力画像 $f(n_1, n_2)$ 及び $g(n_1, n_2)$, (b) 対数振幅スペクトル $\log\{|F(k_1, k_2)|+1\}$ 及び $\log\{|G(k_1, k_2)|+1\}$, (c) 対数極座標変換後のスペクトル $F_{LP}(k'_1, k'_2)$ 及び $G_{LP}(k'_1, k'_2)$

変換)を行い、 $F_{LP}(k'_1, k'_2)$ 及び $G_{LP}(k'_1, k'_2)$ を求める。ここで、 k'_1 と k'_2 は変換された画像のインデックスを表している。最後に、 $F_{LP}(k'_1, k'_2)$ と $G_{LP}(k'_1, k'_2)$ の間の平行移動量をサブピクセル移動量推定アルゴリズムにより求め、画像の回転角度 θ と拡大縮小率 κ を算出する。

平行移動量推定の実験と同様の環境を用いて回転角度 θ と拡大縮小率 κ の推定精度を評価した。回転角度推定ではマイクロステージの代わりに回転ステージを、拡大縮小率推定では z ステージ (z 軸はカメラの光軸方向)を用いて画像を撮影した。図3 (b) 及び (c) に、それぞれ回転角度と拡大縮小率の誤差を示す。回転角度 θ についてはRMS 誤差が0.03 度、拡大縮小率 κ についてはRMS 誤差が0.02 % の高精度な計測が可能になっている。なお、拡大縮小率計測における z ステージの移動量 z (mm) と画像における拡大縮小率 κ は、次の関係にある。

$$\kappa = 1 + \frac{z}{b} \quad (12)$$

ここで、 $b = 436.987$ (mm) である。



図5 超高速画像認識システムと専用LSI

なお、平行移動量については、画像 $g(n_1, n_2)$ を $-\theta$ 度だけ回転し、 $1/\kappa$ 倍にスケールさせた後に計測を行う。

3.3 工業用画像認識への応用

位相限定相関法を用いた超高速画像認識システムが既に実用化されている⁽²¹⁾。図5に実用化されている製品の例を示す。本システムは、相似変換パラメータの推定アルゴリズムにより、登録された画像と入力画像の平行移動量、回転角度、拡大縮小率並びに類似度をリアルタイムで出力する。また、(A-3)で述べたピーク評価式も実装されており、処理の高速化に寄与している。本システムにおいては、位相限定相関法の高速処理のために独自開発された専用LSI⁽²⁷⁾が搭載されており、POC関数(128×128ピクセル)の計算をわずか3ms弱の時間で実行できる。本システムは、液晶基板や半導体チップの位置決め装置、製本検査装置、レーザスペckル計測装置など幅広い応用に適用されている。

3.4 電子顕微鏡の倍率校正への応用

位相限定相関法に基づき、従来は困難であった透過形電子顕微鏡(TEM: Transmission Electron Microscope)のオートフォーカス機能が初めて実現されている⁽²¹⁾。また、近年、電子顕微鏡画像の倍率推定の問題に位相限定相関法が適用され、極めて高い精度で顕微鏡の倍率校正を実現できる可能性が示されている⁽²⁸⁾。通常、電子顕微鏡の倍率校正はサイズが既知の標準試料を用いて行われる。低倍率(μm スケール)の領域では半導体技術によって加工された試料が用いられ、高倍率(nmスケール)の領域では原子格子が長さの基準として用いられる。しかし、その間の相対倍率にして約1,000倍の領域においては、標準試料が存在しないため、直接的に倍率校正を行うことは困難である。これに対して、倍率校正された領域の画像と倍率校正がされていない領域の画像の相対倍率を位相限定相関法により多段階推定することによって、標準試料の存在しない領域での倍率校正を実現する手法が提案

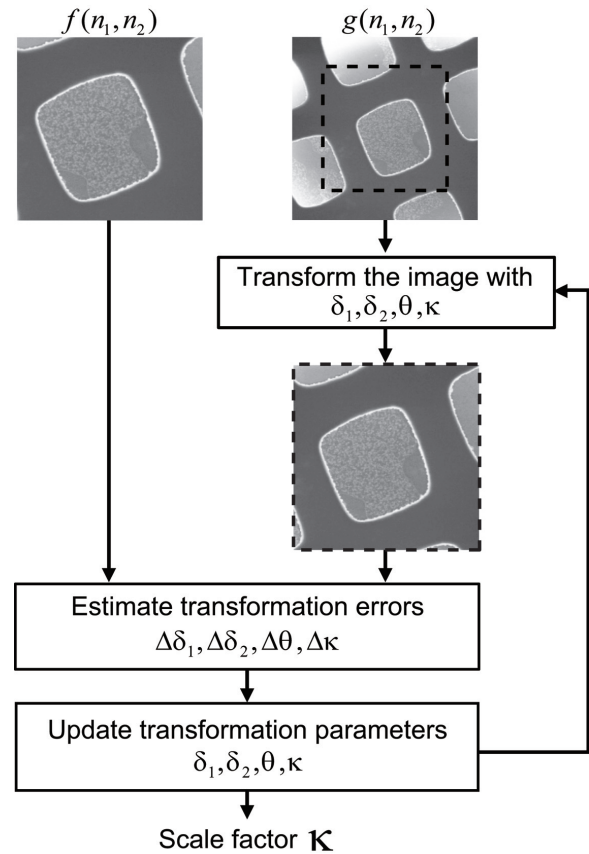


図6 電子顕微鏡画像の倍率推定

されている。画像サイズが400×400ピクセルで1,000倍に拡大された画像の倍率を5～10段階で推定した場合、提案手法は0.2%程度の誤差で極めて高精度に推定可能であることが示されている。

図6に1段階の倍率推定のフローを示す。画像の相似変換とパラメータ推定を繰り返しながら誤差を収束させることにより、高精度な倍率推定が可能である。

4. サブピクセル対応点探索と受動型三次元計測への応用

4.1 対応点探索手法の分類

本章では、二つの画像の間に相似変換のような単純な変換が定義できない一般的な場合の対応問題について議論する。この場合、画像の各点の対応付けのためには、いわゆる対応点探索アルゴリズムが必要になる。例えば、映像信号処理では、連続するフレームごとに対応点を決定し、動きベクトルを計算することが求められる。また、コンピュータビジョンの分野では、異なる視点から撮影された画像間の対応点を自動計算することが必要となる。通常、対応点探索のためには、対応候補点近傍から切り出した局所的な画像ブロックに対するマッチングが用いられる。このブロックマッチングの尺度としては、SAD (Sum of Absolute Differences) や SSD (Sum of Squared Differences) などの相違度、あるいは、NCC (Normalized Cross-Correlation) な

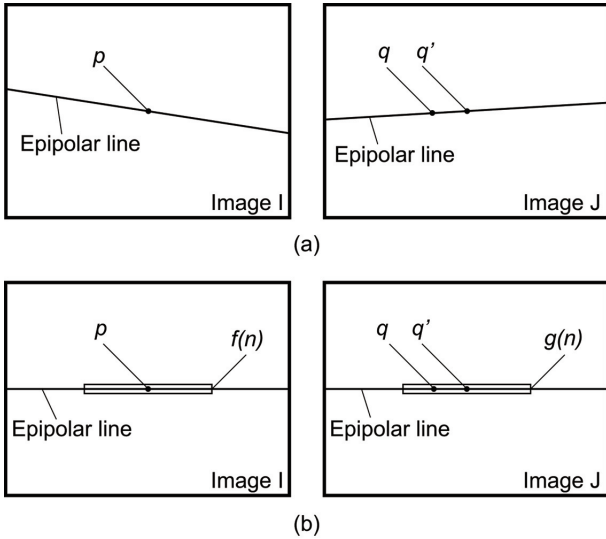


図7 ステレオ画像の平行化 (a) 平行化前の画像, (b) 平行化後の画像

どの類似度がよく用いられる⁽³⁾.

サブピクセル対応点探索を行う場合には、このブロックマッチングにおいて、サブピクセル精度の位置推定が必要となる。映像信号処理でよく用いられる方法は、あらかじめ画像の補間拡大を行う方式であり、拡大された画像に対して SAD や SSD などを用いて、サブピクセル精度のマッチングを行うことが多い⁽⁴⁾。一方、SAD や SSD などの相違度、あるいは、NCC などの類似度の計算結果に対して、連続関数をフィッティングすることにより、サブピクセル精度の位置推定を行う方法も提案されている^{(3), (6)-(10)}。この方法では、パラボラフィッティングや等角直線フィッティングがよく用いられる⁽³⁾。

これに対して、位相限定相関法では、(i) 画像の明るさの変化に対してロバストであること、並びに、(ii) 相関ピークの形状の理論モデルに基づいた高精度フィッティングが可能であることが重要な特長として挙げられる。一方、DFT の計算コストが問題になるが、用途によっては、一次元 POC 関数を利用することにより、大幅な高速化が可能である。位相限定相関法に基づくサブピクセル対応点探索手法は、以下の三つに分類される。

• 二次元 POC 関数に基づく二次元対応点探索

二次元 POC 関数による平行移動量推定手法 (A-1) ~ (A-3) をブロックマッチングに適用し、画像ピラミッドを用いた粗密探索を組み合わせることにより、対応点の座標 (二次元) をサブピクセル精度で推定することが可能である^{(17), (19)}。この手法は、超解像やビデオモザイクなどの映像信号処理において、フレーム間の二次元の動きベクトルをサブピクセル精度で求める应用到している。

• 二次元 POC 関数に基づく一次元対応点探索

本手法は平行化されたステレオ画像の対応付けなどのように、対応点座標の探索が一次元に制限されている場合に用いられる。基本的には前項で述べた二次元探索を一

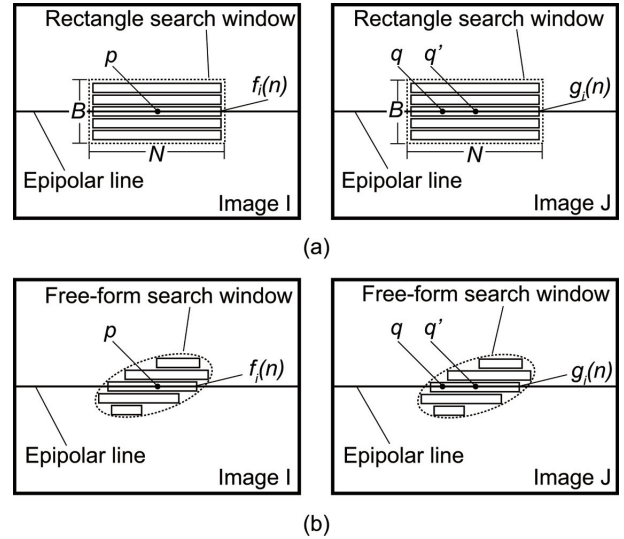


図8 複数の一次元信号の利用による高信頼化

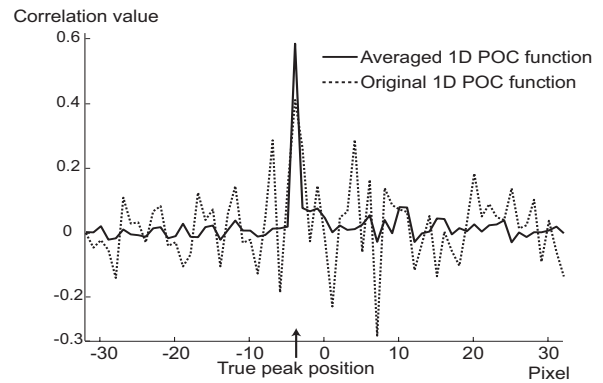


図9 一次元 POC 関数の平均化による SN 比の向上

次元探索に置き換えた手法である。

• 一次元 POC 関数に基づく一次元対応点探索

本手法も平行化されたステレオ画像の対応付けに有効である。前項で述べた二次元 POC 関数を一次元 POC 関数 (E) に置き換えた手法である⁽²⁶⁾。二次元 POC 関数を用いた場合よりも、計算量を大幅に削減しつつ、高い対応付け精度を実現することが可能である。

以下では、上記の三つの手法のうち、最後に述べた一次元 POC 関数に基づく手法について詳しく述べる。

4.2 一次元 POC 関数に基づくステレオ画像のサブピクセル対応点探索

図7に示すように、対応付けを行うステレオ画像を、それぞれのエピポーラ線が画像の水平軸と平行になるように幾何補正 (平行化) する。補正された二つの画像を画像 *I* 及び画像 *J* とする。このとき、画像 *I* の基準点 *p* に対応する画像 *J* の対応点 *q* を求めることを考える。図7 (b) に示すように、画像 *I* から基準点 *p* を中心とした一次元の画像信号を切り出し、*f*(*n*) とする。同様に、画像 *J* から探索する未知の対応点 *q* の

表2 対応付け手法の性能比較

		ADD	MUL	DIV	SQRT	RMS error [mm]	Max. error [mm]
POC (proposed)	1D: 32 pixels x 11 lines	12,821	11,050	768	352	0.50	2.07
	2D: 32x32 pixels	95,667	72,350	2,048	1,042	0.49	2.11
SAD	16x16 pixels	8,178	1	1	0	2.66	40.29
	32x32 pixels	32,754	1	1	0	1.73	25.66
SSD	16x16 pixels	8,179	4,099	1	0	1.77	34.91
	32x32 pixels	32,755	16,387	1	0	1.11	23.94

- (i) 1D POC (一次元 POC) 及び 2D POC (二次元 POC) において、スペクトル重み付け関数としてガウス関数 ($\sigma^2=0.5$) を用いた。
- (ii) サブピクセル移動量推定に用いるデータ点数は、1D POC、SAD、SSD については 3 点とし、2D POC については 3x3 点とした。
- (iii) SAD 及び SSD の一次元探索範囲を 16 ピクセルとした。

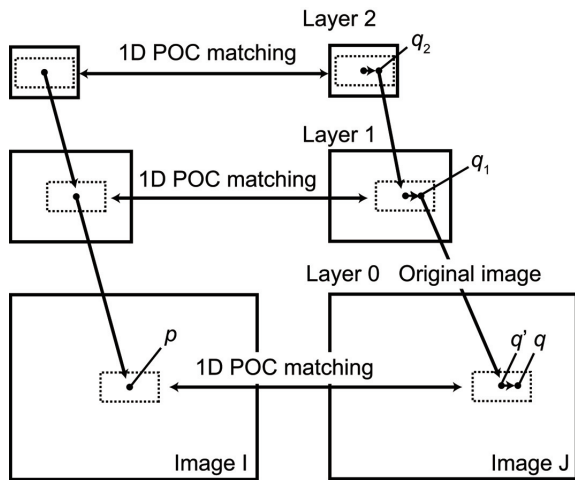


図10 画像ピラミッドを用いた粗密探索

候補となる点 q' を中心として一次元画像信号 $g(n)$ を切り出す。 $f(n)$ と $g(n)$ から(E)で定義した一次元POC関数を計算することで、信号間のサブピクセル移動量を算出し、対応点 q を求める。このとき、二次元POC関数の場合と同様に、高精度化手法(A-1)～(A-3)を適用する。

画質が低い場合は、一組の一次元画像信号 $f(n)$ と $g(n)$ のみを用いて信頼性の高い対応付けを行うことが困難である。そこで、複数の一次元画像信号の組を p と q' の近傍領域から抽出し、それらの相関計算の結果を統合することによって誤対応を減らし、推定精度を向上することができる。具体的には、図8(a)に示すように、画像Iの基準点 p の周辺から B 個の一次元画像信号 $f_i(n)$ ($i=1, 2, \dots, B$)を抽出する。このとき、図8の破線で示した画像領域を探索ウィンドウと呼ぶことにする。一方、画像Jの点 q' の周辺の対応する位置からも B 個の一次元画像信号 $g_i(n)$ ($i=1, 2, \dots, B$)を抽出する。抽出した $2B$ 個の信号から B 個の一次元POC関数を求め、これらを平均化することで、相関ピークの信頼性が向上する(図9)。この際に、平均化を周波数領域で行うと計算量が減少する。また、探索ウィンドウは、図8(b)に示すように、異なる長さの一次元画像信号を用いて任意の形状に設定することもできる。

なお、上記の方法では、探索ウィンドウ内に真の対応点 q が存在することを仮定している。この仮定を現実のステレ



Image size: 1004 x 1004 pixels
Focal length (lens): 15 mm
Stereo baseline: 46 mm

図11 ステレオカメラ

オ画像の対応付けにおいて常に成立させるために、画像ピラミッドを用いた粗密探索を用いる。図10にその概略を示す。探索を画像ピラミッドの低解像度画像から順に行うことにより、常に、探索ウィンドウ内に真の対応点 q をとらえつつ、その座標の推定が可能である。

4.3 対応点探索手法の性能比較

ここでは、ステレオ画像の対応問題について、POC関数(一次元及び二次元)を用いる提案法と、SADに等角直線フィッティングを用いる方法⁽⁹⁾、SSDにパラボラフィッティングを用いる方法⁽⁹⁾を比較する。評価項目は、表2に示すように、典型的な条件のもとでの計算コストと三次元復元精度とした。まず、表中の“ADD”、“MUL”、“DIV”、“SQRT”は、それぞれ、一回の画像マッチングに必要な加算、乗算、除算、開平方の回数である。一般にPOC関数の計算コストが大きいが、一次元POC関数を用いることにより、二次元の場合と比較して計算コストの大幅な削減が可能である。

三次元復元精度の比較では、球面(ボーリング球、直径: 108.45 mm)をステレオカメラから500 mmの位置に固定し、三階層の粗密探索で対応付けし、三次元復元を行った。実験で用いたステレオカメラを図11に示す。復元された三次元点群に最小二乗法を用いて球面の方程式を当てはめ、その当てはめ誤差を三次元復元誤差として評価した。表2にRMS誤

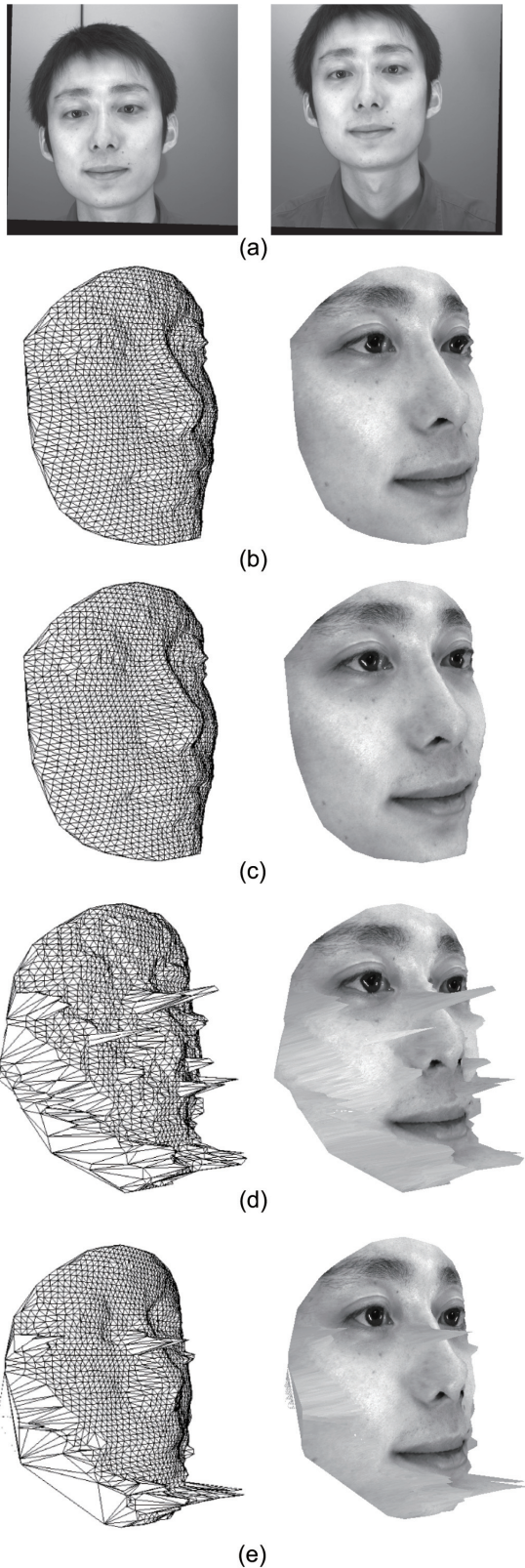


図12 顔の三次元復元結果 (a) ステレオ画像, (b) 1D POC (32 pixels × 11 lines), (c) 2D POC (32 × 32 pixels), (d) SAD (32 × 32 pixels), (e) SSD (32 × 32 pixels)

差及び最大誤差を示す。一次元POC関数を用いる手法は、計測誤差の点において二次元POC関数を用いる手法と同等であり、SAD及びSSDを用いる手法よりも優れていることが分かる。計測精度は用いる画像によって異なるため、より詳細な評価・検討が必要であるが、一般に、POC関数を用いる手法は、画像の変化に対してロバストである。

最後に、人物の顔の三次元復元を行い、複雑な曲面形状の計測性能を比較する。図12 (a) はステレオ画像である。ステレオカメラヘッドは縦置きのカメラ配置であるため(図11)、エピポーラ線は画像の垂直座標軸と平行になる。図12 (b) 及び(c) は、それぞれ一次元POC関数(32 pixels × 11 lines)及び二次元POC関数(32 × 32 pixels)を用いた場合の三次元計測結果である。一方、図12 (d) 及び(e) は、それぞれSAD(32 × 32 pixels)及びSSD(32 × 32 pixels)を用いた場合の三次元計測結果である。このように、位相限定相関法を用いることで、人物の顔などの複雑な曲面形状を持つ対象の場合でも、高精度に三次元復元できることが分かる。

5. その他の応用

サブピクセル画像マッチングは、本論文で取り上げた用途以外に、映像の動き抽出⁽²⁹⁾やビデオモザイク⁽³⁰⁾、超解像⁽³¹⁾などの映像信号処理の応用でも有効である。また、文献⁽³²⁾では古いフィルム映像の修復を行う際のフレーム位置ずれの高精度補正に適用されている。文献⁽³³⁾ではコンクリートのひび割れを検出する際の画像の高精度位置合わせに用いられている。更に、ステレオビジョンの応用としては、顔の高精度三次元形状計測による個人認証⁽³⁴⁾、車載カメラなど多岐にわたる。

同様の原理は、画像に限らず、任意の一次元波形のマッチングに応用可能である。一次元POC関数を用いて複数の信号波形をマッチングし、相対的なジッタを高精度に推定することができる。この原理を暗号処理LSIのサイドチャンネル情報の解析に応用した例が報告されている⁽³⁵⁾。

一方、類似度の評価を目的とする画像照合の典型的な応用としては、バイオメトリクス認証が挙げられ、比較的古くから指紋照合装置への応用事例がある^{(20), (21)}。その発展形として、指紋画像の劣化に対して極めてロバストな照合アルゴリズムがBLPOC関数を用いて実現されている⁽¹⁸⁾。BLPOC関数を用いた手法は、虹彩⁽²²⁾、掌紋⁽²³⁾、歯科X線写真⁽²⁴⁾を用いた個人認証においても非常に高い性能を発揮している。更に、位相限定相関法を静脈パターンによる個人認証に適用する試みも報告されている⁽³⁶⁾。

また、離散フーリエ変換(DFT)を用いる位相限定相関法に対して、離散コサイン変換(DCT)を用いて同様の画像マッチングを行う方法が提案されている⁽³⁷⁾。DCTの正負符号に基づく鏡像位相限定相関関数が提案されており、位相限定相関法と同様の画像マッチングが実現できることが示されている。この理論は解像度の異なるJPEG符号化画像の同定⁽³⁸⁾などの問題とも密接に関係しており、幅広い応用が期待される。

6. まとめ

位相限定相関法は、信号の振幅成分を捨て去り、位相成分にのみ着目するという意味で意外性のある方法であるが、その有効性は様々な応用で実証されつつある⁽²⁾。本論文では、特に、位置合わせのサブピクセル分解能を追求するアプローチについて解説した。本手法は、複雑な拘束条件を用いた最適化を行わずに、単純なDSP計算のみで信頼性の高いサブピクセル推定が可能であり、広範囲の分野にインパクトを与えつつある。従来は、計算量の観点から位相限定相関法の用途が制限されてきたが、今後、組み込み用途向けの並列DSPエンジンなどの進展とともに、デジタルコンシューマ製品などへの展開も大幅に加速するものと期待される。

謝 辞

東北工業大学の樋口龍雄教授、(株)山武の小林孝次氏、石井秀昭氏、勝亦敦氏、中島寛氏、並びに日頃より研究協力を頂く多数の企業の皆様に深謝致します。本論文の執筆にあたり、有意義なご助言を頂いた宝珠山治氏に感謝致します。

文 献

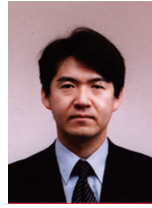
- (1) B. Zitová and J. Flusser, "Image registration methods: A survey," *Image Vis. Comp.*, vol.21, no.4, pp.977-1000, 2003.
- (2) 青木孝文, "位相限定相関法とその応用展開—3Dビジョンからバイオメトリクスまで—," *信学技報, SIS2006-64*, pp.31-38, Nov. 2006.
- (3) デジタル画像処理, 奥富正敏(編), CG-ARTS協会, 2004.
- (4) H.264/AVC 教科書, 鈴木輝彦(編), 角野真也, 菊地義浩, インプレス, 2004.
- (5) Q. Tian and M.N. Huhns, "Algorithms for subpixel registration," *Comput. Vis. Graph. Image Process.*, vol.35, no.2, pp.220-233, 1986.
- (6) D. Scharstein and R. Szeliski, "A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms," *Int. J. Comput. Vis.*, vol.47, no.1/2/3, pp.7-42, 2002.
- (7) M. Shimizu and M. Okutomi, "Sub-pixel estimation error cancellation on area-based matching," *Int. J. Comput. Vis.*, vol.63, no.3, pp. 207-224, 2005.
- (8) M. Shimizu and M. Okutomi, "Multi-parameter simultaneous estimation on area-based matching," *Int. J. Comp. Vis.*, vol.67, no.3, pp. 327-342, 2006.
- (9) 清水雅夫, 奥富正敏, "画像のマッチングにおけるサブピクセル推定の意味と性質," *信学論 (D-II)*, vol.J85-D-II, no.12, pp.1791-1800, Dec., 2002.
- (10) 渡部 齊, 角岡幹篤, 鷺見和彦, 松山隆司, "画像の2次元空間構造を利用したサブピクセルマッチングの高速化," *画像の認識・理解のシンポジウム (MIRU2005)*, no.IS3-124, July 2005.
- (11) C.D. Kuglin and D.C. Hines, "The phase correlation image alignment method," *Proc. Int. Conf. Cybernetics and Society*, pp.163-165, 1975.
- (12) Q.S. Chen, M. Defrise, and F. Deconinck, "Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol.16, no.12, pp.1156-1168, Dec. 1994.
- (13) G.A. Thomas, B.A. Hons, and A.M.I.E. E., "Television motion measurement for DATV and other applications," *BBC Research Department Report*, Sept. 1987.
- (14) B.V.K. V. Kumar, A. Mahalanobis, and R.D. Juday, *Correlation Pattern Recognition*, Cambridge University Press, 2005.
- (15) H. Foroosh, J.B. Zerubia, and M. Berthod, "Extension of phase correlation to subpixel registration," *IEEE Trans. Image Process.*, vol.11, no.3, pp.188-200, March 2002.
- (16) K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi, and K. Kobayashi,

"High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E86-A, no.8, pp.1925-1934, Aug. 2003.

- (17) K. Takita, M.A. Muquit, T. Aoki, and T. Higuchi, "A sub-pixel correspondence search technique for computer vision applications," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E87-A, no.8, pp.1913-1923, Aug. 2004.
- (18) K. Ito, H. Nakajima, K. Kobayashi, T. Aoki, and T. Higuchi, "A fingerprint matching algorithm using phase-only correlation," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E87-A, no.3, pp.682-691, March 2004.
- (19) M.A. Muquit, T. Shibahara, and T. Aoki, "A high-accuracy passive 3D measurement system using phase-based image matching," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E89-A, no.3, pp.686-697, March 2006.
- (20) H. Nakajima, K. Kobayashi, M. Kawamata, T. Aoki, and T. Higuchi, "Pattern collation apparatus based on spatial frequency characteristics (USP 5915034)," *US Patent*, May 1995.
- (21) Products using phase-based image matching, <http://www.aoki.ecei.tohoku.ac.jp/research/poc.html>
- (22) K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi, and H. Nakajima, "A phase-based iris recognition algorithm," *Lect. Notes Comp. Sci. (ICB2006)*, vol.3832, pp.356-365, Dec. 2005.
- (23) K. Ito, T. Aoki, H. Nakajima, K. Kobayashi, and T. Higuchi, "A palmprint recognition algorithm using phase-based image matching," *Proc. the 2006 IEEE Int. Conf. Image Processing*, pp.2669-2672, Oct. 2006.
- (24) A. Nikaido, K. Ito, T. Aoki, E. Kosuge, and R. Kawamata, "A dental radiograph registration algorithm using phase-based image matching for human identification," *Proc. IEEE 2006 Int. Symp. Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, pp.375-378, Dec. 2006.
- (25) S. Nagashima, T. Aoki, T. Higuchi, and K. Kobayashi, "A subpixel image matching technique using phase-only correlation," *Proc. IEEE 2006 Int. Symp. Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, pp.701-704, Dec. 2006.
- (26) 柴原琢磨, 青木孝文, 中島 寛, 小林孝次, "1次元位相限定相関法に基づくステレオ画像のサブピクセル対応付け手法," *第21回信号処理シンポジウム*, no.B6-3, pp.1-6, Nov. 2006.
- (27) M. Morikawa, A. Katsumata, and K. Kobayashi, "Pixel-and-column pipeline architecture for FFT-based image processor," *Proc. IEEE Int. Symp. Circuit and Systems*, vol.3, pp.687-690, 2002.
- (28) 長嶋 聖, 青木孝文, 常田るり子, "位相限定相関法に基づく電子顕微鏡画像の倍率推定アルゴリズムとその高精度化," *映情学技報*, vol.30, no.33, pp.41-44, June 2006.
- (29) H.C. Loy and T. Aoki, "Robust motion estimation for video sequences based on phase-only correlation," *Proc. the 6th IASTED Int. Conf. Signal and Image Processing*, pp.441-446, Aug. 2004.
- (30) 沼 徳仁, 青木孝文, 近藤敏志, "位相限定相関法に基づく高品質背景スプライト生成," *信学技報, SIP2005-104*, pp.49-54, Oct. 2005.
- (31) 岩淵 修, 青木孝文, 近藤敏志, "位相限定相関法に基づく超解像と順次走査変換への応用," *第20回信号処理シンポジウム*, no.D1-3, pp.1-6, Nov. 2005.
- (32) M. Hagiwara, M. Abe, and M. Kawamata, "Estimation method of frame displacement for old films using phase-only correlation," *Journal of Signal Processing*, vol.8, no.5, pp.421-429, Sept. 2004.
- (33) N. Itoh, "An image registration technique for detection of crack and rust growth," *Proc. the First Int. Conf. Computer Vision Theory and Applications*, pp.389-392, Feb. 2006.
- (34) N. Uchida, T. Shibahara, T. Aoki, H. Nakajima, and K. Kobayashi, "3D face recognition using passive stereo vision," *Proc. the 2005 IEEE Int. Conf. Image Processing*, no.II, pp.950-953, Sept. 2005.
- (35) N. Homma, S. Nagashima, Y. Imai, T. Aoki, and A. Satoh, "High-resolution side-channel attack using phase-based waveform matching," *Lect. Notes Comput. Sci. (CHES 2006)*, no.4249, pp.187-200, Oct. 2006.
- (36) 樋口正憲, 田中敏幸, "位相限定相関法を用いた静脈パターンによる個人認証," *計測自動制御学会論文集*, vol.40, no.3, pp.364-366, March 2004.
- (37) 伊藤 泉, 藤吉正明, 貴家仁志, "DCT係数の正負符号と位相

限定相関との関係について,” 信学論 (A), vol.J90-A, no.7, July 2007 (掲載決定).

- (38) F. Arnia, I. Iizuka, M. Fujiyoshi, and H. Kiya, “Fast image identification methods for JPEG images with different compression ratios,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E89-A, no.6, pp.1585-1593, June 2006.



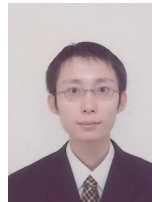
青木 孝文 (正員)

1988 東北大・工・電子・卒。1992 同大学院工学研究科博士課程了。同年同大学・工・助手, 1994 同大学院情報科学研究科助手, 1996 同助教授, 2002 同教授。現在に至る。超高速デジタル計算の理論, 画像センシング, 映像信号処理, バイオメトリクス, VLSI 設計技術, 分子コンピューティングに関する研究に従事。英国電気学会フレミング賞及びマウントバッテン賞ほかを受賞。IEEE, 計測自動制御学会, 情報処理学会各会員。博士(工学)。



伊藤 康一 (正員)

2000 東北大・工・電子・卒。2005 同大学院情報科学研究科博士課程了。同年同大学院情報科学研究科助手, 2007 同助教。2004—2005 日本学術振興会特別研究員。現在に至る。画像処理及びバイオメトリクスに関する研究に従事。IEEE, 情報処理学会各会員。博士(情報科学)。



柴原 琢磨 (学生員)

2003 山形大・理・数理学・卒。2005 東北大大学院情報科学研究科修士課程了。現在, 同大学院博士課程在学中。画像処理及びステレオビジョンに関する研究に従事。IEEE 会員。



長嶋 聖 (学生員)

2003 東北大・工・情報・卒。2005 同大学院情報科学研究科修士課程了。現在, 同大学院博士課程在学中。画像処理, 信号処理に関する研究に従事。IEEE 会員。