増分符号相関による孔壁 3 次元形状のステレオ画像計測*

金子 俊一**

村瀬 一朗***

五十嵐 悟**

亀和田 俊一†

Measuring 3-D Shape of Borehole Wall Using Stereo Vision with Increment Sign Correlation

Shun'ichi KANEKO, Ichiro MURASE, Satoru IGARASHI and Shun'ichi KAMEWADA

A method is proposed for stereoscopic depth measurement with stereo pair images of borehole wall. Increment sign correlation (ISC) is used to solve the stereo correspondence problem. ISC is a kind of cross correlation between binary-coded increment signs and has a binary or normal distribution, low computational cost, robustness against ill-illumination and occlusion. The method provides dense depth information and reliability of stereo correspondence by using statistical estimation of thresholds. Experiments with real pictures show effectiveness of the proposed approach.

Key words: stereo matching, template, increment sign correlation, borehole TV

1. はじめに

地質調査において、地下岩盤の解析、地層・断層の構造推定・再構成、地下水系の構造推定、などの多様な目的のために、ボーリング標本の観察が広く行われている。特にボアホール TV¹⁾ は地中孔壁状態の TV 映像による直接観察を可能とするため、画像記録をも含めて有効であることが知られている。さらに孔壁面の定量的計測を進めるために、孔壁面の 3 次元形状計測に対する必要が高まっている。現在はキャリパーによる接触型計測が行われているが、分解能が低く接触痕の生成などの問題がある。著者の一人は、単一 CCD カメラとリニアプリズム光学系とを組み合わせ用いるステレオ画像の取得技術を開発し、両眼目視観察による実体視による定性観測を可能とした²⁾³⁾。地質調査の分野においては、このような実体視機能は専門家による目視判定のためには必須であり、このステレオ画像を併用する 3 次元形状計測の実現が効率的である。本論文は、このステレオ画像に基づいて孔壁面の 3 次元形状を定量的に復元するための手法を提案し、その実応用の可能性を検討することである。

孔壁形状の画像計測においては、装置がボーリング孔の大きさに限定されるため照明条件が良好でない、更に岩盤表面がコントラストの低い細かなテクスチャパターンからなるので対応付け処理が容易ではないなどの特有の問題がある。加えて、孔壁の形状計測では、いわゆる密な奥行き情報が必要とされる。このための方法として、レンジファインダ⁴⁾があるが、今回の条件である両眼目視観察による実体視のための画像をも取得するためには、レーザスリット投光光学系などが余分に必要となる。そこで、本研究では、目視観察用のステレオ画像を直接用いる画像計測方式について検討する。

計算機処理による奥行き復元の方法には、おもにエッジなどの特徴照合に基づく方法と部分画像の照合に基づく方法がある。前者として、エッジ点間の対応に基づく方法^{5)~7)}や、エッジセグメント間の対応に基づく方法^{8)~10)}などがある。これら特徴を用いる手法は、工業製品のような人工的な対象物においては明りような特徴抽出が容易であるため有効な手法と考えられるが、自然物あるいは自然環境中の対象に対しては対応付け処理が不安定になる傾向がある¹¹⁾。一方、後者に属する手法として、左右小領域の明度の相関を利用した対応付けを行う手法があり、正規化相

関¹²⁾、残差二乗和¹³⁾などのテンプレート照合法が用いられている。テンプレート照合法の多くは、明りような特徴が存在しない場合でも適用可能な手法であるといえるが、一般的に左右画像にわたる明度変化に弱く、また遮蔽を扱うことが困難である¹⁴⁾。

我々はこれまでに、増分符号相関法と呼ぶ汎用の画像照合法を提案している¹⁵⁾¹⁶⁾。それは類似パタンの明度増減の傾向が保存されるという性質を利用した照合法であり、統計的ノイズ、照明変化、遮蔽などに対してロバストであり、計算コストが小さな手法である。本論文では、孔壁ステレオ画像における上述の問題を解決し良質な奥行き計算を行うために、増分符号相関による奥行き計算法を提案する。更に、対応付けにおける不良値を判定するためのしきい値の算出法を提示する。

本論文の構成を次に示す。2 章において増分符号相関の基本的定義を行い、その統計的な性質について説明する。3 章ではボアホールカメラの基本構造、ステレオ画像の合成法および奥行き計算について述べる。4 章ではステレオ照合の基本アルゴリズム、視差の不定状態の検出およびその補てん方法について述べる。5 章においてはサンプル実画像を用いた実験結果を示し、3 次元測定値を用いた比較考察を行う。6 章はまとめである。

2. 増分符号相関

2.1 定義と統計的性質

増分符号相関は、画素明度を直接用いる正規化相関などと異なり、隣接画素における明度の増減傾向の類似を判定する手法である。これによって、照明変動などの明度変化に対してロバストな特性が得られる。詳しい導出などは文献¹⁵⁾に譲り、ここでは要点のみを述べる。

長さ $N+1$ の明度列 $G = \{g_n\}_{n=1}^{N+1}$ をテンプレート画像とする。ここでは簡単のため 1 次元配列とする。任意の照合対象画像を同様に、明度列 $G' = \{g'_n\}_{n=1}^{N+1}$ とする。増分符号相関 r を双方の隣接画素間の明度差の正負符号の一致する割合として次式で定義する。

$$r = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N b(g_{n+1} - g_n) * b(g'_{n+1} - g'_n) \quad (1)$$

ここで、演算 $x * y = xy + (1-x)(1-y)$ は対等の論理演算であり、次式で定義される符号選択関数 $b(x)$ を用いている。

$$b(x) = \delta(\text{sign}(x) - 1) + \delta(\text{sign}(x)) \quad (2)$$

ただし、 $\delta(x)$ はクロネッカーのデルタ関数、 $\text{sign}(x)$ は $\{-1, 0, 1\}$ の値をとる符号関数である。上式 (2) では、 $g_{n+1} > g_n$ (ある

* 原稿受付 平成 12 年 4 月 13 日

** 正会員 北海道大学大学院 (札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

*** 正会員 精電舎電子工業 (株) (東京都荒川区西日暮里 2 丁目)

† (株) レアックス (札幌市東区北 24 条東 17 丁目)

Fig. 1 Mechanism of borehole camera

いは $g'_{n+1} > g'_n$ 及び $g_{n+1} = g_n$ ($g'_{n+1} = g'_n$) の場合にそれぞれ第 1 項, 第 2 項が対応する. 上の計算は, 明度値の大小判定 ($2N$ 回), 符号の一致判定 (N 回) と平均操作 (N 回の和と 1 回の除算) を含むのみであり, 計算コストは小さい. 増分符号相関の統計的性質はよくわかっており, その確率密度は, 大きな N では, 次のガウス関数 (平均: q , 分散: qp/N) で近似することができる¹⁵⁾.

$$p_r(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi qp/N}} \exp \left\{ -\frac{(r-q)^2}{2qp/N} \right\} \quad (3)$$

ここで, p 及び $q = 1 - p$ はそれぞれビットの反転および非反転確率である.

画像照合の実応用においては, 照合判定のためのしきい値の設定が大きな問題となる. 増分符号相関においては, その確率密度が既知であるので, 通常事前に設定されるコスト値を用いることによって, 式 (3) の確率密度値の比を経てしきい値を容易にかつ合理的に算出することができるという利点をもつ¹⁵⁾. この点については, 後に実画像を用いて検証を行う.

3. 孔壁ステレオ画像と奥行き計算

3.1 ボアホールカメラ

図 1 にボアホールカメラの概略構造を示す. 図に示す撮像装置を含むプローブをボーリング孔内に複合ワイヤで吊り下げ, ウィンチによって一定速度 (15mm/s) で降下する. 孔壁上の任意位置を下降開始位置を原点とする円筒座標 (R, θ, z) によって表すことにすると, 深さ z はウィンチの繰り出し量で計られる. 方位角度 θ はプローブ内に取りつけられた方位センサによって求められる. 孔壁面の奥行き量 R をステレオ計測により求めようとするものである. 図 1(a) は孔壁面上の任意位置のステレオ撮像を行う原理を示している. ある時刻 t における孔壁上の点 $P(t)$ は T 時間後に点 $P(t+T)$ に相対移動すると考える. すなわち, 実際にはプローブが下降するが, この図では点が上に移動しているとして考えている. それぞれの像は下プリズム, 上プリズムを通過し, 角度 $\pm\alpha$ ($\pm 12^\circ$) だけプリズムにより左右に偏

Table 1 Specifications of probe	
Probe diameter	50mm
Cone mirror diameter	30mm
Refraction angle	12°
Prism pitch	0.27mm
Resolution (horizontal)	1°/pixel(normal) 0.5°/pixel(doubled)
Resolution (vertical)	0.5mm/pixel

Fig. 2 Composition of stereo-images

向される. ここでステレオ計測に必要な視差が得られる. 次に光軸に直交して高低差 G (時間 T 内のプローブ全体の移動量) を保って円すい鏡に入射する. ここで光軸に平行に反射され, レンズによる補正後, 上部の (仮想) CCD 撮像面に, 中心からの距離差を保って結像する. 同一水平面上の像は, 高低差 G に基因する半径差をもつ 2 つのサンプル円上に像を結ぶことになる. この円上の画素列を時間をずらして順次取り出し, 累積することによって通常のステレオ画像対を得る. 図 1(b) に, リニアプリズムの断面の構造を示す. 平面シート上に微小な三角プリズムを連続的に並べて整形したもので, これを相互に反転し上下 2 層の円筒にすることで視線の輻輳を得ることができる. 表 1 にボアホールカメラの仕様を示す.

3.2 ステレオ画像の合成

図 2 はステレオ画像の合成のしくみを示す. 継続的に与えられる孔壁面の全周画像から, 固定の 2 つの円上の画素をサンプルする. このとき孔壁面の標準径約 66mm (掘削面に一致する) に対応して設定される標準視差 (角度) 値 $2\theta_0$ 分だけ左右の走査開始点はずらされる. 解像度は, 標準型 (360 画素/周) と倍精度型 (720 画素/周) がある. 一定時間間隔で降下することによって, 走査線を一定に並列し画像を合成する. 先に述べた標準径を用いると, 画像における横方向の掘削面における分解能は約 0.57mm/画素となる. 一方, 縦方向 (深度方向) の分解能は, 横方向と同程度とするために降下速度を標準走査において 15mm/s としている. 高低差 G (既知量) を補正することによって, ステレオ画像対を得る. 得られたステレオ画像は, 肉眼による実体視と孔壁面の観察に用いられると共に, 本手法による 3 次元形状計測に用いる. ステレオ画像の合成においては, 円周上のサンプルによるひずみなどによる劣化が考えられるが, 実用上は大きな問題はない.

図 3 に視差角度と距離との関係を示す. 光軸から孔壁面上の

Fig. 3 Disparity angle and depth

Fig. 4 Error sensitivity at $\Delta d = 0$

Fig. 5 Stereo matching algorithm

点 P までの距離を R ，プリズムの半径を R_1 ，プリズムの屈折角を α とする。また点 P のリニアプリズム上の対応点を P_L ， P_R とする。このとき P_L と P_R のなす角 2θ が視差角度となり， θ と距離 R には次の関係が成立する。

$$R = R_1 \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \theta)} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{\Delta d}{A} \pi \quad (5)$$

ここで， Δd はステレオ画像上の視差 (単位: 画素)， $A = 360$ (標準走査)， $A = 720$ (倍精度走査) である。図 4 は $\alpha = 12^\circ$ ， $R_1 = 25\text{mm}$ のときの視差対距離値の感度特性を示す。推定される視差値 Δd に ± 4 画素の範囲のずれがあるとき，距離 R のずれはほとんど一定感度 $1\text{mm}/\text{画素}$ (図中の破線) 倍の値だけずれることがわかる。3.1 節で導入した円筒座標系の z はウィッチの位置決め精度に依存し，視差対 θ の感度係数は π/A となり一定である。

4. ステレオ照合アルゴリズム

4.1 基本アルゴリズム

左右ステレオ画像における対応点照合のための基本アルゴリズムについて述べる。図 5 にアルゴリズムの概要を示す。左画像のすべての画素に関して，その対応点を右画像の同一走査線上で探索する方式であり，照合評価には増分符号相関を用いる。左右ステレオ画像 (サイズ: $W \times H$) をそれぞれ g_L ， g_R とする。それぞれの増分符号画像を b_L ， b_R とする。式 (2) の関数

$b(x)$ を用いて次のように定義される。

$$b_{L(R)}(i, j) = b(g_{L(R)}(i+1, j) - g_{L(R)}(i, j)) \quad (6)$$

$$0 \leq i \leq W-2, 0 \leq j \leq H-1 \quad (7)$$

ここでは，横方向の増分符号に基づいている。参照点 (i, j) を左上隅とする部分符号画像 (サイズ: $L \times M$) を， $s^{i,j}(l, m) = b(i+l, j+m)$ ($0 \leq i \leq W-L-1$ ， $0 \leq j \leq H-M$ ， $0 \leq l \leq L-1$ ， $0 \leq m \leq M-1$) と定義する。左右部分画像 $s_L^{i,j}$ ， $s_R^{u,v}$ (位置は (u, v) とする) 間の増分符号相関 $r_{u,v}^{i,j}$ を次のように定義する。

$$r_{u,v}^{i,j} = \frac{1}{LM} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} s_L^{i,j}(l, m) * s_R^{u,v}(l, m) \quad (8)$$

この値の最大となる位置を対応点と考える。ここで，エッジロー拘束条件 ($v = j$) を仮定し，さらに，水平方向の探索範囲 D を定める。この範囲で探索し，各々の x 座標値の差を左部分画像の中央位置での視差 Δd とする。すべての視差をもとめ，視差画像 $\{\Delta d(i, j)\}$ 及び相関画像 $\{r(i, j)\}$ を作成する。

$$\Delta d\left(i + \frac{L}{2}, j + \frac{M}{2}\right) = \left\{ \Delta d \mid r\left(i + \frac{L}{2}, j + \frac{M}{2}\right) = \max_{0 \leq \Delta d \leq D-1} r_{i+\Delta d, j}^{i, j} \right\} \quad (9)$$

ここで，孔壁上の奥行きはほとんどいつも掘削面 (円筒面) よりも大きくなっており， Δd は常に正に保たれている。

基本アルゴリズムでは，最大相関値の条件のみで対応点を判定しており誤対応が生じる。これを抑えるために，あるしきい値より小さな相関値の視差を不定とする。文献¹⁵⁾に述べたコストによる計算法によって算出されるしきい値 T_r を用いる。これは正照合の相関値の分布と偽照合の分布を区別するしきい値であるので，ステレオ画像対に基づいて推定することが可能である。例えば観測者が手動で与える対応点对 (訓練パターン) から計算してもよい。あるいは後述のように，毎回の探索における最善照合値を正照合サンプル，次善照合値を偽照合サンプルと見なすことにより，両分布を推定することもできる。

4.2 k 近傍則による視差不定画素の補てん

検出された不定状態の視差を補填するために， k 近傍決定則を利用する。これは，急激な視差の変化は少ないであろうという先験的な知識に基づくもので，不定画素の視差値を近傍の視差値で代用しようというものである。

k 近傍決定則は視差不定画素の近傍正方領域で用いる。 k の値は実験的に決められるが，不定画素はやや集中して発生する傾向が見られるため，設定した領域内の有効数が k 個に満たない場合がある。そこで，領域内の有効数が k 個以上となるように，始めに与えた正方領域から決定則の適用範囲を段階的に拡張するという方法を採用する。注目画素の xy 座標に基づいて近傍正方領域を設定し， k 近傍内で得られた最も頻度の高い視差値を不定画素の視差としている。

5. 実験

5.1 サンプル実験

先にも述べたように実際の孔壁においては，直接的な 3 次元形状の計測が困難なため，得られた結果の検証を行うことが難しい。そこで，まず 3 次元測定機によって測定可能な内壁面を模したサンプル (図 6) を作成し実験に用いた。

サンプルの内壁面には実際の砂岩を塗布した。実験仕様を表 2 に示す。合成されたステレオ画像対を図 7 に示す。視差不定画素の判定のためのしきい値 T_r は，実画像から推定される正照合及び偽照合分布を用いて得ることとする。それぞれの推定分

Fig. 6 Sample

Table 2 Specifications of experiments

Sample	Internal D. 64mm, Height 96mm
Range finder	Range 45 × 89(pitch 1mm) Resolution 50 μm
Scanning	Doubled (0.5°/pixel)
Stereo images	401 × 201
Coded images	400 × 201
Sub-image	17 × 16
Coded sub-image	16 × 16
Searching width	$D = 13$
Threshold	$T_r = 0.55$

(a) Left image (b) Right image
Fig. 7 Stereo images (sample)

(a) Example of matching

(b) Regular and irregular correspondences
Fig. 8 Estimation of threshold

布は、最善及び次善照合分布を用いる。図 8(a) は、図 7 の対応点探索計算における増分符号相関値 (ISC) の分布の実例の一つを示す。この例では、位置 5 (5 画素のずれ) で最善の照合 (相関値 0.66) が得られ、次善照合は位置 0, 11 で現れている (共に相関値 0.57)。このような 2 種類の相関値をすべての画素において求めると、図 8(b) に示すように、明確に分離した 2 つのヒストグラムが得られた。それぞれは正規分布 $N(0.606, 0.0322^2)$ 、

Fig. 9 Distribution of ill-posed disparity

Fig. 10 Depth image

(a) Intersection A-A

(b) Intersection B-B

(c) Intersection C-C

Fig. 11 Intersections ○: reconstructed depth, ●: measured depth

$N(0.504, 0.0317^2)$ で近似できるので、それぞれを誤認識するコストを等しく設定し $c_1 = c_2$ とすると、 $T_r = 0.55$ と推定できる。図 9 は検出された視差不定画素を示す。総画素数 51842 のうち約 2% (1093 画素) を $T_r = 0.55$ 以下の低相関値のために視差不定とし、約 1% (629 画素) を $D = 13$ 以上の視差を超えたために視差不定とした。総じて約 3% の視差不定となるが、凹部形状を評価するためには満足すべき歩どまりと思われる。他に取得した 2 種類のステレオ画像に対する同様の実験では、標準型で 3.1%、倍精度型で 3.8% となった。視差不定画素が孔壁凹部周辺によく集中している様子がわかる。これは、奥行き急変部で切り出した左右部分画像間のパタンの歪みが大きくなるということに基因するものと考えられる。図 10 に距離画像を示す。視差から距離への変換は式 (4) を用いて行い、 k 近傍則 ($k = 8$) による不定画素の補てんを行っている。先に述べた総画素の約 3% の視差不定画素が補てんされた。図 10 においては奥行きが大きい (孔壁が陥没している) ほど明度を低く表示している。

図 11 は図 10 の断面図を示している。断面 (A~C) は図 10

Fig. 12 Depth calculation (real)

に示した位置にそれぞれ対応している。サンプル内壁面に対してレーザ測距計によって、1mm 間隔で分解能 $50\ \mu\text{m}$ の測定をあらかじめ行い、黒点で示す評価用形状データ（測定値）とした。半円筒面の中央部分を含むように円周方向に 45 点、縦方向に 89 点を計測した。両データの位置合せは、双方の座標中心のみを標識として一致させることにより行った。復元された断面形状には局所的に例外値が散見されるが、これらを自動的に除去することはまだ容易ではない。また位置合せにおいても基準位置などを一致させる方式ではなく相対的である。そこで本論文では図に示すような断面形状の個別比較によって復元性能について検討した。提案手法による形状復元結果（白丸）には 3 次元測定結果に沿っている様子がわかる。いずれにおいても連続した測定点群によって孔壁凹部の形状を復元している。提案手法は右半部分に、視差 1~2 画素に相当する奥行きを報告している。これはボーリング孔中心とプローブ軸の偏りによるものであると思われる。図 11(a) および (c) では、孔壁の凹部の輪郭がよくとらえられている。図 11(b) は掘削面（円筒面）の輪郭をよく復元している。通常はこのような円筒面形状（視差値 0 に相当する）が復元されている部分を基準にして、孔壁陥没部の奥行きを判定することになるため、この円筒面計測の精度は重要である。

5.2 実孔壁画像実験

図 12 は実孔壁ステレオ画像を用いた奥行き復元の結果を示す。ステレオ画像は標準走査で合成され、 400×394 のサイズをもつ。 $D = 7$ 画素の探索範囲において、照合窓サイズ 16×16 、しきい値 $T_r = 0.55$ の設定で、視差不定画素は全体の 8.46% 検出された。ステレオ画像双方の右端付近に上下にわたる筋状パターンが見られる。これはプローブ外面の付着物の像が常に写り込んでいるものであり、この部分に対応して奥行きに誤差が多く見受けられるが、その他の部分では、ステレオ両眼実体視により判定された奥行き形状とよく一致した定量化を行っている。

6. ま と め

本論文では、孔壁の 3 次元形状を計測するための手法として、増分符号相関に基づくロバストなステレオ照合法を提案した。本手法は、ポアホールカメラによって得られる合成ステレオ画像に対しても効果を発揮する。サンプル及び実例を用いた 3 次元形状計測実験を行い、提案手法の有効性を検証した。更に次のような成果を付随して得た。

- (1) 正照合・偽照合分布を最善・次善照合の分布によって推

定する手法を提案し、統計モデルに基づく合理的なしきい値の設定方法を示した。

- (2) 手法をサンプルに適用し、密な奥行き情報（約 97%）を抽出した。
- (3) 奥行き情報と 3 次元計測データを比較することにより、奥行き情報の基準となる掘削面と陥没部の奥行きを再構成し、復元形状によって孔壁状態が確認できることを示した。

今後は、計測した 3 次元形状の表示や陥没部分の形状解析の機能を付加してフィールドにおける評価を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 亀和田俊一、遠藤 努、西垣好彦、杉江剛史：ボーリング孔壁画像処理とその解析について、応用地質、34, 6, (1994) 49.
- 2) 孔壁全周の立体画像の撮影及び作成方法並びに立体視用プリズムとその装置、公開特許広報、特開平 7-168124（公開日平成 7 年 7 月 4 日）。
- 3) 亀和田俊一、牛渡 聡、金内正直：ボーリング孔壁の実体視展開画像観察記録装置の開発、日本応用地質学会平成 8 年度研究発表会講演論文集、(1996) 33.
- 4) Y.Sato, H.Kitagawa and H.Fujita: Shape Measurement of Curved Objects Using Multiple Slit-Ray Projections, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., 4, 6, (1982) 641.
- 5) 安江利一、白井良明：物体認識のための両眼立体視、電総研彙報、37, 12, (1974) 1101.
- 6) W.E.L.Grimson: Computational Experiments with a Feature Based Stereo Algorithm, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., PAMI-7, 1, (1985) 17.
- 7) Y.Ohta and T.Kanade: Stereo by Intra- and Inter-scanline Search Using Dynamic Programming, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., PAMI-7, 2, (1985) 139.
- 8) 富田文明、高橋裕信：ステレオ画像の境界線表現に基づく対応、信学論 (D), J71-D, 6, (1988) 1074.
- 9) 金子俊一、大町洋正、本多庸悟：両眼視奥行き計算への顕著度エントロピーに基づくエッジセグメントグループの構造化の導入、信学論 (D-II), J75-D-II, 10, (1992) 1649.
- 10) R. Horaud and T.Skordas: Stereo Correspondence through Feature Grouping and Maximal Cliques, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., PAMI-11, 11, (1989) 1168.
- 11) 山口 証、高地和隆、井口征士：ごま塩バタンの形状特徴量を用いた石像のためのステレオ対応付け、信学論 (D-II), J81-D-II, 11, (1998) 2598.
- 12) D.I.Barnea and H.F.Silverman: A Class of Algorithms of Fast Digital Image Registration, IEEE Trans. of Computers, C-21, 2, (1972) 179.
- 13) M.Okutomi and T.Kanade: A Multiple-Baseline Stereo, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., PAMI-15, 4, (1993) 353.
- 14) A.Venot, J.F.Lebruchec and J.C.Roucaayrol: A New Class of Similarity Measures for Robust Image Registration, CVGIP, 28, (1984) 176.
- 15) 村瀬一朗、金子俊一、五十嵐 悟：増分符号相関法による画像照合—光沢物体および不良照明条件に対するロバスト画像処理—、精密工学会誌、66, 2, (2000) 261.
- 16) 村瀬一朗、金子俊一、五十嵐 悟：増分符号相関によるロバスト画像照合、信学論 (D-II), J83-D-II, 5, (2000) 1323.