

増分符号相関法を用いたボーリング孔壁ステレオ画像撮影システム

小杉亨, 亀和田俊一 (レックス)

1 序論

ボーリング孔を使った地質調査においては, 孔壁面の凹凸の計測や視覚による直接的な観察が必要となる. 凹凸情報の計測にはキャリパーによる計測などが行われているが, 一般に分解能が低く, 接触式であることも問題となる. また, 孔壁面の直接的観察では画像を用いた観察・記録が行われている. さらに孔壁面の亀裂, 空隙, 陥没などの岩盤状況の正確な把握のために, 著者のひとりにはリニアプリズムに基づくステレオ画像の合成技術を開発し, 両眼実体視による目視観測などが可能となっている. 今回はこれらのステレオ画像を利用し増分符号相関を応用して孔壁面の三次元形状を定量的に復元する方法を開発した.

増分符号相関は比較的大きな外乱がある場合でもパター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評価量であり, 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. この手法を使って良質な照明の設定が困難でありかつ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り, 対応づけに利用できるような顕著な特徴が少ないボーリング孔壁内特有の問題点に対処できる.

2 ステレオ照合アルゴリズム

2.1 増分符号相関の定義

増分符号相関は, 比較すべき画像 (明度列) の明度の増減傾向の類似を判定するものである. 長さ  $N + 1$  の明度列  $G = \{g_n\}_{n=1,2,\dots,N+1}$  に対し, 長さ  $N$  のビット列  $B = \{b_n\}_{n=1,2,\dots,N}$  を次のように定義し,  $b_n$  を  $g_n$  に対する増分符号と呼ぶ.

$$b_n = \begin{cases} 1 & \text{if } g_{n+1} \geq g_n \\ 0 & \text{if } g_{n+1} < g_n \end{cases}$$

また, 明度列  $G = \{g_n\}$  とビット列  $B = \{b_n\}$  を同様に定義する. このとき, 増分符号相関  $r_{sc}$  を双方のビット列のビット "1" 同士およびビット "0" 同士の一致の割合として次式で定義する.

2.2 基本アルゴリズム

増分符号相関に基づく基本的なステレオ照合アルゴリズムについて述べる. 図 1 にアルゴリズムの概要を示した. 左部分画像を  $s_L^{ij}$  とし, 右部分画像 (位置  $(u, v)$ ) を  $s_R^{u,v}$  とする. これらの部分画像間の増分符号相関  $r_{u,v}^{i,j}$  を次のように定義する.

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

上式で定義した増分符号相関が最大となる位置が左右画像の対応する位置と考える. ステレオ画像対における照合では, エピポーラ拘束条件 ( $v=j$ ) を仮定できる. また, エピポーラ線上における探索の範囲  $d_i$  を定める. この範囲内で左部分画像に対する増分符号相関が最大となる右部分

画像を探索し, 左右  $x$  座標の差を左部分画像中央位置における視差 ( $\Delta d$ ) とする. 左画像のすべての位置における視差を求め, 視差画像  $\{\Delta d(i, j)\}$  を作成する. また各位置における増分符号相関の値から相関画像  $\{r(i, j)\}$  を作成する.

$$\Delta d(i', j') = \left\{ \Delta d \mid r(i', j') = \max_{0 \leq \Delta d \leq d_i - 1} r_{i+\Delta d, j'}^{i, j} \right\}$$

$$i' = i + \frac{L}{2}, \quad j' = j + \frac{M}{2}$$

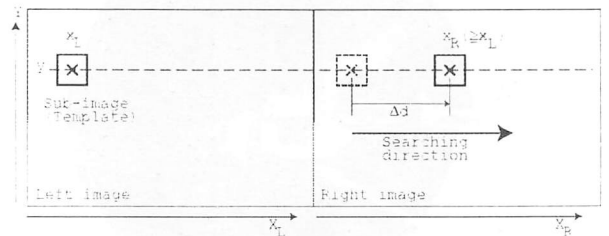


図 1: ステレオ照合アルゴリズム

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 2 にボアホールカメラによるステレオ画像の撮像原理を示した. プローブはボーリング孔内に複合ワイヤで吊り下げられ, ウィンチによって一定速度 (1.5cm/秒) で降下させられる.

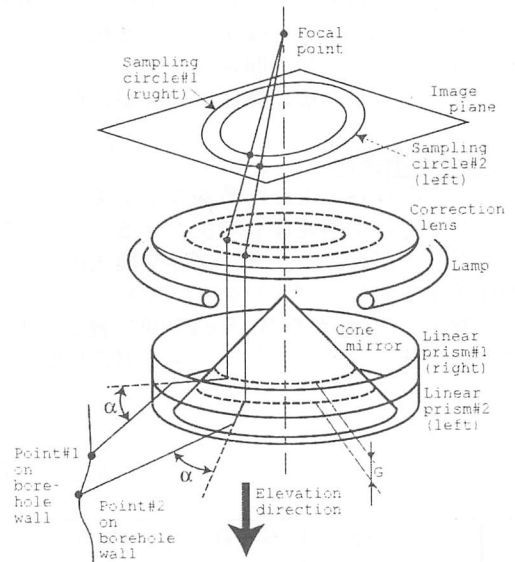


図 2: ステレオ画像撮影ボアホールカメラの原理

プローブには, 微小な三角プリズムをシート状に連続的に並べたりニアプリズムが取り付けられている. これを円筒状にすることで立体視に必要な視線の輻輳を得ている. プリズムは屈折角 12 度, 0.27mm ピッチのものを使用している. 図 2 は, 視差の発生を概念的に示したものである. リニアプリズムを屈折角が反転するように二枚を

組み合わせて取りつけることで、左右に対応した画像が撮像される。画像は円錐鏡で反射させられ、プローブ内に格納されている CCD カメラによって撮像を行う。CCD カメラ光軸と円錐鏡の中心軸は同軸上に配置されている。2層のリニアプリズムは円筒面上に配置されており、水平および垂直向きの偏向精度は十分である。

### 3.2 ステレオ画像合成

孔壁面の画像は孔壁面の同一水平高さが同一円周上に並ぶような状態で撮像される。これをフレームメモリに取り込み、円周走査を行うことで展開走査線(直線状)を得る。円周走査には、解像度 360 画素/周の標準的な走査方式と 720 画素/周の倍精度の走査方式がある。

一定時間間隔で降下することによって、展開走査線を一定に並列することができ、左右ステレオ画像を得ることができる。標準の孔壁の直径は約 66mm であり、ステレオ画像における横方向の分解能は約 0.57mm/画素となる。一方、縦方向(深度方向)の解像度を同程度とするために降下速度は、標準走査において 15mm/秒としている。2層のリニアプリズムに対応する半径差の分の上下ずれ幅(既知量)を補正することによって、ステレオ画像対を得る。

### 3.3 奥行き計算

図 3 にボアホールカメラの視差角度と奥行き量との関係を示した。リニアプリズム及び円錐鏡の中心から孔壁面上の点  $P$  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  $\alpha$  とする。また点  $P$  の左右円周画像上での対応点を  $P_L, P_R$  とする。このとき  $P_L, P_R$  のなす角  $2\theta$  が視差となるが、 $\theta$  と距離  $R$  には次の関係が成立する。

$$R = R_1 \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \theta)} \quad \theta = \frac{\Delta d}{360} \pi, \frac{\Delta d}{720} \pi$$

ここで  $\Delta d$  はステレオ画像対の対応点のズレ量を画素で表したものである。

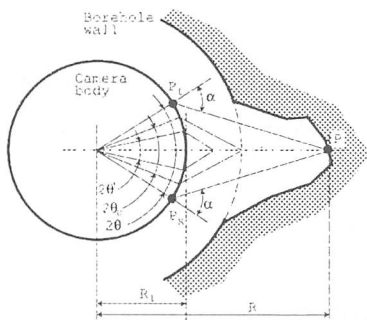


図 3: リニア反転プリズムの幾何

### 4. 実画像実験

実際の孔壁においては、直接的な立体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できない。そこで三次元測定器によって測定可能な孔壁を模したサンプルを作成し実験に用いた。実験仕様を表 2 に示す。孔壁画像は倍精度で撮像したものを使用した。合成されたステレオ画像対を図 4 に示す。レーザーによる距離測定は、1mm 間隔で 50  $\mu$ m の分解能で行った。測定器の制限から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 点の計測となった。奥行き計算後、サンプルの背景に相当する部分は削除し、孔壁面部分(321  $\times$  160)のみを切

り出し検証を行うこととした。

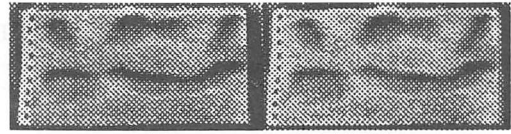


図 4: ステレオ画像対

図 5 に得られた距離画像を示す。距離が大きくなるほど暗い明度になるように示している。図 6 は、図 5 の断面図を示している。断面 A は図 6 に示したそれぞれの位置に対応している。三次元測定器によって得られた測定結果は図 6 に実線で示した。両データの位置合せは、双方の座標中心を標識として目視により一致させることで行った。これらの断面図から、処理結果が三次元測定結果によく適合している様子が分かる。孤立した例外値は総画素の約 3%となった。図から、孔壁の凹部の輪郭がよく捉えられていることがわかる。

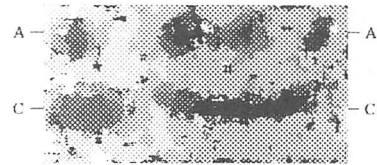


図 5: 距離画像

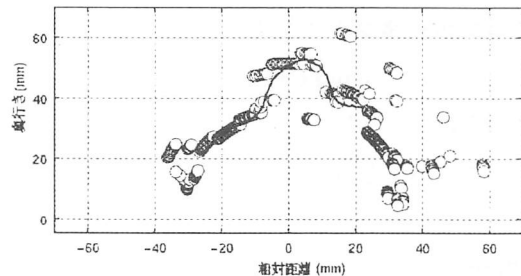


図 6: A-A 断面図

### 5 まとめ

対応画像間の不良条件(明度差、遮蔽など)にロバストで、計算コストが小さな増分符号相関に基づいたステレオ照合アルゴリズムを提案した。視差不定の検出においてはサンプル画像に基づいて、しきい値の合理的な設定が可能であることを示した。提案した手法をサンプルステレオ画像に適用し、孔壁の三次元輪郭の復元を行った。そこでは全画素の約 97%に視差を与え、密な奥行き情報を得た。約 3%の視差不定の画素を検出したが、それらは奥行き急変部に集中していることがわかった。今後は、現場での適用事例を増やし検証していく予定である。

### 参考文献

- [1] 金子俊一, 村瀬一朗, 五十嵐悟, 小杉亨, 亀和田俊一, 牛渡聡: "増分符号相関法を用いた孔壁ステレオ画像からの立体形状計測", 日本応用地質学会平成11年度研究発表会講演論文集, pp. 343-346, 1999
- [2] 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, pp. 33-36, 1996