画像セグメンテーション用アルゴリズム **GrowCut** の解説

—液状化画像を例題にして—

中 島 善 人*

Introduction to GrowCut, an Image Segmentation Algorithm Applied to Liquefaction Images

Yoshito NAKASHIMA*

[Received 30 May, 2016; Accepted 3 August, 2016]

Abstract

GrowCut is a specific digital image segmentation technique using cellular automata. The GrowCut algorithm and examples applied to the successful segmentation of sand dyke images embedded in undisturbed sediments are presented.

Key words : GrowCut algorithm, liquefaction, sand dyke, image segmentation, X-ray CT

キーワード : GrowCut アルゴリズム, 液状化, 砂脈, 画像セグメンテーション, X線CT

I. はじめに

ボーリングコアの観察やトレンチ掘削調査で、砂脈 (sand dyke) やコンボルト葉理 (convolute lamination) を探索することは、液状化リスク評価作業で重要である (例えば、寒川, 1992)。とくにボーリングコアは、トレンチでは到達困難な深度まで探索するのに有効である (稲崎, 2012; 風岡ほか, 2014)。しかし、液状化の代表的な痕跡である砂脈は、コンボルト葉理とは違ってコア中に局在するので、コア半断面 (つまりコアの2次元断面) の観察だけでは砂脈を発見できる保証はなく、結果としてそのサイトの液状化履歴を過小評価するおそれがある。多大な時間と費用をかけてコアを採取したにもかかわらず、半断面の観察だけでは、コアのもっている情報を十分に活用できていないのである。いっぽう、X線CT

(例えば、中島・中野, 2013) は、コアを非破壊でフル3次元イメージングすることによって、コア内部に隠れている砂脈などをもれなくみつけだすことができる (Flisch and Becker, 2003; 平ほか, 2012)。このようにX線CTという手法はより正確な液状化リスク評価に役立つので、破壊分析前の非破壊ルーチンとして、今後の液状化コア研究に導入することを強く提案したい (水野ほか, 2013; 神宮司・中島, 2014)。

さて、実際にX線CTを用いてコア中の砂脈を画像解析する場合に直面するのが、CT画像中の砂脈の抽出という問題である。砂脈が3次元的にコア中にどのような形状・サイズで埋め込まれているかを知るには、CT画像中から砂脈のみを抽出する (これを画像のセグメンテーションという) デジタル画像処理作業が必須である。しかし、このセグメンテーション作業は簡単ではな

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所

* National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, 305-8567, Japan

図 1 医療用 X 線 CT で撮影した液状化コア画像の例。
(a) 8 ビット (0-255) グレースケール画像。画像サイズは、 210×740 画素 = $66 \times 231 \text{ mm}^2$ 。
(b) 閾値 180 を採用して大域的閾値法によって (a) を二値化した 1 ビットの白黒画像。(c) (a) の画素値のヒストグラム。下向きの黒矢印の位置が、(b) で採用した閾値 (180)。

Fig. 1 Unsuccessful segmentation of a sand dyke body from a CT image using the global thresholding method. (a) 8-bit (i.e., 0-255) grey-scale CT image of a liquefied boring core. Image dimensions are 210×740 voxels = $66 \times 231 \text{ mm}^2$. (b) Output of segmentation using the global thresholding method with a threshold of 180. 1-bit (i.e., black and white) image. (c) Histogram of voxel values of (a). Threshold value, 180, used in (b) is indicated with a downward solid arrow.

い。図 1 にその例をあげる。図 1a は、2011 年東北地方太平洋沖地震で液状化がおき、地表で噴砂現象が確認された GS-ITK-2 というサイト（茨城県潮来市；水野ほか, 2013）の地下 1.6 m（砂質の埋め立て層）から採取したボーリングコアの CT 画像である（Nakashima and Komatsubara, 2016）。CT 画像の濃淡（グレースケール）についていえば、暗い部分が比較的低密度のシルト、明るい部分が比較的高密度の砂、非常に明るい部分が酸化鉄を豊富に含む砂である。埋め立て時にできた水平の葉理構造を 1 本の砂脈が鉛直方向に突き破っているのがみえる。問題は、乱れていない地層（水平な葉理部分）と乱された部分（砂脈）で、画像の濃淡の差がほとんどない点である。このことは、図 1a の画素値のヒストグラム（図 1c）が双峰型ではなく単峰型であることでも確認できる。なお、図 1a は 16 ビット（65536 階調）のオリジナル画像を 8 ビット（256 階調）に圧縮したものである。一般にこのような圧縮は、双峰型から単峰型にデータを劣化させるので要注意であるが、この画像に限れば、16 ビット画像の段階でも単峰型であることを確認済みである。さて、もしもシルト層に貫入した砂脈であれば、シルトと砂の画素値がかなり異なり、双峰型のヒストグラムになる。その良好なコントラストのおかげで、大津の方法（Otsu, 1979）のような大域的閾値法（global thresholding 法）を使うことができ、適切な閾値を導入すれば、その値より大きい画素を砂脈、その値より小さい画素をシルト層としておおむね判別できる（Nakashima and Komatsubara, 2016）。しかし、図 1a の画像については、そのような閾値をみつけることは不可能であり、強引に閾値を設定して画像を 2 値化すると、砂脈の抽出に失敗する（図 1b）。かといって、手でマウスを動かして、人間の眼によって砂脈の輪郭をなぞって砂脈を抽出するという作業は、主観的な系統誤差が混入するリスクがあるうえに、CT 画像のような大量の画像を人力だけで処理するのは時間がかかりすぎるので望ましくない。

比較的最近開発された GrowCut アルゴリズム

(Vezhnevets and Konouchine, 2005) は、主観の混入をできるだけ抑えて、かつ、半自動的に（つまり対話形式で）セグメンテーション作業を行うセルオートマトン的なアルゴリズムである。GrowCut は、液状化コアの CT 画像に実際に適用され、砂脈の 3 次元形態の抽出に成功している (Nakashima and Komatsubara, 2016)。しかし、その有用性・汎用性にもかかわらず、GrowCut に関する日本語解説は、著者の知る限り山崎 (2010) をのぞいてほとんどない。そこで本稿では、液状化画像への適用を例題にとり、アルゴリズムの簡単な解説を行う。

後述するように、GrowCut の特長は、画素値のヒストグラム情報しか利用しない大域的閾値法とは違って、画素の空間配置情報すなわち画素同士の物理的な距離情報も援用してセグメンテーション結果を改善する点にある。そのようなアルゴリズムには、GrowCut 法以外にも、Watershed 法、Graph Cuts 法、GrabCut 法、Random Walker 法など多数ある（例えば、Vezhnevets and Konouchine, 2005; 山崎, 2010）。各アルゴリズムの比較もされているが（例えば、Peng *et al.*, 2011; Ergül, 2012）、どれも万能ではなくセグメンテーション能力には一長一短がある。しかし、本稿では GrowCut 法に限定して解説を行う。セグメンテーションアルゴリズムのこの百家争鳴状態において、GrowCut 法にのみスポットをあてる理由は、(i) その能力がほかの手法にひけをとらないくらい優秀にもかかわらずアルゴリズムがとても簡単で理解しやすいこと、(ii) プログラムを短くできること（山崎, 2010）、(iii) アルゴリズムの改変が容易なので自分が直面している画像の特質にあったセグメンテーション作業ができること（例えば、Yamasaki *et al.*, 2012）、という長所があるからである。

II. GrowCut アルゴリズム

大域的閾値法が失敗した図 1a に対して GrowCut を施せば、砂脈を首尾良く抽出できる（図 2b, c）。GrowCut では、まず図 2a のように、抽出すべき対象（前景）すなわち砂脈の一部と、

乱れていない葉理（背景）の一部を、セルオートマトンの種（シード）としてユーザーが指定する（マウスドラッグ操作で入力する）。シードとは、「その画像のその部位だけは間違いなく前景あるいは背景だ」とユーザーが主観的に断言できる領域のことである。人の主観が関与するのはここまでは、これ以降は、自動的にセグメンテーションがはじまる。すなわち、そのシードを起点として、前景と背景の領域が周囲の画素を侵略して勢力範囲を拡大し、未帰属の画素を奪いあって、最終的には画像全体を前景（赤）と背景（青）の 2 色で塗り分ける。ライフゲームとしてよく知られているように、セルオートマトンのアルゴリズムはしばしば生き物の増殖に見立てることができる。GrowCut についても、上記のシード画素からスタートした赤と青の 2 種類のバクテリアのコロニーが増殖を繰り返して、画像全体を覆い尽くす (Vezhnevets and Konouchine, 2005) というアナロジーで理解できる。その増殖のルールが GrowCut のミソであるが、それは以下のように単純なセルオートマトンである。

わかりやすい例として、増殖を続ける青と赤のバクテリアコロニーの前線が、それぞれ左右から激突しているケースを考える（図 3）。青と赤の勢力に挟まれた画素 E は、どちらの色に染まるのであろうか？ GrowCut では、図 3a のオリジナル画像のほかに、同じ画素数から構成されるラベル画像（図 3b）と信頼度画像（図 3c）を作成する。ラベル画像には、その画素が前景（赤）か、背景（青）か、あるいは中立（その時点では赤にも青にも帰属していない。図 3b では白色）かの情報が記載されている。セルオートマトン開始の初期状態としては、シード画素は赤または青、その他の画素はすべて白（中立）とする。最終状態では、中立の画素は、前景か背景への帰属作業が完了している。いっぽう信頼度画像は、画素値が 0 以上 1 以下の実数で、その画素の前景あるいは背景としての信頼度を意味する。中立の画素は信頼度が最低（つまり 0）で、シード画素は信頼度が最高（つまり 1）である。シード画素以外の画素については、後述のルールに従い、そ

図 2 GrowCut アルゴリズムによる砂脈のセグメンテーション作業. (a) 図 1a の画像について、前景としての砂脈 (赤) と背景としての非擾乱層 (青) の種 (シード) を指定した. (b) GrowCut 処理の結果 (スムージング処理前). 背景として仕分けられた画素を、青色で塗ってある. (c) (b) にスムージング処理を施した後. これが最終的な産物である. 砂脈の先端と底部をそれぞれ黄色と緑色の矢印で表示した. 赤い矢印は、下方方向にたわんでいるシルト層 (暗い画素). (a) から (b) への時間変化の様子を、アニメーションとして電子付録で公開している (スロー再生すれば、時間変化の様子がよりわかりやすいであろう).

Fig. 2 Successful segmentation of a sand dyke body from the CT image of Fig. 1a using the GrowCut algorithm. (a) Portions in red (foreground) and blue (background) are a sand dyke and surrounding undisturbed layer, respectively. (b) GrowCut output before smoothing processing. Segmented background is in blue. (c) Outcome of smoothing processing applied to (b). Top and bottom of sand dyke body are indicated with yellow and green arrows, respectively. Downward bending of a silt layer can be seen (red arrow). Temporal change from (a) to (b) is available as an electronic supplementary material (animation file). A slow-motion replay of the animation would depict the temporal change more clearly.

の画素の信頼度は最終状態に落ち着くまで時々刻々変化していく。

さらに、GrowCut では、隣接画素との親近度 (g_{EX}) という量も導入する。

$$g_{EX} = 1 - \frac{|C_E - C_X|}{255} \quad (1)$$

g_{EX} は、図 3a の画素 E と隣接する 8 画素 X ($X = A \sim D, F \sim I$) との親近度である。 C_E は、図 3 の画素 E の 8 ビットグレースケール値であ

る ($0 \sim 255$ の範囲の整数値をとり得る)。 C_X は、E に隣接する 8 つの画素 X の 8 ビットグレースケール値である。右辺第二項の分子は画素 E と画素 X とのグレースケールの差の絶対値、右辺第二項の分母は分子の理論的な最大値である (規格化のために導入した)。式 (1) から明らかなように、 $0 \leq g_{EX} \leq 1$ であり、画素 E と X が同じ画素値のとき $g_{EX} = 1$ (つまりもっとも親近度が高い)、画素 E と X の画素値の差が 255 のとき $g_{EX} = 0$ (つまりもっとも疎遠) である。

図 3 GrowCut における、画素のセグメンテーションアルゴリズム。(a) A ~ I の $3 \times 3 = 9$ 画素からなるオリジナル画像。黒色の数値は、8 ビットの画素値 C_X ($X = A \sim I$)。緑色の数値は、8 方向の近隣画素との間で定義される g_{EX} 値。(b) ラベル画像。赤が前景、青が背景、白は未帰属の中立画素。(c) 信頼度画像。数値は、各画素の信頼度 θ_X ($X = A \sim I$)。

Fig. 3 Segmentation algorithm of GrowCut. (a) Original image with $3 \times 3 = 9$ voxels (from A to I). 8-bit voxel values are shown in black. g_{EX} values against eight neighbors are indicated in green. (b) Label image. Red, blue, and white voxels are foreground, background, and unassigned voxels, respectively. (c) Reliability image. Each voxel value is reliability, θ_X , for $X = A$ to I.

画素 E の帰属については、まず、信頼度 θ_X つまり信頼度画像の画素値を読みとり、また式(1)を用いて 8 方向の隣接画素の親近度 g_{EX} を計算する。次に、両者の積 $g_{EX}\theta_X$ が $X = A \sim D, F \sim I$ のなかでもっとも大きい画素（つまり侵略能力のもっとも高いバクテリアの画素）に対して、画素 E は以下のような「勝負」をする。すなわち、

$$\theta_E \geq g_{EX}\theta_X \quad (2)$$

であれば、画素 E はバクテリアの侵略からの防衛に成功したことになり、画素 E の信頼度 θ_E もラベル画像状態も変化しない。いっぽう、

$$\theta_E < g_{EX}\theta_X \quad (3)$$

であれば、画素 E は、バクテリアからの攻撃に負けて征服されたことになり、その最強の画素 X と同じ色にラベルされ、かつ画素 E の信頼度の値 θ_E は $g_{EX}\theta_X$ で更新される。図 3 では、画素 E の更新可能性だけ記述しているが、実際のセグメンテーションでは、画像全体をスキャンして、全画素値の更新可能性を式(2)と(3)で検査する。その結果、オリジナル画像の画素値は時間変化しないが、ラベル画像と信頼度画像は、シード画素

をのぞいて、その画素値は時間変化していく（その時間変化の一例は、電子付録として閲覧可能である）。このセルオートマトン的な時間発展では、一度青になった画素が、そのあと赤に転じるケースもある（その逆のケースもありうる）。そして、その時間変動が終息したら、セグメンテーション作業が終了したことになる。

以上では、前景（赤）と背景（青）という 2 つの領域へのセグメンテーション作業を例にとってアルゴリズムの解説を行った。本稿では深く追求しないが、GrowCut は、3 つ以上の領域へのセグメンテーション（Vezhnevets and Konouchine, 2005）という機能拡張も容易であることを附記しておく。具体的には、ラベル画像において、バクテリアコロニーの色数を 3 色以上に設定することで対応できる。このような 3 つ以上のセグメンテーションは、例えば、砂脈が 2 つ以上混在していてそれぞれの砂脈を区別したいときに便利である。

GrowCut の特徴は、 g_{EX} だけでなく θ_X という量を導入した点である。式(1)からわかるように、 g_{EX} は単なる画素値の差（つまり色空間あるいはヒストグラム空間における距離）にすぎず、もし

も g_{EX} だけでセグメンテーションを実施すると、画素値が近い方の画素に染まってしまう。例えば図 3a でいえば、画素 E は画素 D と同じグレースケール (90) なので g_{ED} は最高値の 1 をとり、したがって画素 E は青色に染まるべきである。しかしこれでは、画素値の親近度だけでセグメンテーションを行うということであり、大域的閾値法と同じ考え方である。いっぽう GrowCut の視点でみると、図 3c によれば、画素 D の信頼度はかなり低い (0.1) ので、積 $g_{ED}\theta_D$ は $1 \times 0.1 = 0.1$ という低い値になる。これに対して、画素 F については、 g_{EF} は 0.69 であり g_{ED} より低い値であるものの信頼度 θ_F が 0.9 と高いので、積 $g_{EF}\theta_F$ は $0.69 \times 0.9 \approx 0.62$ という 8 候補のなかではもっとも高い値をとる。よって、結局画素 E は画素 F に侵略されて赤色に染まり、画素 E の信頼度 θ_E は 0.62 に更新される。

式 (3) にあるように、画素 E の信頼度 θ_E が更新される時、 θ_X で更新されるのではなく、 g_{EX} という減衰係数が掛け算された状態 ($g_{EX}\theta_X$) で更新される点に注目いただきたい。一般に $g_{EX} \leq 1$ であるが、同じグレースケール値でない限り必ず $g_{EX} < 1$ なので、 g_{EX} という親近度を掛け算するということは信頼度が弱められるということである。セルオートマトンが増殖していくと増殖の最前線は当然シード画素 (信頼度が最高値) から遠ざかっていくが、1 画素遠ざかるたびに親近度という名の減衰係数が掛け算されていき、その画素の青 (あるいは赤) としての信頼度がどんどん低下していく。これによって、遠くにあるシード画素の影響は希薄になり、比較的近い位置にある画素の親近度と信頼度がセグメンテーションに強い影響を及ぼすようになる。つまり、画像上の物理的な距離をセグメンテーションアルゴリズムに導入したわけである。このようにヒストグラム上の距離だけでなく、物理的な距離も考慮している点が GrowCut アルゴリズムの成功のミソである。

III. 液状化画像への応用例

図 3 によるアルゴリズムの基本解説が終わったので、液状化 CT 画像 (図 2) にもどって Grow

Cut 法をより詳しく吟味してみよう。図 2a のシード画像に II 章で述べたセルオートマトンルールを適用した結果が図 2b である。大した問題ではないが図 2b を子細に観察すると、砂脈の輪郭 (つまり前景と背景の境界) が不自然に凸凹している (少し毛羽立っている)。この不自然な凸凹を抑制してスムーズな輪郭を得るには、バクテリアの増殖ルール (図 3) を多少変えたり (Vezhnevets and Konouchine, 2005)、メジアンフィルター (山崎, 2010) を施す必要があるが、そのようなスムージングを施して得た最終結果が図 2c である。

ともあれ、まずは大域的閾値法 (図 1b) に対する GrowCut 法 (図 2b, c) の優位性を味わっていただきたい。図 1b では抽出に失敗した砂脈が図 2b, c では明確に抽出できている。本質的には、前景 (砂脈) か背景 (非擾乱層) かは、「葉理が液状化で乱れているか、それとも保存されているか」である。したがって、砂脈の抽出をしたければ、理想的には、地層の乱れ具合を定量化できるセグメンテーションアルゴリズムを採用すべきであろう。しかし、GrowCut アルゴリズムには地層の乱れ具合そのものを定量化する能力はなく、単に、大域的閾値法に、セルオートマトンという形で「画像上の物理的な距離」という判定基準を追加しただけである。それにもかかわらず、これほどまでにセグメンテーション能力が改善したことは、注目に値する。

図 2 の CT 画像は、わずか直径 6 cm 程度のコア径にもかかわらず、砂脈の全体像 (底部から先端まで) を奇跡的にカバーできている貴重なものである。このような貴重なコアを単に半裁して断面のみを観察するというのはもったいない話であり、CT を使ってコアに埋もれている砂脈の構造を丁寧に解析する作業の重要性を強調したい。例えば、シルト層 (図 2c の赤色矢印) が下方にたわんでいるのは、液状化の後期に砂脈中の砂の流れの勢いが衰えて上昇流から下降流 (つまり逆流) に転じたときの痕跡 (未固結のシルト層が砂の下降流に引っ張られて変形した) と思われる。また、砂脈の先端 (図 2c の黄色矢印) が剣

のように尖っているのは、地表に到達せずに途中で伝播を停止したためであろう（例えば、寒川, 1992）。なお、GrowCut を用いて図 2c の要領で抽出した砂脈部分（2 次元画像）を 216 枚スタックして 3 次元構造として可視化したものを、Nakashima and Komatsubara (2016) で公開している。

本来、GrowCut は、グレースケール画像よりもむしろカラー画像に対して威力を発揮する (Vezhnevets and Konouchine, 2005)。ただし、カラー画像の場合は、 g_{EX} の計算方法を式(1)から式(4)に変更する必要がある。

$$g_{EX} = 1 - \frac{\sqrt{(R_E - R_X)^2 + (G_E - G_X)^2 + (B_E - B_X)^2}}{255\sqrt{3}} \quad (4)$$

R_E , G_E , B_E は画素 E の、 R_X , G_X , B_X は画素 X の、 $3 \times 8 = 24$ ビットフルカラーの各 8 ビット RGB 成分値である（それぞれ 0 ～ 255 の範囲の整数値をとり得る）。式(4)は、RGB カラーという 3 次元色空間での 2 つの色の親近度をユークリッド距離という形で表しており、式(1)の自然な拡張となっている。なお、条件判定式(2)と(3)は、カラー画像についても、そのまま採用する。

CT 画像ではないが、カラー画像の GrowCut 結果の例を図 4 に示す。図 4 のカラー写真は、2011 年東北地方太平洋沖地震時に地表で噴砂現象が確認された地点（千葉県神崎町）でトレンチ掘削を実施して得たはぎとり標本である（水野, 2013; 小松原ほか, 2014）。幅十数 cm の砂脈が、シルト層（灰色）と砂層（茶色）を突き破って鉛直上方に走っている。図 4a では、図 2a と同じ要領で、セルオートマトン用のシードとしての前景（砂脈）と背景（砂脈以外）をそれぞれ赤と青で指定しているが、図 2a と比べてはるかに少ないシード面積で済んでいる点に注意いただきたい。すなわち、図 2a では砂脈の輪郭を連続的なぞる必要があったが、図 4a では、ほとんどのシードは離散的な丸いドットであり、それでいて図 4b では砂脈を明瞭にセグメンテーションできている。これは、RGB の 3 成分が独立な情報を

もっているカラー画像の特性のおかげである。たいていの場合 CT 画像というものは、図 1, 2 のようにグレースケール画像である。しかし、多重エネルギー法という高度なイメージング手法を使えば（X 線のエネルギーを 3 種類変えて 3 枚の画像を撮影し、それぞれの画像を RGB 成分の画像とみなして 1 枚の画像に合成する）、疑似カラー CT 画像を獲得でき、図 4 と同レベルの楽な処理作業が可能と思われる。

ユーザーがシード画像さえ入力すれば、あとは前述のアルゴリズムで決定論的にバクテリアの勢力争い（画像のセグメンテーション）が実施される。このシード入力作業について、以下の 3 項目を記しておく。(i) シードは、前景にしる背景にしる、その信頼度は最大値の 1 である。つまり、シードとして指定した部分は、セルオートマトンの時間発展中には決して変更を受けない絶対的な「教師」であり「スタンダード」であるので、このシード画素の空間配置次第で、セグメンテーション結果が変わってくる。セグメンテーション結果の良否を左右する最大のポイントは、このシード画像の与え方であり、ユーザーはこの点に留意が必要である。シード画像の与え方が不適切な例を、図 4c, d に示す。図 4a の黄色い矢印で示した薄い砂層は明らかに砂脈ではないが、色という点では砂脈に似ている（ともに茶色）。そこで試験的に、緑色の矢印で示した青いドットをシード画像から削除したら、GrowCut アルゴリズムは砂層の茶色に引き寄せられてその砂層を砂脈の一部として誤判定した（図 4d の白い矢印）。このように、画像によってはシードの与え方に十分な注意が必要である（このケースでは、前景のバクテリアが黄色い矢印で示した砂層の方向へ侵攻しないように、緑色の矢印で示した青いドットを「防波堤」として打ち込んでおくべき）。(ii) シードの与え方としては、図 2a では、予想される最終的な 2 種のバクテリアコロニーの境界（つまり砂脈の輪郭）を意識しつつ、その境界から充分内側に離れた部分を前景として選んで赤い線を引き、充分外側に離れた部分を背景として選んで青い線を引いた。画像の難度が図 2a より低けれ

図 4 砂脈のはぎとり標本（カラー写真）に対する GrowCut 処理. (a) オリジナル画像. 図 2a と同じ要領で、前景と背景のシードをそれぞれ赤と青で指定した. 黄色い矢印で示した茶色の薄い層は、シルト層中の砂層. 写真右上の青い部分は、トレンチ現場で使った作業用のビニールシート. (b) (a) の GrowCut 結果 (スムージング処理後). 背景を青色で塗っている. (c) (a) のシードから、緑色の矢印で示した青いドットのみを削除した. (d) (c) の GrowCut 結果 (スムージング処理後). 白い矢印で示した領域が、間違っって前景 (砂脈) として認識された.

Fig. 4 Same as Fig. 2 but for a different sand dyke image. Color photograph of peel-off specimen obtained from one of the walls of a trench. (a) Original image. Portions in red (foreground) and blue (background) are a sand dyke and surrounding undisturbed layer, respectively. Thin sand layer embedded in the thick silt layer is indicated with a yellow arrow. Blue region at the right top is a blue sheet used at the trench. (b) GrowCut output of (a) after smoothing processing. Segmented background is in blue. (c) Same as (a), but a blue dot indicated with a green arrow is discarded. (d) GrowCut output of (c) after smoothing processing. Part of the thin sand layer indicated with an open arrow is erroneously assigned to the foreground (i.e., sand dyke).

ば、連続的な線を引く必要はなく、離散的な破線 (Nakashima and Komatsubara, 2016) やドット (図 4a) で充分である (ただし、ドットの置き場所については、図 4c, d のような事態にならぬように要注意)。(iii) 前項で「予想される」と書いたが、ここに恣意性が入るので、主観的な系統誤差が混入するリスクがある。とはいえ、シードで与えるのは、ほぼ確実に前景か背景か断言できる安全な画素 (リスクでない画素) であって、人によって意見が分かれる最終的な砂脈の輪郭の位置を指定するわけではないので、そのリスクは小さいであろう。

IV. おわりに

パターン認識はいまだ発展途上の研究分野であり、熟練した人間と同等のセグメンテーション能力をもつ汎用アルゴリズムは開発されていない。図 1 のような難度の高い画像からの砂脈の抽出法については、近い将来完成が期待される人工知能による機械学習が最終的な解決策をもたらしてくれるであろう。しかし、単純なアルゴリズムの GrowCut でも、満足すべき抽出作業ができることを本稿で例証できた。GrowCut はその単純なアルゴリズムのおかげで、MATLAB ならばわずか 50 行程度で書けるので (山崎, 2010)、プログラミングの心得のある地球科学研究者なら容易に自作できるであろう。また、100 米ドル程度でネットでダウンロードもできる。さらに、コアシキャン用の CT 装置についていえば、全国共同利用研究施設の高知コアセンターで実施できるであろう。このように、CT 画像による砂脈の 3 次元形態の抽出作業をバックアップできる環境は既に整っている。より信頼できる液状化リスク評価法の確立を志す人には、GrowCut のようなデジタル画像処理と組み合わせた液状化コアの 3 次元 CT 分析のルーチン化を薦めたい。

謝 辞

論文の改訂作業において、匿名査読者のコメントは有意義であった。

文 献

- Ergül, M. (2012): *A Fully Automatic Shape Based Geo-Spatial Object Recognition*. Thesis, Middle East Technical University.
- Flisch, A. and Becker, A. (2003): Industrial X-ray computed tomography studies of lake sediment drill cores. *Geological Society London Special Publications*, **215**, 205–212.
- 稲崎富士 (2012): 液状化サイト採取コアの堆積学的特徴評価. 第 22 回環境地質学シンポジウム講演論文集, 155–160. [Inazaki, T. (2012): Sedimentological characterization of cores taken at liquefied sites triggered by the 2011 East Japan Earthquake. *Proceedings of the 22th Symposium on Geo-Environment and Geo-Technique*, 155–160. (in Japanese with English figure captions)]
- 神宮司元治・中島善人 (2014): 利根川下流域液状化エリアにおける各種液状化ポテンシャル調査とその評価. 巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書 (地質調査総合センター速報 No.66), 319–342. [Jinguji, M. and Nakashima, Y. (2014): The liquefaction positional investigations and those estimations along lower reaches of Tone River. *GSJ Interim Report No. 66 (AIST14-G63166)*, 319–342. (in Japanese with English figure captions)]
- 風岡 修・水野清秀・吉田 剛・宮地良典・森崎正昭・田辺 晋・香川 淳・小松原純子・古野邦雄・小松原琢 (2014): 利根川下流低地での液状化・流動化層準—2011 年東北地方太平洋沖地震と過去の履歴—. 巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書 (地質調査総合センター速報 No.66), 289–296. [Kazaoka, O., Mizuno, K., Yoshida, T., Miyachi, Y., Morisaki, M., Tanabe, S., Kagawa, A., Komatsubara, J., Furuno, K. and Komatsubara, T. (2014): Horizons of liquefaction-fluidization strata in the Holocene formation on the Tonegawa Lowland, central Japan: by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and paleo-earthquakes. *GSJ Interim Report No. 66 (AIST14-G63166)*, 289–296. (in Japanese with English figure captions)]
- 小松原 琢・宮地良典・水野清秀・風岡 修・齋藤 勝・細矢卓志 (2014): 液状化・流動化層のトレンチ調査. 巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書 (地質調査総合センター速報 No.66), 273–288. [Komatsubara, T., Miyachi, Y., Mizuno, K., Kazaoka, O., Saitou, M. and Hosoya, T. (2014): Trenching survey of liquefaction-fluidization layers. *GSJ Interim Report No. 66 (AIST14-G63166)*, 273–288. (in Japanese with English figure captions)]
- 水野清秀 (2013): 液状化しやすい地質特性の解明—利根川下流域を対象とした産総研でのとりくみの紹介—. *GSJ 地質ニュース*, **2**, 376–379. [Mizuno, K. (2013): Geological properties of the liquefied layers in the downstream of the Tone River investigated by GSJ, AIST. *GSJ Chishitsu News*, **2**, 376–379. (in Japanese)]

- 水野清秀・風岡 修・田辺 晋・宮地良典・石原与四郎・安原正也・小松原純子・中島善人・小松原 琢・石原武志・稲村明彦・吉田 剛・香川 淳・森崎雅昭・野崎真司・菅野美穂子・古野邦雄・酒井 豊・木村満男・古賀千裕 (2013): 地形および地質学的手法による液化化調査. 巨大地震による複合的災害に関する調査・研究 中間報告 (地質調査総合センター速報 No.63), 179-205. [Mizuno, K., Kazaoka, O., Tanabe, S., Miyachi, Y., Ishihara, Y., Yasuhara, M., Komatsubara, J., Nakashima, Y., Komatsubara, T., Ishihara, T., Inamura, A., Yoshida, T., Kagawa, A., Morisaki, M., Nozaki, S., Kannno, M., Furuno, K., Sakai, Y., Kimura, M. and Koga, C. (2013): Geomorphological and geological investigations into the liquefaction. *GSJ Interim Report No.63 (AIST13-G63163)*, 179-205. (in Japanese with English figure captions)]
- Nakashima, Y. and Komatsubara, J. (2016): Seismically induced soft-sediment deformation structures revealed by X-ray computed tomography of boring cores. *Tectonophysics*, **683**, 138-147.
- 中島善人・中野 司 (2013): X線 CT による地質試料の分析: これから始める人のために. *GSJ 地質ニュース*, **2**, 86-90. [Nakashima, Y. and Nakano, T. (2013): Analysis of geo-materials by X-ray computed tomography: an introduction for beginners. *GSJ Chishitsu News*, **2**, 86-90. (in Japanese)]
- Otsu, N. (1979): A threshold selection method from gray level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **9**, 62-66.
- Peng, B., Zhang, L., Zhang, D. and Yang, J. (2011): Image segmentation by iterated region merging with localized graph cuts. *Pattern Recognition*, **44**, 2527-2538.
- 寒川 旭 (1992): 地震考古学—遺跡が語る地震の歴史. 中央公論社. [Sangawa, A. (1992): *Earthquake Archeology (Jishin Kokogaku)*. Chuokoronsha. (in Japanese)*]
- 平 朝彦・飯島耕一・五十嵐智秋・坂井三郎・阪口 秀・坂口有人・木川栄一・金松敏也・山本由弦・東 垣・田中智行・西村征洋・鈴木孝弘・木戸芳樹・渡邊直人・奥野 稔・井上 武・黛 廣志・小田友也・濱田泰治・室山拓生・伊能隆男・高階實雄・勝又英信・原田 直・西田文明・南川浩幸・金高良尚 (2012): ボーリングコアの X 線 CT スキャン解析による東北地方太平洋沖地震における地盤液化化層の同定. *地質学雑誌*, **118**, 410-418. [Taira, A., Iijima, K., Igarashi, C., Sakai, S., Sakaguchi, H., Sakaguchi, A., Kikawa, E., Kanamatsu, T., Yamamoto, Y., Azuma, W., Tanaka, T., Nishimura, M., Suzuki, T., Kido, Y., Watanabe, N., Okuno, M., Inoue, T., Mayuzumi, H., Oda, T., Hamada, T., Muroyama, T., Ino, T., Takashina, J., Katsumata, H., Harada, N., Nishida, F., Minamikawa, H. and Kanetaka, Y. (2012): Identification of a soil liquefied layer due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake using X-ray CT scan imaging: an example from core samples from Maihama 3-chome, Urayasu city. *Journal of the Geological Society of Japan*, **118**, 410-418. (in Japanese with English abstract)]
- Vezhnevets, V. and Konouchine, V. (2005): GrowCut: Interactive multi-label ND image segmentation by cellular automata. *Proceeding of Graphicon*, 150-156.
- 山崎俊彦 (2010): セグメンテーション: GrowCut. 映像情報メディア学会誌, **64**, 833-838. [Yamasaki, T. (2010): Segmentation: GrowCut. *Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers*, **64**, 833-838. (in Japanese)]
- Yamasaki, T., Chen, T., Yagi, M., Hirai, T. and Murakami, R. (2012): Comparative study of interactive seed generation for growcut-based fast 3D MRI segmentation. *Signal & Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), 2012 Asia-Pacific (IEEE Conference Publications)*, 1-4.

* Title etc. translated by Y.N.