SAR画像を用いたリニアメントの自動抽出法の検討

正員 景山陽一 (秋田大学)
 正員 西田眞 (秋田大学)
 非会員 内海富博 (秋田大学)

Algorithm for Automatic Extraction of Lineaments from SAR Image Data

Yoichi Kageyama, Member, Makoto Nishida, Member, Tomihiro Utsumi, Non-member(Akita University)

This paper proposes a new method for the automatic extraction of the lineaments on the SAR (Synthetic Aperture Radar) image data. It is well known that the lineament patterns are the important feature reflect the structures of the subsurface. A lineament map has been drawn by the fieldworks of experts and the analysis of the enhanced image data using visual interpretation. It is therefore indicated that automatic extraction of the lineaments on the SAR image data is useful and effective for understanding the geological structure in the study area.

This paper generates the edge data which contains the lineaments using some operators and template matching at first. Next, the emphasis of edge with the scored method is carried out. It is assumed that the edge pixel having high scored value can be much related to the lineaments. Finally, the trace and connection of the edge is conducted with the above assumption. As a result, it is confirmed that the results with the proposed method correspond to the lineament map drawn by experts. Therefore, it can be concluded that the proposed method is the effective technique for automatic extraction of the lineaments on the SAR image data.

キーワード：リニアメント, SAR画像, スコア化, エッジ, リモートセンシング

1. はじめに

近年、自然災害に対する防災といった見地から、地震を引き起こす一因となる断層などを把握する必要性が高まっている。断層のような地形上に見られる連続性を持った天然の線状構造はリニアメントと称され⁽¹⁾、資源探査などの対象地域における地質構造と専門家により抽出されたリニアメントの関連に関する研究が報告されている⁽²⁾⁽³⁾。リニアメントの抽出作業は、限られた地表の起伏や形態を手がかりとして行われるため⁽⁴⁾、専門家の高度な知的判断と経験的な知識に依存することが大きい⁽⁵⁾。例えば、同一方向に存在する不連続な線分要素から、地質構造を考慮することにより連続性のあるリニアメントを抽出している場合がある。このようにリニアメントの抽出には複雑・多様な要因を考慮する必要があるため、画像処理によるリニアメントの自動抽出化が困難であった。

一方、リモートセンシングデータは瞬時性・広域性・経済性に優れた特徴を有するため、これをリニアメント解析に用いた例は報告されているものの、その抽出法としては、

フィルタ等を用いてエッジを強調した画像から専門家の目視判読により行われる手法⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾が主な内容となっている。しかしながら、リニアメントの抽出作業は長時間に及ぶため、解析者が同一コンディションを維持して判読を行うことは困難であることに加えて、目視判読では解析者が異なると、抽出したリニアメントの異なる場合も生じるなどといった問題点も指摘されている⁽¹⁰⁾。そこで、本論文は同一基準を有するリニアメントの抽出法の開発を目的とし、SAR画像を用いたリニアメントの自動抽出法を提案する。具体的には、前処理、スコア化処理およびエッジの追跡・連結処理からなるアルゴリズムを構築し、SAR（合成開口レーダー：Synthetic Aperture Radar）画像上に見られるリニアメントの自動抽出を試みた。また、本論文で提案するリニアメント自動抽出法の有用性を検討するため、画像の回転などを考慮したリニアメントの自動抽出法である方向性線素抽出方式により得られたリニアメントとの比較を行った。さらに、汎用性を検討するため、JERS-1衛星により取得したSAR画像についても本提案法を適用したので結果を報告する。

本論文は D.W.O'Leary らによるリニアメントの定義，すなわち“リニアメントは，直線上または僅かな曲線で配列する地表の単一あるいは複合した線状形態で，地下の現象を反映する地形的特徴を示すもの”に基づき⁽¹⁰⁾，リニアメントの自動抽出法の検討を行った。提案法の処理手順を図 1 に示す。

＜2.2＞スコア化 前処理により作成したエッジ画像の中からリニアメントに対応すると思われるエッジのみを抽出するため、2値化したエッジ画像に対してスコア化を行った。すなわち、スコア化とはエッジが確認される画素（以下、エッジ画素と略記する）において、リニアメントに対応すると思われるエッジ画素ほど保持する値（スコア）が大きくなると仮定し、処理を行うものである。前述のように本論文では“直線上または僅かな曲線で配列し線状形態”とリニアメントを定義している。そのため、リニアメントの構成要素になるとと思われる基本パターンを意し、パターンマッチングを行った。具体的には、図3示す7×7サイズのテンプレートをもとに8方向について計60パターン用意し、テンプレートと一致する部分を定数倍した。なお、テンプレートのサイズは大きくなる程、リニアメントに対応する線分要素（平均長）が長く抽出されることを

T. IEE Japan, Vol. 118-C, No. 11, '98

1111111
1333331
1355531
1357531
1355531
1333331
1111111

図4 エッジ強調フィルタ
Fig.4.A local operator for enhancing the scored value.

<2.3>エッジの追跡・連結処理

(1) エッジの追跡：処理手順を図5に示す。はじめに、エッジ画像E(i, j)において、エッジが存在する座標 (E(x_s, y_s)=1) を追跡始点として抽出し、始点(x_s, y_s)を中心とみた5×5画素の領域の重心(x_{g0}, y_{g0})を次式より求めた。なお、5×5画素の領域を用いることにより、専門家の抽出したリニアメントの特性に近い線分の追跡が可能であることを確認している。

$$x_{g0} = \frac{1}{Z} \sum_{p=-2}^2 \sum_{q=-2}^2 \{E(x_s+p, y_s+q) \times (x_s+p)\} \quad \dots\dots (3.1)$$

$$y_{g0} = \frac{1}{Z} \sum_{p=-2}^2 \sum_{q=-2}^2 \{E(x_s+p, y_s+q) \times (y_s+q)\} \quad \dots\dots (3.2)$$

ここで、Zは5×5画素の領域内におけるエッジ画素の総和を、pは5×5画素の領域のx方向を、qはy方向をそれぞれ意味する。次に算出した重心から、初期方向θ_{g0}と、距離v隔てたθ_{g0}方向における5×5画素の領域にエッジが存在するかについては次に示す条件に基づいて判別を行った。

$$\theta_{g0} = \frac{1}{\pi} \times \tan^{-1} \left(\frac{y_{g0} - y_s}{x_{g0} - x_s} \right) \times 180^\circ$$

(x_{g0} > x_s かつ y_{g0} ≠ y_s)

$$\theta_{g0} = \frac{1}{\pi} \times \tan^{-1} \left(\frac{y_{g0} - y_s}{x_{g0} - x_s} \right) \times 180^\circ + 180^\circ$$

(x_{g0} < x_s かつ y_{g0} ≠ y_s)

$$\theta_{g0} = 90^\circ \quad (x_{g0} = x_s \text{ かつ } y_{g0} > y_s)$$

$$\theta_{g0} = -90^\circ \quad (x_{g0} = x_s \text{ かつ } y_{g0} < y_s)$$

$$\theta_{g0} = 0^\circ \quad (y_{g0} = y_s \text{ かつ } x_{g0} > x_s)$$

$$\theta_{g0} = 180^\circ \quad (y_{g0} = y_s \text{ かつ } x_{g0} < x_s)$$

エッジが存在しない場合は、そこで追跡を終了した。エッジが存在する場合、その領域の重心(x_{g0}, y_{g0})に始点を移動する。なお、移動する方向は上記条件と同様に算出し、エッジを連結することにより、その都度追跡方向を更新しながらエッジの追跡を行った。

(2) エッジの連結処理：本研究ではエッジ画素を2値化し、リニアメントに対応すると思われるエッジの追跡を行

った。しかしながら、追跡点を順に連結するだけでは地質構造を反映した線分要素の抽出されにくいことが予測される。そこで、本研究では(2.1)式から得られたスコア値を用いて、エッジの連結を行った。すなわち、リニアメントを抽出する上で、スコア値はエッジを連結するための結合の強さ(以下、結合力とする)であると仮定し、スコア値の高い画素から順に連結を行った。エッジ連結の例を図6に示す。图中、追跡処理により確認された追跡点はA1(始点)～A7(終点)の計7点が存在する。このうち、最大スコア値を有するA4を出発点とし、初期点方向については次にスコア値の高いA2を経由してA1を連結する。一方、終点方向については、次に大きい値を有する追跡点がA7であるため、A4とA7を連結した。以上の処理を画像全体に施し、結合力を考慮したエッジの連結を行った。さらに、連結処理を施したエッジから大局的で連続性の有したリニアメントを生成するため、解析画像を等分割してメッシュを作成し、メッシュ内においてハフ変換⁽¹⁾⁽²⁾を施した。

図5 エッジ追跡の処理手順
Fig.5.Flow chart of edge trace.

図6 結合力を考慮した追跡・連結の例
Fig.6.A sample of the trace and connection with the scored value.

3. 抽出したリニアメントの評価方法

<3.1>ローズダイアグラム 専門家が目視により判読して作成されたリニアメントでは、解析者が異なると、抽出されるリニアメントの異なる場合もあるといった問題点が指摘されている⁽¹⁰⁾。また、フィールドワークにより検証する場合も、断層が露頭している状況は少ないため、対象地域の地形等を総合的に考慮する必要がある。従って、抽出したリニアメントを評価する方法としては、個々のリニアメントについて検討する他、抽出したリニアメントを方位別に分類し、方位別頻度分布を示すローズダイアグラムにより評価を行うのが一般的とされている⁽⁷⁾⁽¹⁴⁾。そこで、本研究ではローズダイアグラムを用いてSAR画像から自動抽出したリニアメントと専門家が目視判読により抽出したリニアメントの比較・検討を加えた。なお、4方位(North-South, East-West, NorthWest-SouthEast, NorthEast-SouthWest)を設定し、方位別のリニアメントの頻度と抽出リニアメントの平均長を比較項目とした。

<3.2>方向性線素抽出方式 本論文で提案したリニアメントの自動抽出法の有用性を検証するため、画像の回転などを取り入れたリニアメントの自動抽出法である方向性線素抽出方式(DSDA: Directional Segment Detection Algorithm)との比較を試みた。DSDAの概要⁽¹³⁾は以下のようになる。

DSDAは数個の連続した画素を1つの線素と呼び、リニアメントがこれらの線素の集合体であると考えて、ある刻みごとの角度でこれらの線素を抽出し、各々の抽出結果を重ね合わせることでよりリニアメントを抽出する手法である。この手法は次に示す3ステップにより構成される。

- (1) 特定方向の線素を抽出するため、x軸を固定し抽出方向をy軸とする斜交座標に原画像を変換した後、y軸方向に画像を圧縮し、線素画像を作成する。この線素画像に対し、x軸方向の微分を行い、線素エッジ画像を作成する。
- (2) しきい値Tを設定し、抽出方向(y軸)に対してT以上のエッジ強度を有する線素が所定の個数以上連続して存在している場合、その領域を保存するとともに雑音を除去する。
- (3) エッジ抽出後の線素エッジ画像に対し、y軸方向に線素を復元した後、原画像座標へ変換する。

以上の操作を設定角度ごとに順次行い、重ね合わせた結果に平均化と細線化を施して終了とする。

4. リニアメント抽出結果および抽出精度の評価

<4.1>使用したSAR画像データおよびリニアメント図 本研究の対象領域は秋田県南部に位置する秋の宮とした。この地域には火山基盤としての花崗岩類が広く分布するとともに、高温地熱地帯が存在する場所でもある。本研究では昭和56年6月-8月に取得したレーダ映像調査モザイク画像⁽¹⁵⁾をSAR画像として解析に用いた。目視判読によりリ

ニアメントの抽出を行う場合、解析者によって抽出結果に個人差が生じる。しかしながら、自動化した手法により得られたリニアメントの評価法は現在のところ存在しない。そこで、本研究では一般的にリニアメントを把握する上で通用しているリニアメント図⁽¹⁶⁾を同地域におけるリニアメントの指標としてとらえ、自動抽出したリニアメントとの比較・検討に用いた。SAR画像を図7に、リニアメント図を図8にそれぞれ示す。なお、図8におけるリニアメントは確度の高いものから順に、太線、破線の太線、細線によって表されている。また、図7~図8に示した①、②の地域は抽出結果を検討するために着目した地点を示しており、詳細については後述する。

<4.2>リニアメントの抽出結果

(1) 提案法によるリニアメントの抽出結果とリニアメント図との比較: 提案法により抽出されたリニアメントを図9に示す。目視による比較を行うと、座標的なずれがあるものの、抽出したリニアメントの多くは専門家が抽出したリニアメントに対応している様子が認められる。特に、リニアメント図(図8)中、①の地域に存在する環状構造の一部が、図9に示す提案法により得られた結果では直線リニアメントの連続として抽出されていることが確認される。このため、環状構造の存在の判読は図9を用いることにより容易と思われる。また、図8の②の地域におけるリニアメントは確度が高いため、太く表されているが、提案法により得られた結果(図9)においてもこのリニアメントが明瞭に抽出されている。すなわち、本提案法により得られたリニアメントと専門家が目視判読により抽出したリニアメントは合致している様子が認められる。

次に、提案法によるリニアメントと専門家によるリニアメントのローズダイアグラムを図10、図11にそれぞれ示す。専門家の抽出したリニアメントの平均長と比較し、提案法により得られたリニアメントの平均長は全般的に短くなっている。しかしながら、複数のリニアメントで専門家の抽出した環状構造やリニアメントを表現している部分もあり、提案法により抽出されたリニアメントと専門家が目視判読により抽出したリニアメントは大局的に同様の特性を有している様子が認められる。これは図10と図11に示した各方位別の抽出頻度が同様の傾向を示していることにも符合する。以上の結果は、本提案法を用いることにより地質構造の反映したリニアメントを得る可能性のあることを示唆するものである。

(2) DSDAによるリニアメント抽出結果との比較: 本論文での提案法の有用性を検討するため、予察的段階での地質データとして利用可能なリニアメントの自動抽出法であるDSDA(方向性線素抽出方式)⁽¹³⁾により得られた結果との比較を試みた。しかしながら、文献(13)で設定したDSDAのデフォルトパラメータを用いて対象画像を解析したところ、良好な結果を得ることは出来なかった。そこで、本論文では最適と思われるパラメータを試行錯誤的に選定し、その値を用いてDSDAによる解析結果を得

図7 SAR画像⁽¹⁵⁾
Fig.7.SAR image.

図10 抽出結果のローズダイアグラム (提案法)
Fig.10.Rose diagram of the lineaments obtained by the proposed method.

図8 リニアメント図⁽¹⁶⁾
Fig.8.Lineament map.

図11 抽出結果のローズダイアグラム (専門家)
Fig.11.Rose diagram of the lineaments obtained by the experts.

図9 提案法によるリニアメントの抽出結果
Fig.9.Experimental results with the proposed method.

図12 DSDAによるリニアメントの抽出結果
Fig.12.Experimental results with the DSDA.

て、比較検討に用いた。DSDAにより得られたリニアメントの抽出結果を図12に示す。

DSDAにより線分要素は抽出されているものの、これが対象地域における地質特性の反映したリニアメントであるかについての判別は難しいように思われる。一方、提案

法により得られたリニアメントはDSDAの抽出結果と比較し、リニアメントの判別が容易である。また、各方位別のリニアメントの頻度分布(ローズダイアグラム)を比較したところ、DSDAよりも提案法により得られたリニアメントの方が専門家の抽出したリニアメントに近い特性を

有していることを確認している。従って、本提案法を用いることにより効率良くリニアメントを抽出することが可能になると思われる。

<4.3> JERS-1衛星により取得したSAR画像への適用

本提案法の汎用性を検証するため、JERS-1衛星により取得したSAR画像（以下JERS-1 SARと略記する）に本提案法の適用を試みた。リニアメントの抽出結果を図13に、同対象領域におけるリニアメント図を図14にそれぞれ示す。前述したSAR画像とJERS-1 SAR画像の取得条件および取得高度は異なるため、単純な比較は出来ないものの、概ねリニアメント図に近い結果の得られている様子が認められる。従って、本提案法はJERS-1衛星により取得したSAR画像からリニアメントを自動抽出する上でも有用な手法になり得ると判断される。

5. まとめ

本論文ではSAR画像を用いたリニアメントの自動抽出法を提案し、検討を加えた。得られた成果をまとめると以下のようになる。

(1) 本研究では前処理・スコア化・エッジの追跡処理を施した後、エッジ画素におけるスコア値をエッジ連結による結合力と見なしてエッジ連結処理を行い、同一基準を有したリニアメントの抽出を試みた。この結果、本提案法を用いて抽出したリニアメントと専門家により抽出されたリニアメントは、おおよそ良好な対応が確認された。また、環状構造の一部が抽出されている様子も認められた。従って、本提案法を用いて地質構造の反映したリニアメントの取得できることを明らかにした。

(2) 各方位別のリニアメントの頻度分布について比較したところ、提案法による抽出リニアメントと専門家が抽出したリニアメントは、大概同様の特性を有していることを確認した。

(3) JERS-1 SAR画像に対して、提案法の適用を試み、手法の汎用性について検討した。提案法により得られたリニアメントは専門家が抽出したリニアメントの特性に近い様子が認められる。従って、本提案法はJERS-1衛星より取得したSAR画像からリニアメントを自動抽出する上でも有用な手法になり得ることが示された。

なお、本論文では専門家の高度な知的判断と経験的知識によるリニアメント抽出の処理プロセスを自動化するには至らなかった。このため、専門家の知識ベースを解析手法へ導入すること、提案法の汎用性を検討することなどを今後の課題と考える。

最後に、本研究に協力下された川村尚司氏（現在、(株)ネクスト）、本学情報工学科石沢千佳子助手および佐藤貴子技官に謝意を示します。また、リニアメントに関して有益なご助言を賜っております本学部附属素材資源システム研究施設高島 勲教授に厚く御礼申し上げます。本研究の一部は秋田大学工学資源学部附属素材資源システム研究施設の共同利用システムを使用させて頂いたことを付

図13 JERS-1衛星 SAR画像から抽出した結果
Fig.13.Experimental results with the proposed method using JERS-1 SAR image.

図14 対象領域(図12対応)におけるリニアメント図
Fig.14.Lineament map for JERS-1 SAR image.

記し、感謝します。本研究で使用したSAR画像およびリニアメント図は新エネルギー・産業技術総合開発機構の承認を得て使用したことを付記するとともに、JERS-1 SARデータは通商産業省・宇宙開発事業団がデータ所有し、(財)リモート・センシング技術センターによりデータ配布されたことを付記します。

(平成10年2月26日受付、平成10年4月30日再受付)

文 献

- (1)土屋編：「リモートセンシング概論」，朝倉出版，p249(1990)
- (2)植木・柴田・片井・岩井・塚田：「ファジィ特徴抽出と構造化ニューラルネットワークによる地質画像解析システム」，日本ファジィ学会誌，Vol.6，No.5，pp957-973(1994)
- (3)姜・村井・垣内：「SAR画像に基づいた岐阜北部地質構造の調査及びリニアメントの評価」，写真測量とリモートセンシング，Vol.30，No.5，pp29-35(1991)
- (4)星野：「LANDSAT映像による地質構造解析の手法」，石油技術協会誌，Vol.46，No.6，pp27-42(1981)
- (5)J.F.Wang and P.J.Howarth：“Use of the Hough Transform in Automated Lineament Detection”，IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing，Vol.28，No.4，pp561-566(1990)
- (6)岩下・下田・坂田：「TMデータによるリニアメント抽出能力の定量的評価」，写真測量とリモートセンシング，Vol.31，No.5，

- pp22-35(1992)
- (7) 岩下・下田・坂田：「TM VNIRによる画像強調とリニアメント解析との相関」, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 33, No. 3, pp48-57(1994)
- (8) 岩下・下田・坂田：「活断層との対比によるリニアメント抽出を目的とした画像強調効果の定量的評価」, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 33, No. 6, pp6-15(1994)
- (9) 岩下・下田・坂田：「リニアメント解析に対する最適な局所オペレータ」, リモートセンシング学会誌, Vol. 15, No. 5, pp20-33(1995)
- (10) 岩下：「活断層センシング」, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 34, No. 3, pp37-40(1995)
- (11) 高木・下田編：「画像解析ハンドブック」, 東京大学出版会, p502, p539, p578(1991)
- (12) 梅田：「ハフ変換」, 日本ファジィ学会誌, Vol. 8, No. 2, pp229-233(1996)
- (13) 大地・駒井・新井・藤岡・徳尾・大谷：「衛星MSSデータからのリニアメント自動抽出とその地質学的評価」, 鉱山地質, Vol. 32, No. 2, pp99-108(1987)
- (14) (財) 資源・環境観測解析センター編：「新編リモートセンシング用語辞典」, p203(1996)
- (15) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：「レーダー映像法調査モザイク画像(新庄NJ-54-20)」, 全国地熱資源総合調査(1981)
- (16) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：「レーダー画像解析調査リニアメント図(新庄NJ-54-20)」, 全国地熱資源総合調査(1982)

景山 陽一

(正 員) 1972年5月25日生。97年3月秋田大学大学院博士前期課程情報工学専攻修了。同年4月秋田大学鉱山学部情報工学科助手。各種リモートセンシングデータの解析技術とアルゴリズムの開発に関する研究に従事。電子情報通信学会, 情報処理学会, 東京地学協会, 日本素材物性学会会員。

西田 眞

(正 員) 1952年1月18日生。74年3月秋田大学鉱山学部電気工学科卒業。同年4月トヨタ自動車工業(株)入社。75年4月秋田大学助手。講師, 助教授を経て, 96年1月情報工学科教授。各種リモートセンシングデータの解析技術とアルゴリズム, 画像情報応用および知識情報システムの研究に従事。

88年~89年クラークソン大学客員研究員。84年電気学会論文賞, 88年静電気学会論文賞受賞。ファジィ学会, リモートセンシング学会, 写真測量学会, 応用物理学会, IEEE会員。工博。

内海 富博

(非会員) 1974年5月24日生。97年3月秋田大学鉱山学部情報工学科卒業。同年4月秋田大学鉱山学部情報工学科教務職員。現在, 半導体の光物性に関する研究に従事。応用物理学会, 電子情報通信学会会員。