

## 論文の内容の要旨

論文題目 空間的事象の構造的類似性を捉える位相的方法に関する研究

氏 名 増山 篤

この論文は、空間的事象の位相的特徴を抽出し、それを比較することで、その構造的類似性を客観的に判断する方法を提案するものである。また、その計算機上への実装法を開発し、さらに、実際のデータへの適用を通じて、その有効性を検証するものである。

空間的事象を理解するプロセスは、そこで深めていく理解の程度と理解における客観性の高さに応じて、視覚化、特徴や構造の記述、数理的手段による客観的判断という三つの段階を行き来することだと考えることができる。

この三段階のうち、第二段階における代表的な方法としては、空間的要約、空間的ズームング、位相幾何学を援用した方法がある。これらのうち、位相幾何学を援用した方法に関して詳しくみると、そこで抽出される特徴や構造には、主立ったものとして、二次元平面オブジェクト間に接続関係を与えたグラフ、二つの空間オブジェクトの共通部分集合に着目した位相的空間関係、連続的関数の位相的特徴の三種類がある。

この三種類の中でも、グラフとして記述された空間的事象の構造に関しては、数値的指標等を用いて判断する方法が数多く提案され、利用されている。しかしながら、連続的関数の位相的特徴については、それを利用し、客観的判断段階へと進んでいくための方法に関する既存研究は極めて少ない。

この論文では、連続量の空間的・時間的変化を記録したデータを通じて空間的事象に関する客

観的判断段階において、連続的変換に対する不変な特徴—すなわち、位相的特徴—を有効に利用しうる三つの具体的場面を見出し、それぞれの場面に対する位相的方法の提案、計算アルゴリズムの開発、実証的適用を通じた有効性の検証を行う。

本論文は、全部で五つの章からなる。

第一章「序」では、既存研究のレビューを行い、この研究の位置づけを与え、本論文が取り組む研究テーマの概略について述べる。

第二章「時系列曲線のロバストな分析方法」では、一変数関数的変化を表す曲線の位相的特徴を用いた探索的な時系列分析方法を提案および適用を行う。

近年、リモートセンシングを始めとする観測技術の発達により、膨大な時系列データが取得されるようになった。しかし、そこでの観測値は必ずしも信頼できない。真の値が何らかの連続的変換によって歪められ、それが観測値となっている場合が多々ある。このとき、取得された連続量の時系列変化がなす一変数関数（以下、時系列曲線）に対し、従来の分析方法を適用することは必ずしも適切ではない。分析結果が観測値に生じた歪みに引きずられ、分析者を誤った結論に導きかねないためである。

あくまで従来の方法を用いるためには、データの補正を行う必要がある。しかし、データの補正はコストのかかる作業であり、今日の時系列データの膨大さには対応し得ない。そこで、時系列曲線の位相的特徴を用い、データの歪みに影響されることなく、特徴的パターンを抽出する探索的方法を提案する。

まず、連続かつ二階微分可能な時系列曲線上の各点の微分に基づく局所的性質を定義する。そして、これが、時間軸（定義域）や観測値軸（値域）の連続的変換に対して不変であることを示す。この局所的性質を用いて、これら連続的変換に対して不変な時系列曲線の大局的な位相的特徴を導く。さらに、時系列曲線に対し、微少な変動や攪乱の影響を取り除くスムージング手続きを導入する。

次に、有限個の観測値列からなる時系列データについても、同様の局所的性質が定義でき、適切なアルゴリズムによって、その大局的特徴の抽出、スムージングが実行可能であることを示す。その後、計算機実験から、このアルゴリズムの平均計算時間を導く。以上のようにして求められる時系列曲線の大局的特徴に基づき、二つの時系列曲線の位相的類似度指標を提案し、また、大局的特徴に基づく位相的分類方法を提案する。

最後に、これらの方法を、ペルシア湾岸地域における植生活動の変化をとらえたリモートセンシングデータへ適用し、その結果から、実証的有効性を示す。

第三章「二つの連続面の関係を分析する探索的方法」では、二つの連続面の量的関係の存在の

可否を判別するための方法の提案および適用を行う。

地形など二変数関数的な連続面として捉えられる空間的事象は数多い。これら連続面同士の関係を分析する方法としては、専ら、何らかの量的関係を事前に想定する分析方法が用いられてきた。典型的な方法は、回帰分析であり、連続量同士の線形関係が仮定されている。しかし、こうした分析方法は、そこで想定された量的関係からの逸脱に対応し得ない。例えば、回帰分析は、非線形な関係に対応し得ない。

そこで、二つの連続面の位相的特徴を比較することによって、これらの間に量的関係が成り立ちうるかを調べ、その次に、量的に精緻な確証的分析に進むという手順が考えられる。この章では、まさにその前段階にあたる探索的分析方法の提案する。

まず、連続面の質的關係を定義域の連続的変換によって二つの連続面が互いに移し替える関係（「空間的關係」）と値域の連続的変換によって互いに移し替える関係（「値の關係」）の二種類に整理する。

次に、二つの連続面の關係が「値の關係」のみで説明されるかどうかを調べるための簡便な指標を提案する。また、「空間的關係」も考慮し、二連続面間の關係が「値の關係」と「空間的關係」で説明されることを保証するためには、領域木と呼ばれる連続面の位相的特徴を用いることができることを示す。

領域木に関しては、メッシュデータやポイントサンプリングデータから求める方法を開発する。特に、メッシュデータに関しては、そのデータ配列の規則性を利用した簡便な計算法について述べ、その方法がメッシュ数に線型に比例する計算時間で構築できることを計算機実験結果から示す。

さらに、分析結果の不安定さを回避するために、前章と同様に、微少なリンクを除外するスムージング手続きを導入する。

最後に、この章で提案した分析方法を、仮想的数値例、および、東京都 23 区内の二酸化窒素分布の時系列変化分析に対して適用した結果を示す。

第四章「二つの領域分割図の適合度評価と統合化の手続き」では、境界線の形状を一変数関数として記述し、第二章における位相的分析方法を拡張することで、二つの境界線形状の質的同一性を評価する方法の提案および適用を行う。

近年、多数のデータ作成主体によって、一つの領域をいくつもの小領域に分割した状態を記録したベクトルデータ（領域分割図）が作成されている。そのため、本来同一であるべき領域分割図が複数存在するという状況が発生する。ところが、往々にして、これらを構成する境界線の間には相違が生じている。この相違が甚だしい場合には、いずれのデータの信頼性も疑わしい。そ

れゆえ、その相違を評価する必要が生じる。

従来、一致すべき境界線のずれを評価する方法としては、片方の境界線から発生させたバッファを用い、その中に含まれる他方の長さを求めるという方法が主として用いられてきた。しかし、この方法では、境界線形状の大局的構造における左右への折れ曲がり方が異なるという質的相違を検出できない。境界線上の点から端点までの道のりの距離を変数、その点での曲率を関数値として得られる一変数関数を通じて境界線形状を見れば、この関数において位相的特徴が異なっている。この相違はデータ作成時における致命的エラー等を意味していると考えられ、見逃すべきではない。

この章では、まず、ファイル形式の統一、図郭線の除去、名称リストのチェックおよび修正、といった前処理手続きを行う。また、これらの前処理手続きにおいて生じうるエラーのタイプを整理し、それぞれに対する対処法を示す。

この後、領域分割図における境界線の作るネットワークにおいて、リンクの対応付けを行い、評価の対象となる境界線のペアを見出す。

対応付けられた境界線に対し、以下の手順に従って、質的同一性評価を行う。まず、境界線を等間隔に並んだ点列で近似する。次に、この点列に対して複素数列の離散フーリエ変換を適用することによって、デジタイジング精度の違いなどに起因する粗さの違いを操作し、境界線の骨格を抽出する方法について述べる。最後に、二つの骨格が質的に同一であることを、その上の特徴的な点（以下、特質点）の数が同じであり、また、左右への折れ曲がり方も一致することと定義する。このように定義を行うと、骨格の質的同一性を判定するためには、骨格における各バーテックスの折れ曲がり角度の列がなす折れ線の大局的特徴を比べればよく、また、その比較は、第二章における位相的分析方法の拡張によって可能であることを示す。

質的に同一な境界線については、その特質点の組を用いて、回転、拡大・縮小、平行移動といった量的空間関係を調べる方法について考える。

これら一連の手続きは、世田谷区および新宿区の町丁目界を記録した領域分割図データに適用し、その結果から、この手続きの妥当性を示す。

一方、特質点抽出に関しては、必ずしも曲率関数の位相的特徴によらない方法も試み、それと先の位相的方法との比較を行った。具体的には、境界線の直線的部分毎に主成分直線をあてはめ、その継ぎ目から特質点を抽出するという方法を用い、世田谷区および新宿区に対して適用を行った。その結果、やはり曲率関数の位相的特徴を用いた方法に利点が多いことが明らかになった。

第五章「結語」では、第二章から第四章における本論文の成果のまとめ、また、今後の課題について述べた。