空間データ分析と地理情報システム

張 長 平*

Spatial Data Analysis in GIS Environment

Changping ZHANG*

Abstract

This paper discusses a number of general issues and new trends of spatial data analysis in the GIS environment and focuses on two kinds of spatial data analysis, *i.e.*, exploratory and confirmatory data analysis. The exploratory data analysis is the most common approach in GIS and has taken different forms. In an exploratory data analysis, data are used in an inductive fashion to gain new insights. On other hand, a confirmatory data analysis is a traditional approach, and uses spatial statistics and quantitative geographical methods in a GIS environment. In particular, spatial statistics are more general than statistics for non-spatial information, because they require access not only to attributes (non-spatial information), but also to locational and topological information. Recently, spatial interpolation has become a major function of many GIS. In this paper, two forms of spatial interpolation, the interpolation of point and areal data, are distinguished and reviewed.

A series of methods that link spatial data analysis modules with GIS are outlined and how the linkage should be made in practice is discussed. Two types of linkage are distinguished in this area. The first is an interface type, which involves interfacing spatial data analysis modules via macro languages provided by the GIS. The second type integrates GIS with spatial data analysis software, which involves file transfers between the GIS and other software. This paper also reviews directions for future research on GIS applications and there is a conviction that the future success of GIS technology will depend to a large extent on incorporating more powerful analytical and modelling capabilities.

Key words : geographical information systems (GIS), exploratory data analysis, confirmatory data analysis, spatial interpolation, interface type, integration type

キーワード : 地理情報システム, 探索的分析, 検証的分析, 空間補間, インタフェース方式, 統合方式

I. はじめに

地球表面の近くに発生した種々の自然現象と人間活動に地理学的研究を行なう際に、地球上の位

置と明示的に関連づけられた空間データは、ますます重要になっている。地球上において、いつ、どこで、なにが起こったか、そして、地区(地点)に位置する地理的事象は空間的に見てどんな相互

* 国際航業株式会社技術センター

* Department of R & D, Kokusai Kogyo Co. Ltd.

表 1 GISと空間分析との異なる役割。

Table 1 Major differences among GIS and spatial analysis.

	GIS	空間分析
関係問題	地球上でいつ、どこで、なにが起きたか。	・点・線・面の地理的事象の分布にどんな空間パターンが隠れているか。 ・将来なにが起こりうるか。
表現手法	地図、グラフ、テーブル、レポート等	将来予測の結果、空間クラスター、ヘテロジニアス地域の主題図等
利用目的	・地図、属性情報の一元的管理 ・地理情報の可視化	・点・線・面パターンの発見 ・データによる将来の予測 ・意志決定への支援

関係・相互作用、どんなパターンが現われ、将来どう変化していくかという2種類の問題については、空間データを基にした答えが求められている。前者の問題には、地図データと属性データを一元的に管理し、データを可視化できる地理情報システム (Geographical Information Systems, GIS) が適用されているが、後者の問題には、空間パターン分析、時・空間系列モデル、シミュレーションなどを中心とする空間分析の理論的研究が数多く蓄積され、空間統計学、空間プロセス、空間予測モデルなどの空間データ分析手法とモデルが開発された。ここでは、GISと空間データ分析に関する地理的問題、表現手法、利用目的およびその相異について表1に簡約した。

空間データ分析法とモデルは、Anselin and Griffith (1988) が指摘したように、空間データと統合されない限り、実際の問題に有効に適用することがまだ不可能に近い状態にある。しかし、最近のGIS技術の発達と国土空間データ基盤 (National Spatial Data Infrastructure, NSDI) の整備を進めるにつれ、空間データとGISを用いた空間分析の研究は、地理学をはじめ、それに関係する各分野に数多く見られ、空間データ分析がますます実用化されつつある。

GISは単なるコンピュータ・マッピングではなく、主要特徴は解析的处理を強調することにある。現在、商用GISのほとんどは、地図図形データと属性データを一元的に管理し、オーバーレイ、バッ

ファリング、コロプレス図の作成など独自の空間データ操作機能を用いて空間解析を行なっているが、上記のような高度な空間分析機能をいまだにもたないため、現在の商用GISだけでは真の空間分析が依然として不可能に近い状態にある。本稿では、GISにおける空間データ分析の問題点を踏まえながら、GISを援用した空間データ分析の理論と実践の現状と最新動向を概説してみる。

II. 空間データとGIS

GISを用いた空間データ分析は、無論、空間データを使わなければならない。空間データとは、地球上の位置と明示的に関連づけられた自然、社会、経済、文化などのデータであり、GISの利用と空間分析を支える基本データである。一般に空間データは、ラスタ型とベクトル型の2種類のデータに分けられる。ラスタデータでは、グリッド (あるいはピクセル) が、実体の情報を記録する基本的空間データ単位となる。つまり、属性情報は、位置 (セル) に関するものであり、行と列の番号で参照されるデータ記録に保存される。ラスタデータは、空間的に互いに近隣するグリッドが離れているグリッドよりも似た属性値をもっていることが多いというグリッド間の空間的自己相関 (spatial autocorrelation) が強く、ラスタデータを用いた空間統計を行なう場合に、統計結果に重大な偏りが生じる主な原因の一つになる。そのために、土地利用、適地評価などに利用する

図 1 空間分析の位相構造モデルとデータ。

Fig. 1 Topological model and data for spatial analysis.

際に、予め適切なデータ分類や集計をしなければならない。

ラスターデータの対を成すものとしてベクトルデータがある。ベクトルデータは、地理的事象を点、線、面の三つの基本的な幾何的オブジェクトに集約・表示し、位置と属性情報をもつ空間データである。ベクトルデータに基づく空間データ分析には、地理的事象の位置と属性データの他に、地物間の空間関係を示す位相構造データも欠かせない。空間分析にかかわる位相構造では、主にポリゴンの隣接 (adjacency)、ポリゴンの包含 (containment)、線分の連結 (connectivity) という三つの位相情報が含まれている。ポリゴンの隣接は、一本のアーク両側のポリゴン ID で二つのポリゴンの隣接関係を示す位相情報であり、ポリゴンの包含は、一つのポリゴンが一つあるいは複数のポリゴンを含む位相情報である。線分の連結は、線分の始点と終点の座標で点と線分の連結関係を表わす位相情報であり、それによって連続した複数の線分を記載する n 組の座標で点とアークの連結関係を表わすこともできる。図 1 は、空間分析にかかわる代表的な位相構造データの例を幾何学的に表現したグラフである。この位相構造データは、グラフの下にテーブルに記録されている。ところで、地理的事象の位置、属性、位相という 3 種類のデータは、空間分析において異なる役割を果たしている。たとえば、線形回帰分析では、従属変数と独立変数が地理的事象の位置と位相データではなく、地物の属性データで定義されるが、不整形な小区域データの空間的自己相関検定では、地理的事象の属性とその位置関係を説明

図 2 GIS の概念的フレームワーク。

Fig. 2 Conceptual framework of GIS.

するために、属性データのみならず、位置と位相のデータをも活用しなければならない。

GIS で利用できる空間データには、ベクトル型のデジタル地図とラスター型のグリッドデータがあり、国土地理院では 1993 年から数値地図 50 m メッシュ (標高) のラスター型数値地図および、ネットワーク、構造化ポリゴンといった暗示的な位相構造をもつ数値地図 2500 (空間データ基盤) のベクトル型数値地図をはじめ、多種の数値地図の整備・刊行を行ってきた。それと同時に総務庁統計局も、国勢調査統計データにおいて従来の地域メッシュ統計を主流とした基本単位集計に町丁・字別集計項目を新たに加えた。現在、それらの地図データと統計データは、社会全体の空間データ基盤となって GIS の利用と空間データ分析を支えている。

その一方、GIS は主にハードウェア、ソフトウェア、空間データ、利用者の四つの要素から構成され、空間データ入力、保存・管理、操作・分析、表示・出力という四つの機能 (図 2) をもつコンピュータベースの情報システムである。近年、

GISは、自然資源管理、環境保全・アセスメント、都市・地域・交通計画、公共事業（電話、水道、ガス、電力等）の施設管理・計画、厚生福祉事業の支援、エリア・マーケティング分析等々の広い分野で急速に普及し、巨大なビジネスとして成功しつつある（Goodchild, 1987; 高阪, 1994）。しかし、空間統計学、空間プロセス、空間予測モデルのような高度の空間分析は、現在の商用GISにはほとんど組み込まれていない。

III. 空間データ分析現状と動向

GIS環境の上で、空間データ分析はGIS操作機能の利用の他に、探索的分析（exploratory analysis）、検証的分析（confirmatory analysis）、空間補間（spatial interpolation）を適用できると考えられる。空間データの探索的分析は、空間分布における空間クラスターや空間「ヘテロジニアス」（heterogeneous）地域を探索的に分析し、さらなる検証に値する地理的仮説やモデルを提示することである。それに対して検証的分析は、空間統計学の諸手法や空間シミュレーションなどの技法を用いて空間的自己相関検定や時・空間モデルの構築などを行なうことである。その二つの空間分析の他に、空間補間は長い間地理学者や地球科学者の関心を集めてきた空間データ分析のもう一つの問題である。空間補間は、対象地域で規則あるいは不規則的に配置された地点（地区）に観察された地理的事象の属性データを基に、該当地域を覆う連続的なサーフェースをどう作成するか、あるいは、同地域内に観察されなかった地点（地区）の属性データをどう推定するかという問題を取り扱う。

1) 空間データの探索的分析

近年、日本国内では、中央省庁、地方自治体が主導で民間企業も参加する空間データ整備、製作が急速に進み、CD-ROMやテープなどのメディアだけでなく、インターネットやケーブルテレビ回線などを通じてデータを提供し始めており、世の中にはデータがあふれんばかりに増えてきた。それらのデータは効率的に利用されなければ、宝の持ち腐れになるかもしれない。そのため、いか

に膨大なデータから検討に値する特色やパターンを探し出すかというような方法が必要になる。GISを用いた空間データ探索的分析は、コンピュータの繰り返し計算、地理データベースへの高速アクセス、GISの空間データ可視化などの能力を十分に発揮させ、膨大な空間データに隠されている特色や空間パターンを探索する技術である。とくに、最新のコンピュータ・グラフィック技術を活用し、空間データを人間の脳に解釈・認知されやすい点、線、面の地理的事象の分布図、統計グラフ、統計地図などに視覚化し、いくつかの異なるアプローチを展開している。

その第1は、Openshaw *et al.* (1987) が開発した地理分析ツール（Geographical Analysis Machine GAM）である。このツールは伝統的な空間統計法を援用せず、点分布における空間クラスターを発見し、クラスターが認められた領域をディスプレイ装置に表示する解析ソフトである。このように、研究者が点分布の特徴を視覚的に捉えながら空間分析を進めるのは、このツールの最も顕著な特徴である。しかし、このツールの不十分な点は、点パターンの形成要因とプロセスを解明できないことにある。Openshawらは、このツールを利用して人口密度が与えられている対象地域におけるガン患者のグループを抽出し、人口分布との関係を分析した。それによってガン患者の地域分布の形成要因に関するさらなる検討のために、点分布の特徴および地理的仮説を提供した。船本・岡部（1998）は、従来の点パターン分析手法の不十分な点を指摘した上で、局所的から大局的にわたる階層的な点パターン特性を導出する「可変クランプ法」を開発した。そして開発した「可変クランプ法」を用いて点パターン特性を自動的に検出・表示する分析ツールの開発を行なった。

第2は、Openshawらの地理分析ツールと異なっており、統計分析パッケージや空間統計ツールをGISとリンクし、GISで作成した位相構造データなどを入力データとして空間分析を行ない、さらに空間分析の結果をGISに入力し、コロプレス図などを作成しながらパターン分析を行なうことである。このアプローチの適用事例としては、GISあるい

は空間データ基盤から位相構造データを作成し、空間的自己相関のウェイト・マトリクスを算出し、人口密度や農業所得、農産物の比率などの空間的自己相関検定を実施したものがある。これは同時に、空間統計ツールとGISとのリンケージ方式をも提案した（遠藤ほか，1991；Ding and Fotheringham, 1992；Can, 1996；張 1999）。

第3は、典型的な例としてHaslett *et al.* (1990)が開発したソフトSPIDER (Spatial Interactive Data Explorer) が挙げられる。このソフトは空間データの探索的分析のために、地図、統計グラフ、空間データ・リストをダイナミックにリンクし、三者のいずれかのオブジェクトが選択・表示・変更される時、他の二つのオブジェクトもダイナミックに選択・表示・変更されるようになり、ユーザが操作しやすいソフトウェアである。このアプローチでは、とくにコンピュータ上で統計グラフと地図表現の可視化技術の開発を重視し、空間と非空間データ両方とも視覚的に表現するのに力を注いでいた。

以上三つのアプローチの他に、最近では、空間統計学と人工知能分野でのパターン認知や空間クラスター知覚モデルも空間データの探索的分析に適用されている（貞広，1998）。

2) 空間データの検証的分析

GISを援用した空間分析の分野では別に空間データ検証的分析があり、近年この分野では大きな進歩が見られないが、分析方法として現在でも重要な位置を占めている。その中に最も多用された手法となっている空間統計学は、空間確率プロセス、空間サンプリング、空間補間、空間的自己相関、方格カウント法、点パターン分析、画像解析よりなる（Ripley, 1981）。それにKing (1969)を代表とする計量地理学で先駆的な研究成果を加えれば、今日の空間データ検証的分析法のほとんどとなろう。なお、現在の空間統計学のスタンダードな教科書とされているのはCressie (1993)の“*Statistics for spatial data* (空間データ統計)”である。Cressie (1993)は、空間統計の対象となる空間データを非常に重視し、Ripleyらの空間統計学体系をさらに空間統計データ、ラティスデー

タ、空間パターンという三大テーマに集約し、1980年代の10年間に発表された空間統計学に関する最新の理論と応用成果をその本に網羅した。

地表上に立地する地理的事象は、空間的に見れば多かれ少なかれ相互作用、相互関係がある。一つの地区（あるいは地点）に立地する事象が、その周辺の地区（あるいは地点）に立地する事象の影響を受けて互いに従属関係が発生する時、空間的自己相関が見られるという。空間データ検証的分析の研究領域においては、空間的自己相関の研究が最も重要かつ基礎的領域の一つになる。これは空間的自己相関という現象が、一つには地理学の本質的な問題と、いま一つは計量地理学のきわめて重要な技術上の問題とにそれぞれかわり合いをもっているからである。とりわけ空間的自己相関は、計量地理学で頻用されている統計学的諸検定や回帰推測結果に重大な偏りが生じてくる主な原因の一つである（奥野，1981）。

空間的自己相関測度はグローバルとローカルの2種類があり、グローバルな空間的自己相関測度は、対象地域全体における空間データの自己相関の強度を統計的に測定できるが、ローカルな空間的自己相関測度は、局地的な空間的自己相関を測定し、空間クラスターや空間「ヘテロジニアス」地域を発見するのに適用する。前者は、最も多用されたMoran (1948) 測度とGeary (1954) 測度の他に、数多くの測度が列挙できる（Cliff and Ord, 1981；Getis, 1991）。後者はGatis and Ord (1992, 1996) とZhang and Morayama (Submitted) のローカルな空間的自己相関測度が挙げられる。現在、点パターン分析、クラスターリング、地域区分などの広い分野においてはグローバルおよびローカルな空間的自己相関の理論と応用の研究がかなり進んでいる。

上記のように、本稿では空間データ分析が探索的と検証的分析に分類されたが、実際の研究においてはその2種類の分析が常に併用されたことが多い。たとえばFotheringham and Zhan (1996)は、点パターン分析に際してポアソン分布の有意性検定を探索的分析に導入し、空間クラスターを発見する方法を提案した。なお、空間データ分析

に関する研究を歴史から見ると、空間データ分析研究の開始期に、規則的な方格のメッシュデータを用いて空間データ分析を行なうことが多い。不整形な小区域データの空間分析研究においては、各パラメータの測定や計算などがきわめて困難であり、たとえば区域の面積や両区域の共有する境界線の長さや区域を隔てる距離などの地図上での幾何的測定、区域間の空間的近隣関係と相互作用を示すウェイト係数を算出するための位相構造データの作成、地理的属性データの空間的表示などの一連のステップを踏まなければならない。しかし、最近、任意の境界を自由に表示し、測定・分析などに利用することができるGISの普及により、不整形な小区域データの空間分析が比較的容易になった。

3) 空間補間

GISにおいて、空間データの探索的と検証的分析の他に対象地域での地理的事象の変動パターンを把握するために、一連の地点においてサンプリングし、それらの観察データに基づいてグリッドデータや三角形不規則網 (triangulated irregular network, TIN) を作成し、そして事象のサーフェスをGISに表示するという空間補間が採用されている。

地理的事象は、研究対象とする地域の規模によって、点と線と面の3種それぞれのオブジェクトに識別、表現することができる。この地理事象の幾何学的分類によると、空間補間は点補間と面補間 (point and areal interpolation) に大別される。点補間は、属性をもつ離散的に分布しているサンプル点を基に、サンプリングされなかった地点の属性データをどう推定するか、あるいはサンプリング地域を覆う連続的なサーフェスをどう作成するかという問題を取り扱う。点補間には離散的と連続的な空間変化のモデルを取り込む手法があり、さらに連続的な方法はグローバルな手法とローカルな手法に分けられる。離散的な点補間法では、規則あるいは不規則に配置されているサンプル点を基に規則的なティーセン・ポリゴンあるいは不規則なティーセン・ポリゴンで対象地域を分割し、サンプリングされなかった地点の属性データを推

定する。Ripley (1981) と Cressie (1993) は、そのテッセレーション (tesselation) データモデルの原理について数学的議論を行なった。離散的な点補間法と対照的に連続的な点補間法では、対象地域におけるすべてのサンプル点から連続的なサーフェース・モデルを構成する傾向面分析やフーリエ級数などというグローバルな手法があり、他の点での補間値に影響を与えずに局地的な異常値に対応できるスプラインや移動平均、クリギング (Kriging) を含む重み付き移動平均などというローカルな手法もある。その中ではクリギング補間法は最も優れていると思われ、既知のサンプルデータを用いてその空間傾向を考慮しながら、未知の地点の属性データを推定する手法である (Cressie, 1990, 1993)。

空間分析において最もよく用いられる空間データの一つとして、空間単位に基づいた集計データがある。その集計単位が利用目的に適していればそのまま利用できるが、データの集計単位と利用目的の単位と異なる場合にはデータの変換が必要になる。調査区あるいは基本単位区の国勢調査データのメッシュデータへの変換はそのよい例の一つであろう。面補間はこのような集計単位間のデータ変換によく用いられている。GISにおける面補間の代表的な方法として代表点法と部分区域法がある。代表点法は、まず元の集計単位に代表点を配置して、それから新たな集計単位を元の集計単位に重ね、その中に含まれるすべての代表点に割り当てられている数値を合計する方法である。部分区域法では、元の集計単位の新たな集計単位と重ねている部分の大きさをウェイトに新たな集計値を算出する。通常、面補間で推定されたデータは誤差を伴い、この誤差は元の集計単位の規模、代表点の位置、データの精度、単位内の地理的事象分布の等質性に左右されている (Lam, 1983; Langford *et al.*, 1991)。上記の空間補間法が図3にまとめられる。

Lam (1983) は、多数の空間補間法を総合的に考察した結果、どの空間補間法も利点と欠点があるので、ユーザがデータ型、補間結果の精度、計算量などに基づいて複数の手法を選択・併用する

図 3 空間補間法とその分類。

Fig. 3 Types of spatial interpolation methods.

ほうが、単一方法の利用より良い補間結果を得られやすいと指摘した。Lessard *et al.* (1990) は、距離減衰パラメータをもつ重み付き空間データ補間法を考案し、この方法と GIS ソフト ARC/INFO を併用することによって、アフリカの家畜病の空間データ推定を行なった。日本では空間補間法を用いた空間単位の集計データを非集計化する手法の開発例も見られる。古谷ほか (1998) は、交通需要予測に際してクリギング補間法と回帰モデルを統合したモデルを構築することにより、空間単位の異なるメッシュに人口分布や交通需要を非集計化する手法を提示した。

空間補間に関して特筆すべき点としては、最近、数多くの空間データ補間法が GIS と統合され実際の業務と研究に適用されつつあり、とくに補間結果を即時に GIS 上で表示し、ユーザに可視化され

たりアルなイメージを与えることができるということである。

IV. 空間データ分析ツールと GIS のリンケージ

上記のような Openshaw らの開発したスタンドアロンの地理分析ツール (GAM) を除けば、一般には、ユーザの開発したアプリケーション・ツールを GIS とリンクして空間分析を行なう。その際、アプリケーション・ツールと GIS とのリンケージは、システム・インタフェース方式 (interface type) とデータ統合方式 (integration type) という二つの方式が採用されている。

システム・インタフェース方式は GIS の空間データベースを直接に利用でき、GIS から提供されたマクロ言語 (たとえば、ARC/INFO の Arc Macro Language (AML) など) でユーザのデベロップ・アルゴリズムを用いて空間データ分析ツールおよびその GIS へのインタフェースを作成する方式である (図 4-a)。近年の空間分析の研究では、ほとんどこの方式が採用され、しかも GIS の位相構造データ作成機能やマクロ言語を用いて空間分析を行なっている (Kehris, 1990; Ding and Fotheringham, 1992; Can, 1996)。たとえば Can (1996) の研究では、ARC/INFO の位相構造データを利用して空間的自己相関のウェイト・マトリクスを算出し、そして空間的自己相関検定をも ARC/INFO の環境上で実施した。

図 4 空間分析モジュールと地理情報システムのリンケージ方式。

a. インタフェース方式, b. 統合方式

SAM: 空間分析モジュール (Spatial Analysis Module)

DCM: データ変換モジュール (Data Conversion Module)

Fig. 4 Two types of linkage of GIS with SAM.

データ統合方式は、空間分析ツールと GIS の間にデータを直接共有するか、もしくはデータ交換モジュールを通してデータを共有する方式である(図 4-b)。この方式を採用した例は、遠藤ほか(1991)の研究が挙げられる。彼らの研究では、まず ARC/INFO の位相構造データを利用して空間的自己相関のウェイト・マトリクスを作成し、それを統計分析システム SAS に受け渡して空間的自己相関係数が算出した。筆者(張, 1999)は、国土地理院の数値地図 2500(空間データ基盤)データを活用して不整形な小区域データの空間分析ツール開発を試みた。その研究では、開発した空間分析ツールと GIS とのリンケージにデータ統合方式を採用し、空間分析に必要な位相構造データは空間データ基盤から作成された。それによって千葉県松戸市における町丁別人口密度の空間的自己相関を検定し、正の空間的自己相関の存在が統計的に確認された。

最近、空間データ分析ツールが GIS と完全に統合され、GIS の基本機能として利用できる商用 GIS は徐々に増えてきている。多くの GIS ソフト会社は、基本 GIS ソフトにネットワーク分析やエリア・マーケティング分析、三次元表示・分析などの空間分析ツール群を加える新たな GIS を開発している。

V. 空間データ分析ツール開発の最新動向

空間データ分析ツールの開発について、次のようにいくつかの新しい動向が見られる。

その一つは、空間データ分析ツールの開発が、小型化、簡素化、特定目的利用の傾向にあることである。複雑な空間データ分析の場合、分析ツールがいくつかのモジュールから構成され、モジュールを並列処理することにより空間分析の目標を達成させる。さらに、分析の結果を他のアプリケーション・ツールに入力し、表示や再利用する。

その他には、オブジェクト指向データベースや Active X などの標準的開発環境の上で、Visual Basic, Visual C++, Java, Power Builder などの汎用コンピュータ言語と Netscape Navigator, Internet Explorer などの一般インターネッ

ト・ブラウザを利用した空間データ分析ツールを開発するケースが多く見られる。そのため、アプリケーションの開発費用を軽減できるし、メンテナンス、アップグランド、ユーザ・トレーニングも容易になる。さらに、そのように開発されたアプリケーションは、従来の研究分野や部門間の壁を突き破り、多種多様のデータやプラットフォームとアクセスできる。

従来、空間分析ツールの開発は、GIS ソフトを購入してその上でアプリケーションを開発するのが普通であった。このような開発アプローチは、高額で非効率的でありながら、ユーザはユニークな空間分析ツールをもたされると同時に、高額のメンテナンスとアップグランドのコストを負担させられる。それに反して標準化した共通の空間分析ツールは、多数のユーザが利用できる上、開発・メンテナンスのコストも軽減できる。そうすると、GIS の機能を補完する空間データ分析ツールは GIS のパワフルな計算能力とリアルな視覚的表示機能を一層高めると同時に、GIS によって空間データ分析結果を視覚化できる。まさに、それは GIS と空間データ分析ツールが互いに機能を強化し合うことである。

VI. おわりに

近年 GIS の普及につれ、GIS を活用して空間データ分析を行なうユーザがずいぶん増えてきたが、その中ではアカデミックな研究者だけではなく、一般のユーザも GIS による空間データ分析の理論と実践、GIS の空間分析機能の現状と開発の動向に深い興味をもっている。本稿は、空間データ分析において最も多用されている探索的分析、検証的分析、空間補間を中心に GIS 環境での空間データ分析機能開発の現状と最新動向について紹介したものである。以上によって、次世代の GIS は、もっと多種の空間分析法を援用し、人間と自然・社会の中間メディアとして真の知識ベース情報システムになることを予想できるだろう。

文 献

- Anselin, L. and Griffith, D.A. (1988): Do spatial effects really matter in regression analysis? *Paper Regional Science Association*, **65**, 11-34.
- Can, A. (1996): Weight matrices and spatial autocorrelation statistics using a topological vector data model. *Intern. J. Geographical Information Systems*, **10**, 1009-1017.
- Cliff, A.D. and Ord, J.K. (1981): *Spatial processes: Models and applications*. Pion, London, 266p.
- Cressie, N.A.C. (1990): The origins of Kriging. *Mathematical Geol.*, **22**, 239-252.
- Cressie, N.A.C. (1993): *Statistics for spatial data*. Wiley & Sons, New York, 900p.
- Ding, Y. and Fotheringham, A.S. (1992): The integration of spatial analysis and GIS. *Computers, Environment and Urban System*, **16**, 3-19.
- 遠藤光浩・小長谷一之・酒井高正 (1991): 地理学研究・教育のための GIS の課題—GIS と分析手法のリンケージ—. *地理科学*, **46**, 229-241.
- Fotheringham, A.S. and Zhan, F.B. (1996): A comparison of three exploratory methods for cluster detection in spatial point patterns. *Geogr. Anal.*, **28**, 200-218.
- 船本志乃・岡部篤行 (1998): 点分布の空間階層的特性を抽出する探索的解析ツールの開発. GIS—理論と応用, **6-1**, 49-58.
- 古谷知之・表明栄・室町泰徳・原田 昇・太田勝敏 (1998): 交通需要の空間的非集計化に関する研究. 地理情報システム学会講演論文集, **7**, 85-90.
- Geary, R.C. (1954): The contiguity ratio and statistical mapping. *The Incorporated Statistician*, **5**, 115-141.
- Getis, A. (1991): Spatial interaction and spatial autocorrelation: A cross-product approach. *Environ. Plann. A*, **23**, 1269-1277.
- Getis, A. and Ord, J.K. (1992): The analysis of spatial association by use of distance Statistics. *Geogr. Anal.*, **24**, 189-206.
- Getis, A. and Ord, J.K. (1996): Local spatial statistics: An overview. In Longley, P. and Batty, M. eds.: *Spatial analysis: Modelling in a GIS environment*. GeoInformation International, 261-277.
- Goodchild, M.F. (1987): A spatial analytical perspective on geographical information systems. *Intern. J. Geographical Information Systems*, **1**, 327-334.
- Haslett, J., Wills, G. and Unwin, A. (1990): SPIDER—An interactive statistical tool for the analysis of spatially distributed data. *Intern. J. Geographical Information Systems*, **4**, 285-296.
- Kehris, E. (1990): Spatial autocorrelation statistics in Arc/Info. *North west regional research laboratory, Research report*, **16** (Lancaster University).
- King, L.J. (1969): *Statistical Analysis in geography*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- 高阪宏行 (1994): 行政とビジネスのための地理情報システム. 古今書院, 233p.
- Lam, N.S. (1983): Spatial interpolation methods: A review. *The American Cartographer*, **10**, 129-149.
- Lessard, P., L'Eplattenier, R., Norval, R.A.I., Kundert, K., Dolan, T.T., Croze, H., Walker, J.B., Irvin, A.D. and Perry, B.D. (1990): Geographic information Systems for studying the epidemiology of cattle diseases caused by *Theileria Parva*. *Veterinary Record*, **126**, 255-262.
- Langford, M., Maguire, D.J. and Unwin, D.J. (1991): The areal interpolation problem: Estimating population using remote sensing in a GIS framework. In Masser, I. and Blakemore, M. eds.: *Handling geographical information: Methodology and potential applications*. Longman, New York, 55-77.
- Moran, P.A.P. (1948): The interpretation of statistical maps. *J. Royal Statistical Society, B*, **10**, 243-251.
- 奥野隆史 (1981): 空間的自己相関論 (I) —測度と検定について—. 筑波大学人文地理学研究, **5**, 165-183.
- Openshaw, S., Charlton, M., Wymer, C. and Craft, A. (1987): A Mark 1 Geographical Analysis Machine for the automated analysis of point data sets. *Intern. J. Geographical Information System*, **1**, 335-358.
- Repley, B.D. (1981): *Spatial statistics*. John Wiley & Sons, New York, 241p.
- 貞広幸雄 (1998): 点オブジェクト分布における集散パターン認知に関する分析. GIS—理論と応用, **6-1**, 1-9.
- 張 長平 (1999): 空間データ基盤を用いた不整形な小区域データの空間分析ツール開発. *地理学評論*, **72A**, 166-177.
- Zhang, C. and Morayama, Y. (submitted): Testing local spatial autocorrelation using k-order neighbors.

(1999年6月10日受付, 1999年9月20日受理)