

時空間データベースのダイナミックな更新を目指した 概念データモデルの提案

関本義秀*・柴崎亮介

Conceptual data modeling for dynamic updating of spatio-temporal database

Yoshihide SEKIMOTO and Ryosuke SHIBASAKI

Abstract: Recently many kinds of spatio-temporal data are repeatedly acquired or generated mainly because of the recent rapid progress of data acquisition technology. However those data are still so limited and "fragmentary" in terms of observation frequency, spatial coverage and thematic accuracy etc. that we can not always monitor dynamic changes of spatial objects or features with sufficient spatio-temporal resolution directly from those data. In order to reconstruct the dynamic changes of spatial objects or features with sufficient spatio-temporal resolution, we have to "integrate" a variety of fragmentary data. In addition, it is very desirable to revise the reconstructed dynamic changes of spatial objects whenever new observation data are added to the spatio-temporal database. (We call it "dynamic updating".) For this purpose, it is necessary to improve a framework of GIS in order to represent observational data and dynamic changes of spatial objects under external disturbances, in addition to the development of integration methodologies. In this study we propose FEO (Feature/Event/Observation) model as a conceptual framework of spatio-temporal database which enables dynamic updating.

Keywords: 時空間データベース (spatio-temporal database), 概念モデル (conceptual modeling), 観測データ (observation data), イベント (event)

1. はじめに

1.1. ニーズの高度化

ライフラインの施設の維持管理や、固定資産課税における課税客体（土地・家屋など）の異動管理などのいわゆる古典的な応用分野から、ITS（Intelligent Transport System：高度道路交通システム）における交通状況の把握やガイダンス情報の提供、マーケティング活動の支援、地震発生後の緊急対応支援などの分野へもGISの応用範囲が広がることが期待されている。こうした分野では、よりダイナミックに変動する事象を対象に情報を

収集し、その現況を把握、さらに将来の動きを予想することなどが必要となる。つまり従来からの地図や統計などに比べ、より細かい時間分解能はもちろん、より高い空間分解能、あるいは詳細な属性情報が時空間データベースに必要とされると考えられる。

1.2. データ取得とデータベース構築の分離した発展とその問題点

しかしながら、前述したような様々な利用形態のニーズにぴったり対応した分解能や項目のデータが、観測やモニタリングから必ずしも直接得ら

* 関本義秀：〒153-8505 目黒区駒場 4-6-1 東京大学空間情報科学研究センター
Tel&Fax: 03-5452-6417 e-mail: sekimoto@skl.iis.u-tokyo.ac.jp

れるわけではない。計測やモニタリング作業から得られる多様なデータをつき合わせ、解釈して対象物の時間的・空間的な分布やその変化状況を推定するプロセスが不可欠であるといえる。データ編集・統合の自動化を実現しようという観点からこれまでの空間データ取得技術・統合化技術に関する研究とデータベース構築・管理に関する研究を概観すると、両者が一般的には切り離されて進められていることがわかる。すなわち、様々な「断片的」データを集めて解釈・総合化する編集過程を通じて、様々な地物等の空間的な分布や時間的な変化を表現する「編集済み」データがまず作成され、その後、データベースに入力されると、多くの場合想定されている。

たとえば、時空間データベースに関する多くの研究も、地物などの時空間的な分布や変化を記述した「編集済み」時空間データがあるという前提にたち、そのデータを効率的にデータベース化するという観点から研究が主に行われてきた（たとえば、Langran, 1992 など）。しかしこうしたアプローチは、地物などの状況・変化の推定という立場から見た場合、地物等の状態推定プロセスが別立てになっている点や観測データがデータベース化されておらず、観測データと地物等との対応が不明確になりがちである。また地物等の状態推定を念頭においてGISデータベースがデザインされていないため、観測データ以外の推定に必要な情報がデータベースから欠落する可能性がある。

1.3. 「拡大」時空間データベース表現モデルの構築

以上のような問題点を克服するためには、データ取得・統合化プロセスとデータベース構築・更新プロセスを一体化し、観測データ、地物データ等も含めて推定過程に必要なデータを管理する「拡大」時空間データベースを構築することが必要となる。そのためにはさらに、地物等の時空間変化や観測データを表現する概念モデルの開発から、それに基づいたデータベースの実装、多様なデータを用いた地物等の状況・変化の推定モデル・手法まで様々な課題が解決されねばならない。

本研究では、概念モデルの開発に焦点をあて、第2章で地物だけではなく観測データも含んだ「拡大」時空間データベースのための概念レベルの表現モデルを提案する。そして第3章でその概念モデルを前提とした推定法について考察し、第

4章でその適用可能性を簡単な例を使って示す。

もちろんいくつかの分野では対象となる地物等や観測手段の特性に応じて、多様な観測データから地物等の状況を推定するシステムや手法の検討が進められている（たとえば交通に関しては小根山・桑原, 1997, 土地利用に関しては Shibasaki and Huang, 1996 など）。しかし、それらの検討も比較的近年始められたものであり、他の分野に波及する例はまだ少ない。上記の表現モデルに代表されるようなより一般性の高い概念レベルの検討をすることで、個別の文脈で検討・開発されてきた統合手法、データベース化手法など相互の位置付けを明らかにすることができ、新たな分野への展開や手法の一層の深化を図ることができると期待される。

2. FEOモデルの提案

第2章では、地物だけではなく観測データも含んだ「拡大」時空間データベースのダイナミックな更新を可能にするための、概念レベルの表現モデルとしてFEOモデルを提案する。FEOモデルはフィーチャー（Feature）、イベント（Event）、オブザベーション（Observation）の3つのモデルから構成される。フィーチャーは車両、人、建物のような実世界に存在する様々な地物を指す。イベントはフィーチャーに外生的変化を与える時空間的広がりを持つ「出来事」である。オブザベーションはイベントやフィーチャーを観測する活動とその結果（データ）である。イベントのフィーチャーに対する活動の枠組みをインパクトモデル、オブザベーションのフィーチャーに対する活動を観測モデルと呼ぶ（図1）。その詳細は以下の節で説明する。

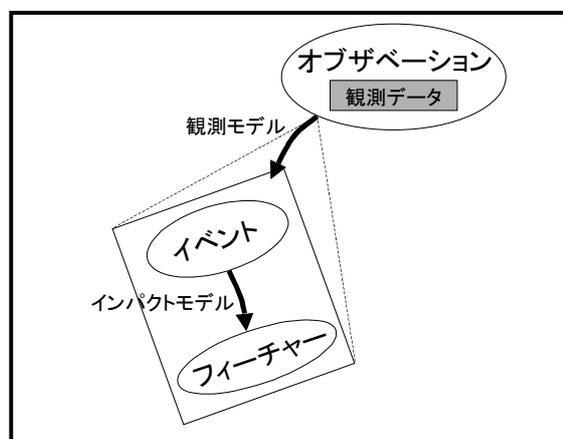


図1 FEOモデルの概要

2.1. 構築にあたっての基本的な考え方

概念モデルに必要な条件は以下のように整理される。

- 1) 不確実性も含み、地物等(フィーチャー)の時空間的な分布・変化を表現できること。
- 2) 地物等の時空間的な分布・変化を表現するデータと、そのデータを推定・構築する基となる観測データを区分し、地物等の時空間変化だけでなく、観測データをも明示的な時空間情報として取り込めること。

- 3) 地物等の変化は内生的な変化と外部から与えられた情報により外生的に与えられる変化がある。外生的、外乱要因としてのイベントを表現できること。

1) に関しては 2.2. で述べるように概に提案されているものに従うこととし、本論文では主たる研究対象としない。また 2) に関しては、観測の概念モデルが必要である。これまで、CEOS などさまざまな衛星画像を表現するモデルとして検討されている例(CEOS Global Mapping Task Team, 1998)はあるが、一般的な観測を概念モデルとして表現している例はないため、本論文で提案する。3) に関しても、イベントの概念モデルが必要であるが、既存の研究事例がないため、本論文で提案する。

2.2. フィーチャーモデル

これまで GIS において様々な時空間データモデルが提案されてきた(詳しくは関本・柴崎, 1999)。その中で、地理情報の標準化を目指す活動の一つとして ISO/TC211 が 1994 年から始まっており、General Feature Model が地理情報の最上位の概念モデルとして提案されている。そして General Feature Model を基にして、空間スキーマと時間スキーマが定義され、それぞれ幾何プリミティブと位相プリミティブを有している(原文は ISO/CD15046-7 (1999), ISO/CD15046-8 (1998), 解説に関しては、柴崎ほか(1996, 1999)を参照)。

本研究ではフィーチャーに関する表現方法は ISO/TC211 に準拠し、さらに動的に変化するフィーチャーまで拡張し、幾何、位相プリミティブを整理した太田(1999)に従うこととする。つまり、フィーチャーは表 1 のように構成され、それぞれ

表 1 フィーチャーモデル

項目
フィーチャーの開始・終了
フィーチャーのふるまい
自身の変化
他のフィーチャーへの影響(アクション)
フィーチャー間の関係
フィーチャー属性

空間的、時間的プリミティブを持つ。フィーチャーの例を図 2 に示した。a) では、建物がポイントとして表され、動的には変化しない様子を示し、b) では都市や農地の範囲がサーフェスとして表され、動的に変化する様子を示している。これは土地の境界が mobile もしくは mutable であることを表す。また c) では、車両が道路上にあるという制約条件を持ったポイントとして表され、動的に変化する様子は車両が道路上を移動することを示している。

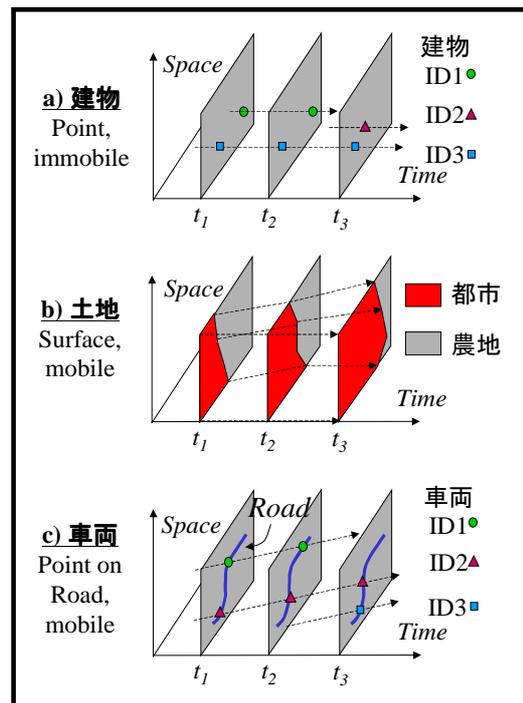


図 2 フィーチャー例

なお、GIS データに関する標準化活動を行っている ISO/TC211 (ISO/CD 15046-4, 1999) によると、フィーチャーは、Abstraction of real world phenomena と定義されている。この定義に従えば、この世界の事象のすべてはフィーチャーとして表現できることから、観測データやイベントはすべ

てフィーチャーとなる。しかし、後述するようにダイナミックな更新を可能にする「拡大」時空間データベースを構築するためには、ISO/TC211 の定義する広義のフィーチャーの下に、いわゆる地物等を表現する狭義のフィーチャーと、観測（オブザベーション）、イベントの両概念を必要とすることから本研究では、フィーチャーの定義をより狭く解釈し、明示的に観測（オブザベーション）とイベントを別のモデルとして表現するとしている。

また不確実性を含む、より一般的なフィーチャー表現のためにはより詳細な概念モデルを構築する必要があるが、Shibasaki(1994)のように土地・家屋に限定した研究が散見される程度であり、今後の研究課題とする。

2.3. イベントモデル

一般的にイベントはデータベース関連の分野では単なる変化点という文脈でとらえられることが多かった（たとえば Pequet (1995) など）。しかしフィーチャーの変化は以下のように分類される（図3）。

- 1) フィーチャー自身の内在的な変化（例：建物が年数の変化とともに劣化するという変化）
- 2) フィーチャーの間に生じる相互作用による変化（例：建物の火災が隣接する建物へ延焼する場

合、隣接建物の火災という変化は、延焼という相互作用で記述される）

- 3) フィーチャー以外の要因による変化（例：法律が改正され、多くの建物が「既存不適格」となる時、法律の改正はデータベース化の範囲から見て外部要因であり、「既存不適格」となることが外部要因による変化となる。）

上記のうち、1), 2) に関してはデータベースに

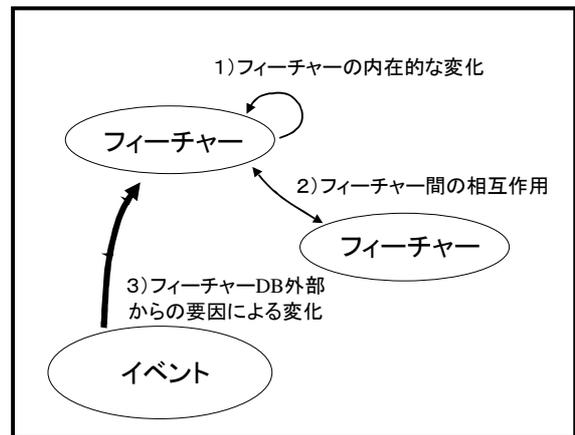


図3 フィーチャーの変化のタイプ

とって内在的な変化であり、フィーチャーに変化モデルや相互作用モデルを与えておくことで、表

表2 イベントモデル

項目	内容	例
1. イベントの開始, 終了	イベントの開始・終了時刻	地震動の開始・終了時刻
2. イベントのふるまい	イベント自身の変化と、地物等へのインパクト	
1) イベント自身の変化	イベント属性の時間的な変化	地震動の時間変化データ
2) インパクトモデル	インパクトの内容と対象	
(1) インパクトの方法	下記に定義されるインパクト対象に与えるインパクトの内容	以下の対象フィーチャに関して、損傷状態という属性を地震動の大きさと建物の耐震性能に応じて変化させる。
(2) インパクトの対象	インパクトの与えられる対象	
フィーチャー範囲	インパクトの対象となる地物等の空間範囲	地震の発生地域・期間
フィーチャータイプ	地物等のタイプ	建物
フィーチャー関係	地物等の関係	インパクト無し
フィーチャー属性	地物等の属性	損傷状態
3. イベント間の関係	イベント間の因果関係	別途定義された地震と「本震」、「余震」という関係でリンクされる。
4. イベントの属性	イベントの属性	マグニチュード、震源までの深さなど

現可能である。3)の外部要因に関しては、フィーチャー・データベースの対象外でありながら、フィーチャーの変化を記述したり、再構築する上で不可欠な情報であることから、フィーチャーとは区別してデータベースに取り込めるようにしておくことが有利である。たとえばフィーチャーを建物とすると変化を引き起こすイベントとしてはたとえば地震、開発事業が考えられる。イベントのふるまいには、図4に示すように、イベント自身の变化と対象範囲のフィーチャーに変化を与えるインパクトモデルがある。後者はインパクトの対象範囲に対して何らかの方法でインパクトを与えるモデルである。イベントモデル全体の枠組みとその例を表2に示した。

たとえば地震というイベントを考えると、地震

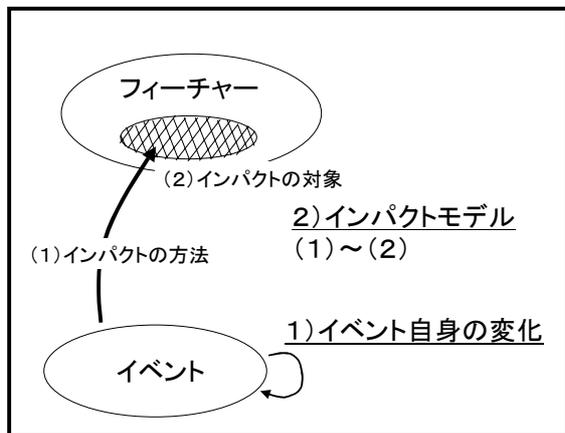


図4 イベントのふるまいとフィーチャーとの関連

自体は開始・終了や発生地域・期間といった時空間的属性を持ち、同時に余震のように他の地震と何らかの関係（ここでは因果関係）を持つ。そしてふるまいとして、地震動が拡散していくといった物理モデルなどを自身の内生的変化として持ち、たとえば破壊という方法を伴ったインパクトモデルを持つ。それは建物というフィーチャータイプを対象とし、発生地域・期間をインパクトの及ぶフィーチャー範囲として定義できる。インパクトの方法は、建物の損傷状態というフィーチャー属性を変化させるという関数として定義できる。

2.4. オブザベーションモデル

観測オブザベーションにおいては、観測対象を選択して観測を行い結果（データ）を得る。観測対象の選択には、特定の時間的、空間的範囲を指定する場合（航空写真の撮影など）、特定の地物と属性だけを対象に観測する場合（課税のための家

屋異動調査や交通量調査など）がある。そのためには観測モデルの中にまず観測対象（サンプル）を選択するサンプリング方法の記述が必要である。その後選択された観測対象から、観測データが得られる。観測対象（真値）と観測データの食い違いは誤差として取得される。その様子を図5に示した。また表3はオブザベーションモデルの仕様とその例を整理したものである。

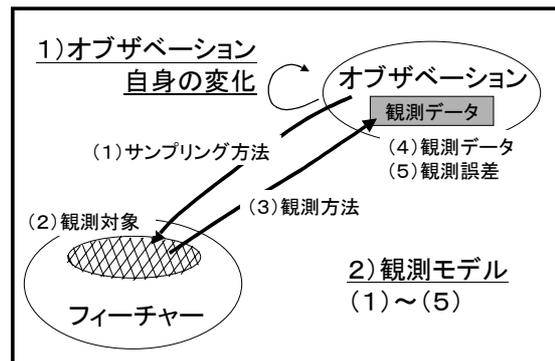


図5 オブザベーションのふるまい

たとえば航空写真による課税対象建物の異動判読というオブザベーションを考える。まず撮影時のカメラの位置・姿勢データ（共線方程式）を用いてフィルムと地表面の対応付けがなされる。これは観測対象の時空間的範囲の決定に相当する。そして航空写真から建物の有無や増築などを判読し、その結果がそれぞれのフィーチャー（建物）に関連付けられる。

またオブザベーションモデルに関してはデータ管理の面において、たとえば以下のような利点を有すると考えられる。画像データの多くはオルソ画像などのように地表面の特定の位置に貼り付けられる形で収録される。その一方、衛星画像に関しては、地表面への貼り付けに必要な衛星軌道データは頻繁に更新され、精度が向上する。しかしながら、従来は観測モデルが存在しないため画像撮影時の位置や姿勢データ、さらに元の画像データはデータベースに記録されていないことが多く、こうした新しいデータによりオルソ画像を再作成することが困難となっている。そこで、観測時の状況を表現するオブザベーションモデルを明示的に持ち、必要に応じてその画像データやセンサの位置や姿勢データを参照できるようにしておくことが必要になる。

2.5. フィーチャー、イベントとオブザベシヨ

表3 オブザーベーションモデル

項目	内容	例		
		高分解能衛星画像	航空写真による課税対象家屋の異動判読	建築確認申請による新築建物の把握
1. オブザーベーションの開始・終了	観測の開始・終了時刻	画像撮影時刻	写真撮影時刻	常に継続
2. オブザーベーションのふるまい	観測方法, 結果(データ), その精度に関する情報(以下の1), 2)の項目)			
1) オブザーベーション自身の変化	観測に関する属性の時間変化(例: 観測中のセンサの感度劣化など)	なし	なし	建築基準法の改正などによる申請内容の変化
2) 観測モデル	観測の方法(以下の(1)から(5)に対応)			
(1) サンプリング方法	観測対象(サンプル)の空間的, 時間的な範囲と, その決定方法.	撮影時のセンサ位置・姿勢データを用いて記述されたセンサの素子と地表面上の領域(画素のフットプリント)との対応関係.	撮影時のカメラの位置・姿勢データを用いて記述されたフィルム面と地表面との対応関係.(例: 共線方程式)	すべての新築建物(定義は建築基準法による)
(2) 観測対象	以下の項目からなる観測対象の定義			
フィーチャー/イベントのタイプあるいはインスタンス	観測対象となる地物等やイベントのタイプあるいはインスタンス	上空から「見える」すべての地物等	すべての課税対象家屋	すべての建築物
フィーチャー/イベント関係のタイプ, あるいはインスタンス	観測対象となる地物等間の関係, あるいはイベント間の関係(タイプあるいはインスタンス)	観測せず	観測せず	観測せず
フィーチャー/イベント属性のタイプ, あるいはインスタンス	観測対象となる地物等の属性, あるいはイベントの属性(タイプあるいはインスタンス)	地物等の太陽光の反射光量(センサの検知可能範囲)	変化(新築, 滅失, 増築)と家屋の位置・形状(新築, 増築のみ)	観測せず
(3) 観測方法	観測対象と観測データとの関連	地物等からの反射光エネルギーと, センサ出力との関連(大気の透過率, センサ感度特性など)	2時点の航空写真を判読することにより, 家屋の変化を発見する.	建築確認申請の有無・内容・時期と, 実際の新築の有無・内容・時期との関連
(4) 観測データ	各サンプルに対応した観測データ	センサの各素子からの出力データ	課税対象家屋のそれぞれに関する変化の有無・内容データ, と位置・形状データ(新築・増築家屋のみ)	個別の確認申請内容
(5) 観測誤差	観測データごとの誤差	上記出力データから再現された地物等の反射光エネルギーと実測値との誤差に関する統計情報	判読誤り(漏れなど)に関する統計情報	建築確認申請の有無・内容・時期と, 実際の新築の有無・内容・時期との食い違い
3. オブザーベーション間の関係	異なる観測活動間の関連	他の画像との関連(例: ステレオ撮影など)	変化確認のための現地調査と, 航空写真判読との関連	なし
4. オブザーベーションの属性	観測活動の属性	衛星名や軌道のパス・ロー番号など	判読者の氏名など	確認申請者の氏名, 申請の審査担当官氏名

ンの相互関係

今までの議論をもとにフィーチャーとイベント

とオブザーベーションの相互関係をまとめると図1を拡張した図6のようになる. また他分野におい

ても、類似した枠組みが存在している事が見出せる。たとえば、制御工学の分野における状態空間表現(図7)では、状態空間を中心として影響を与える外乱と変化を表す状態空間を持つ系とそれを観測する観測器が存在している。

すなわち制御の観点から、動的に変化する実世界を記述するアプローチとしての状態空間表現とFEOモデルは共通の構造を有しているといえる。

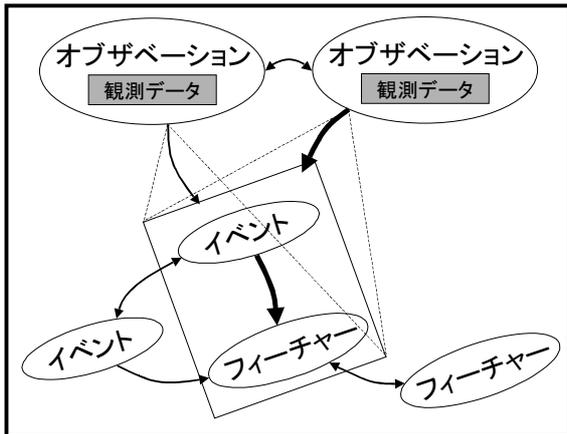


図6 フィーチャー、イベント、オブザベーションの相互関係

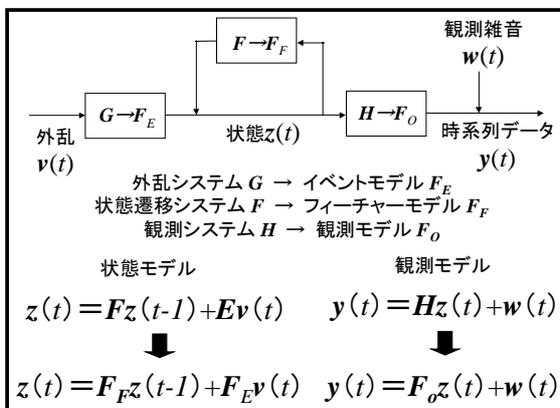


図7 状態空間表現とFEOモデルとの比較

3. FEOモデルに基づく地物等の推定方法の概観

第2章で提案した枠組みに基づいて、地物等の推定を行う必要がある。各分野で様々な推定方法が発展しているものの、それらを統合的に扱えるような概念的なフレームワークは今後の課題である。有効な手法と思われるものとしてたとえば、多様に存在する知識を記号的に処理して情報を抽出するという時間的・空間的推論(たとえば Stock

(1997)等多数、またGISに組織的に取り入れることを試みたものとして NCGIA のプロジェクト (Egenhofer, 1998).), 不確実性を含んだ推論(たとえば Console, 1991)のようなAIの分野で主に発展してきた推論技術や、観測値を確率場の実現値の1つとみなし観測値が最も起きやすくなるように推定する最尤法、時々刻々と変化するダイナミックなシステムに対し統計的な処理を施すカルマンフィルタなどがある。特に人工知能システムの実際の応用として様々なセンサやネットワークを通じて大量の生データを統合化することが期待されており、AIにおける推論技術と統計的推定の接点の重要性は高まっている(麻生ほか, 1997)といえる。あるいは交通の分野においても従来からの集計データと個別利用者の交通行動を表す非集計データの整合性を取りながら推定することを試みた MPS (Most Probable State) 分析などがある(小林, 1987)。

4. 建物変化の推定に関する FEO モデルの適用数値実験

4.1. 実験目的

第4章では、建物の異動推定を例に FEO モデルを適用し、フィーチャー(建物)に関するデータがどのように整理され、その状態がどのように推定されるかを数値実験により明らかにする。すなわち、実際にシミュレーション実験を行うことによって、時々刻々と変化する現実世界がイベントや観測データから、最尤法の枠組みに従って、どのように再構成できるかを示す。実験目的は以下のとおりである。

- 1)シミュレーション実験により、更新されているデータベースから少なくとも一つの推定法でフィーチャーの状態を再構成できる事を確認する
- 2)オブザベーションモデルの検証として、観測条件(観測回数・観測データの不確実性)を変化させた場合の推定精度を検証する。
- 3)イベントはつかまえにくいので、イベントのインパクトモデルのみ既知でイベントそのものの存在が確認されない場合に、間接的な観測デ

ータから、イベントの存在の抽出を行い、推定精度を検証する。

なお本実験では、推定の可能性やその推定結果のふるまいの明確化を主な目的としているので、フィーチャーのふるまいなどに関するパラメータの値は常識でない範囲で現実的であれば良いと判断した。

4.2. 想定したモデル

以下にフィーチャー、イベント、オブザベーションについて想定したモデルを述べる。

フィーチャー

まずフィーチャーの開始・終了は建物の新築・滅失に相当する。また改築はここでは考慮せず、他の建物への影響（アクション）も基本的にないと考える。各建物 50 件の空間的な位置・形状は簡単にポイントとして表現した（図 8 b）。前述の太田（1999）に従うと以下ようになる。

$$z_i(t) = (sP_i, P_i, eP_i), st_i < t < et_i \quad (1)$$

$z_i(t)$: 各建物の状態を表す属性

sP_i : 発生時刻 st_i における建物フィーチャー、

eP_i : 滅失時刻 et_i における建物フィーチャー

P_i : 変化中の建物フィーチャー

また建物の一般的性質（フィーチャーのふるまい）として平均寿命等があり、ここでは寿命（滅失時刻 - 新築時刻）は平均寿命を中心とした正規分布に従うとする（式 2）。なお既知のパラメータとして表 4 の値を与えた。建物間関係にはたとえば隣接関係が考えられるがここでは考慮しない。

$$p(z_i; \theta_F) = f_F(et_i - st_i; \mu_F, \sigma_F^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_F} \exp\left(-\frac{(et_i - st_i - \mu_F)^2}{2\sigma_F^2}\right) \quad (2)$$

$$\theta_F = \{\mu_F, \sigma_F\}$$

f_F : 各建物の生起確率関数

θ_F : 建物フィーチャーのパラメータ

μ_F : 建物の平均寿命

σ_F : 建物寿命の分散

表4 フィーチャーのパラメータ

建物の平均寿命	建物の寿命の分散
700(日)	200(日)

イベント

ここでは建物フィーチャーに影響を与えるものとして、開発事業イベントを考える。開発事業は開始・終了時期を持つ。また建物を対象としたインパクトモデルを持ち、その対象範囲は図 8 a) のように表せ、式 (3) のようになる。

$$z_{Er}(t) = (sP_{Er}, P_{Er}, eP_{Er}), st_{Er} < t < et_{Er} \quad (3)$$

$z_{Er}(t)$: 開発事業の対象範囲を表す属性

sP_{Er} : 時刻 st_{Er} における開発事業の対象範囲

eP_{Er} : 時刻 et_{Er} における開発事業の対象範囲

P_{Er} : 開発事業中の対象範囲

また図 8 e) のようにインパクトモデルは建物の新築・滅失時刻にインパクトを与え式 (4) のように表すことができ、パラメータは表 5 のように与えた。

$$p(z_i; \theta_E) = f_E(st_i; st_{Er}, et_{Er}) = \begin{cases} p_1 & (st_i \leq st_{Er}, et_{Er} \leq st_i) \\ p_2 & (st_{Er} \leq st_i \leq et_{Er}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\theta_E = \{st_{Er}, et_{Er}\}$$

f_E : 各建物のイベントに対する生起確率関数

θ_E : 開発事業イベントのパラメータ

p_1 : 通常の建物生起確率

p_2 : 開発事業期間中の建物生起確率

表5 イベントのパラメータ

建物の生起確率比 (開発事業時/通常時)	開発事業 開始時刻	開発事業 終了時刻
10	1000(日)	1100(日)

オブザベーション

オブザベーションに関しては、1) 航空写真判読と、2) 行政情報を利用した建築確認申請受理と異動登記受理を考える。それに対して観測データは建物 i について以下のような観測データ y_i を取得しているとする。

$$y_i = \{y_{ia}, y_{is}, y_{ie}\} \quad (5)$$

y_{ia} : 建物の有無、 y_{is} : 建築確認申請データ、

y_{ie} : 異動登記申請データ

1) 航空写真判読

航空写真判読におけるサンプリングモデルの対象範囲は図 8 c) オブザベーション(航空写真判読)のように表現され、今回は対象範囲に建物はすべて含まれるとする(式 6)。

$$z_{Oar}(t) = (sP_{Oar}, P_{Oar}, eP_{Oar}), st_{Oar} < t < et_{Oar} \quad (6)$$

$z_{Oar}(t)$: 航空写真計測の対象範囲を表す属性

sP_{Oar} : 時刻 st_{Oar} における計測の対象範囲

eP_{Oar} : 時刻 et_{Oar} における計測の対象範囲

P_{Oar} : 変化中の計測の対象範囲

オブザベーションパラメータと観測データに対する各建物の生起確率は

$$p(z_i; \theta_{Oa}, y_i) = f_{Oa}(st_i, et_i; st_{Oar}, et_{Oar}, y_{ia}) \quad (7)$$

f_{Oa} : 各建物の航空写真判読に対する生起確率関数

θ_{Oa} : 航空写真判読のパラメータ

と表され、建物の有無の判定は図 8 f) のようになされる。また建物が存在するのにないと判断したり、ないのにあると判断してしまう判読誤差は確率的に表現でき(式 8), パラメータは表 6 のよう

に定めた。

$$\begin{aligned} f_{Oa}(st_i, et_i; st_{Oar}, et_{Oar}, \text{有}) &= 1 - \varepsilon_1 \\ &(st_i \leq st_{Oar} = et_{Oar} \leq et_i) \\ f_{Oa}(st_i, et_i; st_{Oar}, et_{Oar}, \text{無}) &= \varepsilon_1 \\ &(st_i \leq st_{Oar} = et_{Oar} \leq et_i) \\ f_{Oa}(st_i, et_i; st_{Oar}, et_{Oar}, \text{有}) &= \varepsilon_2 \\ &(st_{Oar} = et_{Oar} \leq st_i, et_i \leq st_{Oar} = et_{Oar}) \\ f_{Oa}(st_i, et_i; st_{Oar}, et_{Oar}, \text{無}) &= 1 - \varepsilon_2 \\ &(st_{Oar} = et_{Oar} \leq st_i, et_i \leq st_{Oar} = et_{Oar}) \end{aligned} \quad (8)$$

ε_1 : 建物が存在する時に無いと判読する確率

ε_2 : 建物が存在しない時に有ると判読する確率

表 6 オブザベーション(航空写真判読)のパラメータ

計測時刻	観測誤差(無しと誤判読)	観測誤差(有りと誤判読)
400,800,1200,1600(日)	5(%)	1(%)

2) 行政情報による建物の把握

建築確認申請受理や異動登記受理などにおけるサンプリングモデルの対象範囲は図 8 d) オブザベーション(行政情報の利用)のように各建物ベースで表現され(式 9), 図 8 g) のように正規分布

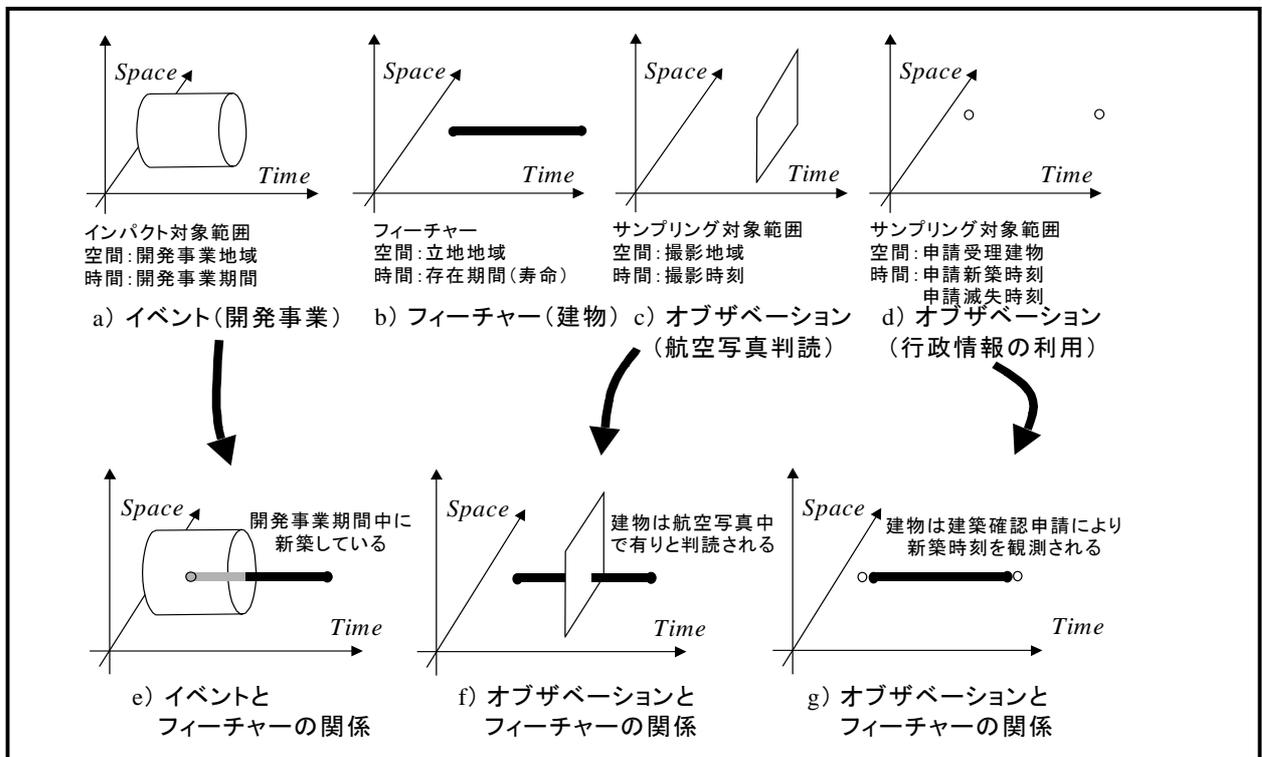


図 8 建物管理におけるフィーチャーとイベントとオブザベーションの関係

の誤差付きで新築時刻，滅失時刻が観測されると仮定すると式(10)のように表せ，パラメータは表7のように設定する．

$$z_{Obr}(t) = (sP_{Obr}, P_{Obr}, eP_{Obr}), st_{Obr} < t < et_{Obr} \quad (9)$$

$z_{Obr}(t)$: 行政情報による状態把握の範囲
 sP_{Obr} : 時刻 st_{Obr} における把握の対象範囲
 eP_{Obr} : 時刻 et_{Obr} における把握の対象範囲
 P_{Obr} : 変化中の把握の対象範囲

$$p(z_i; \theta_{Ob}, y_i) = f_{Obs}(st_i; \mu_{Obs} = 0, \sigma_{Obs}^2, y_{is}) \cdot f_{Obe}(et_i; \mu_{Obe} = 0, \sigma_{Obe}^2, y_{ie}) \\ = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{bs}} \exp\left(\frac{-(y_{is}-st_i)^2}{2\sigma_{bs}^2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{be}} \exp\left(\frac{-(y_{ie}-et_i)^2}{2\sigma_{be}^2}\right) \quad (10)$$

θ_{Ob} : 行政情報による建物把握のパラメータ
 f_{Obs} : 建築確認申請に対する各建物の生起確率関数
 f_{Obe} : 異動登記申請に対する各建物の生起確率関数
 μ_{Obs} : 建築確認申請と新築時刻の誤差の平均
 μ_{Obe} : 異動登記申請と滅失時刻の誤差の平均
 σ_{Obs} : 建築確認申請と新築時刻の誤差の分散
 σ_{Obe} : 異動登記申請と滅失時刻の誤差の分散

表7 オブザベーション(行政情報等の調査)のパラメータ

新築時刻の観測誤差(分散)	滅失時刻の観測誤差(分散)
30(日)	20(日)

こうしたフィーチャー，イベント，オブザベーションに関して想定したモデルをまとめたものが図8である．

4.3. 実験手順

具体的なシミュレーション実験手順は以下の通りである．全体の構成図は図9に示した．

Step1: モデリング

まず前節に従って各モデルを仮定する．具体的にはある地域を想定し，地域内の対象建物50件について約10年間(4000日)の期間とし，建物フィーチャー，開発事業イベント，航空写真判読オブザベーションと行政情報利用のオブザベーションに関するモデリングを行う．

Step2: 真値の生成

次に仮定したモデルに基づき，実世界のシミュレーションデータすなわち各建物の状態を表すデータを時系列に生成していく．その時間間隔は1日

とする．

Step3: 観測値の生成

同時に生成データの一部が観測データとして誤差付きで取得される．観測データは前節で整理した航空写真データと行政情報とする．

Step4: 真値の推定

最後にそれらの観測データと，各モデルに関する事前知識から，モデルのパラメータを推定する．今回は仮定したモデルに対して観測データが尤度最大になるようにモデルのパラメータやフィーチャーの状態，特に各建物の新築・滅失時刻を推定した．なお解の推定には遺伝的アルゴリズムを用いた．

Step5: 推定値の検証

これらの推定された解の分散を調べるため，Step1-4の一連のシミュレーション実験を10回行った．

Step6: 観測状況の変化

また観測状況が変化した場合にどれほど推定精度に違いが出るかを調べるために推定されたパラメータの分散を調べた．具体的には観測状況の変化として航空写真の撮影回数を変化させた．

Step7: イベントの抽出

イベントの発生は必ずしも直接は観測されない．そこで，直接観測されないイベントが，フィーチャーに関する観測データから推定できるかどうかをテストするために，イベントが存在した時においても同様のことをStep1-4まで行い，イベント時刻の推定値の分散を求めた．具体的には，イベントとしては「開発事業」を取り上げ，その開始時刻を推定した．

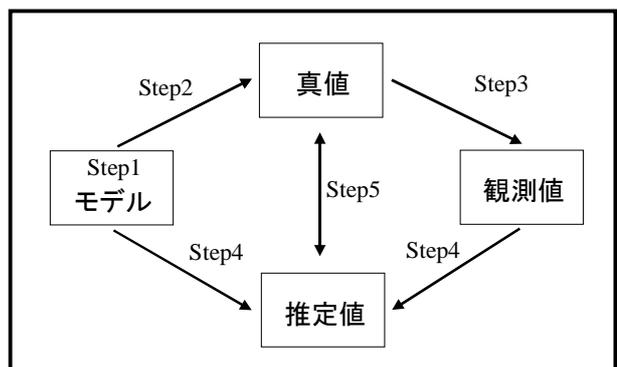


図9 シミュレーション実験の構成

4.4. 最尤法による推定の方法

次に上で述べた手順に従い実験を行った。Step1-3 に関しては 4.2. で想定したモデルに従い、Step4 の真値の推定に関しては以下のように尤度が最大になるように推定を行った。すなわち、建物 i についての生起確率は、式 2, 4, 7, 10 から以下のように表せ、

$$p(z_i; \theta_F, \theta_E, \theta_{Oa}, \theta_{Ob}, y_i) \quad (11)$$

$$= p(z_i; \theta_F) \cdot p(z_i; \theta_E) \cdot p(z_i; \theta_{Oa}, y_i) \cdot p(z_i; \theta_{Ob}, y_i)$$

全建物についてそれぞれの生起確率を掛け合わせると、

$$p(z; \theta, y)$$

$$= p(z; \theta_F, \theta_E, \theta_{Oa}, \theta_{Ob}, y) \quad (12)$$

$$= \prod_i p(z_i; \theta_F, \theta_E, \theta_{Oa}, \theta_{Ob}, y_i)$$

のようになるので、この生起確率が最大になるようにの既知パラメータと観測データ y から、それぞれの z_i との未知パラメータを推定した。ただし本研究では未知パラメータ数を増やした場合、推定精度が極度に悪化したので、未知パラメータは前述 (表 4, 5, 6, 7) のように与え、各建物の状態すなわち新築時刻、滅失時刻のみを推定した。従って求める解は 50×2 の 100 個である。

4.5. 最尤推定の結果

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) は生物進化から着想を得た確率的探索手法であり、最適解の求め方が確立していない問題や求め方が非常に非効率的で実用にならないという問題に適した手法である。本論文では遺伝的アルゴリズムを適用し、最尤推定を行った。すなわち、評価基準を尤度とし、100 個の解すなわち 100 個の遺伝子からなる個体に対して、GA のパラメータを試行錯誤的に個体数 : 200, 突然変異率 : 0.02, 世代数 : 1000 とした。表 8 は、航空写真判読による観測回数が 2 回の時の推定値の分散を全ての建物で平均したものである。なおその値は 10 回シミュレーションした時の標本平均である。また表 9 は Step6 の結果である。航空機の観測回数が増えるに従い推定値の分散が減少している。すなわちオブザベーションの条件の変化が推定結果の不確実性に影響することが確かめられた。また表 10 は

Step7 の結果であり、再開発事業の開始時刻と終了時刻の推定値と分散が求められ、イベントのインパクトモデルは知られているもののイベントの有無が確認できない場合、観測データからイベントの有無やその発生時刻を推定できることが確かめられた。

表8 建物の状態推定結果(分散)

新築時刻の推定値の平均分散	滅失時刻の推定値の平均分散
193.3(日)	277.3(日)

表9 観測回数の増加による分散の減少

観測回数	新築時刻の推定値の平均分散	滅失時刻の推定値の平均分散
1(回)	272.1(日)	359.7(日)
2(回)	193.3(日)	277.3(日)
4(回)	97.0(日)	119.6(日)

表10 イベントの抽出

開発事業開始時刻の推定値の分散	103.8(日)
-----------------	----------

4.6. 考察

FEO モデルの枠組みに、生起確率最大基準 (最尤法) を適用することで、実世界の変化を推定することを試みた。これにより、実世界の変化推定が少なくとも可能であることが示された。また、観測情報の量と、推定結果の信頼性との関連を示すことができた。

5. 結論

5.1. FEO モデルの意義

本研究では多種多様なデータから実世界上でダイナミックに変化する事象を推定、再現、予測できるような、よりインテリジェントなデータベースシステムを実現するために、概念データモデルとして FEO モデルを提案した。そして、家屋の状態推定をケーススタディとして、FEO モデルの適用可能性を示した。このように FEO モデルを概念フレームとして利用することにより、様々な観測データだけでなく、推定手法やフィーチャーの変化モデル、イベントのインパクトモデルなどもより容易にデータベースとして整理できると期待される。

5.2. 今後の課題

今後の課題には以下のようなものがある。

- 1) フィーチャーのふるまいに関する不確実性などを表現できるように FEO モデルを一層展開させる。
- 2) FEO モデルに基づいてデータベースシステムを実装する。
- 3) 各種ケーススタディによる適用実験を行う。
これらを各段階相互にフィードバックさせながら構築していく予定である。

謝辞

本研究では、日頃様々なアドバイスをくれた研究室のメンバー、また講演会等で貴重なアドバイスを下さった各方面の先生方に感謝したい。特に国際航業(株)の太田守重氏には貴重な御意見を頂いた。

参考文献

- 麻生英樹, 赤穂昭太郎, 本村陽一 (1997) 統計的推論と AI の推論, 「人工知能学会誌」, **12**(2), 196-203.
- 太田守重 (1999) GIS のための時空間スキーマ, 「GIS 理論と応用」, **7**(1), 37-44.
- 小根山裕之, 桑原雅夫 (1997) 路側観測交通量からの時間変化する OD 交通量の推定, 「交通工学」, **32**(2), 5-16.
- 小林潔司 (1987) エントロピー理論と都市・交通モデリングへの適用, 「土木計画学講演集」, **10**, 291-298.
- 柴崎亮介, 稲葉和雄, 平井雄, 太田守重, 村上真幸, 今井浩, 奥山祥司, 佐藤潤 (1996) 地理情報に関する ISO 標準化の現状, 「写真測量とリモートセンシング」, **35**(6), 4-22.
- 柴崎亮介, 村上広史, 村尾吉章, 三宅敏和, 太田守重, 黒岩昇, 山本譲, 大野武士, 笹川正, 渡辺誠, 津留宏介 (1999) わが国における GIS 標準化の現状と課題, 「写真測量とリモートセンシング」, **38**(3), 4-31.
- 関本義秀・柴崎亮介 (1999) 時空間データ統合におけるフィーチャーの表現方法のレビュー, 「地理情報システム学会第 2 回バーチャルカンファレンス」.
- CEOS Global Mapping Task Team. (1998) A Strawman Proposal for a Standard Sensor Description Format for Earth Observing Dynamic

Sensors.

- Console, L., et al. (1991) Fuzzy temporal reasoning on causal models, *International Journal of Intelligent System*, **6**, 107-133.
- Egenhofer, M., Golledge, R eds. (1998) *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems*. New York : Oxford University Press.
- ISO/CD 15046-4. (1999) Terminology, *ISO/TC211*.
- ISO/CD 15046-7. (1999) Spatial schema, *ISO/TC211*.
- ISO/CD 15046-8. (1998) Temporal schema, *ISO/TC211*.
- Langran, G. (1992) *Time in geographic information systems*. London : Taylor and Francis.
- Peuquet, J. (1995) An event-based spatiotemporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data, *International Journal of Geographical Information Systems*, **9**, 7-24.
- Shibasaki, R. (1994) Handling spatio-temporal uncertainties of geo-objects for dynamic update of GIS databases from multi-source data, *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Com. Midterm Symposium*, **30**, 761-768.
- Shibasaki, R., Huang, S. (1996) Spatio-temporal Interpolation by Integrating Observational Data and a Behavioral Model, *Advances of GIS (Proceedings of Spatial Data Handling)*, 251-265.
- Stock, O eds. (1997) *Spatial and temporal reasoning*. Netherlands : Kluwer Academic Publishers.