

# 動く図形のデータベース化

## 位相空間データモデルの時空間データへの応用

黒木 進

### ■ 研究のねらい

携帯情報端末の普及やネットワーク技術の進展により、位置情報を取り扱うアプリケーションが急速に普及してきた。例えば、GPS を持ち歩き、各時刻でどこにいたかを記録してゆくことにより、自分自身が今どこにいるのか、そして過去にはどこにいたのかという記録を残すことが可能になってきている。位置とその時間変化を記録するとき、コンピュータの高速化と記憶領域の増大とによって、位置の時間変化を記録する際の時間間隔を十分小さくすることが可能になり、時間的に見てほぼ連続的に位置変化を記述することができる。また、点の位置の時間変化を記述することにより、例えば位置の時間変化が記述された点を頂点とする多角形などの図形の形状についても時間的にほぼ連続的に記述することができる。つまり、図形の位置や形状について、その時間変化(動きと呼ぶ)をほぼ時間的に連続に記述することができる。このような図形の位置や形状の時間変化(これを時空間データと呼ぶ)を記述・格納・検索するデータベースを時空間データベースと呼ぶ。

時空間データベースを構築するときの研究課題のひとつは、時空間データを表現する時空間データ型と、それらに対するオペレーションの体系を記述する時空間データモデルを構築することである。時空間データ型は、時空間データベースにどのような性質を持つ時空間データを格納するかを規定するために用いられるものである。これは関係データベースにおいて、氏名や電話番号を表す文字・数字型や実数を表す数値型、真または偽を表す真理値型が提供されるのと同様に、時空間データベースが提供すべきものである。また、時空間データ型の値によって表現される時空間データに関するオペレーションとして、例えば、二つの図形が動いているときに、それらは果たして接触することはあるのかどうかを計算するオペレーションや、二つの図形の距離がどのように変化しているのかを調べるオペレーションを考えることができる。このようなオペレーションの体系をどのように定義すれば、動く図形に関する関係を表現できるかを決める必要がある。

本研究では、動く図形をデータベースに表現・格納・検索するために用いる時空間データモデルを構築する際に、位相空間という概念を用いる。位相空間とは、図形のつながり方を記述するための基礎的な概念であり、さまざまな自由度の図形を取り混ぜて複雑な図形を記述することができる。そこで、本研究では、位相空間をデータベースに表現・格納し検索するための位相空間データモデルを構築する。その位相空間データモデルを基盤として時空間データを表現・格納するための時空間データモデルを構築する。時空間データモデルで定義されるデータ型は、位相空間データの形式で共通に表現される。このことによって、時空間データ型の値も空間データ型の値も共通のデータ構造で表現される。共通のデータ構造で表現された値は、その値がどの型をもつかによって適用されるオペレーションの種類が変わり、異なる解釈がなされ、時空間データあるいは空間データとして意味が与えられる。

## ■ 研究成果

### 1. 時空間データモデル

動く図形を記述するためには、その図形が各時刻でどこにあり、どのような形をしているのかを記述する必要がある。図形自身の位置や形の時間変化を表現するデータを時空間データと呼ぶ。また、時空間データを時間変化する位置属性としてもつオブジェクトを時空間オブジェクトと呼ぶ。時空間オブジェクトとなるのは、例えば人や車、列車や台風など空間の中を自由に、あるいはある種の制約に従って動く実体である。空間を動き回る人や車をデータベースに記録する際には、人や車を時空間オブジェクトとしてモデル化し、その属性として時空間型の値として表現される時間変化する位置を定義する。

このとき、人や車の位置や時刻に関して検索を行う場合に、時空間型の値に対してどのようなオペレーションを利用者に提供するかはデータベースのアプリケーションプログラムによってさまざまである。ここでは代表的なオペレーションを定義するために必要なデータ型(時空間データ型を含む)と、それに関するオペレーションを定義する。

#### 1.1 時空間抽象データ型

ここでは、時空間データを表現する時空間データ型と、オペレーションの結果を表現するための補助的なデータ型を定義する。

##### 1.1.1 空間データ型

図形の位置や形など、時間によらない空間の値を表現するデータ型を空間データ型という。ここでは、空間データ型のとりうる値として空集合または多面体を考えた。多面体とは、 $n$ 次元空間  $R^n$  の点集合(但し  $n=2, 3$ )であり、凸多面体の和集合で表現されるものとする。但し、凸多面体としては自由度0から  $n$  までの凸胞を考える。

例えば  $n=2$  の場合は、 $R^2$  の多面体として、点、線分、凸多角形の和集合によって表現される点集合を考える。同様に、 $n=3$  の場合には、点、線分、凸多角形、凸多面体の和集合によって表現される点集合とする。

データベースに格納する空間データ値として多面体を考えたのは、図形のつながり方を表す性質、例えば穴の数などを考察する場合には、任意の曲面の正確な表現は必要がないからである。また、図形の計量的な性質については、図形を多面体近似することにより十分精度よく計算することが可能であるからである。

##### 1.1.2 時間データ型

図形が存在する時間や、図形がある空間的な条件を満たす位置や形状をしているときにその時間、あるいは時間帯を表現するために用いるのが時間データ型の値である。ここでは、時間データ型のとりうる値として、空集合または、時刻、時区間の和集合として表現される時刻の集まりとした。ここで時刻とは、10時12分30秒などのある瞬間をあらわす値をいう。また、時区間とは、11時ちょうどから11時30分までのような区間によって表現される時刻の集合とする。これらの和集合により、時刻あるいは時区間を出力とするオペレーションの値を表現できるようにした。

##### 1.1.3 時間変化型

図形に関する値の時間変化や、真理値の時間変化を表現するためのデータ型が時間変化型である。

例えば、2次元図形の面積の時間変化や、3次元図形の体積の変化、二つ2図形に関する距離の時間変化を表すために、時間変化する実数型を定義した。また、二つの図形が重なるかどうかを各時刻で表現するために時間変化する真理値型を定義した。

#### 1.1.4 時空間型

これは、図形の各時刻での位置と形状を表現するデータ型である。ここでは、時空間型の値として、多面体の時間変化をとることにする。ここで多面体とは、 $n$ 次元空間 $R^n$ の点集合(但し $n=2, 3$ )であり、凸多面体の和集合で表現されるものとする。但し、凸多面体としては自由度0から $n$ までの凸胞を考える。

例えば $n=2$ の場合は、 $R^2$ の多面体として、点、線分、凸多角形の和集合によって表現される点集合を考える。同様に、 $n=3$ の場合には、点、線分、凸多角形、凸多面体の和集合によって表現される点集合とする。

次に、多面体で表現される図形の動きの種類について定義する。図形が空間の中に存在している時間を $[a, b]$ (つまり $a \leq t \leq b$ )とする。このとき、時区間 $[a, b] = [t_0, t_1] \cup [t_1, t_2] \cup \dots \cup [t_{k-1}, t_k]$ と分解でき、各時区間 $[t_i, t_{i+1}]$ において、 $t=t_i, t_{i+1}$ での図形の位置と形を表す多面体をそれぞれ $R(t_i)$ 、 $R(t_{i+1})$ とする。このとき、各時刻 $t \in [t_i, t_{i+1}]$ ( $i=0, 1, \dots, k-1$ )における図形の位置と形を表す多面体 $R(t)$ が、関係式

$$R(t) = \{(t - t_i)R(t_{i+1}) + (t_{i+1} - t)R(t_i)\} / (t_{i+1} - t_i)$$

を満たすように動くものと定義する。この関係を満たしながら図形が動く場合には、たとえば図形が等速度で平行移動する場合や、図形が拡大・縮小する場合が含まれる。このような定義であっても、時区間を細かく設定することにより、連続的な図形の動きを精度よく表現することができる。

#### 1.1.5 空間と図形の次元

ここまでで、動く図形を表現するためのデータ型である時空間型とそれに付随して発生する空間型、時間型、時間変化型を定義した。その際に、図形が動き回る空間 $R^n$ と、図形それ自身の持つ次元について簡単に述べる。

本研究においては、図形が動き回る空間 $R^n$ の次元を基準として考える。例えば、 $n=3$ の場合、つまり $R^3$ の中を図形が動く場合、その図形の種類によらず図形の動きはすべて3次元時空間型(空間座標として3つ、時間座標として1つによる座標を持つ)として表現するものとする。例えば、3次元空間 $R^3$ を点が動き回る場合でも、線分が動き回る場合でも、あるいは多角形、多面体が動く場合であれ、その位置と形状は3次元の空間座標と1次元の時間座標によって表現される。同様に図形が動き回る空間の次元が2の場合、つまり図形が2次元空間 $R^2$ を動き回る場合には、2次元時空間型(空間座標として2つ、時間座標として1つによる座標を持つ)として表現する

同様に、空間データ型に対しても2次元空間型と3次元空間型を定義する。例えば図形が存在する空間が2次元空間 $R^2$ であれば、その図形はその種類によらず2次元空間型の値として表現される。また、図形が存在する空間が3次元空間 $R^3$ であれば、その図形はその種類によらず3次元空間型の値として表現される。

### 1.2 時空間オペレーション

ここまでの部分で、動く図形を表現するためのデータ型として、時空間型(2次元または3次元)、空間型(2次元または3次元)、時間型、時間変化型(実数、真理値)を定義した。これらによって表現

された値に関するオペレーションを定義する。

### 1.2.1 空間データに関するオペレーション

空間データを表す空間型の値に関するオペレーションとしては、二つの図形の位置関係に関するオペレーションが主要なオペレーションである。これらのオペレーションは、二つの図形(点集合として考える)が重なる、接する、含まれる、等しい、離れているという関係を表現するオペレーションである。これらの2項オペレーションは二つの図形の位置によって真または偽の真理値を返す。これらのオペレータはトポロジカルオペレータと呼ばれる。

また、二つの図形に関するオペレーションとして、二つの図形の集合演算結果を空間型の値として出力するオペレーションがある。二つの図形に関するオペレーションは、これ以外にも二つの図形の距離を実数として出力するなど、実数型オペレーションがある。

さらに、一つの図形に関するオペレーションとして、その図形の境界を空間型の値として出力するオペレーションがある。また、一つの図形に関して、その面積や体積などを出力する実数型のオペレーションや、連結成分の数を出力する整数型のオペレーションがある。

### 1.2.2 時間データに関するオペレーション

空間データ型と同様に、時間データ型の値に対してもオペレーションが定義される。空間データの場合と同様に、二つの時間データに関して、それらが重なる、離れている、接続している、含まれるという関係が成り立つかどうかを判定し、真または偽の真理値で表現し出力するオペレーションが存在する。二つの時間データに関するこれらの関係は Allen らによって定義されたものであり、基本的な時制関係である。

### 1.2.3 時空間データに関するオペレーション

空間データ型および時間データ型の値に関するオペレーションを見てきた。これらのオペレーションに対して時間的あるいは空間的な条件を付加して得られるオペレーションが時空間型の値に関するオペレーションとして定義される。定義されるオペレーションにはいくつかの種類に分類される。

#### (1) 二つの時空間データから真理値を出力するオペレーション

二つの時空間データに関する時空間的な条件が成り立つかどうかを判定し、真偽を出力するオペレーションである。ここで時空間的な条件としては、例えば二つの図形が重なる瞬間があるかどうか、一方が他方の内側に完全に含まれることがあるかどうかなど、二つの動き回る図形に関して、ある瞬間の位置関係が満たされることがあるかどうかということがあげられる。また、二つの図形が空間の中でともに存在する時間帯の中で、すべての時刻で二つの図形の位置関係が同一であるかどうか(例えば二つの図形がともに存在する時間すべてにわたって、二つの図形が交わることがないなど)ということも時空間的な条件となる。

これらの条件は、空間データ型の値に対するトポロジカルオペレータの値が、ある時刻に成り立つかどうか、あるいは全時刻で成り立つかどうかを表現するものである。そこで、これらの時空間的な条件を表現するために、トポロジカルオペレータを時空間化オペレータ化する。例えば、二つの空間データ型の値が交わるというトポロジカルオペレータを  $\text{intersect}(a, b)$  とすると(但し、 $a, b$  は空間データ型の値)、「二つの動く図形が交わるという条件が成り立つ」時に、またそのときに限り真を出力するオペレータを  $\text{intersect\_for\_sometime}(A, B)$  と定義する(但し、 $A, B$  は時空間型の値)。このオペレータを使うことにより、たとえば、時空間データベースの利用者がある領域を通過する図形を検索するとき、検索条件をこのオペレータ一つで記述することができ、利用者の便宜を図ることがで

きる。また、トポロジカルオペレータの値がすべての時刻にわたって真であるという時空間関係を表現するために、`intersect_always(A, B)`のように定義することができる。

二つの空間データに関するトポロジカルオペレータとして `intersect(a, b)` 以外に、「a が b を含む」という関係を表す `contain(a, b)`、「a と b が接する」という関係を表す `meet(a, b)`、「a と b が離れている」という関係を表す `disjoint(a, b)`、「a と b が等しい」という関係を表す `equal(a, b)` とする。これらに対して、それぞれ `contain_for_sometime(A, B)`、`contain_always(A, B)` のようにオペレータを定義する。

## (2) 時空間データと時刻から空間データを出力するオペレータ

動く図形の、ある時刻での位置と形を求めるために用いるオペレータ `at(A, time)` がこのようなオペレータの例である。このオペレータの値としては空間型のデータあるいは空集合をとる。

## (3) 二つの時空間データから時空間データを出力するオペレータ

二つの時空間データの共通部分、和、差の時間変化を表すオペレータである。

## (4) 時空間データから時間データを出力するオペレータ

一つの時空間データからその時空間データが存在する時区間を求めるオペレータである。このオペレータの取る値は時間データであり、時刻、時空間の和集合あるいは空集合のいずれかの値をとる。

## (5) 二つの時空間データから時間変化する真理値を返すオペレータ

(1) の場合に述べたオペレータの変種であり、二つの図形の位置関係を記述するオペレータ (例えば `intersect()` など) が真を出力する時間と偽を出力する時間を定義するオペレータである。このオペレータを `temporal_intersect(A, B)` のように定義する。このオペレータにより、二つの時空間データの間で位置関係が時間とともにどのように変化するかを記述することができる。また、このオペレータが真である時区間を求めることもであるので、図形の間空間的条件が成り立っている時区間が求まる。

## (6) 空間データと時間データから時空間データを出力するオペレータ

2次元または3次元空間の中にある図形の位置と形を表現する空間データと、その図形が存在する時間データを入力として、図形を空間の中で動かしたときにできる時空間データを出力する関数である。本研究では、図形の動きに関して1. 1. 4で定義した制約によって表現された動きを持つとしている。この条件に当てはまる動きとしては、図形の平行移動や拡大縮小がある。このような動きを与えるオペレータとして `translate_motion(a, b, c)` を定義することができる。ここで、`a`、`b`、`c` はそれぞれ空間データ、時間データ、ベクトル(次元は空間データの次元による)である。同様に、図形の拡大または縮小を表す動きを表す時空間データを出力とするオペレータ `scale_motion(a, b, r)` を定義することができる。但し、`a`、`b`、`c` はそれぞれ空間データ、時間データ、拡大縮小率を表す実数である。これらのオペレータは空間データに対するリフトやスweepと類似の意味を持っている。

## 2. 位相空間データモデル

1. で述べた時空間データ型と時空間オペレーションをコンピュータ内部に実装するための内部表現として本研究では、位相空間型と位相区間オペレーションを定義した。

### 2.1 位相空間データ型

位相空間とは、図形の構成要素である頂点や稜線、面分などのつながり方を記述するための概念で

ある。位相空間自身はもっぱら、図形の構成要素のつながりを記述することに用いられる。そのため、図形の大きさや位置によらずにつながりがたを表現することができる。また、図形の構成要素がどのようにつながっているかは図形の構成要素を表す記号に関する代数的な演算だけで求めることができ、座標値などの幾何情報を必要としない。

しかし、動く図形は、位置を表す空間座標や、存在する時間を表す時間座標を持っていて、これらの座標値を通じて位置や形の時間変化が記述される。そのため、これらの座標値を位相空間に与える必要がある。そのために、位相空間を表現するための枠組みとして凸胞複体を用いることとした。

空間データ型の値を定義したときに、その値を「点、線分、凸多角形、凸多面体の和集合で表現される点集合または空集合」と定義した。これと逆に、 $n$ 次元空間  $R^n$  の点集合を、それぞれが凸な図形になるように分解したときに得られる凸図形の集合を凸胞複体と考える。このときに得られた凸図形の構成要素をすべて求めてそれらのつながりを記述すれば凸胞複体の表す図形の本質を表すことができる。同時に点集合を分割したときに得られる凸図形の頂点には座標データが付加されているので、このデータを位相空間と同時にデータベースに格納すれば図形的位置や時刻を表すことができるようになる。そこで、位相空間の本質を表す構成要素のつながり関係と頂点データの双方を位相空間データ型の値に持たせることとした。

位相空間を表すために、位相区間型を定義した。位相区間型は、凸図形の和集合を表すのに用いる。凸図形の構成要素である、点や線分、面分などはすべて凸図形であるため、凸図形の構成要素の集合自体もまた凸図形の集合である。こうして求まる凸図形の集合と、その頂点と座標の対応関係を表す表によって点集合を表現する。

このような表現によって、位相区間型の値は  $n$ 次元空間  $R^n$  の多面体を表現することができる。このとき  $n=2, 3, 4$  の場合にも共通な表現を与えることができる。

## 2.2 位相空間オペレーション

先に述べたように、位相空間には点集合という性質と、構成要素である凸図形のつながりを表す性質がある。そのため、座標によって決まる位置関係に関するオペレーションや、多面体に関するつながりを利用したオペレーションを定義することができる。

### (1) 二つの位相空間から真理値や位相空間を出力するオペレータ

二つの空間データから真理値や空間データを出力するオペレータと同様に、位相空間であると同時に多面体でもある位相空間が交わる、接する、含まれる、等しい、離れているかを判定したり、位相空間を多面体と見たときに二つの位相空間の集合演算を表すオペレータを定義することができる。このとき、二つの位相空間が共通の凸図形への分解を採用している場合には、位相空間に関する代数的な演算を利用することができ、計算を効率よく、簡単に求めることができる。このことからデータをデータベースに格納する際に、格納された位相空間がすべて共通の分割法によって定義されていれば、ここで定義するオペレータは代数的に、また簡単に計算することができるようになる。

### (2) 位相空間から位相空間を出力するオペレータ

位相空間の多面体の性質を用いて、ある位相空間の部分空間への射影を計算したり、ある部分空間(例えば平面)との交わりを計算することができる。これらのオペレーションは位相空間の多面体の性質に完全によっている。一方、位相空間からその境界を求める演算は、位相空間の構成要素のつながり方から完全に代数的に求めることが可能である。このような演算も同時に定義した。

### (3) 位相空間から実数値を出力するオペレータ

このオペレータも位相空間の多面体の性質に基づいたオペレーションである。例えば位相空間を表す多面体の体積を求めるためには、多面体を分割して得られた凸多面体の体積を集計すればよいことになる。

## 3. 時空間データモデルや空間データモデルと位相空間データモデルの統合

これまで時空間データモデルとその内部表現を与える位相空間データモデルについて述べた。本研究では、これらを統合して実装する。その際に必要になるのは、位相空間データ型によって表現された値の解釈である。例えば、2次元空間を図形が動き回る現象をデータベース化しようとするとき、時空間データモデルにおいては、2次元時空間型の値を用いて図形の動きを表現する。そしてこの値を内部表現に変換する際に、2次元時空間データを2次元空間座標と時間座標からなる3次元空間の位相空間に変換して格納する。また、3次元空間を図形が動き回る現象をデータベース化するとき、3次元時空間データを表現するのに付随して、3次元空間データを表す空間データ値ができる。

このとき、内部表現においては2次元の時空間データと、3次元空間データはまったく同じ形式で表現される。そのため、時空間データモデルやオペレーションでは、内部表現での形式と座標の意味を位相空間に対して与える解釈が必要となる。このような解釈を行うことによりはじめてデータの意味や値を確定することができる。

このような解釈の部分を、個別の時空間データモデル(2次元または3次元)や空間データモデル(2次元または3次元)、時間データモデルに応じて機能拡張として個別に定義する。これにより、位相空間データモデルを共通基盤としてさまざまな時空間、空間、時間データモデルを定義することができる。そしてそれら空間の持つ特質の違いが機能拡張の部分にあらわれる。

## ■ 今後の展開

研究期間である3年間に渡り、時間とともに位置や形が変化する図形をデータベースに格納・検索するためのモデルについて、その内部表現である位相空間データモデルから時間、空間、時空間データのためのデータ型、オペレーションを定義、実装してきた。また、ここで定義した内部表現に基づいて画像に表れる図形の位置や形を表現し、検索することについても検討し、インデックスの実装や評価を行ってきた。これらによって、時空間データベースのシステムに関して広く知見や経験を得ることができた。

時空間データベースを構築する際に必要となる要素技術のうち、時空間データモデルや空間データモデル、時間データモデルなどデータモデル、インデックスといった部分はデータベース内での値の内部表現とは独立して考えることができる。一方、時空間データを検索する際の効率を議論するためには内部表現とオペレーションのアルゴリズムがキーポイントである。特に、オペレーションのアルゴリズムとその実装についての部分の検討が重要である。この部分についての改良についての研究を進めてゆく必要がある。とくに位相空間のつながりを元にして位相空間の重なりや包含関係を計算することができればアルゴリズムが単純化されオペレーションのスピードアップが期待される。この部分での研究が十分ではなかったもので、今後試みてゆきたい。とくに位相空間の共通分割が重要になるだろう。

また、研究してきた時空間データベースの応用についても進めてゆきたい。例えば、映像の内容を図形によって記述するという方向は映像データの規格とも関係する部分であり、ビデオデータベースの内容記述とシーンの検索にも関連するとみられる。そのようなテーマへも研究を広げてゆきたいと考えている。

## ■ 成果

黒木進、牧之内顕文：位相空間データモデル Universe の凸胞と凸胞複体クラスの拡張、DEWS1999、1999.

A. Makinouchi and S. Kuroki: Enhancing Databases by Introducing Spatial Data Types for Non-Geographical Applications, *Advances in Multimedia and Databases for the New Century* (Y. Masunaga and S. Spaccapietra (Eds.)), pp.96・105, World Scientific, 2000.

尾下真樹、長野英彦、中野裕也、金子邦彦、黒木進、牧之内顕文：時空間データ表現モデル Universe のプロトタイプ開発、DEWS2000、2000.

前迫隆志、黒木進、佐藤聡、北上始：クラスタ分析木を用いた対話的画像検索のためのインタフェース、DEWS2001、2001.