

## 時空間データベースシステムHawksにおける 時空間質問の表現

黒木進, 石塚健作, 牧之内顕文  
九州大学大学院システム情報科学研究科  
〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1

tel: 092-642-3883, fax: 092-632-5204

e-mail: kuroki@is.kyushu-u.ac.jp, ishizuka@db.is.kyushu-u.ac.jp,  
akifumi@is.kyushu-u.ac.jp

あらまし

われわれは時空間データベースシステムHawksの開発を行なっているが、このシステムでの時空間質問の表現について述べる。Hawksは質問言語としてOQLを用いているので、OQLに時空間的な述語やオペレータを導入して利用者に提供する。時間的あるいは空間的な述語とオペレータは従来より用いられてきたものをそのまま導入する。また、時間的な述語とオペレータについては新しく定義する。そのようにして記述された時空間質問は、このシステムの時空間データの内部表現モデルであるUniverseでの表現に変換されるが、そこででの表現とそれへの変換についても述べる。

## Expressions of Spatio-Temporal Queries in the Spatio-Temporal Database System Hawks

Susumu Kuroki, Kensaku Ishizuka, and Akifumi Makinouchi

Graduate School of Information Science and Electrical Engineering  
Kyushu University  
6-10-1 Hakozaki, Higashi, Fukuoka 812-81, Japan

abstract

We discuss expressions of spatio-temporal queries used in the spatio-temporal database system Hawks, which we are now implementing. The system Hawks uses OQL as a query language and we provide users the spatio-temporal query language by introducing spatio-temporal predicates and operators. While spatial and temporal predicates and operators, which have been frequently used for a long time, are directly introduced, spatio-temporal ones are newly defined. Spatio-temporal queries expressed in the resulting spatio-temporal query language are transformed into the one in the internal representation, which the prerepresentation model Universe provides, and we address the transformation and the internal representation.

## 1. はじめに

ビデオの映像に現われる物体の動きに関する内容検索や、空間データベースに格納された空間オブジェクト(例えば建物や車)の時間的変遷に関する質問処理に関する研究が盛んになってきている。このような問題に対するアプローチのひとつが時空間データベースである。このデータベースに格納される時空間オブジェクトとは、時間的に変化する空間データのことをいう。

これら時空間データベースの研究には、例えば次の2つがある。

ひとつは、ビデオに現れる物体の動きを表現する時空間オブジェクトを定義し、それに関する表現と検索を行なうものである[1]。この研究では、時空間オブジェクトは、そのオブジェクトが交差するgridの集合として表現される。このgridの集合は各座標軸に射影されて、与えられた点集合を端点とする区間に分解される。このように表現された各区間に関する関係をあらかじめassertionの集合として記述しておく、その集合から区間論理を用いて空間関係が計算される。

もうひとつは、Moving Objectと呼ばれるオブジェクトのインスタンスによって動き回る物体、例えば車を表現してその将来の動きを予測をするために検索を行なうものがある[2]。例えば、この車がある地域に到着する時刻はいつごろかという質問が考察された。この研究においては、車の動きは時間の関数として表現されている。

前者の研究の問題点は物体の位置や形状をラフな近似によって表現していることである。そのアプローチにおいては、物体をそのMBBよりも大きな近似物体で表現しているため、物体間の関係を計算するときの、その「正確さ」において問題がある。

後者の研究の問題点は、物体の動きに制約があることである。例えば、物体の動きとしては、各座標の時間変化を例えば、 $a=a(t)$ のような関数で表現するだけであるから、剛体運動に代表される位相の変化しない動きは表現できても、位相の変化する動き、例えば物体の分裂・結合・生成・消滅を表現することができない。

これらの問題点を解決するために、この研究では、空間データが時間的に変化するオブジェクトを表現する際に、時空間データの内部表現のためにUniverse[3]というモデルを用いる。このモデルにおいては、空間座標 $(x, y, z)$ と時間座標 $t$ の直積として得られる4次元位相空間を定義し、その空間で物体の動きをその物体の軌跡を表わす4次元図形として表現する。そして、そ

の4次元図形を単体複体を用いて表現しているのが特徴である。単体複体とは、単体(点、線分、三角形、三角錐など)の集合である。

この表現を用いることによって、幅広い図形の形状や動きを表現できるが、その一方で表現はCADのソリッドモデルに比べて複雑になる。そのことによって、データベースに格納された物体やその動きに関する質問を利用者がUniverseでの表現を用いて定義するのは難しい。

そのため、利用者にとって従来から用いられている空間質問言語や時間質問言語と同程度の抽象さで時空間質問を記述できる質問言語が必要である。これをうけて、われわれは時空間データベースシステムHawksのための時空間質問言語の研究・開発に着手した[4]。

この質問言語を作るにあたっては、OQL[5]を用いることにした。つまり、OQLに時間的、空間的、時空間的な述語やオペレータを導入して拡張する。というのも、このデータベースシステムHawksがINADA/ODMG[6, 7]というデータベースプログラミング言語を用いて実装されていて、質問言語OQLが利用可能となっているからである。具体的には、ODMG-93のC++ bindingsによってオブジェクトを定義したり、質問を記述する。

そこで、この質問言語について以下で述べる。まず最初に、このシステムHawksでの質問処理の流れについて2章で説明する。利用者が質問を記述するための質問言語Spatio-Temporal OQLについて3章で説明する。さらに、時空間データの内部表現である単体複体表現によって記述された時空間データに関する質問言語Universe OQLについて4章で説明する。最後に、Spatio-Temporal OQL表現された質問がどのようにしてUniverse表現された質問に変換されるのかを5章で説明する。

## 2. 時空間データベースシステム Hawksにおける質問処理

時空間データベースシステムHawksでは、時空間質問処理は次の3つのフェーズから成り立つ。それらは

- (1) 時空間質問の作成、
- (2) 時空間質問の処理、
- (3) 検索結果の表示

である。このような構成は通常システムと同じであるが、このシステムにおいては、時間データと空間データが時空間データ表現モデルUniverseによって統合された形で格納・表現されているために、これら3つのフェーズに違い

が生まれる。このことを以下で述べる。

## 2.1 時空間質問の作成

このフェーズは、Spatio-Temporal OQL, 時空間質問変換モジュール, Universe OQL という3つの要素から成り立つ。Spatio-Temporal OQLとは、もっぱらデータベースの利用者が従来からある空間質問言語や時間質問言語同様、時空間質問を抽象的な記法で定義できるよう支援するものである。この質問言語においては、時間述語、空間述語、時間オペレータ、空間オペレータのほかに、時空間述語と時空間オペレータが定義されている。

時空間質問変換モジュールは、Spatio-Temporal OQLによって定義された時空間質問をこのシステムの時空間データ表現モデルUniverseでの表現に変換するものである。Spatio-Temporal OQLで定義された質問の時空間条件はいくつかの時間述語、空間述語、時空間述語が組み合わされて定義される可能性があるが、これによって定義された条件をUniverseでの表現に変換する。

このシステムの内部表現モデルUniverseにおいては、時間データ、空間データ、時空間データは共通の形式で表現される。その表現形式においては、空間データ(3次元まで)と時間データ(1次元)の直積をすることによって得られる位相空間TSでの図形として空間データ、時間データ、時空間データを表わすということである。例えば、等速直線運動する点はこの空間においては線分として表現される。

上記のように物体の動きを4次元図形表現に帰着させるので、例えば時間変化する空間領域 $S(t)$ との交わりをもつ時空間オブジェクトを求める時空間質問は、位相空間TSでの図形 $S^*$ (位相空間TSでの $S(t)$ の軌跡)と交わりを持つデータベース中の時空間オブジェクトを求める質問となる。すなわち、Spatio-Temporal OQLによって定義された時空間質問は、位相空間STにおける「空間」質問に帰着される。

上で述べた時空間質問変換モジュールの出力がUniverse OQLである。時空間データ表現モデルUniverseにおいては、時空間データは位相空間TSでの図形として表現されるが、その表現には単体複体という位相幾何学の概念を用いている[8]。単体とは、1次独立な点 $(k+1)$ 個を含む最小の凸集合である。これを特に次元を明確にするために $k$ -単体と書くことがある。具体的には、点、線分、三角形、四面体などである。簡単にいうと、単体複体によるモデリングとは、CAD

のソリッドモデルリングを拡張して、4次元位相空間で行なっていることと等価である。

## 2.2 時空間質問の処理

Universe OQLで表現された時空間質問は、4次元図形の間を調べる「空間」質問として表現される。そのため、空間データの時間的変遷を表現するときに各時刻別にレイヤを作って格納する方式で時空間質問と処理するためには、各レイヤを調べる必要がある。そのため、ある時空間的実体は各レイヤに現われることになって冗長である。そのため、時間的変遷に関する質問を処理するためには各レイヤに関して質問を処理し、その結果を突き合わせる必要がある。しかしこれはコストが高い。

一方、Universeのように時間と空間を統合した表現をとれば、ある実体の時間的変遷は例えば位相空間における図形の「形状」として定義されるため、前者場合に必要であった結果の突き合わせは必要ない。このことは、Universeの利点のひとつである。

## 2.3 検索結果の表示

時空間質問の結果をどのように利用者に提示するかも重要な課題である。特に、このシステムでは4次元図形として物体の動きを表現しているのをそのまま利用者に提示しても意味をなさない可能性がある。そのために、利用者にとって理解しやすい、あるいは利用者が希望する形式に変化する。例えば、ある時刻での位置関係だけ表示するとか、アニメーションを用いて時間変化を表示するとか、ある平面での断面の時間変化を表示するという形式が考えられる。これらの出力形式をどのようにするかという現在は現在の課題のひとつである。

## 3. 時空間OQL

この研究で目指す時空間質問言語はODMG-93(Release 1.2)のOQLに時空間質問のための述語とオペレータを導入することによって得られる言語である。この言語はデータベースの利用者が質問を定義するためのツールとして位置付けられるものである。

さらにOQLとしては、われわれの研究室で開発されているINADAというデータベース言語を用いている。これはC++を拡張したもので、その結果ODMG-93のC++バインディングを用いて

いる。

OQLに導入する述語とオペレータは次の3種類に分けられる。それらは空間に関するもの、時間に関するもの、時空間に関するものである。以下ではこれらを個別に見ていく。

### 3.1 空間質問

空間的な述語とオペレータは従来から研究されてきたものをそのまま導入する。これらはその性質から位相的(topological)なものや計量的(metric)なものに分けられる。

位相的な関係とは、2つの図形の集合関係である。それゆえ、位相的な述語は2つの図形のあいだに集合関係、例えば、「交わりがあるかどうか」や「内部に含まれるかどうか」を判定するものである。これを用いた空間質問とは、例えば、ある与えられた図形と共通部分を持つ図形を取り出す質問である。この質問において「共通部分を持つ」という関係を記述するのがintersectという位相的な性質を記述する述語である。位相的な述語としては、intersect, overlap, containがあげられ、位相的なオペレータとしては、union, intersection, differenceがあげられる。

また、計量的な関係とは、2つの図形の距離関係である。例えば、ある与えられた図形から別の図形が距離d未満にあるかどうかを判定するのが計量的な述語である。また、2つの図形の距離を計算するために用いられるのがdistanceというオペレータである。

空間質問をOQLを用いて記述すると、例えば次のようになる。位相関係に関する質問として、「ある与えられたオブジェクトcと交わりを持つオブジェクトを取り出せ」が考えられるが、これは例えば次のようになる。但し、STOとは時空間オブジェクトのデータベースを表わす。また、ここでは時空間関係だけに着目して非空間データに関する記述は省略した。

```
% spatial intersection query
select c
from c in STO
where c.intersect(given range r)
```

これと同様に、先ほどの計量的な関係を用いた「あるオブジェクトcから距離d未満にあるオブジェクトを取り出せ」という計量的な空間質問は次のようになる。

```
% spatial distance query
select c
```

```
from c in STO
where c.distance(given range) < d
```

われわれの立場では、これらの述語やオペレータは時間に関係しない概念として扱われる。そのため、時間に関して指定がなければ、データベースに格納された時空間オブジェクトの存在する時間全部に関する質問と解釈される。

### 3.2 時間質問

時間的な述語とオペレータについても空間述語とオペレータの場合と同様に従来より用いられたものをそのまま導入する。例えば、duringやoverlapなど、Allenのtemporal logicにおいて用いられているものをそのまま流用する。

### 3.3 時空間質問

時空間的な述語とオペレータについては新しいものを導入する。ここで想定しているアプリケーションは、コンピュータアニメーションやバーチャルリアリティであるので、それらに特有な、あるいは有用なものを定義する予定である。例えば、バーチャルリアリティでは、あるオブジェクトが別のオブジェクトと衝突するのを検出したり、あるいは衝突する時刻を求めたり、あるいは最終的にある状態に至るオブジェクトを検索することが重要になると思われる。

この目的のために、例えば、われわれは2つのオブジェクトの衝突を記述するための述語collideを導入する。この述語は、「データベースに格納された2つの時空間オブジェクトがある時刻において共通部分を持つ」という関係を表わすものである。時間述語と空間述語を用いてこれを記述しようとする、各時刻において「2つのオブジェクトが共通部分を持つかどうか」を調べるようにプログラムを書く必要がある。しかし、この述語を用いることによって、先の例と同様に簡潔に質問を書くことができる。

```
% an instance of a spatiotemporal query
select c
from c in STO
where c.collide(given object)
```

## 4. Universe OQL

前の章で利用者が質問を定義するための時空間質問言語を説明した。ここではそのように表現された時空間質問が、この時空間データベース

システムでの内部表現においてどのように表わされるかを述べる。

質問変換モジュールにおいて、Spatiotemporal OQLで表現された時空間質問は、Universeデータ表現モデルでの表現に帰着される。Universeにおいては、時空間質問は4次元空間の図形の関係に関する質問として表現される。そのとき、4次元空間の図形は単体複体によって表現される。そのため時空間質問は4次元単体と単体複体の「空間的な」関係に帰着される。

単体複体は単体の集合であるから、単体複体の間の関係は、単体どおしの関係を求めてその結果を統合することで決められる。例えば、2つの単体複体(すなわち、2つの4次元図形)が交わりを持つかどうかを判定する述語intersectionを定義することができるが、これは異なる単体複体に属する単体のペアのうちで、交わりを持つものがひとつでもあれば真、そうでなければ偽と判定すればよい。

単体複体および単体の間の関係として、ここでは3次元空間での空間述語やオペレータを4次元空間でのものに拡張・一般化したものを用いる。その中で、主要なものは位相的な述語とオペレータである。例えば4次元空間図形の和集合、差集合、積集合を求めるオペレータや、交わりがあるかどうかを調べる述語である。

4次元空間図形の和集合、差集合、積集合を求めたり、空間的な関係を求める述語を一般的な図形に対して定義・実装することは困難な課題である。この課題に対してわれわれは、単体どおしの関係や演算を定義し、それらの結果をもとに単体複体間の関係や演算を定義する。このアプローチをとることによって一般的なアルゴリズムを作り実装する困難さがあるとすれば、それを単体間の関係や演算を統合する困難さに変換しているといえる。

Universe OQL を用いて先に記述した質問をSpatiotemporal OQL に書き直すと次のようになる。4次元空間では2つのオブジェクトの衝突も、ある決まった一瞬にだけ存在するオブジェクトが交わりを持つことも、拡張された述語intersect()によって同じ形式で表現することができる。但し、計量的な質問に関しては、4次元位相空間における距離を定義することができないため、注意を払う必要がある。2番目のspatial distance queryにおいて用いられているdistance()というオペレータの定義について、どのようにすればよいかを現在検討中である。

```
% spatial intersection query
select c
```

```
from c in Complex
where c.intersect(given range r)
```

```
% spatial distance query
select c
from c in Complex
where c.distance(given range) < d
```

```
% an instance of a spatiotemporal query
select c
from c in Complex
where c.intersect(given object)
```

## 5. 質問変換

ここまでで、利用者が質問を定義するための言語Spatiotemporal OQLでの表現と、システム内部で質問を定義するために用いるモデルUniverseでの表現を見てきた。ここではそれらに関係付ける質問変換モジュールについて述べる。

このモジュールの持つべき機能とは、利用者の定義したSpatiotemporal OQLを、Universe OQLに変換するときに質問の条件節をUniverseでの表現に置き換えることである。例えば、3次元空間を自由に動く物体MOと衝突する物体の集合を求める時、条件節ではSpatiotemporal OQLの場合collide()という述語を用いるが、Universe OQLにおいてはintersect()という述語を用いる。このように使用する述語を変換することがひとつである。

それに加えて、条件節に現われる図形とその動きをUniverseでの表現に置き換えることも備えるべき機能のひとつである。例えば時間的に変化する領域に関するrange queryを考えると、領域の動きによってできる軌跡をUniverseモデルにおける4次元図形として単体複体を使って表現する必要がある。そしてこの単体複体表現された4次元図形に関するintersection queryに変換する。

それ以外には、例えば条件節に時間に関する条件を含まない空間質問が与えられたときにその質問をどのように変換するかも考える必要がある。そのような質問をわれわれは時空間的不完全質問と呼ぶが、これをUniverse OQLでどのように取り扱うかという態度がここに影響を及ぼす。時空間的不完全質問を取り扱うときにわれわれは、例えば「時間的な制約が与えられていない」ということを、「すべての時間に関する」ことであると解釈し、条件節を4次元図形に変換する。例えば時刻に関する条件のない

range query の場合, rangeとなっている図形を時間にそって「引き延ばす」ことによって4次元図形を定義する。

## 6. おわりに

われわれが研究・開発を行なっている時空間データベースシステムHawksでの時空間質問をどのように表現するべきかについて述べた。ここでは次のアプローチをとった。それは以下の通りである。

- (1) まず利用者にはSpatiotemporal OQL という時空間関係を抽象的に記述できる質問言語を用いて質問を定義してもらう。
  - (2) そのように定義された質問を, 質問変換モジュールによってUniverse OQL での表現に直す。その際に条件節に現われる述語や時空間オブジェクトの表現をUniverseでのものに改める。
  - (3) 検索結果はUniverse表現された4次元図形であるので, 利用者の必要に応じて表現形式を改める(例えば3次元画像で, あるいは動画で)。
- そのうち今回は上の(1)と(2)について述べた。
- (3)についても, 今後の課題として研究を行なっていく必要がある。

それ以外の課題として, ここで考えた質問表現を用いて現実的なアプリケーションを記述することがあげられる。この研究においてはオブジェクトの時空間的な側面に注意を集中して行ってきたが, 今後は非時空間的な側面との関係も考慮して質問の表現・処理ができるようにしていく必要がある。

また, 質問を処理するときにはindexを用いるが, これとの関係についても考える必要がある。われわれのシステムHawksでは現在, 4次元のrange query を処理するためのindexを実装しているが[9], それ以外の質問を効率よく処理するためにどのようなindexを用いればよいかや, そのindexにおいてどのように判定をおこなうかについても検討する予定である。

## 謝辞

この研究は一部, 文部省科学研究費補助金重点領域研究(課題番号08244105)の補助を受けている。

## 参考文献

- [1] Del Bimbo, E. Vicario, and D. Zingoni: Symbolic Description and Visual Querying of Image

Sequences Using Spatio-Temporal Logic, IEEE Trans. Knowledge and Data Eng., 7(4), pp.609-622, 1995.

- [2] A. P. Sistla, O. Wolfson, S. Chamberlain, and S. Dao: Modeling and Querying Moving Objects, Proc. 13th Int. Conf. Data Engineering, pp.422-432, 1997.

- [3] 黒木進, 牧之内顕文: 単体複体を用いた時空間データモデルUniverseの設計, 情報処理学会データベースシステム研究会資料109-37, 1996.

- [4] S.Kuroki, K. Ishizuka, and A. Makinouchi: Towards a Spatio-Temporal OQL for the Four Dimensional Spatial Database System Hawks, Int. Conf. and Workshop Database and Expert Systems Applications, 1997(to appear).

- [5] R. G. G. Cattell(ed.): The Object Database Standard: ODMG-93, Release 1.2, Morgan Kaufmann, 1996.

- [6] 山本完, 金子邦彦, 有次正義, 牧之内顕文: オブジェクトデータベース「出世魚」ODMG対応, 情報処理学会第53回全国大会論文集, 1996.

- [7] 山本完, 王国仁, 金子邦彦, 牧之内顕文, 有次正義: 分散永続プログラミング言語INADA/ODMGの実装, 科学研究費重点領域研究「高度データベース」松江ワークショップ, pp.372-379, 1996.

- [8] M. J. Egenhofer, A. U. Frank, and J. P. Jackson: A Topological Data Model for Spatial Databases, Proc. 1st Symp. SSD'89, pp.271-286.

- [9] H.Horinokuchi, S. Kuroki, and A. Makinouchi: Design and Implementation of R\*-tree for Spatio-temporal Index, Proc. IPSJ Int. Symp. Next-Generation Information Systems and Technologies, 1997 (to appear).