トポロジー暗示型時空間情報管理システム STIMS におけるトポロジーデータのキャッシュ方式

野中 秀樹[†,☆] 大沢 裕[††]
笠原 直[†] 郭 薇[†]

地理情報システム（GIS）は，位置情報によって参照されるデータを管理するためのシステムである．しかし近年，これらのデータに時間情報を持たせた，時空間データを管理可能な GIS，すなわち時空間情報管理システムが注目されている．現在，この時空間情報管理システムの実現例は少なく，そのほとんどでトポロジーを保持するための方式として，トポロジー暗示方式が適用されている．トポロジー暗示方式は，地図オブジェクトが持つ座標値を用いて，トポロジーを暗示的に記述する方式であり，トポロジーが必要なときには演算により復元する．この方式は，データ構造が単純で，時空間情報管理システムへの適用に有利であるが，トポロジー復元のための演算コストが大きいという短所も持つ．この演算コストを小さくするための方式として，トポロジーキャッシュ方式が提案されている．しかし，その方式では，キャッシュデータは時間情報を持たないため，時空間情報管理システムへ適用することができない．そこで本稿では，トポロジーキャッシュにおけるキャッシュデータに時間情報を持たせ，それを管理する方式を提案する．さらに本方式を，筆者らが開発中の時空間情報管理システム STIMS へ適用し，実験によりその評価を行う．

A Cache Method for a Spatio-Temporal Information Management System

Hideki Nonaka,[†,☆] Yutaka Ohsawa,[††] Nao Kasahara[†] and Wei Guo[†]

Geographic information system (GIS) is a system to manage the data which is referred by position in 2 or 3 dimensional space. Yet recently, a novice GIS which can handle spatio-temporal data draws the attention. Such system is called spatio-temporal information management system. However actual spatio-temporal information management system is still not in general. Most of the actual spatio-temporal information management system adopt implicit topology description model as a method to describe topology. In this method, topologies are described implicitly by referring coordinates of geographic objects. Then, when topologies are required, they are restored by spatial operations. This method has simple data structure, and it is considered to be advantageous to spatio-temporal information management system. However, the method requires large operation costs to restore topology. On the other hand, topology cache has been proposed to overcome this defect, neverthless it is not considered the situation where topology have duration. So spatio-temporal information management system cannot adopt this method directory. In this paper, two kinds of topology cache method suitable for spatio-temporal information management system are proposed. Furthermore these methods are applied to actual spatio-temporal information management system, STIMS. Then, these methods are evaluated through some experiments.

† 埼玉大学大学院理工学研究科情報数理科学専攻
Department of Information and Mathematical Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Saitama University
†† 埼玉大学工学部情報システム工学科
Department of Information and Computer Sciences, Saitama University
☆ 現在，アジア航測株式会社総合研究所
Presently with Asia Air Survey, Co. Ltd.

1. はじめに

地理情報システム（GIS）は，2次元平面，または空間内の位置によって参照されるデータ（地図オブジェクト）を扱うシステムとして発展してきた．GIS の重要な機能として，空間解析や空間検索があげられる．これらの演算を正確に行うためには，位相構造（トポロジー）が非常に重要である．従来の GIS では，地図

オブジェクトに与えられた ID やポインタを用いてそれらを結び付け合うことにより，トポロジーを明に記述してきた．この方式をトポロジー明示方式と呼ぶ．

一方，近年位置だけでなく時間によっても参照されるデータを扱えるシステム（時空間情報管理システム）が必要とされている．時空間情報管理システムでは，地図オブジェクトにその位置形状を示す座標値データのほかに，その存在（有効）期間を示す時間データが与えられる．これにより現在の世界における空間演算・検索だけでなく，過去の状態を復元しての空間演算・検索を行うこともできる．このようなシステムは，たとえば設備管理監視システムにおける工事履歴の管理や，土地台帳における土地区分の分割・合併，土地利用変化の管理などに利用される．

時空間情報を管理するためのデータ構造としては，2 次元の空間データ管理構造と差分記述ファイルを組み合わせて管理する方式[1]や，3 次元空間に時間軸を加えた 4 次元データとして扱う方式[2]など，いくつかの方式が提案されている．一方，時空間情報管理システムの実現例には筆者らが開発中の STIMS[3]のほか，ATOM[4]，DiMSIS[5]などがあるが，その種類はまだ少ない．

これらの時空間情報管理システムでは，位相構造（トポロジー）の記述にトポロジー暗示方式[4)~6)]が適用されている．これは，そのデータ構造が単純であり，トポロジーが利用時に変化するような場合への適用に有利であるためである．トポロジー暗示方式では，地図オブジェクトの持つ座標値データを用いてトポロジーを暗示的に記述し，トポロジーが必要なときには演算によりそのつど求める．そのため，トポロジー明示方式に比べて計算コストが大きい．逆に，トポロジーを演算でそのつど求めることにより，オブジェクトごとの時間管理も可能となっている．

このトポロジー復元にかかる演算時間を短縮するための方式として，トポロジーキャッシュ[7]が提案されている．これは，一度復元されたトポロジーをメモリ上にキャッシュしておき，次にそれが必要なときにはキャッシュされたデータを利用することで，トポロジー復元にかかる時間を短縮する方式である．この方式により，トポロジー暗示方式における演算時間が大幅に短縮されることが示されている．しかし，時空間情報管理システムのような，任意の時点を指定し，その時点での「世界」において空間演算を行う場合のように，設定時刻によりトポロジーが変化する場合に有効となるキャッシュデータの管理方式については，まだ検討されていない．

そこで本稿では，現在筆者らが開発中の時空間情報管理システム STIMS（Spatio-Temporal Information Management System）を対象として，トポロジーキャッシュの管理手法について述べる．以下では，まず 2 章においてトポロジー暗示型時空間情報管理システム STIMS を概説し，3 章では，すでに提案されているトポロジーキャッシュ法の概略を述べる．4 章では，本稿で提案する時空間情報管理システムにおけるトポロジーキャッシュデータの管理方式について述べる．次に 5 章において，提案手法の評価実験とその結果，考察について述べる．最後に 6 章において本稿のまとめと今後の課題について述べる．

2. トポロジー暗示型時空間情報管理システム STIMS

STIMS は，従来の GIS が扱ってきた 2 次元（または 3 次元）の位置情報に，時間軸を加えた時空間データを扱うことができる地理情報システムである．STIMS は，地方自治体における日々業務を対象として開発を行った．STIMS の特徴を以下にあげる．

- 時空間データを管理可能
- トポロジーの記述方式としてトポロジー暗示方式を適用
- 地図データの編集機能を持ち，その編集履歴をトランザクションにより管理
- 外部 RDBMS を用いた属性管理
- 空間データ管理構造に GBD 木を採用

各機能の詳細は別文献[3),8)]に譲り，以下ではトポロジー暗示方式と STIMS における時間情報管理について述べる．

2.1 トポロジー暗示方式

STIMS では，トポロジーを保持する方式として，トポロジー暗示方式を採用している．これは，従来の GIS で用いられてきたトポロジー明示方式では，時空間データの管理がきわめて複雑なものとなる．そのため，STIMS と同様に時空間データを扱うことができるシステム，ATOM や DiMSIS でも，トポロジー暗示方式が適用されている．時空間データを管理するうえで，トポロジー暗示方式が有利な理由は次に述べるとおりである．

トポロジー明示方式では，トポロジーを保持するために，各地図オブジェクトの ID やポインタが用いられ，トポロジーが明に記述されている．トポロジーを明示的に記述するデータ構造としては，アークノードデータ構造[9]や DIME 構造[10]がある．たとえば，ネットワークトポロジーについて考えてみる．**図 1** のよう

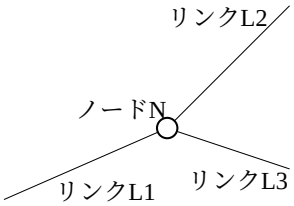

図 1 ネットワークの例
Fig. 1 Example of network.

にノード N においてリンク L1，L2，L3 が接続しているとき，多くの GIS で採用されているアークノードデータ構造では，ノード N はリンク（アーク）L1，L2，L3 の ID（またはポインタ）を持つ．また，リンク L1，L2，L3 もそれぞれ端点のノードとしてノード N の ID（またはポインタ）を持つ．

このようにトポロジー明示方式では，ID やポインタなどを用いて各オブジェクトが密に結び付き合っている．そのため，ID やポインタをたどることによって容易に（かつ高速に）トポロジーを取得することができる．その反面，地図オブジェクトが削除や追加されたりしたときには，それに関係するトポロジーデータをすべて更新しなければならない．時空間情報管理システムでは，このような更新履歴をすべて管理する必要があるため，トポロジー明示方式を用いて時空間情報システムを実現することが困難となっている．

一方，トポロジー暗示方式では，トポロジーを地図オブジェクトが持つ座標値により保持する．たとえば，ネットワークのトポロジーを保持する場合，リンクの端点の座標値を一致させる．図 1 のようなネットワークでは，リンク L1，L2，L3 の端点の座標値としてノード N の座標値を持つ．このように地物の種類が同じであり，かつ端点の座標値が同じリンクどうしは，その位置において互いに接続すると見なされる．トポロジーが必要なときには，これを演算により復元する必要がある．たとえば，図 1 において，ノード N でリンク L1 と接続するリンクを求めるためには，ノード N の座標値をキーとした空間検索を行う．この処理をノードの展開と呼ぶ．もう少し厳密には，このノードの展開処理に際しては,「主題」という概念が指定され，その主題に属すリンクを対象として実行される．たとえば道路網における最短経路探索を実行する際には，高速道路を含めて最短経路を求めたい場合や，高速道路は含めず，一般道のみでの最短経路を求めたい場合もある．前者の場合には，高速道路が一般道とともに主題に含まれ，後者の場合には一般道のみが主題に含まれることになる．

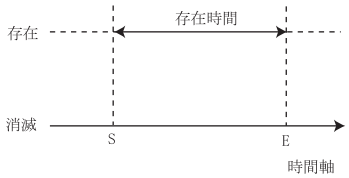

図 2 STIMS における時間モデル
Fig. 2 Time model on STIMS.

このように，トポロジー暗示方式では各地図オブジェクトの位置・形状（座標値データ）を用いてトポロジーを暗示的に保持する．そのため，トポロジーが動的に変化する場面，たとえば時空間情報管理システムへの適用に有利である．その一方で，トポロジーが必要なときには，これを演算により復元しなければならないため，トポロジー明示方式に比べて演算コストが大きくなる．

2.2 時間モデル

STIMS では，地図オブジェクトに時間情報を持たせることにより時間管理を行う．地図オブジェクトは，2 つの時間情報を持つ（**図 2**）．地図オブジェクトが持つ時間は生成時刻 S と消滅時刻 E である．このとき，地図オブジェクトが存在する期間（存在期間）は，S から E までの間となる．

3. トポロジーキャッシュ

前章において述べたとおり，トポロジー暗示方式には空間演算時の演算コストが大きいという短所がある．そこで，一度復元したトポロジーをメモリ上にキャッシュしておき，次にこれが必要なときにはキャッシュデータを利用することにより，トポロジー復元のための演算コストを小さくする方式（トポロジーキャッシュ）が提案されている[7]．トポロジーキャッシュは，トポロジーを復元するための最も基本的な演算であるノードの展開を高速に行うための方式である．以下では，ノードの展開処理と，トポロジーキャッシュについて述べる．

3.1 ノードの展開

ノードの展開とは，あるノードに接続し，同じ主題に属するすべてのリンクを取得する処理であり，ネットワーク解析や領域形状復元の演算で用いられる．この処理は次の手順で行われる．まず空間データベース中で，展開するノードを外接長方形内に含むようなリンクを求める．この処理は，R 木[11]や GBD 木[12),13]といった空間データ管理構造により高速に行われる．次に，これらのリンクの 1 つ 1 つについて，指定された位置に属し，かつ片端点の座標値が展開するノード

の座標値と一致するかどうかを調べる．ここで端点の座標値が一致するリンクが，ノードに接続するリンクである．

3.2 トポロジーキャッシュ

トポロジーキャッシュを用いて，ノードの展開を高速に行う方式について述べる．上述のように，ノードの展開処理では，そのノードに接続するリンクのリストが得られる．そこで，あるノードが展開されたとき，そのノードの座標値とそこに接続するリンクのポインタのリストの組（これをトポロジーデータと呼ぶ）を，メモリ上にキャッシュしておく．次に再びこのノードが展開されるときには，空間検索を行わずキャッシュデータを参照することにより，そのノードに接続するリンクを取得する．ここで，キャッシュデータへのアクセスは，ノードの座標値をキー値とするハッシュにより行う．また，キャッシュされたデータ量が，トポロジーキャッシュのサイズを超えた場合，キャッシュデータの破棄を行う必要がある．このとき，破棄するデータの選択アルゴリズムには，LRU アルゴリズム[14]を適用する．

トポロジーキャッシュを使ったとき，ノード N の展開手順は次のようになる．

(1) N の座標値をキーとしてトポロジーキャッシュにアクセスし，N のトポロジーデータ C_N がキャッシュされているかどうかを調べる．キャッシュへのアクセスにはハッシュを用いる．
(2) C_N がキャッシュされていれば，処理はここで終了する．
(3) N を端点とするリンクを，空間検索により求める．
(4) 検索結果より，C_N を作成し，これをキャッシュする．
(5) キャッシュされたデータサイズがトポロジーキャッシュのサイズを超えたとき，LRU アルゴリズムにより破棄すべきキャッシュデータを選択し，これを破棄する．

4. 時系列トポロジーキャッシュ

前述のトポロジーキャッシュを用いることにより，トポロジー暗示方式を適用した GIS において演算速度が大幅に向上することがすでに示されている[7]．しかし，時空間情報管理システムでは，トポロジーは利用時に設定した興味対象時間により変化する（ここで興味対象時間とは，いつの時点でのデータを対象として空間演算を行うかを指定する時間である）．よって，時空間情報管理システムでトポロジーキャッシュを利用するためには，トポロジーキャッシュデータにもその有効期間を示す時間情報を持たせ，それを管理する必要がある．

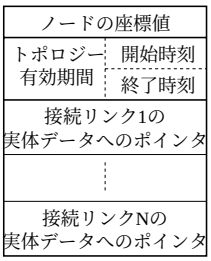

図 3 トポロジー有効期間保持型におけるキャッシュデータ
Fig. 3 Cached data of the method having node lifetime.

本稿では，地方自治体における GIS 利用を想定している．そこには地積管理や上下水道などの設備管理，道路管理など，理想的には日々業務の中で地図の修正が行えると都合がよい対象が多い．本システムで対象とする，追加・削除などにともなうデータの動きは年間にたかだか 5%程度を想定している．

本稿では，次の 2 つの方式を示す．1 つは，注目時間において，あるノードのトポロジーが維持される期間を求め，これをキャッシュデータの有効期間として持たせる方式（これをトポロジー有効期間保持型と呼ぶ）である．2 つ目は，トポロジーキャッシュデータに含まれるすべてのリンクの存在期間をキャッシュデータに持たせる方式（これをリンク存在期間保持型と呼ぶ）である．以下では，これら 2 つの方式について述べる．

4.1 トポロジー有効期間保持型

トポロジー有効期間保持型時系列トポロジーキャッシュは，ある時刻 T においてノード N が展開されたとき，T における N のトポロジーデータをキャッシュする．このとき，トポロジーデータに加えて T と同じトポロジーが維持される期間（トポロジーの有効期間）をデータに付与する．すなわち本方式では，トポロジーキャッシュデータはノードの座標値とトポロジーの有効期間，そのノードに接続するリンクデータへのポインタから構成される（**図 3**）．トポロジーの有効期間は，その開始時刻と終了時刻からなる．リンクデータへのポインタは，リンクの実データが記録されている位置を示すデータであり，STIMS では実データが記録されているファイルの識別番号と，そのファイルにおける実データの位置（ファイルポジション）の組である．

トポロジー有効期間は，1 つの復元されたトポロジーがまったく変化しない期間であるといえる．トポ

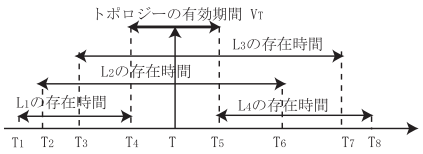

図 4 トポロジー有効期間
Fig. 4 Lifetime of a node.

ロジー有効期間を求める手順を，以下に示す．

(1) N に接続するすべてのリンクを，時刻 T において存在するもののグループ（GE）と，存在しないもののグループ（GNE）に分ける．

(2) GNE に含まれるリンクを，時刻 T 以前に消滅したもののグループ（GNE_e）と，T 以降に生成されたもののグループ（GNE_l）に分ける．GNE に含まれるリンクがない場合，生成時刻 S_1 を $-\infty$，消滅時刻 E_1 を $+\infty$ として (5) に進む（$-\infty$ は生成時刻不明を表し，$+\infty$ は消滅時刻未確定を表す）．

(3) GNE_e に含まれるリンクのうち，最も遅く消滅したものの消滅時刻を S_1 とする．

(4) GNE_l に含まれるリンクのうち，最も早く生成されたものの生成時刻を E_1 とする．

(5) GE に含まれるリンクのうち，最も遅く生成したものの生成時刻を S_2 とし，最も早く消滅するものの消滅時刻を E_2 とする．

(6) 生成時刻 S_1, S_2 を比較して，遅い方をトポロジー有効期間の開始時刻とする．また，消滅時刻 E_1, E_2 を比較して，早い方をトポロジー有効期間の終了時刻とする．

たとえば，接続するリンクが L_1，L_2，L_3，L_4 であり，これらのリンクの存在期間が**図 4** であるような，ノード N について考える．このとき，GE には L_2，L_3 が含まれ，GNE には L_1，L_4 が含まれる．また，GNE_e には L_1，GNE_l には L_4 が含まれることになる．したがって，S_1 は L_1 の消滅時刻 (T_4)，E_1 は L_4 の生成時刻 (T_5) となり，S_2 は L_3 の生成時刻 (T_3)，E_2 は L_2 の消滅時刻 (T_6) となる．S_1 と S_2 を比較した場合，S_1 の方が遅いので，トポロジー有効期間の開始時刻を S_1（すなわち T_4）とする．E_1 と E_2 を比較した場合，E_1 の方が早いので，トポロジー有効期間の終了時刻を E_1（すなわち T_5）とする．このようにして，トポロジー有効期間 V_T を求めることができる（図 4）．このとき設定時間 T とトポロジー有効期間 V_T を比較して，トポロジーが有効であると見なすのは $[T_4, T_5)$ の範囲とする．

トポロジー有効期間保持型トポロジーキャッシュを用いたとき，時刻 T においてノード N を展開する手順を以下に示す．

(1) N の座標値をキーとしてトポロジーキャッシュへアクセスし，ノード N のトポロジーキャッシュデータが存在するかどうかを調べる．このとき，N のトポロジーキャッシュデータには，トポロジー有効期間が異なる複数のデータが存在する場合がある．

(2) N のキャッシュデータが存在したとき，時刻 T がキャッシュデータのトポロジー有効期間内かどうかを調べる．有効期間内であれば，それが時刻 T における N のトポロジーデータであるので処理を終了する（このデータを利用する）．

(3) 該当するトポロジーデータが見つからなかった場合，時刻 T においてノード N に接続するリンクを空間検索により取得する．この手順は次のとおりである．

  (a) 得ようとするトポロジーの主題に属するすべての地図オブジェクトの中から，MBR が N を内包するようなリンクの集合 V_1 を求める．

  (b) V_1 のうち，時刻 T において存在するリンクの集合を V_2 とする．

  (c) V_2 のうち，片端点の座標値が N に一致するものが，時刻 T において N に接続するリンクである．

(4) 時刻 T におけるノード N の展開結果から，図 3 に示されるキャッシュデータ $C_{(N:T)}$ を作成する．

(5) $C_{(N:T)}$ をトポロジーキャッシュに追加する．

(6) キャッシュ容量があふれた場合には，LRU アルゴリズムにより破棄すべきキャッシュデータを選択し，それを破棄する．

4.2 リンク存在期間保持型

リンク存在期間保持型時系列トポロジーキャッシュでは，存在期間に関係なくノードに接続するリンクのポインタリストをキャッシュする方式である．本方式では，キャッシュデータにアクセスされた時点で，各リンクの存在時間を参照し，そのリンクが指定された時刻 T において存在するかどうかを逐次確認することにより，キャッシュデータが有効であるか調べる．すなわち，利用時に有効なリンクのみからなるトポロジーを作成し，利用する．キャッシュされるデータの内容を**図 5** に示す．

リンク存在期間保持型トポロジーキャッシュを用いたときの，時刻 T においてノード N を展開する手順

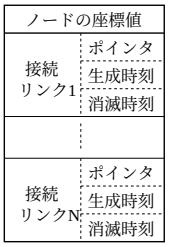

図 5 リンク存在期間保持型におけるキャッシュデータ
Fig. 5 Cached data of the method having link lifetime.

を以下に示す．

(1) N の座標値をキーとしてトポロジーキャッシュにアクセスし，ノード N のトポロジーキャッシュデータ C_N が存在するかどうかを調べる．

(2) C_N が存在するとき，そこに含まれるすべてのリンクについて，時刻 T に存在するリンクかどうかをチェックする．このうち，時刻 T において存在するリンクのみから構成されるトポロジーが求めるトポロジーである．以上で処理は終了となる．

(3) C_N が見つからなかったとき，ノード N に接続するリンクを空間検索により取得する．この空間検索時には，時間情報にかかわりなく，ノード N の座標値を端点として持つリンクの集合 V_N を求める．この手順は次のとおりである．

(a) すべての地図オブジェクトの中から，MBR が N を内包するようなリンクの集合 V'_N を求める．

(b) V'_N のすべてのリンクについて，片端点の座標値が N の座標値に一致するかどうかを調べる．一致するリンクの集合が V_N となる．

(4) 空間検索の結果 V_N より，ノード N のトポロジーキャッシュデータ C_N を作成する．

(5) C_N をトポロジーキャッシュに追加する．

(6) キャッシュ容量があふれたときには，LRU アルゴリズムにより破棄すべきキャッシュデータを選択し，それを破棄する．

5. 実　　験

前章では，時空間情報管理システムにおいてトポロジーキャッシュデータの時間情報を管理するための手法として，次に示すの 2 つの方式について述べた．

方式 A トポロジー有効期間保持型トポロジーキャッシュ

方式 B リンク存在期間保持型トポロジーキャッシュ

これら 2 つの方式の性能を評価するため，最短経路探索にかかる時間がどの程度向上するかを測定する実験を行った．本章では実験の方法と結果，その考察を述べる．最短経路探索は，GIS においてトポロジーデータを必要とする代表的な演算である．

5.1 実験方法

STIMS 上で最短経路探索を行ったとき，方式 A，B により処理時間がどの程度短縮されるかを測定する実験を行う．本実験では，キャッシュサイズが S のときのトポロジーキャッシュによる性能向上率 I_S（$= T/T'$：T はキャッシュを用いないときの処理時間，T' はキャッシュを用いたときの処理時間）と，キャッシュヒット率 H_S を，以下に述べる方法により測定する．

(1) 4 章で述べた興味対象時間を変化させても経路が存在することが保証される 2 地点を調査し，この組合せを 11 組作成した．また，これらの 2 地点間について，トポロジーキャッシュを用いずに最短経路探索を行い，これにかかる時間を測定する．

(2) (1) で選択した 2 地点間の最短経路探索を，トポロジーキャッシュを用いて連続して行い，それぞれの経路探索にかかる時間とキャッシュヒット率を測定する．ただし，1 回目の経路探索を行うとき，キャッシュデータはなく，経路探索を行っていく過程で徐々に蓄積されていくものとする．

(3) 2〜11 回目の測定結果から性能向上率の平均を求める．1 回目の測定結果を除外するのは，1 回目の経路探索は，キャッシュにデータが蓄積されておらず，キャッシュの効果が現れないためである（ただし，2 回目以降の経路探索では，それまでに行われた経路探索において展開されたノードを必ずたどるよう経路を設定したため，キャッシュヒット率が 0%となることはない）．

(2)，(3) の実験においてキャッシュサイズ S を，地図データが記録されたデータファイルサイズ比で 5〜50%の間で変化させて実験を行う．また，1〜11 回目の最短経路探索を，興味対象時間を固定した場合（実験 1）（この際にはトポロジーは変化しない）と，変化させた場合（実験 2）（この場合は，そのつどトポロジーが変化する）について行う．

これらの実験で用いるデータは，数値地図 2500（国土地理院発行）のさいたま市域のデータ（81 図葉）を，STIMS 用データファイルに変換したものである．ここに含まれるオブジェクト数は 284,970 で，データファイルサイズは約 7 Mbyte である．時系列データは擬似

表 1 実験環境
Table 1 Experimental environment.

CPU	Pentinum4（1.5 GHz）
RAM	256 Mbyte
OS	WindowsXP Pro.
Compiler	Visual C++ 6.0

乱数により存在開始時間と終了時間を発生させて作成した．また，時系列データ比（地図中の全オブジェクトのうち，興味対象時間を変化させた期間において変化するものの割合）は 50%とする．

(1) で作成した 2 地点の最短経路上には 139〜348 のノードが存在し，最短経路探索のために展開したノード数は 5,463〜21,916 である．実験 2 では，注目時間を変化させながら経路探索を行っているが，これによりそれぞれの地点間の最短経路が変化している．たとえば，2 地点間の最短経路ノード数は，実験 1 の注目時間において 205 であった区間が実験 2 での注目時間では 252 となり，また 259 であった区間が 139 というように増減している．

最短経路探索には，注目しているノードと終点との直線距離をヒューリスティクスとする A*アルゴリズム[15]を用いた．また，STIMS は C++言語を用いて実装されている．本実験を行った計算機環境を**表 1** に示す．

5.2 実験結果

5.2.1 実験 1（設定時間を一定にする場合）

設定時間を一定にした場合の結果（実験 1）を**図 6**，**図 7** に示す．図 6 はキャッシュヒット率とキャッシュサイズの関係を示している．横軸はキャッシュサイズであり，縦軸はキャッシュヒット率である．図 7 は性能向上率とキャッシュサイズの関係を示している．横軸はキャッシュサイズ，縦軸は性能向上率である．図 6，図 7 において，キャッシュサイズは実験に用いた STIMS オブジェクトデータファイルのサイズに対する割合で示されている．

図 6 に示されるように，両方式ともにキャッシュサイズが増加するに従って，キャッシュヒット率が向上する．ただし，方式 A はキャッシュサイズが 15%のあたりからキャッシュヒット率が 83%程度で飽和している．一方，方式 B ではキャッシュサイズの増大にともない，キャッシュヒット率は緩やかに増加し，キャッシュサイズが 45%程度となったところで，方式 A よりも高いキャッシュヒット率となった．方式 A が少ないキャッシュ容量で高いヒット率を示すのは，1 つのノードに対するトポロジーデータサイズが小さく，より多くのノードのトポロジーデータをキャッシュしているためである．

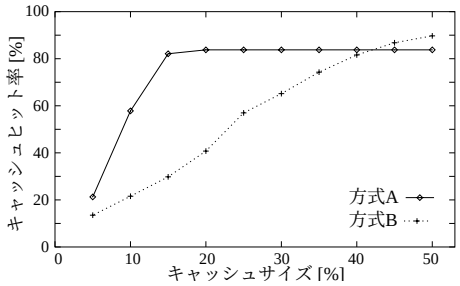

図 6 キャッシュヒット率（実験 1：設定時間一定）
Fig. 6 Cache hit ratio of experiment 1.

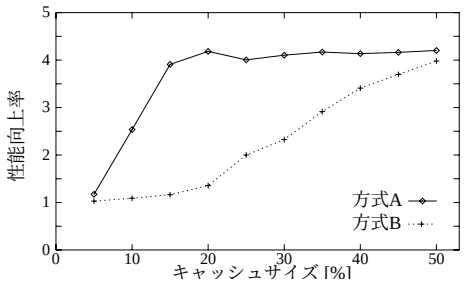

図 7 性能向上率（実験 1：設定時間一定）
Fig. 7 Performance improvement ratio of experiment 1.

性能向上率は，図 7 に示されるとおりキャッシュヒット率と同様の変化を示し，方式 A のキャッシュヒット率はキャッシュサイズが 15%を超えたところで約 4.2 で飽和している．しかし，キャッシュサイズが 45%を超えても方式 A の性能向上率は方式 B に比べて高くなっている．この結果より，キャッシュヒットした場合の演算量は，方式 A の方が少ないことが分かる．

本実験における経路探索にかかる処理時間は，キャッシュを用いずに行ったときは約 9.9 ms であった．一方，キャッシュ容量をオブジェクトデータファイルサイズの 10%としたとき，方式 A を用いたときの処理時間は約 8.6 ms であったのに対し，方式 B を用いたときの処理時間は 9.6 ms であり，方式 A の効果が大きいことが分かる．また，キャッシュ容量を 20%としたときには，方式 A を用いたときの処理時間が約 2.0 ms であったのに対し，方式 B を用いたときの処理時間は 9.5 ms と，その効果の差が大きくなった（5.1 節に示した第 11 回目の測定時間）．

以上の結果より，設定時間が固定された利用場面では，キャッシュサイズの大小にかかわらず方式 A が有利であるといえる．

5.2.2 実験 2（設定時間がランダムに変化する場合）

経路ごとに設定時間をランダムな値に設定した場合

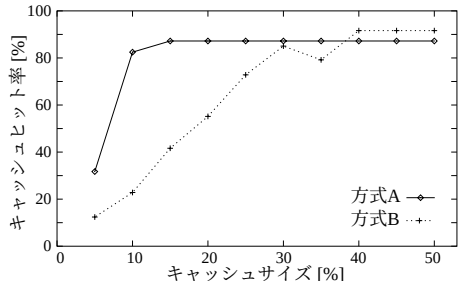

図 8 キャッシュヒット率（実験 2：設定時間はランダム）
Fig. 8 Cache hit ratio of experiment 2.

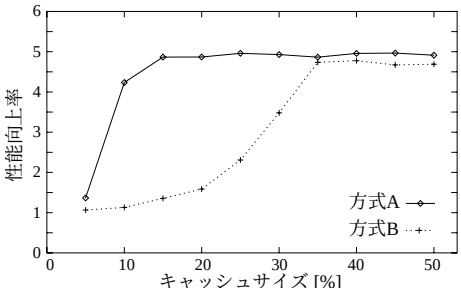

図 9 性能向上率（実験 2：設定時間はランダム）
Fig. 9 Performance improvement ratio of experiment 2.

（実験 2）の結果を**図 8**，**図 9** に示す．図 8 はキャッシュヒット率とキャッシュサイズの関係を，図 9 は性能向上率とキャッシュサイズの関係を示している．図 8，図 9 において，キャッシュサイズは前節と同様に実験で用いた STIMS オブジェクトデータファイルのサイズに対する割合で示されている．

図 8，図 9 に示されているとおり，設定時間をランダムに変化させた場合でも，キャッシュヒット率，性能向上率ともに設定時間が一定の場合と同様に変化している．また，実験 1 の結果に比べて，キャッシュサイズが増えたときのキャッシュヒット率，性能向上率が上昇する割合が大きい．これは，実験に利用したデータでは設定時間を変化させた場合，通行可能な経路の数が限定され，同じノードをたどる確率が高くなっているためであると考えられる．

キャッシュヒット率は，方式 A ではキャッシュサイズが 15%程度において約 87%で飽和している．一方方式 B は，キャッシュサイズが 40%を超えたところで方式 A に比べてキャッシュヒット率が高くなり，約 92%で飽和している．

性能向上率は，方式 A ではキャッシュサイズが 15%を超えたところで約 4.9 で，方式 B ではキャッシュサイズが 35%を超えたところで約 4.7 で飽和している．キャッシュサイズが 40%を超えたとき，キャッシュヒット率は方式 B の方が高い値となっているが，性能向上率は方式 A の方が高い値となっている．この結果より，設定時間がランダムに変化する場合でも，方式 A の方が演算コストが少ないことが分かる．また実験 1 に比べて実験 2 の性能向上率が高い値を示すのは，実験 2 では道路セグメントに対して乱数によりその存在時間を生成したデータを用いているため，実験 1 よりも通行可能な経路の種類が少なくなり，ノード展開を行うノード数も少なくなることから，キャッシュヒット率が若干向上している影響と考えられる．

以上の結果より，設定時間がランダムに変化する場合でも，キャッシュサイズの大小にかかわらず，方式 A が有利であるといえる．

5.3 考　　察

個々のキャッシュデータサイズを比較したとき，方式 A のサイズは方式 B のサイズに比べて小さい．たとえば STIMS の実装では，ノードに接続するリンク数が 4 のとき，方式 A ではデータサイズは 32 byte であるのに対し，方式 B ではデータサイズは 56 byte である．しかし，方式 A では時系列データ比が増加した場合，すなわちトポロジーの変化が多くなったとき，同一のノードに対して有効期間が異なるキャッシュデータが多数存在するようになる．一方，方式 B では，時系列データ比が増加しても，1 つのノードに対するキャッシュデータは 1 つのみであることが保証されている．したがって，一定のキャッシュサイズで考えた場合，注目時間を固定して演算を行うことが多い場面（実験 1）では，方式 A が有利であり，時系列データ比が大きく，注目時間が頻繁に変わるような場面（実験 2）での利用には方式 B が有利であると予想される．

しかし実験 2 の結果では，性能向上率は方式 B よりも方式 A が高い．これは，先述のように使用したデータではリンクの存在期間を乱数により発生させたため，通行可能な経路の種類が限定され，方式 A のキャッシュヒット率が高くなったことと，キャッシュヒットした後の処理に要する演算量が方式 B に比べて方式 A の方が小さいためであると考えられる．

以上のように注目時間が固定されている環境でも，ランダムに変化する環境でも，方式 A が有利であるとの結果が得られた．また，方式 A ではどちらの環境でもキャッシュサイズがデータファイルサイズの 15%程度で，性能向上率が飽和していることから，キャッシュサイズとしてはデータファイルサイズの約 15%準備すれば十分であるといえる．

存在時間を持つ実際の時系列データを入手することは現在きわめて困難であり，実験 2 では存在時間を乱

数により発生させたデータを用いざるをえなかった．今後時系列データ管理が普及し，実際の時系列データが入手できる場合には本実験を実際のデータで行うことが可能となる．

ただし，現在 STIMS が主として対象とする分野である地方自治体における日々業務では，データの更新頻度は小さい．また各種検索，解析，注目時間は現在（最新の状態）に設定して行われることが多いため，時間の動き（トポロジーの変化）は比較的小さいといえる．したがって，STIMS で対象とする分野では，方式 A が有利である．

6. ま と め

本稿では，トポロジー暗示型時空間情報システムにおいて，演算速度を向上させるための手法として，時間データを持ったトポロジーのキャッシュ方式について述べた．この方式として，ノードにおける接続関係の有効期間を保持する，トポロジー有効期間保持型トポロジーキャッシュと，ノードに接続するリンクの存在期間を保持する，リンク存在期間保持型トポロジーキャッシュの，2 つの方式について述べた．これらの方式を，時空間情報システム STIMS に実装し，最短経路探索の実験により評価した．この結果，トポロジー有効期間保持型トポロジーキャッシュが，少ないキャッシュサイズで大きな効果が得られることが分かった．

謝辞 本研究は，一部総務省「戦略的情報通信研究開発推進制度」の補助による．

参 考 文 献

1) 大沢 裕，金 景月：差分記述に基づく時系列データ管理構造，GIS — 理論と応用，Vol.8, No.1, pp.55–62 (2000).
2) 黒木 進，牧之内顕文：単体複製の概念を用いた時空間データモデル Universe の設計，情報処理学会研究会報告 (1996).
3) Ohsawa, Y. and Nagashima, A.: A Spatio-temporal Geographic Information System Based on Implicit Topology Description: STIMS, *Proc. DMGIS2001* (2001).
4) 大伴真吾，大沢 裕：位相構造を持たない地理情報システムに関する考察，第 8 回機能図形システムシンポジウム，pp.55–62 (1997).
5) 畑山満則，松野文俊，角本 繁，亀田弘行：時空間地理情報システム DiMSIS の開発，GIS — 理論と応用，Vol.7, No.2, pp.25–33 (1999).
6) 野中秀樹，大沢 裕：トポロジー暗示型データモデルをベースとする GIS における処理時間に関する実験的考察，GIS — 理論と応用，Vol.9, No.2, pp.17–24 (2001).
7) 野中秀樹，大沢 裕：暗示的トポロジーモデルをベースとする GIS におけるキャッシュ性能，電子情報通信学会技術報告，ITS2000-15, pp.1–6 (2000).
8) 大沢 裕：トポロジー暗示型時空間情報システム STIMS, 埼玉大学工学部情報システム工学科大沢研究室 (2001).
9) Star, J. and Estes, J.: *GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS: An Introduction*, Prentice-Hall (1990). 岡部篤行，貞広幸雄，今井 修（訳）：入門地理情報システム，共立出版 (1992).
10) Burrough, P. and McDonnell, R.: *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press (1998).
11) Guttman, A.: R-tree: A dynamic index structure for spatial searching, *Proc. ACM SIGMOD* (1984).
12) Ohsawa, Y. and Sakauchi, M.: A New Type Data Structure with Homogeneous Nodes Suitable for a Very Large Spatial Database, *Proc. 6th International Conference on Data Engineering* (1990).
13) 大沢 裕，坂内正夫：2 種類の補助情報により検索と管理性能の向上を図った多次元データ構造の提案，電子情報通信学会論文誌，Vol.J74-D-I, No.8, pp.467–475 (1991).
14) 前川 守：オペレーティングシステム，岩波書店 (1998).
15) Nilson, A.: *Problem-solving Methods in Artificial Intelligence*, McGraw-Hill (1971).

(平成 15 年 9 月 20 日受付)
(平成 16 年 1 月 12 日採録)

（担当編集委員 角田 和俊）

野中 秀樹

昭和 49 年生．平成 11 年 3 月埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程修了．平成 14 年 4 月アジア航測株式会社入社．地理情報システム，写真測量に関する研究に従事．

大沢　　裕（正会員）

昭和 51 年信州大学工学部電子工学科卒業．昭和 53 年同大学院工学研究科電子工学専攻修了．昭和 57 年東京大学生産技術研究所助手．平成元年埼玉大学工学部助手．平成 2 年同助教授，平成 10 年同教授．地理情報システム，マルチメディアデータベースの研究に従事．工学博士．昭和 60 年電子通信学会論文賞受賞．

笠原　　直

昭和 53 年生．平成 13 年 3 月埼玉大学工学部情報システム工学科卒業．同年 4 月同大学院理工学研究科情報システム工学専攻博士前期課程入学．現在，在学中．地理情報システムに関する研究に従事．

郭　　薇

昭和 47 年生．平成 8 年 6 月中国華北電力大学電子工学部コンピュータ及び応用専攻卒業．平成 10 年埼玉大学理工研究科情報システム専攻博士前期課程入学．現在，在学中．地理情報システムに関する研究に従事．