

UNA REVISION DE BASES DE DATOS DE OBJETOS EN MOVIMIENTO

Andrea Rodriguez

andrea@udec.cl

Departamento de Ingeniería Informática y Ciencias de la Computacion

Universidad de concepción

A B S T R A C T

Las bases de datos de objetos en movimiento han acaparado una mayor atención científica y práctica al existir dispositivos que permiten la captura continua de la posición de los objetos. Este artículo describe logros y desafíos de bases de datos que manejan información de objetos en movimiento. El énfasis en este artículo son desarrollos en cuanto a modelos conceptuales, modelos lógicos y métodos de acceso. Los desafíos descritos en este artículo resaltan un cambio de enfoque que lleve la modelación y representación de información espacio temporal más allá de ser manejada en base al estado de los objetos, sino que también, en base a los eventos o procesos en que los objetos están envueltos.

I N T R O D U C C I O N

Las bases de datos de objetos en movimiento son casos particulares de bases de datos espacio-temporales que representan y manejan cambios relacionados con el movimiento de los objetos. A diferencia de las aplicaciones espacio-temporales asociadas con fenómenos geográficos donde la identidad de las componentes geográficas puede cambiar en el tiempo, en las bases de datos de objetos en movimiento los objetos mantienen sus identidades pero cambian sus ubicaciones o formas a través del tiempo. Esto es, el aspecto geométrico de un objeto es el que cambia, en lugar del objeto en sí. Dentro de este dominio, las aplicaciones que han logrado un mayor avance como sistemas de información son aquellas en las que los objetos son automóviles, aviones o cualquier objeto con movimientos regulares.

Los DBMSs no están apropiadamente equipados para manipular datos acerca de objetos en movimiento. Una de las razones es que los DBMSs asumen que los datos son constantes a menos que ocurra una modificación explícita, suposición que no es adecuada para manipular datos que cambian continuamente, tales como la ubicación de objetos en movimiento. En los DBMSs tradicionales es difícil especificar consultas acerca de información espacial y temporal. Por ejemplo, una consulta como “recuperar los autos que se intersectarán en una ubicación específica en una hora” no se expresa fácilmente en SQL. Finalmente, la ubicación de un objeto en movimiento es inherentemente imprecisa porque la ubicación almacenada en la base de datos no siempre puede ser la ubicación real del objeto (Wolfston, 2002).

A diferencia de las aplicaciones tradicionales de bases de datos, las aplicaciones de objetos en movimiento involucran los siguientes requerimientos, que son un subconjunto de los requerimientos espacio-temporales (Pfoser & Tryfona, 1998):

- La necesidad de representar objetos, tales como automóviles en movimiento, con una posición en el espacio y una existencia en el tiempo;
- La necesidad de capturar el cambio de posición en el tiempo. Dicho cambio de posición puede ser continuo o discreto;
- La necesidad de representar relaciones espaciales entre objetos en el tiempo; y
- La necesidad de especificar restricciones de integridad espacio-temporales.

A N T E C E D E N T E S G E N E R A L E S

Inicialmente, las investigaciones sobre bases de datos manipulaban tiempo y espacio por separado. Fue sólo en los 90's que las bases de datos espacio-temporales se volvieron un área de investigación activa. La evolución de las bases de datos espacio-temporales y, por ende, de las bases de datos de objetos en movimiento, involucra asuntos de distintos niveles. Por ejemplo, a nivel ontológico, la semántica construida dentro de una base de datos espacio-temporal debe ser acorde con los conceptos ontológicos asociados al espacio y tiempo de objetos en movimiento (Frank, 2003). A nivel conceptual, los requerimientos espacio-temporales se expresan en términos independientes de cualquier modelo particular de datos. El modelamiento conceptual de bases de datos espacio-temporales debe considerar aspectos espaciales y temporales asociados no sólo a objetos, sino que también a relaciones y atributos (Tryfona et al., 2003). A nivel de modelos de datos y lenguajes, los componentes típicos para representar objetos en movimiento son tipos de datos abstractos y clases de objetos que incorporan aspectos espaciales y temporales (Güting et al., 2003).

Los componentes básicos de las bases de datos espacio-temporales son objetos espaciales, que son conjuntos finitos de puntos en un espacio (Pfoser & Tryfona, 2001). Desde una perspectiva temporal, las propiedades y relaciones son consideradas hechos de objetos y, por lo tanto, pueden tener asignados valores de verdad. Existen distintos tipos de aspectos temporales que han sido discutidos tradicionalmente:

- *Tiempo válido* es el tiempo en el que un hecho es cierto en una realidad modelada;
- *Tiempo de transacción* es el tiempo en que un elemento de la base de datos, el cual no es necesariamente un hecho, es parte del estado actual en la base de datos; y
- *Tiempo de existencia* de un objeto se refiere al tiempo en que un objeto existe en la realidad.

En el contexto de los objetos en movimiento, el tiempo válido de un objeto dado es la posición presente, pasada y futura que ha sido registrada. El tiempo de transacción de una posición se refiere a las posiciones actuales y previas que fueron

registradas como presentes en la base de datos. El tiempo de existencia está asociado únicamente con la existencia de un objeto, y no con su posición.

Para el tiempo, diferentes tipos de modelos están dados por puntos de tiempo e intervalos de tiempo. Un punto de tiempo es un instante en el tiempo, mientras que un intervalo de tiempo está definido por un punto de tiempo inicial y uno final. Una base de datos espacio-temporal puede almacenar eventos o estados. Un evento ocurre usualmente en un punto de tiempo específico, sin duración. Por ejemplo, un evento puede ser un choque de automóvil. Por el contrario, un estado tiene duración y está definido para cada punto de tiempo al interior de un intervalo; por ejemplo, el estado de un automóvil que está estacionado.

L O G R O S A L C A N Z A D O S

Esta sección analiza el desarrollo de bases de datos de objetos en movimiento concerniente a modelamiento conceptual, modelos lógicos y lenguajes de consulta, y métodos de acceso espacio-temporal. Este análisis será fundamental para la presentación de tendencias para futuras bases de datos de objetos en movimiento.

Modelamiento Conceptual

El modelamiento conceptual apunta a proporcionar una correspondencia directa entre el mundo real percibido y su representación. Para cumplir este objetivo, los modelos conceptuales deben ofrecer constructores suficientemente poderosos como para expresar un modelo de la realidad. Las propuestas actuales para dichas construcciones incluyen, como mínimo, tipos de objetos, tipos de relaciones y atributos. Para bases de datos espacio-temporales, estos constructores están asociadas a conceptos espaciales o temporales (Tryfona et al., 2003).

La mayoría de los trabajos en bases de datos espacio-temporales se han centrado en modelar el tiempo como un atributo asociado con objetos espaciales; por ejemplo, el cambio de valor en los atributos de un objeto, cambios en la geometría o topología de un objeto. Estos sistemas representan el cambio en los objetos con respecto al tiempo como una colección de objetos temporalmente indexados o como una colección de *snapshots*. Los snapshots representan imágenes de un estado del mundo en instantes de tiempo particulares. Tal representación sólo puede extraer el cambio en los objetos comparando diferentes estados de los objetos. Aún más, los snapshots no permiten saber el momento exacto en el que ocurrió el cambio. Esto ha motivado a que investigaciones recientes consideraren no sólo a los objetos, sino también, a los eventos en el modelamiento de información espacio-temporal (Worboys and Hornsby, 2004; Grenin and Smith, 2004).

La estrategia tradicional para modelamiento conceptual espacio-temporal ha sido extender los modelos existentes con componentes que se adecuan a los requerimientos de información espacial y temporal. Una extensión del modelo entidad-relación (ER) a un ER espacio-temporal (STER) (Tryfona & Jensen, 1999; Tryfona et al., 2003) incorpora aspectos temporales, espaciales y espacio-temporales en la especificación de las componentes. De hecho, el STER permite

modelar casos temporales, espaciales y espacio-temporales de entidades, atributos y relaciones. STER facilita la integración de vistas del espacio basadas en archivos y en objetos (Shekhar *et al.*, 1997), la representación explícita de relaciones topológicas entre objetos, así como la representación con múltiples granularidades.

Una aproximación distinta para modelar bases de datos de objetos en movimiento es considerar una extensión a UML (Price *et al.*, 2000). El UML Espacio-Temporal soporta cambios de los elementos instanciados del UML (objetos, asociaciones e instancias de atributos) para emplearlos en períodos de tiempo asociados o extensiones espaciales (Tryfona *et al.*, 2003). La extensión incorpora un conjunto mínimo de constructores para datos espaciales, temporales y temáticos, que pueden modelar cambios temporales en extensiones espaciales o ubicación, cambios en valores de atributos a través del tiempo o el espacio, y datos compuestos cuyos componentes varían dependiendo del tiempo o la ubicación. Estos constructores pueden entonces ser aplicados a cualquier diagrama de clases o elemento de modelado en UML. Las especificaciones de la semántica espacio-temporal para unidades de tiempo (instantes e intervalos), dimensiones de tiempo y espacio (tiempo válido, de existencia y de transacción), modelos (modelos espaciales de objetos versus modelos espaciales basados en campo) e interpolaciones (discreta, lineal o spline) están dadas en cajas de especificación, que pueden ser asociadas con cualquier icono o combinación usando una etiqueta única de identificación.

Un modelo ER/OO híbrido para aplicaciones con características espacio-temporales, llamado modelado Modelado de Datos de Aplicación con características Espacio-temporales (MADS), fue explorado en (Parent *et al.*, 1999). En este acercamiento, un modelo basado en objetos es extendido con jerarquías predefinidas de tipos de datos abstractos temporales y espaciales, y tipos de datos espaciales complejos para describir las propiedades de los atributos (nombre, cardinalidad, dimensiones espaciales y temporales). Las características espacio-temporales en MADS pueden ser asociadas además con objetos, atributos y relaciones. Las cualidades espaciales de MADS soportan la vista discreta o continua de un espacio, donde el dominio espacial para cualquier información que varía espacialmente es la geometría de cualquier ítem seleccionado. Las relaciones en MADS pueden ser de diferentes tipos, tales como relaciones de tipo “es-un”, relaciones de agregación, relaciones de restricción (espaciales y de sincronización) y relaciones dinámicas (de transición y generación). Este modelo no soporta directamente elementos de datos asociados con muchas extensiones espaciales diferentes. En tales casos, el elemento de datos debe ser modelado como una asociación de objetos espaciales.

Un reciente trabajo propone un Modelo llamado “Geospatial Event Model” (GEM) (Worboys and Hornsby 2004), donde a nivel conceptual se propone un enfoque de modelamiento para dominios geospaciales y que utiliza clases de eventos y clases de objetos como las entidades principales del modelo. En este trabajo se revisan las principales relaciones entre clases de distinto tipo (ej. relaciones entre objetos y eventos) y entre clases del mismo tipo (ej. relaciones entre eventos). Un concepto de interés es el concepto de *setting* espacio-temporal, el cual puede ser definido como una función que acepta un *setting* temporal como entrada y entrega un *setting* espacial como salida. Esto restringe la posibilidad de que un evento u objeto ocupe más de una región espacial en un tiempo determinado.

El único inconveniente que presenta el GEM en su propuesta, es la falta de un ejemplo práctico que tenga relación con eventos naturaleza puramente espacial, como los eventos de merge y split. No obstante, este trabajo establece las bases conceptuales para lograr una futura formalización del GEM.

Modelos de Datos y Lenguajes

Algunas soluciones prácticas para el modelamiento y consulta de objetos en movimiento proponen extensiones basadas en tipos de datos abstractos (ADTs) (Forlizzi et al., 2000; Güting et al., 2000; Güting et al., 2003). Éstas modelan *puntos en movimiento* y *objetos en movimiento* como entidades tridimensionales (2D + tiempo) o de más dimensiones cuya estructura y comportamiento son capturados en un ADT. Sin embargo, diseñar tipos y operaciones para representar objetos en movimiento puede requerir otros tipos además de puntos y regiones en movimiento (Ej.: líneas para modelar trayectorias). Una vez que los ADTs están definidos, pueden ser integrados dentro de bases de datos relacionales u orientadas a objetos, y sus operaciones pueden ser empleadas en consultas.

La aproximación de los ADTs se enfoca en modelar relaciones espaciales y temporales que pueden ser descritas con geometría algebraica. Se incluyen además operaciones adicionales en los ADTs, tales como, cálculo de velocidad y dirección de aceleración. Una extensión de los ADTs que media con el modelamiento de objetos en movimiento es definir predicados espacio-temporales y su composición, para efectos de describir el desarrollo de relaciones entre objetos en movimiento (Güting et al., 2003). Por ejemplo, dos objetos pueden estar a 10 millas de distancia uno del otro, luego se intersectan, y finalmente quedan a 10 millas uno del otro nuevamente.

Las bases de datos basadas en restricciones representan otra alternativa para el modelamiento de datos espaciales y temporales. La idea es usar una formulación matemática para representar datos espaciales y temporales como una colección infinita de puntos que satisfacen fórmulas de primer orden. Los modelos basados en restricciones permiten una representación uniforme de todos los tipos de datos espacio-temporales y soportan lenguajes de consulta declarativos que son adecuados para consultas espacio-temporales complejas (Grumbach et al., 2003).

Existen distintos modelos basados en restricciones para datos espacio-temporales. En el modelo de datos de restricciones original, las restricciones se expresan como ecuaciones o desigualdades lineales (Kanellakis et al., 1995). El modelo de datos de restricciones indefinido (Koubarakis, 1994) extiende el modelo de restricciones original para manipular información indefinida definiendo *mundos posibles* como relaciones de restricción lineales o polinomiales que usan variables para manipular valores vagos o imprecisos. Una extensión del modelo lineal de restricciones emplea geometría diferencial (Su et al., 2001). Dentro de tal aproximación, primitivas simples de velocidad y aceleración junto con operadores vectoriales son suficientes para expresar relaciones acerca de movimientos y relaciones topológicas y temporales entre objetos. Finalmente, otra extensión al modelo de restricciones original trata los datos espacio-temporales como conjuntos de puntos (posiblemente infinitos) en un espacio multidimensional de números

racionales, sin limitación de dimensión del espacio (Grumbach et al., 2003). Estos conjuntos son entonces usados como valores en tuplas.

Métodos de Acceso

Los métodos de acceso tradicionales no soportan datos espacio-temporales; por ende, se han desarrollado diferentes propuestas para soportar simultáneamente tiempo y espacio. Éstas apuntan a indexar objetos que se mueven en un espacio bidimensional (Ghanem & Aref, 2003). La mayoría de estos métodos extienden los métodos de acceso espacial para incluir componentes temporales. Estos métodos se pueden clasificar basándose en el tipo de dato, acerca de objetos en movimiento, con el que tratan. Algunos métodos se enfocan en la recuperación de datos históricos con consultas definidas por *divisiones de tiempo* o *intervalos*. Algunos ejemplos son RT-Tree (Xu et al., 1990), HR-Tree (Nascimento et al., 1999), y sus variaciones. Un segundo tipo de métodos de acceso se enfoca en la trayectoria de los objetos en movimiento, tales como TB-Tree and STR-Tree (Pfoser et al., 2000). Finalmente, algunos métodos son usados para recuperar posiciones futuras de objetos en movimiento basadas en la posición actual y patrones de movimiento (Agarwal et al., 2000, Kollios et al., 1999).

Una clasificación distinta de los métodos de acceso considera la forma en que el tiempo está incluido en la estructura espacial. Considerando el tiempo como otra dimensión, el 3D-Rtree (Theodoridis et al., 1996) trata los datos espacio-temporales como estructuras tridimensionales en las que las ubicaciones espaciales están especificadas, es decir, en el plano-xy, y el eje z es la dimensión del tiempo. Otra estrategia incorpora datos temporales en los nodos de la estructura espacial, tal como el caso del RT-Tree (Xu et al., 1990). Otras aproximaciones toman en cuenta la superposición de datos comunes a través del tiempo, reduciendo así la duplicación innecesaria de los datos. Este es el tipo de aproximación utilizado por HR-Tree (Nascimento et al., 1999) y OLQ (Tzouramanis et al., 2000).

Además de los métodos generales de indexación espacio-temporal, algunos métodos de acceso han sido diseñados tomando en consideración requerimientos específicos de las aplicaciones en las que son usados (Frentzos, 2003, Pfoser et. al, 2001). Dichos requerimientos especiales pueden incluir movimientos dentro de particiones del espacio, movimientos a diferente rapidez, objetos como puntos sin consideraciones de forma, e indexación dinámica cuando se incluyen nuevos objetos en el sistema.

DISCUSION Y DESAFIOS FUTUROS

Las bases de datos de objetos en movimiento constituyen un área importante de la investigación en bases de datos, que se ha vuelto especialmente activa desde los 90's. Aunque han habido avances en los diferentes aspectos involucrados en el diseño de bases de datos de objetos en movimiento, quedan todavía muchos desafíos que también han sido sólo parcialmente abordados o no abordados en

absoluto. A continuación se resumen desafíos para bases de datos de objetos en movimiento:

Estados versus Eventos

La forma tradición de manejar información espacio-temporal es a través de la descripción de los estados de objetos. Este enfoque tiene limitaciones en cuanto no permite identificar qué fue lo que ocurrió, como tampoco, cuando exactamente ocurrió. Más aún, no es tan raro que información de objetos en movimientos sea descrita en término de lo que ocurrió con los objetos, como por ejemplo, un objeto entró o salió de un área and un objeto fue eliminado. Debido a esto, investigación reciente resalta la importancia de manejar no sólo estados sino eventos de los objetos.

Incertidumbre

Las aplicaciones de objetos en movimiento pueden incluir aspectos de incertidumbre y calidad de los datos, así como más restricciones semánticas derivadas.

Observaciones discretas versus movimiento continuo

Los datos vienen como observaciones discretas de un movimiento continuo. Este es aún un tópico que constituye un desafío para aplicaciones de objetos en movimiento que requieren definir la frecuencia de las observaciones.

Falta de estandarización

Todavía hay una gran cantidad de características no estandarizadas siendo usadas para modelar datos espacio-temporales. En este contexto, los creadores de los modelos espacio-temporales deben considerar de qué forma sus modelos pueden ser integrados con ISO TC 211, GML (The Geographic Markup Language) o desarrollos relacionados.

Integración de datos

Como en las bases de datos tradicionales, la integración en aplicaciones de objetos en movimiento presenta aspectos a nivel semántico, lógico y físico de una base de datos.

Granularidad

No sólo los datos espaciales, sino también los datos temporales pueden ser vistos en múltiples granularidades. Dichas granularidades ofrecen múltiples representaciones para datos de objetos en movimiento, las que tienen un impacto en la consistencia e integración de bases de datos.

Consistencia

Manejar la consistencia es usualmente precedida por la definición de restricciones de integridad. No hay estudios que profundicen lo suficiente en la especificación y modelamiento de restricciones espacio-temporales (reglas).

Procesamiento de consultas

El procesamiento de consultas requiere tener en cuenta algo más que índices. En particular, se requiere también optimizadores y algoritmos de combinación.

Evaluación de rendimiento

Se requiere mucha investigación para verificar el rendimiento de métodos nuevos o existentes en escenarios realistas.

Sistemas distribuidos

Las bases de datos centralizadas pueden no ser factibles en la práctica, en cuyo caso se necesitaría una solución distribuida. Dicha solución requiere un sistema para situar, actualizar y consultar objetos en movimiento o trayectorias en repositorios de datos distribuidos.

Data mining de objetos en movimiento

La minería de patrones de movimiento significa detección de periodicidad en el movimiento de objetos. Ésta puede ser cíclica (mensual, diaria) o no, lo cual es muy útil en predicción de movimiento.

Agregación y visualización

El OLAP espacio-temporal involucra el estudio de funciones de agregación, así como también la visualización de datos multidimensionales.

Interfaz de usuario

Aunque existen muchos acercamientos a lenguajes visuales de consulta para bases de datos espaciales, todos ellos permiten consultas sólo de situaciones estáticas. Consultar y visualizar cambios de objetos y de relaciones entre objetos son la meta para un lenguaje espacio- temporal.

REFERENCIAS

- Agarwal, P., Arge, L. & Erickson, J. (2000). Indexing moving points. *Symposium on Principles of Database Systems* (pp. 175-186). ACM Press.
- Di Pasquale, A., Forlizzi, L., Jensen, C., Manolopoulos, Y., Nardelli, E., Pfoser, D., et al. (2003). Access method and query processing techniques. In K. Koukarakis, R. Sellis, A. Frank, S. Grumbach, R. Güting, C. Jensen, N., et al., (Eds.), *Spatio-Temporal Databases: The Chorochronos Approach*, LNCS 2520. (pp. 203-262). Berlin: Springer-Verlag.
- Frank, A. (2003). Ontology for spatio-temporal databases. In K. Koukarakis, R. Sellis, A. Frank, S. Grumbach, R. Güting, C. Jensen, N., et al., (Eds.), *Spatio-Temporal Databases: The Chorochronos Approach*, LNCS 2520. (pp. 9-78). Berlin: Springer-Verlag.
- Forlizze, L., Güting, H., Nardelli, E. & Schneider, M. (2000). A data model and data structure for moving objects databases. *ACM SIGMOD* (pp. 319-330). ACM Press.
- Fretzos, E. (2003). Indexing objects moving on fixed networks. In T. Hadzilacos, Y. Manolopoulos, J. Roddick & Y. Theodoridis, (Eds.), *Advances in Spatial and Temporal Databases*, LNCS 2750. (pp. 289-305). Berlin: Springer-Verlag.
- Grenin, P. & Smith, B. (2004). Snap and Span: Towards Dynamic Spatial Ontology. *Journal of Spatial Cognition and Computation* 4(1):69-103.
- Grumbach, S., Koubarakis, M., Rigaux, P., Scholl, M. & Skiadopoulos, S. (2003). Spatio-temporal models and languages: An approach based on constraints. In K. Koukarakis, R. Sellis, A. Frank, S. Grumbach, R. Güting, C. Jensen, N., et al., (Eds.), *Spatio-Temporal Databases: The Chorochronos Approach*, LNCS 2520. (pp. 177-201). Berlin: Springer-Verlag.
- Güting, R., Böhlen, M., Erwing, M., Jensen, C., Lorentzos, N., Nardelli, E., et al. (2003). Spatio-temporal models and languages: An approach based on data types. In K. Koukarakis, R. Sellis, A. Frank, S. Grumbach, R. Güting, C. Jensen, N., et al., (Eds.), *Spatio-Temporal Databases: The Chorochronos Approach*, LNCS 2520. (pp. 117-176). Berlin: Springer-Verlag.
- Güting, R., Böhlen, M., Erwing, M., Jensen, C., Lorentzos, N., Schneider, M., et al. (2000). A foundation for representing and querying moving objects. *ACM Transactions on Database Systems*, 25, 1-42.
- Kanellakis, P., Kuper, G. and Revesz, P. (1990). Constraint query languages, *ACM Symposium on Principles of Database Systems* (pp.299-313). ACM Press.
- Kollios, G., Gunopulos, D. and Tsotras, V. (1999). On Indexing Mobile Objects, *ACM Symposium on Principles of Database Systems* (pp. 261-272). ACM Press.
- Koubarakis, M. (1994). Database models for infinite and indefinite temporal information. *Information Systems*, 19, 141-173.
- Mokbel, M.F. & Aref, W.G. (2003). Spatiotemporal access methods. *IEEE Data Engineering Bulletin*, 26, 40-49.
- Nascimento, M., Jefferson, R., Silva, J. & Theodoridis, Y. (1999). Evaluation of access structures for discretely moving points. *Workshop on Spatiotemporal Database Management* (pp. 171-188).

- Parent, C., Spaccapietra, S. & Zimányi, E. (1999). Spatiotemporal conceptual models: data structure + space + time. In C. Medeiros, *ACM GIS* (pp.26-33). ACM Press.
- Pfoser, D. & Tryfona, N. (2001). Requirements, definitions and notations for spatiotemporal application environments. *ACM GIS* (pp. 124-130). ACM Press.
- Pfoser, D., Jensen, C. & Theodoridis, T. (2000). Novel approaches in query processing for moving object trajectories, *VLDB Journal*, 395-406.
- Price, R., Tryfona, N. & Jensen, C. (2000). Extended spatiotemporal UML: Motivations, requirements and constructs. *Journal of Database Management*, 11, 14-27.
- Shekhar, S., Coyle, M., Goyal, B., Liu, D.-R. & Sakar, S. (1997). Data models in geographic information systems. *Communications ACM*, 40, 103-111.
- Su, J., Xu, H. & Ibarra, O. (2001). Moving objects: logical relationships and queries. In C. Jensen, M. Schneider & J.T. Vassilis (Eds.), *Advances in Spatial and Temporal Databases*, LNCS 2121. (pp. 3-19). Berlin: Springer-Verlag.
- Theodoridis, Y., Vazirgiannis, M. and Sellis, T. (1996). Spatiotemporal indexing for large multimedia applications. *International Conference on Multimedia Computing and Systems* (pp. 441-448).
- Tryfona, N, Price, R. & Jensen, C. (2003). Conceptual models for spatio-temporal applications. In K. Koukarakis, R. Sellis, A. Frank, S. Grumbach, R. Güting, C. Jensen, N., et al., (Eds.), *Spatio-Temporal Databases: The Chorochronos Approach*, LNCS 2520. (pp. 79-116). Berlin: Springer-Verlag.
- Tryfona, N. & Jensen, C. (1999). Conceptual data modeling for spatiotemporal applications. *GeoInformatica*, 3, 245-268.
- Tzouramanis, T., Vassilakopoulos, M. & Manolopoulos, Y. (2000). Overlapping linear quadrees and spatiotemporal query processing. *The Computer Journal*, 43, 325-343.
- Xu, X., Han J. & Lu, W. (1990). RT-Tree: An improved R-Tree index structure for spatiotemporal database. *4th International Symposium on Spatial Data Handling* (pp. 1040-1049).
- Wolfson, O. (2002). Moving objects information management: The database challenge. *5th Workshop on Next Generation Information Technology and Systems* (pp. 75-89). Berlin: Springer-Verlag.
- Worboys, M. & Hornsby, K. (2004). Objects to Events: GEM, the geospatial event model. In Egenhofer, M., Freksa, C. & Miller, H.(Eds.), *Geographic Information Science*, LNCS 3234. (pp. 327-344). Berlin: Springer-Verlag.