



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΣΕ ΡΕΥΜΑΤΑ ΚΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Εμμανουήλ Κυπραίου

Επιβλέπων : Τιμολέων Σελλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2006



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΣΕ ΡΕΥΜΑΤΑ ΚΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Εμμανουήλ Κυπραίου

Επιβλέπων : Τιμολέων Σελλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 12^η Ιουλίου 2006.

.....
Τιμολέων Σελλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Βασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Νεκτάριος Κοζύρης
Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2006

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Φ. ΚΥΠΡΑΙΟΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

© 2006-All rights reserved

Πρόλογος

Οι πρόσφατες ραγδαίες εξελίξεις στις τεχνολογίες εντοπισμού της γεωγραφικής θέσης αύξησαν το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη εφαρμογών παρακολούθησης κινούμενων αντικειμένων. Οι χρήστες των εφαρμογών αποστέλλουν τη θέση τους περιοδικά και είναι σε θέση να υποβάλλουν πολλαπλά ερωτήματα περιοχής και εγγύτερων γειτόνων. Τα ερωτήματα περιοχής εντοπίζουν τους χρήστες που βρίσκονται εντός μιας συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής, ενώ τα ερωτήματα εγγύτερων γειτόνων εντοπίζουν τους χρήστες που βρίσκονται πλησίον ενός συγκεκριμένου χρήστη. Τα ερωτήματα των δύο τύπων είναι δυνατόν να είναι κινούμενα: η έκταση ή/και το κέντρο των περιοχών μπορεί να μεταβάλλεται, ενώ ο χρήστης του οποίου αναζητούνται οι γείτονες μπορεί επίσης να κινείται. Οι δύο τύποι ερωτημάτων είναι αρκετά κοινοί στη συντριπτική πλειοψηφία των αναγκών των εφαρμογών παρακολούθησης. Για παράδειγμα, ένα ερώτημα περιοχής θα ήταν «Στείλε γραπτό μήνυμα στις συσκευές κινητής τηλεφωνίας των χρηστών υποψήφιων πελατών μου οι οποίοι βρίσκονται γύρω από την επιχείρησή μου ενημερώνοντάς τους για τις νέες προσφορές προϊόντων». Ένα ερώτημα εγγύτερων γειτόνων θα ήταν «στείλε μήνυμα άμεσης βοήθειας στο πλησιέστερό μου ασθενοφόρο».

Αφετηρία της παρούσας εργασίας είναι η παραδοχή ότι η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση μεγάλου πλήθους χρηστών και ερωτημάτων προκύπτει υπερβολικά χρονοβόρα για τα διαθέσιμα τεχνολογικά μέσα και τις παραδοσιακές μεθόδους. Έτσι, για την ανάπτυξη των εφαρμογών λαμβάνονται υπόψη οι αρχές των ρευμάτων δεδομένων, τα οποία υποδέχονται την εισροή πληροφοριών με υψηλό ρυθμό και επιβάλλουν την ειδική μεταχείρισή τους. Επιπλέον, τα ερωτήματα έχει νόημα να αποτιμώνται διαρκώς για μεγάλο χρονικό διάστημα παρακολουθώντας την κίνηση των χρηστών. Έτσι, εισάγεται η έννοια των ερωτημάτων διαρκείας. Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη και υλοποίηση μεθόδων που θα επιτρέπουν σε πραγματικό χρόνο απαντήσεις σε ερωτήματα διαρκείας σχετικά με τη θέση μεγάλου αριθμού κινούμενων αντικειμένων.

Διάρθρωση της εργασίας

Ο τόμος διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια. Τα κεφάλαια 1 έως 3 θέτουν το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης. Τα κεφάλαια 4 και 5 περιγράφουν τις τεχνικές επεξεργασίας των ερωτημάτων περιοχής και εγγύτερων γειτόνων. Στο κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

Το κεφάλαιο 1 αποτελεί μια εισαγωγή στα συστήματα ρευμάτων δεδομένων. Αρχικά επιχειρείται η ανάλυση των ειδικών χαρακτηριστικών των ρευμάτων και των ερωτημάτων διαρκείας, καθώς και των ζητημάτων που προκύπτουν για την υλοποίησή τους. Ακολούθως, περιγράφονται διάφορα αλγοριθμικά ζητήματα καίριας σημασίας για την ανάπτυξη συστημάτων διαχείρισης βάσεων δεδομένων.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται εισαγωγή στις έννοιες των χωρικών και χωροχρονικών δεδομένων. Αναφέρονται οι τρόποι αναπαράστασης των διαφόρων χωρικών αντικειμένων στον υπολογιστή και αναλύεται η ανάγκη δεικτοδότησής τους για την αποδοτική προσπέλασή τους. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται επισκόπηση των κυριότερων μεθόδων χωρικής προσπέλασης σημείων και χωρικών αντικειμένων με έκταση στο χώρο.

Στο κεφάλαιο 3 δίνεται έμφαση στα ζητήματα παρακολούθησης κινούμενων σημειακών αντικειμένων. Εξετάζονται με λεπτομέρεια τόσο η κίνησή τους όσο και οι κυριότεροι τύποι ερωτημάτων σε κινούμενα αντικείμενα. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται

η σύνδεση της παρακολούθησης των αντικειμένων με το μοντέλο των ρευμάτων δεδομένων και προτείνεται η καταλληλότερη μέθοδος χωρικής προσπέλασης καθώς και η υλοποίησή της.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύονται τα ερωτήματα περιοχής ως ερωτήματα διάρκειας επί της τρέχουσας θέσης των αντικειμένων. Παρουσιάζονται οι προτεινόμενες τεχνικές επεξεργασίας και αποτίμησής τους. Υλοποιείται και αξιολογείται πειραματικά η τεχνική της από κοινού επεξεργασίας βασισμένη στην τεχνική του κατακερματισμού για τη δεικτοδότηση των αντικειμένων.

Στο κεφάλαιο 5 αναλύονται τα ερωτήματα *k*-εγγύτερων γειτόνων ως ερωτήματα διάρκειας επί της τρέχουσας θέσης των αντικειμένων. Παρουσιάζονται επίσης οι προτεινόμενες τεχνικές επεξεργασίας τους. Υλοποιείται και αξιολογείται πειραματικά η μέθοδος Conceptual Partitioning Monitoring των Παπαδιά, Μουρατίδη και Χατζηγελευδερίου.

Στο κεφάλαιο 6 εκτίθενται ορισμένα συμπεράσματα, καθώς και πιθανές μελλοντικές προοπτικές της εργασίας.

Ευχαριστίες

Στο τέλος αυτής της πολύμηνης και ιδιαίτερα επίπονης διαδικασίας, που είχε ως αποτέλεσμα την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, αισθάνομαι έντονη την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και μου συμπαραστάθηκαν στην προσπάθειά μου. Καταρχήν, θερμά ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κώστα Πατρούμπα για τη σπουδαία του καθοδήγηση και την εξαιρετικά καθοριστική συμβολή του τόσο στο παρόν σύγγραμμα όσο και στην ανάπτυξη του αντίστοιχου λογισμικού. Επίσης, ιδιαίτερη υποχρέωση και ευχαριστίες οφείλω στον καθηγητή μου κ. Τίμο Σελλή τόσο για την υπεύθυνη επίβλεψή του όσο και για την άρτια και μεθοδική συνεργασία μου με όλη την ομάδα του Εργαστηρίου Συστημάτων Βάσεων Γνώσεων και Δεδομένων του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.

Ευγνωμονώ τους γονείς μου Φιλία και Φραγκίσκο για την αστείρευτη φροντίδα και ανοχή τους σε αυτή την αγχώδη πορεία μου. Δε θα μπορούσα βεβαίως να ξεχάσω τις ευχαριστίες μου στους φίλους μου και ειδικά την Ευφροσύνη για την κατανόηση που μου έδειξαν.

Παρά τον κόπο, το άγχος και την αγωνία μου για την εκπόνηση αυτής της εργασίας, θα ήθελα να πω ότι μάλλον νοιώθω λύπη γιατί τελείωσε το πιο συναρπαστικό κομμάτι της ακαδημαϊκής μου πορείας.

Εμμανουήλ Κυπραίος
Αθήνα
Ιούλιος 2006

Περίληψη

Πυρήνας της εργασίας είναι η μελέτη και υλοποίηση αλγορίθμων που επιτρέπουν απαντήσεις σε πραγματικό χρόνο για πολλαπλά ερωτήματα διαρκείας σχετικά με την τρέχουσα θέση μεγάλου αριθμού κινούμενων αντικειμένων. Ως βασική υπόθεση εργασίας θεωρείται ότι ένα ρεύμα δεδομένων δημιουργείται παρακολουθώντας την κίνηση πολλών σημειακών αντικειμένων, τα οποία ανανεώνουν συχνά το στίγμα τους και το αποστέλλουν τακτικά σε έναν κεντρικό επεξεργαστή. Για την επίτευξη γρήγορων ενημερώσεων, οι θέσεις των αντικειμένων δεικτοδοτούνται σε πλέγμα με βάση την τεχνική του κατακερματισμού. Σε ό,τι αφορά την επεξεργασία, αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι με τη μορφή τελεστών στο ρεύμα, οι οποίοι αποτιμούν πολλαπλά κινούμενα ερωτήματα περιοχής και ερωτήματα k -εγγύτερων γειτόνων.

Ένα ερώτημα περιοχής εντοπίζει διαρκώς τα αντικείμενα που κινούνται σε μια δοσμένη περιοχή, που για λόγους απλοποίησης θεωρείται ορθογώνια. Η αποτίμησή τους γίνεται με την τεχνική της από κοινού επεξεργασίας, βάσει της οποίας τα ερωτήματα που τέμνουν ένα κελί του πλέγματος συνδέονται χωρικά με τα αντικείμενα που βρίσκονται σε αυτό.

Ένα ερώτημα εγγύτερων γειτόνων εντοπίζει τα k αντικείμενα πλησίον ενός δοσμένου σημειακού αντικειμένου. Η αποτίμηση τέτοιων ερωτημάτων έγινε με την μέθοδο της σπειροειδούς διαμέρισης (*Conceptual Partitioning Monitoring*), διαμερίζοντας τον χώρο γύρω από το ερώτημα σε επάλληλες λωρίδες κελιών σε σπειροειδή σχηματισμό. Η τεχνική αυτή εκμεταλλεύεται την ιδιότητα της ελάχιστης απόστασης μεταξύ ενός σημείου και ενός πολυγώνου: αν η ελάχιστη απόσταση του ερωτήματος από ένα κελί ή μια λωρίδα είναι μεγαλύτερη από την απόσταση του k -στού εγγύτερου γείτονα, τότε εντός του κελιού ή της λωρίδας αποκλείεται να υπάρχει άλλο σημείο πλησιέστερα από τον ήδη υπολογισμένο k -στό γείτονα. Η μέθοδος εξετάζει το βέλτιστο σύνολο κελιών και με τη διαμέριση επιταχύνει την αναζήτησή τους.

Οι δύο αλγόριθμοι αποτιμούν αποδοτικά κυμαινόμενο πλήθος ενεργών ερωτημάτων σε κλιμακούμενο πλήθος αντικειμένων. Οι επιδόσεις τους μετρήθηκαν πειραματικά και ανέδειξαν την επάρκειά τους ως προς τον χειρισμό πολλαπλών ερωτημάτων διαρκείας. Οι δύο χωροχρονικοί τελεστές είναι δυνατόν να ολοκληρωθούν σε ένα ευρύτερο ενιαίο μηχανισμό επεξεργασίας, αφού χρησιμοποιούν αποτελεσματικά το ίδιο πλέγμα κατάτμησης του χώρου.

Λέξεις κλειδιά: ερωτήματα διαρκείας, κινούμενα αντικείμενα, ρεύμα δεδομένων, κατακερματισμός, ερώτημα περιοχής, ερώτημα εγγύτερων γειτόνων.

Processing Continuous Queries over Streaming Moving Objects

Abstract

The focus of this thesis is on studying and implementing algorithms for online evaluation of multiple continuous queries over the position of large sets of moving objects. We assume that a data stream is actually created by monitoring numerous moving point objects, which frequently relay their location updates to a central processor. Due to their fast updating rate, all current object locations are hashed into a regular grid. With respect to processing, we deal with multiple moving *range* and *k-nearest neighbour continuous queries*, both developed as *stream operators*.

A range query continuously locates objects lying within a specified area, which in our case is considered a rectangular one. Evaluation of those queries is performed by using a *shared execution* model, such that all queries intersecting a grid cell are spatially joined with the point objects lying in it.

A nearest neighbor query locates the k objects that are currently closest to a specific point object. A method known as Conceptual Partitioning Monitoring (CPM) is used for their effective evaluation, organising the space around the query point into spiral-shaped cell stripes. This method utilizes the property of minimal distance between a point and a stripe: if the minimal distance of the query point from a stripe or cell is greater than its distance from the current k^{th} nearest neighbor, then no other point closer than this k^{th} neighbor is possible to exist. This technique examines the optimum set of cells and accelerates searching by means of the spiral-shaped spatial decomposition.

In terms of scalability, both algorithms manage to efficiently evaluate fluctuating number of active moving queries over increasing numbers of moving objects. Their performance was experimentally evaluated and appears to be sufficient for handling multiple continuous queries. Both spatiotemporal operators can be integrated into a unified stream processing engine, since they can efficiently utilize the same hash-based grid.

Keywords: continuous queries, moving objects, data stream, hashing, range query, nearest neighbor query.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Διαχείριση ρευμάτων δεδομένων.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Το μοντέλο των ρευμάτων δεδομένων.....	2
1.2.1 Ερωτήματα σε ρεύματα δεδομένων.....	3
1.2.2 Η ανεπάρκεια των συμβατικών ΣΔΒΔ.....	4
1.3 Ερωτήματα διαρκείας.....	5
1.3.1 Συνάφεια ερωτημάτων διαρκείας με μηχανισμούς των ΣΔΒΔ.....	5
1.3.2 Κατηγορίες και παράμετροι ερωτημάτων διαρκείας.....	6
1.3.3 Η χρήση παραθύρων στα ερωτήματα διαρκείας.....	7
1.3.4 Γλώσσα υποβολής ερωτημάτων.....	8
1.4 Αλγόριθμοι για ρεύματα δεδομένων.....	9
1.4.1 Μαζική επεξεργασία.....	9
1.4.2 Δειγματοληψία ρεύματος.....	10
1.4.3 Περιλήψεις δεδομένων.....	10
1.5 Επισκόπηση κυριότερων συστημάτων διαχείρισης ρευμάτων δεδομένων.....	12
1.5.1 AURORA.....	12
1.5.2 STREAM (STanford stREam datA Management).....	12
1.5.3 TelegraphCQ.....	12

Κεφάλαιο 2

Διαχείριση χωρικών δεδομένων.....	13
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Αναπαράσταση χωρικών αντικειμένων.....	14
2.2.1 Το αφηρημένο μοντέλο χωρικών δεδομένων.....	14
2.2.2 Αναπαράσταση τιμών και δομές δεδομένων.....	15
2.3 Αναπαράσταση χωροχρονικών αντικειμένων.....	16
2.3.1 Το αφηρημένο μοντέλο κίνησης.....	16
2.3.2 Το διακριτό μοντέλο κίνησης.....	17
2.4 Χωρικά και χωροχρονικά ερωτήματα.....	18
2.5 Χωρικές μέθοδοι προσπέλασης.....	19
2.5.1 Απαιτήσεις στη σχεδίαση χωρικών μεθόδων προσπέλασης.....	20
2.5.2 Χειρισμός αντικειμένων με έκταση στο χώρο.....	21
2.6 Επισκόπηση χωρικών μεθόδων προσπέλασης για σημειακά αντικείμενα.....	21
2.6.1 Τεχνικές βασισμένες σε κατακερματισμό.....	22
2.6.2 Ιεραρχικές τεχνικές.....	24
2.7 Επισκόπηση χωρικών μεθόδων προσπέλασης για ορθογωνικά αντικείμενα.....	27
2.7.1 Μέθοδοι μετασχηματισμού.....	27
2.7.2 Μέθοδοι επικαλυπτόμενων περιοχών.....	28
2.7.3 Μέθοδοι ανεξάρτητων περιοχών.....	30
2.7.4 Μέθοδοι πολλαπλών στρωμάτων.....	31

Κεφάλαιο 3

Παρακολούθηση κινούμενων σημειακών αντικειμένων.....	33
3.1 Εισαγωγή.....	33

3.2	Καταγραφή και αναπαράσταση της κίνησης των αντικειμένων.....	34
3.2.1	Η τροχιά των κινούμενων αντικειμένων.....	34
3.2.2	Κατηγορίες κίνησης.....	34
3.2.3	Αβεβαιότητα στη θέση των κινούμενων αντικειμένων.....	35
3.2.4	Μέθοδοι ενημέρωσης της θέσης και της τροχιάς.....	36
3.3	Ερωτήματα σε κινούμενα σημειακά αντικείμενα.....	37
3.3.1	Ερωτήματα θέσης.....	37
3.3.2	Τοπολογικά ερωτήματα.....	38
3.3.3	Ερωτήματα πλοήγησης.....	38
3.4	Το σύστημα παρακολούθησης ρεύματος κινούμενων αντικειμένων.....	39
3.4.1	Διαχείριση ρεύματος κινούμενων αντικειμένων.....	39
3.4.2	Τα δυναμικά ερωτήματα θέσης και τροχιάς ως ερωτήματα διάρκειας.....	40
3.4.3	Διαχείριση κινούμενων ερωτημάτων.....	41
3.4.4	Αποτίμηση ερωτημάτων και ζητήματα σχεδίασης του συστήματος.....	42
3.4.5	Δομές δεικτοδότησης υπό τις απαιτήσεις του μοντέλου ρευμάτων δεδομένων.....	44
3.5	Σύστημα ερωτημάτων θέσης ως στιγμιαία ερωτήματα διάρκειας.....	46
3.5.1	Σχεδίαση μεθόδου προσπέλασης.....	47
3.5.2	Υλοποίηση μεθόδου προσπέλασης.....	48
3.5.3	Σχολιασμός υλοποίησης της μεθόδου προσπέλασης.....	49

Κεφάλαιο 4

Ερωτήματα περιοχής.....	51	
4.1	Εισαγωγή.....	51
4.2	Τεχνικές επεξεργασίας ερωτημάτων περιοχής.....	52
4.2.1	Από κοινού επεξεργασία.....	52
4.2.2	Σταδιακή αποτίμηση.....	53
4.3	Προτεινόμενες προσεγγίσεις επεξεργασίας ερωτημάτων περιοχής.....	53
4.3.1	Scalable Incremental hash-based algorithm (SINA).....	53
4.3.2	MobiEyes.....	54
4.4	«Από κοινού» επεξεργασία ερωτημάτων περιοχής.....	54
4.4.1	Σχεδίαση.....	55
4.4.2	Υλοποίηση.....	56
4.5	Πειραματικά αποτελέσματα.....	58
4.5.1	Πειραματικές συνθήκες.....	58
4.5.2	Προς αναζήτηση βέλτιστου βαθμού κατάτμησης.....	58
4.5.3	Αξιολόγηση παραμέτρων.....	62

Κεφάλαιο 5

Ερωτήματα εγγύτερων γειτόνων.....	65	
5.1	Εισαγωγή.....	65
5.2	Τεχνικές και μέθοδοι επεξεργασίας ερωτημάτων εγγύτερων γειτόνων.....	66
5.2.1	Προσεγγίσεις για στατικά αντικείμενα.....	66
5.2.2	Προσεγγίσεις για κινούμενα αντικείμενα και ερωτήματα.....	67
5.3	Η μέθοδος Conceptual Partitioning Monitoring.....	69
5.3.1	Δομές τήρησης εγγύτερων γειτόνων.....	69
5.3.2	Υπολογισμός χρήσιμων μεγεθών.....	73
5.3.3	Σπειροειδής διαμέριση του χώρου.....	75
5.3.4	Υλοποίηση σπειροειδούς διαμέρισης.....	78
5.3.5	Ο κύριος αλγόριθμος της μεθόδου CPM.....	79
5.3.6	Επεξεργασία στατικών ερωτημάτων.....	79

5.3.7 Διαχείριση ενημερώσεων για στατικά ερωτήματα.....	81
5.4 Πειραματικά αποτελέσματα.....	82
5.4.1 Πειραματικές συνθήκες.....	82
5.4.2 Προς αναζήτηση βέλτιστου βαθμού κατάτμησης.....	82
5.4.3 Αξιολόγηση παραμέτρων.....	86
Κεφάλαιο 6	
Συμπεράσματα.....	89
Βιβλιογραφία.....	92
Γλωσσάρι.....	95
Εκτενής περίληψη.....	97

Κεφάλαιο 1

Διαχείριση ρευμάτων δεδομένων

1.1 Εισαγωγή

Τα συμβατικά συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων είναι σχεδιασμένα για την αποτελεσματική αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων. Οι χρήστες του συστήματος είναι σε θέση να υποβάλουν ερωτήματα (*queries*) διαφόρων τύπων καθώς και να ζητούν την εκτέλεση διαφόρων δοσοληψιών (λ.χ. εισαγωγή, διαγραφή ή τροποποίηση δεδομένων). Ένα τυπικό Σύστημα Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων (ΣΔΒΔ) παρέχει ακριβείς απαντήσεις στα ερωτήματα που υποβάλλουν οι χρήστες, θεωρώντας ότι όλα τα στοιχεία που χρειάζονται στους υπολογισμούς είναι άμεσα διαθέσιμα. Τέτοιες απαντήσεις είναι πολύ πιθανό να χρειάζονται αρκετό χρόνο μέχρι να προκύψουν, όμως ενδεχόμενες απαιτήσεις εφαρμογών στις οποίες δημιουργείται η ανάγκη για απόκριση σε πραγματικό χρόνο (*real-time response*), δεν μπορούν να καλυφθούν πάντοτε από τα συμβατικά ΣΔΒΔ.

Έτσι, τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να εμφανίζεται μια νέα κατηγορία εφαρμογών, η οποία έχει σημάνει μια νέα εποχή στο πεδίο των βάσεων δεδομένων. Οι εφαρμογές παρακολούθησης (*monitoring applications*) απαιτούν μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση του χειρισμού και επεξεργασίας των δεδομένων, όπου οι προδιαγραφές ενός τυπικού ΣΔΒΔ είναι άκρως περιοριστικές. Πρόκειται για εφαρμογές όπου τα στοιχεία παρουσιάζονται όχι πλέον με τη μορφή στατικών σχέσεων (*relations*), αλλά ως δεδομένα συνεχούς ροής, δηλαδή ως **ρεύμα δεδομένων (*data stream*)**. Έτσι, τα δεδομένα δεν αντιμετωπίζονται πια ως περιεχόμενα κάποιων γνωστών αποθηκευμένων αρχείων, αλλά ως στοιχεία τα οποία δεν είναι γνωστά από την αρχή, αλλά καταφθάνουν στο σύστημα σε πραγματικό χρόνο (λ.χ. ένα τηλεφωνικό δίκτυο ή το Internet). Ένα τέτοιο μοντέλο δεδομένων, επιβάλλει την ριζοσπαστική αναθεώρηση τόσο του κλασικού τρόπου υποβολής των ερωτημάτων, όσο και της επεξεργασίας που οδηγεί στον υπολογισμό των αντίστοιχων απαντήσεων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών θα μπορούσαν να

περιλάβουν συστήματα εποπτείας δικτύων υπολογιστών, διαχείρισης τηλεπικοινωνιακών συνδιαλέξεων, παρακολούθησης της διακύμανσης οικονομικών μεγεθών (λ.χ. χρηματιστηριακοί δείκτες), διαχείρισης δικτύων αισθητήρων, παρακολούθησης της κίνησης πιστωτικών καρτών, στρατιωτικών εφαρμογών κ.α. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, θα μελετηθεί διεξοδικότερα η περίπτωση των συστημάτων παρακολούθησης μεγάλου αριθμού **κινούμενων αντικειμένων (moving objects)** λ.χ. ενός στόλου οχημάτων που κινείται στο οδικό δίκτυο μίας περιοχής.

1.2 Το μοντέλο ρευμάτων δεδομένων

Το ρεύμα δεδομένων μπορεί να θεωρηθεί ως μια ακολουθία στοιχείων που παράγονται διαρκώς από κάποια πηγή και καταφτάνουν στον κεντρικό επεξεργαστή σε πραγματικό χρόνο (online). Για παράδειγμα, πηγές δεδομένων μπορεί να είναι αισθητήρες μέτρησης κάποιου φυσικού μεγέθους, μια αυτόματη ταμειακή μηχανή, μια μετοχή που η διακύμανση της τιμής της παρακολουθείται στο χρηματιστήριο ή ένα κινούμενο αντικείμενο που αποστέλλει περιοδικά τη θέση του κ.α. Τα στοιχεία του ρεύματος είναι δυνατόν να έχουν τη μορφή σχεσιακών πλειάδων, δηλαδή καθορισμένη δομή (λ.χ. τα πεδία μιας τηλεφωνικής συνδιάλεξης, όπως διάρκεια, ταυτότητα καλούντος κτλ). Όμως, αυτές οι πλειάδες δεν καταχωρούνται πλέον σε στατικούς πίνακες όπως στα τυπικά ΣΔΒΔ, αλλά καταφθάνουν διαρκώς με κυμαινόμενο και ενδεχομένως καταιγιστικό ρυθμό, χωρίς περιορισμούς ως προς το μέγεθος ή τις ιδιότητές τους. Έτσι, τα στοιχεία δεν είναι άμεσα διαθέσιμα για επεξεργασία, όπως θα ήταν σε ένα συμβατικό ΣΔΒΔ, αλλά καταφθάνουν με τη μορφή ενός ή περισσότερων ρευμάτων δεδομένων.

Συνήθως, στις πλειάδες υπάρχει καταγεγραμμένη η ταυτότητα της πηγής από την οποία προέρχονται, καθώς κι ένα χρονόσημο (*timestamp*), ώστε να υπάρχει ένδειξη της χρονικής στιγμής άφιξης ή παραγωγής της πληροφορίας. Τέτοιες χρονικές ενδείξεις ή η διάταξη των πλειάδων είναι εξαιρετικά πολύτιμες παράμετροι σε διάφορα ερωτήματα που μπορεί να τεθούν στα δεδομένα. Το σύστημα δεν έχει καμία δυνατότητα ελέγχου επί της σειράς με την οποία τα δεδομένα καταφθάνουν για επεξεργασία. Από τη στιγμή που η επεξεργασία κάποιας πλειάδας ενός ρεύματος δεδομένων ολοκληρωθεί, αυτή θα απορριφθεί ή θα αποθηκευθεί.

Ωστόσο, η αποθήκευση πλειάδων συνήθως γίνεται με τη μορφή περιλήψεων (*data synopses, summaries*), οι οποίες μετασχηματίζουν τα δεδομένα ώστε να καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο στη μνήμη και έτσι οι πλειάδες είναι δύσκολο έως αδύνατο να ανακτηθούν αυτούσιες. Το διαθέσιμο μέγεθος της κύριας μνήμης στις περισσότερες περιπτώσεις κρίνεται αρκετά μικρό για να καταφέρει να διατηρήσει πλήρως όλο τον όγκο ενός ρεύματος δεδομένων. Έτσι, μπορεί να κρατηθεί αυτούσιο μόνο κάποιο μικρό τμήμα των πιο πρόσφατων περιεχομένων, ενώ τα παλαιότερα δεδομένα μετασχηματίζονται σε περιλήψεις μειώνοντας σημαντικά το μέγεθός τους με αντίστοιχη επίπτωση στην ακρίβειά τους.

Παράλληλα, είναι πιθανό τα δεδομένα να εισέρχονται στο σύστημα έχοντας ήδη ανακατευτεί με παρόμοια στοιχεία από άλλες πηγές, λ.χ. να καταφθάνουν στοιχεία από τους πολλαπλούς αισθητήρες για διαφορετικές χρονικές περιόδους. Επίσης, υπάρχει το ενδεχόμενο πολυδιάστατων ρευμάτων δεδομένων (*multidimensional data streams*), όπου τα στοιχεία αναφέρονται σε περισσότερες από μια πηγές δεδομένων. Χαρακτηριστική περίπτωση είναι ένα ρεύμα τηλεφωνικών κλήσεων αποτελούμενο από πλειάδες, που στην καθεμιά καταγράφεται τόσο ο συνδρομητής που καλεί όσο κι εκείνος που καλείται. Τέλος, η ύπαρξη ρευμάτων δεδομένων μπορεί να συνδυαστεί με την παρουσία στο σύστημα και άλλων δεδομένων με τη μορφή αποθηκευμένων σχέσεων, όπου ενδεχομένως να είναι απαραίτητη η σύνδεση τους με ρεύματα δεδομένων. Ειδικά σε ό,τι αφορά τα σχεσιακά

δεδομένα, συνήθως θεωρείται ότι παραμένουν αμετάβλητα σε σχέση με τα πλήρως δυναμικά δεδομένα των ρευμάτων.

1.2.1 Ερωτήματα σε ρεύματα δεδομένων

Τα ερωτήματα που μπορούν να τεθούν σε ένα ρεύμα δεδομένων διαφοροποιούνται από τα συνήθη ερωτήματα στιγμιοτύπου (*one-time ή snapshot queries*) που υποβάλλονται σποραδικά σε παραδοσιακά ΣΔΒΔ. Απεναντίας, διατυπώνονται ερωτήματα διαρκείας (*continuous queries*), τα οποία υπολογίζονται διαρκώς (συνήθως περιοδικά, ανάλογα με το ρυθμό άφιξης των πλειάδων) και εκτελούνται μονίμως επί μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρις ότου ο χρήστης τα αποσύρει ή αναστείλει τον υπολογισμό τους. Ο λόγος της διαρκούς αποτίμησής τους έγκειται στη μικρή διάρκεια εγκυρότητας των απαντήσεών τους λόγω του πλήρως δυναμικού περιβάλλοντος. Το ίδιο το σύστημα αναλαμβάνει να προωθήσει τα νέα αποτελέσματα προς το χρήστη (*push model*), όποτε αυτά καταστούν διαθέσιμα, χωρίς εκείνος να είναι υποχρεωμένος να υποβάλλει αλληπάλλληλα το ίδιο ερώτημα. Οι απαντήσεις που δίνονται μπορούν να αποθηκεύονται είτε να λαμβάνουν οι ίδιες τη μορφή ρευμάτων δεδομένων. Τα αποτελέσματά τους δεν μπορούν παρά να υπολογίζονται σταδιακά (*incrementally*), συμβαδίζοντας με το ρυθμό άφιξης των στοιχείων, καθώς σε αρκετές περιπτώσεις υπάρχει το ενδεχόμενο να επιστρέφονται με τη μορφή προσεγγιστικών απαντήσεων.

Έτσι λοιπόν, οι απαντήσεις σε ερωτήματα συνάθροισης (*aggregate queries*) συνήθως κρίνεται σκόπιμο να αποθηκεύονται, αφού οι πλειάδες του αποτελέσματος είναι λίγες και τυχόν συχνές αλλαγές δεν έχουν ισχυρό αντίκτυπο στη λειτουργία του συστήματος. Αντίθετα, σε ερωτήματα σύνδεσης (*join queries*) είναι προτιμότερο οι ταχύτατα παραγόμενες και ποσοτικά απεριόριστες απαντήσεις να εξάγονται ως ρεύματα δεδομένων. Για παράδειγμα, σε συστήματα διαχείρισης δικτύων υπολογιστών, χρειάζονται ερωτήματα διαρκείας για να ελέγχουν online την ομαλή λειτουργία τους και να ανιχνεύουν τυχόν ανωμαλίες (λ.χ. συμφόρηση συνδέσεων) ή τις αιτίες τους (λ.χ. βλάβη στο υλικό ή απειλή για την ασφάλεια του δικτύου από επιθέσεις τρίτων). Σε οικονομικού περιεχομένου εφαρμογές, ερωτήματα διαρκείας μπορούν να τεθούν για να εντοπίζονται τάσεις της αγοράς ή χρηματιστηριακές ευκαιρίες της στιγμής.

Για παράδειγμα, ένα στιγμιαίο ερώτημα θα ήταν : «Να δοθεί η χρονοσειρά των θερμοκρασιών που καταγράφηκαν στο μετρητικό σταθμό κατά τη διάρκεια του περασμένου μήνα». Το ερώτημα ορίζεται πάνω στις χρονοσειρές που υπάρχουν διαθέσιμες μέχρι την χρονική στιγμή υποβολής του ερωτήματος καλύπτοντας μόνο δεδομένα του παρελθόντος και του παρόντος. Αντίστοιχα ένα ερώτημα διαρκείας θα ήταν : «Να δίνεται η χρονοσειρά της θερμοκρασίας που θα καταγράφεται στο μετρητικό σταθμό καθημερινά στις 10 το πρωί για τις επόμενες τρεις εβδομάδες». Το ερώτημα καλύπτει όχι μόνο τις χρονοσειρές που υπάρχουν όταν αυτό τίθεται, αλλά και όσες αλλαγές συμβούν μελλοντικά μέχρι τον τερματισμό της εκτέλεσής, αφού τα ερωτήματα διαρκείας καλύπτουν περασμένα, τωρινά και μελλοντικά δεδομένα.

Εξάλλου, τα ερωτήματα σε ένα ρεύμα δεδομένων διαφοροποιούνται από τα προκαθορισμένα ερωτήματα (*predefined queries*) που έχουν υποβληθεί σε πριν την άφιξη οποιουδήποτε τμήματος του ρεύματος. Απεναντίας, τα μη προβλέψιμα ερωτήματα (*ad-hoc queries*) υποβάλλονται online αφού τα στοιχεία αρχίσουν να καταφθάνουν. Πρόκειται κυρίως για ερωτήματα διαρκείας που τίθενται δυναμικά στο σύστημα σε κάποια επόμενη φάση και γι' αυτό περιπλέκουν σε μεγάλο βαθμό το σχεδιασμό ενός συστήματος διαχείρισης ρευμάτων δεδομένων. Προφανώς, αφού τα ερωτήματα δεν είναι εκ των προτέρων γνωστά, δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη κατά το στάδιο της βελτιστοποίησης ερωτημάτων (*query optimization*), της ταυτοποίησης κοινών υποεκφράσεων μεταξύ ερωτημάτων κ.λ.π.

Επιπλέον, ένα ad-hoc ερώτημα είναι πιθανόν να απαιτεί αναφορά σε δεδομένα που έχουν ήδη παρέλθει, δηλαδή ιστορικά στοιχεία που ίσως δεν έχουν τηρηθεί, όποτε δεν υπάρχει καμία δυνατότητα ανάκτησής τους στο μέλλον.

Άρα, σε ένα συμβατικό ΣΔΒΣ, η υποβολή των ερωτημάτων είναι εκείνη που επιβάλλει προσπέλαση στα αποθηκευμένα δεδομένα, ενώ αντίθετα η άφιξη των ρευμάτων δεδομένων είναι εκείνη που ενεργοποιεί ένα σύνολο υποβληθέντων ερωτημάτων. Εκ των πραγμάτων λοιπόν, η επεξεργασία των ερωτημάτων που υποβάλλονται σε ένα Σύστημα Διαχείρισης Ρεύματος Δεδομένων (ΣΔΡΔ) αποτελεί ένα πολύπλοκο ζήτημα.

1.2.2 Η ανεπάρκεια των συμβατικών ΣΔΒΔ

Η αρχιτεκτονική ενός τυπικού ΣΔΒΔ ακολουθεί ένα συγκεκριμένο μοντέλο προσπέλασης των δεδομένων σύμφωνα με το οποίο ο χρήστης χρειάζεται την ανάκτηση δεδομένων, και έτσι υποβάλλει ένα ερώτημα στο σύστημα για να αντλήσει τις ανάλογες πληροφορίες (*pull-based model*). Αντίθετα, στις εφαρμογές ρευμάτων δεδομένων, τα στοιχεία προωθούνται στο σύστημα (*push-based model*) και εκείνο οφείλει να παράγει τα αποτελέσματα των υποβαλλόμενων ερωτημάτων από τους χρήστες. Το γεγονός ότι δεν είναι πλέον ο χρήστης εκείνος που δρομολογεί την ροή των δεδομένων, αλλά οι ίδιες οι πηγές, αποτελεί την ειδοποιό διαφορά με το πρότυπο των συμβατικών ΣΔΒΔ. Επιπλέον, το ίδιο το σύστημα αναλαμβάνει την ευθύνη να ειδοποιήσει τον χρήστη για τυχόν απρόβλεπτες καταστάσεις (λ.χ. απροσδόκητα μεγάλες τιμές κάποιας ένδειξης, βλάβη κάποιας συσκευής). Έτσι, ο χρήστης περιορίζεται σε «παθητικό» ρόλο του παρατηρητή, αρκούμενος να ρυθμίζει τις παραμέτρους του συστήματος και να υποβάλλει ερωτήματα.

Τα χαρακτηριστικά των δεδομένων, ενδεχομένως και η δομή τους, δεν είναι εκ των προτέρων γνωστά, γεγονός που δυσκολεύει σημαντικά οποιαδήποτε προσπάθεια βελτιστοποίησης ερωτημάτων. Αντίθετα, τα παραδοσιακά ΣΔΒΔ στοχεύουν στην παραγωγή λεπτομερών απαντήσεων με βάση κάποια στατικά προσχέδια εκτέλεσης ερωτημάτων (*query plans*), τα οποία βοηθούνται και από το φυσικό σχεδιασμό της βάσης δεδομένων (λ.χ. δεικτοδότηση κάποιων πινάκων). Συνεπώς, ο επεξεργαστής ερωτημάτων (*query processor*) δεν έχει πλέον δυνατότητα συνδρομητικότητας στην διαχείριση δοσοληψιών, αλλά απλά πρέπει να καταστεί ικανός ν' ανταποκριθεί στην συνεχή άφιξη των πληροφοριών.

Τα δεδομένα συλλέγονται διαρκώς από ένα ρεύμα δεδομένων και έτσι διογκώνονται συνεχώς καθώς νέα στοιχεία συνεχίζουν να καταφθάνουν. Τα ΣΔΒΔ αναμφισβήτητα προσφέρονται για διαχείριση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων, όμως η προσπέλαση τόσο μεγάλου όγκου στοιχείων είναι πρακτικά πολύ δύσκολη έως αδύνατη. Άρα, για να μπορεί να γίνει αποτελεσματική επεξεργασία των ρευμάτων δεδομένων, καθώς τα στοιχεία καταφθάνουν online, θα πρέπει να παραμένουν στην κύρια μνήμη και οι σχετικοί αλγόριθμοί να πραγματοποιούν μόνο ένα «πέρασμα» (*single pass*) από τα δεδομένα κατά τη σειρά άφιξης στο σύστημα.

Ο ρυθμός παραγωγής των δεδομένων από τις πηγές είναι δυνατόν να γίνει υπερβολικά υψηλός, τόσο που το σύστημα να μην μπορεί να ανταποκριθεί έγκαιρα σε αντίστοιχο καταιγιστικό ρυθμό άφιξης των αντίστοιχων πλειάδων. Τέτοια σενάρια αντιμετωπίζονται με την τακτική της επιλεκτικής απόρριψης δεδομένων, ώστε να μειωθεί σε λογικά επίπεδα ο φόρτος του συστήματος (*load shedding*). Ωστόσο, δεν είναι καθόλου απίθανο το φαινόμενο απώλειας δεδομένων, όταν οποιαδήποτε άλλη τεχνική δεν μπορεί να ρυθμίσει τη ροή της εισερχόμενης πληροφορίας. Έτσι, καθίσταται ανώφελη οποιαδήποτε προσπάθεια να δοθούν ακριβείς απαντήσεις στα ερωτήματα, μην αφήνοντας περιθώρια παρά μόνο για προσεγγίσεις (*approximations*) των πραγματικών αποτελεσμάτων.

Τέλος, οι περισσότερες εφαρμογές ρευμάτων δεδομένων επιβάλλουν απαντήσεις σε πραγματικό χρόνο, καθώς τα στοιχεία μπορούν να αφορούν παραμέτρους κρίσιμες από άποψη ασφάλειας (λ.χ. θερμοκρασία σ' ένα πυρηνικό αντιδραστήρα) ή αποτελεσματικότητας (λ.χ. δρομολόγηση πακέτων δεδομένων μέσω δικτύου υπολογιστών). Η ιδιαιτερότητα αυτή επιβάλλει στα συστήματα ρευμάτων δεδομένων μια περισσότερο αποδοτική διαχείριση πόρων και βελτιωμένη μεθοδολογία επεξεργασίας των ερωτημάτων, χαρακτηριστικά που τα παραδοσιακά ΣΔΒΔ δεν παρέχουν. Εξαιτίας των μειονεκτημάτων των παραδοσιακών ΣΔΒΔ σε πολλαπλά επίπεδα όσον αφορά τα ρεύματα δεδομένων, οι περισσότερες σχετικές εφαρμογές τείνουν είτε να χρησιμοποιούν τα ΣΔΒΔ για βοηθητική αποθήκευση στοιχείων εκτός γραμμής παραγωγής (offline) είτε καθόλου.

1.3 Ερωτήματα διαρκείας

Τα ερωτήματα διαρκείας εφαρμόζονται όταν είναι απαραίτητο να υπάρχει πάντοτε διαθέσιμη η τρέχουσα απάντηση σε ένα ερώτημα, το οποίο αναφέρεται στα διαρκώς μεταβαλλόμενα δεδομένα του ρεύματος. Η απάντησή του είναι δυνατόν να αποθηκεύεται ή να λαμβάνει τη μορφή ρεύματος δεδομένων εξόδου. Ωστόσο, εάν υποτεθεί ότι το ρεύμα δεδομένων εισόδου είναι ανεξάντλητο, τότε προφανώς δεν μπορούν να τεθούν περιορισμοί στο μέγεθος της απάντησης και κατά συνέπεια η αποθήκευση είναι αδύνατη.

Οι περιορισμοί αποθήκευσης του ρεύματος είναι καθοριστικοί ακόμα και στην περίπτωση που η απάντηση λαμβάνει τη μορφή ρεύματος εξόδου, ιδίως όταν χρειάζεται να καταγραφεί η είσοδος νέων πλειάδων στο αποτέλεσμα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αδυναμία υπολογισμού του αποτελέσματος της σύνδεσης ενός ρεύματος δεδομένων με τον εαυτό του. Τα πράγματα περιπλέκονται περισσότερο εάν επιτραπουν διαγραφές (deletions) ή ενημερώσεις (updates) στις πλειάδες του αποτελέσματος. Για να συμβεί κάτι τέτοιο, δεν χρειάζεται απαραίτητα να υπάρχουν αντίστοιχης μορφής αλλαγές (διαγραφές ή ενημερώσεις) στο πρωτογενές ρεύμα δεδομένων. Για παράδειγμα, η ύπαρξη ενός τελεστή συνάθροισης (aggregate operator) σε ένα ερώτημα επί των εισερχόμενων δεδομένων αρκεί για να αλλοιώσει το μέγεθος και το περιεχόμενο του αποτελέσματος, αφού η συνεχής έλευση νέων στοιχείων υποχρεώνει σε αναθεώρηση της απάντησης.

Τέλος, εάν το ίδιο το ρεύμα δεδομένων γενικά υφίσταται αλλαγές, είναι αναμενόμενο ότι και η απάντηση θα έχει ανάλογη συμπεριφορά, ιδίως εάν το ερώτημα καλύπτει μεγάλο μέρος της ιστορικής εξέλιξης του ρεύματος. Τότε η ανάγκη για αποθήκευση τουλάχιστον ενός τμήματος του ρεύματος γίνεται πολύ περισσότερο επιτακτική, ώστε να μπορούν να τηρηθούν με κάποιο τρόπο οι ενημερώσεις. Η αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων επιτυγχάνεται με δύο προσεγγίσεις: Η πρώτη τακτική συνηγορεί στην υιοθέτηση περιορισμών στο μέγεθος της απάντησης που θα μπορεί να ληφθεί. Η δεύτερη τακτική υιοθετεί την παροχή προσεγγιστικής απάντησης (approximate query answering) αντί της ακριβούς.

1.3.1 Συνάφεια ερωτημάτων διαρκείας με μηχανισμούς των ΣΔΒΔ

Ο μηχανισμός των υλοποιημένων όψεων (materialized views) των συμβατικών ΣΔΒΔ έχει αρκετές ομοιότητες με τα ερωτήματα διαρκείας. Οι υλοποιημένες όψεις αναπαριστούν ένα στιγμιότυπο της κατάστασης της βάσης δεδομένων σε κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Κάθε φορά που συμβαίνουν αλλαγές στη βάση, αυτές θα πρέπει να μεταφέρονται και στις υλοποιημένες όψεις. Μια απλοϊκή προσέγγιση μπορεί να είναι ο εξαρχής υπολογισμός από τα πρωτογενή δεδομένα, ωστόσο είναι εφικτός και ο σταδιακός υπολογισμός τους (incremental view maintenance), όταν οι αλλαγές δεν είναι

πολύ εκτεταμένες. Έτσι, οι υλοποιημένες όψεις είναι ερωτήματα που ουσιαστικά πρέπει να επαναυπολογίζονται εξαρχής ή να ανανεώνουν σταδιακά το περιεχόμενό τους κάθε φορά που συμβαίνει κάποια αλλαγή στα σχετικά δεδομένα. Υπ' αυτή την έννοια έχουν κάποια μορφή συγγένειας με τα ερωτήματα διαρκείας. Ασφαλώς, τα ερωτήματα διαρκείας διαφέρουν σημαντικά δεδομένων των συχνών αλλαγών στα στοιχεία, των προσαρμοζόμενων μηχανισμών επεξεργασίας και της άμεσης σχέσης τους με τα ρεύματα εισόδου και εξόδου.

Εξάλλου, οι σκανδαλιστές (*triggers*), γνωστοί επίσης ως κανόνες *ECA* (*Event-Condition-Action*), αποτελούν ένα μηχανισμό των βάσεων δεδομένων για τη διάγνωση καταστάσεων ή γεγονότων στα οποία το σύστημα πρέπει ν' ανταποκριθεί άμεσα με κάποιες ενέργειες. Η ομοιότητά τους με τα ερωτήματα διαρκείας είναι ότι παρέχουν κατά κάποιο τρόπο ένα μηχανισμό παρακολούθησης των ενημερώσεων των δεδομένων προκειμένου να αντιδράσουν έγκαιρα όταν συμβούν συγκεκριμένα γεγονότα ή καταστάσεις. Αντίστοιχα, τα ερωτήματα διαρκείας παρακολουθούν τη ροή πληροφορίας στο ρεύμα ώστε να ανανεώνουν έγκαιρα την απάντηση και να την αποθηκεύσουν ή να τη διοχετεύσουν στο ρεύμα εξόδου.

1.3.2 Κατηγορίες και παράμετροι ερωτημάτων διαρκείας

(i) Ερωτήματα διαρκείας βάσει του χρόνου ή του περιεχομένου

Τα ερωτήματα διαρκείας επιβάλλεται να ανταποκρίνονται είτε σε κάθε μεταβολή των στοιχείων (*change based*) όποτε αυτά γίνονται διαθέσιμα, είτε να εκτελούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (*time-based*) όπως τα προσδιορίζει ο χρήστης. Η πρώτη κατηγορία ερωτημάτων, που μοιάζει με το μοντέλο των *triggers*, πλεονεκτεί ως προς τον χρόνο απόκρισης, αλλά ενδεχομένως δεσμεύει πολύτιμους πόρους του συστήματος όταν δεν χρειάζονται άμεσες απαντήσεις. Από την άλλη πλευρά, όταν τα ερωτήματα διαρκείας εκτελούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, το σύστημα μπορεί να τα υποστηρίξει περισσότερο αποτελεσματικά, εμφανίζοντας δυνατότητες κλιμάκωσης (*scalability*). Βεβαίως, παρουσιάζονται προβλήματα στο ζήτημα της βελτιστοποίησης ερωτημάτων όταν αυτά χαρακτηρίζονται από διαφορετικές συχνότητες εκτέλεσης ή όταν τα χρονικά διαστήματα είναι αλληλοεπικαλυπτόμενα.

(ii) Ερωτήματα συνάθροισης σε ρεύματα δεδομένων

Συνήθως η πληροφορία που καταφτάνει από τα ρεύματα δεδομένων είναι αρκετά λεπτομερής σε βαθμό που ίσως να μην ενδιαφέρει την πλειοψηφία των χρηστών. Για παράδειγμα, εάν ένας αισθητήρας στέλνει μετρήσεις θερμοκρασίας κάθε λεπτό, είναι πολύ πιθανόν να μην υπάρχουν μεταβολές στην τιμή μεταξύ διαδοχικών τιμών. Αντίθετα, περισσότερο νόημα έχουν κάποια στατιστικά στοιχεία, λ.χ. μέση ωριαία θερμοκρασία ή η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε τις τελευταίες 24 ώρες. Επομένως, τα ερωτήματα συνάθροισης (*aggregate queries*) αποτελούν σπουδαίο εργαλείο για την επεξεργασία των ρευμάτων, αφού παρέχουν τη μακροσκοπική εικόνα τους δίνοντας την τάση μεταβολής των στοιχείων τους. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εξής τύποι συναθροιστικών ερωτημάτων.

- Ερωτήματα συνάθροισης για μεμονωμένα στοιχεία (*point aggregates*). Πρόκειται για ερωτήματα όπου ζητούνται συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ένα συγκεκριμένο στοιχείο που καταγράφεται στο ρεύμα, λ.χ. «Να υπολογιστεί η μέση χρονική διάρκεια συνδιαλέξεων του συνδρομητή με αριθμό <#> σήμερα»
- Ερωτήματα συνάθροισης για σειρά στοιχείων (*range aggregates*). Τα ερωτήματα αυτά ομαδοποιούν τα δεδομένα σε ομάδες που προσδιορίζονται από το γεγονός ότι κάποια χαρακτηριστικά τους κινούνται σε ένα ορισμένο διάστημα τιμών. Για παράδειγμα,

μπορεί να ζητηθεί η συνολική χρονική διάρκεια των κλήσεων που είναι εξερχόμενες από κάποιο τηλεφωνικό κέντρο την τελευταία εβδομάδα.

- Ερωτήματα συνάθροισης σε στοιχεία βαθμιαίας ηλικίας (*aged aggregates*). Σε αυτή την περίπτωση συνδυάζονται οι τιμές ενός στοιχείου από διαφορετικές χρονικές στιγμές δίνοντας διαφορετικό βάρος στην κάθε μία. Συνήθως, το βάρος των παρελθοντικών τιμών μικραίνει με την πάροδο του χρόνου, ενώ οι πιο πρόσφατες τιμές έχουν μεγάλη επίδραση στη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος. Για παράδειγμα, η εκτιμώμενη μέση μεταβολή της τιμής μια μετοχής συνυπολογίζεται λαμβάνοντας περισσότερο υπόψη τις πρόσφατες τιμές της και λιγότερο από τις αρκετά παλαιότερες της.

(iii) Ενεργά ερωτήματα

Τα ενεργά (*active*) ερωτήματα διαρκείας αποτιμώνται διαρκώς από το σύστημα, σε αντίθεση με τα ανενεργά (*inactive*) των οποίων η εκτέλεση έχει ανασταλεί. Έτσι, για ένα ανενεργό ερώτημα δεν παράγονται απαντήσεις, παρόλο που τα στοιχεία στο ρεύμα εισόδου καταφτάνουν και καταγράφονται. Ωστόσο, η εκτέλεσή τους μπορεί οποιαδήποτε στιγμή να επανεργοποιηθεί και γι' αυτό το λόγο λαμβάνονται υπόψη στην προετοιμασία που γίνεται για τα ενεργά ερωτήματα (λ.χ. κατάστρωση σχεδίου εκτέλεσης και κατανομή πόρων του συστήματος).

(iv) Ερωτήματα με βάρη

Στα συστήματα διαχείρισης ρευμάτων δεδομένων, συνήθως το ενδιαφέρον εστιάζεται στην συνολική ρυθμοαπόδοση (*throughput*), παρά στις επιδόσεις μεμονωμένων ερωτημάτων. Έτσι, στα ερωτήματα συνήθως αποδίδονται βάρη (*weights*), μέσω των οποίων δημιουργείται μια μορφή ιεράρχησής τους. Με βάση τα αποδιδόμενα βάρη από τους χρήστες, το σύστημα επιλέγει να προβεί σε προσεγγιστικές απαντήσεις για τα ερωτήματα με χαμηλή βαρύτητα, όταν κρίνεται απαραίτητο. Παράλληλα, η προτεραιότητα εκτέλεσης των ερωτημάτων είναι δυνατόν να γίνεται με βάση τη βαρύτητά τους, ενώ τα ανενεργά ερωτήματα μπορούν να θεωρηθούν ως ερωτήματα αμελητέας βαρύτητας. Η απόδοση βαρών στα ερωτήματα δεν είναι απαραίτητο να καθορίζεται μόνο από τους χρήστες αλλά και από το σύστημα. Για παράδειγμα, το σύστημα μειώνει από μόνο του τη βαρύτητα ενός εξαιρετικά ακριβούς ερωτήματος, η εκτέλεση του οποίου ενδεχομένως να παραγκωνίσει την εκτέλεση των άλλων απορροφώντας μεγάλο ποσοστό των πόρων. Έτσι, η απόδοση βαρών πρέπει να είναι μια δυναμική διαδικασία ώστε η τιμή τους ανά ερώτημα να μεταβάλλεται ανάλογα με τις απαιτήσεις των χρηστών και τις επίκαιρες συνθήκες του συστήματος και των ρευμάτων.

1.3.3 Η χρήση παραθύρων στα ερωτήματα διαρκείας

Ένα σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων είναι αδύνατον να αποδηκεί και να λαμβάνει υπόψη του όλη την ιστορική εξέλιξη των ρευμάτων εισόδου. Δεδομένου ότι συχνά καταφεύγει σε προσεγγιστικές απαντήσεις των ερωτημάτων, δεν είναι απαραίτητο να εξετάσει το σύνολο των πλειάδων που έχει περάσει ως εκείνη τη στιγμή από το σύστημα, αλλά μάλλον μόνο ένα συγκεκριμένο τμήμα τους, εντός ενός παραθύρου (*window*) επί των πλέον πρόσφατων στοιχείων. Έτσι, σε κάθε χρονική στιγμή, το παράθυρο περιλαμβάνει ένα σύνολο διαδοχικών πλειάδων επί των οποίων θα εφαρμοστεί το ερώτημα. Για παράδειγμα,

για την τιμή μιας μετοχής μπορούν να ληφθούν υπόψη οι διακυμάνσεις της τελευταίας εβδομάδας, ενώ τα παλαιότερα στοιχεία μπορούν να απορριφθούν.

Η οριοθέτηση των χρονικών παραθύρων γίνεται με τη χρήση κατάλληλων *χρονοσήμων (timestamps)* στις πλειάδες του ρεύματος. Κάθε πλειάδα συνοδεύεται από μια χρονική ένδειξη η οποία συνήθως δηλώνει τη χρονική στιγμή παραγωγής της. Το σύστημα οργανώνει τις πλειάδες που λαμβάνει με βάση το χρονόσημό τους (λ.χ. σε αύξουσα σειρά), σχηματίζοντας έτσι το παράθυρο. Το εύρος του παραθύρου σχηματίζεται είτε με βάση τη διάσταση του χρόνου από τα χρονόσημα (λ.χ. πλειάδες των τελευταίων 10 λεπτών) είτε με βάση το πλήθος των πλειάδων. Είναι σαφές ότι στην πρώτη περίπτωση δεν είναι προκαθορισμένο το μέγεθος μνήμης που απαιτείται σε αντίθεση με τη δεύτερη όπου διατηρείται σταθερό πλήθος πλειάδων ανεξαρτήτως εύρους των χρονοσήμων.

Προκειμένου να είναι δυνατή η εφαρμογή χρονικών παραθύρων, δηλαδή ο υπολογισμός των πλειάδων που περιλαμβάνονται εντός τους, θα πρέπει να υπάρχει πρόνοια για διάταξη των στοιχείων με βάση τα χρονόσημα που δίνονται καθολικά από το χρονόμετρο του συστήματος. Πολύ ενδιαφέρουσα δείχνει η ιδέα του *σφυγμού (heartbeat)*, δηλαδή της περιοδικής αποστολής ειδικών σημάτων από το ρολόι. Έπειτα από τη λήψη των σημάτων αυτών δεν θα πρέπει να αναμένονται άλλα στοιχεία ρευμάτων ή ενημερώσεις που υστερούν σε σύγκριση με την χρονική σήμανση του σφυγμού, ειδάλως δεν θα είναι δυνατόν να προκύπτουν αποτελέσματα. Τυχόν μη διατεταγμένες πλειάδες κάποιων ρευμάτων θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν με χρήση ενδιάμεσης μνήμης και αναμονής μέχρι τον επόμενο σφυγμό πριν ξεκινήσει η ταξινόμησή τους. Μια παρεμφερής αντιμετώπιση θα ήταν η χρήση περιοδικού χρονικού περιθωρίου (*timeout*). Βάσει αυτής της τεχνικής, έπειτα από την εκπνοή του χρονικού ορίου δεν θα γίνονται αποδεκτές πλειάδες με προγενέστερο χρονόσημο.

Οι κυριότερες κατηγορίες χρονικών παραθύρων σε ερωτήματα διάρκειας είναι:

- *Παράθυρα οροσήμου (landmark windows)* Τα παράθυρα έχουν ως σταθερή αφετηρία κάποιο χρονόσημο, αλλά το πέρας τους παρακολουθεί τη χρονική εξέλιξη των πλειάδων του ρεύματος. Επομένως, το νεότερο άκρο του παραθύρου προχωρεί παράλληλα με το χρόνο, ταυτιζόμενο με την παρούσα χρονική στιγμή, ώστε να καλύπτει συνεχώς την έλευση νέων στοιχείων. Το εύρος του παραθύρου αυξάνεται λοιπόν διαρκώς, όπως και ο αριθμός των πλειάδων που περιλαμβάνει. Λ.χ. «Υπολόγισε τον συνολικό ημερήσιο αριθμό συνδιαλέξεων του συνδρομητή με τηλεφωνικό αριθμό <#> από την αρχή του έτους μέχρι σήμερα»
- *Κυλιόμενα παράθυρα (sliding windows)*. Τα κυλιόμενα παράθυρα έχουν αφετηρία και πέρας που κινούνται ταυτόχρονα παρακολουθώντας την χρονική εξέλιξη των στοιχείων που συρρέουν σύστημα. Έτσι, παλαιότερα δεδομένα απορρίπτονται και καινούργια εισέρχονται με κυμαινόμενο ρυθμό. Το εύρος των παραθύρων παραμένει σταθερό, όμως ούτε το πλήθος των πλειάδων ούτε φυσικά και τα περιεχόμενα εντός των τους διατηρούνται αμετάβλητα. Λ.χ. «Από την αρχή του έτους και στο τέλος κάθε εβδομάδας, υπολόγισε τη μέση χρονική διάρκεια των συνδιαλέξεων του συνδρομητή με αριθμό <#>».

1.3.4 Γλώσσα υποβολής ερωτημάτων

Ένα τυπικό σύστημα διαχείρισης ρευμάτων δεδομένων (ΣΔΡΔ) οφείλει να παρέχει στους χρήστες μια πλήρη γλώσσα υποβολής ερωτημάτων διάρκειας. Η γλώσσα SQL που χρησιμοποιείται από τα ΣΔΒΔ εμφανίζεται ικανοποιητική ως βάση για μια τέτοια γλώσσα για τους εξής λόγους:

- Η γλώσσα SQL είναι ευρέως διαδεδομένη.
- Τα ΣΔΒΔ και τα ΣΔΡΔ έχουν αρκετά κοινά στοιχεία.

- Οι απαραίτητες επεκτάσεις που πρέπει να γίνουν στην SQL για ερωτήματα διαρκείας, όπως λ.χ. χρονικά παράθυρα κτλ, δεν συγκρούονται με τις ήδη παρεχόμενες λειτουργίες της.

Κατά την ανάπτυξη του ΣΔΡΔ *STREAM* στο Stanford, προτάθηκε μια επέκταση της SQL ονομαζόμενη CQL. Τα κυλιόμενα παράθυρα με βάση τις πλειάδες υποδηλώνονται από τη λέξη κλειδί ROWS ενώ με βάση το χρόνο από τη λέξη κλειδί RANGE.

1.4 Αλγόριθμοι για ρεύματα δεδομένων

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται σε περιβάλλον ρευμάτων δεδομένων για την επεξεργασία των ερωτημάτων διαρκείας εμφανίζουν ιδιαιτερότητες σε σχέση με τους αντίστοιχους των τυπικών ΣΔΒΔ. Προφανώς, θα πρέπει να διαχειρίζονται αποδοτικά τους διαδέσιμους πόρους μνήμης και να κατανέμουν με τέτοιο τρόπο την υπολογιστική ισχύ ώστε να βελτιώνουν τη συνολική ρυθμοαπόδοσή τους. Επιπλέον, οφείλουν να παρακολουθούν την online εξέλιξη των στοιχείων με την πάροδο του χρόνου δεδομένου ότι δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί η μελλοντική πληροφορία. Τέλος, απαιτείται να είναι σε θέση να δίνουν αποτελέσματα σταδιακά (*incrementally*), ώστε να επιτυγχάνουν καλύτερες επιδόσεις και να παρέχουν στους χρήστες ενδιάμεσα αποτελέσματα.

Ένας τυπικός αλγόριθμος ρεύματος δεδομένων λαμβάνει ως είσοδο μια ακολουθία στοιχείων x_1, \dots, x_n που αποκαλείται ρεύμα δεδομένων, και η ακολουθία σαρώνεται μόνο μια φορά κατά την αύξουσα φορά των δεικτών. Το ζητούμενο από τον αλγόριθμο είναι να υπολογίζει την τιμή μιας συνάρτησης f επί του τμήματος των δεδομένων που έχει παρέλθει μέχρι εκείνη τη στιγμή (λ.χ. ένα άθροισμα ή μέσο όρο). Οπωσδήποτε, υπάρχουν αλγόριθμοι που επιτρέπουν πολλαπλά περάσματα από το ρεύμα δεδομένων, ωστόσο οι πλέον αποδοτικοί είναι εκείνοι που επεξεργάζονται τα στοιχεία μόνο μια φορά (*single pass*).

Η πολυπλοκότητα σε χώρο συνήθως αποτελεί συνάρτηση του πλήθους των στοιχείων (N) που έχουν εισέλθει στο σύστημα μέχρι τότε, ενώ η πολυπλοκότητα σε χρόνο εκφράζεται ανά στοιχείο του ρεύματος. Βασικό μέλημα σε ό,τι αφορά την επίδοση των αλγορίθμων είναι η δέσμευση μνήμης να είναι ανεξάρτητη του N , το οποίο είναι προφανώς απεριόριστο. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο απαιτούμενος χώρος δεν μπορεί να είναι ανεξάρτητος του N , αλλά κινείται σε υπογραμμικά όρια. Ένας αλγόριθμος θεωρείται ότι επιλύει ένα πρόβλημα ικανοποιητικά, όταν ο χώρος αλλά και ο χρόνος επεξεργασίας που απαιτούνται είναι το πολύ πολυλογαριθμικοί, δηλαδή $O(\text{poly}(\log N))$ χώρος και $O(\text{poly}(\log N))$ χρόνος ανά στοιχείο ή ερώτημα. Είναι σαφές ότι δεν είναι πάντοτε εφικτό ένας αλγόριθμος να είναι τόσο αποδοτικός, ακόμα κι αν παρέχει προσεγγιστικές απαντήσεις. Ακολούθως θα παρουσιασθούν διάφορες τεχνικές επεξεργασίας των ρευμάτων και τεχνικών παραγωγής προσεγγιστικών απαντήσεων.

1.4.1 Μαζική επεξεργασία

Η επεξεργασία των στοιχείων είναι δυνατόν να μην γίνεται μεμονωμένα για το καθένα, δηλαδή αμέσως μόλις καταφθάνουν, αλλά μαζικά (*batch processing*), προκειμένου να επιταχυνθεί η εκτέλεση των ερωτημάτων. Κάτι τέτοιο εφαρμόζεται αρκετά αποδοτικά όταν ο ρυθμός άφιξης των στοιχείων είναι ραγδαίος, αλλά η περαιτέρω επεξεργασία τους εξελίσσεται αργά. Το αποτέλεσμα του ερωτήματος υπολογίζεται περιοδικά ανάλογα με τα χρονικά περιθώρια που έχουν τεθεί από την εφαρμογή, αντί να παράγεται μια διαρκώς ενημερωμένη απάντηση. Το αποτέλεσμα θεωρείται προσεγγιστικό με την έννοια ότι δεν λαμβάνεται έγκαιρα, δηλαδή δεν αντιπροσωπεύει την ακριβή απάντηση στο παρόν, αλλά την ακριβή απάντηση σε κάποια χρονική στιγμή στο άμεσα πρόσφατο παρελθόν. Έτσι, η

τεχνική αυτή επιχειρεί να συμβιβάσει τις πρακτικά αντιμαχόμενες τάσεις για έγκυρη και έγκαιρη απάντηση, δεδομένου ότι η καθυστέρηση της απάντησης είναι σε πλαίσια όπου δεν τίθεται θέμα εγκυρότητας ή ακρίβειας του αποτελέσματος. Μια τέτοια προσέγγιση είναι εφαρμόσιμη όταν τα ρεύματα δεδομένων εμφανίζουν καταϊγιστικά ξεσπάσματα. Ένας αλγόριθμος που δεν μπορεί να υποστηρίξει υπερβολικά υψηλό ρυθμό άφιξης δεδομένων, θα μπορούσε ίσως να χειριστεί έναν μέσο ρυθμό άφιξης αποθηκεύοντας προσωρινά τα δεδομένα ώστε αργότερα να τα επεξεργαστεί ομαδικά, όταν ο ρυθμός θα έχει μειωθεί σε λογικά επίπεδα.

1.4.2 Δειγματοληψία ρεύματος

Η τεχνική της δειγματοληψίας (*sampling*) του ρεύματος δεδομένων συνηγορεί στη διατήρηση και επεξεργασία μόνο ενός περιορισμένου δείγματος εισερχόμενων πλειάδων, αντί του συνόλου. Η δειγματοληψία είναι δυνατόν να είναι τυχαία (*randomized sampling*), ομοιόμορφη (*uniform sampling*) ή και διαστρωματωμένη (*stratified sampling*). Ο υπολογισμός του τυχαίου δείγματος από τα στοιχεία ενός ρεύματος δεδομένων είναι σχετικά απλός: κάθε πλειάδα είτε αποθηκεύεται ως συστατικό του δείγματος είτε απορρίπτεται άμεσα. Τα τυχαία δείγματα μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστη μορφή σύνοψης δεδομένων υπό την προϋπόθεση ότι το δείγμα είναι αντιπροσωπευτικό των βασικών χαρακτηριστικών του ρεύματος δεδομένων. Ωστόσο, μόνο η διαστρωματωμένη δειγματοληψία επιχειρεί ελάττωση του τυχαίου σφάλματος που υπεισέρχεται εξαιτίας της διακύμανσης των δεδομένων, καθώς και του σφάλματος στα ερωτήματα που εμπεριέχουν ομαδοποίηση των στοιχείων.

Η τεχνική της δειγματοληψίας ενδείκνεται όταν η ενημέρωση των τηρούμενων δομών με τις εισερχόμενες πλειάδες είναι ακριβή, ενώ η τεχνική της μαζικής επεξεργασίας ενδείκνεται όταν η επεξεργασία των διατηρούμενων πλειάδων είναι αργή. Σαφώς, οι δύο τεχνικές είναι δυνατόν να εφαρμοσθούν ταυτόχρονα, μειώνοντας δραστικά το φόρτο και στις δύο φάσεις επεξεργασίας.

1.4.3 Συνόψεις δεδομένων

Οι περιλήψεις ή συνόψεις δεδομένων (*summaries or data synopses*) παρέχουν μια συνοπτική αναπαράσταση της πληροφορίας με μειωμένη ακρίβεια. Το μέγεθός τους θα πρέπει να είναι σημαντικά μικρότερο (λογαριθμικό ή πολυλογαριθμικό) σε σχέση με το συνολικό αριθμό των πλειάδων του ρεύματος και επιπλέον θα πρέπει να είναι εφικτός ο υπολογισμός τους με ένα πέρασμα των δεδομένων με τη σειρά που καταφτάνουν. Εάν ο κύριος όγκος των ερωτημάτων που υποβάλλονται αφορούν προβολές (*projections*) συγκεκριμένων ιδιοτήτων του ρεύματος, τότε το μέγεθος των περιλήψεων μπορεί να συρρικνωθεί ακόμη περισσότερο. Σε κάθε χρονική στιγμή, ο επεξεργαστής ερωτημάτων μπορεί να συνδυάζει στοιχεία από τις περιλήψεις που συντηρεί, προκειμένου να εξάγει προσεγγιστικά αποτελέσματα για τα υποβληθέντα ερωτήματα. Η χρήση περιλήψεων διευκολύνει τους τύπους ερωτημάτων, για τους οποίους δεν υπάρχει δομή δεδομένων αρκετά ικανή να τα διαχειριστεί επαρκώς. Οι τεχνικές εξαγωγής περιλήψεων επιδιώκουν τη δραστική μείωση του χώρου που καταλαμβάνουν τα στοιχεία σε καθεστώς περιορισμένου αποθηκευτικού χώρου. Οι περιλήψεις έχουν ιδιαίτερη χρησιμότητα σε ερωτήματα σύνδεσης με παράλληλη χρήση τελεστών συνάθροισης. Οι κυριότερες τεχνικές περιλήψεων είναι οι ακόλουθες:

(i) Σκίτσα δεδομένων

Η τεχνική των σκίτσων δεδομένων αποσκοπεί σε παραγωγή περιληψής με τυχαίο τρόπο (*randomized sketching*). Χρησιμοποιείται σε ερωτήματα απόστασης ή υπολογισμού του πλήθους των διακριτών τιμών ενός ρεύματος δεδομένων.

(ii) Κυματίδια

Η τεχνική των κυματιδίων (*wavelets*) προέρχεται από το πεδίο της θεωρίας σημάτων. Πρόκειται για μαθηματικούς μετασχηματισμούς που επιχειρούν να αποτυπώσουν την πληροφορία με αριθμητικές συναρτήσεις, των οποίων οι συντελεστές είναι προβολές του σήματος (αντίστοιχα, ενός συνόλου δεδομένων) σε ένα ορθοκανονικό σύνολο διανυσμάτων αναφοράς (*basis vectors*). Η επιλογή των κατάλληλων διανυσμάτων αναφοράς κρίνει και τον τύπο των *wavelets*. Στις βάσεις δεδομένων εφαρμόζονται τα λεγόμενα Haar κυματίδια λόγω της ευκολίας υπολογισμού τους. Τα Haar κυματίδια μπορούν να αναπαρασταθούν με ένα δυαδικό δένδρο, σε κάθε κόμβο του οποίου φυλάσσονται ο μέσος όρος των παιδιών του και η διαφορά του αριστερού από τον δεξιό κλάδο. Η σπουδαιότητα των κυματιδίων στηρίζεται στην ιδιότητα ότι πρακτικά από μικρό πλήθος των σημαντικότερων συντελεστών των γραμμικών προβολών μπορούν να αναπαρασταθούν τα πρωτότυπα δεδομένα με κριτήριο την ευκλείδεια νόρμα τους.

Τα κυματίδια διευκολύνουν σημαντικά το χειρισμό των ρευμάτων δεδομένων. Διατηρώντας μια αντιπροσωπευτική περιληψή του ρεύματος με τη μορφή κυματιδίων, η οποία θα καταλαμβάνει σημαντικά μικρότερο όγκο από τα πρωτογενή δεδομένα, είναι εύκολο να απαντηθούν απευθείας απλά ερωτήματα συνάθροισης για μεμονωμένα χαρακτηριστικά των στοιχείων με πολύ καλή προσέγγιση. Παρέχουν επίσης αξιόλογη ακρίβεια στα πιο πολύπλοκα ερωτήματα συνάθροισης.

(iii) Ιστογράμματα

Τα ιστογράμματα αποτελούν μια εξαιρετικά δημοφιλή δομή στις βάσεις δεδομένων για τη συνοπτική αναπαράσταση της κατανομής των τιμών ενός συνόλου δεδομένων (λ.χ. μία ή περισσότερες στήλες ενός πίνακα). Το αναμενόμενο εύρος του συνόλου τιμών χωρίζεται σε διαστήματα για καθένα από τα οποία διατηρείται η συχνότητα τιμών που καταφτάνει, σχηματίζοντας έτσι ένα ιστόγραμμα, το οποίο μπορεί να αναπαρασταθεί και με ένα διάγραμμα. Σαφώς, το πλήθος και το εύρος των διαστημάτων συνηγορεί στην ακρίβεια της αναπαράστασης. Ένα ρεύμα δεδομένων πρέπει να χωρίζεται σε τέτοια διαστήματα από συγκεκριμένους αλγόριθμους οι οποίοι θα επιτρέπουν τον δυναμικό προσδιορισμό των διαστημάτων. Κατόπιν, βάσει του εύρους των τιμών κάθε διαστήματος επιχειρείται να εντοπισθεί η αντιπροσωπευτικότερη τιμή, η οποία τελικά θα διατηρηθεί αποθηκευμένη. Η ανασύσταση του συνόλου των δεδομένων από το ιστόγραμμα γίνεται με βάση τις αντιπροσωπευτικές τιμές κάθε διαστήματος και τη συχνότητα των στοιχείων που αντιστοιχεί στο εν λόγω διάστημα. Ενώ έχουν προταθεί αρκετοί αλγόριθμοι ιστογραμμάτων (λ.χ. *V-optimal*, *ίσου πλάτους* κτλ), το ζήτημα εύρεσης δυναμικών αλγορίθμων προσδιορισμού των διαστημάτων με βάση τις πλειάδες που καταφτάνουν, επιδέχεται αρκετή έρευνα.

1.5 Επισκόπηση κυριότερων συστημάτων διαχείρισης ρευμάτων δεδομένων

1.5.1 AURORA

Το AURORA είναι ένα γενικού σκοπού Σύστημα Διαχείρισης Ρευμάτων Δεδομένων που σχεδιάζεται και υλοποιείται από το 2001 με τη σύμπραξη των Πανεπιστημίων Brandeis και Brown καθώς και του M.I.T. Στο σύστημα AURORA, για την υποβολή ερωτημάτων, χρησιμοποιείται ένα γραφικό περιβάλλον με «κουτιά» και «βέλη», θυμίζοντας ένα διάγραμμα ροής δεδομένων. Το σύστημα διαθέτει ένα χρονοπρογραμματιστή (scheduler), ο οποίος αποτελεί το συνδετικό κρίκο όλων των τμημάτων της αρχιτεκτονικής του συστήματος και αποφασίζει με ποια σειρά θα εκτελεστούν οι τελεστές στα ρεύματα. Οι πλειάδες που καταλήγουν στην έξοδο παρακολουθούνται μονίμως από τον Επόπτη Ποιότητας (QoS Monitor), ανατροφοδοτώντας τον χρονοπρογραμματιστή με χρήσιμα στοιχεία για τη συνολική επίδοση του συστήματος. Υπάρχει επίσης ένας διαχειριστής αποθήκευσης (storage manager). Το AURORA παρέχει στους χρήστες τη δυνατότητα να επιλέγουν δυναμικά την ποιότητα υπηρεσιών που επιθυμούν για την υλοποίηση των ερωτημάτων.

1.5.2 STREAM (STanford stREam datA Management)

Το STREAM είναι ένα ΣΔΡΔ γενικού σκοπού, το οποίο αναπτύσσεται από το 2001 στο Πανεπιστήμιο Stanford. Η σχεδιάσή του εγκαταλείπει οποιαδήποτε απόπειρα προσαρμογής κάποιου υπάρχοντος ΣΔΒΔ, καθώς επικεντρώνεται στη συγκρότηση ενός ολοκληρωμένου πρωτότυπου ΣΔΡΔ. Η ανάπτυξη έχει θέσει τρεις κύριους στόχους:

- Ένα ευέλικτο τρόπο διεπαφής (interface) προκειμένου να διευκολύνεται η ανάγνωση και η εγγραφή ρευμάτων δεδομένων.
- Την αποτελεσματική επεξεργασία των ερωτημάτων διαρκείας που διατυπώνονται σε SQL ή με τελεστές της σχεσιακής άλγεβρας, συμπεριλαμβανομένων των συναθροιστικών.
- Ένα περιβάλλον API για την υποβολή των ερωτημάτων διαρκείας και τη λήψη των απαντήσεων σ' αυτά.

Τα ερωτήματα υποβάλλονται με χρήση της ειδικά διαμορφωμένης δηλωτικής γλώσσας ερωταποκρίσεων CQL (Continuous Query Language). Συντακτικά, η CQL είναι υπερσύνολο της SQL, με προσθήκη εξειδικευμένων δομών για την υποστήριξη κυλιόμενων παραθύρων και δειγματοληψίας. Σημαντικό στοιχείο της γλώσσας αποτελεί το γεγονός ότι η σημασιολογία των ερωτημάτων διαρκείας αντιμετωπίζει με παρόμοιο τρόπο τόσο τα δεδομένα των ρευμάτων όσο κι εκείνα των στατικών σχέσεων.

1.5.3 TelegraphCQ

Το TelegraphCQ αποτελεί μια εξέλιξη του πρωτότυπου Telegraph που συντονίζεται από το πανεπιστήμιο Berkeley. Στη σχεδίαση του συστήματος δίνεται έμφαση σε δικτυακά περιβάλλοντα, κυρίως για δίκτυα αισθητήρων. Η ανάπτυξη του στηρίχθηκε στην προσαρμογή της αρχιτεκτονικής της PostgreSQL προγραμματίζοντας σε C/C++. Το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στην ευελιξία και προσαρμοστικότητα εκτέλεσης ερωτημάτων διαρκείας, εισάγοντας τον μηχανισμό Eddy.

Κεφάλαιο 2

Διαχείριση χωρικών δεδομένων

2.1 Εισαγωγή

Η πρόσφατη ραγδαία εξέλιξη των συστημάτων γεωγραφικού εντοπισμού αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη ποικίλων σχετικών εφαρμογών. Η τεχνολογία GPS, καθώς και η χρήση των ασύρματων επικοινωνιών, παρέχουν συνεχώς αυξανόμενη ακρίβεια στον εντοπισμό της θέσης ενός κινούμενου αντικειμένου με το χαμηλότερο κόστος. Ήδη έχουν αναπτυχθεί απλές εμπορικές εφαρμογές πλοήγησης στο οδικό δίκτυο μιας πόλης σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί να υποβάλει τη θέση προορισμού του (λ.χ. δίνοντας την διεύθυνση μιας οδού ή το όνομα μιας τοποθεσίας κ.α.) και το σύστημα, έχοντας αποθηκευμένες τοπικά πληροφορίες για το οδικό δίκτυο, παράγει την πιο σύντομη διαδρομή. Ταυτόχρονα, μέσω τεχνολογίας GPS μπορεί να εντοπίζει τη θέση του ανά πάσα στιγμή, να καθοδηγεί το χρήστη-οδηγό ανάλογα (λ.χ. με φωνητικά μηνύματα), ακόμα και να διορθώνει τη διαδρομή σε περίπτωση λάθους του. Οι ανάγκες μιας τέτοιας εφαρμογής, καθώς και γενικά αυτών που χειρίζονται γεωγραφικές και χωροχρονικές πληροφορίες, εισάγουν ένα νέο αντικείμενο έρευνας στο πεδίο των βάσεων δεδομένων, τις χωροχρονικές βάσεις δεδομένων.

Για τις ανάγκες των εν λόγω εφαρμογών είναι απαραίτητη η ανάπτυξη κατάλληλων δομών, οι οποίες να αναπαριστούν τα χωρικά και τα χωροχρονικά δεδομένα και κατάλληλων πράξεων (συναρτήσεων) επί αυτών, που να περιγράφουν τα χωροχρονικά φαινόμενα, δηλαδή την πιθανή κίνηση ή μεταβολή της έκτασης ή του σχήματος των χωρικών αντικειμένων στο πεδίο του χρόνου. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι αναπαράστασης των πραγματικών χωρικών αντικειμένων (σημεία, γραμμές και επιφάνειες) στον υπολογιστή [EGSV98, GBE+00]. Τα ίδια βασικά χωρικά δεδομένα έχουν επεκταθεί για τις ανάγκες των χωροχρονικών βάσεων δεδομένων (κινούμενο σημείο, κινούμενη γραμμή, κινούμενη επιφάνεια). Οι αναπαραστάσεις ποικίλουν από ένα απλό

ζεύγος πραγματικών αριθμών που αντιπροσωπεύουν ένα στατικό σημείο στο διδιάστατο χώρο μέχρι πολύ σύνθετες δομές για πολύγωνα και τυχαίες περιοχές με οπές (*faces*).

Οι χρήστες τέτοιων εφαρμογών μπορούν να υποβάλλουν πολλαπλά χωροχρονικά ερωτήματα σε συνδυασμό και με επιπλέον κριτήρια μη χωροχρονικού χαρακτήρα. Οι τύποι των ερωτημάτων που διατίθενται εξαρτώνται από την εφαρμογή και τους σκοπούς της. Για παράδειγμα σε ένα σύστημα παρακολούθησης εναέριας κυκλοφορίας ένα ερώτημα θα ήταν «εντόπισε τα αεροπλάνα με προορισμό την Αθήνα, που βρίσκονται εντός του εθνικού εναερίου χώρου». Το σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να επεξεργάζεται αποδοτικά πολλαπλά και ενδεχομένως αρκετά πολύπλοκα ερωτήματα εντός χρονικών περιορισμών, ενώ παράλληλα να παρακολουθεί την κίνηση και τη μεταβολή των χωρικών αντικειμένων.

Το πλήθος των χωρικών δεδομένων στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογών είναι αρκετά μεγάλο και τα ίδια αποτελούν αρκετά πολύπλοκες, ογκώδεις και δύσχρηστες δομές. Η αποδοτική αποτίμηση των ερωτημάτων, πέρα από την καλύτερη δυνατή σε ακρίβεια και οικονομία αναπαράσταση των χωρικών δεδομένων, επιβάλλει την οργάνωση τους σε κατάλληλες δομές για την εύκολη προσπέλασή τους από τα ερωτήματα. Οι χωρικές μέθοδοι προσπέλασης (*spatial access methods - SAM*) αποτελούν δομές οργάνωσης και προσπέλασης των χωρικών δεδομένων πολλαπλών διαστάσεων. Αντίθετα με τις αντίστοιχες που χρησιμοποιούνται στις κλασικές βάσεις δεδομένων για μονοδιάστατα μεγέθη (λ.χ. *B-trees*), οι χωρικές έχουν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της απουσίας ολικής διάταξης στα χωρικά δεδομένα. Στο πεδίο των χωρικών μεθόδων προσπέλασης, καθώς και στις μεθόδους προσπέλασης σημείων, έχει γίνει και γίνεται σημαντική έρευνα.

2.2 Αναπαράσταση χωρικών αντικειμένων

Τα πρωταρχικά χωρικά αντικείμενα που χειρίζονται οι χωρικές βάσεις δεδομένων, είναι το σημείο, η γραμμή (καμπύλη στο χώρο) και η περιοχή (αντικείμενα που εκτείνονται στο χώρο). Η μοντελοποίησή τους βασίζεται σε ένα αφηρημένο μοντέλο τύπων και λειτουργιών που συνδέει μια άλγεβρα χωρικών αντικειμένων, η οποία αποτελεί τη βάση για την ένταξή τους σε κάποια αντίστοιχη γλώσσα ερωταποκρίσεων κάποιου συστήματος βάσεων δεδομένων. Στη συνέχεια, γίνεται η υλοποίηση της άλγεβρας με τέτοιο τρόπο ώστε να ενσωματωθεί στο σύστημα ερωταποκρίσεων ενός ΣΔΒΔ. Για το λόγο αυτό, πρέπει να παραχθούν κατάλληλες αναπαραστάσεις για τους τύπους της άλγεβρας και αλγόριθμοι για τις αντίστοιχες λειτουργίες.

2.2.1 Το αφηρημένο μοντέλο χωρικών δεδομένων

Γενικά, η χρήση ενός αφηρημένου μοντέλου για την περιγραφή του πραγματικού κόσμου εξασφαλίζει την κλειστότητα (*closure*) των οριζόμενων τύπων, τη συνέπεια, την απλότητα και την εκφραστική ικανότητα στη διαχείριση απείρων συνόλων χωρίς καμία αναφορά σε οποιαδήποτε πεπερασμένη αναπαράστασή τους με μαθηματικό τρόπο.

Οι βασικοί τύποι δεδομένων *int*, *real*, *string* και *bool* επεκτείνονται στο αφηρημένο μοντέλο με μια επιπλέον αόριστη τιμή "⊥". Ο τύπος *point* αντιστοιχεί σε ένα μεμονωμένο σημείο στο διδιάστατο επίπεδο, ενώ ο τύπος *points* σε ένα πεπερασμένο σύνολο αντίστοιχων σημείων ως μια οντότητα. Ο τύπος *line* περιγράφει μια πεπερασμένη ομάδα συνεχών καμπυλών στο επίπεδο. Ο τύπος *region* αναπαριστά ένα πεπερασμένο σύνολο χωριστών επιφανειών που δεν είναι κενές στο εσωτερικό τους, αλλά μπορεί να έχουν οπές ή να βρίσκονται εν μέσω οπών άλλων επιφανειών.

Υπάρχουν 4 κλάσεις λειτουργιών:

- Συνθήκες επιλογής με κριτήρια που εκφράζουν τοπολογικές σχέσεις (λ.χ. *inside, intersects, meets, adjacent, encloses*).
- Λειτουργίες που επιστρέφουν νέες τιμές χωρικών τύπων (λ.χ. *intersection(line, line), intersection(region, region), union, difference, contour*).
- Τελεστές που επιστρέφουν αριθμούς (λ.χ. *dist, perimeter, size, area*).
- Λειτουργίες σε σύνολα χωρικών αντικειμένων (λ.χ. *sum, closest*).

2.2.2 Αναπαράσταση τιμών και δομές δεδομένων

Η αναπαράσταση της τιμής ενός χωρικού τύπου πρέπει να είναι ταυτόχρονα συμβατή με τα συστήματα βάσεων δεδομένων και με τη χωρική άλγεβρα. Από την πλευρά του ΣΔΒΔ, η αναπαράσταση πρέπει είναι ίδιων χαρακτηριστικών με αυτή άλλων τύπων, ενώ μπορεί να έχει μεγάλο και μεταβλητό μέγεθος. Πρέπει να αποθηκεύεται μόνιμα στο δίσκο σε μια ή περισσότερες σελίδες και να είναι δυνατό να φορτώνεται αποδοτικά στην κύρια μνήμη για να παρέχεται στις διαδικασίες, οι οποίες θα εκτελούν τις λειτουργίες της άλγεβρας. Τέλος, πρέπει να παρέχει ένα σύνολο υλοποιήσεων τύπων γενικών λειτουργιών που απαιτούνται από το ΣΔΒΔ. Από τη σκοπιά της υλοποίησης της χωρικής άλγεβρας, η αναπαράσταση γίνεται σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού (συνήθως του ΣΔΒΔ). Οι τύποι της άλγεβρας εκφράζονται μέσω τύπων δεδομένων της γλώσσας υλοποίησης, συνήθως αρκετά πολύπλοκες δομές δεδομένων. Τέλος, η συνολική αναπαράσταση τύπων και δομών πρέπει να υποστηρίζει την αποδοτική επεξεργασία πολλαπλών αλγορίθμων Υπολογιστικής Γεωμετρίας για τις ανάγκες της υλοποίησης των λειτουργιών.

Τα χωρικά δεδομένα, δηλαδή οι δομές δεδομένων που τα αναπαριστούν, πρέπει να υποστηρίζουν αποδοτική φόρτωση στη μνήμη και αποθήκευση στο δίσκο. Για το λόγο αυτό κάθε ανεξάρτητο αντικείμενο πρέπει να αποτελείται από μια ακέραια συνεχόμενη ομάδα bytes (*single contiguous byte block*), η οποία να μπορεί να αποθηκευτεί σε μια σελίδα μνήμης (κύριας ή δευτερεύουσας) ή σε περισσότερες, αν δεν είναι αρκετά μικρή. Με αυτή την προϋπόθεση, το ΣΔΒΔ είναι ικανό να διαχειριστεί τα αντικείμενα ως ανεξάρτητες οντότητες και να δεσμεύει μνήμη αποδοτικά για την προσπέλασή τους. Σε περίπτωση που η δομή ενός αντικειμένου δε χωράει σε μια σελίδα, τότε διάφορες τεχνικές χειρισμού μπορούν να υιοθετηθούν. Συνήθως, η δομή διασπάται σε κομμάτια κατάλληλου μεγέθους όχι μόνο για να χωράνε στις σελίδες, αλλά έτσι ώστε κάθε κομμάτι να αντιστοιχεί σε κάποιο διακριτό γεωμετρικό χαρακτηριστικό του αντικειμένου, προκειμένου σε περίπτωση ανάγκης προσπέλασης μόνο ενός από αυτά, να φορτωθεί στην κύρια μνήμη μόνο η αντίστοιχη σελίδα του.

Ιδιαίτερα σημαντικό θέμα κατά την αναπαράσταση των χωρικών δεδομένων είναι η δημιουργία επιπλέον πληροφορίας η οποία να αποτελεί κατά κάποιο τρόπο μια περιλήψη του αντικειμένου. Πρόκειται ουσιαστικά για μια απλή και λιτή δομή, εύκολη στο χειρισμό της, που εκφράζει μια προσέγγιση του αντικειμένου και κυρίως της πολύπλοκης και ογκώδους δομής που το αναπαριστά. Η χρησιμότητα των περιλήψεων είναι η γρήγορη προσπέλαση συνήθως ενός υπερσυνόλου του χωρικού αντικειμένου για την ικανοποίηση συνθηκών στις λειτουργίες και την αποτίμηση ερωτημάτων. Εάν η περιλήψη δεν είναι αρκετή για τον αντίστοιχο σκοπό, τότε κρίνεται απαραίτητο να προσπελαστεί η ακριβής αναπαράσταση της δομής ή τμήματα αυτής στις διάφορες σελίδες της. Τυπικό παράδειγμα περιλήψης χωρικής δομής στις 2 διαστάσεις αποτελεί το ορθογώνιο ελάχιστης διάστασης, το οποίο περικλείει πλήρως το αντικείμενο (*minimum bounding box*). Η επιπλέον πληροφορία των περιλήψεων συνήθως προσαρτάται στην αρχή του block της δομής.

Άλλες επιπλέον πληροφορίες που μπορεί να συμπεριλαμβάνονται στην αναπαράσταση είναι η αποτίμηση ακριβών συναρτήσεων σε σχέση με το αντικείμενο (λ.χ.

μέτρηση εμβαδού, περιμέτρου κτλ). Τέλος, συχνά οι αλγόριθμοί στην υπολογιστική γεωμετρία χρησιμοποιούν κάποια συγκεκριμένη σάρωση του επιπέδου (*plane-sweep*). Η τεχνική αυτή χρειάζεται τα συστατικά ενός αντικειμένου με μια συγκεκριμένη σειρά (λ.χ. *z-ordering*), η οποία συνήθως απαιτείται να αποθηκευτεί ρητά στη δομή ώστε να είναι έτοιμη για προσπέλαση.

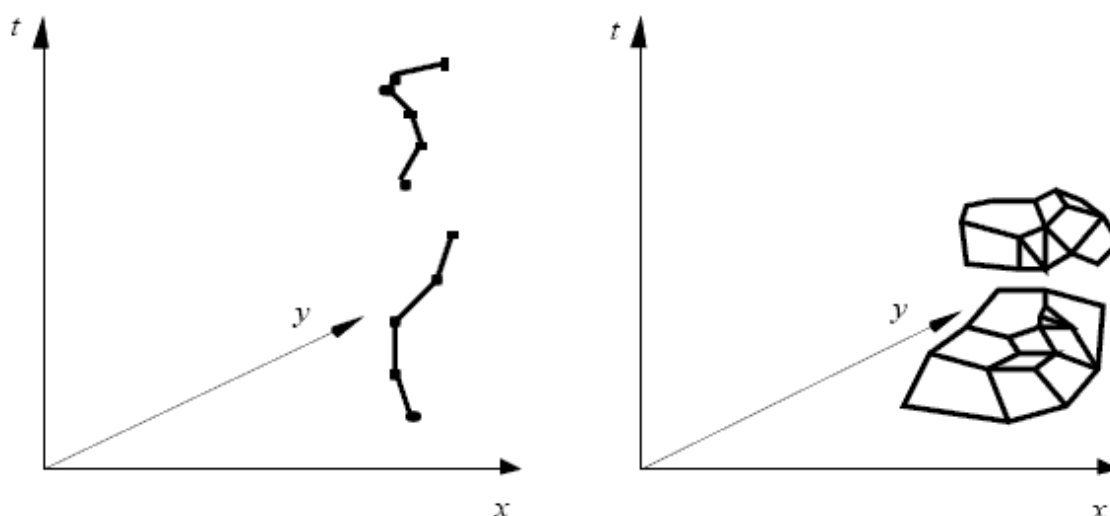
2.3 Αναπαράσταση χωροχρονικών αντικειμένων

Τα πρωταρχικά χωρικά αντικείμενα που χειρίζονται οι χωρικές βάσεις δεδομένων είναι το σημείο, η γραμμή (καμπύλη στο χώρο) και η περιοχή (αντικείμενα που εκτείνονται στο χώρο). Οι χωροχρονικές βάσεις δεδομένων επεκτείνουν τα πρωταρχικά αντικείμενα ως κινούμενα συμπεριλαμβανομένου και της μεταβολής της έκτασης των περιοχών. Η μοντελοποίηση των αντικειμένων γίνεται σε δύο επίπεδα. Αρχικά με το αφηρημένο μοντέλο γίνεται η θεμελίωση και αποσκοπεί στη μελέτη των χωροχρονικών φαινομένων. Το αφηρημένο μοντέλο στηρίζεται σε αφηρημένους τύπους δεδομένων (*abstract data types*) τόσο για τον ορισμό των αντικειμένων όσο και των λειτουργιών επί αυτών, ενώ συνήθως αποτελεί επέκταση του αντίστοιχου αφηρημένου μοντέλου για τα στατικά χωρικά αντικείμενα. Το σύνολο των τύπων δεδομένων και των λειτουργιών συνδέτουν αντίστοιχα μια άλγεβρα κινούμενων αντικειμένων που είναι η βάση για την ένταξη τους σε κάποια αντίστοιχη γλώσσα ερωταποκρίσεων κάποιου συστήματος βάσεων δεδομένων. Ωστόσο το αφηρημένο μοντέλο δεν είναι κατάλληλο για την αναπαράσταση των δεδομένων στον υπολογιστή. Το δεύτερο επίπεδο μοντελοποίησης είναι το διακριτό μοντέλο, το οποίο περιορίζει την κίνηση σε πεπερασμένα μόνο στιγμιότυπα. Για παράδειγμα, μια κινούμενη περιοχή ορισμένη στο αφηρημένο μοντέλο ως μια συνάρτηση του χρόνου με τιμές τα αντίστοιχα στιγμιότυπα της περιοχής για κάθε χρονική στιγμή, θα μπορούσε να αντιστοιχεί στο διακριτό μοντέλο σε μια πολυγωνική περιοχή (που να προσεγγίζει την πραγματική) ορισμένη ως συνάρτηση του διακριτού χρόνου.

2.3.1 Το αφηρημένο μοντέλο κίνησης

Με βάση το αφηρημένο μοντέλο για τα στατικά χωρικά αντικείμενα προστίθενται οι εξής τύποι. Ο τύπος *instant* προσδιορίζει το πεδίο του χρόνου ισομορφικό με τους πραγματικούς αριθμούς. Ο κατασκευαστής τύπων *range* χρησιμεύει στον ορισμό παράγωγων τύπων, των οποίων οι τιμές είναι διακριτά σύνολα διαστημάτων επί του πεδίου τιμών του κατηγορήματος. Τέλος, ο κατασκευαστής *intime* συσχετίζει τιμές κάποιου πεδίου σε μια δεδομένη χρονική στιγμή.

Ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο κατασκευαστής τύπων *moving* που επεκτείνει ένα τύπο στον αντίστοιχο κινούμενό του ως συνάρτηση του χρόνου (πεδίο ορισμού *instant*). Οι τύποι κινούμενου σημείου (*moving point* ή *mpoint*) και κινούμενης περιοχής (*moving region* ή *mregion*) είναι αποτελέσματα αυτού του κατασκευαστή. Θεωρείται ότι οι χωρικές και χρονικές διαστάσεις είναι συνεχείς και ισομορφικές προς το σύνολο των πραγματικών αριθμών. Άρα, μεταξύ δύο οποιωνδήποτε συντεταγμένων ή χρονικών στιγμών μπορεί να παρεμβληθεί αυθαίρετα μια τρίτη. Έτσι, μια μεταβλητή τύπου *mpoint* περιγράφει την κίνηση ενός σημείου, δηλαδή τη θέση του ως συνάρτηση του χρόνου και μπορεί να αναπαρασταθεί με τη μορφή μιας καμπύλης στο τρισδιάστατο σύστημα αξόνων (x,y,t) χωρίς απαραίτητα να είναι συνεχής. Αντίστοιχα μια μεταβλητή τύπου *mregion* είναι ένα σύνολο όγκων στο τρισδιάστατο σύστημα (x,y,t) , των οποίων η τομή με το επίπεδο $t=t_0$ αντιστοιχεί στο στιγμιότυπο της περιοχής, δηλαδή τη θέση και την έκταση των επιφανειών στη χρονική στιγμή t_0 που αντίστοιχα αναπαρίσταται από μια μεταβλητή



Σχήμα 2.1: Διακριτές αναπαραστάσεις κινούμενου σημείου και περιοχής (πηγή [EGSV98])

τύπου region. Άλλες χρήσεις του κατασκευαστή moving είναι η κινούμενη απόσταση (moving distance), δηλαδή ένας χρονικά μεταβαλλόμενος πραγματικός αριθμός (moving real ή mreal), που χρησιμοποιείται για την καταγραφή της απόστασης δύο κινούμενων σημείων στο πεδίο του χρόνου.

Οι λειτουργίες επί των βασικών τύπων δεδομένων, οι οποίες δεν περιέχουν τη διάσταση του χρόνου, είναι συνθήκες επιλογής με κριτήρια (predicates) όπως INSIDE ή \leq , πράξεις συνόλων (λ.χ. UNION), λειτουργίες συνάθροισης (aggregates), πράξεις που επιστρέφουν αριθμητικό αποτέλεσμα (λ.χ. μέτρηση εμβαδού, SIZE), καθώς και λειτουργίες εύρεσης της απόστασης ή της διεύθυνσης της κίνησης. Οι ίδιες λειτουργίες επεκτείνονται (temporal lifting) προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους «κινούμενους», δηλαδή χρονικά εξαρτώμενους τύπους (λ.χ. χρήση της INSIDE με mpoint και mregion επιστρέφοντας τιμή moving bool). Τέλος, υπάρχουν και πιο σύνθετες λειτουργίες που εφαρμόζονται σε μεταβλητές τύπων με χρονική αναφορά παράγουν συναρτήσεις. Η συσχέτισή τους με τους κατασκευαστές τύπων instant και range παράγει μεμονωμένες τιμές του ή διαστήματα τιμών τους. Επίσης μπορεί να προκύψει η τροχιά της κίνησης από την προβολή της στο επίπεδο ή να οριστούν πιο πολύπλοκες συναρτήσεις όπως ταχύτητα και άλλες σύνθετες.

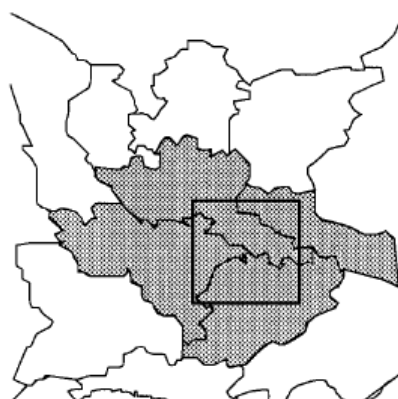
2.3.2 Το διακριτό μοντέλο κίνησης

Το διακριτό μοντέλο αποτελεί ουσιαστικά μια ατελή προσέγγιση της κίνησης των χωρικών αντικειμένων. Ένα άπειρο φαινόμενο εκφράζεται σε στιγμιότυπα πεπερασμένου πλήθους μέσω υποσυνόλων των τιμών του αντίστοιχου αφηρημένου μοντέλου. Για παράδειγμα, μια περιοχή μπορεί να εμφανίζεται ως πολύγωνο ή μια καμπύλη να εμφανίζεται ως πολυγραμμική (polyline). Αντίστοιχα η κίνηση ενός αντικειμένου αναπαρίσταται ως μια διακοπτόμενη πολυγραμμική στο τρισδιάστατο σύστημα (x,y,t), ενώ μια κινούμενη περιοχή αναπαρίσταται από ένα σύνολο πολυέδρων (σχ. 2.1).

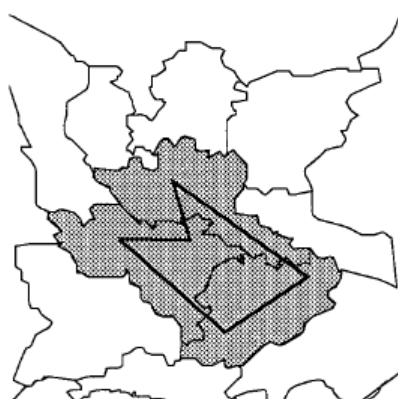
Ο ορισμός τύπων δεδομένων και λειτουργιών αποδεικνύεται αρκετά πολύπλοκος στο διακριτό μοντέλο, εξαιτίας των προσεγγίσεων, παρόλο που η πεπερασμένη και διακριτή μορφή εξυπηρετεί την κατασκευή κατάλληλων δομών δεδομένων και αλγορίθμων για την επεξεργασία τους. Για παράδειγμα, η κινούμενη απόσταση μεταξύ δύο αντικειμένων ορίζεται ως ένας χρονικά μεταβαλλόμενος αριθμός και η αναπαράστασή του αποτελεί



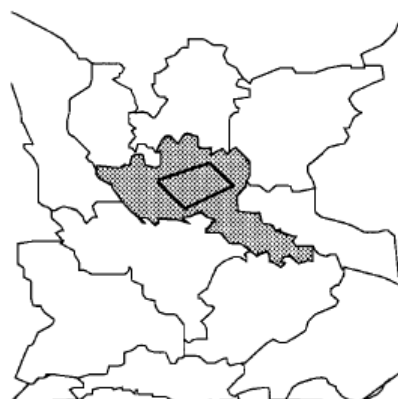
Σχήμα 2.2: Ερώτημα σημείου (πηγή [GG98])



Σχήμα 2.3: Ερώτημα ορθογωνίας περιοχής (πηγή [GG98])



Σχήμα 2.4: Ερώτημα τομής (πηγή [GG98])



Σχήμα 2.5: Ερώτημα περίφραξης (πηγή [GG98])

δυσεπίλυτο πρόβλημα. Ο τρόπος υπολογισμού του προκύπτει εύκολα για ίδιες χρονικές στιγμές, αλλά διαφέρει, όταν στο τρισδιάστατο σύστημα τα αντικείμενα θεωρηθούν κινούμενα και ως προς τη διάσταση του χρόνου.

Ο μετασχηματισμός τύπων με τον κατασκευαστή moving λειτουργεί στο αφηρημένο μοντέλο, αλλά στο διακριτό δεν είναι πάντα πρακτικά υλοποιήσιμος. Έτσι, έχει προταθεί η τεχνική της τμηματικής αναπαράστασης (*sliced representation*) διασπώντας τη χρονική εξέλιξη μιας τιμής σε τμήματα, που το καθένα προσεγγίζεται αυτοτελώς από κάποια απλή συνάρτηση του χρόνου. Έτσι, ο τύπος moving αντικαθίσταται από τον τύπο mapping.

2.4 Χωρικά και χωροχρονικά ερωτήματα

Συνήθως τίθενται 9 είδη χωρικών ερωτημάτων επί του συνόλου των στατικών χωρικών αντικειμένων.

1. Ακριβής αναζήτηση αντικειμένων (*exact match query*): Βρες όλα τα αντικείμενα, που ταυτίζονται με το δοσμένο.

2. *Σημείου (point query)*: Βρες όλα τα αντικείμενα που η χωρική τους έκταση περιλαμβάνει το δοσμένο σημείο (σχήμα 2.2).
3. *Περιοχής (range query)*: Βρες τα αντικείμενα που περιέχονται στη δοσμένη περιοχή, η οποία μπορεί να είναι ορθογώνιο, κύκλος ή οποιοδήποτε πολύγωνο (σχήμα 2.3).
4. *Τομής (intersection query)*: Βρες τα αντικείμενα που τέμνουν το δοσμένο (έχουν τουλάχιστον ένα κοινό σημείο) (σχήμα 2.4).
5. *Περίφραξης (enclosure query)*: Βρες τα αντικείμενα που περικλείουν το δοσμένο (σχήμα 2.5).
6. *Περιεχομένου (containment query)*: Βρες τα αντικείμενα που περιέχονται πλήρως στο δοσμένο.
7. *Γειτνίασης (adjacency query)*: Βρες τα αντικείμενα που συνορεύουν με το δοσμένο.
8. *Εγγύτερου γείτονα (nearest-neighbor query)*: Βρες το αντικείμενο που βρίσκεται κοντινότερα στο δοσμένο (ή τα k κοντινότερά του).
9. *Χωρικής σύνδεσης (spatial join)*: για δύο δοσμένα σύνολα αντικειμένων, βρες τα ζεύγη αντικειμένων από το ένα και το άλλο που ικανοποιούν μια προκαθορισμένη συνθήκη (λ.χ. απόσταση μικρότερη από 100m). Η συνθήκη μπορεί να είναι ή να περιέχει άλλα ερωτήματα.

Όλα τα παραπάνω ερωτήματα εκφράζονται στην άλγεβρα και στο ΣΔΒΔ μέσω των λειτουργιών που έχουν αναπτυχθεί. Αντίστοιχα, μπορούν να επεκταθούν στο πεδίο του χρόνου για κινούμενα χωρικά αντικείμενα μέσω των αντίστοιχων λειτουργιών. Η χωρική διάσταση μπορεί να αναφέρεται είτε στο παρελθόν, είτε στο παρόν, είτε στο άμεσο μέλλον υποδέτοντας και κάποια τεχνική για την πρόβλεψη.

2.5 Χωρικές μέθοδοι προσπέλασης

Η απαιτούμενη υπολογιστική επεξεργασία για την αποτίμηση των χωρικών ερωτημάτων είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερη από τους επιθυμητούς περιορισμούς των εφαρμογών. Οι αλγόριθμοι της υπολογιστικής γεωμετρίας είναι αρκετά πολύπλοκοι και έτσι ο φόρτος επεξεργασίας αυξάνεται υπερβολικά για μεγάλο πλήθος αντικειμένων και ερωτημάτων. Για την αποδοτική αποτίμηση των χωρικών ερωτημάτων απαιτείται η χρήση ειδικών μεθόδων προσπέλασης, οι οποίες ονομάζονται *χωρικές μέθοδοι προσπέλασης (Spatial Access Methods)* και περιλαμβάνουν κατάλληλες δομές οργάνωσης και προσπέλασης των χωρικών δεδομένων. Σκοπός τους είναι να μειώσουν το φόρτο επεξεργασίας των αλγορίθμων αποτίμησης των ερωτημάτων, όπως αντίστοιχα κάνουν λ.χ. τα B-trees στις κλασικές βάσεις δεδομένων. Η σχεδιάσή τους διαφέρει ανάλογα με τους τύπους χωρικών αντικειμένων που θα χειρίζονται, τις απαιτήσεις των εφαρμογών, καθώς και τους τύπους των χωρικών ερωτημάτων.

Η αποτίμηση των χωρικών ερωτημάτων με τη χρήση μεθόδων προσπέλασης γίνεται σε δύο διαδοχικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο (*filter step*), η μέθοδος προσπέλασης επιλέγει τα υποψήφια αντικείμενα που είναι πιθανό να ικανοποιούν τα κριτήρια του ερωτήματος, έστω και κατά προσέγγιση. Η επιλογή των αντικειμένων προς επεξεργασία, είναι λοιπόν ένα υποσύνολο του συνόλου των αντικειμένων. Επιπλέον πρέπει να είναι πάντοτε ένα υπερσύνολο αυτών που απαιτούνται να οδηγηθούν προς επεξεργασία, ώστε να ολοκληρωθεί η ορθή αποτίμηση καθενός ερωτήματος. Στην συνέχεια, κατά το δεύτερο στάδιο (*refinement step*), εξετάζονται λεπτομερώς τα υποψήφια αντικείμενα και επιλέγονται όσα ικανοποιούν τα κριτήρια ακριβώς. Οι γεωμετρικοί αλγόριθμοι του σταδίου *refinement* είναι πολύπλοκοι και έχουν άμεση σχέση με το είδος των αντικειμένων και την αναπαράστασή τους. Αντίθετα, ο αλγόριθμος του σταδίου *filter* είναι πιο γενικός. Χρησιμοποιεί μια γενική αναπαράσταση για τα αντικείμενα (λ.χ. το *minimum bounding*

box) και τα τακτοποιεί, ώστε κάθε φορά να παρέχει τα υποψήφια στο επόμενο στάδιο. Οι μέθοδοι προσπέλασης αφορούν αποκλειστικά το πρώτο στάδιο, ανεξάρτητα από την επεξεργασία στο δεύτερο στάδιο.

Έχει γίνει μεγάλη έρευνα πάνω στις μεθόδους προσπέλασης, από την οποία έχουν προκύψει τεχνικές που διευκολύνουν διαφορετικά περιβάλλοντα και ερωτήματα. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι για τα πολυδιάστατα χωρικά δεδομένα δεν υπάρχει εγγενώς ολική διάταξη. Έτσι, τα πολυδιάστατα χωρικά δεδομένα είναι δύσκολο να οργανωθούν σε μονοδιάστατα, έτσι ώστε αντικείμενα που βρίσκονται κοντά μεταξύ τους στον πολυδιάστατο χώρο να βρίσκονται επίσης κοντά μεταξύ τους και στον μονοδιάστατο. Μια βασική ταξινόμηση των μεθόδων προσπέλασης ως προς τη δομή τους είναι:

- **Δομές με γνώμονα τον χώρο (Space-driven):** Αυτές είναι βασισμένες στην κατάτμηση του χώρου σε ορθογώνια κελιά, ανεξάρτητα από την χωρική κατανομή των αντικειμένων. Τα αντικείμενα τοποθετούνται στα κελιά με βάση κάποιο γεωμετρικό κριτήριο (λ.χ. η έκτασή τους τέμνει το κελί). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλες οι μέθοδοι, οι οποίες χρησιμοποιούν την τεχνική του κατακερματισμού. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, εφαρμόζεται ένα πλέγμα (ενδεχομένως μεταβλητής κατάτμησης) στο χώρο και τον κατακερματίζει σε κελιά με τη χρήση μιας συνάρτησης κατακερματισμού (*hash function*).
- **Δομές με γνώμονα τα δεδομένα (Data-driven):** Αυτές διαμερίζουν το σύνολο των αντικειμένων αντί για το χώρο που καταλαμβάνουν, ώστε να προσαρμόζονται σε οποιαδήποτε χωρική κατανομή τους. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι μέθοδοι με ιεραρχικές (δενδρικές) δομές. Σύμφωνα με αυτές, ο χώρος κατακερματίζεται ιεραρχικά, όχι από κάποιο πλέγμα, αλλά ανάλογα με την κατανομή των ίδιων των αντικειμένων στο χώρο (λ.χ. με γνώμονα σταθερό μέγιστο πλήθος αντικειμένων ανά περιοχή)

Άλλη βασική ταξινόμηση είναι ως προς τον τύπο αντικειμένων που χειρίζονται: σημειακά αντικείμενα (*point access methods*) ή αντικείμενα με έκταση στο χώρο.

2.5.1 Απαιτήσεις στη σχεδίαση χωρικών μεθόδων προσπέλασης

Οι προγενέστερες χωρικές μέθοδοι προσπέλασης δεν λάμβαναν υπόψη την σελιδοποιημένη αποθήκευση των δεδομένων σε δευτερεύουσα μνήμη, δηλαδή ήταν μέθοδοι κυρίως κατάλληλες για την κύρια μνήμη τυχαίας προσπέλασης και ακατάλληλες από πλευράς αποδοτικότητας για το δίσκο. Για τις ανάγκες των χωρικών βάσεων δεδομένων μεγάλης κλίμακας, των οποίων το μέγεθος υπερβαίνει το μέγεθος της βασικής μνήμης, έπρεπε να αναπτυχθούν κατάλληλες μέθοδοι δευτερεύουσας μνήμης. Ωστόσο, οι προγενέστερες μέθοδοι και κυρίως οι τεχνικές τους αποτέλεσαν βάση για την ανάπτυξη των σύγχρονων μεθόδων.

Η σχεδίαση των χωρικών μεθόδων προσπέλασης στηρίζεται στις ίδιες θεμελιώδεις υποθέσεις της ανάπτυξης των B-trees ή της τεχνικής κατακερματισμού για την επιτάχυνση της προσπέλασης δεδομένων στις κλασικές βάσεις δεδομένων. Θεωρείται ότι το μέγεθος του συνόλου των αντικειμένων είναι μεγαλύτερο από την διαθέσιμη κύρια μνήμη και επιπλέον ότι ο χρόνος προσπέλασης του δίσκου είναι κατά πολύ μεγαλύτερος απ' αυτόν της κύριας μνήμης. Τα χωρικά δεδομένα είναι οργανωμένα σε σελίδες (*blocks*) και η ανάγνωση ή εγγραφή μιας σελίδας από ή προς το δίσκο αναφέρεται ως μια λειτουργία εισόδου / εξόδου (I/O). Αγνοείται η δυνατότητα χρήσης λανθάνουσας μνήμης για τις σελίδες (*page caching*), δηλαδή υποτίθεται ότι για κάθε λειτουργία I/O συμβαίνει αστοχία της λανθάνουσας μνήμης (*page fault*) και αυτή φορτώνεται ή εγγράφεται εκ νέου από ή προς το δίσκο. Από την πλευρά του κόστους της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU time)

υποτίθεται ότι είναι αμελητέο σε σχέση με το κόστος των λειτουργιών I/O. Αν και αυτή η υπόθεση ήταν ισχυρή στις κλασικές βάσεις δεδομένων, στα χωρικά δεδομένα δεν είναι πάντα. Παρόλα αυτά, τη θεωρούμε πάντοτε ισχυρή. Έτσι, η αποδοτικότητα των SAM μετράται σε λειτουργίες I/O. Δεδομένων αυτών των υποθέσεων, οι απαιτήσεις από μια χωρική μέθοδο προσπέλασης είναι: υπογραμμική πολυπλοκότητα (*sublinear time complexity*) σε ερωτήματα ακριβούς αναζήτησης (σημείου) και περιοχής (παραθύρου) και επιπλέον το μέγεθός της πρέπει να είναι συγκρίσιμο με αυτό του συνόλου των αντικειμένων (*space complexity*).

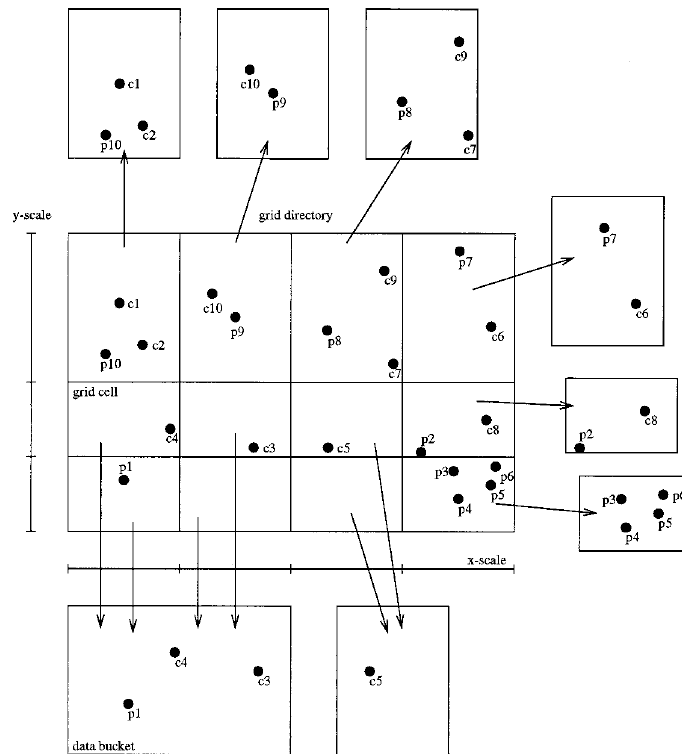
Η *δυναμικότητα (dynamicity)* μιας χωρικής μεθόδου είναι ένα εξίσου σημαντικό θέμα στη σχεδίασή τους. Πρέπει να υποστηρίζεται η δυναμική εισαγωγή και εξαγωγή αντικειμένων σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Η μέθοδος πρέπει να προσαρμόζεται σε οποιαδήποτε αύξηση ή μείωση του συνόλου των αντικειμένων και κατά το μέγιστο δυνατό σε οποιαδήποτε κατανομή των αντικειμένων στο χώρο χωρίς απώλειες απόδοσης. Η δημιουργία μιας αρκετά σθεναρής δομής ως προς τη στατιστική κατανομή των αντικειμένων στο χώρο είναι μια δύσκολη υπόθεση. Παρόλο που η σχεδίαση των SAM γίνεται συνήθως για λογαριθμική πολυπλοκότητα ως προς το πλήθος των αντικειμένων, πάντα υπάρχει η περίπτωση μιας κατανομής (*worst case*) για την οποία, η δομή δεν αποδίδει τόσο αποτελεσματικά. Κατά κύριο λόγο οι SAM λειτουργούν σύμφωνα με τις προδιαγραφές για ομοιόμορφες (ή σχεδόν ομοιόμορφες) κατανομές. Ενώ η κατασκευή του B-tree για τις κλασικές βάσεις δεδομένων είναι μια *worst case* δομή, αυτό δεν ισχύει για τις χωρικές μεθόδους προσπέλασης, των οποίων η απόδοση φθίνει για ασύμμετρες κατανομές. Η ανάγκη της δυναμικότητας είναι λιγότερο σημαντική, όταν το πλήθος και το σύνολο των αντικειμένων είναι γνωστό εκ των προτέρων, όπου η δομή της μεθόδου γίνεται στατική.

2.5.2 Χειρισμός αντικειμένων με έκταση στο χώρο

Επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας για χωρικά αντικείμενα με έκταση στο δισδιάστατο χώρο, δηλαδή για πολύγωνα και γραμμές στο επίπεδο. Η δημιουργία ευρετηρίου (*indexing*) για αυτά αποτελεί δύσκολη και κυρίως πολύπλοκη διαδικασία εξαιτίας της σύνθετης μορφής τους. Αντί των ιδίων, γίνεται χρήση μιας πιο εύχρηστης προσέγγισης της έκτασης που καταλαμβάνουν στο χώρο. Η πιο συνηθισμένη προσέγγιση είναι το ελάχιστο περιβάλλον παραλληλόγραμμο (*minimum bounding rectangle*) που περιλαμβάνει το αντικείμενο. Η επιλογή αυτής της τεχνικής δεν βλάπτει την ορθότητα, αφού οι χωρικές μέθοδοι προσπέλασης λαμβάνουν μέρος μόνο κατά το πρώτο στάδιο της αποτίμησης (*filter step*) των ερωτημάτων. Στο δεύτερο στάδιο (*refinement step*) συνυπολογίζεται η ακριβής έκταση των αντικειμένων. Έτσι, ανεξαρτήτως σχήματος των αντικειμένων, αρκεί να γίνει σχεδίαση μεθόδων προσπέλασης αντικειμένων ορθογωνίου σχήματος. Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται οι αντιπροσωπευτικότερες μέθοδοι.

2.6 Επισκόπηση χωρικών μεθόδων προσπέλασης για σημειακά αντικείμενα

Στις ακόλουθες υποενότητες γίνεται συνοπτική επισκόπηση αντιπροσωπευτικών μεθόδων προσπέλασης για σημειακά αντικείμενα. Το κοινό στοιχείο τους είναι ότι τα σημειακά αντικείμενα, δηλαδή τα χωρικά δεδομένα της αναπαράστασής τους, οργανώνονται σε σελίδες, οι οποίες ονομάζονται κάδοι (*buckets*). Όλα τα σημειακά αντικείμενα εντός του ίδιου κάδου έχουν την ίδια ιδιότητα με αυτή που έχει ο κάδος σε σχέση με το χώρο (λ.χ. ανήκουν στο ίδιο κελί του πλέγματος ή στην ίδια περιοχή του χώρου) και είναι γειτονικά. Οι κάδοι, ως σελίδες του δίσκου (ή της μνήμης αντίστοιχα), έχουν προκαθορισμένο σταθερό



Σχήμα 2.6: Grid File (πηγή [GG98])

μέγεθος, όπως περιγράφεται στην υποενότητα 2.5.1. Έτσι, η χωρητικότητά τους είναι σταθερή με την υπόθεση ότι και η αναπαράσταση όλων των σημειακών αντικειμένων είναι σταθερού μεγέθους. Όταν ένας κάδος γεμίζει, πρέπει είτε να διασπαστεί σε δύο είτε να δημιουργηθεί ένας επιπλέον κενός. Οι δύο κάδοι που προκύπτουν τελικά, δεικτοδοτούνται κατάλληλα στη δομή και διατηρούν την ίδια ιδιότητα (σε σχέση με το χώρο) που είχε ο αρχικός. Για παράδειγμα, κάποιον κελί του πλέγματος μιας μεθόδου κατακερματισμού είναι αντιστοιχισμένο με ένα ή περισσότερους κάδους, των οποίων τα σημεία βρίσκονται στο ίδιο κελί.

2.6.1 Τεχνικές βασισμένες σε κατακερματισμό

(i) Grid File

Εφαρμόζει ένα ορθογώνιο πλέγμα (grid) πάνω στο χώρο αντίστοιχης διάστασης d . Το πλέγμα δεν είναι απαραίτητα κανονικό και έτσι τα κελιά (cells) μπορεί να είναι διαφορετικών διαστάσεων. Υπάρχει ένας κατάλογος πλέγματος (grid directory), που αντιστοιχίζει ένα ή περισσότερα (γειτονικά) κελιά σε ένα κάδο αποθηκευμένο σε μια σελίδα μνήμης. Κοινώς, ένας κάδος μπορεί να περιέχει αντικείμενα πολλών γειτονικών κελιών, αλλά κάθε κελί έχει ανατεθεί σε ένα κάδο. Το πλέγμα αναπαρίσταται από d μονοδιάστατους πίνακες (κλίμακες), που αντιπροσωπεύουν τα διαστήματα κατάρτησης σε κάθε διάσταση.

Η εισαγωγή ενός σημειακού αντικειμένου γίνεται με τη χρήση των μονοδιάστατων κλιμάκων για να βρεθεί το κελί όπου ανήκει. Στη συνέχεια εντοπίζεται ο αντίστοιχος κάδος (μέσω του καταλόγου) και γράφεται στη σελίδα, εφόσον υπάρχει χώρος. Αν δεν υπάρχει (overflow), τότε είτε χρησιμοποιείται ένα υπάρχον υπερπίπεδο (hyperplane) του

πλέγματος είτε δημιουργείται ένα νέο. Δεσμεύεται μια νέα σελίδα και γίνεται διάσπαση της παλιάς. Τα σημεία κατανέμονται στις δύο σελίδες. Τα κελιά που τέμνει το νέο υπερεπίπεδο επίσης διασπώνται αντίστοιχα και αυτό καθιστά τη διαδικασία μη τοπική.

Η διαγραφή επίσης δεν είναι τοπική διαδικασία. Με τη διαγραφή ενός σημείου η κάλυψη μιας σελίδας μπορεί να πέσει κάτω από το προκαθορισμένο κατώφλι (*underflow*). Ανάλογα με την τρέχουσα κατάτμηση του χώρου, μπορεί να χρειαστεί η σελίδα να συγχωνευτεί με μια γειτονική και να διαγραφεί το αντίστοιχο υπερεπίπεδο. Η συγχώνευση μπορεί να απαιτήσει τον πλήρη έλεγχο του καταλόγου ανάλογα με τον τρόπο υλοποίησής του.

(ii) Παραλλαγές του Grid File

Στην πορεία προτάθηκαν δύο επεκτάσεις του Grid File με στόχο να λύσουν ορισμένες αδυναμίες του, το Two-Level Grid File και το Twin Grid File. Το Two-Level (δύο επιπέδων) Grid File χρησιμοποιεί ένα δεύτερο grid file για να διαχειρίζεται τον κατάλογο πλέγματος. Το πρώτο επίπεδο (root directory) περιέχει δείκτες προς τις σελίδες καταλόγου του δεύτερου επιπέδου, το οποίο με τη σειρά του περιέχει δείκτες στις σελίδες των αντικειμένων. Με τη χρήση του δεύτερου επιπέδου οι διασπάσεις συχνά περιορίζονται σε αυτό χωρίς να επηρεάζουν πολύ το περιβάλλον τους. Παρόλο που αυτή η τροποποίηση οδηγεί σε μικρότερη αύξηση του καταλόγου, δεν λύνει το πρόβλημα της υπεργραμμικής του αύξησης.

Το Twin Grid File προσπαθεί να αυξήσει την αξιοποίηση της δεσμευμένης μνήμης με τη χρήση του δεύτερου grid file. Η σχέση των δύο grid files δεν είναι ιεραρχική, ενώ και τα δύο εκτείνονται σε όλο το χώρο. Η διανομή των σημείων μεταξύ τους γίνεται δυναμικά. Αν ένας κάδος γεμίσει πρέπει να ανακαταμετρηθούν τα σημεία μεταξύ των δύο files. Η μεταφορά σημείων από το ένα στο άλλο μπορεί να προκαλέσει υπερχειλίση στο δεύτερο και στη συνέχεια μείωση κάτω του επιτρεπτού στο πρώτο και έπειτα συγχώνευση κ.ο.κ. Ο στόχος είναι να επιλέγεται κατάλληλη μεταφορά σημείων ώστε να μειώνεται ο συνολικός αριθμός των κάδων. Συνήθως δεν υπάρχει μοναδική βέλτιστη λύση για την αναδιανομή των σημείων μεταξύ των δύο grid files. Τέλος, οι αναζητήσεις σημείων πρέπει να γίνονται και στα δύο grid files, γεγονός που προσθέτει κάποια επιβάρυνση. Στα ερωτήματα περιοχής, το Twin Grid file εμφανίζεται ανώτερο του αυθεντικού για μεγάλης έκτασης περιοχές, όχι όμως για μικρές.

(iii) EXCELL

Παρόμοιο με το grid file είναι το EXCELL μόνο που το πλέγμα του είναι κανονικό, δηλαδή όλα τα κελιά έχουν το ίδιο μέγεθος. Για τη διατήρηση αυτής της ιδιότητας, κάθε διάσπαση προκαλεί τη διχοτόμηση όλων των κελιών του πλέγματος και έτσι το διπλασιασμό του καταλόγου. Για την καταπολέμηση αυτού του προβλήματος ο Tamminen αργότερα πρότεινε μια ιεραρχική μέθοδο παρόμοια με το multilevel grid file των Whang και Krishnamurthy. Επίσης εισήγαγε τις σελίδες υπερχειλίσης για τον περιορισμό του βάθους της ιεραρχίας.

(iv) Multidimensional Linear Hashing

Βασίζεται στον κλασικό γραμμικό κατακερματισμό ανά διάσταση. Χρησιμοποιεί πολύ μικρό ή καθόλου κατάλογο. Οι αρχικές προτάσεις αποτύγχαναν να υποστηρίξουν ερωτήματα περιοχής. Η πρόταση των Kriegel και Seeger ήταν μια παραλλαγή του γραμμικού κατακερματισμού με όνομα *multidimensional order-preserving linear hashing with partial expansions (MOLHPE)*. Η ιδέα της δομής είναι η μερική επέκταση των

κάδων χωρίς την επέκταση του αρχείου. Καταφέρνει μέτρια αύξηση του καταλόγου και σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα υπερνικά τις άλλες μεθόδους για ομοιόμορφα κατανεμημένα σημεία. Αποτυγχάνει ωστόσο για μη ομοιόμορφες κατανομές εξαιτίας της συνάρτησης κατακερματισμού. Αργότερα προτάθηκε η τεχνική *a-quantiles* και η μέθοδος προσπέλασης μετονομάστηκε σε *Quantile Hashing*. Η τεχνική μπορεί να μετασχηματίζει μη ομοιόμορφη κατανομή σημείων σε ομοιόμορφη και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται οι αλγόριθμοι MOLHPE.

2.6.2 Ιεραρχικές τεχνικές

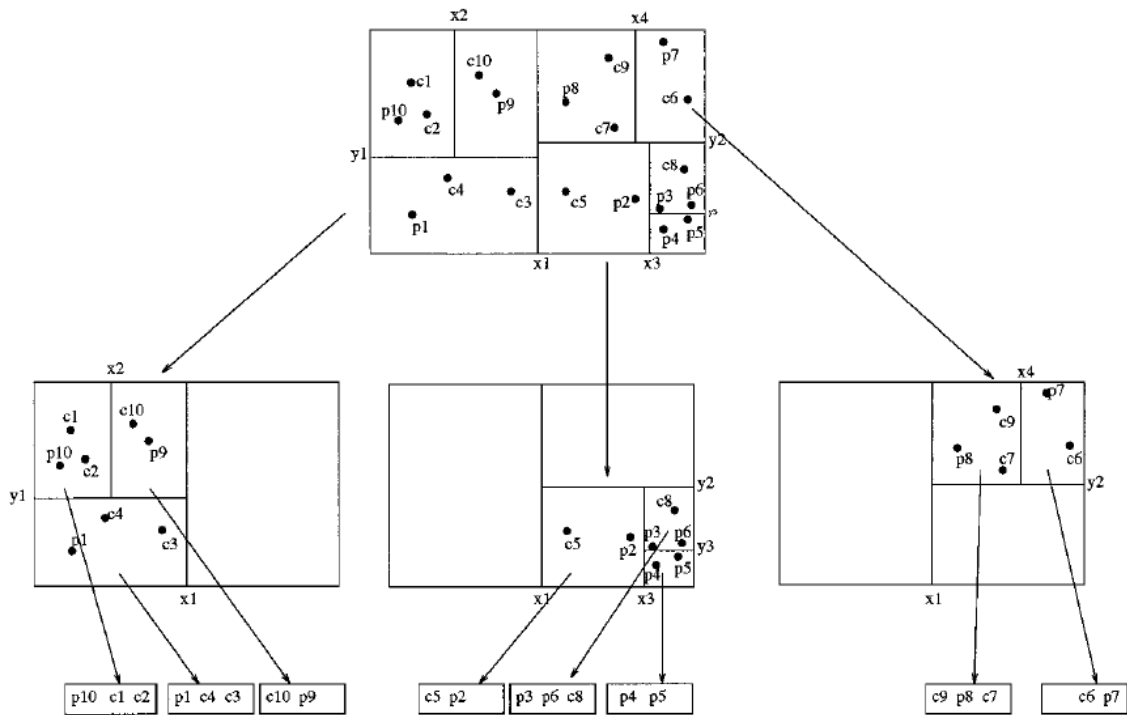
Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται χωρικές μέθοδοι προσπέλασης σημείων ιεραρχικής (δενδρικής) μορφής. Οι ιεραρχικές μέθοδοι προσπέλασης είναι βασισμένες σε δυαδικές ή πολλαπλών δρόμων δενδρικές δομές και οργανώνουν τα σημεία σε κάδους. Κάθε κάδος συνήθως αντιστοιχεί σε ένα φύλλο του δένδρου. Οι εσωτερικοί κόμβοι του δένδρου χρησιμοποιούνται για την καθοδήγηση των αναζητήσεων. Κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει ένα ευρύτερο μέρος του χώρου απ' αυτόν κάθε παιδιού του. Μια αναζήτηση πραγματοποιείται με διάσχιση από την ρίζα (που αντιπροσωπεύει το σύμπαν) προς τα φύλλα. Οι μέθοδοι διαφοροποιούνται στα χαρακτηριστικά των υποπεριοχών των κόμβων. Στις περισσότερες, οι υποπεριοχές του ίδιου επιπέδου στο δένδρο αποτελούν μια κατάτμηση του χώρου, δηλαδή δεν έχουν κοινά σημεία και η ένωσή τους είναι το σύμπαν.

(i) *k-d-B-tree*

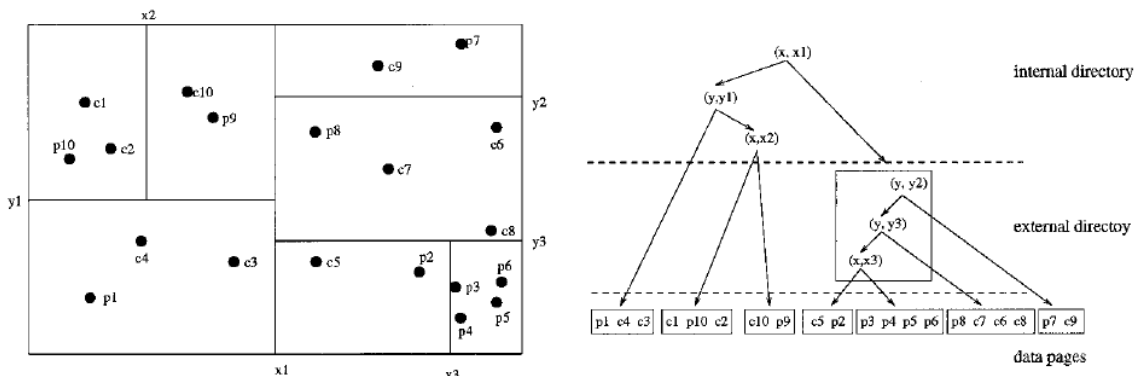
Συνδυάζει μερικά από τα χαρακτηριστικά του προσαρμοζόμενου *k-d-tree* [Bentley and Friedman 1979] και του *B-tree* [Comer 1979]. Κάθε εσωτερικός κόμβος αντιστοιχεί σε ένα διάστημα του χώρου. Οι περιοχές του ίδιου επιπέδου αποτελούν κατάτμηση του χώρου. Στα φύλλα αποθηκεύονται τα σημεία που βρίσκονται στην αντίστοιχη περιοχή. Όπως και το *B-tree*, είναι τέλεια ισοσταθμισμένο και προσαρμόζεται καλά στην κατανομή των σημείων. Ωστόσο, δεν μπορεί να εγγυηθεί κάποια τιμή για την ελάχιστη χρησιμοποίηση της μνήμης.

Η εισαγωγή ενός σημείου ξεκινάει με μια αναζήτηση για την εύρεση του κατάλληλου κάδου. Αν ο κάδος δεν είναι πλήρης, τότε γίνεται η εισαγωγή άμεσα. Αλλιώς, ο κάδος διασπάται και περίπου οι μισές του καταχωρήσεις μεταφέρονται στο νέο κάδο. Ποικίλες προτάσεις είναι διαθέσιμες για τη βέλτιστη διάσπαση [Robinson 1981]. Αν ο γονέας δεν έχει αρκετό χώρο για να φιλοξενήσει το νέο κάδο, διαχωρίζεται από ένα υπερεπίπεδο και μια νέα σελίδα δεσμεύεται. Οι καταχωρήσεις μοιράζονται στις δύο σελίδες ανάλογα με τη σχετική του θέση ως προς το νέο υπερεπίπεδο και η διάσπαση διαδίδεται παραπάνω στο δένδρο. Η διάσπαση ενός εσωτερικού κόμβου από ένα νέο υπερεπίπεδο μπορεί να επηρεάσει περιοχές σε χαμηλότερα επίπεδα του δένδρου, οι οποίες επίσης πρέπει να διασπαστούν από αυτό.

Η διαγραφή ενός σημείου ξεκινάει με την αναζήτηση του κάδου που ανήκει και αφού εντοπισθεί, το αντικείμενο διαγράφεται. Αν το πλήθος των καταχωρήσεων στον κάδο πέσει κάτω από ένα κατώφλι, ο κάδος μπορεί να συγχωνευτεί με κάποιον αδερφικό, εφόσον η ένωσή τους παραμένει ένα διάστημα διάστασης d . Η συγχώνευση οδηγεί στη διαγραφή ενός τουλάχιστον υπερεπιπέδου στον γονέα και αν κι εκεί οι καταχωρήσεις είναι κάτω του επιτρεπτού, η διαγραφή διαδίδεται παραπάνω στο δένδρο. Σημειώνεται ότι οι υποψήφιοι αδελφικοί κάδοι μπορεί να είναι πολλοί.



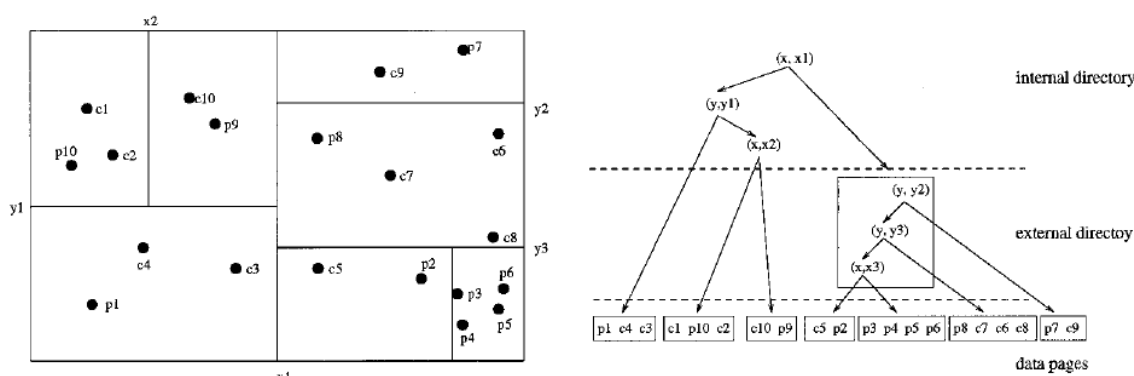
Σχήμα 2.7: k-d-b-tree (πηγή [GG98])



Σχήμα 2.8: LSD tree

(ii) *LSD-Tree*

Το LSD-tree (*local split decision*) είναι οργανωμένο ως ένα προσαρμοζόμενο k-d-tree. Διαμερίζει το χώρο σε ξένα μεταξύ τους κελιά ποικίλων μεγεθών και έτσι προσαρμόζεται καλύτερα στην κατανομή των σημείων σε σχέση με το δυαδικό χωρισμό. Διατηρεί την εξωτερική εξισορρόπηση, δηλαδή το ύψος των εξωτερικών υποδένδρων του διαφέρει το πολύ κατά ένα επίπεδο. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτυγχάνεται από ένα ειδικό αλγόριθμο σελιδοποίησης. Διευθετεί τις μη ομοιόμορφες κατανομές των σημείων με το συνδυασμό δύο στρατηγικών διάσπασης. Η στρατηγική *data-dependent (SP1)* εξαρτάται από τα δεδομένα και προσπαθεί να καταφέρει την μέγιστη δυνατή ισορροπημένη δομή. Η απόφαση λαμβάνεται τοπικά. Με τη στρατηγική *distribution-dependent (SP2)* η διάσπαση γίνεται σε συγκεκριμένη διάσταση και θέση. Τα δεδομένα δεν λαμβάνονται



Σχήμα 2.9: Point Quadtree (πηγή [GG98])

υπόψη επειδή υποτίθεται ότι είναι γνωστή η κατανομή. Για τον υπολογισμό του σημείου διάσπασης SP ενός κελιού, υπολογίζεται ο γραμμικός συνδυασμός των $SP1, SP2$ ως $SP = \alpha \cdot SP1 + (1-\alpha) \cdot SP2$. Ο συντελεστής α υπολογίζεται εμπειρικά και μπορεί να είναι μεταβλητός κατά τις εισαγωγές και διαγραφές από το δένδρο.

(iii) Τετραδικό δένδρο (Quadtree)

Το τετραδικό δένδρο χωρίζει το σύμπαν d διαστάσεων με ισοσταθμισμένα υπερεπίπεδα και είναι δομή κύριας μνήμης. Κάθε κόμβος έχει 2^d απογόνους που καθένας αντιστοιχεί σε ένα τεταρτημόριο του δοσμένου υποχώρου. Τα χωρίσματα δεν είναι απαραίτητο να είναι ίδιας διάστασης. Για παράδειγμα, για το διδιάστατο σύμπαν, κάθε κόμβος έχει 4 απογόνους που καθένας αντιστοιχεί σε ένα ορθογώνιο. Η κατάτμηση του χώρου συνεχίζει μέχρι το πλήθος των αντικειμένων σε κάθε ορθογώνιο να πέσει κάτω από ένα κατώφλι και για αυτό το τετραδικό δένδρο δεν είναι ισοζυγισμένο.

Οι αναζητήσεις γίνονται όπως ακριβώς και σε ένα δυαδικό δένδρο. Σε κάθε επίπεδο πρέπει να αποφασιστεί σε ποια από τα 4 υποδένδρα θα συνεχιστεί η αναζήτηση. Για παράδειγμα, στα ερωτήματα περιοχής μπορεί να είναι απαραίτητη η επίσκεψη πολλαπλών μονοπατιών.

Μια παραλλαγή του υποστηρίζει σημεία (point quadtree) και κατασκευάζεται με την εισαγωγή των σημείων ένα προς ένα. Για κάθε εισαγωγή γίνεται πρώτα αναζήτηση και αν το σημείο δεν βρεθεί, τότε εισάγεται στο φύλλο που σταμάτησε η αναζήτηση. Αν το πλήθος των σημείων στο φύλλο ξεπεράσει το κατώφλι, τότε το αντίστοιχο τεταρτημόριο διαιρείται σε 2^d υποδιαστήματα με το νέο σημείο στο κέντρο. Η διαγραφή ενός σημείου απαιτεί την ανακατασκευή του υποδένδρου του αντίστοιχου κόμβου. Ένας απλός τρόπος για να γίνει αυτό είναι η επανεισαγωγή των σημείων ένα προς ένα στο υποδένδρο.

(iv) Άλλες μέθοδοι

Άλλες ιεραρχικές μέθοδοι προσπέλασης για σημεία είναι το *hB-Tree* και το *BV-Tree*. Υβριδικές μέθοδοι προσπέλασης που συνδυάζουν δενδρική δομή και κατακερματισμό, είναι το *Buddy Tree* και το *BANG File*.

Εξάλλου, οι τεχνικές που αξιοποιούν καμπύλες *space-filling curves* για σημεία προσπαθούν να ορίσουν ολική διάταξη στον πολυδιάστατο χώρο διατηρώντας μερικώς την εγγύτητα. Παραδείγματα τέτοιων καμπυλών είναι οι *z-ordering*, *Hilbert* και *Gray*. Η ιδέα είναι ότι, αν δύο αντικείμενα είναι κοντά μεταξύ τους στον πολυδιάστατο χώρο, τότε πρέπει τουλάχιστον να υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να είναι κοντά μεταξύ τους στην ολική

διάταξη, δηλαδή στη μία διάσταση. Για την οργάνωση των μεταποιημένων δεδομένων στην ολική διάταξη χρησιμοποιούνται κλασικές μονοδιάστατες μέθοδοι προσπέλασης (λ.χ. B-tree).

2.7 Επισκόπηση χωρικών μεθόδων προσπέλασης για ορθογωνικά αντικείμενα

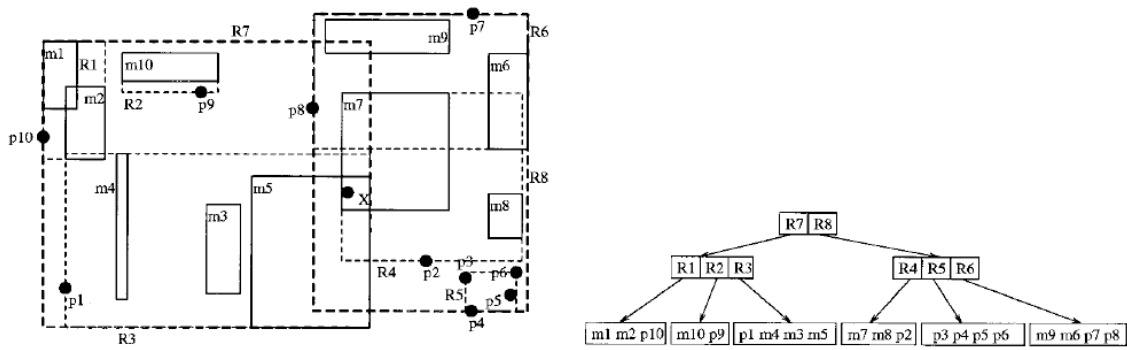
Οι μέθοδοι προσπέλασης σημείων είναι σχεδιασμένες να χειρίζονται σύνολα σημείων και χωρικά ερωτήματα επί αυτών. Καμία από αυτές δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμη για αντικείμενα με έκταση. Οι αντίστοιχες χωρικές μέθοδοι, ωστόσο, προκύπτουν από την τροποποίηση των σημειακών μεθόδων. Έχουν χρησιμοποιηθεί 4 τεχνικές τροποποίησης.

- **Μετασχηματισμός (transformation):** Τα χωρικά δεδομένα των αντικειμένων μετασχηματίζονται σε άλλη μορφή ώστε να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν άμεσα από τις σημειακές μεθόδους.
- **Επικαλυπτόμενες περιοχές (overlapping regions):** Επιτρέπεται διαφορετικοί κάδοι δεδομένων να αντιστοιχούν σε κοινές επικαλυπτόμενες περιοχές. Οι αλγόριθμοι αναζήτησης εφαρμόζονται σχεδόν ανέπαφοι, ωστόσο λόγω των επικαλύψεων, είναι δυνατόν να αυξηθούν τα μονοπάτια αναζήτησης. Το γεγονός αυτό επιβαρύνει την απόδοση.
- **Ανεξάρτητες περιοχές (Clipping):** Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας δεν επιτρέπουν επικάλυψη περιοχών και έτσι οι αναζητήσεις είναι αποδοτικές. Οι εισαγωγές και διαγραφές ωστόσο, είναι πιθανό να αποθούν αρκετά πολύπλοκες και ακόμα και να προκαλέσουν σοβαρά αδιέξοδα.
- **Πολλαπλά στρώματα (multiple layers):** Τα στρώματα οργανώνονται ιεραρχικά και το καθένα διαχωρίζει το συνολικό χώρο σε ανεξάρτητες περιοχές με διαφορετικό τρόπο. Περιοχές από διαφορετικά στρώματα είναι δυνατόν να επικαλύπτονται και δεν προσαρμόζονται στην έκταση των αντικειμένων που περιέχουν.

2.7.1 Μέθοδοι μετασχηματισμού

Η τεχνική του μετασχηματισμού (transformation) μπορεί να εφαρμοστεί με δύο τρόπους. Αφενός μέσω των *space-filling curves*, αφετέρου με το μετασχηματισμό ενός αντικειμένου σε σημείο του χώρου μεγαλύτερης διάστασης. Για παράδειγμα, η αναπαράσταση ενός ορθογώνιου αντικειμένου στο δισδιάστατο επίπεδο απαιτεί 4 πραγματικούς αριθμούς. Είτε τις συντεταγμένες των κορυφών μιας διαγωνίου του (*endpoint transformation*), είτε για το κέντρο του και δύο πραγματικούς για την έκτασή του οριζόντια και κάθετα (*midpoint transformation*). Η θεώρηση των 4 πραγματικών αριθμών ως τις συντεταγμένες ενός σημείου στο 4D χώρο αποτελεί τον μετασχηματισμό και καθιστά ικανές τις μεθόδους προσπέλασης σημείων να φιλοξενούν ορθογώνιες περιοχές. Οι αναζητήσεις μπορούν ομοίως να εκφραστούν σε αναζητήσεις σημείου ή περιοχής σε αυτό το δισυστάτο χώρο.

Ωστόσο, τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι αρκετά. Καταρχήν η έκφραση ερωτημάτων στο χώρο υψηλής διάστασης συνήθως είναι πιο πολύπλοκη απ' ό,τι στον απλό χώρο. Είναι δυνατόν να προκύψουν περιπτώσεις αοριστίας. Περιοχές αναζήτησης καλά ορισμένες, είναι δυνατόν να μετασχηματισθούν σε περιοχές αόριστες. Σύνθετα ερωτήματα με χωρικά κατηγορήματα ενδεχομένως να μην μετασχηματίζονται καν. Επιπλέον, ανάλογα με τον τρόπο μετασχηματισμού, είναι δυνατόν να προκύψει μη ομοιόμορφη κατανομή σημείων, ακόμα και αν τα αρχικά αντικείμενα ήταν ομοιόμορφα κατανομημένα στο χώρο. Τέλος, δύο σημεία μπορεί να απέχουν απεριόριστα, παρόλο που τα αντίστοιχα αντικείμενα στον κανονικό χώρο να απέχουν λιγότερο.



Σχήμα 2.10: R-tree (πηγή [GG98])

2.7.2 Μέθοδοι επικαλυπτόμενων περιοχών

Το R-tree μαζί με πολλά παράγωγά του αποτελούν την οικογένεια μεθόδων προσπέλασης επικαλυπτόμενων περιοχών. Το R-tree αντιστοιχεί σε μια ιεραρχία από d -διάστατα διαστήματα (boxes). Κάθε κόμβος του αντιστοιχεί σε μια σελίδα του δίσκου και σε ένα διάστημα. Αν ο κόμβος είναι εσωτερικός, τότε τα διαστήματα των απογόνων του περιέχονται σε αυτό του κόμβου. Τα διαστήματα κόμβων του ίδιου επιπέδου είναι δυνατόν να επικαλύπτονται. Οι κόμβοι φύλλα του δένδρου αποτελούν τα ελάχιστα περιβάλλοντα παραλληλόγραμμα (*minimum bounding boxes*) των χωρικών αντικειμένων. Κάθε κόμβος έχει μεταξύ m και M απογόνους εκτός κι αν είναι η ρίζα, η οποία μπορεί να είναι φύλλο. Το κατώφλι m αποτρέπει τον εκφυλισμό του δένδρου, ώστε να διατηρείται η αποδοτική αποθήκευση. Όταν οι απόγονοι ενός κόμβου μειωθούν κάτω από το κατώφλι, τότε ο κόμβος διαγράφεται και οι απόγονοί του κατανέμονται σε αδερφικούς του. Η μέγιστη τιμή απογόνων M μπορεί να εξαχθεί από το μέγιστο μέγεθος της σελίδας του δίσκου. Το δένδρο είναι ισοζυγισμένο ως προς το ύψος του, δηλαδή όλα τα φύλλα βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Το ύψος του είναι το πολύ λογαριθμικό (με βάση m) του πλήθους των εσωτερικών κόμβων του.

Οι αναζητήσεις σε ένα R-tree είναι παρόμοιες με του B-tree. Σε κάθε εσωτερικό κόμβο εξετάζονται οι απόγονοί του, αν τέμνουν το διάστημα αναζήτησης, οι οποίοι και επισκέπτονται. Λόγω των επικαλυπτόμενων περιοχών, είναι δυνατόν να υπάρχουν πολλοί απόγονοι, οι οποίοι ικανοποιούν τη συνθήκη της τομής τους με το διάστημα αναζήτησης. Στη χειρότερη περίπτωση είναι δυνατόν να γίνουν M επισκέψεις απογόνων.

Η εισαγωγή ενός αντικειμένου προφανώς γίνεται μέσω του *mhb* του. Αντίθετα με τις αναζητήσεις, για την εισαγωγή γίνεται μια διάσχιση του δένδρου από τη ρίζα προς τα φύλλα. Σε κάθε κόμβο επιλέγεται ο απόγονός του, για τον οποίο απαιτείται η ελάχιστη επέκτασή του ώστε να περικλείει την έκταση του εισερχόμενου αντικειμένου. Αν περισσότεροι του ενός απόγονοι ικανοποιούν αυτή τη συνθήκη, επιλέγεται εκείνος που απαιτεί τη μικρότερη επέκταση. Το αντικείμενο εισέρχεται τελικά ως φύλλο στο τελευταίο επίπεδο, όπου αν απαιτείται η επέκταση του αντίστοιχου κλάδου, τότε τροποποιείται κατάλληλα και η επέκταση προωθείται προς το ανώτερο επίπεδο. Αν το φύλλο δεν έχει αρκετό χώρο, τότε η σελίδα διασπάται και τα αντικείμενα κατανέμονται ανάμεσα στην παλιά και νέα σελίδα. Τα νέα διαστήματα τροποποιούνται κατάλληλα και η διάσπαση προωθείται προς το ανώτερο επίπεδο.

Για τη διαγραφή ενός αντικειμένου, αρχικά αυτό εντοπίζεται μέσω ενός ερωτήματος ακριβούς αναζήτησης και διαγράφεται. Αν η διαγραφή δεν προκαλέσει μείωση του πλήθους των απογόνων του ανωτέρου κόμβου κάτω από το κατώφλι m (*underflow*), τότε εξετάζεται

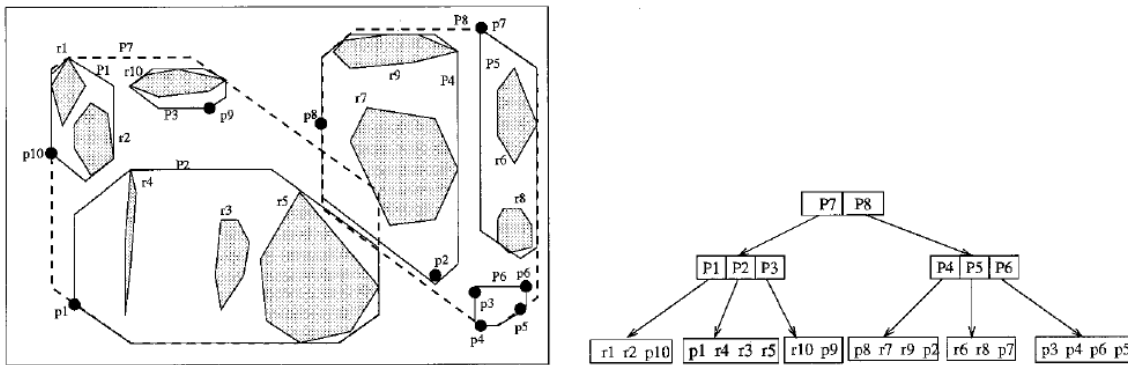
αν το διάστημά του μπορεί να συρρικνωθεί και η συρρίκνωση προωθείται προς το ανώτερο επίπεδο. Διαφορετικά, σε περίπτωση *underflow*, τα εναπομείναντα αντικείμενα αποθηκεύονται προσωρινά και ο κόμβος διαγράφεται. Η διαγραφή προωθείται προς το ανώτερο επίπεδο μαζί με τις απαραίτητες συρρίκνώσεις. Στη συνέχεια τα αντικείμενα επανεισάγονται εκ νέου στο δένδρο. Εναλλακτικά, τα αντικείμενα μπορούν να συγχωνευτούν σε αδερφικούς κόμβους μαζί με τις απαραίτητες τροποποιήσεις των διαστημάτων.

Έχει αναπτυχθεί πληθώρα παραλλαγών του R-tree με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσής του. Οι παραλλαγές βασίζονται κυρίως στη στρατηγική των αλγορίθμων των πράξεων του (λ.χ. κριτήρια που τηρούνται κατά την εισαγωγή), καθώς και στο πως διαχειρίζονται συμβάντα, όπως διάσπαση, συγχώνευση κόμβων κτλ.

Το R^* -tree διαφέρει κυρίως στον αλγόριθμο εισαγωγής. Εισάγεται μια νέα πολιτική με όνομα *εξαναγκασμένη επανεισαγωγή* (*forced reinsert*) κατά την οποία, αν σε ένα κόμβο συμβεί υπερχειλίση, τότε, αντί για την άμεση διάσπασή του, επιλέγεται ένα ποσοστό p των στοιχείων του, τα οποία διαγράφονται και επανεισάγονται εκ νέου. Μια πρόταση για την τιμή της παραμέτρου p είναι 30%, αλλά μπορεί να είναι κυμαινόμενη. Η πολιτική αυτή οδηγεί σε καλύτερα ποσοστά χρησιμοποίησης του χώρου, αλλά ενδεχομένως να αυξάνεται η επιβάρυνση της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας.

Επιπλέον, στο R^* -tree αναθεωρείται η διαχείριση των διασπάσεων των κόμβων λόγω ανεπάρκειας (*underflow*). Ο αλγόριθμος του αυθεντικού R-tree ελαχιστοποιεί μόνο την έκταση των διαστημάτων, ενώ του R^* -tree λαμβάνει υπόψη του περισσότερα κριτήρια. Η επικάλυψη των διαστημάτων του ίδιου επιπέδου πρέπει να ελαχιστοποιείται. Όσο λιγότερη, τόσο μικρότερη η πιθανότητα να απαιτούνται πολλαπλές επισκέψεις κόμβων του ίδιου επιπέδου κατά τις αναζητήσεις. Οι περιμέτροι των ορθογώνιων πρέπει να ελαχιστοποιούνται και συνεπώς, το επιθυμητό ορθογώνιο είναι το τετράγωνο, ως η πιο συμπαγής αναπαράσταση αντικειμένων. Η βελτίωση της απόδοσης του R^* -tree ανέρχεται μέχρι και 50%.

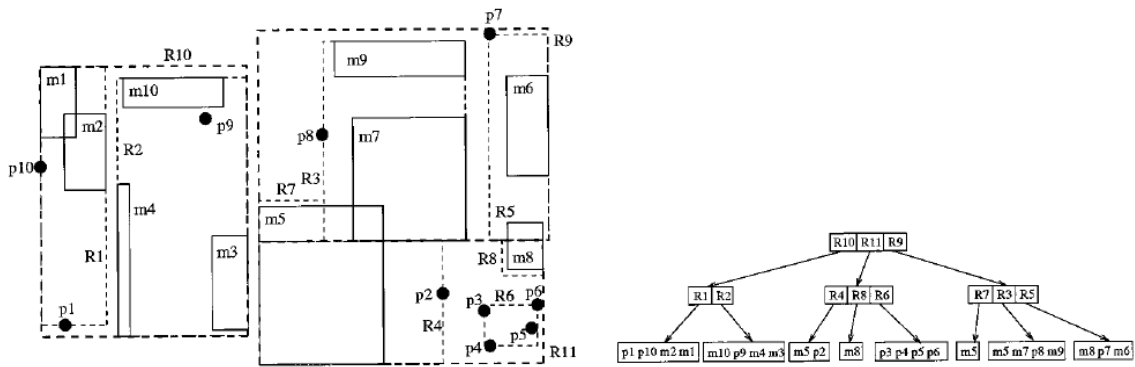
Τα JP-tree και SP-tree αποτελούν δύο παρόμοιες παραλλαγές του P-tree, όπου αντί για τα *mhb*, ως διαστήματα του χώρου, χρησιμοποιούν γενικά πολύεδρα, ως καλύτερες προσεγγίσεις των αντικειμένων. Έτσι, συνδυάζουν την ευκαμψία των πολυγωνικών κουτιών με την απλότητα του R-tree. Το JP-tree θεωρεί μια μεταβλητή m , η οποία εκφράζει το πλήθος των κατευθύνσεων της προσέγγισης στο χώρο διάστασης d ($m > d$). Για παράδειγμα για $d=2$ και $m=4$, έχουμε 4 κατευθύνσεις: οι δύο παράλληλες προς τους άξονες του χώρου και δύο παράλληλες προς τις 2 κύριες διαγώνιους. Τα αντικείμενα προσεγγίζονται από ελάχιστα περιβάλλοντα πολύτοπα (*minimum bounding polytopes*), των οποίων οι πλευρές είναι παράλληλες στις 4 κατευθύνσεις και η ποιότητα της προσέγγισης είναι άμεσα συσχετισμένη με την τιμή της μεταβλητής m . Έτσι, ο αρχικός χώρος χαρτογραφείται σε ένα m -διάστατο περιβάλλοντα χώρο. Για τη διατήρηση και οργάνωση των m -διάστατων διαστημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες χωρικές μέθοδοι με προτεινόμενες τις R-tree και R^+ -tree.



Σχήμα 2.11: JP-tree (πηγή [GG98])

2.7.3 Μέθοδοι ανεξάρτητων περιοχών

Το R^+ -tree είναι τυπικός αντιπρόσωπος των χωρικών μεθόδων προσπέλασης που δεν επιτρέπουν επικάλυψη περιοχών στο ίδιο επίπεδο της δενδρικής δομής τους με αποτέλεσμα τα ερωτήματα σημείου να ακολουθούν ένα μόνο μονοπάτι από τη ρίζα. Τα μειονέκτημα αυτής της τακτικής επικεντρώνονται στην εισαγωγή και διαγραφή αντικειμένων. Κατά την εισαγωγή ενός αντικειμένου, το οποίο εκτείνεται σε περισσότερες της μιας περιοχές, είναι δυνατόν να πρέπει να υποδιαιρεθεί κατά την έκταση των διαχωριστικών υπερεπιπέδων. Η διαίρεση των αντικειμένων προκαλεί τη δημιουργία πολλαπλών καταχωρήσεων κάδων για την εισαγωγή ενός μόνο αντικειμένου. Κάθε κάδος είναι δυνατόν να περιέχει τη γεωμετρική περιγραφή ολόκληρου του αντικειμένου (*object duplication*) ή την γεωμετρική περιγραφή του αντίστοιχου κομματιού του. Σε κάθε περίπτωση, τα δεδομένα για το αντικείμενο διασκορπίζονται σε πολλαπλές σελίδες (*spanning property*). Ο πλεονασμός που προκαλείται, είναι δυνατόν να προκαλέσει αύξηση του μέσου χρόνου προσπέλασης, αλλά και αύξηση στη συχνότητα των υπερχειλίσεων των κάδων. Επιπλέον, για τις μεθόδους που δεν χωρίζουν το σύνολο του χώρου, η εισαγωγή ενός αντικειμένου είναι δυνατόν να προκαλέσει την αύξηση της έκτασης πολλαπλών κάδων, η οποία ενδεχομένως να μην είναι δυνατόν να γίνει, αν δεν προκληθεί επικάλυψη περιοχών. Επειδή η επικάλυψη δεν είναι επιτρεπτή, πρέπει να υπολογισθεί μια νέα δομή των περιοχών, διαδικασία αρκετά πολύπλοκη. Στη χειρότερη περίπτωση είναι πιθανή και η ολοκληρωτική κατάρρευση της δομής. Τέλος, προβλήματα προκαλούνται στη διάσπαση κάδων. Όταν ένας κάδος (και η αντίστοιχη περιοχή) πρέπει να διασπαστεί, ενδεχομένως να μη μπορεί να βρεθεί κατάλληλο διαχωριστικό υπερεπίπεδο το οποίο να διαιρεί κανένα ή έστω λίγα αντικείμενα. Το γεγονός αυτό είναι δυνατόν να προκαλέσει αλυσιδωτές διασπάσεις κάδων. Για την καταπολέμηση αυτού του προβλήματος, τα αντικείμενα μεγάλης έκτασης, τα οποία είναι πιο πιθανό να δημιουργούν προβληματικές διασπάσεις, δεν εισάγονται στη δομή αλλά αποθηκεύονται ξεχωριστά σε ειδικούς κάδους.



Σχήμα 2.12: R⁺-tree (πηγή [GG98])

Η εισαγωγή ενός νέου αντικειμένου στο R⁺-tree είναι δυνατόν να διασχίσει πολλαπλά μονοπάτια ανάλογα με το πλήθος των τομών του *mbb* του αντικειμένου με τα διαχωριστικά υπερεπίπεδα. Κατά τη διαδικασία της διάσχισης το αντικείμενο είναι δυνατόν να διασπαστεί σε πολλαπλά ανεξάρτητα κομμάτια. Κάθε κομμάτι τοποθετείται σε διαφορετικό φύλλο του δένδρου. Αν το *mbb* του αντικειμένου εκτείνεται σε περιοχές, οι οποίες δεν είναι ήδη καλυμμένες, παρουσιάζεται το πρόβλημα με τις επεκτάσεις των αντίστοιχων διαχωριστικών διαστημάτων, για τις οποίες είναι πιθανό να προκληθούν πολλαπλές διασπάσεις κάδων. Η διάσπαση των υπερχειλισμένων κάδων λειτουργεί παρόμοια με του R-tree. Η σημαντική διαφορά είναι ότι μια διάσπαση μπορεί να μεταδοθεί όχι μόνο προς τη ρίζα του δένδρου αλλά και προς τα φύλλα του. Οι εξαναγκασμένες διασπάσεις είναι πιθανό να προκαλέσουν περαιτέρω διασπάσεις των διαστημάτων. Κατά τη διαγραφή ενός αντικειμένου, εντοπίζονται οι κάδοι που περιέχουν τα κομμάτια του, από τους οποίους διαγράφονται. Αν η χρησιμοποίηση του χώρου μειωθεί κάτω από ένα δοσμένο κατώφλι, επιχειρείται η συγχώνευση του αντίστοιχου κόμβου με τους αδερφικούς του, είτε επιχειρείται η επαναδόμηση του δένδρου. Αυτό δεν είναι πάντα δυνατό και έτσι το R⁺-tree δεν εγγυάται ελάχιστη χρησιμοποίηση του χώρου.

2.7.4 Μέθοδοι πολλαπλών στρωμάτων

Η τεχνική πολλαπλών στρωμάτων μπορεί να θεωρηθεί ως παραλλαγή της τεχνικής επικαλυπτόμενων περιοχών, επειδή περιοχές διαφορετικών στρωμάτων είναι δυνατό να επικαλύπτονται. Τα στρώματα οργανώνονται ιεραρχικά με κάθε ένα να διαχωρίζει το χώρο σε ανεξάρτητες περιοχές, των οποίων η έκταση δεν προσαρμόζεται κατάλληλα στην έκταση των χωρικών αντικειμένων που περιέχουν. Η εισαγωγή ενός αντικειμένου ξεκινάει με την εύρεση του ιεραρχικά χαμηλότερου στρώματος, του οποίου τα διαχωριστικά υπερεπίπεδα δεν τέμνουν το αντικείμενο. Το αντικείμενο εισάγεται στον αντίστοιχο κάδο και η διαδικασία ολοκληρώνεται, εφόσον δεν προκαλείται υπερχειλίση της σελίδας του κάδου. Σε περίπτωση υπερχειλίσης, πρέπει να δημιουργηθεί νέο υπερεπίπεδο και να κατανεμηθούν κατάλληλα τα περιεχόμενα στους νέους κάδους, ενώ αντικείμενα τα οποία πλέον τέμνουν το νέο υπερεπίπεδο πρέπει να μετακινηθούν σε υψηλότερο στρώμα. Έτσι, αντικείμενα μεγάλης έκτασης συγκεντρώνονται στα υψηλότερα επίπεδα και στη χειρότερη περίπτωση είναι αδύνατο να εισαχθούν αντικείμενα χωρίς να τέμνουν τα διαχωριστικά υπερεπίπεδα.

Το πλεονέκτημα της τεχνικής είναι η υψηλότερη επιλεκτικότητα της κατά τις αναζητήσεις λόγω της περιορισμένης επικάλυψης των διαφορετικών στρωμάτων. Τα πλεονεκτήματα είναι: η πολλαπλή διαστρωμάτωση πάσχει από θρυμματισμό, γεγονός που

την καθιστά ακατάλληλη για συγκεκριμένες κατανομές δεδομένων. Συγκεκριμένα ερωτήματα απαιτούν την επιθεώρηση όλων των στρωμάτων. Δεν είναι ξεκάθαρο πως να γίνει η ομαδοποίηση αντικειμένων, τα οποία βρίσκονται κοντά το ένα στο άλλο, αλλά είναι σε διαφορετικά στρώματα. Τέλος, υπάρχει μερική αμφιβολία σε ποιο στρώμα πρέπει να εισαχθεί ένα αντικείμενο. Χωρικές μέθοδοι προσπέλασης βασισμένες στην τεχνική των πολλαπλών στρωμάτων είναι οι *Multilayer Grid File* και *R-File*.

Κεφάλαιο 3

Παρακολούθηση κινούμενων σημειακών αντικειμένων

3.1 Εισαγωγή

Ιδιαίτερα πρακτικό και εμπορικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εφαρμογές παρακολούθησης κινούμενων σημειακών αντικειμένων. Η έκταση των κινούμενων αντικειμένων σε αυτές τις εφαρμογές θεωρείται αμελητέα και έτσι αντιμετωπίζονται ως σημειακές οντότητες συνήθως στο δισδιάστατο χώρο. Το γενικό μοντέλο των εφαρμογών προϋποθέτει τον εντοπισμό της θέσης κάθε αντικειμένου (λ.χ. μέσω GPS και ασύρματων τηλεπικοινωνιών) και την αποστολή της περιοδικά (συνήθως ανά μερικά δευτερόλεπτα) σε ένα κεντρικό επεξεργαστή, όπου γίνεται η επεξεργασία πολλαπλών ερωτημάτων.

Οι τύποι ερωτημάτων ποικίλουν ως προς το χρονικό πλαίσιο εφαρμογής τους. Υπάρχουν ερωτήματα τροχιάς, τα οποία εξετάζουν την εξέλιξη της κίνησης των αντικειμένων με την πάροδο του χρόνου. Από την επέκτασή τους με βάση τις πρόσφατες πληροφορίες για την κίνηση των αντικειμένων προκύπτουν ερωτήματα πρόβλεψης της μελλοντικής τους θέσης (λ.χ. «ποια ταξί θα βρίσκονται στην περιοχή κοντά στον ηλεκτρικό σταθμό σε 10 λεπτά;»). Τα ερωτήματα που απασχολούν κυρίως την παρούσα διπλωματική εργασία, αφορούν τις τρέχουσες θέσεις των αντικειμένων στο παρόν (*now-related queries*). Πρόκειται για ερωτήματα θέσης (*coordinate-based queries*), τα οποία αναφέρονται μόνο στην τρέχουσα θέση των αντικειμένων και έτσι ο κεντρικός επεξεργαστής δε χρειάζεται να καταγράψει την τροχιά τους παρά μόνο τις συντεταγμένες της τελευταίας ενημέρωσης της θέσης τους. Η λήψη συχνών ανανεώσεων των θέσεων των κινούμενων αντικειμένων στον κεντρικό υπολογιστή ακολουθεί τα χαρακτηριστικά των ρευμάτων δεδομένων. Επιπλέον τα ερωτήματα που μελετώνται, αντιμετωπίζονται ως ερωτήματα διαρκείας (*continuous queries*), ώστε η αποτίμησή τους γίνεται κατά το μέγιστο δυνατό σε πραγματικό χρόνο ώστε να παρέχονται άμεσα απαντήσεις στους χρήστες.

3.2 Καταγραφή και αναπαράσταση της κίνησης των αντικειμένων

Βασικό μέλημα των εφαρμογών παρακολούθησης κινούμενων αντικειμένων είναι η καταγραφή της τροχιάς των κινούμενων αντικειμένων. Ενώ η αποτύπωση της τρέχουσας θέσης ενός αντικειμένου με τη χρήση της τριάδας (x, y, t) είναι εύκολη υπόθεση, η αποτύπωση της τροχιάς του αποτελεί δυσκολότερο πρόβλημα. Η κατάλληλη αναπαράστασή της ποικίλει ανάλογα με τους τύπους ερωτημάτων που καλείται να υποστηρίξει καθώς και τις απαιτήσεις σε ακρίβεια, στην οποία άμεση επίδραση έχουν οι διαδέσιμες τεχνολογικές δυνατότητες (τηλεπικοινωνίες, GPS).

3.2.1 Η τροχιά των κινούμενων αντικειμένων

Η τροχιά ενός κινούμενου αντικειμένου προκύπτει από την καταγραφή των διαδοχικών του θέσεων. Η ιδανική κατασκευή της τροχιάς του θα προέκυπτε με την καταγραφή της θέσης του συνεχώς με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία είναι πρακτικά ανέφικτη εξαιτίας των τεχνολογικών περιορισμών: τα συστήματα εντοπισμού (λ.χ. GPS) παρέχουν μόνο ένα δείγμα των θέσεων, ενώ τα διαδέσιμα υπολογιστικά συστήματα και μέσα αποθήκευσης είναι ανεπαρκή να διαχειριστούν συνεχή μεγέθη στο πεδίο του χρόνου. Έτσι, η μελέτη και καταγραφή των φαινομένων πρέπει να γίνουν με τη σύμβαση ότι οι διαδοχικές θέσεις των αντικειμένων μπορούν μόνο να λαμβάνονται σε διακριτές χρονικές στιγμές. Κατά συνέπεια, η τροχιά κατασκευάζεται με τη δειγματοληψία της πραγματικής κίνησης, δηλαδή από την περιοδική λήψη των συντεταγμένων του αντικειμένου (x, y) μαζί με το χρονόσημό (*timestamp*) t , τα οποία συνδέτουν την τριάδα (x, y, t) .

Η συμπλήρωση της τροχιάς, δηλαδή των θέσεων του αντικειμένου στις χρονικές στιγμές μεταξύ των διαδοχικών δειγμάτων, γίνεται με χρήση κάποιας μαθηματικής μεθόδου (λ.χ. παρεμβολή), όταν αυτό απαιτείται από τα ερωτήματα. Συνήθως η χρήση γραμμικής παρεμβολής είναι επαρκής για τις ανάγκες των εφαρμογών. Έτσι, η τροχιά σχηματίζεται από διαδοχικά ευθύγραμμα τμήματα, των οποίων τα άκρα είναι τα σημεία των διαδοχικών δειγμάτων, σχηματίζοντας μια τετλασμένη πολυγραμμή (*polyline*). Ενώ η γραμμική παρεμβολή είναι υπολογιστικά απλούστερη, αρκετές φορές η χρήση πολυωνύμου ανωτέρου βαθμού εμφανίζει κάποια πλεονεκτήματα. Η κίνηση θα μπορούσε να αποδοθεί ενδεχομένως με λιγότερα τμήματα και με περισσότερη ακρίβεια ως προς τη γραμμική, εφόσον σπάνια η κίνηση αντικειμένων του πραγματικού κόσμου είναι απόλυτα γραμμική. Επιπλέον, η χρήση πολυωνύμων πολλαπλού βαθμού παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής μεγεθών της κίνησης όπως ταχύτητα και επιτάχυνση. Η επιλογή τριτοβάθμιων πολυωνύμων αποτελεί την ικανοποιητικότερη λύση μεταξύ απλότητας υπολογισμών και επαρκούς προσέγγισης, αφού είναι αρκετή για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης.

3.2.2 Κατηγορίες κίνησης

Στον πραγματικό κόσμο η κίνηση των αντικειμένων είναι πιθανό να διέπεται από περιορισμούς, αφού η ελεύθερη κίνηση σε ένα δισδιάστατο ευκλείδειο χώρο δεν είναι πάντα εφικτή. Έτσι, οι κινήσεις μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες.

- *Κίνηση χωρίς περιορισμούς* περίπτωση αρκετά σπάνια στις εφαρμογές του πραγματικού κόσμου (λ.χ. κίνηση πλοίων στη θάλασσα), αφού προϋποθέτει την ύπαρξη ενός τέλει ευκλείδειου επιπέδου. Ωστόσο, αποτελεί επιλογή για την αξιολόγηση των μεθόδων προσπέλασης.
- *Κίνηση υπό περιορισμούς* θεωρείται ότι υπάρχουν φυσικά εμπόδια που δυσχεραίνουν ή απαγορεύουν την κίνηση (λ.χ. κίνηση πεζών ή οχημάτων). Τα εμπόδια είναι δυνατόν να

είναι δυναμικά, δηλαδή η έκταση τους στο χώρο να μεταβάλλεται ή να κινείται (λ.χ. κυκλοφοριακή συμφόρηση).

- **Κίνηση σε δίκτυα μεταφορών:** (λ.χ. οδικό ή σιδηροδρομικό δίκτυο). Πρόκειται για υποπερίπτωση της κίνησης υπό περιορισμούς, αφού η μετατόπιση των αντικειμένων συμβαίνει αποκλειστικά πάνω στο δίκτυο και όχι ελεύθερα στο επίπεδο. Σημασία δεν έχουν οι απόλυτες συντεταγμένες των αντικειμένων, αλλά η σχετική θέση τους ως προς τα τμήματα του δικτύου, λ.χ. ότι το αυτοκίνητο βρίσκεται στο 42^ο χλμ της εθνικής οδού. Επιπλέον, οι προελεύσεις και οι προορισμοί των αντικειμένων είναι αποκλειστικά σημεία του δικτύου. Υπ' αυτήν την έννοια οι distâncias του χώρου ελαττώνονται και πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος «χώρος 1.5 διαστάσεων» χωρίς να προσμετράται η χρονική διάσταση.

Η μελέτη της ειδικής κίνησης των αντικειμένων σε κάθε περίπτωση εφαρμογής και η κατάταξή της σε μια από τις παραπάνω γενικές κατηγορίες διευκολύνει τη δεικτοδότηση (*indexing*) των αντικειμένων, μέσω των ενδεδειγμένων δομών που έχουν προταθεί για την κάθε περίπτωση. Τέλος, η έννοια της απόστασης είναι διαφορετική στις περιπτώσεις περιορισμένης κίνησης, αφού δεν έχει νόημα ο υπολογισμός της ευκλείδειας απόστασης λ.χ. δύο οχημάτων στο οδικό δίκτυο, αλλά ο υπολογισμός του αδροίσματος των μηκών των τμημάτων που τα συνδέουν.

3.2.3 Αβεβαιότητα στη θέση των κινούμενων αντικειμένων

Ο τρόπος λήψης και καταγραφής των διαδοχικών θέσεων των αντικειμένων εξορισμού ενέχει *αβεβαιότητα (uncertainty)*. Από τη μια το σφάλμα λόγω έλλειψης ακρίβειας των συσκευών εντοπισμού της θέσης του αντικειμένου και από την άλλη η αβεβαιότητα λόγω δειγματοληψίας για τις θέσεις του αντικειμένου στις χρονικές στιγμές μεταξύ δύο διαδοχικών λήψεων, καθιστούν σχεδόν αδύνατο οι καταγεγραμμένες θέσεις στον κεντρικό υπολογιστή να ταυτίζονται με τις πραγματικές, δημιουργώντας έτσι ορισμένη απόκλιση (*deviation*). Κάτι τέτοιο ενδεχομένως να δημιουργεί προβλήματα σε αρκετούς τύπους ερωτημάτων για το αν πρέπει να συμπεριληφθεί στην απάντηση κάποιο αντικείμενο, για το οποίο υπάρχει αμφιβολία για τη θέση του ή την τροχιά του. Ενώ δραστηκή λύση του προβλήματος της αβεβαιότητας δεν υπάρχει λόγω των περιορισμών, στα τεχνολογικά μέσα εντοπισμού της θέσης και στη μέθοδο της δειγματοληψίας, η έρευνα στρέφεται προς την ποσοτικοποίηση του σφάλματος που είναι πιθανό να υπεισέρχεται στους υπολογισμούς.

Κυρίως από τις συσκευές GPS, αλλά και από άλλες αιτίες όπως λ.χ. θόρυβος, παρεμβολές και διακοπές στη μετάδοση, είναι αναπόφευκτο ότι στη διαδικασία καταγραφής των συντεταγμένων υπεισέρχονται σφάλματα μέτρησης. Η πραγματική θέση του αντικειμένου δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με ακρίβεια, αλλά κυμαίνεται εντός κάποιων ορίων σφάλματος. Επιπρόσθετα, τα όρια σφάλματος των συσκευών εντοπισμού δεν είναι σταθερά, αλλά είναι δυνατόν να κυμαίνονται ανάλογα με άλλες συνθήκες όπως λ.χ. τις καιρικές συνθήκες και την ίδια τη γεωγραφική θέση του αντικειμένου λόγω πυκνής δόμησης. Μια συσκευή GPS απαιτεί την άμεση οπτική επαφή της ταυτόχρονα με τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους, ώστε να είναι σε θέση να μετρήσει τη θέση της. Η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται από το πλήθος των δορυφόρων με τους οποίους έχει επαφή και επηρεάζεται από ορισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Η πυκνή δόμηση (λ.χ. διέλευση από στενούς δρόμους σε πυκνοκατοικημένη περιοχή) εμποδίζει την επαφή με τους δορυφόρους και κατά συνέπεια και την ακρίβεια.

Τα σφάλματα δειγματοληψίας υπεισέρχονται κατά την κατασκευή της τροχιάς από το δείγμα των θέσεων από τις οποίες διήλθε το αντικείμενο. Η τεχνική της παρεμβολής,

είτε γραμμική είτε μεγαλύτερου βαθμού, μεταξύ δύο διαδοχικών θέσεων επιχειρεί να προσεγγίσει την τροχιά και να άρει την αβεβαιότητα, αλλά σε καμία περίπτωση δεν είναι δυνατόν να εξαλείψει το σφάλμα. Εκτιμάται, ότι τα σφάλματα δειγματοληψίας είναι αρκετά μεγαλύτερα από τα σφάλματα μέτρησης. Η μείωση των σφαλμάτων δειγματοληψίας επιτυγχάνεται με την αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας, δηλαδή τη συχνότητα που τα αντικείμενα αποστέλλουν τη θέση τους προς τον κεντρικό υπολογιστή.

3.2.4 Μέθοδοι ενημέρωσης της θέσης και της τροχιάς

Η συχνότητα ενημέρωσης της θέσης ενός αντικειμένου και κατ' επέκταση της τροχιάς του είναι ένα σημαντικό ζήτημα για την απόδοση των συστημάτων παρακολούθησης. Η σύμβαση της σταθερής περιοδικής αποστολής της καταγεγραμμένης θέσης από το σύστημα GPS προς τον κεντρικό υπολογιστή είναι μεν απλή, αλλά δεν είναι απαραίτητα η καλύτερη επιλογή. Ενέχει ιδιαίτερα σημαντικούς κινδύνους στην ακρίβεια ή πιθανόν να επιβαρύνει το σύστημα με πλεονάζουσα πληροφορία. Για κινούμενα αντικείμενα, τα οποία μεταβάλλουν συχνά την κατεύθυνση της κίνησής τους, απαιτείται συχνότερη ανανέωση της θέσης τους για να αποτυπώνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια οι λεπτομέρειες της τροχιάς τους. Αντίθετα, για αντικείμενα που κινούνται ευθύγραμμα ή σχεδόν ευθύγραμμα, απαιτείται μικρότερη συχνότητα δειγματοληψίας. Διαδοχικά συνευδαικά σημεία διέλευσης του δείγματος για κάποιο αντικείμενο μπορούν κάλλιστα να θεωρηθούν ως πλεονάζουσα πληροφορία, η οποία δεν προσφέρει επιπλέον λεπτομέρεια στο σχηματισμό της τροχιάς, παρά μόνο επιβαρύνει το σύστημα. Η επιβάρυνση έγκειται σε δύο μέτωπα. Αφενός στο κόστος αποστολής της θέσης (λ.χ. στη χρήση τους εύρους ζώνης της τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης του αντικειμένου με τον κεντρικό υπολογιστή) και αφετέρου στην υπολογιστική ισχύ του κεντρικού υπολογιστή για να διαχειριστεί τη νέα πληροφορία (λ.χ. τήρηση των απαραίτητων δομών και κατασκευή της τροχιάς). Επιπλέον, η σύμβαση σταθερού ρυθμού δειγματοληψίας προκαλεί παρόμοια προβλήματα, όταν οι ταχύτητες των αντικειμένων διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Σε αυτή την περίπτωση ο επιλεγόμενος ρυθμός αποδεικνύεται αφενός ανεπαρκής για την ικανοποιητική λεπτομέρεια στα «ευκίνητα» αντικείμενα, αφετέρου, υπερβολικός για τα «δυσκίνητα» αντικείμενα.

Η ρύθμιση του σφάλματος μέτρησης της θέσης ενός αντικειμένου δεν επιδέχεται δυναμική διόρθωση, αφού εξαρτάται μόνον από την τεχνολογία των συστημάτων GPS. Αντίθετα, το σφάλμα δειγματοληψίας είναι δυνατόν να ελέγχεται και να διορθώνεται σε μεγάλο βαθμό κατά τη διάρκεια κίνησης ρυθμίζοντας τη συχνότητα δειγματοληψίας. Κάθε κινούμενο αντικείμενο είναι σε θέση να αποθηκεύει τοπικά τις συντεταγμένες της τελευταίας ενημέρωσης της θέσης του και στη συνέχεια να παρακολουθεί την εξέλιξη της κίνησής του. Το αντικείμενο ενημερώνει ξανά τη νέα του θέση, όταν αυτό απαιτείται με βάση πολλαπλά κριτήρια. Ένα κριτήριο μπορεί να είναι η μέγιστη μετατόπιση του αντικειμένου από την προηγούμενη ενημερωμένη θέση προς τον κεντρικό υπολογιστή. Άλλο κριτήριο μπορεί να είναι η μεταβολή της κατεύθυνσης κίνησης του αντικειμένου ή η απότομη αλλαγή του μέτρου της ταχύτητάς του, συμβάντα σημαντικά για την εξέλιξη της πορείας του, για τα οποία πρέπει να ενημερώσει τον κεντρικό υπολογιστή, είτε με προσωρινή αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας, είτε με άμεση πληροφόρησή του για αυτά.

Γενικά, υιοθετείται, κατά μία έννοια, κατανεμημένη στρατηγική, αφού τα αντικείμενα παρακολουθούν τις παραμέτρους της κίνησής τους (λ.χ. μετατόπιση, ταχύτητα κλπ) και ενημερώνουν τον κεντρικό υπολογιστή για τυχόν μεταβολές. Η τακτική αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι περιορίζει κατά μεγάλο βαθμό τις ανανεώσεις και το αντίστοιχο κόστος τους σε εύρος ζώνης και υπολογιστική ισχύ. Το σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι τα αντικείμενα πρέπει να είναι κατάλληλα εξοπλισμένα για την τοπική επεξεργασία (λ.χ.

επεξεργαστή, μνήμη), γεγονός που αυξάνει το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας τους (λ.χ. μείωση του χρόνου ζωής της μπαταρίας). Σε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο κατανομημένης επεξεργασίας, η υπολογιστική ισχύς των αντικειμένων είναι δυνατόν να λαμβάνει μέρος ακόμα και στην αποτίμηση ερωτημάτων.

Εξάλλου, ο κεντρικός υπολογιστής πρέπει να είναι σε θέση να ξεχωρίζει, αν κάποιο αντικείμενο αποσυνδέθηκε ή γενικά αδυνατεί να στείλει ανανεώσεις της θέσης του, ή, αν καθυστερεί να στείλει ανανεώσεις, επειδή καμία σημαντική αλλαγή δεν έχει συμβεί στην κίνησή του που να ικανοποιεί κάποια από τα λοιπά κριτήρια. Για τη λύση αυτού ζητήματος εγκαθίσταται ένα επιπλέον κριτήριο πυροδότησης ενημερώσεων. Κάθε αντικείμενο είναι υποχρεωμένο να αποστέλλει νέα ενημέρωση της θέσης του εντός ενός προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος από την προηγούμενη, ανεξάρτητα αν ικανοποιήθηκε κάποιο άλλο κριτήριο. Αν το χρονικό περιθώριο λήξει, τότε ο κεντρικός υπολογιστής θεωρεί το αντικείμενο ως αποσυνδεδεμένο και το μεταχειρίζεται κατάλληλα στις εσωτερικές του δομές.

3.3 Ερωτήματα σε κινούμενα σημειακά αντικείμενα

Τα κλασικά χωρικά ερωτήματα (βλ ενότητα 2.4) δεν είναι όλα εφαρμόσιμα σε κινούμενα σημειακά αντικείμενα λόγω της θεώρησής τους ως αντικείμενα με αμελητέα έκταση στο χώρο. Δεδομένου ότι παρακολουθούνται οι διαδοχικές θέσεις διέλευσης των αντικειμένων και είναι δυνατός ο σχηματισμός της τροχιάς, έχει νόημα η υποβολή ενός διαφορετικού συνόλου ερωτημάτων, τα οποία χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τα ερωτήματα θέσης (*coordinated-based* ή *location-based queries*) και τα ερωτήματα τροχιάς (*trajectory-based queries*). Επιπλέον, τα ερωτήματα τροχιάς διακρίνονται σε τοπολογικά ερωτήματα (*topological queries*) και ερωτήματα πλοήγησης (*navigational queries*).

3.3.1 Ερωτήματα θέσης

Τα ερωτήματα θέσης εξετάζουν άμεσα τη θέση των αντικειμένων σε κάποιο σημείο ή διάστημα της χρονικής διάστασης. Ο προσδιορισμός του χρονικού παραθύρου καθορίζει την περαιτέρω κατηγοριοποίηση των ερωτημάτων ως προς το χρονικό πλαίσιο αναφοράς τους. Τα ερωτήματα είναι δυνατόν να αναφέρονται στις παρελθοντικές θέσεις των αντικειμένων, είτε για κάποια χρονική στιγμή (στιγμιότυπο της θέσης τους), είτε για κάποιο χρονικό διάστημα. Άλλοτε τα ερωτήματα είναι δυνατόν να αναφέρονται στο παρόν (ερωτήματα τρέχουσας θέσης - *now-related queries*), είτε να αναφέρονται στο βραχυπρόθεσμο μέλλον με τη χρήση κάποιας μεθόδου πρόβλεψης των μελλοντικών θέσεων. Η αναφορά στο παρελθόν ή στο μέλλον απαιτεί την αποθήκευση των παρελθοντικών θέσεων των αντικειμένων, αλλά όχι απαραίτητα το σχηματισμό της τροχιάς τους. Τα σημαντικότερα ερωτήματα θέσης είναι τα εξής.

- *Ερωτήματα περιοχής (range queries)*. Δεδομένου ενός χωρικού παραθύρου (λ.χ. ορθογώνιας περιοχής ή κυκλικής ή πολυγωνικής κλπ) και ενός χρονικού παραθύρου (χρονική στιγμή ή διάστημα τιμών), αναζητούνται τα αντικείμενα, των οποίων η κίνηση εξελίσσεται εντός τους. Αναζητούνται, δηλαδή, τα αντικείμενα, τα οποία κινούνται εντός της δοσμένης περιοχής και κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος. Η απάντηση είναι δυνατόν να επιστραφεί είτε με τη μορφή των ταυτοτήτων των αντικειμένων, είτε με τις θέσεις των τμημάτων της τροχιάς τους, όταν το χρονικό παράθυρο έχει εύρος. Παράδειγμα: «ποια αυτοκίνητα βρέθηκαν εντός του δακτυλίου της Αθήνας τις πρωινές ώρες;»
- *Ερωτήματα εγγύτερων γειτόνων (nearest neighbor queries)*. Δεδομένου ενός στατικού ή κινούμενου σημειακού αντικειμένου και ενός χρονικού παραθύρου (χρονική στιγμή ή

διάστημα τιμών), αναζητούνται τα k αντικείμενα πλησίον του δοσμένου κατά τη διάρκεια του χρονικού παραθύρου. Τα ερωτήματα γειτόνων εντός ακτίνας επιρροής (*h-neighbor neighbor queries*) αποτελούν παραλλαγή και αναζητούν, αντί για τα k πλησιέστερα, τα αντικείμενα πλησίον του δοσμένου εντός μιας ακτίνας επιρροής γύρω του. Τα ερωτήματα κλιμακούμενης απόστασης (*sorted-distance queries*) αναζητούν επίσης τα αντικείμενα πλησίον του δοσμένου, αλλά διαφέρουν ως προς το γεγονός ότι δεν προσδιορίζεται το πλήθος τους. Επιστρέφεται η λίστα των γειτόνων μαζί με τις σχετικές αποστάσεις από το σημείο αναφοράς σε αύξουσα ή φθίνουσα διάταξη.

- *Ερωτήματα πυκνότητας (density queries)*. Δεδομένης μια τιμής κατωφλίου για την πυκνότητα των αντικειμένων και ενός χρονικού παραθύρου, αναζητούνται οι ανεξάρτητες περιοχές του χώρου, εντός των οποίων η πυκνότητα των κινούμενων αντικειμένων ξεπερνάει τη δοσμένη ανώτατη τιμή κατά τη διάρκεια του χρονικού παραθύρου. Εναλλακτικά, δεδομένης μιας κατάτμησης του χώρου, αναζητούνται οι πυκνότητες των κινούμενων αντικειμένων εντός των περιοχών της κατάτμησης κατά τη διάρκεια του χρονικού παραθύρου.
- *Ερωτήματα χρονικών τεμαχίων (time-sliced queries)*. Αναζητούνται οι θέσεις του συνόλου των αντικειμένων κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος ή μιας χρονικής στιγμής.

3.3.2 Τοπολογικά ερωτήματα

Τα τοπολογικά ερωτήματα είναι ερωτήματα τροχιάς, τα οποία εξετάζουν τις χωροχρονικές σχέσεις της τροχιάς των αντικειμένων με άλλα στατικά ή κινούμενα γειτονικά αντικείμενα ή με περιοχές του χώρου. Οι χωροχρονικές σχέσεις έχουν παρόμοια σημασιολογία με αυτές του τοπολογικού μοντέλου, οι οποίες υιοθετούνται από τα κλασικά συστήματα χωρικών βάσεων δεδομένων, επεκταμένες φυσικά κατά τη χρονική διάσταση. Τα βασικά κατηγορήματα του τοπολογικού μοντέλου είναι: *εντός (inside)*, *επικαλύπτει (overlap)*, *καλύπτεται (covered by)*, *καλύπτει (covers)*, *περιλαμβάνει (contains)*, *συναντά (meet)*, *ισούται (equal)* και *χωρίς συνάφεια (disjoint)*. Επιπλέον, εισάγονται τα σύνθετα κατηγορήματα: *εισέρχεται (enter)*, *εξέρχεται (leave)*, *διασχίζει (cross)* και *παρακάμπτει (bypass)*. Για την εξακρίβωση μιας τοπολογικής σχέσης της τροχιάς ενός αντικειμένου με μια δοσμένη περιοχή του χώρου, ενδεχομένως να απαιτείται η εξέταση περισσοτέρων του ενός τμημάτων της τροχιάς.

3.3.3 Ερωτήματα πλοήγησης

Τα ερωτήματα πλοήγησης είναι ερωτήματα τροχιάς με τη διαφορά ότι αναζητούνται απαντήσεις αναφορικά με παραγόμενα μεγέθη από την τροχιά και όχι από τις ίδιες τις αποθηκευμένες θέσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μεγέθους που μπορεί να υπολογιστεί από την τροχιά είναι η *ταχύτητα* ως πηλίκο της *διανυθείσας απόστασης* προς το αντίστοιχο *χρονικό διάστημα*. Συνήθως, οι αναζητούμενες τιμές των μεγεθών υπολογίζονται στα επιμέρους τμήματα της τροχιάς και στη συνέχεια υπολογίζεται κατά περίπτωση ο μέσος όρος ή η μέγιστη τιμή τους. Άλλα χρήσιμα παράγωγα μεγέθη ενδιαφέροντος στα κινούμενα αντικείμενα είναι η *διανυθείσα απόσταση (traveled distance)*, ο *χρόνος διαδρομής (travel time)*, ο *προσανατολισμός κίνησης (heading)* και η *περιοχή κάλυψης (area)*.

3.4 Το σύστημα παρακολούθησης ρεύματος κινούμενων αντικειμένων

Οι εφαρμογές παρακολούθησης κινούμενων σημειακών αντικειμένων παρουσιάζουν ιδιαίτερο πρακτικό και εμπορικό ενδιαφέρον. Τα πραγματικά περιβάλλοντα, όπου χρησιμοποιούνται τέτοια συστήματα παρακολούθησης, είναι πλήρως δυναμικά και οι απαιτήσεις τους αυξάνονται συνεχώς. Τα συστήματα καλούνται να εξυπηρετούν ολοένα και μεγαλύτερο πλήθος κινούμενων αντικειμένων και ερωτημάτων. Επιπλέον, τα ερωτήματα θέσης και τροχιάς υποβάλλονται από τους χρήστες του συστήματος σε πραγματικό χρόνο και η απάντηση στα ερωτήματα πρέπει να επιστρέφεται στους χρήστες επίσης σε πραγματικό χρόνο ή τουλάχιστον εντός αυστηρών χρονικών πλαισίων. Παρωχημένες απαντήσεις καθίστανται εκ των πραγμάτων άχρηστες, δεδομένου ότι ο χρόνος εγκυρότητάς τους είναι πολύ μικρός λόγω της συνεχούς κίνησης των αντικειμένων. Τέτοιου είδους περιορισμοί οδηγούν στην αντιμετώπιση των συστημάτων παρακολούθησης σύμφωνα με το μοντέλο των ρευμάτων δεδομένων, ενώ τα ερωτήματα θέσης ή τροχιάς θεωρούνται ως ερωτήματα διαρκείας. Σε αυτή την ενότητα επιχειρείται η περιγραφή των προδιαγραφών και των παραμέτρων των συστημάτων παρακολούθησης της κίνησης αντικειμένων με βάση τις αρχές διαχείρισης ρευμάτων δεδομένων και επεξεργασίας ερωτημάτων διαρκείας.

3.4.1 Διαχείριση ρεύματος κινούμενων αντικειμένων

Ανεξάρτητα από τους τύπους ερωτημάτων που προορίζεται να υποστηρίξει το σύστημα, βασική του λειτουργία είναι να καταγράφει τις θέσεις των αντικειμένων και να σχηματίζει τις αντίστοιχες τροχιές τους, όταν είναι απαραίτητο. Ο κεντρικός υπολογιστής δέχεται καταιγιστικά μηνύματα ανανέωσης των θέσεων από το σύνολο των αντικειμένων. Τα αντικείμενα αποστέλλουν τη θέση τους περιοδικά, καθώς ένα μεγάλο ποσοστό τους, αν όχι το σύνολο αυτών, επιχειρεί συγχρονισμένη αποστολή. Το γεγονός αυτό επιβαρύνει το σύστημα, λόγω του υψηλού ρυθμού ροής πληροφορίας προς τον κεντρικό υπολογιστή. Το σύστημα πρέπει να προλαβαίνει την απορρόφησή της εισερχόμενης πληροφορίας, διαφορετικά λειτουργεί απολύοντας πληροφορία και παράγοντας παρωχημένες απαντήσεις. Δεδομένων των αντικειμενικών στόχων του συστήματος, όπως η εξυπηρέτηση του μέγιστου δυνατού πλήθους ενεργών αντικειμένων και η ελάχιστη δυνατή περίοδος ενημερώσεων, όλες οι ενδείξεις οδηγούν προς τη θεώρησή του με βάση το μοντέλο των ρευμάτων δεδομένων και τη θεώρηση των μηνυμάτων ενημέρωσης των θέσεων ως το βασικό ρεύμα εισόδου.

Η αποθήκευση και ο χειρισμός των μηνυμάτων ενημερώσεων με τη χρήση των κλασικών συστημάτων διαχείρισης βάσεων δεδομένων ή ακόμα και των τυπικών χωροχρονικών βάσεων δεδομένων είναι πρακτικά αδύνατη. Από τη μια, ο όγκος της πληροφορίας εισόδου γίνεται υπερβολικός, καθώς το πλήθος των ενεργών αντικειμένων αυξάνει. Από την άλλη, το γεγονός ότι ο ρυθμός της πληροφορίας εισόδου είναι κυμαινόμενος (εξαιτίας των ενδεχόμενων διαφορετικών μεθόδων ενημέρωσης ανά αντικείμενο), καθώς και η καταιγιστική του φύση, δυσχεραίνουν το χειρισμό της. Το σύνολο αυτών των ιδιοτήτων είναι χαρακτηριστικό των ρευμάτων δεδομένων, όπου η χρήση δευτερεύουσας μνήμης καθίσταται απαγορευτική για τη λειτουργία και τη συνολική απόδοση του συστήματος. Οι καθυστερήσεις προσπέλασης και ανάκτησης των δεδομένων στη δευτερεύουσα μνήμη (σκληρό δίσκο) είναι υπερβολικά υψηλές σε σχέση με τον αναμενόμενο ρυθμό του ρεύματος εισόδου.

Εναλλακτικά, παρόλο που η κύρια μνήμη (μνήμη τυχαίας προσπέλασης) εμφανίζεται ικανοποιητική από άποψη ταχύτητας για το χειρισμό του ρεύματος εισόδου, η χωρητικότητά της δεν είναι αρκετή. Η επεξεργασία των μηνυμάτων ενημέρωσης πρέπει να

γίνεται με μια εντελώς διαφορετική τακτική πέρα από την τετριμμένη διαρκή αποθήκευσή τους. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από το κεντρικό υπολογιστή, επιβάλλεται να είναι ενός περάσματος (*one-pass algorithms*), ώστε κάθε μήνυμα να αποβάλλεται μετά την επεξεργασία του. Στη χειρότερη περίπτωση μόνο ένα μέρος των εισερχόμενων μηνυμάτων είναι δυνατό να αποθηκεύεται προσωρινά. Η πληροφορία που φέρει κάθε μήνυμα ενημέρωσης, πρέπει να απορροφάται στις εσωτερικές δομές του κεντρικού υπολογιστή με αποδοτικό τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται η συνολική συμπίεσή της και επιπλέον να γίνεται κατάλληλη προετοιμασία για την περαιτέρω επεξεργασία της από τους αλγορίθμους αποτίμησης των ερωτημάτων. Επιπρόσθετα, η επεξεργασία κάθε μηνύματος οφείλει να είναι ταχύτατη, ώστε ο κεντρικός υπολογιστής να προλάβει να επεξεργαστεί το σύνολό τους, καθώς και να περισσεύει αρκετός χρόνος για την τελική αποτίμηση των ερωτημάτων πριν την επόμενη καταγιμιστική λήψη ενημερώσεων. Στην ιδανική περίπτωση, ο χρόνος επεξεργασίας ανά μήνυμα οφείλει να είναι ανεξάρτητος ως προς τις παραμέτρους του συστήματος, που το επιβαρύνουν, όπως το πλήθος των κινούμενων αντικειμένων και το πλήθος των ερωτημάτων.

Στην περίπτωση ερωτημάτων για τα οποία δεν απαιτείται η αποτύπωση της τροχιάς και γενικά η τήρηση του ιστορικού της εξέλιξης της κίνησης, η ταυτόχρονη ικανοποίηση των παραπάνω περιορισμών είναι εύκολη υπόθεση. Για παράδειγμα, στα ερωτήματα θέσης, των οποίων το χρονικό παράθυρο αναφέρεται στην τρέχουσα κατάσταση της κίνησης (*now-related*), ο κεντρικός υπολογιστής αρκεί να αποθηκεύει την τελευταία ενημέρωση της θέσης κάθε αντικειμένου. Σε αυτή την περίπτωση, η χωρητικότητα της κύριας μνήμης είναι ικανοποιητική για να κρατήσει εξολοκλήρου τις τρέχουσες θέσεις αρκετά μεγάλου πλήθους αντικειμένων, ενώ η επεξεργασία κάθε ενημέρωσης απλοποιείται σημαντικά. Αντίθετα, η τήρηση της τροχιάς και γενικά του ιστορικού της κίνησης προϋποθέτει ειδικές τεχνικές συμπίεσης. Η βασική ιδέα αυτών των τεχνικών είναι η σύμβαση ότι το ενδιαφέρον για ακρίβεια στην αναπαράσταση της κίνησης μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον, η συνδυασμένη χρήση δίσκου, ενδεχομένως για την αποθήκευση των δεδομένων του μακρινού παρελθόντος, δεν εγκαταλείπεται.

3.4.2 Τα δυναμικά ερωτήματα θέσης και τροχιάς ως ερωτήματα διαρκείας

Κατά το κλασικό μοντέλο ερωτημάτων, γνωστό από τα συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων, η διαδικασία αποτίμησης τους ακολουθεί ένα συγκεκριμένο σχέδιο εκτέλεσης (*query plan*) ανάλογα με τον τύπο του ερωτήματος. Πολλαπλοί τύποι ερωτημάτων είναι δυνατόν να μοιράζονται τμήματα του ίδιου σχεδίου εκτέλεσης χάριν βελτιστοποίησης. Ωστόσο, κάθε ερώτημα υποβάλλεται και αποτιμάται μία φορά. Αυτό το μοντέλο δεν είναι πάντα βολικό και αποδοτικό για τα ερωτήματα θέσης και τροχιάς, των οποίων το χρονικό παράθυρο αναφέρεται σε δεδομένα που συνεχώς μεταβάλλονται.

Τα ερωτήματα θέσης και τροχιάς, όπως ορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, κατηγοριοποιούνται επιπλέον σε στατικά και δυναμικά ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του χρονικού παραθύρου εφαρμογής τους. Όταν το χρονικό παράθυρο ενός ερωτήματος είναι στατικό, δηλαδή τόσο η αρχή του όσο και το τέλος του αναφέρονται σε σταθερές χρονικές στιγμές στο παρελθόν, οι θέσεις των αντικειμένων παραμένουν σταθερές. Έτσι, η αποτίμηση ενός τέτοιου ερωτήματος αρκεί να γίνει μία φορά και η απάντησή του παραμένει έγκυρη όσος χρόνος κι αν περάσει. Ερωτήματα με στατικό παράθυρο χαρακτηρίζονται ως στατικά. Για παράδειγμα η απάντηση στο ερώτημα «εντόπισε ποια αυτοκίνητα εισήλθαν στο δακτύλιο τις πρωινές ώρες» παραμένει έγκυρη όσος χρόνος κι αν περάσει.

Αντίθετα, το χρονικό παράθυρο ενός ερωτήματος είναι δυναμικό, όταν ολισθαίνει με την πάροδο του χρόνου ακόμα κι αν αναφέρεται στο παρελθόν. Αν η αρχή ή το τέλος του ως χρονικές στιγμές ορίζονται ως προς τις τρέχουσες ή τις μελλοντικές θέσεις των

αντικειμένων, τότε το παράθυρο ολισθαίνει καθώς η χρονική διάσταση αυξάνει καδιστώντας το ερώτημα δυναμικό. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα εξής ερωτήματα: «ποια αντικείμενα βρίσκονται εντός της δοσμένης περιοχής αυτή τη στιγμή;», «ποια είναι η περιοχή κάλυψης του δοσμένου αντικειμένου τα τελευταία 10 λεπτά;», «ποια αντικείμενα ήταν πλησίον του δοσμένου πριν 2 λεπτά;». Οι θέσεις των αντικειμένων εντός ενός δυναμικού χρονικού παραθύρου είναι μεταβαλλόμενες με αποτέλεσμα να μην έχει νόημα η αποτίμηση του ερωτήματος μία μόνο φορά. Η απάντησή του καδίσταται άκυρη μετά το πέρας σύντομου χρονικού διαστήματος, το πολύ ίσου με την περίοδο της επόμενης μαζικής ανανέωσης των θέσεων των αντικειμένων.

Έτσι, τα δυναμικά ερωτήματα θέσης και τροχιάς είναι χρήσιμο να αποτιμώνται περιοδικά, ενώ κατέχουν τη συντριπτική μερίδα ενδιαφέροντος στις εφαρμογές παρακολούθησης. Η περιοδική αποτίμηση των δυναμικών ερωτημάτων δε θα ήταν καθόλου αποδοτική να γίνεται κάθε φορά από το μηδέν. Οι απαιτήσεις του πλήρως δυναμικού περιβάλλοντος των εφαρμογών παρακολούθησης κινούμενων αντικειμένων επιβάλλουν την αντιμετώπιση των συγκεκριμένων τύπων ερωτημάτων ως **ερωτήματα διαρκείας (continuous queries)** σύμφωνα με το μοντέλο των ρευμάτων δεδομένων. Κάθε ερώτημα διαρκείας υποβάλλεται και στη συνέχεια παραμένει ενεργό για ενδεχομένως μακρύ χρονικό διάστημα, συνήθως μη προκαθορισμένο. Η αποτίμησή του γίνεται εν γένη περιοδικά διακρίνοντας δύο περιπτώσεις όσον αφορά την περίοδο: είτε για κάθε χρονόσημο (*timestamp*) μετά τη λήψη ενημερώσεων των αντικειμένων (*στιγμιαία ερωτήματα – instantaneous queries*), είτε σπανιότερα, όταν ικανοποιηθούν συγκεκριμένες συνθήκες με βάση την εξέλιξη της κίνησης των αντικειμένων (*εξακολουθητικά ερωτήματα – persistent queries*). Για παράδειγμα, στο ερώτημα «βρες τα αντικείμενα, των οποίων η ταχύτητα θα διπλασιαστεί εντός των προσεχών 10 λεπτών», η επεξεργασία του πρέπει να γίνει μόνο αν ενημερωθεί αλλαγή στην ταχύτητα ενός ή περισσοτέρων αντικειμένων. Από σημασιολογικής πλευράς, ένα στιγμιαίο ερώτημα, το οποίο υποβάλλεται τη χρονική στιγμή t , ισοδυναμεί με μια ακολουθία απλών ερωτημάτων επί της τρέχουσας θέσης των αντικειμένων αποτιμώμενα για κάθε διακριτή χρονική στιγμή (χρονόσημο) μετά την υποβολή του. Ένα εξακολουθητικό ερώτημα, το οποίο υποβάλλεται τη χρονική στιγμή t , ισοδυναμεί με μια ακολουθία απλών ερωτημάτων καθ' όλη την ιστορική εξέλιξη της κίνησης με σταθερή αφετηρία για όλα τη χρονική στιγμή t .

3.4.3 Διαχείριση κινούμενων ερωτημάτων

Τα ερωτήματα διαρκείας, εκτός από τα ειδικά χαρακτηριστικά του τύπου τους και του χρονικού τους παραθύρου, είναι δυνατό να κινούνται στο χώρο μεταβάλλοντας τη χωρική τους επιροή (*κινούμενα ερωτήματα – moving queries*). Συνήθως πρόκειται για ερωτήματα, των οποίων το επίκεντρο ενδιαφέροντος είναι κάποιο κινούμενο αντικείμενο ή περιοχή, η μεταβολή της θέσης ή της έκτασης των οποίων επηρεάζει άμεσα την απάντηση, καθώς και τον τρόπο επεξεργασίας. Αναλυτικότερα, στα ερωτήματα χωροχρονικού παραθύρου, η χωρική περιοχή είναι δυνατόν να κινείται στο χώρο και γενικά να μεταβάλλει την έκταση και το σχήμα της. Εξάλλου, στα ερωτήματα εγγύτερων γειτόνων, το αντικείμενο ενδιαφέροντος του οποίου αναζητούνται οι πλησιέστεροι γείτονες, είναι δυνατόν να είναι στατικό ή να κινείται καδιστώντας το ερώτημα κινούμενο. Είναι αναμενόμενο και αποδεικνύεται πειραματικά ότι τα κινούμενα ερωτήματα διαρκείας, σε αντιδιαστολή με τη στατική τους έκδοση, επιβαρύνουν σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Έτσι, παράλληλα με τις ενημερώσεις των θέσεων των κινούμενων αντικειμένων, ο κεντρικός υπολογιστής πρέπει να λαμβάνει και ενημερώσεις των χωρικών χαρακτηριστικών των κινούμενων ερωτημάτων. Και ενώ η θέση ενός κινούμενου ερωτήματος εγγύτερων γειτόνων μπορεί να ταυτίζεται με τη θέση του εν λόγω κινούμενου αντικειμένου, το οποίο

υπέβαλλε το ερώτημα, στη γενική περίπτωση, θεωρείται η λήψη ενός ξεχωριστού ρεύματος δεδομένων εισόδου για τις ενημερώσεις των κινούμενων ερωτημάτων.

Εξάλλου, η υποβολή και κατάργηση των ερωτημάτων διαρκείας θα μπορούσαν να ενσωματωθούν στο εν λόγω ρεύμα. Η υποβολή ενός νέου ερωτήματος ξεκινάει με την αποστολή ενημέρωσης των παραμέτρων του προς τον κεντρικό υπολογιστή μέσω του ρεύματος. Αντίστοιχα με τις μεθόδους ενημέρωσης των θέσεων των αντικειμένων, ο κεντρικός υπολογιστής διατηρεί το ερώτημα διαρκείας ενεργό για όσο χρονικό διάστημα λαμβάνει ενημερώσεις του, οι οποίες συνήθως αποστέλλονται με την ίδια συχνότητα. Η κατάργηση ή διακοπή της επεξεργασίας ενός ερωτήματος διαρκείας γίνεται στο χρονόσημο κατά το οποίο δεν θα ληφθεί ενημέρωσή του. Η συγκεκριμένη μέθοδος υποβολής και κατάργησης ερωτημάτων έχει το μειονέκτημα ότι τα ερωτήματα, των οποίων οι παράμετροι είναι σταθερές ή δεν μεταβλήθηκαν ή δεν πρόκειται να μεταβληθούν, πρέπει να συνεχίζουν να αποστέλλουν μηνύματα ενημέρωσης. Το πλεονέκτημά της είναι ότι αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της αποσύνδεσης των φορέων των ερωτημάτων, όταν αυτοί δεν ανήκουν στο σύνολο των κινούμενων αντικειμένων, αλλά αποτελούν ένα ξεχωριστό σύνολο. Επιπλέον, η μέθοδος είναι βολική στην περίπτωση που τα ίδια ερωτήματα υποβάλλονται και διακόπτονται συχνά. Ο κεντρικός υπολογιστής είναι δυνατόν να θεωρήσει τη διακοπή λήψης ενημερώσεων ενός ερωτήματος ως προσωρινή παύση του και να αναστείλει την αποτίμησή του χωρίς να το διαγράψει από τις εσωτερικές του δομές. Εναλλακτικά, η υποβολή και κατάργηση ερωτημάτων μπορεί να γίνει με τη χρήση στίξης (*punctuation*), όπως συνίσταται από το μοντέλο των ρευμάτων δεδομένων. Για λόγους απλότητας, συνήθως επιλέγεται η λήψη διαφορετικού ρεύματος ενημερώσεων για κάθε τύπο ερωτημάτων, που το σύστημα καλείται να υποστηρίξει.

Η επεξεργασία των μηνυμάτων ενημέρωσης των ερωτημάτων από τον κεντρικό υπολογιστή ακολουθεί σε γενικές γραμμές τους ίδιους κανόνες με αυτή των μηνυμάτων ενημέρωσης των αντικειμένων. Αντίθετα με τις θέσεις των κινούμενων αντικειμένων, μόνο οι πρόσφατες ενημερώσεις των παραμέτρων των ερωτημάτων απαιτείται να αποθηκεύονται, γεγονός που απλοποιεί το χειρισμό του ρεύματος από άποψη απορρόφησης. Ωστόσο, το κόστος επεξεργασίας των μηνυμάτων για τα ερωτήματα ενδέχεται να είναι μακράν μεγαλύτερο από το κόστος των αντίστοιχων μηνυμάτων για τα κινούμενα αντικείμενα. Ενώ η μεταβολή της θέσης ενός ή περισσότερων αντικειμένων επιφέρει ορισμένη επιβάρυνση στο κόστος επεξεργασίας των ερωτημάτων, η μεταβολή των παραμέτρων ενός κινούμενου ερωτήματος σαφώς ενέχει μεγαλύτερη επιβάρυνση, αφού στις περισσότερες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η μερική αναδιοργάνωση των εσωτερικών δομών στον κεντρικό υπολογιστή. Βεβαίως, το πρόβλημα αυτό εξισορροπείται κάπως από το γεγονός ότι συνήθως στις εφαρμογές το πλήθος των πολλαπλών ενεργών ερωτημάτων είναι ένα σχετικά μικρό ποσοστό (ενδεικτικά από 30%-50%) του πλήθους των κινούμενων αντικειμένων.

3.4.4 Αποτίμηση ερωτημάτων και ζητήματα σχεδίασης του συστήματος

Στη γενική περίπτωση, το σύστημα σχεδιάζεται για να εξυπηρετεί την αποτίμηση πολλαπλών ερωτημάτων διαρκείας από κάθε υποστηριζόμενο τύπο ερωτημάτων. Για κάθε τύπο ερωτήματος προσδιορίζεται ένα ρεύμα εισόδου, μέσω του οποίου υποβάλλονται, ενημερώνονται και καταργούνται τα αντίστοιχα ερωτήματα. Επιπλέον, για κάθε υποστηριζόμενο τύπο προσδιορίζεται ένα ρεύμα δεδομένων εξόδου, στο οποίο διοχετεύονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης των αντίστοιχων ενεργών ερωτημάτων. Τα αποτελέσματα είναι δυνατόν να επιστρέφονται στους χρήστες του συστήματος, που υπέβαλλαν τα ερωτήματα ή κατά περίπτωση να αναφέρονται σε κάποιο κέντρο ελέγχου του συστήματος. Η κατάσταση λειτουργίας του συστήματος εναλλάσσεται μεταξύ δύο κύριων

φάσεων. Χρονολογικά, προηγείται η *φάση ενημερώσεων (update phase)*, την οποία ακολουθεί η *φάση αποτιμήσεων (evaluation phase)*. Η *φάση αποτιμήσεων* ολοκληρώνεται με την έξοδο των αποτελεσμάτων στα ρεύματα εξόδου και κατέχει τη συντριπτική μερίδα του συνολικού χρόνου και των δύο. Ο συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης των δύο φάσεων πρέπει οπωσδήποτε να είναι μικρότερος από την περίοδο ενημερώσεων, ώστε να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος και η έγκαιρη ανταπόκρισή του. Σε αντίθετη περίπτωση, η ροή πληροφορίας προς το σύστημα μέσω των ρευμάτων δεν απορροφάται εγκαίρως με αποτέλεσμα να προκαλείται σταδιακή υπερχειλίση των *buffers* των ρευμάτων εισόδου και τελικά το σύστημα να εξάγει παρωχημένες απαντήσεις των ερωτημάτων, πρακτικά άχρηστες για τις εφαρμογές. Και ενώ ο χρόνος ολοκλήρωσης της φάσης ενημερώσεων είναι πρακτικά αμελητέος και ελαχιστοποιείται σχετικά εύκολα, βασικό μέτρο της απόδοσης του συστήματος αποτελεί ο χρόνος ολοκλήρωσης της φάσης αποτιμήσεων.

Επιπλέον, το σύστημα, σύμφωνα με το πρότυπο των συστημάτων διαχείρισης ρευμάτων δεδομένων, είναι υποχρεωμένο να προσαρμόζεται στο δυναμικό περιβάλλον της κίνησης των αντικειμένων. Παρόλη την αρχική του μελέτη για τους αναμενόμενους ρυθμούς εισαγωγής δεδομένων και τα υποστηριζόμενα πλήθη αντικειμένων και ερωτημάτων, είναι δυνατόν να υποβληθεί σε δυσμενείς συνθήκες κατά τη λειτουργία του σε πραγματικά περιβάλλοντα. Έτσι, λαμβάνοντας μια σειρά από δυναμικά μέτρα χειρισμού των ρευμάτων εισόδου και της εσωτερικής του δομής, προσαρμόζεται στον κυμαινόμενο ρυθμό εισόδου, ώστε να αντιμετωπίζει τυχόν προσωρινές καθυστερήσεις στην απόδοσή του.

Ο αποτελεσματικός χειρισμός των ρευμάτων εισόδου πραγματοποιείται μέσω της σύμβασης ότι το ρεύμα αναφοράς είναι το ρεύμα ενημέρωσης της θέσης των αντικειμένων. Πλειάδες ενημέρωσης που καταφτάνουν και φέρουν χρονόσημο παλαιότερο του τρέχοντος, αγνοούνται. Σε κάθε εκκίνηση της φάσης των ενημερώσεων, ο κεντρικός υπολογιστής αναμένει τη λήψη τους για συγκεκριμένο ανώτατο χρονικό διάστημα, ώστε στη συνέχεια να προχωρήσει στην αποτίμηση των ερωτημάτων. Και ενώ για να ολοκληρωθεί η φάση αποτιμήσεων απαιτείται να έχουν γίνει οι ενημερώσεις του συνόλου των αντικειμένων και ερωτημάτων, το ανώτατο χρονικό διάστημα αναμονής για αυτές είναι αναγκαίο για λόγους όπως η αποσύνδεση αντικειμένων και η συνέπεια στο ρυθμό εξαγωγής απαντήσεων στα ρεύματα εξόδου. Ενημερώσεις που καταφτάνουν κατά τη διάρκεια της φάσης αποτίμησης δεν είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν και αγνοούνται. Το ανώτατο χρονικό διάστημα αναμονής πρέπει να ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε να είναι πρακτικά αρκετό για να ολοκληρωθούν το σύνολο των ενημερώσεων. Οι αυξομειώσεις του πρέπει να είναι ανάλογες με τις αυξομειώσεις του πλήθους των ενεργών αντικειμένων και ερωτημάτων.

Εξάλλου, το σύστημα διαθέτει δύο βασικά μέτρα για την αντιμετώπιση ενδεχόμενων καθυστερήσεων στην εξαγωγή αποτελεσμάτων. Η πιο απλή και αποτελεσματική λύση είναι η μείωση της συχνότητας δειγματοληψίας στην κίνηση τόσο των αντικειμένων όσο και των κινούμενων ερωτημάτων. Η αύξηση της περιόδου λήψης ενημερώσεων μειώνει άμεσα το ρυθμό ροής εισόδου της πληροφορίας και παράλληλα αυξάνει το διαθέσιμο χρονικό διάστημα για την ολοκλήρωση της φάσης αποτιμήσεων. Έτσι, το σύστημα είναι δυνατόν να δίνει δυναμικά εντολή προς τα αντικείμενα να αυξομειώνουν τη συχνότητα αποστολής ενημερώσεων. Ωστόσο, η ακραία χρήση αυτού του μέτρου δεν είναι πάντα δυνατή, αφού, ανάλογα με τις προδιαγραφές της εφαρμογής, συνήθως υπάρχει περιορισμός ως προς την ελάχιστη συχνότητα. Η ακραία μείωση της συχνότητας μειώνει τη συνολική ικανότητα του συστήματος να παρακολουθεί την κίνηση των αντικειμένων με ικανοποιητική ακρίβεια. Το δεύτερο μέτρο αντιμετώπισης ενδεχόμενων καθυστερήσεων στην εξαγωγή αποτελεσμάτων εφαρμόζεται στη φάση των αποτιμήσεων. Σε αυτή την περίπτωση ο κεντρικός υπολογιστής αποφασίζει να εφαρμόσει εναλλακτικούς αλγόριθμους αποτίμησης των ερωτημάτων. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι

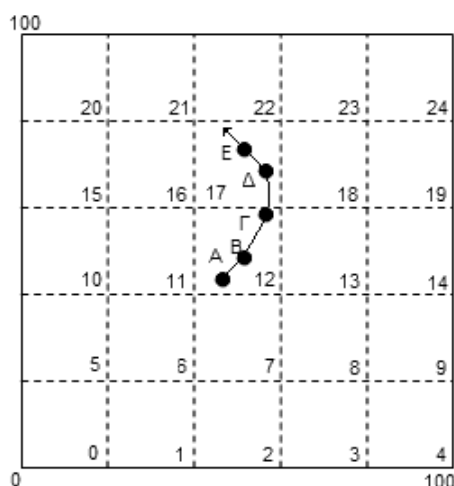
βασισμένοι σε τεχνικές υπολογισμού, οι οποίες θυσιάζουν την ακρίβεια της απάντησης για να κερδίσουν ταχύτητα στον υπολογισμό. Επιπλέον, σε περίπτωση που τα ερωτήματα φέρουν προτεραιότητα εκτέλεσης, τα ερωτήματα με χαμηλή προτεραιότητα υπολογίζονται τελευταία και εφόσον υπάρχει διαθέσιμος χρόνος.

3.4.5 Δομές δεικτοδότησης υπό τις απαιτήσεις του μοντέλου ρευμάτων δεδομένων

Οι χωρικές μέθοδοι προσπέλασης σημείου, που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2, χρειάζονται αναθεώρηση για να υποστηρίξουν το πλήρως δυναμικό περιβάλλον των εφαρμογών παρακολούθησης κινούμενων σημειακών αντικειμένων, όπως αυτό τέθηκε σύμφωνα με το μοντέλο των ρευμάτων δεδομένων. Οι προδιαγραφές των μεθόδων προσπέλασης πρέπει να ικανοποιούν δύο βασικά κριτήρια: αφενός την αποτελεσματική διύλιση των υποψηφίων σημειακών αντικειμένων κατά τη φάση *filter step*, αφετέρου την ευελιξία των δομών στις συχνές ενημερώσεις τους. Το πρώτο εξασφαλίζει τη δραστηκή μείωση του πλήθους των αντικειμένων, τα οποία οδηγούνται προς λεπτομερή εξέταση από τους αλγορίθμους κατά τη φάση *refinement step*. Το δεύτερο, εξίσου σημαντικό, εξασφαλίζει τη γρήγορη ενημέρωση των θέσεων και της τροχιάς των αντικειμένων, ώστε το σύστημα να ανταποκρίνεται αποτελεσματικά στον υψηλό ρυθμό των ρευμάτων εισόδου. Η βασική αναπροσαρμογή των μεθόδων προσπέλασης είναι η χρήση της κύριας μνήμης, αντί της δευτερεύουσας, για την αποθήκευση των θέσεων της τροχιάς του πρόσφατου παρελθόντος.

Οι μέθοδοι προσπέλασης της κατηγορίας με γνώμονα τα δεδομένα (*data driven*) κρίνονται ακατάλληλες ως προς τις απαιτήσεις των ρευμάτων δεδομένων, υπό την έννοια ότι δεν εξασφαλίζουν γρήγορες και σταθερού χρόνου ενημερώσεις. Η κατηγορία περιλαμβάνει το σύνολο των ιεραρχικών δομών, οι οποίες διαμερίζουν το χώρο σε περιοχές ώστε κάθε μια να περιέχει ένα ανώτατο πλήθος αντικειμένων. Η τεχνική αυτή προσαρμόζεται σε μη ομοιόμορφες κατανομές των αντικειμένων στο χώρο και εξασφαλίζει το μέγιστο κόστος επεξεργασίας ανά περιοχή. Ωστόσο, οι ενημερώσεις των δομών καθίστανται αρκετά πιο πολύπλοκες, καθώς συχνά απαιτείται μερική ή ακόμα και ολική αναδιοργάνωσή τους. Η μετακίνηση ενός αντικειμένου έξω από τα όρια της περιοχής του συνήθως αντιμετωπίζεται με τη διαγραφή και επανεισαγωγή του στη δομή.

Η διαγραφή είναι πιθανό να προκαλέσει πτώση του πλήθους των αντικειμένων στην περιοχή κάτω του επιτρεπτού, γεγονός που πυροδοτεί τον εκάστοτε, σχετικά πολύπλοκο, αλγόριθμο για τη συγχώνευση των λοιπών περιεχομένων της περιοχής σε γειτονικές της. Όταν αυτό είναι δυνατό, η διαγραφή ολοκληρώνεται, αλλιώς είναι πιθανόν να προκληθεί διατάραξη της ισορροπίας στο πλήθος των περιεχόμενων αντικειμένων σε υπέρ-περιοχές ανώτερες στην ιεραρχία. Στη συνέχεια ακολουθεί η επανεισαγωγή του αντικειμένου στη δομή με τη διάσχιση της ιεραρχικής δομής για την εύρεση της περιοχής, στην οποία ανήκει η νέα του θέση. Η εισαγωγή του είναι πιθανό να προκαλέσει άνοδο του πλήθους των περιεχόμενων αντικειμένων πέρα από το επιτρεπτό, γεγονός που πυροδοτεί τον εκάστοτε αντίστοιχο αλγόριθμο διάσπασης της περιοχής. Οι συγχωνεύσεις και οι διασπάσεις, μέσω των οποίων διατηρείται το πλήθος των αντικειμένων στις περιοχές σε κάποια άνω και κάτω όρια, επιβαρύνουν σημαντικά το χρόνο ενημερώσεων. Η άμβλυση αυτού του προβλήματος επέρχεται με τη μείωση των ελάχιστων και την αύξηση των μέγιστων χωρητικότητων των περιοχών, ώστε να είναι σπανιότερες οι μεταβάσεις σε άλλες περιοχές και κατ' επέκταση οι συγχωνεύσεις και οι διασπάσεις. Επιπλέον, το ελάχιστο κόστος κάθε ενημέρωσης είναι ίσο με το κόστος διάσχισης της ιεραρχικής δομής, το οποίο δεν είναι σταθερό αλλά εξαρτάται (συνήθως λογαριθμικά) από το συνολικό πλήθος των κινούμενων αντικειμένων.



Σχήμα 3.1: Κατακερματισμός χώρου

Η κατηγορία μεθόδων προσπέλασης με γνώμονα το χώρο (*space driven*) έχει σαφή πλεονεκτήματα ως προς τις απαιτήσεις του μοντέλου των ρευμάτων δεδομένων. Σύμφωνα με την τεχνική του κατακερματισμού (*hashing*), που χρησιμοποιείται από τις εν λόγω μεθόδους, ο χώρος κατακερματίζεται από ένα πλέγμα κελιών ανεξαρτήτου κατανομής των αντικειμένων σε αυτά. Κάθε σημειακό αντικείμενο βρίσκεται εντός των ορίων ενός κελιού. Κατά τη μετάβαση ενός αντικειμένου σε κάποιο νέο (συνήθως γειτονικό) κελί, διαγράφεται σε σταθερό χρόνο από το προηγούμενο και εισάγεται σε σταθερό χρόνο στο νέο. Κάθε κελί επιτρέπεται να περιέχει απεριόριστο πλήθος αντικειμένων, γεγονός που δεν επιβάλλει τη χρήση αντίστοιχων αλγορίθμων για τη διάσπαση ή τη συγχώνευσή τους. Η πολύπλοκη διάσχιση της ιεραρχικής δομής της άλλης κατηγορίας μεθόδων, για την εισαγωγή του αντικειμένου στη δομή υπό τη νέα του θέση, αντικαθίσταται από τη σύντομη αποτίμηση μιας συνάρτησης κατακερματισμού, της οποίας ο υπολογισμός είναι σταθερός και ανεξάρτητος από το πλήθος των αντικειμένων και των κελιών και η οποία υποδεικνύει άμεσα το κελί εισαγωγής. Έτσι, η μέθοδος δεν υποφέρει από τα προβλήματα των *data-driven* μεθόδων.

Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται ένας δισδιάστατος τετραγωνικός χώρος, ο οποίος κατακερματίζεται από το εφαρμοσμένο πλέγμα, τα κελιά του οποίου είναι χαραγμένα με διακεκομμένες γραμμές. Η νοητή εφαρμογή του πλέγματος ουσιαστικά υλοποιείται από την αντίστοιχη συνάρτηση κατακερματισμού. Στην περίπτωση του σχήματος έχει εφαρμοσθεί γραμμικός κατακερματισμός δύο διαστάσεων με βαθμό κατάτμησης 5x5. Στη γενική περίπτωση επιλέγεται ο βαθμός κατάτμησης κάθε διάστασης χωριστά: έστω G_x ο βαθμός κατάτμησης της οριζόντιας διάστασης και G_y της κάθετης. Αν ο χώρος έχει μήκος *width* και ύψος *height*, τότε κάθε κελί θα έχει μήκος $dx=width/G_x$ και ύψος $dy=height/G_y$. Τότε, η συνάρτηση $f(x,y)=G_x\lfloor y/dy \rfloor+\lfloor x/dx \rfloor$ είναι συνάρτηση κατακερματισμού με πεδίο ορισμού το $[0,width)\times[0,height)$ και πεδίο τιμών τους ακέραιους του διαστήματος $[0,G_xG_y-1]$. Δηλαδή, η συνάρτηση μετασχηματίζει τις συντεταγμένες ενός σημείου του χώρου σε ένα ακέραιο αριθμό, ο οποίος είναι η ταυτότητα του κελιού στο οποίο ανήκει το σημείο. Στο σχήμα φαίνονται οι ταυτότητες όλων των κελιών που προκύπτουν από την αντίστοιχη συνάρτηση κατακερματισμού για $G_x=G_y=5$.

Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται ένα κινούμενο σημειακό αντικείμενο, το οποίο αρχικά βρίσκεται στη θέση A και κινείται στη χαραγμένη τροχιά. Απέστειλε ενημερώσεις της θέσης του κατά τη διέλευσή του από τις θέσεις B, Γ, Δ και E της τροχιάς του. Η συνάρτηση

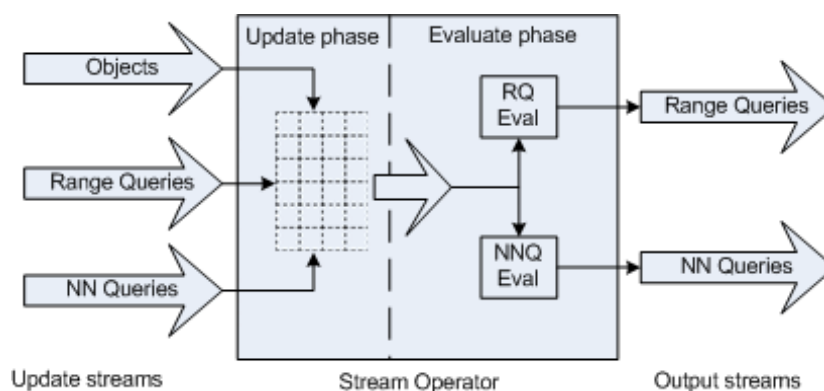
κατακερματισμού αποτιμάται (σε σταθερό χρόνο) για τις συντεταγμένες καθεμιάς θέσης. Για τις θέσεις Β και Γ το αποτέλεσμα της συνάρτησης είναι ταυτόσημο με την ταυτότητα του κελιού, στο οποίο ήδη κινείται και έτσι απαιτείται μόνο η ανανέωση των συντεταγμένων του. Κατά την αποτίμηση της συνάρτησης στη θέση Δ, επιστρέφεται διαφορετικό αποτέλεσμα, που υποδηλώνει τη μετάβαση του αντικειμένου σε άλλο κελί. Έτσι, η μέθοδος ανανεώνει τη δομή της ώστε να αποτυπώσει αυτή τη μετάβαση, ενώ παράλληλα καταγράφει σαν κελί κίνησης το νέο κελί για να απαιτείται μόνο μια κλήση της συνάρτησης για κάθε ενημέρωση της θέσης. Στη θέση Ε ανανεώνονται μόνο οι συντεταγμένες, αφού δεν προκύπτει μετάβαση σε άλλο κελί. Με αυτή την απλή τεχνική η μέθοδος υλοποιεί το μέσο με το οποίο διεκπεραιώνει το *filter step*: τα αντικείμενα ενός κελιού οδηγούνται στους αλγόριθμους αποτίμησης των ερωτημάτων, αν η χωρική έκταση του κελιού ικανοποιεί τις προϋποθέσεις για το εκάστοτε ερώτημα.

Η απόδοση της τεχνικής είναι άριστη για ομοιόμορφες κατανομές των σημειακών αντικειμένων στο χώρο, καθώς προσφέρεται η δυνατότητα επιλογής πλέγματος συγκεκριμένης σταθερής κατάτμησης καθ' όλη τη διάρκεια παρακολούθησης των φαινομένων, και αποτελεί την απλούστερη και παράλληλα πιο ευέλικτη έκδοσή της. Εναλλακτικά, η απόδοση της τεχνικής μειώνεται για μη ομοιόμορφες κατανομές, κατά τις οποίες παρουσιάζονται δύο προβλήματα. Ένα κελί, είτε περιέχει λίγα (ή καθόλου) αντικείμενα με αποτέλεσμα το κόστος ελάχιστης επεξεργασίας του να είναι μεγαλύτερο από αυτό των περιεχομένων του, είτε περιέχει υπερβολικό πλήθος αντικειμένων με πιθανό αποτέλεσμα το κόστος επεξεργασίας τους να είναι υπερβολικό σε σχέση με το απαιτούμενο κατά τη φάση του *refinement step*. Η ύπαρξη μεγάλου ποσοστού τέτοιων προβληματικών κελιών μειώνει τη συνολική απόδοση κατά *refinement step*. Η αντιμετώπιση του προβλήματος επιτυγχάνεται με τη χρήση διαφορετικού βαθμού κατάτμησης του πλέγματος στις περιοχές όπου η κατανομή παρουσιάζει έντονη ανομοιομορφία. Η τεχνική αυτή μειώνει δραστικά το ποσοστό των προβληματικών κελιών με κόστος τη χρήση πιο πολύπλοκων ή πολλαπλών συναρτήσεων κατακερματισμού, οι οποίες όμως διατηρούν τα πλεονεκτήματά τους όπως η σταθερή (ανεξάρτητη από τα πλήθη αντικειμένων και κελιών) αποτίμησή τους.

3.5 Μηχανισμός επεξεργασίας

Επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας σε συστήματα παρακολούθησης κινούμενων σημειακών αντικειμένων στο δισδιάστατο χώρο, τα οποία υποστηρίζουν ερωτήματα θέσης ως στιγμιαία ερωτήματα διαρκείας για τις τρέχουσες θέσεις των αντικειμένων (*now-related queries*). Το περιβάλλον λειτουργίας και το σύστημα διέπονται από τα εξής χαρακτηριστικά.

- Τα κινούμενα αντικείμενα αποστέλλουν τη θέση τους σε κάθε χρονόσημο, ανεξαρτήτως αν η θέση τους έχει μεταβληθεί ή όχι. Η πιθανή αποσύνδεση κάποιου αντικειμένου ανιχνεύεται, όταν δεν ληφθεί ενημέρωση για αυτό σε κάποιο χρονόσημο. Το σύνολο ενημερώσεων των θέσεων των αντικειμένων συνδέτουν το ρεύμα εισόδου αντικειμένων ως το βασικό ρεύμα αναφοράς.
- Δεδομένου ότι το ενδιαφέρον παρουσιάζεται μόνο στις τρέχουσες θέσεις των αντικειμένων, απλοποιείται σημαντικά η σχεδίαση των δομών του κεντρικού υπολογιστή. Μόνο η τελευταία ενημερωμένη θέση κάθε αντικειμένου είναι απαραίτητο να αποθηκεύεται για τον υπολογισμό των υποστηριζόμενων τύπων ερωτημάτων θέσης. Η χωρητικότητα της κύριας μνήμης είναι ικανοποιητική ώστε να φιλοξενεί εξ ολοκλήρου τη συνολική επεξεργασία των φάσεων ενημερώσεων και αποτιμήσεων. Η

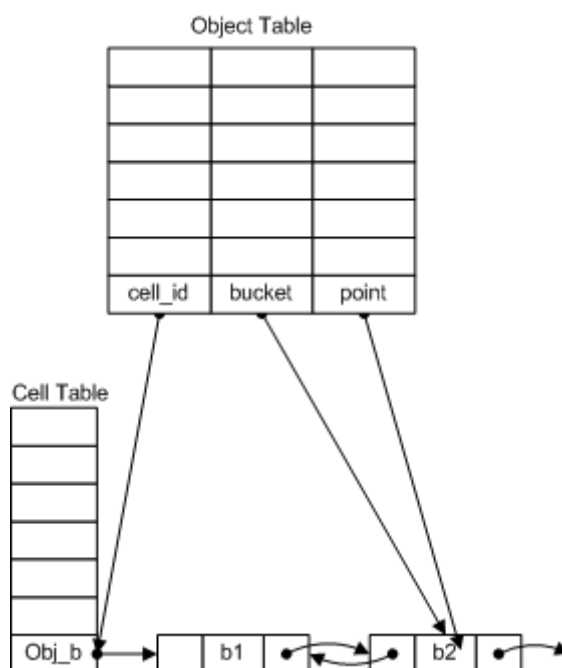


Σχήμα 3.2: Μηχανισμός επεξεργασίας

- επιλεγόμενη μέθοδος προσπέλασης είναι βασισμένη στην τεχνική του γραμμικού κατακερματισμού δύο διαστάσεων.
- Σε αυτή την πλατφόρμα εγκαθίσταται η υποστήριξη πολλαπλών κινούμενων ερωτημάτων χωροχρονικού παραδύρου (αναφερόμενα ως ερωτήματα περιοχής - *range queries*), των οποίων το χωρικό παράθυρο είναι μια ορθογώνια περιοχή μεταβλητής έκτασης και το χρονικό παράθυρο είναι η τρέχουσα χρονική στιγμή. Τα ερωτήματα υποβάλλονται και ενημερώνονται μέσω ενός ρεύματος εισόδου ερωτημάτων περιοχής. Η ορθογώνια περιοχή προσδιορίζεται μέσω των συντεταγμένων της κάτω αριστερής και άνω αριστερής κορυφής της. Οι φορείς των ερωτημάτων αποστέλλουν μηνύματα ενημέρωσής τους σε κάθε χρονόσημο ώστε τα ερωτήματα να παραμένουν ενεργά ως ερωτήματα διαρκείας.
- Επίσης, εγκαθίσταται η υποστήριξη πολλαπλών κινούμενων ερωτημάτων *k*-εγγύτερων γειτόνων (*k-nearest neighbor queries*), των οποίων το χρονικό παράθυρο είναι η τρέχουσα χρονική στιγμή και τα σημεία ενδιαφέροντός τους υποβάλλονται μέσω ενός διαφορετικού συνόλου σημείων, τα οποία αποτελούν τις θέσεις των φορέων τους. Τα ερωτήματα υποβάλλονται και ενημερώνονται μέσω ενός ρεύματος εισόδου ερωτημάτων εγγύτερων γειτόνων. Οι φορείς των ερωτημάτων αποστέλλουν τη θέση τους (ως τη θέση ενδιαφέροντος του ερωτήματος) και την τιμή του *k* ως μηνύματα ενημέρωσης των ερωτημάτων. Η αποστολή ενημερώσεων γίνεται για κάθε χρονόσημο, ώστε τα ερωτήματα να παραμένουν ενεργά ως ερωτήματα διαρκείας.
- Το πλήθος των ενεργών ερωτημάτων από κάθε τύπο μπορεί να είναι κυμαινόμενο, αρκεί να είναι γνωστό εκ των προτέρων το μέγιστο πλήθος τους. Το σύστημα θα απορρίπτει την υποβολή νέων ερωτημάτων πέραν του ανώτατου ορίου.
- Οι απαντήσεις των ερωτημάτων επιστρέφονται στους φορείς μέσω δύο ρευμάτων εξόδου: ρεύμα εξόδου ερωτημάτων περιοχής και ρεύμα εξόδου ερωτημάτων εγγύτερων γειτόνων.

3.5.1 Σχεδίαση μεθόδου προσπέλασης

Στο χώρο εφαρμόζεται ένα στατικό πλέγμα συγκεκριμένης κατάτμησης (σταθερής καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης) με τη χρήση μιας συνάρτησης κατακερματισμού (*hash function*). Σε κάθε κελί του πλέγματος αντιστοιχίζονται σύνολα χωρικών αντικειμένων που περιέχονται ή αφορούν το κελί, όπως τα κινούμενα αντικείμενα ή οι διάφοροι τύποι χωρικών ερωτημάτων. Έτσι, στην έκταση του κελιού αντιστοιχίζονται χωρικά, τα κινούμενα αντικείμενα με τα χωρικά ερωτήματα που αφορούν το χώρο ή μέρος του χώρου



Σχήμα 3.3: Δομές υλοποίησης κατακερματισμού

όπου εκτείνεται το κελί. Ειδικά για τα κινούμενα αντικείμενα αντιστοιχίζεται ένα σύνολο κάδων (κάδοι κινούμενων αντικειμένων), οι οποίοι είναι σελίδες μνήμης σταθερού μεγέθους που περιέχουν τις πληροφορίες (ταυτότητα αντικειμένου και συντεταγμένες) για τη θέση των σημειακών αντικειμένων στο αντίστοιχο κελί.

Οι ανανεώσεις των θέσεων των αντικειμένων αποστέλλονται από τα αντικείμενα περιοδικά και η μέθοδος τις λαμβάνει από το ρεύμα εισόδου των αντικειμένων. Κατά τη λήψη μιας πλειάδας ανανέωσης της θέσης ενός αντικειμένου από το ρεύμα εισόδου $\langle timestamp, Oid, x, y \rangle$ εντοπίζεται το κελί και στη συνέχεια ο κάδος όπου βρίσκεται το αντικείμενο. Αν η νέα του θέση ανήκει στο ίδιο κελί, τότε απλά ανανεώνονται οι συντεταγμένες του. Διαφορετικά, διαγράφεται από τον κάδο του κελιού και επανατοποθετείται με τις νέες συντεταγμένες του σε κάποιον κάδο του νέου κελιού που έχει διαδέσιμο χώρο.

Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας θεωρείται σταθερή ως προς το συνολικό πλήθος των αντικειμένων και επιβαρύνεται από λειτουργίες όπως ο εντοπισμός του αντικειμένου στον κάδο που βρίσκεται και η πιθανή διαγραφή και επανατοποθέτησή του σε άλλον. Όπως αναλύεται στην επόμενη υποενότητα, η διαδικασία μπορεί να επιταχυνθεί αν για κάθε αντικείμενο καταγράφονται επιπλέον πληροφορίες για τη θέση του εκτός από το κελί που βρίσκεται. Ωστόσο, η μέθοδος εξασφαλίζει την άμεση και γρήγορη προσπέλαση των αντικειμένων που βρίσκονται σε κάθε κελί από οποιουδήποτε τύπου χωρικά ερωτήματα, αφού τα αντικείμενα με τις συντεταγμένες τους αποθηκεύονται σε κάδους κατά ομάδες, δηλαδή σε συνεχόμενες θέσεις μνήμης (σελίδες).

3.5.2 Υλοποίηση μεθόδου προσπέλασης

Η συνάρτηση κατακερματισμού δέχεται ως είσοδο τις συντεταγμένες ενός σημείου του χώρου και επιστρέφει την ταυτότητα του κελιού του πλέγματος στο οποίο ανήκει. Έτσι διατηρείται ένας πίνακας κελιών (*cell table*) τόσων γραμμών όσο και το πλήθος των κελιών (*cell_cnt*), που είναι ίσο με το γινόμενο των βαθμών κατάτμησης κάθε διάστασης

του πλέγματος. Κάθε πεδίο του πίνακα αναφέρεται σε ένα σύνολο κάποιου συγκεκριμένου τύπου χωρικών αντικειμένων που περιέχονται στο κελί ή το αφορούν, όπως για παράδειγμα τα κινούμενα αντικείμενα ή ένα τμήμα της περιοχής που καλύπτει ένα χωρικό ερώτημα. Ειδικά για τα κινούμενα αντικείμενα ο δείκτης *obj_b* δείχνει στον πρώτο από μια διπλοσυνδεδεμένη λίστα κάδων κινούμενων αντικειμένων. Κάθε κάδος φέρει μια κεφαλίδα στην οποία καταγράφεται το τρέχον πλήθος αντικειμένων στον κάδο και οι διευθύνσεις μνήμης του επόμενου και του προηγούμενου κάδου στη λίστα.

Επίσης διατηρείται ένας πίνακας για τα κινούμενα αντικείμενα (*object table*), όπου για το καθένα σημειώνεται το κελί (*c_id*) - η γραμμή του πίνακα κελιών - στο οποίο βρίσκεται, ο δείκτης του κάδου (*bucket*) της αντίστοιχης λίστας όπου περιέχεται και η ακριβής θέση του (*point*) μέσα στον κάδο. Έτσι ο εντοπισμός ενός αντικειμένου γίνεται κατευθείαν με τη χρήση των τριών δεικτών. Με τη χρήση του πρώτου είναι άμεσα διαθέσιμη η ταυτότητα του κελιού (όπου βρίσκεται το αντικείμενο) για να συγκριθεί με το αποτέλεσμα της συνάρτησης κατακερματισμού για τις νέες συντεταγμένες. Με τη χρήση του δεύτερου είναι άμεσα διαθέσιμη η κεφαλίδα του κάδου όπου περιέχεται το αντικείμενο σε περίπτωση διαγραφής του από αυτόν. Και με τη χρήση του τρίτου είναι άμεσα διαθέσιμη η θέση του αντικειμένου στον κάδο σε περίπτωση διαγραφής του από αυτόν, καθώς και οι συντεταγμένες του για άμεση ανανέωσή τους.

Η συνολική διαδικασία της ενημέρωσης της θέσης ανά αντικείμενο έχει ως εξής. Μετά τη λήψη της αντίστοιχης πλειάδας από το ρεύμα αντικειμένων αρκεί μια κλήση της συνάρτησης κατακερματισμού (*Hash*) με τις νέες συντεταγμένες για τον έλεγχο αλλαγής κελιού. Το νέο κελί ελέγχεται με το σημειωμένο *c_id* στην αντίστοιχη θέση του πίνακα αντικειμένων (βλ σχήμα 3.3). Αν αυτά είναι ταυτόσημα, τότε το αντικείμενο παραμένει στο ίδιο κελί και με το δείκτη *point* γίνεται μόνο η ανανέωση των συντεταγμένων. Διαφορετικά, το αντικείμενο διαγράφεται από το παλιό κελί ως εξής. Αν ο κάδος περιέχει μόνο ένα αντικείμενο, δηλαδή αυτό που πρέπει να διαγραφεί, τότε ο κάδος αφαιρείται εντελώς από τη λίστα και αποδεσμεύεται η σελίδα μνήμης του. Διαφορετικά, εντοπίζεται το τελευταίο αντικείμενο στον κάδο μέσω του δείκτη *bucket* και του πλήθους των αντικειμένων από την κεφαλίδα του κάδου. Αυτό στη συνέχεια μεταφέρεται στη θέση του αντικειμένου προς διαγραφή, ενημερώνεται κατάλληλα ο δείκτης *point* προς αυτό επειδή άλλαξε θέση μέσα στον κάδο και μειώνεται το πλήθος στην κεφαλίδα του κάδου κατά 1. Επιπλέον το αντικείμενο επανατοποθετείται στο νέο κελί με τον εξής τρόπο. Σαρώνεται η λίστα κάδων του νέου κελιού και το αντικείμενο τοποθετείται στον πρώτο κάδο που θα βρεθεί να έχει διαθέσιμο χώρο και στην επόμενη θέση μετά από εκείνη του τελευταίου αντικειμένου. Τέλος ενημερώνεται κατάλληλα ο πίνακας αντικειμένων για τις νέες τιμές κελιού, κάδου και θέσης.

3.5.3 Βελτιστοποίηση της μεθόδου προσπέλασης

Η τήρηση της ακριβούς θέσης του αντικειμένου στον κάδο του (δείκτης *point*) δεν είναι απαραίτητη, αφού θα μπορούσε να αναζητηθεί με την ταυτότητα του αντικειμένου σαρώνοντας όλα τα αντικείμενα του κάδου. Μολονότι η χωρητικότητα των κάδων δεν αναμένεται να είναι μεγάλη, ώστε η αναζήτηση της ταυτότητας του αντικειμένου μέσα στον κάδο να είναι τόσο χρονοβόρα, η τήρηση και της ακριβούς θέσης του αντικειμένου σαφώς επιταχύνει τον εντοπισμό, κυρίως όμως καδιστά τον χρόνο των ενημερώσεων ανεξάρτητο από την χωρητικότητα των κάδων. Επίσης, η διαδικασία εισαγωγής στο νέο κελί διευκολύνεται από την τήρηση της ακριβούς θέσης, διότι έτσι δίνεται η δυνατότητα για επιλογή μεγαλύτερης χωρητικότητας κάδων, κάτι που μειώνει τις μεταβάσεις κατά τη σάρωση της λίστας κάδων. Όταν λοιπόν οι κάδοι έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα, διευκολύνεται η προσπέλαση των αντικειμένων από τα ερωτήματα χωρίς περαιτέρω

επιβάρυνση από τις ανανεώσεις των θέσεων. Το τίμημα όλων των παραπάνω είναι η κατανάλωση 50% επιπλέον μνήμης (ένας επιπλέον δείκτης στους δύο) για τον πίνακα αντικειμένων και η σπατάλη μνήμης στους μισοάδειους κάδους για επιλογή μεγάλης χωρητικότητας κάδων.

Κεφάλαιο 4

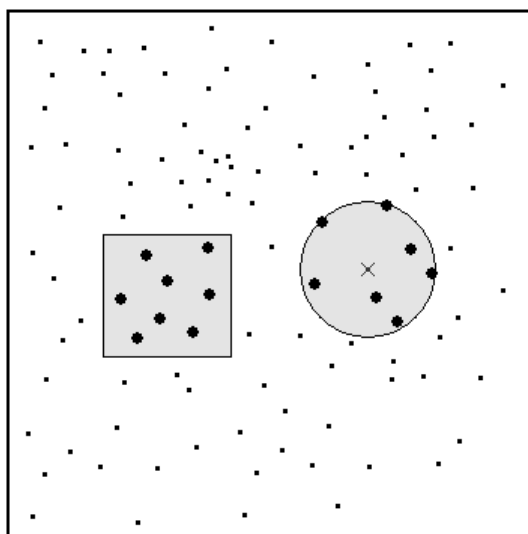
Ερωτήματα περιοχής

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται λεπτομερής αναφορά στα ερωτήματα περιοχής, καθώς μελετώνται οι τεχνικές αποδοτικής επεξεργασίας τους. Ένα ερώτημα περιοχής ορίζεται από μια έκταση στο χώρο συγκεκριμένου σχήματος, ορθογώνια, κυκλική ή πολυγωνική (σχήμα 4.1). Το ερώτημα επιστρέφει τα αντικείμενα που βρίσκονται εντός της περιοχής.

Τα ερωτήματα περιοχής αποτελούν τη βασικότερη κατηγορία χωροχρονικών ερωτημάτων, και ήδη έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι επεξεργασίας τους προκειμένου για χωρικές βάσεις δεδομένων. Οι εφαρμογές τους ποικίλουν, παρέχοντας μια πολύ χρήσιμη δυνατότητα: να «ερωτάται» ο χώρος, αντί για τα επιμέρους αντικείμενα. Επιπλέον, τα αποτελέσματά τους μπορούν να αξιοποιηθούν και άλλα πολυπλοκότερα χωρικά ερωτήματα, λ.χ. ερωτήματα εγγύτερων γειτόνων. Οι χρήσεις τους στον πραγματικό κόσμο ποικίλουν ανάλογα και με το σχήμα της έκτασής τους. Για παράδειγμα, με ένα κυκλικό ερώτημα περιοχής είναι δυνατόν να εντοπισθούν οι πελάτες μιας επιχείρησης που βρίσκονται πλησίον της σε ακτίνα 500m. Ένα πολυγωνικό ερώτημα περιοχής μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά το δακτύλιο της Αθήνας και να εντοπίσει όσα οχήματα έχουν εισέλθει παράνομα εντός των ορίων του.

Συνήθως, έμφαση δίνεται στα ερωτήματα ορθογώνιας περιοχής διότι είναι και τα απλούστερα. Επιπλέον, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και ως περιβάλλοντα παραλληλόγραμμα για την διευκόλυνση οποιουδήποτε άλλου ερωτήματος περιοχής διαφορετικού σχήματος. Σε αυτή την περίπτωση, το ερώτημα ορθογώνιας περιοχής αποτιμάται πρώτο και επιστρέφει τα υποψήφια αντικείμενα. Στη συνέχεια η αποτίμηση του δεύτερου και αρκετά πιο πολύπλοκου σταδίου, εκτελείται σαφώς πιο γρήγορα εξετάζοντας το σύνολο μόνο των υποψήφια αντικειμένων.



Σχήμα 4.1: Ερωτήματα ορθογώνιας και κυκλικής περιοχής

Στη συνέχεια του κεφαλαίου μελετώνται κινούμενα ερωτήματα ορθογώνιας περιοχής ως ερωτήματα διαρκείας επί της τρέχουσας θέσης κινούμενων αντικειμένων. Η τεχνική της από κοινού επεξεργασίας (*shared execution*) υλοποιείται και αξιολογείται πειραματικά.

4.2 Τεχνικές επεξεργασίας ερωτημάτων περιοχής

4.2.1 Από κοινού επεξεργασία

Η τεχνική της από κοινού επεξεργασίας (*shared execution*) αποτελεί τη βασική μέθοδο αποτίμησης ερωτημάτων περιοχής. Τα ερωτήματα ομαδοποιούνται και συνδέονται χωρικά με τα αντικείμενα με τη χρήση μιας μεθόδου χωρικής προσπέλασης. Η χωρική σύνδεση (*spatial join*) ερωτημάτων και αντικειμένων διευκολύνει τον εντοπισμό των υποψήφιων αντικειμένων που είναι πιθανό να βρίσκονται εντός των περιοχών των ερωτημάτων, μειώνοντας το πλήθος των απαιτούμενων συγκρίσεων.

Η υλοποίηση της χωρικής σύνδεσης είναι στενά συνδεδεμένη με την επιλεγμένη μέθοδο προσπέλασης των αντικειμένων, αφού η έκταση της περιοχής κάθε ερωτήματος πρέπει να εισάγεται στη δομή της μεθόδου. Για παράδειγμα, μια ιεραρχική μέθοδος (λ.χ. R-tree) διαμερίζει το χώρο σε τμήματα στα οποία περιέχονται τα αντικείμενα. Η εισαγωγή της περιοχής ενός ερωτήματος γίνεται με τη διάσχιση της δενδρικής δομής για την εύρεση των τμημάτων διαμέρισης που τέμνει. Τελικά, η περιοχή είναι δυνατόν να διασπαστεί μέχρι να φτάσει στα φύλλα διαφορετικών τμημάτων, όπου εκεί βρίσκονται τα αντίστοιχα περιεχόμενα αντικείμενα. Έτσι, η αποτίμηση ενός ερωτήματος ολοκληρώνεται στην επόμενη φάση με την εξέταση μόνο των αντικειμένων που περιέχονται στα ίδια τμήματα διαμέρισης που τέμνει η περιοχή ενδιαφέροντος. Συνήθως, η φάση της χωρικής σύνδεσης των ερωτημάτων γίνεται μαζί για όλα τα ερωτήματα (ομαδοποίηση). Στη φάση των αποτιμήσεων εξετάζονται εξαντλητικά τα τμήματα διαμέρισης των φύλλων όπου είναι αντιστοιχισμένα ερωτήματα και αντικείμενα (από κοινού επεξεργασία). Η αποτίμηση του συνόλου των ερωτημάτων ολοκληρώνεται με την εξέταση του συνόλου των τμημάτων

διαμέρισης. Τέλος, αν η περιοχή ενός ερωτήματος περικλείει πλήρως ένα τμήμα διαμέρισης, τότε το σύνολο των αντικειμένων αποτελεί μέρος της απάντησης του ερωτήματος. Έτσι, τα ερωτήματα που ικανοποιούν αυτή τη συνθήκη είναι δυνατόν να ομαδοποιούνται ξεχωριστά ανά τμήμα διαμέρισης, ώστε η αποτίμησή τους να γίνει μαζί.

Η τεχνική είναι ιδανική για στατικά χωρικά αντικείμενα και ερωτήματα, αφού δεν απαιτείται καμία μεταβολή ή ενημέρωση της δομής της εκάστοτε μεθόδου χωρικής προσπέλασης. Ωστόσο, στην περίπτωση χωροχρονικών δεδομένων η απόδοσή της μειώνεται λόγω της επιβάρυνσης των απαιτούμενων ενημερώσεων. Καταρχήν, η διαμέριση του χώρου σε τμήματα γίνεται συνήθως με βάση τα αντικείμενα, των οποίων το πλήθος είναι αρκετά μεγαλύτερο από το αναμενόμενο πλήθος ερωτημάτων. Η μέθοδος χωρικής προσπέλασης των αντικειμένων επιλέγεται ανάλογα με την κίνηση και το είδος τους, όπως για παράδειγμα επιλέχθηκε η τεχνική του κατακερματισμού για διαρκώς κινούμενα σημειακά αντικείμενα. Κατόπιν, η απόδοση της τεχνικής της από κοινού επεξεργασίας εξαρτάται από το είδος των ερωτημάτων. Αν οι περιοχές τους είναι στατικές, τότε η εισαγωγή τους στα αντίστοιχα τμήματα διαμέρισης γίνεται μόνο μια φορά, ακόμα και αν τα αντικείμενα κινούνται ή τα ερωτήματα αντιμετωπίζονται ως ερωτήματα διαρκείας. Ωστόσο, αν τα ερωτήματα είναι κινούμενα ή μεταβάλλουν την έκταση της περιοχής τους, τότε είναι δυνατόν να τέμνουν διαφορετικό σύνολο τμημάτων, καθιστώντας τη χωρική σύνδεση άκυρη και επιβάλλοντας την επανεισαγωγή τους στη δομή.

4.2.2 Σταδιακή αποτίμηση

Η τεχνική της σταδιακής αποτίμησης (*incremental evaluation*) εφαρμόζεται σε κινούμενα ερωτήματα περιοχής τα οποία υποβάλλονται ως ερωτήματα διαρκείας. Ο σκοπός της εφαρμογής της είναι για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της από κοινού επεξεργασίας με τα κινούμενα ερωτήματα, προκειμένου να μη γίνεται διαρκώς η επανασύνδεσή τους με τα αντικείμενα. Η αποτίμηση των ερωτημάτων ξεκινάει με την κλασική μέθοδο και στη συνέχεια παρακολουθείται η θέση αντικειμένων και ερωτημάτων ώστε να υπολογίζονται μόνο οι μεταβολές της απάντησης των ερωτημάτων. Στους χρήστες είναι δυνατόν να επιστρέφονται οι πλήρεις απαντήσεις ή μόνο οι ενημερώσεις τους, οι οποίες διακρίνονται σε θετικές και αρνητικές. Μια θετική ενημέρωση για ένα αντικείμενο σημαίνει ότι αυτό προστίθεται στο σύνολο της απάντησης, ενώ μια αρνητική ότι εξαιρείται από αυτή. Η αποστολή μόνο των ενημερώσεων έχει το πλεονέκτημα ότι μειώνει το κόστος επικοινωνίας του κεντρικού επεξεργαστή με τους χρήστες.

Οι τρόποι υλοποίησής ποικίλουν και έχουν άμεση επίδραση στην απόδοσή της μεθόδου. Η διαδικασία της παρακολούθησης της θέσης πρέπει να γίνεται μόνο για τα αντικείμενα και ερωτήματα που είναι πιθανό να συνδέονται χωρικά. Διαφορετικά, η απόδοσή της δεν είναι πάντα καλύτερη από εκείνη της διαρκούς χωρικής επανασύνδεσής. Επιπλέον είναι σαφές ότι η εφαρμογή της πρέπει οπωσδήποτε να συνοδεύεται από μια μέθοδο χωρικής προσπέλασης που επιτυγχάνει γρήγορων ενημερώσεων των θέσεων αντικειμένων και ερωτημάτων.

4.3 Προτεινόμενες προσεγγίσεις επεξεργασίας ερωτημάτων περιοχής

4.3.1 Scalable Incremental hash-based algorithm (SINA)

Η μέθοδος *Scalable Incremental hash-based algorithm (SINA)* έχει προταθεί στο [MXA04] για τη διαρκή αποτίμηση χωροχρονικών ερωτημάτων διαρκείας σε ένα κεντρικό

επεξεργαστή. Η μέθοδος χρησιμοποιεί τις δύο προαναφερθείσες βασικές τεχνικές, τις οποίες υλοποιεί μέσω τριών διαδοχικών φάσεων επεξεργασίας. Τα αντικείμενα και τα ερωτήματα διατηρούνται σε δύο δομές πλέγματος στο δίσκο. Κατά την πρώτη φάση του κατακερματισμού (*hash phase*), οι πρόσφατες ενημερώσεις αντικειμένων (U_p) και ερωτημάτων (U_q) συγκεντρώνονται και αποθηκεύονται προσωρινά στη μνήμη, όπου εκτελείται η χωρική τους σύνδεση. Η επεξεργασία της πρώτης φάσης παράγει τις θετικές ενημερώσεις των απαντήσεων των ερωτημάτων. Κατά τη δεύτερη φάση των ακυρώσεων (*invalidation phase*), παράγονται αρνητικές ενημερώσεις α) για τα αντικείμενα του U_p τα οποία μετακινήθηκαν εκτός του κελιού που βρίσκονταν και β) για τα ερωτήματα του U_q τα οποία τέμνουν διαφορετικό σύνολο κελιών από αυτά έτεμναν. Στην τρίτη φάση της σύνδεσης (*joining phase*), εξετάζονται τα κελιά στα οποία εισήλθαν νέα αντικείμενα ή τέμνονται από νέα ερωτήματα. Για κάθε κελί στο οποίο περιέχονται νεοεισερχόμενα αντικείμενα από το U_p ή από το οποίο τέμνονται νέα ερωτήματα από το U_q , η μέθοδος συνδέει τα νέα αντικείμενα με τα παλαιά ερωτήματα και τα νέα ερωτήματα με τα στατικά αντικείμενα. Οι παραγόμενες θετικές ενημερώσεις των ερωτημάτων συγχωνεύονται με αυτές από τις προηγούμενες φάσεις, κάποιες από τις οποίες είναι πιθανό να ακυρωθούν. Οι τελικές θετικές και αρνητικές ενημερώσεις αποστέλλονται στους χρήστες και αποθηκεύονται στο δίσκο ελευθερώνοντας τη μνήμη.

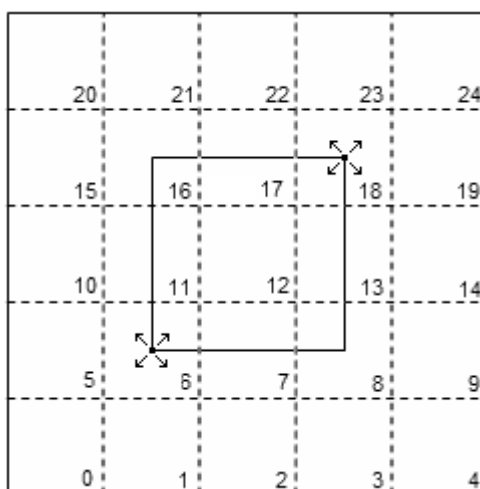
Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος SINA σχεδιάστηκε να υποστηρίζει ερωτήματα διάρκειας σε χωροχρονικές θάσεις δεδομένων και όχι σε ρεύματα δεδομένων. Το γεγονός ότι χρησιμοποιεί το δίσκο σαφώς περιορίζει την απόδοσή της. Έτσι, υποδέεται ότι μόνο ένα σχετικά μικρό ποσοστό του συνόλου των αντικειμένων και ερωτημάτων μεταβάλλουν τη θέση τους κατά τη διάρκεια της περιόδου T χρονικών στιγμών, μετά το πέρας της οποίας επεξεργάζεται και παράγει τις επόμενες απαντήσεις.

4.3.2 MobiEyes

Στο [GL04], προτείνεται μία μέθοδος κατανεμημένης επεξεργασίας κινούμενων ερωτημάτων διάρκειας σε κινούμενα αντικείμενα, η οποία ονομάζεται *MobiEyes*. Η μέθοδος κατακερματίζει το χώρο με ένα πλέγμα και διατηρεί τις περιοχές παρακολούθησης (*monitoring regions*) των ερωτημάτων. Η περιοχή παρακολούθησης ενός ερωτήματος ορίζεται ως το σύνολο των κελιών τα οποία είναι δυνατόν να τέμνονται από το ερώτημα εφόσον το κέντρο του παραμένει στο ίδιο κελί. Τα αντικείμενα τα οποία περιέχονται στην περιοχή παρακολούθησης ενός ή περισσοτέρων ερωτημάτων λαμβάνουν από τον κεντρικό επεξεργαστή πληροφορίες γι' αυτά όπως τη θέση, την έκταση και την ταχύτητά τους. Κατόπιν, τα ίδια τα αντικείμενα παρακολουθούν την κίνησή τους εκτελώντας τις απαραίτητες συγκρίσεις με τις εκτάσεις των ερωτημάτων που έχουν λάβει και είναι πιθανό να εμπίπτουν. Όταν το αντικείμενο κινείται, ενημερώνει τον κεντρικό επεξεργαστή, ο οποίος με τη σειρά του αποστέλλει τυχόν αλλαγές στο σύνολο των ερωτημάτων που το αφορούν. Επιπλέον, ο κεντρικός επεξεργαστής αποστέλλει στα αντικείμενα μόνο τις τυχόν ενημερώσεις των ερωτημάτων που τα αφορούν.

4.4 «Από κοινού» επεξεργασία ερωτημάτων περιοχής

Σε αυτή την ενότητα εκτίθεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μιας μεθόδου για τη διαρκή αποτίμηση ερωτημάτων ορθογώνιας περιοχής, η οποία βασίζεται αποκλειστικά στην τεχνική της από κοινού επεξεργασίας (*shared execution*). Οι περιοχές των κινούμενων ερωτημάτων επανακατακερματίζονται πάνω στο πλέγμα, όταν τέμνουν διαφορετικό σύνολο κελιών απ' ό,τι έτεμναν στο προηγούμενο χρονόσημο. Η ορθογώνια περιοχή ενός



Σχήμα 4.2: Κατακερματισμός ερωτήματος

ερωτήματος ορίζεται από τις συντεταγμένες της κάτω αριστερής και άνω δεξιάς κορυφής του. Η περιοχή τέμνει διαφορετικό σύνολο κελιών, όταν τουλάχιστον μία εκ των δύο κορυφών μεταθούν σε άλλο κελί (σχήμα 4.2). Η υλοποίηση της μεθόδου επιτρέπει το γρήγορο επανακατακερματισμό της περιοχής στο πλέγμα με βάση τις ταυτότητες των κελιών των νέων (μιας ή δύο) κορυφών και σε συνδυασμό με την εφαρμογή της τεχνικής της καθυστερημένης εκκαθάρισης για το παλιό σύνολο κελιών. Στις ακόλουθες υποενότητες παρουσιάζεται λεπτομερώς η σχεδίαση και υλοποίηση της μεθόδου.

4.4.1 Σχεδίαση

Κατά τη φάση των ενημερώσεων η περιοχή ενός ερωτήματος κατακερματίζεται πάνω στο πλέγμα, δηλαδή εντοπίζονται τα κελιά που επικαλύπτει ολικώς ή μερικώς. Το σύνολο των αντικειμένων που περιέχονται στα ολικώς επικαλυπτόμενα κελιά αποτελούν μέρος της τελικής απάντησης, αφού όλες αυτές οι θέσεις περιέχονται σίγουρα στην περιοχή του ερωτήματος. Τα υπόλοιπα κελιά τέμνονται από την περιοχή του ερωτήματος και έτσι τα περιεχόμενα αντικείμενα πρέπει να εξεταστούν σε δεύτερο στάδιο ένα προς ένα για την εύρεση αυτών που βρίσκονται εντός της περιοχής του ερωτήματος.

- Αν ένα ερώτημα είναι στατικό και η έκταση της περιοχής του παραμένει σταθερή, τότε ο κατακερματισμός του στο πλέγμα αρκεί να γίνει μια φορά.
- Αν το ερώτημα κινείται ή η έκταση του μεταβάλλεται, τότε πρέπει να γίνεται εκ νέου ο έλεγχος του κατακερματισμού του στο πλέγμα.
- Αν η νέα θέση ή η νέα έκταση της περιοχής του ερωτήματος τέμνει το ίδιο σύνολο κελιών, τότε δεν είναι απαραίτητη καμία ενέργεια.
- Διαφορετικά, ο κατακερματισμός του ερωτήματος πρέπει να γίνει εκ νέου.

Από το ρεύμα εισόδου για τα ερωτήματα περιοχής λαμβάνονται οι πλειάδες ανανεώσεων των ερωτημάτων $\langle timestamp, Qid, lx, ly, ux, uy \rangle$, όπου $\langle lx, ly \rangle$ το σημείο της κάτω αριστερής κορυφής και $\langle ux, uy \rangle$ το σημείο της άνω δεξιάς κορυφής της ορθογώνιας περιοχής. Ένα ερώτημα με ταυτότητα Qid παραμένει ενεργό και αποτιμάται για όσο διάστημα λαμβάνονται γι' αυτό πλειάδες ανανέωσης από το ρεύμα εισόδου, ακόμα κι αν παραμένει στατικό σε θέση και έκταση. Αν για κάποιο χρονόσημο δεν ληφθεί πλειάδα, τότε αυτό απενεργοποιείται και στην επόμενη φάση αποτίμησης δεν λαμβάνεται υπόψη.

Η από κοινού αποτίμηση (*shared execution*) είναι η σταδιακή αποτίμηση των ερωτημάτων ομαδοποιημένα ανά κελί και όχι η αποτίμηση κάθε ερωτήματος ξεχωριστά. Κατά τον κατακερματισμό των ερωτημάτων στο πλέγμα προκύπτουν σύνολα κελιών, δηλαδή κάθε ερώτημα αντιστοιχίζεται με τα κελιά που επικαλύπτει η περιοχή του (ολικώς ή μερικώς). Αντίστοιχα, κάθε κελί αντιστοιχίζεται με ένα σύνολο ερωτημάτων, αφού ολόκληρο ή μέρος του είναι δυνατόν να επικαλύπτεται από περισσότερα του ενός ερωτήματα. Η από κοινού αποτίμηση γίνεται ανά κελί, δηλαδή αποτιμώνται σταδιακά τα αντιστοιχισμένα ερωτήματα. Η αποτίμηση του συνόλου των ερωτημάτων ολοκληρώνεται, όταν ολοκληρωθεί η επεξεργασία του συνόλου των κελιών.

4.4.2 Υλοποίηση

Για τα ερωτήματα περιοχής, διατηρείται ένας πίνακας (*range query table*) με μέγεθος όσο το μέγιστο πλήθος ενεργών ερωτημάτων, στον οποίο κρατούνται πληροφορίες σχετικά με αυτά:

- Η τελευταία ενημέρωση της περιοχής του, δηλαδή οι συντεταγμένες της κάτω αριστερής και άνω δεξιάς κορυφής (lx, ly, ux, uy).
- Το αντίστοιχο χρονόσημο (ts).
- Μια δυαδική μεταβλητή (inf_flag), η οποία αλλάζει κατάσταση κάθε φορά που γίνεται νέος κατακερματισμός της περιοχής του ερωτήματος.

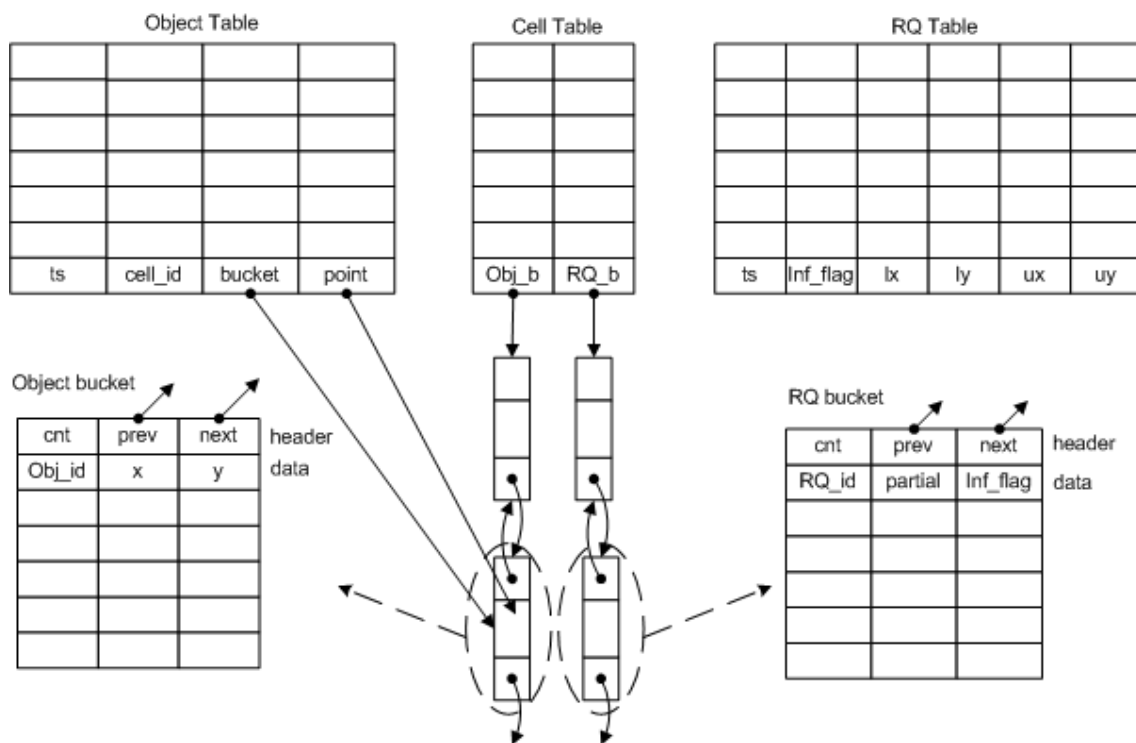
Επιπλέον στον πίνακα κελιών για κάθε κελί υπάρχει ένας δείκτης (iq_b) προς τον πρώτο κάδο της αντίστοιχης διπλοσυνδεδεμένης λίστας κάδων των ερωτημάτων περιοχής. Οι κάδοι των ερωτημάτων περιοχής έχουν την ίδια μορφή επικεφαλίδας με αυτή των κάδων των κινούμενων αντικειμένων. Περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τα ενεργά ερωτήματα (αντιπρόσωποι ερωτημάτων), των οποίων η περιοχή τους περιλαμβάνει ολόκληρο ή μέρος του αντίστοιχου κελιού.

Ένας αντιπρόσωπος αποτελείται από:

- Την ταυτότητα του ερωτήματος (Qid).
- Μια δυαδική μεταβλητή ($partial$), η οποία υποδηλώνει την πλήρη ή όχι κάλυψη του κελιού από την περιοχή του ερωτήματος.
- Μια δυαδική μεταβλητή (inf_flag) παρόμοια με αυτή που κρατείται στον πίνακα ερωτημάτων.

Από τον κατακερματισμό της περιοχής ενός ερωτήματος προκύπτει ένα σύνολο κελιών και για καθένα από αυτά εισάγεται ένας αντιπρόσωπος του ερωτήματος στην αντίστοιχη λίστα κάδων των ερωτημάτων. Η στρατηγική της εισαγωγής είναι ίδια με αυτή των κάδων αντικειμένων, δηλαδή σαρώνεται η λίστα και ο αντιπρόσωπος εισάγεται στον πρώτο κάδο που έχει διαθέσιμο χώρο.

Όταν προκύψει ότι ένα μεταβαλλόμενο ερώτημα επικαλύπτει διαφορετικό σύνολο κελιών, τότε θα έπρεπε να εισαχθούν νέοι αντιπρόσωποι για τα κελιά που δεν εμφανίζονται στο παλιό σύνολο και να διαγραφούν οι αντιπρόσωποι των κελιών που δεν εμφανίζονται στο νέο σύνολο. Αυτή η μέθοδος θα ήταν χρονοβόρα αν κατά τη φάση των ενημερώσεων έπρεπε να παραχθεί εκ νέου το παλιό σύνολο κελιών (ουσιαστικά εκ νέου κατακερματισμός της παλιάς περιοχής), να συγκριθεί με το νέο και να γίνουν οι απαραίτητες εισαγωγές και διαγραφές αντιπροσώπων. Απεναντίας, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της καθυστέρημένης εκκαθάρισης, σύμφωνα με την οποία εισάγονται νέοι αντιπρόσωποι για όλα τα κελιά του νέου συνόλου και αργότερα, κατά την αποτίμηση των ερωτημάτων, όταν σαρώνονται όλοι οι αντιπρόσωποι, οι παλιοί διαγράφονται αντί να οδηγηθούν προς επεξεργασία. Η αναγνώριση των παλιών αντιπροσώπων γίνεται με τη βοήθεια των δυαδικών μεταβλητών inf_flag , δηλαδή αυτής μέσα στον αντιπρόσωπο και της καθολικής για το ερώτημα στον



Σχήμα 4.3: Υλοποίηση χωρικής σύνδεσης αντικειμένων και ερωτημάτων

πίνακα ερωτημάτων. Κατά τον κατακερματισμό της νέας περιοχής, η καθολική αλλάζει κατάσταση και έτσι οι νέοι αντιπρόσωποι εισάγονται στους κάδους με την τιμή της νέας κατάστασης. Οι τυχόν παλιοί αντιπρόσωποι του ίδιου ερωτήματος έχουν διαφορετική τιμή της *inf_flag* και έτσι διαχωρίζονται από τους νέους κατά τη φάση της αποτίμησης.

Η συνολική διαδικασία της ενημέρωσης ενός ερωτήματος περιοχής έχει ως εξής. Μετά τη λήψη της αντίστοιχης πλειάδας από το ρεύμα εισόδου των ερωτημάτων περιοχής ενημερώνεται το αντίστοιχο χρονόσημο στον πίνακα ερωτημάτων (βλ σχήμα 4.3). Στη συνέχεια ελέγχονται οι νέες συντεταγμένες των κορυφών, που ορίζουν την ορθογώνια περιοχή, με τις ήδη σημειωμένες στον πίνακα. Αν είναι ίδιες, τότε το ερώτημα παρέμεινε στατικό και καμία άλλη ενέργεια δεν είναι απαραίτητη. Διαφορετικά, υπολογίζεται η συνάρτηση κατακερματισμού για τα παλιά και νέα ζεύγη κορυφών και κρατούνται οι συντεταγμένες των νέων. Αν τα κελιά που βρίσκονται παλιές και νέες κορυφές εξακολουθούν να είναι ταυτόσημα, σημαίνει ότι το ερώτημα μετακινήθηκε ή άλλαξε έκταση, χωρίς όμως να επικαλύπτει διαφορετικό σύνολο κελιών. Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι απαραίτητη καμία άλλη ενέργεια. Διαφορετικά, γίνεται η αλλαγή κατάστασης της καθολικής *inf_flag* και αναπαράγεται το σύνολο κελιών με βάση τα κελιά των κορυφών. Για κάθε κελί γίνεται ο έλεγχος ως προς πλήρη κάλυψή του από την περιοχή του ερωτήματος και τίθεται κατάλληλα η *partial* στον αντιπρόσωπο που παράγεται και εισάγεται στη λίστα κάδων.

Αν για κάποιο ήδη ενεργό ερώτημα δεν ληφθεί πλειάδα ανανέωσης, τότε δεν γίνεται ενημέρωσή του, οπότε δεν ανανεώνεται το χρονόσημό του με το τρέχον και έτσι καθίσταται ανενεργό. Κατά την αποτίμηση μόνο οι αντιπρόσωποι με τρέχον χρονόσημο (και έγκυρο *inf_flag*) οδηγούνται προς επεξεργασία. Οι υπόλοιποι διαγράφονται. Είναι σαφές ότι η στρατηγική διαγραφής των αντιπροσώπων στους κάδους ερωτημάτων είναι ίδια με αυτή των αντικειμένων στους αντίστοιχους κάδους.

Η συνολική διαδικασία της από κοινού αποτίμησης είναι η εξής:

- Σαρώνεται ο πίνακας κελιών και για κάθε κελί σαρώνεται η λίστα κάδων των ερωτημάτων.
- Όποιος αντιπρόσωπος έχει τιμή κατάστασης στην *inf_flag* ίδια με την καθολική για το ερώτημα και χρονόσημο ίσο με το τρέχον, οδηγείται προς επεξεργασία.
- Διαφορετικά, ο αντιπρόσωπος διαγράφεται από τον κάδο του.
Η επεξεργασία των έγκυρων αντιπροσώπων είναι η εξής.
- Εξετάζεται η *partial*, η οποία εκφράζει την πλήρη ή όχι κάλυψη του κελιού από την έκταση του ερωτήματος. Αν αυτή είναι πλήρης, τότε σαρώνεται η λίστα κάδων των αντικειμένων και για κάθε αντικείμενο στέλνεται μια πλειάδα στο αντίστοιχο ρεύμα εξόδου των ερωτημάτων περιοχής.
- Διαφορετικά, σαρώνεται η λίστα κάδων των αντικειμένων και εξάγεται πλειάδα στο ρεύμα εξόδου μόνο για τα αντικείμενα, των οποίων οι συντεταγμένες τους είναι εντός των ορίων περιοχής του ερωτήματος.
- Η διαδικασία τερματίζεται, όταν έχει ολοκληρωθεί η σάρωση του πίνακα κελιών.

4.5 Πειραματικά αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα αξιολογείται πειραματικά η μέθοδος για την αποτίμηση πολλαπλών ερωτημάτων περιοχής με βάση τις προδιαγραφές του συστήματος, οι οποίες περιγράφονται στην ενότητα 3.5.

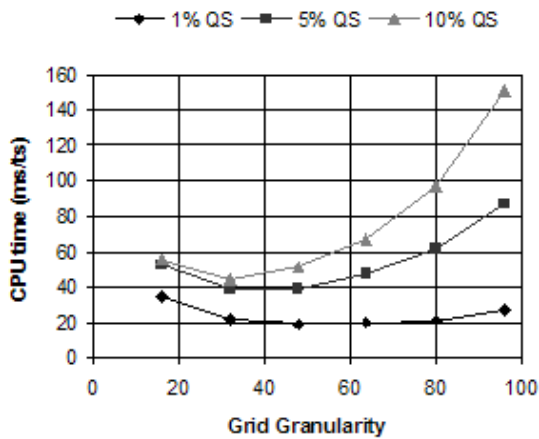
4.5.1 Πειραματικές συνθήκες

Οι δομές και οι αλγόριθμοι της τεχνικής υλοποιήθηκαν σε γλώσσα C++ και τα πειράματα εκτελέστηκαν στο λειτουργικό σύστημα SUSE Linux 9.0 σε προσωπικό υπολογιστή AMD Athlon 64 3200+ (2GHz) με μνήμη 266MHz. Το πειραματικό σύνολο δεδομένων αποτελείται από 100000 κινούμενα αντικείμενα, τα οποία κινούνται για 200 χρονικές στιγμές σε τροχιές που προσομοιώνουν την κυκλοφοριακή κίνηση στο οδικό δίκτυο του κέντρου της Αθήνας. Έγιναν πειράματα για τρεις παραμέτρους της εφαρμογής:

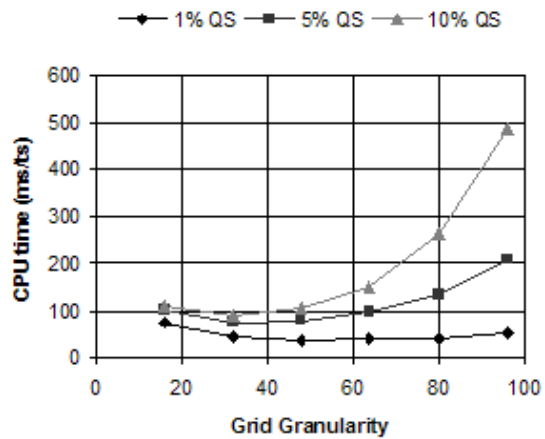
- Πλήθος αντικειμένων *Obj* (10k, 20k, 50k, 100k).
- Πλήθος ερωτημάτων *Q* (1k, 2k, 5k, 10k).
- Έκταση κάθε ερωτήματος ως ποσοστό του συνολικού χώρου *Qs* (1%, 5%, 10%). Οι ορθογώνιες περιοχές έχουν αναλογία διαστάσεων ίση με την αναλογία διαστάσεων του χώρου.
- Κάθε αντικείμενο μεταβάλλει τη θέση του κάθε χρονική στιγμή (100% agility).

4.5.2 Αναζήτηση βέλτιστου βαθμού κατάτμησης

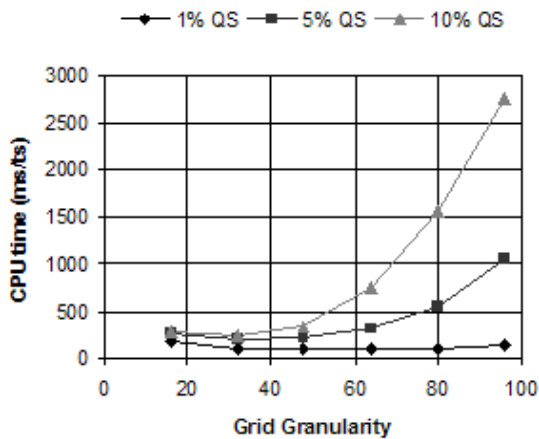
Η επιλογή του βαθμού κατάτμησης του πλέγματος αποτελεί σημαντική απόφαση για την απόδοση του συστήματος. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν συγκεκριμένα κριτήρια εύρεσής του, η επιλογή του μπορεί μόνο να στηριχτεί σε πειραματικά δεδομένα και εμπειρικούς κανόνες, που εξάγονται από αυτά. Επιπλέον, η βέλτιστη τιμή του, με την αυστηρή έννοια, δεν είναι δυνατόν να ορισθεί με σιγουριά σε ένα πραγματικό σύστημα, του οποίου οι παράμετροι είναι δυνατόν να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του. Συνήθως, αναζητούμε ένα εύρος τιμών του βαθμού κατάτμησης, το οποίο να είναι ικανοποιητικό για τις συνθήκες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Ακολούθως, επιχειρούμε να εξετάσουμε την επιρροή των παραμέτρων του συστήματος στην τιμή του βαθμού κατάτμησης, ώστε στη συνέχεια με βάση αυτή να μελετήσουμε τη συμπεριφορά των ερωτημάτων.



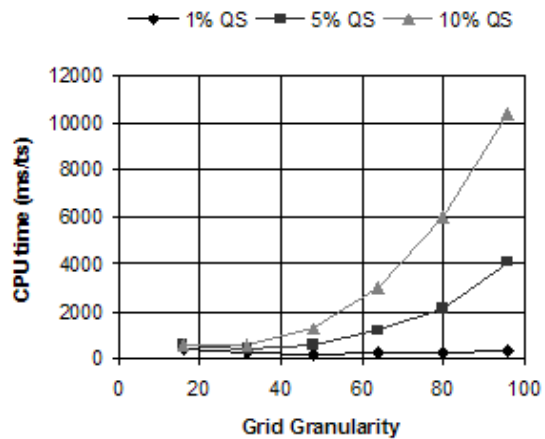
Σχήμα 4.4: 10k Obj / 1k Q



Σχήμα 4.5: 10k Obj / 2k Q



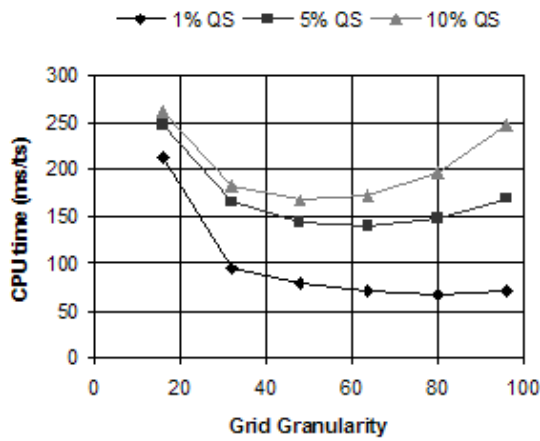
Σχήμα 4.6: 10k Obj / 5k Q



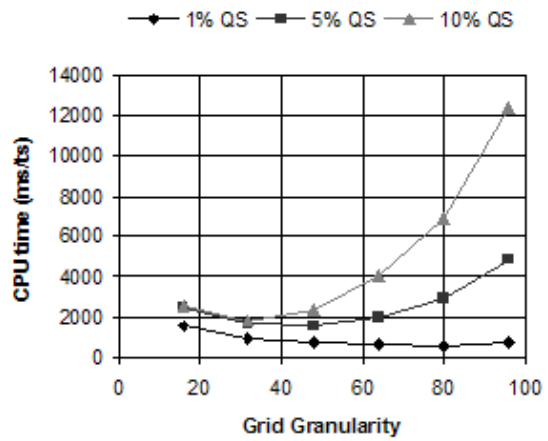
Σχήμα 4.7: 10k Obj / 10k Q

(i) Επίδραση της έκτασης των ερωτημάτων

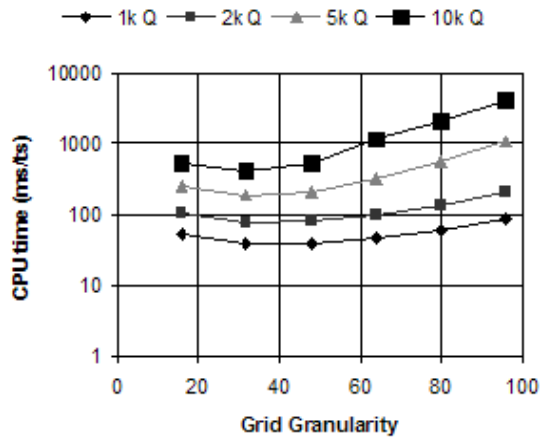
Στα σχήματα 4.4 έως 4.7 απεικονίζεται ο χρόνος επεξεργασίας ανά χρονόσημο συναρτήσει του βαθμού κατάτμησης για διάφορες περιπτώσεις αναλογίας πλήθους αντικειμένων και ερωτημάτων. Στο εύρος τιμών κατάτμησης 32x32 έως 48x48 παρατηρούνται οι καλύτεροι χρόνοι επεξεργασίας για όλες τις περιπτώσεις έκτασης των ερωτημάτων. Επιπλέον παρατηρείται ότι στο ίδιο εύρος, οι κλίσεις των τριών καμπυλών λαμβάνουν τις χαμηλότερες τιμές. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται για μεγαλύτερο πλήθος αντικειμένων στα διαγράμματα 4.8 και 4.9. Σε κάθε περίπτωση υπάρχει ένα εύρος τιμών κατάτμησης στο οποίο παρατηρούνται οι καλύτεροι χρόνοι και οι κλίσεις των τριών καμπυλών λαμβάνουν τις ελάχιστες τιμές τους. Προκύπτει λοιπόν ότι η έκταση των ερωτημάτων επηρεάζει ελαφρώς την καλύτερη τιμή του βαθμού κατάτμησης. Εξάλλου, σε ένα σύστημα είναι δυνατόν να υποβάλλονται πολλαπλά ερωτήματα κυμαινόμενης έκτασης, γεγονός που εξομαλύνει την επίδρασή τους στο επιλεγμένο μέγεθος κελιών. Η κατεύθυνση



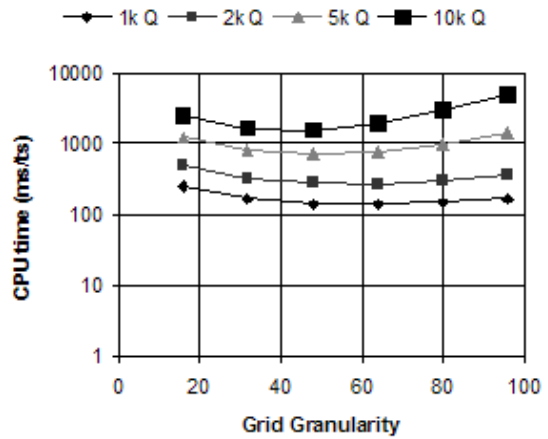
Σχήμα 4.8: 50k Obj / 1k Q



Σχήμα 4.9: 50k Obj / 10k Q



Σχήμα 4.10: 10k Obj / 5% Qs

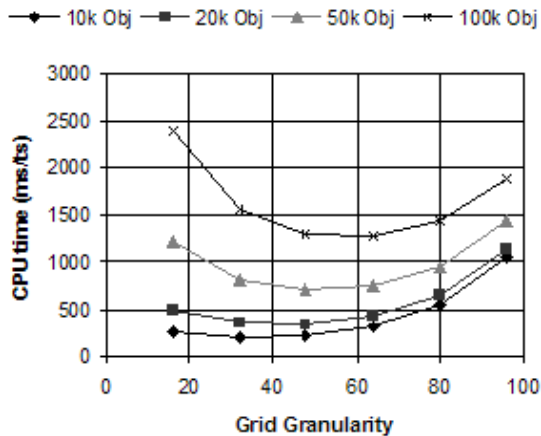


Σχήμα 4.11: 50k Obj / 5% Qs

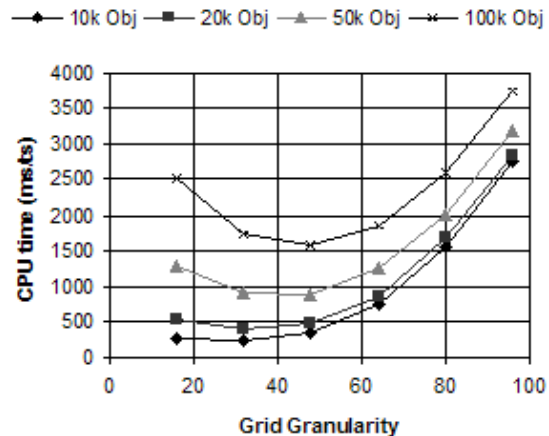
της επίδρασης είναι αντίστροφη: όσο μεγαλύτερη είναι έκταση των περιοχών, τόσο μικρότερος πρέπει να είναι ο βαθμός κατάτμησης ώστε η έκταση των κελιών να προσεγγίζει την έκταση των περιοχών.

(ii) Επίδραση του πλήθους ερωτημάτων

Στα διαγράμματα 4.10 και 4.11 παρατηρείται καλύτερη συμπεριφορά της βέλτιστης τιμής κατάτμησης του πλέγματος συναρτήσει του πλήθους των ερωτημάτων. Ο καλύτερος χρόνος επεξεργασίας επιτυγχάνεται με σταθερή τιμή κατάτμησης.



Σχήμα 4.12: 5k Q / 5% Qs



Σχήμα 4.13: 5k Q / 10% Qs

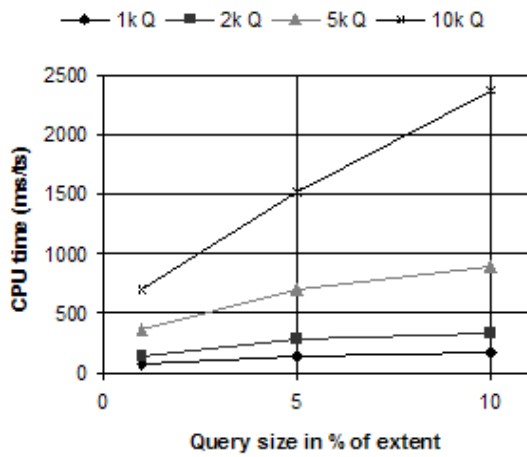
(iii) Επίδραση του πλήθους αντικειμένων

Το πλήθος των αντικειμένων εμφανίζεται να επηρεάζει το μέγεθος των κελιών σε ίδιο βαθμό με την έκταση των ερωτημάτων. Ωστόσο, μεγαλύτερο πλήθος αντικειμένων απαιτεί μεγαλύτερη τιμή κατάτμησης

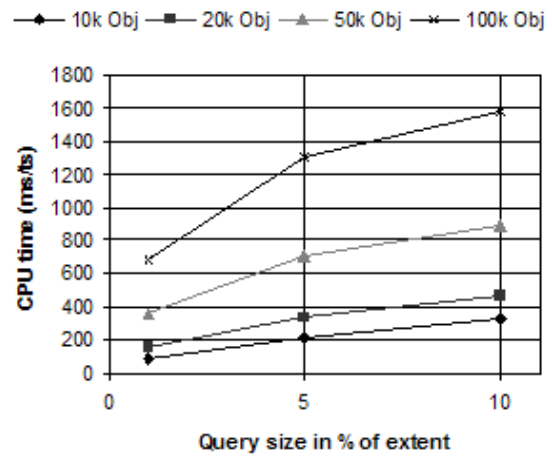
ώστε σε κάθε κελί να περιέχονται λιγότερα αντικείμενα. Στα σχήματα 4.12 και 4.13 απεικονίζονται οι διαφορετικές τιμές του βέλτιστου βαθμού κατάτμησης συναρτήσει του πλήθους των αντικειμένων.

(iv) Επιλογή βαθμού κατάτμησης

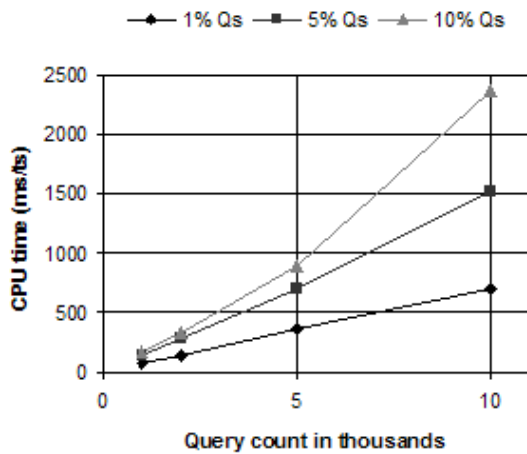
Με βάση την υπόθεση ότι σε ένα πραγματικό σύστημα είναι δυνατόν να υποβάλλονται ερωτήματα κυμαινόμενης έκτασης, μπορούμε να αγνοήσουμε την εξάρτηση της βέλτιστης τιμής κατάτμησης από την έκτασή των ερωτημάτων. Εξάλλου, στα σχήματα 4.4 έως 4.7 παρατηρείται ότι το κόστος των ερωτημάτων έκτασης 1% του συνολικού χώρου είναι σαφώς μικρότερο από το κόστος των ερωτημάτων μεγαλύτερης έκτασης. Επιπλέον, όσο μικρότερη είναι η έκταση των ερωτημάτων, τόσο μικρότερη είναι η αυξητική τάση του κόστους επεξεργασίας συναρτήσει του βαθμού κατάτμησης. Έτσι, με βάση τα διαγράμματα 4.12 και 4.13, επιλέγουμε βαθμό κατάτμησης 48x48, ο οποίος αποτελεί τη μέση δυνατή λύση.



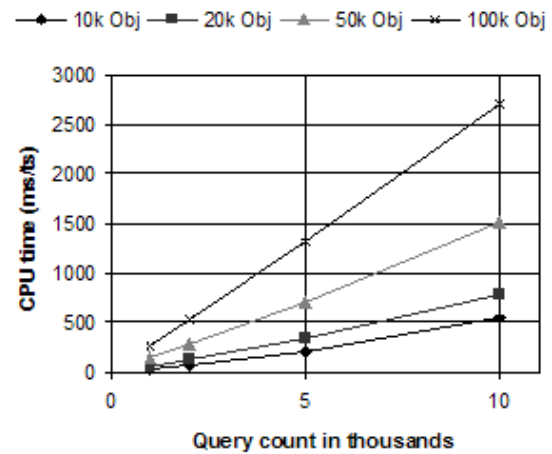
Σχήμα 4.14: 50k Obj



Σχήμα 4.15: 5k Q



Σχήμα 4.16: 50k Obj

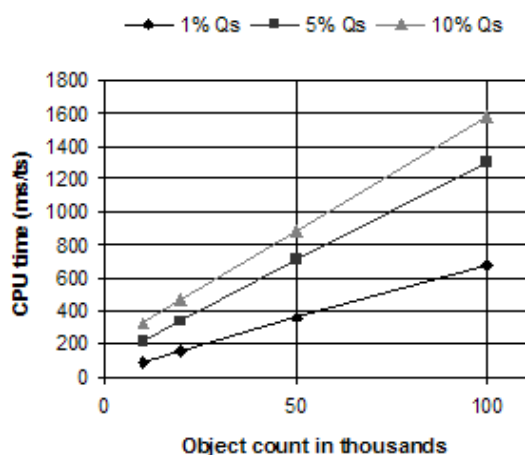


Σχήμα 4.17: 5% Qs

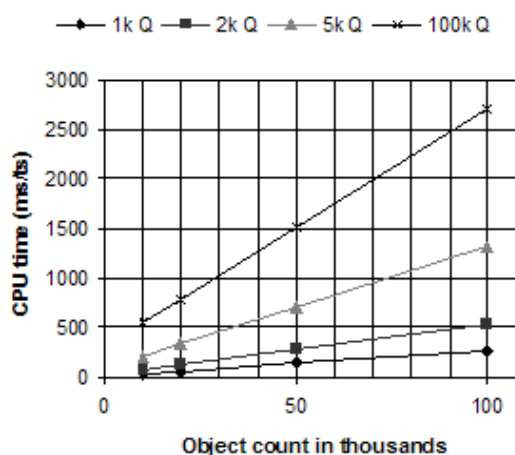
4.5.3 Αξιολόγηση παραμέτρων

(i) Έκταση ερωτημάτων

Από τα σχήματα 4.14 και 4.15 επιβεβαιώνεται ότι η αύξηση της έκτασης των ερωτημάτων επιβαρύνει το σύστημα, διότι καλύπτονται περισσότερα κελιά του πλέγματος, οπότε μεγαλώνουν οι λίστες αποτίμησης ανά κελί και επιβραδύνεται η διαδικασία. Στα διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα για διάφορες τιμές των υπολοίπων παραμέτρων. Σε κάθε περίπτωση, ο χρόνος επεξεργασίας είναι γραμμικός σε σχέση με την έκταση των ερωτημάτων (με ελάχιστη μεταβολή της κλίσης).



Σχήμα 4.18: 5k Q



Σχήμα 4.19: 5% Qs

(ii) Πλήθος ερωτημάτων

Όπως είναι αναμενόμενο, κλιμάκωση του πλήθους των ενεργών ερωτημάτων επιβαρύνει το σύστημα. Στα σχήματα 4.16 και 4.17 παρουσιάζεται η επίδοση του αλγορίθμου συναρτήσει του πλήθους ερωτημάτων για όλες τις τιμές έκτασης των περιοχών και πλήθους αντικειμένων αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση, ο χρόνος επεξεργασίας ανά χρονόσημο είναι επίσης γραμμικός σε σχέση με το πλήθος των ερωτημάτων.

(iii) Πλήθος αντικειμένων

Οι επιδόσεις του αλγορίθμου συναρτήσει του πλήθους αντικειμένων εμφανίζονται παρόμοιες στα σχήματα 4.18 και 4.19. Όπως αναμενόταν, το σύστημα επιβαρύνεται από την αύξηση του πλήθους των αντικειμένων και η απόδοση του χειροτερεύει με την αύξηση του αριθμού των ενεργών ερωτημάτων (σχήμα 4.19). Ωστόσο, ο χρόνος επεξεργασίας παραμένει γραμμικός.

(iv) Εξαγωγή ποσοτικών στοιχείων

Με τη βοήθεια των διαγραμμάτων των σχημάτων 4.14 έως 4.19 είναι δυνατόν άμεσα να εξαχθούν ποσοτικά στοιχεία για την απόδοση του συστήματος, καθώς όλα εκφράζουν το χρόνο επεξεργασίας ανά χρονόσημο, δηλαδή ενός πλήρους κύκλου ενημερώσεων και αποτιμήσεων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το διάγραμμα του σχήματος 4.19, στο οποίο απεικονίζεται η απόκριση του συστήματος συναρτήσει του πλήθους των αντικειμένων για όλες τις περιπτώσεις πλήθους ερωτημάτων έκτασης του 5% της έκτασης του χώρου. Με βάση την υπόθεση ότι οι χρήστες υποβάλλουν ερωτήματα κυμαινόμενης έκτασης, των οποίων ο μέσος φόρτος αντιστοιχεί σε ερωτήματα σταθερής έκτασης του 5% της έκτασης του χώρου (σχήμα 4.19), από το διάγραμμα προκύπτει ότι το σύστημα είναι σε θέση να εξυπηρετεί περίπου 72000 αντικείμενα και 5000 ερωτήματα με περίοδο δειγματοληψίας (κύκλος φάσεων) 1 δευτερόλεπτο. Επίσης, από το διάγραμμα προκύπτει ότι η εξυπηρέτηση 100000 αντικειμένων και 10000 ερωτημάτων απαιτεί περίοδο δειγματοληψίας περίπου 2.7 δευτερόλεπτα. Παρόμοια συμπεράσματα με τις

ανάλογες υποθέσεις μπορούν να εξαχθούν από όλα τα διαγράμματα των σχημάτων 4.14 έως 4.19.

Κεφάλαιο 5

Ερωτήματα εγγύτερων γειτόνων

5.1 Εισαγωγή

Σε διάφορες πρακτικές εφαρμογές που στηρίζονται στον εντοπισμό κινούμενων αντικειμένων είναι πολλές φορές απαραίτητο να αναζητούνται οι πλησιέστεροι γείτονες για κάποιες επιλεγμένες θέσεις. Λ.χ. ένα περιπολικό που κινείται σε κάποια περιοχή ενδεχομένως να χρειαστεί την άμεση βοήθεια από κάποια άλλα που κινούνται πλησίον του, οπότε χρειάζεται άμεση ενημέρωση για τις θέσεις τους. Επίσης, σε διάφορα μοντέρνα παιχνίδια (*BotFighters*, *BattleMachine*) οι παίκτες ενδιαφέρονται για τις θέσεις των αντιπάλων ώστε να καταστρώσουν κάποιο σχέδιο δράσης. Ακόμη, προβλέπεται ότι σύντομα θα υπάρξει σημαντική έξαρση σε διαφημιστικά μηνύματα που θα αποστέλλονται σε κατόχους κινητών τηλεφώνων όταν κινούνται κοντά σε μεγάλα πολυκαταστήματα ή εκθεσιακά κέντρα (location based advertising). Τέτοια ερωτήματα εγγύτερων γειτόνων ορίζονται για επιλεγμένα σημεία ενδιαφέροντος, για καθένα από τα οποία αναζητούνται οι k πλησιέστεροι γείτονες, εκμεταλλευόμενοι την τρέχουσα θέση των αντικειμένων (location-based query).

Η φύση και οι ιδιότητες αυτών των ερωτημάτων έχουν εξεταστεί κατά κόρον σε χωρικές βάσεις δεδομένων. Ωστόσο, όταν οι ενημερώσεις θέσεων για το σύνολο των αντικειμένων λαμβάνονται με πολύ μεγάλη συχνότητα, η διαχείριση τέτοιων ερωτημάτων από συμβατικά συστήματα είναι μάλλον χρονοβόρα. Ιδιαίτερα όταν οι απαντήσεις πρέπει να αποστέλλονται από κάποιο κεντρικό επεξεργαστή προς τους χρήστες σε πραγματικό χρόνο, είναι προφανές ότι η επεξεργασία μπορεί να επιταχυνθεί αν εφαρμοσθούν μέθοδοι που έχουν προταθεί για τη διαχείριση ρευμάτων δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση, τόσο οι ενημερώσεις των θέσεων όσο και ο προσδιορισμός των αντικειμένων ενδιαφέροντος είναι ευνόητο να θεωρηθούν ως ρεύματα δεδομένων με χωροχρονική πληροφορία.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου ανασκοπούνται τεχνικές διαρκούς αποτίμησης ερωτημάτων εγγύτερων γειτόνων επί της τρέχουσας θέσης των αντικειμένων. Από τη βιβλιογραφία έχει επιλεγεί η μέθοδος της σπειροειδούς διαμέρισης, η οποία παρουσιάζεται λεπτομερώς στην ενότητα 5.3 και αξιολογείται πειραματικά στην ενότητα 5.4.

5.2 Τεχνικές και μέθοδοι επεξεργασίας ερωτημάτων εγγύτερων γειτόνων

5.2.1 Προσεγγίσεις για στατικά αντικείμενα

Έχει προταθεί πληθώρα μεθόδων για την αποδοτική αποτίμηση ερωτημάτων εγγύτερων γειτόνων σε στατικά αντικείμενα. Οι περισσότερες μέθοδοι χρησιμοποιούν μεθόδους χωρικής προσπέλασης που μερικές από αυτές έχουν σχεδιαστεί αποκλειστικά για ερωτήματα εγγύτερων γειτόνων. Για παράδειγμα, τα κελιά Voronoi διαμερίζουν το χώρο σε πολυγωνικές περιοχές μέσα στις οποίες το αποτέλεσμα ενός ερωτήματος εγγύτερων γειτόνων παραμένει ίδιο για οποιοδήποτε σημείο τους.

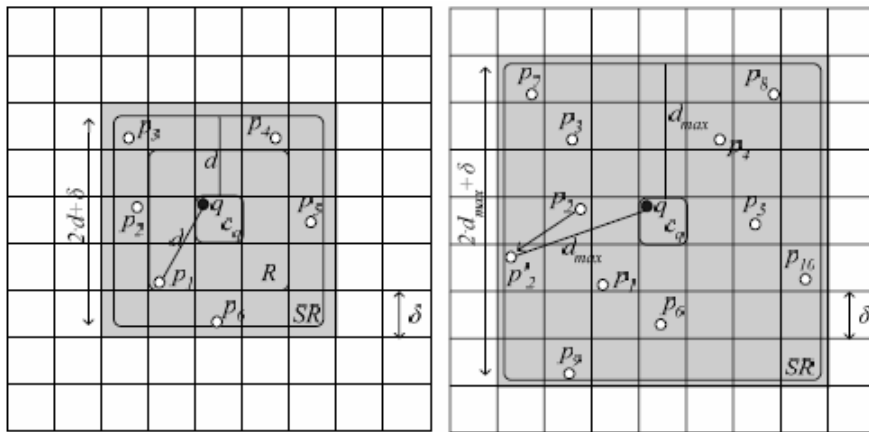
Οι αλγόριθμοι τεχνικής *branch-and-bound*, οι οποίοι αρχικά σχεδιάστηκαν για ερωτήματα περιοχής, χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μεθόδους χωρικής προσπέλασης για την αποτίμηση ερωτημάτων εγγύτερων γειτόνων. Η πιο σημαντική τέτοια προσέγγιση είναι ένας αλγόριθμος που προτάθηκε από τον Ρουσόπουλο. Σύμφωνα με αυτή, χρησιμοποιείται ένα R-tree για τη δεικτοδότηση των σημείων, στο οποίο εκτελείται μια διάσχιση κατά βάθος. Κατά τη διάρκεια της διάσχισης, οι καταχωρήσεις του δένδρου ταξινομούνται και αφαιρούνται με βάση ένα σύνολο κατάλληλων κανόνων ώστε τελικά να προκύψει το σύνολο των k εγγύτερων γειτόνων. Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούν την τεχνική *branch-and-bound*, τροποποιούν κατάλληλα τη μέθοδο δεικτοδότησης για τις ανάγκες των ερωτημάτων.

Ακολουθως, προτάθηκε μια σειρά από αλγόριθμους σταδιακής αποτίμησης (*incremental evaluation*), οι οποίοι υπολογίζουν τον $(k+1)$ -στό εγγύτερο γείτονα, δεδομένου ότι είναι γνωστοί οι k από αυτούς. Χρησιμοποιούν ένα R-tree (ή μια παραλλαγή του) για τη δεικτοδότηση των αντικειμένων και μια λίστα προτεραιότητας για τα αντικείμενα που εντοπίζουν κατά τη διάσχισή του.

Ο Κόλλιος έχει προτείνει μια προσέγγιση για ερωτήματα εγγύτερων γειτόνων σε κινούμενα αντικείμενα και μονοδιάστατο χώρο. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί ένα δυϊκό μετασχηματισμό, όπου η μελλοντική τροχιά ενός κινούμενου αντικειμένου $x(t)=x_0+u_x t$ μετασχηματίζεται σε ένα σημείο (x_0, u_x) του λεγόμενου δυϊκού χώρου. Η λύση γενικεύεται στο χώρο 1.5 διαστάσεων, όπου τα αντικείμενα κινούνται στο επίπεδο σε προκαθορισμένα τμήματα γραμμών (λ.χ. ένα οδικό δίκτυο). Ωστόσο, ένα ερώτημα, αναφερόμενο σε κάποιο χρονικό παράθυρο, επιστρέφει το μοναδικό αντικείμενο πλησίον του κατά τη διάρκεια του χρονικού παραθύρου και όχι τα αντικείμενα πλησίον του για κάθε χρονική στιγμή του παραθύρου. Επιπλέον, αυτή η λύση δεν είναι δυνατόν να επεκταθεί άμεσα στο διδιάστατο χώρο, όπου οι τροχιές των αντικειμένων είναι γραμμές του τρισδιάστατου χώρου.

Η προσέγγιση βασισμένη στα Voronoi διαγράμματα υποδέτει διαρκώς κινούμενα αντικείμενα, παρόλο που αυτά αλλάζουν καθώς τα αντικείμενα κινούνται. Ωστόσο, η τοπολογική τους δομή μεταβάλλεται μόνο υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη από τον προτεινόμενο αλγόριθμο για τη διαρκή ανακατασκευή των διαγραμμάτων.

Ο Song και ο Ρουσόπουλος [SR01] πρότειναν μια λύση για κινούμενα ερωτήματα, αλλά σε στατικά αντικείμενα. Επιπλέον, ο χρόνος δεν θεωρείται συνεχής αλλά διαιρείται σε



Σχήμα 5.1: Παραδείγματα για το YPK-CNN (πηγή [MHP05])

n ίσα τμήματα. Όταν υπολογίζεται το αποτέλεσμα ενός δείγματος, ο αλγόριθμος επιχειρεί να χρησιμοποιήσει την πληροφορία από τις απαντήσεις των προηγούμενων δειγμάτων.

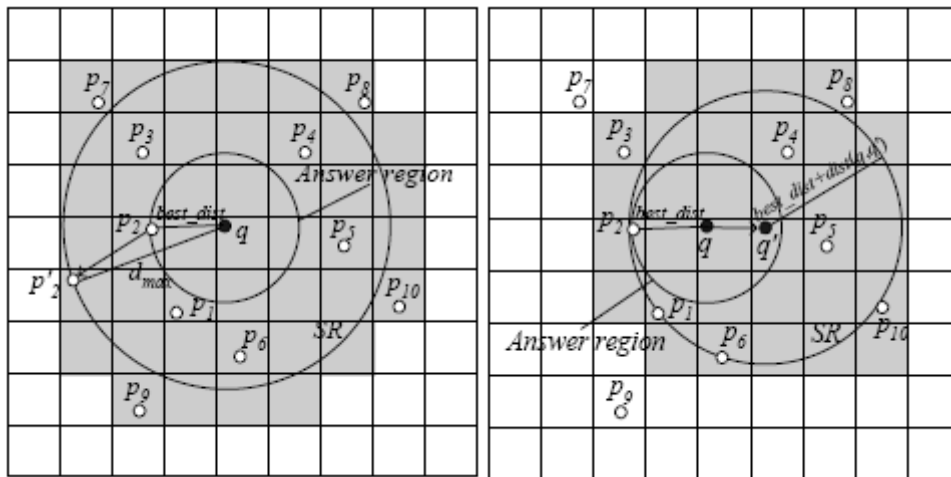
5.2.2 Προσεγγίσεις για κινούμενα αντικείμενα και ερωτήματα

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται μέθοδοι επεξεργασίας κινούμενων ερωτημάτων εγγύτερων γειτόνων ως ερωτήματα διαρκείας σε κινούμενα αντικείμενα. Έχουν προταθεί αρκετές λύσεις, οι οποίες ανάγουν ένα ερώτημα εγγύτερων γειτόνων σε ερώτημα περιοχής. Για παράδειγμα, το σύστημα SINA που περιγράφηκε στην υποενότητα 4.3.1, υπολογίζει ένα ερώτημα εγγύτερων γειτόνων με κάποιο παραδοσιακό αλγόριθμο και κατόπιν συνεχίζει τη διαρκή αποτίμησή του ως ερώτημα διαρκείας κυκλικής περιοχής.

(i) YPK-CNN

Στο [YPK05] προτείνεται μια μέθοδος συνεχούς παρακολούθησης για ακριβή ερωτήματα k εγγύτερων γειτόνων που θα αναφέρεται στο εξής ως YPK-CNN. Με βάση την υπόθεση ότι τα αντικείμενα χωρούν στην κύρια μνήμη, κατακερματίζονται σε ένα κανονικό πλέγμα κελιών, διαστάσεων $d \times d$. Το YPK-CNN δεν επεξεργάζεται τα εισερχόμενα δεδομένα, αλλά εφαρμόζει άμεσα τις αλλαγές στο πλέγμα. Κάθε ερώτημα εγγύτερων γειτόνων που υποβάλλεται στο σύστημα, υπολογίζεται κάθε T χρονικές στιγμές. Η αποτίμηση ενός ερωτήματος για πρώτη φορά γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, ο αλγόριθμος επισκέπτεται τα κελιά ενός ορθογωνίου R μέχρι να βρεθούν k αντικείμενα. Το R , το οποίο περικλείει το ερώτημα q και έχει κέντρο το κελί του ερωτήματος c_q , φαίνεται στο σχήμα 5.1α. Στο σχήμα απεικονίζεται ένα παράδειγμα ενός ερωτήματος εγγύτερου γείτονα (1-NN query), όπου ο πρώτος υποψήφιος εγγύτερος γείτονας είναι το p_1 με απόσταση d από το q . Το p_1 δεν είναι απαραίτητα ο τελικός εγγύτερος γείτονας, εφόσον μπορεί να υπάρχουν αντικείμενα (λ.χ. το p_2) στα κελιά έξω από το R με απόσταση μικρότερη από d . Για τον εντοπισμό αυτών των αντικειμένων, το δεύτερο στάδιο ερευνά τα κελιά που περιέχονται στο ορθογώνιο SR , το οποίο περικλείει το c_q και έχει διάσταση πλευράς $2d+d$. Έτσι, υπολογίζει το τελικό εγγύτερο γείτονα μέσα σε αυτό. Στο σχήμα 5.1α, το YPK-CNN επεξεργάζεται τα σημεία από το p_1 έως το p_6 και αναφέρει το p_2 ως το ακριβές σημείο εγγύτερου γείτονα. Τα εξεταζόμενα κελιά αναπαρίστανται σκιασμένα.

Όταν αποτιμάται ένα ήδη υπάρχον ερώτημα q , το YPK-CNN χρησιμοποιεί το προηγούμενο αποτέλεσμα για να περιορίσει την έκταση της έρευνας. Συγκεκριμένα, υπολογίζει τη μέγιστη μετατόπιση d_{max} των εγγύτερων γειτόνων από την προηγούμενη



Σχήμα 5.2: Παραδείγματα για το SEA-CNN (πηγή [MHP05])

θέση τους. Το νέο SR είναι ένα ορθογώνιο με κέντρο το c_q και διάσταση πλευράς $2d_{max} + \delta$. Στο σχήμα 5.16, αν υποθέταμε ότι το τρέχον σύνολο εγγύτερων γειτόνων p_2 του q μετακινήθηκε στη θέση p_2' , τότε το τετράγωνο ορισμένο με πλευρά $d_{max} = \text{dist}(p_2', q)$ περιέχει εγγυημένα τουλάχιστον ένα αντικείμενο (λ.χ. το p_2). Το ΥPK-CNN εντοπίζει όλα τα αντικείμενα (από το p_1 έως το p_{10}) στα κελιά που τέμνουν το SR και υπολογίζει το νέο εγγύτερο γείτονα p_1 . Τέλος, όταν ένα ερώτημα q αλλάζει θέση, αντιμετωπίζεται ως νέο και αποτιμάται εκ νέου.

(ii) SEA-CNN

Η τεχνική SEA-CNN [XMA05] εστιάζει αποκλειστικά στην παρακολούθηση των αλλαγών του συνόλου εγγύτερων γειτόνων χωρίς όμως να αναφέρει κάποιο αλγόριθμο για τον αρχικό υπολογισμό του. Τα αντικείμενα αποθηκεύονται στην δευτερεύουσα μνήμη και κατακεραματίζονται σε ένα κανονικό πλέγμα. Η περιοχή επιρροής (answer region) του ερωτήματος q ορίζεται από τον κύκλο με κέντρο q και ακτίνα $best_dist$, όπου $best_dist$ η απόσταση του τρέχοντος k -στού εγγύτερου γείτονα. Η αναπαράσταση της περιοχής επιρροής γίνεται με την τήρηση της ταυτότητας του ερωτήματος στα κελιά τα οποία περιλαμβάνονται ή τέμνονται από τον κύκλο. Όταν οι ενημερώσεις εισέρχονται στο σύστημα, αναλόγως ποια κελιά (που ανήκουν σε μία ή πολλές περιοχές επιρροής) επηρεάζουν, η μέθοδος σχηματίζει ένα κύκλο έρευνας SR γύρω από το q , μέσα στον οποίο υπολογίζει το νέο σύνολο εγγύτερων γειτόνων. Η ακτίνα r του κύκλου SR υπολογίζεται με βάση τις εξής περιπτώσεις:

- Εάν κάποιοι από τους τρέχοντες εγγύτερους γείτονες μετακινηθούν μέσα στην περιοχή επιρροής του ερωτήματος ή κάποια εξωτερικά αντικείμενα εισέλθουν στην περιοχή επιρροής του ερωτήματος, τότε τίθεται $r = best_dist$ και η μέθοδος εξετάζει όλα τα αντικείμενα τα οποία περιλαμβάνονται στην περιοχή επιρροής ώστε να εντοπίσει τους k εγγύτερους γείτονες.
- Εάν κάποιος από τους τρέχοντες εγγύτερους γείτονες μετακινηθεί εκτός της περιοχής επιρροής, τότε η διαδικασία συνεχίζεται όπως στο ΥPK-CNN, δηλαδή η ακτίνα r τίθεται ίση με την απόσταση του γείτονα που μετακινήθηκε μακρύτερα από το ερώτημα. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2α.
- Τέλος, αν το ερώτημα μετακινηθεί σε μια νέα θέση q' , τότε η ακτίνα τίθεται ίση με $best_dist + \text{dist}(q, q')$. Η διαδικασία απεικονίζεται στο σχήμα 5.2β.

5.3 Η μέθοδος της σπειροειδούς διαμέρισης (Conceptual Partitioning Monitoring)

Η τεχνική της σπειροειδούς διαμέρισης (CPM) πλεονεκτεί σε σύγκριση με τις προηγούμενες μεθόδους επειδή εξετάζει το βέλτιστο σύνολο κελιών και παράλληλα επιταχύνει την εύρεσή του.

5.3.1 Δομές τήρησης εγγύτερων γειτόνων

Η μέθοδος CPM χρησιμοποιεί ένα σύνολο από ευέλικτες αφαιρετικές δομές για την αποδοτική λειτουργία των βασικών αλγορίθμων επεξεργασίας των ερωτημάτων. Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται αυτές οι δομές μαζί με τις πράξεις τους και προτείνονται τρόποι υλοποίησής τους.

(i) Σύνολο k εγγύτερων γειτόνων

Θεωρούμε μια αφαιρετική δομή, η οποία είναι ένα σύνολο από k κινούμενα αντικείμενα διατεταγμένα ως προς τις αποστάσεις τους από κάποιο σημείο ενδιαφέροντος (k -NN_set). Το μέγιστο πλήθος των καταχωρήσεων σε κάθε στιγμιότυπό (*instance*) της είναι k , όσοι και οι γείτονες που αναζητούνται πλησίον του σημείου ενδιαφέροντος. Είναι σαφές ότι η μέθοδος διατηρεί ένα στιγμιότυπό της για κάθε ενεργό ερώτημα. Αρχικά το σύνολο είναι κενό και τελικά, μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας του ερωτήματος, περιέχει τους k ζητούμενους εγγύτερους γείτονες.

Η δομή διαθέτει τρεις βασικές λειτουργίες.

- Η λειτουργία εισαγωγής (*Insert*) δέχεται ως είσοδο ένα αντικείμενο και την απόστασή του από το σημείο ενδιαφέροντος. Αν το τρέχον πλήθος καταχωρήσεων του στιγμιότυπου είναι μικρότερο από k , δηλαδή το k -σύνολο δεν είναι συμπληρωμένο, τότε το αντικείμενο εισάγεται και διατάσσεται ανάμεσα στα υπόλοιπα. Διαφορετικά, συγκρίνεται η απόστασή του με την απόσταση του k -στου αντικειμένου. Αν βρεθεί μικρότερη, τότε το k -στο σημείο αποβάλλεται, ενώ το νέο εισάγεται και διατάσσεται ανάμεσα στα υπόλοιπα. Διαφορετικά, το νέο αντικείμενο απορρίπτεται, διότι η απόστασή του είναι μεγαλύτερη (ή ίση) από του k -στου πιο μακρινού γείτονα του σημείου ενδιαφέροντος.
- Η δεύτερη βασική λειτουργία (έλεγχος πληρότητας - *Is_Full*) συγκρίνει το τρέχον πλήθος (n) καταχωρήσεων με το k (). Επιστρέφει ψευδή τιμή (*false*), όταν $n < k$, που σημαίνει ότι η αναζήτηση δεν έχει ακόμα εντοπίσει k γείτονες για να συμπληρώσει το k -σύνολο.
- Η τρίτη βασική πράξη είναι η αναφορά (*Report*) των καταχωρήσεων του συνόλου, η οποία χρησιμοποιείται στην τελική φάση της αποτίμησης του ερωτήματος, όταν η σύνδεση του k -συνόλου έχει πλέον οριστικοποιηθεί. Η δομή εξάγει τους εγγύτερους γείτονες κατ' αύξουσα σειρά απόστασης, ως απάντηση του ερωτήματος. Επιπλέον, η μέγιστη καταχωρημένη απόσταση του συνόλου είναι πάντα άμεσα προσπελάσιμη από το χρήστη του στιγμιότυπου της δομής.

Άλλες χρήσιμες πράξεις, που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια επεξεργασίας του ερωτήματος, είναι:

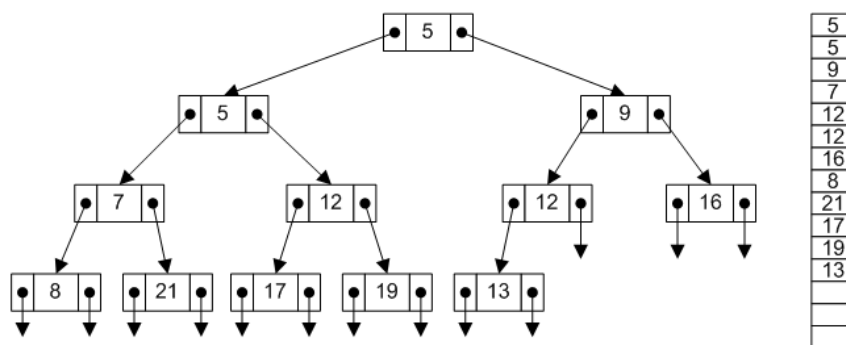
- Έλεγχος αν ένα δοσμένο αντικείμενο ανήκει στο τρέχον σύνολο (*Find_Object*). Επιστρέφει αληθινή τιμή, αν το αντικείμενο πράγματι περιέχεται στο τρέχον σύνολο.
- Διαγραφή του αντικειμένου (*Delete_Object*), το οποίο εντοπίστηκε στο σύνολο από την πράξη *Find_Object*.

- Ανανέωση (*Update_Object*) της απόστασης του αντικειμένου (και κατ' επέκταση της θέσης του στη διάταξη), το οποίο εντοπίστηκε από την πράξη *Find_Object*. Η νέα απόστασή του χορηγείται ως είσοδος στην πράξη.
- Συγχώνευση δύο συνόλων (*Merge_To*). Το σύνολο συγχωνεύεται με κάποιο άλλο, το οποίο χορηγείται ως είσοδος. Το αποτέλεσμα είναι ένα νέο k -σύνολο, το οποίο φιλοξενείται στο στιγμιότυπο της δομής του δεύτερου συνόλου και περιέχει όλα τα αντικείμενα σε αύξουσα σειρά απόστασης. Είναι σαφές ότι το άθροισμα των αντικειμένων των δύο συνόλων μπορεί να είναι μεγαλύτερο του k (το μέγιστο $2k$), από τα οποία το νέο σύνολο περιέχει τα k κοντινότερα. Διαφορετικά, το νέο σύνολο περιέχει τα αντικείμενα και των δύο. Προφανώς, η συγχώνευση δύο συνόλων έχει νόημα μόνο όταν οι αποστάσεις των αντικειμένων και από τα δύο είναι μετρημένες ως προς το ίδιο σημείο αναφοράς. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία της συγχώνευσης γίνεται μεταξύ δύο ήδη διατεταγμένων συνόλων. Ωστόσο, ο απλούστερος τρόπος είναι να επιχειρηθεί η εισαγωγή ένα προς ένα των αντικειμένων του πρώτου συνόλου στο δεύτερο.

Η υλοποίηση της δομής είναι κρίσιμη για τις επιδόσεις των πράξεών της. Η χρήση ενός ευρετηρίου (*index*) για τις αποστάσεις των αντικειμένων είναι απαραίτητη για την αποδοτική διάταξή τους. Η πολυπλοκότητα των πράξεων *Insert*, *Find_Object* και *Merge_To* αυξάνει για μεγαλύτερες τιμές του k . Η πράξη *Insert* διατάσσει τα αντικείμενα με βάση την απόστασή τους, ενώ η *Find_Object* τα αναζητεί με βάση την ταυτότητά τους. Οι τρεις βασικές πράξεις είναι απαραίτητες για τους βασικούς αλγόριθμους της μεθόδου CPM, ενώ οι υπόλοιπες χρησιμοποιούνται από έναν εναλλακτικό αλγόριθμο για την επεξεργασία στάσιμων ερωτημάτων εγγύτερων γειτόνων.

Οι εμπνευστές της μεθόδου CPM [MHP05] προτείνουν το *red-black* δένδρο ως δομή ευρετηρίου για τις αποστάσεις. Το *red-black* δένδρο είναι ένα ισοζυγισμένο δυαδικό δένδρο αναζήτησης ανάλογο του *AVL-tree*, που επιτυγχάνει τη διάταξη ενός αντικειμένου με πολυπλοκότητα συγκρίσεων $O(\log k)$. Ωστόσο, σε εφαρμογές του πραγματικού κόσμου εκτιμάται ότι σπάνια υποβάλλονται ερωτήματα εγγύτερων γειτόνων με μεγάλες τιμές του k (λ.χ. $k > 10$). Εξάλλου, ο τρόπος με τον οποίο έχει σχεδιασθεί η πράξη εισαγωγής, επιτυγχάνει μείωση των εισαγωγών στη δομή δεικτοδότησης, διότι εισάγονται μόνο τα αντικείμενα των οποίων η απόσταση είναι μικρότερη της απόστασης του k -στού. Επιπρόσθετα, μετά από κάθε επιτυχημένη εισαγωγή, η μεγαλύτερη απόσταση στη δομή μειώνεται, γεγονός που ελαττώνει την πιθανότητα να βρεθεί κάποιο αντικείμενο με μικρότερη απόσταση στο μέλλον.

Για τους λόγους αυτούς, η δομή δεικτοδότησης των αποστάσεων επιλέχθηκε να υλοποιηθεί με διπλοσυνδεδεμένη γραμμική λίστα με κόμβο-φρουρό. Οι κόμβοι της λίστας περιέχουν τα ζεύγη ταυτότητας και απόστασης των αντικειμένων και διατηρούνται συνδεδεμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι διατεταγμένοι σε αύξουσα σειρά απόστασης. Η εισαγωγή ενός αντικειμένου γίνεται με συγκρίσεις πολυπλοκότητας $O(k)$. Κατά την εισαγωγή, ο κόμβος του k -στού αντικειμένου, ο οποίος βρίσκεται στην ουρά της λίστας (*tail*) και πρόκειται να απορριφθεί, λαμβάνει προσωρινά το ρόλο κόμβου φρουρού μέχρι να ολοκληρωθεί η διάταξη του νέου αντικειμένου. Η αναζήτηση ενός αντικειμένου με βάση την ταυτότητα του γίνεται με συγκρίσεις πολυπλοκότητας $O(k)$. Η συγχώνευση δύο συνόλων γίνεται με εισαγωγή ένα προς ένα των αντικειμένων του πρώτου συνόλου στο δεύτερο. Η απόδοση της γραμμικής λίστας συγκρίθηκε με την απόδοση ενός δυαδικού δένδρου αναζήτησης ως δομή δεικτοδότησης των αποστάσεων. Οι δομές έχουν σχεδόν ίδια απόδοση για τιμές του k μέχρι μερικές δεκάδες γειτόνων, ενώ για $k \leq 10$, η απλότητα της γραμμικής λίστας την καθιστά καλύτερη.



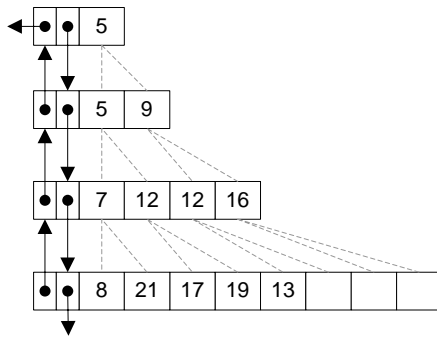
Σχήμα 5.3: Σωρός ελαχίστων με δυαδικό δένδρο και με πίνακα

(ii) Σωρός Ελαχίστων

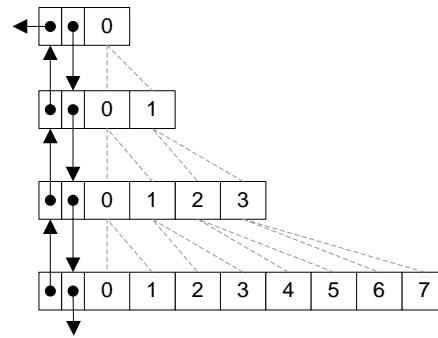
Η μέθοδος χρησιμοποιεί μία δομή σωρού ελαχίστων (*min heap*) για κάθε ερώτημα. Ο σωρός είναι μια αφαιρετική δομή, η οποία είναι ένα σχεδόν πλήρες δυαδικό δένδρο, όπου η τιμή του κλειδιού κάθε κόμβου δεν είναι μεγαλύτερη από τις τιμές των κλειδιών των δύο παιδιών του. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει το σχηματισμό και τη διατήρηση του δένδρου ως σχεδόν πλήρες για οποιαδήποτε ακολουθία εισαγωγών και εξαγωγών κλειδιών, γεγονός που εξασφαλίζει τη λογαριθμική πολυπλοκότητά τους $O(\log n)$ στη χειρότερη περίπτωση.

Η ιδιαιτερότητα της δομής είναι ότι η εισαγωγή μιας νέας καταχώρησης ξεκινάει τη διάσχιση του δένδρου από τελευταίο επίπεδο προς τη ρίζα μέχρι το νέο στοιχείο να τοποθετηθεί στη σωστή θέση. Το νέο στοιχείο εισάγεται σε ένα νέο κόμβο στο τελευταίο επίπεδο. Αν το τελευταίο επίπεδο είναι πλήρες, δημιουργείται νέο με το νέο κόμβο ως το πρώτο φύλλο από τα αριστερά. Στη συνέχεια συγκρίνεται το κλειδί του με το κλειδί του γονικού του κόμβου και ανάλογα με το αποτέλεσμα της σύγκρισης τα στοιχεία είναι δυνατόν να ανταλλάξουν κόμβους. Με ανάλογες διαδοχικές συγκρίσεις, το νέο στοιχείο είναι δυνατόν να φτάσει στον κόμβο της ρίζας. Αντίστοιχα, η εξαγωγή ενός στοιχείου γίνεται πάντα από τη ρίζα (το ελάχιστο ή μέγιστο όλων). Το στοιχείο του δεξιότερου φύλλου στο τελευταίο επίπεδο τοποθετείται στον κόμβο της ρίζας και με διαδοχικές συγκρίσεις ξεκινάει η κάθοδος του προς τη σωστή θέση, ενώ ο κόμβος του φύλλου καταστρέφεται. Αξίζει να σημειωθεί, ότι ειδικά η πράξη της εισαγωγής έχει στη μέση περίπτωση σχεδόν σταθερή πολυπλοκότητα, διότι στο κατώτατο επίπεδο βρίσκεται το 50% των κόμβων, στο ανώτερο το 25% κοκ.

Είναι σαφές, ότι οι ιδιαιτερότητες του δένδρου ως προς τη διάσχισή του και προς τις δύο κατευθύνσεις προκαλεί προβλήματα στην υλοποίησή του. Η κλασική υλοποίηση ενός δυαδικού δένδρου με δείκτες στους κόμβους του δεν είναι βολική και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το δένδρο του σωρού είναι σχεδόν πλήρες, η βιβλιογραφία προτείνει τη χρήση πίνακα (*array*). Στο σχήμα 5.3 φαίνεται ένα παράδειγμα σωρού ελαχίστων υλοποιημένο με δυαδικό δένδρο και πίνακα. Το πρώτο στοιχείο του πίνακα είναι η ρίζα. Ο γονέας ενός κόμβου στη θέση j βρίσκεται στη θέση $j/2$. Τα παιδιά ενός κόμβου στη θέση j είναι στις θέσεις $2j$ και $2j+1$. Έτσι, η υλοποίηση των πράξεων εισαγωγής και εξαγωγής απλοποιείται, αφού η διάσχιση του δένδρου προς τις δύο κατευθύνσεις γίνεται με απλούς πολλαπλασιασμούς και διαιρέσεις με τις θέσεις του πίνακα. Ωστόσο, το σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι το μέγιστο πλήθος των στοιχείων πρέπει να είναι γνωστό από την αρχή για να γίνει η δέσμευση της μνήμης για τον πίνακα. Η χρήση σωρού από τη μέθοδο CPM αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα. Η μέθοδος εισάγει στο σωρό στοιχεία, των οποίων το μέγιστο πλήθος είναι το πλήθος των κελιών του πλέγματος, τιμή απαγορευτική για τη



Σχήμα 5.4: Σωρός ελαχίστων με λίστα πινάκων



Σχήμα 5.5: Αρίθμηση των θέσεων στους πίνακες της λίστας

δέσμευση ενός πίνακα για κάθε ερώτημα. Ενώ πρακτικά το μέγιστο πλήθος στοιχείων στο σωρό είναι συνήθως μικρό, δεν υπάρχει τρόπος να γίνει πρόβλεψή του. Συνεπώς, η υλοποίηση του σωρού με πίνακα δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμη για τη μέθοδο CPM, ενώ στο αντίστοιχο άρδρo δε γίνεται καμία αναφορά στο θέμα της υλοποίησης.

Η υλοποίηση του σωρού επιλέχθηκε να γίνει με τη δυναμική δέσμευση πολλαπλών πινάκων, όπου κάθε ένας αντιπροσωπεύει ένα επίπεδο του αντίστοιχου δυαδικού δένδρου του σωρού. Οι πίνακες διασυνδέονται μεταξύ τους με γραμμική διπλοσυνδεδεμένη λίστα. Ο πίνακας στην κεφαλή (*head*) της λίστας αντιπροσωπεύει τη ρίζα και η χωρητικότητά του είναι για ένα μόνο στοιχείο. Ο επόμενος στη λίστα αντιπροσωπεύει το επόμενο επίπεδο και η χωρητικότητά του είναι για δύο στοιχεία. Ο επόμενος αντιπροσωπεύει το τρίτο επίπεδο με χωρητικότητα τεσσάρων στοιχείων κοκ. Ο πίνακας στην ουρά (*tail*) της λίστας πινάκων αντιπροσωπεύει το τελευταίο επίπεδο και έχει χωρητικότητα 2^{l-1} στοιχείων, όπου l το πλήθος των επιπέδων συμπεριλαμβανομένου εκείνου της ρίζας. Στο σχήμα 5.4 φαίνεται το παράδειγμα σωρού του σχήματος 5.3 με λίστα πινάκων, διατεταγμένα κάθετα ώστε να είναι εμφανής η αντιστοίχιση με τα επίπεδα του δυαδικού δένδρου. Οι διακεκομμένες νοητές γραμμές του σχήματος αναπαριστούν τις γονικές σχέσεις των στοιχείων μεταξύ των πινάκων ως κόμβους του αντίστοιχου δυαδικού δένδρου.

Κάθε πίνακας φέρει μια κεφαλίδα, στην οποία αποθηκεύονται οι δείκτες διασύνδεσης, το μέγιστο και το τρέχον πλήθος στοιχείων του. Μόνο ο πίνακας στην ουρά είναι δυνατόν να έχει κενές θέσεις στο τέλος του, αφού το δένδρο είναι σχεδόν πλήρες. Οι τύποι μετάβασης από γονέα προς παιδιά και αντίθετα, που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση απλού πίνακα, παραμένουν ίδιοι. Η σημαντική διαφορά είναι ότι το αποτέλεσμα των τύπων προσδιορίζει τη θέση του εκάστοτε στοιχείου στον αντίστοιχο πίνακα μετάβασης, ο οποίος είναι ο προηγούμενος στη λίστα για μετάβαση σε γονέα και ο επόμενος για μετάβαση σε παιδί. Ο γονέας του στοιχείου στη θέση j του επιπέδου (πίνακα) l είναι το στοιχείο στη θέση $j/2$ του επιπέδου $l-1$ ($l.previous$). Αντίστοιχα, τα παιδιά του στοιχείου στη θέση j του επιπέδου l είναι στις θέσεις $2j$ και $2j+1$ του επιπέδου $l+1$ ($l.next$), εφόσον υπάρχει επόμενο επίπεδο μετά το l και εφόσον υπάρχουν τα παιδιά, δηλαδή οι ενδείξεις των θέσεών τους να είναι μικρότερες ή ίσες από το τρέχον πλήθος στοιχείων στον (τελευταίο) πίνακα μείον ένα. Στο σχήμα 5.5 φαίνεται η αρίθμηση των θέσεων των πινάκων, ώστε να εφαρμόζονται οι τύποι. Για παράδειγμα, τα παιδιά του στοιχείου στη θέση 2 του επιπέδου 3 είναι τα στοιχεία στις θέσεις 4 και 5 του επιπέδου 4. Ωστόσο, το αντίστοιχο στοιχείο με κλειδί 12 στο σχήμα 5.4 έχει μόνο ένα παιδί (το στοιχείο στη θέση 4 με κλειδί 13), γιατί το τρέχον πλήθος στοιχείων στο τελευταίο επίπεδο είναι 5.

Η υλοποίηση του σωρού με πολλαπλούς πίνακες λύνει το πρόβλημα, αφού στο τέλος της λίστας μπορούν δυναμικά να προστίθενται και να αφαιρούνται επίπεδα ανάλογα με το τρέχον πλήθος στοιχείων στο σωρό. Αν ζητηθεί η εισαγωγή ενός νέου στοιχείου, ενώ το δένδρο είναι πλήρες, δηλαδή ο πίνακας του τελευταίου επιπέδου είναι πλήρης, τότε δεσμεύεται μνήμη για ένα νέο πίνακα, ο οποίος θα προσαρτηθεί στην ουρά της λίστας. Η χωρητικότητα του νέου πίνακα είναι διπλάσια από του προηγούμενου του. Η συνολική χωρητικότητα του σωρού γίνεται διπλάσια συν ένα και έτσι καμία άλλη δέσμευση μνήμης δεν απαιτείται μέχρι το πλήθος των στοιχείων αυξηθεί τόσο. Αν ζητηθεί η διαγραφή ενός στοιχείου, ενώ ο πίνακας του τελευταίου επιπέδου περιέχει μόνο μια καταχώρηση, τότε αυτός αφαιρείται από τη λίστα και αποδεσμεύεται η μνήμη του προκαλώντας τις αντίστροφες συνέπειες στη συνολική χωρητικότητα του σωρού. Με αυτό τον τρόπο υλοποίησης η δομή ανταποκρίνεται δυναμικά στο φόρτο μνήμης διατηρώντας την ευελιξία των αλγορίθμων της.

5.3.2 Υπολογισμός χρήσιμων μεγεθών

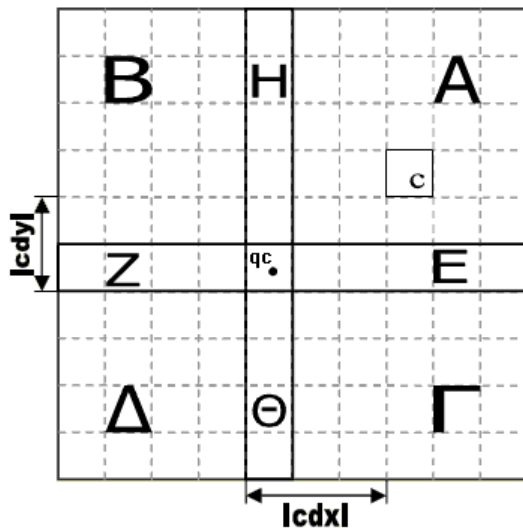
Η μέθοδος χρησιμοποιεί το πλέγμα κελιών για την αποδοτική επεξεργασία των ερωτημάτων με τον περιορισμό ότι τα κελιά πρέπει να είναι τετραγωνικά. Ο βαθμός κατάτμησης κάθε διάστασης του χώρου επιλέγεται κατάλληλα ώστε η έκταση των κελιών να είναι ίση με δ και στις δύο διαστάσεις. Αν G_x είναι ο βαθμός κατάτμησης της οριζόντιας διάστασης και G_y της κάθετης και ο χώρος έχει μήκος $width$ και ύψος $height$, τότε κάθε κελί θα έχει μήκος $dx=width/G_x$ και ύψος $dy=height/G_y$. Για να ισχύει η σχέση $dx=dy=\delta$, αρκεί τα G_x, G_y να επιλεγούν τέτοια ώστε να ικανοποιούν τη συνθήκη $G_x/G_y=width/height$.

Η μέθοδος ξεκινάει την αναζήτηση των k πλησιέστερων γειτόνων εξετάζοντας το κελί q_c , όπου βρίσκεται το σημείο ενδιαφέροντος q του ερωτήματος. Η αναζήτηση συνεχίζεται σε γειτονικά κελιά, στα οποία είναι δυνατόν να ηρεθούν αντικείμενα που ανήκουν στο σύνολο των k εγγύτερων γειτόνων (k -NN_set) και τερματίζεται, όταν ικανοποιηθούν συγκεκριμένες συνθήκες, όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Για κάθε κελί, το οποίο επιλέγεται να εξεταστεί λεπτομερώς, εξετάζονται όλα τα περιεχόμενα αντικείμενά του. Για κάθε αντικείμενο υπολογίζεται η ευκλείδεια απόστασή του από το q , ώστε να ανανεωθεί κατάλληλα το k -NN_set. Ο υπολογισμός των αποστάσεων των αντικειμένων από το q αποτελεί το κύριο κόστος επεξεργασίας του ερωτήματος. Ο σκοπός της μεθόδου είναι να ελαττώσει το απαιτούμενο πλήθος υπολογισμών αποστάσεων επιλέγοντας να εξετάσει το βέλτιστο σύνολο κελιών. Απεναντίας, η τετριμμένη μέθοδος θα υπολόγιζε τις αποστάσεις του συνόλου των αντικειμένων από το q .

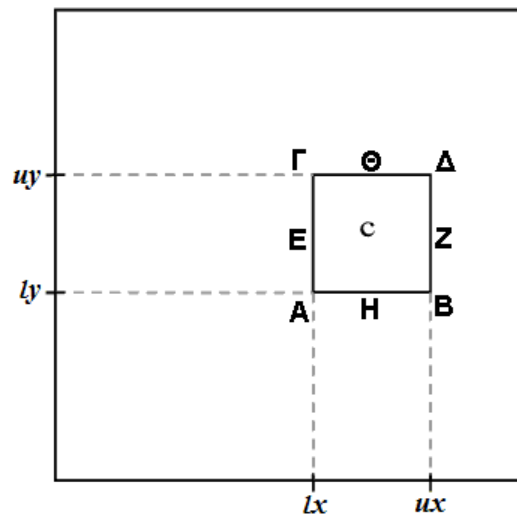
(i) Η συνάρτηση απόστασης σημείων

Η ευκλείδεια απόσταση, ως συνάρτηση $f(x_1, y_1, x_2, y_2) = [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2]^{1/2}$, πρέπει να διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να έχει το ελάχιστο δυνατό υπολογιστικό κόστος. Ο υπολογισμός της απόστασης ως τιμή δεν είναι άμεσα χρήσιμη, αφού η φύση του ερωτήματος απαιτεί μόνο τη σύγκριση των αποστάσεων των αντικειμένων (από το q) μεταξύ τους. Έστω δύο αντικείμενα $A_1(x_1, y_1)$ και $A_2(x_2, y_2)$, των οποίων υπολογίζονται οι αποστάσεις τους από το $q(x_q, y_q)$: $d_1 = f(x_1, y_1, x_q, y_q)$, $d_2 = f(x_2, y_2, x_q, y_q)$ και έστω $d_1 < d_2$. Επειδή οι συναρτήσεις $x^2, x^{1/2}$ είναι γνησίως αύξουσες, μπορεί να γραφεί η εξής ισοδυναμία σχέσεων:

$$d_1 < d_2 \Leftrightarrow f(x_1, y_1, x_q, y_q) < f(x_2, y_2, x_q, y_q) \Leftrightarrow [(x_1 - x_q)^2 + (y_1 - y_q)^2]^{1/2} < [(x_2 - x_q)^2 + (y_2 - y_q)^2]^{1/2} \Leftrightarrow (x_1 - x_q)^2 + (y_1 - y_q)^2 < (x_2 - x_q)^2 + (y_2 - y_q)^2$$



Σχήμα 5.6: Περιοχές υπολογισμού *mindist*



Σχήμα 5.7: Υπολογισμός *mindist* ανά περιοχή

Συνοπώς, η διάταξη μεταξύ των αποστάσεων δύο σημείων από ένα κοινό δεν διαταράσσεται, αν παραλειφθεί ο υπολογισμός της τετραγωνικής ρίζας. Έτσι, η συνάρτηση ευκλείδειας απόστασης μετασχηματίζεται στον σαφώς απλούστερο υπολογισμό του τετραγώνου της. Ορίζουμε τη συνάρτηση $dist(x,y)=(x-x_q)^2+(y-y_q)^2$ ως την απόσταση ενός σημείου από το σημείο ενδιαφέροντος $q(x_q,y_q)$ του ερωτήματος.

(ii) *Ελάχιστη απόσταση σημείου από κελί*

Έστω $mindist(c,p)$ η ελάχιστη απόσταση ενός σημείου $p(x,y)$ από όλα τα σημεία του κελιού του πλέγματος με ταυτότητα c ($p \neq c$). Η συνάρτηση *mindist* αποτελεί βασικό μέγεθος στην επεξεργασία ενός ερωτήματος εγγύτερων γειτόνων, αφού επιστρέφει την ελάχιστη απόσταση $mindist(c, q)$ του σημείου ενδιαφέροντος q από κάποιο κελί c . Αν το αποτέλεσμα της $mindist(c, q)$ είναι μεγαλύτερο από την απόσταση του k -στού εγγύτερου γείτονα, τότε δεν είναι απαραίτητο να εξεταστούν τα περιεχόμενα αντικείμενα του κελιού. Η μέθοδος υπολογίζει συχνά την ελάχιστη απόσταση του q από πολλαπλά γειτονικά κελιά και έτσι ο υπολογισμός της *mindist* πρέπει να είναι σύντομος.

Στο σχήμα 5.6 απεικονίζεται το σημείο ενδιαφέροντος ενός ερωτήματος εγγύτερων γειτόνων και δίπλα του είναι σημειωμένη η ταυτότητα του κελιού qc στο οποίο ανήκει: $qc=Hash(x_q,y_q)$, όπου *Hash* η συνάρτηση κατακερματισμού του πλέγματος. Με αφετηρία το κελί του ερωτήματος, θεωρούμε την οριζόντια και την κάθετη λωρίδα κελιών, οι οποίες ορίζουν 8 διαφορετικές περιοχές στο χώρο (περιοχές A, B, Γ, Δ, E, Z, H, Θ). Ο υπολογισμός της $mindist(c, q)$ διαφέρει ανάλογα με την περιοχή όπου βρίσκεται το κελί c . Ο εντοπισμός της περιοχής γίνεται με τη βοήθεια των μεγεθών cdx και cdy , τα οποία επίσης απεικονίζονται στο σχήμα. Η ποσότητα cdx εκφράζει την απόσταση σε πλήθος κελιών στον οριζόντιο άξονα μεταξύ του κελιού ερωτήματος (qc) και του κελιού c . Αντίστοιχα, η ποσότητα cdy εκφράζει την απόσταση στον κάθετο άξονα μεταξύ του qc και του c . Τα cdx και cdy υπολογίζονται από τους εξής τύπους: $cdx=(c \bmod Gx) - (qc \bmod Gx)$ και $cdy=c/Gx - qc/Gx$, όπου Gx ο βαθμός κατάτμησης του πλέγματος στην οριζόντια διάσταση. Αξίζει να σημειωθεί ότι το υπόλοιπο της διαίρεσης της ταυτότητας ενός κελιού με την τιμή Gx , επιστρέφει το κελί «τεταμημένη», ενώ η ακέραια διαίρεση επιστρέφει το αντίστοιχο κελί «τεταγμένη». Έτσι, το cdx δεν είναι παρά η αφαίρεση των «τεταμημένων» των κελιών c και qc . Αντίστοιχα, το cdy δεν είναι παρά η αφαίρεση των «τεταγμένων» των

κελιών c και q_c . Είναι σαφές από τον ορισμό τους ότι μπορούν να πάρουν αρνητικές τιμές. Για παράδειγμα, αρνητική τιμή του cdx στο σχήμα 5.6 θα σήμαινε ότι το c βρίσκεται στη συμμετρική του θέση ως προς την κάθετη λωρίδα κελιών. Η μηδενική τιμή θα σήμαινε ότι το c είναι κελί της κάθετης λωρίδας κελιών. Οι συνδυασμοί των πρόσημων και μηδενικών τιμών των cdx και cdy προσδιορίζουν τις 8 διαφορετικές περιοχές (πίνακας 5.1).

Ο προσδιορισμός της περιοχής του κελιού c είναι σημαντικός, διότι εκφράζει τη σχετική θέση του κελιού με το σημείο του ερωτήματος. Η σχετική θέση τους καθορίζει άμεσα το σημείο του κελιού πλησίον του σημείου του ερωτήματος, η απόσταση των οποίων αποτελεί το ζητούμενο αποτέλεσμα της *mindist*. Στο σχήμα 5.7 απεικονίζεται το κελί c σε μεγέθυνση με τις συντεταγμένες της κάτω αριστερής (lx, ly) και άνω δεξιάς (ux, uy) κορυφής του. Κάθε μια από τις 8 περιοχές αντιστοιχίζεται σε κάποια κορυφή ή πλευρά του δηλώνοντας το τμήμα πλησιέστερα στο σημείο του ερωτήματος. Αν το κελί βρίσκεται σε κάποια από τις περιοχές A, B, Γ, Δ, τότε πλησιέστερα στο ερώτημα βρίσκεται η αντιστοιχισμένη κορυφή του. Σε αυτή την περίπτωση το αποτέλεσμα της *mindist* είναι η απόσταση του σημείου του ερωτήματος από την αντίστοιχη κορυφή. Αν το κελί βρίσκεται σε κάποια από τις λοιπές περιοχές (E, Z, H, Θ), τότε πλησιέστερα στο ερώτημα βρίσκεται η αντιστοιχισμένη πλευρά του, και η απόστασή τους αποτελεί το αποτέλεσμα της *mindist*. Στον πίνακα 5.1 βρίσκονται συγκεντρωμένα όλα τα αποτελέσματα για τις 8 περιοχές.

Περιοχή	cdy	cdx	<i>mindist</i>
A	+	+	$\text{dist}(lx, ly)$
B	+	-	$\text{dist}(ux, ly)$
Γ	-	+	$\text{dist}(lx, uy)$
Δ	-	-	$\text{dist}(ux, uy)$
E	0	+	$\text{dist}(lx, y_q)$
Z	0	-	$\text{dist}(ux, y_q)$
H	+	0	$\text{dist}(x_q, ly)$
Θ	-	0	$\text{dist}(x_q, uy)$
$q \equiv q_c$	0	0	0

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα της *mindist* για κάθε περιοχή συναρτήσει των cdx και cdy

Οι συντεταγμένες των κορυφών του κελιού υπολογίζονται ως εξής:

$$lx = (c \bmod G_x) \cdot \delta \quad ux = lx + \delta$$

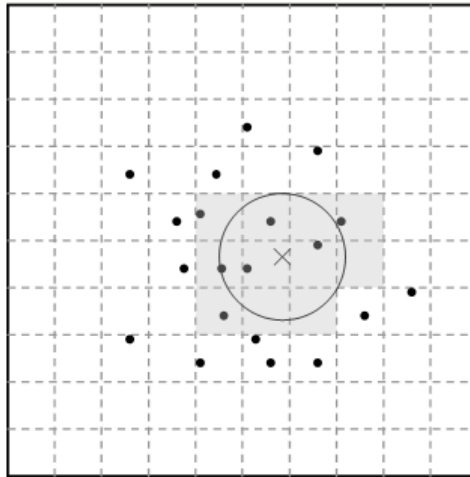
$$ly = (c / G_x) \cdot \delta \quad uy = ly + \delta$$

Το συνολικό κόστος υπολογισμού της *mindist* είναι σταθερό και αποτελείται από: τον υπολογισμό των cdx , cdy , δύο συγκρίσεις για τα πρόσημά τους, τις συντεταγμένες των κορυφών του c και την τελική αποτίμηση της *dist*.

5.3.3 Σπειροειδής διαμέριση του χώρου

Εστω ότι βρίσκεται σε εξέλιξη η αναζήτηση των k εγγύτερων γειτόνων ενός ερωτήματος και στο k -NN_set (δομή k -συνόλου των εγγύτερων γειτόνων) έχουν ήδη εισαχθεί k αντικείμενα με *best_dist* την απόσταση του k -στού. Αν για το κελί c , του οποίου τα περιεχόμενα δεν έχουν εξεταστεί, ισχύει $\text{mindist}(q, c) \geq \text{best_dist}$, τότε η επεξεργασία των περιεχόμενων αντικειμένων του μπορεί να παραλειφθεί, εφόσον αποκλείεται να περιέχει αντικείμενο του οποίου η απόσταση από το q να είναι μικρότερη από *best_dist*. Αυτή η παρατήρηση σηματοδοτεί την κατασκευή του εξής αλγόριθμου για την εύρεση των εγγύτερων γειτόνων.

Αρχικά, υπολογίζεται η $\text{mindist}(q, c)$ για όλα τα κελιά του πλέγματος συμπεριλαμβανομένου του κελιού του ερωτήματος και οι προκύπτουσες ελάχιστες

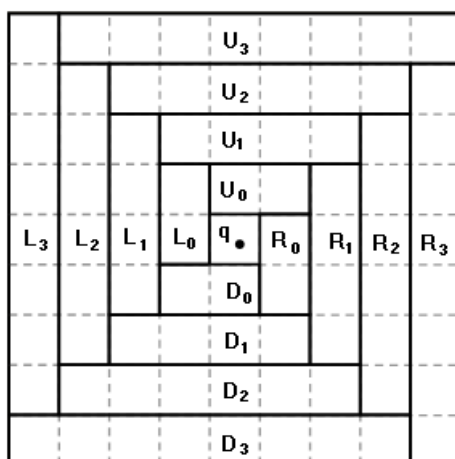


Σχήμα 5.8: Βέλτιστο σύνολο κελιών

αποστάσεις ταξινομούνται σε αύξουσα σειρά. Αρχικοποιείται στιγμιότυπο της δομής k - NN_set , το οποίο στην αρχή είναι κενό από αντικείμενα. Τα κελιά εξετάζονται σύμφωνα με τη διάταξή τους ως προς τις ελάχιστες αποστάσεις με πρώτο το κελί του ερωτήματος q_c , το οποίο έχει μηδενική ελάχιστη απόσταση. Η επεξεργασία κάθε κελιού διεξάγεται με τη σάρωση των αντικειμένων του (σημεία p), καθένα από τα οποία εισάγεται στο k - NN_set με την απόστασή του από το ερώτημα: $Insert(p, dist(x_p, y_p))$. Η διαδικασία εξέτασης κελιών συνεχίζεται μέχρι να βρεθούν k γείτονες (το k - NN_set να αποκτήσει k αντικείμενα) και επιπλέον η ελάχιστη απόσταση του επόμενου κελιού υπό εξέταση να είναι μεγαλύτερη της απόστασης του k -στού εγγύτερου γείτονα. Τελικά, στο k - NN_set θα περιέχονται οι ζητούμενοι k εγγύτεροι γείτονες.

Ο αλγόριθμος είναι βέλτιστος ως προς το πλήθος των εξεταζόμενων κελιών. Στο σχήμα 5.8 απεικονίζεται με το σύμβολο x το σημείο ενός 4 - NN ερωτήματος. Η έκταση του κύκλου με κέντρο το σημείο του ερωτήματος και με ακτίνα την απόσταση του k -στού εγγύτερου γείτονα (τέταρτου στο σχήμα) τέμνει ένα σύνολο κελιών (κελιά με σκίαση στο σχήμα), το οποίο είναι το ελάχιστο δυνατό ώστε το αποτέλεσμα να είναι ορθό. Τα κελιά του βέλτιστου συνόλου έχουν το χαρακτηριστικό ότι η ελάχιστη απόστασή τους από το ερώτημα είναι μικρότερη από την απόσταση του k -στού γείτονα, δηλαδή την ακτίνα του κύκλου. Συνεπώς, ολόκληρη ή τμήμα της έκτασης του κάθε κελιού τέμνεται από την έκταση του κύκλου. Οι ελάχιστες αποστάσεις των λοιπών κελιών του πλέγματος είναι μεγαλύτερες (ή ίσες) από την ακτίνα του κύκλου, γεγονός που εξασφαλίζει ότι ο κυκλικός δίσκος δεν τα τέμνει. Οποιοσδήποτε αλγόριθμος εξετάζει τα περιεχόμενα κελιών πέραν του βέλτιστου συνόλου δεν είναι βέλτιστος, ενώ η ορθή σύνδεση του συνόλου των k εγγύτερων γειτόνων οριστικοποιείται μόνο όταν ολοκληρωθεί η επεξεργασία του βέλτιστου συνόλου κελιών.

Ο αλγόριθμος που περιγράφηκε, μολονότι βέλτιστος ως προς το σύνολο εξεταζόμενων κελιών, δεν είναι αρκετά γρήγορος. Η διαδικασία υπολογισμού των ελαχίστων αποστάσεων όλων των κελιών του πλέγματος και στη συνέχεια η ταξινόμησή τους ενέχει υπερβολικό υπολογιστικό κόστος. Ο αλγόριθμος μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να περιοριστεί ο υπολογισμός των ελαχίστων αποστάσεων στο ελάχιστο δυνατό υπερσύνολο του βέλτιστου συνόλου κελιών. Είναι σαφές ότι τα κελιά του βέλτιστου συνόλου εκτείνονται σε μια συμπαγή περιοχή επιρροής (*influence region*) γύρω από το σημείο και το κελί του ερωτήματος, αφού καλύπτουν (στο ελάχιστο δυνατό) τον κύκλο του ερωτήματος με ακτίνας όση η με την απόσταση του k -στού γείτονα. Η έκταση της περιοχής επιρροής εξαρτάται από



Σχήμα 5.9: Σπειροειδής διαμέριση

την τιμή του k και από το πλήθος των αντικειμένων στα αντίστοιχα κελιά. Όσο περισσότεροι γείτονες αναζητούνται, τόσο μεγαλύτερη έκταση είναι πιθανό να έχει η περιοχή. Επιπλέον, όσο μικρότερη είναι η πυκνότητα των κινούμενων αντικειμένων στη γύρω περιοχή, τόσο μεγαλύτερη έκταση είναι πιθανό να έχει η περιοχή επιρροής για να βρεθούν k γείτονες. Παράλληλα, όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός κατάτμησης του πλέγματος, τόσο καλύτερα το βέλτιστο σύνολο κελιών προσεγγίζει τον κύκλο του ερωτήματος μειώνοντας το πλήθος των εξεταζόμενων αντικειμένων. Ωστόσο, η επιλογή υπερβολικής κατάτμησης του χώρου ενέχει τον κίνδυνο τα μικρότερης έκτασης κελιά να περιέχουν λίγα ή καθόλου αντικείμενα με αποτέλεσμα το κόστος υπολογισμού της ελάχιστης απόστασης του κελιού να καταντάει μεγαλύτερο από το κόστος της λεπτομερούς εξέτασής του.

Η μέθοδος CPM αναζητεί τους εγγύτερους γείτονες αρχικά στο κελί του ερωτήματος και στη συνέχεια στα τριγύρω κελιά εφαρμόζοντας σπειροειδή διαμέριση, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.9. Η περιοχή τριγύρω από το κελί του ερωτήματος διαμερίζεται σε λωρίδες κελιών, οι οποίες ορίζονται από την κατεύθυνσή τους και την τιμή του επιπέδου τους (λ.χ. D_0, D_1, D_2, D_3 κτλ), όπως φαίνεται στο σχήμα. Η μέθοδος χρησιμοποιεί την ελάχιστη απόσταση μιας λωρίδας από το σημείο του ερωτήματος, η οποία είναι μικρότερη από τις αντίστοιχες ελάχιστες αποστάσεις των κελιών που περιλαμβάνει. Έτσι, η μέθοδος επιτυγχάνει τη μαζική οριοθέτηση της περιοχής επιρροής του βέλτιστου συνόλου κελιών και σαφώς τη μείωση του πλήθους υπολογισμών των ελάχιστων αποστάσεων. Για παράδειγμα, αν η ελάχιστη απόσταση της λωρίδας R_2 είναι μεγαλύτερη (ή ίση) από την απόσταση του k -οστού εγγύτερου γείτονα, τότε οι ελάχιστες αποστάσεις όλων των περιεχόμενων κελιών στη λωρίδα είναι μεγαλύτερες (ή ίσες) από την απόσταση του k -οστού εγγύτερου γείτονα. Συνεπώς, κανένα από τα κελιά της λωρίδας R_2 δεν ανήκει στο βέλτιστο σύνολο. Κατ' επέκταση η περιοχή επιρροής του οριοθετείται από την πλευρά της λωρίδας πλησιέστερα στο ερώτημα (η πλευρά στην αντίθετη κατεύθυνση της λωρίδας) και προφανώς η αναζήτηση εγγύτερων γειτόνων προς αυτή την κατεύθυνση τερματίζεται. Διαφορετικά, αν η ελάχιστη απόσταση της λωρίδας είναι μικρότερη από την απόσταση του k -οστού εγγύτερου γείτονα, τότε τουλάχιστον ένα κελί της ανήκει στο βέλτιστο σύνολο κελιών και πρέπει να εξεταστεί λεπτομερώς. Σε αυτή την περίπτωση, η λωρίδα διασπάται στα περιεχόμενα κελιά της, των οποίων υπολογίζεται η ελάχιστη απόσταση ώστε να εξακριβωθεί ποια ανήκουν στο βέλτιστο σύνολο και πρέπει να εξεταστούν λεπτομερώς. Η διαδικασία εξέτασης των ελάχιστων αποστάσεων των λωρίδων και των κελιών τους

γίνεται δυναμικά με τη χρήση του σωρού ελαχίστων, καθώς ταυτόχρονα ανανεώνεται το σύνολο των εγγύτερων γειτόνων. Ο σωρός ελαχίστων δέχεται τις ελάχιστες αποστάσεις λωρίδων και κελιών και τις επιστρέφει δυναμικά σε αύξουσα σειρά απόστασης επιταχύνοντας την αποτίμηση του ερωτήματος.

5.3.4 Υλοποίηση σπειροειδούς διαμέρισης

Η υλοποίηση της σπειροειδούς διαμέρισης ανάγεται καθαρά στον τρόπο του χειρισμού των λωρίδων της. Η αναπαράσταση μιας λωρίδας κελιών επιτυγχάνεται με την κωδικοποίηση των τεσσάρων δυνατών κατευθύνσεών της, συνοδευόμενη από την τιμή του επιπέδου της. Ένας ακέραιος των τεσσάρων *byte* αρκεί για τις δύο τιμές κατεύθυνσης και επιπέδου. Έτσι, οι καταχωρήσεις του σωρού είναι πλειάδες σταθερού μεγέθους και αποτελούνται από έναν ακέραιο και ένα αριθμό κινητής υποδιαστολής. Ο ακέραιος, ανάλογα με το πρόσημό του και την τιμή του, είναι δυνατόν να συμβολίζει λωρίδα ή κελί. Ο αριθμός κινητής υποδιαστολής αναπαριστά την αντίστοιχη ελάχιστη απόσταση. Μια ειδική ρουτίνα διεξάγει τον έλεγχο ύπαρξης μια λωρίδας συγκεκριμένης κατεύθυνσης και επιπέδου. Αν το σημείο του ερωτήματος βρίσκεται πλησίον των ορίων του χώρου, τότε είναι δυνατόν κάποια λωρίδα να εκτείνεται ολόκληρη εκτός αυτού, οπότε δεν υφίσταται. Η διάσπαση μιας λωρίδας στα περιεχόμενα κελιά της, εφόσον αυτή εκτείνεται εντός του χώρου, επιτελείται από μια άλλη ρουτίνα, η οποία ουσιαστικά υπολογίζει τις ταυτότητες των δύο κελιών που είναι τα άκρα της. Ομοίως, αν το σημείο του ερωτήματος βρίσκεται πλησίον των ορίων του χώρου, είναι δυνατόν το ένα ή και τα δύο άκρα κάποιας λωρίδας να εκτείνονται εκτός αυτού. Σε αυτή την περίπτωση τα άκρα της, ως ταυτότητες κελιών, διαφοροποιούνται με αυτά του σχήματος 5.9. Η κωδικοποίηση των δύο ρουτινών προέκυψε μια αρκετά επίπονη διαδικασία δεδομένων των δυσκολιών της υλοποίησης της σπειροειδούς διαμέρισης πλησίον των ορίων του χώρου.

Ο υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης μια λωρίδας κελιών εκτελείται με αναδρομικό τύπο. Η ελάχιστη απόσταση μιας λωρίδας μηδενικού επιπέδου, δεν είναι παρά η απόσταση του σημείου του ερωτήματος από την αντίστοιχη πλευρά του κελιού του προς την κατεύθυνση της λωρίδας. Για παράδειγμα, η ελάχιστη απόσταση της U_0 είναι η απόσταση του σημείου q από την άνω πλευρά του κελιού q_c , δηλαδή ίση με $dist(x_q, uy_{q_c}) = (x_q - uy_{q_c})^2$, όπου uy_{q_c} η τεταγμένη της άνω δεξιά κορυφής του κελιού (βλ τύπους υπολογισμού των I_x, I_y, u_x, u_y ενός κελιού στην υποενότητα 5.3.2). Για τη λωρίδα κατεύθυνσης Dir και επιπέδου Ivl συμβολίζουμε Dir_{Ivl} και την ελάχιστη απόστασή της $mindist(Dir_{Ivl})$. Τότε, $mindist(Dir_{Ivl}) = mindist(Dir_{Ivl-1}) + d$. Θεωρώντας τη συνάρτηση ευκλείδειας απόστασης, η ποσότητα d θα ήταν ίση με δ , δηλαδή ίση με τη διάσταση του κελιού, αφού κάθε λωρίδα έχει πάχος όσο η διάσταση ενός κελιού. Στην περίπτωση της συνάρτησης του τετραγώνου της απόστασης, η ποσότητα d διαφοροποιείται και μετά από κατάλληλες αλγεβρικές πράξεις προκύπτει $d = \delta(2 \cdot Ivl \cdot \delta + 2 \cdot mindist(Dir_0))$, όπου η $mindist(Dir_0)$ υπολογίζεται με βάση τις αποστάσεις του q από τις πλευρές του κελιού του (q_c). Συμβολίζουμε με E_{Ivl} την ελάχιστη απόσταση μιας λωρίδας, υπολογισμένη με την ευκλείδεια συνάρτηση απόστασης και με Δ_{Ivl} την ελάχιστη απόσταση της ίδιας λωρίδας, υπολογισμένη με τη συνάρτηση του τετραγώνου της ευκλείδειας ($\Delta_{Ivl} = E_{Ivl}^2$). Τότε, ισχύουν οι εξής ισοδυναμίες:

$$\begin{aligned} E_{Ivl} = E_{Ivl-1} + \delta &\Leftrightarrow E_{Ivl}^2 = (E_{Ivl-1} + \delta)^2 \Leftrightarrow E_{Ivl}^2 = E_{Ivl-1}^2 + 2 \cdot E_{Ivl-1} \cdot \delta + \delta^2 \Leftrightarrow \Delta_{Ivl} = \Delta_{Ivl-1} + 2 \cdot E_{Ivl-1} \cdot \delta + \delta^2 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \Delta_{Ivl} = \Delta_{Ivl-1} + 2 \cdot [E_0 + (Ivl-1) \cdot \delta] \cdot \delta + \delta^2 \Leftrightarrow \quad (\text{επειδή ισχύει } E_{Ivl-1} = E_0 + (Ivl-1) \cdot \delta) \\ \Delta_{Ivl} &= \Delta_{Ivl-1} + \delta(2 \cdot Ivl \cdot \delta + 2 \cdot E_0) \end{aligned}$$

Πράγματι λοιπόν $d = \delta(2 \cdot Ivl \cdot \delta + 2 \cdot mindist(Dir_0))$.

5.3.5 Ο κύριος αλγόριθμος της μεθόδου CPM

Η εξαρχής αποτίμηση ενός ερωτήματος εγγύτερων γειτόνων (αλγόριθμος *NN_Computation*) ξεκινάει με τις απαραίτητες αρχικοποιήσεις του k -συνόλου εγγύτερων γειτόνων (k -*NN_set*) και ενός σωρού ελαχίστων (*heap*). Σε πρώτη φάση εκτελείται η επεξεργασία του κελιού του ερωτήματος. Τα κινούμενα αντικείμενα (p) του κελιού εισάγονται στο k -*NN_set*: $Insert(p, dist(x_p, y_p))$. Στη συνέχεια εισάγονται στο σωρό οι λωρίδες μηδενικού επιπέδου για κάθε μια από τις τέσσερις κατευθύνσεις μαζί με τις ελάχιστες αποστάσεις τους ως κλειδιά.

Η διαδικασία συνεχίζεται με μια ακολουθία από εξαγωγές και εισαγωγές λωρίδων και κελιών στο σωρό με κλειδί την αντίστοιχη ελάχιστη απόστασή τους. Η λειτουργία και οι ιδιότητες του σωρού παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιτάχυνση της διαδικασίας. Η εξαγωγή μιας καταχώρησης από το σωρό ελαχίστων είναι δυνατόν να είναι λωρίδα είτε κελί και συνοδεύεται από την αντίστοιχη ελάχιστη απόσταση, η οποία είναι η ελάχιστη από τις αποστάσεις όλων των άλλων καταχωρήσεων του σωρού. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι πολύ σημαντικό, διότι αν η εξαγόμενη απόσταση συγκριθεί στη συνέχεια με την απόσταση του k -στού εγγύτερου γείτονα και βρεθεί μεγαλύτερη (ή ίση), τότε οι ελάχιστες αποστάσεις των λοιπών καταχωρήσεων του σωρού θα είναι επίσης μεγαλύτερες από αυτή του k -στού εγγύτερου γείτονα. Επομένως, όχι μόνο προκύπτει ότι η εξαγόμενη καταχώρηση δεν απαιτείται να οδηγηθεί προς επεξεργασία (αν είναι κελί) ή προς διάσπαση στα κελιά της (αν είναι λωρίδα), αλλά κυρίως δεν απαιτείται καμία περαιτέρω επεξεργασία οποιασδήποτε άλλης καταχώρησης του σωρού. Επομένως, τα κελιά, που έχουν εξεταστεί μέχρι εκείνη τη στιγμή, αποτελούν το βέλτιστο σύνολο. Η περιοχή επιρροής οριοθετείται αυτόματα για όλες τις κατευθύνσεις και το ζητούμενο σύνολο εγγύτερων γειτόνων έχει οριστικοποιηθεί.

Ο αλγόριθμος *NN_Computation* συνεχίζει ως εξής:

- i. Εφόσον ο σωρός δεν είναι κενός, εξάγεται η επόμενη καταχώρηση. Διαφορετικά ο αλγόριθμος τερματίζεται.
- ii. Αν το k -*NN_set* περιέχει k καταχωρήσεις και η ελάχιστη απόσταση της εξαγόμενης καταχώρησης είναι μεγαλύτερη από την απόσταση του k -στού εγγύτερου γείτονα, ο αλγόριθμος τερματίζεται.
- iii. Διαφορετικά, αν η εξαγόμενη καταχώρηση είναι κελί, τότε αυτό οδηγείται προς επεξεργασία, δηλαδή εισαγωγή των αντικειμένων του στο k -*NN_set*.
- iv. Αν η εξαγόμενη καταχώρηση είναι λωρίδα, τότε αυτή διασπάται στα αντίστοιχα κελιά. Κάθε κελί εισάγεται στο σωρό με την ελάχιστη απόστασή του. Επιπλέον, στο σωρό εισάγεται η αντίστοιχη λωρίδα του επόμενου επιπέδου με ελάχιστη απόσταση αυτή της εξαγόμενης, αυξημένη κατά την κατάλληλη ποσότητα d .
- v. Επιστροφή στο βήμα (i).

5.3.6 Επεξεργασία στατικών ερωτημάτων

Ο αλγόριθμος *NN_Computation* υπολογίζει εξαρχής ένα κινούμενο ερώτημα από το μηδέν. Ωστόσο, είναι δυνατόν να επεκταθεί (*NN_Recomputation*) ώστε να υπολογίζει στατικά ερωτήματα με βελτιωμένη απόδοση. Η ιδέα είναι ότι αν το σημείο ενός ερωτήματος παραμείνει σταθερό, τότε οι ελάχιστες αποστάσεις του από όλα τα κελιά επίσης παραμένουν σταθερές. Συνεπώς, δεν είναι απαραίτητο να επαναληφθεί η εφαρμογή της σπειροειδούς διαμέρισης από την αρχή.

Ο αλγόριθμος ξεκινάει κατευθείαν την επεξεργασία των κελιών του βέλτιστου συνόλου, τα οποία υπολογίστηκαν από το προηγούμενο χρονόσημο.

- Σε περίπτωση που το σύνολο των k εγγύτερων γειτόνων δεν οριστικοποιηθεί ή συμπληρωθεί μετά το πέρας της επεξεργασίας όλων των κελιών του βέλτιστου συνόλου, τότε ο αλγόριθμος συνεχίζει την εφαρμογή της σπειροειδούς διαμέρισης από τη φάση που είχε διακοπεί στο προηγούμενο χρονόσημο. Η περαιτέρω επέκταση της σπειροειδούς διαμέρισης συντελεί στη διεύρυνση της περιοχής επιρροής και του βέλτιστου συνόλου κελιών. Το νέο βέλτιστο σύνολο κελιών είναι υπερσύνολο του παλαιού, ενώ η νέα περιοχή επιρροής περικλείει την παλαιά.
- Διαφορετικά, αν το σύνολο των k εγγύτερων γειτόνων οριστικοποιηθεί πριν το πέρας (ή ακριβώς στο πέρας) της επεξεργασίας όλων των κελιών του παλαιού βέλτιστου συνόλου, τότε δεν είναι απαραίτητη η περαιτέρω αναζήτηση από το σωρό. Η περιοχή επιρροής συρρικνώνεται (ή παραμένει ίδια), ενώ ανάλογα αποτελέσματα προκαλούνται στο βέλτιστο σύνολο κελιών.
- Αν στο επόμενο χρονόσημο το ερώτημα εξακολουθεί να παραμένει στάσιμο, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία με τις ανανεωμένες καταστάσεις της περιοχής επιρροής και του βέλτιστου συνόλου.
- Στο μελλοντικό χρονόσημο κατά το οποίο η θέση του ερωτήματος θα μεταβληθεί, ο αλγόριθμος δεν είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί, διότι οι ελάχιστες αποστάσεις λαμβάνουν νέες τιμές. Έτσι, η αποτίμηση του ερωτήματος γίνεται από εκ νέου με τη χρήση του βασικού αλγορίθμου.

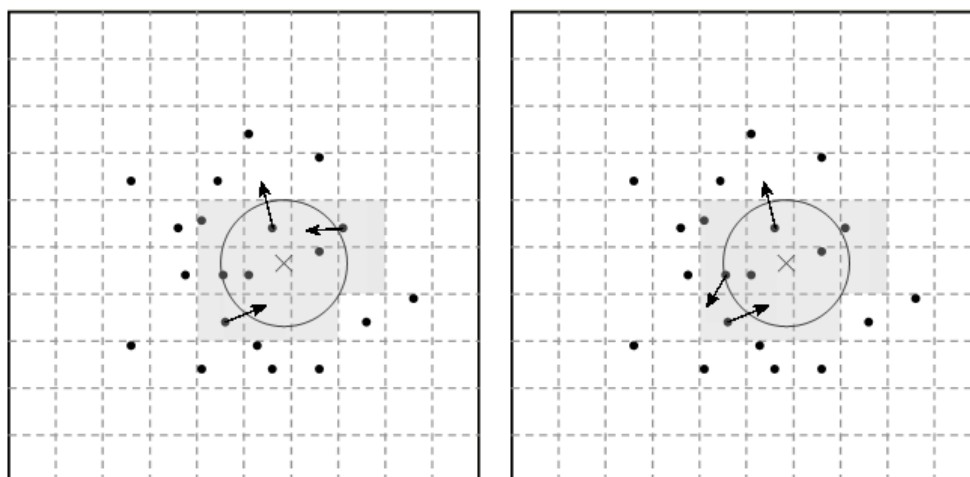
Είναι σαφές ότι η χρήση του αλγορίθμου *NN_Recomputation* ενέχει σαφώς αυξημένες απαιτήσεις μνήμης σε σχέση με τον *NN_Computation*. Η τήρηση της προηγούμενης φάσης της σπειροειδούς διαμέρισης και του βέλτιστου συνόλου κελιών υπαγορεύουν τη διατήρηση του σωρού και μιας επιπλέον λίστας (*visit_list*) ανά ερώτημα. Αντίθετα, ο βασικός αλγόριθμος επεξεργάζεται τα ερωτήματα ένα προς ένα αγνοώντας προηγούμενα αποτελέσματα. Έτσι, απαιτείται μόνο μια δομή σωρού να είναι ενεργή για το σύνολο των ερωτημάτων.

Στη λίστα *visit_list* καταγράφεται το βέλτιστο σύνολο κελιών μαζί με τις αντίστοιχες ελάχιστες αποστάσεις. Η αρχικοποίησή της γίνεται κατά την εκτέλεση του *NN_Computation* (γεγονός που υπαγορεύει την τροποποίησή του). Όταν το βέλτιστο σύνολο επεκτείνεται, οι νέες καταχωρήσεις κελιών και αποστάσεων εισάγονται στο τέλος της λίστας. Αντίθετα, όταν το βέλτιστο σύνολο συρρικνώνεται, δεν αφαιρούνται οι αντίστοιχες καταχωρήσεις από το τέλος της για λόγους απόδοσης. Είναι σαφές ότι στη λίστα περιέχονται τα κελιά του βέλτιστου συνόλου σε αύξουσα σειρά ελάχιστης απόστασης από το σημείο του ερωτήματος. Έτσι, ο αλγόριθμος ξεκινάει την επεξεργασία των κελιών σαρώνοντας τη λίστα. Εάν μετά το πέρας της δεν έχει βρεθεί k -στός εγγύτερος γείτονας του οποίου η απόσταση από το ερώτημα να είναι μικρότερη από την ελάχιστη απόσταση κάποιου κελιού (οριστικοποίηση k -συνόλου), τότε η αναζήτηση συνεχίζεται στο σωρό.

Η τροποποίηση του αλγορίθμου *NN_Computation* απαιτείται στο βήμα (iii), κατά την οποία η επεξεργασία των αντικειμένων ενός κελιού συνοδεύεται από την εισαγωγή του κελιού και της ελάχιστης απόστασής του στο τέλος της *visit_list*. Συμβολίζουμε τον τροποποιημένο αλγόριθμο με *NN_Computation2*

Ο αλγόριθμος *NN_Recomputation* είναι ο εξής:

- i. Επεξεργασία του κελιού του ερωτήματος.
- ii. Αν η σάρωση της *visit_list* έχει εξαντληθεί, τότε μετάβαση στο βήμα (vi).
- iii. Διαφορετικά, αν το k -*NN_set* περιέχει k καταχωρήσεις και το επόμενο κελί έχει ελάχιστη απόσταση μεγαλύτερη από τον k -στό εγγύτερο γείτονα, τότε ο αλγόριθμος τερματίζεται.
- iv. Επεξεργασία του επόμενου κελιού της *visit_list*.
- v. Επιστροφή στο βήμα (ii).



Σχήμα 5.10: Περιπτώσεις εισερχόμενων και εξερχόμενων αντικειμένων στον κύκλο

- vi. Εφόσον ο σωρός δεν είναι κενός, εξάγεται η επόμενη καταχώρησή του. Διαφορετικά, ο αλγόριθμος τερματίζεται.
- vii. Αν το k -NN_set περιέχει k καταχωρήσεις και η ελάχιστη απόσταση της εξαγόμενης καταχώρησης είναι μεγαλύτερη από την απόσταση του k -οστού εγγύτερου γείτονα, ο αλγόριθμος τερματίζεται.
- viii. Διαφορετικά, αν η εξαγόμενη καταχώρηση είναι κελί, τότε αυτό οδηγείται προς επεξεργασία. Ακολουθεί η εισαγωγή του κελιού στη *visit_list*.
- ix. Αν η εξαγόμενη καταχώρηση είναι λωρίδα, τότε αυτή διασπάται στα αντίστοιχα κελιά. Κάθε κελί εισάγεται στο σωρό με την ελάχιστη απόστασή του. Επιπλέον, στο σωρό εισάγεται η αντίστοιχη λωρίδα του επόμενου επιπέδου με ελάχιστη απόσταση αυτή της εξαγόμενης, αυξημένη κατά την κατάλληλη ποσότητα d .
- x. Επιστροφή στο βήμα (vi).

Η βελτίωση της απόδοσης είναι βέβαιη, ωστόσο δεν αναμένεται ιδιαίτερα σημαντική, ειδικά για μεγάλες τιμές του k .

5.3.7 Διαχείριση ενημερώσεων για στατικά ερωτήματα

Η μέθοδος επιτρέπει επίσης την επεξεργασία στατικών ερωτημάτων παρακολουθώντας τις ενημερώσεις των θέσεων των κινούμενων αντικειμένων (*Update handling*). Η αποτίμηση των στατικών ερωτημάτων επιχειρείται με τη θεώρησή τους ως ερωτήματα κυκλικής περιοχής, σταδιακής αποτίμησης, όπου η περιοχή είναι ο κύκλος με ακτίνα την απόσταση του k -οστού εγγύτερου γείτονα. Η ιδέα της τεχνικής είναι ότι το σύστημα παρακολουθεί τις ανανεώσεις των κινούμενων αντικειμένων ώστε να εντοπίσει τα αντικείμενα που εισέρχονται και εξέρχονται του κύκλου του ερωτήματος. Αν τα εισερχόμενα αντικείμενα είναι περισσότερα από τα εξερχόμενα, τότε ο κύκλος περικλείει m αντικείμενα με $m > k$. Το νέο σύνολο k εγγύτερων γειτόνων υπολογίζεται από τα m αντικείμενα εντός του κύκλου. Διαφορετικά, ο κύκλος δεν περικλείει αρκετά αντικείμενα και έτσι η αποτίμηση του ερωτήματος ανατίθεται στον αλγόριθμο *NN_Recomputation*. Στο σχήμα 5.10 απεικονίζονται οι δύο περιπτώσεις για ένα 4-NN ερώτημα.

Οι περιοχές επιρροής των ερωτημάτων κατακερματίζονται στο πλέγμα και έτσι για κάθε κελί διατηρείται μια λίστα κώδων, οι οποίοι περιέχουν τις ταυτότητες των ερωτημάτων των οποίων η περιοχή επιρροής επικαλύπτει το κελί. Όταν η έκταση της

περιοχής επιρροής μεταβάλλεται, η μέθοδος ενημερώνει κατάλληλα τις καταχωρήσεις στις λίστες κάδων, με βάση το γεγονός ότι ανά πάσα στιγμή η *visit_list* περιέχει ένα υπερσύνολο των κελιών της περιοχής επιρροής.

- Αν τα εισερχόμενα αντικείμενα στον κύκλο είναι περισσότερα από τα εξερχόμενα, τότε η ακτίνα του κύκλου, δηλαδή η απόσταση του νέου k -στού εγγύτερου γείτονα, μειώνεται με αποτέλεσμα την πιθανή συρρίκνωση της περιοχής επιρροής. Τότε, η ταυτότητα του ερωτήματος αναζητείται και αφαιρείται από τα πιθανόν εξαιρούμενα κελιά, οι ταυτότητες των οποίων εντοπίζονται στη *visit_list*. Ο εντοπισμός διεξάγεται με βάση την παλαιά και τη νέα ακτίνα του κύκλου. Τα εξαιρούμενα κελιά είναι αυτά των οποίων οι ελάχιστες αποστάσεις είναι μεγαλύτερες από τη νέα ακτίνα του κύκλου και μικρότερες από την παλαιά.
- Διαφορετικά, η αποτίμηση του ερωτήματος δεν είναι δυνατόν να γίνει με αυτό τον τρόπο και έτσι προωθείται στον αλγόριθμο *NN_Recomputation*. Τότε, η περιοχή επιρροής διαγράφεται εντελώς από το πλέγμα, δηλαδή το ερώτημα αφαιρείται από όλα τα κελιά, τα οποία στη *visit_list* έχουν ελάχιστη απόσταση μικρότερη από την παλαιά ακτίνα του κύκλου. Έτσι, ο σχηματισμός της νέας περιοχής επιρροής γίνεται εκ νέου από τον αλγόριθμο *NN_Recomputation*. Είναι σαφές ότι τόσο ο *NN_Recomputation*, όσο και ο *NN_Computation* πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα ώστε μετά την επεξεργασία κάποιου κελιού, να εισάγουν την ταυτότητα του αντίστοιχου ερωτήματος στην αντίστοιχη λίστα κάδων του κελιού.

5.4 Πειραματικά αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα αξιολογείται πειραματικά η μέθοδος για την αποτίμηση πολλαπλών ερωτημάτων με βάση τις προδιαγραφές του συστήματος, οι οποίες περιγράφονται στην ενότητα 3.5.

5.4.1 Πειραματικές συνθήκες

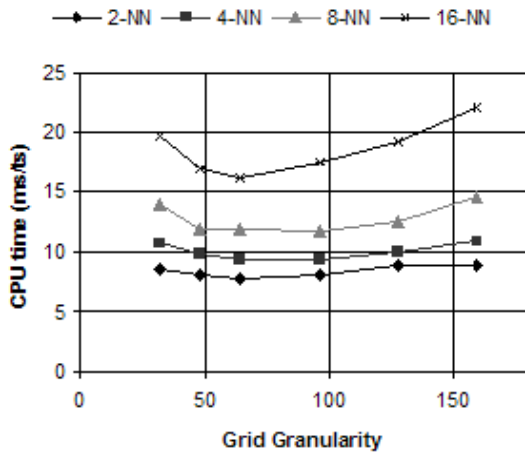
Όπως και για τα ερωτήματα περιοχής στην ενότητα 4.5, οι δομές και οι αλγόριθμοι της τεχνικής υλοποιήθηκαν σε γλώσσα C++ και τα πειράματα εκτελέστηκαν στο λειτουργικό σύστημα SUSE Linux 9.0 σε προσωπικό υπολογιστή AMD Athlon 64 3200+ (2GHz) με μνήμη 266MHz. Το πειραματικό σύνολο δεδομένων αποτελείται από 100000 κινούμενα αντικείμενα και 10000 κινούμενα ερωτήματα, τα οποία παρακολουθούνται για 200 χρονικές στιγμές σε τροχιές που προσομοιώνουν την κυκλοφοριακή κίνηση στο οδικό δίκτυο της Αθήνας. Έγιναν πειράματα για τρεις παραμέτρους της εφαρμογής:

- Πλήθος αντικειμένων *Obj* (10k, 20k, 50k, 100k).
- Πλήθος ερωτημάτων *Q* (1k, 2k, 5k, 10k).
- Αναζητούμενοι k εγγύτεροι γείτονες *NN* (2, 4, 8, 16).

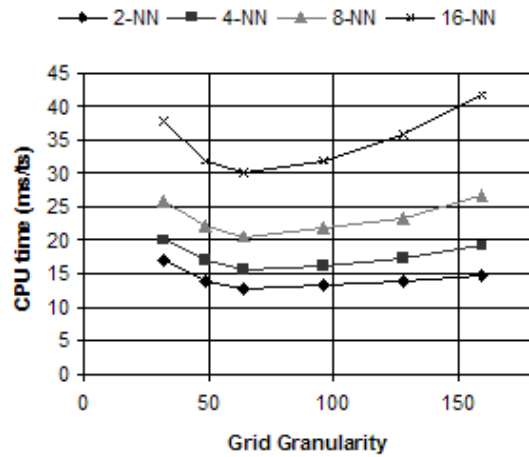
Αξίζει να τονιστεί ότι κάθε αντικείμενο μεταβάλλει τη θέση του κάθε χρονική στιγμή (100% agility).

5.4.2 Αναζήτηση βέλτιστου βαθμού κατάτμησης

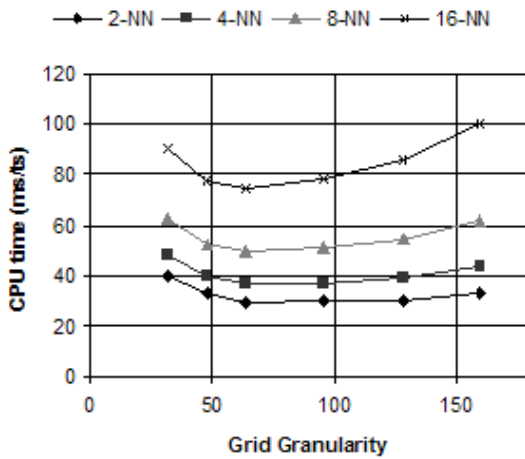
Η επιλογή του βαθμού κατάτμησης του πλέγματος αποτελεί σημαντική απόφαση για τις επιδόσεις του αλγορίθμου. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν συγκεκριμένα κριτήρια εύρεσής του, η επιλογή του μπορεί μόνο να στηριχτεί σε πειραματικά δεδομένα και εμπειρικούς κανόνες, που εξάγονται από αυτά. Επιπλέον, η βέλτιστη τιμή του, με την



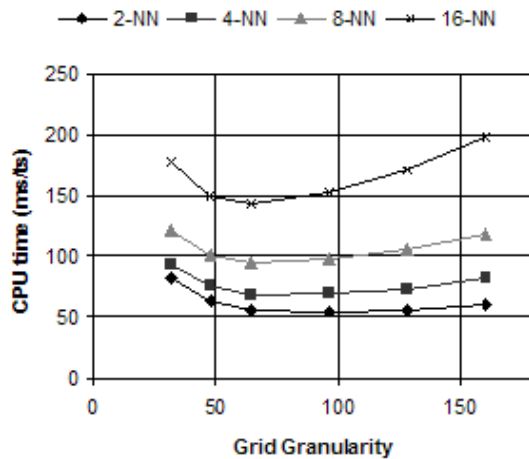
Σχήμα 5.11: 10k Obj / 1k Q



Σχήμα 5.12: 10k Obj / 2k Q



Σχήμα 5.13: 10k Obj / 5k Q

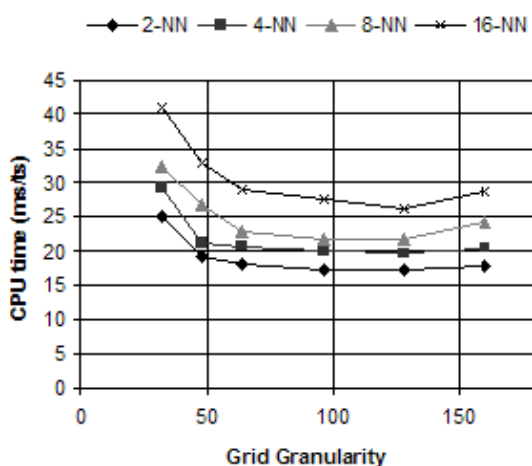


Σχήμα 5.14: 10k Obj / 10k Q

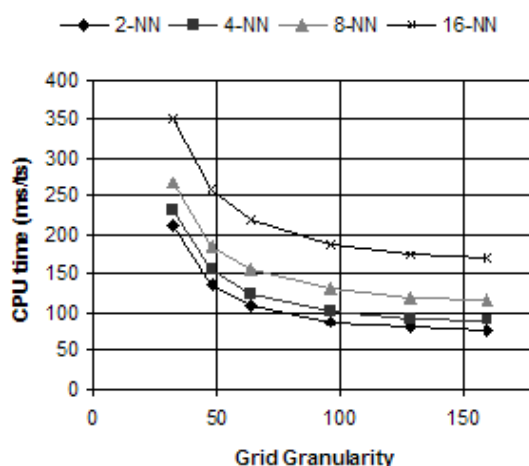
αυστηρή έννοια, δεν είναι δυνατόν να ορισθεί με σιγουριά σε ένα πραγματικό σύστημα, του οποίου οι παράμετροι είναι δυνατόν να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του. Συνήθως, αναζητούμε ένα εύρος τιμών του βαθμού κατάτμησης, το οποίο να είναι ικανοποιητικό για τις συνήθεις συνδήςκες λειτουργίας του συστήματος. Ακολουθώντας, επιχειρούμε να εξετάσουμε την επιρροή των παραμέτρων του συστήματος στην τιμή του βαθμού κατάτμησης, ώστε στη συνέχεια με βάση αυτή να μελετήσουμε τη συμπεριφορά των ερωτημάτων.

(i) Επίδραση του πλήθους αναζητούμενων εγγύτερων γειτόνων

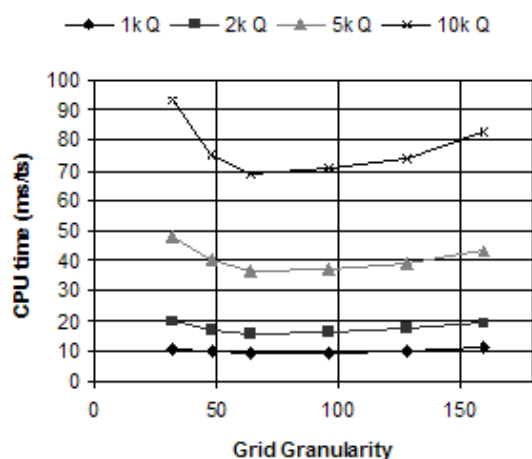
Στα διαγράμματα 5.11 έως 5.14 απεικονίζεται ο χρόνος επεξεργασίας ανά χρονόσημο συναρτήσει του βαθμού κατάτμησης για διάφορες περιπτώσεις αναλογίας πλήθους αντικειμένων και ερωτημάτων. Παρατηρείται ότι το πλήθος των αναζητούμενων εγγύτερων γειτόνων (NN) δεν επηρεάζει καθόλου την καλύτερη τιμή του βαθμού κατά-



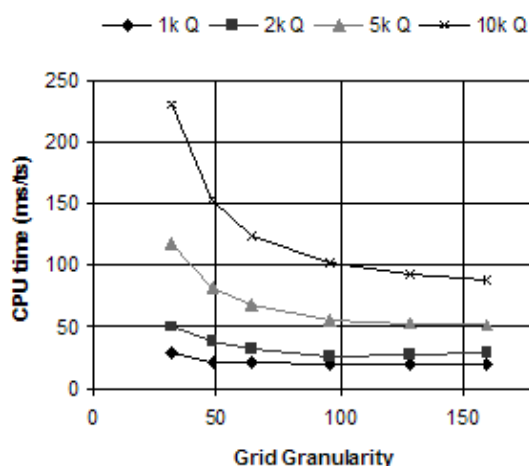
Σχήμα 5.15: 50k Obj / 1k Q



Σχήμα 5.16: 50k Obj / 10k Q



Σχήμα 5.17: 10k Obj / 4NN



Σχήμα 5.18: 50k Obj / 4NN

τμησης. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει από τα διαγράμματα 5.15 και 5.16 για μεγαλύτερο πλήθος αντικειμένων.

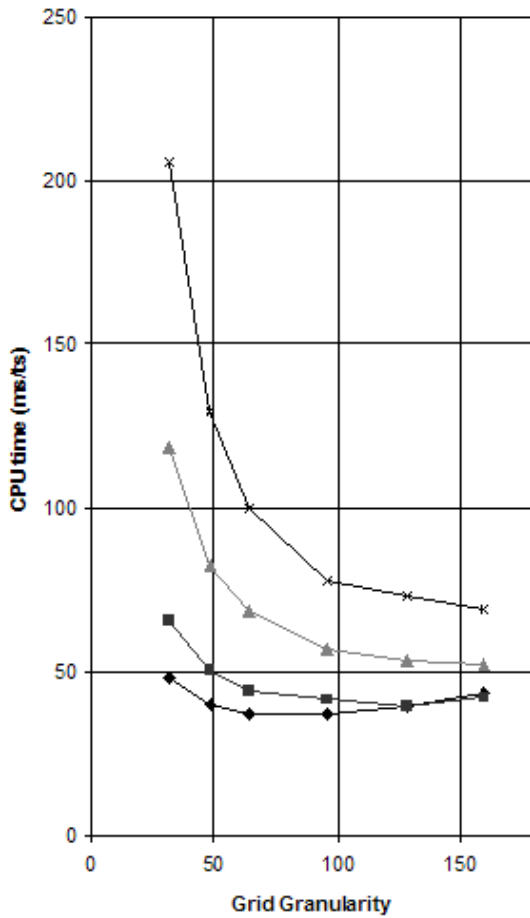
(ii) Επίδραση του πλήθους ερωτημάτων

Στα διαγράμματα 5.17 έως 5.18 απεικονίζεται ο χρόνος επεξεργασίας ανά χρονόσημο συναρτήσει του βαθμού κατάτμησης για διάφορες περιπτώσεις πλήθους ερωτημάτων. Παρατηρείται ότι το πλήθος ερωτημάτων (Q) δεν επηρεάζει καθόλου την καλύτερη τιμή του μεγέθους των κελιών.

(iii) Επίδραση του πλήθους αντικειμένων

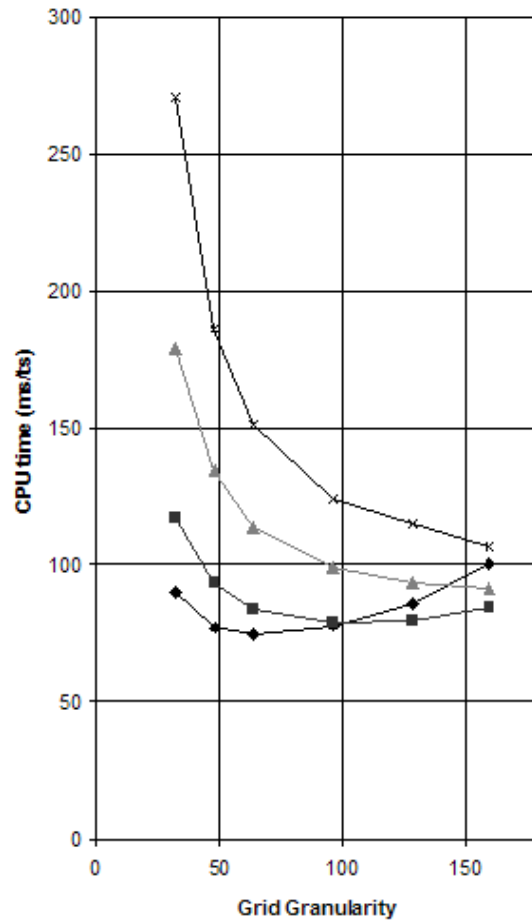
Στα διαγράμματα 5.19 έως 5.20 απεικονίζεται ο χρόνος επεξεργασίας ανά χρονόσημο συναρτήσει του βαθμού κατάτμησης για διάφορες περιπτώσεις πλήθους αντικει-

◆ 10k Obj ■ 20k Obj ▲ 50k Obj ✕ 100k Obj



Σχήμα 5.19:5k Q / 4NN

◆ 10k Obj ■ 20k Obj ▲ 50k Obj ✕ 100k Obj

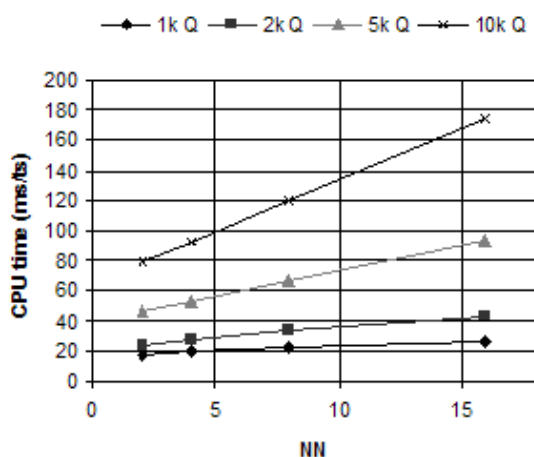


Σχήμα 5.20:5k Q / 16NN

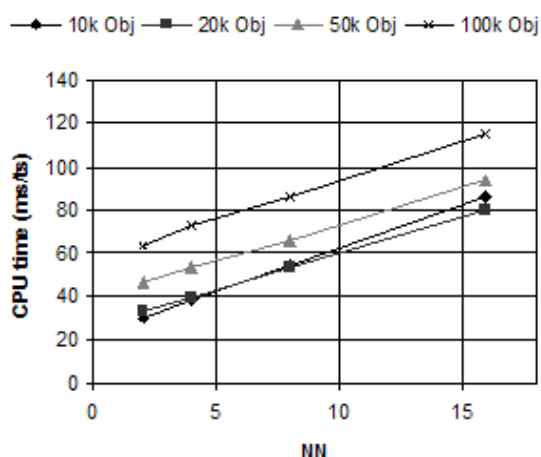
μένων. Παρατηρείται ότι το πλήθος αντικειμένων (Q) επηρεάζει την καλύτερη τιμή του βαθμού κατάτμησης. Για παράδειγμα, στο σχήμα 5.20 είναι εμφανές ότι για 10k αντικείμενα, καλύτερη κατάτμηση πλέγματος είναι 64×64 , ενώ για 20k αντικείμενα το ελάχιστο προκύπτει 96×96 . Για 100k αντικείμενα, η ενδεδειγμένη τιμή είναι ακόμα μεγαλύτερη από 160×160 .

(iv) Επιλογή βαθμού κατάτμησης

Το πλήθος των αναζητούμενων εγγύτερων γειτόνων (k -NN) αναμενόταν να επηρεάζει τον βαθμό κατάτμησης του χώρου, εφόσον επηρεάζει την ακτίνα του κύκλου και κατ' επέκταση την έκταση της περιοχής επιρροής του ερωτήματος. Ωστόσο, τα πειραματικά αποτελέσματα δεν ανέδειξαν κάτι τέτοιο, τουλάχιστον για το εύρος τιμών του k που εξετάστηκε (2, 4, 8, 16). Εξάλλου, με βάση την υπόθεση που έγινε για την υλοποίηση της δομής (k -NN_set), σε ένα πραγματικό σύστημα σπάνια θα υποβάλλονται ερωτήματα εγγύτερων γειτόνων με μεγάλες τιμές του k . Επιπλέον, το γεγονός ότι είναι δυνατόν να υποβάλλονται πολλαπλά ερωτήματα με κυμαινόμενες τιμές του k , οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το πλήθος των εγγύτερων γειτόνων δεν δείχνει να επηρεάζει την επιλογή του βαθμού κατάτμησης.



Σχήμα 5.21: 50k Obj



Σχήμα 5.22: 5k Q

Έτσι, ο βαθμός κατάτμησης επιλέγεται αποκλειστικά με βάση το πλήθος των αντικειμένων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αυξητική τάση του χρόνου επεξεργασίας ανά χρονόσημο (σε όλα τα διαγράμματα) διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα για αρκετά μεγαλύτερο βαθμό κατάτμησης από την βέλτιστη τιμή του, γεγονός που αναδεικνύει την ευστάθεια της μεθόδου και την καλή απόδοσή της σε ενδεχόμενη μη ομοιόμορφη κατανομή αντικειμένων. Επιλέγεται κατάτμηση 128x128, η οποία αποτελεί την αναμενόμενα καλύτερη επιλογή για πλήθος αντικειμένων από 10k έως 100k.

5.4.3 Αξιολόγηση παραμέτρων

(i) Αναζητούμενοι εγγύτεροι γείτονες

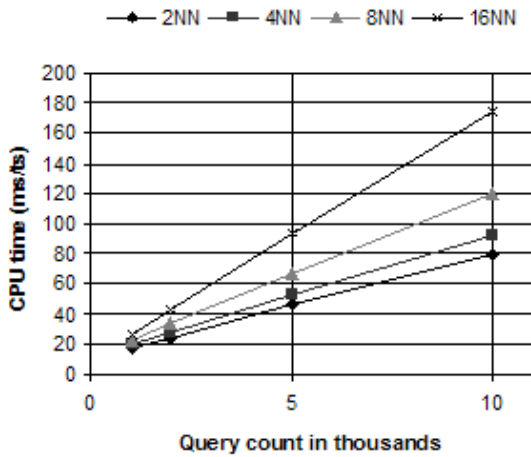
Από τα σχήματα 5.21 και 5.22 επιβεβαιώνεται ότι η αύξηση του k επιβαρύνει γραμμικά το σύστημα. Επιπλέον, η κλίση των ευθειών στα σχήματα εξαρτάται μόνο από το πλήθος ερωτημάτων. Η τομή των γραμμών στο σχήμα 5.22 για 10k και 20k αντικείμενα οφείλεται στο γεγονός ότι η κατάτμηση 128x128 δεν είναι τόσο καλή για 10k αντικείμενα.

(ii) Πλήθος ερωτημάτων

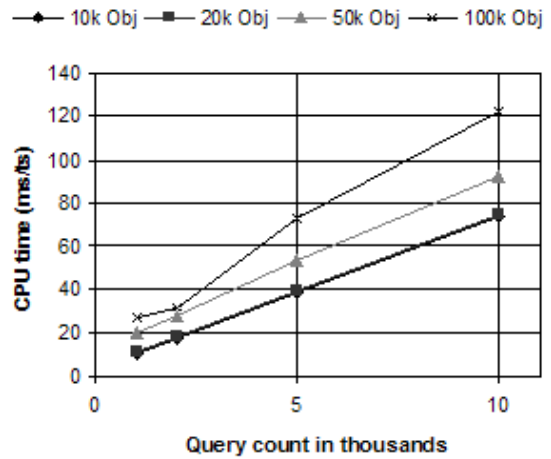
Όπως ήταν αναμενόμενο, κλιμάκωση του πλήθους των ενεργών ερωτημάτων επιβαρύνει γραμμικά το σύστημα (σχήματα 5.23 και 5.24). Η ταύτιση των γραμμών στο σχήμα 5.24 για 10k και 20k αντικείμενα οφείλεται στο γεγονός ότι η κατάτμηση 128x128 δεν είναι ενδεδειγμένη για 10k αντικείμενα.

(iii) Πλήθος αντικειμένων

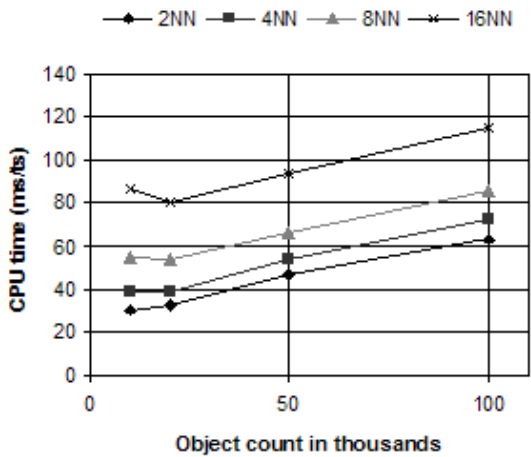
Όπως ήταν αναμενόμενο, κλιμάκωση του πλήθους των αντικειμένων επιβαρύνει γραμμικά το σύστημα (διαγράμματα 5.25 και 5.26).



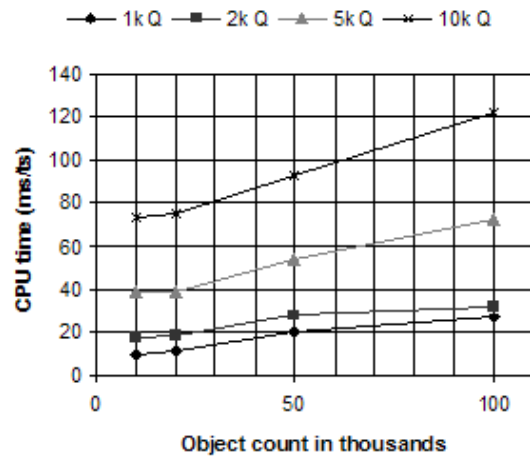
Σχήμα 5.23: 50k Obj



Σχήμα 5.24: 4NN



Σχήμα 5.25: 5k Q



Σχήμα 5.26: 4NN

(iv) Εξαγωγή ποσοτικών στοιχείων

Οι εξαιρετικές επιδόσεις της μεθόδου CPM αναδεικνύεται στα σχήματα 5.21 έως 5.26, όπου ο χρόνος επεξεργασίας ανά χρονόσημο δεν ξεπερνάει τα 180ms για κάθε περίπτωση τιμών των παραμέτρων. Από το σχήμα 5.26 προκύπτει ότι το σύστημα είναι σε θέση να εξυπηρετεί 100000 αντικείμενα και 10000 ερωτήματα μέσω φόρτου αντίστοιχου με αυτό 4 αναζητούμενων εγγύτερων γειτόνων για περίοδο δειγματοληψίας περίπου 0.12 δευτερόλεπτα. Ανάγοντας αυτό το χρόνο στο 1 δευτερόλεπτο συμπεραίνεται ότι είναι δυνατόν το πλήθος των αντικειμένων είτε των ερωτημάτων να οκταπλασιαστεί.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Οι πρόσφατες ραγδαίες εξελίξεις στις τεχνολογίες εντοπισμού της γεωγραφικής θέσης αύξησαν το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη εφαρμογών παρακολούθησης κινούμενων αντικειμένων, γνωστές με το όνομα *Υπηρεσίες Εντοπισμού (Location Based Services)*. Οι χρήστες τέτοιων εφαρμογών αποστέλλουν τη θέση τους περιοδικά και είναι σε θέση να υποβάλλουν πολλαπλά ερωτήματα διαρκείας σε ένα κεντρικό επεξεργαστή, συνήθως ερωτήματα περιοχής ή εγγύτερων γειτόνων. Τα ερωτήματα περιοχής εντοπίζουν τους χρήστες που βρίσκονται εντός μιας προσδιορισμένης γεωγραφικής έκτασης, ενώ τα ερωτήματα εγγύτερων γειτόνων εντοπίζουν όσους χρήστες βρίσκονται πλησίον ενός συγκεκριμένου χρήστη. Τα ερωτήματα των δύο τύπων είναι δυνατόν να είναι κινούμενα: η έκταση ή/και το κέντρο των περιοχών μπορεί να μεταβάλλεται, ενώ ο χρήστης του οποίου αναζητούνται οι γείτονες μπορεί επίσης να κινείται. Οι δύο τύποι ερωτημάτων είναι αρκετά κοινά στη συντριπτική πλειοψηφία των αναγκών των εφαρμογών παρακολούθησης και απαιτείται να λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο, εφαρμοζόμενοι διαρκώς πάνω στο ρεύμα ενημερώσεων των θέσεων των χρηστών.

Το πλήρως δυναμικό μοντέλο τέτοιων συστημάτων διαφοροποιεί το χειρισμό τους από τις συμβατικές βάσεις δεδομένων, θέτοντας στόχους όπως:

- Η υποστήριξη ολόένα και μεγαλύτερου –ενδεχομένως κυμαινόμενου– πλήθους αντικειμένων και ερωτημάτων.
- Η συχνότερη καταγραφή των θέσεων των αντικειμένων με σκοπό τη μεγαλύτερη ακρίβεια στην τήρηση της τροχιάς τους.
- Η επεξεργασία ερωτημάτων σε πραγματικό χρόνο.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη κατάλληλων δομών και αλγορίθμων για την αποτίμηση ερωτημάτων περιοχής και εγγύτερων γειτόνων με τη μορφή αυτόνομων τελεστών στο ρεύμα με τις τρέχουσες θέσεις των αντικειμένων. Οι τελεστές αυτοί είναι ικανοί να αξιοποιούν μια διαμέριση του επιπέδου σε ένα κανονικό πλέγμα από κελιά όπου κατακερματίζεται το τρέχον στίγμα κάθε αντικειμένου, καθώς και

η περιοχή κάλυψης των αντίστοιχων ερωτημάτων. Από την μελέτη ζητημάτων σχεδίασης τέτοιων συστημάτων, προκύπτουν αξιοσημείωτες παρατηρήσεις:

i. Η επιλογή της τεχνικής του κατακερματισμού ως μεθόδου προσπέλασης, αποδείχτηκε ιδανική για τη διαρκή παρακολούθηση της θέσης των αντικειμένων.

Το σύνολο των εξυπηρετούμενων αντικειμένων αποστέλλουν το στίγμα τους περιοδικά, άρα η επιλεγείσα μέθοδος χωρικής προσπέλασης πρέπει να υποστηρίζει γρήγορες ενημερώσεις. Η τεχνική του κατακερματισμού υπερέρχει των ιεραρχικών μεθόδων ως προς το κόστος των ενημερώσεων λόγω της σύντομης αποτίμησης της συνάρτησης κατακερματισμού σε σχέση με την πολύπλοκη διάσχιση της ιεραρχικής δομής. Τόσο η απλή ενημέρωση των συντεταγμένων ενός αντικειμένου όσο και η μετάβασή του σε άλλο κελί επιτυγχάνονται σε σταθερό χρόνο, ανεξάρτητο από οποιαδήποτε άλλη παράμετρο. Αντίθετα, η διάσχιση της εκάστοτε ιεραρχικής μεθόδου έχει λογαριθμική πολυπλοκότητα ως προς το συνολικό πλήθος των αντικειμένων, καθώς ενδεχόμενες διασπάσεις και συγχωνεύσεις των κώδων τις επιβαρύνουν ακόμα περισσότερο. Έτσι, το τμήμα της διαμερίσης του χώρου με γνώμονα τα δεδομένα είναι οι χρονοβόρες ενημερώσεις. Ακόμα και η φαινομενικά καλύτερη συμπεριφορά των ιεραρχικών μεθόδων σε μη ομοιόμορφες κατανομές αντικειμένων δεν καταφέρνει να αντισταθμίσει το κόστος των ενημερώσεων.

ii. Οι δύο τεχνικές που υλοποιήθηκαν, αποτιμούν αποδοτικά κυμαινόμενο πλήθος ενεργών ερωτημάτων σε κυμαινόμενο πλήθος αντικειμένων (scalability).

Τόσο η τεχνική της από κοινού επεξεργασίας για την αποτίμηση ερωτημάτων περιοχής όσο και η μέθοδος CPM για την αποτίμηση ερωτημάτων εγγύτερων γειτόνων, χάριν της ευελιξίας του κατακερματισμού, υποστηρίζουν κυμαινόμενο πλήθος αντικειμένων και ερωτημάτων. Κάθε κύκλος επεξεργασίας εκτελείται αποκλειστικά στην κύρια μνήμη και ολοκληρώνεται σε δύο φάσεις. Στη φάση ενημερώσεων λαμβάνονται τα μηνύματα ενημέρωσης της θέσης των ενεργών αντικειμένων και ερωτημάτων μαζί με το τρέχον χρονόσημο. Στη φάση αποτιμήσεων ο κεντρικός επεξεργαστής αγνοεί τα αντικείμενα και ερωτήματα των οποίων το χρονόσημο δεν ταυτίζεται με το πρόσφατο. Έτσι, τα αντικείμενα που εισέρχονται στο σύστημα παραμένουν ενεργά εφόσον αποστέλλουν τη θέση τους σε κάθε χρονόσημο. Αντίστοιχα, τα ερωτήματα διαρκείας υποβάλλονται και αποτιμώνται διαρκώς εφόσον ενημερώνουν τακτικά για τη θέση τους.

iii. Οι επιδόσεις των αλγορίθμων μετρήθηκαν πειραματικά και ανέδειξαν την επάρκειά τους στον χειρισμό πολλαπλών ερωτημάτων διαρκείας σε σχέση με τους αντίστοιχους τετριμμένους.

Ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας μετρήθηκε γραμμικός συναρτήσεως του πλήθους τριών παραμέτρων: πλήθος αντικειμένων, πλήθος ερωτημάτων και φόρτος ερωτημάτων. Η τιμή του βαθμού κατάτμησης του πλέγματος επηρεάζει μη γραμμικά την επίδοση. Το βέλτιστο μέγεθος κελιών εξαρτάται μόνο από το πλήθος των αντικειμένων στις συνθήκες ενός πραγματικού συστήματος, όπου υποβάλλονται ερωτήματα κυμαινόμενου φόρτου. Ωστόσο, όταν ο βαθμός κατάτμησης έχει τη βέλτιστη τιμή του, η αύξηση του χρόνου επεξεργασίας παραμένει σε χαμηλά επίπεδα για αρκετά μεγάλο εύρος τιμών του πλήθους των αντικειμένων. Πέρα από αυτό το εύρος, είναι απαραίτητη η αναδιάρθρωση του πλέγματος σε κατάλληλο βαθμό κατάτμησης για να αντεπεξέλθει στο νέο πλήθος αντικειμένων.

iv. Οι δύο χωροχρονικοί τελεστές είναι δυνατόν να ολοκληρωθούν σε ένα ενιαίο μηχανισμό, αφού χρησιμοποιούν αποτελεσματικά το ίδιο πλέγμα κατάτμησης του χώρου.

Σαφώς, οι δύο χωροχρονικοί τελεστές είναι δυνατόν να λειτουργούν υπό το ίδιο πλέγμα, εφόσον ο βαθμός κατάτμησής του είναι ο ενδεδειγμένος. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το υπολογιστικό κόστος των ερωτημάτων εγγύτερων γειτόνων είναι σημαντικά χαμηλότερο από εκείνο των ερωτημάτων περιοχής. Έτσι, αν ληφθεί υπόψη η αναμενόμενη αναλογία πλήθους ερωτημάτων των δύο τύπων, είναι δυνατόν να επιλεγεί η ενδιάμεση βέλτιστη τιμή του βαθμού κατάτμησης.

Είναι σαφές ότι ένα τέτοιο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης ρευμάτων κινούμενων αντικειμένων θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε πρόσθετους τύπους ερωτημάτων:

- Ερωτήματα πυκνότητας (*density queries*) αναζητούν συμπαγείς περιοχές με πυκνότητα σημειακών δέσεων πάνω από ένα προσδιορισμένο κατώφλι.
- Ερωτήματα ανάστροφου εγγύτερου γείτονα (*reverse nearest neighbors*), αναζητώντας το αντικείμενο του οποίου εγγύτερος γείτονας είναι το αντικείμενο ενδιαφέροντος.
- Συναθροιστικά ερωτήματα εγγύτητας (*aggregate NN queries*), τα οποία εντοπίζουν τα αντικείμενα που ελαχιστοποιούν τη συνολική τους απόσταση από ένα σύνολο σημειακών δέσεων ενδιαφέροντος.

Τέλος, είναι εφικτό το σύστημα να παρέχει δυνατότητες οπτικοποίησης διαθέτοντας στο χρήστη λειτουργίες αλληλεπίδρασης και δυναμικής αλλαγής των παραμέτρων της επεξεργασίας. Εκτιμάται ότι η διατύπωση ερωτημάτων online και η απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε χάρτη θα συντελούσε καθοριστικά στην φιλικότητα του συστήματος και στην άμεση εποπτεία της κίνησης των αντικειμένων.

Βιβλιογραφία

- [ACC+03b] D.J. Abadi, D. Carney, U. Cetintemel, M. Cherniack, C. Convey, S. Lee, M. Stonebraker, N. Tatbul, and S. Zdonik. Aurora: a New Model and Architecture for Data Stream Management. *VLDB Journal*, 12(2):120-139, August 2003.
- [BBD+02] B. Babcock, S. Babu, M. Datar, R. Motwani, and J. Widom. Models and Issues in Data Stream Systems. In *Proceedings of the 21st ACM SIGACT-SIGMOD-SIGART Symposium on Principles of Database Systems (PODS'02)*, pp.1-16, Madison, Wisconsin, May 2002.
- [BW01] S. Babu and J. Widom. Continuous Queries over Data Streams. *ACM SIGMOD Record*, 30 (3): 109-120, September 2001.
- [BJKS06] R. Benetis, C. S. Jensen, G. Karciuskas, and S. Saltenis. Nearest and reverse nearest neighbor queries for moving objects. In *VLDB Journal*, 2006 (to appear).
- [CCD+03] S. Chandrasekaran, O. Cooper, A. Deshpande, M.J. Franklin, J.M. Hellerstein, W. Hong, S. Krishnamurthy, S.R. Madden, V. Raman, F. Reiss, and M.A. Shah. TelegraphCQ: Continuous Dataflow Processing for an Uncertain World. In *Proceedings of the First Biennial Conference on Innovative Data Systems Research (CIDR)*, Asilomar, California, January 2003.
- [EGSV98] M. Erwig, R.H. Guting, M. M. Schneider, and M. Vazirgiannis. Abstract and Discrete Modeling of Spatio-Temporal Data Types. In *Proceedings of the 6th ACM Symposium on Geographic Information Systems*, Washington DC, pp.131-136, November 1998.
- [FGNS00] L. Forlizzi, R. H. Guting, E. Nardelli, and M. Schneider. A Data Model and Data Structures for Moving Objects Databases. In *ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, pp. 319-330, 2000.
- [GL04] B. Gedik and L. Liu. MobiEyes: Distributed Processing of Continuously Moving Queries on Moving Objects in a Mobile System. In *Proceedings of the 9th International Conference on Extending Database Technology (EDBT'04)*, Heraklion (Crete), Greece, March 2004.
- [GO03] L. Golab, and M. Tamer Ozsu. Issues in Data Stream Management. *ACM SIGMOD Record*, 32(2):5-14, June 2003.
- [Gut94] R. H. Guting. An Introduction to Spatial Database Systems. *VLDB Journal*, Special Issue on Spatial Database Systems, 3 (4): 357-399, October 1994.

- [GBE+00] R. H. Guting, M. H. Bohlen, M. Erwig, C. S. Jensen, N.A. Lorentzos, M. Schneider, and M. Vazirgiannis. A Foundation for Representing and Querying Moving Objects. *ACM Transactions on Database Systems*, 25 (1): 1-42, 2000.
- [Gut84] A. Guttman. R-Trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching. In *Proceedings of the 1984 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, pp. 47-57, Boston, Massachusetts, USA, June 1984.
- [GG98] V. Gaede, and O. Gunther. Multidimensional Access Methods. *ACM Computing Surveys*, 30 (2): 170-231, 1998.
- [LLL06] K. Lee, W.-C. Lee, and H.V. Leong. Nearest Surrounding Queries. In *Proceedings of 22nd International Conference on Data Engineering (ICDE'06)*, Atlanta, Georgia, USA, April 2006.
- [LR96] M.-L. Lo and C.V. Ravishankar. Spatial Hash-Joins. In *Proceedings of the 15th ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, pp. 247-258, Montreal, Quebec, Canada, June 1996.
- [MA05] M.F. Mokbel and W.G. Aref. GPAC: Generic and Progressive Processing of Mobile Queries over Mobile Data. In *Proceedings of the 6th international conference on Mobile data management (MDM'05)*, pp. 155-163, Ayia Napa, Cyprus, May 2005.
- [MAHP03] M. F. Mokbel, W. G. Aref, S. E. Hambrusch, and S. Prabhakar. Towards Scalable Location-aware Services: Requirements and Research Issues. In *Proceedings of the 11th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (GIS'03)*, pp. 110-117, New Orleans, Louisiana, USA, November 2003.
- [MXA04] M. F. Mokbel, X. Xiong, W. G. Aref. SINA: Scalable Incremental Processing of Continuous Queries in Spatio-temporal Databases. In *Proceedings of the 23rd ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, Paris, France, June 2004.
- [MWA+03] R. Motwani, J. Widom, A. Arasu, B. Babcock, S. Babu, M. Datar, G. Manku, C. Olston, J. Rosenstein and R. Varma. Query Processing, Approximation, and Resource Management in a Data Stream Management System. In *Proceedings of the 2003 Conference on Innovative Data Systems Research (CIDR)*, January 2003.
- [MHP05] K. Mouratidis, M. Hadjieleftheriou, and D. Papadias. Conceptual Partitioning: An Efficient Method for Continuous Nearest Neighbor Monitoring. In *Proceedings of the 24th ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, pp. 634-645, Baltimore, Maryland, USA, June 2005.

- [PW96] J.M. Patel and D.J. DeWitt. Partition Based Spatial-Merge Join. In *Proceedings of the 15th ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, pp. 259-270, Montreal, Quebec, Canada, June 1996.
- [RSV02] P. Rigaux, M. Scholl, and A. Voisard. *Spatial Databases with Application to GIS*, Morgan Kaufmann, 2001.
- [Sam84] H. Samet. The Quadtree and Related Hierarchical Data Structures. *ACM Computing Surveys*, 16(2): 187-260, June 1984.
- [SR01] Z. Song and N. Roussopoulos. Hashing Moving Objects. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile Data Management (MDM'01)*, pp. 161-172, Hong Kong, China, January 2001.
- [TSPM98] Ύ. Theodoridis, T. Sellis, A.N. Papadopoulos and Ύ. Manolopoulos. Specifications for efficient indexing in spatiotemporal databases. In *Proceedings of 10th International Conference on Scientific and Statistical Database Management (SSDB 1998)*, pp. 123-132, Capri, Italy, 1998.
- [WXCJ98] O. Wolfson, B. Xu, S. Chamberlain, L. Jiang. Moving Objects Databases: Issues and Solutions. In *Proceedings of 10th International Conference on Scientific and Statistical Database Management (SSDB 1998)*, pp. 111-122, Capri, Italy, July 1998.
- [XMA05] X. Xiong, M.F. Mokbel, and W.G. Aref. SEA-CNN: Scalable Processing of Continuous K-Nearest Neighbor Queries in Spatio-temporal Databases. In *Proceedings of the 21st International Conference on Data Engineering (ICDE'05)*, pp. 643-654, Tokyo, Japan, April 2005.
- [YPK05] X. Yu, K. Q. Pu, and N. Koudas. Monitoring k-Nearest Neighbor Queries Over Moving Objects. In *Proceedings of the 21st International Conference on Data Engineering (ICDE'05)*, pp. 631-642, Tokyo, Japan, April 2005.
- [ZZP+03] J. Zhang, M. Zhu, D. Papadias, Ύ. Tao, and D. L. Lee. Location-based Spatial Queries. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, pp. 443-454, San Diego, California, June 2003.
- [Pat03] Κ. Πατρούμπας. *Συστήματα ρευμάτων δεδομένων για κινούμενα αντικείμενα*. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία στο Δ.Π.Μ.Σ. «Γεωπληροφορική», Ε.Μ.Π., Ιούνιος 2003.

Γλωσσάρι

αβεβαιότητα	uncertainty
αποτίμηση ερωτημάτων	query evaluation
βελτιστοποίηση ερωτημάτων	query optimization
δείκτης	index
εφαρμογές παρακολούθησης	monitoring applications
ελάχιστο περιβάλλον παραλληλόγραμμο	minimum bounding box
επεξεργασία από κοινού	shared execution
ερώτημα διαρκείας	continuous query
ερώτημα εγγύτερου γείτονα	nearest-neighbor query
ερώτημα θέσης	location-based query
ερώτημα περιοχής	range query
ερώτημα στιγμιοτύπου	one-time, snapshot query
ερώτημα τρέχουσας θέσης	now-related query
ερώτημα τροχιάς	trajectory-based query
κινούμενο αντικείμενο	oving object
κλιμάκωση	scalability
κυματίδιο	wavelet
παράθυρο κυλιόμενο	sliding window
παράθυρο οροσήμεου	landmark window
περιληψη	summary
πλέγμα	grid
σταδιακή αποτίμηση	incremental evaluation
σχέδιο εκτέλεσης ερωτήματος	query execution plan
ρεύμα δεδομένων	data stream
σκίτσο	sketch
σπειροειδής διαμέριση	conceptual partitioning
συνάθροιση	aggregation
κατακερματισμός	hashing
σύνδεση	join
σύνοψη	synopsis
σχέση	relation
σωρός	heap
τελεστής	operator

υπηρεσίες εντοπισμού	location-based services
φάση αποτιμήσεων	evaluation phase
φάση ενημερώσεων	update phase
χρονόσημο	timestamp
χωρικές μέθοδοι προσπέλασης	spatial access methods
χωρική σύνδεση	spatial join

Επεξεργασία ερωτημάτων διαρκείας σε ρεύματα κινούμενων αντικειμένων

Εμμανουήλ Κυπραίος
e198735@mail.ntua.gr

Διπλωματική εργασία στο Εργαστήριο Συστημάτων Βάσεων Γνώσεων και Δεδομένων
Επιβλέπων: Καθηγητής **Τ. Σελλής**

Περίληψη

1 Γενικό πλαίσιο

Η εργασία στοχεύει στη μελέτη και υλοποίηση αλγορίθμων που θα επιτρέπουν online απαντήσεις σε ερωτήματα διαρκείας (*continuous queries*) σχετικά με τη θέση μεγάλου αριθμού κινούμενων αντικειμένων. Δεδομένου ότι το πλήθος των κινούμενων αντικειμένων είναι μεγάλο και ότι οι θέσεις τους καταγράφονται με μεγάλη συχνότητα, ο όγκος της πληροφορίας αυξάνει υπερβολικά και η αποθήκευσή της γίνεται απαγορευτική. Παρωχημένες απαντήσεις καθίστανται εκ των πραγμάτων άχρηστες, δεδομένου ότι ο χρόνος εγκυρότητάς τους είναι πολύ μικρός λόγω της συνεχούς κίνησης των αντικειμένων.

Ως βασική υπόθεση εργασίας θεωρείται ότι η παρακολούθηση πολλών κινούμενων σημειακών αντικειμένων τα οποία ανανεώνουν συχνά το στίγμα τους, δημιουργεί **ρεύμα δεδομένων (data stream)**:

- Τα στοιχεία καταφτάνουν σε μεγάλο και ενδεχομένως μεταβλητό ρυθμό σε πραγματικό χρόνο (online).
- Τα ρεύματα έχουν απεριόριστο μέγεθος και συνήθως είναι ανεξάντλητα.
- Η επεξεργασία πρέπει να γίνεται στην κύρια μνήμη αφού η αποθήκευση είναι χρονοβόρα.
- Οι αλγόριθμοι απαντούν σε ερωτήματα διαρκείας και οφείλουν να είναι ενός περάσματος (one-pass) για την ελάχιστη δυνατή τήρηση στοιχείων στη μνήμη. Ένα στοιχείο δίνεται προς επεξεργασία και ύστερα απορρίπτεται.

Η φύση του μοντέλου συνηγορεί σε επιλογή προσεγγιστικών αλγορίθμων που εξοικονομούν μνήμη, συνεκτιμώντας το σφάλμα που μπορεί να γίνει αποδεκτό.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη κατάλληλων αλγορίθμων με τη μορφή **τελεστών** στο ρεύμα, οι οποίοι θα είναι ικανοί να αποτιμούν πολλαπλά ερωτήματα θέσης (*coordinate-based queries*):

- *Ερωτήματα περιοχής (range queries)*. «Ποια αντικείμενα βρίσκονται στην περιοχή A ;»
- *Ερωτήματα k εγγύτερων γειτόνων (nearest-neighbor queries)*. «Για ένα (στατικό ή κινούμενο) σημείο ενδιαφέροντος q , ποια είναι τα k κοντινότερά του;»

Τα ερωτήματα θέσης υποβάλλονται στο σύστημα ως ερωτήματα διαρκείας και η χρονική τους διάσταση αφορά αποκλειστικά τις τρέχουσες θέσεις των αντικειμένων.

2 Ρεύματα κινούμενων αντικειμένων

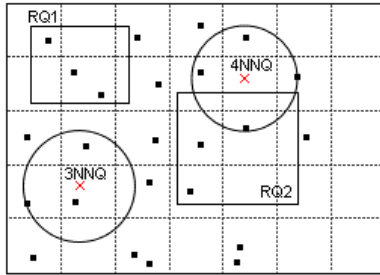
Οι εφαρμογές παρακολούθησης κινούμενων αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο παρουσιάζουν ιδιαίτερο πρακτικό και εμπορικό ενδιαφέρον. Η έκταση των αντικειμένων συνήθως θεωρείται αμελητέα και έτσι αντιμετωπίζονται ως κινούμενες *σημειακές* οντότητες. Το γενικό μοντέλο των εφαρμογών προβλέπει τον εντοπισμό της θέσης (x,y) κάθε αντικειμένου (λ.χ. μέσω GPS) και την αποστολή της περιοδικά μαζί με ένα *χρονόσημο (timestamp)* t σε ένα κεντρικό επεξεργαστή, όπου γίνεται η αποτίμηση πολλαπλών χωροχρονικών ερωτημάτων που υποβάλλουν οι χρήστες.

Τα ερωτήματα σε κινούμενα σημειακά αντικείμενα μπορούν να είναι είτε *ερωτήματα τροχιάς (trajectory-based queries)* είτε *ερωτήματα θέσης (coordinated-based ή location-based queries)*. Τα ερωτήματα τροχιάς διακρίνονται σε *τοπολογικά* (λ.χ. είσοδος ή έξοδος αντικειμένου από περιοχή) και *ερωτήματα πλοήγησης* (μέση ταχύτητα, χρόνος διαδρομής κλπ.). Η τροχιά ενός κινούμενου αντικειμένου προκύπτει από την καταγραφή διαδοχικών του θέσεων σε διακριτές χρονικές στιγμές.

Τα ερωτήματα θέσης εξετάζουν το στίγμα των αντικειμένων σε κάποια χρονική στιγμή ή διάστημα. Ο προσδιορισμός του χρονικού παραθύρου καθορίζει την περαιτέρω κατηγοριοποίηση των ερωτημάτων. Τα ερωτήματα είναι δυνατόν να αναφέρονται σε θέσεις που είχαν τα αντικείμενα κατά το παρελθόν, είτε για κάποια χρονική στιγμή (στιγμιότυπο) είτε για κάποιο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, τα ερωτήματα είναι δυνατόν να αναφέρονται στο παρόν (*ερωτήματα τρέχουσας θέσης – now-related queries*), είτε στο βραχυπρόθεσμο μέλλον με τη χρήση κάποιας μεθόδου πρόβλεψης των μελλοντικών θέσεων. Η απάντηση ενός ερωτήματος στατικού παραθύρου, π.χ. «εντόπισε ποια αυτοκίνητα εισήλθαν στο δακτύλιο τις πρωινές ώρες» παραμένει έγκυρη όσος χρόνος κι αν περάσει. Αντίθετα, οι θέσεις των αντικειμένων εντός ενός δυναμικού χρονικού παραθύρου είναι μεταβαλλόμενες, με αποτέλεσμα να μην έχει νόημα η αποτίμηση του ερωτήματος μία μόνο φορά. Για παράδειγμα, το ερώτημα «ποια αντικείμενα βρίσκονται εντός της δοσμένης περιοχής αυτή τη στιγμή;» απαιτεί *διαρκή* αποτίμηση.

Τα ερωτήματα θέσης που μελετήθηκαν στην εργασία αυτή είναι τα εξής.

- *Ερωτήματα περιοχής (range queries)*. Δεδομένου ενός χωρικού παραθύρου (λ.χ. ορθογώνιας, κυκλικής ή πολυγωνικής περιοχής A) και ενός χρονικού παραθύρου (χρονική στιγμή ή διάστημα) Δt , αναζητούνται τα αντικείμενα που κινούνται εντός της A κατά τη διάρκεια του διαστήματος Δt .
- *Ερωτήματα k -εγγύτερων γειτόνων (k -nearest neighbor queries)*. Δεδομένου ενός στατικού ή κινούμενου σημειακού αντικειμένου αναφοράς q και ενός χρονικού παραθύρου Δt , αναζητούνται τα k αντικείμενα πλησίον του q κατά τη διάρκεια του Δt .



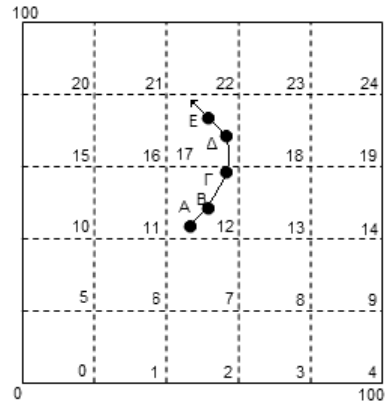
Σχήμα 1

Στην προκειμένη περίπτωση, το χρονικό παράθυρο αναφέρεται στην τρέχουσα κατάσταση της κίνησης (*now-related query*), ενώ οι περιοχές περιορίζονται μόνο σε απλά ορθογώνια (Σχήμα 1). Ο κεντρικός επεξεργαστής αρκεί να αποθηκεύει την τελευταία ενημέρωση της θέσης κάθε αντικειμένου. Η χωρητικότητα της κύριας μνήμης θεωρείται ικανοποιητική για να κρατήσει πλήρως τις τρέχουσες θέσεις αρκετά μεγάλου πλήθους αντικειμένων, ενώ η επεξεργασία κάθε ενημέρωσης απλοποιείται σημαντικά.

3 Η μέθοδος προσπέλασης σημείων

Οι κλασικές μέθοδοι προσπέλασης σημείων χρειάζονται αναθεώρηση για να υποστηρίξουν το πλήρως δυναμικό περιβάλλον των εφαρμογών παρακολούθησης. Καταρχήν, πρέπει να τροποποιηθούν σε δομές κύριας μνήμης. Επιπλέον, οφείλουν να υποστηρίζουν γρήγορες ενημερώσεις των θέσεων των αντικειμένων. Οι ιεραρχικές δομές, οι οποίες διαμερίζουν το χώρο με γνώμονα τα δεδομένα (*data-driven*), γενικά κρίνονται ακατάλληλες λόγω της πολυπλοκότητας των ενημερώσεών τους.

Το ενδιαφέρον στρέφεται λοιπόν σε μεθόδους που αξιοποιούν την τεχνική του *κατακερματισμού (hashing)*. Ο χώρος κατακερματίζεται από ένα πλέγμα κελιών ανεξαρτήτως της κατανομής των αντικειμένων, με τη χρήση μιας συνάρτησης κατακερματισμού (*hash function*). Κάθε σημειακό αντικείμενο εμπίπτει εντός των ορίων ενός κελιού. Κατά τη μετάβαση ενός αντικειμένου σε κάποιο νέο κελί, διαγράφεται από το προηγούμενο και εισάγεται στο νέο σε σταθερό χρόνο. Για κάθε κελί διατηρείται μια λίστα κάδων, στους οποίους αποθηκεύονται οι τρέχουσες θέσεις των αντικειμένων. Στο σχήμα 2 εικονίζεται ένας



Σχήμα 2

δισδιάστατος τετραγωνικός χώρος, ο οποίος κατακερματίζεται από το εφαρμοσμένο πλέγμα 5x5. Ένα σημειακό αντικείμενο p , το οποίο αρχικά βρίσκεται στη θέση A, κινείται στη χαραγμένη τροχιά. Το p απέστειλε ενημερώσεις της θέσης του κατά τη διέλευσή του από τις θέσεις B, Γ, Δ και E της τροχιάς του. Η συνάρτηση κατακερματισμού αποτιμάται για τις συντεταγμένες καθεμιάς θέσης. Για τις θέσεις B, Γ και E το αποτέλεσμα της είναι ταυτόσημο με την ταυτότητα του κελιού, στο οποίο ήδη κινείται. Κατά την αποτίμηση της συνάρτησης στη θέση Δ, επιστρέφεται διαφορετικό αποτέλεσμα, που υποδηλώνει τη μετάβαση του p σε άλλο κελί.

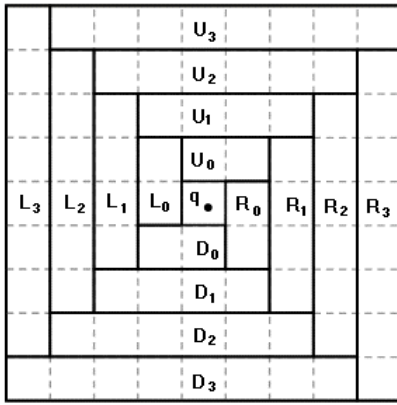
4 Ερωτήματα περιοχής

Τα ενεργά κινούμενα ερωτήματα περιοχής τίθενται δυναμικά, ως ορθογώνιες περιοχές κυμαινόμενης έκτασης, με κυμαινόμενο πλήθος και με μοναδικό περιορισμό το μέγιστο πλήθος τους. Οι περιοχές κατακερματίζονται στο ίδιο πλέγμα και χρησιμοποιείται τεχνική αντίστοιχη μ' εκείνη των σημείων, αυτή τη φορά με κάδους ερωτημάτων. Όταν η κινούμενη ορθογώνια περιοχή τέμνει διαφορετικό σύνολο κελιών, γίνεται επανακατακερματισμός της. Χρησιμοποιείται η τεχνική της *καθυστερημένης εκκαθάρισης* για το χειρισμό των παλιών αντιστοιχίσεων της περιοχής με τα κελιά.

Η αποτίμηση των ερωτημάτων γίνεται με την τεχνική της *από κοινού επεξεργασίας (shared execution)*. Σαρώνεται το πλήθος των κελιών και για κάθε ένα γίνεται μερική αποτίμηση των ερωτημάτων που το τέμνουν. Αν το κελί περικλείεται από την περιοχή ενός ερωτήματος, τότε το σύνολο των αντικειμένων του αποτελεί απάντηση, αλλιώς γίνονται οι απαραίτητες λεπτομερείς συγκρίσεις. Η αποτίμηση του συνόλου των ερωτημάτων ολοκληρώνεται με την επεξεργασία του συνόλου των κελιών. Η αποτίμηση γίνεται περιοδικά, εναλλασσόμενη με την φάση ενημέρωσης των θέσεων αντικειμένων και ερωτημάτων.

5 Ερωτήματα εγγύτερων γειτόνων

Τα κινούμενα ερωτήματα k εγγύτερων γειτόνων τίθενται μέσω ενός διαφορετικού συνόλου κινούμενων

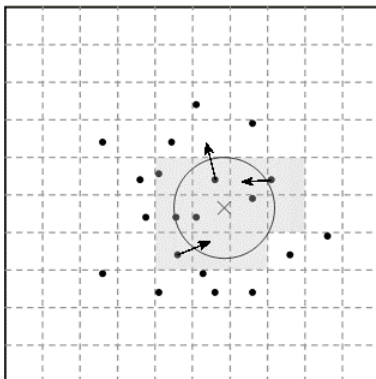


Σχήμα 3

σημείων με κυμαινόμενο πλήθος. Η τεχνική επεξεργασίας ονομάζεται *σπειροειδής διαμέριση* (*conceptual partitioning*) και απεικονίζεται στο σχήμα 3.

Η μέθοδος εκμεταλλεύεται τη σχέση της ελάχιστης απόστασης του σημείου αναφοράς q από ένα κελί ($mindist(q,c)$) με την απόσταση του k -στού εγγύτερου γείτονα ($best_dist$). Αν $best_dist \leq mindist(q,c)$, τότε το κελί αποκλείεται να περιέχει αντικείμενα πλησιέστερα στο q από τον k -στό γείτονα. Διαφορετικά, το κελί c οδηγείται προς λεπτομερή επεξεργασία. Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται με τη χρήση της ελάχιστης απόστασης μιας λωρίδας του σχήματος 3. Αν ισχύει η ίδια σχέση, αποκλείονται μαζικά όλα τα περιεχόμενα κελιά της. Διαφορετικά, η λωρίδα διασπάται σε αυτά για να εξεταστούν οι ελάχιστες αποστάσεις τους μία προς μία.

Η διαδικασία εκτελείται με τη χρήση μιας δομής σωρού, στον οποίο αρχικά εισάγονται οι λωρίδες μηδενικού επιπέδου (L_0, R_0, U_0, D_0). Όταν συμπληρωθεί το k -σύνολο των εγγύτερων γειτόνων και το επόμενο στοιχείο του σωρού έχει ελάχιστη απόσταση μεγαλύτερη (ή ίση) από αυτή του k -στού γείτονα, τότε η αναζήτηση τερματίζεται: το k -σύνολο έχει ήδη οριστικοποιηθεί αφού η ίδια σχέση θα ισχύει για όλα τα στοιχεία του σωρού. Ο αλγόριθμος εξετάζει το βέλτιστο σύνολο κελιών, δηλαδή αυτά τα οποία τέμνονται από τον κύκλο με ακτίνα την απόσταση του k -στού γείτονα (σχήμα 4). Η σπειροειδής διαμέριση του χώρου επιταχύνει την εύρεσή τους.



Σχήμα 4

Ο χειρισμός των στατικών ερωτημάτων βασίζεται στην παρατήρηση ότι οι ελάχιστες αποστάσεις του ερωτήματος από τα κελιά και τις λωρίδες δεν μεταβάλλονται. Έτσι, η μέθοδος είναι δυνατόν να διατηρεί ανά ερώτημα τη δομή του σωρού και τα κελιά που ήδη εξετάστηκαν (μαζί με τις αντίστοιχες ελάχιστες αποστάσεις τους) σε μια λίστα. Η αποτίμηση ενός στατικού ερωτήματος ξεκινάει με την εξέταση του βέλτιστου συνόλου κελιών της προηγούμενης αποτίμησής του, τα οποία βρίσκονται στη λίστα σε αύξουσα σειρά ελάχιστης απόστασης. Αν το k -σύνολο οριστικοποιηθεί πριν το πέρας της σάρωσης της λίστας, δεν απαιτείται άλλη ενέργεια. Διαφορετικά, η αναζήτηση στρέφεται στη χρήση του σωρού, με τον οποίο συνεχίζεται η σπειροειδής διαμέριση από το σημείο που είχε σταματήσει στην προηγούμενη αποτίμηση. Επιπλέον, στη λίστα προστίθενται τα νέα κελιά που θα εξεταστούν.

Η μέθοδος επιτρέπει επίσης την επεξεργασία στατικών ερωτημάτων παρακολουθώντας τις ενημερώσεις των θέσεων των κινούμενων αντικειμένων (*Update handling*). Η αποτίμηση των στατικών ερωτημάτων επιχειρείται καταρχήν με τη θεώρησή τους ως *ερωτήματα* (κυκλικής) *περιοχής*, όπου η περιοχή είναι ο κύκλος με ακτίνα την απόσταση του k -στού εγγύτερου γείτονα. Η ιδέα της τεχνικής είναι ότι το σύστημα παρακολουθεί τις ανανεώσεις των κινούμενων αντικειμένων ώστε να εντοπίσει τα αντικείμενα που εισέρχονται εντός ή εξέρχονται εκτός του κύκλου του ερωτήματος (σχήμα 4). Αν τα εισερχόμενα αντικείμενα είναι περισσότερα από τα εξερχόμενα, τότε ο κύκλος περικλείει n αντικείμενα με $n > k$. Το νέο σύνολο k εγγύτερων γειτόνων υπολογίζεται από τα n αντικείμενα εντός του κύκλου. Διαφορετικά, ο κύκλος δεν περικλείει αρκετά αντικείμενα και έτσι η αποτίμηση του ερωτήματος ανατίθεται στον προηγούμενο αλγόριθμο στατικών ερωτημάτων.

6 Αξιολόγηση επιδόσεων

Οι αλγόριθμοι αποτίμησης ερωτημάτων περιοχής και εγγύτερων γειτόνων υλοποιήθηκαν σε γλώσσα C++ και δοκιμάστηκαν πειραματικά. Το πειραματικό σύνολο δεδομένων αποτελείται από 100000 κινούμενα αντικείμενα, τα οποία κινούνται για 200 χρονικές στιγμές σε τροχιές που προσομοιώνουν την κυκλοφοριακή κίνηση στο οδικό δίκτυο της Αθήνας. Μελετήθηκαν οι επιδόσεις τους για τις εξής παραμέτρους:

- Πλήθος αντικειμένων (10k, 20k, 50k, 100k),
- Πλήθος ερωτημάτων (1k, 2k, 5k, 10k),
- Φόρτος ερωτημάτων (έκταση ορθογώνιας περιοχής ή πλήθος αναζητούμενων (k) εγγύτερων γειτόνων).

Γενικά, η κλιμάκωση των τιμών κάθε παραμέτρου επιβαρύνει τις επιδόσεις του συστήματος με γραμμική εξάρτηση στις περισσότερες περιπτώσεις. Η επιλογή του βαθμού κατάτμησης του πλέγματος επηρεάζει σημαντικά την απόδοση, ιδίως για μεγάλο πλήθος κελιών. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι το καλύτερο μέγεθος κελιών επηρεάζεται μόνο από το πλήθος των αντικειμένων και το φόρτο των ερωτημάτων, δηλαδή τις οντότητες που

κατακερματίζονται στο πλέγμα. Τα κινούμενα ερωτήματα είναι σαφώς πιο απαιτητικά από τα στατικά, όχι όμως πολλαπλάσιας πολυπλοκότητας. Τέλος, η τεχνική *Update handling* για τα στατικά ερωτήματα εγγύτερων γειτόνων δεν βρέθηκε ικανή να μειώσει το συνολικό χρόνο επεξεργασίας.

7 Συμπεράσματα

Οι πρόσφατες ραγδαίες εξελίξεις στις τεχνολογίες εντοπισμού της γεωγραφικής θέσης αύξησαν το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη εφαρμογών παρακολούθησης κινούμενων αντικειμένων. Το πλήρως δυναμικό μοντέλο τέτοιων συστημάτων διαφοροποιεί το χειρισμό τους από τις κλασικές βάσεις δεδομένων, θέτοντας στόχους όπως:

- Η υποστήριξη ολοένα και μεγαλύτερου –ενδεχομένου– κυμαινόμενου– πλήθους αντικειμένων και ερωτημάτων.
- Η συχνότερη καταγραφή των θέσεων των αντικειμένων με σκοπό τη μεγαλύτερη ακρίβεια στην τήρηση της τροχιάς τους.
- Η αποτίμηση ερωτημάτων σε πραγματικό χρόνο.

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη κατάλληλων δομών και αλγορίθμων για την αποτίμηση ερωτημάτων περιοχής και εγγύτερων γειτόνων που αναφέρονται στην τρέχουσα θέση των αντικειμένων. Από την μελέτη ζητημάτων σχεδίασης τέτοιων συστημάτων, προκύπτει ότι:

- Η επιλογή του κατακερματισμού ως μεθόδου προσπέλασης, αποδείχτηκε ιδανική για τη διαρκή παρακολούθηση της θέσης των αντικειμένων.
- Οι δύο τεχνικές που υλοποιήθηκαν, αποτιμούν αποδοτικά κυμαινόμενο πλήθος ενεργών ερωτημάτων σε κυμαινόμενο πλήθος αντικειμένων (scalability).
- Οι επιδόσεις των αλγορίθμων μετρήθηκαν πειραματικά και ανέδειξαν την επάρκειά τους στον χειρισμό πολλαπλών ερωτημάτων διαρκείας.
- Οι δύο χωροχρονικοί τελεστές είναι δυνατόν να ολοκληρωθούν σε ένα ενιαίο σύστημα, αφού χρησιμοποιούν αποτελεσματικά το ίδιο πλέγμα κατάτμησης του χώρου (σχήμα 1).

Τέλος, ένα τέτοιο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης ρευμάτων κινούμενων αντικειμένων θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε πρόσθετους τύπους ερωτημάτων, όπως ερωτήματα *πυκνότητας*, *ανάστροφου εγγύτερου γείτονα* (reverse nearest neighbors), *συναθροιστικά ερωτήματα εγγύτητας* κ.ά.