2025

Πολυδιάστατες Δομές Δεδομένων

Project 1: Multi-dimensional Data Indexing and Similarity Query Processing

Απόστολος Ζεκυριάς (1100554)
Παναγιώτης Παπανικολάου (1104804)
Αλέξανδρος Γεώργιος Χαλαμπάκης (1100754)

Γενικές Πληροφορίες

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται οι απαντήσεις της ομάδας μας στο Project του μαθήματος "Πολυδιάστατες Δομές Δεδομένων". Σε αυτήν τη σελίδα παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τα μέλη της ομάδας.

Η ομάδα αποτελείται από τους εξής φοιτητές:

Απόστολος Ζεκυριάς

Παναγιώτης Παπανικολάου

Αλέξανδρος Γεώργιος Χαλαμπάκης

Αναλυτικότερες Πληροφορίες:

Απόστολος Ζεκυριάς
1100554
up1100554@ac.upatras.gr
Φοιτητής 4ου έτους

Παναγιώτης Παπανικολάου
1104804
up1104804@ac.upatras.gr
Φοιτητής 4ου έτους

Αλέξανδρος Γεώργιος Χαλαμπάκης
1100754
up1100754@ac.upatras.gr
Φοιτητής 4ου έτους

1. Εισαγωγή

Στα πλαίσια της εργασίας υλοποιήθηκαν και αξιολογήθηκαν πειραματικά τέσσερις θεμελιώδεις πολυδιάστατες δομές δεδομένων:

1. **k-d Tree**
2. **Quadtree (Generalized / Hyper-octree)**
3. **Range Tree**
4. **R-Tree**

Η υλοποίηση έγινε στη γλώσσα προγραμματισμού C, με έμφαση στη διαχείριση μνήμης και την ταχύτητα εκτέλεσης. Ο κώδικας υποστηρίζει δυναμικό αριθμό διαστάσεων, επιτρέποντας την ευρετηρίαση δεδομένων με βάση χαρακτηριστικά όπως Budget, Popularity, Runtime, Vote Average και Revenue.

Χρησιμοποιήθηκε το dataset ταινιών (Movie Dataset), με πλήθος εγγραφών N=200.000.

2. Λεπτομέρειες Υλοποίησης

2.1 Διαχείριση Διαστάσεων

Ο κώδικας σχεδιάστηκε ώστε να είναι Dimension-Agnostic. Μέσω της παραμέτρου K_DIMS, οι δομές προσαρμόζονται αυτόματα:

- Για k=2: Budget, Popularity.
- Για k=3: Budget, Popularity, Runtime.
- Για k=4: + Vote Average.
- Για k=5: + Revenue.

2.2 Δομές Δεδομένων

- **k-d Tree:** Υλοποιήθηκε με κυκλική εναλλαγή των αξόνων διαχωρισμού (depth % k) και υποστηρίζει αναδρομική αναζήτηση εύρους (Range Search).
- **Quadtree:** Υλοποιήθηκε ως **Generalized Quadtree** (Hyper-Octree). Κάθε κόμβος έχει 2^k παιδιά. Για k=5, ο κόμβος έχει 32 δείκτες, γεγονός που αυξάνει σημαντικά τις απαιτήσεις μνήμης.
- **Range Tree:** Λόγω των τεράστιων απαιτήσεων μνήμης ενός πλήρους Range Tree σε 5 διαστάσεις (O(Nlog ^(k−1) N)), υλοποιήθηκε μια **Υβριδική (Hybrid)** προσέγγιση: Δέντρο στην 1η διάσταση, Ταξινομημένος πίνακας (Auxiliary) στη 2η διάσταση, και γραμμικός έλεγχος για τις διαστάσεις 3 έως 5.
- **R-Tree:** Χρησιμοποιήθηκε η τεχνική **Bulk Loading (STR-like)** για τη γρήγορη κατασκευή του δέντρου, με ταξινόμηση των δεδομένων και δημιουργία των MBR (Minimum Bounding Rectangles) από κάτω προς τα πάνω.

2.3 Λειτουργίες Update & Delete

- **Delete:** Υιοθετήθηκε η στρατηγική **Lazy Deletion**. Αντί για φυσική διαγραφή κόμβου και επαναδημιουργία του δέντρου (που είναι χρόνοβορα), η εγγραφή μαρκάρεται με ένα flag **is_deleted = 1**. Κατά την αναζήτηση, οι διαγραμμένες εγγραφές αγνοούνται.
- **Update:** Η ενημέρωση τιμής υλοποιείται ως συνδυασμός: **Delete** (Lazy) της παλιάς εγγραφής και **Insert** της νέας με τις ενημερωμένες τιμές.

2.4 Αναζήτηση Ομοιότητας (Similarity Search)

- **k-NN:** Υλοποιήθηκε αναζήτηση των k πλησιέστερων γειτόνων με χρήση Ευκλείδειας απόστασης στον πολυδιάστατο χώρο.
- **LSH (Locality Sensitive Hashing):** Εφαρμόστηκε **MinHash** με 20 hash functions στα πεδία κειμένου (Genres) για την εύρεση ταινιών με παρόμοιο περιεχόμενο, χρησιμοποιώντας την τεχνική **Banding** για αποδοτικό φιλτράρισμα υποψηφίων.

3. Πειραματική Αξιολόγηση

Τα πειράματα εκτελέστηκαν σε σύστημα Windows με dataset 200.000 εγγραφών. Μετρήθηκαν οι χρόνοι **Build**, **Insert**, **Query** και η κατανάλωση **Μνήμης (MB)**.

3.1 Αποτελέσματα για 5 Διαστάσεις (K=5)

Στις 5 διαστάσεις παρατηρείται η μεγαλύτερη κατανάλωση μνήμης για το Quadtree

k-d Tree (5D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0270	0.0000	0.0000	0.31
40000	0.0530	0.0000	0.0000	0.61
60000	0.0840	0.0000	0.0000	0.92
80000	0.1120	0.0000	0.0000	1.22
100000	0.1490	0.0000	0.0000	1.53
120000	0.1820	0.0000	0.0000	1.83
140000	0.2010	0.0000	0.0000	2.14
160000	0.2520	0.0000	0.0000	2.44
180000	0.2940	0.0000	0.0000	2.75
200000	0.3250	0.0000	0.0000	3.05

Quad Tree (5D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0000	0.0000	0.0000	4.75
40000	0.0120	0.0000	0.0000	7.21
60000	0.0140	0.0000	0.0000	10.07
80000	0.0230	0.0000	0.0000	12.99
100000	0.0290	0.0000	0.0000	16.19
120000	0.0390	0.0000	**0.0010**	20.40
140000	0.0440	0.0000	0.0000	24.30
160000	0.0510	0.0000	0.0000	27.75
180000	0.0810	0.0000	0.0000	31.24
200000	0.0610	0.0000	0.0000	35.14

Range Tree (5D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0440	0.0000	0.0000	1.40
40000	0.0620	0.0000	0.0000	2.95
60000	0.1350	0.0000	**0.0020**	4.56
80000	0.1570	0.0000	0.0000	6.21
100000	0.2020	0.0000	**0.0160**	7.89
120000	0.2540	0.0000	0.0000	9.57
140000	0.3130	0.0000	0.0000	11.28
160000	0.3710	0.0000	0.0000	13.04
180000	0.4350	0.0000	0.0000	14.79
200000	0.5060	0.0000	0.0000	16.55

R-Tree (5D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0160	0.0000	0.0000	0.35
40000	0.0300	0.0000	0.0000	11.10
60000	0.0360	0.0000	0.0000	11.10
80000	0.0200	0.0000	0.0000	11.10
100000	0.0270	0.0000	0.0000	11.10
120000	0.0340	0.0000	0.0000	11.10
140000	0.0420	0.0000	0.0000	11.10
160000	0.0380	0.0000	0.0000	11.10
180000	0.0490	0.0000	0.0000	11.10
200000	0.0540	0.0000	0.0000	11.10

3.2 Αποτελέσματα για 4 Διαστάσεις (K=4)

Εδώ παρατηρούμε μείωση της μνήμης του Quadtree σχεδόν στο μισό σε σχέση με τις 5 διαστάσεις.

k-d Tree (4D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0190	0.0000	0.0000	0.31
40000	0.0560	0.0000	0.0000	0.61
60000	0.0820	0.0000	0.0000	0.92
80000	0.1230	0.0000	0.0000	1.22
100000	0.1360	0.0000	0.0000	1.53
120000	0.1710	0.0000	0.0000	1.83
140000	0.2210	0.0000	0.0000	2.14
160000	0.2340	0.0000	0.0000	2.44
180000	0.2830	0.0000	0.0000	2.75
200000	0.2950	0.0000	0.0000	3.05

Quad Tree (4D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0000	0.0000	0.0000	1.92
40000	0.0180	0.0000	0.0000	3.06
60000	0.0220	0.0000	0.0000	4.31
80000	0.0200	0.0000	0.0000	5.65
100000	0.0280	0.0000	0.0000	7.33
120000	0.0330	0.0000	**0.0010**	9.20
140000	0.0380	0.0000	**0.0010**	11.12
160000	0.0420	0.0000	0.0000	12.91
180000	0.0490	0.0000	0.0000	14.86
200000	0.0470	0.0000	0.0000	16.90

Range Tree (4D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0320	0.0000	0.0000	1.40
40000	0.0780	0.0000	0.0000	2.95
60000	0.1260	0.0000	0.0000	4.56
80000	0.1800	0.0000	0.0000	6.21
100000	0.2170	0.0000	0.0000	7.89
120000	0.2780	0.0000	0.0000	9.57
140000	0.3100	0.0000	0.0000	11.28

160000	0.3650	0.0000	**0.0020**	13.04
180000	0.3980	0.0000	0.0000	14.79
200000	0.4540	0.0000	**0.0160**	16.55

R-Tree (4D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0000	0.0000	0.0000	0.33
40000	0.0130	0.0000	0.0000	10.58
60000	0.0180	0.0000	0.0000	10.58
80000	0.0210	0.0000	0.0000	10.58
100000	0.0280	0.0000	0.0000	10.58
120000	0.0330	0.0000	0.0000	10.58
140000	0.0330	0.0000	0.0000	10.58
160000	0.0410	0.0000	0.0000	10.58
180000	0.0580	0.0000	0.0000	10.58
200000	0.0530	0.0000	0.0000	10.58

3.3 Αποτελέσματα για 3 Διαστάσεις (K=3)

k-d Tree (3D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0230	0.0000	0.0000	0.31
40000	0.0420	0.0000	0.0000	0.61
60000	0.0730	0.0000	0.0000	0.92
80000	0.1010	0.0000	0.0000	1.22
100000	0.1430	0.0000	0.0000	1.53
120000	0.1730	0.0000	0.0000	1.83
140000	0.1990	0.0000	0.0000	2.14
160000	0.2510	0.0000	0.0000	2.44
180000	0.2590	0.0000	0.0000	2.75
200000	0.2910	0.0000	0.0000	3.05

Quad Tree (3D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0000	0.0000	0.0000	0.94
40000	0.0180	0.0000	0.0000	1.55
60000	0.0160	0.0000	0.0000	2.08
80000	0.0170	0.0000	0.0000	2.67
100000	0.0280	0.0000	0.0000	3.42
120000	0.0300	0.0000	0.0000	4.17

140000	0.0370	0.0000	0.0000	4.97
160000	0.0410	0.0000	0.0000	5.70
180000	0.0420	0.0000	0.0000	6.52
200000	0.0460	0.0000	0.0000	7.36

Range Tree (3D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0290	0.0000	0.0000	1.40
40000	0.0570	0.0000	0.0000	2.95
60000	0.1080	0.0000	0.0000	4.56
80000	0.1670	0.0000	0.0000	6.21
100000	0.2050	0.0000	0.0000	7.89
120000	0.2600	0.0000	**0.0020**	9.57
140000	0.2960	0.0000	**0.0140**	11.28
160000	0.3530	0.0000	0.0000	13.04
180000	0.4230	0.0000	0.0000	14.79
200000	0.4800	0.0000	0.0000	16.55

R-Tree (3D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0000	0.0000	0.0000	0.31
40000	0.0220	0.0000	0.0000	10.06
60000	0.0140	0.0000	0.0000	10.06
80000	0.0210	0.0000	0.0000	10.06
100000	0.0280	0.0000	0.0000	10.06
120000	0.0350	0.0000	0.0000	10.06
140000	0.0370	0.0000	0.0000	10.06
160000	0.0400	0.0000	0.0000	10.06
180000	0.0420	0.0000	0.0000	10.06
200000	0.0580	0.0000	0.0000	10.06

3.4 Αποτελέσματα για 2 Διαστάσεις (K=2)

Στις 2 διαστάσεις, το Quadtree είναι εξαιρετικά αποδοτικό σε μνήμη (μόλις 4.47 MB).

k-d Tree (2D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0200	0.0000	0.0000	0.31

40000	0.0370	0.0000	0.0000	0.61
60000	0.0480	0.0000	0.0000	0.92
80000	0.0880	0.0000	0.0000	1.22
100000	0.1210	0.0000	0.0000	1.53
120000	0.1490	0.0000	0.0000	1.83
140000	0.1700	0.0000	0.0000	2.14
160000	0.2190	0.0000	0.0000	2.44
180000	0.2340	0.0000	0.0000	2.75
200000	0.2710	0.0000	0.0000	3.05

Quad Tree (2D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0000	0.0000	0.0000	0.44
40000	0.0220	0.0000	0.0000	0.82
60000	0.0190	0.0000	0.0000	1.27
80000	0.0350	0.0000	0.0000	1.77
100000	0.0240	0.0000	0.0000	2.24
120000	0.0290	0.0000	0.0000	2.72
140000	0.0370	0.0000	0.0000	3.08
160000	0.0380	0.0000	0.0000	3.51
180000	0.0410	0.0000	0.0000	3.95
200000	0.0560	0.0000	0.0000	4.47

Range Tree (2D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0350	0.0000	0.0000	1.40
40000	0.0640	0.0000	0.0000	2.95
60000	0.1320	0.0000	0.0000	4.56
80000	0.1710	0.0000	0.0000	6.21
100000	0.2120	0.0000	**0.0160**	7.89
120000	0.2430	0.0000	0.0000	9.57
140000	0.3120	0.0000	0.0000	11.28
160000	0.3690	0.0000	0.0000	13.04
180000	0.4010	0.0000	**0.0160**	14.79
200000	0.4680	0.0000	**0.0020**	16.55

R-Tree (2D)

Size (N)	Build (s)	Insert (s)	Query (s)	Memory (MB)
20000	0.0000	0.0000	0.0000	0.30

40000	0.0250	0.0000	0.0000	9.55
60000	0.0150	0.0000	0.0000	9.55
80000	0.0270	0.0000	**0.0010**	9.55
100000	0.0270	0.0000	0.0000	9.55
120000	0.0320	0.0000	0.0000	9.55
140000	0.0390	0.0000	0.0000	9.55
160000	0.0420	0.0000	0.0000	9.55
180000	0.0420	0.0000	0.0000	9.55
200000	0.0570	0.0000	0.0000	9.55

4. Συμπεράσματα & Παρατηρήσεις

1. **Η Αύξηση των Διαστάσεων:**

    - Παρατηρούμε ότι το Quadtree είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στην αύξηση των διαστάσεων.
    - Στις 2 διαστάσεις, απαιτεί μόλις 4.47 MB.
    - Στις 5 διαστάσεις, η μνήμη εκτοξεύεται στα 35.14 MB, καθώς κάθε κόμβος πρέπει να διατηρεί 2^5=32 δείκτες, οι περισσότεροι εκ των οποίων είναι NULL (sparse nodes).

2. **Αποδοτικότητα Μνήμης:**

    - Το k-d Tree αποδείχθηκε η πιο αποδοτική δομή σε μνήμη (~3 MB), καθώς είναι δυαδικό δέντρο ανεξαρτήτως διαστάσεων.
    - Το Range Tree (υβριδικό) έχει αυξημένη κατανάλωση λόγω της αποθήκευσης των βοηθητικών δομών (sorted arrays) σε κάθε κόμβο.

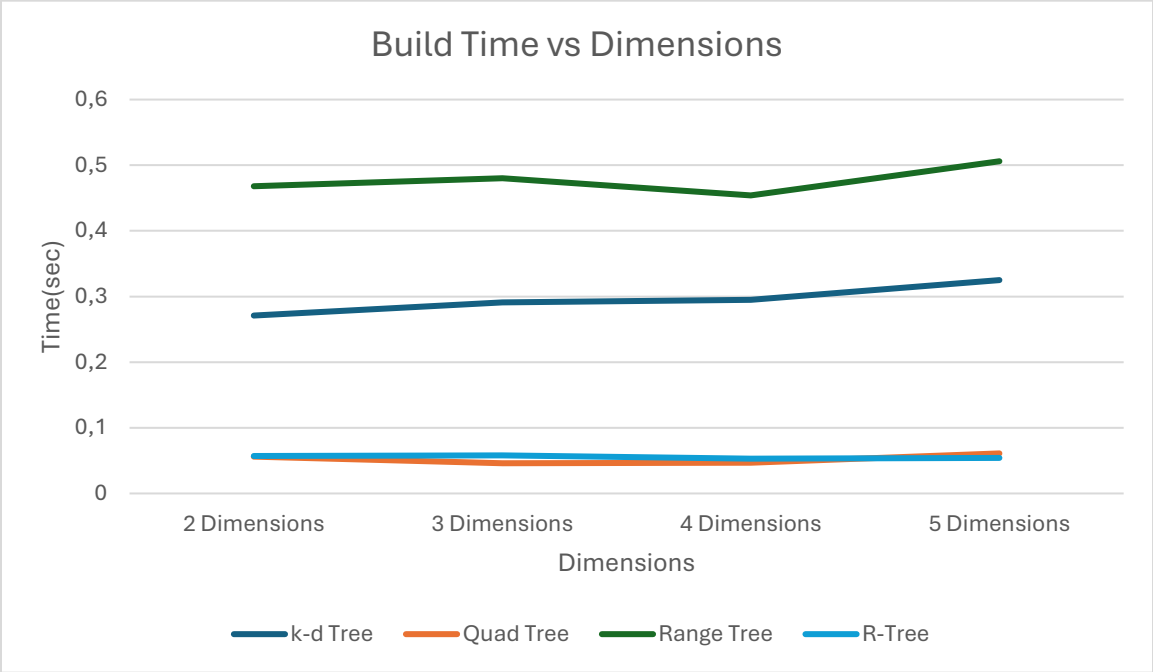
3. **Ταχύτητα Κατασκευής (Build Time):**

    - Το Quadtree και το R-Tree (με Bulk Loading) είναι οι ταχύτερες δομές στην κατασκευή (< 0.1 sec).
    - Το Range Tree είναι το πιο αργό (~0.5 sec) λόγω των πολλαπλών ταξινομήσεων που απαιτούνται κατά την κατασκευή.

4. **Ορθότητα:**

    - Σε όλα τα πειράματα, και οι 4 δομές επέστρεψαν ακριβώς τον ίδιο αριθμό αποτελεσμάτων για τα ίδια κριτήρια αναζήτησης, επιβεβαιώνοντας την ορθότητα των αλγορίθμων.

Build Time vs Dimensions



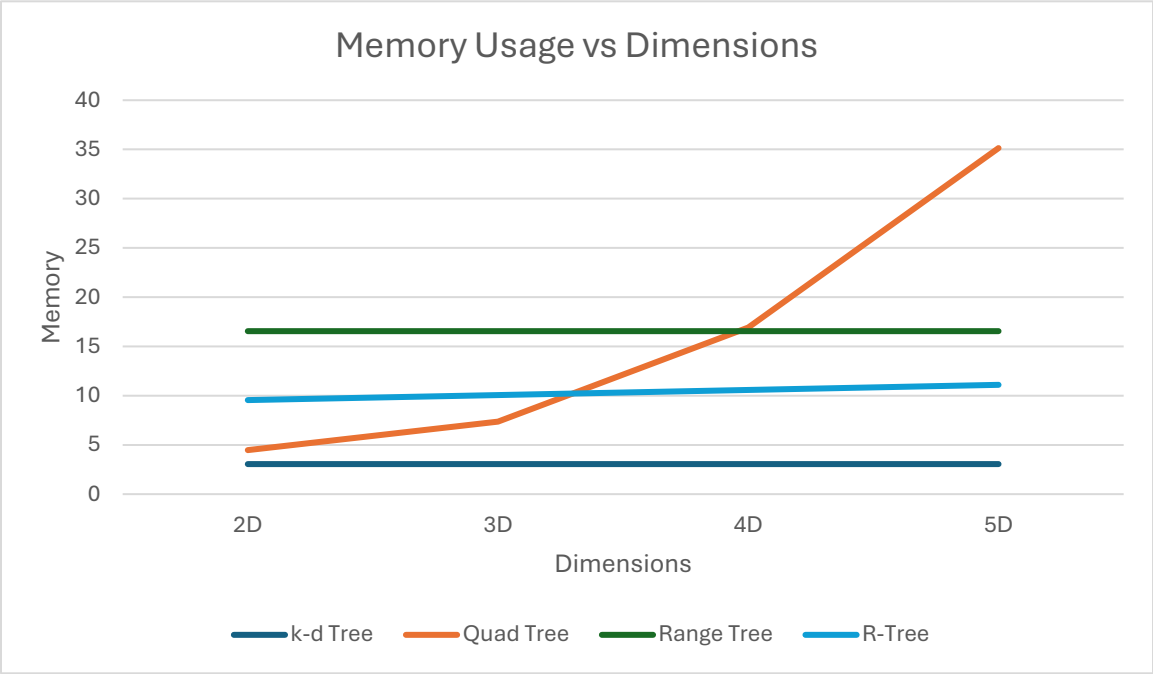
Το διάγραμμα απεικονίζει τον χρόνο κατασκευής των τεσσάρων δομών καθώς αυξάνονται οι διαστάσεις k (από 2 έως 5) για σταθερό μέγεθος δεδομένων N=200.000.

- **Range Tree:** Παρατηρούμε ότι αποτελεί την πιο χρονοβόρα δομή στην κατασκευή (κορυφή διαγράμματος, ~0.5s). Αυτό οφείλεται στην υψηλή θεωρητική πολυπλοκότητα κατασκευής O(N log^{k-1} N), καθώς απαιτεί την δημιουργία βοηθητικών δέντρων και πολλαπλές ταξινομήσεις σε κάθε διάσταση.

- **k-d Tree:** Κινείται σε ενδιάμεσα επίπεδα (~0.3s), καθώς η κατασκευή του απαιτεί την εύρεση της διαμέσου (median finding) σε κάθε επίπεδο αναδρομής.

- **Quadtree & R-tree:** Εμφανίζουν τους χαμηλότερους χρόνους (<0.1s). Ειδικά για το R-tree, η χρήση του αλγορίθμου **Bulk Loading** (Sort-Tile-Recursive) αποδεικνύεται εξαιρετικά αποδοτική, καθιστώντας το σχεδόν ανεπηρέαστο από την αύξηση των διαστάσεων σε αυτό το εύρος.

Memory vs Dimensions

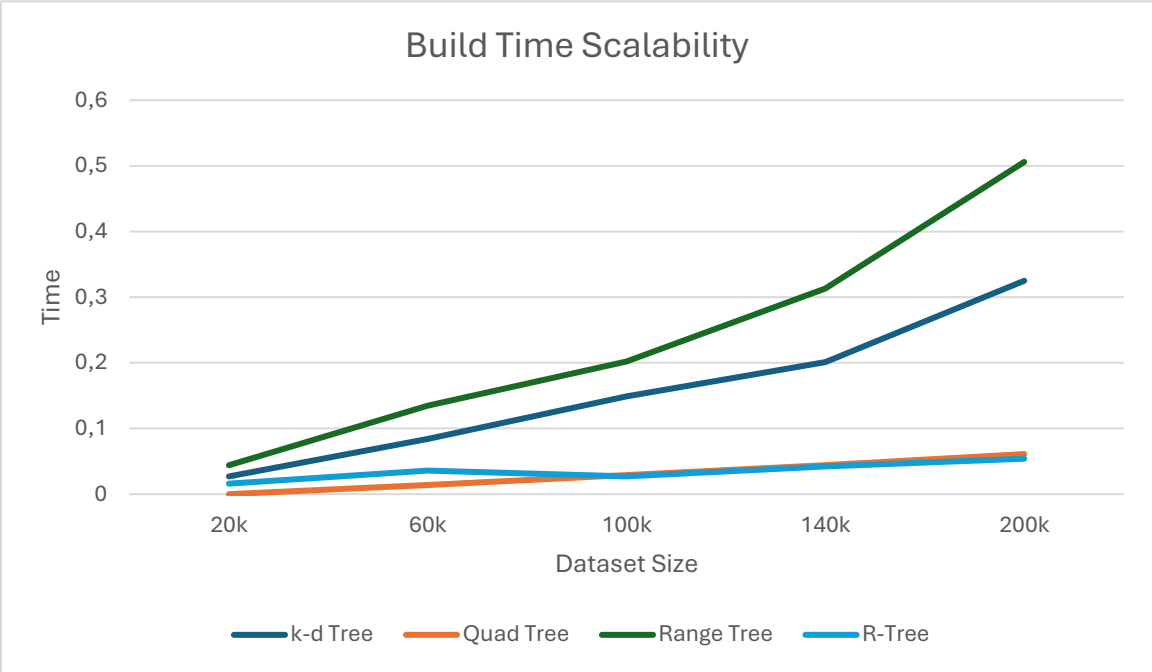


Το διάγραμμα αυτό αναδεικνύει την επίδραση της αύξησης των διαστάσεων στην κατανάλωση μνήμης (Space Complexity).

- **Quadtree:** Παρατηρείται δραματική, εκθετική αύξηση της. Ενώ στις 2 διαστάσεις η μνήμη είναι χαμηλή (4.5 MB), στις 5 διαστάσεις εκτοξεύεται στα **35.14 MB**. Αυτό συμβαίνει διότι κάθε εσωτερικός κόμβος του Point Quadtree πρέπει να διατηρεί 2^k δείκτες (δηλαδή 2^5=32pointers για 5D), η πλειοψηφία των οποίων παραμένουν κενό (NULL) σε αραιά δεδομένα.

- **k-d Tree & R-tree:** Αντιθέτως, το k-d tree παραμένει η πιο αποδοτική δομή σε μνήμη (3 MB σταθερά), καθώς ως δυαδικό δέντρο διατηρεί σταθερό αριθμό δεικτών (2 ανά κόμβο) ανεξάρτητα από το πλήθος των διαστάσεων k.

Build Time vs Size N(200.000)



Το παρόν διάγραμμα εξετάζει την κλιμάκωση του χρόνου κατασκευής σε συνάρτηση με το πλήθος των εγγραφών N (από 20.000 έως 200.000) στις 5 διαστάσεις.

- Όλες οι δομές παρουσιάζουν σχεδόν γραμμική ή O(N log N) αύξηση του χρόνου, γεγονός που επιβεβαιώνει πειραματικά τις θεωρητικές πολυπλοκότητες.

- Η κλίση της καμπύλης του **Range Tree** είναι η πιο απότομη, υποδεικνύοντας ότι είναι η λιγότερο scalable λύση για πολύ μεγάλα datasets όταν οι διαστάσεις είναι πολλές.

- Αντιθέτως, τα **Quadtree** και **R-tree** διατηρούν πολύ μικρή κλίση, αποδεικνύοντας ότι μπορούν να διαχειριστούν μεγαλύτερους όγκους δεδομένων με ελάχιστη επιβάρυνση στον χρόνο κατασκευής.

5. Screenshots από την εκτέλεση

Ακολουθούν ορισμένα στιγμιότυπα εκτέλεσης για την περίπτωση τον 5 διαστάσεων και 1 δέντρο για τις διαστάσεις 2, 3, 4.

```
--- Running k-d Tree ---
Loading data for 5 dimensions...
Loaded 200000 movies.

=== k-d Tree (5 Dimensions) ===
-------------------------------------------------------------------------
| Size         | Build (s) | Insert (s) | Query (s) | Memory (MB) |
-------------------------------------------------------------------------
| 20000        | 0.0180    | 0.0000     | 0.0000    | 0.31        |
| 40000        | 0.0610    | 0.0000     | 0.0000    | 0.61        |
| 60000        | 0.0640    | 0.0000     | 0.0000    | 0.92        |
| 80000        | 0.0900    | 0.0000     | 0.0000    | 1.22        |
| 100000       | 0.1180    | 0.0000     | 0.0000    | 1.53        |
| 120000       | 0.1510    | 0.0000     | 0.0000    | 1.83        |
| 140000       | 0.1880    | 0.0000     | 0.0000    | 2.14        |
| 160000       | 0.2050    | 0.0000     | 0.0000    | 2.44        |
| 180000       | 0.2350    | 0.0000     | 0.0000    | 2.75        |
| 200000       | 0.2590    | 0.0000     | 0.0000    | 3.05        |
-------------------------------------------------------------------------

Query Found: 5 movies

[Delete Demo] Removing: 'Seize the Day'
[Update Demo] Updating popularity...
 [Update] Moved 'Early Bird Gets the Worm' (Pop: 2.00 -> 17.00)

[kNN Search] Top 5 Nearest Neighbors (Numeric Space) for 'Early Bird Gets the Worm':
 1. Early Bird Gets the Worm (Dist: 0.00)
 2. the other man (Dist: 1144.05)
 3. The Vagabonds (Dist: 5750.17)
 4. Blood Feast (Dist: 7164.56)

[LSH Similarity - Banding] Target: Early Bird Gets the Worm
(Showing candidates that collide in at least 1 band)
 -> Candidate: The Vagabonds (Jaccard: 1.00)
```

```
--- Running Quad Tree ---
Loading data for 5 dimensions...
Loaded 200000 movies.

=== Generalized Quadtree (5-D Trie) ===
-------------------------------------------------------------------------
| Size         | Build (s) | Insert (s) | Query (s) | Memory (MB) |
-------------------------------------------------------------------------
| 20000        | 0.0000    | 0.0000     | 0.0000    | 4.75        |
| 40000        | 0.0260    | 0.0000     | 0.0000    | 7.21        |
| 60000        | 0.0150    | 0.0000     | 0.0010    | 10.07       |
| 80000        | 0.0510    | 0.0000     | 0.0000    | 12.99       |
| 100000       | 0.0560    | 0.0000     | 0.0000    | 16.19       |
| 120000       | 0.0330    | 0.0000     | 0.0000    | 20.40       |
| 140000       | 0.0400    | 0.0000     | 0.0000    | 24.30       |
| 160000       | 0.0460    | 0.0000     | 0.0010    | 27.75       |
| 180000       | 0.0600    | 0.0000     | 0.0010    | 31.24       |
| 200000       | 0.0590    | 0.0000     | 0.0000    | 35.14       |
-------------------------------------------------------------------------
Query Found: 5 movies

[Delete Demo] Removing: 'Seize the Day'
[Update Demo] Updating popularity...
 [Update] Moved 'Early Bird Gets the Worm' (Pop: 2.00 -> 12.00)

[kNN Search] Top 5 Nearest Neighbors (Numeric Space) for 'Early Bird Gets the Worm':
 1. Early Bird Gets the Worm (Dist: 0.00)
 2. the other man (Dist: 1144.00)
 3. The Vagabonds (Dist: 5750.15)
 4. Blood Feast (Dist: 7164.55)

[LSH Similarity - Banding] Target: Early Bird Gets the Worm
(Showing candidates that collide in at least 1 band)
 -> Candidate: The Vagabonds (Jaccard: 1.00)
```

```
--- Running Range Tree ---
Loading data for 5 dimensions...
Loaded 200000 movies.

=== Range Tree (5 Dims) ===
-------------------------------------------------------------------------
| Size         | Build (s) | Insert (s) | Query (s) | Memory (MB) |
-------------------------------------------------------------------------
| 20000        | 0.0280    | 0.0000     | 0.0000    | 1.40        |
| 40000        | 0.0680    | 0.0000     | 0.0010    | 2.95        |
| 60000        | 0.0970    | 0.0000     | 0.0010    | 4.56        |
| 80000        | 0.1410    | 0.0000     | 0.0010    | 6.21        |
| 100000       | 0.1880    | 0.0000     | 0.0010    | 7.89        |
| 120000       | 0.2280    | 0.0000     | 0.0020    | 9.57        |
| 140000       | 0.2660    | 0.0000     | 0.0000    | 11.28       |
| 160000       | 0.3080    | 0.0000     | 0.0000    | 13.04       |
| 180000       | 0.3710    | 0.0000     | 0.0020    | 14.79       |
| 200000       | 0.4320    | 0.0000     | 0.0020    | 16.55       |
-------------------------------------------------------------------------
Query Found: 5 movies

[Delete Demo] Removing: 'Seize the Day'
[Update Demo] Updating popularity...
 [Update] Moved 'Early Bird Gets the Worm' (Pop: 2.00 -> 12.00)

[kNN Search] Top 5 Nearest Neighbors (Numeric Space) for 'Early Bird Gets the Worm':
 1. Early Bird Gets the Worm (Dist: 0.00)
 2. the other man (Dist: 1144.00)
 3. The Vagabonds (Dist: 5750.15)
 4. Blood Feast (Dist: 7164.55)

[LSH Similarity - Banding] Target: Early Bird Gets the Worm
(Showing candidates that collide in at least 1 band)
 -> Candidate: The Vagabonds (Jaccard: 1.00)
```

```
--- Running R-Tree ---
Loading data for 5 dimensions...
Loaded 200000 movies.

=== R-Tree (5 Dimensions) ===
-------------------------------------------------------------------------
| Size         | Build (s) | Insert (s) | Query (s) | Memory (MB) |
-------------------------------------------------------------------------
| 20000        | 0.0030    | 0.0000     | 0.0000    | 0.35        |
| 40000        | 0.0100    | 0.0000     | 0.0000    | 11.10       |
| 60000        | 0.0170    | 0.0000     | 0.0000    | 11.10       |
| 80000        | 0.0220    | 0.0000     | 0.0000    | 11.10       |
| 100000       | 0.0270    | 0.0000     | 0.0000    | 11.10       |
| 120000       | 0.0320    | 0.0000     | 0.0000    | 11.10       |
| 140000       | 0.0400    | 0.0000     | 0.0000    | 11.10       |
| 160000       | 0.0410    | 0.0000     | 0.0000    | 11.10       |
| 180000       | 0.0490    | 0.0000     | 0.0000    | 11.10       |
| 200000       | 0.0410    | 0.0000     | 0.0000    | 11.10       |
-------------------------------------------------------------------------
Query Found: 5 movies

[Delete Demo] Removing: 'Seize the Day'
[Update Demo] Updating popularity...
 [Update] Moved 'Early Bird Gets the Worm' (Pop: 2.00 -> 12.00)

[kNN Search] Top 5 Nearest Neighbors (Numeric Space) for 'Early Bird Gets the Worm':
 1. Early Bird Gets the Worm (Dist: 0.00)
 2. the other man (Dist: 1144.00)
 3. The Vagabonds (Dist: 5750.15)
 4. Blood Feast (Dist: 7164.55)

[LSH Similarity - Banding] Target: Early Bird Gets the Worm
(Showing candidates that collide in at least 1 band)
 -> Candidate: The Vagabonds (Jaccard: 1.00)
```

```
--- Running Quad Tree ---
Loading data for 3 dimensions...
Loaded 200000 movies.

=== Generalized Quadtree (3-D Trie) ===
-------------------------------------------------------------------------
| Size         | Build (s) | Insert (s) | Query (s) | Memory (MB) |
-------------------------------------------------------------------------
| 20000        | 0.0050    | 0.0000     | 0.0000    | 0.94        |
| 40000        | 0.0090    | 0.0000     | 0.0000    | 1.55        |
| 60000        | 0.0140    | 0.0000     | 0.0000    | 2.08        |
| 80000        | 0.0190    | 0.0000     | 0.0000    | 2.67        |
| 100000       | 0.0250    | 0.0000     | 0.0000    | 3.42        |
| 120000       | 0.0300    | 0.0000     | 0.0000    | 4.17        |
| 140000       | 0.0340    | 0.0000     | 0.0000    | 4.97        |
| 160000       | 0.0380    | 0.0000     | 0.0000    | 5.70        |
| 180000       | 0.0580    | 0.0000     | 0.0000    | 6.52        |
| 200000       | 0.0520    | 0.0000     | 0.0000    | 7.36        |
-------------------------------------------------------------------------
Query Found: 5 movies

[Delete Demo] Removing: 'Seize the Day'
[Update Demo] Updating popularity...
 [Update] Moved 'Early Bird Gets the Worm' (Pop: 2.00 -> 12.00)

[kNN Search] Top 5 Nearest Neighbors (Numeric Space) for 'Early Bird Gets the Worm':
 1. Early Bird Gets the Worm (Dist: 0.00)
 2. The Vagabonds (Dist: 42.20)
 3. the other man (Dist: 67.60)
 4. Blood Feast (Dist: 88.57)

[LSH Similarity - Banding] Target: Early Bird Gets the Worm
(Showing candidates that collide in at least 1 band)
 -> Candidate: The Vagabonds (Jaccard: 1.00)
```

```
--- Running R-Tree ---
Loading data for 4 dimensions...
Loaded 200000 movies.

=== R-Tree (4 Dimensions) ===
-------------------------------------------------------------------------
| Size         | Build (s) | Insert (s) | Query (s) | Memory (MB) |
-------------------------------------------------------------------------
| 20000        | 0.0040    | 0.0000     | 0.0000    | 0.33        |
| 40000        | 0.0160    | 0.0000     | 0.0000    | 10.58       |
| 60000        | 0.0180    | 0.0000     | 0.0000    | 10.58       |
| 80000        | 0.0230    | 0.0000     | 0.0000    | 10.58       |
| 100000       | 0.0270    | 0.0000     | 0.0000    | 10.58       |
| 120000       | 0.0340    | 0.0000     | 0.0000    | 10.58       |
| 140000       | 0.0420    | 0.0000     | 0.0000    | 10.58       |
| 160000       | 0.0520    | 0.0000     | 0.0000    | 10.58       |
| 180000       | 0.0460    | 0.0000     | 0.0000    | 10.58       |
| 200000       | 0.0450    | 0.0000     | 0.0000    | 10.58       |
-------------------------------------------------------------------------
Query Found: 5 movies

[Delete Demo] Removing: 'Seize the Day'
[Update Demo] Updating popularity...
 [Update] Moved 'Early Bird Gets the Worm' (Pop: 2.00 -> 12.00)

[kNN Search] Top 5 Nearest Neighbors (Numeric Space) for 'Early Bird Gets the Worm':
 1. Early Bird Gets the Worm (Dist: 0.00)
 2. the other man (Dist: 1144.00)
 3. The Vagabonds (Dist: 5750.15)
 4. Blood Feast (Dist: 7164.55)

[LSH Similarity - Banding] Target: Early Bird Gets the Worm
(Showing candidates that collide in at least 1 band)
 -> Candidate: The Vagabonds (Jaccard: 1.00)
```

```
--- Running Range Tree ---
Loading data for 2 dimensions...
Loaded 200000 movies.

=== Range Tree (2 Dims) ===
-------------------------------------------------------------------------
| Size         | Build (s) | Insert (s) | Query (s) | Memory (MB) |
-------------------------------------------------------------------------
| 20000        | 0.0290    | 0.0000     | 0.0000    | 1.40        |
| 40000        | 0.0650    | 0.0000     | 0.0010    | 2.95        |
| 60000        | 0.0990    | 0.0000     | 0.0010    | 4.56        |
| 80000        | 0.1500    | 0.0000     | 0.0020    | 6.21        |
| 100000       | 0.2130    | 0.0000     | 0.0020    | 7.89        |
| 120000       | 0.2360    | 0.0000     | 0.0020    | 9.57        |
| 140000       | 0.2860    | 0.0000     | 0.0020    | 11.28       |
| 160000       | 0.3170    | 0.0000     | 0.0020    | 13.04       |
| 180000       | 0.4050    | 0.0000     | 0.0000    | 14.79       |
| 200000       | 0.4560    | 0.0000     | 0.0030    | 16.55       |
-------------------------------------------------------------------------
Query Found: 111 movies

[Delete Demo] Removing: 'The End Of Summer'
[Update Demo] Updating popularity...
 [Update] Moved 'Seduction of the Innocent' (Pop: 9.00 -> 19.00)

[kNN Search] Top 5 Nearest Neighbors (Numeric Space) for 'Seduction of the Innocent':
 1. Seduction of the Innocent (Dist: 0.00)
 2. White Waves (Dist: 1.00)
 3. Satsuma Courier Part 2: The Passionate Sword (Dist: 2.00)
 4. The Appointment (Dist: 3.00)
 5. Forsaking All Others (Dist: 3.00)

[LSH Similarity - Banding] Target: Seduction of the Innocent
(Showing candidates that collide in at least 1 band)
 -> Candidate: Gossip (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: Footlights and Shadows (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: The Failure (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: Infidelity (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: The Spite Bride (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: Who doesn't obey will be lost (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: Youthful Folly (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: The Cruz Brothers and Miss Malloy (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: Sleep Is for Sissies (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: Forsaking All Others (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: The Big Moment (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: You Are Not I (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: And Then There Were Four (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: Sarajevo (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: Appointment with Death (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: Hadrat Al-Muhtaram (Jaccard: 1.00)
 -> Candidate: Seed (Jaccard: 1.00)
```