

Benchmark cấu trúc dữ liệu cho Leaderboard Realtime

1. Phương pháp

Ta đánh giá hiệu năng của 4 cấu trúc dữ liệu (Sorted Array, Linked List, Red-Black Tree, Skip List) thông qua hai kịch bản kiểm thử:

1. Micro-benchmark:

- Đo thời gian thực thi trung bình của từng thao tác đơn lẻ: **Insert, Search, Delete**.
 - Thực hiện trên các tập dữ liệu có kích thước tăng dần: 5,000, 10,000, 20,000, 50,000 và 100,000 phần tử.
 - Mục tiêu: Đánh giá chi phí cơ bản của từng thao tác.

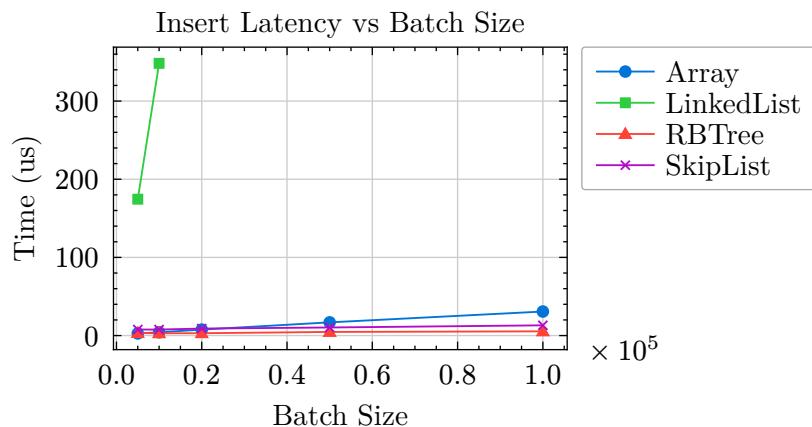
2. Realtime Simulation:

- Mô phỏng môi trường thực tế với tải cao (High Churn).
- **Tỷ lệ Churn:** 30% người dùng cập nhật điểm số mỗi giây (Update = Delete cũ + Insert mới).
- **Quy mô:** Kiểm thử khả năng chịu tải với 5,000, 10,000, 20,000, 50,000 và 100,000 phần tử.
- **Tiêu chí:** Đo độ trễ (latency) của thao tác Update và Search. Hệ thống được coi là “quá tải” (Falling Behind) nếu thời gian xử lý batch 1 giây vượt quá 1 giây thực tế.

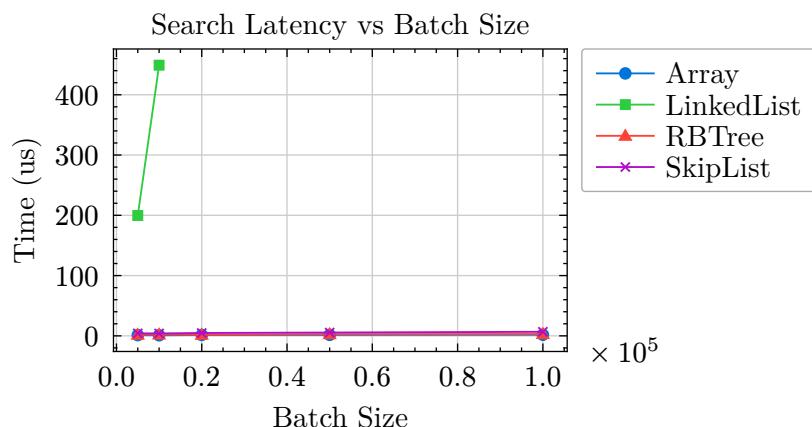
2. Kết quả thực nghiệm

2.1. Micro-benchmark (Độ trễ thao tác đơn lẻ)

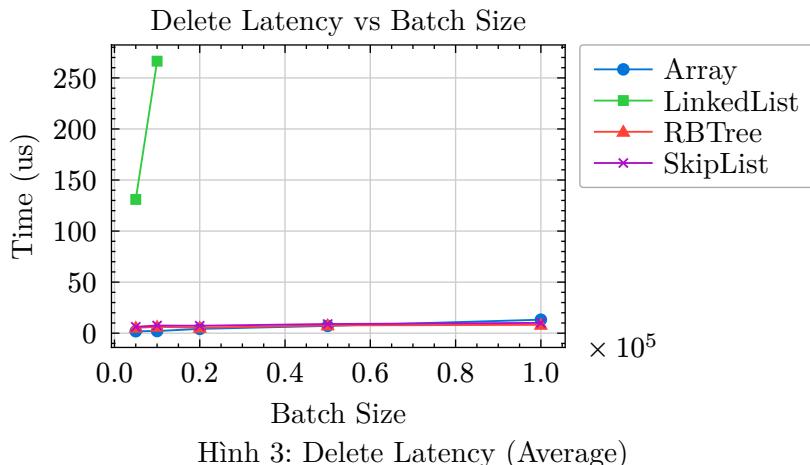
Biểu đồ dưới đây thể hiện sự thay đổi thời gian thực thi (Average Latency) theo kích thước dữ liệu (Batch Size).



Hình 1: Insert Latency (Average)



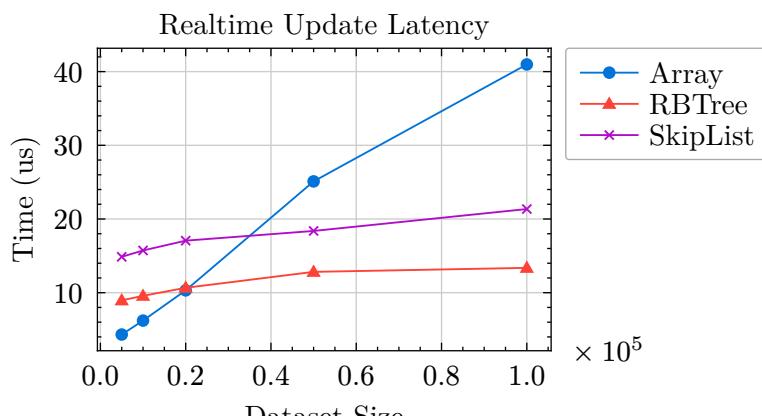
Hình 2: Search Latency (Average)



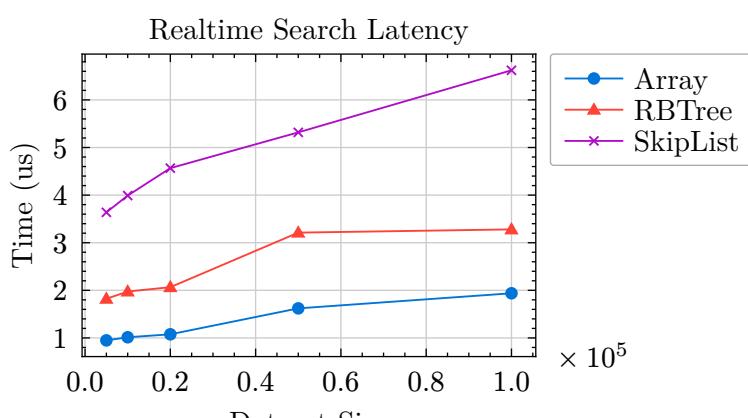
Hình 3: Delete Latency (Average)

2.2. Realtime Simulation (Độ trễ dưới tải cao)

Mô phỏng tải thực tế với 30% user cập nhật điểm số mỗi giây.



Hình 4: Update Latency under Load



Hình 5: Search Latency under Load

3. Nhận xét và So sánh

3.1. Phân tích chi tiết

- Sorted Array:** Rất nhanh ở các thao tác đọc (Search) nhờ Binary Search. Tuy nhiên, thao tác ghi (Insert/Delete/Update) cực chậm ($O(N)$) khi dữ liệu lớn. Trong kịch bản Realtime, nó bắt đầu quá tải khi dữ liệu đạt 100k phần tử.
- Linked List:** Hiệu năng kém nhất ($O(N)$ cho mọi thao tác). Không vượt qua được bài test Realtime ngay cả ở mức 10k phần tử.
- Red-Black Tree:** Cấu trúc ổn định nhất. Đảm bảo hiệu năng $O(\log N)$ cho mọi thao tác, chịu tải tốt ở mức 100k phần tử.

- **Skip List:** Hiệu năng tương đương Red-Black Tree, là một sự thay thế tốt với cài đặt có phần đơn giản hơn về mặt ý tưởng (dù tốn bộ nhớ hơn).

3.2. Bảng so sánh tổng hợp

| Thuật toán | Độ phức tạp (Search/Update) | Micro-bench (Read/Write) | Realtime (Scalability) | Đánh giá |
|--------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|
| Sorted Array | $O(\log n)$ / $O(n)$ | Rất Tốt / Kém | Kém (Fail @ 100k) | Tốt cho ít ghi |
| Linked List | $O(n)$ / $O(n)$ | Kém / Kém | Rất Kém (Fail @ 10k) | Không phù hợp |
| RB Tree | $O(\log n)$ / $O(\log n)$ | Tốt / Tốt | Tốt (Pass @ 100k) | Khuyên dùng |
| Skip List | $O(\log n)$ / $O(\log n)$ | Tốt / Tốt | Tốt (Pass @ 100k) | Thay thế tốt |