資料結構 – HW2 報告 *2024 NOV*

姓名：徐崇恆
學號：112503023
系級：通訊二

1 摘要

本作業的目的是在 Linux 環境中，以 C 語言開發一個性能測試程式 (benchmark) 。此作業需要將作業一的資料庫程式封裝為函式庫，並比較其與開源 Redis 的效能，測試項目包含操作耗時及記憶體使用情況。

2 需求分析

本作業的目標是通過性能測試，評估作業一的 NoSQL 資料庫與 Redis 之間在時間和空間複雜度上的差異。為了達到此目標，測試程式生成大量假資料，並依次執行新增與讀取操作，以測量延遲。此外，程式也會監測程式的記憶體佔用情況。

Redis

Redis (Remote Dictionary Server) 是一個以記憶體為基礎的開源 NoSQL 資料庫，具有快速的讀寫速度。然而，其記憶體佔用相對較高，適合需要快速存取的應用場景。

3 設計

資料模型

本次測試所使用的資料模型沿用作業一中的通訊錄人物記錄格式。

以下是一份 JSON 格式的資料樣本：

```
{
    "name": "Alice",
    "jobTitle": "Software Engineer",
    "age": 30,
    "address": "123 Main St",
    "phoneNumbers": ["123-456-7890", "098-765-4321"],
    "emailAddresses": ["alice@example.com", "alice.work@example.com"],
    "isMarried": true,
    "isEmployed": true
}
```

假資料生成

程式的假資料生成規則以流水號參數 i 為基準，為每個 `PersonSample` 實例生成各個屬性。首先，名稱 `name` 使用 `"test_person_<i>"` 格式，以確保每筆資料的唯一性；職稱 `jobTitle` 和年齡 `age` 則依序根據 i 的不同取值循環生成，使職稱在 `"job_0"` 至 `"job_99"` 間變化，年齡在 0 到 68 間分佈。電話號碼和電子郵件地址的數量根據 i 的值決定，並按特定格式生成內容。這樣的設計使生成的假資料具有規律性和唯一性，適合用於測試資料庫的儲存與查詢操作。

為了確保對兩個資料庫的測試公平性，我們定義了一個結構體 PersonSample 作為假資料的格式標準。在資料寫入和讀取的過程中，我們也考慮了資料庫原始資料類型轉換為 PersonSample 結構體所需的時間成本，以便更加準確地評估性能。

基準測試 (benchmark)

程式引入了 time.h 庫，以利用時間相關函數實現計時功能。本作業中所比較的是資料庫內資料所佔用的記憶體空間，而非整個程式的記憶體使用量。

在作業一中，資料庫使用雜湊表 (hash table) 作為資料結構，其中每個槽位都指向一個 DBItem 結構體。DBItem 是一個資料節點，包含資料的 key、 next 指位器以及儲存資料本體的 cJSON 結構體。為了精準計算資料所佔用的記憶體空間，需要考慮計算雜湊表、所有 DBItem 節點、 cJSON 結構體以及所有結構體中的指位器所指向的記憶體空間。

而 Redis 資料庫中資料所佔用的記憶體可以使用 Redis 指令 “INFO memory” 查詢。

4 實作

開發環境

硬體：Raspberry Pi 5

作業系統：Raspberry Pi OS Lite (64-bit) (Linux-based OS)

IDE：Visual Studio Code (with SSH Remote)

編譯器：GCC

版本控制：Git, GitHub

Tester

本作業中定義了一個 Tester 結構體，結構體中有指向與測試資料庫相關的函式的指位器，用於在測試時執行。資料庫的寫入、讀取、刪除以及記憶體佔用大小的查詢函式會被包含在 Tester 結構體中。

```c
typedef struct DBTester
{
  PersonSample **samples;
  uint32_t sample_size;
  PersonSample *(*read_item)(const char *key);
  void (*write_item)(const char *key, const PersonSample *person);
  bool (*delete_item)(const char *key);
  size_t (*get_memory_usage)();
} DBTester;
```

```c
// Creates a DBTester with a specified sample size
DBTester *create_tester(int32_t sample_size);
// Frees a DBTester and all associated PersonSample objects
void free_tester(DBTester *tester);
// Executes the benchmark for database operations
DBResourceUsage *exec_tester(DBTester *tester);
// Frees memory used by a DBBenchmarkResult object
DBBenchmarkResult *run_db_benchmark(int32_t sample_size);
// Runs a benchmark to compare Redis and HW1DB
void free_db_benchmark_result(DBBenchmarkResult *result);
```

Fig 1. Tester 相關程式碼片段

計算操作用

程式引入了 time.h 庫中的 clock() 函式，用以獲取自程式開始運行以來所經過的處理器時間 (CPU time)，單位為時鐘週期數 (clock ticks)。在測試程式時，於開始和結束處分別調用 clock() 函數以記錄時間，取得的時間差再除以 CLOCKS_PER_SEC 進行換算，即可得到程式的運行時間。

Hiredis

本作業中使用了 Hiredis 函式庫對 Redis 資料庫的操作提供支持。Hiredis 是一個輕量級的 C 語言 Redis 客戶端庫，用於連接、操作 Redis 資料庫。它提供簡單、高效的 API，支援同步與非同步操作，適合嵌入式系統和性能要求高的應用場景。Hiredis 以其小巧的設計和快速的處理速度而受到廣泛使用，特別適合需要直接用 C 語言與 Redis 進行高效互動的開發者。

計算記憶體佔用

在計算作業一資料庫的記憶體使用量過程中，考慮到作業系統在分配記憶體時會進行對齊 (alignment) 。本作業使用 `malloc.h` 函式庫中的 `malloc_usable_size` 函式來測量指位器所指向空間的實際大小。該函數只能被用於測量動態分配的記憶體空間。

```
size_t get_db_hash_table_memory_usage()
{
  if (!db_hash_table)
    return 0;

  size_t size = malloc_usable_size(db_hash_table);
  DBItem *item;

  for (int i = 0; i < db_hash_table_size; ++i)
  {
    item = db_hash_table[i];
    while (item != NULL)
    {
      size += get_cjson_memory_usage(item->json);
      size += malloc_usable_size(item);
      size += malloc_usable_size(item->key);
      item = item->next;
    }
  }

  return size;
}
```

```
size_t get_cjson_memory_usage(cJSON *item)
{
  if (!item)
    return 0;

  size_t size = 0;

  while (item != NULL)
  {
    size += malloc_usable_size(item);
    if (cJSON_IsString(item) && item->valuestring != NULL)
    {
      size += malloc_usable_size(item->valuestring);
    }
    else if (cJSON_IsArray(item) || cJSON_IsObject(item))
    {
      size += get_cjson_memory_usage(item-
>child); // Recursively calculate size of child elements
    }

    if (item->string != NULL)
    {
      size += malloc_usable_size(item->string);
    }

    item = item->next; // Move to the next item in the chain
  }

  return size;
}
```

Fig 2. 計算作業一資料庫資料記憶體空間佔用量的程式碼片段

此外，為了取得 Redis 資料庫中資料的記憶體佔用量，本作業透過 Redis 指令 `INFO memory` 獲取記憶體相關資訊。接著，利用 `string.h` 函式庫中的 `strstr` 函數來提取這些資訊，並使用 `stdio.h` 函式庫的 `sscanf` 函數匹配 "`used_memory_dataset:`"，以獲得資料在 Redis 資料庫中佔用的記憶體空間的確切大小。

```
long memory_usage = 0;
if (reply->type == REDIS_REPLY_STRING)
{
  char *memory_line = strstr(reply->str, "used_memory_dataset:");
  if (memory_line)
    sscanf(memory_line, "used_memory_dataset:%ld", &memory_usage);
}
```

Fig 3. 計算 Redis 資料庫資料記憶體空間佔用量的程式碼片段

5 測試與結果

基準測試結果

本作業中使用自定義的通訊錄人物格式作為測試資料，測試樣本數為 100,000 筆。

資料庫	寫入用時 (ms)	讀取用時 (ms)	記憶體空間用量 (Byte)
作業一資料庫	456	552	132418832
Redis	1724.2	1724.2	43369440

Table 1. 作業一資料庫 v.s. Redis 基準測試

6 討論

根據測試數據顯示，作業一的資料庫在寫入和讀取延遲方面表現較佳，但記憶體佔用顯著高於 Redis，這表明作業一的資料庫適合應用於不依賴大量記憶體的高效能場景。而 Redis 雖然在延遲方面稍遜一籌，但因記憶體佔用較少，具備更高的效能。

Redis 的 Rehash 機制

在撰寫作業過程中，我了解到 Redis 也使用雜湊表來儲存資料，但它包含一種更為複雜的 rehash 機制，能夠根據資料集大小自動調整雜湊表的大小。每個 Redis 資料庫內包含兩個哈希表，一個用於當前數據，另一個用於 rehash 過程中。當載荷因子（load factor）達到某個閾值時，Redis 會動態調整哈希表的大小，從而在內存使用和查找效率之間取得平衡。

Redis 的哈希表大小並非固定，而是隨著數據量的變化自適應地增長或縮小。當表中元素數量超過容量的某個閾值（通常為 1）時，Redis 會啟動 rehash 將哈希表擴容或縮減。這樣做有助於保持查找的高效性，使時間複雜度接近 O(1)。

作業一可以改進的地方

作為當前主流的開源 NoSQL 記憶體資料庫，Redis 技術穩定且安全，值得借鑒。根據測試結果，作業一的資料庫在操作速度上優於 Redis，但記憶體佔用顯著高於 Redis。為了改善這一點，以下是幾個潛在的優化方向：

1. **記憶體優化**：可以考慮引入資料壓縮技術，以減少記憶體佔用。壓縮技術有助於降低單位資料的儲存空間，這對記憶體有限的環境特別有用。
2. **改進資料結構**：作業一中使用的 `cJSON` 雖然在開發上帶來了便利，但增加了額外的記憶體開銷。可以考慮使用更高效的資料結構（如自定義二進位編碼），以減少對內存的需求，進一步提升效能。
3. **借鑒 Redis 的 Rehash 機制**：作業一的資料庫可以參考 Redis 的 rehash 機制，實現類似的動態調整功能，以在內存和效能之間取得更好的平衡。

時間複雜度與空間複雜度

在完成 100,000 筆資料的測試後，我們進行了對作業一資料庫與 Redis 資料庫性能的更全面比較，旨在分析它們在時間複雜度、空間複雜度以及資料樣本數之間的關係。

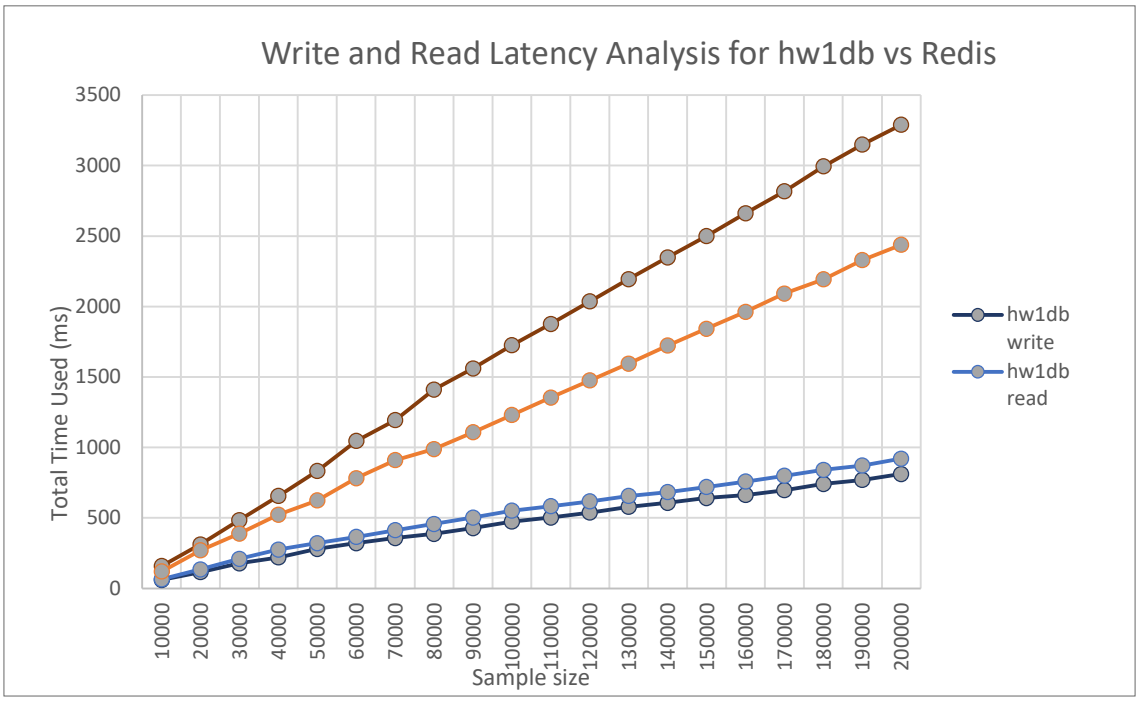
我們將樣本數從 10,000 逐步提升至 200,000，觀察到作業一資料庫的時間複雜度為 $O(n)$，空間複雜度也為 $O(n)$，兩者隨著樣本數增加呈線性增長趨勢。

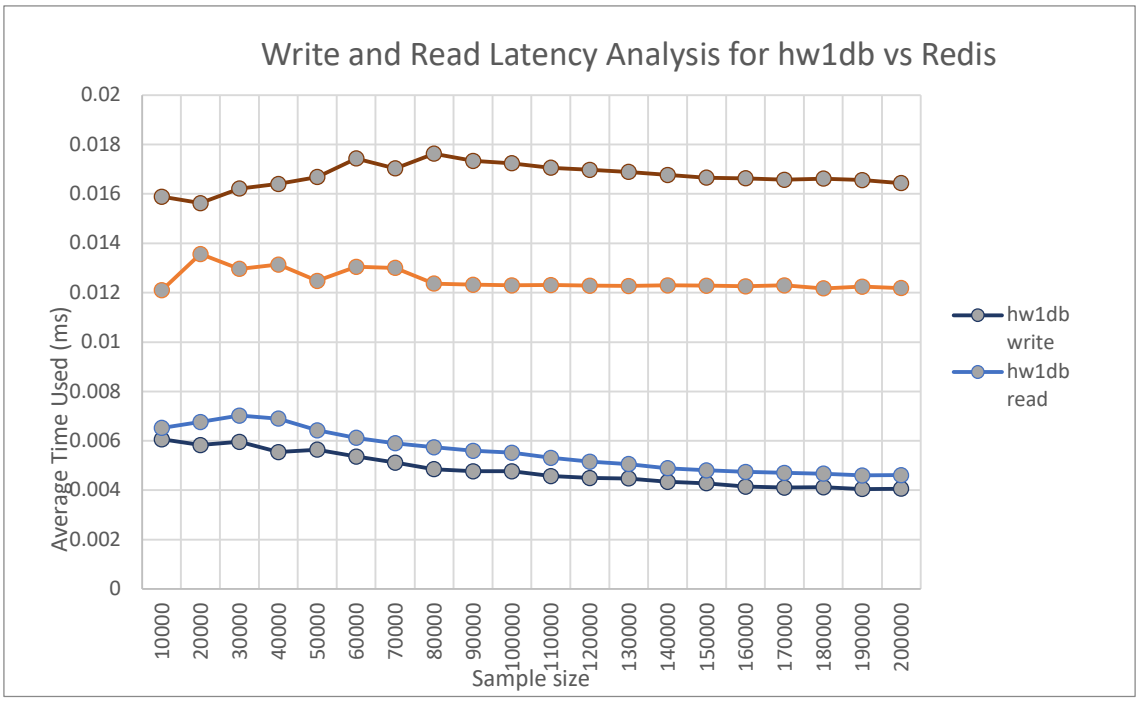
此外，我們對每筆資料在資料庫中的相關測試總結如下：

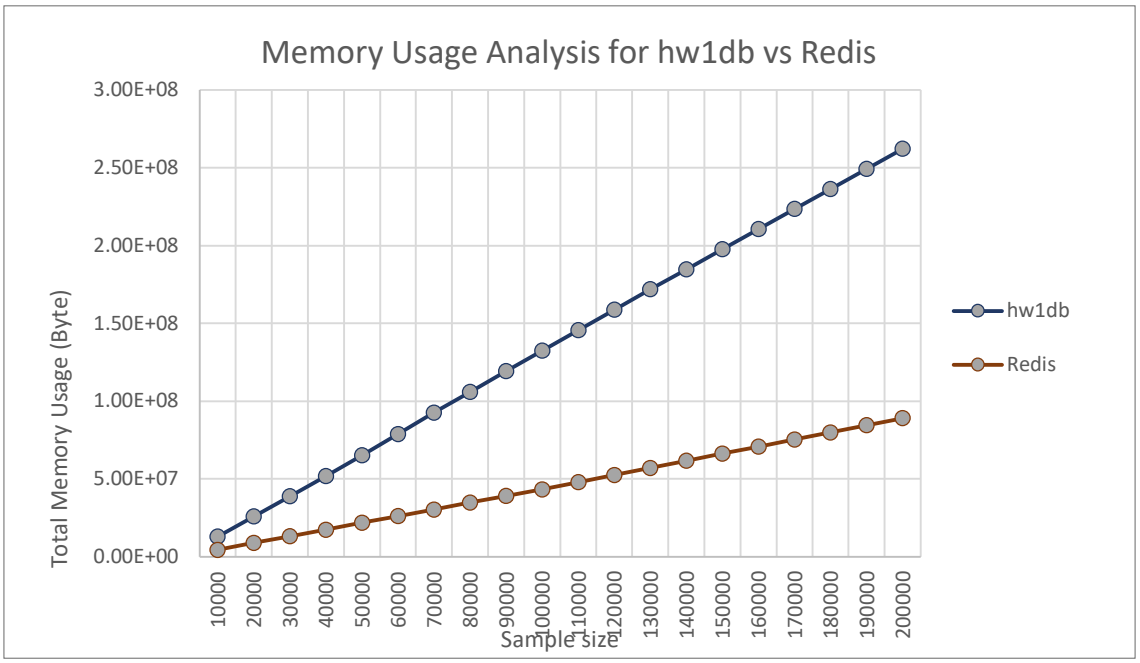
資料庫	寫入用時 (ms)	讀取用時 (ms)	記憶體空間用量 (Byte)
作業一資料庫	0.004826	0.005522	1313.834168
Redis	0.016791	0.012489	439.216724

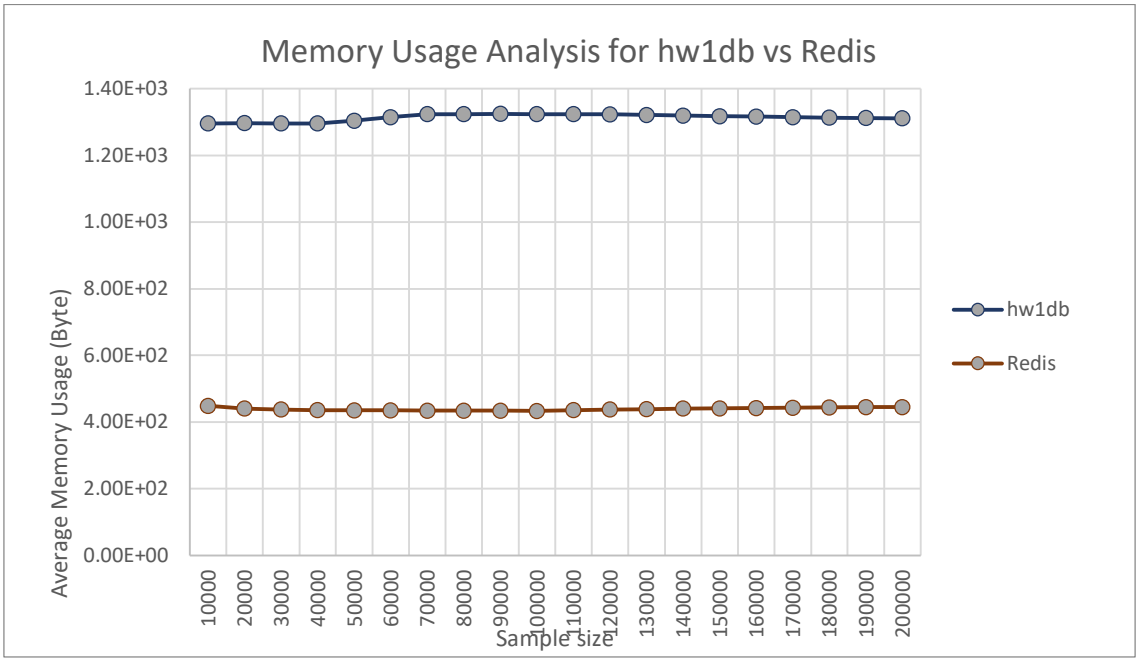
Table 2. 作業一資料庫 v.s. Redis 每筆樣本資料操作用時與記憶體空間用量

測試結果顯示，作業一資料庫在寫入和讀取速度上均優於 Redis，但記憶體使用量顯著高於 Redis。具體而言，作業一資料庫的寫入時間約為 Redis 的 0.29 倍，讀取時間約為 Redis 的 0.44 倍，顯示出在操作速度上有較高的效能。然而，在記憶體空間用量方面，作業一資料庫約為 Redis 的 2.99 倍，明顯佔用了更多的記憶體資源。


Write and Read Latency Analysis for hw1db vs Redis
Total Time Used (ms)
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
10000
20000
30000
40000
50000
60000
70000
80000
90000
100000
110000
120000
130000
140000
150000
160000
170000
180000
190000
200000
Sample size
hw1db write
hw1db read


Write and Read Latency Analysis for hw1db vs Redis
Average Time Used (ms)
0.02
0.018
0.016
0.014
0.012
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0
10000
20000
30000
40000
50000
60000
70000
80000
90000
100000
110000
120000
130000
140000
150000
160000
170000
180000
190000
200000
Sample size
hw1db write
hw1db read


Memory Usage Analysis for hw1db vs Redis
Total Memory Usage (Byte)
3.00E+08
2.50E+08
2.00E+08
1.50E+08
1.00E+08
5.00E+07
0.00E+00
10000
20000
30000
40000
50000
60000
70000
80000
90000
100000
110000
120000
130000
140000
150000
160000
170000
180000
190000
200000
Sample size
hw1db
Redis


Memory Usage Analysis for hw1db vs Redis
Average Memory Usage (Byte)
1.40E+03
1.20E+03
1.00E+03
8.00E+02
6.00E+02
4.00E+02
2.00E+02
0.00E+00
10000
20000
30000
40000
50000
60000
70000
80000
90000
100000
110000
120000
130000
140000
150000
160000
170000
180000
190000
200000
Sample size
hw1db
Redis

7 結論

本作業在 Linux 環境下對作業一自建資料庫與 Redis 進行效能測試，涵蓋寫入、讀取速度及記憶體使用量的比較。結果顯示，作業一資料庫在操作速度上優於 Redis，但記憶體佔用約為 Redis 的三倍，適合高效能且記憶體不受限的應用場景；而 Redis 以較低的記憶體使用在資源受限環境中更具優勢。

為進一步提升作業一資料庫的記憶體效率，可以考慮引入壓縮技術和更高效的資料結構設計，並參考 Redis 的 rehash 機制進行優化。本次測試為 NoSQL 資料庫的選擇和改進提供了有價值的數據依據與方向。

8 參考文獻與資料

1. Redis - Docs
   https://redis.io/docs/latest/
2. Hiredis - Redis
   https://redis.io/lpage/hiredis/

9 附錄

1. 程式碼 GitHub 倉庫
   https://github.com/113NCUCE/hw2-cch137
2. 函式庫 cJSON GitHub 倉庫 - DaveGamble/cJSON: Ultralightweight JSON parser in ANSI C
   https://github.com/DaveGamble/cJSON
3. 函式庫 hiredis GitHub 倉庫 - redis/hiredis: Minimalistic C client for Redis >= 1.2
   https://github.com/redis/hiredis