

基於非揮發性記憶體特性優化 Bε-Tree 讀寫效能

專題編號：111-CSIE-S014

執行期限：111 年第 1 學期至 112 年第 1 學期

指導教授：劉傳銘教授

專題參與人員： 109310324 蔡宇翔

109590040 游宗霖

一、摘要

本畢業專題主要著墨在如何優化 Bε-Tree 操作時所運用到的演算機制，由於觀察到在新增、刪除、修改、查詢時，會有大量磁碟寫入與複製的情形，在過程中會消耗大量的時間以及內存，並存在一定程度的寫入放大情形，因此本專題期望在運算時透過非揮發性記憶體 Skyrミon Racetrack Memory(SK-RM)[1]來協助運算，由於其讀取快、儲存密度高等等的特性，以此來取代或同時兼容傳統的 DRAM、SRAM，降低內存的負擔。但是如單純的將 Bε-Tree 套用在 SK-RM 上，因為其操作 bits 的機制將會導致不可預期的 Latency 產生，但透過本專題提出的三個方法，分別可以在更新 bits 時節省掉 SK-RM 中 insert 和 remove 這些耗能較嚴重 operation，以及在進行 Query Operations 能減少將近 50% 的 SK-RM 的 shifts 使得 Latency 可以得到顯著的改善。

關鍵詞：Bε-Tree、Skyrmion Racetrack Memory(SK-RM)、NVRAM、Algorithm

二、緣由與目的

本專題提出的想法是觀察在 Bε-Tree[2]操作時，當 storage 端或 RAM 端發生變化時，對應到物理層面上，即是 Skyrミons 粒子在 Racetrack 及 offsets 發生了變換。隨著資料科學應用的盛行，無論是行動裝置或是大型伺服器所要面臨的資料儲存量以及寫入量呈現倍率的增長，相關的文獻已開始尋找是否有更低能耗、低延遲、寫入密度高等特性之記憶體材料。

本專題期望使用儲存密度更高的記

憶體來輔助 Bε-Tree 的資料存取，寫入過程中產生的運算以及在記憶體中儲存索引也是本專題關注的重點。

本專題希望透過提出將 Bε-Tree 結合 SK-RM 之框架，並且解決其中會產生的問題。

三、研究報告內容

(一)、研究方法

這項研究自行編寫的 Bε-Tree 和 SK-RM 模擬器，以進行實驗。模擬 SK-RM 架構的資料擺放、寫入、讀取和比較方法，量化提出的演算法和優化方案效益。

a. Virtual Buffer Encoding :

針對 Bε-Tree 在 Insertion 操作中的寫入放大效應，提出 Virtual Buffer Encoding 解決方案。優化後的編碼方式最大程度地減少了空間佔用，並改進了 Upsert(更新)流程。

b. Dynamic Node Based Schema :

為了提高 Cache 空間的使用效率，提出了動態節點架構的方法。這種方法根據資料的更新模式，適當地調整資料冷區節點的緩衝區大小，以容納更多的索引。這樣可以釋放空間並減少寫入操作的負載。

c. Low Shift Algorithm :

在 Bε-Tree 查詢時，提出了低移位演算法，以改進尋找適當 Pivots 的過程。該演算法使用 SK-RM 的平行讀取頭，實現並行讀取，以在 1 個字的距離內完成 Lower Bound 的操作。改進方法可減少在 SK-RM 上產生大量 Shift 操作，提高效率。

總結，這些方法旨在改進 Bε-Tree 和 SK-RM 模擬器的效能，減少空間和時間的浪費，並提高資料存取的效率。這些方法對於處理大量資料和提高系統性能可

能會有重要的應用價值。

(二)、研究步驟

1.編寫 $B\epsilon$ -Tree 和 SK-RM 模擬器：首先，我們使用 C++語言自行編寫 $B\epsilon$ -Tree 和 SK-RM 模擬器，這兩個工具將用於實驗和性能評估。

a. Virtual Buffer Encoding 方法，對 $B\epsilon$ -Tree 的 Insertion 操作進行優化優化 Operation Type 的編碼方式，節省空間。

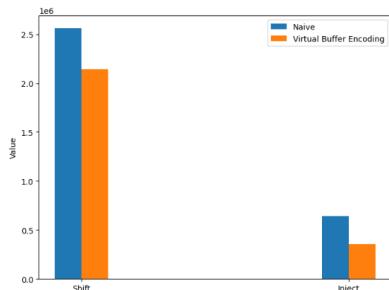
b. Dynamic Node Based Schema：引入動態節點架構，提高 Cache 空間的使用效率。

c. Low Shift Algorithm：低移位演算法，以改進查詢過程。

這些步驟旨在提高 $B\epsilon$ -Tree 和 SK-RM 模擬器的性能，減少資源浪費，並改進資料存取效率，有望對處理大規模資料和提高系統性能產生重要影響。

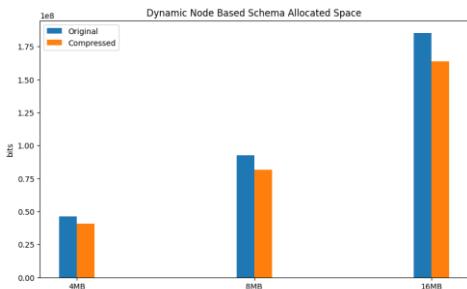
(三)、研究成果

a. Virtual Buffer Encoding：成功降低 SK-RM shift 操作 20%，Inject 操作 45%。



圖一、a.模擬結果

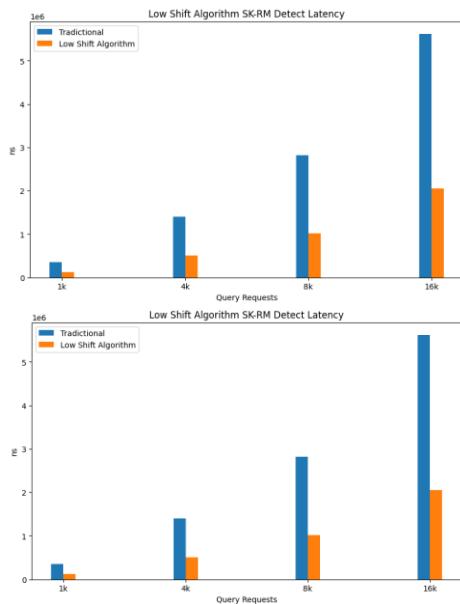
b. Dynamic Node Based Schema：降低空間占用 11%。



圖二、b.模擬結果

c. Low Shift Algorithm: 成功降低平均

SK-RM shift, detect 64%。



圖三、c.模擬結果

參考文獻

- [1] Fan Chen, Zheng Li, Wang Kang, Weisheng Zhao, Hai Li, and Yiran Chen, Process variation aware data management for magnetic skyrmions racetrack memory, 2018
- [2] Michael A.Bender,Martin Farach-Colton, William Jannen, Rob Johnson, Bradley C. Kuszmaul, Donald E.Porter, Jun Yuan, and Yang Zhan, An Introduction to $B\epsilon$ -trees and Write-Optimization, 2015
- [3] Fert, Albert, Vincent Cros, and Joao Sampaio, Skyrmions on the track , 2013
- [4] Xing Chen, Haoyang Zhang, Erya Deng , Mingchang Yang , Na Lei, Youguang Zhang, Wang Kang , and Weisheng Zhao, Sky-RAM: Skyrmionic Random Access Memory, 2019
- [5] Ya-Hui Yang, Shuo-Han Chen, Yuan-Hao Chang, Evolving Skyrmion Racetrack Memory as Energy-Efficient Last-Level Cache Devices, 2022