

國立臺灣大學電機資訊學院資訊工程學系
碩士論文

Department of Computer Science and Information Engineering
College of Electrical Engineering and Computer Science
National Taiwan University
Master Thesis

淺狀態區塊鏈之設計
The design of shallow-state blockchain

蔡存哲
TSUN-CHE TSAI

指導教授：廖世偉博士
Advisor: Shih-Wei Liao, Ph.D.

中華民國 109 年 5 月
May, 2020

國立臺灣大學碩士學位論文 口試委員會審定書

淺狀態區塊鏈之設計

The design of shallow-state blockchain

本論文係蔡存哲君 (R05922086) 在國立臺灣大學資訊工程學系完成之碩士學位論文，於民國 109 年 5 月 1 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

<hr/>	
<hr/>	<hr/>
<hr/>	<hr/>
<hr/>	<hr/>
<hr/>	<hr/>

所 長：

<hr/>

誌謝

感謝指導教授。

感謝陪伴我的家人、朋友。

感謝在 514 和我一起討論論文的建中、贊鈞，區塊鏈組的德倚、彥智、鼎元、伯駒，以及其他實驗室的同學子賢、爾晨、宗興。

感謝實驗室助理 Kelly 在庶務上的幫忙。

摘要

基於區塊鏈的虛擬貨幣是一種點對點的交易系統，在此去中心化的系統中，每個節點都維護一個完整的賬本，其中記錄了所有賬戶的全部交易資料。這樣的系統具有不容易被竄改資料的特點，然而此種特性會使得所需要儲存的資料只增不減，經年累月下來，對單個節點的儲存容量要求只會越來越高，一旦個體維護的節點逐漸不勘負荷，將導致此區塊鏈的中心化程度逐步上升。

無狀態區塊鏈是一種針對以上問題的改進方案，它的每一筆交易中附上了合法性證明，使得節點不需要進入硬碟查找過往賬本資訊，只要驗證交易內附的證明即可，從而使節點所需儲存資訊大幅減少。

在本論文中，我們將討論以下兩點：第一，並無必要在每一筆交易都附上證明，只要快取部分訊息，一筆交易的合法性很可能由最近出現過的其他交易的合法性推知。第二，當區塊鏈發生分叉時，必須回到分叉點再產生新區塊的快取，為此我們設計了不可變的資料結構，使得快取能夠在各種情況下被快速計算。最後，進行實驗來瞭解數種快取策略與資料結構在不同工作量（workload）下的表現。

關鍵字：區塊鏈、無狀態區塊鏈、快取、資料結構

Abstract

Cryptocurrency based on blockchain is a peer to peer trading system. In this decentralized system, each node maintain a complete ledger which records entire transaction history of all account. The system has the characteristics that it is very hard to tamper with the data. However, such characteristic only makes the data increase but do not decrease. Years after years, requirement to single node will get higher and higher. Once some entities get overwhelmed, the degree of centralization of this blockchain system will gradually rise.

Dealing with the issue, stateless blockchain is a promising approach. To be more specific, in this system, each transaction is attached with proof of validity. With this approach, there is no need for a node to access the disk to search past information of the ledger. Instead, node only verifies the proof attached to each transaction. Therefore, it will significantly reduce the space of data storage for each node.

In this paper, we will discuss the following two points. First, it only need to cache part of information instead of attaching proof to each transaction. It is highly possible to infer the validity of a transaction from other valid transaction appearing recently. Second, when blockchain forks, it have to go back to the bifurcation point and create new cache of new blocks. To reach the purpose, we propose an immutable data structure so that cache can be rapidly computed under any situation. Finally, we conduct the experiments with different workload to understand the performance of different cache strategies

and data structures.

Keywords: blockchain, stateless blockchain, cache, data structure

Contents

口試委員會審定書	iii
誌謝	v
摘要	vii
Abstract	ix
1 Introduction	1
2 背景	3
2.1 區塊鏈	3
2.1.1 交易生成	3
2.1.2 交易驗證	4
2.1.3 交易查詢	4
2.1.4 以太坊狀態儲存	4
2.1.5 狀態儲存的問題	5
2.2 無狀態區塊鏈	5
2.2.1 accumulator	6
2.2.2 vector commitment	6
3 設計	7
3.1 淺狀態區塊鏈	7
3.2 快取設計	8
3.2.1 分叉處理	8

3.2.2	持久化快取	9
3.3	快取策略	10
3.3.1	最近 k 塊	10
3.3.2	LRU	11
3.4	持久化 LRU 算法	12
3.4.1	雜湊 + 紅黑樹	13
3.4.2	雜湊 + 順序樹	14
4	相關研究	19
4.1	Utreexo	19
4.2	Making Data Structure Persistent	19
5	未來工作	21
5.1	更多快取策略	21
5.2	快取拆分	21
6	Conclusion	23
	Bibliography	25

List of Figures

2.1	一般區塊鏈、無狀態區塊鏈交易比較	6
3.1	不一致的快取	8
3.2	區塊鏈分叉	9
3.3	分叉頻繁切換	9
3.4	區塊 7a 為粉紅色區塊中的所有交易資訊	10
3.5	LRU 資料結構	12
3.6	雜湊 + 紅黑樹	14
3.7	不可變紅黑樹	14
3.8	以網連接節點	15
3.9	滿二元樹連接節點	16
3.10	雜湊 + 順序樹	16
3.11	對順序樹進行一連串操作	17

List of Tables

Chapter 1

Introduction

2008 年，中本聰發佈了比特幣的白皮書 [9]，這是一個以區塊鏈為根本的新型虛擬貨幣系統，這個系統中的每個節點都會保留一個完整的賬本，如此確實使得該系統的去中心化程度達到相當高的程度，但不可磨滅的賬本資訊也導致每個節點所需要的儲存空間逐年增加。

在十多年後的現在，人們需要上百 GB 的硬碟空間，才能夠運行最為知名的虛擬貨幣系統比特幣、以太坊 [11] 的一個節點，這使得部分由私人維護的節點逐漸不堪負荷。若退而求其次，僅儲存驗證新區塊所需的資訊，亦即比特幣中的 UTXO、以太坊中的世界狀態，也需要數 GB 到數十 GB 的硬碟空間，不止是在空間上會對硬碟的有所要求，速度上也是，傳統硬碟的隨機存取太慢，驗證以太坊區塊的速度已經跟不上共識生成區塊的速度，如此迫使以太坊節點的維護者必須購買較為昂貴的固態硬碟，進一步提高了節點的運行成本。

為此，虛擬貨幣的社群開始嘗試提出一些解決方案，無狀態區塊鏈就是其一。無狀態區塊鏈僅要求每個節點儲存區塊頭，但每一筆交易必須附帶合法性證明，如此大幅降低了空間需求，並且無需在硬碟查找過去狀態就能夠驗證交易合法性。

本研究嘗試進一步優化無狀態區塊鏈，我們讓無狀態區塊鏈的節點有共識的維護快取，若一筆交易的付款人曾在最近的其他交易中出現過，就有機會從快取中推知此交易仍然是合法的，此時便可以在交易中省略合法性證明，進而降低了交易的大小，也減少廣播時所需要的網路流量。

但是，如何高效的維護快取成了新的問題。每一筆區塊接上區塊鏈時，都會有

一個對應的快取，而臨近區塊上的快取很可能有所重疊，我們分別為不同的快取策略，最近 k 塊、LRU，設計了持久化的資料結構，並且進行實驗考察了它們的性能。

論文的其餘章節依序如下：第二章講述相關研究，第三章說明背景以及基礎知識，第四章開始說明淺狀態區塊鏈的設計，包含快取的策略以及快取使用的資料結構，第五章為實驗的設計與結果，第六章為未來展望，第七章為總結。

Chapter 2

背景

2.1 區塊鏈

在區塊鏈網路中的每一個全節點 (full node) 都會維護一份完整的賬本，賬本記錄了過往所有區塊中的交易，由此我們能夠知曉交易發生的時間點、交易的付款人收款人、交易的金額，付款人得以向收款人證明自己確實已經付款。

區塊鏈中的資料主要由交易構成，一個交易的生命週期如下：

1. 生成
2. 廣播
3. 礦工驗證並包入區塊
4. 成為區塊鏈的一部分，供後人查詢歷史

為了能夠完成這些工作，節點必須快速地檢索交易，因此，一個一個區塊的尋找是不切實際的，通常節點會內置一個資料庫，資料庫的索引能夠高速完成查詢工作。

以下分別討論執行生成、驗證、查詢這三項工作時，節點必須儲存哪些資料。

2.1.1 交易生成

在 UTXO 系統中，付款人會找到自己能控制的 UTXO，附上收款人地址後簽章。節點會根據錢包中的私鑰持續追蹤自己能花用的 UTXO，如果錢包新增私鑰，則

節點必須從新掃描所有交易來得到可用的 UTXO。

在賬戶 (account) 系統中，付款人則直接寫入金額與收款人後簽章。節點僅需要追蹤付款人的賬戶中的餘額大小。

2.1.2 交易驗證

當每個區塊來臨時，除了驗證區塊頭中的元 (meta) 訊息是否正確以外，還會一一驗證區塊中的每一筆交易。

在 UTXO 系統中，節點可以維護一個 UTXO 的集合，對於每一筆交易，節點去驗證交易的輸入是否存在於 UTXO，並且驗證交易的簽名。

也就是說，驗證交易所需要儲存的狀態是一個集合：

$$state = \{UTXO\}$$

而在支援智能合約的賬戶系統中，對於一般交易，節點必須知道付款人是否有足夠的餘額；若涉及智能合約，則需要額外執行合約程式碼，欲執行合約，節點需要知道當前合約的狀態。

我們可以用一個鍵值對來表示賬戶系統在驗證交易時所需要儲存的資訊：

$$state = f : address \rightarrow account$$

給一個地址，我們能得到對應賬戶的資訊，可能是餘額，也可能是智能合約設置的狀態。

2.1.3 交易查詢

最常見的查詢即為

2.1.4 以太坊狀態儲存

TODO: 本小節我們以以太坊為例，說明狀態儲存的細節

2.1.5 狀態儲存的問題

區塊鏈的狀態儲存方式造成了兩個危害

1. 佔用硬碟空間大
2. 驗證交易時需要硬碟隨機存取

佔用硬碟空間大

永遠增長的區塊已經對節點維護者造成負擔，比特幣與以太坊佔用的空間都已經超過 200 GB，如果在 AWS 上租用機器來運行以太坊節點，每個月需花費 50 - 70 美金，若這個成本降不下來，慈善節點的數量勢必會不斷下滑，根據 <https://ethernodes.org/> 的資訊，2018 年仍有將近兩萬個節點，2020 年已經下降到七千。

另外一個問題是，以太坊中存在許多智能合約已經不再被使用，例如 EOS 的首次貨幣發行 (ICO)，在發行結束後，該合約已無作用，但所有的全節點卻仍得繼續儲存它的歷史數據。這類僅有短暫效力的合約這無疑造成了大量的空間浪費。

需要硬碟隨機存取

交易中的賬戶地址沒有規則，因此當節點驗證交易，去獲取賬戶狀態時，必須進行隨機存取，一個區塊中有幾筆交易，就必須進行幾次隨機存取。傳統硬碟的存取依賴讀寫頭移動跟碟片旋轉，隨機操作的效率低下，以致於使用傳統硬碟的節點甚至無法跟上以太坊網路 15 TPS (transaction per second) 的交易速度。不得不使用造價較為昂貴的固態硬碟又進一步加劇了節點維護者的經濟負擔。

2.2 無狀態區塊鏈

為了解決上述問題，區塊鏈社群提出了狀態租賃、狀態修剪、無狀態區塊鏈等等改進方案。

以下介紹無狀態區塊鏈的概念。

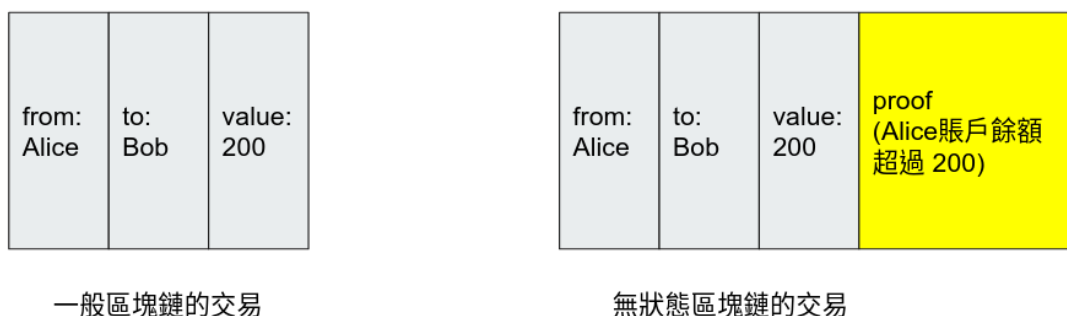


Figure 2.1: 一般區塊鏈、無狀態區塊鏈交易比較

無狀態區塊鏈的核心想法在於，節點能否在只儲存區塊頭的情況下，仍然能夠驗證交易的正確性？

可以的，如果我們在交易中附上一些額外資訊，並且以區塊頭來驗證這些額外資訊無誤，就能夠利用這些額外資訊來驗證交易的正確性了。

在 UTXO 系統中，可以在每個區塊頭裡都放入當前所有 UTXO 集合所構成的梅克爾樹的根，而在每個交易中，額外加入了它所用到的所有 UTXO 的梅克爾路徑，如此，節點就可以藉由計算區塊頭中的梅克爾根以及交易中的梅克爾路徑是否吻合，來推論交易是否有效。

在帳戶系統中，則可以讓所有帳戶狀態構成一顆 Patricia 梅克爾樹或是稀疏梅克爾樹，並且在區塊頭裡放入根，在交易中附上付款人的餘額，以及付款人狀態的梅克爾路徑，如此，就可以確認付款人的餘額，再去看它是否足夠支應本次交易。

2.2.1 accumulator

accumulator[2] 可以看做是一個集合的摘要

2.2.2 vector commitment

vector commitment[4] 比 accumulator 更強，

近年來 vector commitment 領域也持續出現不同針對無狀態區塊鏈的新構造，有的能夠將多個證明打包以降低空間 [3]，有的則有同態加法的特性，使得製作交易時付款人不用知道收款人的當前餘額 [5]。

Chapter 3

設計

無狀態區塊鏈為了縮減硬碟佔用空間，必須在交易附上證明，導致所需網路流量增大；為了省去硬碟隨機存取所耗用的時間，必須花費 CPU 計算能力來驗證證明。

無狀態區塊鏈相較於一般區塊鏈做出了一些取捨 (trade-off)，而淺狀態區塊鏈的目的是讓這種取捨不再是全有或全無（全部都附上證明或全部不附上證明），使得狀態儲存的程度變得可調節。

3.1 淺狀態區塊鏈

無狀態區塊鏈中的一個區塊，如果多份交易的付款人、收款人都相同，交易的證明也會是完全相同的，這樣重複的資訊顯然可以省略。

擴展這個想法，如果我們快取最近出現過的交易中的賬戶資訊，則下一次收到同樣賬戶的交易時，也不需要去驗證證明。

再更進一步，讓整個網路上的節點都遵循同一套規則來記錄快取，使得所有節點對於什麼時候要附證明、什麼時候不用附證明有共識，那在區塊廣播的時刻，節點就能夠剝離掉不必要的證明，進而省下網路流量。

淺狀態相對於無狀態，犧牲了一些記憶體空間，但是只要存取快取的速度快過驗證證明的速度，淺狀態區塊鏈就有望在效能上勝過無狀態區塊鏈。

如果節點在驗證同一個區塊時，使用的快取不一致，將會導致某些節點承認該區塊，某些節點不承認，從而導致分叉。

譬如，如果節點快取住它高度最高的 k 個區塊中的交易資訊，當網路延遲，不同節點中的鏈分叉情形不同時，快取就會不一致，見下圖：

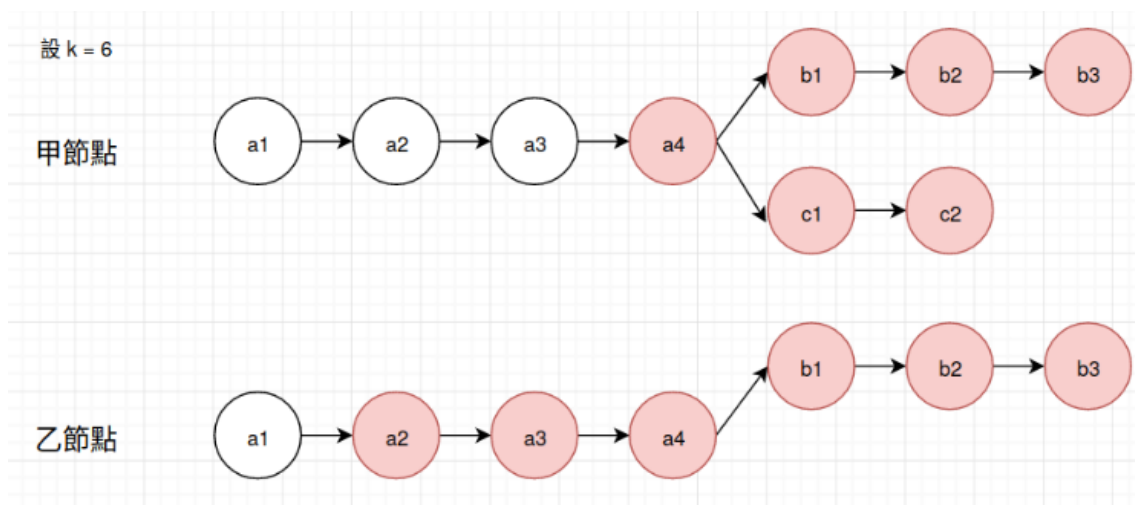


Figure 3.1: 不一致的快取

粉紅色表示在快取，白色區塊則表示不在快取。此時若有一個不附證明的交易，付款方在 a2 區塊出現過，則乙節點會接收交易，甲節點則不會接收。

3.2 快取設計

一個簡單的設計準則可以避免前述的錯誤：每一個區塊都有自己的快取，快取的內容僅僅由該區塊所在的鏈的資料所決定。如此，我們把樹狀結構縮減為一個串列 (list)，而不同節點上同個區塊所在的串列必定是相同的，只要每個節點都用同樣的確定性算法從這個串列計算出快取，就能夠保證每個節點驗證同一個區塊時的快取一致。

3.2.1 分叉處理

觀察以下這條鏈：

此時，區塊 4b 嘗試接上區塊 3，因此它必須基於區塊 3 的快取來進行驗證。也就是說，如果我們在接上區塊 4a 時，將區塊 3 的快取直接修改而稱為區塊 4a 的快取，那當我們要接區塊 4b 時，就無從知悉區塊 3 的快取了，使用某些快取策略時，我們可以透過回退 (roll back) 來取回區塊 3 的快取，但當使用某些快取策

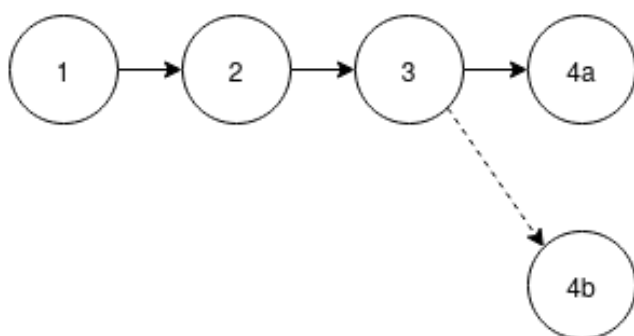


Figure 3.2: 區塊鏈分叉

略時，遺失的快取無法輕易找回。

即使使用可以回退的快取策略，當分支切換越頻繁，回退的次數也會越頻繁，而回退的效能可能就會成為瓶頸。

例如在圖 3.3 中，如果同時維持 a, b 兩條分支，則每次接收到非當前分叉的區塊時，都要進行回退，並且隨著分叉的差異越大，回退的長度也越長，若從 7a 要走到 7b，就必須先退回 3，再走向 7b，若之前曾經從 6a 走到過 6b，則過程中的大部分運算都是相同的，這顯然是一種浪費。

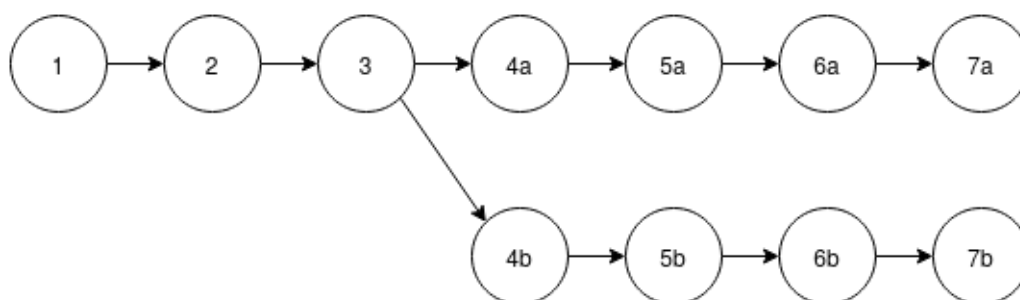


Figure 3.3: 分叉頻繁切換

3.2.2 持久化快取

我們採用另外一種思路：在每個區塊上都保留它自己的快取，當新區塊要接上鏈的時候，就可以直接取用它前一個區塊的快取，無需重新計算。換句話說，我們

採用全持久化資料結構 (fully persistent data structure) [6] 來儲存快取，每接受一個區塊，就生成一個快取的版本。

在這個方案中，我們必須定時刪除太舊 (例如，距離最長鏈超過 20 個區塊) 區塊的快取，以將整條鏈的快取大小限制在一定範圍，否則任由快取無限增長，將導致記憶體用罄，以致於必須使用到硬碟，快取就變得沒有意義了。

這個方案帶來了一個立即問題，如果我們每次都複製前一個區塊的快取，那快取的所佔用的空間將會正比於未刪除的快取的數量。然而，相鄰區塊中的快取有很高的相似性，若能選用適當的資料結構來讓相鄰區塊共享快取，將能夠有效提高空間使用率。

3.3 快取策略

不同的快取策略在應對不同工作量 (workload) 時的命中率 (hit rate) 各不相同，以下討論實作簡單的「最近 k 塊」策略、FIFO 策略，以及實作較為複雜，但經驗上命中率較高的 LRU 策略。

3.3.1 最近 k 塊

在「最近 k 塊」策略中，一個區塊的快取即為由該區塊開始，由高往低取 k 個區塊，這 k 個區塊中出現過的交易中的資訊。

以下為 $k = 6$ 的示意圖

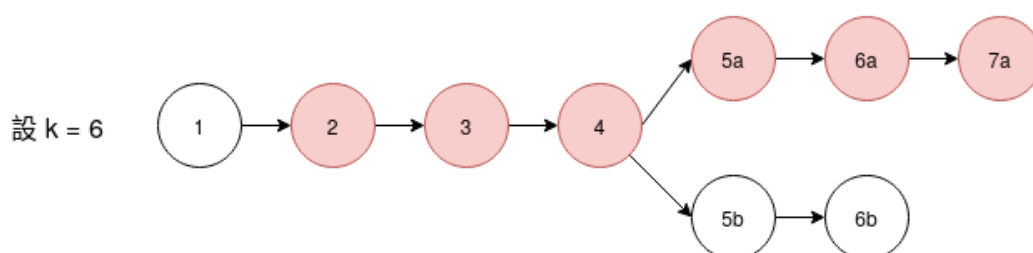


Figure 3.4: 區塊 7a 為粉紅色區塊中的所有交易資訊

可以用一個鍵值對 (key value pairs) (其底層可為雜湊表 (hash table)、平衡搜尋樹 (balanced search tree)、跳錶 (skip list)..... 等等) 來表示快取，若考慮每次重算

的情境，例如在圖 3.4 中，要在 7a 後方額外加入一個 8a 區塊，則我們加入 8a 區塊中的交易資訊，並丟掉只在 6a 中出現但沒有在其餘區塊中出現的交易資訊。

「最近 k 塊」的快取可以回退，跟前進時的算法一樣，只是換了個方向。

當考慮全持久化時，我們可以選用可持久化的鍵值對資料結構，例如雜湊 [1][10]、搜尋樹都有相對應高效成熟的持久化實作，若一個快取有 n 個鍵，則持久化雜湊 / 搜尋樹插入 / 刪除一筆鍵值時，時間、空間複雜度皆為 $O(\log(n))$ 。

3.3.2 LRU

LRU 是 least recently used 的縮寫，這種策略中，快取大小是固定的，若快取已滿，在插入新資料之前必須先丟棄一筆資料，LRU 會去挑選快取中所有資料中最久沒被用到的那一筆來丟棄。

LRU 之所以比 FIFO 的命中率更高，是因為以太坊的歷史數據顯示，(1) 一個帳戶花錢之後，很可能又接著花錢。(2) 一個帳戶收到錢之後，很可能會馬上將錢花掉。LRU 由於會更新資料的使用時間，得以一直快取住頻繁出現的資料，FIFO 則只看資料進入快取的時間，只要快取失效會發生，快取需要被抽換，那即使某些資料頻繁出現，遲早還是會被丟掉。

抽象來看，LRU 是一種支援兩個介面的資料結構，

- `get(key)`
- `put(key, value)`

`get(key)` 時，若 LRU 存在該鍵，則返回對應值，並且將 `key` 的使用時間調整到最新。

`put(key, value)` 時，若 LRU 空間未滿，直接插入一筆鍵值對，這筆新鍵值對的使用時間為最新；若 LRU 空間已滿，就要找出當前快取中使用時間最舊的丟掉，再插入新鍵值對，此新鍵值對的使用時間亦為最新。

對應到淺狀態區塊鍵的情境中，每當一個區塊要接上，我們要計算新區塊快取時，會把一系列帳號資訊的讀取跟修改操作轉變成 `get` 跟 `put`，鍵是帳號地址，值是帳號狀態，然後在 LRU 底層的資料結構上進行相應操作。

當在淺狀態區塊鏈中使用 LRU 策略時，是無法高效回退的。插入一筆鍵值對時，要丟棄的資料可能在好幾個區塊之外，然而被修改的 LRU 無從得知這筆資料要去哪個區塊尋回。

3.4 持久化 LRU 算法

在討論持久化 LRU 算法之前，我們先觀察如何在軟體上高效實作 LRU 快取，調查 github 上多個高使用量的 LRU 函式庫，內部資料結構都是雜湊表與雙向鏈表 (doubly linked list) 的組合：

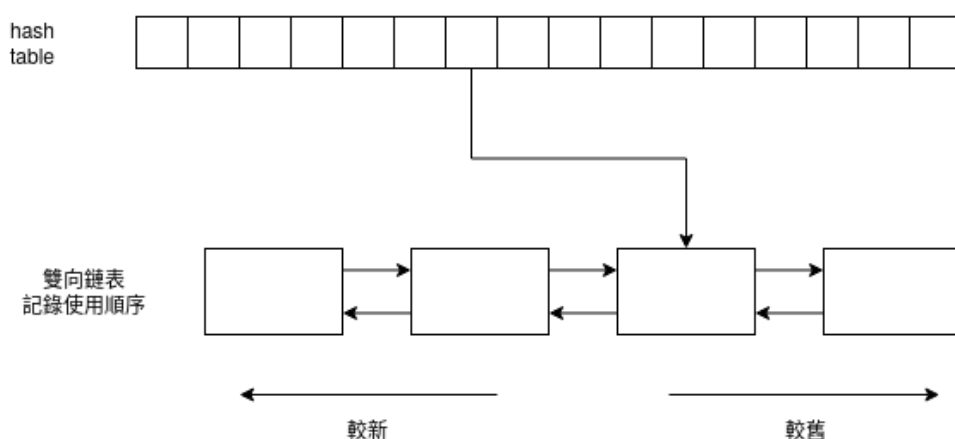


Figure 3.5: LRU 資料結構

執行 get 時，透過雜湊得到指向節點的指針，獲取資料，並且將指針指向的鏈表節點移動至鏈表頭部（最左側）。執行 put 時，若快取命中，更新節點的值，並將節點移動至鏈表頭部，若快取未滿，從頭部加入快取值，並將其指針放入雜湊表，若快取已滿，拔出雙向鏈表的尾部（最右側）節點，並且在雜湊表中移除該舊鍵，然後在頭部加入快取值，放指針到雜湊表。

觀察到 LRU 需要記錄的資訊有二：

1. 由鍵找到值（鍵值對）
2. 各個鍵的順序資訊

在前述的雜湊表 + 雙向鏈表的實現方案中，雜湊表負責 (1)，雙向鏈表則負責 (2)，注意到，雙向鏈表極為自然的記錄了順序關係，它甚至不需要記錄確切的使用時間。

一個簡單的想法是，我們直接把雜湊跟雙向鏈表的持久化替代品組合起來，就得到了一個持久化 LRU，然而，雖然持久化雜湊有很成熟的替代品，持久化雙向鏈表卻沒有。

因此，我們需要用其他可高效持久化的資料結構來取代雙向鏈表，進一步抽象雙向鏈表做的事情有：

- 更新一個節點的使用時間到最新
- 刪除使用時間最舊的節點
- 插入新節點，新節點的使用時間為最新

以下，先討論了如何用紅黑樹 [8]（平衡搜尋樹）來完成上述任務，再介紹我們設計的順序樹資料結構，相比紅黑樹，它更加高效。

3.4.1 雜湊 + 紅黑樹

我們嘗試使用紅黑樹來記錄順序資訊。首先，為每一筆賬戶資訊設置一個獨一無二的時間序，這個時間序可以很容易得到，例如說設置成 $block_height * max_tx_in_one_block + tx_number$ 。

然後，以時間序做為鍵，賬戶資訊為值，建造一棵紅黑樹。雜湊表則用賬戶地址為鍵，對應的時間序為值。

get 時，先在雜湊表中由賬戶地址得到時間序，再到紅黑樹中由時間序得到賬戶資訊。例如，在圖 3.6 中，我們會先從雜湊表得到賬戶的時間序為 243，再到紅黑樹中查找 243。

查找後，需更新使用時間。具體操作為修改雜湊表中地址對應的時間序，並移除紅黑樹中的原節點，加入新時間序做為鍵。

put 類似於 get，但需要修改賬戶資訊。

圖 3.6 表示不可變紅黑樹的共享結構。該圖中，快取的大小設為 8。狀態 1 時，只有 7 筆資料，狀態 2 對狀態 1 插入 14，資料變成 8 筆，狀態 3 再對狀態 2

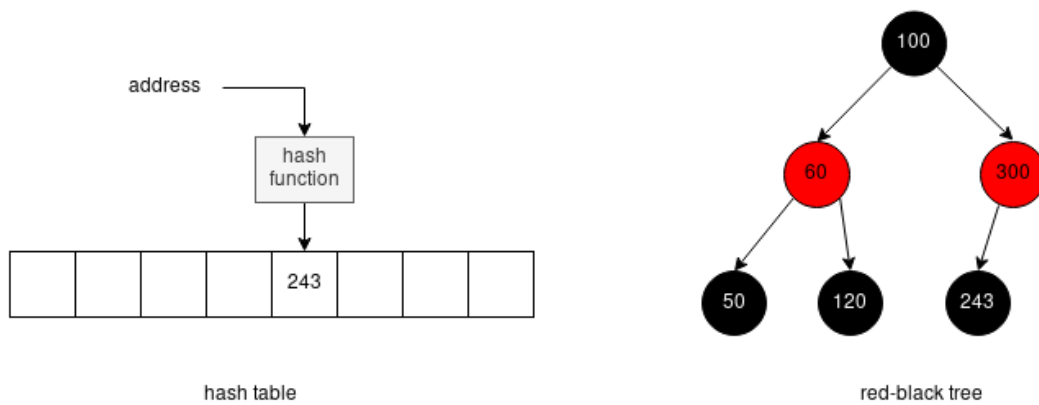


Figure 3.6: 雜湊 + 紅黑樹

插入 15，由於快取已滿，必須先刪除時間序最小的資料，也就是最左下角的紅色 7。

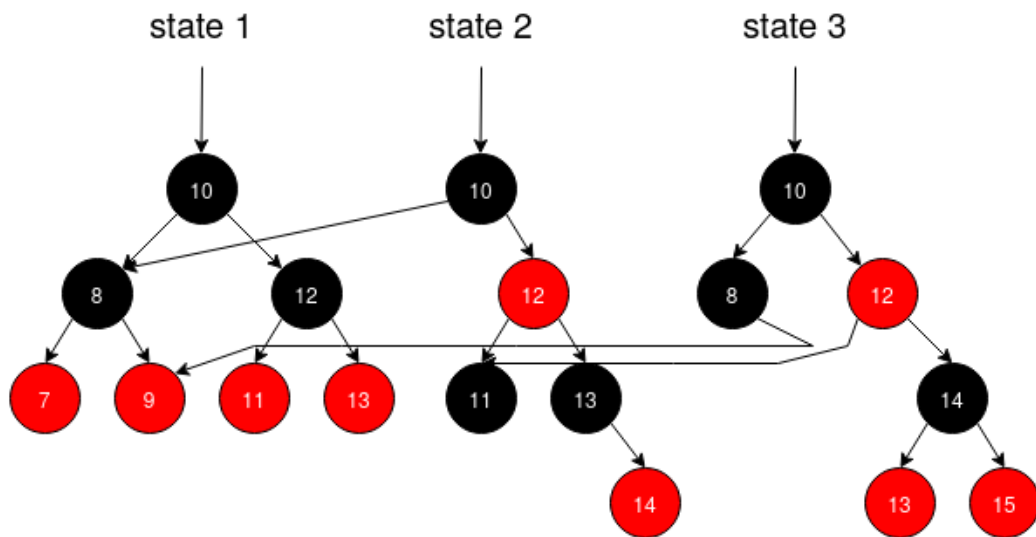


Figure 3.7: 不可變紅黑樹

3.4.2 雜湊 + 順序樹

雙向鏈接串列以節點之間的指向關係記錄順序關係，紅黑樹卻必須額外記錄時間序，此外，原本透過雜湊就能一次查找到賬戶資訊，紅黑樹方案卻得地址 -> 時間序 -> 賬戶資訊兩段式地查找。

雙向鏈表無法以路徑複製來變換為不可變資料結構的原因在於，兩個相鄰節點總是互指，一旦以路徑複製的方式修改節點，就得複製整個鏈表。於是我們思考，不要用互指的方式來連接節點，就可以順利路徑複製。

想像在這些節點的背後編織一張網，然後將它們粘在一起（圖 3.8）。

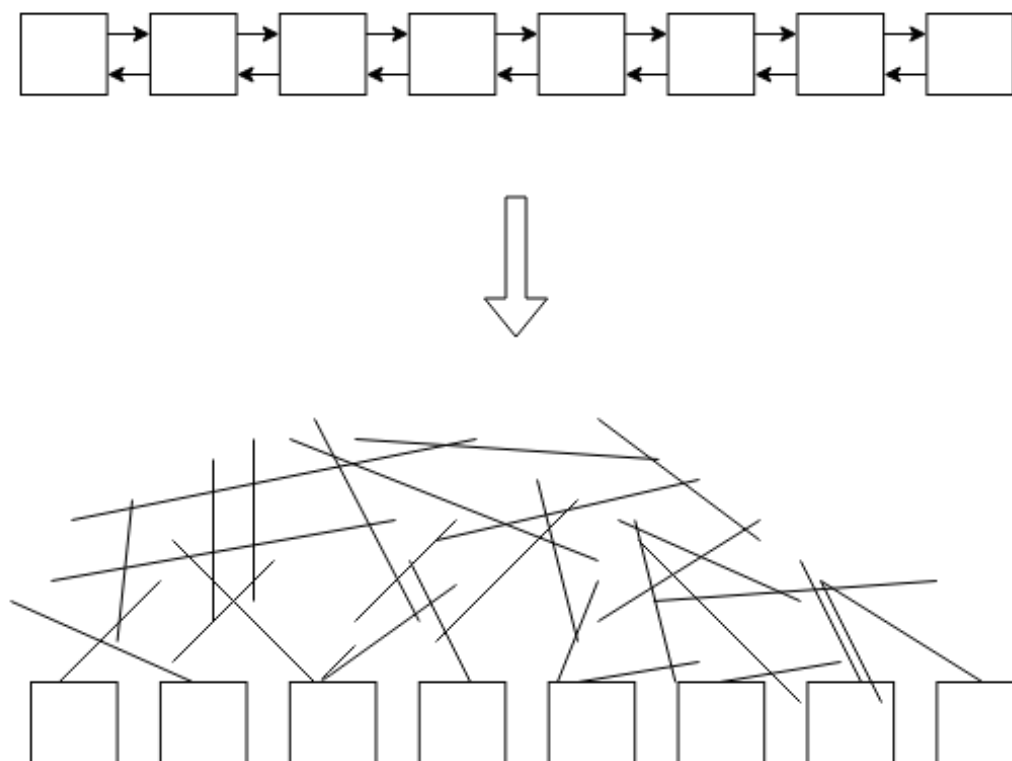


Figure 3.8: 以網連接節點

這個網狀結構最簡單形式就是一棵滿二元樹 (full binary tree) (圖 3.9)。

我們將利用滿二元樹來儲存順序資訊的資料結構稱為順序樹，以下開始一一介紹順序樹的各種操作。

若快取的容量為 n ，順序樹的高度將會設置為 $1 + \lceil \log_2 n \rceil$ ，也就是說，葉子的數量至少是快取容量的兩倍。圖 3.10 就是一棵容量為 4 的順序樹，它有 8 個葉子節點。

應用於 LRU 快取時，雜湊表所儲存的值會是一個指向順序樹葉子節點的指針，只要一次雜湊表查詢就能取得資料。(見圖 3.10)

順序樹將所有資料都存放在葉子節點，每份資料按照使用時間的新舊來排列，本文往後都按照資料越新，葉子的位置越右側的慣例來解釋跟畫圖。

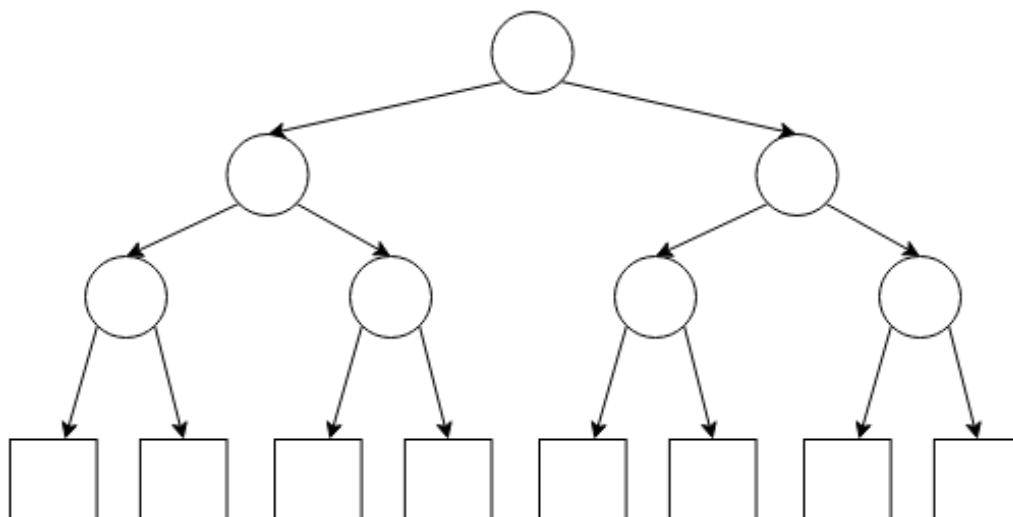


Figure 3.9: 滿二元樹連接節點

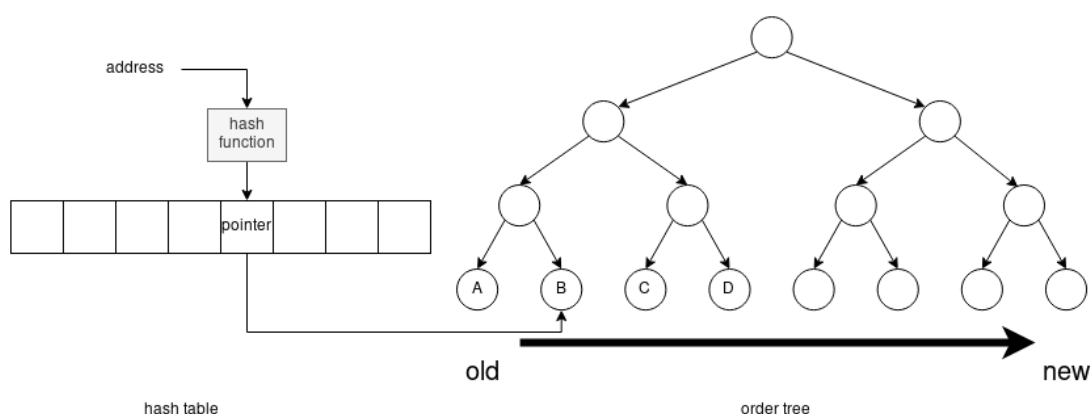


Figure 3.10: 雜湊 + 順序樹

順序樹的葉子有些有存放資料，有些沒有，我們將有存放資料的葉子稱為「有用葉子 (used leaf)」，沒有存放資料的葉子稱為「無用葉子 (unused leaf)」。

get 時，將被查詢到的有用葉子改為無用的，並在當前最右有用葉子再往右一個的無用葉子中寫入原葉子的資料。put 時，先找出最左側的有用葉子，將之改為無用的，並且在當前最右有用葉子再往右一個的無用葉子中寫入資料。

無論是 get 還是 put，每次都會往右多佔用一個葉子，如果當前最右的有用葉子已經在整棵樹的最右側了，就必須執行一次全複製，把所有有用的葉子節點按照原本的順序緊密的排列在新順序樹的左側。

圖 3.11 演示了一連串的順序樹操作，其中狀態 7 到狀態 8 的時候發生了全複

製。圖中淺藍色節點表示它是無用的，注意到我們將所有葉子都無用的子樹的所有節點也都塗成淺藍了。

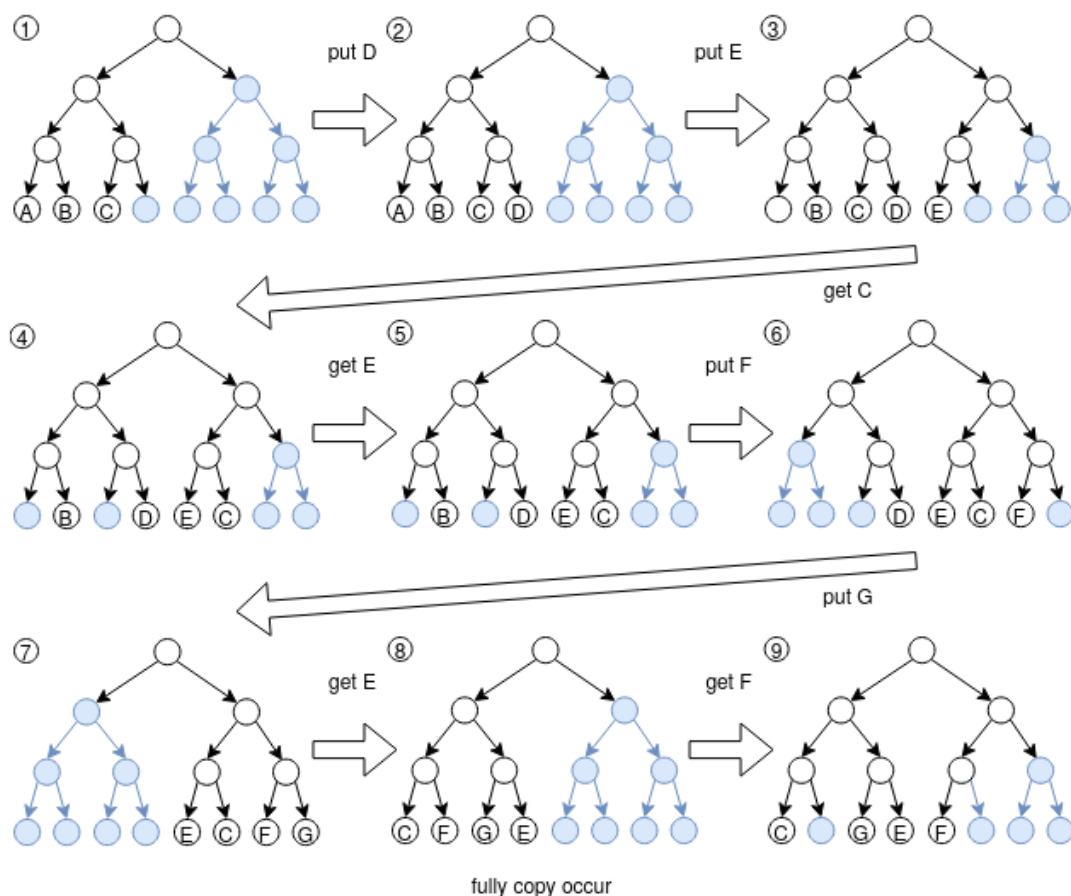


Figure 3.11: 對順序樹進行一連串操作

在實作中，不需要真的為淺藍色節點分配記憶體空間，指向純淺藍色子樹的指針會是一個空指針 (null pointer)。

操作細節

我們接著探討 get, put 的操作細節。

要如何找出最左側的有用葉子？從根部開始往下，若左兒子非空，往左走，若左兒子為空，往右走，走到高度為零時，就走到最左側有用葉子了。

從雜湊表中得到有用葉子的指針時，要如何知道該葉子在順序樹中的位置，以刪除它？在葉子節點中，會儲存一個序號表示自己是從左到右的第幾個葉子，刪除葉子時，會從根一路往下，判斷 $index \& (1 \ll height)$ 是否為 0 來決定往左還

是右。

時空間複雜度分析

以下分析中，順序樹容量皆為 n 。

若沒有發生全複製，get, put 都從根到葉子兩次，順序樹的高度是 $O(\log n)$ ，時空間複雜度都是 $O(\log n)$ 。

如果發生全複製，就得遍歷一次順序樹，將所有有用葉子集結建一棵新樹，注意到滿二元樹的總節點數量是葉子數量 * 2 - 1，不會超過 $n * 8$ ，因此全複製的時空間複雜度是 $O(n)$ 。

$O(n)$ 的複雜度似乎有點高，但是每一次的 get/put 操作都只會讓有用葉子往右走一格，至少要 n 次操作，才會使有用葉子走到整棵樹的最右側，因此，若把全複製的成本攤銷到每一次操作，時空間複雜度是 $O(1)$ ，get, put 的時空間複雜度依然是 $O(\log n)$ 。

嚴格來說，一個葉子的佔用的空間是 $O(\log n)$ ，因為葉子必須記錄自己的序號，而序號在二進位的長度與順序樹的高度相同。但這不影響前述的空間複雜度分析，即使考慮這點，時空間複雜度依然是 $O(\log n)$ 。況且，實作中不可能會創建容量超過 CPU 位址空間大小的順序樹，序號必定能用 64bit 的整數存下。

Chapter 4

相關研究

4.1 Utreexo

Utreexo [7] 應用梅克爾樹構成的森林設計了一種新的 accumulator，基於此種 accumulator，Utreexo 節點不需要真正的儲存比特幣所有的 UTXO，就能夠驗證區塊。

然而，比特幣網路已經存在多年，大幅修改協議使得所有節點改為無狀態並不現實，Utreexo 提議可以採用一個橋接節點作為比特幣全節點與 Utreexo 節點的中介，當區塊廣播由 Utreexo 節點到全節點時，會剝離掉證明，反之則補上證明。

該篇論文也提及到，分析比特幣的歷史記錄，約有 40% 的 UTXO 會在 20 個區塊內被消耗，將近 80% 的 UTXO 會在 1000 個區塊內被消耗，因此使用少量的記憶體空間來快取最近出現的 UTXO，就能夠省略傳輸許多證明。

與本研究的差別在於，本研究考慮基於帳號的虛擬貨幣，而非基於 UTXO 的，同時，本研究也額外考量了分叉時的情況。

4.2 Making Data Structure Persistent

該篇論文 [6] 提出了多種算法能夠使得任何基於節點的資料結構半 / 全持久化 (partial/fully persistent)，根據該論文的 node-splitting 算法，甚至能夠在 $O(1)$ 時間複雜度內完成雙向鏈表的插入、修改。

然而，該論文並沒有提出刪除持久化資料結構的老舊版本的方法，這使得這些

算法難以應用到淺狀態區塊鏈的快取上，因為無法刪除過去版本將導致快取所需的空間始終無法釋放，最終耗盡記憶體容量。

Chapter 5

未來工作

5.1 更多快取策略

工作量 (workload) 不同時，最佳的快取策略也不同，FIFO, LFU, Second-chance, 等等快取策略若要應用進淺狀態區塊鏈，就必須分別設計如何持久化地儲存它們。

5.2 快取拆分

若要讓淺狀態區塊鏈支援智能合約，單以一個賬戶為快取單位會導致一些問題，因為每個智能合約的狀態所佔用的空間可能相差巨大，如果快取中的每一個狀態都非常大，那整個快取就會佔用很多空間，反之若快取中的狀態都很小，整個快取佔用空間就很小，當快取佔用的空間不穩定時，節點的維護者就很難為自己的機器設定參數。

我們可以借鑑作業系統的分頁設計，將智能合約的狀態切割成等體積的多個小塊，每次快取只會存取到用到的小塊，如此就能夠使快取佔用空間變得穩定。

Chapter 6

Conclusion

本論文描述了淺狀態區塊鏈的設計，並探討了多種快取策略的優缺點。特別對於 LRU 快取策略，我們先嘗試持久化雜湊加持久化紅黑樹的組合，再進一步提出了一種新穎的資料結構，順序樹，讓它與持久化雜湊組合，得到一種更高效的持久化 LRU 實作。

最後，進行了實驗來評估這兩種不同的 LRU 設計。

Bibliography

- [1] P. Bagwell. Ideal hash trees. Technical report, 2001.
- [2] J. Benaloh and M. De Mare. One-way accumulators: A decentralized alternative to digital signatures. In Workshop on the Theory and Application of Cryptographic Techniques, pages 274–285. Springer, 1993.
- [3] D. Boneh, B. Bünz, and B. Fisch. Batching techniques for accumulators with applications to iops and stateless blockchains. In Annual International Cryptology Conference, pages 561–586. Springer, 2019.
- [4] D. Catalano and D. Fiore. Vector commitments and their applications. In International Workshop on Public Key Cryptography, pages 55–72. Springer, 2013.
- [5] A. Chepurnoy, C. Papamanthou, and Y. Zhang. Edrax: A cryptocurrency with stateless transaction validation. IACR Cryptology ePrint Archive, 2018:968, 2018.
- [6] J. R. Driscoll, N. Sarnak, D. D. Sleator, and R. E. Tarjan. Making data structures persistent. In Proceedings of the eighteenth annual ACM symposium on Theory of computing, pages 109–121, 1986.
- [7] T. Dryja. Utreexo: A dynamic hash-based accumulator optimized for the bitcoin utxo set. Technical report, IACR Cryptology ePrint Archive, 2019.
- [8] L. J. Guibas and R. Sedgewick. A dichromatic framework for balanced trees. In 19th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (sfcs 1978), pages 8–21. IEEE, 1978.

- [9] S. Nakamoto. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. Technical report, Manubot, 2019.
- [10] J. P. B. Puente. Persistence for the masses: Rrb-vectors in a systems language. Proceedings of the ACM on Programming Languages, 1(ICFP):1–28, 2017.
- [11] G. Wood et al. Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger. Ethereum project yellow paper, 151(2014):1–32, 2014.