

第三章 晶片架構與資料流控制設計

本研究所提之指紋前處理與編碼之可撓性與可擴充性 VLSI 晶片設計，簡稱指紋辨識晶片(Fingerprint Recognition Chip, FRC)。FRC 可細分為三大功能模組：輸出入介面模組、資料流向操控模組以及指紋前處理與編碼運算模組，如圖 10 所示。以下章節將分別對晶片架構及資料流控制的設計方式逐一說明。

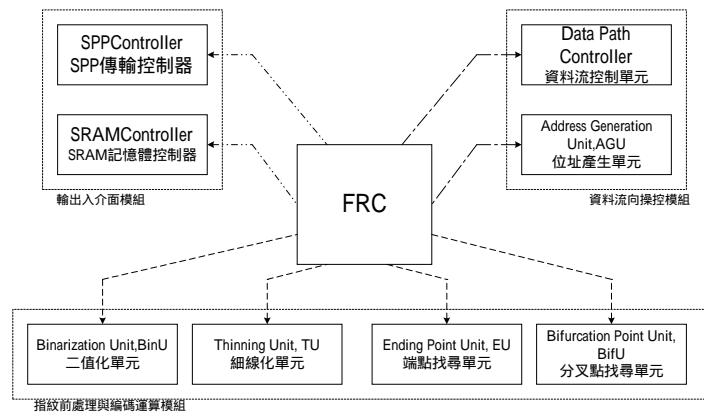


圖 10 FRC 功能模組

第一節 晶片架構

FRC 的功能為具有指紋前處理(preprocessing)及編碼(encoding)功能的晶片。在本研究的晶片設計過程中，使用可撓性(flexible)與可擴充性(scalable)的原則，以便未來擴充指紋辨識其它功能硬體化電路。其中可撓性的設計，將使本設計架構可適應不同的演算法；可擴充性的設計，可使得所設計的晶片，擁有易於擴充影像遮罩尺寸的彈性空間。

FRC 的影像輸入(input)為經過影像切割(segmentation)處理後的 200x200 8bit 灰階(gray level)的指紋影像，輸入的指紋影像，將先經由 FRC 硬體之二值化(binanzation)與細線化(thinning)處理，再透過端點(ending point)與分叉點(bifurcation point)的運算，即可得到指紋的特徵影像。其中二值化與細線化的動作屬於指紋前處理硬體化的部份，而端點與分叉點的找尋則為屬於編碼硬體化的部份，FRC 的整體功能與處理流程如圖 11 所示。

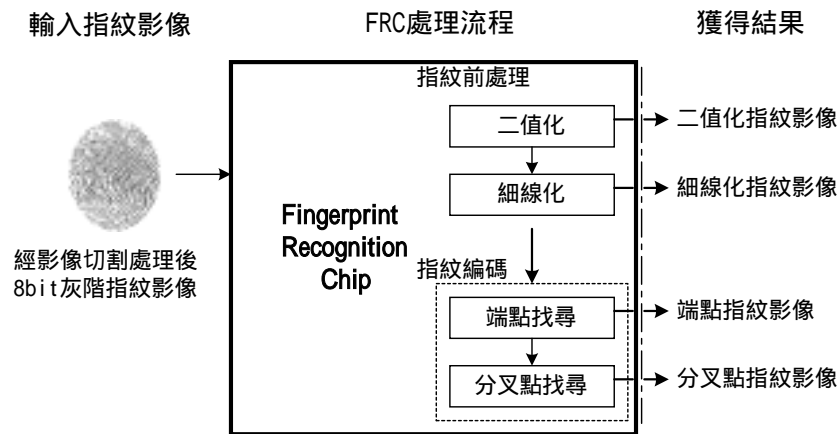
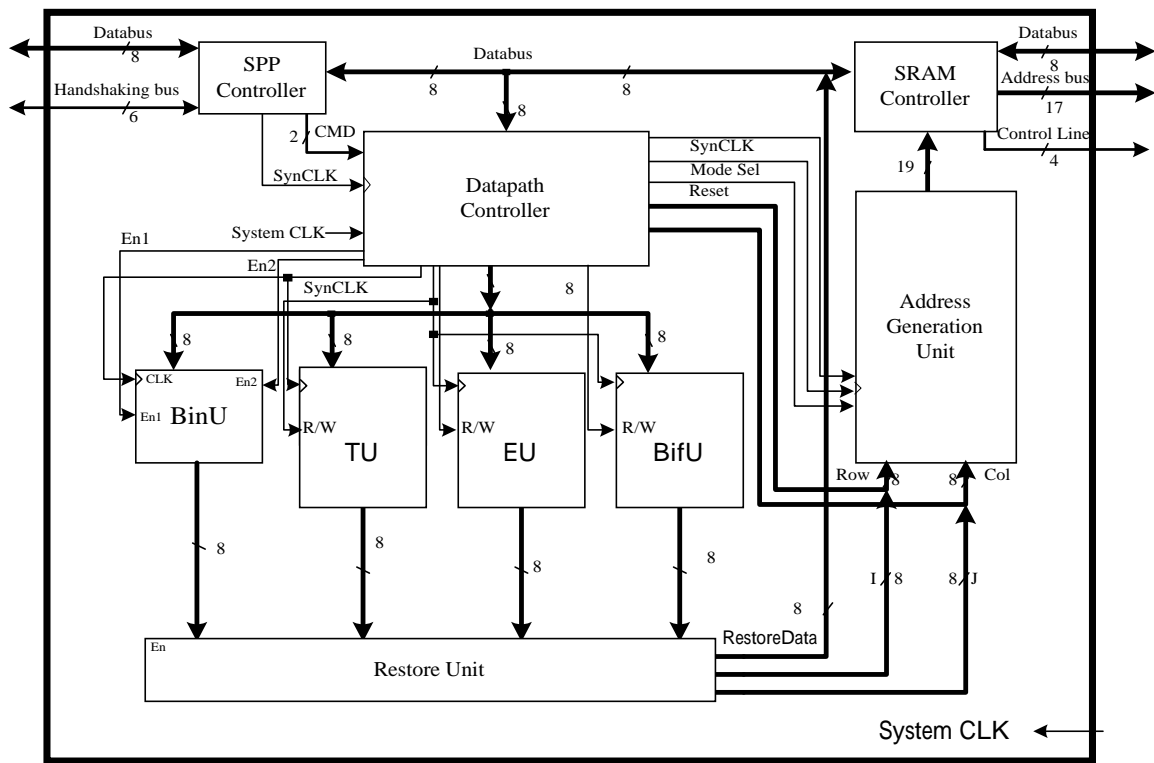


圖 11 晶片功能與處理流程

根據圖 11 設計 FRC 晶片功能模組架構如圖 12 所示，在 FRC 電路中，包含指紋前處理單元：二值化處理(Binarization Unit, BinU)與細線化處理(Thinning Unit, TU)；指紋編碼運算單元：端點找尋運算(Ending Unit, EU)與分叉點找尋運算(Bifurcation Unit, BifU)。

為配合晶片的驗證測試功能，必需另行設計輸出入介面單元；命令/資料交握協定控制器(SPP controller, SPPCtrl)，用來與 PC 端完成指紋灰階影像下載(download)與將運算結果上傳(dump)的動作；外掛式記憶體存取控制器(SRAM controller, SRAM Ctrl)用來產生符合外掛式記憶體讀出或寫入資料的時序。整個 FRC 資料流的控制，與各功能模組的協調，將由資料流控制器(DataPath Unit, DPU)來負責，可視為 FRC 晶片的控制單元。在影像處理的遮罩(mask)運用上，目前同時選用 3x3 與 5x5 兩種不同大小的遮罩，所以在硬體設計中，必需衡量這兩者的共用關係以及資源共用的可行性，正因如此，所以在晶片中設計了位址產生單元(Address Generation Unit, AGU)，因為遮罩所對應的記憶體位址，都不是屬於連續的。在圖 13 中，以影像大小為 10x10，並使用 3x3 遮罩為例，說明遮罩與實際記憶體位體非連續對應關係。所以 AGU 的設計，可以使得 FRC 很容易地對外掛式記憶體，以運算遮罩所對需的記憶體位址進行指紋影像資料的存取。



Remark :

- 8條(含以上)bus線
- 2~7條bus線
- 單一訊號線

Fingerprint Recognition Chip

圖 12 晶片內部功能模組架構

以影像大小為10x10為例：(寬：0x0A；高：0x0A)

P1 (0,0)	P2 (1,0)	P3 (2,0)
P8 (0,1)	P (1,1)	P4 (2,1)
P7 (0,2)	P6 (1,2)	P5 (2,2)

P1實體位址為：0x00
 P2實體位址為：0x01
 P3實體位址為：0x02
 P4實體位址為：0x02+0x0A
 P5實體位址為：0x02+0x0A+0x0A
 P6實體位址為：0x01+0x0A+0x0A
 P7實體位址為：0x00+0x0A+0x0A
 P8實體位址為：0x00+0x0A
 P 實體位址為：0x01+0x0A

由上可知，遮罩中所對應的實體位址並非連續位址

圖 13 使用 3x3 遮罩於 10x10 大小的影像中所對應之實體位址

第二節 外掛記憶體空間配置

外掛式記憶體主要功能是用來作為 FRC 運算時所需的影像暫存空間，以及存放 FRC 運算後的結果。本研究對於外掛式記憶體的存取頻率十分頻繁，FRC 運算大部份的時間幾乎花費在對於外掛式記憶體的存取上，所以在 FRC 的運算速

度上，將受限於選用的外掛式記憶體規格(延遲時間)。曾尋找 FPGA 內是否可提供符合本研究的記憶體容量(200KByte x 8)，但經比較過一般市面上的各家廠牌的 FPGA 規格，其內部資源均未能提供符合本研究的需求，所以才改選用外掛式記憶體取代。

外掛記憶體的記憶容量為 512Kx8 SRAM，延遲時間為 70nS。在記憶體運用的配置上，將依不同的處理時間分配，填入不同的資訊。外掛式記憶體依配置分為 5 個區段(Bank)，如圖 14 所示。由圖 14 可知，外掛式記憶體僅使用了 200KByte，尚剩餘 312KByte 的空間。外掛式記憶體填置內容與 FRC 處理過程，逐一說明如後。

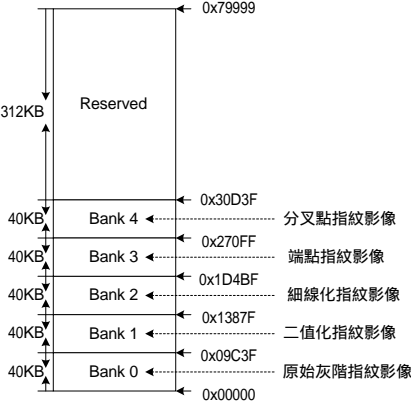


圖 14 外掛式記憶體配置

(1)透過 PC 或微控制器將 40KByte(200 x 200 x 8 bit)，經影像切割處理後的灰階指紋影像載入至外掛式記憶體位址的 0x00000~0x09C3F 中(共 40KB)，如圖 15 所示。

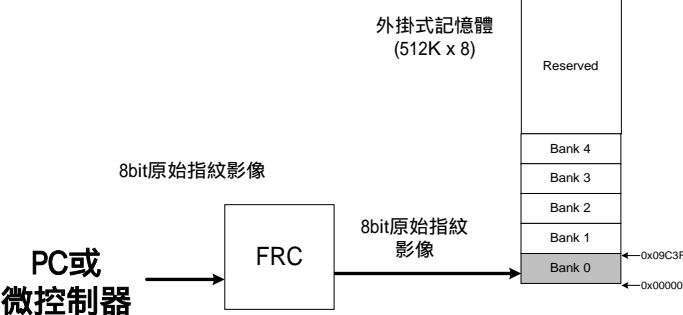


圖 15 BANK0 記憶體配置內容

(2)當 FRC 準備要進行二值化的處理時，FRC 會從外掛式記憶體讀取灰階指紋影

像 (Bank 0) 至 FRC 內部作處理，並將處理結果填入記憶體位址 0x09C40~0x1387F 中(Bank 1)，如圖 16 所示。

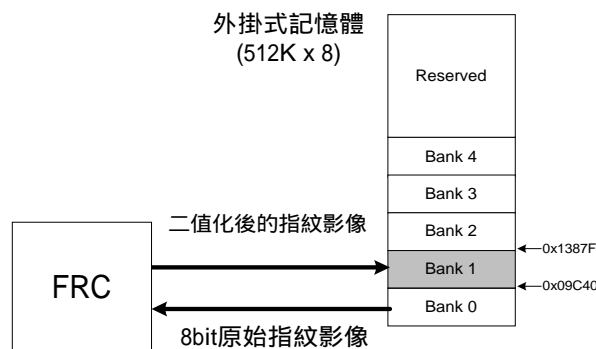


圖 16 BANK1 記憶體配置內容

(3)當 FRC 處理完二值化運算後，接著就是要進行細線化的動作，由於細線化必需重覆運算(先進行左上處理，再進行右下處理，反覆進行)，所以對於記憶體的存取也會比較多次，如圖 17 所示。在細線化的動作裡，可以分為兩個部份：
 (1)第一部份就是從 Bank1 中將二值化的影像讀入 FRC 進行左上的細線化的運算，
 (2)接著就是存取 Bank2 的影像資料，反覆進行細線化運算，直到沒有任一像素需要被刪除為止，最後可以在 Bank 2 中取得細線化後的結果。

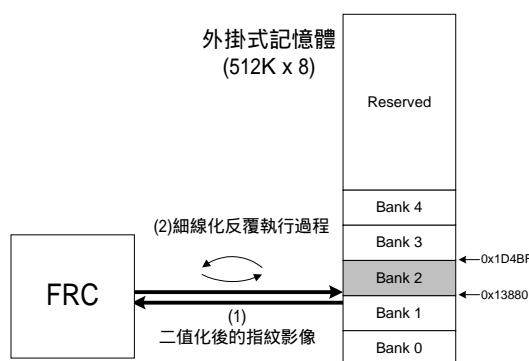


圖 17 BANK2 記憶體配置內容

(4)利用細線化後的指紋影像資料，同時進行端點找尋與分叉點找尋的處理，將端點找尋與分叉點找尋的結果，分別存放於外掛式記憶體中的 0x1D4BF~0x270FF 與 0x27100~0x30D3F，如圖 18 所示。

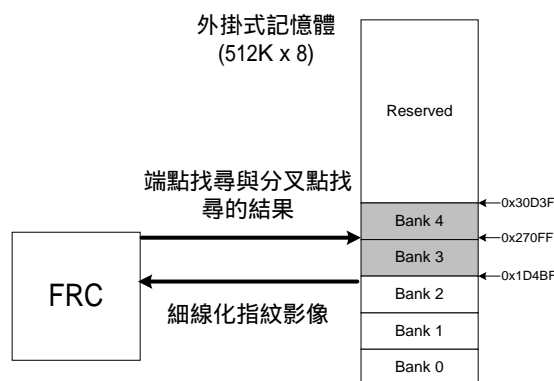


圖 18 BANK3 與 BANK4 記憶體配置內容

第三節 資料流控制

在 FRC 運算處理流程的資料流(Data Path)控制排程中，可細分為 5 個階段，每個階段都必需控制資料的輸出與輸入以及功能模組間的相互協調，各階段工作內容個別說明如下：

- (1)從 PC 或微控制器將指紋影像資料載入至外掛式的記憶體中。
- (2)接著就是運用 5x5 遮罩，將指紋影像進行二值化的運算。
- (3)緊接著使用 3x3 遮罩進行細線化運算，細線化將會是這幾個運算中最為耗時的運算，這是因為細線化演算法的特性，必需要先經由左上運算再配合右下計算，反覆處理，直至沒有像素需被刪除為止。
- (4)繼續利用細線化的結果，處理端點找尋與分叉點找尋的計算，這兩者的運算可同時進行(採平行計算)，因為這兩者的運算性質與處理方式同屬於使用 3x3 遮罩的運算。
- (5)最後將運算結果回傳至 PC 端或微控制器顯示處理結果。

配合以上敘述，整個 FRC 運算處理流程圖如圖 19 所示。

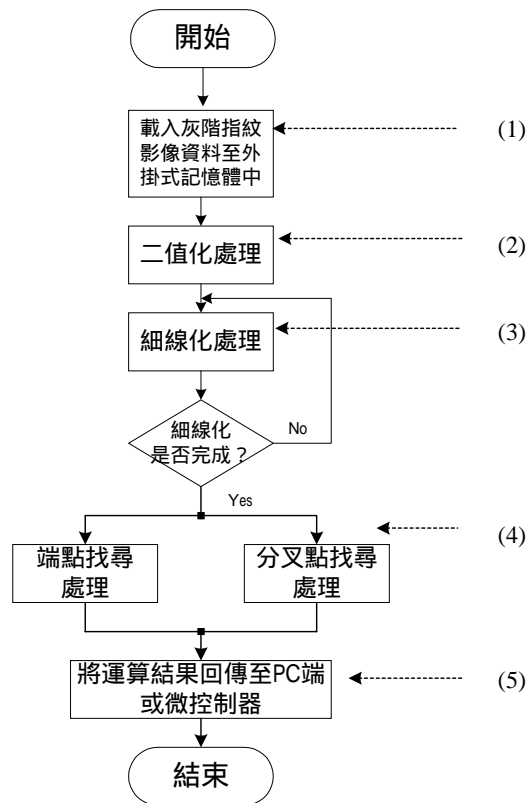


圖 19 FRC 運算處理流程

資料流控制最主要的工作就是將外掛式記憶體的指紋影像資料，依照 3x3 遮罩或 5x5 遮罩的排列方式，將影像內容依指定的方式，配置於 FRC 內部運算單元中，以達成運算目的。資料流控制的處理方式，可分為兩個階段，在此以使用 3x3 遮罩為例，分別說明這兩個階段的動作情形：

第一階段(Stage 1)：在 3x3 遮罩運算中，第一個動作就是要取得以 P 點為中心的周圍 8 個像素的影像相對座標位址內的資料，並載入至 FRC 內部的運算單元中，如圖 20 所示，這同時表示所取得的影像資料，必需滿足 3x3 遮罩指定的排列要求，才可繼續進行指定的運算。正因如此，要從外掛式記憶體中取得這些像素的影像資料，並載入至圖 20 中的 P1~P8 及 P 的運算單元中。當開始執行第

一階段的動作，同時也代表即將要對一張影像中的其中一列(row)，開始以 3x3 遮罩進行運算。

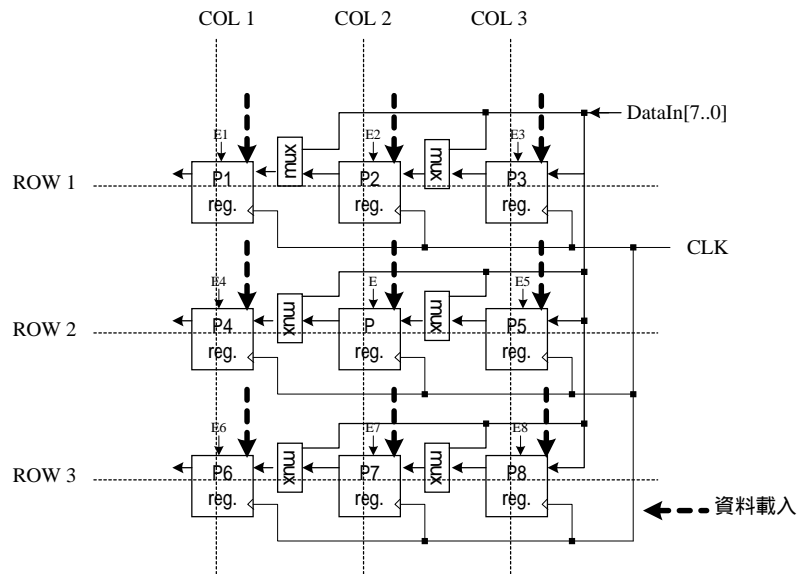


圖 20 資料流控制使用 3x3 遮罩第一階段處理方式

第二階段(Stage 2): 將圖 20 中原本 COL 2 運算單元的資料左移至 COL1 的暫存器中(P2 reg. P1 reg.、P reg. P4 reg.、P7 reg. P6 reg.)，而 COL3 暫存器的資料移位至 COL2 中(P3 reg. P2 reg.、P reg. P5 reg.、P7 reg. P8 reg.)，分別再從外掛式記憶體取得相對於 P3、P5 及 P8 的相對座標位址的影像資料，並依序載入至 P3、P5 及 P8 的暫存器中，如圖 21 所示。第二階段的動作必需處理像素個數，達到影像的寬度後(200pixel)，才算是結束一行影像資料的運算。

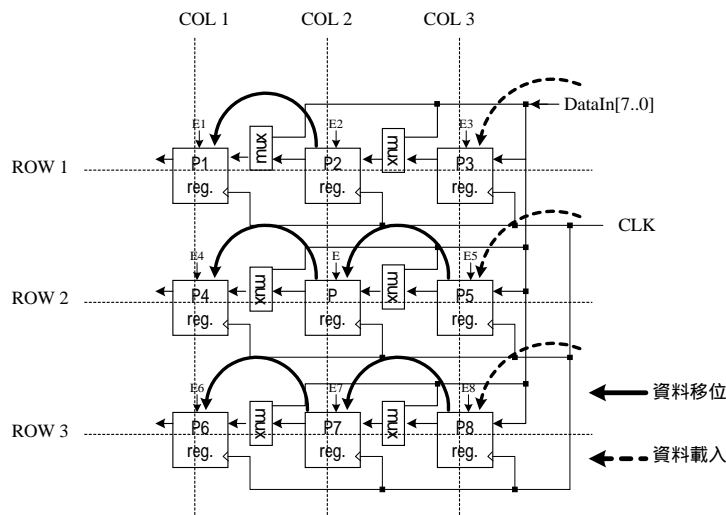


圖 21 資料流控制使用 3x3 遮罩第一階段處理方式

當第二階段結束後，表示完成一行(ROW)的運算處理，此時再從第一階段開始執行，直到重覆的次數達到整個影像的高度(200pixel)，即完成以 3x3 遮罩對 200x200 的影像完成運算。第一階段與第二階段所執行的動作與其時脈對應關係，分別如圖 22 及圖 23 所示。

時脈個數	執行動作
1	從外掛式記憶體載入影像資料於 P1 暫存器中
2	從外掛式記憶體載入影像資料於 P2 暫存器中
3	從外掛式記憶體載入影像資料於 P3 暫存器中
4	從外掛式記憶體載入影像資料於 P4 暫存器中
5	從外掛式記憶體載入影像資料於 P 暫存器中
6	從外掛式記憶體載入影像資料於 P5 暫存器中
7	從外掛式記憶體載入影像資料於 P6 暫存器中
8	從外掛式記憶體載入影像資料於 P7 暫存器中
9	從外掛式記憶體載入影像資料於 P8 暫存器中

Remark : 3x3 遮罩於 Stage 1 需要 9 個時脈

圖 22 3x3 遮罩於 STAGE 1 所執行動作與時脈對應關係

時脈個數	執行動作
1	將 P2 暫存器資料移位至 P1 暫存器中
	將 P 暫存器資料移位至 P4 暫存器中
	將 P7 暫存器資料移位至 P6 暫存器中
	將 P3 暫存器資料移位至 P2 暫存器中
	將 P5 暫存器資料移位至 P 暫存器中
	將 P8 暫存器資料移位至 P7 暫存器中
2	從外掛式記憶體載入影像資料於 P3 暫存器中
3	從外掛式記憶體載入影像資料於 P5 暫存器中
4	從外掛式記憶體載入影像資料於 P8 暫存器中

Remark : 3x3 遮罩於 Stage 2 需要 4 個時脈

圖 23 3x3 遮罩於 Stage 2 所執行動作與時脈對應關係

根據圖 22 及圖 23 可知，若使用 3x3 遮罩處理一張 200x200 影像的一行影像資訊，則需要 $9+4 \times (200-2)=801$ 個時脈(Clock)，所以掃描完整一張 200x200 影像則需要 $(200-2) \times 801= 158,598$ 個時脈(Clock)，時脈使用個數(Clock Usage Num.) 計算如公式(4)。

$$\begin{aligned}
 \text{ClockUsage Num} &= (\text{IMGH} - 2) \times (\text{MaskSize}^2 + (\text{MaskSize} + 1) \times (\text{IMGW} - 2)) \\
 \text{IMGH} &: \text{影像高度} \\
 \text{IMGW} &: \text{影像寬度} \\
 \text{MaskSize} &: \text{遮罩大小 (若為 } 3 \times 3 \text{ 遮罩, 則 } \text{MaskSize} = 3; \text{ 若為 } 5 \times 5 \text{ 遮罩, 則 } \text{MaskSize} = 5)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

根據公式(4)可以進一步推導出，當使用 5x5 遮罩時，在時脈的使用上，將會使用 $(200-2) \times (25+6 \times 198) = 240,174$ 個時脈。