

2018 IC Design Contest Preliminary

研究所組標準元件數位電路設計

Huffman Coding

1. 問題描述

赫夫曼編碼(Huffman Coding)是一種用於無損壓縮的可變長度編碼演算法，由 David Albert Huffman 於 1952 年發明(參考圖 1)。本題要請各位參賽者完成 Huffman Coding 的編碼產生器(huffman 電路)，輸入為原始資料，參賽者應該就輸入資料進行統計，並依統計結果產生對應的 Huffman Code 作為輸出，細節描述於後 2.3 系統功能描述一節。

本電路各輸入輸出信號的功能說明，請參考表 1。本電路系統方塊圖請參考圖 2。每個參賽隊伍必須根據下一節所給的設計規格及附錄 E 中的測試樣本完成設計驗證。

本次 IC 設計競賽比賽時間為上午 08:30 到下午 08:30。當 IC 設計競賽結束後，CIC 會根據第 3 節中的評分標準進行評分。為了評分作業的方便，各參賽隊伍應參考附錄 C 中所列的要求，附上評分所需要的檔案。軟體環境及設計資料庫說明請參考附錄 A 與附錄 B。



圖 1. David Albert Huffman，Huffman coding 的發明者
(source: <https://www.huffmancoding.com/my-uncle/scientific-american>)

2. 設計規格

請注意：

1. 此次top module名稱及檔案名稱、大小寫須完全符合**附錄B規範**，若有引入其它模組或檔案請自行寫在設計檔內，測試檔不允許任何修改否則不予計分。
2. 最後評分方式為使用最後上傳檔案版本評分，並以最後上傳檔案版本時間為依據，請參考3.評分標準。

2.1 系統方塊圖

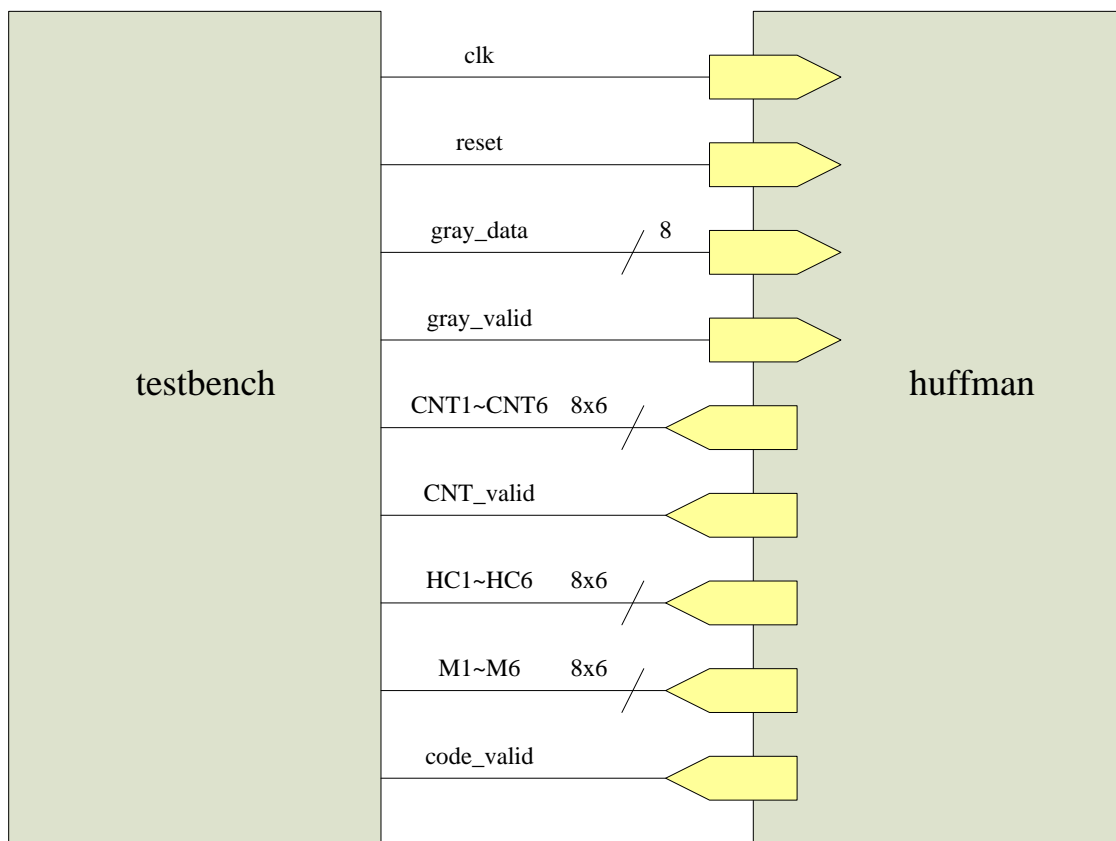


圖 2. 系統方塊圖

2.2 輸出入訊號描述

表一、輸入/輸出信號

Signal Name	I/O	Width	Simple Description
clk	I	1	本系統為同步於時脈正緣之同步設計。
reset	I	1	高位準”非”同步(active high asynchronous)之系統重置信號。
gray_data	I	8	灰階圖像資料匯流排。Testbench 會在 gray_valid 有效期間每 cycle 送出一筆灰階圖像資料。
gray_valid	I	1	灰階圖像資料指示信號。當為 High 時，表示 gray_data 上的資料是有效的。
CNT1~CNT6	O	8x6	Huffman 電路對輸入階段的灰階圖像資料進行統計的統計結果。其中 CNT1 代表 A1 的數目，CNT2 代表 A2 的數目，其餘類推。CNT1~CNT6 各用 8-bit 資料來紀錄資料，這些資料在 CNT_valid 訊號為 High 時，必須正確顯示各 symbol 的統計數目。
CNT_valid	O	1	各 symbol 統計數目 CNT1~CNT6 輸出有效通知信號。當輸入資料完成統計後，此訊號拉為 High 並維持一 cycle，該 cycle 內的 CNT1~CNT6 分別代表各 symbol 的數目。
HC1~HC6	O	8x6	經 huffman 電路所決定出各 symbol 的 huffman 編碼內容。其中 HC1 到 HC6 均為 8-bit 資料寬度，分別代表本題目中的六個 symbol A1~A6 的 Huffman code。完整的 Huffman code 須由每個 symbol 的編碼內容及對應的遮罩來表示(參考 2.3.1 節)。
M1~M6	O	8x6	經 huffman 電路所決定出各 symbol 的 huffman 編碼遮罩(mask)。每個遮罩均為 8-bit 寬度，其中 M1 代表 A1 的遮罩，M2 代表 A2 的遮罩，其餘類推。完整的 Huffman code 須由每個 symbol 的編碼內容及對應的遮罩來表示(參考 2.3.1 節)。
code_valid	O	1	huffman 電路產生出輸入灰階圖像資料對應的 huffman code 後的 HC1~HC6 及 M1~M6 輸出有效通知信號。當 huffman 電路完成產生 huffman code 後，此訊號拉為 High 並維持一 cycle，該 cycle 內的 HC1~HC6 及 M1~M6 分別代表各 symbol 的 Huffman code。

2.3 系統功能描述

考慮一張只有 100 pixel 的灰階圖片，每個 pixel 以 8 bit 儲存其灰階資料。此處為簡便起見只考慮六種灰階 A1、A2、A3、A4、A5、A6，其對應的數值(16 進位)如下表所示。在此定義 A1、A2、A3、A4、A5、A6 等 symbol 的索引值(index)分別為 1、2、3、4、5、6。

Symbol	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Value	0x01	0x02	0x03	0x04	0x05	0x06

本電路功能當 *reset* 結束後，Host 端會將 *gray_valid* 訊號拉為 High 表示此時每一個 cycle 的 *gray_data* 均代表一個 pixel 的輸入，總共有 100 個 pixel。這 100 筆資料輸入後，*gray_valid* 訊號拉為 Low。此為第一階段，系統電路應該就這些輸入對本次要進行處理的圖形資料進行各 symbol 發生次數的統計，並加以排序以得到此圖中各 symbol 的發生機率大小以產生 Huffman code。


Symbol	P(Ai)
A1	0.1
A2	0.4
A3	0.06
A4	0.1
A5	0.04
A6	0.3

圖 3. 各 symbol 發生機率，P(Ai)代表 Ai symbol 的發生機率

要解釋 Huffman coding 的最好方式莫過於實際舉例說明。故今假設統計出來 A1 的發生機率為 0.1(即 10%)，A2 發生機率為 0.4，A3 的機率為 0.06，A4 的機率為 0.1，A5 的機率為 0.04，A6 的機率為 0.3(如圖 3 所示)，並以此為例說明 Huffman coding 的產生方法，可分為 initialization、combination、split 三階段進行。

首先為 initialization 階段，將之各 symbol 發生機率依機率大小由大到小、從上而下排列下來；在 initialization 階段，若有機率相同者，則擁有較小索引值的 symbol 排上方(如 A1 跟 A4 的機率都是 0.1，A1 的索引值為 1 比較小，所以 A1 排在 A4 上方)，排成後如圖 4 所示

Symbol	P(Ai)
A1	0.1
A2	0.4
A3	0.06
A4	0.1
A5	0.04
A6	0.3



P(Ai)	Symbol
0.4	A2
0.3	A6
0.1	A1
0.1	A4
0.06	A3
0.04	A5

圖 4. 依 symbol 發生機率大小排列

接著會經過一連串 combination 階段，每一回合將前一回合中機率最低的兩組組合在一起，合併後的機率與其他組的機率再重新按機率大小排序(re-order)。所以第一次的 combination (C1 回合，如圖 5 所示)用的原始資料，目前 A3 的機率為 0.06，A5 的機率為 0.04，是現在機率最小的兩組，

故將兩組合併成一項{A3,A5}，合併後的項對應的發生機率為合併項個別機率的和，所以{A3,A5}的機率為 $0.06+0.04=0.1$ 。合併項的機率要再經過排序，因 0.1 比上面的 A4 發生機率(0.1)是一樣的，此處規定在 combination 階段一樣機率者，統一規定合併項放在此相同機率的群組中的最後一位。右方為第一回合對應的 Huffman tree，Huffman tree 的畫法請參考附錄 F 中的介紹。

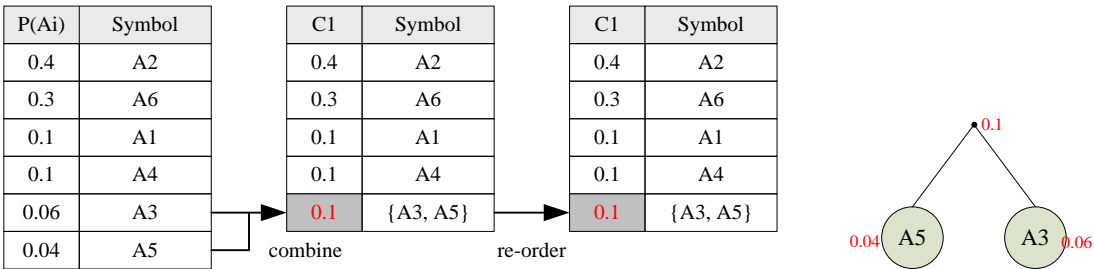


圖 5. 第一次組合 C1 回合

在 C1 回合後，進行 C2 回合(參考圖 6)，將 C1 回合中機率最低的兩組組合在一起，合併後的機率與其他組的機率再重新按機率大小排序(re-order)。所以 C2 回合會檢查 C1 回合結果中機率最小的兩組(即排在最下面的兩組)，分別是 A4(機率 0.1)及{A3,A5}(機率 0.1)，將兩組合併成一項{A4,A3,A5}，合併後的項對應的發生機率為合併項個別機率的和，所以{A4,A3,A5}的機率為 $0.1+0.1=0.2$ 。合併項的機率要再經過排序，此處合併項{A4,A3,A5}機率為 0.2 ，比 A1 的機率 0.1 大，但比 A6 的機率 0.3 小，故在 re-order 排序時，要將{A4,A3,A5}合併項位置移到 A1 及 A6 的中間，到此完成 C2 回合。

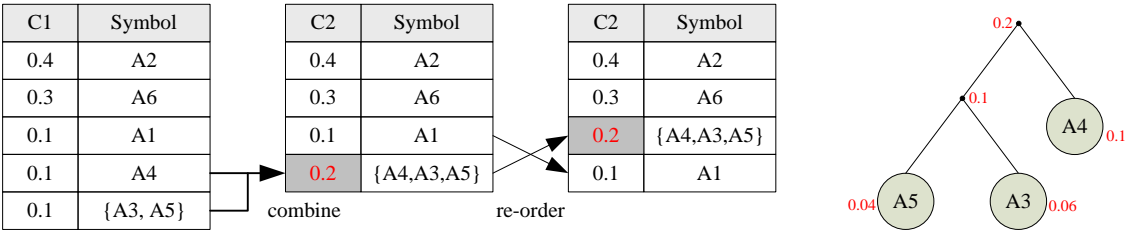


圖 6. 第二次組合 C2 回合

如上說明，combination 階段會一直進行合併到只剩兩項時停止，故還要經過兩次合併 C3、C4 回合(如圖 7、圖 8 所示)。

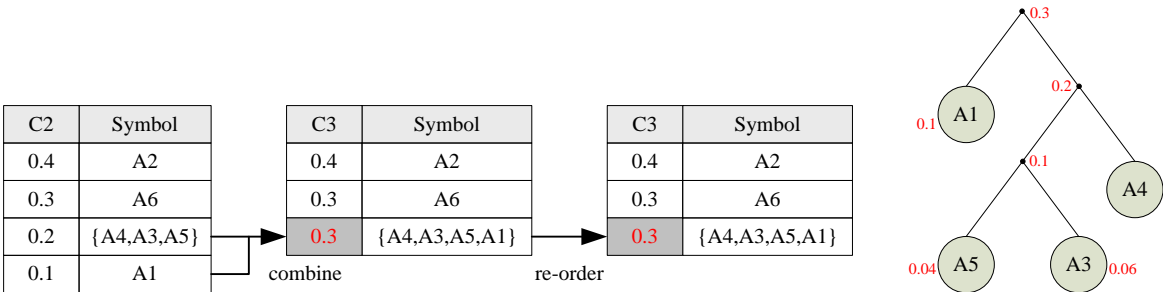


圖 7. 第三次組合 C3 回合

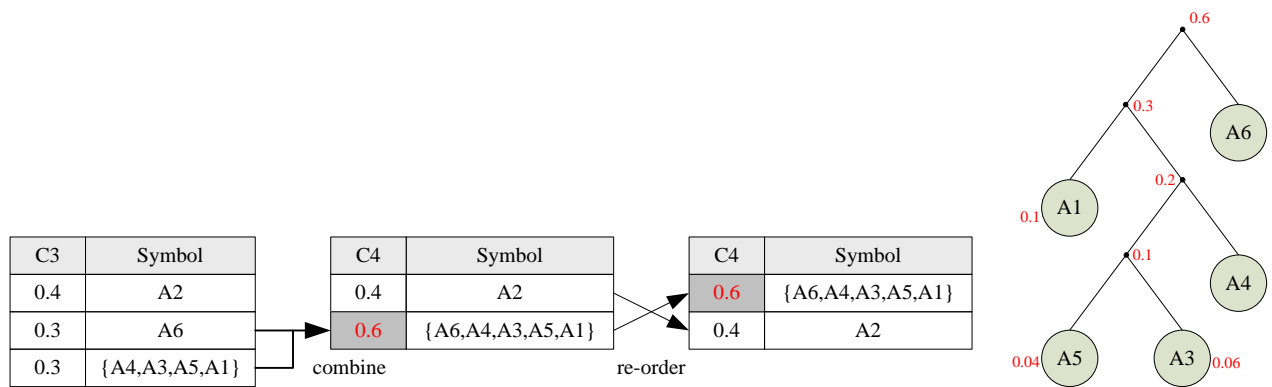


圖 8. 第四次組合 C4 回合

將所有的 combination 階段放在一起觀察，即圖 9 所示，有時也會將此資料製成如圖 10 的 Huffman table 來觀察(也有人做成 Huffman Tree)。

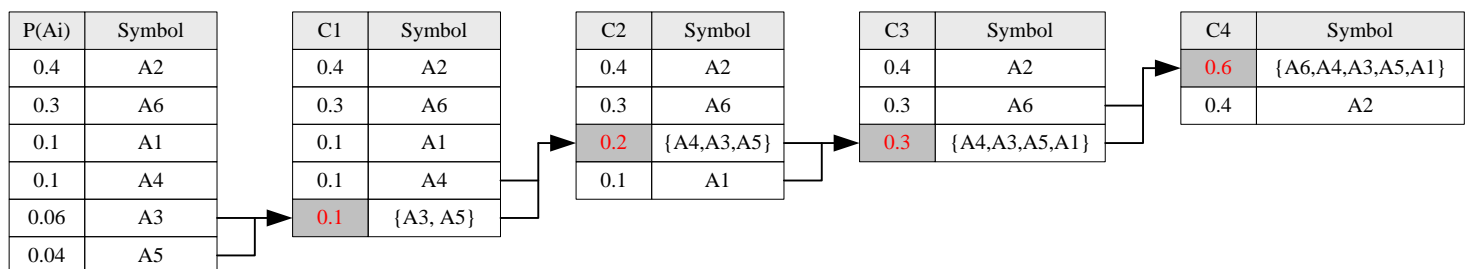


圖 9. 組合程序總覽

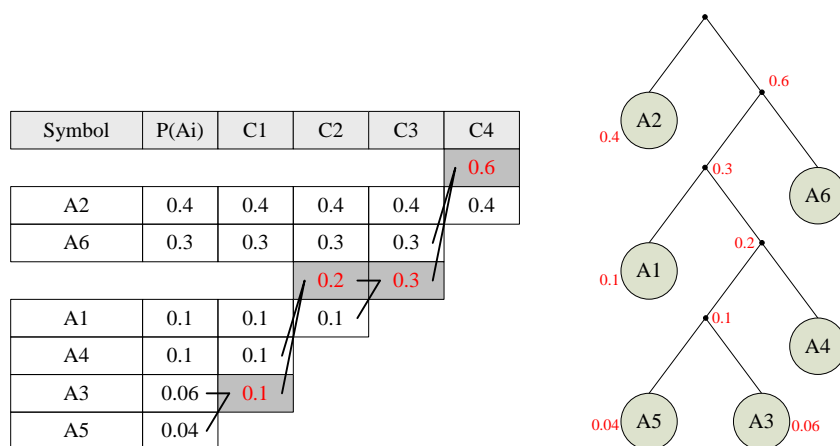


圖 10. 對應的 Huffman table

接著是一連串倒推回來的 split 階段，在此階段會逐步對各 symbol 賦予其 Huffman code。首先由 C4 的結果開始(參考圖 11)，C4 只有兩組 symbol，一組為排在上方、擁有發生機率 0.6 的 {A6,A4,A3,A5,A1} 混合集團，一組是排在下方、擁有發生機率為 0.4 的純血 A2，在本題目中規定上方的分配 code 0，下方的分配 code 1。所以 symbol A2 用 1 來表示其 Huffman code，同時 0 代表 {A6,A4,A3,A5,A1} 的混合集團。此即意味著當 decoder 讀到 1 即代表是一個 A2，但是讀到 0 時只知道是 A6、A4、A3、A5、A1 的其中一個，尚無法確認是那一個，所以對 {A6,A4,A3,A5,A1} 的編碼 0 需要追加額外的編碼，以便能確認是那一個 symbol。

assign		
C4	Symbol	code
0.6	{A6,A4,A3,A5,A1}	0
0.4	A2	1

圖 11. C4 回合的 Huffman code

接著由 C4 split 到 C3。每次 split 時均是 combination 階段每一次 combine 的逆推，並規定上方的分支追加編碼 0，下方的分支追加編碼 1(參考圖 12)。故 C4 回合中，混合集團{A6,A4,A3,A5,A1}會由原來的 combination 過程逆推 split 成 A6 及{A4,A3,A5,A1}兩項(如圖 13)，其中 A6 位於上方，故其編碼為 C4 中{A6,A4,A3,A5,A1}分配到的繼承編碼 0 及 split 時追加的編碼 0，故 A6 的 Huffman code 為 00。同理{A4,A3,A5,A1}的編碼為 01，但是因為{A4,A3,A5,A1}仍為混合集團，故須依照上面方式進一步的進行 split，直到每個單獨的 symbol 為止。完整的 split 過程請參考圖 14，也可參考利用 Huffman table 進行 split 的圖解(如圖 15)。

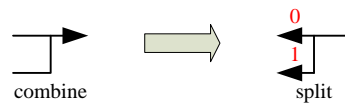


圖 12. Split 時上方追加編碼 0，下方追加編碼 1

C3	Symbol	code
0.4	A2	1
0.3	A6	00
0.3	{A4,A3,A5,A1}	01

C4	Symbol	code
0.6	{A6,A4,A3,A5,A1}	0
0.4	A2	1

圖 13. C4 Split 至 C3

Sym.	code
A2	1
A6	00
A1	011
A4	0100
A3	01010
A5	01011

C1	S.	code
0.4	A2	1
0.3	A6	00
0.1	A1	011
0.1	A4	0100
0.1	{*}	0101

C2	S.	code
0.4	A2	1
0.3	A6	00
0.2	{*}	010
0.1	A1	011

C3	S.	code
0.4	A2	1
0.3	A6	00
0.3	{*}	01

C4	S.	code
0.6	{*}	0
0.4	A2	1

圖 14. 完整的 Split 過程，圖中{*}代表多項 symbol 組成的混合集團

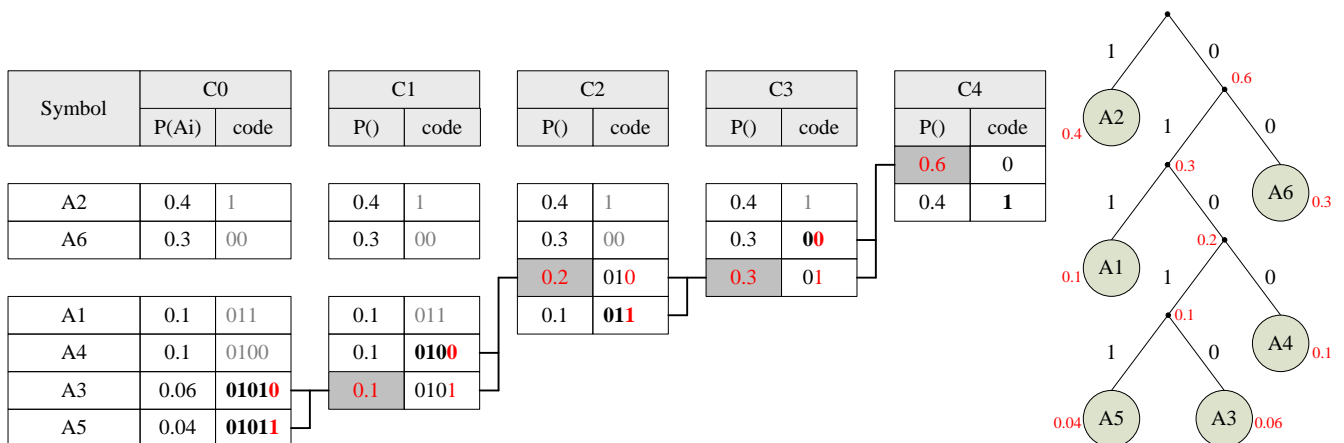


圖 15. 以 Huffman table 來進行 split

故經過 split 階段後，即可得到的例子的 Huffman coding 如下圖所示

Symbol	P(A _i)	Huffman code
A1	0.1	011
A2	0.4	1
A3	0.06	01010
A4	0.1	0100
A5	0.04	01011
A6	0.3	00

圖 16. 本範例各 symbol 對應的 Huffman code

Huffman coding 是一種 prefix-free 的技術，意即編碼中的任意一個 code 均不是其他編碼的 prefix，因此不需要有間隔(space)的編碼也能做到可變長度編碼的特性。故對圖 17 中的二進位位元流，以圖 16 中的 Huffman code 進行解碼，即代表 A2A4A2A6A1A2A2A6A2 的原文。

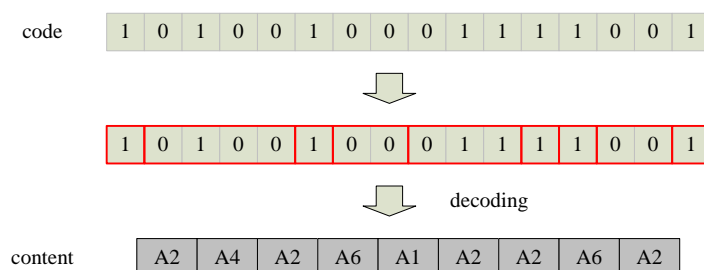


圖 17. 利用 Huffman coding 進行解碼

2.3.1 huffman 電路輸出 huffman code 的表示方式

Huffman 電路產生各 symbol 所對應的 Huffman code 時，由於顯示編碼內容的 HC1~HC6 輸出均為固定 8-bit 寬度，而 Huffman code 是可變長度編碼，故額外加上遮罩訊號，以指出 HC1~HC6 輸出的那幾個 bit 是有效的。遮罩中 1 代表有效，0 代表無效。同時 HC1~HC6 輸出超過 Huffman code 編碼長度的位元規定均設為數值 0。

以 A6 的 Huffman code 是 00 為例，該編碼是 2 個 bit 長，所以其遮罩 M6 為 0000_0011，同時其 HC6 輸出為 0000_00**00**。

再以 A3 的 Huffman code 是 01010 為例，該編碼是 5 個 bit 長，所以其遮罩 M3 為 0001_1111，同時其 HC6 輸出為 000**0**_1010。

若有興趣參考原論文，可自行 Google “A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes, 1952, David A. Huffman”

由統計至產生 Huffman code 這段過程禁止用窮舉查表法，否則以 0 分計算。

2.4 時序規格圖

系統輸入/輸出時序規格圖及參數，分別如圖 18 及圖 19 所示。

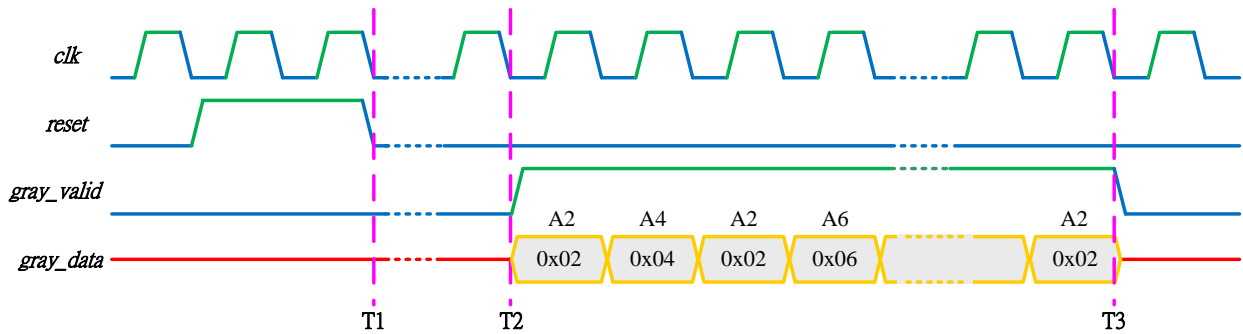


圖 18. 時序規格圖一(資料輸入階段)

- a、T1 時間點，*reset* 訊號持續兩個 Cycle 時間後，huffman 電路初始化結束。
- b、T2 時間點，testbench 端開始傳送灰階圖像資料，合計 100 個 pixel，在時脈訊號負緣觸發一個 cycle 傳送一筆 pixel 的灰階值。資料傳送期間 *gray_valid* 拉為 High。參賽者所設計之 huffman 電路應採正緣觸發動作來進行設計。
- c、T3 時間點，testbench 傳送資料完畢，將 *gray_valid* 拉為 Low。此後參賽者所設計之 huffman 電路應接著完成各 symbol 數目的計數，以及推算各 symbol 對應的 Huffman code，此部分請參考圖 19 與輸出相關的相關說明。

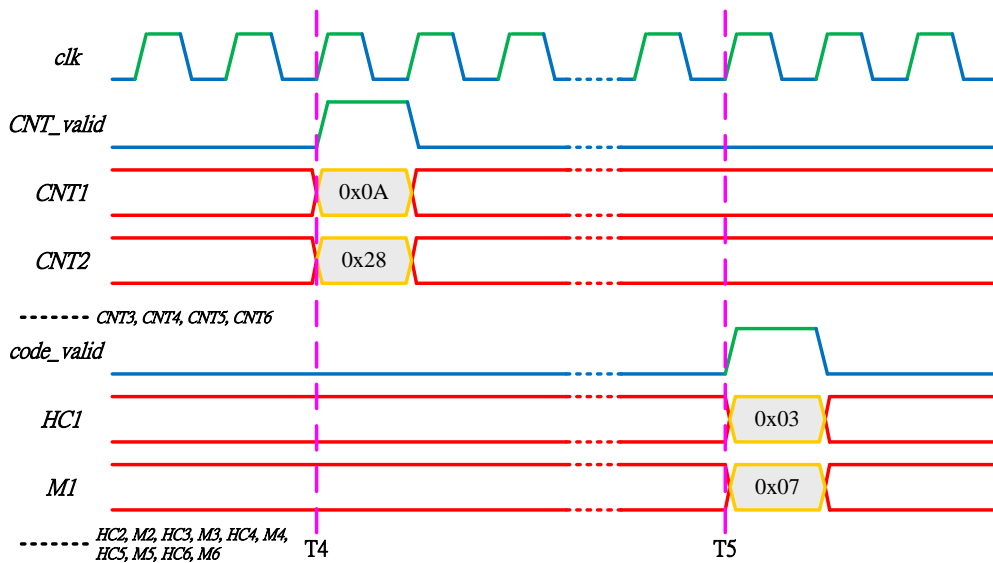


圖 19. 時序規格圖二 (輸出部分)

- d、T4 時間點(參考圖 19)，當 huffman 電路完成各 symbol 數目的計算，應將 *CNT_valid* 訊號拉為 High 一個時脈周期，並在該周期時間內利用 *CNT1*、*CNT2*、*CNT3*、*CNT4*、*CNT5*、*CNT6* 輸出各 symbol 數目。(注意，huffman 電路為正緣觸發動作)
- e、T5 時間點(參考圖 19)，當 huffman 電路推算出各 symbol 的 Huffman code，應將 *code_valid* 訊號拉為 High 一個時脈周期，並在該周期時間內利用 *HC1*、*M1*、*HC2*、*M2*、*HC3*、*M3*、*HC4*、*M4*、*HC5*、*M5*、*HC6*、*M6* 輸出各 symbol 的 Huffman code，testbench 偵測到 *code_valid* 拉回

為 Low 時即可進行驗證，驗證完成後整個模擬會立即結束。(注意，huffman 電路為正緣觸發動作)

3. 評分標準

主辦單位的評分人員將依照參賽者提供之系統時脈進行 RTL simulation 或 gate-level simulation，以驗證設計正確性，並且依據設計檔上傳至 CIC FTP 檔案伺服器(請參閱附錄 D)的時間來進行排名。各參賽隊伍應於參賽者定義的系統時脈下，確保輸出結果無設置與保持時間(setup/hold time)的問題，並完全符合主辦單位所提供的標準設計結果。

CIC 將本試題分為下面五個等級作為功能完成度之評分，完成度越高者優先錄取。若為同一等級則以檔案上傳時間來評分，請在每完成新等級時即將結果上傳，CIC 會以最後上傳版本作為評分結果。

1. A 等級：通過所有 3 組測試樣本(包含 CIC 評分用樣本)之 RTL 與 gate-level simulation
2. B 等級：通過其中 3 組測試樣本(包含 CIC 評分用樣本)之 RTL simulation
3. C 等級：通過其中 2 組測試樣本(包含 CIC 評分用樣本)之 RTL simulation
4. D 等級：通過其中 1 組測試樣本(包含 CIC 評分用樣本)之 RTL simulation
5. E 等級：即排除以上狀況者，歸於 E 等級

附錄

在附錄 A 中說明本次競賽之軟體環境；附錄 B 為主辦單位所提供各參賽者的設計檔說明；附錄 C 為評分用檔案，亦即參賽者必須回傳至 CIC 的檔案資料；附錄 D 則為設計檔上傳步驟說明；附錄 E 則為測試樣本說明；附錄 F 則為 Huffman Tree。

附錄 A 軟體環境

競賽所提供的設計軟體與版本如下表二。驗證評分時，係以所列軟體及版本作為驗證依據。

表二、設計軟體版本

Functionality	Corresponding EDA tools
Logic Simulator	NC-Verilog (INCISIVE_15.20.039) Modelsim (v10.5c) QuestaSim (v10.5c) VCS-MX (2017.03)
Logic Synthesizer	Design-Compiler (2017.09-SP2)
HDL Debugger	Verdi (2016.06-sp1-1) nLint (2016.06-sp1-1)
Standard cell library	Cell-Based Design Kit for IC Contest v2.1

附錄 B 設計檔案說明

1. 下表三.為主辦單位所提供各參賽者的設計檔案

表三、設計檔

檔名	說明
tb.v	測試樣本檔。此測試樣本檔定義了時脈週期與測試樣本之輸入信號。
huffman.v (huffman.vhd)	參賽者所使用的設計檔，已包含系統輸/出入埠之宣告
./pattern1.dat	第一組測試樣本檔案
./pattern2.dat	第二組測試樣本檔案
./pattern3.dat	第三組測試樣本檔案
./golden1.dat	第一組比對樣本檔案
./golden2.dat	第二組比對樣本檔案
./golden3.dat	第三組比對樣本檔案
report.000	結果報告範本
huffman.sdc	Design Compiler 電路合成規範檔
DC_syn.tcl	Design Compiler 合成之參考 script
synopsys_dc.setup	Design Compiler 初始設定範例檔案

2. 請使用 huffman.v (.vhd)，進行本題電路之設計。其 Verilog 模組名稱、輸出/入埠宣告如下所示：

```

`timescale 1ns/10ps
module huffman ( clk, reset, gray_valid, gray_data, CNT_valid, CNT1, CNT2, CNT3, CNT4, CNT5, CNT6,
                code_valid, HC1, HC2, HC3, HC4, HC5, HC6, M1, M2, M3, M4, M5, M6);
    input        clk;
    input        reset;
    input        gray_valid;
    input  [7:0] gray_data;
    output        CNT_valid;
    output  [7:0] CNT1, CNT2, CNT3, CNT4, CNT5, CNT6;
    output        code_valid;
    output  [7:0] HC1, HC2, HC3, HC4, HC5, HC6;
    output  [7:0] M1, M2, M3, M4, M5, M6;
    //=====

    //=====
Endmodule

```

3. 比賽共提供三組測試樣本，參賽者可依下面範例來進行模擬：
(此處說明以 ncverilog 為主，若使用其他 simulator 軟體請自行參閱相關使用手冊)

RTL Simulation 時使用指令如下：

- 使用 ncverilog 模擬指令範例如下：

```
ncverilog tb.v huffman.v +define+tb1 +access+r
```

- 使用 modelsim 模擬，則是在 compiler verilog 時，使用下面指令：

```
vlog tb.v huffman.v +define+tb1 +access+r
```

Gate-Level Simulation 時使用指令如下：

- 使用 ncverilog 模擬指令範例如下：

```
ncverilog tb.v huffman_syn.v -v tsmc13_neg.v +define+SDF +define+tb1 \  
+access+r
```

define 中加上 SDF 可讓測試程式引入 gate level netlist 的 sdf 檔案資訊。

若要避免時序檢查以減少錯誤訊息，可於模擬指令中自行加入+notimingchecks。

- 上述指令中+define+tb1 指的是使用第一組測試樣本模擬，當使用第二組測試樣本請自行修改此參數為+define+tb2；當使用第三組測試樣本，請自行修改此參數為+define+tb3。
- tsmc13_neg.v 為 gate-level simulation 時所使用的 standard cell simulation model，該檔案位於 CBDK_IC_Contest_v2.1 裡(參考路徑為 CBDK_IC_Contest_v2.1/Verilog/tsmc13_neg.v)。

附錄 C 評分用檔案

評分所需檔案可分為三部份：(1)RTL design，即各參賽隊伍對該次競賽設計的 RTL code，若設計採模組化而有多個設計檔，請務必將合成所要用的各 module 檔放進來，以免評審進行評分時，無法進行編譯；(2)gate-level design，即由合成軟體所產生的 gate-level netlist，以及對應的 SDF 檔；(3)report file，參賽隊伍必須依照自己的設計內容，撰寫 report.000 檔，以方便主辦單位進行評分，report.000 的格式如圖八所示。(report 檔以後三碼序號表示版本，若繳交檔案更新版本，則新版的 report 檔檔名為 report.001，依此類推)

表六、評分用檔案

RTL category		
Design Stage	File	Description
N/A	report.xxx	design report
RTL Simulation	*.v or *.vhd	Verilog (or VHDL) synthesizable RTL code
Gate-Level category		
Design Stage	File	Description
Pre-layout Gate-level Simulation	*_syn.v	Verilog gate-level netlist generated by Synopsys Design Compiler
	*_syn.sdf	SDF timing information generated by Synopsys Design Compiler
	*_syn.ddc	design database generated by Synopsys Design Compiler

FTP 帳號(FTP account): 999999

通過 gate-level simulation 之 cell area report : 9000

通過 gate-level simulation 之 clock cycle time (ns) : 10

--- RTL category---

使用之 HDL 模擬器名稱(HDL simulator): nc-verilog

RTL 檔案名稱(RTL filename): huffman.v 以及使用到的子模組檔案...

--- Pre-layout gate-level ---

gate-level 檔案名稱(gate_level filename): huffman_syn.v

gate-level sdf filename: huffman_syn.sdf

design compiler 合成資料庫(dc library): huffman_syn.ddc

-----注意事項(annotation)-----

(其餘注意事項依各參賽隊伍的需求填寫)

圖八、report.000 的範本

附錄 D 檔案上傳

所有包含於如附錄 C 中表格所示的檔案，均需要提交至 CIC。並且，提交的設計檔案，需要經過壓縮於同一個資料夾下，步驟如下：

1. 建立一個 result_xxx 資料夾。其中“xxx”表示繳交版本。例如“000”表示為第一次上傳；“001”表示為第二度上傳；002 表示為第三度上傳，以此類推…。
2. 參考附錄 C 評分用檔案，將所有繳交檔案複製到 result_xxx 資料夾
3. 執行 tar 指令將 result_xxx 資料夾包裝起來，tar 的指令範例如下：
tar cvf result_xxx.tar result_xxx
其中 xxx 表示繳交版本
執行完後應該會得到 result_xxx.tar 的檔案
4. 使用 ftp 將 result_xxx.tar 及 report.xxx 一併上傳至 CIC 提供的 ftp server，result_xxx.tar 與 report.xxx 之“xxx”編號需一致，評審將以最後上傳的設計檔及報告檔編號進行評分作業。

本題限制上傳之設計檔僅可使用 tar 或 zip 壓縮格式，使用 rar 或其他格式者一律不予計分。

請注意!!上傳之 FTP 需切換為二進制模式(binary mode)，且傳輸埠均設為 21(port:21)。

ftp 的帳號和密碼在賽前已用 email 寄給各參賽者。若有任何問題，請聯絡 CIC

FTP site1 (新竹晶片中心)：iccftp.cic.org.tw (140.126.24.18)

FTP site2 (南區晶片中心)：iccftp2.cic.org.tw(140.110.117.9)

5. 若你需要繳交更新版本，請重覆以上步驟，並記得修改 report 檔及 tar 檔的版本編號，因為你無法修改或刪除或覆蓋之前上傳的資料。

附錄 E 測試樣本

在此提供參賽者三份測試樣本，以供驗證所設計之電路是否合乎標準。CIC 於評分階段會用額外的測試樣本測試參賽者所設計之電路。**禁止用窮舉查表法，否則以 0 分計算。**

測試樣本 1

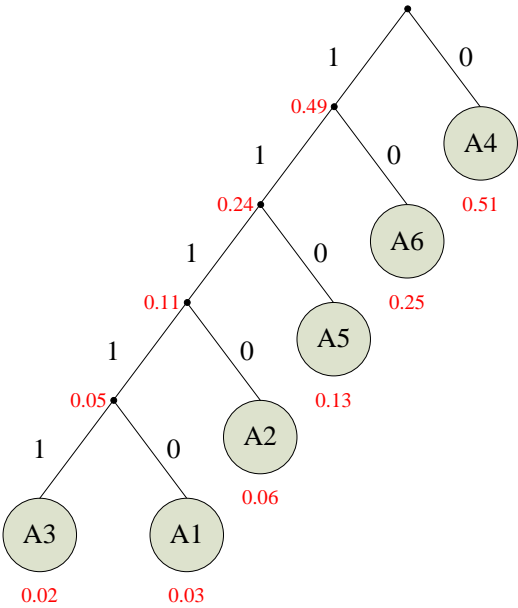
Pattern file : pattern1.dat

Golden file : golden1.dat

對應之 Huffman table 如下所示

Symbol	C0		C1	C2	C3	C4
	P(Ai)	Code	P()	Code	P()	Code
A4	0.51	0	0.51	0	0.51	0
A6	0.25	10	0.25	10	0.25	10
A5	0.13	110	0.13	110	0.24	11
A2	0.06	1110	0.06	1110	0.11	111
A1	0.03	11110	0.05	1111		
A3	0.02	11111				

Symbol	P(Ai)	Huffman code	CNTi	HCi	Mi
A1	0.03	11110	3 = 0x3	8'b0001_1110 = 0x1E	8'b0001_1111 = 0x1F
A2	0.06	1110	6 = 0x6	8'b0000_1110 = 0x0E	8'b0000_1111 = 0x0F
A3	0.02	11111	2 = 0x2	8'b0001_1111 = 0x1F	8'b0001_1111 = 0x1F
A4	0.51	0	51 = 0x33	8'b0000_0000 = 0x00	8'b0000_0001 = 0x01
A5	0.13	110	13 = 0x0D	8'b0000_0110 = 0x06	8'b0000_0111 = 0x07
A6	0.25	10	25 = 0x19	8'b0000_0010 = 0x02	8'b0000_0011 = 0x03



測試樣本 2

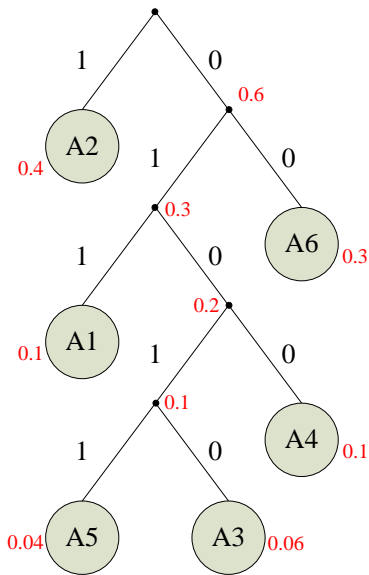
Pattern file : pattern2.dat

Golden file : golden2.dat

對應之 Huffman table 如下(同圖 15)所示

Symbol	C0		C1		C2		C3		C4	
	P(Ai)	code	P()	code	P()	code	P()	code	P()	code
A2	0.4	1	0.4	1	0.4	1	0.4	1	0.6	0
A6	0.3	00	0.3	00	0.3	00	0.3	00	0.4	1
A1	0.1	011	0.1	011	0.2	010	0.3	01		
A4	0.1	0100	0.1	0100	0.1	011				
A3	0.06	01010	0.1	0100						
A5	0.04	01011	0.1	0101						

Symbol	P(Ai)	Huffman code	CNTi	HCi	Mi
A1	0.1	011	10 = 0xA	8'b0000_0011 = 0x03	8'b0000_0111 = 0x07
A2	0.4	1	40 = 0x28	8'b0000_0001 = 0x01	8'b0000_0001 = 0x01
A3	0.06	01010	6 = 0x6	8'b0000_1010 = 0x0A	8'b0001_1111 = 0x1F
A4	0.1	0100	10 = 0xA	8'b0000_0100 = 0x04	8'b0000_1111 = 0x0F
A5	0.04	01011	4 = 0x4	8'b0000_1011 = 0x0B	8'b0001_1111 = 0x1F
A6	0.3	00	30 = 0x1E	8'b0000_0000 = 0x00	8'b0000_0011 = 0x03

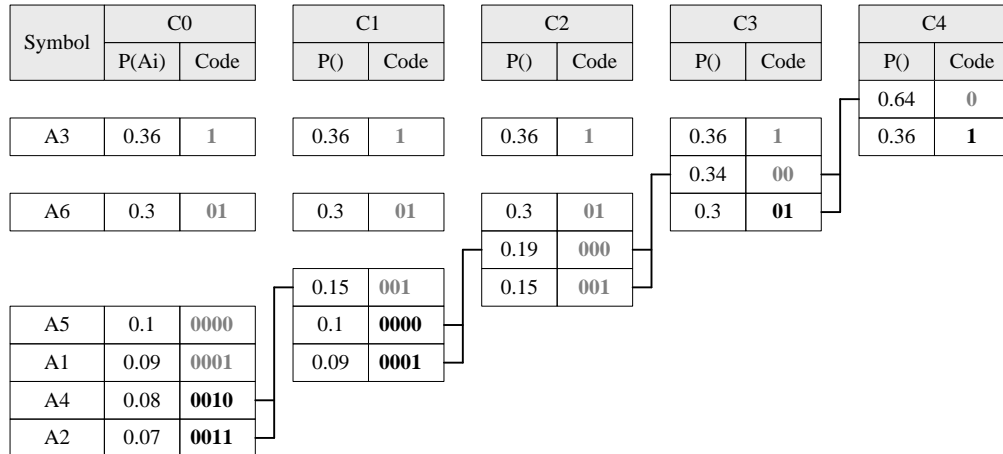


測試樣本 3

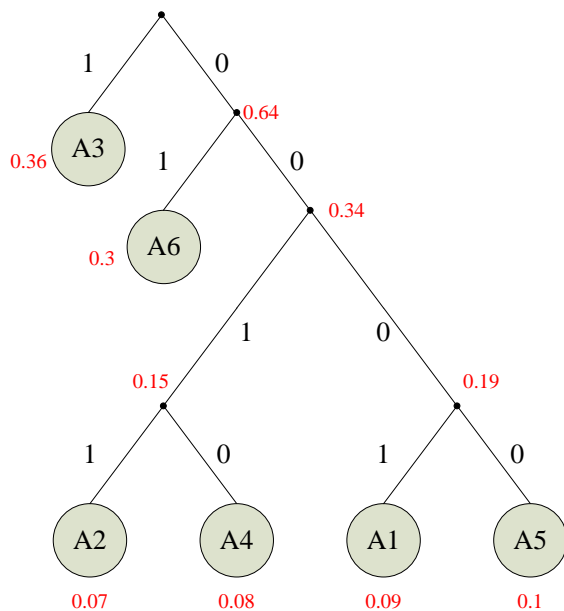
Pattern file : pattern3.dat

Golden file : golden3.dat

對應之 Huffman table 如下所示



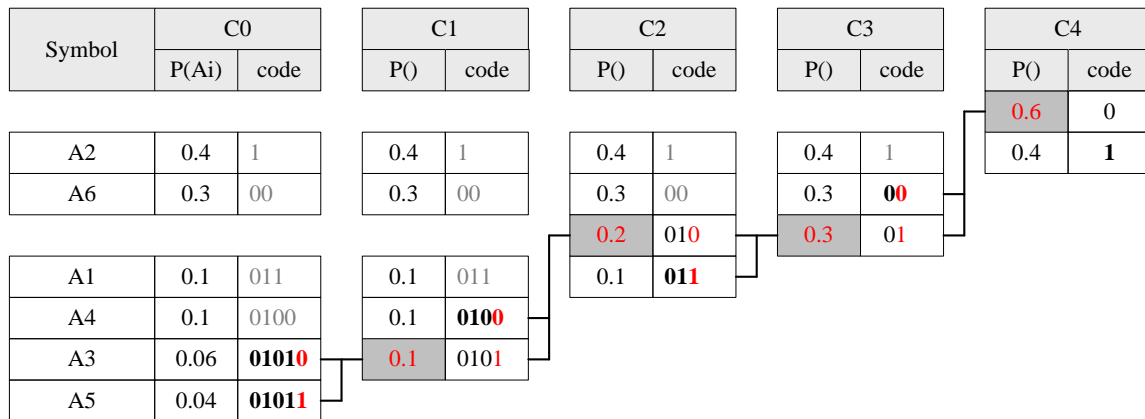
Symbol	P(Ai)	Huffman code	CNTi	HCi	Mi
A1	0.09	0001	9 = 0x9	8'b0000_0001 = 0x01	8'b0000_1111 = 0x0F
A2	0.07	0011	7 = 0x7	8'b0000_0011 = 0x03	8'b0000_1111 = 0x0F
A3	0.36	1	36 = 0x24	8'b0000_0001 = 0x01	8'b0000_0001 = 0x01
A4	0.08	0010	8 = 0x8	8'b0000_0010 = 0x02	8'b0000_1111 = 0x0F
A5	0.1	0000	10 = 0xA	8'b0000_0000 = 0x00	8'b0000_1111 = 0x0F
A6	0.3	01	30 = 0x1E	8'b0000_0001 = 0x01	8'b0000_0011 = 0x03



附錄 F Huffman Tree

為幫助參賽者對 Huffman coding 的了解，在此提供 Huffman Tree 畫法供各位參考。此處直接使用題目本文中的範例(即測試樣本 pattern2.dat)做說明。

測試樣本 2 的 Huffman table 如下所示



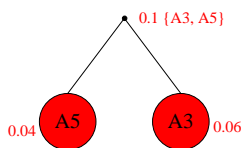
要建 Huffman tree 時，首先還是由樣本資料統計後的各 symbol 出現機率的排序後結果出發。測試樣本的初始排序資料如下(由上至下對應到由大到小，最底下 2 個是機率最小的，在作答期間，雖題目中多處用到機率的數值去比大小，但實際上可以直接用計數出來的出現次數代替)。在初始化排序時，對相同機率的 symbol 何者在上會影響做出來的 Huffman coding，雖然壓縮率的表現一樣，但此處為了評分方便，統一規定在初始排率時相同機率者，擁有較小索引值的 symbol 排上方，所以下圖中，A1 與 A4 的機率是相同的，但 A1 的索引較小，故 A1 排 A4 上方。

C0	
Symbol	P(Ai)
A2	0.4
A6	0.3
A1	0.1
A4	0.1
A3	0.06
A5	0.04

接著會經過四個回合，每個回合會合併最下面兩個(即當時機率最小的兩組)成一個合併項，再與原來的資料作排序。此處合併項{A3,A5}的機率是 $0.06+0.04=0.1$ ，再與上面四個項的機率作排序，發現跟 0.1 機率的 A1 與 A4 相同機率，在此合併的過程中，同上面理由，統一規定合併過程中合併項若有相同機率的現象，合併項放在此相同機率的群組中的最後一個。所以合併後{A3,A5}放在 A4 的下面。此時對應的局部 Huffman tree 如下圖(Huffman 的精神在於每次找最低機率的兩個來畫圖)，圖中代表由 A3 與 A5 的合併項，統一規定左邊的機率要小於右邊的，故 A3 放右邊。

C0	
P(A _i)	Symbol
0.4	A2
0.3	A6
0.1	A1
0.1	A4
0.06	A3
0.04	A5

P(A _i)	Symbol
0.1	{A3, A5}



該圖表格合併後作排序的結果如下

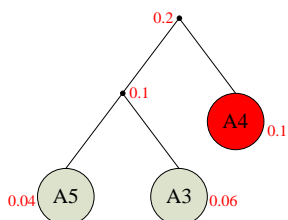
C0	
P(A _i)	Symbol
0.4	A2
0.3	A6
0.1	A1
0.1	A4
0.06	A3
0.04	A5

C1	
P(A _i)	Symbol
0.4	A2
0.3	A6
0.1	A1
0.1	A4
0.1	{A3, A5}

接著我們利用 C1 排序後的表格進行下一次合併，找 C1 表格中最低機率的兩個來合併(畫到 Huffman tree 內)，若有機率相同者，取最底下兩個作合併，所以此處為 A4 跟 {A3, A5} 作合併，合併的兩者在表格上方(機率大的)的放右邊，所以得到此時對應的 Huffman tree 如下

C1	
P(A _i)	Symbol
0.4	A2
0.3	A6
0.1	A1
0.1	A4
0.1	{A3, A5}

P(A _i)	Symbol
0.2	{A4, A3, A5}



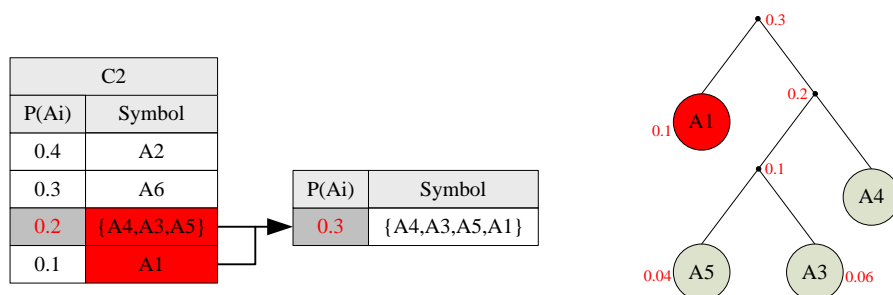
該圖表格合併後作排序的結果如下，因為合併項 {A4, A3, A5} 的機率 0.2 比 A1 機率大，所以在表格中把 A1 擠下去了

C1	
P(A _i)	Symbol
0.4	A2
0.3	A6
0.1	A1
0.1	A4
0.1	{A3, A5}

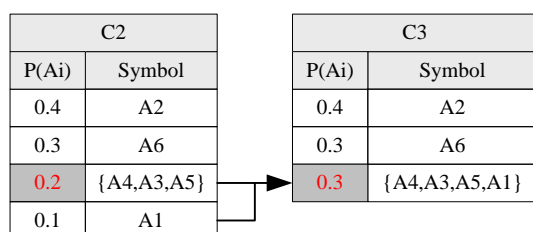
C2	
P(A _i)	Symbol
0.4	A2
0.3	A6
0.2	{A4, A3, A5}
0.1	A1

接著我們利用 C2 排序後的表格進行下一次合併，找 C2 表格中最低機率的兩個來合併(畫到

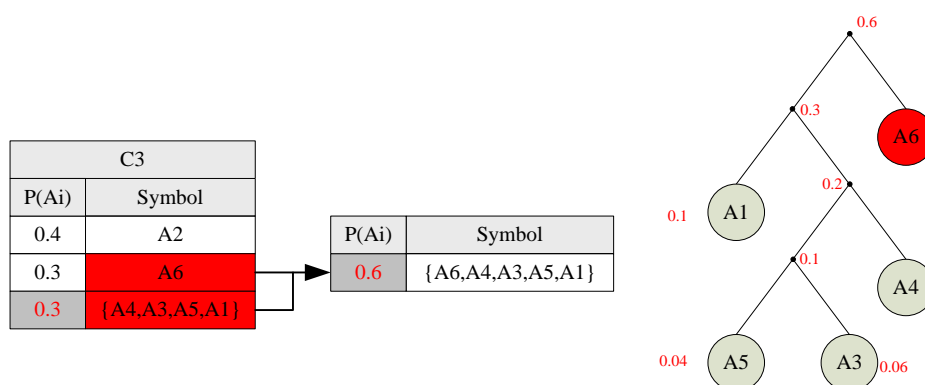
Huffman tree 內)，此時原合併項的機率比較大放右邊，新合併的 A1 機率比較小，放左邊



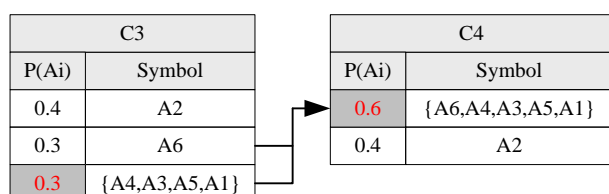
該圖表格合併後作排序的結果如下，因為合併項{A1,A4,A3,A5}的機率 0.3 與 A6 機率一樣大，所以依規定放最下面(合併過程中合併項若有相同機率的現象，合併項放在此相同機率的群組中的最後一個)



接著我們利用 C3 排序後的表格進行下一次合併，找 C3 表格中最低機率的兩個來合併(畫到 Huffman tree 內)，此時原合併項的機率比較小大放左邊，新合併的 A6 機率比較大，放右邊

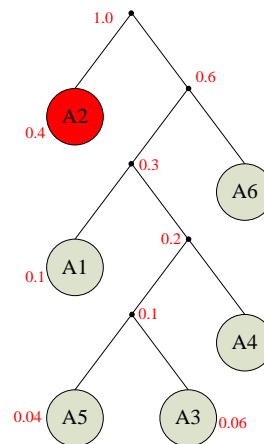


該圖表格合併後作排序的結果如下，因為合併項{A6,A1,A4,A3,A5}的機率 0.6 大於 A2 的機率，所以在表格中把 A2 擠下去了。

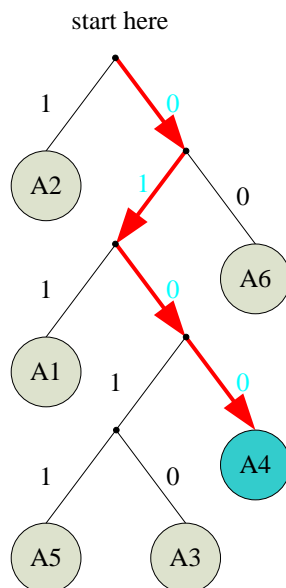


至此 C4 回合，表格只剩下兩個項，繪 Huffman tree 時需作最後一次合併(合起來總機率為 1) ，此時的 Huffman tree 如下所示，此時原合併項的機率比較大放大右邊，新合併的 A2 機率比較小，放左邊。

C4		C5	
P(Ai)	Symbol	P(Ai)	Symbol
0.6	{A6,A4,A3,A5,A1}	1.0	{A2,A6,A4,A3,A5,A1}
0.4	A2		



如何由 Huffman tree 得到個 symbol 的 Huffman coding 呢？至此對 Huffman tree 的每一組分支，左邊設為 1，右邊設為 0，由頂端沿 Huffman tree 走到各 symbol 沿途經過的數字即為各 symbol 的 Huffman code。如下圖以 A4 的 Huffman code，即為由 Top (start here)開始走到 A4 沿途遇到的數字，所以 A4 的 Huffman code 為 0100，與用 Huffman table 方法得到的結果一致。



Symbol	P(Ai)	Huffman code
A1	0.1	011
A2	0.4	1
A3	0.06	01010
A4	0.1	0100
A5	0.04	01011
A6	0.3	00