

# JPEG 解碼器專案報告

## 一、專案概述

本專案實作了一個 Baseline JPEG 解碼器，能夠將 `.jpg` 檔案解碼並輸出為 `.bmp` 格式的點陣圖。整體流程遵循 JPEG 標準，依序解析各段 (Segment)，最終透過反量化、反 Zigzag、IDCT 還原影像像素。

## 二、解碼流程

### 1. 讀取 JPEG 標記 (Marker)

JPEG 檔案由多個段落組成，每個段落以 `0xFF` 開頭，後接一個標記碼。主要段落包括：

標記碼	名稱	功能
<code>0xD8</code>	SOI	Start of Image，檔案起始
<code>0xE0</code>	APP0	應用程式資訊 (如 JFIF)
<code>0xDB</code>	DQT	定義量化表
<code>0xC0</code>	SOF	定義影像尺寸與採樣因子
<code>0xC4</code>	DHT	定義霍夫曼表
<code>0xDA</code>	SOS	開始掃描，進入熵編碼資料區
<code>0xD9</code>	EOI	End of Image，檔案結束

程式透過 `readStream()` 函式依序讀取各標記，並呼叫對應的解析函式。

### 2. 量化表 (DQT)

`readDQT()` 讀取 8x8 量化矩陣，用於後續反量化。每個係數會乘上對應的量化值還原原始 DCT 係數。

### 3. 影像資訊 (SOF)

`readSOF()` 讀取影像高度、寬度，以及各顏色分量 (Y、Cb、Cr) 的採樣因子與對應量化表 ID。

### 4. 霍夫曼表 (DHT)

`readDHT()` 讀取 DC 與 AC 的霍夫曼表，建立查表結構供熵解碼使用。

### 5. 熵解碼 (SOS + Data)

進入 SOS 段後，`readData()` 開始逐 MCU (Minimum Coded Unit) 解碼：

- 讀取 DC 係數：透過霍夫曼解碼取得差分值，累加得到實際 DC。
- 讀取 AC 係數：透過 Run-Length 編碼解析 (zeros, value) 對，填入 64 個係數。

3. 反量化：將係數乘上量化表值。
4. 反 Zigzag：將一維順序還原成 8×8 矩陣。
5. IDCT：透過二維逆離散餘弦變換還原空間域像素值。
6. YCbCr → RGB：將色彩空間轉換為 RGB，寫入 BMP 檔案。

## 三、效能優化

### 優化前問題

原始版本使用 `std::map<std::pair<unsigned char, unsigned int>, unsigned char>` 儲存霍夫曼表，查表時需要：

1. 建立 `std::pair` 物件
2. 進行 `std::map::find()` 查詢 (  $O(\log n)$  複雜度 )
3. 若未找到則繼續累積位元重試

這導致每次霍夫曼匹配都有較高的函式呼叫與記憶體配置開銷。

### 優化後改進

#### 1. 霍夫曼表結構改寫

將 `std::map` 替換為自訂的 `HuffTableEntry` 結構：

```
struct HuffTableEntry {
    unsigned int startCode[17]; // 每個長度的起始碼
    unsigned int endCode[17];   // 每個長度的結束碼
    unsigned int count[17];      // 每個長度有幾個符號
    std::vector<unsigned char> symbols[17]; // 各長度的符號陣列
};
```

優點：

- 以陣列索引取代 map 查詢，存取複雜度從  $O(\log n)$  降至  $O(1)$
- 預先計算 `startCode` 與 `endCode`，可快速判斷當前碼是否落在該長度範圍內
- 使用 `vector::assign()` 預配置空間，避免 `push_back` 的重複配置

#### 2. 霍夫曼匹配邏輯優化

原始 `matchHuff()` 每次都要建立 `std::pair` 並呼叫 `map::find()`：

```
// 舊版
if (huffTable[ACorDC][number].find(std::make_pair(count, len)) != ...) {
    codeLen = huffTable[ACorDC][number][std::make_pair(count, len)];
    return codeLen;
}
```

新版改用範圍檢查：

```
// 新版
if (codeval >= table.startCode[length] && codeval <= table.endCode[length]) {
    unsigned int offset = codeval - table.startCode[length];
    return table.symbols[length][offset];
}
```

優點：

- 純整數比較，無物件建立開銷
- 提前排除不可能的長度 ( `count[length] == 0` 或範圍外 )，減少無效迭代

### 3. 量化表讀取修正

修正了一個筆誤：

```
// 舊版 ( 錯誤 )
t == t << 8;

// 新版 ( 正確 )
t = t << 8;
```

這個 bug 會導致高精度量化表讀取錯誤。

### 4. 餘弦快取 ( 原有優化 )

IDCT 使用預計算的 `cos_cache[200]` 陣列，避免每次都呼叫 `cos()` 函式：

```
void init_cos_cache() {
    for (int i = 0; i < 200; i++) {
        cos_cache[i] = cos(i * M_PI / 16.0);
    }
}
```

並採用分離式二維 IDCT ( 先對列做一維 IDCT，再對行做一維 IDCT )，將複雜度從  $O(n^4)$  降至  $O(n^3)$ 。

## 四、效能測試結果

使用 `time` 指令測量：

```
0.37 user 0.01 system 0:00.38 elapsed 98%CPU
```

- **user time ( 0.37s )**：CPU 在使用者態執行的時間，主要是演算法計算
- **system time ( 0.01s )**：系統呼叫時間，佔比極低 ( 約 2.6% )
- **elapsed time ( 0.38s )**：總經過時間
- **CPU 使用率 98%**：幾乎沒有 I/O 等待

這表示目前的瓶頸在於計算本身 ( IDCT、色彩轉換等 )，而非檔案 I/O。

## 與舊版比較

版本	執行時間
舊版 ( map-based )	~725 ms
新版 ( array-based )	~400 ms
ffmpeg ( 參考 )	~30 ms

優化後速度提升約 **45%**。

## 五、程式碼架構

```
main.cpp
├─ readStream()           // 主迴圈，依標記分派
│   └─ readAPP()         // 解析 APP0/JFIF
│   └─ readDQT()         // 解析量化表
│   └─ readSOF()         // 解析影像資訊
│   └─ readDHT()         // 解析霍夫曼表
│   └─ readSOS() + readData() // 熵解碼主體
│       └─ readMCU()      // 讀取一個 MCU
│           └─ readDC()   // 讀取 DC 係數
│               └─ readAC() // 讀取 AC 係數
│                   └─ MCU::decode() // 反量化 + 反 Zigzag + IDCT
│                       └─ MCU::toRGB() // 色彩轉換
└─ main()                // 進入點
```

## 六、結論

本專案成功實作了 Baseline JPEG 解碼器，並透過將霍夫曼表從 `std::map` 改為陣列結構、預計算範圍邊界等優化，將執行時間從約 725 ms 降至約 400 ms，提升約 45%。後續仍有進一步優化空間，如位元緩衝、快速 IDCT 等，可望進一步縮短與 ffmpeg 的差距。