

# A study of PVO-based Reversible Data Hiding methods

李金鳳\*  
朝陽科技大學  
資訊管理系  
教授

\* Whom correspondence:  
lcf@cyut.edu.tw

曾郁茹  
朝陽科技大學  
資訊管理系  
研究生

yujusteve@gmail.com

## 摘要

可逆式資訊隱藏在近年來崛起一項新穎的方法稱之為像素排序法，許多學者以基於像素排序法將機密訊息藏入於預測誤差值當中，或是藉由影像的特性利用區塊的方式進行分析，並藏入機密訊息，藉由分析個學者們所提出的方法進行比較，並以各方法的範例中得知個方法的特性。

**關鍵詞：** 可逆式資訊隱藏法、像素排序法、藏入量、偽裝影像品質。

## Abstract

Pixel value ordering (PVO) is a reversible data hiding method which with high image quality. In recently years, PVO has been improve much better than the original PVO from Li et al. proposed. Most of authors using prediction error embedding secret and analysis the block of image to embedding secret data. To survey each data hiding method based on PVO which method can achieve better stego image quality and higher embedding capacity.

**Keywords:** Reversible Data Hiding、Pixel value ordering(PVO)、Embedding Capacity、Stego-Image Quality.

## 1. 前言

自古自今人們傳遞訊息的方式不再限於書信以及電話，在現今的社會人們依靠網路傳達訊息，網路的便利也使得科技不斷的進步，促使人類改變通訊的方式，漸漸的依賴網路傳遞任何訊息，無論是文字、圖片、影片、音樂或是軟體皆可透過網路傳遞，這些訊息可能是私密或是重要的，因此安全的保護多媒體訊息是一個重要的議題，在網路的世界中依然會有

非法的第三者利用各種手法竊取他人的重要資料，並惡意的散佈或是從中獲取利益，為了防止多媒體訊息被惡意人士竊取，學者們發明資訊隱藏的技術，此技術可以將重要的訊息藏入至多媒體當中，機密訊息受到保護並且多媒體不會有太大的失真以及影響，讓惡意第三者無法察覺機密訊息嵌入至其中，並安全送達至接收方，此類的技術需要安全性(Security)、不可察覺性(Imperceptibility)、高負載量(Capacity)、明確性(Unambiguousness)以及不可移除性(Non-removable)等條件，才能完整資訊隱藏的目的。安全性是防止惡意第三者竊取機密訊息，也是資訊隱藏最根本的目的；不可察覺性為將機密訊息藏入至多媒體又稱作偽裝多媒體(Stego-Media)，偽裝多媒體若因藏入的訊息量過多使偽裝多媒體失真，則會造成失真，使惡意的第三者會猜測該多媒體可能因為額外的訊息造成失真，因此為了不讓惡意第三者發現，必須確保偽裝多媒體的品質；高負載量指的是資訊隱藏技術如果可使多媒體藏入大量的機密訊息則可達到很高的效益，但是也需要考量失真程度，若失真程度較大也無法達到不可察覺性的問題；明確性為接收方收到偽裝多媒體時取出的機密訊息需與藏入時的機密訊息吻合，達到有效的資訊隱藏；不可移除性指的是偽裝多媒體在傳送的過程當中，假使被惡意的人士篡改或是破壞不會因此造成移除或是改變機密訊息，確保藏匿後的機密訊息的安全，滿足以上的條件則可稱為資訊隱藏，在這其中最重要的為不可察覺性以及高負載量，在不引起有心人士的惡意竊取且具有高容量的機密訊息藏入量，是資訊隱藏不斷在追求的目的，因此許多學者創立多種方法，使資訊隱藏的技術不斷的提升，追求更好的技術。

因影像中具有許多像素值且影像若受到失真時人類的肉眼並不易察覺，所以此篇論文以影像作為掩護多媒體(Cover-Media)進行探討，。資訊隱藏以影像為例的可分為不可逆式

資訊隱藏以及可逆式資訊隱藏，不可逆式資訊隱藏具有較高的藏入量，當接收方獲得偽裝影像後可提取機密訊息，但因藏入量較多掩護影像受到相當程度的破壞而無法還原掩護影像(Cover-Image)，導致不可逆式資訊隱藏的方法具有較多的限制以及應用；可逆式資訊隱藏具有可還原掩護影像的作用，當機密訊息取出之後，可完整保有掩護影像的原始像素值，也稱之為無失真資訊隱藏，因此可逆式資訊隱藏多數運用於軍事、醫療、犯罪偵查、情報等高敏感度的影像，為了提升更多的藏入量以及更好的偽裝影像(Stego-Image)的品質，由於不可逆式資訊隱藏具有較高的實用性，因此不少學者專研於可逆式資訊隱藏，使可逆式資訊隱藏不斷的更新和突破。

可逆式資訊隱藏具有兩大類別所開發，差異擴張法(Difference Expansion)以及直方圖位移修正法(Histogram Shifting and Modification)。差異擴張法[4]最初為 Tian 學者於 2003 年透過影像相鄰像素之間的相似性的概念，以兩像素做為一組，進行差值與平均值的計算，在藏入機密訊息時，藏入時可區分為兩種情況，可擴張或是可改變，為了辨別此兩種情況因此有了位置地圖(Location Map)的協助，也因此降低偽裝影像的純藏入量，此方法具有 0.15bpp(bit) 影像品質有 44.2dB，在 2004 年 Alattar 學者提出了可逆式整數轉換函是隱藏法(Generalized Integer Transform)[1]改善了 Tian 學者的差異擴張法的，Alattar 學者利用四個相鄰的像素進行權重平均值的計算，在四個一組的像素可藏入三個機密訊息，使藏入量增加 0.19bits 影像品質也比較高 44.5dB。

直方圖位移修正法由 Ni 學者於 2006 年提出的[9]，此方法利用灰階影像之像素的個數繪製成直方圖的方式，並統計出出現最多次數的像素作為鋒值點(peak point)，未出現的像素值設定為零值點(zero point)，利用像素位移的方式進行機密訊息的藏入，以著名的 Lena 影像可具有 0.02bpp 的藏入量而影像品質具有 48.2dB。而後 Lee 學者改善了 Ni 學者的直方圖位移修正法提出差值直方圖位移修正法(Difference Histogram Shifting and Modification)[5]。由於鋒值點為藏入機密訊息之藏入量，因此為了創造更多的鋒值點，Lee 學者利用相鄰像素值較為接近的特性，將相鄰像素相減得到差值，因此差值會大分布於 0、1 以及 -1，藉此得到了更多的鋒值點，可以大幅提升藏入量以 Lena 影像做為比較 Lee 學者將藏入量提升至 0.10bpp 且影像品質具有 52.2dB。

學者們依據相鄰像素通常像素值比較相似，因此學者們利用區塊的方式對像素值進行排序，2013 年 Li 等學者[6]提出以四個為一組的像素值進行排序(Pixel Value Ordering)，將最大像素值的預測誤差值或是最小像素值的預測誤差值，以差值 1 或是 -1 為鋒值點，進行機密訊息的藏入，因像素值藉由排序後，像素值會更為相近，得到的預測誤差值也較小，Li 等學者以 1 與 -1 為鋒值點，進行機密訊息的藏入，透過位移的像素值以 1 與 -1 為，使影像品質在 50dB 以上，藏入量可在 0.10bpp。在 2014 年 Peng 等學者提出改良像素排序法[3]，將像素排序法的最大像素值與次大像素值以及最小像素值以及次小像素值，以原始排序順序小的減去順序大的，所得的預測誤差值進行機密訊息的藏入，鋒值點的設立為 0 與 1 或是 -1，藏入量可達到 0.12bpp，影像品質可達到。2014 年 Weng 等學者也提出改良 Li 等學者的像素排序法[2]，其中將鋒值點提升為兩個 -1 以及 1，提倡更好的藏入量，平均藏入量比 Li 學者高出 0.04bpp，影像品質高出 2dB。於 2015 年 Qu 等學者提出具有高真實性的可逆式資訊隱藏，基於像素排序法[8]，Qu 等學者將區塊內的像素值，以第一個像素為指標像素，若指標像素等於此區塊的最大像素值或是最小像素值則才選擇藏入，由此可得知 Qu 等學者的方法選擇區塊中最大像素值以及最小像素值為鋒值點，使機密訊息藏入指標像素當中，Qu 等學者的方式讓平均藏入量達到 0.143bpp，影像品質達到 59.2dB。一樣於 2015 年 Wang 等學者提出一個新的資訊隱藏方法[7]，使用動態的區塊進行分析，判斷區塊的平滑程度才進行機密訊息的藏入，若此區塊極為平滑則可在進行區塊切割並藏入更多的機密訊息，Wang 等學者的機密訊息藏入量為 0.122bpp，平均影像品質可達到 59.42dB。

本片論文將分析以上六種以像素排序法為基礎的資訊隱藏方法，從每個方法的藏入法、藏入量、以及影像品質進行比較，使學者若進行像素排序法的研究可做為參考。於本篇的第二節將介紹原始的像素排序法的藏入方法，第三節則為像素排序法的實驗結果比較，第四節為結論。

## 2. 相關文獻

### 2.1 Li 等學者所提出的像素排序法(PVO)

Li 等學者所提出的像素排序法，是基於像素的預測誤差值進行擴張(Prediction-error

Expansion), 將預測誤差值為 1 或是-1 為峯值點, 進行機密訊息的藏入。透過排序過後的像素值可拉近像素值之間的距離, 使誤差值產生較多的-1 至 1 間的值, 促使較高的峯值點, 使機密訊息可以藏入更多並且在藏入之後不會影響較多的失真。

### 2.1.1 藏入步驟

步驟1: (溢位處理)在藏入機密訊息前, 需先判斷影像中的像素值符合公式(1)的條件, 則以位置地圖(Location Map)(LM)記錄。

$$\begin{cases} p_{\sigma(n_1 \times n_2)} - p_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)} \geq 1 \text{ and } p_{\sigma(n_1 \times n_2)} = 255 \\ p_{\sigma(1)} - p_{\sigma(2)} \leq -1 \text{ and } p_{\sigma(1)} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

步驟2: (溢位處理) 若符合公式(1)此條件之像素值, 此區塊則不會進行機密訊息的藏入以及擴張的動作。位置地圖記錄為  $LM_{(i)} = 1$ , 其餘並未有溢位問題的像素值則為  $LM_{(i)} = 0$ , 因此位置的圖如同一串的二進制訊息, 且此位置的圖的訊息總共有 k bits, 利用算術編碼(Arithmetic Coding)將此位置的圖壓縮為  $l_{clm}$ 。在影像中會造成溢位問題的區塊通常很少, 所以只有少數的  $LM_{(i)} = 1$ , 利用算術編碼的無失真壓縮技術則可使位置的圖縮小, 有效的減少額外訊息。

步驟3: (額外訊息處理)以  $k_{end}$  為藏入額外訊息之區塊和藏入機密訊息之區塊的索引值作為分界, 利用最小位元取代法(Least Significant Bits)將影像中第一個像素值開始至  $16 + 2[\log N] + l_{clm}$  個像素值為所有額外訊息之總數, 其中被取代最小位元則以  $H_{LSB}$  表示, 並且如同機密訊息一般藏入於區塊中。其額外訊息內容如下:

- 將影像切割為  $n_1 \times n_2$  之區塊大小, 總共 8 位元
- 門檻值  $NL$  總共 8 位元
- 藏入額外訊息的最後一個索引值  $k_{end}$  具有  $[\log N]$  位元, 其中 N 為影像中總共有幾個像素值。
- 壓縮後的位置地圖  $l_{clm}$  的訊息長度 k, 具有  $[\log N]$  位元
- 壓縮過後的位置地圖  $l_{clm}$

步驟4: 將  $H \times W$  的掩護影像  $I$  切割成  $n_1 \times n_2$  大小的區塊。

步驟5: 對於每個區塊  $B$  內的像素值以 zig-zag 方式掃描並給予像素值編號  $(p_1, p_2, p_3, \dots, p_{n_1 \times n_2})$ , 接著再將區塊  $B$  內

的像素值由小到大進行排序(Ascending Ordering)得到排序後的區塊  $B_{\sigma}$  及有序的像素值序列  $(p_{\sigma(1)}, p_{\sigma(2)}, p_{\sigma(3)}, \dots, p_{\sigma(n_1 \times n_2)})$ 。假設區塊中有序的像素值序列排序結果為  $p_{\sigma(1)} \leq p_{\sigma(2)} \leq p_{\sigma(3)} \leq \dots \leq p_{\sigma(n_1 \times n_2)}$ 。

步驟6: 針對未有溢位問題可藏入機密訊息以及擴張預測誤差值區塊( $LM_{(i)} = 0$ )。取出排序過後的區塊  $B_{\sigma}$  中最大像素值  $p_{(n_1 \times n_2)}$  與次大像素值  $p_{(n_1 \times n_2 - 1)}$  以及最小像素值  $p_{\sigma(1)}$  和次小像素值  $p_{\sigma(2)}$ , 以下列公式(2)計算兩種預測誤差值  $d_{max}$  與  $d_{min}$ 。

$$\begin{cases} d_{max} = p_{\sigma(n_1 \times n_2)} - p_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)} \\ d_{min} = p_{\sigma(1)} - p_{\sigma(2)} \end{cases} \quad (2)$$

步驟7: 若次大像素值  $p_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)}$  減去次小像素值  $p_{\sigma(2)}$  的值超出門檻值  $T$ , 則此區塊則為粗糙的區塊(rough block), 並不適合機密訊息的藏入以及擴張, 藏入條件與方式如公式(3)(4)。

$$\tilde{d}_{max} = \begin{cases} d_{max}, & \text{if } d_{max} = 0 \\ d_{max} + s, & \text{if } d_{max} = 1 \\ d_{max} + 1, & \text{if } d_{max} > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\tilde{d}_{min} = \begin{cases} d_{min}, & \text{if } d_{min} = 0 \\ d_{min} - s, & \text{if } d_{min} = -1 \\ d_{min} - 1, & \text{if } d_{min} > -1 \end{cases} \quad (4)$$

步驟8:  $\tilde{d}_{max}$  與  $\tilde{d}_{min}$  為藏入機密訊息後的預測誤差值, 藉此更改每個區塊  $B_{\sigma}$  的最大像素值  $p_{\sigma(n \times n)}$  以及最小像素值  $p_{\sigma(1)}$ , 其他像素值保持不變。詳見公式(5)。

$$\begin{cases} \tilde{p}_{\sigma(n \times n)} = p_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)} + \tilde{d}_{max} \\ \tilde{p}_{\sigma(1)} = p_{\sigma(2)} + \tilde{d}_{min} \\ \tilde{p}_{\sigma(i)} = p_{\sigma(i)} \text{ for } i = 2, 3, 4, \dots, n_1 \times n_2 - 1 \end{cases} \quad \text{公式(5)}$$

步驟10: 藉由原始的排序方式還原像素的原始位置。

步驟11: 以上步驟由 6 至步驟 9 則會不斷的重複直到機密訊息藏完為止, 並且形成偽裝影像  $I$ 。

### 2.1.2 取出機密訊息與還原影像之步驟

步驟1: (額外訊息的取出)偽裝影像中的第一個像素值到第  $16 + 2[\log N] + l_{clm}$  個像素值為額外訊息, 其中包含切割區塊大小  $n_1 \times n_2$ 、門檻值  $T$ 、機密訊息藏入的結束位置  $k_{end}$  以及壓縮過後的位置地圖  $l_{clm}$ 。依據最小位元取代法取出, 並將壓縮過後的位置地圖依據算術編碼解壓縮。

步驟2: 將 $H \times W$ 的偽裝影像 $I'$ 切割成 $n_1 \times n_2$ 大小的區塊。

步驟3: 對於每個區塊 $B$ 內的像素值以 zig-zeg 方式掃描並給予像素值編號  $(p_1, p_2, p_3, \dots, p_{n_1 \times n_2})$ ，接著再將區塊 $B$ 內的像素值由小到大進行排序(Ascending Ordering)得到排序後的區塊 $B_\sigma$ 及有序的像素值序列

$(\tilde{p}_{\sigma(1)}, \tilde{p}_{\sigma(2)}, \tilde{p}_{\sigma(3)}, \dots, \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)})$ 。假設區塊中有序的像素值序列排序結果為。

甲、假設區塊中有序的像素值序列排序結果為 $\tilde{p}_{\sigma(1)} \leq \tilde{p}_{\sigma(2)} \leq \tilde{p}_{\sigma(3)} \leq \dots \leq \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)}$ 。

步驟4: 在排序過後的區塊 $B_\sigma$ 中取出最大像素值 $\tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)}$ 與次大像素值 $\tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)}$ 以及最小像素值 $\tilde{p}_{\sigma(1)}$ 和次小像素值 $\tilde{p}_{\sigma(2)}$ ，以下列公式(6)計算兩種預測誤差值 $\tilde{d}_{max}$ 與 $\tilde{d}_{min}$ 。

$$\begin{cases} \tilde{d}_{max} = \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)} - \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)} \\ \tilde{d}_{min} = \tilde{p}_{\sigma(1)} - \tilde{p}_{\sigma(2)} \end{cases} \quad (6)$$

步驟5: 若位置地圖 $LM_{(i)} = 1$ 且預測誤差值 $\tilde{d}_{max}$ 與 $\tilde{d}_{min}$ 超出門檻值 $T$ ，則該區塊並沒有藏入機密訊息以及擴張。

步驟6: 藉由公式 2-17 取得機密訊息以及額外訊息 $H_{LSB}$ ，其 $H_{LSB}$ 之長度為 $16 + 2[\log N] + l_{clm}$ ，並還原第一個像素值到第 $16 + 2[\log N] + l_{clm}$ 個像素值。

$$\begin{cases} s = 0, & \text{if } \tilde{d}_{max} = 1 \\ s = 1, & \text{if } \tilde{d}_{max} = 2 \\ s = 0, & \text{if } \tilde{d}_{min} = -1 \\ s = 1, & \text{if } \tilde{d}_{min} = -2 \end{cases} \quad (7)$$

$$d = \begin{cases} d_{max}, & \text{if } \tilde{d}_{max} = 1 \\ d_{max} - 1, & \text{if } \tilde{d}_{max} \geq 2 \\ d_{min}, & \text{if } \tilde{d}_{min} = -1 \\ d_{min} + 1, & \text{if } \tilde{d}_{min} \leq -2 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} p_{\sigma(n_1 \times n_2)} = \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)} + d_{max} \\ p_{\sigma(1)} = \tilde{p}_{\sigma(2)} + d_{min} \\ p_{\sigma(i)} = \tilde{p}_{\sigma(i)} \text{ for } i = 2, 3, 4, \dots, n_1 \times n_2 - 1 \end{cases} \quad (9)$$

步驟7: 將取出機密訊息後的預測誤差值 $\tilde{d}_{max}$ 以及 $\tilde{d}_{min}$ 還原始預測誤差值 $d$ ，詳見公式(8)。

步驟8: 將次大像素值以及次小像素值加上以還原後的預測誤差值 $d$ ，得到原始像素值，且其餘像素值並未改變，詳見公式(9)。

步驟9: 依照原始像素值大小還原於原始位

置即可得到掩護影像 $I$ 。

## 2.2 Peng 等學者所提出改良的像素排序法 (IPVO)

Peng 等學者所提出的 Improved PVO 可逆式資訊隱藏技術。改良後的 IPVO 演算法在每一個區塊中分別計算最大像素值與次大像素值的預測誤差值，以及計算最小像素值與次小像素值的預測誤差值。IPVO 演算法在處理區塊中最大與次大的兩個像素值的預測誤差值時或者在處理區塊中最小與次小的兩個像素值的預測誤差值時，是依據先被掃描到的像素值減去後被掃描到的像素值來計算的，所以得到預測誤差值具有正值或者負值，藉此預測誤差值擁有的可能性。IPVO 演算法有兩個峰值點為 0 和 1，藏入機密訊息的方式與 PVO 演算法一樣但此方法的優點為在影像中具有許多像素十分相近或是具有一樣的像素值，尤其是平滑影像，藉此在擴張預測誤差時以 0 為峰值點則可提高藏入量，在整體比較上可增加約 14% 的藏入量。Peng 等學者的實驗結果之影像品質平均可提升 Li 等學者的方法 0.69dB。

### 2.2.1 藏入步驟

步驟1: (額外訊息處理)將額外訊息以及位置地圖利用 LSB 取代法藏入至影像中的第一個像素值到第 $12 + [\log_2 N] + l_{clm}$ 個像素值，其中額外訊息包含下列內容，則原始像素值之最小位元 $H_{LSB}$ 使用步驟 4 至步驟 7 藏入於影像中。

- 區塊的大小 $n_1$ (2bits)以及 $n_2$ (2bits)且 $n = n_1 \times n_2$ ，總共 4bits
- 門檻值 $T$ ，總共 8bits。
- 額外訊息之結束位置 $k_{end}$ 總共 $[\log_2 N]$ bits，其中 $N$ 為影像中總共有幾個像素值。
- 壓縮過後的位置地圖 $l_{clm}$ 。
- 壓縮過後的位置地圖 $l_{clm}$ 之長度 $k$ ，以 $[\log_2 N]$ bits 表示 $k$ 。

步驟1.2: (溢位處理)在藏入機密訊息前，需先判斷影像中的像素值為 0 或是 255，則以位置地圖(Location Map)(LM)記錄 $LM_{(i)} = 1$ ，其餘並沒有溢位問題的像素值對應到位置地圖處的指示位元為 $LM_{(i)} = 0$ 。

步驟2.2: (溢位處理)因此位置地圖如同一串的二進制訊息，利用算術編碼(Arithmetic Coding)將此位置地圖壓縮為 $l_{clm}$ ，且假設位置地圖之訊息

長度為  $k$  bits。在影像中會造成溢位問題的區塊通常很少，所以只有少數的  $LM_{(i)} = 1$ ，利用無失真壓縮技術則可使位置地圖縮小，可以有效地減少額外訊息的長度。

步驟2: 將  $H \times W$  的掩護影像  $I$  切割成  $n_1 \times n_2$  大小的區塊，若區塊中的像素值其對應的  $LM_{(i)} = 1$ ，則該像素不進行下列步驟。

步驟3: 對於每個區塊  $B$  內的像素值以 zig-zag 方式掃描並給予像素值編號  $B = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_{(n_1 \times n_2)})$ ，接著再將區塊  $B$  內的像素，依其值由小到大進行排序 (Ascending Ordering) 得到排序後的區塊  $B_\sigma$  及有序的像素值序列

$(p_{\sigma(1)}, p_{\sigma(2)}, p_{\sigma(3)}, \dots, p_{\sigma(n_1 \times n_2)})$ 。假設區塊中有序的像素值序列排序結果為  $p_{\sigma(1)} \leq p_{\sigma(2)} \leq p_{\sigma(3)} \leq \dots \leq p_{\sigma(n_1 \times n_2)}$ 。

步驟4: 若次大像素值與次小像素值之差值可視為區塊  $B_\sigma$  的變異程度 (noise level; NL)，為了避免區塊  $B_\sigma$  內的影像像素值變動太大，因此若變異程度 NL 大於預設的門檻  $T$ ，則不進行機密訊息的藏入或是位移如公式(10)。

$$NL = p_{\sigma(n \times n - 1)} - p_{\sigma(2)} \quad (10)$$

步驟5: 若該區塊的  $NL \leq T$  且  $LM_{(i)} = 0$  則可進行機密訊息的藏入以及位移。取出區塊中的最大像素值  $p_{\sigma(n_1 \times n_2)}$  與次大像素值  $p_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)}$  以及最小像素值  $p_{\sigma(1)}$  和次小像素值  $p_{\sigma(2)}$ ，並依原始像素之編號以編號小的像素值  $p_u$  減去編號大的像素值  $p_v$ ，取得預測誤差值  $d_{max}$  如公式(11)，預測誤差值  $d_{min}$  也是編號小的像素值  $p_s$  減去編號大的像素值  $p_t$ ，公式(12)。

$$d_{max} = p_u - p_v \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} u = \min(\sigma(n_1 \times n_2), \sigma(n_1 \times n_2 - 1)) \\ v = \max(\sigma(n_1 \times n_2), \sigma(n_1 \times n_2 - 1)) \\ d_{min} = p_r - p_t \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{其中 } \begin{cases} r = \min(\sigma(1), \sigma(2)) \\ t = \max(\sigma(1), \sigma(2)) \end{cases}$$

若預測誤差值  $d_{max}$  或  $d_{min}$  為峰值點 0 或 1，則可進行預測誤差值或是在預測誤差值中藏入一個位元的機密訊息  $S$ ，詳見公式(13)以及(14)。

$$\tilde{d}_{max} = \begin{cases} d_{max} - s, & \text{if } d_{max} = 0 \\ d_{max} + s, & \text{if } d_{max} = 1 \\ d_{max} + 1, & \text{if } d_{max} > 1 \\ d_{max} - 1, & \text{if } d_{max} < 0 \end{cases}$$

$$\tilde{d}_{min} = \begin{cases} d_{min} - s & \text{if } d_{min} = 0 \\ d_{min} + s & \text{if } d_{min} = 1 \\ d_{min} + 1 & \text{if } d_{min} > 1 \\ d_{min} - 1 & \text{if } d_{min} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

步驟6: 藏入機密訊息(詳見公式(15)以及公式(16))就如同是將每個區塊中排序最大像素值變大或是將最小像素值變小。使得大者恆大小者恆小，自始至終未曾改變每個區塊中像素值的排序。

$$\tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)} = p_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)} + |\tilde{d}_{max}| = \begin{cases} p_{\sigma(n_1 \times n_2)} + s, & \text{if } d_{max} = 1 \\ p_{\sigma(n_1 \times n_2)} + 1, & \text{if } d_{max} > 1 \\ p_{\sigma(n_1 \times n_2)} + s, & \text{if } d_{max} = 0 \\ p_{\sigma(n_1 \times n_2)} + 1, & \text{if } d_{max} < 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\tilde{p}_{\sigma(1)} = p_{\sigma(2)} + |\tilde{d}_{min}| = \begin{cases} p_{\sigma(1)} - s, & \text{if } d_{min} = 1 \\ p_{\sigma(1)} - 1, & \text{if } d_{min} > 1 \\ p_{\sigma(1)} - s, & \text{if } d_{min} = 0 \\ p_{\sigma(1)} - 1, & \text{if } d_{min} < 0 \end{cases} \quad (16)$$

步驟7: 還原原始像素的位置，即成為偽裝影像  $I'$ 。

### 2.2.1 取出機密訊息

步驟1: (額外訊息的取出)偽裝影像中的第 1 個像素值到第  $(12 + 2[\log N] + l_{clm})$  個像素值之最小位元 (least significant bits) 為額外訊息藏匿處。在  $(12 + 2[\log N] + l_{clm})$  個位元中，包含切割區塊大小  $n_1, n_2$ 、門檻值  $T$ 、機密訊息藏入的結束位置  $k_{end}$  以及壓縮過後的位置地圖  $l_{clm}$ 。依據最小位元取代法取出額外訊息，並將壓縮過後的位置地圖  $l_{clm}$  解壓縮還原為  $LM$ 。其中第 1 個像素值到第  $(12 + 2[\log N] + l_{clm})$  個像素值之原始最小位元以  $H_{LSB}$  如同機密訊息藏入於區塊中並由步驟 2 至步驟 6 取出。

步驟2: 將  $H \times W$  的偽裝影像  $I'$  切割成  $n_1 \times n_2$  大小的區塊，若區塊中有  $LM_{(i)} = 1$  之像素值則不進行下列步驟。

步驟3: 每個區塊進行像素大小的排序  $(\tilde{p}_{\sigma(1)}, \tilde{p}_{\sigma(2)}, \tilde{p}_{\sigma(3)}, \dots, \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)})$  其中  $\tilde{p}_{\sigma(1)} \leq \tilde{p}_{\sigma(2)} \leq \tilde{p}_{\sigma(3)} \leq \dots \leq \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)}$ 。

步驟4: 在排序過後的像素值取出最大值  $\tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)}$  與次大值  $\tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)}$  以及最小值  $\tilde{p}_{\sigma(1)}$  和次小值  $\tilde{p}_{\sigma(2)}$  利用公式取得預測誤差值  $\tilde{d}_{max}$  如公式(17),  $\tilde{d}_{min}$  如公式(18)。

$$\tilde{d}_{max} = p_u - p_v$$

$$\begin{cases} u = \min(\sigma(n_1 \times n_2), \sigma(n_1 \times n_2 - 1)) \\ v = \max(\sigma(n_1 \times n_2), \sigma(n_1 \times n_2 - 1)) \end{cases}$$

其中

$$(17)$$

$$\tilde{d}_{min} = p_r - p_t$$

$$\begin{cases} r = \min(\sigma(1), \sigma(2)) \\ t = \max(\sigma(1), \sigma(2)) \end{cases}$$

其中

$$(18)$$

步驟5: 已知峰值點  $pk = 0, 1$ , 若預測誤差值等於峰值點 0 則可取出機密訊息 0, 若預測誤差值為峰值點加 1 或是減 1 則機密訊息為 1。詳見公式(19)以及(20)取出機密訊息。

$$\begin{cases} s = 0, & \text{if } \tilde{d}_{max} = pk \\ s = 1, & \text{if } \tilde{d}_{max} = pk + 1 \text{ or } pk - 1 \end{cases}$$

$$(19)$$

$$\begin{cases} s = 0, & \text{if } \tilde{d}_{min} = pk \\ s = 1, & \text{if } \tilde{d}_{min} = pk + 1 \text{ or } pk - 1 \end{cases}$$

$$(20)$$

$$p_{\sigma(n_1 \times n_2)} = \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)} + |d_{max}| = \begin{cases} \tilde{d}_{max} + 1, & \text{if } \tilde{d}_{max} < 0 \\ \tilde{d}_{max} - 1, & \text{if } \tilde{d}_{max} > 1 \end{cases}$$

$$(21)$$

$$p_{\sigma(1)} = \tilde{p}_{\sigma(2)} + |d_{min}| = \begin{cases} \tilde{d}_{min} + 1, & \text{if } \tilde{d}_{min} < 0 \\ \tilde{d}_{min} - 1, & \text{if } \tilde{d}_{min} > 1 \end{cases}$$

$$(22)$$

步驟6: 取出機密訊息後還原原始像素值, 詳見公式(21)以及(22)。

步驟7: 將原始像素值還原至原始位置及完成取出的動作。

### 2.3 Qu 等學者所提出的像素排序法 (PVO-K)

PVO-K 和 IPVO 演算法相同, PVO-K 演算法也是為了利用 PVO 方法中預測誤差“0”並未能藏入機密訊息, 而 PVO-K 以及 IPVO 皆是可以使用預測誤差值“0”為藏入機密訊息, 並且將 K 所代表的是 K 個相同的最大像素值或者最小像素值可視為同一個整體藏入機密訊息, 此方式依然是更改最大像素值以及最小像素值進行機密訊息的藏入, 為了促使更好的藏入量 PVO-K 將藏入的機制分為 PVO-1 以及 PVO-2, 在 PVO1 中則是 1 像素值與次小的或是次大的像素值相減的預測誤差值若為 1 或是

-1 則可藏入機密訊若大於 1 或是小於 -1 則進行位移, PVO2 則是 2 個相同的像素值若兩個相同大的像素值與次大像素值之預測誤差值為 1 或是最小像素值與次小像素值的預測誤差值為 -1 及可藏入機密訊息, 若小於 -1 或是大於 1 則不藏入且不改變。PVO-K 的藏入量比 PVO 增加 0.01bpp 其影像品質只降低 0.27dB。

#### 2.3.1 藏入步驟(額外訊息)

步驟1: 將區塊 B 內的像素值由小到大進行排序(Ascending Ordering)得到排序後的區塊  $B_\sigma$  及有序的像素值序列  $(p_{\sigma(1)}, p_{\sigma(2)}, p_{\sigma(3)}, \dots, p_{\sigma(n_1 \times n_2)})$ 。假設區塊中有序的像素值序列排序結果為  $p_{\sigma(1)} \leq p_{\sigma(2)} \leq p_{\sigma(3)} \leq \dots \leq p_{\sigma(n_1 \times n_2)}$ 。

步驟2: 假設一個區塊中有 a 個相同的最大值與 b 個相同的最小值, 若區塊中的 a=1 或是 b=1 且  $NL < T_1$  則可藏入機密訊息在為 PVO-1; 若區塊中的 a=2 或是 b=2 且  $NL < T_2$  則可藏入機密訊息在為 PVO-2, 已下分為四種藏入的 case 並假設  $n_1 \times n_2$  為 n。

- Case 1: 當 a = k, b ≠ k 則最大值可藏入機密訊息或是進行位移如公式(23)。

$$\tilde{p}_{\sigma(i)} = \begin{cases} p_{\sigma(i)}, & \text{if } 1 \leq i \leq n - a \\ p_{\sigma(i)} + s, & \text{if } n - a + 1 \leq i \leq n \text{ and } d_{max} = 1 \\ p_{\sigma(i)} + 1, & \text{if } n - a + 1 \leq i \leq n \text{ and } d_{max} > 1 \end{cases}$$

$$(23)$$

- Case 2: 當 a ≠ k, b = k 則最小像素值則可進行機密訊息的藏入及位移如公式(24)。

$$\tilde{p}_{\sigma(i)} = \begin{cases} p_{\sigma(i)}, & \text{if } b + 1 \leq i \leq n \\ p_{\sigma(i)} - s, & \text{if } 1 \leq i \leq b \text{ and } d_{min} = -1 \\ p_{\sigma(i)} - 1, & \text{if } 1 \leq i \leq b \text{ and } d_{min} < -1 \end{cases}$$

$$(24)$$

- Case 3: 當 a = b = k 且  $n_1 \times n_2 > 2k$  則可將最大像素值與最小像素值進行機密訊息的藏入或是位移如公式(25)。

$$\tilde{p}_{\sigma(i)} = \begin{cases} p_{\sigma(i)}, & \text{if } b + 1 \leq i \leq n - a \\ p_{\sigma(i)} - s_1, & \text{if } 1 \leq i \leq b \text{ and } d_{min} = -1 \\ p_{\sigma(i)} - 1, & \text{if } 1 \leq i \leq b \text{ and } d_{min} < -1 \\ p_{\sigma(i)} + s_2, & \text{if } n - a + 1 \leq i \leq n \text{ and } d_{max} = 1 \\ p_{\sigma(i)} + 1, & \text{if } n - a + 1 \leq i \leq n \text{ and } d_{max} > 1 \end{cases}$$

$$(25)$$

- Case 4: 當 a = b = k 且 n = 2k 不進行任何機密訊息的藏入。

步驟3: (額外訊息處理)將機密訊息藏入後剩餘的像素值利用最小位元取代法(LSB)

藏入額外訊息於像素值當中。其額外訊息包括如下：

- 可藏入的機密訊息量 EC，總共 18bits
- 區塊大小  $n_1 \times n_2$ ，總共 4bits
- 壓縮過後的位置地圖 L，總共 18bits
- 最佳的門檻值  $T_1$  與  $T_2$ ，總共 20bits
- 藏入機密訊息之結束位置，總共 18bits

共 78bits 的額外訊息。

步驟4: 完成後即可形成偽裝影像  $I'$ 。

### 2.3.2 取出機密訊息還原原始影像

步驟1: 將最後一個像素值之位置往回推算至 78 個像素值並利用 LSB 取代法取出額外訊息，其中額外訊息包含可藏入的機密訊息量 EC、區塊大小  $n_1 \times n_2$ 、壓縮過後的位置地圖 L、最佳的門檻值  $T_1$  與  $T_2$ 、藏入機密訊息之結束位置。

步驟2: 透過額外訊息的資訊首先將偽裝影像進行切割成  $n_1 \times n_2$  大小的區塊。

步驟3: 將區塊  $B$  內的像素值由小到大進行排序得到排序後的區塊  $B_\sigma$  及有序的像素值序列  $(\tilde{p}_{\sigma(1)}, \tilde{p}_{\sigma(2)}, \tilde{p}_{\sigma(3)}, \dots, \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)})$ 。假設區塊中有序的像素值序列排序結果為  $\tilde{p}_{\sigma(1)} \leq \tilde{p}_{\sigma(2)} \leq \tilde{p}_{\sigma(3)} \leq \dots \leq \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)}$ 。

步驟4: 假設一個區塊中有  $a$  個相同的最大值與  $b$  個相同的最小值，若  $a=k$  或是  $b=k$  則可藏入機密訊息，已下分為四種藏入的 case 並假設  $n_1 \times n_2$  為  $n$ 。

- Case 1: 假若  $a = k$ ,  $b \neq k$ ，在此種狀況像素值將回復於如公式。若最大像素值之預測誤差值為 1 或是 2 則取出的機密訊息為 0 或是 1 如公式(26)。

$$p_{\sigma(i)} = \begin{cases} \tilde{p}_{\sigma(i)}, & \text{if } 1 \leq i \leq n - a \\ \tilde{p}_{\sigma(i)}, & \text{if } n - a + 1 \leq i \leq n \text{ and } \tilde{d}_{max} = 1 \\ \tilde{p}_{\sigma(i)} - 1, & \text{if } n - a + 1 \leq i \leq n \text{ and } \tilde{d}_{max} > 1 \end{cases} \quad (26)$$

- Case 2: 假若  $a \neq k$ ，在此種狀況像素值將回復於如公式。若最小像素值之預測誤差值為 -1 或是 -2 則可取出機密訊息 0 與 1 如公式(27)。

$$p_{\sigma(i)} = \begin{cases} \tilde{p}_{\sigma(i)}, & \text{if } b + 1 \leq i \leq n \\ \tilde{p}_{\sigma(i)}, & \text{if } 1 \leq i \leq b \text{ and } \tilde{d}_{min} = -1 \\ \tilde{p}_{\sigma(i)} + 1, & \text{if } 1 \leq i \leq b \text{ and } \tilde{d}_{min} < -1 \end{cases} \quad (27)$$

- Case 3: 假若  $a = b = k$  且  $n > 2k$  在

此種狀況像素值將回復於如公式。

若此區塊為 Case3 則可能在一個區塊中取出兩個機密訊息，若最大預測誤差值與最小預測誤差值中

$(\tilde{d}_{max}, \tilde{d}_{min})$  為 (1, -1)、(1, -2)、(2, -1)、(2, -2) 其機密訊息

為 "00"、"01"、"10"、"11"。

步驟5: Case4: 假若當  $a = b = k$  且  $n = 2k$  不進行任何機密訊息的藏入。

步驟6: 將所有區塊進行分析並取出機密訊息以及還原原始像素值則可形成原始掩護影像  $I$ 。

### 2.3 Qu 等學者所提出的高真實性像素排序法(PPVO)

Qu 等學者提出了一個高真實性的可逆式像素排序法(PPVO)，與 Li 學者等人的方法具有很大的不同。Qu 等學者使用浮動式視窗(Sliding window)，充分的用運每一個像素值並且進行機密訊息的藏入。因為自然影像是具有高度結構化的特性，在自然影像中相鄰像素之間有很強的關聯性，尤其在平滑影像當中，因此預測誤差值通常介於 1 至 -1 之中。PPVO 利用浮動式視窗(Sliding window)為區塊，使影像中的每個像素值充分的利用，並且在藏入機密訊息時只更改區塊中的一個像素值，稱之為指標像素值(Target pixel)，區塊內除了指標像素值以外的像素值，取出最大像素值以及最小像素值，若指標像素值等於最大像素值或是最小像素值則可藏入機密訊息；若區塊內的像素值皆相等，包括指標像素值，也可藏入機密訊息。此方法的優點為以浮動式視窗(Sliding window)為區塊進行區塊間的分析，善用每個像素值，在相同區塊中的藏入量比 Li 學者等人的方法增加 1 個 bits，而且藏入機密訊息時，只需更改一個像素值，達到更好的影像品質。PVO 方法比平均藏量比 PVO 方法高出 13500bits，在影像品質也平均提高 2.3dB。

#### 2.4.1 藏入步驟

步驟1: (溢位處理)將掩護影像中，0 以及 255 的像素值更改為 1 以及 254，並且利用位置的圖記錄為  $LM_{(i)} = 1$ ，而像素值介於 1 至 254 的像素值則位置地圖更改為  $LM_{(i)} = 0$ 。並且將位置地圖將以碼算術編碼(Arithmetic Coding)的方式壓縮為  $I_{clm}$ ，藏入於影像當中。

步驟2: (額外訊息處理)以  $k_{end}$  為藏入額外訊息之區塊和藏入機密訊息之區塊的索引值作為分界，將影像中最後一行的 16 +



$2(\log N)$ 個像素值至最後一個像素值為額外訊息，且利用最小位元取代法(Least Significant Bits)，其中所有額外訊息之總數為 $16 + 2(\log N)$ ，其中被取代最小位元則以 $H_{LSB}$ 表示，並且如同機密訊息一般藏入於區塊中。其額外訊息內容如下：

- 將影像切割為 $n_1 \times n_2$ 之區塊大小，總共 8 位元
- 門檻值 $T$ 總共 8 位元
- 藏入額外訊息的最後一個索引值 $k_{end}$ 具有 $[\log N]$ 位元，其中 $N$ 為影像中總共有幾個像素值。
- 壓縮後的位置地圖 $l_{clm}$ 的訊息長度 $k$ ，具有 $[\log N]$ 位元

步驟3: 將 $H \times W$ 的掩護影像 $I$ 切割成 $n_1 \times n_2$ 大小的區塊 $B$ ，且區塊為浮動式視窗(Sliding window)，使部分像素值可重疊。

步驟4: 每個區塊中掃描的第一個像素值為指標像素值 $P_k$ ，除了指標像素值以外的最大像素值 $p_{\sigma(n_1 \times n_2)}$ 以及最小像素值 $p_{\sigma(1)}$ 相減的差值 $NL$ 若大於門檻值 $T$ 則不進行機密訊息的藏入以及位移的動作。

步驟5: 區塊內的像素值須符合 $LM_{(i)} = 0$ 且 $NL \leq T$ 才能進行藏入機密訊息或是位移，其 $NL$ 如公式(28)。

$$NL = p_{\sigma(n_1 \times n_2)} - p_{\sigma(1)} \quad (28)$$

步驟6: 首先，判斷區塊中除了指標像素值以外，最大像素值與最小像素值是否相等。

步驟6.1: (若兩者不相等)，則指標像素值有兩種可能性如公式(29)與公式(30)則可藏入機密訊息以及位移。若區塊中的指標像素值介於區塊中的最大像素值或是最小像素值、指標像素值則不進行任何動作。

步驟6.2: (若兩者等)則在像素值皆為 254 或是區塊內的像素值皆相等 VC(包括指標像素值)則可藏入機密訊息或是進行位移如公式(31)。若區塊中的像素值皆相等除了指標像素值不相等則此區塊不進行任何動作；若區塊中的指標像素值大於區塊中皆相等的像素值則不進行任何動作。

$$\begin{cases} P_k - s, & \text{if } P_k = p_{\sigma(1)} \\ P_k - 1, & \text{if } P_k < p_{\sigma(1)} \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} P_k + s, & \text{if } P_k = p_{\sigma(n_1 \times n_2)} \\ P_k + 1, & \text{if } P_k > p_{\sigma(n_1 \times n_2)} \end{cases} \quad (30)$$

$$\begin{cases} P_k + s, & \text{if } P_k = VC \\ P_k - s, & \text{if } P_k \leq VC \\ P_k - 1, & \text{if } P_k < VC \end{cases} \quad (31)$$

步驟7: 透過浮動視窗的區塊將機密訊息藏入後將每個區塊透過步驟六的判斷後則可得到偽裝影像 $I'$ 。

#### 2.4.2 取出機密訊息及還原掩護影像

步驟1: (額外訊息的取出)偽裝影像中最後一行的 $16 + 2[\log N]$ 個像素值至最後一個像素值為額外訊息，其中包含切割區塊大小 $n_1 \times n_2$ 、門檻值 $T$ 、壓縮後的位置地圖 $l_{clm}$ 的訊息長度 $k$ 、機密訊息藏入的結束位置 $k_{end}$ 。依據最小位元取代法取出。

步驟2: (溢位問題)透過解壓縮過後的位置地圖，將 $LM_{(i)} = 1$ 且像素值為 1 以及 254 更改為 0 以及 255，若 $LM_{(i)} = 0$ 則繼續下個步驟。

步驟3: 將 $H \times W$ 的偽裝影像 $I'$ 切割成 $n_1 \times n_2$ 大小的區塊，且區塊為浮動式視窗(Sliding window)，使部分像素值可重疊，從最後一組區塊進行機密訊息的取出以及像素值的還原。

步驟4: 每個區塊中掃描的第一個像素值為指標像素值 $\tilde{P}_k$ ，除了指標像素值以外的最大像素值 $\tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)}$ 以及最小像素值 $\tilde{p}_{\sigma(1)}$ 相減的差值 $NL$ 若大於門檻值 $T$ 則不進行機密訊息的藏入以及位移的動作。

步驟5: 區塊內的像素值須符合 $LM_{(i)} = 0$ 且 $NL \leq T$ 才能進行藏入機密訊息或是位移，其 $NL$ 如公式(32)。

$$NL = \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)} - \tilde{p}_{\sigma(1)} \quad \text{公式(32)}$$

步驟6: 首先，判斷區塊中最大像素值與最小像素值是否相等，

步驟6.1: (若兩者不相等)指標像素值若等於最小像素值或是最大像素值則可取出機密訊息"0"若為最小像素值減 1 或是最大像素值加 1 則可取出機密訊息為"1"如公式(33)。

若需還原指標像素值則依據公式(35)還原。若區塊中的指標像素值介於區塊中的最大像素值或是最小像素值、指標像素值則不進行任何動作。

步驟6.2: (若兩者等)則在像素值皆為 254 或是區塊內的像素值皆相等 VC(包括指標像素值)則有藏入機密訊息或是進行位移，藉由公式(34)取出機密訊息，指標像素值取出機密訊息後依公式(36)還原原始指標像素值。若區塊中的像素值皆相等除了指標像素值不相等則此區塊不進行任何動作；若區塊中的指標像素值大於區



塊中皆相等的像素值則不進行任何動作。

$$\begin{cases} s = 0, & \text{if } \tilde{P}_k = \tilde{p}_{\sigma(1)} \\ s = 0, & \text{if } \tilde{P}_k = \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)} \\ s = 1, & \text{if } \tilde{P}_k = \tilde{p}_{\sigma(1)} - 1 \\ s = 1, & \text{if } \tilde{P}_k = \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)} + 1 \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} s = 0, & \text{if } \tilde{P}_k = VC \\ s = 1, & \text{if } \tilde{P}_k = VC - 1 \end{cases} \quad (34)$$

$$P_k = \begin{cases} \tilde{p}_{\sigma(1)}, & \text{if } \tilde{P}_k = \tilde{p}_{\sigma(1)} \\ \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)}, & \text{if } \tilde{P}_k = \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)} \\ \tilde{P}_k + 1, & \text{if } \tilde{P}_k = \tilde{p}_{\sigma(1)} - 1 \\ \tilde{P}_k - 1, & \text{if } \tilde{P}_k = \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)} + 1 \end{cases} \quad (35)$$

$$P_k = \begin{cases} VC, & \text{if } \tilde{P}_k = VC \\ VC + 1, & \text{if } \tilde{P}_k = VC - 1 \end{cases} \quad (36)$$

步驟7: 透過浮動區塊對整張影像進行區塊的分析並取出機密訊息及還原原始指標像素值則可還原掩護影像  $I$ 。

## 2.5 Weng 等學者提出高效率的無失真資訊隱藏技術之像素排序法

Weng 學者的方法是改善 Li 等學者的方法, Li 等學者利用像素排序法使像素值之差值進行統計, 使預測誤差值為 1 或是 -1 為峰值點藏入機密訊息, 而 Weng 等學者的方法則為兩個峰值點 1 與 -1 進行藏入, 藏入量最高可高達 Li 等學者的方法一倍之多, 且影像品質平均也高達 50dB 以上, 也因此大幅提升了像素排序法的藏入量。像素值藉由排序後可發進像素值之間的距離, 也因此 Weng 等學者設定以 1 與 -1 為峰值點進行機密訊息的藏入。

### 2.5.1 藏入步驟

步驟1:  $H \times M$  的掩護影像  $I = \{p_i | \text{for } i = 1, 2, 3, \dots, H \times M\}$

步驟2: 將掩護影像切割為  $n_1 \times n_2$  個區塊  $B_i = \{p_i | \text{for } i = 1, 2, 3, \dots, n_1 \times n_2\}$

步驟1: 每個區塊進行像素大小的排序  $B'_i = (p_{\sigma(1)}, p_{\sigma(2)}, p_{\sigma(3)}, \dots, p_{\sigma(n_1 \times n_2)})$  其中  $p_{\sigma(1)} \leq p_{\sigma(2)} \leq p_{\sigma(3)} \leq \dots \leq p_{\sigma(n_1 \times n_2)}$ 。

步驟3: 在排序過後的像素值取出最大值  $p_{\sigma(n_1 \times n_2)}$  與次大值  $p_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)}$  以及最小值  $p_{\sigma(1)}$  和次小值  $p_{\sigma(2)}$ 。

步驟4: 利用最大像素值減去次大像素值得到預測誤差值  $d_{max}$ ; 最小像素值減去次小像素值得到預測誤差值  $d_{min}$ 。

步驟5: 選取預測誤差值  $d_{max}$  和  $d_{min}$  為 1 以及 -1 為峰值點  $pk$  進行位移或是藏入機密訊息  $S$  的藏入依據公式(37)與公式(38)。

$$\tilde{d}_{max} = \begin{cases} d_{max}, & \text{if } d_{max} = 0 \\ d_{max} + s, & \text{if } d_{max} = 1 \\ d_{max} + 1, & \text{if } d_{max} > 1 \end{cases} \quad (37)$$

$$\tilde{d}_{min} = \begin{cases} d_{min}, & \text{if } d_{min} = 0 \\ d_{min} - s, & \text{if } d_{min} = -1 \\ d_{min} - 1, & \text{if } d_{min} > -1 \end{cases} \quad (38)$$

步驟6: 將更改過後的預測誤差值改變最大像素質  $p_{\sigma(n \times n)}$  以及最小像素質  $p_{\sigma(1)}$ , 依據公式(39)。

$$\begin{cases} \tilde{p}_{\sigma(n \times n)} = p_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)} + \tilde{d}_{max} \\ \tilde{p}_{\sigma(1)} = p_{\sigma(2)} + \tilde{d}_{min} \\ \tilde{p}_{\sigma(i)} = p_{\sigma(i)} \text{ for } i = 2, 3, 4, \dots, n_1 \times n_2 - 1 \end{cases} \quad (39)$$

步驟7: 更改過後的像素值依原始的位置排序成原始像素的位置, 便形成偽裝影像。

### 2.5.2 取出機密訊息及還原掩護影像

步驟1:  $H \times M$  的掩護影像  $I' = \{\tilde{p}_i | \text{for } i = 1, 2, 3, \dots, H \times M\}$

步驟2: 將掩護影像切割為  $n_1 \times n_2$  個區塊  $B'_i = \{\tilde{p}_i | \text{for } i = 1, 2, 3, \dots, n_1 \times n_2\}$

步驟3: 每個區塊進行像素大小的排序  $B''_i = (\tilde{p}_{\sigma(1)}, \tilde{p}_{\sigma(2)}, \tilde{p}_{\sigma(3)}, \dots, \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)})$  其中  $\tilde{p}_{\sigma(1)} \leq \tilde{p}_{\sigma(2)} \leq \tilde{p}_{\sigma(3)} \leq \dots \leq \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)}$ 。

步驟4: 在排序過後的像素值取出最大值  $\tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)}$  與次大值  $\tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)}$  以及最小值  $\tilde{p}_{\sigma(1)}$  和次小值  $\tilde{p}_{\sigma(2)}$ 。

步驟5: 利用最大像素值減去次大像素值得到預測誤差值  $\tilde{d}_{max}$ ; 最小像素值減去次小像素值得到預測誤差值  $\tilde{d}_{min}$ 。為了得取原始預測誤差值, 藉由公式還原並取出機密訊息, 如公式(40)與公式(41)。

$$\begin{cases} s = 0, & \text{if } \tilde{d}_{max} = 1 \\ s = 1, & \text{if } \tilde{d}_{max} = 2 \\ s = 0, & \text{if } \tilde{d}_{min} = -1 \\ s = 1, & \text{if } \tilde{d}_{min} = -2 \end{cases} \quad (40)$$

$$\begin{cases} d_{max}, & \text{if } \tilde{d}_{max} = 1 \\ d_{max} - 1, & \text{if } \tilde{d}_{max} \geq 2 \\ d_{min}, & \text{if } \tilde{d}_{min} = -1 \\ d_{min} + 1, & \text{if } \tilde{d}_{min} \leq -2 \end{cases} \quad (41)$$

步驟6: 取得原始預測誤差值  $d_i$ , 藉由  $d_i$  還原最大像素值  $\tilde{p}_{\sigma(n \times n)}$  以及最小像素值  $\tilde{p}_{\sigma(1)}$  詳見公式(42)。

$$\begin{cases} p_{\sigma(n_1 \times n_2)} = \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)} + d_{max} \\ p_{\sigma(1)} = \tilde{p}_{\sigma(2)} + d_{min} \\ p_{\sigma(i)} = \tilde{p}_{\sigma(i)} \text{ for } i = 2, 3, 4, \dots, n_1 \times n_2 - 1 \end{cases} \quad (42)$$

步驟7: 依據像素值原始位置, 還原其掩護

影像  $I$ 。

## 2.6 Wang 等學者提出的像素排序法

Wang 等學者沿用 Peng 等學者的方法，以 1 與 0 為峰值點進行機密訊息的藏入，此方法利用四分法進行影像的切割。將區塊像素進行分析，依據該區塊的性質辨別機密訊息的藏入與否，此方法依然使用像素排序的方式將機密訊息藏入，但有別於前幾位學者，利用兩個門檻值更細部分析區塊的平滑程度，若該區塊為平滑影像則可再切已四分法將區塊切割，使區塊可藏入更多機密訊息且在整張影像上產生較小的失真，增加藏入量以及提高影像品質。

### 2.6.1 藏入步驟

- 步驟1:  $H \times M$  的掩護影像  $I = \{p_i | \text{for } i = 1, 2, 3, \dots, H \times M\}$
- 步驟2: 將掩護影像切割為  $n \times n$  個不重疊的區塊  $B_i = \{p_i | \text{for } i = 1, 2, 3, \dots, n_1 \times n_2\}$ 。
- 步驟3: 若區塊  $B$  具有可能意味的像素值 0 或是 255，則此區塊不藏入機密訊息並且利用位置地圖記錄  $LM_{(i)} = 1$ ；其他區塊  $B$  利用門檻值  $T_1$  和  $T_2$  判斷其餘區塊是否可進行機密訊息的藏入。
- 步驟4: 若每一個區塊內的最大像素值  $p_{\sigma(n_1 \times n_2)}$ ；一樣在每一個區塊內的最小像素值  $p_{\sigma(1)}$ ，將兩者相減得到  $NL$ 。
- 步驟5: 利用  $NL$  判斷是否在門檻值  $T_1$  和  $T_2$  範圍內，若在範圍內則為一般區塊 (Normal Block)，區塊  $B_i$  則可藏入最多 1 位元的機密訊息，若小於  $T_1$  則為平滑區塊 (Flat Block)，則區塊最多可藏置 4 位元的機密訊息且最小區塊至少含有四個像素值，若大於  $T_2$  則為複雜區塊，並不進行機密訊息的藏入，詳見公式(43)。

$$\begin{cases} \text{Rough Block,} & \text{if } NL > T_1 \\ \text{Normal Block,} & \text{if } T_2 < NL \leq T_1 \\ \text{Flat Block,} & \text{if } NL \leq T_2 \end{cases} \quad (43)$$

- 步驟 5.1: 若區塊為一般區塊 (Normal Block) 或是平滑區塊 (Flat Block) 則可進行機密訊息的藏入或是預測誤差值的位移。
- 步驟 5.3: 取出區塊中最大值  $p_{\sigma(n_1 \times n_2)}$  與次大值  $p_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)}$  以及最小值  $p_{\sigma(1)}$  和次小值  $p_{\sigma(2)}$  依據像素值順序小的減去排序大的得到的預測誤差值分別為  $d_{max}$  以及  $d_{min}$ 。
- 步驟 5.4: 以 1 與 0 為峰值點藏入機密訊

息，並更改最小像素值以及最大像素值，依據公式(44)以及(45)。

$$\tilde{p}_{\sigma(1)} = \begin{cases} p_{\sigma(1)} - s, & \text{if } d_{min} = 0 \\ p_{\sigma(1)} - 1, & \text{if } d_{min} > 1 \\ p_{\sigma(1)} - s, & \text{if } d_{min} = 0 \\ p_{\sigma(1)} - 1, & \text{if } d_{min} < 0 \end{cases} \quad (44)$$

$$\tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)} = \begin{cases} p_{\sigma(n_1 \times n_2)} + s, & \text{if } d_{max} = 1 \\ p_{\sigma(n_1 \times n_2)} + 1, & \text{if } d_{max} > 1 \\ p_{\sigma(n_1 \times n_2)} + s, & \text{if } d_{max} = 0 \\ p_{\sigma(n_1 \times n_2)} + 1, & \text{if } d_{max} < 0 \end{cases} \quad (45)$$

- 步驟6: 利用最小位元取代法 (LSB) 從最後一個像素值往前藏入  $16 + 2[\log_2 16N] + l_{clm}$  個像素值，其額外訊息包含以下：
- 門檻值  $T_1$  與  $T_2$  總共 16bits
  - 藏入的結束位置，總共  $[\log_2 16N]$  bits
  - 位置地圖的訊息長度，總共  $[\log_2 16N]$  bits
  - 利用算術編碼壓縮過後的位置地圖，總共  $l_{clm}$  bits
- 步驟7: 將更改過後的像素值依據原始像素位置還原則可得到偽裝影像  $I'$ 。

### 2.6.2 取出機密訊息及還原掩護影像

- 步驟1: (額外訊息的取出) 由最後一個像素值至第  $16 + 2[\log_2 16N] + l_{clm}$  個像素值進行額外訊息的提取，並解壓縮位置地圖。
- 步驟2:  $H \times M$  的偽裝影像  $I' = \{\tilde{p}_i | \text{for } i = 1, 2, 3, \dots, H \times M\}$ 。
- 步驟3: 將偽裝影像切割為  $n_1 \times n_2$  個不重疊的區塊  $B_i = \{\tilde{p}_i | \text{for } i = 1, 2, 3, \dots, n_1 \times n_2\}$ 。
- 步驟4: 透過位置地圖得知不藏入機密訊息以及未更動的區塊則不進行動作，其他區塊  $B$  利用門檻值  $T_1$  和  $T_2$  判斷其餘區塊是否可進行機密訊息的藏入。
- 步驟5: 若每一個  $B$  區塊內的像素值進行比較，取出最大像素值大值  $p_{\sigma(n_1 \times n_2)}$ ；一樣在每一個區塊內的最小像素值  $p_{\sigma(1)}$ ，將兩者相減得到  $NL$ 。
- 步驟6: 若  $NL$  在門檻值  $T_1$  和  $T_2$  範圍內，則為一般區塊，區塊則可藏入最多 1 位元的機密訊息，若小於  $T_1$  則為平滑區塊，則區塊最多可藏置 4 位元的機密訊息，若大於  $T_2$  則為複雜區塊，並不沒有機密訊息的藏入。
- 步驟 6.1: 將區塊內的像素值進行大小排序如將區塊內的像素值進行大小排序  $B_i = (\tilde{p}_{\sigma(1)}, \tilde{p}_{\sigma(2)}, \tilde{p}_{\sigma(3)} \dots, \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)})$  其

中  $\tilde{p}_{\sigma(1)} \leq \tilde{p}_{\sigma(2)} \leq \tilde{p}_{\sigma(3)} \leq \dots \leq \tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)}$

步驟 6.2: 每個區塊中取出最大值  $\tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2)}$  與次大值  $\tilde{p}_{\sigma(n_1 \times n_2 - 1)}$  以及最小值  $\tilde{p}_{\sigma(1)}$  和次小像素值  $\tilde{p}_{\sigma(2)}$  依據像素值順序小的減去排序大的得到的預測誤差值分別為  $\tilde{d}_{max}$  以及  $\tilde{d}_{min}$ 。

步驟 6.3: 已知 1 與 0 為峰值點, 所以可取出機密訊息藉由公式(46)以及公式(47), 並還原最小像素值以及最大像素值, 依據公式(48)以及公式(49)。

$$\begin{cases} s = 0, & \text{if } \tilde{d}_{max} = pk \\ s = 1, & \text{if } \tilde{d}_{max} = pk + 1 \text{ or } pk - 1 \end{cases} \quad (46)$$

$$\begin{cases} s = 0, & \text{if } \tilde{d}_{min} = pk \\ s = 1, & \text{if } \tilde{d}_{min} = pk + 1 \text{ or } pk - 1 \end{cases} \quad (47)$$

$$p_{\sigma(1)} = \tilde{p}_{\sigma(2)} + |d_{min}| = \begin{cases} \tilde{p}_{\sigma(1)} + 1, & \text{if } \tilde{d}_{min} < 0 \\ \tilde{p}_{\sigma(1)} - 1, & \text{if } \tilde{d}_{min} > 1 \end{cases} \quad (48)$$

$$p_{\sigma(n \times n)} = \tilde{p}_{\sigma(n \times n - 1)} + |d_{max}| = \begin{cases} \tilde{p}_{\sigma(n \times n)} + 1, & \text{if } \tilde{d}_{max} < 0 \\ \tilde{p}_{\sigma(n \times n)} - 1, & \text{if } \tilde{d}_{max} > 1 \end{cases} \quad (49)$$

步驟8: 將有藏入機密訊息以及位移的區塊透過步驟 4 至步驟 6 後取出機密訊息以及還原掩護影像  $I$ 。

### 3. 各方法範例以及比較

PVO 皆是藉由排序後的最大像素值以及最小像素值進行機密訊息的藏入或是位移, 因此以同一張掩護影像如圖 1 進行六種不同基於 PVO 的資訊隱藏方法進行比較。

55	57	56	58
62	59	60	61
63	65	62	62
64	63	59	58

圖 1 掩護影像

#### 3.1 PVO 方法

將影像以  $1 \times 4$  的大小為一個區塊, 將區塊內的像素值進行排序後, 以  $B_1$  區塊為例, 此區塊之像素值為 55、57、56、58, 其餘區塊也此類推, 將每一個區塊中提出最大像素值與次大像素值, 利用最大像素值減去次大像素值, 並得到預測誤差值  $d_{max}$ , 如第一個區塊所示, 其  $d_{max} = 1$  等於峰值點 1 所以可藏入機密訊息

$s_1=1$  如公式(3), 則  $\tilde{d}_{max} = 2$ , 將藏入機密訊息的預測誤差值加上次大像素值則可形成新的最大像素值 58。將區塊依據上述之方法將機密訊息  $S=011$  藏入於預測誤差值為 1 的最大像素值中, 當所有機密訊息藏入完畢後, 再藉由原始像素值的位置還原則可形成偽裝影像  $I'$  如圖 2, 紅色的像素值為可藏入機密訊息或是可進行位移的像素值。

55	57	56	58
63	59	60	61
63	66	62	62
65	63	59	58

圖 2 PVO 方法之偽裝影像

#### 3.2 IPVO 方法

假設圖一為掩護影像進行  $1 \times 4$  的大小為一最大像素值 58 以及次小像素值 57 以及最小像素值 55 和次小像素值 57, 依據影像在並未排序前以 zig-zag 方式掃描, 以先掃描到的像素值減去後掃描到的像素值, 所以區塊  $B_1$  的  $d_{max} = -1$  以及  $d_{min} = -1$ , 依據公式(13)以及公式(14)則  $d_{max} = -1$  需要進行位移所以  $\tilde{d}_{max} = -2$  而  $d_{min}$  也是則  $d_{min} = -2$ , 所以其最大像素值為 59 最小像素值為 54。以 IPVO 方法則以預測誤差值 1 與 0 為峰值點進行機密訊息藏入, 其機密訊息  $S=0110$  將每個區塊中的預測誤差值進行判斷進行藏入以及位移, 則偽裝影像為圖 3。

54	57	56	59
62	58	60	61
63	66	61	62
64	63	59	57

圖 3 IPV 偽裝影像

#### 3.3 PVO-K 方法

以圖 1 為掩護影像, 並將影像切割為  $1 \times 4$  的大小的區塊, 將區塊中的像素值進行排序, 以區塊  $B_3$  區塊為例, 其像素值為 63、65、62、62, 其最大像素值的預測誤差值為其  $d_{max} = 2$ 、最小像素值的預測誤差值為  $d_{min} = -1$ , 當預測誤差值為 1、-1 則可藏入機密訊息依據 PVO-K 中的不同 case 進行判斷, 因此區塊中具有兩個相等的最小像素值且最大像素值只有 1 個所以

此區塊為 case2 依據公式(24)將預測誤差值  $d_{min} = -1$  藏入機密訊息  $s_5 = 1$  如 case2 公式(24);  $d_{max} = 2$  則不進行動作。將所以機密訊息  $S = 110010$  藏入於影像當中偽裝像影像如圖 4。

54	57	56	59
62	59	60	61
63	65	63	63
65	63	59	58

圖 4 PVO-K 偽裝影像

### 3.4 PPVO 方法

將掩護影像以  $2 \times 2$  為一個浮動式區塊，此區塊將以可重疊的方式移動一個像素值並掃描圖 1 之掩護影像。以  $B_1$  區塊為例，其區塊內的像素值為 55、57、62、58，並以第一個掃描的像素值為指標像素值 55，除了指標像素值以外以的像素值之最大像素值為 58 最小為 57，因指標像素值小於最小像素值 57，所以指標像素值進行位移如公式(29)，則指標像素值更改為 54。若指標像素值等於最大像素值或是最小像素值則可藏入機密訊息  $S = 10$ ，將所有區塊進行分析其偽裝影像為圖 5。

55	57	55	58
62	58	59	61
64	66	63	62
64	63	59	58

圖 5 PPVO 偽裝像素值

### 3.5 Weng 等學者提出的方法

以圖 1 作為掩護影像，將影像切割為  $1 \times 4$  的大小為一個區塊。以區塊  $B_1$  區塊為例，其像素值具有 55、57、56、58，取出最大像素值 58 以及次大像素值 57 其預測誤差值  $d_{max} = 1$  而最小像素值的預測誤差值為  $d_{min} = -1$ ，因此方法以 1 與 -1 為峰值點，所以此區塊可藏入兩個機密訊息  $s_1 = 0$ 、 $s_2 = 0$ ，因此預測誤差值更改為  $\tilde{d}_{max} = 2$  以及  $\tilde{d}_{min} = -2$ ，並對最大像素值以及最小像素值進行更改，則可得到最大像素值 59 以及最小像素值 54 如公式(37)(38)(39)。將所有區塊中的預測誤差值進行藏入機密訊息  $S = 001101$  或是位移則可則可完成偽裝像素值，再藉由像素值之原使位置進行還原則可得到偽裝影像如圖 6。

54	57	56	59
64	57	60	61
63	68	62	62
66	63	59	57

圖 6 Weng 等學者的方法之偽裝影像

### 3.6 Wang 等學者提出的方法

將掩護影像如圖 1，切割為  $1 \times 4$  的大小進行分析，假設門檻值  $T_1 = 4$ 、 $T_2 = 2$ ，以  $B_1$  區塊為例，將區塊中的最大像素值 58 減去最小像素值 55 得到  $NL = 3$ ，則  $NL$  介於門檻值  $T_1$  與  $T_2$  之間，所以此區塊為一般區塊，可藏入機密訊息，Wang 等學者提出的方法在藏入的方式與 IPVO 相同，以 zig-zag 方式掃描，以先掃描到的像素值減去後掃描到的像素值所以得到  $d_{max} = -1$ 、 $d_{min} = -1$ ，並以 1 與 0 為峰值點藏入機密訊息  $S = 10$ ，所以  $B_1$  區塊進行位移，則預測誤差值為  $\tilde{d}_{max} = -2$ 、 $\tilde{d}_{min} = -2$ ，且最大像素值更改為 59 最小像素值為 54 如公式(44)與公式(45)。將所有區塊進行分析進行藏入或是位移的動作則可得到偽裝像素值，再依據具像素值之原始位置還原，則可得到掩護影像如圖 7。

54	57	56	59
63	58	60	61
63	66	62	62
64	63	59	58

圖 7 Wang 等學者之偽裝影像

### 3.7 各方法比較

此小節將六個以 PVO 方法為基礎的可逆式資訊隱藏方法進行比較，以藏入的方式、峰值點、以  $4 \times 4$  的影像最多可藏之機密訊息(bits) 以及區塊的分析。

表(1) PVO 方法比較表

	PVO	IPVO	PVO-K	PPVO	Weng et al	Wang et al
藏入的方式	峰值點	峰值點	峰值點以及相同個最大或最小像素值	最大像素值以及最小像素值	峰值點	峰值點
峰值點	1 或是-1	0 與 1 或是-1	-1 與 1	最大像素值及最小像素值	-1 與 1	0 與 1 或是-1
以 4×4 的影像最多可藏 BITS	8	8	8	9	8	8
區塊分析	1 個門檻值 (次大像素值減去次小像素值)<門檻值	1 個門檻值(次大像素值減去次小像素值)<門檻值	2 個門檻值 (分別為 PVO-1 與 PVO-2)	1 個門檻值(最小像素值與最大像素值的差值)	X	2 個門檻值 (最小像素值與最大像素值的差值)

由表 1 的藏入方式可以看出基於 PVO 方法的藏入方多數以預測誤差值為峰值點進行機密訊息的藏入，為 PPVO 的方式以最大像素值以及最小像素值為基準，若指標像素值等於最大像素值或是最小像素值則可藏入機密訊息。因多數的像素排序法皆是使用峰值點藏入機密訊息，但峰值點設定在不同方法上有不同的差異，以 1 與-1 為峰值點的最多學者使用，以零為峰值點的有 IPVO 以及 Wang 等學者的方法，Wang 等學者的方法為 IPVO 的改良，以區塊加以分析並對於較為平滑的區塊試圖藏入較多的機密訊息，而 PPVO 則是以指標像素值作為藏入點，並以區塊中的最大像素值或是最小像素值為依據。在範例當中以 4×4 的影像作為掩護影像，在每個方法中進行藏入得知以 PPVO 為最有可能藏入最多機密訊息的方法，其餘的方法皆最多藏入 8 個機密訊息。對於區塊的分析可分為兩大類，一種以最大像素值與最小像素值的預測誤差值作為分析(PPVO、Wang et al.)，另一種為次大素值與次小像素值的差值作為分析(IPVO、PVO)；PVO-K 則以兩種不同的藏入方式設定兩個門檻值，與其他方法較為不同。

#### 4. 實驗結果比較

像素排序法於 2013 年到 2015 年都持續的在進步當中。像素排序法的特性為區塊中相鄰的像素值依區塊進行排序後，拉近像素值的距離，因此預測誤差值接近於-1、0 與 1 所以學

者們藉此將峰值點改變以及藏入機密訊息的條件改變並使 PVO 促進更好的結果。

#### 4.1 藏入量在 10,000 bits 的影像品質比較

由表格(1)比較出 2013 年至 2015 年像素排序法(PVO)的藏入量以及影像品質的提升，藉由近年來六種 PVO 方法之實驗結果的比較。上述學者們皆使用六張 512×512 的灰階影像進行實驗，且透過比較可得知像素排序法適用於何種圖像並且如何達到最高的影像品質以及最高的藏入量。

在藏入量為 10000bits 下以六張影像進行比較，整體數據可得知影像品質介於 53dB 至 63dB，影像品質遠高於人類肉眼的辨別失真度的能力範圍之上。從每個學者的實驗中可得知影像品質最差的則為 Baboon 的圖像，介於 53.55dB 至 55.43dB，Baboon 的圖像較為複雜，因此像素間的像素值差距較大，在進行像素排序法(PVO)的藏入方法中，以區塊間的像素值進行大小的排序進而拉近像素值的距離使像素的差值縮小，並得到 0、1 或是-1 為峰值點進行機密訊息的藏入，所以若影像的性質較為複雜則影像品質也會因此有所影響；反之影像品質以 Airplane 的圖像為最高，介於 62dB 至 63.97dB，Airplane 的圖像較為平滑，圖像中相鄰的像素值較為相近，因此區塊中的像素差值可較小，並以 0、1 或是-1 為峰值點進行機密訊息的藏入，藉此更改的後的像素值與原始像素較為相近，也得到更好的影像品質，從表格中，發現以 Wang 等學者的 Airplane 的圖像上得到最高的影像品質 63.97dB，影像品質最



表格(2) 2013 年至 2015 年之像素排序法以藏入量為 10,000bits 進行比較

學者(年分)	Li et al (PVO)	Peng et al IPVO	Qu et al PVO-k	Qu et al PPVO	Weng et al (2014)	Wang et al (2015)
Lena	60	60.47	60.63	60.3	61.09	60.44
Baboon	54	53.55	54.58	54.2	55.43	54.50
Airplane	62	62.96	63.33	63.7	63.23	63.97
Peppers	58	58.98	59.21	58.8	60.27	58.97
Boat	58	58.27	58.17	58.4	63.78	58.39
Babara	60	60.54	60.62	59.8	59.65	60.27
Average	58.66	59.12	59.42	59.2	60.57	59.42

差的為 Peng 等學者的 Baboon 的圖像，影像品質為 53.55dB。平均值中最高為 Wang 等學者的方法，平均影像品質可得到 60.75dB；最低平均值 Li 等學者的方法平均影像品質為 58.66dB。

#### 4.2 藏入量與影像品質比較

藏入量的比較如表格(2)所示，像素排序法(PVO)的藏入量介於 13000bits 至 69000bits 之間，整體平均可有 33479bits 的藏入量，且影像品質集中於 51dB 至 60dB 之間。藏入量具有較大的差距皆是因為圖片的具有不同的特徵以及性值，也造就了不同的藏入量，而像素排序法在 Qu 等學者所提出的 PPVO 中的影像 Airplane 達到最高的藏入量 69000bits，但影像品質卻為最低，最低的藏入量在 Baboon 圖像藏入量為 13000bits，且 PVO、IPVO、PVO-K 以及 Wang 等學者所提出的方法皆為最低。Airplane 圖像是一張十分平滑的圖像，平滑的意思則為圖像上的色調較為一致，並未有過多的複雜的線條或是明顯的深淺，且圖像的像素值都十分相近，也因此像素進行排序後，更

拉近像素值的距離，使差值集中在一定的範圍內，促使更高的藏入量；Baboon 圖像是一張複雜的影像，具有明顯的線條以及明顯的深淺，圖像的像素值差距較大，使像素值在排序後也很難將差值集中於一定的範圍內，使藏入量降低許多，其證實平滑影像較適用於 PVO 的方法並且可達到影像品質高且藏入量高的結果。六種像素排序法中平均藏入量最高為 Weng 等學者所提出的方法，藏入量平均可達至 37730 bits。

#### 5. 結論

像素排序法為區塊內的像素值藉由排序後由最大像素值的預測誤差值與最小像素值的預測誤差值進行機密訊息的藏入，或是藉由區塊內的像素值進行分析並將機密訊息藏入於像素值當中。學著們藉由不同的方向使像素排序法不斷的進步，也使像素排序法具有更多的未來發展性。

PVO 為影像品質較高的資訊隱藏方法，在

表格(3) 2013 年至 2015 年之像素排序法藏入量與影像品質比較表

學者	Li et al (PVO)		Peng et al IPVO		Qu et al PVO-k		Qu et al PPVO		Weng et al		Wang et al	
	EC	PSNR	EC	PSNR	EC	PSNR	EC	PSNR	EC	PSNR	EC	PSNR
Lena	32,000	52.32	40,000	52.35	37000	52.02	46,000	50.50	40,116	52.50	38,000	52.20
Baboon	13,000	51.75	13,000	51.80	13000	52.00	15,000	50.51	18,318	51.64	13,000	51.90
Airplane	38,000	53.12	55,000	52.50	47000	52.24	69,000	50.50	52,640	52.80	53,000	52.00
Peppers	28,000	52.05	30,000	52.00	31000	51.92	33,000	51.20	46,490	52.46	30,000	58.97
Boat	24,000	52.00	26,000	51.80	26000	51.82	30,000	51.20	43,721	52.25	27,000	58.39
Babara	27,000	52.24	33,000	52.05	29000	52.16	33,000	50.51	25,099	51.89	32,000	60.27
Average	27,000	52.24	32,833	52.08	29000	51.98	37,666	50.73	37,730	52.25	32,166	59.42

近年來不斷的進步，其影像品質皆達到 50dB 以上但藏入量進步的幅度較小，在未來研究中可透過以往的學者所提出的方法加以專研，從中改良使藏入量增加。由於像素排序法中，需依照像素值之原始像素大小順序使像素排才具有可逆的特性，若能藉由此特性或是跳脫此特性的限制則可使像素排序法更為優秀。

### 參考文獻

- [1] A. M. Alattar, "Reversible Watermark Using the Difference Expansion of a Generalized Integer Transform," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 13, No. 8, pp. 1147-1156, Aug. 2004.
- [2] C. Y. Weng, Y. Li. Chen, H. M. Sun, and S. J. WANG, "Efficient Lossless Data Hiding Scheme using Pixel Value Ordering and Prediction Error Shifting," *International Symposium, G U A M , U S A*, Dec.2014.
- [3] F. Peng, X. L. Li, B. Yang, "Improved PVO-based Reversible Data Hiding," *Digital Signal Processing*, Vol.25, pp. 255-265, Feb.2014
- [4] J. Tian, "Reversible Data Embedding Using a Difference Expansion," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technology*, Vol. 13, No. 8, pp.890-896, Aug. 2003.
- [5] S. K. Lee, Y. H. Suh, and Y. S. Ho, "Reversible Image Authentication Based on Watermarking," *Proc. IEEE Int. Conf. Multimedia Expo*, pp. 1321-1324, Jul. 2006.
- [6] X. L. Li, J. Li, B. Li, and B. Yang, "High-Fidelity Reversible Data Hiding Scheme Based on Pixel-Value-Ordering and Prediction-Error Expansion," *Signal Processing*, Vol. 93, Issue 1, pp. 198-205, Jan. 2013.
- [7] X. Wang, J. Ding, Q. Pei, "A novel Reversible Image Data Hiding Scheme Based on Pixel Value Ordering and Dynamic Pixel Block Partition," *Information Sciences*, Vol. 310, pp. 16-35, Jul. 2015
- [8] X. Qu, H. J. Kim" Pixel-Based Pixel Value Ordering Predictor for High-Fidelity Reversible data Hiding," *Signal Processing*, Vol. 111, pp. 249-260, Jun. 2015
- [9] Z. Ni, Y. Q. Shi, N. Ansari, and W. Su, "Reversible Data Hiding," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 354-362, Mar. 2006.