

# 以多預測器為基礎之像素值排序藏入技術

呂慈純  
朝陽科技大學副教授  
tclu@cyut.edu.tw

吳致暉  
朝陽科技大學研究生  
s10214601@gm.cyut.edu.tw

劉家維  
朝陽科技大學研究生  
s10414609@gm.cyut.edu.tw

## 摘要

像素值排序藏入方法(Pixel Value Ordering, PVO)是近期常被使用的可逆式資訊隱藏技術，該方法將影像分割成數個相同大小的區塊，並且以區塊內的像素值進行排序，最後機密訊息嵌入像素值中的最大值與最小值當中。PVO的影像品質與藏入能力會因區塊的大小而不同，如果區塊太大，藏入量可能受到限制。因此，本研究以多種預測器進行改良，以多種不同預測方法提升影像品質，並且結合Ou和Kim學者提出的PVO方法，將機密訊息藏在最大預測值或最小預測值中，達到高藏入量。從實驗結果可知所提方法利用中間邊緣偵測法(Median Edge Detect, MED)進行預測，有效減少影像失真，達到高影像品質，而使用高藏量可逆式隱寫器(High Capacity Reversible Steganography, CRS)進行預測，可提升整體藏入量。

**關鍵詞：**多預測器、可逆式資訊隱藏、像素值排序、預測值。

## Abstract

Pixel Value Ordering (PVO) hiding scheme has been used in reversible data hiding technique more often. This kind of scheme divides an image into several blocks and orders the pixels in the same block. The secret message are concealed into the maximum and minimum values. The quality of the stego image and hiding capacity by using PVO is dependent on the size

of the block. Large block will cause low hiding rate. This paper combines multiple predictors to improve the hiding capacity of PVO. The experimental results show that the proposed scheme used MED can get higher image quality. The scheme applies CRS can get higher hiding capacity.

## 1. 介紹

資訊隱藏(Data Hiding)技術近年來被大量用於多媒體技術與資訊安全領域上，該技術把機密訊息隱藏在文字、影像、聲音和影片等多媒體上，使非法第三者不易察覺。其中，可逆式資訊隱藏技術(Reversible Data Hiding, RDH)在取出機密訊息時，偽裝影像可被恢復回藏入前的狀態，該技術常應用於藝術品、軍事地圖和醫療影像等不允許失真的範籌上。

目前，可逆式資訊隱藏技術以差異擴張(Difference Expansion)技術與直方圖位移(Histogram-Shift Based)技術最常被使用。差異擴張技術主要將2個鄰近像素之間的差異值擴張數倍後，將機密訊息嵌入差異值中。Tian學者於2003年提出第一個差異擴張技術，該方法將相鄰像素之間的差異值擴張2倍，同時嵌入1位元的機密訊息[14]；Alatter學者於2004年延伸Tian學者的方法，以4個鄰近像素之間的差異值為基礎，將3位元機密訊息嵌入擴張2倍後的差異值中[1]；Sachnev等學者於2009年提出一個預測誤差擴張技術(Prediction Error

Expansion, PEE)，該方法利用 4 個鄰近像素之間的標準差決定預測誤差值嵌入順序，增加影像品質[12]；Li 等學者於 2011 年將像素複雜度與 PEE 技術結合，根據像素複雜度將像素區塊分成平坦區塊(Flat Regions)和複雜區塊(Rough Regions)兩類，接著依照分類的結果決定預測誤差值和嵌入機密訊息的數量[7]；Gui 等學者於 2014 年改良 Li 等學者的方法，使複雜度的分類依據影像特性而增加，提升藏入能力[3]。

直方圖位移技術分析像素值或預測誤差值以產生直方圖，接著利用出現次數最多的數值嵌入機密訊息。例如 Ni 等學者於 2006 年透過統計方式分析像素值的分佈情形，並將機密訊息隱藏在最頻繁出現的像素值當中[11]；Wang 等學者於 2012 年利用馬可夫模型(Markov Model)統計像素值，產生一個直方圖矩陣，最後針對矩陣中每個直方圖進行嵌入[15]；Chen 等學者於 2013 年利用線性預測方法取得區塊中的最大誤差值和最小誤差值，並且分別建立直方圖，最後將最大誤差值直方圖的誤差值往左位移，最小誤差值直方圖的誤差值往右位移，減少影像失真[2]；Lu 等學者於 2015 年延伸 Chen 等學者的方法，透過 Lukac 的預測方法與 Feng 和 Fan 的預測方法建立最大誤差值直方圖和最小誤差值直方圖進行藏入[8]。

近期有學者以數個像素值為一組進行排序，並利用每組像素的最大值或最小值嵌入機密訊息，減少像素值的修改。例如 Li 等學者於 2013 年提出第一個像素值排序的嵌入方法(PVO)，該方法首先將區塊內的像素值進行排序，接著將最大像素值與次大像素值(或最小像

素值與次小像素值)相減以產生誤差值，最後利用誤差值 1 和-1 嵌入機密訊息[6]；Peng 等學者於 2014 改良 PVO 方法(Improved PVO, IPVO)，該方法利用最大像素值與次大像素值的相對位置產生誤差值，並將機密訊息嵌入誤差值 0 和 1 當中，增加藏入量[10]；Wnag 等學者於 2015 年延伸 IPVO 方法，先利用動態區塊切割策略(Dynamic Pixel Block Partition)決定區塊的大小，接著透過 IPVO 方法進行嵌入[16]；Ou 和 Kim 學者於 2015 年提出一個以像素為基底的 PVO 方法(Pixel-based PVO, PPVO)，將原本嵌入對象由區塊改為像素，並且從數個鄰近像素中取出最大值或最小值進行機密訊息嵌入，以達到高藏入量 [9]。

由上述內容可知，PVO、IPVO 和 Wnag 等學者的方法僅對區塊內最大像素值和最小像素值進行修改，達到高影像品質效果，但藏量可能受到限制。而 PPVO 方法當參考用的鄰近像素個數較少時，藏入量較其他方法高，但影像可能受到嚴重破壞；當鄰近像素個數較多時，具有高影像品質，藏入量的表現不如其他方法。為了解決像素個數影響藏量和影像品質的表現，本研究擬透過中間邊緣偵測法(Median Edge Detect, MED)[17]、影像差值法(Neighbor Mean Interpolation, NMI)[4]、相鄰像素差值法(Interpolation by Neighboring Pixels, INP)[5]和高藏量可逆式隱寫器(High Capacity Reversible Steganography, CRS)[13]等預測方法產生預測值，並利用預測值取代 PPVO 方法的鄰近像素進行嵌入，以找出高藏量和高影像品質的配對組合。

## 2. 文獻探討

### 2.1 PPVO

為了達到高藏量，Ou 和 Kim 學者於 2015 年改良 PVO 方法，將嵌入單位由區塊縮小至像素值，並且利用鄰近像素決定是否嵌入機密訊息[9]。該方法首先以像素值  $x_{i,j}$  為中心，選取  $4 \times 4$  大小的區塊(如圖 1 所示)，從區塊中取  $n$  個鄰近像素值放入參考集合  $C=\{c_1, \dots, c_n\}$  中，並且利用集合  $C$  中的最大值  $C^{\max}$  與最小值  $C^{\min}$  決定是否嵌入機密訊息，嵌入公式如下所示：

$$x'_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j} - s, & \text{if } x_{i,j} = C^{\min}, \\ x_{i,j} + s, & \text{if } x_{i,j} = C^{\max}, \\ x_{i,j} - 1, & \text{if } x_{i,j} < C^{\min}, \\ x_{i,j} + 1, & \text{if } x_{i,j} > C^{\max}, \\ x_{i,j}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

$$x'_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j} + s, & \text{if } x_{i,j} = C^{\max} = C^{\min} = 254, \\ x_{i,j} - s, & \text{if } x_{i,j} = C^{\max} = C^{\min}, \\ x_{i,j} - 1, & \text{if } x_{i,j} < C^{\max} = C^{\min}, \\ x_{i,j}, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $x'_{i,j}$  為偽裝像素值， $s$  為機密訊息。為了避免影像無法還原，檢查  $C^{\max}$  與  $C^{\min}$  是否相等，若相等，則利用公式(2)嵌入機密訊息；若不相等，則透過公式(1)進行嵌入。

$x_{i,j}$	$c_1$	$c_4$	$c_9$
$c_2$	$c_3$	$c_6$	$c_{11}$
$c_5$	$c_7$	$c_8$	$c_{13}$
$c_{10}$	$c_{12}$	$c_{14}$	$c_{15}$

圖 1 PPVO 之  $4 \times 4$  區塊示意圖

以圖 2 為例，令原始影像  $X=\{55, 50, \dots, 55, 53\}$  且  $n=3$ 。當像素值  $x_{0,0}=55$ ，將 3 個鄰近像素

值加入集合  $C=\{50, 57, 52\}$  中，計算集合  $C$  的最大值  $C^{\max}$  為  $\max(50,57,52)=57$  與最小值  $C^{\min}$  為  $\min(50,57,52)=50$ ，因為  $C^{\max}$  與  $C^{\min}$  不相等且  $x_{0,0}$  介於兩個數值之間，因此透過公式(1)得到偽裝像素值  $x'_{0,0}=x_{0,0}=55$ 。當像素值  $x_{0,1}=50$  且機密訊息  $s=1$ ，將其鄰近像素值  $x_{0,2}=50$ 、 $x_{1,1}=52$  和  $x_{1,2}=50$  放入集合  $C$  當中，取得最大值  $C^{\max}=\max(50,52,50)=52$  與最小值  $C^{\min}=\min(50,52,50)=50$ ，由於  $x_{0,0}$  等於  $C^{\min}$ ，故利用公式(1)計算嵌入後偽裝像素值  $x'_{0,1}=50+1=51$ 。

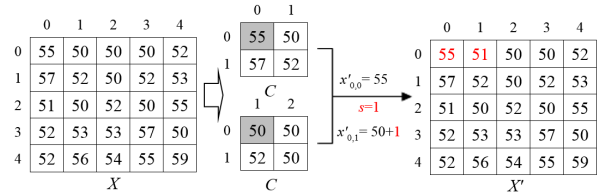


圖 2 PPVO 之嵌入範例

### 2.2 中間邊緣偵測法

Weinberger 等學者於 2000 年提出低複雜度的中間邊緣偵測法 MED[17]，該方法對於邊緣像素的預測相當精準。MED 每次以  $2 \times 2$  區塊(如圖 3 (a)所示)進行預測，並透過原始像素值  $x_{i,j}$  之鄰近像素值  $a$ 、 $b$  和  $c$  計算預測值  $P_{i,j}$ ，預測公式如下所示：

$$P_{i,j} = \begin{cases} \min(a, b), & \text{if } c \geq \max(a, b), \\ \max(a, b), & \text{if } c \leq \min(a, b), \\ a+b-c, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

以圖 3 (b)為例，假設原始像素值  $x_{i,j}=52$  且鄰近像素值  $a=57$ 、 $b=50$  和  $c=55$ ，透過公式(3)進行預測，因為像素值  $x_{i,j-1}$  介於  $a$  和  $b$  之間，因此預測值  $P_{i,j}=50+57-55=52$ 。

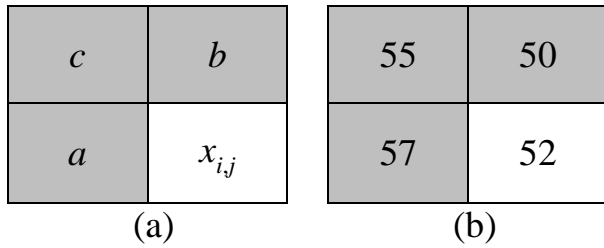


圖 3 MED 示意圖

### 2.3 影像差值法

Jung 和 Yoo 學者於 2009 年提出影像差值法 NMI[4]，該方法利用內插的方式將 2x2 區塊擴增至 3x3 區塊，並且將兩個鄰近像素的平均值視為預測值，預測公式如下所示：

$$P_{i,j} = \begin{cases} \lfloor (x_{i,j-1} + x_{i,j+1}) / 2 \rfloor, & \text{if } i = 2m, j = 2n + 1, \\ \lfloor (x_{i-1,j} + x_{i+1,j}) / 2 \rfloor, & \text{if } i = 2m + 1, j = 2n, \\ \lfloor (x_{i-1,j-1} + P_{i-1,j} + P_{i,j-1}) / 3 \rfloor, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (4)$$

其中  $m$  與  $n$  分別為原始影像區塊的大小。以 2x2 區塊中像素值  $x_{0,0}=55$ 、 $x_{0,1}=50$ 、 $x_{1,0}=57$  和  $x_{1,1}=52$  為例，首先透過公式(4)計算鄰近像素之間的預測值  $P_{0,1} = \lfloor (55+50) / 2 \rfloor = 52$ 、 $P_{1,0} = \lfloor (55+57) / 2 \rfloor = 56$ 、 $P_{1,2} = \lfloor (50+52) / 2 \rfloor = 51$  和  $P_{2,1} = \lfloor (57+52) / 2 \rfloor = 54$ ，最後利用像素值  $x_{0,0}$  與預測值  $P_{0,1}$  和  $P_{1,0}$  計算正中間的預測值  $P_{1,1} = \lfloor (55+52+56) / 3 \rfloor = 54$ ，如圖 4 所示。

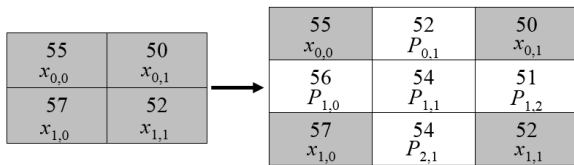


圖 4 NMI 範例

### 2.4 相鄰像素差值法

Lee 和 Huang 學者於 2012 年提出相鄰像素差值法 INP[5]。該方法與 NMI 皆是利用內插法將影像擴張，並透過平均法與權重計算兩個鄰近像素的預測值，以提升預測的

精準度，預測公式如下所示：

$$P_{i,j} = \begin{cases} \lfloor (x_{i,j-1} + (x_{i,j-1} + x_{i,j+1}) / 2) / 2 \rfloor, & \text{if } i = 2m, j = 2n + 1, \\ \lfloor (x_{i-1,j} + (x_{i-1,j} + x_{i+1,j}) / 2) / 2 \rfloor, & \text{if } i = 2m + 1, j = 2n, \\ \lfloor (P_{i-1,j} + P_{i,j-1}) / 2 \rfloor, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

以區塊內的像素值  $x_{0,0}=55$ 、 $x_{0,1}=50$ 、 $x_{1,0}=57$  和  $x_{1,1}=52$  為例，利用公式(5)依序計算預測值  $P_{0,1} = \lfloor (55 + (55 + 50) / 2) / 2 \rfloor = 53$ 、 $P_{1,0} = \lfloor (55 + (55 + 57) / 2) / 2 \rfloor = 55$  和  $P_{1,2} = \lfloor (50 + (50 + 52) / 2) / 2 \rfloor = 50$  和  $P_{2,1} = \lfloor (57 + (57 + 52) / 2) / 2 \rfloor = 55$ ，接著利用預測值  $P_{0,1}$  和  $P_{1,0}$  取得預測值  $P_{1,1} = \lfloor (53 + 55) / 2 \rfloor = 54$ ，如圖 5 所示。

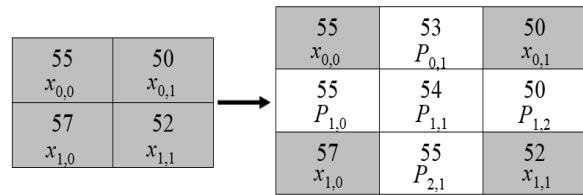


圖 5 INP 範例

### 2.5 高藏量可逆式隱寫器

Tsang 等學者於 2014 年提出較 NMI 精準的預測方法[13]。該方法首先從 2x2 區塊的像素中找出最大值  $x^{\max}$  與最小值  $x^{\min}$  計算參考值  $AD$ ，由於參考值考慮到區塊的最大像素值和最小像素值，因此有效減少預測值與原始像素值之間的落差。接著利用參考值與兩個鄰近像素的平均進行預測，其預測公式如下所示：

$$AD = (3 \times x^{\min} + x^{\max}) / 4, \quad (6)$$

$$P_{i,j} = \begin{cases} \lfloor (AD + (x_{i,j-1} + x_{i,j+1}) / 2) / 2 \rfloor, & \text{if } i = 2m, j = 2n + 1, \\ \lfloor (AD + (x_{i-1,j} + x_{i+1,j}) / 2) / 2 \rfloor, & \text{if } i = 2m + 1, j = 2n, \\ \lfloor (x_{i-1,j-1} + P_{i-1,j} + P_{i,j-1}) / 3 \rfloor, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

以圖 6 為例，假設 2x2 區塊內的像素值

$x_{0,0}=55$ 、 $x_{0,1}=50$ 、 $x_{1,0}=57$  和  $x_{1,1}=52$ ，取得最大像素值  $x^{\max}=\max(55, 50, 57, 52)=57$  與最小像素值  $x^{\min}=\min(55, 50, 57, 52)=50$ ，並且計算參考值  $AD=(3 \times 50 + 57)/4=51.75$ ，接著利用公式(7)依序計算預測值

$$P_{0,1} = \lfloor (51.75 + (55 + 50) / 2) / 2 \rfloor = 52$$

$$P_{1,0} = \lfloor (51.75 + (55 + 57) / 2) / 2 \rfloor = 53$$

$$P_{1,2} = \lfloor (51.75 + (50 + 52) / 2) / 2 \rfloor = 51$$

$$P_{2,1} = \lfloor (51.75 + (57 + 52) / 2) / 2 \rfloor = 53$$

$$P_{1,1} = \lfloor (55 + 52 + 53) / 3 \rfloor = 53$$

55	50	55	52	50
$x_{0,0}$	$x_{0,1}$	$x_{0,0}$	$P_{0,1}$	$x_{0,1}$
57	52	53	53	51
$x_{1,0}$	$x_{1,1}$	$P_{1,0}$	$P_{1,1}$	$P_{1,2}$
		57	53	52
		$x_{1,0}$	$P_{2,1}$	$x_{1,1}$

圖 6 CRS 範例

### 3. 研究方法

本研究針對 PPVO 方法進行改良，利用 MED、NMI、INP、CRS 等預測方法產生多組預測值，接著將預測值放入 PPVO 的參考集合當中，找出最大值與最小值進行機密訊息嵌入，嵌入流程如圖 7 所示。

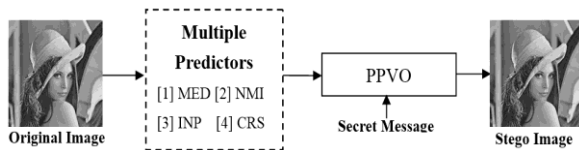


圖 7 嵌入流程圖

#### 3.1 預測階段

進行預測前，以像素值  $x_{i,j}$  為中心，選取 4 個鄰近像素值  $x_{i-1,j-1}$ 、 $x_{i-1,j+1}$ 、 $x_{i+1,j-1}$  和  $x_{i+1,j+1}$ ，由於影像邊緣位置的像素在找尋鄰近像素值時可能超過邊界，因此本研究對邊緣位置的像素不進行嵌入。

取得鄰近像素值後，利用 MED、NMI、INP 和 CRS 進行預測，在 MED 預測的部分，本研究利用鏡射三角形的位置找出 4 組鄰近像素的組合(如圖 8 所示)，分別計算出 4 個預測值  $P_1^{\text{MED}}$ 、 $P_2^{\text{MED}}$ 、 $P_3^{\text{MED}}$  和  $P_4^{\text{MED}}$ 。以圖 8 的像素值  $x_{i,j}=52$  且鄰近像素值  $x_{i-1,j-1}=55$ 、 $x_{i-1,j+1}=50$ 、 $x_{i+1,j-1}=51$  和  $x_{i+1,j+1}=52$  為例，將 MED 的參考值  $a$ 、 $b$  和  $c$  分別以  $x_{i+1,j-1}$ 、 $x_{i-1,j+1}$  和  $x_{i-1,j-1}$  做為參考，因  $x_{i-1,j-1}$  大於  $\max(50,51)=51$ ，故預測值  $P_1^{\text{MED}}=\min(x_{i-1,j+1}, x_{i+1,j-1})=\min(50,51)=50$ 。接著將  $x_{i+1,j+1}$ 、 $x_{i-1,j-1}$  和  $x_{i+1,j-1}$  做為參考值，透過 MED 公式(3)計算  $P_2^{\text{MED}}=\max(52,55)=55$ ，以此類推，可以取得預測值  $P_3^{\text{MED}}=\min(50,51)=50$  和  $P_4^{\text{MED}}=\max(52,55)=55$ 。

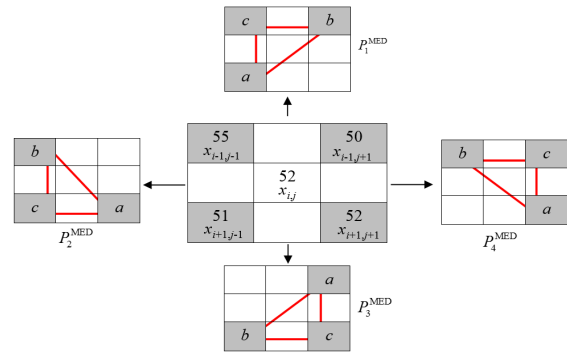


圖 8 MED 之鄰近像素位置示意圖

而 NMI、INP 和 CRS 方面，本研究將鄰近像素值  $x_{i-1,j-1}$ 、 $x_{i-1,j+1}$ 、 $x_{i+1,j-1}$  和  $x_{i+1,j+1}$  做為  $3 \times 3$  區塊中 4 個角落的像素值(如圖 9(a)所示)進行預測，並且將鄰近像素之間的預測值加入像素值  $x_{i,j}$  的參考集合中。以像素值  $x_{i,j}=52$  且鄰近像素值  $x_{i-1,j-1}=55$ 、 $x_{i-1,j+1}=50$ 、 $x_{i+1,j-1}=51$  和  $x_{i+1,j+1}=52$  為例，透過 NMI 公式(4)和 INP 公式(5)計算預測值，計算結果如圖 9(b)和(c)所示。接著取得 4 個鄰近像素的最大值  $x^{\max}=\max(50,51,52,55)=55$  與最小值

$x^{\min} = \max(50, 51, 52, 55) = 50$ ，計算出參考值  $AD = (3 \times 50 + 55) / 2 = 51.75$ ，利用 CRS 公式(7)進行預測，預測結果如圖 9(d)所示。

55 $x_{i-1,j-1}$		50 $x_{i-1,j+1}$
	52 $x_{i,j}$	
51 $x_{i+1,j-1}$		52 $x_{i+1,j+1}$

(a) 3x3 區塊

55 $x_{i-1,j-1}$	52 $P_1^{\text{NMI}}$	50 $x_{i-1,j+1}$	55 $x_{i-1,j-1}$	53 $P_1^{\text{INP}}$	50 $x_{i-1,j+1}$	55 $x_{i-1,j-1}$	51 $P_1^{\text{CRS}}$	50 $x_{i-1,j+1}$
53 $P_2^{\text{NMI}}$		51 $P_2^{\text{NMI}}$	54 $P_2^{\text{INP}}$		50 $P_2^{\text{INP}}$	52 $P_2^{\text{CRS}}$		51 $P_2^{\text{CRS}}$
51 $x_{i+1,j-1}$	51 $P_3^{\text{NMI}}$	52 $x_{i+1,j+1}$	51 $x_{i+1,j-1}$	51 $P_3^{\text{INP}}$	52 $x_{i+1,j+1}$	51 $x_{i+1,j-1}$	51 $P_3^{\text{CRS}}$	52 $x_{i+1,j+1}$

圖 9 NMI、INP 和 CRS 之預測範例

### 3.2 嵌入階段

在嵌入機密訊息時，本研究同 2.1 節的 PPVO 方法，利用預測值中的最大值與最小值決定該像素是否能嵌入機密訊息，詳細流程如下所示：

- (1) 取得鄰近像素值  $x_{i-1,j-1}$ 、 $x_{i-1,j+1}$ 、 $x_{i+1,j-1}$  和  $x_{i+1,j+1}$ ，並利用 MED、NMI、INP 和 CRS 計算預測值，預測方法如 3.1 節所示。
- (2) 將所有預測值放入集合 C 中，找出最大值  $C^{\max}$  與最小值  $C^{\min}$ 。
- (3) 將最大值  $C^{\max}$  與最小值  $C^{\min}$  代入 PPVO 方法的嵌入公式(1)計算偽裝像素值  $x'_{i,j}$ 。
- (4) 以此類推，重複步驟 (1)-(3)直到所有機密訊息嵌入影像當中。

以圖 10 為例，假設原始影像  $X = \{55, 50, \dots, 55, 53\}$  且機密訊息為 00111，當像素值  $x_{1,1} = 52$ ，取得鄰近像素值  $x_{0,0} = 55$ 、 $x_{0,2} = 50$ 、 $x_{2,0} = 51$  和  $x_{2,2} = 52$  進行預測，並將預測值放入參考集合  $C = \{50, 55, \dots, 51, 51\}$  中，得到最大值  $C^{\max} = 55$  與最小值  $C^{\min} = 50$ ，因為  $x_{1,1}$  介於  $C^{\max}$  與  $C^{\min}$

之間，故透過公式(1)計算偽裝像素值  $x'_{1,1} = 52$ 。下一個像素值為  $x_{1,2} = 50$ ，找到鄰近像素值  $x_{0,1} = 50$ 、 $x_{0,3} = 50$ 、 $x_{2,1} = 50$  和  $x_{2,3} = 50$ ，並且計算預測值，放入集合  $C = \{50, 50, \dots, 50, 50\}$  中，取得最大值  $C^{\max} = 50$  與最小值  $C^{\min} = 50$ ，因  $C^{\max}$  與  $C^{\min}$  相等，且  $x_{1,2} = C^{\max} = C^{\min}$ ，因此利用公式(2)嵌入機密訊息  $s = 0$ ，得到偽裝像素值  $x'_{1,2} = 50 - 0 = 50$ ，以類推產生偽裝影像  $X'$ 。

	0	1	2	3	4
0	55	50	50	50	52
1	57	52	50	52	53
2	51	50	52	50	55
3	52	53	53	57	50
4	52	56	54	55	59

$X$

	0	1	2	3	4
0	55	50	50	50	52
1	57	52	50	52	53
2	51	50	51	49	55
3	52	53	53	58	50
4	52	56	54	55	59

$X'$

預測

C

50	55	50	55	52	53	51	51	53	54	51	50	51	52	51	51
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

PPVO

圖 10 嵌入範例

### 3.3 取出階段

嵌入機密訊息後，偽裝像素值  $x'_{i,j}$  的鄰近像素值可能被修改，因此取出流程的像素處理順序與嵌入流程相反，詳細流程如下所示：

- (1) 取得偽裝影像的鄰近像素值  $x'_{i-1,j-1}$ 、 $x'_{i-1,j+1}$ 、 $x'_{i+1,j-1}$  和  $x'_{i+1,j+1}$  後，利用 MED、NMI、INP 和 CRS 進行預測。
- (2) 將預測值放入集合 C，找出  $C^{\max}$  與  $C^{\min}$ 。
- (3) 還原像素值  $x_{i,j}$  與取出機密訊息  $s$ ，取出與影像還原公式如下所示：

$$s = \begin{cases} 0, & \text{if } x'_{i,j} = C^{\max} \text{ or } x'_{i,j} = C^{\min}, \\ 1, & \text{if } x'_{i,j} = C^{\max} + 1 \text{ or } x'_{i,j} = C^{\min} - 1, \end{cases} \quad (8)$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} x'_{i,j} + 1, & \text{if } x'_{i,j} < C^{\min}, \\ x'_{i,j} - 1, & \text{if } x'_{i,j} > C^{\max}, \\ x'_{i,j}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

(4) 以此類推，重複步驟 (1)-(3)直到所有像素值被還原。

以 3.2 節嵌入範例為例，當偽裝像素值  $x'_{3,3}=58$ ，利用鄰近像素值  $x'_{2,2}=51$ 、 $x'_{2,4}=55$ 、 $x'_{4,2}=54$  和  $x'_{4,4}=59$  進行預測，將預測值放入集合  $C=\{55, 56, \dots, 54, 54\}$  中，取得最大值  $C^{\max}=57$  與最小值  $C^{\min}=51$ ， $x'_{3,3}=58$  與  $C^{\max}+1$  相等，代表該像素值有嵌入機密訊息，代入公式(8)取出機密訊息  $s=1$ ，並透過公式(9)計算出原始像素值  $x_{3,3}=58-1=57$ ；當偽裝像素值  $x'_{3,2}=53$ ，取鄰近像素值  $x'_{2,1}=50$ 、 $x'_{2,3}=49$ 、 $x'_{4,1}=56$  和  $x'_{4,3}=55$  計算預測值，放入  $C=\{55, 50, \dots, 52, 51\}$  中，得到最大值  $C^{\max}=55$  與最小值  $C^{\min}=49$ ，因為  $x'_{3,2}$  介於  $C^{\max}$  與  $C^{\min}$  之間，代表該像素值沒有被嵌入任何機密訊息，因此透過公式(9)得到原始像素值  $x_{3,2}=53$ 。以此類推，直到機密訊息全部取出，並且將偽裝影像恢復成原始影像。

### 3.4 溢位處理

在嵌入機密訊息時，所提方法對像素值的修改量為 $\pm 1$ ，因此假如原始像素值為 0 或 255 嵌入後可能會變成 -1 或 256，產生上溢或下溢的溢位問題。為了解決此問題，所提方法在嵌入之前會將 0 或 255 的像素值，修改為 1 或 254，並且記錄該像素的位置，使影像順利還原至嵌入前狀態。

## 4. 實驗結果

本研究使用 6 張 512x512 標準灰階影像進行測試，並且利用 Matlab 7.14.0 (R2012a) 實作，實驗用影像如圖 11 所示。本章節將探討所提方法與 PPVO 在影像品質與藏入量的比較結果。

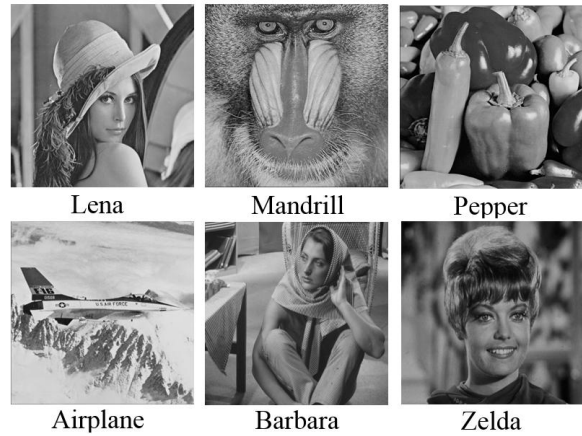


圖 11 測試影像

為了評估偽裝影像與原始影像之間的差異程度，本研究利用高峰影像信號雜訊比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 進行衡量，PSNR 公式如下所示：

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left[ \frac{255^2}{\frac{1}{h \times w} \times \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w (x'_{i,j} - x_{i,j})^2} \right] \text{ (dB)}, \quad (10)$$

其中  $h \times w$  為整張影像的大小。若兩張影像之間的差異過大，代表偽裝影像的失真度較高，PNSR 值較低。反之，兩張影像的差異較小，代表偽裝影像的失真度較低，PNSR 值較高。

為了與 PPVO 比較，本研究利用相同個數的預測值與鄰近像素值進行實驗。表 1 為使用單一預測器的所提方法與 PPVO 之藏量與影像品質比較，其中  $n$  為 PPVO 的鄰近像素值個數。由表 1 可知當所提方法利用 MED 進行預測，所有影像的 PSNR 值平均為 52.6 dB，比 PPVO 高 1 dB，而藏入量介於 10,600 至 46,000 位元；當所提方法透過 CRS 預測，平均 PSNR 值約為 49.54 dB，較 PPVO 低 2 dB，但藏量多 3,000 至 11,000 位元。表 2 呈現使用 2 個預測器的所提方法與 PPVO 之比較結果，所提方法使用 MED 與 INP 預測時，PSNR 值較 PPVO

高 0.1~0.7 dB 左右，但藏入量少 1,000 至 4,000 位元。所提方法結合 MED 與 INP 進行預測，藏入量較 PPVO 多 4,000 至 10,000 位元，但影像品質的表現較該方法差。

表 3 呈現使用 3 和 4 個預測器的所提方法與 PPVO 之比較結果。從表 3 中發現當所提方法利用 NMI、INP 和 CRS 進行預測，PSNR 值雖然較  $n=12$  的 PPVO 低，但藏入量多 5,000~10,000 位元；當所提方法利用 4 個預測器進行預測，PSNR 值較  $n=15$  的 PPVO 低 1 dB，但藏入能力較 PPVO 好。

表 1 單一預測器之所提方法與 PPVO 比較表

Method		Lena	Mandrill	Pepper	Airplane	Barbara	Zelda
Propose Method(MED)	Capacity	31.173	10.629	30.315	46.530	25.731	31.693
	PSNR	52.84	52.24	52.49	52.95	52.49	52.75
Propose Method(NMI)	Capacity	38.422	13.513	37.388	57.485	29.864	37.985
	PSNR	51.71	50.94	51.57	51.84	51.22	51.99
Propose Method(INP)	Capacity	35.889	12.844	34.730	52.908	28.072	35.712
	PSNR	52.06	51.28	51.90	52.18	51.56	52.28
Propose Method(CRS)	Capacity	44.635	15.286	41.871	55.881	34.937	46.724
	PSNR	49.65	49.36	49.54	49.51	49.47	49.76
PPVO( $n=4$ )	Capacity	37.921	12.221	32.091	58.862	29.999	35.685
	PSNR	51.73	52.04	51.85	52.01	51.93	51.92

表 2 2 個預測器之所提方法與 PPVO 比較表

Method		Lena	Mandrill	Pepper	Airplane	Barbara	Zelda
Propose Method (MED+NMI)	Capacity	29.806	10.377	29.177	45.311	24.263	29.609
	PSNR	53.38	52.67	53.07	53.51	53.00	53.45
Propose Method (MED+INP)	Capacity	29.000	10.096	28.459	44.148	23.628	28.698
	PSNR	53.45	52.75	53.16	53.60	53.08	53.56
Propose Method (MED+CRS)	Capacity	30.467	10.570	29.780	45.843	25.215	30.856
	PSNR	53.12	52.39	52.77	53.23	52.74	53.12
Propose Method (NMI+INP)	Capacity	34.901	12.319	33.939	52.202	27.232	34.206
	PSNR	52.41	51.61	52.24	52.50	51.83	52.68
Propose Method (NMI+CRS)	Capacity	37.834	13.286	36.792	55.646	29.542	37.393
	PSNR	51.89	51.06	51.74	52.04	51.35	52.16
Propose Method (INP+CRS)	Capacity	35.206	12.698	34.182	51.893	27.451	34.930
	PSNR	52.22	51.42	52.05	52.32	51.69	52.46
PPVO( $n=8$ )	Capacity	31.220	9.722	26.795	48.259	24.991	29.675
	PSNR	52.76	53.42	52.80	53.00	53.01	52.80

表 3 3 和 4 個預測器之所提方法與 PPVO 比較表

Method		Lena	Mandrill	Pepper	Airplane	Barbara	Zelda
Propose Method (MED+NMI+INP)	Capacity	28.742	10.042	28.159	43.975	23.240	28.029
	PSNR	53.54	52.83	53.25	53.68	53.15	53.67
Propose Method (MED+NMI+CRS)	Capacity	29.655	10.332	29.090	45.135	24.264	29.626
	PSNR	53.40	52.67	53.09	53.53	53.01	53.47
Propose Method (MED+INP+CRS)	Capacity	28.857	10.071	28.259	43.959	23.446	28.526
	PSNR	53.18	52.77	53.19	53.61	53.11	53.60
Propose Method (NMI+INP+CRS)	Capacity	34.509	12.320	33.788	51.705	27.016	33.963
	PSNR	52.45	51.63	52.28	52.55	51.87	52.72
Propose Method (MED+NMI+INP+CRS)	Capacity	28.738	10.002	28.181	43.911	23.308	28.095
	PSNR	53.55	52.83	53.26	53.68	53.16	53.68
PPVO( $n=12$ )	Capacity	24.195	7.564	20.224	37.317	19.503	22.561
	PSNR	53.98	54.89	54.27	54.27	54.23	54.09
PPVO( $n=15$ )	Capacity	22.480	6.963	18.818	34.868	18.362	21.311
	PSNR	54.30	55.34	54.56	54.57	54.61	54.31

圖 12 呈現使用單一預測器的所提方法與 PPVO 之藏入量與影像品質的比較結果，由圖可知所提方法利用 MED 進行預測，藏入量較 PPVO 少，但在相同藏入量下，Lena、Pepper 和 Zelda 的影像品質較 PPVO 好，而 Airplane 與 Barbara 的 PSNR 值接近 PPVO。所提方法使用 CRS 進行預測，雖藏入能力優於 PPVO，但影像品質的表現較 PPVO 差。

圖 13 為使用 2 個預測器的所提方法與 PPVO 之比較結果，所提方法利用 MED 與 NMI 進行預測，Lena、Pepper、Airplane 和 Zelda 的影像品質較 PPVO 好，Pepper 與 Zelda 的藏入量較 PPVO 多。若所提方法使用 NMI 和 CRS 進行預測，雖然 Mandrill 和 Airplane 的影像品質較 PPVO 差，但所有影像的藏入量較 PPVO 多 3,000 至 8,000 位元。

圖 14 呈現使用 3 和 4 個預測器的所提方法與 PPVO 之比較結果。由圖可知所提方法利用 MED、NMI 和 CRS 進行預測，Lena、Pepper 和 Zelda 的 PSNR 值較  $n=12$  的 PPVO 高，藏入量的表現較好。所提方法利用所有預測器進行預測，Lena、Pepper 和 Zelda 的表現優於  $n=15$  的 PPVO，而 Airplane 的表現與 PPVO 相似。



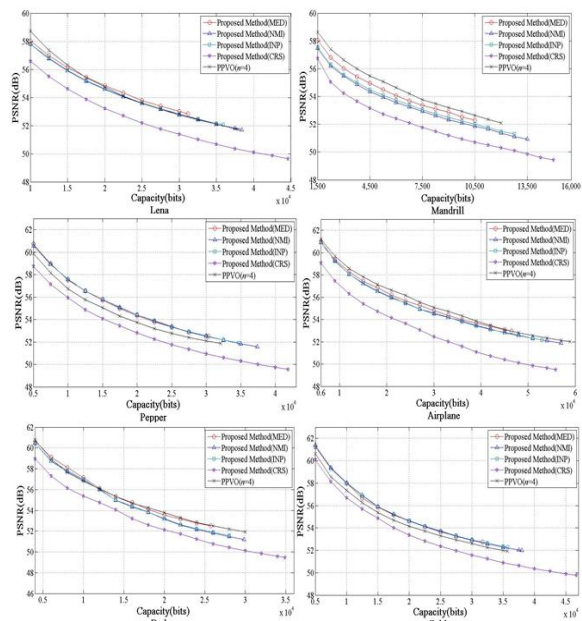


圖 12 單一預測器的所提方法與 PPVO 比較圖

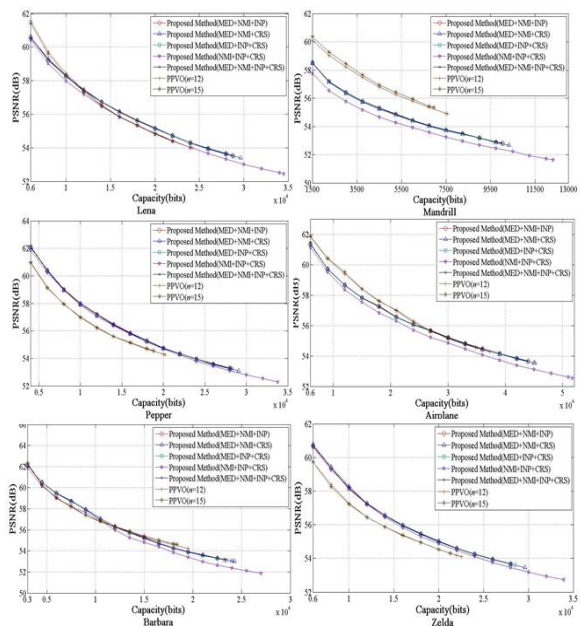


圖 14 3 和 4 個預測器的所提方法與 PPVO 比較圖

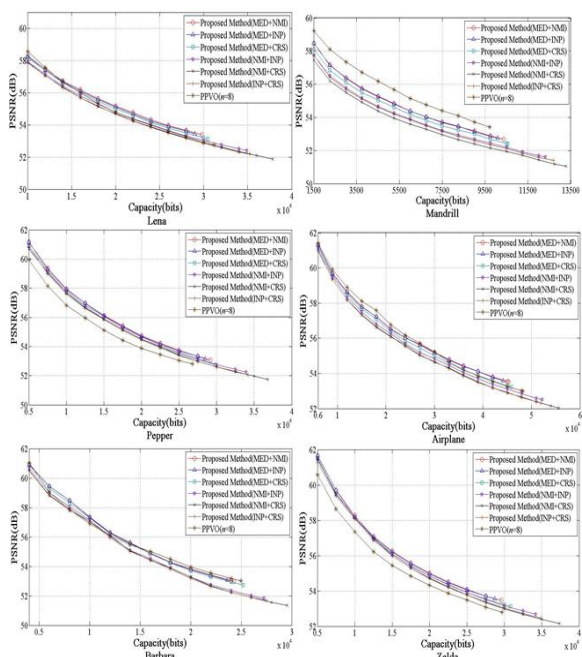


圖 13 2 個預測器的所提方法與 PPVO 比較圖

## 5. 結論

本研究利用不同預測器產生多個預測值，並且結合 Ou 和 Kim 學者的 PPVO 嵌入機密訊息，可以有效提升影像品質與藏入能力。從實驗結果中可以發現所提方法利用 MED 進行預測，達到高影像品質，但藏量會受到限制，而所提方法使用 CRS 進行預測，雖然達到高藏入量，但影像可能受到嚴重破壞。

## 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, pp. 1147-1156, 2004.
- [2] X. Chen, X. Sun, H. Sun, Z. Zhou, and J. Zhang, "Reversible Watermarking Method Based on Asymmetric-Histogram Shifting of Prediction Errors," *Journal of Systems and Software*, Vol. 86, pp. 2620-2626, 2013.
- [3] X. Gui, X. Li, and B. Yang, "A High

- Capacity Reversible Data Hiding Scheme Based on Generalized Prediction-Error Expansion and Adaptive Embedding,” *Signal Processing*, Vol. 98, pp. 370-380, 2014.
- [4] K.H. Jung and K.Y. Yoo, “Data Hiding Method Using Image Interpolation,” *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 31, pp. 465-470, 2009.
- [5] C.F. Lee and Y.L. Huang, “An Efficient Image Interpolation Increasing Payload in Reversible Data Hiding,” *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, pp. 6712-6719, 2012.
- [6] X. 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, pp. 198-205, 2013.
- [7] X. Li, B. Yang, and T. Zeng, “Efficient Reversible Watermarking Based on Adaptive Prediction-Error Expansion and Pixel Selection,” *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 20, pp. 3524-3533, 2011.
- [8] T.C. Lu, C.Y. Tseng, and J.H. Wu, “Asymmetric-histogram Based Reversible Information Hiding Scheme Using Edge Sensitivity Detection,” *Journal of Systems and Software*, in Press.
- [9] X. Ou and H.J. Kim, “Pixel-based Pixel Value Ordering Predictor for High-fidelity Reversible Data Hiding,” *Signal Processing*, Vol. 111, pp. 249-260, 2015.
- [10] F. Peng, X. Li, and B. Yang, “Improved PVO-based Reversible Data Hiding,” *Digital Signal Processing*, Vol. 25, pp. 255-265, 2014.
- [11] Z. Ni, Y.Q. Shi, N. Ansari, and W. Su, “Reversible Data Hiding,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 354-362, 2006.
- [12] V. Sachnev, H.J. Kim, J. Nam, S. Suresh, and Y.Q. Shi, “Reversible Watermarking Algorithm Using Sorting and Prediction,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 19, pp. 989-999, 2009.
- [13] M. Tang, J. Hu, and W. Song, “A High Capacity Image Steganography Using Multi-layer Embedding,” *International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 125, pp. 3972-3976, 2014.
- [14] J. Tian, “Reversible Data Hiding Using a Difference Expansion,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 13, No. 8, pp. 890-896, 2003.
- [15] C.T. Wang and H.F. Yu, “A Markov-based Reversible Data Hiding Method Based on Histogram Shifting,” *Journal of Visual Communication and Image Representation*, Vol. 23, pp. 798-811, 2012.
- [16] X. Wang, J. Ding, and 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, 2015.
- [17] M. J. Weinberger, G. Seroussi, and G. Sapiro, “The LOCO-I Lossless Image Compression Algorithm: Principles and Standardization into JPEG-LS,” *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 9, No. 8, pp. 1309-1324, 2000.