

## 運用可位移嵌入策略以提高圖像品質之可逆式資訊隱藏技術

### Reversible Data Hiding Scheme Using Shiftable Block Strategy for Enhancing Image Fidelity

沈肇基

國立中興大學

台中市南區興大路 145 號

jjshen@nchu.edu.tw

李金鳳\*

朝陽科技大學

台中市霧峰區吉峰東路 168 號

lcf@cyut.edu.tw

吳宜蓁

國立中興大學

台中市南區興大路 145 號

g107029080@smail.nchu.edu.tw

#### 摘要

資訊隱藏是將特定的資訊嵌入媒體(如:文本、圖像、視頻)，目的在於保護隱藏的資訊不引起監控者的注意，而減少被攻擊的可能性，本研究使用圖像作為嵌入媒體，並選擇可逆式資訊隱藏(Reversible Data Hiding, RDH)作為嵌入方法，在取出機密資訊後，能還原至原始影像，著名的可逆式資訊隱藏方法如：2003 年 Tian 學者所提出的差值擴張法(Difference Expansion, DE)、2013 年 Li 學者等人提出的像素值排序法(Pixel Value Ordering, PVO)等等，諸多學者都思索如何改善資訊隱藏的演算法，以求獲得更大的嵌入容量及更高的偽裝影像品質，本研究亦提出了一種使用可位移區塊嵌入的策略應用在 PVO 及 DE 系列，來提升偽裝影像的影像品質。實驗結果顯示本研究的確有效的提升影像品質與藏量。

**關鍵詞:** 資訊隱藏、可逆式資訊隱藏、影像品質、可位移雙層嵌入策略

#### Abstract

In data hiding methods, secret information is embedded into the cover media (e.g. text, images, video) to protect the information from any malicious attacks. This paper uses images as embedded media and Reversible Data Hiding (RDH) as the embedding

method. RDH methods can restore the original image after extracting secret data. The famous RDH methods include: Differential Expansion method (DE) proposed by the Tian in 2003, Pixel Value Ordering method(PVO) proposed by Li et al. in 2013. Many scholars are thinking about how to improve the information hiding algorithm in order to obtain greater embedded capacity and higher stego image's quality. This paper proposes a method of using shiftable blocks embedding strategy based on PVO series and DE series to improve the image quality of stego images. The experimental results show that the image quality for the proposed method is enhance.

**Keywords:** data hiding、reversible data hiding (RDH)、image fidelity、shiftable blocks embedding strategy

## 一、背景介紹

資訊隱藏是指將特定的資訊嵌入媒體，目的在於保護隱藏的機密資訊，減少被攻擊的可能性 [1]。資訊隱藏分為空間域及頻率域，其中空間域又分為不可逆式資訊隱藏(Irreversible Data Hiding; IDH)與可逆式資訊隱藏(Reversible Data Hiding, RDH)。IDH 在取出機密資訊後，無法還原至原始影像，具有較高的藏量，由於藏量與影像品質屬於互補關係，因此影像品質並不高，在醫療、軍事等需要較高影像品質的圖像較不易被接受；RDH 在取出機密資訊後，能還原至原始影像，雖然藏量通常較低，但影像品質和實用性較高，常被用於軍事、醫療、等需要高影像品質的重要領域上。IDH 著名的方法如 2004 年 Chan 學者提出的 LSB 取代法(Least Significant Bit Substitution) [2]或 2003 年由 Wu 學者提出的像素值差異法(Pixel Value Differencing) [3]。而 RDH 著名的方法如：2003 年 Tian 學者所提出的差值擴張法(Difference Expansion, DE) [4]、2004 年由 Thodi 學者等人提出的預測誤差擴張法(Prediction Error Expansion, PEE) [5]、2006 年 Ni 學者等人所提出的直方圖位移法(Histogram Shifting, HS) [6]。

2013 年 Li 學者等人提出了像素值排序法(Pixel Value Ordering, PVO) [7]，屬於可逆式資訊隱藏，此方法減少了位移像素的數量來達到高影像品質，吸引很多學者致力於改進此方法 [8] [9]，本研究亦是致力於提升 PVO 系列的影像品質。

本研究將可位移區塊嵌入策略應用在以下三個 PVO 資訊隱藏方法: PVO [7]、IPVO [10]、PVO- $k$  [11]，目的是提升這些方法的多層嵌入的影像品質，另外我們也嘗試將此方法應用在 DE 系列，實驗結果請見第 4 節。

本研究的其餘部分安排如下：第 2 節回顧了 PVO 系列及 DE 系列的可逆式資訊隱藏方法，第 3 節介紹本研究提出的多層資訊隱藏策略，實驗結果與改善後的比較請見第 4 節，第 5 節總結了本研究。

## 二、文獻探討

在本節我們首先回顧三個 PVO 系列及兩個 DE 系列的可逆式資訊隱藏方法。

2013 年 Li 學者等人提出了像素值排序法(Pixel Value Ordering, PVO) [7]，在 Li 學者的方法中，將原始圖像切成不重疊的區塊，將像素值排序後，將最大值減第二大值和最小值減掉第二小值來得到預測誤差，在預測誤差為 1 或 -1 的時候藏入機密資料，像素值最多改變正負 1，所以擁有相當高的影像品質。

2014 年 Peng 學者等人提出的 IPVO [10] 改良了 Li 學者的方法，使最大值等於第二大值或最小值等於第二小值時也可藏入機密資訊，提升了藏量。同年 Ou 學者等人也提出 PVO- $k$  [11]，此方法擴展了 Li 學者的方法，讓所有的最大值，都能嵌入機密資訊，使圖像更有效的被利用，優化了嵌入容量。

2003 年 Tian 學者提出差值擴張(Difference Expansion, DE) [4]，在此方法中 Tian 學者將機密資訊嵌入在相鄰像素值的差值中，能達到高嵌入容量及保持低失真。在 2007 年 Liu 學者等人提出了改善 DE 的方法：RDE [12]，此方法使用對數變換函數來減少由差值擴張引起的失真，來提升影像品質。

本研究提出的方法能夠增強 PVO 系列與 DE 系列的多層影像品質，使用可位移區塊嵌入策略，在第一層以後改變切塊模式來避免取到與前一層重複的區塊，目的是在改善多層嵌入的影像品質，詳細方法請見第 3 節。

## 三、研究方法

在本節中將詳細介紹本研究所提出的方法。由於現今的許多方法進行多層藏入後，能大大的提升藏入容量，但相對的影像品質也會大幅降低，所以我們針對這方面進行思考後，發現影像品質大幅降低的原因在於同一個像素值藏入兩層後會被擴張的更大，於是我們提出了可位移區塊嵌入策略，在第一層以後改變切塊模式來避免取到與前一層重複的區塊，減小像素值被擴張的幅度，希望能提升多層嵌入的影像品質，實驗結果後證明我們提出的方法能提升 PVO 系列及 DE 系列方法的多層影像品質。

### (一)可位移區塊嵌入策略

在我們的方法中，假設圖像為  $W \times H$  大小，基於 PVO 的嵌入方法，第一層先將圖像切為  $n_1 \times n_2$  的區塊大小， $n_1, n_2 \in \{2, 3, 4, 5\}$ ，使用可調式區塊大小  $n_1, n_2$ ，選擇能達到最高影像品質的  $n_1, n_2$ ，通常較大的區塊複雜度較大，很多區塊不藏入機密資訊，能藏入的容量較小但影像品質較高。本例使用  $2 \times 2$  的區塊大小，第二層從第二列第二行開始掃描，如圖一、二、三所示，目的是為了第一層和第二層不會取到重複的區塊，避免降低影像品質。

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$
$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$
$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$
$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$

圖一：第一層切塊模式      圖二：第二層切塊模式      圖三：第三層切塊模式

另外我們也將此方法應用在 DE 系列,DE 系列的嵌入方法為兩個像素值為一組,在第一層將圖像橫切為  $1 \times 2$  的區塊,如圖四所示;第二層往右位移一個單位,從第一列第二行開始掃描,如圖五所示,而第三層則使用第一層的切塊模式,如圖六所示,以此類推。目的是為了不會取到和上一層重複的區塊,保持低失真。

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$
$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$
$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$
$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$

圖四：第一層橫向切塊模式      圖五：第二層橫向切塊模式      圖六：第三層橫向切塊模式

另外本研究也將圖像縱切成  $2 \times 1$  的區塊做實驗,圖七、圖八、圖九所示:

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$
$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$
$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$
$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$

圖七：第一層縱向切塊模式      圖八：第二層縱向切塊模式      圖九：第三層縱向切塊模式

## (二)基於 PVO 方法的嵌入流程

本方法嵌入的過程與 Li 學者所提出的方法相同，但第二層開始改變切塊模式，假設圖像為  $W \times H$  大小，第一層先將原始影像切成  $n_1 \times n_2$  大小的區塊， $n_1, n_2 \in \{2, 3, 4, 5\}$ ，第二層從第二列第二行開始切成  $n_1 \times n_2$  大小的區塊，如圖二所示。分別對每一個區塊的像素值進行排序  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，獲得排序後的像素值  $(x_{\sigma(1)}, x_{\sigma(2)}, \dots, x_{\sigma(n)})$ ，

計算區塊複雜度  $NL$  等於次大值減掉次小值： $NL = x_{\sigma(n-1)} - x_{\sigma(2)}$ ，大於門檻值  $t$  則這個區塊不藏。 $x_{\sigma(n)}$  是最大值， $x_{\sigma(n-1)}$  是第二大值，計算預測誤差  $PE_{max}$  為最大值減第二大值：

$$PE_{max} = x_{\sigma(n)} - x_{\sigma(n-1)} \quad (1)$$

計算出  $PE_{max}$  後，生成  $PE_{max}$  直方圖，由於  $PE_{max} = 1$  通常是直方圖峰值，所以 Li 學者等人將  $PE_{max} = 1$  當作嵌入機密數據的區域，大於 1 則位移以確保可逆性。 $b \in \{0, 1\}$  是要嵌入的數據，最大值被修改為：

$$\tilde{x}_{\sigma(n)} = x_{\sigma(n-1)} + \widetilde{PE}_{max} = \begin{cases} x_{\sigma(n)}, & \text{if } PE_{max} = 0 \\ x_{\sigma(n)} + b, & \text{if } PE_{max} = 1 \\ x_{\sigma(n)} + 1, & \text{if } PE_{max} > 1 \end{cases} \quad (2)$$

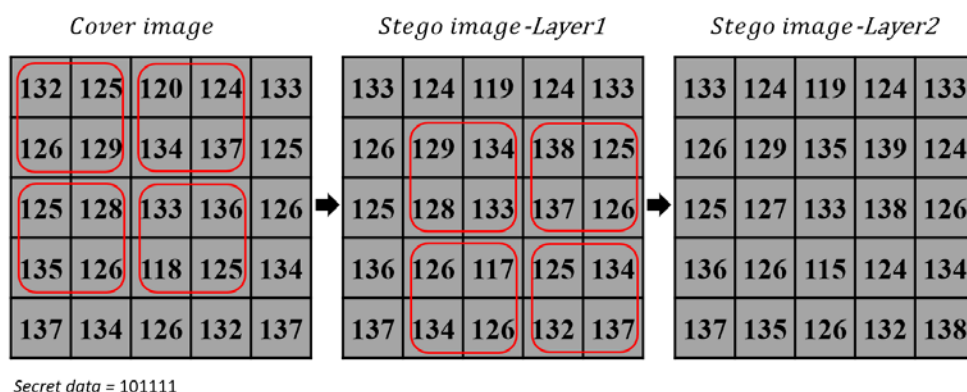
最小值以此類推， $x_{\sigma(1)}$  是最小值， $x_{\sigma(2)}$  是第二小值，計算預測誤差  $PE_{min}$  為最小值減第二小值：

$$PE_{min} = x_{\sigma(1)} - x_{\sigma(2)} \quad (3)$$

注意  $PE_{min}$  只會是負值，Li 學者等人將  $PE_{min} = -1$  當作嵌入數據的區域，小於 -1 則位移以確保可逆性。 $b \in \{0, 1\}$  是要嵌入的數據，最小值被修改為：

$$\tilde{x}_{\sigma(1)} = x_{\sigma(2)} + \widetilde{PE}_{min} = \begin{cases} x_{\sigma(1)}, & \text{if } PE_{min} = 0 \\ x_{\sigma(1)} - b, & \text{if } PE_{min} = -1 \\ x_{\sigma(1)} - 1, & \text{if } PE_{min} < -1 \end{cases} \quad (4)$$

圖十為可位移區塊嵌入策略應用於 PVO 方法的嵌入範例，假設圖像大小為  $5 \times 5$ ，首先我們會將圖像從第一列第一欄開始切成  $2 \times 2$  大小的區塊，並執行嵌入的步驟，在完成第一層的嵌入後，我們使用獲得的偽裝影像從第二列第二欄開始切成  $2 \times 2$  大小的區塊，並進行第二層的嵌入後，可以得到藏入兩層機密資訊的偽裝影像。



圖十: 基於 PVO 方法的嵌入範例

### (三)基於 PVO 方法的取出流程

本方法取出機密資訊的方法是先將偽裝影像切成 $n_1 \times n_2$ 大小的區塊後進行排序，檢查是否有藏入機密資訊，取出機密資訊以及修改回原始的像素值。本方法取出數據的順序先從第二層開始還原，也就是先從第二列第二行開始將偽裝影像切成 $n_1 \times n_2$ 大小的區塊， $n_1, n_2 \in \{2, 3, 4, 5\}$ 。分別對每一個區塊的像素值進行排序 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，獲得排序後的像素值 $(x_{\sigma(1)}, x_{\sigma(2)}, \dots, x_{\sigma(n)})$ 。

取出機密資訊：

STEP 1: 最大值減次大值 $x_{\sigma(n)} - x_{\sigma(n-1)}$ ：

- 如果 $x_{\sigma(n)} - x_{\sigma(n-1)} > 2$ ，沒有藏入資料，原始最大值 $x_{\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} - 1$ 。
- 如果 $x_{\sigma(n)} - x_{\sigma(n-1)} = 1$  or  $2$ ，機密資訊 $b = x_{\sigma(n)} - x_{\sigma(n-1)} - 1$ ，原始最大值 $x_{\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} - b$ 。
- 如果 $x_{\sigma(n)} - x_{\sigma(n-1)} = 0$ ，沒有藏入資料，原始最大值為 $x_{\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}$ 。

STEP 2: 最小值減次小值 $x_{\sigma(1)} - x_{\sigma(2)}$ ：

- 如果 $x_{\sigma(1)} - x_{\sigma(2)} < -2$ ，沒有藏入資料，原始最小值 $x_{\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} + 1$ 。
- 如果 $x_{\sigma(1)} - x_{\sigma(2)} = -1$  or  $-2$ ，機密資訊 $b = x_{\sigma(2)} - x_{\sigma(1)} - 1$ ，原始最小值 $x_{\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} + b$ 。
- 如果 $x_{\sigma(1)} - x_{\sigma(2)} = 0$ ，沒有藏入資料，原始最小值為 $x_{\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}$ 。

再來還原第一層，將原始影像從第一列第一行  $W \times H$  開始再切成 $n_1 \times n_2$ 大小的區塊。

圖十一為可位移區塊嵌入策略應用於 PVO 方法的取出範例，假設圖像大小為  $5 \times 5$ ，首先我們會將圖像從第二層開始取出機密資訊並還原，我們將偽裝影像從第二列第二欄開始切成  $2 \times 2$  大小的區塊，並進行取出和還原的步驟，在完成第二層的取出與還原後，我們將還原後的偽裝影像繼續從第一列第一欄開始切成  $2 \times 2$  大小的區塊，並進行第一層的取出與還原，最後可以得到藏入的機密資訊與原始影像。

<i>Stego image-Layer2</i>					<i>Stego image-Layer1</i>					<i>Cover image</i>				
133	124	119	124	133	132	125	120	124	133	132	125	120	124	133
126	129	134	138	125	126	129	134	137	125	126	129	134	137	125
125	128	133	137	126	125	128	133	136	126	125	128	133	136	126
136	126	117	125	134	135	126	118	125	134	135	126	118	125	134
137	134	126	132	137	137	134	126	132	137	137	134	126	132	137

圖十一: 基於 PVO 方法的取出範例

#### 四、實驗結果

我們的方法主要是使用 MATLAB 撰寫，並在配備 i7 7700 3.6 GHz CPU 及 8 GB RAM 的 Windows 10 -64 位元系統上完成實驗。本實驗使用六個標準圖像包含：4 張 512 × 512 大小的圖像: Lena、F16、Peppers、Boat，及 2 張 256 × 256 大小的圖像做測試，圖片皆來自於 SIPI image database [13]，如圖十二所示。本實驗分別使用不同的切塊模式應用在 PVO 系列及 DE 系列方法上，目的是提升多層藏入的影像品質。



(a)Lena

(b)F16

(c)Boat

(d)Peppers

(e)Aerial

(f)Clock

圖十二: 六張測試圖像

本實驗將使用以下兩種的參數來評估方法的表現：Peak signal-to-noise ratio(PSNR)，典型的 PSNR 值在 30dB 到 40dB 之間，愈高愈好，代表失真越少。另一個則是 embedded capacity(EC)代表一張圖像能嵌入的機密資訊數量，愈高愈好。

PSNR 值的定義如下：

$$PSNR = 10 \times \log \frac{255^2}{MSE} \quad (5)$$

$$MSE = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2 \quad (6)$$

本實驗機密訊息使用亂數產生。本方法將每一層運用不同的切塊模式來進行實驗分析，每一層都不會取到重複的區塊，以保持低失真。

表一中的 PVO 欄位為 Li 學者等人提出的方法[7]，在每一層的嵌入容量和影像品質，每一層皆使用一樣的模式，欄位為 Our scheme based on PVO 的是本研究方法應用在 PVO 方法後的實驗結果，每一層使用的切塊模式如圖一、二、三所示；IPVO 欄位為 Peng 學者等人提出的方法[10]，每一層皆使用一樣的模式，Our scheme based on IPVO 欄位為本研究方法應用在 IPVO 方法後的實驗結果；PVO-k 欄位為 Ou 學者等人提出的方法[11]，每一層皆使用一樣的模式，Our scheme based on PVO-k 欄位為本研究方法應用在 PVO-k 方法後的實驗結果。從實驗結果可以看出經過本方法確實有提升 PVO 系列多層嵌入的影像品質並且提升藏量。

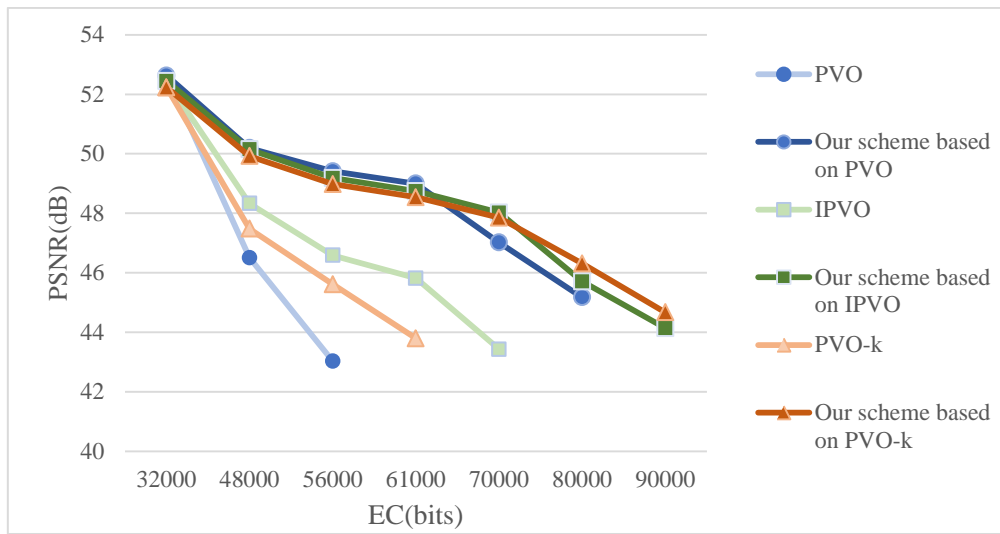
表一: PVO 系列使用不同切塊模式的藏量與影像品質

Image	Layer	PVO		Our scheme based on PVO		IPVO		Our scheme based on IPVO		PVO-k		Our scheme based on PVO-k	
		PSNR (dB)	EC (bits)	PSNR (dB)	EC (bits)	PSNR (dB)	EC (bits)	PSNR (dB)	EC (bits)	PSNR (dB)	EC (bits)	PSNR (dB)	EC (bits)
Lena (512x512)	Layer1	52.61	32108	52.61	32108	51.81	37373	51.81	37373	51.41	38491	51.41	38491
	Layer2	46.50	48174	48.84	62967	45.77	61511	47.96	70588	45.30	57816	47.57	73847
	Layer3	42.89	56328	44.85	82583	42.17	75895	44.08	90742	41.67	67317	43.81	97509
Boat (512x512)	Layer1	52.10	24194	52.10	24194	51.59	26022	51.59	26022	51.28	27207	51.28	27207
	Layer2	46.02	36223	48.18	46789	45.56	42628	47.62	49878	45.20	40856	47.29	52103
	Layer3	42.43	42158	44.28	61260	41.99	52490	43.78	64033	41.61	47609	43.53	68517
F16 (512x512)	Layer1	53.21	38963	53.21	38963	52.07	50440	52.07	50440	51.85	49176	51.85	49176
	Layer2	47.06	58419	49.81	76721	46.03	83565	48.46	95913	45.69	73921	48.22	95761
	Layer3	43.42	68325	45.72	100697	42.41	103934	44.52	124426	42.01	85931	44.40	127996
Peppers (512x512)	Layer1	52.28	28144	52.28	28144	51.67	30135	51.67	30135	51.34	32216	51.34	32216
	Layer2	46.18	42239	48.05	54039	45.63	49283	47.40	57316	45.25	48474	47.03	60847
	Layer3	42.58	49166	44.18	70576	42.05	60704	43.59	73599	41.64	56278	43.33	79960
Aerial (256x256)	Layer1	51.74	4011	51.74	4011	51.43	4247	51.43	4247	51.20	4422	51.20	4422
	Layer2	45.69	5968	48.81	8034	45.40	6928	48.42	8313	45.13	6627	48.15	8763
	Layer3	42.14	7071	44.78	10523	41.84	8521	44.42	10663	41.57	7727	44.23	11447
Clock (256x256)	Layer1	53.91	9637	53.91	9637	52.32	15533	52.32	15533	52.24	13198	52.24	13198
	Layer2	47.75	14463	50.15	19056	46.29	25976	48.30	28903	46.02	19809	48.29	26120
	Layer3	44.08	16860	46.09	25111	42.65	32762	44.47	37862	42.31	23078	44.48	35777
Average	Layer1	52.64	22843	52.64	22843	51.82	27292	51.82	27292	51.55	27452	51.55	27452
	Layer2	46.53	34248	48.97	44601	45.78	44982	48.03	51819	45.43	41251	47.76	52907
	Layer3	42.92	39985	44.98	58458	42.19	55718	44.14	66888	41.80	47990	43.96	70201

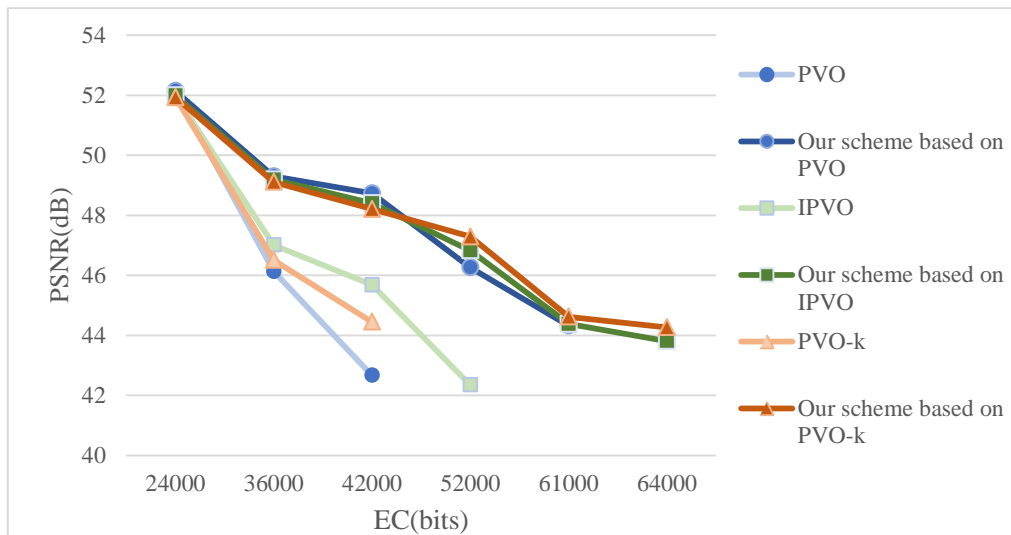
圖十三為在 Lena、Boat、F16、Peppers、Aerial、Clock 圖片下進行的實驗結果，在圖中我們可以看到 PVO 系列方法使用可移位區塊策略方法前後的 PSNR 值及藏量，橫坐標為能藏入的資訊量(EC)，縱座標為影像品質 PSNR，從圖中可以看出使用我們提出的可位移區塊嵌入策略後的影像品質及藏量皆高於原始的 PVO 系



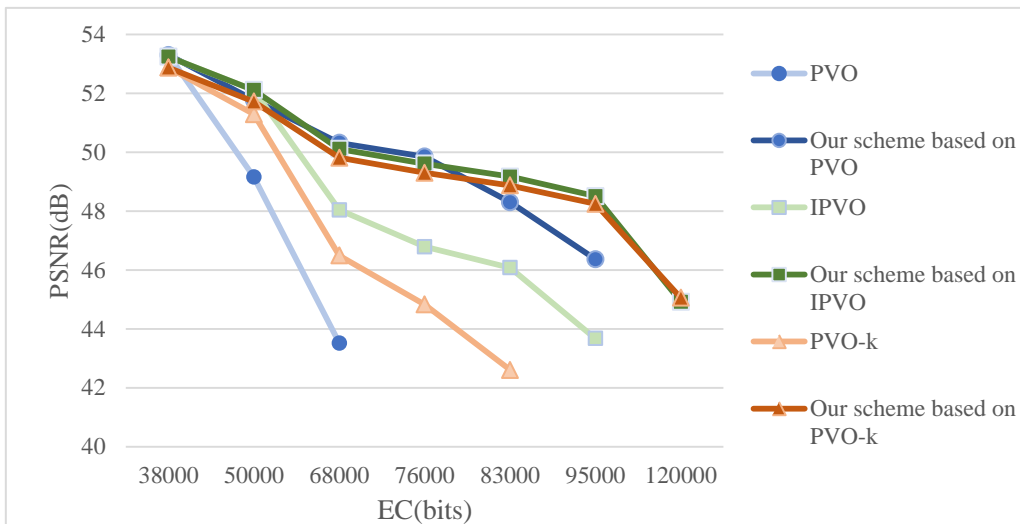
列。



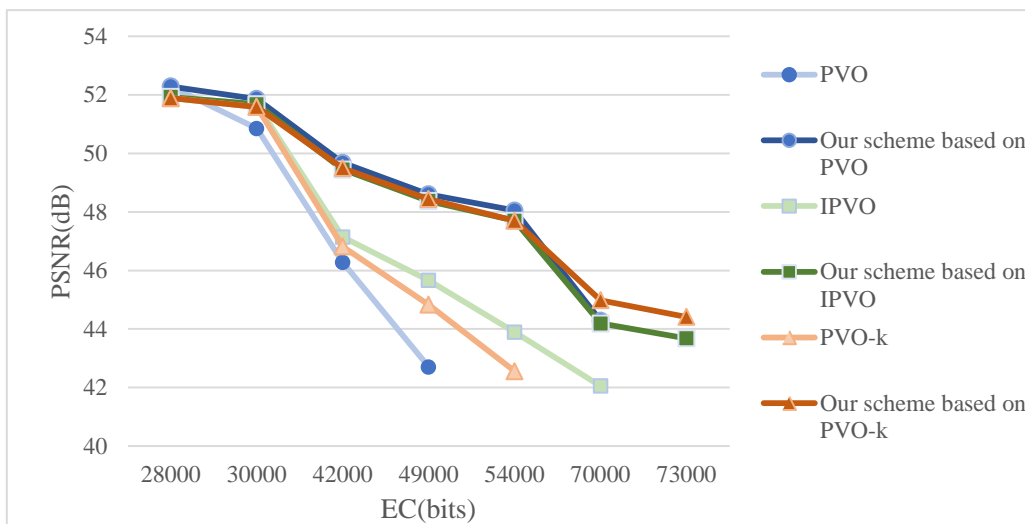
(a) Lena



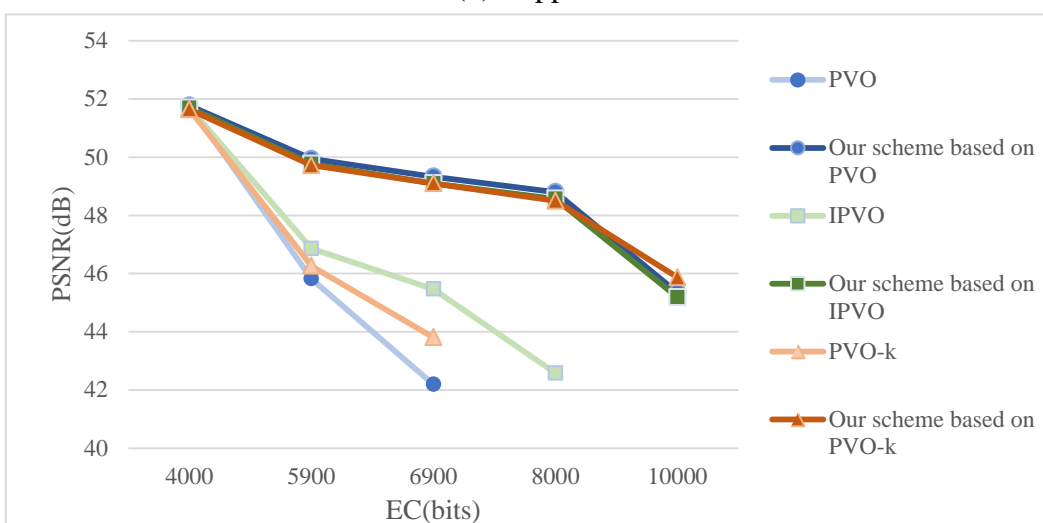
(b) Boat



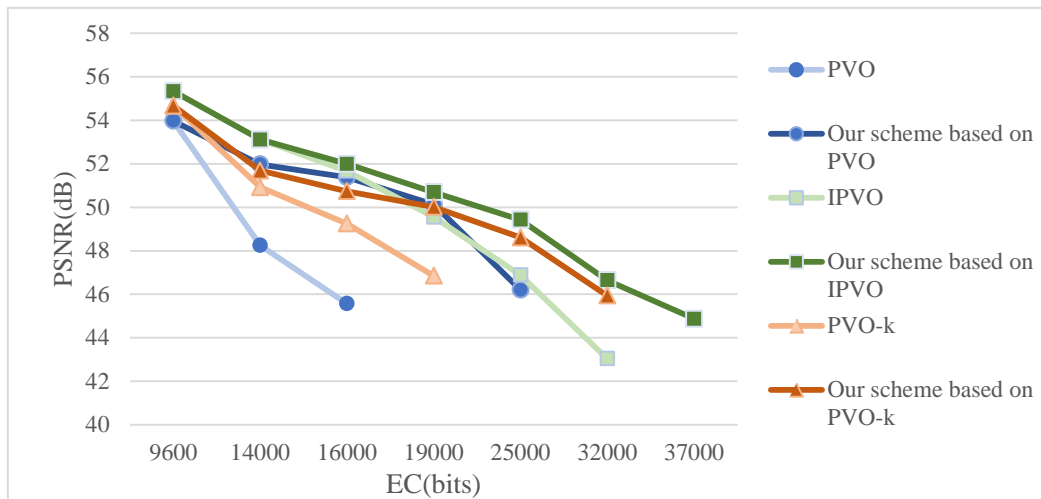
(c) F16



(d) Peppers



(e) Aerial



(f) Clock

圖十三: PVO 系列方法使用可移位塊策略方法前後的 PSNR 值及藏量

另外我們也將此方法應用在 DE 系列，如表二所示。表二中的 DE 欄位為 Tian 學者提出的方法[4]在每一層的嵌入容量和影像品質，每一層皆使用一樣的橫向切塊模式；欄位為 **Our scheme based on DE-Horizontal block mode** 的是本研究方法應用在 DE 方法後的實驗結果，每一層使用不同的橫向切塊模式，如圖四、五、六所示；**Our scheme based on DE-Vertical block mode** 欄位亦為本研究方法應用在 DE 方法後的實驗結果，每一層使用不同的縱向切塊模式，如圖七、八、九所示；RDE 欄位為 Liu 學者等人提出的方法[12]，剩餘欄位則是本研究的不同切塊模式應用在 RDE 方法後的實驗結果。從實驗結果可以看出經過本方法也能提升 DE 系列多層嵌入的影像品質及藏量。

表二: DE 系列使用不同切塊模式的藏量與影像品質

Image	Layer	DE		Our scheme based on DE		Our scheme based on DE		RDE		Our scheme based on RDE		Our scheme based on RDE	
				Horizontal block mode		Vertical block mode				Horizontal block mode		Vertical block mode	
		PSNR (dB)	EC (bits)	PSNR (dB)	EC (bits)	PSNR (dB)	EC (bits)	PSNR (dB)	EC (bits)	PSNR (dB)	EC (bits)	PSNR (dB)	EC (bits)
Lena (512x512)	Layer1	33.12	131016	33.12	131016	35.62	131070	42.36	131072	42.36	131072	44.88	131072
	Layer2	25.21	260211	29.90	261361	32.38	261619	36.05	262137	40.17	261632	42.78	261632
	Layer3	20.42	382574	23.75	389351	25.34	391314	31.78	393044	35.50	392178	38.05	392191
Boat (512x512)	Layer1	30.90	130306	30.90	130306	33.20	130984	39.35	130938	39.35	130938	42.51	131065
	Layer2	23.35	257206	25.90	259167	30.41	261352	33.80	261655	35.75	261271	40.69	261611
	Layer3	18.56	375056	20.48	382848	23.30	389637	29.73	392097	31.77	391358	35.97	392134
F16 (512x512)	Layer1	32.94	130703	32.94	130703	32.53	130733	40.24	131072	40.24	131072	40.53	131072
	Layer2	25.81	259114	30.77	261069	30.36	261048	35.60	261850	38.90	261625	39.23	261630
	Layer3	21.66	381831	25.05	389118	24.96	388535	31.44	392657	35.32	392185	35.28	391961
Peppers (512x512)	Layer1	34.09	130298	34.09	130298	33.98	130597	41.67	130921	41.67	130921	41.98	131042
	Layer2	26.01	258257	29.27	260192	29.24	260438	36.82	261658	39.24	261456	39.30	261573
	Layer3	20.45	379671	22.85	386693	23.05	387075	32.74	392241	35.34	391837	35.44	391983
Aerial (256x256)	Layer1	28.29	32676	28.29	32676	27.21	32462	37.79	32764	37.79	32764	35.91	32666
	Layer2	20.59	63655	25.16	64910	23.89	64664	31.32	65493	35.54	65271	33.87	65178
	Layer3	16.65	89818	19.58	95145	18.76	93662	26.74	98069	30.94	97750	29.50	97615
Clock (256x256)	Layer1	30.87	32553	30.87	32553	32.35	32687	39.34	32768	39.34	32768	40.87	32768
	Layer2	25.72	63912	27.18	64407	29.42	65019	33.22	65436	35.51	65253	38.84	65280
	Layer3	22.22	93813	23.91	95132	25.01	96534	29.99	97945	31.80	97606	34.49	97759
Average	Layer1	31.70	97925	31.70	97925	32.48	98088	40.12	98255	40.12	98255	41.11	98280
	Layer2	24.44	193725	28.03	195184	29.28	195690	34.46	196371	37.51	196084	39.11	196150
	Layer3	19.99	283793	22.60	289714	23.40	291126	30.40	294342	33.44	293819	34.78	293940

## 五、結論

本研究提出增強 PVO 系列多層影像品質的方法，我們將此方法應用在以下三個 PVO 系列方法: PVO、IPVO、PVO- $k$ ，使用可位移區塊嵌入策略，在每一層使用不同的切塊模式，避免取到與上一層重複的區塊，以保持低失真，並將此方法應用在兩個 DE 系列方法：DE、RDE。從實驗結果可以看出經過本方法確實可以提升 PVO 系列及 DE 系列的影像品質及藏量。

## 致謝

本研究由科計部計畫「基於像素值排序技術之高資訊負載量可逆式資訊隱寫技術研究」(MOST 108-2221e324-014) 補助支持，特此誌謝。

## 參考文獻

- [1] Johnson N.F., Jajodia S., Exploring steganography: Seeing the unseen, pp.26-34(1998)
- [2] C.-K. Chan and L.-M. Cheng, Hiding data in images by simple LSB substitution, Pattern recognition, vol. 37, no. 3, pp. 469-474(2004)
- [3] D.-C. Wu and W.-H. Tsai, A steganographic method for images by pixel-value differencing,

- Pattern Recognition Letters, vol. 24, no. 9-10, pp. 1613-1626(2003)
- [4] J. Tian, Reversible data embedding using a difference expansion, IEEE transactions on circuits and systems for video technology, vol. 13, no. 8, pp. 890-896(2003)
- [5] D. M. Thodi and J. J. Rodríguez, Reversible watermarking by prediction-error expansion, 6th IEEE Southwest Symposium on, pp. 21-25(2004)
- [6] 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)
- [7] 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, 51no. 1, pp. 198-205(2013)
- [8] B. Ou, X. Li, and J. Wang, "Improved PVO-based reversible data hiding: A new implementation based on multiple histograms modification," J. Vis. Commun. Image Represent., vol. 38, pp. 328–339, Jul. 2016.
- [9] C.-F. Lee, J.-J. Shen, Y.-C. Kao, and S. Agrawal, "Overlapping pixel value ordering predictor for high-capacity reversible data hiding," J. Real-Time Image Process., pp.1-21, May 2019.
- [10] F. Peng, X. Li, B. Yang, Improved pvo-based reversible data hiding, Digital Signal Process, vol.25, pp. 255–265(2014)
- [11] Bo Ou, Xiaolong Li, Yao Zhao, Rongrong Ni, Reversible data hiding using invariant pixel-value-ordering and prediction-error expansion, Signal Process: Image Commun.vol.29, pp.760–772(2014)
- [12] H. Yi, S. Wei, and H. Jianjun, "Improved reduced difference expansion based reversible data hiding scheme for digital images," in 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009, pp. 4-315-4–318.
- [13] The USC-SIPI Image Database, <http://sipi.usc.edu/database/>, University of Southern California, Signal and Image Processing Institute.