

基於預測值與鄰近像素差值的標準差的可逆式資訊隱藏

冷輝世

國立彰化師範大學

lenghs@cc.ncue.edu.tw

張維剛

國立彰化師範大學

s9922119@mail.ncue.edu.tw

曾顯文

朝陽科技大學

hwtseng@cyut.edu.tw

摘要

近年來可逆式資訊隱藏逐漸受到重視，尤其是基於預測值的預測值與原始值的差值擴張方法。同樣是基於預測值，本研究改用預測值與鄰近像素差值的標準差，其優點是減少影像結構的失真，使偽裝影像有更好的影像品質與藏量。一般使用預測值的方式會定義預測值與原始值差值的門檻值，本研究則是使用相對於預測值的鄰近像素差值定義標準差。實驗結果顯示本研究提出的方法能有效的提高偽裝影像的藏量並具有較佳的影像品質。

關鍵詞：可逆式資訊隱藏、預測值、差值擴張、標準差。

Abstract

Reversible data hiding is paid great attention in recent years, especially for prediction-based difference expansion schemes. Different from other schemes, in traditional design, threshold is used to be the standard of whether the target pixel should embed secret bits or not. The proposed method uses the concept of the standard deviation replaces the original design. The experimental results show that the purposed method is effective in increasing payload and improving the image quality.

Keywords: Reversible data hiding, prediction-based, difference expansion, standard deviation.

1. 前言

隨著網路科技的發展，大量的資訊在網路間傳遞。因此，資訊安全也越來越受到重視。資訊隱藏是一門新興的資訊安全科學，將機密訊息藏入載體中不被發現，再傳送給接收方，接收方可藉由與傳送方協定的方法取出載體中的機密訊息。載體可以是文字、圖形、影像等類型，由於圖形被廣泛的使用在網路上，而且圖形具有龐大藏量的特性，所以大部份的研究都使用圖形為載體。

資訊隱藏法又分為不可逆式與可逆式。不可逆式是指機密訊息取出後無法還原原始載體。對於商業、醫療、軍事等資訊的傳遞，保持其原始載體的完整性非常重要，所以可逆式資訊隱藏逐漸成為研究的主流方向。

可逆式資訊隱藏又分為兩大類，一種是 Tian 學者提出的差值擴張法，一種是 Ni 學者提出的直方圖位移法。差值擴張法主要是以預測像素值與實際像素值的差值進行擴張藏匿，包括 Lee 等學者[1]利用目標像素 x 的鄰近像素 a 、 b ，如圖 1 所示，將 $(a+b)/2$ 作為 x 的預測值，Chuan Qin 等學者[2]利用 x 鄰近像素 a 、 b 、 c 如圖 1 所示，將 $(a+b+c)/3$ 作為 x 的預測值，Vasily Sachnev 等學者[3]利用 x 鄰近像素 a 、 b 、 c 、 d 如圖 2 所示，將 $(a+b+c+d)/4$ 作為 x 的預測值，本研究基於 Lee 等學者的方法為基礎，改進實驗方法。

由於 Lee 等學者提出的預測值與原始值差值擴張必須設定一個門檻值，對於預測值差值大於門檻值的像素都必須加或減一個門檻值，因而造成失真。本研究使用了另一種方式減少此類的失真。

c	b
a	x

圖 1 目標像素 x 與其鄰近像素

	b	
a	x	c
	d	

圖 2 目標像素 x 與其鄰近像素

2. 相關研究

本章將介紹 Lee 等學者的預測值與原始值差值擴張法與冷等學者的 MMED 預測法。

2.1 Lee 等學者的預測值差值擴張法

在 Lee 等學者(2010)的方法中，對於一張長寬為 $M \times N$ 的影像，藏匿區域為影像中去掉的一行與第一列的部分如圖 3 白色部分：

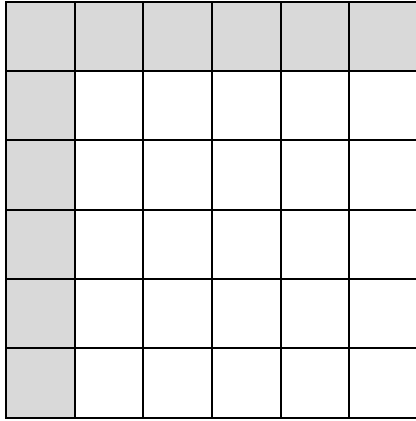


圖 3 藏匿區域示意圖

首先決定一個門檻值 T ， T 值愈小藏量愈低但影像品質好， T 值愈大藏量愈高但影像品質愈差。
藏匿方法：

對於目標像素 $x_{i,j}$ ，使用其左上方的臨近像素進行預測，如圖 4 所示：

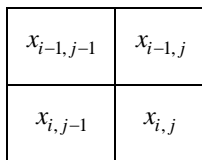


圖 4 臨近像素示意圖

則其預測像素 $x'_{i,j} = \lfloor (x_{i-1,j} + x_{i,j-1}) / 2 \rfloor$ ，預測誤差 $d = |x_{i,j} - x'_{i,j}|$ 。對於 d 值與門檻值有以下兩種情形：

一、若 d 值小於等於門檻值 T ，則進行藏匿，隱蔽像素

$$x_{i,j} = \begin{cases} x'_{i,j} + 2 \times d + s, & \text{if } x_{i,j} \geq x'_{i,j} \\ x'_{i,j} - 2 \times d - s, & \text{if } x_{i,j} < x'_{i,j} \end{cases}, s \in \{0,1\}$$

二、若 d 值大於門檻值 T ，則

$$x_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j} + (T+1), & \text{if } x_{i,j} \geq x'_{i,j} \\ x_{i,j} - (T+1), & \text{if } x_{i,j} < x'_{i,j} \end{cases}$$

取出與還原方法：

對於隱蔽像素 $x_{i,j}$ ，因為 $x_{i-1,j}$ 與 $x_{i,j-1}$ 皆已經被還原，因此可以得到預測像素

$$x'_{i,j} = \lfloor (x_{i-1,j} + x_{i,j-1}) / 2 \rfloor \text{ 與 } d' = |x_{i,j} - x'_{i,j}|$$

由 d' 與門檻值 T 可分為下列兩種情形：

一、若 $d' \leq 2 \times T + 1$

所藏的機密信息 $s = d' \bmod 2$ 且原始像素為

$$x_{i,j} = \begin{cases} x'_{i,j} + \lfloor \frac{d'}{2} \rfloor, & \text{if } x'_{i,j} \leq \bar{x}_{i,j} \\ x'_{i,j} - \lfloor \frac{d'}{2} \rfloor, & \text{otherwise} \end{cases}$$

二、若 $d' > 2 \times T + 1$

$$x_{i,j} = \begin{cases} \bar{x}_{i,j} - (T+1), & \text{if } x'_{i,j} \leq \bar{x}_{i,j} \\ \bar{x}_{i,j} + (T+1), & \text{otherwise} \end{cases}$$

以下舉例說明：

80	179	175
78	178	177

圖 5 示範影像

如圖 5，假設門檻值 $T = 2$ ，機密訊息 $s = 1$ ，對於目標像素 $x_{2,2}$ ， $x'_{2,2} = \lfloor (78+179)/2 \rfloor = 128$ ，

$d = |178 - 128| = 50$ 。因為 $50 > T = 2$ ，屬於第二類型所以 $\bar{x}_{2,2} = x_{2,2} + (T+1) = 178 + 3 = 181$ 。

對於目標像素 $x_{2,3}$ ， $x'_{2,3} = \lfloor (178+175)/2 \rfloor = 176$ ， $d = |177 - 176| = 1$ 。因為 $1 \leq T = 2$ ，屬於第一類型，

所以 $\bar{x}_{2,3} = x'_{2,3} + 2 \times d + s = 176 + 2 + 1 = 179$ 。

取出與還原步驟：

$$\bar{x}_{2,2} = 181, \text{ 則 } x'_{2,2} = \lfloor (78+179)/2 \rfloor = 128,$$

$d' = |x_{i,j} - x'_{i,j}| = |175 - 128| = 47 > 2 \times T + 1 = 5$ ，屬於第二類型，所以 $x_{2,2} = 181 - 3 = 178$ 。

$$\bar{x}_{2,3} = 179, \text{ 則 } x'_{2,3} = \lfloor (178+175)/2 \rfloor = 176,$$

$d' = |x_{i,j} - x'_{i,j}| = |179 - 176| = 2 \leq 2 \times T + 1 = 5$ ，屬於第一類型， $s = 5 \bmod 2 = 1$ ， $x_{2,3} = 176 + 1 = 177$ 。

2.2 冷等學者的 MMED 預測

冷等學者(2013)修改了 MED 預測方法[4]，依據不同影像的特徵得到一個特有的門檻值 T ，令 c 為目標像素的對角像素， a 為目標像素的水平鄰近像素， b 為目標像素的垂直鄰近像素，若 c 與 $(a+b)/2$ 的差小於門檻值 T 的話，則取預測值為 a 、 b 、 c 的平均值，會有更準確的預測：

設 x 為目標像素，其鄰近三個像素為 a 、 b 、 c 如圖 1 所示，且由影像特徵所得到的門檻值 T ，則目標像素 x 的預測值：

$$x' = \begin{cases} \min(a,b), & \text{if } c \geq \max(a,b) \\ \max(a,b), & \text{if } c \geq \min(a,b) \\ \frac{a+b+c}{3}, & c \in (a,b) \left| c - \frac{a+b}{2} \right| < T, T \in \mathbb{N} \\ a+b-c, & \text{otherwise} \end{cases}$$

3. 研究方法

由於考慮到影像的切割、陰影等等對於影像邊緣的影響，因此我們將藏匿區域限制為去除四個邊的中間區域。首先我們依照 S.Geetha 等學者[5]的分割方式，將圖片分割為擁有共用邊的九宮格區塊，並且使用這些鄰近像素利用冷等學者提出的 MMED 預測方法對該像素進行判斷是否為'edge'或是'non-edge'，再根據判斷結果進而預測其像素值，接著計算此預測值與其鄰近像素的標準差(S)，並且利用此標準差(S)設為門檻值，根據不同的標準差，使用差值擴張可逆式資訊隱藏法進行分次藏匿。

3.1 影像分區與使用 MMED 預測像素

依照 S.Geetha 等學者(2011)的分割方式，每個像素的座標皆可用(o,o),(o,e),(e,o),(e,e)這四種座標來表達，其中 o 代表奇數，e 代表偶數，如圖 6 所示：

(o,o)	(o,e)	(o,o)	(o,e)	(o,o)
(e,o)	(e,e)	(e,o)	(e,e)	(e,o)
(o,o)	(o,e)	(o,o)	(o,e)	(o,o)
(e,o)	(e,e)	(e,o)	(e,e)	(e,o)
(o,o)	(o,e)	(o,o)	(o,e)	(o,o)

圖 6 區塊圖示

因此我們可以將影像去除外圍的中間部分區分為四類，分別為：

$$S_{UL} = \{x_{i,j} \mid i = 2k, j = 2k\}$$

$$S_{UR} = \{x_{i,j} \mid i = 2k+1, j = 2k\}$$

$$S_{DL} = \{x_{i,j} \mid i = 2k, j = 2k+1\}$$

$$S_{DR} = \{x_{i,j} \mid i = 2k+1, j = 2k+1\}$$

並且對這四類像素進行分次藏匿。

我們首先針對 S_{UL} 的像素進行藏匿。我們將影像分割為擁有共用邊的九宮格區塊，因此對於目標像素 $x_{i,j}$ 的鄰近像素集合

$$N_{i,j} = \{x_{i-1,j-1}, x_{i-1,j}, x_{i-1,j+1}, x_{i,j-1},$$

$$x_{i,j+1}, x_{i+1,j-1}, x_{i+1,j}, x_{i+1,j+1}\}$$

對 $x_{i,j}$ 的鄰近像素中的四個角落

$$N_{UL}(x_{i,j}) = \{x_{i,j-1}, x_{i-1,j}, x_{i-1,j-1}\}$$

$$N_{UR}(x_{i,j}) = \{x_{i,j+1}, x_{i-1,j}, x_{i-1,j+1}\}$$

$$N_{DL}(x_{i,j}) = \{x_{i,j-1}, x_{i,j+1}, x_{i+1,j-1}\}$$

$$N_{DR}(x_{i,j}) = \{x_{i+1,j+1}, x_{i+1,j}, x_{i,j+1}\}$$

使用 MMED 對 $x_{i,j}$ 判斷該像素是否為'edge'，並且利用此判斷進行預測。

判斷方式：

如圖 1，若 $c \geq \max\{a,b\}$ 或 $c \leq \min\{a,b\}$ ，則該角落為'edge'，否則為'non-edge'。

預測方式：

若角落判斷為'edge'，則 $p_i = (a+b)/2$ 。若角落判斷為'non-edge'，則 $p_i = MMED(x_{i,j})$ 。

因此對於目標像素 $x_{i,j}$ ，可以得到四個預測結果 p_1, p_2, p_3, p_4 ，我們令 $x_{i,j}$ 的預測值

$$x'_{i,j} = \lfloor (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) / 4 \rfloor。$$

3.2 評估函數 $\sigma_N(x_{i,j})$

我們令

$$D(x_{i,j})$$

$$= (x_{i-1,j-1} - x'_{i,j})^2 + (x_{i-1,j} - x'_{i,j})^2 + (x_{i-1,j+1} - x'_{i,j})^2 \\ + (x_{i,j-1} - x'_{i,j})^2 + (x_{i,j+1} - x'_{i,j})^2 + (x_{i+1,j-1} - x'_{i,j})^2 \\ + (x_{i+1,j} - x'_{i,j})^2 + (x_{i+1,j+1} - x'_{i,j})^2$$

，且 $\sigma_N(x_{i,j}) = \lfloor \sqrt{D(x_{i,j})/8} \rfloor$ ，為 $x'_{i,j}$ 與鄰近九宮格像素的標準差，因此我們可以設立標準差 S 的大小來決定哪些像素點要藏入機密訊息。

3.3 藏匿方法與取出還原方法

藏匿方法：

對於目標像素 $x_{i,j}$ ，若 $\sigma_N(x_{i,j}) \leq S$ ，則隱蔽像素

$$x_{i,j} = \begin{cases} x'_{i,j} + 2 \times |x'_{i,j} - x_{i,j}| + b, & \text{for } x_{i,j} > x'_{i,j} \\ x'_{i,j} - 2 \times |x'_{i,j} - x_{i,j}| - b, & \text{for } x_{i,j} \leq x'_{i,j} \end{cases}$$

其中 $b \in \{0,1\}$ 為機密訊息。

若 $\sigma_N(x_{i,j}) > S$ ，則不進行藏匿。

取出與還原方法：

對於隱蔽像素 $\hat{x}_{i,j}$ ，可以得到預測像素 $x'_{i,j}$ ，令 $d' = \lfloor \hat{x}_{i,j} - x'_{i,j} \rfloor$ ，若 $\sigma_N(x_{i,j}) \leq S$ ，則機密訊息 $s = d' \bmod 2$ ，

$$x_{i,j} = \begin{cases} x'_{i,j} + \lfloor \frac{d'}{2} \rfloor, & \text{if } x'_{i,j} < \hat{x}_{i,j} \\ x'_{i,j} - \lfloor \frac{d'}{2} \rfloor, & \text{otherwise} \end{cases}$$

若 $\sigma_N(x_{i,j}) > S$ ，則不進行動作。

3.4 進行分次藏匿

將 S_{UL} 的像素藏匿完之後，我們對藏匿完的影像進行第二次、第三次與第四次藏匿，藏匿方法與上述方法一樣，但是目標像素分別更改為 S_{UR} 、 S_{DL} 、 S_{DR} ，如圖 7 所示：

	第一次 目標	第二次 目標	第一次 目標	第二次 目標
	第三次 目標	第四次 目標	第三次 目標	第四次 目標
	第一次 目標	第二次 目標	第一次 目標	第二次 目標
	第三次 目標	第四次 目標	第三次 目標	第四次 目標

圖 7 目標像素示意圖

3.5 溢位問題

對於影像中像素質較大或較小的像素點，經過藏匿之後有可能會發生溢位問題(overflow or underflow)，本研究將藏入後會產生溢位的像素點的座標使用 Location Map 記錄下來，不進行藏匿，取出時先判斷該像素點是否位於 Location Map 內，若否才執行取出動作。

3.6 藏匿與取出還原範例

以圖 8 為例：

80	179	175	175
78	178	177	177
79	175	173	179
77	177	175	177

圖 8 藏匿範例圖

灰色部分不進行藏匿，白色部分則為我們的藏匿區域。

藏匿步驟：

我們設門檻值 $T=4$ ， $S=50$ ，機密訊息 $B='100'$ ， $S_{UL}=\{x_{2,2}\}$ ， $S_{UR}=\{x_{2,3}\}$ ， $S_{DL}=\{x_{3,2}\}$ ， $S_{DR}=\{x_{3,3}\}$ ，首先我們對 $S_{UL}=\{x_{2,2}\}$ 進行第一次藏匿，

$$p_1 = 78 + 179 - 80 = 177$$

$$p_2 = (179 + 177) / 2 = 178$$

$$p_3 = 78 + 175 - 79 = 174$$

$$p_4 = (175 + 177) / 2 = 176$$

因此

$$x'_{2,2} = \lfloor (177 + 178 + 174 + 176) / 4 \rfloor = 176$$

$$\sigma_N(x_{2,2}) = 59 > 50，所以 \bar{x}_{2,2} = 178。$$

將 S_{UL} 藏匿完畢後，對 S_{UR} 進行第二次藏匿，

$$p_1 = (178 + 175) / 2 = 176.5$$

$$p_2 = (175 + 177) / 2 = 176$$

$$p_3 = \lfloor (178 + 175 + 173) / 3 \rfloor = 175$$

$$p_4 = (173 + 177) / 2 = 175$$

因此

$$x'_{2,3} = \lfloor (176.5 + 176 + 175 + 175) / 4 \rfloor = 175$$

$$\sigma_N(x_{2,3}) = 2 \leq 50，且 x_{2,3} > x'_{2,3}$$

$$所以 \bar{x}_{2,3} = 175 + 2 \times |175 - 177| - 0 = 179。$$

將 S_{UR} 藏匿完畢後，對 S_{DL} 進行第三次藏匿，

$$p_1 = (178 + 79) / 2 = 128.5$$

$$p_2 = (178 + 173) / 2 = 175.5$$

$$p_3 = (79 + 177) / 2 = 128$$

$$p_4 = (173 + 177 + 175) / 3 = 175$$

因此

$$x'_{3,2} = \lfloor (128.5 + 175.5 + 128 + 175) / 4 \rfloor = 151$$

$$\sigma_N(x_{3,2}) = 49 \leq 50，且 x_{3,2} > x'_{3,2}$$

$$所以 \bar{x}_{3,2} = 151 + 2 \times |151 - 175| + 0 = 199。$$

將 S_{DL} 藏匿完畢後，對 S_{DR} 進行第四次藏匿，

$$p_1 = (179 + 199) / 2 = 189$$

$$p_2 = (179 + 179) / 2 = 179$$

$$p_3 = 199 + 175 - 177 = 197$$

$$p_4 = (175 + 177 + 179) / 3 = 177$$

因此

$$x'_{3,3} = \lfloor (189 + 179 + 197 + 177) / 4 \rfloor = 185$$

$$\sigma_N(x_{3,3}) = 8 \leq 50，且 x_{3,3} < x'_{3,3}$$

$$所以 \bar{x}_{3,3} = 185 - 2 \times |185 - 173| - 1 = 160。$$

取出還原步驟：

第四次： $x'_{3,3} = 185$ ， $\sigma_N(x_{3,3}) = 8 \leq 50$ ，因此 $d' = |160 - 185| = 25$ ，機密訊息 $b = 25 \bmod 2 = 1$ ， $x_{3,3} = 185 - 12 = 173$ 。

第三次： $x'_{3,2} = 151$ ， $\sigma_N(x_{3,2}) = 49 \leq 50$ ，因此 $d' = |199 - 151| = 48$ ，機密訊息 $b = 48 \bmod 2 = 0$ ， $x_{3,2} = 151 + 24 = 175$ 。

第二次： $x'_{2,3} = 175$ ， $\sigma_N(x_{2,3}) = 2 \leq 50$ ，因此 $d' = |179 - 175| = 4$ ，機密訊息 $b = 4 \bmod 2 = 0$ ， $x_{2,3} = 175 + 2 = 177$ 。

第一次： $x'_{2,2} = 176$ ， $\sigma_N(x_{2,2}) = 59 > 50$ ，因此不執行動作。

4. 實驗結果

本實驗使用 SIPI 影像圖庫裡的 'Tiffany'、'Baboon'、'Lena'、'Airplane'、'Scene'與'Peppers'，這 6 張，大小為 512×512 的圖片作為實驗樣本：

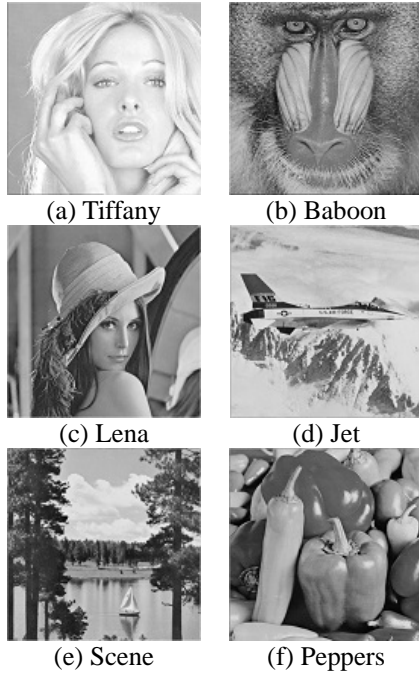


圖 9 六張原始影像

由於人類視覺系統(HVS)對於 PSNR 值大於 30db 的影像幾乎是無法分別出與原始影像的差異，因此本研究希望在 PSNR 值維持在 30 左右的情況下，盡可能的提高藏量，下面表 1 為這 6 張圖在 PSNR 值保持在 30 左右時的最高藏量：

表 1 最高藏量表

	標準差	PSNR	溢位	Payload
Tiffany (T=4)	51	32.493	4194	0.9738
Baboon (T=17)	19	30.738	63	0.5220
Lena (T=3)	74	32.770	11	0.9913
Jet (T=5)	74	33.623	8	0.9908
Scene (T=9)	27	29.742	34	0.8784
Peppers (T=11)	77	29.995	672	0.9881

註：第一欄的 T 值為 MMED 中對於不同的影像特徵所得到的 T 值。

藏匿後的結果如下圖：



圖 10 六張藏匿後的影像

由表 1 可得知本實驗中在 PSNR 值保持在 30dB 左右時，有著極高的藏量。

下面表 2 為本實驗與 Lee 等學者的實驗數據在 PSNR 為 30dB 左右的數據比較：

表 2 與 Lee 等學者的比較表

Tiffany			
	Payload	PSNR	溢位
Lee 方法(T=86)	0.973804	31.228121	4822
本研究(S=51)	0.973850	32.493630	4194
Baboon			
	Payload	PSNR	溢位
Lee 方法(T=9)	0.515072	30.156863	10
本研究(S=19)	0.522045	30.738195	63
Lena			
	Payload	PSNR	溢位
Lee 方法(T=105)	0.991356	30.060167	222
本研究(S=74)	0.991364	32.770688	11
Jet			
	Payload	PSNR	溢位
Lee 方法(T=93)	0.990593	29.517609	422
本研究(S=74)	0.990883	33.623186	8
Scene			
	Payload	PSNR	溢位
Lee 方法(T=15)	0.870777	29.675332	6
本研究(S=27)	0.878490	29.742448	34
Peppers			
	Payload	PSNR	溢位
Lee 方法(T=123)	0.987999	29.428772	1102
本研究(S=77)	0.988117	29.995505	672

註：上表的 T 值為 Lee 方法中的門檻值。

由表 2 得知與 Lee 等學者的方法在相近的 Payload 比較之下，PSNR 值都明顯較高，表示本研究有較佳的影像品質。

5. 結論

由表 2 可得知本實驗方法在'Tiffany'、'Lena'、'Jet'、'Peppers'等圖的 Payload 與 PSNR 值都優於 Lee 等學者的方法，Overflow/Underflow 的數量也明顯少很多。在'Baboon'與'Scene'這兩個比較複雜的圖形，如果扣除 Location Map，本實驗'Baboon'圖的 Pure Capacity 為 134834bits 仍優於 Lee 等學者的 134703bits;本實驗'Scene'圖的 Pure Capacity 為 229202bits 仍優於 Lee 等學者的 228077bits。

關於本實驗能夠擁有這樣結果我們認為是有兩個因素所影響。第一個因素是預測方法，由於我們使用 MMED 的預測方式是對於預測'non-edge'擁有比較準確的結果，而對於'edge'的預測方法則是使用與 Lee 等學者的方法一樣，因此在預測方面我們的結果會比 Lee 等學者的預測來的準確，預測比較準確相對的失真就會比較少，藏量也會比較多。第二個因素是藏匿方法，因為本實驗的藏匿方法中，對於高於標準差 S 的像素我們不需要加減一個門檻值 T ，因此有較少的失真。由此可知使用本實驗的方法可以獲得更高的影像品質。

此外，本實驗使用預測值與其鄰近像素的標準差來當作評估函數，並且由 MMED 中的影像特徵

取門檻值，但是標準差小並不一定代表預測像素與實際像素的差值就會比較小，若是在像素差值較大的形況中，使用差值擴張法進行藏匿就會造成較大的失真，因此我們認為在這個部分是可以再更進一步改進的，另外由於我們使用 MMED 預測方法使我們對於'non-edge'的預測變得比較準確，但是對於'edge'的預測則是沒有多加琢磨，因此可以對'edge'使用更為準確的預測方法或是訂定更加完善的評估方法進而使實驗獲得更好的效果。

參考文獻

- [1] Chin-Feng Lee, Hsing-Ling Chen, & Hao-Kuan Tso, "Embedding capacity raising in reversible data hiding based on prediction of difference expansion", *Journal of Systems and Software*, 83, 2010, pp. 1864 - 1872.
- [2] Chuan Qin, Chin-Chen Chang & Chang, Li-Ting Liao, "An adaptive prediction-error expansion oriented reversible information hiding scheme", *Pattern Recognition Letters* 33, pp. 2166-2172, 2012.
- [3] Vasily Sachnev, Hyoung Joong Kim, Jeho Nam Senior, Sundaram Suresh, and Yun Qing Shi, "Reversible Watermarking Algorithm Using Sorting and Prediction", *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS FOR VIDEO TECHNOLOGY*, VOL. 19, NO. 7, JULY 2009, pp. 989 - 999.
- [4] 冷輝世、余奕憲，"改良 MED 邊緣檢測法以增加可逆式隱藏藏量的方法"，第七屆資訊科技國際研討會(2013)。
- [5] S. Geetha, V. Kabilan, S.P. Chockalingam, & N. Kamaraj, "Varying radix numeral system based adaptive image steganography", *Information Processing Letters*, 111, 2011, pp. 792 - 797.