

不對稱直方圖位移技術之可逆式資訊隱藏方法

呂慈純
朝陽科技大學副教授
tclu@cyut.edu.tw

曾俊雅
朝陽科技大學博士生
s10033901@cyut.edu.tw

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

摘要

直方圖位移技術是一種很常被使用的可逆式資訊隱藏方法，該方法能夠有效地利用影像的像素值分佈情形，進行機密訊息的嵌入。然而，該技術的影像品質，取決於被位移的像素個數，如果位移的數量太多，可能會導致影像嚴重失真。因此，本研究使用 Lukac 等學者所提出的邊緣敏感度分析方法進行預測，降低預測誤差，並且結合 Chen 等學者所提出的不對稱直方圖位移法，讓誤差值在進行第一次位移後，能夠透過第二次位移將誤差值互補回趨近於原始影像像素值狀態。實驗結果可以發現，像素互補機制在進行多層次嵌入時，能夠有較佳的影像品質，尤其是平滑型影像的效果更為顯著，並且透過兩種預測方式，針對不同特徵的影像也能夠擁有較佳的資訊負載能力和影像品質。

關鍵字：直方圖位移、可逆式資訊隱藏、邊緣敏感度分析、預測誤差。

1. 介紹

資訊隱藏技術旨在隱蔽媒體中藏入機密訊息，使其在傳輸的過程中掩飾訊息的存在。對於該技術而言，要如何在高安全性和不被第三方察覺的情形下，提升整體的訊息嵌入能力，成為該項技術的一大挑戰 [4]。

可逆式資訊隱藏技術 (Reversible Data Hiding, RDH) 為資訊隱藏領域中很重要的技術，其目的在偽裝影像取出機密

訊息後，還能恢復回最初始的狀態，達到影像再利用的效果，大多應用於醫療影像、軍事地圖或者是藝術品等高價值的影像 [12]。然而，為了將影像無損的恢復回原始狀態，會犧牲大量的藏入能力，故如何提升藏入量並且保有恢復影像的特性，是 RDH 技術研究的重點。

近年的 RDH 技術可以分為兩個方向，其中一種方法為差異擴張 (Difference Expansion)，差異擴張法是利用像素與像素 (或者是原始像素值與預測像素值) 之間的差異距離嵌入機密訊息，並且將差異距離擴張成數倍 [1, 5, 8, 9]。差異擴張技術若像素之間的差異距離太大，進行倍數擴張後，影像品質將會嚴重失真。因此，如何使差異值降低，對差異擴張法是非常重要的。

另一種 RDH 技術為直方圖位移法 (Histogram-Shift Based)，該方法利用統計的方式分析像素 (或者是誤差值) 分佈情況，將機密訊息嵌入頻繁出現的數值之中 [2, 3, 7, 11]。直方圖位移技術的藏入能力取決於峰值點的大小，假使峰值點越多，代表可嵌入的訊息位置越多；反之，峰值點越小，代表可嵌入訊息的位置會相對的減少，而且誤差值直方圖的峰值點大小將隨著預測方法的精確度而變動。因此，如何提升預測的精準度對誤差值直方圖技術而言，是非常重要的挑戰。

Lukac 等學者提出邊緣敏感度分析的預測方法，可以有效利用鄰近像素的關聯性提升預測精確度。Feng 和 Fan 學者延伸 Lukac 的方法，更提升了在複雜型影像上

的預測精準度。然而，當影像特徵較為平滑時，延伸 Lukac 方法所產生的預測精準度就顯得較為薄弱。因此，本研究結合兩種預測方法，並且透過 Chen 等學者所提出的不對稱直方圖位移技術進行誤差值統計，以提升藏入能力和影像品質。

本篇研究會依序介紹整個研究流程：第 2 章節會詳細介紹直方圖位移技術（第 2.1 節）、Feng 和 Fan 學者延伸 Lukac 預測方法（第 2.2 節）的步驟。第 3 章節會呈現整個研究流程和範例。第 4 章節將探討不同誤差值直方圖建立方式對整體藏入能力和影像品質的影響，並且在第 4.2 節與其他學者進行實驗結果比較。最後，第 5 章節對研究進行結論分析。

2. 文獻探討

2.1. 直方圖位移技術

直方圖位移技術是由 Ni 等學者於 2006 年所提出的 RDH 技術[7]，該方法會先統計整張影像的像素分佈情形並且產生直方圖表，公式如下所示：

$$H(x_{(i,j)}) = H(x_{(i,j)}) + 1, \quad (1)$$

其中 $H(\cdot)$ 為像素值的出現次數， $x_{(i,j)}$ 為原始像素值。當相同的像素值出現時，則該像素值 $x_{(i,j)}$ 出現次數會遞增。所有像素值都統計完成後，接著尋找頻繁出現的像素峰值點 (Peak Point) 和從未出現過的像素零值點 (Zero Point)，並且透過以下條件對直方圖表進行修改：

$$x'_{(i,j)} = \begin{cases} x_{(i,j)} + 1, & \text{if } PK < x_{(i,j)} < Z, \\ x_{(i,j)} + s, & \text{if } x_{(i,j)} = P, \\ x_{(i,j)}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $x'_{(i,j)}$ 為偽裝像素值， PK 為峰值點， Z 為零值點， s 為機密訊息。如果像素值 $x_{(i,j)}$

5	5	0	5	1
0	0	1	3	1
1	5	5	5	2
1	1	1	2	1
1	1	1	1	3

圖 1 直方圖位移範例

介於 PK 和 Z 之間，則該像素值會被往右位移 1；如果像素值 $x_{(i,j)}$ 等於 PK ，代表該像素位置可以嵌入機密訊息 s ；如果像素值 $x_{(i,j)}$ 不在 PK 和 Z 之間，且也不等於 PK ，則該像素值將維持不變。

然而，以原始像素值進行直方圖位移，會限制整體影像的嵌入能力，因為一般影像的顏色分佈並不一致，在影像特徵較為複雜時，峰值點亦會隨之降低，進而減少藏入量。

因此，學者將直方圖位移技術與預測技術進行結合，並且以預測誤差值統計直方圖，提升整體的訊息嵌入能力。Tsai 等學者於 2009 年利用預測誤差值建立誤差值直方圖 [11]，該方法先將影像切割成 5x5 的區塊，以線性預測的方式產生誤差值。其公式如下：

$$e_{(i,j)} = \begin{cases} x_{(i+2,j+2)}, & \text{if } x_{(i+2,j+2)}, \\ x_{(i,j)} - x_{(i+2,j+2)}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $e_{(i,j)}$ 為誤差值， $x_{(i,j)}$ 為原始像素， i 和 j 為 2 維影像的像素位置。線性預測的方式是以區塊矩心的像素值與其它像素進行差異值的計算，以圖 1 為例，當中心像素值 $x_{(2,2)}=5$ 時，利用公式(3)計算出差異值表，計算結果如圖 2 所示。

0	0	-5	0	-4
-5	-5	-4	-2	-4
-4	0	-	0	-3
-4	-4	-4	-3	-4
-4	-4	-4	-4	-2

圖 2 線性預測結果

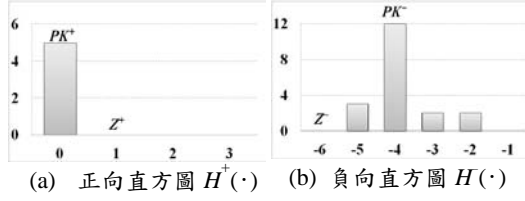


圖 3 Tsai 等學者的誤差直方圖表

取得每個區塊的誤差值 $e_{(i,j)}$ 後，接著進行直方圖統計，Tsai 等學者將直方圖拆分成正向直方圖和負向直方圖，統計條件如下列公式：

$$\begin{cases} H^+(e_{(i,j)})+1, & \text{if } e_{(i,j)} \in [0, 255], \\ H^-(|e_{(i,j)}|)+1, & \text{if } e_{(i,j)} \in [-255, -1]. \end{cases} \quad (4)$$

作者將 $e_{(i,j)} \geq 0$ 的誤差值分類至正向直方圖 $H^+(\cdot)$ 中(如圖 3-(a)所示)，而 $e_{(i,j)} < 0$ 的誤差值則歸類至負向直方圖 $H^-(\cdot)$ 中(如圖 3-(b)所示)，並且取得各自的峰值點和零值點，進行機密訊息的嵌入和位移。

由於使用雙直方圖技術並且產生 2 個峰值點，能夠有效的提升藏入能力，但是可能會造成影像品質失真較大，尤其是較為平滑的影像，預測的越精確，誤差的峰值點會越趨近於 0，例如正向峰值點 $PK^+=0$ 和負向峰值 $PK^-=-1$ ，在進行左右位移時，可能會導致大量的誤差值被位移。

因此，Chen 等學者於 2013 年延伸 Tsai 等學者的方法使用像素互補的方式進行直方圖位移 [2]。該方法同樣使用線性預測的方式計算誤差值，但是區塊大小由 5×5 縮小為 2×2 ，並且利用最右下角的素當做中心像素，與其它 3 個鄰近像素相減，公式如下所示：

$$e_{(i,j)} = \begin{cases} x_{(i+1,j+1)}, & \text{if } x_{(i,j)} = x_{(i+1,j+1)} \\ x_{(i+1,j+1)} - x_{(i,j)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

同樣以圖 1-(a)為例，當 $x_{(i+1,j+1)}=0$ ，利用公式(5)計算得到鄰近像素之誤差值分別為 $e_{(i-1,j-1)}=-5$ 、 $e_{(i-1,j)}=-5$ 和 $e_{(i,j-1)}=0$ 。以

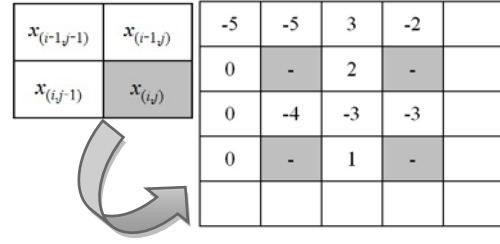


圖 4 Chen 等學者的線性預測範例

此類推，即可得到整張影像的誤差值表，結果如圖 4 所示。

接著從誤差值中找出差異最大的誤差，並且統計成直方圖。例如第 1 個區塊中的誤差值分別為 $e_{(i-1,j-1)}=-5$ 、 $e_{(i-1,j)}=-5$ 和 $e_{(i,j-1)}=0$ ，其中 $e_{(i,j-1)}=0$ 為該區塊中的最大值，因此以 0 作為該區塊的誤差值。以此類推，找出所有區塊的最大誤差值後，即可統計成直方圖並且進行機密訊息嵌入(如圖 5 所示)。同樣地，當 $Max(\cdot)$ 直方圖位移嵌入完成後，再重覆上述的預測方式，並且從 3 個誤差中取最小值進行直方圖分析，並且嵌入機密訊息。

為了達到像素互補的效果，在 $Max(\cdot)$ 的直方圖中，其零值點 Z 必須位於峰值點 PK 的左方；反之， $Min(\cdot)$ 的直方圖其零值點 Z 必須位於峰值點 P 的右方。直方圖位移公式如下所示，公式(6)為 $Max(\cdot)$ 直方圖的位移方式，公式(7)為 $Min(\cdot)$ 直方圖的位移方式。

$$x'_{(i,j)} = \begin{cases} p_{(i,j)} + Max(\cdot) - 1, & \text{if } Z^+ < Max(\cdot) < PK^+, \\ p_{(i,j)} + Max(\cdot) - s, & \text{if } Max(\cdot) = PK^+. \end{cases} \quad (6)$$

$$x'_{(i,j)} = \begin{cases} p_{(i,j)} + Min(\cdot) + 1, & \text{if } PK < Min(\cdot) < Z, \\ p_{(i,j)} + Min(\cdot) + s, & \text{if } Min(\cdot) = PK. \end{cases} \quad (7)$$

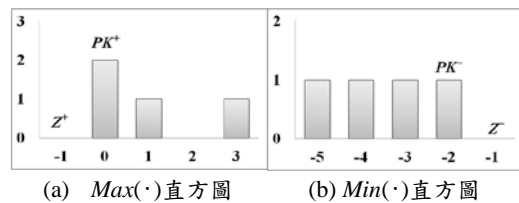


圖 5 Chen 等學者的誤差直方圖表

當進行機密訊息嵌入和位移時， $Max(\cdot)$ 直方圖的像素會被-1 位移，而 $Min(\cdot)$ 直方圖的像素會則被+1 位移，在正負抵銷的情形下，在執行第二次嵌入時，透過 $Min(\cdot)$ 直方圖位移的方式，將 $Max(\cdot)$ 直方圖-1 的像素復原回來，減少影像失真程度。

2.2. 延伸 Lukac 演算法

Feng 和 Fan 學者於 2012 年將 Lukac 等學者[6]提出的彩色影像縮放之技術運用於資訊隱藏方法中 [3]。該方法為了減少前一次的嵌入結果對之後的像素預測產生影響，利用 Yang 和 Tsai 學者於 2009 年提出的交錯式灰階影像直方圖位移技術，將影像轉換成互不相交的 2 個集合，分別為 α 集合（黑色棋格）和 β 集合（白色棋格） [13]，如圖 6 所示。在進行預測時，會使用其它集合的像素進行預測和機密訊息嵌入，例如對 α 集合的像素進行預測和嵌入時，會使用 β 集合像素進行；反之，當預測和嵌入 β 集合的像素時，則透過 α 集合的像素進行。因此，在進行預測、嵌入和取出時，不會受到相同集合的像素值干擾。

Lukac 等學者使用鄰近像素 $x_{(i,j-1)}$ 、 $x_{(i-1,j)}$ 、 $x_{(i,j+1)}$ 和 $x_{(i+1,j)}$ 對欲嵌入訊息的像素進行預測。首先計算 4 個鄰近像素各自的邊緣敏感係數（Edge-Sensing Coefficient）其公式如下：

$$u_l = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^4 |x_l - x_k|}, \quad (8)$$

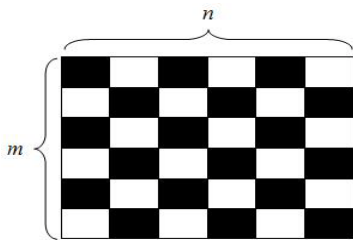


圖 6 Yang 和 Tsai 的交錯式影像

	(j-2)	(j-1)	(j)	(j+1)	(j+2)
(i-2)	65	12	20	22	35
(i-1)	25	5	10	15	12
(i)	20	16	18	9	1
(i+1)	19	20	23	17	10
(i+2)	14	17	30	20	0

圖 7 Lukac 方法範例

其中 u_l 為邊緣敏感係數， k 為鄰近像素的索引位置集合 $k=\{(i,j-1),(i-1,j),(i,j+1),(i+1,j)\}$ ，且 $l = k$ 。該公式是為了計算出鄰近像素與其它鄰近像素之間的差異程度，如果 x_l 与其它鄰近像素的差異越小，代表該像素值對欲預測的像素位置影響越大，得到的分母數值越小，則敏感係數 u_l 會越趨近於 1；反之，如果 x_l 与其它鄰近像素的差異越大，分母得到的數值也會隨之增加，則得到的敏感係數 u_l 會越趨近於 0。公式(8)加強邊緣像素 x_l 与其它鄰近像素 x_k 之間的關聯程度，提升預測時的精準度，並且將 u_l 的數值正規化成權重值 w_l ，其公式如下，

$$w_l = \frac{u_l}{\sum_{k=1}^4 u_k}, \quad \text{subject to } \sum_{k=1}^4 w_k = 1. \quad (9)$$

最後，利用以下公式將權重值 w_l 和原始像素值 x_l 相乘後加總，即可得到預測像素值 $p_{(i,j)}$ 。

$$p_{(i,j)} = \left[\sum_{l=1}^4 w_l x_l \right], \quad (10)$$

以圖 7 為例，首先計算 $x_{(i,j)}=18$ 的 4 個鄰近像素之邊緣敏感係數 u_l ，透過公式(8)得到敏感係數值 $u_{(i-1,j)}=0.04$ 、 $u_{(i,j-1)}=0.04$ 、 $u_{(i+1,j)}=0.02$ 和 $u_{(i,j+1)}=0.04$ 。接著，利用公式(9)將 u_l 值正規化為權重值 $w_{(i-1,j)}=0.28$ 、 $w_{(i,j-1)}=0.28$ 、 $w_{(i+1,j)}=0.17$ 和 $w_{(i,j+1)}=0.25$ 。最後，將權重值和原始像素值相乘後加總，即可得到預測值 $p_{(i,j)}=13$ 。

Feng 和 Fan 學者認為，除了 4 個鄰近像素對欲預測之像素位置 $x_{(i,j)}$ 有貢獻外，再往外擴張的其它像素值對 $x_{(i,j)}$ 的預測也有一定程度影響力。因此，作者延伸 Lukac 等學者的概念，利用先計算鄰近像素的預測值 $p_{(i,j-1)}$ 、 $p_{(i-1,j)}$ 、 $p_{(i,j+1)}$ 和 $p_{(i+1,j)}$ ，再以這 4 個預測值對 $x_{(i,j)}$ 進行預測。預測方式同上述的步驟，先計算敏感係數值 u_l 和權重值 w_l 。由於會先對鄰近像素進行預測，因此 k 集合的像素位置改為 $k'=\{(i-1,j-1),(i-1,j+1),(i+1,j-1),(i+1,j+1)\}$ ，且 $l=k'$ 。

最後對預測後的像素值 p_k 調整影響大小，其公式如下：

$$p'_k = \lfloor x_k - \eta_k \times (p_k - x_k) \rfloor, \quad (11)$$

其中 η_l 為調整預測值 p_k 和原始像素值 x_k 之間差異程度對該預測值的影響，作者建議 η_l 值設為 0.1。

同樣以圖 7 為例，在計算預測 $x_{(i,j)}$ 之前，先計算其鄰近像素的預測值 p'_k 。以 $p'_{(i,j-1)}$ 位置為例，將索引位置取代成 $l=k'$ 後，透過公式(8)和(9)計算出敏感係數值 u_l 和正規化後的權重值 w_l ，並且利用公式(10)得到預測值 $p'_{(i,j-1)} = 20$ 。接著，透過公式(11)對預測值 $p_{(i,j-1)}$ 進行調整，計算後即可得到 $p'_{(i,j-1)} = \lfloor 16 - 0.1 \times (20 - 16) \rfloor = 15$ 。以此類推，算出各個鄰近像素的預測值後，將 4 個鄰近像素的預測值 p'_k 取代原始像素 x_k ，將索引位置以 $l=k$ 取代，再透過同樣的公式(8)-(10)即可得到 $p_{(i,j)} = 12$ 。最後，以直方圖位移技術統計誤差值直方圖，並且將嵌入機密訊息嵌入峰值點。

3. 研究方法

本研究結合 Lukac 的方法和延伸 Lukac 的方法進行同步預測，分別建立誤差大和誤差小的直方圖表，再各自進行直

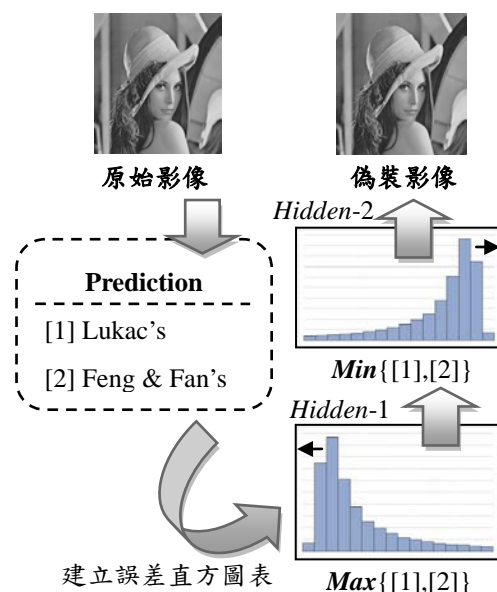


圖 8 研究設計

方圖位移和機密訊息嵌入，研究設計流程如圖 8 所示。

3.1. 預測階段

首先，根據 Yang 和 Tsai 學者的影像切割方式將影像分成 α 和 β 集合，並取其中一個集合進行嵌入，本研究設計以 β 集合（白色棋格）為例，如圖 9 所示。

影像邊緣位置的像素，在進行 Lukac 或是延伸 Lukac 的預測時，會有超出邊界的情形，因此對邊緣位置的像素會有不同的處理。在最邊緣的像素不論使用哪種預測方法，都會超出邊界，因此邊緣部份將會被捨去。靠近邊緣像素最外圍一圈的像素如圖 10-(a)所示，因無法再向外擴張，故僅使用 Lukac 的方法預測；其餘的像素

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	77	85	98	57	44	45	37	33
1	88	70	77	45	25	30	33	54
2	69	85	65	12	20	22	35	56
3	51	57	25	5	10	15	12	91
4	23	55	20	16	18	9	1	14
5	54	68	19	20	23	17	10	12
6	18	14	14	17	30	20	0	37
7	91	33	46	34	22	20	0	0

圖 9 研究範例

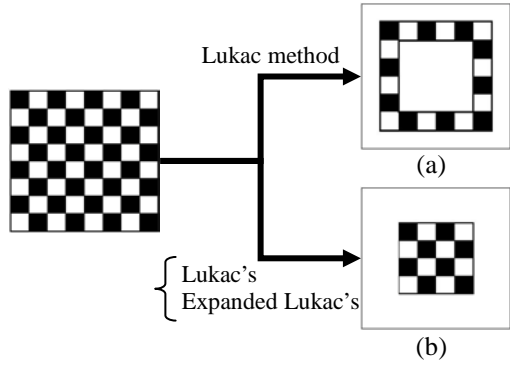


圖 10 不同位置使用的預測方法

則按照研究方法，同步進行 Lukac 方法和延伸 Lukac 方法預測(如圖 10-(b)所示)。

以圖 9 中 $x_{(1,1)}=70$ 為例，其像素位於邊緣最外圍一圈的像素，故僅使用 Lukac 方法預測，得到預測值為 $P_{Lukac}=84$ ；另一個例子為 $x_{(2,4)}=20$ ，使用 Lukac 的方法和延伸 Lukac 方法進行預測，分別得到該位置之預測值為 $P_{Lukac}=17$ 和 $P_{ExpLukac}=16$ 。以此類推，算出所有 β 集合的預測值後，將原始像素 $x_{(i,j)}$ 與預測像素相減，即可得到 Lukac 和延伸 Lukac 的誤差值 e 表，如圖 11 所示。

3.2. 嵌入階段

在進行嵌入時，本研究使用第 2.1 節的 Chen 等學者的方法，使用不對稱的 2 個直方圖進行訊息嵌入。該方法會分別將誤差值分成誤差值大 $Max\{e_{Lukac}, e_{ExpLukac}\}$ 和誤差值小 $Min\{e_{Lukac}, e_{ExpLukac}\}$ 的 2 個群組，並且分別建立直方圖和嵌入。流程如下：

- (1) 以 Lukac 計算預測值 p_{Lukac} 及誤差值 e_{Lukac} 。
- (2) 以延伸 Lukac 計算預測值 $p_{ExpLukac}$ 及誤差值 $e_{ExpLukac}$ 。
- (3) 比較 e_{Lukac} 及 $e_{ExpLukac}$ 取得差值最大的為誤差 e^{Max} 且預測值為 p^{Max} ；差值最小的為誤差 e^{Min} 且預測值為 p^{Min} 。
- (4) 利用 e^{Max} 差值表建立直方圖 $H^{Max}(e^{Max})$ 。利用 e^{Min} 差值表建立直方

圖 $H^{Min}(e^{Min})$ 。

- (5) 尋找 H^{Max} 的峰值點 PK^{Max} ，從左方開始找零值點 Z^{Max} ；尋找 H^{Min} 的峰值點 PK^{Min} ，從右方開始找零值點 Z^{Min} 。
- (6) 透過以下公式進行誤差直方圖嵌入和位移，並且產生偽裝影像，誤差值大的群組以公式(12)進行嵌入，誤差值小的群組以公式(13)進行嵌入：

$$x'_{(i,j)} = \begin{cases} p^{Max} + e^{Max} - 1, & \text{if } Z^{Max} < e^{Max} < PK^{Max}, \\ p^{Max} + e^{Max} - s, & \text{if } e^{Max} = PK^{Max}, \\ p^{Max} + e^{Max}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (12)$$

$$x'_{(i,j)} = \begin{cases} p^{Min} + e^{Min} + 1, & \text{if } PK^{Min} < e^{Min} < Z^{Min}, \\ p^{Min} + e^{Min} + s, & \text{if } e^{Min} = PK^{Min}, \\ p^{Min} + e^{Min}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

以圖 11 誤差表中，位置 $x_{(2,4)}$ 為例，以 Lukac 方法得到的誤差值為 $p_{Lukac} = 3$ ，而以延伸 Lukac 方法得到的誤差值為 $p_{ExpLukac} = 4$ ，因此 $e_{(2,4)}^{Max} = 4$ 。以此類推，利用 e^{Max} 產生誤差值大的誤差表(如圖 12 所示)，並且建立誤差直方圖表。

	0	1	2	3	4	5	6	7
0								
1		-14		4		1		
2			15		3		7	
3		4		-8		4		
4			-3		5		-10	
5		32		2		2		
6			-6		10		-15	
7								

(a) Lukac 誤差表

	0	1	2	3	4	5	6	7
0								
1								
2			15		4			
3				-8		4		
4			-3		6			
5				3		3		
6								
7								

(b) 延伸 Lukac 誤差表

圖 11 誤差值表

	0	1	2	3	4	5	6	7
0								
1		-14		4		1		
2			15		4		7	
3		4		-9		4		
4			-4		6		-10	
5		32		3		3		
6			-6		10		-15	
7								

圖 12 Max 預測誤差， $x_{(i,j)} \in \beta$

經過直方圖分析後，得到頻繁誤差值為 $PK^{Max}=4$ 和左方第一個未出現過的誤差值為 $Z^{Max}=2$ 。接著透過條件公式(12)，對所有誤差值進行修改並且產生偽裝像素。以 $e_{(1,1)}^{Max}=-14$ 為例， $e_{(1,1)}^{Max}$ 沒有位於 PK^{Max} 與 Z^{Max} 之間，因此將預測值 $p^{Max}=84$ 和 $e_{(1,1)}^{Max}=-14$ 相加後得到偽裝像素值 $x'_{(1,1)}=70$ ；當 $e_{(3,1)}^{Max}=4$ ， $e_{(3,1)}^{Max}$ 等於峰值點 PK^{Max} ，代表該位置可嵌入機密訊息。假設欲嵌入的機密訊息 $s=1$ 且該位置的預測值為 $p^{Max}=41$ ，透過公式(12)得到嵌入訊息後得到偽裝像素為 $x'_{(2,4)}=41+4-1=44$ 。以此類推，直到所有訊息都嵌入完成。

當 β 集合嵌入完成後，接著對 α 集合進行相同的預測和嵌入程序，即可完成整張影像的第 1 次嵌入。之後再對誤差值小的群組進行相同的嵌入程序（公式(12)替換成公式(13)），即可完成 2 次嵌入。

3.3. 提取階段

提取階段的流程如下所示：

- (1) 將影像分成 α 和 β 集合，並且對最後進行嵌入的集合開始進行取出，先取出最後藏入的集合，本範例先從 α 集合取出訊息。
- (2) 使用 Lukac 方法和延伸 Lukac 方法進行預測，並且取得誤差值表。
- (3) 還原像素值 $x_{(i,j)}$ 和取出機密訊息 s ，條件如下：

$$x_{(i,j)} = \begin{cases} p^{Max} + e^{Max} + 1, & \text{if } Z^{Max} \leq e^{Max} < PK^{Max} - 1, \\ p^{Max} + e^{Max} + s, & \text{if } e^{Max} = PK^{Max} \parallel PK^{Max} - 1, \\ p^{Max} + e^{Max}, & \text{otherwise} \circ \end{cases} \quad (14)$$

$$x_{(i,j)} = \begin{cases} p^{Min} + e^{Min} - 1, & \text{if } Z^{Min} \geq e^{Min} > PK^{Min}, \\ p^{Min} + e^{Min} - s, & \text{if } e^{Min} = PK^{Min} \parallel PK^{Min} + 1, \\ p^{Min} + e^{Min}, & \text{otherwise} \circ \end{cases} \quad (15)$$

同樣以 3.2 節嵌入範例為例，當 $x'_{(1,1)}=70$ ，且 $\text{Max}\{e_{Lukac}, e_{ExpLukac}\}$ 找出最大誤差 $e_{(1,1)}^{Max}=-14$ 和預測值 $p^{Max}=84$ ， $e_{(1,1)}^{Max}$ 沒有位於 PK^{Max} 與 Z^{Max} 之間，代表該位置並沒有嵌入任何機密訊息和位移，因此透過條件公式(14)將 $p^{Max}=84$ 和 $e_{(1,1)}^{Max}=-14$ 相加後還原回原始像素值 $x_{(1,1)}=70$ ；當 $x'_{(3,1)}=44$ ，且最大誤差值 $e_{(3,1)}^{Max}=3$ 和預測值 $p^{Max}=41$ ， $e'_{(3,1)}$ 位於峰值點 PK^{Max} 右方，代表該位置被嵌入機密訊息 1，故取出機密訊息後，透過條件公式(14)即可得到原始像素值 $x_{(3,1)}=41+3+1=45$ 。以此類推，直到所有訊息被取出，並且將像素還原回原始狀態。

4. 實驗結果與討論

實驗採用的灰階影像如圖 13 所示。

4.1 節針對不同的直方圖位移方式進行實驗，並且找出最好的設定方式進行比較，4.2 節針對提出方法與延伸 Lukac 方法、Tsai 方法和 Chen 方法的方法進行藏入能力和影像品質的比較。

為了評估偽裝影像與原始影像之間的像素落差是否可以被接受，並且符合不被第三方察覺，本論文使用高峰影像訊號



Lena Mandrill Airplane Zelda

圖 13 測試影像

雜訊比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 工具進行測量。其公式如下：

$$MSE = \frac{1}{m \times n} \times \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (x_{(i,j)} - x'_{(i,j)})^2, \quad (16)$$

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left[\frac{(2^{bit} - 1)^2}{MSE} \right] \text{ (dB)}, \quad (17)$$

其中 $m \times n$ 為整張影像的大小， $(2^{bit} - 1)^2$ 為影像的深度，本研究所使用的影像為 512×512 大小，且影像深度為 256 色灰階影像，故 $(2^8 - 1)^2 = 255^2$ 。經過 PSNR 公式的計算，當偽裝影像和原始影像之間的像素差異過大，代表嵌入機密訊息後的影像嚴重失真，且 PSNR 數值會越低，越容易被第三方察覺其中隱藏著訊息。

4.1. 直方圖位移設定

可逆式直方圖位移技術的影像品質，取決於峰值點與零值點之間的距離，如果其距離差異太大，會使更多的像素值被位移。然而，使用誤差值統計的直方圖其數值大多數會趨近於 0 (呈現尖塔型)，零值點有很大的機率離峰值點很遠，造成直方圖位移時，影像品質嚴重失真。

故本實驗設計 4 種不同位移方式，進行 H^{Max} 和 H^{Min} 的嵌入，其方法詳述分別如下：

- (1) **Method-1**：以 Ni 等學者[7]的方式開始找離 PK 最近的 Z 。
- (2) **Method-2**：以 Chen 等學者[2]的方式尋找 Z ， H^{Max} 直方圖向左，而 H^{Min} 直方圖則向右。
- (3) **Method-3**：從 PK 開始左右尋找最近的 2 個 Z ，並且統計各自會被位移的像素個數，選擇修改最少的方向為 Z 。
- (4) **Method-4**：統一以最小誤差值 H^{Min} 產生直方圖，找 Z 的方式同 Method-1。

圖 14 呈現的是在多次嵌入後的情形，不

同的誤差直方圖位移方式對 PSNR 值的影響，上述 4 種位移方式在多數影像上的表現並無顯著差異，但是在 Zelda 影像，使用 Method-2 和 Method-3 的位移方式會比其它的方法還要好，尤其是 Airplane 影像，其 PSNR 值顯著優於其它位移方式。故本研究特別針對此 3 張影像進行分析，使用 Lukac 預測方法計算誤差值。

從圖中可以發現，Method-1 和 Method-4 的位移方式很有可能在進行多層次嵌入時，像素不斷的往同一個方向位

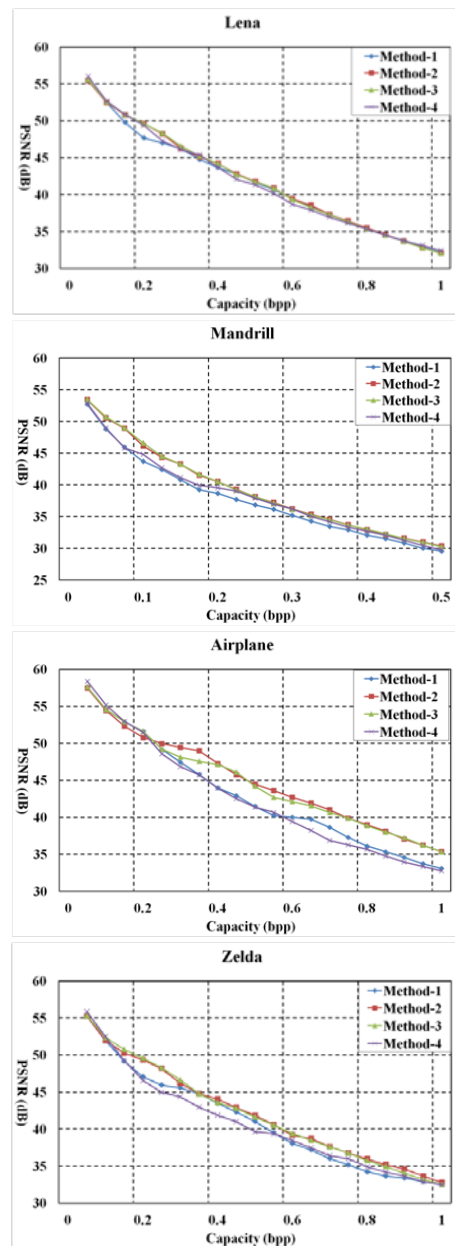


圖 14 多次嵌入之藏入量和 PSNR 比較

移，例如 Zelda 影像離峰值點最近的零值點都位於左方，因此落於該區間的像素值會被減 2，且從 Method-4 的實驗中可以發現，全部採用 H^{Min} 所產生的直方圖雖然能夠提升藏入能力，但是其影像品質卻比其它 3 個方法低，主要原因在於該方法能夠提升預測的精確度，並且增加峰值點可嵌入訊息的數量。Method-2 的方式在 Airplane 影像第一次嵌入時會往左找零值點 $Z=-39$ ，而第二次嵌入時會往右找零值

點 $Z=47$ ；Zelda 影像會分別找到左方 $Z=-22$ 和右方 $Z=29$ 。以此類推，讓同張影像在進行多次嵌入時進行像素互補，不會使像素值朝同一個方向多次位移，故可達到較高的 PSNR 值。

Method-3 的方式是朝著被位移像素個數最少的方向位移，當其中一方向的零值點都被位移成有數值的位置後，該方向之後找到的零值點就會比另一個方向的零值點離峰值點還要遠，且被位移的像素值也會隨之遞增，因此之後的位移方向就會朝另一個方向為主。例如 Airplane 影像第一次會選擇 PK 左方的 Z ，位移像素個數為 66,013，而第二次同樣會選擇 PK 左方的 Z ，位移像素個數為 53,448，因此左方的零值點會被不斷的填補，導致之後的嵌入回合右方位移像素個數會比左方的少，因此改變位移的方向。Zelda 影像的情況相同於 Airplane 影像。在對同一張影像進行多次的嵌入時，其預測誤差會不斷地被修改，使用 Chen 等學者提出的像素互補方式進行位移，可以在每次嵌入時將像素回補成趨近於原始像素的數值，故 Method-2 和 Method-3 會逐漸優越於其它的位移方式，尤其是在非常平滑的影像上，例如 Airplane 影像。

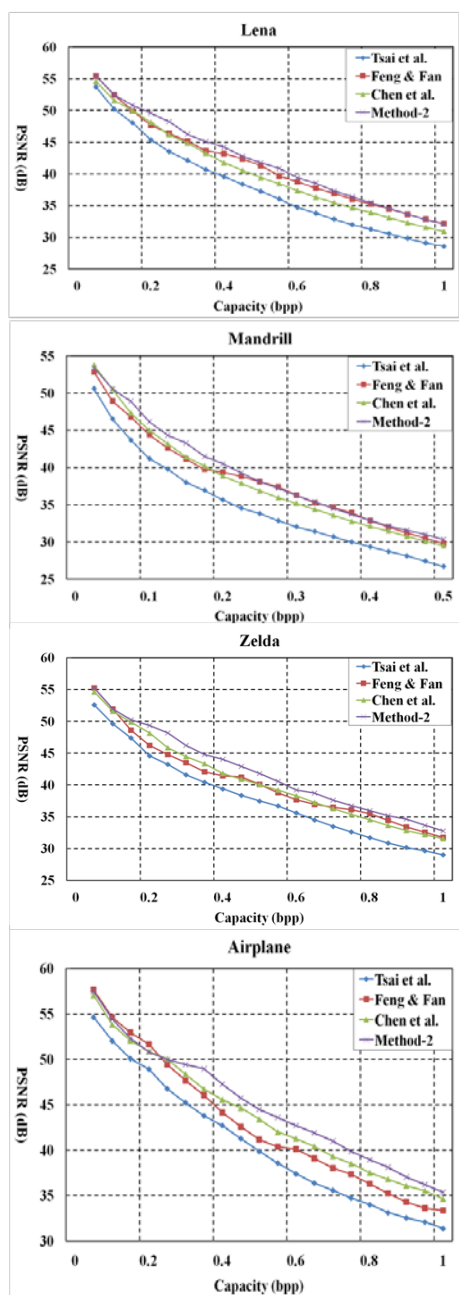


圖 15 與其他學者之藏入量和 PSNR 比較

4.2. 藏入量和影像品質

在本章節呈現所提方法與其它學者之比較結果。可以發現 Chen 等學者的方法能夠達到高資訊負載能力，尤其是非常平滑的 Washsat 影像，其負載能力高於其他學者將近 3 倍，但是 PSNR 值卻比其他學者的方法還差；而 Tsai 等學者的負載能力略遜於 Chen 等學者的方法，值得一提的是該方法同樣在 Washsat 影像有非常可觀的負載能力，且 PSNR 為能夠維持在 38.68 dB，明顯優越於 Chen 等學者的方法；

Feng 和 Fan 學者的延伸 Lukac 方法能達到高影像品質，尤其是複雜型的 Mandrill 影像，但是資訊負載能力並不如 Tsai 和 Chen 等學者的方法。

圖 15 為藏入量和影像品質之間的變化比較圖，本研究方法在多數影像上能夠保有一定水準的影像品質，在嵌入相同的資訊量時，與 Feng 和 Fan 學者相比之下會有顯著的效益，尤其是 Airplane 和 Zelda 和等較為平滑型影像。如上述分析可以瞭解，Tsai 和 Chen 等學者的線性預測結合像素互補位移的方式，能夠有效的提升每次嵌入的藏入能力，但是 PSNR 值卻不如其他學者的方法；而 Feng 和 Fan 學者的方法則適用於複雜型影像，當影像平滑區塊太多時，其 PSNR 值和藏入量卻不如其他學者的方法；本研究方法結合 Lukac 方法和延伸 Lukac 方法，並且透過 Chen 等學者的不對稱直方圖位移方式，能夠保有一定水準的資訊負載能力和影像品質，以應付不同類型的影像。

5. 結論

本研究利用 Chen 等學者的不對稱直方圖位移方式進行像素互補，並且結合 Lukac 預測方法和延伸 Lukac 預測方法，可以有效的提升資訊負載能力和影像品質。實驗結果可以發現，Chen 等學者的像素互補機制在進行多次嵌入時，能夠使位移後的像素再往另一個方向位移，達到互補的效果，尤其是平滑型影像的效果更為顯著。研究中結合適合預測平滑區塊的 Lukac 方法和適合預測複雜區塊的延伸 Lukac 方法，並且取得最大誤差值和最小誤差值進行直方圖位移，使其能夠應付不同類型的影像特性，提升資訊負載能力和影像品質。

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] G. Feng and L. Fan, "Reversible Data Hiding of High Payload Using Local Edge Sensing Prediction," *The Journal of Systems and Software*, Vol. 85, pp. 392-399, 2012.
- [4] D.C. Lou, C.L. Chou, H.Y. Wei, and H.F. Huang, "Active Steganalysis for Interpolation-Error Based Reversible Data Hiding," *Pattern Recognition Letters*, Vol. 34, No. 9, pp. 1032-1032, 2013.
- [5] J. Li, X. Li, and B. Yang, "Reversible Data Hiding Scheme for Color Image Based on Prediction-Error Expansion and Cross-Channel Correlation," *Signal Processing*, Vol. 93, pp. 2748-2758, 2013.
- [6] R. Lukac, K. Martin, and K.N. Plataniotis, "Digital Camera Zooming Based on Unified CFA Image Processing Steps," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 50, pp. 15-24, 2004.
- [7] 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.
- [8] B. Ou, X. Li, Y. Zhao, and R. Ni, "Reversible Data Hiding Based on PDE Predictor," *The Journal of Systems and Software*, Vol. 86, pp. 2700-2709, 2013.
- [9] 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.
- [10] C.L. Tsai, H.F. Chiang, K.C. Fan, and C.D. Chung, "Reversible Data Hiding and Lossless Reconstruction of Binary Images Using Pair-Wise Logical Computation Mechanism," *Pattern Recognition*, Vol. 38, pp. 1993-2006, 2005.
- [11] P. Tsai, Y.C. Hu, and H.L. Yeh, "Reversible Image Hiding Scheme Using Predictive Coding and Histogram Shifting," *Signal Processing*, Vol. 89, pp. 1129-1143, 2009.
- [12] J. Wen, J. Lei and Y. Wan, "Reversible Data Hiding Through Adaptive Prediction and Prediction Error Histogram Modification," *International Journal of Fuzzy Systems*, Vol. 14, No. 2, pp. 244-256, 2012.
- [13] C.h. Yang and M.H. Tsai, "Improving Histogram-Based Reversible Data Hiding by Interleaving Predictions," *IET Image Processing*, Vol. 4, No. 4, pp. 223-234, 2009.