

國立交通大學

管理學院(資訊管理學程碩士班)

碩士論文

以視覺品質衡量指標應用於小波為基礎
之彩色浮水印技術

Visual Quality Measurement for Wavelet Based Color Image

Watermarking Scheme

研究生：葉明釗

指導教授：蔡銘箴 博士

中華民國九十八年七月

以視覺品質衡量指標應用於小波為基礎之彩色浮水印技術

Visual Quality Measurement for Wavelet Based Color Image
Watermarking Scheme

研究生：葉明釗

Student : Ming-Chao Yeh

指導教授：蔡銘箴

Advisor : Min-Jen Tsai



A Thesis
Submitted to Institute of Information Management
College of Management
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science In Information Management
July 2009
Hsinchu, Taiwan, the Republic of China

中華民國九十八年七月

以視覺品質衡量指標應用於小波為基礎之彩色浮水印技術

學生：葉明釗

指導教授：蔡銘箴 博士

國立交通大學管理學院(資訊管理學程碩士班)

摘 要

本論文中，我們提出一套可視數位浮水印架構，以解決數位內容所有權保護與驗證之議題。為了能夠設計出擁有更佳視覺效果的可視數位浮水印，我們採用以人類視覺系統為基礎的視覺品質指標。

在設計可視浮水印系統時，比較重要的條件和需求為半透明性與強韌性，但這兩者互為取捨，本研究中，我們發現人類視覺系統 HVS (Human Visible System)-對比敏感函數 CSF (Contrast Sensitive Function) 與 雜訊可見函數(Noise Visibility Function) 可以在兩者之間取得一個適當的平衡點，透過 CSF 與 NVF 可以得知圖片全域與區域性的特性以便進行可視浮水印的嵌入，同時加入小波雜訊可視門檻值(DWT Noise Visibility thresholds) 調整浮水印加入的權重，使可視浮水印有較佳的視覺效果並兼任強韌性。為了能夠驗證以人類視覺系統為基礎的可視浮水印架構，我們利用視覺品質衡量指標 VSNR(Visual Signal-to-Noise Ratio) 以及 VIF(Visual Information Fidelity) 驗證可視浮水印。實驗結果顯示，我們產生的可視浮水印圖片比其他提出演算法有較好的視覺品質以及強健性，對於近年藉由影像重建理論(Image Recovery)抹除可視浮水印，也有較佳的抵抗能力。

關鍵詞 — 人類視覺系統，對比敏感函數，雜訊可見函數，可視浮水印，視覺品質衡量指標。

Visual Quality Measurement for Wavelet Based Color Image Watermarking Scheme

Student: Ming-Chao Yeh

Advisor: Dr. Min-Jen Tsai

Institute of Information Management
National Chiao Tung University

ABSTRACT

In this study, we propose an architecture based on digital watermarking techniques to solve the issue of copyright protection and authentication for digital contents. In order to design better visual effect of visible watermark image, we adopt the visual quality measure based on HVS (human visual system).

In order to get the best tradeoff between the embedding energy of watermark and the perceptual translucence for visible watermark, the contrast-sensitive function (CSF) and noise visible function (NVF) of perceptual model is applied which characterizes the global and local image properties and identifies texture and edge regions to determine the optimal watermark locations and strength at the watermark embedding stage. In addition, the perceptual weights according to the basis function amplitudes of DWT coefficients is fine tuned for the best quality of perceptual translucence in the design of the proposed watermarking algorithm. In addition we use VSNR and VIF to test the visible watermarking in order to prove the visual watermarking framework based on HVS. From the experimental results, our proposed technique not only improves the VSNR and VIF values and visual quality than other algorithms but also preserves the visibility of the watermark visible under various signal processing and advanced image recovery attacks.

Index Terms — HVS, CSF, NVF, VSNR, VIF, Visual Watermarking

誌 謝

兩年來的學習過程中，承蒙蔡銘箴老師不厭其煩的細心指導，培養學生獨立思考的能力、創新研究的精神與報告的技巧，在生活上也不時的給予關懷與建議，在此謹向吾師致上衷心的感謝與敬意。

本論文的完成，同時也要感謝口試老師劉敦仁教授、曾易聰博士在論文上的細心評閱與指正，讓本論文在內容上更為充實與完整。林志文學長的論文對我提供了一些新的想法，並且留下一些好用的程式協助我完成本論文的研究。

在撰寫論文這段時間裡也感謝實驗室的學姊以及學弟妹們，總是能夠在我需要幫助的時候，適時的提供意見與幫助，也協助我完成論文口試前後的各項準備工作。同學惠婷與俊儀在這段期間對我的鼓勵與關心，更是成為我一路走來毫不退縮的無形力量。

最後將此論文獻給我最敬愛的父母與家人，尤其是我親愛的妻子美媛，感謝妳在我求學這段時期全心全意給予我的支持與鼓勵，若不是家人長久以來的支持，不可能有我今天的小小成果。也將此論文獻給所有關心我的朋友，並致上最真誠的敬意與謝意。

葉明釗

2009年7月29日

謹於交通大學管理學院(資訊管理學程碩士班)

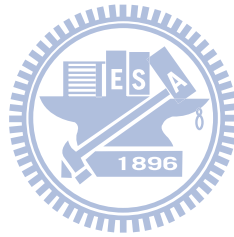
目 錄

頁次

摘 要	I
ABSTRACT	II
誌 謝	III
目 錄	IV
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究動機與目的	1
1.3 研究重點	3
1.4 論文架構	4
第二章 文獻探討	5
2.1 可視浮水印	5
2.2 影像認證與修改偵測	8
2.3 視覺品質衡量指標	9
第三章 影像認證與著作權保護演算法	11
3.1 人類視覺系統模型	11
3.1.1 CSF (Contrast Sensitive Function)	11
3.1.2 NVF (Noise Visibility Function)	14
3.2 DWT 雜訊偵測門檻	16
3.3 可視浮水印演算法	17
第四章 實驗結果與討論	21
4.1 視覺效果	26
4.2 PSNR (Peak Signal to Noise Ratio)	29
4.3 VSNR (Visual Signal-to-Noise Ratio)	30
4.4 VIF (Visual Information Fidelity)	31
4.5 JPEG 2000 Compression	32
4.6 Median Filter	37
4.7 ICA Image Recovery Attack	42
4.8 Tamper Detection	47
第五章 結論與未來展望	51
5.1 結論	51
5.2 未來展望	51
參考文獻	52

表 目 錄

表 1 The basic function amplitudes for a five-level 9/7 DWT	17
表 2 PSNR summary of watermarked color images	29
表 3 VSNR summary of watermarked color images.....	30
表 4 VIF summary of watermarked color images	31
表 5 PSNR summary of watermarked color images before and after JPEG 2000 Compression	33
表 6 VSNR summary of watermarked color images before and after JPEG 2000 Compression	34
表 7 PSNR summary of watermarked color images before and after median filter.....	38
表 8 VSNR summary of watermarked color images before and after median filter	39
表 9 PSNR summary of watermarked color images	47
表 10 VSNR summary of watermarked color images.....	47
表 11 VIF summary of watermarked color images	48



圖目錄

圖 1:Luminance CSF	12
圖 2:DWT CSF mask with 11 unique weights.	13
圖 3:The adequate modulation rate for each subband.	14
圖 4: $\beta_{\lambda,\theta}$ in different DWT level and orientation	18
圖 5:The flow chart of the proposed visible watermarking approach	20
圖 6: Two watermark images : (a) NCTU Logo (b) IIM Logo.....	21
圖 7: Lena NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach	22
圖 8: Lena IIM (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach ...	22
圖 9:Lake NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach	23
圖 10:Lake IIM (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach ..	23
圖 11:Peppers NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach	24
圖 12:Peppers IIM (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach	24
圖 13:Baboon NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach	25
圖 14:Baboon IIM (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach	25
圖 15:Lena NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach	26
圖 16:Lake NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach	27
圖 17:Peppers NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach	27
圖 18:Baboon NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach	28
圖 19:VIF process concept	31
圖 20:Lena JPEG2000 effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach	35
圖 21:Lake JPEG2000 effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach	35
圖 22:Peppers JPEG effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach	36

圖 23: Baboon JPEG effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach	36
圖 24: Lena median filter effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach.....	40
圖 25: Lake median filter effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach.....	40
圖 26: Peppers median filter effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach.....	41
圖 27: Baboon median filter effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach.....	41
圖 28: Lena ICA attack effect 1(a) Original 1(b) [9] watermark 1(c) ICA attack 1(d) ICA attack detail.....	43
圖 29: Lake ICA attack effect 1(a) Original 1(b) [9] watermark 1(c) ICA attack 1(d) ICA attack detail.....	44
圖 30: Peppers ICA attack effect 1(a) Original 1(b) [9] watermark 1(c) ICA attack 2(d) ICA attack detail.....	45
圖 31: Baboon ICA attack effect 1(a) Original 1(b) [9] watermark 1(c) ICA attack 1(d) ICA attack detail.....	46
圖 32: Tamper Detection (a) watermarked image (b) tampered image (c) tampering detection	49
圖 33: Tamper Detection (a) watermarked image (b) ICA attack tampered image (c) tampering detection	50

第一章 緒論

1.1 研究背景

隨著各種資訊技術的進步，網際網路快速發展，數位資訊媒體越來越多。在資訊數位化技術的進步下，人們可以輕易的對數位資訊進行編輯、複製，並透過網路快速的傳送至世界各地。在這樣的背景下，對於數位內容的保護也愈來愈重要，如何避免各種數位內容的非法複製、散佈或提供不被授權的下載等侵害智慧財產權的情事發生，便成為保護智慧財產權的一個重要課題。

智慧財產權包含了心靈創作的創新、文學、藝術、符號、名稱以及影像等被應用在商業領域。智慧財產權可以大致分成以下兩類[1]：

- **Industrial Property:** 包含了專利、商標、工業設計、地理資訊等。
- **Copyright:** 包含了文學、藝術工作、小說、詩詞、戲劇、音樂、繪畫、攝影、雕塑以及建築設計等。

數位內容的創作者關心創作權益的智慧財產權，並期待能夠有一個完善的確認方式，以明確的認定數位內容的所有權歸屬問題，進而在有足夠保障的機制下，增進數位內容創作相關產業的發展。也因此，將浮水印嵌入數位多媒體創作以保障智慧財產權的數位浮水印技術也就愈來愈受到重視了。

1.2 研究動機與目的

由於資訊數位化技術的快速進步下，多樣的多媒體內容被數位化並且可以容易的透過合法或是非法的管道複製、散播，且完全不會降低內容的品質。為了避免數位內容被竄改，重製以及保護智慧財產權成了最近這些年來的重要課題。在最近二十年內，軟體、多媒體以及數位內容產業，不論是否透過網際網路都指望得到有效的智慧財產權保護，特別是正

處於革命階段的數位娛樂與市場。

數位影像的防護技術可以概分為兩類，分述如下：

- 影像加解密技術：

加密技術如 DES 或 RSA 被直接用於保護數位多媒體內容，在這樣的密碼系統中，只有擁有解密金鑰的合法使用者才可以解開內容並且使用。但是數位內容的提供者依然沒有方法可以追蹤合法使用者對於數位多媒體內容的複製與傳送，也因此一般的密碼系統並不是解決問題的好方法。

- 數位浮水印技術：

數位浮水印[2]在十年間已經被廣泛的研究與注意用來保護數位多媒體內容的智慧財產權，因為它讓嵌入秘密資訊來辨識數位多媒體內容擁有人成為可能。數位浮水印相關研究所描述的方法與技術可以隱藏如一串數字順序或是可以辨識的樣板在數位多媒體內容中，特別是圖片、影片與聲音。



已經有非常多的研究者提出多種的數位浮水印技術[3]，一種最為重要的分類方式是將數位浮水印演算法依照浮水印在數位內容中的視覺呈現，區分為可視的(Visible)與不可視的(Invisible)浮水印。

可視數位浮水印以一種更主動的方式來保護智慧財產權，它不僅僅避免數位內容被剽竊，更可以宣揚數位內容所屬的智慧財產權。數位內容加入可視浮水印透過可以辨識的樣板以不顯眼的方式顯示智慧財產權擁有者的資訊。因此可視浮水印的技術必須要能夠保留數位內容的細節，而且可以讓人能夠辨識出浮水印，甚至必須能夠抵抗各種攻擊，讓移除浮水印非常困難甚至於無法移除。

1.3 研究重點

一個有效的可視浮水印演算法通常需要滿足以下幾個需求，這些需求包含了

1. 可視浮水印在被嵌入的數位影像中必須是一般人視覺上明顯可辨識的，即使這個人是個色盲。也就是說，可視浮水印必須可以同時存在於灰階的影像以及彩色的影像中。
2. 可視浮水印必須能夠調整嵌入時的浮水印強度以適應各種內容的數位影像，可視浮水印可以被要求用顯眼的或是不顯眼的方式來加入數位影像。這不僅僅只是保護數位影像不被未合法授權使用，也可以讓數位影像不讓人感興趣或是想要觀看。
3. 可視浮水印的樣板影像必須是可以看的見的，而且必須是一種可辨識的符號讓人可以識別數位影像的擁有者或是提供者。
4. 可視浮水印嵌入的數位影像原始影像的細節都應該要能夠被保留，也就是說被嵌入的像素與未被嵌入的像素間，應該只有不同的亮度值，而擁有相同的色度與彩度。
5. 可視浮水印必須要能夠很困難移除或是能夠強健的對抗各種攻擊，這裡指的強健是需要花費大量成本以及人力超過購買合法的數位影像來使用。

在本篇論文中，我們將提供一個新的可視浮水印保護數位影像架構，我們將展現一個基於雜訊減少(Noise reduction)與人類視覺系統(Human Visible System, HVS)的模型，可以在嵌入浮水印能量與視覺效果中達到一個平衡。在 HVS 的模型中，我們將使用到 CSF(Contrast Sensitive Function) 以及 NVF(Noise Visibility Function) 以及 DWT(Discrete Wavelet Transform) 雜訊減少。我們將找到更好的可視浮水印架構在影像品質、視覺通透性與抵抗攻擊的強健性都有更佳的效果。在影像品質的指標方面，我們除了使用常見的 PSNR(Peak Signal to Noise Ratio) 指標，也加入了針對人類視覺效果的 VSNR(Visual Signal-to-Noise Ratio) 指標與 VIF(Visual Information Fidelity) 指標。

1.4 論文架構

本論文共分為五個部份，探討如何基於人類視覺系統實做出一個具有一定強韌性且保持影像品質的可視浮水印，論文的各章節架構簡述如下：

第一章、緒論：

說明數位影像在智慧財產權保障方面的問題，以及可視數位浮水印所能夠提供的解決方法，並對於整篇論文的研​​究方向與目的作概略性的陳述。

第二章、文獻探討：

簡述可視數位浮水印的定義、種類、特性、實作上的演算法類型，人類視覺系統的模式與特性。

第三章、影像認證與著作權保護演算法：

介紹參考文獻[47]所提出的可視數位影像浮水印演算法，並且說明浮水印嵌入的機制與流程。



第四章、實驗結果與討論：

使用各種的影像數位處理攻擊方式，對於實驗影像進行破壞，以測試本論文所提出之數位影像浮水印演算法的安全性與強韌性。使用多種的參考指標來驗證影像品質的提升。

第五章、結論與未來展望：

針對實驗結果作出結論，以說明本論文之貢獻，提出未來可能之研究方向。

第二章 文獻探討

2.1 可視浮水印

可視數位浮水印被用來保護數位多媒體，如聲音、影像、影片等智慧財產權包含了幾種的使用，例如數位多媒體在展覽會、數位圖書館、廣告或是遠距網路教學等，以防止被非法的複製。從研究文獻探討上發現，可視浮水印比不可視浮水印受到更多的關注 [9]，因為可視浮水印研究不僅僅只是空間域或是轉換域方面的研究，也有許多的浮水印移除方面的討論。我們將在這個章節明確的探討不同的可視浮水印技術，而在第四章討論各種移除浮水印的方法。

Braudaway et al. [4] 提出了可視數位浮水印早期的研究，他採用了非線性方程式在空間域中對影像的明亮度修正，在這個架構中浮水印影像的維度相同於原始數位影像維度，浮水印影像的影像明亮度可以被分為透明與不透明的像素與原始的數位影像以一對一像素對應。原始數位影像的像素在浮水印影像不透明的部份，使用非線性公式增加或是減少像素一定比率的明亮度，將浮水印嵌入到數位影像中，在原始數位影像對應到浮水印的透明區域的像素則是與嵌入浮水印前的明亮度一致。他們定義的非線性公式使用了 CIE 1976 ($L^*u^*v^*$)與 CIE ($L^*a^*b^*$)色彩空間，公式中也有多樣的參數讓浮水印更加難以被移除。

Meng and Chang [10]則是提出了相似於 Braudaway 的方法，改用 discrete cosine transform (DCT)空間域的方式來加入可視浮水印，並且將此方法應用在影片中。Mohanty et al. [11] 則是提供了一種嵌入雙浮水印的方法，將可視浮水印與不可視浮水印嵌入到同一張數位影像中。可視浮水印可以表明影像的智慧財產權擁有人，不可視浮水印可以偵測到任何對數位影像有意或是無意的篡改。Chen [12]提出了一種基於統計方法的灰階

可視浮水印嵌入機制，一開始原始影像被分成許多相同的區塊，並且計算出每個區塊的標準差，區塊標準差的值將會決定灰階浮水印被嵌入到原始影像的量。

Kankanhalli et al. [13]提出了 DCT 空間域的可視數位影像浮水印演算法，首先原始影像與浮水印影像都先分割成 $8*8$ 的區塊，接著將每一個區塊透過對明亮度失真與保留的敏感性分析區分成 8 種等級，並且針對區塊的分類調整浮水印嵌入的強度。因此較強的浮水印將會被加在影像較多樣的高頻區域。Kankanhalli et al. [14]則是提出了上述方法的修改，使得浮水印嵌入後有更佳的強健性。

Hu and Kwong [15-16]提供了一種合適的小波轉換域可視浮水印演算法，透過 truncated Gaussian function 來估計浮水印影像嵌入時明亮度遮罩的影響效果。基於影像的特性，他們一開始將原始影像與浮水印影像的像素區分出視覺感知等級，透過分類資訊將浮水印像素聰明的嵌入到原始影像中。在高頻的子頻區中，他們的焦點放在影像的特性上，在低頻的子頻區中，他們則是使用 truncated Gaussian function 來估計影像嵌入時明亮度遮罩的影響效果。Yong et al. [17]也提出了一種離散小波轉換域(DWT)的半透明數位浮水印並且使用了錯誤修正碼(error-correct code)來改善對抗各種攻擊的能力。

以上的每一個機制並沒有專注於更好的影像特性相關上的分類，以及複雜精細的可視浮水印遮罩模型。也因此，Huang and Tang [9]展示了一種透過 HVS 機制的對比感知可視浮水印架構，他們首先在離散小波轉換域中計算 CSF(contrast sensitive function)遮罩，接著他們使用平方根函數(square function)每一個子頻中的遮罩權重，最後透過人類視覺系統(HVS)架構的影像特徵感知方法對每一個影像區塊分類，並且給予不同比率的數位浮水印嵌入強度。然而他們的架構上沒有包含到以下的幾點問題：

1. 在小波轉換域中當應用 HVS 的 CSF 時，基礎函數(basis function)在小波轉換扮演了很重要的腳色。
2. 浮水印嵌入的因子著重在低頻給予更高的權重替代中頻或是高頻的區域。

3. 浮水印嵌入的位置特徵與區塊分類間的相互關聯性。

第一個問題，在小波轉換域中應用 HVS 的 CSF 時，當小波轉換基礎函數在離散小波轉換中是影響視覺效果很重要的一個因子時，需要再參考研究[18][19][20]。關於第二點，浮水印嵌入在低頻區域時會有較高的失真程度，另外在高頻區的浮水印相對於低頻區域則較難抵擋一般影像數位處理的攻擊。第三點，在[9]中平坦、邊緣、紋理的區塊分類，小波參數的區域以及整體特性都需要被考慮到。



2.2 影像認證與修改偵測

有許多基於數位浮水印技術的內容驗證架構被提出來，一些易碎形浮水印技術 (fragile watermark) [7], [21], [22], [23], [24]通常藉由安全性雜湊函數檢查碼的概念 (e.g. MD5, SHA160)來驗證影像的完整性，它們可以正確的偵測到區域修改，但是對於可接受的修改如 JPEG 壓縮，頻道 AWGN 如同惡意攻擊。因此易碎形浮水印比半易碎形浮水印(semi-fragile watermark) 較無實用價值。所以本篇論文中，我們將採用半易碎浮水印作為影像認證與修改偵測的架構。

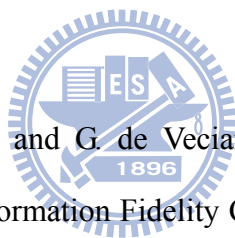
Kundur and Hatzinakos [26]提出了第一個半易碎浮水印架構的研究，他們藉由量化離算小波轉換域的參數將浮水印嵌入影像中，他們聲稱這個修改偵測方法可以同時偵測到區域空間以及頻率域的修改，不像之前提出的一些方法都只能針對空間域的修改做偵測。他們只提供了空間域的修改位置而沒有提供更多影像失真的一般性特徵，他們也使用了以統計為基礎的修改偵測函數來偵測修改與進行認證。

Ding et al. [31]提出了基於小波的雜湊半易碎浮水印(chaotic semi-fragile watermark) 架構主要利用了雜湊表以及奇偶量化。他們的架構可以在保有高噪訊比(PSNR)的情況下偵測並且指出區域攻擊的位置，為了允許更多的 JPEG 壓縮以及附加 AWGN 的能力，在[32]提出了一個認證區域影像(ROI region of interest of image)半浮水印架構。

2.3 視覺品質衡量指標

由於傳統的 PNSR 指標並沒有考量到人類的視覺感知，因此許多基於人類視覺系統的視覺品質衡量指標，在許多人的努力下相繼被提出。本論文認為，這些基於人類視覺系統的視覺品質衡量指標對於可視浮水印的視覺品質衡量比傳統的 PSNR 品質指標更加有代表性。因此，我們採用了基於人類視覺系統的視覺品質衡量指標來驗證本論文的可視浮水印架構。

Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli [48] 提出一種結構相似法 (SSIM) 衡量指標，SSIM 是一種基於結構資訊衡量原始影像與處理後影像之間相似程度的方法。衡量值越接近 1 代表影像的相似程度越高，也就是說影像經過處理後失真程度越低。



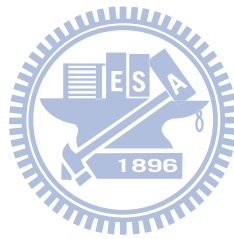
H. R. Sheikh, A. C. Bovik, and G. de Veciana [49] 提出了一種基於人類視覺系統 (HVS) 的視覺衡量指標 IFC (Information Fidelity Criterion)，IFC 透過小波轉換子頻參數的混合高斯邊緣密度以及可視品質量化的運算，求得原始影像與失真影像之間的差異。

N. Damera-Venkata, T. D. Kite, W. S. Geisler, B. L. Evans, and A. C. Bovik[50] 則是提出了 NQM (Noise Quality Measure)，NQM 將以下四點列入考慮：(1) 對比感知在影像上的變動程度；(2) 區域明亮度平均值的變動程度；(3) 對比在空間頻率域的交互影響程度；(4) 對比遮罩的影響程度。最後透過 HVS 模型求得原始影像與失真影像之間的差異。

Damon M. Chandler, Member, IEEE, and Sheila S. Hemami [45] 提出了一種基於小波轉換以及人類視覺系統特性而設計的視覺指標，第一個步驟先運算影像失真是否超過對比感知的門檻值，如果尚未超過門檻值則被視為完全沒有失真，並且不需再計算下去，反之則進行第二步驟的運算。第二步驟運算中則透過低階視覺對比感知屬性值以及中階

的視覺屬性再次運算求得影像的失真程度。VSNR 透過兩階段的運算方式來偵測影像失真的程度。VSNR 的數值越大，代表影像的視覺品質越佳以及失真程度越少。

H. R. Sheikh and A. C. Bovik [46] 提出了一種探索影像資訊以及視覺品質之間的連結的 VIF 指標，它先將原始影像經過人類視覺系統頻道 (HVS Channel) 處理，然後將失真影像先經過失真頻道 (Distortion Channel) 處理後再送到人類視覺系統頻道中處理，最後得到人類大腦能夠辨識的失真並計算出 VIF 的指標。VIF 的數值越接近 1 代表失真程度越低。



第三章 影像認證與著作權保護演算法

3.1 人類視覺系統模型

可視數位浮水印架構中最重要的需求就是半透明性與強健性，可是很不幸的他們彼此互相衝突。假如我們增加了浮水印的能量來加強強健性，我們會得到有缺陷的半透明性。因此我們必須減少浮水印的能量來得到較好的視覺半透明性，也因為這樣浮水印抵抗有意或是無意的數位處理攻擊的能力變差了。我們發現人類視覺系統(Human Visual System, HVS)是一個關鍵因素提供了較佳的強健性與視覺半透明性。

有許多研究已經深入探討與了解人類視覺系統也提出了關於人類如何看這個世界的數學模型。Psychovisual 的研究顯示了人類視覺在空間頻率域每個子頻(subbands)中有不同的敏感性，近來許多研究者也已經將這項發現加入到數位浮水印的研究中。在數位浮水印架構中，我們需要一個視覺上融合了人類視覺系統元素的好影像品質以及一個較能抵抗攻擊的強健浮水印。一般人類視覺系統是由 JND(Just Noticeable Difference) 門檻的相關性與非相關性所組成，因此這篇研究下面將會解釋人類視覺系統中對比感知函數(contrast sensitive function, CSF)與雜訊可視函數(noise visibility function, NVF)的整合。

3.1.1 CSF (Contrast Sensitive Function)

對比感知函數描述了人類對空間頻率域的視覺敏感性，Mannos and Sakrison [33]最先提出了影像明亮度(灰階)的 CSF 模型如下：

$$H(f) = 2.6 * (0.0192 + 0.114 * f) * e^{-(0.114 * f)^{1.1}} \quad (1)$$

這裡 $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ 是空間頻率可視角度(cycles/degree)， f_x 以及 f_y 分別是空間頻率的水平與垂直方向，圖 1 描述了正規化空間頻率域中人類視覺系統對明亮度特性的對比

敏感度函數(CSF)曲線。我們可以看到在正規化空間頻率域中人類視覺系統最敏感的區域在 0.025 與 0.125 之間，低的敏感區域在低頻與高頻之間。因此由 CSF 的結論可以用來發展一個簡單的與影像獨立的人類視覺系統模型。

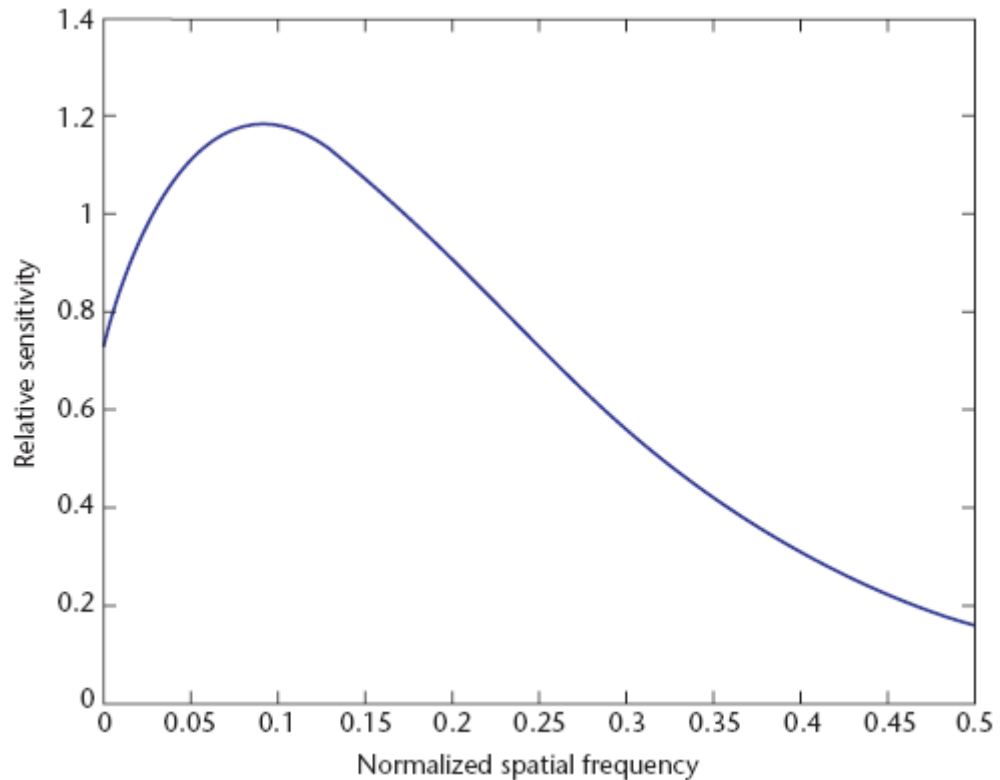


圖 1:Luminance CSF

對比感知函數遮罩(CSF Mask)[18][19]是把對比感知函數加入到離散小波域(DWT Domain)的一種方法。對比感知函數遮罩提出了取決於視覺上重要性的小波參數權重計算方法。一些將對比感知函數曲線視覺上重要性轉換成對比感知函數遮罩的良好設計[18]如圖 2，Huang and Tang [9]使用了相同的方法讓對比感知函數遮罩的 11 個權重放到離散小波轉換的 5 個階層小波轉換上。圖 3 顯示了離散小波轉換的對比感知函數遮罩 11 個權重在每個子頻上。

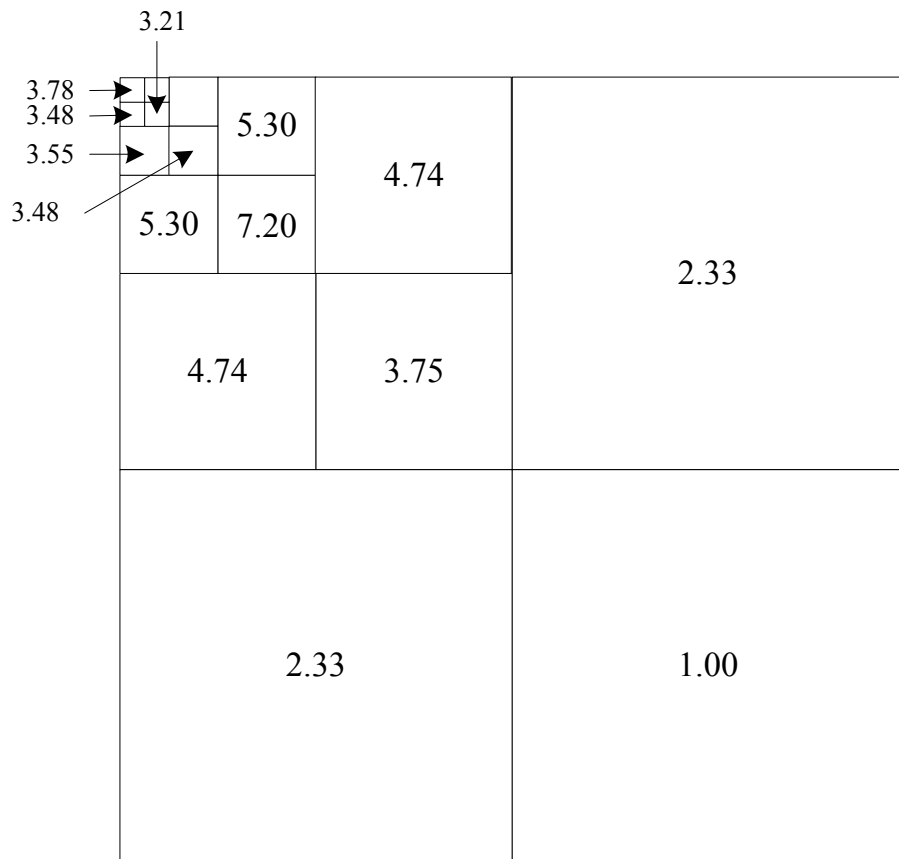


圖 2:DWT CSF mask with 11 unique weights.

在 5 階的金字塔型離散小波轉換的分解，人類視覺系統最敏感的區域落在中頻的位置(level 3)，不敏感的區域則是在兩端(level1, leve2, level4, level5)。[9]中的平方函數 (Square Function)提供了近似於對比感知函數遮罩的效果。

每個子頻的適當修改率 β^λ 定義如下：

$$\beta^\lambda = 0.01 + \frac{(7.20 - r^\lambda)^2}{7.20^2} \quad (2)$$

在這裡 λ 代表了分解的階層， r^λ 則是圖 2 中對比感知函數曲線視覺上重要性的小波參數權重。圖 3 顯示了每個子頻的適當修改率 β^λ ，第三層有最小的適當修改率。

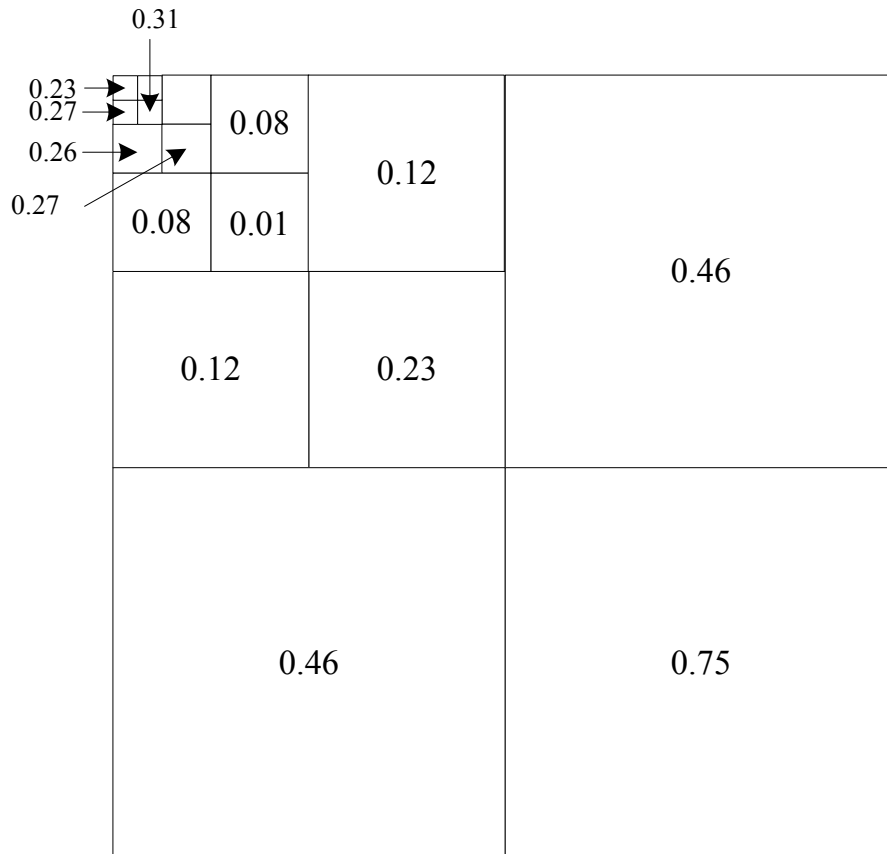


圖 3: The adequate modulation rate for each subband.

3.1.2 NVF (Noise Visibility Function)

許多浮水印嵌入的架構因為忽略了原始影像的區域特性而加入了相同強度的浮水印，導致整張影像中散佈著隨機的雜訊，在影像平滑的區域造成了視覺上的缺陷。S.Voloshynovskiy et al. [34]提出了一種基於雜訊可見函數(NVF)對於影像的區域性質與定義紋理、邊緣位置的機率研究。當區域變數小的時候影像是平滑的，當區域變數大的時候則是邊緣或是複雜紋理的區域。

由於人類眼睛對於影像平滑區域的改變比邊緣區域敏感，因此我們可以在邊緣區域以及紋理複雜的區域增加浮水印的強度而在平滑區域減少浮水印的強度，依然可以保持相似的 PSNR 值。這使我們可以在浮水印嵌入階段決定最佳的浮水印強度與位置。因此 NVF 的概念可以被使用來發展一個基於人類視覺系統(HVS)的浮水印影像。

以下說明三種的雜訊可視函數(NVF function)：

1. NVF Function with Non-Stationary Gaussian Model:

$$NVF(i, j) = \frac{1}{1 + \sigma_x^2(i, j)} \quad (3)$$

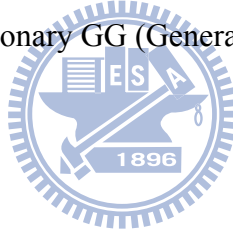
With

$$\sigma_x^2(i, j) = \frac{1}{(2L+1)^2} \sum_{k=-L}^L \sum_{l=-L}^L (x(i+k, j+l) - \bar{x}(i, j))^2$$

$$\bar{x}(i, j) = \frac{1}{(2L+1)^2} \sum_{k=-L}^L \sum_{l=-L}^L x(i+k, j+l)$$

在這裡 L 是取樣視窗寬度， $\sigma_x^2(i, j)$ 則是取樣視窗中央小波參數的區域變異數，因此 NVF 與影像區域性質的區域變異數成反比關係。

2. NVF Function with Stationary GG (Generalized Gaussian) Model:



$$NVF(i, j) = \frac{w(i, j)}{w(i, j) + \sigma_x^2} \quad (4)$$

在這裡 $w(i, j) = \gamma[\eta(\gamma)]^\gamma \frac{1}{\|r(i, j)\|^{2-\gamma}}$ 與 σ_x^2 是原始影像的全域變異數， $\eta(\gamma) = \sqrt{\frac{\Gamma(\frac{3}{\gamma})}{\Gamma(\frac{1}{\gamma})}}$ ，

$\Gamma(t) = \int_0^\infty e^{-u} u^{t-1} du$ (gamma function) 以及 $r(i, j) = \frac{x(i, j) - \bar{x}(i, j)}{\sigma_x}$ ， γ 是外型參數並且

$r(i, j)$ 被區域平均值與區域變異數所定義。在大多數的影像中，外型參數介於 $0.3 \leq \gamma \leq 1$ 之間。

3. NVF Function with Empirical Model:

$$NVF(i, j) = \frac{1}{1 + \theta \sigma_x^2(i, j)} \quad (5)$$

在這裡 $\theta = \frac{D}{\sigma_{x \max}^2}$ 是一個調整參數， $\sigma_x^2(i, j)$ 是區域變異數， $\sigma_{x \max}^2$ 是最大的區域變異

數， $D \in [50, 100]$ 是實驗獲得的參數。

3.2 DWT 雜訊偵測門檻

為了能夠進一步改善人類視覺系統(HVS)模型的影像品質，關於離散小波轉換係數的門檻值偵測也應該被研究。A.B. Watson, et al. [20] 提出了一個偵測離散小波轉換係數門檻值的數學模型，公式中包含了階層、方向、以及顯示的視覺上解析度。公式如下：

$$\log Y = \log a + K (\log f_\lambda - \log g_\theta f_0)^2 \quad (6)$$

在這裡 a 是由 $g_\theta f_0$ 空間頻率所決定的最小門檻值， f_λ 則是空間頻率的分解階層 λ ， g_θ 是藉由方向函數一定數量而平移的最小門檻值，表格顯示了 5 階離散小波轉換的基礎函數振幅，在本篇論文中，我們使用 $A_{\lambda, \theta}$ 來描述基礎函數振幅， λ 是離散小波轉換分解階層， θ 則是方向。

表 1 The basic function amplitudes for a five-level 9/7 DWT

Orientation	Level				
	1	2	3	4	5
LL	0.62171	0.345374	0.18004	0.0914012	0.0459435
HL	0.672341	0.413174	0.227267	0.117925	0.0597584
LH	0.672341	0.413174	0.227267	0.117925	0.0597584
HH	0.727095	0.494284	0.286881	0.152145	0.0777274

3.3 可視浮水印演算法



基於上面的討論，我們實作了基於對比敏感度函數的可視浮水印並且發現了對比敏感度函數的平方函數在影像低頻區內加入更多權重的浮水印參數值。低頻區中加入的浮水印參數值導致了較高的影像失真，因此我們使用離散小波轉換的雜訊偵測門檻的概念來調整對比敏感度函數的浮水印嵌入權重值。

$$T_{\lambda\theta} = MT_{\lambda\theta} \text{ if } MT_{\lambda\theta} > DT_{\lambda\theta}, MT_{\lambda\theta} = DT_{\lambda\theta} \quad (7)$$

其中 $T_{\lambda\theta}$ 為新的離散小波轉換浮水印嵌入的權重值， $MT_{\lambda\theta}$ 為對比敏感度函數計算的離散小波轉換浮水印嵌入的權重值， $DT_{\lambda\theta}$ 則是離散小波轉換的雜訊偵測門檻。透過公式我們可以計算出新的離散小波轉換浮水印嵌入的權重值如圖 4：

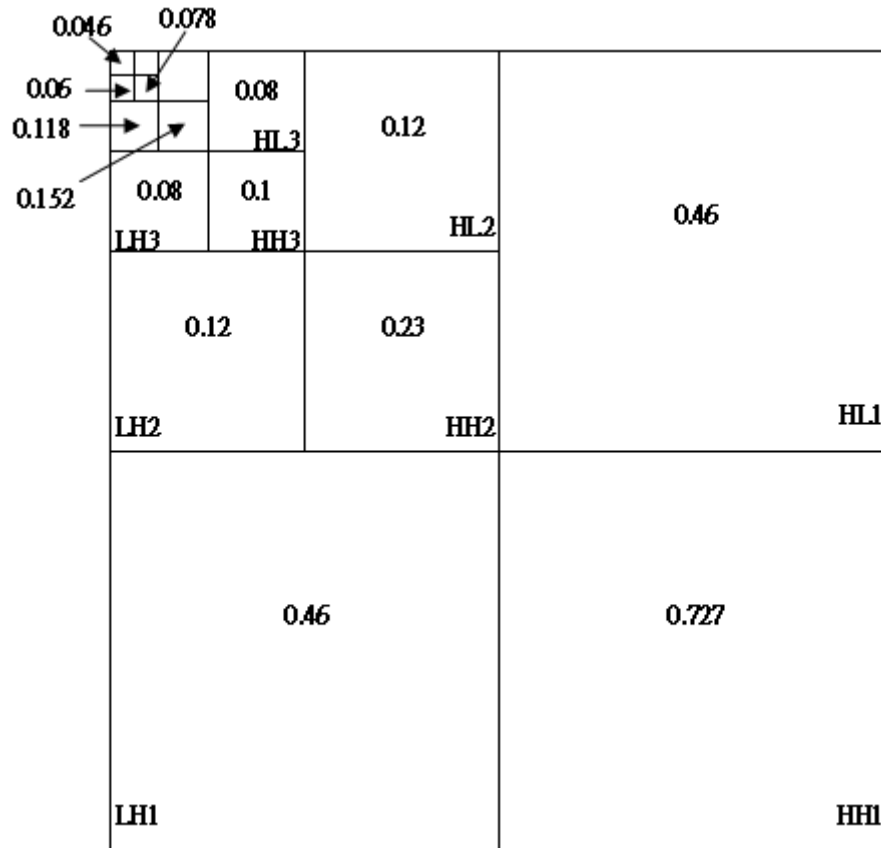


圖 4: $\beta_{\lambda,\theta}$ in different DWT level and orientation

為了更進一步的改善在[9]中影像區塊特性簡單的三種分類，離散小波轉換的區域特性也必須被考慮進來，在我們的架構中，我們使用了雜訊可見函數(NVF)的隨機影像模型來定義影像區域特性為平滑、邊緣或紋理並且作為浮水印加入的應用。我們也發現不變動高斯模式(stationary GG)最適當且接近浮水印嵌入應用且形狀參數 $\gamma = 0.65$ ，視窗寬度為 1。完整的可視浮水印演算法被整理如下且流程圖如圖 5 所示：

1. 原始影像被從 RGB 轉換到 YCbCr 的色彩空間域格式。
2. 使用[20]中 Bi9/7 過濾器計算原始影像 Y 組成與灰階浮水印的 5 階 2D 離散小波轉換參數值，如果浮水印影像與原始影像的寬高不相同時，必須調整大小與原始影像相同。
3. 使用下面的公式修改原始影像離散小波轉換的參數值。

$$\begin{cases} \beta_{ij} = 1 - NVF \text{ if } 1 - NVF > P \times T_{\lambda,0}, 1 - NVF = P \times T_{\lambda,0} \\ \alpha_{ij} = 1 - 0.7\beta_{ij} \end{cases} \quad (8)$$

其中 α_{ij} 為原始影像加入強度的權重值， β_{ij} 為浮水印加入強度的權重值， NVF_{ij} 為區域影像雜訊可見函數值， $T_{\lambda,0}$ 離散小波轉換浮水印嵌入的權重值， P 為浮水印嵌入強度的調整參數。

新的浮水印嵌入公式如下：

$$X'_{ij} = \alpha_{ij} \times X_{ij} + \beta_{ij} \times S_{ij} + NVF_{ij} \times K \times S_{ij} \quad (9)$$

其中 X'_{ij} 為浮水印嵌入後影像小波參數值， S_{ij} 是浮水印影像的小波參數值， K 為原始影像平滑區加入的浮水印影像強度調整參數

4. 將修改過的離散小波轉換參數值反轉回嵌入浮水印後的原始影像 Y 組成部分。
5. 將影像由 YCbCr 色彩空間域轉換為 RGB 格式。

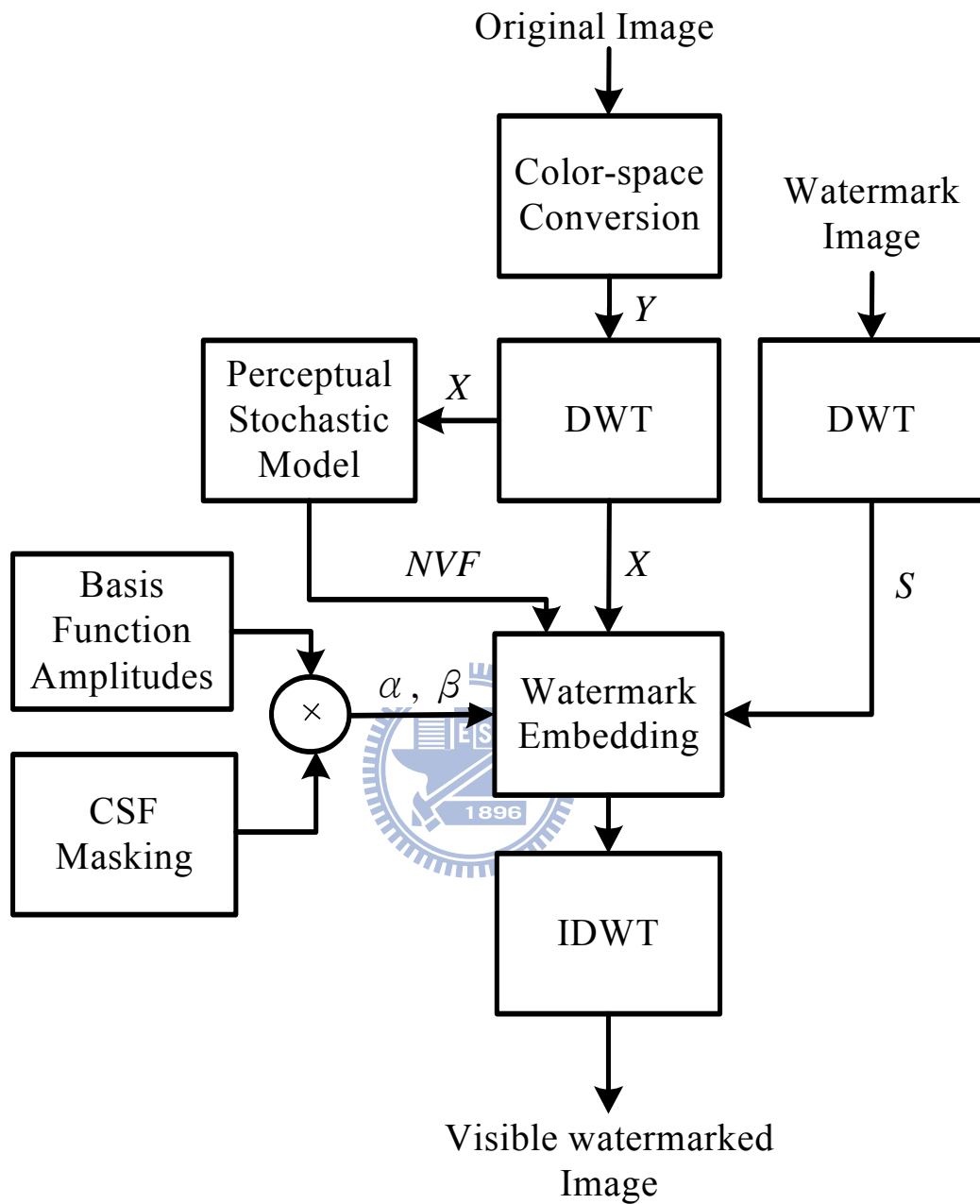


圖 5: The flow chart of the proposed visible watermarking approach

第四章 實驗結果與討論

我們實作了本篇論文提出的可視影像浮水印嵌入機制，並且使用 USC 的影像資料庫[36]一般的彩色影像做為原始影像，由於目前對於可視浮水印系統尚未有很絕對的評估標準，所以使用 Huang and Tang [9]以及 Chih-Wen Lin[47]提出的方法進行比較。在這邊我們採用了 512 x 512 的彩色影像，在 Huang and Tang [9]的方法中並未提及他們分類影像區塊的門檻值，在這邊我們使用 $T1=1$ 與 $T2=350$ 來實作他們的方法。

我們使用了兩個灰階影像做為浮水印分別為圖 6 (a) 交通大學校徽與圖 6 (b) 交通大學資訊管理研究所所徽，兩張影像皆為 512 x 512。圖[7-14] 的 (a) 顯示了原始影像，名稱分別為 "lena"、"lake"、"pappers"、"baboon"。圖[7-14] 的 (b) 顯示了 Huang and Tang [9]提出的方法，圖[7-14] 的 (c) 顯示了 Chih-Wen Lin[47]提出的方法，圖[7-14] 的 (d) 則是本篇論文提出的方法。

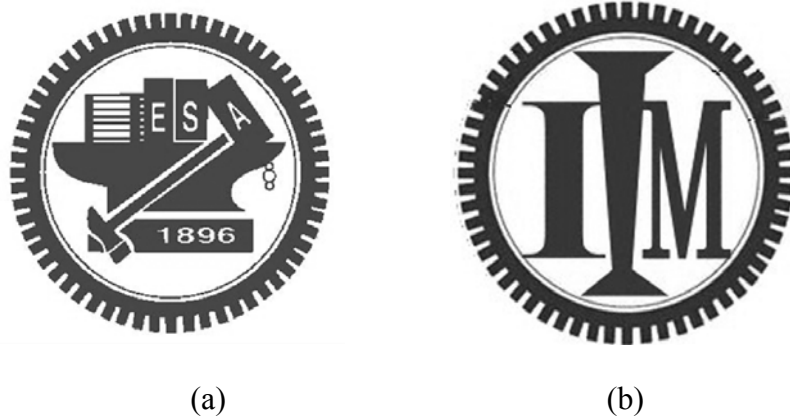


圖 6: Two watermark images : (a) NCTU Logo (b) IIM Logo



圖 7: Lena NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach



圖 8: Lena IIM (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

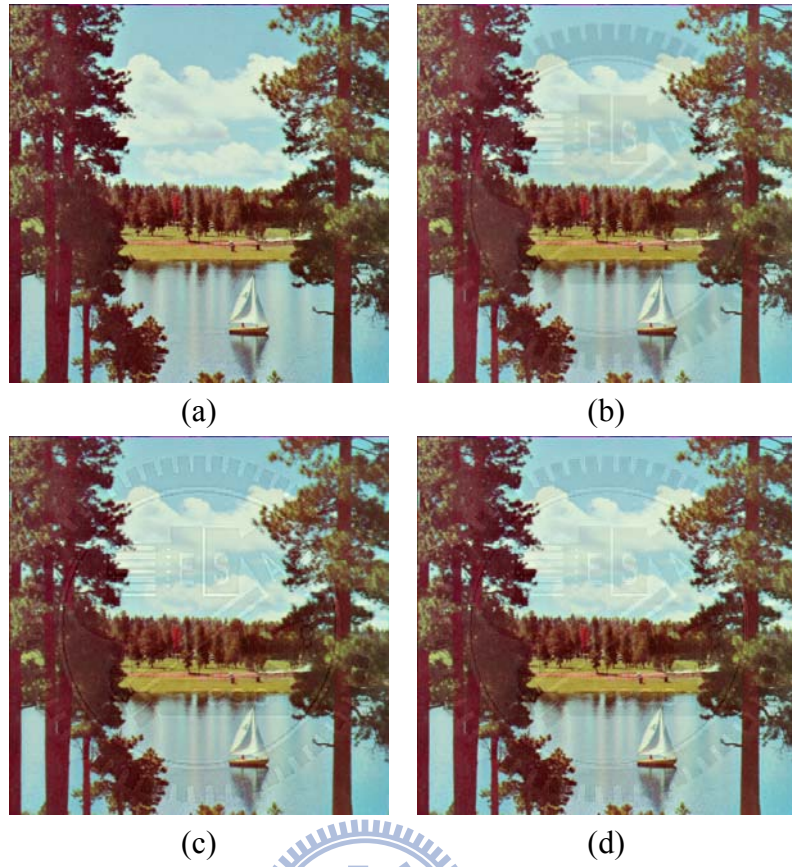


圖 9: Lake NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

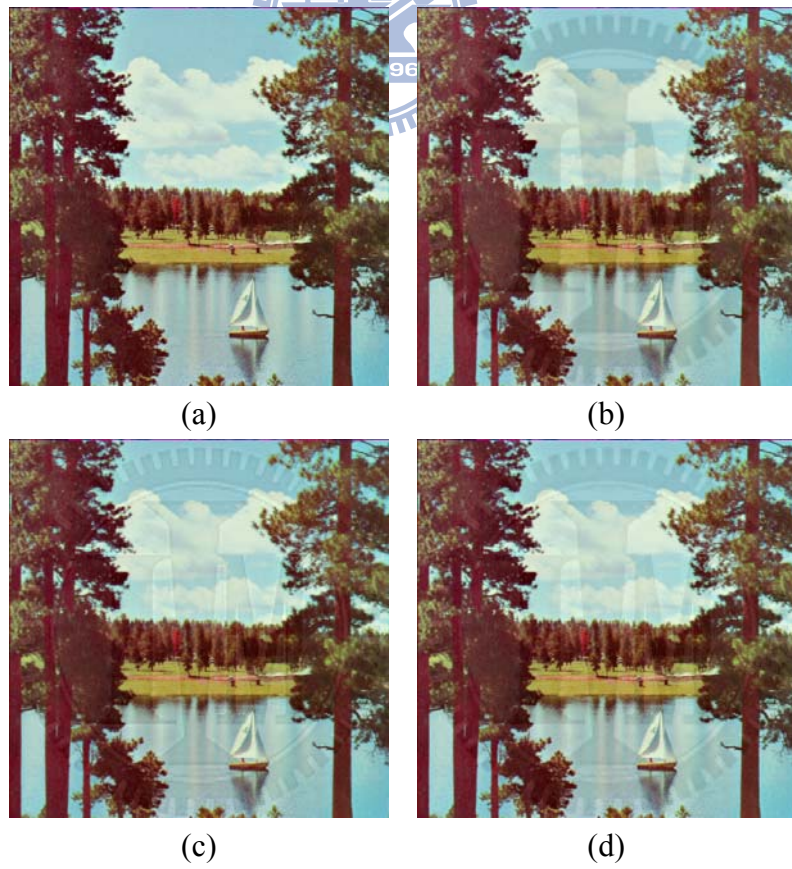


圖 10: Lake IIM (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

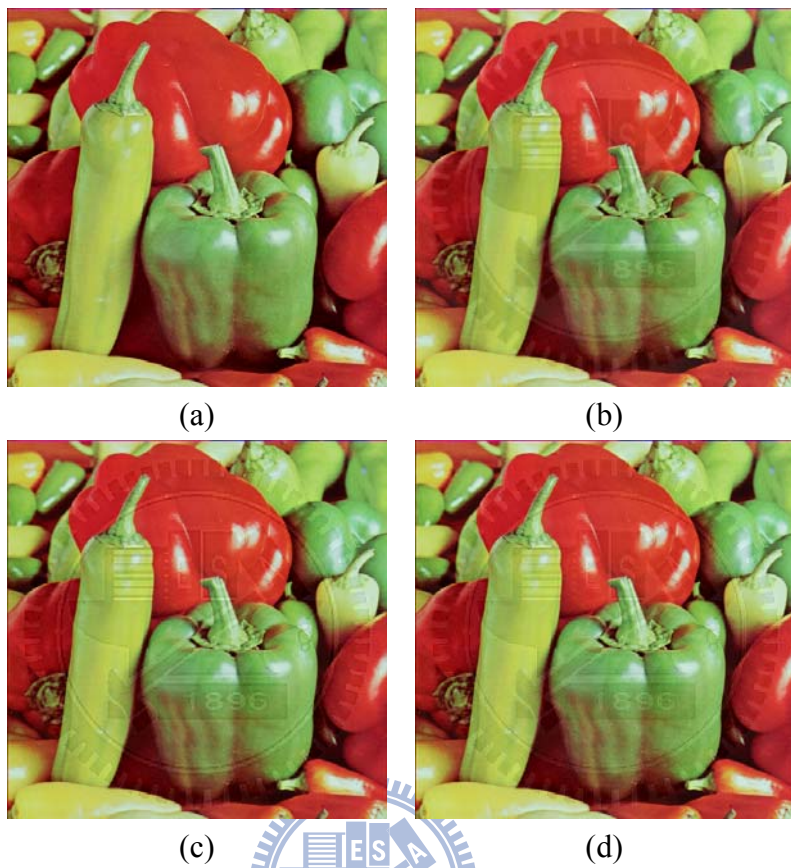


圖 11:Peppers NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

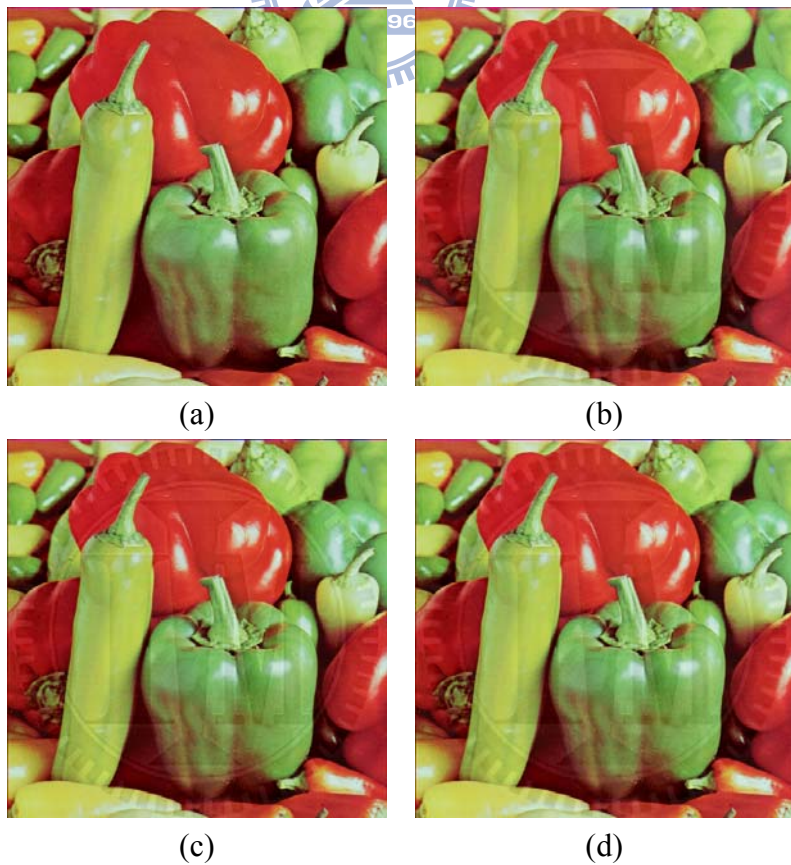


圖 12:Peppers IIM (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

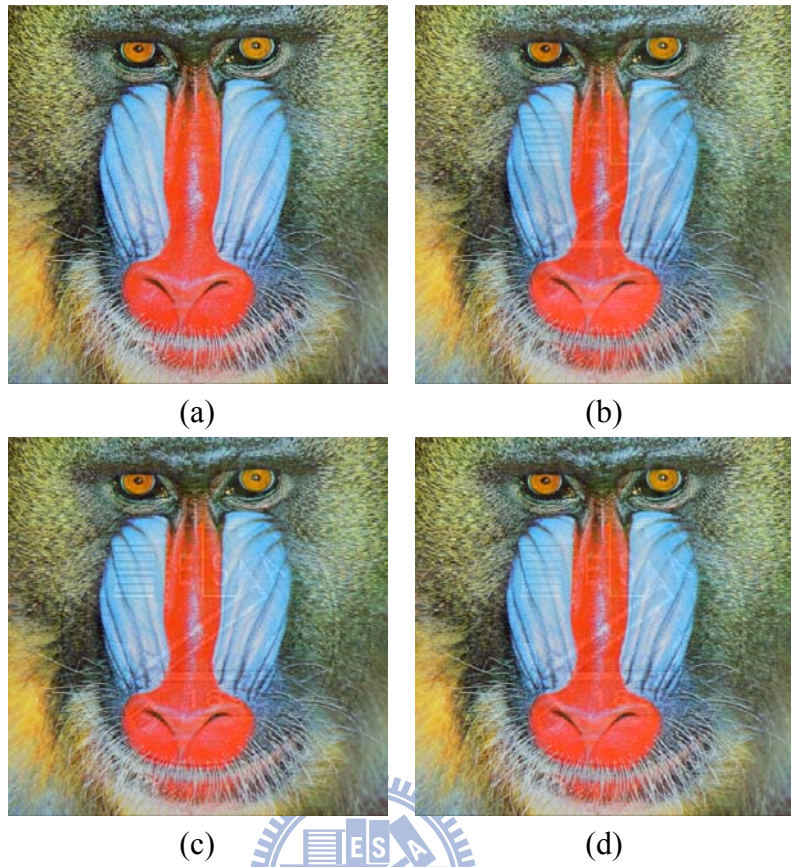


圖 13: Baboon NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

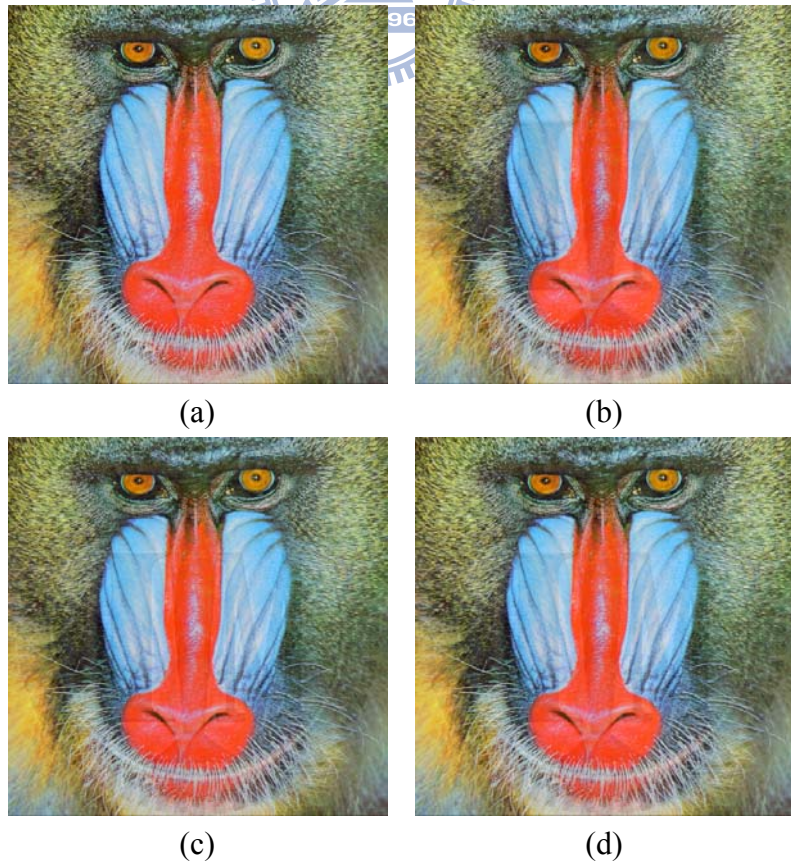


圖 14: Baboon IIM (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

4.1 視覺效果

從圖 15 的(b),(c),(d)可以發現在 Lena 的頭髮部分，本論文提供的方法可以產生較清晰的浮水印邊緣效果。圖 16 的(b),(c),(d)可以發現(d)浮水印在樹木的部份可以約略分辨出浮水印邊緣。圖 17(d)中的字母 A 比(b),(c)在高亮度的部份更能夠區分出字母[A]的圖形。圖 18(d)中的橫線條紋比(b),(c)中的更加清楚可見。

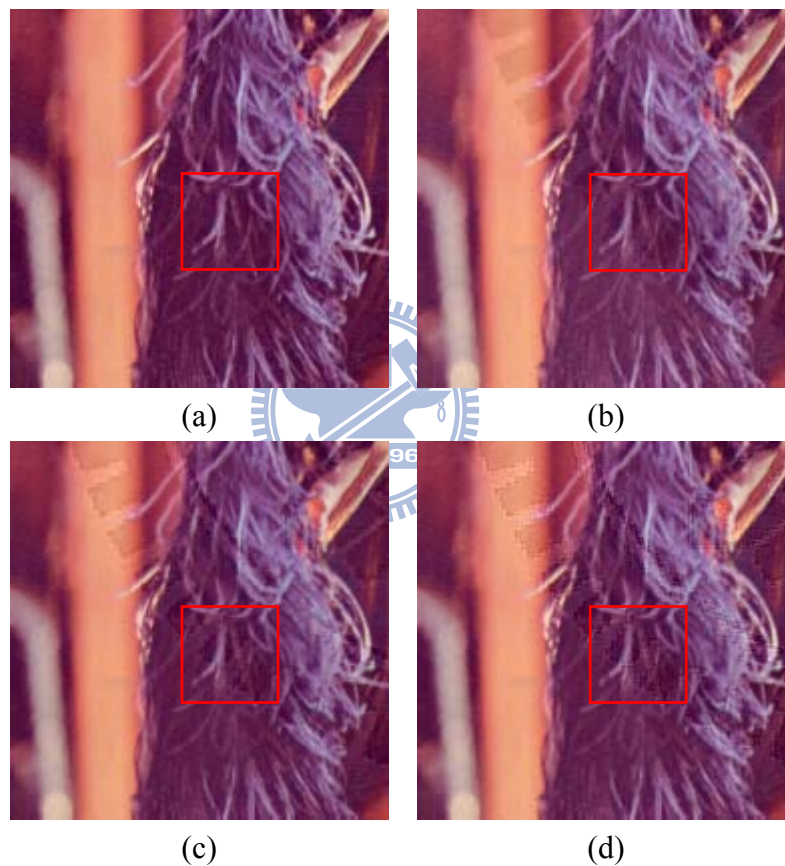


圖 15:Lena NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

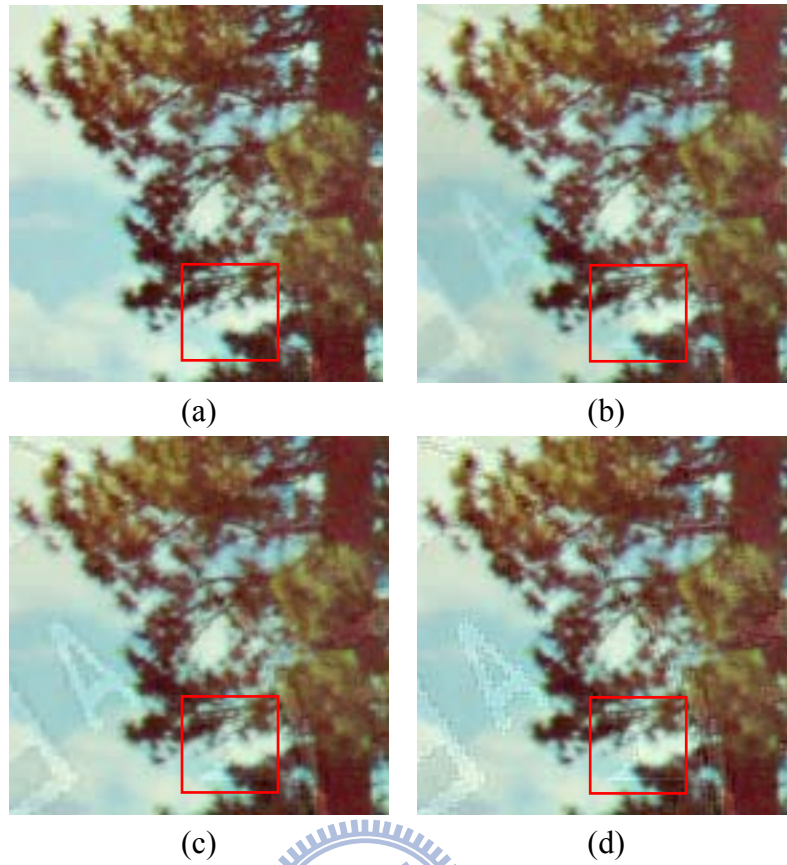


圖 16: Lake NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

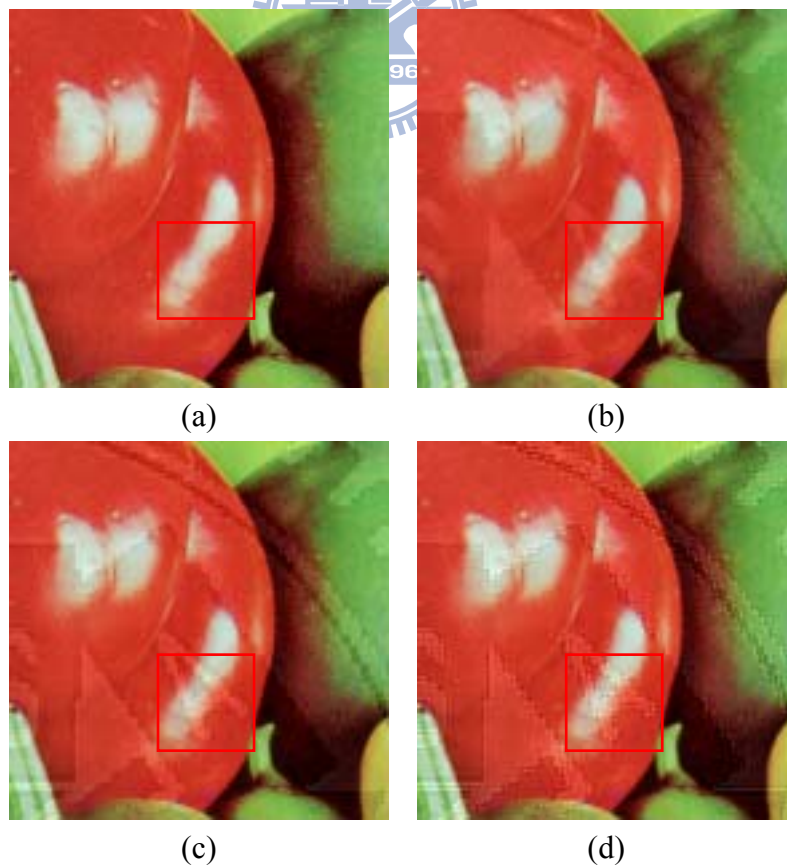


圖 17: Peppers NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

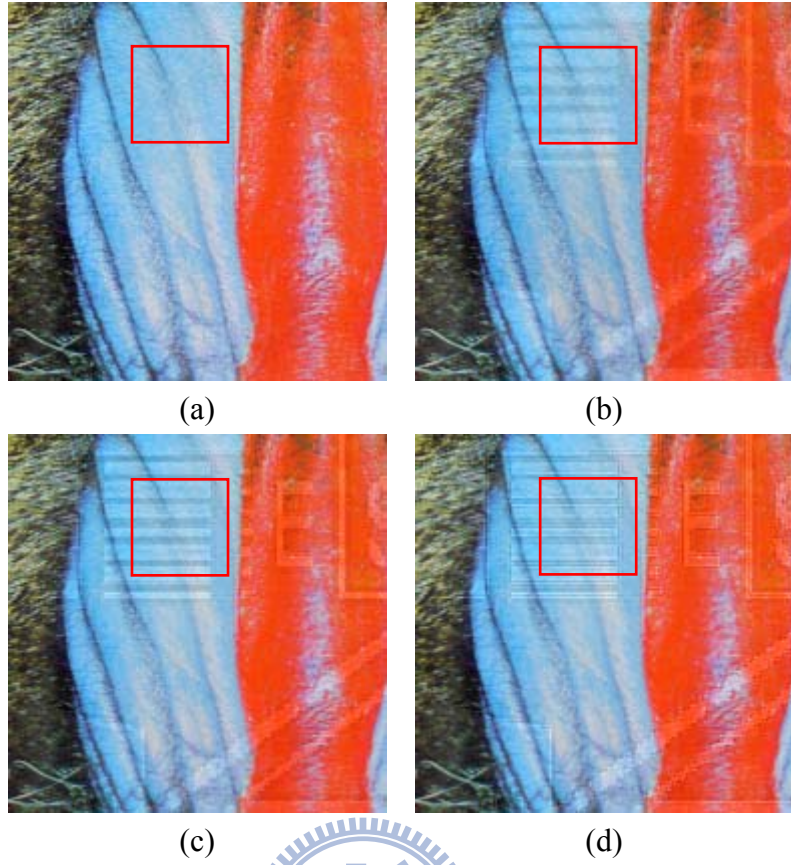
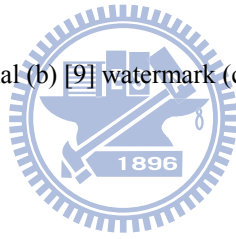


圖 18: Baboon NCTU (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach



4.2 PSNR (Peak Signal to Noise Ratio)

為了比較 Huang and Tang [9]，Chih-Wen Lin[47]以及本論文提出的方法，我們使用了相同的浮水印(圖 6)以及原始影像做為三種方法的浮水印嵌入影像。我們分別計算了 3 種方法下 4 張原始影像分別加入 2 張浮水印後的 PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)數值。

PSNR 數值越大代表了失真越少，也就是說加入浮水印後的影像 PSNR 數值越大越好，我們實驗產生的結果如表 3 所列。在表格中可以發現 Huang and Tang [9]的 PSNR 數值最差平均約 26.7，本論文提供的方法 PSNR 數值平均約在 29.7，低於 Chih-Wen Lin[47]的 PSNR 數值平均 31.4。可是我們覺得可視浮水印面對的是人類視覺感官的感知，因此對於視覺上的效果我們認為可視數位浮水印應該加入使用人類視覺系統為依據的視覺品質影像指標，如 VSNR(Visual Signal-to-Noise Ratio)[48]或是 VIF(Visual Information Fidelity)[49]等指標來加以衡量，而不僅僅只是以 PSNR 做為衡量品質的依據。

表 2 PSNR summary of watermarked color images

Images	Watermark	Huang and Tang's method	Chih-Wen Lin's method	Proposed approach
Lena	NCTU LOGO	26.93	31.57	29.49
Lena	IIM LOGO	26.78	32.67	30.91
Lake	NCTU LOGO	26.17	30.76	29.07
Lake	IIM LOGO	26.03	31.66	30.28
Peppers	NCTU LOGO	26.84	31.45	29.39
Peppers	IIM LOGO	26.83	32.48	30.7
Baboon	NCTU LOGO	27.13	30.16	28.3
Baboon	IIM LOGO	27.16	30.99	29.27

4.3 VSNR (Visual Signal-to-Noise Ratio)

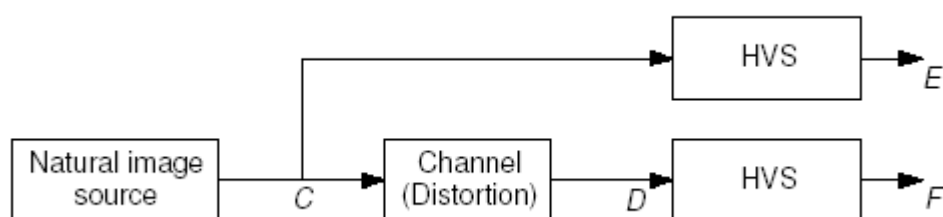
VSNR[45]是一種基於小波轉換以及人類視覺系統特性而設計的視覺指標，VSNR 透過兩階段的運算方式來偵測影像失真的程度。第一個步驟先運算影像失真是否超過對比感知的門檻值，它使用以小波為基礎的可視遮罩(Visual Masking)以及可視總和(Visual Summation)來偵測影像的失真是否為可視的失真。如果尚未超過門檻值則被視為完全沒有失真，並且不需再計算下去，反之則進行第二步驟的運算。第二步驟運算中則透過低階視覺對比感知屬性值以及中階的視覺屬性再次運算求得影像的失真程度。VSNR 的數值越大，代表影像的視覺品質越佳以及失真程度越少。表 3 為使用上述三種方法將原始影像加入浮水印後的 VSNR 數值。Huang and Tang [9]的方法 VSNR 數值平均約為 16.9，Chih-Wen Lin[47]提供的方法 VSNR 數值平均約為 22.2，本論文提供的方法 VSNR 數值平均約為 23.2。

表 3 VSNR summary of watermarked color images

Images	Watermark	Huang and Tang's method	Chih-Wen Lin's method	Proposed approach
Lena	NCTU LOGO	16.96	21.92	23.64
Lena	IIM LOGO	15.74	21.86	21.34
Lake	NCTU LOGO	19.01	24.29	26.3
Lake	IIM LOGO	18.03	24.24	24.52
Peppers	NCTU LOGO	17.70	22.49	24.34
Peppers	IIM LOGO	16.63	22.46	22.29
Baboon	NCTU LOGO	15.92	19.90	21.87
Baboon	IIM LOGO	15.22	20.42	20.91

4.4 VIF (Visual Information Fidelity)

VIF[46]指標探索了影像資訊以及視覺品質之間的連結，它先將原始影像經過人類視覺系統頻道(HVS Channel)處理，然後將失真影像先經過失真頻道(Distortion Channel)處理後再送到人類視覺系統頻道中處理，最後得到人類大腦能夠辨識的失真並計算出 VIF 的指標。上述 VIF 的運作流程可以參考下圖 19



$$\text{VIF} = \text{Distorted Image Information} / \text{Reference Image Information}$$

圖 19: VIF process concept

我們使用了上述三種方法分別對原始影像加入浮水印並計算出 VIF 的數值，Huang and Tang [9]的方法 VIF 數值平均值約為 0.73 最高，本論文提供的方法 VIF 數值平均約為 0.67，Chih-Wen Lin[47]提出的方法得到的 VIF 數值平均值約為 0.64 最低。

表 4 VIF summary of watermarked color images

Images	Watermark	Huang and Tang's method	Chih-Wen Lin's method	Proposed approach
Lena	NCTU LOGO	0.69	0.60	0.62
Lena	IIM LOGO	0.73	0.66	0.70
Lake	NCTU LOGO	0.73	0.62	0.65
Lake	IIM LOGO	0.76	0.67	0.72

Peppers	NCTU LOGO	0.70	0.60	0.63
Peppers	IIM LOGO	0.73	0.66	0.70
Baboon	NCTU LOGO	0.74	0.63	0.62
Baboon	IIM LOGO	0.77	0.68	0.68

4.5 JPEG 2000 Compression

可視浮水印演算法的好壞除了影像品質的指標以及視覺效果以外，還需要檢驗對於各種數位內容處理以及攻擊的抵抗能力。為了檢驗本論文提供的方法對於數位內容處理以及攻擊的抵抗能力，我們使用了來自參考文獻[38]的 Jasper 這套軟體來測試並分析可視浮水印對於 JPEG2000 影像處理的強健度。為了能夠明顯區分出差異性，我們使用了 100:3 的壓縮比來測試，雖然在一般的使用上並不會使用如此高的壓縮比。我們將結果分別建立了 PSNR 以及 VSNR 的表格，表格中 JPEG2000 Compression 欄位分成 Before, After, After(wm)依序分別代表了加入浮水印後的影像 PSNR 數值、經過 JPEG2000 壓縮後與原始影像比較的 PSNR 數值以及經過 JPEG2000 壓縮後與加入浮水印後的影像 PSNR 數值。

從表 5 中我們可以發現本論文提供的方法在 After 欄位得到的 PSNR 數值平均約為 24.7，Chih-Wen Lin[47]提出的方法 PSNR 數值平均約 25.1 而 Huang and Tang [9]的方法 PSNR 數值最低約為 23.2。以 PSNR 數值為基準可以得到抵抗 JPEG2000 的能力由高至低分別為 Chih-Wen Lin[47]提出的方法，本論文的方法以及 Huang and Tang [9]的方法。從表格 6 中我們可以發現本論文提供的方法在 After 欄位得到的 VSNR 數值平均約為 20.2 與 Chih-Wen Lin[47]得到的數值 20.2 相同並且高於 Huang and Tang [9]的 17.0。我們比較三種方法發現 Huang and Tang [9]的數值分析皆明顯低於另外兩種方法，而 Chih-Wen Lin[47]的方法則在 PSNR 數值上略高於本論文的方法。為了更進一步的比較我們列出了三種方法經過 JPEG2000 處理後的圖形於圖 20，其中(b)為 Huang and Tang [9]

方法、(c)為 Chih-Wen Lin[47]的方法以及(d)為本論文提供的方法。我們將圖形放大並且鎖定在交通大學校徽標籤上面的[E]、[S]、[A]三個英文字母，比較三個字母的清晰度以及可辨識度，我們發現(c)與(d)的圖形相當略高於(b)的結果。

表 5 PSNR summary of watermarked color images before and after JPEG 2000 Compression

PSNR: Peak Signal to Noise Ratio					
Images	Watermark	JPEG2000 Compression	Huang and Tang's method	Chih-Wen Lin's method	Proposed approach
Lena	NCTU LOGO	Before	26.93	31.57	29.49
		After	24.50	26.78	26.14
		After(wm)	28.31	28.20	27.69
Lena	IIM LOGO	Before	26.78	32.67	30.91
		After	24.40	27.06	26.42
		After(wm)	28.41	28.52	28.60
Lake	NCTU LOGO	Before	26.17	30.76	29.07
		After	23.10	25.00	24.73
		After(wm)	26.24	26.43	26.12
Lake	IIM LOGO	Before	26.03	31.66	30.28
		After	23.02	25.06	24.75
		After(wm)	26.30	26.61	26.79
Peppers	NCTU LOGO	Before	26.84	31.45	29.39
		After	24.49	26.69	26.15
		After(wm)	28.28	28.14	27.74
Peppers	IIM LOGO	Before	26.83	32.48	30.70
		After	24.44	27.03	26.37
		After(wm)	28.42	28.50	28.65
Baboon	NCTU LOGO	Before	27.13	30.16	28.30
		After	20.84	21.63	21.35
		After(wm)	22.60	23.17	23.23
Baboon	IIM LOGO	Before	27.16	30.99	29.27
		After	20.78	21.69	21.35
		After(wm)	22.61	23.36	23.57

表 6 VSNR summary of watermarked color images before and after JPEG 2000 Compression

VSNR: Visual Signal-to-Noise Ratio					
Images	Watermark	JP2000 Compression	Huang and Tang's method	Chih-Wen Lin's method	Proposed approach
Lena	NCTU LOGO	Before	16.96	21.92	23.64
		After	17.62	21.29	21.68
		After(wm)	26.42	26.50	25.80
Lena	IIM LOGO	Before	15.74	21.86	21.34
		After	16.99	22.10	21.32
		After(wm)	26.82	27.27	28.04
Lake	NCTU LOGO	Before	19.01	24.29	26.30
		After	19.53	22.24	22.57
		After(wm)	24.58	25.11	25.02
Lake	IIM LOGO	Before	18.03	24.24	24.52
		After	19.01	22.49	22.33
		After(wm)	24.67	25.42	25.39
Peppers	NCTU LOGO	Before	17.70	22.49	24.34
		After	18.69	22.03	22.50
		After(wm)	27.51	27.33	26.59
Peppers	IIM LOGO	Before	16.63	22.46	22.29
		After	17.95	22.94	22.22
		After(wm)	28.05	27.91	28.54
Baboon	NCTU LOGO	Before	15.92	19.90	21.87
		After	12.98	14.42	14.59
		After(wm)	14.97	15.84	15.86
Baboon	IIM LOGO	Before	15.22	20.42	20.91
		After	12.78	14.59	14.62
		After(wm)	15.19	16.23	16.15

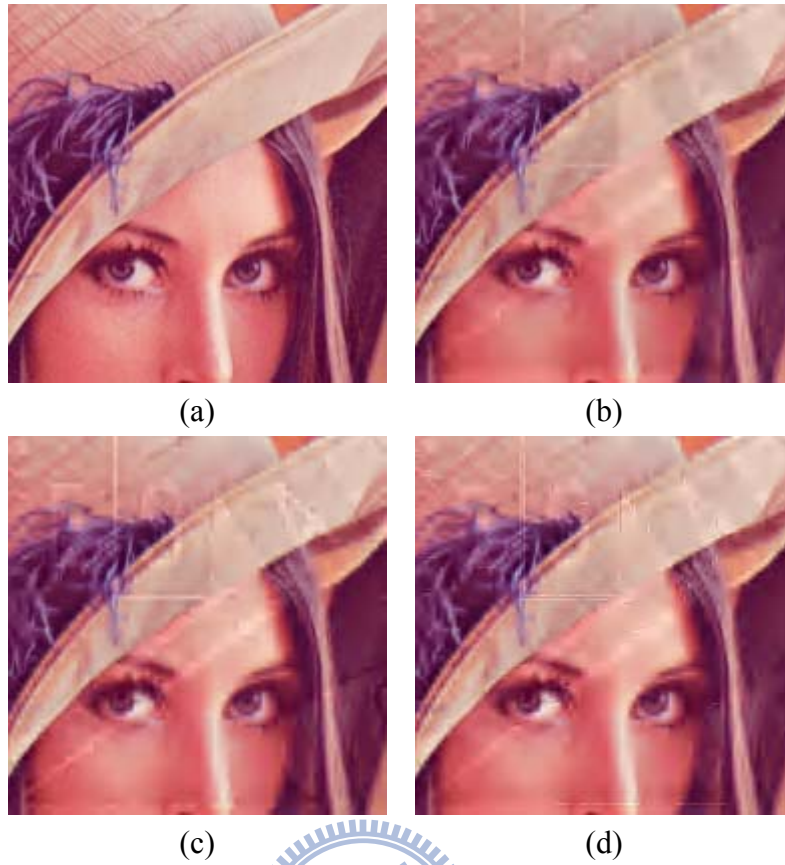


圖 20:Lena JPEG2000 effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

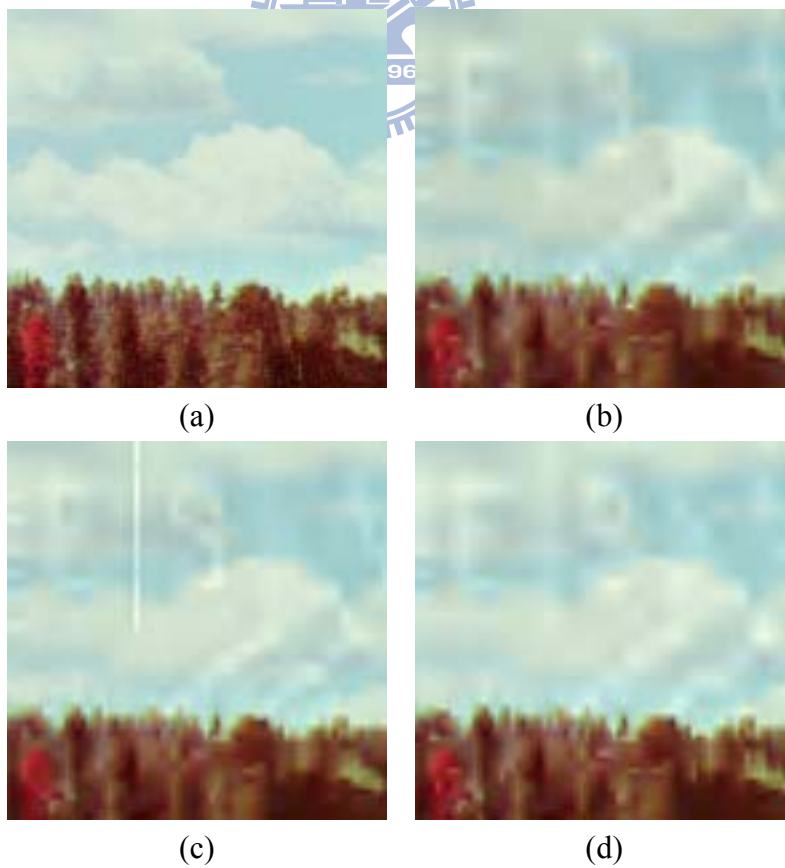


圖 21:Lake JPEG2000 effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

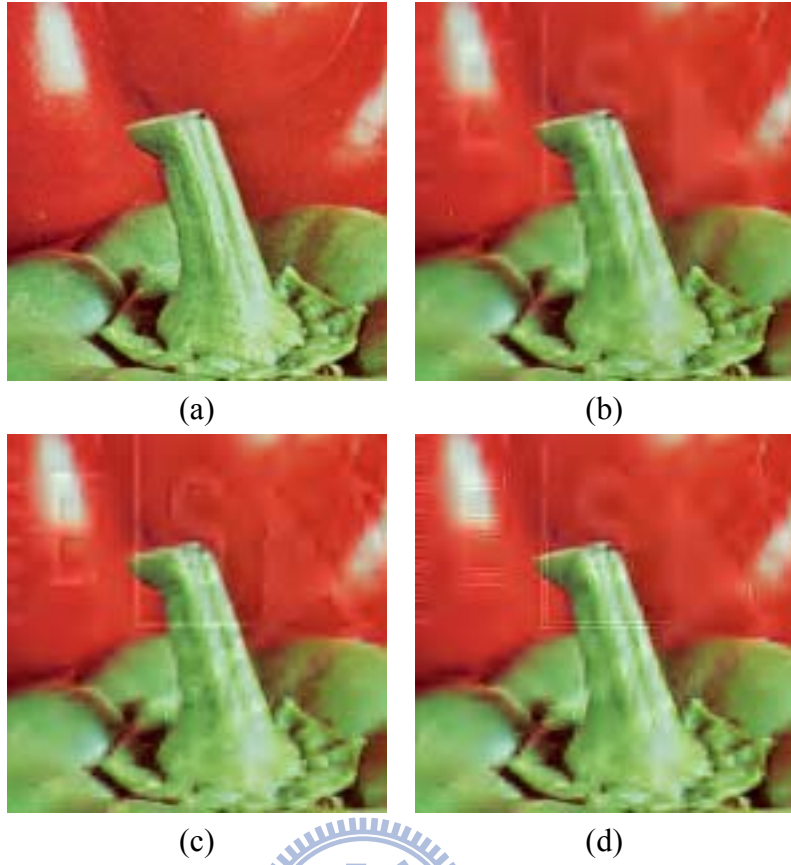


圖 22:Peppers JPEG effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

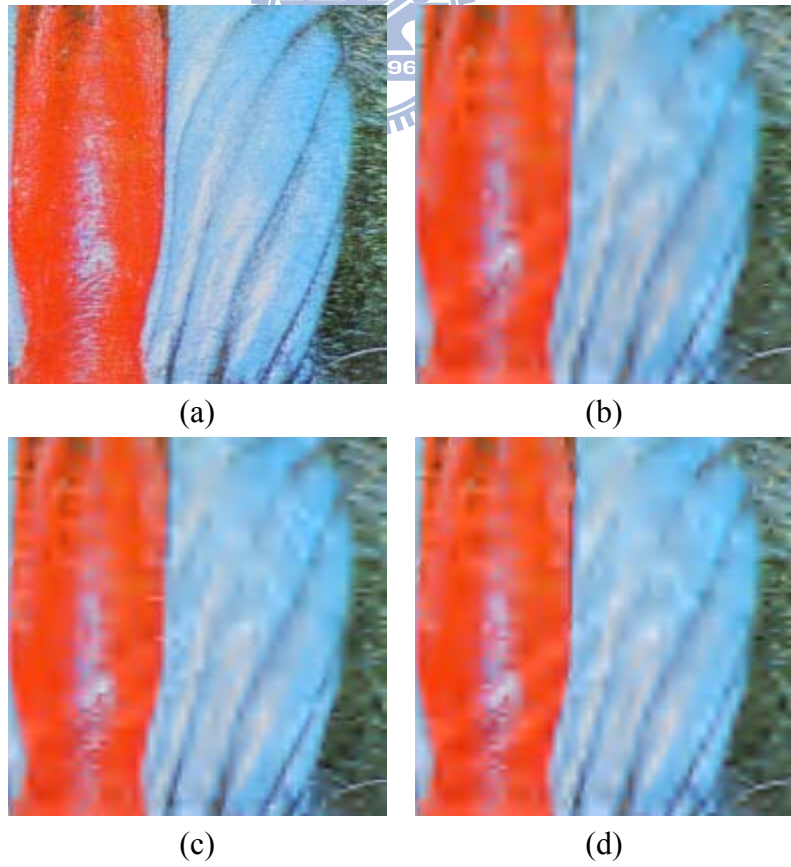


圖 23:Baboon JPEG effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

4.6 Median Filter

為了檢驗本論文提供的方法，我們使用參考論文[39]提出的 StirMark 這套軟體測試 Median Filter 影像處理對於可視浮水印的影響。我們依然測試三種不同方法所加入的可視浮水印，分別計算 PSNR 以及 VSNR 的數值。由於 3x3 以及 5x5 的 Median Filter 效果與嵌入浮水印的圖 11 至圖 14 相似，所以我們使用 7x7 的 Median Filter 讓影像可以產生較明顯的差別，實驗數據分別如表 7 與表 8，表格中 Median Filter 欄位的 Before, After 以及 After(wm)與 JPEG2000 測試中的表格是一樣的意義。

從表 7 的 After 欄位中我們可以發現 Chih-Wen Lin[47]的方法有最高的 PSNR 平均值約 21.0，本論文提出的方法則是 PSNR 平均值約 20.4，Huang and Tang [9]的方法 PSNR 平均值約 19.5。從表 8 中我們則是可以由 After 欄位中發現 Chih-Wen Lin[47]的方法有最高的 VSNR 平均值約 14.8，本論文提出的方法則是 PSNR 平均值約 14.5，Huang and Tang [9]的方法 PSNR 平均值約 12.9。進一步比較圖 24 中(a) Original (b) Huang and Tang [9]、(c) Chih-Wen Lin[47]、(d)本論文方法，我們可以發現圖[24-27]的(b) Huang and Tang [9]、(c) Chih-Wen Lin[47]、(d) 本論文方法，三張影像中交通大學校徽標籤上面的[E]、[S]、[A]三個英文字母清晰度非常接近。整體而言，本論文提出的方法雖然 PSNR 以及 VSNR 有些許的不如 Chih-Wen Lin[47]提出的方法，但是在視覺效果上並未能察覺出這樣的差異，而且部份結果還顯示出略微清晰的情況，因此我們認為 Median Filter 的測試上強健度接近一致。

表 7 PSNR summary of watermarked color images before and after median filter

PSNR: Peak Signal to Noise Ratio					
Images	Watermark	Median Filter	Huang and Tang's method	Chih-Wen Lin's method	Proposed approach
Lena	NCTU LOGO	Before	26.93	31.57	29.49
		After	20.38	22.19	21.40
		After(wm)	23.21	23.20	22.97
Lena	IIM LOGO	Before	26.78	32.67	30.91
		After	20.54	22.31	21.53
		After(wm)	23.27	23.40	23.33
Lake	NCTU LOGO	Before	26.17	30.76	29.07
		After	19.45	20.92	20.35
		After(wm)	21.89	22.08	21.83
Lake	IIM LOGO	Before	26.03	31.66	30.28
		After	19.56	20.99	20.43
		After(wm)	21.92	22.23	22.09
Peppers	NCTU LOGO	Before	26.84	31.45	29.39
		After	20.15	22.01	21.23
		After(wm)	23.04	23.04	22.86
Peppers	IIM LOGO	Before	26.83	32.48	30.70
		After	20.32	22.12	21.34
		After(wm)	23.10	23.23	23.21
Baboon	NCTU LOGO	Before	27.13	30.16	28.30
		After	17.78	18.61	18.25
		After(wm)	19.43	19.96	19.84
Baboon	IIM LOGO	Before	27.16	30.99	29.27
		After	17.89	18.65	18.29
		After(wm)	19.46	20.06	20.01

表 8 VSNR summary of watermarked color images before and after median filter

VSNR: Visual Signal-to-Noise Ratio					
Images	Watermark	JP2000 Compression	Huang and Tang's method	Chih-Wen Lin's method	Proposed approach
Lena	NCTU LOGO	Before	16.96	21.92	23.64
		After	14.69	17.35	16.92
		After(wm)	18.66	19.16	19.01
Lena	IIM LOGO	Before	15.74	21.86	21.34
		After	14.20	17.36	16.78
		After(wm)	18.95	19.99	19.37
Lake	NCTU LOGO	Before	19.01	24.29	26.30
		After	14.35	15.90	15.72
		After(wm)	16.28	17.32	16.91
Lake	IIM LOGO	Before	18.03	24.24	24.52
		After	14.16	15.90	15.69
		After(wm)	16.40	17.68	16.92
Peppers	NCTU LOGO	Before	17.70	22.49	24.34
		After	14.51	16.68	16.40
		After(wm)	18.17	18.48	18.53
Peppers	IIM LOGO	Before	16.63	22.46	22.29
		After	14.13	16.79	16.22
		After(wm)	18.20	18.89	18.41
Baboon	NCTU LOGO	Before	15.92	19.90	21.87
		After	8.44	9.28	9.06
		After(wm)	9.40	10.32	9.66
Baboon	IIM LOGO	Before	15.22	20.42	20.91
		After	8.39	9.28	9.04
		After(wm)	9.67	10.50	9.70

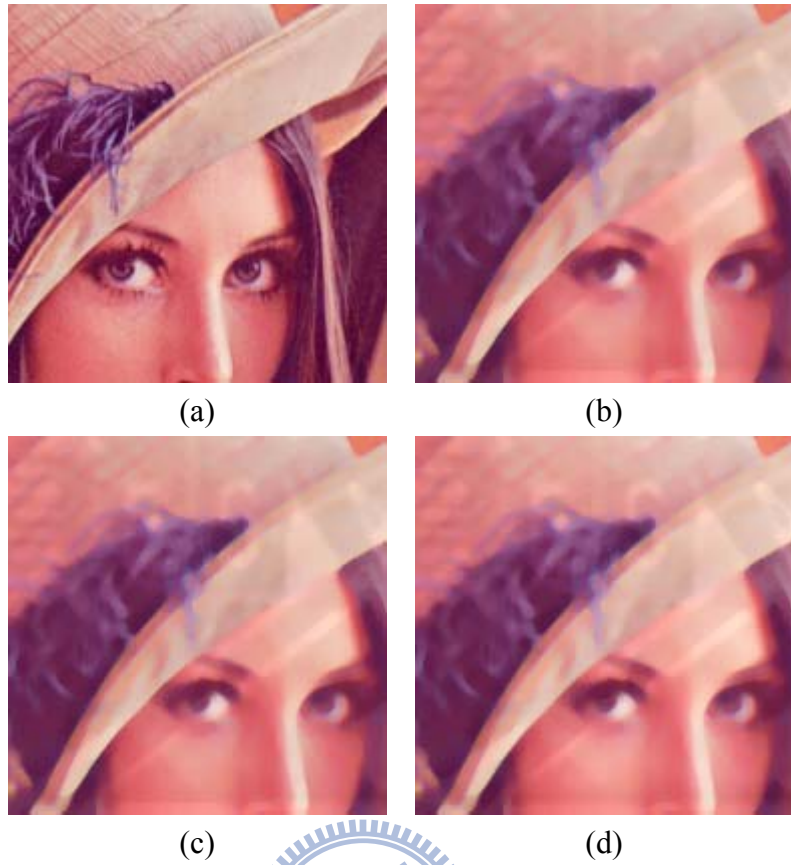


圖 24:Lena median filter effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

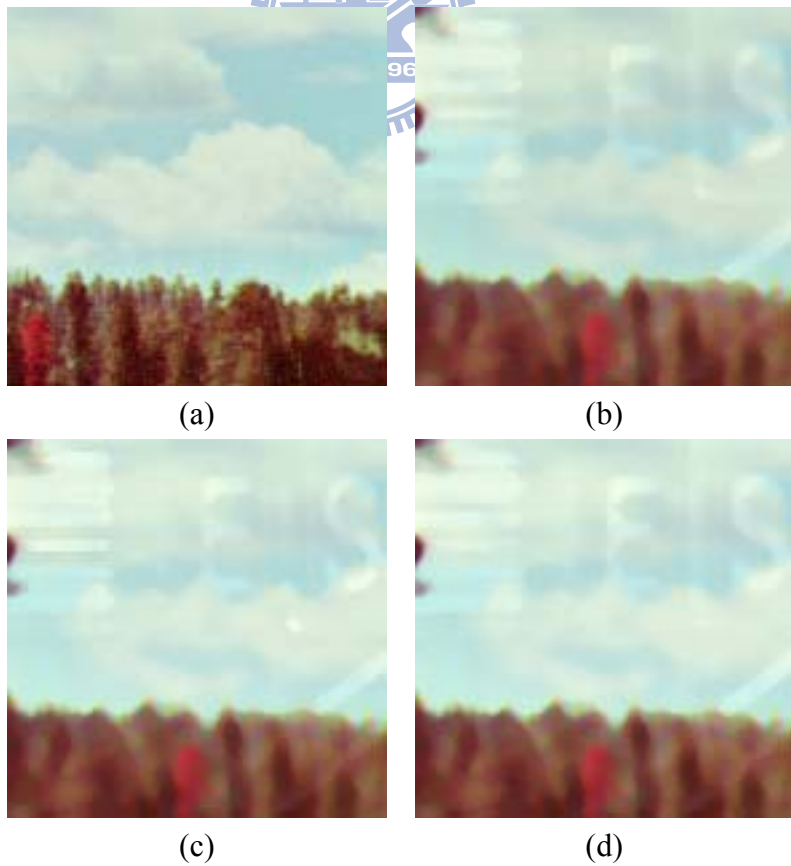


圖 25:Lake median filter effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

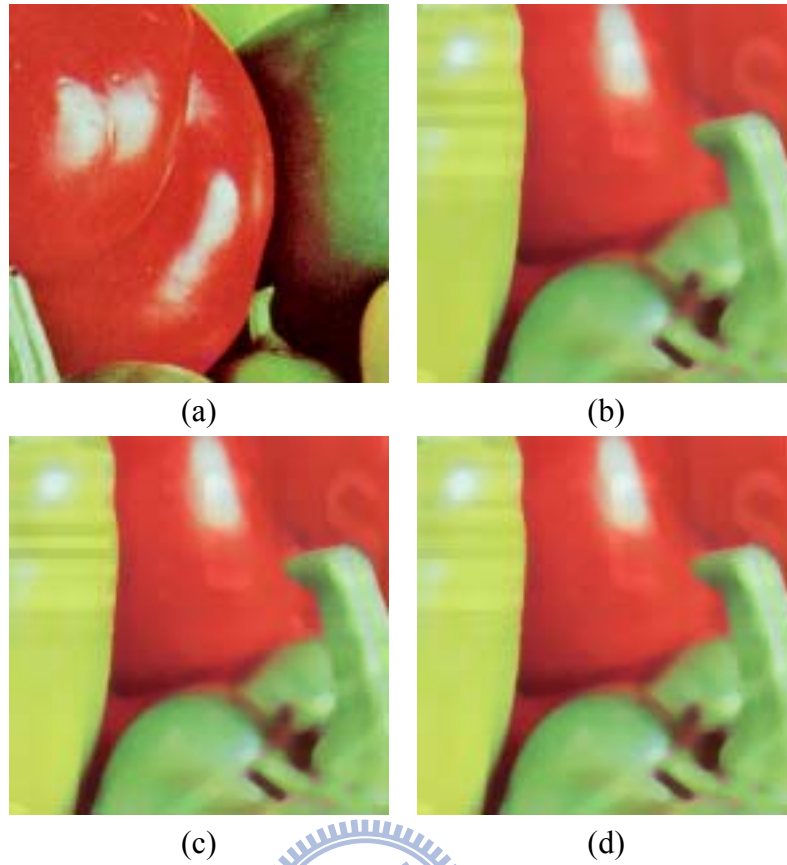


圖 26:Peppers median filter effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

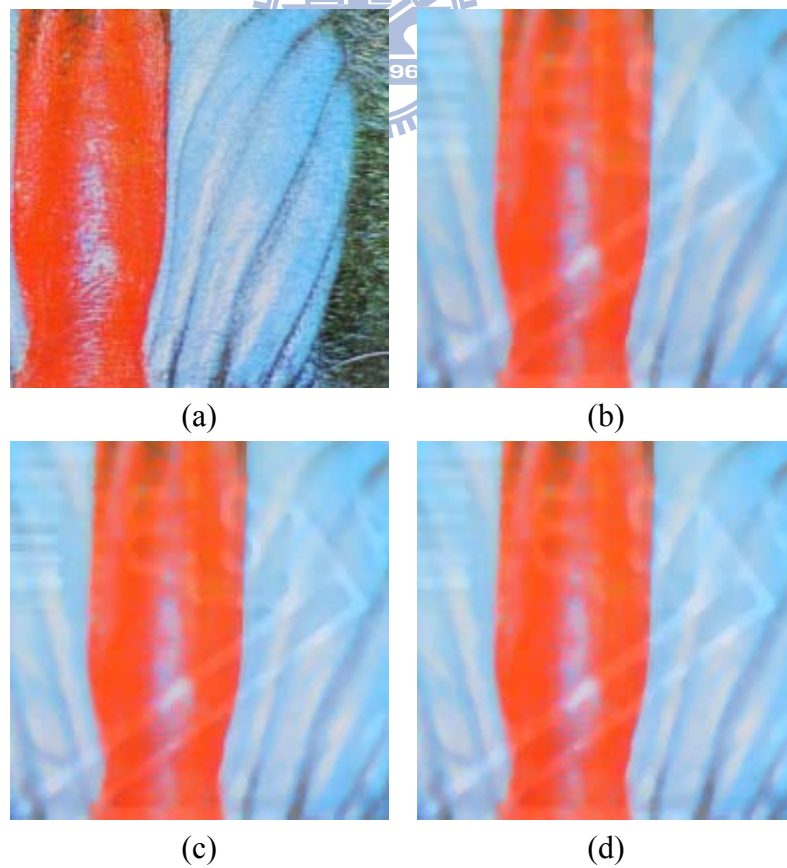


圖 27:Baboon median filter effect (a) Original (b) [9] watermark (c) [47] watermark (d) proposed approach

4.7 ICA Image Recovery Attack

可視浮水印直接嵌入並顯示於需要保護智慧財產權的影像中，但是有時候還是會遇到各式攻擊讓攻擊者可以移除可視浮水印並且自由的使用影像而不用在意智慧財產權的限制。如果可視浮水印被完全地從受保護的影像中移除且移除後僅有極少數不易被發現的失真時，影像智慧財產權的擁有者將難以證明自己是智慧財產權的擁有者。基於這樣的情況，好的可視浮水印必須能夠讓有心移除可視浮水印的非法攻擊者，需要花費大量的人工時間以及成本才能夠達到目的。

關於可視浮水印移除技術，Pei 與 Zeng [42]提出了一種簡單、快速不需大量人力的可視浮水印移除演算法，這個方法主要應用了 ICA(independent component analysis)包含了三個主要的步驟，浮水印區域的分割、參考影像的產生以及影像回復。在[42]的實驗中，有可視浮水印[4,10,11,12,13,15]以及三種公共的領域影像被測試，實驗結果顯示[42]提出的方法可以成功的移除可視浮水印。為了驗證本論文提出的方法，我們使用了 Chih-Wen Lin[47]實作[42]的 ICA 可視浮水印演算法程式測試三種可視浮水印方法。

實驗的結果分別顯示於圖 28~31 中。每張圖第一列為 Huang and Tang [9]的方法，第二列為 Chih-Wen Lin[47]的方法，第三列則是本論文提出的方法，每一列中(a)原始影像(b)為該方法嵌入浮水印後影像，(c)為 ICA 移除浮水印後整張圖縮小影像，(d)為 ICA 移除浮水印後部份放大影像。圖 28 中我們可以發現 Huang and Tang [9]的方法在 Lena 帽子上面的交通大學校徽上[E]、[S]、[A]三個英文字母已經移除的無法辨識，Chih-Wen Lin[47]則勉強可以辨識出[E]、[S]、[A]三個英文字母，本論文提供的方法由於邊緣部份雖然透明度高但是仍然可以看到[E]、[S]、[A]三個英文字母的清楚輪廓，即使位於 Lena 頭髮內[E]英文字母的下方橫線也可以勉強看到。在圖 29~31 中同樣可以看到相同的結果，因此我們認為本論文提出的方法可以抵抗 ICA 攻擊，因為即使浮水印的能量大部分被移除了，但是我們的方法讓浮水印邊緣的能量特別的強，所以可以保留住邊緣的痕跡

幫助辨識浮水印的內容。Chih-Wen Lin[47]的提出的方法也可以抵抗 ICA 攻擊，還能夠辨識出[E]、[S]、[A]三個英文字母，但是部分邊緣由於浮水印能量被 ICA 攻擊移除了，所以邊緣變得模糊難以辨識。



圖 28:Lena ICA attack effect 1(a) Original 1(b) [9] watermark 1(c) ICA attack 1(d) ICA attack detail
 2(a) Original 2(b) [47] watermark 2(c) ICA attack 2(d) ICA attack detail
 3(a) Original 3(b) purposed approach 3(c) ICA attack 3(d) ICA attack detail

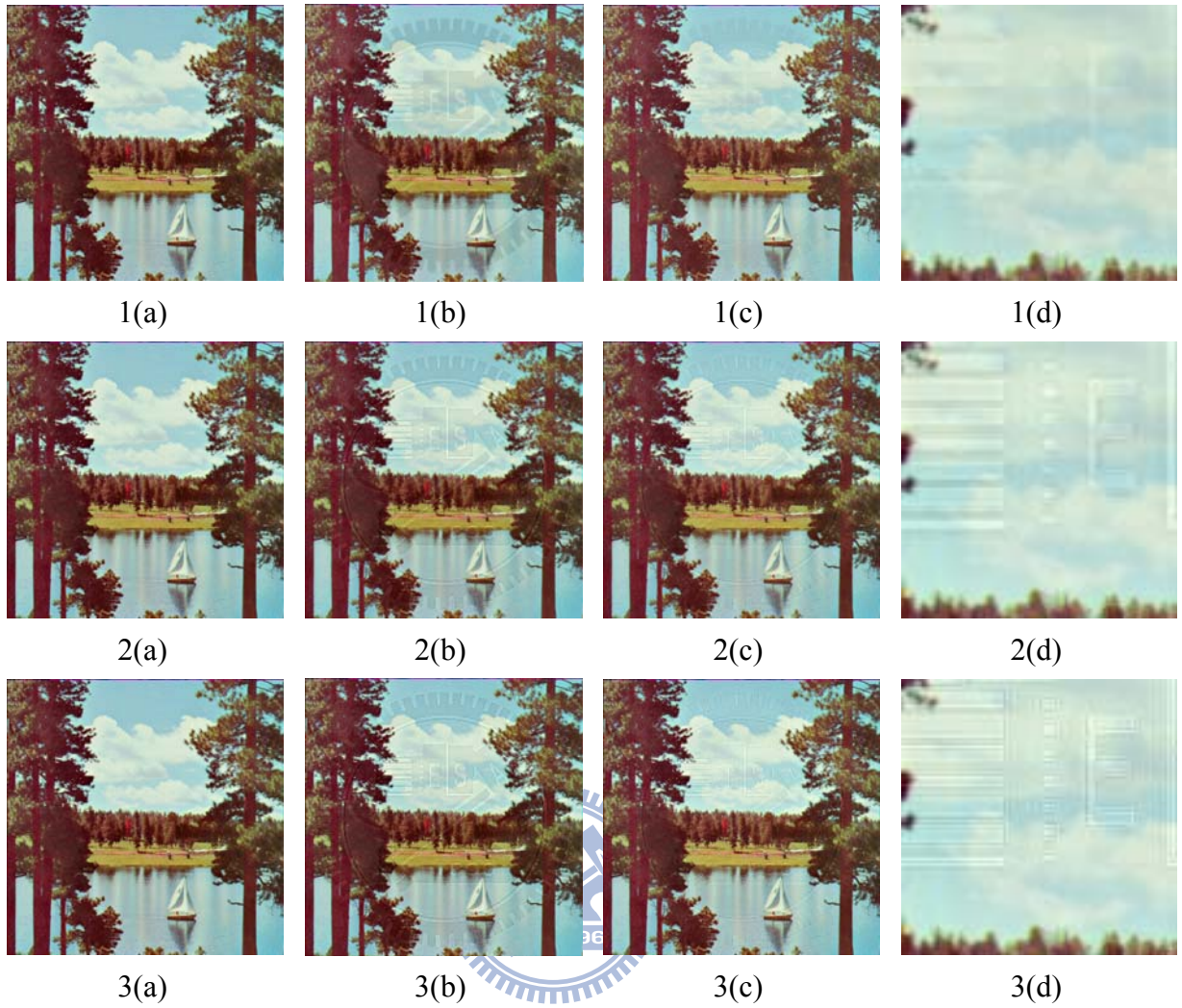


圖 29:Lake ICA attack effect 1(a) Original 1(b) [9] watermark 1(c) ICA attack 1(d) ICA attack detail
 2(a) Original 2(b) [47] watermark 2(c) ICA attack 2(d) ICA attack detail
 3(a) Original 3(b) purposed approach 3(c) ICA attack 3(d) ICA attack detail

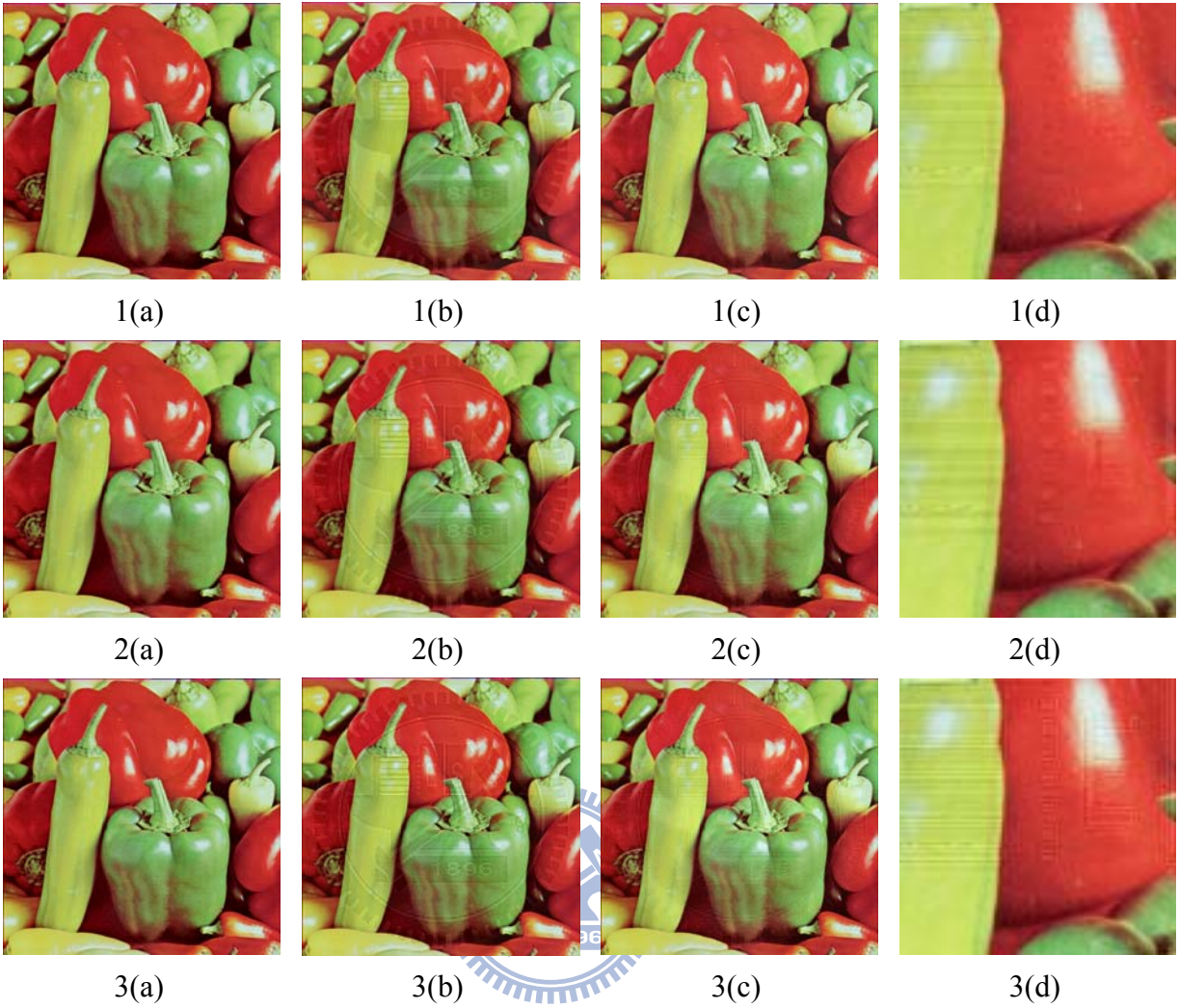


圖 30:Peppers ICA attack effect 1(a) Original 1(b) [9] watermark 1(c) ICA attack 2(d) ICA attack detail
 2(a) Original 2(b) [47] watermark 2(c) ICA attack 2(d) ICA attack detail
 3(a) Original 3(b) purposed approach 3(c) ICA attack 3(d) ICA attack detail

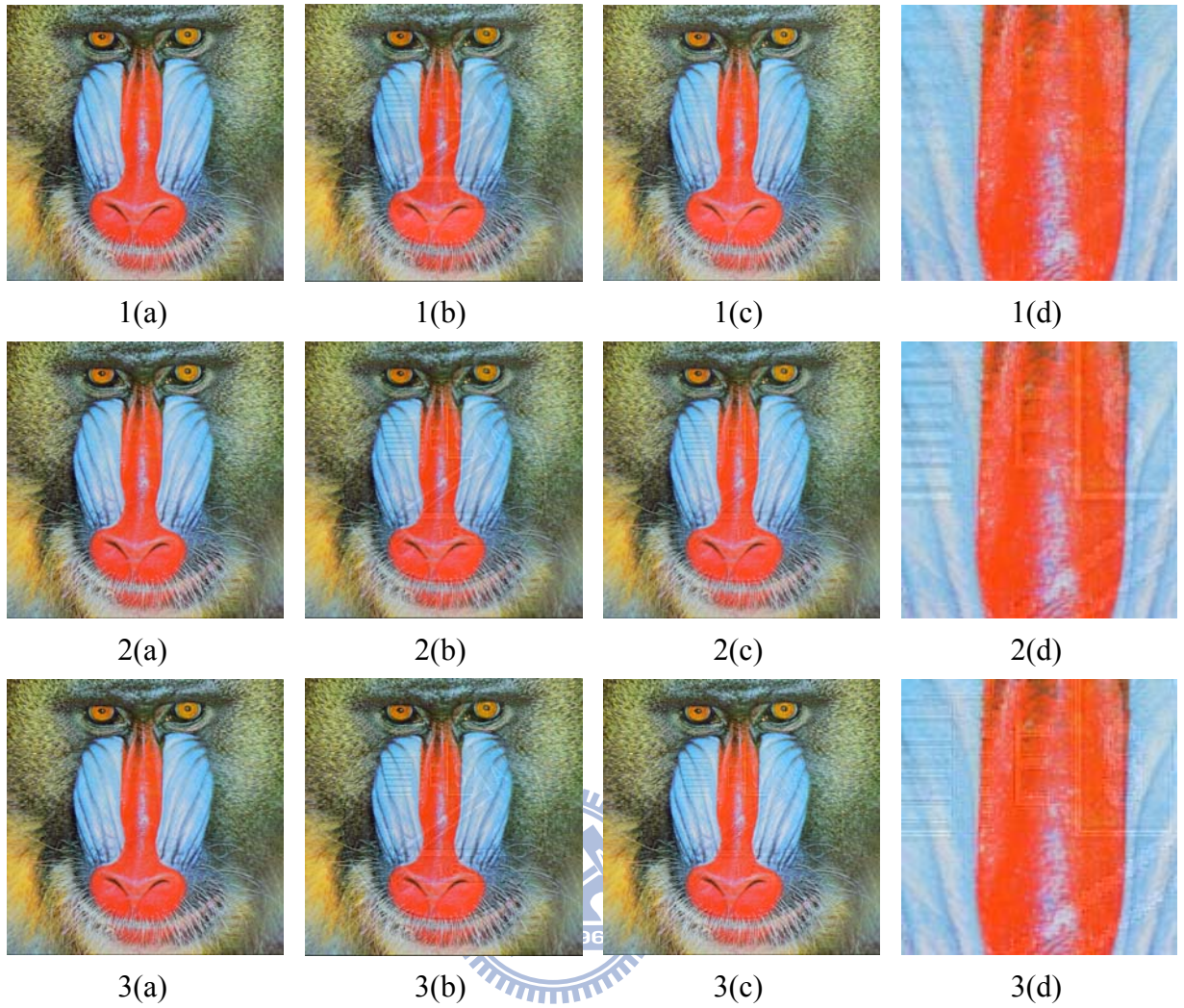


圖 31: Baboon ICA attack effect 1(a) Original 1(b) [9] watermark 1(c) ICA attack 1(d) ICA attack detail
 2(a) Original 2(b) [47] watermark 2(c) ICA attack 2(d) ICA attack detail
 3(a) Original 3(b) purposed approach 3(c) ICA attack 3(d) ICA attack detail

4.8 Tamper Detection

為了提供數位影像更周全的保護，我們在已經加入可視浮水印的數位影像中加入半易碎的不可視浮水印(semi-fragile watermark)。除了進一步的保護影像的智慧財產權，同時也避免當可視浮水印被以人工的方式去除時，影像的智慧財產權因此難以判定。在本篇論文中，我們採用[47]中的半易碎浮水印演算法偵測對數位影像的非法竄改。嵌入半易碎浮水印後的影像 PSNR, VSNR, VIF 分別如表 9 表 10 表 11 所示。

表 9 PSNR summary of watermarked color images

PSNR: Peak Signal to Noise Ratio			
Images	Watermark	Visual Watermark	Semi-Fragile Watermark
Lena	NCTU LOGO	29.49	29.33
Lena	IIM LOGO	30.91	30.68
Lake	NCTU LOGO	29.07	28.94
Lake	IIM LOGO	30.28	30.12
Peppers	NCTU LOGO	29.39	29.25
Peppers	IIM LOGO	30.7	30.51
Baboon	NCTU LOGO	28.3	28.17
Baboon	IIM LOGO	29.27	29.12

表 10 VSNR summary of watermarked color images

VSNR: Visual Signal-to-Noise Ratio			
Images	Watermark	Visual Watermark	Semi-Fragile Watermark
Lena	NCTU LOGO	23.64	23.41
Lena	IIM LOGO	21.34	21.43

Lake	NCTU LOGO	26.3	26.10
Lake	IIM LOGO	24.52	24.45
Peppers	NCTU LOGO	24.34	23.95
Peppers	IIM LOGO	22.29	22.21
Baboon	NCTU LOGO	21.87	21.60
Baboon	IIM LOGO	20.91	20.76

表 11 VIF summary of watermarked color images

VIF: Visual Information Fidelity			
Images	Watermark	Visual Watermark	Semi-Fragile Watermark
Lena	NCTU LOGO	0.62	0.57
Lena	IIM LOGO	0.70	0.64
Lake	NCTU LOGO	0.65	0.61
Lake	IIM LOGO	0.72	0.67
Peppers	NCTU LOGO	0.63	0.58
Peppers	IIM LOGO	0.70	0.64
Baboon	NCTU LOGO	0.62	0.58
Baboon	IIM LOGO	0.68	0.64

由 PSNR、VSNR 以及 VIF 的比較結果可以發現，加入半易碎浮水印對於影像品質的差異不大，為了進一步驗證半易碎浮水印的有效性，我們使用 Adobe Photoshop CS2 進行數位影像竄改的處理步驟。我們分別對四張已經嵌入 NCTU 校徽的影像再進行局部的竄改，並分別產生半易碎浮水印標示竄改位置的結果如圖 32 所示。另外我們也進行了 ICA 攻擊的修改偵測如圖 33 所示。由圖 32 與圖 33 的實驗結果可以看出，嵌入半易碎浮水印的數位影像，當遭受竄改攻擊時確實可以偵測出修改的位置。

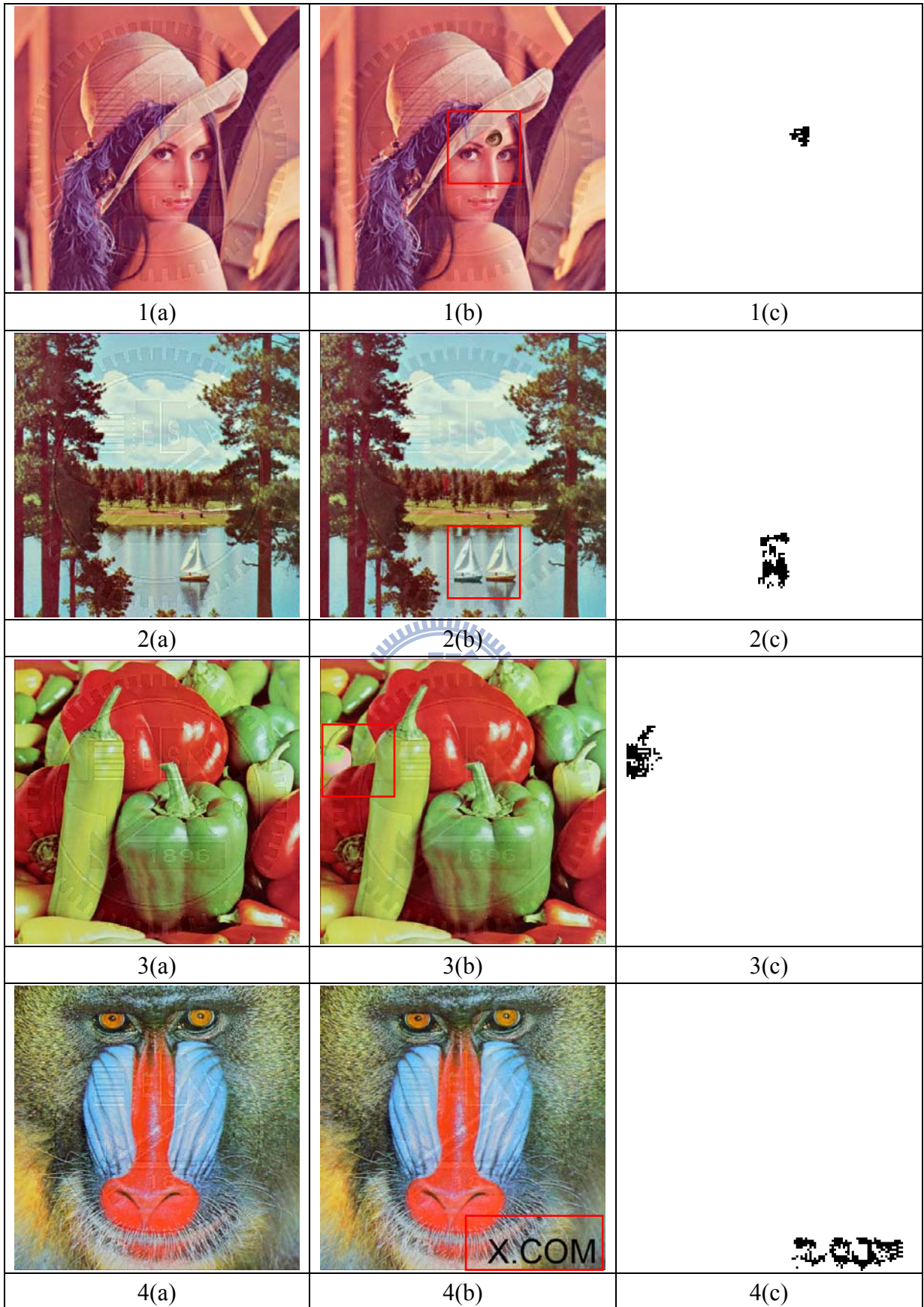


圖 32: Tamper Detection (a) watermarked image (b) tampered image (c) tampering detection

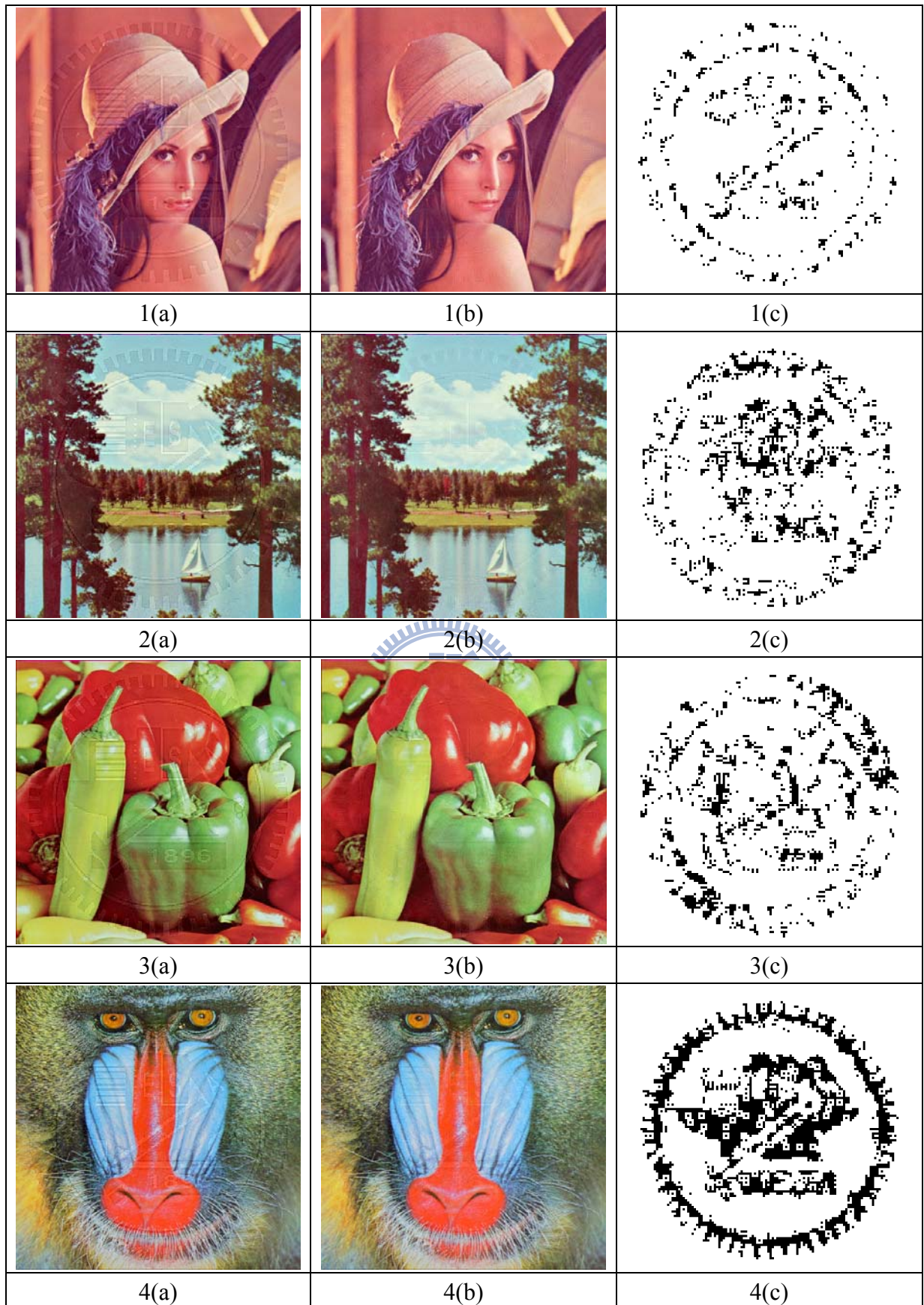


圖 33: Tamper Detection (a) watermarked image (b) ICA attack tampered image (c) tampering detection

第五章 結論與未來展望

5.1 結論

本論文提出了一種新的可視浮水印嵌入演算法，透過 CSF(contrast sensitive function) 以及 NVF(Noise Visibility Function) 應用了 HVS(Human Visual System)的特性來嵌入浮水印，我們也在演算法中加入一項參數來調整浮水印嵌入的強度而保有原來應用 HVS 的特性。在浮水印的效果方面，本論文的方法更加強化原始影像高頻區的浮水印嵌入強度，透過視覺影像品質指標 VSNR 與 VIF 的驗證，我們的方法也擁有更佳的影像品質。抵抗可視浮水印攻擊方面，在 JPEG2000 與 Median Filter 的影像處理上，雖然沒能擁有更佳的強健性，但是也能夠與其它方法擁有相當的強健性。在 ICA 攻擊上，本論文的方法提供的浮水印影像則是保留了更多浮水印邊緣的細節，對於分辨浮水印也有不錯的效果。整體而言，我們認為本論文提供的方法可以有效的保護影像智慧財產權。

5.2 未來展望

在本論文中，我們只針對原始影像進行 CSF、DWT Threshold 以及 NVF 的處理，因此在未來的發展上我們認為可以再進一步探討浮水印影像本身的特性，透過不同的浮水印特性的分析達到更佳的浮水印嵌入效果。

此外，我們發現可視浮水印由於包含了人類視覺感官的感知與浮水印強度的個人主觀喜好，因此如何客觀評斷浮水印嵌入演算法的好壞也是一項值得探討的方向。因此在未來的發展上可以進一步探討可視浮水印的評價方式。

參考文獻

- [1] World Intellectual Property Organization (WIPO), <http://www.wipo.int/>.
- [2] I. J. Cox, et al., “Secure spread spectrum watermarking for multimedia”, IEEE Trans. on Image Proc., vol. 6, no. 12, pp. 1673-1687, Dec. 1997.
- [3] S.-J. Lee and S.-H. Jung, “A Survey of watermarking techniques”, IEEE Int’l Symposium on. Industrial Electronics, IEEE Press, pp.272-277, 2001.
- [4] G.W. Braudaway, K.A. Magerlein , and F.C. Mintzer, “Protecting publicly-available images with a visible image watermark”, Proc. Conf. Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques, SPIE, pp. 126-132, 1996.
- [5] C. S. Lu and H.Y. M. Liao, “Multipurpose watermarking for image authentication and protection”, IEEE Trans. on Image Proc., vol. 10, no. 10, pp. 1579-1592, Oct. 2001.
- [6] Queluz, M.P,” Authentication of digital images and video: Generic models and a new contribution”, Signal Process.: Image Comm., 16 (5), 461–475, 2001.
- [7] Chang C.C, Hu Y.S., Lu T.C., “A Watermarking-Based Image Ownership and Tampering Authentication Scheme”, Elsevier, Pattern Recognition Letter, 2005.
- [8] C. Fei, D. Kundur and R. Kwong, “Analysis and Design of Secure Watermark-based Authentication Systems”, IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 1, pp.43-55, March 2006.
- [9] B. B. Huang and S. X. Tang, “A contrast-sensitive visible watermarking scheme”, IEEE Multimedia, vol. 13, no. 2, pp. 60-66, April-June 2006.
- [10] J. Meng and S.-F. Chang, “Embedding visible video watermarks in the compressed domain,” in *Proc. ICIP*, vol. 1, pp. 474–477, Oct. 4–7 1998.
- [11] S. P. Mohanty, K. R. Ramakrishnan, and M. S. Kankanhalli, “A dual watermarking technique for image,” in Proc. 7th ACM Int. Multimedia Conf., vol. 2, pp. 49–51., Oct./Nov. 1999

- [12] P.-M. Chen, "A visible watermarking mechanism using a statistic approach," in *Proc. 5th Int. Conf. Signal Processing*, vol. 2, pp. 910–913, 2000.
- [13] M.S. Kankanhalli, R. Lil, and R. Ramakrishnan, "Adaptive Visible Watermarking of Images", *Proc. IEEE Int'l Conf. Multimedia Computing and Systems*, IEEE CS Press, pp. 68-73, 1999.
- [14] S.P. Mohanty, M.S. Kankanhalli, R. Ramakrishnan, "A DCT domain visible watermarking technique for image", in *Proc. IEEE Int. Conf Multimedia and Expo.*, vol. 20, pp. 1029-1032, Jul./Aug. 2000.
- [15] Y. Hu and S.Kwong, "Wavelet domain adaptive visiblewatermarking," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 20, pp. 1219–1220, Sep. 2001.
- [16] Y. Hu and S. Kwong, "An Image Fusion-Based Visible Watermarking Algorithm", *Proc. 2003 Int'l Symp. Circuits and Systems*, IEEE Press, pp. 25-28, 2003.
- [17] L. Yong et al., "Translucent Digital Watermark Based on Wavelets and Error-Correct Code", *Chinese J. of Computers*, vol. 27, no. 11, pp. 1533-1539, Nov. 2004.
- [18] A.P. Beegan, L.R. Iyer, and A.E. Bell, "Design and Evaluation of Perceptual Masks for Wavelet Image Compression", *Proc. 10th IEEE Digital Signal Processing Workshop*, IEEE CS Press, pp. 88-93, 2002.
- [19] D. Levick 'y and P. Fori's, "Human Visual System Models in Digital Image Watermarking," *RADIOENGINEERING*, vol.13, no. 4, pp. 38-43, 2004.
- [20] A.B. Watson, G.Y. Yang, J.A. Solomon, J. Villasenor, " Visibility of wavelet quantization noise" , *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol.6, no.8, pp. 1164-1175, 1997.
- [21] Walton, S., "Information Authentication for a Slippery New Age", *Dr. Dobbs J.* 20 (4), pp. 18–26, 1995.
- [22] Schyndel, R.G., Tirkel, A.Z., Osbome, C.F., "A Digital Watermark", *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*, Austin, Texas, vol. 2, pp. 86–90,

- 1994.
- [23] Wolfgang, R.B., Delp, E.J., “A Watermark for Digital Images”, Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, Lausanne, Switzerland, vol. 3, pp. 219–222, 1996.
- [24] M.Hamad Hassan, and S.A.M Gilani, “A Semi-Fragile Signature based Scheme for Ownership Identification and Color Image”, TRANSACTIONS ON ENGINEERING, COMPUTING AND TECHNOLOGY VOLUME 13 MAY 2006.
- [25] Ö. Ekici, B. Sankur, B. Coşkun, U. Nazi and M. Akcay, “Comparative evaluation of semifragile watermarking algorithms”, Journal of Electronic Imaging, vol. 13 (1), pp. 209- 216, 2004.
- [26] D.Kundur and D. Hatzinakos, “Digital watermarking for telltale tamper proofing and authentication,” *Proc. IEEE*, vol. 87, no. 7, pp. 1167–1180, July. 1999.
- [27] H.P. Alexandre, K.W. Rabab, “Wavelet-based digital watermarking for image” , IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, vol. I, pp. 879-884, 2002.
- [28] J.Q. Hu, J.W. Huang, D.R. Huang, and Y.Q. Shi, “Image fragile watermarking based on fusion of multi-resolution tamper detection,” *Electron. Letter*, vol.38, no.24, pp.1512–1523, 2002.
- [29] Z.M. Lu, C.H. Liu, D.G. Xu, and S.H. Sun, “Semi-fragile image watermarking method based on index constrained vector quantization,” *Electron. Lett.*, vol.39, no.1, pp.35–36, 2003.
- [30] H. Yuan and X.P. Zhang, “A multiscale fragile watermarking based on the Gaussian mixture model in the wavelet domain,” *Proc. 2004 Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol.3, pp.413–416, Montreal, QC, Canada, May 2004.
- [31] K. DING, C. HE, L.G. JIANG, and H.X. WANG, “Wavelet-Based Semi-Fragile Watermarking with Tamper Detection” , *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, E88-A(3), pp.787-790 , 2005.

- [32] Yiping Chu, Yin Zhang, Sanyuan Zhang, Xiuzi Ye, "Region of Interest Fragile Watermarking for Image Authentication," First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences-*imsccs*, pp. 726-731, Vol. 1, November 2006.
- [33] J. L. Mannos and D. J. Sakrison, "The effects of a visual fidelity criterion on the encoding of images", IEEE Trans. on Info. Theory, vol. 20, no. 4, pp. 525-536, Jul. 1974.
- [34] S. Voloshynovskiy, et al., "A stochastic approach to content adaptive digital image watermarking", in Proc. 3rd Int. Workshop Information Hiding, Dresden, Germany, pp. 211-236, Sep. 1999.
- [35] G. Voyatzis and I. Pitas, "Application of Toral Automorphisms in Image Watermarking", IEEE Int. Conf. on Image Processing, Vol. 2, pp 237-240, September 1996.
- [36] USC SIPI—The USC-SIPI Image Database
[Online]:<http://sipi.usc.edu/services/database/Database.html>
- [37] AiS Watermark Pictures Protector:<http://www.watermarker.com>
- [38] JPEG 2000 compression,[Online]:<http://www.ece.uvic.ca/mdadams/hasper/~>
- [39] StirMark,[Online]:http://www.petitcolas.net/fabien/software/StirMarkBenchmark_4_0_129.zip
- [40] M. Bertalmio, V. Caselles, and C. Ballester, "Image inpainting", presented at the *SIGGRAPH 2000*, Aug. 2000.
- [41] C.-H. Huang and J.-L. Wu, "Attacking visible watermarking", IEEE Trans. Multimedia, vol. 6, no. 1, pp. 16-30, Feb. 2004.
- [42] S. C. Pei and Y. C. Zeng, "A Novel Image Recovery Algorithm for Visible Watermarked Image", IEEE Trans on Information Forensics and Security, Vol. 1, Issue:4, pp. 543-550, December 2006.
- [43] [Online]:<http://www.dlib.org/dlib/december97/ibm/12lotspiech.html>
- [44] [Online]:<http://www.biblepicturegallery.com/>
- [45] Damon M. Chandler, Member, IEEE, and Sheila S. Hemami "VSNR: A Wavelet-Based

- Visual Signal-to-NoiseRatio for Natural Images”, IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, VOL. 16, NO. 9, SEPTEMBER 2007.
- [46] H. R. Sheikh and A. C. Bovik, “Image information and visual quality,” IEEE Trans. Image Process., vol. 15, no. 2, pp. 430–444, Feb. 2006.
- [47] Chih-Wen Lin “Wavelet Based Multipurpose Color Image Watermarking by Using Dual Watermarks with Human Vision System Models” National Chiao Tung University In Information Management June 2007.
- [48] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, “Image quality assessment: From error measurement to structural similarity,” IEEE Trans. Image Processing, vol. 13, no. 4, Apr. 2004.
- [49] H. R. Sheikh, A. C. Bovik, and G. de Veciana, “An information fidelity criterion for image quality assessment using natural scene statistics,” IEEE Trans. Image Process., vol. 14, no. 12, pp. 2117–2128, Dec. 2005.
- [50] N. Damera-Venkata, T. D. Kite, W. S. Geisler, B. L. Evans, and A. C. Bovik, “Image Quality Assessment Based on a Degradation Model”, IEEE Trans. on Image Processing, vol 9, No 4, April 2000.
- [51] Y. Wang : Survey of Objective Video Quality Measurements. Techni-cal report, EMC Corporation Hopkinton, 2006
- [52] H. R. Sheikh and A. C. Bovik, “A visual information fidelity approach to video quality assessment,” The First International Workshop on Video Processing and Quality Metrics for Consumer Electronics, Scottsdale, AZ, Jan. 23-25, 2005.
- [53] Z. Wang and A. C. Bovik, “A universal image quality index,” IEEE Signal Processing Letters, vol. 9, pp. 81–84, Mar. 2002.