

# 國立交通大學

土木工程研究所

碩士論文

小波理論於智慧型影像處理在鋼構橋梁表面銹蝕面積

檢測之應用

Application of wavelet transform based intelligent image processing  
system to the inspection of steel bridges rusty areas



研究生：戴佳信

指導教授：洪士林 博士

中華民國 九十三年 六月

# 小波理論於智慧型影像處理在鋼構橋梁表面銹蝕面積檢測之應用

學生：戴佳信

指導教授：洪士林 博士

## 國立交通大學土木工程學系

### 摘要

近年來，由於電腦技術的發展、成本花費降低與電腦處理器運算能力的不斷提昇讓影像處理(image processing)技術具有實用性，讓我們可以利用影像處理的過程，將複雜的影像加以分析。因此，本研究之目的在於開發一種智慧型橋梁表面銹蝕面積評估判斷模式，其結合小波轉換(wavelet transform)、影像處理與 MATLAB 程式語言，對於鋼構橋梁表面塗裝銹蝕狀況進行辨認與量測。在系統中利用了小波轉換的基底有較短的持續時間(time duration)、具有多重解析(multi-resolution analysis)的特性和時頻兩域局部特徵的能力，來處理數位影像。

本系統先使用影像檔案之標準差來判斷 R、G、B 三個獨立的影像平面的差異性，選取差異性大的二維數位訊號影像平面來做小波轉換，二維小波轉換產生四塊矩陣，一塊代表低解析部的部分，三塊代表細節的部分。低解析部的部分含有影像中最多的能量，亦即包含了最多的資訊和影像的輪廓，因此對低解析部的係數進行處理，使得重建後的影像能達到求取銹蝕面積的目的，並對銹蝕面積再進行相同的處理，分出深淺不同的區域面積，再分別乘以折減係數求取折減後的銹蝕面積，並結合規範進行銹蝕面積的評估與補救方式，對於規範中不確定的地帶採取模糊(fuzzy)判斷。希望能對銹蝕影像的評估與判斷提供具有客觀性、一致性且量化的程序。

**關鍵字：**影像處理、橋梁塗裝、銹蝕、小波轉換、模糊理論

# Application of wavelet transform based intelligent image processing system to the inspection of steel bridges rusty areas

Student: Jia-Xin Dai

Advisor: Dr. Shih-Lin Hung

Department of Civil Engineering College of Engineering

National Chaio Tung University

## ABSTRACT

In the recent years, the advancement in computer technology allowed image processing to become more practical and cost-efficient. Following the continuous advancement in algorithm ability of computer processors, we are able to analyze the complicated images with image processing. Therefore, this study developed an intellectual bridge surface coating evaluation judgment model which combines wavelet transform, image processing and MATLAB programming language to identify and measure the corrosion situation of the surface coating on steel bridges. The system used the wavelet transform to gain shorter time duration, multi-resolution analysis feature, and time and frequency domain to process images.

The system first uses standard deviation to determine the discrepancies in image plane of R, G, B, and selects 2D digital signal image with large discrepancy for wavelet transform. The 2D wavelet transform produces 4 matrixes, one represents the low resolution part, and the other three represent the details. The low resolution part contains the most part of energy in the image, also the most information and image outline. Processing the parameters of the low resolution part can obtain the corrosion area from the reconstructed image, and process the corrosion area in the same way to divide it into areas of different shades. Then, multiple it with discounted parameters to obtain the discounted corrosion area, and combines with the norm to evaluate and formulate remedy for the corrosion area. Fuzzy concept is adopted for ambiguous area. This study expects to provide objective, consistent, and quantified procedure for evaluation and judgment of corrosion images.

**Keywords:** Image Processing , Steel Bridges Coating , Corrosion, Wavelet Transform , Fuzzy Theory

## 誌謝

經過了兩年的交大生活，在這段期間非常感謝洪士林老師在課業上與各方面的指導與照顧，讓我在學習上有非常多的收穫。

本文能夠順利完成要非常感謝交大的黃炯憲老師、鄭復平老師、黃世昌老師、王維志老師在口試時提供寶貴的意見，讓我能注意到本文的不足與需要增強及修改的部分。另外還要感謝俊明、小史(頌恩)學長在研究期間的許多指導，與蘇威智學長在有關小波問題上的解惑。還有哈寶(勁威)、建芳這兩年的相互扶持，及陪伴我一年的學弟宏安、小龜(博育)、水哥(濬鴻)，是你們讓研究室熱鬧許多。

最後要感謝我家人的鼓勵與支持，讓我能專心的把心思放在課業和研究上，還有在求學期間結識的許多好友，因為有你們的陪伴才讓我的研究所生活更加地豐富和多采多姿。



# 目 錄

頁次

摘要	I
ABSTRACT	II
誌謝	III
目錄	IV
表目錄	VIII
圖目錄	X
符號說明	XIII
<b>第一章 緒論</b>	<b>1</b>
1.1、研究背景	1
1.2、研究目的	2
1.3、相關文獻回顧	2
1.4、研究方法與步驟	3
1.5、論文架構	4
<b>第二章 鋼構橋梁的銹蝕原因與評估修補</b>	<b>5</b>
2.1、前言	5
2.2、鋼橋材料銹蝕原因與型態	5
2.2.1、鋼橋材料銹蝕原因	5
2.2.2、鋼橋銹蝕型態	6
2.2.3、大氣中鋼橋銹蝕原因及種類型態	8

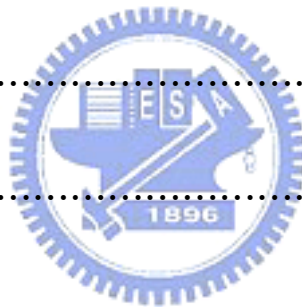
2.3、鋼橋塗裝系統	9
2.3.1、塗裝系統之構成	9
2.3.2、塗裝系統之分類	9
2.4、鋼橋之塗膜劣化與銹蝕評估	10
2.4.1、鋼橋之塗膜劣化	10
2.4.2、鋼橋之銹蝕評估	12
2.5、鋼橋銹蝕修補技術	15
2.5.1、維修塗裝系統	15
2.5.2、維修塗裝施工	15
2.5.3、維修塗裝施工之注意事項	17
<b>第三章 影像處理</b>	<b>19</b>
3.1、前言	19
3.2、影像的表示	20
3.3、RGB 彩色模型	22
3.4、數位影像處理	22
3.5、數位影像處理系統	23
<b>第四章 小波理論</b>	<b>25</b>
4.1、前言	25
4.1.1、轉換法	25
4.1.2、小波分析起源	25



4.1.3、小波分析	26
4.2、傅立葉轉換	27
4.2.1、離散傅立葉轉換	27
4.2.2、短時傅立葉轉換	28
4.3、小波轉換	29
4.3.1、小波轉換類型	29
4.4、多尺度分析	31
4.4.1、近似空間與細部空間	32
4.5、二維小波理論	32
4.5.1、二維小波轉換係數	33
4.6、Mallat 運算法	33
<b>第五章 模糊理論</b>	<b>35</b>
5.1、前言	35
5.2、模糊理論的架構	35
5.2.1、模糊集	36
<b>第六章 系統設計與案例分析</b>	<b>38</b>
6.1、前言	38
6.2、影像擷取	38
6.3、影像前處理	39
6.3.1、影像之濾波處理	39



6.4、小波轉換分析影像.....	39
6.4.1、低頻係數(ca)的處理.....	40
6.4.2、影像的重建與漆銹的分離.....	40
6.4.3、有缺陷的面積(銹)的再分析.....	41
6.5、有缺陷面積(銹)進行判斷與評估.....	42
6.6、案例分析.....	43
<b>第七章 結論與建議.....</b>	<b>46</b>
7.1、前言.....	46
7.2、結論與建議.....	46
參考資料.....	48
附表.....	50
附圖.....	65





# 表目錄

頁次

表 1.1	九十二年底台灣地區橋座數概況	50
表 1.2	ASTM Corrosion Performance Rating	50
表 2.1	外露用一般塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)	51
表 2.2	外露用長期防蝕塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)	52
表 2.3	內面用塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)	52
表 2.4	塗膜劣化的原因及其處理方法	53
表 2.5	美國 SSPC 生銹標準評估法	54
表 2.6	日本塗膜剝離評估基準	54
表 2.7	日本塗膜變褪色檢查標準樣本	54
表 2.8	日本塗膜污穢檢查標準樣本	54
表 2.9	平均劣化等級	55
表 2.10	銹蝕劣化評估對象檢查項目	55
表 2.11	景觀保護區之評估表	56
表 2.12	一般區域之評估	56
表 2.13	判定區分	56
表 2.14	塗膜狀態區分	57
表 2.15	各種塗料重塗之適合性	58
表 2.16	維修用塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽) a 塗裝系(外面塗裝用)	59

表 2.17	維修用塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)b 塗裝系(外面塗裝用)	60
表 2.18	維修用塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)c 塗裝系(外面塗裝用)	61
表 2.19	維修用塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)c 局部修補用塗裝系(外面塗裝用)	62
表 2.20	維修用塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)d 塗裝系(外面塗裝用)	62
表 2.21	表面處理之級	63
表 2.22	塗膜劣化程度及其對應之表面理	63
表 2.23	各噴砂處理及其對應之鹽份殘留量	63
表 2.24	各種鹽份去除方法之效果比較	64



## 圖目錄

頁次

圖 2.1	鋼材表面塗膜劣化剝離	65
圖 2.2	鋼材表面起泡浮腫	65
圖 2.3	鋼材表面起泡浮腫	65
圖 2.4	鋼梁表面褪色、白亞化及孔蝕	65
圖 2.5	塗膜附著困難，螺栓銹蝕	65
圖 2.6	接合版嚴重銹蝕	65
圖 2.7	箱梁角隅處塗膜剝落腐	65
圖 2.8	鋼梁表面褪色、白亞化及孔蝕	65
圖 2.9	接合版嚴重銹蝕	66
圖 2.10	接合版嚴重銹蝕	66
圖 2.11	焊道處防銹處理不良造成銹蝕	66
圖 2.12	扭桿構材高應力處銹蝕	66
圖 2.13	箱梁下方管線通風不良造成銹蝕	66
圖 2.14	排水管出口處附近產生銹蝕	66
圖 2.15	不當美化植栽造成銹蝕	66
圖 2.16	鋼橋銹蝕	66
圖 2.17	第二階段之相關反應	67
圖 2.18	各種銹蝕型態解說示意圖	68
圖 2.19	上部結構檢查部位	69

圖 2.20	下部結構檢查部位	69
圖 2.21	上、下部結構檢查部位	69
圖 3.1	RGB 彩色模型	70
圖 3.2	彩色影像( $m \times n \times 3$ )示意圖	70
圖 3.3	數位影像處理之基本步驟流程	71
圖 4.1	轉換示意圖	72
圖 4.2	STFT 在時頻域平面上的解析度	72
圖 4.3	小波轉換在時頻域平面上的解析度	73
圖 4.4	多尺度一維小波分解	73
圖 4.5	多尺度二維小波分解	74
圖 4.6	小波的分解與重建的示意圖(a)分解(b)重建	75
圖 4.7	二維小波轉換 (a)原始影像(b)第一階的小波轉換(c)第二階的小波轉換(d)第三階的小波轉換	76
圖 6.1	系統架構圖	77
圖 6.2	輸入分析影像	78
圖 6.3	R、G、B 影像及其標準差	78
圖 6.4	低頻係數、垂直高頻係數、水平高頻係數和對角線高頻係數的影像及其修正前後係數值	79
圖 6.5	原始影像與修正重建後影像數值	79
圖 6.6	低頻係數(ca)、修正重建及有缺陷面積與無缺陷面積的影像	80
圖 6.7	提取出的有缺陷面積影像與其 R、G、B 數值	80
圖 6.8	第一次的深淺鏽分離	81
圖 6.9	分離後各程度深淺的鏽	81
圖 6.10	缺陷面積再分析示意	82
圖 6.11	深淺鏽乘以權重後的判斷評估	82

圖 6.12	黃底面漆銹蝕影像	83
圖 6.13	鋼梁表面塗膜劣化、孔蝕影像	84
圖 6.14	鋼梁表面塗膜銹蝕影像	85
圖 6.15	螺栓銹蝕影像	86
圖 6.16	藍底面漆銹蝕影像	87
圖 6.17	綠底面漆銹蝕影像(分解尺度 n=1)	88
圖 6.18	綠底面漆銹蝕影像(分解尺度 n=2)	89



## 符號說明

$F(x, y, t, \lambda)$	影像源在空間座標 $(x, y)$ ，時間 $t$ 且波長為 $\lambda$ 情況下所散發之空間能量分布
$V(\lambda)$	相對亮度效率函數
$R(\lambda)$ 、 $G(\lambda)$ 、 $B(\lambda)$	分別為對紅、綠、藍三原色的頻譜響應
$S_i(\lambda)$	第 $i$ 個感應器的頻譜響應
$f(x, y)$	光強度函數
$f(t)$	信號函數
$F(\omega)$	$f(t)$ 的連續傅立葉轉換
$f(n)$	離散訊號
$F(k)$	$f(n)$ 的一維離散傅立葉轉換
$W_N^{nk}$	轉換核
$g(t)$	視窗函數
$L^2(R)$	平方可積的實數空間(即能量有限的信號空間)
$C_\psi$	$f(t)$ 連續小波轉換的滿足允許條件(admissible condition)
$\psi(t)$	為基本小波(basic wavelet)或母小波(mother wavelet)
$\hat{\psi}(\omega)$	$\psi(t)$ 其傅立葉轉換
$\psi((t-\tau)/a)/\sqrt{a}$	為小波基底函數，有時也稱為子小波(baby wavelet)
$CWT(a, \tau)$	$f(t)$ 的連續小波轉換
$\psi_{mn}(t)$	離散小波
$DWT(m, n)$	離散小波轉換
$DPWT(m, n)$	離散參數小波轉換
$DTWT(m, n)$	離散時間小波轉換

$V_i$	第 $i$ 子空間
$\oplus$	兩空間 $V_m$ 與 $W_m$ 的正交直和
$V_m$	較粗糙的近似訊號函數空間
$V_{m+1}$	較精細的近似訊號函數空間
$W_m$	$V_{m+1}$ 與 $V_m$ 相對應近似訊號函數之細節訊號函數空間
$\downarrow 2$	做次取樣(subsampling)
$\uparrow 2$	做升取樣(upsampling)
$\phi(x, y)$	二維尺度函數
$\psi^{(i)}(x, y)$	第 $i$ 二維小波函數
ca	低頻係數
chd	垂直高頻係數
cvd	水平高頻係數
cdd	對角線高頻係數
$\mu_A(x)$	集合A的明確集
$\mu_{A \cap B}(x)$	集合A與B的交集
$\mu_{A \cup B}(x)$	集合A與B的聯集
$\mu_{\bar{A}}(x)$	集合A的補集
$\mu_{vA}(x)$	非常(very)
$\mu_{mA}(x)$	有些(more-or-less)
$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$	離散值屬性 $X$ 其值所組成的集合
$\mu(x)$	隸屬度函數
$S(x: a, b, c)$	S型函數

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

橋梁是公路網中最重要的一環，卻因面臨老舊的問題，影響交通和行車安全，在所有發生橋梁災難中有些是因為洪水、暴風雨等天災，有些是因為超載、模板之撐不良等人為因素，而有些情況則是因為橋梁老舊所產生的銹蝕而導致破壞〔1〕。而目前台灣地區各級交通網路中，橋梁總數達萬餘座(參考表1.1，截至2003年底，資料來源交通部統計處[道路長度及橋梁座數概況](#))，許多橋梁之橋齡已經達20-40年，卻仍有大半橋梁尚未進行檢測工作。雖然依照規定需定期進行橋梁檢測工作，但由於經費不足及檢測方式昂貴又不具足夠的可靠性與準確性，以及人力不足等因素，導致大半橋梁無法進行檢測工作。

台灣位於亞熱帶，屬於海島型氣候，自然環境屬於高溫潮濕，更因大氣中含高鹽分，橋梁產生銹蝕劣化的機率相當高。近年來又以工業高度發展，加以車輛急劇增長排放高銹蝕性廢氣造成台灣成為高銹蝕性地區。國內個學術研究機構或橋梁主管單位曾對某些特定橋梁之銹蝕程度做過調查分析，但對國內眾多橋梁而言，仍缺乏全面性整體的勘查評估。故希望能有一個低成本及非破壞性，且能將視覺影像自動加以評估的技術，來改善評估的品質，並能給予適時的量化數據以利於橋梁狀況的評估。

而在大部分營建與工程實務中，絕大部分的維護與品質評估是採用主觀的人工視覺評估方式，造成工程管理上評定作業的障礙。在美國因為效率不彰的品質評估方式存在，造成許多高速公路橋梁存在了一些顯著的缺陷，而缺陷發生原因在於高速公路鋼結構橋梁或複合橋梁的抗銹蝕塗層惡化。事實上，橋梁塗層的品質會直接影響橋梁狀況條件，但是卻少有人針對塗層品質的評估方式加以改善提昇，就現行的評估方式而言，主要是利用視覺方式來檢視，這是一種既耗時且缺乏一致性跟客觀性的評估方式〔2〕。

通常，鋼結構橋梁表面塗裝良劣係利用橋梁表面各種狀況之缺陷佔塗裝面



積之百分比表示，其表示法可分類成兩種方式：一到十等級分類或採優、好、普通、劣表示的分類方式。一般而言，若橋梁的銹蝕小於1-2%，其處理方式是將銹蝕部分清除並上底漆，再將橋梁漆上一到二層面漆；而若表面生銹大於20-25%者，則最經濟的處理方式是將結構外部塗層全部清除，並且重新塗裝。而在中間範圍，通常較難以認定，一般都是採個人主觀的判斷〔3〕。

在美國材料試驗協會(ASTM)規範中對於塗層銹蝕評估的分級方式，係利用銹蝕百分比大小訂定從0到10的不同等級〔3〕。表1.2表示不同程度銹蝕所應重漆之百分比。然而，利用工程師經驗去判斷銹蝕面積所佔的百分比是十分困難的，且在判斷銹蝕面積的認定上常會有過於主觀判斷的問題，對於同一銹蝕面積的百分比常會有因人而異的判定結果。

## 1.2 研究目的

本研究目的意圖探討建立一種智慧型鋼構橋梁表面銹蝕面積評估判斷系統，運用於鋼橋表面銹蝕面積難以評估的公路鋼構橋梁上。希望藉由此判斷系統可以提供一個客觀並量化的分析結果。本系統採用小波轉換的基底有較短的持續時間、具有多重解析的特性和時頻兩域局部特徵的能力，來處理數位影像訊號。小波分析的良好解析度與電腦快速的運算能力，能夠去取代理人類視覺與經驗上的主觀判斷，並且能有客觀、量化與一致性的特點。

本論文主要目標是對於鋼橋表面銹蝕面積難以評估的高速公路鋼構橋梁能發展一種智慧型影像分析評估模式，提供鋼橋表面銹蝕面積判別上的一種輔助工具，對銹蝕影像加以分析提供具客觀性、一致性且量化的程序，並希望藉由深淺銹的區分可以更準確的評估判斷銹蝕程度，以減少高速公路鋼構橋梁維修與保養的成本。

## 1.3 相關文獻回顧

在研究過程中，參考了許多有關影像處理方面的相關文獻，影像處理在有關影像的辨識、分割、邊界檢測…等方面有許多的研究。而小波理論在訊號的處理

上與影像壓縮、消噪、識別跟組織成分分析上也都有許多的應用。

在影像處理於鋼構橋梁表面銹蝕面積的判別應用則有〔4〕、〔5〕等的相關文獻，在〔4〕中先利用影像處理軟體對影像進行某些處理，再利用Fuzzy與類神經網路來判別無缺陷跟有缺陷的面積的比。在〔5〕中則是利用影像處理軟體判斷無缺陷與有缺陷面積的閾值(threshold value)位置，並配合人工目視判斷作閾值的修正，以進行二值化的處理，最後利用類神經網路來學習其結果。在本研究中則是利用小波理論來做影像處理，希望可以藉由數學式的轉換找出影像上的有用資訊加以處理，以達到判別無缺陷跟有缺陷的面積的目的，在研究中更進一步的對有缺陷的面積加以分析區分以達到評估判斷銹蝕程度的目的，並結合規範對有缺陷面積的百分比進行評估判斷，對規範中並無明確定義的區域採取模糊集(fuzzy set)的判別。另一方面可藉由程式的撰寫將影像的龐大數據轉換成真正實用的資訊與相關影像和圖形，來取代影像處理軟體在使用上的一些限制與不便，以建立一套更符合需求與應用的智慧型影像判別系統。

#### 1.4 研究方法與步驟

本研究期望建立出一套鋼構橋梁表面銹蝕面積的智慧型影像判斷模式主要可分為四個階段，茲將研究步驟簡述如下：

##### 1. 文獻回顧

收集現行一些有關影像處理方面的參考文獻及相關塗裝規範文獻，以便了解影像處理在塗裝表面應用上的可行性。並了解現行橋梁狀況評估的情形，並就現況的缺失能加以探索，並參考相關小波轉換與影像處理之研究成果與文獻。

##### 2. 資料獲取

對於系統所需業的分析案例是從實地拍攝而獲取的影像，而這一些所需的數位影像資料亦能從一些橋梁評估案例中獲取。

##### 3. 系統建構與測試

收集的影像資料經由系統處理並建立一分析系統，使用小波分析來處理數位

化影像，及採用模糊判斷的方法判斷銹蝕面積百分比評估的不確定部分，以建立一塗層缺陷判斷及量化之分析模型。

#### 4. 研究成果分析與撰寫

彙整本研究系統分析之成果與相關理論及結論撰寫成論文。

### 1.5 論文架構

本論文主要分為緒論、鋼構橋梁的銹蝕原因與評估修補、影像處理、小波理論、模糊理論、系統設計與案例分析、結論與建議等七章，各章節內容簡述如下，第一章「緒論」，包含研究背景、研究目的、相關文獻回顧、研究方法與步驟及論文架構等五節；第二章「鋼構橋梁的銹蝕原因與評估修補」，對鋼橋材料銹蝕原因與型態、鋼橋塗裝系統、鋼橋之塗膜劣化與銹蝕評估與鋼橋銹蝕修補技術做一介紹；第三章「影像處理」，將現階段的影像處理相關技術做一介紹；第四章「小波理論」，介紹小波理論的發展過程與應用及其轉換、特性；第五章「模糊理論」，介紹模糊理論及其架構；第六章「系統設計與案例分析」，應用三、四與五章的理論觀念，建立智慧型橋梁表面銹蝕面積評估判斷模式，並介紹一些案例分析；第七章「結論與建議」，對本研究做一通盤的檢討與建議，對其可行性與未來可發展的地方做一說明。

## 第二章 鋼構橋梁的銹蝕原因與評估修補

### 2.1 前言

銹蝕發生的基本要素為水與氧的作用，大氣中氧的供給變化情況較小，但水分則常受氣候狀態之影響，變化較大。在乾燥、低溫的冬季，銹蝕很難產生；而在梅雨或高溫、多濕的夏季，銹蝕則極易出現。台灣位處亞熱帶，在梅雨、颱風等多雨的季節裡，銹蝕極易產生。此外台灣屬海島型氣候，空氣濕度高，在早晚溫差變化較大的區域，鋼材表面易因結露而有水滴附著，此均為誘發銹蝕產生之因素。因此，本章節將就鋼構橋梁銹蝕的原因、型態與評估修補作一介紹。圖 2.1~2.16 為常見鋼構橋梁的各種銹蝕案例〔1〕。

### 2.2 鋼橋材料銹蝕原因與型態

#### 2.2.1 鋼橋材料銹蝕原因〔1〕

銹蝕是一種自然的現象，將使結構物、金屬機器降低其服務性能。銹蝕是金屬與周圍環境發生化學或電化學反應而使金屬產生損害的一種自然反應。鋼結構物存在於自然環境中，因有氧與水共存而產生銹蝕；氣溫、濕度、降雨量、二氧化硫濃度、海鹽粒子及其他銹蝕性物質，是支配銹蝕進行速度的重要因素〔6〕。

銹蝕產生之鐵銹主要成份為鐵的氫氧化物或氧化鐵水化和物，銹蝕反應的第一階段主要因局部電池的產生而造成鋼材表面特性不均一，此表面若處於銹蝕環境之中，鐵 ( $Fe$ ) 將形成鐵離子 ( $Fe_2^+$ )，若再接觸到水與氧，則鐵離子將遭分解。銹蝕反應的第二階段係銹水內離子相互結合進行後續反應，由鋼材表面分離的  $Fe_2^+$  遇水分解，持續反應成為水和氧化物 ( $FeOOH$ ) 或紅銹 ( $Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ )，其相關反應如圖 2.17 所示。

紅銹產生後，銹水流出將污染鋼構表面，有礙觀瞻。然而紅銹的產生也並非完全是負面的，有時它亦可提供工程師一些有用的訊息，例如在進行結構物疲勞損傷檢測作業時，若發現塗膜上出現銹水，則大致顯示有疲勞龜裂現象發生；另

高拉力螺栓摩擦接合面產生紅銹即為確保摩擦係較重要之條件等。此外，紅銹在發生過程中，若氧的供給並不充份時，氧化作用之結果將產生黑皮 ( $Fe_3O_4 \cdot nH_2O$ )，鋼材若施以噴砂處理，則可去除之，通常鋼材在放置一定時間後，表面常可見黑皮之產生，因此高拉力螺栓接合部位的摩擦面均曾產生黑皮，其位置很快便可確認。

## 2.2.2 鋼橋銹蝕型態 [1]

金屬銹蝕型態由外觀視之，可分為以下八類 [7]，見圖2.18：

### 一、均勻銹蝕

均勻銹蝕(uniform corrosion)或全面銹蝕(general corrosion)，指整個材料暴露表面產生均勻且略為高低起伏之銹蝕生成物，大都是由電化學反應所引起，為銹蝕中最普遍之一種。一般鋼鐵於大氣中之生銹皆屬此類。

### 二、伽凡尼銹蝕

兩個電位不同之金屬，在電解質溶液中接觸，其活性較大者為陽極，比較容易銹蝕；而活性較小者為陰極，抗蝕性較強。兩者間形成一封閉電路而有電流流動造成銹蝕，稱為伽凡尼銹蝕(Galvanic corrosion)或二金屬銹蝕(two-metal corrosion)，當兩金屬電位相差愈大，其銹蝕速率相對也愈大。因工程結構中往往需將不同金屬接合，故造成其中一金屬之嚴重銹蝕，此現象可以伽凡尼偶合引起之銹蝕現象加以解釋。

### 三、間隙銹蝕

間隙銹蝕(crevice corrosion)或濃差電池銹蝕(concentration cell corrosion)為發生於間隙處之局部銹蝕，因為溶液於間隙間滯留過久或無法流通，導致缺氧而無法造成間隙口內外溶液濃度差異，形成金屬離子電池；或因溶液含氧量差異，形成氧濃差電池。最常見於乾濕交替造成間隙中殘留溶液濃度變化之處。

### 四、孔蝕

由於銹蝕因子破壞材料表面或表面鈍化膜，使得銹蝕破壞以針孔深入穿透方式進行，並沿重力方向延伸及排列，稱之為孔蝕(pitting)。造成孔蝕生成之最大原因為溶液中含有鹵素離子，尤其是氯離子，對金屬具有強烈之親和力，足以穿透金屬表面之鈍化膜。一旦氯離子與金屬表面接觸後，將促使金屬離子水解而使鈍化膜脫離。結果金屬失去鈍化作用，而形成活性銹蝕反應。因為氯離子並非全面性穿透鈍化膜，而是發生於某些特定位置，以局部破壞金屬表面氧化膜方式，使每一破損處皆成為一為小陽極，因其面積極小故電流密度特大，遂造成孔蝕產生。孔蝕型態大致可分為深孔淺孔及封閉型三類。

孔蝕亦可說是罅隙銹蝕之一特例，一般孔蝕處常有罅隙銹蝕結伴產生，但罅隙銹蝕卻不會伴隨孔蝕，兩者皆屬極端之局部銹蝕，越鈍化之金屬越容易發生。孔蝕因面積小且常覆於銹蝕產物之下，故不易察覺。但一旦事態嚴重時，卻往往發生無法補救之銹蝕災害。

#### 五、晶界銹蝕

當金屬由液態凝結為固態過程中，是以許多質點為中心，形成交錯之結晶顆粒。通常這些晶粒界面的晶體格子無法匹配，而產生所謂之晶界(grain boundary)。由於晶界為液態金屬最後凝結部分，具有熔點較低、能量較高且富化學活性等特性。當金屬發生銹蝕時，自然先由晶界處被局部銹蝕，使金屬喪失強度及延展性。晶界銹蝕(intergranular corrosion)最常見於焊道兩旁焊材與母材交界處而引起焊道銹蝕。

#### 六、選擇性浸蝕

合金是由兩種以上元素所組合而成。當銹蝕過程中，僅有其中之某一元素被選擇性的淬取銹蝕而析出，導致合金成份改變，進而喪失原有特性，稱之為選擇性浸蝕(selective leaching)。就如同化學中利用有機溶劑，將天然生物中某些成分滲取出來，故為其名。一般來說，選擇性浸蝕皆選擇合金中化學活性較大之元素析出銹蝕。

#### 七、應力銹蝕

當外加應力或內部殘留應力與特定銹蝕環境共同作用時，成為應力銹蝕(stress corrosion)。因應力銹蝕大多伴隨裂紋發生，且方向皆與應力垂直且破裂痕跡沿晶界蔓延，故又稱為應力蝕裂(stress corrosion cracking, SCC)。

造成應力銹蝕皆為拉應力，壓應力不會造成應力銹蝕。其應力之來源可為外力，亦可為殘留應力。殘留應力之來源可能來自冷作、焊接或熱處理作用後散熱不均所致。而應力銹蝕不一定產生銹蝕物，但破壞時所承受之應力均小於抗拉強度，亦即於安全設計範圍內，卻往往造成意想不到的災害。

#### 八、沖磨銹蝕

當金屬與銹蝕環境有相對運動時，兩者間產生相互的摩擦撞擊所造成之銹蝕稱為沖磨銹蝕(erosion corrosion)。金屬銹蝕所產生之氧化物，若沉積或附著於金屬表面，則此氧化物將形成一保護層。若保護層細緻緊密，則此金屬具有良好抗蝕能力，如不銹鋼表面之鈍化膜。相反地，有些結構鬆散多孔，則此金屬較易銹蝕，如鐵銹。銹蝕環境與金屬相對地快速運動，必然造成金屬表面磨損，使保護層除去，暴露出新的金屬面。然後新暴露出之金屬面又重新受到銹蝕，如此不斷循環，而造成沖磨銹蝕。

### 2.2.3 大氣中鋼橋銹蝕原因及種類型態〔8〕

大氣中鋼橋銹蝕原因及種類型態以應力或疲勞銹蝕及電位差銹蝕為最常見。例如：1. 鋼鐵焊接或螺栓，鉚釘連接處之應力、異金屬或間隙銹蝕；2. 支承部或彎角或受張力應力部分之應力銹蝕；3. 時常乾濕或留存水分、汙物或水汽部分之電位差銹蝕；4. 鋼材受到溫度一次或多次反覆突然改變之影響，熱應力在表面上熱脹冷縮或鋼材在使用前之處理過程中如熔煉，酸洗時氫之介入導致氫介入銹蝕或熱處理銹蝕；5. 鋼材切斷、碰撞或末端部位之應力或濃淡氧電池銹蝕；6. 靠海邊側面之鋼梁、構架易受海風吹襲部位之電位差銹蝕。

## 2.3 鋼橋塗裝系統〔1〕

鋼橋防蝕塗裝系統選擇時，除應考慮其設置地點之環境條件及該環境下塗膜之耐久性外，對鋼構造物之製作方法，施工過程等相關工作也應了解〔1〕。

### 2.3.1 塗裝系統之構成〔1〕

塗裝系統的構成，一般包括表面處理、底漆、中塗漆及面漆等部分。為使塗裝工程能長期維持良好的防蝕效果及美觀，一般油漆塗膜應具有下列之性能：

1. 塗膜厚度要足夠；
2. 與鋼料密接良好（密接性）；
3. 優越之防蝕效果（防蝕性）；
4. 因氣象作用之劣化或損耗小（耐候性）；
5. 防止水之滲透（耐水性）；
6. 對污染物質抵抗力大（耐藥品性）；
7. 塗膜均一性。

僅由一層塗膜或一種塗料要滿足上列各項性能是不可能的，故塗裝應分數層實施，方可獲致符合需求之完整塗膜。一般而言，上層塗膜（面漆）應具有良好之耐候性、耐水性、耐藥品性、並須含有著色顏料之塗料；而當為中塗漆之塗料則為對面漆、底漆均具有媒介作用，可調和兩者之差異性及顏色之激變性者。此種以不同性能之塗料，分層塗刷之組合，來發揮整能塗裝之防蝕功能，即是塗裝系統。

### 2.3.2 塗裝系統之分類〔1〕

塗裝系統可分為外露與內面用二類。外露用途裝系統之選擇，應考慮所在地點之環境銹蝕因子與其強弱，以及維修難易度等因素。外露用塗裝系統為顧慮構件在運輸、架設或混凝土施工時，可能遭受損傷或污染，一般分為工場塗裝及工地塗裝兩部分。近年來，長跨度橋梁等維修不易之鋼結構物，已漸趨向於選用長



期防蝕之塗裝系統。

鋼構件之內面（如箱梁之內面）塗裝，因與架設位置之環境關係較小，亦無日光、雨風等之侵襲，但因易產生結露或滲水，維修較麻煩，故採用耐久性良好之環氧柏油漆（Tap Epoxy），表2.1~表2.3為日本道路協會所建議之塗裝系統〔9〕參考表。表中A及B之塗裝系統亦為日本建築學會所認可，適用於建築鋼骨結構防蝕之用。

且由表2.1~表2.3所列之塗裝系統，可或下列數點塗裝系統之結論：

1. 塗裝系統分為外露及內面用兩類。
2. 外露用再細分為一般(A與B)及長期防蝕(C)兩種型態。
3. 外露用之A~C適用範圍如下：
  - A：環境銹蝕因子不強之區域。
  - B：海岸地區或重化學工業地區等環境銹蝕因子強烈的地區。
  - C：長期防蝕區（跨海、或其他長跨徑橋梁等檢查、維修不易之鋼結構物）
4. 內用面依橋梁施工時有無加熱，區分為D及E類。
  - D：閉合斷面之內面（40箱梁）。
  - E：同上，惟因使用鋼橋面鈹之橋梁，由於瀝青面層施工，必須同時要求耐熱性，故此類塗裝系統適用於鋼橋面之內測。
5. 塗裝作業分為工廠塗裝與工地塗裝兩大部分，並明定每層油漆間隔時間。

## 2.4 鋼橋之塗膜劣化與銹蝕評估

### 2.4.1 鋼橋之塗膜劣化〔1〕

塗膜劣化各現象分別說明如下〔10〕：

#### 1. 剝離

塗膜剝離產生於塗膜與表面處理之界面或多層薄膜之層間處，主要原因有塗料附著力不良或被塗面附著有水份、油脂及鹽份等污染物未與以充分去除，或因塗膜下有銹蝕現象發生等。塗膜剝離後，將降低油漆之防蝕功能，剝離面積較小，

成不規則形狀者稱flaking；剝離面積較大，呈片狀剝落者稱scaling；僅大部分塗膜均已剝離者則稱為peeling。

## 2. 浮腫

浮腫係為局部塗膜自底部產生上浮腫脹之現象而造成塗膜分離，主要因為塗膜與鋼材表面或塗膜與塗膜之間產生氣壓或液壓而造成此種現象。對於常有遭水浸泡之鋼構材，非常容易產生塗膜浮腫。此外，若有水溶性物質或鹽份附著於鋼構材上，當水份侵入時，則將助長塗膜浮腫之發生。另外塗膜下方若有金屬銹蝕發生，因銹蝕反應生成物中存有鹼性物質，對塗膜將起軟化作用，因而遭浮腫。

## 3. 龜裂

塗膜產生龜裂主要是由於塗料組合不合宜、乾燥條件不佳、膜厚過大及塗膜老化等原因使得塗膜產生較大的收縮應力而造成。塗膜依其龜裂產生之型態可分為以下二種：

checking：僅面漆塗膜產生細長裂紋。

cracking：自面漆至鋼構表面產生裂縫。

塗膜龜裂後將使得銹蝕物質得以與鋼構材接觸，進而產生銹蝕。

## 4. 受褪色或污穢

塗膜變色主要是由於塗膜中之著色顏料受到紫外線之影響而變質，使得塗料之特定顏料失落導致色系平衡遭到破壞而產生變色。褪色則是由於塗膜受到紫外線之影響，自塗膜表面分解成粉狀的阻塞物，使得塗膜中顏料的性能受到影響造成顏色變薄、變淡。變褪色並不會對塗膜防蝕性能之降低有直接的影響，惟若當塗膜表面已分解粉狀的阻塞物，並由肉眼可顧測到底漆塗膜時，則其防蝕性能將受影響。污穢或光澤降低與防蝕性能並無直接的關係，污穢物可分成油性與非油性等二種，油性污染物很難以清水沖刷乾淨，就美觀上言，鋼橋產生污穢後宜考量予以施補塗裝。

## 5. 生銹

塗膜產生龜裂或剝離等劣化現象後，或由於表面處理不當或受銹蝕物質侵入

將產生銹蝕，銹蝕發生將會促進塗膜劣化的加速進行，故生銹為塗膜劣化之重要指標。依照鋼構表面銹蝕之型態，銹可分成浮腫銹及龜裂銹。浮腫銹發生在金屬表面，在塗膜表面並不會顯現，線狀銹為浮腫銹之一種，在塗膜與鋼構材介面之間若有水份侵入時，將於附著力較弱的部分產生細線狀的銹蝕。龜裂銹亦發生在金屬表面，但亦會顯現在塗膜表面，容易觀察得到。表2.4所示為各種塗膜劣化的原因及其因應處理方法〔6〕。

## 2.4.2 鋼橋之銹蝕評估〔1〕

我國為海島型氣候，各種天然環境與日本頗為相近，國內鋼橋防蝕技術亦多參考日本，因此本節將介紹日本橋梁建設協會「鋼道路橋檢查手冊」〔11〕有關鋼橋銹蝕評估之相關內容。茲將其相關內容敘述如下：

一般為評估鋼橋之銹蝕劣化情形，必須先作檢查，檢查之對象為鋼橋結構物整體，包含主構件及副構件之內外面、鋼製胸牆外側、增設梁、附屬鋼結構等。檢查時需充分了解鋼橋之主構件與副構件之機能與構造概要，若能早期發現鋼橋塗裝有變褪色、剝離、生銹之情形，並作適當的處理，常能大幅地延長結構物之使用年限。

鋼橋銹蝕檢查之目的為明確判定劣化等級、究明劣化原因、決定補修與否及補修工法、選定異常事態之處理方法等，因此需根據個別之目的決定適切之檢查項目、檢查方法、判定基準等。鋼橋銹蝕劣化之一般性檢查通常以目視為主，根據所確認之劣化狀況，當有必要由結構觀點來進行健全性檢核、原因究明等之詳細檢查時，於充分檢討結構物之老舊程度、交通量、重要性、結構型式等之條件後，方可實施特別檢查。

### (1) 塗裝檢查

I、塗裝檢查之目的為維持鋼結構物之耐久性及環境上之調和，掌握塗裝之劣化程度，並判定是否重新塗裝。

II、檢查方法原則為接近結構物各部位檢查，以目視、觸摸及簡單計測進行

檢查。

### III、檢查位置

上部結構與下部結構外部塗裝之檢查部位圖2.19~ 圖2.20所示之3部位為標準。

1. I型梁與箱型梁之檢查位置仍以圖2.19所示3部位為標準。

- (a) 外梁腹板外側。
- (b) 全部主梁腹板內側。
- (c) 下翼板下面。

2. 鋼橋墩之檢查位置仍以圖2.20所示3部位為標準。

- (a) 柱體全面。
- (b) 帽梁側面。
- (c) 帽梁下面。

IV、檢查項目如下：

- 1. 生鏽。
- 2. 剝離。
- 3. 變褪色。
- 4. 污穢。



V、劣化等級之取樣

取樣之對象位置為於每個部位（3部位）上對於每個檢查項目（生鏽、剝離、變褪色、污穢）裂化較大之位置附近，取一部位約3cm\*3cm（與標準樣本大小同一程度）。原則上依每個檢查項目之劣化狀態標準樣本與現狀比較，來決定劣化等級。

VI、檢查標準樣本

- 1. 生鏽之檢查標準樣本。採用美國SSPC之標準評估方法(如表2.5)。
- 2. 剝離之標準樣本:依據日本塗料檢查協化之塗膜評估基準(如表2.6)。

3. 變褪色之檢查標準樣本變褪色之判定則依據JIS L 0804之規定(如表2.7)。
4. 污穢之判定依據JIS L 0804之規定(如表2.8)。
5. 每個檢查項目之平均劣化等級仍是將前述3部位之劣化等級組合(如表2.9)。

## (2)、銹蝕劣化評估

I、評估對象檢查項目：評估對象檢查項目依地區不同分類如表2.10。

### II、評估判定

塗裝檢查之評估依根據3部位平均劣化等級，利用各檢查項目之獨立評估與全部檢查項目組合之兩種方式進行評估。

1. 景觀保護區之評估，如表2.11。
2. 一般區域之評估，如表2.12。
3. 判定區分，如表2.13。

## (3)、其他檢查項目

### I、檢查項目

必要時可實施下述檢查以作為塗裝劣化度判定之標準。

1. 龜裂。
2. 起泡。
3. 漏水所造成塗膜劣化。
4. 方格試驗。
5. 塗膜阻抗試驗。
6. 附著鹽分判定。
7. 其他損傷。

漏水所造成塗膜劣化之檢查項目可作為部分修補之資料，起泡、龜裂、方格試驗及塗膜阻抗試驗之檢查項目則可作為修訂塗裝之設計與施工基準之資料。

## II、檢查位置

上述項目之檢查位置如圖2.21所示位置為標準。

## III、評估

對於上述檢查項目，依據標準樣本以表2.14所示狀態區分加以判定與紀錄。

## 2.5 鋼橋銹蝕修補技術

### 2.5.1 維修塗裝系統〔1〕

維修塗裝因需在已建造完成之工地施工，故受施工期間及工地環境之影響甚大。因此維修塗裝之表面處理及塗裝系統之選擇，必須考慮維修前塗膜劣化之程度，方可決定。維修塗料所採用之表面處理方法，應視鋼板表面塗膜劣化及銹蝕程度而定，一般可參考日本道路協會「鋼橋表面處理等級及其適用標準」，既有鋼橋之維修塗裝一般採用清淨度2~4級。

維修塗裝適用之油漆系統，應與舊塗膜相同之塗裝系統為佳，但因維修塗裝系統在架設現場施工，故難有理想之表面處理，且亦受環境因素影響。因此，在選擇塗裝系統時，應配合現場之各項因素，才能決定。

表2.15所示者為各種塗料重塗之適合性，可供維修塗裝時選用塗料種類之參考。有關維修塗裝系統，以日本道路協會鋼橋維修塗裝為例如表2.16~2.20〔9〕。

### 2.5.2 維修塗裝施工〔1〕

#### 1. 維修塗裝方式

鋼橋塗膜劣化情況會因構材部位不同而有所差異，理論上若劣化區域不大，可施予局部維修塗裝，但因架設施工鷹架或平台之費用通常很高或因景觀上之考

量，部分維修塗裝通常不太可行，目前大多採用當劣化情況已達到容許標準時，即進行全面維修塗裝之方式。

箱梁內面因不需考量景觀上之需求，初期劣化通常發生在易積水之部位或施工不良之處。在進行定期維修檢查時，即可針對劣化處進行局部維修塗裝〔12〕。此外梁端部位由於施工鷹架或平台易於架設，較易局部維修塗裝。對於容易生鏽的局部構材藉由定期檢查予以局部塗裝維修之外，對於造成劣化之原因亦因著手予以改善，特別是避免積水現象等。然而若因實際條件之限制，無法改善劣化原因時，塗膜應予加厚或採用防蝕性能較為優異之塗料。

對於跨海（河）橋而言，搭設施工鷹架或平台以進行維修塗裝並非易事，設計時，應考慮採用防蝕性較為優異之塗裝系統以增加其耐久性〔13〕，並應考量設置可移動之維修台車以便日後進行局部維修塗裝之用。

## 2. 表面處理

表面處理係將附著於鋼材表面之鏽、有害物質或劣化塗膜等予以去除，以使舊塗膜予新塗膜及其層間具有良好的附著力。塗膜之耐久性受表面處理之良窳影響甚鉅，故在選定表面處理方法時應予慎重檢討〔14〕。

維修塗裝之表面處理如表 2.21 所示分成四個等級，各種塗膜劣化程度及其對應之表面處理方式如表 2.22〔9〕。

1 級表面處理需採用噴砂作業，噴砂為良好的表面處理方式，惟因對於周邊環境會產生鏽屑或塗膜片非散的問題，故不太容易在現場施行，通常多係以動力工具或手工具替代之，為這些工具的表面處理效果僅限於表面，對於孔蝕或凹處生鏽等則除鏽相當困難。

2 級表面處理係針對鏽、龜裂、浮腫及剝離等塗膜顯著劣化的部分，將劣化塗膜的全厚及鋼材之鏽予以去除。

3 級表面處理係針對構材上混合存在活膜及死膜（塗膜喪失機能者）時，將附著於活膜上之粉化物或污物予以去除，並將死膜部份之塗膜完全除去直到露出鋼材表面。

4 級表面處理係將附著於活膜上之粉化物或污物予以去除，使構材內仍殘存活膜部份。

對於位於海上或鄰接海岸的鋼橋而言，進行維修塗裝之前需先對附著於舊有塗膜表面上之鹽分予以去除，附著鹽分多具有吸濕性，表面處理很難利用機械化工具予以清除，日本曾對於濱海鋼橋實際測試，發現以高壓水柱清洗最為有效，如表 2.23 及表 2.24 所示。

### 2.5.3 維修塗裝施工之注意事項〔1〕

維修塗裝通常對於中塗漆及面漆均須予以全面性重新塗佈，惟底漆部份則依表面處理等級之不同，塗刷次數較將有所差異。對於露出鋼材表面之部份，應採用與原塗裝系統相同之底漆塗料，塗佈二或三層，對於底漆仍殘存活膜者，則塗佈次數可以少一次。進行 4 級表面處理的維修塗裝時，為使舊塗膜與中塗漆具有良好的密著性，底漆只需塗佈一層即可。

既設結構物在進行維修塗裝時，須考量對周邊環境是否會造成污染或噪音、是否具有足夠的動力來源、施工平台或鷹架的架設位置是否有無問題等，由於受到上述限制條件之影響，維修塗裝之作業效率較新設塗裝者為差。此外，除去劣化塗膜或銹之後進行維修塗裝時，為確保塗膜的防銹性能，施工時須慎重小心，茲將施工時之注意要點列述如下：

1. 表面處理所產生的細銹或銹渣等在進行塗裝前應予以去除，不使其仍殘留附著於構材表面。

2. 表面處理後之鋼材通常很容易再生銹，因此在表面處理完之當天內即要完成第一層底漆，若無法於當天內完成時，該部份即須再行表面處理。



3. 經表面處理之部份若有產生比周邊部位較為凹陷之情形時，該部份在進行塗料塗漆時，應注塗膜須具有足夠厚度，且若凹陷部份與周邊產生明顯落差時，施工時應設法降低該等落差。

4. 維修塗裝之塗膜厚度隨表面處理等級之不同而有差異，塗膜管理不可以新設塗裝之塗膜規定為基準，此在施工時應特別留意。



## 第三章 影像處理

### 3.1 前言 [15]

所謂影像處理(image processing)就是對影像訊息進行加工處理，以滿足人的各種實際運用要求，影像處理可以運用光學方法，亦可以使用電子學的方法進行。從六十年代開始，隨著電子計算機的發展，數位影像處理(digital image processing)的發展呈現快速的發展，而所謂數位影像處理就是利用數位計算機或其他硬體，對於數位訊息加以某些數學運算，以期提高影像的實用性，達到預期之目標。數位影像處理除可以改善影像資訊使人理解外，它還能使機器人像人一樣具有視覺感官的能力。不論是過去許多以成功的數位影像處理應用還是更多開發中的應用，都屬於這兩類。

影像處理技術最早期的應用之一可回溯到二十世紀初，用來改善倫敦和紐約間經海底電纜發送之圖像的品質，一直到五零年代，隨著大型數位計算機和太空科學研究計畫的出現，大家才注意到影像處理的潛力。1964 年在美國航太總署的噴射推進實驗室開始用計算機技術改善從太空探測器獲得的影像，當時用計算機處理由巡航者七號(Ranger 7)傳回的月球照片，以校正電視攝影機所存在的幾何失真或響應失真。其後有一連串的星際探測計畫，一直到現在都在持續不斷送回更多影像。

從 1964 年起今，影像處理領域有快速的發展。除了太空計畫中的應用，目前數位影像處理技術還用於解決其他問題。主要的應用領域如下。

#### **生物醫學領域：**

首先用於細胞分類、染色體分類和放射影像的處理。醫學影像的種類包含 X 光影像、同位素影像、核磁共振影像、超音波影像、紅外線影像以及顯微影像等。對這些影像增強對比度或將亮度準位著色等之處理，可以幫醫師診斷如肺病、腫瘤及心血管等疾病。

#### **遙測資料分析：**

遙測常以顏色為依據，由飛機、衛星及太空船上的多光譜(multi-spectral)掃描器攝得影像，範圍從可見光至紅外光(有時含紫外光)分成幾個頻帶，每個頻帶所攝得的顏色都不同，可用於土地使用、作物收成、作物病害偵測、森林集水資源調查、環境污染偵測、地質與地形分析、礦物探勘及氣象預測等。

#### 科學研究：

例如考古學家可用影像處理方法復原模糊或其它惡化狀況的珍貴文物影像。在物理學上可增強在高能態電漿及電子顯微鏡等的實驗影像，以增加對實驗結果的瞭解。

#### 一般工商業應用：

例如用於非破壞性影像處理的檢測，又如運動員運動影像分析、機械人自走、道路狀況判斷、條碼讀取、指紋、瞳孔、顏面等影像之身份辨識等。

#### 通訊與電腦資料儲存：

包含傳真機、影像電話及視訊會議等都採用影像資料壓縮的技術，使通訊更快速。此外，採同樣的技術可大大降低影像資料儲存量以降低儲存負擔。

整個影像處理的領域仍在蓬勃發展中，其原因有：(1)電腦功能對價格比越來越高；(2)影像擷取與顯示設備更加普遍與便利；(3)影像處理的觀念普及，容易創造新的應用。

### 3.2 影像的表示 [15]

影像以其最廣義的觀點是指用視覺來看的物件。舉凡照片、圖畫、電視畫面以及由透鏡、光柵及全息圖(hologram)所構成的光學成像等均屬之。令 $F(x, y, t, \lambda)$ 代表上述影像源在空間座標 $(x, y)$ ，時間 $t$ 且波長為 $\lambda$ 情況下所散發之空間能量分布，此分佈通成可視為一個具正時數且有上界的光強度函數，亦即

$$0 < F(x, y, t, \lambda) \leq A \quad (3.2-1)$$

其中 $A$ 為最大的影像強度。此外不論就實際影像的考量或數學上討論的方便， $x$ 、 $y$ 與 $t$ 應該也是有界的，例如

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq L_x \\ 0 \leq y \leq L_y \\ 0 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (3.2-2)$$

我們對上述光強度函數的反應常用瞬間強度來表示：

$$f(x, y, t) = \int_0^{\infty} F(x, y, t, \lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (3.2-3)$$

其中  $V(\lambda)$  為相對亮度效率函數，換言之是人類視覺的頻譜響應。同理人對色彩的反應也可以用類似(3.2-3)式的方式來表示。對一個任意的紅-綠-藍座標系統，其三原色的瞬間值為

$$f_R(x, y, t) = \int_0^{\infty} F(x, y, t, \lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (3.2-4a)$$

$$f_G(x, y, t) = \int_0^{\infty} F(x, y, t, \lambda) G(\lambda) d\lambda \quad (3.2-4b)$$

$$f_B(x, y, t) = \int_0^{\infty} F(x, y, t, \lambda) B(\lambda) d\lambda \quad (3.2-4c)$$

其中  $R(\lambda)$ 、 $G(\lambda)$ 、 $B(\lambda)$  分別為對紅、綠、藍三原色的頻譜響應。如果是更多個感應的影像，則第  $i$  個頻譜的影像為

$$f_i(x, y, t) = \int_0^{\infty} F(x, y, t, \lambda) S_i(\lambda) d\lambda \quad (3.2-5)$$

其中  $S_i(\lambda)$  是第  $i$  個感應器的頻譜響應。

如果影像內容不隨時間變化，或相當於  $t = t_0$  (一個定值) 時所得影像，則(3.2-1)式到(3.2-5)式中的時間因子可移除，此時所得影像稱為靜態影像(例如一張照片)，反之稱為動態影像(例如電視的連續畫面)。

因此一個單色(monochrome) 靜態影像可用一個二維的光強度函數  $f(x, y)$  來表示，其中  $x$  與  $y$  表空間座標，而任意點  $(x, y)$  的  $f$  值與在該點影像的亮度(或灰階度)成正比。一個數位影像是影像  $f(x, y)$  在空間座標和亮度上都數位化後的影像。可將數位影像視為一個矩陣，矩陣的行與列的值決定一個點，而對應的矩陣元素直就是該點的灰階度。此種矩陣的元素值稱為像素(pixel element 或 pixel)，所對應的灰階度可稱為像素值。因此像素可以說是數位影像的最基本單位。

### 3.3 RGB 彩色模型 [15]

彩色模型的用途是便於以某種標準來指定彩色。事實上，一種彩色模型是指規定一個三維座標系統和一個子空間，在此子空間內每種彩色用一個點來表示。現今使用的大多數彩色模型有兩種。一種是硬體導向（如顯示器和印表機），另一種是應用導向（如動畫彩色圖形製作）。實際中常使用且較為簡單的是 RGB（紅、綠、藍）模型，以下簡述此模型。

在 RGB 模型中，每種顏色是以它的紅、綠、藍的頻譜分量來表現。該模型是建立在直角座標基礎上，如圖 3.1 所示，其中 R、G、B 值是在三個頂點上，青色、紫紅和黃在另外三個頂點上，黑在原點，白色在點(255, 255, 255)上，而灰色位於黑到白之間的區段上。所有的色彩都在立方體的邊緣及內部中，它是由從原點出發的向量所定義的。

RGB 彩色模型下的影像是由三個獨立的影像平面所組成，每個原色對應一個平面。當這三個平面影像傳給 RGB 顯示器時，這三幅影像組合起來便成為一幅彩色影像，如圖 3.2 所示。所以當影像本身本來就是用三個彩色平面所表示時，將 RGB 模型用於影像處理是有意義的。另一方面，用於獲取數位影像的大多數彩色攝影機使用的是 RGB 方式，所以在影像處理中是一個重要的模型。

### 3.4 數位影像處理 [15]

數位影像處理就是利用電腦對數位影像做運算，以達到所要求期望的目標。然而針對各種不同的需求，所需要的影像處理就不盡相同，不過大致上可將這些問題及其影像處理的方式，歸納成以下幾類。

#### 影像加強：

影像加強(enhancement)是用來強調影像的某些特徵，以便於做進一步的分析或顯示。影像加強的過程中並不會增加原有資料所含有的資訊，而是把影像中的某些資訊特性更加強調，使得影像中的某些特徵更加的鮮明。

#### 影像還原：

影像還原(restoration)是指把影像中已知的惡化因素移除或減少。其目的是試圖將受污染或惡化的影像回復成原本不受污染的原始影像。它與影像加強雖都可造成視覺上的較佳感受，但影像加強較關切的是影像特徵加強或抽取而不是去除退化或污染。

#### **影像壓縮：**

影像壓縮(compression)的目的是在減低代表數位影像所需的資料量，這樣做的好處是可以減少影像傳輸的時間和儲存空間。

#### **影像重建：**

影像重建(reconstruction)的工作是由幾個一維的影像投影來重建出更高維的物體影像。此技術主要是用於醫學影像(電腦斷層掃描)、天文學星象觀測、雷達影像處理、地質研究及非破壞性物體檢測。

#### **影像分析：**

影像分析(analysis)是試圖從影像中抽取並描述出某些特徵，以自動產生所需資訊。其目標是賦予電腦或機器像人一樣看東西的能力。由此可知要做影像分析，必須使機器具備某種程度的智慧(intelligence)。

### **3.5 數位影像處理系統**

數位影像處理的第一步驟是影像的獲取(image acquisition)，即獲取一幅數位影像。為了完成這一步，需要一個成像感應器並能將影像訊號數位化，得到數位影像後，接下來是對影像做前級處理(preprocessing)。前級處理的主要功能是改善影像，以增加影像處理的成功機會，典型的前級處理包括增強對比度、濾除雜訊以及分離出紋理與字元資訊相像的區域。再進行分割，按廣義的定義，分割(segmentation)是自一幅輸入影像中分離出組成部分或物體。通常，在數位影像處理中，自動分割是最困難的任務之一。接著就是如何表示及描述，表示方式的選擇是將原始數據轉換為適合於後續的計算機處理的訊號形式的部分工作。還要確定一種方法來描述這些數據，以便凸顯感興趣的特徵。描述

(description)，也稱特徵選擇(feature selection)，它提取出一些感興趣的定量資訊的特徵或為了將一類物體何其它物體能區分開來所需要的特徵。最後一步包括識別和解釋。識別(recognition)是對一個物體根據其描述子所提供的資訊指定一個標記的過程。解釋(interpretation)是表示出被識別物體的含義，數位影像處理系統的基本步驟流程如圖 3.3 [16]。



## 第四章 小波理論

### 4.1 前言

#### 4.1.1 轉換法 [15]

由於影像上的某些問題在原函數定義的領域內較不易或無法解決，所以藉助某一個轉換法將其轉換到另一個領域，使得問題較易於處理，如示意圖4.1。一般而言，我們希望轉換具有以下三種特性：

1. **影像內像素的相關性要打散**，使得影像大部分的能量集中在少數的轉換係數上，使像素間冗餘性能夠去除。
2. **與影像無關的基底函數**，不同影像其統計特性也不同，而最佳的轉換與影像的統計特性有關，因此最佳的轉換隨著影像的不同而有異。當影像方塊本身就屬非穩態的時候，要找出最佳的轉換的基底函數非常耗時。因此，通常捨棄最佳化的轉換而採用與影像無關的基底函數。
3. **快速完成轉換**，對於  $N$  點的轉換，所需的計算量一般為  $O(N^2)$  的等級。有些快速的演算法能減少計算量，使其降為  $O(N \log_2 N)$  的等級，因此對一個  $N \times N$  的二維轉換，採用依序做列再做行的一維轉換方式，其計算量為  $O(N^2 \log_2 N)$  而非  $O(N^4)$  的等級。

#### 4.1.2 小波分析起源 [17]

小波分析的起源可以追溯到非常遙遠的時代，其說法至少有15種以上。雖然1910年Haar提出了最早的小波單範正交基底，但當時並沒有出現”小波”這名詞。Meyer以為，小波分析思想萌芽於1930年至1980年，但真正最初研究小波是法國地質物理學家Jean Morlet。20世紀60年代，由於工業發展需要，尋找地下石油成為法國一項重要目的，如何從反射信號中提取有用的石油信息是Morlet的主要工作，1981年，Morlet仔細研究Gabor變換的方法，對Fourier變換與加窗Fourier變換的異同、特點及函數構造做了創造性研究，首次提出了”小波分析”



概念，建立以他名字命名的Morlet小波。此方法在Morlet的地質數據處理中取得巨大成功。隨後Morlet又與他的物理學家同學Roger Balian和Grossmann聯合研究。在一個偶然的機會下Grossmann結識大數學家Meyer。Meyer藉由自己深厚的數學功底對Morlet方法進行研究，為小波分析學科的誕生與發展做了重要的貢獻。隨後，Mallat、Daubechies、Chui等人的工作聯合奠定了小波分析的基礎。

### 4.1.3 小波分析

傳統的信號分析是建立在傅立葉(Fourier)轉換的基礎之上，由於傅立葉分析是一種全局的轉換，因此無法表達信號的時頻局域的性质，而這種性質恰是非平穩信號最根本和最關鍵的性质。為了分析和處理非平穩信號，人們對傅立葉分析進行推廣與根本性的革命，提出一連串新的分析理論：短時程傅立葉轉換(short time Fourier transform, STFT)、Gabor 轉換、時頻分析、小波轉換(wavelet transform, WT)等的信號分析。其中，短時程傅立葉轉換與小波轉換也是應傳統傅立葉轉換不能夠滿足信號處理的要求而產生。而短時程傅立葉轉是一種單一分辨率的信號分析法，它使用一個固定的短時窗函數，因而在信號分析上有著不可逾越的缺陷 [18]。

近年來，已有學者提出使用小波(wavelet)當作系統識別的工具，因為在諸多傳統的解析工具中，其僅能具有單一解析時域(time domain)或頻域(frequency domain)的能力，而以小波架構的解析工具能同時具有良好的時域及頻域解析能力，是一種窗口大小固定不變但其形狀可改變，非常適合探測瞬態反常現象。小波分析(wavelet analysis)是傅立葉分析的重要發展，它不僅保留了傅氏理論的優點，又能克服其不足之處。小波分析尚擁有許多優良的特性使其不僅應用在單一領域中，其涵蓋的應用範圍，諸如：數學、物理、信號處理、影像處理、地震勘探、語音識別、雷達、機器視覺、機械故障診斷與監控…等領域。

## 4.2 傅立葉轉換

傅立葉分析的起源應當首推傅立葉本人，傅立葉轉換是眾多科學領域(特別是信號處理、圖像處理、量子物理等)的重要應用工具之一，它把一個信號函數分解為眾多的頻率成分，這些頻率成分又可重建原來的信號函數，這種轉換是可逆的。

信號函數  $f(t)$  的連續傅立葉轉換(continuous Fourier transform, CFT)如下所示：

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (4.2-1)$$

$F(\omega)$  的傅立葉逆轉換如下所示：

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} dt \quad (4.2-2)$$

其中  $f(t)$  顯示了時間的信息隱藏了頻率信號， $F(\omega)$  顯示了頻率的信息隱藏了時間信號 [17]。

### 4.2.1 離散傅立葉轉換

在實際應用中，計算機上實現信號的頻譜分析及其它的處理工作，對信號的要求是，在時域和頻域應是離散的，且都是有限長。

給定離散訊號  $f(n)$  的一維離散傅立葉轉換 (Discrete Fourier transform, DFT) 如下所示：

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)e^{-i(2\pi/N)nk}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4.2.1-1)$$

也可寫成

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)W_N^{nk} \quad (4.2.1-2)$$

其中  $W_N = e^{-i(2\pi/N)}$ 。  $W_N^{nk}$  通常被稱為轉換核 (translation kernel)。而  $F(k)$

的反離散傅立葉轉換 (IDFT) 則如下所示：

$$f(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k)e^{i(2\pi/N)nk}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4.2.1-3)$$

因此，形成下面的轉換對：

$$f(n) \Leftrightarrow F(k) \quad (4.2.1-4)$$

但傅立葉轉換有個缺點，即是只能獲得時間端或頻率端其中之一的訊息，使得獲得頻域的暫態信號，卻也不知在何時出現。

#### 4.2.2 短時傅立葉轉換

為改善傅立葉分析的缺點Dennis Gabor(1946)將視窗(windowing)的觀念引進傅立葉轉換中，把信號劃分成許多的時間間隔，用傅立葉轉換分析每一個時間間隔，以便確定該時間間隔存在的頻率，而此種分析方法便是所謂的短時傅立葉分析。

假想有一個在某個時間所產生短而快速的暫態訊號  $f(t)$ ，以傳統傅立葉分析：

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (4.2.2-1)$$

我們從頻域上可知有暫態訊號產生，但卻不知在何時發生。如果取傅立葉轉換前先乘上一個視窗，則至少可知暫態發生在哪一個視窗範圍內，設此視窗函數為  $g(t)$ ，則此種傅立葉轉換稱為短時傅立葉轉換(Short-Time Fourier Transform, STFT)，可寫成

$$F(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g^*(t-\tau)e^{-i\omega t} dt \quad (4.2.2-2)$$

$f(t)$ : 時域的訊號

$g(t-\tau)$ : 視窗移動函數

$\tau$ : 沿著時間軸的平移參數

當視窗  $g(t)$  為高斯函數時，STFT就稱為Gabor轉換。STFT有固定持續時間的視窗  $g(t)$ ，以及一個固定的頻率解析度。其STFT 在時頻域平面上的解析度可由圖4.2所示。但由於STFT 的視窗大小為固定，有一些需要更佳解析度時，便無法進行調整，對於較細微的部分訊息被忽略，造成訊息模糊不清的問題。而小波理論的視窗大小固定不變但其形狀可以改變可解決此問題，也兼具STFT 的優點。

### 4.3 小波轉換

早期在處理信號的方法，通常是用傅立葉轉換來處理，而相較於傅立葉系列的轉換所採用的弦式波基底而言，小波轉換的基底有較短的持續時間(time duration)，因而得名。一個暫態(transient)訊號的分量通常只在很短的時間區間內不為零，同理許多影像的重要特徵(如邊緣等)也只出現在局部的小空間。這些分量與傅立葉系列的基底函數都不像，因此表達其原始訊號顯得較沒效率。小波便是為了改善此缺點而來 [15]。

小波轉換的基底是由一個原型(prototype)函數的縮張(dilation)與平移(translation)所形成的。這些基底函數具有短持續時間且高頻率，以及長持續時間且低頻率的特性，因此相當適合表達高頻的突發暫態訊號或是長時間變化緩慢的訊號 [15]。正是這種特性，使小波轉換具有對信號的自適應性。小波轉換在時頻域平面上的解析度如圖4.3所示。比較圖4.2與圖4.3可看出，小波轉換提供一個很有彈性的時頻解析度。



#### 4.3.1 小波轉換類型

小波轉換類型主要分為四類：

##### 1. 連續小波轉換(Continuous Wavelet Transform, CWT)

與短時傅立葉轉換相似的是：小波轉換將一個時間函數映射至一個  $a$  與  $\tau$  的二維函數。此處參數  $a$  稱為尺度參數，作用是將函數做壓縮或伸展；而  $\tau$  為沿著時間軸的小波函數的移動。假設訊號為平方可積(即能量有限的信號空間)，表示為  $f(t) \in L^2(R)$ ，也就是

$$\int f^2(t)dt < \infty \quad (4.3.1-1)$$

設  $\psi(t) \in L^2(R)$ ，其傅立葉轉換為  $\hat{\psi}(\omega)$ ，當  $\hat{\psi}(\omega)$  滿足允許條件(admissible condition)：

$$C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4.3.1-2)$$

則  $f(t)$  的連續小波轉換(Continuous WT, CWT)為

$$CWT(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad a, \tau \in R; a \neq 0 \quad (4.3.1-3)$$

此處  $\psi(t)$  稱為基本小波(basic wavelet)或母小波(mother wavelet)且

$\psi((t-\tau)/a)/\sqrt{a}$  為小波基底函數，有時也稱為子小波(baby wavelet)。

其逆轉換為：

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{R^+} \int_R \frac{1}{a^2} CWT(a, \tau) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) da d\tau \quad (4.3.1-4)$$

## 2. 離散小波轉換(Discrete Wavelet Transform)

在上述，連續小波轉換中的  $(a, \tau)$  皆為連續變數，但在離散小波轉換中卻是離散的。當為離散值時，若令  $a = a_0^m, \tau = n\tau_0 a_0^m$ ，其中  $m$  與  $n$  為整數，則此時離散小波轉換為

$$DWT(m, n) = \int f(t) \psi_{mn}(t) dt \quad (4.3.1-5)$$

此處

$$\psi_{mn}(t) = a_0^{-\frac{m}{2}} \psi(a_0^{-m} t - n\tau_0) \quad , \quad \psi_{00} = \psi(t) \quad (4.3.1-6)$$

對一個單範正交(orthonormal)的小波  $\{\psi_{mn}(t)\}$  而言，它必須滿足

$$\int \psi_{mn}(t) \psi_{m'n'}(t) dt = \begin{cases} 1 & m = m', n = n' \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (4.3.1-7)$$

這表示在同一尺度  $m, n$  下，它都是單範正交的。

## 3. 離散參數小波轉換(Discrete Parameter Wavelet Transform)

$$DPWT(m, n) = a_0^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi(a_0^{-m} t - n\tau_0) dt \quad (4.3.1-8)$$

連續小波轉換由於參數是連續的，所以並不像離散小波轉換那樣常常被工程師所使用。連續小波轉換通常用於分析訊號的性質，若要在電腦上計算則須用離散小波轉換。在離散小波轉換中，離散的部分只有尺度參數  $a$  及平移參數  $\tau$ ，時間還是連續的。其中  $a = a_0^m$  及  $\tau = n\tau_0 a_0^m$ ， $a_0, \tau_0$  為取樣間隔(sampling intervals)， $m, n$  為整數， $s(t)$  與  $\psi(a_0^{-m} t)$  仍為連續。此轉換與離散傅立葉級

數相同，只有頻率為離散。為了計算上能更有效率，通常令  $a_0 = 2$  及  $\tau_0 = 1$ ，以  $2^{-m}$  倍數來擴張及以  $n2^m$  倍數來平移，即2次幕格點(dyadic grid)取樣。

#### 4. 離散時間小波轉換(Discrete Time Wavelet Transform)

$$DTWT(m, n) = a_0^{-\frac{m}{2}} \sum_k s(k) \psi(a_0^{-m} k - n \tau_0) \quad (4.3.1-9)$$

即  $s(k)$  與  $\psi(k)$  均為離散，在時間上不連續， $t = kT$  且取樣間隔  $T = 1$ 。此轉換與離散傅立葉級數相似，時間及頻率皆為離散。所以離散時間小波轉換與離散參數小波轉換之不同處在於將(4.3.1-8)式中積分換為總和。

### 4.4 多尺度分析 (Multiresolution Analysis, MRA)

1988年S. Mallat在構造正交小波基時提出了多尺度分析(Multiresolution Analysis, MRA)的概念，以空間的概念上形象地說明了小波多分辨率特性，將此之前的所有正交小波基的構造法統一起來，給出了正交小波的構造方法及正交小波變換的快速算法，即Mallat算法 [18]。

多尺度分析是將訊號  $f(t)$  分解為不同尺度的分量，其多尺度一維小波分解結構的組織形式如圖4.4所示，在圖中ca為經分解後的低頻係數，cd為分解後的高頻係數，而數字則表示分解的尺度。在一個任意的  $V_0$  子空間建立基底，再利用尺度與平移的變換將基底擴充到  $L^2(R)$  中。

設  $V_m$  是一系列  $L^2(R)$  的子空間且滿足以下條件：

(i) 包含性： $\dots V_{-2} \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset V_2 \dots$

(ii) 基底性質：存在一個尺度函數  $\phi(t) \in V_0$  使得集合  $\phi_{mn}(t) = 2^{-\frac{m}{2}} \phi(2^{-m} t - n)$  為

$$V_m \text{ 的一個正規基底，亦即 } \int \phi_{mn}(t) \phi_{mk}(t) dt = \delta_{nk}$$

(iii) 尺度性： $f(t) \in V_m \Leftrightarrow f(2t) \in V_{m+1}$

(iv) 完整性： $\bigcap_{m \in \mathbb{Z}} V_m = \{0\}, \bigcup_{m \in \mathbb{Z}} V_m = L^2(R)$

#### 4.4.1 近似空間與細部空間

近似空間 $V_m$ 與細部空間 $W_m$ 之間關係如下：

$$V_{m+1} = V_m \oplus W_m, V_m \perp W_m \quad (4.4.1-1)$$

其中符號 $\oplus$ 稱為兩空間 $V_m$ 與 $W_m$ 的正交直和(Orthogonal direct summation)。

$V_{m+1}$ ：較精細的近似訊號函數空間

$V_m$ ：較粗糙的近似訊號函數空間

$W_m$ ： $V_{m+1}$ 與 $V_m$ 相對應近似訊號函數之細節訊號函數空間

在訊號處理中，一個較粗糙和一個較精細的訊號，其差別在於較精細的訊號比較粗糙的訊號含有更多的資訊。反覆代換可得 $V_m = W_{m-1} \oplus W_{m-2} \oplus \dots$ 。當 $m \rightarrow \infty$ ，所有 $W_m$ 的直和即為 $L^2(R)$ 。

$V_m$ 是層層相套的空間，全是由一個尺度函數 $\phi(x)$ 的縮脹平移所造成； $W_m$ 是兩兩正交的空間，它是 $V_m$ 中層與層之間的細節部分，全是由一個小波函數的縮脹平移所造成〔19〕。



#### 4.5 二維小波理論

二維小波理論主要應用於影像分析上面，最常採用的方式是二維可分離小波轉換，亦即將二維小波轉換以二個一維小波轉換來實現，其相關母小波函數如下：

$$\phi(x, y) = \phi(x)\phi(y) \quad (4.5-1a)$$

$$\psi^{(1)}(x, y) = \phi(x)\psi(y) \quad (4.5-1b)$$

$$\psi^{(2)}(x, y) = \psi(x)\phi(y) \quad (4.5-1c)$$

$$\psi^{(3)}(x, y) = \psi(x)\psi(y) \quad (4.5-1d)$$

$x, y$ 為二維座標軸， $\phi(x)$ 與 $\psi(x)$ 分別為一維的尺度與小波函數。

然而二維離散小波也為正交小波，其單範正交基底為：

$$\{\psi_{mnk}^{(l)}(x, y)\} = \{2^{-\frac{m}{2}} \psi^{(l)}(2^{-m}x - n, 2^{-m}y - k)\}, l = 1, 2, 3 \quad (4.5-2)$$

實現離散小波轉換比較簡單又有效的方式是透過相對應的濾波器來達成，將原先一維訊號所用的濾波器分別先對二維訊號的每個行向量做一次分解，然後將計算結果的每一個列向量做一次分解，將原來的矩陣分解為四塊矩陣，可達成二

維小波轉換的效果。

### 4.5.1 二維小波轉換係數

多尺度二維小波分解結構的組織形式如圖4.5所示，其中圖4.5中的ca為低頻係數，chd為垂直高頻係數，cvd為水平高頻係數，cdd為對角線高頻係數，而數字則表示分解的尺度。二維離散小波的分解與重建如圖4.6所示，二維離散小波轉換後的四塊矩陣影像如圖4.7所示，其中圖4.7中的ca、chd、cvd、cdd子圖代表的意義如下：

ca子圖：表示水平方向(X方向)與垂直方向(Y方向)的低頻部分，它保留了信號主要能量，是對原信號光滑化的結果，並作為下一步分解的輸入部分。

chd子圖：表示水平方向的低頻與垂直方向高頻的部分，它保留了原信號的水平線條。

cvd子圖：表示水平方向的高頻與垂直方向低頻的部分，它保留了原信號的垂直線條。

cdd子圖：表示水平方向的高頻與垂直方向高頻的部分，它保留了原信號的水平線條與垂直線條的交叉點 [17]。



## 4.6 Mallat 運算法

在離散小波分解與重構(Wavelet Decomposing Reconstruction)中，使用Mallat 運算法，可將訊號一層層進行分解，每一層分解的結果是將上次分解得到的低頻訊號分解成低頻和高頻兩部分，每一次分解後的數據量減半，因此分析後得到的低頻成分和高頻成分的時域解析度比分解前訊號減低一半。

重構算法是分解算法的逆過程，經每一層重構之後，訊號的數據量增加一倍，因此可提高訊號時域解析度。

Mallat 分解及重構的過程中，分別需要跳取(Downsample or Decimate)及零內插(Subsample or Zero interpolation)，舉例說明如下：

1. 跳取(Downsample or Decimate)：



假設一訊號序列為[0 1 2 3 4 5 6 7 8]；跳取因子為2，則新的序列為[0 2 4 6 8]。

## 2. 零內插(Subsample or Zero interpolation)：

由上述新的序列依在每個序列之間內插零，即[0 0 2 0 4 0 6 0 8]。

訊號分解是將訊號經由與濾波器摺積(Convolution)計算後得到一個新的子空間訊號，濾波器可分為低通濾波器(lowpass filters)及高通濾波器(highpass filters)，低通濾波器由尺度函數係數所組合，高通濾波器則是由母小波係數所組合。經由低通濾波器的運算可得到低頻子訊號，經由高通濾波器的運算則可得到高頻子訊號。

訊號重建是將低頻子訊號及高頻子訊號分別經由濾波器的摺積後，將低頻及高頻訊號加起來就可以合成原來的訊號。

符號 $\downarrow 2$ 是做次取樣(subsampling)，符號 $\uparrow 2$ 是做升取樣(upsampling)；次取樣是將分解後的訊號用每兩個點取一點的方式，重新排序，其觀念同跳取，升取樣是在前面做次取樣後每兩個點之間插入一點零，再重新排序，其觀念同零內插。

將訊號一層層進行分解，每一層分解的結果為將前次分解得到的低頻訊號分解成低頻及高頻訊號兩部分，且每一次分解後的數據量減半，也因此分析後得到的低頻及高頻成分的時域解析度比分解前之訊號減低一半。

上述的方式將被使用於訊號的分解與重構，如圖4.6中的抽樣即是 $\downarrow 2$ 次取樣(subsampling)的觀念，而插樣即是 $\uparrow 2$ 升取樣(upsampling)的觀念。

## 第五章 模糊理論

### 5.1 前言

Fuzzy理論是1960年代出現於工程領域內，還是一種非常年輕的理論。概率論這種理論所處理的是「偶然性」這種概率式的不確定性，而Fuzzy理論所處理的卻是一種稱作fuzziness的意義論下的不確定性。概率的概念誕生至今已有300年歷史，這一概念成為現代數學體系中的一個基礎概念迄今也有50年以上的歷史了。相比之下，作為一種處理不確定性的理論，Fuzzy理論是非常年輕的〔20〕。

### 5.2 模糊理論的架構

Fuzzy理論是一個總稱。對通常集合論進行擴充後而形成的Fuzzy集合論、具有概率擴充意味的Fuzzy測度論以及把fuzziness概念導入通常邏輯而形成的Fuzzy邏輯，總稱為Fuzzy理論〔20〕。

事件的不確定性可分成兩種：

1. 隨機性(randomness)：事件發生率的不確定性，其根源是來自自然數理模式的特性，例如：擲某骰子出現一到六點的或然率。

2. 模糊性(fuzziness)：事件定義域的不確定性，其根源是來自人類的思維模式的特性，列如某年紀是屬於年輕，普通或年老的隸屬度。

由於這兩種不同來源的不確定性，產生二種理論：

1. 或然率理論(probability theory)：針對事件發生率的不確定性。

2. 可能度理論(possibility theory)：針對事件定義域的不確定性。

貝氏(Bayes)機率模式便是應用或然率理論，而模糊邏輯模式便是應用可能度理論。模糊理論強調許多事實的結果無法符合傳統的二值邏輯，不僅是「是」及「不是」之間選擇其一，而是介於是與非之間。1965年沙德(Zadeh)提出”模糊集”(Fuzzy set)的觀念，這是相對於傳統集合論的”明確集”(crisp set)的觀念，隨後並以此為基礎發展出模糊邏輯與可能度理論〔21〕。

## 5.2.1 模糊集 (Fuzzy set) [21]

在傳統集合論中一元素(element)是否屬於一集合(set)是明確的,其必屬於或不屬於二者之一,一般可用特徵函數(characteristic function)來表示:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{如果元素 } x \text{ 屬於集合 } A \\ 0 & \text{如果元素 } x \text{ 不屬於集合 } A \end{cases} \quad (5.2.1-1)$$

此種集合稱為明確集,前面已提到模糊性(fuzziness)的觀念,即由於人類思維模式的特性,許多事件的定義域具有不確定性,這種事件可視為一個模糊集,例如多或少即是模糊集。對任何模糊集而言,特徵函數不再是0或1二者之一,而可以是0到1間的任意實數,元素 $x$ 對集合 $A$ 的特徵函數值愈大,表示元素 $x$ 愈屬於集合 $A$ ,反之,特徵函數值愈小,表示元素 $x$ 愈不屬於集合 $A$ ,為了表示一個模糊集的定義域,可將集合的所有元素的特徵函數集合起來,成為一個隸屬度函數(membership function)。

模糊集和明確集一樣,具有一些基本集合組合運作(set composition operation),模糊集中定義  $\mu_A(x) = [0,1]$  和  $\mu_B(x) = [0,1]$  :

1. 交集(intersection):  $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$
2. 聯集(union):  $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$
3. 補集(complement):  $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$

此外還有一些修飾集合定義域的修飾運作,例如:

4. 非常(very):  $\mu_{vA}(x) = (\mu_A(x))^2$
5. 有些(more-or-less):  $\mu_{mA}(x) = (\mu_A(x))^{\frac{1}{2}}$

在一些法則的前件或後件,經常是以屬性一值(attribute-value)的方式表示,如果將每一個值視為一個元素,則屬性可視為一個集合。以下將說明表現屬性集合之隸屬度函數的方法。

屬性的隸屬度函數可依屬性的特性分成三種：

1. 離散值屬性：

離散值屬性  $X$  其值所組成的集合為： $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

隸屬度函數可寫成： $\mu = \{\mu_1/x_1, \mu_2/x_2, \dots, \mu_n/x_n\}$

2. 語意值屬性：

語意值屬性是指常用的一些語詞，例如很低，低，普通，高，很高等這些語詞沒有集合元素，一般常設定為從0到1間的連續區間作為語詞的集合元素。為簡化隸屬度函數的表示法，目前學者大都用一些標準函數來表示隸屬度函數，只要設定若干標準函數的參數即可確定一個隸屬度函數，常用的標準函數為  $S$  型函數，此函數有  $a, b, c$  三個參數其中  $b = (a + c)/2$ ，一個  $S$  型函數可用  $S(x : a, b, c)$  的符號來表示，此函數在  $x = a$  時值為0.0，在  $x = b$  時值為0.5，在  $x = c$  時值為1.0，呈現一個  $S$  型曲線。

$$S(x : a, b, c) = \begin{cases} 0.0 & as \quad x \leq a \\ 2 \left[ \frac{x-a}{c-a} \right]^2 & as \quad a \leq x \leq b \\ 1 - 2 \left[ \frac{x-c}{c-a} \right]^2 & as \quad b \leq x \leq c \\ 1.0 & as \quad x \geq c \end{cases} \quad (5.2.1-2)$$


3. 連續值屬性：

連續值屬性因有無限多個集合元素，為簡化隸屬度函數的表示法，大都用標準函數來表示隸屬度函數。例如很年輕，年輕，中等年紀，年老，很年老這幾個屬性值域可設從0~100歲，其隸屬度函數如下：

$$\begin{aligned} \text{很年輕} \quad & \mu(x) = 1 - S(x : 10, 15, 20) \\ \text{年輕} \quad & \mu(x) = 1 - S(x : 10, 20, 30) \\ \text{中等年紀} \quad & \begin{cases} \mu(x) = S(x : 10, 20, 30) & x < 40 \\ \mu(x) = 1 - S(x : 50, 60, 70) & x \geq 40 \end{cases} \\ \text{年老} \quad & \mu(x) = S(x : 50, 60, 70) \\ \text{很年老} \quad & \mu(x) = S(x : 60, 70, 80) \end{aligned}$$

## 第六章 系統設計與案例分析

### 6.1 前言

本研究所建立之智慧型影像處理系統係運用小波(wavelet)轉換在電腦上來分析數位影像，克服人類視覺評估時，所造成評估的主觀與不一致性的問題。而不同於人類視覺，電腦能夠辨識數百萬種顏色與不同色階，例如灰階影像即有256個色階，經由影像每一像素(pixel)，所獲取影像的參數與特性，系統能夠判定人眼所無法辨識出的缺陷圖形及準確地量測缺陷的範圍〔5〕。缺陷辨認的基本原理是利用光學特性，將影像的像素(pixel)資料加以處理，轉化成所需要的資訊或影像圖形。在鋼結構橋梁的塗裝則可以有兩個分類：有缺陷面積比(鏽)跟無缺陷面積比(底漆)。

此一系統運用小波在時頻兩域局部特徵與多分辨分析(multiresolution analysis)的特性，來處理數位影像。因許多數位影像的重要特徵(如邊緣等)只出現在局部的小空間上，這些分量與任何傅立葉(Fourier)系列的基底函數都不像，而小波轉換的基底有較短的持續時間(time duration)，可以解決這一問題。對分析完成後的影像，可以獲得有缺陷面積比跟無缺陷面積比，再將有缺陷面積比與規範做結合，進行判斷與評估，對於不確定的地帶則採取模糊(fuzzy)判斷。在此系統下，能夠判定品質評估是否可以接受，使鋼結構橋梁的塗層品質能夠維持更好，進而延長鋼橋的使用壽命並且增加公共的安全，其系統架構如圖6.1，系統架構分析流程如下。

### 6.2 影像擷取

本研究所需之影像資料，採用實地拍攝案例和一些橋梁評估案例中的數位影像資料。實地拍攝案例針對一些鏽蝕面積大小不一，及底漆顏色不同與鏽蝕狀況不同的情況來擷取，以增加分析時的廣泛性與各種情況的探討。

## 6.3 系統前處理步驟

在處理數位影像前，需要對影像做一些的整理，例如影像的整理及編排，使其可以做一有系統的分析，在影像整理過後就可以輸入影像進行分析。在此用一已知組織成分的影像做為分析案例，在這影像案例中，其大小為 $480 \times 640$ ，其底色為黃色，中間含有四塊分別為 R-50、R-100、R-150、R-225 強度的紅色方塊，其大小皆為 $100 \times 100$ ，而四個方塊佔總面積的百分比為 13.0208%，如圖 6.2 所示。

### 6.3.1 影像之濾波處理

在原始影像取樣中，因為取樣系統與光源不均，而有雜訊的產生。因此，必須對原始影像做先前的處理，其相關的處理技術眾多，包含多幅影像平均法、空間域濾波法、頻率域濾波法...等。而這一些處理技術都非常問題導向，對不同的問題，其成效均有差異。

對影像之濾波處理，本研究運用 MATLAB 程式語言的指令，將全彩的 RGB 影像轉換成灰階(gray)的影像，但對於銹蝕影像的處理，發現在改善影像明暗不均的情況，其成效並不顯著。因此，決定採取另一方式，將銹蝕影像濾波區分為 R、G、B 三個影像，並計算其標準差，以判斷銹蝕影像在 R、G、B 三個影像中，哪一個的漆銹差異性較大，差異性較大者因其分析效果較佳，將被採用做為下一步的分析，以改善影像明暗不均之現象，本案例因 G 影像檔案標準差較大將被採用做下一步的處理，如圖 6.3 所示。

## 6.4 小波轉換分析影像

鋼構表面塗裝銹蝕影像經影像前處理完成後，將對 R、G、B 三個影像中標準差最大者，進行影像的二維小波分解(尺度  $n=1$ )，因在尺度  $n=1$  在大部分的情況下已可獲得所需要的結果，故將尺度  $n=1$  設定為系統預設值，在必要情況下，例如：出現雜訊或影像發生因光線造成的明暗不均等情況下可將尺度調高。在影像分解的過程中，提取低頻係數(ca)，它含有影像中最多的能量，亦即包含了最多

的資訊和影像的輪廓。在分解的過程中還包含有垂直高頻係數(chd)、水平高頻係數(cvd)和對角線高頻係數(cdd)，高頻係數是影像中細節差異的部分，它們將是影像完美重建與影像辨識上不可或缺的部分。其低頻係數、垂直高頻係數、水平高頻係數和對角線高頻係數，所顯示的影像如圖 6.4。

#### 6.4.1 低頻係數(ca)的處理

從低頻係數(ca)所顯示的影像和係數值的分佈圖(見圖 6.4 與圖 6.4 (a))，可以得到經由尺度  $n=1$  的分解後，影響無缺陷面積(底漆)的低頻係數數值，超出影像所能顯示的數值 0 到 255 以外，而影響有缺陷面積(鏽)的低頻係數數值，保留在影像所能顯示的數值 0 到 255 範圍以內。因此，對低頻係數(ca)的數值採取處理，以達到影像重建後，所希望獲得的結果。

在低頻係數的影像中，因為 255 到 225 屬於偏白的部分，一般肉眼不易察覺，故對於有缺陷的面積(鏽)，只對 225 以下進行處理，省略 255 到 225 的數值以減少一些不必要的誤差，例如：拍攝時因光線不均而造成底漆的深淺不一和底漆上的一些較深的雜訊。對於 225 以下的數值乘以 0.5，以期影像重建後，有缺陷的面積(鏽)，可以被保留下，並加深其顏色，以利於更清楚地顯示出其位置，對於 225 以上的數值乘以 3，使得影像重建後，無缺陷的面積(底漆)其數值大於 255 而不被表現出來，以達到漆鏽分離的目的，其原始數值修正前與修正後見圖 6.5 (a)與圖 6.5 (b)所示。對於 225 以上的數值是乘以越大的數值越好。一般乘以 2 就可以達到使無缺陷的面積(底漆)重建後其數值大於 255，但有些影像因為雜訊的因素，而有些許的誤差出現，因此，系統中採取乘以 3 是較為保險的做法。

#### 6.4.2 影像的重建與漆鏽的分離

經過低頻係數(ca)的處理後，進行影像的二維小波重建，可得到重建後的影像，見圖 6.6 (b)，在重建的影像中，利用其數值化的特性，可找出小於 255 數值的個數佔總數值個數的比例，以求出有缺陷面積比跟無缺陷面積比，其公式如下：

$$\text{有缺陷面積比跟無缺陷面積百分比} = \frac{\text{255以下的個數}}{\text{全部的個數}} \times 100\% \quad (6.4.2-1)$$

由(6.4.2-1)式，可以算出四塊分別為 R-50、R-100、R-150、R-225 強度的紅色方塊佔的總面積百分比為 13.0173%，其誤差約為 0.027%，並利用重建後的影像找出影像中 255 以下數值的位置，再於 R、G、B 三個影像中找出其相對的位置，可得到無缺陷的面積(底漆)的影像和有缺陷面積(鏽)的影像，見圖 6.6 (c)。在這過程中，有時會因為光線明暗不均的問題，造成影像中無缺陷面積會有陰影的產生而偏暗，因而產生誤差，如有此現象，可藉由調高尺度(n=2)，再進行以上步驟，可以獲得改善。

### 6.4.3 有缺陷的面積(鏽)的再分析

經由以上的步驟，已經可以達到有缺陷面積跟無缺陷面積分離的目的，從有缺陷面積(鏽)的影像中，可以發現其中包含深淺不一的鏽與鏽斑，見圖 6.7。因此，有缺陷面積跟無缺陷面積的百分比會比較偏大，亦不能表現出鏽蝕程度的嚴重性。所以將再針對有缺陷面積再次進行分析，進而分離出深淺不一的鏽與鏽斑，並乘以適當的權重，使得鏽蝕程度的嚴重性得以表現出來。

首先，先對有缺陷面積進行同上分析的方式，進行第一次的分離，可以得到第一次未被濾除(較深)的鏽與第一次經過濾除(較淺)的鏽，並求取其佔有缺陷面積的百分比，經第一次的分離可得第一次未被濾除(較深)的鏽佔總缺陷面積的百分比為 50.72%，見圖 6.8。相同地，再次對於第一次未被濾除(較深)的鏽與第一次經過濾除(較淺)的鏽進行分析，可以得到第二次未被濾除(較深)的鏽、第二次經過濾除(較深)的鏽、第二次未被濾除(較淺)的鏽與第二次經過濾除(較淺)的鏽，並求取其個別佔有缺陷面積的百分比，其佔總缺陷面積的百分比依序為 26.00%、24.72%、24.78%、24.50%，見圖 6.9。對於由深到淺的面積百分比乘以 1、0.7、0.3、0.1 的權重，因第二次未被濾除(較深)的鏽與第二次經過濾除(較深)的有缺陷面積大都是屬於影響性較大的鏽蝕部分故研究中定義其折減權重分別為 1 與 0.7，而第二次未被濾除(較淺)的鏽與第二次經過濾除(較淺)的有缺陷



面積大都是屬於影響性較小的銹斑部分故定義其折減權重分別為 0.3 與 0.1。再次求取乘以折減權重後的有缺陷面積比為 6.92%。其示意如圖 6.10。

## 6.5 有缺陷面積(銹)進行判斷與評估

將有缺陷面積百分比與規範做一結合，本研究中採取表 2.13 美國 SSPC 生銹標準評估法與表 2.14 日本塗膜剝離評估基準，對其銹蝕狀況做一判斷評估，而對銹蝕情況所需採取的補救措施則是由以下的一般判斷原則做依據，鋼構橋梁的銹蝕面積百分比小於 1-2%，則將銹蝕部分清除並上底漆，再將橋梁漆上一到二層面漆，而表面生銹面積百分比大於 20-25%者，則採取的方式是將結構外部塗層全部清除，並且重新塗裝與表 1.2 ASTM Corrosion Performance Rating 就銹蝕面積百分比跟銹斑的狀況做重新塗裝面積百分比的評估。而對於表中的不確定地帶，例如表 2.14 日本塗膜剝離評估基準中每一等級之間都有著 0.1~1.0 的不確定地帶與補救措施中對於小於 1%及 2%~20%間的範圍都未有明確的定義及表 1.2 ASTM Corrosion Performance Rating 中等級 8 與等級 6 對於少許和廣泛銹斑的範圍也無明確的定義，在本研究中則定義銹斑佔總面積百分比 5%以下為少許，銹斑佔總面積百分比 20%以上為廣泛的範圍，而銹斑佔總面積百分比則是將第二次未被濾除(較淺)的銹佔總面積百分比乘以 0.5 與第二次經過濾除(較淺)的銹佔總面積百分比乘以 1.0 為依據，而介於 5%~20%之間的銹斑佔總面積百分比則為模糊地帶，且表 1.2 ASTM Corrosion Performance Rating 中等級 4 與等級 3 之間和等級 3 與等級 2 之間也有著模糊的地帶。因此對於上述的情況則採取模糊集(fuzzy set)的概念去做一判斷準則。

對於模糊的判斷則採用 5.2.1-2 式，把不確定地帶的屬性上、下界的值分別設為  $a$  與  $c$ ，中間值  $b$  則為  $(a+c)/2$ ，再把不確定地帶中的有缺陷面積百分比代入 5.2.1-2 式可求得介於 0~1 間的  $S$  值，再把  $S$  值區分成六個區間分別為 0~0.15、0.15~0.35、0.35~0.5、0.5~0.65、0.65~0.85、0.85~1.0，而 0~0.15、0.15~0.35 與 0.35~0.5 分別是屬於不確定地帶上界部分的高度接近、普通接近

與低度接近，而 0.5~0.65、0.65~0.85 與 0.85~1.0 分別是屬於不確定地帶下界部分的低度接近、普通接近與高度接近，藉由此模糊集的判斷可把不確定地帶做一區分。

本案例中有缺陷面積百分比為 6.92%，判斷評估是採取表 2.14 日本塗膜剝離評估基準其結果為標準-幾乎全面性地剝離，補救措施的判定因有缺陷面積百分比介於 2%~20%間，故採取模糊集的判斷令  $a=2$ ， $c=20$ ， $b=11$ ， $x=6.92$  代入 5.2.1-2 式可得  $S=0.149$  為高度接近-清除銹蝕並上底漆，再漆上一到二層面漆，ASTM 重新塗裝面積為 40%，見圖 6.11。

## 6.6 案例分析

本節將對一些實地拍攝的銹蝕數位影像(turecolor)案例做一介紹，其分析流程如同之前所述：

圖 6.12 為一大小為 480×640 的黃底面漆銹蝕影像。經第一次的漆銹分離後所得缺陷面積所佔面積百分比為 6.82%，再將缺陷面積繼續的分析可得由深到淺面積百分比分別為 41.62%、0.57%、55.37%、2.43%，分別乘以折減權重 1.0、0.7、0.3、0.1 後所得缺陷面積所佔面積百分比為 4.02%，再進行缺陷面積百分比的評估，缺陷面積百分比的判斷評估依據表 2.14 日本塗膜剝離評估基準結果為等級 2 的標準-有明顯的剝離，補救措施為高度接近-清除銹蝕並上底漆，再漆上一到二層面漆，依 ASTM 的重新塗裝面積為 40%。

圖 6.13 為一大小為 768×1024 的鋼梁表面塗膜劣化、孔蝕影像。經第一次的漆銹分離後所得缺陷面積所佔面積百分比為 10.22%，再將缺陷面積繼續的分析可得由深到淺面積百分比分別為 53.67%、1.34%、41.05%、3.94%，分別乘以折減權重 1.0、0.7、0.3、0.1 後所得缺陷面積所佔面積百分比為 6.88%，再進行缺陷面積百分比的評估，缺陷面積百分比的判斷評估依據表 2.14 日本塗膜剝離評估基準結果為等級 3 的標準-幾乎全面性地剝離，補救措施為高度接近-清除銹蝕並上底漆，再漆上一到二層面漆，依 ASTM 的重新塗裝面積為 40%。

圖 6.14 為一大小為 480×640 的鋼梁表面塗膜銹蝕影像。經第一次的漆銹分離後所得缺陷面積所佔面積百分比為 40.60%，再將缺陷面積繼續的分析可得由深到淺面積百分比分別為 11.98%、23.10%、60.48%、3.54%，分別乘以折減權重 1.0、0.7、0.3、0.1 後所得缺陷面積所佔面積百分比為 19.20%，再進行缺陷面積百分比的評估，缺陷面積百分比的判斷評估依據表 2.14 日本塗膜剝離評估基準結果為等級 3 的標準-幾乎全面性地剝離，補救措施為高度接近-結構外部塗層全部清除，並重新塗裝，而依 ASTM 的判別介於等級 3 與等級 2 故採取模糊集的判斷令  $a = \frac{1}{6} \times 100$ ， $c = \frac{1}{3} \times 100$ ， $b = 25$ ， $x = 19.20$  代入 5.2.1-2 式可得  $S = 0.046$  故重新塗裝面積為  $60 + (100 - 60) \times S = 61.84\%$ 。

圖 6.15 為一大小為 480×640 的螺栓銹蝕影像。經第一次的漆銹分離後所得缺陷面積所佔面積百分比為 20.37%，再將缺陷面積繼續的分析可得由深到淺面積百分比分別為 40.77%、1.86%、0.05%、57.32%，分別乘以折減權重 1.0、0.7、0.3、0.1 後所得缺陷面積所佔面積百分比為 9.74%，再進行缺陷面積百分比的評估，缺陷面積百分比的判斷評估依據表 2.14 日本塗膜剝離評估基準結果為等級 3 的標準-幾乎全面性地剝離，補救措施為低度接近-清除銹蝕並上底漆，再漆上一到二層面漆，依 ASTM 的重新塗裝面積為 40%。

圖 6.16 為一大小為 480×640 的藍底面漆銹蝕影像。經第一次的漆銹分離後所得缺陷面積所佔面積百分比為 10.95%，再將缺陷面積繼續的分析可得由深到淺面積百分比分別為 33.92%、0.38%、30.61%、35.09%，分別乘以折減權重 1.0、0.7、0.3、0.1 後所得缺陷面積所佔面積百分比為 5.13%，再進行缺陷面積百分比的評估，缺陷面積百分比的判斷評估依據表 2.14 日本塗膜剝離評估基準為介於等級 2 與等級 3 故採取模糊集的判斷令  $a = 5.0$ ， $c = 6.0$ ， $b = 5.5$ ， $x = 5.13$  代入 5.2.1-2 式可得  $S = 0.034$  為高度接近-有明顯的剝離，補救措施為高度接近-清除銹蝕並上底漆，再漆上一到二層面漆，依 ASTM 的重新塗裝面積為 40%。

圖 6.17 為一大小為 480×640 的綠底面漆銹蝕影像，因為光線明暗不均的問

題而留下一些較暗的底漆，因而造成分析上的誤差。經第一次的漆銹分離後所得缺陷面積所佔面積百分比為 4.91%，再將缺陷面積繼續的分析可得由深到淺面積百分比分別為 36.70%、1.17%、57.21%、4.92%，分別乘以折減權重 1.0、0.7、0.3、0.1 後所得缺陷面積所佔面積百分比為 2.71%，再進行缺陷面積百分比的評估，缺陷面積百分比的判斷評估依據表 2.14 日本塗膜剝離評估基準結果為介於等級 1 與等級 2 的普通接近-有明顯的剝離，補救措施為高度接近-清除銹蝕並上底漆，再漆上一到二層面漆，依 ASTM 的重新塗裝面積為 18%。

圖 6.18 為一大小為 480×640 的綠底面漆銹蝕影像，為解決光線明暗不均的問題而提高分解尺度到  $n=2$ ，可發現光線明暗不均的問題以解決，但也濾掉部分較淺的銹斑。經第一次的漆銹分離後所得缺陷面積所佔面積百分比為 2.14%，再將缺陷面積繼續的分析可得由深到淺面積百分比分別為 79.62%、2.20%、18.19%、0%，分別乘以折減權重 1.0、0.7、0.3、0.1 後所得缺陷面積所佔面積百分比為 1.85%，再進行缺陷面積百分比的評估，缺陷面積百分比的判斷評估依據表 2.14 日本塗膜剝離評估基準結果為等級 1 的標準-有部分剝離，補救措施為標準-清除銹蝕並上底漆，再漆上一到二層面漆，依 AST 的重新塗裝面積為 18%。

## 第七章 結論與建議

### 7.1 前言

由於近年來電腦技術的發展，讓影像處理的過程不再是繁複而不可行，已可以實際運用且能夠負擔的一種解決問題的方法，影像處理的技術可以廣泛地運用到各領域的評估工作，其具有評估品質良好、實用性與一致性的特性，對評估過程有很大的助益。小波轉換常運用在影像壓縮、邊緣與特徵檢測以及組織成分分析等問題上，且小波轉換的基底具有較短的持續時間、多分辨分析 (Multiresolution Analysis) 的特性和時頻兩域局部特徵的能力，用來處理數位影像均能達到良好的效果。而 MATLAB 是一套具有高性能數值計算和顯像能力的程式語言，且集數值分析、矩陣運算、信號處理和圖形顯示於一體，構成一個方便、友好的使用者介面。其程式具有簡潔性，和其它的程式語言一樣可程式化，並具有可擴充性，有工具箱(toolbox)可運用於各種領域中，也可以用 MATLAB 來增加新的指令及能力等優點 [22]。故本研究結合了小波轉換、影像處理技術與 MATLAB 程式語言，運用在鋼結構橋梁塗層之評估作為影像銹蝕缺陷的判斷與分類，以達到營建品質評估的目的。

### 7.2 結論與建議

下列即綜合以上章節內容所得之結論與建議：

1. 綜合而言，影像處理系統能夠從影像中判別出缺陷，並產生一量化且可靠的結果。而本研究結合了小波轉換、影像處理技術，建立一智慧型鋼結構橋梁塗層銹蝕評估系統，運用小波的轉換與影像處理來取代之人類視覺對塗層加以評估，產生具有客觀且一致性的結果。

2. 對於分析出來的結果，結合規範並進一步對缺陷面積進行評估與補救的判斷，並對規範中不確定地帶採取模糊(fuzzy)判斷，其分析出的結果可以提供橋梁工程師與檢驗員一種協助工具，以減少高速公路鋼構橋梁維修與保養的成本。

3. 數位影像會因光線條件而造成影像的明暗不均，造成系統分析的誤差，雖然可藉由調高尺度  $n$  來減少誤差，但也會因此濾掉某些較淺的缺陷面積(銹斑)，因此影像明暗不均的避免與改善，仍有賴於後續研究跟探討。

4. 影像在擷取時的距離、角度與影像大小等因素，對於銹蝕面積的分析上，佔有非常大的影響因素，會造成銹蝕面積之分析預測極大的誤差與不可靠性，因此仍有待於多加的探討。

5. 在影像的分析上對於紅色底漆與較為接近銹蝕面積顏色的深色底漆，其分析出的結果並不是十分地理想，在這一方面仍有著很大的探討與研究空間。

6. 在影像的分析上對於塗膜下方的銹蝕並無法顯示出來，因此在這種情況下仍需要採取人為的檢測，例如：孔蝕。

7. 在研究中是以百分比方式來表示銹蝕程度，而研究中已初步地將銹蝕面積區分成由深到淺四個部分，如在後續研究中能更加準確的細分，必能提高分析的準確度，且更符合工程的實用性。



## 參考資料

1. 洪宏基，「橋梁銹蝕防治技術手冊」，台灣營建研究院，台北，1999。
2. Shubinsky G., 「Application of Optical Imaging Method for Bridge Maintenance and Inspection」, ITI Technical Report No. 4, 1994.
3. 「Steel Structures Painting Manual Good Painting Practice」, Steel Structures Painting Council. 1, P280~P291, P490~P519, 1989.
4. Chen, P-H. Chang, L-M. 「Intelligent Steel Bridge Coating Assessment Using Neuro-Fuzzy Recognition Approach」, Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 17 No. 5, P307~p319, 2002.
5. 彭國瑞，「智慧型影像處理於鋼構橋梁表面塗裝檢測之應用」，國立交通大學土木工程研究所，碩士論文，2001。
6. 張荻葳，「鋼結構物之防蝕設計、施工與維護」，中華顧問工程司鋼結構工程實務講義，台北，1994。
7. 柯文賢，「銹蝕及其防治」，全華科技，台北，1995。
8. 王仲宇，「橋梁設計維修支援系統之建立—銹蝕、地震、河川沖蝕之潛勢分析集相關技術整合」，國立中央大學土木工程系橋梁工程研究中心，桃園縣，1999。
9. 日本道路協會，「鋼道路橋塗裝便覽」，丸善株式會社，1991。
10. 張荻葳、王昭烈、宋裕祺，「橋梁劣化與災害損傷之現況及原因探討」，橋梁安全維護與管理研討會論文集，1999。
11. 日本橋梁建設協會，「鋼道路橋檢查手冊」，1995。
12. 中華顧問工程司，「混凝土橋、鋼橋一般檢測手冊」，1995。

13. 奇藤良算，「嚴重銹蝕環境下新設與已設鋼橋之防蝕政策」，第十六屆中日工程技術研討會論文集，1995。
14. AASHTO，「Manual for Bridge Maintenance」，1987。
15. 繆紹綱，「數位影像的處理 活用-MATLAB」，全華，2003。
16. 機器視覺教學網站」，<http://mv.im.isu.edu.tw/mv-web89/>。
17. 李建平、唐遠炎，「小波分析方法的應用」，重慶大學出版社，中國大陸，1999。
18. 胡昌貨、章軍波、夏軍、張偉，「基於 MATLAB 的系統分析與設計-小波分析」，西安電子科技大學出版社，中國大陸，2000。
19. 單維彰，「凌波初步 First Concepts Of Wavelets」，全華科技圖書，台北，1999。
20. 張詩言，「FUZZY 入門 人類思維的新視界 模糊理論」，全欣科技圖書，台北，1995。
21. 葉怡成、郭耀煌，「專家系統方法應用與實作」，全欣科技圖書，台北，1991。
22. William j. palm III，譯者 李宜達、麥焜燦，「MATLAB 在工程上的應用」，美商麥格羅·希爾國際股份有限公司，台北，2000。





## 附表

**表 1.1 九十二年底台灣地區橋座數概況**

公路橋梁：(座)					
合計	國道	省道	縣道	鄉道	專用公路
11,508	1,203	2,769	1,912	5,535	87
台北市區道路橋梁：(座)					
合計	跨河橋	車行高架橋	其它橋梁		
231	32	28	171		
高雄市區道路橋梁：(座)					
合計	跨河橋	車行高架橋			
92	79	13			
鐵路橋梁：(座)					
合計	大橋 (長度>20M)	小橋 (2M<長度 <20M)			
1,938	433	1,505			

注：公路橋梁係國道、省道、縣道、鄉道及專用公路橋梁之合計。

**表 1.2 ASTM Corrosion Performance Rating**

<u>Corrosion Rating</u>	<u>Assessment Description</u>	<u>Areas to be Repainted (%)</u>
10	No rust or less than 0.01% rust	0
9	Less than 0.03% rust	0
8	Few isolated spots, less than 0.1% rust	0
7	Less than 0.3% rust	0
6	Extensive rust spots, less than 1% rust	8
5	Less than 3% rust	18
4	Less than 10% rust	40
3	Approximately 1/6 of surface rusted	60
2	Approximately 1/3 of surface rusted	100
1	Approximately 1/2 of surface rusted	100
0	Approximately 100% of surface rusted	100

表 2.1 外露用一般塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)

塗裝系		表面處理		工廠塗裝					間隔	工地塗裝				
		一次處理	間隔	底漆	間隔	底漆	間隔	底漆		底漆	間隔	中塗漆	間隔	面漆
A	1	鋼 鈹 噴 砂	長 曝 型 防 鏽 底 漆	1日 ~3 個月	紅丹 防鏽 底漆 1種	2日 ~10 日	紅丹 防鏽 底漆 2種	—	6個月 內	—	—	長油性 酸樹脂  中塗漆	1日 ~10 日	長油 性酸 樹脂 面漆
	2				鉛系 防鏽 底漆 1種		鉛系 防鏽 底漆 1種			鉛系 防鏽 底漆				
	3				鉛系 防鏽 底漆	鉛系 防鏽 底漆	酚樹 脂 MIO 塗料							
B	1	—	—	—	鉛系 防鏽 底漆	2日 ~10 日	鉛系 防鏽 底漆	2日 ~10 日	12個月 內	—	—	—	1日 ~10 日	氯化 橡膠 系面 漆
	2				錳 粉 底 漆		2日 ~6 個月			錳粉 底漆				

表 2.2 外露用長期防蝕塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)

塗裝系		表面處理		工廠塗裝						間隔	工地塗裝				
		一次處理	間隔	底漆	間隔	底漆	間隔	底漆	間隔		底漆	中塗漆	間隔	面漆	
C	1	鋼 鋅 粉 底 噴 砂	鋅 粉 底 漆	2日 ~6 個月	厚塗 型鋅 粉底 漆	2日 ~10 日	中間 粘層	1日	氯化 橡膠 系底 漆	1日 ~10 日	氯化 橡膠 系底 漆	12個月	氯化橡 膠系中 塗漆	1日 ~10 日	氯化 橡膠 系面 漆
	2						中間 粘層	1日	環氧 樹脂 系底 漆	2日 ~10 日	環氧 樹脂 MIO 塗料		聚胺基 甲酸脂 中塗漆		聚胺 基甲 酸脂 面漆
	3						短曝 型伐 鏽底 漆	4小 時 ~12 小時	酚樹 脂鋅 鉻黃 防鏽 底漆	1日 ~10 日	酚樹 脂 MIO 中塗 漆		氯化橡 膠系中 塗漆		氯化 橡膠 系面 漆

表 2.3 內面用塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)

塗裝系	表面處理	工廠塗裝				
D	與外露用塗裝 系表面處理同	環氧柏油樹脂 塗料	1日~7日	環氧柏油樹脂 塗料	1日~7日	環氧柏油樹脂 塗料
E	鋼版噴砂 + 鋅粉底漆	厚塗型鋅粉底漆				

注：E系亦適用於鋼橋面版之內側。

表 2.4 塗膜劣化的原因及其處理方法〔6〕

缺陷	現象	原因	防範與處理法
變黃 Yellowing	白色或淡色漆膜之變黃現象	使用桐油、亞麻仁油與苯酚數脂製成之油漆或調配過量乾燥劑。	白色或淡色油漆避免使用異變黃性樹脂，並控制乾燥劑用量。
變色 Discoloration	塗膜變色	使用有機性顏料者較易變色	淡色塗料應選用不變色顏料。
		含鉛或銅顏料之油漆與硫化氫接觸變黑。	有硫化氫產生之環境，應避免使用鉛或銅系顏料。
		水泥、白灰或化學品之接觸變色。	使用耐鹼性或各適當之耐藥品漆塗料。
			使用適當耐藥品性油漆做重塗。
龜裂 Cracking	塗膜產生裂紋 輕者稱為 Checking 重者稱為 Cracking	塗膜太厚。	避免過分厚塗。
		下層漆未乾。	待下層漆乾透後再做上層塗裝。
		上、下層塗裝之配合不當，性質不合。	慎重考慮塗裝系統，避免異種油漆之疊層塗裝。
		溫度急速下降。	氣溫突然下降時應停止施工。
起泡 Blistering	塗膜發生起泡 浮腫現象	因生銹扛起漆膜。	做完整表面處理與防蝕塗裝。
		被塗面有水份，或吸潮性物質之附著，以及塗裝器具內有水份之存在。	做完整表面處理與塗裝器具之清理。
		鋅陽極附近因因氫氣瓦斯之起泡或在陰極產生之鹼性質引起之起泡。	施塗適合陰陽極防蝕之塗料，並控制防蝕電波，不要變為過電蝕蝕。
		厚塗型油漆之連續使用。	按規定塗裝間隔施工。
			除去有起泡漆膜重做塗裝。
生銹 Rusting	產生鐵銹	表面處理不當。	做完整表面處理，除去黑皮、鐵銹、稅份以及其它異物。
		塗料性能不良。	選用品質優良產品。
		塗膜厚度不足或施工不良。	按規定漆膜厚度施工，不要有漏塗情事發生。
			除去漆膜重做表面處理與塗裝。
剝離 Lifting (Scaling)	底面與漆膜或漆膜與漆膜間之剝離現象	被塗面有油、水份或鐵銹之存在。	做完整表面處理。
		底層漆之過分暴露與硬化。	在規定塗裝間隔時間內作塗裝。
		下層漆與上層漆之配合不良。	考慮塗料系統，盡量避免作異種或不同廠牌油漆之疊層油漆。
		工程錯誤，列如無 W/P 之氯乙烯系油漆塗裝。	按規定塗裝工程施工。
		異種塗料之混合。	避免不同系統或廠牌油漆之混合。
		潮濕木材，或從背面吸收了水份之木材正面塗裝。	選用乾燥木材，不做單面塗裝。
		過分平滑之金屬面塗裝。	用噴砂或砂紙磨粗後施工。
	除去剝離漆膜重做塗裝。		
皺紋	塗膜有起皺現象	過分厚塗，造成表乾裡不乾現象。	避免過分之厚塗塗裝。
		下層漆未乾。	待下層漆乾後，再做上層漆塗裝。
		乾燥劑用量太多。	控制乾燥劑用量。
		為了促進乾燥，將塗面加熱或直曬太陽。	避免急速加熱。
			用砂紙磨平後重塗。

表 2.5 美國 SSPC 生鏽標準評估法

		發生面積	劣化狀態
等 級	0	$A < 0.1\%$	幾乎未有生鏽
	1	$0.1\% \leq A < 1.0\%$	僅有些許生鏽
	2	$1.0\% \leq A < 5.0\%$	有明顯生鏽
	3	$A \geq 5.0\%$	幾乎全面性生鏽

表 2.6 日本塗膜剝離評估基準

		發生面積	劣化狀態
等 級	0	0~0.5%	幾乎未有剝離
	1	0.6~2.0%	有部分剝離
	2	3.0~5.0%	有明顯的剝離
	3	6.0%以上	幾乎全面性地剝離

表 2.7 日本塗膜變褪色檢查標準樣本

		劣化狀態
等 級	0	與初期相比幾乎沒有變化
	1	與初期相比有產生變化
	2	與初期相比有明顯之變化
	3	初期之顏色幾乎未留存

表 2.8 日本塗膜污穢檢查標準樣本

		劣化狀態
等 級	0	幾乎未有污穢
	1	污穢下之顏色可明顯判別
	2	污穢下之顏色約略可判別
	3	污穢下之顏色無法確認

表 2.9 平均劣化等級

平均劣化等級	3 部位之劣化等級組合				備註 (下述數字表示 3 部位之劣化等級)
	等級 0	等級 1	等級 2	等級 3	
0	3	-	-	-	000
	2	1	-	-	001, 010, 100
I	1	2	-	-	011, 101, 110
	0	3	-	-	111
	2	-	1	-	002, 020, 200
	1	1	1	-	012, 021, 102, 120, 201, 210
	-	2	1	-	112, 121, 211
II	1	-	2	-	022, 202, 220
	-	1	2	-	122, 212, 221
	-	-	3	-	222
	2	-	-	1	003, 030, 300
	1	1	-	1	013, 031, 103, 301, 310
	-	2	-	1	113, 131, 311
III	1	-	1	1	023, 032, 203, 230, 302, 320
	-	1	1	1	123, 132, 213, 231, 312, 321
	1	-	-	2	033, 303, 330
	-	1	-	2	133, 313, 331
	-	-	2	1	223, 232, 322
IV	-	-	1	2	233, 323, 332
	-	-	-	3	333

表 2.10 銹蝕劣化評估對象檢查項目

區分	地區	評估對象檢查項目
A	景觀保護區	1. 生銹 2. 剝離 3. 變褪色 4. 污穢
B	一般地區	1. 生銹 2. 剝離 3. 變褪色

表 2.11 景觀保護區之評估表

		生鏽或剝離至少有一項					評估區分
		IV	III	II	I	0	
變褪色 或污穢 至少有一 項目	IV	AA	AA	AA	AA	AA	獨立評估
	III	AA	AA	AA	AA	A	組合評估
	II	AA	A	A	B	B	
	I	AA	A	B	C	C	
	0	AA	A	B	C	OK	
評估區分		獨立 評估	組合評估				

表 2.12 一般區域之評估

		生鏽或剝離至少有一項					評估區分
		IV	III	II	I	0	
變 褪 色	IV	AA	AA	AA	A	A	獨立評估
	III	AA	AA	A	B	B	組合評估
	II	AA	A	B	C	C	
	I	AA	A	B	C	C	
	0	AA	A	B	C	OK	
評估區分		獨立 評估	組合評估				

表 2.13 判定區分

判定區分	判定
AA	需盡早重新塗裝
A	已劣化至須重新塗裝程度
B	塗裝劣化持續進行，須依需要重新塗裝
C	塗膜劣化程度輕微
OK	沒有劣化

表 2.14 塗膜狀態區分

檢查項目	塗膜狀態				
	4	3	2	1	0
漏水所造成塗膜劣化		由於漏水使塗膜剝離，鋼版顯著銹蝕	由漏水使塗膜變色污穢外，並有起皺、生銹、龜裂及部分之剝離	由於漏水使塗膜表面顯著變色或污穢	完全無漏水
起泡		顯著起泡 (面積約 25%)	全面地起泡 (面積約 10%)	點狀星佈起泡 (面積約 2%)	完全未起泡或接近時肉眼未察見
龜裂		全面性大裂縫	產生大裂縫	點狀星佈裂縫	完全未裂縫或接近時肉眼未察見
方格試驗 (註 1)	於計入切割線附近之剝離面積時，方格塗裝之剝離數為 4 個以上	方格塗裝之剝離數為 1 個，但若加計入切割線附近之剝離面積則為 2 個以上 3 個以內	方格塗裝沒有剝離，但切割線附近有顯著剝離	方格塗裝沒有剝離，但切割線附近有產生剝離	方格塗裝沒有剝離，但切割線附近亦沒有剝離
塗膜阻抗試驗 (註 2)			阻抗值 小於 $1 \times 10^2 \Omega$	阻抗值 $1 \times 10^2 \sim 5 \times 10^2 \Omega$	阻抗值 $5 \times 10^2 \Omega$ 以上

註 1：試驗方法乃是以小刀切割成深達鋼材之縱橫各 3(格合計 9 格)之 5mm 方格之正方形網目，以透明膠帶壓貼於其上後撕去使塗膜剝離。

註 2：測定面積為 10cm×10cm，測定頻率為 1.0Khz。



表 2.15 各種塗料重塗之適合性〔1〕

上塗塗料種類 底塗塗料種類	油 性 系	磷 苯 二 甲 酸 系	酚 樹 脂 MIO 系	氯 化 橡 膠 系	環 氧 樹 脂 系	變 性 環 氧 樹 脂 系	柏 油 環 氧 樹 脂 系	聚 氨 基 甲 酸 脂 樹 脂 系	矽 利 康 油 性 樹 脂 漆	氟 素 系
長暴型樹脂底漆	○	○	○	○	△	△	△	○	○	○
環氧樹脂鋅粉底漆	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○
無機鋅粉底漆	×	×	×	△	○	○	○	△	×	○
油性系	○	○	○	△	×	×	×	×	○	×
磷苯二甲酸系	○	○	○	△	△	△	△	△	○	×
酚樹脂 MIO 系	○	○	○	○	×	×	×	×	○	×
氯化橡膠系	△	△	△	○	△	△	×	△	△	×
環氧樹脂系	△	△	△	○	○	○	○	○	△	○
變性環氧樹脂系	△	△	△	○	○	○	○	○	△	○
柏油環氧樹脂系	△	△	△	△	△	△	○	△	×	×
聚氨基甲酸脂樹脂系	△	△	△	△	△	△	△	○	△	○

評價：○：可重塗；△：有條件的可重塗；×：不可重塗者

表 2.16 維修用塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)

a 塗裝系(外面塗裝用)

塗裝系	舊塗裝系	表面處理	底漆				中塗層	間隔	面漆
			第一層	間隔	第二層	間隔			
a-1	A-1 A-2	2級	鉛系防銹 底漆 1 級 $140g/m^2$	2日 ~10日	鉛系防銹 底漆 1 級 $140g/m^2$	2日 ~10日	長油性苯二甲酸樹脂中塗漆 $120g/m^2$	2日 ~10日	長油性磷苯二甲酸樹脂面漆 $110g/m^2$
		3級	鉛系防銹 底漆 1 級 $140g/m^2$ (鋼材面露出)	2日 ~10日	鉛系防銹 底漆 1 級 $140g/m^2$	2日 ~10日			
		4級			鉛系防銹 底漆 1 級 $140g/m^2$	2日 ~10日			
a-3	A-1 A-2 A-3	2級	鉛系防銹 底漆 1 級 $140g/m^2$	2日 ~10日	鉛系防銹 底漆 1 級 $140g/m^2$	2日 ~10日	矽利康油性樹脂中塗漆 $120g/m^2$	2日 ~10日	矽利康油性樹脂面漆 $110g/m^2$
		3級	鉛系防銹 底漆 1 級 $140g/m^2$ (鋼材面露出)	2日 ~10日	鉛系防銹 底漆 1 級 $140g/m^2$	2日 ~10日			
		4級			鉛系防銹 底漆 1 級 $140g/m^2$	2日 ~10日			

註：(1)塗料使用量係以塗刷施工為準。

(2)塗裝間隔之最低溫度為  $20^{\circ}C$ 。低溫時應調整塗膜之乾燥狀態，確認塗膜硬化乾燥後才可重塗。

(3)清淨度 3 級，底漆第一層係在鋼材面露出可見之情形下塗刷。

表 2.17 維修用塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)

b 塗裝系(外面塗裝用)

塗裝系	舊塗裝系	表面處理	底漆				中塗層	間隔	面漆
			第一層	間隔	第二層	間隔			
b-1	A-1 A-2 B-1 B-1	2級	鉛系防銹底漆 1 級 $140g/m^2$	2日 ~10日	鉛系防銹底漆 1 級 $140g/m^2$	2日 ~10日	氯化橡膠中塗漆 $170g/m^2$	1日 ~10日	氯化橡膠面漆 $150g/m^2$
		3級	鉛系防銹底漆 1 級 $140g/m^2$ (鋼材面露出)	2日 ~10日	鉛系防銹底漆 1 級 $140g/m^2$	2日 ~10日			
		4級			鉛系防銹底漆 1 級 $140g/m^2$	2日 ~10日			

註：(1)塗料使用量係以塗刷施工為準。

(2)塗裝間隔之最低溫度為 $20^{\circ}C$ 。低溫時應調整塗膜之乾燥狀態，確認塗膜硬化乾燥後才可重塗。

(3)清淨度 3 級，底漆第一層係在鋼材面露出可見之情形下塗刷。

(4)寒冷期鉛系防銹底漆乾燥較為緩慢，若塗裝間隔超過列表上限時，第二層底漆應使用鉛系防銹底漆 2 級( $140g/m^2$ )。

表 2.18 維修用塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)

c 塗裝系(外面塗裝用)

塗裝系	舊塗裝系	表面處理	底漆						中塗層	面漆	
			第一層	間隔	第二層	間隔	第三層	間隔			
c-1	A-1	2級	有機鋅粉底漆 1級 300g/m <sup>2</sup>	1日 ~10日	變性環氧樹脂底漆 240g/m <sup>2</sup>	1日 ~10日	變性環氧樹脂底漆 240g/m <sup>2</sup>	1日 ~10日	聚胺基甲酸酯中塗漆 140g/m <sup>2</sup>	1日 ~1日 0日	聚胺基甲酸酯面漆 120g/m <sup>2</sup>
	A-2										
	A-3	3級	鉛系防銹底漆 1級 240g/m <sup>2</sup> (鋼材表面露出)	1日 ~10日	變性環氧樹脂底漆 240g/m <sup>2</sup>	1日 ~10日	變性環氧樹脂底漆 240g/m <sup>2</sup>	1日 ~10日			
	A-4										
	B-1										
	C-1	4級			變性環氧樹脂底漆 240g/m <sup>2</sup>	1日 ~10日					
C-2											
c-3	A-1	2級	有機鋅粉底漆 1級 300g/m <sup>2</sup>	1日 ~10日	變性環氧樹脂底漆 240g/m <sup>2</sup>	1日 ~10日	變性環氧樹脂底漆 240g/m <sup>2</sup>	1日 ~10日	氟素樹脂中塗漆 140g/m <sup>2</sup>	1日 ~1日 0日	氟素樹脂面漆 120g/m <sup>2</sup>
	A-2										
	A-3										
	A-4										
	B-1	3級	變性環氧樹脂底漆 240g/m <sup>2</sup> (鋼材表面露出)	1日 ~10日	變性環氧樹脂底漆 240g/m <sup>2</sup>	1日 ~10日	變性環氧樹脂底漆 240g/m <sup>2</sup>	1日 ~10日			
	C-1										
	C-2										
	C-3	4級			變性環氧樹脂底漆 240g/m <sup>2</sup>	1日 ~10日					
C-4											

註：(1)塗料使用量係以塗刷施工為準。

(2)塗裝間隔之最低溫度為20°C。低溫時應調整塗膜之乾燥狀態，確認塗膜硬化乾燥後才可重塗。

(3)清淨度3級，底漆第一層係在鋼材面露出可見之情形下塗刷。

表 2.19 維修用塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)

c 局部修補用塗裝系(外面塗裝用)

塗裝系	舊塗裝系	表面處理	底漆			間隔	面漆
			第一層	間隔	第二層		
c-5	C-1	2 級	環氧樹脂 底漆 $120g/m^2$	1 日~10 日	超厚膜形環 氧樹脂底漆 $1000g/m^2$	1 日~10 日	聚胺基甲酸酯面漆 $120g/m^2$
	C-2						
c-6	C-3	2 級	環氧樹脂 底漆 $120g/m^2$	1 日~10 日	超厚膜形環 氧樹脂底漆 $1000g/m^2$	1 日~10 日	聚胺基甲酸酯面漆 $120g/m^2$
	C-4						

註：(1)塗料使用量係以塗刷施工為準。

(2)塗裝間隔之最低溫度為 $20^{\circ}C$ 。低溫時應調整塗膜之乾燥狀態，確認塗膜硬化乾燥後才可重塗。

(3)清淨度 3 級，底漆第一層係在鋼材面露出可見之情形下塗刷。

表 2.20 維修用塗裝系(日本道路協會鋼橋塗裝便覽)

d 塗裝系(外面塗裝用)

塗裝系	舊塗裝系	表面處理	第一層	間隔	第二層
d-1	D-1	3 級	無溶劑形柏油環氧樹脂 塗料 $300g/m^2$	2 日~10 日	無溶劑形柏油環氧樹脂塗 料 $300g/m^2$
	D-3				
d-2	D-1	3 級	無溶劑形柏油環氧樹脂 塗料 $300g/m^2$	2 日~10 日	無溶劑形柏油環氧樹脂塗 料 $300g/m^2$
	D-2				
	D-3				
	D-4				

註：(1)塗料使用量係以塗刷施工為準。

(2)塗裝間隔之最低溫度為 $20^{\circ}C$ 。低溫時應調整塗膜之乾燥狀態，確認塗膜硬化乾燥後才可重塗。

表 2.21 表面處理之等級

等級	作業內容	作業方法
1 級	去除銹及塗膜，使鋼材表面達到清淨。	噴砂。
2 級	去除銹及塗膜，使鋼材表面露出，但是，凹澗部份或狹窄部份仍殘存銹或塗膜。	砂輪機，鋼刷等動力工具與手工工具並用。
3 級	去除銹及塗膜，使鋼材表面露出，但是殘存著沒有劣化之塗膜(活膜)。	砂輪機，鋼刷等動力工具與手工工具並用。
4 級	粉狀物及附著物脫落，殘存活膜。	砂輪機，鋼刷等動力工具與手工工具並用。

註：鋅漆或鋅粉底漆之活膜很難以動力工具或手工工具去除，即使 2 級者亦有殘存。

表 2.22 塗膜劣化程度及其對應之表面處理

塗膜之劣化程度	表面處理之等級
生銹，塗膜龜裂、剝離及浮腫等幾乎全表面產生。	1 級、2 級
局部點銹及塗膜龜裂、剝離及浮腫發生，但活膜仍然很多。	3 級
幾乎不生銹，但塗膜有變色及白亞化之情形。	4 級

表 2.23 各噴砂處理及其對應之鹽份殘留量

處理內容	處理時間 (sec/cm <sup>2</sup> )	氯離子濃度 (mg/m <sup>2</sup> )
噴砂 (使用 5 號砂)	0.21	0.065
	1.03	0.0065
噴砂+水洗 (使用 5 號砂)	0.19	0.0060
鋼砂噴砂 (#30·#5 混合)	0.20	0.370
	1.04	0.147
銹附著狀態	-	2.16

表 2.24 各種鹽份去除方法之效果比較

內 容	鹽份附著量 ( $mg/m^2$ )		
	100	200	300
施工前	218		
高壓水洗後	22		
噴砂後	114		
噴砂後拭淨之	52		



## 附圖



圖 2.1 鋼材表面塗膜劣化剝離

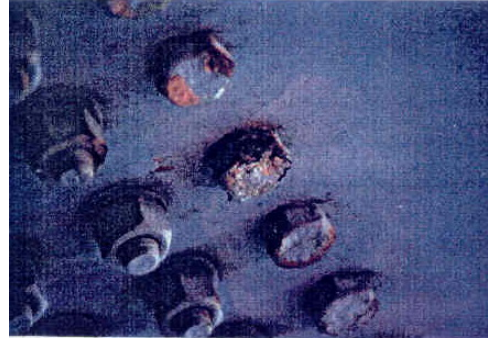


圖 2.5 塗膜附著困難，螺栓銹蝕



圖 2.2 鋼材表面起泡浮腫

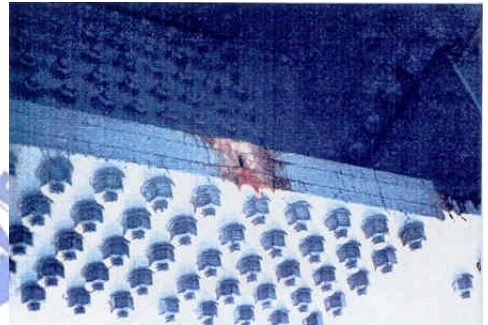


圖 2.6 接合版嚴重銹蝕



圖 2.3 鋼材表面起泡浮腫



圖 2.7 箱梁角隅處塗膜剝落腐



圖 2.4 鋼梁表面褪色、白亞化及孔蝕

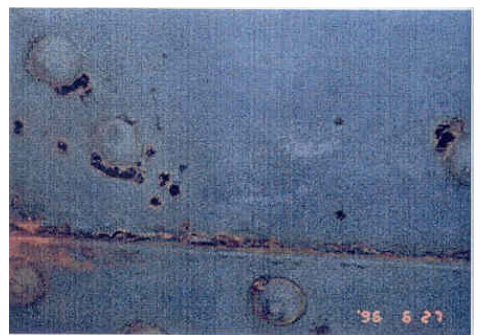


圖 2.8 鋼梁表面褪色、白亞化及孔蝕





圖 2.9 接合版嚴重銹蝕

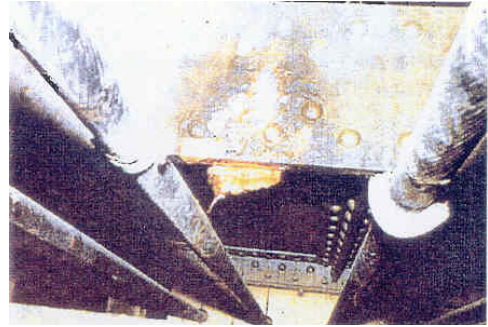


圖 2.13 箱梁下方管線通風不良造成銹蝕



圖 2.10 接合版嚴重銹蝕



圖 2.14 排水管出口處附近產生銹蝕



圖 2.11 焊道處防銹處理不良造成銹蝕

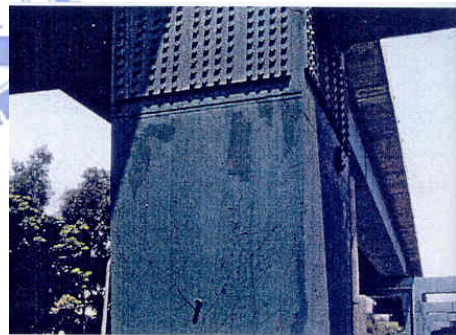


圖 2.15 不當美化植栽造成銹蝕



圖 2.12 扭桿構材高應力處銹蝕

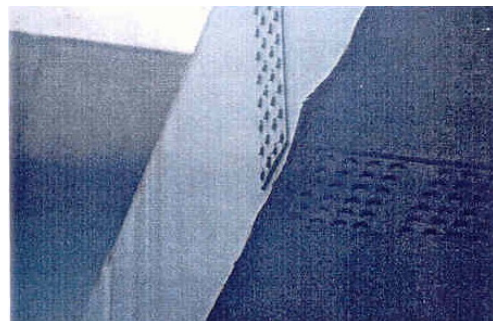


圖 2.16 鋼橋銹蝕

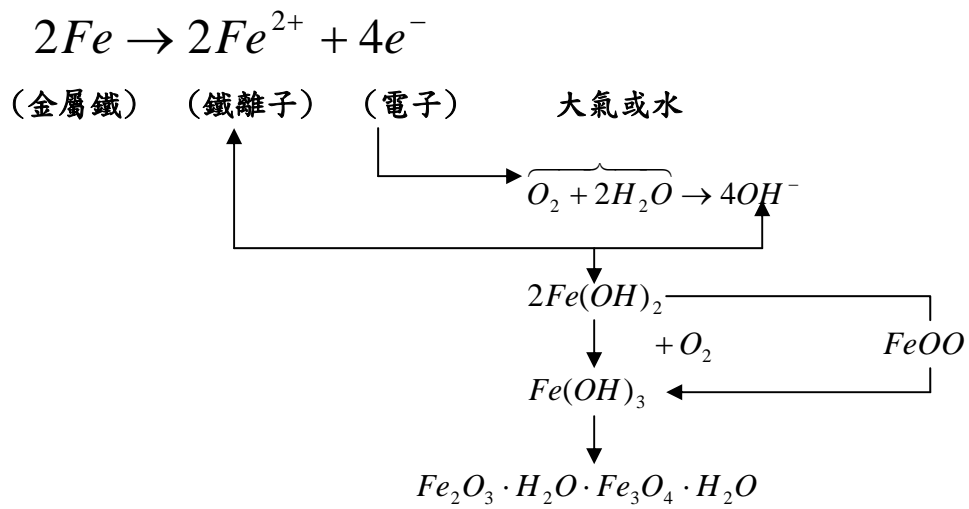


圖 2.17 第二階段之相關反應 [1]



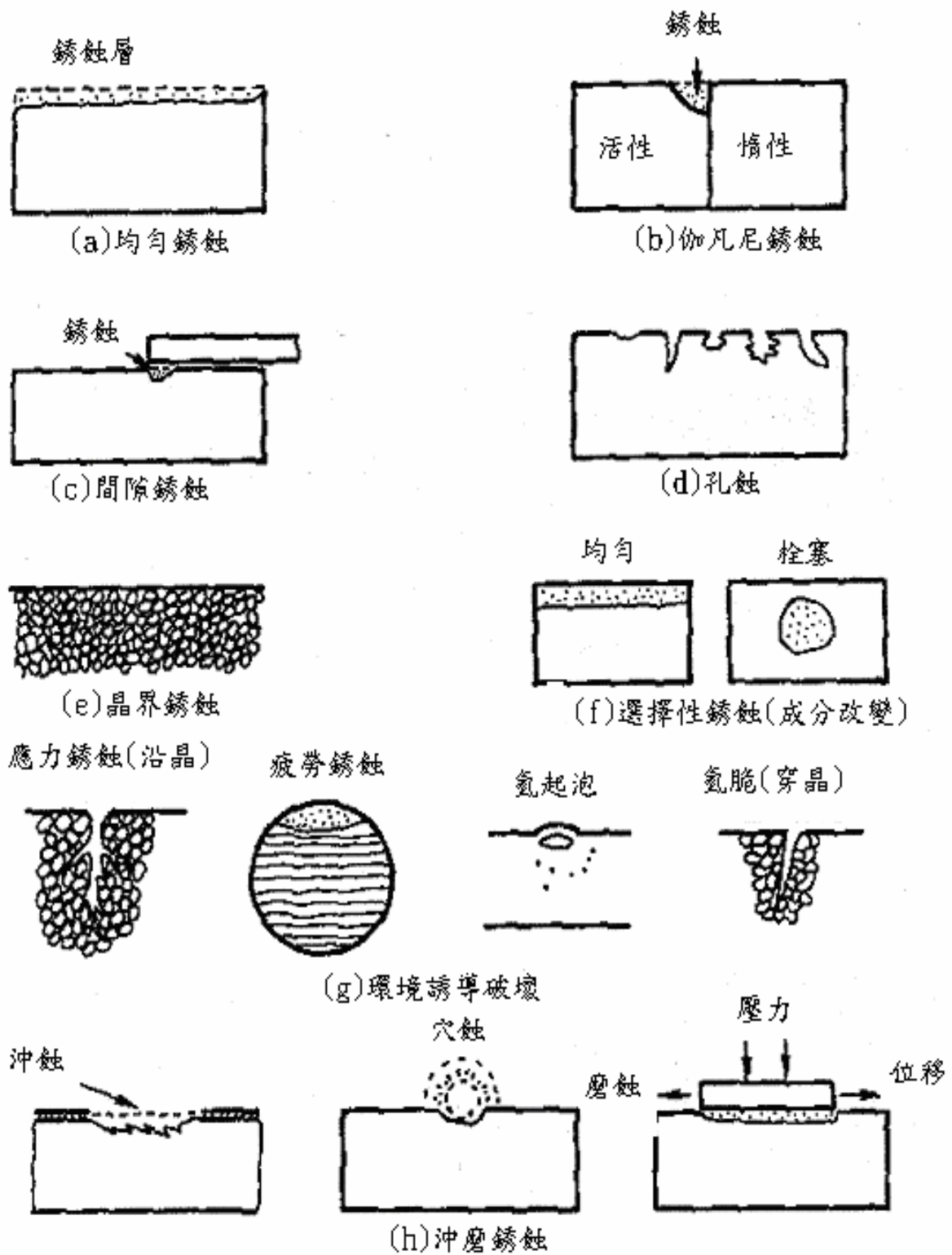


圖 2.18 各種锈蚀型態解說示意圖〔7〕



圖 2.19 上部結構檢查部位

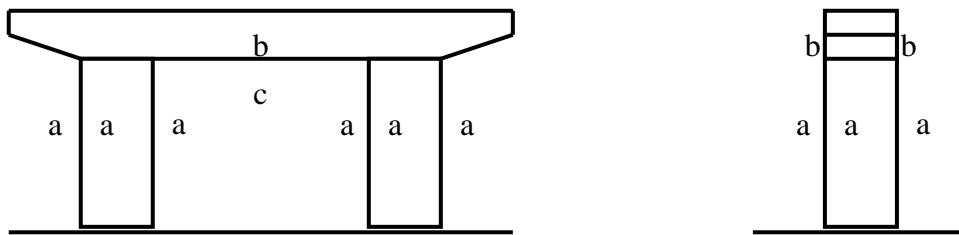
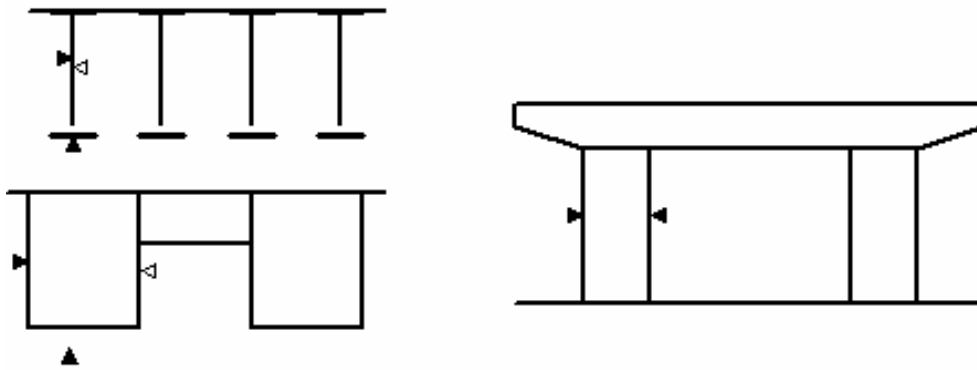


圖 2.20 下部結構檢查部位



試驗位置(跨徑間兩端位置)

▼：基準點

▽：梁內側之塗裝系統與經過年數不同時實施

圖 2.21 上、下部結構檢查部位

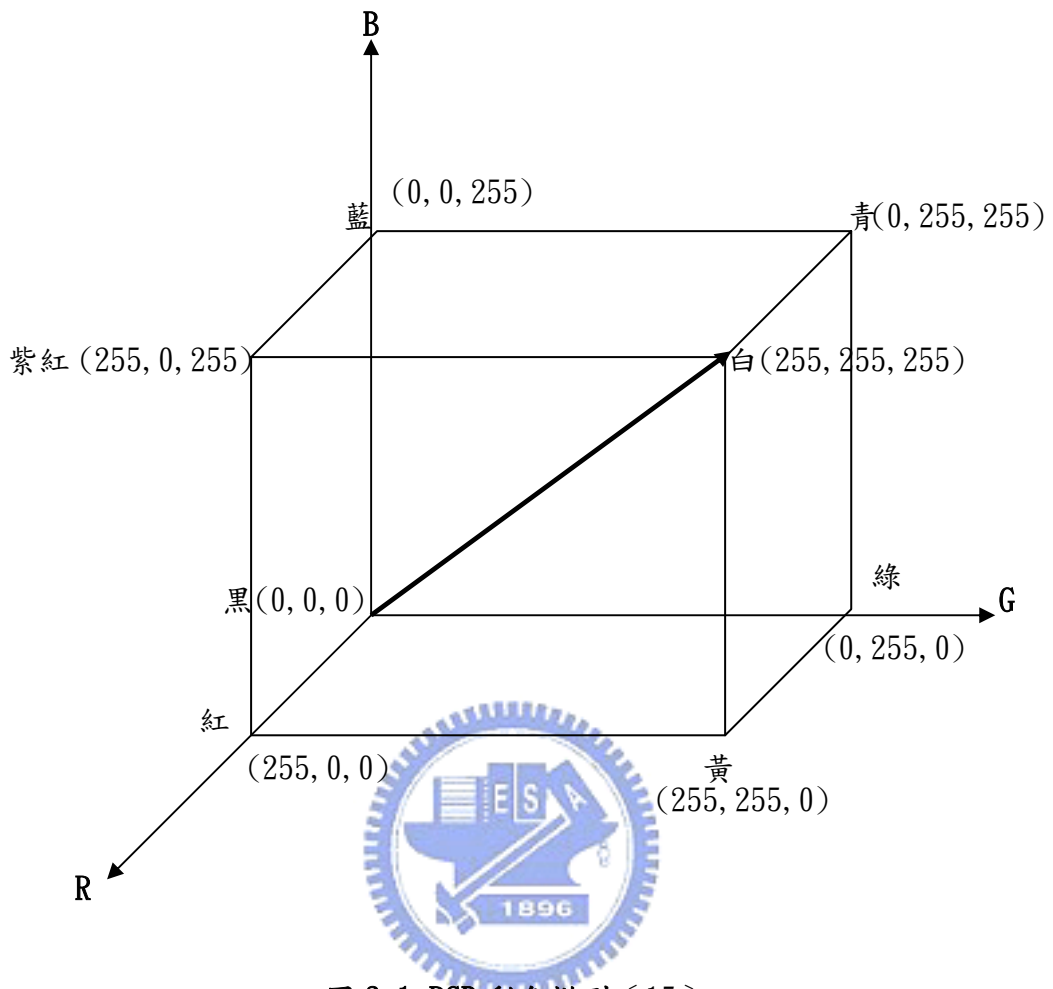


圖 3.1 RGB 彩色模型 [15]

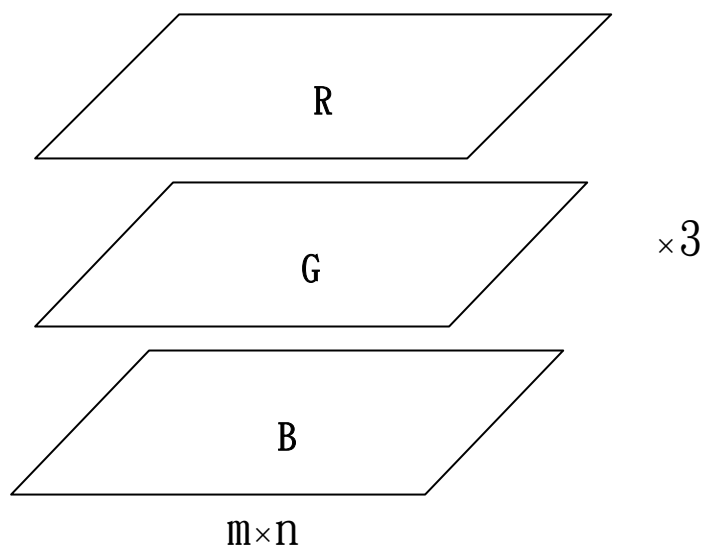


圖 3.2 彩色影像( $m \times n \times 3$ )示意圖

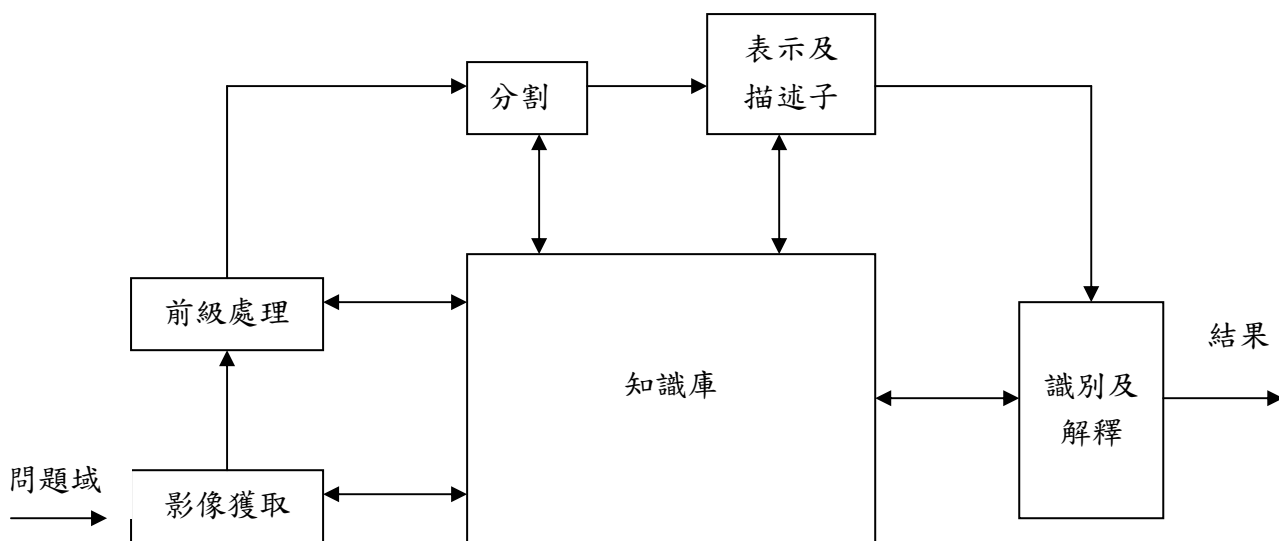


圖 3.3 數位影像處理之基本步驟流程



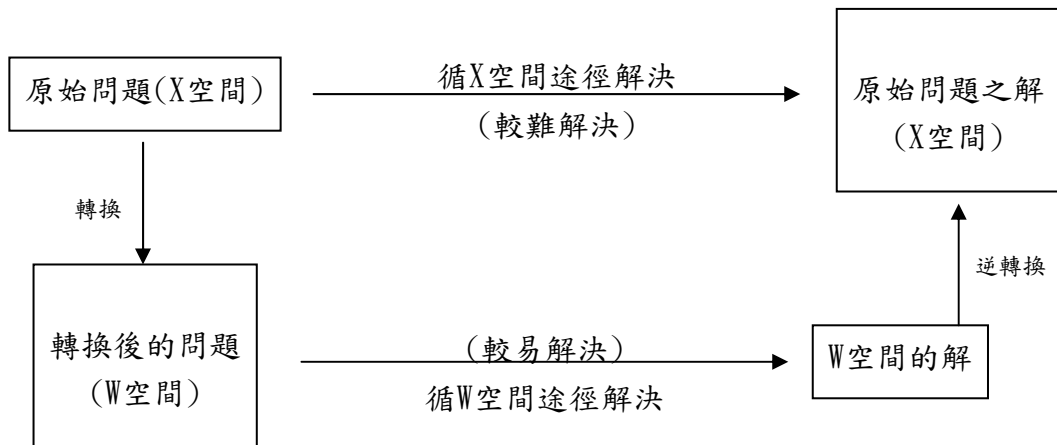


圖 4.1 轉換示意圖

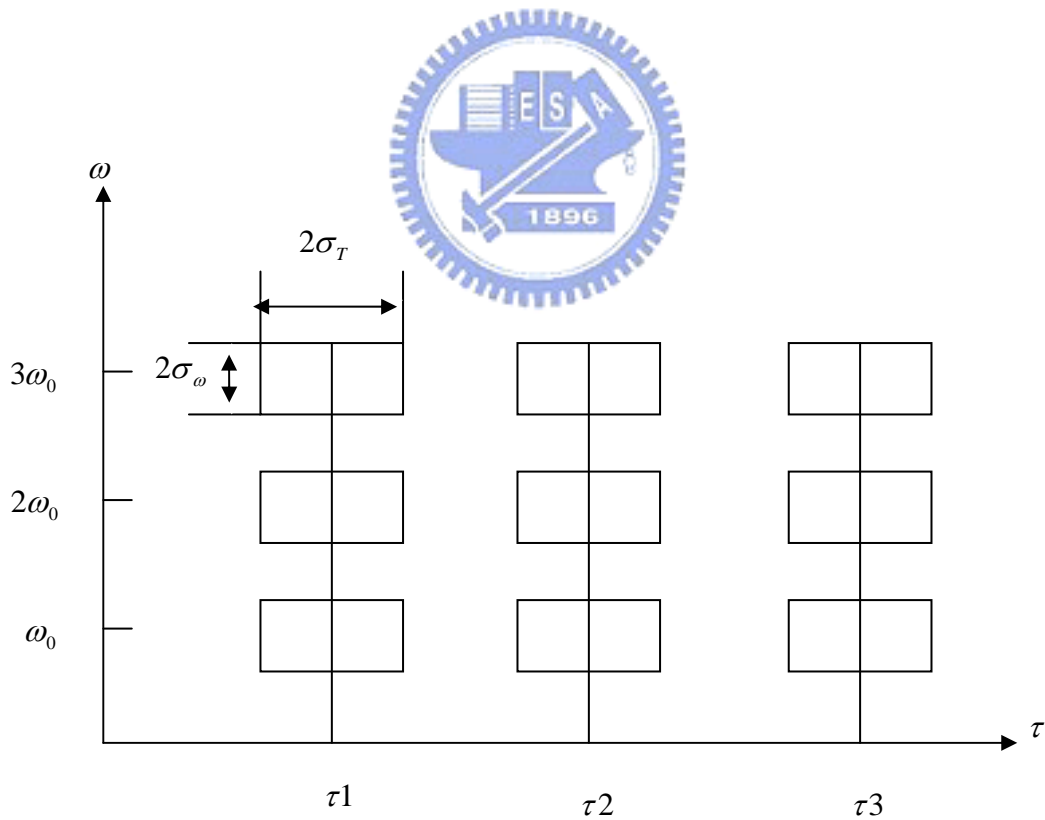


圖 4.2 STFT 在時頻域平面上的解析度 [15]

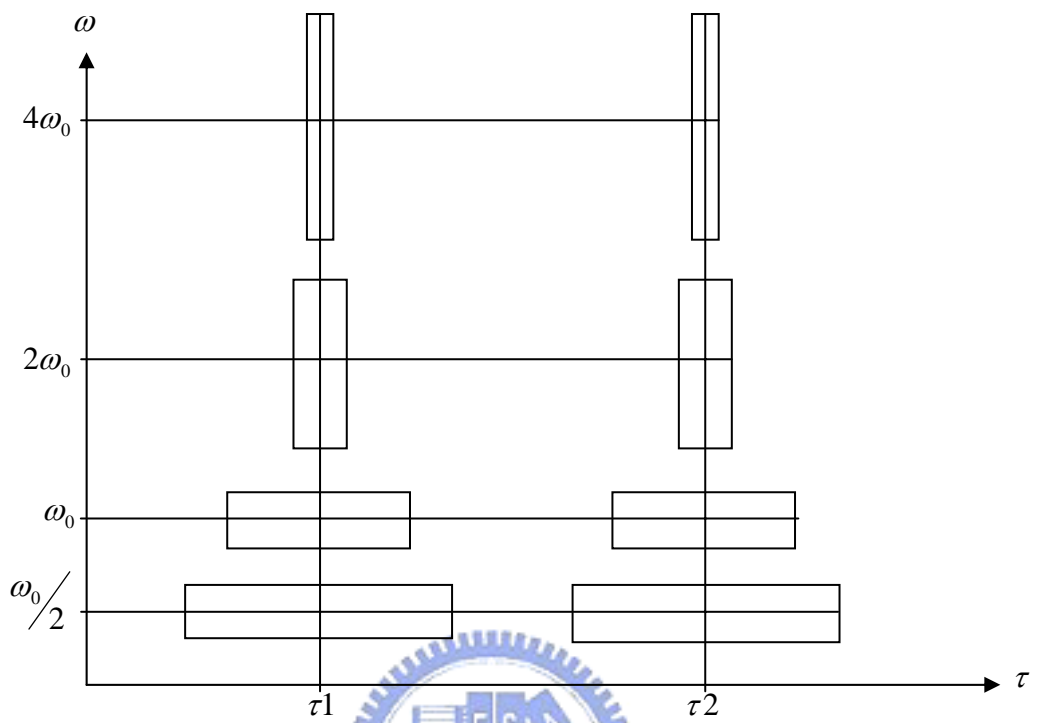


圖 4.3 小波轉換在時頻域平面上的解析度 [15]

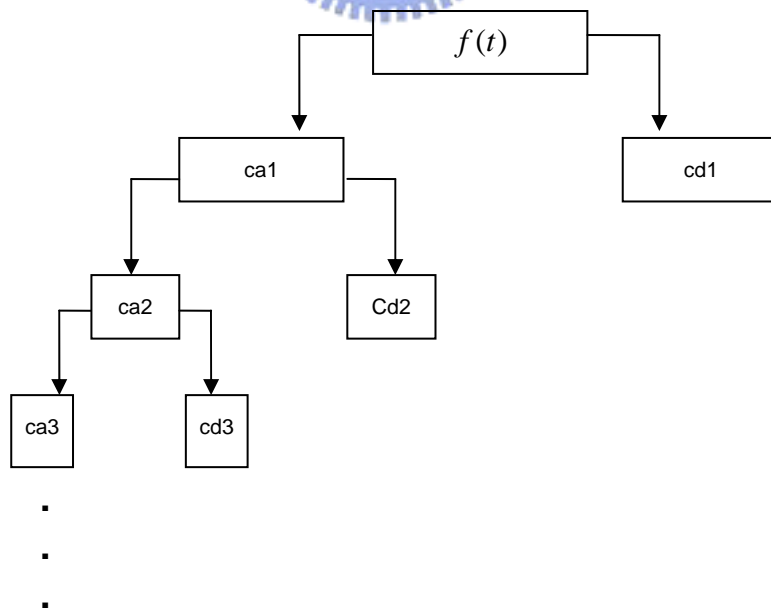


圖 4.4 多尺度一維小波分解



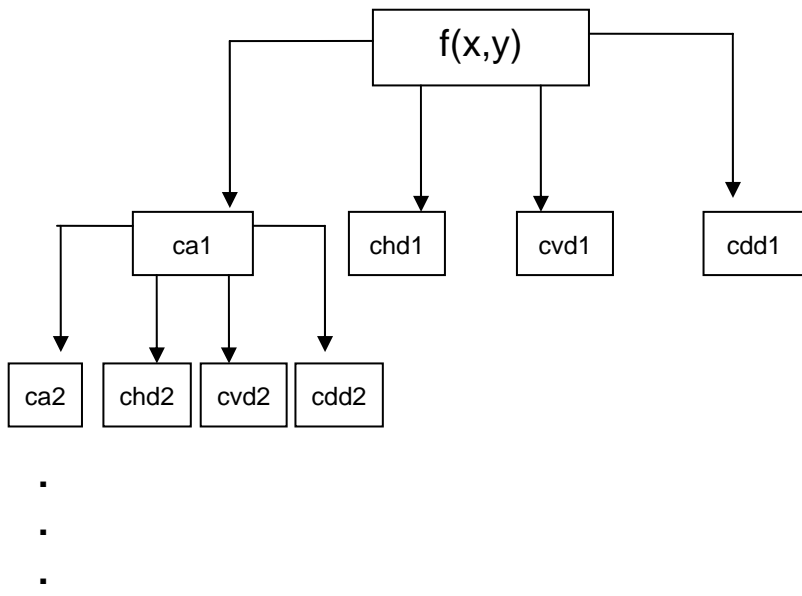
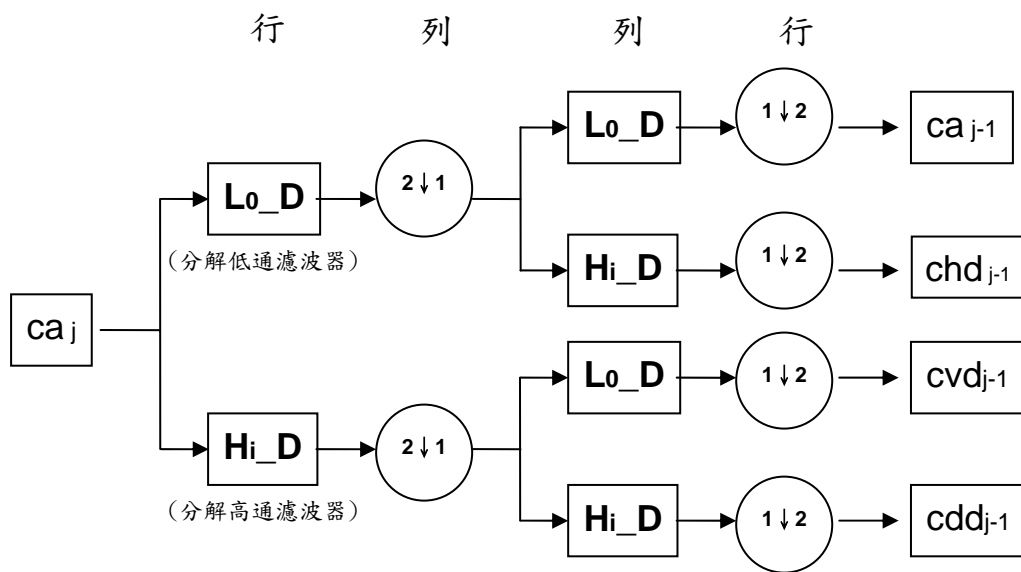


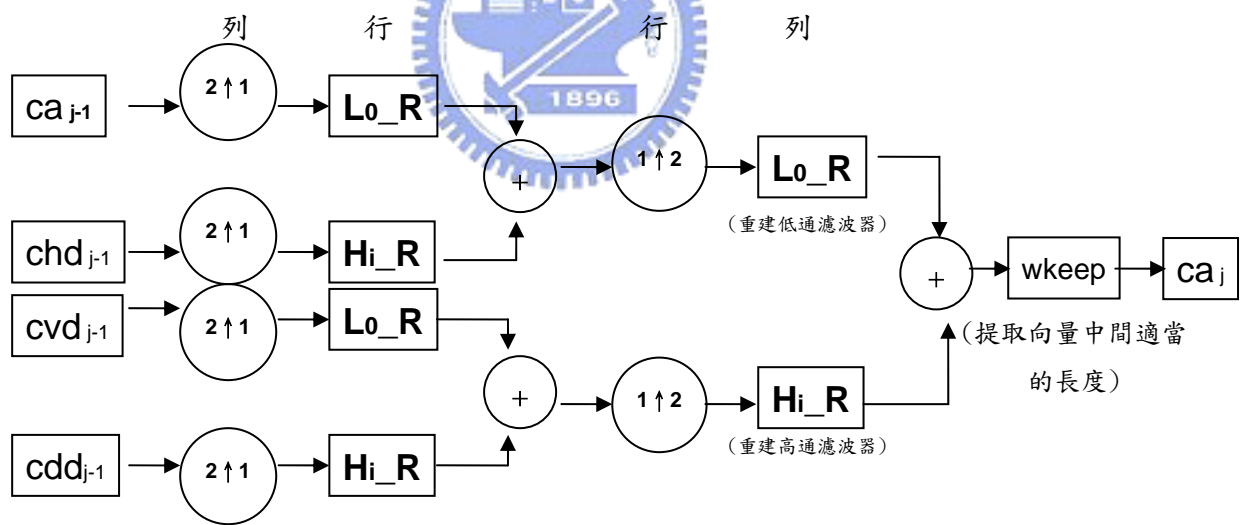
圖 4.5 多尺度二維小波分解





$2 \downarrow 1$  : 表示列抽樣, 保留所有偶數列       $1 \downarrow 2$  : 表示行抽樣, 保留所有偶數行

(a) 小波的分解



$2 \uparrow 1$  : 表示列插樣, 在奇數列插入0值       $1 \uparrow 2$  : 表示行插樣, 在奇數行插入0值

(b) 小波的重建

圖4.6 小波的分解與重建的示意圖(a)分解(b)重建 [18]

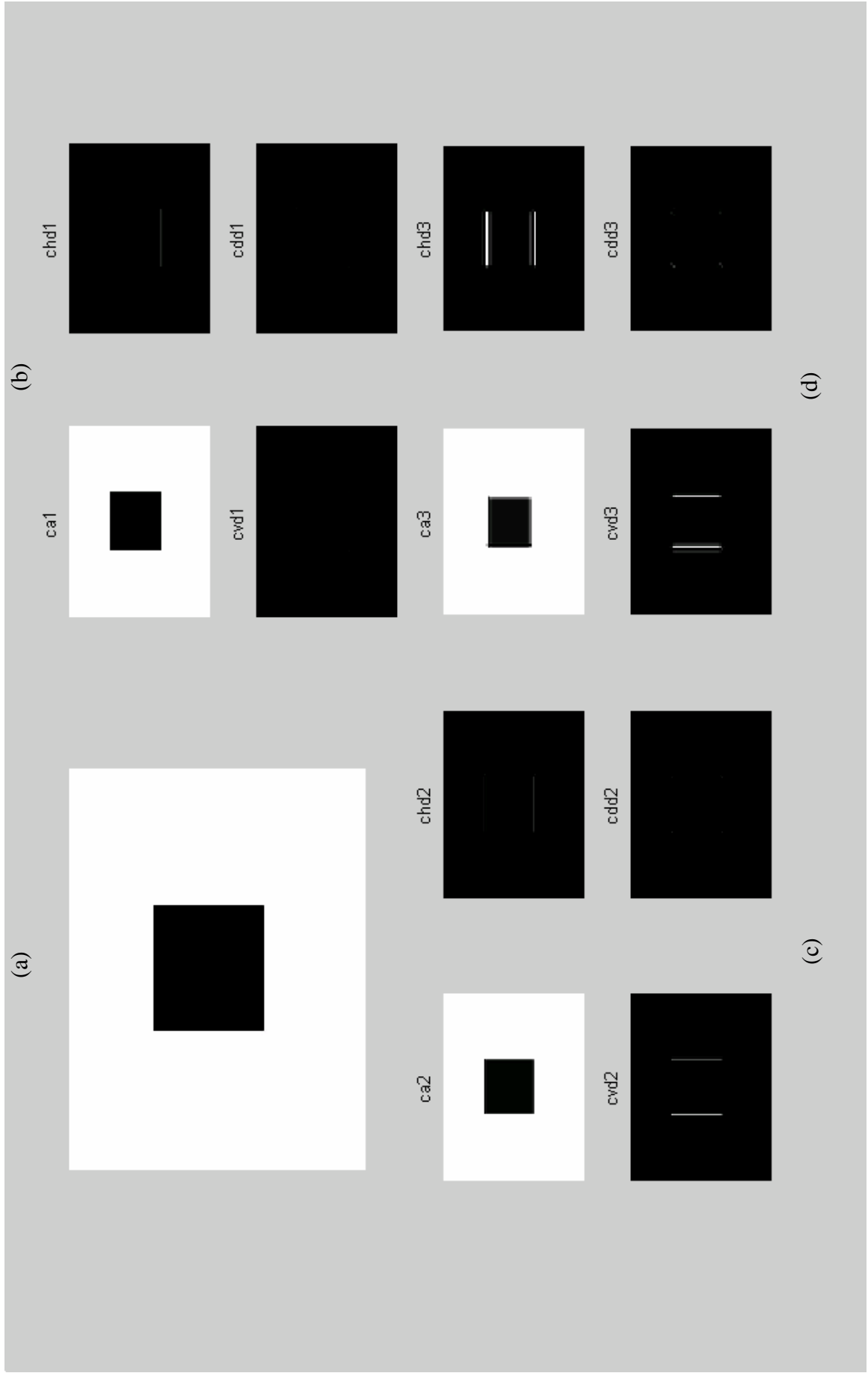


圖 4.7 二維小波轉換 (a)原始影像 (b)第一階的小波轉換  
(c)第二階的小波轉換 (d)第三階的小波轉換

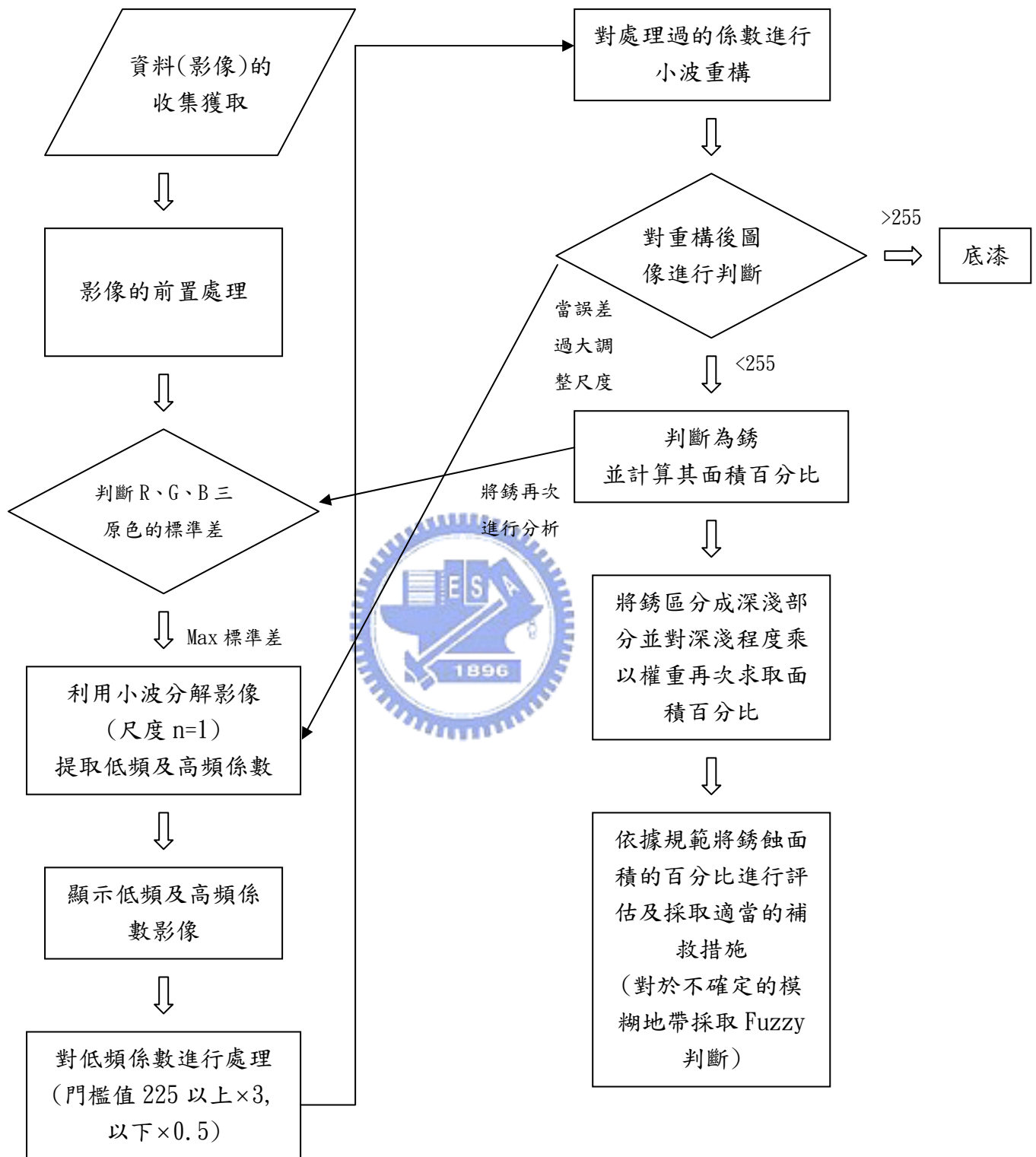


圖 6.1 系統架構圖

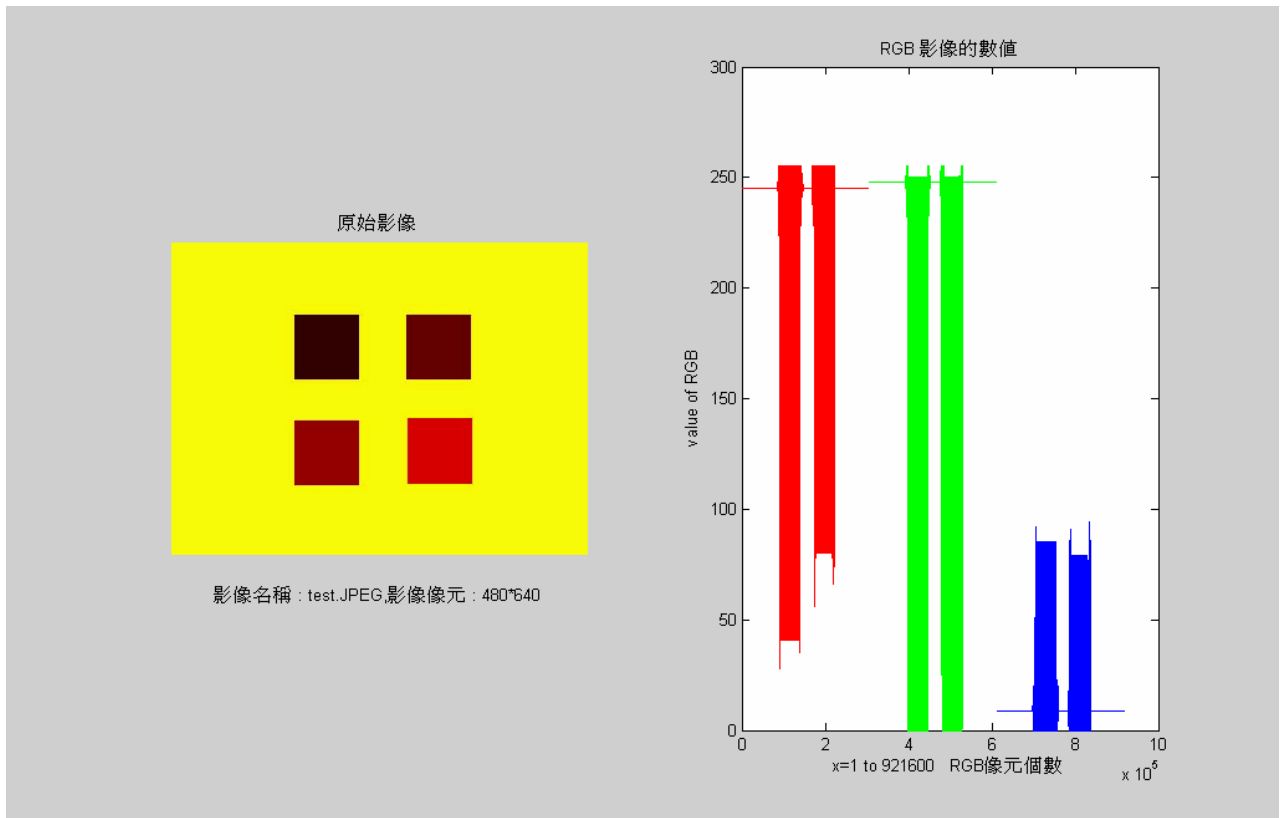


圖 6.2 輸入分析影像

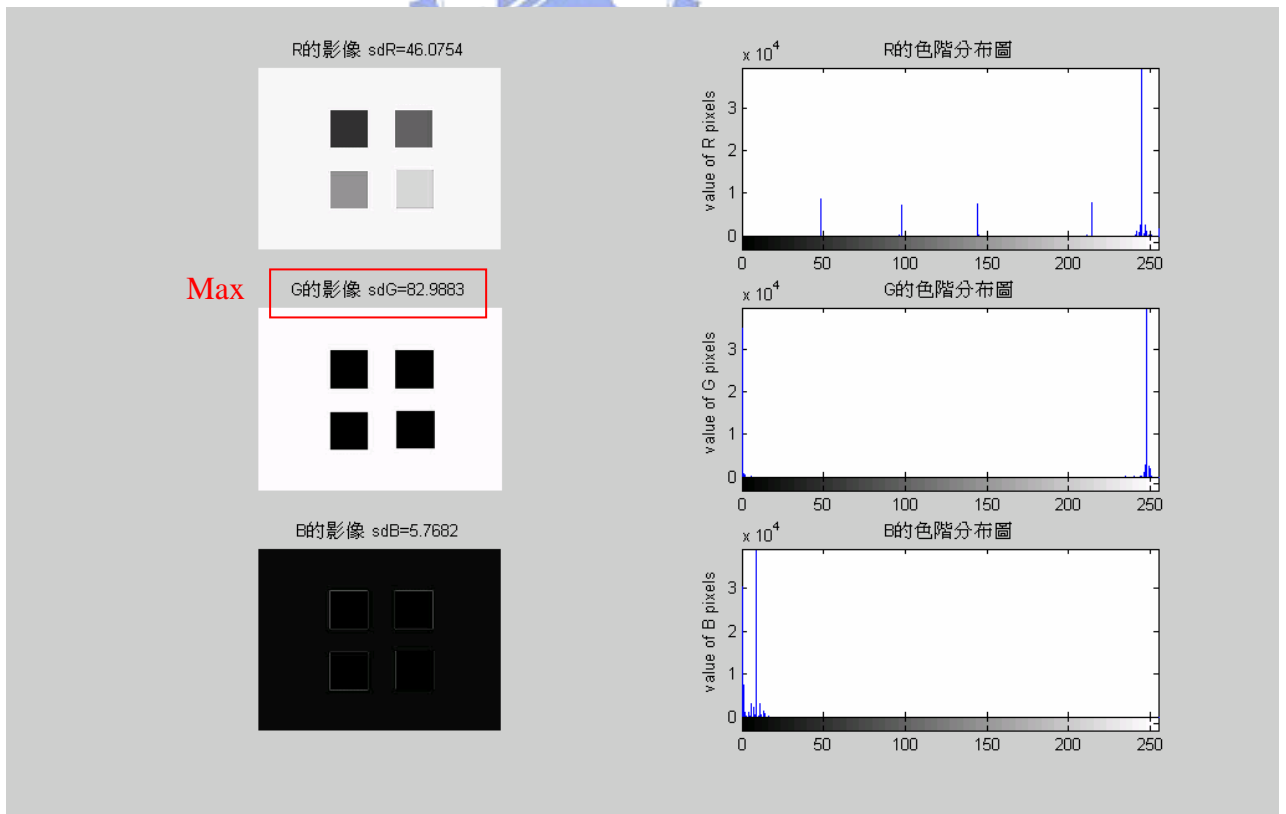


圖 6.3 R、G、B 影像及其標準差

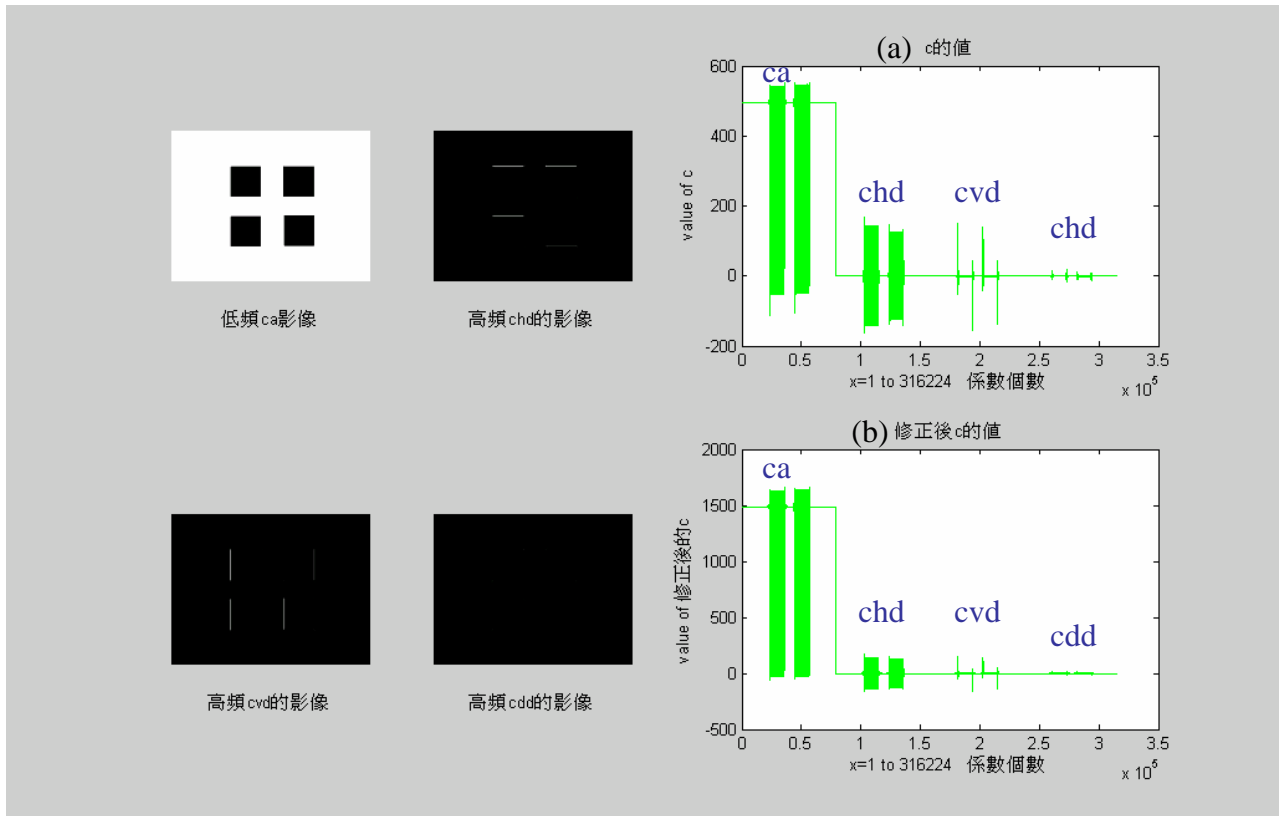


圖 6.4 低頻係數、垂直高頻係數、水平高頻係數和對角線高頻係數的影像及其修正前後係數值

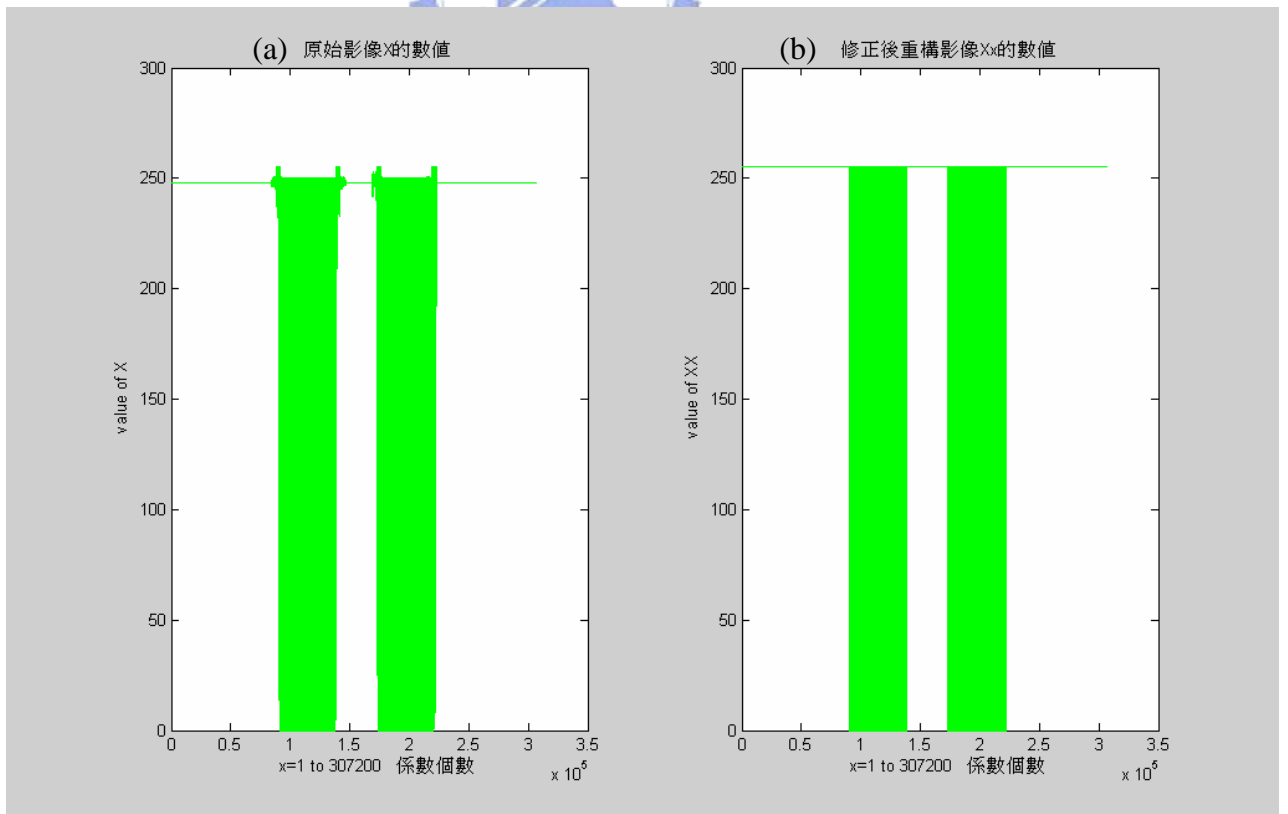


圖 6.5 原始影像與修正重建後影像數值

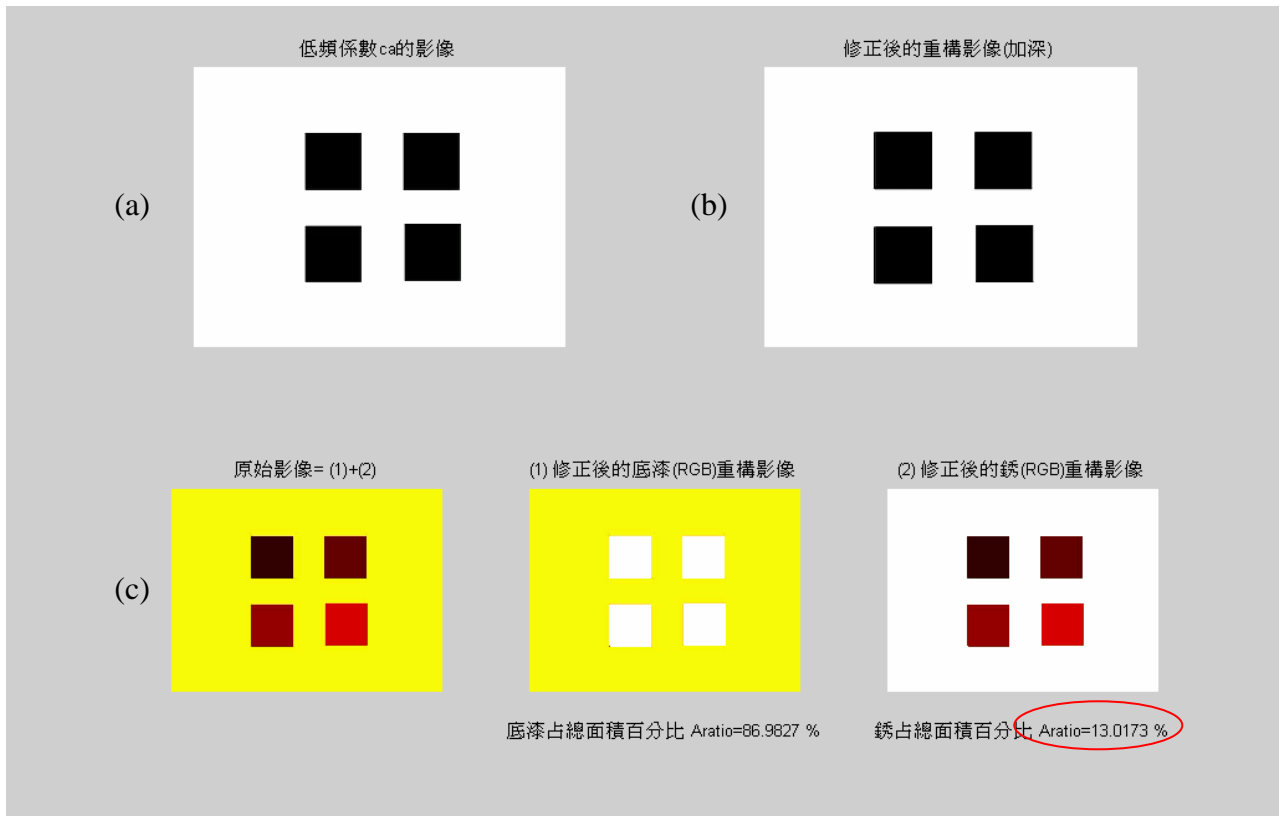


圖 6.6 低頻係數(ca)、修正重建及有缺陷面積與無缺陷面積的影像

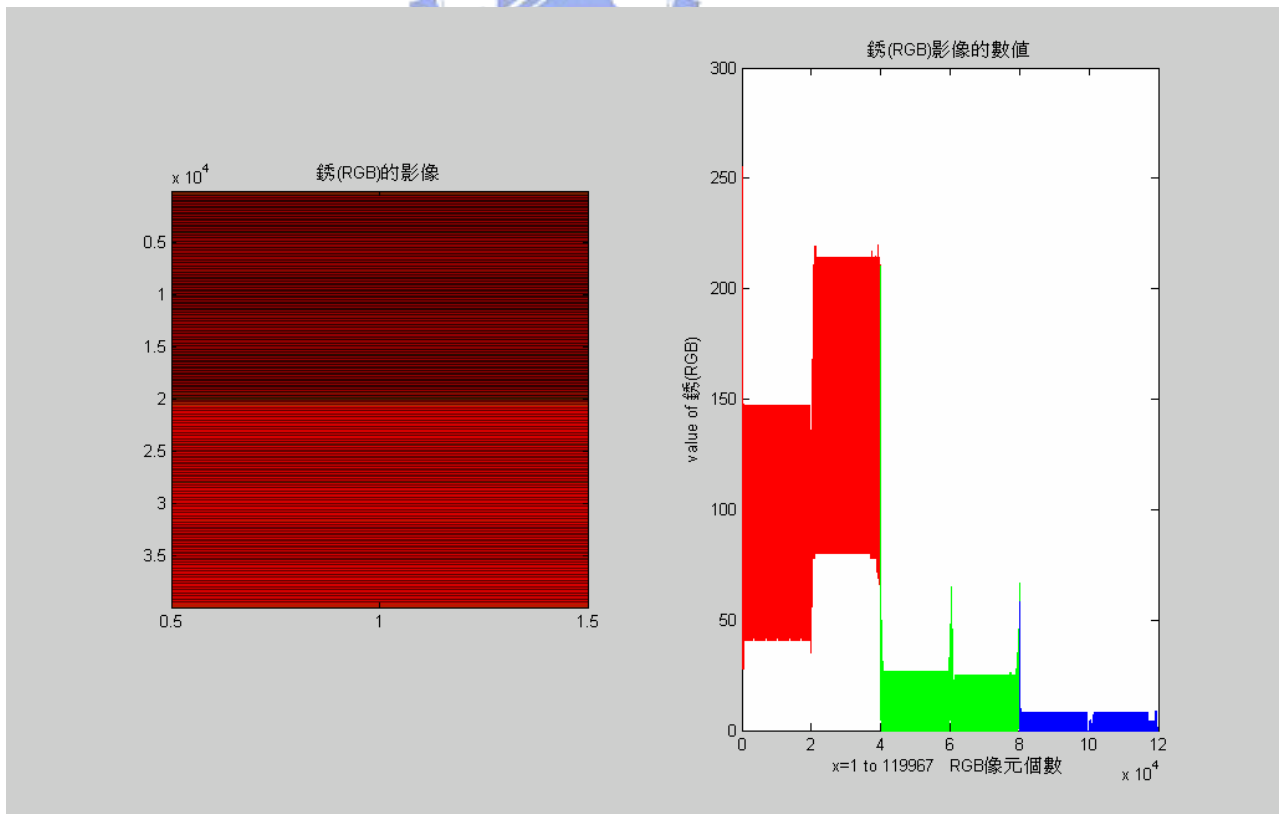


圖 6.7 提取出的有缺陷面積影像與其 R、G、B 數值

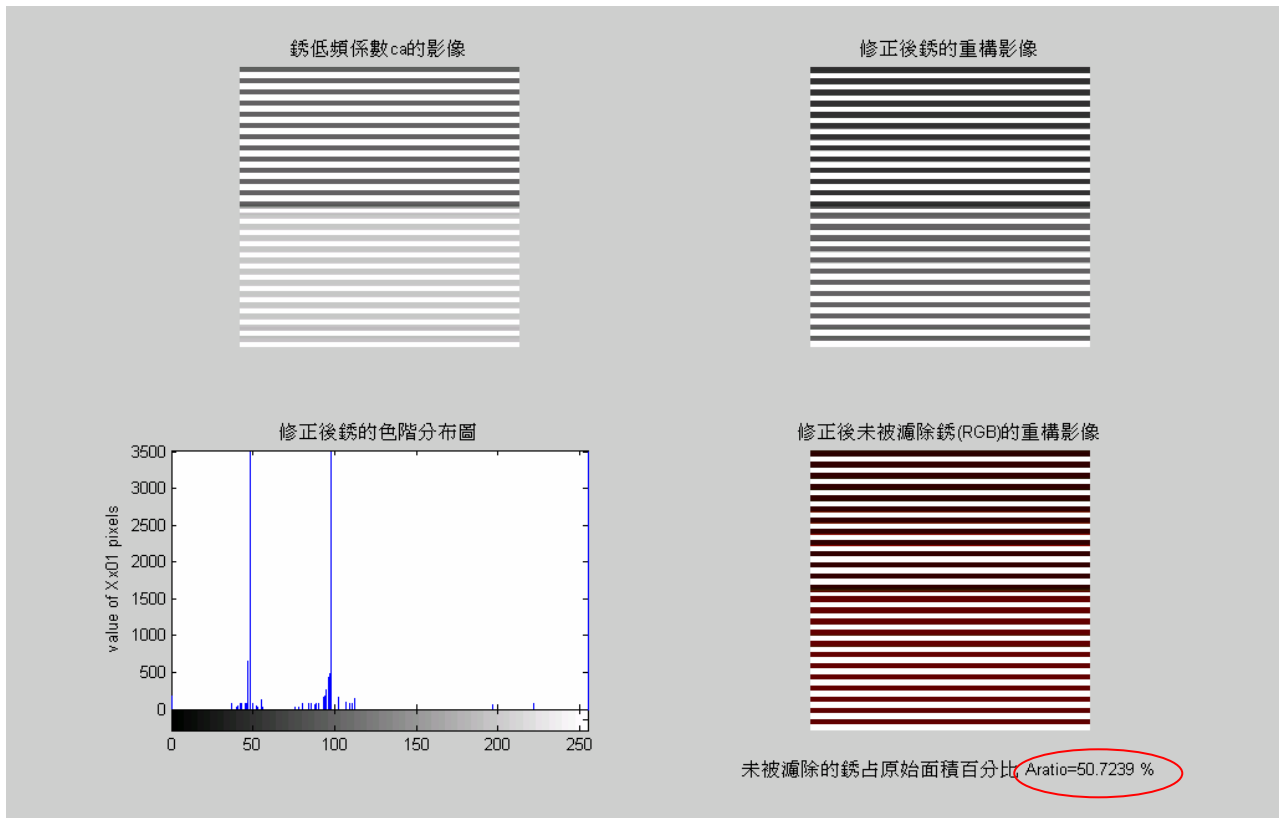


圖 6.8 第一次的深淺锈分離

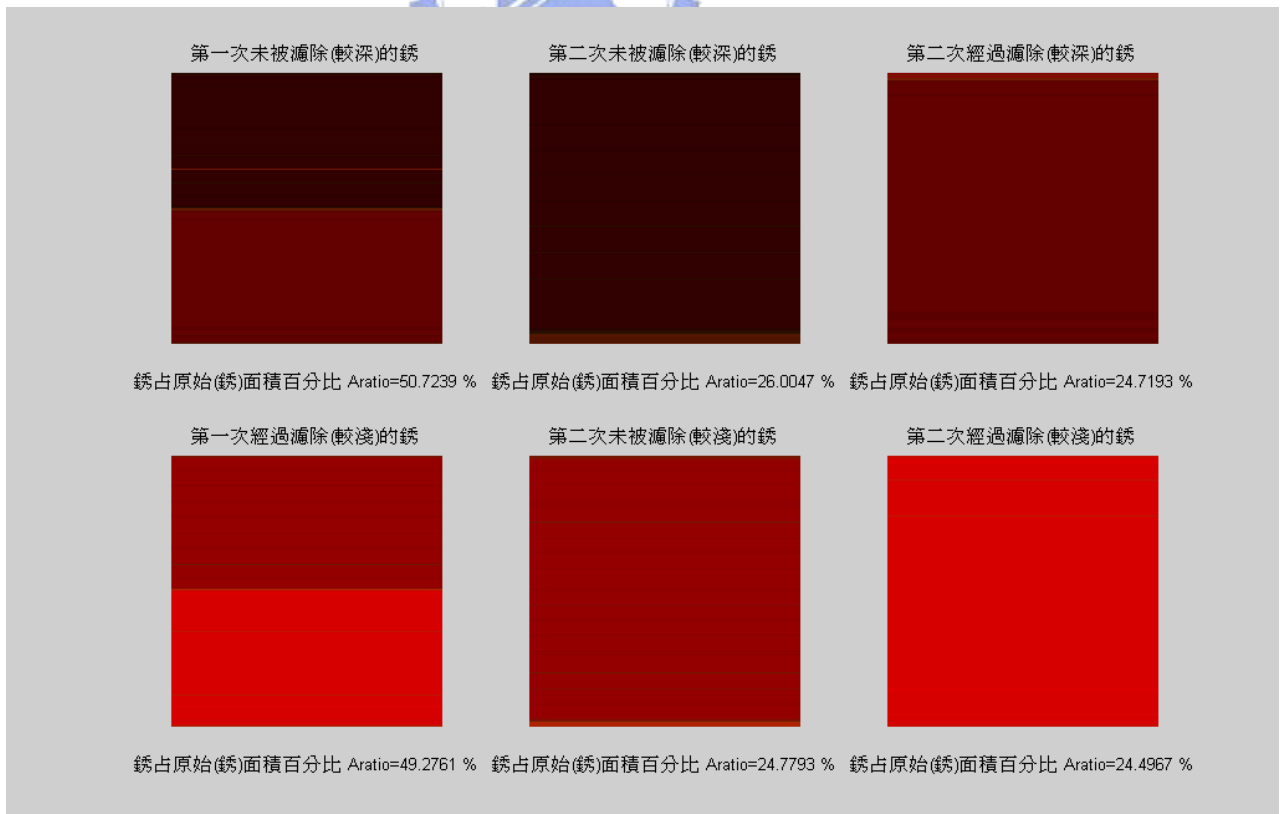


圖 6.9 分離後各程度深淺的锈



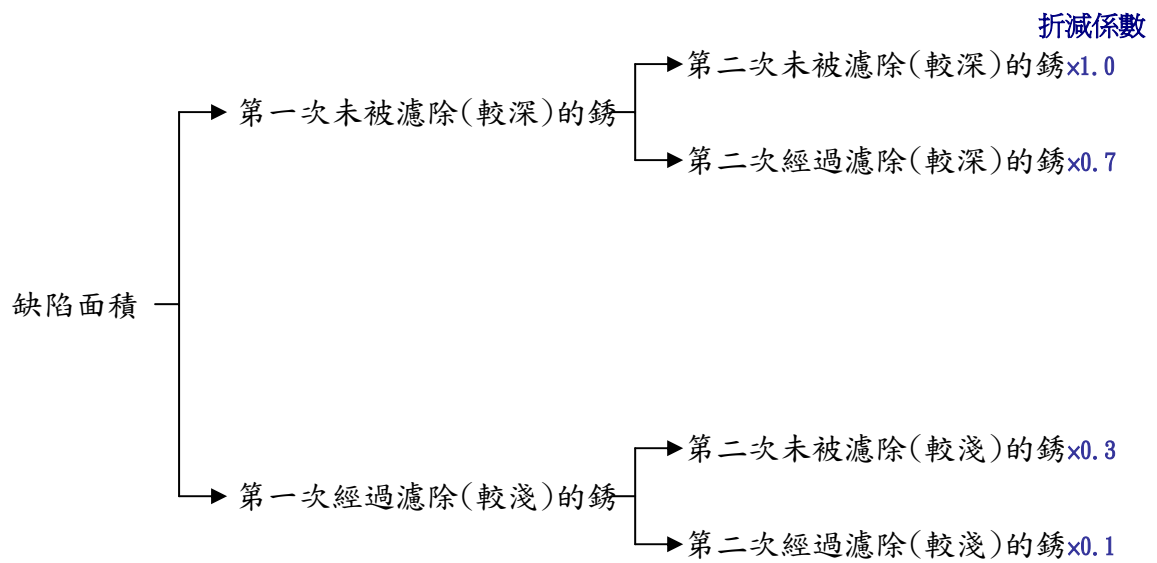


圖 6.10 缺陷面積再分析示意

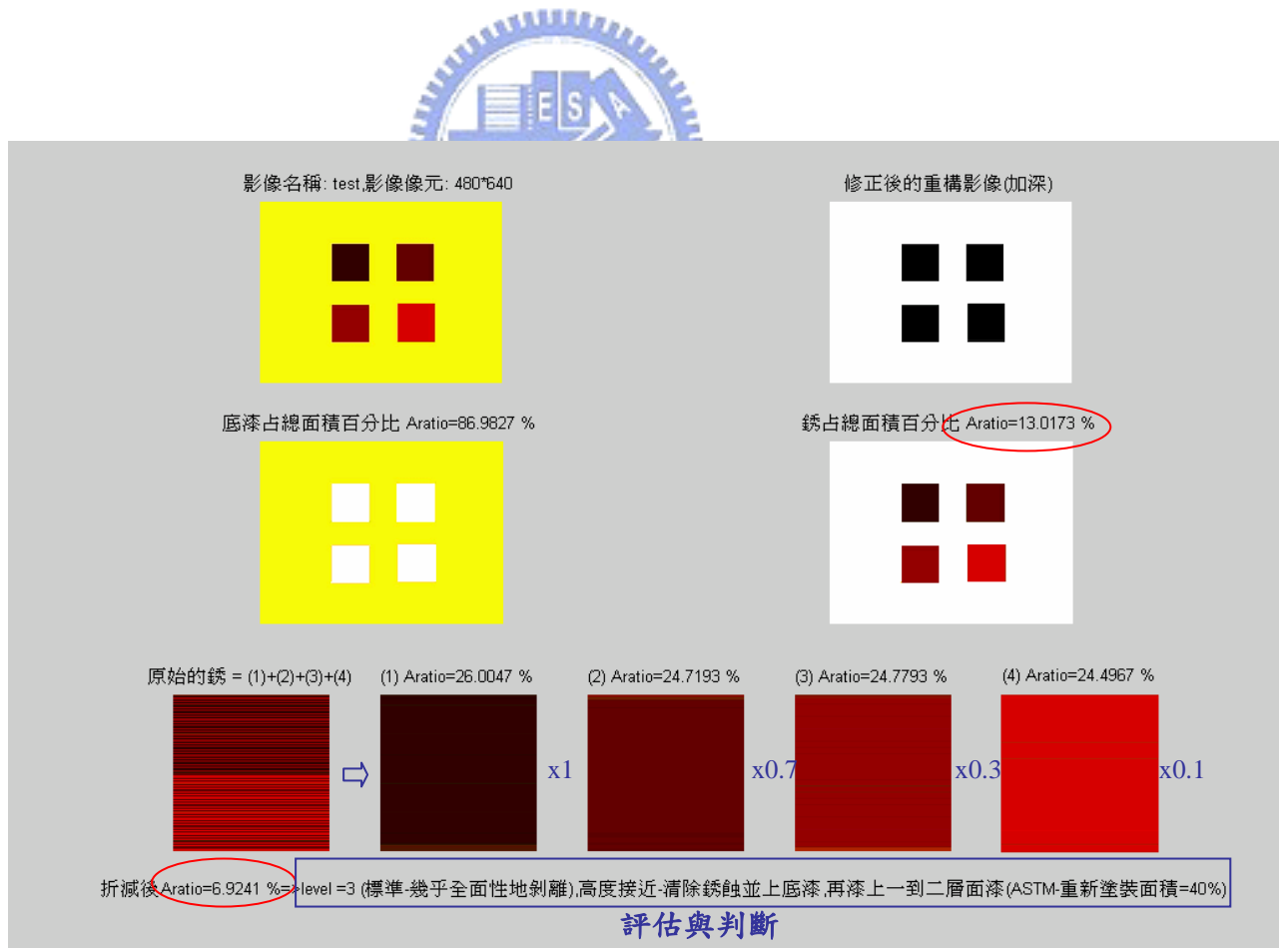


圖 6.11 深淺锈乘以權重後的判斷評估

影像名稱: pic001,影像像素: 480\*640



底漆占總面積百分比 Aratio=93.179 %



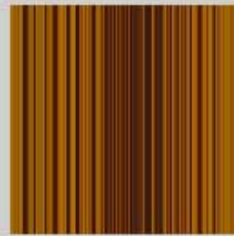
修正後的重構影像(加深)



銹占總面積百分比 Aratio=6.821 %



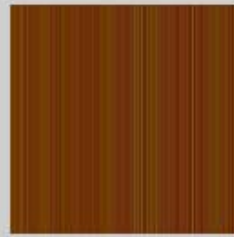
原始的銹 = (1)+(2)+(3)+(4)



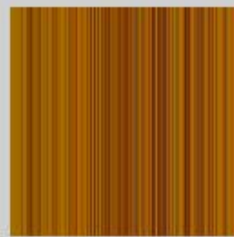
(1) Aratio=41.6197 %



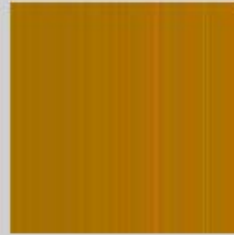
(2) Aratio=0.57268 %



(3) Aratio=55.3737 %



(4) Aratio=2.4339 %



折減後Aratio=4.0159 %=>level =2 (標準-有明顯的剝離),高度接近-清除銹蝕並上底漆,再漆上一到二層面漆(ASTM-重新塗裝面積=40%)

圖 6.12 黃底面漆銹蝕影像

影像名稱: pic002,影像像元: 768\*1024



底漆占總面積百分比 Aratio=89.7789 %



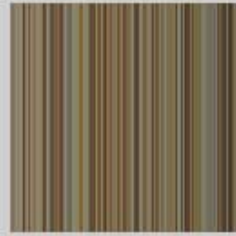
修正後的重構影像(加深)



銹占總面積百分比 Aratio=10.2211 %



原始的銹 = (1)+(2)+(3)+(4)



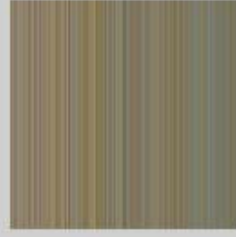
(1) Aratio=53.6662 %



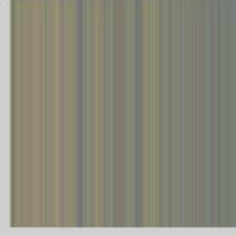
(2) Aratio=1.3411 %



(3) Aratio=41.0502 %



(4) Aratio=3.9424 %



折減後 Aratio=6.8803 % => level =3 (標準-幾乎全面性地剝離),高度接近-清除銹蝕並上底漆,再漆上一到二層面漆 (ASTM-重新塗裝面積=40%)

圖 6.13 鋼梁表面塗膜劣化、孔蝕影像

影像名稱: pic003,影像像素: 480\*640



底漆占總面積百分比 Aratio=59.3988 %



修正後的重構影像(加深)



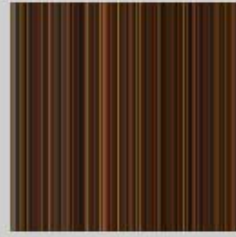
銹占總面積百分比 Aratio=40.6012 %



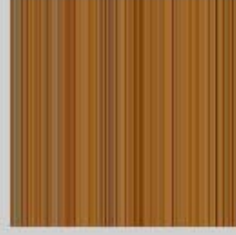
原始的銹 = (1)+(2)+(3)+(4)



(1) Aratio=11.9814 %



(2) Aratio=23.998 %



(3) Aratio=60.4841 %



(4) Aratio=3.5365 %



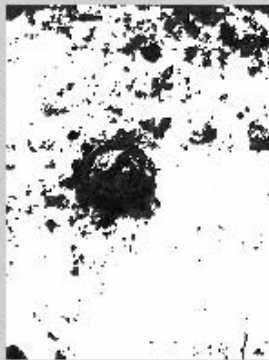
折減後 Aratio=19.1958 % => level =3 (標準-幾乎全面性地剝離),高度接近-結構外部塗層全部清除,並重新塗裝 (ASTM-重新塗裝面積=61.8422%)

圖 6.14 鋼梁表面塗膜銹蝕影像

影像名稱: pic004,影像像素: 480\*640



修正後的重構影像(加深)



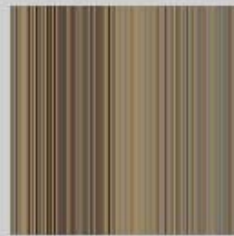
底漆占總面積百分比 Aratio=79.6341 %



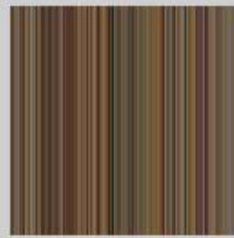
銹占總面積百分比 Aratio=20.3659 %



原始的銹 = (1)+(2)+(3)+(4)



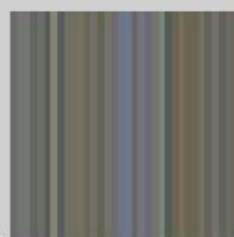
(1) Aratio=40.7726 %



(2) Aratio=1.8557 %



(3) Aratio=0.054344 %



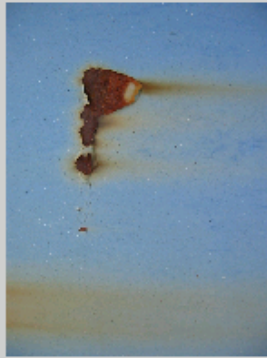
(4) Aratio=57.3173 %



折減後 Aratio=9.7389 % => level =3 (標準 幾乎全面性地剝離),低度接近-清除銹蝕並上底漆,再漆上一到二層漆 (ASTM-重新塗裝面積=40%)

圖 6.15 螺栓銹蝕影像

影像名稱: pic005,影像像素: 480\*640



底漆占總面積百分比 Aratio=89.0524 %



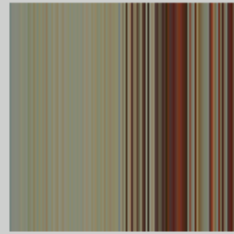
修正後的重構影像(加深)



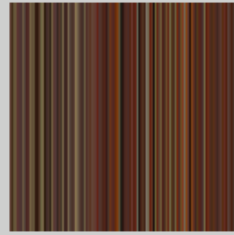
銹占總面積百分比 Aratio=10.9476 %



原始的銹 = (1)+(2)+(3)+(4)



(1) Aratio=33.9181 %



(2) Aratio=0.3806 %



(3) Aratio=30.6087 %



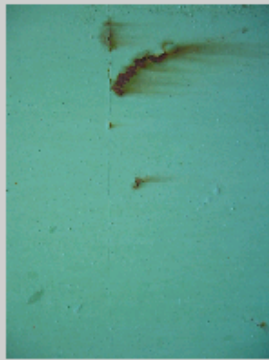
(4) Aratio=35.0926 %



折減後 Aratio=5.1318 %=>level =2.0348 (高度接近-有明顯的剝離),高度接近-清除銹蝕並上底漆,再漆上一到二層面漆(ASTM重新塗裝面積=40%)

圖 6.16 藍底面漆銹蝕影像

影像名稱: pic006,影像像素: 480\*640

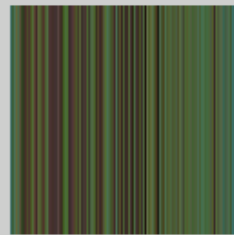


底漆占總面積百分比 Aratio=95.0944 %

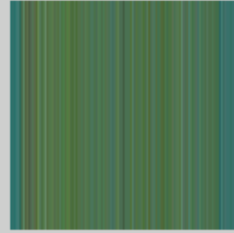


原始的鏽 = (1)+(2)+(3)+(4)

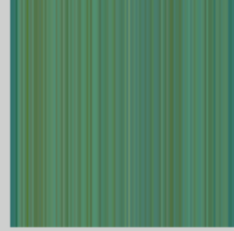
(1) Aratio=36.6954 %



(2) Aratio=1.1679 %



(3) Aratio=57.213 %



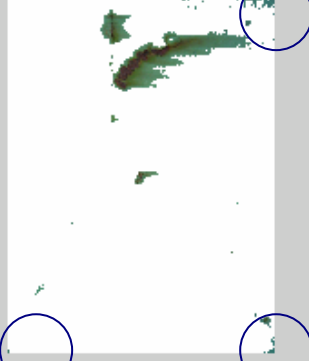
(4) Aratio=4.9237 %



修正後的重構影像(加深)



鏽占總面積百分比 Aratio=4.9056 %



因光線明暗不均造成的誤差

折減後 Aratio=2.7064 % => level = 1.8276 (普通接近-有明顯的剝離,高度接近-清除鏽蝕並上底漆,再漆上一到二層面漆 (ASTM-重新塗裝面積=18%)

圖 6.17 綠底面漆鏽蝕影像(分解尺度 n=1)

影像名稱: pic006,影像像素: 480\*640



底漆占總面積百分比 Aratio=97.8646 %



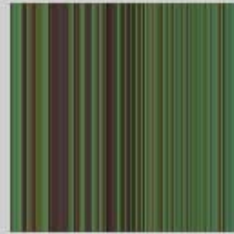
修正後的重構影像(加深)



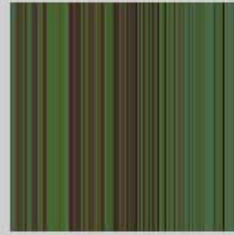
銹占總面積百分比 Aratio=2.1354 %



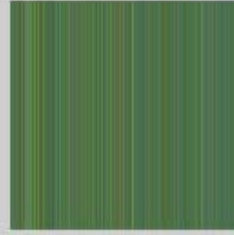
原始的銹 = (1)+(2)+(3)+(4)



(1) Aratio=79.6189 %



(2) Aratio=2.1951 %



(3) Aratio=18.186 %



(4) Aratio=0 %



折減後Aratio=1.8495 %=>level=1 (標準-有部分剝離),標準-清除銹蝕並上底漆,再漆上一到二層面漆(ASTM-重新塗裝面積=18%)

圖 6.18 綠底面漆銹蝕影像(分解尺度 n=2)