

應用小波轉換於 TFT-LCD 之 Mura 瑕疵檢測

陳響亮

周尚達

成功大學製造所

成功大學製造所

slchen@mail.ncku.edu.tw P9694101@mail.ncku.edu.tw

摘要

LCM 上的 mura 瑕疵泛指呈現的均勻影像，其局部小面積具有低對比度與不均勻亮度性質。mura 本身也沒有清晰的輪廓，對於觀測者造成視覺上不舒服趕。對於這種瑕疵本文利用離散小波轉換(DWT)的方法，克服背景不均勻亮度影響，成功擷取出實際 mura 特徵瑕疵。DWT 法是採用具有對稱濾波係數的 9/7 tap 小波，偵測對象以小面積 mura 瑕疵為主，並且有效濾除彩色濾光片的規則條紋結構。

關鍵字：mura，小波，TFT-LCD 瑕疵檢測

壹、前言

本論文探討主動式薄膜液晶顯示器(Active Matrix TFT-LCDs)之顯示模組 mura 瑕疵檢測。顯示模組 LCM(Liquid Crystal Module)指的是液晶面板已接上驅動 IC 與印刷電路板(Printed Circuit Board)，並且加上背光模組(Back Light)及控制電路板(Control Board)。LCM 的 mura，一般泛指具有低對比度與不均勻亮度區域性質，並且大於一個像素的瑕疵[1]。造成 LCM 的 mura 很多種，Mori[2]列出幾項造成 mura 的主要原因如表 1 所示。

檢測 mura 的方法上除了要找出低對比度及不均勻亮度的瑕疵外，也要顧慮受到環境影響所造成擷取影像大面積局部亮度不均勻的現象。從頻率域(frequency domain)觀點來看，mura 相對於整體的原始訊號(背景)是屬於較高頻訊號。DWT 具有空間域與頻率域並存的小波域(wavelet domain)，其多解析度分析及子頻帶編碼的特性，對於小區域的瑕疵能有效突顯，而且運算速度較快。利用由空間域轉頻率域的方法，由離散小波轉換(Discrete Wavelet Transform, DWT)方式來擷取 mura 特徵。

表 1 : Causes of mura for TFT-LCDs

Basic Unit	Causes of Mura
Cell unit	(1) Nonuniform thickness of TFT array layer
	(2) Nonuniform color of color filter
	(3) Nonuniform density of liquid crystal
	(4) Nonuniform gap between glasses
Backlight unit	(5) Nonuniform lamp rays
	(6) Wrinkled optical filter
	(7) Warped light pipe

貳、研究方法

一、小波函數

Mallat[9]從多重解析度表示法的觀點，導入由 Meyer[11]提出的小波函數 ψ ，利用單一函數 ψ 的二進制伸縮與平移系：

$$\psi_{j,n}(t) = \left(\frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi \left(\frac{t - 2^j n}{2^j} \right) \right)_{(j,n) \in \mathbb{Z}^2} \quad (1)$$

構成 Hilbert 空間 $L^2(\mathbb{R})$ 的單範正交小波基底(wavelet orthonormal basis)。

Mallat[9]整理出 quadrature mirror filters (QMF)，在不同尺度下對 f 加以分解(decomposition)與重建(reconstruction)。此概念為子頻帶編碼(subband coding)，如圖 1 是一維小波轉換的概念圖。小波轉換的架構分成兩個部份，一個是小波分析(wavelet analysis)，另一個則是小波合成(wavelet synthesis)。首先將原始數列與高、低頻濾波器分別做旋積(convolution)，產生低頻與高頻數列，稱之為小波係數(wavelets coefficients)。空間域訊號的分解與重建，將訊號 f 分別由 $\bar{h}$ 與 $\bar{g}$ 濾波器轉換為低頻與高頻訊號，其中分解的低通濾波器 $\bar{h}[n] = h[-n]$ 、高通濾波器 $\bar{g}[n] = g[-n]$ ，而 $\tilde{h}$ 與 $\tilde{g}$ 分別為重建的對偶(dual)低通濾波器與對偶高通濾波器。

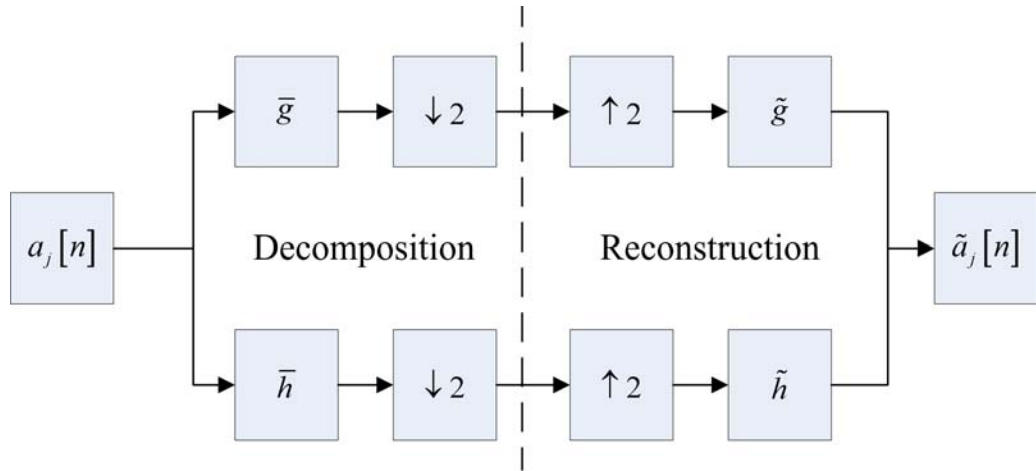


圖 1：小波分解與重建圖

(一)雙正交小波基底

Daubechies 在[12]提出一組 FIR 雙正交濾波器係數，一般稱為 9-7 tap 濾波器係數如表 2 所示，這四個濾波器數列只有在 $-4 \leq n \leq 5$ 之間有非零的值，它的低頻分析濾波器與高頻合成濾波器有 9 個非零值，高頻分析濾波器與低頻合成濾波器有 7 個非零值。9-7 tap 係數具有對稱性，如低頻分解係數以 $n = 0$ 為中心對稱點。[13]對稱好處是原始數列轉換成小波數列時仍可以保留原始數列的週期，反轉換回空間域也可以保留小波數列的週期。代表經過小波轉換後的訊號不會有位置偏移的問題，對於檢測上可以精確的提供其位置的頻率特性。雙正交濾波器分解與重建訊號關係式為

$$a_{j+1}[p] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h[2p-n]a_j[n] \quad (2)$$

$$d_{j+1}[p] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g[2p-n]a_j[n] \quad (3)$$

$$a_j[p] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \tilde{h}[2n-p]a_{j+1}[n] + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \tilde{g}[2n-p]d_{j+1}[n] \quad (4)$$

表 2：Daubechies 9/7 tap filter coefficients

n	$\frac{1}{\sqrt{2}}h[n]$	$\frac{1}{\sqrt{2}}\tilde{h}[n]$	$\frac{1}{\sqrt{2}}g[n]$	$\frac{1}{\sqrt{2}}\tilde{g}[n]$
-4	0.026749	0	0	0
-3	-0.016864	-0.045636	0	-0.026749
-2	-0.078223	-0.028772	-0.045636	-0.016864
-1	0.266864	0.295636	0.028772	0.078223
0	0.602949	0.557543	0.295636	0.266864
1	0.266864	0.295636	-0.557543	-0.602949
2	-0.078223	-0.028772	0.295636	0.266864
3	-0.016864	-0.045635	0.028772	0.078223
4	0.026749	0	-0.045635	-0.016864
5	0	0	0	-0.026749

二、雜訊濾除方法

擷取訊號時，原始訊號會受到高斯白雜訊(additive Gaussian white noise)的影響，如下式表示一個受污染的一維訊號：

$$x_i = s_i + n_i \quad (5)$$

其中 x_i 代表受污染的訊號， s_i 為原始訊號， n_i 為高斯白雜訊。高斯白雜訊為與 s_i 互相獨立，並具備獨立且相同(independent identically distribution, iid)的機率分配 $N(0, \sigma_n^2)$ ，其中 $N(\mu, \sigma^2)$ 代表平均值(mean)與變異數(variance)分別為 μ 與 σ^2 的常態(高斯)分布。

小波分解受污染訊號 x_i 後，低頻帶為該訊號之主要近似資料，而雜訊大多分布於高頻帶中，所以去雜訊方法直接實行於高頻帶中。去雜訊過程如圖二所示， y_i 為污染訊號 x_i 轉換到小波域上的係數， w_i 為無污染原始訊號 s_i 轉到小波域的係數， n_i 則因小波轉換具有正交性，所以其機率密度分布仍舊為 iid 的 $N(0, \sigma_n^2)$ 。

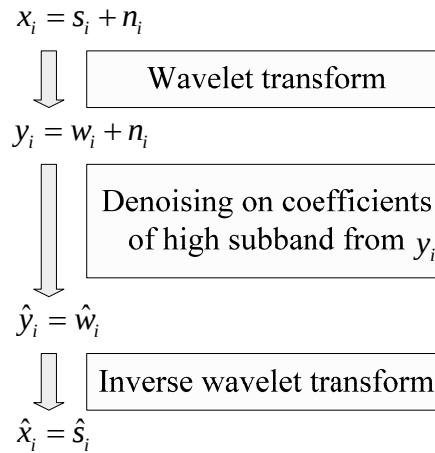


圖 2：基於小波轉換之去雜訊處理流程

常用的濾除雜訊方法或稱為小波閾值有兩種：

軟閾值(soft thresholding)

$$\eta_s(y) = \begin{cases} \text{sgn}(y) \cdot (|y| - T), & \text{if } |y| \geq T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

硬閾值(Hard thresholding)

$$\eta_H(y) = \begin{cases} y, & \text{if } |y| \geq T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

T : 閾值

y : 污染影像的小波係數

η : 修正後的小波係數

硬閾值與軟閾值最大的差異，使用硬閾值處理重建後的訊號 Gibbs 現象比較明顯，而利用軟閾值重建的訊號連續性較佳，Gibbs 現象較不明顯，所以本文採用軟閾值來處理雜訊。

閾值 T 的計算方式採用 Universal (VisuShrink)[14]:

$$T = \sigma_n \sqrt{2a \log(n)} \quad (8)$$

其中

σ_n^2 : noise variance,

$$\sigma_n = \frac{\text{median}(|y_i|)}{0.6745}, \quad y_i \in \text{subband } HH_1 \text{ (finest scale wavelet coefficients)}$$

a : constant

n : number of pixels

三、DWT 檢測流程

DWT 為基礎的檢測法則是在小波域和空間域上的處理，其中小波域具有空間域頻率的資料，所以可以從位置上看出頻率大小。其流程對照圖 3 依序如下表示:

- (a) 輸入所擷取影像的訊號，並轉為灰階影像。
- (b) 以中值濾波器處理來消除脈衝雜訊。
- (c) 空間域訊號由 DWT 轉換為小波域。
- (d) 抑制各頻帶的小波係數的高斯白雜訊。
- (e) 各高頻帶小波係數值乘以同一常數項，用來突顯 mura 特徵。
- (f) 小波域訊號由 IDWT 反轉換回空間域。
- (g) 對空間域的灰階值做調整，將背景灰階值統一，來突顯 mura 瑕疵。
- (h) 對(g)做全域的 Otsu 法二值化，判斷為真值部分則是 mura 特徵。
- (i) 二值化訊號先做斷開處理來減少雜訊。
- (j) 由(i)的結果當作 mura 特徵位置參考，再計算此區域所評價出的 Semu 值。
- (k) 求得 mura 特徵位置與其 Semu 值的檢測結果。

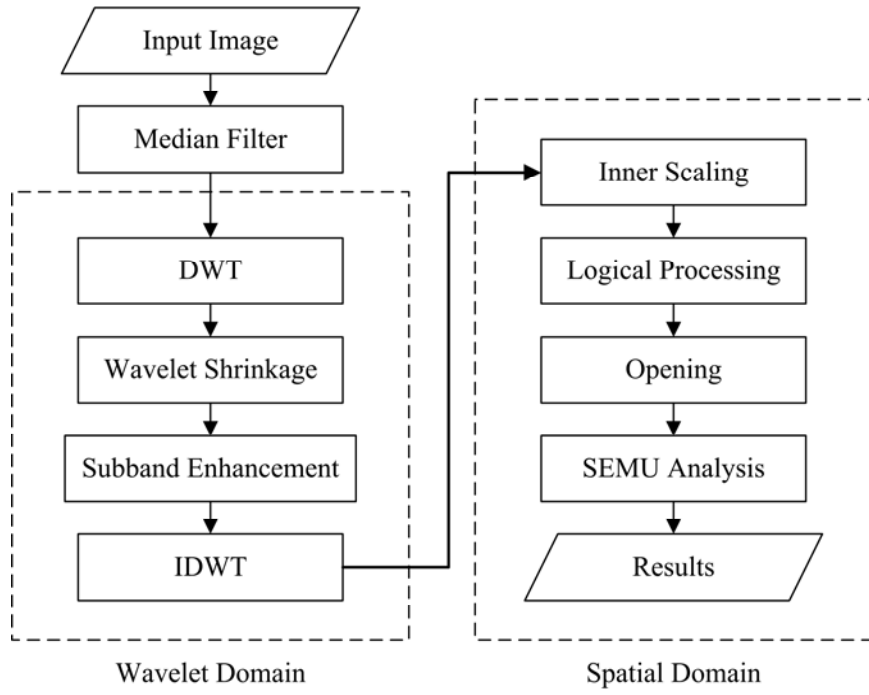


圖 3：基於 DWT 的 mura 檢測流程

在 DWT 的步驟中分解多少 k 階層，本文是依照 mura 大小來決定，如下所示：

$$\text{Maximum length of the mura defect} \leq 2k \quad (9)$$

因每一階層的分解都是將訊號一分為二，例如最大長度為 32 像素的特徵點，分解到第 5 階時其特徵就只剩 1 個像素點。進一步分解到第 6 階的低頻帶，則沒有此瑕疵的資訊，可以視為只有背景的資料而不含 mura 特徵。

本文分解的階層設定為 6 個階層，有 1 組最粗解析度的近似係數(cA)與 18 組細節係數($cD_1 \cdots cD_{18}$)。 cD 代表著原始訊號中的 mura 瑕疵特徵與高頻能量， cA 視為為原始訊號模糊化的訊號，代表著整體訊號的趨勢。對於原始訊號不均勻背景亮度可以從 cA 著手，假設 LCM 的 mura 有兩種情況如下：

$$cA_w = 0 \quad , \quad \text{白 mura 情形} \quad (10)$$

$$cA_b = (2^n - 1) \quad , \quad \text{黑 mura 情形} \quad (11)$$

其中 n 代表訊號為 n -bit 的影像，本文處理訊號為 8-bit 的影像(0~255)，所以 n 設為 8。 cA_w 與 cA_b 合成回原始訊號大小分別預設為 0 與 255 灰階度，可以使 LCM 呈現的背景亮度不均勻現象消除。

由於不確定 cD 中的 mura 分佈情形，利用鈍化遮罩(unsharp masking)的概念，直接對每個 cD 乘以同一個常數如圖 4 所示，可以突顯出 mura 特徵出來，其式如下：

$$cD_{s'} = cD_s \times \omega \quad (12)$$

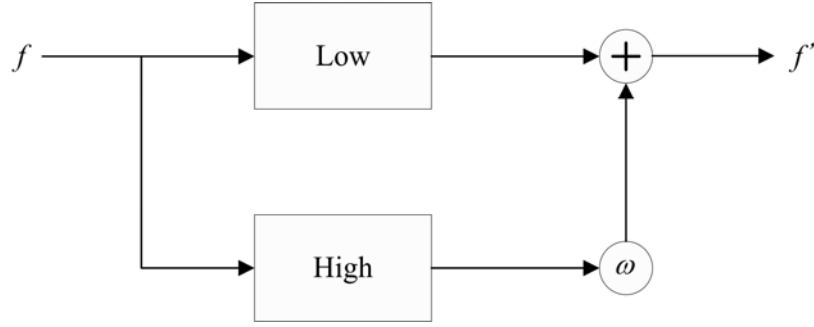


圖 4：小波正反轉換與小波係數增強

接著 IDWT 回空間域後的訊號 $r(x, y)$ ，分別對白及黑 mura 的情況做調整如下：

白 mura 情況-

$$r'_w(x, y) = \begin{cases} \text{offset}_w & , \text{ if } r(x, y) \leq 0 \\ r(x, y) + \text{offset}_w & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

黑 mura 情況-

$$r'_b(x, y) = \begin{cases} \text{offset}_b & , \text{ if } r(x, y) \geq 2^n - 1 \\ r(x, y) + [(2^n - 1) - \text{offset}_b] & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

因實際 LCM 上的 mura 不知道其特性為白或黑 mura，所以將式(13)及(14)相減，求得瑕疵對應背景的灰階值訊號 $r(x, y)$ 如下：

$$r(x, y) = r'_w(x, y) - r'_b(x, y) \quad (15)$$

把 $r(x, y)$ 二值化，以型態學處理求得 mura 特徵位置，並用 Semu 判斷標準來鑑別其瑕疵程度來濾除誤判 mura 瑕疵。

Mura 評價方法是依背景(Background)區域與可能為 mura 的目標(Object)區域的對比度是否為人眼可觀察的，[15]修改由[16]所定義的評價區域關係如圖五。瑕疵程度的 Semu 值定義如下，當 Semu 值越高代表瑕疵程度越嚴重：

$$\text{Semu} = \frac{|C_x|}{C_{JND}} = \frac{|I_o - I_b|}{\left(\frac{1.97}{S_x^{0.33}} + 0.72 \right)} \quad (16)$$

C_x ：目標 mura 的平均對比度。(單位：% 相對於背景 100%)

C_{JND} ：mura 的恰可辨識強度差(Just Noticeable Difference, JND)對比度。(單位：% 相對於背景 100%)

I_o ：mura 平均亮度

I_b ：背景平均亮度

S_x ：目標 Mura 發生的面積。(單位：pixel)

參、研究成果

利用 CIS VCC-8850CL 彩色 CCD 拍攝 17 吋測試面板，如圖 5 所示。根據圖 3 流程進行實驗，調整小波係數增強倍數與斷開半徑結構元素。實驗中發現斷開半徑結構元素越大，背景雜訊可以有效過濾除(圖 6，圖 7)，但缺點是若瑕疵的面積過小，則很容易被斷開處理濾除掉。而增強係數 ω 越大越能突顯瑕疵的特徵，也有抑制背景雜訊的效果，若 ω 過小 mura 瑕疵特徵的強度會與背景雜訊差不多。

若為了精確判別瑕疵，前述抑制背景雜訊的方法可以省略，可以用 Semu 判別來過濾誤判的瑕疵。相對的，標記與評價的計算量會嚴重造成過長的檢測時間。

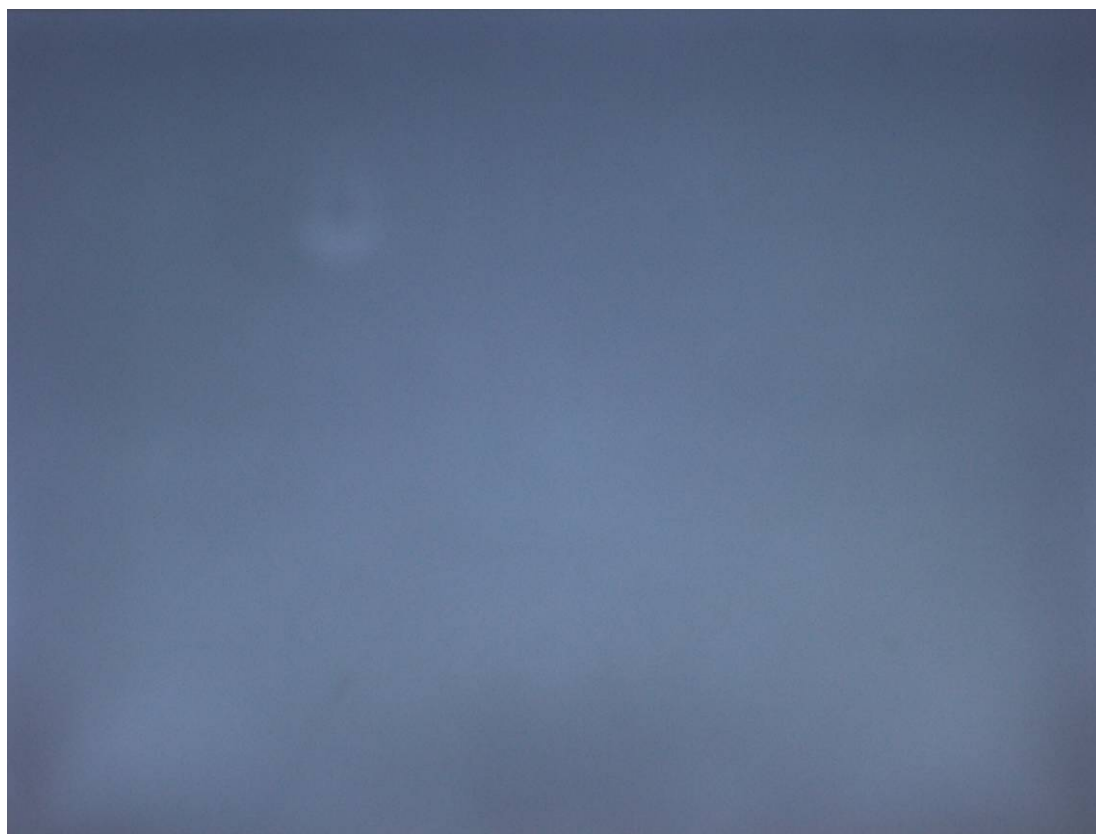


圖 5：Test#1 Mura 測試圖

表 3：檢測結果(a)

Mythology	Opening Radius	Total Detected Num.	Detected Mura Semu ≥ 3 Num.
DWT Based $k=6$ $\omega=10$ $n=8$ $offset=128$	4	970	24
	5	226	14
	6	99	7
	7	54	6

表 4：檢測結果(b)

Mythology	Opening Radius	Total Detected Num.	Detected Mura Semu ≥ 3 Num.
DWT Based $k=6$ $\omega=120$ $n=8$ $offset=128$	4	890	24
	5	212	10
	6	56	8
	7	54	6

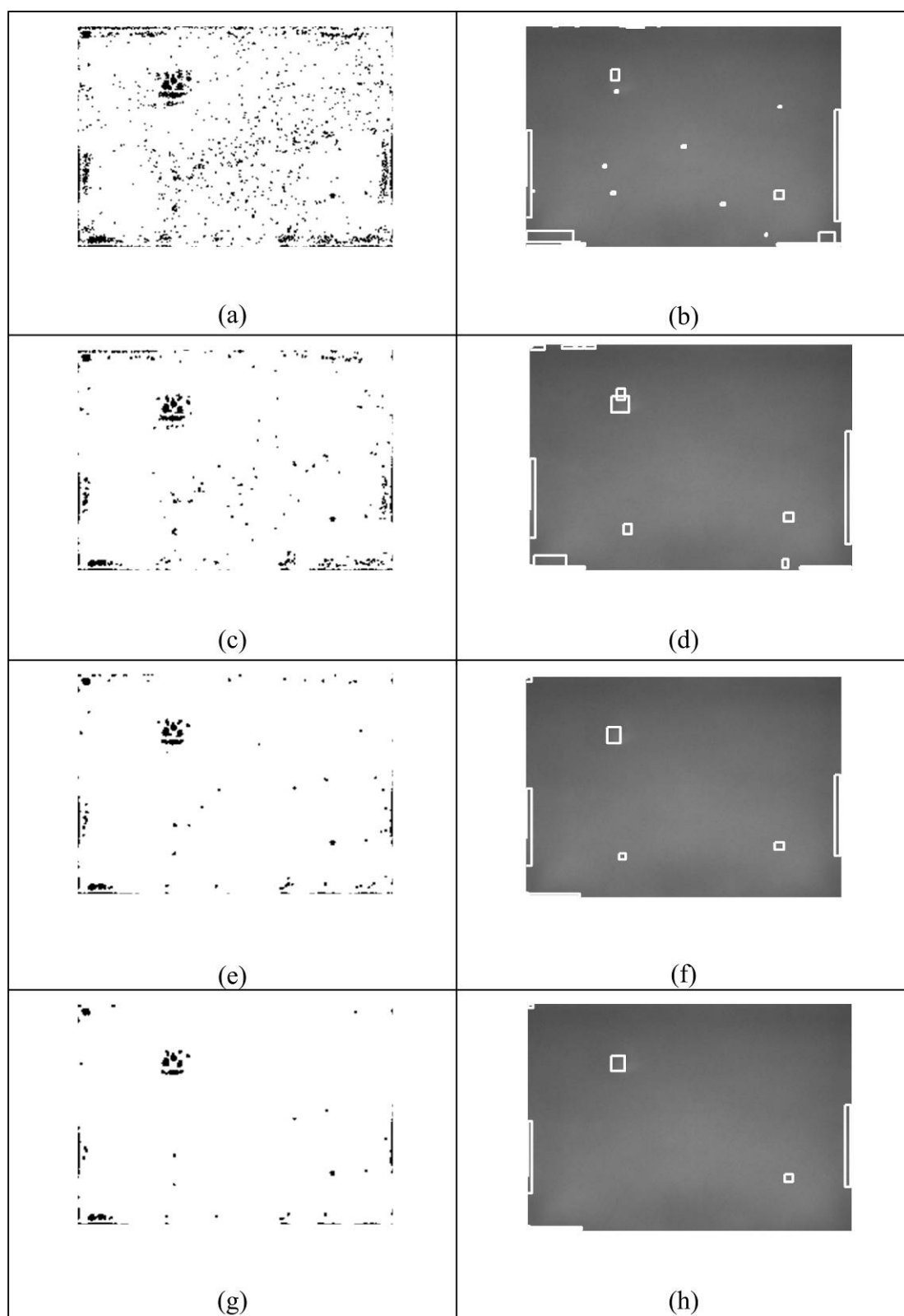


圖 6 : $\omega=10$ (a)半徑 4 pixel (c) 5 pixel (e) 6 pixel (g) 7 pixel ; (b)(d)(f)(h)分別為(a)(c)(e)(g)的檢測結果，白框為 Semu 評價大於 2 的範圍。

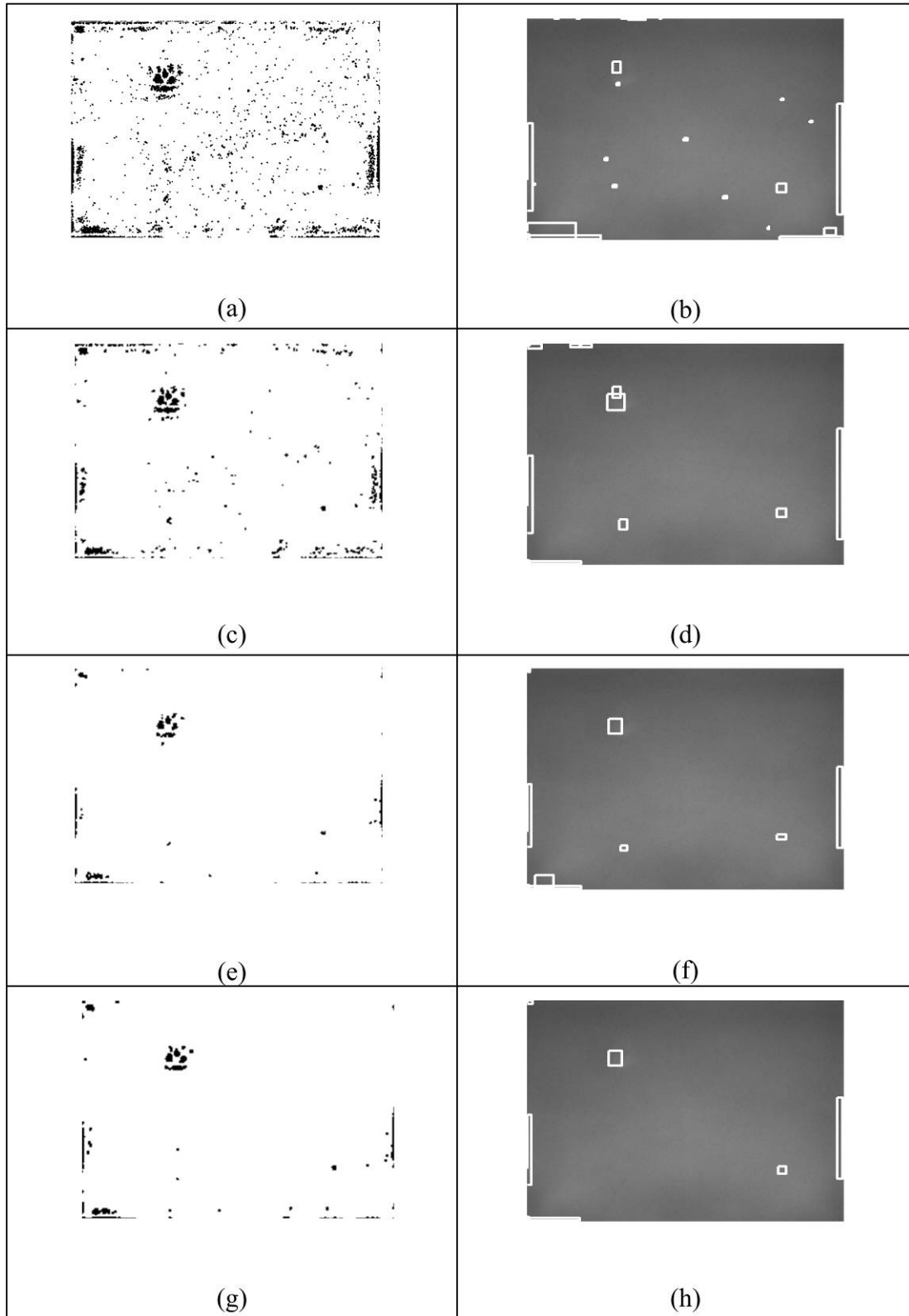


圖 7： $\omega=120$ (a)半徑 4 pixel (c) 5 pixel (e) 6 pixel (g) 7 pixel ; (b)(d)(f)(h)分別為(a)(c)(e)(g)的檢測結果，白框為 Semu 評價大於 2 的範圍。

肆、結論與建議

基於 DWT 的 mura 檢測法則可以成功偵測出 mura 瑕疵，實驗中可發現特色是偏向小面積的 mura 特徵，而本文提出的流程具有參數調整與子頻帶特徵選取以濾除規則條紋結構的方便性。

另外影響 mura 檢測時間的主因，在於 mura 特徵與背景雜訊的差異不大的話，在二值化時會產生相當多的帶測特徵。特徵過多在標記以及 Semu 評價的計算量造成檢測時間過長，本文主要是採用型態學的斷開處理來減少雜訊的特徵，此法的風險在於若真實 mura 的面積小於斷開的結構元素，會造成此瑕疵不易被檢測出來。若採用閉合處理，由於 DWT 是將白與黑 mura 的標記放在同一訊號中，有可能造成不同類型的 mura 會連結在一起，這會使得 Semu 評價的區域改變而造成誤判。針對此問題提供三點建議，第一點是降低影像空間域解析度($\mu\text{m}/\text{pixel}$)，亦即增加擷取影像解析度來降低雜訊與 mura 特徵面積大小的差異，不過缺點是計算量相對增加。第二點是對於段開後的待測特徵，利用圖訊識別的方式，針對不同 mura 的特性改變其選取範圍，以增強 Semu 評價範圍的正確性。第三點則是在小波域的雜訊處理採用 Gaussian 及 Laplacian 機率密度混合模型，針對特徵的部分增強訊號強度，對於背景以及雜訊方面則是降低其訊號強度，此法可以增強 mura 特徵的輪廓。

伍、致謝

感謝國科會贊助本計畫，使其得以順利完成，編號: NSC 95-2221-E-006-400。

陸、參考文獻

- [1] W. K. Pratt, S. S. Sawkar, and K. O'Reilly, "Automatic blemish detection in liquid crystal flat panel displays," IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology, 1998.
- [2] Y. Mori, K. Tanahashi, and S. Tsuji, "Quantitative evaluation of "mura" in liquid crystal displays," Optical Engineering, vol. 43, p. 2696, 2004.
- [3] Y.-H. Tseng, "Automatic Surface Inspection for TFT-LCD Array Panels Using Fourier Reconstruction," in Department of Industrial Engineering and Management. Master: Yuan Ze University, 2003.
- [4] C.-Y. Hung, "Automatic Surface Inspection for TFT-LCD Array Panels Using 1D Fourier Reconstruction," in Department of Industrial Engineering and Management. vol. Master: Yuan Ze University, 2004.
- [5] C.-C. Kuo, "Development of Automatic TFT-LCD Mura Defect Detection," in Institute of Automation Technology. Master: National Taipei University of Technology, 2006.
- [6] C.-C. Chen, "A study of defects of LCD panel with wavelet method," in Department of Electrical Engineering. Master: Yuan Ze University, 2005.
- [7] J. S. Ryu, J. H. Oh, J. G. Kim, T. M. Koo, and K. H. Park, "TFT-LCD panel Blob-Mura inspection using the correlation of wavelet coefficients," TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference, 2004.
- [8] Y.-C. Song, D.-H. Choi, and K.-H. Park, "Wavelet-based image enhancement for defect detection in thin film transistor liquid crystal display panel," Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers, vol. 45, pp. 5069-5072, 2006.
- [9] S. G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, vol. 11, pp. 674-693, 1989.
- [10] D. S. Taubman and M. W. Marcellin, Jpeg2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice: Kluwer Academic Pub, 2002.
- [11] Y. Meyer, "Principe d'incertitude, bases hilbertiennes et algebres d'operateurs," Seminaire Bourbaki, vol. 662, p. 1986, 1985.
- [12] M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu, and I. Daubechies, "Image coding using wavelet transform," Image Processing, IEEE Transactions on, vol. 1, pp. 205-220, 1992.
- [13] W. Cai and M. Adjouadi, "Minimization of boundary artifacts on scalable image compression using

- symmetric-extended wavelet transform," Information Technology: Coding and Computing, 2004. Proceedings. ITCC 2004. International Conference on, vol. 1, 2004.
- [14]D. L. Donoho and J. M. Johnstone, "Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage," Biometrika, vol. 81, p. 425, 1994.
- [15]J.-W. Jhou, "Automatic Optical Inspection on Mura defect of TFT-LCD," in Institute of Manufacturing Engineering. Master: National Cheng Kung University, 2006.
- [16]SEMI, "Definition of Measurement Index (Semu) for Luminance Mura in FPD Image Quality Inspection," Semiconductor Equipment and Materials International, 2002.