



逢甲大學學生報告 ePaper

報告題名：

光學薄膜表面特性量測方法之研究

作者：呂侑儒

系級：產業研發碩士專班 碩二

學號：M9391284

開課老師：田春林 教授

課程名稱：物理光學

開課系所：資電碩專班電控組

開課學年：九十四學年度 第一學期



摘要

在光電產業快速發展之際，製鍍高品質光學薄膜可以有效提升光學系統性能，而薄膜表面的檢測為製鍍高品質光學薄膜之重要參考依據。因此，本研究提出一套自行研發之光學薄膜表面量測系統，此系統以 Twyman-Green 干涉儀為其架構並結合自行設計的軟體程式，利用小波轉換將擷取之影像分高、低頻呈現，並搭配灰階共生矩陣 (GLCM) 與熵值 (entropy) 運算，以快速測定薄膜表面平坦度之良窳。此外，利用自行設計的軟體分析處理干涉圖，進而可量測薄膜厚度。通常厚度之量測須運用干涉儀及精密判讀干涉條紋的位移量來達成，否則將造成量測上的誤差，因此，為了提升干涉式膜厚度量測之精確度，我們利用 Wiener 濾波器有效地濾除雜訊，並且經由干涉圖形之細線化，可使程式精確地自動判別條紋之間距與條紋位移量，達成量測薄膜厚度之目的。

關鍵字：光學薄膜，表面檢測，小波轉換，灰階共生矩陣，細線化

目 錄

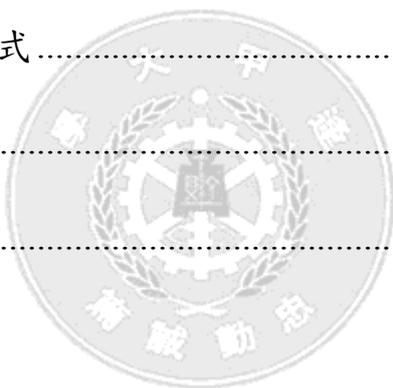
摘 要.....	I
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究方法.....	2
1.3 本文架構.....	3
第二章 基本原理.....	4
2.1 小波轉換.....	4
2.2 灰階共生矩陣.....	7
2.3 熵值運算.....	8
2.4 膜厚度量測.....	9
第三章 實驗架構.....	11
3.1 表面平坦度量測.....	11
3.2 厚度量測.....	12
第四章 程式撰寫.....	14
4.1 薄膜厚度量測程式設計.....	16
4.2 平坦度測定程式設計.....	17
第五章 結果分析.....	18
5-1 基板表面平坦度檢測.....	19

5-2	薄膜表面平坦度檢測	21
5-3	薄膜厚度檢測	23
第六章	結論	24
參考文獻	25



圖目錄

圖一 小波轉換之結構圖	6
圖二 薄膜台階處干涉條紋的位移	10
圖三 平坦度量測架構圖	12
圖四 厚度量測架構圖	13
圖五 薄膜厚度量測程式流程圖	14
圖六 平坦度檢測程式流程圖	15
圖七 薄膜厚度量測程式	16
圖八 平坦度測定程式	17
圖九 基板表面解析	18



第一章 緒論

1.1 研究動機

隨著光電科技的快速發展，光學薄膜在顯示器、光纖通訊、光電系統及雷射系統等方面的應用也愈來愈廣，對於薄膜的基本性能及品質要求也愈來愈高。為製鍍高品質的光學薄膜，薄膜表面特性的量測是一項重要工作，藉此做為改進鍍膜技術的參考依據。

測量薄膜表面之輪廓及粗糙度可以推算散射損耗值，散射越嚴重，能量流失的就越多。對於基板表面拋光之平整度（Flatness）也會影響沈積薄膜的粗糙度。若要很精確地量測薄膜微觀的表面粗糙度，通常都需要使用價格高昂的精密儀器，如探針掃描輪廓儀、原子力顯微鏡（AFM）、掃描式電子顯微鏡（SEM）或穿透式電子顯微鏡（TEM）。若要求次微米等級之精確度，則可利用干涉儀所擷取之影像來分析表面平整度。在數位信號處理方面，由於小波轉換[1]是近幾十年來所發展出來的新理論，其最大的優點是可以同時提供時間上與頻率上的不同尺度的解析度。在早期對數位信號頻域與時域間的轉換的工具，就只有傅立葉轉換，它是利用不同頻率的週期式弦波為基底將信號展開，雖然傅立葉轉換可以有效的在頻愈上分析信號，但是對於信號有不連續的地方，傅立葉轉換就不適合了。相對地，小波轉換

所使用的基底不會持續震盪，也非週期性的尺度函數與小波函數來展開信號，故可以補救傅立葉轉換將信號轉換到頻域後無法得知時域資訊的缺點，所以被廣泛的應用在影像壓縮、雜訊消除與影像辨識方面。

在光學系統中，薄膜的厚度會影響光程差的大小，只要差距四分之一個波長，對基板的反射，透射率就會造成相當大的影響；目前光學薄膜厚度量測之技術已廣泛地被提出，如 ATR 法[2]、橢圓偏振法[3]、包絡法[4]、光干涉技術[5]等，其中光干涉技術是一種靈敏度及準確度較高的量測技術，然而此技術早期是以人工方式判讀干涉條紋的位移量來達成，若干涉條紋判讀不夠精密，將造成量測上的誤差。

本研究的動機為建構一套光學薄膜表面特性量測系統，由小波轉換的角度來檢測薄膜表面平整度以及應用 Tyman-Green 干涉儀並結合自行設計的軟體程式，量測薄膜厚度。

1.2 研究方法

本研究報告利用小波轉換的原理建構以灰階共生矩陣為基礎的表面平坦度檢測系統，我們利用 CCD 擷取 Tyman-Green 干涉儀所產生之干涉圖形，經由小波轉換及灰階共生矩陣之運算求出熵值，利用熵值來判別光學薄膜表面之平坦度。此外我們也可以透過干涉圖形之細線化，利用自行開發之程式自動量測薄膜之厚度。

程式部份我們利用圖控軟體 LabVIEW 建構一套便於操作的檢測系統，並配合 Matlab 優異的影像運算能力處理細線化、濾波器等影像處理問題，透過友善的人機介面，我們可以很方便、快速的完成薄膜表面之量測。

1.3 本文架構

本研究報告共分為五章。第一章為緒論，第二章將深入探討小波轉換、灰階共生矩陣、熵值運算、細線化等應用於干涉圖形影像分析之技術原理。第三章為實驗架構以及整個實驗流程。而第四章是程式之撰寫，我們利用 LabVIEW 建構一個人性化之操作介面並結合 Matlab 優異之運算功能來實現光學薄膜表面特性量測系統。第五章將利用自行研發之光學薄膜表面量測系統來檢測不同待測物之表面平坦度。最後，第六章為結論，並將說明此研究之優缺點與未來之展望。

第二章 基本原理

2.1 小波轉換

小波轉換的基本構想就是將一個信號分析成不同尺度或解析度，信號經由小波轉換後，會產生高低不同的頻率資訊和時域資訊。在後續的處理中，便可針對這些高低頻率的資訊作特定的動作，利如高頻雜訊濾除，或將某一段低頻訊號保留。

在空間和頻域的分析中，小波轉換比傅利葉轉換更有效率。小波的尺度範圍包含頻域和時域，此範圍對於偵測缺陷圖案來說是個優點，而且比起簡單的時域分析更快速。其中空間頻率的量測可藉由離散小波轉換[6]的方法來完成。訊號的小波轉換是透過擴張和轉移母波 ψ 之基底函數集合的分解。基底函數集合 $\psi_{a,b}(x)$ 則是利用尺度化和轉移標準小波函數 $\psi(x)$ ，其中 a 和 b 為其個別的參數。其數學關係式如下：

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad a, b \in R, \quad a \neq 0 \quad (1)$$

小波理論的基本構想是將訊號在不同的尺度和解析度上加以分析，此種方法稱為多重解析度，而此理論是將訊號在空間和尺度方面局部化的典型函數。Mallat[7]認為多重解析度的提出對於適當影像資訊來說是個相當有效率的分析方法。訊號的解析度在近似於 2^{j+1} 和 2^j 時

可以透過分解此訊號的小波標準正規化函數 $L^2(R^n)$ 來取得不同之資料，此種定義完整和正交多解析度的分解表示稱為小波表示。在 Grossmann 和 Morlet[8]的文章中指出，小波函數 $\psi(x)$ 的擴張和轉換可以用來擴張 $L^2(R)$ 函數。 $L^2(R)$ 代表可量測之空間向量即與一維函數 $f(x)$ 成平方關係。由 $f(x) \in L^2(R)$ 和 $\psi_{a,b}(x) \in L^2(R)$ ，離散小波訊號可表示成下式：

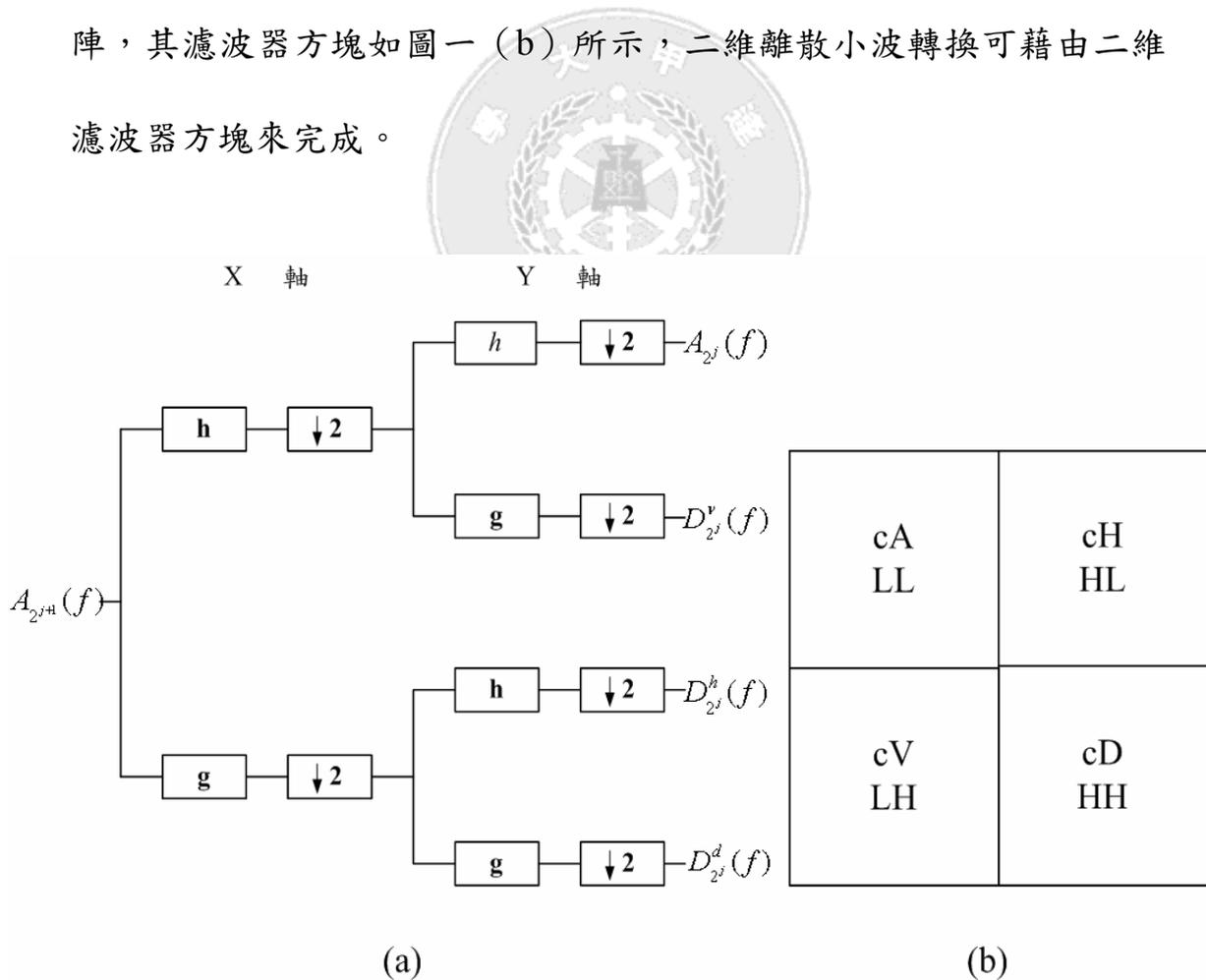
$$C_{m,n}(f) = \langle \psi_{m,n}, f \rangle = \int \psi_{m,n}(x) f(x) dx \quad (2)$$

將上式經過高通、低通濾波器之處理後可以寫為：

$$\begin{aligned} d_{m,n}(f) &= \sum_k g_{2^n-k} a_{m+1,k}(f) \\ a_{m,n}(f) &= \sum_k h_{2^n-k} a_{m+1,k}(f) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 g_{2^n-k} 是高通濾波器，是 h_{2^n-k} 低通濾波器，而我們令 $g_i = (-1)^i h_{-i+1}$ ， $h_n = \int \phi(x-n)\phi(x)dx$ 。在式子 (2) 中，訊號經由最大解析度 $a_{m+1,k}(f)$ 之擷取和高通濾波器 g 、低通濾波器 h 之處理，我們可以得到近似值 $a_{m,n}$ 和局部值 $d_{m,n}$ 。離散小波轉換包含訊號和小波之間的離散相關性，這代表低頻組成包含多種訊號的資訊，而高頻組成可以將不同之局部加以特徵化，因此，對於本研究的應用而言，Morlet 小波轉換是相當適合的。因任何尺度之小波皆可以由母波所產生，離散小波轉換是透過時間尺度離散化參數 a 和 b 所取得。Morlet 小波轉換有一特性，如果小波轉換越寬（低頻部份），則時間分析之間距也就越寬。

小波分析的方法類似帶通濾波器析，每個濾波器都有其相關的固定頻寬，並由串連水平和垂直的濾波器所組成。這 $\downarrow 2$ 種結構有定向性，因此我們可以將三個局部影像各自稱為水平(h)，垂直(v)，對角(d)。圖一(a)為三階離散小波轉換之結構圖。對於任一小波，低通濾波器和高通濾波器都會互補的使用，其中 a 為低通濾波器、 b 為高通濾波器，代表在兩個訊號中只保留一個訊號。如果頻譜分佈適當，則不同的結構將有不同之特徵。每個局部的影像都可以視為矩陣，其濾波器方塊如圖一(b)所示，二維離散小波轉換可藉由二維濾波器方塊來完成。



圖一 小波轉換之結構圖

2.2 灰階共生矩陣

灰階共生矩陣 (GLCM) 是由 Haralick[9]等人提出，是一種二維矩陣並與影像有相同大小的灰階數值。舉例而言，在此篇文章中之影像有 256 種不同之灰階值，因此 GLCM 為一個 256×256 大小之矩陣。此矩陣是藉由計算出現之像素對數目 (基本像素和鄰近像素)，其中包含灰階值 i ， j 和它們在影像中之位置運算子 $C_{L,\theta}$ 。位置運算子 $C_{L,\theta}$ 是描述像素對間兩個不同之參數：方向和距離。

GLCM 可以說是典型的表面紋理分析統計逼近，在本篇文章中灰階像素的強度解析度為 8-bit。求取所有距離 (L) 及角度 (θ) 之 GLCM 需要很大的計算量，因此 Haralick[9]等人建議只運算 $L=1$ 或 2 像素時之四個方向量即 $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 。

共生矩陣的值代表相鄰兩像素間之相關頻率，其中一像素之灰階值為 i ，而另一個則為 j 。此矩陣有對稱性且是角度的函數。整體影像可以利用共生矩陣運算，但藉由類似視窗方式掃描影像，則可得到共生影像與每個像素間的關係，利用共生矩陣之非正規化頻率 C_{ij} 去定義視窗 $M \times N$ ，距離 L ，角度在 45° 區間可被量化定義為下式：

$$C(i, j, L, 0^\circ) = \{|k - m| = 0, |l - n| = L, f(k, l) = i, f(m, n) = j\} \quad (4)$$

$$C(i, j, L, 45^\circ) = \left\{ \begin{aligned} &|k - m| = L, |l - n| = -L, f(k, l) = i, f(m, n) = j \\ \text{or} &= \left\{ \begin{aligned} &|k - m| = -L, |l - n| = L, f(k, l) = i, f(m, n) = j \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$C(i, j, L, 90^\circ) = \left\{ |k - m| = L, |l - n| = 0, f(k, l) = i, f(m, n) = j \right\} \quad (6)$$

$$C(i, j, L, 135^\circ) = \left\{ \begin{aligned} &|k - m| = -L, |l - n| = -L, f(k, l) = i, f(m, n) = j \\ \text{or} &= \left\{ \begin{aligned} &|k - m| = L, |l - n| = L, f(k, l) = i, f(m, n) = j \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 $f(k, l)$ 和 $f(m, n)$ 為原始影像上之兩點，而 i 和 j 為其各自相對應之像素值。我們可以從 256×256 之共生矩陣 $C(i, j, L, \theta)$ 中取得灰階影像 $f(x, y)$ ，此共生矩陣經過正規化後所有元素和都為一標準單位且分佈於 $[0, 1]$ 區間。正規化後之共生矩陣呈現出以兩像素 i 和 j 及距離 L 和角度 θ 之分佈機率。如果影像強度為完全地平坦，經過 GLCM 之運算後會呈現完整的對角化，若影像強度增加，則 GLCM 中非對角線值會變大。

2.3 熵值運算

瑕疵度的判斷在影像檢測中佔了重要的地位，一張影像資料如何判定瑕疵程度有多少？是否超過容忍範圍？是每一套機器檢測系統必做的過程，但是如何選定一個瑕疵度演算法一直沒有明確的定義，而從共生矩陣來做影像檢測的研究也不少[10-12]，這些研究中最為普遍的方法還是對於共生矩陣中的每一個元素代入權重函數中，再將這

些代入權重函數後所得到的權重值做加總和起來，形成一個值作為瑕疵影像的判斷依據。

為了獲取多重解析度分解之資料，我們將計算對稱熵值，此方法是利用降低高強度和低強度之影響來消除小波組合的飽和影像。對稱熵值常被用於當作影像正規化之代表。在此我們令 $N(i, j) = \frac{C(i, j)}{R}$ 為正規化後之共生矩陣，而 $R = \sum_i \sum_j C(i, j)$ 代表共生矩陣 $C(i, j)$ 之總和。

熵值的定義如下式所示：

$$H_{ENT} = - \sum_i \sum_j N(i, j) \log [N(i, j)] \quad (8)$$

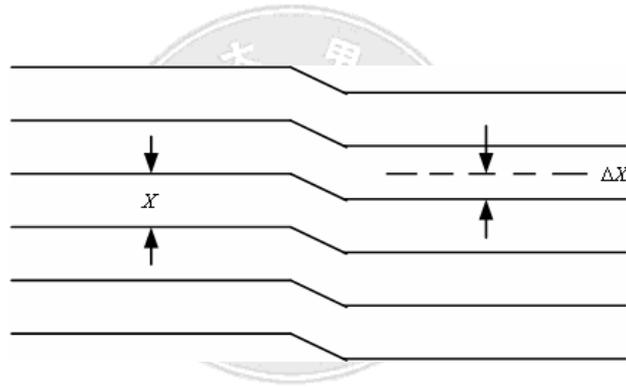
計算熵值的目標是為了呈現干涉影像之複雜度，如果干涉影像越複雜則熵值也就越大。相反的，若越趨近於平坦，則熵值也會變小。經過小波轉換後，如果垂直局部差別沒有較大的變動，則熵值較小。

2.4 膜厚度量測

應用等厚干涉條紋法測量膜厚，是根據劈尖形狀干涉原理，將平行單色光垂直照射到薄膜上，經多次反射干涉而產生鮮明的干涉條紋，然後再根據條紋的偏移，就可求出薄膜的厚度。用這種方法測量膜厚必須把薄膜做成台階狀，但是在一般情況下，如在整個基板上都

製作薄膜並不會出現台階狀。為此，要事先在被測基板表面上製成具有台階狀的薄膜，作為膜厚測量用的待測片。如果單色光照射在鍍膜後的待測片上，由於發生干涉，產生了明暗相間的平行條紋，這時光在待測片上的干涉可看成光在劈尖薄膜的干涉。根據條紋間距 x 和薄膜台階處條紋發生的位移量 Δx ，如圖二所示，已知單色光的波長為 λ ，可得膜厚 d 與它們之間的關係為

$$d = \frac{\Delta x}{x} \times \frac{\lambda}{2} \quad (9)$$



圖二 薄膜台階處干涉條紋的位移

因此，條紋的偏移量對條紋間隔的比值乘以半波長就是台階的高度，即薄膜的厚度。用干涉法測量膜厚具有簡單、快速、不損傷膜面層的優點。但它要求薄膜必須具有高反射和平坦的表面才行，否則會影響所測薄膜厚度的精度。此外，如何精確地測得等厚干涉條紋間距 x 和薄膜台階處條紋發生的位移量 Δx ，以有效提高膜厚量測的精度，此係本研究之重點。

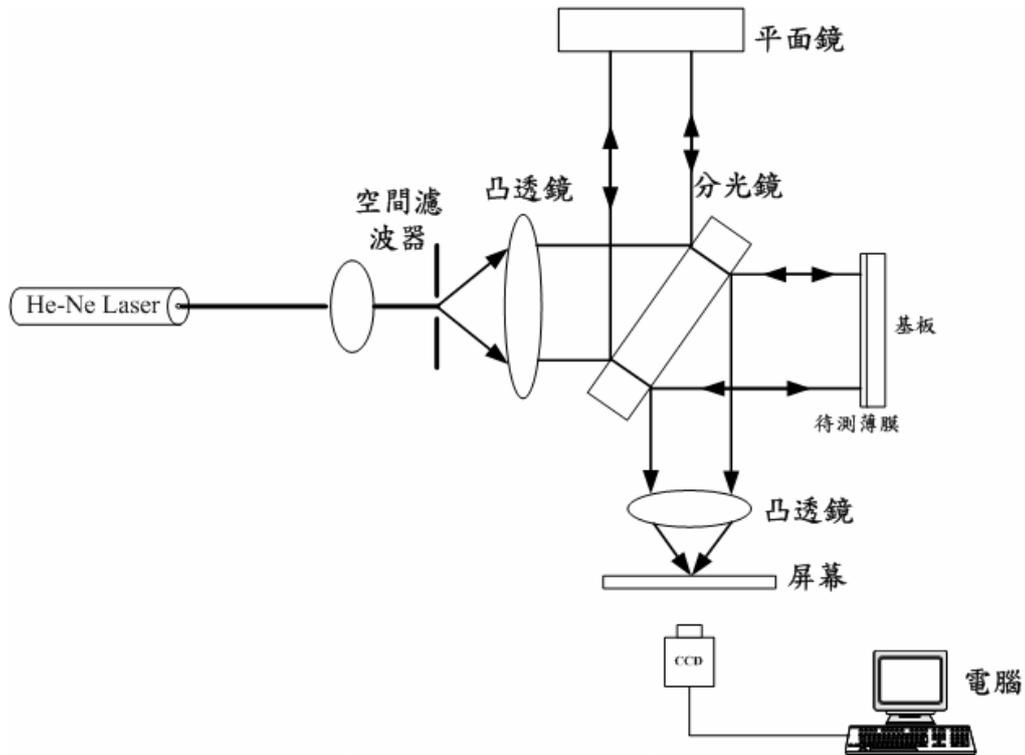
第三章 實驗架構

此量測系統中包含硬體與軟體兩個主要的部分。硬體的架構為 CCD 攝影機擷取待測物表面影像，而軟體則是使用灰階共生矩陣為基礎所發展的程式用以分析擷取的圖像。CCD 攝影機安置在干涉儀屏幕後方，擷取干涉圖像以供分析。擷取的影像將輸入個人電腦內，並使用 8 位元(bits)的灰階將圖像數位化處理成 320×240 畫素。

此系統是利用 Twyman-Green 干涉儀量測標準片(平整度 $\lambda/20$)及待測片樣本的干涉影像，透過 CCD 鏡頭擷取輸入電腦，進行小波轉換將影像中的瑕疵特徵經由不同尺度的小波轉換予以表現出來，最後執行影像灰階共生矩陣及熵值(瑕疵度)的計算，據此測定待測光學元件表面的平坦度。為了達成微小缺陷之自動識別，採取二維小波轉換的觀念以執行空間頻率分解。在本文中，以小波轉換和數位訊號處理技術完成光學元件表面缺陷特性量測，其中表面不平坦的光學元件經三階小波轉換可展現其瑕疵度。而本文另一重點厚度的量測因為待測物和表面平坦度檢測不同，所以茲分為下面兩節加以解釋。

3.1 表面平坦度量測

我們量測平坦度之實驗架構如下所示。



圖三 平坦度量測架構圖

由 He-Ne Laser 發出之光源經由空間濾波器可濾除高頻雜訊，再透過分光鏡產生之光程差造成干涉圖形，最後經由 CCD 將影像擷取至電腦分析。

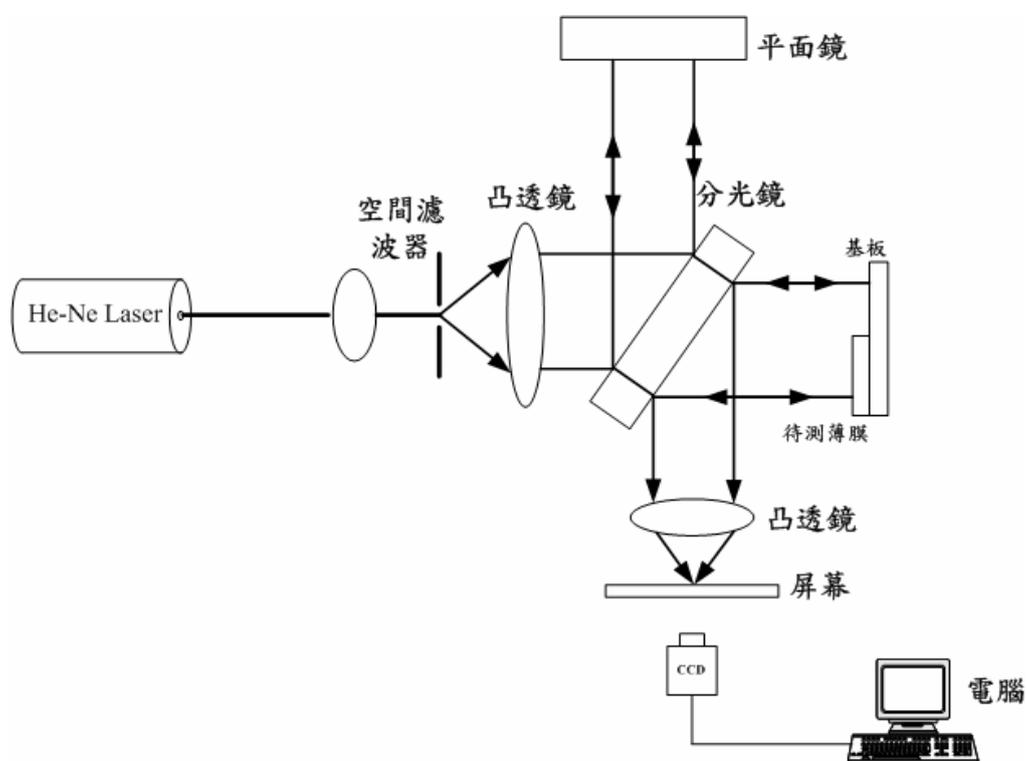
3.2 厚度量測

與平坦度量測架構相似，只需將待測薄膜加以更換。以下將說明厚度量測之方法與架構。

1. 選用一面拋光而另一面打毛的玻璃基板。
2. 利用電子鎗蒸鍍輔以離子助鍍技術於玻璃基板一半鍍膜，並

預留一半空白玻璃區。

3. 將待測薄膜放置在平移臺上。
4. 以 CCD 擷取干涉條紋。
5. 利用自行開發的軟體將圖形之雜訊濾除，並經由細線化處理，可使程式自動判別條紋之間距，計算薄膜之厚度。

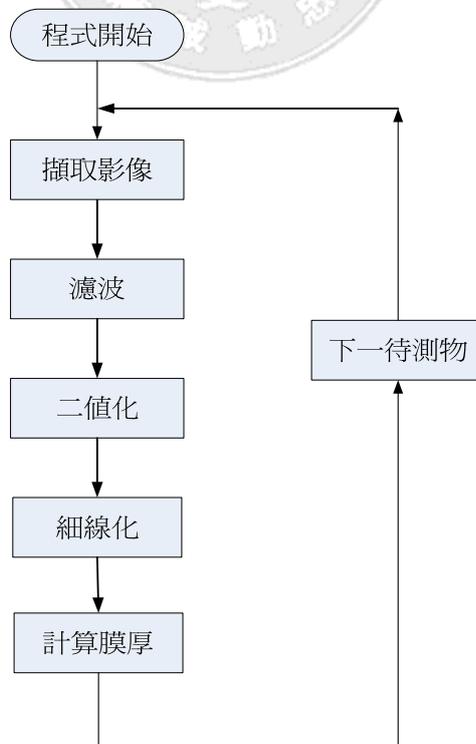


圖四 厚度量測架構圖

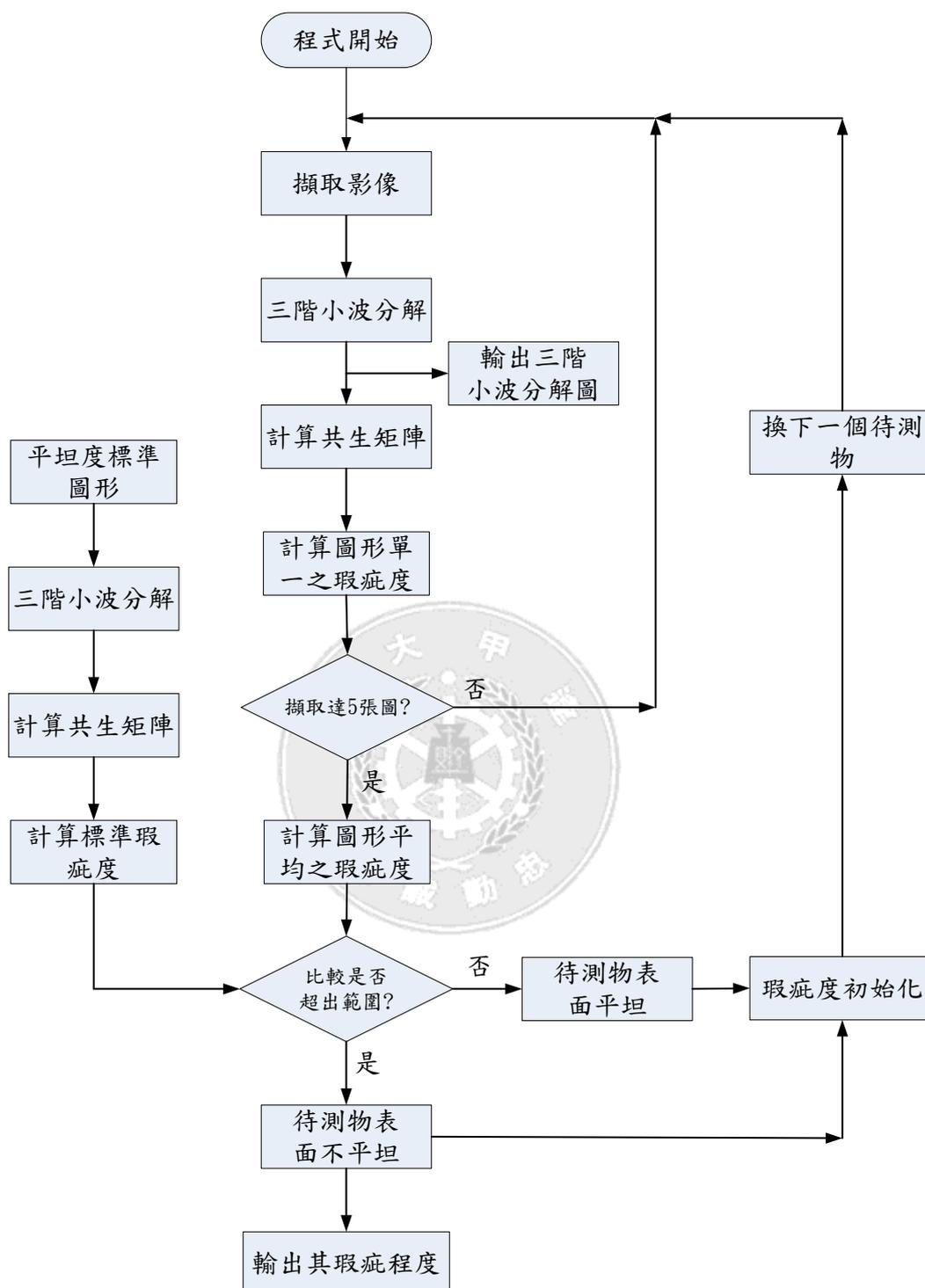
第四章 程式撰寫

本研究之目標為研發一套光學薄膜表面量測系統，因此系統介面之操控是相當重要的一環。如何提供人性化操控、程式穩定性與快速計算是相當重要的考量。有鑑於此，我們利用近年來相當熱門的圖控介面軟體 LabVIEW 做為我們程式之核心，並結合 Matlab 優異之工程運算能力，來建構一套兼具圖控介面與程式之量測系統。

厚度的量測需使用半面鍍膜，並預留一半空白之玻璃基板，圓形基板直徑 25.4mm，平整度為 1λ ，因基板採取半面鍍膜不同於量測平坦度之整面鍍膜，所以程式之撰寫分平坦度以及薄膜厚度量測程式。圖三和圖四便是這兩個程式的設計流程圖。



圖五 薄膜厚度量測程式流程圖



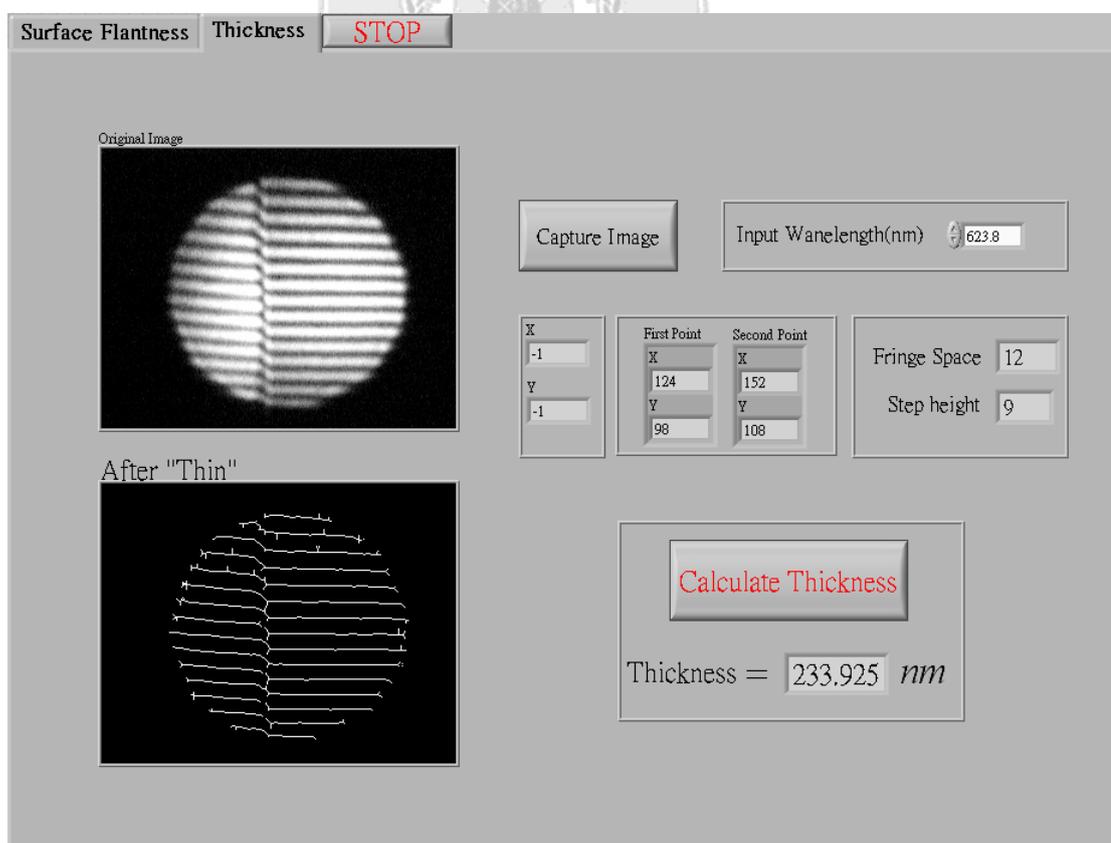
圖六 平坦度檢測程式流程圖

類似於一般高階語言，LabVIEW 具有子程式之功能，因此我們在撰寫程式方面分為許多的子程式逐步一一完成。圖二和圖三中之方塊即代表每個子程式之功能。兩主程式之詳細說明如下。

4.1 薄膜厚度量測程式設計

根據第二章理論介紹中之(9)式，若已知輸入波長(He-Ne Laser 為 632.8nm)、條紋間距與位移量之比值，我們將可以得知薄膜的厚度。因此我們將擷取之影像濾波並加以細線化以求取條紋間距與位移量之比值。

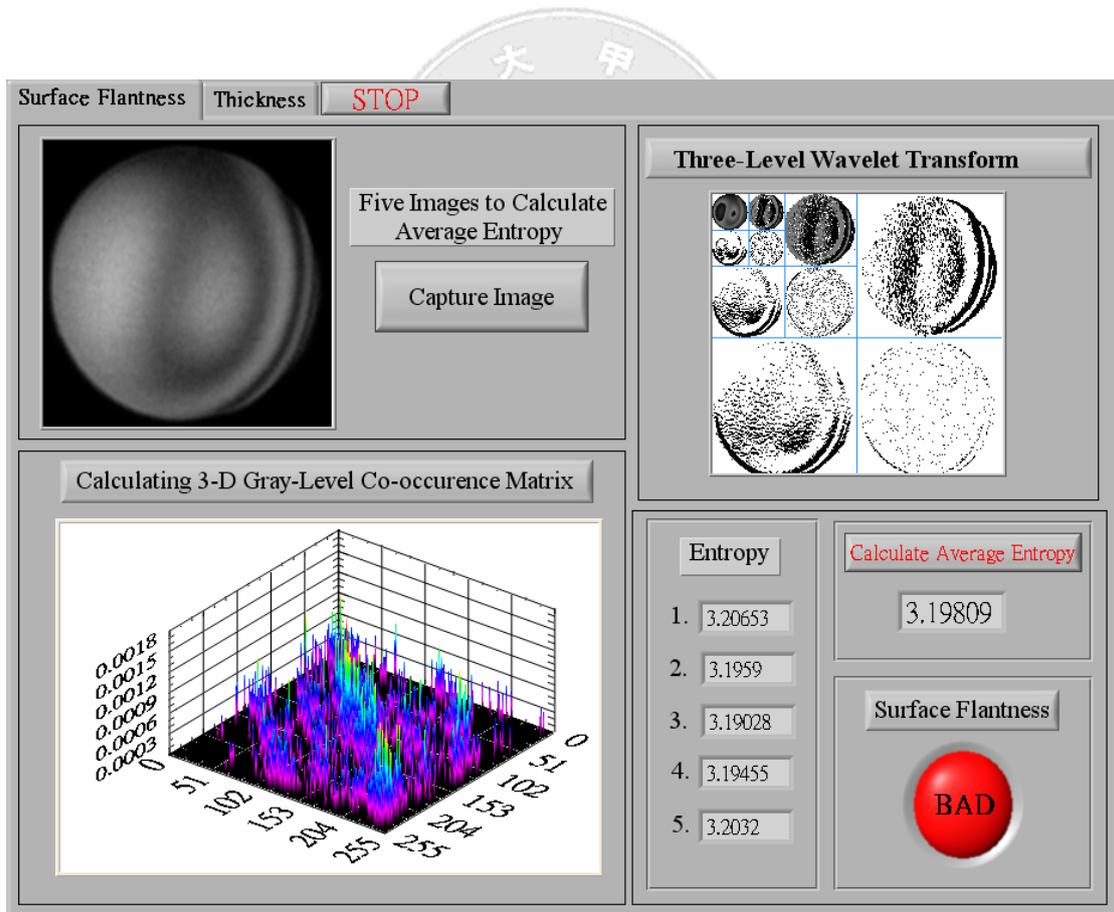
由於濾波和細線化之程式利用 Matlab 所撰寫，所以我們利用 LabVIEW 中的 Matlab Script 功能匯入 Matlab 所計算之數據，再使用 LabVIEW 的圖控介面讓程式尋找兩線間之距離和階梯高度。程式執行介面之軟體設計，如圖五所示。



圖七 薄膜厚度量測程式

4.2 平坦度測定程式設計

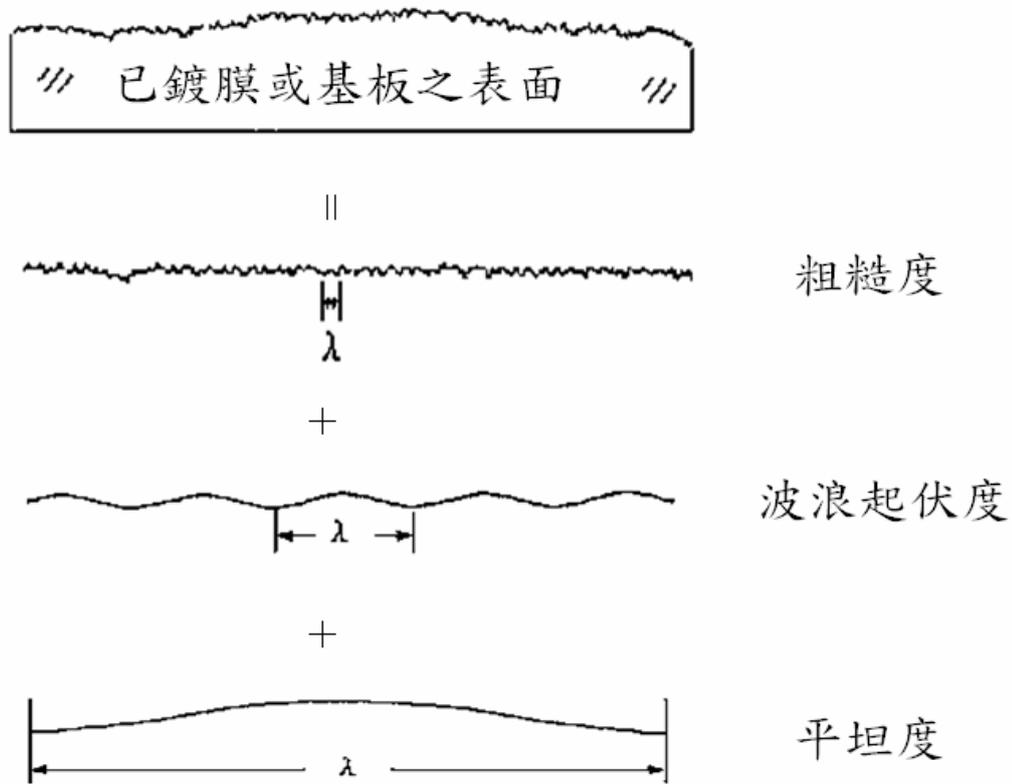
平坦度的判別是透過設定標準平面之熵值作為快速判別待測平面是否平整之標準。我們將擷取之圖形先做三階小波轉換以求取圖形中之高低頻率與複雜度之差異變化，並利用灰階共生矩陣加以量化，最後利用熵值表示其平坦度的指標。為增加程式判別之準確性，我們將擷取五張干涉圖形做處理，透過 5 個熵值之平均，作為表面平坦之依據。以下便是平坦度檢測程式之執行介面。



圖八 平坦度測定程式

第五章 結果分析

我們利用自行研發之薄膜表面量測系統，檢測所擷取之干涉圖形。根據李正中教授[13]薄膜光學與鍍膜技術一書當中所介紹之理論，基板表面可解析為粗糙度(Roughness)、起伏度(Waviness)、平坦度(Flatness)等，如下圖所示。

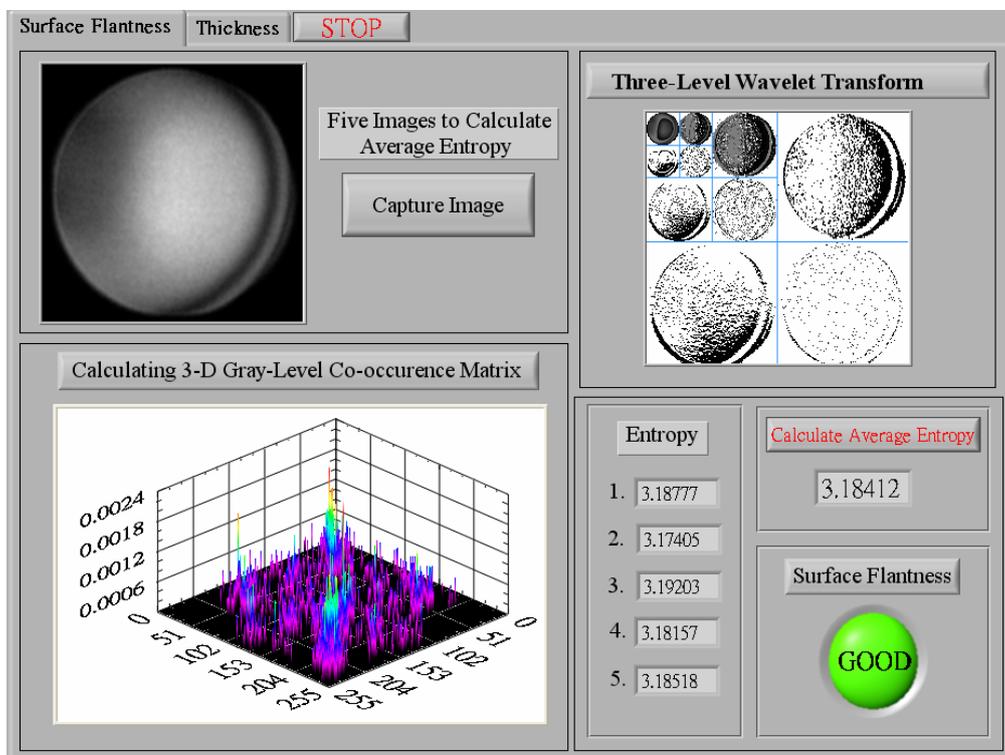


圖九 基板表面解析

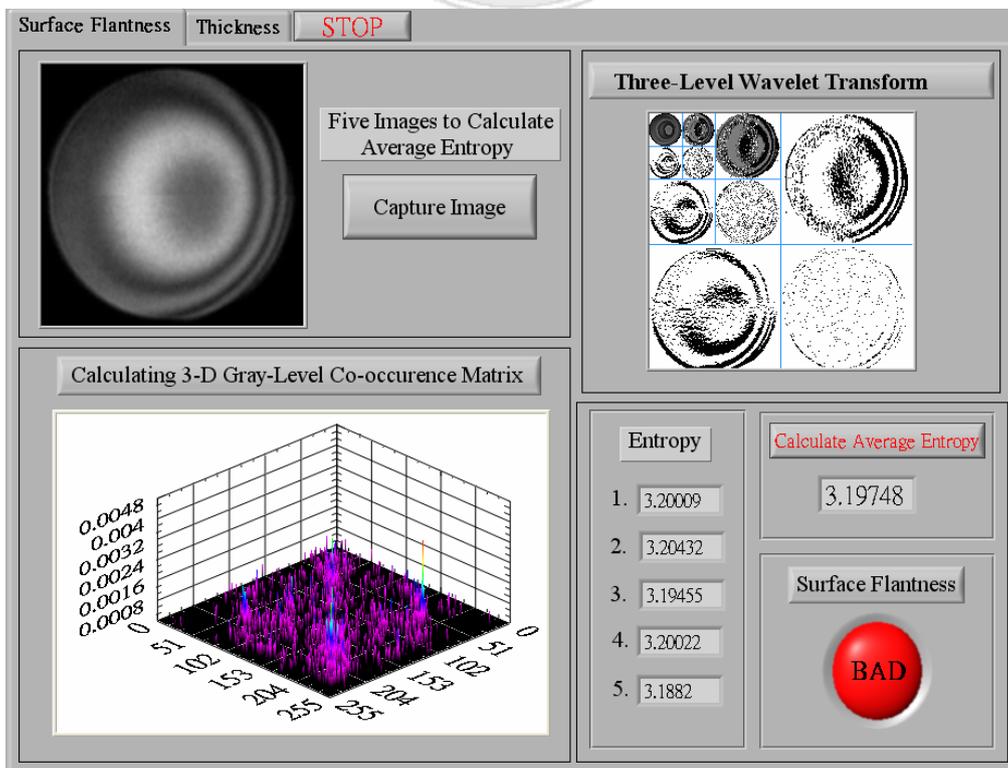
其中此系統為宏觀的平坦度檢測，干涉圖形為待測物表面與標準片(平整度為 $\lambda/20$)表面之比較，因此若待測物越平坦則干涉條紋越少。在此章節中將比較幾張不同條紋數之干涉圖形以驗證此系統的正確性。最後將量測不同光學薄膜之厚度。

5-1 基板表面平坦度檢測

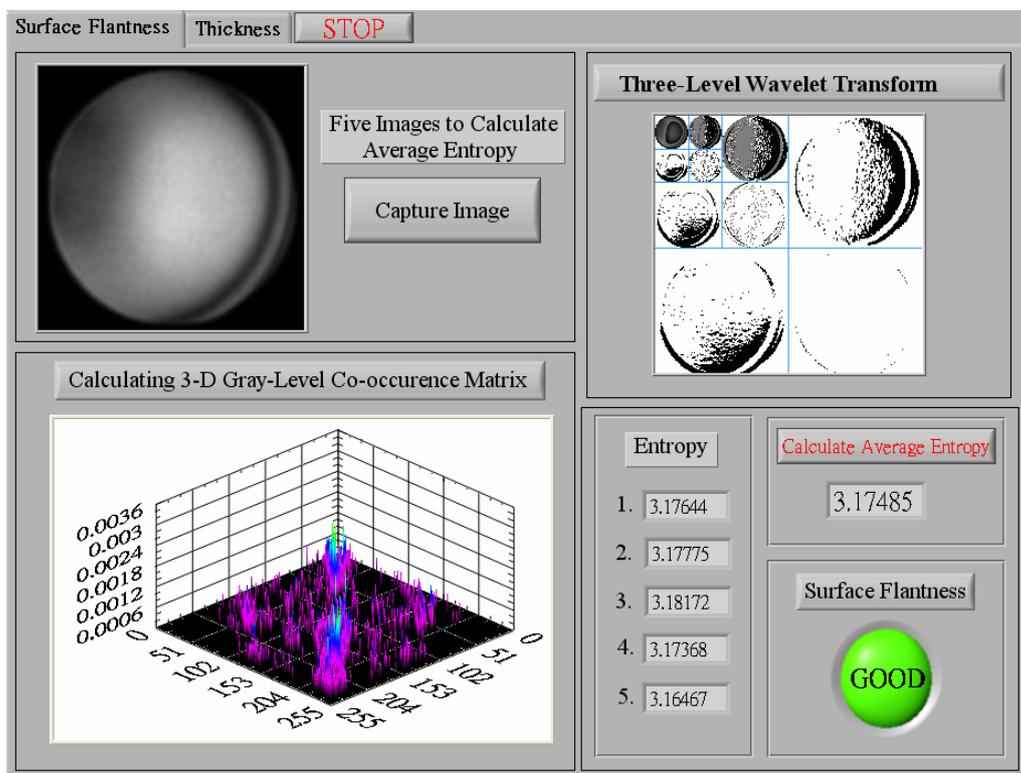
1. 圖形解析度為 320×240，使用三階低通濾波器。



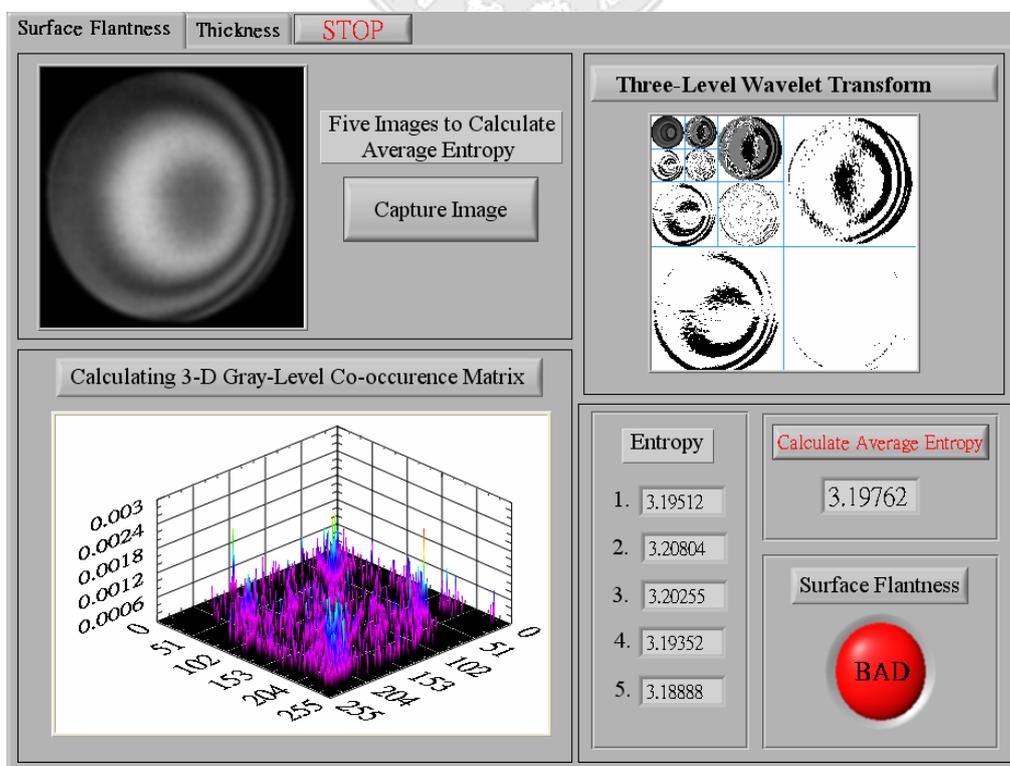
2. 圖形解析度為 320×240，使用三階低通濾波器。



3. 圖形解析度為 320×240 ，使用五階低通濾波器。



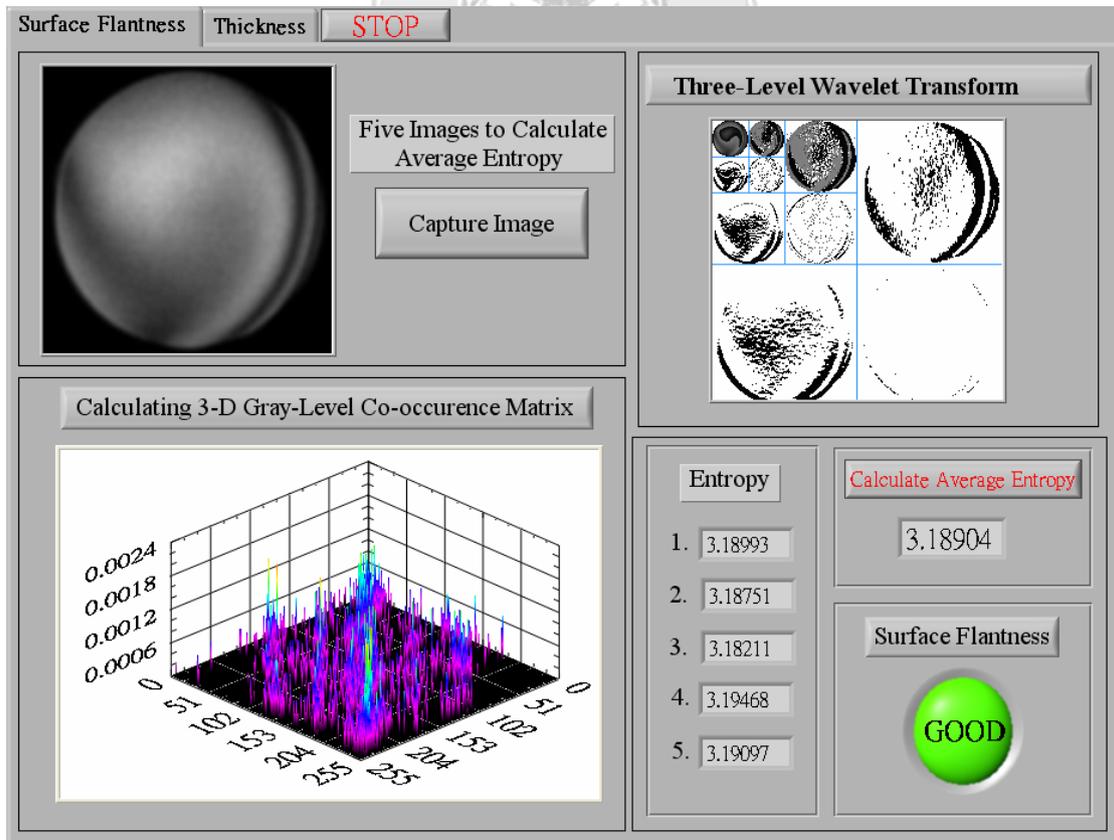
4. 圖形解析度為 320×240 ，使用五階低通濾波器。



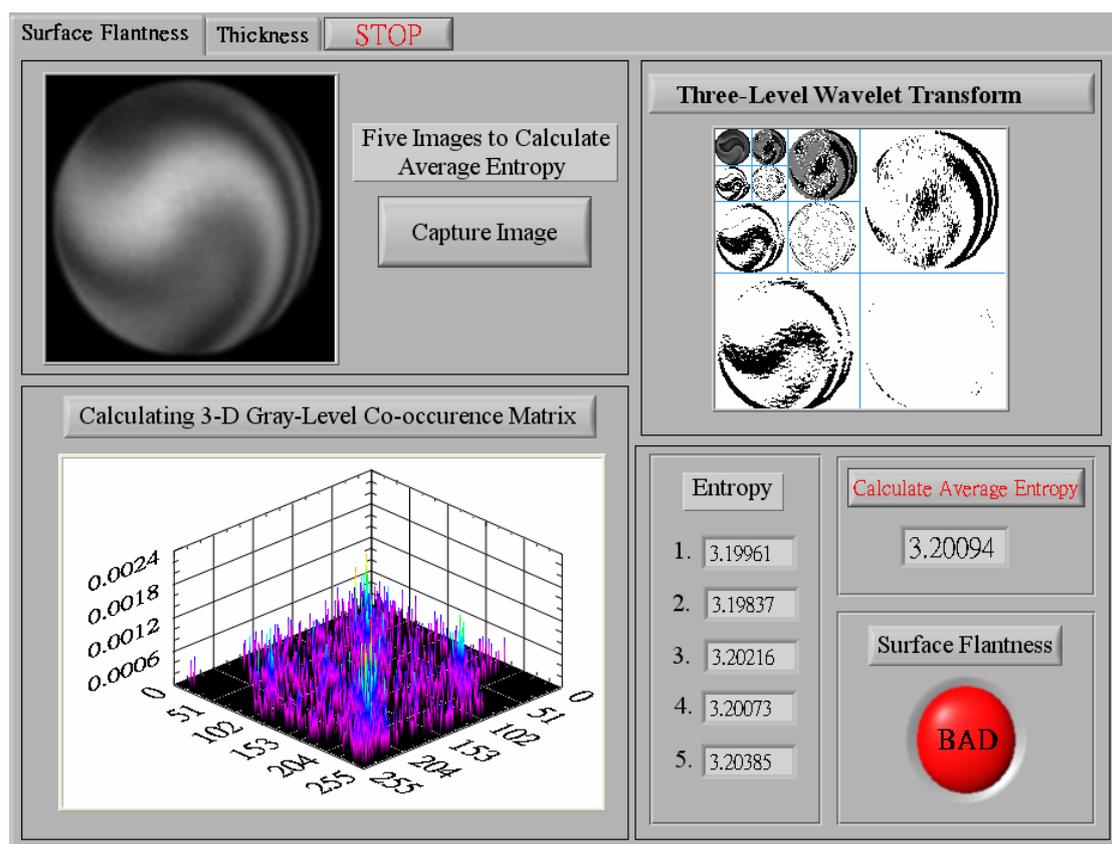
為製鍍高品質的光學薄膜，透過程式之自行判別，我們可以事先挑選平坦度較好之基板。同時，由圖形之比較可得知，使用高階濾波器更能明顯呈現熵值的變化，這是由於我們利用小波轉換之低頻部份，因此高階低通濾波器能將較細微之高頻變化濾除，使圖形更容易為程式所辨別。因此，我們將選用五階低通濾波器做為圖形之前置處理，提高程式判別之準確性。

5-2 薄膜表面平坦度檢測

1. 圖形解析度為 320×240 ，使用五階低通濾波器。



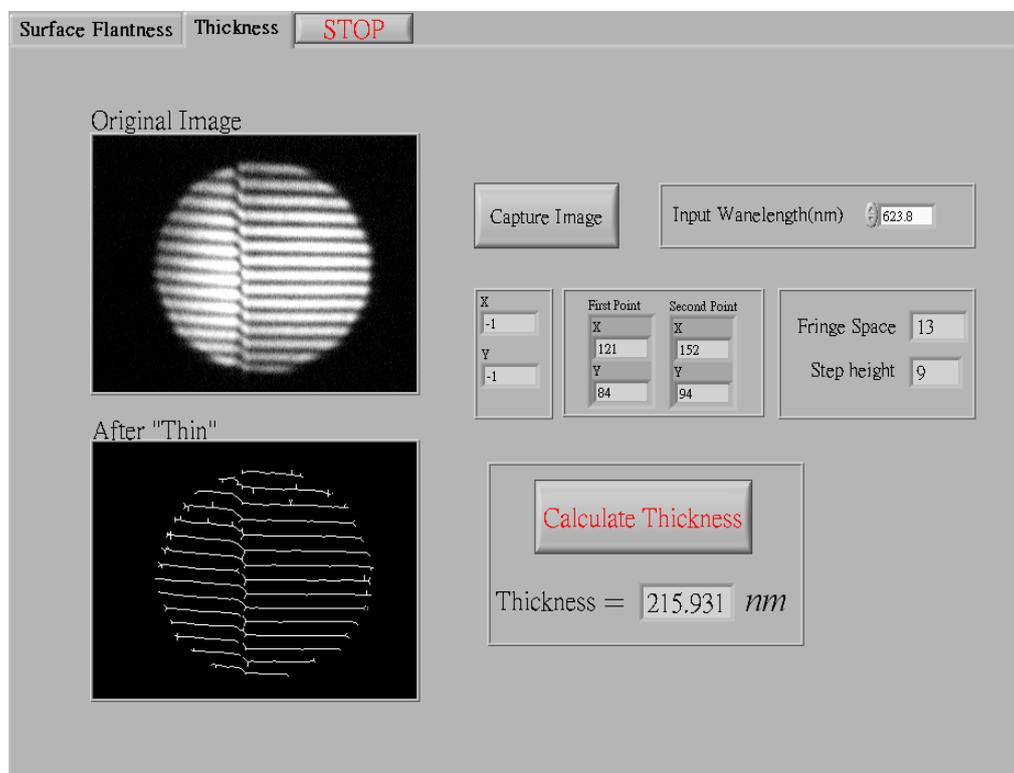
2. 圖形解析度為 320×240 ，使用五階低通濾波器。



由上圖比較可知，鍍膜之後圖形明顯受到膜應力之影響，平均之熵值均比鍍膜前為高、由此更可證明此程式之正確性！同時也可思考是否可以透過此程式，從熵值求取應力或是求其之間的相關性。

5-3 薄膜厚度檢測

1. 量測 ZnS 膜厚



透過對擷取圖形濾波、細線化，我們才能利用程式辨別條紋間距和位移量。輸入入射光波長，並由公式(9)可求出光學薄膜厚度。

第六章 結論

本研究成功利用小波轉換和灰階共生矩陣建構以數位訊號處理為基礎之光學元件表面特性量測系統，灰階共生矩陣的量化分析可透過熵值之計算來達成，同時可用來檢測光學元件表面有缺陷之影像，而熵值可作為判別光學元件表面平坦度之指標。

此系統之架構相當便宜且易於架設，同時更能提供快速且精準的薄膜表面平坦度指標，此外對於光學薄膜厚度之量測也是相當地快速、便利。然而，由於此系統採用干涉式檢測，因此對於空氣擾動和外界震動相當的靈敏，需儘量避免這些外在干擾以提升檢測之精準度。同時由於此系統為干涉式系統，因此若待測物表面反射率越高則所產生之干涉圖形越清晰。

在未來的發展上，我們可以透過精密壓電平移台結合相位偏移技術來提高此一量測系統之精準度，並整合其他應用程式，進而擴展此系統之功能如檢測薄膜應力等，以期開發一套多功能之光學薄膜檢測系統。

參考文獻

- [1]S.G Mallat, "A Theory for Multiresolution Decomposition : The Wavelet Representation. ", IEEE Trans, Pattern analysis and machine intelligence, pp.476-693, 1989.
- [2]Levesque L. , Paton B.E and Payne S.H, "Precise thickness and refractive index determination of polyimide films using attenuated total reflection," Applied Optics, Vol.33, pp.8036-8040, 1994.
- [3]Rivory J., Ellipsometric Measurements Thin Films for Optical System, Chap.11, ed.by Flory F.R., Marcel Dekker Inc ,1995.
- [4]Manificier J.C.,Gasiot J., "A simple method for the determination of the optical constants n , k and the thickness of a weakly absorbing thin film," J.Phy.E: Sci. Instrum , Vol.9, pp.1002-1004, 1976.
- [5]Helen L. Maynarda and Noah Hershkowitz, "Thin-film interferometry of patterned surfaces," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 13, No. 3, 1995.
- [6]T. Gharbi and D. Barchiesi, "Local signal processing to evaluate resolution in SNOM images, using 1D wavelets," *Opt. Comm.*, Vol. **77**, pp. 85-93 (2000).
- [7]S.G. Mallat, "A theory for multiresolution decomposition: the wavelet representation," *IEEE Trans, Pattern analysis and machine intelligence*, Vol.**11**, pp. 674-693 (1989).
- [8]A. Grossmann and J. Morlet, "Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape," *SIAM J. Math.*, Vol. **15**, pp. 723-736 (1984).

- [9] R.M. Haralick, K. Shammugam, I. Dinstein, "Textural features for image classification," *IEEE Trans. Sys., Man Cybernet.*, Vol. **3**, pp.610-621 (1973).
- [10] Ahmet Latif Amet, Aysin Ertuzun, Aytul Ercil, "Subband domain Co-Occurrence matrices for Texture Defect Detection" submitted to *Image and Vision Computing. Journal*, 1998.
- [11] Ross F Walker, Paul Jackway, I.D. Longstaff, "Improving Co-Occurrence Matrix Feature Discrimination." DICTA '95, the 3rd Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications, 6-8th December, 1995, Brisbane, Australia.
- [12] K Kim, S Jeong, B.T Chun, J.Y Lee, Y Bae, "Video image retrieval on the basis of subregional co-occurrence matrix texture features and normalized correlation.", *IEEE Trans*, 1999.
- [13] 李正中, "薄膜光學與鍍膜技術", 第四版, 藝軒圖書出版社, pp.403-428, 2004.