

白光干涉系統之樣品自動平準化

廖界程
致茂電子

林耀明
致茂電子

張維哲
致茂電子

張宏彰
致茂電子

kevin-liao@chrom.com.tw

ymlin@chroma.com.tw

alvin-chang@chroma.com.tw

popai@chroma.com.tw

摘要

使用白光干涉系統進行量測時，樣品表面法線方向若是與系統光軸存在一傾角，則垂直掃描範圍與掃描時間將相對增加，另外波包範圍外的雜訊將使量測誤差隨之增加，為解決此一問題，本論文提出名為 SOF©(Stepwise Optical Flow)的樣品自動平準化技術，以干涉條紋的方向與疏密等觀念，決定樣品相對於光軸的傾角，配合雙軸傾斜調整平台，調整該傾角使樣品與光軸垂直，如此一來，因樣品的傾角被消除，量測上有正確性較佳與量測速度提升的優點，大幅增加白光干涉系統在工業上應用的可行性，目前該技術已應用於致茂電子公司所發展的 Chroma7502 次奈米三維光學輪廓儀，並且申請專利中。

關鍵字：白光干涉、自動平準化、奈米量測

壹、前言

白光干涉系統的適用範圍皆是微、奈米級尺寸的物體，故對於精度有相當的要求，而工業應用上量測所需時間則是技術關鍵，有鑑於此，每一個影響因素都應仔細考慮，才能將白光干涉系統的效能提升，其中樣品的傾角即是因素之一，以下分為兩個部份分析樣品傾角對於白光干涉系統的影響。

一、掃描範圍與掃描時間

在白光干涉系統中，樣品的法線方向若是與光軸存在一傾角，則掃描範圍與掃描時間將相對增加，如圖 1 所示樣品表面為一平面，若是該平面與光軸垂直，對於使用垂直掃描技術的白光干涉系統，僅需要將垂直掃描範圍訂為波包區域寬度大小即可，但由於圖 3 被測平面與直角座標系存在一個傾角，故垂直掃描範圍必須相對加大，才能將垂直方向的樣品干涉波包全部涵蓋計算，如此必須擷取更多高度影像才能計算樣品的三維輪廓，同時量測所需時間也相對地增加，降低了工業應用可行性。

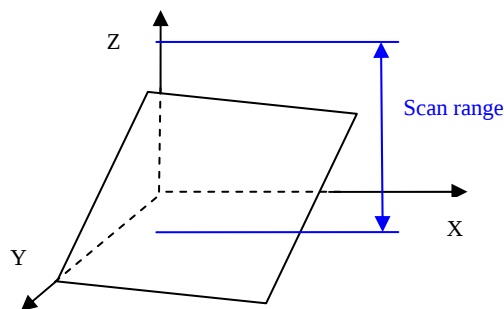


圖 1、樣品的傾角導致掃描範圍加大

二、量測正確性

白光干涉系統對樣品進行垂直掃描以求出三維形貌，若是掃描範圍內全為干涉波包資訊，將波包區外的雜訊降到最低，在判斷波包中心位置上有較佳的正確性，如圖 2 所示，量測誤差也相對獲得改善。

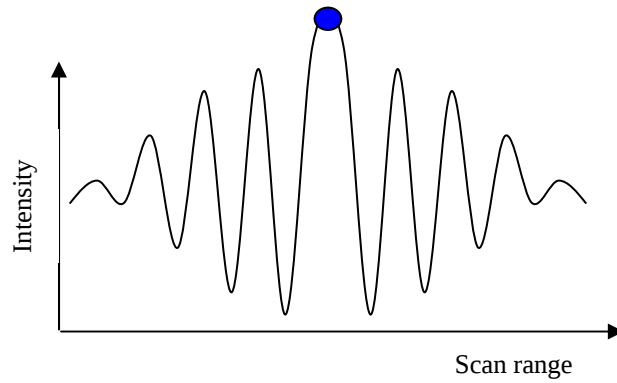


圖 2、掃描範圍內全為干涉波包資訊

相對於圖 2，圖 3 由於掃描範圍過大，干涉波包僅佔掃描範圍的一部分，在波包區以外皆是不必要的雜訊，而引入過多雜訊的結果，將導致波包中心位置的判斷受到影響，計算出的中心位置可能有所偏移致使量測誤差也將隨之增加。

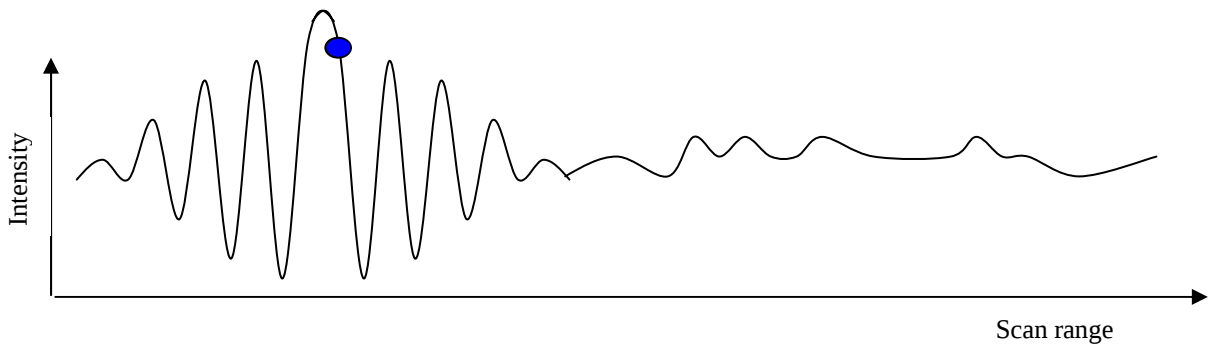


圖 3、掃描範圍內含有干涉波包及雜訊

由上述分析得知，樣品的傾角對於白光干涉系統的效能有著深遠的影響，也間接影響在工業上應用的可行性，但是目前樣品的傾斜平準機制，仍普遍依靠人工調整，以人工進行傾角多寡的判斷並進行平準動作，必須相當依賴使用者的經驗，若是經驗不足或是因樣品表面形貌造成傾角難以判斷（如圖 4 所示），往往無法正確將傾角消除，另外，依靠人工進行傾角判斷，其正確性與重複性可能有所爭議。

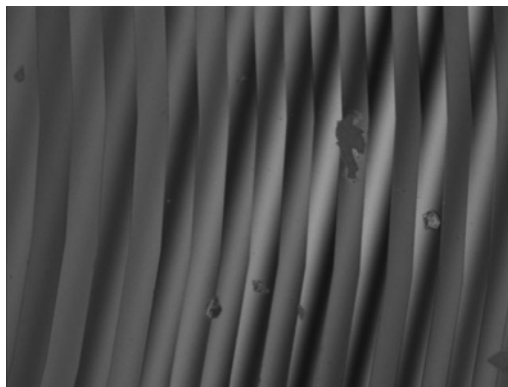


圖 4、因樣品表面形貌造成傾角難以判斷

貳、研究方法

圖 5 是樣品表面不與光軸垂直的情況下，干涉條紋所呈現的狀態，為消除該傾角並提升白光干涉系統的效能，本論文以干涉條紋方向與間隔疏密，作為判斷樣品傾角的依據，應用雙軸傾斜調整平台，搭配不同的平準函數進行二個軸向的平準化，可將傾角調整至最小，其主要流程分為兩個階段：第一軸軸向平準化與第二軸軸向平準化。

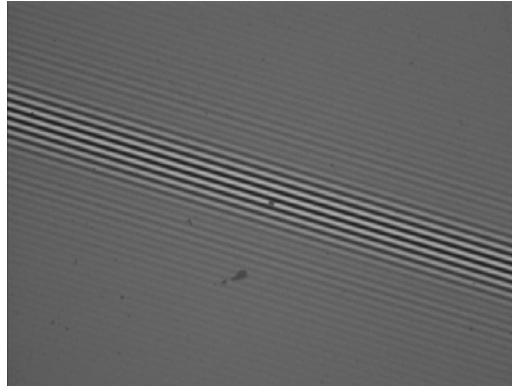


圖 5、樣品存在傾角的干涉條紋

一、第一軸平準化

第一軸平準化的觀念是先判斷影像中樣品表面干涉條紋方向作為依據，將條紋調整與影像橫軸正交的方向，即可消除第一軸的傾角，其動作可以分為判斷平準方向以及平準化函數兩個部份討論。

● 判斷第一軸平準方向

利用第一軸傾角越小，條紋方向越接近影像橫軸正交的特性，作為判斷樣品第一軸平準方向的依據

● 第一軸平準化函數

干涉條紋在傾角最小時，正交方向的灰度值變化量為最小，利用此特性作為平準化的依據，故在平準化過程中，第一軸平準函數曲線應為一具有極小值的單峰曲線，且該極小值即為第一軸傾角最小的位置，正交方向的灰度值變化量可以表示如式一，透過該式可以清楚界定第一軸傾角最小的位置。

$$\sum_{x=0}^M \sum_{y=0}^N \sum_{p=0}^Q |I(x, y) - (x, y + W \times p)| \quad \cdots \text{式一}$$

W ：影像感測器在橫軸方向的像素數目

二、第二軸平準化

當第一軸傾角消除後，干涉條紋方向將固定在正交方向，接下來第二軸平準化過程中調整第二軸傾角僅會改變條紋的間隔疏密程度，故第二軸平準化觀念是以條紋的間隔疏密做依據，目的為將條紋間隔調整至展開最大以消除第二軸的傾角。

● 判斷第二軸平準方向

當干涉條紋與影像橫軸成正交時，第二軸傾角越小，干涉條紋的間隔寬度將越大，利用該特性，配合光流技術(Optical flow)判斷干涉條紋展開方向，並藉此決定第二軸平準化方向，其中光流方程式可表示如下：

對照參考文獻[1]，在任意點 (x, y, t) 的強度方程式可表示為 $f(x, y, t)$ ，而原影像與相鄰影像的假設位置

$(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t)$ 強度方程式則表示為：

$$f(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t) = f(x, y, t) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t + \text{high order terms} \quad \cdots \text{式二}$$

在此高次項不考慮，並假設

$$f(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t) = f(x, y, t) \quad \cdots \text{式三}$$

故式一可以重新表示為：

$$-\frac{\partial f}{\partial t} \Delta t = \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y = \nabla f \cdot [\Delta x, \Delta y] \quad \cdots \text{式四}$$

應用上述式四，配合最小平方法(Least square)即可求取光流向量，進而達到判斷第二軸平準方向的目的。

● 第二軸平準化函數

為界定第二軸傾角最小的位置，利用條紋間隔的疏密程度作為計算函數，首先找出干涉條紋中零階條紋所在作為 Seed point，設定固定的限制條件，計算區域成長(Region growing)的面積大小作為函數值，當第一軸傾角消除後，在第二軸平準化過程中，第二軸傾角越小，區域成長的面積將越大，直到單一個條紋覆蓋了整個影像擷取範圍，第二軸平準函數曲線是一個具有極大值的單峰曲線，且該極大值為第二軸傾角最小的位置，圖 6 是區域成長概念示意。

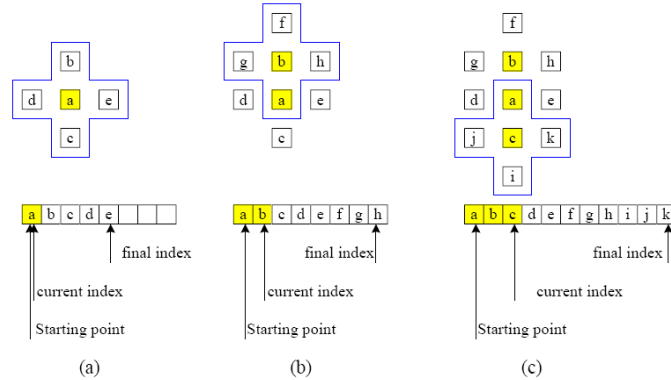


圖 6、區域成長示意圖

在完成上述兩個步驟後，即可將樣品的傾角調整至最小，即完成平準化動作，可有效縮小垂直掃描範圍，也確保量測正確性不受傾角的影響。

參、研究成果

以下是應用在樣品為光學平板的應用實例：

一、第一軸平準化

目的：第一軸平準化的目的為使干涉條紋正交於影像橫軸，消除樣品在第一軸軸向的傾斜量。

平準程序：

- 第一軸平準化是以正交方向變化量為依據，當樣品載入系統後，在初始位置進行取像後計算第一軸平準函數為 $F1$ ，再向第一軸任意方向傾斜一微小角度並計算函數值 $F2$ ，藉由 $F1$ 與 $F2$ 這兩筆函數值判斷函數值遞減的方向，該方向即為第一軸平準方向。
- 決定平準方向後，再以固定步幅調整傾角，搜尋過程中記錄每一步幅影像的平準函數值，該函數曲線極小值即為第一軸傾角最小位置。

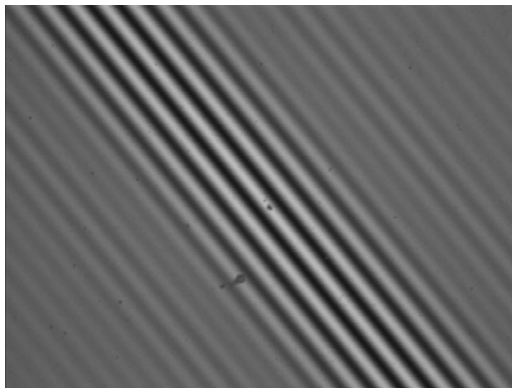


圖 7、判斷第一軸平準方向

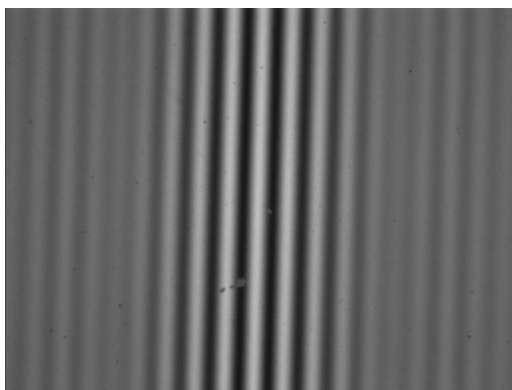


圖 8、條紋方向調整至垂直

二、第二軸平準化

目的：第二軸平準化的目的為將正交於影像橫軸的干涉條紋展開，消除樣品在第二軸軸向的傾斜量，並完成樣品的平準化動作。

平準程序：

- 經過上述步驟後樣品在第一軸傾角已被消除，故第二軸平準化過程中，干涉條紋方向不會改變，始終維持與影像橫軸正交，第二軸傾角多寡對條紋的變化，僅是表現在條紋間隔疏密上，基本上在此情況下第二軸傾角越小，條紋的間隔將會越疏，針對此特性，在第一軸平準完成後取像為 $Image1$ ，再向第二軸任意方向傾斜一微小角度並取像 $Image2$ ，以光流技術判斷條紋在傾斜一微小角度後是否呈現展開，若是光流向量呈現展開，則前述的任意方向即為第二軸平準方向，若否，則為反方向。

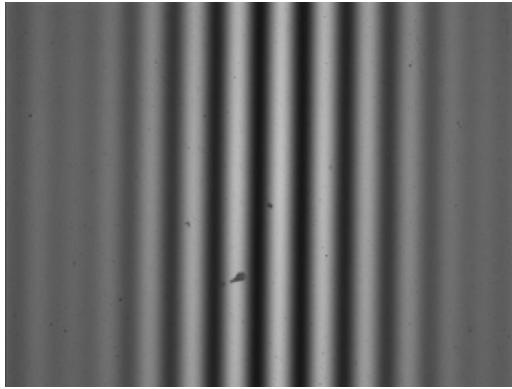


圖 9、判斷第二軸平準方向(條紋間隔寬度增加)

- 決定平準方向後，再以固定步幅調整傾角，搜尋過程中記錄每一步的第二軸平準函數值，該函數曲線極大值即為第一軸傾角最小位置。
- 在實際應用上，第二軸平準函數可能受限於樣品表面輪廓或雜點，無法精確定位平準最佳位置，例如 grating 的邊界或是表面缺陷將影響區域成長的範圍，間接導致誤判的可能性增加，針對此問題，可在平準過程中紀錄每一位置的灰度直方圖分佈，透過干涉條紋間隔展至最大時，單一條紋覆蓋樣品表面將使直方圖分佈最小的特性，提升判斷第二軸平準位置的解析能力。

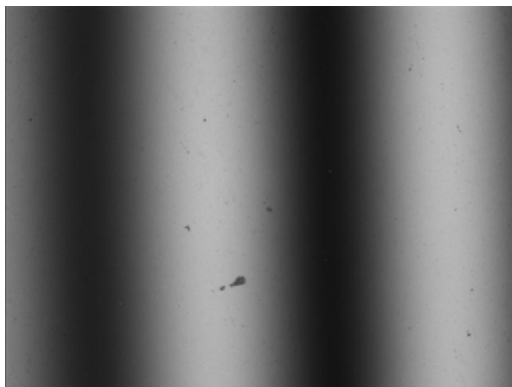


圖 10、進行第二軸平準化

完成上述四個步驟，即可將樣品的傾角調整至最小，而樣品因為干涉條紋的擴展，造成單一條紋覆蓋了整個取像範圍，故在影像感測器中將呈現全黑或全白的影像，如圖 11 所示。

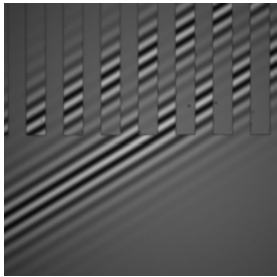
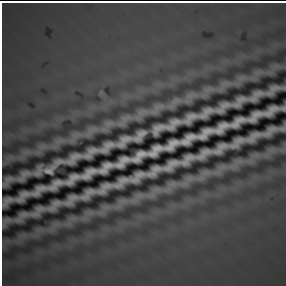
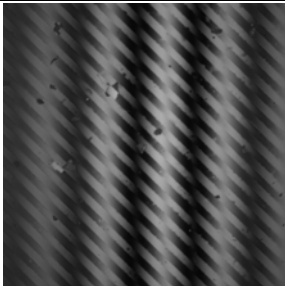
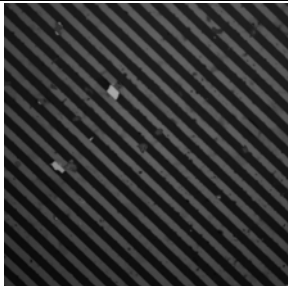
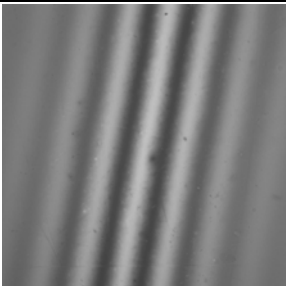
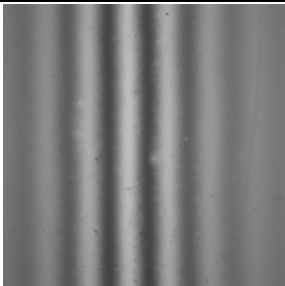
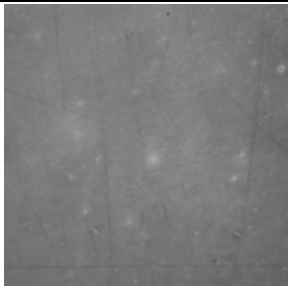


圖 11、平準化完成後的全白影像

三、各式樣品的平準化

下表 1 為應用自動平準化在各種樣品的結果，表中分別列出進行平準之前影像、第一軸平準完成影像及第二軸平準完成影像，其中樣品包含有 VLSI 階高標準片、grating 與 TFT，皆是白光白光干涉系統實際應用的微奈米尺寸樣品。

表 1、應用在各種樣品的平準化

樣品名稱	平準前影像	平準中影像	平準後影像
VLSI 階高標準片			
grating			
TFT			

肆、結論與建議

本論文提出 SOF©(Stepwise Optical Flow)的樣品自動平準化技術，以干涉條紋方向與間隔疏密的觀念，作為判斷被測物體傾斜量的依據，進行被測物體傾斜調整，具有以下特點：

- 不需人工判斷傾斜量，系統可以自動調整樣品表面與光軸垂直。
- 樣品平準化可有效縮小白光干涉系統垂直掃描範圍，提升量測正確性與節省掃描時間。
- 即使是樣品表面有規律性的起伏，如 grating 等規則階高物體，也可以正確完成平準化動作。

該技術已應用於致茂電子所發展的 Chroma7502 次奈米三維光學輪廓儀，且目前專利申請中，另外，因表面粗糙度產生不規則干涉條紋之樣品，其自動平準演算法則需另外考慮，故不在本論文探討之列。

關於自動平準的未來發展，本論文的著眼點為利用干涉條紋方向與間隔疏密進行平準化，在平準過程中使用的平準函數並沒有限定必須為本論文所述的，故發展不受樣品表面性質影響、更強固化的平準函數可作為未來發展方向。

伍、參考文獻

- [1] 張宏彰 (2004)：強固性整體運動估測及其視訊應用，*清華大學資訊工程所碩士論文*，1(1)，13-22。