結合雷射干涉儀與 CCD 影像視覺技術應用於位移之動態量測

陳美勇 國立台灣師範大學 機電科技研究所 助理教授 cmy@ntnu.edu.tw 郭江禹
 國立台灣師範大學
 機電科技研究所
 研究生
 t7511307@yahoo.com.tw

蘇峻緯 國立台灣師範大學 機電科技研究所 研究生 su4002@hotmail.com 陳俊宇 國立台灣師範大學 機電科技研究所 研究生 B887799@hotmail.com

摘要

本研究提出以雷射干涉儀結合 CCD 影像視覺技術應用於精密運動控制系統,並利用所組 裝之雷射干涉儀系統進行運動平台精密微位移之量測,該量測系統主要是以架構簡單與低成本的方式 呈現出來。本量測的雷射干涉儀系統,有別於一般的光二極體感測的方式,是透過 CCD 影像視覺辨 識技術的方式來觀察干涉圖形的變化,同時,在即時系統方面,利用 Visual Basic 程式所設計之人機 介面來驗證,當我們不停改變 CCD 的擷取速度時,則 Visual Basic 程式介面也會不停的即時更新,用 以調整雷射干涉儀與 CCD 的擷取速度之同步,以提高實驗校正之準確性。

關鍵字:雷射干涉儀、CCD、動態量測

壹、前言

近年來,隨微奈米科技的興起,使得加工生產設備、檢測儀器之加工技術及輸送裝置,必須仰賴奈米 等級的精密驅動及定位之技術,其中不論是半導體產業、光電通訊、精密機械設備、顯微機構、表面 工程等,或是高精密加工、定位與強調無污染環境之高科技產業,亦需定位精度高、快速驅動及低摩 擦之機械相關設備來完成,有鑑於此,為因應未來高精度與高性能之科技產品需求,快速驅動與高精 密定位之機械工具機與量測儀器,為目前工業界最迫切需求與發展的設備。為滿足業界對高精度的定 位移動量測需求,目前常用的工具有金屬尺、電阻尺、玻璃尺、全像式光學尺及雷射干涉儀等,但在 長度量測的校正體系中,雷射干涉儀是傳遞長度原級標準的最上層技術,其技術核心是利用光干涉的 原理,以雷射光的波長來量測位移,因此具有高精度的定位特性。在今日加工水準及檢測精度不斷提 升的要求下,雷射干涉儀能符合長距離、高精度奈米級的量測需求。以半導體八寸晶片之步進機爲例, 其定位精度要求為 50nm,除雷射干涉儀外,沒有其他儀器能有此定位精度。此外,台灣的機床工業, 已將產品定位在高技術的生產應用範圍,在精密機械加工製程中,必須利用雷射干涉儀,進行產品特 性量測,以提升產品品質,故本研究基於這樣的訴求,便著手開始此一研究[16]-[20]。

貳、研究方法

一、麥克森干涉儀基本原理

麥克森干涉儀(Michelson Interferometer)為一應用極為廣泛之光干涉儀器,由美國科學家 Albert Abraham Michelson (1852-1931)所發明,故後人將此類型之干涉儀通稱之為麥克森干涉儀。其基本原

理是利用光之波動性質,使兩束光相遇時產生干涉現象,出現明暗不同的干涉條紋,並據此來分析光 波或產生光波的光學元件特性之特性。其麥克森干涉儀的基本架構如圖1所示,利用一個50%/50%分 光鏡先將入射雷射光分成兩道相同強度的光束,被分出來的兩道光束各自經鏡子〈量測鏡,參考鏡〉 反射後回到原來的分光鏡再經由這個分光鏡結合到CCD相機前,若是兩面鏡子和分光鏡之間的距離 不一樣,兩道光的光程及相位便有了差距,因為光程差或相位差的不同會在CCD相機上形成建設性 干涉或是破壞性干涉的條紋[1]、[3]、[6]、[8]。



圖 1 麥克森干涉儀基本架構圖

圖1中的相位補償片,主要是讓干涉儀中的干涉條紋只和光走的路徑長度有關,通常相位補償片 所使用的材質厚度會和分光鏡用的一模一樣。若沒有相位補償片,經由參考鏡反射的那道光在分光鏡 中多走了兩趟,其原因為分光鏡所鍍的膜通常只鍍玻璃的單側。而相位補償片在同調光量測中會變的 特別重要,由於在量測微小的微位移與相位無關,所以我們在實驗中可以忽略此項。光擴束器與平行 光透鏡主要是讓入射雷射光束進入干涉儀後有一個適當的光束大小及分散角,否則雷射光點太小便不 易觀察到同心圓的干涉圖形。

另外,由於光會繞射,干涉儀中的兩道光均有個別的波前,若干涉儀中兩道雷射光之準直度都很 完美,我們便可透過 CCD 相機看到一個同心圓,因爲輸入的雷射光及干涉儀中的光學鏡組均是圓形 對稱的。同心圓外緣所形成之干涉條紋的光程差與圓心附近所形成之干涉條紋的光程差是不同的。這 種情形可由以下所展開的圖 2 中看出來。若參考鏡與量測鏡相對於分光鏡相距 d,光點 p 在參考鏡與 量測鏡中形成的像點(分別為 p'與 p"),從觀察者的角度 θ 來看, p'與 p"之間將有一個 2d cosθ 的光程 差。假使這光程差剛好是波長的整數倍

$$2d\cos\theta = m\lambda\tag{1}$$

觀察者就會看到建設性干涉的亮紋,若式(1)中的光程差是二分之一波長加上整數倍的波長,觀察者就 會看到破壞性干涉所形成的干涉暗紋,因此在不同的觀察角度 *θ*上會形成明暗相間的條紋。



圖 2 麥克森干涉儀展開示意圖

二、雷射干涉儀之量測原理

由於雷射技術迅速的發展,因此在傳統的麥克森干涉儀中,若採用的光源改成雷射光,其同調長度可 拉長,也就是量測光和參考基準光兩道光的光程會被拉長,此原理即被用來作微小距離檢測之用,因 此叫作雷射干涉儀[1]-[8]、[13]-[15]。

如果我們假設麥克森干涉儀二片反射鏡的調整非常精確,二道光束幾乎平行重合,因此 $\cos\theta=1$ (因為 $\theta=0$ 度), 透過式(1)可得到明紋移向暗紋之方程式變為

$$d = \frac{m\lambda}{2} \tag{2}$$

由式(2)得知,m當作 CCD 相機擷取到干涉圖形的變化量,當m 變更為1時,d 必變更為λ/2。根據 圖2可知量測鏡與參考鏡的光程接近時(即兩臂等臂的條件),條紋變得很寬。如量測鏡與參考鏡的光 程越來越遠時(即兩臂漸漸非等臂的條件),則干涉條紋呈現週期性由大到小的圓形變化。利用這個條 紋變動量便可去計算微位移的距離。

如果使用類似光學尺的條紋監視及計數方式 ,將使整個系統的造價非常低廉,那麼何以要自行 架設雷射干涉儀?在此列述如下:

(一)光源方面

麥克森干涉儀通常採用單一波長的雷射,一般是氦氛雷射。而一般雷射干涉儀則採用根據齊曼效應 (Zeeman effect)產生的雙頻氦氖雷射。由於雷射干涉儀所使用的光源爲氦氖穩頻雷射,是爲了避免當 雷射光源強度及波長有變化時將使光干涉的結果產生不良的誤差,因此雷射干涉儀之雷射必須要有穩 頻裝置,而一般的光量測方式較不需要,這也使得雷射干涉儀價格始終降不下來(價格從臺幣160萬 至 500 萬都有)。

(二)反射鏡部份

一般麥克森干涉儀採用平面繞反射,而雷射干涉儀所採用的則是立方角反射鏡,其可容忍較大的光軸 角度偏差量。目前雷射干涉儀都採用立方角反射鏡 (corner cube),這是為了對準各道光束之中心,立 方角反射鏡可以將入射的光線以平行於入射角度的方向將光線反射回去。原理就如同高速公路兩旁的反光交通設施一般,因此不須費心去考慮反射鏡片中心是否對準反射鏡片、是否傾斜等問題。這一點和使用平面反射鏡差別很大,在操作麥克森干涉儀時,如果反射面鏡稍有傾斜,當光路很長時,光點的偏移量就會非常大。除此之外,使用立方角反射鏡,也可避免雷射光有反射光點反射回雷射共振腔,造成雷射光輸出雜訊的困擾。

(三)分光鏡部份

一般麥克森干涉儀採用1:1的分光鏡,而雷射干涉儀採用偏極分光鏡,使信號的損失減為最低。在一般的雷射干涉儀中,偏極分光鏡將雷射光束分成雙頻兩道光,在機構上並不旋轉雷射光束的極性,因此最後仍然重返原來的位置。

綜合上面所述,便可知道在量測上,為什麼雷射干涉儀的架構會比麥克森干涉儀複雜的原因。但 由於雷射干涉量測技術在近代被廣泛的應用,經過多年的演進,並與電子技術、計算機技術結合,現 今所使用的雷射干涉儀可以分為兩大類,一是雙頻雷射干涉儀(Hetrodyne Interferometer)。另一是單頻 雷射干涉儀(Homodyne Interferometer)。

目前商用雷射干涉儀大多數使用雙頻雷射光源,優點是利用量測干涉訊號之頻率,以求得物體之 位移量,位移訊號是載於 AC 訊號之上,所以較不受低頻雜訊干擾,可量測距離較長,因此適合發展 成通用型雷射干涉儀,但其缺點是需要有複雜的電子電路來設計硬體,且造價昂貴。而在單頻雷射干 涉儀方面,其優點是原理簡單,元件成本較低,缺點是藉由量測干涉訊號之強度變化,來計算物體的 位移量,位移訊號是載於 DC 訊號之上,所以在抗雜訊方面能力較差,同時需要精密的校準,故只適 用在單一特定功能並且有限制量測範圍之量測儀器上。

三、數位影像處理基本原理

一個基本的數位影像處理系統應包括電腦計算或儲存記憶單元,以及顯像或記錄單元。如果要處理擷 取的影像,則必須再加入擷取單元,其基本架構如下圖3所示[9]、[11]、[16]。



圖 3 數位影像處理的基本架構

首先系統透過數位化器擷取到影像,然後再將影像傳送到電腦作處理,當電腦接收到影像的資訊後,會先將影像暫時儲存在記憶體之中(即隨機存取記憶體,RAM),接著再將影像轉成實際的影像,經由顯示器輸出。其中紀錄是指以列印或是其他「永久」性呈現影像的方式,有別於先前由顯像裝置所呈現的影像在電源關閉後就消失的狀況。

上述的各個基本方塊圖,即是所有影像處理作業的基本流程架構。一般,一個典型的影像處理系統,是依據 256×256 的影像解析度以及 8 位元的亮度分布。因此,本研究將以此標準來做各種影像處理技術的探討。

畫像像素點處理是最基本的影像處理技術,通常是用於影像對比強化。基本上,它是改變每個輸入影像像素的亮度值(gray level),再放置輸出影像中對映的像素位置上。每一個畫像像素均各別地被 處理,例如:在座標 *I*(*x*, *y*)上的一個畫像像素被處理於附著在 *O*(*x*, *y*)的座標上。而必須注意到的這 種點處理,僅改變其亮度型態,其空間組成並沒改變。我們可以下面的數學式表示:

$$O(x, y) = M[I(x, y)]$$
(3)

M 稱為對映函數(mapping function),意即輸入影像上之每一畫像像素均將被處理。而其座標(x,y)和輸出的座標(x,y)是一致的。如果僅作亮度的變化,意即是此函數 M 只是一個亮度的對應函數。意即將輸入影像經過 MAPPING 函數的運作之後得到輸出之影像。例如:將照片中之正片變成負之影像, 通常稱為互補影像作業(complement image operation),其結果即是將一張相片拍成底片,即將輸入影 像黑的部份變成白的,而白的部分變成黑的。這是一個相當有用的作業,因為我們了解,眼睛對於暗 區域的對比變化感覺較為敏感。透過此種處理,我們明亮區域所做的對比變化,雖不易觀察,但經轉 換成負片相片時,呈現於暗區域之中,我們便很容易地察覺。如圖 4 所預期的,即黑暗部分亮度為 0 會對應到亮度值 255 的白亮部份。反之,亦然。其中,所有亮度值均有一個相對應的對應值[10]。



上述我們是將一張影像上的像素亮度對應到輸出的影像,現在,我們要對應的是兩個像素的亮度。其中,各別來自兩張輸入影像中的其中一張,而形成的一個輸出影像。再次強調,我們所討論的點處理,即是每一個像素均勻獨立地被處理。雙重影像的對映函數,處理起來較爲複雜。以8位元的輸入像素而言,每一點均擁有256種不同亮度之其中一種。由於每一個像素均是獨立的,所以,共有256×256不同的輸入組合,映到256種不同的輸出亮度,它的函數爲三度空間,因此很難被理解,於是我們通常以組合函數(combination function)來命名。用此名詞是非常恰當,因此他是由兩個輸入影像所組合的。雙重影像點處理可由下列數學式表達:

$$O(x, y) = I_1(x, y) \& I_2(x, y)$$
(4)

*I*₁(*x*, *y*)及*I*₂(*x*, *y*)分別代表兩個不同的輸入影像, & 的符號代表組合函數, 其意義是所有影像中的像素均要被處理到。組合函數可以是數學運算或是邏輯運算, 如加、減、乘、除、AND(及)、OR(或)、XOR(互斥或), 有了這些運算的功能, 我們可以除去影像雜訊或將兩個影像重疊組成新的影像, 而減

法的技術可提供一種背景物的消除,且易於偵測目標之目的運動[9]、[11]、[16]。

參、研究成果

一、系統簡介與架設

(一)系統簡介

本研究量測系統如圖 5 所示。由於雷射干涉儀對於環境的擾動非常敏感,需要在光學桌上架設以隔離 干涉系統以外的環境影響。其結構部份主要可分為雷射光源、麥克森干涉儀、受控平台與光電檢測器。 1.雷射光源:使用單頻 He-Ne 光源(線性極化 500:1),輸出波長為 632.8nm 之紅光(功率為 10mw)。 2.麥克森干涉儀:包括空間濾波器(物鏡的放大倍率為 20 與針孔的直徑為 10 μm 組成)、分光鏡(平整 度為 λ/4)、參考鏡(平整度為 λ/4)。

3.受控平台:為一台雙軸 XY 撓性控制平台,其利用類音圈馬達產生之推斥力來使平台驅動。
4.光電檢測器:使用 CCD(型號為 TM-6740CL)來偵測干涉條紋的明暗條紋變化,同時將 CCD 所記錄的干涉圖形訊號送到監視器和影像擷取卡(型號為 Matrox Solios XCL),藉由 Intellicam 的介面軟體, 我們可調整 CCD 的解析度,除此之外還可設定影像暫存、擷取數據數度等等。通常我們的實驗設定為 256 灰階記錄光強度、640×480 的圖片大小與 30fps 的顯示速度。



圖 5 雷射干涉儀量測系統配置示意圖

(二)系統光路架設描述

1.首先架設雷射光源,並同時調整雷射光之直線性。

2. 雷射光束穿過空間濾波器後發出之球面光波,同時調整光源能量,使其集中發散出去並產生點光源, 儘可能將點光源調整到無繞射現象產生。

3.光波通過分光鏡後形成反射光波(參考光)及穿透光波(量測光)。分光鏡之部分反射膜係在後層,因此在前層會有些微的光波被反射,由於反射強度太弱,故所引起之干擾可以忽略不計。因此我們只單純討論後層鍍膜層所引起之反射。

4.光波經過分光鏡形成的參考光會折射到參考鏡上,另一道量測光會穿透分光鏡照射到受控平台之平 面鏡,接著,參考鏡會反射一道光穿透分光鏡到 CCD 面前,而受控平台也會反射另一道光到分光鏡 再折射到 CCD 面前,最後此兩道光交會於 CCD 面前,並透過 CCD 來擷取干涉條紋。

5.假設兩道光有作干涉現象,但沒有干涉條紋,其原因為參考鏡和受控平台兩者不成垂直放置而略有 偏差,則此時固定受控平台,調整參考鏡的鏡面垂直反射,直到出現干涉條紋為止。

二、雷射干涉儀系統

在量測開始之前,必須做幾樣檢查和準備工作。首先打開紅光氦氖雷射,一般來說需暖機 30 分鐘以上,光源的品質與強度才會穩定。暖機到量測之間,可以先調整雷射的直線性、產生合適的點光源與適當調整光路以產生可見的干涉圖形。上述所說雷射之直線性與產生合適之點光源,都是實驗上基本的校正,所謂調整光路,是將量測臂(分光鏡到受控平台的距離)與參考臂(分光鏡到反射鏡的距離)這兩臂之間的距離調成相等,即所謂的等臂(Equal arm)。為了達到低成本,該系統是以人為的方式調校,其精度難免會有誤差,若是改以電控之線性平台來做調校,其精確度可提高更多。圖 6 為雷射干涉儀系統實體圖。



圖 6 雷射干涉儀系統實體圖

前述的準備作業完成時,然後打開監視器、CCD 與受控平台的電源,開始擷取影像,透過 CCD 擷取 到的影像經由擷取卡做數位影像處理分析,達到控制器動態回授的補償與分析功能,最後由 Visual Basic 控制系統介面呈現出即時的動態顯示。表1 為雷射干涉儀系統規格表。

表1 雷射干涉儀系統規格表

He-Ne 雷射	波長為 632.8nm 之紅光(功率為 10mw)。	
空間濾波器	物鏡的放大倍率為 20 與針孔的直徑為 10µm 組成。	
分光鏡	平整度為 1/4。	
反射鏡	平整度為 λ/ 4。	
CCD	640×480的圖片大小與200 fps的高顯示速度(可藉由外部觸發改變顯示速度)。	

本研究選用之影像擷取卡為泰洛公司代理 MATROX 之 SOL 6M CL, Solios 為全方位型的影像擷取卡,可支援類比(Solios XA)或數位(SoliosXCL)攝影機,其中 XA 版可提供 4 組獨立標準或非標準類比輸出,每組頻道取樣率高達 65MHZ.而數位型的 XCL,可支援兩組 CameraLink base 或壹組 medium 標準攝影機,這款即將登場的多功能影像卡,可相容於 PCI-X 匯流排技術、具備由 Matrox 專屬設計的 Oasis ASIC 客製化晶片處理組、即時像素編排(image formatting)、具備前處理能力(不佔用 CPU 的效能)與 680MB/sec 的進像速度。同時為搭配我們所選取 CCD 的設備規格,所以此影像擷取卡選用數位型的 XCL,相當適合於本實驗之快速及精確需求[12]。

本研究使用的控制器程式為 Visual Basic 6.0 專業版,作為撰寫控制程式的工具。Visual Basic 它 是一種為電腦專業人員提供了一套功能完整的程式開發工具,以便開發解決方案。同時還包括了提供 完整線上文件的 Microsoft developer network CD(MSDN 光碟)。不單是如此, Visual Basic 6.0 配合 PCI 6208 系列訊號擷取卡可得強而有力的資料擷取、資料分析與結果呈現。除此之外,更提供量測後的數 學分析與顯示功能。本研究之控制介面及程式可見圖 7。圖 7 的左邊可即時顯示所擷取的干涉圖形, 以利於方便系統校整;而右邊可即時顯示所擷取的資料數據變化介面。



圖 7 Visual Basic 控制系統介面圖

四、系統穩定性測試

我們主要的方法是利用干涉圖形的明暗變化來檢驗系統的穩定性,而理想的雷設干涉儀系統,則干涉 圖形為一恆定的光強度值。然而周邊的環境影響,例如:空氣的溼度與擾動。或是光學桌的等級影響, 都會影響到整體系統的穩定性。主要的量測方法,是連續擷取兩百張的干涉圖形,分析某一點光強度 值的變化量,在此我們是假設圖片的中心點。如圖 8(a)所示,如果當使用一般的反射鏡當作待測物來 檢測系統的穩定性,可觀看出我們系統的穩定性非常高。如圖 8(b)所示,若當待測物改使用我們所設 計的受控平台時,可觀看出系統穩定性的變化量其實還蠻大的,原因在於可能每次受控平台的撓性臂 所造成不規則振動,導致整體量測結果的數據呈現不穩定的狀態。



(b) 受控平台圖 8 系統穩定性量測數據。(a) 反射鏡(λ/4); (b) 受控平台

五、即時系統驗證

由於本系統 CCD 最高的擷取速度可達到 200fps,若要配合受控平台運動的速度,達到動態回授的控制與分析,則必須驗證每次 CCD 所擷取到的資料是否有遺漏,如果有遺漏,即無法達成即時系統量測。其主要的方法是利用 Visual Basic 所撰寫的程式驗證即時系統,在每次迴圈做即時資料繪圖的同時,迴圈在一開始的同時,假設一個起始時間,而迴圈結束後再設一個結束時間,最後將結束時間減去起始時間,除以每次迴圈的資料比數,在此我們程式所撰寫每次迴圈的資料筆數是 130 筆資料。如圖 9 所示,當 CCD 的擷取速度調整到 30fps 時,則在 Visual Basic 的介面上亦可看到即時顯示 30fps 的數據。以此類推,不停改變 CCD 的擷取速度,則 Visual Basic 的程式介面也會不停的即時更新。

起始時間	結束時間	結束時間-起始時間
43680.671	43680.671	4.31200000
CCD擷取速质	雙(fps) 單	【點光強度數値即時顯示
30.1484230	D. 9	1

圖 9 即時系統驗證數據

本研究著重的特點是架構簡單、成本低廉、硬體需求不須太高、以及高準確性與穩定性,同時能達到 動態回授的分析與補償功能的訴求,去建構出一組雷射干涉儀量測系統。此受控系統使用研究室設計 之電磁致動裝置提供致動源,推動一結構簡單的單層無接面式撓性移動平台;然後以自組雷射干涉儀 系統,做為定位系統的位移感測器。此外,傳統的雷射干涉儀,均透過光接受器來擷取數據,無法做 系統上的校正,使整體系統的準確度無法做的出有效的改善。在此我們透過 CCD 的方式擷取影像數 據來做分析,不僅可以明確的校正整體系統,並進而提高其準確度。

由最後的實驗結果發現,在系統校正中,我們可以透過CCD的方式,可直接地觀察干涉圖形的 變化,來提高實驗數據的準確度。同時,我們還可以透過外部觸發的方式改變CCD的擷取速度來搭 配高速授控平台的量測。整體系統穩定性方面,因容易受到週遭環境的影響,例如:空氣的溼度與擾 動,以及光學桌等級的影響,都會直接關係到整體系統的穩定性。在最後實驗數據中,當使用待測物 為反射鏡時,可看出系統穩定性的變化量很低,若將待測物改為受控平台時,依據實驗數據,可看出 系統穩定性的變化量很高,其原因在於受控平台撓性臂所引起的不規則振動,導致整體量測結果的數 據呈現不穩定的狀態,若在未來可以改用較佳的受控平台當作待測物,在量測結果上想必會改善很 多。在即時系統方面,因為我們截取到的數據資料是影像,往往很難達到即時的系統,因為影像處理 的速度較慢,在此,我們利用撰寫 Visual Basic 的程式來驗證即時系統,當我們不停地改變 CCD 的擷 取速度時, Visual Basic 程式介面也會不停地即時更新。

本研究未來有許多可以深入探討與改進的地方,但現階段主要是提升系統穩定性與絕對位置的量 測為主。在穩定性方面,可探討如何降低周邊環境的影響與提高光學桌的防震等級。絕對位置的量測 計算方面,必須有參考頻率和量測頻率,根據督卜勒效應,必須得之頻率的變化才可觀測出絕對位移 量的變化,因此未來可提高雷射的裝置,例如:使用雙頻雷射裝置。此外,我們可以著手於位移量測 相關的演算法與多軸自由度的量測,或是改用不同受控平台的架構,去量測其結果和進一步去分析比 較。如果能克服以上幾項問題,將更能表現實驗設備之效能與達到動態回授的分析和補償功能。

伍、參考文獻

- [1] 吳光雄 編著 (2002):光學實驗,高立圖書有限公司
- [2] 吳漢雄 編著 (2002): 工程光學與實習, 俊傑書局股份有限公司
- [3] 胡錦標 博士編著 (2000):精密光電技術, 高立圖書有限公司
- [4] 胡錦標 曹培熙 陳世萍等 編著 (1976): 雷射光電系列(一)- 雷射光電實驗, 國立台灣大學慶齡工業發展基 金會合設工業研究中心
- [5] 陳席卿 編著 (2004):雷射原理與光電檢測, 全華科技圖書股份有限公司
- [6] 黃衍介 編著 (2005):近代實驗光學, 台灣東華書局股份有限公司
- [7] 黃文雄 編著 (1998):儀器總覽-光學量測儀器, 行政院國家科學委員會精密儀器發展中心
- [8] 楊伯溫 博士 編著 (2004):光電工程實驗, 全威圖書有限公司
- [9] 張錚 編著 (2005):Mat lab 教學範本程式設計與應用,知城數位科技股份有限公司
- [10] 衛祖賞 編著 (1990):數位影像處理, 全華科技圖書股份有限公司
- [11] 繆紹綱 編著 (1999):數位影像處理 活用-Matlab, 全華科技圖書股份有限公司
- [12] Available website: http://www.nowa.com.tw/newpage//product_details.cfm?AdminType=Product&ID=119

- [13] Available website: http://cslin.auto.fcu.edu.tw/eleme/premea/index.htm
- [14] Available website: http://140.134.32.136/scteach/mik/chm_1.html
- [15] DANIEL MALACARA. (1992) : Optical Shop Testing , John Wiley & Sons, Inc.
- [16] John Lawall. (2004) .Interferometry for accurate displacement metrology. OSA on Optics & Photonics News.
- [17] L. Z. Cai and Y. R. Wang. (2000). Simple real-time 3-D displacement measurement by fringe analysis using a photorefractive interferometer. *Optics and lasers in engineering*.
- [18] X. Wang , X. wang, et al. (1999). Photothermal modulation of laser diode wavelength: application to sinusoidal phase-modulation interferometer for displacement measurements. *Optics & Laser Technology*. pp. 559-564.
- [19] X. Wang, X. wang, et al. (2001). Laser diode interferometer for measuring displacements in large range with a nanometer accuracy. *Optics & Laser Technology*. pp. 219-223.
- [20] X. Liu, W. Clegg, et al. (2001). Polarization Interferometer for Measuring Small Displacement. *IEEE Transaction* on Instrumentation Measurement. vol. 50, no. 4.