

掃瞄式雷射測距之研製

徐力弘／國立虎尾科技大學 光電工程系 教授

黃文鴻／國立虎尾科技大學 光電工程系 研究生 · 陳雲翔／國立虎尾科技大學 光電工程系 碩士

本文獨創出追蹤鎖定檢測位置的斜向三角量測方法，從而解決了斜向光點位置變動的致命問題外，並將此一結果應用於”影像測量儀”之中，使該產品能快速分析待測物的幾何參數。

關鍵字：斜向三角量測、影像、幾何參數

1. 前言

非接觸影像量測儀是用成像技術來定量分析待測物的尺寸、形狀與面積。此一產品的性能提升有賴於精密的測距技術，然而高精度的雷射位移計除了價格高之外並受限於現有的規格，往往不能符合實際的需要，必須更改設計滿足位移計的規格。為此，本文採用外加式之光電裝置來解決此一問題。由於不同的量測範圍有不同的規格，為了配合未來的發展，應掌握不同的三角測距的設計與製造能力，且該技術能與影像設備結合，因此本文的目標在完成一台低價位及高精度之三角量測設備。

雖然雷射之父T. H. Maiman早在1960年首創世上第一台的雷射(紅寶石雷射)後不久，Hall及Fenner等人即在1962年研發出第一顆半導體雷射，從此邁入雷射的年代。於是各種非接觸量測的雷射測距技術在60年代開始被應用在軍工業的領域，然而直到70年代才出現結合雷射和三角量測技術的雷射位移計(Laser Displacement meter)[1-2]。

由於早期雷射位移計的光機結構上有許多缺點，因此如何改良系統結構與缺點是研究的主題。於是有人根據幾何光學的Scheimpflug條件[3]來設計系統，可有效降低像差的影響。此外待測物有曲面或傾斜的問題，因此鄭元進[4]提出了以四個檢測器平均環繞雷射光軸的方式來解決此一問題。在針對如何增加量測範圍的問題中，涂輝[5]提出以無繞射光束的方式來改善投射系統，以達增加量程的目的。在針對待測物表面反射率變化的問題上，一般用自動調整CCD的增益或光源功率的方式來解決問題。在訊號處理方面，孫軍利[6]比較了各種數學演算法與各種濾波方法，以尋找最適合的演算法。此外，針對系統各參數間的關聯性上，金文燕[7]建立數學模型並用Matlab推算各參數的影響。

本文分析了影像量測儀的共軸問題及三角測量法的發展規律後，根據本研究室的研發能量，決定發展斜向式的三角量測的能力，以解決系統共軸量測的問題。

2. 研究方法

2-1 原因與理由

三角量測探頭從原理上可分類成：

- (1) 散射式
- (2) 反射式

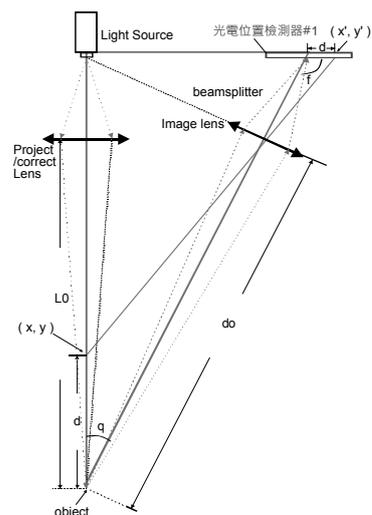
其中反射式雖然具有奈米級的精度，但量程只有幾微米或幾十微米，不太符合一般工業界的需求。而散射式的三角量測探頭是一種點對點的成像系統，需要一個良好的光學系統與位置檢測器。

而影像量測儀是一種二維檢測系統，藉由光學放大系統及CCD影像系統的整合，可定量分析待測物體的尺寸與形狀。

傳統三角量測系統的系統結構如圖1所示，由於檢測精度與光點的型狀與大小有關，因此系統中使用透鏡來縮小光點，使量測範圍內的光斑維持在合理的尺寸。

三角量測系統設計的程序中可分成如下的步驟：

- 【第一步】決定系統的架構
- 【第二步】建立光束投射系統
- 【第三步】檢測器的選用



(圖1) 傳統直射式三角量光學架構圖

【第四步】成像系統的分析與建構

【第五步】修正系統以符合應用環境

本節將依設計步驟逐項說明。

【第一步】決定系統的架構

常見的三角量測結構可分為反射式檢測系統及散射式檢測系統，必需依功能及應用範圍來決定適合的檢測結構。

【第二步】建立光束投射系統

不論是散射式或是反射式的三角量測系統，都需要一個高品質的投射光束來確保檢測的精度，因此在決定檢測架構後就要考慮光束投射系統的問題。目前常見的光源有半導體雷射、氣體雷射及LED等。但光源必需從光束品質、光源體積、功率控制等各方面來進行評選。本文採用的是波長660nm的半導體雷射。

【第三步】檢測器的選用

在決定光源後需考慮到搭配的檢測器，三角量測系統中常見的光檢測器有兩種，分別為：

1. 位置敏感檢測器 (Position Sensitive Detector, PSD)
2. 線陣列檢測元件 (Linear Array Detector, LAD)

由於PSD的光斑位置檢測能力沒有LAD來的優越，且LAD上的光斑訊號能夠藉由數學演算法來提升精度至0.1Pixel以上。從感光區長度的來看，PSD的感光區長度有限，且越長的感光區的非線性誤差越大，而LAD A一般都有數公分長度的工作區，因此本文選用線陣列LAD做為光檢測器。

【第四步】成像系統的分析與建構

若要達成高精度量測的目標，成像系統中待測物上的光斑需能清晰成像於檢測器上。根據幾何光學的理論，角度 θ 、 ψ 及成像透鏡的位置必需符合Scheimpflug條件，才能滿足待測物在移動時的物像對應關係，即物平面、成像面與透鏡的主平面等三個平面交會於一點，將此一條件應用於量測系統中可得(1)式。

$$\tan\theta = \frac{d_i}{d_o} \tan(\pi - \phi) = M \tan(\pi - \phi) \quad (1)$$

其中 θ 為雷射光束與成像透鏡光軸的夾角， ψ 為檢測器表面與成像透鏡光軸的夾角， M 為成像系統的橫向放大率，各參數間互相影響，因此在架設成像系統時必需了解 θ 、 M 及 β 對系統的影響。

在散射式的檢測系統中，由於成像系統所接收的是待測物表面的散射光，待測物表面的散射光強度會隨著 θ 角的增加而降低，且 θ 過大時甚至會造成光強度不足使得CCD無法檢測，但角度過小時除了使得光機結構的安排發生問題，也會

因光強過高使CCD飽和而無法正確的測出光斑分佈，必需根據實際狀況進行取舍。本文在考慮光機結構的空間限制後選擇的 θ 角為37度，此一角度有將近85%的散射光強度。

【第五步】修正系統以符合應用環境

在設計出符合需求的三角量測系統後，可依實際的狀態在合理的範圍內來進行結構的調整，以滿足實際的情況。

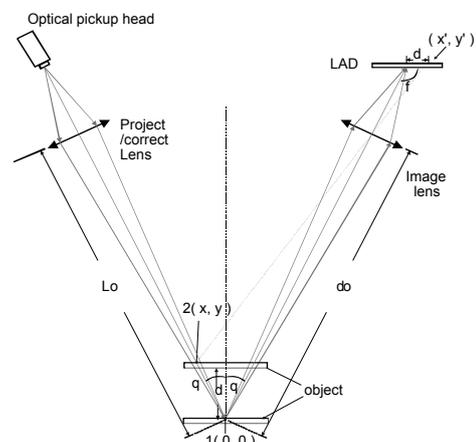
2-2 系統架構

由於“影像檢測儀”是一種影像量測設備，基本上是一台工具顯微鏡，光軸部份除非使用同軸光並修改原有的光機結構，否則無法加入一般的三角量測探頭，因此採用外加式的精密測距系統最符合商業的經濟效應。

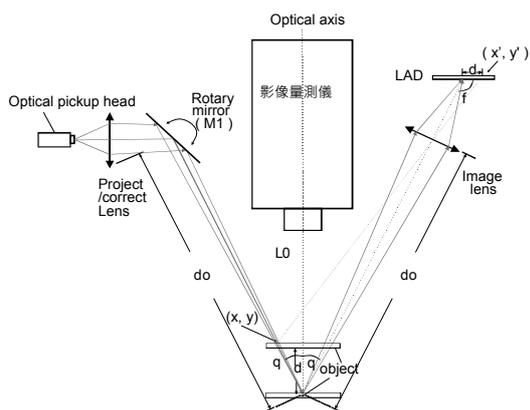
本文根據設計的需求、學理的分析、及相關技術的可行性，判定三角量測及LAD感測器所組成的探頭是最佳的選擇。

在解決同軸量測的問題上，本文採用斜向投射式的三角量測結構，如圖2及圖3所示。斜向光束入射的最大問題是測量光點隨工件位置改變，如圖2中的入射光點位置(光點位置1)發生偏移(由點1移動至點2)產生測量點改變的問題。由於顯微式影像系統本身有一台二維的CCD攝影系統，而影像系統在光軸位置上的像差趨近於零，有很高的精度。本文設計了如圖3的系統架構，其中三角量測系統加入了一個可控制角度的反射鏡(rotary mirror, M1)，當入射光束以 α 角入射後經反射鏡反射，然後打到工件上形成一個散射光斑，並且與顯微系統的光軸夾一個角度 θ ，而此一光點成像於位置檢測元件之上，經前置放大器及後級信號處理後計算出待測物表面的位置(軸向)。

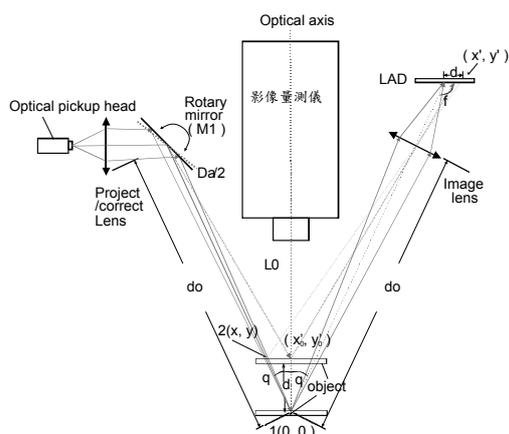
然而在工件位置發生變動後，散射光斑 $2(x, y)$ 將不在影像系統的光軸位置上，從而造成測量的誤差。為了解決此一問題，顯微影像系統將光點偏離光軸的資訊給控制單元，調整反射鏡M1



(圖2) 傳統斜射式三角量光學架構圖



(圖3) 本文的光學系統架構圖



(圖4) 旋轉控制光點示意圖

的角度($\alpha \rightarrow \alpha + \Delta\alpha$)如圖4的示意圖，使光點平移回光軸上($x0'$, $y0'$)，從而解決光點位置橫向變化的致命問題。由於採用回饋控制的方法，故本文採用單軸的掃描鏡模組。

由於採用成像光學的檢測架構，成像品質必然影響到量測的精度。而投射光束的尺寸與景深 Δdi 是光學設計的重點，因此投射光束的波形修整與聚集成像的能力至關重要。根據估計，在目標物(object)上的光點尺寸在 $100\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$ 之間，可滿足系統精度的需求。

本文的信號處理系統分成兩個部份，分別是：

1. 前級檢測系統 及
2. 後級信號處理系統。

前級部份由接收部及發射部構成，接收部的光電位置檢測器由線陣列電荷耦合元件(CCD)構成。而發射部則由雷射二極體(LD)與光檢測二極體(PD)構成，此一部份比較麻煩，其中PD是用來監測雷射光的功率，並回饋用來進行自動功率控制，以確保雷射的輸出功率維持恆定，而其中自動功率控制指的是平均的直流功率。而此一部份信號經比較器之後作為一個信號過高或過低的警示輸出信號。由於雷射二極體為一種二級體結構，因此有一個閾值電流(Threshold current)，

高過此一閾值才進入雷射的模式，另外，本文採用“直流準位調整”的方法進行預設準位的工作(Pre adjust)。

由於待測物體的反射率不一，因此回到光電位置檢測器的信號強弱不同。而後級處理有一定的動態區(dynamic range)，且在大範圍時有較大的非線性效應，因此本文回饋光檢測器上的信號來控制AGC電路的增益，使投射在待測物上的信號位準(檢測信號)維持恆定，不因反射率改變而使後級信號處理的工作點改變。舉例而言，當待測物反射率低時加強信號的振幅，碰到高反射率的待測物體時則降低信號的振幅，使落在光檢測器上的信號強度維持恆定。

3. 實驗方法與結果

本文的LAD是CCD。為了驅動CCD工作，本文根據Sony公司編號1XL526的這顆CCD的規格進行驅動，並以高速ADC IC轉換訊號，透過電腦進行演算及控制。

圖5為CCD搭配資料擷取系統擷取影像的時序圖，其中CLK是CCD的鐘準訊號，頻率為1MHz。而ROG是決定CCD內的訊號轉移至暫存器的時間。SHUT則是電子快門，利用半導體電路的方式來控制CCD的動作，以決定是否接收光線。首先必須先產生CLK、ROG、SHUT三個數位訊號來驅動CCD，以DMA的模式傳輸，暫存在資料擷取系統的FIFO記憶緩衝器中。



(圖5) Sony CCD ILX526A的時序驅動圖

當CCD接收了光訊號並轉換為電子訊號之後，透過輸入通道將資料擷取至資料擷取系統。資料會由一類比輸入的FIFO緩衝器以守住資料，以確保沒有資料的遺漏。而後資料會經過類比數位轉換器，將類比電壓訊號轉換為電腦所能接收的數位訊號。

然而對同步的FIFO緩衝器而言，在讀出資料和寫入資料時必須有相同的鐘準訊號，因此類比訊號的轉換頻率必須和數位輸出鐘準一致，唯有如此才能確保沒有資料的流失。然後訊號經過低通濾波器消滅雜訊，最後以DMA的模式將資料轉移至電腦緩衝器暫存起來。

由於待測物體的表面散射並非是均勻的，因此散射光的成像點與滿足反射定理的成像點之間

有一定的差異，造成檢測的誤差。若以CCD做為感測元件，則可通過影像處理的方法消滅之。

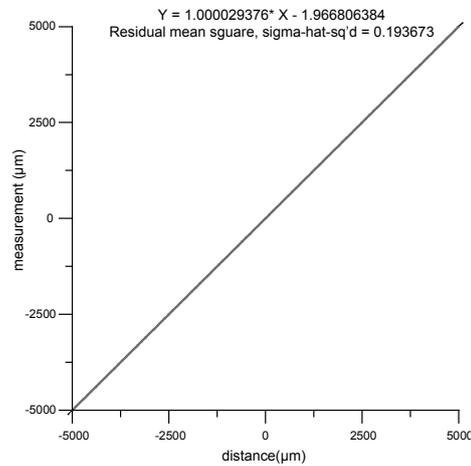
此外待測物的反射率及表面性質對測量結果有很大的影響，因此系統採用回饋的方式控制投射在待測物上的光點功率，以確保後級檢測系統的信號強度及在一定範圍內的檢測精度。特別是散射式雷射位移計的信號微弱，通常使用脈波調制以增加功率。採用脈波調制的好處是可破壞雷射光的同調性，降低光斑散斑的影響，從而調高測量的精度。

在完成驅動CCD陣列及藉由資料擷取系統抓取CCD所感測到的影像之後，便開始進行訊號處理的程序。本實驗在處理訊號上採用常見的訊號處理方法。步驟如下：

- (1)消除隨機雜訊：
- (2)消除DC準位：
- (3)濾波：
- (4)歸一化：
- (5)質心計算。

為了驗證測量的結果，本文對系統進行實測。首先測試-5mm、0mm及+5mm等三個位置的光斑波形，看是否符合設計的目標，基本上符合幾何光學分析的結果。

最後以精密平台為載具，並用SIOS干涉儀作為比對的工具，並以5 μm 為間隔對 $\pm 5\text{mm}$ 的範圍



(圖6) 在 $\pm 5\text{mm}$ 的量測範圍內校正後的檢測結果

進行測量，結果如圖6所示，圖中的橫軸為待測物的位置坐標，而縱軸則是校正後的測量結果，單位為微米(μm)。本文CCD的每個畫素的間隔為7 μm ，基本上由實驗的結果顯示本系統已達到 $\pm 5\text{mm}$ 範圍內精度達到2 μm 的規格。

4. 結論

本文針對工作距離120mm、檢測範圍 $\pm 5\text{mm}$ 、精度2 μm 的系統規格，完成一套雷射位移計的設計與組裝流程。此一系統經過實驗的驗證後，在工作範圍內的精度(位置檢測的標準差)好於2 μm ，此一系統經SIOS干涉儀的比對與校正後，二次曲線擬合的最大偏差量小於4 μm 。

致謝

本文由教育部99-100年度技專特色發展領域聯合技術發展中心及國科會編號NSC-98-2622-E-150-091-CC3之計畫支持，使本文得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

1. 董祐銓，雷射位移計的研究，國立虎尾科技大學 光電與材料科技研究所 碩士論文，2010
2. 徐力弘、黃文鴻、董祐銓，結合影像量測儀之雷射位移計系統，tsmea 台灣製造工程與自動化科技協會_產學合作專刊 2010，p26-32(2010)
3. Ajay K. Prasad and Kirk Jensen, "Scheimpflug stereocamera for particle image velocimetry in liquid flows", Applied Optics, Vol.34 Issue 30, pp.7092-7099 (1995)
4. 李碩仁、鄭元進，"單點雷射多探測器量測系統的研製"，機械月刊，25卷12期，374(1999)
5. 涂輝，無衍射線結構光三角測量及CCD攝像機定標的研究，華中科技大學，碩士論文，2006
6. 孫軍利，基於線陣CCD的激光三角測距傳感器數據處理算法的研究，上海交通大學，碩士論文，2006。
7. 金文燕，基於CCD的激光三角測距傳感器建模與優化研究，上海交通大學，碩士論文，2006。