

6. 結合影像量測儀之雷射位移計系統

黃文鴻¹、董祐銓²、徐力弘³

¹國立虎尾科技大學 光電工程系 研究生

²國立虎尾科技大學 光電工程系 碩士(兵役)

³國立虎尾科技大學 光電工程系 教授

摘要

非接觸影像量測儀是採用成像技術來定量分析待測物的幾何參數。此一產品的實踐有賴於精密的對焦技術與測距技術，而快速精準的對焦並不容易，而且成本較高，因此採用雷射測距與校正技術是本系統的核心技術之一，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，往往不能符合實際設計的需要，因此本研究以三角量測的技術來建構雷射位移計系統，首先根據工業上的檢測需求定出系統規格，然後再對各相關的參數如角度、系統靈敏度、橫向放大率等參數進行優化，最後完成結合影像量測儀之雷射位移計的架設與組裝。

關鍵字：幾何參數、測距、雷射位移計、三角量測

一、前言

非接觸影像量測儀是採用成像技術來定量分析待測物的尺寸、形狀與面積。此一技術的實踐有賴於精密的對焦技術與測距技術，而快速的精準對焦並不容易，而且成本較高，因此採用測距與校正技術是系統的核心技術之一，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，往往不能符合實際設計的需要，只好更改設計滿足雷射位移計的規格，不太實際。

為了與國外同品級產品競爭或提升產品的層級，該產品的對焦精度與速度是目前最需急迫解決的問題。如果採用外國現有的技術，則每台成本過高而無競爭力。因此本文採用外加入可測量物體位置之光電裝置來解決此一問題。本研究與該廠商反覆商討之後，參考國外三角探頭技術的發展趨勢，決定採用三角量測的技術。

由於不同的對焦範圍有不同的規格，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。而該技術易與影像設備結合，因此本計劃的目標在完成一台低價位高精度之三角量測設備，測量範圍與精度的比值至少5000（以100mm為工作位置的原點，測量範圍10mm時精度可達2 μ m以上），而測量速度為每秒1KSPS以上，而生產成本低於二萬元以下。

雖然雷射之父T. H. Maiman早在1960年首創世界上第一台的雷射(紅寶石雷射)後不久，Hall及Fenner等人也於1962年研發出第一顆半導體雷射之後，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]。

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[2]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上鄭元進[3]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[4]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，顏偉彬[5]提出了自動調整CCD的增益及調整光源功率的方式來解決此問題。在針對背景光及電路雜訊使訊噪比降低的問題上，張玉貴[6]提出了以正弦波調制及解調的方式來提升訊噪比。在訊號處理方面，孫軍利[7]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[8]建立數學模型並用Matlab推算各參數的影響。

二、研究方法

三角量測探頭從原理上進行分類大致可分成

(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成像系統，需要一個良好的成像光學系統與測量位置的檢測器。

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。

本文的系統結構如圖1所示，為了將三角量測系統與影像量測儀結合，因此在系統中加入分光鏡，使雷射光束的投射光軸與影像量測儀的光學的放大系統的光軸重合。

在圖1中雷射光經聚焦透鏡，分光鏡1及分光鏡2投射於待測物上。由於檢測精度與光點的型狀與大小有關，因此本系統使用聚焦透鏡來縮小光點，使量測的範圍內的光斑維持合理的尺寸。

由於影像量測儀需要照明光源來提升待測亮度，因此使用分光1將輔助光源的照明光投射於待測物上。

三角量測系統設計的程序中可分為以下的幾個步驟：

- 第一步：決定系統的檢測架構
- 第二步：建立光束投射系統
- 第三步：檢測器的選用
- 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其設計方法及理論。

第一步：決定系統的檢測架構

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，因此光源就成了在決定檢測架構後第一個要考慮的問題。目前在市面上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. 電荷耦合元件 (Charge-Coupled Devices, CCD)

由於PSD的光斑位置檢測能力沒有CCD來的優越，且CCD上的光斑訊號能夠藉由數學演算法進一步的提升精度至0.1Pixel或者更高的地步，而PSD則需依靠光源調變及相位鎖定的技術才能使位置檢測能力提升。從感光區長度的方面來看，PSD的感光區長度有限且越長的感光區在位置檢測時的非線性誤差越大，而CCD則無此問題，工作區一般都有數公分的長度，因此本文選用Sony公司的ILX526A線陣

列CCD做為光檢測器。圖2為ILX526A之脈波驅動的時序圖

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 、 β 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。

$$\tan \alpha = \frac{b}{a} \tan \beta = M \tan \beta \quad (1)$$

其中 θ 為雷射光束與成像透鏡光軸的夾角， β 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，而散射光的強度會隨夾角 θ 的改變而變化，其中 θ 為雷射光束與成像透鏡光軸間的夾角，圖3為實際測量不同夾角 θ 下的散射光強度的變化，橫軸為不同的角度 θ ，縱軸為歸一化處理後的散射光強度，從圖2中可看出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。

根據圖1及幾何光學中可以得到物與像的關係整理如下：

$$P = \frac{bD \sin \beta}{a \sin \beta - D \sin(\theta + \beta)} \quad (2)$$

$$D = \frac{aP \sin \beta}{b \sin \theta + P \sin(\theta + \beta)} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{P}{D} = \frac{b \sin \beta}{a \sin \beta - D \sin(\theta + \beta)} \quad (4)$$

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (5)$$

其中 a 為物距， b 為像距， f 為焦距， θ 為雷射光

束的投射光軸與成像透鏡光軸的夾角， β 為檢測器與成像透鏡光軸的夾角， P 為在檢測器上光點相對於 P_0 的距離， D 為物體相對於 D_0 點的距離， L_1 為聚焦透鏡， L_2 為成像透鏡。

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，可依實際的狀態或條件在合理的範圍內來進行結構的調整，以滿足實際應用的情況。以應用於「影像量測儀」為例，由於雷射位移計系統不能阻擋量測儀的光路，因此需要修改量測系統的光路來配合影像量測儀的光路系統，這才能共軸檢測同一物體位置。

在原系統光路中在雷射光源的位置會阻擋測量測儀的檢測光路，因此需變動雷射的位置，本文利用一個分光鏡將雷射位置轉動90度與量測儀共光路，結構如圖1所示，此即為「影像量測儀」結合三角檢測系統之示意圖。

三、實驗方法與結果

圖3為CCD搭配資料擷取系統擷取影像的時序圖。首先必須先產生CLK、ROG、SHUT三個數位訊號來驅動CCD，數位訊號從電腦到資料擷取系統之間，以DMA的模式傳輸到資料擷取系統的數位輸出FIFO記憶緩衝器暫存起來，當FIFO緩衝器內的資料要更新為下一個數位訊號時，必須使用資料擷取系統其它子系統中的一個內部訊號來當作數位輸出訊號鐘準，在此我們選擇使用計數器脈衝輸出來當作數位輸出訊號鐘準的來源訊號，並將計數器的頻率控制在1MHz輸出，之後經由資料擷取系統的三個輸出通道以很快的切換速率將三組數位訊號傳至CCD，使CCD驅動並接收光訊號。

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。資料會先經過一類比輸入FIFO緩衝器，FIFO緩衝器可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。然而對一個同步的FIFO緩衝器而言，在讀出資料和寫入資料必須使用相同的鐘準訊號，因此類比訊號的轉換頻率必須保持和數位輸出鐘準一樣的1MHz，當一樣本由電腦輸出即有一樣本由電腦輸入，唯有如此才能確保沒有資料的流失。訊號會再經過低通濾波器，減少不必要的雜訊，最後以DMA的模式將資料轉移至電腦緩衝器暫存起來。

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數學插值法，再加上其他訊號處理的方法。整體的步驟詳述如下：

- (1)消除隨機雜訊：
- (2)消除DC準位：
- (3)濾波：
- (4)歸一化：
- (5)曲線擬合。

本文為了驗證測量的結果，對系統進行實驗。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，分別列於圖4、圖5及圖6，基本上符合幾何光學分析的結果。

然後以精密平台為載具，並用SIOS干涉儀作為比對的工具，並以 $5\mu\text{m}$ 為間隔對 $\pm 5\text{mm}$ 的範圍進行測量。每次測量取樣100次，並進行標準差的分析，總共測量了六次，結果如圖7所示，顯示有很好的重複率。

此外，將標準差的測量結果分別表示成圖8到圖13。圖中的橫軸為測量範圍的位置坐標，而縱軸則是以畫素為單位的標準差，每個畫素的間隔為 $7\mu\text{m}$ ，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 $2\mu\text{m}$ 的規格。

四、結論

本文針對工作距離100mm、檢測範圍 $\pm 5\text{mm}$ 、精度 $2\mu\text{m}$ 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 $2\mu\text{m}$ ，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 $5\mu\text{m}$ 。

五、致謝

本文由產學合作案98AD23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. stereocamera for particle image velocimetry in liquid flows", Applied Optics, Vol.34 Issue 30, pp.7092-7099 (1995).
2. 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，201A Jay K. Prasad and Kirk Jensen,

"Scheimpflug stereocamera for particle image velocimetry in liquid flows", Applied Optics, Vol.34 Issue 30, pp.7092-7099 (1995)

3. 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)
4. 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
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. 張玉貴，正弦波光強調制式雷射三角法高精度測距技術研究，天津大學，碩士論文，2005。
7. 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。
8. 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。

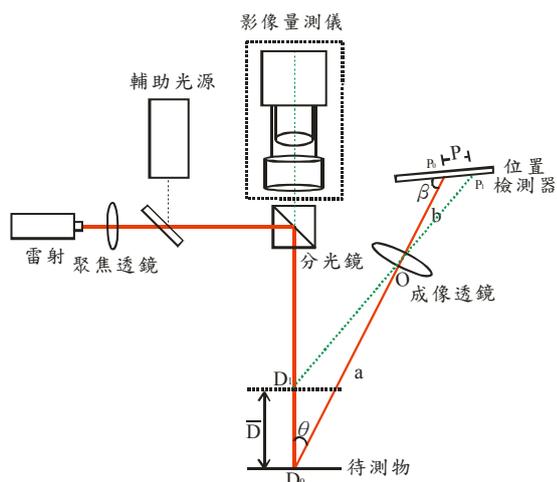


圖1：系統結構如圖

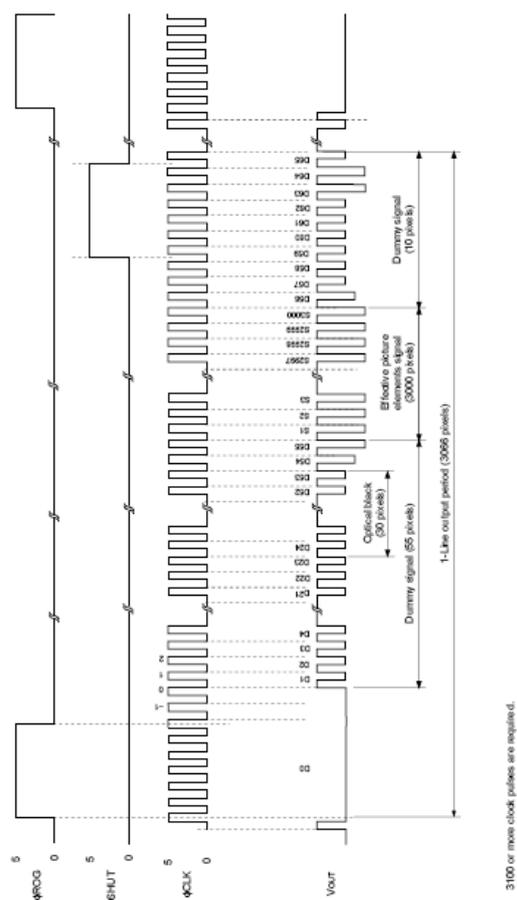


圖2：Sony CCD ILX526A之脈波驅動的時序圖

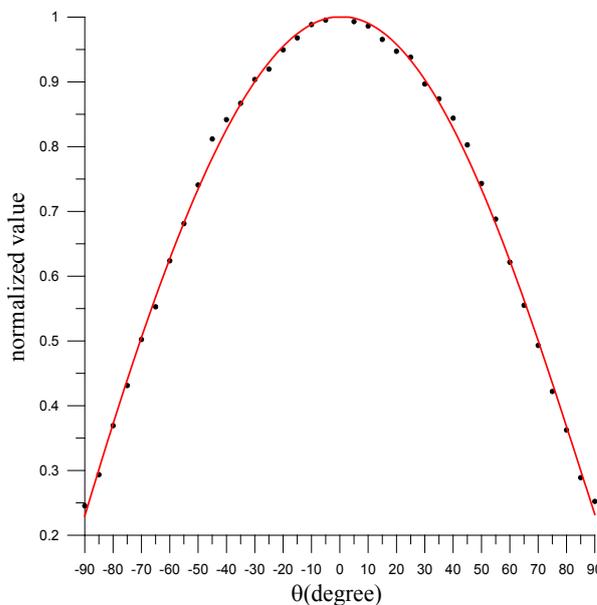


圖3：散射光強度與角度的關係

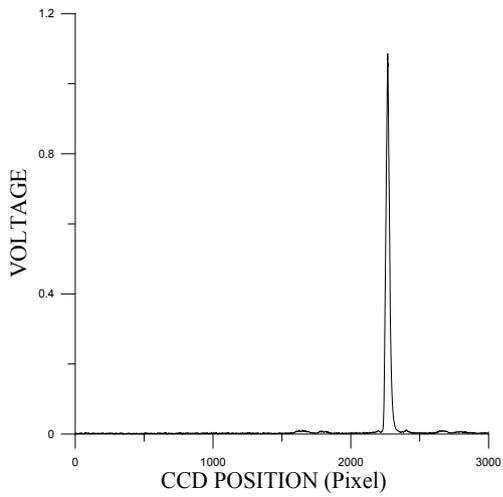


圖4：-5mm位置的光斑波形(標準差0.06167)

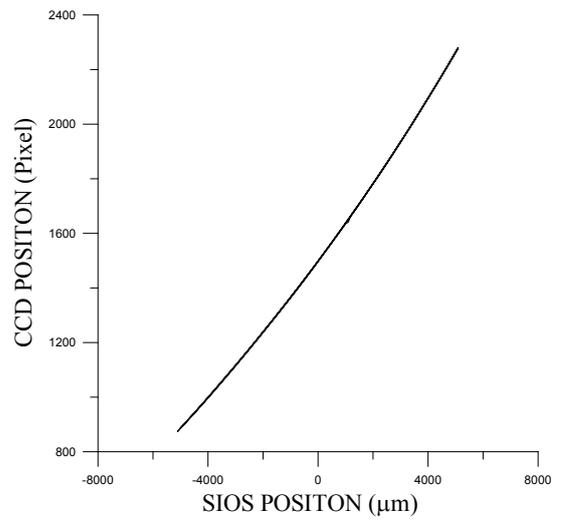


圖7：在±5mm的量測範圍內來回量測六次

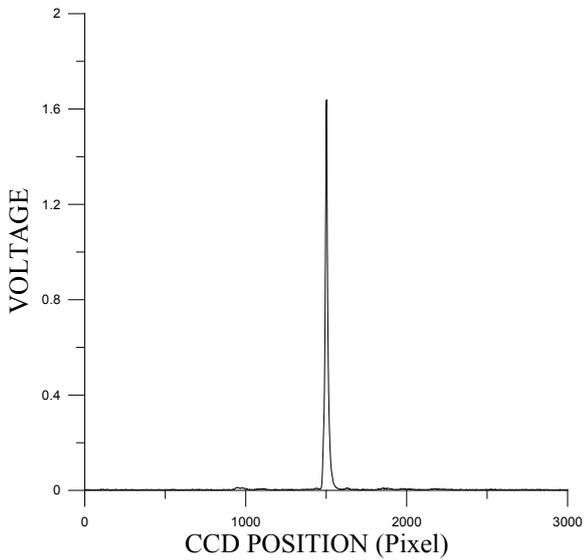


圖5：0mm位置的光斑波形(標準差0.059)

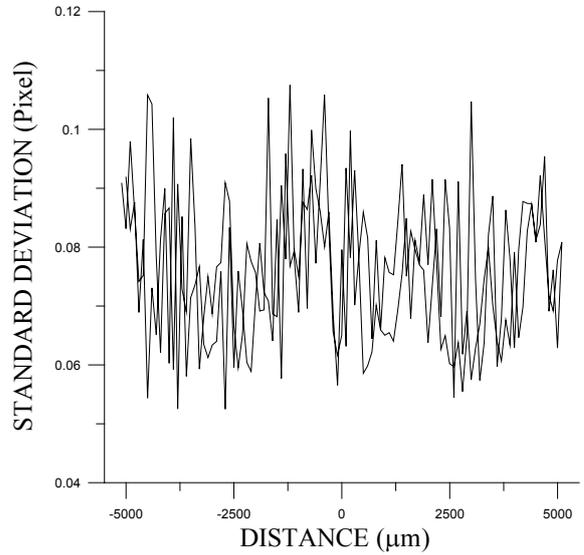


圖8：第1次各位置的標準差測量

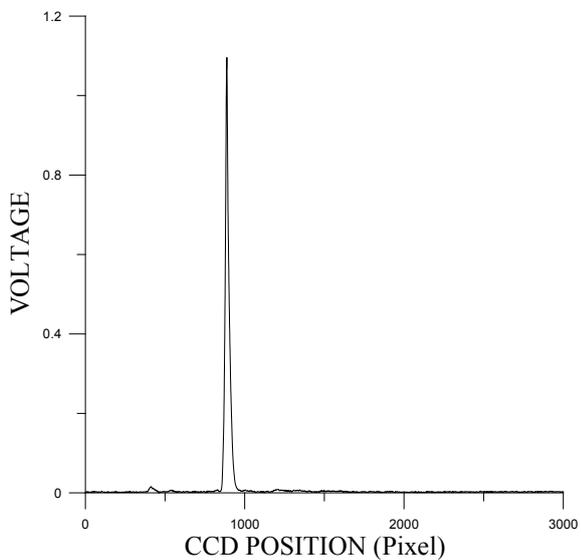


圖6：+5mm位置的光斑波形(標準差0.0759)

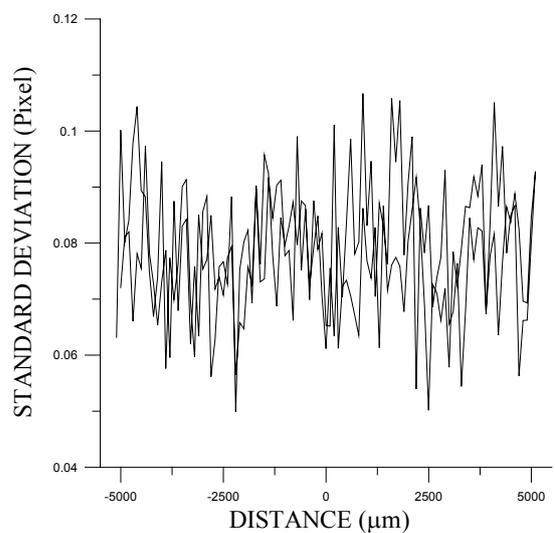


圖9：第2次各位置的標準差測量

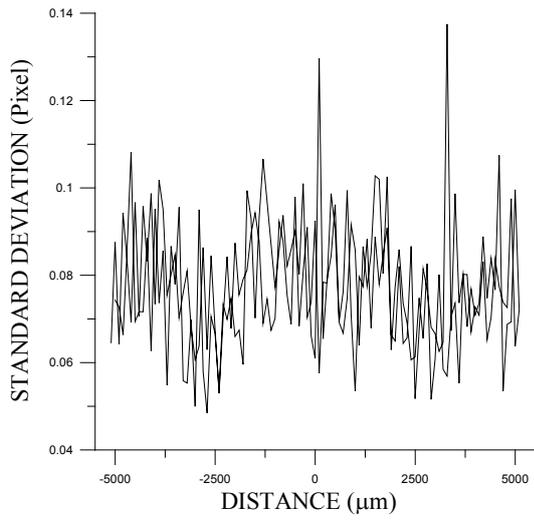


圖10：第3次各位置的標準差測量

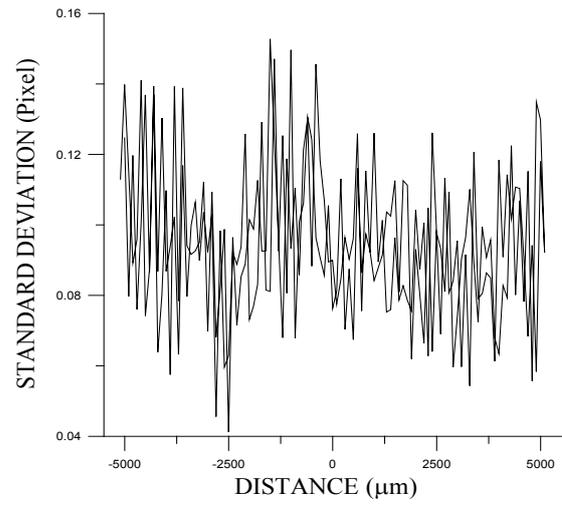


圖13：第6次各位置的標準差測量

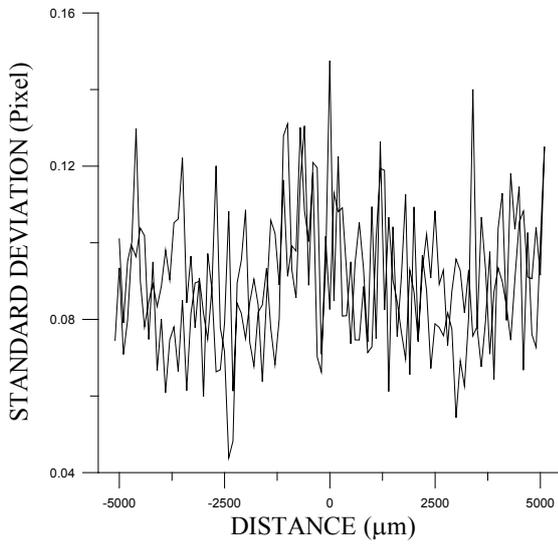


圖11：第4次各位置的標準差測量

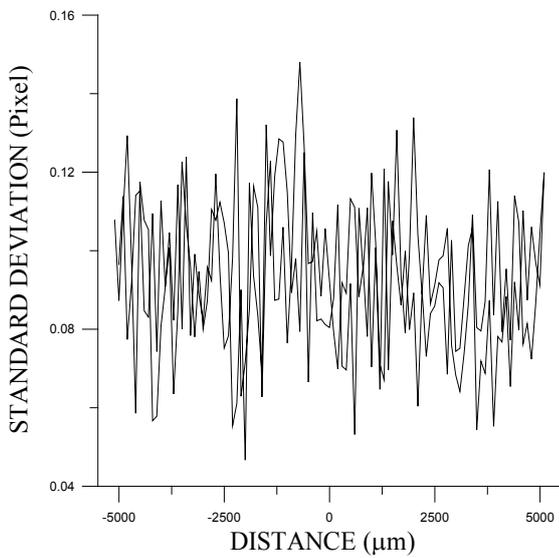


圖12：第5次各位置的標準差測量