

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

光電式位移感測系統之設計開發

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-002-040-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：黃光裕

計畫參與人員：鄭欽宇 黃建泰 國立臺灣大學 機械工程學研究所

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 10 月 4 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 光電式位移感測系統之設計開發

### Development of an Optoelectronic Displacement Sensor System

計畫編號：NSC92-2212-E-002-040-

執行期限：92年08月01日至93年07月31日

主持人：黃光裕 國立臺灣大學 機械工程學系

計畫參與人員：鄭欽宇 黃建泰 國立臺灣大學 機械工程學研究所

#### 一、中文摘要

本計畫目的在於設計開發一個光電式位移感測系統，位移解析度設定在 $\mu\text{m}$ 範圍，並追求 $0.1\mu\text{m}$ 最高解析度，並且能夠量測靜態與高速動態位移。首先根據所需之系統功能選用光束直徑 $3\text{mm}$ 之雷射光源，光束經由適當光學元件之配置傳送到位移量測區域。被測物之位移造成光強度與明暗區域的變化，透過光電感測元件之量測進而產生電子類比訊號。為了提昇位移量測之準確性與減少隨機雜訊之干擾，研究中採用差動式量測方法，被測物位移所造成光照區域的變化透過分光鏡傳送到兩個光電元件上，並以此二光電元件之相減訊號作為量測系統的輸出訊號。

**關鍵詞：**位移感測系統、光電式、設計開發、特性測試、解析度、精度

#### Abstract

The aim of this project is to develop an optoelectronic displacement sensor system with a nominal displacement resolution of  $1\mu\text{m}$  for static and dynamic measurements. Besides, we intend to reach the highest resolution of  $0.1\mu\text{m}$ . According to the function of the developed system, a laser source with beam diameter of  $3\text{mm}$  is chosen. The laser beam is transmitted to the sensing area by the appropriate setup of

optical elements. The motion of the sensing object induces the variation of the transmission intensity and the bright/dark area, which is detected by two optoelectronic sensors and is transferred to the corresponding analog signal. To increase the accuracy and reduce the interference of the noise, the differential measurement method is applied. The transmitted laser beam is projected onto two optoelectronic sensors by using a prism. The differential output signal of the both sensors is used as the output signal of the displacement sensor system.

**Keywords:** displacement sensor system, optoelectronic, design and development, performance testing, resolution, accuracy

#### 二、緣由與目的

非接觸式位移感測之原理大致可分為電容式、電感式、渦電流式、及光電式…等，而光電式又是對被測物影響最少的一種，同時其反應極快速，目前已經能感測到 $10^{15}\text{Hz}$ 的光載波頻率。光學感測之物理性質包含可直接量測的光強度與波長，以及透過輔助裝置所造成之光強度、波長、偏光效應與相位角之變化。光電式位移感測原理又可分為點感測與場感測，點感測是以一個光點來感測物件之位移與變形，而場感測方法則是以光線照射面為出

發，然而點感測也可透過掃描方式取得面位移或變形之資訊。在位移感測精度  $1\sim 0.1\mu\text{m}$  的範圍中，常見的位移感測原理是採用三角反射原理。在雷射光束固定射角下，被測物件的位移會造成反射位置變化，由光學二極體陣列 (Photodiode Array) 或位置敏感元件 (PSD) 作為反射光點位置的感測。除此外還有設備昂貴與體型龐大的光學干涉位移量測器也可以獲得相當高的位移解析度，感測光束必須與位移方向相同，同時被測物的導引誤差必須小於位移感測系統之解析度一個等級。被測物件之表面光學特性與其位移導引精確度會嚴重影響位移量測之精確度。[1-6]

隨著非接觸式和高效率測量儀器的大量出現，專家們預測 21 世紀測量技術的發展方向大致如下：(1) 測量精度由微米級向奈米級發展，進一步提高測量解析度；(2) 由點測量過渡至面測量，由長度的精密測量擴展至形狀的精密測量；(3) 隨著圖像處理新技術的應用，遙控精密感測技術將被推廣及普及化；(4) 隨著標準化的確立和測量不確定度的數值化，有效地提高測量的可靠性。總而言之，測量技術必須實現高精度化，同時也要求實現高速化和高效率化。

本研究之目標是適用於小型物件之光電式位移感測器之設計與開發，位移解析度預定在  $\mu\text{m}$  尺寸範圍，並追求  $0.1\mu\text{m}$  之最高解析度，不只是靜態量測也要能進行動態位移量測。除了高速與精密量測外同時又能考慮到經濟效益。系統中採用雷射光束與光電感測元件，光電感測元件主要採用光學二極體陣列或 CCD 陣列，被測物之位移是以光遮斷方式改變在光電感測元件上明暗邊界之移位，經由電子電路取得與位移相關之信號，再透過數位擷取卡、即時信號控制器和數據處理程式進行數位信號處理。當被測物件很小時，也可透過光學元件將其移動邊緣投射在光電感測元件上。除了位移感測功能外，還必須講求系統精緻性及不受外界各種干擾...等，使其能迎合各種任務需求與更具實用性。

### 三、結果與討論

#### 3.1 遮斷式量測系統之設計

本研究採用遮斷式光學量測法，被測物的位移件會遮斷部分光束，進而改變感測器接收光強度變化。遮斷式量測方法較不受被測物表面之反射性質及粗糙度之影響。考慮感測系統在量測環境之限制，所以設計了兩種不同光電元件配置之架構，分別如圖 1(a) 及 (b) 所示。被測物作水平或垂直方向位移時投射至兩個光電元件上的光束面積則會發生變化，所輸出之差動輸出訊號會隨著被測物位移產生變化。當兩個光電元件上的光束面積相同時，則差動輸出訊號等於零。

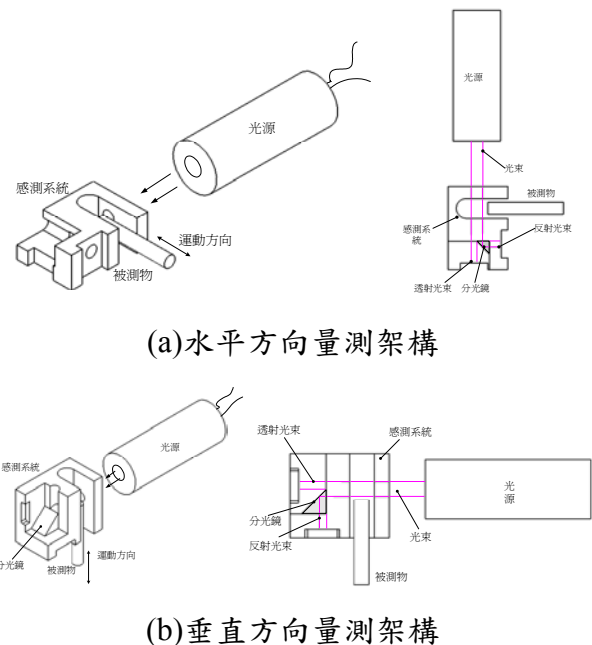


圖 1 兩種位移感測系統架構

所選用光電元件為 TEXAS INSTRUMENTS 公司的 Monolithic Photodiode OPT101P 光電二極體，尺寸為  $2.29\text{mm} \times 2.29\text{mm}$ 。圖 2 為光電二極體的差動式訊號處理電路，INA118P 為精密低功率儀器放大器，差動電壓輸出為  $V_{Out} = G \cdot (V_{IN}^+ - V_{IN}^-)$ ，其中增益值為  $G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G}$ ，當  $R_G = \infty$  時增益  $G = 1$ 。增益值 G 增加時輸出電壓上升時間也隨著變長。在相同供應電壓下，增益值較低者較適於快速位

移量測。

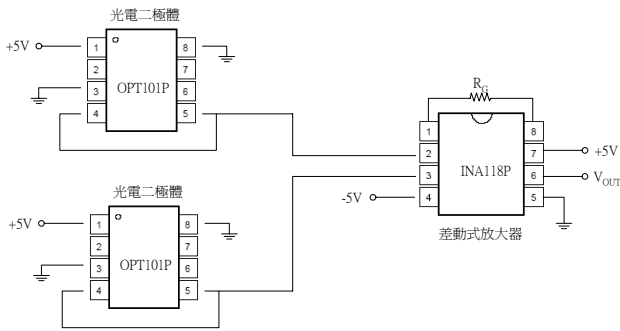


圖 2 光電二極體 OPT101P 差動式訊號處理電路

### 3.2 靜態系統測試

圖 3 為水平位移感測系統之靜態測試平台，被測物安置在位於精密位移平台上的固定架，藉由轉動位移平台來移動被測物，同時利用 LVDT 量測被測物的位移，以作為比較量測之用。當光束未被遮斷時，兩個光電二極體之輸出電子訊號都是最大值，所得差動輸出訊號為最小值。隨著被測物的移動，投射至其中一個光電二極體感光區的光束會逐漸縮小，差動輸出訊號值則會逐漸上升，當該光束完全被遮斷時則有最大差動訊號值。如果被測物繼續同方向移動，另一感光區的光束也會陸續被遮斷，差動輸出訊號值則會隨著持續下降，直到兩個光電二極體都無光束照射時，會得到最小差動式訊號值。

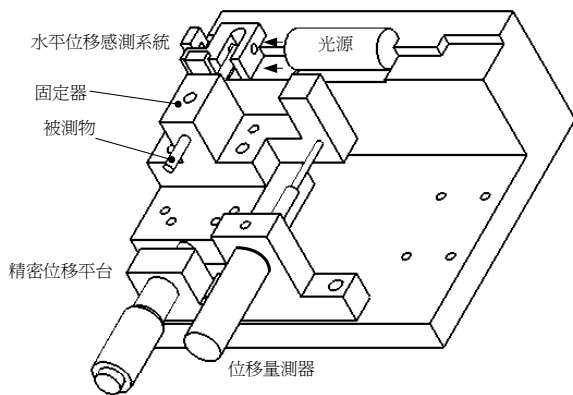
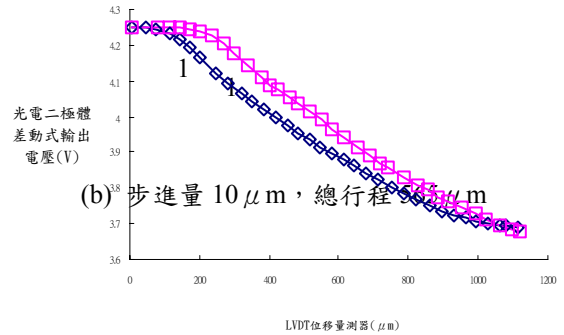


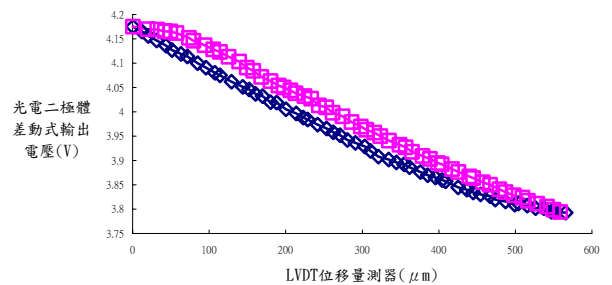
圖 3 水平位移感測系統之靜態測試裝置

圖 4 為以固定步進量移動被測物所測得之往返運動之曲線，圖 4(a)的移動步進量為 33

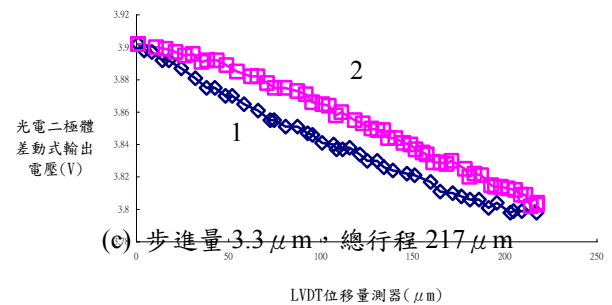
$\mu\text{m}$ ，總行程為  $1112 \mu\text{m}$ ，圖中趨勢線特性值  $R^2$  值分別為 0.9976 與 0.9994，解析度為  $9 \mu\text{m}$ 。圖 4(b)的移動步進量為  $10 \mu\text{m}$ ，總行程為  $565 \mu\text{m}$ ，圖中趨勢線特性值  $R^2$  值為 0.9988，解析度為  $7 \mu\text{m}$ 。圖 4(c)的移動步進量為  $3.3 \mu\text{m}$ ，總行程為  $217 \mu\text{m}$ ，圖中趨勢線特性值分別為 0.9928 與 0.9949，解析度為  $11 \mu\text{m}$ 。



(a)



(b)



(c)

圖 4 水平位移感測系統之靜態測試訊號

圖 5 為垂直方向位移感測系統之靜態測試平台，將感測系統之量測 U 型開口向下固定，精密位移平台移動被測物進入量測 U 型開口中。

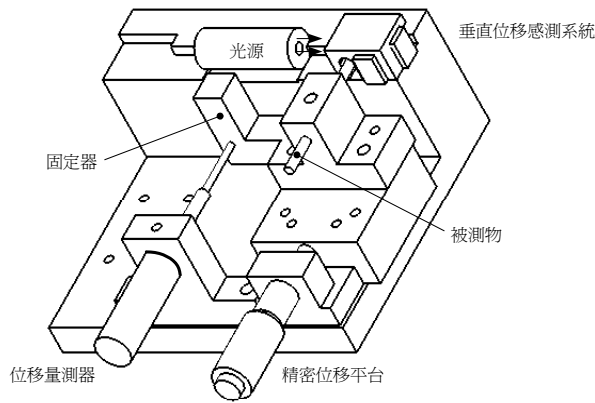
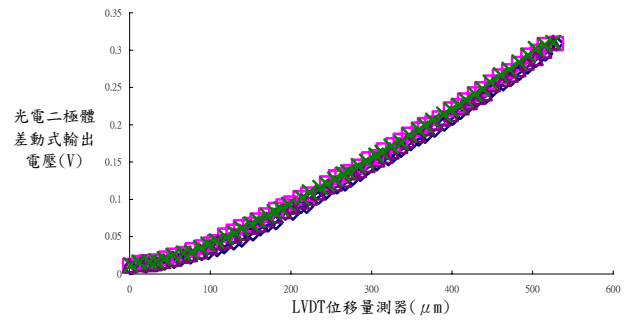
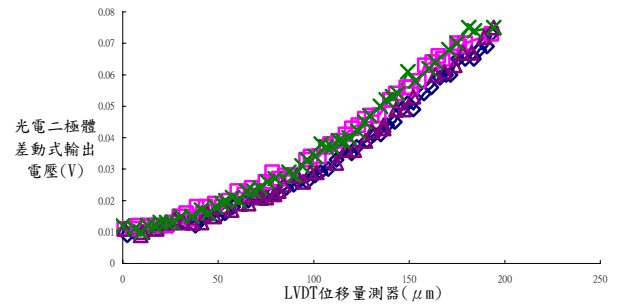


圖 5 垂直方向位移感測系統之靜態測試裝置

圖 6 為以固定步進量兩次往復移動被測物下感測系統之輸出電壓曲線，圖 6 (a) 的移動步進量為  $33 \mu\text{m}$ ，總行程為  $1280 \mu\text{m}$ ，圖中線性區段之  $R^2$  值分別為 0.9968、0.9982、0.9976 與 0.9998，解析度為  $6 \mu\text{m}$ 。圖 6 (b) 的移動步進量為  $10 \mu\text{m}$ ，總行程為  $529 \mu\text{m}$ ，圖中線性區段之  $R^2$  值分別為 0.9981、0.9977、0.9981 與 0.9975，解析度為  $8 \mu\text{m}$ 。圖 6(c) 的移動步進量為  $3.3 \mu\text{m}$ ，總行程為  $194 \mu\text{m}$ ，圖中線性區段  $R^2$  值分別為 0.9913、0.9919、0.9943 與 0.9874，解析度為  $11 \mu\text{m}$ 。隨著被測後的移動光束將投射至其中一個光電二極體上，感測系統的輸出電壓逐漸變大。被測物以反方向移動時，感測系統的輸出電壓以線性趨勢快速下降，直到整體感光區域變小為止，輸出電壓才會以比較慢速度變化。



(b)

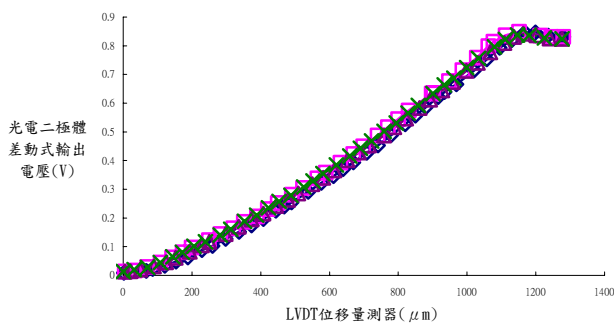


(c)

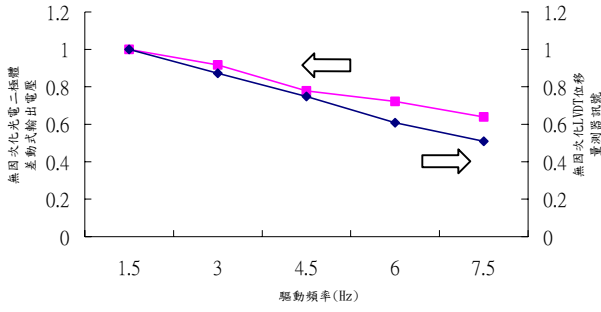
圖 6 垂直位移感測系統之靜態測試訊號

動態測試時，被測物被置於 PI 的 P-171.00 壓電致動器上，以函數產生器輸出振幅為  $0 \sim 10\text{V}$  的正弦波到壓電驅動放大器 P-261 上，放大器輸出振幅為  $0 \sim 1000\text{V}$  的正弦波來驅動壓電致動器，透過數據擷取卡 (DAQ 卡) 和 LabView 量測程式擷取感測系統之輸出電壓，另一方面也使用 LVDT 位移量測器量測被測物之位移量，以供比較用。

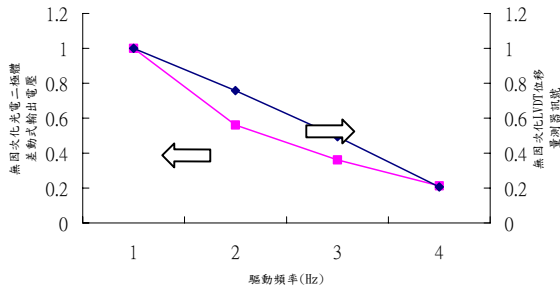
圖 7 顯示不同驅動頻率下，光電位移感測系統所輸出之電壓訊號以及 LVDT 位移量測器所測量得之變形量。壓電致動器之往復運動振幅會隨著頻率增加而逐漸減小，兩個感測訊號在頻率增加時也都呈下降趨勢，之間存在些微差異，因為光電位移感測系統和 LVDT 位移量測器因為配置而使用不同感測位置所造成的。



(a)



(a) 水平位移感測系統



(b) 垂直位移感測系統

圖 7 光電位移感測系統與 LVDT 位移量測器之位移量測結果對驅動頻率

### 3.2 誤差分析

本論文所採用的雷射光可以視為各向同性、線性和無損耗介質中的高斯光束，光束可視為 x 方向上線性偏極化的光波，電場分量  $E_x$  為主導影響因素。對於基模高斯光束，電場分佈取決於徑向距離  $r$  和光源距離  $z$  座標，而與徑向方位角  $\phi$  無關， $E_x$  可以表示為

$$E_x(r, z) = E_x(0, 0) \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] \times \exp\left[-jnkz + j\Theta(z) - \frac{jnkr^2}{2R(z)}\right] \quad (1)$$

如果不考慮雷射光源之電場分量與時間之關係，則可定義暫態下  $t=0$ ，中心位置電場分量  $E_x(0, 0) = E_0$ ， $E_0$  為實數。因此振幅分佈為

$$E_x(r, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] \quad (2)$$

在  $t=0$  時的相位角，即零相位角為

$$\Phi_0(r, z) = -nkz + \Theta(z) - \frac{jnkr^2}{2R(z)} \quad (3)$$

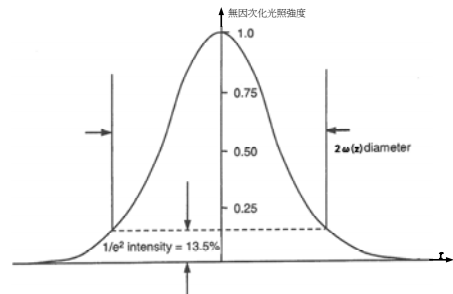
當  $z$  固定時，振幅分佈為鈴形的高斯函數，在  $z$  軸上，即中心點  $r=0$  的高斯函數為 1；當  $r=\omega(z)$  時，高斯函數下降到  $z=0$  時的  $1/e$ ，即 0.37。因為雷射光束之強度正比於振幅之平方，所以在  $r=\omega(z)$  處的光強度為光軸上光強度的  $1/e^2=0.135$  倍，如圖 8(a) 所示。所以用  $\omega(z)$  可以定義模場半徑，光束直徑則為  $2\omega(z)$ 。在  $z=0$  時的光束截面半徑稱之為束腰，用  $\omega_0$  表示。由於繞射效應，模場半徑會隨著光源距離  $z$  變化，即

$$\omega(z) = \omega_0 [1 + (z/z_r)^2]^{1/2} \quad (4)$$

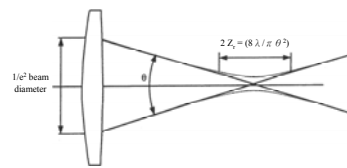
在束腰處 ( $z=0$ )，光束模場半徑有最小值。式 (4) 中的  $z_r$  為 Rayleigh 距離 (準直距離)，如圖 8 (b) 所示，定義為

$$z_r = \pi n \omega_0^2 / \lambda \quad (5)$$

其中  $\lambda$  為真空中雷射平面波之波長， $n$  為光束所處介質的折射率。



(a) 光強度分佈



(b) Rayleigh

圖 8 光強度分佈與 Rayleigh 距離示意圖

當光束如圖 9(a) 所示完全投射至光電二極體之感光區上時，光束之強度分佈有如上述之高斯分佈情形，當光束和感光區之間有一個被測物沿著 Y 方向移動，如圖 9(b) 所示，隨著光束投射至感光區之範圍的擴大，開始時光照累積能量以較緩慢速度增加，移動一段距離後光

照累積能量以穩定較快速度線性的增加，最後再以較緩的速度達到飽和。當位移量 $\Delta y$ 極小時，光照累積能量也十分微弱，所以光電二極體輸出電壓也十分小，會與光電元件之黑雜訊混淆不分進而影響位移量測之解析能力。為了解決光束邊緣較弱之情形，可以利用光圈將光束邊緣予以隔離，讓照在光電二極體感光區部分的光束具備較大光強度。

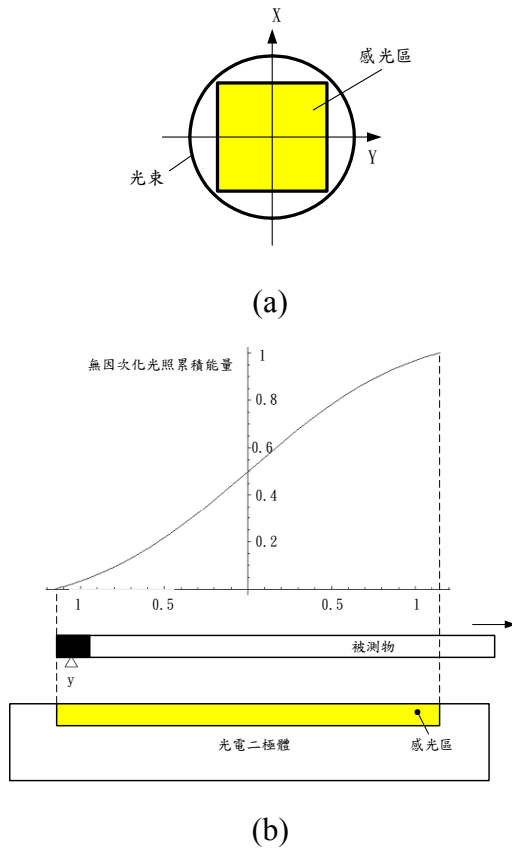


圖 9 光照累積能量分佈與與被測物位移關係之示意圖

當光束如圖 10 (a)所示對光電二極體偏斜一角度 $\alpha$ ，或 10(b)所示光電二極體對垂直光束偏斜一角度 $\beta$ 時，依據幾何關係，存在對應光程差 $\Delta z = \Delta y \sin \alpha$  或  $\Delta z = \Delta y \tan \beta$ 的關係，因此照射到光電二極體表面上的雷射光束會有不同光程差 $z = z + \Delta z$ ，電場分量公式(3.2)將被改寫成

$$E_x(r, z) = E_0 \frac{1}{\left\{1 + \left[\frac{z + \Delta z}{z_r}\right]^2\right\}^{1/2}} \times \exp \left[ \frac{-r^2}{\omega_0 \left[1 + \left(\frac{z + \Delta z}{z_r}\right)^2\right]^{1/2}} \right] \quad (6)$$

而雷射光束之強度正比於振幅之平方，所以光強度變化也會隨著入射角 $\alpha$ 和元件偏斜角度 $\beta$ 而有所影響。圖 11 為光束偏斜時之光強度分佈示意圖，由圖可得知此時光強度最大值已不再是光軸心處，偏移距離隨著光束入射偏斜角度 $\alpha$ 的增加而變大，而光電二極體所接受到的光照累積能量亦會如圖 12 所示；與圖 9 (b)比較可看出圖 12 中光照累積能量以線性變化區域明顯變短了，同時累積強度的變化速度較快，在前半區域整體累積光照強度已經達六成，上述現象會因為光束入射偏斜角度 $\alpha$ 之增加而更明顯，會對位移感測精確度產生影響。

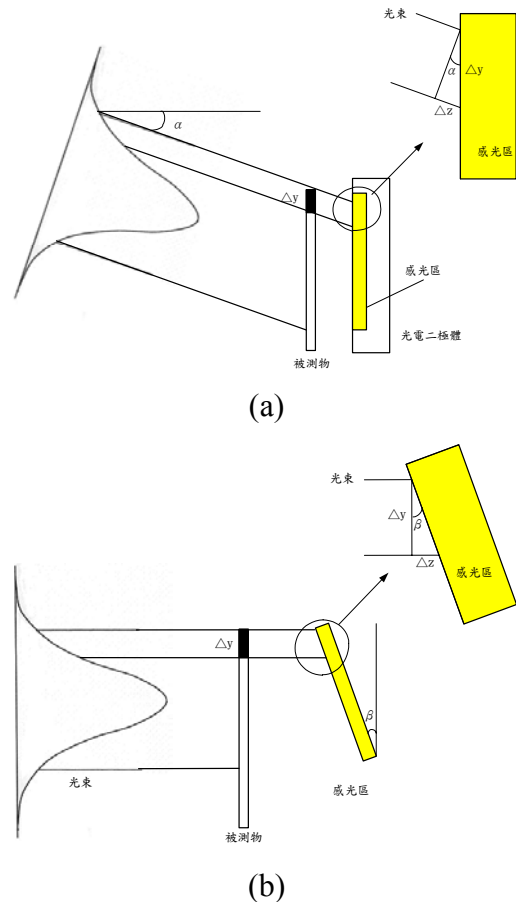


圖 10 光源或光電二極體偏斜之示意圖

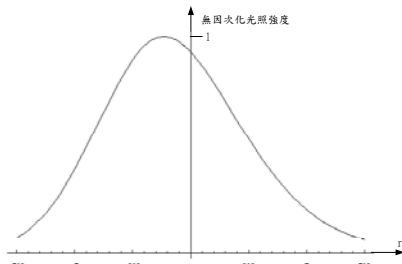


圖 11 光束偏斜下光強度分佈示意圖

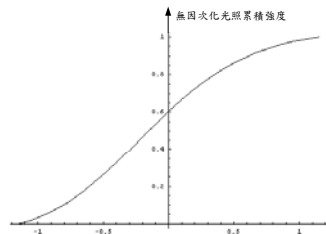


圖 12 光束偏斜之光照累積能量分佈與與被測物位移關係之示意圖

#### 四、計畫成果自評

本研究計畫如預期規劃完成計畫進度，以設計開發、實驗測試與誤差分析等項完成適用於小型物件之光電式位移感測系統之設計開發與其特性測試。本研究採用遮斷式光學量測法，較不受被測物表面之反射性質及粗糙度之影響，被測物位移時投射至兩個光電元件上的光束面積則會發生變化，所輸出之差動輸出訊號會隨著被測物位移產生變化。考慮被測物移動與感測系統配置上可能遭遇之限制，設計出兩種水平與垂直配置之感測系統架構。為了探討位移感測系統之靜態性能，開發出靜態測試平台，並與 LVDT 位移量測器量測結果進行比較測試。光電感測系統可測得之最小位移解析為  $6\mu\text{m}$ ，靜態線性度  $R^2$  值約為 0.99。

#### 五、參考文獻

- [1] Anssi, J. M., Juha, T. K., and Risto, A. M., "A High-Resolution Lateral Displacement Sensing Method Using Active Illumination of a Cooperative Target and a Focused Four-Quadrant Position-Sensitive Detector", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 44, No. 1, February 1995, pp.46-52
- [2] Fang, R., Yan, Z., Yee, L. L., Suohai, M., Chinyi, L., and Jun, L., "A Precision Fiber Optic Displacement Sensor based on Reciprocal Interferometry", Optical Communications, 176 (2000), March 15, 2000, pp.105-112
- [3] Joon, H. B., Ki, H. K., Mun, H. H., Chang, H. G., and Wonho, J., "High-Resolution Confocal Detection of Nanometric Displacement by Use of a  $2 \times 1$  Optical Fiber Coupler", Optical Letters, Vol. 25, No. 23, December 1, 2000, pp.1696-1698
- [4] Tadaoki, Y. and Hirota, N., "Measuring Longitudinal Displacements Using Laser Beam Diffraction Changes near the Focal Point", Rev. Sci. Instrum., Vol. 64, No. 8, August 1993, pp.2245-2249
- [5] Yeung, J. S., Jin, H. K., and Ok, S. C., "Portable Autocollimators Using the Laser Diode and the Position Sensitive Detector", Review of Scientific Instruments, Vol. 69, No. 2, February 1998, pp.402-405
- [6] Kovačević, K. and Zadro, M., "Two-Dimensional Position Sensitive Silicon Photodiode as a Charged Particle Detector", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 423 (1999), pp.103-107
- [7] Texas Instrument Monolithic Photodiode and Single-Supply Transimpedance Amplifier OPT101 data sheet
- [8] Texas Instrument Precision, Low Power Instrumentation Amplifier INA118 data sheet
- [9] 聶秋華，單模光纖及其特性參數測量，全華科技圖書股份有限公司，1994 年出版
- [10] Robert, E. F. and Biljana, T. G., Optical System Design, McGraw-Hill International Editions, 2001
- [11] Ramon. P. A. and John, G. W., Sensors and Signal Conditioning, John Wiley & Sons, Inc., 2001



[12] 葉貞秀，非接觸式小型轉軸之動態偏擺量  
測系統之設計與特性研究，國立臺灣大學  
機械工程學研究所碩士論文，2003

## 可供推廣之研發成果資料表

 可申請專利

 可技術移轉

日期：93年9月8日

<b>國科會補助計畫</b>	計畫名稱：光電式位移感測系統之設計開發 計畫主持人：黃光裕 計畫編號：NSC92-2212-E-002-040- 學門領域：生產自動化
<b>技術/創作名稱</b>	光電式位移感測系統
<b>發明人/創作人</b>	黃光裕, 鄭欽宇
<b>技術說明</b>	<p>中文：設計開發一個能與小型致動元件整合之光電式位移感測系統，雷射光束經由適當光學元件之配置傳送到位移量測區域。被測物之位移造成光強度與明暗區域的變化，透過分光鏡傳送到兩個光電感測元件上，再以差動式電路產生與位移成正比的類比訊號。考慮被測物移動與感測系統配置上可能遭遇之限制，設計出兩種水平與垂直配置之感測系統架構。</p> <p>英文：An optoelectronic displacement sensor system, that can be integrated with small actuating element, is designed and developed. The laser beam is transmitted to the sensing area by the appropriate setup of optical elements. The motion of the sensing object induces the variation of the transmission intensity and the bright/dark area, which is split up into two beams by a prism. And two optoelectronic sensors detect the both transmitted beams. Their output signals are processed by a differential circuit and are transformed into a displacement proportional analog output signal. Considering the possible arrangement constraints of the measured element, two different structures of the sensor system are designed and developed.</p>
<b>可利用之產業及可開發之產品</b>	自動化設備 致動器定位系統 小型物件變形量與位移量測 與致動器整合之位移量測系統
<b>技術特點</b>	1. 非接觸光電位移量測， 2. 不受被測物光學反射特性影響， 3. 量測方向垂直於位移方向，不會干擾致動位移端之運用， 4. 量測系統緊緻與致動系統整合性。
<b>推廣及運用的價值</b>	由於其體積緊緻性與整合性，使致動與位移量測系統得以在小體積中整合在一起，減輕自動化整體系統之重量，進而提昇運轉速度與減少耗能。

※ 1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。

※ 2. 本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。