

崑山科技大學

機械工程系

光學尺原理的探討



摘要

本專題在於探討光學尺 Linear scaler(亦稱為線性編碼器 Linear encoder)，目的為了解光學尺的原理及組裝，將微米 ($1\mu\text{m}$) 解析度的光學尺組裝在氣浮 XYZ 平台上作為三次元量測之用。

光學尺之主副尺是利用玻璃製透明板所構成，上刻有具有相當多等間隔之平行線，較長一片固定不動稱為主尺，另外一片則可移動稱為副尺。當光源經瞄準透鏡聚光後，再經副尺及主尺，而直射光偵測器，光偵測器如只一個，只能量測位移量，光偵測器如有二個，則可進行電路分割，並能察知位移為向左或向右，目前通常光偵測器都增為四至八個，可以做信號分割處理以得到很精密的量測結果。四個光偵測器所接收到的光強度受副尺及主尺交錯時產生的明暗變化所影響，明暗帶橫向移動較副尺移動為快，因此光偵測器受光感應產生迅速變化，信號經放大及修正整形後即可顯示出來。

原氣浮式三次元量測儀購於 1985 年 10 月，其中主要位移感測元件光學尺，因使用年限問題，經常損壞，且已無零件可維修。原購置之軟體亦不符合現代資訊時代之要求，本專題收集光學尺資料並探討光學尺原理，作為氣浮式三次元量測儀之光學尺更新及軟體開發之研製準備。

關鍵字

光學尺(Linear scaler)

線性編碼器(Linear encoder)

三次元量測儀(Coordinate Measuring Machine, CMM)

誌謝

經歷這一年六個月的努力，從文獻資料的參考到原理的應用以致結論的分析，而從中探討問題點的存在與找尋問題的結論和解決問題，更從中體悟人與人之間，團結就是力量的那一份真誠，以及分工合作的精神。

除此之外，我們更要感謝專題指導老師—李振發老師的熱心指導，以及研究生張友倫學長的熱心支持，才能促使本專題能順利完成。

在專題製作的這段期間，有賴整組同學的互相合作下，終於能如期的完成。此外，也感謝許多不吝給予我們協助的同學及朋友，再此也一併感謝。

目錄

中文摘要	I
誌謝	II
目錄	III
第1章 序論.....	1
研究動機.....	1
文獻回顧.....	1
貢獻.....	2
第2章 簡介.....	3
三次元量測儀.....	3
光學尺.....	5
第3章 光學尺的原理.....	6
光學尺.....	6
光學尺輸出訊號之原理.....	10
編碼器的原理.....	12
光學編碼器之原理.....	15
光柵的製作原理.....	17
第4章 光學尺於三次元量測儀的組裝準備.....	19
光學尺組裝之位置.....	19
第5章 結論與未來研究建議.....	23
結論.....	23
研究建議.....	23

第一章 序論

1.1 研究動機

將老舊氣浮式床台三次元座標量測機之光學尺更新，以免原氣浮式床台三次元座標測量機報廢，並可作為三次元量測自動化之研究。

1.2 文獻回顧

1. 三次元量床量測能力之研究

摘要

本研究的目的是透過一般量測系統的五種量測特性：偏差、線性、重複性、重現性及穩定性，以建立一套有系統的 CMM 量測能力的評估方法。由文獻探討得知，可以採用 CMM 量測幾何特性中的長度量測作為評估 CMM 量測能力的指標。

經由 CMM 長度量測的五種量測特性定義，選擇時間、受測工件塊規與操作人員為實驗因子，反應變數為塊規 CMM 量測值。考慮時間無法隨機化，以時間為集區。以集區內實施分裂區塊設計實驗獲得塊規 CMM 量測值數據。

分析塊規 CMM 量測值數據，此次實驗的 CMM 的長度量測準度與精度極為優越。可以接受 CMM 長度量測之穩定性、重現性、線性與偏差，重複性極小，估計為 0.1×10^{-7} inch²。

2. 三軸伺服氣壓運動控制之研究

摘要

本論文利用工業電腦、介面卡、光學尺、壓力感測器、伺服流量閥、衝壓型氣壓缸與無桿型氣壓缸等元件建立一個三軸氣壓運動平台。本論文研究目的是嘗試找到一個適用於三軸伺服氣壓系統的控制法則，控制法則包括氣壓缸受到垂直負荷下定位控制之研究與平面軌跡追蹤之法則。

在定位控制上，由於性能要求在穩態，本論文以最簡單的 PD 位置控制法則加上最大靜摩擦力補償。在直線運動控制上，以 PD 位置控制法則加上速度前饋式補償器，使用前饋-回授迴路控制系統，使系統

產生直線等速運動。在圓弧運動控制上，此論文根據氣體之可壓縮、系統摩擦力、閥軸死區與氣體流經閥口下的非線性模型嘗試以補償或使用感測器回授方式，以及根據弦波軌跡的頻率與振幅大小與系統的摩擦力及死區等特性，使用摩擦力補償、閥軸死區補償與虛擬彈簧效應補償，其目的使系統仿效一個質量彈簧系統使氣壓缸可以追蹤弦波軌跡追蹤，此方法應用在兩軸向的氣壓缸系統上，可以系統作循環軌跡控制。

1.3 貢獻

原三次元量測儀機台之光學尺，因使用年限問題導致訊號讀取元件已不能更新，本專題重新安裝三支光學尺於原機台上，作為研究生將原機台自動化之預備。

第二章 簡介

2.1 三次元量測儀

三次元量測儀可定義為「一種具有可作三個方向移動的探測器，可在三個互相垂直的導軌上移動，此探測器以接觸或非接觸等方式傳送訊號，三個軸之位移量測系統(如光學尺)經數據處理器或電腦等計算出工件的各點座標(X, Y, Z)及各項功能量測的儀器」，本專題使用之三次元量測儀為氣浮滑軌式之移動橋架型的三次元量測儀(如圖 2-1)，Z 軸為主軸在垂直方向移動，廂形架導引主軸沿水平樑在 X 方向移動，此水平樑垂直 Z 軸且被兩支柱支撐於兩端，樑與支柱形成「橋架」，橋架沿著兩個水平面上垂直 X 和 Z 軸的氣浮滑軌(如圖 2-3)在 Y 軸方向移動。因為樑的兩端備支柱支撐，所以可得到最小的撓度，且比懸臂型有較高的精度。



圖 2-1 三次元量測儀-XYZ 軸



圖 2-2 氣浮式平台主軸-Y, Z 軸



圖 2-3 三次元量測儀之 Y 軸滑軌(拆卸前)

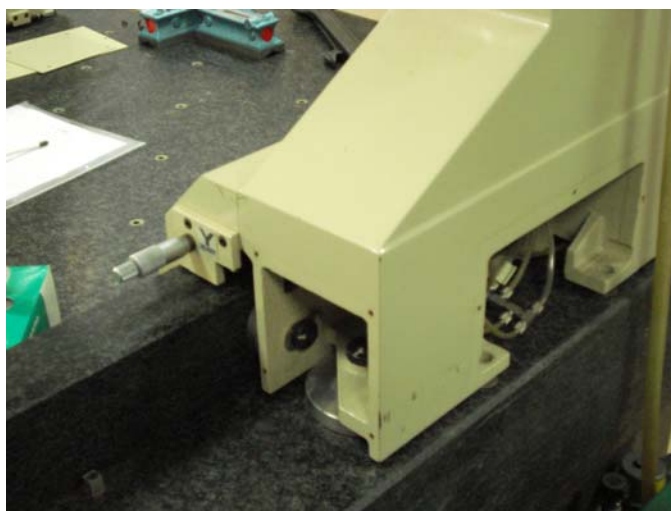


圖 2-4 氣浮式平台主軸-Y 軸(拆卸後)



圖 2-5 三次元量測-光學尺滑軌

2.2 光學尺

本專題使用之光學尺型號如下

光學尺型號：LIA20 (如圖 2-6)

光學尺簡介：

光柵尺：由讀頭(如圖 2-7)與尺帶組合，用於位置量測。

讀頭分辨率：1 μ m、0.5 μ m、0.1 μ m、0.05 μ m。

尺帶精度： $\pm 5\mu$ m/m、 $\pm 1\mu$ m/m。

應用：金屬加工設備、半導體設備、半導體生產與檢測設備、線性馬達與其他線性機構、測量機。



圖 2-6 光學尺零件與線材



圖 2-7 光偵測器



圖 2-8 光偵測器

第三章 光學尺的原理

3.1 光學尺

傳統量測是用游標卡尺及分釐卡來進行測定，或是在平台上使用塊規、高度規等作一次元之尺寸量測。隨後線性編碼器（光學尺）發展成為強而有力的量測工具，特別是光學尺以數位來表示，可與電腦的結合，使得量測時間縮短，於是慢慢擴展到二次元、三次元位置的量測，光學尺乃成為座標量測的發展基礎。而三次元座標量測機的精確量測機構則是具有正交的XYZ三軸光學尺，利用裝在Z軸前端的各種探頭接觸在工件的量測位置。

常見的光學尺可分為兩種佈置：

1. 穿透型

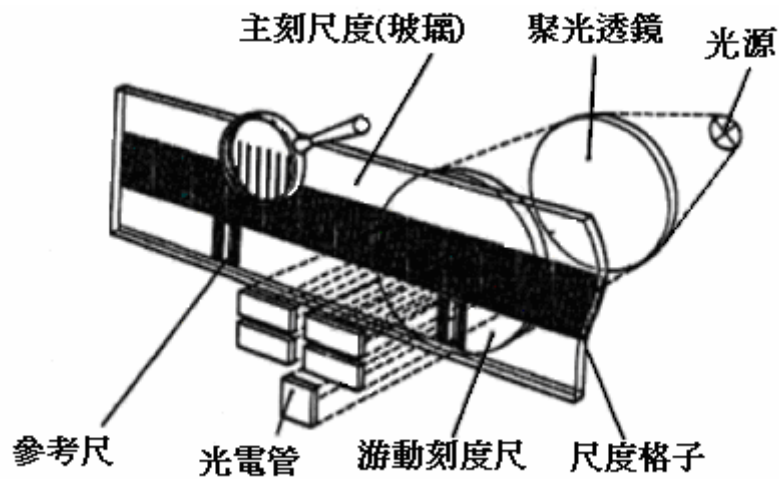


圖 3-1 穿透式光學尺

2. 反射型

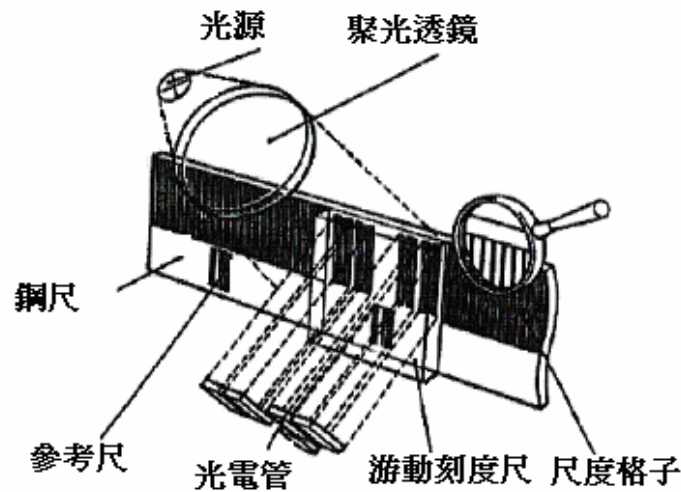


圖 3-2 反射式光學尺

光學尺又可分為兩種量測方法：

1·線性平行格子型

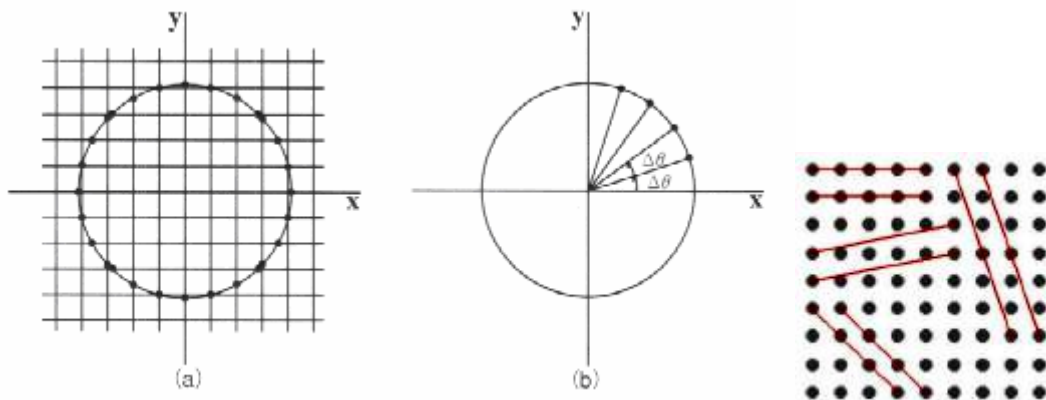


圖 3-3 線性平行格子型光學尺

2·疊紋型

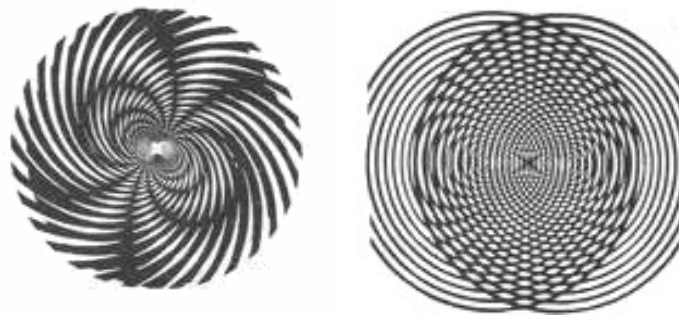


圖 3-4 疊紋型光學尺

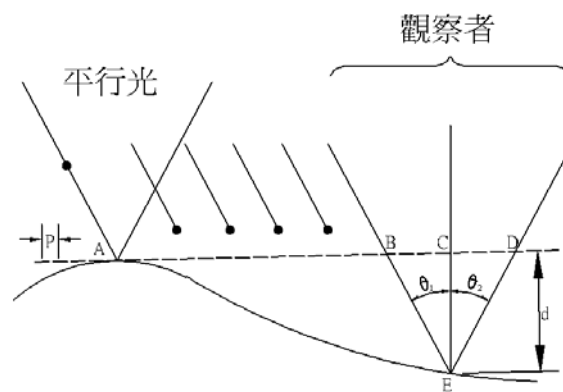


圖 3-5 疊紋形光學尺

光學尺依輸出型式亦可分為：

1. 絕對值輸出

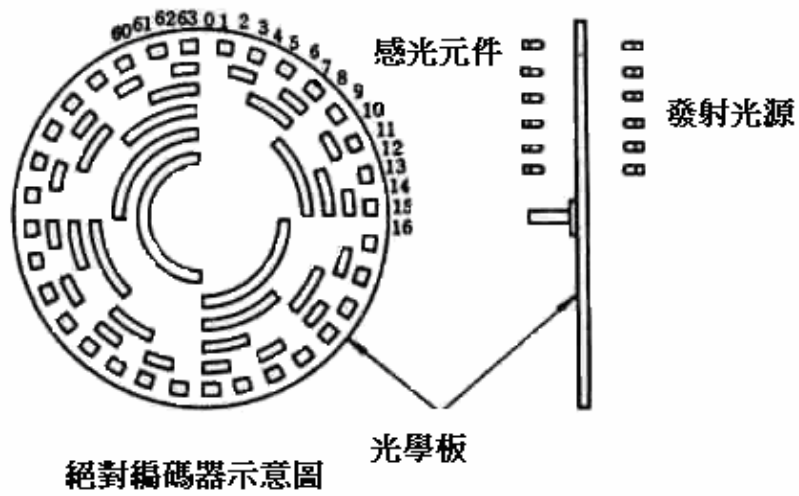


圖 3-6 絕對編碼器示意圖

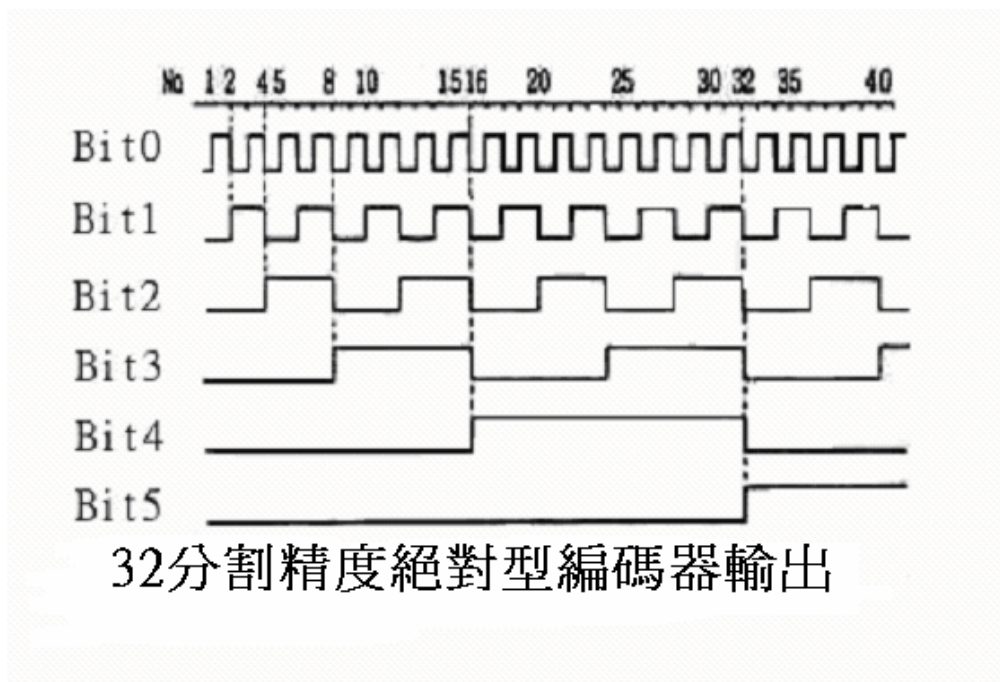


圖 3-7 32 分割精度絕對型編碼器

2. 增量值輸出

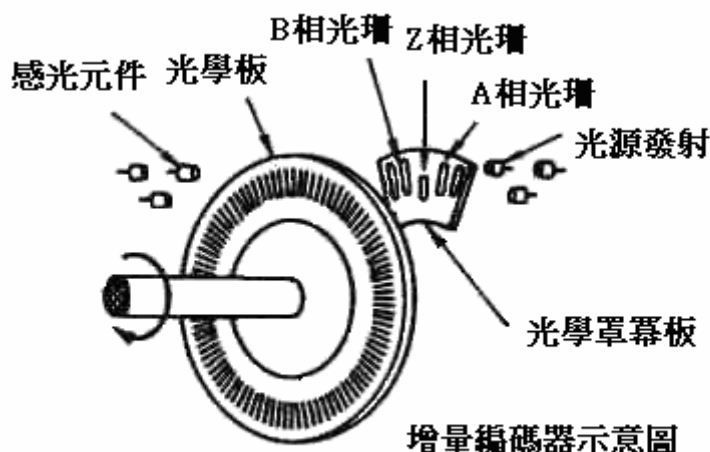


圖 3-8 增量編碼器示意圖

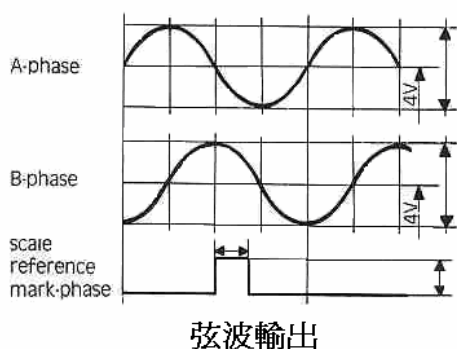


圖 3-9 旋波輸出

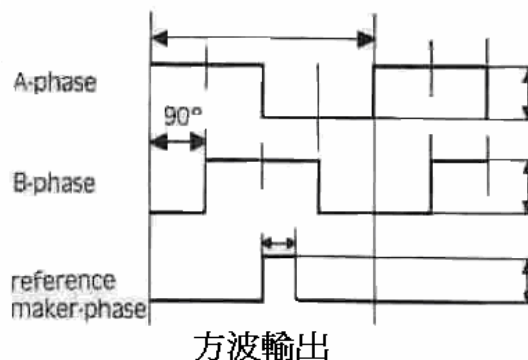


圖 3-10 方波輸出

3.2 光學尺輸出訊號之原理

如(圖 3-1)(圖 3-2)光學尺之主副尺是利用玻璃製透明板所構成，上刻有具有相當多等間隔之平行線，較長一片固定不動稱為主尺，另外一片則可移動稱為副尺。當光源經瞄準透鏡聚光後，再經副尺及主尺，而直射光偵測器，光偵測器如只一個，只能量測位移量，光偵測器如有A, B二個，則可進行A蓋B的電路分割，並能察知位移為向左或向右，目前通常光偵測器都增為四至八個，可以做信號分割處理以得到很精密的量測結果。四個光偵測器所接收到的光強度受副尺及主尺交錯時產生的明暗變化所影響，明暗帶橫向移動較副尺移動為快，因此光偵測器受光感應產生迅速變化，例如假設光學尺能夠應用在 50 CM/SEC 之移動速率之精密量測時，每一個光偵測器檢測之響應頻率為 2.5×10^3 Hz，這樣的光偵測器價格並不昂貴，信號經放大及修正整形後即可顯示出來，假如平

行線之間隔為 $20\ \mu\text{m}$ ，經信號四分割電路處理後可得 $5\ \mu\text{m}$ 精度，信號四分割電路價格也很便宜。

疊紋 (Moiré fringe) 的產生係由兩組光柵 (grating) 重疊時產生。其產生之方式有二：

1. 光柵平行但節距 (pitch) 不等。
2. 光柵節距相等，但不平行。

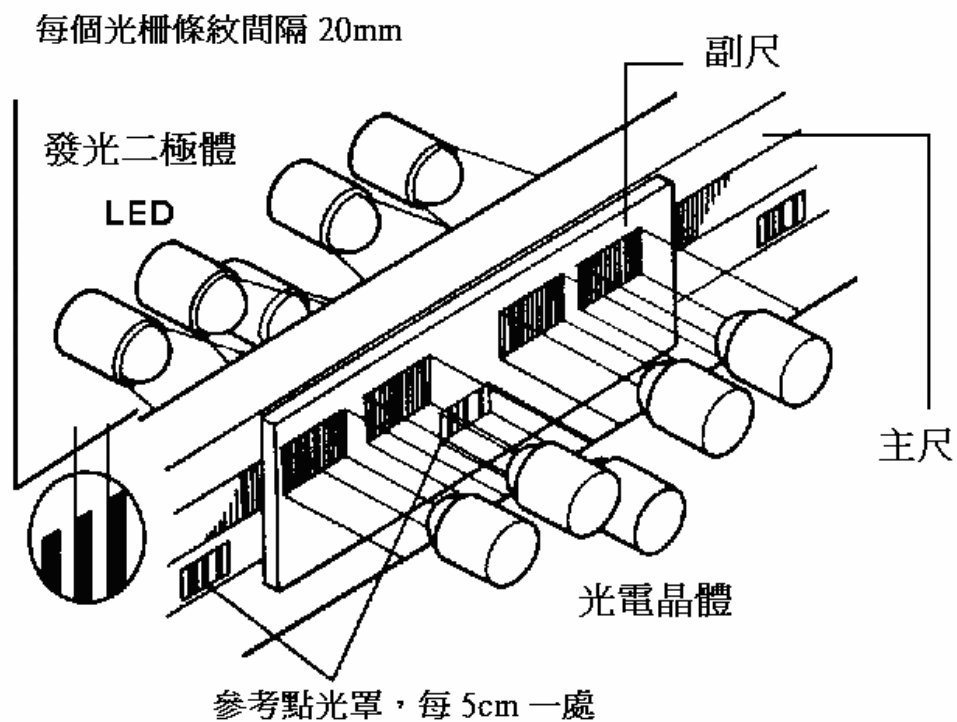


圖 3-11 多光源光檢測器光學尺

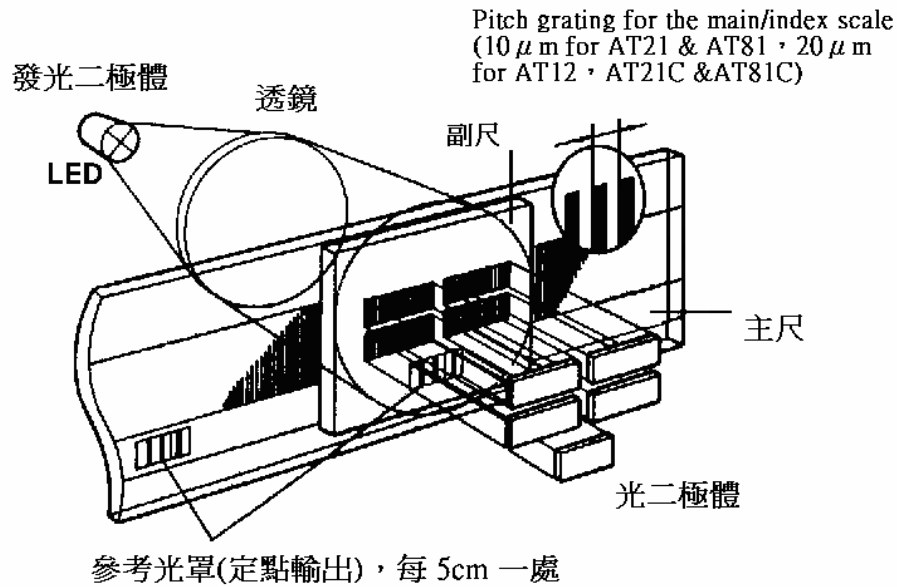


圖 3-12 單光源光檢測器光學尺

將等間隔光柵平行重疊，此時可能看不到疊紋，但一旦輕輕轉動上面一張光柵使其與下面之光柵呈一夾角，則可發現有間隔很大的疊紋出現，其間隔與已有之光柵間隔差異很大，當轉動的角度越大時，疊紋的間隔就變得越小，但條紋明暗對比卻越強烈，當上下兩片光柵之夾角為 90 度時，疊紋間隔最密，仔細觀察仍然可以找到疊紋的存在，其間隔與已有之光柵間隔接近。當將上面的一片光柵輕微移動此時將可看到疊紋圖形產生劇烈的變化，疊紋移動的速度大小與光柵移動之速度成等比例放大的結果，此即疊紋將小位移信號轉換成大位移信號的具體呈現。

即使是線性平行格子型之光學尺，其輸出信號之原理仍可視同疊紋之原理，只是與兩組光柵的夾角 θ 很小，因此疊紋的間距 θ 可視同無窮大，但無論是兩組光柵的平行度作得多好，仍然很難作到兩組光柵的夾角 θ 為零，因此疊紋的產生是必然的，只是現象明顯與否的程度上差異而已。

3.3 編碼器的原理

組合邏輯中將某輸入線的動作狀態以數碼的形式輸出，此電路即為編碼器 (encoder)。編碼器電路輸出線數越多，可以編碼的數量就越多，亦即可以區分輸入的線數就越多，例如一個擁有 101 個按鍵的鍵盤，若要以編碼器區分每一

個按鍵的動作，此編碼器的輸出線至少要 7 條($2^7=128$)，我們常將鍵盤按鍵編碼輸出，最主要的目的就是減少鍵盤與數位系統中的連線，試想一個 101 條線輸出的鍵盤如何在桌面上移動，若將其編碼輸出，信號線僅需 7 條，是不是方便太多了。

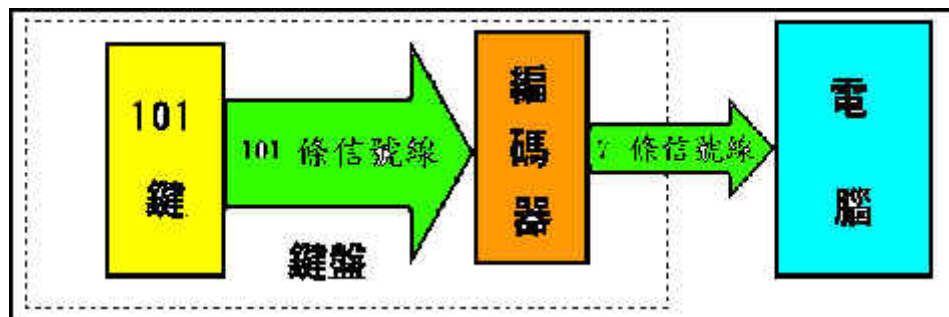


圖 3-13 編碼器訊號輸出示意簡圖

3.3.1 編碼器的動作與編碼

下圖 3-4 是一個四鍵編碼器，我們藉由這個圖來瞭解何謂輸入線的動作與編碼，當編碼器輸入端 4 個開關其中一個按下時，我們稱此開關動作(active)，因為每一個開關都有自己的輸入線，所以也可以說編碼器某輸入線動作了，「動作」對邏輯電路而言沒有規定一定是「0」或「1」，對 TTL 的編碼器而言，通常是以「0」來動作的，而 CMOS 則大多以「1」來動作。

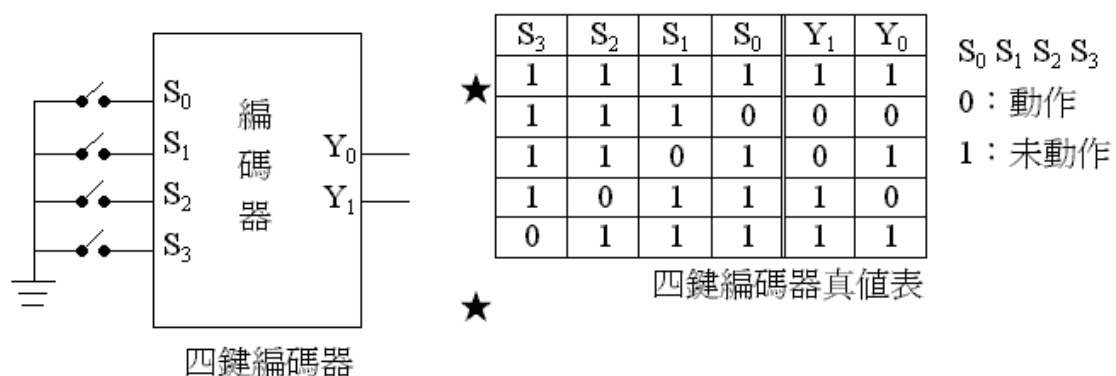


圖 3-14 四鍵編碼器示意圖與真值表

當編碼器任何一個輸入線動作時，輸出端將會產生編碼，以圖 3-14 而言， S_0, S_1, S_2, S_3 動作時分別對應的 $Y_1 Y_0$ 輸出是 00、01、10、11(見圖 3-14)，請注意一個問題，沒有任何一個按鍵動作時 $Y_1 Y_0 = 11$ 與 S_3 動作時的編碼相同，這個問題如

何解決呢？也就是 Y_1Y_0 用什麼碼來代表 $S_0、S_1、S_2、S_3$ 中沒有任何一個按鍵壓下呢？解決的方法有二，方法之一為將輸入線減少一條，例如我們可以將圖(3-14表)中的 S_3 去除，因此原來對應於 S_3 的編碼狀態 11 就可以設計成 $S_0、S_1、S_2$ 中無鍵按下時的狀態輸出，整個編碼輸出對應(如表 3-15)所示。

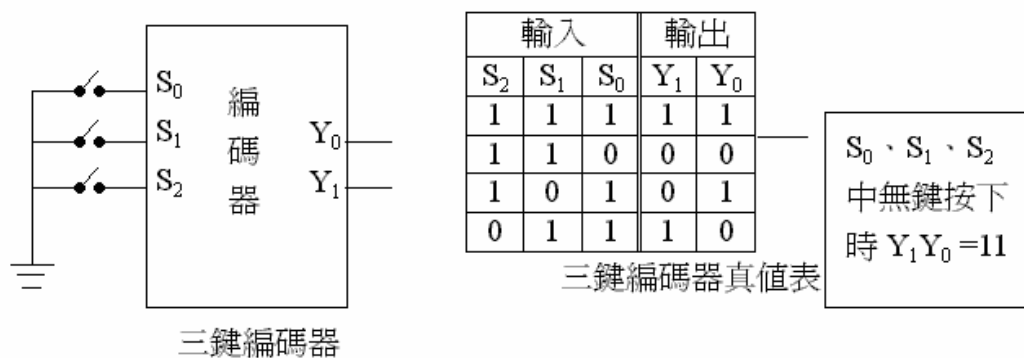


圖 3-15 三鍵編碼器示意圖與真值表

方法之二則為多加一條有效編碼輸出線ST，每當任何一鍵動作時，此輸出線立即跟著動作用以表示線目前的編碼是有效的，表 3-6 中的ST僅在有鍵按下時為 0，數位系統可根據ST為 0 時讀取 Y_1Y_0 的編碼。



圖 3-16 有效編碼器輸出四鍵編碼器與真值表

3.4 光學編碼器之原理

光電式圓編碼器又稱光學分角儀，其動作原理如下：

細縫圓板安裝於旋轉軸上，軸旋轉時，由光電感測器可感應明暗的變化，光的明暗變化的取法具有細縫的圓盤與檢出細縫相向而置，在兩側安裝光源、準置透鏡、光電感測器。常圓板旋轉一個間距，光電感測器經由檢出細縫得到一次光的明暗變化，將之轉換為正弦波形的輸出電壓。圓板每旋轉一間距，試取出一波形的輸出信號，將之脈衝化，以計數器計算脈衝數，即可數位計測軸的旋轉量。需要更細的讀值時，可利電子電路的分割回路，如在每轉 2000 分割的入碼器加裝 4 分割回路時，每轉可得 8000 個分割。

旋轉圓編碼器為了判軸的旋轉方向，組合相位錯開四分之一間距的兩種信號。兩檢出細縫群 A 與 B 錯開 $m+1/4$ 間距而佈置 ($m = \text{整數}$) (圖 3-17)。因而，細縫圓板旋轉的話，相對於輸出信號 a, b 的相位前進 90 度 ($1/4$ 間距) (圖 3-18)。細縫圓板順時針轉動時，輸出信號 a 比 b 超前 90 度。組合此二輸出信號，判別其旋轉方向。一旋轉一脈衝的基準信號與細縫圓板的主刻度同心，開一細縫，即可每旋轉一圈產生一脈衝的基準信號，可作為高速轉軸的誤差檢查。

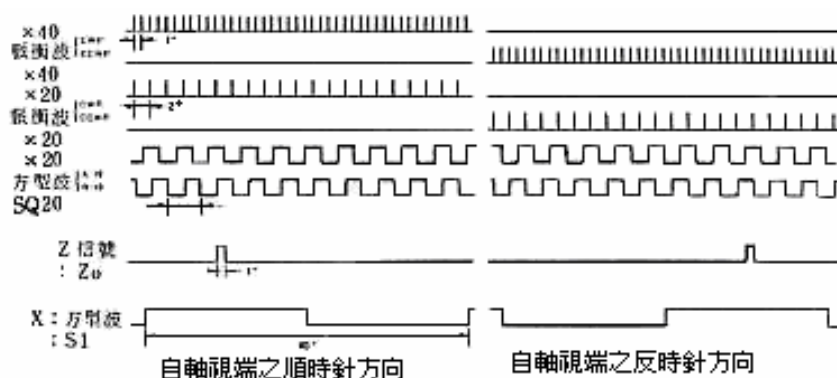


圖 3-17 旋轉圓編碼器

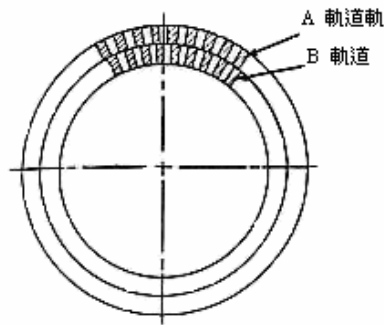


圖 3-18 旋轉圓編碼器

受光元件使用與發光二極體同波長的矽太陽能電池。用於二個受光元件，安裝於疊紋條紋間距的 1/4 處，亦即 1.5mm 間隔，如此取出兩相信號之相位差為 90 度，可用此判斷正反轉。

1986 年日本人 Yasuhtko Arai 及 Tadao Kurata 兩位提出採用多重式 (multiplication) 方法來提高疊紋的解析度。利用多重式 (multiplication) 的方法製造兩個角度間距不同的徑向格子板，一為每隔 3.6 度一條線，另一為每隔 1.2 度一條線。其解析度比沒有多重的疊紋條紋比較，其解析度高出三倍。

細縫圓板及檢出細縫板又稱為解碼光片(圖 3-19)，依照偵測的精密度而有 100、500、1000 而至 2000 個脈波，通常縫寬在大於 $70\mu\text{m}$ 者，一般採用 SUS304 不銹鋼材料，利用光蝕刻加工(photo etching process)製造之。

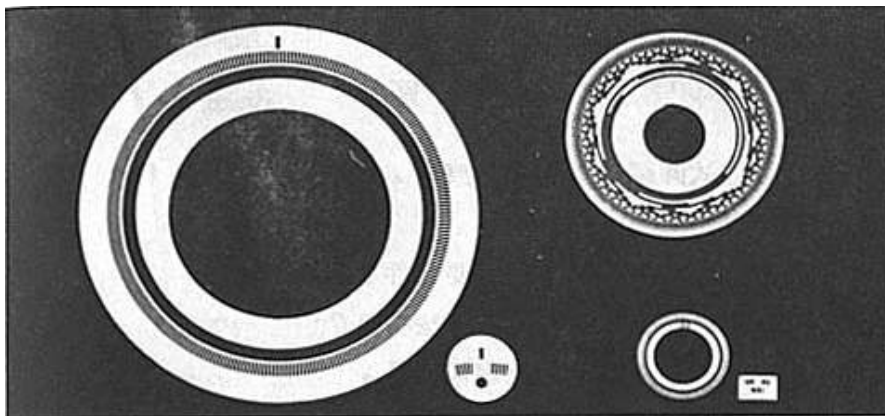


圖 3-19 細縫圓板及檢出細縫板

光蝕刻加工是圖形設計技術(Art work Design)，微縮照相技術(Micro photography)、光阻劑(photo resist)、塗佈、曝光、顯影技術及化學蝕刻技術(Cheical Wet Etching Techniques)等的組合。徑向格子板為高解析度的解碼

光片，線寬在 $5\mu\text{m}$ 之間，利用濺射或蒸鍍方法，塗佈在玻璃面上，其膜厚約 $0.08\mu\text{m}$ 到 $0.2\mu\text{m}$ 之間。

3.5 光柵的製作原理

光柵是一種特別的全息圖，能表現全彩及應用在傳統的平板印刷出版。光柵一詞源于圖像印刷在有凸透線紋的膠片上。交織的圖像透過附有凸透線紋的膠片，在不同的視角展現出不同的圖像。

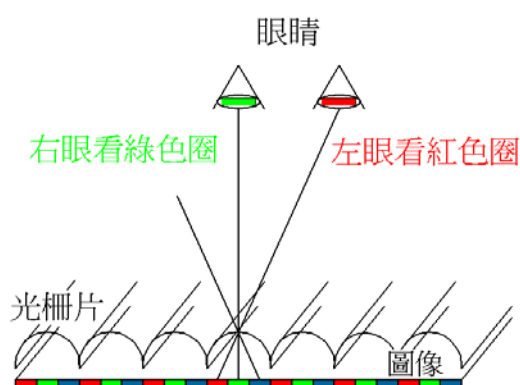


圖 3-20 光柵示意圖

光學尺的光柵是光蝕刻加工所製造，利用光阻的光化學反應特點，將光照上的圖形精確地放大或縮小印製在塗有光阻的基材表面上，在利用光阻的耐腐蝕特性，對基材表面進行腐蝕，從而獲得極為複雜精細的圖形。下圖為主光蝕刻的主要工作流程。

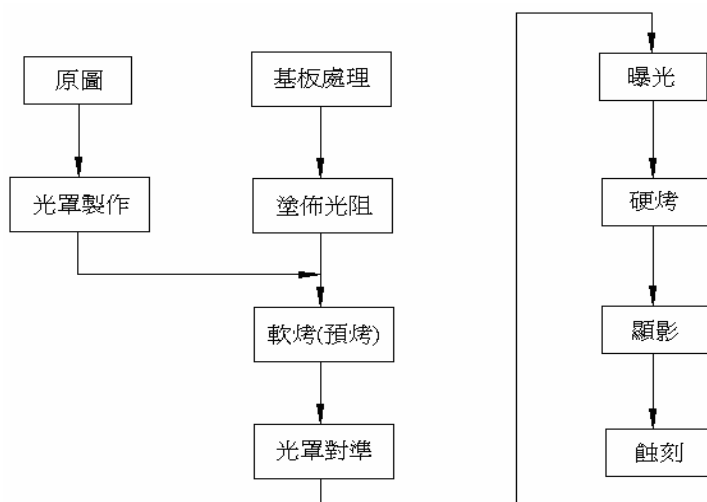


圖 3-21 光蝕刻的主要工作流程

(1)原圖和光罩製作

按照產品的要求利用 CAD 技術對加工圖案進行圖形設計，然後用影像處理把原圖所小製成初縮版，然後用步進重複照相機將初版精縮，使圖形進一步縮小，從而獲得精確的照相底板，再把照相底板用接觸複印法，將圖形印製到塗有光阻的高純度鍍鉻玻璃板上，經過腐蝕即可製得具有金屬薄膜圖案之光罩 (mask)。

(2)上光阻

光阻的塗佈是將基材固定在一個轉盤上，然後將光阻滴於基材上使光阻擴散而均勻附著於基材上，其厚度約為 $0.5\mu\text{m}$ 至 $3\mu\text{m}$ 之間。

(3)軟烤

上完光阻後之基材必須經過加熱烘烤，稱為「軟烤」(soft baking)或「預烤」(prebaking)。軟烤的目的是將光阻薄膜加熱使溶劑蒸發，並增加光阻的附著性。

(4)光罩對準

在每次曝光前都必須先將「光罩對準」(mask alignment)，製作出來的元件會與所設計的不同。

(5)曝光

將光阻照射光線使產生化學反應，造成光阻材料內部結構的改變的程序，稱為「曝光」(exposure)。

(6)硬烤

曝光之後還需要將光阻烘烤，目的在於使光阻進一步硬化，使未曝光部分的光阻較難溶解。

(7)顯影

經由化學溶液將光阻材料的圖形顯現出來稱為「顯影」(development)。

(8)蝕刻

將被光阻覆蓋的氧化物層去除稱為「蝕刻」(etching)。

(9)光阻剝除

蝕刻之後需要將光阻材料去除，通常稱為光阻的「剝除」(stripping)。

第4章 光學尺於三次元量測儀的應用

4.1 光學尺之安裝位置

氣浮式三次元量測儀之 X、Y、Z 軸尚未更換 LIA20 光學尺之前全貌(如圖 4-1)



圖 4-1 未拆開的全圖

如圖 4-2 所標示需更換 LIA20 光學尺之位置

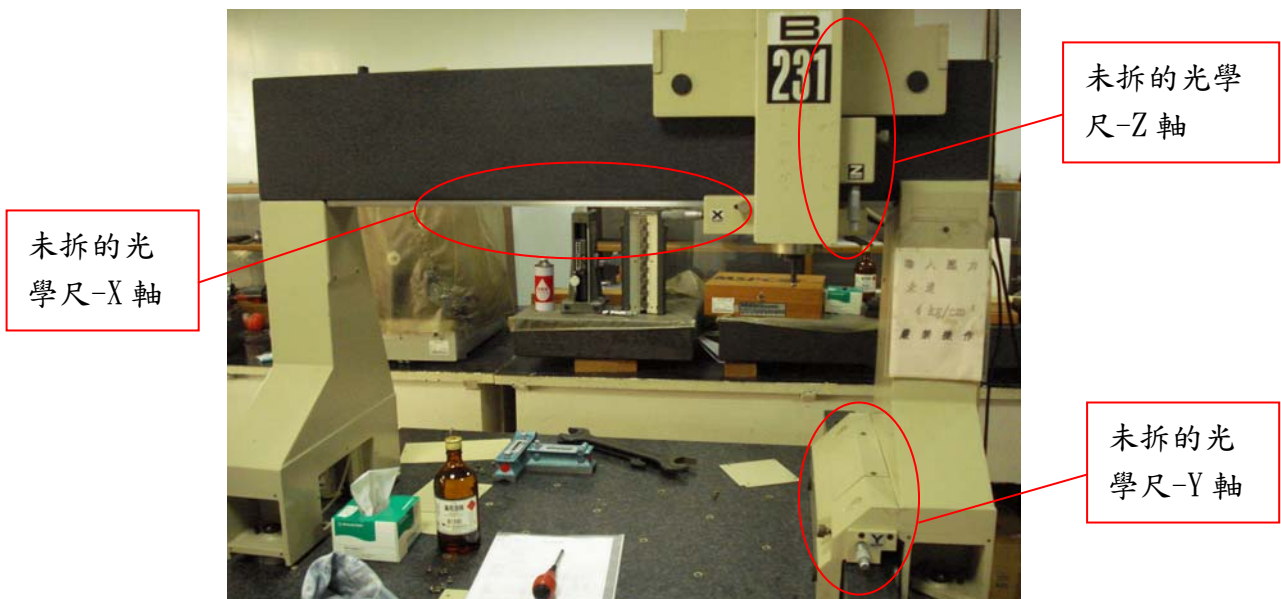


圖 4-2

如圖 4-3 圖中標示位置即為更換 LIA20 光學尺及讀頭位置

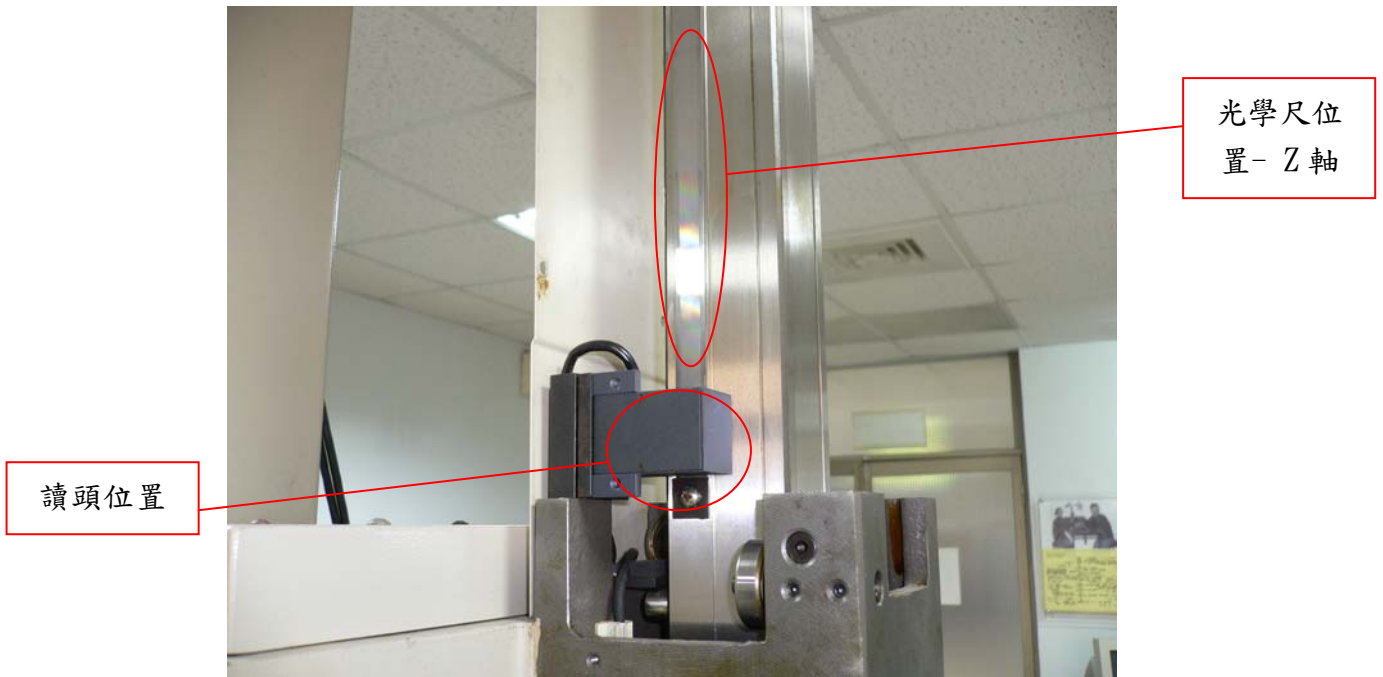


圖 4-3

如圖 4-4 圖中標示位置即為氣浮式三次元量測儀之 X 軸之光學尺安裝位置

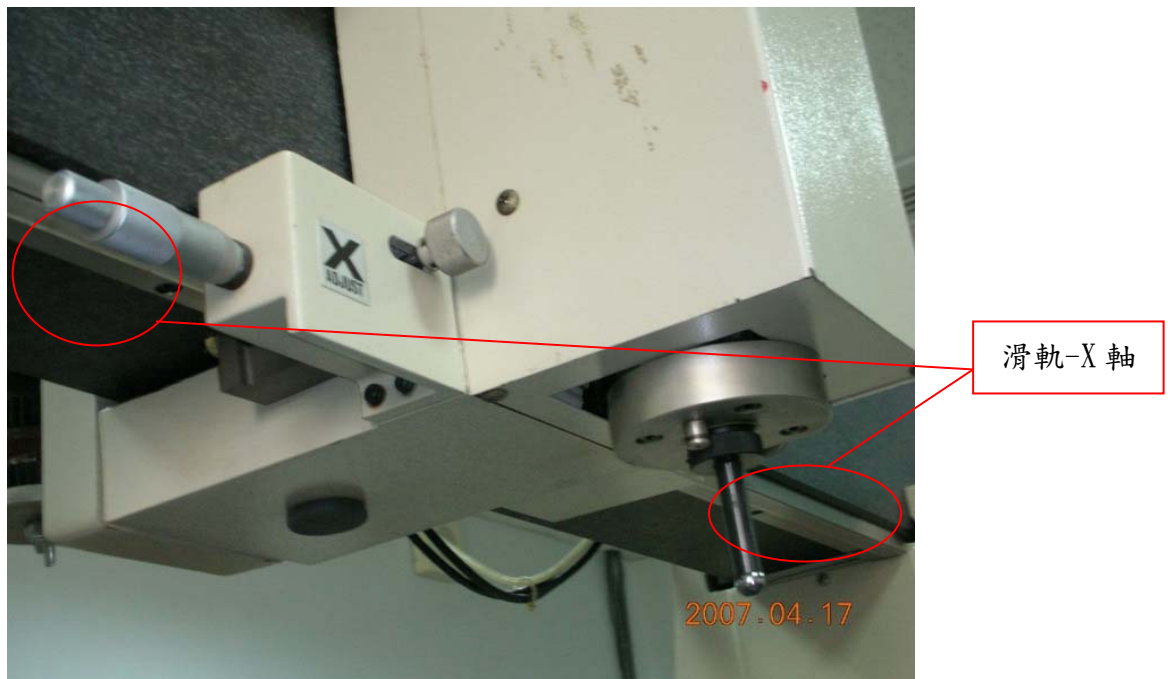
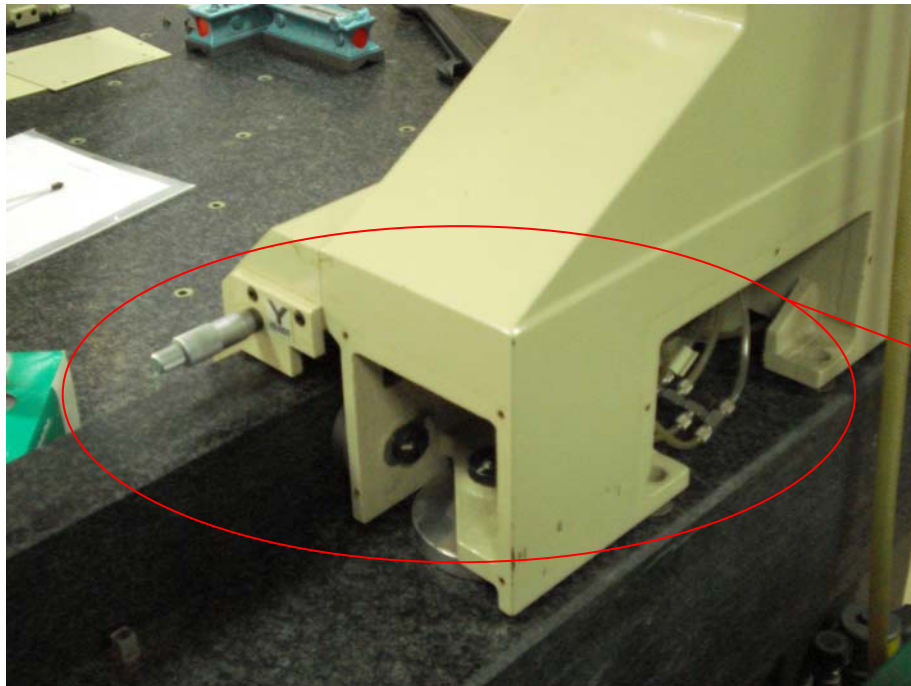


圖 4-4

如圖 4-5 為氣浮式三次元量測儀之 Y 軸滑軌拆卸後之狀態



氣浮式平
台主軸-Y
軸

圖 4-5

如圖 4-6 為氣浮式三次元量測儀之 Y 軸滑軌拆卸後之狀態



滑軌-Y 軸

圖 4-6

氣浮式三次元量測儀之 X、Y、Z 軸滑軌部分將安裝 LIA20 光學呎如圖 4-7 及光偵測器如圖 4-8



圖 4-7



圖 4-8

第5章 結論與未來研究建議

5.1 結論

本專題雖未能如其預定進度組裝完成，但可以期待本專題將氣浮式三次元量測儀的老舊光學尺替換成新式光學尺，此舉將可使原氣浮式三次元座量測儀之解析度保持 $1\ \mu\text{m}$ 。以免原機臺，因光學尺老舊及軟體不符合時代而報廢浪費資源。

5.2 未來研究建議

- a. 氣浮式三次元量測儀替換光學尺之後，解析度將高達 $1\ \mu\text{m}$ ，可作為研究生三次元量測自動化之硬體與軟體的研發。
- b. 可繼續探討光學尺的原理，且可以朝增加解析度的方向研究，比如光柵的研究，還有數學模式的建構。