

交通部中央氣象局委託研究計畫成果報告

建立雨量儀校正系統標準追溯體系
Establishment of Calibration Traceability of Rain Gage

計畫類別：國內

計畫編號：CWB 86-2M-06

執行期間：85 年 7 月 1 日 至 86 年 6 月 30 日

計畫主持人：范光照教授

協同主持人：劉明揚副主任

中華民國八十六年六月三十日

目 錄

1. 前言
2. 量測原理
3. 硬體結構設計
 - 3.1 有效面積之計算模式
 - 3.2 誤差分析
4. 有效面積之數學模式與誤差分析
 - 4.1 原始機械架構
 - 4.2 修正後之機械架構
 - 4.3 傳動機構
 - 4.4 電腦介面架構
5. 軟體發展
 - 5.1 發展環境
 - 5.2 軟體架構
 - 5.3 系統功能
6. 實驗結果
 - 6.1 系統之校正
 - 6.2 系統量測實例功能
7. 結論與建議
 - 7.1 結論
 - 7.2 建議
8. 參考資料
9. 附錄

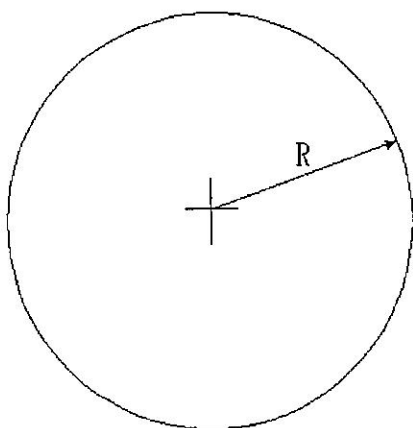
1. 前言

自古以來降雨量之量測即是氣象單位最主要的工作之一，其量測之準確性與否更是直接影響國民生計及社會安定，雨量儀便是現行量測降雨量最主要的器具，而如何確保雨量儀之量測準確度便是一大課題，其中定期校正更是最基本的工作。依降雨量之定義係單位面積內降下之雨水，總體積謂之而雨量儀之原理即是將流入雨量儀集雨筒內之雨水總體積除以集雨口面積得到降雨量，其中雨水體積係由其內之傾斗儀量得。其追溯校正較無問題倒是集雨口之有效面積量測較易產生誤差。

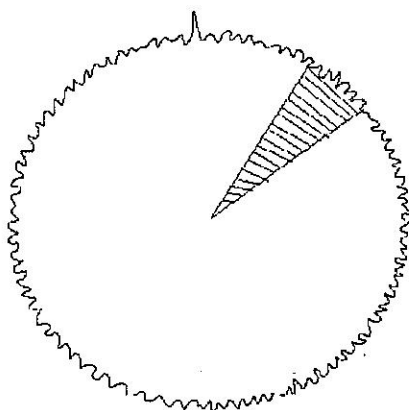
通常，雨量儀集雨筒集雨口之形狀為圓形，但由於長期的使用，極易使集雨口產生變形而成非圓形，現行集雨口有效面積之量測方式係以游標卡尺量取約三個方向之直徑加以平均，再以標準圓面積公式來換算集雨口之有效面積，然而在游標卡尺的解析度只有 $0.02 \sim 0.05\text{mm}$ ，且未考慮集雨口失圓的狀況下，集雨口之有效面積量測便成為雨量量測之最大誤差源，因此，如何更精確量測集雨口有效面積並獲得完整之標準追溯便是本文之重點。

2. 量測原理

圖一所示為一理想之圓形，此理想圓的面積為 πR^2 。雨量儀量雨筒之集雨口形狀理論上亦應為理想圓，但由於使用或其他因素使然，此集雨口之形狀並不會呈現一理想之圓形，極有可能如圖二般的變形，因此若是以理想圓面積之公式來計算集雨口面積，則將得到極大之誤差，因此本計劃能即時量測圓的半徑(或直徑)，圓形面積可由小面積積分方式來獲得，即可求得該圓的有效面積。本系統即設計一校正系統以高精度的電子量表取代游標卡尺，利用一旋轉機構帶動此電子量表，量取量雨筒各方位的半徑，再以數值方法將量雨筒之集雨面積精確算出。由於本系統的精度較高，且幾無人為誤差因素，故在系統不準確度方面將大為提昇。



圖一 理想圓形



圖二 實際的圓形

3. 有效面積之數學模式計算與誤差分析

3.1 有效面積之計算模式

由於雨量儀集雨口並非正圓形，故無法使用標準圓面積公式來計算其面積，圖 3.1 所示為一圓之部分扇形區域，斜線部分面積為

$$dA = \frac{1}{2} \int_a^b r(\theta)^2 d\theta \dots (1)$$

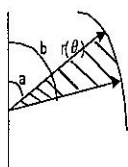


圖 3.1 圓面積之推導

吾人欲得知其整圓之面積，只需將其由 0 至 360° 積分即可（但是其假設是圓心必須固定不動）。然由於機械加工或裝配上之誤差，常使得系統機構運轉時並非繞著圓心旋轉，將會產生若干幾何誤差，以下則針對這些誤差作一詳細之探討。

3.2 誤差分析

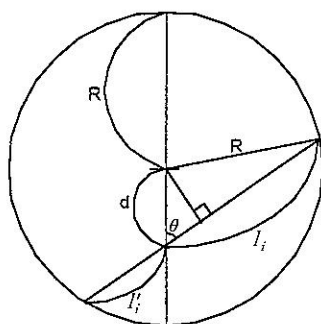
3.2.1 若是雨量儀集雨口中心、馬達轉軸中心、電子量表中心三點重合則

$$r(\theta) = R = \text{常數}$$

所以量測值 $x_i = X$

$$A = \frac{1}{2} \int_0^\pi [(X)^2 + (X)^2] d\theta = \frac{1}{2} \pi X^2 \cdot 2 = \pi X^2 \dots (2)$$

3.2.2 若是馬達轉軸中心，電子量表中心兩點重合，如下圖所示，則



$$l_i = \sqrt{R^2 - (d \sin \theta)^2} + d \cos \theta \dots (3)$$

$$l'_i = \sqrt{R^2 - (d \sin \theta)^2} - d \cos \theta \dots (4)$$

$$\text{而 } x_i = l_i + l'_i \dots (5)$$

$$A = \frac{1}{2} \int_0^\pi (l_i^2 + l'^2_i) d\theta = \frac{1}{2} \int_0^\pi (x_u^2 - 2l_i l'_i) d\theta \dots (6)$$

$$\text{而 } l_i l'_i = [R^2 - (d \sin \theta)^2] - (d \cos \theta)^2 = (R^2 - d^2) \dots (7)$$

$$\therefore A = \pi(d^2 - R^2) + \frac{1}{2} \int_0^\pi x_i^2 d\theta \dots (8)$$

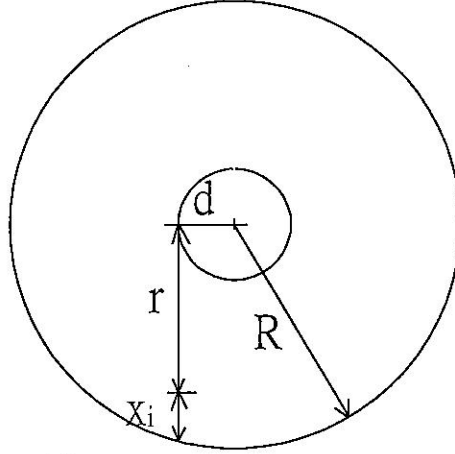
3.2.3 由於裝配的定位誤差，馬達旋轉中心及電子量表中心可能有所偏差，故這兩點之間位置的偏差均須加以考量。以下推導以一理想圓（即環規，其圓半徑為R）為一基準，當雨量儀量測此一理想圓時，因為環規中心、馬達轉軸中心與電子量表中心三點彼此位置偏差所造成的誤差對圓面積公式的影響如下，假設圖3.2中的圓O面積為A，因為圖中的P點固定不動，所以可以以方程式(1)來計算圓O面積A：

$$A = \oint \frac{1}{2} R^2 d\theta = \pi R^2 \dots (9)$$

$$A = \sum \frac{1}{2} [(r + x_i)^2 + d^2] \Delta\theta = \pi R^2 \dots (10)$$

$$A = \sum \frac{1}{2} (r^2 + 2rx_i + x_i^2 + d^2) \Delta\theta = \pi R^2 \dots (11)$$

$$A = \frac{1}{2} \sum r^2 \Delta\theta + \sum rx_i \Delta\theta + \frac{1}{2} \sum x_i^2 \Delta\theta + \frac{1}{2} \sum d^2 \Delta\theta = \pi R^2 \dots (12)$$



A : 圓 O 面積

O : 環規圓心

P : 馬達中心

R_i : 馬達中心到環規內徑的距離

d : 馬達中心與電子量表中心兩點的偏差量

R : 標準圓(即環規)的半徑

r : 電子量表的參考絕對長度

x_i : 某一角位電子量表之量測值

圖 3.2 環規中心、馬達轉軸中心與電子比測儀中心偏心

因為 r 與 d 是常數，所以

$$A = \frac{1}{2} r^2 \sum \Delta\theta + r \sum x_i \Delta\theta + \frac{1}{2} \sum x_i^2 \Delta\theta + \frac{1}{2} d^2 \sum \Delta\theta = \pi R^2 \dots (13)$$

而旋轉是由步進馬達驅動，所以每一步進角都相同，因此

$$\sum \Delta\theta = 2\pi \dots (14)$$

$$\Rightarrow A = \pi r^2 + r \Delta\theta \sum x_i + \frac{1}{2} \Delta\theta \sum x_i^2 + \pi d^2 = \pi R^2 \dots (15)$$

因為這個方程式有兩個未知數，而我們用此系統量測標準件

(環規)只能獲得一個方程式,所以必須用其他的校正方法先求出其中一個未知。而當機構完成時,機構本體所產生的常數 R 與 D 即固定了,所以我們可採用 CMM(三次元量床)或輪廓投影儀,先量出偏心量 D,再利用此一方程式解出 R 值,而 R 值與 D 值即此機構的校正參數,因此用此機構量測量兩筒時,將此二參數輸入,即可得量測面積為

$$A = \pi r^2 + \pi d^2 + r\Delta\theta \sum x_i + \frac{1}{2} \Delta\theta \sum x_i^2 \dots (16)$$

4. 硬體結構設計

4.1 原始機械架構

集雨口有效面積之差異最主要係因其變形所引起的，因此，本系統的設計即是採取類似探頭旋轉式真圓度量測儀之架構為基礎。原始設計以 double ball bar（其兩端為 LVDT 測頭）繞一圓並讀取其直徑偏差量，其硬體架構示意圖如圖 4.1 所示，再以電腦計算得到其面積值，雖然 LVDT 測頭之解析度與精度均非常高，但其量測範圍僅有 2mm 左右，當遇到集雨口變形較大時便無法使用了。

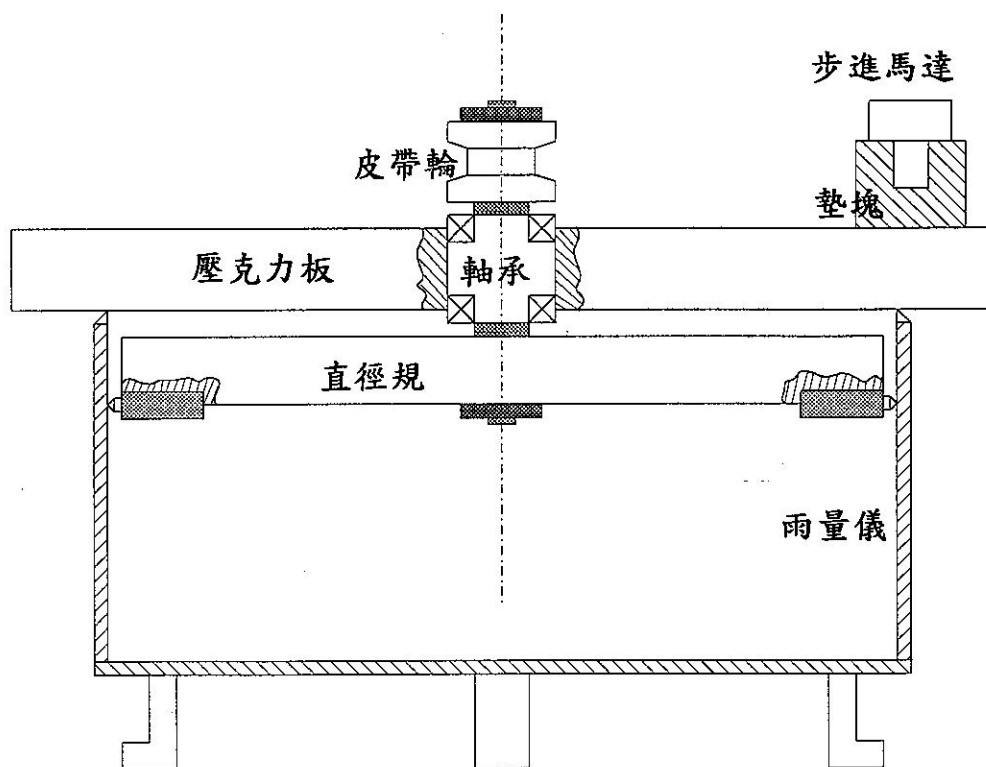


圖 4.1 原始硬體結構示意圖

4.2 修正後之機械架構

本計畫為了克服這個問題，第二階段改採電子量表來量測集雨口之半徑，此量表之量測範圍可達 25mm，解析度亦可達微米級 (μm)，對於本系統來說已是綽綽有餘，同時，電子量表本身即具備數據之輸出裝置，可經 RS-232C 介面直接輸入電腦應用，故可放心使用，修正後之硬體架構如圖 4.2 所示。整個硬體結構照片如附錄所示。

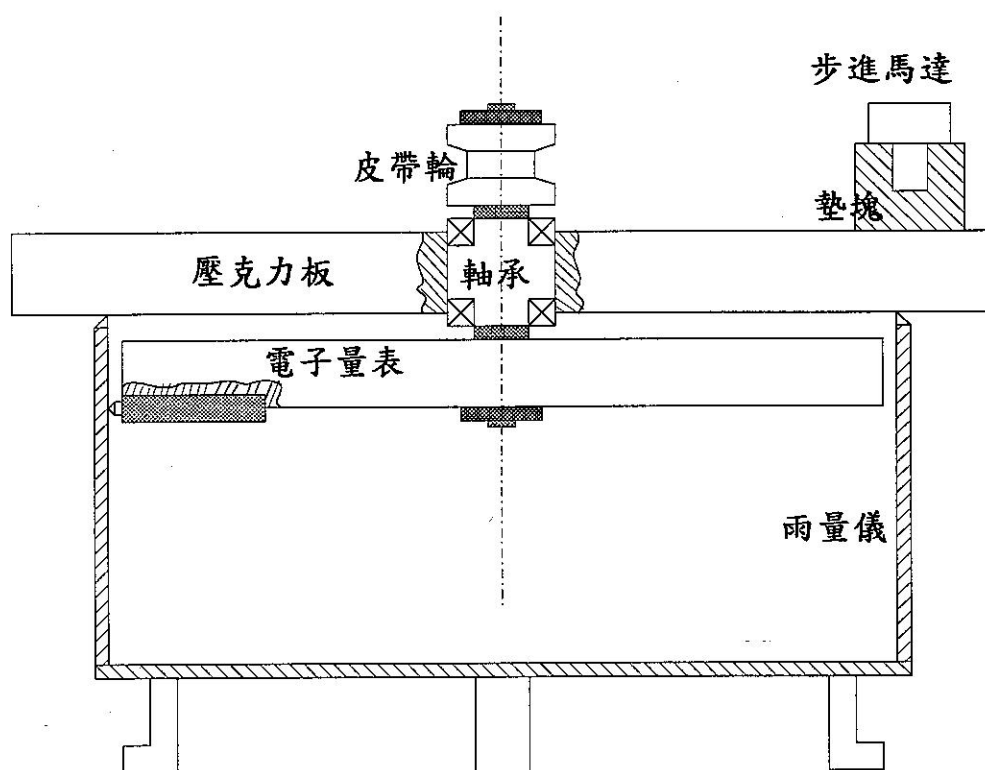


圖 4.2 硬體結構示意圖

4.3 傳動機構

本系統之傳動機構係使用步進馬達(其最小步進角度為 1.8 度)作為動力源，透過正時皮帶帶動電子量表旋轉，而電子量表之測頭

即依循集雨口之形狀伸縮，集雨口之半徑即可由電子量表得知。此步進馬達之驅動器為將來維修方便，又考慮到將來本系統可能攜帶至野外而使用筆記型電腦，屆時將無法外接任何介面卡，故採用最簡單之市售品，使用時僅需依次送入方型波，步進馬達即可依需要旋轉至所需角度。

此外，本系統使用二個滾柱止推軸承作為傳動軸之支撐，以克服軸向力之影響或軸向位移誤差之發生。

4.4 電腦介面架構

通常，筆記型電腦僅有二個序列埠，因使用視窗環境故其中一個必須保留給滑鼠使用，另一於序列埠則保留給電子量表使用，在無法使用外接介面卡之情況下，已無多餘之序列埠可供步進馬達之驅動器使用，因此，步進馬達之驅動器所須之訊號改由印表機之並列埠送出，如此除可充分運用電腦之資源外，也解決了介面不足的窘境。圖 4.3 為有關電腦介面架構之示意圖。

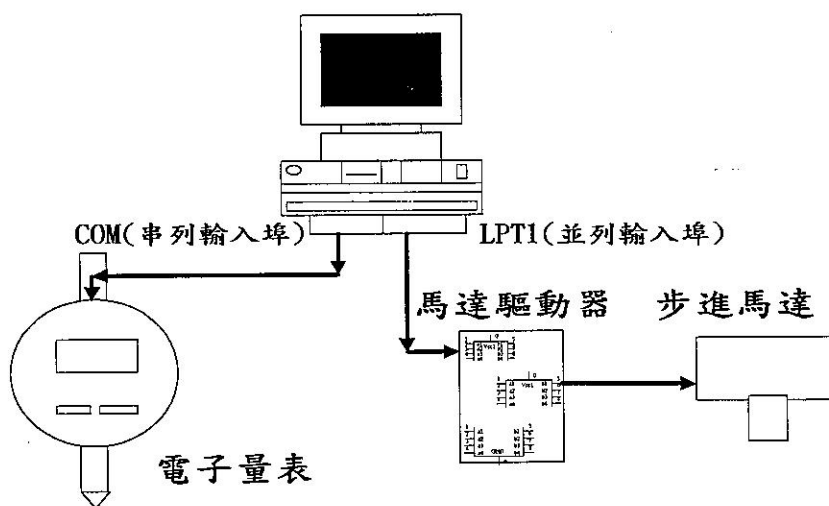


圖 4.3 電腦介面之架構示意圖

5. 軟體發展

5.1 發展環境

本系統另一重要之工作為軟體之發展，有鑒於視窗化、圖形化軟體乃當前軟體發展之趨勢，因此，本系統之軟體亦採用視窗化為其主體，整個軟體係由架構在 Delphi 之整合環境下所發展而成，其 Object Pascal 物件導向之程式語言極適合作為控制與分析軟體之撰寫，系統中每一項功能或分析模組均已物件型態表現，圖 5.1 為本軟體之主畫面。

5.2 軟體架構

為方便使用，故本系統全部採用電腦化控制，電腦控制機構旋轉、量測與計算分析，其中電腦與馬達之連線、電腦與電子量表之連線、系統之校正、面積值之計算與校正報告列印等功能均以物件方式存在於程式之中，本軟體程式之主要架構如圖 5.2 所示。

5.3 系統功能

本軟體目前計有量測、計算分析、校正及報告列印等多項功能，各項功能之使用說明均已詳列於系統 HELP 檔中，使用者可於軟體執行期間叫出說明檔參考使用，亦可參考本章說明使用，以下簡要說明各項功能之使用，使用者可按功能表上之小圖標(ICON)或直接選擇功能表之選項來呼叫該項功能，取消時按<ESC>鍵即可。

5.3.1 校正

由於旋轉軸之偏心對於本系統之影響頗大，故本系統在重新安裝或經過拆解、碰撞等動作後，均必需做系統誤差之再校正；此外，於正常使用中也必須依使用狀態及頻率，定期對系統誤差作校正及追溯，並將系統誤差 R 及 D 值加以記錄，以便在量測時予以補償之。系統之校正方法極為簡單。先用 CMM(三次元量床)或是輪廓投影儀量取馬達中心與量表量測軸的偏心量，然後只需再用已經組裝好之面積校正系統來量測一標準環規的面積一次即可，再由本程式自動計算分析系統整體之系統誤差 R 值，校正完畢後，R 及 D 值會自動存入系統當中。如圖 5.3 所示。

完成此項校正動作後，同時意味著長度的標準已藉由標準環規傳遞至本系統，爾後使用只要先將此標準環規定期送至度量衡國家標準實驗室(NML)校正過，即可順利將標準轉移至此雨量儀，亦即建立其追溯體系。

5.3.2 開啟新檔

本系統儲存數據檔案係以每次之量測為存檔單位，故每次執行面積量測時均需先開啟一個新的檔案(亦可使用舊檔名稱)，用以暫存量測之原始數據，供稍後之計算分析使用，待完成量測動作後，使用者亦可選擇將其存檔或放棄。本程式內定程式一開始執行開啟一個新檔案，無須再重複此動作。此外，如量測過程有干擾或錯誤，將造成量測值的誤差，應將此次量測放數據放棄，所以無論每一次的量測是否完成，欲開始另一次新的量測過程，切記一定要先執行開啟新檔。也就是說開啟新檔有清除現有數據的

功能。

5.3.3 開啟舊檔

量測系統電腦化有一個優點，即是數據的儲存，經常，使用者可能需要將以往之數據與現在的新數據做比較，或是做些統計分析等，此時便可使用開啟舊檔之功能載入已存在於磁碟中的量測資料數據檔，再對檔案內的數據資料做計算或分析。如圖 5.4 所示。

5.3.4 (有效面積)量測

本項為本系統最主要的功能，用以量測雨量儀集雨口之有效面積，其量測(即數據輸入)方式有二，一為手動方式，一為電腦連線方式，使用者可依實際需要選擇之，一般建議以電腦連線之量測方式較佳，使用電腦連線除可節省大量量測時間外，亦可降低手動輸入錯誤之風險。

(a)手動：使用者以目視電子量表(亦可使用其他種類之量測方式，如卡尺...等)量測雨量儀集雨口之半徑(直徑)，再將這些量測數據由鍵盤直接鍵入電腦中供分析，其操作畫面如圖 5.5 所示。

(b)電腦連線：選擇此項功能需先將電子量表接於電腦的序列埠(COM2 或 COM1)，並將步進馬達驅動器之接頭連接於電腦的印表機輸出埠(LPT1)，按下開始量測後，即可由電腦直接控制驅動步進馬達旋轉，並由序列埠讀取電子量表之數值，其操作畫面如圖 5.6 所示。

5.3.5 面積值計算

本項功能係將先前所取得之原始數據，依前面章節所

推導之分析方法加以計算，以獲得雨量儀集雨口之有效面積值，其操作畫面如圖 5.7 所示。

5.3.6 量測結果

除了集雨口之有效面積值外，集雨口之形狀有時也是使用者關心的焦點，因此，本系統之量測結果將分二種型式表現出來，一是數據型式，一是圖形型式，使用者除可從面積得知集雨口之面積外，亦可從圖形看出集雨口是否變形，有時，不同之幾何形狀有可能得到相同之面積值，故將數值與圖形搭配使用方為較佳之選擇。

(a)數據：將量測值顯示於資料欄中，使用者可按上下捲軸獲得其他數據，如圖 5.8 所示。

(b)圖形：將集雨口之形狀顯示出來，此時，圖形係將量測值與理想值間的偏差值放大約 10 倍繪出，但其半徑(直徑)值並未相對地放大，故使用時需特別注意其放大倍率及相關性。如圖 5.9 所示。

5.3.7 列印

本項功能用以列印校正結果，校正報告列印選項中可先選擇檔案作分析，再列印校正報告。如圖 5.10，圖 5.11 所示。

5.3.8 離開

結束量測程式回到視窗作業系統環境，結束作業前請注意量測數據是否存檔。



圖 5.1 軟體主畫面

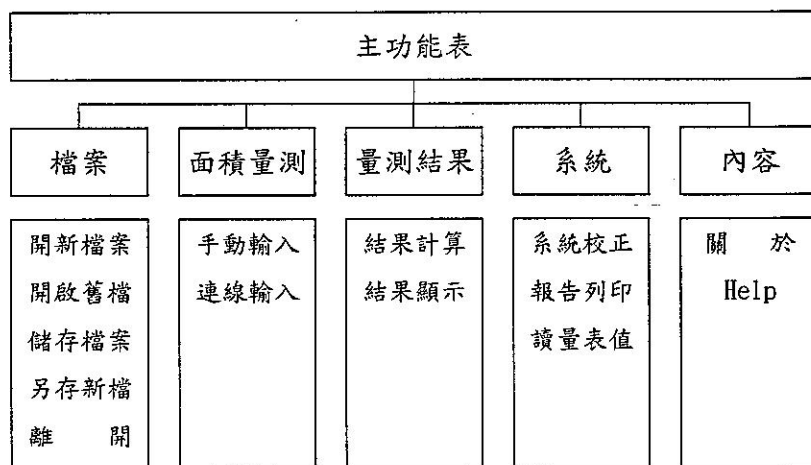


圖 5.2 軟體主要架構

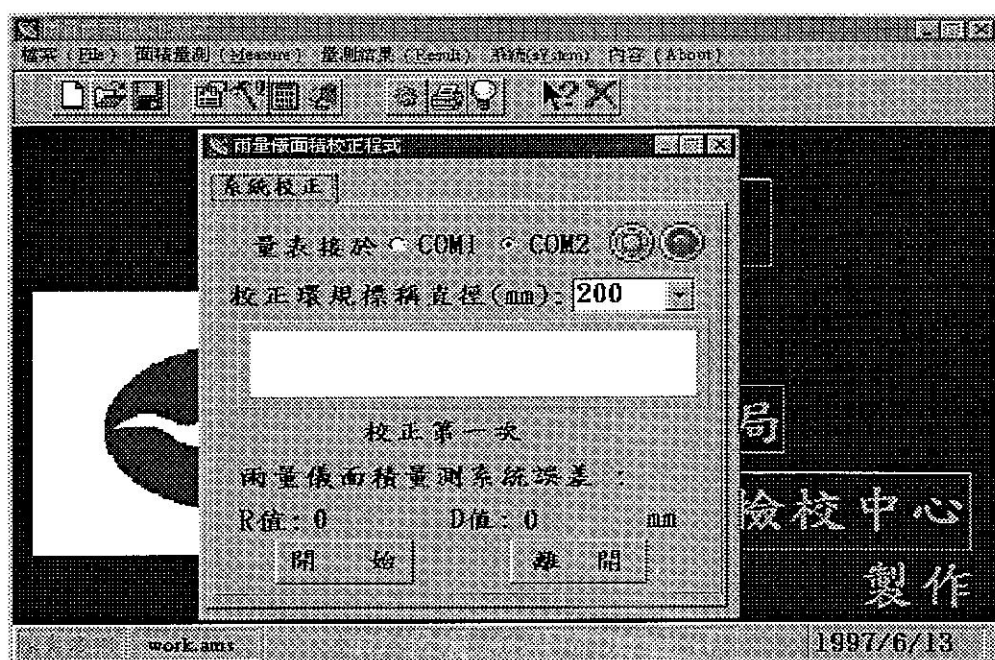


圖 5.3 校正畫面

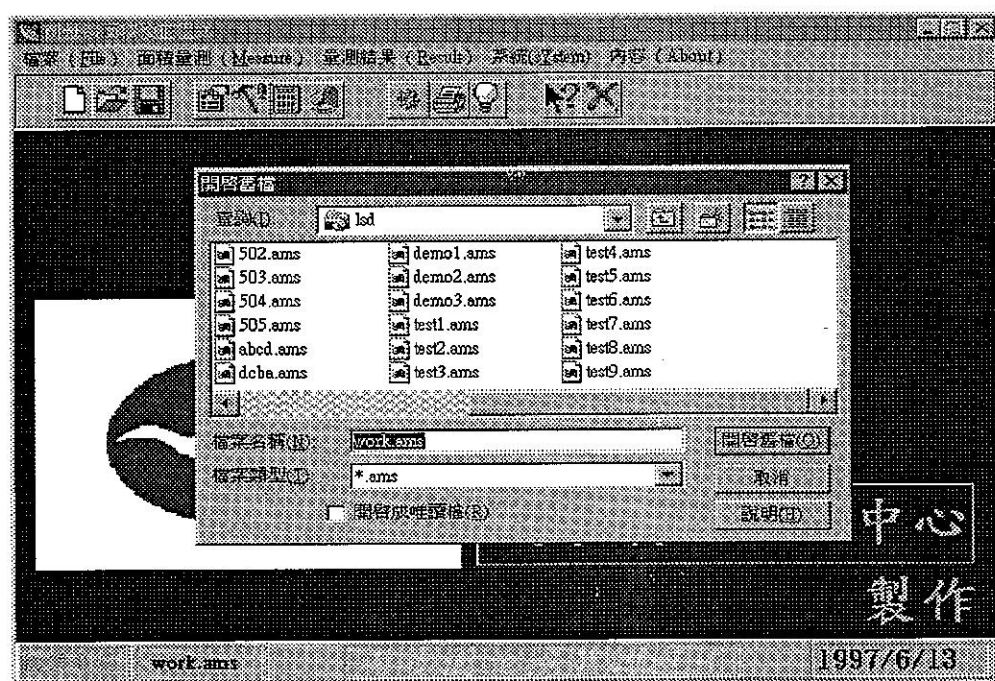


圖 5.4 開啟舊檔畫面

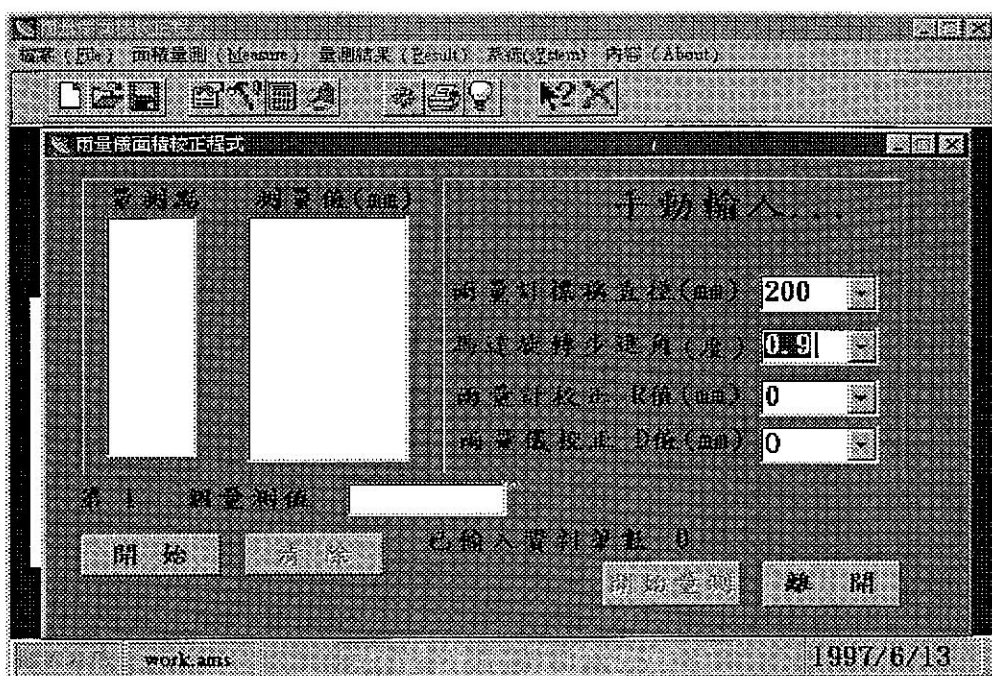


圖 5.5 有效面積量測之手動輸入

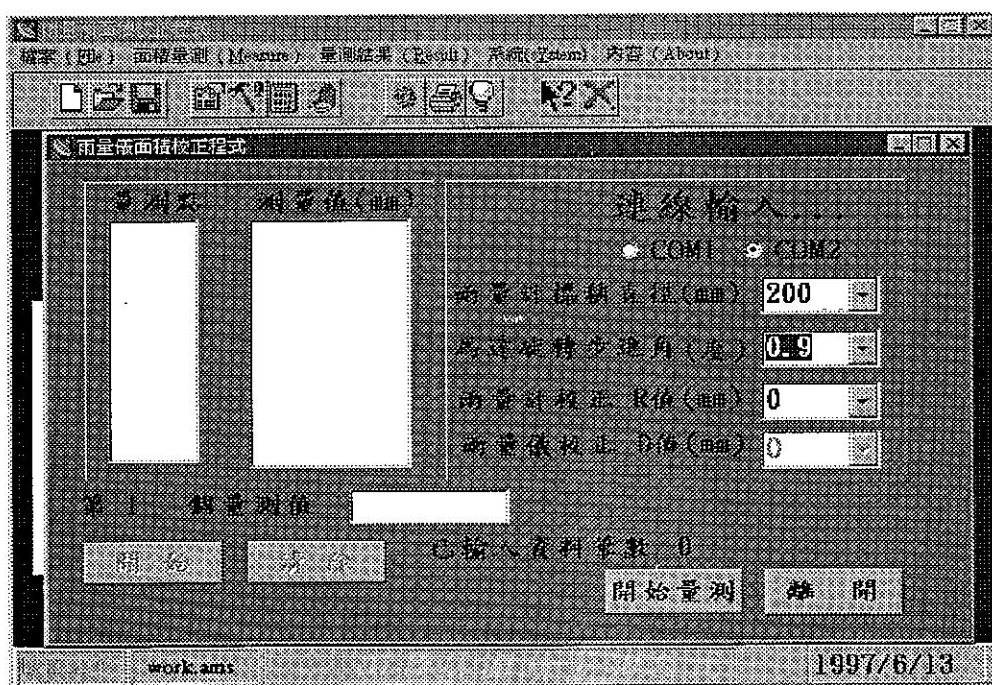


圖 5.6 有效面積量測之電腦連線



圖 5.7 計算畫面

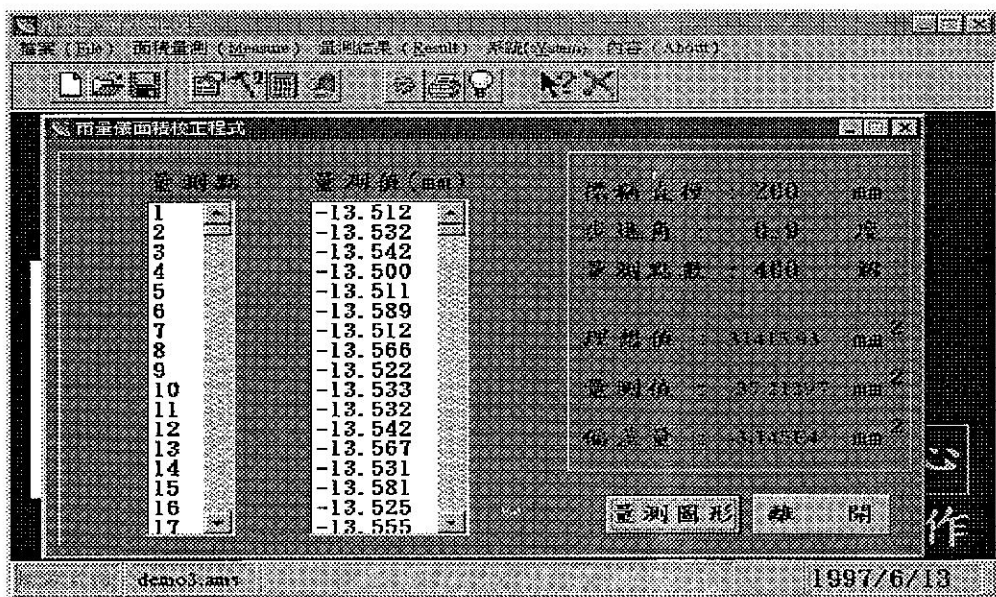


圖 5.8 量測結果數據畫面

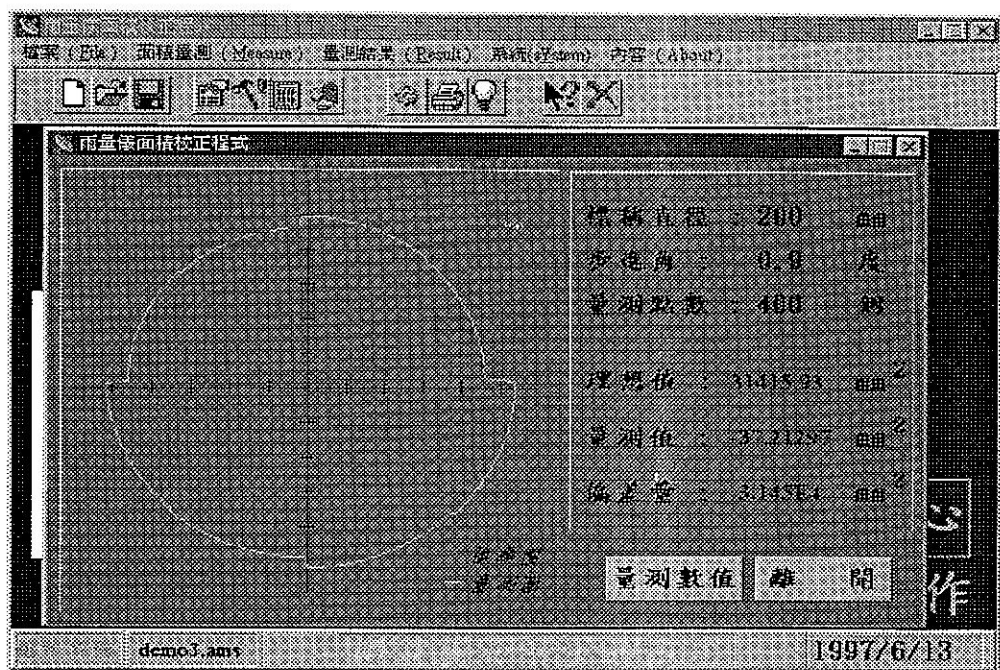


圖 5.9 量測結果圖形畫面

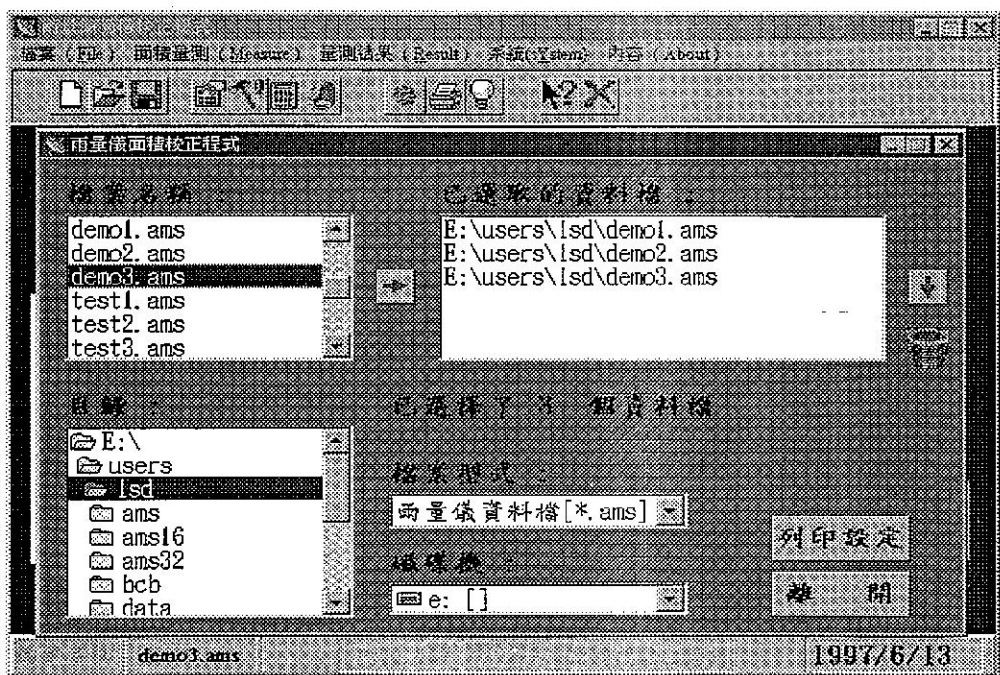


圖 5.10 列印畫面

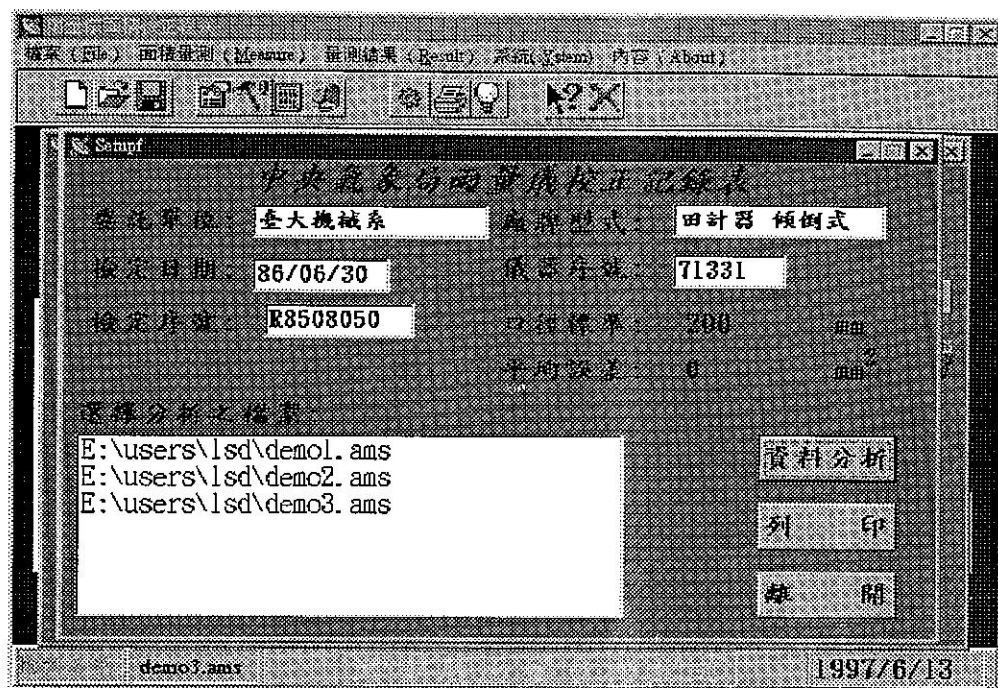


圖 5.11

6. 實驗結果

6.1 系統之校正

系統之校正有二部份，一是 D 值的量測，一是 R 值的量測。而本系統的 D 值與 R 值校正如下所述。

6.1.1 D 值的量測

為避免因量測儀器選用所造成的誤差過大，我們採用兩種量測方式來量測 D 值。一是輪廓投影儀，一是用 CMM(三次元量床)。

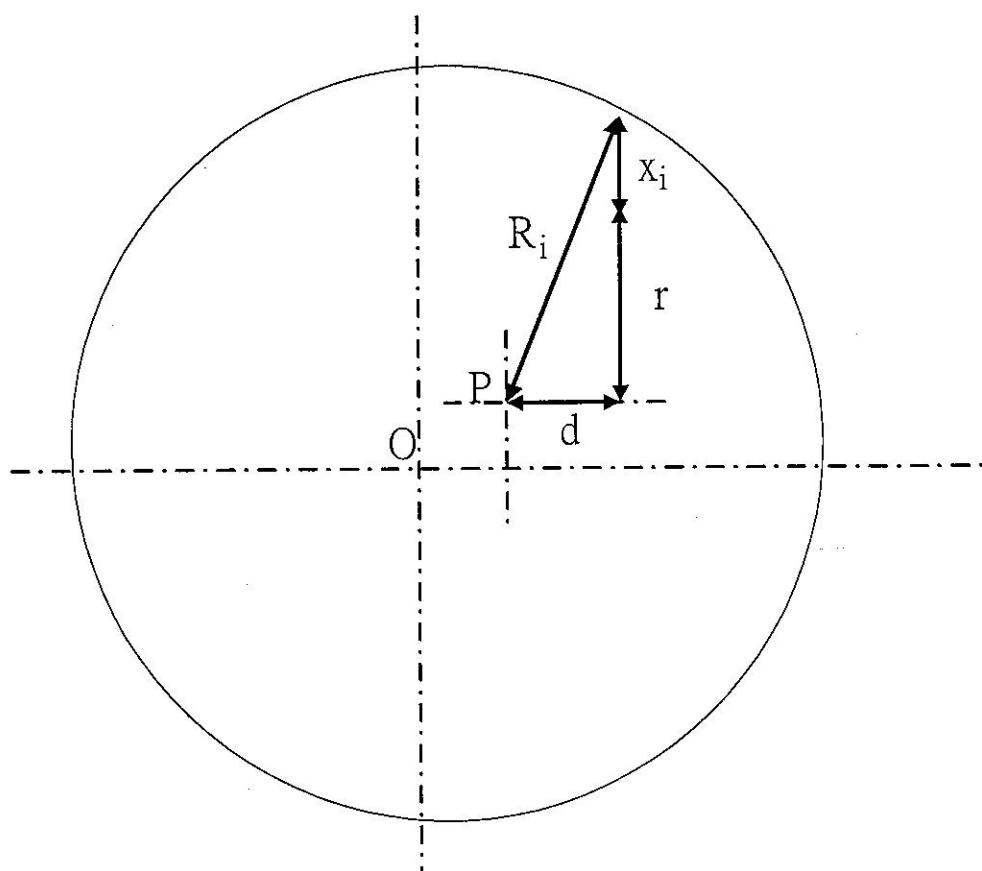


圖 6.1 是附錄實體圖的示意圖

利用投影儀投影螢幕上的刻線可定出直線 A、B、C、

The diagram illustrates a geometric construction within a large circle. A vertical line passes through the center of the large circle. A smaller circle is positioned above the center, tangent to the vertical line. A point is marked on the vertical line below the center, with labels A, B, C, D, E, and F indicating various points and distances.

另一種方式我們可以用 CMM 量得直線 C 及直線 D 的方程式來求出直線 F 的方程式，並利用 CMM 的量測功能量測圓盤的圓心 O 點，計算 O 點到直線 F 的距離即是馬達中心與量表量測軸的偏心量即是 D 值。

求出 D 值後將機構架設於一標準圓(環規)上,執行程式上的校正功能,則程式會透過 COM 及 LPT1 自動驅動馬達並讀取量表值,並將之記錄處理而得到 R 值。

6.2 系統量測實例功能

我們由投影儀的實際量測得到 D 值為 0.9mm,而經由 CMM 得到的量測 D 值為 0.73mm,因為 CMM 精度較投影儀高,原本應該採用其量測值,但為證明 D 值的量測誤差對系統的量測的影響,所以我們採用 0.9mm 為我們的 D 值。

再經由直接量測環規的面積,由程式我們得到 R 值為 93.86mm。因為我們並不知道量雨筒的面積所以量測量雨筒並無法看出量測系統的精度,所以我們用此校正參數及此校正機構量測環規的面積,環規面積值為 31415.93mm²而下面的表格則是十組量測值的表格,

量測組別	量測面積值	誤差值
1	31412.41	-3.516
2	31411.53	-4.398
3	31412.99	-2.938
4	31412.84	-3.09
5	31411.93	-3.994
6	31413.11	-2.816
7	31412.71	-3.215
8	31412.85	-3.08

9	31413.70	-2.23
10	31412.36	-3.57

所以我們可以看出本系統在校正過後，其量測誤差為千分之一，由此可看出本系統的量測精度很高。

而我們實際量測一量雨筒，可以得到如圖 6.3 之誤差圖形，下面的表格則是十組量測數據。

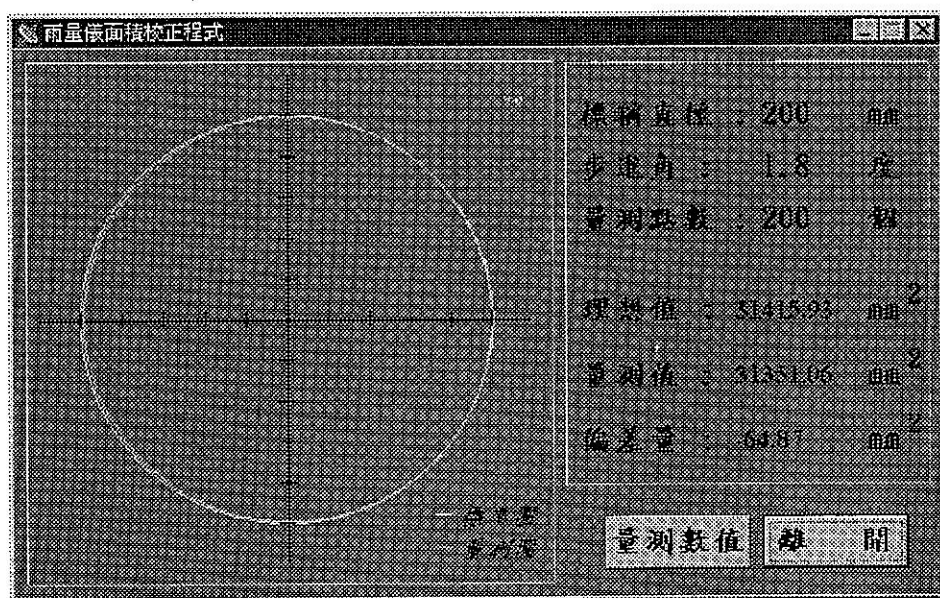


圖 6.3 實際量測量雨筒的誤差圖形

量測組別	量測面積值	誤差值
1	31351.60	-64.32
2	31350.82	-65.1
3	31349.39	-66.54
4	31349.32	-66.61

5	31351.06	-64.87
6	31349.78	-66.15
7	31350.24	-65.68
8	31350.00	-65.93
9	31350.89	-65.03
10	31350.82	-65.11

其誤差平均值為 65.534mm²，可以算出其誤差為百分之

二。

7. 結論與建議

7.1 結論

本系統研製的雨量儀集雨口有效面積校正系統，以高精度的電子量表取代游標卡尺，利用一旋轉機構帶動此電子量表量取量雨筒的真圓度，再將實際的表面積以積分精確算出。且本機構可作上下位置調整如此可量測各不同高度位置的真實截面積。以總和求得量雨筒的實際圓筒度誤差及容積。本系統的精度較高，且幾無人為誤差因素，故在系統不準確方面將大為提昇。

使用上的注意事項

1. 本系統在重新安裝或經過拆解、碰撞等動作後，均必需做系統誤差之再校正；此外，於正常使用中也必須依使用狀態及頻率，定期對系統誤差作校正及追溯，並將系統誤差 R 及 D 值加以記錄，以便在量測時予以補償之。
2. 為避免過大的誤差於架設時產生，量測前應先用軟體功能”讀取量表值”以手動方式將機構儘量架設與量雨筒同心，並夾緊量雨筒。
3. 由於串列傳輸的限制，應避免於量測過程中使量測系統受到干擾，因為小則影響量測時間，大則影響量測之準確性。
4. 程式的使用應儘量依照使用手冊所寫之流程進行。
5. 當程式發生錯誤時，可選擇”開新檔案”來清除程式中所有錯誤資料，並開始一全新檔案。如尚無法解決，應結束本程式，回到作業系統，再重新執行本程式。

7.2 建議

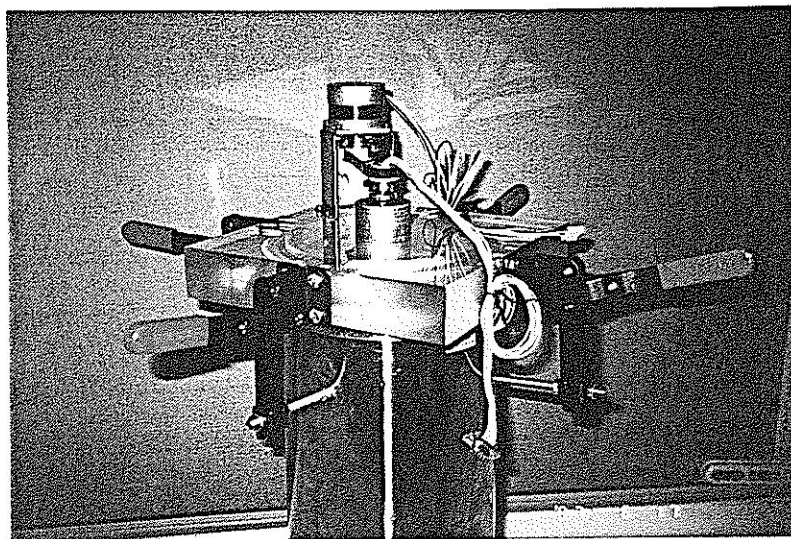
本系統初期僅針對有效面積量測分析，故實用上尚需將此數據與體積部分之校正數據整合後，方能完成整個雨量儀之校正，在

時間及程序上仍未能達到盡善盡美，若能將體積部分之校正功能也整合進本系統，則本系統之功能將更趨完善，也更能縮減校正時間。

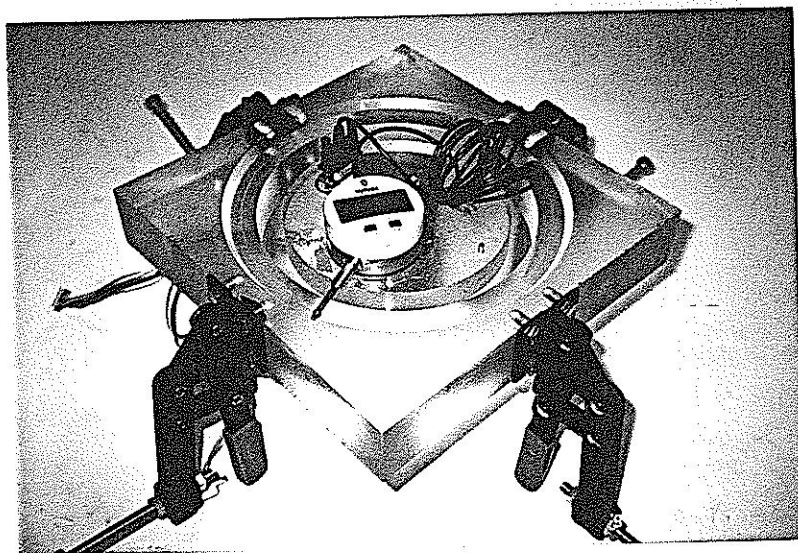
8. 參考文獻

1. "精密量測總覽"，三豐儀器公司，1994，pp. 38.
2. "端點尺寸量測"，度量衡國家標準實驗室技術手冊，NML-E8008，1994，pp. 48.
3. Murthy， T.S.R. and S.Y. Rao， "A Simple Approach for Evaluation of Cylindrical Surfaces" Annals of the CIRP， Vol. 30/1， 1981， pp. 441-444.
4. 范光照，張郭益，"精密量具及機件檢驗"，高立圖書公司，1995

附錄：



機構整體組合照片



量表及固定量表之旋轉圓盤