經濟部

經濟部工業局八十六年度

精密機械與自動化技術研究發展計畫

課程名稱：

工具機循圓量測技術實務研討會

主辦單位：IDB 經濟部工業局

執行單位：財團法人精密機械研究發展中心

中華民國 八十六 年 三 月 十二 日

工具機循圓量測技術實務研討會

課程內容　　頁次

1.引言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
2.循圓量測方法介紹・・・・・・・・・・・・・・・・・7
3.誤差原因診斷法及診斷步驟・・・・・・・・・・・・26
4.誤差原因分析及改善對策・・・・・・・・・・・・・40
5.實例分析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・62
6.討論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・68
7.附錄・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・69

1.引言

1-1目的:

在這個時間就是金錢的時代裡，生產任何產品均要求效率及品質，且成本及售價要低。在這種環境驅使之下，如何在生產過程中的每一環節，縮短時間，又不影響品質，是每一個生產事業單位重要之課題。

就機械加工業者而言，以前使用傳統工具機加工，品質不穩定且產值低，相對成本亦高；故對於量產型的加工業者，NC工具機取代傳統工具機。而目前機械加工業者對NC工具機的要求，必需是精度高、穩定性好、壽命長並且具有高效率、高精度加工的能力。要達到高精度加工有很多要求，如圖一所示加工精度與加工限制的相互關係，可由構成要素這一部份看出，除了刀具及工件夾持要作好之外，影響工具機精度的是(1)結構(2)主軸系統(3)進給系統三部份，而對加工精度有決定性影響的因素是工具機之運動精度。工具機上如果有運動誤差，該誤差將轉移到加工件之形狀上，加大加工誤差，因此高運動精度對高精度加工是不可或缺的。除此之外，運動精度也會受組裝、控制系統之調整的影響。

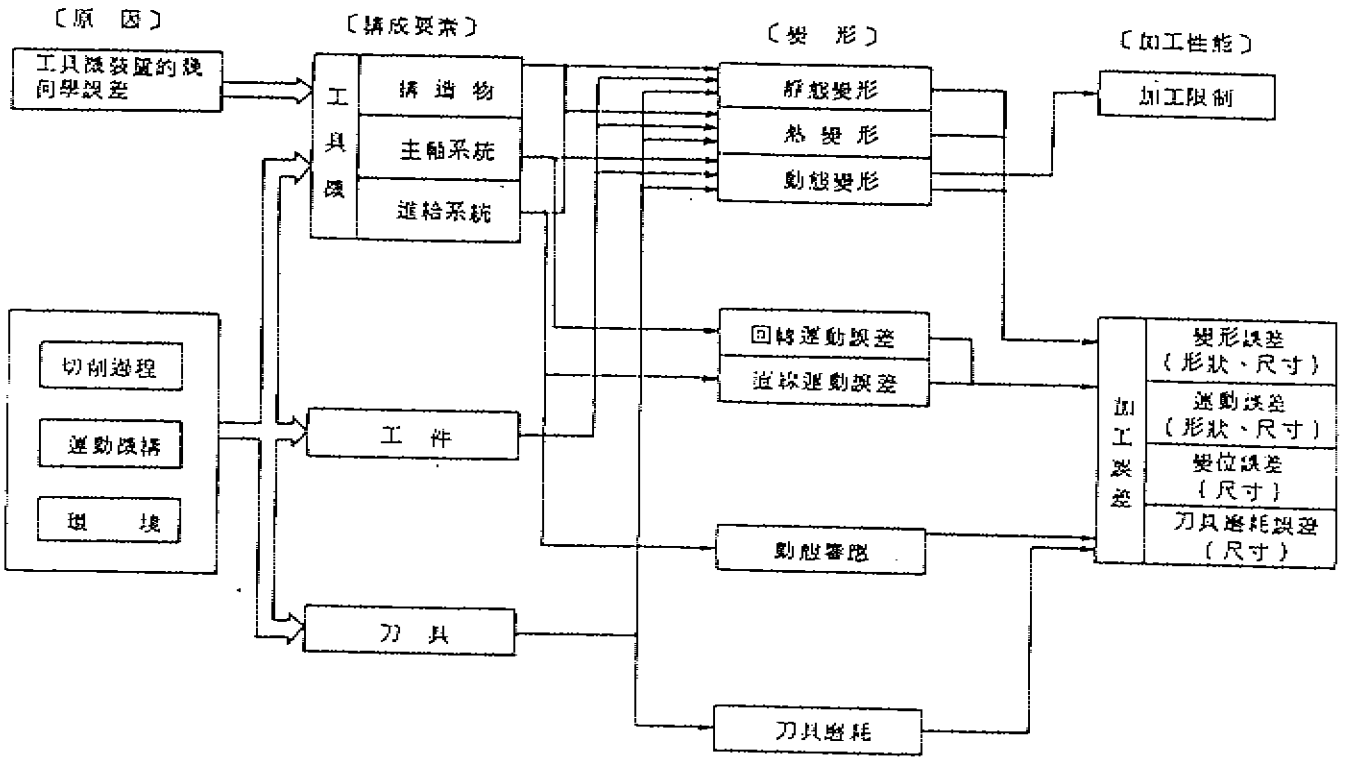
因此，爲了確認工具機運動，傳統的檢查方式是使用〝直接切削〞。所謂直接切削是在可作圓弧內插之NC銑床、綜合加工機上作切削，則利用(1)直線切削作尺寸、形狀精度檢查(2)搪孔作定位精度檢查(3)端銑刀作圓形徑切削，進行形狀精度檢查，藉以檢查NC工具機之運動精度。而直接切削測試是在機台已組裝完成且調整結束後進行，此測試方式可綜合了解刀具、工件及其固定方法的影響等優點。可是，加工測試後必須待加工件冷卻，再根據三次元量

測機、眞圓度測量機、表面精度測量儀等來測量工件精度；除了費事耗時之外，這些測量機的測量精度也是問題，即使是測量精度正確，如果沒有方法解析工具機那個部份會導致精度降低，則無法使用在原因診斷上。

目前機台製造時間縮短，組裝、檢查時間及人力愈來愈少。傳統上工具機精度檢查是使用 laser 干涉測長儀、square、autocollimeter、block gauge、straight edge master 等，而這些檢查需要靠熟練技術員長時間進行，故很難達到製造時間短及品質好的目的。爲了符合量測經濟效益，又可量測出機台運動精度，乃使用 Double Ball Bar (簡稱 DBB) 來作量測。

DBB 是爲了測定三次元誤差，由 U.S.A 的 (Lanrence Livermore National Laboratory) 提案之方法，使用高精度球與磁性座之裝置，可以高精度測量出球面上 2 點間之距離。其量測方式通常是將一軸的運動固定下來，其他二軸作圓弧內插進給，取出圓弧上的點擴大 bar 的伸縮量，於平面上作極座標表示 (稱爲運動誤差軌跡)，將之解析後，進行三次元精度評估。現在 NC 機器是不能三軸同時作圓弧內插進給 (例如在球面上作螺旋)，而只能二軸同時作圓弧內插進給測定。

使用 DBB 檢測 NC 工具機軸向動態精度，不需要作實際的循圓切削，不但省力省時，同時量測過程中主軸不動，因此測試的結果可排除因刀具、工件、夾治具及主軸運動所造成的誤差，同時可由所量測之誤差量及形式判別此軸向運動誤差是屬於軸向幾何誤差或是 NC 伺服方面的誤差。



圖一　工具機加工精度與加工限制的相互關係

1-2直接切削與DBB比較：

爲了確認DBB測定方法之妥當性，對經過DBB測定的機台作直接切削測試(Direct Test)，求其加工形狀誤差，和其DBB測定結果，相互做一比較。以端銑刀做圓形外形切削，和作DBB測定機台位置，大致是同一位置。端銑刀爲直徑20mm，2刃之直刃刀。被切削材料是鑄鐵FC25，直徑200mm，切削深度每一刀0.1mm。切削後加工形狀，以真圓度測定機予以測定。

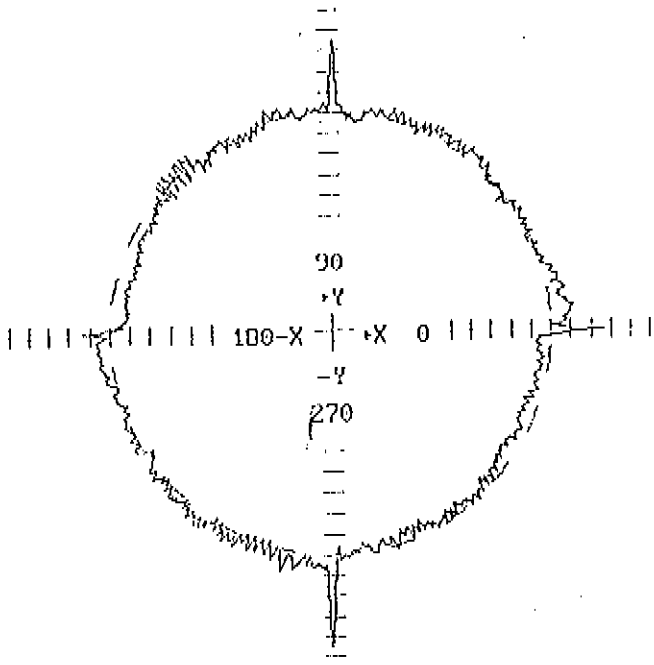
實際切削與循圓量測之間，如圖二比較兩者結果：

(1)以整體性而言，細部的凹凸部份，全盤看來也是相似的。

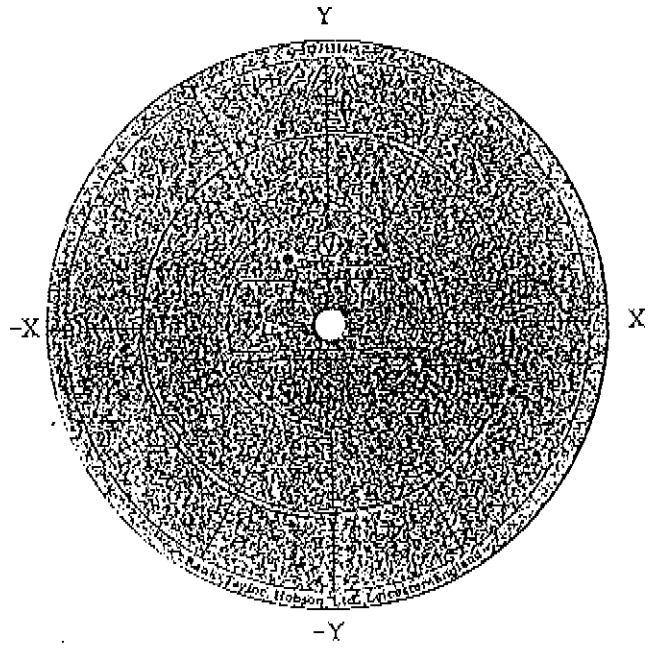
(2)由循圓加工所得到的工件真圓度，輪廓較爲平滑。

(3)由循圓加工所得到的真圓度運動軌跡變異量較不明顯。

基於上述說明，利用循圓量測法測定運動誤差時，並不會像利用測定加工形狀誤差會受到切削力及表面粗糙度等影響，因而循圓量測法，可以更正確地測定出機械之運動誤差。



a. 循圓量測軌跡圖



b. 直接切削真圓度輪廓圖

圖. 二 直接切削與循圓量測比較

直接切削與循圓量測比較表：

項　　目	直接切削	循圓量測
可查看刀具、主軸、工件夾持對加工精度影響	可	不可
省時、省力	不可	可
診斷誤差原因	不可	可
可CW及CCW兩方向量測	不可	可

循圓量測應用於：

(1)NC工具機開發之際，試作機缺點的消除。

(2)NC工具機出貨時(或出貨時)之最終調整及精度檢查。

(3)NC工具機定期精度檢查。

2.循圓量測方法介紹

2.循圓量測法介紹

2 1量測儀說明:

目前量測儀品牌有:

(一)Renishaw

(二)Heidenhain

(三)A.P.I

(四)J.B.Bryan

(五)C.D.Measuremcnts

(六)CARY RING

而國內較多廠家採用Renishaw、A.P.I、Heidenhain、CARY RINGB量測儀如圖2-1、圖2 2、圖2 3 圖2-4所示。

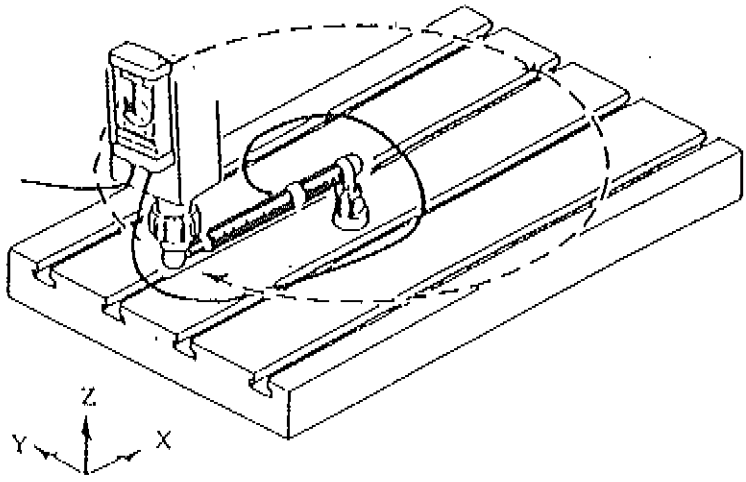


圖2-1 Renishaw量測儀

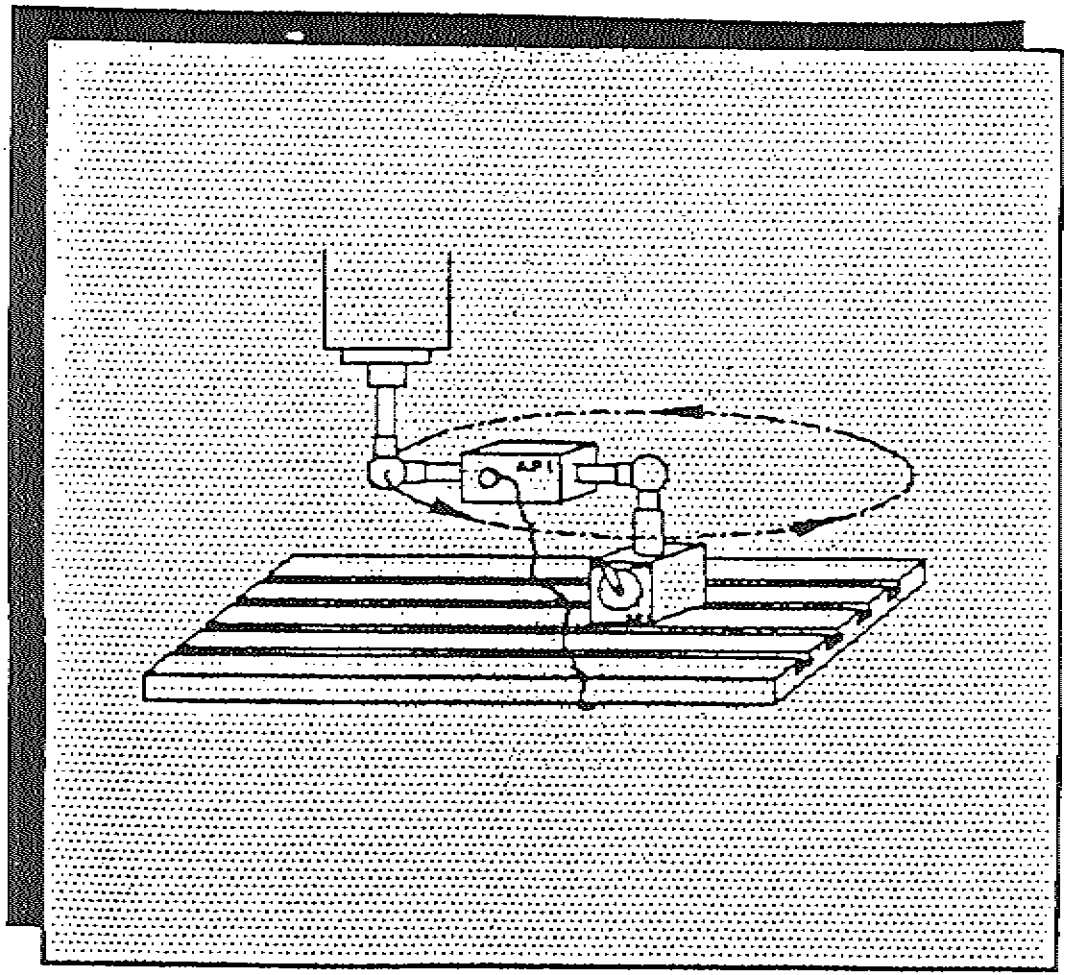


圖2-2 A.P.I量測儀

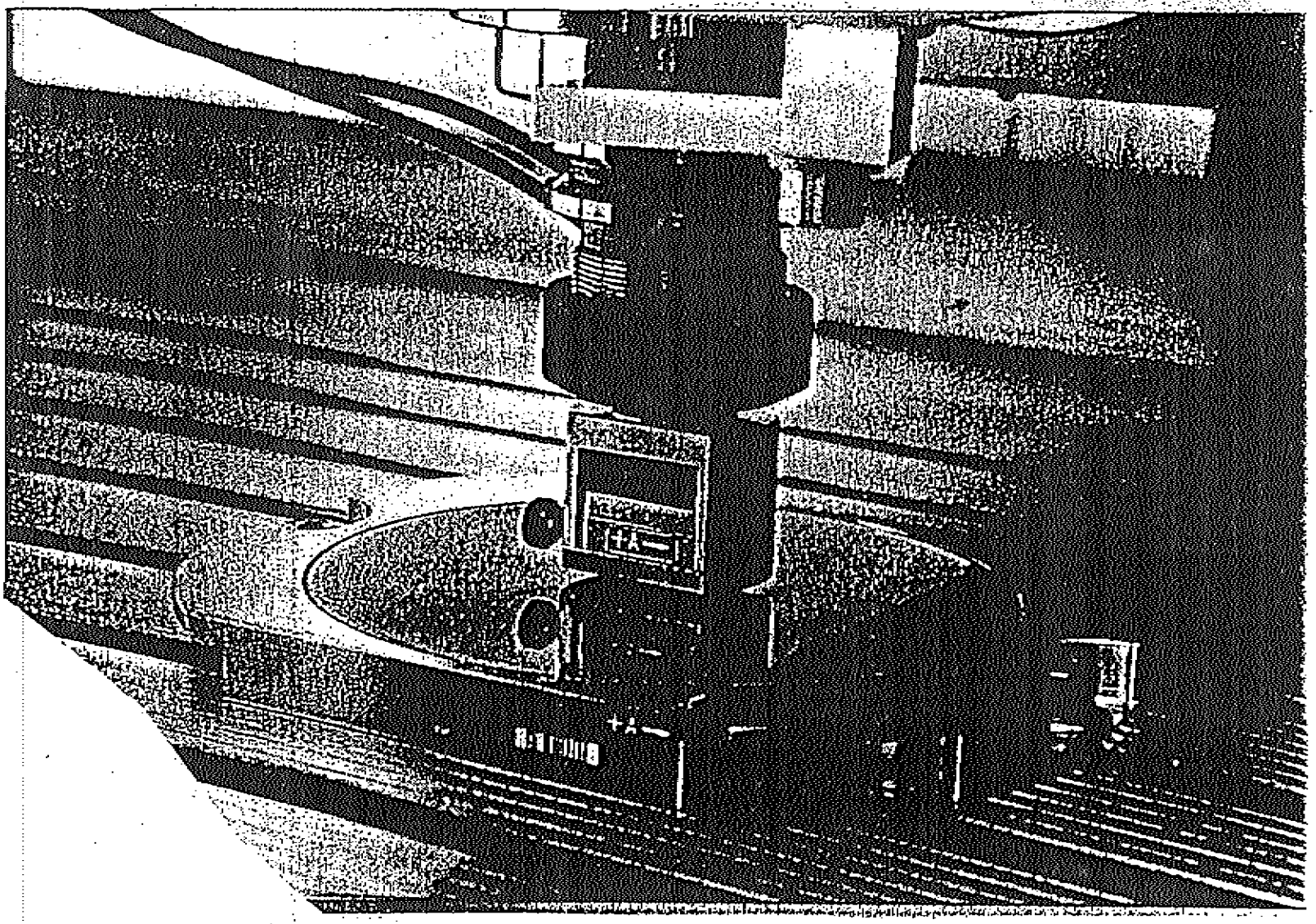


圖2-3 Heidenhain量測儀

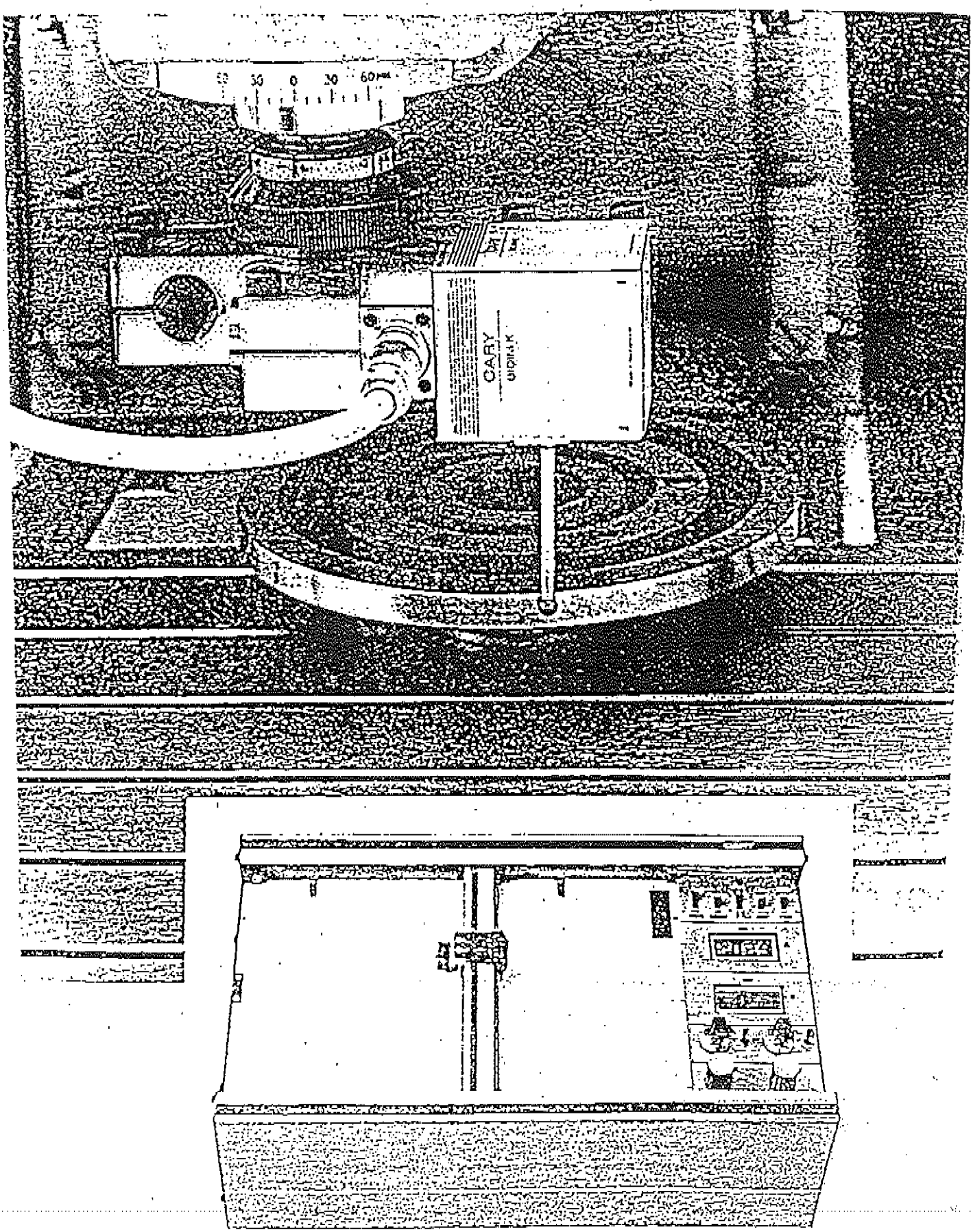


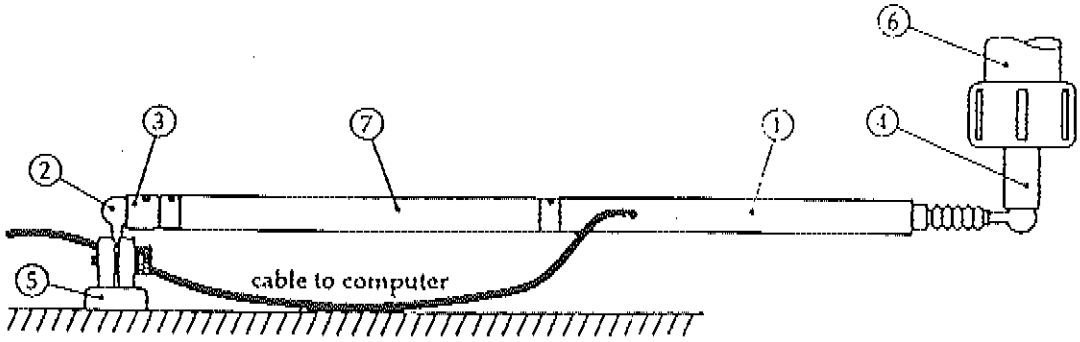
圖2-4 CARY RING量測儀

2-2 量測儀裝置及使用原理：

由於量測儀品牌很多，本章節就以Renishaw量測儀來作概略介紹。

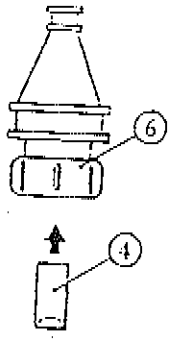
2-2.1儀器各部名稱介紹：

(1) 轉換器　(2) 鋼球　(3) 磁性球面座
(4) 磁性短桿　(5) 鋼球固定座　(6) 刀把
(7) 延長桿

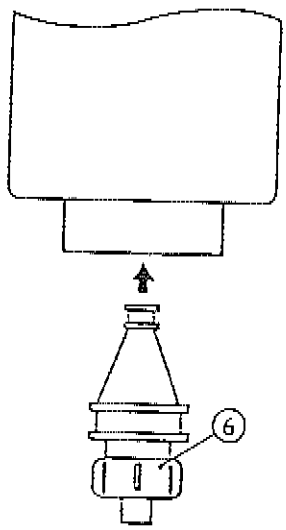


2-2.2 量測裝置

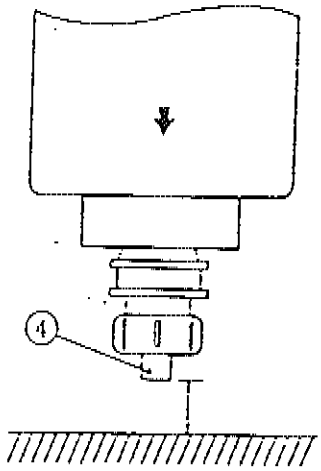
1. 將(4)磁性短桿裝入(6)刀把並鎖緊。



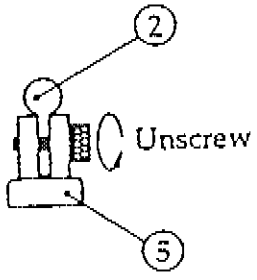
2. 將(6)刀把裝入主軸。



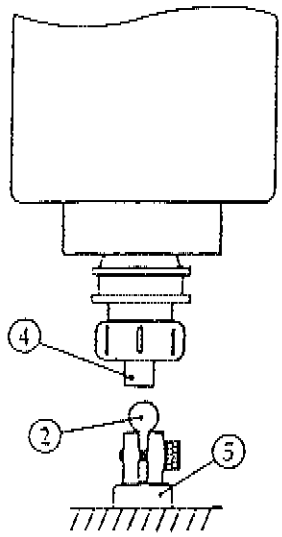
3. 移動主軸往下，並且移動工作台至要測試位置。刀把短磁桿端，離工作台高度不可低於100mm以下。



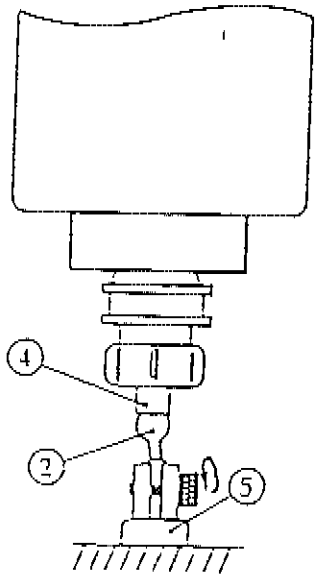
4. 將(2)鋼球裝入(5)鋼球固定座(螺絲放鬆)並將鋼球稍微調正，且螺絲微鎖。



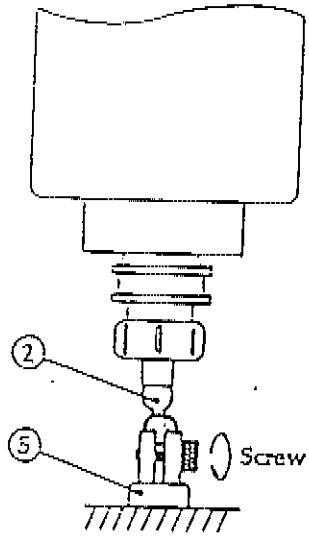
5.鋼球固定座置放於量測位置，移動主軸於鋼球正下方。



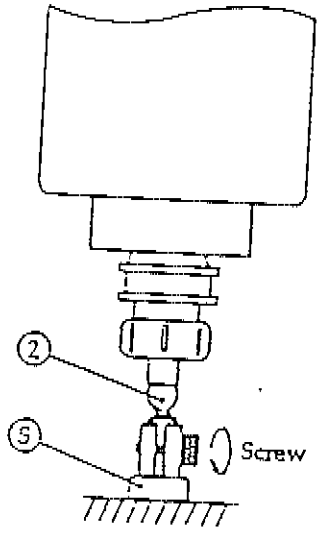
6.移動主軸往下至快接近鋼球後，放鬆(5)鋼球固定座螺絲，使鋼球吸附在主軸短磁桿上。



7. 檢視主軸與鋼球是否在同一中心線上，若有偏差移動工作台使之同一中心。



8. 移動主軸往下至大鋼球進入鋼球固定座內，並鎖緊螺絲。

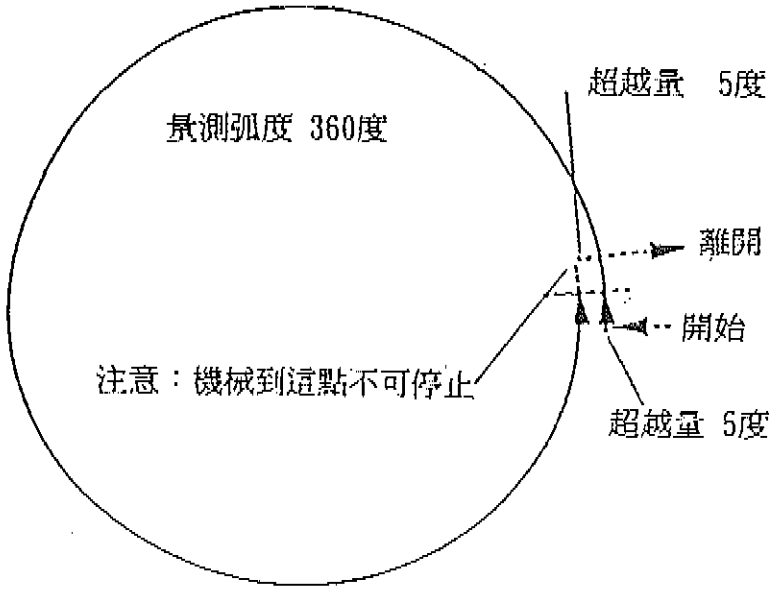


9. 記錄目前機械座標並將此座標設定在工作座標。設定後再將主軸往上昇。

2 2.3 量測法(量測程式)

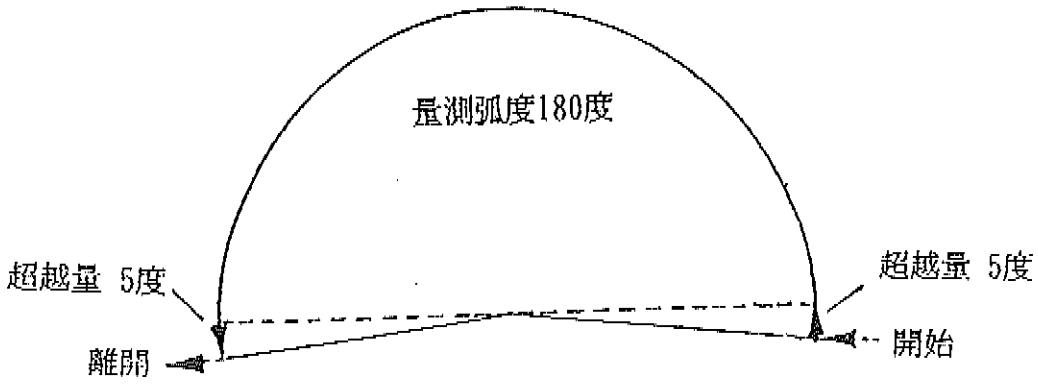
(1) XY 平面(全圓) R = 150mm

```
oxxx
/G54G17G80
/G90G00X151.5Y0Z0
M00
G02X150.923Y-13.2-151.5JOF500
MOO
G01X149.429Y-13.073F1000
G03X149.429Y-13.073I-149.429J13.073
G03X149.429Y13.073I-149.429J13.073
G01X150.923Y13.204
M00
G01X149.429Y13.073
G02X149.429Y13.073I-149.429J-13.073
G02X149.429Y-13.073I-149.429J-13.073
G01X150.923Y-13.204
M00
G03X151.5Y0I-150.923J13.204
M30
```



(2) XZ 平面(半圓) R = 150mm

```
0XXX
/G54G18G80
/G90G00X150.923Z-13.204Y0
M00
G90G01X149.429Z-13.073Y0F1000
G02X-149.429Z-13.073I-149.429K13.073
G01X-150.923Z-13.204
M00
G01X-149.429Z-13.073
G03X149.429Z-13.073I149.429K13.073
G01X150.923Z-13.204
M30
```



(3) YZ 半面(半圓) R = 150mm

0XXX

/G54G19G80

/G90G00X150.923Z-13.204

M00

G90G01X0Y149.429Z-13.073F1000

G03Y-149.429Z-13.037J-149.429K13.073

G01Y-150.923Z-13.204

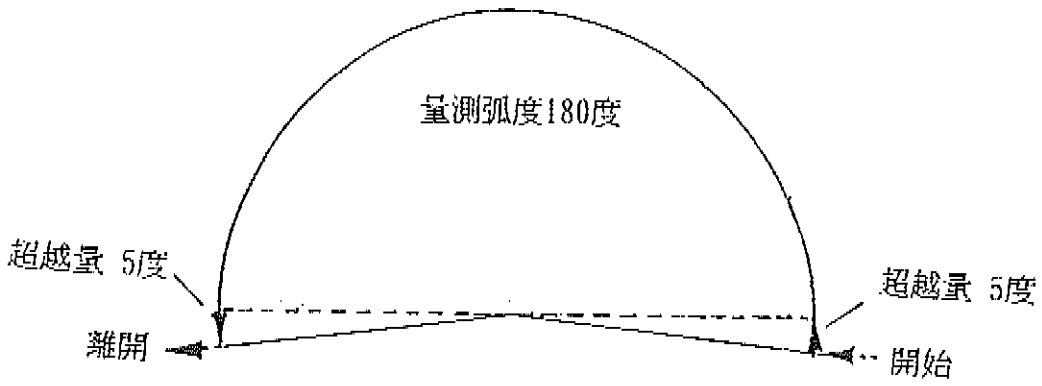
M00

G01Y-149.429Z-13.073

G02Y149.429Z-13.073J149.429K13.073

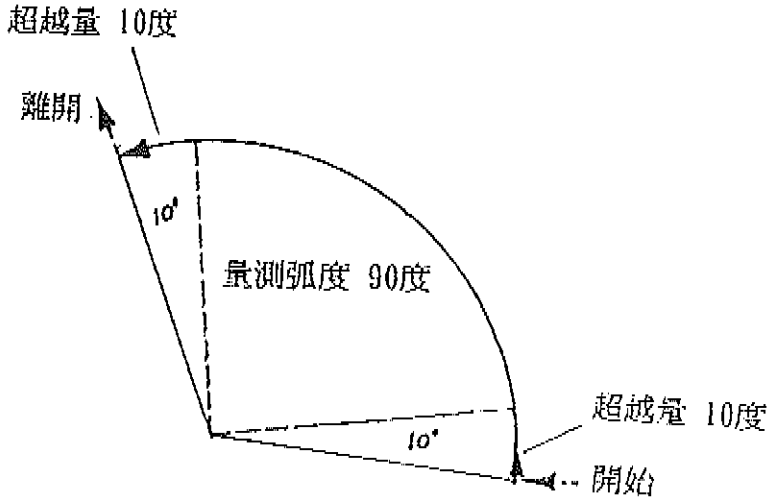
G01Y150.923Z-13.204

M30



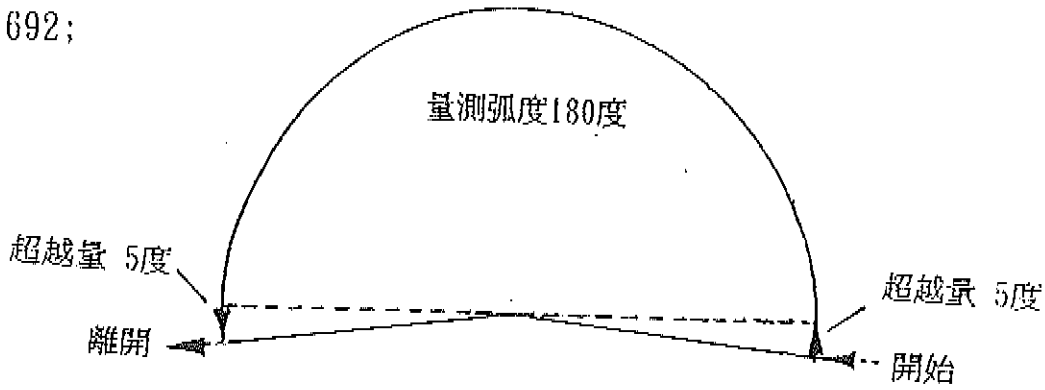
(4) 車床量測XZ平面(四分之一圓)

```
0XXX
G28X0Z0
/TXXXX
/G0X0Z100
G54
G00Z99.958X-35.25
M01
G94
G01Z98.48X-34.729F1000
G03Z-17.364X196.96R100
G01Z-17.625X199.916
M01
G01Z-17.364X196.96
G02Z98.48X-34.728R100
G01Z99.958X-35.25
M30
```



(5)車床量測XZ平面(半圓)

```
O0XXX
G96G90G54G01X0Z101.5F500;
X-17.692Z101.114;
M00;
G01Z99.619X-17.432;
G03Z-99.619X-17.432R-100.;
G01Z-101.114X-17.692;
M00;
G01Z 99.619X-17.432;
G02Z99.619X-17.432R-100.;
G01Z101.114X-17.692;
M30;
```



2-2.4 量測時注意事項

(1) 機台開機後，第一個動作必須是回HOME點。

(2) 量測儀器裝置時，必須確實不可有搖晃鬆動現象。

(3) 量測前必須注意工作台的清潔，表面不可有鐵屑，以免量測時被短磁桿或鋼球吸取。並且在裝置儀器前檢查鋼球與短磁桿是否有鐵屑。

(4) 量測時機台選用的feedrate，必須與量測設定的feedrate相同。

(5) 量測時訊號線不要打結及拉扯現象。

(6) 量測時主軸不可有慢速回轉的現象，一定要完全停止轉動。

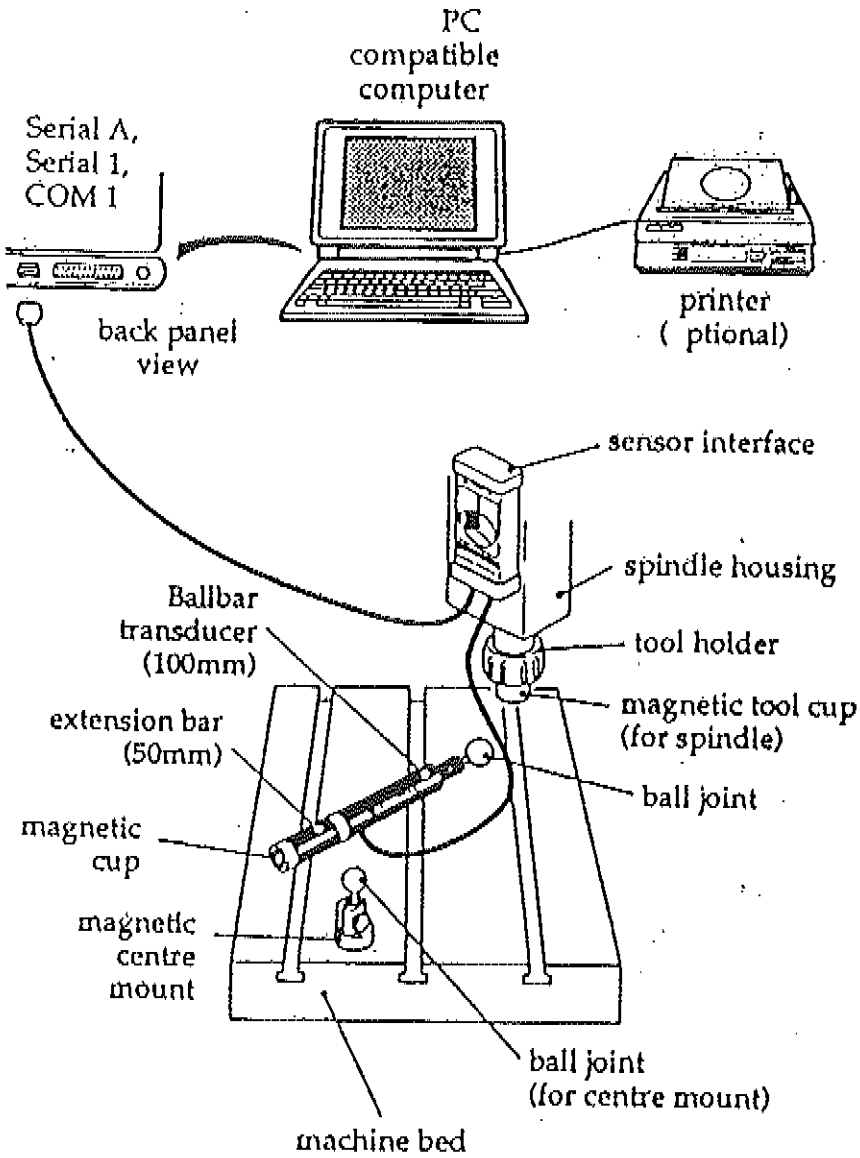


圖2-5　綜合加工機量測裝置

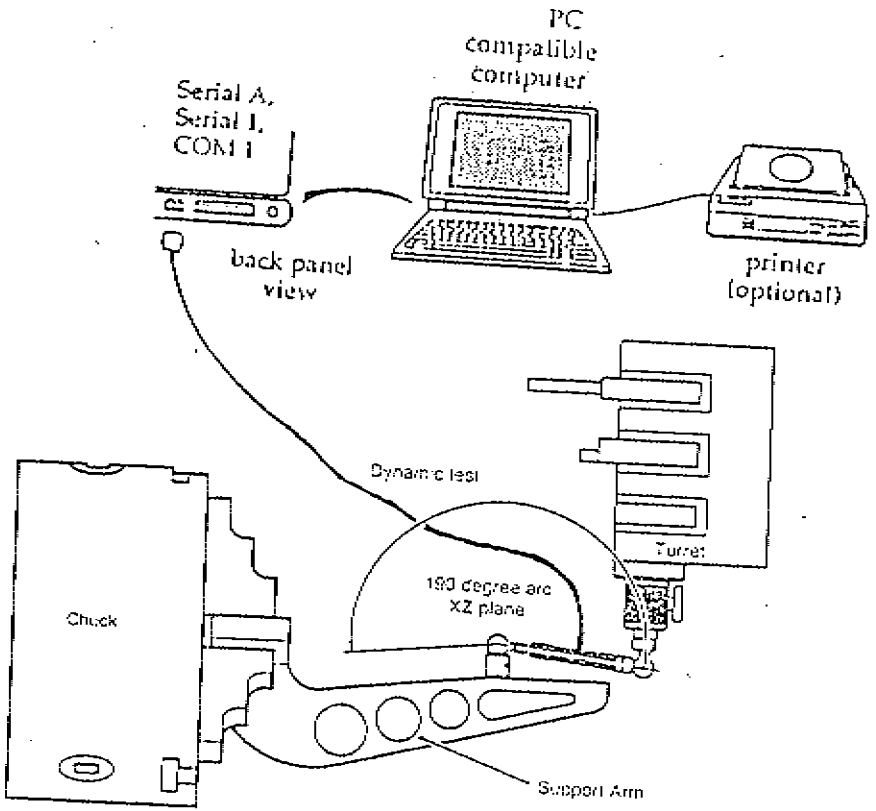


圖2-6 NC車床量測裝置

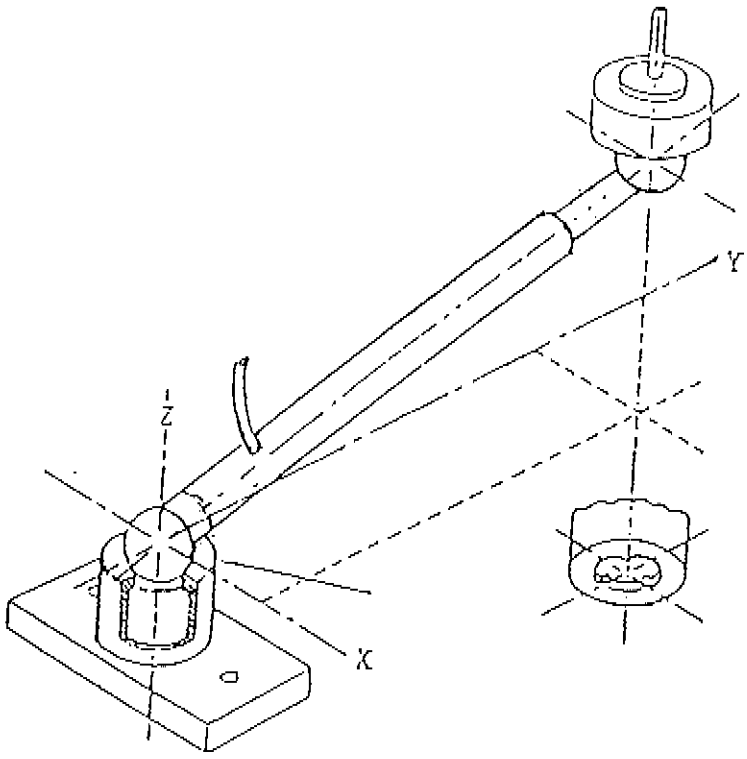
2 2.5 量測儀使用原理

DBB量測裝置之檢測部如圖3所示，是用可以伸縮，可以檢測變化量的Bar，來連接由安裝在工作台上與主軸前端，且由3點支撐而內帶磁石之球面座來吸附兩個鋼球，根據NC作半徑R之圓弧內插進給，將此時的Bar伸縮量用極座標表示。

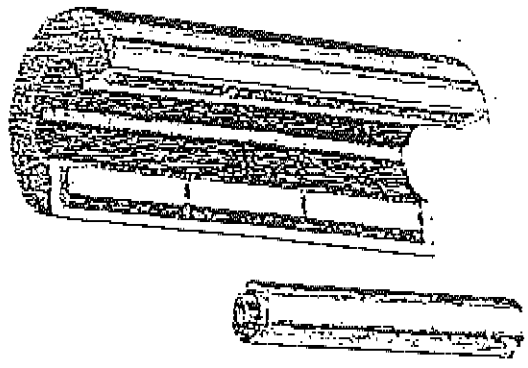
DBB檢測伸縮部份是安裝一個LVDT (Linear Variable Differential Transformer)線性可變差分變壓器。結構剖面圖如圖四所示爲交流電源加入於一次圈。對稱分布於一次圈兩側的兩個完全相似的二次圈，以串聯相反電路聯接在一起。內部鐵蕊的移動，使每一個二次圈與一次圈之間的互導值產生變化。因而使一次圈感應至每一個二次圈的電壓變化。

若鐵蕊落於兩個二次圈的中央，則每一個二次圈所感應得到的電壓大小相等，但相角相差180度，因此沒有輸出。若鐵蕊移離中心點，則一次圈與兩個二次圈之間的互導將有差值。因此兩個串聯的二次圈之間，會有電位差產生。在工作範圍以內，此一電位差將與鐵蕊偏離中心點的位移成線性關係。

因爲鐵蕊與線圈之間，並無實際接觸，所以LVDT的機械部份不會受到損傷。同時，因爲沒有摩擦的存在，故沒有滯後現象以及其解析度爲眞正的無限。LVDT並不受機械性超載所影響，所以其可靠度甚高。



圖三　DBB裝置之檢測部



圖四　LVDT結構剖面圖

LVDT 的特性：

(1) 良好的解析度。

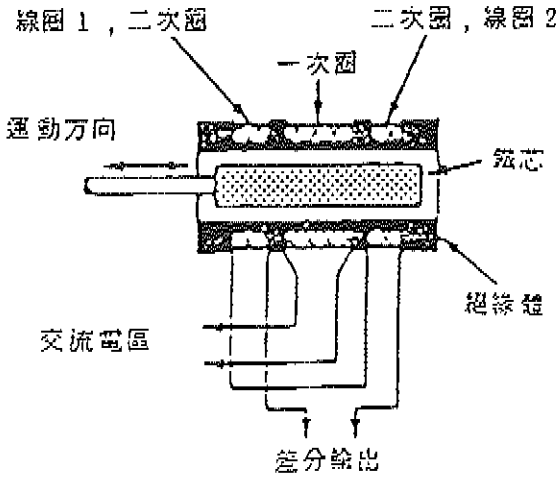
(2) 滯後甚小。

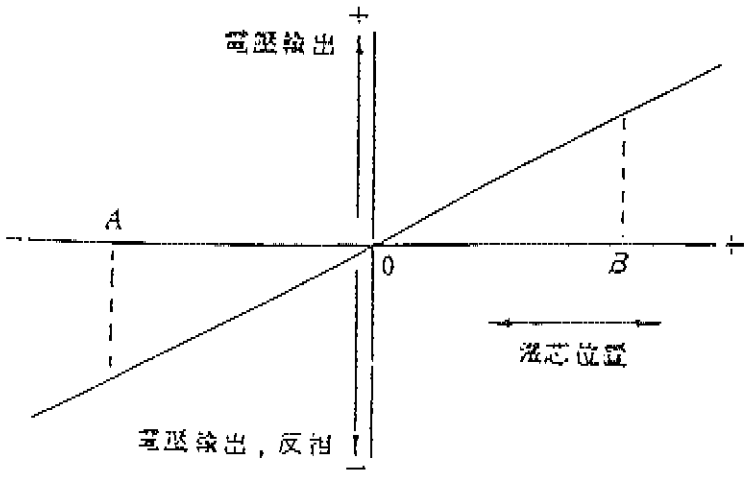
(3) 響應特性與動態特性均甚優越。

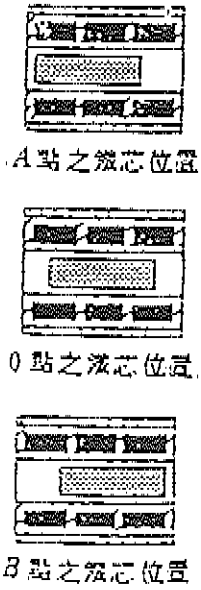
(4) 溫度特性良好。

(5) 振動及環境靈敏度均好。

(6) 線性度、機械性超載量及壽命均高。







3.誤差原因診斷法及診斷步驟

3.誤差原因診斷法及診斷步驟

3-1 誤差原因之分類

NC工具機之運動誤差有很多，關於診斷爲了便利，便將他分類如表1所示。

診斷上誤差大小分類爲(I)與位置有關之誤差原因(II)與進給速度(含方向)有關之誤差。其中(I)又分類成(1)定位機構的誤差(2)導軌之形狀誤差。說明如下：

(I-1)定位機構之誤差

有光學尺(或導螺桿)之相同伸縮、導螺桿之節距誤差、止推軸承安裝錯誤等造成之周期性誤差、光學尺的內插誤差、背隙、NC產生的背隙補正或節距誤差補正不當、位置或角度檢出器、速度檢出器之雜訊等。而這些造成的誤差全部是並進誤差。

(I-2)導軌之形狀誤差

有2軸間之直角度誤差、眞直度誤差(2次、3次)、平行度誤差等。這些除了導軌製作時之加工誤差之外，也有因組裝、熱變形、鞍座安裝不良、重量物之移動、滑動體引發之導軌面展延等之因素。導軌之形狀誤差除了直角度誤差，是所有回轉誤差的原因。

(II)與進給速度及方向有關之誤差

這類誤差大小是由進給速度而定，但也會隨著位置而有一點變化。並進誤差有失位(lost motion)、換向跳動(stick motion)、爬行(stick slip)、伺服系統的位置增益不一致、在圓弧內插進給時之半徑減少(加速時)或增加(減速時)呈現之伺服系統之非固定性應答、與垂直運動軸之配重平衡有關

之油壓閥、鍊條等之振動。回轉誤差有滑動面，因動壓引發之滑動體浮昇等。

3-2 診斷法概要

DBB診斷法是針對表1所示之各種誤差原因，定出誤差向量，將之代入DBB測定之基本式子(參閱附錄二)，導出軌跡形狀，測定的運動誤差軌跡存在的大小程度是多少？判斷是何種誤差原因？以及判斷如何提高運動精度，須採取怎樣的對策？

以上的過程中，相關的誤差原因很多，誤差的原因與軌跡形狀是呈一對一對應的，但其中有時相同的軌跡形狀存有多種誤差原因。這種情形，爲了明瞭誤差原因，而必須先了解如後述表2所示之工具機構造與控制系統的特徵。

回轉誤差之原因診斷一般是很困難。若不累積充分的經驗，則不能了解誤差原因。若能與第一章說明的傳統方法合併使用，則較容易得到結論。

回轉誤差II並不是由單一誤差所產生的，而是由Gib與滑動面以怎樣的剛性可以阻止回轉誤差，或者如何消除由非對稱力所產生之滑動體的旋轉力矩來決定。此剛性除了與滑動面的面壓、接觸面、形狀精度有關，導軌支撐用結構體之剛性也有影響。這種情形在臥式MC之Y軸(主軸頭於雙柱之間上下移動)上特別明顯。

表1　運動誤差原因的分類

I、僅與位置有關之誤差

(1) 定位機構之誤差

(a) ball screw、linear scale之相同伸縮(1次、2次)

(b) ball screw、linear scale等之周期性誤差

(c) 檢出器雜訊(encoder's Noise)

(d) back lash

(e) back lash 補正

(f) pitch error 補正

(2) 導軌之形狀誤差

(g) 2軸間之直角度誤差

(h) 眞直度誤差

(h-1) 由加工、組合所產生的

(h-2) 因基座不良所造成的

(h-3) 因重量移動所造成的

(i) 旋轉力矩

(i-1) 垂直軸 rolling

(i-2) 垂直軸 pitching

(i-3) 垂直軸 yawing

(i-4) 垂直軸 yawing + 帶傾斜

(i-5) 水平軸 yawing

(j) 平行度誤差

(k) hose 干擾、cover之拖曳等

II、與進給速度、方向有關之誤差

(l) lost motion

(m) stick motion

(n) stick slip

(o) 位置 loop gain 之不一致

(p) SERVO 應答遲緩造成之半徑減少

(q) 油壓閥、鍵條等之振動

(r) 重壓造成之滑動體之浮昇

3-3 診斷程序：

對NC工具機進行DBB量測後所得到的運動誤差軌跡，診斷該機械存在之運動誤差原因之際，有時候多種誤差原因會產生相同之軌跡形狀。這種場合爲了找出特定原因，則必須考慮工具機之結構與控制系統的特徵如表2，其次抽出軌跡形狀，列出特定誤差原因之具體程序。而一些如波浪狀突起或Peak相當高的波等，可以捨棄不論。

[1] 求出cw與ccw方向與位置有關的誤差

(1-1) 45° 方向與135° 方向的直徑有差異時，首先要考慮的誤差因素是兩軸間之直角度誤差。測試面爲水平面時，要考慮的是基座按置不良，因此只要利用水準器測定Table上的45° 方向的傾斜即可。

(1-2) 座標軸方向的直徑有差異時，可以認爲是兩軸間的scale相對上不一致。如是是semi-closed回路方式的NC，則首先要考慮的是ball screw之相同伸縮，如果是closed回路方式的NC，則首先可考慮的是linear scale之相同的伸縮。此外由滑動體的pitching造成的誤差等也可考慮，有疑問時即變更位置(與導軌面的距離)測試看看。誤差軌跡上如果有很大的變化，即可以認爲存有旋轉誤差，原因爲自導軌之眞直度誤差或重量物移動造成的結構體的彈性變形。

(1-3) 若視(1-1)和(1-2)之外的形狀爲異常，則請參考進給運動誤差軌跡圖，檢查有無眞直度誤差或scale 2次伸縮。另一個關鍵是否能從3平面軌跡中看出那一軸是造成誤差之主要原因。

表2　DBB診斷之際應該考慮的結構與控制系統的特徵

構造 (1) 整體構造……臥式、立式、門型、quill構造

(2) 導軌……滑動、滾動、靜壓、摩擦阻力(預壓)(窄、寬)

(3) counter balance……無、dead weight、油壓直接連結、chain、某場所、平衡重量%

(4) 滑動體 (stroke)……X- (table)、overhung之狀態

Y- (saddle, column)

Z- (主軸頭，saddle, column)

(5) ball screw .....pitch、徑大小、whirling、一端固定 (single anchor)、兩端固定 (double anchor coupling)。

控制 (1) NC的種類……FANUC、MELDAS、YASNAC、NEDAC、OSP、TOSNUC

(2) 控制方式……封閉回路半封閉回路

(3) 伺服馬達……DC、AC (直接連結、定時BELT、齒輪)

(4) 檢測器……inductosyn、光學scale、magenscale、encoder、resolver、tachogenerator、無TG

(5) 位置增益……位置、sec^{-1} msec、速度、sec^{-1} (時間常數)

[2] 察看象限變換之際的軌跡形狀特徵。

(2-1) 產生段差的場合，如果是急劇的階差，則原因出於對於backlash及lost motion之backlash補正最不適當。即使是closed loop方式NC也會出現的場合或有緩和的段差的場合是產生與進給方向有關之旋轉誤差。其中，誤差軌跡對於產生段差之軸呈對稱的場合，原因是該軸方向運動之際，間隙或接觸剛性不足等因素造成之旋轉，致使測試面垂直方向發生變位之pitching。非對稱的場合，原因爲該軸方向運動之際由旋轉致使測試面平行方向發生變位之yawing。旋轉誤差產生的場合，應考慮機械結構之後，調查變位上需要的力的因素，否則無法找出特定的誤差原因。

(2-2) 發生突起的場合，其原因爲stick motion、lost motion、back lash補正之timming的差異。

[3] 觀察除象限切換外，在固定位置產生的軌跡形狀的特徵

(3-1) 對座標軸呈對稱之位置上出現段差的場合，是該軸上有過大的pitch error補正。出現突起而且爲closed loop方式NC的場合，可能是該軸的linear scale上有損傷。

(3-2) 誤差軌跡上出現周期性誤差的場合，可以認爲是ball screw(或linear scale)、角度檢出器之缺陷、油壓閥、鏈條的振動。計算產生誤差的軸上的周期之後，與ballscrew、linear scale、chain等的pitch作比較，即可以判斷原因何在。

(3-3) 不是在象限變換附近，出現與軸不成對稱之大段差，帶有聲響的場合，原因可能是hose之干擾、cover之拖曳。

[4] 比較CW方向與CCW方向之誤差軌跡之後，如有必要可以變化進給速度，找出與進給速度、進給方向有關的誤差原因

(4-1) 在各軸與45°方向形成之位置上CW方向與CCW方向的軌跡間隔最大，在象限變換的位置上兩者交差的場合，是於兩軸間存有位置loop gain之不一致。如果增加進給速度，則CW方向與CCW的軌跡間隔變大。

(4-2) 圓弧內挿進給開始時及停止時半徑急劇變化，這個時間之外，則出現固定的半徑減少之情形，其原因是伺服之應答遲緩。半徑減少量與進給速度的2次方成正比。可用下式根據伺服理論求出大小 $\Delta R = \frac{1}{2R}(T_P^2 + T_S^2)(\frac{F}{60})^2$，其中 T_P：位置loop之時間常數，T_S：smoothing回路之時間常數。

(4-3) 一軸方向之進給速度在特定低速範圍時，出現振幅大而沒有重現性之振動的情形，原因是stick slip。變更進給速度之後，軌跡上出現振動的位置有變化或不出現振動。

其次簡單說明診斷之際應該考慮的結構與控制系統的參照事項。

(1) 全體結構：

立式MC：

圖3-1為典型的立式MC例示。本機器的構造如圖3-2所示，可以用向量表示。立式MC結構單純，因此特有的overhung並不這麼多。但是，Bed薄的結構，對基座按置不良非常敏感，因此必須注意。且，大多數的立式MC由於X軸stroke很大，Table成為overhung狀態。這種場合，隨著Table之移動，容易發生由重量移動造成的眞直度誤

差與pitching，運動誤差軌跡呈現橢圓，必須注意。此overhung所伴隨的誤差會隨工具機使用年數而變大。

其他的問題尚有：內部熱源之主軸頭的熱容易傳達到Column上，因而必須控制主軸頭溫度。

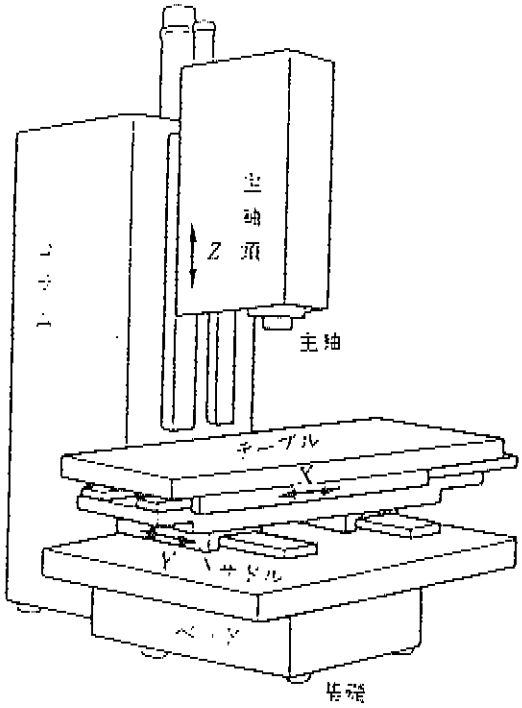


圖3-1 典型的立式MC外觀

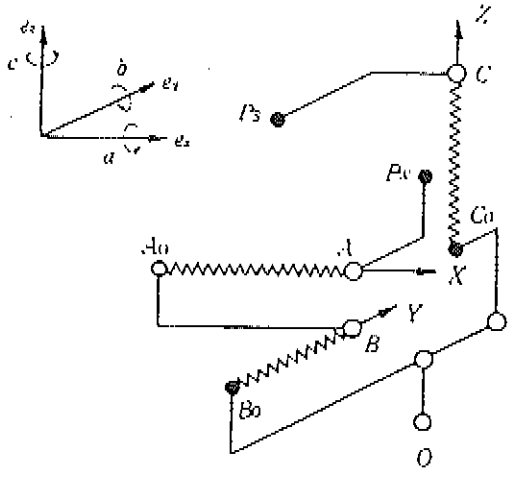


圖3-2 立式MC構造

臥式MC：

圖3-3爲典型的臥式MC之一例示。本機器之構造如圖3-4所示，可以用向量表示。

臥式MC問題大多出於Y軸。亦即，主軸頭夾於細的double column之間，而且ballscrew按裝偏單邊，而必須抵制重力作上下運動，因此主軸頭容易產生yawing、pitching等之搖擺變化(旋轉誤差)。

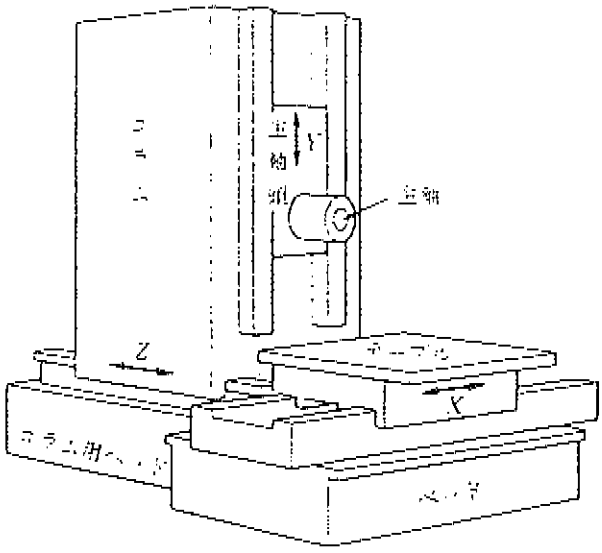


圖3-3典型的橫型MC外觀

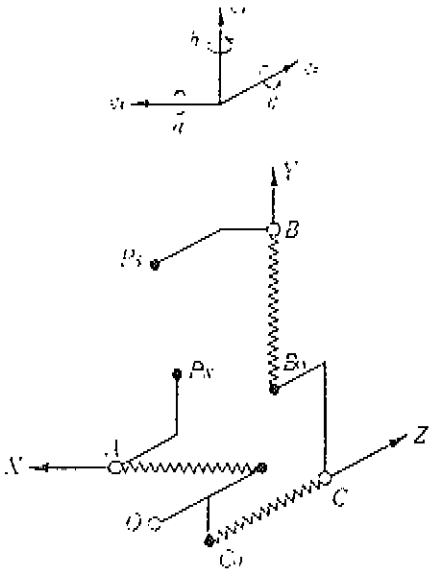


圖3-4橫型MC構造

門型MC：

圖3-5爲典型的MC之一例示。本機器的構造如圖3-6所示可以作向量表示。

門型MC問題大多出於在Cross rail上水平移動之Saddle與主軸頭(通常稱爲Y軸，有時也稱爲X軸)。亦即，由於自ball screw驅動部到主軸前端之間隔很長，容易受主軸頭搖擺變化的影響。再者，其他問題是結構上Saddle或主軸頭之carriage之L/B(L：長度，B：寬度)不容易取大，以及由於cross rail位於高的位置，因此容易受到室溫變化產生的熱變形的影響等。

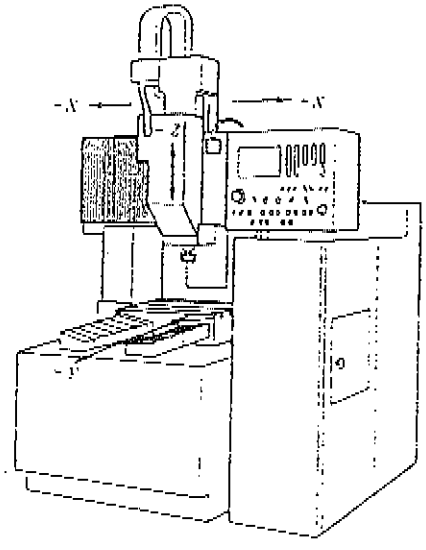


圖3-5典型的門型MC外觀

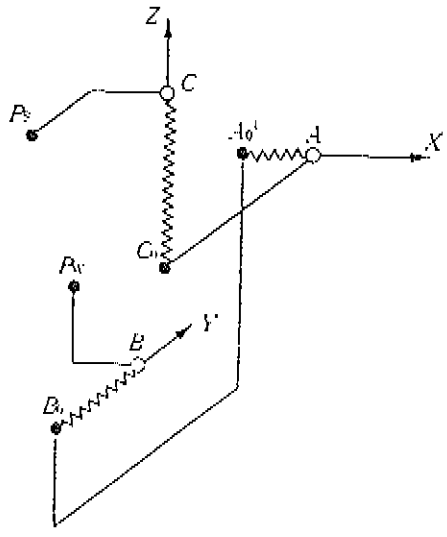


圖3-6典型的門型MC構造

(2) 導軌：

滑動導軌可以說是滑動阻力大、容易產生 stick slip，滑動面上黏貼 TURCITE 樹脂的場合磨擦亦非常小，若除掉特別情形，是不發生 stick slip。但是鑄鐵與鑄鐵或鑄鐵與硬化性樹脂的場合，磨擦力很大因此不在此限。導軌與 ball screw 驅動部的配置不是對稱時，運動之際將產生力矩而容易發生旋轉誤差(特別是 yawing)，因此必須注意。

滾動導軌的特徵是磨擦阻力很小，同時振動減衰能也很小，因此在伺服雜訊大的場合，高次波成分容易變大。另外，rail 式滾動導軌的情形是 rail 按裝關係致使容易產生偏直度誤差。靜壓導軌的場合，壓力源發生之壓力變動會傳到驅動系統，因此要注意。

另外，如果作動油溫度控制不完全，將導致導軌熱變形，精度下降。

(3) counter balance

dead weight 式 countar balance 本身並沒有問題，但如果平衡重量、懸吊場所、鏈條等不適當，則主軸頭運動時將發生旋轉力矩，容易發生旋轉誤差，因此要注意。

油壓汽缸式 counter balance，還要注意中立點之設定位置與油壓之變動。小型機器的場合，即使不設置 counter balance 亦無妨，對運動精度影響就不會這麼大了。

(4) 滑動體：

X、Y、Z 軸與 Table、Saddle、主軸頭、Column 等的連接關係以及其個別的移動距離決定了工具機基本構造。

(5) ball screw ：

大多數NC工具機是使用ball screw作爲進給螺桿。此ballscrew的whirling太大或有錯誤配置，在semi-closed loop方式NC在ball screw的pitch上就會出現爲周期性運動誤差。當然也會受到thrust軸承的倒裝、coupling、伺服馬達軸的偏心等之影響。

最近的機械在ball screw與伺服馬達之間，使用coupling以外的傳達機構，例如齒輪、timmning belt等的情形已不是這樣多了，但這些上面如果有backlash，則就爲呈現振幅一定的random運動誤差。

ball screw的thrust荷重承載方法有只於馬達這側承載之single anchor方式及馬達及承載側兩邊承載的dobble anchor方式，在double anchor方式的場合，ball screw的軸方向的剛性與nut的位置無關，幾乎爲一定，single anchor方式的場合，軸方向剛性乃隨nut位置而變。所以，如果沒有滑動體之旋轉誤差等，象限切換之際的段差就可以看成是由lost motion產生的，而在double ancher方式的場合，段差與位置無關，幾乎是固定的，single anchor方式的場合就呈變化的。相反的，如果有階段差((+)側與(-)側)，則表示存有滑動體的旋轉誤差。

(6) 控制方式：

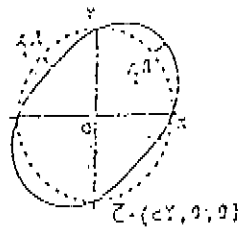
有全閉回路及半閉回路兩種方式，由於方式不同，所以某些誤差就不考慮，如lost motion，在全閉回路不考慮，因爲工作台位置誤差作補償，所以不會產生失位誤差，但是若在象限切換之際的段差，是由滑動體的搖擺變化(亦即由旋轉誤差所產生)

(7) 檢出器：

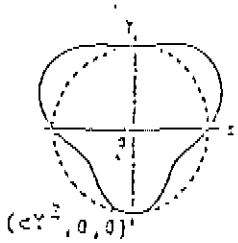
關於closed loop方式NC之位置檢出器，滑動體與光學尺scale間如果有間隙，則兩者之間容易出現溫度差，易發生scale之誤差，但如果加強電壓上有相位偏差，或磁場有雜訊干擾，則會發生周期性誤差。

半閉回路方式NC角度檢出器，resolver大多是每次旋轉有固定波數之雜訊成分，其servo noise，容易比rotary encoder大，速度檢出器使用之tacho generator的雜訊在低速時很小，但高速進給時容易變大。

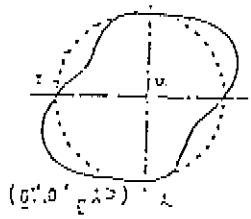
PMC 進給運動誤差軌跡圖



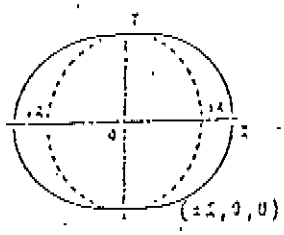
(a) 垂直度誤差



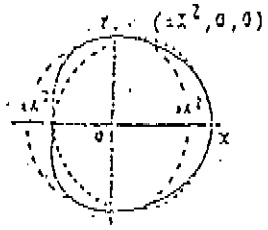
(b) 二階直度誤差



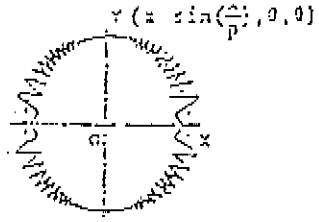
(c) 三階直度誤差



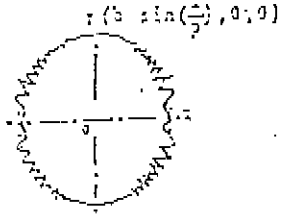
(d) 位置量測尺
一階均勻誤差



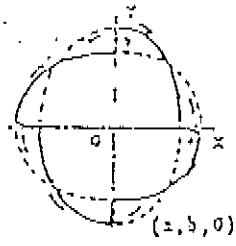
(e) 位置量測尺
二階均勻誤差



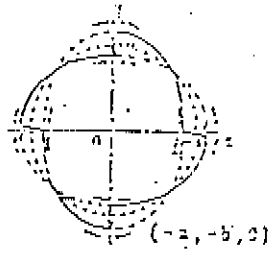
(f) 導螺桿之導程誤差



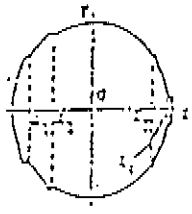
(g) 角度量測元件
之分度誤差



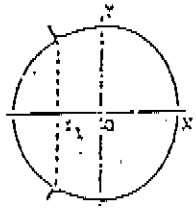
(h) 失位誤差



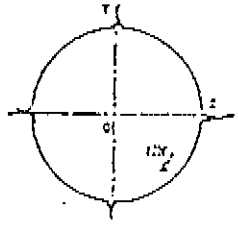
(i) 背隙補償誤差



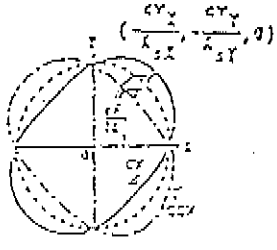
(j) 導程補償誤差



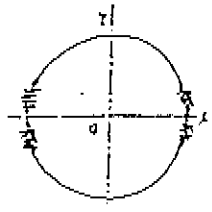
(k) 位置量測尺的誤差



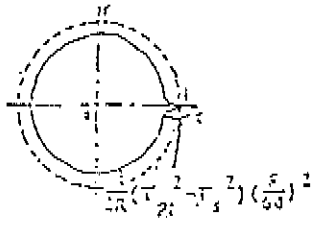
(l) 跳動誤差



(m) 位置增益不同



(n) 爬行誤差



(o) 伺服響應誤差

4.誤差原因分析及改善對策

4.誤差原因分析及改善對策

本章乃收集例年所量測軌跡資料，經歸納整理而成的實例圖譜資料，實例圖譜軌跡是由本中心實際量測的資料，較常出現的圖譜整理出來，經過原因分析，進而提供改善對策，使機台運動精度提升，達到機台進給最佳化。希望這些資料能對業界有所幫助。為了使學員們更清楚診斷誤差原因，除了上一章所介紹的診斷程序之外，將圖譜分類為：(1) 常見圖譜誤差軌跡診斷(2) 圖譜模組分析兩部分。

第一部分主要介紹單項誤差現象的軌跡形狀及產生原因，作為第二部分診斷原因的基礎。

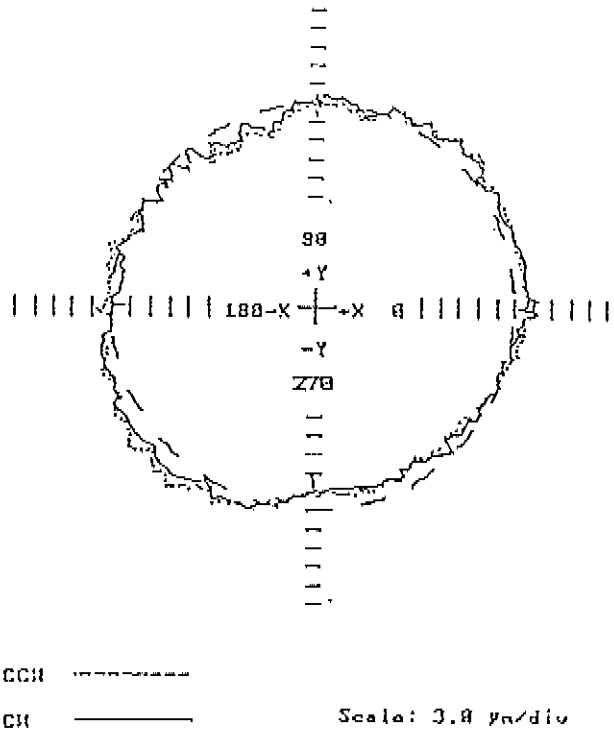
第二部分介紹一般機台量測的實例軌跡，分析出誤差現象及改善對策。

常見圖譜誤差軌跡診斷：

(1) 直角度誤差(squareness)：

其量測CW及CCW軌跡誤差，偏斜角度在45度或135度時，則爲垂直度誤差。

而產生原因是工具機裝配狀態時由bed, column, saddle本身以及其附屬之導軌的形狀誤差所產生的。

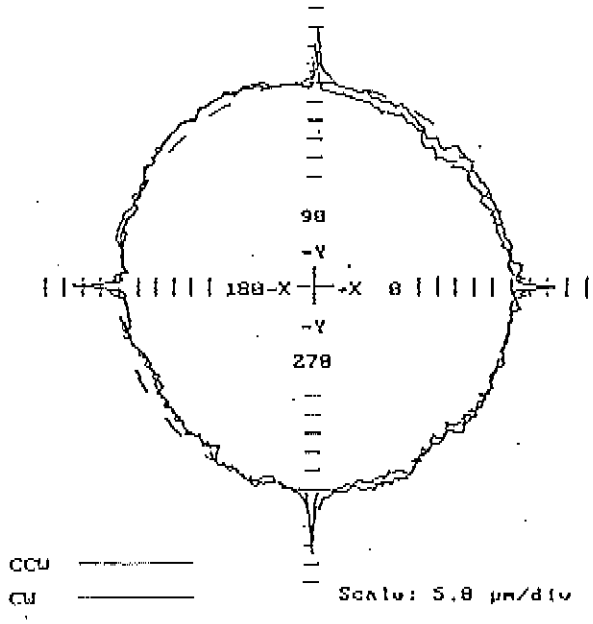


(2) 換向跳動誤差(stick motion)：

其圓諧軌跡誤差，在0度、90度、180度、270度有尖角產生。

產生原因(一)運動方向反轉時伺服馬達的負荷變化，使得出力torque應達延遲，造成旋轉角的延遲而產生的狀態。

(二)背隙補償反應時間不適當。



(3) 失位誤差(lost motion) ：

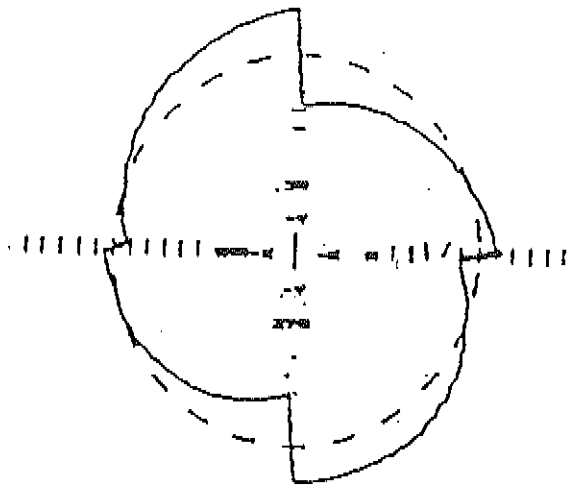
其圖譜軌跡誤差，在0度、90度、180度、270度有段差產生。

產生原因(一)滾珠螺桿與nut及該支撐部份的彈性變形。

(二)滑動阻力造成的進給驅動系統的彈性變形。

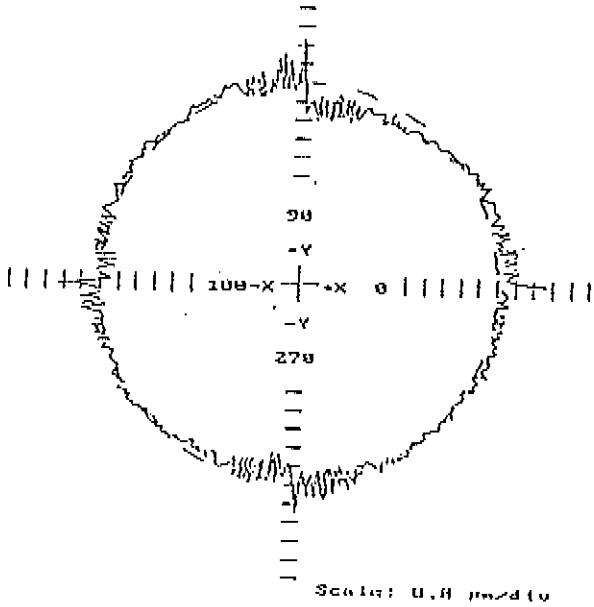
(三)軸承座內軸承軸向游隙太大。

(四)軸承座剛性不足造成彈性變形。



(4) 黏滯爬行(stick slip)：

其圓諧軌跡誤差，在換向時會產生密集抖動軌跡。原因爲進給速度小時滑動體完全停止，短時間內反覆移動，主要由滑動面的摩擦狀態所決定。

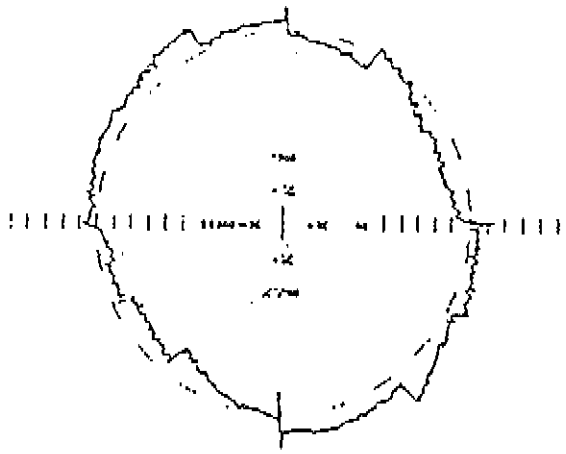


(5) 導程補償誤差(pitch error)

其圖譜軌跡誤差，分別對稱X軸或Y軸的STEP形式產生。

產生原因：(一) PITCH 補償值不正確。

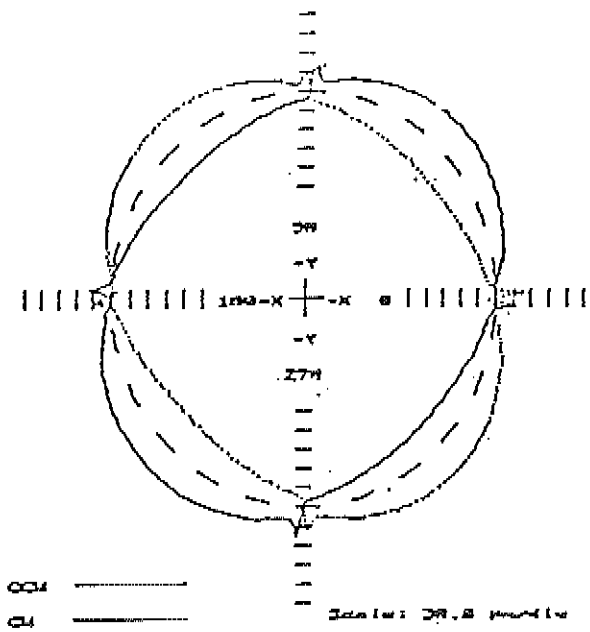
(二) 傳動作鬆動如齒輪或時規皮帶太鬆。



(6) 增益不一致(loop gain)：

其量測CW及CCW軌跡誤差，偏斜角度在45度及135度時，則爲增益不一致。

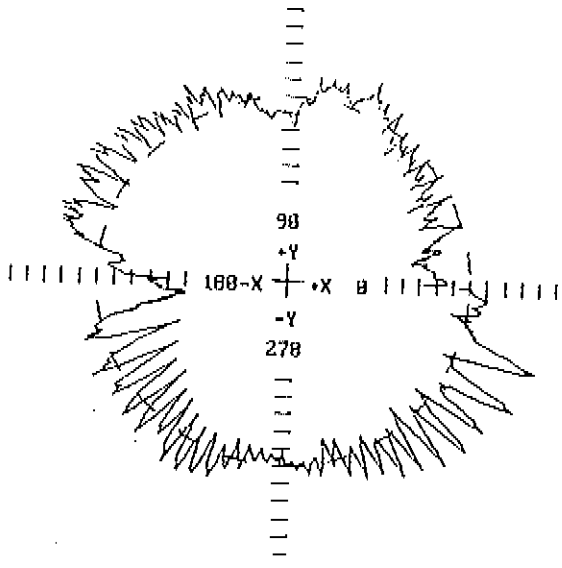
產生原因是由伺服系統應答遲緩生成，有時smoothing時間常數設定造成的遲緩引起。



(7) 導螺桿偏擺(ball screw run out)

其圓諧軌跡誤差，呈波浪週期性變動，且與導螺桿 pitch 相關。

產生原因：導螺桿裝配不同心(nut、馬達端軸承座、螺桿支撐端軸承座任一元件同心度不佳，則裝配後螺桿便有偏擺現象)。



Scale: 6.8 μm/div

PMC	循圓量測圖譜模組分析

誤差分析：

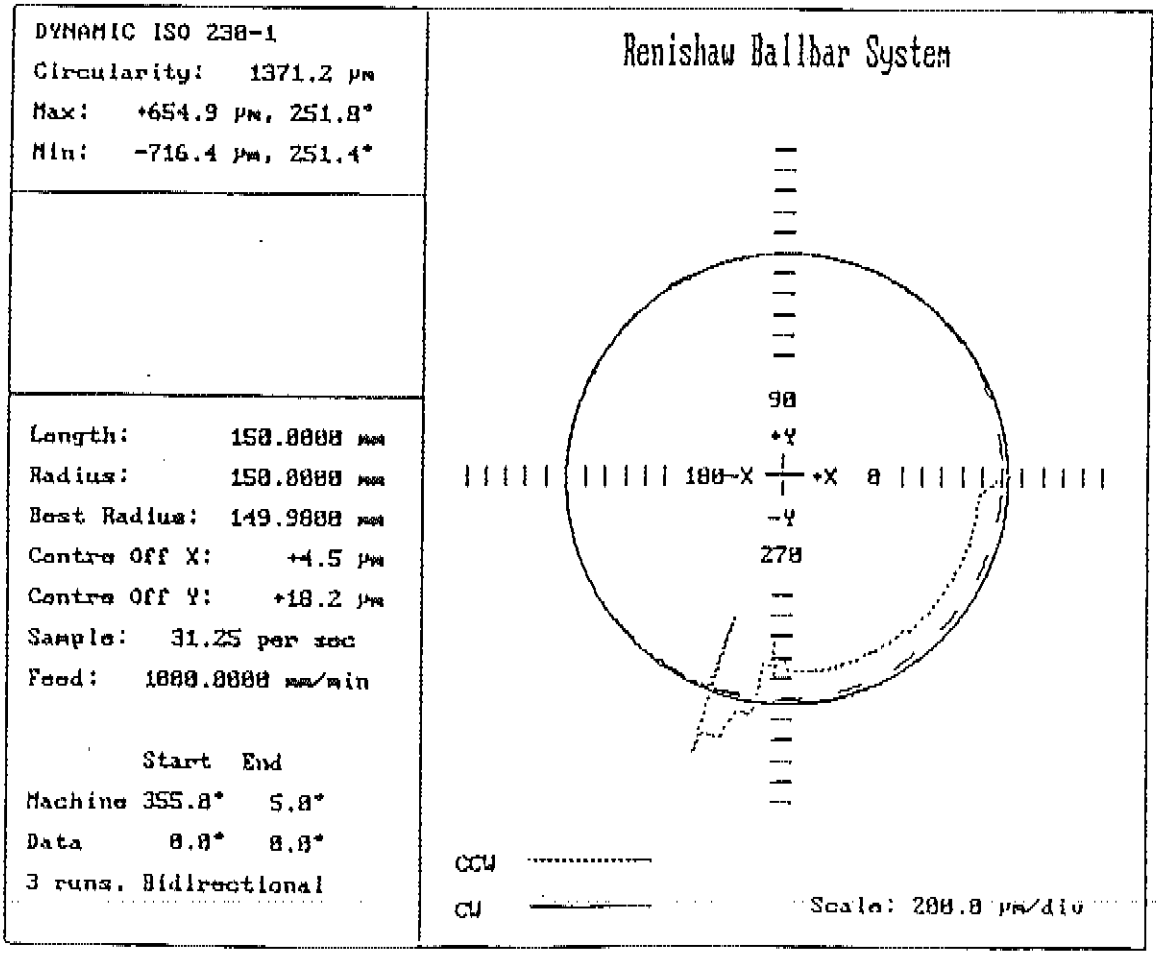
可能量測儀器，量測時：

(1)訊號線拉扯到

(2)鋼球或球座有鐵屑

建議對策：

將鋼球及球座擦拭乾淨



PMC 循圓量測圖譜模組分析

誤差分析：

(1) XY 兩軸 LOST MOTION

(2) BALLSCREW RUN OUT

建議對策：

(1) LOST MOTION 調整背隙參數(X增加80 ，Y增加50)

(2) BALLSCREW RUN OUT 檢視

* 導螺桿安裝同心度
* 軸承，軸承座，螺帽座安裝是否不良。
* 軸承座剛性是否足夠

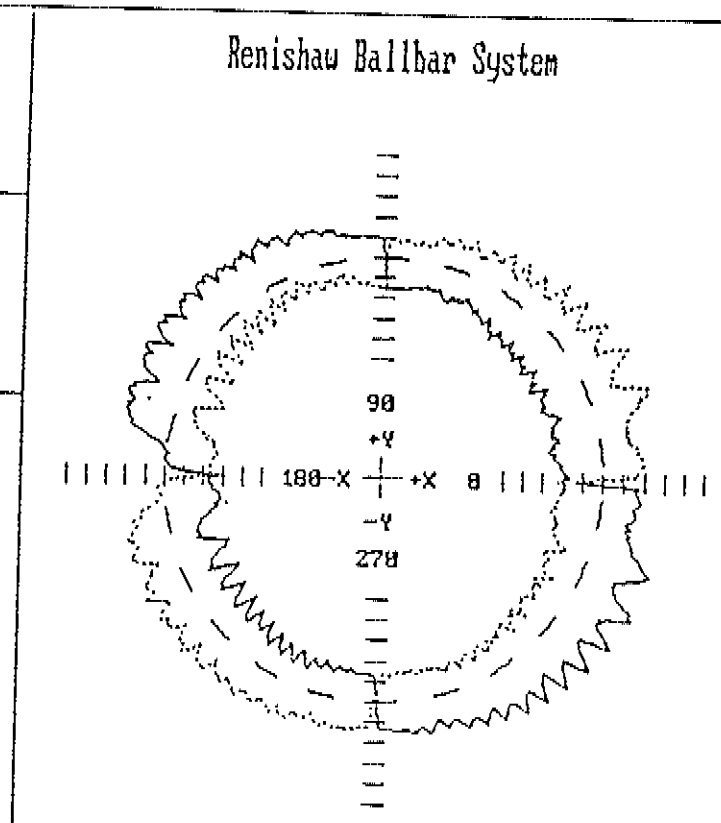
DYNAMIC ISO 230-1
Circularity: 119.4 μm
Max: +63.1 μm, 331.3°
Min: -56.3 μm, 188.3°

Length: 150.0000 mm
Radius: 150.0000 mm

Centre Off X: +5.2 μm
Centre Off Y: -23.7 μm
Sample: 31.25 per sec
Feed: 1000.0000 mm/min

	Start	End
Machine	355.8°	5.8°
Data	0.0°	0.0°

2 runs, Bidirectional



PMC 循圓量測圖譜模組分析

誤差分析：

Y軸進給有爬行現象(STICK SLIP)

建議對策：

(1)增加潤滑油

(2)增加速度增益

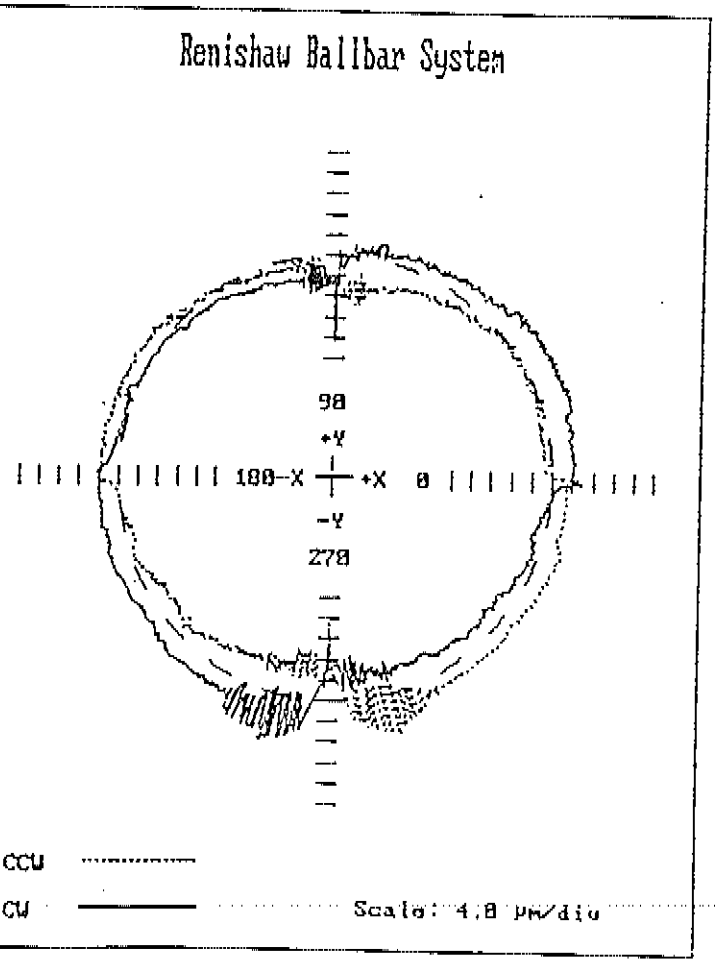
DYNAMIC ISO 230-1
Circularity: 26.1 μm
Max: +9.4 μm, 254.4°
Min: -16.7 μm, 98.2°

Length: 150.0000 mm
Radius: 150.0000 mm

Centre Off X: -15.9 μm
Centre Off Y: +4.4 μm
Sample: 37.50 per sec
Feed: 1000.0000 mm/min

	Start	End
Machine	355.8°	5.8°
Data	8.8°	8.8°

2 runs, Bidirectional



PMC	循圓量測圖譜模組分析

誤差分析：

(1) XY 軸 STICK MOTION。

(2) XY 軸 SCALE 誤差 8um/150mm(1x<1y)。

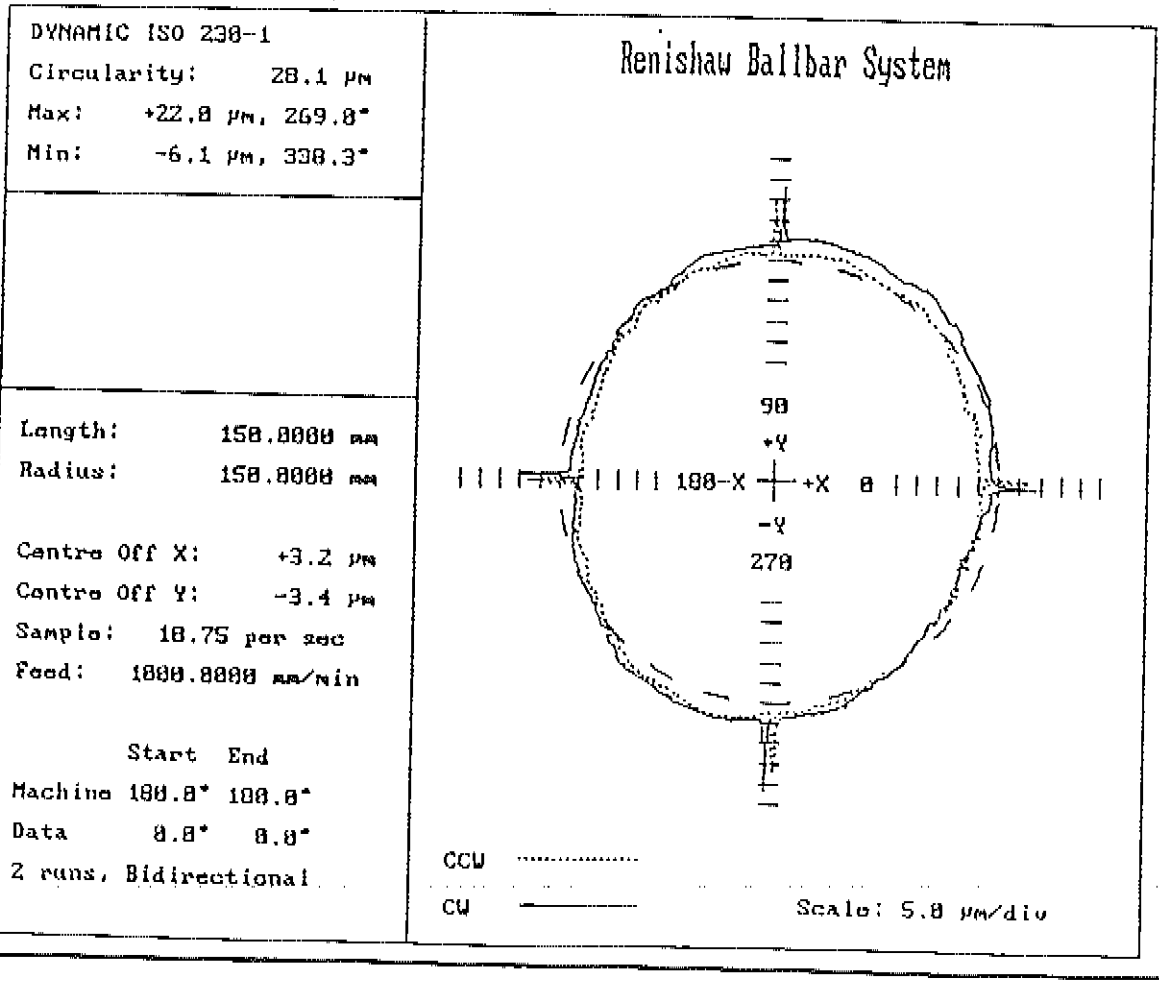
建議對策：

(1) STICK MOTION → 打開背隙加速功能，並調整下列參數：

※ backlash acceleration amount

※ backlash acceleration rotation

(2) pitch error 補正不以階狀加入，而改採用內插方式。



PMC	循圓量測圖譜模組分析

誤差分析：

(1) Y 軸 STICK MOTION 及 LOST MOTION

(2) XY 軸直角度誤差

建議對策：

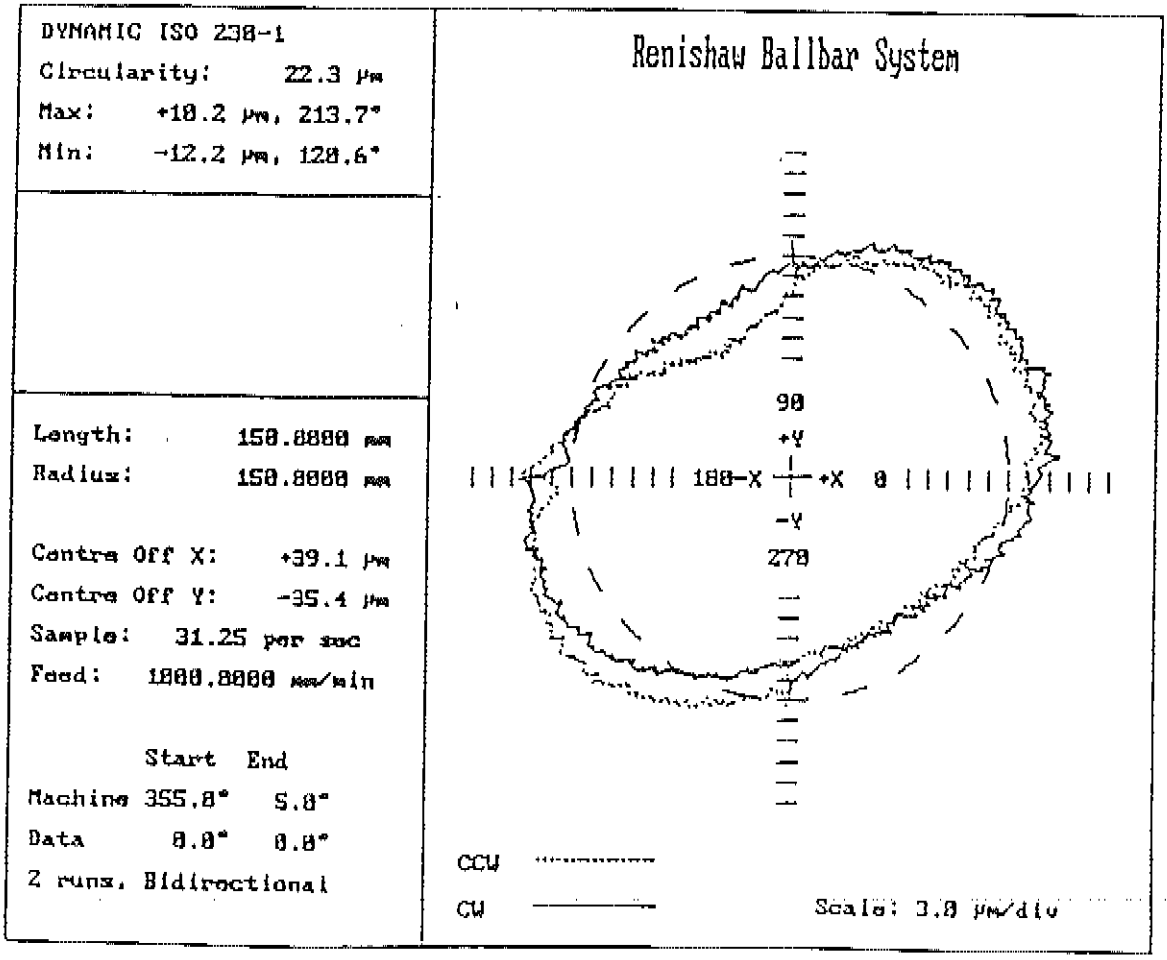
(1) LOST MOTION ，調整背隙參數

STICK MOTION → 打開背隙加速功能，並調整下列參數：

※ backlash acceleration amount

※ backlash acceleration rotation

(2) 修整滑軌面 fitting 。



PMC 循圓量測圖譜模組分析

誤差分析：

(1) STICK MOTION 換向跳動

(2) LOST MOTION 失位誤差

(3) 兩端摩擦阻力不同

(4) 兩軸直角度誤差

建議對策：

(1) STICK MOTION → 打開背隙加速功能，並調整下列參數：

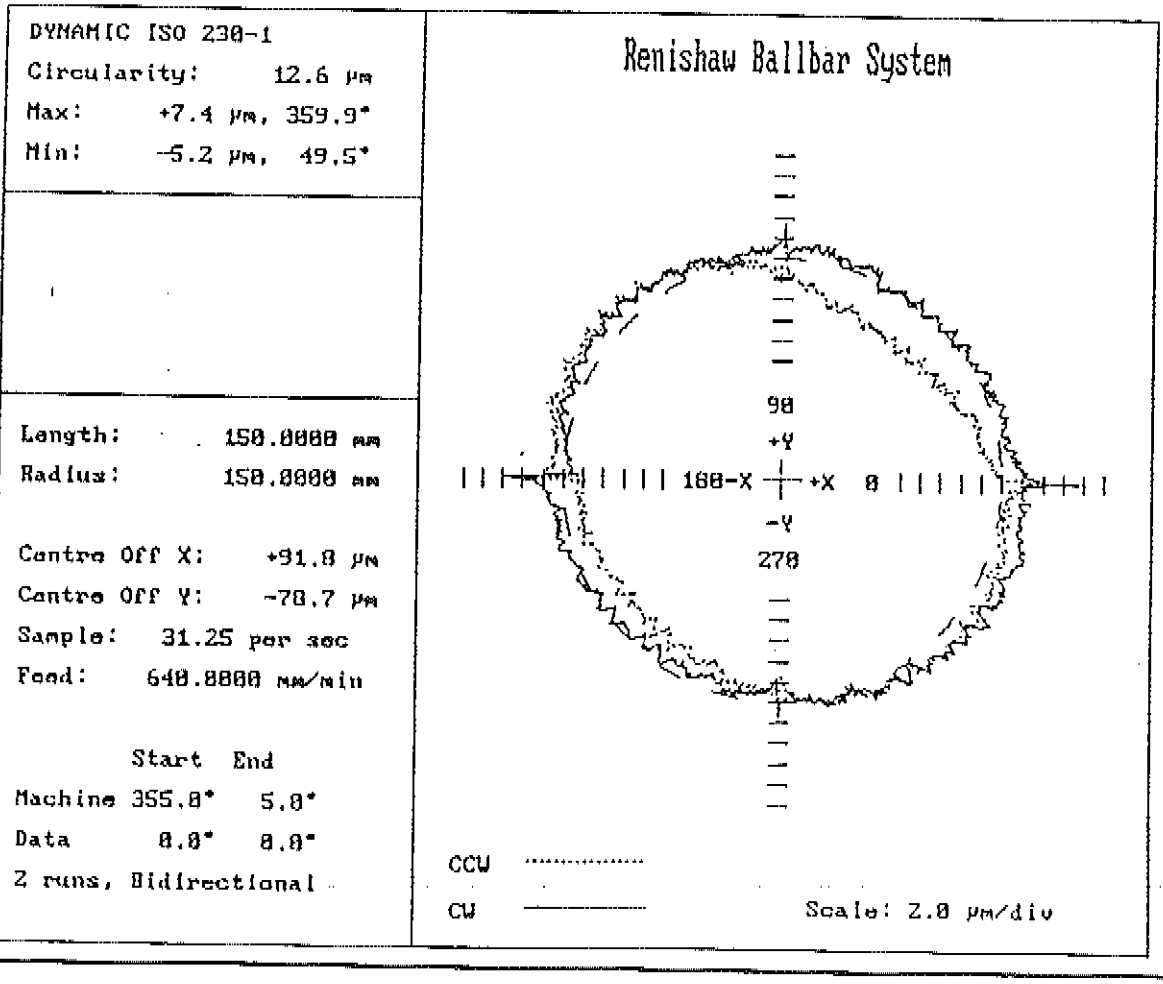
※ backlash acceleration amount

※ backlash acceleration rotation

(2) LOST MOTION 調整背隙參數(X增加4，Y增加2)

(3) 一般發生在工作台上，裝有第四軸，建議平衡要作好。

(4) 修整滑軌面 fitting。



PMC	循圓量測圖譜模組分析

誤差分析：

(1) Z 軸換向跳動 (STICK MOTION)

(2) XZ 兩軸直角度誤差

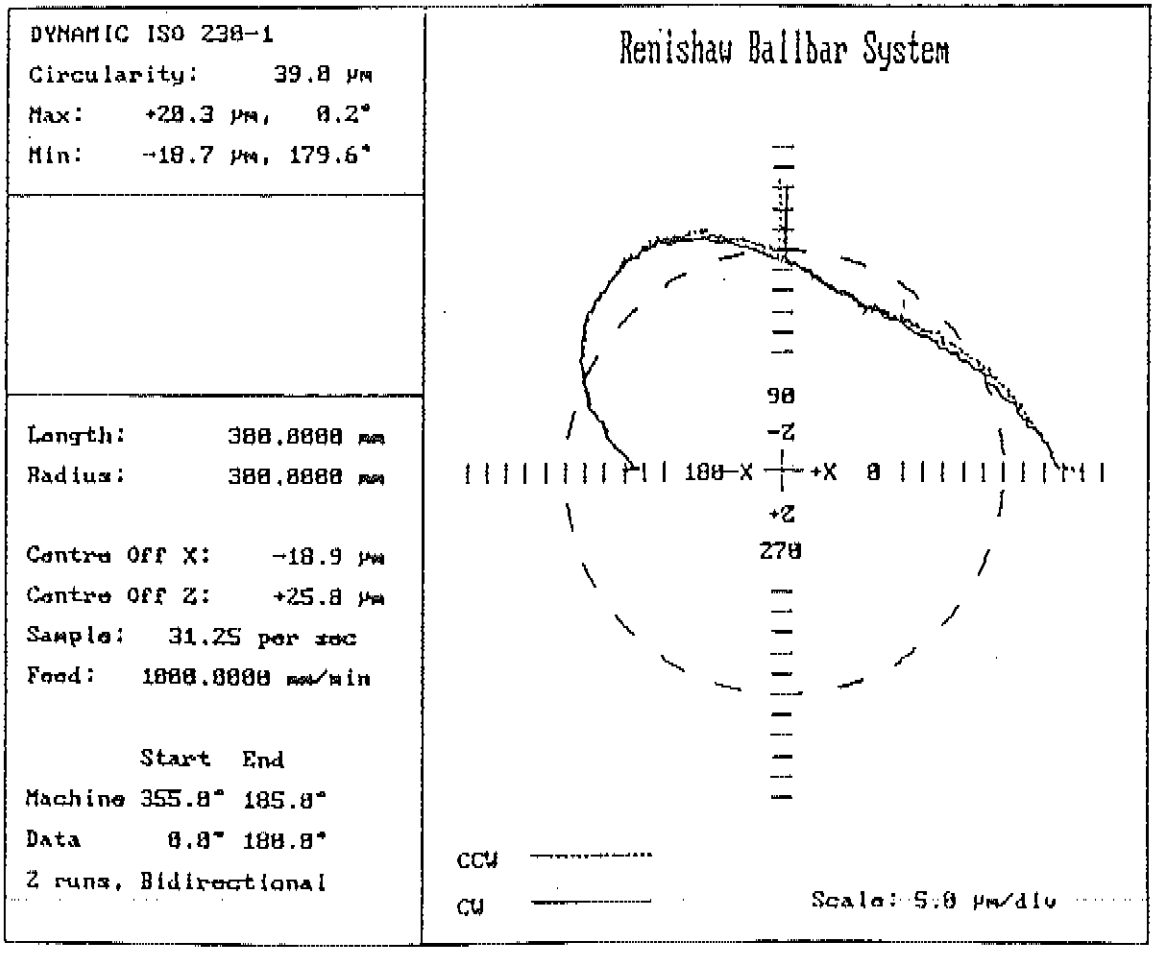
建議對策：

(1) STICK MOTION → 打開背隙加速功能，並調整下列參數：

※ backlash acceleration amount

※ backlash acceleration rotation

(2) 調整 COLUMN 水平。



PMC	循圓量測圖譜模組分析

誤差分析：

可能(1)導螺桿PITCH ERROR補償誤差。

(2)傳動齒輪或皮帶鬆動。

建議對策：

(1)重新補償PITCH ERROR值。

(2)調整齒輪或皮帶。

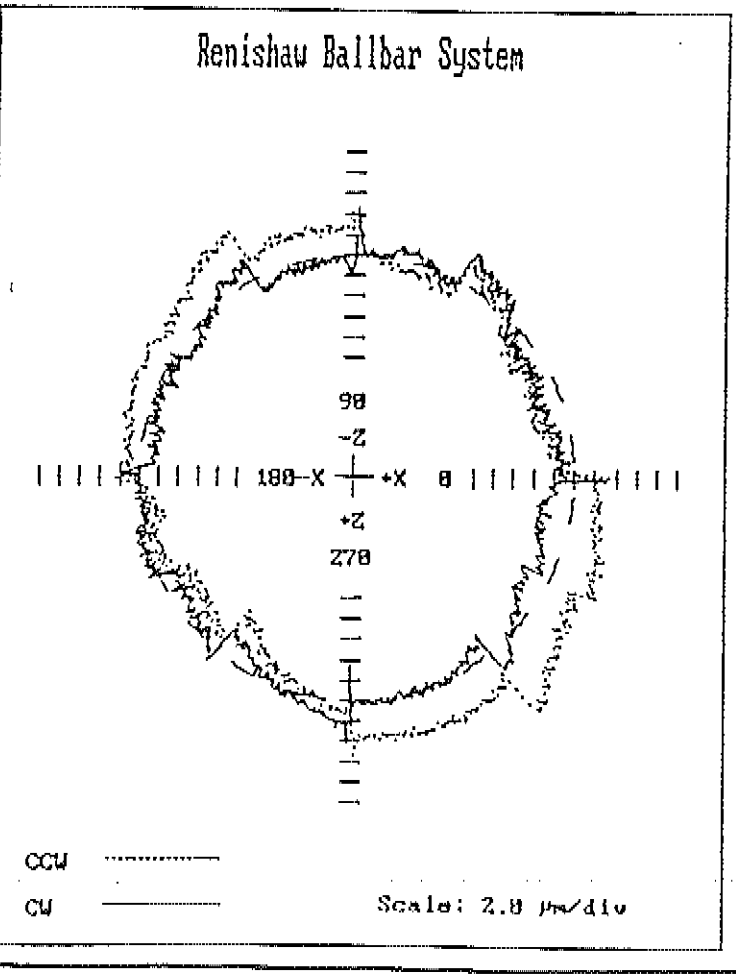
DYNAMIC ISO 230-1
Circularity: 12.9 µm
Max: +7.8 µm, 389.2°
Min: -5.1 µm, 232.5°

Length: 150.0000 mm
Radius: 150.0000 mm

Centre Off X: +296.9 µm
Centre Off Z: +187.3 µm
Sample: 37.50 per sec
Feed: 1000.0000 mm/min

	Start	End
Machine	355.8°	5.8°
Data	0.0°	0.0°

2 runs, Bidirectional



PMC	循圓量測圖譜模組分析

誤差分析：

(1) XY 兩軸 LOST MOTION

(2) Y 軸有 PITCHING 及 YAWING 滑動現象。

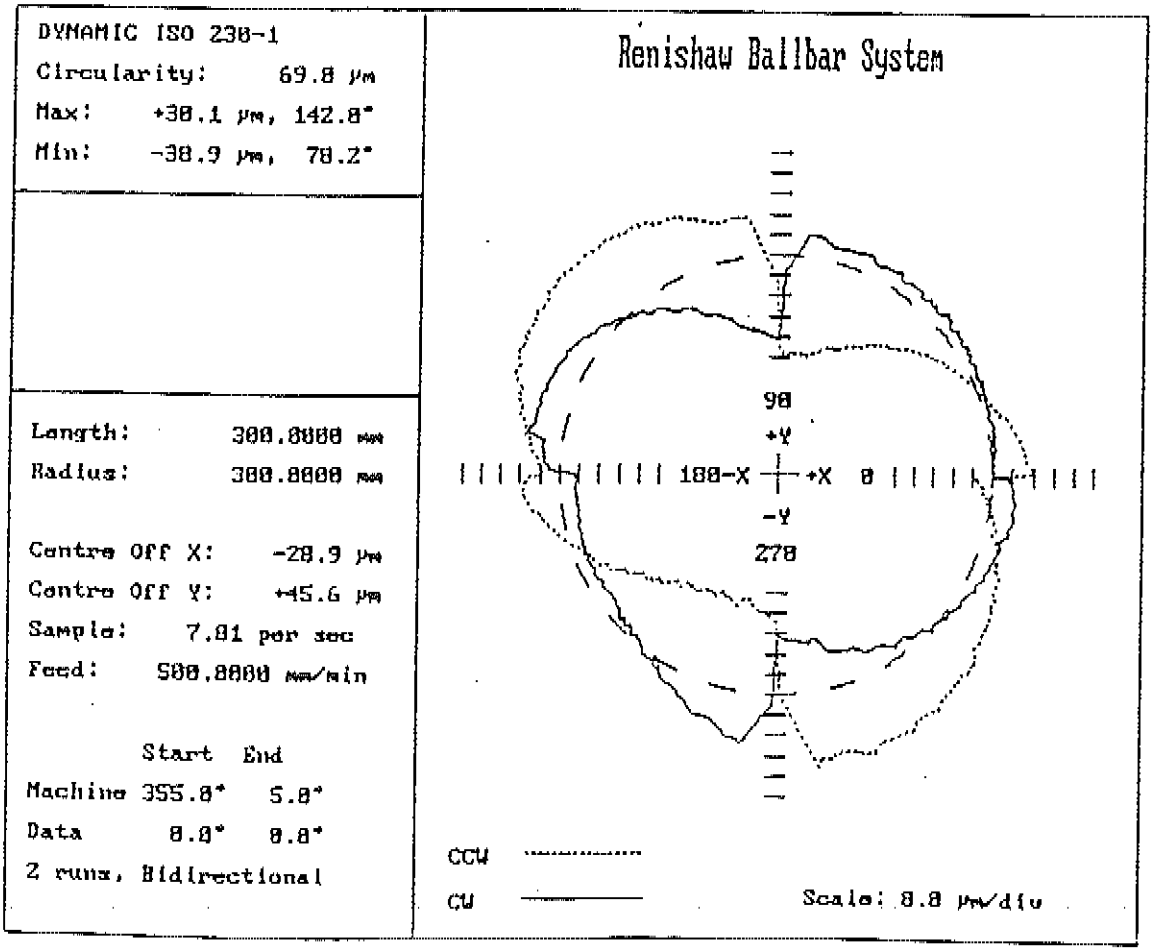
建議對策：

(1) 調整 XY 兩軸背隙參數

X 增加 16，Y 增加 60。

(2) 方軌調整 Gib 及檢視滑動面情形。

線性滑軌檢視安裝幾何精度。



PMC	循圓量測圖譜模組分析

誤差分析：

油壓配重系統反應延遲

建議對策：

改善油壓系統

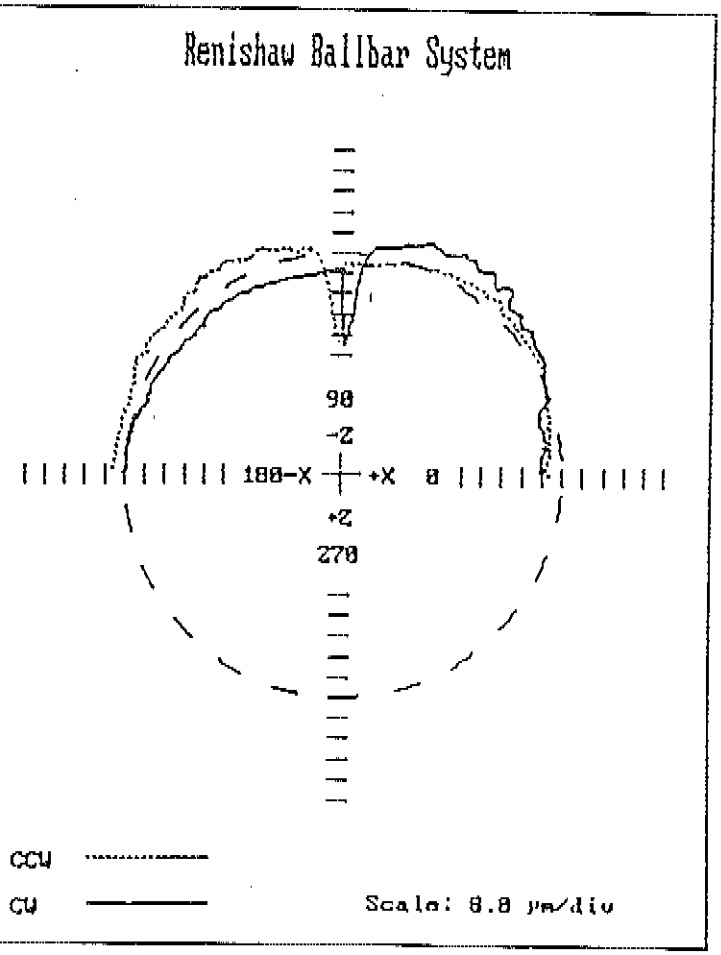
DYNAMIC ISO 230-1
Circularity: 48.6 μm
Max: +12.4 μm, 53.5°
Min: -36.2 μm, 89.0°

Length: 150.0000 mm
Radius: 150.0000 mm

Centre Off X: -39.1 μm
Centre Off Z: -8.9 μm
Sample: 15.63 per sec
Feed: 1000.0000 mm/min

	Start	End
Machine	355.0°	185.0°
Data	0.0°	180.0°

2 runs, Bidirectional



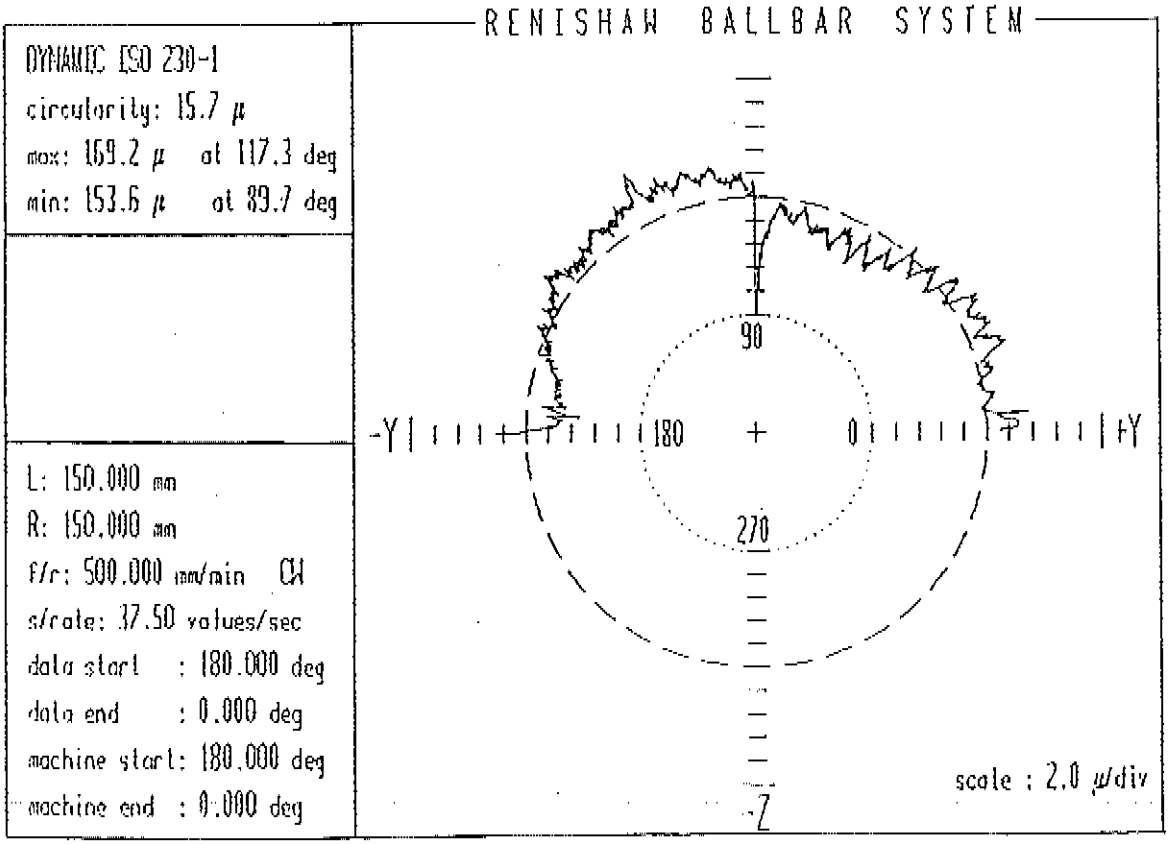
PMC	循圓量測圖譜模組分析

誤差分析：

Z軸配重往上移動時，產生共振(或搖晃)現象。

建議對策：

須由機械設計作探討，除了變更配重系統的設計外，可選用剛性更高之鍊條替換；若無法改善可將加減速時間加長。



PMC	循圓量測圖譜模組分析

誤差分析：

兩軸進給加減速不一樣

(伺服增益不同)

建議對策：請參閱附錄一

檢視與進給加減速相關參數值兩軸設定是否相同。

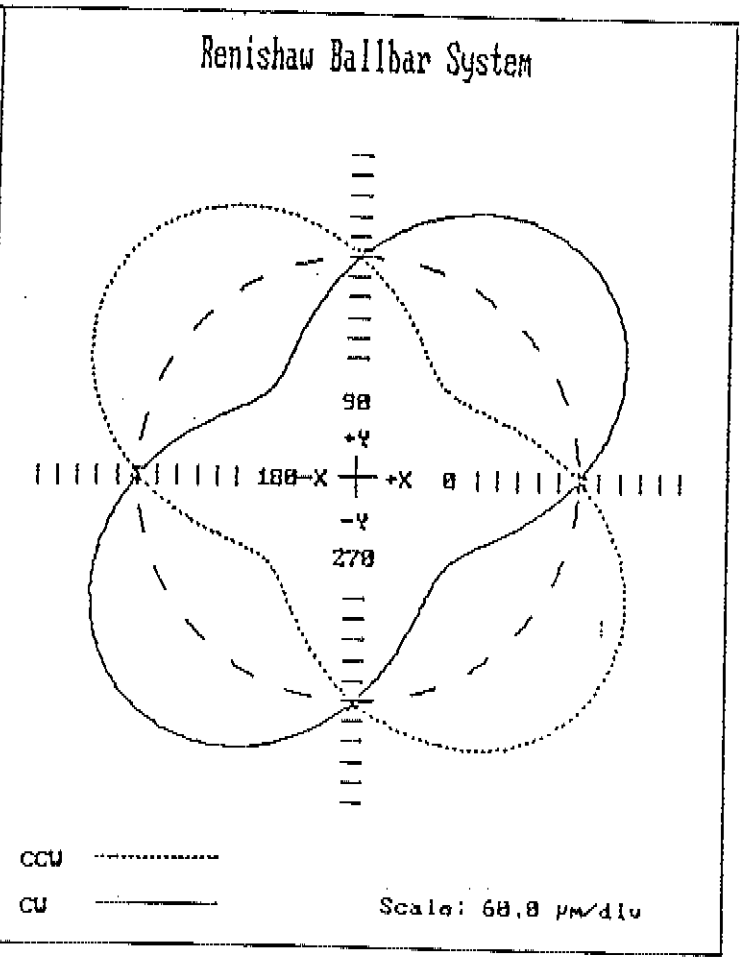
DYNAMIC ISO 230-1
Circularity: 587.4 μm
Max: +295.3 μm, 135.5°
Min: -292.1 μm, 224.5°

Length: 150.0000 mm
Radius: 150.0000 mm

Centre Off X: +33.6 μm
Centre Off Y: -24.5 μm
Sample: 31.25 per sec
Feed: 1000.0000 mm/min

	Start	End
Machine	355.8°	5.8°
Data	0.0°	0.0°

2 runs, Bidirectional



PMC	循圓量測圖譜模組分析

誤差分析：

訊號線受到干擾

建議對策：

(1)檢查電源是否有接地

(2)檢查控制箱訊號線是否受到干擾

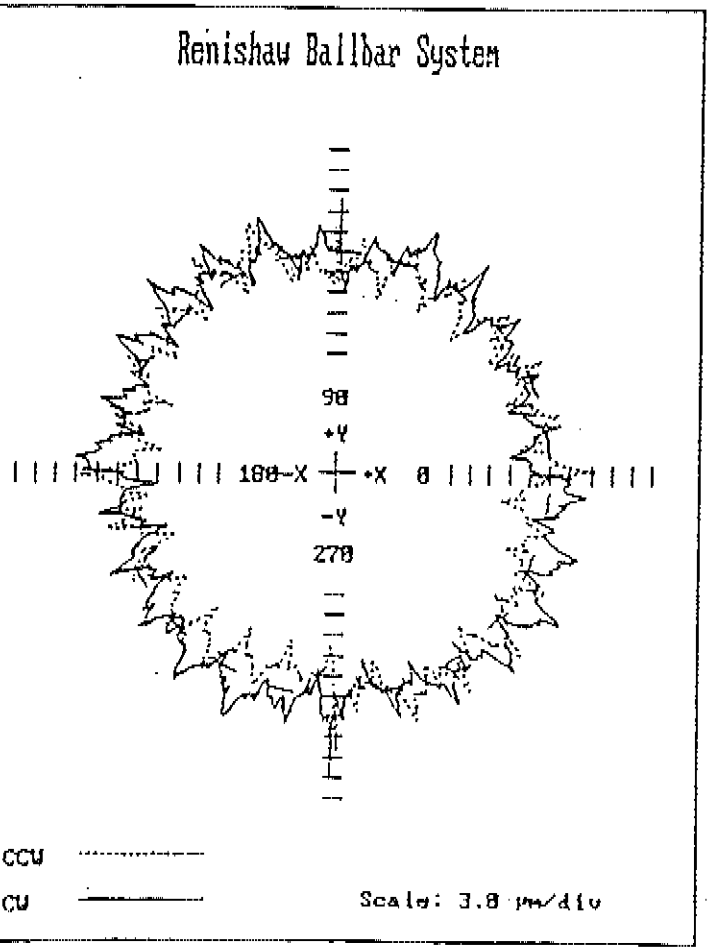
DYNAMIC ISO 230-1
Circularity: 19.7 μm
Max: +12.4 μm, 269.2°
Min: -7.4 μm, 255.6°

Length: 150.0000 mm
Radius: 150.0000 mm

Centre Off X: +26.8 μm
Centre Off Y: -18.4 μm
Sample: 18.75 per sec
Feed: 500.0000 mm/min

	Start	End
Machine	355.8°	5.8°
Data	0.8°	0.8°

2 runs, Bidirectional



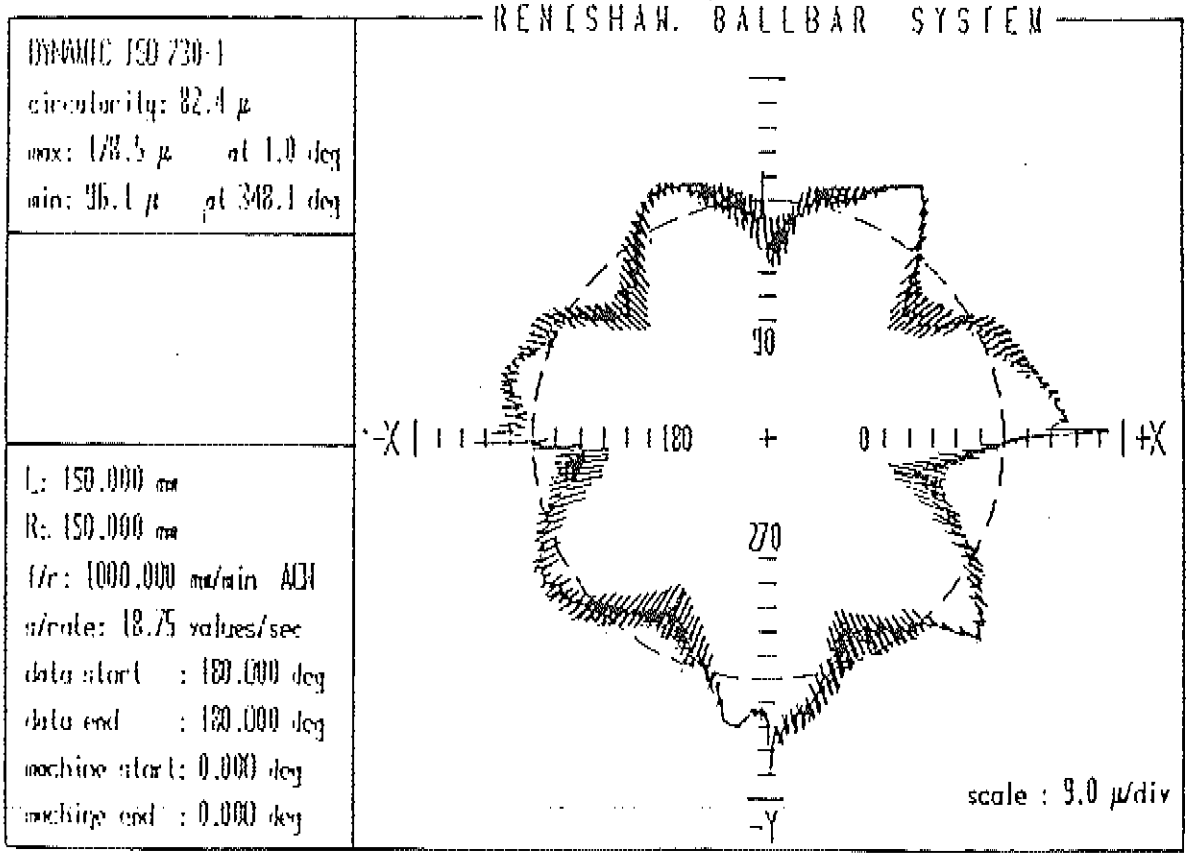
PMC	循圓量測圖譜模組分析

誤差分析：

機台電源未接地

建議對策：

將電源接地



5.實例分析

DYNAMIC ISO 230-1

Circularity: 48.4 µm

Max: +32.7 µm, 359.8°

Min: -15.7 µm, 171.8°

Length: 150.0000 mm

Radius: 150.0000 mm

Centre Off X: +12.7 µm

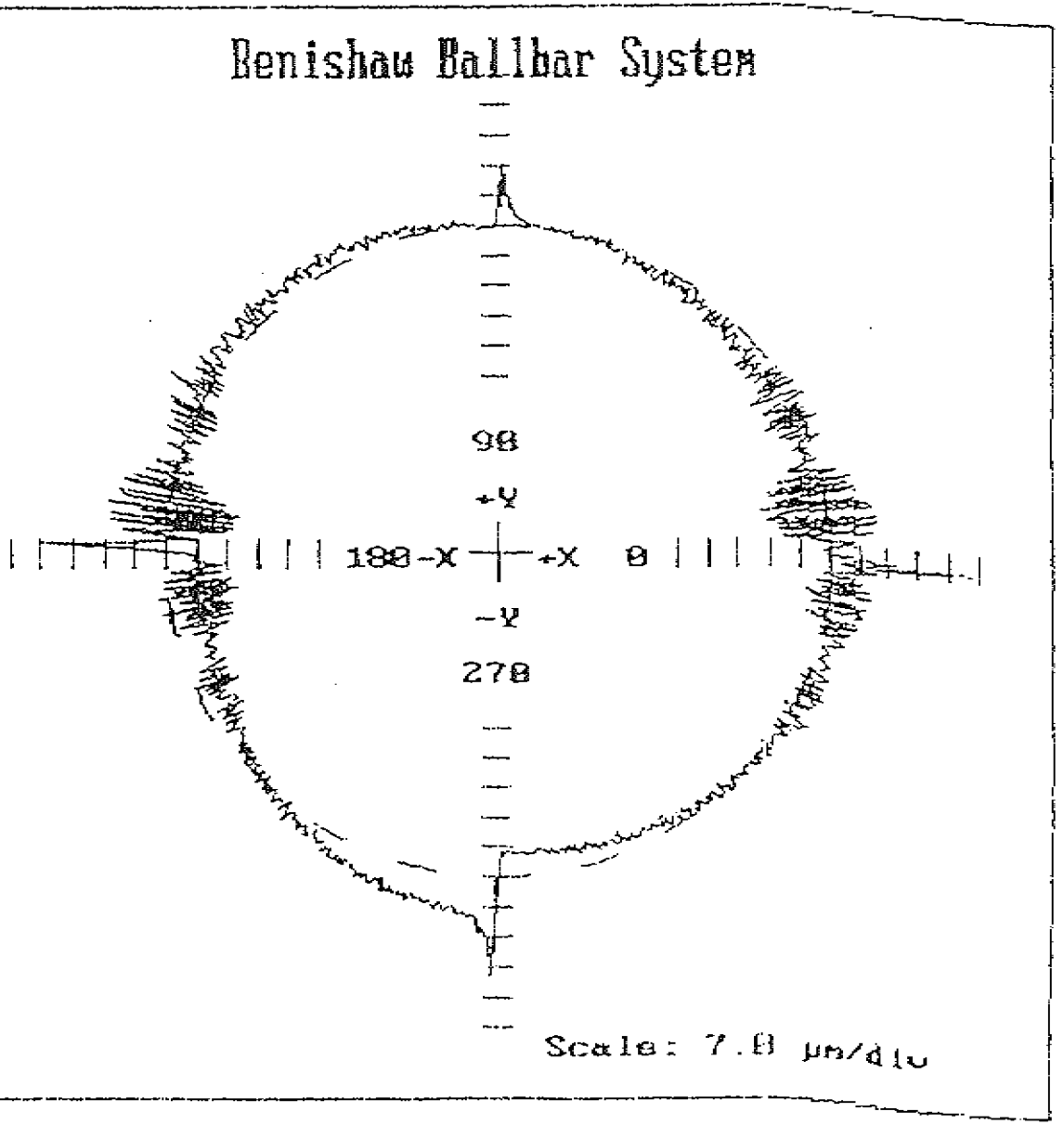
Centre Off Y: +37.0 µm

Sample: 9.38 per sec

Feed: 500.0000 mm/min

	Start	End
Machine	180.0°	180.0°
Data	0.0°	0.0°

1 run, Clockwise



DYNAMIC ISO 230-1

Circularity: 76.3 µm

Max: +38.6 µm, 359.3°

Min: -37.8 µm, 355.0°

Length: 100.0000 mm

Radius: 100.0000 mm

Centre Off X: -0.4 µm

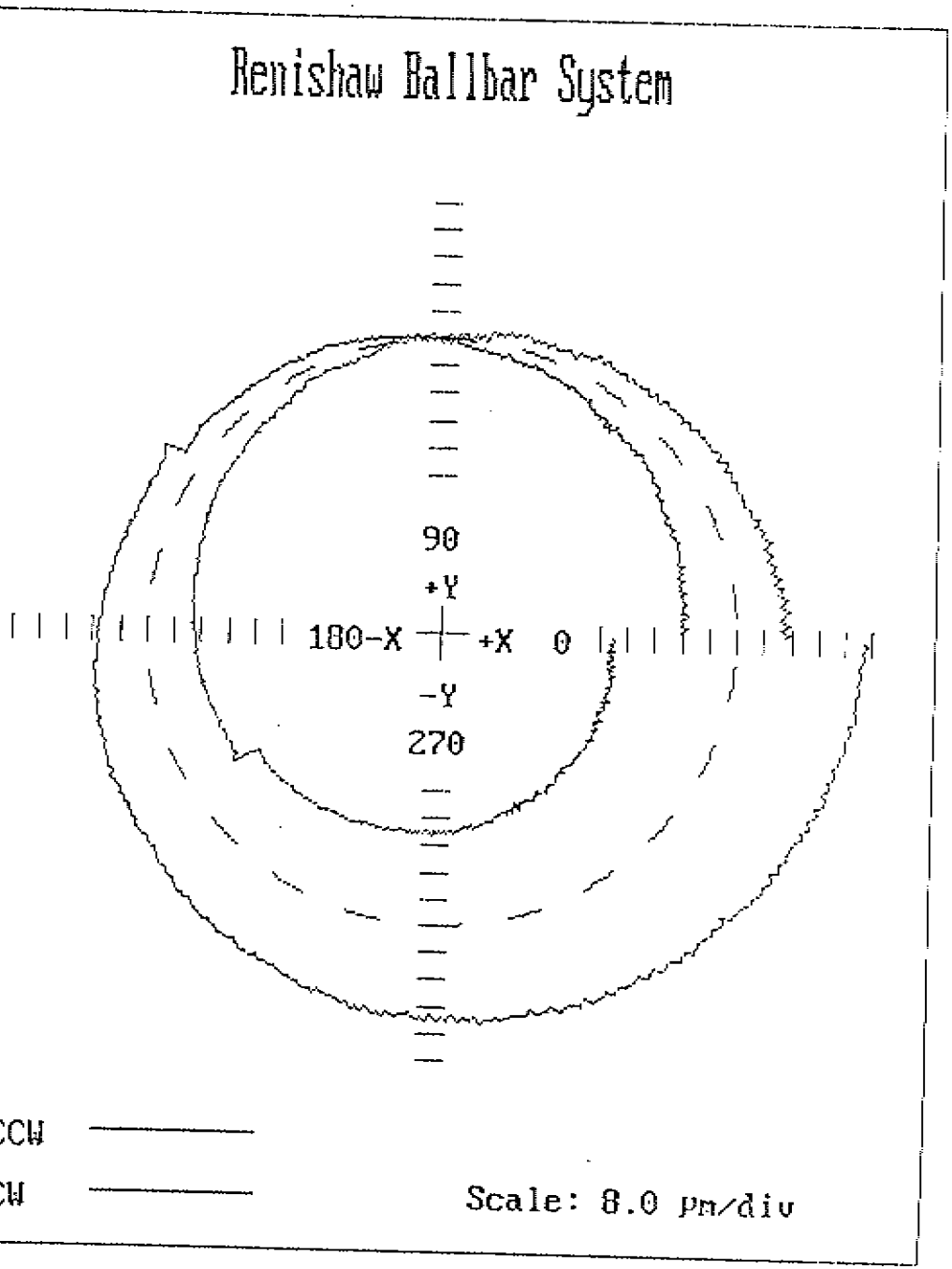
Centre Off Y: -0.4 µm

Sample: 125.00 per sec

Feed: 3000.0000 mm/min

	Start	End
Machine	180.0°	180.0°
Data	0.0°	0.0°

2 runs, Bidirectional



DYNAMIC ISO 230-1

Circularity: 43.2 µm

Max: +23.4 µm, 203.5°

Min: -19.8 µm, 134.1°

EXXY1.RTB

By: pmc

Machine:

Date: 10:50 May 28 1994

Length: 150.0000 mm

Radius: 150.0000 mm

Centre Off X: +65.2 µm

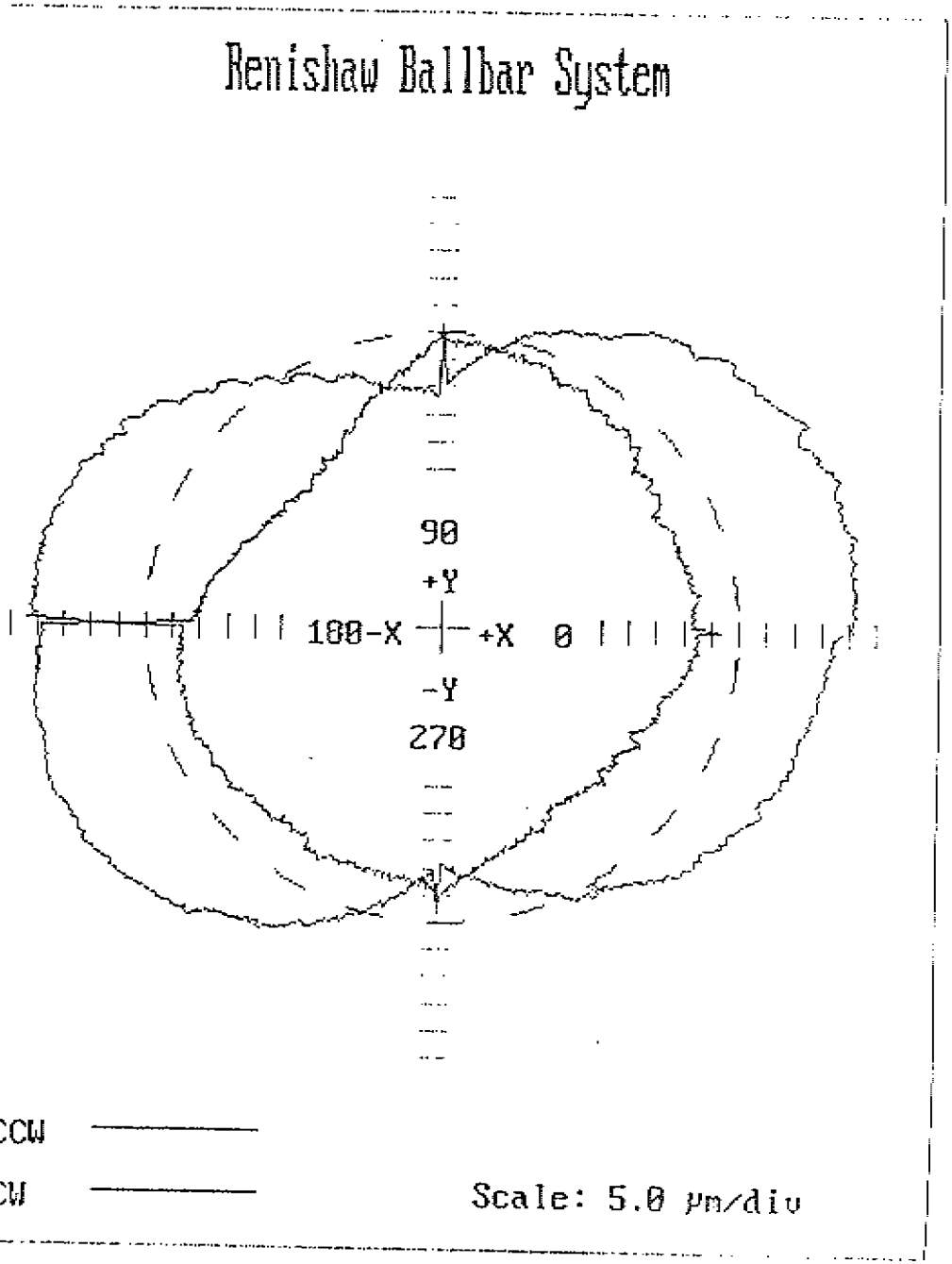
Centre Off Y: +10.9 µm

Sample: 31.25 per sec

Feed: 1000.0000 mm/min

	Start	End
Machine	355.0°	5.0°
Data	0.0°	0.0°

2 runs, Bidirectional



DYNAMIC ISO 230-1

Circularity: 20.5 µm

Max: +11.3 µm, 74.0°

Min: -9.2 µm, 87.7°

Length: 150.0000 mm

Radius: 150.0000 mm

Centre Off X: +79.5 µm

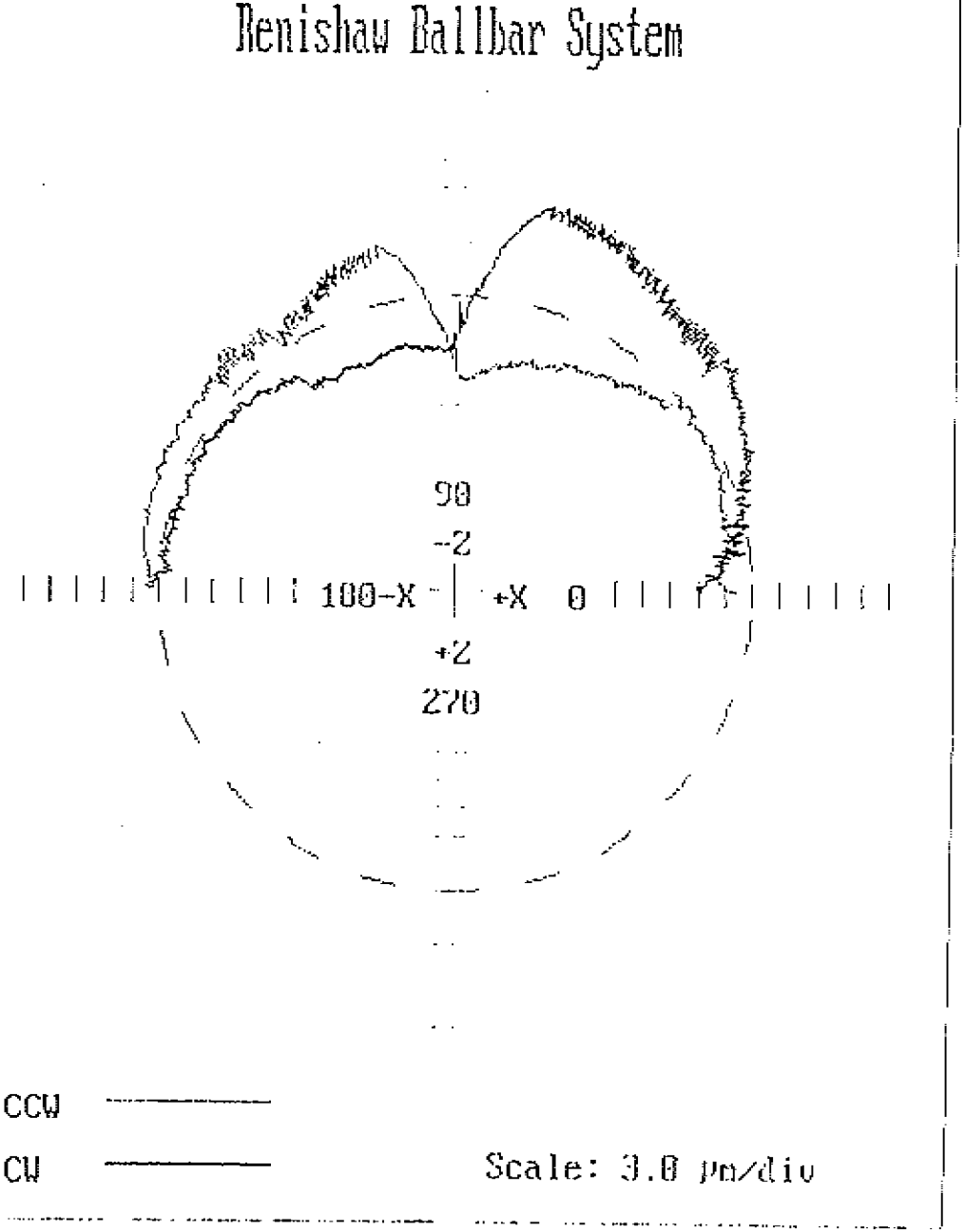
Centre Off Z: +18.9 µm

Sample: 31.25 per sec

Feed: 1000.0000 mm/min

	Start	End
Machine	355.0°	185.0°
Data	0.0°	180.0°

2 runs, Bidirectional



DYNAMIC ISO 230-1

Circularity: 25.7 µm

Max: +16.3 µm, 0.0°

Min: -9.4 µm, 49.4°

EXYZ1.RTB

By: pmc

Machine:

Date: 13:48 May 28 1994

Length: 150.0000 mm

Radius: 150.0000 mm

Centre Off Y: +23.9 µm

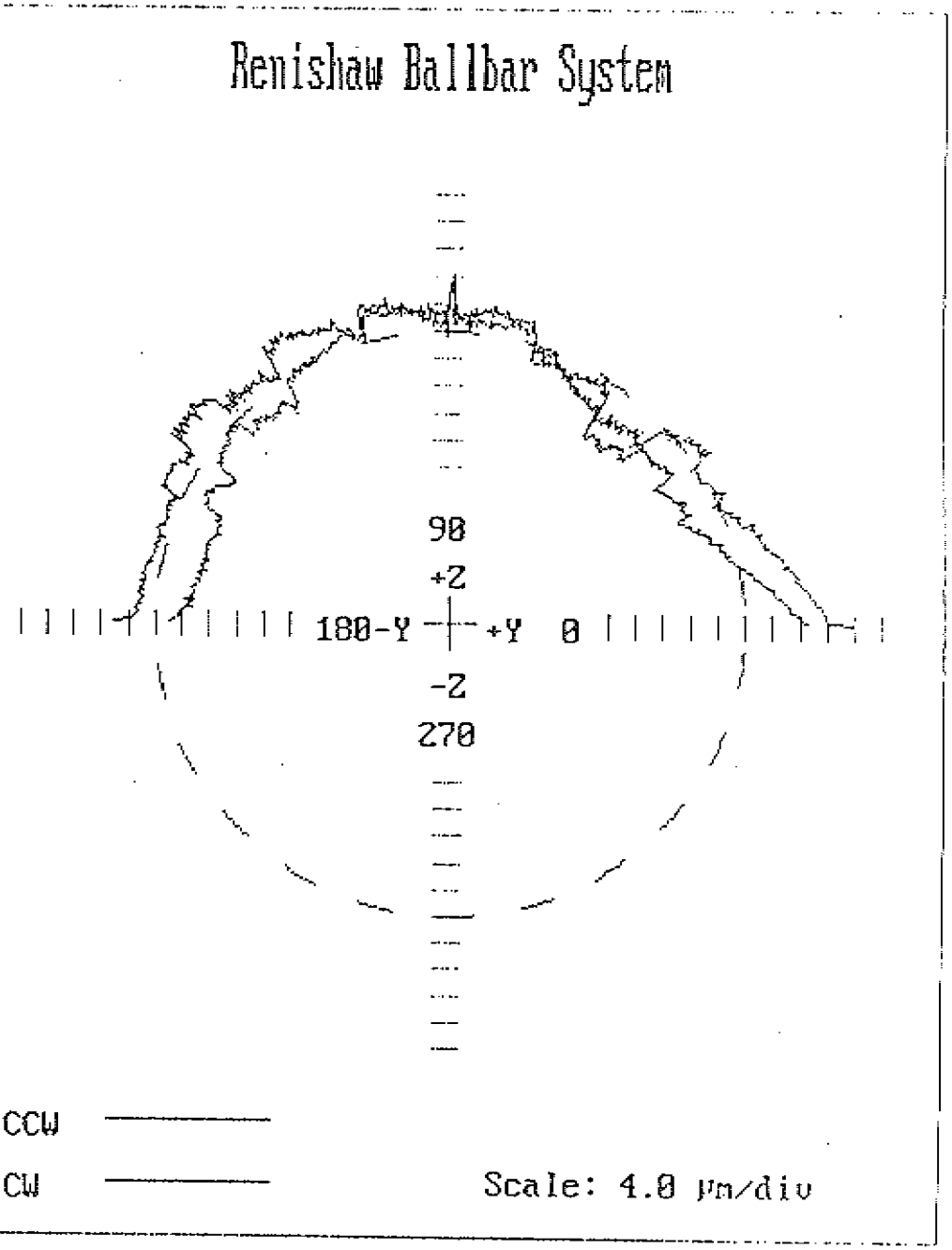
Centre Off Z: +281.8 µm

Sample: 15.63 per sec

Feed: 1000.0000 mm/min

	Start	End
Machine	355.0°	185.0°
Data	0.0°	180.0°

2 runs, Bidirectional



DYNAMIC ISO 230-1

Circularity: 19.8 µm

Max: +10.2 µm, 179.9°

Min: -9.6 µm, 0.2°

NCMX29.RTB

By: pmc

Machine:

Date: 13:49 Jul 22 1994

Length: 300.0000 mm

Radius: 300.0000 mm

Centre Off X: -76.8 µm

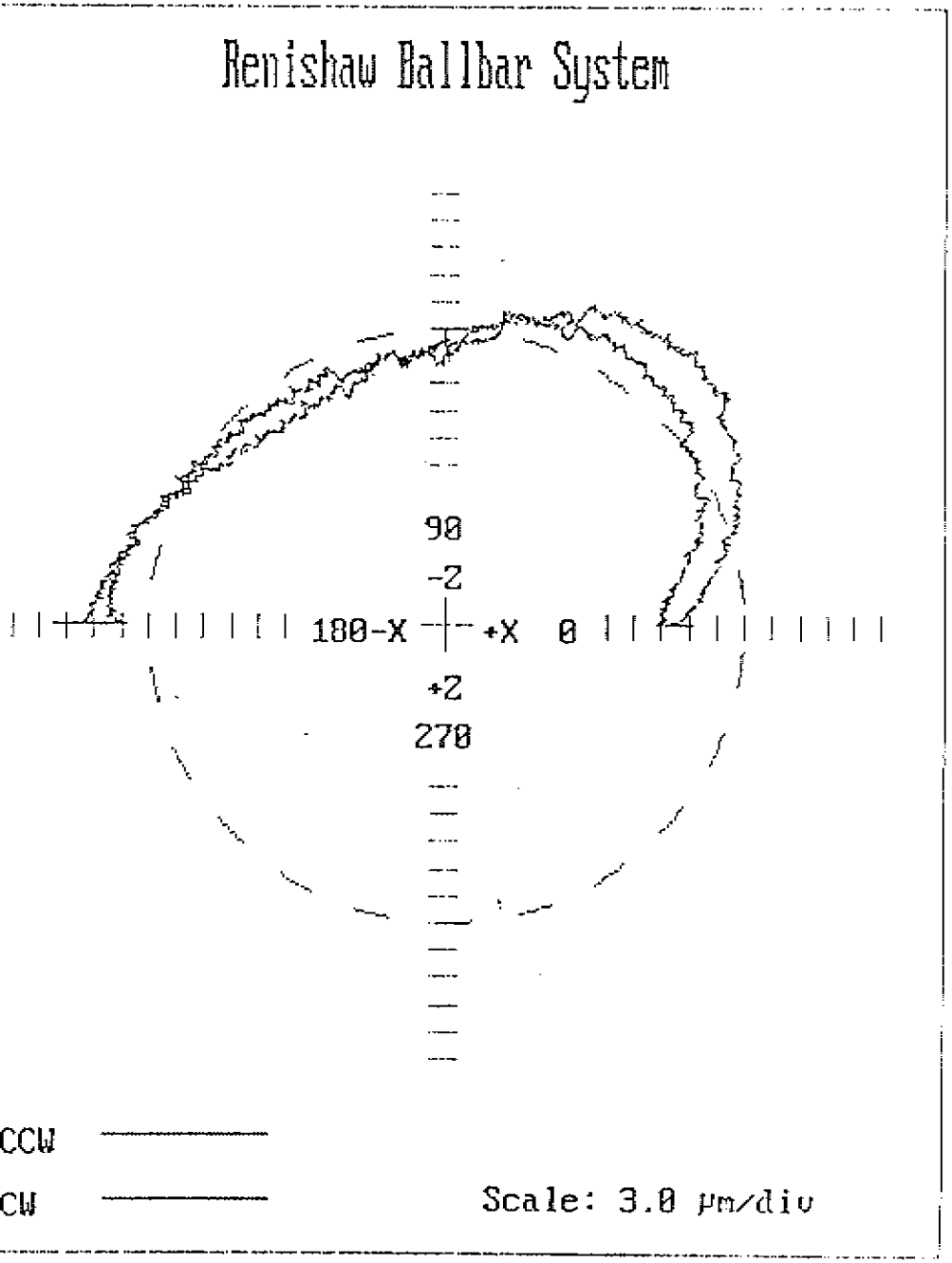
Centre Off Z: +20.0 µm

Sample: 15.63 per sec

Feed: 500.0000 mm/min

	Start	End
Machine	355.0°	185.0°
Data	0.0°	180.0°

2 runs, Bidirectional



6.討　　論

6. 結論

一般使用直接切削來了解機台加工精度，雖然很實際，但在機台製程縮短的環境壓迫下，這種作法顯得較不經濟，並且無法了解影響加工誤差的成因爲何？

所以，使用DBB來量測機台運動精度，可說是一大突破。不過要把DBB這套儀器發揮出來，必須要有判讀圖譜的能力，這種能力的培養，必須是經驗累積，才能運用自如。不過若有圖譜模組作參考，相信量測時亦能達到事半功倍的效用。

DBB雖然是一套非常簡便的量測儀器，但其功能亦是有限，並不能把工具機的問題點完全解決。對一個不了解機台結構、裝配及電控伺服的人，它僅能用來檢驗機台運動精度；相反的對一個了解機台結構、裝配及電控伺服的人，它是一套具有檢驗及補償誤差的設備，並且可了解影響精度誤差的成因，而提出改善方案。所以此套設備效用是依各人經驗累積程度不同而有所差異。

診斷圖譜誤差原因，必須要有經驗的人才能作到，所以目前爲了解決此項困擾，已有自動診斷誤差軟體開發完成，但實際上DBB的量測誤差還有許多問題待突破，如旋轉誤差等；所以此軟體並未能有效的將誤差原因完全剖析出來。相信過幾年時機成熟後推出的軟體一定可以滿足業者的需求。

本人過去所作的量測雖然很多，但仍嫌不足，若以上資料有原因診斷錯誤，煩請不吝指正、賜教。

7.附　錄

附錄一

各軸進給速度不一對策

原因：

(1) 位置命令一致、但追隨誤差不同(正逆轉軌跡，大差異)

查看下列參數：

1. Kp 值設定

FANUC：＃517　三軸設定同，無此問題。

＃512 → ＃515　三軸單獨設定時需注意。

MITSUBISHI：PGN-X、Y、Z

2. 齒輪比、進給命令比設定

FANUC：CMR, DMR, FLEXIBLE GEAR

MITSUBISHI：PC1, PC2, PIT

3. 每轉回授脈波數設定

FANUC：VPPLSE, PPPLSE, AMR

MITSUBISHI：RNG

(2) 位置增益相同、但位置命令不一致(正逆轉軌跡，大差異)

各軸之 G01 加減速時間常數設定

查看下列參數：

FANUC：529　三軸相同

MITSUBISHI：G1t1, G1t2

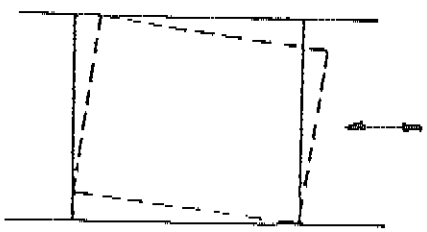
(3) 部份軸之速度響應太慢(正逆轉軌跡，小差異)

調整速度回路，並以響應最慢之軸決定加減速時間常數。

(4) 機械因素(正逆轉軌跡，小差異)

查看進給傳動機構裝配是否不良

(例一) 傳動件延遲(半閉)



檢查：工作台之運動

(例二) 各軸軌道特性差異太大

檢查：是否某軸之啓動扭矩特別大

(例三) 回授元件延遲(全閉)

檢查：工作台之運動

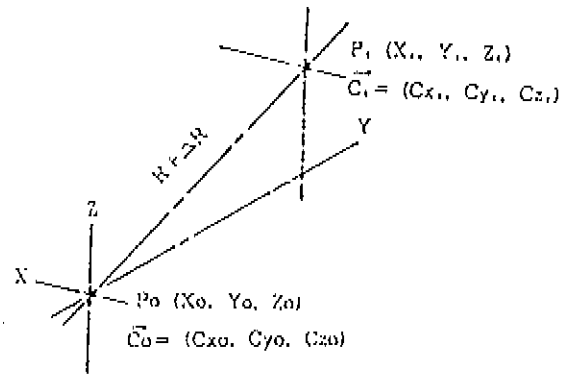
附錄二

圓弧內插軌跡診斷原理

工作台上球中心點指令值爲 $P_0(X_0,Y_0,Z_0)$，實際位置值 $P_0'(X_0',Y_0',Z_0')$ 主軸上球中心點指令值爲 $P_1(X_1,Y_1,Z_1)$，實際位置值 $P_1'(X_1',Y_1',Z_1')$，而誤差向量在點 P_0 上爲 $\vec{C_0}$，在點 P1 上爲 $\vec{C_1}$

則 $\vec{C_0}=(Cxo,Cyo,Czo)$

$\vec{C_1}=(Cx_1,Cy_1,Cz_1)$



BAR是可伸縮，故兩球中心距離R值不固定。此量若爲 ΔR，則根據畢氏定理：

$$(R+\Delta R^2)=(X_1'-X_0')^2+(Y_1'-Y_0')^2+(Z_1'-Z_0')^2$$
$$=\{(X_1+Cx_1)-(X_0+Cx_0)\}^2+\{(Y_1+Cy_1)-(Y_0+Cy_0)\}^2+\{(Z_1+Cz_1)-(Z_0+Cz_0)\}^2$$

展開兩邊，由於誤差平方項很小，予忽略則：

$$\Delta R=\frac{1}{R}\{(X_1-X_0)(Cx_1-Cx_0)+(Y_1-Y_0)(Cy_1-Cy_0)+(Z_1-Z_0)(Cz_1-Cz_0)\}$$

若 $(X_1-X_0,Y_1-Y_0,Z_1-Z_0)=(X,Y,Z)$

$(Cx_1-Cx_0,Cy_1-Cy_0,Cz_1-Cz_0)=(Cx,Cy,Cz)$

故 $\Delta R=\frac{1}{R}(CxX+CyY+CzZ)$

此式稱爲DBB測定基本式