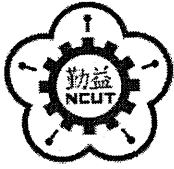


DT
448.6
1111
100
225317



國立勤益科技大學
光機電產業碩士專班

碩士論文

五軸工具機動態精度量測與補償方法
Five-axis Machine Tool Dynamic Accuracy
Measurement and Compensation Approach

研究生：張珀璋

指導教授：王圳木



中華民國一百年七月

國立勤益科技大學圖書館



225317

勤益科技大學

博碩士論文全文上網授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文書名頁之次頁用)

本授權書所授權之論文為授權人在勤益科技大學
電子工程系 _____ 組 99 學年度第 2 學期取得碩士學位之
論文。

論文題目：五軸工具機動態精度量測與補償方法
指導教授：王圳木

■ 同意

本人具有著作權之論文全文資料，非專屬、無償授予本人畢業學校圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或數位化等各種方式重製與利用，提供讀者基於著作權法合理使用範圍內之線上檢索、閱覽、下載及列印。

論文全文上載網路公開之範圍及時間：

校內區域網路	<input checked="" type="checkbox"/> 立即公開
校外網際網路	<input checked="" type="checkbox"/> 中華民國 105 年 8 月 22 日公開

授權人：張珀璋

簽名： 張 珀 璋

中 華 民 國 100 年 8 月 23 日

國立勤益科技大學
研究所碩士班
論文口試委員會審定書

本校 電子工程系 碩士班 張珀璋 君

所提論文 五軸工具機動態精度量測原理

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

論文口試委員會：

召集人：詹剛寬

委員：王洲木

詹剛寬

李夏莉

指導教授：王洲木

所

長：

電子工程系主任 林熊徵

中華民國一百年七月二十三日

致 謝

兩年來的研究生活告一段落了，能夠完成論文最要感謝的就是我的指導教授王圳木老師，還要感謝陳文淵老師老師，不只在課業上教導了很多專業知識，在論文中也給予很多的建議。同時還要感謝口試委員詹永寬老師，三位老師在口試時，針對學生的論文研究給予建議與指正，使得論文可以更加的完善。

在上課期間還有感謝黃世演老師、黃俊明老師、潘吉祥老師、邱文志老師、李鴻濤老師這些日子來的細心教導，並順利獲得學分。此外還要感謝同學羅竣鴻、黃祥柏、張文鴻、曾學承、賴南宏、劉嘉慶在學業上的相互幫忙。還有專題討論級ILT研討會時學弟和學妹的協助，非常懷念及珍惜一起度過的美好時光。

還要感謝嵩富公司對我的栽培與照料，最後更要感謝的就是我的家人，特別是我摯愛的妻子，在各方面無條件的支持讓我可以無後顧之憂的完成學業。

中文摘要

五軸工具機對於精度、效率與加工範圍上有相當重大的改進，可達到縮短製程時間，提昇新的加工應用技術，減少夾治具支出，顯著地提高生產效益，然而五軸工具機具有五個傳動軸，當多軸同時運動誤差量勢必隨著累加，其加工精度控制比三軸工具機更加重要且複雜，因此工具機之動態精度量測，是發展五軸工具機之重要課題之一，要如何將五軸加工機的精度效能提升到與國外並駕齊驅是我們急需的，無論任何加工機，精度一定都是排第一位，接著才是速度、性能、配備等。

五軸機除了三個平移軸外，還多了兩個旋轉軸，因為多了兩個旋轉軸，使得下達給五個軸的速度不再是單純的平均分配，有鑑於此，為了提高五軸工具機之精度，適當的誤差補償是必要的，本論文提出系統動態誤差及精度量測之方法，利用旋轉軸量測系統及雙球桿量測儀（Double Ball Bar, DBB）搭配五軸同動量測路徑，對五軸 CNC 進給系統之動態誤差及精度，行幾何誤差量測，將機器誤差值補償至控制器做分析，將運算結果反饋至位置編碼器以得到精準的位移量，顯著地提高五軸機之加工精度。

關鍵字: CNC 五軸工具機、幾何誤差、線性軸、旋轉軸、DBB、Probe-Ball。

Abstract

Five-axis machine tools can improve manufacturing precision, efficiency, and process significantly thus minimize production time, expand application of new processing techniques, reduce fixture spending, and increase productivity considerably. However with a conventional five-shaft design, a five-axis machine tool can accumulate undesirable errors during its multi-axis operation, while its capability in precision-control is of greater importance and complexity than that of a three-axis machine tool. The development in precision control to achieve greater dynamic accuracy within five-axis machine tools is therefore one of many important improvements that can be addressed to further enhance performance. It is of primary importance and urgency to improve the accuracy and quality of the machine tools in order to meet or exceed the performance set by those foreign-built machine tools. Precision is always the number one objective for any machine tools, followed by speed, performance, features and so on.

The five-axis machine tool consists of three translational and two rotational axes. The average distribution in speed to all five axes is not easily achieved with the addition of two rotational axes. To improve the precision of five-axis machine tools, appropriate error compensation in speed between different axes is thus necessary. This paper presents a methodology in quantifying system dynamic error and measuring axes' precision to improve the accuracy of a five-axis machine tool performance. Data from two rotational axes measuring system and Double Ball Bar (DBB) instrumentation along with the measured axes' momentum path are fed into a five-axis CNC system. The differential in precision from dynamic and geometric errors of measurement line is obtained and compensated through an error analysis processed within a machine controller. The resulting signal for correction of the operation is sent from the controller to a position feedback encoder to obtain a more accurate displacement. This methodology and process can significantly improve the precision five-axis machines.

Keyword: CNC five-axis machine tools, geometric error, linear axes, rotary axis, DBB, Probe-Ball

目錄

中文摘要	I
Abstract.....	II
目錄	II
圖目錄	V
表目錄	VII
第一章 導論	1
1.1 研究背景	1
1.2 文獻回顧	2
1.3 論文大綱	3
第二章 五軸工具機系統架構	4
2.1 整體架構	4
2.2 系統分析	6
2.3 主要系統形式	7
2.4 五軸同動推導	9
2.5 軸向逆運動轉換方式	12
第三章 旋轉軸雷射量測系統	13
3.1 量測元件	13

3.1.1 線性量測硬體設備	15
3.1.2 角度量測硬體設備	16
3.2 量測方法	18
3.2.1 硬體及連接組件之組合	19
3.2.2 雷射光校正程序	22
3.2.3 軟體設定程序	24
3.3 量測結果分析	29
第四章 循圓量測系統.....	31
4.1 DBB(Double Ball Bar)量測裝置.....	31
4.2 Probe-ball 3D 量測裝置.....	34
第五章 插補與進給速度規劃.....	36
5.1 線性軸插補	36
5.2 曲面插補	38
5.3 線性軸與旋轉軸的插補	40
5.4 循圓軌跡插補	42
第六章 結論.....	43
參考資料.....	44

圖目錄

圖 2-1 工具機的完整架構	4
圖 2-2 進給系統流程圖	5
圖 2-3 主軸傾斜型加工機示意圖	7
圖 2-4 工作台傾斜型加工機示意圖	8
圖 2-5 工作台&主軸傾斜型加工機示意圖	8
圖 2-6 直角座標系統[2].....	9
圖 2-8 旋轉矩陣示意圖[3].....	11
圖 3-1 麥克森干涉原理示意圖[5].....	13
圖 3-2 線性雷射元件圖[6].....	15
圖 3-3 量測元件示意圖[6].....	16
圖 3-4 元件之實體照片	16
圖 3-5 實機配置圖	17
圖 3-6 主要裝配零件	17
圖 3-7 量測系統實機安裝圖	18
圖 3-8 鎖緊腳架固定鈕.....	19
圖 3-9 調整高度.....	20

圖 3-10 固定雷射頭.....	20
圖 3-11 電源線及信號線連接前.....	21
圖 3-12 電源線及信號線連接後.....	21
圖 3-13 雷射光校正圖.....	22
圖 3-14 雷射光束接收圖.....	23
圖 3-15 感測器圖.....	23
圖 3-16 未補償.....	30
圖 3-17 已補償.....	30
圖 4-2 五軸之DBB 量測示意圖.....	32
圖 4-3 半圓球面之測試路徑圖.....	33
圖 4-4 Probe-Ball 三軸向誤差量測裝置圖[7].....	35
圖 4-5 切削球半徑示意圖[7].....	35
圖 5-1 改善速度進度圖[9].....	37
圖 5-2 改善加速度進度圖[9].....	38
圖 5-3 曲面插補[10].....	39
圖 5-4 Machining time[15].....	41

表目錄

表 3-1 材料膨脹係數對照表	14
表 3-2 線性軸及旋轉軸之ISO10791-4 國際標準	29
表 4-1 QC20-W量測系統規格表	32



第一章 導論

1.1 研究背景

國內工具機主要還是在於一般機械加工，對於 3C、航太、汽機車或醫療產品的加工生產線，五軸加工是未來的趨勢，世界先進國家，為了節省工時或提高加工的精度（一次多角度加工），紛紛採用五軸加工機，或是在原有的三軸加工中心機上，增加了兩個旋轉軸座標，像是加裝具有傾斜和轉動功能的五軸工作檯、或具有轉動和擺動功能的搖擺主軸頭。

要發展能集中工序進行高精、高效和複合加工的五軸加工機，就能使工件一次夾持下便可完成全部或大部分加工。不過五軸加工所形成的空間運動軌跡相當複雜，需透過座標變換和複雜的空間幾何運算做插補，經由強大的控制器運算速度和精度，以發揮其應用效率，進而加工較為複雜的產品，像是渦輪葉片、螺旋葉片…等。

要如何將五軸加工機的精度效能提升到與國外並駕齊驅是我們急需的，遠在幾年前歐美日就已經在生產五軸加工機，為什麼我們台灣總是慢人家一小步甚至一大步，但是台灣認真打拼的精神卻不輸別人，一定會把國外所做過的全部吸收，還精益求精，無論任何加工機，精度一定都是排第一位，接著才是速度、性能、配備…等。

1.2 文獻回顧

五軸工具機在動態精度量測方面的探討相當多，在雷[1]雙球桿量測儀（Double Ball Bar, DBB）搭配所創造之特殊五軸同動量測路徑，進行五軸工具機之幾何誤差量測。而學術界及業界對於工具機線性軸誤差雷射量測系統及DBB量測系統非常普遍，但是對於五軸工具機旋轉軸的動態誤差量測的方法，還能更進一步的研究與剖析。

工具機設計對旋轉工作台的應用越來越普遍，為了要瞭解旋轉工作台是否有足夠的精度，就必需能量測其幾何誤差，目前一般都只量測角度定位誤差，其他的誤差項只能依Schlesinger在1927年以千分表及測試棒的方法所做的簡單量測。對於五軸工具機而言，五軸同動之路徑產生需要相當複雜的計算，因此CNC位置指令產生器，亦稱為插補器(Interpolator)的數學運算誤差亦會影響動態循跡精度。所以動態循跡誤差的分析，對五軸工具機加工精度的影響特別重要。

在本次研究中運用前人所用過的量測方法做改良及先進儀器的量測，將五軸工具機動態精度量測方法做具體的呈現，對於機台動態精度的衡量、加工特性的表現更加優越。

1.3 論文大綱

本篇論文共分為五章節，每一章節之內容概述如下；第一章說明研究背景、文獻回顧及本篇論文的大綱，第二章描述研究系統結構、系統分析、系統形式、五軸同步運動方式及軸向逆運動轉換方式等介紹，第三章則詳細說明旋轉軸雷射系統之量測元件、量測方法及量測結果分析，第四章則介紹雙球桿循圓量測系統 DBB 量測裝置及 Probe-ball 3D 量測裝置，第五章說明線性軸插補、曲面插補、線性軸與旋轉軸的插補及循圓軌跡插補及其用途，最後第六章是結論。



第二章 五軸工具機系統架構

2.1 整體架構

五軸工具機的完整結構包含五軸工具機機台型式以及控制系統，五軸工具機的核心為控制系統，控制系統的架構有傳動系統、驅動器、馬達、光學尺、軟硬體設計、程式編輯(Edit Programming)、可程式邏輯控制器(PLC controller)、插補器、與人機操作介面等幾個要素，如圖2-1為工具機所需要的元件。

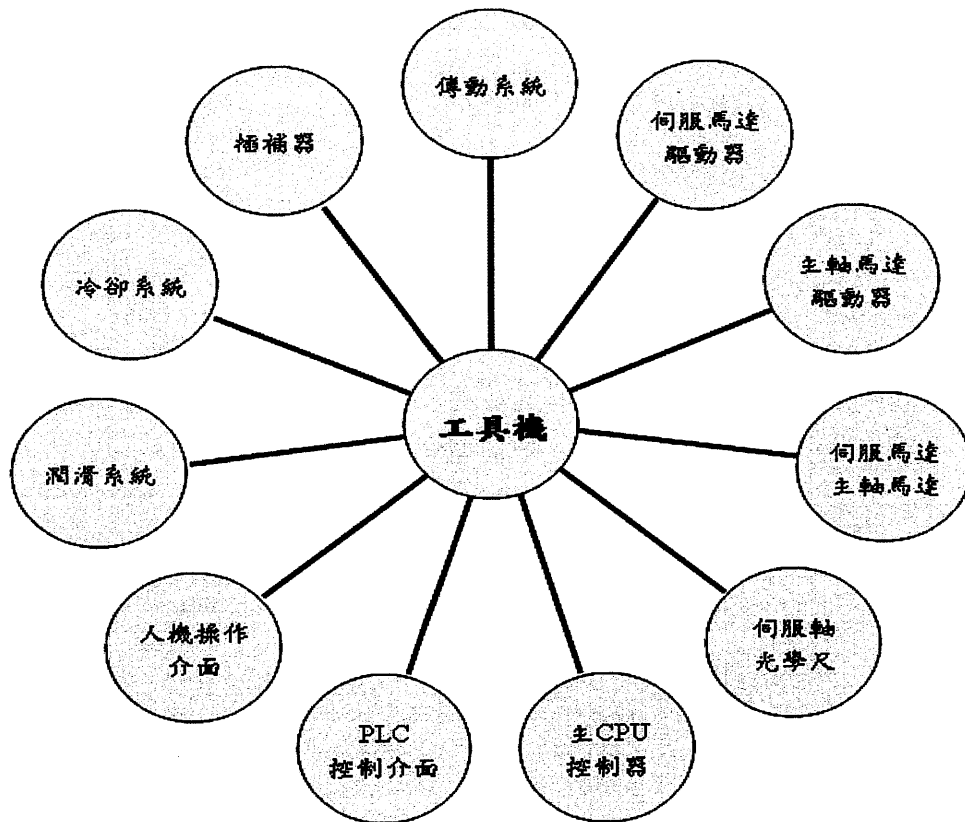


圖 2-1 工具機的完整架構

工具機進給系統的主要功用是將傳動元件(工作台、鞍座、立柱或主軸頭等)沿著導軌，依指令速率控制導螺桿做運動，除了考慮機械傳動元件的設計方面，還關係到伺服定位控制問題，如圖 2-2 進給系統所示。因此進給系統是一套機電整合系統，利用電腦控制使機器依程式指令的速度、位置及精度作動。

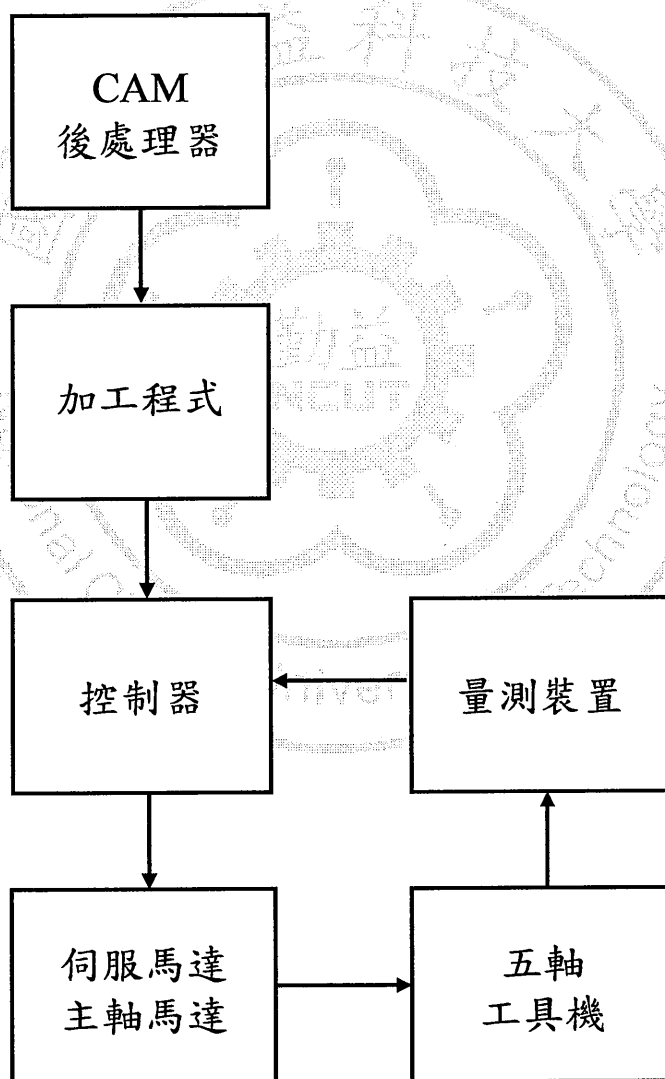


圖 2-2 進給系統流程圖

2.2 系統分析

由於工具機加工技術的提升，五軸工具機加工逐漸成為近年來的加工生產主流。五軸工具機同時控制三個直線軸和二個旋轉軸，在五軸同動的狀態下，使五個軸的移動速度做適當分配，以獲得精確的加工表面。在工具機的速度規劃方面，大部分都在探討三軸工具機的加減速功能；如何降低切削時間、進給速度及精度最佳化等，但是三軸工具機大都是三個直線軸的循跡控制，對於五軸工具機來說，直線軸的速度控制並不適用於多了二個旋轉軸的五軸工具機。

本次研究是想透過儀器量測五軸工具機的定位精度，並分析比較其結果，運用的儀器有旋轉軸雷射校驗系統、平行直規、雙球桿循圓量測儀，相關之技術包括五軸逆運動轉換、工具機插補運算法、進給速度(Feed Rate)規劃與輪廓誤差分析等。

五軸工具機系統的動態輪廓誤差分析遠比二軸或三軸的工具機更為複雜，因此電腦運算誤差及控制器插補對於五軸工具機運動精度的分析更顯重要。

2.3 主要系統形式

五軸工具機的插補運算需要瞭解使用的機台型式以及五軸控制的相關參數，還有 X 軸、Y 軸、Z 軸、A 軸、B 軸、C 軸的相對位置，常見的五軸工具機型式，分為三大類：

- (1) 兩個旋轉軸 A 軸和 B 軸在主軸頭刀具側，稱為主軸傾斜型(Spindle-Tilting Type)，如圖 2-3。
- (2) 兩個旋轉軸 A 軸和 C 軸在工作台工件側，稱為工作台傾斜型(Table-Tilting Type)，如圖 2-4。
- (3) 一個旋轉軸 B 軸在主軸頭刀具側，另一個旋轉軸 C 軸在工作台工件側，稱為工作台&主軸傾斜型(Table/Spindle-Tilting Type)，如圖 2-5。

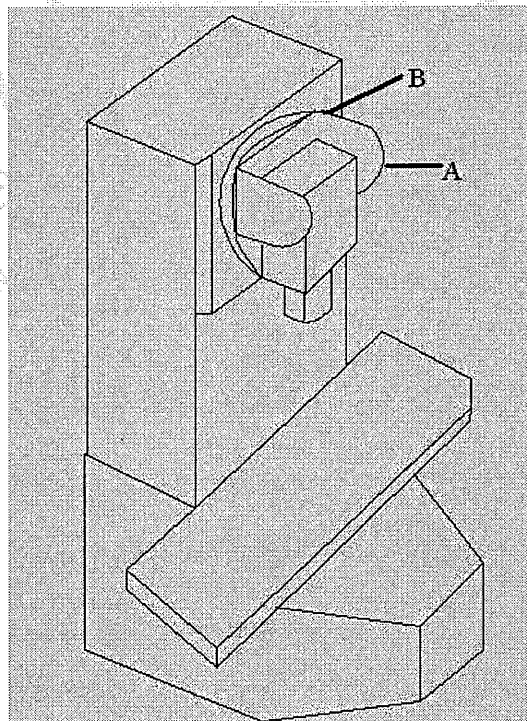


圖 2-3 主軸傾斜型加工機示意圖

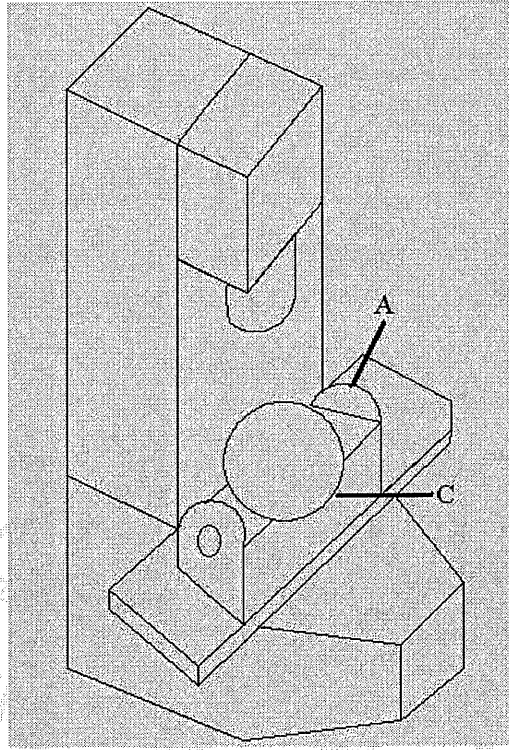


圖 2-4 工作台傾斜型加工機示意圖

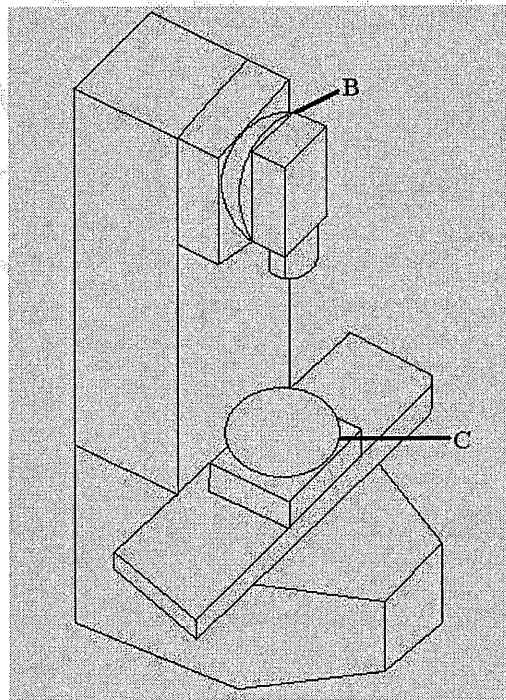


圖 2-5 工作台&主軸傾斜型加工機示意圖

2.4 五軸同動推導

五軸工具機的同動推導，首先需要知道五軸工具機的機台型式，以及所需要的基本機械參數有哪些，五軸工具機的機台型式主要分為三大類，包括 TTTRR、RRTTT、RTTTR，其中 T 代表平移運動方式，R 代表旋轉運動方式，且其排列順序代表從主軸上的刀具到加工件所經過的伺服軸型式，不同的機台有不同的運動方程式，這三大類的共同特點為旋轉軸均位於機器結構末端。

標準的 CNC 工具機是採用右手直角座標系統(或稱笛卡爾座標系統)，直線移動軸為 X、Y、Z 三個軸，如圖 2-6(a)所示三隻手指互相垂直，分別代表座標系統的 X、Y、Z 軸，其中拇指代表 X 軸、食指代表 Y 軸、中指代表 Z 軸，且手指所指的方向為正方向；而旋轉移動軸為 A、B、C 三個軸，繞 X 直線軸旋轉者稱為 A 軸，繞 Y 直線軸旋轉者稱為 B 軸，繞 Z 直線軸旋轉者稱為 C 軸，如圖 2-6(b)所示。

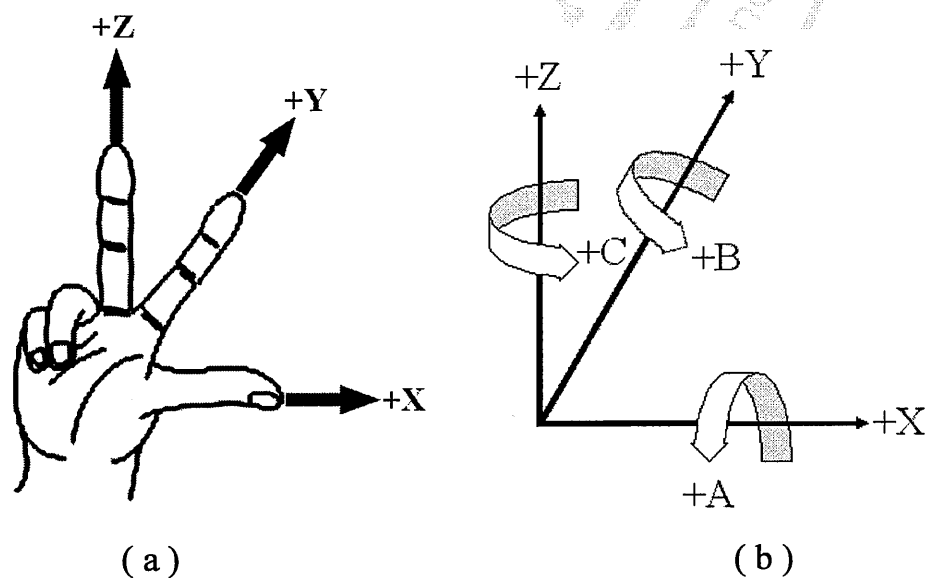


圖 2-6 直角座標系統[2]

CNC 工具機先定義 Z 軸，以工具機的主軸線為 Z 軸，再以刀具遠離工件的方向為正，刀具沿左右方向移動者為 X 軸，規定向右為正方向；向左為負方向。最後依右手直角座標系統決定 Y 軸，此定義稱為程式座標系或稱為工件座標系，如圖 2-7 所示為工具機座標示意圖。程式設計開發人員是依據程式座標系來描述刀具動向，且必須假設工件固定不動，刀具沿著工件輪廓移動加工。

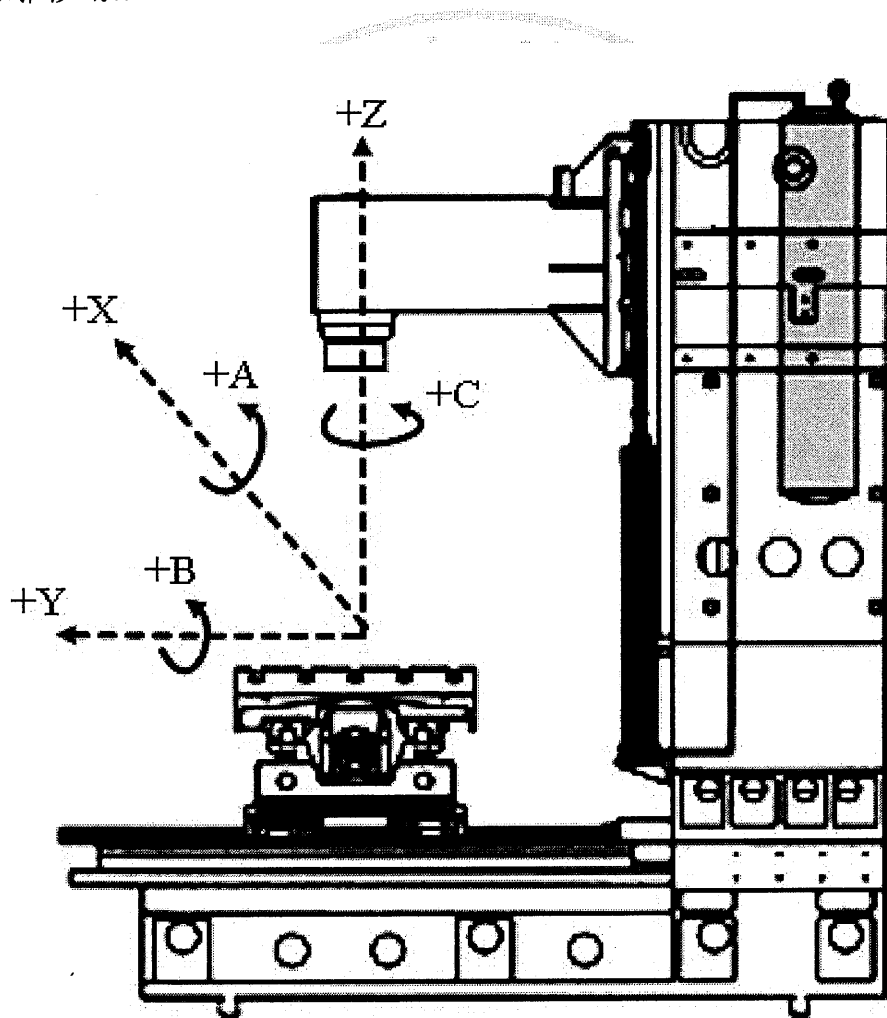


圖 2-7 工具機座標示意圖

經由直角座標系統之定義可建立機台的運動方程式，且藉由旋轉矩陣及平移矩陣之方法定義如下： $R(x,A)$ 為對 X 軸旋轉 A 角度時的齊次轉換矩陣， $R(y,B)$ 為對 Y 軸旋轉 B 角度時的齊次轉換矩陣， $R(z,C)$ 為對 Z 軸旋轉 C 角度時的齊次轉換矩陣，如圖 2-8 旋轉矩陣示意圖(a)、(b)、(c)所示。

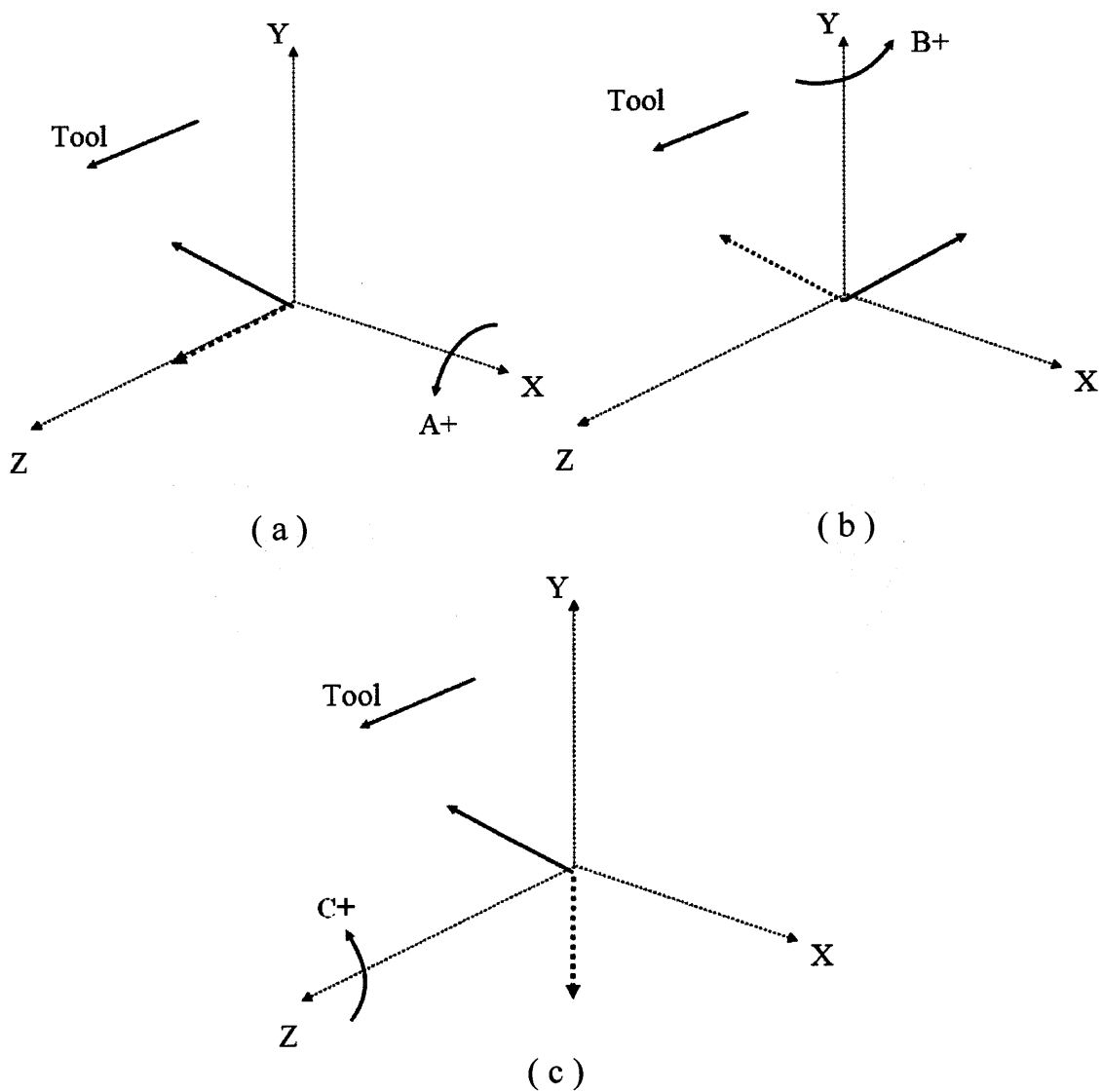


圖 2-8 旋轉矩陣示意圖[3]

2.5 軸向逆運動轉換方式

五軸工具機的插補運算需要知道欲使用的機台型式，以及五軸機台的相關參數，例如:A軸、B軸、X軸、Y軸、Z軸的相對位置，以及五軸逆運動轉換式中需要用到相關的參數， P_x 、 P_y 、 P_z 為工件表面點位置， O_x 、 O_y 、 O_z 為工件表面(P_x, P_y, P_z)點的單位法線向量，對於五軸加工機台必須經過逆運動轉換(Inverse Kinematics)產生五軸加工機能夠讀取的加工碼。將六個變數(P_x 、 P_y 、 P_z 、 O_x 、 O_y 、 O_z)轉換成五個變量(X 、 Y 、 Z 、 A 、 B)，其中 X 、 Y 、 Z 代表三個線性軸所應移動的距離， A 、 B 分別代表加工機台二個旋轉軸所對應的旋轉角度，此轉換關係如圖2-9所示。

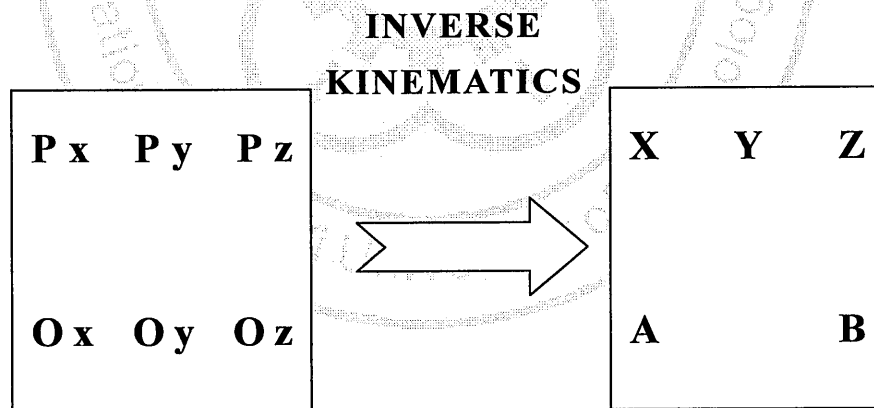


圖 2-9 五軸逆運動轉換關係式[4]

第三章 旋轉軸雷射量測系統

3.1 量測元件

本研究係採用線性軸誤差雷射量測系統的延伸，擴展為角度旋轉軸誤差雷射量測系統與補償，線性位置量測的精度取決於對雷射波長變化情況的瞭解準確度。雷射干涉儀主要是應用麥克森(Michelson)干涉原理，如圖3-1所示，以穩頻雷射為光源，構成一個具有干涉作用之量測系統，雷射光經由分束鏡(Beamsplitter)，又稱半反射鏡(Semireflector)，將光束一分為二，一束射向一個固定反射鏡形成參考路徑，一束射向可移動之反射鏡形成量測路徑。這二反射鏡所反射的光，回到分束鏡內重新會合，合併成一道光束並產生干涉條紋射至光電感測器，因感測器感測出這些條紋的明暗變化，經由後級信號處理電路加以處理，即能計算出移動反射鏡(待測物)所移動的距離。

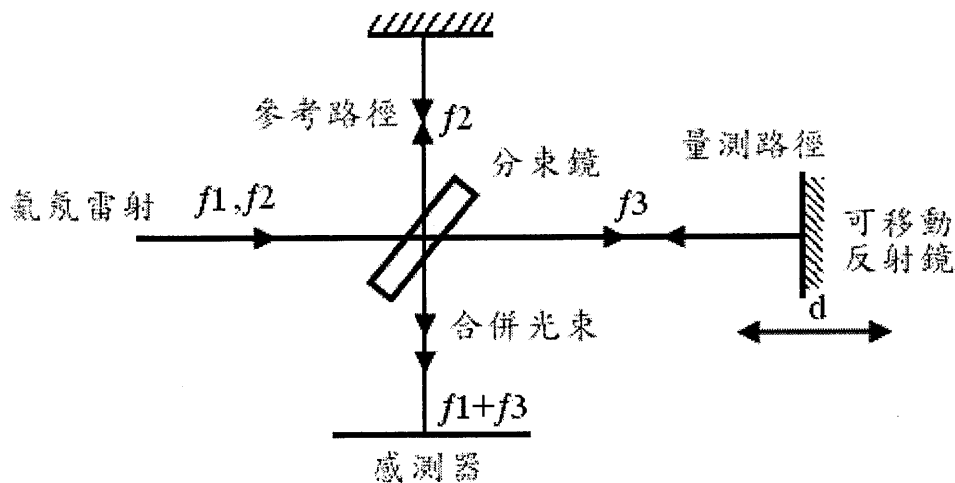


圖 3-1 麥克森干涉原理示意圖[5]

雷射穩定性品質由周圍環境參數來決定，尤其是氣溫、氣壓和相對濕度，它們將影響雷射光束的波長。影響的還有材料熱膨脹補償係數，材料熱膨脹補償不當是導致在非受控溫度環境中鐳射線性距離量測誤差的主要原因。這是因為與波長補償誤差和鐳射光束校準誤差有關的係數相比，普通工程材料的膨脹係數相對較大。已正規化的量測值將有一個與材料溫度量測頭的量測精度有關的誤差。該誤差的大小要依待測機器的熱膨脹係數而定(如表3-1)。大多數材料隨溫度變化而膨脹或收縮的量很小。因此，熱膨脹係數的單位為百萬分之一/攝氏或華氏度 (ppm/°C 或 ppm/°F)。這些係數指定了溫度上升或下降一度時材料的膨脹或收縮量。例如，假定熱膨脹係數為 11 ppm/°C。它表示材料溫度每上升 1 攝氏度，材料將膨脹 11 ppm。

表 3-1 材料膨脹係數對照表

材料	應用	膨脹係數	
		ppm/°F	ppm/°C
鐵/鋼	機構元件、小齒輪和滾珠螺桿	6.5	11.7
鋁合金	輕型三次元量床的構造	12	22
玻璃	玻璃計量器線性編碼器	4.5	8
花崗岩	機器構造和工作臺	4.5	8
混凝土	機器基礎	6	11
殷鋼	低膨脹編碼器/構造	<1	<2
玻璃	“零”膨脹編碼器/構造	<0.1	<0.2

3.1.1 線性量測硬體設備

- a. HP 5519A 雷射頭
 - b. HP 10766A 線性干涉鏡，附有一個 HP 10767A 線性可移動反射鏡
 - c. 高度調整器
 - d. 個人電腦(PC)
 - e. HP 10888A 遙控器(選擇性配備)
 - f. HP 10751D 空氣感測器(選擇性配備)
 - g. HP 10767A 線性可移動反射鏡
 - h. HP 10757D 材料溫度感測器(選擇性配備)
 - i. HP 10753B 三腳架
- * 連接這些組件至個人電腦的電纜線如圖 3-2 所示

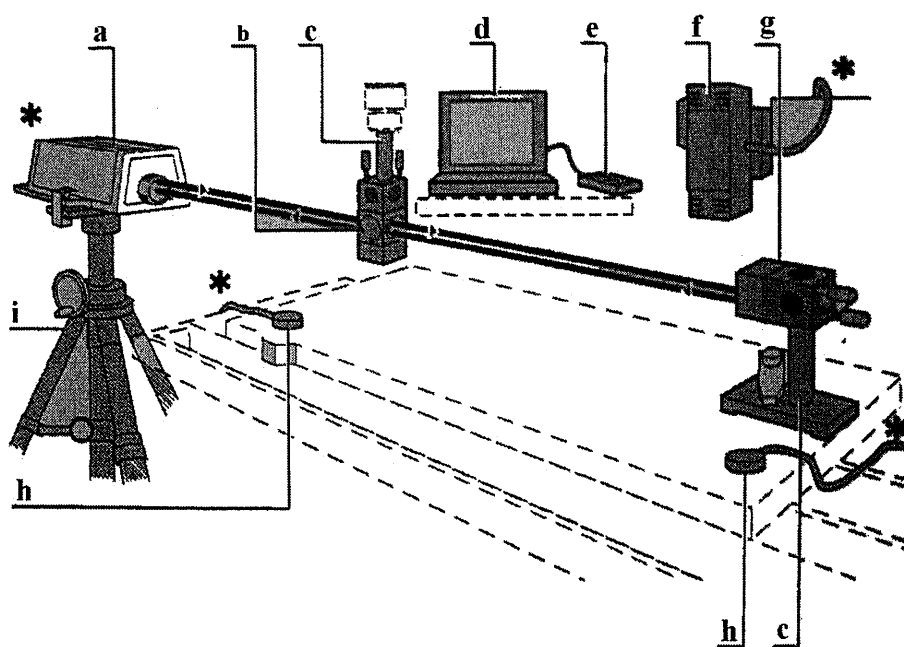


圖 3-2 線性雷射元件圖[6]

3.1.2 角度量測硬體設備

如圖 3-3 及 3-4 為 E5290C 旋轉軸及分度軸雷射校驗系統有以下元件：

- a - 5519A/B 雷射頭
- b - E1735A USB 雷射量測模組
- c - 55290B 轉盤
- d - 電腦含 5529A 量測軟體
- e - 10888A 遙控器
- f - E1738 空氣感測器
- g - E1737A 材料感測器
- h - E1736A USB 感測器集線器

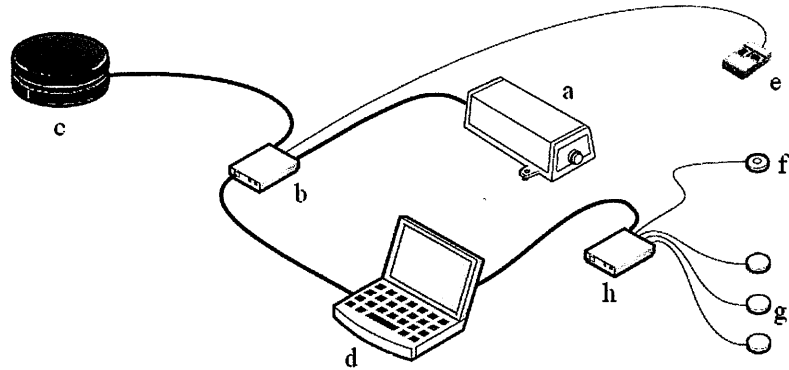


圖 3-3 量測元件示意圖[6]

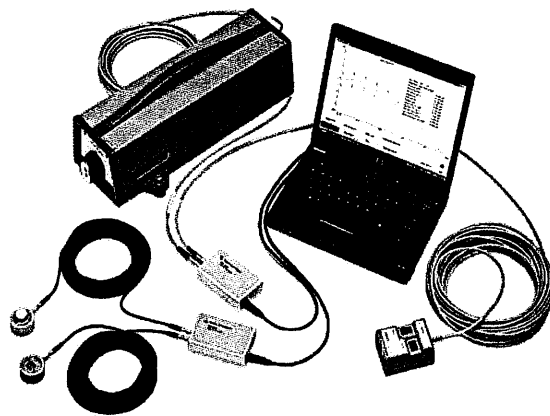


圖 3-4 元件之實體照片

如圖 3-5 為 E5290C 角度位置量測系統實機配置照片及圖 3-6 為 E5290C

主要裝配零件 Rotary Table、Flanged Shaft、Base Clamps。

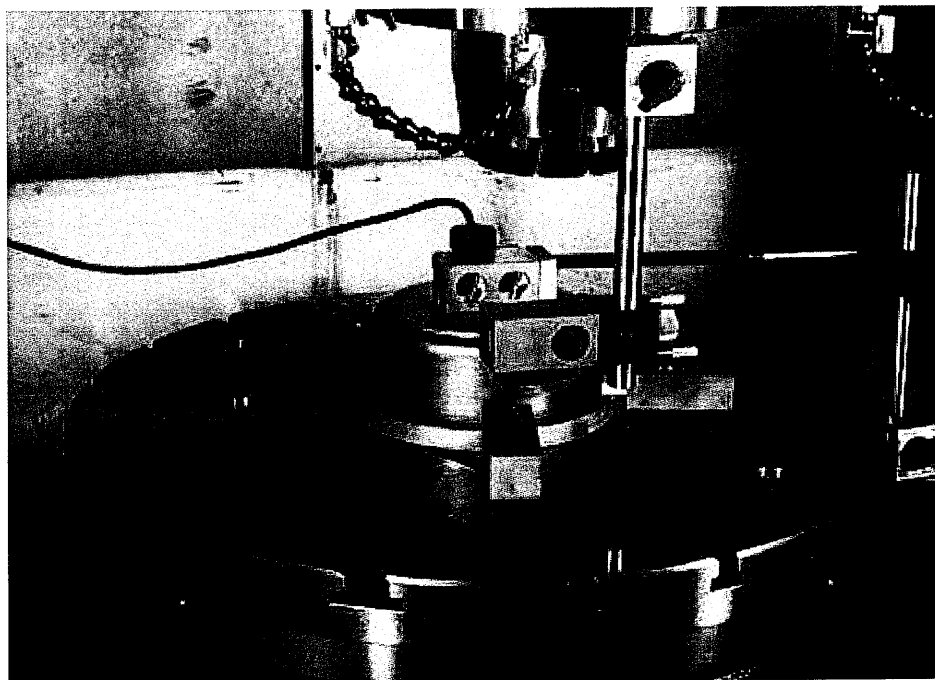


圖 3-5 實機配置圖

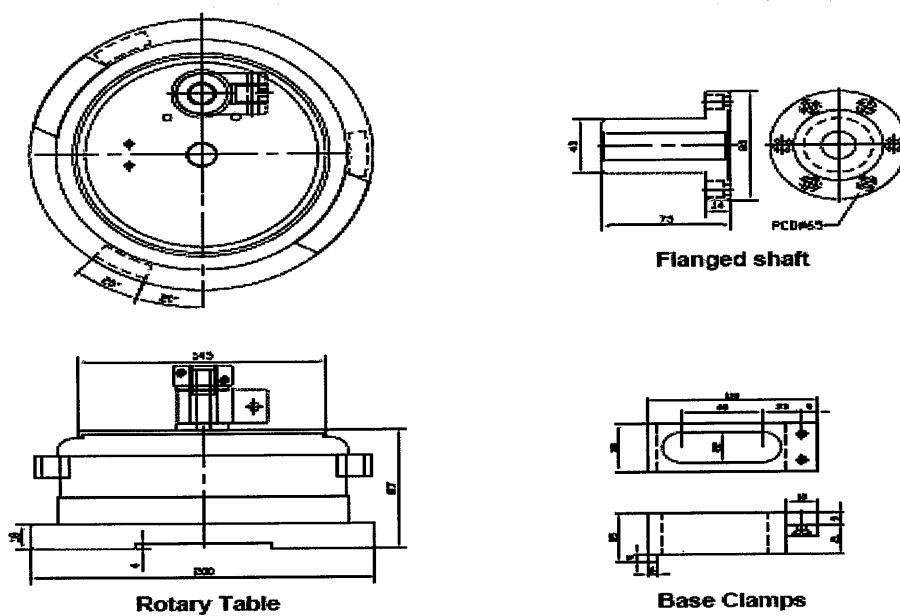


圖 3-6 主要裝配零件

3.2 量測方法

在旋轉軸平面上固定 E5290B 轉盤如圖 3-7 量測系統實機安裝圖所示，以千分槓桿量錶將轉盤及旋轉軸同心度校正在 0.02mm 以內，再以螺絲及 T 形塊將固定塊三點固定 E5290B 轉盤於五軸平面上，將干涉鏡裝於磁性座上並吸在主軸側面，以目測方式平行左右對正旋轉盤上方之八面折射鏡，使兩鏡之透射孔相對，檢查各支撐部位均鎖固，左側用一磁性座吸在本體不會移動處並連結支撐桿至八面鏡使其不隨著旋轉軸而轉動，將 E5290B 轉盤內部 ENCODER 回授傳輸線線頭固定並連接至雷射主機，線頭不能因移動時而造成干涉。

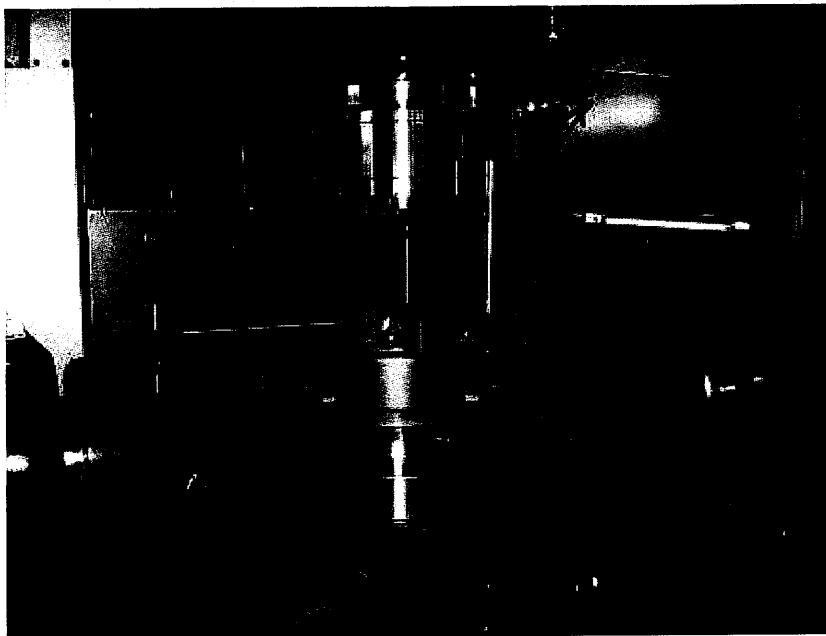


圖 3-7 量測系統實機安裝圖

3.2.1 硬體及連接組件之組合

1. 將三腳架三隻腳安全平穩的張開並將腳架固定旋鈕鎖緊。(如圖 3-8)
2. 將三隻腳調整至欲檢驗大約之高度再將腳架鎖鎖緊。(如圖 3-9)
3. 將雷射頭置於承載板上，並將雷射頭前腳以承載板底座固定螺絲鎖緊。

(如圖 3-10)

4. 將雷射頭接上電源線及訊號線。(如圖 3-11、圖 3-12)



圖 3-8 鎖緊腳架固定鈕

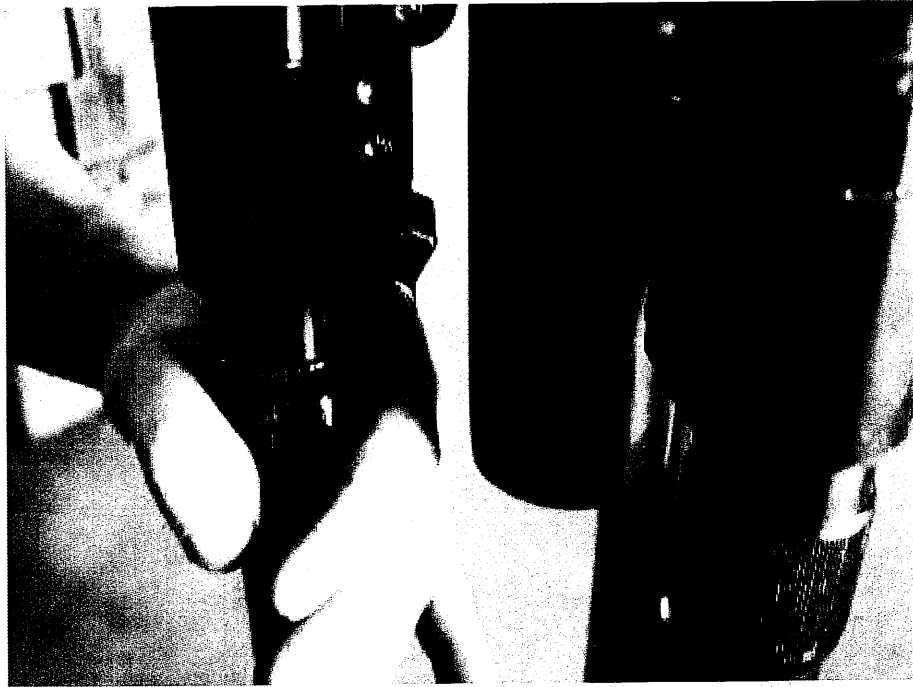


圖 3-9 調整高度

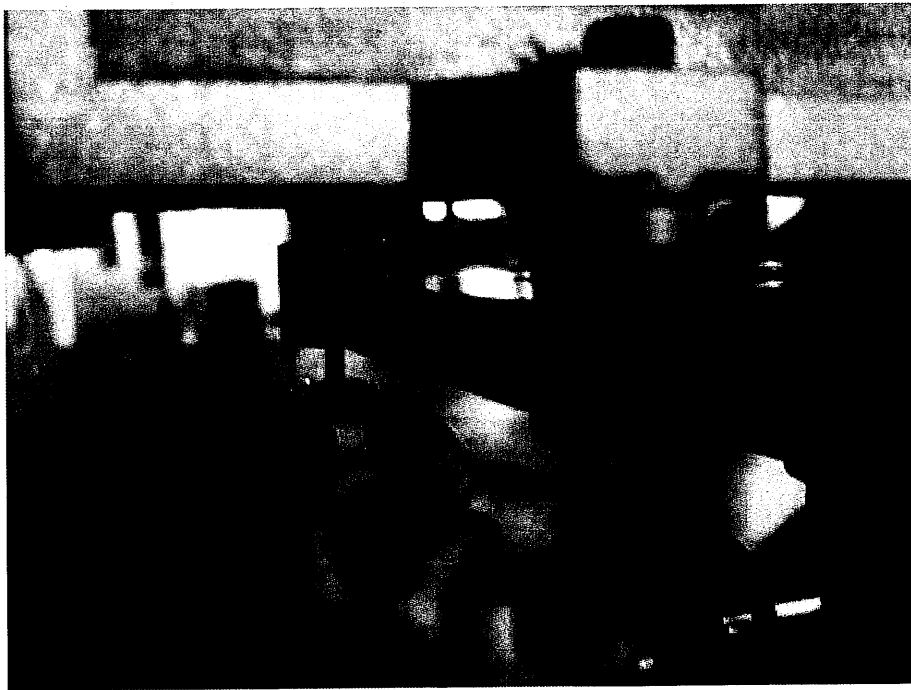


圖 3-10 固定雷射頭



圖 3-11 電源線及信號線連接前

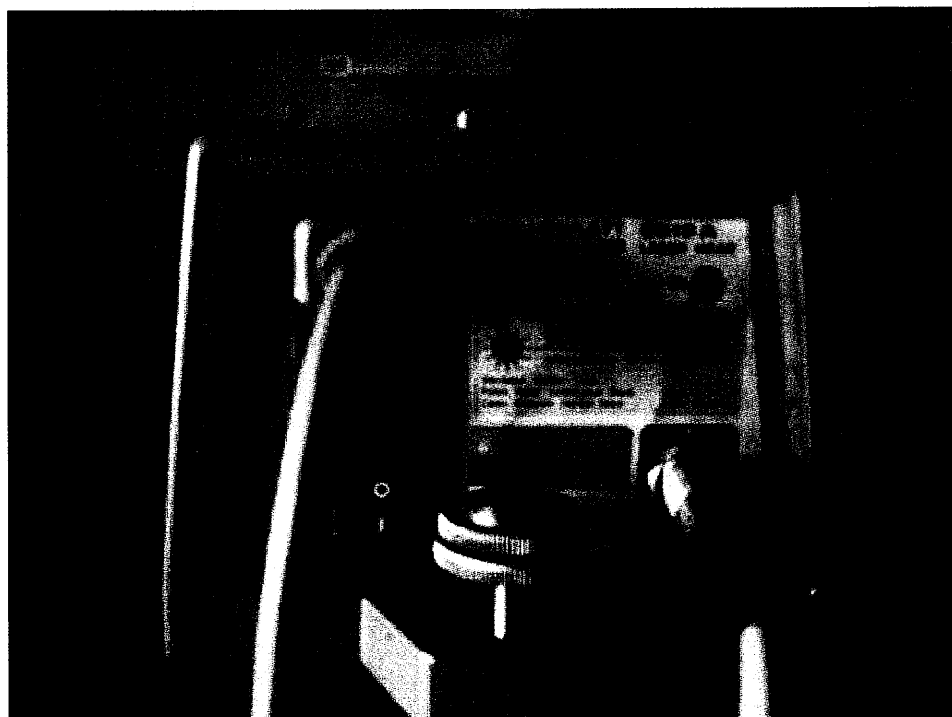


圖 3-12 電源線及信號線連接後

3.2.2 雷射光校正程序

如圖 3-13 雷射光校正圖所示，攤開三腳架將雷射頭固定於上方，連接電源線及傳輸線，一端連至主機再連接至電腦，開機後將雷射光對正干涉鏡玻璃孔並平行穿透至 E5290B 轉盤八面鏡，雷射光束折射及反射二焦點須對正於同雷射頭之接收孔中心點，調整接收光束飽和量至 90%以上如圖 3-14 量測軟體介面所示，連接空氣感測器及材料感測器至主機如圖 3-15 所示，使感測器對於雷射光做環境因素補償，於量測時更加準確的控制光束穩定度不至於隨氣流而飄移。

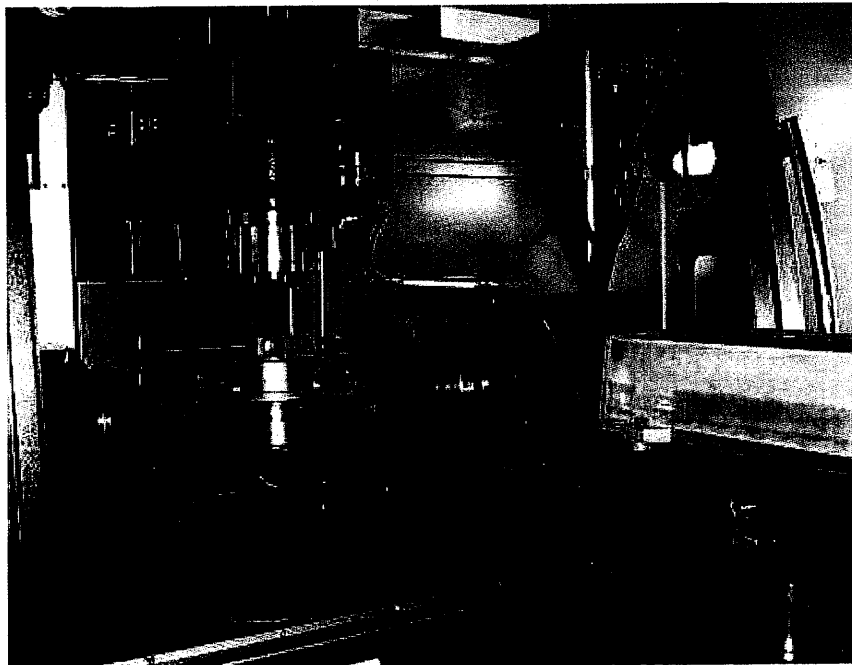
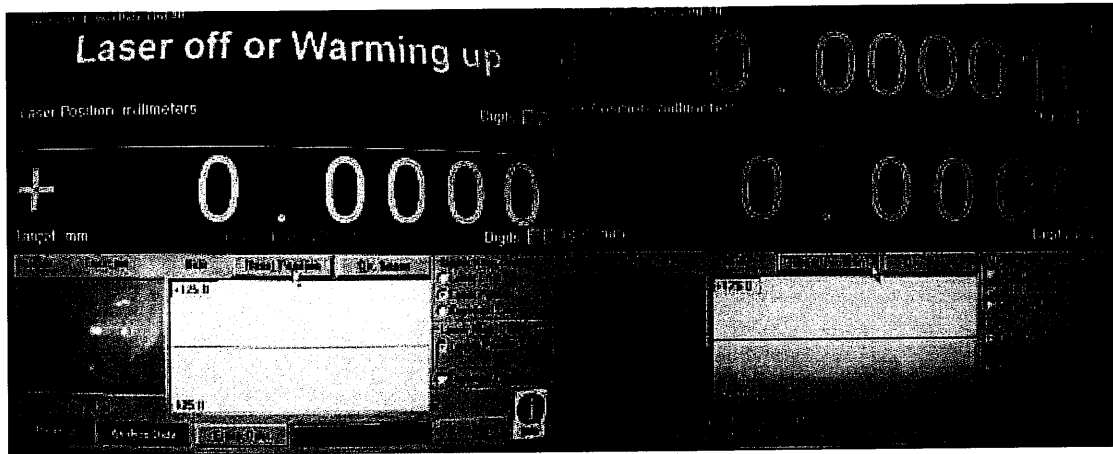


圖 3-13 雷射光校正圖



調整前

調整後

圖 3-14 雷射光束接收圖

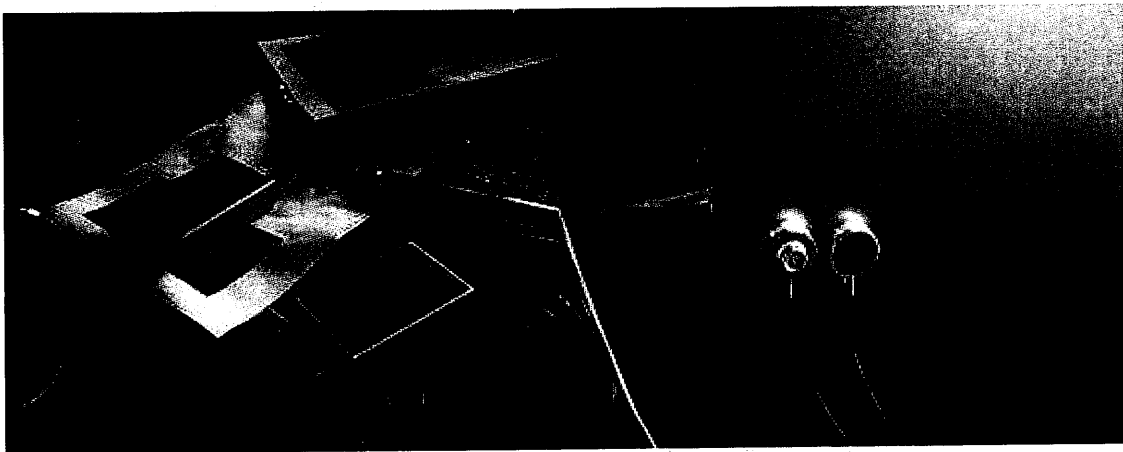


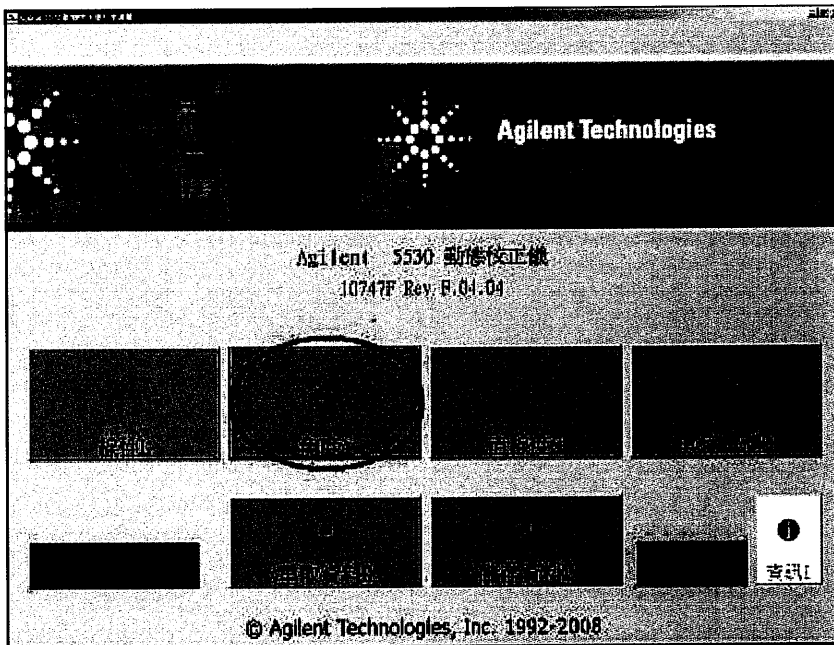
圖 3-15 感測器圖

所有安裝程序備妥之後，開始編輯旋轉軸雷射量測程式，啟動機器做來回反覆角度位置量測(每次移動位置量自訂，起始點為 0 度，最終點為 360 度)，由電腦運算結果得到背隙值及角度誤差值，將數值換算成千分之一度單位，依控制器讀取方式(絕對或增量)輸入至誤差視窗做補償運算，再下達指令給馬達。

3.2.3 軟體設定程序

使用美國惠普HP公司生產之5530動態校正儀量測軟體相關步驟說明如下：

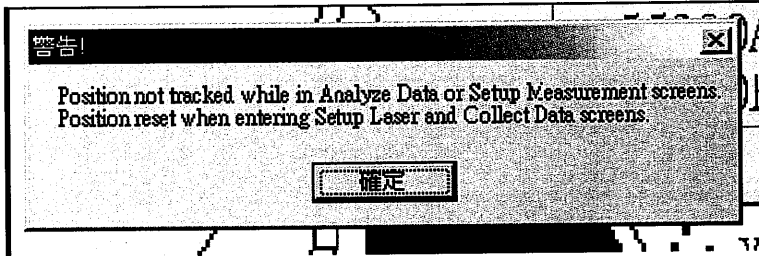
1. 軟體首頁選擇 ==> 角度A



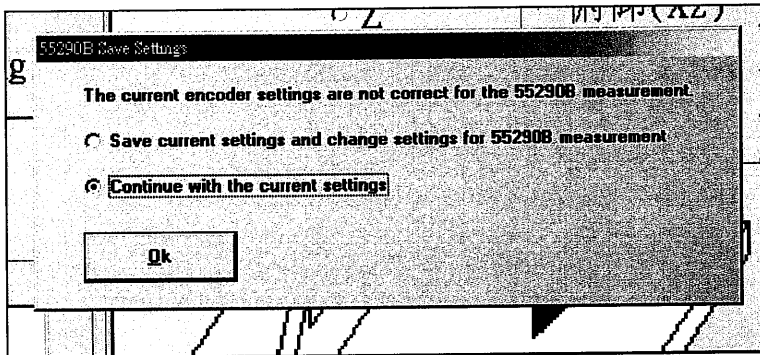
2. 選擇55290B



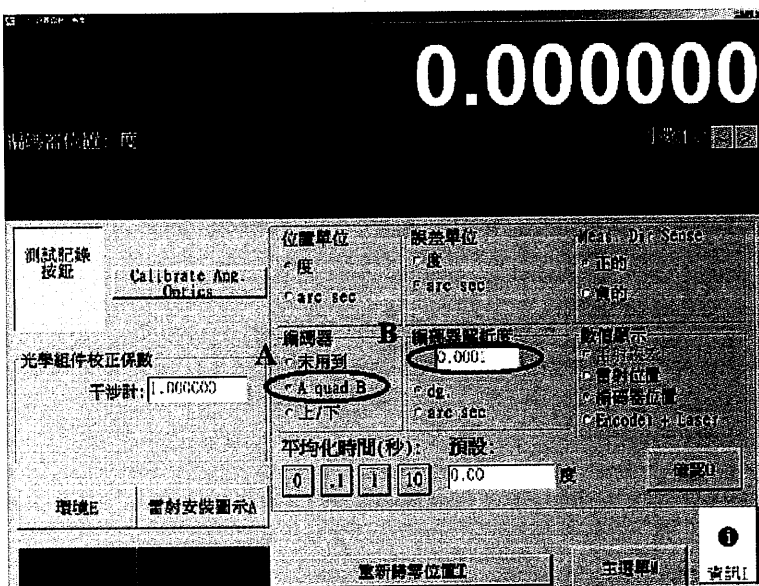
3. 詢問是否重取參數==> 選擇 確定



4. 詢問是否要儲存舊有參數設定==> 選擇 Continue with the current setting ==> OK

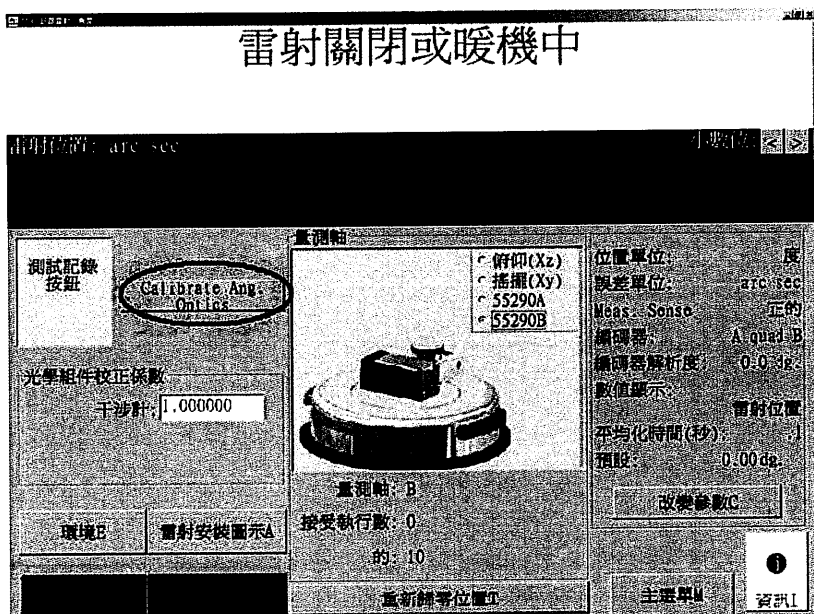


5. 設定編碼器解析度：A.選擇 ==> A quad B
B.碼器解析度 ==> 0.0001 deg.

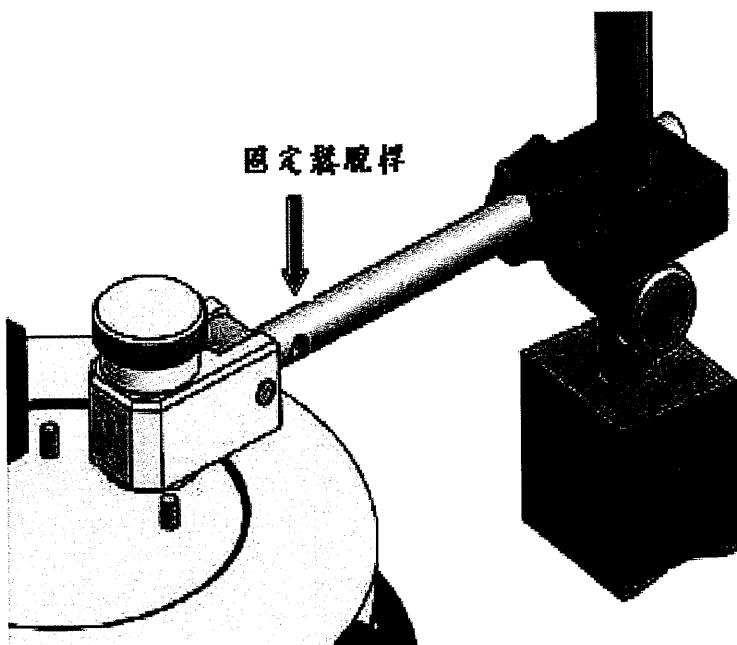


6. 校正E5290C 轉盤

A. 選擇 ==> Calibrate Angular Optics



B. 將固定上盤支桿鬆脫



C. Reset Position 數值歸零

3.3 量測結果分析

量測及補償數次後經由分析圖表及數據得到理想的結果，比較誤差補正前及誤差補正後之差異，檢查單向定位精度、雙向定位精度、單向重複精度、雙向重複精度是否有明顯改善，對照 VDI 及 ISO 國家標準(表 3-2)若為標準公差範圍內，則此實驗結果成功；若無法達到標準，則需要再重複量測補償將角度誤差值降低，或從機械方面著手由基礎幾何靜態精度做檢查修正，再重複量測補償直至各項精度符合所需。

表 3-2 線性軸及旋轉軸之 ISO10791-4 國際標準

線性軸 (單位：mm)		旋轉軸 (單位：弧秒)	
測量項目	公差值	測量項目	公差值
雙向定位精度 A	0.020	雙向定位精度 A	28
單向定位精度 A+ 和 A-	0.016	單向定位精度 A+ 和 A-	22
雙向重複定位精度 R	0.012	雙向重複定位精度 R	16
單向重複定位精度 R+ 和 R-	0.006	單向重複定位精度 R+ 和 R-	8
反向差值 B	0.010	反向差值 B	12
雙向定位系統偏差 E	0.015	雙向定位系統偏差 E	20
單向定位系統偏差	0.01	單向定位系統偏差	14
雙向平均偏差範圍	0.01	雙向平均偏差範圍	12

如圖 3-16 所示，第一次量測誤差值未補償的原始圖形，角度分裂曲線趨勢向上，顯著誤差過大；如圖 3-17 為第二次量測後角度誤差已補償之圖形，角度分割曲線趨近於零，角度定位誤差值明顯的改善。

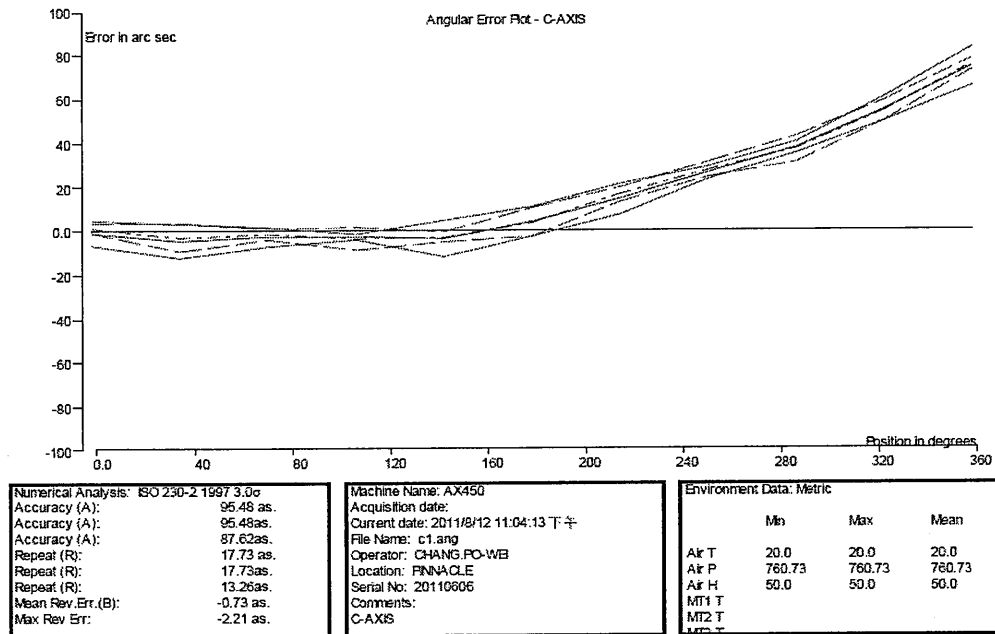


圖 3-16 未補償

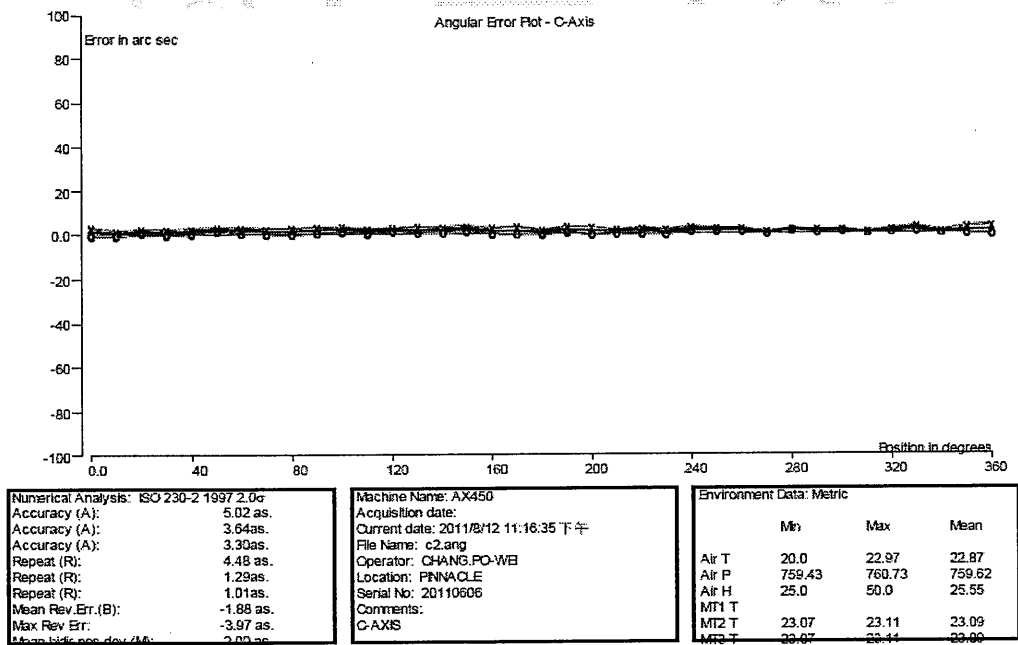


圖 3-17 已補償

第四章 循圓量測系統

4.1 DBB(Double Ball Bar)量測裝置

DBB是目前最常使用於三軸工具機之量測儀器，可在三向平面下做360度全圓量測以求得三軸工具機之靜態與動態誤差。其原理是安裝一個線性差動變壓器(LVDT)(Linear Variable Differential Transformer)在內部。編輯CNC程式繞圓形軌跡做循圓量測時出現多項誤差，如直角度、背隙、節距誤差以及動態誤差如迴路增益匹配、黏滑效應 (Stick-Slip) 及失位(Lost-Motion)誤差等。此量測裝置雖然只能量測到刀具與工件間之一維距離變化，但經由適當路徑規劃下，工具機線性軸(XYZ)之各項動態誤差均可輕易量測，再將CNC 各伺服軸參數加以調整以獲得補償。

本研究之實驗裝置是使用英國RENISHAW 公司生產之QC20-W無線循圓量測儀，其量測裝置組成元件如圖4-1所示，系統規格如下表4-1。

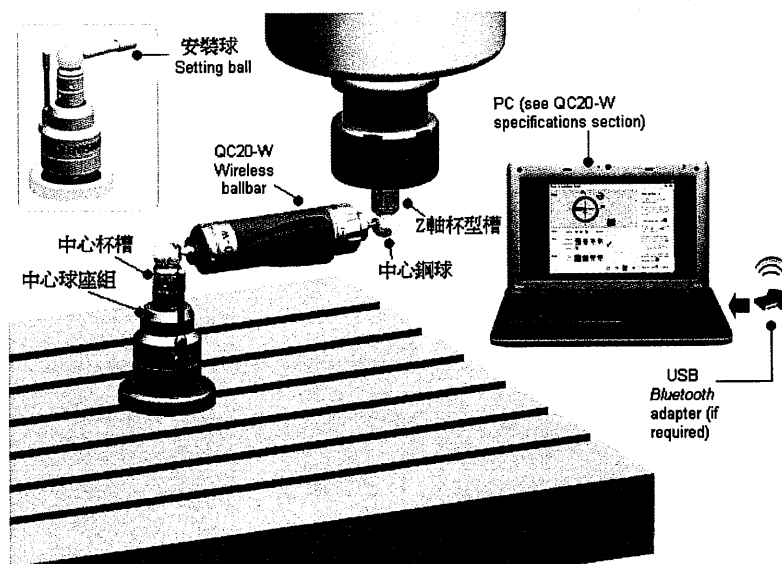


圖4-1 QC20-W系統元件示意圖

表 4-1 QC20-W 量測系統規格表

QC20-W 循圓量測儀規格	
解析度	0.1 μm
感測器精度	$\pm 0.5 \mu\text{m}$ (at 20 °C)
最大採樣率	1000點/秒
量測範圍	$\pm 1\text{mm}$
操作範圍	0-40 °C
傳輸方式	藍芽-2 級(10M 典型)

在循圓路徑下由DBB量測出其半徑長度誤差量，並使用Ball Bar20分析軟體將機台之幾何誤差與運動誤差檢測出來。將DBB 量測儀器運用在搖籃式五軸工作台上，在C軸轉盤上架設一座已經過校正之中心真圓球，使DBB 連接在標準球與裝附主軸之磁性杯槽刀桿之間，其系統裝置如圖4-2 所示。

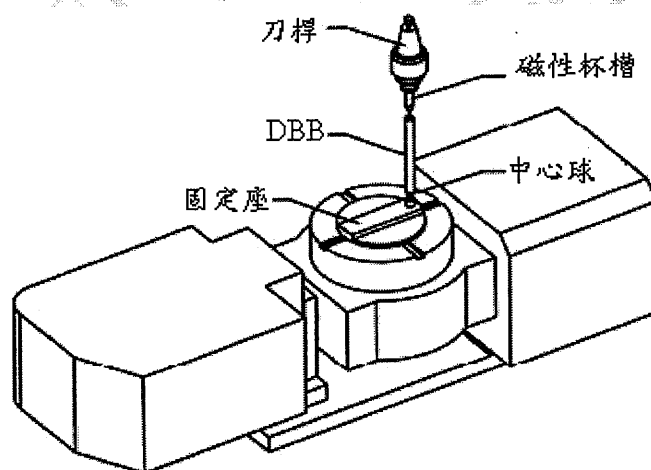


圖 4-2 五軸之 DBB 量測示意圖

使用DBB 量測原理並搭配獨創的測試路徑，可將五軸工具機之相關幾何誤差量測出來。其特殊路徑的設計概念，是以中心真圓球之球心作為測試半圓球中心點，此測試半圓球之半徑即為DBB 之桿長度。因此測試球面上之任一路徑點，其半徑誤差量即可由DBB 的長度變化值所量測出來。在工件座標系內定義特殊路徑，如圖4-3 所示：

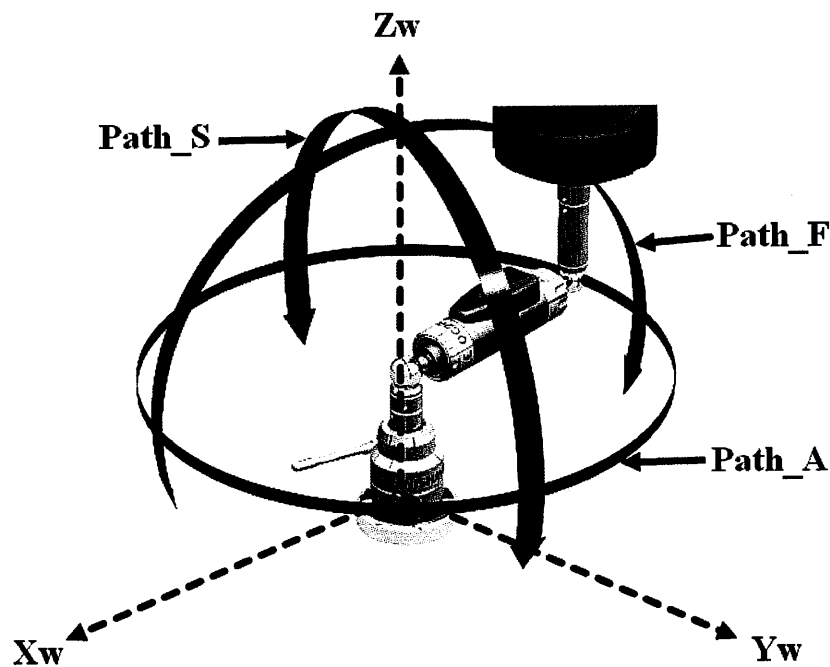


圖 4-3 半圓球面之測試路徑圖

以上所介紹之路徑，雖都是設計來量得測試半圓球路徑的半徑變化量。但在此五軸DBB 理論推導可應用的條件下，DBB 必須在整個量測過程中分別保持平行參考座標系的X、Y、Z 軸，亦即更需要A、C 軸調整刀具指向使DBB 符合條件。在估測誤差參數過程中，這樣所量測到的長度變化值才能有效提供貢獻。以進行數值的計算。因此建立Path_A、Path_F、Path_S 三個量測路徑。

4.2 Probe-ball 3D 量測裝置

五軸工具機因在 XYZ 三軸上加了 AC 旋轉軸，可使刀具指向垂直於切削之輪廓曲面，但這也使得五軸工具機在總合誤差的量測相當困難，至今仍無簡便有效的量測工具。為能有效量測五軸沿運動路徑運動至任一位置的靜態誤差(幾何誤差)，針對五軸運動特性，結合 DBB 部份量測裝置及可同時量測 X,Y,Z 三軸向偏移量的高精度 Probe，發展出 Probe -Ball 三軸向誤差量測裝置如(圖 4-4)所示，將一量測精度為 1 微米的 Scanning Probe(Renishaw SP2-1)固定於主軸，另自製一測桿裝於 Probe 上，測桿底端則裝有高磁性及三點接觸式的球軸承，在 C 盤上並裝有高精度真圓球及可精確將中心圓球球心定位於相對五軸工具機工件座標的一定位置之中心圓球球座。

此外，此一量測系統為了使五軸工具機形成一完整封閉的機構鏈 (ClosedChain)，其測桿的長度 (Probe 量測感測的自由原點至中心圓球球心的距離) 應與與切削球半徑相同。在量測時，將 Probe 量測感測器之自由原點定為 NC 程式中的刀具端點，球心則設定為工件座標的零點，且 Probe 量測中心至球心距離與切削球半徑相同，如(圖4-5)所示。因此，在無幾何誤差的情形下沿此一半球面運動時，Probe 所量測的三軸向誤差量

應皆為零。故此Probe-ball 3D 誤差量測裝置，已完成可直接量出五軸工具機刀具對工件座標原點作球面相對運動時之定位及運動誤差。

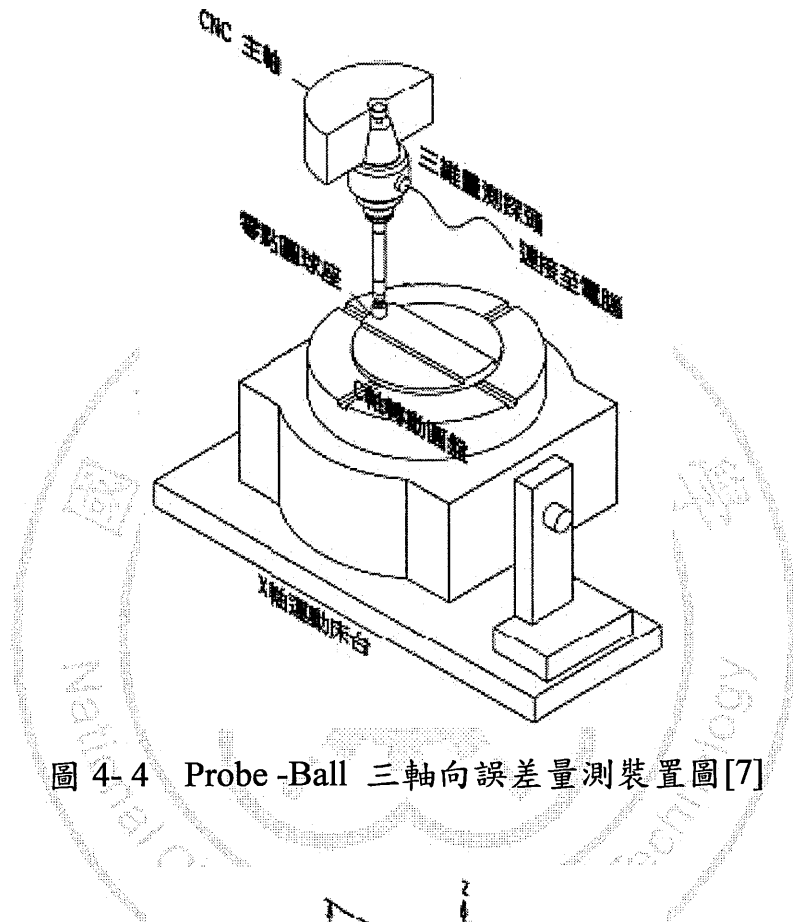


圖 4-4 Probe -Ball 三軸向誤差量測裝置圖[7]

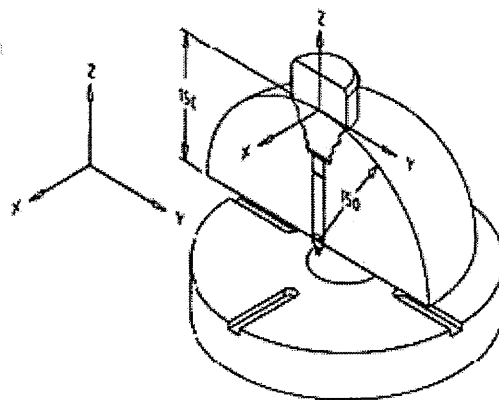


圖 4-5 切削球半徑示意圖[7]

第五章 插補與進給速度規劃

五軸工具機的加工指令碼及加工軌跡模擬之研究，將從基本的2D橢圓軌跡探討加工指令軌跡，進而深入探討3D橢圓軌跡之加工指令軌跡，五軸工具機之多軸同動加工軌跡皆包含至少一個旋轉軸相關之同動運動。

本研究設定加工進給速度(Feedrate)為常數，並假設刀具方向並無考慮干涉的情形，刀具方向則設定為加工軌跡的主法線方向，在已知條件下，提出了五軸工具機插補的方法，也就是新的五軸工具機加工碼G-code指令，包括2D橢圓軌跡、3D橢圓軌跡的插補。

5.1 線性軸插補

Yeh and Hsu [8]提出Speed-controlled Interpolator有效改善曲線速度的精確度，參考一階插補算式，設計補償參數，所得到插補結果與一次微分插補法和二次微分插補法做比較，對高次項用上述補償參數去代替，而不是省略，進而有效改善曲線速度精確度，所提出的運算法有效改善進給速度的尖峰值，亦使輪廓誤差的均方根值在合理範圍內，其運算法對於線性插補有相當的貢獻，但如果要運用到五軸旋轉軸中，對於旋轉軸的插補並不適用，本研究將應用其三軸分析方法，改善五軸插補之結果。

單一線性軸加減速規劃方面，我們以Liu et al. [9]，經由所設定的條件下，可明顯看出他的改善順序，如圖5-1為改善速度分佈圖，(A)未改善前(B)修正變化大時的速度(C)修正起始速度，如圖5-2為改善加速度進度圖，(A)未改善(B)改善後。完整的速度曲線就如同圖5-1(C)，加速度曲線則如同圖5-2(B)。

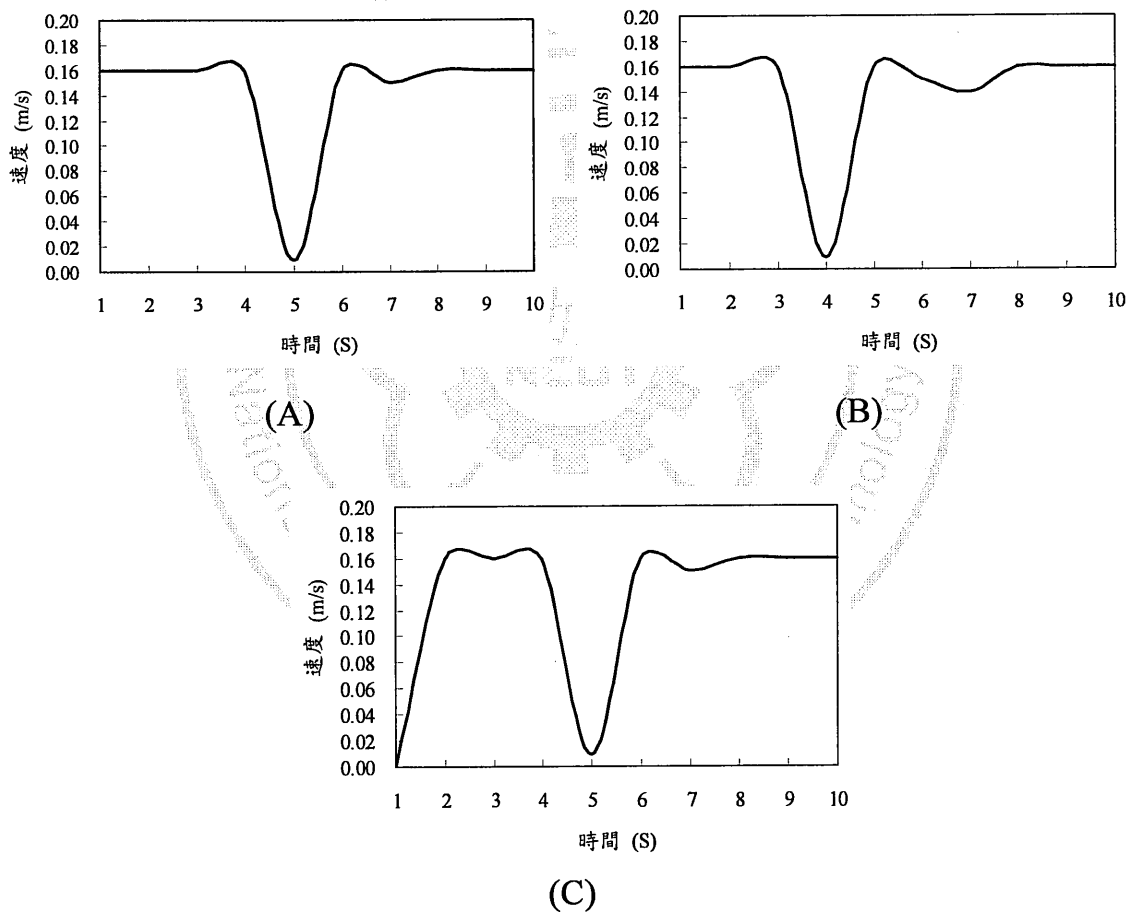


圖 5-1 改善速度進度圖[9]

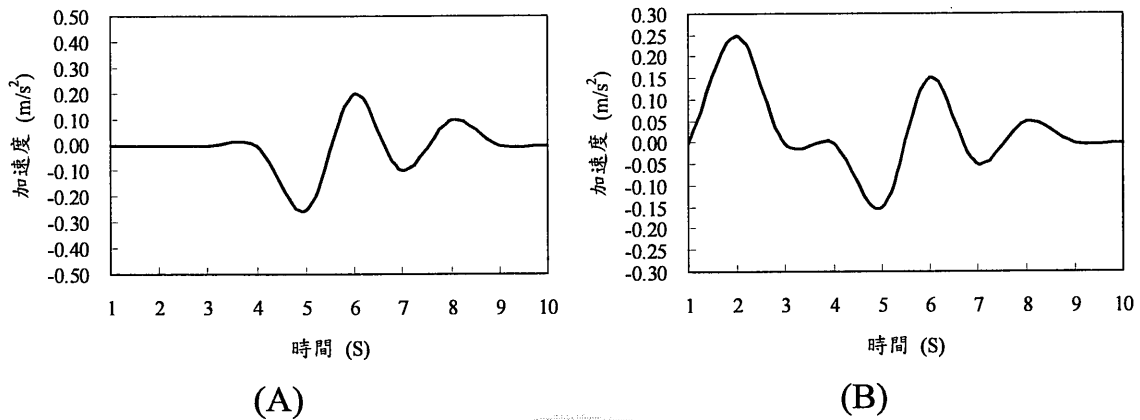


圖 5-2 改善加速度進度圖[9]

5.2 曲面插補

在曲面插補運算與速度規劃的部分，Kim, et al. [10] 提出NURBS曲面的即時循跡插補，分別設定進給速度為常數、不是常數二種情況下，加上曲面參數的泰勒展開式以及曲面法向量，再根據曲面定理算出線性插補與旋轉插補時所需的插補參數、速度、加速度的部份。

在曲面加減速度的部份，設定S為參數曲面， $\langle S_{Nx}, S_{Ny}, S_{Nz} \rangle$ 為曲面法向量， u, v 為曲面參數， V 為速度， T 為Sampling time， u_{i-1} 為前一點插補點， u_i 為目前插補點，曲面參數的泰勒展開式以及曲面法向量(5-1):

$$u_i = u_{i-1} + \frac{VT}{\sqrt{x_{i-1}^2 + y_{i-1}^2 + z_{i-1}^2}} [S_{Nx}, S_{Ny}, S_{Nz}] = \frac{\frac{\partial S}{\partial u} \times \frac{\partial S}{\partial v}}{\left| \frac{\partial S}{\partial u} \times \frac{\partial S}{\partial v} \right|} \quad (5-1)$$

把(6-1)代回原曲面的參數式S，再根據曲面定理算出線性插補與旋轉插補時所需的插補參數，速度(V)、角速度(ω)與線性加速度(α)、角加速度()

)的部份為(5-2)，為參數曲面的一次微分、二次微分：

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \bar{\alpha}'\dot{s} \quad \text{and} \quad \bar{a} = \bar{\alpha}'\ddot{s} + \bar{\alpha}''\dot{s}^2 \\ \bar{\omega} &= \bar{U}_0\dot{s} \quad \text{and} \quad \dot{\bar{\omega}} = \bar{U}_0\ddot{s} + \bar{U}'_0\dot{s}^2 \end{aligned} \quad (5-2)$$

有了上式的速度與加速度即可做即時插補的部份。圖5-3為曲面插補的結果。在曲面插補與速度規劃的部分，對於大範圍的軌跡路徑容易控制，但是對於局部的加工軌跡並不容易做到微調，對於局部微調的部分，仍以線性軸與旋轉軸的插補速度規劃較為容易。

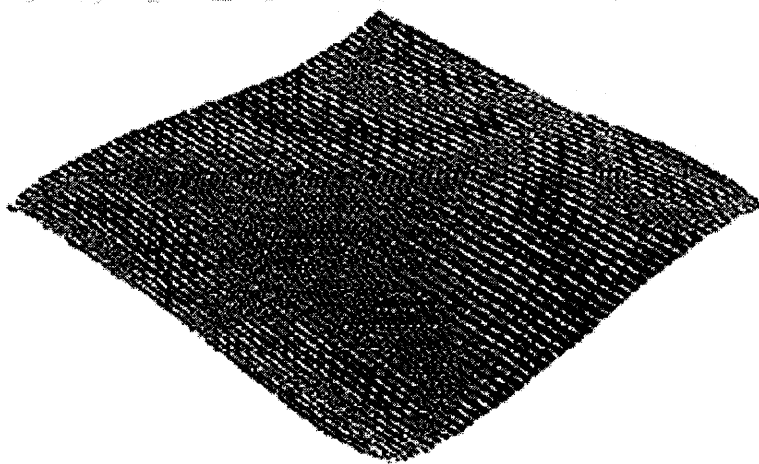


圖 5-3 曲面插補[10]

5.3 線性軸與旋轉軸的插補

在線性軸與旋轉軸的插補運算部分，Xu et al.[11][12]提出把進給速度分成旋轉與平移二個部分，分別加入不同的限制條件，而有了 (CLCA)插補、(CACL)插補。CLCA為Constant Linear feedrate and Constrained Angular feedrate縮寫，將線性速度設為常數，角速度為設定一個最大值，插補時，線性速度為常數，角速度則有可能會有尖峰值出現，設定角速度的最大值不超過一定的值。CACL為CConstant Angular feedrate and Constrained Linear feedrate，將角速度為常數，線性速度設定一個最大值，插補時，角速度為常數，線性速度則有可能會有尖峰值出現，設定線性速度的最大值不超過一定的值。所提出的插補方法不僅有效控制線性速度與角速度之外，所得到的加工表面精度亦在合理範圍內，此方法是用雙參數法，在刀具所在的平面亦須先設定好，對於即時插補並不容易控制。

So et al.[13][14]更提出了feed angle的因子，以及控制器處理機械碼的處理參數、旋轉軸與平移軸的比例關係式，更加對旋轉軸插補的部分提出Arc-length作插補動作，設定feed angle (ψ)，弧長(S)，曲率半徑(R)， v 為該點的單位向量，feed angle為(5-3):

$$\varphi_i = \frac{S_i}{R_i} = \cos^{-1}(\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_{i+1}) \quad (5-3)$$

再加上設定控制器處理機械碼的處理參數(6-4):

$$N_{NC} = \frac{1}{60} \frac{F_C}{S_i} \quad (5-4)$$

以及旋轉軸與平移軸的比例關係式(6-5)

$$H_i = \frac{S_{t,i}}{S_{r,i}} = \frac{\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}}{\sqrt{\Delta A^2 + \Delta B^2 + \Delta C^2}} \quad (5-5)$$

由上述(5-3)、(5-4)、(5-5)，以及Arc-length插補，這些不僅提高切削效率，也減少了切削時間，如圖5-4。

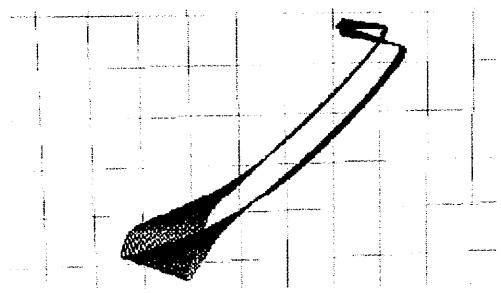
Test methods	Tool path
	
Commercial program	230.38
This research	156.84
Actual machining time	147

圖 5-4 Machining time[15]

5.4 循圓軌跡插補

在循圓形軌跡插補中，我們先討論位於XZ平面之圓弧軌跡，因此先指定二個平移軸(X軸、Z軸)與一個旋轉軸(B軸)去做插補運算，刀具方向則為主法線方向。插補的第一個要素是要先知道所要加工的曲線方程式，圓軌跡的參數式(5-6):

$$\begin{cases} x = R \sin \theta \\ z = R \cos \theta + R \end{cases} \quad (5-6)$$

以及可從參數式求得單位法向量的參數式 Ox 、 Oz (5-7):

$$\begin{cases} Ox = \sin \theta \\ Oz = \cos \theta \end{cases} \quad (5-7)$$

其中 θ 為圓的參數， x 為圓上的點資料，在此圓的參數式，我們取 θ 為0度到180度的半圓加工軌跡。

第六章 結論

以目前工具機業主流要求三高：高速、高精、高效率的趨勢，五軸工具機能在生產製造業表現已佔有一席之地。但在加工過程中，同動精度約有 70~80% 受到旋轉軸角度誤差影響，為提高加工產品的優越性，對旋轉軸進行動態量測與補償，可有效提升五軸工具機的同動精度，使所有工序一次到位。

本研究採用線性軸誤差補償方法的擴展，將旋轉軸做角度誤差補償，在反覆量測數次後，由 CNC 補償器的指令運算誤差值，驗證其補償前及補償後的差異性，並取得了最終的結果，對照 ISO10791-4 訂定標準，發現定位精度和可重複精度都在標準範圍內。

再之，運用誤差補償完成之機器以五軸同動方式實際加工可展現幾何精度之工件，以適用之儀器如游標卡尺、分厘卡、三次圓量測儀...等，做尺寸精度量測，直到實測值與圖面一致，且加工表面精度符合需求。

未來可利用高精度角度編碼器把誤差值降到最低，再做動態量測補償驗證，肯定會有更好的效應。

參考資料

- [1] 雷衛台, 副教授 國立清華大學動力機械工程學系, 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。
- [2] Weisstein, Eric W. "Rotation Matrix." From MathWorld--A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/RotationMatrix.html>。
- [3] Descartes, René. Oscamp, Paul J. (trans). Discourse on Method, Optics, Geometry, and Meteorology. 2001。
- [4] Y. Koren and R. Lin, 1995, "Five-Axis Surface Interpolators," CIRP annals, Vol.44, No.1, 1995, pp. 379-382. (EI)
- [5] Michelson, American Journal of Science, 22,1881, p.120。
- [6] Cullam Technologies Co Ltd Agilent 5529 Laser System Catalog。
- [7] 雷衛台, 徐永源, "建立以 PROBE-BALL 為五軸 CNC 銑床之幾何誤差量測系統", 中國機械工程學會第十五屆學術研討會。
- [8] Yeh, S. S. and Hsu, P. L., "The speed-controlled interpolator for machining parametric curves", National Chiao Tung University, 1998。
- [9] Liu, X. B., Fahad Ahmad, Kazuo Yamazaki, Masahiko Mori, "Adaptive interpolation scheme for NURBS curves with the integration of machining dynamics", International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 433-444, 2005。

- [10]Kim,J. H., Ryuh B. S. and Gordon R. Pennock, ” Development of a trajectory generation method for a five-axis NC machine ”, Mechanism and Machine Theory 36 (2001) 983-996,2001 ◦
- [11]Xu, S. Y. and Hsu, P. L.,” Linear and angular federate interpolation for planar implicit curves ”, Computer-Aided Design 35 301-317, 2003 ◦
- [12]Xu, H. Y., Zhou, Y. H. and Zhang, J. J., ” Angular interpolation of bi-parameter curves ”, Computer-Aided Design 35 1211–1220, 2003 ◦
- [13]So, B. S.,Jung, Y. H., Park, J. W. and Lee, D. W., ” Five-axis machining time estimation algorithm based on machine characteristics ”, Journal of Materials Processing Technology 187–188 (2007)37–40, 2007 ◦
- [14]So, B. S.,Jung, Y. H., Park, J. W. and Lee, D. W., ” 5-Axis machining speed enhancement by step length optimization ”, Journal of Materials Processing Technology 187–188 (2007) 2–5, 2007 ◦
- [15]Cho,H.D.;Yang, M.Y.;Jun,Y.T.,”Five-Axis CNC Milling for Effective Machining of sculptured surface”,International Journal of Production ◦