



國立臺灣大學機械工程學研究所

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

旋轉台幾何誤差之量測與探討

Research on measurement of geometry errors on rotary table

孫文波

Wen-Po Sun

指導教授：范光照 博士

Advisor: Kuang-Chao Fan, Ph.D.

中華民國 103 年 7 月

July, 2014



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書
旋轉台幾何誤差之量測與探討

Research on measurement of geometry errors on rotary table

本論文係孫文波君 (R01522706) 在國立臺灣大學機械工程學系
完成之碩士學位論文，於民國 103 年 7 月 19 日承下列考試委員審查
通過及口試及格，特此證明

口試委員：

范光照

范光照 (指導教授)

陳亮嘉

陳亮嘉

修芳仲

修芳仲

系主任

楊耀州

(簽名)

誌謝



時光荏苒，研究所的生活即將進入尾聲。感謝神讓我在研究所的期間當中一切平安，在知識、智慧、身量上都有所磨練與成長，最後能夠完成這篇論文，我願將這一切過程的喜樂、感恩事項和大家分享。

首先感謝我的恩師范光照老師的指導，在我進入實驗室以後，就給我一個具有挑戰性的題目，同時指示我動作做實驗。就這樣，一開始什麼都不太會的我，就開始動手做實驗，在過程當中遇到困難和挑戰時，老師都很願意給予指導，仔細觀察實驗架設是否有問題，並陪同學一起做實驗，這是我十分敬佩的地方。最後，整個研究過程雖然不是很順利，但老師願意包容並給予新的方向，幫助我在有限的時間和研究結果中找到出路，真的十分感謝老師。

在研究伙伴當中，首先特別感謝羿宗學長，若是沒有他的加入，只怕研究過程會更加險峻。在學長的教導與相互討論中，我總是能夠發現我思考不足的地方。在實驗自動化程式的部分，也仰賴羿宗學長所提供軟體上的支援。一些實驗感測儀器的部分，感謝已經畢業的志雄學長、梓楠學長，讓我可以使用自動視準儀進行實驗，也感謝實驗室的研究助理宜宏，在儀器的校正和比對上相當用心。也要感謝助理雅淑，為實驗室默默付出，讓我可以免去一些行政事務的煩擾，專心投入研究。

在此也要感謝研究室的伙伴，一起陪我度過碩一的學長揚喻、旻君，已經在智泰公司上班的學長世將，同窗翰銘、世昕，學弟立民、皓瑋等。真的感謝你們在實驗室的陪伴，讓我在研究所的時間中不孤單。另外，也要感謝精密量測實驗室提供給我一個適合學習的環境，母校台大提供的豐富資源，讓我在學習過程中

可以得到許多幫助。

在生活上，特別感謝倍加團契的弟兄，時常陪伴在我身旁，和我一同享受敬畏神生命的祝福。另外也感謝足球校隊楊老師，讓我在有機會可以代表學校出去比賽，在研究所時間中學習自主管理與節制的生活，這部分也使我的研究所生活更多彩多姿。此外還有很多一起修課的同學，關心我的朋友，這些感謝礙於篇幅的關係在此就不一一詳述了，在此祝福大家在求學、工作、生活各樣的世上一切順利。

最後感謝愛我、支持我的家人，讓我可以專心學習。沒有你們做我穩固的避風港，這一路走來將會艱辛許多，謝謝你們。



摘要

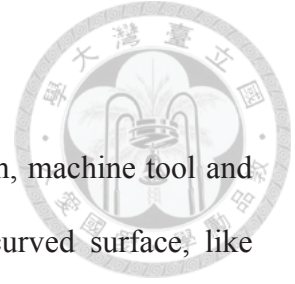


旋轉軸的使用目前已經被廣泛地應用在工業，像是機器人手臂、工具機或三次元量測儀。一些曲面切削，如蝸輪機葉片或螺紋，現在都可以透過多軸工具機來完成。而為了進一步提高工具機的精度，必要探討旋轉軸的幾何誤差，因此如何量測到旋轉軸幾何誤差是一個關鍵。目前已經不少學者提出各種旋轉軸幾何誤差的量測方法，當中有些方法更是可以達到相當高的解析度。

在本研究中，首先建立了旋轉軸幾何誤差的量測系統，可以量測旋轉軸偏擺誤差與偏心誤差。偏擺誤差量測系統有三種方法，分別是使用千分錶、多面稜鏡搭配自動視準儀和塊規搭配自動視準儀三種。偏心誤差量測系統有兩種方法，分別是使用千分錶搭配標準球，以及使用雷射光、四象限感測器再搭配角耦稜鏡作為反射鏡。在量測過程中，一些架設誤差會導致量測結果的不穩定，因此必須盡可能減小或排除。從量測結果的分析與比對中，可以評估量測方法的可靠性。另外也在這些量測結果中，找出旋轉軸幾何誤差之間的關聯。這些結果可作為日後分析旋轉軸誤差的基礎。

關鍵字： 旋轉軸、旋轉台、幾何誤差、量測系統

ABSTRACT



Rotary axes are widely used in industry, such as in robotic arm, machine tool and coordinate measuring machines (CMM). The cutting of special curved surface, like turbine blade or helical thread, could be performed through multi-axis machine tool. To improve the accuracy of machine tools, it is important to research on the geometry errors of rotary axes. Consequently, how to measure the accuracy of rotary table is essential. There are some measurement systems that had been developed and some systems can reach high resolution.

In this study, several measurement systems have been developed, some can measure tilt error and the others can measure eccentric error. There are three kinds of tilt error measurement systems, one using dial gauge, another using polygon and autocollimator, the other using gauge block and autocollimator. There are two kinds of eccentric error measurement system, one using dial gauge and master ball, another using laser diode, QPD and corner cube as reflector. In the measurement process, some setting errors cause the measurement results unstable. Therefore, it is important to minimize or eliminate setting error. Through the analysis and comparison of measurement results, it can be used to evaluate the reliability of the measurement system, and find out the correlation between linear errors and angle errors of axes. The result can be used as the basis of analyzing the errors of rotary axis in the future.

Keyword: Rotary axis, Rotary table, Geometry errors, Measurement system

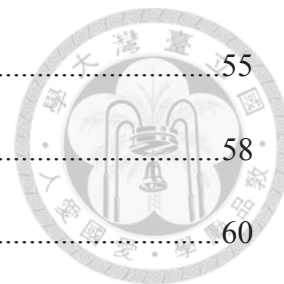
目錄



誌謝	i
摘要	iii
ABSTRACT	iv
目錄	v
LIST OF FIGURES	viii
LIST OF TABLES	xii
第一章 緒論	1
1-1. 研究動機與目的	1
1-2. 文獻回顧	4
1-2-1 非接觸式旋轉軸誤差量測	4
1-2-2 五軸工具機幾何誤差量測	9
1-3. 研究方法與內容概要	13
第二章 實驗儀器與設備	14
2-1. 感測器	14
2-1-1 自動視準儀	14
2-1-2 自動視準儀校正	17
2-1-3 位移感測器	20
2-2. 旋轉台	20
2-2-1 旋轉台介紹	20
2-2-2 定位精度與重複精度	21

2-2-3	盤面偏心校正	23
2-3.	多面稜鏡(polygon).....	24
2-3-1	多面稜鏡校正標準	24
2-3-2	多面稜鏡誤差校正 – 夾角誤差	25
第三章	量測系統	28
3-1.	旋轉台偏擺量測系統	28
3-1-1	量測系統架設	28
3-1-2	偏擺模擬與分析	30
3-1-3	偏擺量測結果	38
3-2.	旋轉軸偏心量測系統	41
3-2-1	量測系統架設	41
3-2-2	偏心量測系統校正	42
3-2-3	偏心量測結果	45
第四章	誤差分析	47
4-1.	接觸式量測誤差	47
4-2.	光學量測系統誤差	50
4-2-1	雷射光	50
4-2-2	分光鏡	51
4-2-3	四象限感測器	52
4-3.	公轉誤差	53
第五章	結果與討論	55

5-1.	偏擺誤差量測	55
5-2.	偏擺誤差與偏心誤差的關聯	58
第六章	結論與未來展望	60
6-1.	結論	60
6-2.	未來展望	60
References		61



LIST OF FIGURES

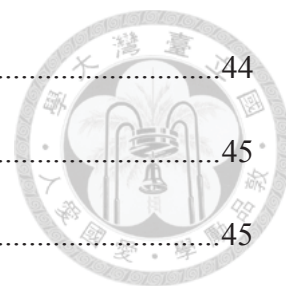


圖 1-1-1 旋轉軸六自由度誤差[1].....	1
圖 1-1-2 使用標準球或標準棒來進行量測[1].....	2
圖 1-2-1 Suk-Hwan Suh 等進行旋轉軸六自由度誤差量測[2]	4
圖 1-2-2 劉建宏教授等發表之主軸誤差量測系統[3].....	5
圖 1-2-3 劉建宏教授等將雷射光放置在旋轉台上量測主軸徑向誤差[4].....	5
圖 1-2-4 劉建宏教授等使用角耦稜鏡進行主軸誤差量測[5].....	6
圖 1-2-5 覺文郁教授等使用金字塔型多面稜鏡進行旋轉軸誤差量測[6].....	6
圖 1-2-6 Kengo Fujimaki 利用自動視準儀原理量測主軸徑向誤差[7].....	7
圖 1-2-7 H.F.F. Castro 使用干涉原理進行誤差量測[8].....	7
圖 1-2-8 Jindong Wang 使用雷射追蹤法來量測旋轉軸誤差[9].....	8
圖 1-2-9 Muhummad Madden 使用同心圓光柵進行主軸誤差量測[10]	8
圖 1-2-10 Hiroshi Murakami 利用圓柱透鏡與球透鏡量測主軸誤差[11]	9
圖 1-2-11 以雙球桿進行幾何誤差量測[13].....	9
圖 1-2-12 R-test 裝置架設圖[16]	10
圖 1-2-13 使用接觸式觸發探頭進行幾何誤差量測[20].....	10
圖 1-2-14 使用圓錐台來進行幾何誤差分析[21].....	11
圖 1-2-15 使用不同的切削模型來進行幾何誤差分析[24].....	11
圖 1-2-16 使用球透鏡進行幾何誤差分析[25].....	12
圖 2-1-1 四象限感測器光點位置與輸出電壓關係圖	15
圖 2-1-2 四象限訊號處理電路圖	15

圖 2-1-3 自動視準儀原理示意圖	16
圖 2-1-4 自動視準儀架構圖	17
圖 2-1-5 自動視準儀光路設計	17
圖 2-1-6 自動視準儀 Pitch 校正示意圖	18
圖 2-1-7 自動視準儀 Yaw 與雷射干涉儀校正結果	18
圖 2-1-8 自動視準儀 Pitch 與雷射干涉儀校正結果	19
圖 2-1-9 自動視準儀 Yaw 量測誤差	19
圖 2-1-10 自動視準儀 Pitch 量測誤差	20
圖 2-2-1 旋轉台機構示意圖	21
圖 2-2-2 旋轉台運作示意圖	21
圖 2-2-3 旋轉台定位精度與重複精度檢驗	22
圖 2-2-4 旋轉台定位精度檢驗	22
圖 2-2-5 重複精度與量測跳動量比較	23
圖 2-2-6 旋轉台面偏心校正	23
圖 2-3-1 多面稜鏡校正裝置	24
圖 2-3-2 多面稜鏡在標準模式下的校正結果	25
圖 2-3-3 使用雙自動視準儀校正面鏡誤差示意圖	26
圖 2-3-4 多面稜鏡校正時的偏擺範圍	27
圖 2-3-5 多面稜鏡夾角誤差	27
圖 3-1-1 使用千分錶進行偏擺量測	28
圖 3-1-2 使用自動視準儀搭配二十四面鏡進行偏擺量測	29

圖 3-1-3 反射鏡的架設誤差	29
圖 3-1-4 以塊規作為反射鏡進行偏擺量測	30
圖 3-1-5 偏擺的大小與方位角	31
圖 3-1-6 Catia 偏擺模型	32
圖 3-1-7 偏擺發生的模型	32
圖 3-1-8 模擬不同旋轉角度下自動視準儀的量測值	33
圖 3-1-9 Pitch 模擬值和弦波值比對	33
圖 3-1-10 偏擺量測方向性比較 – 使用多面稜鏡	34
圖 3-1-11 偏擺量測方向性比較 – 使用塊規	34
圖 3-1-12 當偏擺方位角為 0° ，大小為 60arc sec 時	35
圖 3-1-13 當偏擺方位角為 45° ，大小為 60arc sec 時	36
圖 3-1-14 當偏擺方位角為 45° ，大小為 60arc sec 時進行歸零	36
圖 3-1-15 偏擺誤差量測結果 – 使用千分錶	39
圖 3-1-16 偏擺誤差量測結果 – 使用多面稜鏡	39
圖 3-1-17 偏擺誤差量測結果 – 使用塊規	40
圖 3-2-1 以標準球搭配千分錶進行偏心率量測	41
圖 3-2-2 以光學感測器搭配角耦稜鏡進行偏心率量測	42
圖 3-2-3 角耦稜鏡光路系統	42
圖 3-2-4 位移感測器 X 方向校正示意圖	43
圖 3-2-5 位移感測器 X 方向與雷射干涉儀校正結果	43
圖 3-2-6 位移感測器 Y 方向與雷射干涉儀校正結果	44

圖 3-2-7 位移感測器 X 方向量測誤差.....	44
圖 3-2-8 位移感測器 Y 方向量測誤差.....	45
圖 3-2-9 偏心誤差量測結果 – 使用千分錶	45
圖 3-2-10 偏心誤差量測結果 – 使用角耦稜鏡	46
圖 3-2-11 偏心誤差量測 – 使用角耦稜鏡重複性.....	46
圖 4-1-1 千分錶	47
圖 4-1-2 餘弦誤差	47
圖 4-1-3 消除探針與工件之接觸誤差	48
圖 4-1-4 標準球真圓度量測(中間).....	48
圖 4-1-5 標準球真圓度量測(上面).....	49
圖 4-1-6 標準球真圓度量測(下面).....	49
圖 4-2-1 自動視準儀長時間穩定性實驗[27].....	50
圖 4-2-2 偏心量測系統中雷射光誤差示意圖	51
圖 4-2-3 四象限感測器誤差示意圖	52
圖 4-3-1 角耦稜鏡的公轉誤差	53
圖 4-3-2 角耦稜鏡偏位的影響	54
圖 5-1-1 偏擺誤差量測結果比較	56
圖 5-1-2 偏擺誤差擬合結果比較	56
圖 5-1-3 偏擺量測結果-方位角誤差	57
圖 5-2-1 偏擺與偏心的關聯	58



LIST OF TABLES

表 4-2-1 偏心率測系統誤差分析	52
表 5-1-1 偏擺誤差量測結果比較	56
表 5-2-1 從偏擺量去計算偏心率	59



第一章 緒論



1-1. 研究動機與目的

不管在機器手臂上或是五軸工具機，利用旋轉運動來達到定位目的已是常見的方法。當中機器手臂以多自由度運動著稱，不過在空間定位上仍有精度不足的困擾。而五軸工具機的旋轉軸在定位誤差的精度上，也有難以克服的精度問題。因此本論文嘗試探討旋轉軸的幾何誤差是否會對定位誤差造成影響，希望藉此找出提升旋轉軸定位精度的關鍵。

在 ISO230-7 中[1]，旋轉軸本身含有六個自由度誤差，如圖 1-1-1。這六個幾何誤差分別是三個線性誤差及三個角度誤差。線性誤差的部分又分成兩個徑向誤差(EXC、EYC)與一個軸向誤差(EZC)；角度誤差的部分則分成兩個偏擺誤差(EAC、EBC)與一個旋轉定位誤差(ECC)。EAC 代號說明：E 表示為元件誤差、A 為誤差方向、C 為軸線方向。

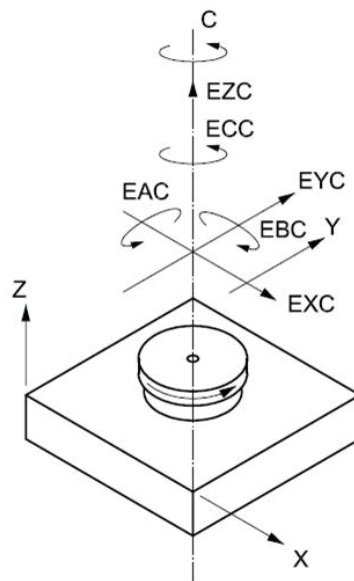


圖 1-1-1 旋轉軸六自由度誤差[1]

另外在 ISO230-7[1]中，線性誤差與角度誤差所使用的量測方法如圖 1-1-2 所示，使用標準球與位移感測器來量測徑向誤差，圖中右方是使用標準棒(standard bar, 亦稱標準桿)與非接觸式位移感測器來量測，從量測結果去計算主軸的偏擺誤差，定位角度的部分可以使用角度編碼器或其他角度感測器來檢驗。

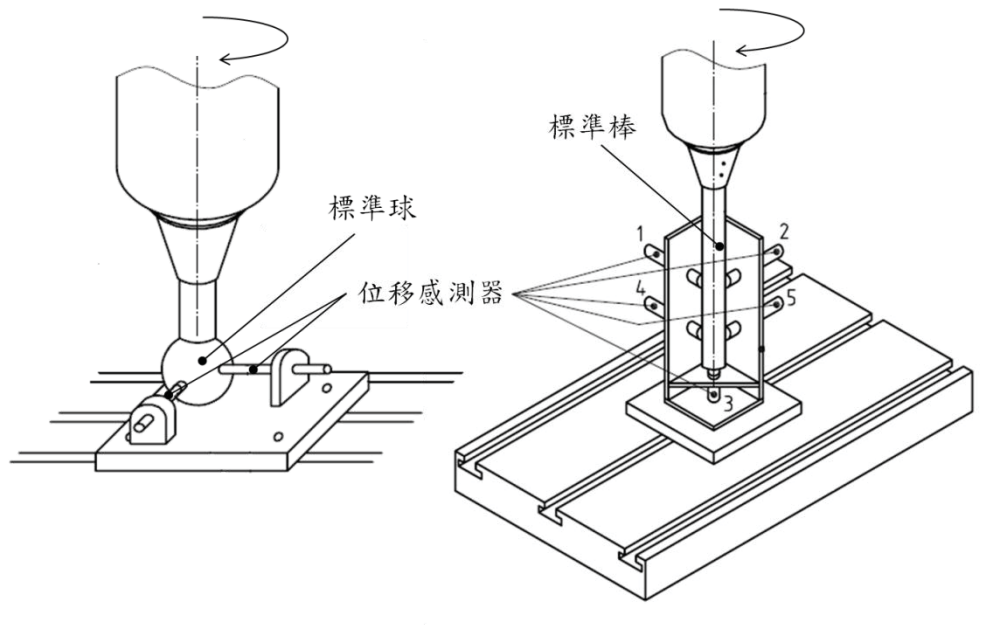


圖 1-1-2 使用標準球或標準棒來進行量測[1]

除了上述使用標準球或標準桿，以非接觸式的光學感測儀器來進行量測外，目前已經有很多旋轉軸誤差的量測方法被開發出來。只不過在這些量測系統中，為了達到高精度，仍然必須仰賴角度感測器(如自動視準儀等)或光學元件等，而這些並不是所有廠商都能夠負擔的起。不過隨著精密量測技術的開發，這些問題已經逐漸被克服。在自動視準儀的研製上，目前已經可以克服高成本的問題，而且經過校正後仍可以保有高精度。

在擁有精密量測儀器之後，本研究建立幾種不同旋轉軸誤差量測系統。透過與量測系統之間比對，證實量測系統與量測結果的可靠性。另外透過量測結果的

分析與比對，將過去旋轉軸誤差分離出來，並且從中找出關聯。這些研究結果將可作為一套旋轉軸誤差的量測方法或日後分析旋轉軸誤差的基礎。





1-2. 文獻回顧

本論文參考文獻分為兩類：(1).非接觸式旋轉軸誤差量測 (2).五軸工具機幾何誤差量測

1-2-1 非接觸式旋轉軸誤差量測

Suk-Hwan Suh 等[2]分別量測出旋轉軸的六個自由度誤差。角度誤差的部分是使用自動視準儀搭配多面稜鏡。線性誤差的部分是使用三個線性感測器分別讀取 X-Y-Z 的線性誤差。如圖 1-2-1。

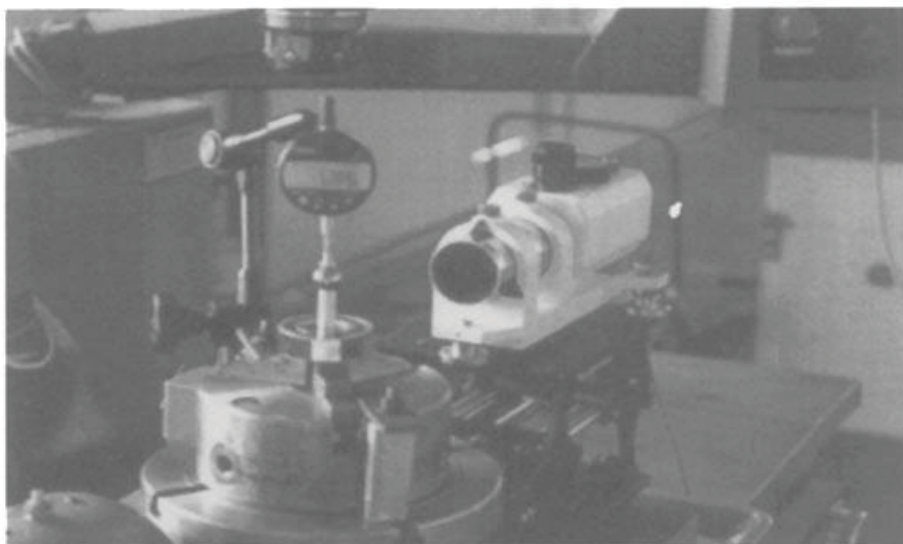


圖 1-2-1 Suk-Hwan Suh 等進行旋轉軸六自由度誤差量測[2]

劉建宏教授等[3]發表一種同時量測 X-Y 徑向位移與主軸偏擺的方法。將主軸內嵌雷射二極體，透過雷射光點的變化量測到主軸徑向誤差。在進入 PSD 前先用分光鏡使一道雷射光進入透鏡，利用視準儀原理得到偏擺角度。如圖 1-2-2。

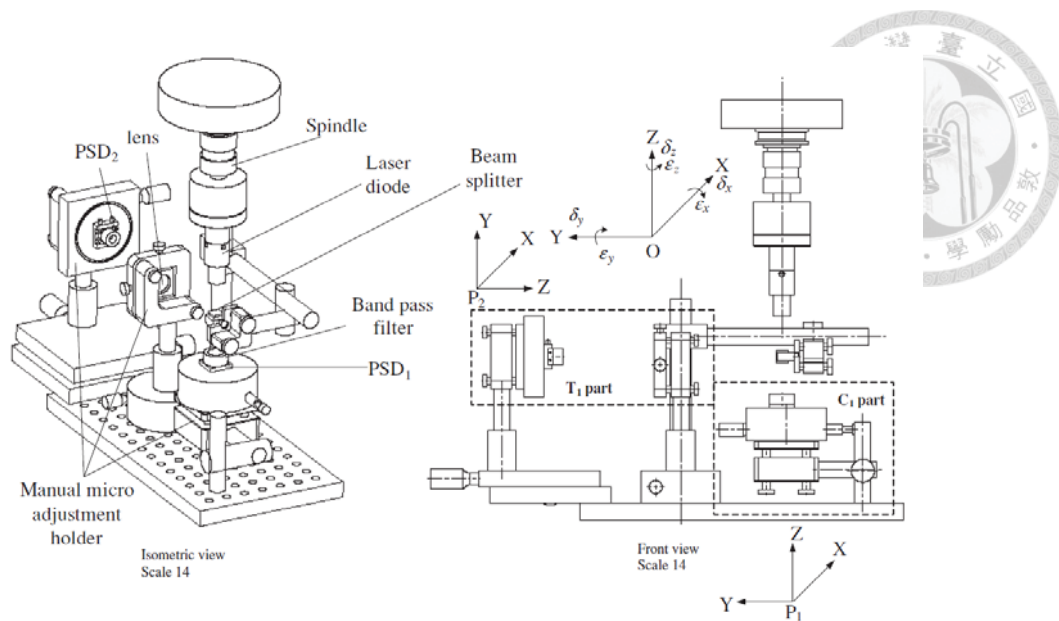


圖 1-2-2 劉建宏教授等發表之主軸誤差量測系統[3]

劉建宏教授等[4]使用可調整雷射光放置在旋轉台上，藉由雷射光上方所放置的位置感測器來得到旋轉軸的徑向誤差。如圖 1-2-3。

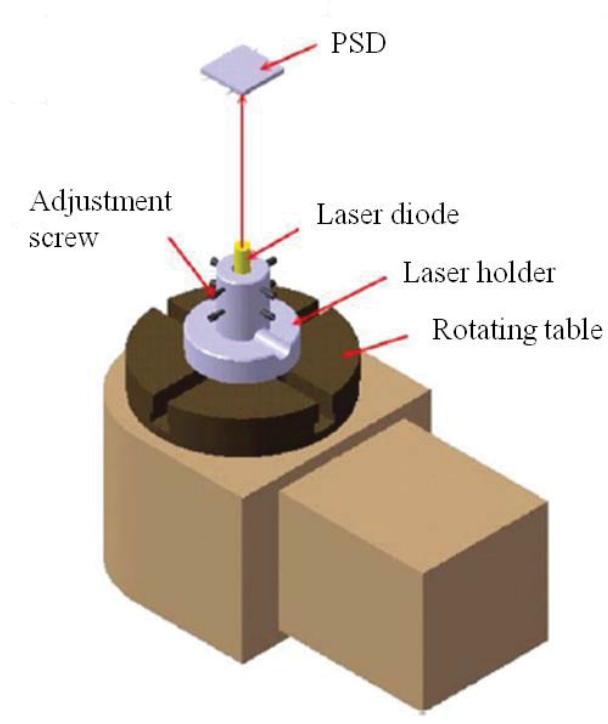


圖 1-2-3 劉建宏教授等將雷射光放置在旋轉台上量測主軸徑向誤差[4]

劉建宏教授等[5]提出另外一種量測方法，將角耦稜鏡裝在主軸上，可以消除主軸偏擺的影響，藉此可以量測到主軸在旋轉過程中產生的徑向誤差。如圖 1-2-4。

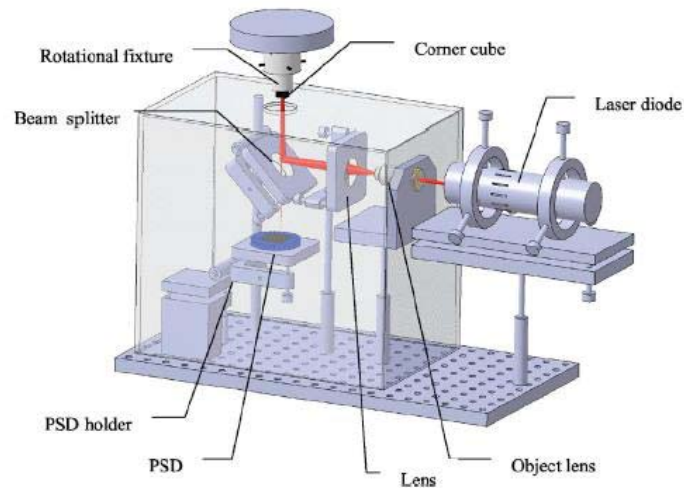


圖 1-2-4 劉建宏教授等使用角耦稜鏡進行主軸誤差量測[5]

覺文郁教授等[6]使用金字塔型多面稜鏡來進行量測，搭配三個雷射光源與三個 X-Y 位置感測器，經過數值分析可以得到六個自由度的旋轉軸誤差。如圖 1-2-5。

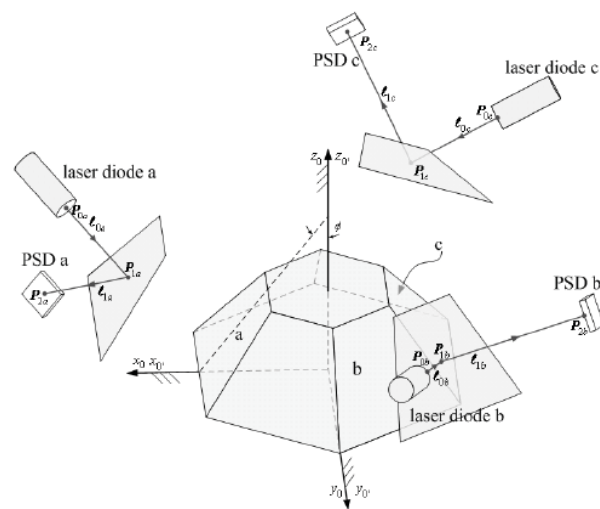


圖 1-2-5 覺文郁教授等使用金字塔型多面稜鏡進行旋轉軸誤差量測[6]

Kengo Fujimaki 教授等[7]提出一種可量測高速主軸徑向誤差的方法。利用自動視準儀原理，當主軸上的目標物產生徑向誤差時會導致 QPD 感測器上光點的變化。如圖 1-2-6。

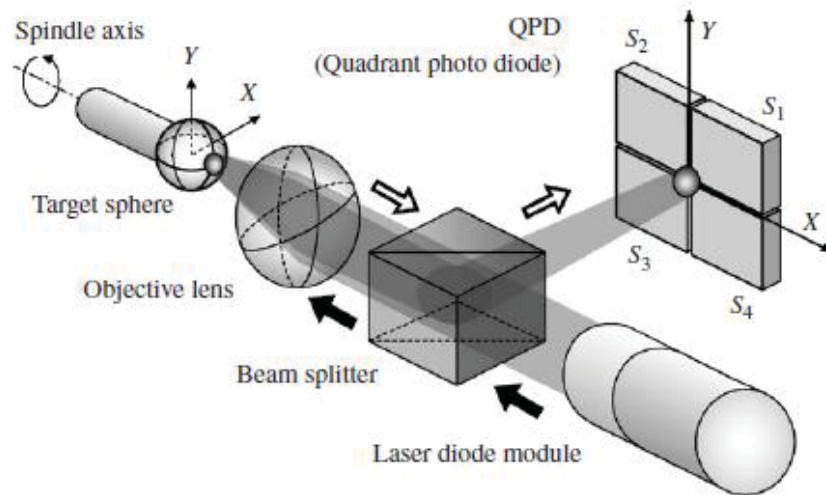


圖 1-2-6 Kengo Fujimaki 利用自動視準儀原理量測主軸徑向誤差[7]

H.F.F. Castro 教授[8]使用干涉儀原理來進行量測。雷射光經會聚透鏡後聚焦在標準球上，利用干涉原理可以得到徑向誤差。若將雷射光從軸向入射就可以得到軸向誤差。如圖 1-2-7。

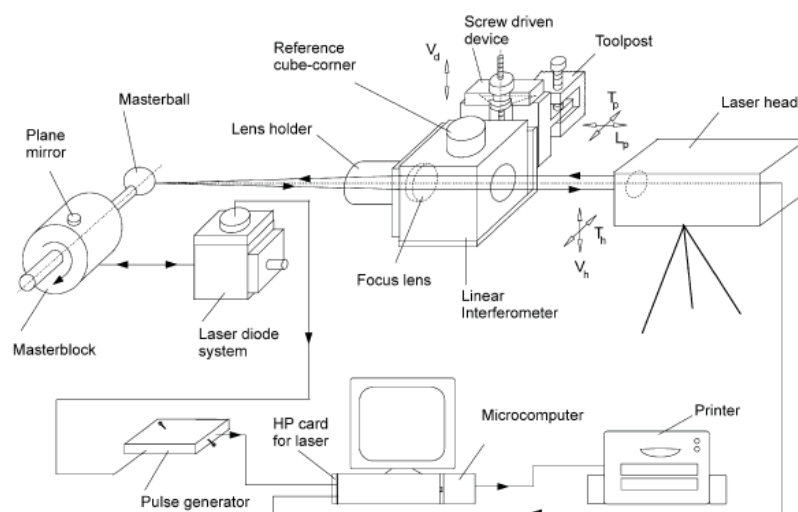


圖 1-2-7 H.F.F. Castro 使用干涉原理進行誤差量測[8]

量測，考慮精準度

圖 1-2-8。

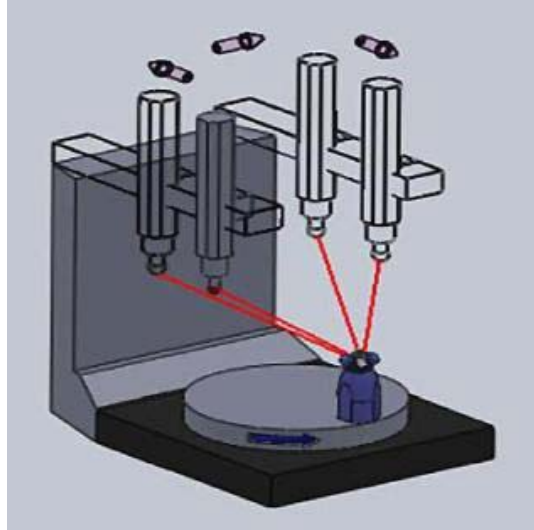


圖 1-2-8 Jindong Wang 使用雷射追蹤法來量測旋轉軸誤差[9]

Muhummad Madden 等[10]使用同心圓光柵來進行主軸誤差量測，將感測器分別放置在不同位置的光柵上方，利用正負二階繞射光可以得到水平位置的變化，利用反射光可以得到垂直高度的變化，藉由運算可以得到線性誤差與偏擺誤差。如圖 1-2-9。

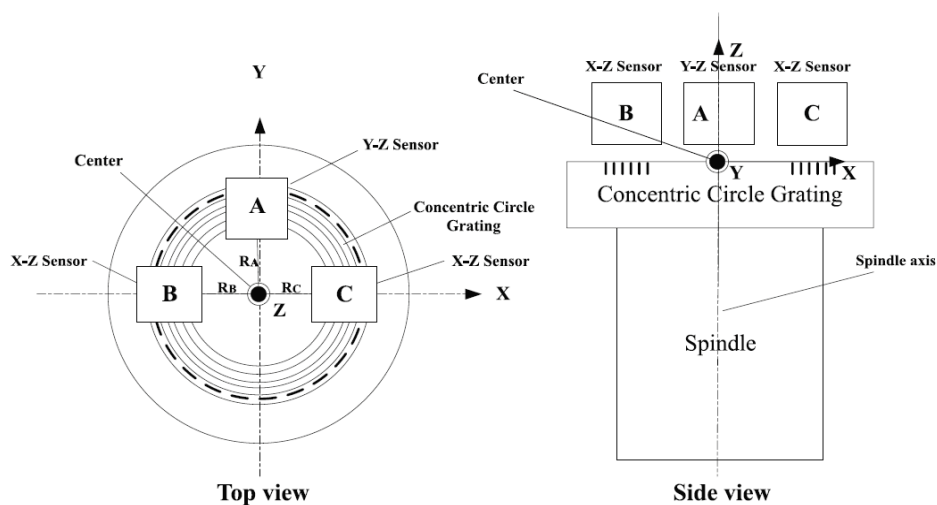


圖 1-2-9 Muhammad Madden 使用同心圓光柵進行主軸誤差量測[10]

Hiroshi Murakami 等[11]提出一種可以量測高速主軸誤差的方法。利用圓柱透鏡與球透鏡裝置在主軸上，當主軸誤差產生的時候，位置感測器可以得到旋轉軸徑向誤差、軸向誤差以及偏擺誤差。如圖 1-2-10。

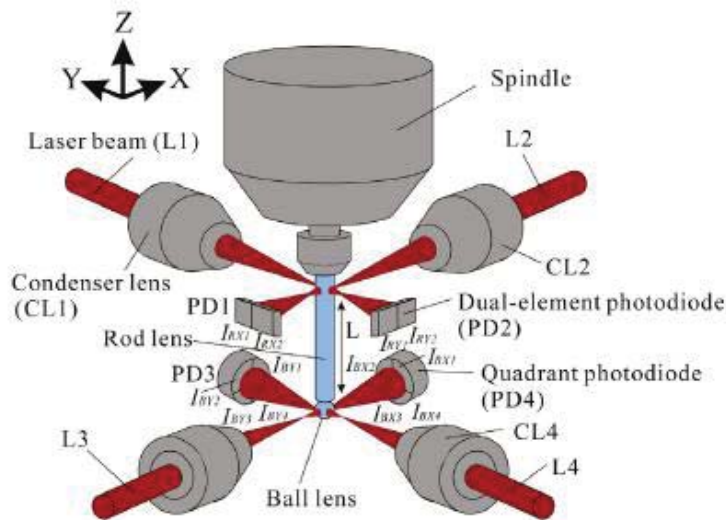


圖 1-2-10 Hiroshi Murakami 利用圓柱透鏡與球透鏡量測主軸誤差[11]

1-2-2 五軸工具機幾何誤差量測

日本 M. Tsutsumi、南韓 Dong-Mok Lee [12-15]等使用雙球桿量測五軸工具機的幾何誤差，透過各軸的相對運動，使得工件和加工點的距離維持相等。另外，控制不同運動模式，就可以得到不同的幾何誤差。如圖 1-2-11。



圖 1-2-11 以雙球桿進行幾何誤差量測[13]

瑞士 S. Weikert [16] 推出 R-test 方法來檢測五軸工具機幾何誤差。其架構為三個增量式探頭搭配一個標準球，如圖 1-2-12。當標準球隨著運動軌跡開始移動時，誤差的部分會反應在三個不同方向的探頭上。此方法可以量測旋轉軸的線性誤差，另外也可以量測五軸工具機 X-Y-Z 同動時的幾何誤差。另外也有多篇論文以 R-test 為基礎在分析。[17-19]



圖 1-2-12 R-test 裝置架設圖[16]

日本 Soichi Ibaraki 等[20]使用接觸式觸發探頭進行量測，可以校正五軸工具機產生的幾何誤差。如圖 1-2-13。

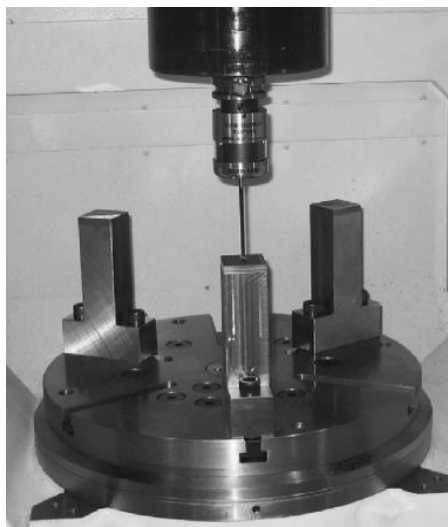


圖 1-2-13 使用接觸式觸發探頭進行幾何誤差量測[20]

Michael Gebhardt [21]和 Cefu Hong 教授等[22]使用在 ISO/DIS 10791-7 規範中 [23]的圓錐台測試來評估五軸工具機的幾何誤差。如圖 1-2-14，當運動軸進行運動時，同時進行切削工作，因此最後可以得到各個不同運動之下的切削面，最後再透過切削面的幾何量測結果去分析工具機的幾何誤差。

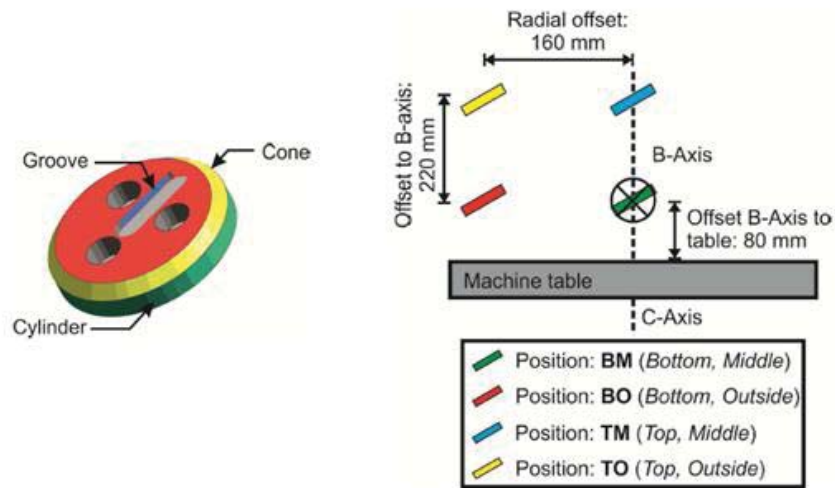


圖 1-2-14 使用圓錐台來進行幾何誤差分析[21]

Soichi Ibaraki 教授等[24]提出一套有別於圓錐台的方法，利用不同量測模式搭配邊緣切削使誤差累積在工件上，接著使用三次元量測儀得到工件尺寸後再回去推算誤差。如圖 1-2-15 是徑向誤差量測模式。

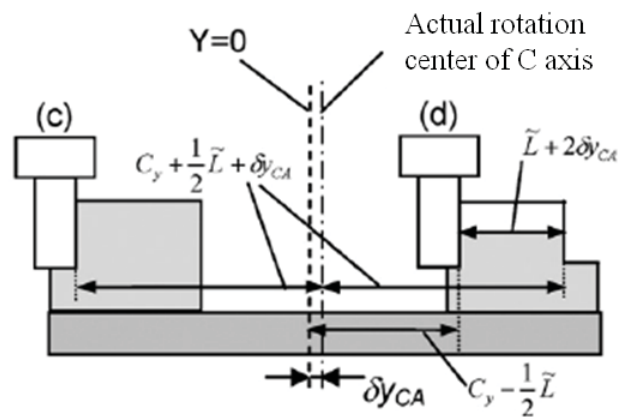


圖 1-2-15 使用不同的切削模型來進行幾何誤差分析[24]

覺文郁教授等[25]等開發出一套光學式的校正方法。當球透鏡產生位移後，經過透鏡的雷射光會產生相對應位移的變化，可以量測到 X-Y-Z 三個方向，如圖

1-2-16

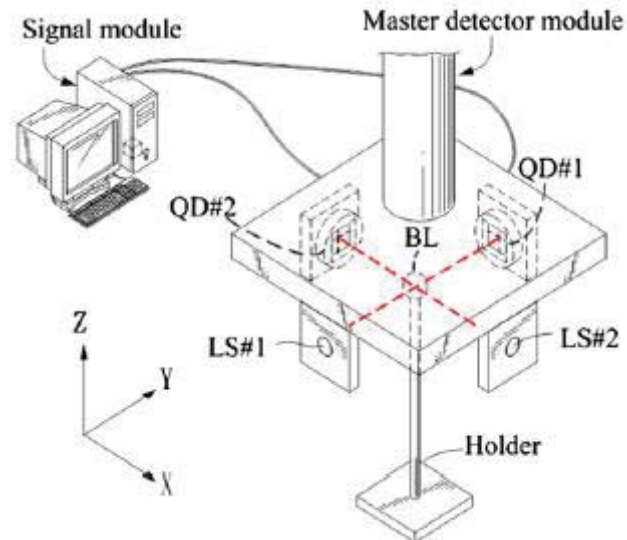


圖 1-2-16 使用球透鏡進行幾何誤差分析[25]

1-3. 研究方法與內容概要

本研究使用不同的方法去分離各個旋轉軸的基本誤差。

本文的內容分成下面幾個部分：第一部分是量測儀器與量測方法介紹，第二部分是量測結果誤差與分析，針對上述研究方向，本論文分成下列幾個章節進行討論：

第一章 緒論

針對研究動機部分加以說明並回顧相關文獻的內容。

第二章 實驗儀器與設備

針對實驗儀器的部分進行介紹，分成感測器、旋轉台、多面稜鏡進行介紹。

第三章 量測系統

介紹旋轉台偏擺量測系統與偏心量測系統，並針對結果進行評估與分析。

第四章 誤差分析

針對實驗架設中的各個誤差進行分析與說明

第五章 結果與討論

針對分析之後的結果進行討論

第六章 結論與未來展望

本研究之結論與未來可以發展的方向。



第二章 實驗儀器與設備



2-1. 感測器

2-1-1 自動視準儀

本實驗所使用的角度感測器是由台大黃梓楠等研製之自動視準儀[26, 27]。其基礎是建立在光電感測器的使用上。光電感測器可以用來感測光點在二維平面上位置的變化量，其原理如光二極體(Photodiode)。光二極體能夠將光訊號轉換為電流訊號，照射在感光二極體上的光強度決定了電流的輸出大小，透過積體電路可以將電流放大，並轉換成電壓訊號。儀器中使用的為四象限光感測器(QPD, Quadrant Photodetector)，是由四片面積接近，且光電性質相同的光感測器所組成，如圖 2-1-1 所示，其主要材料為矽，中央間隔約為 2 至 12 μm 。當光點投射在感測器上時，隨著光點的位置不同，每一個象限接收到的光強不同，訊號輸出也將不同。可利用簡單的電路對各感測器的輸出做處理，即可得知光點的位置差異，如式(2.1)、(2.2)所示。

$$X = K_X \frac{(V_A + V_D) - (V_C + V_B)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (2.1)$$

$$Y = K_Y \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (2.2)$$

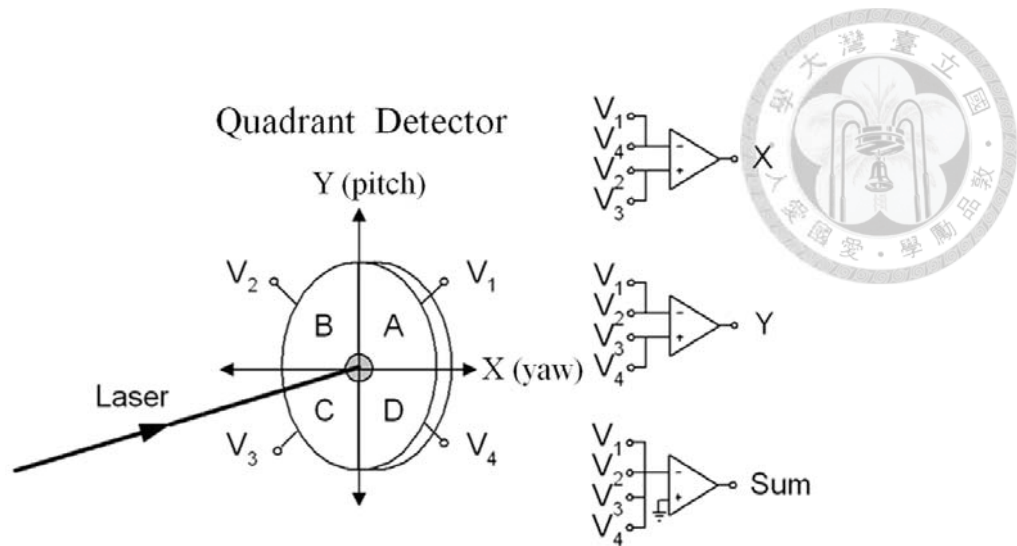


圖 2-1-1 四象限感測器光點位置與輸出電壓關係圖

在訊號處理部份，使用的是如圖 2-1-2 的訊號電路圖，感光二極體將光訊號轉成電流訊號後，透過運算放大器進行電流-電壓轉換，最後四個電壓訊號經過差動放大器(Differential Amplifier)、加法放大器(Summing amplifier)即可計算光點位置。

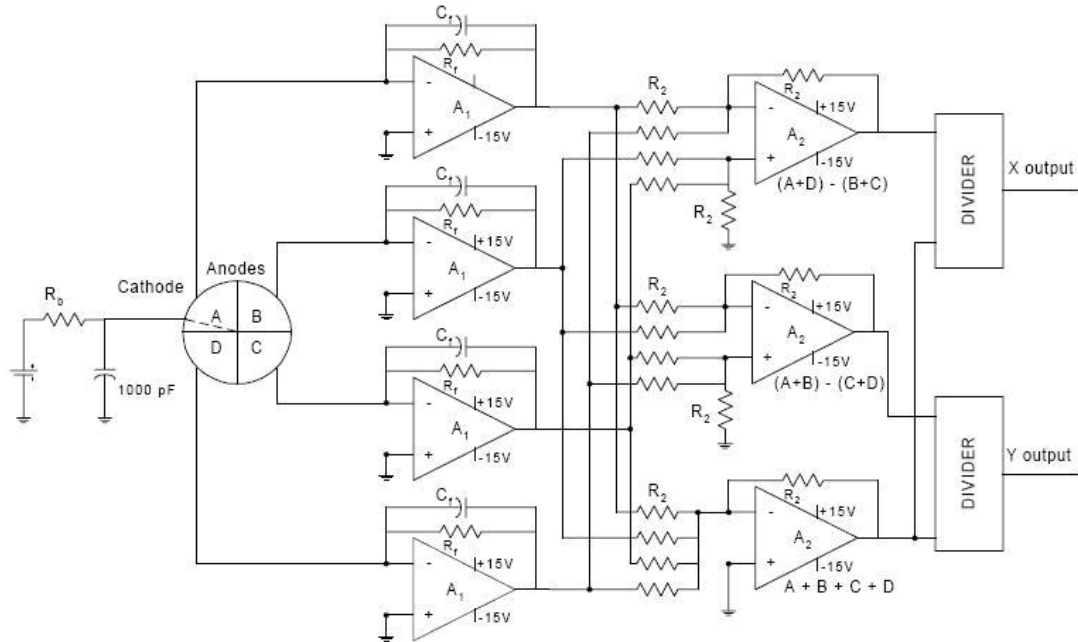


圖 2-1-2 四象限訊號處理電路圖

自動視準儀能夠量測微小角度，是一種靈敏且精確的光學儀器。圖 2-1-3 為其

量測原理，圖中一開始平面反射鏡置於光束通路中並與聚焦透鏡的幾何軸心成正交，將光沿著傳送路線再反射到光源處。當反射鏡與光線成 θ 之微小角度傾斜時，光從傳送路線以等於 2θ 之角度反射，通過透鏡反射光束的任何部分，將被再集中到與焦點相距 $f \cdot \tan 2\theta$ 大小於聚焦平面。

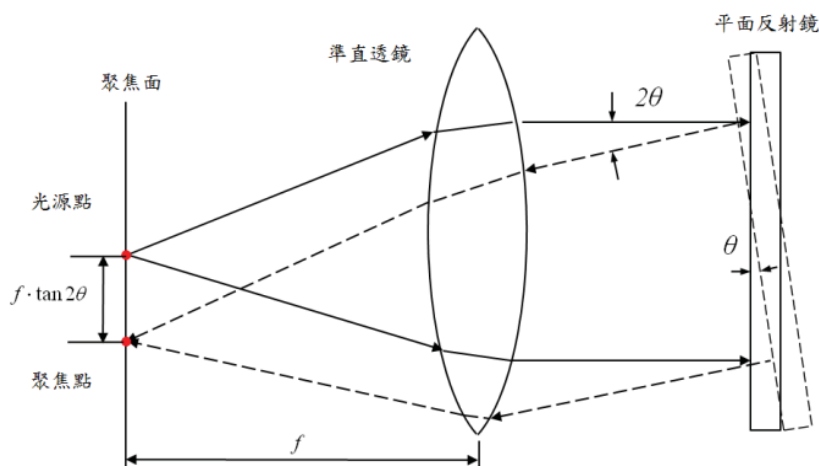


圖 2-1-3 自動視準儀原理示意圖

實際自動視準儀的架構，如圖 2-1-4 所示，感測器元件分別為：準直雷射二極體光源(Collimated LD)、偏極化分光鏡(PBS, Polarizing beam splitter)、四分之一波片(QWP, Quarter-wave plate)、聚焦透鏡(Focusing Lens)，與四象限感測器(QPD, Quadrant Photodiode)。光路圖的部分如圖 2-1-5 所示：雷射光經雷射二極體發出後，通過偏極化分光鏡及四分之一波板後，打在反射鏡上，雷射光由反射鏡反射後，再次通過四分之一波板，其偏極方向已改變，故再進入偏極化分光鏡以後，會被反射由而聚焦透鏡匯聚在四象限感測器上；當反射鏡有一角度變化時，其雷射光會與原光路產生一角度變化在聚焦透鏡上，而聚焦到四象限上時，就會有電壓變化，藉著取得電壓以及角度變化的關係，即可得到電壓變化時，對應到的角度變化為多少。

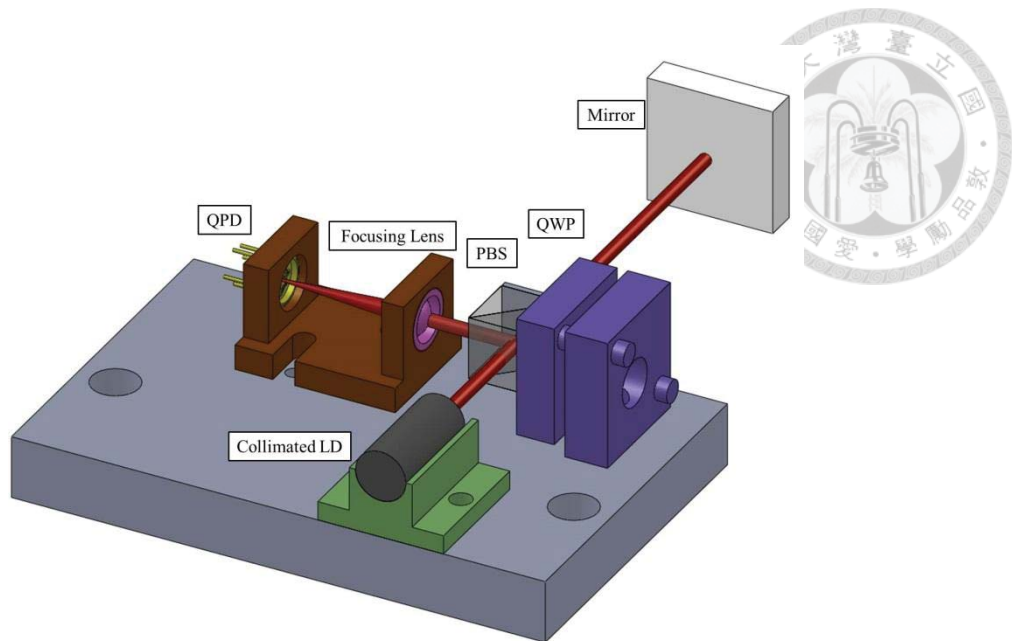


圖 2-1-4 自動視準儀架構圖

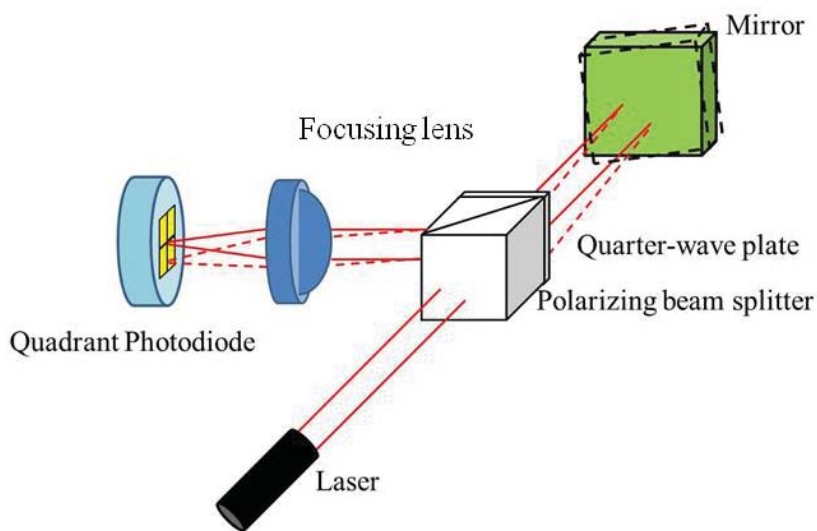


圖 2-1-5 自動視準儀光路設計

2-1-2 自動視準儀校正

為了瞭解自動視準儀系統之性能，架設精度比對實驗，如圖 2-1-6 所示；將自動視準儀和 HP5529A 雷射干涉儀的鏡組擺在同一個角度旋轉平台上，同時讀取旋轉平台上之偏擺角度，並就兩儀器之輸出數值進行靜態校正比對。以 HP5529A 讀

值為量測依據，校正範圍設定在 ± 150 arc-sec。Yaw 比對結果如圖 2-1-7 所示；Pitch 比對結果如圖 2-1-8 所示。如圖中所呈現的結果，可以發現 HP5529A 與微型 Autocollimator 輸出之角度值幾乎重疊，將其校正倍率代入後計算其量測殘差，圖 2-1-9 為 Yaw 量測殘差；圖 2-1-10 為 Pitch 量測殘差。在 ± 150 arc-sec 的量測範圍內大部分殘差在 ± 1 arc-sec 內。

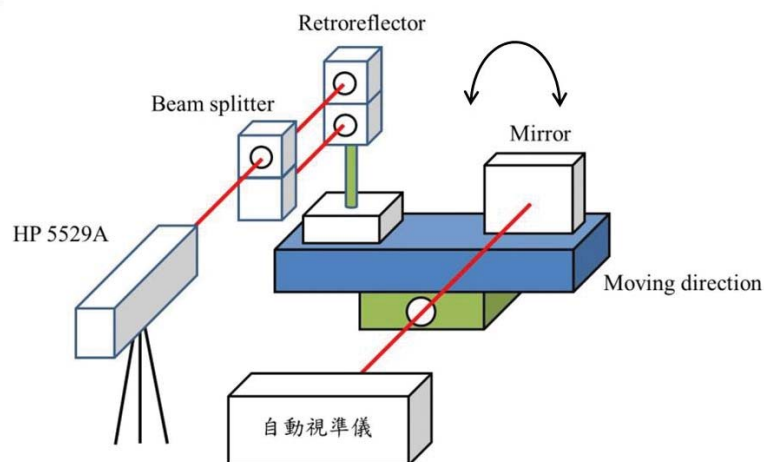


圖 2-1-6 自動視準儀 Pitch 校正示意圖

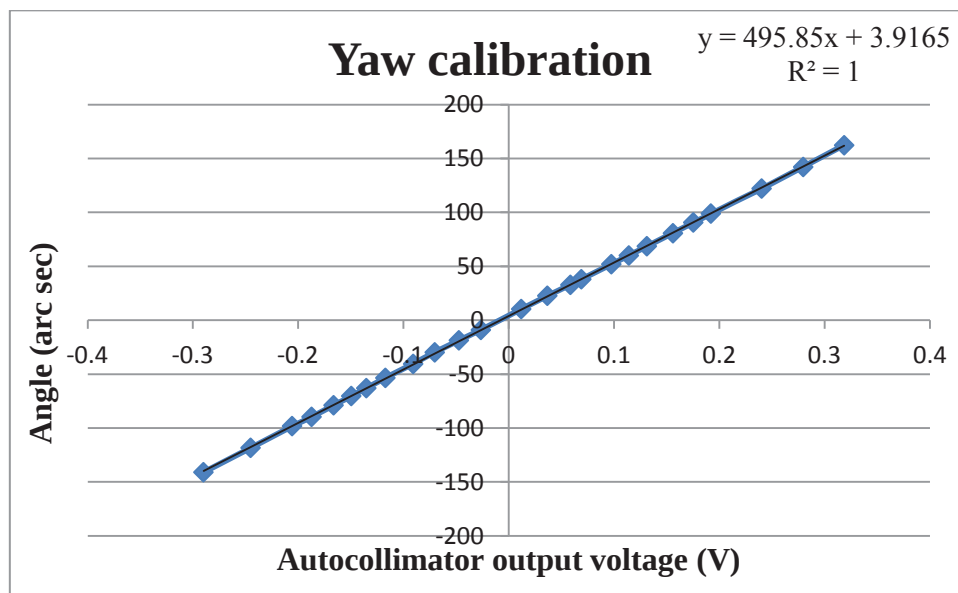


圖 2-1-7 自動視準儀 Yaw 與雷射干涉儀校正結果

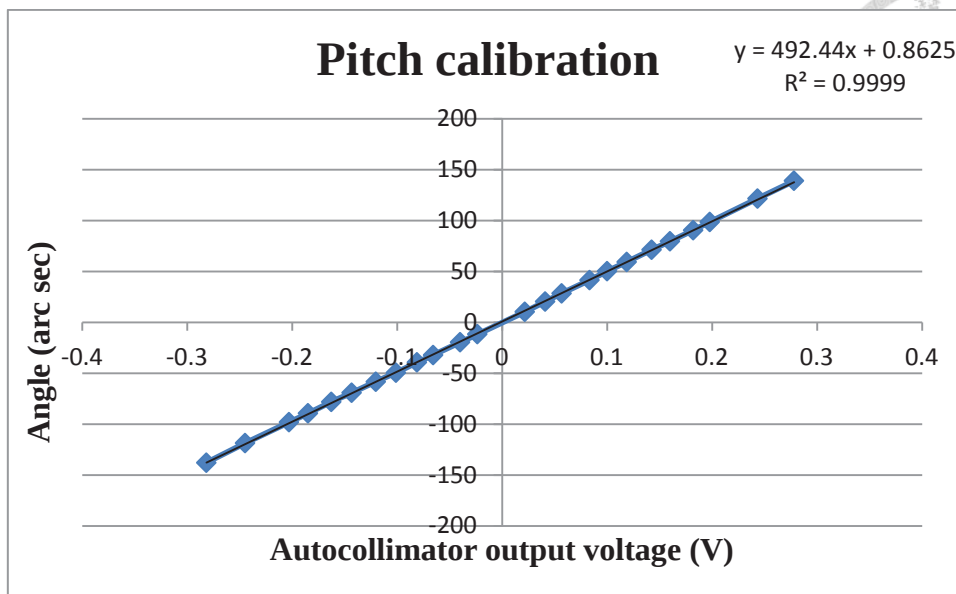


圖 2-1-8 自動視準儀 Pitch 與雷射干涉儀校正結果

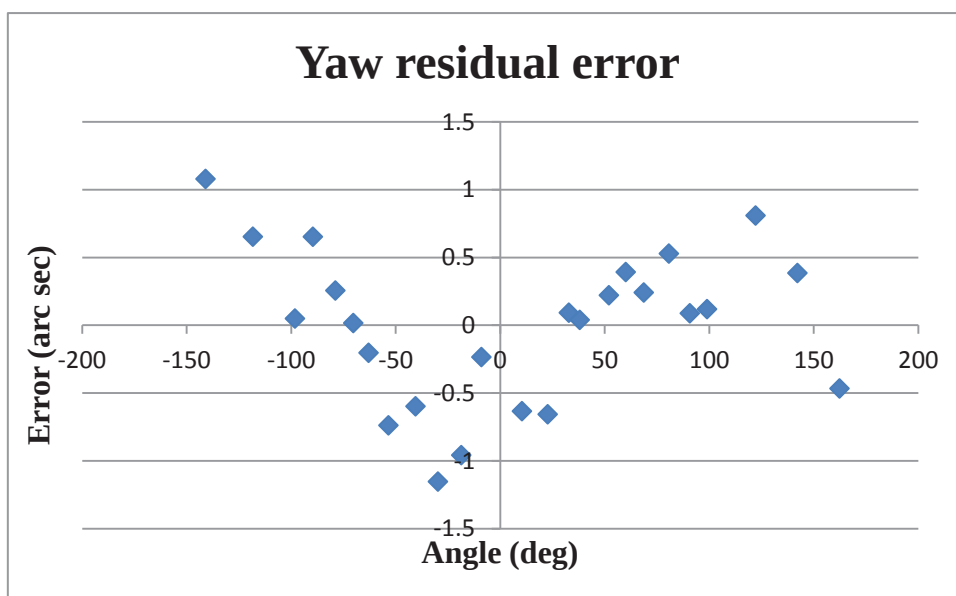


圖 2-1-9 自動視準儀 Yaw 量測誤差

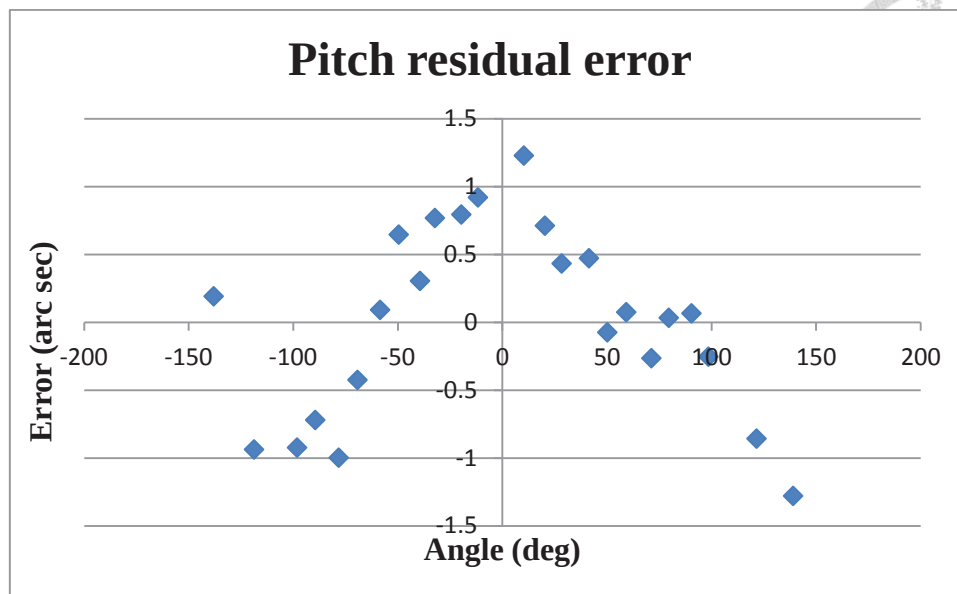


圖 2-1-10 自動視準儀 Pitch 量測誤差

2-1-3 位移感測器

位移感測器能夠感測微小線性位移量的變化。量測基本原理是利用光點在光感測器上位置的變化。不過由於角度的變化也會造成光點在光感測器上位置的變化，所以反射鏡的部分使用抗偏擺的角耦稜鏡(corner cube)作為反射鏡。位移感測器的架構與自動視準儀相近，只不過少了聚焦透鏡。

2-2. 旋轉台

2-2-1 旋轉台介紹

實驗中所使用的是Parker旋轉台，如圖 2-2-1，旋轉機構是使用蝸桿蝸輪機構。推動蝸桿的是步進馬達(OEM57-83)，其作用原理是透過電流來控制轉動角度的大小，配合 Parker 設計的 OEM750 驅動器，經 RS232 與電腦進行通訊達到控制目的。其運作示意圖如圖 2-2-2。OEM750 內針對每轉一圈的解析度設定為 36000。搭配減速比 180：1，最小可控制的範圍在 0.2 arc-sec。

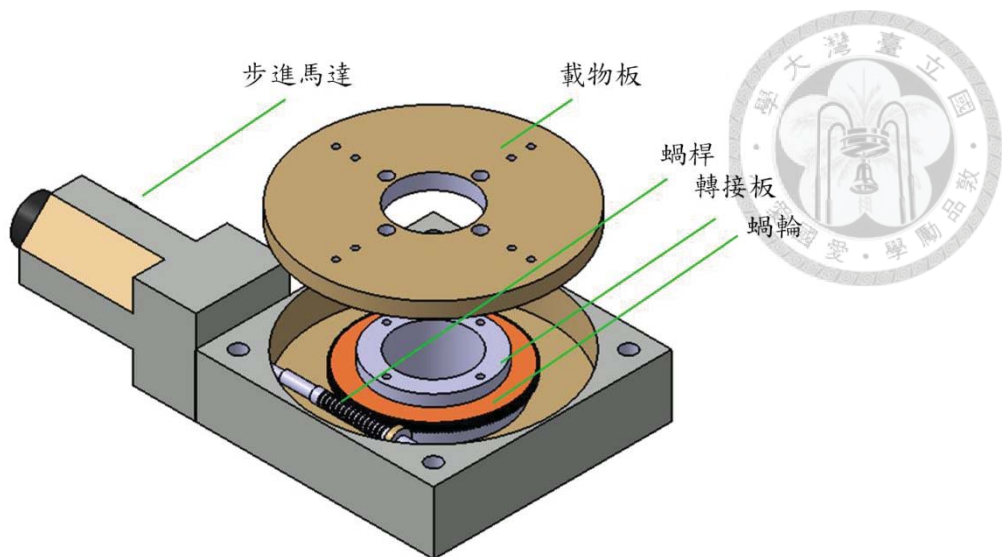


圖 2-2-1 旋轉台機構示意圖

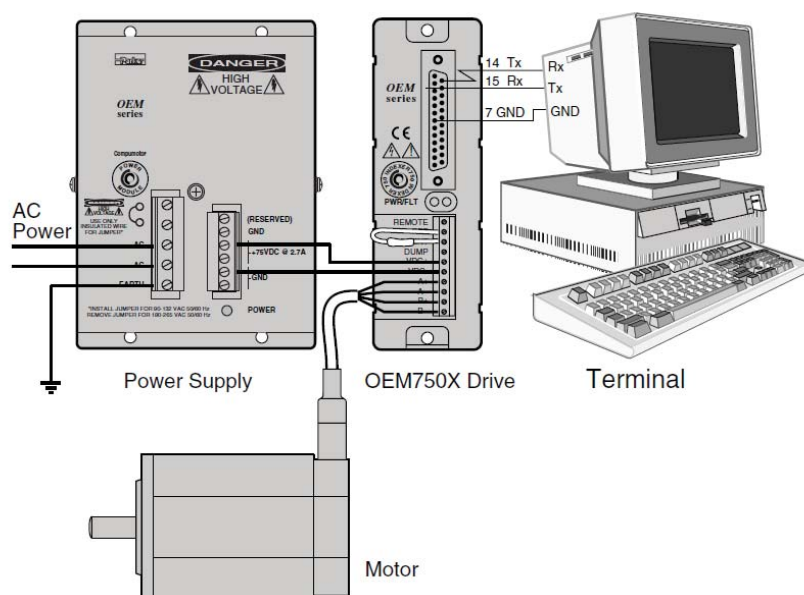


圖 2-2-2 旋轉台運作示意圖

2-2-2 定位精度與重複精度

在旋轉台的出廠規格中，旋轉台的定位精度為 0.05 度(180 arc-sec)；重複精度為 0.01 度(36 arc-sec)。在進行旋轉軸量測前，利用 Autocollimator 與二十四面稜鏡

進行定位精度、重複精度檢驗。實驗架設如圖 2-2-3，將二十四面鏡放置在旋轉台上，逆時針每轉 15 度記錄一次數值。圖 2-2-4 為旋轉五圈之後得到的平均值，其定位誤差範圍為 130 arc-sec，仍然符合當初出場的規格。

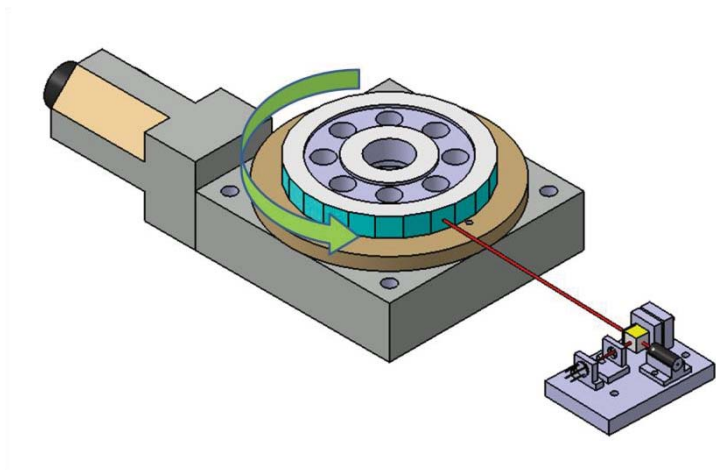


圖 2-2-3 旋轉台定位精度與重複精度檢驗

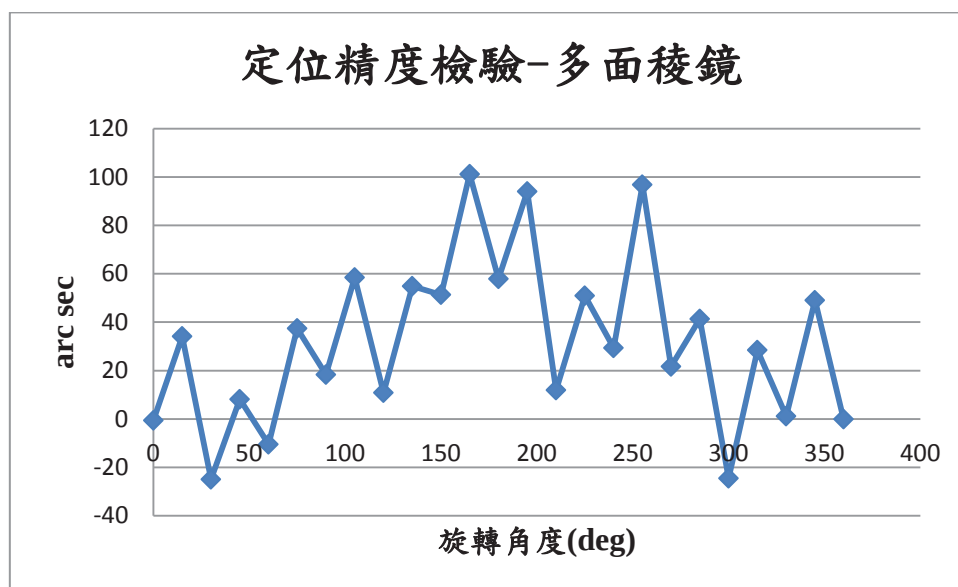


圖 2-2-4 旋轉台定位精度檢驗

重複精度的部分，將量測結果 x_i 由式子(2.3)計算出算數平均數 $\bar{x}$ 。接著使用標準差公式(2.4)，去計算標準差 σ 。(N 為量測次數)

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (2.4)$$



計算的結果是其重複精度約在 6 arc-sec 以內。如圖 2-2-5。

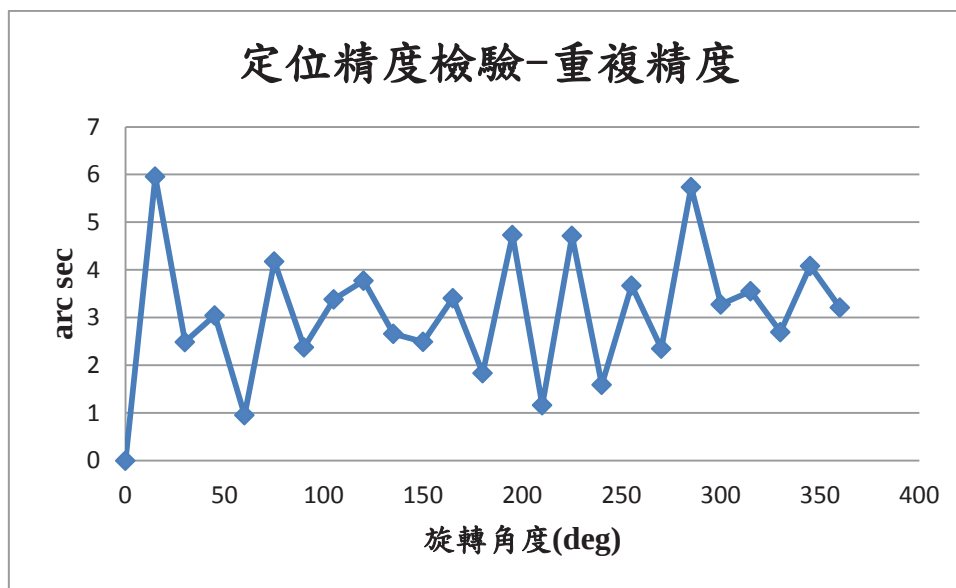


圖 2-2-5 重複精度與量測跳動量比較

2-2-3 盤面偏心校正

旋轉台面上的承載面可以透過螺絲孔位進行位置微調，將千分錶放在旋轉台承載面側邊，邊旋轉邊調整使其偏位減至最小，如圖 2-2-6。

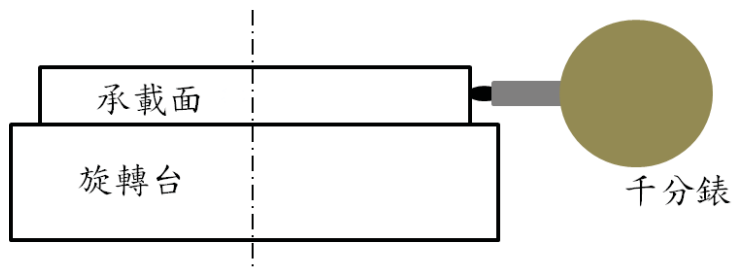


圖 2-2-6 旋轉台面偏心校正



2-3. 多面稜鏡(polygon)

2-3-1 多面稜鏡校正標準

在使用二十四面鏡進行量測時，必須瞭解多面稜鏡的誤差及其來源。最初在使用二十四面鏡時，很多地方想要針對二十四面鏡進行校正與比對，但是每一次的量測結果都不吻合。在二十世紀末，設立了一個檢驗二十四面鏡的方法[28]。在這標準中規範了下列項目：

1. 多面稜鏡支撐裝置：能固定多面稜鏡，進行偏擺微調，如圖 2-3-1。
2. 調整多面稜鏡中心位置使其與旋轉軸同軸，偏心範圍在 $\pm 100\mu\text{m}$ 以內。
3. 自動視準儀須對準旋轉軸中心，光路能短的話盡量短。
4. 量測之前進行鏡面的清理。
5. 透過自動視準儀與支撐裝置調整座，使旋轉台面與旋轉軸盡量同軸，偏擺範圍在 $\pm 10 \text{ arc-sec}$ 以內。

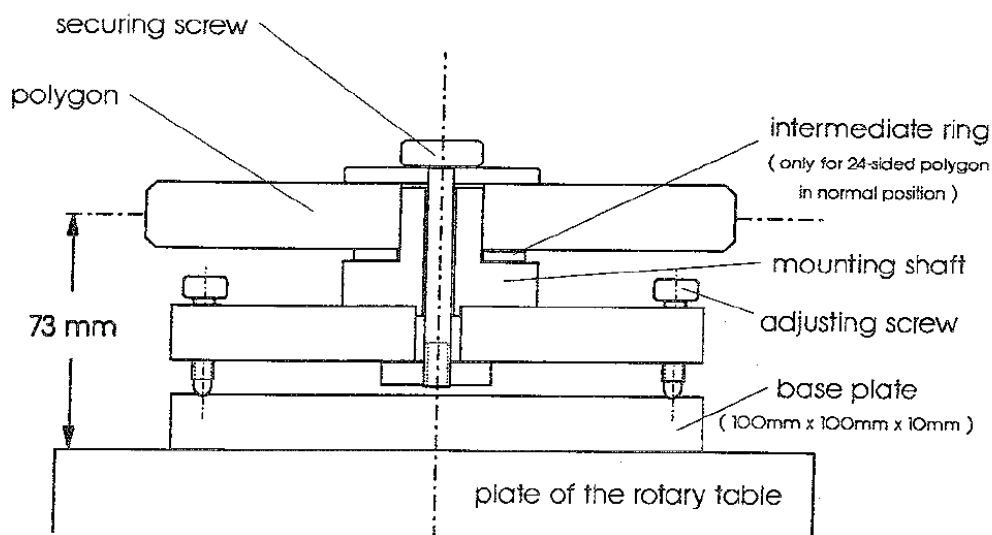


圖 2-3-1 多面稜鏡校正裝置

在這標準模式操作下，可以得到不同地方針對多面稜鏡的量測結果，其整理如圖 2-3-2。在旋轉定位為精準的情況下，同一個面的量測結果之標準差不會超過 0.30 arc-sec。估計其誤差是來自於反射面的平坦度。

Laboratory	PTB	OFMET	NMI	VTT	IMGC	SMU	LNE	GUM	s_i	s_i^*
Result No.	1	2	3	4	5	6	7	8		
Face No.	values in arcsec									
1	-0,01	-0,03	0,84	-0,05	-0,01	-0,01	0,00	-0,03	0,30	0,02
2	-0,03	-0,03	-0,34	-0,46	0,05	-0,01	0,02	0,03	0,19	0,18
3	0,01	0,00	-0,29	0,19	-0,05	-0,01	0,01	0,03	0,13	0,08
4	-0,04	0,00	-0,29	-0,34	0,24	-0,02	0,01	0,42	0,25	0,24
5	-0,01	0,01	-0,52	0,01	-0,02	0,01	0,00	0,10	0,19	0,04
6	0,00	0,02	0,02	0,14	-0,09	0,03	-0,01	-0,02	0,06	0,07
7	0,03	0,04	0,37	-0,17	-0,20	0,08	-0,03	-0,37	0,22	0,16
8	0,02	0,00	0,01	0,75	-0,19	0,01	0,00	-0,06	0,29	0,31
9	-0,01	0,03	0,30	-0,43	-0,02	0,03	-0,01	-0,21	0,21	0,17
10	0,00	0,00	-0,08	0,10	0,08	-0,03	0,01	0,26	0,11	0,10
11	0,01	-0,01	-0,42	0,42	-0,10	-0,01	0,01	0,06	0,23	0,17
12	-0,03	-0,03	0,10	-0,45	0,28	-0,03	0,01	0,05	0,20	0,21
13	0,01	-0,01	0,50	0,09	-0,15	0,02	0,00	-0,36	0,27	0,15
14	-0,01	-0,02	-0,17	-0,06	0,00	0,00	0,01	-0,02	0,06	0,02
15	-0,02	0,01	0,04	-0,42	0,04	0,01	0,00	-0,10	0,15	0,16
16	-0,02	-0,02	0,40	-0,22	0,24	-0,02	0,00	0,08	0,19	0,14
17	-0,01	0,00	-0,46	0,05	-0,05	0,03	0,00	0,09	0,17	0,05
18	0,00	0,00	-0,10	0,15	0,13	-0,06	0,01	0,14	0,09	0,08
19	-0,01	0,01	-0,16	0,18	0,01	0,00	0,00	0,26	0,13	0,11
20	-0,01	0,01	-0,30	-0,39	0,10	0,00	0,00	0,06	0,18	0,16
21	0,04	0,02	0,09	0,33	-0,03	-0,04	0,00	-0,10	0,13	0,14
22	0,03	0,00	0,38	-0,13	0,11	-0,01	-0,01	-0,05	0,15	0,07
23	0,03	0,01	-0,05	0,25	-0,19	0,04	-0,01	-0,14	0,13	0,14
24	0,04	-0,01	0,03	0,46	-0,18	-0,02	0,00	-0,11	0,19	0,21
s_j	0,02	0,02	0,34	0,32	0,14	0,03	0,01	0,18		

Table 7.2 : 24-sided polygon, measured on 24 faces in **normal** position.
Differences of the reduced angle deviations from the weighted mean of the faces.
Last two columns : Standard deviations s_i of the results for each face No. i
Standard deviations s_i^* of seven results, excluding NMI (see Section 6.5, Figure 11)
Last row : Standard deviations s_j of the faces for each result No. j

圖 2-3-2 多面稜鏡在標準模式下的校正結果

在擁有標準之後，接著針對多面稜鏡的量測結果進行分析以及面與面之間夾角誤差。

2-3-2 多面稜鏡誤差校正 — 夾角誤差

在使用多面稜鏡來量測定位誤差時，必須先對其夾角誤差進行校正[29, 30]。

實驗示意圖如圖 2-3-3，Face A 和 Face B 分別為兩台 Autocollimator 所面對的鏡面，

R1 和 R2 分別為其所量測到的數值。 S_i 為第 i 鏡面與下一鏡面垂直方向的夾角， T

為兩台 Autocollimator 之間的夾角。由圖 2-3-3 可以得到式子(2.5)。

$$S_i + R_1 = T + R_2 \quad (2.5)$$

將公式整理之後可以得到式子(2.6)

$$\sum_{i=1}^{24} S_i = \sum T + \sum (R_2 - R_1) \quad (2.6)$$

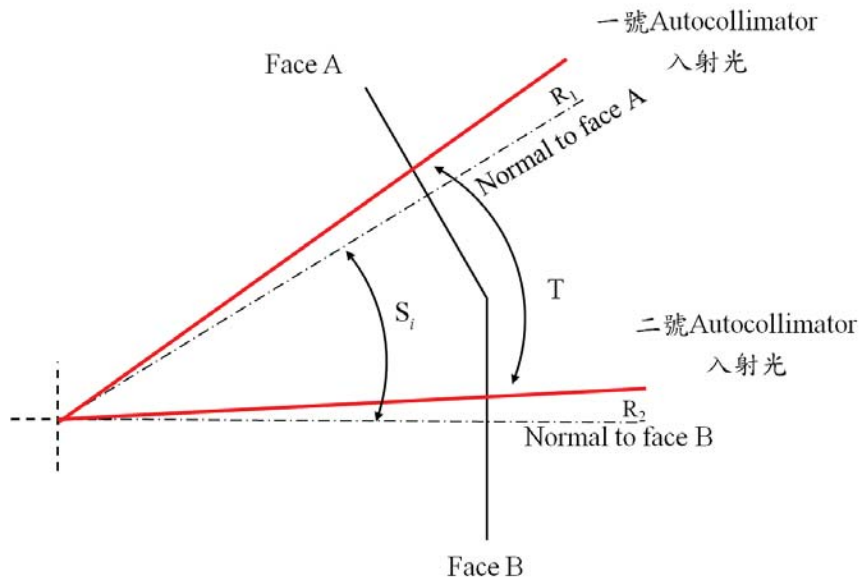


圖 2-3-3 使用雙自動視準儀校正面鏡誤差示意圖

又 $\sum S_i = 360^\circ$ ，再將式子(2.6)的結果除以 24 後，可以得到式子(2.7)。

$$\frac{360^\circ}{24} = \frac{\sum T}{24} - \frac{\sum (R_2 - R_1)}{24} \quad (2.7)$$

當中 R_1 和 R_2 值分別為在不同面上的量測值，因此由式子(2.7)，可以得到兩台自動視準儀的夾角 T ，接著透過式子(2.5)，代入在第 i 面與其下一個面的視準儀量測值，即可得到兩個面之間的夾角，如式子(2.8)。再將兩面之間的夾角減去理論值，即可得到夾角誤差如式子(2.9)。

$$S_i = T + (R_2 - R_1) = 15^\circ - \frac{\sum (R_2 - R_1)}{24} + (R_2 - R_1) \quad (2.8)$$

$$E_i = S_i - 15^\circ = (R_2 - R_1) - \frac{\sum(R_2 - R_1)}{24} \quad (2.9)$$

使用實驗室多面稜鏡進行量測的結果如下，當中偏擺部分的量測結果如圖 2-3-4，一號和二號自動視準儀所量測的偏擺範圍大約 ± 15 arc-sec，接近校正標準。而圖 2-3-5 為十次量測中，代入公式後的計算結果，其中兩兩面的夾角誤差在正負 2 arc-sec 內，而誤差的標準差範圍在 0.07 到 0.2 角秒之間。

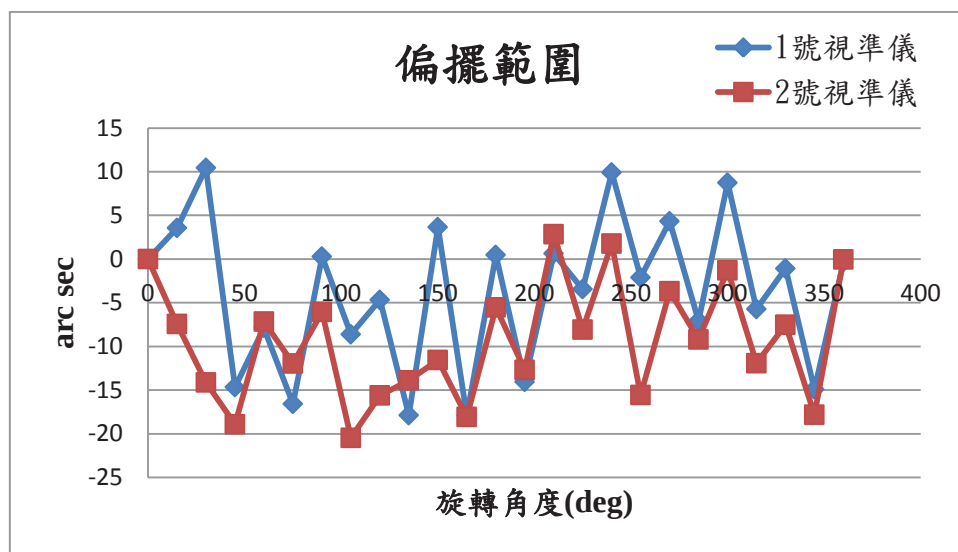


圖 2-3-4 多面稜鏡校正時的偏擺範圍

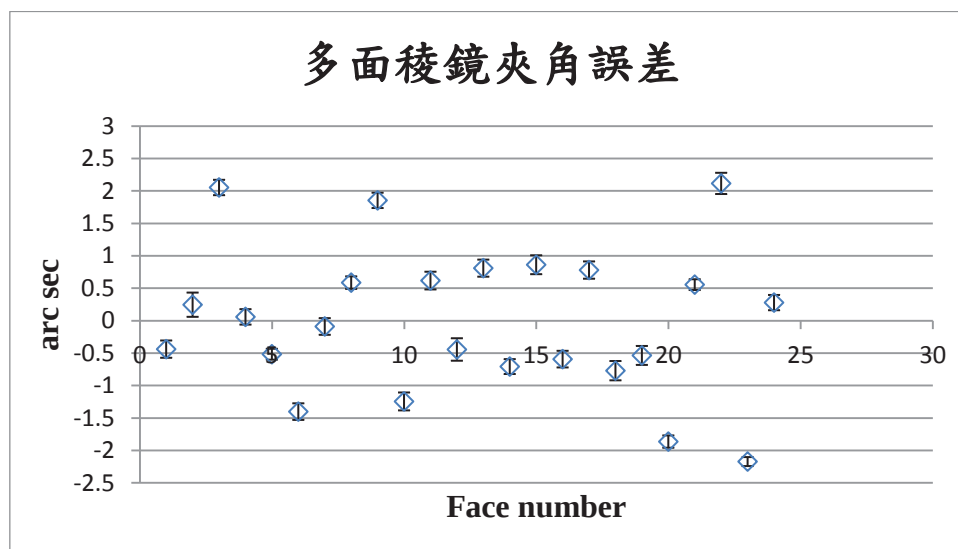


圖 2-3-5 多面稜鏡夾角誤差

第三章 量測系統



為了分析旋轉台誤差之間的相互關係，必須擁有可量測旋轉台幾何誤差的量測系統。本章節主要介紹旋轉台偏擺與旋轉台偏心的量測系統。

3-1. 旋轉台偏擺量測系統

3-1-1 量測系統架設

以下使用三種旋轉軸偏擺量測方法。

第一種量測方法如圖 3-1-1 使用千分錶進行偏擺量測圖 3-1-1，使用千分錶來量測承載面上因偏擺造成的起伏誤差。當 R 接近零時，偏擺誤差的影響很小，因此所量測到的值幾乎就是軸向誤差。當 R 拉大至接近承載面半徑時，就可以量到偏擺造成的台面起伏。因偏擺的分量會隨著不同旋轉角度而改變，所以透過量測結果可以得到實際台面的偏擺誤差。

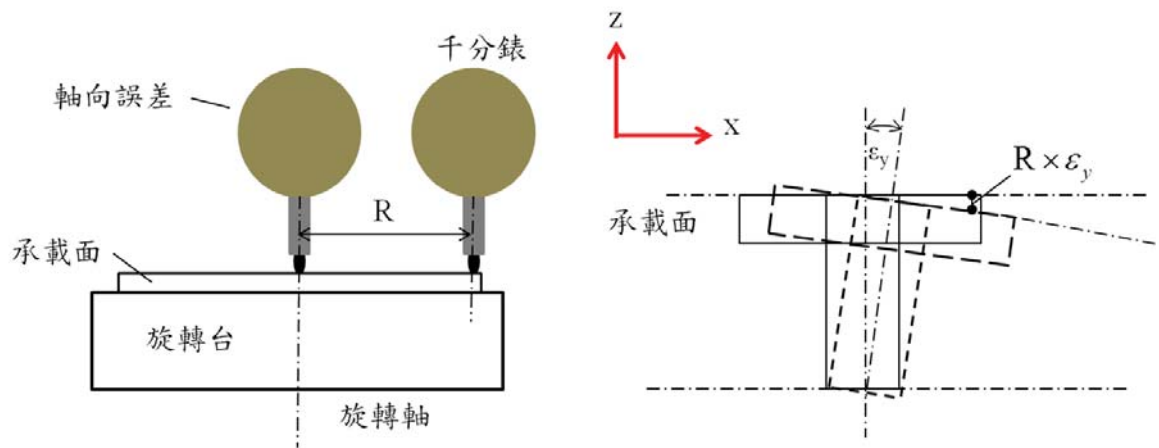


圖 3-1-1 使用千分錶進行偏擺量測

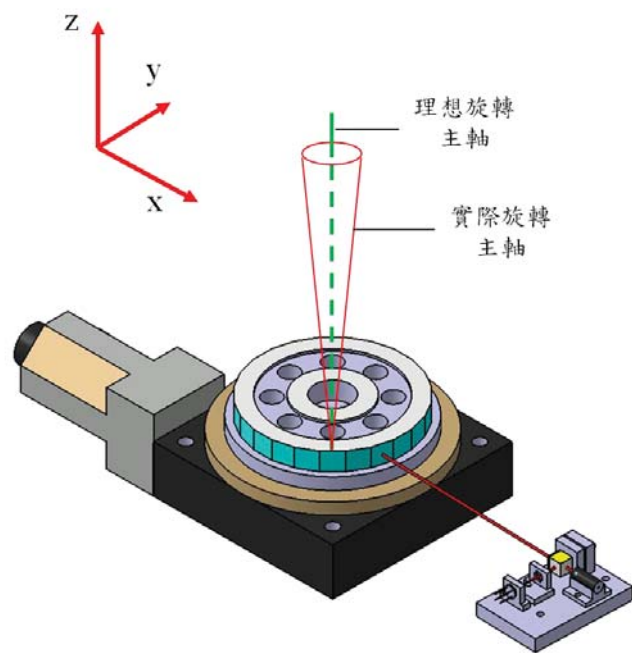


圖 3-1-2 使用自動視準儀搭配二十四面鏡進行偏擺量測

第二種方法是由二十四面稜鏡搭配自動視準儀進行量測，如圖 3-1-2。X 方向為自動視準儀的入射方向。擺放上盡量使多面稜鏡和承載面貼齊以減少架設誤差，如圖 3-1-3。另外多面稜鏡必須盡量接近旋轉中心。

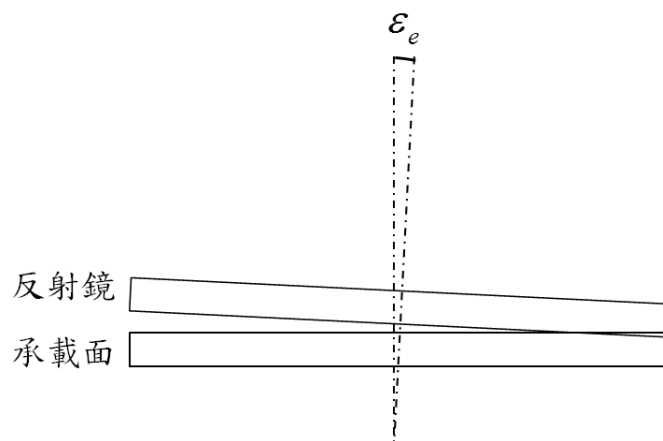


圖 3-1-3 反射鏡的架設誤差

第三種方法架設圖如圖 3-1-4。自動視準儀延著旋轉軸方向入射承載面，在承載面上放置塊規作為反射鏡，反射之後自動視準儀可以得到因偏擺造成的角度變

化量。使用塊規的原因是因其正好同時擁有高平行度及反射兩種特性，其平坦度可以在 $0.15\mu\text{m}$ 以內。不過，要將塊規固定在承載面上又不產生架設誤差其實不容易，因此在塊規與承載面之間加入另外一個同樣擁有高平行度的光學平板。光學平板的平坦度在 $0.1\mu\text{m}$ 以內，因此可以和塊規以扭合的方式結合，達到去除架設誤差的效果。

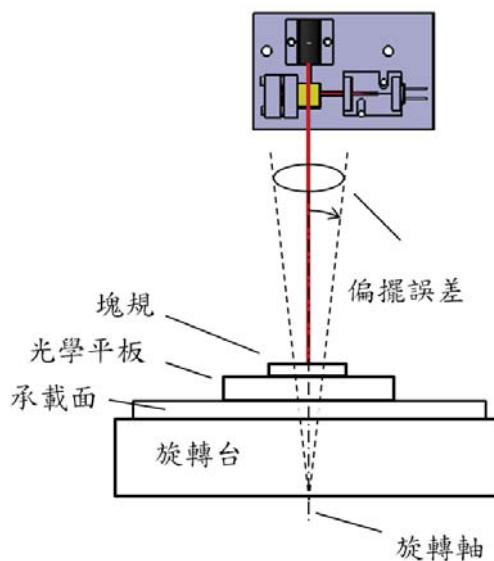


圖 3-1-4 以塊規作為反射鏡進行偏擺量測

3-1-2 偏擺模擬與分析

在分析量測結果前，首先在這邊針對偏擺進行初步探討。當旋轉台產生偏擺時，其示意圖如圖 3-1-5， ε_t 為旋轉台偏擺大小， $\theta_z(0)$ 為偏擺在座標系上的起始方位角，這個角度的大小會和一開始定義座標系的方位有關。當旋轉台轉動之後， ε_t 的位置會隨著旋轉角度不同而跟著改變，其分量 ε_x 和 ε_y 也會跟著變化。

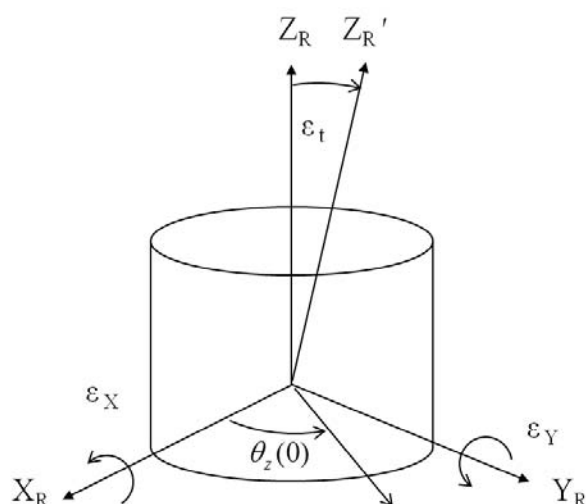


圖 3-1-5 偏擺的大小與方位角

為了了解 ε_x 和 ε_y 的變化趨勢，在此使用 Catia 建立一個模型進行分析，如圖 3-1-6。旋轉台上的旋轉軸座標系，多面稜鏡上的是偏擺座標系。當偏擺大小為零時，兩個座標系之間並沒有角度誤差產生。但是當偏擺產生以後，兩個座標就會彼此分離。如圖 3-1-7，左上、左下和右上的圖分別是上視圖、右視圖及正視圖，由此可見， ε_x 和 ε_y 是和偏擺的方位角有關。若此時加入旋轉角度的變化，利用 Catia 內建角度量測的功能，如圖 3-1-8，就可得到不同旋轉角度下， ε_x 和 ε_y 的理論值。將其結果與弦波比對，可以得到圖 3-1-9，其變化的趨勢幾乎和弦波一致。弦波的振幅代表偏擺大小，與 $\cos$ 弦波的相位差即為偏擺的方位角。

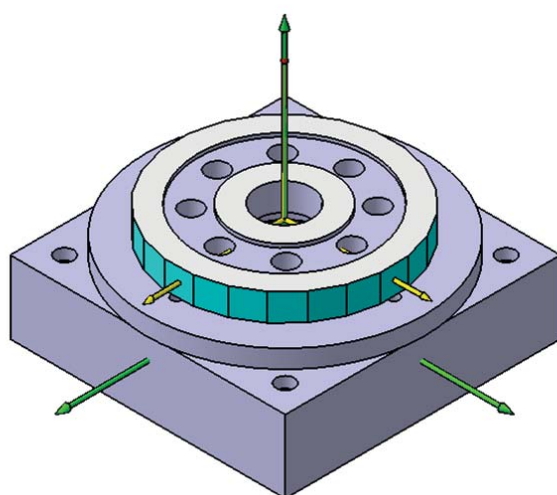


圖 3-1-6 Catia 偏擺模型

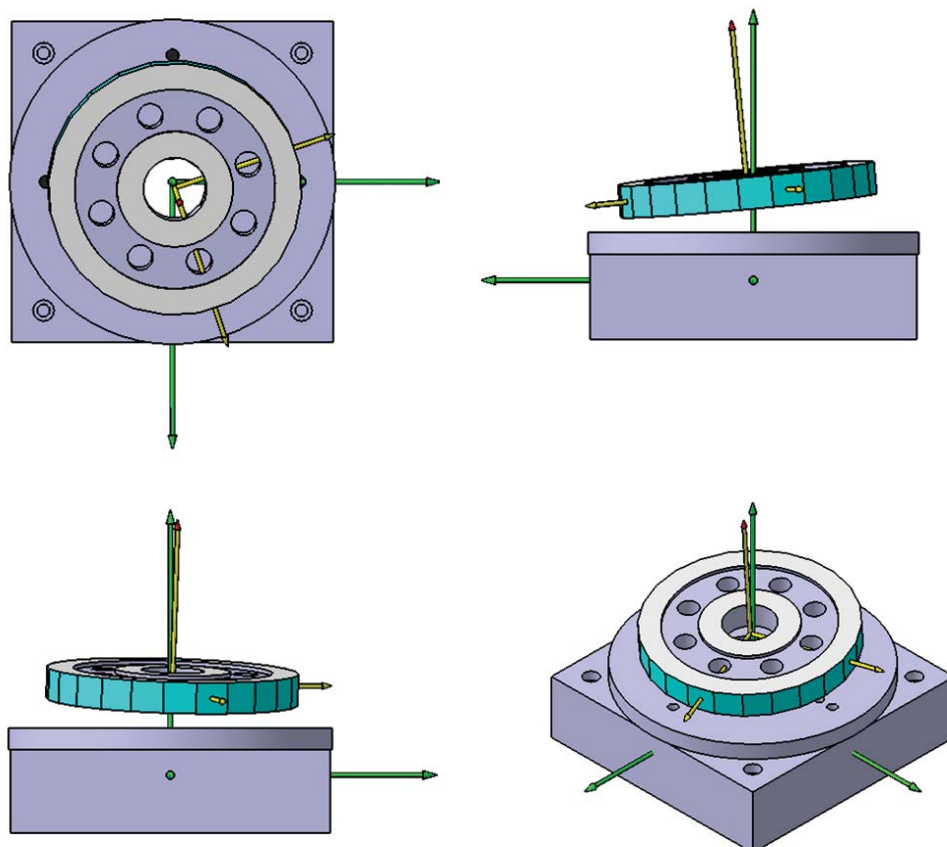


圖 3-1-7 偏擺發生的模型

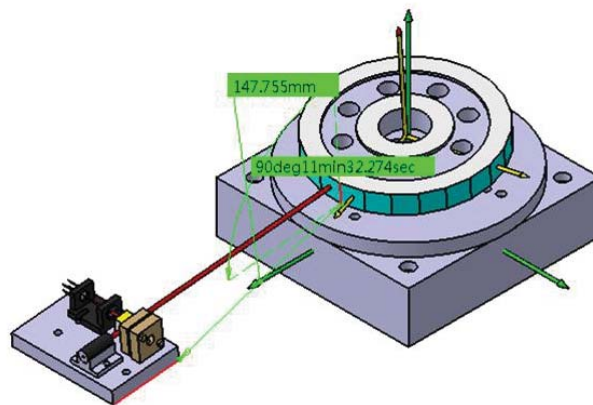


圖 3-1-8 模擬不同旋轉角度下自動視準儀的量測值

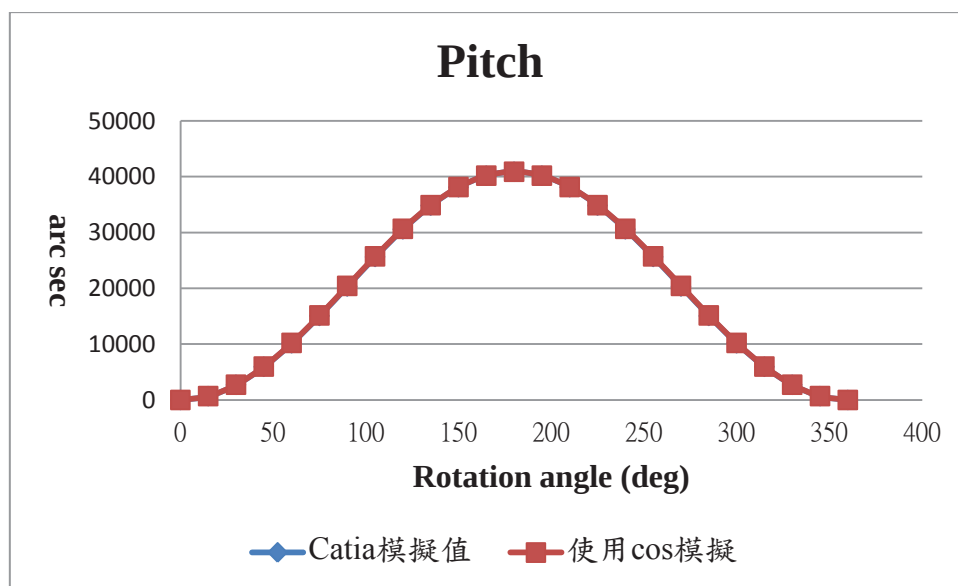


圖 3-1-9 Pitch 模擬值和弦波值比對

再來將旋轉軸座標系方向與自動視準儀所量測的方向進行比較。圖 3-1-10，為使用自動視準儀搭配多面稜鏡進行量測時的狀況，其中自動視準儀量測為正的方向與旋轉軸座標系的剛好相反。所以接下來針對多面稜鏡量測結果進行公式運算時，必須先將原始數據進行反向變號處理。另外圖 3-1-11 為使用自動視準儀搭

配塊規進行量測時的狀況，圖中可以看見自動視準儀 Yaw 方向所量測到的為 ε_y ，量測結果與旋轉軸座標系的方向相反；自動視準儀 Pitch 方向所量測到的為 ε_x ，量測方向與旋轉軸座標系一致。

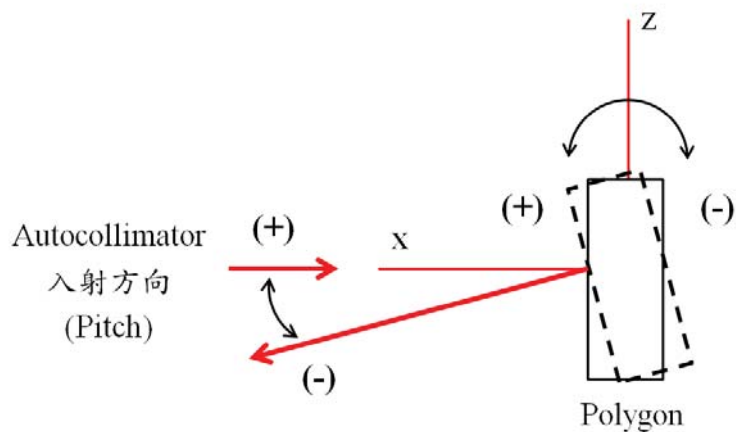


圖 3-1-10 偏擺量測方向性比較 - 使用多面稜鏡

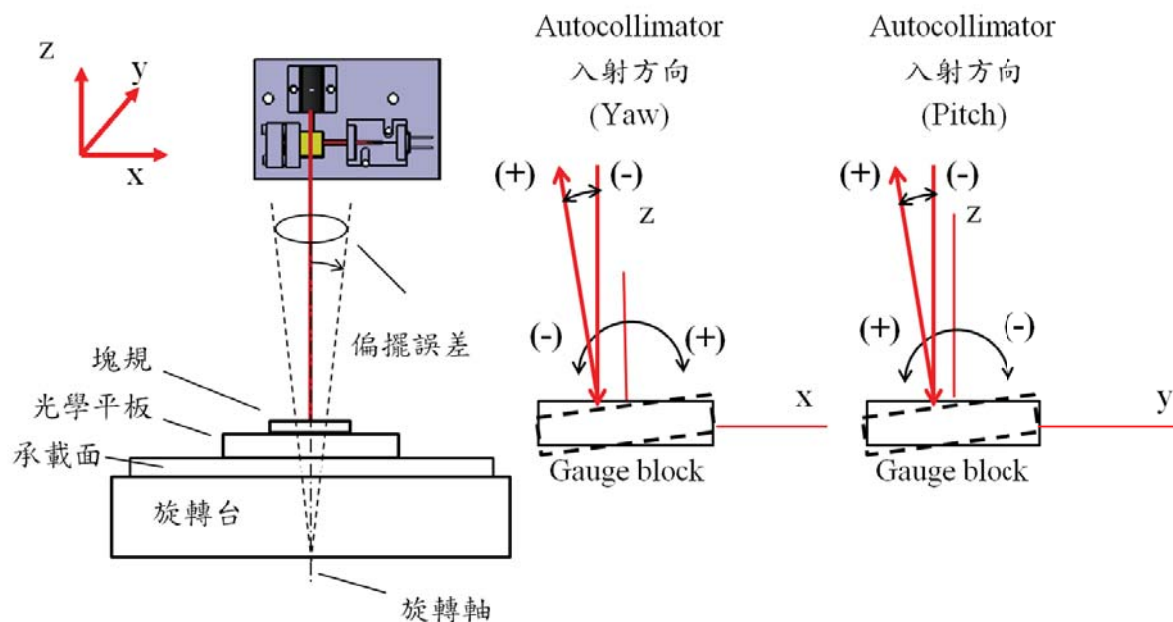


圖 3-1-11 偏擺量測方向性比較 - 使用塊規

接下來是弦波公式的推導，假使偏擺方位角為 0° ，大小為 60arc sec 。此時若在 X 方向架設 Autocollimator 來量測角度時，所量測到的是 ε_y 的數值。而隨著旋轉角度 $\theta_z(i)$ 的變化， $\varepsilon_y(i)$ 也會跟著變化。最後的量測結果經反向處理後會得到一個弦波圖，如圖 3-1-12，式子(3.1)。

$$\varepsilon_y(i) = \varepsilon_t \cos \theta_z(i) \quad (3.1)$$

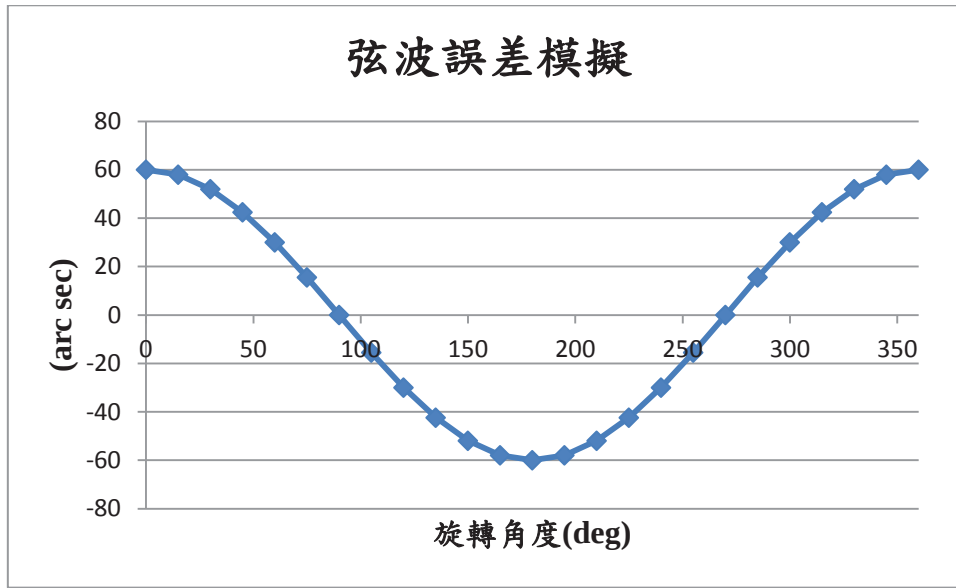


圖 3-1-12 當偏擺方位角為 0° ，大小為 60arc sec 時

但是當偏擺發生的位置是在方位角 $\theta_z(0)$ 時，其量測結果與式子會變成圖 3-1-13，式子(3.2)。而實際再進行量測時，會將起始角進行歸零的動作，其量測結果與式子會變成，式子(3.3)。

$$\varepsilon_y(i) = \varepsilon_t \cos(\theta_z(i) + \theta_z(0)) \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_y(i) = \varepsilon_t \cos(\theta_z(i) + \theta_z(0)) - \varepsilon_t \cos \theta_z(0) \quad (3.3)$$

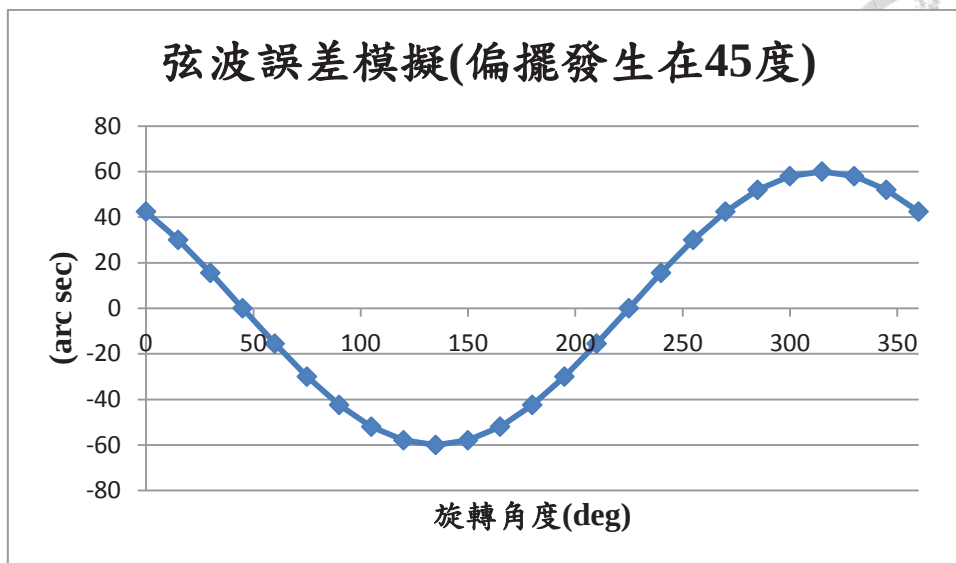


圖 3-1-13 當偏擺方位角為 45° ，大小為 60arc sec 時

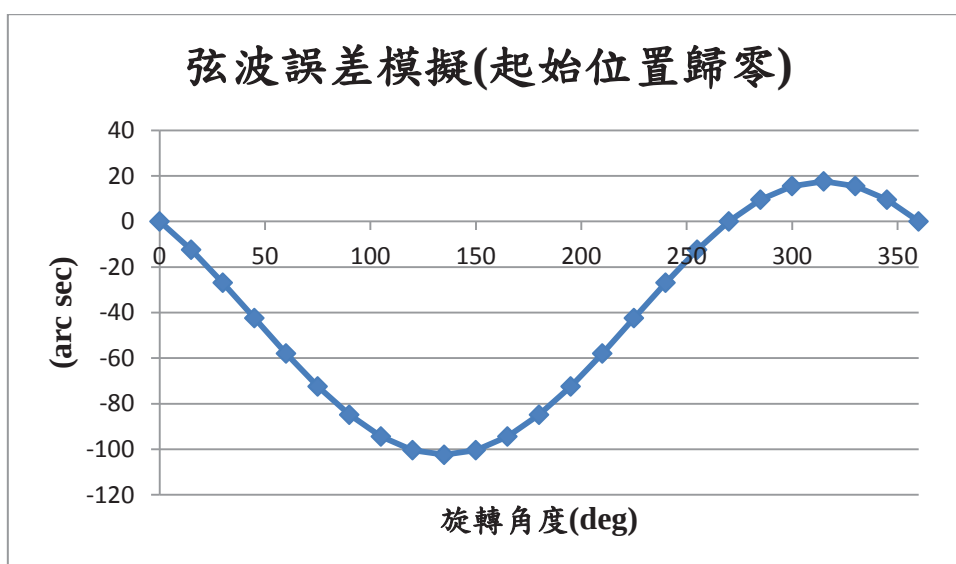


圖 3-1-14 當偏擺方位角為 45° ，大小為 60arc sec 時進行歸零

從式子(3.3)經由展開可以得到式子(3.4)。由式子(3.4)可以轉換成式子(3.5)的矩陣公式， i 分別以第一個點，第二個點的旋轉角度與量測結果代入。最後再利用 matlab 中最小平方法得到 $\varepsilon_t \times \cos \theta_z(0)$ 和 $\varepsilon_t \times \sin \theta_z(0)$ 。

$$\varepsilon_y(i) = \varepsilon_t \times [\cos(\theta_z(i) - 1) \cos \theta_z(0) - \sin \theta_z(i) \times \sin \theta_z(0)] \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_z(1)-1 & -\sin \theta_z(1) \\ \cos \theta_z(2)-1 & -\sin \theta_z(2) \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_t \times \cos \theta_z(0) \\ \varepsilon_t \times \sin \theta_z(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_y(1) \\ \varepsilon_y(2) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

令 $\varepsilon_t \times \cos \theta_z(0) = a$, $\varepsilon_t \times \sin \theta_z(0) = b$, 則偏擺大小和偏擺方位角分別可以透過

式子(3.6)(3.7)獲得。

$$\varepsilon_t = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3.6)$$

$$\theta_z(0) = \cos^{-1} \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (3.7)$$

在第三種偏擺量測系統中使用塊規作為反射鏡，在忽略其他誤差的影響下，若光軸垂直旋轉台，自動視準儀所量測的結果會由 ε_x 和 ε_y 組成。因為 ε_x 和 ε_y 分別為弦波變化，所以其圖形為一個圓。式子(3.8)、(3.9)為圓的基本方程式及其展開式， X 和 Y 分別為 ε_x 和 ε_y 的量測值， r 為偏擺大小， C_1 和 C_2 分別為光軸在 ε_x 和 ε_y 的起始角度。

$$(X_1 - C_1)^2 + (Y_1 - C_2)^2 = r^2 \quad (3.8)$$

$$r^2 - C_1^2 - C_2^2 + 2C_1X_1 + 2C_2Y_1 = X_1^2 + X_2^2 \quad (3.9)$$

令 $r^2 - C_1^2 - C_2^2 = C_3$ ，可以將式子(3.9)轉換成矩陣公式，如式子(3.10)。此時利用最小平方法可以解得 C_1 、 C_2 和 r 。透過調整雷射光的入射角度可以改變量測結果的圓心，也可以使雷射光準直入射旋轉台。

$$\begin{bmatrix} 2X_1 & 2Y_1 & 1 \\ 2X_2 & 2Y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^2 + Y_1^2 \\ X_2^2 + Y_2^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.10)$$



3-1-3 偏擺量測結果

以下分別針對三種方法的量測結果進行說明。

千分錶的量測結果為量測點的高度變化，因此必須將高度變化轉成角度變化。

已知半徑 R 大約 63mm，將所量測到的高度變化(Δz)代入式子(3.11)可以解得偏擺角度，如圖 3-1-15。接著再透過弦波擬合公式，可以得到偏擺大小為 20.84 arc-sec，方位角為 85.91°。 R 為使用鐵尺得來的估計值，其最小單位為 1mm，若擁有 0.5mm 偏差，則偏擺大小的計算誤差量為 0.163 arc-sec。

$$\Delta z = R \times \varepsilon_y \quad (3.11)$$

使用自動視準儀的量測結果如圖 3-1-16。使用弦波擬合公式得到的偏擺大小為 24.1 arc-sec，方位角為 96.2 deg。

使用塊規的量測結果，首先經過圓的最小平方法公式，將上方自動視準儀的起始角度找出來。計算出來的偏擺大小為 20.28 arc-sec， ε_x 起始角為 1.17 arc-sec， ε_y 起始角為 0.88 arc-sec。再將原始數據扣除掉自動視準儀的起始角度後，為了和前兩種方法進行比較，將初始的偏擺角度加以歸零，同時考量到旋轉軸座標系的方向，最後結果如圖 3-1-17。從 X 方向得到的 ε_y 擬合結果偏擺大小為 21.35 arc-sec，方位角為 116.11 arc-sec；從 Y 方向得到的 ε_x 擬合結果偏擺大小為 18.41 arc-sec，方位角為 26.37 arc-sec。方位角的部分兩者差 89.74°，與 X-Y 座標系夾角 90° 接近。

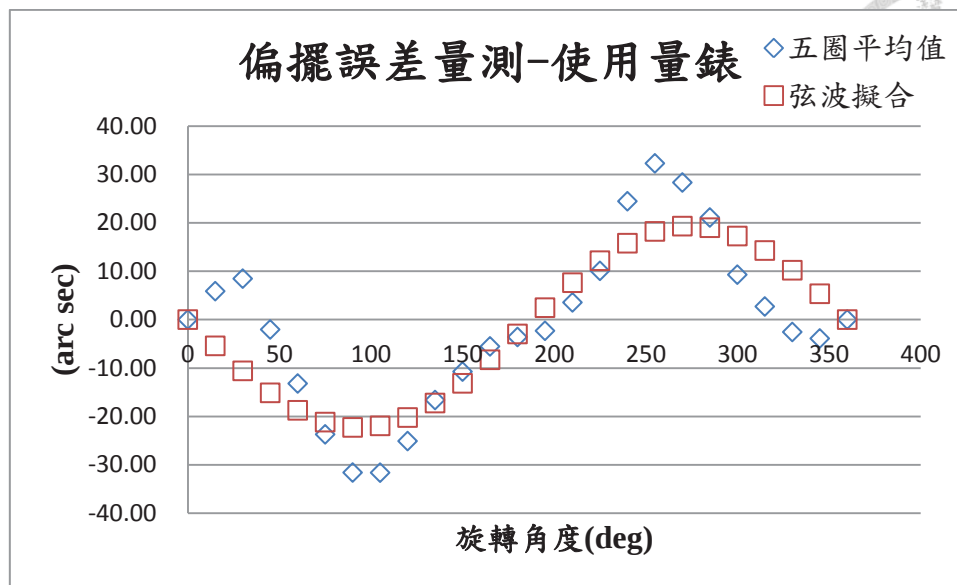


圖 3-1-15 偏擺誤差量測結果 - 使用千分錶

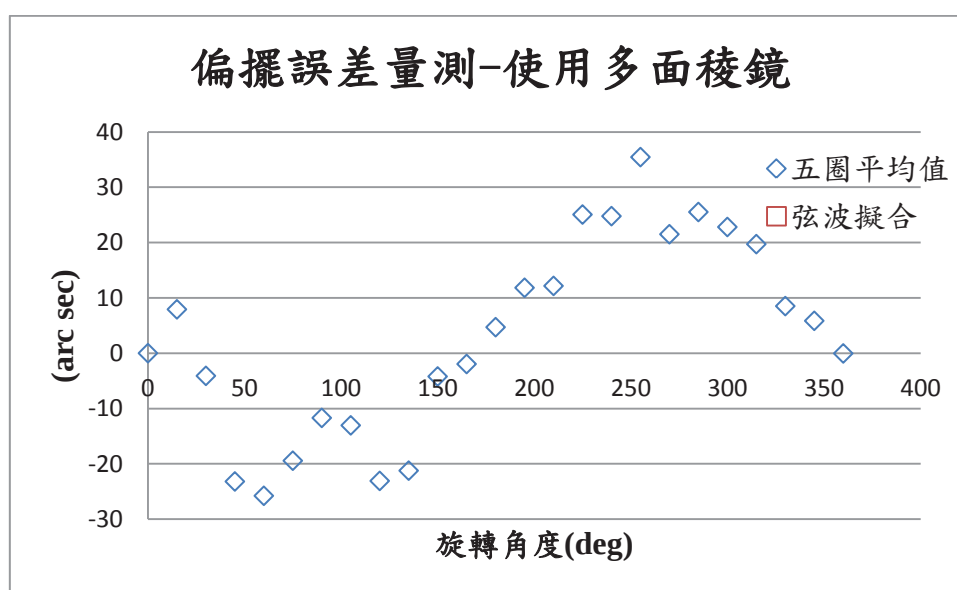


圖 3-1-16 偏擺誤差量測結果 - 使用多面稜鏡

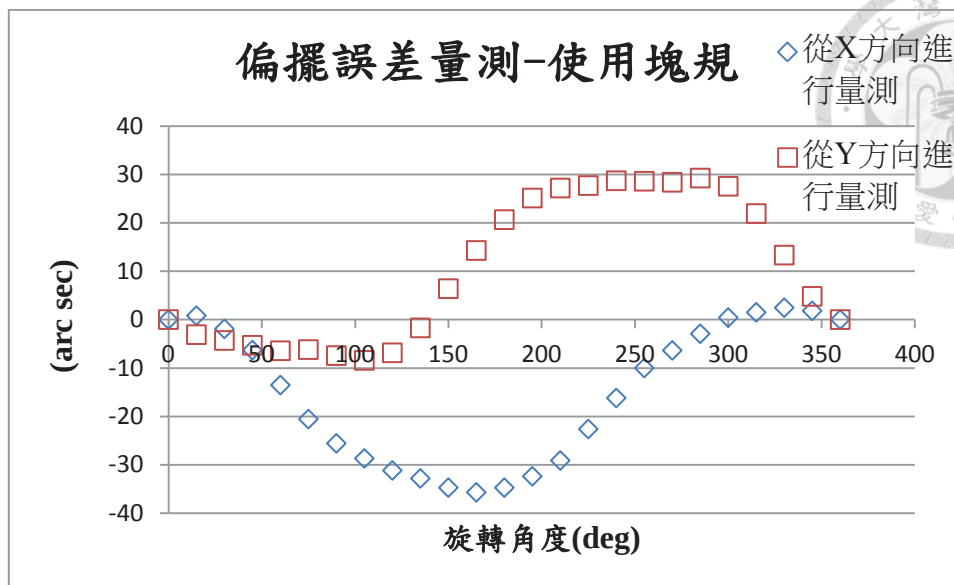


圖 3-1-17 偏擺誤差量測結果 - 使用塊規



3-2. 旋轉軸偏心量測系統

3-2-1 量測系統架設

以下使用三種量測偏心的方法。

第一種方法是使用標準球搭配千分錶進行偏心量測，如圖 3-2-1。當中使用 X-Y 微調座來減少因標準球偏心造成的公轉誤差。 R_b 為標準球半徑， L_{xy} 為 X-Y 微調座高度， L_s 為承載面高度。

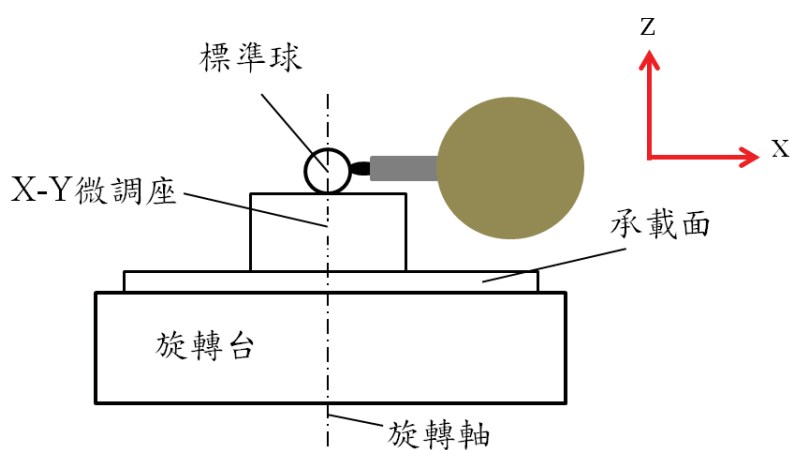


圖 3-2-1 以標準球搭配千分錶進行偏心量測

第二種方法是非接觸式量測，實驗架設與第三種偏擺量測方法相似，如圖 3-2-2。當偏心誤差產生時，反射光會經由角耦稜鏡產生相對應的位移，透過位移感測器的 QPD 可以得到偏心誤差。角耦稜鏡擁有兩個特點，如圖 3-2-3，一是抗偏擺性，另外一個是擁有較高靈敏度，可以用來量測微小變化量的系統。[5, 31] 在先前第三種偏擺量測方法，可以先將光源調整至接近垂直光以減少架設誤差；X-Y 微調座在這裏的功用是為了消除公轉誤差。

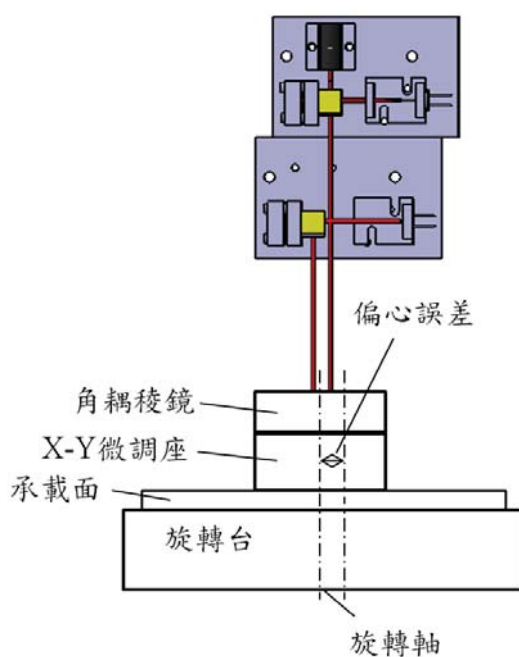


圖 3-2-2 以光學感測器搭配角耦稜鏡進行偏心量測

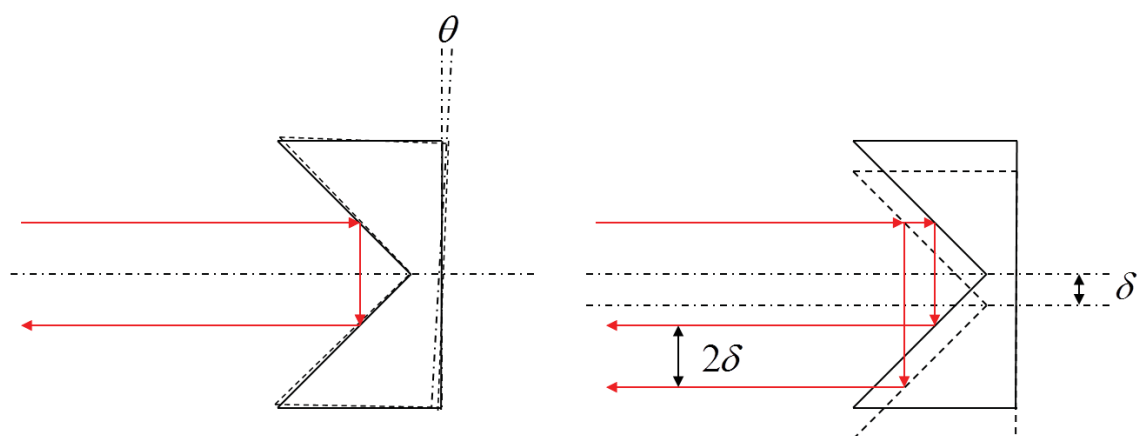


圖 3-2-3 角耦稜鏡光路系統

3-2-2 偏心量測系統校正

位移量測部分是使用 QPD 作為感測器，搭配角耦稜鏡作為反射鏡。為了確認 QPD 性能，在此直接使用角耦稜鏡作為反射鏡和 HP5529A 雷射干涉儀進行校正比對，如圖 3-2-4 所示。將兩個角耦稜鏡均放置在移動平台上，改變位移以後記錄兩儀器所輸出的數值進行靜態校正比對。以 HP5529A 讀值為量測依據，校正範圍設

定在 $\pm 40\mu\text{m}$ 。X 方向比對結果如圖 3-2-5 所示；Y 方向比對結果如圖 3-2-6 所示。

如圖中呈現的結果，HP5529A 與位移感測器輸出的數值幾乎重疊，將其校正倍率

代入後計算其量測殘差，圖 3-2-7 為 X 方向量測殘差；圖 3-2-8 為 Y 方向量測殘

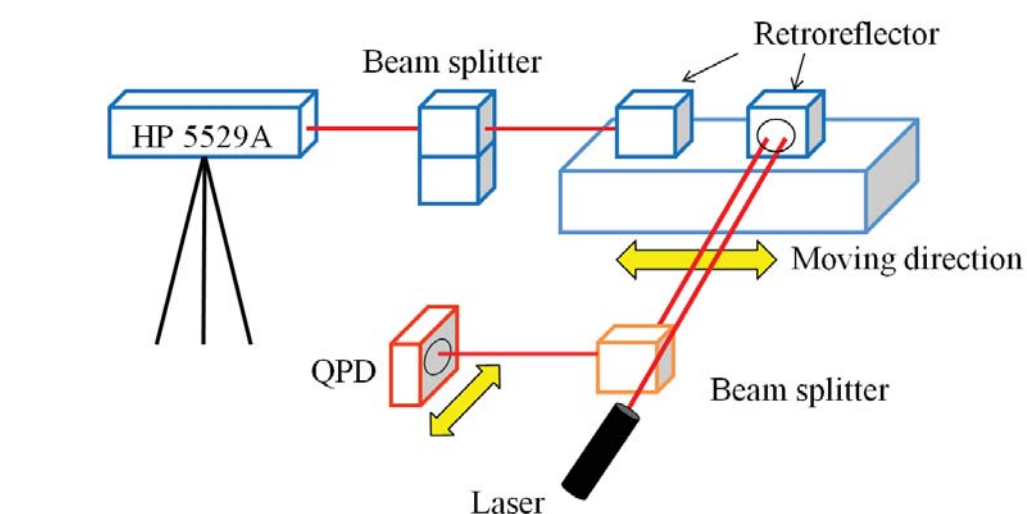


圖 3-2-4 位移感測器 X 方向校正示意圖

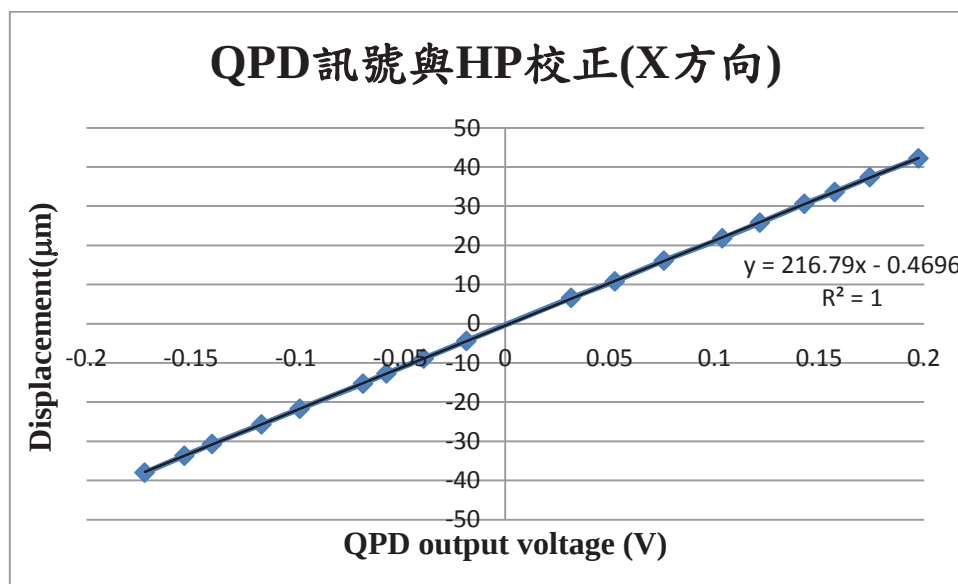


圖 3-2-5 位移感測器 X 方向與雷射干涉儀校正結果

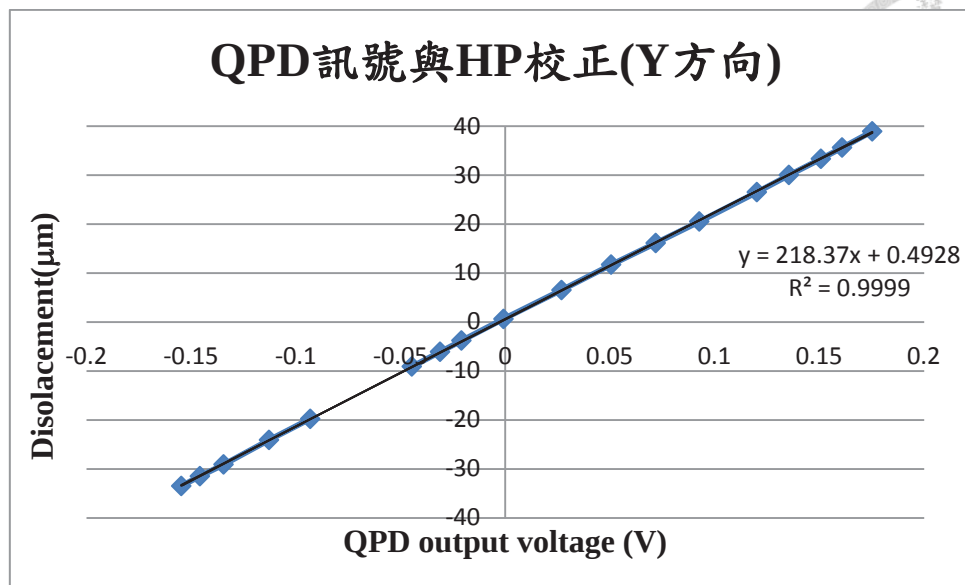


圖 3-2-6 位移感測器 Y 方向與雷射干涉儀校正結果

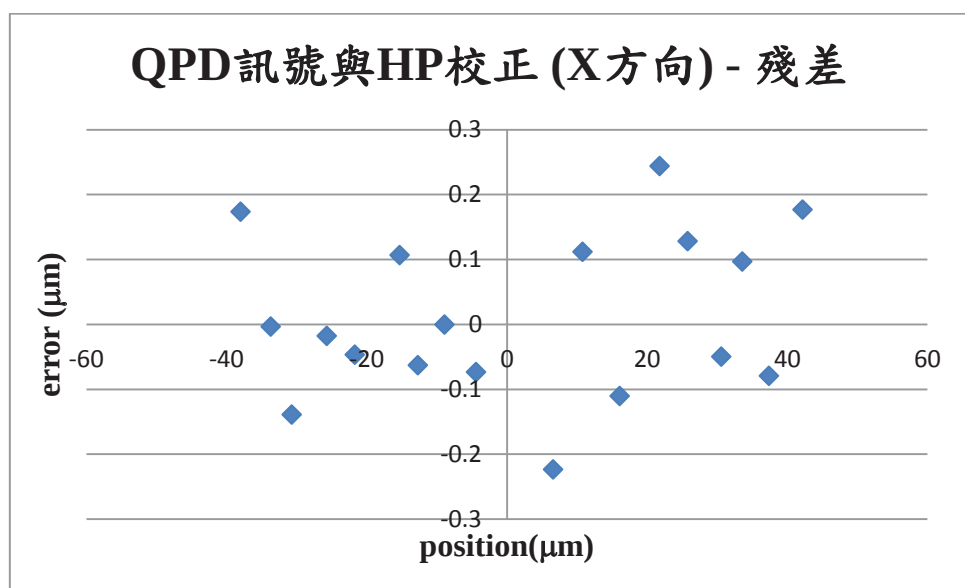


圖 3-2-7 位移感測器 X 方向量測誤差

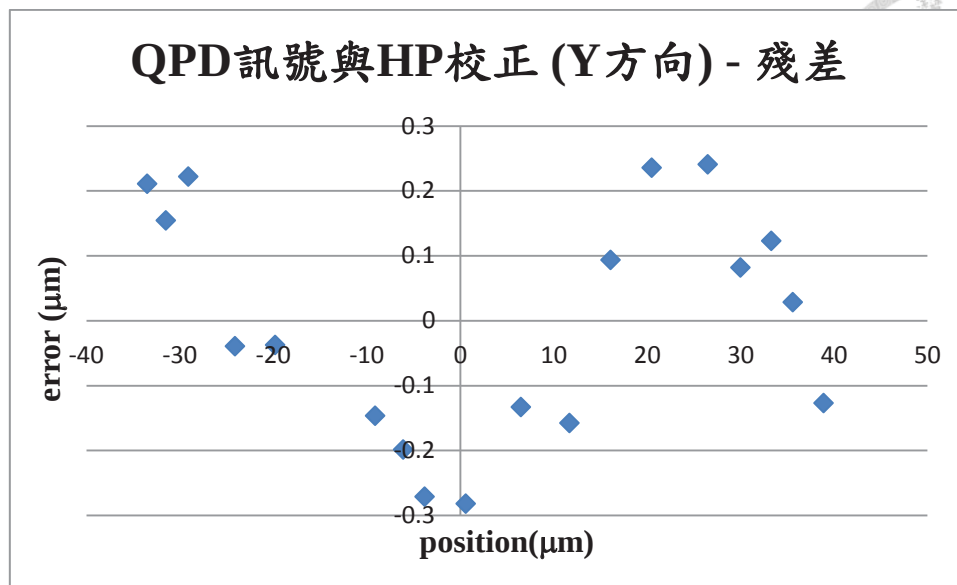


圖 3-2-8 位移感測器 Y 方向量測誤差

3-2-3 偏心量測結果

使用千分錶的量測結果如圖 3-2-9，其 X 和 Y 方向的偏心範圍在正負 4μm。

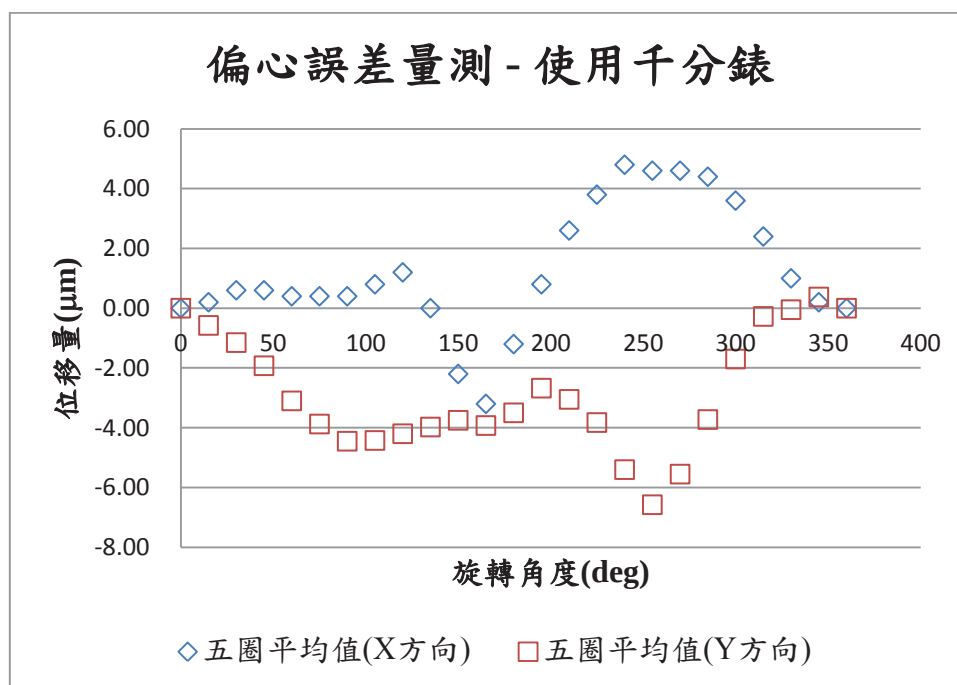


圖 3-2-9 偏心誤差量測結果 - 使用千分錶

使用角耦稜鏡作為反射鏡後，進行五圈的量測，量測結果平均值如圖 3-2-10，其 X 方向的偏心率範圍在 $\pm 5\mu\text{m}$ 以內，Y 方向偏心率範圍較大，在 $\pm 7\mu\text{m}$ 以內。重複性的部分如圖 3-2-11，Y 方向重複性一開始較差外，其餘的誤差大約在 $1\mu\text{m}$ 以內。

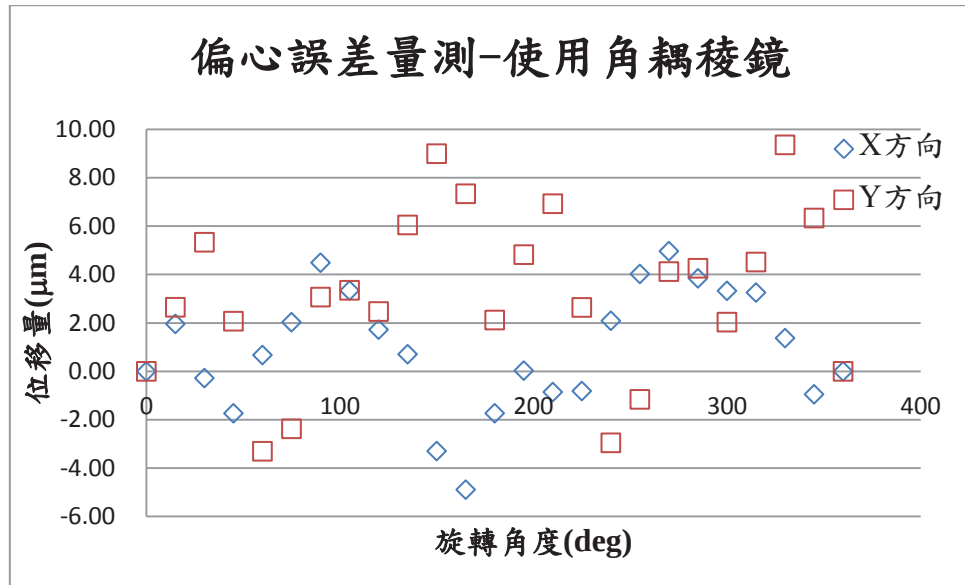


圖 3-2-10 偏心誤差量測結果 – 使用角耦稜鏡

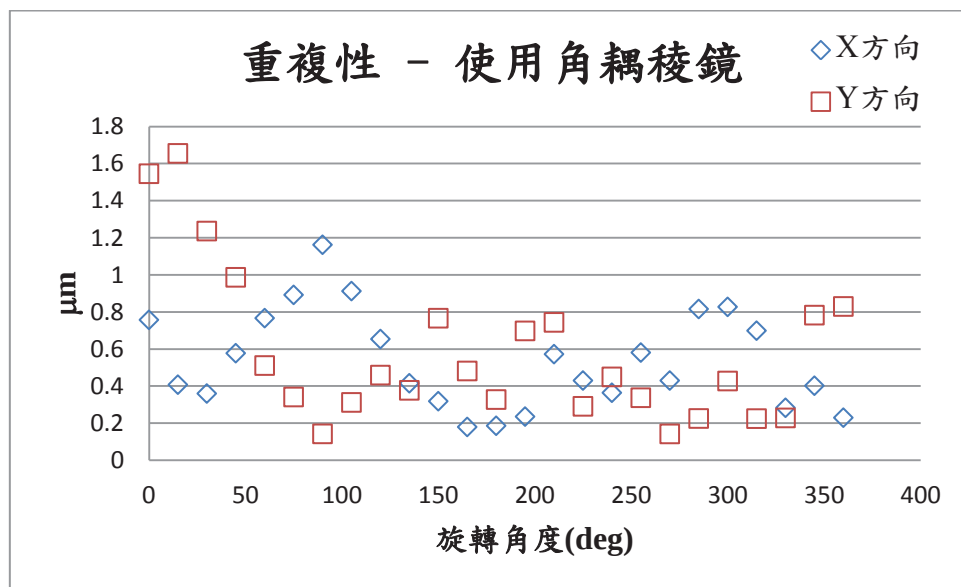


圖 3-2-11 偏心誤差量測 – 使用角耦稜鏡重複性

第四章 誤差分析



本章針對實驗架設中的各個誤差進行分析與說明。

4-1. 接觸式量測誤差

量測系統中所使用的千分錶如圖 4-1-1，其探針為一球形，半徑大約 1mm。

量測時，因儀器設計或擺置不量等所造成的誤差，包括餘弦誤差[32]。餘弦誤差發生在量測軸與待測表面成一定傾斜角度 θ 時，如圖 4-1-2，其誤差量為 $L(1-\cos\theta)$ 。

實驗中量測時角度誤差範圍若在 3° 以內， L 為 $20\mu\text{m}$ 時，則餘弦誤差為 27nm 。



圖 4-1-1 千分錶

$$D = L \cos \theta$$

$$\delta = L - D = L(1 - \cos \theta)$$

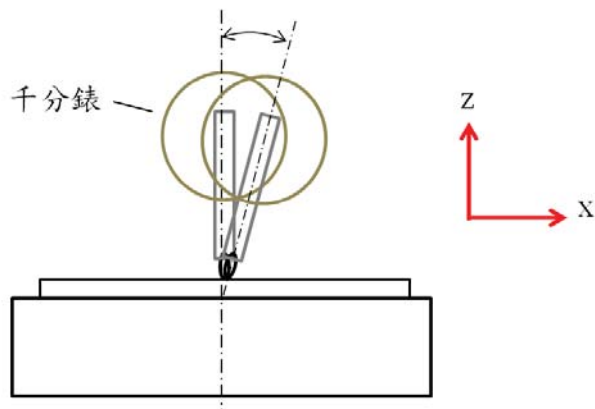
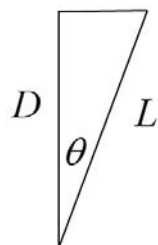


圖 4-1-2 餘弦誤差

在量測標準球時，為了避免球形探針造成的偏位誤差，將千分錶的探針替換為平面接觸，如圖 4-1-3。

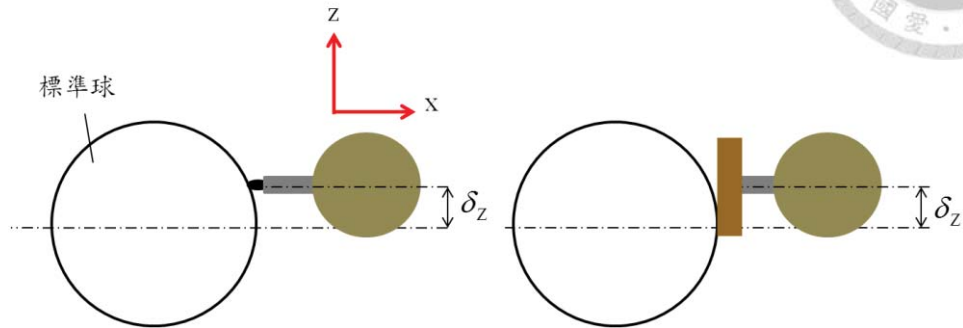


圖 4-1-3 消除探針與工件之接觸誤差

進行偏心率量測時所使用的標準球，透過 Talyrond 365 真圓度量測儀進行真圓度檢驗。因為實驗中千分錶所對應的高度無法量化，所以這裡針對標準球三個不同高度去量測真圓度。這三個高度是以標準球大徑為中心，分別向上、向下增加 1.5mm。量測結果為圖 4-1-4、圖 4-1-5、圖 4-1-6。

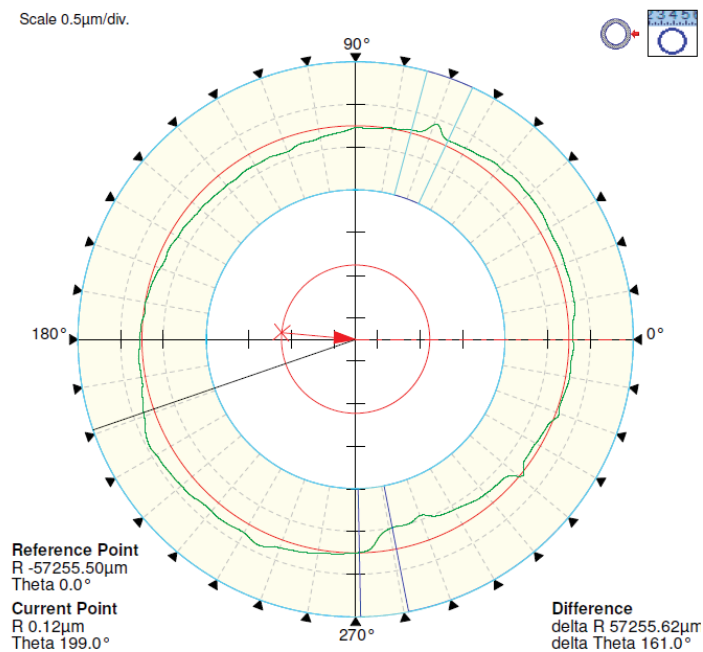


圖 4-1-4 標準球真圓度量測(中間)

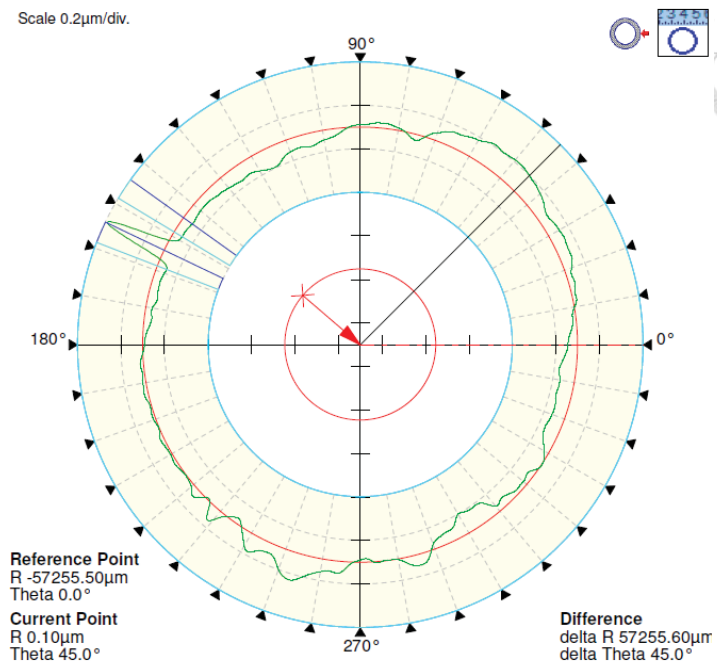


圖 4-1-5 標準球真圓度量測(上面)

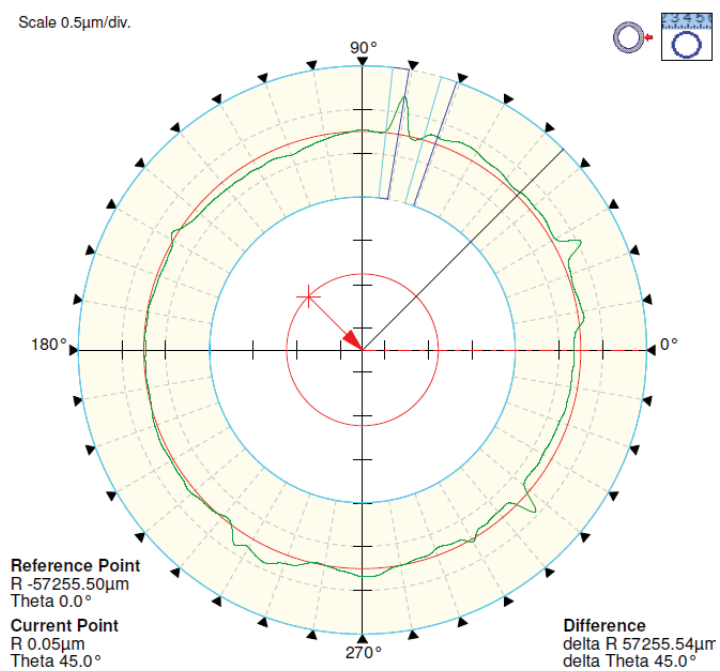


圖 4-1-6 標準球真圓度量測(下面)

三個不同高度的量測結果中，其峰對峰值分別如下，上面是 0.39 μm ，中間是

0.52 μm ，下面是 0.56 μm 。儘管圖中可以發現到不同高度的標準球表面均有一些突起的地方，不過其造成的徑向誤差並不會大於 1 μm 。



4-2. 光學量測系統誤差

這個部分主要針對實驗中所使用的光學量測系統進行誤差分析。

在偏擺量測系統中所使用的自動視準儀，不管是雷射光或分光鏡，當中若產生角度誤差，其結果會直接反應在 QPD 的量測結果中。因此使用前需要對自動視準儀進行在穩定性實驗，在一個小時的量測中，飄移量不會超過 1 arc-sec。[27]

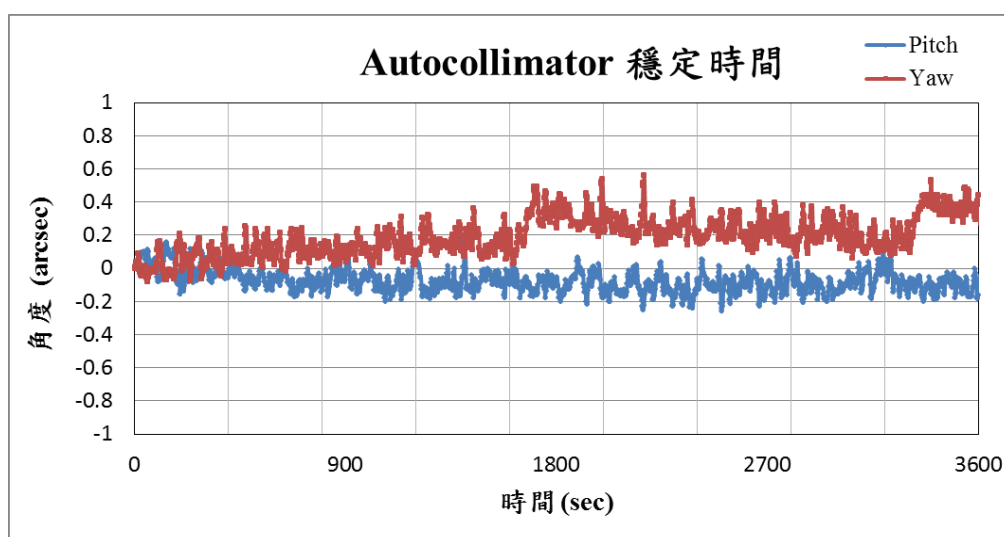


圖 4-2-1 自動視準儀長時間穩定性實驗[27]

接下來的部分主要是針對偏心量測系統的光學系統進行分析，分成雷射光、分光鏡、四象限感測器三個部分。

4-2-1 雷射光

在偏心量測系統中雷射光誤差示意圖如圖 4-2-2， $\theta_{zlasery}$ 和 $\theta_{zlasery}$ 分別為兩個不同方向的角度誤差。D 為分光鏡到 QPD 的距離， Δx 為因角度誤差產生的位移。當

雷射光產生角度誤差時，會直接導致位移的變化，式子(3.1)(3.2)為其誤差計算公式，其中透過尺取得 D 和 L 的量測值，D 大約為 4mm，L 大約為 30mm。當產生 1arc-sec 角度誤差時，偏位量為 170nm。

$$\varepsilon_x = (D + L) \times \tan(\theta_{zlasery}) \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_y = (D + L) \times \tan(\theta_{zlaseryx}) \quad (3.2)$$

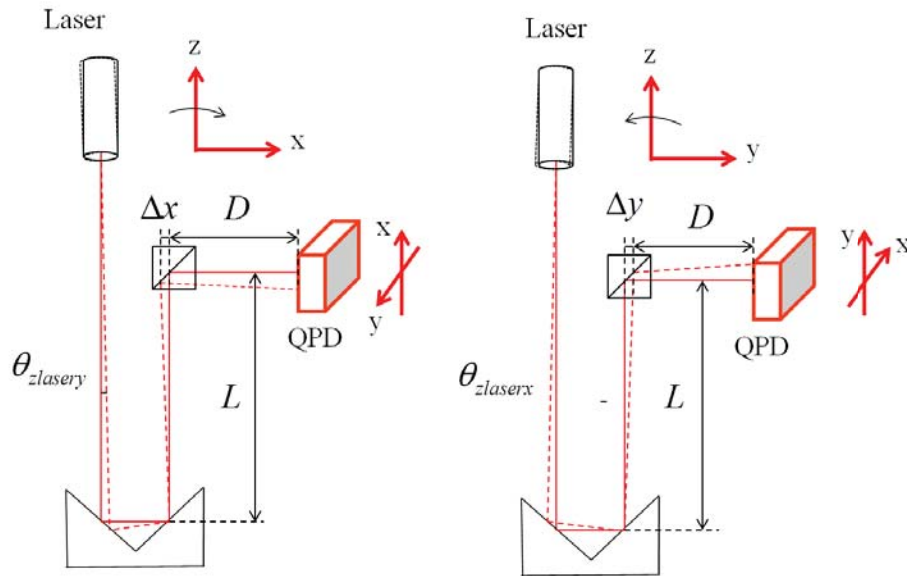


圖 4-2-2 偏心量測系統中雷射光誤差示意圖

4-2-2 分光鏡

分光鏡角度誤差示意圖和圖 4-2-2 相似，只不過角度誤差 $\theta_{zlasery}$ 和 $\theta_{zlaseryx}$ 出現在分光鏡到 QPD 這一段。此時若分光鏡產生角度誤差時，其計算式由式子(3.1)(3.2)修改為式子(3.3)(3.4)。當產生 1 arc-sec 角度誤差時，偏位量為 19.4nm。

$$\varepsilon_x = D \times \tan(\theta_{zlasery}) \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_y = D \times \tan(\theta_{zlaseryx}) \quad (3.4)$$



4-2-3 四象限感測器

四象限感測器(QPD)在架設當中會產生角度誤差，如圖 4-2-3。圖中 θ_{QPDx} 和 θ_{QPDy} 分別為兩個不同方向的角度誤差。當產生角度誤差時，其實際位移量與量測值之間的差值由式子(4.5)(4.6)表示。假使位移為 $8\mu\text{m}$ ，角度誤差 3° ，則會產生 11nm 誤差。

$$\varepsilon_x = \Delta D \times (1 - \cos \theta_{QPDy}) \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_y = \Delta D \times (1 - \cos \theta_{QPDx}) \quad (4.6)$$

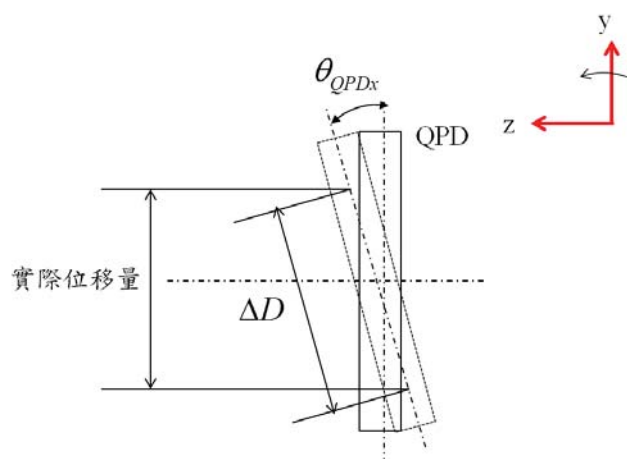


圖 4-2-3 四象限感測器誤差示意圖

將偏心率量測系統的誤差整理如表 4-2-1，總共誤差範圍小於 200nm 。若縮短感測器到角耦稜鏡的距離，將可以有效地減少量測誤差。

誤差來源	角度誤差	非接觸式偏心率量測系統
雷射光	1 arc-sec	170 nm
分光鏡	1 arc-sec	19.4 nm
四象限感測器	3° (偏位 $8\mu\text{m}$ 下)	11 nm

表 4-2-1 偏心率量測系統誤差分析



4-3. 公轉誤差

當光學元件放置在旋轉台上時，會因其中心位置與旋轉軸不同軸而導致公轉誤差，如圖 4-3-1。多面稜鏡與塊規因其作用特性，公轉不會對量測結果造成太大差異，所以可以忽略，但是角耦稜鏡中心偏位卻會直接導致量測結果改變。從圖中可以看到因角耦稜鏡擁有放大偏位誤差的關係，當中心偏位 $1\mu\text{m}$ 時，反射光位置會產生一個半徑為 $2\mu\text{m}$ 的圓形軌跡誤差。

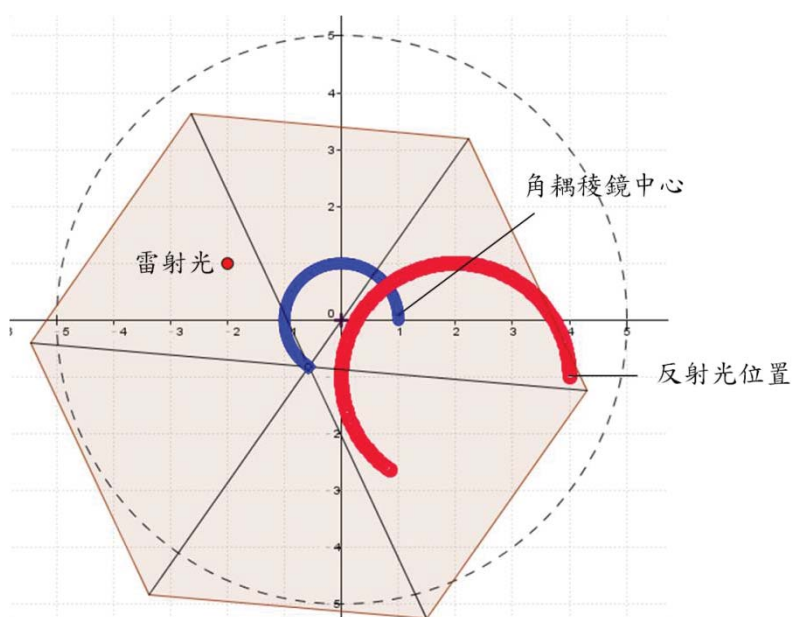


圖 4-3-1 角耦稜鏡的公轉誤差

當偏位誤差遠大於量測誤差時，其圓形軌跡十分明顯，如圖 4-3-2，因此可以透過圓的擬合公式將其偏位計算出來以後並加以消除。但是因 X-Y 微調座的調整沒有辦法十分精確，因此當圓形軌跡誤差變小時，偏位誤差會變得難以分離。

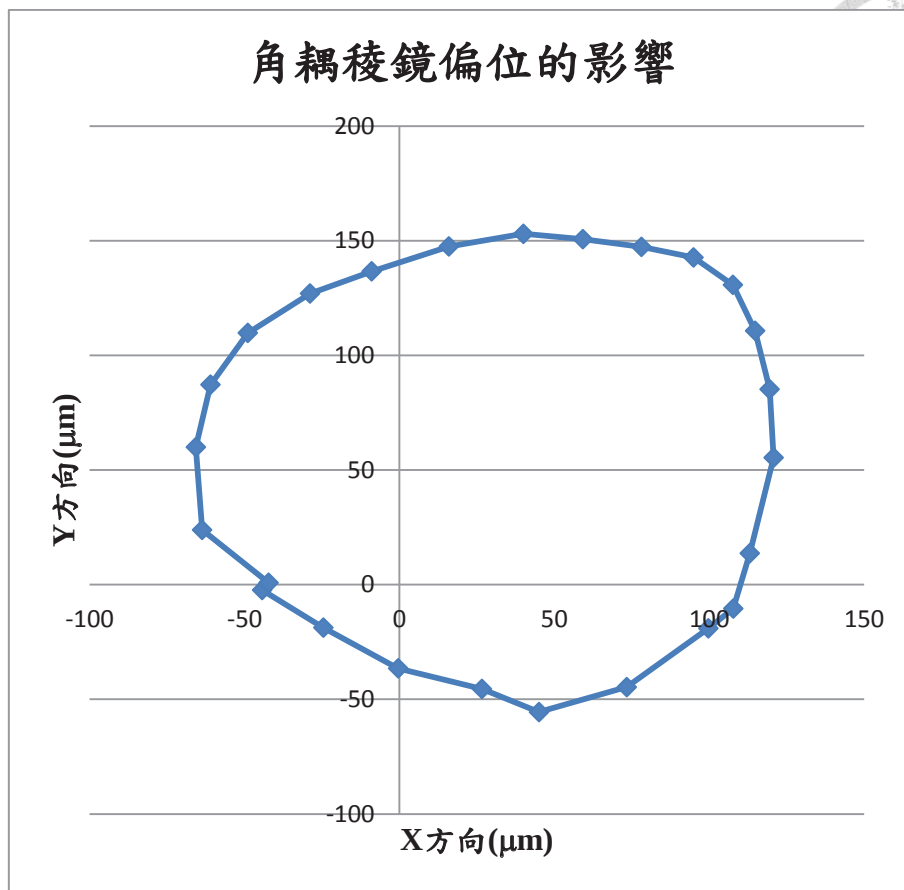


圖 4-3-2 角耦稜鏡偏位的影響

第五章 結果與討論



5-1. 偏擺誤差量測

三種旋轉台偏擺量測方法的量測結果整理成圖 5-1-1，擬合結果整理成如表 5-1-1，圖 5-1-2。在量測結果的部分，從三個量測結果中可以發現使用千分錶和多面稜鏡都會出現量測點在某些旋轉角度忽大忽小的狀況，而使用塊規則比較沒有這個問題。這部分應該和量測面的表面狀況有關。塊規擁有高平坦度的表面，所以量測結果不會受到的位置的影響太多。使用千分錶所量測的承載面，因為沒有經過研磨等精密處理，所以表面粗糙度比較差。使用多面稜鏡的話，由於每一次所反射的面都不同，有些面的表面狀況比較差的話，就會反應在量測結果中。除了表面狀況外，旋轉台在不同方位角的搖晃(wobble)也會影響量測結果。上面的這些狀況都會導致接下來擬合數值的偏差。

就擬合結果的部分分成偏擺大小和方位角兩個部分討論。偏擺大小的部分是多面稜鏡所擬合出來的量測結果比較大，這可能和多面稜鏡的架設誤差有關，在多面稜鏡與承載面的接面上有產生額外的偏擺。另外方位角的部分主要差異原因來自兩個，一個是表面狀況，另外一個是座標系設定。表面狀況的部分上一段已經提過，在此就不贅述。座標系的設定如圖 5-1-3，使用千分錶是以千分錶的起始位置為 X 方向，使用多面稜鏡是以自動視準儀的入射的方向為 X 方向。但是使用塊規的起始方向確會受到 roll 方向誤差影響。這部分的誤差沒有辦法從自動視準儀的量測結果中去消除，因此可能會其他兩種方法的 X 方向有些許夾角誤差，造成最後結果搭不起來。

量測方法	偏擺大小(arc-sec)	方位角(deg)
使用千分錶	20.84	85.91
使用多面稜鏡	24.11	96.2
使用塊規	20.28	116.11

表 5-1-1 偏擺誤差量測結果比較

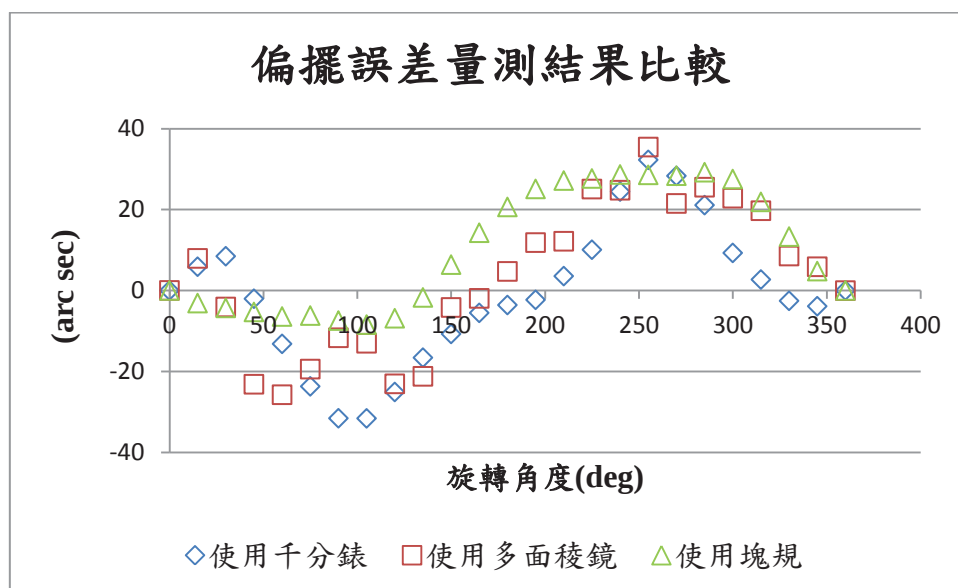


圖 5-1-1 偏擺誤差量測結果比較

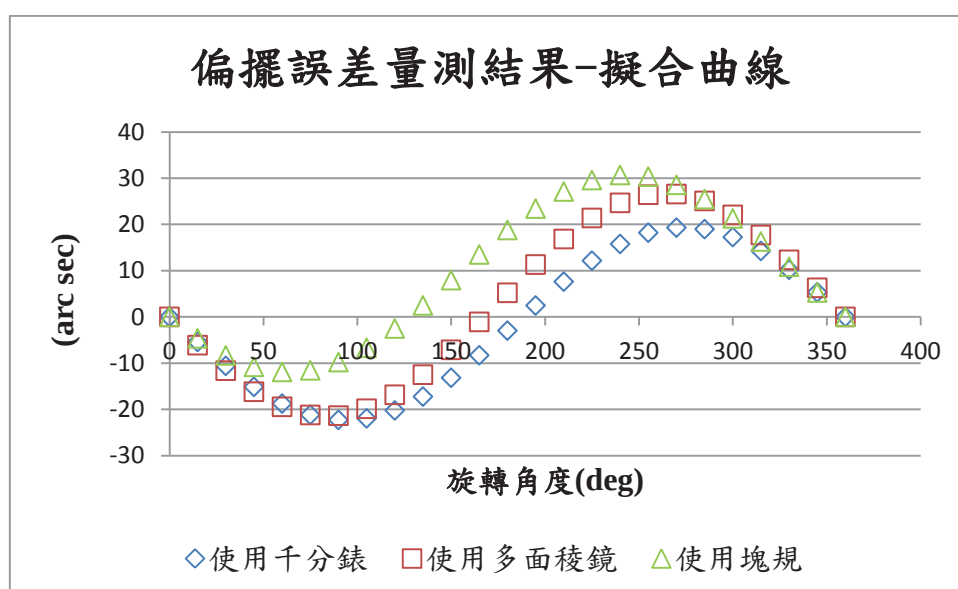


圖 5-1-2 偏擺誤差擬合結果比較

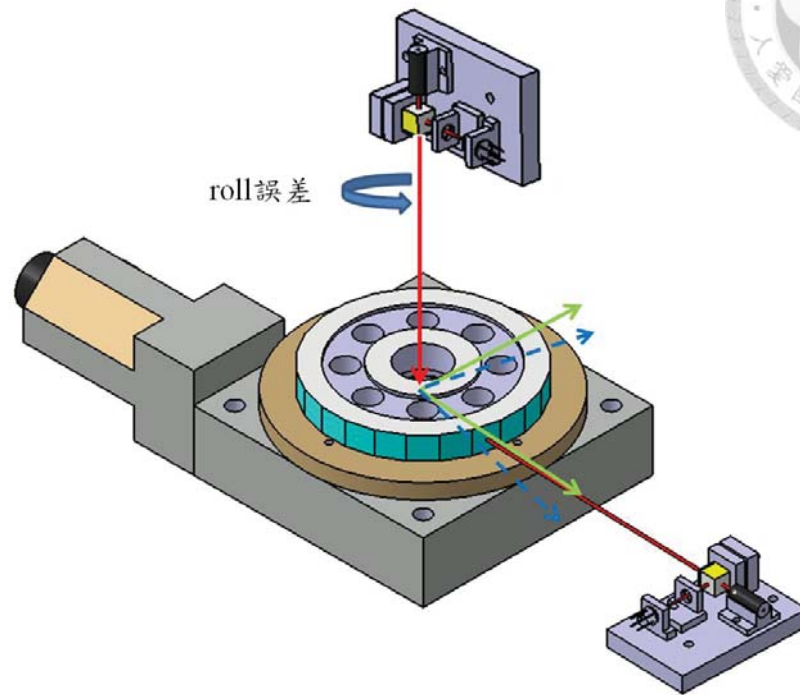


圖 5-1-3 偏擺量測結果-方位角誤差



5-2. 偏擺誤差與偏心誤差的關聯

從偏擺誤差量測中可以得到偏擺向量的大小與方位角。在本節計算從偏擺造成的偏心誤差，示意圖如圖 5-2-1。O 為旋轉軸中心， O_t 為偏位之後的位置， δ_x 和 δ_y 分別為在 X 方向上的偏位與在 Y 方向上的偏位， $\theta_z(0)$ 為偏擺起始方位角，L 為旋轉軸底端到承載面的高度。

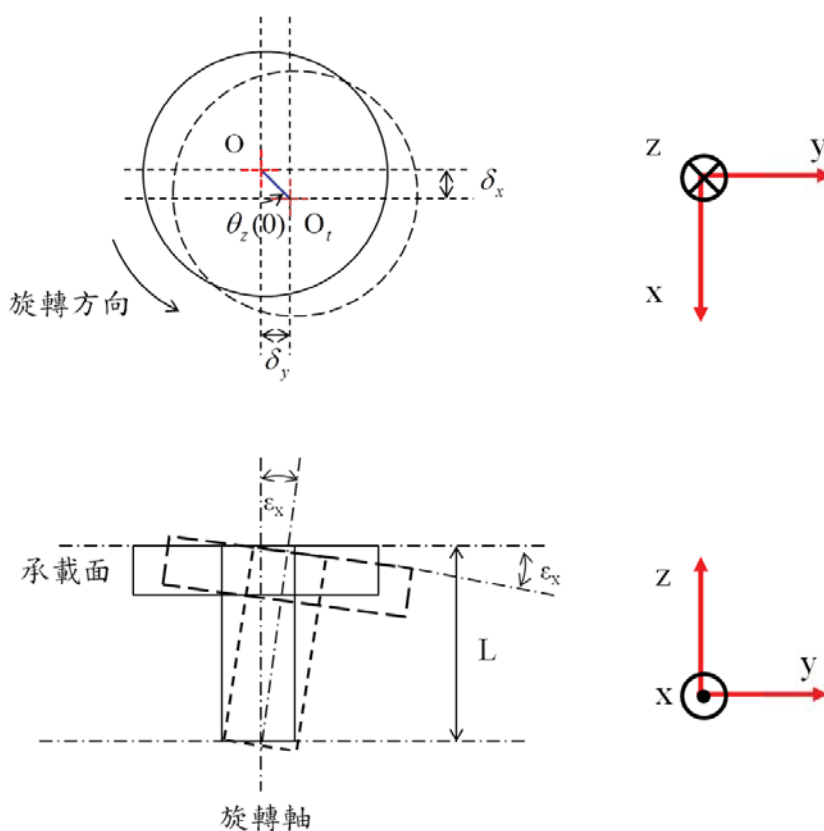


圖 5-2-1 偏擺與偏心的關聯

偏心計算公式如式子(5.1)、(5.2)、(5.3)， δ 為偏擺造成的偏位， ϵ_t 為偏擺大小。

$$\delta = \overline{OO_t} = L \times \epsilon_t \quad (4.1)$$

$$\delta_x = \delta \times \cos(\theta_z(0) + \theta_z(i)) \quad (4.2)$$

$$\delta_y = \delta \times \sin(\theta_z(0) + \theta_z(i)) \quad (4.3)$$

從旋轉軸底端到承載面的高度(L)以游標卡尺量測後的值 37.5mm 代入後，其偏心量如表 5-2-1。



量測方法	偏擺大小(arc-sec)	偏心量(μm)
使用千分錶	20.86	3.79
使用多面稜鏡	24.1	4.38
使用塊規	20.3	3.7

表 5-2-1 從偏擺量去計算偏心量

偏心量測系統的量測結果較為複雜，因裡面包含了旋轉軸的偏心誤差，偏擺造成的偏心誤差以及量測系統誤差等，是以沒有辦法直接從量測結果去比對從偏擺量估出來的偏心量。若從量測結果中的偏心範圍去和偏擺量造成的偏心進行比對。在偏心量測的偏心範圍如下，標準球為 3~4 μm ；使用角耦稜鏡量測到的偏心範圍比較大，約 5~7 μm ，這部分較大的原因可能和量測系統中角耦稜鏡的公轉誤差有關。整體來說，與偏擺量去估的偏心量差距為 2~3 μm 。因此，當偏擺很大時，可以直接從偏擺量測系統的量測結果去估計偏心範圍，應該不會相差甚遠。

第六章 結論與未來展望



6-1. 結論

本研究利用市售的光學元件及雷射，用較低成本的方式建立了非接觸式量測系統，可以分別得到旋轉軸偏擺誤差及偏心誤差。

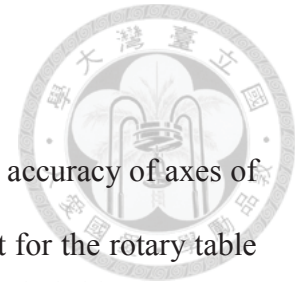
在偏擺誤差量測系統上，使用塊規作為反射鏡的量測結果擁有較高的準確性。因此，傳統使用多面稜鏡來進行偏擺誤差的量測與校正時，可能會因為多面稜鏡本身的架設誤差和面與面之間的差異而無法得到實際旋轉台面的偏擺誤差。另外，使用塊規作為偏擺量測系統還可以進行調光軸的動作，使雷射光垂直旋轉台的承載面。

在偏心誤差量測系統上，雖然可以量測到很小的偏心誤差，但偏心的問題會影響到最後量測結果的準確性。另外偏心量出的結果也會受到角耦稜鏡品質的影響。不過當偏擺誤差很大時，可以從旋轉台偏擺誤差去估計旋轉台偏心誤差。

6-2. 未來展望

本研究接下來將繼續往定位誤差與偏擺誤差、偏心誤差的關聯前進。目前在旋轉台的定位誤差上，因其重複性不佳，所以無法得到一個明確的關係。未來透過旋轉編碼器的架設，希望能對旋轉台的誤差有更多的發現。

References



- [1] "ISO 230-7, 2006 Test code for machine tools. Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation", 2006
- [2] Suh S-H, Lee E-S, Jung S-Y, "Error modelling and measurement for the rotary table of five-axis machine tools", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol.14, pp.656-663, 1998
- [3] Liu C-H, Jywe W-Y, Lee H-W, "Development of a simple test device for spindle error measurement using a position sensitive detector", *Measurement Science and Technology*, Vol.15, pp.1733-1741, 2004
- [4] Liu C-H, Jywe W-Y, Shyu L-H, Chen C-J, "Application of a diffraction grating and position sensitive detectors to the measurement of error motion and angular indexing of an indexing table", *Precision Engineering*, Vol.29, pp.440-448, 2005
- [5] Liu C-H, Jywe W-Y, Tzeng S-C, Lin Y-S, "Development of a novel optical measurement system for the error verification of a rotating spindle", *Optical Engineering*, Vol.44, pp.097003, 2005
- [6] Chen CJ, Lin PD, Jywe WY, "An optoelectronic measurement system for measuring 6-degree-of-freedom motion error of rotary parts", *Opt Express*, Vol.15, pp.14601-14617, 2007
- [7] Fujimaki K, Mitsui K, "Radial error measuring device based on auto-collimation for miniature ultra-high-speed spindles", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.47, pp.1677-1685, 2007
- [8] Castro HFF, "A method for evaluating spindle rotation errors of machine tools using a laser interferometer", *Measurement*, Vol.41, pp.526-537, 2008
- [9] Wang J, Guo J, Zhou B, Xiao J, "The detection of rotary axis of NC machine tool based on multi-station and time-sharing measurement", *Measurement*, Vol.45, pp.1713-1722, 2012
- [10] Muhummad Madden MA, Shuhei Uesugi, Takuya Kumagai EO, "Spindle error motion measurement using concentric circle grating and phase modulation interferometers", *IntJ of Automation Technology*, Vol.7, pp.506-516, 2013
- [11] Murakami H, Katsuki A, Sajima T, "Simple and simultaneous measurement of five-degrees-of-freedom error motions of high-speed microspindle: Error analysis", *Precision Engineering*, Vol.38, pp.249-256, 2014
- [12] Tsutsumi M, Saito A, "Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.43, pp.771-780, 2003
- [13] Lee D-M, Zhu Z, Lee K-I, Yang S-H, "Identification and measurement of geometric errors for a five-axis machine tool with a tilting head using a double ball-bar", *Int J Precis Eng Manuf*, Vol.12, pp.337-343, 2011
- [14] Lee K-I, Lee D-M, Yang S-H, "Parametric modeling and estimation of geometric errors for a rotary axis using double ball-bar", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol.62,

- pp.741-750, 2012
- [15] Soichi Ibaraki YK, Takayuki Akai, Naoshi Takayama, Iwao Yamaji, Keiji Ogawa, "Measurement of Error motions on Five-axis Machine Tools by Ball Bar Tests", 2012
- [16] Weikert S, "R-Test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.53, pp.429-432, 2004
- [17] Ibaraki S, Oyama C, Otsubo H, "Construction of an error map of rotary axes on a five-axis machining center by static R-test", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.51, pp.190-200, 2011
- [18] Florussen GHJ, Spaan HAM, "Dynamic R-Test for Rotary Tables on 5-Axes Machine Tools", Procedia CIRP, Vol.1, pp.536-539, 2012
- [19] Hong C, Ibaraki S, Oyama C, "Graphical presentation of error motions of rotary axes on a five-axis machine tool by static R-test with separating the influence of squareness errors of linear axes", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.59, pp.24-33, 2012
- [20] Ibaraki S, Iritani T, Matsushita T, "Error map construction for rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.68, pp.21-29, 2013
- [21] Michael Gebhardt WK, Konrad Wegener, "5-Axis Test-Piece – Influence of Machining Position", The Proceedings of MTTRF 2012 Annual Meeting, 2012
- [22] Hong C, Ibaraki S, Matsubara A, "Influence of position-dependent geometric errors of rotary axes on a machining test of cone frustum by five-axis machine tools", Precision Engineering, Vol.35, pp.1-11, 2011
- [23] "ISO/DIS 10791-7 Test conditions for machining centers – Part 7: Accuracy of a finished test piece", Document ISO/TC 39/SC 2, 2012-02-14
- [24] Ibaraki S, Sawada M, Matsubara A, Matsushita T, "Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools", Precision Engineering, Vol.34, pp.387-398, 2010
- [25] Jywe W, Hsu T-H, Liu CH, "Non-bar, an optical calibration system for five-axis CNC machine tools", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.59, pp.16-23, 2012
- [26] Wang C-H, "Development of an Abbé error compensator for 3-axis NC machine tools", Master Thesis, Vol.National Taiwan University, 2012
- [27] Huang Z-N, "The Research of Laser Metrology on the Accuracy Improvement of Machine Tools", Master Thesis
Vol.National Taiwan University, 2013
- [28] Probst R, Wittekopf R. "Angle Calibration on Precision Polygons: Final Report of EUROMET Project 371": PTB, 2001.
- [29] Galyer JFW, Shotbolt, C. R. "Metrology for engineers"1980.
- [30] Gassner G, Ruland R, /SLAC. "Laser Tracker Calibration - Testing the Angle

Measurement System”2008.

- [31] Shang-Liang Chen W-YJ, Tung-Hsien Hsieh, Chien-Hung Liu, Hsueh-Liang Huang,, Tung-Hui Hsu Y-RJ, Ming-Shi Wang, “THE DEVELOPMENT OF A 3-DIMENSIONAL VIBRATION MEASURING SYSTEM WITH CORNER CUBES AND QUADRANT DETECTORS”, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol.Vol. 33, pp.71-80, 2010
- [32] 范光照・張郭益, “精密量測”, 高立圖書有限公司, pp.35-38, 2007 年 8 月 5 版