

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

光纖光柵讀取系統軟體之研發

Development of a Fiber Bragg Grating

Interrogation Software System



研究生：李瑞庭

指導教授：黃安斌 博士

中華民國九十四年七月

光纖光柵讀取系統軟體之研發
Development of a Fiber Bragg Grating
Interrogation Software System

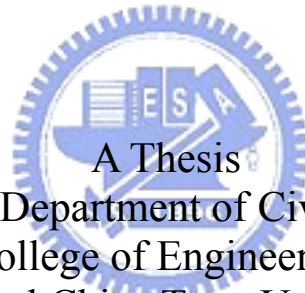
研究生：李瑞庭

Student: Jui-Ting Lee

指導教授：黃安斌 博士

Advisor: Dr. An-Bin Huang

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文



Submitted to Department of Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Civil Engineering

July 2005
Hsinchu, Taiwan, Republic of China.

中華民國九十四年七月

光纖光柵讀取系統軟體之研發

學生：李瑞庭

指導教授：黃安斌 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

中文摘要

由於光纖感應相對於傳統電子式監測儀器有許多優點，學術界與產業界已對如何將光纖監測技術應用於土木工程系統中投入了大量的資源。光纖光柵可能是現有許多光纖監測技術中最具有潛力而應用也最為廣泛之光纖感測技術。但是現有光纖光柵讀取設備多為國外進口，由光電專業人員設計，價格昂貴同時不盡然符合土木或大地工程監測所需。在實際光纖監測應用時經常需要使用例如光纖切換器（optical switch）與網路等其它系統進行多頻道之訊號擷取與資訊之自動傳輸。而各系統間經常存在軟體介面整合的問題。

本研究目的係研發以 Labview 程式作為現有光纖光柵讀取系統之解析，然後並結合了光切換機及網路通訊等功能建構一完整之自動化光纖光柵解讀系統。為測試本系統之功能，研究中將整合成功之光纖光柵監測系統於台北法鼓山農禪寺深開挖工程中做實際監測應用測試。

關鍵字：光纖光柵、光纖光柵訊號解讀、光纖光柵節理式偏斜儀。

Development of a Fiber Bragg Grating

Interrogation Software System

Student : Jui-Ting Lee

Advisor : Dr. An-Bin Huang

Department of Civil Engineering
National Chiao-Tung University

ABSTRACT

Because of the unique advantages over the traditional electronic devices, the researchers and engineers have devoted much of their effort in the development of fiber optic sensor technologies and their applications in monitoring civil engineering systems. Fiber Bragg grating (FBG) is considered as one of the most promising and most widely used fiber optic sensing technique. Most of the available FBG interrogation devices are imported and their control software may be proprietary. It is difficult to integrate the FBG interrogation device into a complete automated monitoring system with the current set up. The objective of this research is to develop a LabVIEW based software for FBG interrogation. With the help of the newly developed software, the FBG interrogator can readily be integrated into an automated monitoring system that includes optical switches and internet communication. To demonstrate its capabilities, the integrated system was tested at Fa-gu-shan temple construction project to monitor the diaphragm deformation during a braced excavation, using an FBG sensor system.

Keywords: optic fiber Bragg grating, fiber Bragg grating interrogation, optic fiber Bragg Grating segmented deflectometer.

誌謝

論文寫作猶如馬拉松賽跑一樣，需慢慢累積而成。在此感謝吾師黃安斌博士這兩年對學生不斷地悉心指導及教誨，使得學生能夠更加成長茁壯，謹致上誠摯的感激。

研究期間，感謝方永壽教授、廖志中教授、潘以文教授、林志平教授及單信俞教授授予學生許多學業上專業方面的知識，使得學生不管在學術理論與實務經驗都能夠兼顧，並且能善加利用。

口試期間，感謝成功大學李德河教授、經濟部水利署水利規劃試驗所謝勝彥所長及義守大學古志生教授給予學生在論文上寶貴的意見，使得論文能夠更加完善。

此外也感謝何彥德學長與黃耀道學長在研究期間給予研究上的幫助，以及我的同窗好友洋峻、福駿、証傑及秀隆同學在學業與生活上彼此切磋與關懷及學弟智超與聖傑在實驗上的幫忙。

最後，感謝我父母這二十年來栽培與養育之恩，使得我能夠有今天的成就，當然還要感謝我最心愛的女友斯閔（寶貝）在我研究期間失意時能鼓勵及支持我，讓我更加有動力與信心去完成我的研究。

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vii
圖目錄.....	viii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究流程	2
1.3 論文架構	3
第二章 光纖光柵感測與解讀原理	4
2.1 光纖簡介	4
2.2 光纖感測器的基本原理	5
2.3 何謂光纖光柵與感測原理	6
2.3.1 應變與波長飄移關係	7
2.3.2 溫度與波長標移關係	8
2.4 光纖光柵讀取之原理與系統架構	9
2.5 常見的光纖光柵讀取之方法	10

一般常見的光纖光柵讀取方法，可分為下列幾種。	10
2.6 光纖光柵波長之分析原理與方法	12
2.7 光纖光柵系統之溫度補償原理與方法	14
第三章 Labview 光纖光柵解讀系統之研發.....	31
3.1 Labview 程式簡介	31
3.2 本研究之光纖光柵讀取系統架構	31
3.3 光纖光柵讀取系統相關元件之原理及應用	32
3.3.1 光路系統部分	32
3.3.2 控制擷取系統部分	34
3.4 光纖光柵波長之分析計算	35
第四章 節理式偏斜儀感測原理	59
4.1 節理式偏斜儀感測機制	59
4.2 節理式偏斜儀之室內標定結果	59
4.1.1 各側傾管位移差異性比較	60
4.1.2 節理式偏斜儀室內標定結果	60
第五章 系統整合與現地應用	74
5.1 系統整合架構說明	74
5.1.1 光纖讀取監測系統	74
5.1.2 節理式光纖光柵感測器系統	75

5.2 現地概況說明	75
5.3 監測結果	75
第六章 結論與建議	92
6.1 結論.....	92
6.2 建議.....	92
參考文獻.....	94
附錄 A.....	95



表目錄

表 3.1 參考波長	37
表 3.2 參考波長值 (續)	38
表 4.1 懸臂型之九米內管與中間測傾管變形比較	61
表 4.2 弓型之九米內管與中間測傾管變形比較	61
表 4.3 懸臂型之 FBG 感測器與測傾移量測讀數比較	61
表 4.4 弓型之 FBG 感測器與測傾移量測讀數比較	61
表 5.1 節理光纖光柵感測器波長配置表	77
表 5.2 光纖光柵感測器監測讀數	78
表 5.3 光纖光柵感測器監測讀數 (續)	79



圖目錄

圖 1.1 研究流程圖	2
圖 2.1 光纖光柵反射原理示意圖 (摘自 Yu and Yin, 2002)	17
圖 2.2 光纖光柵示意圖 (摘自簡旭君, 2003)	18
圖 2.3 分散式光纖光柵感測系統架構圖 (摘自陳欲文, 2000)	19
圖 2.4 麥克遜干涉儀量測系統 (摘自 Flavin et al., 1997)	20
圖 2.5 光纖 Mach-Zehnder 干涉儀量測系統 (摘自 Othonos and Kalli, 1999)	21
圖 2.6 利用光纖 Fabry-Perot 濾波器之量測系統 (摘自 Othonos and Kalli, 1999)	22
圖 2.7 斜布拉格光纖光柵作解調器之系統 (摘自 Kang et al., 1998)	23
圖 2.8 兩個相同之光纖光柵作被動解調之系統 (摘自 Fallon et al., 1997)	24
圖 2.9 可調式雷射作感測光源之系統	25
圖 2.10 利用不同方法計算光纖光柵波長之 2 倍偏差與訊號雜訊比關係圖 (Dyer et al., 2005)	26
圖 2.11 不同反射強度及波長間格之訊號雜訊比與 2 倍偏差之關係圖 (Dyer et al., 2005)	27
圖 2.12 利用溫度不敏感之光纖光柵陣列作為參考濾波器之架構 (摘自陳欲文, 2000)	28
圖 2.13 利用一固定之費彼-泊羅濾波器作為參考濾波器之架構 (摘自陳欲文, 2000)	29

圖 2.14 溫度係數相反之壓電材料	30
圖 3.1 Labview 程式之前置面板示意圖	39
圖 3.2 Labview 程式之程式方塊流程示意圖	40
圖 3.3 Labview 程式之圖像和連接器示意圖	41
圖 3.4 Fibera 光纖光柵解讀系統架構	42
圖 3.5 光纖光柵讀取系統架構圖	43
圖 3.6 光路系統架構圖	44
圖 3.7 PD1 輸出波形圖	45
圖 3.8 PD1 輸出波形圖 (點數 15,000 至 40,000)	46
圖 3.9 PD2 輸出波形圖	47
圖 3.10 PD2 輸出波形圖 (點數 15,000 至 40,000)	48
圖 3.11 PD3 輸出波形圖	49
圖 3.12 PD3 輸出波形圖 (點數 15,000 至 40,000)	50
圖 3.13 PD1/PD2 輸出波形圖	51
圖 3.14 PD1/PD2 輸出波形圖 (點數 16,000 至 25,000)	52
圖 3.15 PD3/PD2 輸出波形圖	53
圖 3.16 PD3/PD2 輸出波形圖 (點數 16,000 至 25,000)	54
圖 3.17 光纖光柵與雷射輸出波形圖	55
圖 3.18 雷射輸出波形圖之門檻值與波寬的設定示意圖	56
圖 3.19 光纖光柵輸出波形圖之門檻值與波寬的設定示意圖	57
圖 3.20 光纖光柵波長計算示意圖	58
圖 4.1 光纖光柵感測器實體圖	62
圖 4.2 九米側傾管現場實景	63

圖 4.3 九米現場架設示意圖	64
圖 4.4 位移為 0mm 時之九米內管與中間側傾管結果比較.....	65
圖 4.5 懸臂型，最大位移為 5mm 之九米內管與中間側傾管結果比較	66
圖 4.6 懸臂型，最大位移為 10mm 之九米內管與中間側傾管結果比較	67
圖 4.7 弓型，最大位移為 5mm 之九米內管與中間側傾管結果比較	68
圖 4.8 弓型，最大位移為 10mm 之九米內管與中間側傾管結果比較	69
圖 4.9 懸臂型，最大位移為 7mm 之 FBG 感測器與測傾儀結果比較	70
圖 4.10 懸臂型，最大位移為 16mm 之 FBG 感測器與測傾儀結果比較	71
圖 4.11 弓型，最大位移為 12mm 之 FBG 感測器與測傾儀結果比較	72
圖 4.12 弓型，最大位移為 17mm 之 FBG 感測器與測傾儀結果比較	73
圖 5.1 現場監測架構圖	80
圖 5.2 EXFO IQ203 光切換機.....	81
圖 5.3 基地平面圖	82
圖 5.4 監測孔位示意圖	83
圖 5.5 裝置完成示意圖	83
圖 5.6 基地位址平面	84

圖 5.7 基地開挖示意圖	85
圖 5.8 第二階支撐架設完畢(2005/05/03)FBG 感測器 與測傾儀結果比較.....	86
圖 5.9 第三階開挖(2005/05/09)FBG 感測器與測傾儀結果比較	87
圖 5.10 大底綁筋(2005/05/17)FBG 感測器與測傾儀結果比較	88
圖 5.11 大底澆置完成(2005/05/27)FBG 感測器與測傾儀結果比較..	89
圖 5.12 地梁完成(2005/06/03)FBG 感測器與測傾儀結果比較	90
圖 5.13 第二階支撐解壓(2005/06/13)FBG 感測器與測傾儀結果比較	91



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

由於光纖感應相對於傳統電子式監測儀器有許多優點，學術界與產業界已對如何將光纖監測技術應用於土木工程系統中投入了大量的資源。光纖光柵可能是現有許多光纖監測技術中最具有潛力而應用也最為廣泛之光纖感測技術。但是現有光纖光柵讀取設備多為國外進口，由光電專業人員設計，價格昂貴同時不盡然符合土木或大地工程監測所需。在實際光纖監測應用時經常需要使用例如光纖切換器（optical switch）與網路等其它系統進行多頻道之訊號擷取與資訊之自動傳輸。而各系統間經常存在軟體介面整合的問題。本研究之主要目的是首先了解現有光纖光柵訊號解讀之基本原理，進而自行發展以Labview為基礎之訊號解讀與處理軟體，以奠定未來自行研發充分符合土木或大地工程監測應用之光纖光柵監測技術與系統整合之基礎。

1.2 研究流程

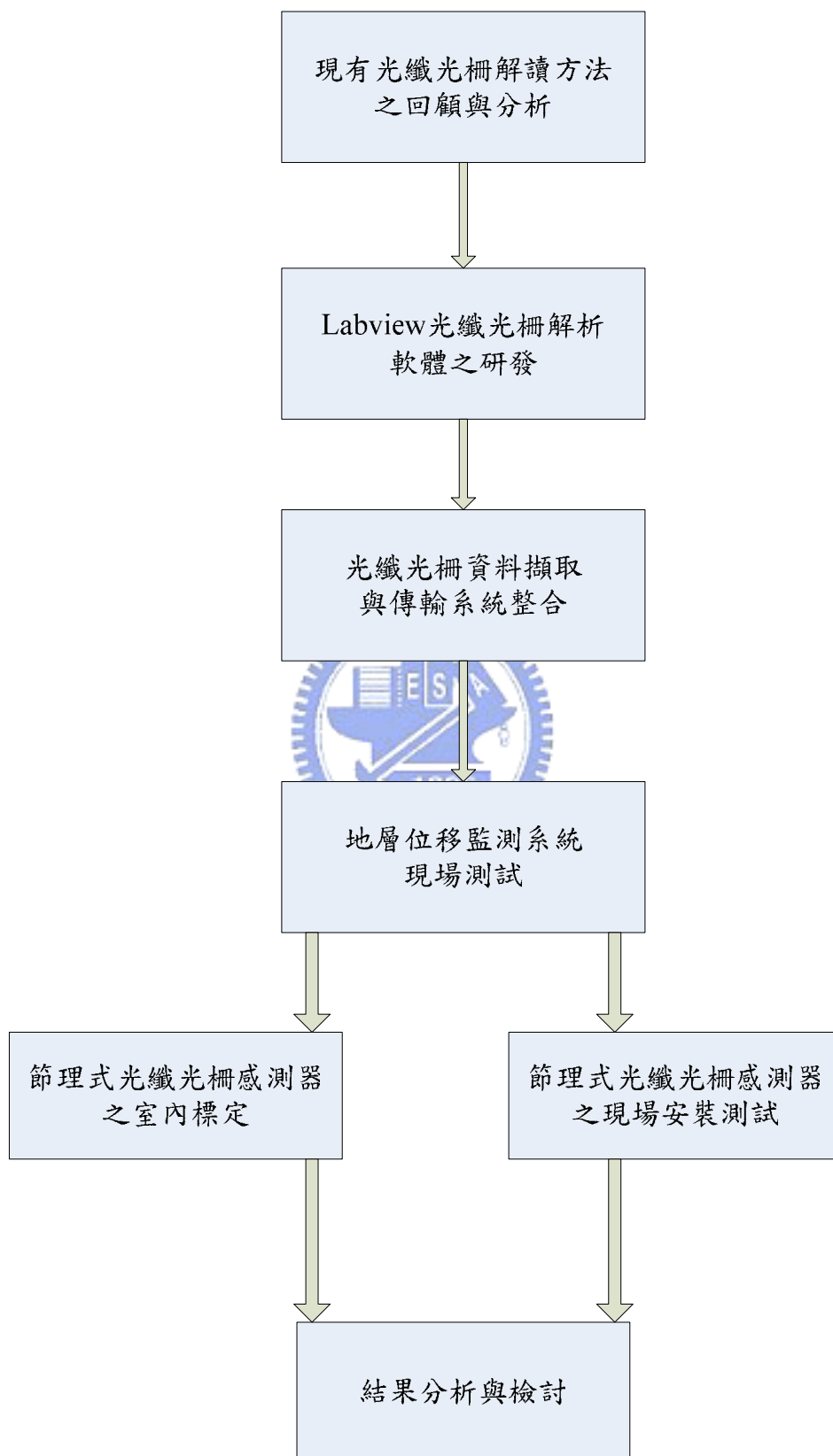


圖 1.1 研究流程圖

1.3 論文架構

本論文共分為五章，其各章節敘述如下：

第一章 緒論

主要敘述本文的研究動機與目的，以及研究的流程。

第二章 光纖光柵感測與解讀原理

本章介紹光纖光柵感應之基本原理以及現有常用光纖光柵解讀技術。

第三章 Labview 光纖光柵解讀系統之研發

說明本研究所使用之儀器與相關設備操作原理，以及擷取訊號之分析步驟並介紹所研之 Labview 程式。

第四章 光纖光柵節理式偏斜儀感測機制

主要敘述本研究所使用的光纖光柵節理式偏斜儀感測原理與室內標定過程及結果。

第五章 系統整合與現地應用

敘述本研究所整合之自動化光纖光柵解讀系統，應用於台北法鼓山農禪寺新建工程深開挖監測;包括現場監測結果與傳統測傾儀所測得之數據之比較。

第六章 結論與建議

統合本研究之過程與經驗，提出結論與建議。

第二章 光纖光柵感測與解讀原理

本章針對光纖光柵之感測原理以及如何解讀光纖光柵之現有技術做一詳細之敘述。

2.1 光纖簡介

在西元前三四千年光傳輸就已經被人類開始廣泛的利用，例如古希臘戰士利用金屬盾牌反射太陽光作為軍事命令的傳輸媒介，法國船艦間在夜晚利用火光旗號彼此交換訊息，還有中國邊疆要塞所使用的狼煙烽火，都是光傳輸最早利用的記載。而西元 1880 年電話的發明人貝爾先生嘗試利用光取代電流製成造出另外一種「光電話」，其方法係利用太陽光反射與聲波的震動產生光束的變化，傳輸距離可達 1200 公尺遠，是對光傳輸有系統利用的開始，爾後玻璃材料的誕生與人造纖維抽絲技術的進步，以狹長的玻璃絲線取代了空氣作為介質的傳輸方式，使傳輸訊號更為清晰，功率損耗大幅下降，而至今廣為大眾所熟之的光纖焉然誕生。

對於光纖的研究，最早是針對醫學上常用的內視鏡所需柔性攝影管開始，隨著 1960 年代雷射光的誕生，光纖傳輸找到了理想的窄頻率高功率光源；1977 年美國最大通訊公司 AT&T 開始採用光纖取代傳統的銅導線做為中央資料交換機的傳輸線路，效果卓著，而後包括南方貝爾、西南聯合通訊等通訊公司也相繼跟進。光纖所具有的高傳

輸量、低功率損耗、較輕的質量與較小的截面積使得它迅速取代了傳統的銅導線而成為通訊界的新寵，此外光纖具有抗電磁波干擾、高強度與不易被竊聽等等的優點，材料製造成本因為量產而逐漸降低，已被工商各界大量採用。

光纖是一根透明細桿，寬度約在 125 微米至 450 微米之間，材質方面，傳統光纖使用玻璃材料，傳輸效果佳，訊號損耗低，但容易受外力破壞，且技術層次較高，成本降低幅度有限；而近年來隨著石油化學科技的進步，塑膠亦成為光纖的新材料 (Pedrotti and Pedrotti, 1993)。塑膠材質的光纖訊號損耗稍高，但以其耐用性與較低廉的價格獲得短距離使用者的青睞，美國通用電子公司即以強化塑膠材質光纖作為洛杉磯級核子動力潛艦在通訊、控制與戰管的資料傳輸管線。而兩者均提供相較於空氣的光傳輸低消耗路徑。

2.2 光纖感測器的基本原理

至今發展的光纖感測器可應用於應力應變量測者不在少數，以型式區分大致可分為四種：(Kersey, 1993)

1. 時間域多工系統(Time-division multiplexing, TDM): 在光纖中製作感應點，當感應點受到應力時，光源通過該感應點就會反射部分光強度，利用接收訊號時間的先後與反射光度強弱，就可以判斷應力或應變發生的位置所在與大小。

2. 頻率區間多工系統(Frequency-division multiplexing, FDM)：製作感應點，當感應點受力時，光源通過該感應點就會影響光波頻率，由發射端發射一寬頻光源，檢測接收端與反射端的光度與發射端光源相互比對，即可判斷應力或應變發生的位置與大小。
3. 波長區間多工系統(Wavelength-division multiplexing, WDM)：製作感測點使其會影響光波波長的特性，由發射端發射一寬頻光源，檢測接收端與反射端的光度與發射端光源相互比對，即可判斷應力或應變發生的位置與大小。
4. 副載波多工系統(Subcarrier based multiplexing, SBM)：製作感應點使其反射某頻率與波形的的光波，由光源發射數種單頻波疊合而成的複合光，檢測接收端與反射端的光波與發射端相互比對，即可判斷應力或應變發生位置與大小。

其中以 TDM 與 WDM 較廣為使用，TDM 型式的感測器以各類型的 Optic Time Domain Reflectometry (OTDR) 最為常見；而 WDM 感測器依照感測點對光的影響方式主要又分為兩種：干涉式與反射式，前者以 Fabry-Perot 干涉式感應器為代表；後者以 Fiber Bragg Grating 光柵反射式感應器為代表。

2.3 何謂光纖光柵與感測原理

一般光纖光柵的製造係利用高能量同調雷射在光纖曝光造成折

射率永久改變，成為一系列週期為 Λ 的明暗條紋，此稱之為光纖光柵 (Fiber Grating)。當一寬頻光耦合進入此一光纖時，除了滿足布拉格條件 (Bragg condition) 的特定波長，其餘波長都會因為相位差而相消。

其布拉格反射波長 λ_B 為

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (2-1)$$

n = 光纖纖心的有效折射率

Λ = 折射率週期性改變的間距

圖 2.1 為光纖光柵原理示意圖，光柵中的週期明暗條紋類似在光纖中製造一系列透鏡組合，當寬頻光束通過這些透鏡組合時，將會造成某特定頻率光波被反射，而其他頻率光波則繼續向前傳導，而這些透鏡的間距不同，則被反射光波頻率亦不相同。

2.3.1 應變與波長飄移關係

如圖 2.2 中，當光柵受到外力產生應變時，則造成光纖光柵原本間距 Λ 的改變增加量為 $\Delta\Lambda$ ，帶入(2-1)式可以得到

$$\Delta\lambda_B = 2n\Delta\Lambda \quad (2-2)$$

根據應變的定義

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (2-3)$$

得到

$$\Delta l = \left(\frac{\Delta \Lambda}{\Lambda}\right)l = \left(-\frac{2n}{\lambda_B}\right) \times \frac{\Delta \lambda_B}{2n} \times l \quad (2-4)$$

因此

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \quad (2-5)$$

此外，外力施加產生應變後，不只是反射回來的 λ_B 會改變，光纖的有效折射率 n 也會同時改變。因此上式應該被修正為

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = K \frac{\Delta l}{l} = K\varepsilon \quad (2-6)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta \lambda_B}{K \times \lambda_B} \quad (2-7)$$

2.3.2 溫度與波長標移關係

當光纖光柵受到溫度變化時，波長飄移量可由下式表示

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = (\xi + \alpha) \times \Delta T = K_t \times \Delta T \quad (2-10)$$

ξ = 光纖的熱光係數 (Thermal Optical Coefficient)

α = 光纖的熱膨脹係數 (Thermal Expansion Coefficient)

K_t = 溫度敏感係數

布拉格波長飄移並非完全線性，在高溫時溫度變化會使波長飄移較為顯著，因為在 ξ 在 150°C 約為 $6.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ， 450°C 時則變為約 $9.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，而熱膨脹係數 $\alpha = 0.55 \sim 1.1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。然而在室溫條件下， 1°C 的溫度變化約使得布拉格飄移約 $1.1 \sim 1.2 \times 10^{-2} \text{mm}$ 。

2.4 光纖光柵讀取之原理與系統架構

光纖光柵讀取之原理係利用發射端發射一寬頻光源或連續之窄頻光源，檢測接收端與反射端的光度與發射端光源相互比對，即可判斷光纖光柵波長改變的大小。

一般分散式光纖光柵解讀系統架構，可分為下列幾項模組，其相關流程如圖 2.3 所示：

1. 系統光源模組

一般可區分兩種，一為利用寬頻光源來作為讀取系統之光源，另一為可調式雷射作為感測光源。在寬頻光源的系統上，光源輸出頻率可到達 100Hz 以上，但是從輸出光源頻譜圖來看，其每單位波長功率並不是很大，所以在傳出距離上容易受到限制。此外，操作頻率較高系統的穩定性也會受到影響。

而可調式雷射系統上，因每次輸出為一個脈衝，所以每單位波長功率較高且傳輸也較遠，但是系統之操作頻率往往須花費較多時間。

2. 光多工模組

一般光纖光柵解讀系統常用光多工模組有分波多工器 (Wavelength Division Multiplexing, WDM)、空間分工多工器 (Spatial Division Multiplexing, SDM) 及時間分工多工器 (Time Division Multiplexing, TDM) 等。

3. 光偵測模組

可採用可調式費彼-泊羅濾波器 (Fabry-Perot Filter, FPF) 或馬赫-詹德式 (Mach-Zehnder) 光纖干涉儀作為量測光纖光柵機制。

4. 信號擷取及處理模組、控制模組及使用者介面

一般視量測目的需要而決定。

2.5 常見的光纖光柵讀取之方法

一般常見的光纖光柵讀取方法，可分為下列幾種。

1. 主動解調方法

在主動解調方式上常見之兩種方法為干涉法及利用可調式濾波器之方法。而在干涉法方面中，其原理是利用一干涉儀來對訊號作自相關 (auto-correlation) 之量測，最後將此自相關訊號作富氏轉換即可得出待測訊號的頻譜。

Flavin et al. (1996) 提出利用麥克遜干涉儀之架構如圖 2.4 所示，其方法是在量測系統中，加入一穩定參考光源並利用線性變動其中一面鏡子來作自相關之量測，最後將時間軸上所量到之光強度變化利用快速傅立葉轉換計算出頻譜，其解析度可達 $3.5\mu\epsilon$ 。此方法之優點為一次可以偵測很多頻道，但缺點為需利用軟體作快速傅立葉轉換，而解析度和動態量測範圍會受限於電腦之速度與容量。

Kersey et al. (1997) 提出利用光纖 Mach-Zehnder 干涉儀方式作波

長的擷取，此量測系統如圖 2.5 所示。其方法是當光纖光柵波長改變時，則會使得訊號之相位改變，而訊號相位的改變則會造成光強度上之改變，然後再利用鎖相放大器（Lock-in Amplifier）及鎖相迴路（Phase Lock Loop）來做訊號偵測。此方法的優點靈敏度高，缺點則為系統過於複雜。

此外，Kersey et al. (1997) 又採用光纖式 Fabry-Perot 濾波器來做光纖光柵波長擷取如圖 2.6 所示，為利用壓電材料（Piezoelectric Transducer, PZT）來改變共振腔長，從而達到掃描穿透峰值波長之目的，其量測解析度可達 $0.3\mu\text{e}$ 。此方法優點為與光纖相容性高、解析度良好及模組簡單。缺點為解析度受溫度及壓電材料滯後效應所影響。



Kang et al. (1998) 提出利用特殊設計斜布拉格光纖光柵來作解調器，其穿透頻譜為兩個陷峰，再利用壓電材料來改變光柵週期及可得出圖 2.7 所示之掃描式光纖光柵濾波器。此方法之優點為光纖光柵濾波器不受溫度影響，缺點則為掃描的範圍無法太大。

2. 被動解調方法

一般被動解調方式大部分是直接利用反射訊號功率之變化來量測波長之改變。此方式之優點為量測寬頻大、架構較為簡單且成本較低，缺點則為解析度較差。

Fallon et al. (1997)利用兩個相同的光纖光柵，一個當作感測用光纖光柵元件其工作在反射區，而另一個當作濾波器其工作在穿透區如圖 2.8 所示。當感測用光纖光柵未受到外加應力時其接收端之光功率為最低，但隨著感測用光纖光柵受外加應力之增加，則接收端之光功率會跟著增加。其量測系統之應變的解析度可達到 $4\mu\epsilon$ 。

3. 可調式雷射

一般光纖光柵波長量測系統中，常用之感測光源大多為寬頻光源外，但也可以使用可調式雷射作為感測光源。

Kang et al. (1998)則利用此種方法來建立光纖光柵感測系統。如圖 2.9 所示。



2.6 光纖光柵波長之分析原理與方法

一般量測光纖光柵波長的技術方法非常多，如利用可調式雷射當作感測光源量測系統、光譜分析儀的系統 (Optic Spectrum Analysis, OSA) 和干涉方法等系統。

但是如何將上述這些方法量得的資料，計算出光纖光柵的波長峰值、中間值及波長之質量中心將是我們所面臨的問題。

假設我們設計一個光纖光柵的頻譜圖以及加入一個高斯懷特雜訊 (Gaussian White noise)。其中我們決定峰值波長係利用一個最大值來尋找雜訊頻譜的資料，另外就是用一個 2nm 頻譜資料窗口來計

算光纖光柵波長的質量中心，其公式如下所示：

$$\lambda_c = \frac{\sum_j \lambda_j I_j}{\sum_j I_j} \quad (2-11)$$

上式中， λ_c 為所需量測的波長

I_j 為反射波長的能量

而另一計算峰值波長方法則是利用兩資料點間的波長的中間值且反射係數須接近於最大反射係數的一半。然而，我們也可用一曲線來符合所計算的峰值波長，其詳細步驟如下：

1. 我們去除低於在最大量測的反射係數點以下-1.5dB 的量測反射資料。
2. 然後，用一四階多項式的曲線來符合反射頻譜的中心部分，且微分此四階多項式來決定峰值波長。

根據上述方法我們可得到，多項式的階數並不會影響分析結果，除非是用一高階多項式來符合雜訊的資料，所以多項式的方法都是用於雜訊方面。另外，我們也可以應用多項式符合去除後的資料為一個高斯函數（Gaussian function）。

我們可以在重復模擬中計算出峰值波長的偏差，而在這當中，雜訊為一隨機的，但是訊號雜訊比（Signal-Noise Ratio, SNR）為固定常數。而偏差是決定於 50 次模擬的標準偏差。

如圖 2.10 所示，我們比較這些峰值波長計算程序。在低的訊號雜訊比中，峰值波長的尋找與波長質量中心的計算是敏感於雜訊及不足的工作。由圖 2.10 中可知，以最大值一半的中間值之方法為最好的結果且曲線非長平緩，原因是其反射頻譜有較陡峭的斜率之結果，所以在許多的應用上最大一半的中間值計算是非常容易去執行且具有好的選擇性。

而高斯及多項式曲線的符合也可得到良好的結果，由圖 2.10 所示，值得注意的是曲線的符合偏差的影響是取決於頻譜的輪廓及光纖光柵頻譜分散的取樣點密度且良好的光纖光柵頻譜形狀與峰值反射強度有關。一般強度高的光纖光柵其反射之頻譜圖波峰較為平坦，故很難用曲線來符合它且有較高之偏差值，由圖 2.11 所示。

此外，在圖 2.11 也可得知，若光纖光柵的頻譜是由高密度取樣點所取樣出 ($\Delta\lambda$ 非常小)，則曲線得符合可得到良好之改善。所以在光纖光柵感測器應用上，所取決的光纖光柵最好能避免使用特出的反射頻譜及選擇較寬窄的反射頻譜且容易識別出峰值。

2.7 光纖光柵系統之溫度補償原理與方法

一般光纖光柵解讀系統中，除了針對量測解析度之要求之外，還須對環境溫度影響作一修正。因在量測時，若溫度隨著量測時間而改變，將會影響其儀器的穩定度，使得量測精度降低。所以必須在量測

系統上作溫度補償之動作，而以下為常用之光纖光柵解讀系統溫度補償方法。

1. 利用對溫度較不敏感之光纖光柵陣列

如圖 2.12 所示為利用對溫度較不敏感之光纖光柵陣列來作為光纖 Fabry-Perot 濾波器之參考用濾波器。其原理為利用光纖光柵陣列反射至光纖 Fabry-Perot 濾波器上之訊號不會因溫度而產生飄移之特性，利用其反射訊號來對光纖 Fabry-Perot 濾波器作溫度的補償校正。目前工研院發展出的溫度不敏感光纖光柵已經可以達到 $1\text{pm}/^\circ\text{C}$ （對沒有作 athermal package 的光纖光柵而言是 $10\text{pm}/^\circ\text{C}$ ）。但是如果掃描的範圍較大時，校正之點數就需增多，所以光纖光柵的數目必須很多（約 20~25 個），成本上來說就較為昂貴。

2. 利用一個固定的 Fabry-Perot 濾波器做參考用濾波器

圖 2.13 為利用一個固定的 Fabry-Perot 濾波器做參考濾波器來補償溫度對光纖 Fabry-Perot 濾波器所造成的飄移之實驗架構圖。其原理與上述方法類似，只是將光纖光柵陣列換作固定之 Fabry-Perot 濾波器。而此固定之 Fabry-Perot 濾波器可用不同 Finesse 且有加溫控之光纖 Fabry-Perot 濾波器，或者是溫度係數較低之 spacer 所作成之 air gap Fabry-Perot 濾波器。

3. 利用一與壓電材料溫度係數相反之物質作補償

如圖 2.14 所示，在光纖 Fabry-Perot 濾波器內之壓電材料旁加上一與溫度改變相反之壓電材料。所以當溫度變化時，壓電材料所產生之應變可以被抵消，而使得光纖 Fabry-Perot 濾波器對溫度產生的影響降低。



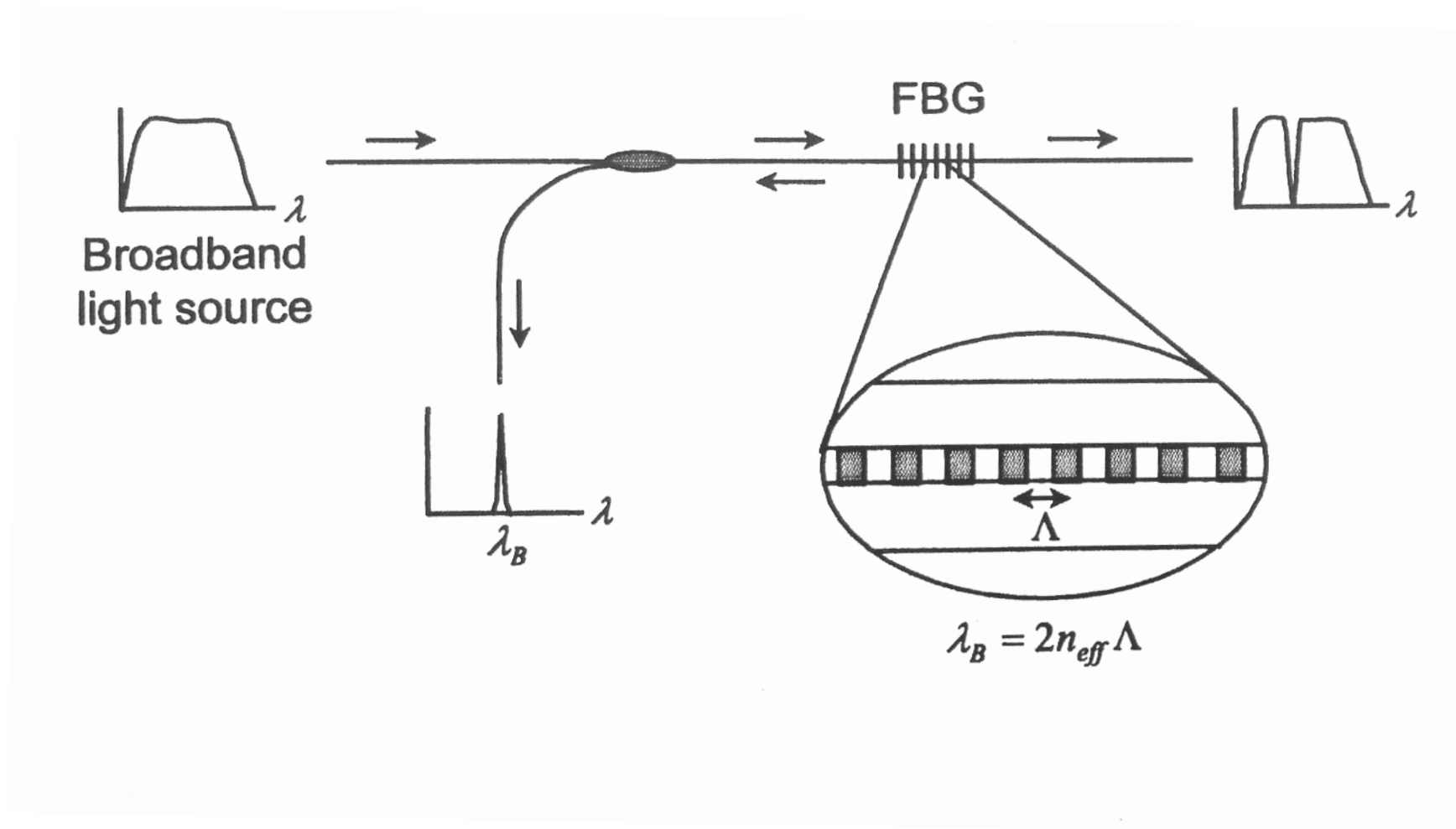


圖 2.1 光纖光柵反射原理示意圖 (摘自 Yu and Yin, 2002)

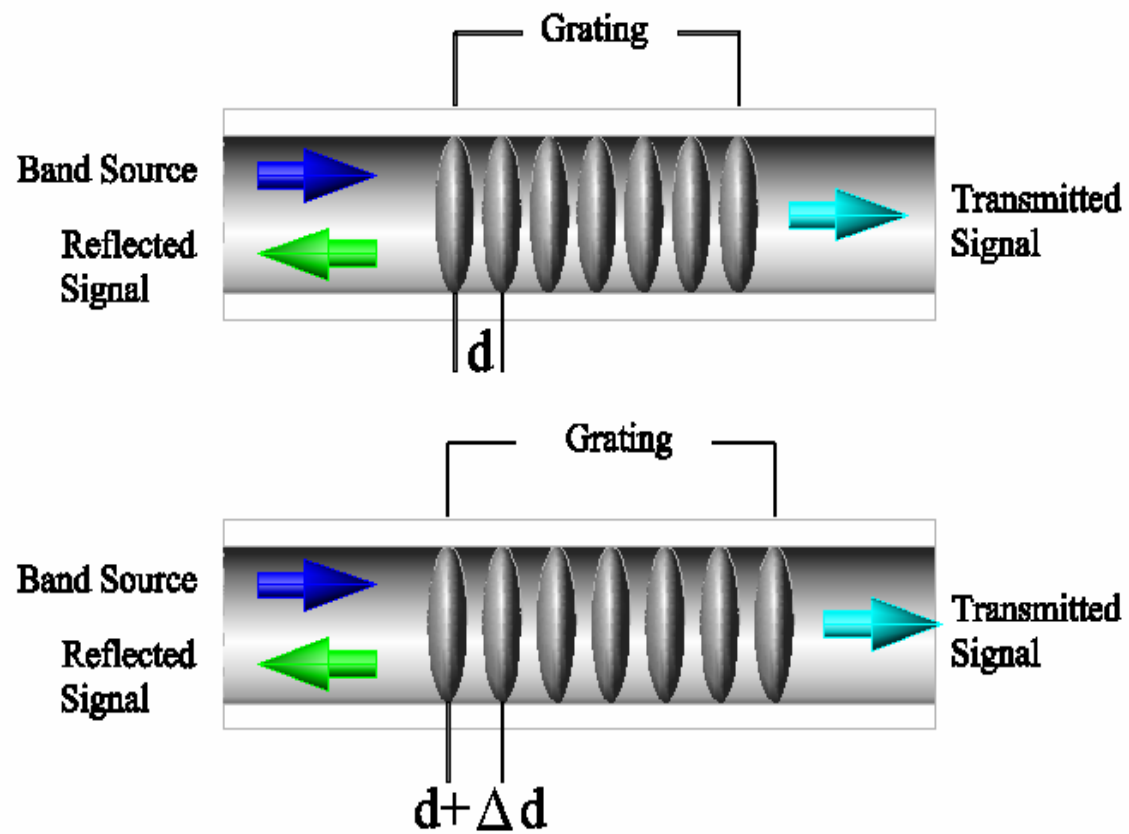


圖 2.2 光纖光柵示意圖 (摘自簡旭君, 2003)

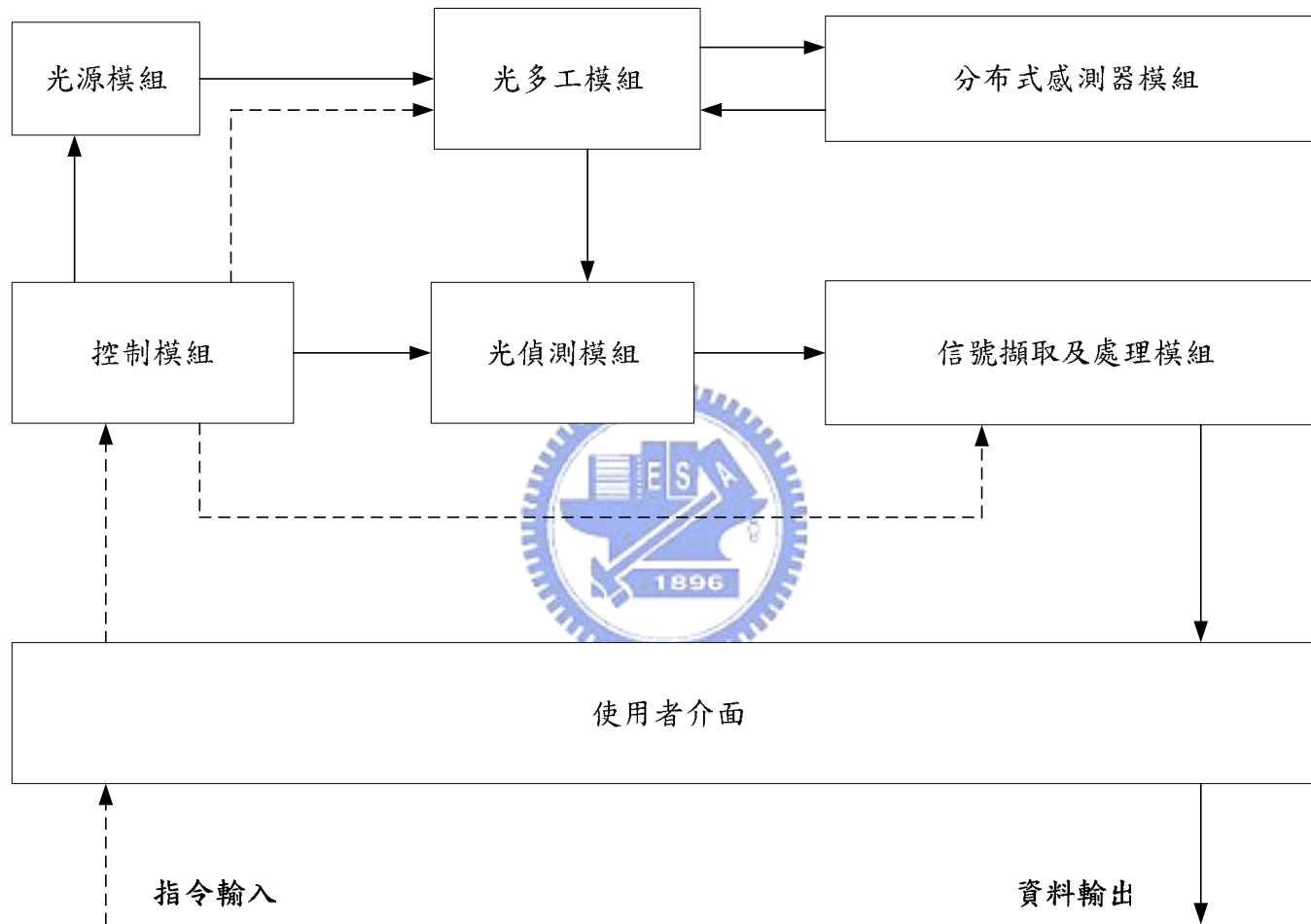


圖 2.3 分散式光纖光柵感測系統架構圖 (摘自陳欲文, 2000)

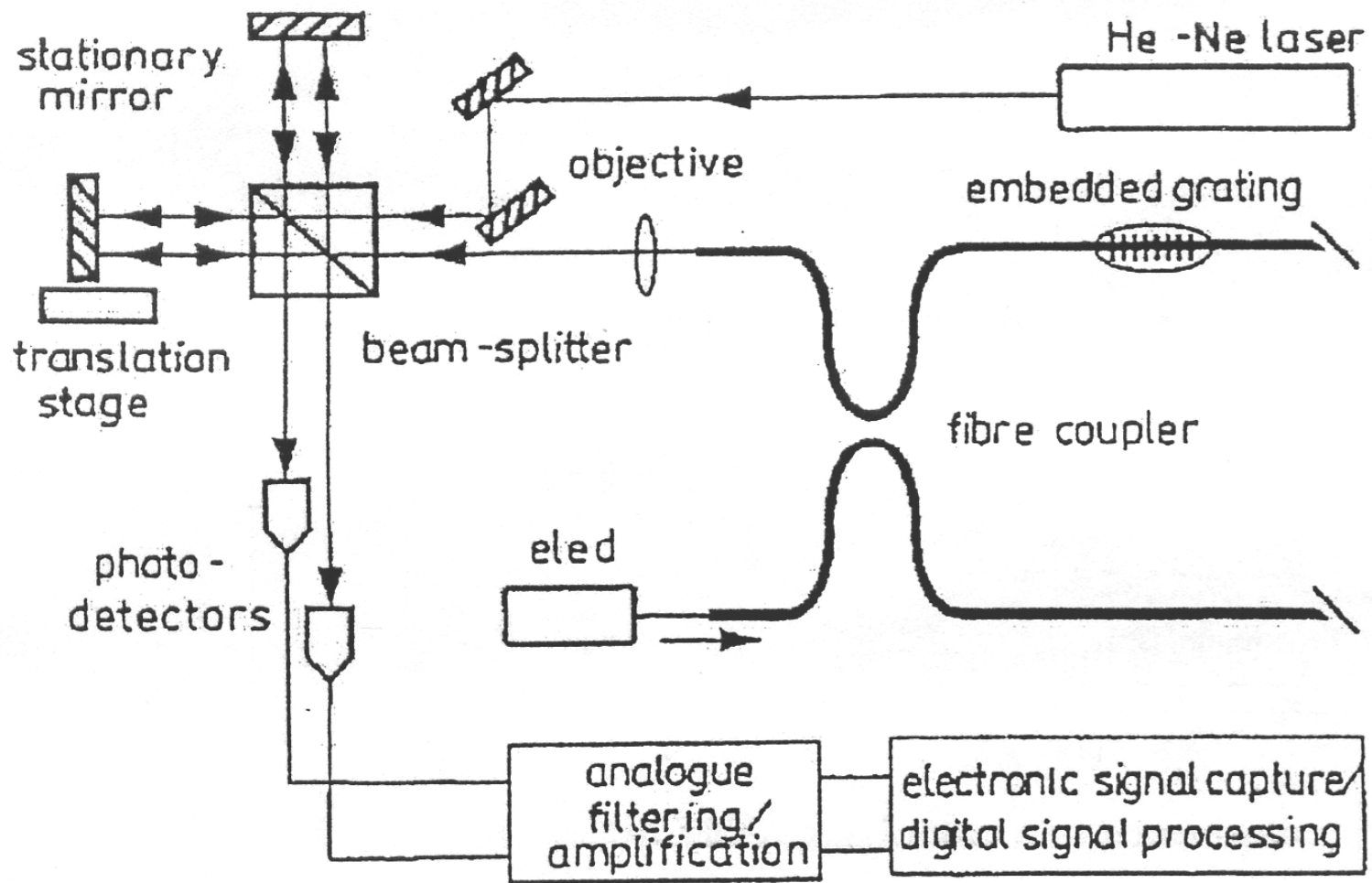


圖 2.4 麥克遜干涉儀量測系統 (摘自 Flavin et al., 1997)

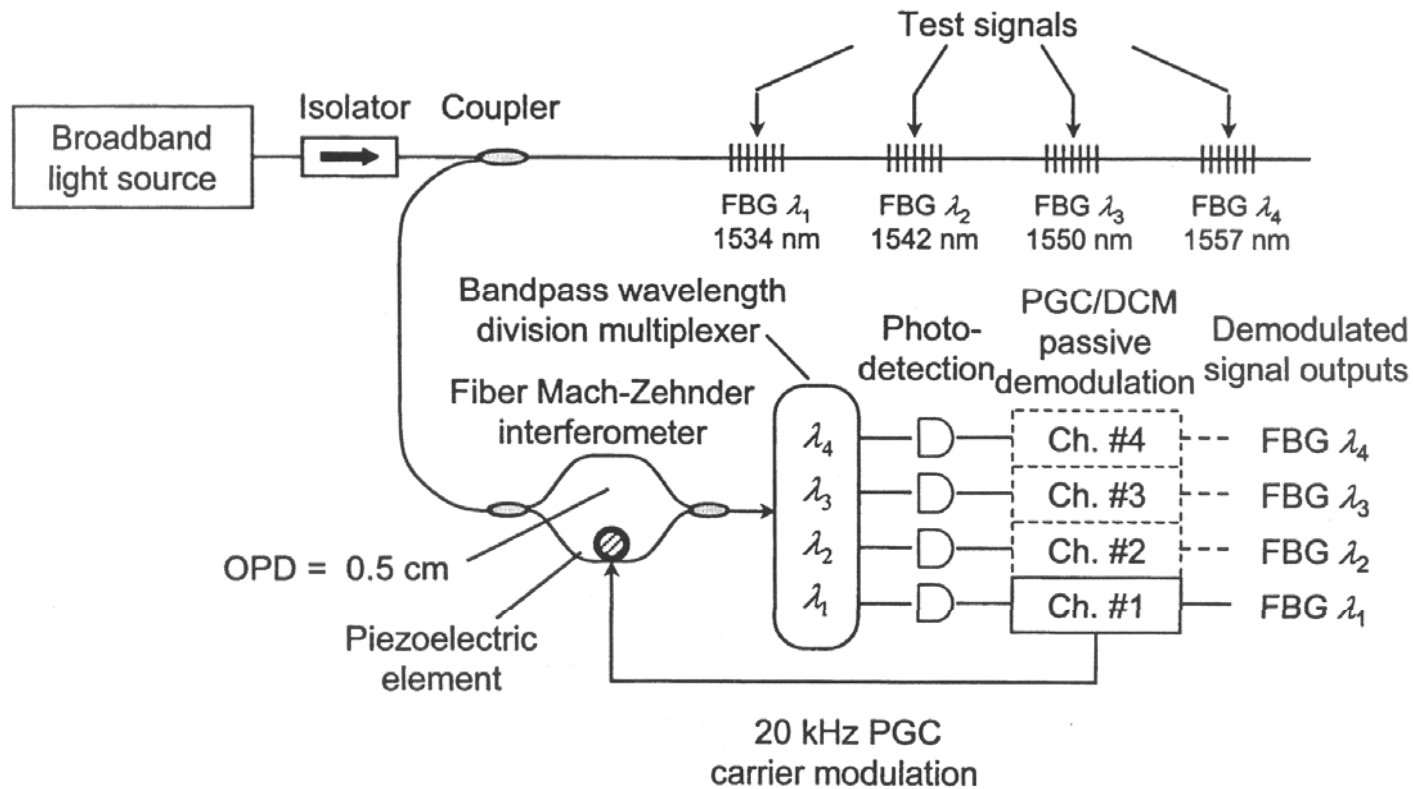


圖 2.5 光纖 Mach-Zehnder 干涉儀量測系統 (摘自 Othonos and Kalli, 1999)

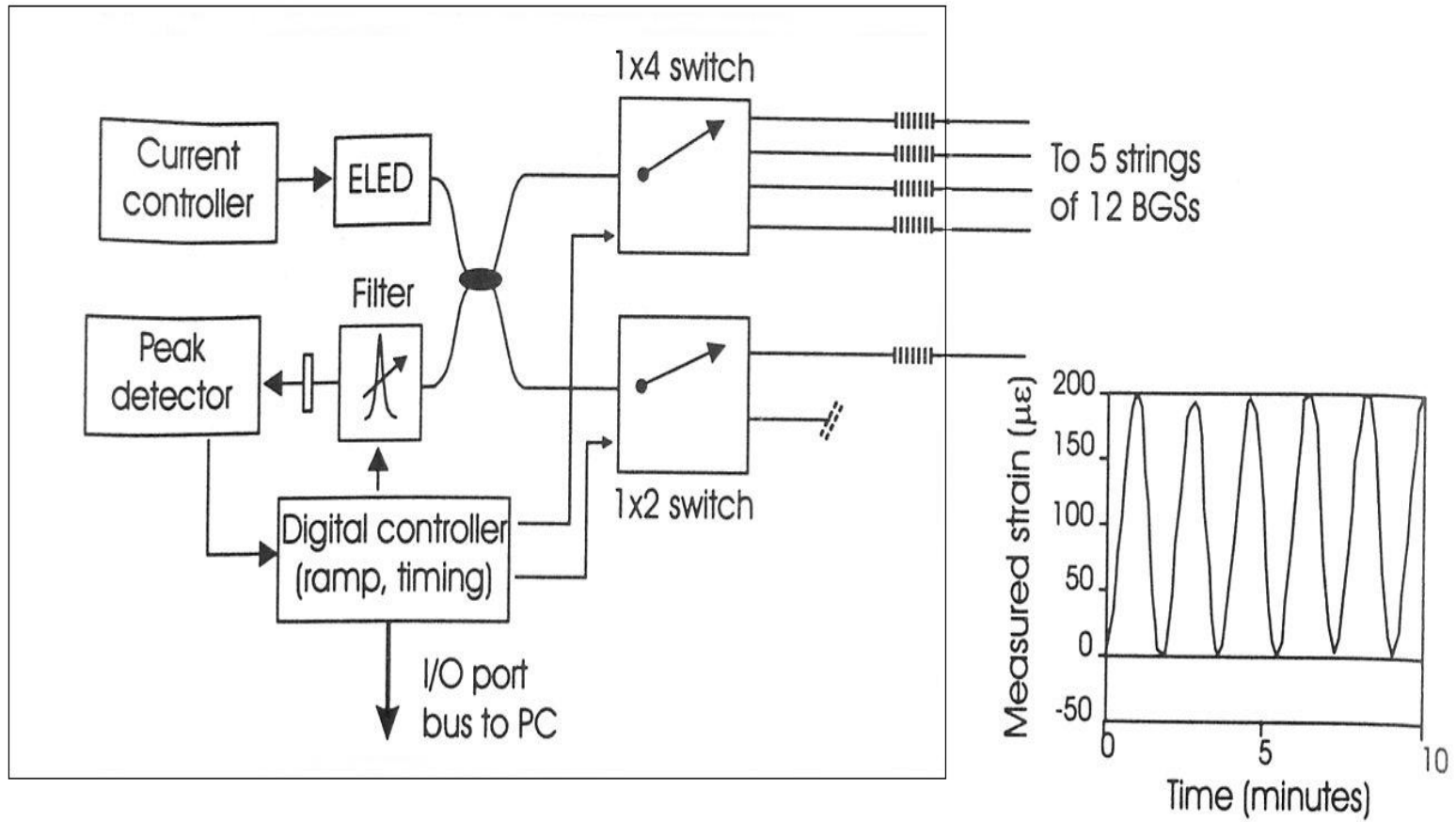


圖 2.6 利用光纖 Fabry-Perot 濾波器之量測系統 (摘自 Othonos and Kalli, 1999)

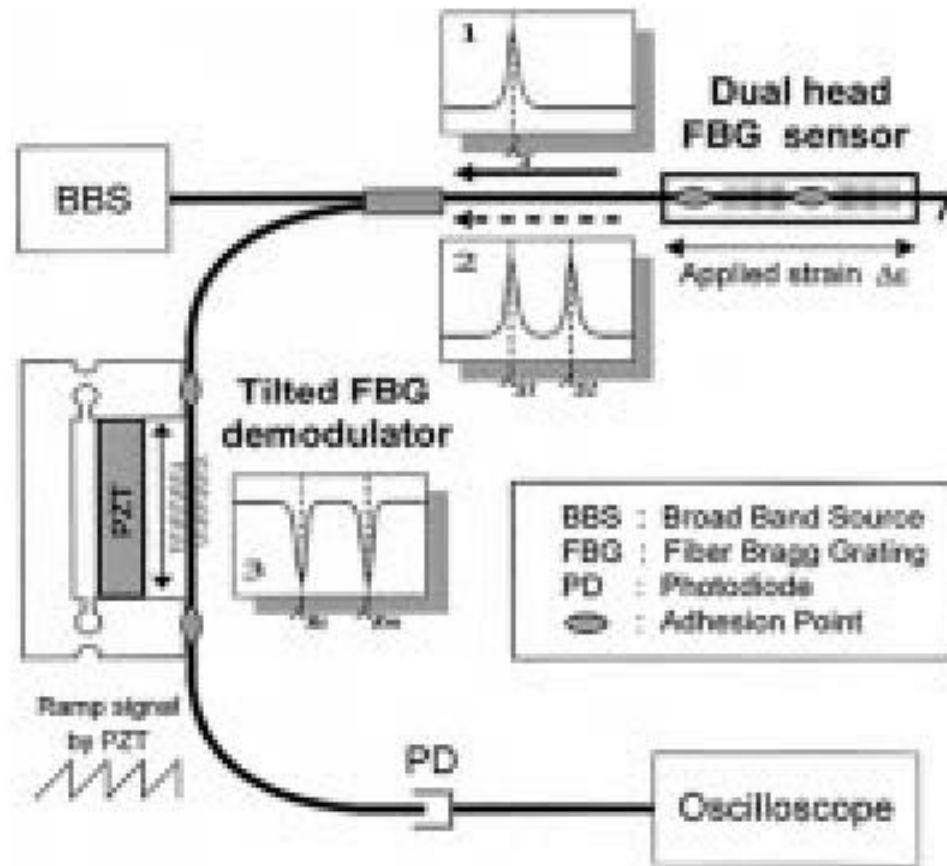


圖 2.7 斜布拉格光纖光柵作解調器之系統 (摘自 Kang et al., 1998)

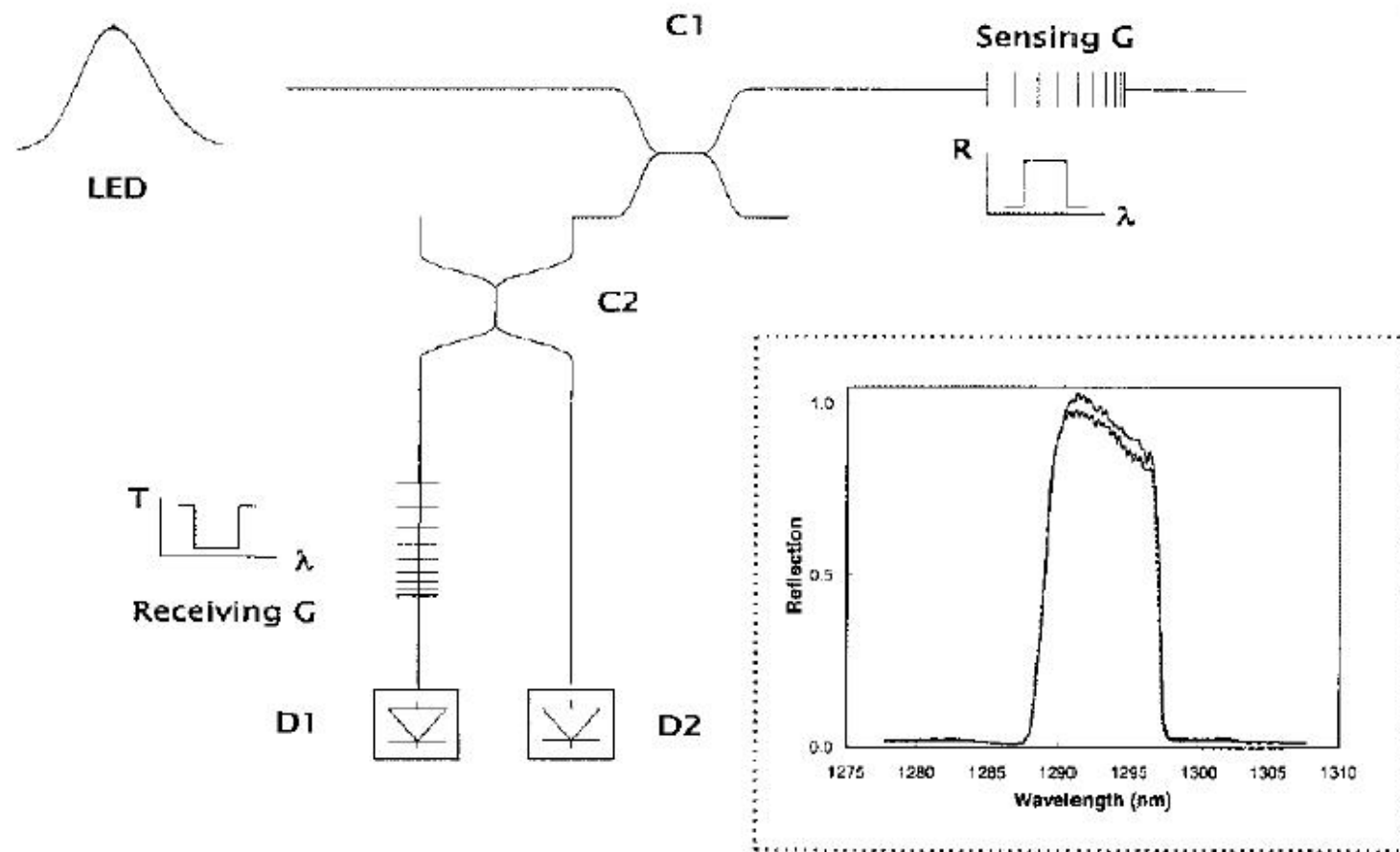


圖 2.8 兩個相同之光纖光柵作被動解調之系統 (摘自 Fallon et al., 1997)

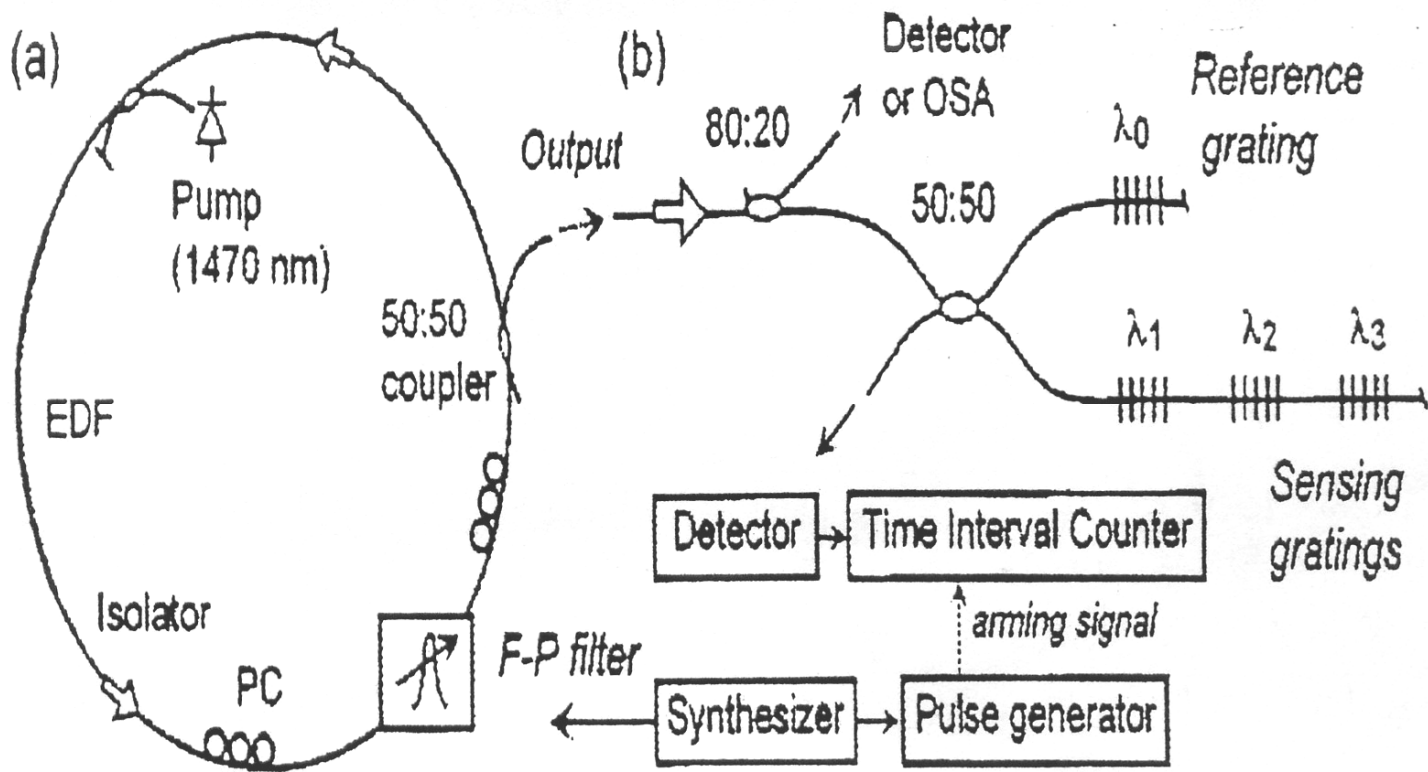


圖 2.9 可調式雷射作感測光源之系統

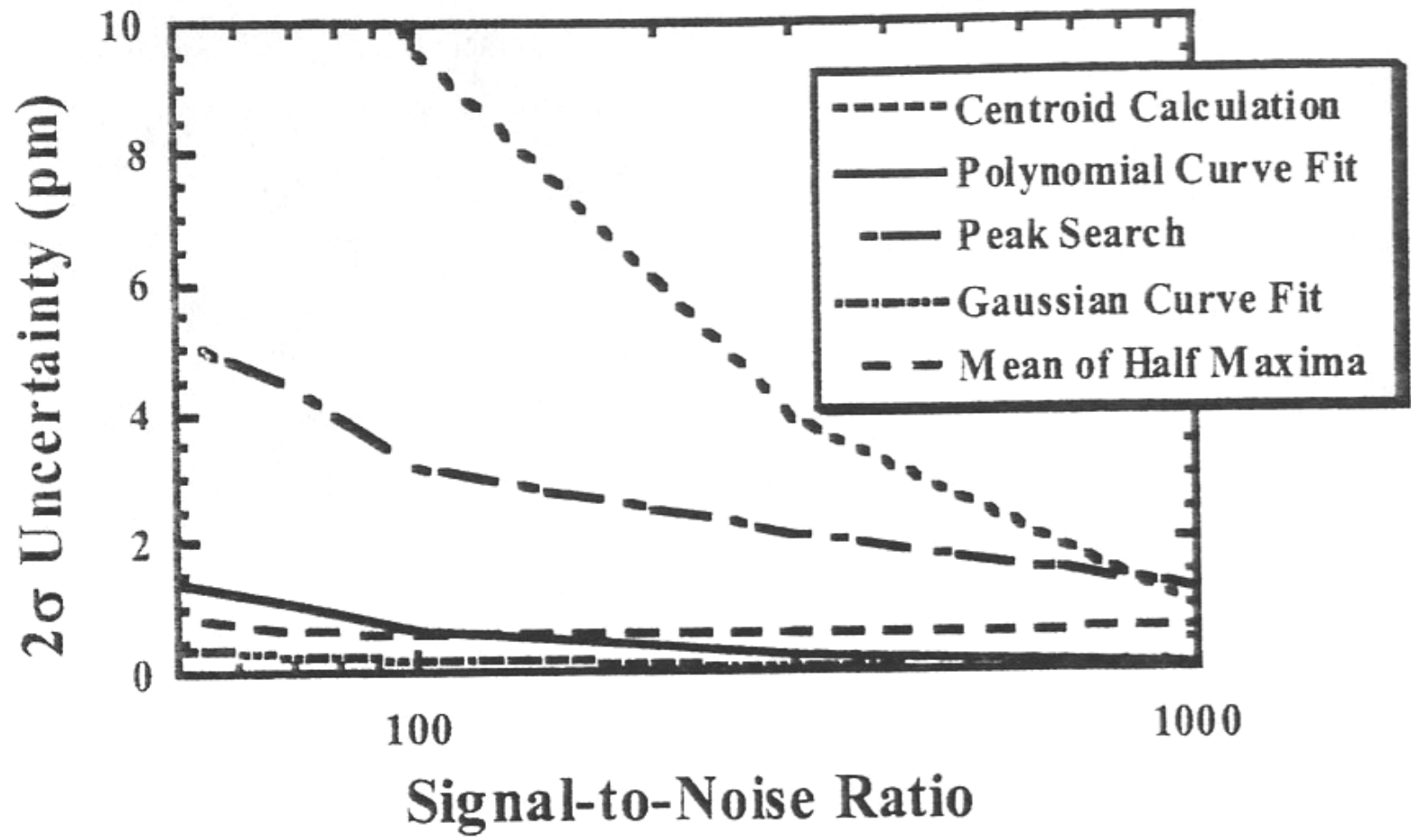


圖 2.10 利用不同方法計算光纖光柵波長之 2 倍偏差與訊號雜訊比關係圖 (Dyer et al., 2005)

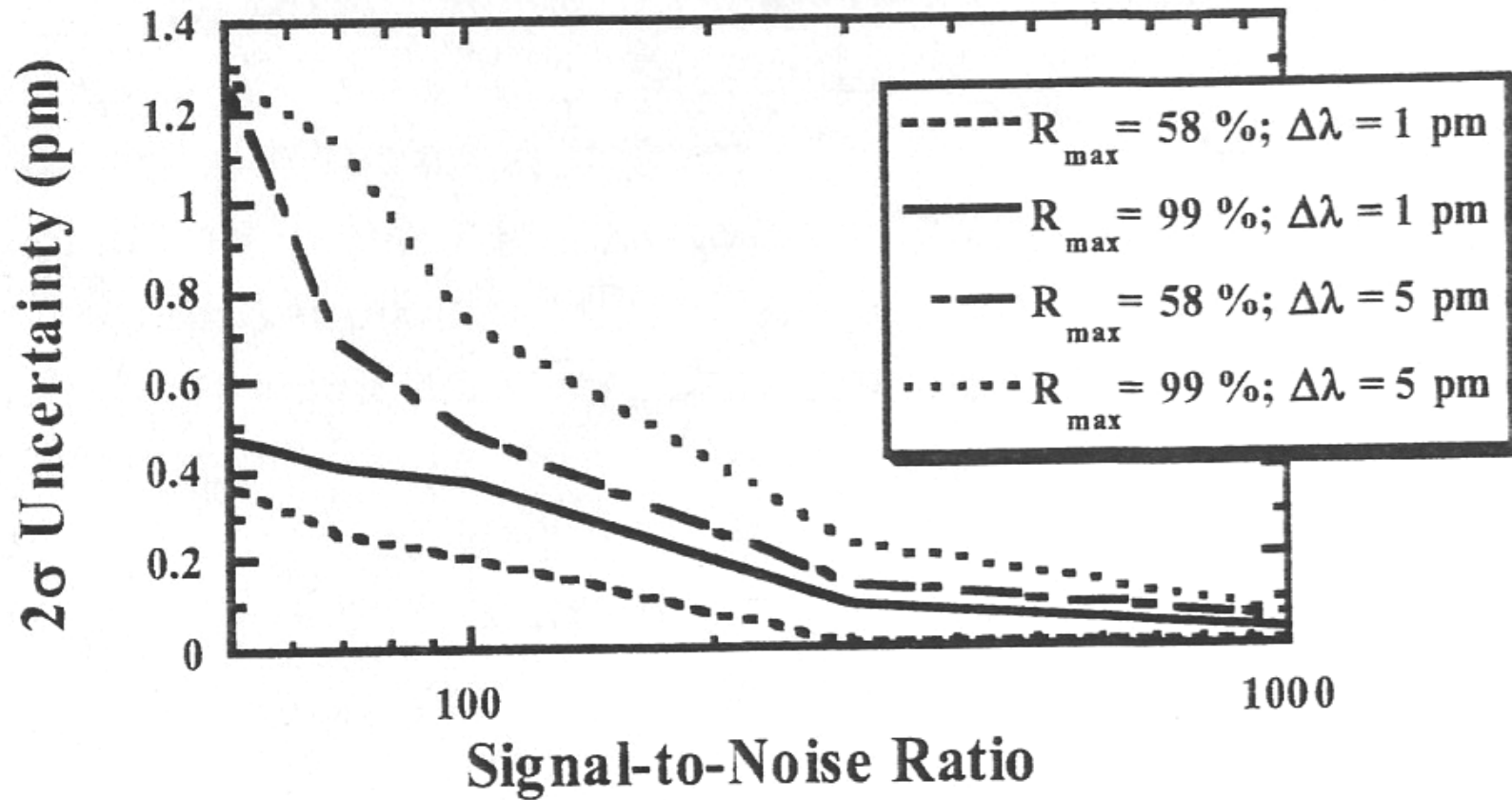


圖 2.11 不同反射強度及波長間格之訊號雜訊比與 2 倍偏差之關係圖 (Dyer et al., 2005)

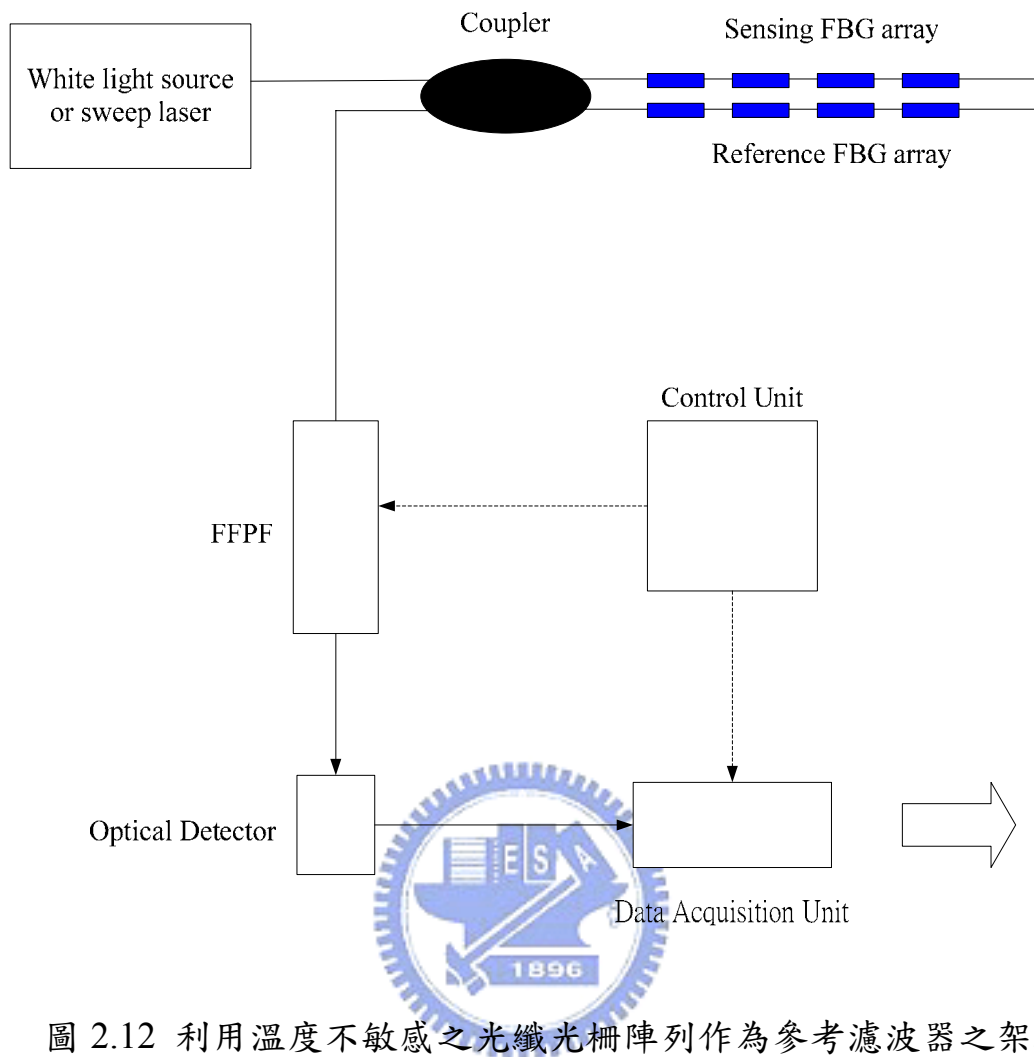


圖 2.12 利用溫度不敏感之光纖光柵陣列作為參考濾波器之架構

(摘自陳欲文, 2000)

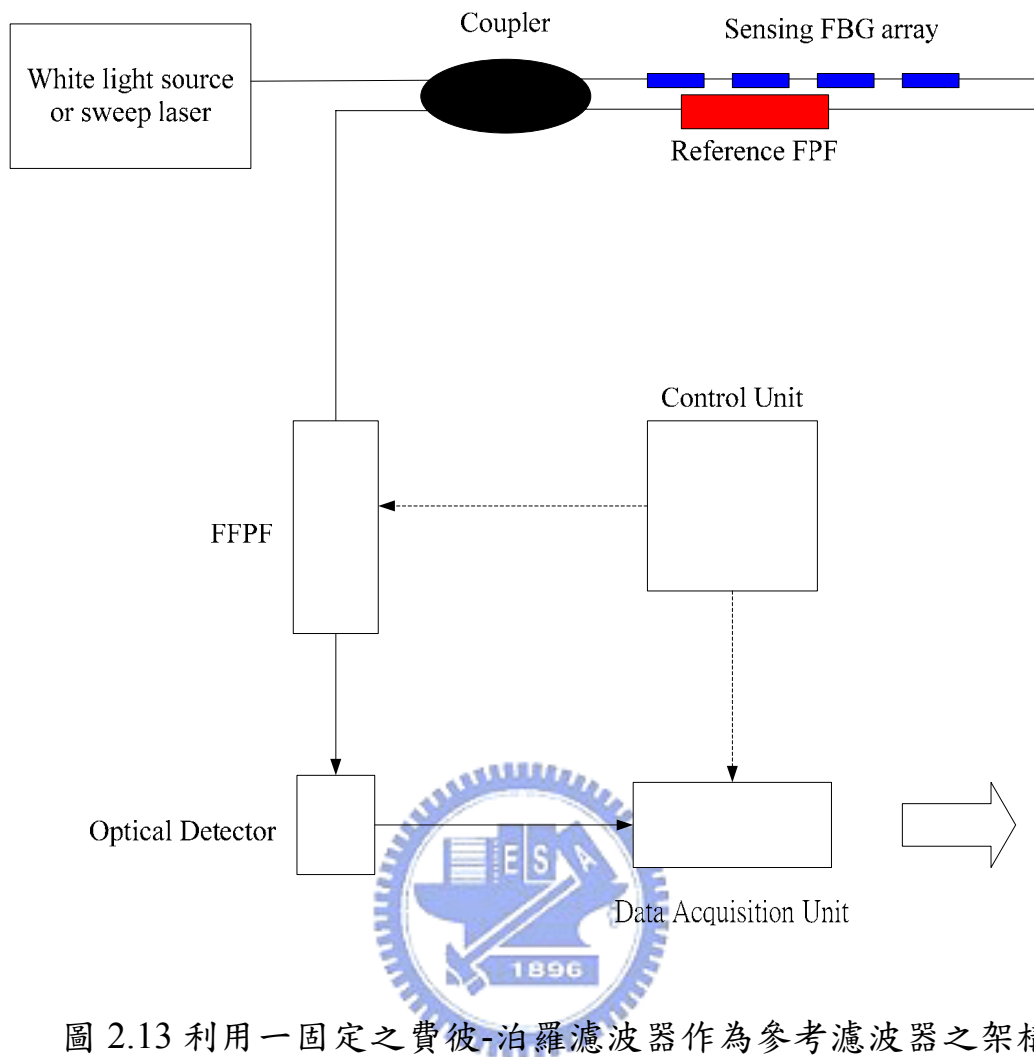


圖 2.13 利用一固定之費彼-泊羅濾波器作為參考濾波器之架構

(摘自陳欲文, 2000)

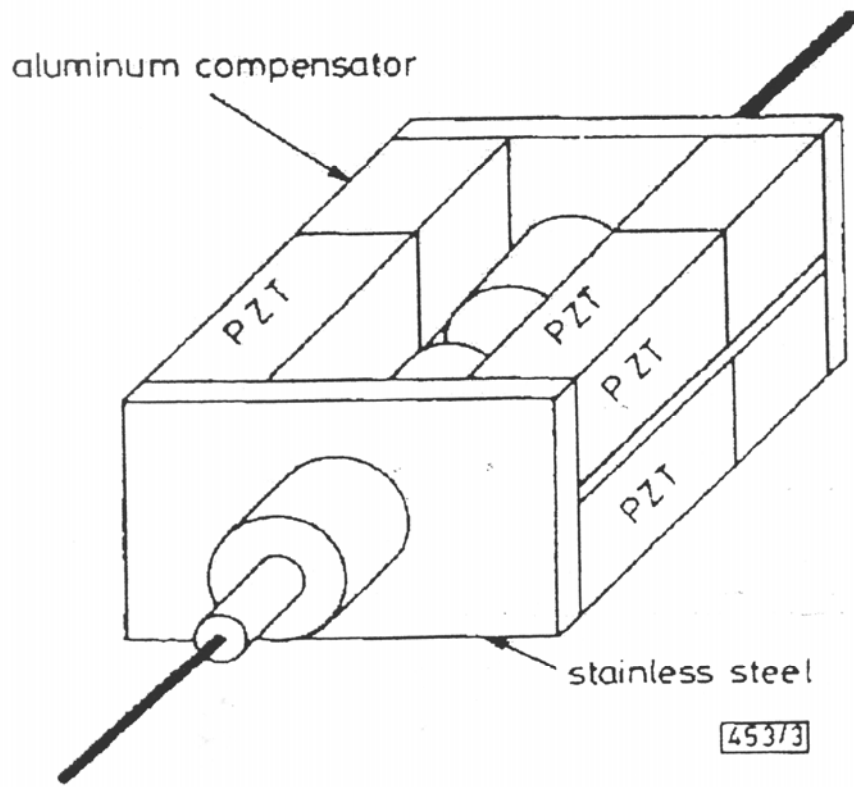


圖 2.14 溫度係數相反之壓電材料

第三章 Labview 光纖光柵解讀系統之研發

3.1 Labview 程式簡介

Labview (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) 是由 National Instrument 公司所發展出的繪圖程式語言，也就是說，在程式設計上則是以圖形方式來編寫。而 Labview 程式操作上主要分為三部份分別為前置面板、程式方塊流程圖及圖像連接器，在前置面板中，如圖 3.1 所示，主要是讓使用者來設定輸入端的值，另一方面也提供輸出及輸入物件的選擇，猶如像真實儀表一樣之控制面板，包含了控制端及顯示端；圖 3.2 中為程式方塊流程圖的架構，也就是程式主要部份，而這些圖形化程式再藉由圖像連接器的功能，如圖 3.3 所示，將每個圖形程式用線段相連接來達到資料傳輸的目的。

3.2 本研究之光纖光柵讀取系統架構

本研究主要以 Fibera 公司生產之光纖光柵解讀儀為基礎，其系統架構如圖 3.4 所示，而訊號分析計算上採用 Dyer et al. (2005)所提出波長質心概念之方法。在操作方面係利用 Labview 軟體所撰寫之控制擷取程式來控制可調式雷射 (Tunable Laser) 輸出一連續窄頻光源，當連續窄頻光源經過光耦合器時，則依據光耦合器分光原理再分出兩道連續之窄頻光源。在兩道連續之窄頻光源中，其中一道光源進入波長鎖模器 (Wavelength Locker) 將可調式雷射輸出之連續窄頻光源訊號

轉換為連續之電壓訊號並作溫度上之修正。此外，另一連續窄頻光源，則進入光纖光柵中，當連續之窄光源內之其中某一波長符合光纖光柵之波長時，則符合光纖光柵波長之光訊號將被反射回來，其餘波長光源將穿透過去。而被反射的光訊號將經過光偵測器轉換為電壓訊號，最後再經由資料擷取卡將上述之電壓訊號轉為數位訊號並做訊號上之分析得出光纖光柵之波長值。而以下各節將介紹本研究儀器相關元件之操作原理及訊號之分析計算。

3.3 光纖光柵讀取系統相關元件之原理及應用

由圖 3.5 所示，本研究的光纖光柵解讀系統主要分為兩部分，分別為光路系統及控制系統，而各系統之相關元件說明如下：



3.3.1 光路系統部分

如圖 3.6 所示，本光路系統所使用的光源為可調式雷射 (Tunable Laser)，分光元件為二進二出之光耦合器 (Bidirectional Coupler)，光訊號轉換電壓訊號元件為光偵測器 (Photo Detector) 及波長鎖制器 (Wavelength Locker)，至於頻道切換之元件為光切換器 (Optic Switch)，其儀器各項說明如下：

1. 可調式雷射光源 (Tunable Laser Source)

如錯誤! 找不到參照來源。所示，可調式雷射之原理係利用一寬頻光源雷射、可調式 Fabry-Perot 濾波器及光隔離器 (Isolator)，當寬

頻光源經過可調式 Fabry-Perot 濾波器則會依據設定輸出單一波長出來，而根據不同時間的設定連結起來時，就成為依連續之窄頻光源，故稱之可調式雷射。

2. 光耦合器 (Coupler)

其係利用光折射之原理將光源一分為二或一分為多，而詳細說明可參照光電相關書籍。

3. 光偵測器 (Photo Detector)

一般常見的光偵測器的型態大多為半導體型式，其感測機制為光子進入光偵測器元件時，則會激發自由電荷載子（電流），且輸出之電流與光功率之比為一常數。若輸入光功率愈大時，則輸出電流愈大。另外有些光偵測器輸出為電壓之型態。

4. 波長鎖制器 (Wavelength Locker)

係利用內部之光偵測器將光源依據光功率之大小來作一鎖頻的動作，通常波長鎖制器具有下列之優點：

- (1) 較高的精確性。
- (2) 具工業標準化的輸入及輸出介面。
- (3) 高密度封裝確保長時間使用的可靠性。
- (4) 多頻道的功能。

而本研究所採用的波長鎖制器頻率為 50GHz，其頻率為 50GHz

所代表的兩波長頻率間距為 50GHz，若頻率間距愈小量測的精度愈高。

5. 光切換器 (Optic Switch)

主要由東盈光電公司所生產，其具備 4 個頻道的輸出，而各頻道切換由電晶體電晶體邏輯 (Transistor Transistor Logic, TTL) 數位邏輯電路來控制且具有高切換之速度。


3.3.2 控制擷取系統部分

在控制方面係透過工業電腦內 Labview 系統程式，並藉由 RS-232 傳輸介面來下達命令程式於可調式雷射作出輸出光源的動作，而光切換機頻道切換部分，則是利用資料擷取卡數位部分功能來作控制。

當雷射光源輸出動作進行時，此時資料擷取卡將擷取波長鎖制器與光偵測器所轉換之電壓訊號，而電壓訊號分別為光譜訊號 (PD1)、溫度訊號 (PD2) 及光纖光柵反射訊號 (PD3)，最後將所擷取之訊號作一分析計算得到光纖光柵之波長值。

3.4 光纖光柵波長之分析計算

此節主要敘述如何計算光纖光柵 (Fiber Bragg Grating, FBG) 的波長值，以下為此波長計算的分析步驟：

1. 光源部分：我們設定可調式雷射光源調頻速度為每秒 2.5nm，且波長範圍從 1520nm 至 1570nm，所以可調式雷射每一次循環週期為 20 秒。
2. 擷取訊號部分：我們設定擷取卡擷取的點數共為 230,000 點，且截取卡共有 4 個頻道，故每個頻道所擷取的點數為 57,500 點，但為了配合可調式雷射掃頻的時間，擷取速率設為每秒 2,500 次，所以擷取卡每一次循環的時間為 23 秒，如此一來，才可達到很好的量測效果。
3. 如圖 3.7 所示，此訊號為波長鎖制器對可調頻雷射所輸出的光源所偵測之訊號波形 (PD1)，且此波形隨著點數的增加會有上揚的趨勢，其原因為溫度所影響之。圖 3.8，橫座標為 15,000 至 40,000 點的波形圖。
4. 圖 3.9 所示，為波長鎖制器針對溫度變化所得到之訊號 (PD2)，而圖 3.10，為橫座標點位從 15,000 至 40,000 的波形。
5. 由圖 3.11 所顯示，為兩個光纖光柵反射訊號波形圖 (PD3)，而圖 3.12 為其中一個光纖光柵反射訊號放大波形圖。


6. 圖 3.13 所顯示，為可調式雷射所輸出的波形對溫度訊號波形所做的修正，以解決參考波形因溫度影響，而造成參考波長之漂移。
圖 3.14，為放大之訊號波形圖。
7. 相同地，因量測系統會受到溫度的影響，故光纖光柵得反射訊號波形，也須對溫度作一修正，如圖 3.15 所示。另外圖 3.16，為其中一光纖光柵之放大圖形。
8. 我們將圖 3.17 所得到之波形圖作一峰值點位的尋找，而本研究的方法為，分別設定波高的門檻值(Threshold)及波之寬度(Width)，由圖 3.18 所示。然後利用求圖形面積質心的觀念，即可找到峰值所對應的點位。
9. 利用上述的方法，同樣我們設定波高的門檻值(Threshold)及波之寬度(Width)，就求取圖 3.19 中之每一個光纖光柵之峰值所對應之點位。
10. 由圖 3.20 所示意，我們將步驟 8 所得知每一個峰值所對應的點位，由後往前來尋找第一個光纖光柵介於哪兩個參考波長峰值的點位，同樣，將參考波長峰值所對應的點位由後往前分別對應編號由後往前之表 3.1、表 3.2 參考波長值，最後利用內插的方法求出第一個光纖光柵的波長值，並依此類推，計算其他光纖光柵之波長值。

表 3.1 參考波長

編號	波長值, pm	編號	波長值, pm	編號	波長值, pm	編號	波長值, pm	編號	波長值, pm
1	1521	16	1527.136	31	1532.986	46	1538.89	61	1544.834
2	1521.711	17	1527.526	32	1533.382	47	1539.288	62	1545.234
3	1522.094	18	1527.915	33	1533.774	48	1539.684	63	1545.637
4	1522.479	19	1528.301	34	1534.166	49	1540.075	64	1546.033
5	1522.864	20	1528.693	35	1534.558	50	1540.473	65	1546.434
6	1523.254	21	1529.086	36	1534.952	51	1540.867	66	1546.834
7	1523.615	22	1529.47	37	1535.345	52	1541.267	67	1547.229
8	1524.005	23	1529.864	38	1535.739	53	1541.661	68	1547.629
9	1524.418	24	1530.252	39	1536.132	54	1542.055	69	1548.032
10	1524.809	25	1530.64	40	1536.526	55	1542.455	70	1548.429
11	1525.189	26	1531.033	41	1536.917	56	1542.845	71	1548.829
12	1525.583	27	1531.425	42	1537.314	57	1543.247	72	1549.229
13	1525.969	28	1531.815	43	1537.709	58	1543.642	73	1549.628
14	1526.355	29	1532.206	44	1538.094	59	1544.039	74	1550.028
15	1526.744	30	1532.596	45	1538.493	60	1544.438	75	1550.43

表 3.2 參考波長值 (續)

編號	波長值, pm	編號	波長值, pm	編號	波長值, pm	編號	波長值, pm
76	1550.827	91	1556.877	106	1562.959	121	1569.09
77	1551.23	92	1557.273	107	1563.37	122	1569.504
78	1551.633	93	1557.676	108	1563.775	123	1569.916
79	1552.035	94	1558.086	109	1564.179		
80	1552.432	95	1558.493	110	1564.589		
81	1552.836	96	1558.899	111	1565		
82	1553.242	97	1559.302	112	1565.408		
83	1553.647	98	1559.711	113	1565.812		
84	1554.052	99	1560.114	114	1566.221		
85	1554.447	100	1560.522	115	1566.632		
86	1554.856	101	1560.926	116	1567.036		
87	1555.258	102	1561.333	117	1567.452		
88	1555.659	103	1561.74	118	1567.865		
89	1556.068	104	1562.145	119	1568.275		
90	1556.47	105	1562.554	120	1568.681		

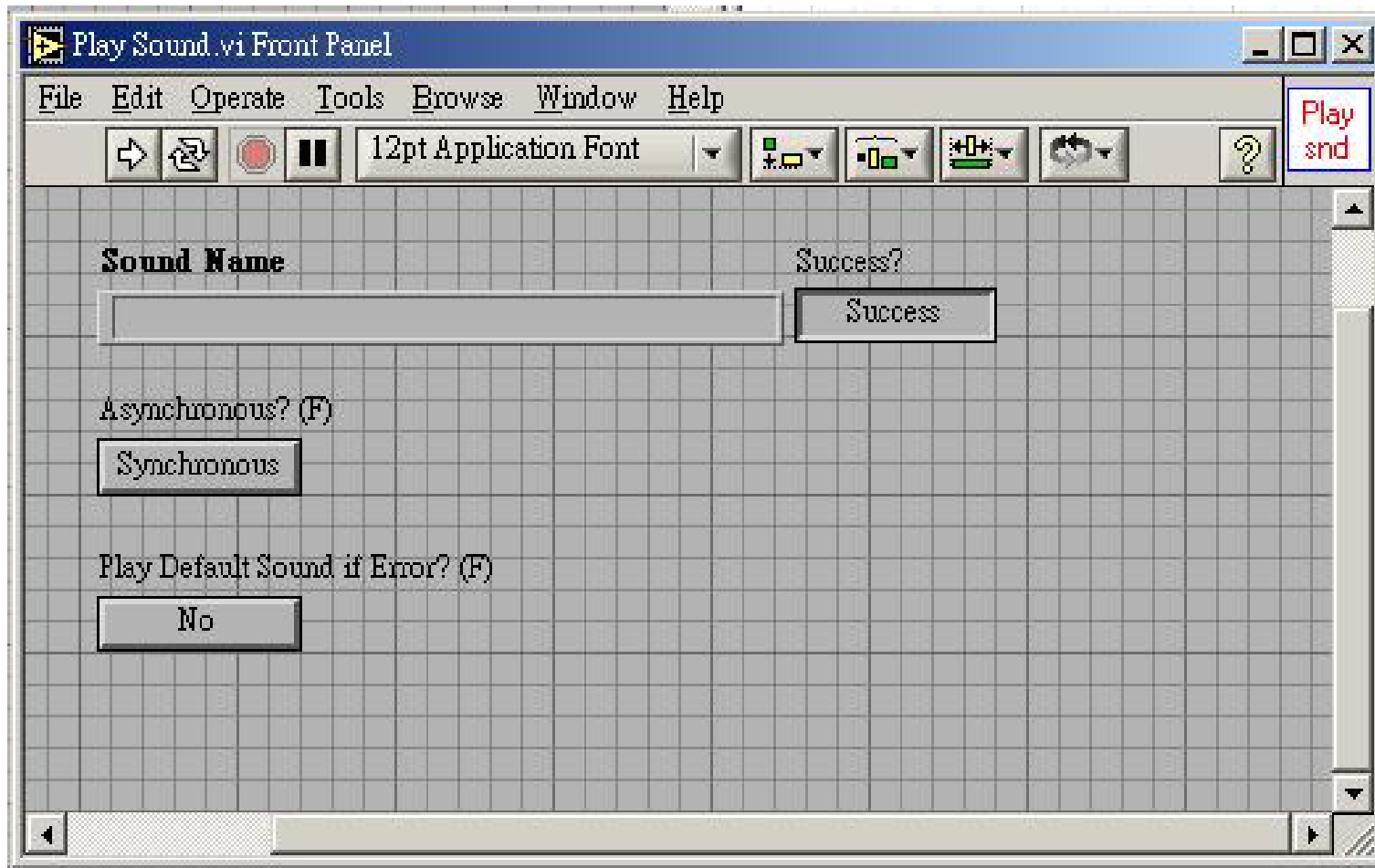


圖 3.1 Labview 程式之前置面板示意圖

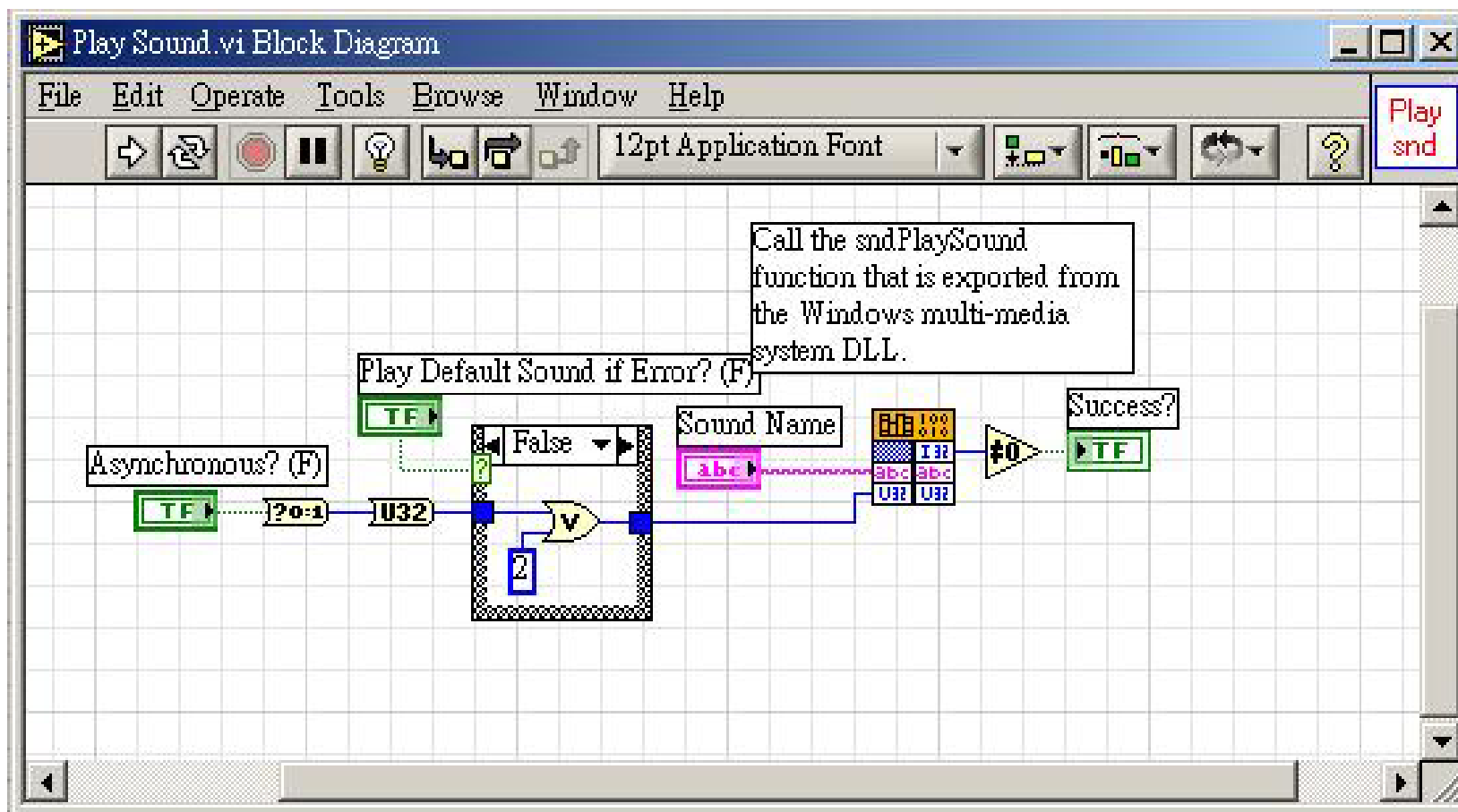


圖 3.2 Labview 程式之程式方塊流程示意圖



圖 3.3 Labview 程式之圖像和連接器示意圖

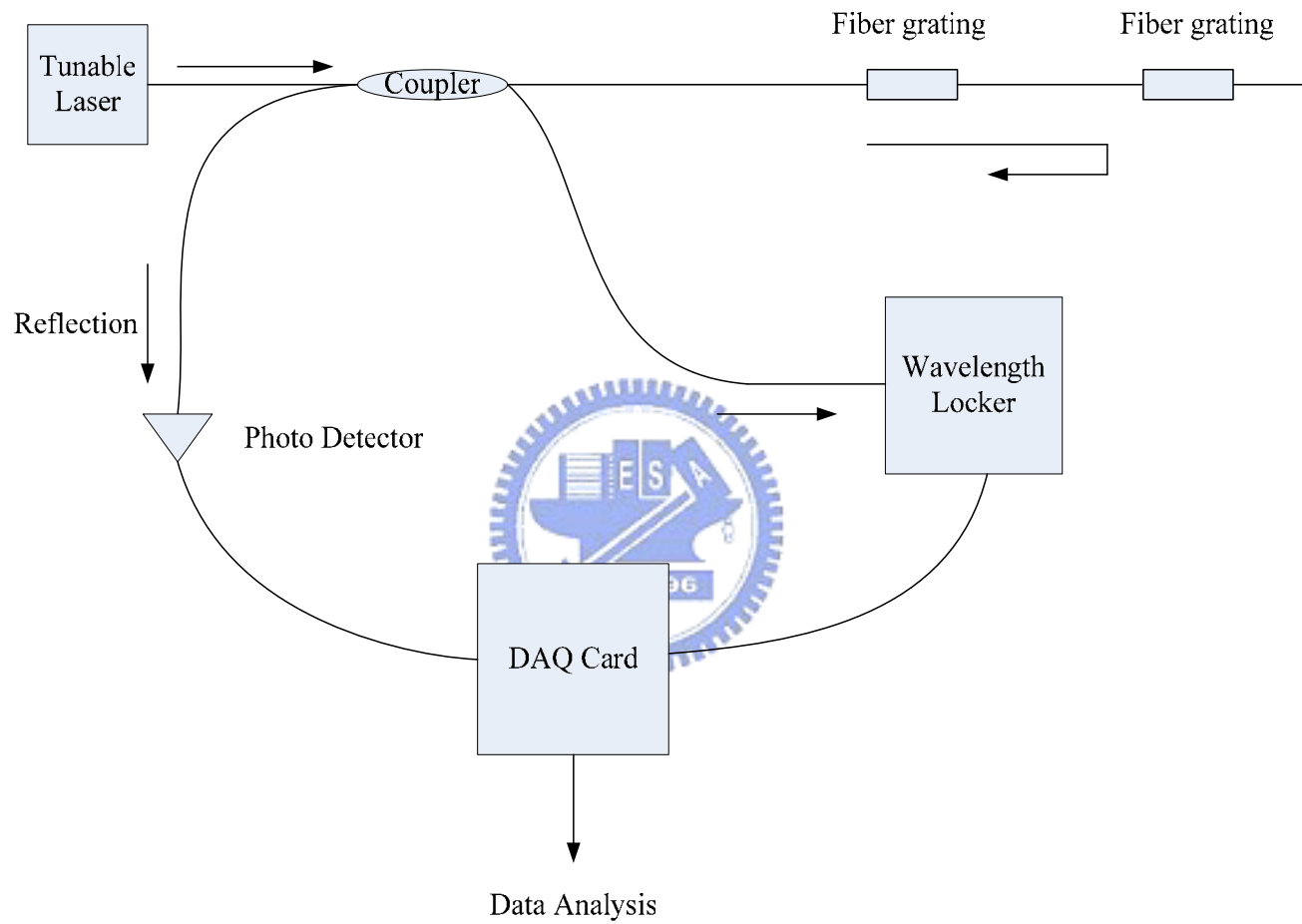


圖 3.4 Fibera 光纖光柵解讀系統架構

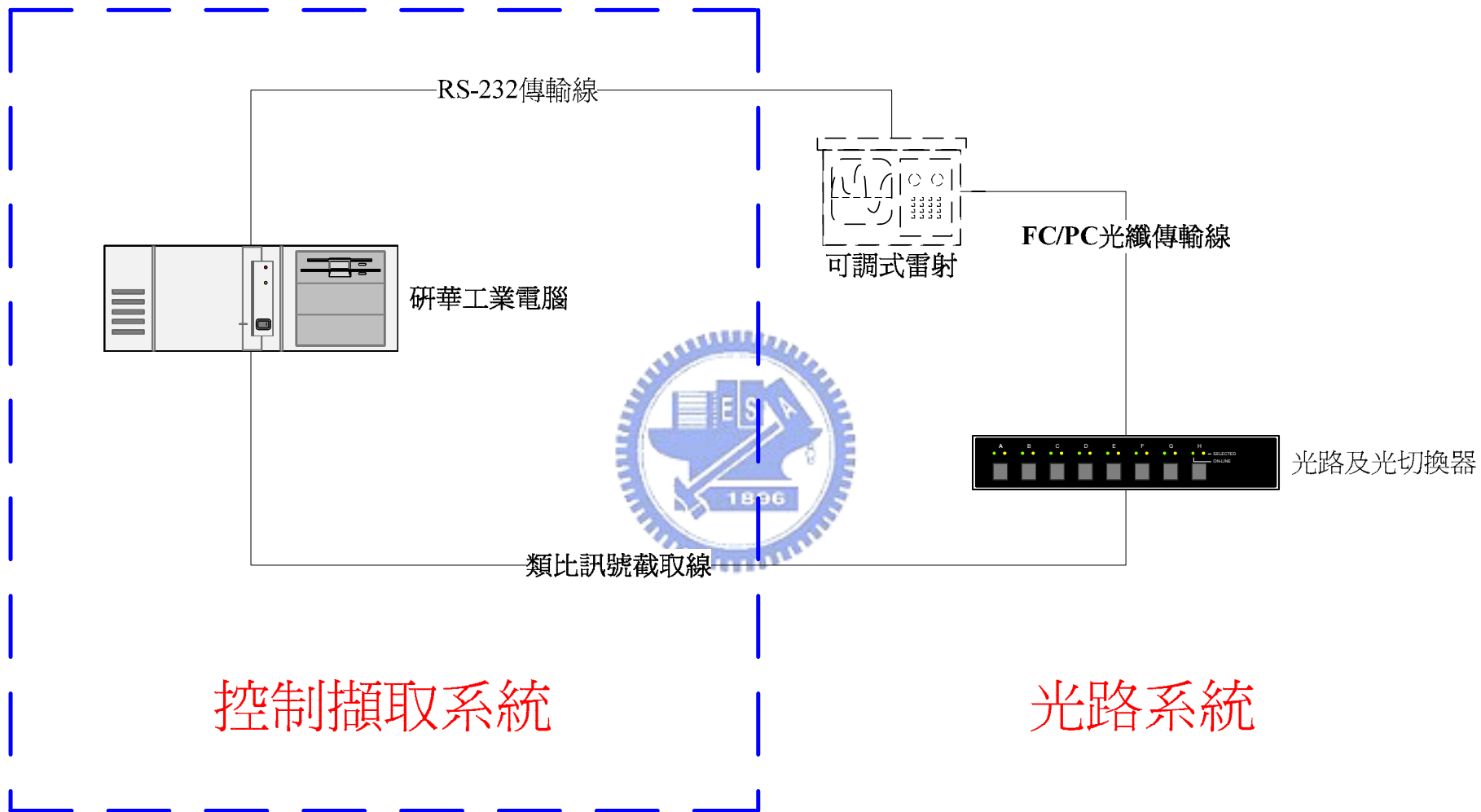


圖 3.5 光纖光柵讀取系統架構圖

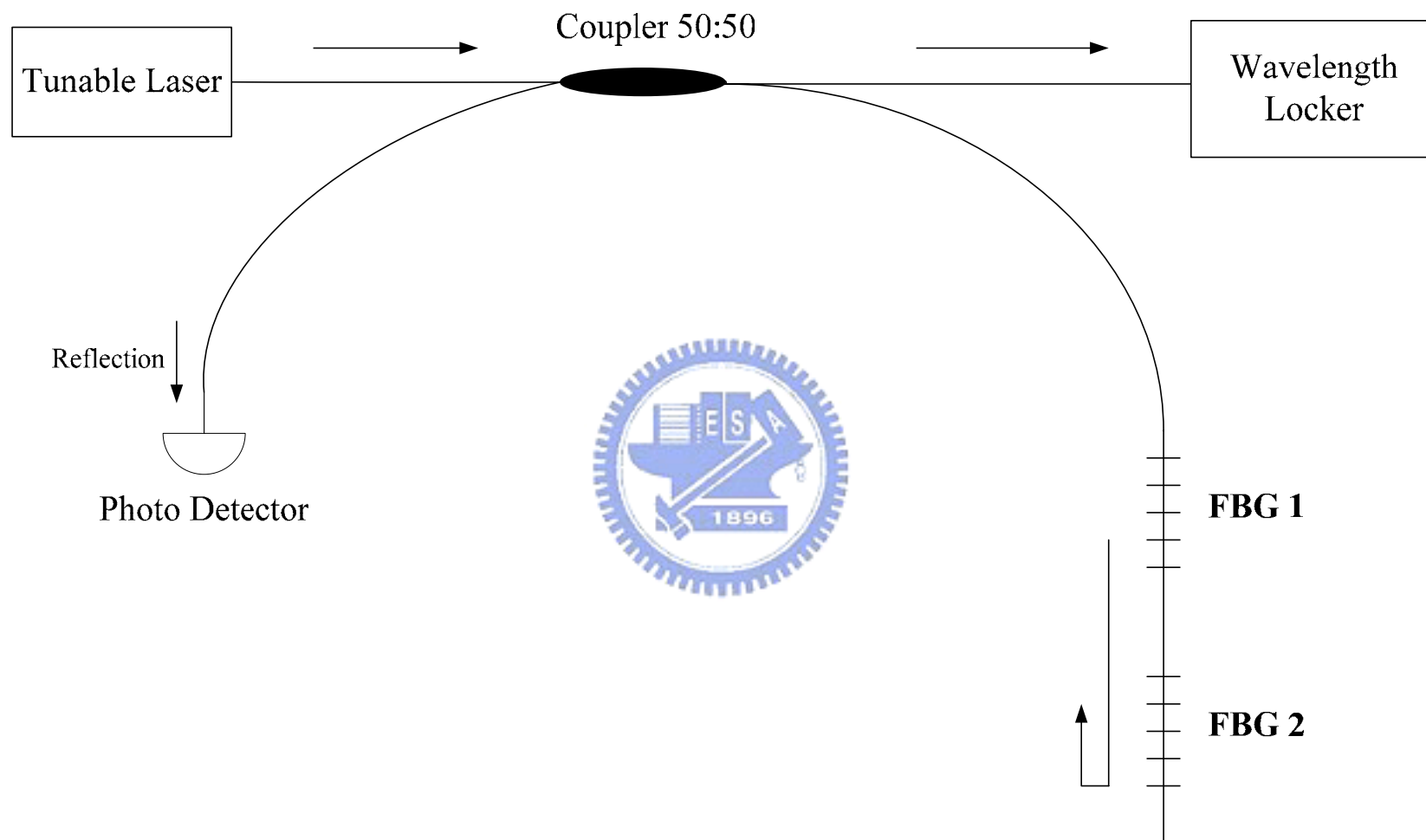


圖 3.6 光路系統架構圖

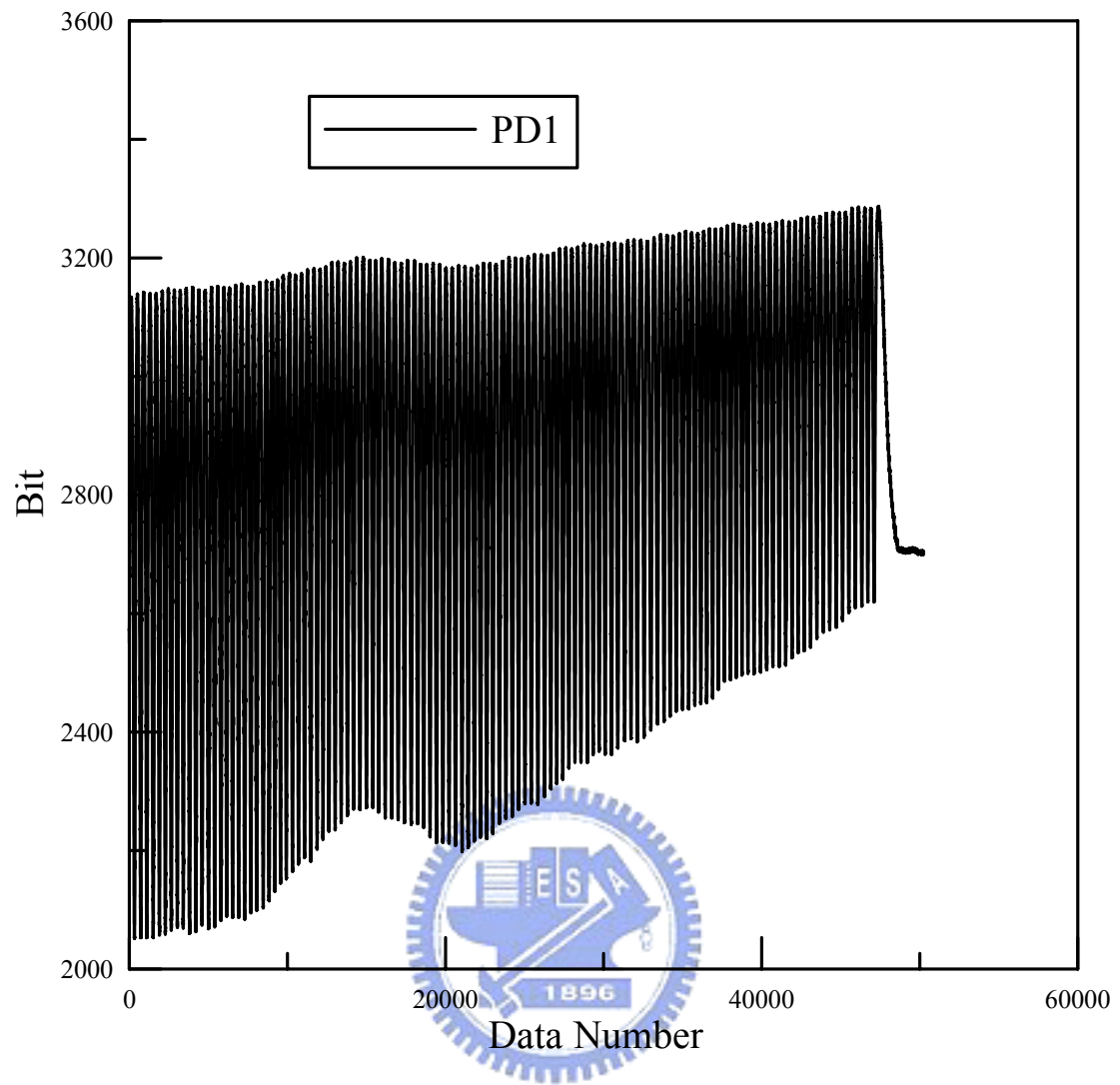


圖 3.7 PD1 輸出波形圖

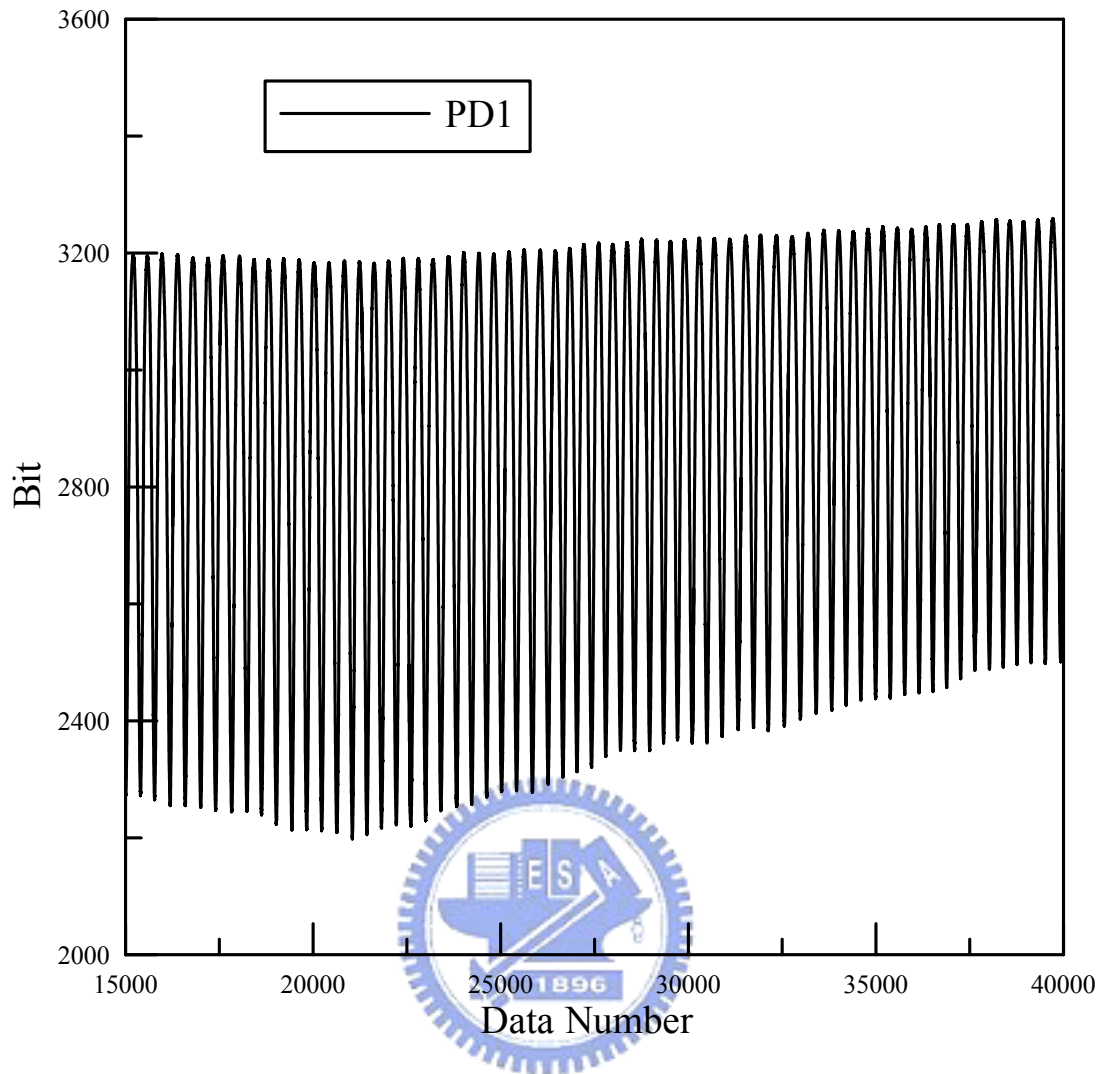


圖 3.8 PD1 輸出波形圖 (點數 15,000 至 40,000)

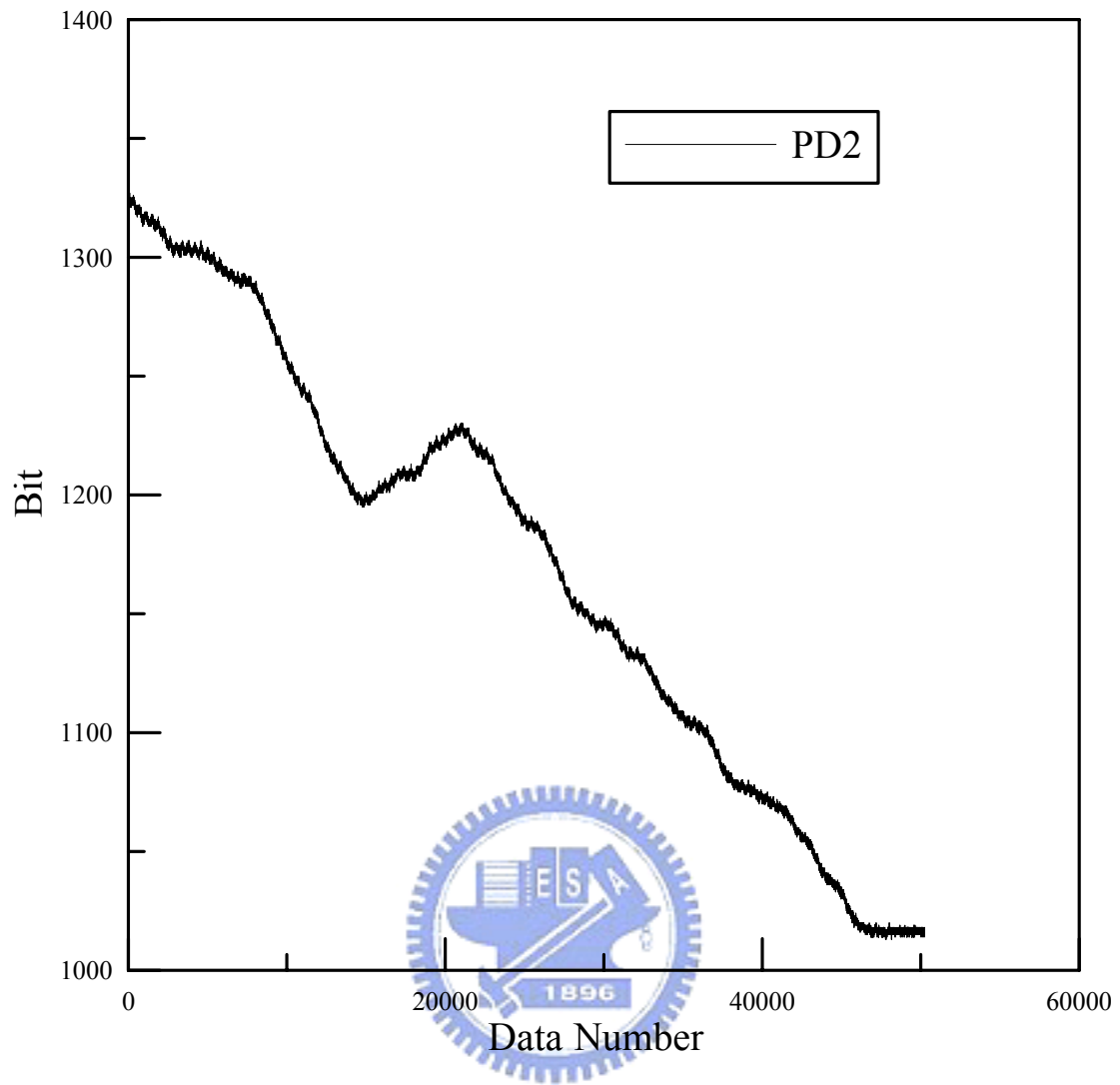


圖 3.9 PD2 輸出波形圖

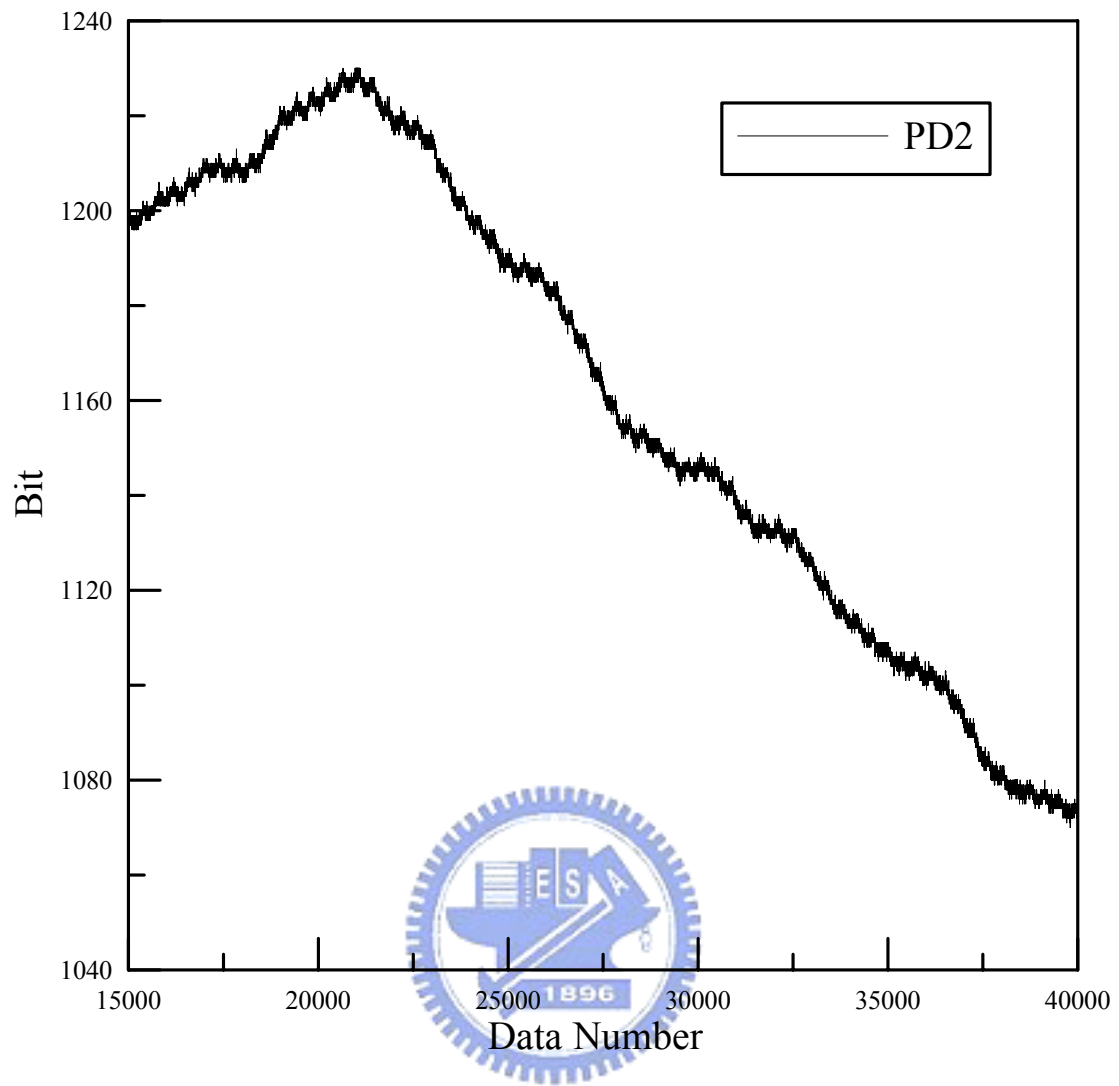


圖 3.10 PD2 輸出波形圖 (點數 15,000 至 40,000)

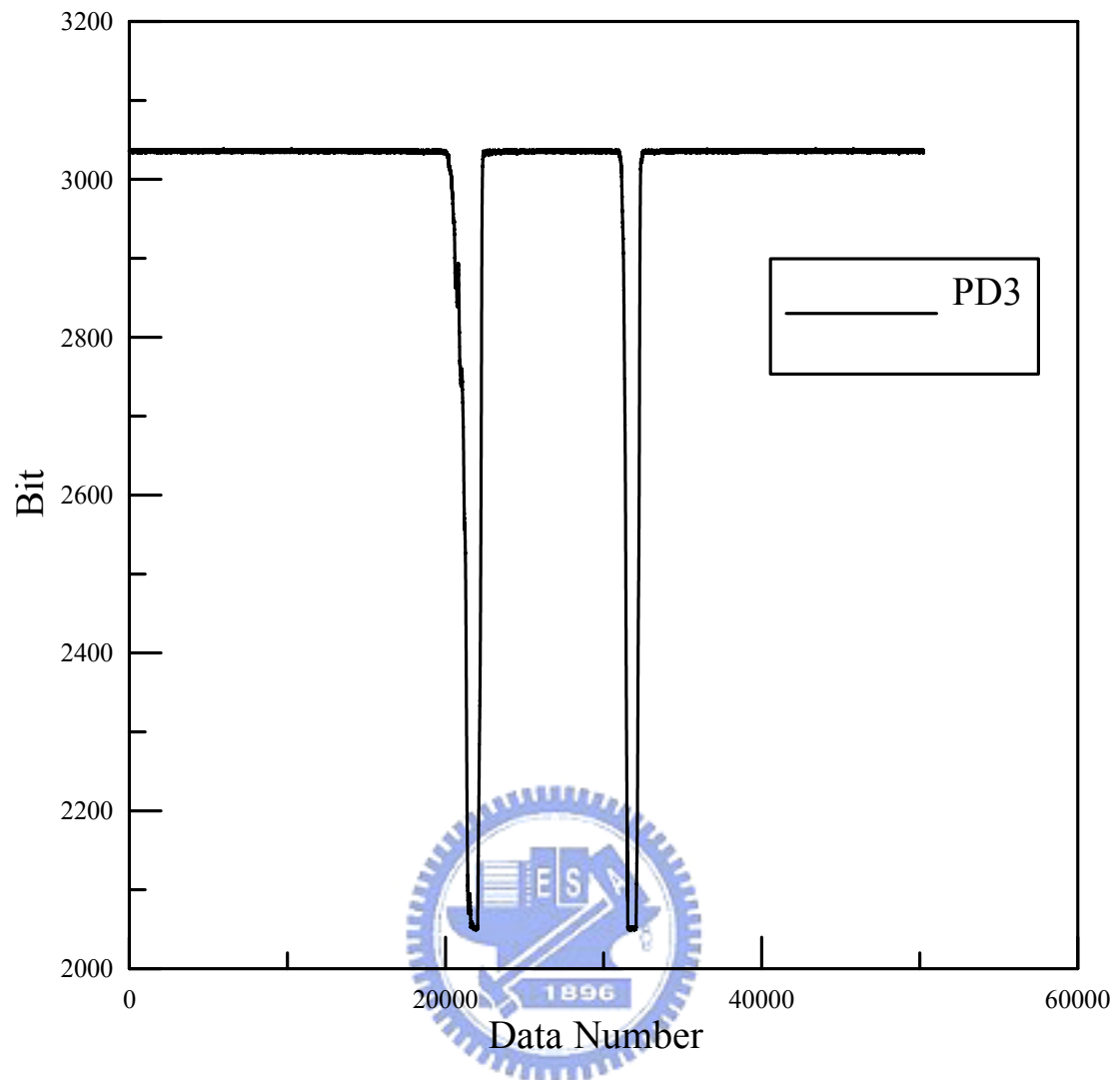


圖 3.11 PD3 輸出波形圖

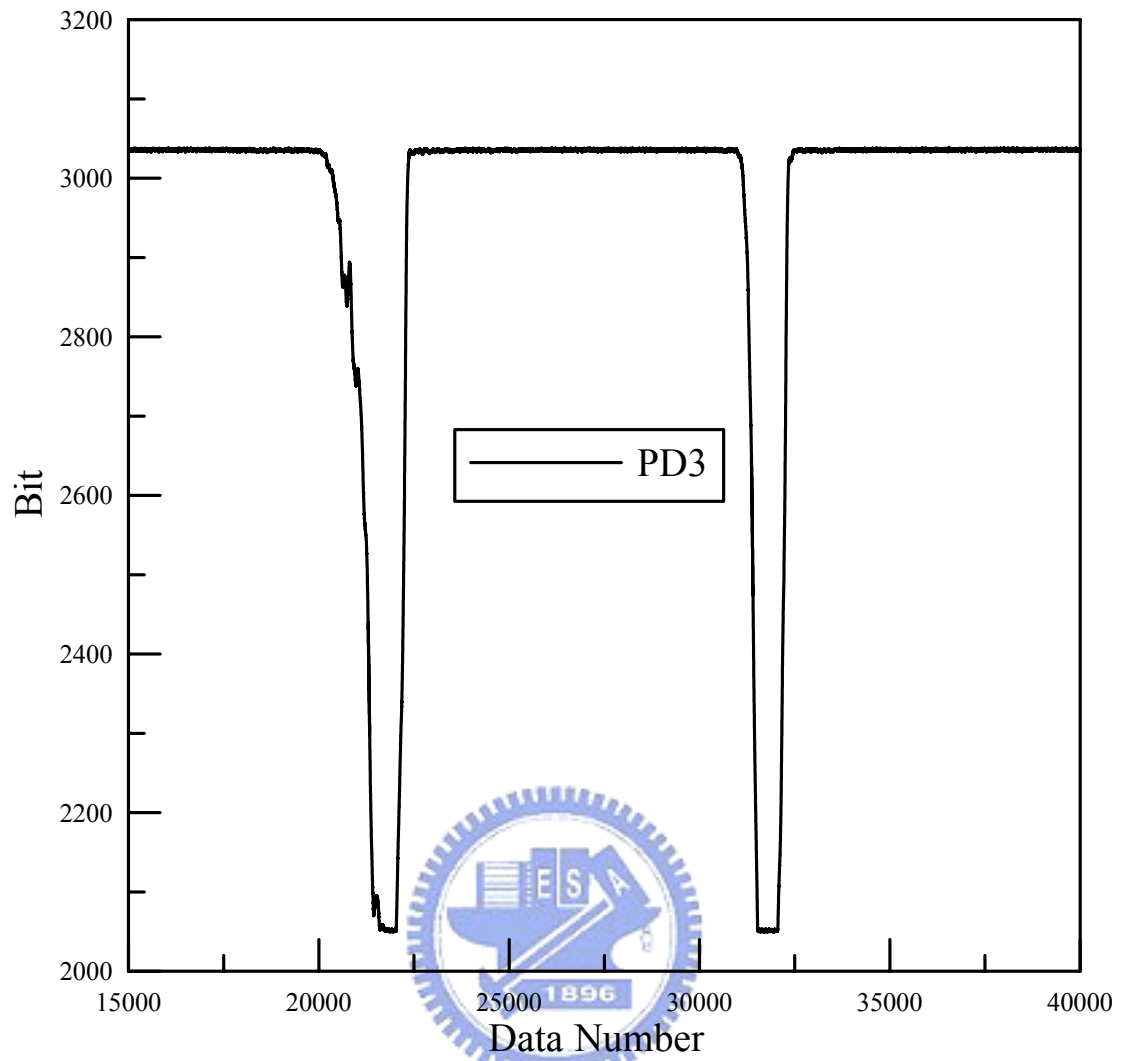


圖 3.12 PD3 輸出波形圖 (點數 15,000 至 40,000)

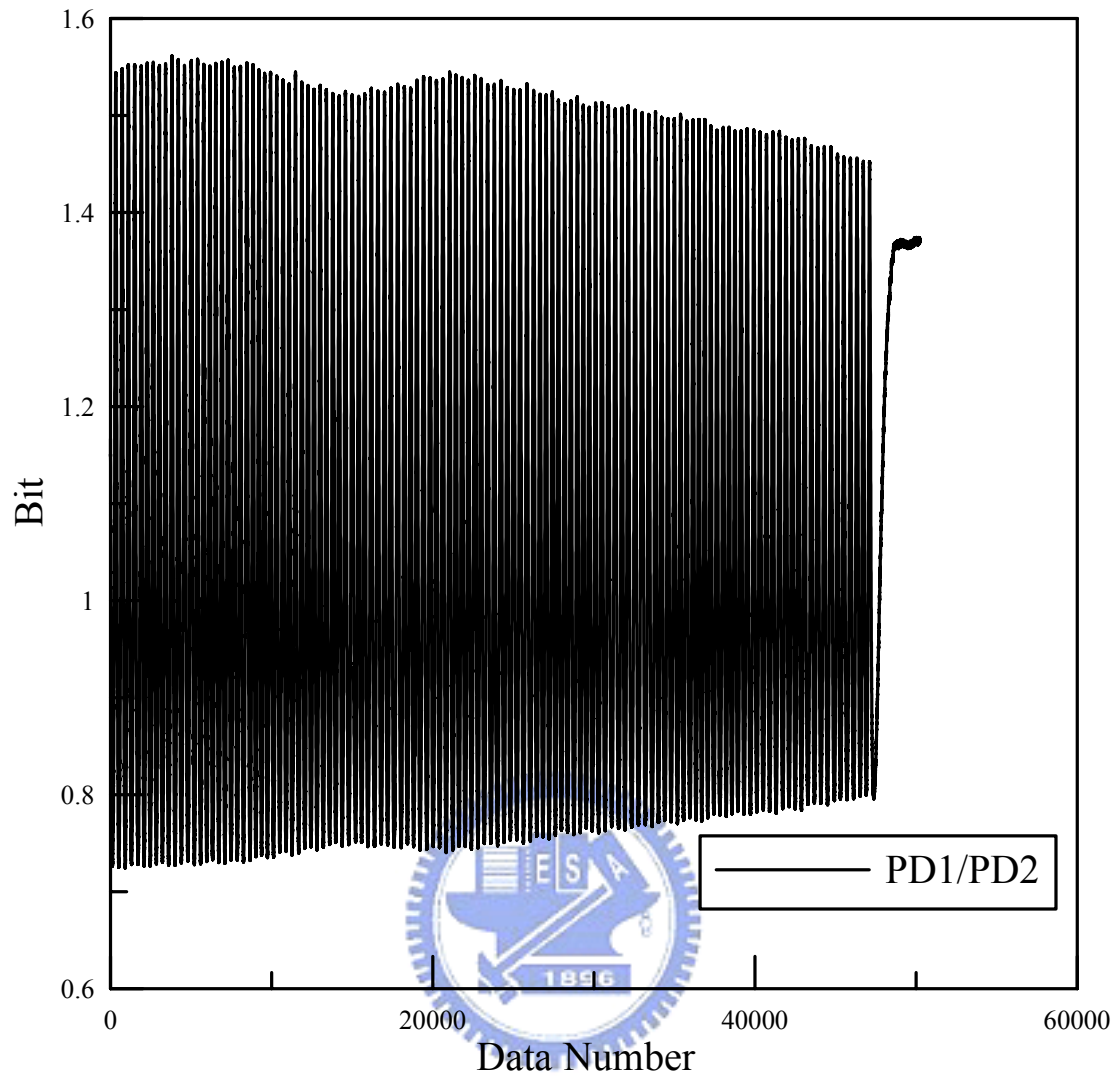


圖 3.13 PD1/PD2 輸出波形圖

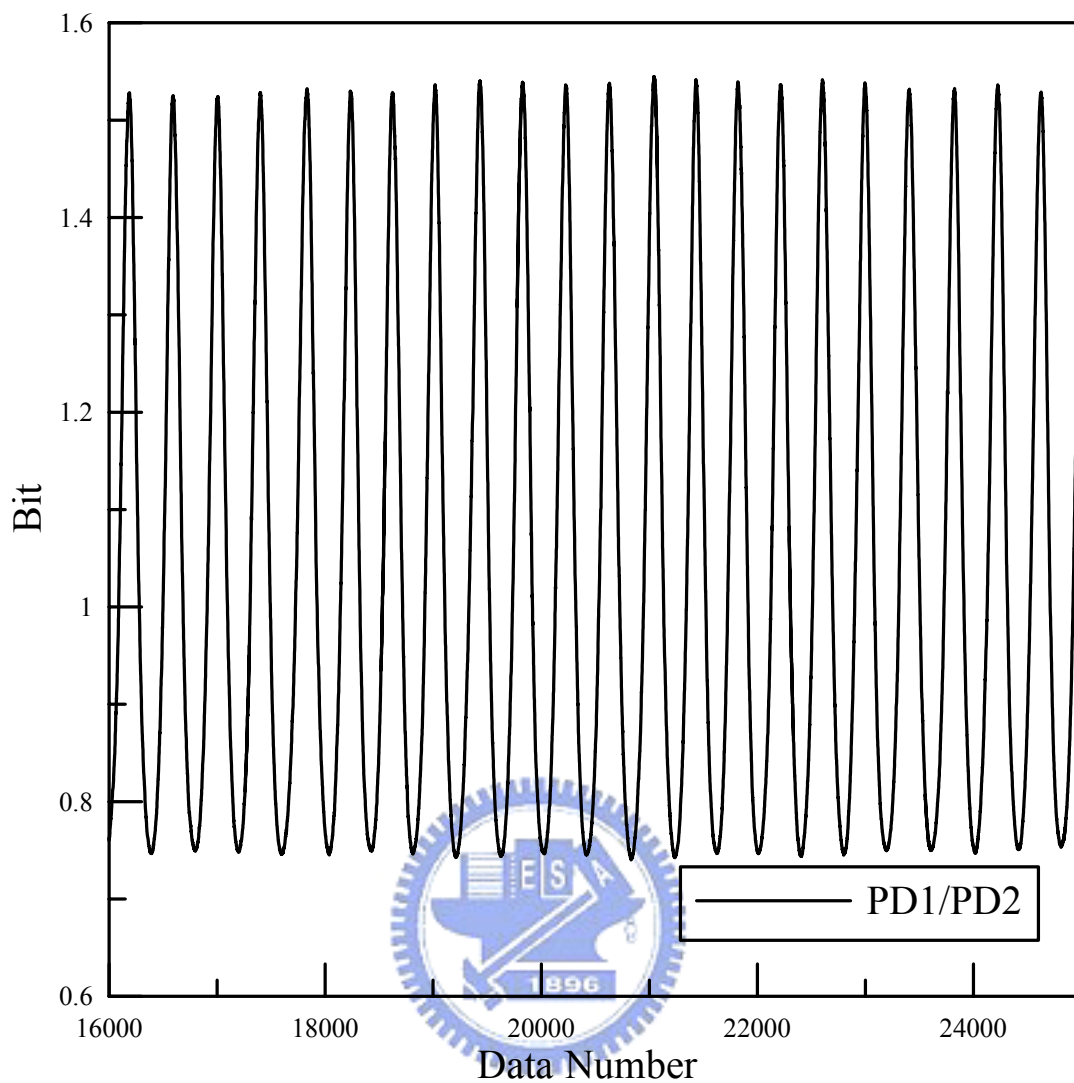


圖 3.14 PD1/PD2 輸出波形圖（點數 16,000 至 25,000）

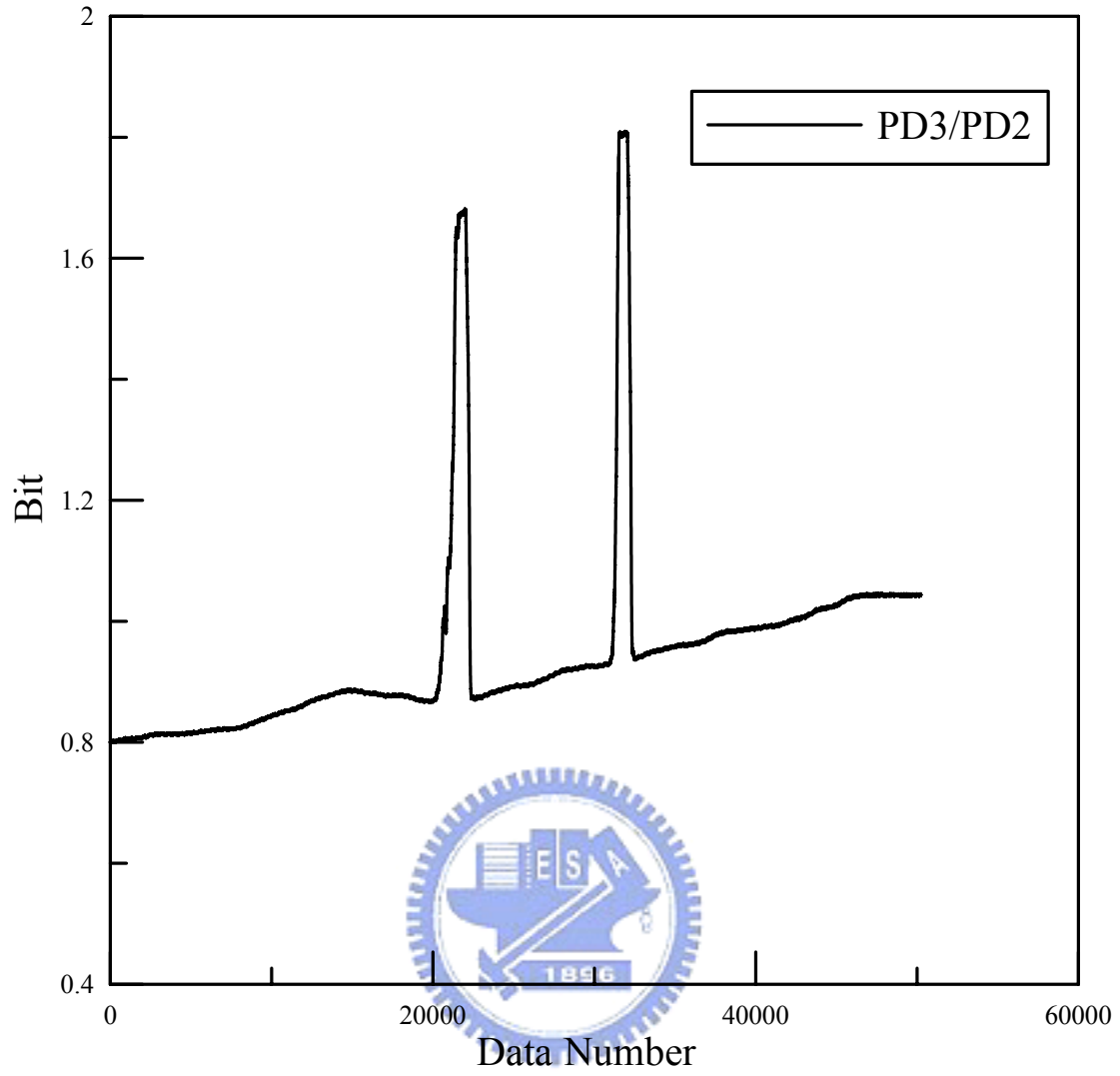


圖 3.15 PD3/PD2 輸出波形圖

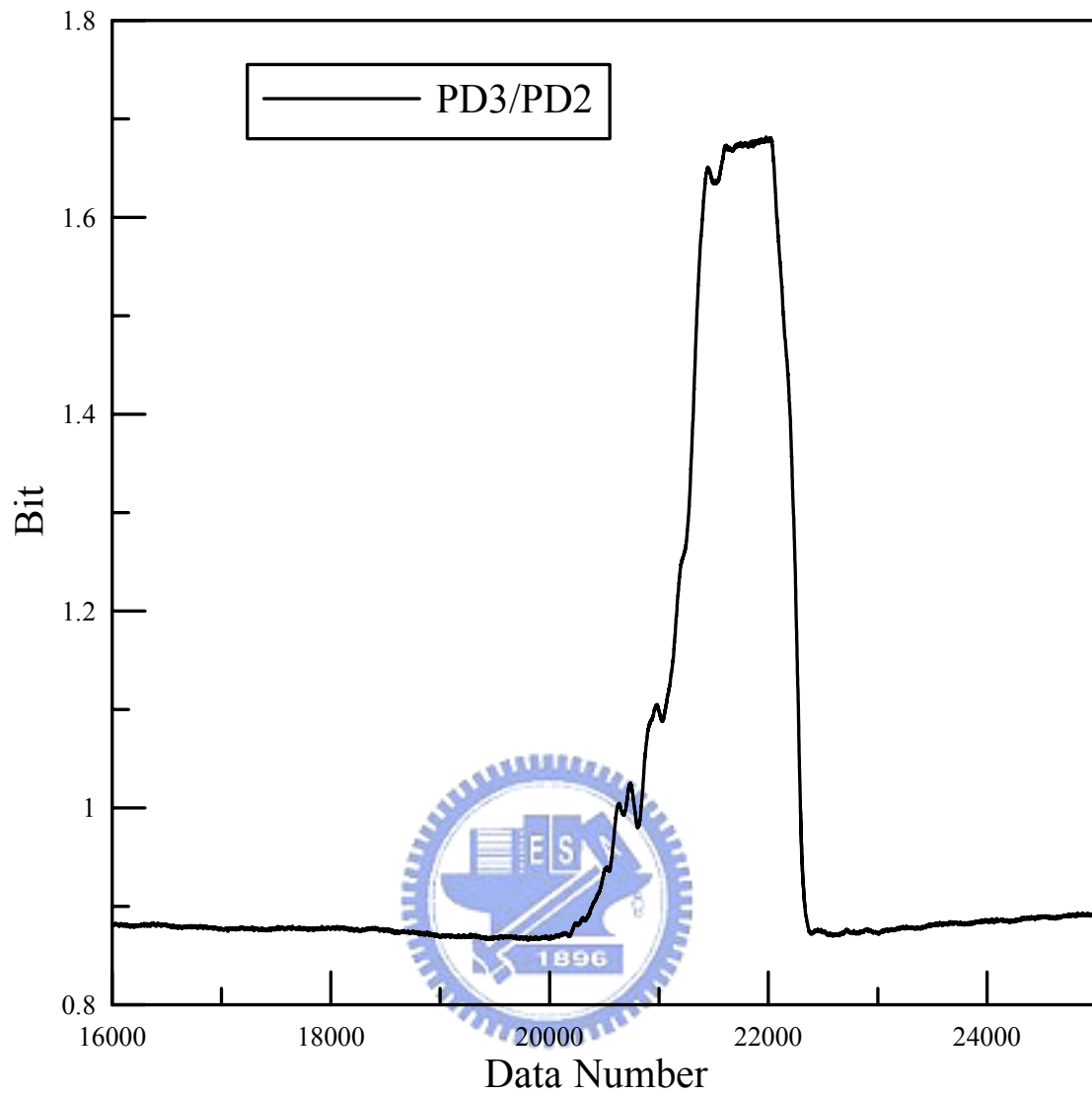


圖 3.16 PD3/PD2 輸出波形圖 (點數 16,000 至 25,000)

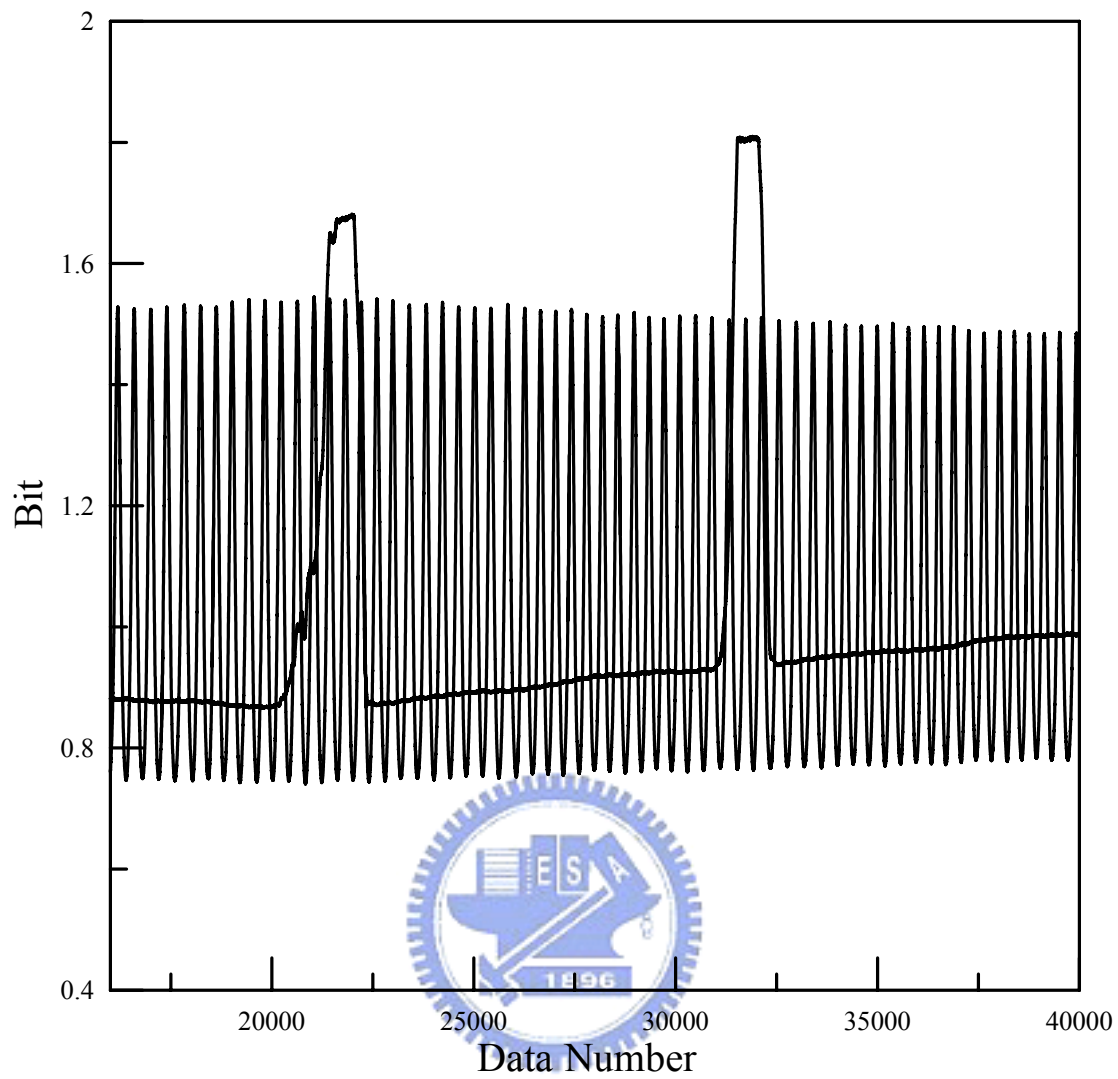


圖 3.17 光纖光柵與雷射輸出波形圖

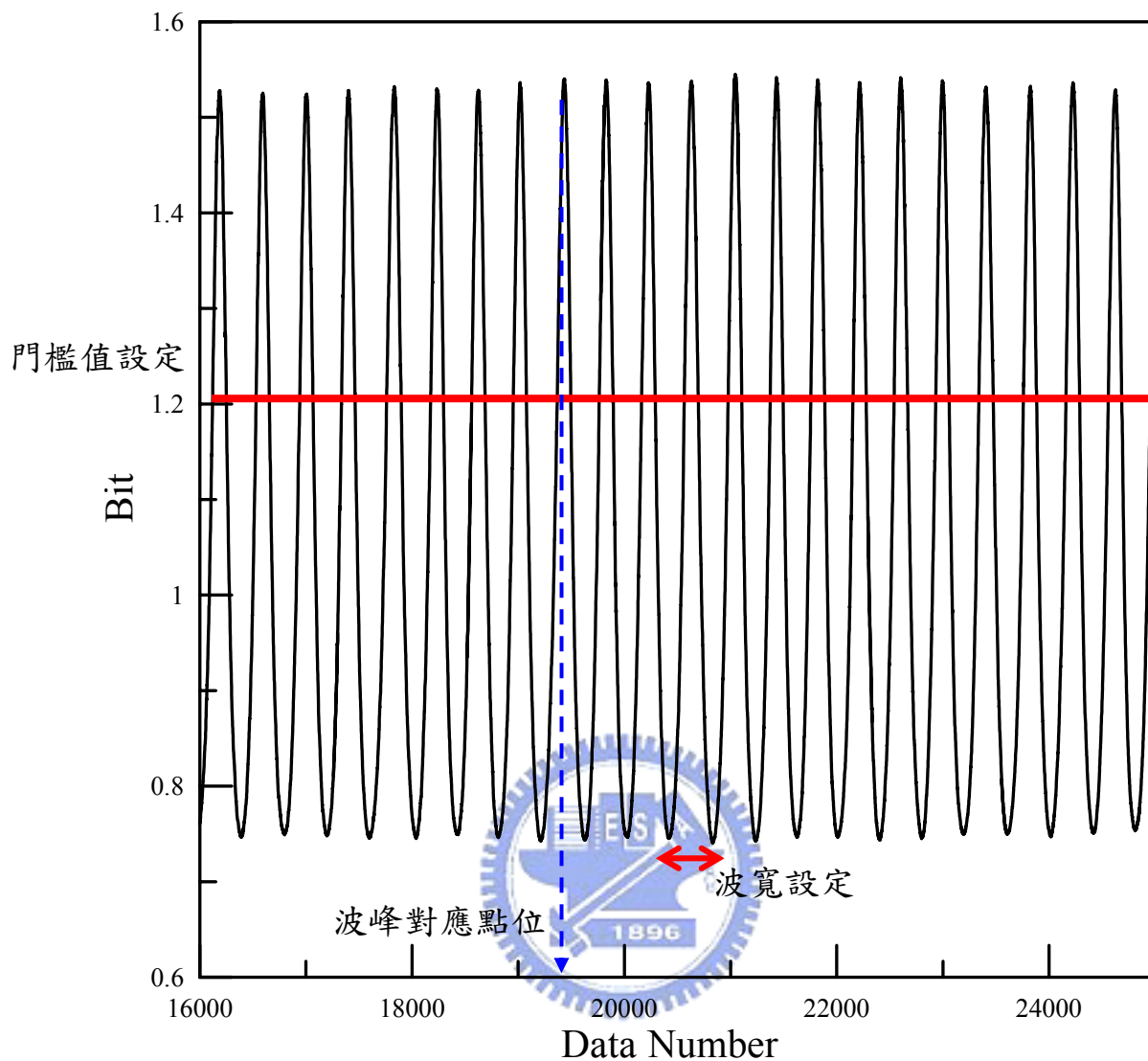


圖 3.18 雷射輸出波形圖之門檻值與波寬的設定示意圖

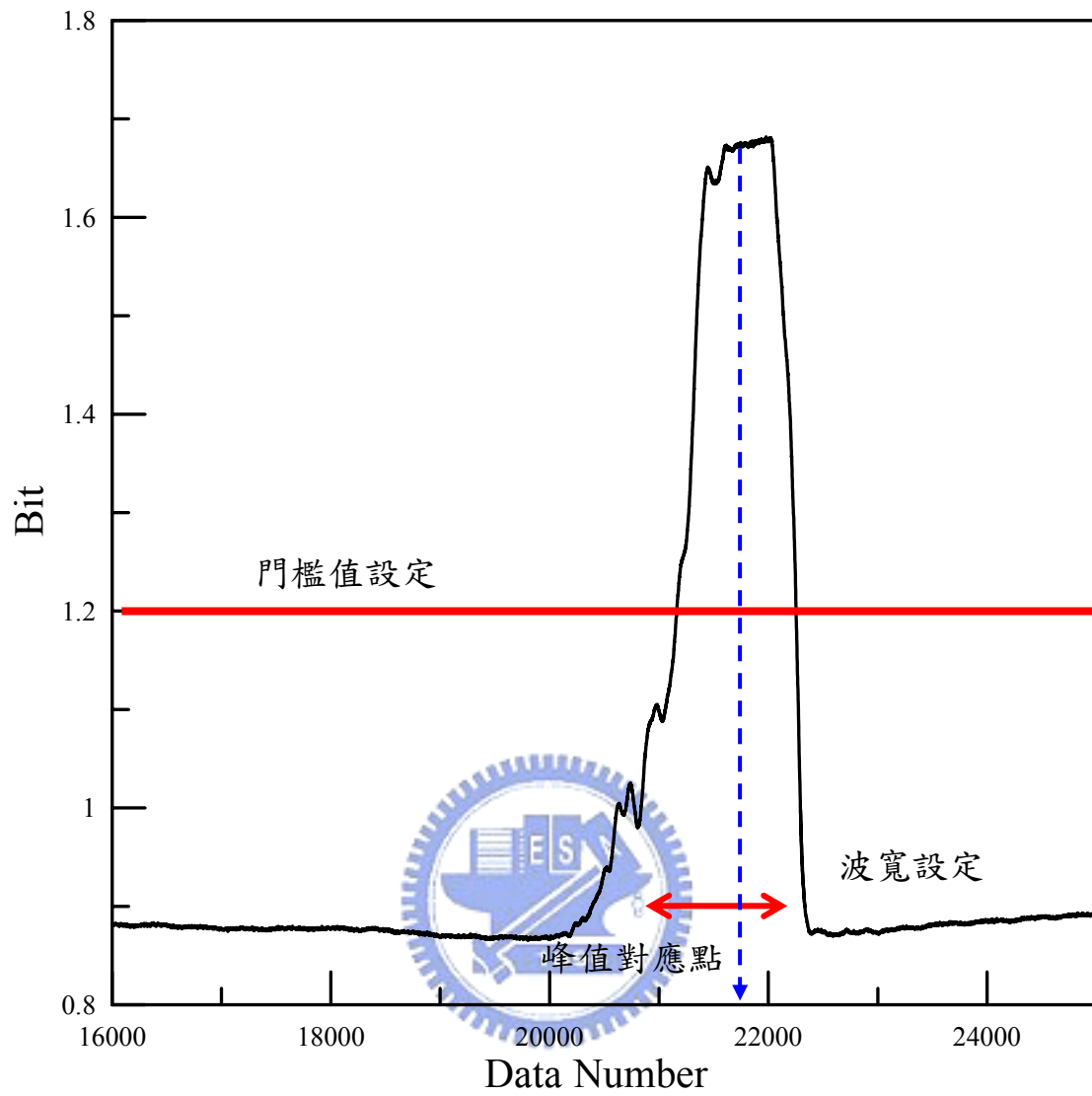


圖 3.19 光纖光柵輸出波形圖之門檻值與波寬的設定示意圖

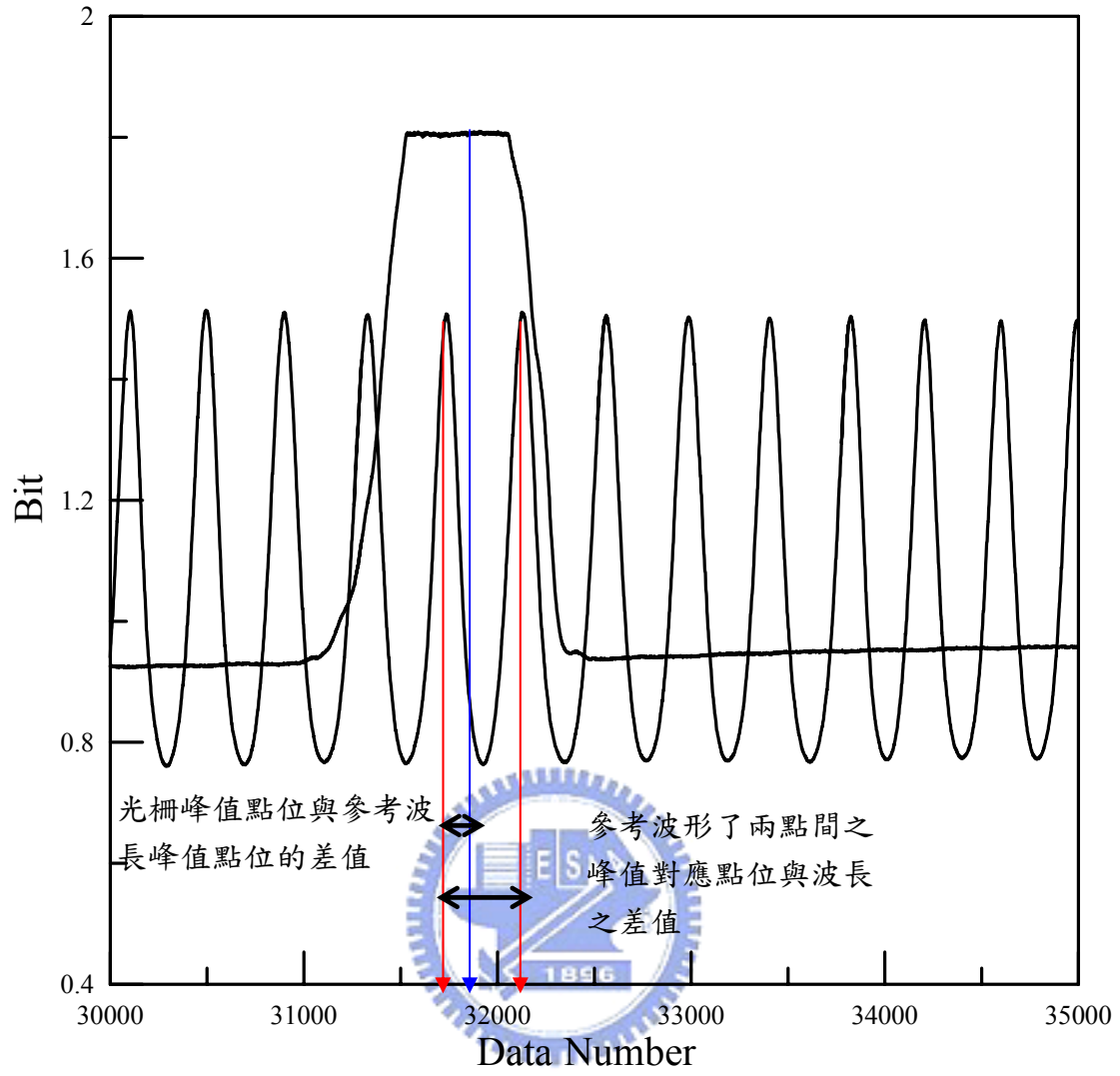


圖 3.20 光纖光柵波長計算示意圖

第四章 節理式偏斜儀感測原理

此章節主要說明光纖光柵節理式偏斜儀感測原理機制以及室內標定過程與結果。

4.1 節理式偏斜儀感測機制

如圖 4.1 所示，為本研究所使用的節理式偏斜儀實體圖。其原理係利用當節理式偏斜儀受外力作用時，絞接會產生一旋轉量，而力的傳遞是透過 ABS 管上的鋼棒，此時 ABS 管上下的光纖光柵分別受到拉力及壓力，也就是使 ABS 管受到彎曲（Bending Moment）的效果，之後，我們利用上述原理可以得到一標定曲線，為旋轉量（角度）與光纖光柵波長改變量關係，所以當節理式偏斜儀受到外力時，我們將得到的光纖光柵波長改變量乘上其標定係數，則可得到節理式偏斜儀所產生的旋轉量，最後把 絞接點後之長度乘上角度之正弦值即可得到位移量。

4.2 節理式偏斜儀之室內標定結果

本室內標定場共架設三支九米長側傾管，其現場示意圖如圖 4.2、圖 4.3 所示。再進行標定之前，我們先確認各側傾管受到位移時，此時各管測得變形是否一致，之後再比較節理式感測器與傳統測傾儀兩者標定結果之差異性。

4.1.1 各側傾管位移差異性比較

此次試驗我們採用儀器為傳統之測傾儀 (Inclinmeter)，而所測試的孔位分別為中間管及內管，內管為靠近鋼柱。在懸臂形狀測試中，所推之最大位移為 5mm 和 10mm，其試驗結果圖 4.5、圖 4.6 顯示，中間管與內管的差異平均值為 0.1mm；弓型形狀測試中，所推之最大位移為 5mm 及 10mm，其試驗結果兩管的差異平均值為 0.28mm，見圖 4.7、圖 4.8 所示。由表 4.1、表 4.2 結果可知，當兩管受到位移產生變形後，其兩管位移的一致性可高達 95% 以上。

4.1.2 節理式偏斜儀室內標定結果

經由上節試驗後，我們將對光纖光柵感測器與傳統測傾儀作比較，在懸臂形狀試驗中，可由圖 4.9、圖 4.10 所示，最大位移 7mm 時與測傾儀所量出的值有 0.2mm 的差異值；最大位移 16mm 時，差異值也是為 0.2mm。而在弓型形狀試驗中，最大位移 12mm 與 17mm 時跟傳統測傾儀量測差異值分別為 1.0mm 與 1.2mm，如圖 4.11、圖 4.12 所示。而表 4.3、表 4.4 中，為節理式感測器室內標定結果總整理。

表 4.1 懸臂型之九米內管與中間測傾管變形比較

形狀	懸臂型		
最大位移, mm	0	5	10
差異值, mm	0.03	0.15	0.12
平均差異值, mm	0.1		

表 4.2 弓型之九米內管與中間測傾管變形比較

形狀	弓型		
最大位移, mm	0	5	10
差異值, mm	0.06	0.18	0.6
平均差異值, mm	0.28		

表 4.3 懸臂型之 FBG 感測器與測傾移量測讀數比較

形狀	懸臂型	
最大位移, mm	7	16
差異值, mm	0.2	0.2
平均差異值, mm	0.2	

表 4.4 弓型之 FBG 感測器與測傾移量測讀數比較

形狀	弓型	
最大位移, mm	12	17
差異值, mm	1.0	1.2
平均差異值, mm	1.1	



圖 4.1 光纖光柵感測器實體圖





圖 4.2 九米側傾管現場實景

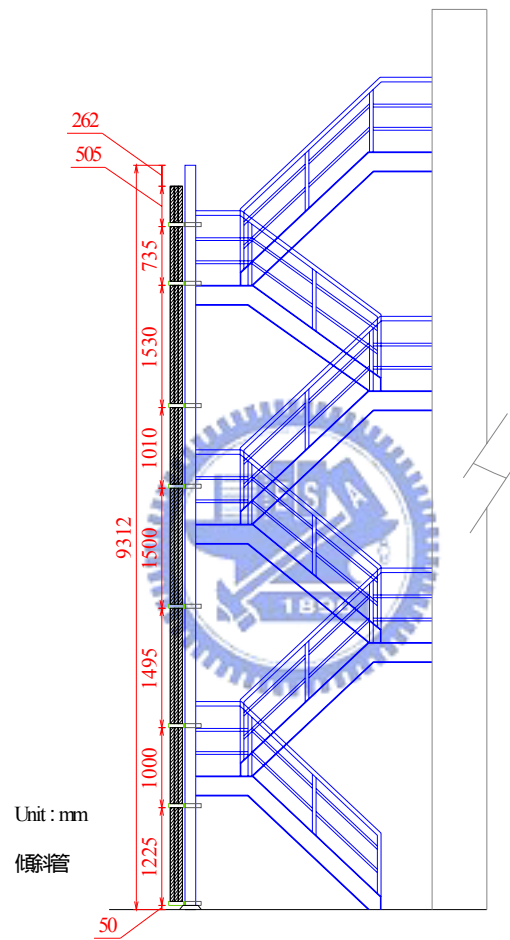


圖 4.3 九米現場架設示意圖

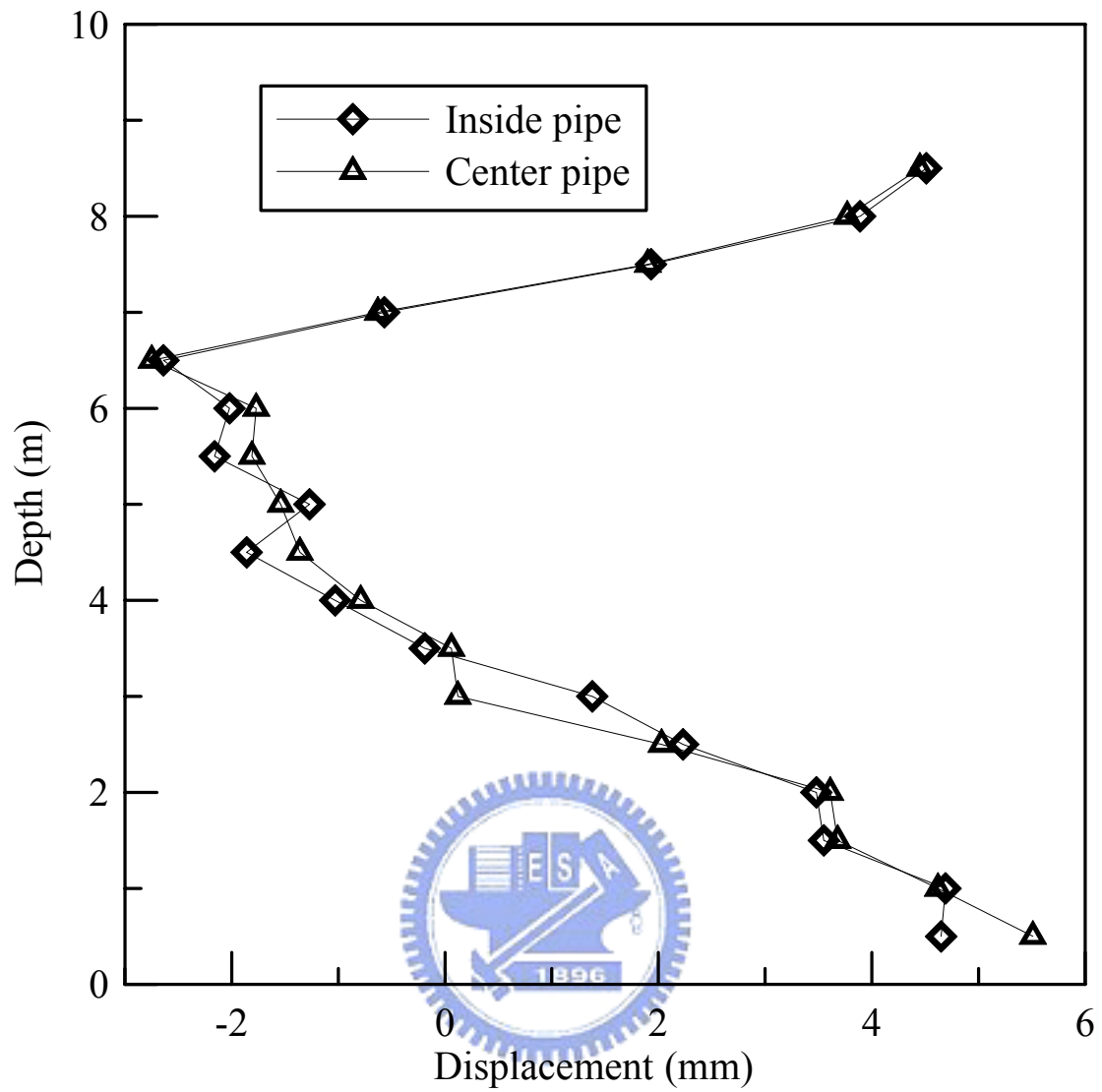


圖 4.4 位移為 0mm 時之九米內管與中間側傾管結果比較

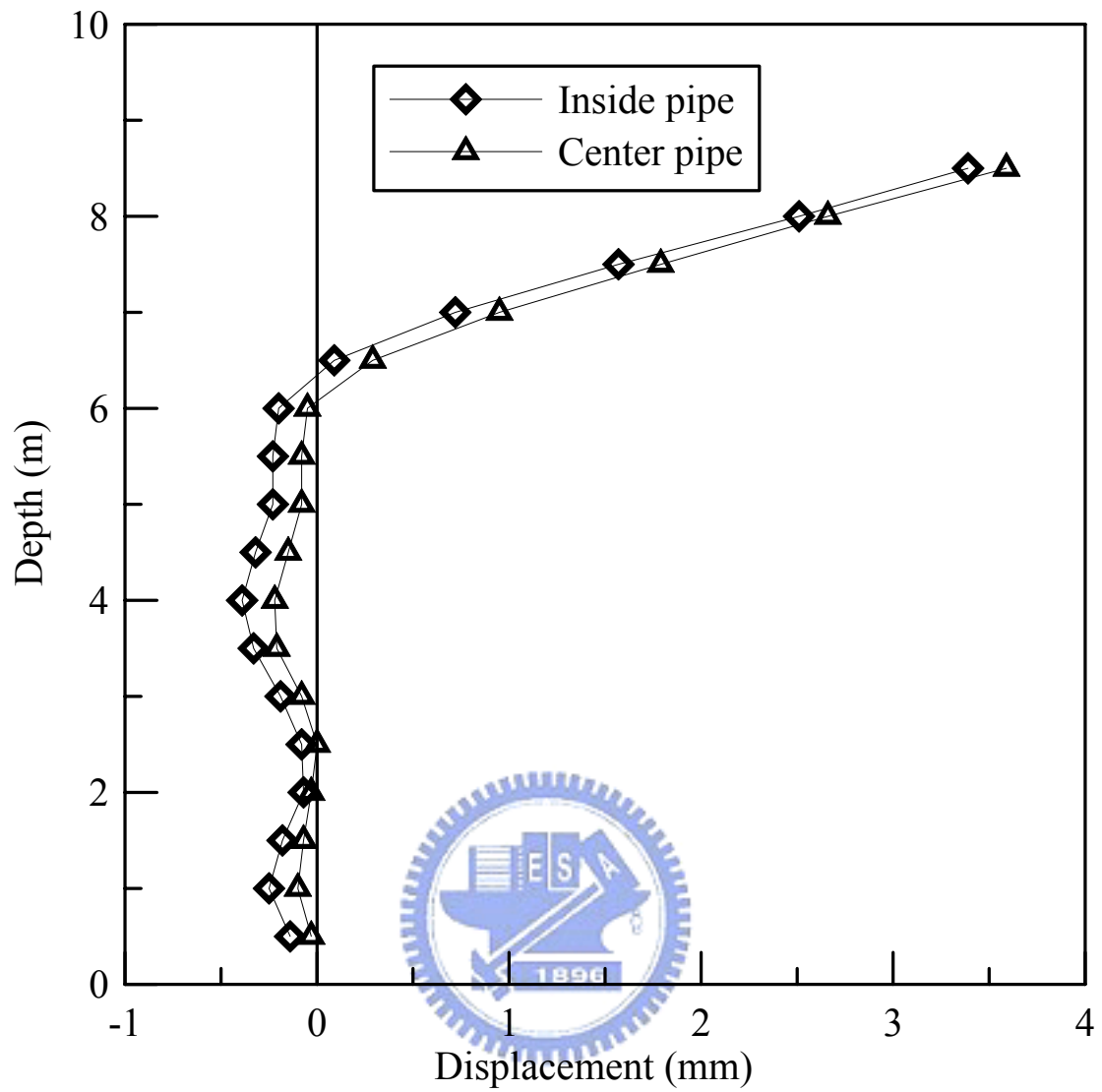


圖 4.5 懸臂型，最大位移為 5mm 之九米內管與中間側傾管結果
比較

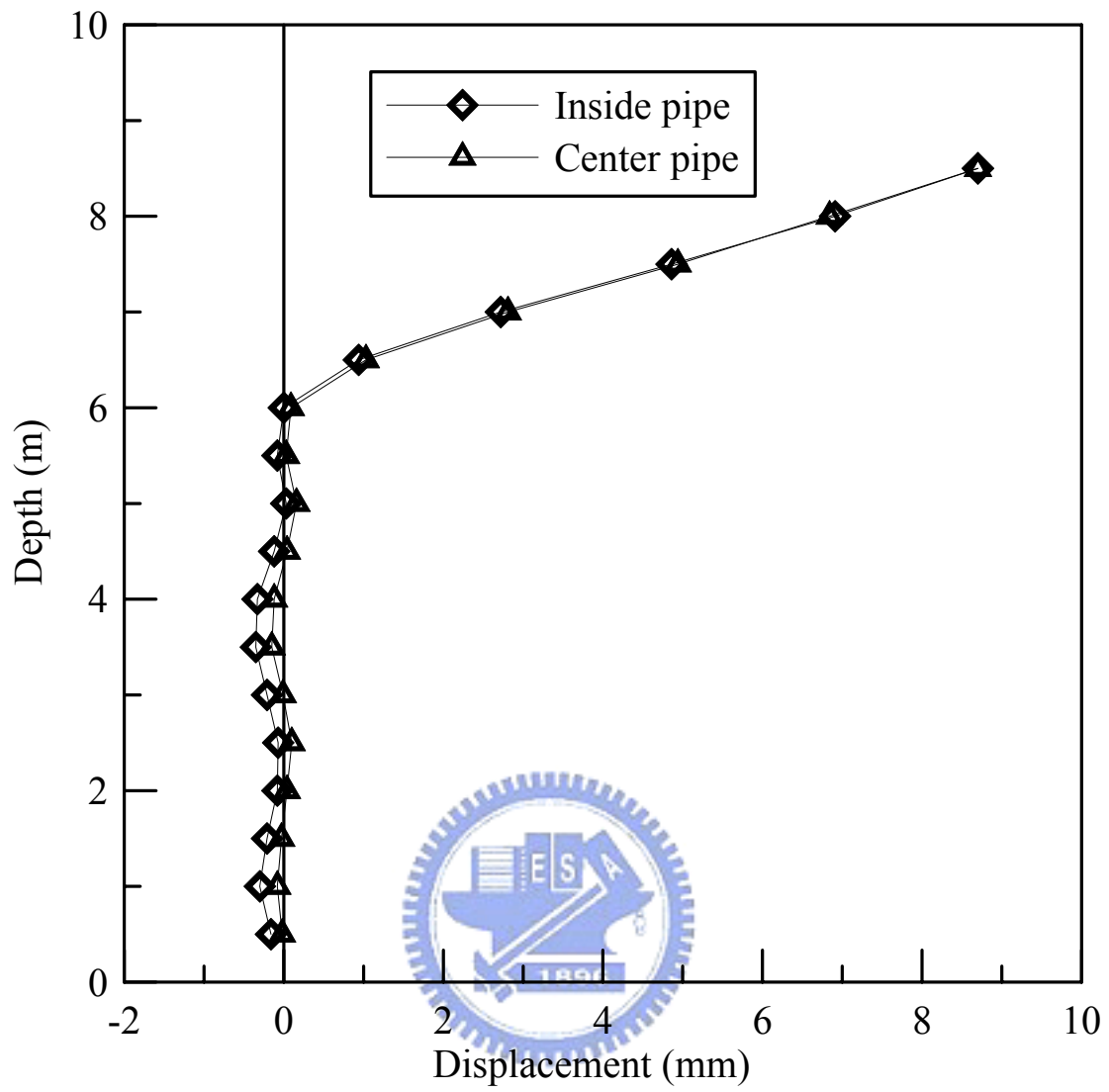


圖 4.6 懸臂型，最大位移為 10mm 之九米內管與中間側傾管結果
比較

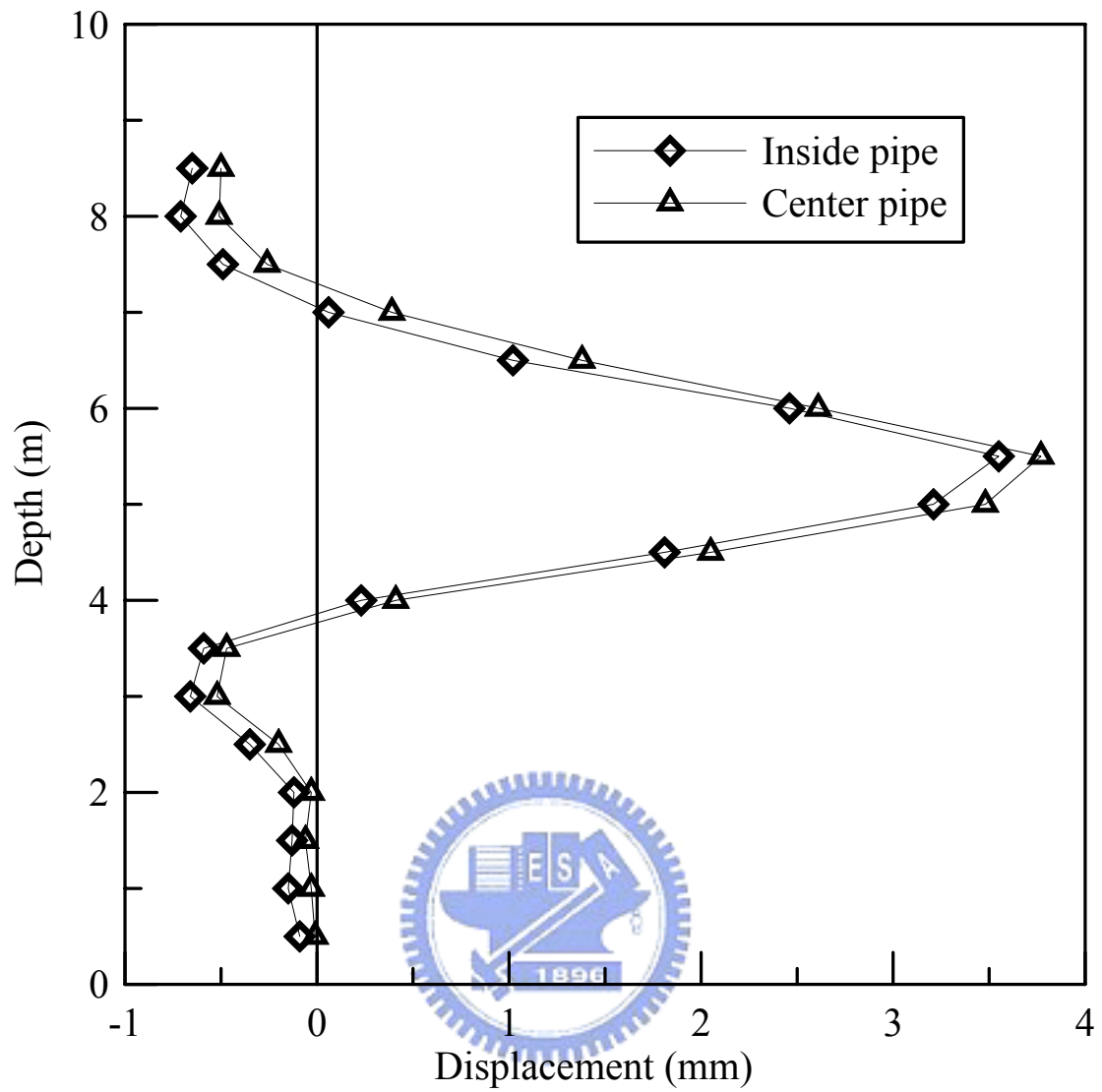


圖 4.7 弓型，最大位移為 5mm 之九米內管與中間側傾管結果比較

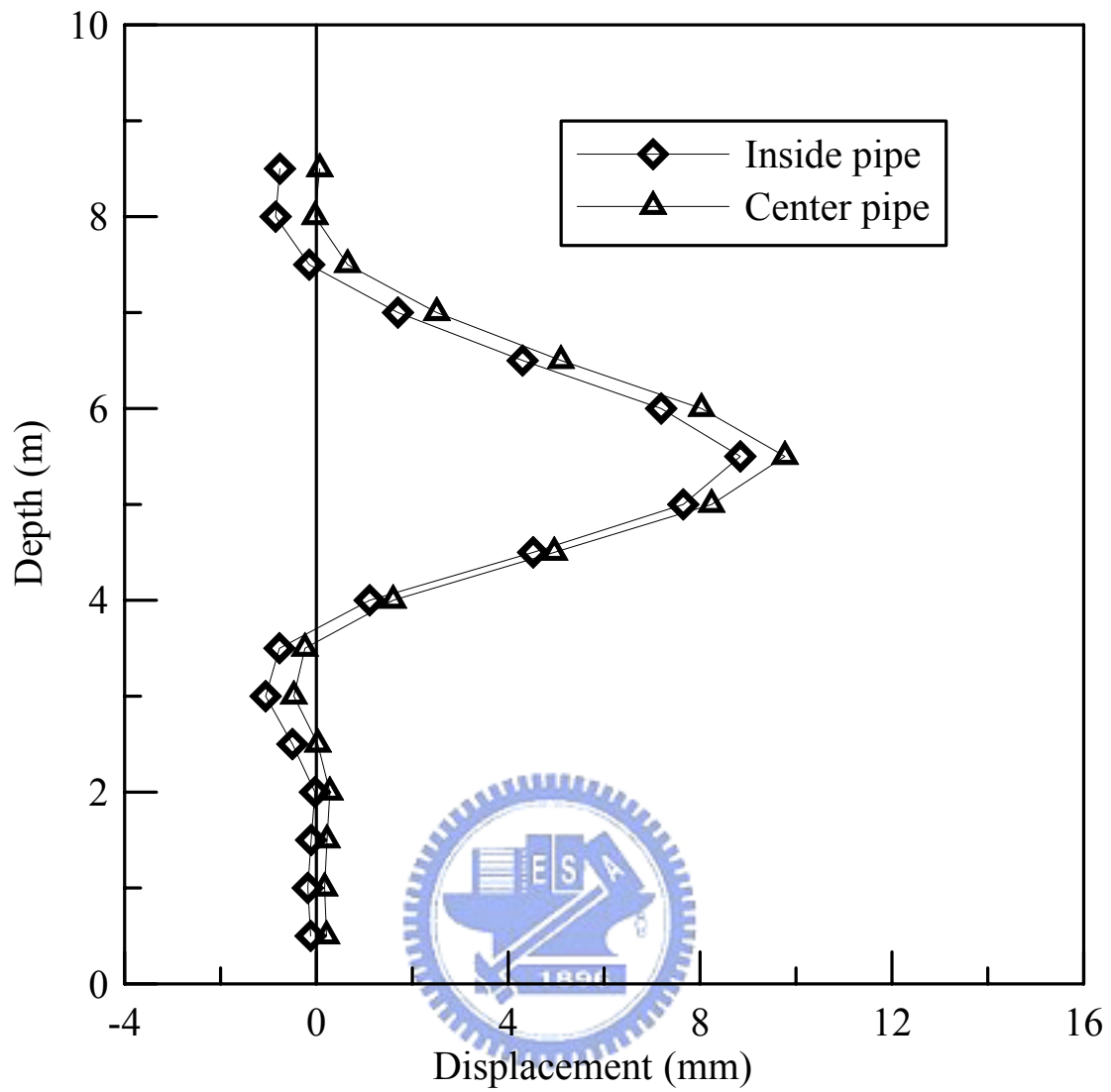


圖 4.8 弓型，最大位移為 10mm 之九米內管與中間側傾管結果比較

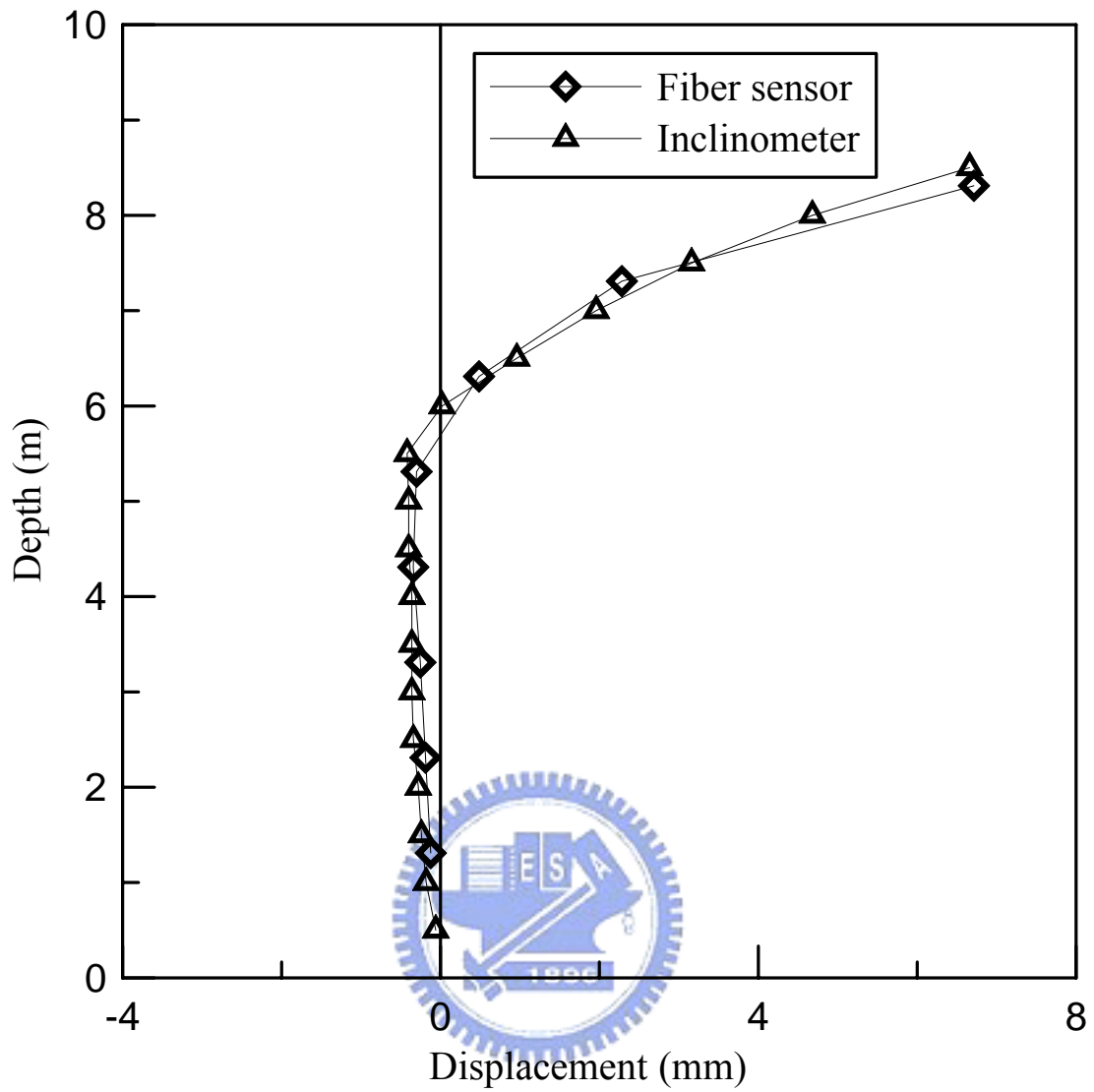


圖 4.9 懸臂型，最大位移為 7mm 之 FBG 感測器與測傾儀結果比較

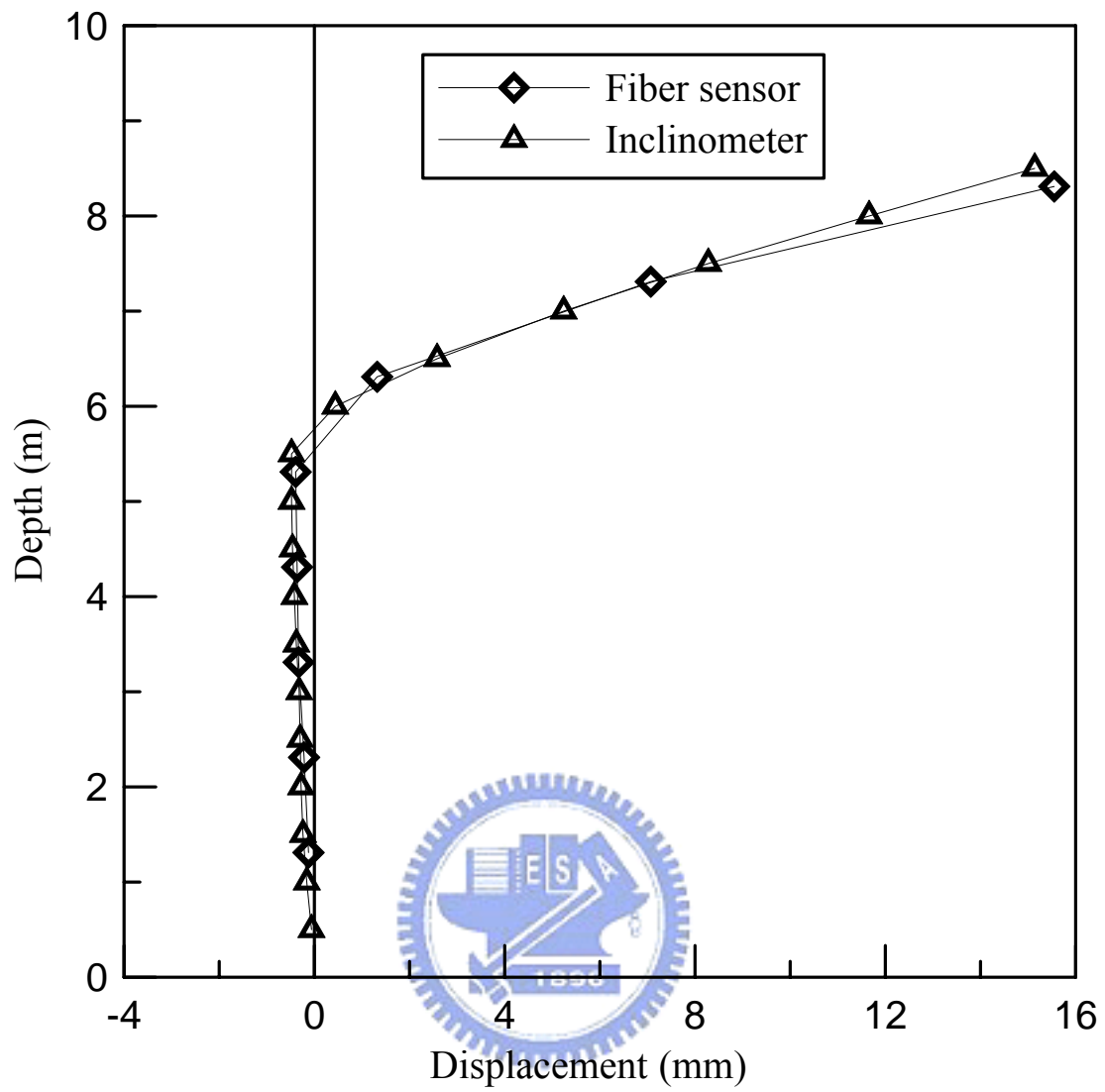


圖 4.10 懸臂型，最大位移為 16mm 之 FBG 感測器與測傾儀結果
比較

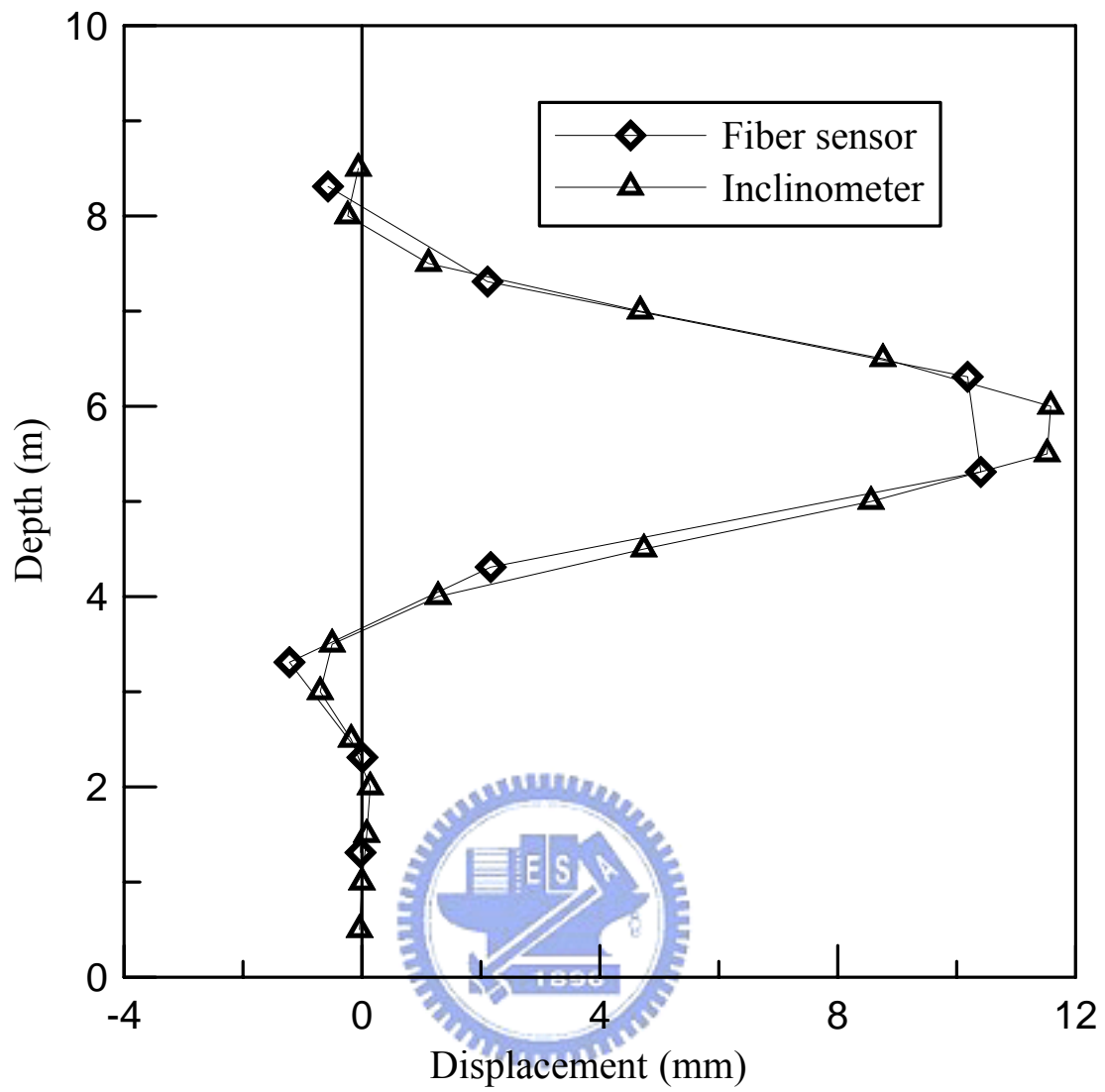


圖 4.11 弓型，最大位移為 12mm 之 FBG 感測器與測傾儀結果比較

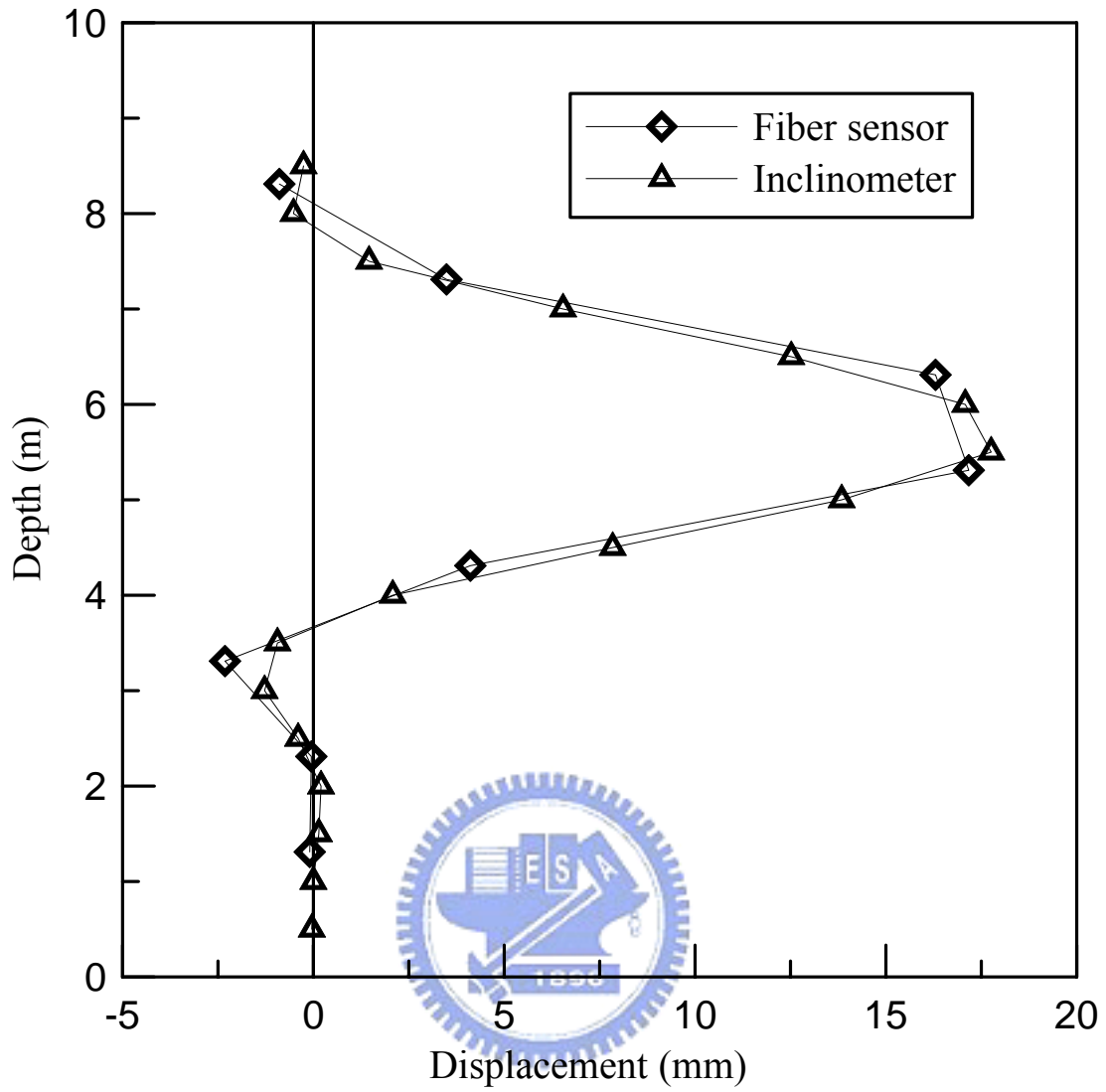


圖 4.12 弓型，最大位移為 17mm 之 FBG 感測器與測傾儀結果比較

第五章 系統整合與現地應用

本章主要敘述整合之自動化光纖光柵解讀系統，應用於台北法鼓山農禪寺新建工程深開挖監測，並將現場監測結果與傳統測傾儀之數據作比較。

5.1 系統整合架構說明

如圖 5.1 所示，本系統架構主要分為兩部分，分別為光纖讀取監測系統與節理式光纖光柵感測器系統，其各項說明如下。

5.1.1 光纖讀取監測系統

為了配合安全上的考量，加上儀器須配合網路傳輸之需要，故裝置於基地之工務所，並透過 12 芯光纜與監測孔位之節理式光纖光柵感測器作連接。此案例所使用之監測設備除了配置本研發的光纖光柵讀取系統，另外還配置一臺 EXFO 公司所生產的光切換器，型號為 IQ203，其內部配置有 3 組光切換機，每組光切換機有 4 個頻道，頻道，故可提供的頻道為 12 個，如圖 5.2 所示。

而為何多配置一臺光切換機，主要是因監測孔位所佈設的節理式感測器分為三個部分，而每部分需兩個傳輸線，所以共有六個傳輸線須接於光切換機的頻道上。但本研發之光纖光柵讀取儀只有四個頻道，故須在增加一臺光切換器。而上述所增加之切換機是透過 RS-232 傳輸線來控制每組光切換機之頻道切換時間。

5.1.2 節理式光纖光柵感測器系統

在這次案例中，連續壁體內所裝置的側傾管深度為 14 公尺，而圖 5.3 所示，為此基地之平面圖。

此次節理式感測器主要安裝於基地開挖構臺旁的監測孔位內，如圖 5.4 所示。在表 5.1 中，為我們所裝置 11 個節理式光纖光柵感測器配置深度及感測器之標定斜率，而各節理式光纖光柵感測器的標定圖結果請見附錄。其裝置完成如圖 5.5 所示意。

5.2 現地概況說明

本基地工程名稱為法鼓山農禪寺新建工程，工程概要為地下二層樓，地上結構物七層樓 RC 結構物，位於台北市北投區公館路 147 號。其基地平面位置圖如圖 5.6 所示。



在地下結構構築上，主要採用明挖工法，而擋土設施及支撐系統則分別採連續壁與水平鋼支撐。

5.3 監測結果

本開挖基地主要分為三階段開挖，第一階段開挖至地表下 2.2 公尺，其支撐架設位於地表下 1.3 公尺；第二階段開挖至地表下 5.8 公尺，其支撐位置位於地表下 4.9 公尺；第三階段開挖至地表下 8.1 公尺，然後打底灌漿，如圖 5.7 所示。

表 5.2、表 5.3 為此開挖所量得之數據，並配合傳統測傾儀量測數

據相互比較。圖 5.8 為第二階支撐架設前與架設完畢後之測傾管變形圖，其最大位移量 2mm 發生在頂部之位置；圖 5.9 為第三層開挖前與開挖後之測傾管變形圖，其最大位移量為 6mm，且也是發生於頂部位置。圖 5.10 為大底綁筋前與綁筋結束後，其最大位移為 0.45mm。圖 5.11 為當大底灌漿前與灌漿完成後所量測結果，此時最大位移發生在頂部有 12mm，推測其原因有可能是因為大底灌漿時重物堆放、重車來回於構臺上與連日豪雨導致土壤鬆軟所致；圖 5.12 與圖 5.13 因開挖與大底灌漿已經完成，所以壁體變形已趨於穩定，最大變形量皆在 2mm 以內，由這些實驗可看出其量測結果與傳統測傾儀量測結果有高度之一致性。



表 5.1 節理光纖光柵感測器波長配置表

感測器編號	距地表深度, m	感測器標定係數 ($\theta-\Delta\lambda$)	$\lambda_{\text{outside}}(\text{nm})$	$\lambda_{\text{inside}}(\text{nm})$
1	12.55	0.0012	1555	1537
2	11.05	0.0013	1561	1557
3	9.55	0.0014	1552	1554
4	8.55	0.0012	1546	1549
5	7.55	0.0011	1551	1542
6	6.55	0.0014	1542	1532
7	5.55	0.0012	1544	1548
8	4.55	0.00145	1548	1545
9	3.55	0.0013	1541	1539
10	2.55	0.00175	1563	1562
11	1.55	0.0015	1551	1555

表 5.2 光纖光柵感測器監測讀數

感測器編號	2005/04/30 第二支撐架設前		2005/05/03 第二支撐架設完畢		2005/05/09 第三層出土		2005/05/17 大底綁筋	
	$\lambda_{\text{outside}}(\text{nm})$	$\lambda_{\text{inside}}(\text{nm})$	$\lambda_{\text{outside}}(\text{nm})$	$\lambda_{\text{inside}}(\text{nm})$	$\lambda_{\text{outside}}(\text{nm})$	$\lambda_{\text{inside}}(\text{nm})$	$\lambda_{\text{outside}}(\text{nm})$	$\lambda_{\text{inside}}(\text{nm})$
1	1549.881	1543.316	1549.917	1543.354	1549.898	1543.370	1549.908	1543.335
2	1563.437	1557.007	1563.496	1557.046	1563.452	1557.087	1563.492	1557.027
3	1553.943	1556.078	1553.988	1556.151	1553.978	1556.165	1554.025	1556.162
4	1546.186	1547.524	1546.229	1547.580	1546.263	1547.594	1546.248	1547.556
5	1550.397	1543.837	1550.376	1543.806	1550.088	1543.578	1550.402	1543.922
6	1542.745	1538.525	1542.788	1538.573	1542.807	1538.568	1542.810	1538.573
7	1541.257	1553.460	1541.301	1553.504	1541.253	1553.498	1541.288	1553.491
8	1555.781	1550.329	1555.832	1550.388	1555.821	1550.387	1555.845	1550.346
9	1545.945	1534.811	1545.966	1534.842	1545.958	1534.834	1545.938	1534.814
10	1564.621	1563.215	1564.672	1563.274	1564.665	1563.271	1564.711	1563.272
11	1549.617	1557.262	1549.626	1557.316	1549.660	1557.324	1549.655	1557.324

表 5.3 光纖光柵感測器監測讀數 (續)

	2005/05/27 大底澆置完成		2005/06/03 地梁完成		2005/06/13 第二支撐千斤頂解壓	
感測器編號	$\lambda_{\text{outside}}(\text{nm})$	$\lambda_{\text{inside}}(\text{nm})$	$\lambda_{\text{outside}}(\text{nm})$	$\lambda_{\text{inside}}(\text{nm})$	$\lambda_{\text{outside}}(\text{nm})$	$\lambda_{\text{inside}}(\text{nm})$
1	1549.965	1543.398	1549.976	1543.422	1549.977	1543.446
2	1563.519	1557.046	1563.506	1557.037	1563.505	1557.056
3	1554.069	1556.211	1554.059	1556.213	1554.045	1556.184
4	1546.330	1547.634	1546.350	1547.664	1546.373	1547.690
5	1550.174	1543.7	1550.199	1543.734	1549.979	1543.549
6	1542.860	1538.616	1542.861	1538.618	1542.887	1538.634
7	1541.310	1553.515	1541.317	1553.519	1541.343	1553.540
8	1555.874	1550.377	1555.880	1550.385	1555.905	1550.410
9	1545.970	1534.851	1545.977	1534.87	1545.989	1534.893
10	1564.770	1563.325	1564.789	1563.336	1564.824	1563.376
11	1549.663	1557.35	1549.667	1557.354	1549.684	1557.364

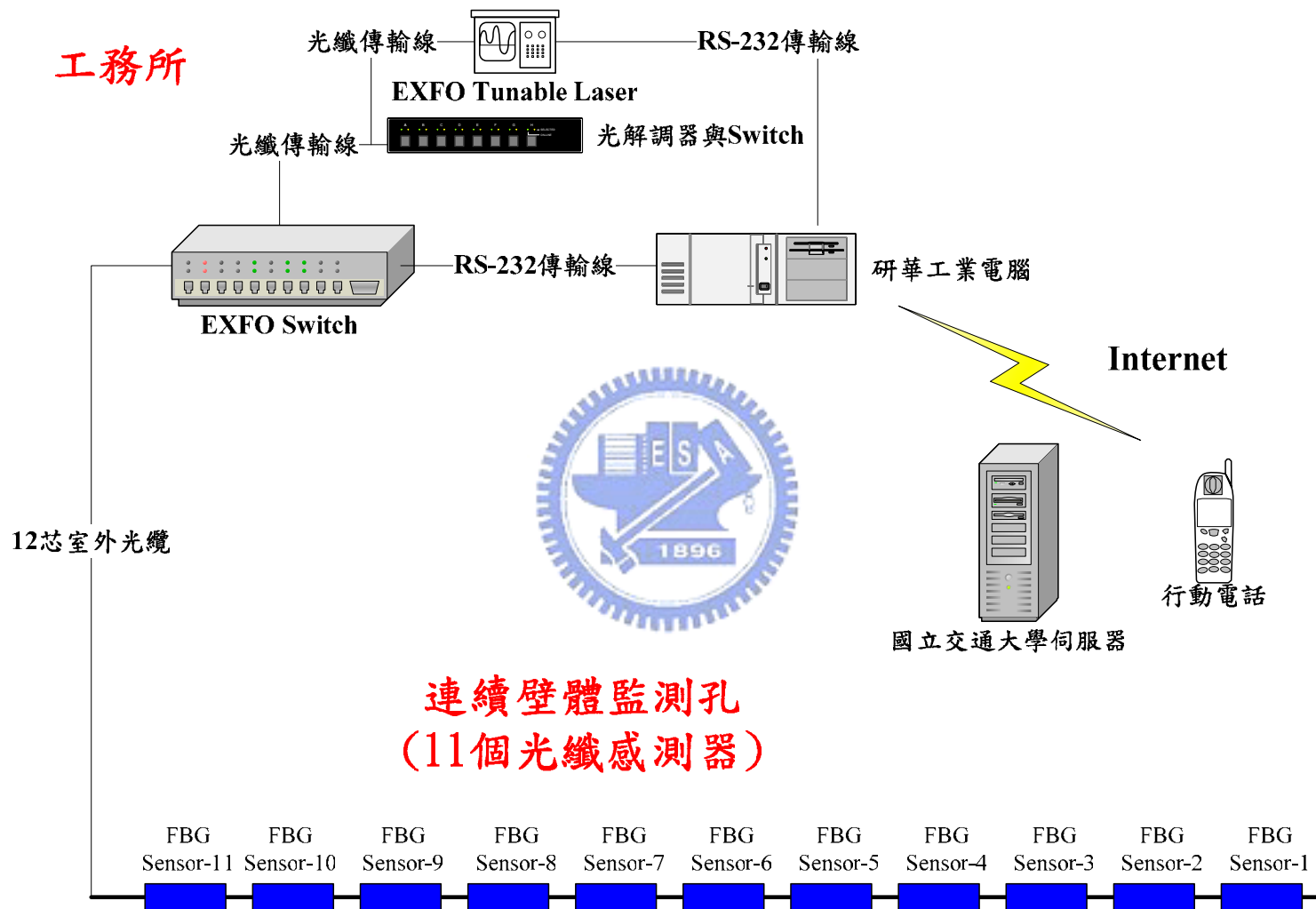
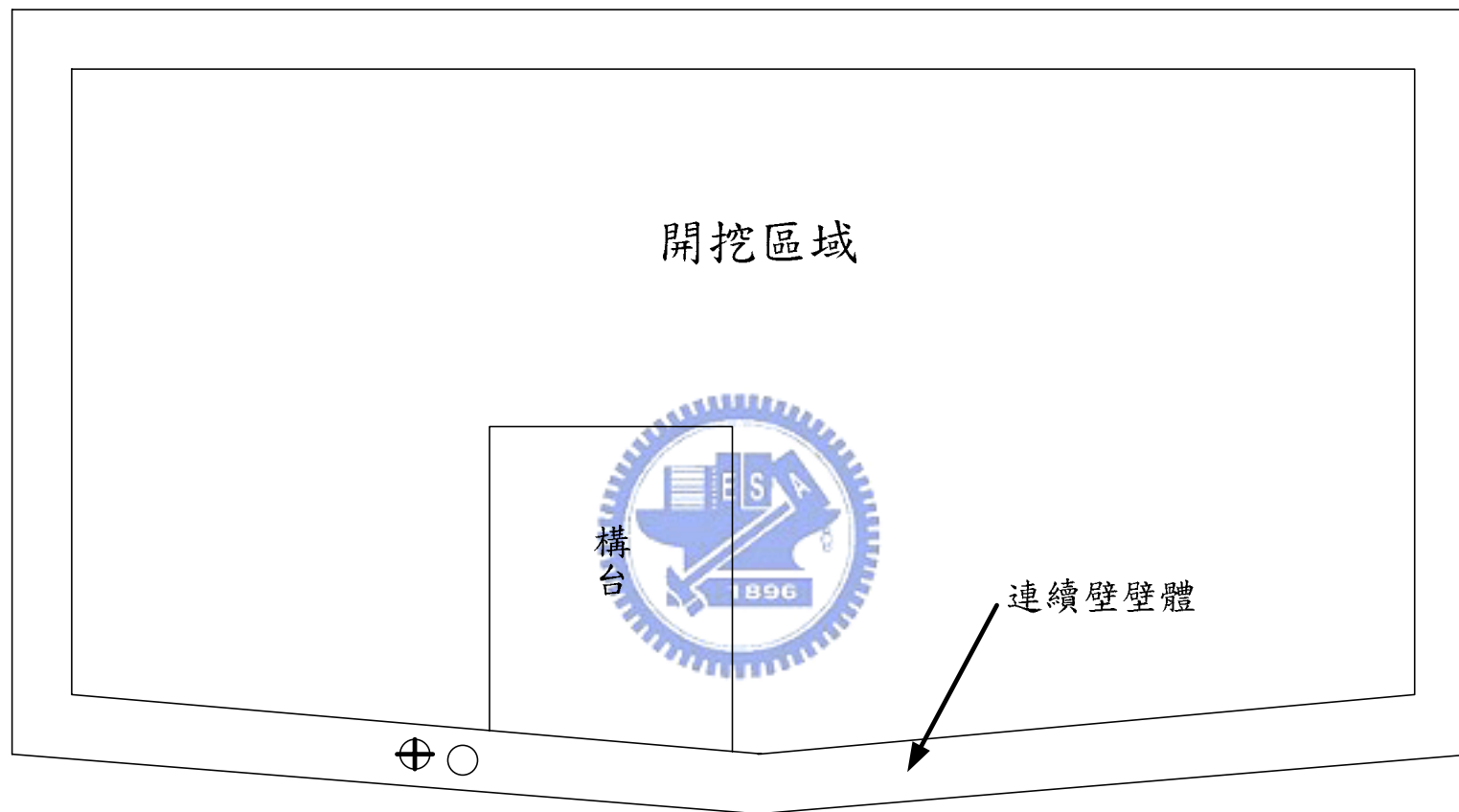


圖 5.1 現場監測架構圖



圖 5.2 EXFO IQ203 光切換機





- 節理式光纖光柵感測器裝置孔位
- ⊕ 傳統測傾儀監測孔位

圖 5.3 基地平面圖

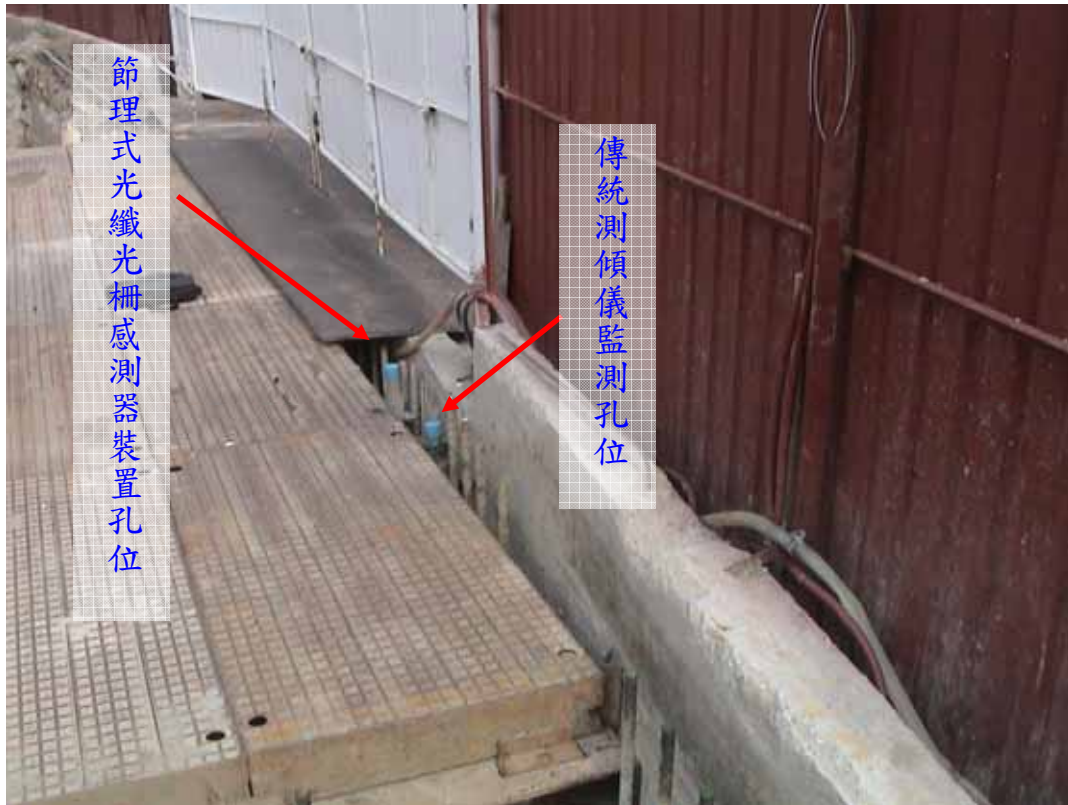


圖 5.4 監測孔位示意圖



圖 5.5 裝置完成示意圖

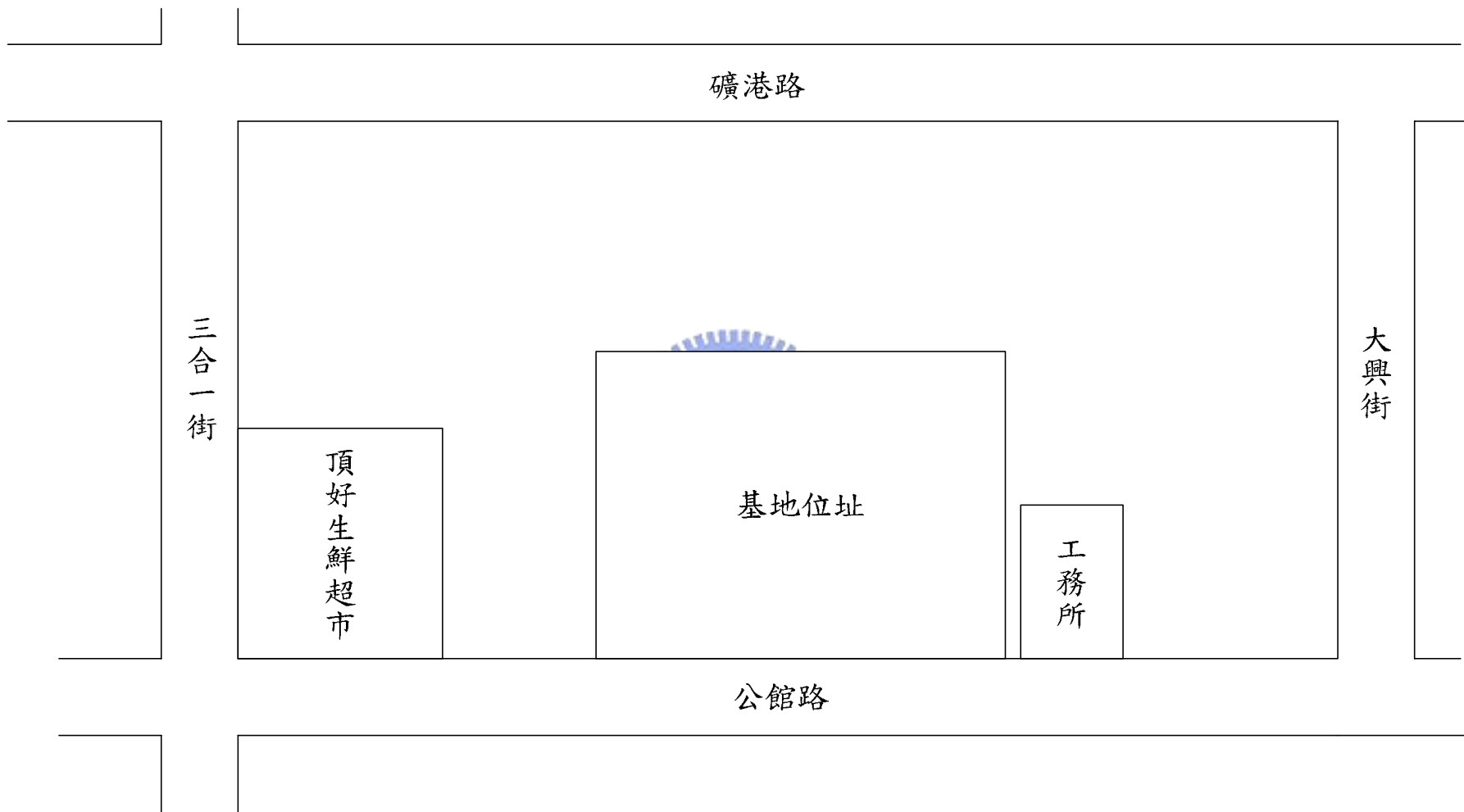


圖 5.6 基地位址平面

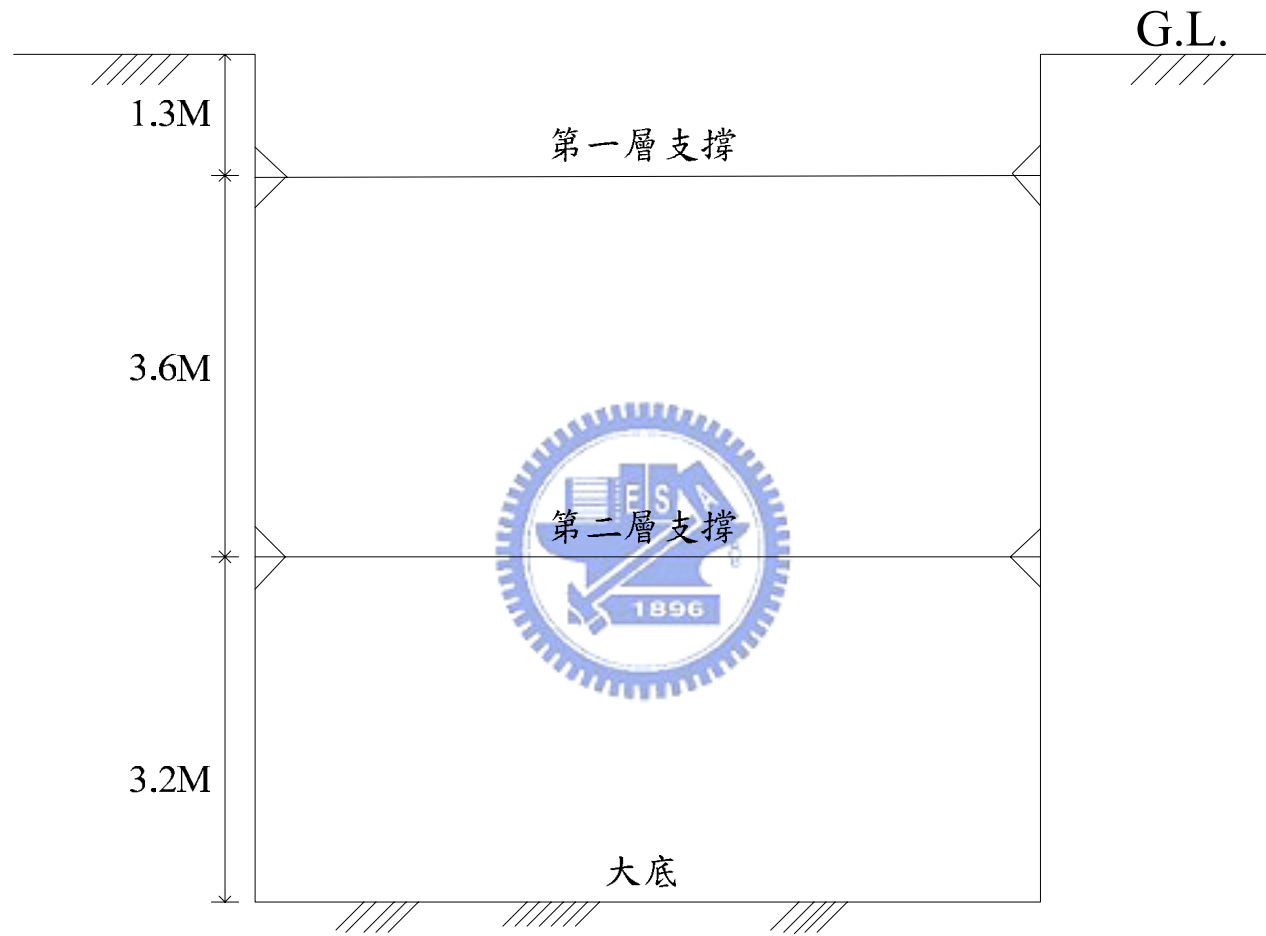


圖 5.7 基地開挖示意圖

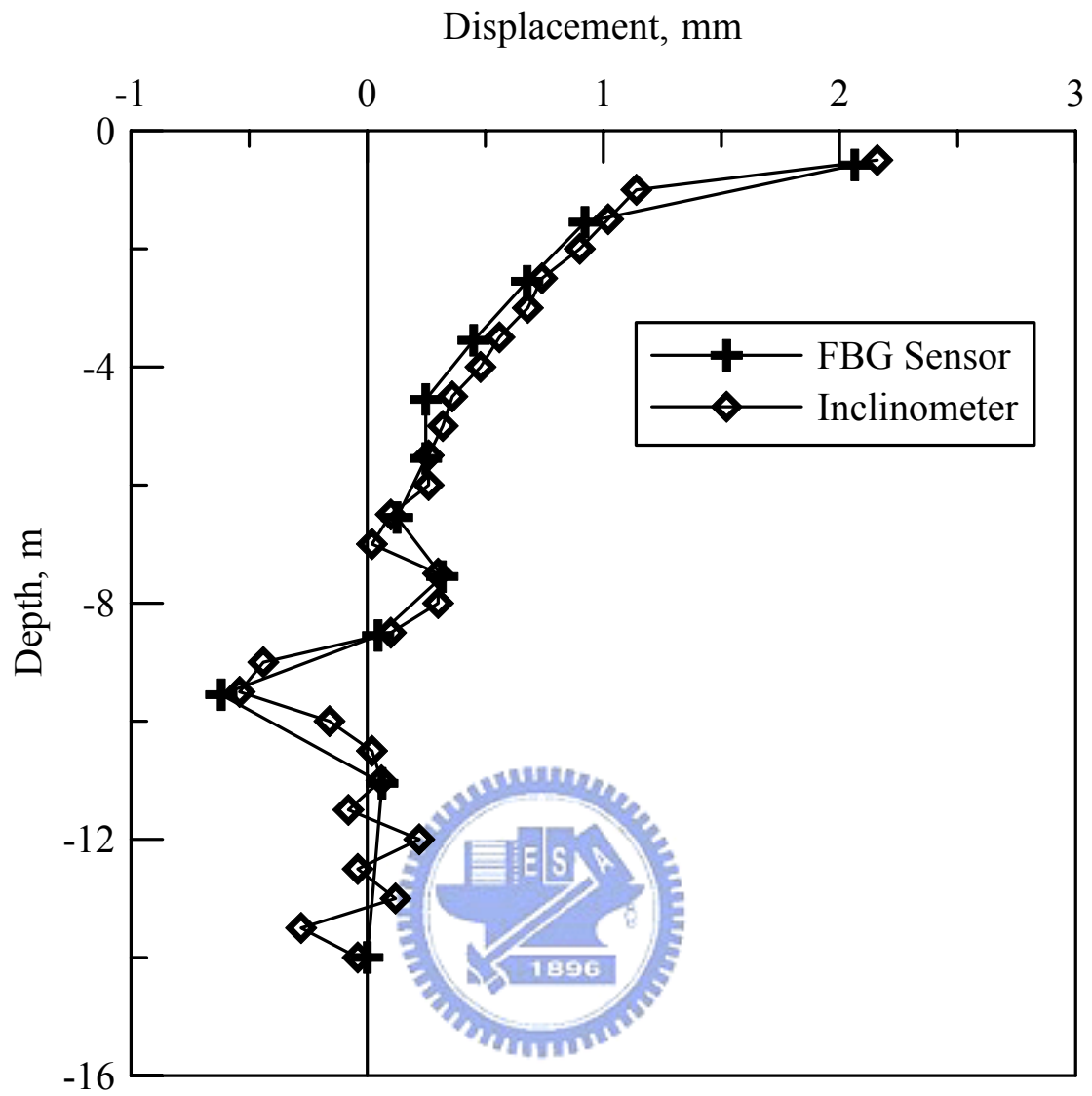


圖 5.8 第二階支撐架設完畢(2005/05/03)FBG 感測器
與測傾儀結果比較

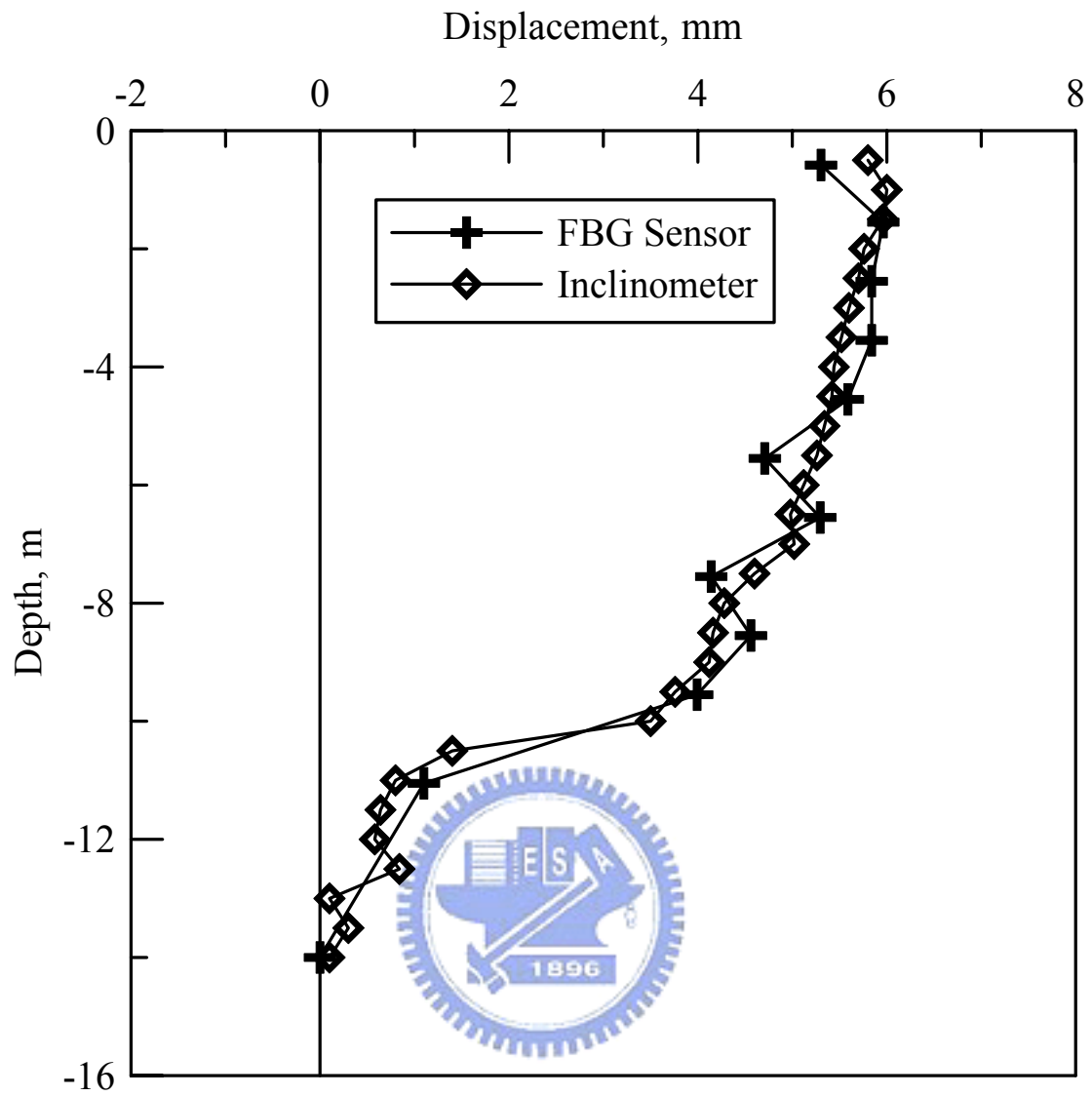


圖 5.9 第三階開挖(2005/05/09)FBG 感測器與測傾儀結果比較

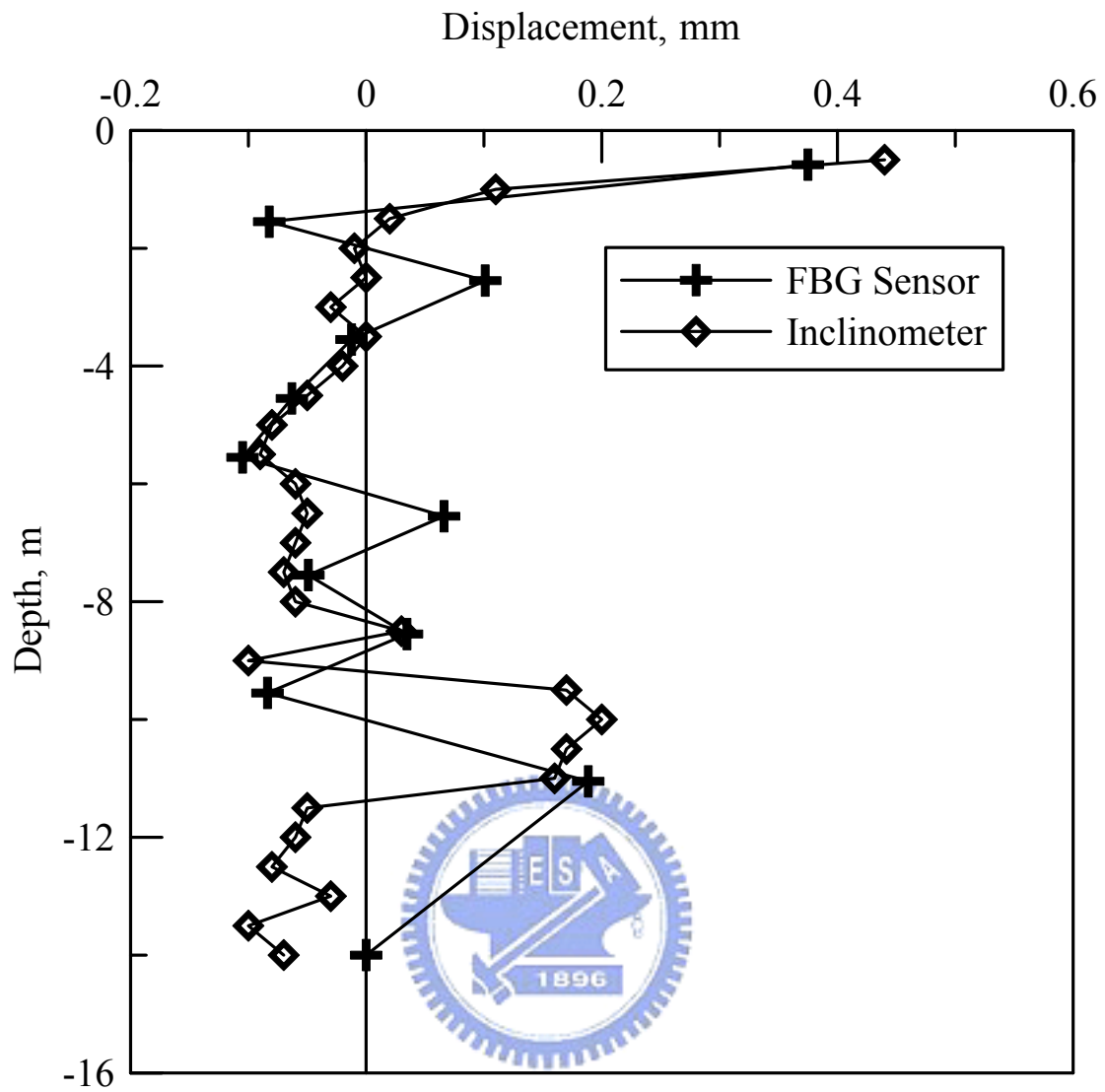


圖 5.10 大底綁筋(2005/05/17)FBG 感測器與測傾儀結果比較

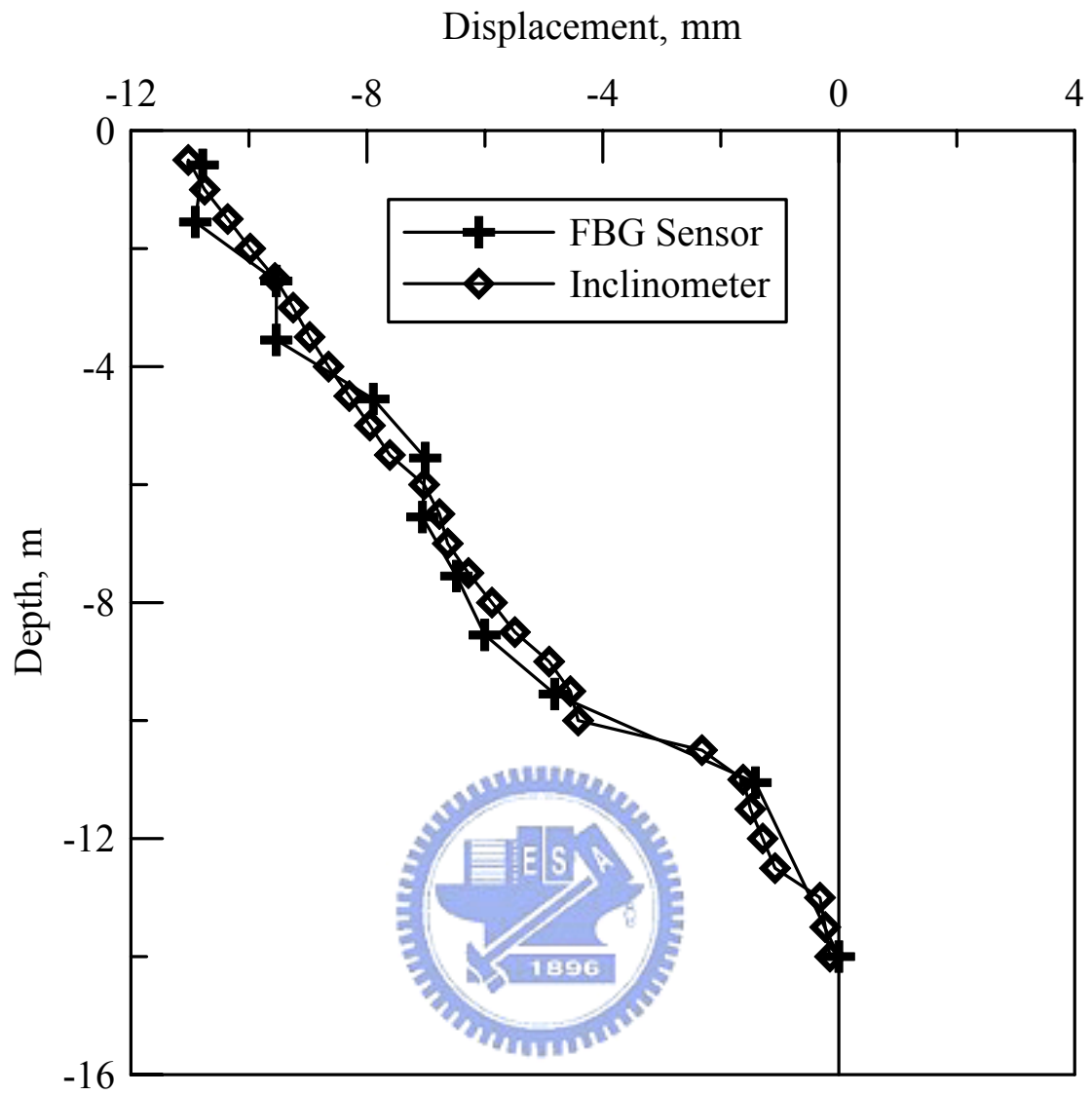


圖 5.11 大底澆置完成(2005/05/27)FBG 感測器與測傾儀結果比較

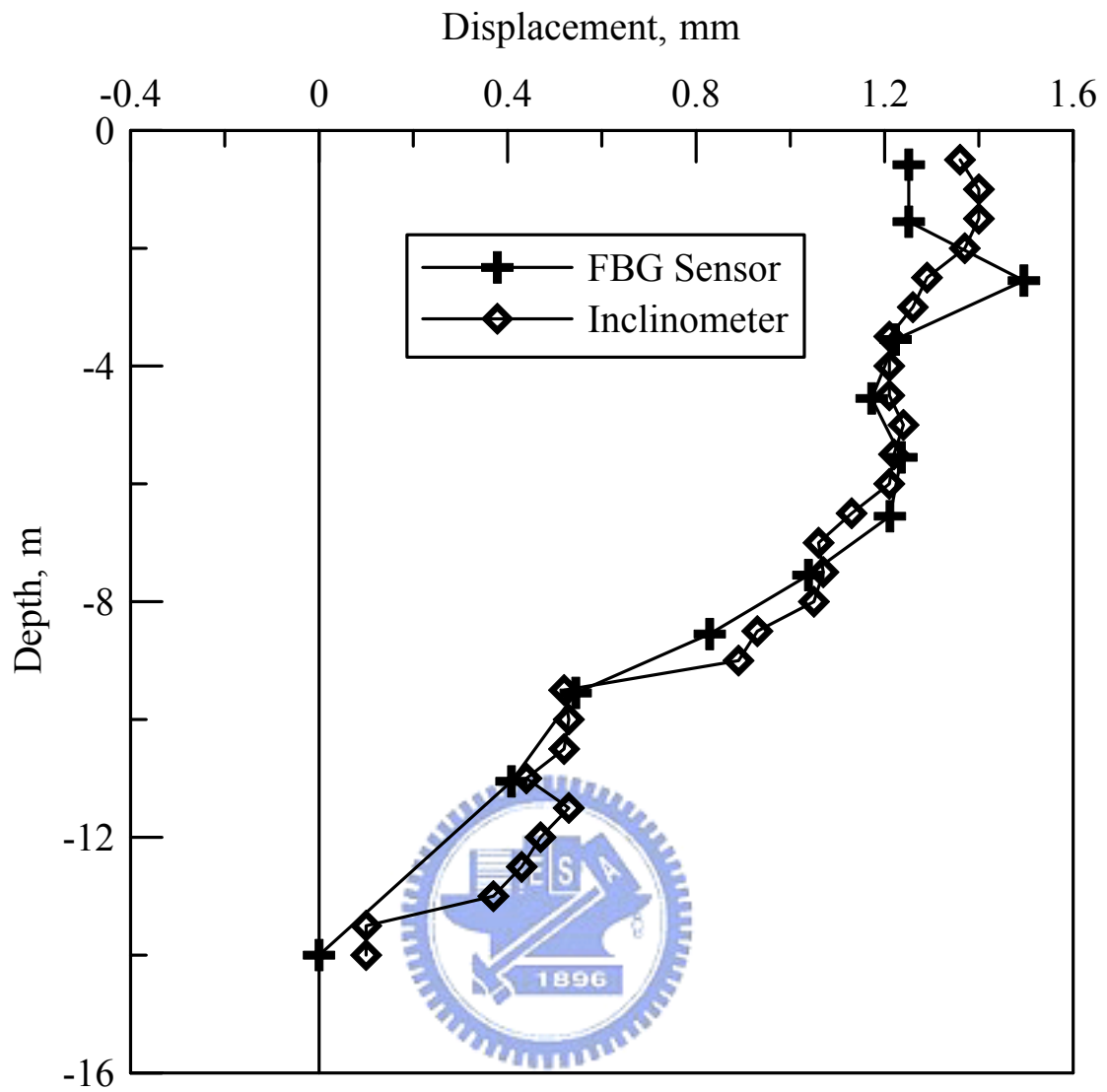


圖 5.12 地梁完成(2005/06/03)FBG 感測器與測傾儀結果比較

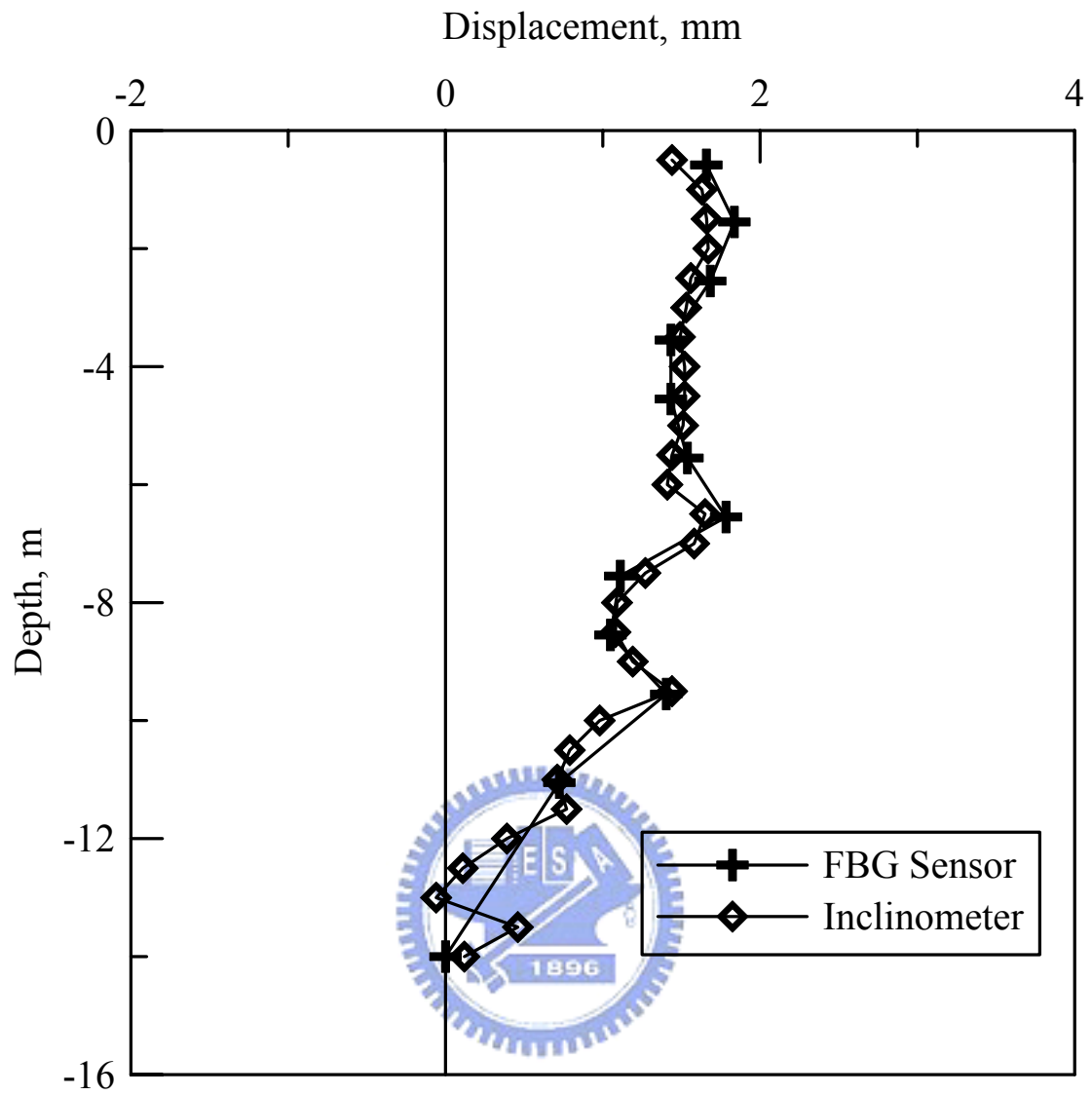


圖 5.13 第二階支撐解壓(2005/06/13)FBG 感測器與測傾儀結果比較

第六章 結論與建議

6.1 結論

1. 本研究已將 Labview 光纖光柵讀取系統軟體研發完成，並解決頻道不足的限制及增加資料網路傳輸功能。
2. 在整合的系統中，本研究已成功應用於台北法鼓山農禪寺深開挖監測。
3. 在節理式感測器室內標定中，所得結果與測傾儀量測結果差異量都很小，而在台北深開挖方面，所監測數據結果也與傳統測傾儀量測結果相差約 0.5mm。

6.2 建議

1. 本研究所使用之光路系統架構為 Fibera 公司所生產光纖光柵解讀系統，系統中部分元件如可調式雷射及波長鎖制器上市面上，已有較好之產品，故建議本讀取系統可採用新元件，如波長鎖制器採用 25GHz 以提高讀取系統之穩定性及精度及採用輸出頻率較高之可調式雷射以減少量測時間。
2. 在網路傳輸介面是採用寬頻網路，一旦此系統用於野外時，則網路系統會受到限制，所以建議可加入無線網路系統以備不時之需。
3. 在這次案例中，所使用之光切換機為外接式，雖然在控制方面能與本光纖光柵讀取系統相整合，但使用上所占空間太多且須較多

光纖連接線，所以建議使用較多頻道的光切換機直接裝入系統中。

4. 在土木工程監測中，自動化及網路傳輸是必然之趨勢，但監測現場通常都須配置一台工業電腦，若能將系統整合於嵌入式工業電腦並透過網路來控制擷取，則可提高操作系統之穩定性，以防作業系統當機現象發生。

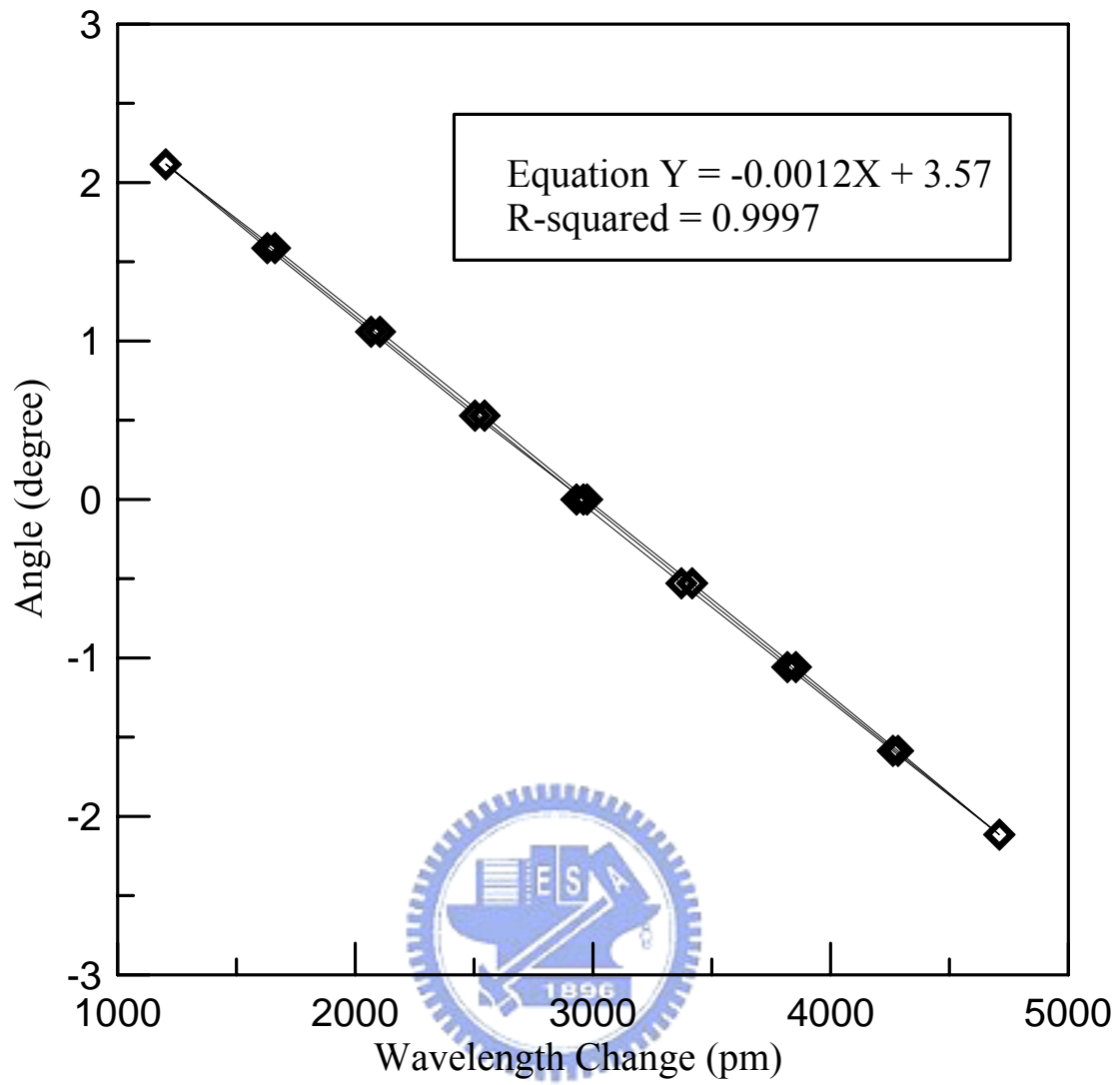


參考文獻

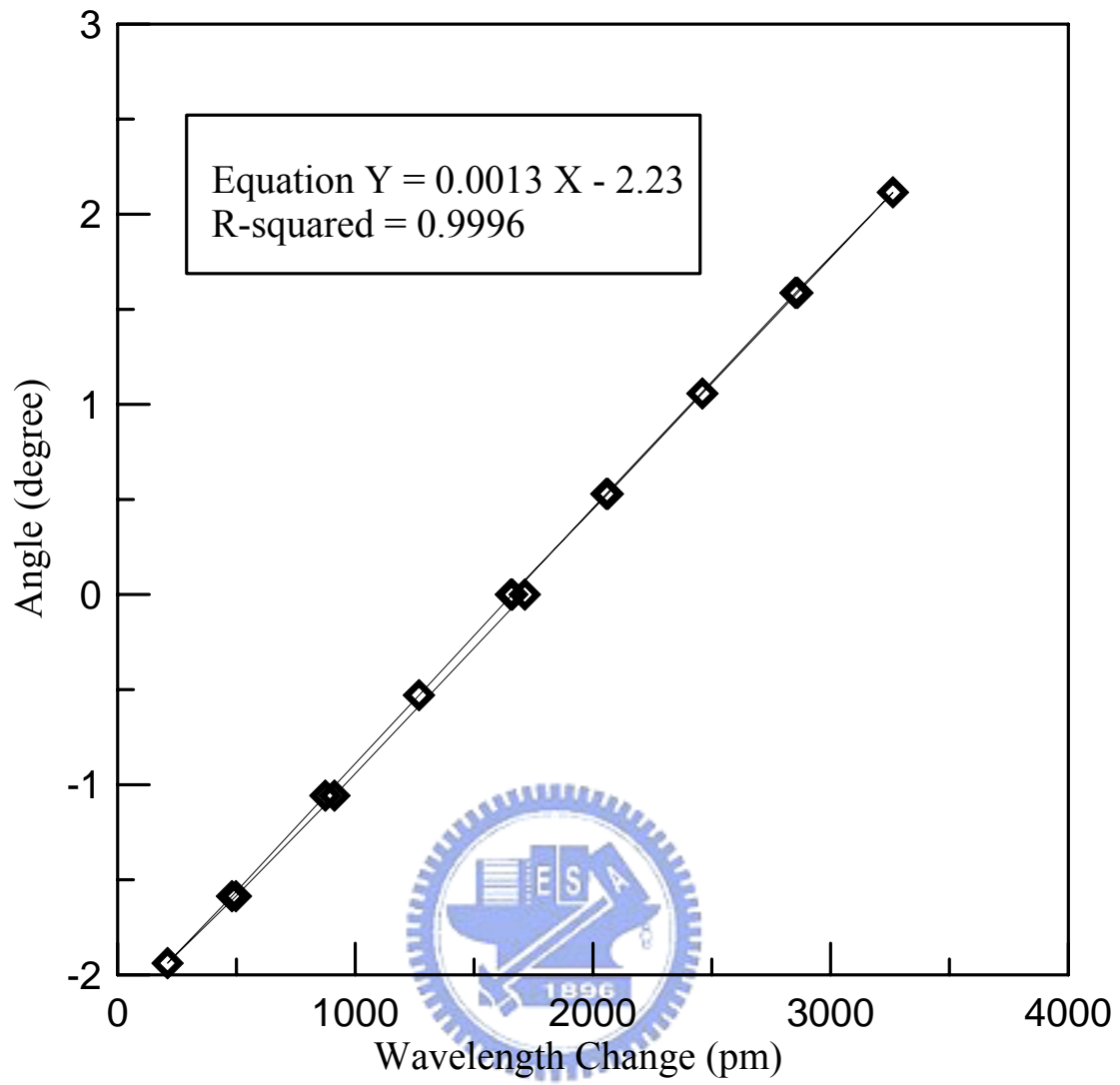
1. 陳至揚, 2001, “光纖光柵感測偏斜儀之研發”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文.
2. 簡旭君, 2003, “光纖光柵應變管之研發”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文.
3. 陳裕文, 2000, “光纖光柵應變感測系統之研製”, 國立交通大學光電工程研究所碩士論文.
4. 楊文豪, 1998, “光纖光柵感測器在磁場與振動上之應用”, 國立交通大學光電工程研究所碩士論文.
5. 陳水龍, 1992, “管式應變計於邊坡滑動監測之分析”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文.
6. 陳君毅, 1998, “Bragg 光柵光纖感測器在應變量測上的應用”, 國立交通大學土木工程學系專題研究報告.
7. Flavin, et al., “Short optical path scan interferometric interrogation of a fiber Bragg grating embedded in a composite”, *Electron. Lett.* Vol. 33, pp.160-176., 1996.
8. Kersey, et al., “Fiber Grating Sensor”, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 15, No. 8, pp.160-176., 1997.
9. Davis, et al., “Application of a fiber Fourier transform spectrometer to the detection of wavelength-encoded signals from Bragg grating sensors”, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 13, pp.1289-1295, 1995.
10. Fallon, et al., “Multiplexed identical broad-band-chirped grating interrogation system for large-strain sensing application”, *IEEE Photo. Technol. Lett.*, Vol. 12, pp.1616-1618, 1997.
11. Fallon, et al., “Identical broadband chirped grating interrogation technique for temperature and strain sensing”, *Electron Lett.*, Vol. 33, no 8, pp.705-706, 1997.
12. Meltz et al., “Information of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method”, *Opt. Lett.*, Vol. 14, no 15, pp.823-825, 1989.
13. Dyer et al., “Fundamental limits in fiber Bragg grating peak wavelength measurements”, 17th International Conference on Optical Fiber Sensors, Vol. 1, pp.88-93, 2005.
14. Kang et al., “Temperature-Independent strain sensor system using a tilted fiber Bragg grating demodulator”, *IEEE. Photo. Technol. Lett.*, Vol. 10, pp.1461-1463, 1998.

附錄 A

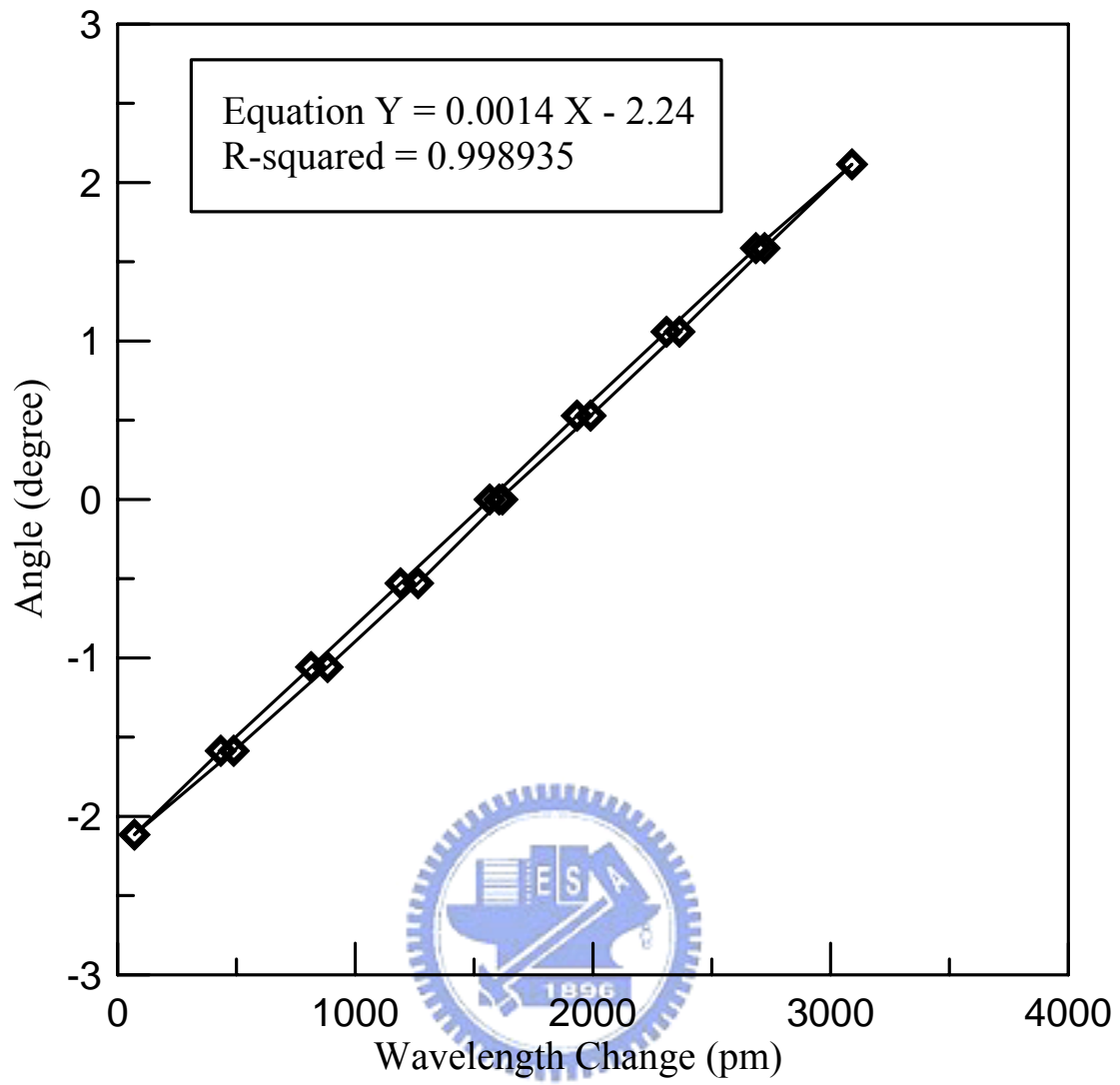




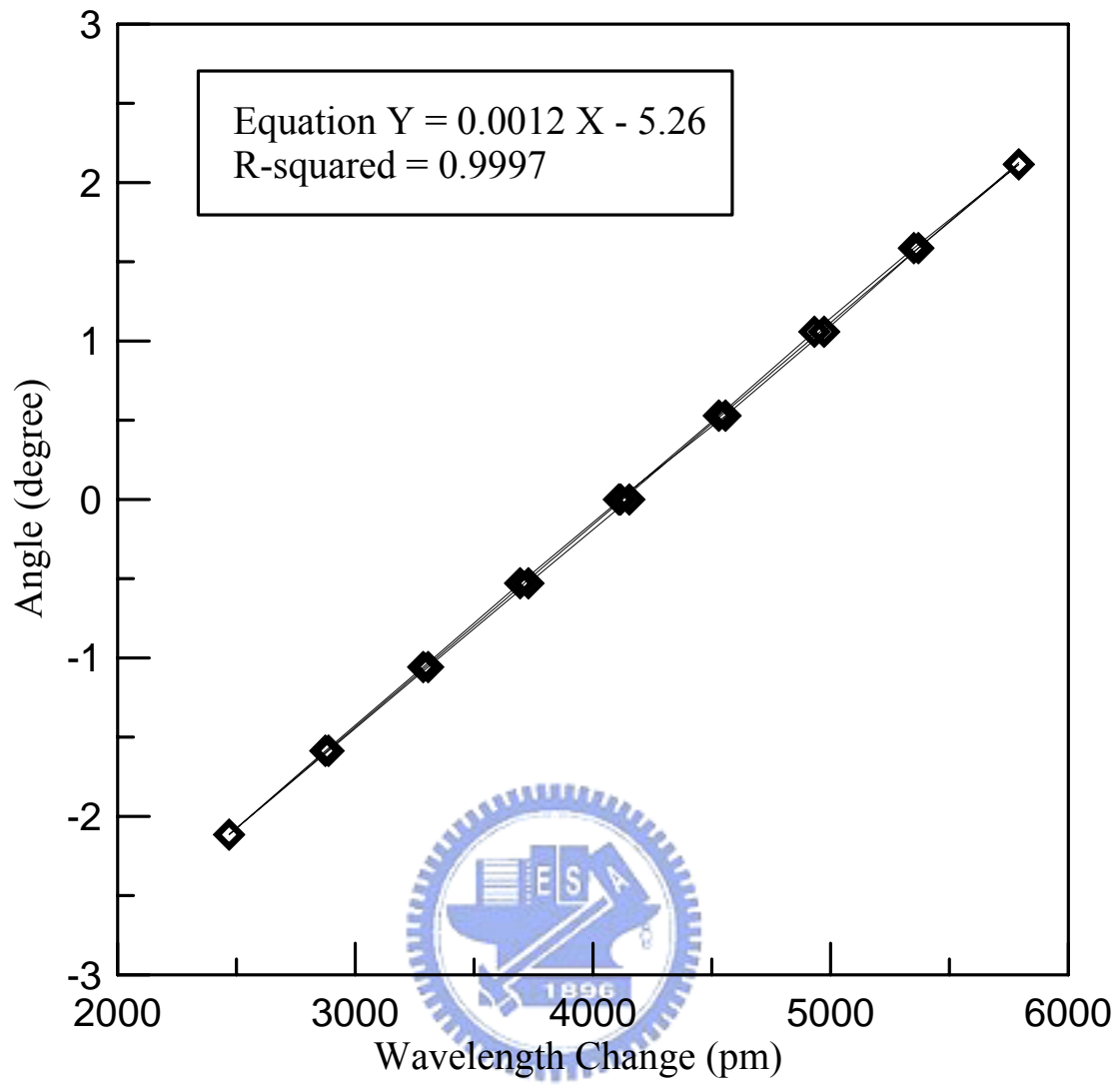
感測器編號 1 之標定圖



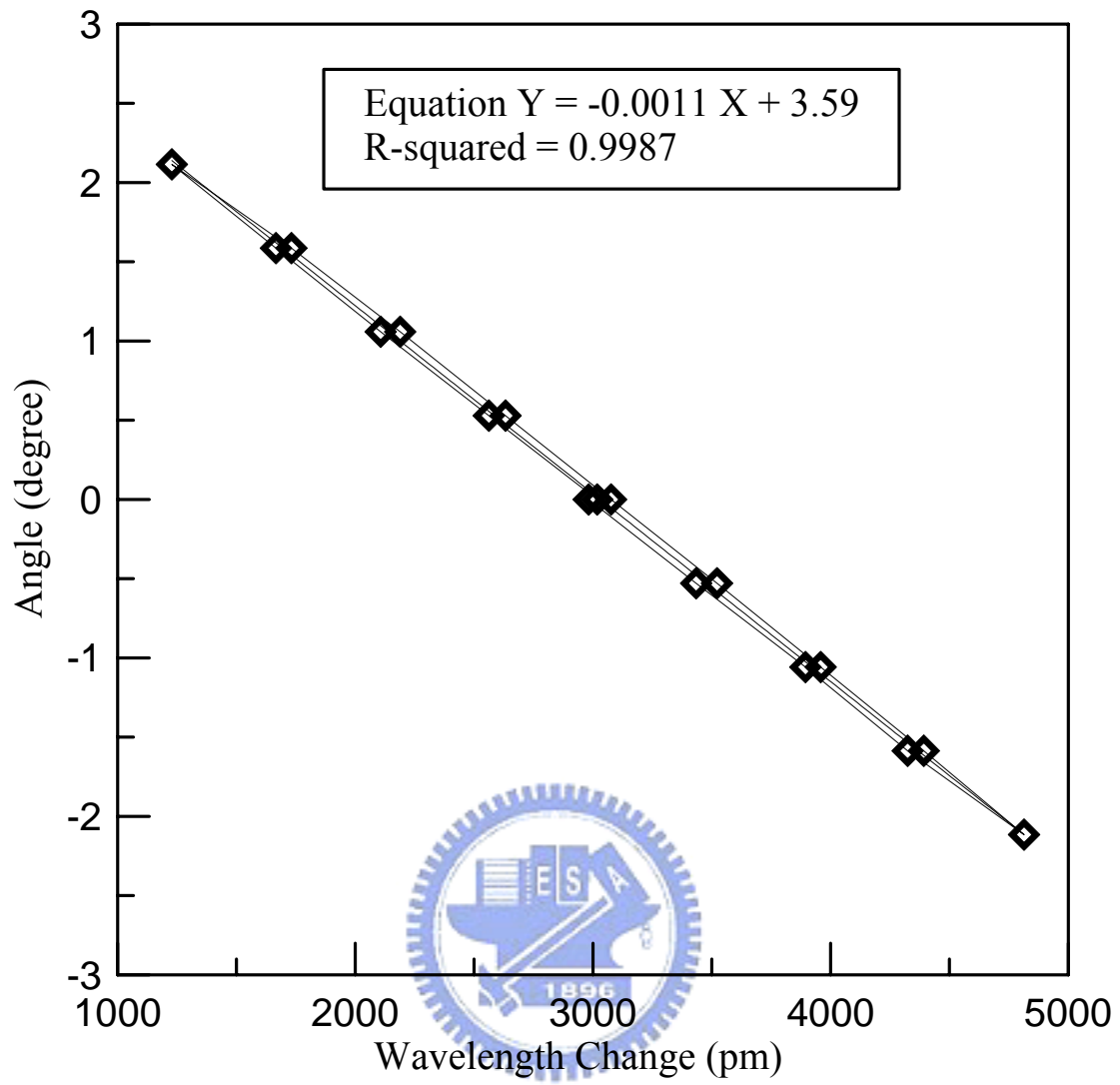
感測器編號 2 之標定圖



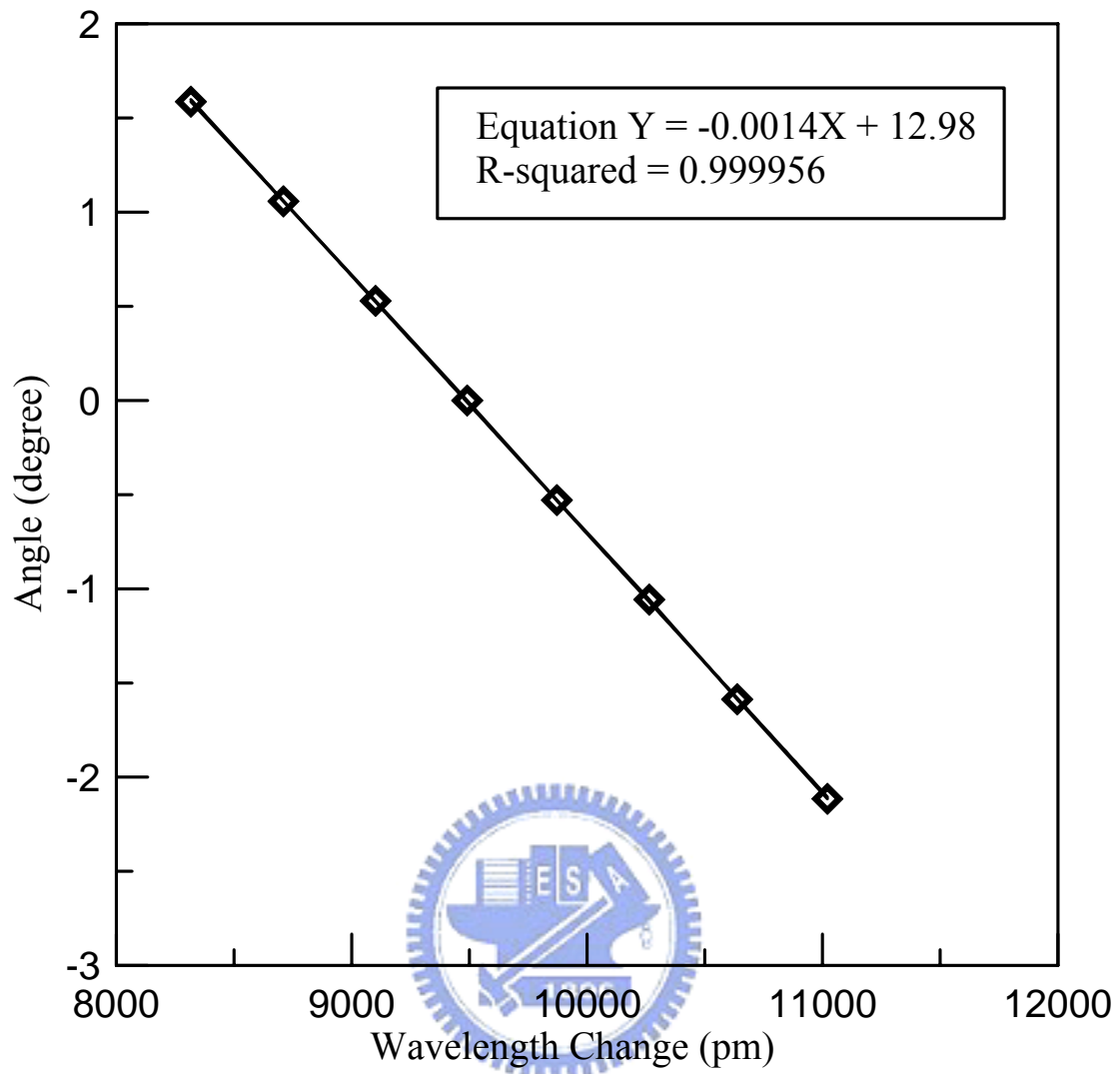
感測器編號 3 之標定圖



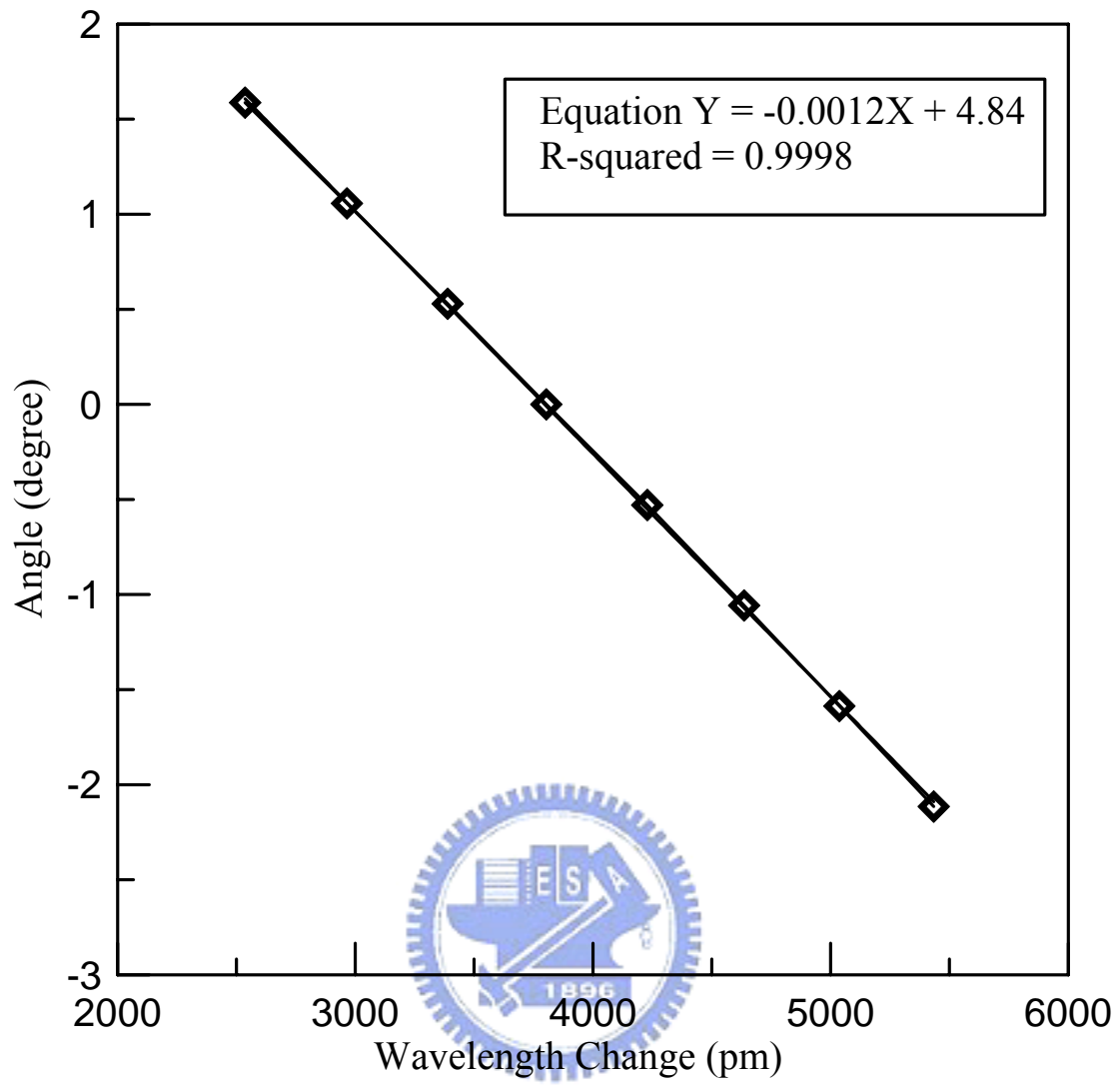
感測器編號 4 之標定圖



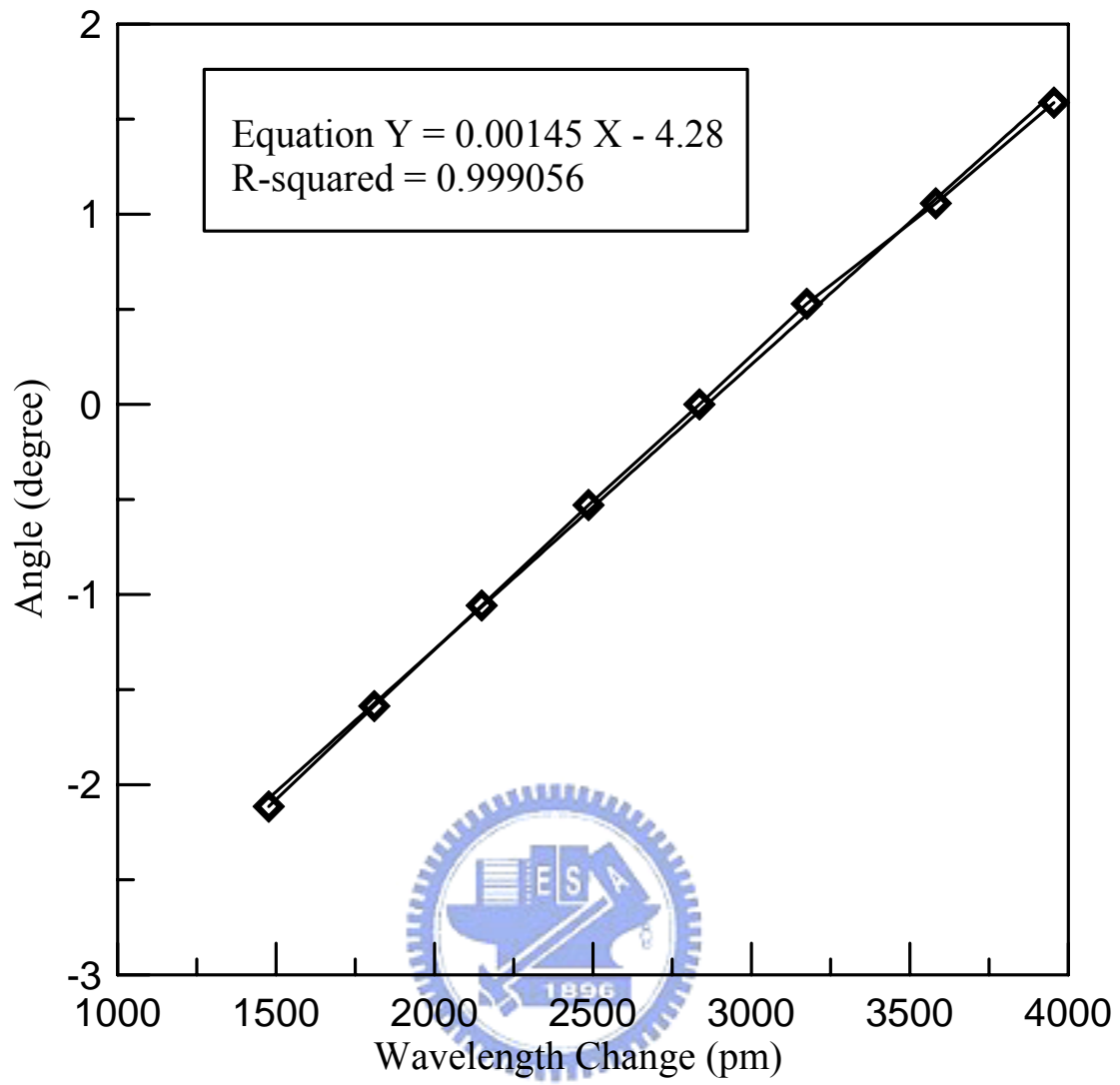
感測器編號 5 之標定圖



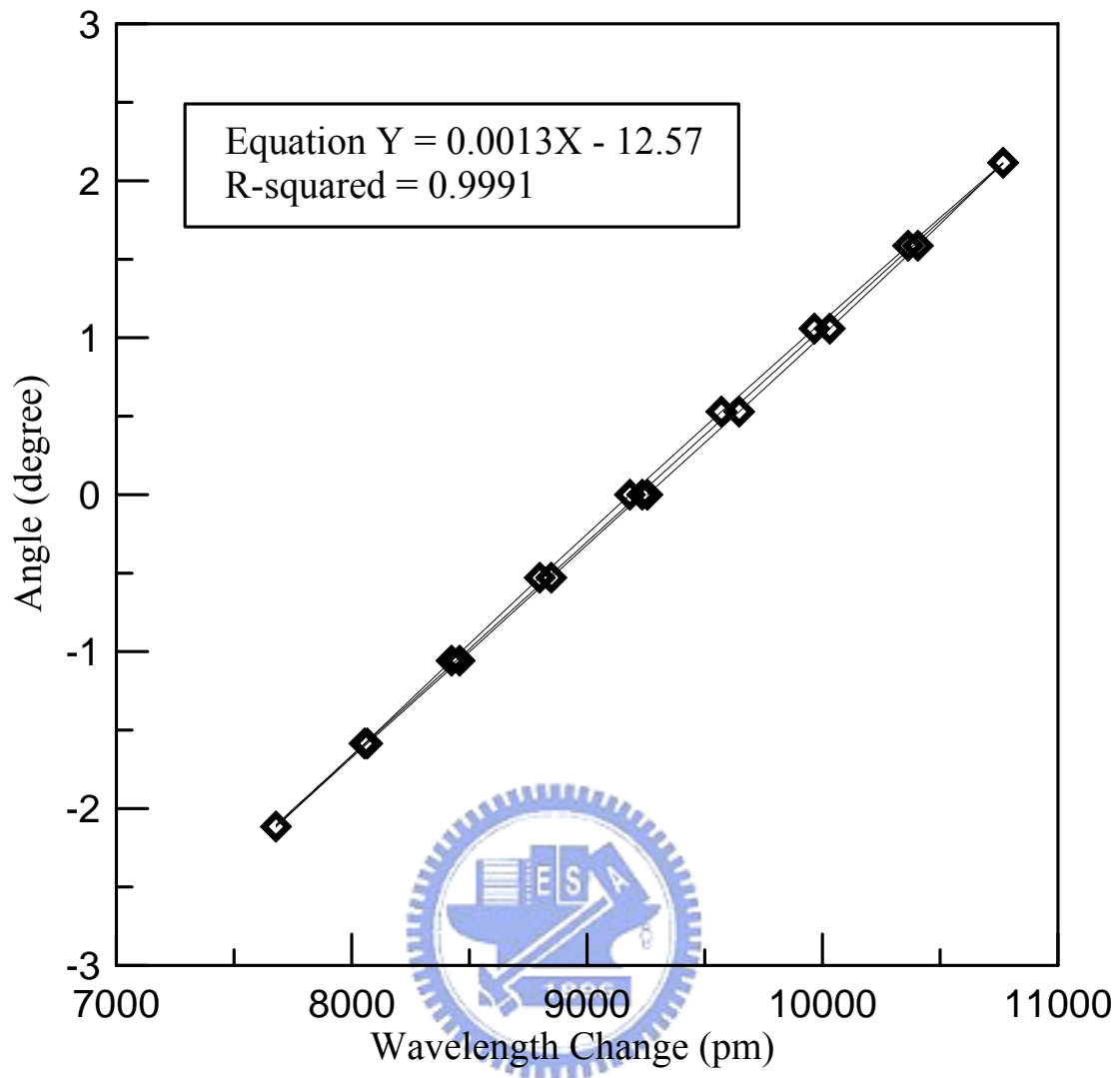
感測器編號 6 之標定圖



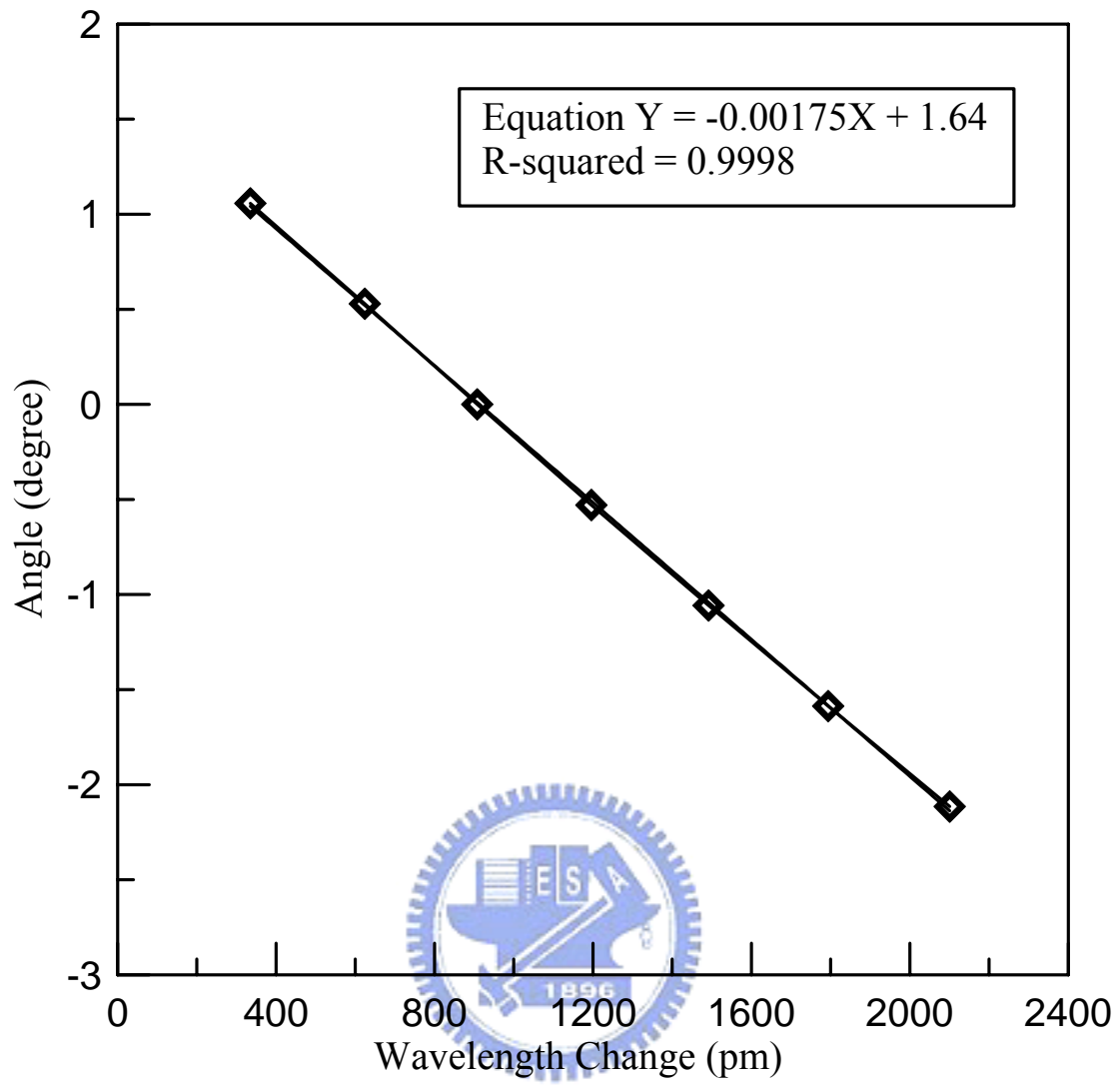
感測器編號 7 之標定圖



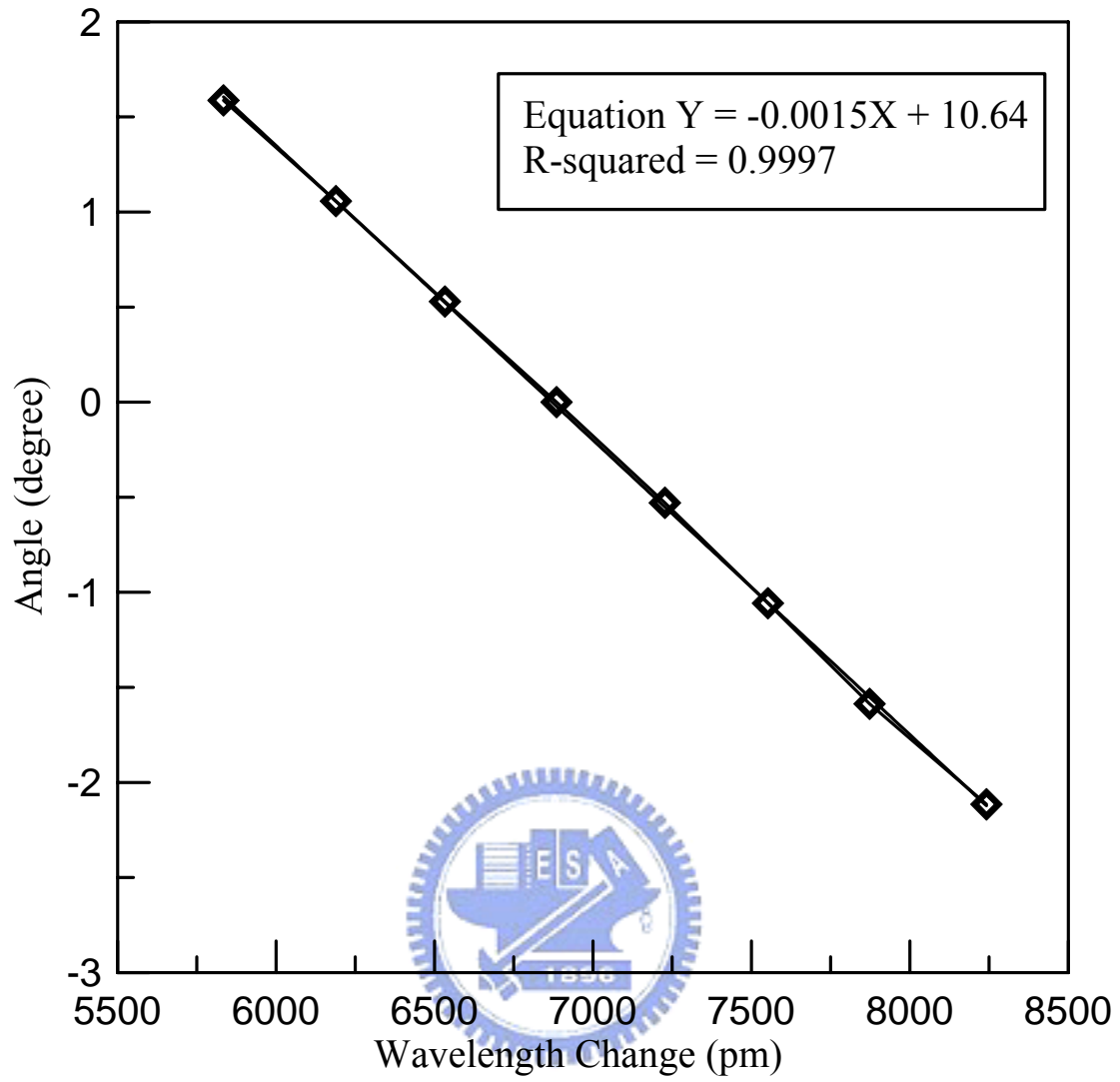
感測器編號 8 之標定圖



感測器編號 9 之標定圖



感測器編號 10 之標定圖



感測器編號 11 之標定圖