

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

FPGA/Real-Time 架構下光纖光柵
現地解讀儀系統之研發



Development of an FPGA/Real-Time
based field FBG interrogation system

研究生：許崑山

指導教授：黃安斌 博士

中華民國九十六年八月

FPGA/Real-Time 架構下光纖光柵
現地解讀儀系統之研發

Development of an FPGA/Real-Time
based field FBG interrogation system

研究生：許崑山

Student : Kun-Shan Hsu

指導教授：黃安斌 博士

Advisor : Dr.An-Bin Huang



A Thesis

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

August,2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年八月

FPGA/Real-Time 架構下光纖光柵 現地解讀儀系統之研發

研究生：許崑山

指導教授：黃安斌 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

摘要

光纖光柵監測系統，較一般電子式的監測系統更適合於野外的現地環境，但還有許多問題尚需要克服。目前光纖光柵監測解讀系統（interrogation system），大多使用商用的儀器，其價格昂貴且儀器本身無法達到即時分析預警效果。為了克服儀器設計的限制，而能夠直接進行動態量測，獲得監測標地的工程物理量，本研究利用嵌入式的即時控制系統，搭配使用現地可程式化陣列邏輯閘（Field Programmable Gate Array；FPGA），增加系統擴充的彈性與獨立運算的能力，並且能夠透過網路技術，遠端監控現地的情況，即時將資訊傳遞到使用者端，達到預警的功效。

關鍵詞：光纖光柵、現地可程式化陣列邏輯閘、即時

Development of an FPGA/Real-Time based field FBG interrogation system

Student : Kun-Shan Hsu

Advisor : Dr. An-Bin Huang

Institute of Civil Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Optical fiber Bragg grating (FBG) sensor systems are more suitable for field monitoring purposes than conventional electric devices. However, there are still obstacles to be resolved before FBG can be practically applied in the field. The currently available commercial interrogation systems are costly and difficult to implement in a real time analysis/warning system. This research developed an FBG interrogation system using the Field Programmable Gate Array (FPGA) technique under an embedded, real time control. The new interrogation system is easily expandable and can operate independent from a personal computer. Through internet, the data and warning messages can be transmitted on a real time basis.

Keywords : FBG 、 FPGA 、 Real-Time

誌謝

完成本篇論文研究首先要感謝我的指導教授 黃安斌博士，在我的研究過程當中給予許多指導，訓練我們具備良好的思考邏輯與解決問題的能力，使本篇論文的研究得以順利完成，在此謹向恩師致上最誠摯的敬意與感謝。口試期間承蒙指導老師 黃安斌教授、中興工程顧問社經理 冀樹勇博士、建國科技大學 許懷後教授與暨南大學 張文忠教授等諸位委員給予愷切的指導，提供寶貴的意見使論文不足之處得已改進，於此特別感謝各位口試委員。

在學期間受教於 方永壽教授、潘以文教授、廖志中教授、黃安斌教授與 林志平教授，傳授專業知識與引導論文方向於此敬表謝忱。研究過程也受到美商國家儀器公司郭皇志經理、劉枉甫專員與諸位工程師很多協助也予以感謝。以及建國科大 許懷後教授所屬實驗室提供許多設備供研究使用深表感謝。對於黃門的學長何彥德、李瑞廷、許智超、高聖傑、黃俞傑與洪若安在研究上的協助與經驗傳承也予以感謝。

在這兩年的期間與我一起建立革命情感的同學黃价民、戴源昱還有我的室友范佐憲、林文欽與謝孟修等人，感謝你們陪我度過無數的晨昏，經過許多歡笑與淚水。以及劉全修、田凱丞等學弟妹不論在研究上或是生活上的諸多協助也一併感謝，希望你們也早日順利畢業。

最後要感謝的也是我最重要的家人與摯愛的女友，感謝父親、母親的養育與教導之恩，還有姊姊與哥哥在我背後支持著我，讓我順利完成學業而無後顧之憂，女友一路陪伴我無怨無悔，度過許多難熬的日子，為你們獻上在我心中最誠摯的感謝與祝福，希望大家一起分享這成果與喜悅。

許崑山 謹誌 於新竹交大

中華民國九十六年八月

目錄

摘要	I
Abstract	II
誌謝	III
目錄	IV
圖目錄	VI
表目錄	VIII

第一章 緒論

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 光纖光柵感測系統解讀與原理

2.1 光纖簡介	4
2.2 光纖光柵感測器的基本原理	4
2.2.1 應變與波長飄移關係	5
2.2.2 溫度與波長飄移關係	6
2.3 光纖感測系統的解讀原理	8
2.3.1 光纖感測系統解讀之方法	8
2.3.2 光纖光柵系統之波長分析方法	10

第三章 光纖光柵解讀系統之硬體架構

3.1 光纖監測系統之架構	14
3.2 光學系統架構	14

3.2.1 光纖光學系統元件介紹.....	14
3.2.2 光纖光路系統元件之應用.....	16
3.3 資料擷取分析系統架構.....	16
3.3.1 嵌入式即時控制系統 (Real-Time System)	16
3.3.2 現地可程式陣列邏輯閘 (FPGA)	18

第四章 程式控制分析方法與訊號處理

4.1 系統階層的程式溝通.....	37
4.1.1 PC base 階層.....	37
4.1.2 Real-Time 控制運算階層.....	38
4.1.3 FPGA 擷取階層.....	38
4.2 雷射光源控制.....	39
4.3 光切換器控制.....	39
4.4 光柵波長訊號分析.....	39

第五章 系統整合與現地應用

5.1 網路傳輸技術.....	59
5.2 資料存取模式.....	61
5.3 即時預警功能.....	61
5.4 模擬遠端量測試驗.....	61

第六章 結論與建議

6.1 結論.....	67
6.2 建議.....	68
參考文獻.....	69

圖目錄

圖 1-1 研究流程圖.....	2
圖 2-1 光纖光柵示意圖.....	11
圖 2-2 光纖 Mach-Zehnder 干涉儀量測系統.....	12
圖 2-3 布拉格光纖光柵實體.....	13
圖 3-1 光纖光柵解讀系統架構圖.....	26
圖 3-2 光纖光柵監測系統組織圖.....	27
圖 3-3 光偵測器原理示意圖.....	28
圖 3-4 光波長參考器吸收頻譜.....	29
圖 3-5 C band 雷射光源.....	30
圖 3-6 2x2 光耦合器.....	30
圖 3-7 光波長參考器.....	31
圖 3-8 1x8 光路切換器.....	31
圖 3-9 光纖光柵感測器（偏斜儀）.....	32
圖 3-10 光偵測測器.....	32
圖 3-11 Real-Time 系統構成要素.....	33
圖 3-12 邏輯方程式示意圖.....	34
圖 3-13 FPGA 晶片示意圖.....	35
圖 3-14 晶片功能分區示意.....	36
圖 4-1 各階層架構下所執行工作與溝通語言.....	43
圖 4-2 系統階層程式架構.....	44
圖 4-3 程式介面的專案階層.....	45
圖 4-4 LabVIEW 程式介面.....	46

圖 4-5	LabVIEW 的使用者介面.....	47
圖 4-6	FPGA 架構下使用者介面	48
圖 4-7	FPGA 階層下的程式介面	49
圖 4-8	FPGA 階層下光切換器布林邏輯控制函式	50
圖 4-9	Real-Time 階層下雷射光源控制部份程式	51
圖 4-10	Real-Time 階層下光切換器程式	52
圖 4-11	波長擷取程式之初始設定.....	53
圖 4-12	訊號擷取轉換程式	54
圖 4-13	波長尖峰分析程式	55
圖 4-14	光柵波長與參考波長	56
圖 4-15	波長計算與分析程式	57
圖 4-16	水平位移計算程式	58
圖 5-1	監測警戒值發布簡訊.....	64
圖 5-2	地層變化監測畫面	65
圖 5-3	模擬現地監測流程圖	66



表目錄

表 3-1 各種半導體光偵測器波長適用範圍.....	21
表 3-2 常用半導體光偵測器特性.....	21
表 3-3 不同氣體對於光波長的吸收波段.....	22
表 3-4 不同 Real-Time 系統的應用分類.....	23
表 3-5 Hard & Soft Real-Time 系統的特徵.....	24
表 3-6 FPGA 在不同階層架構下的行為.....	25
表 5-1 LabVIEW 環境下各種網路技術的特性.....	63



第一章 緒論

光纖光柵監測系統如果使用於山坡地或是結構物安全監測，較一般電子式的監測系統更適合於野外的現地環境，具有訊號不易受電磁波干擾，以及感測器可不怕短路或雷擊的優點，因此逐漸廣泛的被選擇為監測的方法之一。但是相較於一般傳統的監測系統，它發展的歷史較為短暫，因此還有許多問題尚需要克服。

1.1 研究動機與目的

目前的光纖光柵監測解讀系統 (interrogation system)，大多使用現成的商用儀器，但是大部分現有的商用儀器價格昂貴，並且受到儀器本身功能的限制，常無法完全自定所需要的功能，使得監測無法達到即時的預警效果。而如果使用客製化的晶片設計費時且技術上有相當的難度，日後擴充性也不高。

因此為了改善傳統的光纖監測解讀系統的缺點，克服儀器本身電路模組設計的限制，而能夠直接進行動態量測，獲得監測標地的物理量。所以本研究的內容就是利用嵌入式的即時控制系統，搭配使用現地可程式化陣列邏輯閘 (Field Programmable Gate Array; FPGA)，增加系統擴充的彈性與獨立運算的能力，並且能夠透過網路技術，遠端監控現地的情況，即時將資訊傳遞到使用者端，達到預警的功效。

1.2 研究流程

本研究的流程如圖 1-1 所示：

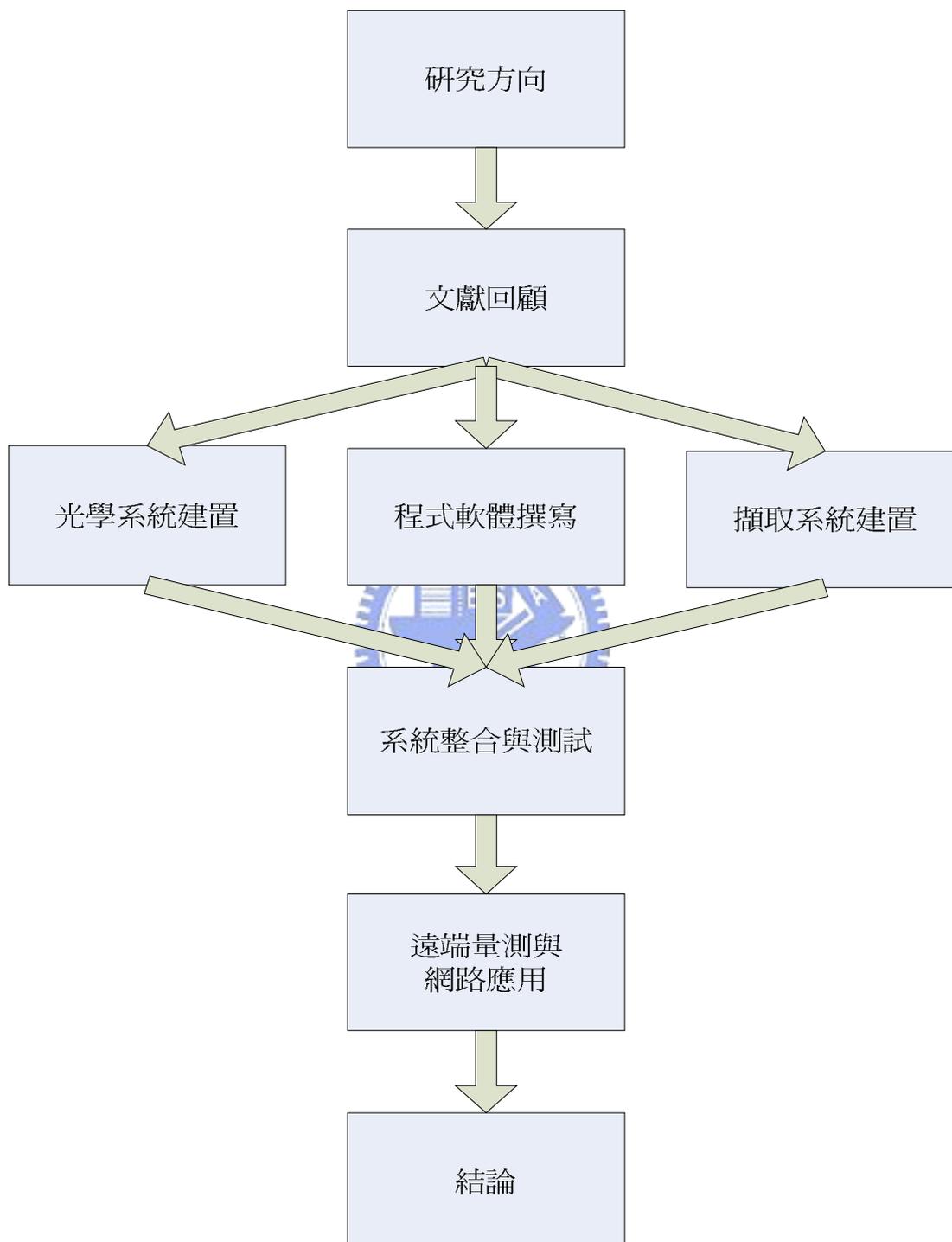


圖 1-1 研究流程圖

為了解決前述的問題以及達成改善的方法，所以擬定了研究的方向後，蒐集相關的研究作為參考，並開始建置軟硬體設備。先將光學系統的各项元件作整合，搭配擷取系統測試基本功能，然後撰寫程式將本研究所欲達到的特定功能完成，再將整個系統的軟硬體作完整性的功能測試，對於有問題的部份修改，最後撰寫網路功能程式，在模擬現地的情況作實際的室內遠端量測。

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：

陳述本論文的研究動機、目的與研究流程。

第二章 光纖光柵感測與解讀原理：

介紹光纖光柵的基本原理與各種光纖光柵解調技術差異。

第三章 光纖監測系統之硬體架構：

說明本研究所使用之儀器與相關設備操作原理。

第四章 程式控制分析方法與訊號處理：

描述在各階層中如何藉由程式控制的方法達到即時擷取、分析的目
的，以及說明擷取訊號之分析步驟。

第五章 系統整合與遠端應用：

敘述本研究所建構之自動化光纖監測系統，如何應用網路技術將監測
結果分享以及傳遞，並做實際的測試。

第六章 結論與建議：

總和本研究的過程與經驗提出目前的成果與日後改善的建議。

第二章 光纖光柵感測系統解讀與原理

2.1 光纖簡介

1970 年代雷射以及低損耗光纖這兩項關鍵性的元件技術有了重大突破，使得光通訊的技術也大幅提升。1974 年美國貝爾實驗室製作出 1dB/km 的低損耗光纖；1977 年研發出使用時間可達 100 萬小時的半導體雷射，讓光纖通訊的技術正式達到應用化的階段。

而光纖感測的技術也是隨著應用光通訊的技術提升而逐漸的發展，由 Vali and Shorthill (1976) 及 Rogers (1977) 分別發表兩篇關於光纖感測技術的論文，此後就有一連串關於感測技術的論文陸續被發表，因此這兩篇論文的問世，被視為光纖感測技術的新里程。1976 年的論文提到可以利用光纖製造光干涉儀，1977 年的研究說明光纖可以在惡劣的環境下，進行感測並將訊號傳回，因此光纖具有良好的感測潛力。

光纖在外型上具有體積小、重量輕及可彎曲的優點，材料本身抗酸鹼、耐腐蝕與高溫高壓，又有不受電磁波干擾的量測訊號特性。因此陸續有許多使用光纖作為感測元件的研究相繼發表。Kitagawa and Hayashi (1985)、Tvdten et al. (1980)、Lagakos et al. (1981)、與 Bock (1989) 分別提出關於速度、加速度、位移與壓力量測應用的光纖研究，Ferrari and Garca (1996)、Ricardo et al.(1996) 也分別發表利用光纖量測振動與溫度的論文。皆是利用光在光纖中感測外部變化，所產生的光強度、頻率、相位與波長等改變，解析其量測標地的物理量變化。

2.2 光纖光柵感測器的基本原理

Hill et al. (1978) 首先發現光纖的光折射效應，並利用氫離子雷射在摻鍺光纖中產生干涉條紋，使光纖核心發生週期性的折射率變化，這是最早

的光纖光柵，但此方法效率不高且波長固定。其後 Meltz et al. (1989) 利用兩道紫外光從兩側曝照在光纖上，製作出不同反射波長的反射式光纖光柵，其特點是調整兩道紫外光之間的角度就可以調整光纖光柵的反射波長，其感光效率也大幅的提升。而現今大多是使用 Hill et al. (1993) 提出使用相位光罩配合紫外光或雷射的光柵製作方式，使得光源的同調性需求降低，降低技術難度增加實用性。

當一寬頻光源在光纖中行進，僅反射特定條件的光。而反射光的波長如 2-1 式。

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \text{ ----- (2-1 式)}$$

其中 n_{eff} = 光纖核心的有效折射率

Λ = 折射率週期性改變的間距

光纖光柵在核心會有一連續的干涉條紋，如同一組透鏡的組合，使大多數波長的光都能順利通過，僅反射符合布拉格條件 (Bragg condition) 波長的光。其構造如圖 1-1 所示。像是一系列的透鏡反射一般，在某特定散射角度，兩相鄰的透鏡所散射的光波彼此間相位相同，但是光程差恰為其波長的整數倍，因而使通過這一系列的透鏡產生的光，產生建設性干涉，只要滿足此條件便可產生布拉格繞射。而其間距亦決定反射光的波長特性。

2.2.1 應變與波長飄移關係

當應用於感測時，量測標地的物理量使有效折射率或光柵週期 $n_{eff}\Lambda$ 發生變化時，相對應光柵的反射波長 λ_B 也會產生漂移，應變是最主要的影響參數之一。當應力產生應變造成的光彈效應 (Photo-elastic effect) 會使光柵有效折射率的變化。將 2-1 式微分，可得到增量的關係式 2-2。

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \text{ ----- (2-2 式)}$$

光纖光柵的有效折射率和光柵週期與所受之應變有關，其中應變假設只有沿光纖軸方向施加的應力，由虎克定律（Hooke's law）得到軸向應變和橫向應變和應力關係如 2-3 式與 2-4 式。

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \text{ ----- (2-3 式)}$$

$$\varepsilon' = -\nu\varepsilon = -\frac{\nu\sigma}{E} \text{ ----- (2-4 式)}$$

其中

ε = 沿光纖軸的軸向應變

ε' = 橫向應變

σ = 沿光纖軸施加的應力

E = 光纖的彈性係數

ν = 柏松比



而在光彈效應中，當光纖的材料受到應變作用，介電係數（Permittivity）會隨之改變，相對的有效折射率也隨之改變，其效應的影響表示如 2-5 式。

$$[\Delta n_{eff}] = -\frac{1}{2} n_{eff}^3 [p][\varepsilon] \text{ ----- (2-5 式)}$$

其中

p = 光彈係數張量

ε = 應變張量

2.2.2 溫度與波長飄移關係

另一個影響光柵的反射波長的參數是溫度，因溫度變化產生的熱漲冷縮會導致光柵週期產生變化。其影響為光纖受熱產生的熱膨脹效應（Thermal expansion effect），因此溫度變化導致光柵週期產生變化如 2-6 式。

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \alpha \cdot \Delta T \text{----- (2-6 式)}$$

其中

α = 光纖的熱膨脹係數

ΔT = 溫度增量

溫度造成的熱光效應 (Thermo-optic effect) 也會造成光柵中有效折射率的變化。熱光效應原理是描述材料的溫度增量和折射率變化的關係，在等向性的材料中可表示如下 2-7 式。

$$\Delta n_{eff} = \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \cdot \Delta T = \xi \cdot \Delta T \text{----- (2-7 式)}$$

其中

ξ = 熱光係數

因為光是以橫波的方式行進，所以只有橫向的折射率變化會造成光柵波長的飄移，在只有沿光纖軸向應力的情況下，兩個橫向方向的波長會有相同的漂移量，考慮溫度以及應力的疊加條件下將 2-5 式、2-6 式與 2-7 式代入 2-2 式可以得 2-8 式。

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left\{ 1 - \frac{n_{eff}^2}{2} [P_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \varepsilon + \left\{ \frac{\xi}{n_{eff}} + \alpha \left[1 - \frac{n_{eff}}{2} (p_{11} + 2p_{12}) \right] \right\} \Delta T \text{---- (2-8 式)}$$

其中

p_{11} 、 p_{12} = 光彈係數張量的矩陣係數

由公式 2-8 式可以感測軸向應變和溫度兩個參數，藉由量測波長飄移量，獲得這兩個參數的變量。

2.3 光纖感測系統的解讀原理

2.3.1 光纖感測系統解讀之方法

關於光纖光柵解讀系統的分類，一般可以依系統調變特性分為主動式、被動式調變，或是依訊號調變特性分為光強度調變、光波長調變與光相位調變，以下茲說明主被動調變的特性並針對訊號調變特性做分類。

主被動調變定義如下：

- 1、主動式調變：即是使用主動元件作為調變的方式，而主動元件泛指在系統中可以將光能轉換為電能，或是將電能轉換為光能以及能將光能放大的元件，利用這些轉換特性以解析訊號的方法。
- 2、被動式調變：利用光被動元件調變的方式，光纖監測系統中，不需要外加能量來源便可產生作用的元件，亦即是純粹對光訊號作各種形式傳輸，而不牽涉光能和電能轉換的，即稱為被動調變的方法。

訊號調變特性做分類：

- 1、光強度（Intensity）調變：光纖感測系統是以光強度的變化量來表示量測標地的物理量，運用光的吸收、散射與放射損失等特性，解析訊號。架構的形式較為簡單且應用範圍廣，但光纖中光強度容易受到光纖彎曲或是震動而影響量測結果的準確性。

利用光強度作為解讀的系統有很多種，僅以布里淵光時域反射感測儀做介紹，其原理是利用布里淵散射（Brillouin scattering）的特性，當入射端入射一道高強度窄頻的光脈衝，當光功率足以在材料內部產生音波，會因音波而使光產生散射損失的現象，使得光在光纖中之傳輸速度改變，這種非線性的散射反應至頻譜中即是布里淵頻率飄移，其飄移量與應變及溫度相關。

藉由量測光脈衝在光纖中傳播時間的光時間域分析（Optical Time Domain Analysis）獲得光纖長度內的空間訊息，在土木界也常應用的光時域反射儀（Optical Time Domain Refractor；OTDR）亦是同一種原理。在 OTDR 中當脈衝光於光纖中行進時，因為材料的不均勻程度而產生雷利散射，其發送端就可以量測到由雷利散射所產生的反向散射光，其中由反向散射光與脈衝光之間的時間延遲獲得光纖空間位置的訊息，反向散射光強度提供對光纖衰減的測量。

在布里淵光時域反射感測儀（Brillouin Optical Time Domain Refractor；BOTDR）中，反向的布里淵散射代替了前述 OTDR 的雷利散射，散射受應變及溫度的影響，因此藉由測量布里淵散射便可以得到應變與溫度的特性。

2、光相位（Phase）調變：係利用光傳輸路徑長度上的相位改變來解析光纖的訊號。通常需一個光纖作為量測的訊號，和一個不受外界變化影響的光纖參考訊號做比較，當同調的兩道光重合時，光波長的相位會影響其干涉現象，經解析光波間的相位差做為干涉式的量測，此種方式其優點是具有相當高的靈敏度與動態的量測範圍，但是通常系統較為複雜且昂貴。

以下僅以馬克司詹德干涉儀（Mach-Zehnder Interferometer）做介紹。馬克司詹德干涉儀是 Kersey et al.（1997）所提出的，以平行架構的干涉量測方式如圖 1-2 來解析訊號，其原理是利用窄頻雷射光源入射到單模光纖中，經由定向耦合器分別送入長度一致的參考光纖以及感測光纖，當光纖受到應變或溫度影響，這兩道光的光程便發生了變化，彼此之間相互產生干涉，透過光纖光路之相位延遲可以量測到極小的相位偏差，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。以這樣的方式來解析訊號對外界環境的變化。

以上兩種不同訊號調變方式，分別是屬於光強度調變與光相位調變的方法，而其在系統特性上是屬於主動調變的方法，因為他們都有利用了光強度的改變量，而且後者更使用了放大器，因此都符合使用主動元件的特徵，故為主動調變方式。

3、波長(Wavelength) 調變：係利用光波長的飄移來解析外界物理量的變化。經過特殊處理過後的光纖感測器在外界感測環境下，可以由波長訊號的改變來得知量測標地的變化，因為光波長不需經過太多處理大多可以直接被讀取，所以可以做到直接量測，而且通常架構上都比較簡單。

而本研究之光纖光柵系統即是以此波長特性解析，用來量測標地物的應變量，亦是屬於被動式調變的一種，將於第三章再予以說明其特性。

2.3.2 光纖光柵系統之波長分析方法

光纖光柵感測的技術是基於光波長解調原理所發展出來的方法，其原理是利用 2.2 節所提到的溫度與應力皆會使光纖光柵材料本身產生應變，因而使反射波長值飄移，在去除溫度效應的前提之下，藉由反射光的中心波長尖峰飄移量與參考的波長基準比較，經過計算便可以得到所求的外力或是材料的應變量。通常光纖光柵系統對應變的解析度可到達 $1\mu\epsilon$ ，光柵本身體積小如圖 2-3 可以使用在許多感測元件或是附著在待測物上，亦具有可多工 (Multiplexing) 的特性，因此極具發展的潛力。而其他尚有許多種量測光纖光柵波長的技術方法，如利用可調式雷射當作感測光源的量測系統與光譜分析儀的系統 (Optic Spectrum Analysis ; OSA) 和干涉方法等系統。

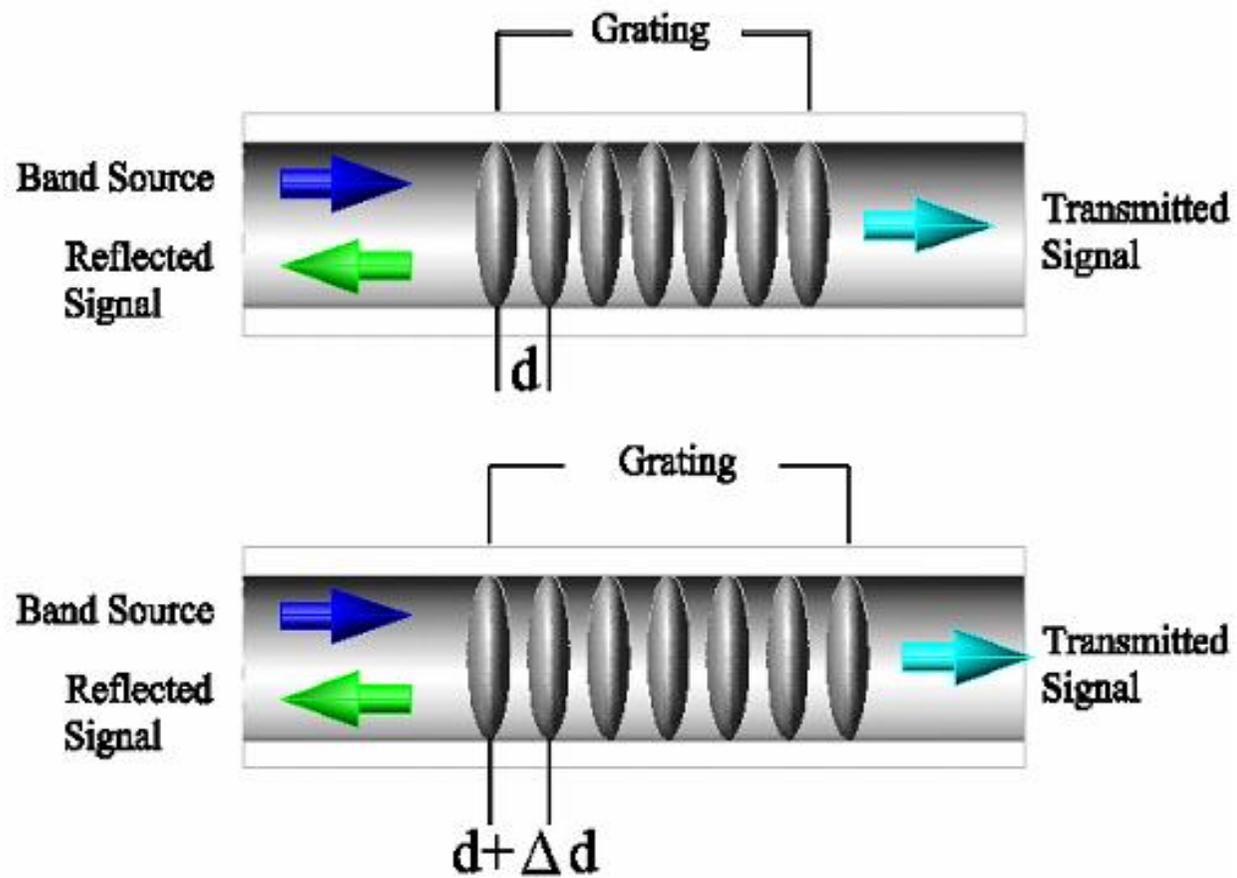


圖 2-1 光纖光柵示意圖 (摘自簡旭君,2003)

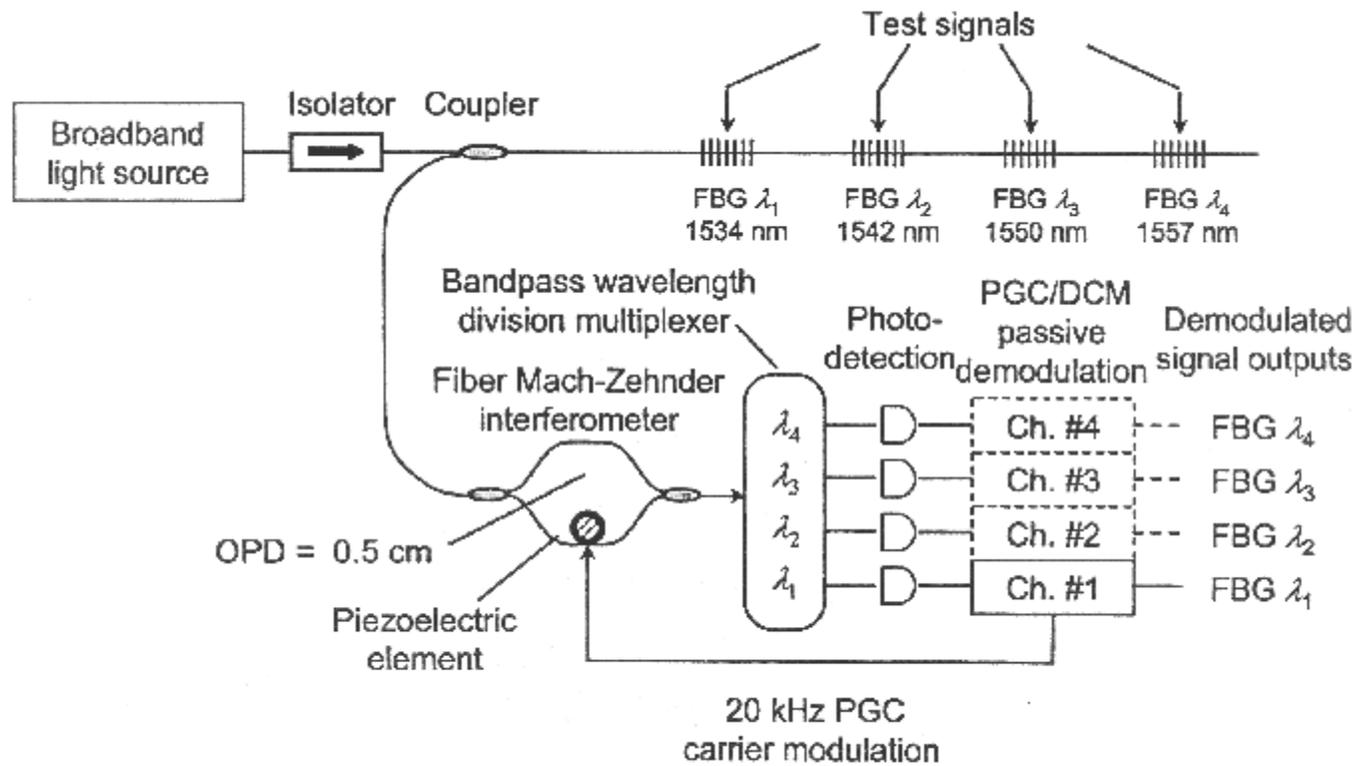


圖 2-2 光纖 Mach-Zehnder 干涉儀量測系統 (摘自 Kalli et al., 1999)

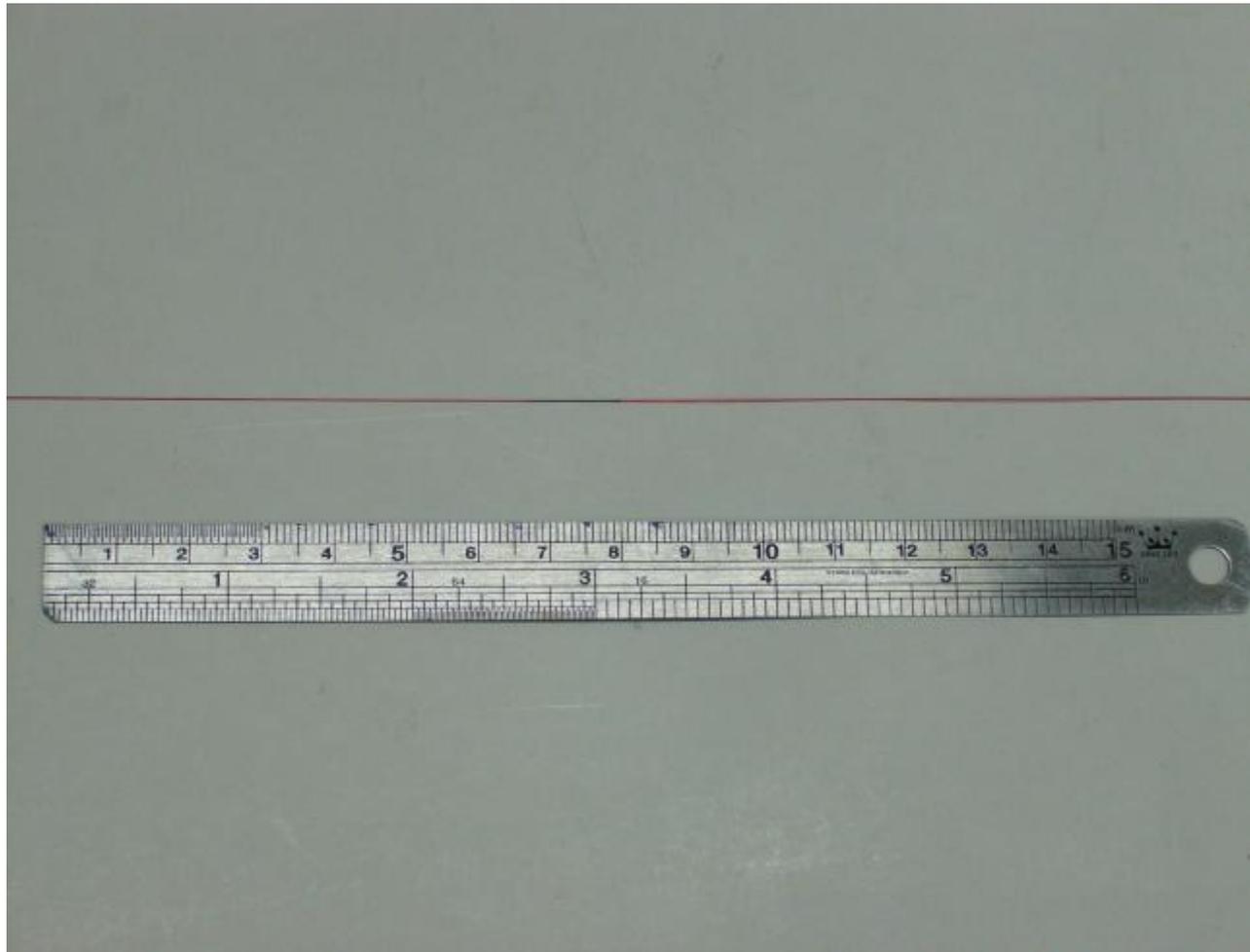


圖 2-3 布拉格光纖光柵實體

第三章 光纖光柵解讀系統之硬體架構

3.1 光纖監測系統之架構

光纖監測系統通常包含兩部份，一部份是作為光學量測的光路系統，另一部份是資料解擷取的分析系統，由此兩部份組成整體系統的架構如圖 3-1。以下章節茲針對這兩部份做說明。

3.2 光學系統架構

光路系統如圖 3-2 所示。其目的就是產生光訊號進入光路系統，當光經過感測器去量測外界的變化後，再將光訊號送回解調系統後，經光/電訊號轉換後由擷取系統作後續計算、分析的工作。因此光學系統在光纖監測架構下的主要工作是處理光訊號。

3.2.1 光纖光學系統元件介紹

光纖光路系統是由光源、光路、光解調與光接收這些部份所組成的，下面就針對這些元件的原理做介紹。

1、可調式雷射：雷射（Light Amplify by Stimulated Emission of Radiation；Laser）即是利用原子內的電子由激態返回基態，必須維持能量守恆，將能量封包以光子的形式放出，而雷射與寬頻光源的差別在於雷射是受激放射（Stimulated Emission），而寬頻光是自發性放射（Spontaneous）。受激放射是指電子受光子激發到激態且受到外加光子激發而產生放射，因為外加光子會使受激電子回到基態時，產生與外加光子放射出相同波長的光。因此雷射具有高指向性、高能量與高波長同調性的特點。而其可調式的特點則是利用費比泊羅（Fabry-Perot）濾波器，來調整輸出光源的波段。其原理是

利用壓電材料 (Piezoelectric Transducer ; PZT) 來改變共振腔的長度，在腔體兩側是由兩面高反射率的鏡面，利用改變共振腔長度為輸入光波長的倍數，會使光在兩側多次反射形成干涉光束，藉此控制輸出的波長。

2、光耦合器 (Coupler)：是將兩根光纖扭絞在一起，再加以熔合，使通過的光可以因此而分離，其構造可分為星型、T 型等輸出入的形式，其對於分光強度也有 10/90、20/80 與 50/50 等形式。

3、光偵測器 (Photo detector ; PD)：光偵測器的原理是利用半導體的光吸收特性。通常是以一組 p-n 型態的半導體組合，當光子具有足夠的能量撞擊半導體材料，並超過半導體的能階，此時光子會被吸收而產生一組電子與電洞，若外加一反向偏壓會使 p-n 接面產生電動勢能，也就是電子、電洞分別受到正、負電荷吸引因而產生電流其形式如圖 3-3 所示，通常不同的半導體材料會具有不同的光吸收波段如表 3-1。而其 p-n 接合形式，也會影響光吸收效率、光反應時間與訊噪度等因素如表 3-2。

4、光路切換器 (Optical Switch)：係利用電晶體邏輯 (Transistor- Transistor Logic ; TTL) 去控制數位反射鏡進入或離開頻道，或是導引其改變光束的方向，藉此切換光頻道。

5、光波長參考器 (Wavelength Reference)：本系統的波長參考器是使用不同氣體分子 (Gas Cell) 對不同的光頻譜有吸收特性如表 3-3。光頻譜經過這些氣體吸收後會產生一個吸收的線型如圖 3-4，這些尖峰值是透過標定後所得到的標準波長頻譜，可以準確的反應出光波長的中心位置。根據 Gilbert et al. (2002) 所為美國標準技術組織 (National Institute of Standards and Technology ; NIST) 制定 (Standard Reference Material ; SRM) SRM-2519 規範指出 Gas cell 的穩定性高，對溫度的影響小於 $0.01\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ ，其波長的正確性達到 $\pm 0.3\text{pm}$ 。

3.2.2 光纖光路系統元件之應用

本研究所使用的系統是可調式雷射如圖 3-5 作為系統光源，利用程式控制光波長輸出，我們所使用的光波長範圍涵蓋光通訊波段常用的 C Band 從 1520nm~1570nm，每秒的波長調頻是 2.5nm，光強度維持在 2.5dB。接著將光導入 50/50 光耦合器進行分光如圖 3-6，一道光導入光波長參考器如圖 3-7，另一道進入光路切換器如圖 3-8 後再分別進入不同頻道的光纖光柵感測器如圖 3-9。接著光纖光柵感測器會將其感應到外界量測標地的物理量透過光柵波長的變化訊號傳回光偵測器如圖 3-10，另一邊進入光波長參考器的光，將吸收的光波長訊號進入另一個光偵測器轉換成電訊號，進入資料擷取分析系統做分析運算的工作。

3.3 資料擷取分析系統架構

光波長訊號在經過感測器與波長參考器後分別會進入兩個光偵測器轉換成電訊號，以利於擷取系統做分析計算。它分為兩個主要的硬體架構，直接與光偵測器做連接的是現地可程式化邏輯閘（FPGA），另一個在邏輯閘上層的是嵌入式即時系統（Embedded Real-Time System），其功能與作用茲敘述於下兩節。

3.3.1 嵌入式即時控制系統（Embedded Real-Time System）

根據美國電子電機工程師學會（Institute of Electrical and Electronic Engineers；IEEE）的定義，即時系統的定義如下：

- 1、即時系統必須能夠清楚直接的回應時間管制與承擔重大的風險，包含錯誤的程序。
- 2、系統需具備有輸出參數與時序參數在邏輯上完全正確的特性。
- 3、在正規的系統工作項目中，必須能夠滿足一或多個設備的特性要求。

由上述的說明可以了解即時系統對於所執行工作的時序要求相當的嚴格，在一個系統的溝通模式中，必須在限定時間內做出回應，而且經過核心所運算的結果需要精確，對於我們所要獲得的訊號具有相當高的正確性，因此 Real-Time 不意味著是非常『快速』，而是非常『準時』且『正確』的意思。

一個完整的即時系統，是由許多元素所組成，需考慮的因素很多如圖 3-11，像是控制、序列、排程理論與演算法則，是一個系統的靈魂核心，而作業系統與電腦架構是其骨幹，資料結構、程式語言與其他軟體則是實踐軟硬體整合，介於兩者之間的溝通橋樑，因此一個優良的 Real-Time 系統是考量到軟硬體架構都能妥善整合的系統。

因為 Real-Time 的特性，所以讓這樣可靠的系統用來執行許多特殊需求的工作任務，針對其特點與硬體的相互關係，在英國電子電機工程師學會（Institution of Electrical Engineers；IEE）更進一步定義出嵌入式即時系統的特性：

- 1、專門執行特定的任務工作，與一般桌上型電腦、辦公設備等非決定性影響的設備不同。
- 2、以微電腦晶片與周邊元件所構成核心，規模可以是 8051 單晶片或是 x86 等級晶片系統。
- 3、具有嚴格的時序控制與穩定度要求。
- 4、能夠自動循環操作，在停電後供電能夠恢復執行原有的工作。

而及時的系統亦可以區分為三種等級，Soft Real-Time、Firm Real-Time 與 Hard Real-Time，其特性與應用如表 3-4 所描述，Soft Real-Time 並不一定能夠在限定時間內完成所有工作的回應，但是仍然會依序將延遲的工作完成，可以避免發生嚴重的損害，所以一般是使用在非決定性的自動化機

械溝通上。而 Firm Real-Time 必須具備更嚴格的時序控制，所以在回應系統的時間上必須是在 ms 的等級，避免在臨界狀態下發生重大的損害，通常是應用在自動化機器人或是導航控制上。Hard Real-Time 則是在時序要求中最嚴格，不容許有任何延遲或是錯誤發生，所以運算、反應時間最短的系統，通常是應用在軍事用途的航空武器、導航飛彈等用途。一般均簡化概分為兩個層次架構，而其特點如表 3-5 所描述。

即時系統省略了一般分時多工電腦所具有的附加功能，簡化了作業系統許多繁雜的工作，使即時多工的系統能夠專注在所需的特定功能，而嵌入式的特點能夠將軟體置入記憶體當中，直接控制硬體，在面對不同的底層架構，提供了擴充性增加整體系統的彈性。

應用在光纖監測系統的嵌入式即時控制器是使用美商國家儀器公司 (National Instrument Company ; NI) 所生產的 Compact RIO-9004，它本身內建有 200MHz Pentium 等級的 CPU，並擁有 512MB 的 ram 使得光纖監測系統整體的運算分析都能在控制器內部快速的獨立完成。下轄有一現場可程式化陣列邏輯閘 (FPGA)，提供彈性的擴充模組，讀取不同的訊號來源。

3.3.2 現地可程式陣列邏輯閘 (Field Programmable Gate Array ; FPGA)

Field Programmable Gate Array (FPGA) 自 1983 年發明自今已經有二十多年的歷史，最初只有 800 個邏輯閘，發展至 90 年代已經有 25 萬個閘可以使用，如今已經普遍達到數百萬個閘，甚至有上千萬個閘。

FPGA 是一個 $N \times N$ 的大型積體電路，配置有許多可程式化的邏輯單元 (Configurable Logic Block ; CLB)，每個 CLB 都擁有基本的組合邏輯和順序邏輯如圖 3-12。各 CLB 之間配置有可程式化的配線(Routing)與輸出入

埠(IOB)，利用訊號控制這些配線與輸出入埠就能成為一個大型的複雜電路矩陣如圖 3-13。其內部上可以規劃分為不同區塊，可針對其上位架構提供不同時脈的運算功能如圖 3-14。

相較於其他同樣作為積體電路的可程式晶片，如常用的複雜可程式邏輯 (Complex Programmable Logic Device ; CPLD)，FPGA 的優點在於其 CLB、IOB、Routing 都是可程式化的 RAM 格式，而 CPLD 無法完全達到這種彈性化的設計。

從前述參考圖 3-14 中我們得知 FPGA 晶片可以分區管理不同階層的硬體邏輯。FPGA 在與上位的控制器連結，形成一個整體的硬體架構，在不同階層中所關聯的硬體架構，必須要有一種能夠針對這些不同階層概念行為的描述，它總共可以分為六個階層由抽象到實體的方向，其描述如表 3-6。第一個階層它分別將即時 (Real-Time ; RT) 架構下的硬體納入邏輯考量，如 CPU 效能的分配、記憶體寫入和管理與輸出入埠的切換元素的描述。第二個階層是晶片對於處理器運作、記憶體類型運作、平行埠輸出入元件的回應與演算法則的描述。第三個階層是暫存器在處理實體運作上的功能，分別作為算術邏輯單元、計數與多工器。第四個階層是邏輯閘運用布林邏輯正反器的描述。第五個階層則是整個電路行為描述。第六個階層是矽晶體的幾何結構。因此需要有一個針對這些從抽象概念到實體應用都能描述的語言。

對於 FPGA 硬體架構合成的硬體描述的語言是源自於 1970 年末期美國國防部，為了統一管理武器系統的電子電路設計，於是制定了一個新的軟硬體架構之描述設計介面，使所有設計能夠被重複使用，此計畫稱為超高速積體電路計畫 (Very High Speed Integrated Circuit ; VHSIC)，直到 1982 年終於正式制定出一種電路的描述語言 (VHSIC Hardware Description Language ; VHDL)。VHDL 最初是用在嚴格的軍事需求，所以自然適用於

民間商用規格，因此也成為一般積體電路的設計語言，1987 年由 IEEE 正式制定為 IEEE1076 標準，到了 1993 年再度修編成 IEEE1164 標準。

應用 VHDL 於 FPGA 在設計流程上分為幾個步驟：

1.Design Entry：考慮硬體的功能需求，將概要的電路結構雛形編輯構思後，考慮電路邏輯與方程式的演算法則，接著將這些硬體語言合成。

2、Implementation：將上述這些工作項目作依排線的表列，然後進行分割，在這個階段就要將這些邏輯真正寫入到晶片之中，接著將所有工作妥善的分配到各個晶片之中，依序將各模組配置到晶片之中後繞線，通常在這階段會進行一個簡單的邏輯模擬，並將這些繞線與時間關係資訊紀錄。

3、Verification：最後便是進行實體的電路功能模擬，驗證整體設計是否完成。

在光纖監測系統的資料擷取架構下，佈署於 Real-Time 控制器下的 FPGA 背板是使用 NI 公司的 Compact RIO-9104 配備有 Xilinx 公司所生產內含 300 萬個邏輯閘的晶片，包含有 8 個擴充 I/O 模組介面。目前在光纖監測系統使用了一個類比輸入訊號（Analog Input；AI）用來擷取經過光偵測器所轉換的電訊號，然後傳送到 Real-Time 控制器進行分析運算。AI 模組可解讀 15 Channel 之類比輸入，訊號的輸入範圍是 $\pm 5V$ ，訊號解析度 24 bit，最大取樣頻率 50kS/s。另一個模組是數位輸出入訊號（Digital I/O）用來控制、顯示光切換器的的頻道，具有 4 Channel，5V 的 TTL 訊號，100ns 的高速訊號反應時間。

表 3-1 各種半導體光偵測器波長適用範圍

Semiconductor	Energy gap (eV)	Wavelength (nm)
Si	1.11	500-900
Ge	0.66	900-1300
GaAs	1.43	750-850
InGaAs	0.74	900-1500
InGaAs	0.38-2.25	1000-1600

表 3-2 常用半導體光偵測器特性

Material	Type	Wavelength	Dark current	Rise time	Absorption coefficient	Diffuse constant	Bias
Si	PIN	850 (nm)	3 (nA)	0.6 (ns)	2×10^3 (cm ⁻¹)	40 (cm ² /s)	-70 (V)
Ge	PIN	1150 (nm)	80 (nA)	0.3 (ns)	2×10^4 (cm ⁻¹)		-10 (V)
InGaAs	APD	1330 (nm)	5 (nA)	0.2 (ns)	1×10^4 (cm ⁻¹)	40 (cm ² /s)	-22 (V)

表 3-3 不同氣體對於光波長的吸收波段

Type	Wavelength	Gas
Acetylene	1510nm-1540nm	acetylene
Cyanide	1528nm-1562nm	C13 hydrogen cyanide
HF	1250nm-1360nm	hydrogen fluoride
Water lines	950nm-1.8microns	strongest water vapor
Multi-Gas Cells	1560nm-1595nm	C12 carbon monoxide
	1595nm-1630nm	C13 carbon monoxide
	1520nm-1595nm	C12 HCN and C12 CO
	1520nm-1630nm	C12 HCN

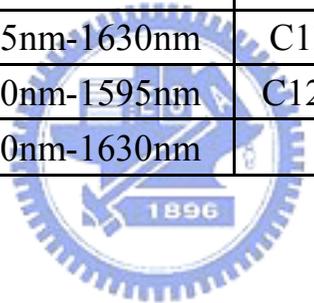


表 3-4 不同 Real-Time 系統的應用分類

Application	Real-Time Classification	Explanation
Automated teller machine	Soft	Missing even many deadlines will not lead to catastrophic failure, only degraded performance.
Embedded navigation controller for autonomous robot weed killer	Firm	Missing critical navigation deadlines causes the robot to veer hopelessly out of control and damage crops.
Avionics weapons delivery system in which pressing a button launches an air-to-air missile	Hard	Missing the deadline to launch the missile within a specified time after pressing the button can cause the target to be missed, which will result in catastrophe.

表 3-5 Hard & Soft Real-Time 系統的特徵

characteristic	hard real-time	soft real-time (on-line)
response time	hard-required	soft-desired
peak-load performance	predictable	degraded
control of pace	environment	computer
safety	often critical	non-critical
size of data files	small/medium	large
redundancy type	active	checkpoint-recovery
data integrity	short-term	long-term
error detection	autonomous	user assisted

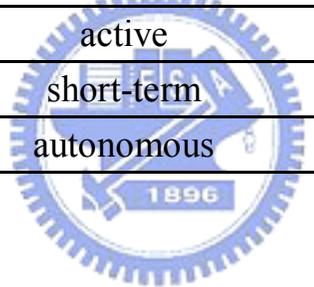


表 3-6 FPGA 在不同階層架構下的行為

Hardware Description Level	Described Structural Primitives	Representation of Behaviors
PMS Processor Memory Switch	CPUs Memories Buses	Performance properties of primitives
Chip	Mircroprocessors RAMs, ROMs UARTs Parallel ports	I/O response Algorithms Micro-operations
Register	Registers ALUs Counters Multiplexors	Truth Tables State Tables Micro-operations
Gate	Gates Flip-flops	Boolean equations
Circuit	Transistors, R, L, and C	Differential equations
Silicon	Geometrical objects	None

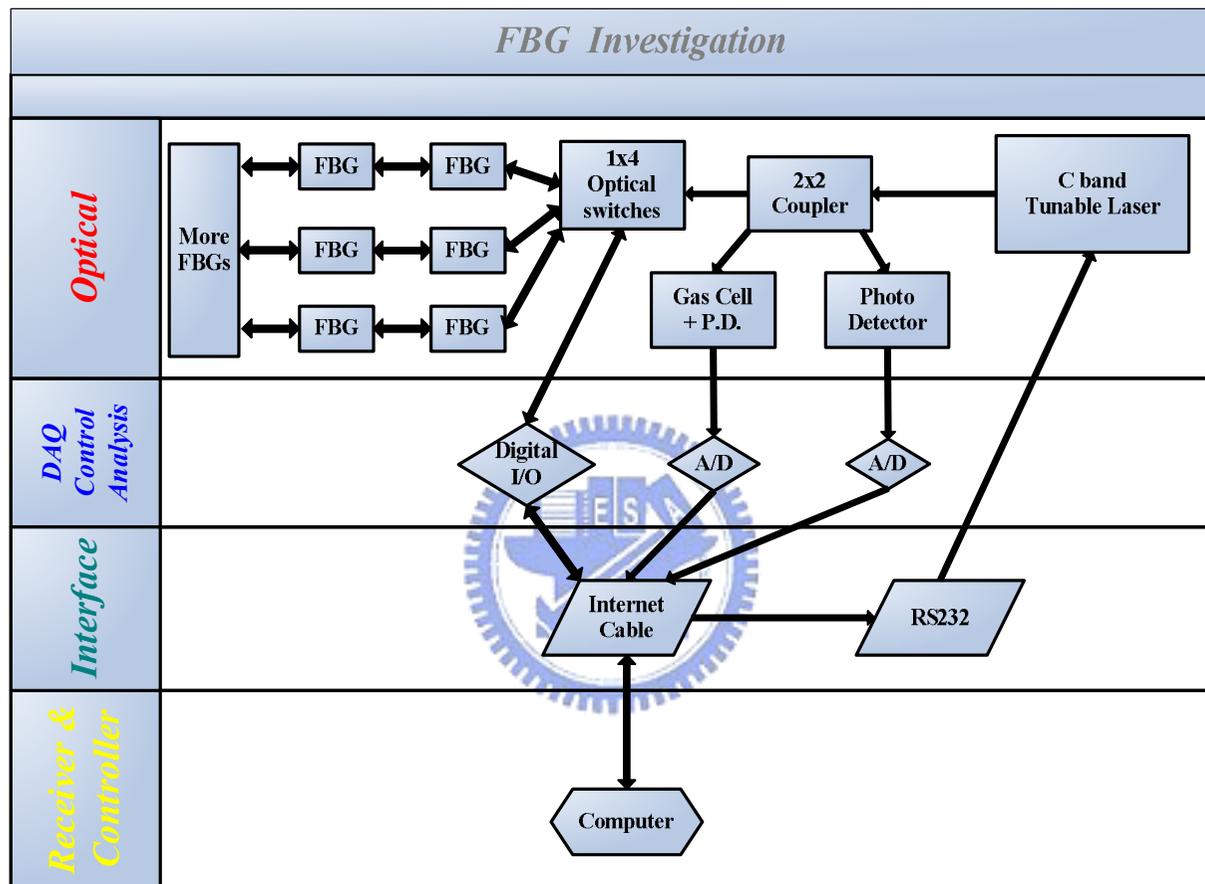


圖 3-1 光纖光柵解讀系統架構圖

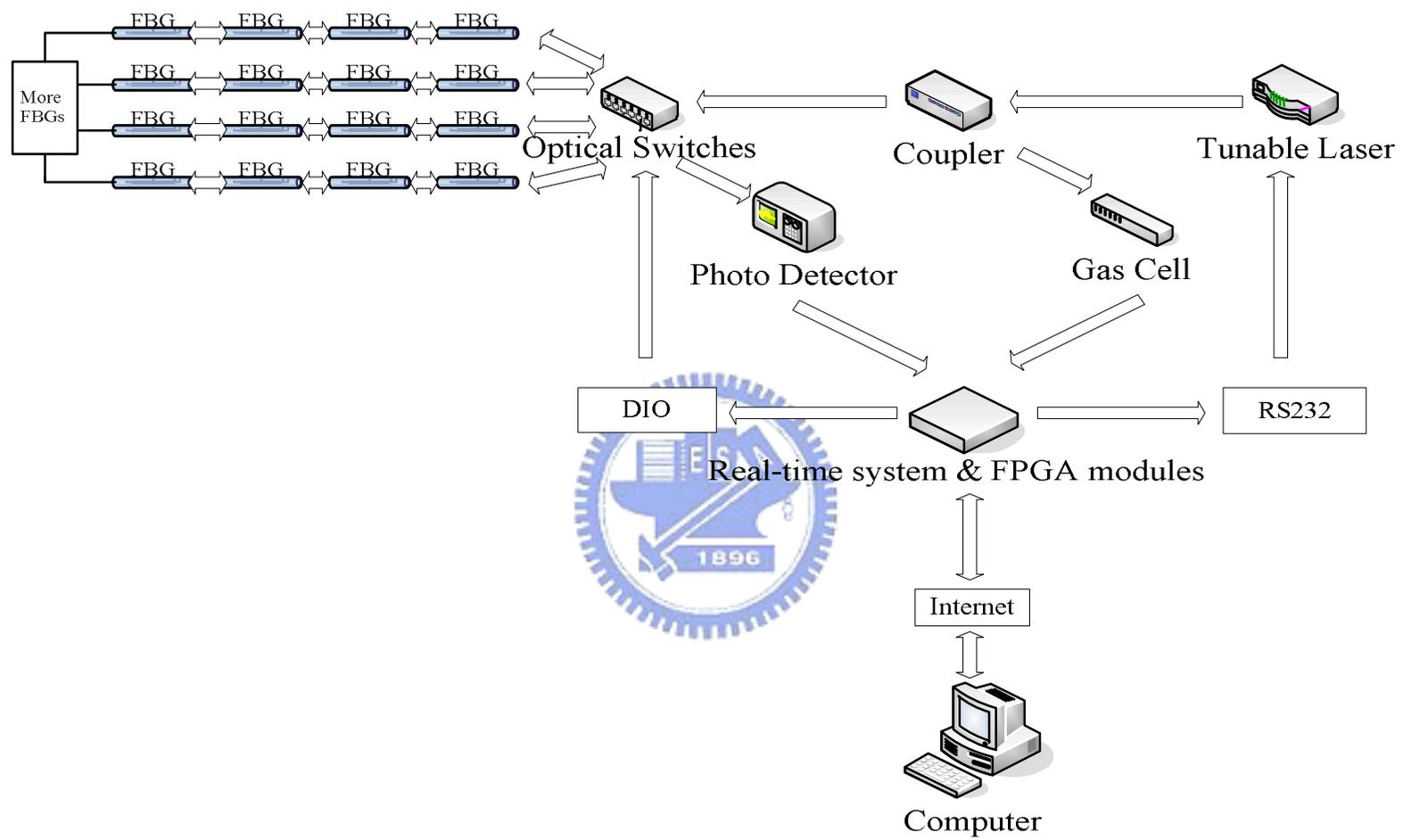


圖 3-2 光纖光柵監測系統組織圖

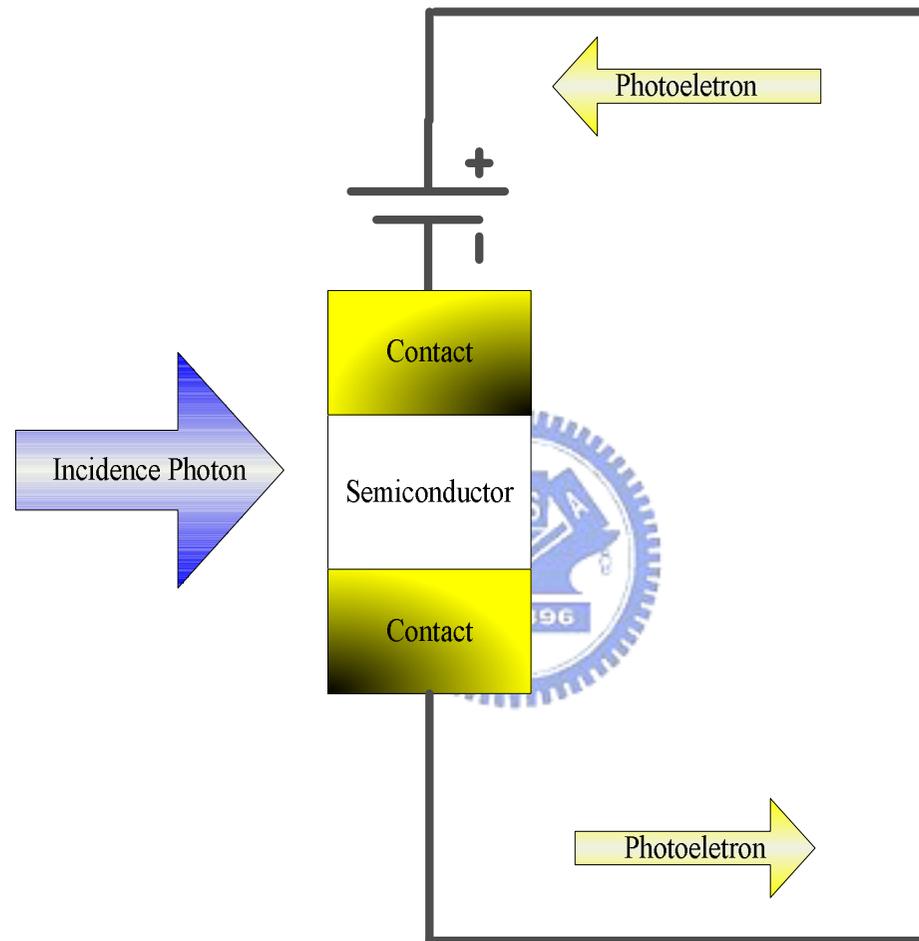


圖 3-3 光偵測器原理示意圖

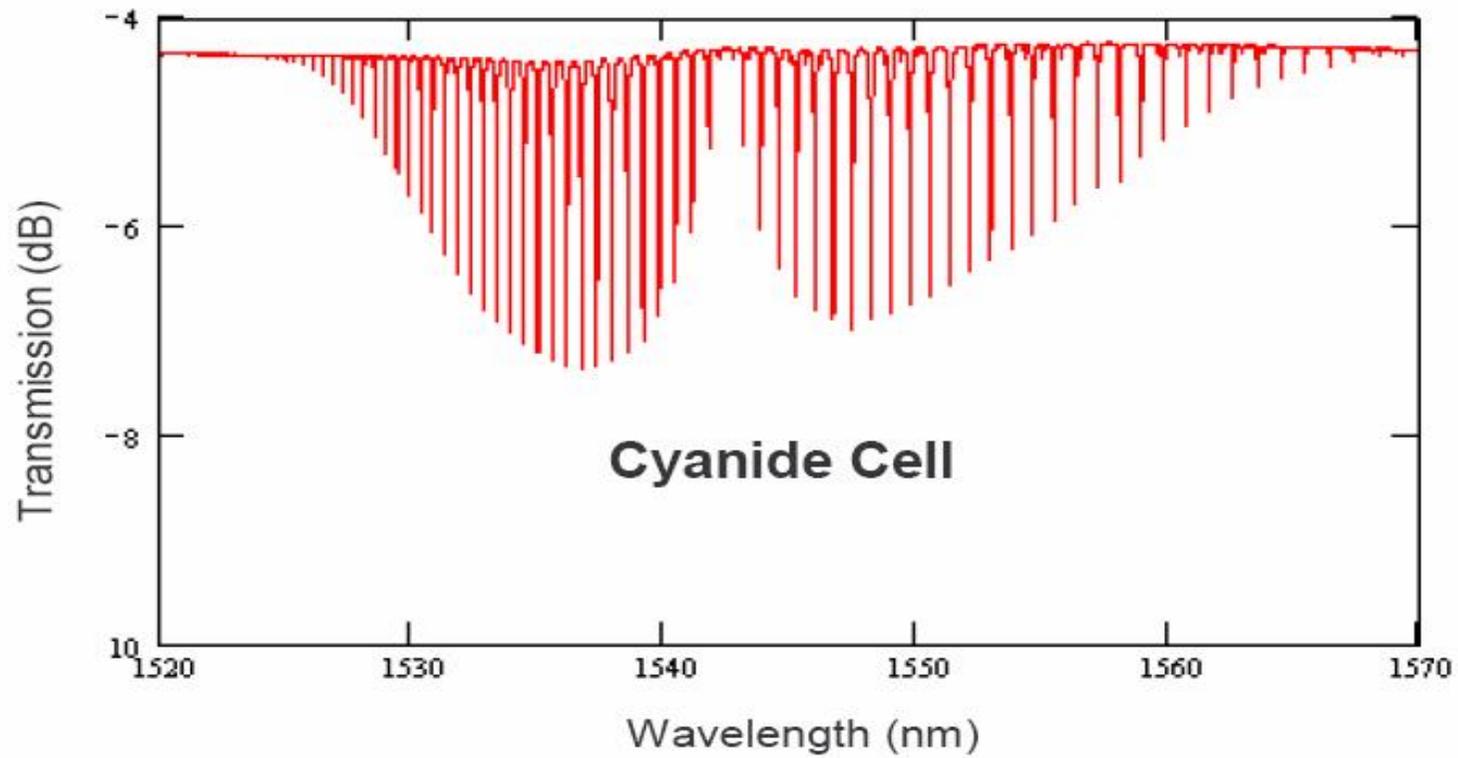


圖 3-4 光波長參考器吸收頻譜



圖 3-5 C band 雷射光源

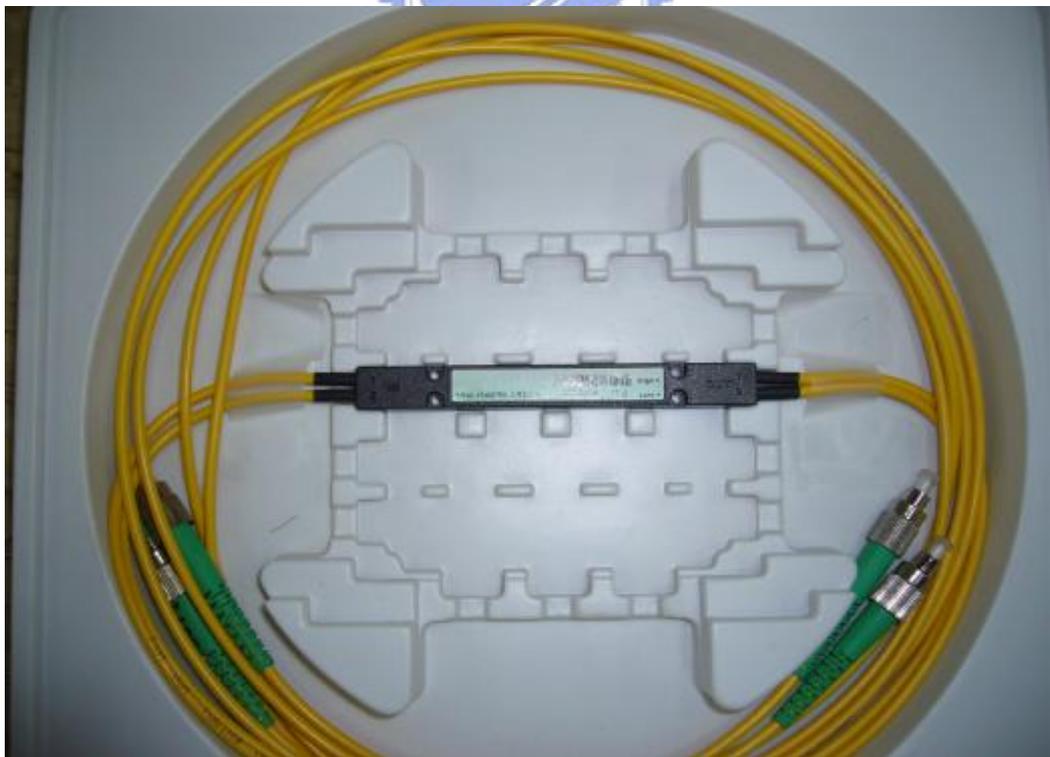


圖 3-6 2x2 光耦合器

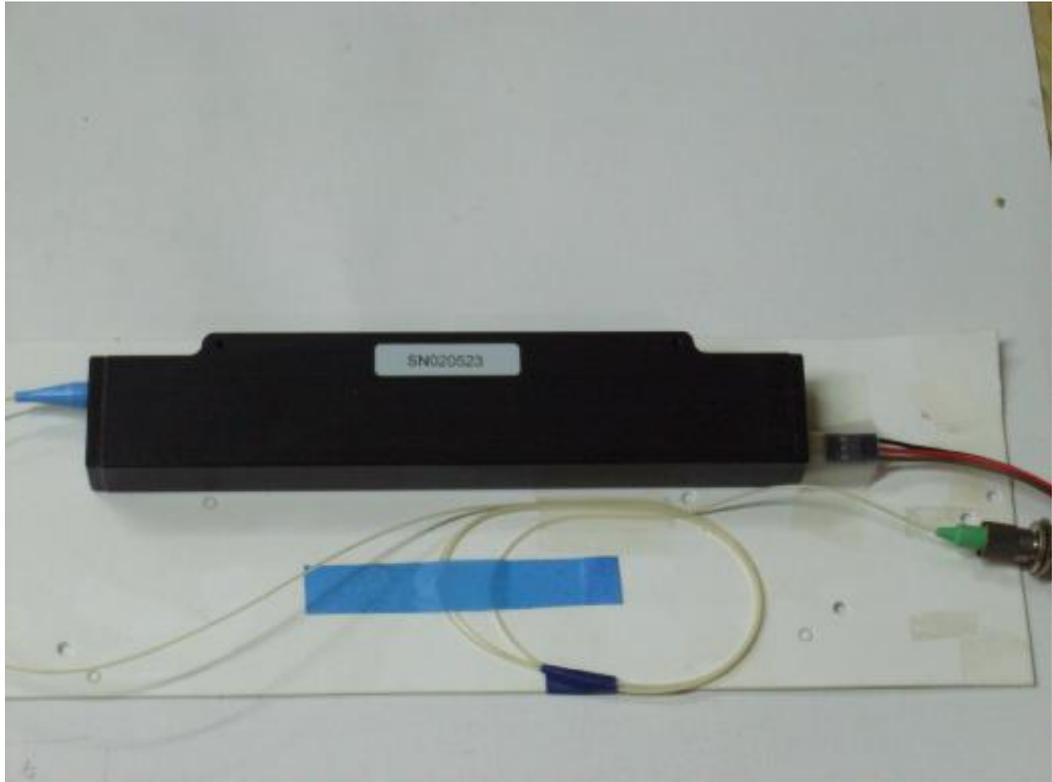


圖 3-7 光波長參考器



圖 3-8 1x8 光路切換器

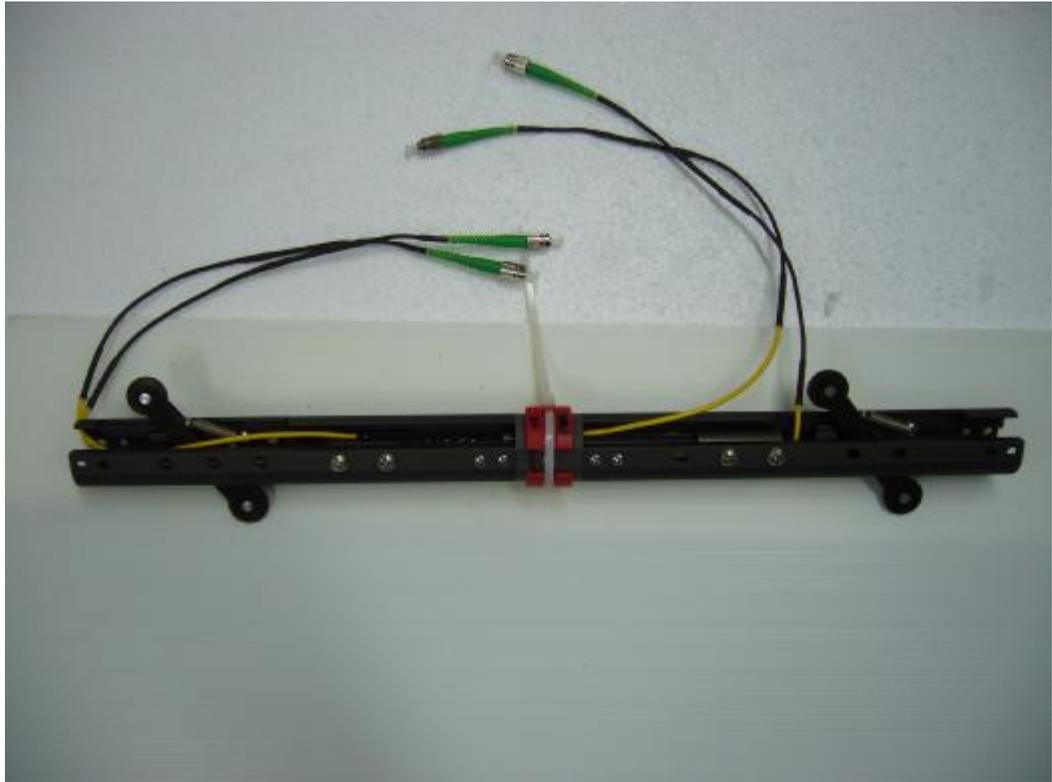


圖 3-9 光纖光柵感測器（偏斜儀）

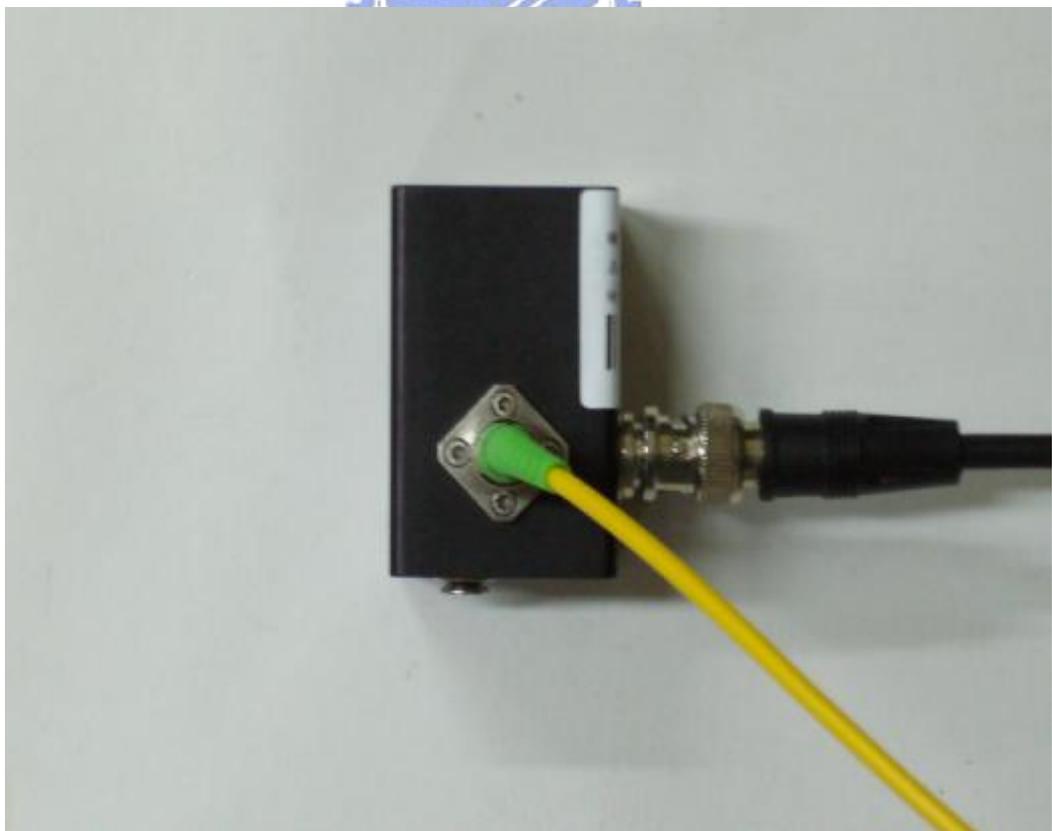


圖 3-10 光偵測器

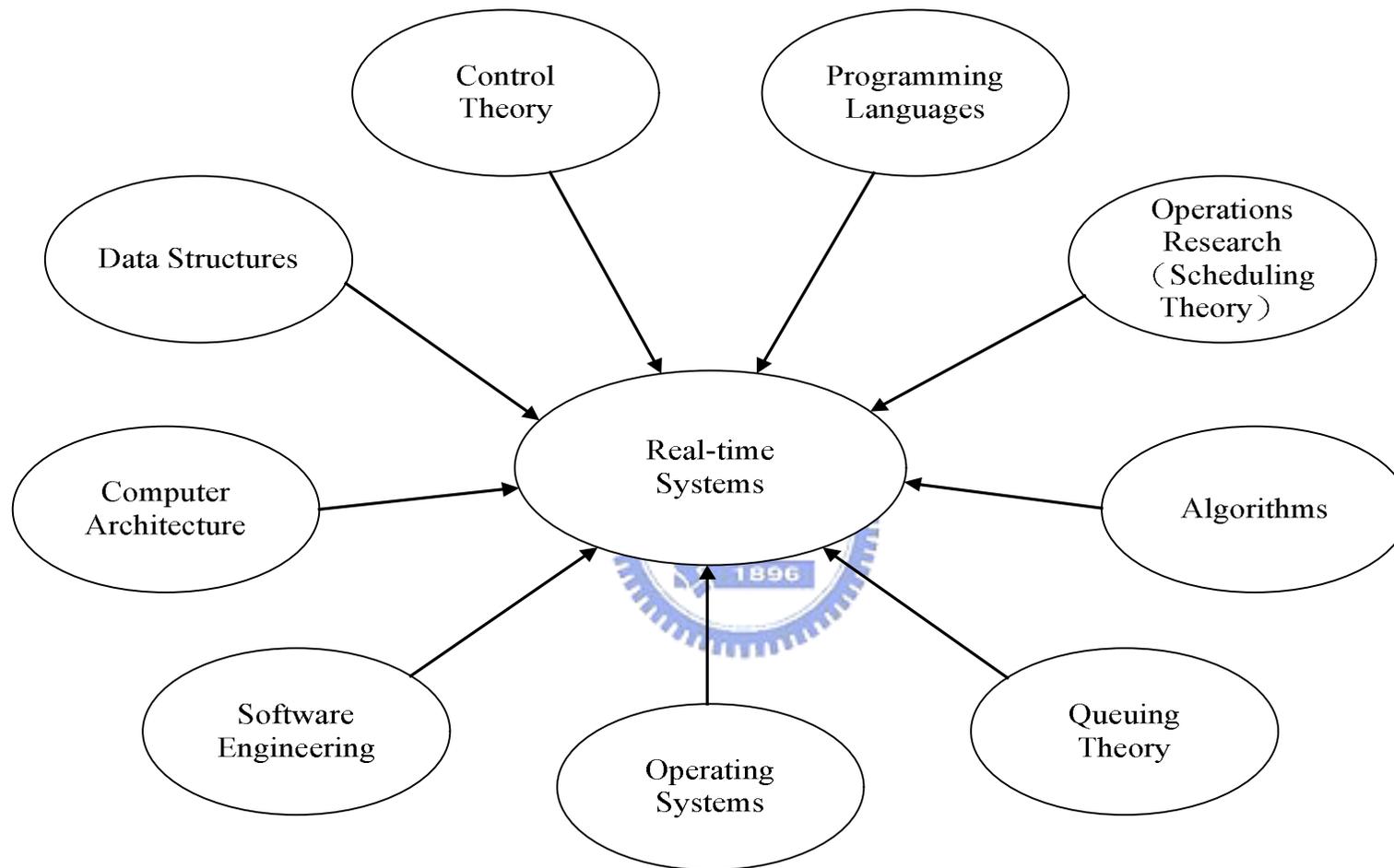


圖 3-11 Real-Time 系統構成要素

邏輯方程式 $Y=X1 \cdot X2 + X1' \cdot X2' + X2 \cdot X3$

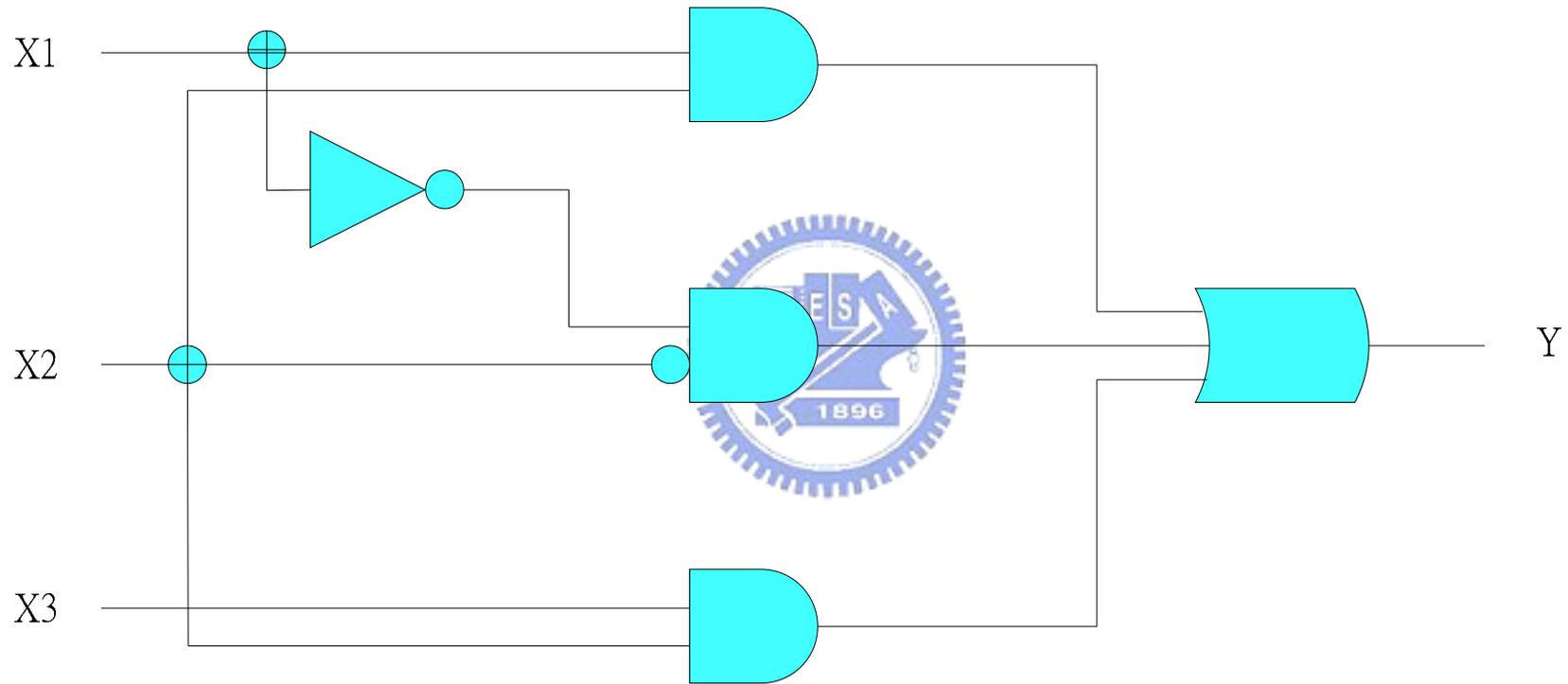


圖 3-12 邏輯方程式示意圖

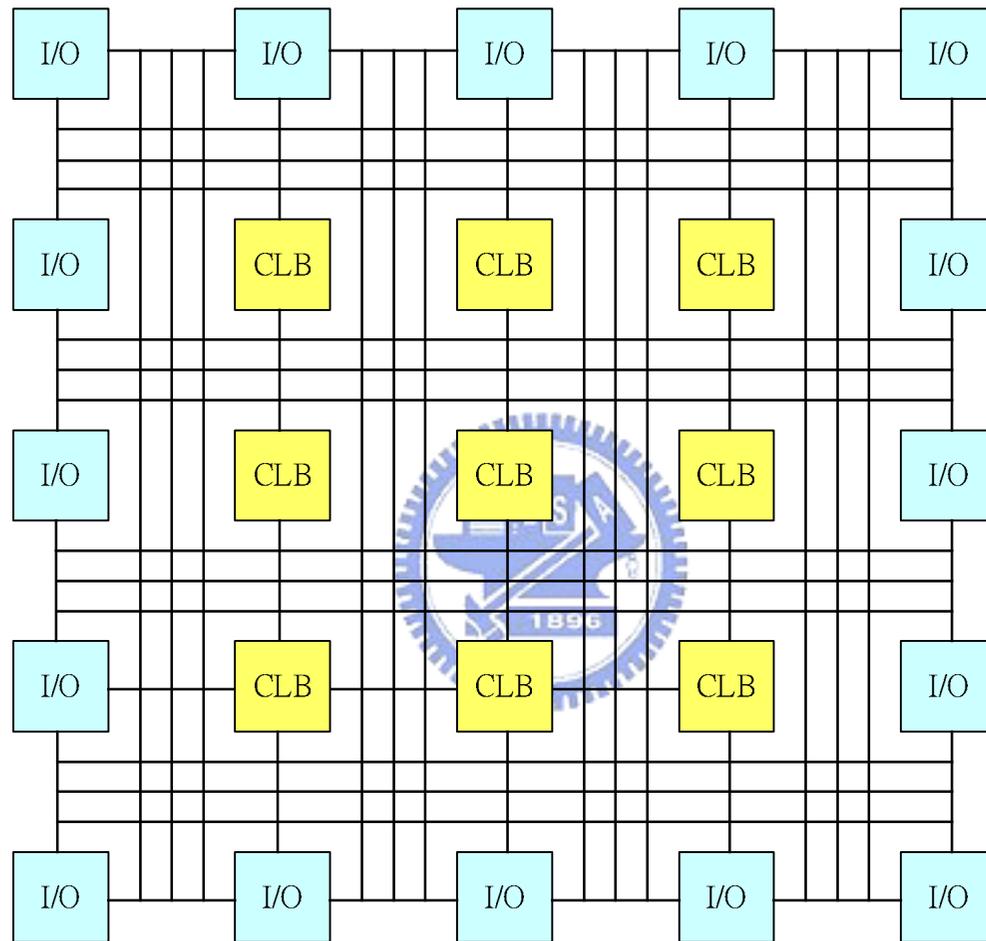


圖 3-13 FPGA 晶片示意圖

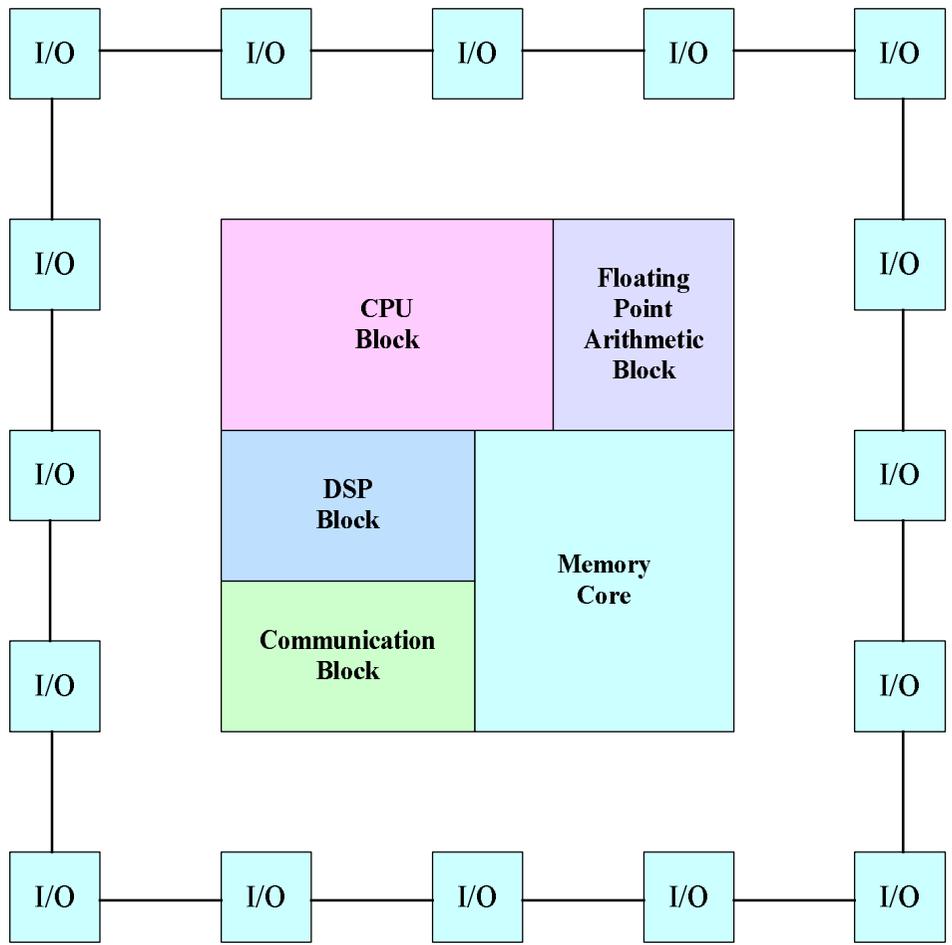


圖 3-14 晶片功能分區示意

第四章 程式控制分析方法與訊號處理

4.1 系統階層的程式溝通

由於光纖光柵監測系統可以分為光路系統與擷取系統，所使用的擷取控制系統在不同階層架構下所使用的軟體語言不同，欲達到的功用也不同，如圖 4-1 所示。而光纖光柵的監測系統在使用者撰寫程式時，僅利用 LabVIEW 程式語言就可以完成所需要的功能，LabVIEW 是一種物件導向的語言，利用它取代傳統程序導向的語言，物件導向 (Objected-oriented) 的語言具有下列特點：

- 1、資料抽象(Data abstraction)：利用物件導向的可重複函式元件，撰寫類似或是相同功能的程式，可達到共享的優點。
- 2、資料封裝(Data encapsulation)：可以利用邏輯元件構成新的函式或次程式供往後利用。
- 3、繼承能力(Inheritance ability)：每一個函式就如同是一個次程式，去支援主程式，在此架構下所有的程式都具有這樣特點，而且可重複擴展其架構。
- 4、動態聯結(Dynamic binding)：各元件易於測試維護，撰寫方式也相當直覺化，提高程式開發的效率。

因此我們利用 LabVIEW 來開發光纖光柵解讀系統，而整體擷取分析控制系統的架構如圖 4-2。而在 LabVIEW 環境下的使用者介面顯示如圖 4-3 的階層式分類，其各層次功能分別如下幾節所敘述。

4.1.1 PC base 階層

使用 LabVIEW 的程式語言在 PC 架構下進程式撰寫環境如圖 4-4 所

示，與圖形化介面顯示如圖 4-5 所示。其顯示面板有許多控制項分別代表在撰寫介面下的函式，而在撰寫的介面下也有許多函式可以使用，其存在的位置也是儲存在電腦之中，待撰寫完成後再將整個程式下載到 RT 控制器與 FPGA 晶片，而後續的資料儲存也會將 PC 當作是一個資料庫，而部份網路功能也會在此階層執行，將在第五章中再詳加敘述。

4.1.2 Real-Time 控制運算階層

在這個階層進行主要的運算工作，也是整個系統的核心。主要有兩個工作；控制與分析。控制的部份主要有兩個任務，一個是控制雷射光源的輸出與調頻，將於 4.2 節詳述，另一項是光切換器的控制，將雷射輸出的光源分別導入不同頻道的感測器，進行多通道量測，此部份會在 4.3 節詳述。分析的工作是將經由感測器所讀回的訊號經過 FPGA 晶片擷取，轉換成數位訊號後傳遞至 RT 架構下進行運算，然後分析結果計算後進行下一個決策，接著傳送到 PC 上在使用者介面呈現，細部將於 4.4 節討論。

4.1.3 FPGA 擷取階層

在前一章有討論到 FPGA 的特點是在實踐電腦的運算邏輯與硬體連結的功能，而略過 IC 電路設計的繁雜過程，透過程式語言就可以輕鬆的佈署電路，完成運算邏輯與輸出入埠的接點。因此 FPGA 硬體下仍然是以 LabVIEW 程式來進行撰寫的工作。在撰寫完成時可以將算術邏輯直接轉譯成 VHDL 然後直接燒錄至 FPGA 晶片中，執行所賦予的工作。其主要目的就是將 RT 架構下的光切換器控制邏輯，直接將數位邏輯導入電路模組當中，產生類比訊號去控制切換器。擷取的工作也是先將讀取的類比訊號在此架構下轉換成數位訊號然後傳遞至 RT 進行運算。

圖 4-6 顯示的是 FPGA 的使用者介面，上面顯示有電壓轉換的標定係數可供參考選擇，並且光切換控制的選項也可以直接在這裡作手動控制。圖

4-7 是程式介面 AI 訊號輸入的程式邏輯，將電壓訊號擷取後轉換成數位訊號再利用 FIFO Read Function 將訊號傳遞至 RT 進行運算。圖 4-8 則是由 RT 控制器讀取布林邏輯值，然後決定控制頻道的切換。

4.2 雷射光源控制

此程式是改自李瑞廷（2005）所撰寫的程式，如圖 4-9 所顯示利用許多 Sequence Case 與 Time Delay Function 將字串指令輸入到儀器內，等待儀器的反應時間，並將訊號狀態傳回，一步一步的傳送、檢查，確保硬體動作能夠正確執行。

應用在光纖監測系統的調頻範圍是從 1520nm 至 1570nm，調頻的速率是 2.5nm/s，因此在配合每一個序階的等候與檢查延時，每完成一次全頻掃描大約是 25 秒，也是每次光頻道切換最少需要等候的時間。

4.3 光切換器控制

目前應用在光纖監測系統的光切換器頻道共有八個，所以仍然需要用到四個布林邏輯元才能達到八個頻道的組合。

如圖 4-10 所顯示，利用布林邏輯元的組合進行光頻道的切換，當我們使用兩個布林邏輯元可以產生四個不同的輸出，而使用四個布林邏輯元則可以產生達十六個組合，以此類推。因此利用這樣的方式作為切換的邏輯順序，再經由 Write Control Function 將邏輯結果寫入至 FPGA 的控制邏輯中，再透過 FPGA 將數位訊號傳遞至 Digital I/O 模組轉換成 TTL 訊號去控制光切換器的動作。

4.4 光柵波長訊號分析

這部份是整體架構的核心程式，所運用的程式技巧也最多，整體架構最為複雜，第一個部份如圖 4-11 所示，進行類比數位訊號標定值、電壓範

圍與接線方式的設定，接著決定訊號的取樣頻率然後將值傳給 FPGA 溝通，待中斷需求 (Interrupt Request; IRQ) 完成，確認 CPU 的狀態閒置，與 FIFO 的記憶體空間是否已經淨空後完成後就開始擷取的動作。

第二個部份如圖 4-12 利用 For Loop Function 重複將 FPGA 模組擷取的訊號，由 Binary 轉換成 Normal。在程式執行的過程當中，以我們所定義的方式重複工作任務。For Loop 是以我們所指定的次數去執行重複的工作，當我們所指定的次數完成時，便完成停止迴圈結束工作，這次數也可以是其其他程式所執行完成的數值結果輸入。因此我們的輸入條件是在考慮前面設定的取樣頻率下達到與總取樣數後停止迴圈。當此迴圈完成時已將同一條光纖上所有光柵反射之光波長擷取完成。

第三個部份是訊號分析的部份，一般訊號分析大多在時域或是頻率域處理，在許多關於光電研究中的訊號都是頻率域將訊號做傅利葉轉換，分析其頻率特性。而本研究在前面章節曾提過，由於光纖光柵解調的特性是利用其波長的變化量解析感測器的應變量，其參考的波長基準單元 (Gas Cell)，是以吸附光的波峰位置在時間軸間距作為參考基準，因此本系統的訊號解析皆是在時域作分析。

如圖 4-13 所示，我們用來獲得波形的尖峰值是利用 Peak Detect Function。它是一種在時域訊號分析中相當重要的函式，藉由設定門檻值與寬度兩種參數去求得波形的尖峰值。Peak Detect function 透過我們預設的門檻值過濾我們不要的背景值 (雜訊)，再經由擷取寬度獲得波長的尖峰值，因為 Peak Detect function 的演算法則是利用二次式的最小平方法公式在波型中求得波峰或是波谷的位置。其在時間軸上定義的波峰位置如 4-1 式所表示：

$$\text{Time Locations}[i] = t_0 + dt * \text{Locations}[i] \quad \text{【4-1 式】}$$

其中 i ：波形資料的點數

t_0 ：波形的開始時間

dt ：資料點的取樣時間間隔

由這樣的方法可以很簡單將波長值定義出來，不過在使用此一函式仍需注意以下幾點：

1. 訊號是時域訊號或頻率訊號：一個非時域的頻率訊號使用此一方程式解析將會產生嚴重的錯誤，無法獲得其頻率特性。
2. 訊號是否為週期性函數：當訊號如果是很一致性的週期函數，將會過度的去浪費處理的時間，如果可以將週期縮短為一平均時間，將可以更有效率的去獲得尖峰位置。
3. 取樣是否具有代表性：不適當的取樣頻率將造成所獲得的尖峰位置不正確，儘管訊號是在時域處理仍然不能違反 Nyquist 取樣法則，取樣頻率至少要大於實際訊號頻率的兩倍，否則將會造成訊號的混疊，通常的應用情況之下需要更多倍，因此需要注意取樣頻率的代表性。
4. 雜訊的處理是否適當：在取樣的過程中難免會受到雜訊的干擾，通常可以利用門檻值將其過濾，但是此一手段針對背景雜訊可以有效的去除，如果包含一些震幅與訊號接近的雜訊通常就難以處理，這時就必須有效的使用寬度去排除掉這些雜訊。例如針對高頻的雜訊可以將寬度增加過濾掉高頻的雜訊，低頻的雜訊就可以縮減寬度以符合訊號頻率的實際寬度。

第四個部份是將求出的尖峰位置及時的進行計算，得到實際的光柵波長值。如圖 4-14 顯示經過擷取的光柵訊號與參考波長的波形。經過即時計算分析後的波長值也顯示在圖的左方，其程式介面顯示如圖 4-15，當中使用大量的 While Loop 去對每一個波峰值獨立運算並利用 Case Structure Function 去判別正確性再做下一步的決定。

第五個部分是將各點的光纖光柵感測器波長飄移量進行計算，即時的將偏斜儀的水平位移量計算出來，任何的使用者端都可以馬上透過網路的技術，獲得儀器端的感測情形。



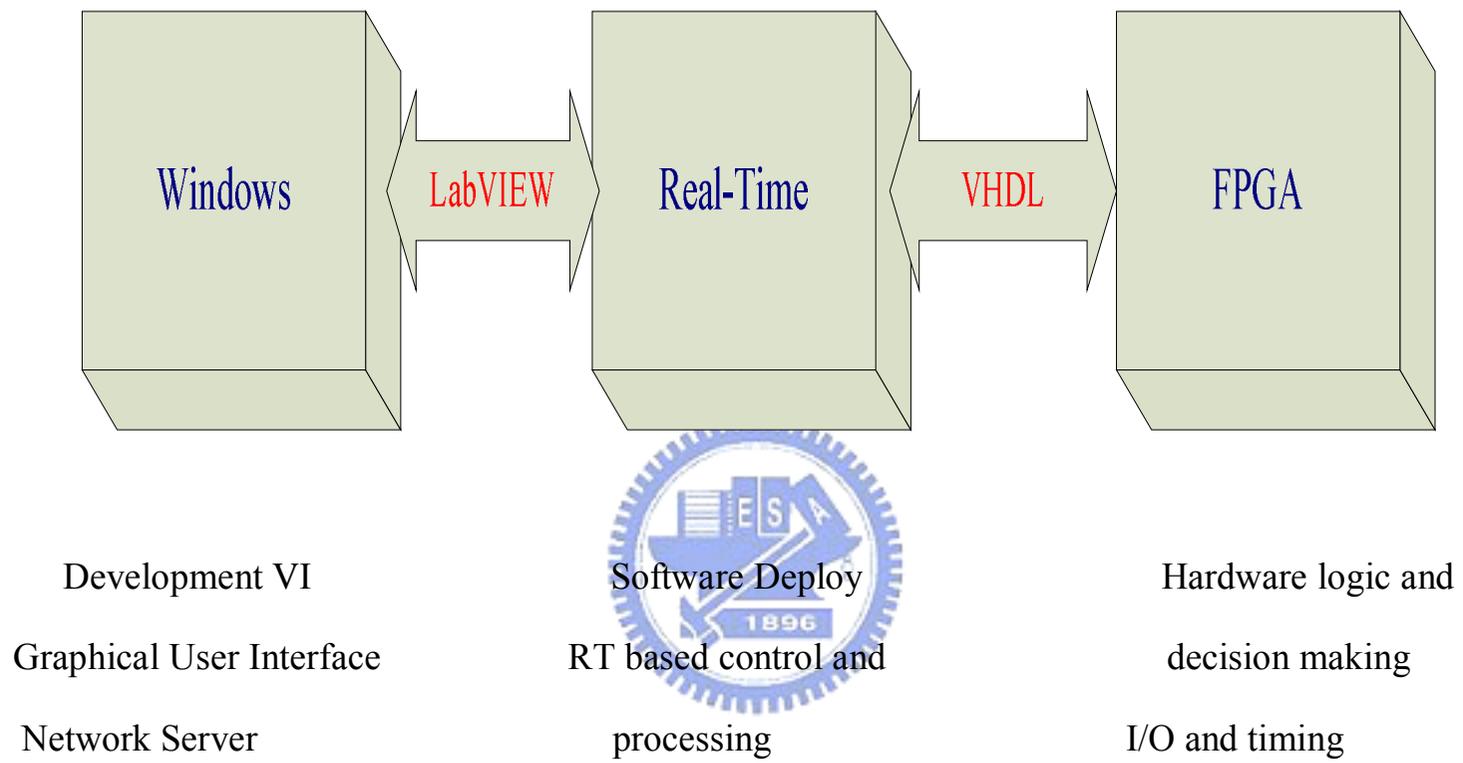


圖 4-1 各階層架構下所執行工作與溝通語言

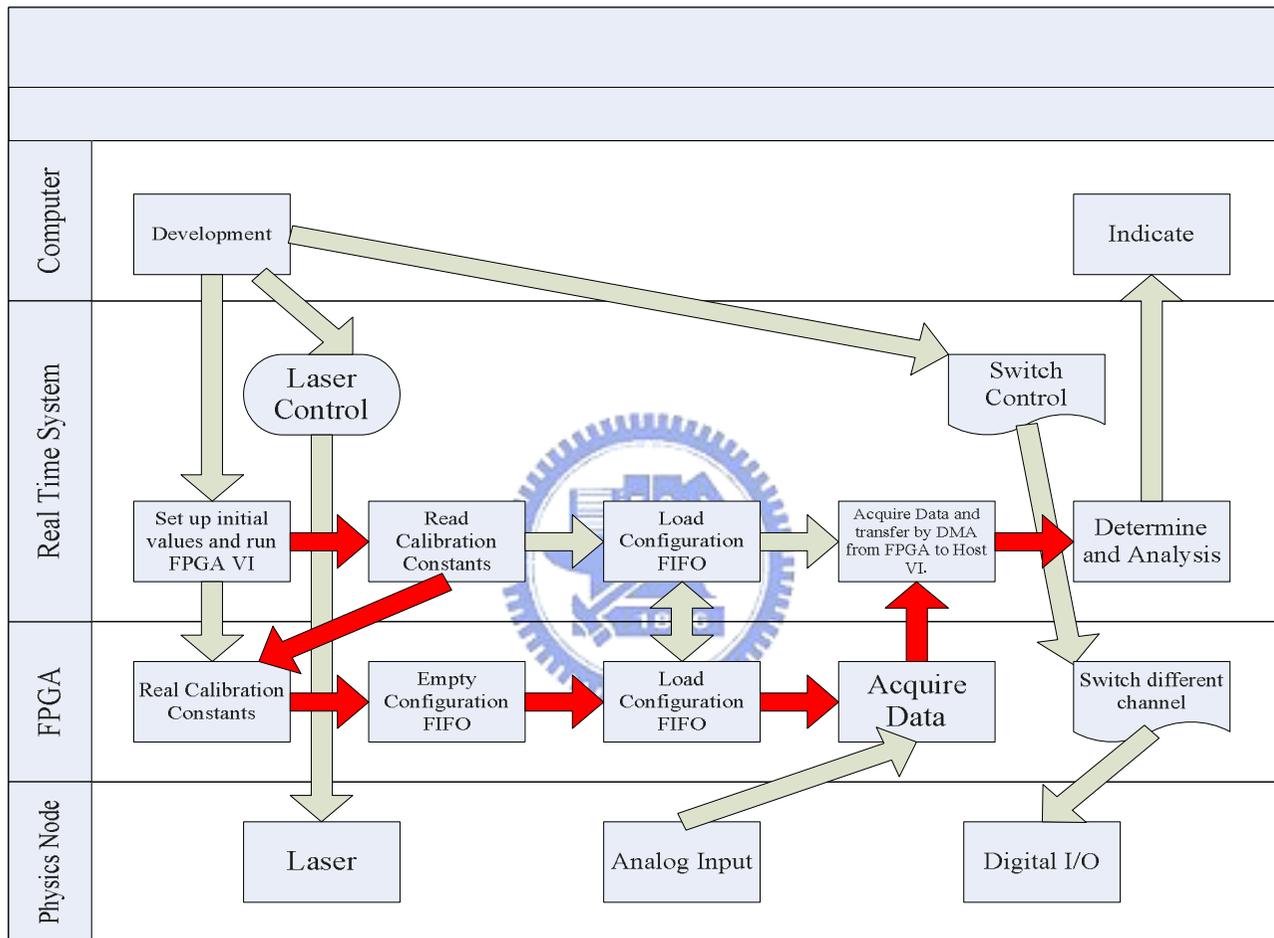


圖 4-2 系統階層程式架構

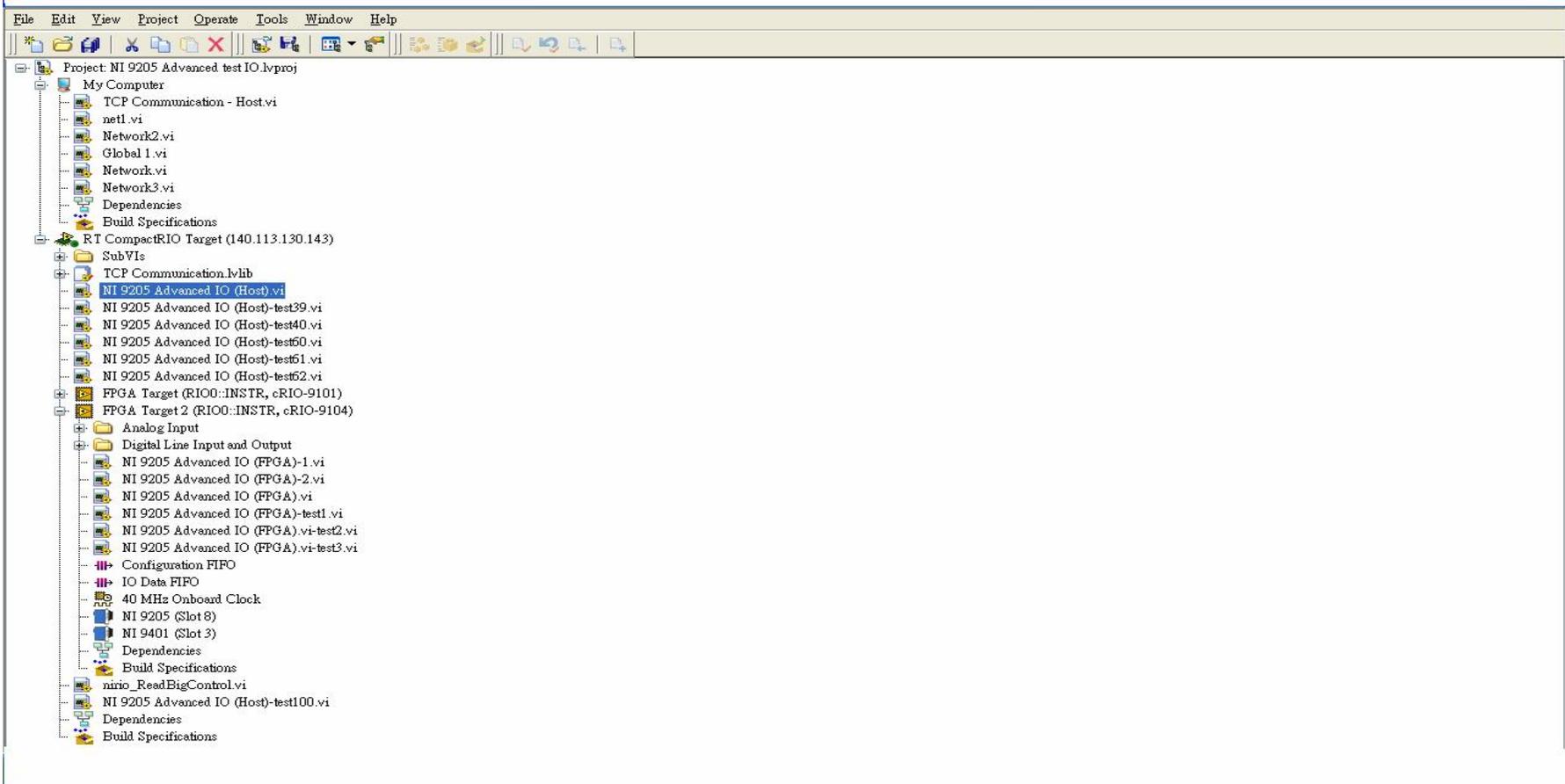


圖 4-3 程式介面的專案階層

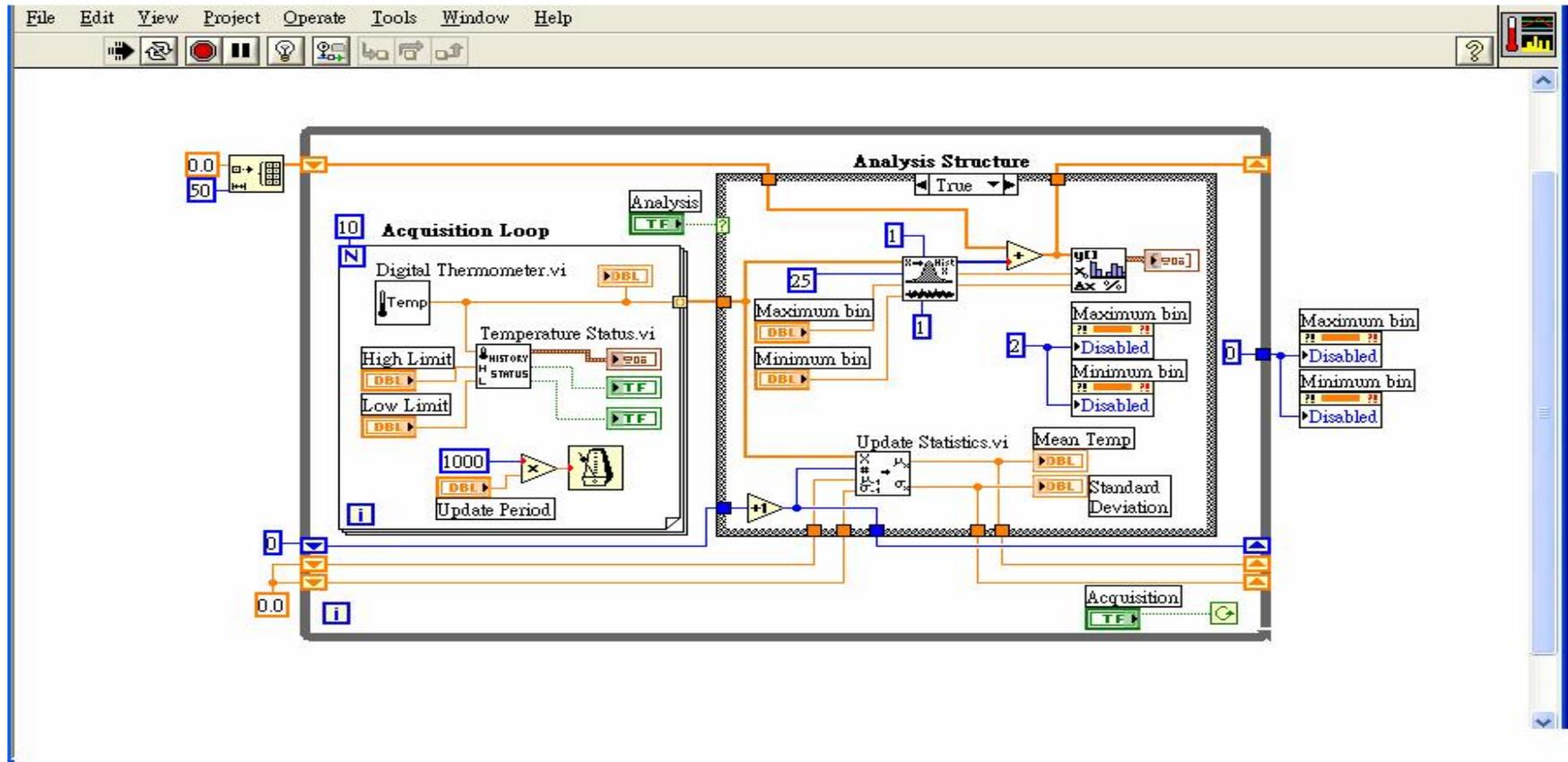


圖 4-4 LabVIEW 程式介面

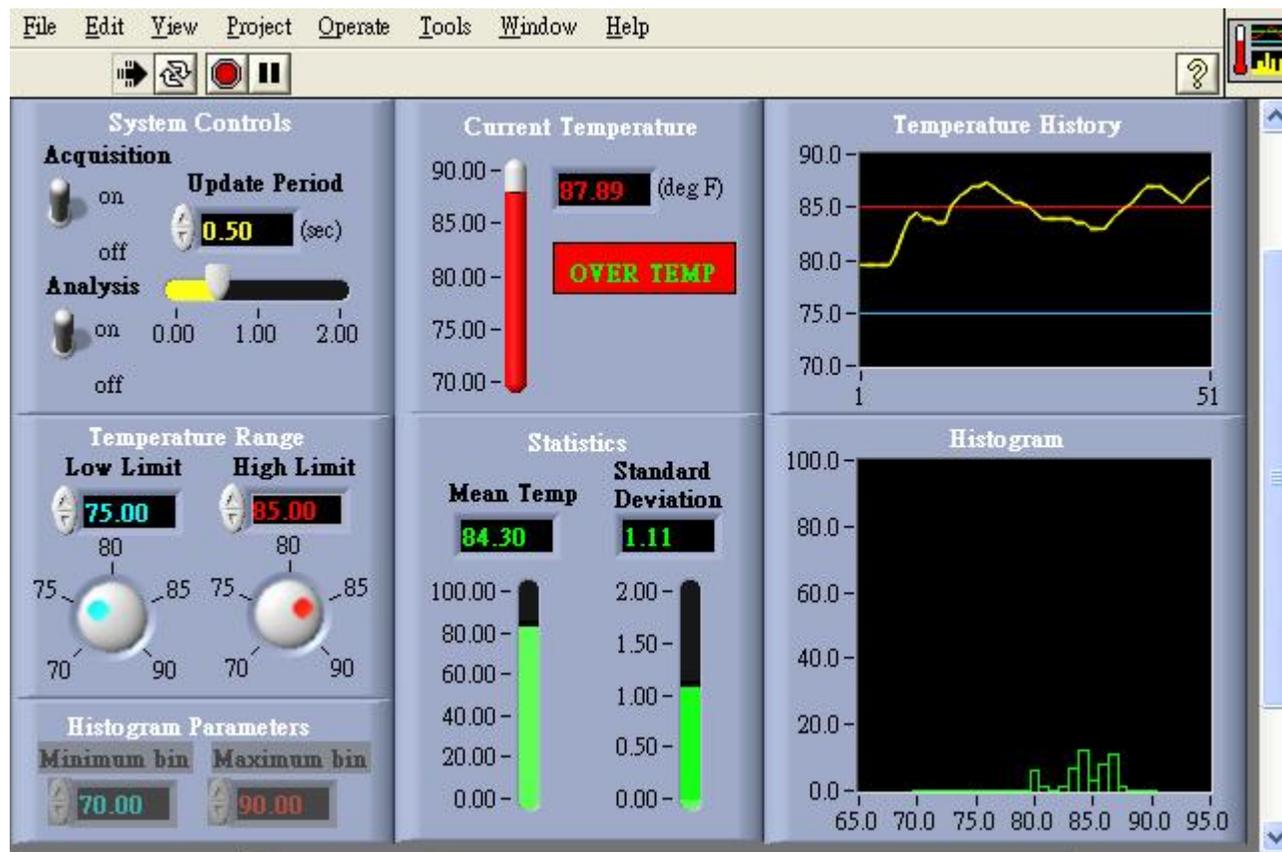


圖 4-5 LabVIEW 的使用者介面

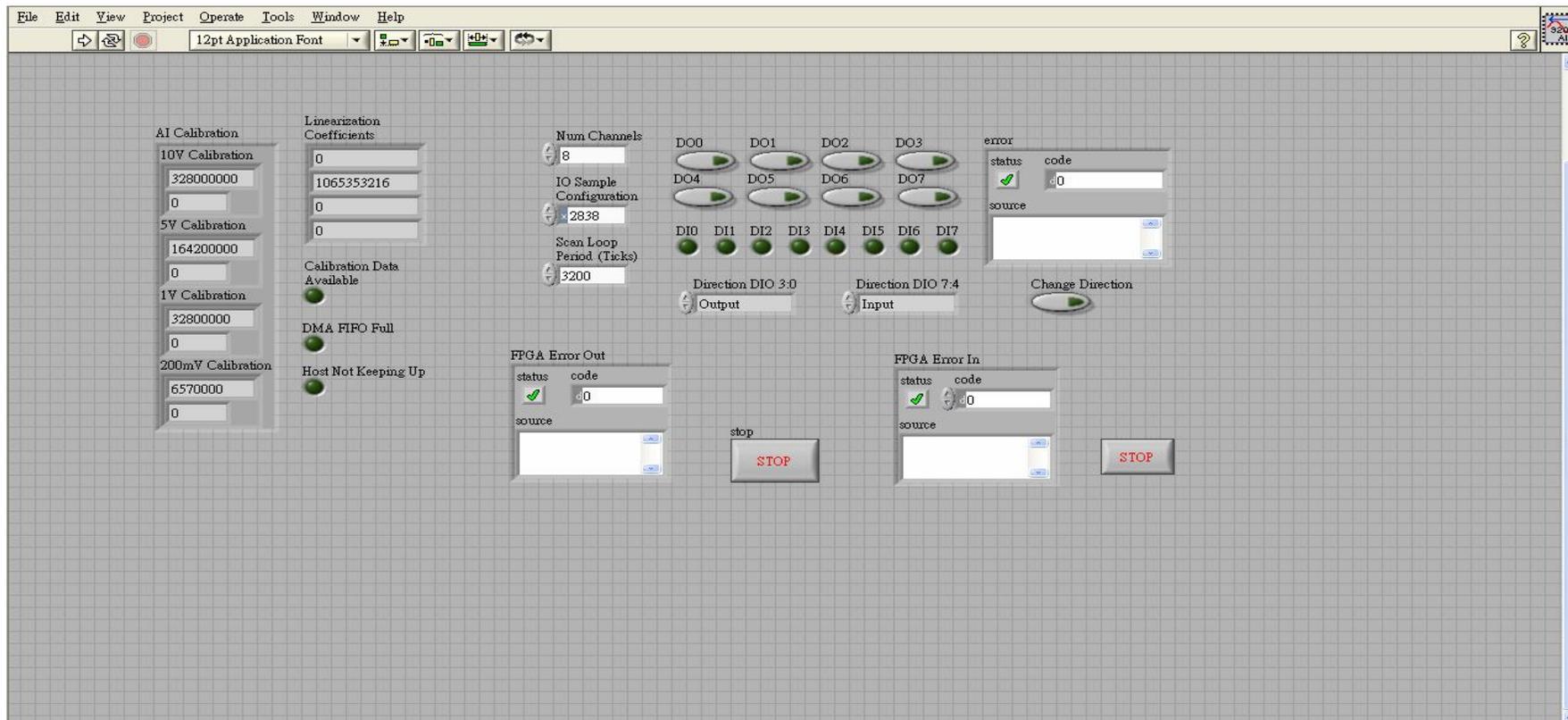


圖 4-6 FPGA 架構下使用者介面

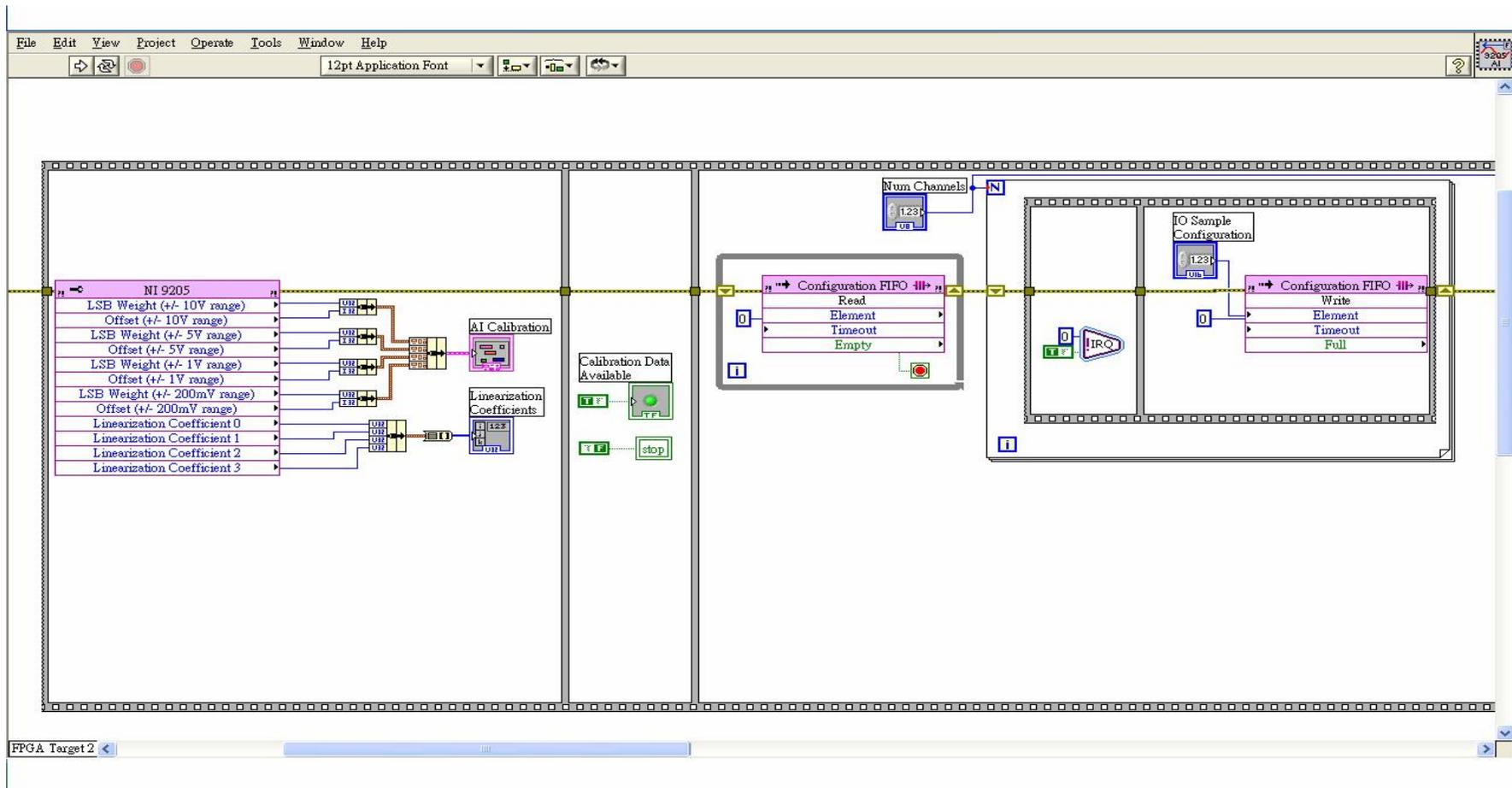


圖 4-7 FPGA 階層下的程式介面

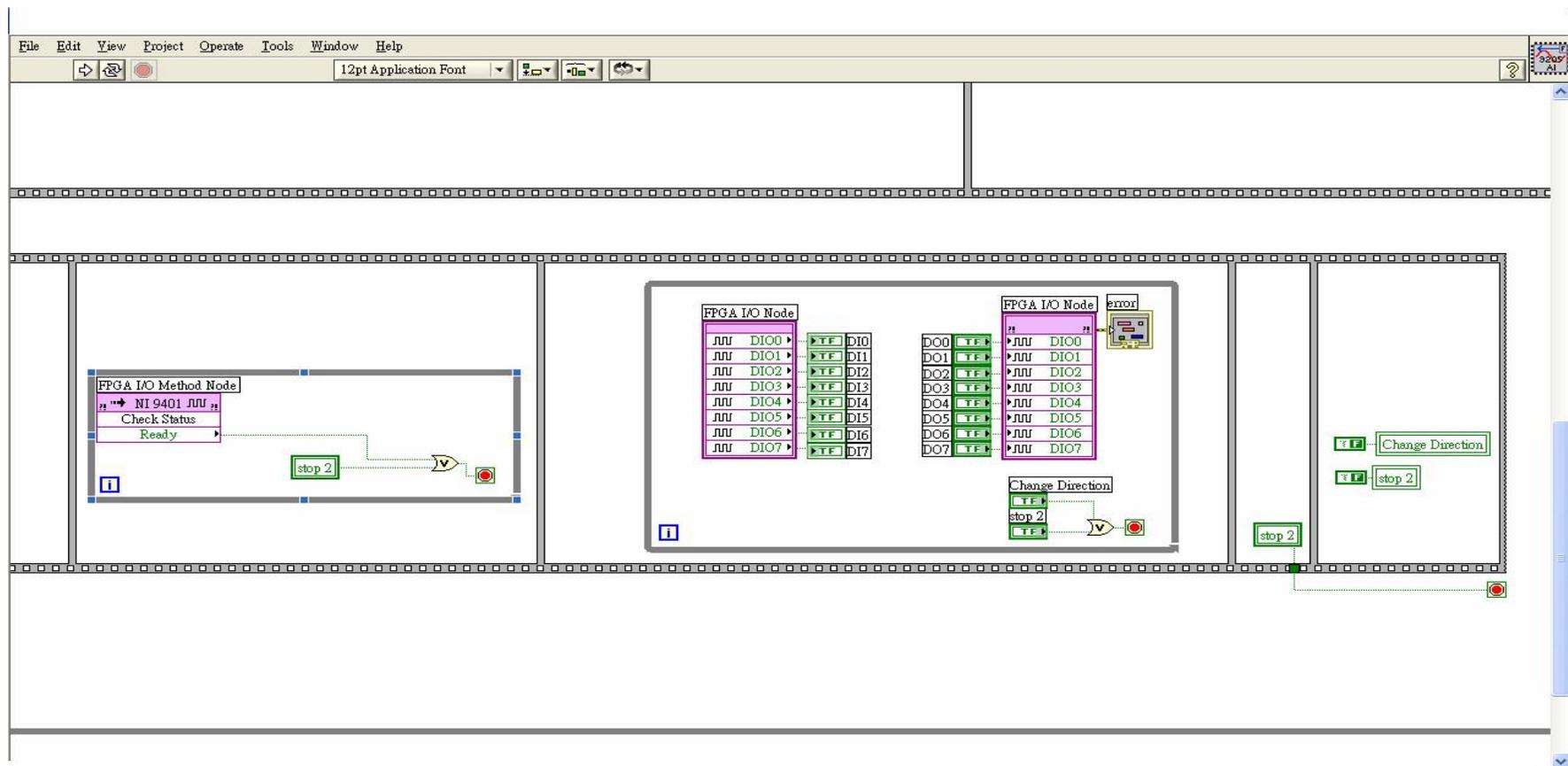


圖 4-8 FPGA 階層下光切換器布林邏輯控制函式

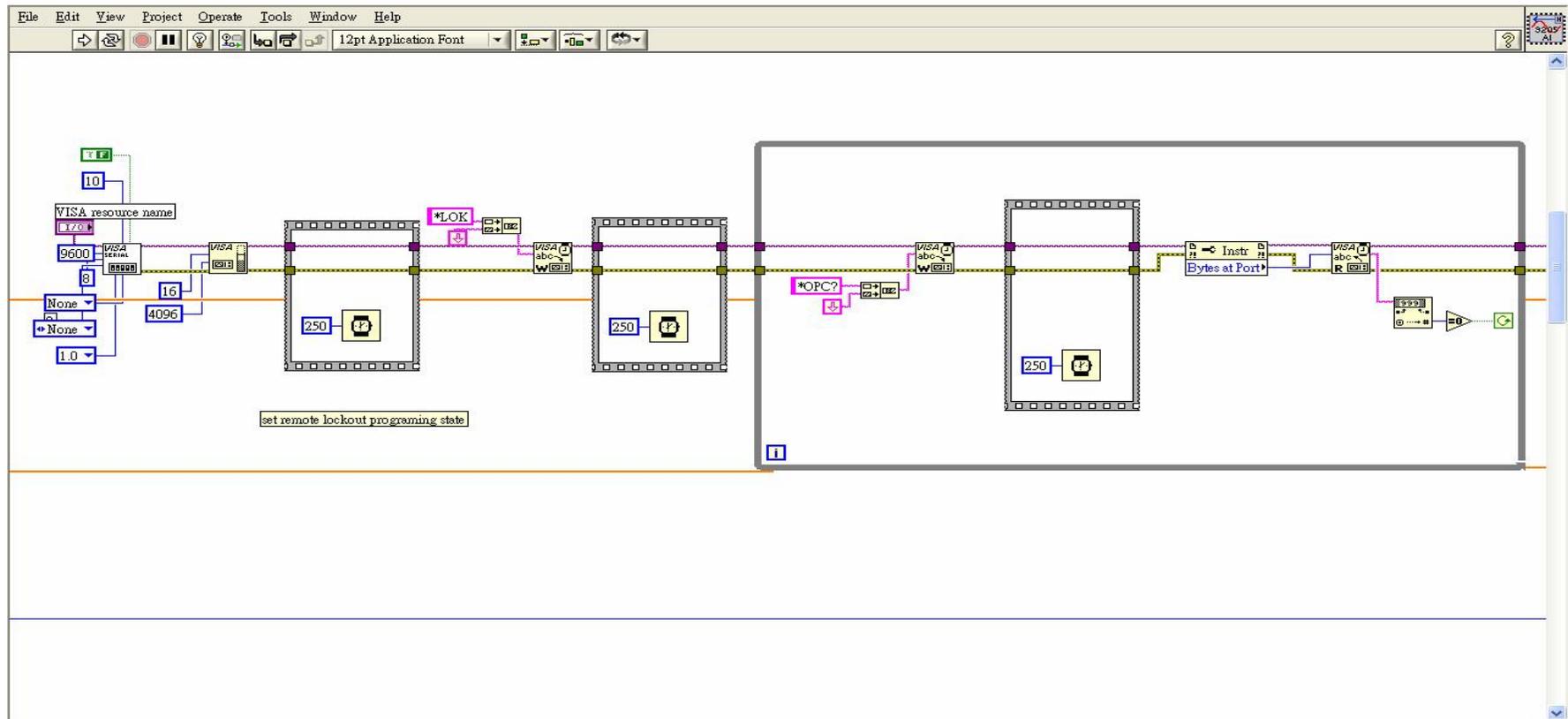


圖 4-9 Real-Time 階層下雷射光源控制部份程式

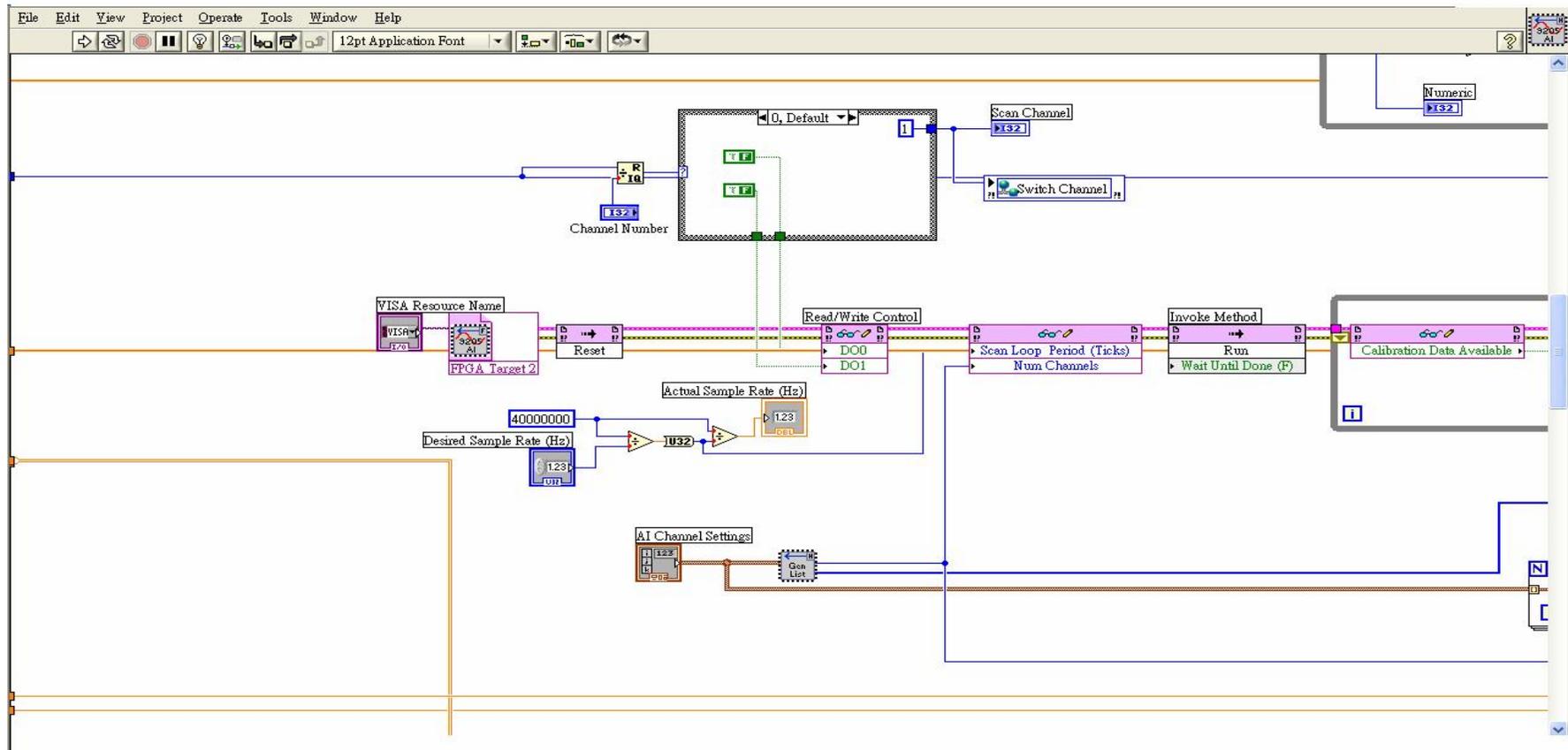


圖 4-10 Real-Time 階層下光切換器程式

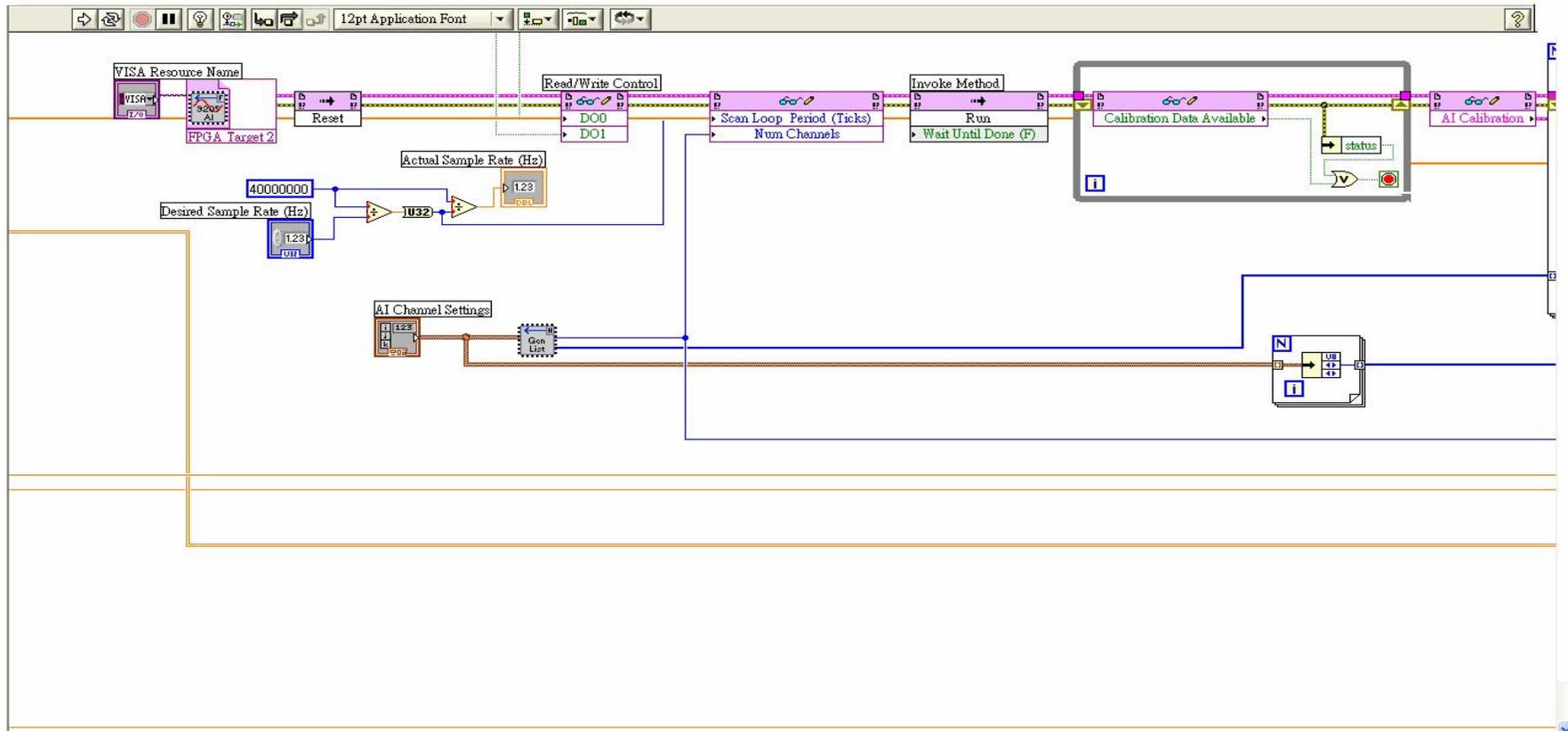


圖 4-11 波長擷取程式之初始設定

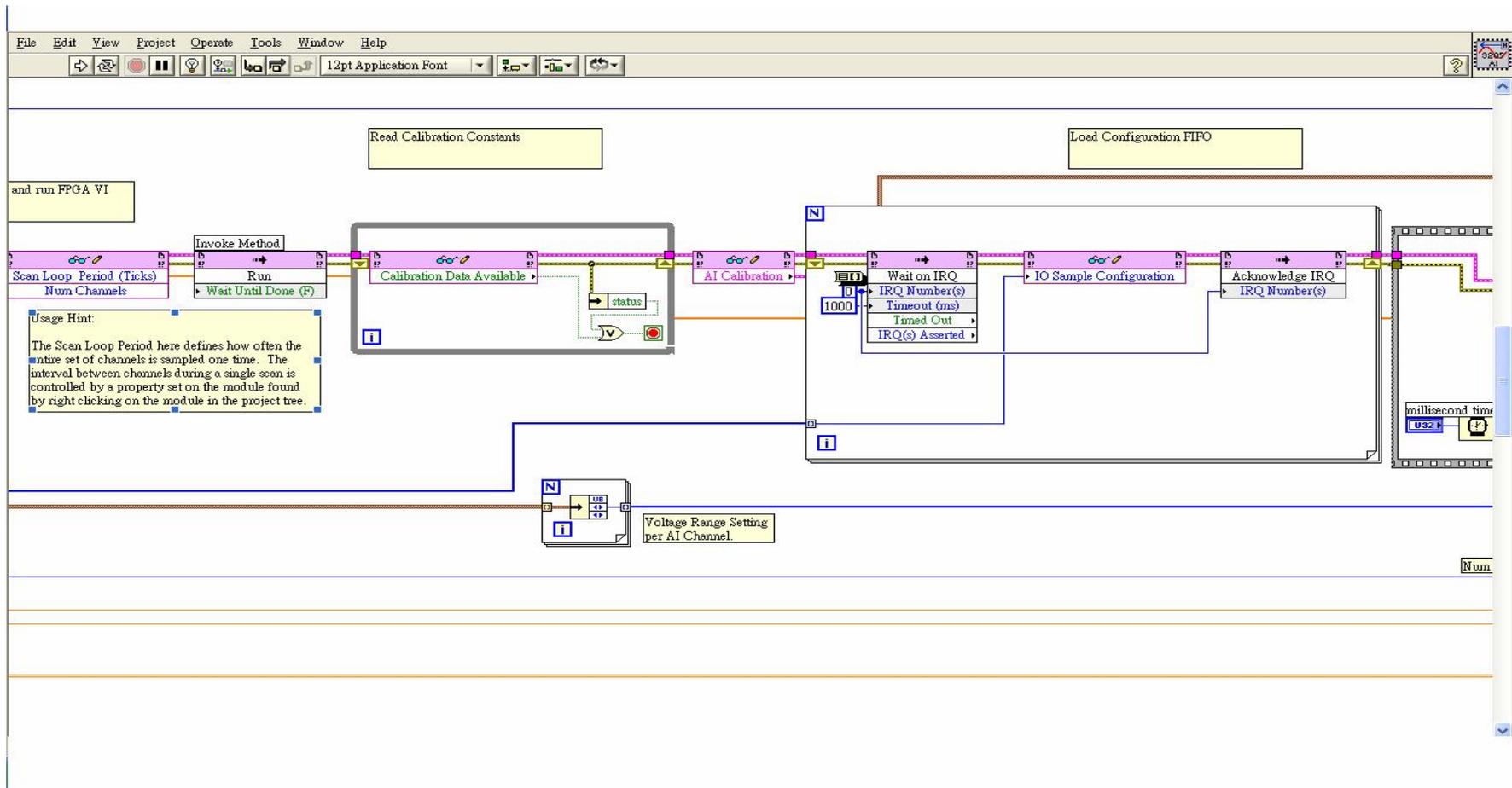


圖 4-12 訊號擷取轉換程式

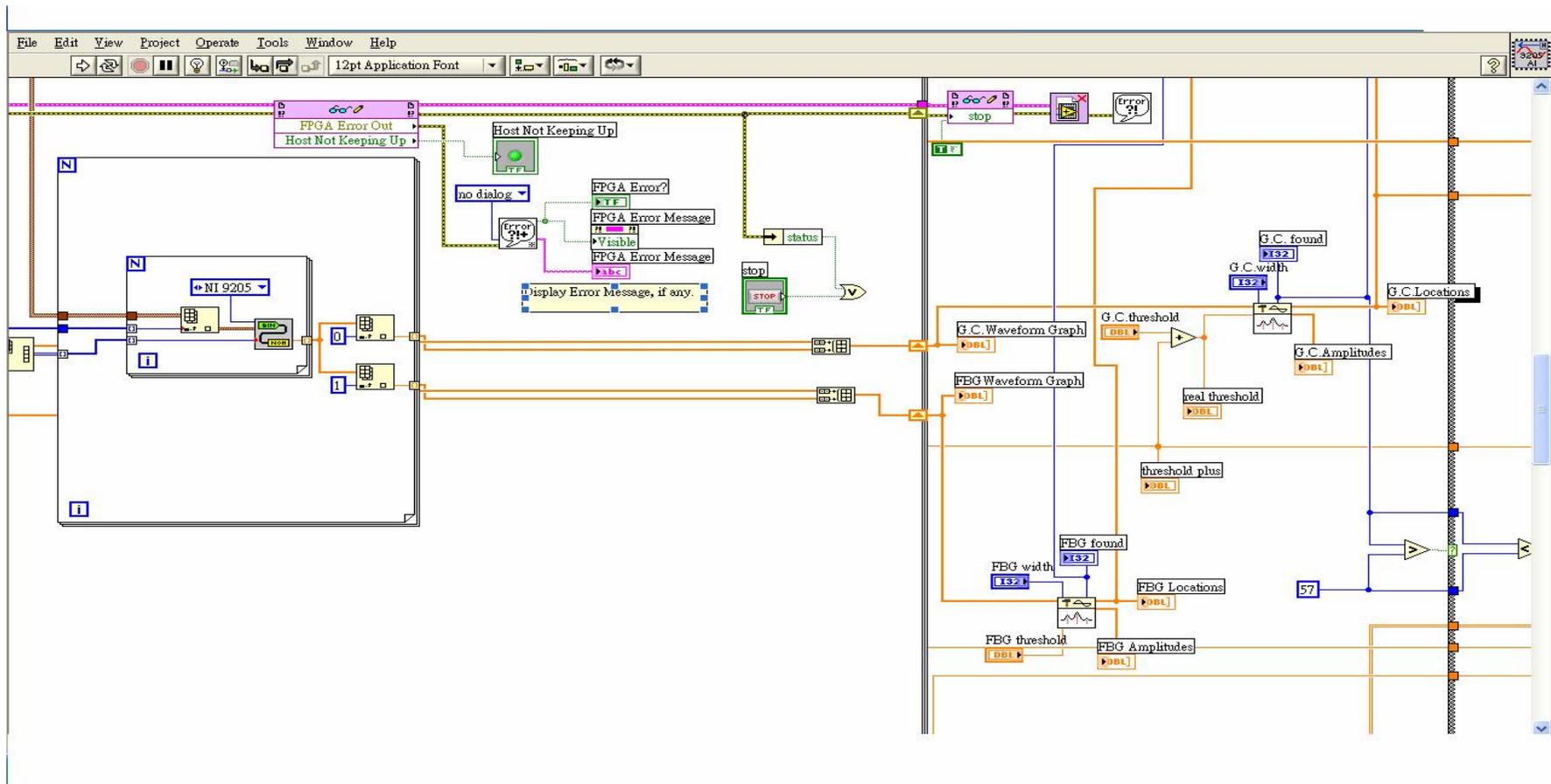


圖 4-13 波長尖峰分析程式

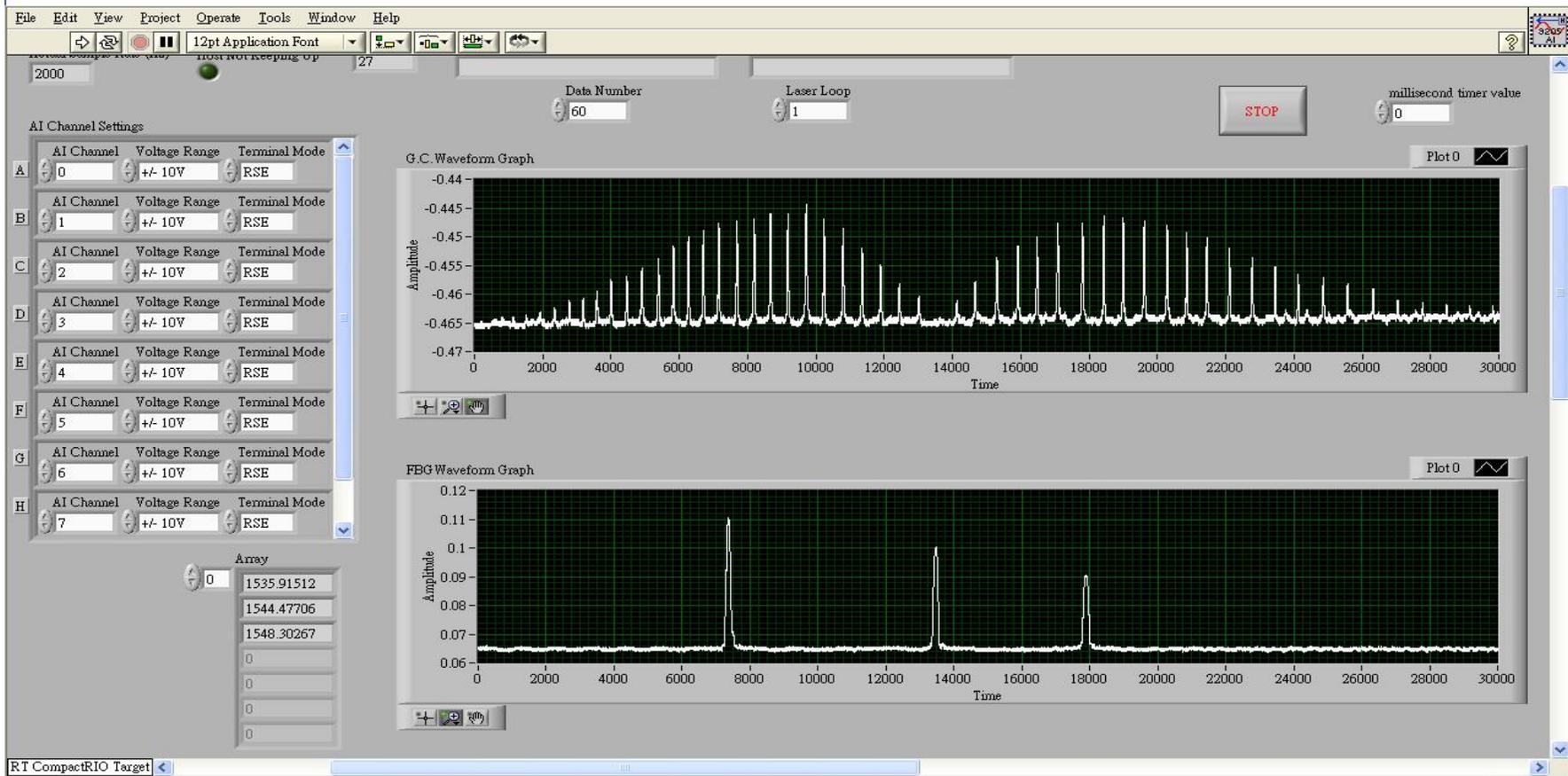


圖 4-14 光柵波長與參考波長

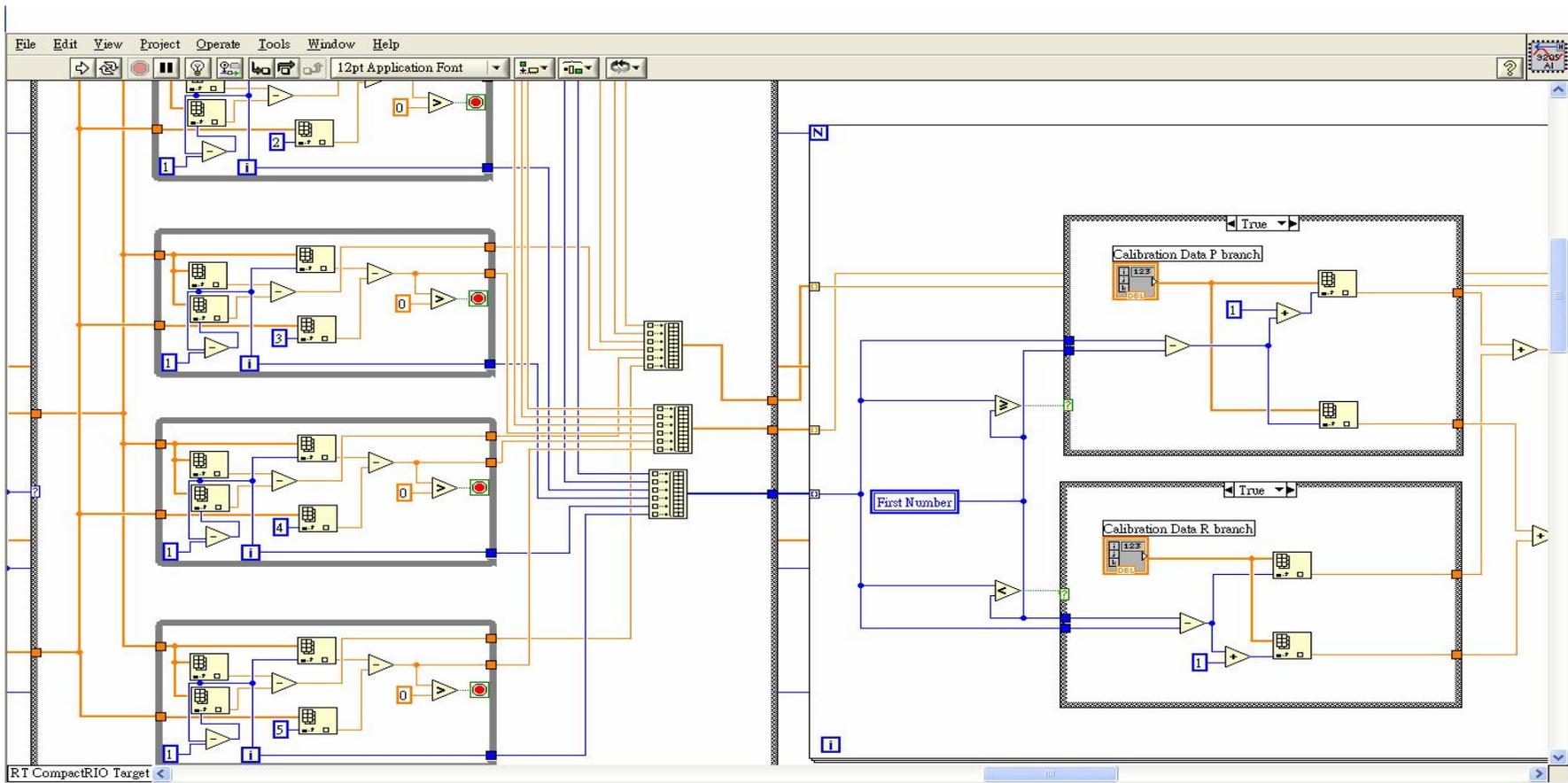


圖 4-15 波長計算與分析程式

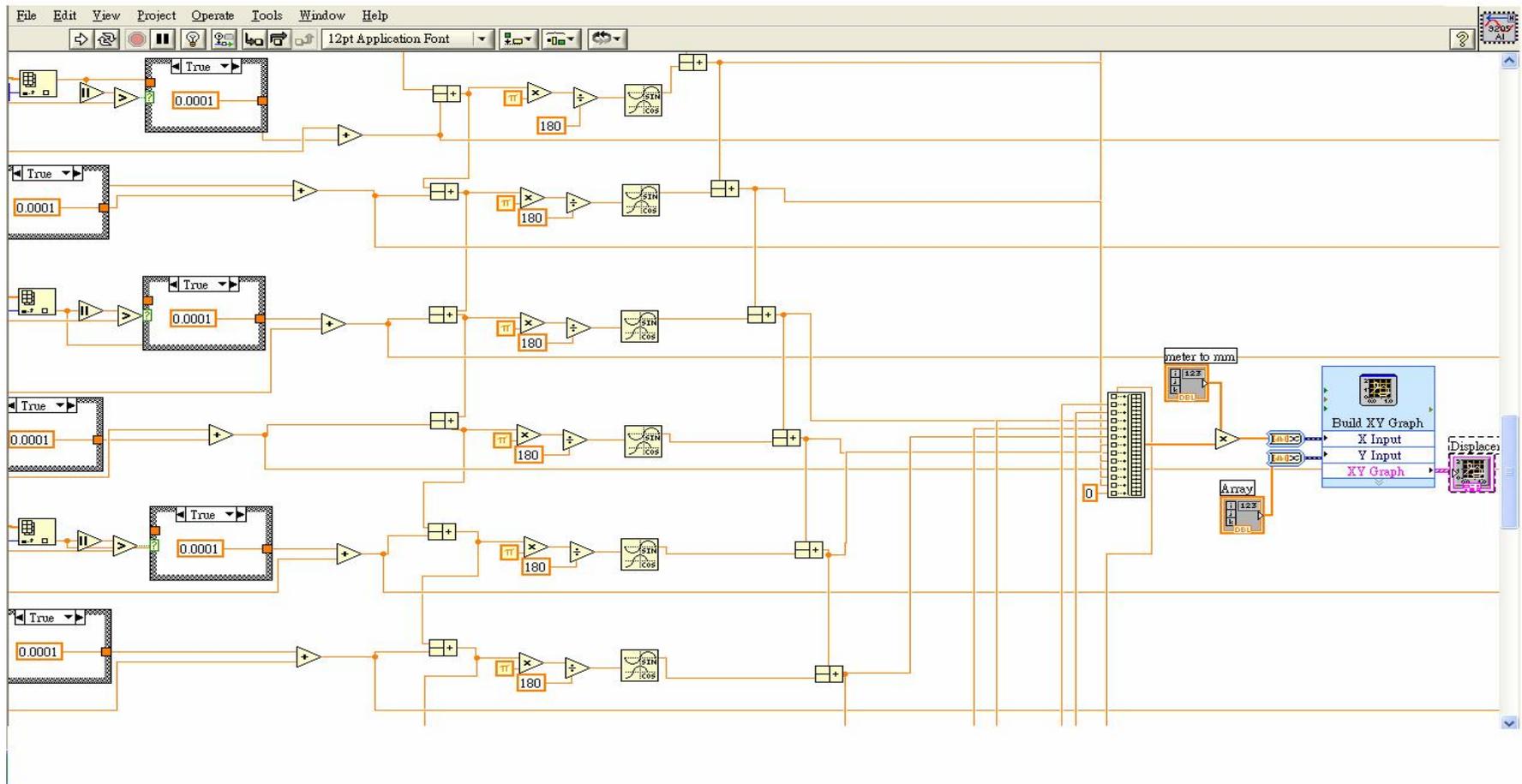


圖 4-16 水平位移計算程式

第五章 系統整合與現地應用

光纖光柵監測系統的使用標的是在於現地的環境，以光纖光柵偏斜儀為例，其目的在於能夠提供準確的地層滑動資訊，並提供預警的功能。所以對於安全性的需求也要比一般的系統高，本章要敘述的是如何將系統功能導入遠端自動化的技術。

5.1 網路傳輸技術

由於現地的環境惡劣與不安全，傳統使用的測傾儀大多需要人工現場計讀，一方面監測頻率低，另一方面在現地環境惡劣時也不適合人工現場作業。

光纖光柵監測系統在使用 Real-Time 控制器與 FPGA 模組後已經可以達到自動化監測、分析的功能，而這些監測資訊也可以透過 LabVIEW 程式語言與網路技術做連結，使得分析運算後的結果可以即時的呈現達到預警的功效，更可以透過網路的傳輸將運算簡化後的資訊傳回使用著端儲存，這兩部份將在 5.2 與 5.3 做詳細的介紹。

目前光纖光柵監測系統所使用的是 LabVIEW 最新的網路技術 Share Variable，它提供廣域變數的技術，可以在 LabVIEW 環境下，透過此一技術在所有的分布式應用中存取任何類型的資料，使用 Share Variable 可以藉由網路的技術分享資料在單一程式的迴圈之中或是介於不同的程式之間，甚至是在不同網路位置的儀器上。相對於在 LabVIEW 中現存的許多技術例如：TCP (Transmission Communication Protocol)、UDP (Universal Data gram Protocol)、Data Socket 與 VI Server 等技術，Share Variable 是一種典型的簡化技術，而且其底層仍舊是使用 TCP/IP 的架構，不但傳輸速度快，而且訊

號最為準確可靠，參考表 5-1。它可以直接透過屬性的設定，建構出所需要的特定功能，達到分享資料的工作，而略過令人覺得煩雜的 TCP/IP 等低階的網路設定，與基本的程式碼撰寫工作。

使用 Share Variable 有下列三種的基本變數型態(Variable Type)：single-process、network-published、time-triggered。一般較常使用的部分是 single-process、network-published 這兩種方式：

single-process 大多是使用在單一程式之間的資料分享，例如在許多平行迴圈當中，我們無法直接將某參數拉到另一個迴圈做運算，就可以利用 single-process 的 Share Variable。另一種情況則是在同一個設備儀器中的兩個不同程式，也是需要透過這樣的功能屬性設定，才能將資料做傳遞或是同步運算。這樣的特性相當便利於執行具有決定性影響的即時應用，也可以更進一步藉由 Real-Time FIFO 的技術將這些資料給不同使用者運用，並且確保這些資料不會失真。

Network-published 則是使用在不同儀器設備之間的不同程式之間，也可以簡易的透過網際網路將資料作傳遞或是分享的動作。而在使用 Share Variable 除了上述的類型是需要被適當的選擇：資料型態 (Data Type) 也是需要事先被定義，否則可能因為在不同儀器中的程式所產出的資料型態差異，將導致在不同程式之間資料的傳輸發生錯誤。

光纖光柵解讀系統中的使用者端並不一定都安裝有 LabVIEW 程式，但是我們仍然可以透過 LabVIEW 的環境之下，進行網路權限分享設定，利用超文件傳輸協定 (Hyper Text Transmission Protocol；HTTP) 的網頁瀏覽格式，讓一般使用者使用網際網路瀏覽器 (Internet Explorer；IE) 就可以觀看系統的監測資訊如圖 5-1，完全不需要任何特殊介面，或是安裝任何其他軟體，達到簡易分享資訊的功能。

5.2 資料存取模式

即時的監測資訊除了可以馬上讓使用者了解現地的情形外，如果可以将監測資訊儲存至遠端使用者的電腦中，這是利用 5.1 節所描述的網路技術將資料儲存在使用者的電腦，避免一般長期監測在現地的儀器可能發生的記憶空間不足的缺點。

在 LabVIEW 的環境下可以将資料儲存成文件檔的格式或是動態資料檔的型態。文件檔的優點是檔案位元小不佔記憶體空間，而動態檔案的優點則是可以立即將現地的動態資料馬上還原成波形，方便使用者觀看。

5.3 即時預警功能

監測系統除了可以在使用者介面即時觀察現地情況，並將資訊透過網路儲存外，當使用者無法長時間觀看監測畫面時，仍然有辦法可以獲得重大變化的訊息，因此預警功能就是在這樣的環境下所產生的需求，可以透過撰寫程式完成警戒功能，在現地的量測物理量超過安全範圍，並透過 E-Mail 通知寄送到指定的信箱，將系統所設定的訊息傳達給使用者端，而使用者並不限定為一位，甚至可以一次傳送給多人，但是必須配合各家網路公司郵件伺服器是否允許未經驗證的使用者進行轉信，當系統如果轉信失敗會顯示出哪些收件者被拒絕，可以此檢視哪些使用者並沒有收到警訊的電子郵件。

5.4 模擬遠端量測試驗

在系統所有程式都撰寫完成後，在實驗室進行模擬現地的遠端監測、預警測試，假設現地是一片安裝側傾管的山坡地，地質鑽孔深度 12 公尺，約在地下 8 公尺左右有潛在一地質弱面，透過系統觀察感測器的變形資訊，當安裝在孔內的偏斜儀如果超過限定的水平位移量將發送 E-Mail 至指定的

信箱，並送出簡訊至指定使用著的行動電話中，警告現地量測的地層位移量超出所範圍。實際上在實驗室中的操作是使用微調儀，將固定在光學桌上的偏斜儀推動，造成一偏斜量使光纖光柵波長飄移，當 FPGA 的 I/O 模組偵測到光電訊號，經過類比與數位轉換後，再將訊號傳回系統在 RT 架構下進行運算，解讀實際的感測器偏移量，當測傾管孔頂的偏移量超過 30mm 時，發送 E-Mail 到指定信箱並送出簡訊圖 5-1 是收到簡訊的情形。圖 5-2 是地層變化的監測畫面。整體的運作流程如圖 5-3 所示。

而在這當中的警戒值、擷取頻率與頻道數目都是使用輸入參數寫在程式中，使用者都可以直接由控制者介面進行調整，例如當現地的光柵頻道變更時，可以直接調整光頻道的數目，也可以控制自動掃描或是對需要了解的頻道改為手動掃描，檢查單一頻道中光柵的情形。或是針對不同的監測深度與感測器量測範圍都是在程式使用者介面可以變更參數，減少更改程式的不便。



表 5-1 LabVIEW 環境下各種網路技術的特性

Protocol	Speed	Reliability
TCP	Fast	Lossless
UDP	Very Fast	Lossy
DataSocket	Fast	Lossy
VI Server	Slow	Lossless



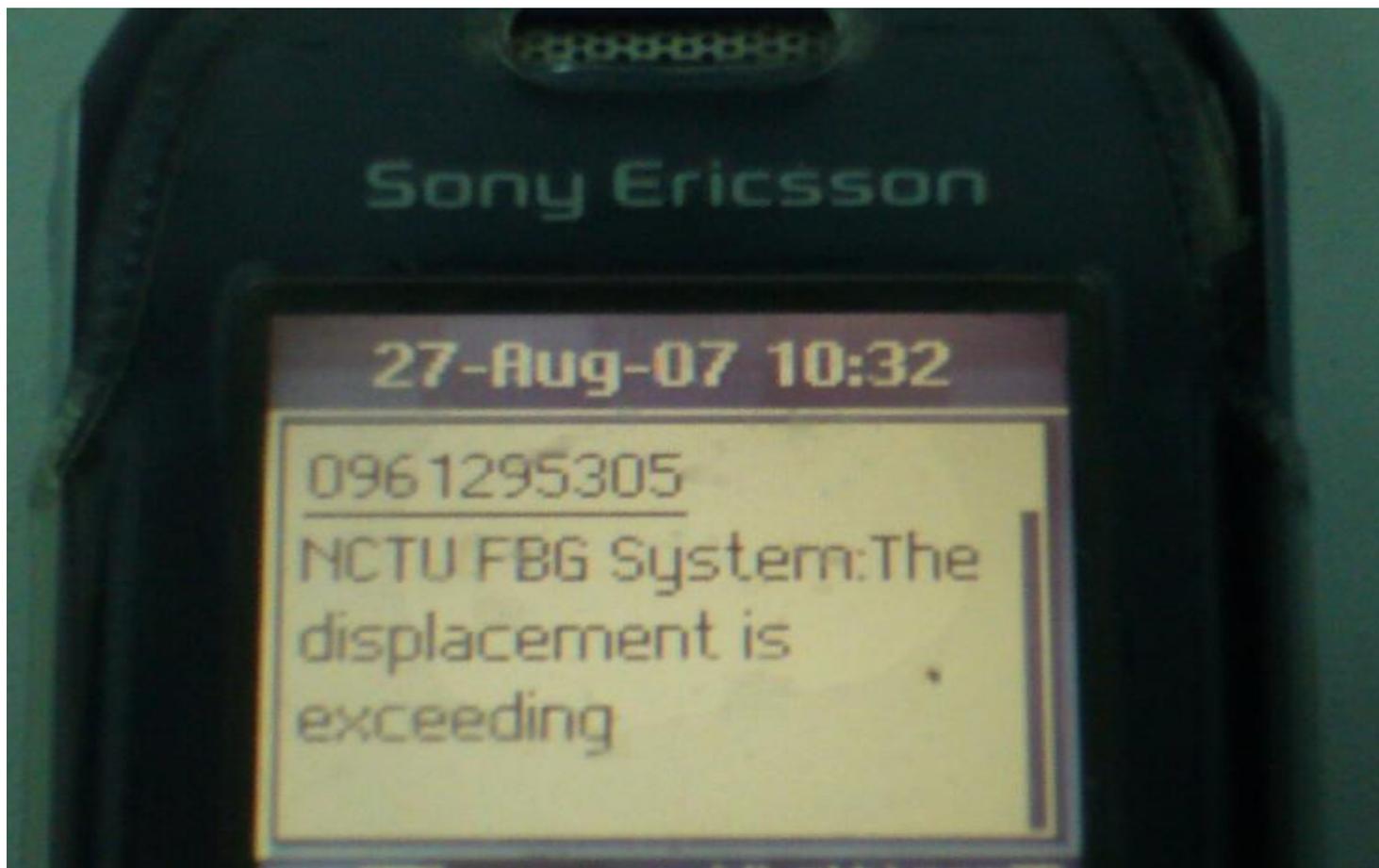


圖 5-1 監測警戒值發布簡訊

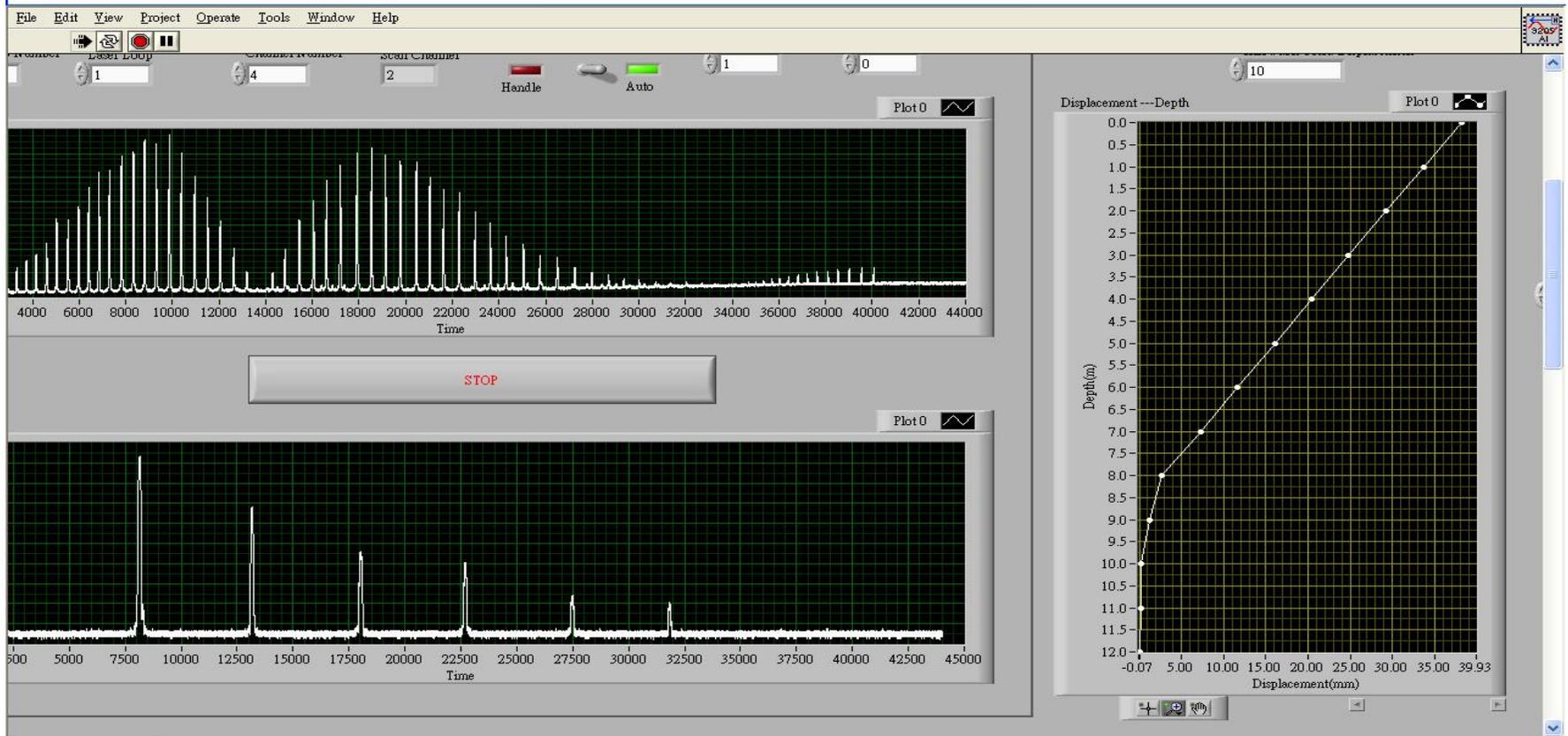


圖 5-2 地層變化監測畫面

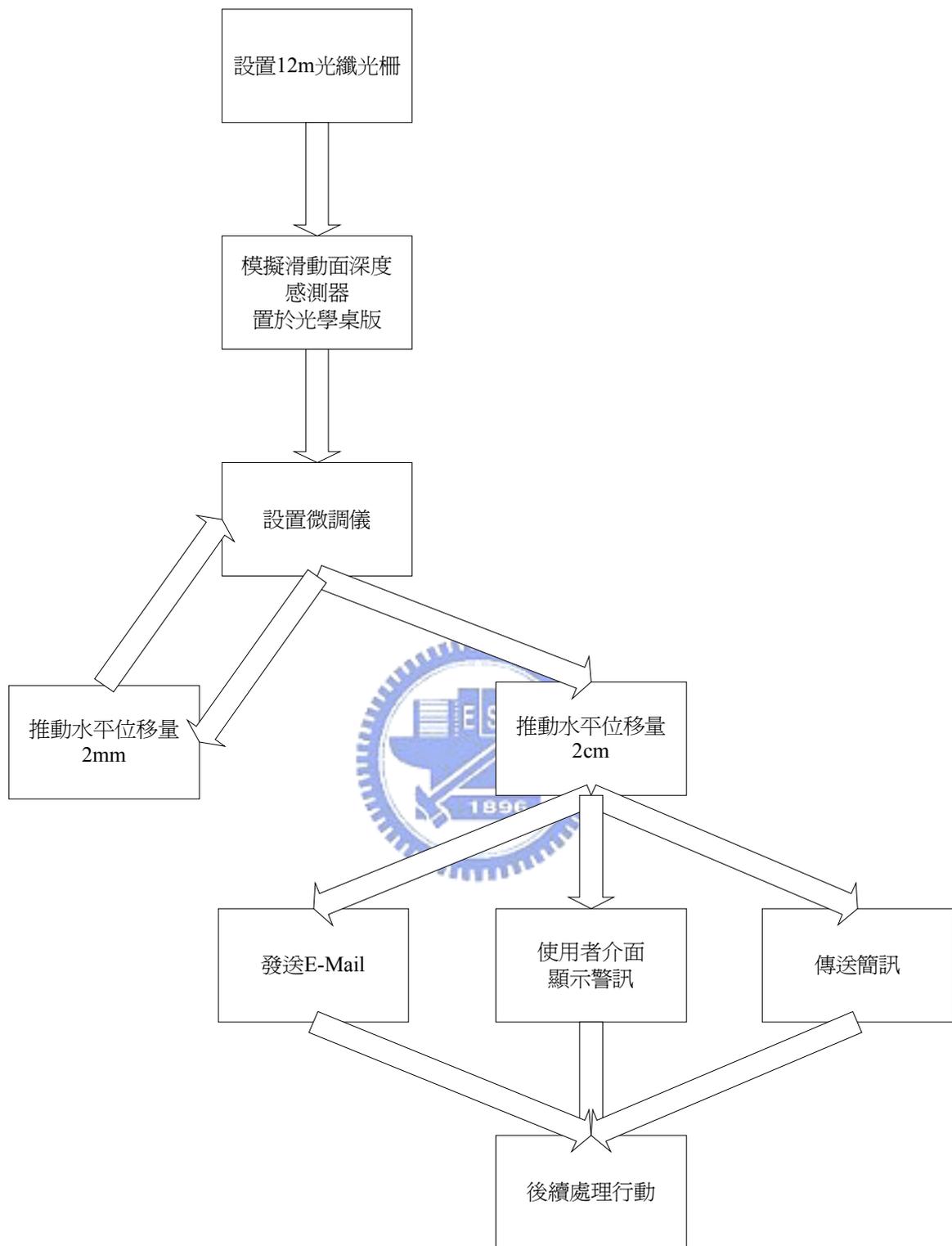


圖 5-3 模擬現地監測流程圖

第六章 結論與建議

6.1 結論

光纖光柵感測系統經過實際的測試獲得以下幾點結論：

1、即時獲得監測資訊---

系統將光柵感測訊號的波長飄移量，直接於現地運算處理轉換成地層偏移量，改進了傳統 Datalogger 需要將所有波形的記錄，而且無法立即解析訊號的缺點，大幅的減少記錄的資料量，並且能夠馬上得到監測資訊。在遠端自動化的應用，資料量的大小直接影響網路的傳輸效能與儲存記憶單元的使用量。因此本研究的系統特性對於遠端自動化的效能提升有很顯著的增加。而其擷取系統的硬體可以在 -40°C 到 70°C 的溫度環境下正常運作，相當適合土木工程的現地監測環境。

2、擴充效能彈性增加經濟性---

系統所使用的軟硬體介面整合性良好，對於功能的提升或是修改十分的便利，只需要增加 FPGA 下的模組，透過程式的撰寫即可以定義電路的邏輯以及 RT 的運算功能，大幅增加系統的擴充彈性。對於建構一個多功能監測的系統，也避免針對不同量測標的需要使用多部監測儀器的缺點，增加監測系統建置的經濟性。

3、光學系統元件的改進---

系統使用新的光波長參考元件，溫度對於波長影響小於 $0.01\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ ，其波長的正確性達到 $\pm 0.3\text{pm}$ 。對於現地環境的溫度變化可以保持系統的穩定性與正確性。

6.2 建議

對於研究過程中尚有需要改進的或是以後值得繼續研究的部份有以下幾點：

1、對於程式撰寫架構的適用性改進---

由於光纖光柵監測系統未來使用的地點是在不同的現地環境，如何讓程式能夠適用各現地環境的差異性，必須使程式的撰寫介面能夠更彈性、便捷，讓使用者只需改變輸入參數就能符合現地環境的差異，而不需要再將程式做太多修改。

2、整體系統經濟性的提升---

在本系統的光源是使用雷射光源價格不菲，如果可以使用較便宜的光源取代，將可以降低系統的造價，有利於實際應用的推廣，但仍需注意光強度的損耗。

3、光學系統的元件光損耗減少---

因為目前使用的光學元件整體損耗，使得光纖光柵的串接數目約是六個左右，如果可以對於系統元件如連接器與光耦合器的損耗降低，以及光偵測器的光吸收功率增加，應有助於增加光纖光柵串接數目，降低掃描頻道，提升系統效能。

4、多工性能的研究---

由於使用 Real-Time 系統搭配 FPGA 模組，可以使系統的擴充功能大幅提升，因此對於未來除了光纖光柵的地層位移監測，像是其他地震頻率分析或是山崩土石流影像監控等應用，都值得去研究其可行性，讓系統能夠發揮其多工的特性。

參考文獻

1. Bock, W.J., 1989, "High-pressure polarimetric sensor using birefringent optical fibres" Instru. and Meas. Tech. Conf, IMTC-89. 414-147
2. Downing, J.N., 2005, "Fiber optic communications ", Singapore, Tomson learning Inc.
3. Ferrari, J.A. and Garca, P., 1996, "Optical-fiber vibration sensor using step interferometry, "Applied Optics , Vol. 35, 5667-5669.
4. Gilbert, S.L., Swann, W.C. and Wang, C.M. , 2002, "Standard reference materials:Hydrogen cyanide H¹³C¹⁴N absorption reference for 1530-1560nm wavelength calibration-SRM 2519 "NIST special publication 260-137.
5. Hill, K.O., Fujii, Y., Johnson, D.C., and Kawasaki, B., 1978, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication", Applied Physics Letter, Vol.32, No.10, p647.
6. Hill, K.O., Malo B, and Bilodeau E, 1993, " Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask" , Applied Physics Letter, Vol.62, No.10, 1035-1037.
7. Kalli, K., Othonos, A, and Christofides, C, 1999, "Non-destructive evaluation of metal contaminated silicon wafers using radiometric measurements", Applied Physics, Vol.86, 3064.
8. Kersey, J. , 1997 ,"Fiber Grating Sensor", Light-wave Technology, Vol.15, No.8, 160-176.
9. Kitagawa, Y., and Hayashi, A, 1985, "Fiber-optics sensor for distance and velocity measurements using speckle dynamics", Applied Optics , Vol.24, 955-959.

10. Kopetz, H., 1997, "Real-time systems design principles for distributed embedded applications", Boston, Kluwer academic publishers.
11. Laplante, P.A., 2004, "Real-time systems design and analysis", IEEE press, New Jersey, Wiley-Interscience publication.
12. Lawson, H.W., 1992, "Parallel processing in industrial real-time applications", New Jersey, Prentice hall Inc.
13. Meltz, G., Money, W. W., and Glem, W. H., 1989, "Formation of Bragg grating in optical fibers by a transverse holographic method" Optics Letter, Vol.14, No.15, P189.
14. Oldfield, J.V., and Dorf, R.C., 1995, "Field-programmable gate arrays", New York, Wiley-Interscience publication.
15. Ricardo, J., Chu, L.S., and Jieliu, Z., 1996, "Real time frequency domain fiber optic temperature sensor," IEEE Trans. On Biomedical Engineering, Vol.42, 471-476.
16. Rogers, A.J., 1977, "Optical methods for measurement of voltage and current at high voltage." Optics Laser Technol., Vol.9, 273.
17. Svrcek, W.Y., Mahoney, D.P., and Young, B.R., 2000, "A real-time approach to process control", Calgary, John Willey & Sons Ltd.
18. Trimberger, S.M., 1994, "Field programmable gate array technology", Boston, Kluwer academic publisher.
19. Tvdten, A.B., Dandridge, A., Davis, C.M., and Giallorenzi, T.G., 1980, "Fiber optic accelerometer," Electron. Letter, Vol.16, 854-855.
20. Vali, V., and Shorthill, R. W., 1976, "Fiber ring interferometers." Applied Optics, Vol.15, 1009.
21. 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.

22.李瑞廷, 2005, “光纖光柵讀取系統軟體之研發”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文.

23.黃紀堯, 2003, “分時多工光纖電流感測系統之研製”, 國立中山大學電機工程研究所碩士論文.

