

南華大學科技學院永續綠色科技碩士學位學程

碩士論文

Master Program of Green Technology for Sustainability

College of Science and Technology

Nanhua University

Master Thesis

細胞培養裝置結合 MQTT 通訊協定之系統開發

System Development of Cell Culturing Device in

Combination of MQTT Communication Protocol



林坤翰

Kun-Han Lin

指導教授：賴信志 博士

Advisor: Shin-Chi Lai, Ph.D.

中華民國 110 年 6 月

June 2021

南華大學
永續綠色科技碩士學位學程
碩士學位論文

細胞培養裝置結合 MQTT 通訊協定之系統開發
System development of cell culturing device in combination of
MQTT communication protocol

研究生： 林坤翰

經考試合格特此證明

口試委員： 蔡文凱

葉文河

黃冠雄

指導教授： 賴信志

系主任(所長)： 

口試日期：中華民國 110 年 6 月 28 日

摘要

本研究旨在設計一細胞培養裝置，除了可同一般培養箱調控環境參數外，額外增加了光的可調控參數，使照射受試物的光源可根據使用者需求來更換不同波長之 LED 光板，並透過調整輸入光板電壓與控制光板與受試物的距離來調整照度變數。本裝置是以 Arduino Nano 微處理器作為系統核心，負責接收裝置中各個感測器之回傳訊號，將其封包後再輸出顯示供使用者查看，亦可接收由不同裝置傳入的操作命令後，對培養箱內部進行環境參數調整。

本裝置共提供了三種調整介面，其包含主板本身實體介面、連接 PC 端之視窗程式以及行動裝置介面，彼此皆可即時且同步顯示當前培養箱之內部資訊而不相互影響，而其中的行動裝置是透過 MQTT 輕量化傳輸協議來實現，藉由簡單的設定即可使任何安裝 MQTT 相關 APP 的行動裝置皆成為本裝置的遠端監控介面。多樣化的操作介面得以讓使用者更加便利且彈性的使用培養箱。

關鍵詞：物聯網、環境控制、遠端監控

ABSTRACT

The purpose of this research is to design a cell culture device. In addition to adjusting the environmental parameters same as a common incubator, additional light adjustable variables are added. For example, the illumination light source can be replaced with different wavelength LED panels according to user needs, by adjusting the input light board The voltage and the distance between the motor control light board and the test object can control the illuminance variable. This device is based on the Arduino nano microprocessor as the core of the system. It is responsible for receiving the return signal of each sensor in the device, and then package it and output the display for the user to view. It can also receive operation commands from different devices. Adjust the environmental parameters inside the incubator.

This device provides a total of three adjustment interfaces, including the physical interface of the motherboard itself, the window program connected to the PC and the remote mobile device, which can display the internal information of the current incubator in real time and synchronously without affecting each other. And among them, the remote control of mobile devices is achieved through MQTT. With simple settings, any mobile device with MQTT-related APP can become the remote monitoring interface of this device. The diversified operation interface allows users to use the incubator more conveniently and flexibly.

Keywords: Internet of Things, environmental control, remote monitoring, MQTT

目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	VI
表目錄.....	X
第一章 緒論	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究目的.....	2
第二章 背景原理與相關知識	3
2.1 細胞培養.....	3
2.2 電磁波概述	4
2.3 光度量.....	6
2.4 有線資料傳輸—序列通訊	8
2.4.1 通用非同步收發傳輸器(UART).....	8
2.4.2 積體電路匯流排(I ² C)	9
2.4.3 單匯流排協議 (1-Wire)	10
2.5 無線通訊技術—MQTT	12
第三章 裝置使用建材、硬體及軟體介紹	17
3.1 外部機械結構建置	17

3.2 電源供應.....	18
3.3 單晶片微處理器介紹	19
3.3.1 Arduino Nano.....	19
3.3.2 ESP8266(ESP-01).....	21
3.3.3 ESP32-cam.....	23
3.4 感測器及致動模組簡介	24
3.4.1 溫度感測器	24
3.4.2 照度感測器模組	25
3.4.3 步進馬達	26
3.4.4 馬達控制器	27
3.4.5 LCD 模組	30
3.4.6 LED 光板.....	30
3.4.7 加熱裝置	32
3.5 軟體開發、架設環境	33
3.5.1 Arduino Software IDE	33
3.5.2 MQTT broker.....	34
3.6 MQTT 行動裝置設定	36
第四章 系統整合	39
4.1 系統架構.....	39

4.2 主電路板硬體整合說明	40
4.3 培養箱整合說明	43
4.4 裝置軟體程式說明	48
4.4.1 程式設計流程－Arduino Nano	48
4.4.2 光板平台設計	55
4.4.3 Wi-Fi 及 MQTT 連線－ESP8266.....	57
4.4.4 影像遠端傳輸－ESP32-CAM.....	59
第五章 結果與討論	60
5.1 使用介面與操作	60
5.2 溫度控制.....	63
5.3 照度控制.....	65
5.4 系統比較.....	68
第六章 結論與未來展望	70
參考文獻.....	72

圖目錄

圖 1、電磁波譜	5
圖 2、光度量示意圖	7
圖 3、RS232 介面.....	8
圖 4、I ² C 介面接線	9
圖 5、I ² C 時序表	9
圖 6、1-Wire 時序表	11
圖 7、MQTT 運作機制	12
圖 8、QoS0 流程	14
圖 9、QoS1 流程	15
圖 10、QoS2 流程	15
圖 11、外部機械結構.....	17
圖 12、電源供應示意圖	18
圖 13、12V40A 電源供應器.....	18
圖 14、5V 變壓器.....	19
圖 15、Arduino Nano	20
圖 16、ESP8266.....	22
圖 17、ESP32-CAM(含 OV2640 鏡頭)	23
圖 18、DS18B20 溫度感測器.....	24

圖 19、DS18B20 接線.....	25
圖 20、BH1750FVI 照度感測器	25
圖 21、2 相 4 線步進馬達	26
圖 22、A4988 控制器.....	27
圖 23、A4988 接線圖.....	28
圖 24、20*4LCD 模組(搭配轉接板).....	30
圖 25、可替換 LED 光板.....	31
圖 26、加熱裝置	32
圖 27、黏貼於鐵板上的撓性加熱片	33
圖 28、Arduino IDE 介面	33
圖 29、新增 ESP8266 & ESP32 的開發版管理員	34
圖 30、DIoTY 首頁	35
圖 31、DIoTY 登入後畫面.....	35
圖 32、行動裝置安裝 MQTT 之 APP.....	36
圖 33、MQTT Dash 設定方式.....	38
圖 34、系統架構圖	39
圖 35、裝置實體圖	40
圖 36、Arduino Nano 模擬接腳圖	40
圖 37、系統控制主板	41

圖 38、MOSFET 運作原理.....	42
圖 39、繼電器運作原理	42
圖 40、培養箱內部實體圖	44
圖 41、BH1750FVI 使用方式	44
圖 42、DS18B20 安裝位置.....	45
圖 43、防滑動卡榫模型	46
圖 44、LED 光板接頭 & 放置平台	46
圖 45、微動開關安裝位置	47
圖 46、步進馬達安裝位置	48
圖 47、ESP32-CAM 安裝位置.....	48
圖 48、主板流程圖-(A)主端實體控制	50
圖 49、主板流程圖-(B)遠端、PC 實體控制.....	52
圖 50、主板流程圖-(C)輸出感測器資訊.....	54
圖 51、馬達移動程式碼	55
圖 52、光板設定程式碼	56
圖 53、遠端連線設定程式碼	58
圖 54、ESP32-CAM 影像傳輸程式碼.....	59
圖 55、控制主板操作介面	60
圖 56、PC 端操作視窗.....	61

圖 57、行動裝置端顯示畫面	62
圖 58、艙溫測試：持續加熱溫度變化	63
圖 59、加溫測試	64
圖 60、受試物置放區與光板直射範圍示意圖	65
圖 61、照度均勻度	66



表目錄

表 1、ESP-01 版本差異	21
表 2、A4988 微步設定.....	28
表 3、光板之波長區段	31
表 4、ESP8266 接收封包.....	53
表 5、Serial(PC)接收封包.....	53
表 6、MQTT 連線參數.....	58
表 7、2D 平面照度感測數值	66
表 8、各級距照度數值	67
表 9、培養箱比較	68

第一章 緒論

1.1 前言

在科技快速發展的現今，越來越多的電子設備逐漸充斥在我們生活周遭，5G 網路的興起也使得物聯網愈發成熟，在使社會更加便利的同時，卻也有一部份的人對於其伴隨產生的電磁波是否會對人體造成未知的影響[1]而抱持著恐懼。

而可見光，是我們最為熟悉的一種電磁波，在現代科學中也被證實對於動、植物之細胞影響有著正相關性，如結合 415 nm 藍光與 660nm 紅光可用於輔助治療青春痘瘰癧[2]，以 525 nm 綠光照射雄性大鼠(Sprague Dawley)的傷口有助於癒合作用[3]，使用低能量的 630nm 紅光或 850 nm 近紅外光可刺激對體外培養之大鼠骨髓間葉幹細胞增生[4]，還有被稱作生育光線(growth ray)的遠紅外光(波長介於 5.6~1000 um)，透過其對生物體產生的熱效應可以促進血液循環、改善微血管循環不良、促使組織生長與再生等作用[5]。

除上述案例以外，尚有許多可見光及遠紅外線光仍待相關的研究來了解其機制，而其他不可見光(如無線電、微波、紫外光等)對於生物之影響的研究更是稀少，其原因即在於研究所需的相關設備缺乏，因而也就沒有辦法有系統地為此進行資料蒐集。

1.2 研究目的

為探討光(電磁波)對於人體的影響，本論文希望參考生技領域之細胞培養裝置，打造一個專為研究電磁波影響之設備，而培養箱作為實驗室中常見的培養裝置，其主要是藉由通過控制環境參數(如溫、濕度)來模擬受試物(如細胞、組織、微生物等)在生物體或特定條件的環境下，對其進行體外培養，然而目前市售的培養箱卻鮮少有將光作為受試物培養的變數考量之一，儘管有所謂的光照培養箱，其使用的大多為模擬日照、混和不同波長的 LED 燈管，對於研究受試物生長的环境，將會侷限在同一種光源的照射下，無法進一步得知不同波段的光對其影響。此外，培養箱屬於專業儀器，因此大多要價不菲，且通常設備建置完成後便很難再將其移動，使用者會受限於地點的因素，一旦離開實驗室便無法及時對受試物進行調整觀測。

基於上述原因，本研究將以市售之常見電子元件及材料，開發一個可替換不同波長之光源、控制光與受試物距離，藉此來增加光的可調控參數之培養箱，並結合當今物聯網的技術，使用 MQTT 輕量化傳輸協定，將手邊的行動裝置設定為遠端遙控裝置。完成本系統後，最終盼能對未來的學、醫界之相關研究作出貢獻。

第二章 背景原理與相關知識

2.1 細胞培養

細胞培養(cell culture)或組織培養(tissue culture)是近代生物學研究相當重要的技術，這兩項技術都是在生物體外維持組織或細胞的生命活性，進而保存或用在醫療及實驗上。組織培養是在生物體外維持特定組織的正常功能或是以小部分的組織培養成有功能的器官；細胞培養則是將細胞從組織分離出來，培養在人為控制的環境下使其分裂生長。

一般而言，細胞株培養出來的每個細胞都極為相似，因此它們成為細胞學實驗上的重要研究材料或是用來生產合成大量的酵素蛋白質產物等，而癌細胞株也廣泛得被應用在癌症治療的相關研究上。

培養所需條件、環境

細胞需要的培養環境根據不同的細胞類型而有所差異，但通常由一個合適的容器組成一細胞培養皿，其必須提供細胞所需營養素(如氨基酸、碳水化合物、維生素、礦物質.....)、生長因子(Growth factor)、激素(Hormone)、抗生素或培養基等等，此外還須要能夠精準地控制物理環境，如溫度、氣體(O_2 、 CO_2)、滲透壓、以緩衝溶液調節 pH 值等等[6]。早期的培養皿材質為玻璃，但不易清洗，且細胞貼附效果不好，而後多改為拋棄式塑膠材質(Polystyrene)。

培養箱

市售之細胞培養箱擁有完整的偵測功能，可以精準地控制溫度和二氧化碳濃度，新型的培養箱甚至可以調節濕度或對內部滅菌。如果無法控制濕度，則通常會放置水盤以維持足夠的溼度，避免培養液蒸發造成鹽類劇烈變化，影響細胞生長[7]。

2.2 電磁波概述

電磁波是當帶電粒子做加速或減速運動時，其感應電場與磁場不斷的交互作用所產生的能量，不需要依靠介質就能進行傳播，在真空中傳播的速度為光速，特性為頻率越高，波長越短，通常穿透能力較差(γ 射線、X 光除外，因其能量較高故穿透力強)，而輻射指的是能量傳遞的方式，依據能量的強弱又可分為游離輻射、非游離輻射(有熱效應)、非游離輻射(無熱效應)。

游離輻射的能量較高，可以使原子產生游離之電磁波或粒子，當照射到人體可能會與細胞產生作用，使分子鍵斷裂導致破壞生物細胞，如 X 光、 α 射線、 β 射線、 γ 射線、宇宙射線等。

非游離輻射能量較低，不足以使原子產生游離，也就無法使之直接影響到人體細胞，不過是否會因為其他因素而導致間接影響其人體仍待更多的研究證明，另外非游離輻射中的可見光、紅外光能夠對照射物產生熱效應，不會產生熱效應的則為無線電波、微波。

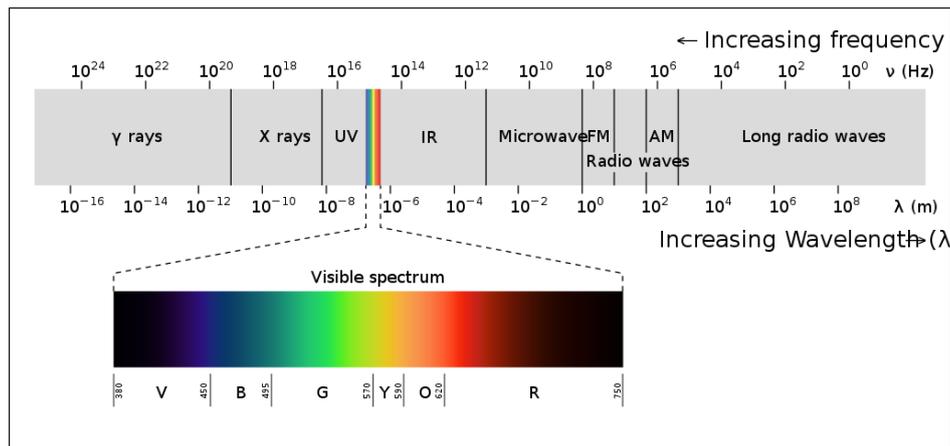


圖 1、電磁波譜[8]

在電磁學中，電磁波譜包含電磁輻射所有可能頻率，如圖 1，對於人類眼睛所能觀測到的波長大約落在 380nm~760nm 之間，僅占頻譜中的一小部分，藉由光譜儀可以偵測到比可見光的波長值域要更寬廣的電磁波。

電磁波是否會對人體造成影響

國際癌症研究署(International Agency for Research on Cancer; IARC)於 2011 年 5 月 31 日發布 208 號文件，依據使用無線手機與增加罹患神經膠質瘤之風險，已將射頻電磁場歸類為「人類可能致癌物」(人類致癌因子分類表為 2B)。針對使用行動電話者之研究顯示，最重量級之重度行動電話使用者中(每天使用超過 30 分鐘且使用 10 年以上)，有增加 40%罹患神經膠質瘤的風險[9]。

IARC 針對 2B 類致癌物質定義為「The agent is possibly carcinogenic to humans」(疑似可能對人類具致癌性)，其依據之證據為

以下情況之一：

- 一、人類致癌性證據有限，動物實驗致癌性證據尚未充足。
- 二、人類致癌性證據不充分，動物實驗致癌性證據充足。
- 三、某些情況下，人類致癌性證據不充分，且動物實驗致癌性證據也尚未充足，不過由於其在生物機轉與其他相關資料上具有強而有力的證據顯示其致癌傾向，仍可被歸於此類。

2.3 光度量

科學家將研究有關光輻射的量測科學稱為輻射度量學 (radiometry)，是用能量單位描述光輻射能的客觀物理量，其涵蓋可見光 (visible light) 部份；若單考慮可見光的輻射關係就稱作光度學 (photometry)。換言之，光度學為描述可見光在亮度和顏色方面對人眼的影響。

描述可見光的光度量[10]包含：發光能、光通量、光強度、發光度、光照度、光亮度等。圖 2 為示意圖，其定義及符號如下：

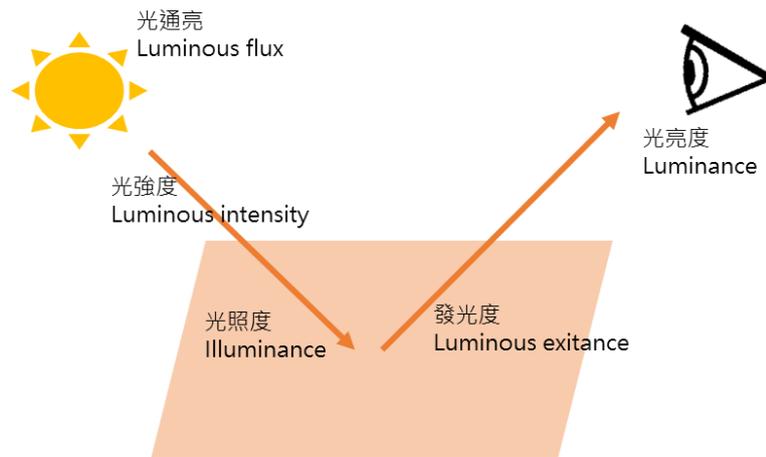


圖 2、光度量示意圖

發光能 (luminous energy)：光源所發出被人眼感知的輻射能量，亦稱作光量(quantity of light)，符號 Q_v ，單位流明·秒(lm·s)。

光通量 (luminous flux)：光源在輻射方向上每單位時間內能被人眼感知的輻射能量，亦稱作光功率(luminous power)，符號 Φ_v ，單位流明(lm)。

光強度 (luminous intensity)：光源所發出的在給定方向上單位立體角內的光通量，亦稱作發光強度，符號 I_v ，單位燭光(cd)。

光照度 (illuminance)：被光照面上每單位面積所吸收的光通量，用於入射表面的光，簡稱為照度，符號 E_v ，單位勒克斯(lx)。

發光度 (Luminous exitance)：每單位面積所發出的光通量，用於出射表面的光，亦稱作光出射度，符號 M_v ，單位勒克斯(lx)。

光亮度(luminance)：光源在給定方向上單位面積內所發出的光強度，亦稱作耀度，簡稱為亮度，符號 L_v ，單位燭光每平方米 (cd/m^2)。

2.4 有線資料傳輸—序列通訊

本系統為使中央處理器能夠與周邊電子元件、感測器進行資料交換，主要透過有線的傳輸協定作為彼此間的溝通橋樑，包含 UART、I²C、1-Wire，而跨平台的遠距資料傳輸，則透過 MQTT 傳輸協定來實現，以下將針對各式協定進行介紹。

2.4.1 通用非同步收發傳輸器(UART)

UART 為非同步收發傳輸器，實際上並非屬於通信協議，而是其他通信協議中，有著非同步、串行通信口之協議的通稱，包括如 RS-232、RS-449、RS-423、RS-422 和 RS-485 等[11]。

在 RS-232 介面中，僅使用一條電纜發送數據，以及一條電纜接地，在發送端的電纜被稱為 TX (Transmit)，反之接收端的電纜則被稱為 RX (Receive)，如圖 3，根據電子公會協會制定的標準，其電平標準以+3V~+15V 對應 0；-3V~-15V 對應 1。

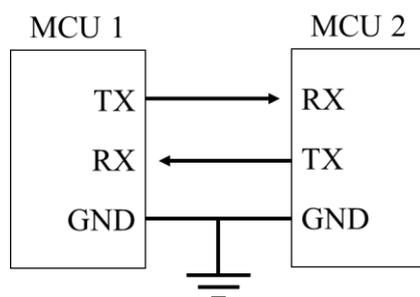


圖 3、RS232 介面

對於本系統而言，使用的是類似於 RS-232 介面，協議相同但電平不同的 TTL，其電平為 0~0.5V 對應 0(False)；2.4~5V 對應 1(true)。

2.4.2 積體電路匯流排(I²C)

I²C 是「Inter IC communication」的意思，也就是 IC 與 IC 間的通訊界面，是一種串列通訊匯流排，由 Philips 公司在 1980 年代為解決電視機及顯示器內部與周邊 IC 的通訊而被開發出來，其速度不快且無法應用於長距離裝置通訊，最初速度限制在 100Kbit/s，不過隨時代演進，現今速度可達 400Kbit/s，甚至 1Mbit/s 或 3.4Mbit/s。

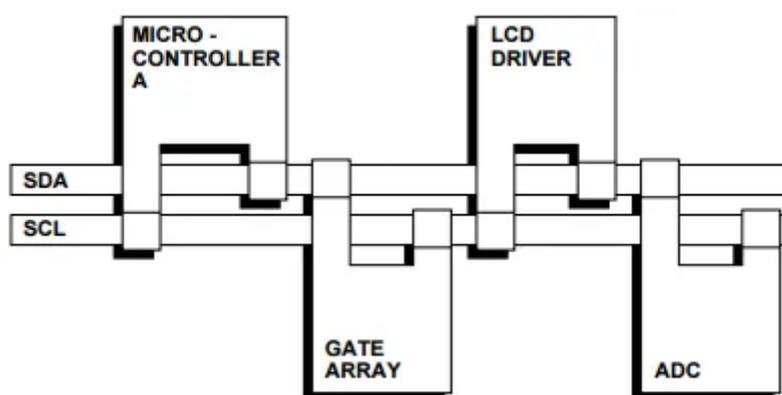


圖 4、I²C 介面接線[12]

I²C 實體介面只有兩個訊號線，分別為 SCL(串列時鐘線)與 SDA(串列資料線)，兩條皆有上拉電阻，工作電壓的範圍廣，但典型電壓為 3.3V 或 5V，採用多主從式架構，允許同時存在多個主設備與從設備，如圖 4。

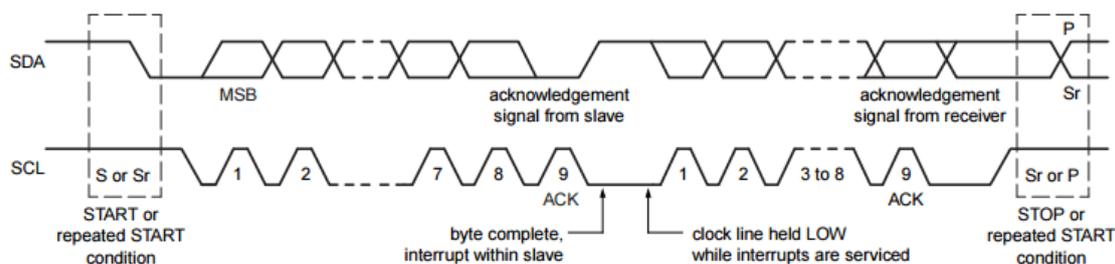


圖 5、I²C 時序表[12]

圖 5 為 I²C 時序表，由 START 狀態開始，接著傳資料與 ACK，最後 STOP 狀態結束，而所謂 ACK 為 acknowledge bit，用於接收方通知傳送方已收到資料，而 I²C 通訊主要遵循以下原則：

- (1) I²C 在閒置時間，SCL 與 SDA 通常為高電位。
- (2) SCL 為 HIGH 時，SDA 狀態不能改變，接收方可以取樣 SDA 資料。
- (3) SCL 為 LOW 時，SDA 狀態可以改變。
- (4) SCL 為 HIGH 且 SDA 有變動時，I²C 此時為 Start(SDA 下降)或 Stop(SDA 上升)狀態。

2.4.3 單匯流排協議 (1-Wire)

1-Wire 是由達拉斯半導體公司推出的一項半雙工串列通訊技術，由 1 個主機與 1 或多個從機組成，其採用單條訊號線，既可傳輸時鐘，又能傳輸資料，工作電壓大多在 2.8V~5.25V 間，可以寄生電源或外部電源供電，早期傳輸速度為 16.3KBit/s(標準模式)，而現今速度可達 142Kbit/s(驅動模式)。

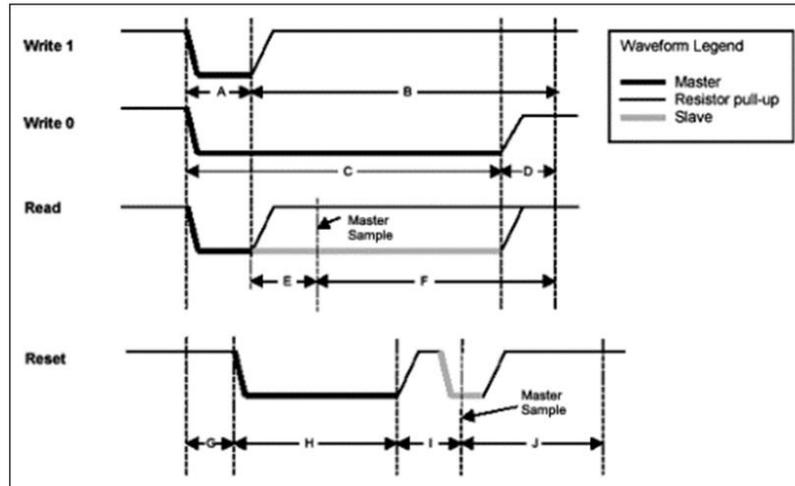


圖 6、1-Wire 時序表[13]

圖 6 為 1-Wire 時序表，運作原理主要是通過電平的延遲復位搭配中斷來讀取資料，各命令其動作如下。

寫入訊號 1 至從端(Write 1)：

(1)拉低匯流排電平，延遲 A 時間，(2)釋放匯流排，延遲 B 時間。

寫入訊號 0 從端(Write 0)：

(1)拉低匯流排電平，延遲 C 時間，(2)釋放匯流排，延遲 D 時間。

由從端讀取 1 bit 訊號(Read bit)：

(1)拉低匯流排電平，延遲 A 時間，(2)釋放匯流排，延遲 E 時間，(3)主端從匯流排上採樣，(4)延遲 F 時間。

初始化 bus 上的設備，並準備接收命令(Reset)：

(1)延遲 G 時間，(2)拉低匯流排電平，延遲 H 時間，(3)釋放匯流排，延遲 I 時間，(4)匯流排訊號，0 = 存在設備，1 = 不存在設備，(5)延遲 J 時間。

2.5 無線通訊技術—MQTT

MQTT(MQ Telemetry Transport)是一種基於「發佈/訂閱」機制的輕量級通訊協定。最初此協議被發明是為能夠在狹窄的頻寬及微小的電力損耗下，讓石油感測器與人造衛星彼此進行通訊，除上述條件外 [14]，發明者還要求協議實現簡單、確保的訊息傳遞、相容多個平台、能夠保持連線。現今主流版本為 v3.1.1 的 OASIS 國際標準，最新版本為 5.0。

MQTT 元素說明

MQTT 運作原理可以將之想像為雜誌發行與訂閱的機制，如圖 7，雜誌出版社(發佈者)在出版雜誌後不直接寄去給消費者(訂閱者)，而是經由經銷商(代理者)來協助統籌發行，消費者可以訂閱自己所需的內容(主題)。

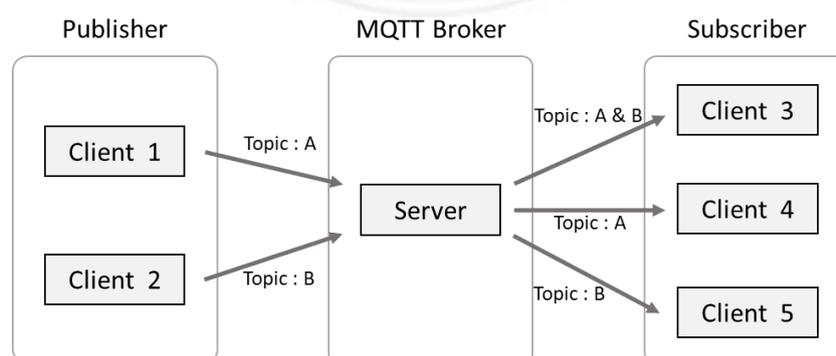


圖 7、MQTT 運作機制

MQTT 其主要角色有代理者(Broker)、客戶端(Client)、主題(Topic)，動作有發佈/訂閱(Publish/Subscribe)，各元素詳細說明如下：

- (1) **代理者(Broker)**:可視為一個伺服器(Server)亦可視為訊息代理器，作為客戶端彼此間的中繼站，負責 MQTT 網路內部訊息之處理，一般由運算能力較強的節點擔任(如：樹梅派、電腦)。
- (2) **客戶端(Client)**:在 MQTT 網路中，除 Broker 節點外，其他節點皆可視為客戶端，可以同時作為發佈者或訂閱者。而發佈者可將訊息發送指定主題至 Broker，並可決定是否將資料設定為保留訊息，而訂閱者可以接收來自 Broker 的訂閱主題。由於運算能力要求不高，使用如 Arduino 或 Esp8266 的 MUC 即可勝任。
- (3) **主題(Topic)**:為 MQTT 網路中的流動資料，由 utf-8 編碼的字串，並依照規定的命名方法(namespace)進行儲存，類似於電腦的檔案路徑階層式的命名方式，為樹狀結構，上下階層間以斜線(/)來分隔，比如有一主題為 esp8266/incubator/lux，此即為三個層級構成之主題。
- (4) **發佈/訂閱(Publish/Subscribe)**:客戶端若作為發佈者，可針對指定的主題，將資料發送至代理者，代理者再把資料轉送至有訂閱該主題的訂閱者，而若是發佈者有將傳送的資料設定為保留訊息，則新的訂閱者會在連線之後，接收到該主題之保留訊息。由於此機制的存在，使得 MQTT 得以在網路不佳的環境下使用。另外訂閱者可以透過萬用字元來達到訂閱多個主題的功能，比如加號(+)可以訂閱該層級所有訊息，井號(#)可以訂閱該層以下之所有內容。

QoS 品質設定

QoS(Quality of Service)在 MQTT 網路中的定義為，發佈者與代理者或代理者與訂閱者間的傳輸品質，根據傳遞的可靠度共分為三層級別。

(1) QoS0(至多傳送一次)

發佈者或代理者的訊息只傳送一次，而代理者或訂閱者在接收資料後並無提供反饋，故無法確定對方是否有真正收到訊息，如圖 8，屬效率最高、佔用頻寬最低之設定。

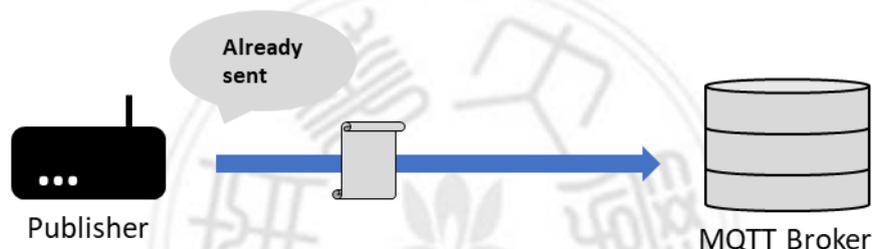


圖 8、QoS0 流程[15]

(2) QoS1(至少傳送一次)

在發佈者傳送資料後，代理者倘若收到資料時，會回傳 PUBACK 訊息，以告知發佈者已收到消息，如圖 9，而若此時因為連線因素而導致無法順利回傳，發佈者會因為誤以為對方未收到而再傳遞一次，故代理者可能會收到重複的訊息，屬效率次之、佔用頻寬較多之設定。

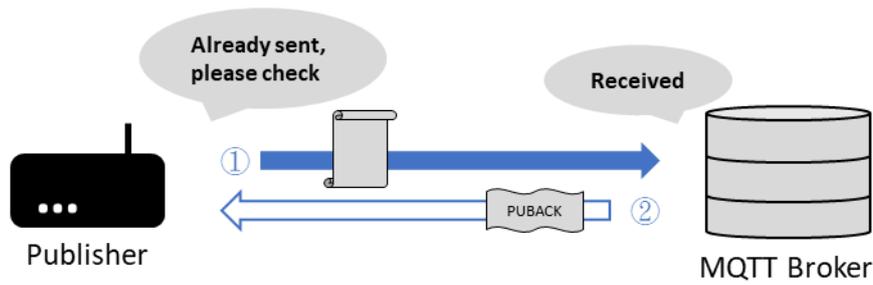


圖 9、QoS1 流程[15]

(3) QoS2(確實傳送一次)

代理者在收到發佈者的訊息後，除會回傳 PUBREC 訊息告知發佈者外，同時會暫存訊息之封包識別碼，以防止處理相同訊息，而後發佈者在接受到 PUBREC 訊息後，會再度傳送 PUBREL 訊息給對方，請對方釋放暫存訊息，代理者收到 PUBREL 訊息後，最後再回報 PUBCOMP 告訴發佈者已完成釋放，如圖 10。由於此過程發佈者與代理者(接收方)皆會暫存訊息且反覆驗證，故屬於效率最低，佔用頻寬最高之設定。

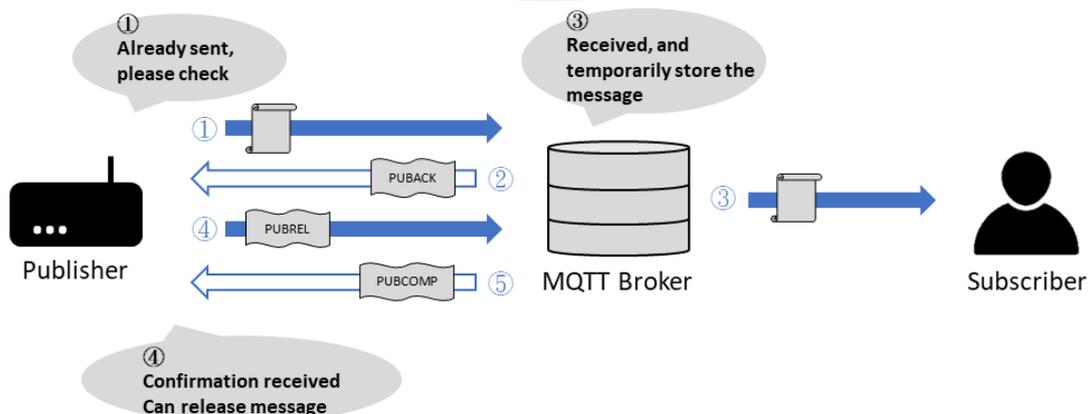


圖 10、QoS2 流程[15]

MQTT 優勢

MQTT 為基於 TCP 協議之上的應用層，其標頭採用數字編碼，僅僅占 2 bytes，相較於同為 TCP 之上的 HTTP 協定的標頭需要向伺服器詳細描述客戶的資訊而言，要來的有效率、節省記憶體空間且佔用較小頻寬。此外發佈者與訂閱者間還有著低耦合、非同步的特性，可以做到讓發佈者與訂閱者於自己的環境中分工建置而彼此不受影響。

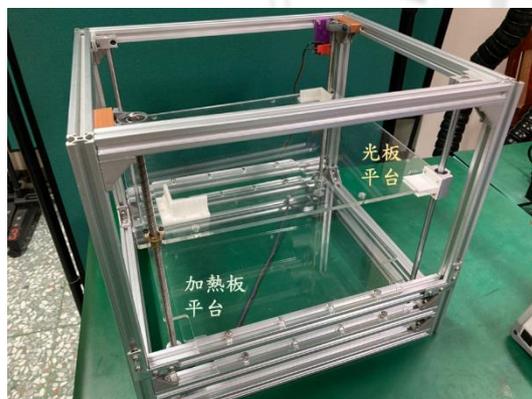


第三章 裝置使用建材、硬體及軟體介紹

3.1 外部機械結構建置

本系統之艙內結構主要以 20 系列的鋁擠型搭建，其擁有低成本，高強度、輕量化等優點。在中下半部另外與透明壓克力板搭建兩個平台(圖 11.a)，其一作為放置加熱裝置之用，另一平台則用於放置受試物。內部整體總長為 44cm，寬為 39cm，高為 39.5cm，建置完畢後將其置放於能夠隔絕室外環境的艙體中(圖 11.b)。

置放光板的可調控升降平台，是使用聯軸器將螺桿與步進馬達連接在一起，再將平台的壓克力板與螺桿的螺帽鎖上。螺桿與螺帽的規格為 T8、導程 8mm。



(a) 鋁擠建材搭建



(b) 置於隔熱艙內

圖 11、外部機械結構

3.2 電源供應

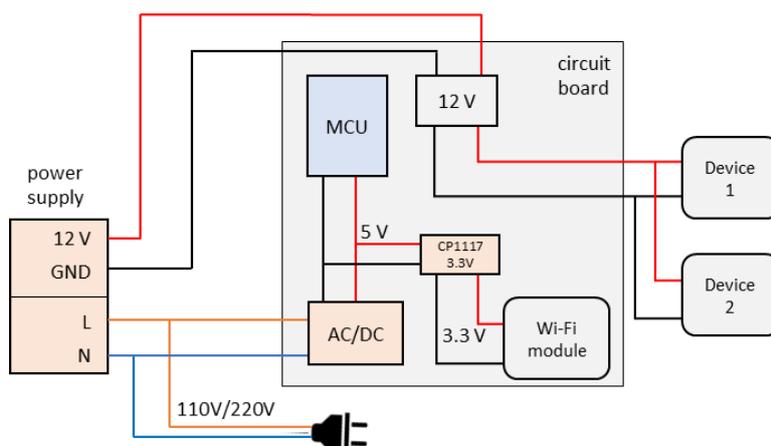


圖 12、電源供應示意圖

本系統的供電有三種電壓，分別為 12V、5V 及 3.3V，連接方式如圖 12 所示。電壓 12V 供給至加熱板、光板以及步進馬達，考慮到加熱裝置需要使用不小的電功率，因此在供電方面選用了洪*電源所生產的 12V、40A 大功率電源供應器，如圖 13。



(a)實體圖

型號	S-500-12
輸入電壓	110 ~ 220 V
輸出電流	40 A
輸出電壓	12 V
環境溫度	-20°C ~ 60°C
功率	500 W
轉換效率	80 %

(b)規格

圖 13、12V40A 電源供應器

電壓 5V 則是由 110V 交流電，經 AC/DC 模組變壓(圖 14)後，提供給微處理器使用，如 Arduino、ESP32-CAM，而同樣的 5V 再經

CP1117-3.3V IC 穩壓成 3.3V 後，供 ESP8266 模組所使用。此外為簡化供電 Input 口，將 AC/DC 變壓器的交流端，與 12V 隔離電源的交流端並聯共接為同一條電源線。



(a)實體圖

型號	AM21-12W05V
輸入電壓	100 ~ 250 V
輸出電壓	5 V
持續電流	2400 mA
輸出功率	12 W
過流保護	2800 mA
轉換效率	82 %

(b)規格

圖 14、5V 變壓器

3.3 單晶片微處理器介紹

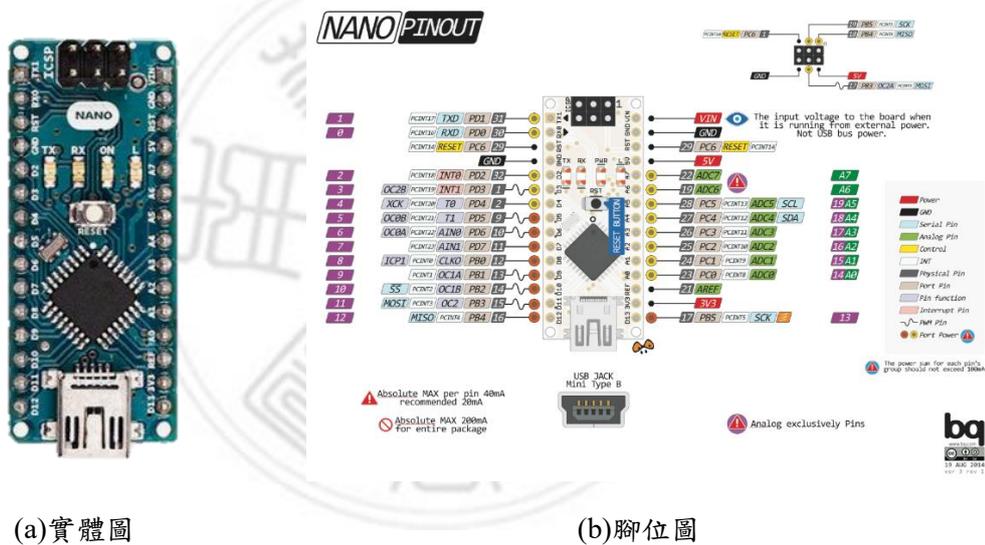
單晶片，全稱單晶片微電腦（Single-chip microcomputer），又稱微控制器（Microcontroller Unit），是把中央處理器、記憶體、定時/計數器（timer/counter）、各種輸入輸出介面等都整合在一塊積體電路晶片上的微型電腦，本系統使用了 Arduino Nano、Esp8266、Esp32-cam，以下將其各自介紹。

3.3.1 Arduino Nano

Arduino 是一個開放原始碼的單晶片微控制器，其包括一塊具備簡單輸入/輸出介面的電路板，並擁有類似於 Java、C 語言的開發環境，可簡單的與各式感測器、電子元件連接。官方根據使用者不同需求陸續設計出多種版本，如：主流版本 Uno、進階版本 Mega、Due 或是

專為設計師打造的 LilyPad.....。

本系統採用的微處理器為 Arduino Nano(如圖 15.a)，在設計上去掉了直流電源介面，採 Mini-B 標準的 USB 介面以連接電腦溝通、供電，相比 Arduino Uno 其介面與功能維持保持不變，控制器同樣採用 ATmega168 或 ATmega328，並且體積更小。工作電壓為直流 5V，可透過 Vin 腳位輸入 7~12V，經內部穩壓電路後使用，或是以 USB 介面來供給 5V 電壓。



(a)實體圖

(b)腳位圖

圖 15、Arduino Nano[16]

Arduino Nano 的接腳圖如圖 15.b，D0 至 D13 為「數位輸出、輸入腳位」，可輸出高電位 5V 或低電位 0V，其中部分腳位的數字旁有「~」，則可以藉由 PWM 的方式，以數位訊號來模擬出類比訊號。另外 D0、D1 分別 TX 與 RX，為 Arduino 的序列埠，同時與 USB 序列埠接口連接，用來與其他的控制器通訊，通常為避免占用序列埠

(Serial)窗口，鮮少再額外連接使用。

A0 至 A5 為「類比輸入腳位」，用來接受類比訊號，解析度為 10 個位元，故可以表示的值為 2^{10} 個，預設介於 0~1023 之間，另外 A4、A5 也可用於連接支援 I²C 協定的設備，其分別代表 SCL(Serial Clock) 與 SDC(Serial Data)，此外，A0 至 A5 也可做為數位輸入、輸出腳位使用。

3.3.2 ESP8266(ESP-01)

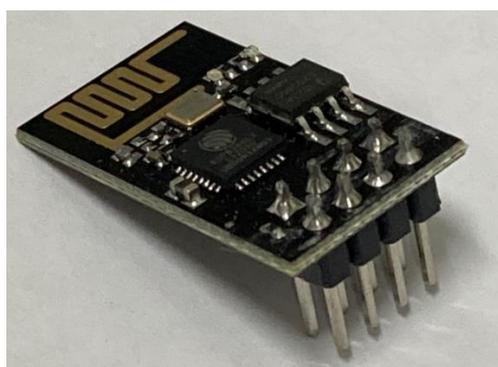
ESP8266 是由樂鑫信息科技生產的 Wi-Fi 晶片，Ai-Thinker 再以此晶片開發出 12 種小型電路板，分別為 ESP-01~12。本系統所選用的型號為 ESP-01(如圖 16.a)，這些電路板擁有 CPU、記憶體、I/O 接口，因此也可將其視為微處理器，支援 C/C++、Python、Lua 等語言。ESP-01 共推出三個版本，除出廠韌體、Flash 不同外，其餘硬體線路相似，程式可以共用，版本差異如表 1。

表 1、ESP-01 版本差異[17]

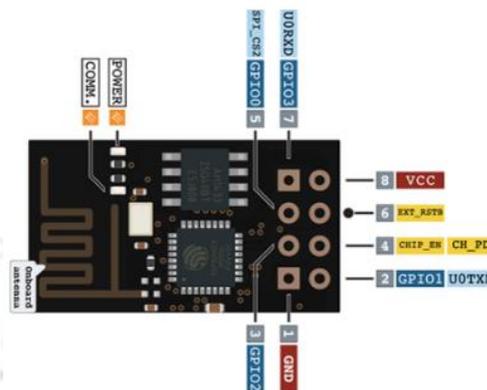
項目	ESP-01 Old	ESP-01 New	ESP-01s
PCB	藍色	黑色	黑色
Flash	512KB	1MB	1MB
Blue LED	on TX	on TX	on GPIO2
Red LED	on Power	on Power	x

ESP-01(new)一共拉出了 8 隻接腳，其詳細腳位如圖 16.b，扣掉

Vcc、Gnd 等必要接腳，僅剩下 GPIO0 與 GPIO2 兩隻接腳可再外接設備使用，在燒錄模式下 GPIO0 需接地，GPIO2 需高電位(預設有上拉電阻)。本模組僅連接 Tx 與 Rx 腳位，利用序列埠(UART)與 Arduino Nano 進行資料溝通。



(a)實體圖



(b)電路圖

圖 16、ESP8266[18]

板子可承受的電壓為 3.0V~3.6V，然而需要特別注意的是，ESP8266 在持續傳送資料的情況下，其耗電量平均可達 70 mA，在使用 Wi-Fi 連線資料傳輸時，甚至可能達到最高 200 mA，對於 3.3 V 腳位僅能提供 50 mA 的 Arduino Nano 明顯無法達成其需求，為此需要使用外部供電來使之正常運作。

3.3.3 ESP32-cam

ESP32 亦為由樂鑫信息科技所生產的晶片，相較於 ESP8266 其效能與儲存空間要更高一階，相關的開發版除了可當 MCU 的從端設備外，也可自己做為主機獨立建構網路，而 ESP32-CAM 是一款基於 ESP32 的低成本開發板，該板集成了 Wi-Fi、傳統藍牙與低功耗藍牙 (BLE)，以及 32 位元雙核 CPU，如圖 17。



圖 17、ESP32-CAM(含 OV2640 鏡頭)[19]

此開發板通常搭配 OV2640 鏡頭，其具有高靈敏度，能夠在低照度下運行，輸出格式支援：Raw RGB、RGB、GRB422、YUV 與 YCbCr，圖像規格支援：UXGA、SXGA、SVGA、SXGA 以及從 SXGA 到 40*30 的任何尺寸，影像自動調控功能包含：自動曝光(AEC)、自動增益 (AGC)、自動白平衡 (AWB)、自動波段濾光器 (ABF) 以及自動黑電平校準 (ABLC)。

在本系統中，ESP32-CAM 將作為獨立主板，負責擷取受測物的影

像，再傳至雲端 Server，因此除供電外，實際上並沒有與培養箱主板控制電路相連接。

3.4 感測器及致動模組簡介

為模擬出細胞生長環境，需要能夠偵測環境變化的感測器以及調整環境的致動模組相互配合才得以建置，以下將對本系統所使用的感測器及致動模組進行介紹。

3.4.1 溫度感測器



圖 18、DS18B20 溫度感測器[20]

本系統所使用的溫度感測器型號為 DS18B20，外觀如同三極管一般，為使用方便，選擇市售將之封裝至不鏽鋼探頭內的樣式(如圖 18.a)，可有效的防潮、防鏽。其用於感測培養箱之艙內溫度以及加熱版溫度，而後將感測到的數據傳入微控制器中，再以內部程式對培養箱以及加熱板作溫度平衡，感測器規格如圖 18.b。

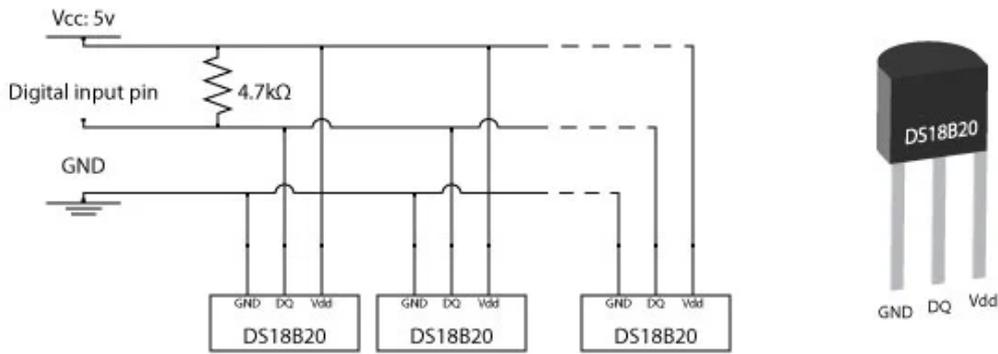


圖 19、DS18B20 接線

DS18B20 的接線方式如圖 19，由於採用 1-Wire 通訊協定，其接線簡單，僅需一條導線配合一個 4.7 歐姆的上拉電阻即可將線路上的設備資料回傳給微處理器，能夠有效地節省微處理器的 I/O 接口。

3.4.2 照度感測器模組

BH1750FVI 為一照度感測器模組(如圖 20.a)，在本系統中負責感測與受試物所接收同等的光照度(單位為勒克斯，英文 lx)，並回傳給為控制主板。



(a)實體圖

適應電壓	3.0 ~ 5.0 V
工作電壓	2.4 ~ 3.6 V
通訊方式	I ² C
照度範圍	0 ~ 65,535 lx
操作溫度	-40 ~ 85 °C
測量偏差	± 20%

(b)規格

圖 20、BH1750FVI 照度感測器[21]

感測器規格如圖 20.b，除此之外還具有以下特性：

(1)內置了 16bitAD 轉換器，將感測照度數據直接以數字方式輸出，省略複雜計算。

(2)不區分環境光源，接近視覺靈敏度的分光特性，換句話說，對光源的依賴性小，能夠在寬廣範圍的照度中，進行 1 勒克斯的高精度判定，不過相對的，也是因為其特性，將無法辨別可見光波段以外的照度(如紅外光輻射)。

3.4.3 步進馬達

步進馬達其原理是藉由不斷切換馬達內部線圈的通電順序，產生不同方向的磁性，使得馬達中的永久磁鐵因對應電流所產生的不同極性而有轉動的結果，因此相較於一般無刷馬達或伺服馬達，精度要來的準確許多。

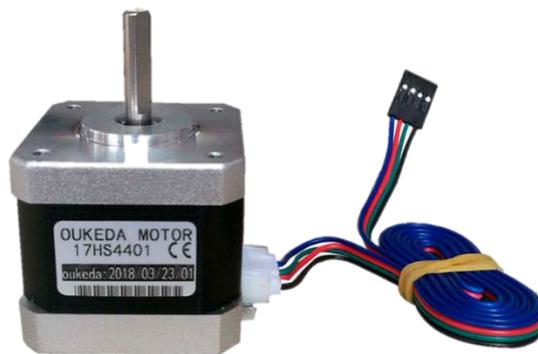


圖 21、2 相 4 線步進馬達[22]

本系統所選用的步進馬達為 42 型、2 相 4 線、型號 17HS4401，如圖 21，屬於雙極性馬達，相較於單極性馬達(如 2 相 6 線)有著更高力矩，保持轉矩可達 450 N.m，步矩角為 1.8° ，代表需執行 200 步(360° 除以 1.8° /步)才可旋轉一圈。

3.4.4 馬達控制器

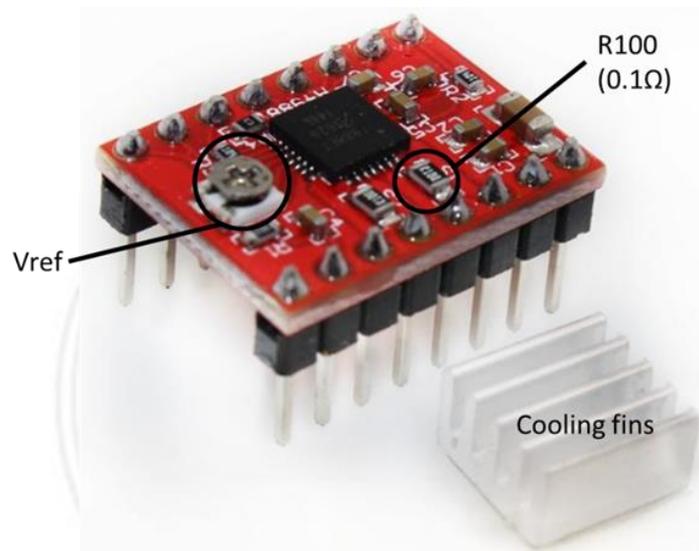


圖 22、A4988 控制器[23]

A4988 是一款常見的步進馬達控制器(如圖 22)，最細可將馬達微步劃分至 1/16，可接受外部電壓最高達 35V，電流最高為 $\pm 2A$ ，特點為操作簡單，只須對其輸入正逆旋轉方向、脈波以及設定輸出的步矩就可對馬達進行控制，接法如圖 23，各腳位說明如下。

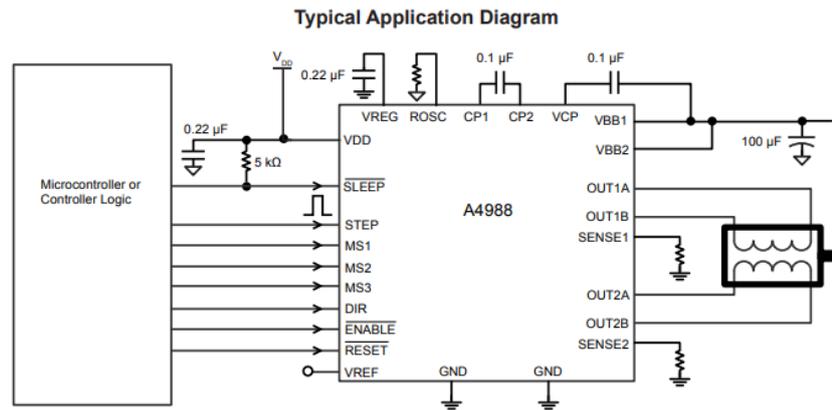


圖 23、A4988 接線圖[24]

VMOT：馬達電源正極，允許輸入 8~35V

GND：接地

2B、2A：馬達第二相控制引線

1A、1B：馬達第一相控制引線

VDD：邏輯電源正極，3V~5.5V

ENABLE：使能腳位，低電平時才可運作。懸空時默認為低電平

M1、M2、M3：微步控制腳位，透過不同邏輯電平組合，如表 2，可

調整控制器為 5 種步進模式

表 2、A4988 微步設定

MS1	MS2	MS3	步進結果
L	L	L	全步進
H	L	L	半步進
L	H	L	1/4 步進
H	H	L	1/8 步進
H	H	H	1/16 步進

RESET：重設腳位，在低電平時觸發，此時控制器將重設。懸空時默

認為高電平。

SLEEP：休眠腳位，在低電平時觸發，若無需使用此功能，可與 RESET 對接懸空，此舉將不會使控制器進入休眠，而使之持續運作。

STEP：步進腳位，透過由其他 MCU 發送過來的脈衝訊號，根據微步控制引腳來控制馬達。

DIR：方向腳位，在低電平時，馬達順時針旋轉，反之在高電平時，馬達逆時針旋轉。

A4988 電流上限設定

A4988 上有一電位器旋鈕，可以調整參考電壓(V_{ref})，此電壓將直接影響流經馬達的電流大小，量測方法為使用三用電表，正極置於 V_{ref} ，負極置於 GND 腳位。

電流換算公式：

$$I_{TripMAX} = V_{ref} / (8 * R_{cs})$$

市面上的 A4988 的參考電阻(R_{cs})有 3 種規格，分別是 R050(0.05 Ω)、R100(0.1 Ω)、R200(0.2 Ω)，可自行查看板子上的 SMD 電阻代碼。本系統所使用的 A4988 其參考電阻為 0.1 Ω 。

由於本系統是由一個 A4988 同時控制兩顆步進馬達，電流將會從同條導線分流至兩顆馬達中，為避免流經控制器的電流過高，造成控制板溫度散熱不及導致損壞，在能驅動馬達且不失步的前提下，最終將電流上限定為 1.3A，套入上述公式後，可得 V_{ref} 應設為 1.04V。

3.4.5 LCD 模組

本系統採用 20*4 的綠底黑字液晶模組 2004A-5V，搭配 I²C 轉接板(如圖 24)，作為顯示培養箱資訊之用。LCD 本身一共具有 16 個腳位，包含 Vcc、Gnd、Enable、讀/寫、資料...等，與轉接板連接後，可將這些腳位轉換成 I²C 介面的 4 個腳位，使得 Arduino 可透過簡單的 I²C 介面去控制 LCD。另外，顯示畫面容易受當下提供的電源影響，因此轉接板也將 LCD 背光電路的限流電阻以電位器外接出來，供使用者隨時做調整。

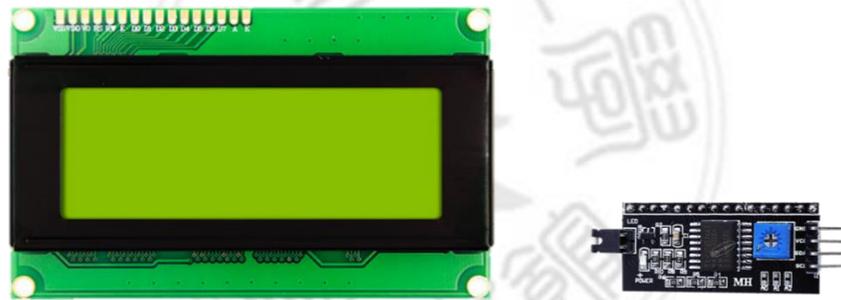


圖 24、20*4 LCD 模組(搭配轉接板)

3.4.6 LED 光板

本系統使用的光板是由立*照明有限公司協助客製，整體長 290 mm、寬 250 mm，散熱鋁板厚度 5 mm，如圖 25，每片光板的供電電壓皆是使用 DC 12V，根據波長可分為三片，分別為 530 nm 的綠光、620 nm 的紅光以及 830 nm 近紅外光，表 3 為廠商提供光板的實際照射波長區段(可見光由積分球量測，近紅外光波長圖為 LED 晶粒廠提

供)。

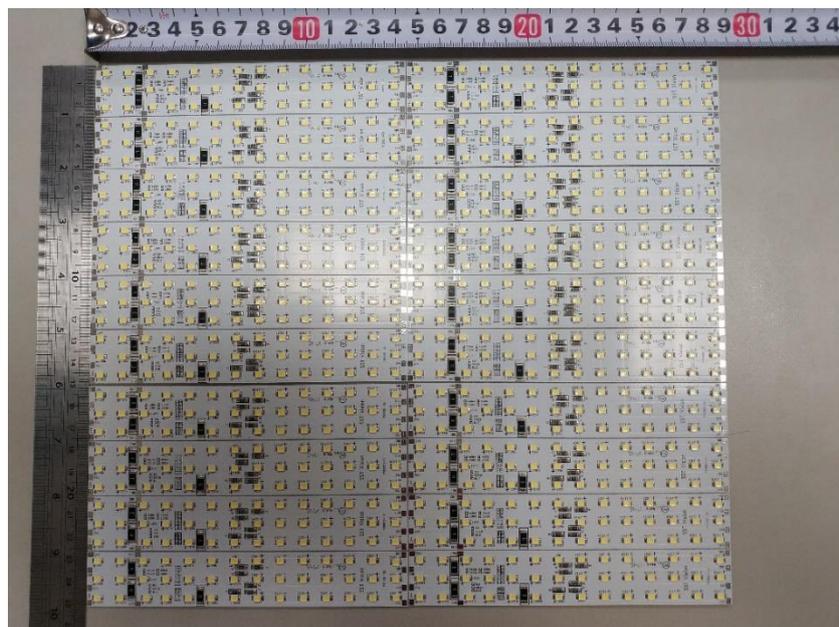
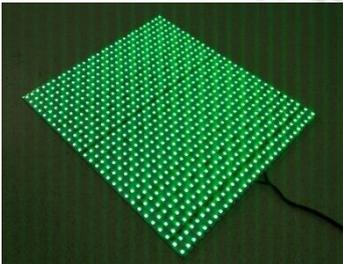
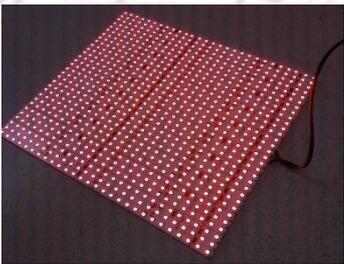
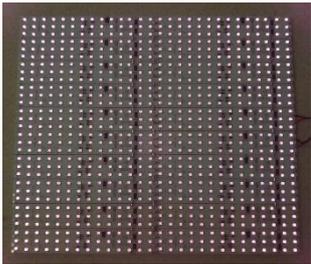
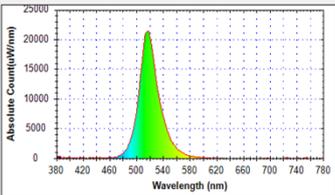
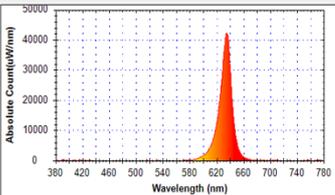
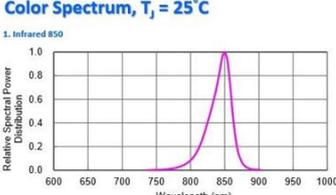


圖 25、可替換 LED 光板

表 3、光板之波長區段

	Green LED	Red LED	Infrared LED
預估 波長	530 nm	620 nm	830 nm
實際 畫面			
實測 波長 範圍	 470~600 nm	 570~675 nm	 775~883 nm

3.4.7 加熱裝置

本系統使用的加熱裝置(如圖 26)，是將金*俊科技公司開發的撓性加熱片，黏貼於鐵片一面，另一面則塗有遠紅外線塗料，由於平台是以透明壓克力板建置，具有 90% 以上的高度透光率，在加熱的同時，塗料所發散的遠紅外線可穿透壓克力板讓受試物吸收，另外為避免加熱板直接與壓克力板接觸，加熱片與平台間有著隔熱墊作為隔離。

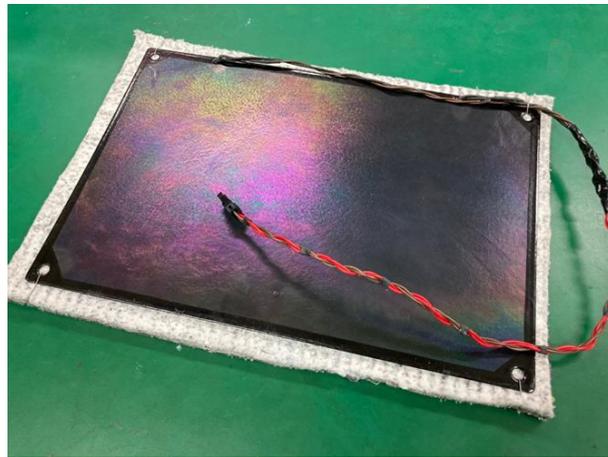


圖 26、加熱裝置

本系統選購的撓性加熱片(圖 27)，沒有分極性，一共黏貼兩片，線路採並聯方式連接，其共測得並聯電阻為 $1.9\ \Omega$ ，以 DC 12V 供電，流經兩片加熱片的電流大約共 6.3A，加熱器運作期間，發熱功率約莫落在 75 W。

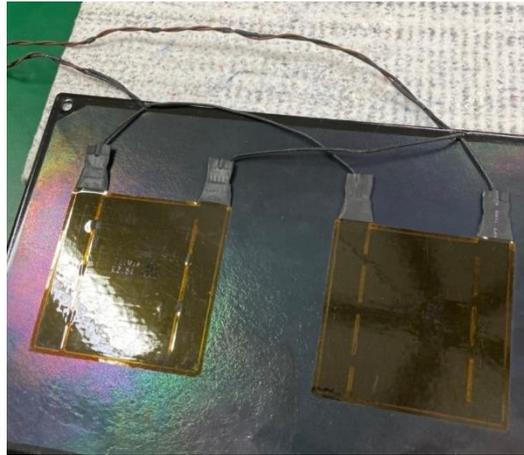


圖 27、黏貼於鐵板上的撓性加熱片

3.5 軟體開發、架設環境

3.5.1 Arduino Software IDE

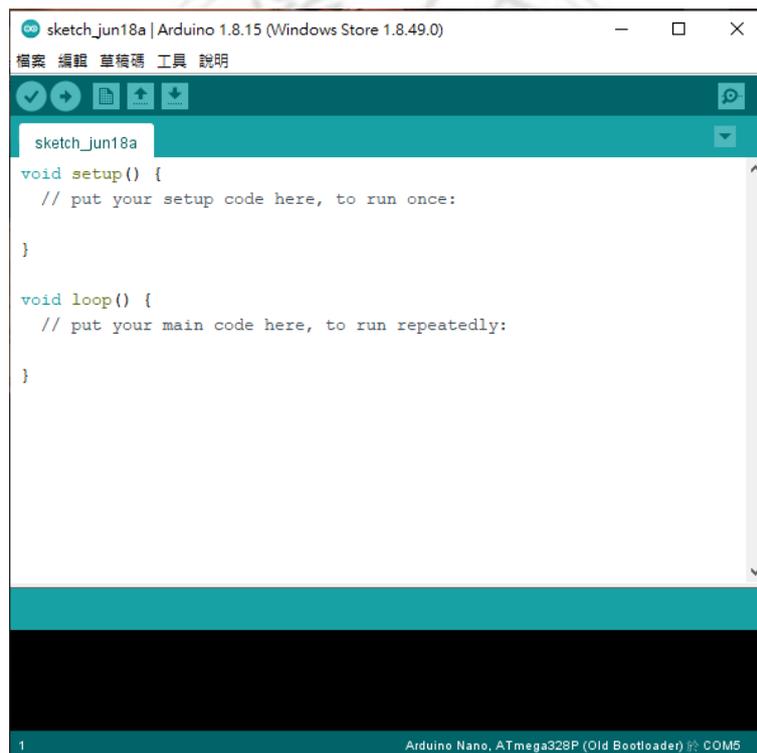


圖 28、Arduino IDE 介面

Arduino IDE(Integrated Development Environment)是一款跨平台的應用程式，如圖 28，其源自於 Processing 程式語言以及 Wiring 計劃的整合開發環境，用於編寫和上傳程式到 Arduino 開發版，

Processing 的程式語言相仿 C 或 C++，可藉由新增第三方開發版管理員來支援其他供應商的開發版。

在本系統中的 Arduino、Esp 系列開發版皆由此軟體進行編程，但由於後者對此軟體而言屬第三方開發版，需要再從設定裡外步引入相關網址來加以安裝，如圖 29。



圖 29、新增 ESP8266 & ESP32 的開發版管理員

3.5.2 MQTT broker

為實現無線傳輸 MQTT，設備彼此間的通訊皆需要由稱之為代理人(Broker)的 Sever 協助溝通，使用者可自行使用如 Mosquitto 的開放原始碼，自行架設在一般 PC 或是如樹梅派的微型電腦裡。

本系統選用專為 IoT 開發者打造的公共伺服器(MQTT Public Brokers) Dioty 進行測試安裝，支援連接埠號有 1883 (MQTT)、8883(MQTT+SSL)、8080(WebSockets)、8880(WebSockets+SSL)，其他同樣屬於公共伺服器的還有如 flux、flespi.....。

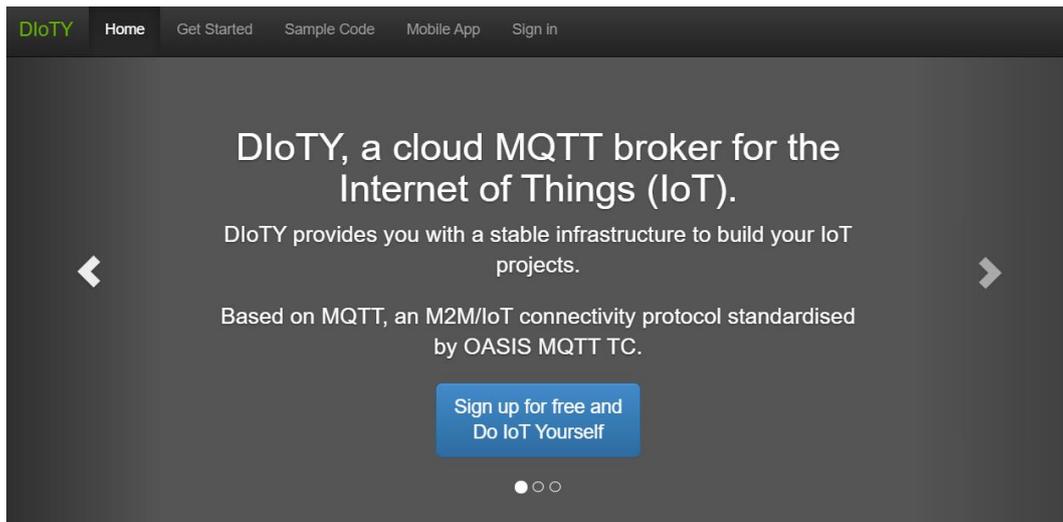


圖 30、DIoTY 首頁

進入首頁(圖 30)後，首先要進行註冊，以 Google 帳號登入。

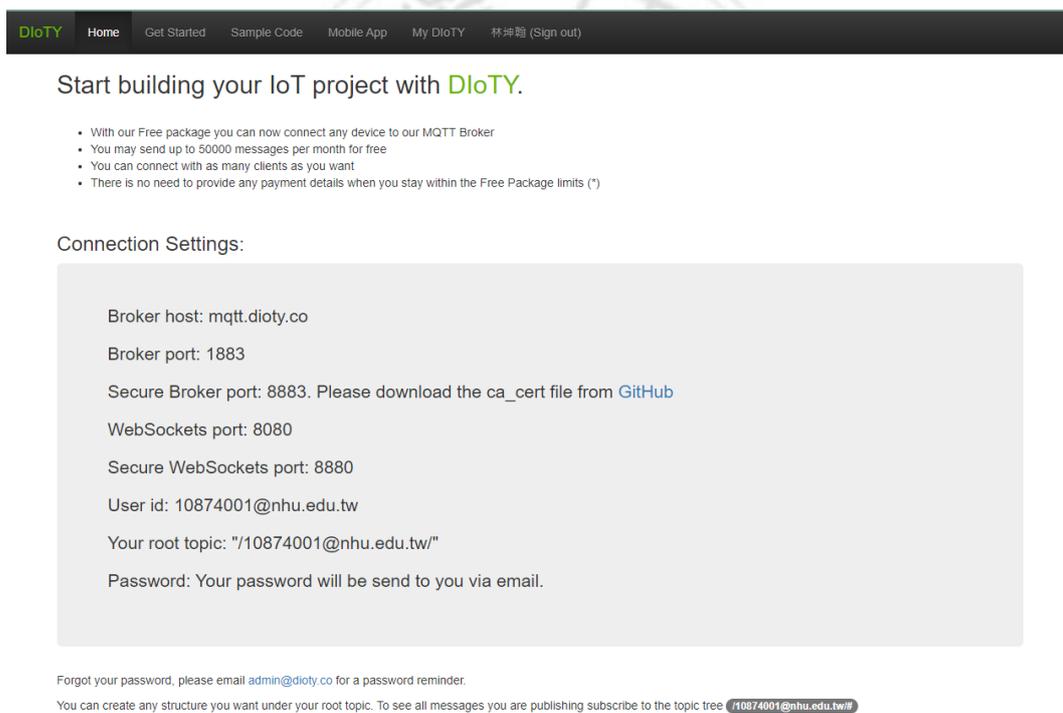


圖 31、DIoTY 登入後畫面

登入後(圖 31)即會顯示可使用的埠口，以及 MQTT topic 名稱，搭配此 Topic 的密碼則會寄信至登入的 Google 信箱中，待收信確認密碼後便可開始使用此公共 Broker。

3.6 MQTT 行動裝置設定

MQTT 因其輕量化且易於操作的特性，可以用不同程式語言或者在不同平台上將其實現，如 MCU、Facebook Messenger、Microsoft Azure 等等，用於測試的軟體與環境也不在少數，如 Google Chrome 的擴充程式(MQTT Lens)，在 Android 這類開放原始碼的行動作業系統上更是不可勝數。

本系統選擇了在 Android 平台上的 MQTT Dash 作為系統的遠端遙控 APP，其由一位名為 Routix software 的開發者建立，如圖 32，此 APP 除了可以接收文本訊息之外，亦內建將二進制檔轉為圖像檔的功能設定。

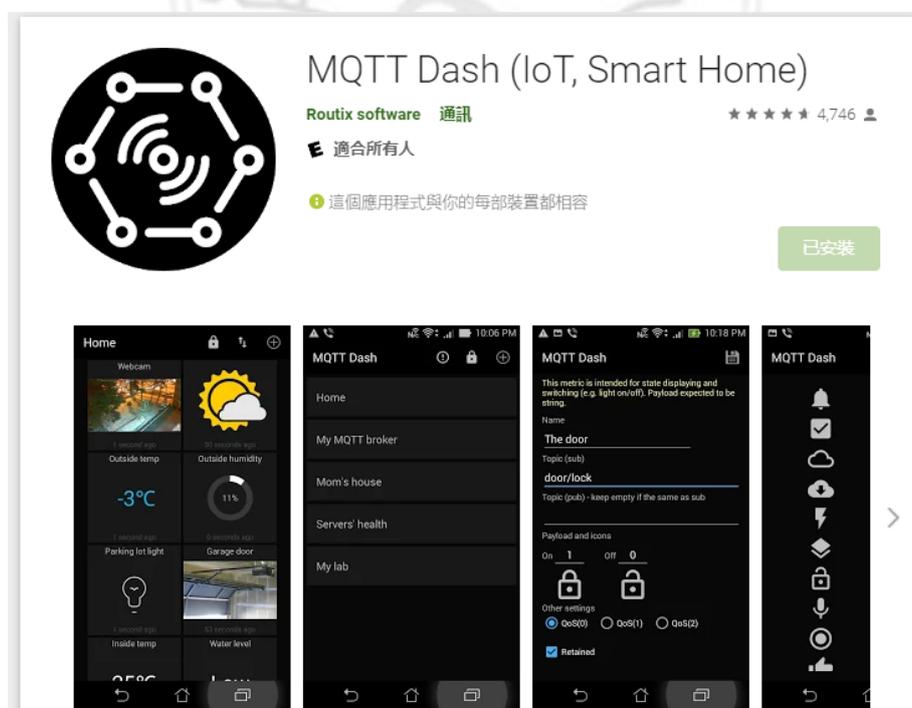
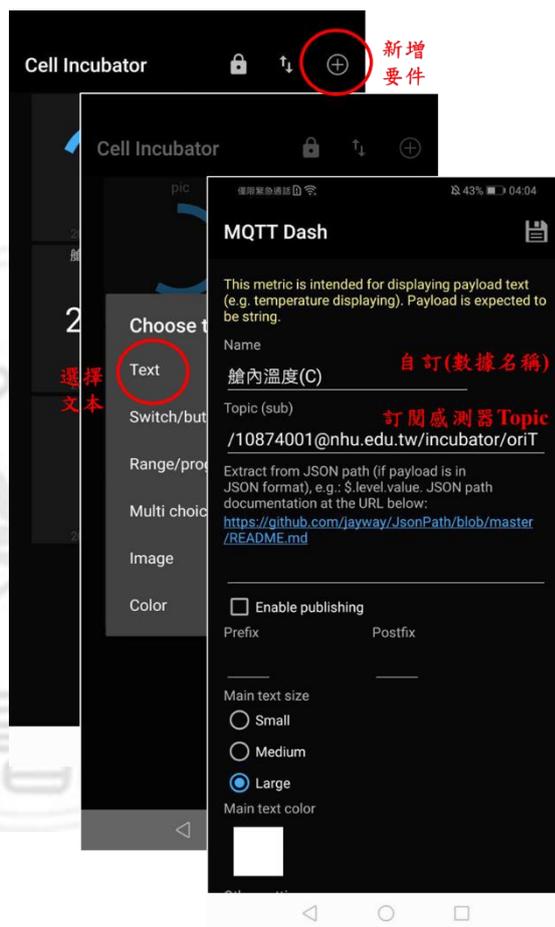


圖 32、行動裝置安裝 MQTT 之 APP

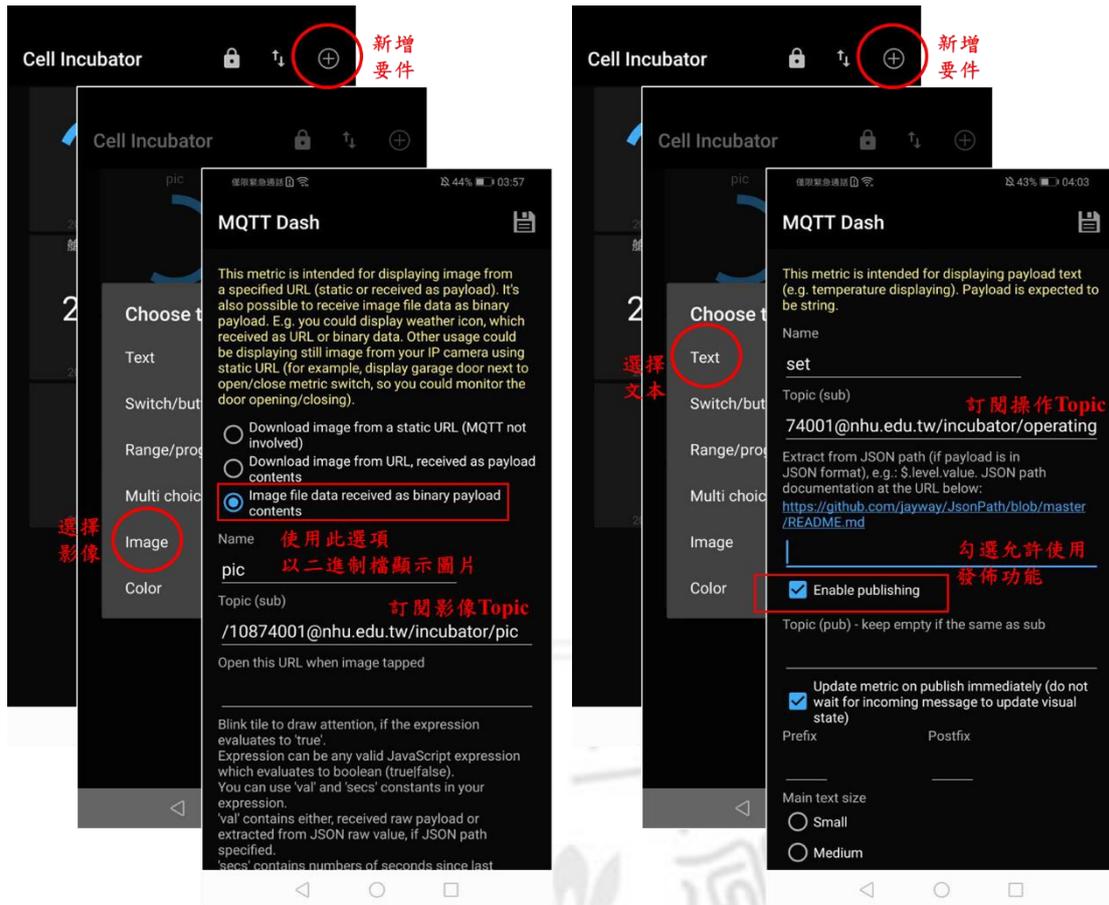
下載安裝完 APP 後，首先需建立與 MQTT Broker 的連接(圖 33.a)，接著設定欲訂閱之 Topic，包含感測器數據(圖 33.b)、影像二進制檔(圖 33.c)，以及發佈之 Topic(圖 33.d)，至此即完成了行動裝置的遠端控制器設定。



(a)新增裝置



(b)感測器數據接收



(c) 影像接收

(d) 送出命令

圖 33、MQTT Dash 設定方式

第四章 系統整合

4.1 系統架構

本裝置的系統架構如圖 34，實體圖如圖 35，其核心主要由控制主板以及培養箱兩部分來維持系統整體運作(詳見 3.6 章節)，若額外以數據線(UART)將主板與 PC 連接，則可以使用視窗程式對培養箱進行更有效率地控制。遠端溝通則是由行動裝置的 APP、Broker 與主板的 Wi-Fi 模組三者相互配合才得以實現(架構圖之虛線部分)，對 APP 而言，其收到的資訊主要來自於主板所感測的數據，傳送的資料則是對培養箱的調整命令，對主板而言則反之。此外，ESP32-CAM 在本系統中可視為獨立主板，主要負責擷取培養箱內之畫面，同樣透過 MQTT 協定來完成與控制主板的資料(圖像)交換。

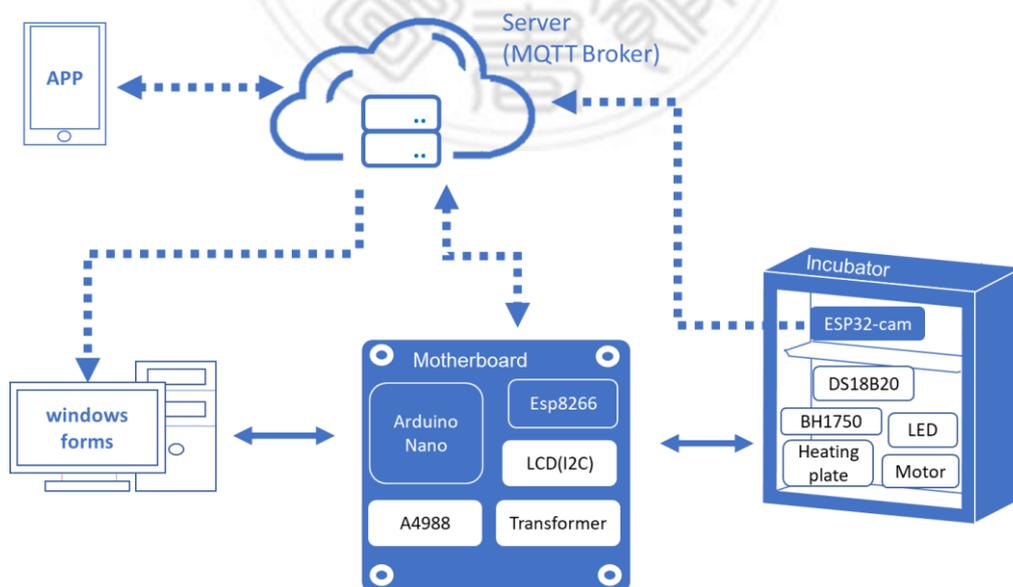


圖 34、系統架構圖

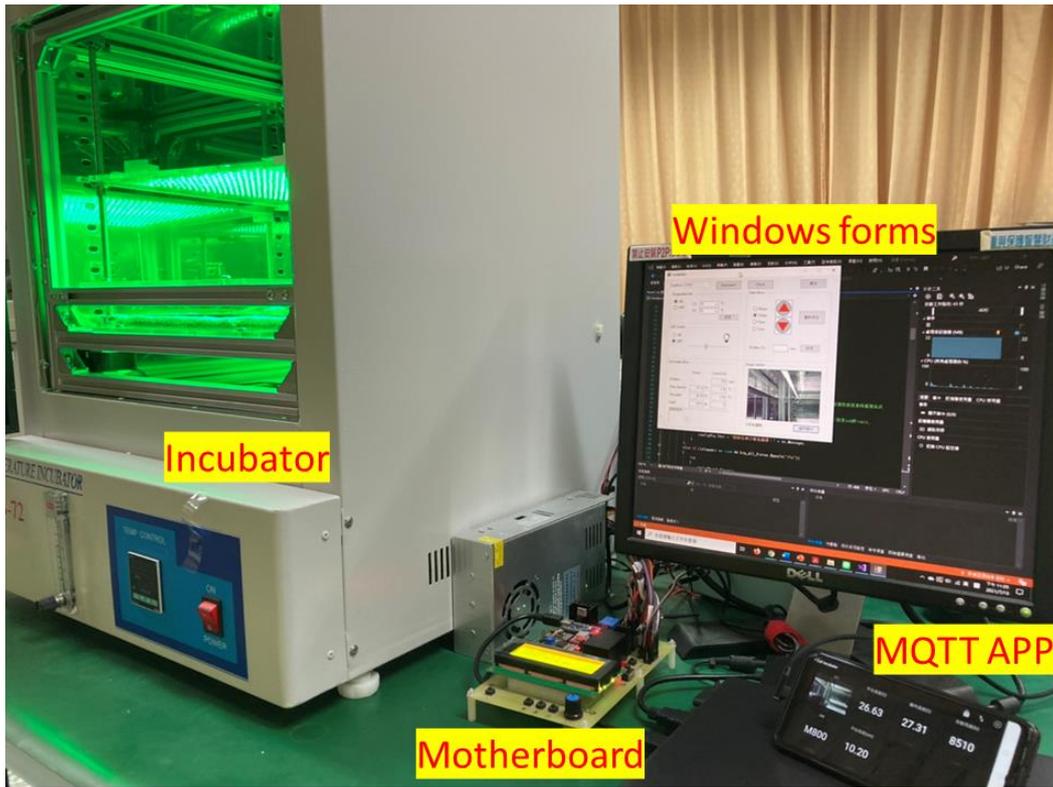


圖 35、裝置實體圖

4.2 主電路板硬體整合說明

本系統控制主板模擬接腳圖如圖 36 所示，由此圖可以清楚看出微處理器與各感測器與致動模組連接情形。

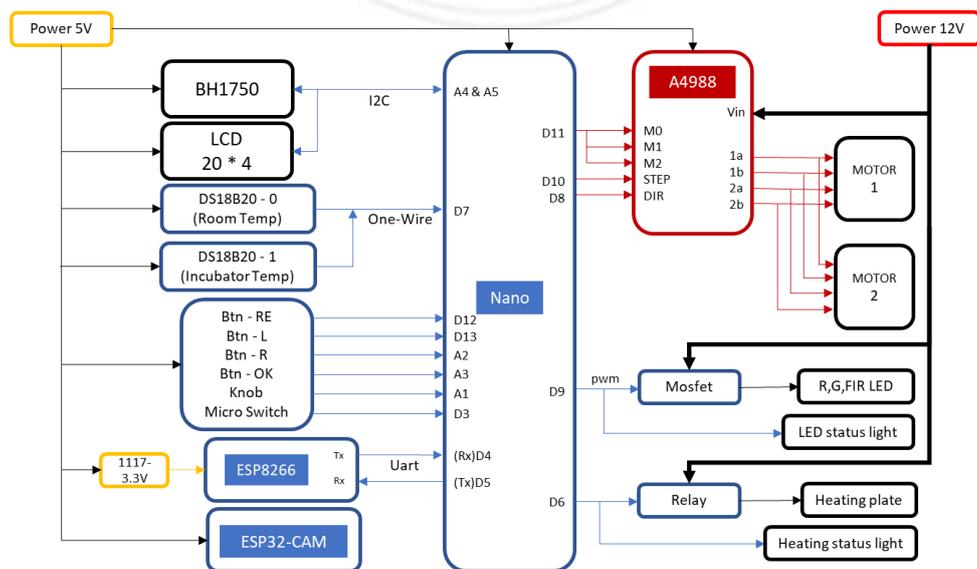


圖 36、Arduino Nano 模擬接腳圖

在完成連接與測試後，接著以 Altium 設計電路(圖 37.a)，最後再用雕刻機將電路刻於 PCB 雙面板上，最終完成如圖 37.b，上層主要規劃微處理器、各類模組的安裝母座，操作介面以及由微處理器、馬達控制器拉出的 I/O 接口，下層則是大部分的電路走線以及各式電子元件，包含電阻、電容、電晶體與降壓 IC 等等，以下將針對主板規劃的 6 個區域進行簡單說明：

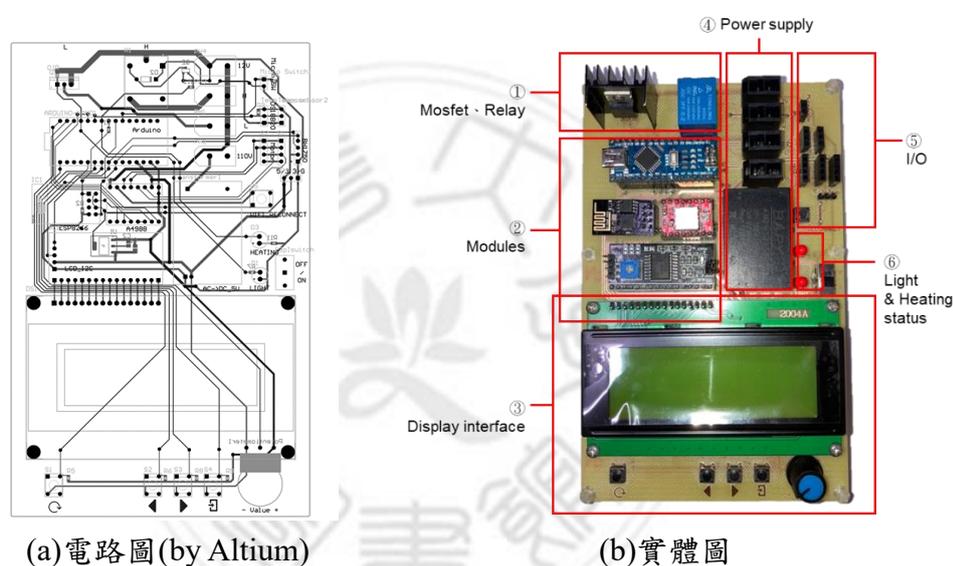


圖 37、系統控制主板

(1)區：MOSFET(左)與 Relay(右)其功能為開關，MOSFET 負責光板，Relay 負責加熱板，兩者皆是由微處理器接收信號後再對負責的裝置做控制，不同之處在於，MOSFET[25]可根據輸入的訊號電壓(或電流)大小轉變成較大的電壓或電流輸出(如圖 38)，因此光板的照度可隨微處理器的類比訊號(PWM)進行微調。Relay[26]是利用小電流將線圈通電，電磁鐵在產生電磁後會將內部簧片向下吸附從而使常開端(NP)與

公共端變成通路(如圖 39)，另 Relay 是藉控制實體線路來連接電路，能夠有效避免過多電能轉換成熱能散逸，因此較適用於大電流的加熱裝置。

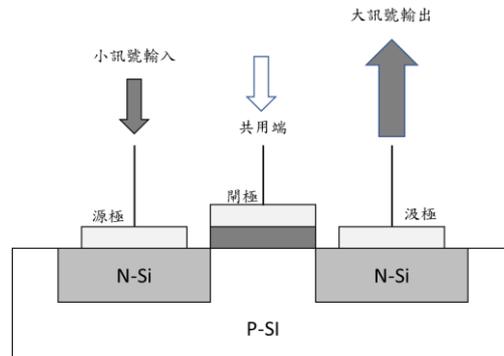


圖 38、MOSFET 運作原理

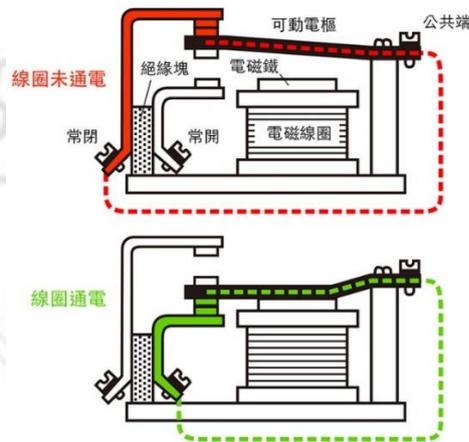


圖 39、繼電器運作原理

(2)區：各類模組，包含微處理器(Arduino Nano)、Wi-Fi 模組(ESP8266)、馬達控制器(A4988)、LCD 顯示與 I²C 介面端口，其針腳多為 2.54 mm，可直接插入主板之杜邦母座，利於安裝與後續維護。

(3)區：實體端顯示介面，依靠配合板子上的按鈕來切換選單，目前功能分為 Position(平台位置)、Temperature(溫度控制)、Light Board(照度

控制)三頁，每頁除即時顯示相關感測器回傳資料外，也可配合板子上的按鈕進行參數設定。

(4)區：較大的電壓 I/O 端口，每個端口的右側皆有標示，由上到下分別為，12V 直流電源輸入，12V 加熱器直流輸出、12V 光板直流輸出、110V/220V 交流輸入，而其中交流電與其他線路完全隔離，僅供下方的 AC/DC 變壓器使用，透過變壓將其轉換為穩定的 5V 直流以供整塊主板使用。

(5)區：由微處理器或控制器接出的 I/O 端口，杜邦母座負責連接各式感測器或步進馬達，杜邦公頭則將 5V、3.3V 與 GND 外接出來，其主要功能為供電給艙內的攝影機模組(Esp32-cam)作使用。

(6)區：負責顯示光板與加熱板目前是否為開啟狀態，由微處理器輸出訊號至 MOSFET 與 Relay 的線路並聯拉出，光板的 LED 狀態燈會隨類比訊號發光，而加熱板 LED 狀態燈則只有明、暗兩種狀態。

4.3 培養箱整合說明

培養箱的內部由數個感測器以及致動模組所組成，感測器包含溫度、照度以及重新定位平台的微控開關，致動模組則包含 LED 光板、控制溫度的加熱板以及調整平台高度的步進馬達，其內部實體如圖 40 所示。



圖 40、培養箱內部實體圖

照度感測器

由於置放受試物之平台，其感測到的照度在不同的位置會有不同結果(參 5.2 章節)，因此為了讓使用者方便量測該點的照度，並無固定在某一點，而是於背後黏貼膠布，待量測後即可將之卸下或移至周圍，如圖 41 所示。

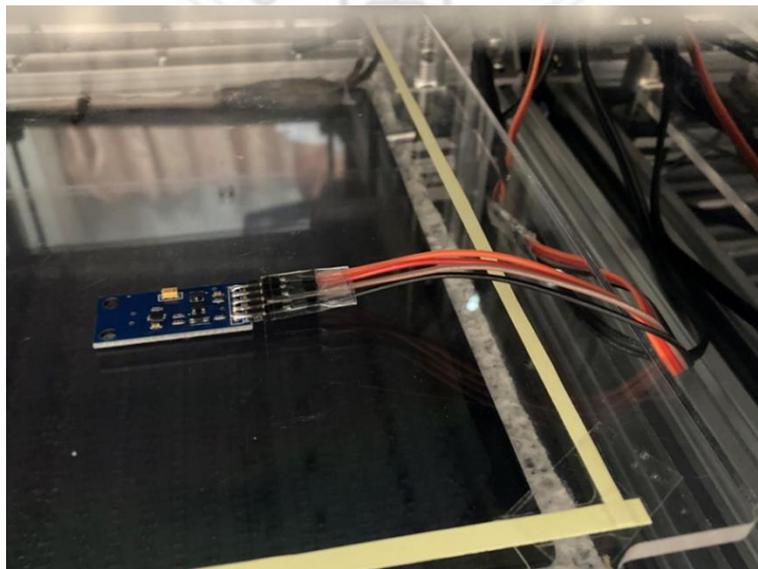


圖 41、BH1750FVI 使用方式

溫度感測器

本裝置一共使用 2 個溫度感測器，其一置放於加熱板與隔熱墊之中間位置，另一個則是將之嵌入鋁擠的凹槽內，感測器頂端距離加熱板 100 mm 處。

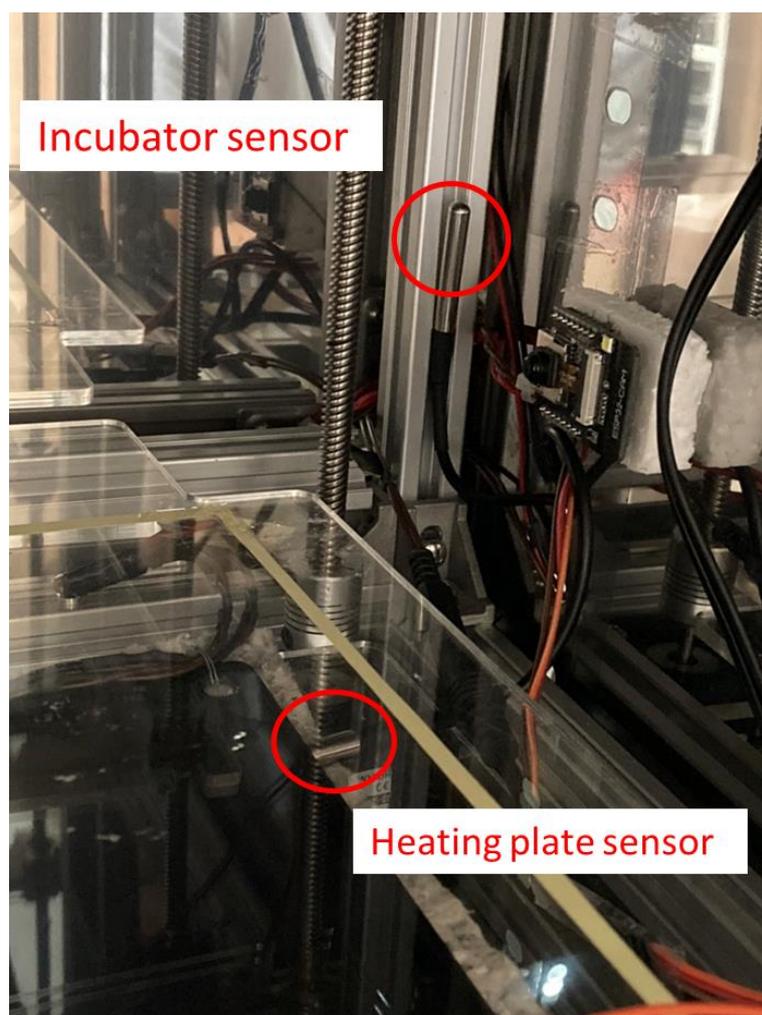


圖 42、DS18B20 安裝位置

LED 光板的安裝則是直接置放於透明壓克力板上，且為避免其滑動額外設計出類似於卡榫的物件，並以 3D 列印出來，如圖 43。另外 LED 的正負極以電源接頭 5.5 * 2.1 接出，接頭的另一端則與電路

板連接，如圖 44，如此一來使用者便可透過拔插此接頭來自行更換所需 LED 光板。

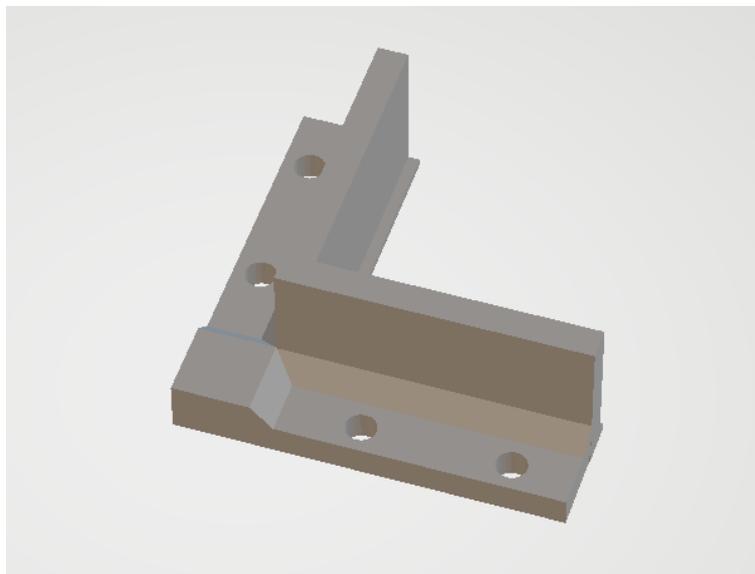


圖 43、防滑動卡榫模型

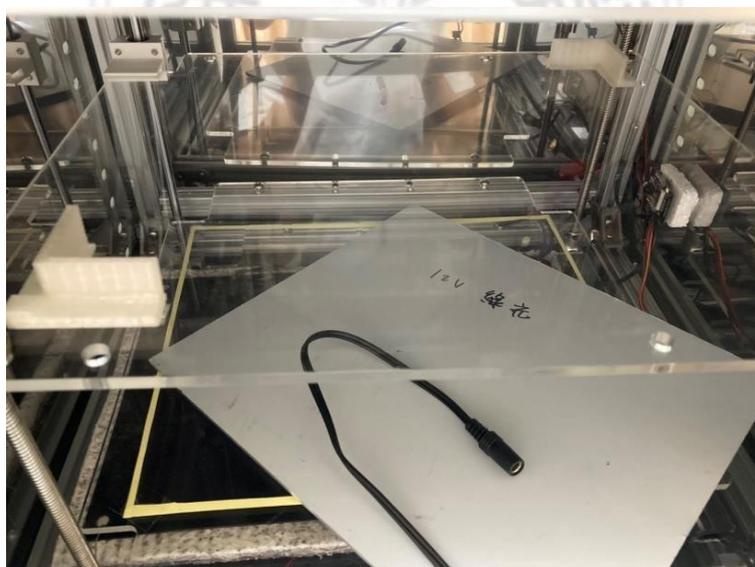


圖 44、LED 光板接頭 & 放置平台

微動開關

微動開關為用於重新定位平台頂點座標之元件，本裝置將之安裝於開關底部距離受試物平台 200 mm 之處(圖 45)，需要特別注意的是此微動開關的鍵程為 4 mm，也就是說，在重新定位時，光板平台持續向上移動直到按壓開關的瞬間，此時會距離受試物平台 204 mm，並非程式所設定的頂點 200 mm，因此在定義內部程式的頂點位置時，需要將微動開關的鍵程考慮進去。

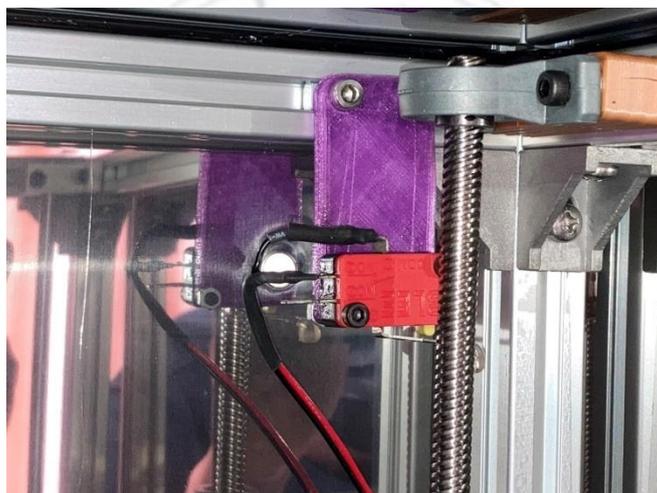


圖 45、微動開關安裝位置

其他電子元件安裝

步進馬達安裝於裝置的對角兩側，如圖 46，ESP32-CAM 則暫時安插於保麗龍內，並黏貼於艙體右側、受試物平台之上的位置，以利於影像擷取，如圖 47。

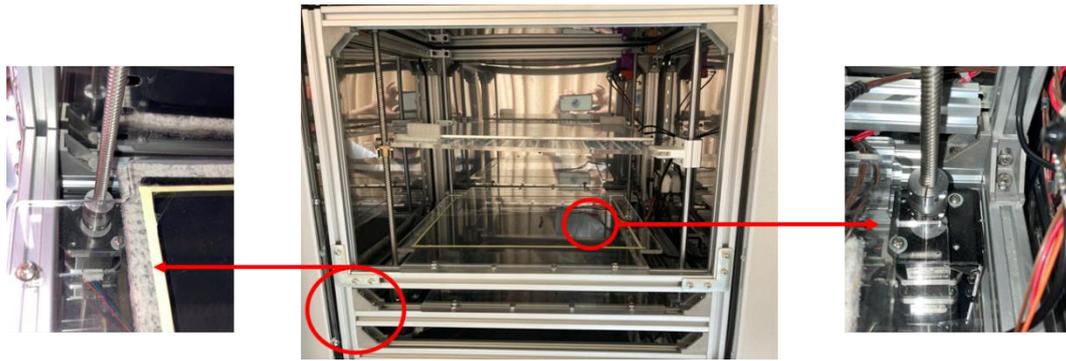


圖 46、步進馬達安裝位置



圖 47、ESP32-CAM 安裝位置

4.4 裝置軟體程式說明

4.4.1 程式設計流程—Arduino Nano

本系統雖然有三個微控制器，但控制主板的核心理念主要為 Arduino Nano，由其負責各種數據的資料處理以及致動模組的運作。以下可大致將主板的動作分作三類，分別為(A)主端實體控制、(B)遠端、PC 實體控制、(C)輸出感測器資訊。

一開始開機後即對各個模組進行初始化設定，接著會進入 A 流程(圖 48)，在此流程中，主板會根據目前停留的暫存頁面去對應顯示

相關資訊，而若使用者點選了主板上的調控按鈕，則可進入設定頁面，在光平台的設定頁面中，可指定其到達指定位置，在移動完成前會停止所有動作，如接收由 Wi-Fi 模組傳回的動作指令；在溫度的設定頁面中，可以更新系統中欲維持的溫度；在燈光的設定頁面中，可以對光板調 1~10 的亮度等級。

使用者若無使用調整按鈕，或者系統參數已調整完畢，至此 A 流程結束。



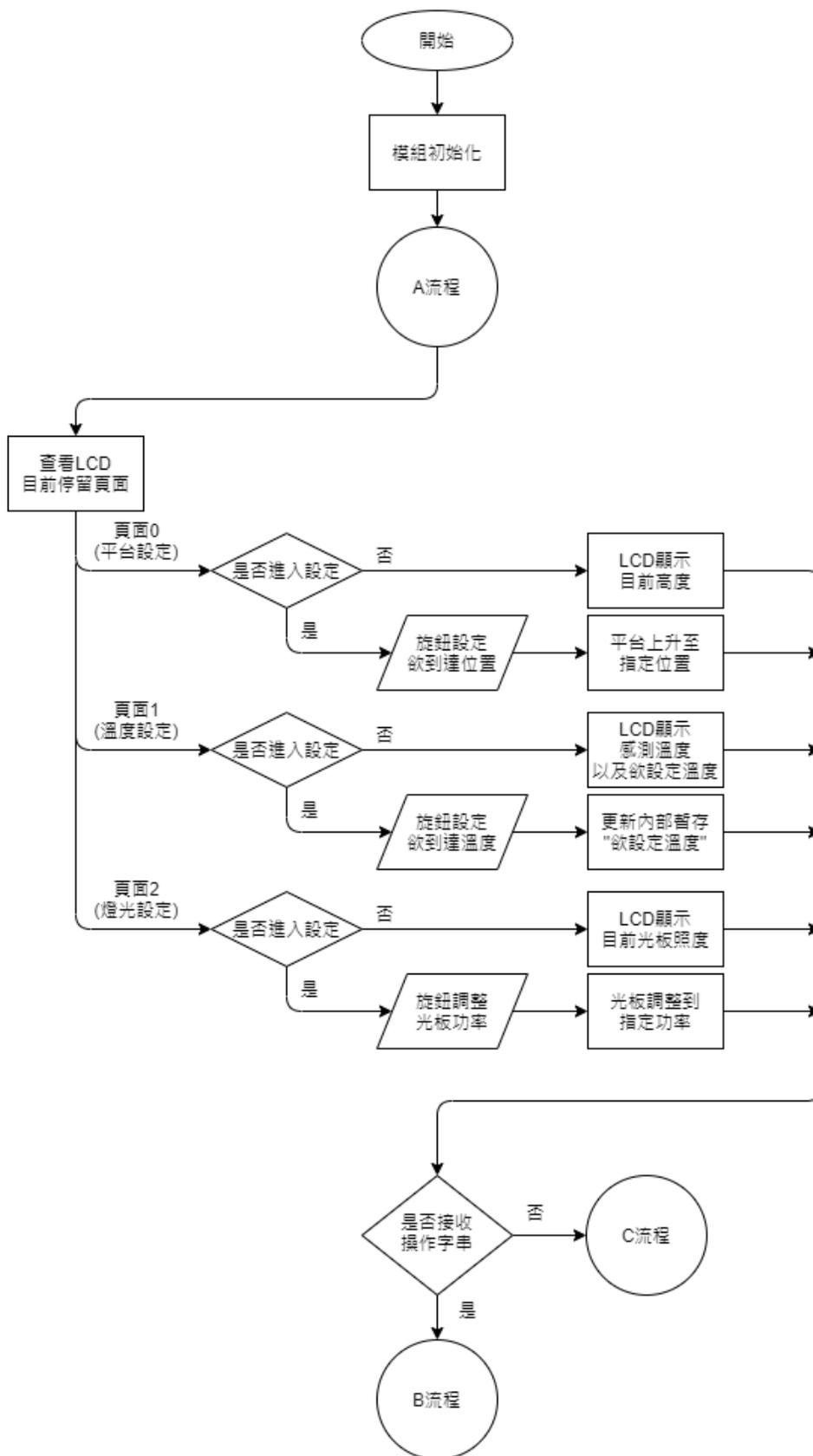


圖 48、主板流程圖- (A)主端實體控制

接著判斷有無由 PC 端傳來的指令或是 Wi-Fi 模組遠端接收來的指令，來決定是否進入 B 流程(圖 49)，此流程主要為環境參數設定，在接收完資料後即進行字串處理，並根據得到的字符組合進入相關函式如下說明：

A：使光板平台重新定位。

M+脈衝：使光板平台上升指定距離 (1 mm/400 步)，例 M400。

N+脈衝：使光板平台下降指定距離 (1 mm/400 步)，例 N1600。

S+位置：使光板移動到指定位置(0~200)，單位 mm，例 S5、S108。

T+溫度：更新加熱裝置欲維持溫度，例 T60。

C+溫度：更新培養箱內欲維持溫度，例 C30。

L+級距：調整光板功率，一共分為 10 級，例 L5、L0(關閉)。

待調整完成後，B 流程即結束並進入 C 流程。

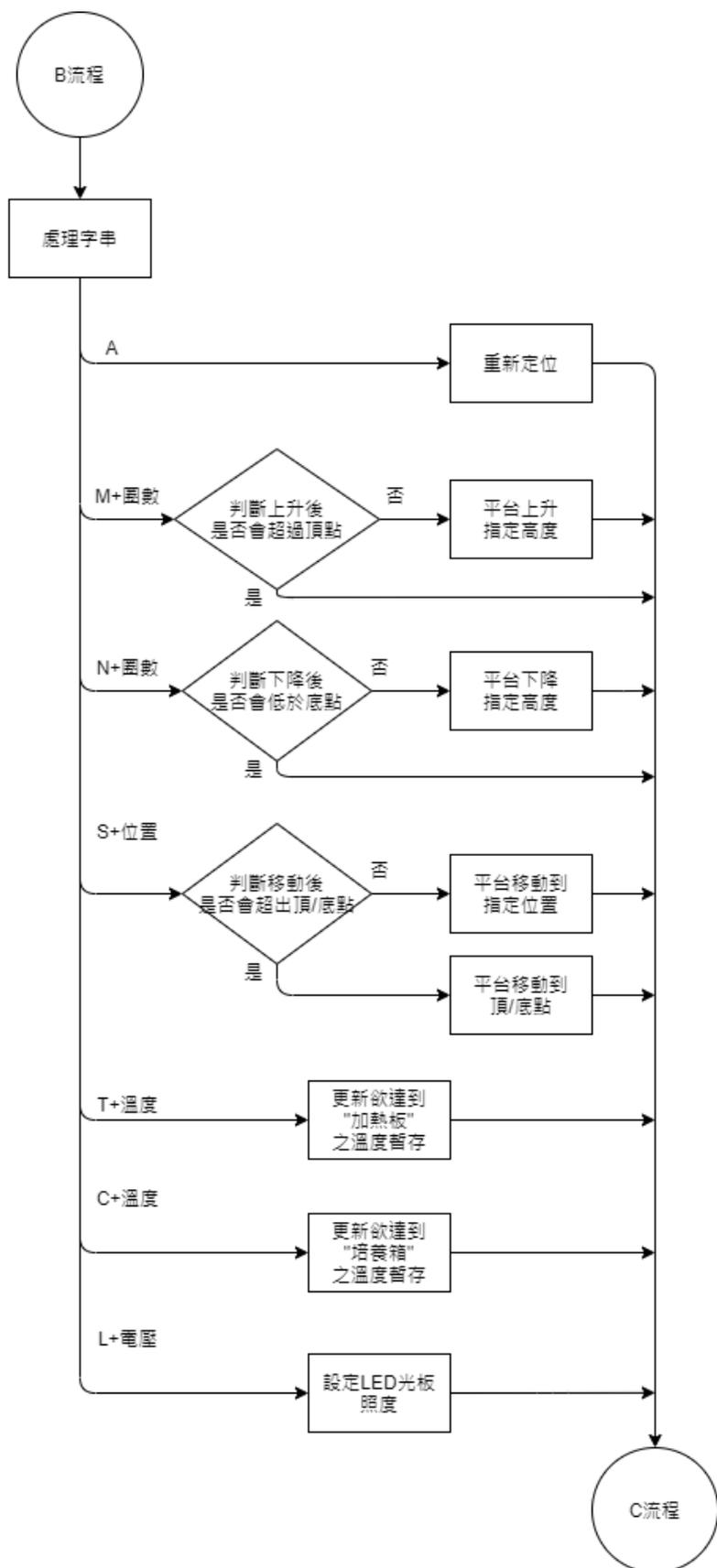


圖 49、主板流程圖-(B)遠端、PC 實體控制

在 C 流程(圖 50)裡，其主要負責回傳感測器所測得數值，並將其封包後分別傳入 Wi-Fi 模組(表 4)及 PC 端的視窗介面(表 5)。此外，在本流程也會進行培養箱其內部的溫度平衡，透過比較感測器回傳溫度與使用者設定欲達到的溫度，來選擇是否開啟加熱器。至此 C 流程結束並重新回到 A 流程。

表 4、ESP8266 接收封包

Esp8266 (Wi-Fi)	起始位元	平台高度	艙內溫度	加熱板溫度	光板照度	結尾字元
類別	@	,Float	,Float	,Float	,Long	;
範例	@	,10.5	,25.7	,50.12	,3711	;
值	@	0~20.0	小於 35	小於 60	0~65,535	;

表 5、Serial(PC)接收封包

Serial (PC)	平台高度	艙內溫度	加熱板溫度	光板照度	艙內溫度 (欲設)	加熱溫度 (欲設)	光板功率 (欲設)
類別	皆為 String						
範例	10.5	,25.7	,50.12	,3711	30	50	10
值	0~20.0	小於 35	小於 60	0~65,535	25~35	40~60	0~10

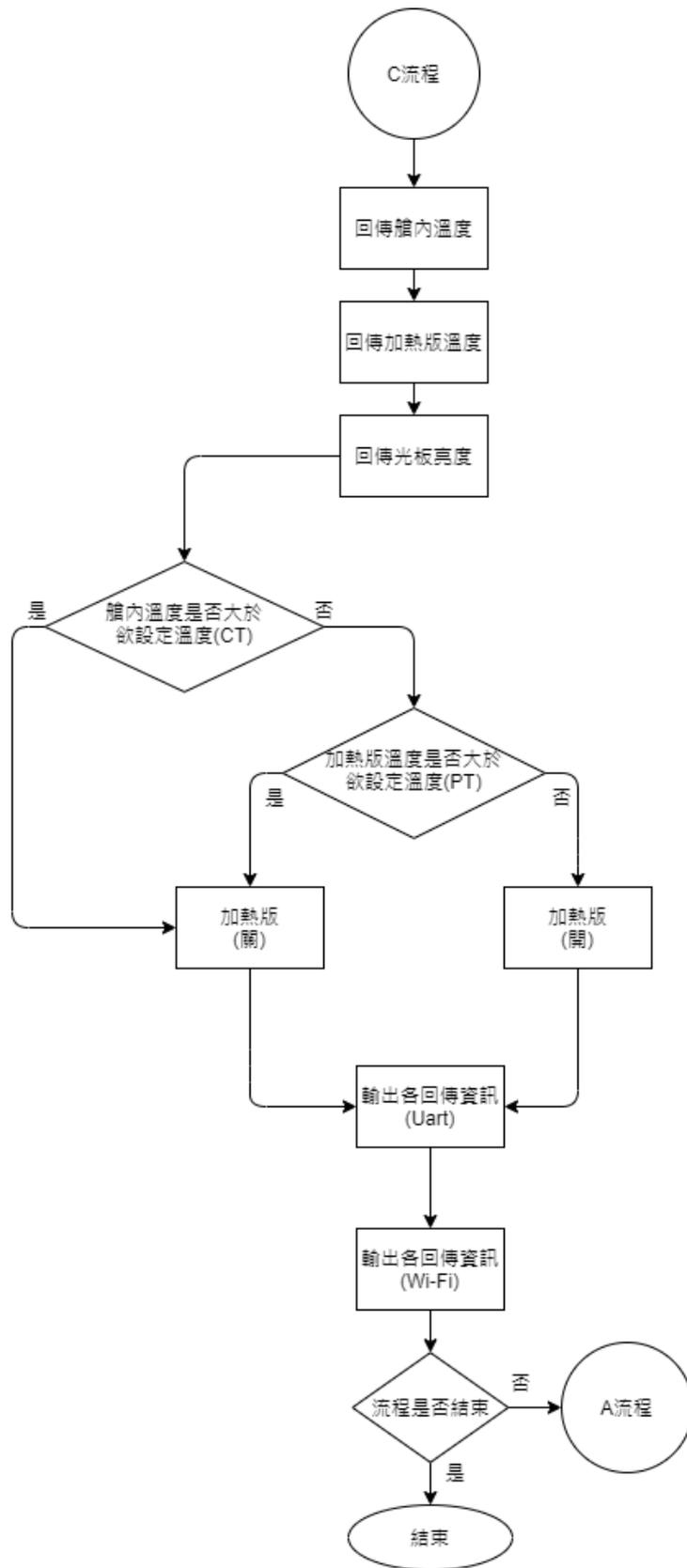


圖 50、主板流程圖-(C)輸出感測器資訊

4.4.2 光板平台設計

平台光板的設計主要源於光的平方反比定律，照度與光源成正比，與距離平方成反比，本系統可藉由調整光板的輸出功率，或者控制置放光板的平台高度來實現照度控制。

移動控制

置放光板的可調控升降平台，採用的螺桿導程為 8 mm，即旋轉一圈移動 8 mm，接著由程式控制以每 400 步定為一個最小移動單位 (200 步一圈，400 步即為旋轉 2 圈)，並將馬達控制器的微步控制設定為 1/16，如此一來只要馬達每執行完一次 400 步脈衝，即螺桿移動 1/8 圈，也就是 1 mm(如圖 51)。

```
Incubator::stepMotor( long stepM, bool spin ){
    digitalWrite(DIR_PIN, spin);           ———> 旋轉方向
    ...                                     ———> 上限判斷
    for( long i = 0; i < stepM; i++ ) {    ———> 迴圈執行一次即旋轉一步
        digitalWrite(STEP_PIN,HIGH);
        delayMicroseconds(motorDelayTimer);
        digitalWrite(STEP_PIN,LOW);
        delayMicroseconds(motorDelayTimer);
    }
}
```

圖 51、馬達移動程式碼

光板功率控制

本系統使用的光板，是由特定波長之發光二極體(LED)所組成，意即當輸出電壓只要超過其順向偏壓時即可使光板發亮。委託廠商客製此光板時，是以 12V 為供電前提去設計的，因此該電壓是光板不燒壞的前提下能穩定提供的最高功率之電壓，。

接著利用 Arduino 可以輸出 PWM 訊號的腳位，配合 MOSFET 設計出類似於可調式電源供應器，根據 PWM 的訊號對電壓源進行電壓調整，輸入分為 1~10 等級，並於輸入 0 時斷開供電(如圖 52)。

```
Incubator::setLight(){
  while(digitalRead(ENTER_PIN)!=1){
    lightDegree = map(analogRead(VALUE_ADJUST_PIN),100,900,0,10);
    if(lightDegree > 10) lightDegree = 10;
    else if(lightDegree < 0 ) lightDegree = 0;
    analogWrite(LIGHT_PIN, map(lightDegree,0,10,0,254));
    ...
  }
  delay(300);
}
```

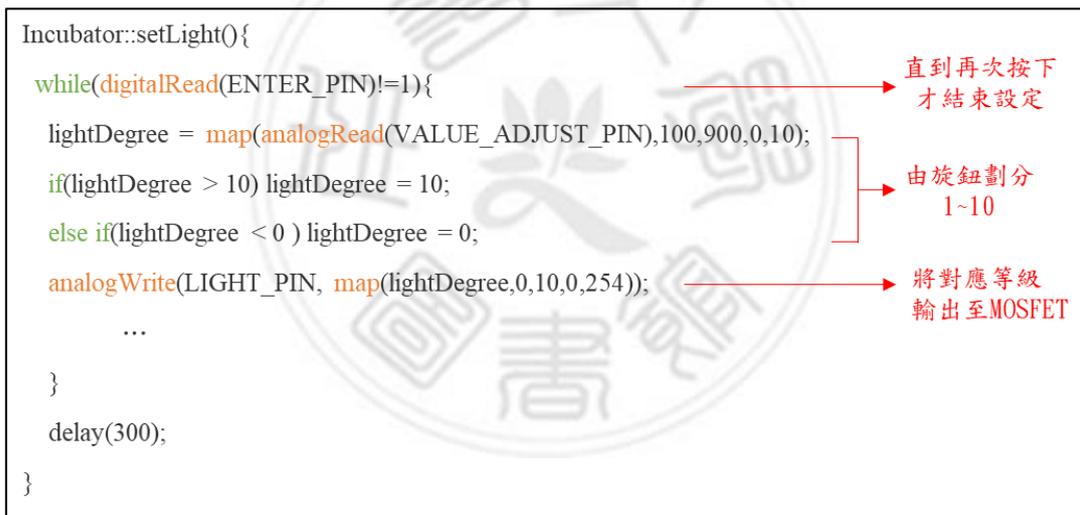
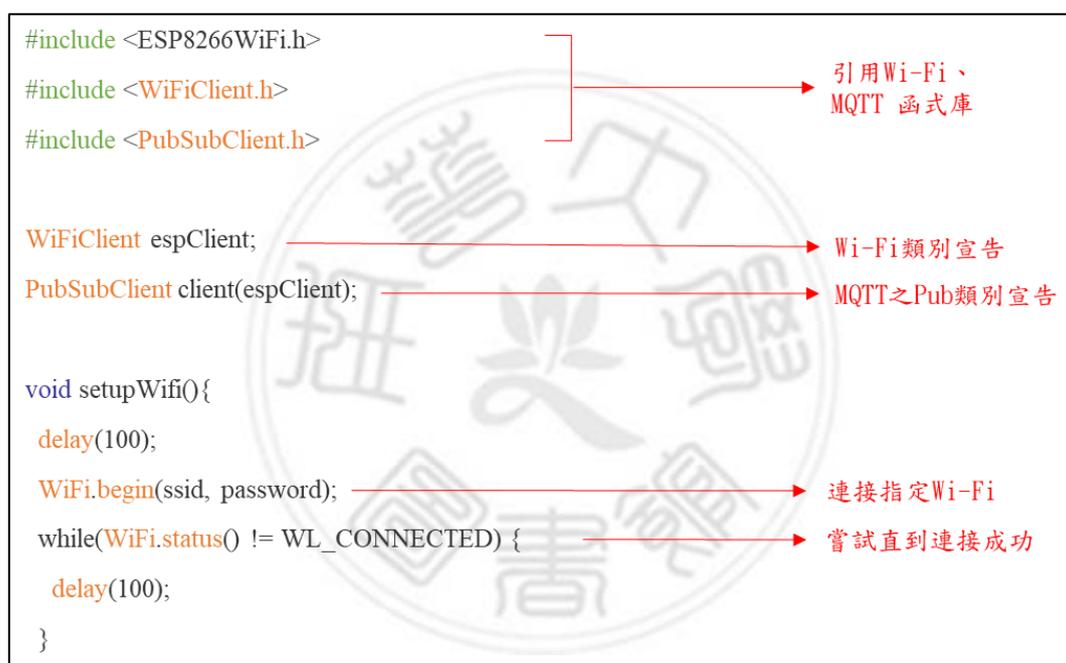


圖 52、光板設定程式碼

4.4.3 Wi-Fi 及 MQTT 連線—ESP8266

本系統遠端監控的實現，主要以 Wi-Fi 模組(ESP8266)作為裝置與行動設備間的溝通橋樑，其功能為將感測到的數據傳送出去，以及接收來自於外部的指令後再傳給 Arduino Nano。

ESP8266 的程式碼中，首先需要對 Wi-Fi 進行初始化設定並嘗試連接上網，如圖 53.a。



(a)Wi-Fi 連接

接著需要連接 MQTT 的 Broker，並設定訂閱的 Topic(設定指令)以及發布的 Topic(感測器數據)，程式碼如圖 53.b，MQTT 相關連線設定參表 6。

```

void reconnect(){
  while(!client.connected()){          → 嘗試直到連接成功
    if(client.connect("vv43tv", MQTT_USER, MQTT_PASSWORD)) → 連線登入Broker
      client.subscribe(MQTT_SUBSCRIBE_TOPIC);           (唯一碼、帳號、密碼)
    else
      delay(5000);
  }
  void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length){ → 建立callback function
    for(int i=0; i<length; i++)
      Serial.print((char)payload[i]);
  }
  void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.setTimeout(100); → 因使用readString(), 使之讀取時間不超過0.1s
    setupWifi();
    client.setServer(mqtt_broker,mqtt_port); → 設定Broker的伺服器網址、連接埠
    client.setCallback(callback); → 設定callback function
  }
  void loop() {
    if(!client.connected()) → 檢查是否斷開Broker
      reconnect();
    client.loop(); → 重複呼叫以保持連線
    reciveData(); → 字串處理函式
    ...
    client.publish(MQTT_PUBLISH_LUX,c_Lux); → 發佈感測數據 以Lux照度為例
    ...
  }

```

(b)MQTT 連線、Topic 訂閱與發佈

圖 53、遠端連線設定程式碼

表 6、MQTT 連線參數

mqtt_broker	mqtt.dioty.co
mqtt_port	1883
MQTT_USER	10874001@nhu.edu.tw
MQTT_PASSWORD	b8f*****
MQTT_PUBLISH_POSITION	/10874001@nhu.edu.tw/incubator/PosConvert
MQTT_PUBLISH_PLATET	/10874001@nhu.edu.tw/incubator/plateC
MQTT_PUBLISH_ORIT	/10874001@nhu.edu.tw/incubator/oriT
MQTT_PUBLISH_LUX	/10874001@nhu.edu.tw/incubator/LUX
MQTT_SUBSCRIBE_TOPIC	/10874001@nhu.edu.tw/incubator/operating

4.4.4 影像遠端傳輸—ESP32-CAM

由於 ESP32 與 ESP8266 的 Wi-Fi 連線與 MQTT 連線，其不同之處僅在於使用的函式庫上有少許差異以及僅有發佈功能以外，其他設定則相去無幾，故在此小節重點介紹 ESP32-CAM 的 MQTT 影像傳輸，其做法為將擷取的圖像檔(二進位制陣列)，分割其內容後依序發佈出去，再由接收端將其二進制檔轉為圖像檔。圖 54 為該板的主要程式。

```
void MQTT_picture() {  
  camera_fb_t * fb = NULL;   
  fb = esp_camera_fb_get();  
  if (!fb) {  
    delay(100);  
    ESP.restart();  
  }  
  if (!mqttClient.connected()) {  
    mqtt_reconnect();  
  }  
  else {  
    int imgSize = fb->len;  
    int ps = MQTT_MAX_PACKET_SIZE;  
    mqttClient.beginPublish(MQTT_PUBLISH_Monitor, imgSize, false);  
    for (int i = 0; i < imgSize; i += ps) {  
      int s = (imgSize - i < ps) ? (imgSize - i) : ps;  
      mqttClient.write((uint8_t *) (fb->buf) + i, s);  
    }  
    esp_camera_fb_return(fb);  
  }  
}
```

建立<esp_camera.h>內的一空物件
抓取影像截圖
倘若失敗則重啟開發板
倘若斷開MQTT則重新連線
抓取影像(二進位)陣列大小
PubSubClient.h內參數：可傳送最大訊息長度
準備Pub：主題、長度、保留
每次傳送“ps”位數直到影像陣列傳送結束
釋放緩衝區的fb類別

圖 54、ESP32-CAM 影像傳輸程式碼

第五章 結果與討論

5.1 使用介面與操作

使用介面可分為實體人機介面操作與遠端操作，控制主板其自身包含控制按鈕以及顯示介面可供使用者進行簡易設定，各項設定如圖 55.a~c，此操作介面中共提供 4 鍵 1 旋鈕，而四鍵分別對應，重新定位、向左、向右、設定/確認，通常 LCD 會根據目前的選單來顯示感測資訊，透過"向左"、"向右"鍵可以查看不同選單，再鍵入"設定"鍵後即可進行調整。而重新定位按下後，會使平台持續移動到頂點並更新程式內部的頂點位置參數，接著移動到裝置中央，如圖 55.d。

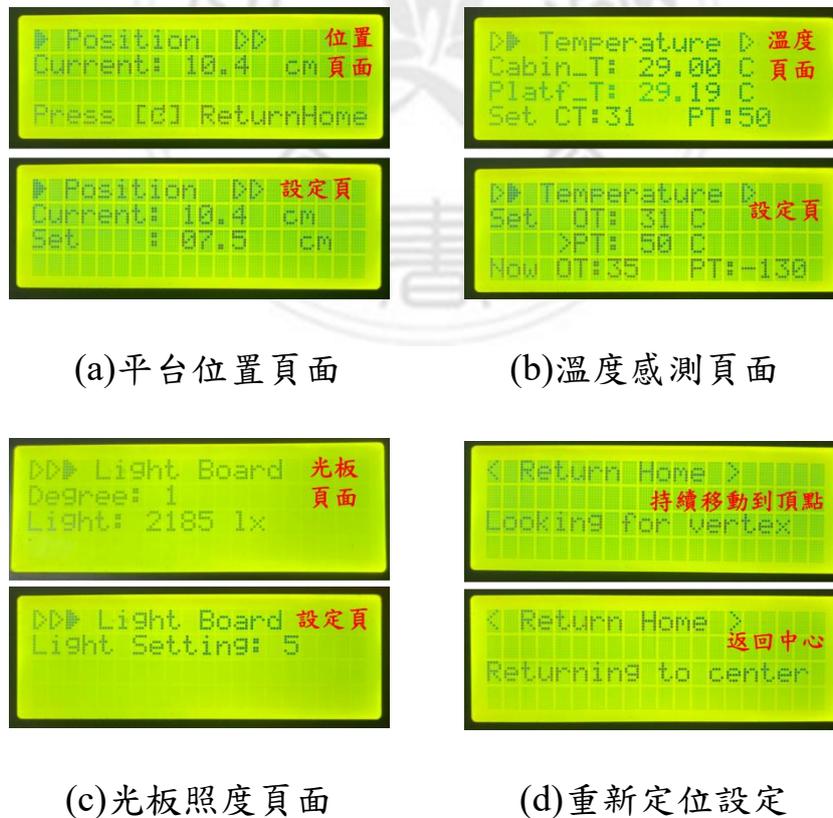


圖 55、控制主板操作介面

使用 PC 端視窗介面(圖 56)時，可提供較為詳盡之資訊，使用者須用傳輸線將電腦與控制主板(Arduino)連接並以序列埠進行連線。

視窗一共分為四個區塊，分別對應環境設定、平台高度控制、環境資訊及畫面擷取區。加熱版溫度(PT)可調範圍為 40~60 度，艙內溫度(CT)可調範圍為 25~35 度，光板可調級距為 0~10。平台可設定以 50、10、5、1 mm 為一次移動距離調整升降，或是直接調整至指定高度。電腦每隔一小段時間，便會接收由 Arduino 傳來的環境資訊，並及時顯示在資訊區。畫面擷取則是讓視窗呼叫 MQTT 函式，將其作為 Subscriber，定期接收 Broker 之更新影像

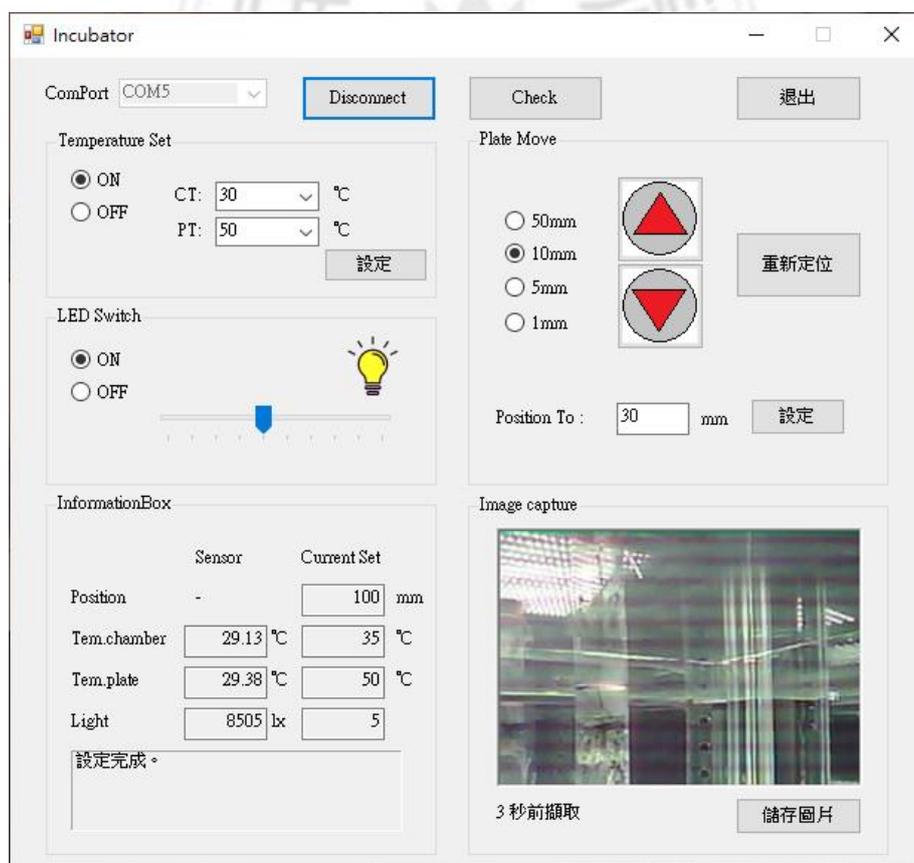


圖 56、PC 端操作視窗

行動裝置的顯示介面如圖 57 所示，在系統成功連接上 MQTT 的 Broker 後，手機畫面便會開始接收來自 Wi-Fi 模組的資料，倘若要對裝置進行設定，需要按主板的字串規格發佈命令，其命令由一個字母，或字母與整數之組合，各命令參 3.8.1 章節說明。

需要特別注意的是，由於裝置無法進行多工，有可能在接收指令的時候，裝置正在由其他介面進行參數調整(如平台的移動)，在發佈完命令後，使用者可透過回傳影像畫面(更新頻率為 1 張/10s)，或是回傳之感測數值來查看培養箱是否有正確調整。



圖 57、行動裝置端顯示畫面

5.2 溫度控制

本裝置使用透明壓克力板作為培養箱的建材之一，雖然對於光而言具有良好透光性，不過因其耐熱溫度較低，使用過高的加熱溫度可能會使之變形扭曲，因此在加熱裝置的升溫上，將其溫度限制在 60 度以下。

圖 58 為光板功率最大，加熱裝置設定為 60 度的條件下，其艙內溫度以及加熱版溫度之變化，由此圖可看出，艙溫在 60 分鐘內，其溫度大致由 25°C 上升至 35°C，而後便漸漸趨於平緩，故在加熱的設計考量上，將其設定艙溫可控範圍為 25(室溫)~35°C。

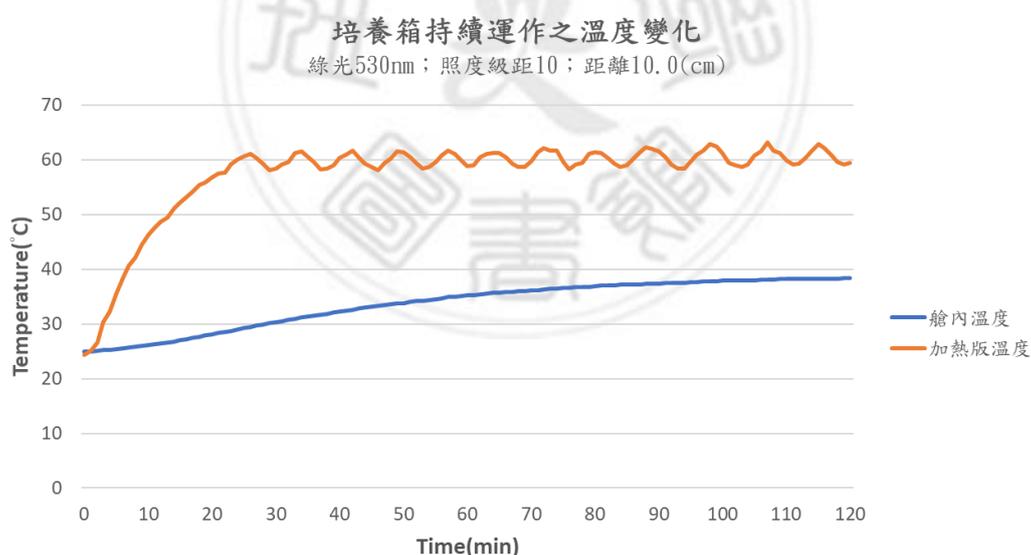
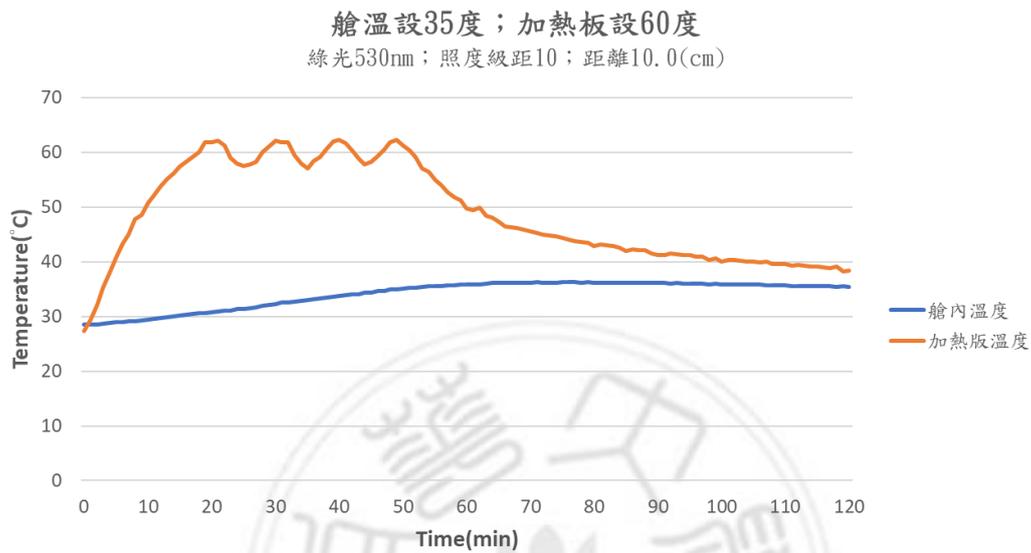


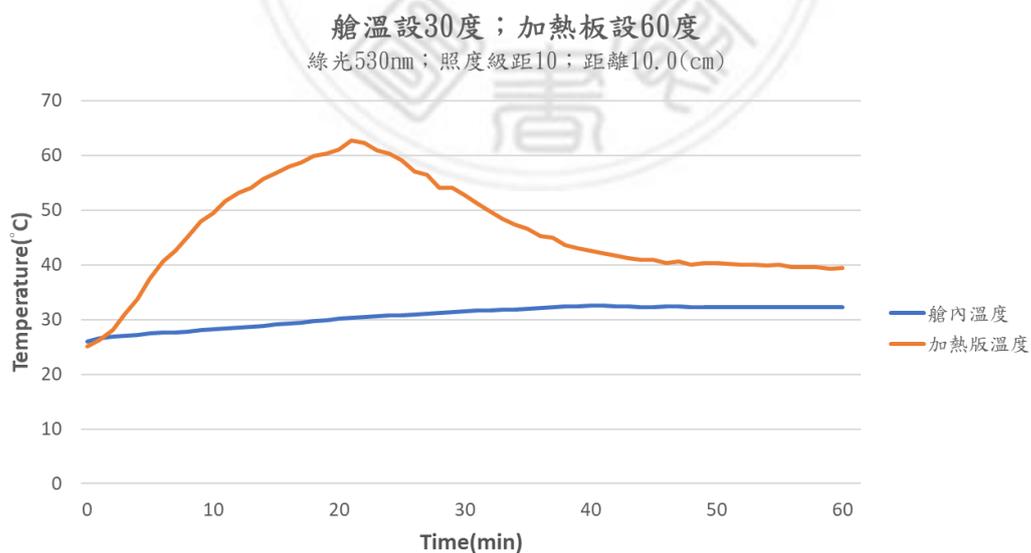
圖 58、艙溫測試：持續加熱溫度變化

以下為對培養箱設定艙溫 35 度與 30 度之測試，在設定 35 度時 (圖 59.a)，其約在 50 分鐘時關閉加熱器，在設定 30 度時(圖 59.b)，

則是約在 22 分鐘時停止加熱，而由於本系統置放於隔溫良好的空間中，溫度在到達目標後，可以持續維持數小時以上，直到低於欲設溫度後，才會再度啟動加熱器。



(a)艙溫欲設 35 度；加熱板 60 度；運行 2 小時



(b)艙溫欲設 30 度；加熱板設 60 度；運行 1 小時

圖 59、加溫測試

5.3 照度控制

本系統所使用的 BH1750FVI 照度感測器，其感測波長範圍僅為接近人眼所能辨別的可見光，因此以下測試主要以可見的綠色與紅色之光板為主。

2D 平面照度分析

圖 60 為艙內置放受試物之透明壓克力板的實際大小以及光板直射範圍之示意圖，將照射區域分為 16 個部分後依序標號，並根據光板功率或位置進行照度分析。

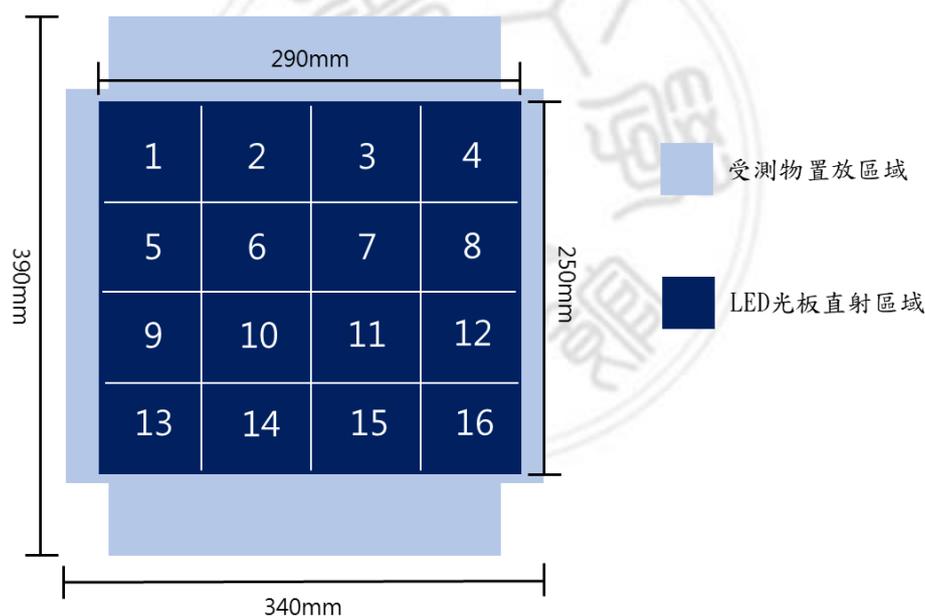


圖 60、受試物置放區與光板直射範圍示意圖

表 7 為感測器在相同條件、不同位置下所測得照度數據，圖 61 則為位置照度與平均照度之比值，由此圖表可看出光板的照射並非均勻分布在各位置上，接近中間的部分因為疊加較多的光，其照度較四周角落的位置要來的高。

表 7、2D 平面照度感測數值(單位 lx)

溫度 25°C，距離 10.0 cm				
條件 位置	綠光 530nm 照度級距 1	紅光 620nm 照度級距 1	綠光 530nm 照度級距 10	紅光 620nm 照度級距 10
1	1,112	1,608	9,455	15,359
2	1,423	1,994	13,777	21,106
3	1,549	2,226	15,945	21,855
4	1,398	1,964	13,644	20,947
5	1,152	1,831	11,806	19,112
6	1,640	2,341	18,183	22,563
7	1,803	2,543	18,926	26,006
8	1,658	2,406	17,192	22,758
9	1,230	1,883	12,159	18,442
10	1,711	2,443	17,018	23,748
11	1,789	2,547	18,092	25,487
12	1,613	2,142	16,872	21,694
13	1,037	1,523	10,465	15,280
14	1,369	1,954	13,783	19,154
15	1,459	2,140	14,688	19,722
16	1,341	1,875	13,068	17,208
平均	1,455	2,088	14,692	20,652

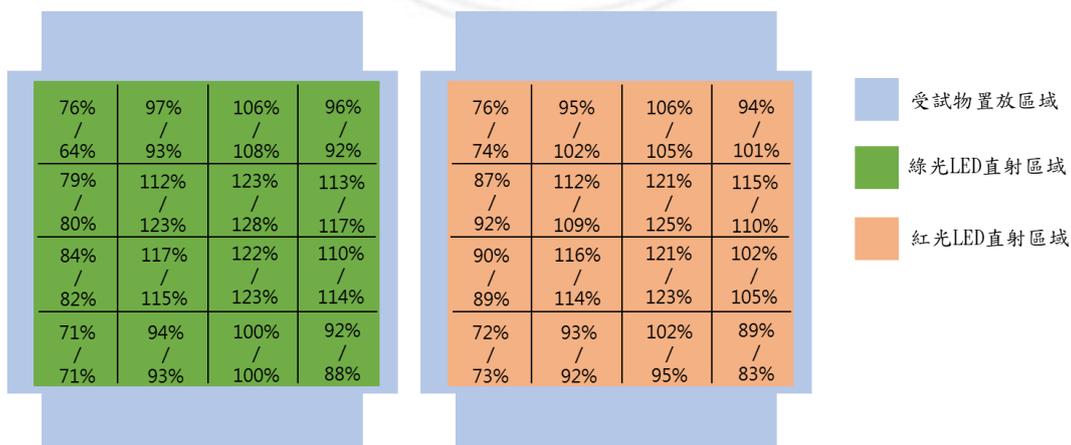


圖 61、照度均勻度(級距 1 與平均照度比值 / 級距 10 與平均照度比值)

以光板功率級距分析

利用 MOSFET 輸入小訊號能夠控制電流大小的特性，將 Arduino 輸出的 PWM 訊號分為 0.5V、1V...到最高 5V，共 10 個級距，對應至輸入光板的 12V 電壓，表 8 為溫度距離位置的條件固定下，各級距所測得照度數值，由於紅外線屬於不可見光，故其照度數值不可作為參考。

表 8、各級距照度數值(單位 lx)

溫度 25°C，距離 10.0 cm，位置 3			
級距	綠光 530nm	紅光 620nm	紅外線光 830 nm
1	1,449	2,078	0
2	2,914	4,150	0
3	4,395	6,294	0
4	5,870	8,325	1
5	7,390	10,453	1
6	8,847	12,522	1
7	10,335	14,544	2
8	11,840	16,640	2
9	13,313	18,636	2
10	15,374	21,610	3

照度自訂義設定

由於本裝置之微處理器並不具備多工，無法在使用者調整光板時即時顯示目前照度，因此若使用者需要設定指定的照度時，需要先選定位置後，再大致選擇所需的照度級距，接著利用平台升降的方式對光板進行微調。

以綠光 530 nm、照度 5000 lx 為例，在距離 10cm 的前提下，若選擇靠近中央的位置 7，5000 lx 落在級距 2 與 3 之間(約 3747~5695 lx)，這時可以選擇級距 3，並將平台上升(遠離受試物)約 24 mm，而後可由感測器測得照度大約位在 4981~5037 lx 之間。

5.4 系統比較

本裝置分別與市面上已公開銷售的小型培養箱、CO₂ 滅菌培養箱以及光照培養箱進行系統比較，其比較結果參表 9。

表 9、培養箱比較

	H3550-45[27] 小型恆溫培養箱	CB170UL-120V[28] CO ₂ 滅菌培養箱	LLI-A11[29] 光照培養箱	This study
溫度控制	17°C ~ 40°C	4°C ~ 60°C	5°C ~ 35 °C	室溫 ~ 35°C
濕度控制	X	50 ~ 95 vol%	X	X
CO ₂ 控制	X	0 ~ 20 vol%	X	X
光照裝置	X	X	日光燈	特定波長 可替換光板
照度調整	X	X	O	O
人機介面	LCD+按鈕	觸控面板	LCD+按鈕	(1) LCD+按鈕 (2)視窗介面 (3)MQTT APP
遠端控制	X	X	X	O
內部尺寸 (cm ³)	29 * 18 * 31	71.5 * 68 * 87	70 * 55 * 120	29 * 25 * 20 (底部僅考慮 有光照範圍)
內部容積	18L	170L	450L	15L
貨架數量	2~3 個	3 個	4 個	1 個
價格	USD 572.43	USD 11,881	需詢價	約 NT 15,000

市面上的培養箱除了植物用的光照培養箱外，幾乎沒有將可見光

列入細胞培養的考量之一，因此本裝置額外增加的可調控光參數乃相較於其他培養箱而言，屬最大的優勢之一，且由於使用 MQTT 作為遠端傳輸的協定，讓使用者能夠輕易的利用行動裝置設定為培養箱的監控裝置，大大增加了使用的彈性，此外在架設成本這一部分，經費大多投入在客製化的光板及加熱片上，其餘以電子元件搭建的部分大約僅佔總額的 1/4。



第六章 結論與未來展望

本系統的重點著重在於可替換波長光板以及可調控光板距離、照度，由不同的面相來模擬受試物的培養環境，使研究人員能夠更有系統的對其相關研究進行資料蒐集，也由於因為本系統使用的大多為市售常見的電子元件，結合 MQTT 輕量化協定，使用者可以此為原型自行客製專用的培養箱，並隨時透過手機建立一遙控設備，改善以下幾點將可以為系統提供更好的性能。

(1)以集成 Wi-Fi 之開發板替換為 Arduino Nano

本系統使用 Arduino 與 ESP8266 其考量為低廉價格與易操作性，倘若使用內建 Wi-Fi、藍牙的開發板，建構完成後可以省去不少空間。

(2)增加濕度、CO₂ 等其他可控變因

礙於 MCU 的腳位不足，儘管能夠以 I²C 協定連接感測器，也沒有其他腳位能夠提供致動模組來調整環境，須使用更高階開發板才得以達成，如 Arduino Mega。

(3)增加降溫裝置

在恆溫功能中，艙內溫度的上升是以加熱裝置來達成，溫度的下降則僅依靠裝置本身的散熱，因此若需要由目前溫度調整到較低溫時，會造成其散熱耗費時間過久，考慮到培養箱為密閉空間，安裝製冷晶片會較通風散熱設計要來的合適。

(4)相機改善

本系統使用的相機為原廠標準的 OV2640 鏡頭，在光板為可見光的情況下較無大礙，倘若使用不可見光如紅外線，會造成相機的圖片因亮度不足導致成像漆黑，可替換廣角夜視鏡頭來改善此情形。

(5)行動設備端之 MQTT 設計更加人性化

目前手機對系統的遠端控制指令，主要依循微處理器的字串處理函式，使用上較不為人性化，如要使平台上升 1 mm，其指令為 M400。可自行開發或選擇在初始設定中能夠先行設定發佈自定義字串組合之 APP。

(6)系統與使用者雙向溝通

就目前的系統設計而言，僅僅只有使用者單向的對培養箱進行參數調整，培養箱並不會根據環境的異常參數對使用者進行回饋。其主要原因在於異常數值雖可藉由 MQTT 回傳給使用者，但針對後續判斷或系統回應需要由接收資料端來進行設計，故同樣需要另外開發其客製 APP。

參考文獻

- [1] 張芳青, "無線通訊之電磁波對人體健康影響的應用分析," 碩士, 電腦與通訊學系碩士班, 臺中健康暨管理學院, 2005. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/8u85ws>
- [2] "認識紅藍光治療," 羅東博愛醫院 15 5 2020. [Online]. Available: https://www.pohai.org.tw/health_detail.php?PKey=403
- [3] Min-Woo Cheon, and Yong-Pil Park, "Wound Healing Effect of 525 nm Green LED Irradiation on Skin Wounds of Male Sprague Dawley Rats," in *2010 Transactions on Electrical and Electronic Materials*
- [4] 吳家隆, "紅光與近紅外光光照對大鼠骨髓間葉幹細胞增生影響之比較及機制探討," 碩士, 醫學工程研究所, 中原大學, 2009. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/utu235>
- [5] Lin, Chun-Chih;Hsieh, Ying-Yeh;Lin, Jao-Perng;Liu, and Wei-Chung, "Medical Applications and the Action Mechanisms of Far-infrared Ray," in *2007 Taiwanese Journal of Applied Radiation and Isotopes* 3 卷 3 期 pp.333-340
- [6] "Cell culture - Wikipedia ," 2021. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Cell_culture
- [7] "Cell culture | 細胞培養- ACE Biolabs, " 泓佑生物科技有限公司 2021. [Online]. Available: <https://www.acebiolab.com/TW/news/25>
- [8] "電磁波 - 維基百科," 2021. [Online]. Available: <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E8%BC%BB%E5%B0%84>
- [9] "世界衛生組織 (WHO) 文件," 衛生福利部國民健康署, 22 7 2014, [Online]. Available: <https://www.hpa.gov.tw/Pages/Detail.aspx?nodeid=576&pid=901>
- [10] "光強度的單位:燭光(cd)," 國家度量衡標準實驗室, 3 2017, [Online]. Available: <https://www.nml.org.tw/measurement/new-knowledge/3603-%E5%85%89%E5%BC%B7%E5%BA%A6%E7%9A%84%E5%96%AE%E4%BD%8D%EF%BC%9A%E7%87%AD%E5%85%89.html>

- [11] "Universal Asynchronous Receiver/Transmitter," 成大資工 Wiki, [Online]. Available: <http://wiki.csie.ncku.edu.tw/embedded/USART>
- [12] "I2C-協定用法原理簡介-晶片溝通的橋樑," 6 2016, [Online]. Available: <https://www.strongpilab.com/i2c-introduction/>
- [13] "1-WIRE COMMUNICATION THROUGH SOFTWARE," 2002, [Online]. Available: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/1/126.html>
- [14] HiveMQ Team, "Introducing the MQTT Protocol - MQTT Essentials: Part 1," 12 1 2015, [Online]. Available: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-1-introducing-mqtt/>
- [15] "MQTT 教學 (五):「保留」發布訊息以及 QoS 品質設定," 5 4 2017, [Online]. Available: <https://swf.com.tw/?p=1015>
- [16] "NANO V3.0 FT232RL 副廠/相容 Arduino 原裝晶片非大陸晶片," [Online]. Available: <https://www.taiwaniot.com.tw/product/arduino-nano-v3-0-ft232rl/>
- [17] "30 天入門智慧家庭系列 第 12 篇-ESP8266," iT 邦幫忙, 28 9 2019, [Online]. Available: <https://ithelp.ithome.com.tw/articles/10222071>
- [18] "ESP8266 Wi-Fi 模块用户手册 V1.0," [Online]. Available: <https://iottalk.vip/static/iottalk/01/ESP8266UsersGuide.pdf>
- [19] "ESP32 CAMERA-QR Tutorial," [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/ESP32_CAMERA-QR_Tutorial
- [20] "DS18B20 - Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer," [Online]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [21] "Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC," [Online]. Available: <https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>
- [22] "2 Phase Hybrid Stepper Motor 17HS series-Size 42mm(1.8 degree)," [Online]. Available: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/928661/MotionKing/17HS4401/1>

- [23] Benne de Bakker, "How to control a stepper motor with A4988 driver and Arduino," 2019, [Online]. Available: <https://www.makerguides.com/a4988-stepper-motor-driver-arduino-tutorial/>
- [24] "DMOS Microstepping Driver with TranslatorAnd Overcurrent Protection," [Online]. Available: <https://www.pololu.com/file/0J450/A4988.pdf>
- [25] "金屬－氧化物－半導體場效電晶體(MOSFET)," Ansforce 知識力, 23 5 2020, [Online]. Available: <https://www.ansforce.com/post/S1-p400>
- [26] "繼電器," Webduino 學習手冊, [Online]. Available: <https://tutorials.webduino.io/zh-tw/docs/basic/component/relay.html>
- [27] "Thermo Scientific Heratherm Cmpct Microbio, Heratherm Compact Microbiological Incubator," [Online]. Available: https://www.tequipment.net/Thermo-Scientific/Heratherm-Cmpct-Microbio/Incubators/?Source=googleshopping&gclid=CjwKCAjw3MSHBhB3EiwAxcaEu0HQF9wE7pFbTrVTyDKgdSKERhpAx8EzQcVsgRz9Evw42IcBQzD3bxoC_cMQAvD_BwE
- [28] "Binder World CB170UL-120V-O - CO2 Incubator with O2 Control, Hot Air Sterilization and Heat Sterilizable CO2 Sensor (170L, 100-120V 1ph 50/60 Hz)," [Online]. Available: <https://www.tequipment.net/Binder-World/CB170UL-120V-O/Incubators/?rrec=true>
- [29] "Lighting Incubator LLI-A12," LABTRON, [Online]. Available: <https://www.labtron.com/description/Incubator/Lighting-Incubator/LLI-A12>