

溫室二氧化碳控制系統模擬環境建置

呂全斌

美和科技大學 副教授

e-mail: chuan.pin.lu@gmail.com

蔡治禾

美和科技大學 學士生

e-mail: jimmy81006@gmail.com

摘要

洋菇是國內民眾普遍食用的菇類，其經濟效益大，近年來，因無環境監控設施，易受各種病蟲危害，導致產量降低的風險存在。孕育洋菇的生長包含以下過程：堆肥方法、堆肥成分、發酵處理、洋菇下種、走菌、覆土、出菇管理。其中，發酵、走菌、出菇過程的溫度、濕度、二氧化碳濃度等三項條件的管理，對孕育洋菇有著關鍵性的影響；然而，常見的溫室環控系統對於三項條件控制，皆採開迴路控制。以二氧化碳為例，開迴路控制讓排風機經常性的開啟與關閉，使二氧化碳變化產生震盪導致影響洋菇的生長；不僅如此，也容易使排風機損壞與耗電。為了進行閉迴路系統控制的相關研究，本研究進行一項「溫室二氧化碳控制系統模擬環境」的建置，期望透過此「溫室二氧化碳模擬環境」協助研發出閉迴路溫室控制系統，並進一步提高洋菇的生長效率與品質。此研究將透過小型模擬裝置找出溫室二氧化碳氣體變動行為，同時設計出適合之 PID 控制器參數、排風機控制模組。在文章以實驗結果展現出傳統二氧化碳控制與本研究所使用 PID 控制器進行排風機控制二氧化碳結果，本研究的實作結果可呈現出本模擬裝置的功能性與實用性。

關鍵詞：智慧農業、農業 4.0、溫室環控系統、智慧農業生產、系統控制、PID 控制器。

Abstract

Stability in mushroom production and quality has always been an objective for mushroom growers. Temperature, humidity, and the amount of carbon dioxide in the environment are three factors that affect the growth of the common mushroom. The amount of carbon dioxide determines the size of the mushroom, which in turn determines the valuation of the mushroom. For this reason, this study developed a control system of fan to control the concentration of carbon

dioxide in mushroom cultivation rooms. This system measures and collects the aforementioned three types of environmental data and controls carbon dioxide levels within the environment. Mushroom size is stabilized through control of carbon dioxide levels. Currently, there are no the concentration of carbon dioxide systems are used in environmental control system. Using PID control, carbon dioxide can be controlled at the set point. The methods section of this paper describes the structure and functions of the system hardware and PID control theory. The experimental section of the paper establishes the practicality of the system.

Keywords: smart-agriculture, agriculture 4.0, greenhouse environmental control system, intelligent agriculture production, system control, PID controller.

1. 前言

農業一直是我國相當重要且無法被進口取代的產業，只要遇到全球糧食危機，在自由貿易實施與糧食自給率過低的情況下，就必須付出高額代價向國外購買所需的糧食。我國目前的糧食自給率僅占約百分之三十左右，過度依賴進口，在此情況下將會產生許多民生問題，如糧食安全危機，以及因輸入通貨膨脹導致糧食價格波動等問題；因此，提高我國農業的生產力與自給率才是解決問題的根本，然而，現今一般百姓取得食物容易，很難注意到此問題。我國政府單位農糧署近年來已經注意到此問題的嚴重性，因此開始著手投入政策在農業科技上，不論是生物科技或品種改良，嘗試以新品種與新技術來帶動高品質的農業發展，如生技農業、精緻農業與精準農業，這些也都已經獲得了一些不錯的成效。然而，我國目前正處於人口老化與少子化的階段，使得原本已是勞動力短缺的農業生產更加困難；除了人力短缺、高齡化之外，全球氣候暖化所形成的天然災害與作物蟲害，也嚴重影響許多農作物的採收，

這些問題成為我國在提升農產技術後必須解決的當務之急[1]。農業人力短缺、農民高齡化、環境氣候劣化，這三項問題必須解決，才能讓我國農業邁向效能、安全與降低風險的新農業時代；我國的三大強項：電子電機製造、資通訊技術、機械自動化，過去這些技術與資源大多投注在資通訊科技與工業製造上，而學校培養出的許多人才就業也都集中在這些產業，企業的投資也大多以電子相關產品為首選目標；由於大多資訊人才不懂農業生產相關知識，以及學校所在地區產業特色不同，資通訊科技人才於畢業後，大部分都不願意也不知道投入農業生產自動化上，使得智慧農業的實現總是缺乏資通訊人才的投入，對於企業而言，也總認為農業的獲利價值不高，不值得投入，因此在農業自動化科技上總是缺乏人才、應用技術與設備。開創協同、便捷、人性化的智慧農業，推升高質化農業生產效率與量能，提高消費者對農產品安全之信賴感是行政院農業委員會在2015年生產力4.0科技發展策略上的目標[2]，行政院有鑑於資通訊技術高速發展的情況下，新時代的智慧型農業必須藉由資通訊技術來實現[3]，這些技術包含感測技術、通訊網路、雲端儲存、智能機器裝置、物聯網、巨量資料分析等，這些技術可以提高農業生產者的反應速度、提高生產效能、維持與管控農產品品質、追蹤產品生產訊息、提供客製化服務與進行產銷分析等。近年來，已開發的歐美國家已經利用網路通訊與物聯網精確的掌控作物種植、灌溉與收穫的時機，也透過感測器技術即時監控牲畜的生長狀態，在最大限度地減少了資源浪費並獲得最高效益，將大農業策略轉型為精準農業。如美國 FarmLogs 公司的雲端平台讓農民使用智慧型手機透過網路，將耕作方面的資料上傳到平台，並為其進行數據分析，為農作物輪作提供智慧預測以及優化分析，農民也可透過平台所提供的服務瞭解當下農產品價格、耕作開支、利潤預測、天氣等重要訊息，並進行生產規劃並獲取最高效益作物成果，在歐美國家資電科技應用於農業的潛力已被證實，確實能提升農業生產效率與量能。

如何讓農作物生長受到控制、無病蟲害、產量穩定，以及不受氣候影響，一直是農民所追求的目標，亦是科技農業 4.0 的目標；而這樣的目標，同樣的也可解決糧食危機的問題。具高度營養價值的洋菇一直是全世界商業栽種量最大的菇類，以前種植洋菇容易受到氣候的影響；由於科技的進步，使得傳統菇舍演進

到溫室菇舍的型態，雖然洋菇栽種環境已改善，但仍有許多元素影響到洋菇的生長，如環境溫度、濕度、二氧化碳、發酵、除菌技術、走菌方式...等，其中植床土壤溼度、二氧化碳決定了洋菇體型大小，這也決定了洋菇的賣價。在2016年6月研究團隊曾協助景湍溫室蘑菇農企業建置溫室環控系統，在完成環控系統後，發現到現今的環控系統僅能提供環境當下環境溫濕度、二氧化碳等數據的監測，以洋菇成長條件來看，這些數據之間並非獨立、無相關性；例如洋菇屬於中低溫型菇，最適合的生長溫度為12至16度之間，溫室為了要維持此溫度範圍，則必須使用冷氣空調來達到製冷效果，而空調具有除濕效果，這是因為空調在製冷的過程中，室內機的熱交換器必須透過蒸發器吸熱，當溫室空氣被空調器吸入並通過蒸發器之後，空氣中的水分被冷凝成水並排掉，溫室空氣中的部分水分就這樣被除掉，而植床也因為土壤表面蒸散原理降低了土壤濕度；然而，洋菇必須在高濕度下才能生長(土壤濕度以40至50%為佳；空氣相對濕度以85至90%為佳)[4]。因此，當空調製冷的過程中，不但降低了空氣溫度同時降低了空氣與土壤濕度，在這樣的情況下會直接影響洋菇生長狀況；除此之外，土壤濕度與空氣相對濕度也不同，如何取得環境最佳化也是相當困難。環境參數如何搭配才能培養出農民想要的農作物，這是目前實際問題無法解決的事，也因此，本人與景湍溫室蘑菇農企業共同認為現今環控系統與溫室緊密結合性仍然不足，如何讓環控系統能依據農作物生長的情況來調整，才是整個系統必須達到的目標，否則仍須憑藉著農民自身經驗來決定溫室條件，這樣的環控系統也只能說是半自動化程度而已。

農業領航產業的其中一項重點為"精緻農產業[3]：菇類全環控智慧化生產"，如何讓菇類產量與品質穩定，一直是農民所追求的目標。其中，洋菇生長的環境溫度、濕度與二氧化碳，這三項元素關係到洋菇的生長，二氧化碳決定了洋菇的大小，而洋菇的大小也決定了賣價與摘取成本。蕈傘未爆開的洋菇，越大賣價越好，反之越小賣價越差；此外，在摘取成本而言，以同樣的菇床栽種面積來評估，體型較小洋菇得花上許多次數來摘取；反之，大洋菇只需較少次數來摘取。雖說體型大的洋菇似乎生產價值較高，但還是得視市場喜好來決定，因此，如何利用環境控制來決定洋菇大小才是最佳做法。洋菇生長因子與大多的農作物生長因子

[4]相同，但以洋菇成長環境之精密控制系統，在市場上仍無此研發。另外，現階段市場所建置之環控系統中的條件控制僅是開迴路控制，這樣控制容易造成溫室微氣候起伏變動，不論是二氧化碳、溫度、濕度或其他條件，以及容易造成調節微氣候之排風機損壞、耗電，溫室微氣候調節能做到最平穩與最佳化，我們需要研發具閉迴路功能之控制系統，為此本研究進行了溫室二氧化碳控制系統模擬環境，透過此模擬裝置來研發出洋菇溫室適用之閉迴路控制能力之微氣候調節排風機。

2. 文獻探討

Hans Persson 曾在 2003 年的文獻[5]裡將大部分的真菌菇做了調查，包含了真菌菇的外觀、種類、歷史，也針對真菌菇生長環境與臨床特徵進行了評估，找出真菌菇樣本，並進行樣本的化學分析，分析出是否有毒性。Hesham 與 Rajni 則是針對洋菇的藥食用性與萃取功效來進行探討[6]，同時也分析出洋菇成分的化學結構，過程中發現洋菇的免疫調節蛋白質對人體的免疫調節有很大的助益，文獻研究中發現免疫調節蛋白質的主要作用便是免疫系統活化，具有抗腫瘤功效；其中具此功效的原因是來自於所謂的"高分子多醣體"中的葡萄糖聚醣。陳裕鏞也曾在研究中[7]指出這種聚醣由於無法被人體消化系統所消化分解，因此高分子多醣體的作用方式並非是直接殺死或抑制腫瘤細胞，而是透過調節免疫系統所得到的抵抗能力，因而讓身體本身的免疫系統來殺死腫瘤細胞。關於食用無毒的真菌菇類對人體的好處已經有許多國內學者研究證實了這件事，如中央研究院 翁啟惠院士[8]、陽明大學醫學生物技術研究所 許先業、台灣大學生物化學研究所 陳水田、台灣大學生命科學院 陳秀男等。另外，也有許多研究室針對溫室科技來進行探討，如 Zhou 與 Zuo 在 2009 年時[9]，就已經提出使用計算機控制系統來為溫室進行控制，並且提出計算機控制系統在溫室環境中對環境管理複雜性，節能和優化等方面的必要性。Zhang 與 Chen 在 2011 年[10]針對溫室微氣候控制提出使用 DMC-PID 控制器來控制溫室溫度，DMC-PID 控制器結合了串聯控制結構與預測控制算法，內部循環使用一般比例調整器，外部循環使用動態矩陣控制。研究中的控制系統不僅保持預測控制算法的強健性和快速跟踪性能，而且快速抑制干擾。Reed 等人[11](2001

年)在一個特別設計的實驗室開發出一套洋菇採收系統，系統能夠自動找出蘑菇位置、選擇、採摘、修剪、輸送與放置產線上，採收成功率約 80%。Irman 與 Muhammad[12]在 2012 年設計了一套以馬鈴薯生產為監測與控制的氣孔生長系統，所設計的控制系統用於管理執行器輸送水和營養物，並將溫度和濕度數據將顯示在 LCD 上，並傳送到計算機，以方便監測植物生長室；同時也使用微控制器系統於自動調節用於水(噴嘴)的分配和營養物(超聲霧化器，風扇和泵)分配的致動器上。Liu 等人[13]於 2106 年以溫室通訊方法為研究目標並將其用來預測溫室微氣候模式，他們提出了一種基於極限學習機(ELM)算法和 KELM(基於內核的 ELM)的新型預測方法，來預測實際溫室環境中的溫度和濕度。Athukorala 等人[14]於 2016 年研發了一個以溫室為空間之環境監測控制系統，此系統能夠使用各種傳感器收集溫室環境相關的訊息，該系統具備有通過網絡與行動裝置以遠程監控方法來控制溫室的能力；作者使用低成本的無線傳感器網絡，溫室的環境數據被發送到集中式服務器，系統將存儲的這些數據，以 Web 界面顯示溫室來顯示溫室的最新環境詳細信息。因篇幅關係，溫室設計相關的文獻仍有許多，如文獻[15~17]。

另，Lin 等人在文獻[18]中探討了二氧化碳對洋菇成為產品後包裝的重要性，採收後的洋菇在一定的時間內將會因氧化出現褐色的斑點，透過二氧化碳的充填，可延緩氧化造成的斑點問題，同時也可以維持實用的口感。Marcelo 等人則在文獻[19]研究中探討影響溫室栽種側耳屬蕈褶菇類成長的因素，研究中提到溫度、光照度、濕度、空氣組成、環境，雖然側耳屬蕈褶菇不是洋菇，但相關資訊仍可作為重要參考。Jang 等人[20]於 2011 年曾探討光照對真姬菇成長的影響，透過使用藍色(475nm)、綠色(525nm)、黃色(590nm)、紅色(660nm)等發光二極管(LED)照射實驗樣本，誘導菌絲體生長後形成子實體，其結論是藍光 LED 燈的光照作用可提升真姬菇成長成效。Miyazaki 等人也同樣在 2011 年進行一項藍光 LED 燈對幾種菇類(香菇、金針菇、真姬菇、灰樹花、滑菇、杏鮑菇)成長的研究[21]，研究中證實在菌絲成長階段使用特定的 LED 光源連續照射菇菌，確實比使用一般白色日光燈照射能產生更高的生產力和數量。

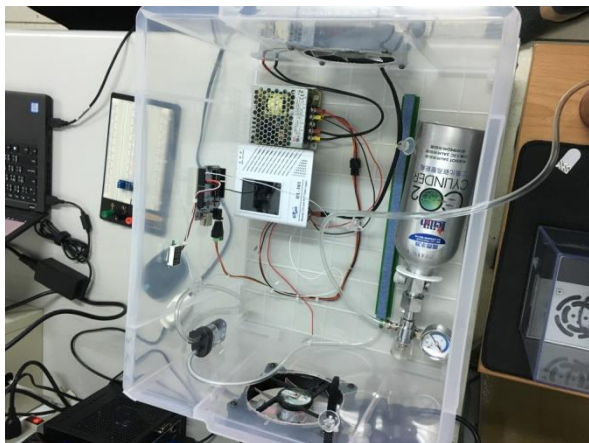
上述文獻皆未提到二氧化碳控制之必需性與做法，為此，我們於此文章中進行溫室二

氧化碳控制系統模擬環境建置，並嘗試找出最佳的排風機控制方式，進一步將溫室二氧化碳控制在最平穩之狀態，以及研發出低成本、高效能之排風機控制器。

3. 溫室二氧化碳模擬系統設計

3.1 系統硬體設計

本文章主要以二氧化碳濃度控制為目標，在做法上是透過排風機將溫室外部氣體導入溫室進行氣體混合，使用排風機來控制外部氣體的導入量，讓溫室中的二氧化碳能維持在系統設定目標值。為了能夠掌握住氣體流動變化，以及排風機轉速控制，此研究打造一小型的密閉箱體，來模擬菇舍溫室空間；另外裝設 DC 小型 PWM 訊號四線控制風扇來當作排風機，排風機裝設對向壁也開設通風孔，讓風扇進行抽風或吸風時，溫室氣體能進行對流。由於菇舍中的洋菇會產生大量的二氧化碳，所以在模擬系統中，使用二氧化碳氣瓶並採以節流閥控制做法來模擬洋菇排放二氧化碳的行為與排放速度。而風扇轉速控制則由 Atmel AVR MCU 控制板執行，此微處理器直接透過 PWM 訊號來改變風扇速度。微處理器所執行功能則由晶片韌體來執行；在此研究中，我們將 PID 控制器程式寫入微處理器，並透過 TTL 通訊來收集二氧化碳感測器數值，並輸入至控制器來進行分析計算，控制器輸出 PWM 訊號至風扇；溫室二氧化碳模擬系統硬體配置如圖一所示。



圖一、溫室二氧化碳模擬系統硬體配置

3.2 以 Atmel AVR MCU 為核心之 Arduino 控制板

幾年來，ATmega328P 晶片[22]是一種微控制器(簡稱 MCU，Micro Controller Unit)，是 Atmel AVR 系列的晶片，因為導入的 Arduino

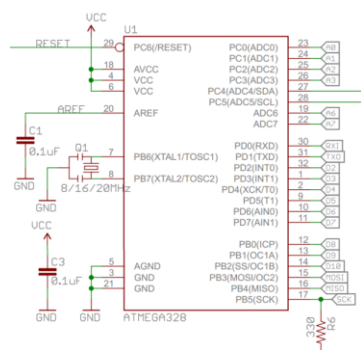
架構[23]受到許多學習者的喜愛，原因是 Arduino 架構有搭配的 IDE 工具，學習者可以直接以 C 語言來撰寫韌體，大幅度降低了開發的難度，再加上許多感測器模組的搭配，使得過去難懂的電子電路，變成電子積木一般的容易接受，也因此許多創新的想法就開始使用了 MCU 來實現。另外，過去的 MCU 必須透過 AVR ISP(In-System Programmer)裝置來進行韌體燒錄，在 Arduino 開發者設計了 Bootloader 之後，韌體就可以直接透過 IDE 工具與 TTL 串列通訊寫錄至晶片。ATmega328P 是一 16 MHz 處理速度的 8-bit 微處理器，設置有 1 KByte EEPROM，14 個數位 IO 與 6 個類比 IO 腳位(10 bits A2D 的訊號轉換)，6 個腳位可支援 PWM 訊號(Pulse Width Modulation)(Pins 3, 5, 6, 9, 10 與 11)，支援一個 SPI (Serial Peripheral Interface)通訊協定(Pins 10, 11, 12, 13)。

PWM 訊號[24]是一種透過數位方式來產生類比訊號的一種作法，這種方式相當適合使用在數位型態的 MCU，決定 PWM 訊號所產生出的電壓是訊號的工作週期，該週期所描述的是訊號中邏輯高準位所占的時間，以及完成一個訊號週期的比例。舉例說明：ATmega328P 晶片可輸出 5V 的 PWM 訊號，若要輸出 2V 的訊號，則需定義一個工作週期 40% 的 5V 訊號；在指令上可以使用 analogWrite(N)來產生 PWM 訊號，其中 N=0~255 之間，要輸出 2V 的訊號 analogWrite(102)。此系統使用 ATmega328P 晶片的 PWM 訊號來控制 DC 排風機轉速，當洋菇栽培室的二氧化碳過多時，則隨時調整排風機轉速(如變頻一般作法)以符合環境空氣品質最佳化，使用此作法的優點是馬達控制的成本較低，同時在也較一般交流馬達來得更省電。目前景瑞洋菇農場所裝設的排風機是為常見的交流三相馬達排風機，要控制交流三相馬達只能透過加裝變頻器，而控制器也得另外裝設；若改用伺服馬達，整體排風機的成本又會高出 6 倍以上，另外同樣也需要裝設 PLC 控制器(可程式邏輯控制器)來控制轉速，成本更高。在改裝 DC 排風機與本研究所設計之控制器之後，比較之下，排風機電能消耗將大幅下降，控制器成本也相當低廉，排風機動能也並無任何耗損。現階段我們直接採用 Arduino Pro Mini 開發板來進行開發。圖二為 ATmega328P 腳位圖。

3.3 DL302 二氧化碳感測器

DL302 二氧化碳感測器是一種工業級資料

紀錄器，DL302 二氧化碳感測器功能為二氧化碳、環境溫度、環境相對濕度以及露點溫度的資料提供，符合了我們洋菇生長需求的環境監測。工業級資料紀錄器是以 RS485 通信界面作為通訊，其中有三種通訊協定可供選擇，分別為 Modbus RTU、DCON 與 DCON ChkSum 通訊協定。MODICON[25]公司為自己所生產的 PLC 所開發的 Modbus 通訊協定，後來廣泛為工業界所使用。其中 Modbus RTU 是以 Binary 的方式來傳輸；則 DCON 是一個以 ASCII 字串為基礎，相對簡單且容易使用的通訊協定；DCON 與 DCONChkSum 的不同在於 DCONChk-Sum 加入了 Checksum 機制，Checksum 機制廣泛運用於通訊或其他序列傳輸的系統中，來校驗其傳輸封包，提供一定的可靠性。最後，我們使用 ModbusRTU 來作為通訊協定，以 Binary 方式傳輸，在計算過程中較為容易；圖三為 DL302 二氧化碳感測器示意圖。



圖二、ATmega328P 腳位圖(以 Arduino Pro Mini 為例)[22]

3.4 Modbus RTU 通訊協定

Modbus 是一種串行通訊協定，工業領域通訊協定的業界標準，並且現在是工業電子裝置之間相當常用的連線方式，Modbus 允許多個裝置連線在同一個網路上進行通訊，舉個例子，一個由測量溫度和濕度的裝置，並且將結果傳送給電腦。在 SCADA 資料採集與監視控制系統中，經常使用具 Modbus 通訊協定的感測器量測設備或控制設備，透過 Modbus 通訊協定將量測到之資料回傳與控制訊號送至設備端。Modbus 常用之通訊方式有 RTU(RS232/RS485)、TCP、UDP、ASCII 幾種型態，使用哪一種通訊協定必須視感測或控制設備元配置規格。DL302 二氧化碳感測器則設置有 Modbus RTU(RS485)與 Modbus TCP 兩種通訊協定，選擇其中之一來使用即可。Modbus 通訊結構如下：Master 設備詢問訊息包括其它

Slave 設備的位址或廣播位址、功能代碼、任何所需資料以及檢查錯誤欄位。Slave 設備回應訊息包括確認功能代碼、回應資料及檢查錯誤欄位。

其中前兩個 Byte 01 與 02 代表符號為傳輸順序標識符，是由 Modbus/TCP Master (Client) 指定；而 Byte 02 與 03 則是表示協定標識符；Byte 04 表示欄位長度中的 Upper Byte(訊息長度小於 256 (0xFF))；Byte 05 則表示欄位長度中的 Lower Byte (訊息長度同樣必須小於 256 (0xFF))，此欄位的組合可允許資料長度為 65536。



圖三、DL302 通訊配置圖[25]

表 1 Modbus TCP 訊息結構[26]

Modbus/TCP 訊息結構

Byte 00~05	Byte 06~11
6-byte header	RTU Data

Modbus/TCP 協定的前 6 個 Byte

Byte 00	Byte 01	Byte 02	Byte 03	Byte 04	Byte 05
傳輸順序標識符 (Transaction Identifier)	協定標識符 (Protocol Identifier)	欄位長度 (Upper Byte)	欄位長度 (Lower Byte)		

RTU Data 結構

Byte 06	Byte 07	Byte 08-09	Byte 10-11
站號 (Net ID)	功能代碼 (Function Code)	資料欄位	
		參考位址 (Address Mapping)	通道數 (Point)

而 RTU Data bytes 內容則為[26]：Byte 06 是為

設備之站號(Net ID)，也就是指定接收地址 (Modbus/TCP slave)設備的代號；而 Byte 07 功能代碼是指定所要執行之指令類型；最後的 Byte 08/09 與 Byte 10/11 的資料欄位則是資料區塊(參考位址+通道數)。在 Modbus RTU 結構中第一個 Byte 是接收位址。有效的位址範圍是 0 到 247。當位址為 0 的時候，是為廣播功能，當位址為 1 到 247 的時候，分別是 Modbus 設備的 Net ID。例如透過 Modbus TCP 跟 DL302 設備要二氧化碳濃度、溫度、濕度、露點溫度，則送出之請求碼為{0x00, 0x01, 0x00, 0x00, 0x00, 0x06, 0x01, 0x04, 0x00, 0x00, 0x00, 0x05}，DL302 回應訊息為{0x00, 0x01, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x01, 0x04, 0x0A, 0x02, 0x37, 0x16, 0x50, 0x09, 0xCB, 0x1E, 0x1B, 0x06, 0x3B}，其中 Byte 09/10 表示二氧化碳數值，Byte 11/12 表示濕度，Byte 13/14 表示攝氏溫度，Byte 15/16 表示華氏溫度，Byte 17/18 表示露點溫度。

表 2 功能代碼[26]

功能代碼	功能敘述	參考位址
01(0x01)	Read the Status of the Coils (Readback DOs)	0xxxx
02(0x02)	Read the Status of the Input (Reads DIIs)	1xxxx
03(0x03)	Read the Holding Registers (Readback AOs)	4xxxx
04(0x04)	Read the Input Registers (Reads AIs)	3xxxx
05(0x05)	Force a Single Coil (Writes DO)	0xxxx
06(0x06)	Preset a Single Register (Writes AO)	4xxxx
15(0x0F)	Force Multiple Coils (Writes DOs)	0xxxx
16(0x10)	Preset Multiple Registers (Writes AOs)	4xxxx

Modbus RTU 結構中第二個 Byte 是功能代碼。Function Code 是要求 Slave 設備需執行的類型。有效的 Function Code 範圍是 1 到 255 之間。而 Slave 設備的回應訊息可設定相同的 Function Code，當發生錯誤時，系統將 Function Code 最高位元設定為 1，此時 Master 設備會知道該訊息是否已正確發送。

3.5 PID 控制器

一個控制系統除了被控程序外，最主要還要有一個適當的控制器、適用的感測器與訊號迴路等軟硬體，如何針對被控程序的特性來設計一控制器是個重要的工作，好的控制器設計，

能讓系統性能達成我們所要的目標；反之，系統性能可能產生不穩定甚至出現發散的現象，在面對實際的系統上，如何做好完善的設計就有賴於模擬工程的應用了，模擬做得完整將來放到實際的系統上也不會有太大的差距。PID 控制器[27]是一種常見於工業控制應用中的閉迴路控制器(Close Loop)，此控制器原理為控制器利用收集到的數據與目標值進行比較，比較後所計算出差異值，此差異值則用於計算修正接下來新的輸入值，而該新的輸入值則可以讓系統的輸出朝目標值接近或持續維持在目標值。PID 控制器可以根據先前累積的數據與差異的出現率來進行輸入值調整，使系統更加準確而穩定。因此此研究即針對洋菇生長環境空氣中的二氧化碳來做進行一連串的控制測試，並分析在不同控制調協下的系統的性能響應，並找出最佳的控制性能。以期將二氧化碳的濃度控制在一定的數值之中，方便農民或菌類養殖專家能掌握有利洋菇生長的條件。

在這裡我們將討論 PID 控制器在閉迴路架構下的應用，傳統的閉迴路回饋控制架構如圖四所示，我們可由圖四中不難發現到，PID 控制器是由三個控制元件所組成的，其個別的特性分述如下：

P 比例控制(Proportional Control)

比例控制動作是藉由增益的改變，來調整系統的相對穩定度與穩態誤差，增益變大可以降低穩態上的誤差，但會相對的增加系統的不穩定性。

I. 積分控制(Integral Control)

當比例控制對系統來說有不足時，則必須有另外動態補償能力的控制動作才行，如積分控制(微分控制)，積分控制主要是可以消除穩態誤差，有利於雜訊的抑制，經常和比例控制搭配應用。

D. 微分控制(Derivative Control)

微分控制可改善系統的阻尼特性與暫態響應，主要的功能是預期誤差走向的功用，若是系統有明顯的干擾或雜訊時，微分控制反而會造成系統的不穩定，因此經常是和比例、積分控制一起使用。

$$G_c = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (1)$$

G_c ：控制器轉移函數

K_c ：比例增益

τ_i ：積分時間

τ_D ：微分時間

由圖四中我們可發現控制器與誤差之間關係

$$u(s) = G_c(s) \varepsilon(s) \quad (2)$$

將 PID 控制表示成離散型態方程式(3)，用來模擬實際控制現象：

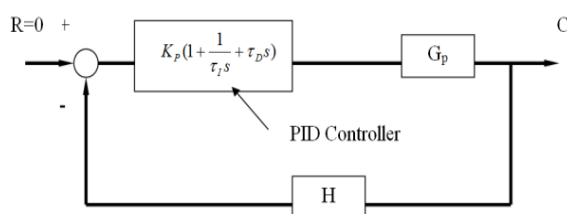
$$u(z) = K_c \left[\varepsilon(z) + \frac{\Delta t}{\tau_i} \left(\frac{1}{1-z^{-1}} \right) \varepsilon(z) + \frac{\tau_D}{\Delta t} (1-z^{-1}) \varepsilon(z) \right] \quad (3)$$

$u(z)$ ：控制器輸出

$\varepsilon(z)$ ：系統誤差值

Δt ：取樣時間

以上為 PID 控制器的表示式。



圖四、閉迴路下的 PID 控制器架構

其圖四中的控制系統程式執行流程：

$e = \text{Error}$ ； $e(i)$ ($i=1,2,3,\dots$)

$e_l = e(i-1)$ ； $e_{ll} = e(i-2)$

R ：系統目標值(Setpoint)

C ：系統輸出(System Output)

ADC：類比訊號轉數位處理

DAC：數位訊號轉類比處理

● Ziegler-Nichols Tuning 協調方法

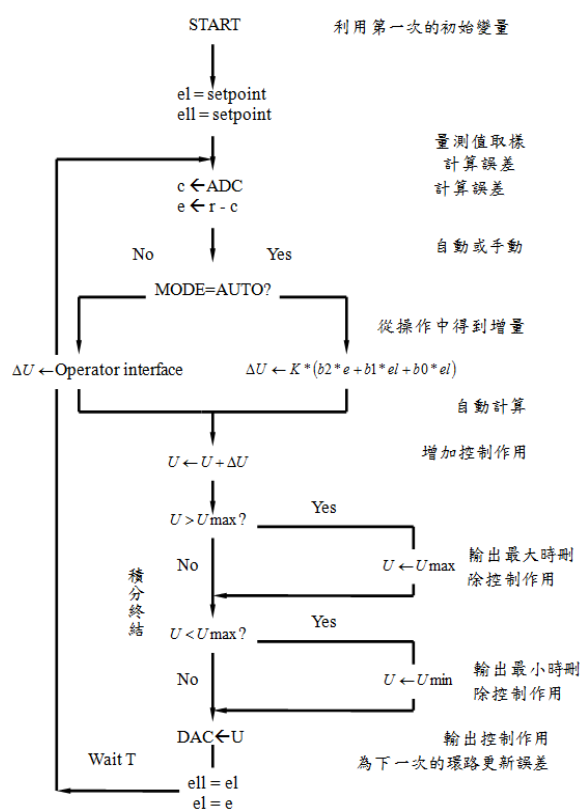
控制器必須依據被控系統行為來設計，而系統行為可透過物理現象分析與數學模式來建立，之後在進行系統穩定性分析，將系統特徵方程式排成羅斯表(Routh Table)，並分析極點零點的移動軌跡(根軌跡圖)，來判斷系統是否可以被控制。當系統無法或不易以數學模式來描述時，也可適用系統鑑定方式來進行。本研究的控制體(系統)是為流體型態二氧化碳氣體，因此不易建立系統的數學模式，所以直接採用系統鑑定方式進行，並假設模擬實驗系統是為一階導函數來進行實驗。

Ziegler-Nichols Tuning 協調方法在 PID 控制器調協參數的法則，經常應用在工業界中，在設計控制器上也是一種比較的標準，這種調

協方法是由 Ziegler 與 Nichols 在 1942 所提出 [27]，其中參數設計的原則是以步階響應下，過衝量呈現四分之一衰減為目標，在此調協法中存在著兩種方法，其敘述如下：

■ 方法一：透過實驗，找出系統對步階輸入訊號的響應，使用此法有一限制，控制的系統必須不包括主導共軛複數極點，響應曲線必須呈現 S 型才行(如圖六所示)。

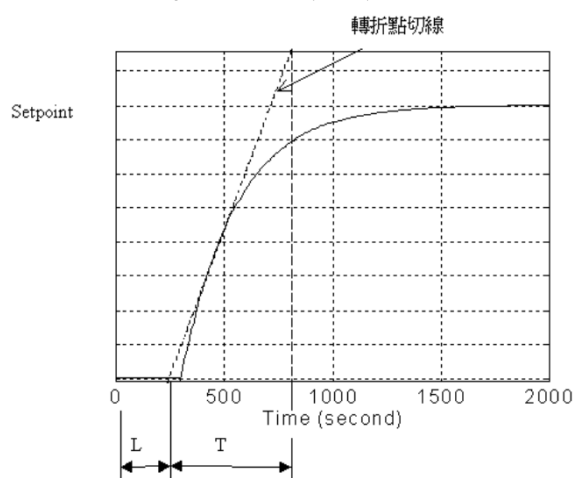
■ 方法二：在第二種型式下，我們先假設 $\tau_i = \infty$ 與 $\tau_D = 0$ ，在閉迴路控制架構下僅用比例控制，利用調整 K_c 的方法，將系統調至臨界振盪的型式，此時的 K_{cr} 是使系統首次呈現持續振盪的增益值，如果不論怎樣選取 K_c 的值，系統都無法呈現出振盪的型式，則不能使用此法。在找出臨界增益 K_{cr} 之後，即可找出相對應的週期 P_{cr} ，並將 K_{cr} 與 P_{cr} 帶入公式來確定 K_c 、 τ_i 、 τ_D 的值。



圖五、控制系統程式執行流程

本研究所使用的控制器以 PID 控制器為主，輸入為二氧化碳濃度，控制器控制參數為排風機轉速(電壓值輸出)與二氧化碳鋼瓶排氣控制閥(開啟時間)，量測值為二氧化碳濃度，由於

二氧化碳濃度控制反應需要一些時間，不適合使用微分控制來提升暫態響應。另外，PID 參數的調整上則直接使用 Ziegler-Nichols Tuning 方式來決定 K_C 與 τ_I 參數(表 3)。



圖六、S 響應曲線

表 3 Ziegler-Nichols Approximate Model PID 調協參數

控制器	K_C	τ_I	τ_D
P	$\frac{1}{K_p} \left(\frac{T}{L} \right)$	-	-
PI	$\frac{0.9}{K_p} \left(\frac{T}{L} \right)$	$3.33L$	-
PID	$\frac{1.2}{K_p} \left(\frac{T}{L} \right)$	$2L$	$0.5L$

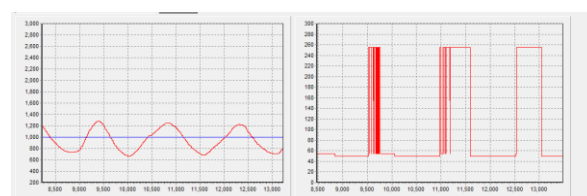
4. 實驗

在實驗的項目包含：ON/OFF 風扇開關實驗 I/II、Ziegler-Nichols Tuning 協調 PID 控制實驗、最佳 PID 控制實驗。透過上述五項實驗來展現本研究的控制結果，實驗過程中，將 ATmega328P 晶片接收到的 DL302 資料，透過 RS232 通訊協定傳送至電腦，並透過 C++ 程式撰寫之軟體進行資料紀錄與二氧化碳濃度變化曲線描繪，取樣週期為 100 毫秒，紀錄 5000 筆資料(共 500 秒時間)，二氧化碳濃度控制目標為(Setpoint)1000 ppm；實驗風扇 PWM 訊號最高 255 最低 50(此風扇接受訊號低於 50 都視同 50)，實驗說明分別如下：

4.1 實驗一：ON/OFF 風扇開關實驗 I(設定範圍控制)

此實驗主要是要展現一般常見溫室二氧化碳變動範圍控制方式，此方式常見於傳統非變頻冷氣使用。在此實驗中，設定二氧化碳在

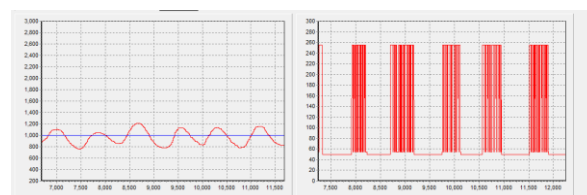
高於 1200 ppm 時啟動風扇，低於 800 ppm 時關閉風扇，透過 DL302 感測器量取二氧化碳濃度，並記錄下來。紀錄之資料量以 5000 筆為一視窗資料範圍，實驗結果如圖七所示；圖七中的左圖(紅色線是二氧化碳濃度、藍色線是目標值)是 DL302 感測器量測到二氧化碳濃度表現；右圖是給風扇 PWM 的訊號，因為是開啟與關閉兩種指令，所以 PWM 訊號僅會是 255(開啟)與 50(關閉)。我們可以從實驗結果發現，當二氧化碳濃度到達 1200 ppm 時，風扇會立即啟動，透過外部空氣的引入，可及降低二氧化碳濃度；當濃度低於 800 ppm 時，風扇關閉，然而此時氣體的流動無法立刻停止，因此，濃度仍持續下降至 700 ppm 附近。透過 5000 筆資料的觀察，整個溫室的二氧化碳濃度起伏不定，無法有效的穩定二氧化碳濃度於 1000 ppm 目標值。



圖七、ON/OFF 風扇開關實驗(800 ppm~1200 ppm)

4.2 實驗二：ON/OFF 風扇開關實驗 II(設定單一目標值控制)

為了降低二氧化碳濃度起伏變化程度，在此實驗，僅設定二氧化碳濃度高於 1000 ppm 時啟動風扇，低於 1000 ppm 時關閉風扇，同樣紀錄下 5000 筆資料來進行觀察，實驗結果如圖八所示；從圖八中的左圖來觀察，這樣的做法確實可以縮小二氧化碳濃度變動範圍；但右圖是風扇開啟關閉頻率也增加了許多，這樣高頻率的開啟關閉容易造成風扇的損壞，並不是一項理想的做法。

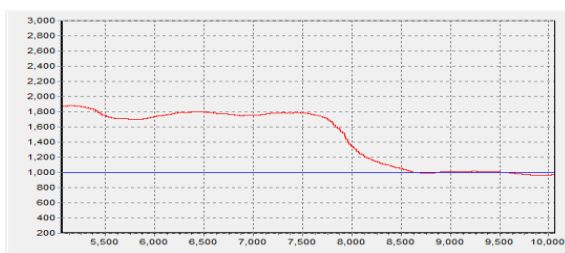


圖八、ON/OFF 風扇開關實驗(1000 ppm)

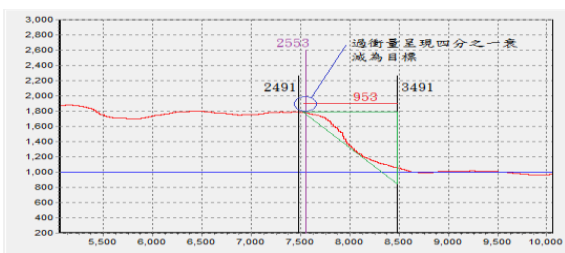
4.3 實驗三：Ziegler-Nichols Tuning 協調 PID 控制實驗

此實驗則依據 Ziegler-Nichols Tuning 協調第二型方式來設計 PID 控制器參數。在找尋

Ziegler-Nichols Tuning 參數的過程中，給予一個步階響應(Step Input)，透過此步階響應來找出 S 響應曲線(如圖九所示)，並推估出 K_p 、 T 、 L 參數(如圖十所示)，並依據表 3 計算出 PID 控制器參數(K_c, τ_I, τ_D)，其結果如表 4 所示，經過實驗發現 Ziegler-Nichols Tuning 方式對溫室二氧化碳控制效果並不佳，其結果如圖十一所示，從圖十一右圖 PWM 輸出訊號來看，PID 控制器確實有隨著二氧化碳濃度變動進行輸出訊號調整，但因氣體不同於馬達具有快速反應特性，導致控制結果如同實驗 II 一樣，透過此實驗證實 Ziegler-Nichols Tuning 方式不適用於氣體濃度的控制。



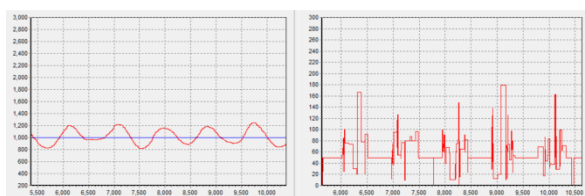
圖九、S 響應曲線(PWM：50 → 80)



圖十、S 響應曲線(K_p 、 T 、 L)

表 4 推論出之 Ziegler-Nichols Approximate Model PID 調協參數

控制器	K_C	τ_I	τ_D
P	0.75		
PI	0.67	156.51	
PID	0.89	94.00	23.50

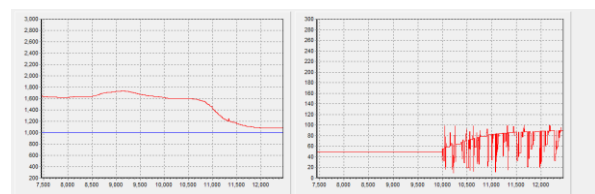


圖十一、Ziegler-Nichols Tuning 協調 PID 控制實驗

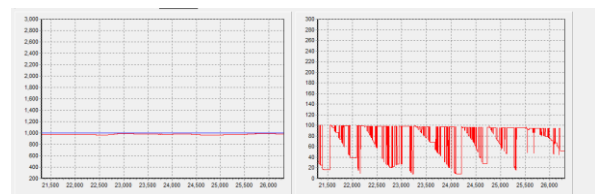
4.4 實驗四：最佳 PID 控制實驗

此實驗主要是從實驗三的結果來觀察到 I

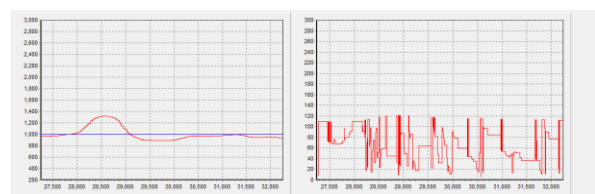
控制器參數太高使得風扇高速運轉的現象，這是因為控制器要立即修正目標誤差，然而風扇高速運轉的結果容易使得二氧化碳濃度過度變動，這也是因為氣體是彈性體，容易受到溫度、壓力而有所變化，所以 PID 控制器參數必須較小，也就是控制器的反應不能大，須慢速修正，這部分可當作是對一彈性體施力，施力越大反彈越大，輕微的施力反彈越小，施力小反應速度雖慢，但可修正到控制目標。此實驗 PID 控制參數為 $K_C = 0.01$ 、 $\tau_I = 0.0005$ 、 $\tau_D = 0.0025$ ，其結果展現在圖十二、十三與十四。在圖十二中，在 1000 秒之前 PID 控制器並未啟動，從 1000 秒之後啟動 PID 控制器，PID 控制器開始逐次輸出(看圖十二右圖)，在 2100 秒之後二氧化碳濃度的變化呈現穩定狀態(Stable)(圖十三左圖)；在 2800 秒時候，故意加大二氧化碳氣瓶氣體的流量，由圖十四左圖可以看到二氧化碳濃度僅變化一小段，之後 PID 控制器亦能立即進行輸出調整，讓二氧化碳能維持在系統控制目標 1000 ppm。經過反覆的實驗與驗證，此研究結果已經達成，吾等已經能將實驗室溫室中的二氧化碳濃度穩定控制。



圖十二、最佳 PID 控制實驗(I)



圖十三、最佳 PID 控制實驗(II)



圖十四、最佳 PID 控制實驗(III)

5. 結論

本研究進行溫室二氧化碳控制系統模擬環境建置，主要目的是為了進行日後實際菇舍溫室控制找出適當控制器，以及了解二氧化碳

氣體變動行為。透過模擬環境的建置，以及 PID 控制器的使用，本研究獲得許多重要的結果，傳統 ON/OFF 控制容易使得溫室二氧化碳濃度變化產生震盪，也容易使得風扇因經常性地開啟與關閉導致損壞；Ziegler-Nichols Tuning 協調 PID 控制也無法穩定的控制二氧化碳濃度維持在目標值，同樣也會產生震盪，不適用於氣體濃度控制；最後則是自行找出 PID 控制參數，找出之參數確實能將二氧化碳濃度維持在目標值，其結果相當穩定，穩態誤差也能保持在 ± 5 ppm 中。完成初步的研究後，接下來吾等將直接以景湍洋菇溫室作為實驗環境，並且使用高效能排風機來進行二氧化碳濃度調節，控制板仍使用本文章所提之 ATmega328P 晶片來執行 PID 控制器計算，以及排風機控制訊號輸出，另外，二氧化碳感測器也將改用可於高濕度環境下使用之 JV-250 感測器，完成閉迴路二氧化碳控制系統之研發。

參考文獻

- [1] 商業週刊, “為何全球年輕人都在瘋農業?”, 2015-05-06.
- [2] “2015 年行政院生產力 4.0 科技發展策略會議”, 104.06.04, <http://www.bost.ey.gov.tw/cp.aspx?n=94090FED75EFA410>
- [3] “行政院生產力 4.0 發展方案”, 104.09.14, <http://www.ey.gov.tw>
- [4] 陳昇明, 羅榮豪, “添加營養劑對洋菇產量的影響”, 國立中興大學生命科學院碩士在職專班碩士學位論文, 一月, 2013.
- [5] Hans Persson, (2003), "Mushrooms", Medicine, Issue 10, 1, 31:61-63.
- [6] El Enshasy HA; Hatti-Kaul R.;(2013), "Mushroom Immunomodulators: Unique Molecules With Unlimited Applications", Trends Biotechnol. ;31(12): 668-77.
- [7] 陳裕鏞; 張鴻民;(2004), "食品與生活：菇類食品的免疫調節能力", 科學發展, 384:30-37.
- [8] 翁啟惠;(2005), "中研院翁啟惠對靈芝多醣的觀點", 健康靈芝, 27: 8-13.
- [9] Ji-hong Zhou; Yong-mei Zuo; (2009), "Application of Computer Control System in the Greenhouse Environmental Management", 2009 International Conference on Future BioMedical Information Engineering, 204 - 205.
- [10] Zhang Chunfeng; Chen Yonghui; (2011), "Applications of DMC-PID algorithm in the measurement and control system for the greenhouse environmental factors", 2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 483-485.
- [11] J.N. Reed; S.J. Miles; J. Butler; M. Baldwin; , R. Noble; (2001), "AE-Automation and Emerging Technologies: Automatic Mushroom Harvester Development", Journal of Agricultural Engineering Research, 78: 15-23.
- [12] Irman Idris; Muhammad Ikhsan Sani; (2012), "Monitoring and Control of Aeroponic Growing System for Potato Production", 2012 IEEE Conference on Control, Systems & Industrial Informatics, 120-125.
- [13] Qi Liu; Dandan Jin; Jian Shen; Zhangjie Fu; Nigel Linge; (2016), "A WSN-Based Prediction Model of Microclimate in a Greenhouse Using Extreme Learning Approaches", 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 730-735.
- [14] Supun Athukorala; Irunika Weeraratne; Dumindu Jayathilaka; Asitha Bandaranayake; Roshan Ragel; (2016), "Affordable Real-Time Environment Monitoring System for Greenhouses", 2016 Manufacturing & Industrial Engineering Symposium (MIES), 1-5.
- [15] Shulian Yang; Yu Zhang; (2010), "Wireless Measurement and Control System for Environmental Parameters in Greenhouse", 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 3: 1099-1102.
- [16] Krutika Rao; Srijana K; Durga Prasad; K. Chandrasekaran; (2015), "Ubiquitous Greenhouse Monitoring System", 2015 International Conference on Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology (ICERECT), 335-339.
- [17] Quan Luo; Linlin Qin; Xiaofeng Li; Gang Wu; (2016), "The implementation of wireless sensor and control system in greenhouse based on ZigBee", 2016 35th Chinese Control Conference (CCC), 8474-8478.
- [18] Qiong Lin; Yuanyuan Lu; Jie Zhang; Wei Liu; Wenqiang Guan; Zhidong Wang; (2017), "Effects of High CO₂ In-Package Treatment on Flavor, Quality and Antioxidant Activity of Button Mushroom (*Agaricus bisporus*) During Postharvest Storage Original", Postharvest Biology and Technology, 123: 12-118.
- [19] Marcelo Barba Bellettini; Fernanda Assumpção Fiorda; Helayne Aparecida Maievas; Gerson Lopes Teixeira...;(2016),

- "Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp.", Saudi Journal of Biological Sciences, In Press, Corrected Proof.
- [20] Myoung-Jun Jang¹; Yun-Hae Lee; Young-Cheol Ju; Seong-Min Kim; Han-Mo Koo; (2013), "Effect of Color of Light Emitting Diode on Development of Fruit Body in *Hypsizygus Marmoreus*", *Mycobiology*, 56: 177-182.
- [21] Miyazaki, Y.; Masuno, K.; Abe, M.; Nishizawa, H....(), "Light-Stimulative Effects on The Cultivation Of Edible Mushrooms By Using Blue Led", *Mushroom biology and mushroom products. Proceedings of the 7th International Conference on Mushroom Biology and Mushroom Products*, Arcachon, 2: 58-67.
- [22] Atmel, Inc., Web Site: <http://www.atmel.com>
- [23] Arduino, Web Site: <https://www.arduino.cc>
- [24] PWM, Web Site: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>
- [25] 泓格 DL300 系列使用手冊.
- [26] 泓格 tWG700 使用手冊.
- [27] Jens Graf, "PID Control: Ziegler-Nichols Tuning", Create Space Independent Publishing Platform, 2013.