

2024 年【科學探究競賽-這樣教我就懂】

普高組 成果報告表單

題目名稱： 數位生物實驗室：研製酵母實驗之即時觀測儀器

一、摘要

酵母菌，這種與眾不同的真菌在人類的化學領域、飲食文化以及歷史中扮演了不可或缺的角色。從製作麵包時的發酵過程，到在高級化學工程中生產酒精等複雜物質，酵母菌的重要性不言而喻。本研究利用 Arduino 作為核心，配合飛秒雷射測距感測器，並以 Python 繪製出即時距離與體積的曲線圖。透過數位科技來減少純肉眼觀測中所造成的誤差，以對酵母菌在糖類溶液中的發酵速率進行精確量測，並在得到每秒量一次的資料後，對其進行曲線繪製、斜率判斷其速率的差異，並探討其發生原因。

二、探究題目與動機

在學校的課程中，我們透過實際操作實驗，來學習自然科學原理、並鼓勵我們延伸探究學習。在其中的一個生物實驗中，我們實際觀察了酵母在發酵過程中，產出 CO₂ 的現象。以葡萄糖為例，化學反應式如下：



酵母行無氧呼吸，發酵作用將醣轉化為 CO₂ 以及酒精。而課堂中，老師帶領著同學利用 60 毫升的針筒，吸取了 20 毫升的酵母與糖的混合液。接著封閉針頭，讓酵母在針筒內進行發酵作用。而由實驗組員每 3 分鐘進行一次目測針筒刻度來觀察因二氧化碳體積增加而推動針筒推柄的過程，進而了解發酵作用時的 CO₂ 的產生率(毫升/分鐘)。

這個實驗相當有趣，讓我們可以使用簡單的器材就能觀察到那生物與化學的所交織的美妙交響曲。然而，我們思考了兩個問題。第一，我們所使用的針筒，它的刻度是否精準？我們使用肉眼觀察刻度不僅無法察覺微小變化，更會因為組員間對於刻度的認定差異，導致實驗的變異性。第二、每三分鐘肉眼觀察一次刻度，這樣的觀察間隔無法看出短時間內氣體體積的變化。搭配著在資訊課程中所學到的程式語言，我們思考著，有沒有什麼方式，能夠利用數位的方式來協助這個實驗？能不能藉由程式語言與感測器的結合，來製作出一個體積改變的觀察設備，即時的觀察發酵作用中 CO₂ 體積改變的過程呢？讓生物、化學與資訊科技，共譜一個新的美麗篇章，並能用簡易且貼近生活的實驗來讓科學學習的過程更有趣，不正是本活動—2024 年【科學探究競賽-這樣教我就懂】所鼓勵的嗎？我們以此為初衷開始了本項專題研究。

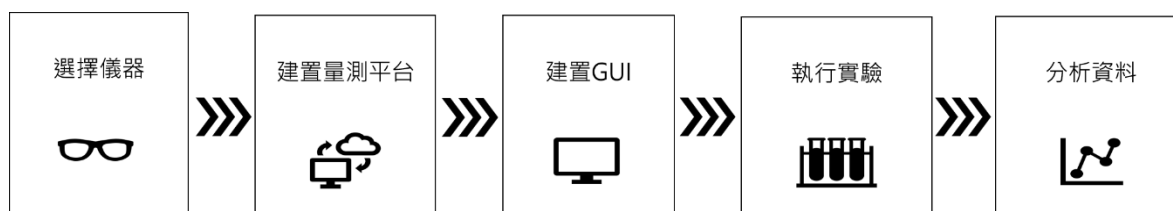
三、探究目的與假設

為了要完成我們心中的數位觀測儀器，首先我們觀察原先的針筒刻度觀法，其中一個很明顯的特徵就是在酵母產氣的過程，針筒推柄會有一個明確的位移。且針筒內部空間為圓柱狀，這意謂的針筒內部空氣或液體的體積應約正比針筒柄的位移。可由 $V = A \times \Delta L$ 這個數學式來描述。其中，V 為針筒腔室內體積，A 為圓柱體截面積， ΔL 則為針筒柄比排

空狀況時的相對位移。若 A 假設為固定，則 V 應正比於 ΔL 。因此，若是能夠有一個感測器能觀察到位移 ΔL ，我們是不是就能估計出體積 V。而這樣的位移量測，我們在生活中常常能看到相關的應用。例如，在家中的電子鋼琴上，可以看到一個滑桿。利用這個滑桿的位移，我們得以調整電子鋼琴的音量大小。還有父母親駕駛汽車時，倒車雷達得以偵測車後方與障礙物之間的距離，並用聲音來警示即將碰撞。根據實驗過程的延伸理解與日常生活的觀察，我們因此提出以下假設。那就是我們可以利用一個位移感測器，搭配視窗程式設計，來完成一個即時的發酵氣體體積量測裝置，利用電腦快速資料取樣及紀錄，我們可以更密集更精準地觀察以及紀錄 CO₂ 產出的過程。

四、探究方法與驗證步驟

本項探索研究的核心就是要能夠製作一個距離感測裝置，並且搭配 Arduino Uno 微控制板，將所測得的距離資料透過 USB 介面傳送至電腦。之後將數值讀取進電腦程式中，即時繪製並紀錄針筒柄的位移距離。最後再根據位移距離來推得 CO₂ 的產出體積。我們將這個儀器命名為「數位生物實驗室」。



圖一:專題流程圖

(一)選擇儀器

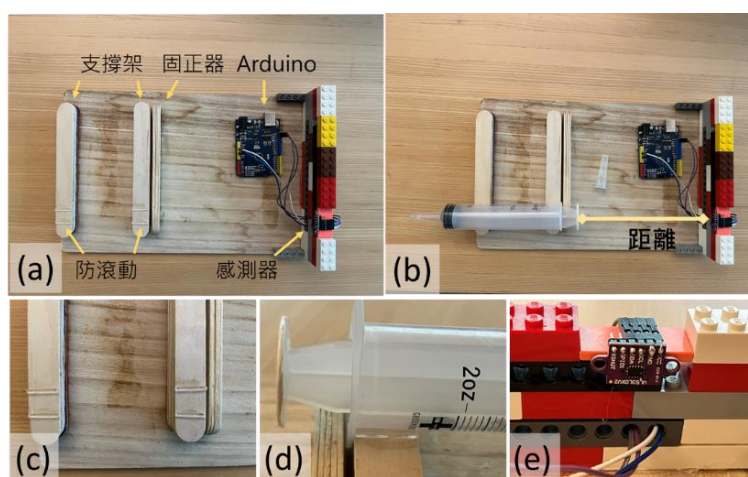
研究的第一步是去找尋適合的感測器，我們透過 iCShop 及祥昌電子採購到了以下三種感測器 (1)滑動型可變電阻(PTL60-10R0-104B2)、(2)超音波測距感測模組 (US-100)、(3)雷射測距感測器模組(VL53L0X V2 ToF)三個選項。而再經過更深入的了解後，我們排除了前兩個選項。以選項(1)來說，原始的想法是利用針筒柄的位移去推動滑桿，再利用物理學中的歐姆定律 $V = I \times R$ ，隨著位移造成的電阻改變，電壓也會改變。也因此我們得以利用觀測電壓來間接得知位移。然而該可變電阻在滑動時具有摩擦阻力，這個阻力勢必使得 CO₂ 氣體更難以推動針筒柄，也因此我們排除了此選項。

而選項(2)及(3)分別以超音波以及光學來無接觸量測，沒有前述阻力的缺點。再更深入比較兩個感測器後，我們發現兩者的幾項差異 (1)由於光線的直進性，光學感測器較適合量測小型物體，例如我們的觀察目標針筒柄，(2)聲速在不同溫度的空氣中約為 $331.4 + 0.6T(m/s)$ [1]，其中 T 為攝氏溫度。而光速在空氣中因溫度的改變幾乎可以忽略[1]，因此利用光速量測物體距離受室溫影響較小，(3)規格表的中兩者精確度相似。因此我們最後選擇了選項(3)。該模組利用了意法半導體公司所生產的 VL53L0X 積體電路，整合了波長為 940nm 雷射光發射器以及紅外線感測器，利用飛時測距原理[2] (Time of Flight, TOF)，透過計算光發射與接收之間的時間差再透過光速來推算得到反光物體的距離。

我們將這個感應器透過杜邦線連接至 Arduino Uno 板，如圖一(a)所示。而我們將感測器的操作在高精確度模式[3]，我們設定觀察周期為每秒一次，並且由 Arduino 板透過 USB 序列埠傳目標筆記型電腦 ASUS ExpertBook 以供後續 Python 繪製體積時間曲線圖型。我們將程式碼完成並透過 Arduino IDE (2.3.1) 上傳至 Arduino Uno 板。

(二)建置量測平台

接下來我們建置了放置針筒的平台，如下圖所示。使用的材料由文具行以及美術材料行取得。主要有 A4 大小木板、冰棒棍、透明壓克力方柱以及樂高積木等，而材料之間黏合使用保麗龍膠以及熱融膠。首先我們用冰棒棍貼合出兩個支撐架及固定器，並在上面用細小的壓克力方柱來防止針筒的滾動，如圖一(c)所示。而固定器與支架的細縫剛好能卡入針筒後方的握柄，目的是讓針筒每次擺上去的距離與感測器間的距離一致，如圖一(d)所示。而圖一(e)則顯示了距離感測器以及利用樂高孔洞整理杜邦線的設計，圖一(b)則顯示了針筒置放在支架上的情形。我們所採購的針筒為綠十字塑膠灌食空針 (滅菌, 60ml, 含針筒蓋)。內附的針筒蓋具有很好的密合性，能夠避免氣體的洩露造成實驗失敗。此外，針筒是半透明的，較不利於光線反射。因此我們用壓克力顏料將整個尾端塗成白色。



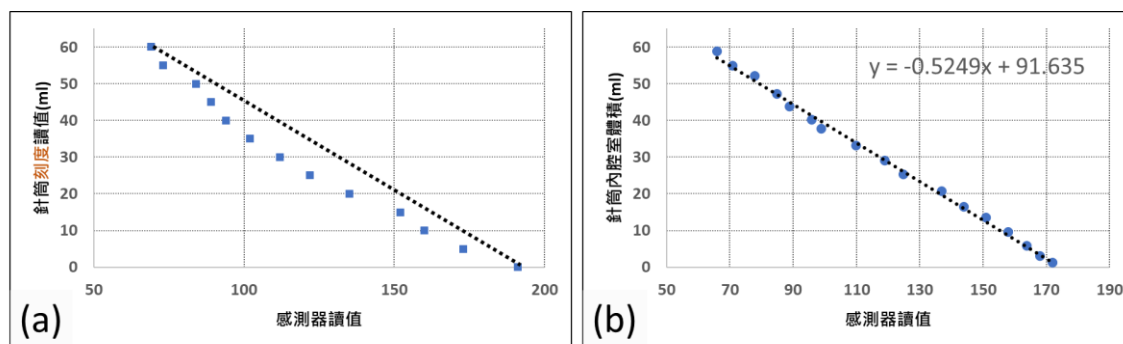
圖二:Arduino 量測原型機

(三)建置 GUI

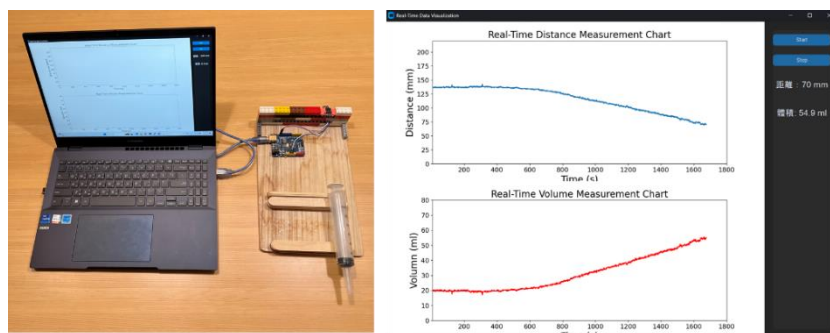
我們接著開始 Python(3.8) 程式碼的撰寫。我們透過 PySerial 模組透過 USB 接收來自 Arduino 的距離量測資訊，並將接收的時間以及距離的資訊紀錄在陣列中並寫入一個 CSV 檔案。此外，我們更透過 Tkinter 以及 Matplotlib 設計了一個使用者界面以及繪製即時體積時間曲線圖。接著我們將筆電與感測器連接，開始校準儀器。感測器給出的讀值為距離 (mm)，而我們想獲得的是體積 (ml)。因此一開始最簡單的想法是將針筒推至完全排空及特定刻度，量測獲得距離。我們初步得到 $(V, \Delta L) = (0 \text{ ml}, 191 \text{ mm})$ 及 $(60 \text{ ml}, 69 \text{ mm})$ 兩個數據點，接利用兩點求直線公式來獲得換算公式。然而我們調整不同的刻度的去測試這個方程式，距離與體積的關係並不如預期一般呈現線性變化的結果，如圖二(b)所示。探究其原因，我們想到兩個可能性。(1)針筒上的刻度不精確，因為該針筒是用來灌食而非量

測，因此上面的印刷刻度可能不精確，這個部份我們透過了標準量筒的測試得到證實。(2) 距離感測器的輸出有誤差，雖然我們的量測距離在其操作範圍之內，但光的發射與接收畢竟是在極短的時間內完成，在短距離量測的情況，反應時間更短或許會形成更大的誤差。

考量到這兩個因素，我們設計了以下的實驗來完成校準。我們先利用空針筒將電子秤歸零。接著抽滿過濾水之後，量測重量以及其對應的光感應距離量測值。而後隨機擠出筒中液體再量測重量及並紀錄此時感測器讀值。重覆這個動作之後，我們可以得到距離讀值與過濾水重量之間的關係，再利用密度公式 $V = M / D$ (V : 體積、 M : 質量、 D : 密度)，我們假設水的密度為 1ml/g ，因此可以推算距離讀值與針筒腔內體積的關係圖如下圖所示。而利用 Excel 所求出的趨勢線方程式，我們獲得了感測器讀值與體積的相關方程式。 $V = -0.5249 \times \Delta L + 91.635$ 。經過校準程序獲得轉換方程式，我們將其寫入 Python 程式碼中。我們總算完成了「數位生物實驗室」的原型機。整套儀器與視窗介面如圖三所示。



圖三：感測器讀值與(a)針筒上刻度讀值 (b)電子秤重量換算體積之間的關係



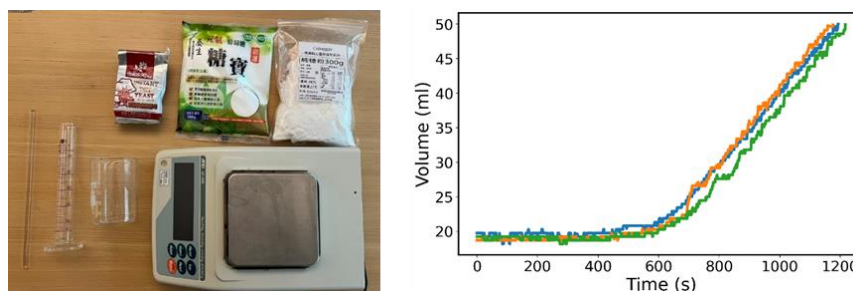
圖四：數位生物實驗室及其使用者介面

(四)執行實驗

為了進行酵母發酵實驗。我們額外所準備的器具及材料如下 (1)電子秤 (A&D-GF-200), (2)量筒 (50ml), (3)燒杯 (250ml), (4)玻璃攪拌棒, (5)永誠工業即溶快發酵母(100g), (6)富鼎生技純葡萄糖(300g), (7)棋軒實業純蔗糖(300g)。其中量筒等玻璃容器與酵母糖粉分別於龍洋容器及棋美點心屋購得，如圖四(左)所示。我們先將酵母 8g 以及過濾水 50ml 充份攪拌後，再加入糖粉 2g 攪拌後，以針筒抽取約 20ml 後，封閉針筒蓋。將針筒放上數位生物實驗室後，開始以 Python 程式讀取數值、記錄資料以及繪製曲線。

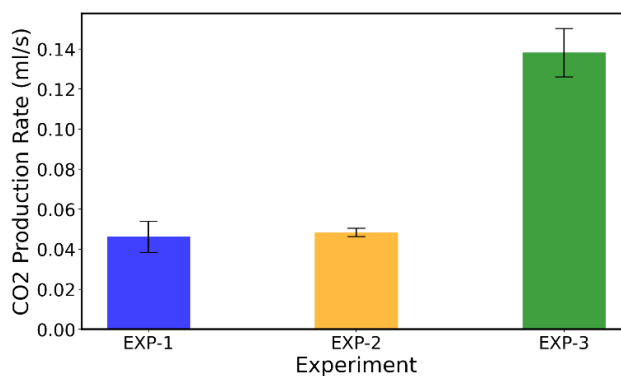
(五)分析資料

我們共設計了三個實驗：(1) EXP-1: 葡萄糖搭配室溫水(2) EXP-2: 蔗糖搭配室溫水及(3) EXP-3: 蔗糖搭配加溫水。其中加溫水為室溫水以微波爐微波 10 秒。每個實驗設定重覆三次，之後用所紀錄的 CSV 檔案儲存之後分析。將曲線平均後觀察結果。圖四(b)所展示的是三次重覆的 EXP-2 蔗糖實驗。實驗當天的室溫約為 20 度，我們可以看到經由「數位生物實驗室」所量測出來的發酵氣體體積，在約第十分鐘後開始有明顯的增加。



圖五: (左)實驗材料及器材，(右)EXP-2 三次量測結果

這顯示了酵母在這個溫度之下，需要有一段時間活化，當針筒內氣體壓力，大於由大氣壓力及針筒內的橡皮的最大靜磨擦力時所形成的壓力時， CO_2 將推動針筒柄，而這個移動可以由我們設計的裝置來測量到。從這此曲線中，我們取出最後 100 秒的資料進行線性迴歸的計算，獲得斜率分別為，0.048, 0.051 及 0.046 (ml/s)，因此可以獲得 EXP-2 的 CO_2 產出率平均值為 0.048(ml/s)，標準差為 0.002 (ml/s)。接著我們將三次實驗的結果以長條顯示如下圖(c)。



圖六: 蔗糖、葡萄糖、加熱的葡萄糖發酵液之實驗盒狀圖

比較 EXP-1 及 EXP-2 的結果，兩者間之操作變因為糖的種類。我們可以發現使用葡萄糖及蔗糖來進行發酵實驗， CO_2 的產氣速率沒有明顯不同。這個觀察與加拿大 Waterloo 大學 Chem13 News Magazine 中 Charles Pepin 的報告結果類似[4]。此外，我們參考該報告以微波爐來加熱的方式讓液體升溫(EXP-3)。結果發現，EXP-3 產氣效率大增(平均約為 0.138 ml/s)，並且總實驗縮短至 5 分鐘就完成了。比較 EXP-2 及 EXP-3，操作變因為 10 秒的微波爐加熱。因此可以知道，發酵液的溫度，對於發酵速度有著明顯的影響。經由上面的實驗，我們發現以 TOF 距離量測技術所製作的「數位生物實驗室」確實可以即時量測發酵實驗的產氣量，經過仔細的儀器校正後。這個儀器能夠克服肉眼的量測誤差，並且用每

秒一次的取樣速度來即時紀錄實驗數據，並繪製圖形。這個可行性評估驗證了我們最初的假設。所得到的實驗結果與文獻一致。「數位生物實驗室」快速且精準的紀錄能力，尤其在 EXP-3 的加溫發酵實驗得以展現。若是該實驗僅有人眼每三分鐘觀察一次，而 5 分鐘後針筒柄即將突破整個密閉空間，意謂著實驗數據僅有兩個數據點 (0 分鐘，3 分鐘)，不利於產氣效率的計算。而我們所研發的裝置，便能改善這個缺點。

然而，我們的實驗還有許多改進的空間。例如，光學感測器容易受到外部光線干擾，實驗過程中如果有開關燈的動作容易造成雜訊。因此，未來可以將裝置放入一個不透光的盒子中，來避免這個問題。此外針筒柄的橡膠塞所形成的磨擦力無法估計，雖然我們所有的實驗都是用同一個針筒完成。但是橡膠塞的磨擦力可能會因為接觸面而改變，因而改變筒內的氣體壓力。根據理想氣體方程式 $pV = nRT$ ，當 CO_2 之莫耳數及溫度相同的情形下，氣體體積與壓力呈現反比。若無法估計磨擦力，極可能造成實驗的誤差。未來應該可以引入氣壓及溫度感測器，讓視窗程式紀錄距離、推算體積、氣壓以及溫度，更可能直接由公式反推莫耳數，讓這個實驗可以更完善。

五、結論與生活應用

本項科學探究驗證了以距離感測器結合 Arduino 微控制板及 Python 程式來即時同步觀測發酵作用的可行性。並且使用所完成的儀器探討了在不同變因下，發酵作用的產氣效率。本研究的結論為：(1)數位生物實驗室的構想確實可行，(2)葡萄糖與蔗糖的使用對發酵速率的影響並不大，(3)溶液的溫度明顯影響發酵作用。而在生活中，距離感測器的可以應用在自動化設備對於物體距離的觀測，例如自動駕駛車對於周遭障礙物的判斷。而使用感測器結合 Arduino 及 Python 的則可能讓我們能簡易的在家中完成環境的量測，例如智慧家庭中的，溫溼度感測、照明感測等應用。另外，發酵作用一直是食品工業中重要的角色，若能應用數位科技在麵包製作及釀酒等產業上，將可能提升其生產效率或品質風味。酵母本身即為生活中常見的材料，本次實驗能以此發展而來本身就有鼓勵人們從生活中尋找靈感與科學思考的意義。這個研究起源於一門學校的實驗課，而我們結合了在資訊課所習電腦程式能力，將這個實驗研究繼續延伸。在製作過程中，充份體會了「學以致用」的樂趣。原本在書本裏的化學式、生物知識、物理原理以及資訊科學，在本次探究實驗中共譜一個交響曲。雖然過程非常的艱辛，但看到曲線動起來的那一刻，那種成就感帶給我們極大滿足。也讓我們能更堅定地探究知識，以徜徉在浩瀚無垠的科學大海裏。

參考資料

1. Benson, H. (2019). University Physics Third Revised Edition. Benson.
2. Li, L. (2014). Time-of-Flight Camera – An Introduction (SLOA190B). Sensing Solutions.
3. VL53L0X Distance Sensor User Manual. (2018). Version V1.0.0. Retrieved from <https://www.waveshare.com/w/upload/0/01/VL53L0X-Distance-Sensor-User-Manual-en.pdf>
4. Pepin, C., & Marzacco, C. (2015). The fermentation of sugars using yeast: A discovery experiment., Chem13 News Magazine, University of Waterloo, Canada