

第十四屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA14-150

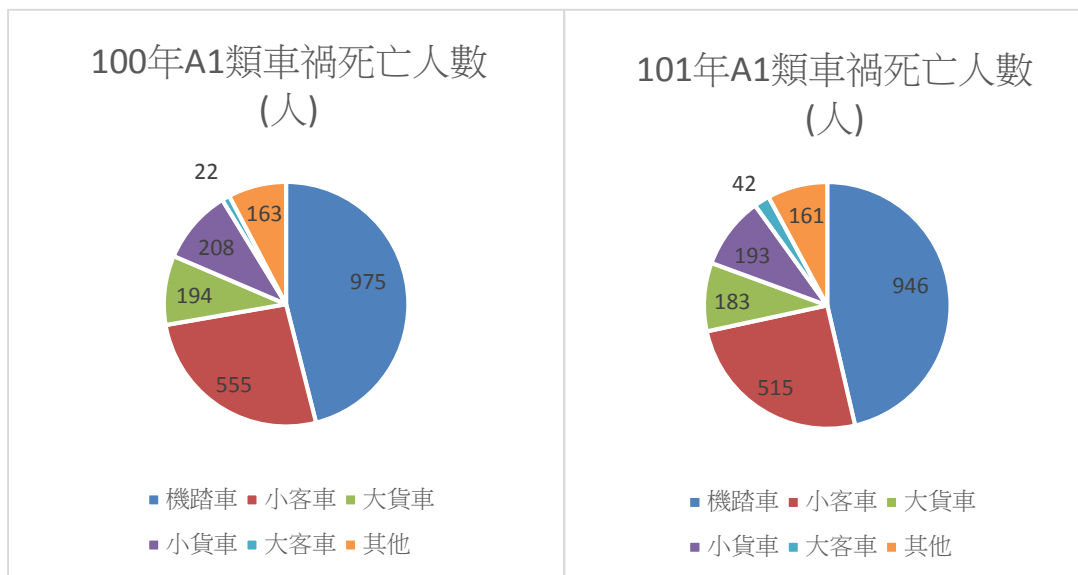
作品名稱：「洞」燭「機」先——道路坑洞偵測機器人

姓名：羅容川

關鍵字：Arduino、機器人、路面坑洞

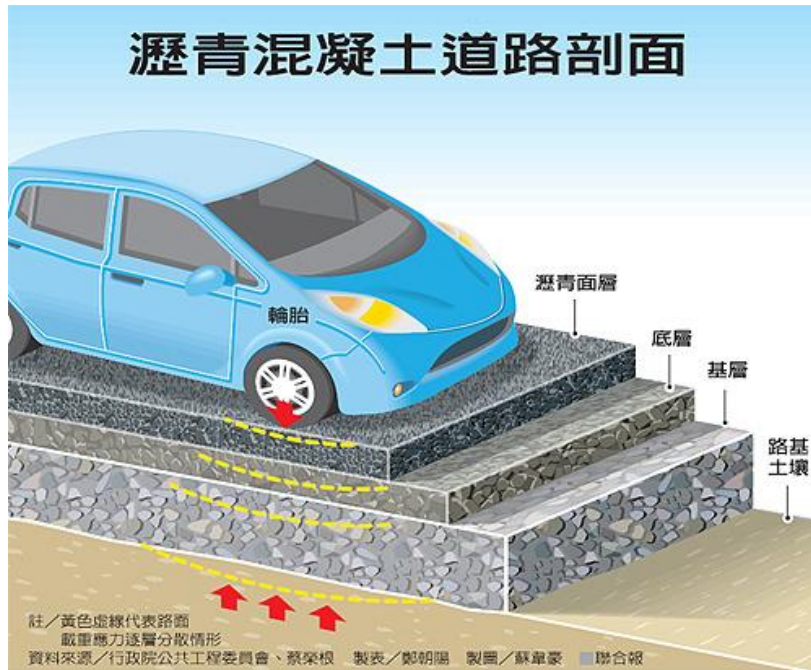
壹、研究動機

台灣車禍死亡率相對偏高，其中機車占很大比例，傷亡率也非常高，依據交通部的統計，99年至101年的車禍死亡案件中，有將近一半的死亡人數都是機車駕駛(表一~表二)。除了駕駛人之疏失外，道路坑洞的缺陷更危及駕駛與行人的安全。



(表一~表二：100、101年A1類交通事故死亡人數統計表)(資料來源：交通部統計查詢網)

機車行駛的穩定度深受道路品質影響，而台灣的道路構築大都以柔性鋪面—瀝青混凝土—為主，容易因路面材料的老化、交通運輸工具反覆荷重碾壓、氣候因素與施工挖掘等導致路面機能與結構產生破壞，影響交通安全和舒適度。衍生之意外事故往往造成生命財產損失並增加社會成本支出，為數眾多的道路坑洞更成為亟需處理的嚴重社會安全問題。



(圖一：柔性道路鋪面結構)(圖片來源：聯合報新聞網)

近年來，道路養護權責單位也逐漸重視提升道路服務水準，延續道路使用壽命及永續發展管理，正在發展坑洞偵測及通報系統，如：民眾網路通報系統。然而，現行的坑洞測量通報系統仍有其缺陷。



(圖二：網路坑洞通報系統)(圖片來源：宜蘭縣路平通報網站)

若由民眾肉眼判斷，人工通報，既無法量化路面狀況也不便測量與了解整體狀況，因此若能透過簡單的機器輔助，偵測坑洞並收集其位置、深度、大小等數據，便能準確分析坑洞，防微杜漸地預防較小的裂縫與凹洞持續加深擴大，並先行維修狀況最危急的坑洞，有助於有效率的道路保養。因此，我決定設計出一種

裝置，以偵測路面上的坑洞數據，並即時傳出資料，建立中央資料庫，以便規劃日後的維修作業，並提醒駕駛避開坑洞路段，提升安全性。

貳、研究目的

為了解決路面坑洞維修時因為沒有系統化坑洞記錄造成的不便，使工務單位能針對最需要及時維修的路段進行修護，用路人也能得到提醒，我們的研究以設計一個坑洞偵測系統為目的，並製作一個模型—「坑洞偵測機器人」—測試其功用和發展系統，更以低成本、操作簡易、使用方便為目標，以利日後推廣使用。

一、運用超音波測距裝置測量路面，獲得道路坑洞深度等數據

二、以 Arduino 系統為平台，整合微晶片處理器、傳輸裝置及偵測裝置

三、以 Arduino 坑洞偵測機器人進行不同類型的道路偵測，並回傳資料至電腦，以整合各項數據

四、分析測得數據，以測得數據判斷路面狀況

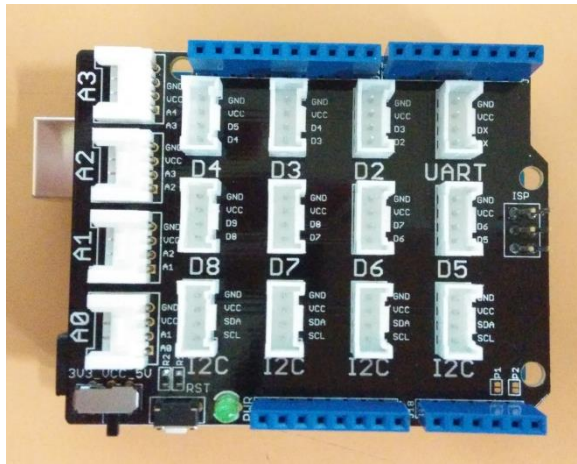
參、研究設備及材料

<u>研究材料</u>	<u>功能</u>
ARDUINO UNO REV3 微處理器	系統控制核心
GROVE BASE SHIELD 轉接板	在 Arduino 微處理器上擴充 GROVE 模組
HC-SR04 超音波感測模組	偵測距離
GROVE GPS 模組	紀錄坑洞絕對位置
GROVE 3-AXIS DIGITAL GYRO 陀螺儀	測量自走車傾斜角度
GROVE 433MHZ 無線發射模組	發送訊息
GROVE 433MHZ 無線接收模組	接收訊息
麵包板	

自走車

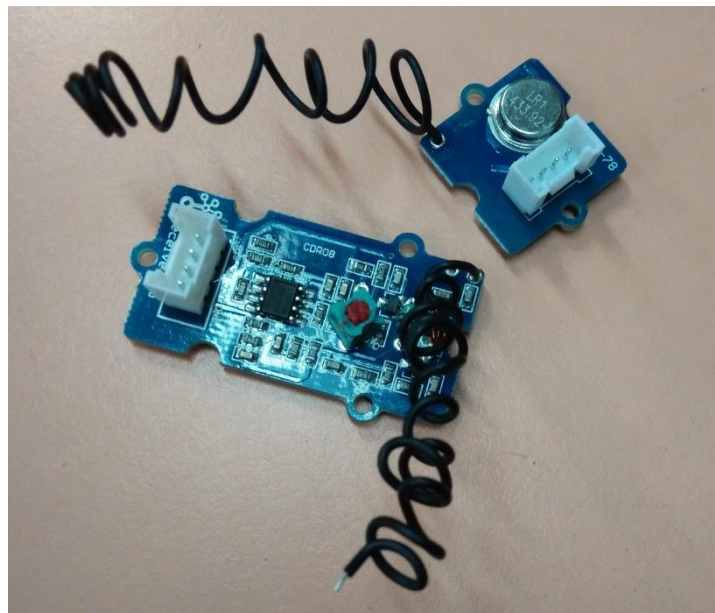
自製模擬路面

模擬坑洞情況



(圖三：GROVE 擴充板加裝於 Arduino UNO 控制板上)

(圖四：自製模擬路面)



(圖五：Grove 433MHZ 無線模組 —發射+接收端)

研究設備

功能

筆記型電腦	接收與儲存資料
桌上型電腦	編寫程式
ARDUINO IDE 軟體	Arduino 程式編寫軟體

肆、研究過程及方法

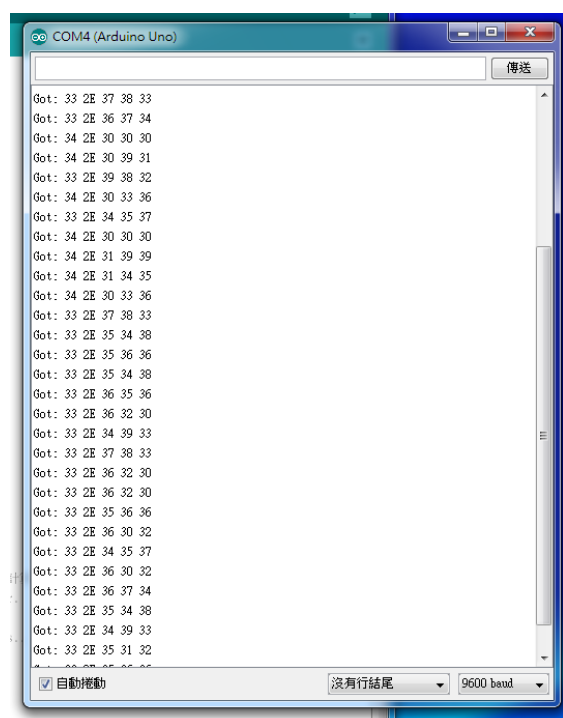
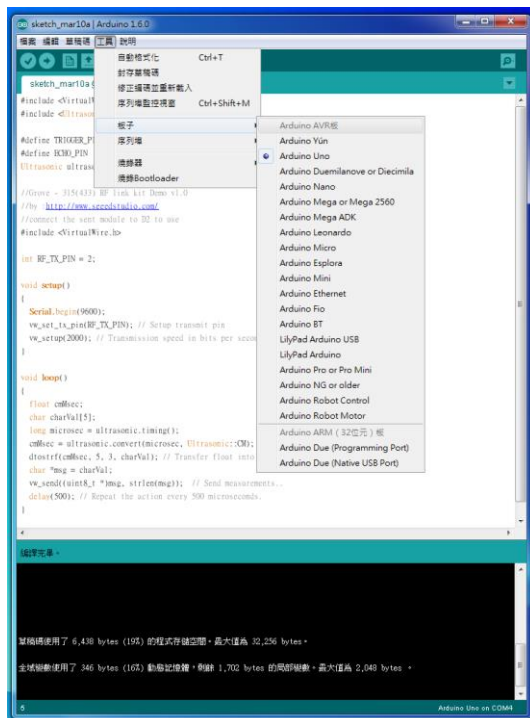
一、研究材料探討與應用方法

〈一〉 ARDUINO 開發模組環境探討

Arduino 包含硬體與軟體兩大部分：

1. 軟體發展環境(Arduino IDE):

Arduino IDE 是一整合開發環境的軟體，使用與 java、C/C++語法相似的 Processing/Wiring 開發環境，並可以在不同作業平台上開發，具備文字編輯介面、常用工具欄、圖形化控制介面及錯誤編輯器，可將編寫的程式上傳至控制板。

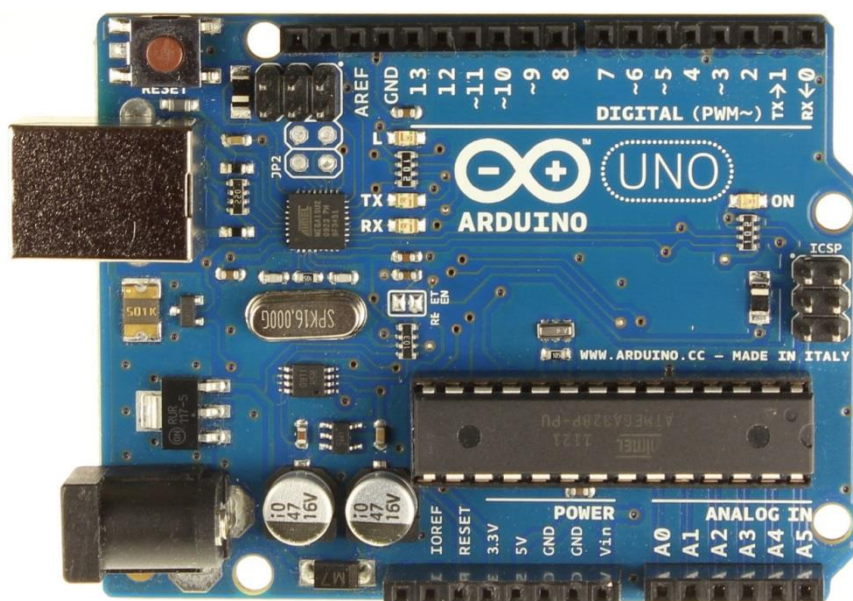


(圖六、七：Arduino IDE 開發環境介面和 Serial Monitor)

2. 硬體控制板(Arduino I/O board):

Arduino 是一塊基於開放原始碼發展出來的 I/O 介面控制板，為一單晶片微電腦，它有幾項特點：

- i. 提供數位式與類比式輸出/入端，支援 USB 資料傳輸，Arduino 電路可獨立運作，也可與電腦搭配運作。
- ii. 能結合其他電子元件如感測器、控制器件或其他輸出裝置，再由控制器來驅動。
- iii. 有各種的擴充系統，如本研究所使用的 GROVE，可以結合更多型態和種類的裝置至 Arduino 控制板。

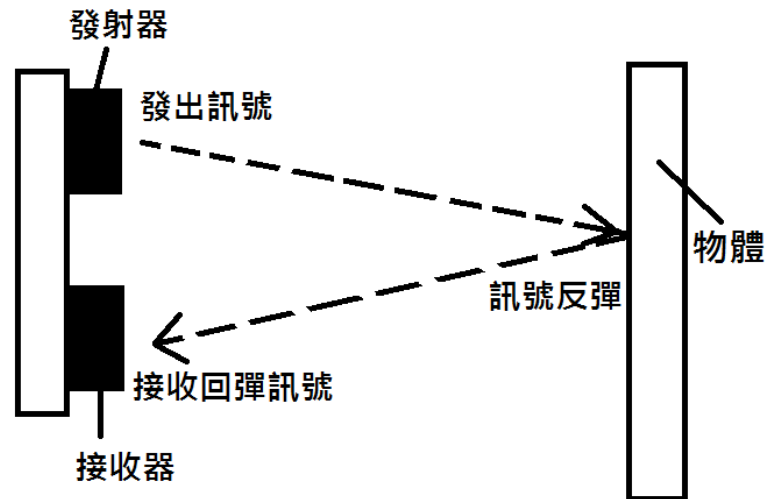


(圖八：Arduino UNO 微電腦控制板)(圖片來源：Arduino.cc)

Arduino 的優點在於其高開發性、低入門門檻、價格較一般電路板便宜，且能快速製作電路電子原型，具彈性且易使用，不須外接電源，也可使用外接電壓輸入，支援多樣的互動程式。再加上程式語法簡單，程式開發環境能免費下載，因此 Arduino 以公開共享為基礎開放原始碼，網路上資源眾多，能利用易取得的程式模組資料，進行自動控制，並可依據官方提供之硬體資料，調整電路板及元件。

〈二〉超音波感測器(Ultrasonic Sensor)之探討:

超音波是人耳無法辨識(>20kHz)的高音頻聲波，依據其不同的功率可分別應用於清洗、焊接、醫療診斷、偵測、測量定位等用途，是非常實用的非接觸式系統。本作品使用的超音波工具為一距離感測模組，利用類似聲納的工作原理，運用超音波會被其路徑上物體反彈的特性，測量物體的距離。



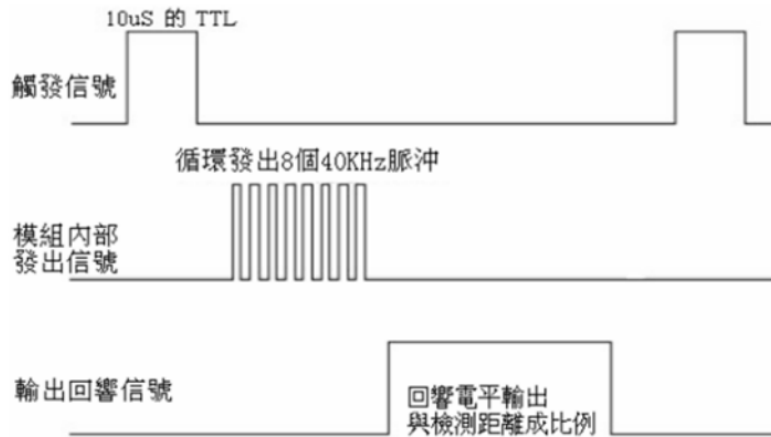
(圖九：超音波接收信號)

超音波感測器包含超音波發射器、接收器與控制電路，其工作原理為量測超音波發射至接收到反射波的時間，當其啟動時，會發射 40kHz 的方波，並檢測是否有信號返回。當接收到信號時，會輸出一高電位，而高電位持續時間便是超音波發射到返回的傳播時間，並藉由換算公式求得距離：

$$V \text{ (m/sec)} = 331.5 + 0.60714t \quad (V \text{ 為超音波在空氣 } t^{\circ} \text{ C 下之傳播速率})$$

$$T \text{ (microseconds/cm)} = 100000 / V * 100 \quad (T \text{ 為聲音傳播一公分所需時間})$$

$L \text{ (cm)} = \text{timing} / T / 2$ (timing 為測量到之超音波傳播時間，L 為超音波感測器與物體表面距離)。



(圖十：超音波測距原理)(圖片來源：Arduino 智慧型居家監控系統)

超音波感測器是一實用的距離偵測儀器，因此被廣泛應用於機器人、自走車還有汽車上作為距離感測和避障之用。超音波測距相較於其他測距方式，雖然測量距離較短，但是精確度較高，以本研究使用之 HC-SR04 超音波感測模組為例，其最遠偵測距離只有 4 公尺，但使能夠測量到 0.3cm 的差距，因此非常適合應用於本作品。

〈三〉RF 無線傳輸之探討：

無線通訊是現今非常重要的一種通訊方式，也發展出各種不同的型態以應用於各樣的環境，如：Zigbee、RF、紅外線、藍芽等傳輸系統，每種系統都有其特性，可適用於不同的情況。本研究使用的 RF 是被廣泛利用的一種無線通訊系統，從自走車遙控到電視廣播系統皆可使用。

RF(Radio Frequency)使用電磁波進行通訊，以光速行進且不需要任何介質即可傳遞，頻率為 300GHZ 以下，而民用頻率通常<1GHZ。RF 模組可分為兩部分：發射模組與接收模組。

1. 發射模組：將資料訊號以振幅調變方式(AM)調變後傳送出去
2. 接收模組：由天線接收訊號後，經 AM 解調還原資料原始訊號

〈三〉陀螺儀之探討：

陀螺儀是一種探測角加速度和角速度的儀器，在陀螺儀產生角度變化時，內部電壓會改變，藉由計算電壓的改變即可得知角加速度和角速度。以本研究使用的 3 軸陀螺儀為例，它可以測量在 x、y、z 三軸的角加速度與角速度，判斷物體

在立體空間轉動的情況。陀螺儀可以判斷物體的傾斜和旋轉的狀態，因此被應用於非常廣泛的用途，例如：火箭、手機等。

儘管陀螺儀可以測量角速度，但卻無法直接判斷物體的傾斜角度，因此物體的傾斜角度只能從角速度加以計算出。因為角速度轉換角度的運算涉及微積分，而使用 Arduino 程式解微積分不可行，所以必須取近似值。由角速度 $\omega = d\theta/dt$ 可推得 $\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt \approx \sum_0^t \omega(t) T$ (T 為測量取樣時間)，因此傾斜的角度可以轉換為公式： $\theta = \theta_{last\ time} + \omega T$ ，以便使用 Arduino 程式計算。

〈四〉GPS 裝置之探討：

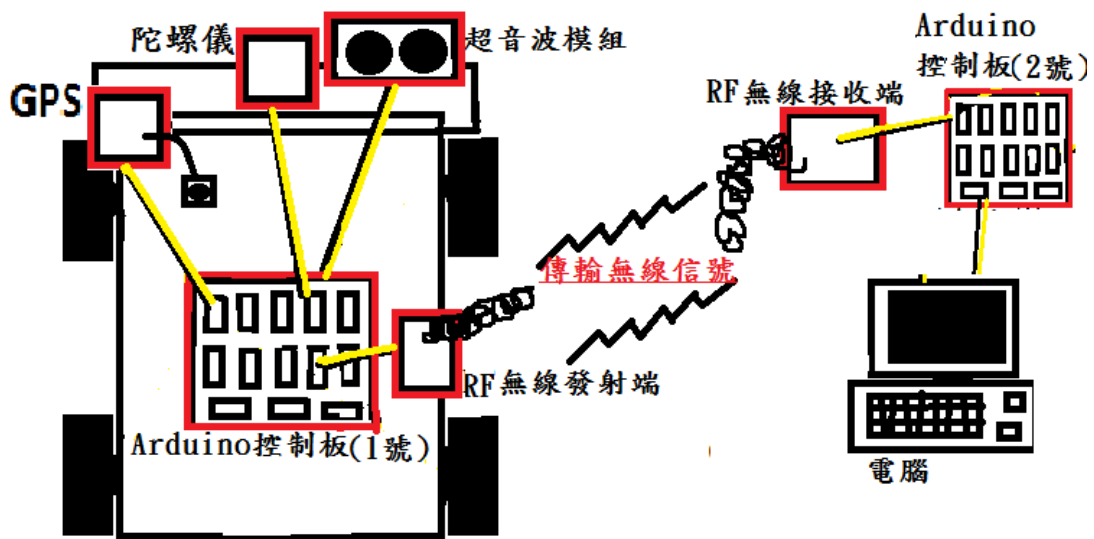
GPS 是「全球定位系統(Global Positioning System)」的簡稱，以由 GPS 衛星、地面主控站、數據注入站和監測站及用戶端 GPS 接收機組成的系統為地面提供精準的定位。由於 GPS 定位精度高、快速、效率高和可移動定位等優點，而且使用者只須擁有接收端即可運作，目前受到廣泛應用。

本研究使用的 GPS 裝置使用 NMEA 標準的資料格式，以「語句(Sentence)」的方式傳輸資料，包括 GGA、RMC 等若干代表不同含意的語句，語句中則包含了經度值、緯度值、日期、使用的衛星個數等內容。其中的 GGA(GPS 固定資料)即包含了本研究所需的經緯度值。例：

\$GPGGA,154653,2480.5461,N,12130.5952,E,0,00,,-00044.7,M,051.6,M,,*6C

二、系統運作

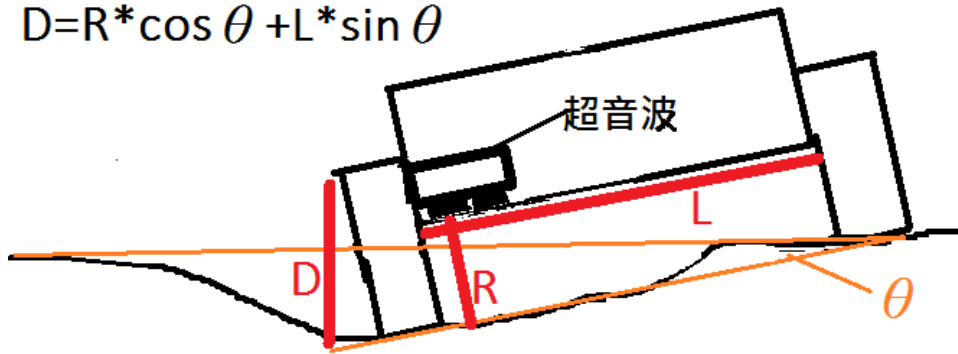
「坑洞偵測機器人」以 Arduino 為系統平台，系統架構包括偵測裝置、無線傳輸裝置、傳動裝置和 2 個 Arduino UNO 微處理器(編號為：1 號及 2 號)等元件。電腦端則包含無線傳輸裝置和 Arduino IDE 等軟硬體元件。



(圖十一：系統架構圖)

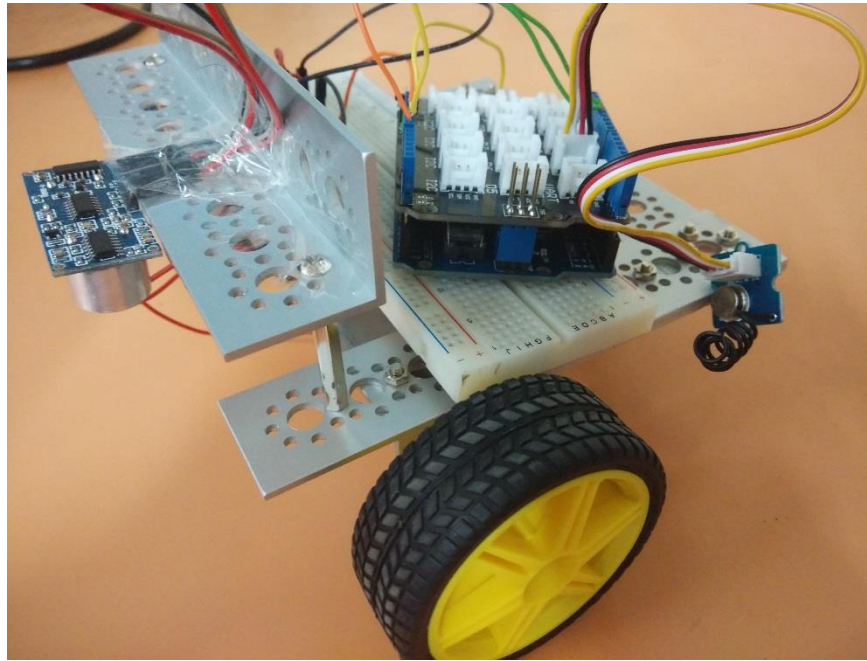
- 〈1〉 偵測裝置：使用超音波模組作為測距裝置。
1. 超音波測距器在機器人運作時會判斷距地面的高度，以測定地面之坑洞位置與深度。
- 〈2〉 無線傳輸裝置：使用 433mhz 的 RF 無線傳輸與接收裝置，將機器人所測得的數據傳至個人電腦上。
1. 無線輸出端與超音波模組裝置在同一控制板(1 號控制板)上，無線接收端裝置於與電腦連接之 2 號控制板
 2. 超音波模組測得的數據由輸出端發送，並由接收端接收訊息
 3. 2 號控制板將訊息顯示於電腦端 Arduino IDE 的 Serial Monitor，便可觀察到超音波模組測得的數據
- 〈3〉 陀螺儀：機器人行進於凹凸不平的路面上，會因為顛簸和輪子掉入坑洞等原因而改變自走車平台的水平度，使得超音波測距器測得的距離並非真正的坑洞深度。加裝了陀螺儀後，可以測量自走車平台傾斜的角度，由此修正超音波數據，以得到正確的坑洞深度。

$$D=R*\cos \theta +L*\sin \theta$$



(圖十二：精確距離數據)

1. 輪子陷入坑洞時，超音波會測得距離數據 R，但是因為當時超音波偵測器已下陷，而且並非垂直對著坑洞，R 並非真實的坑洞數據。
 2. 經陀螺儀得到傾斜角度 θ (公式： $\theta = \theta_{last\ time} + \omega T$) 後，真實距離數據 D 即可由公式： $D=R\cos \theta +L\sin \theta$ (L 為自走車平台寬度) 而得
- 〈4〉 GPS 系統：裝置於自走車上，可記錄行進路徑和坑洞的經緯度座標，以便定位測得坑洞。原則上，只要位於室外、不受建築物遮擋，GPS 即可接收衛星信號，且不受氣候影響。
1. GPS 測得資料會先以 NMEA 格式呈現，因此除了定位坑洞所需的 \$GPGGA 語句中的經緯度座標，也會有許多不需要的內容，如：使用的衛星個數、距海平面高度等。
 2. 為從 NMEA 格式資料中擷取本研究所需的內容，可使用 TinyGPS++ 函式庫解析 GPS 語句，並從繁複的語句內容中找出經緯度座標。
- 〈5〉 電腦端系統：藉由無線接收端取得訊號，經 Arduino IDE 的 Serial Monitor 顯示，並可進一步整理、分析資料。
1. 將 2 號控制板和接收端連接至電腦，以 Arduino IDE 的 Serial Monitor 即可顯示所測得知數據
 2. 將測得數據匯入 Microsoft Excel，即可製成圖表，即可用以分析坑洞情形



(圖十三：組裝完成的機器人)

三、判定坑洞

經過機器人的測量，可得知一段路面之凹陷狀況。若路面平整無凹陷，則測得的距離數據將會大致相同，其為「標準距離」；若測得距離有明顯大於標準距離者，則可判斷為路面有凹陷，即為一「坑洞數據」。

由於超音波測距是週期性的測量與地面距離，所以當路面上的坑洞直徑大於機器人在一個超音波測量週期中的位移，就一定可以探測到這坑洞，而連續的數個坑洞數據則可用於判斷坑洞的大小。同時，因為超音波測距並非持續不斷進行「線」的測量，而是進行數個「點」的測量，所以路面上的縫隙等較細小的凹陷基本上不會被探測到。因此機器人可探測到的坑洞基本上都是直徑較大、對交通安全有所影響的坑洞，而沒有探測到坑洞的路面則都是平整的路面或是對交通安全無礙的細小裂縫。

伍、研究結果

將機器人與系統架設完成後，即可用於偵測各種路面的坑洞情況。

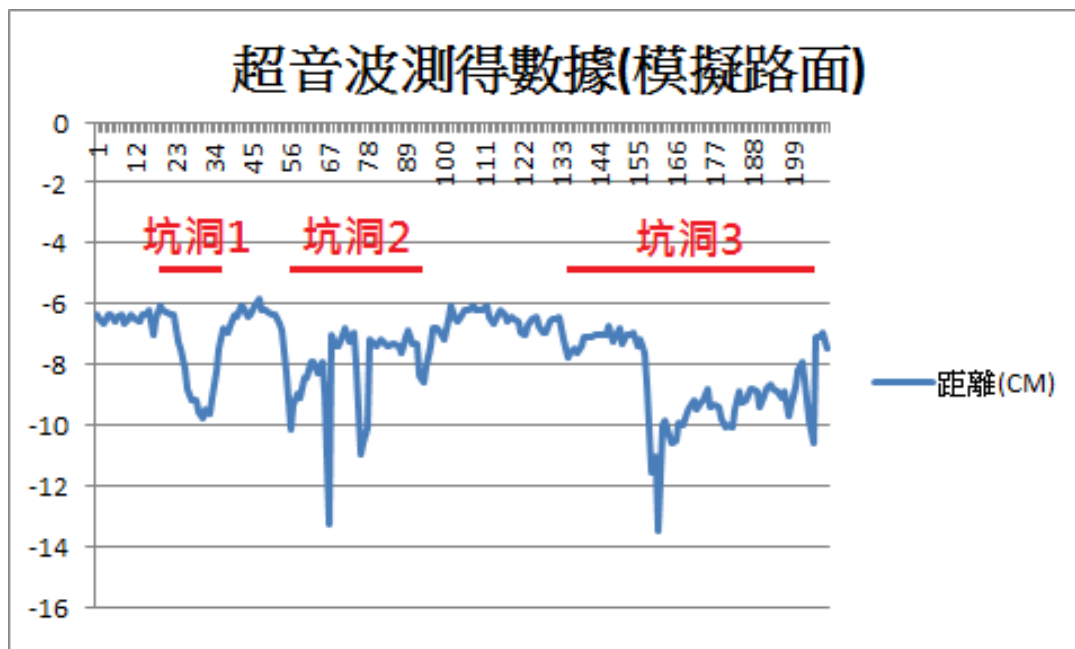
一、模擬路面

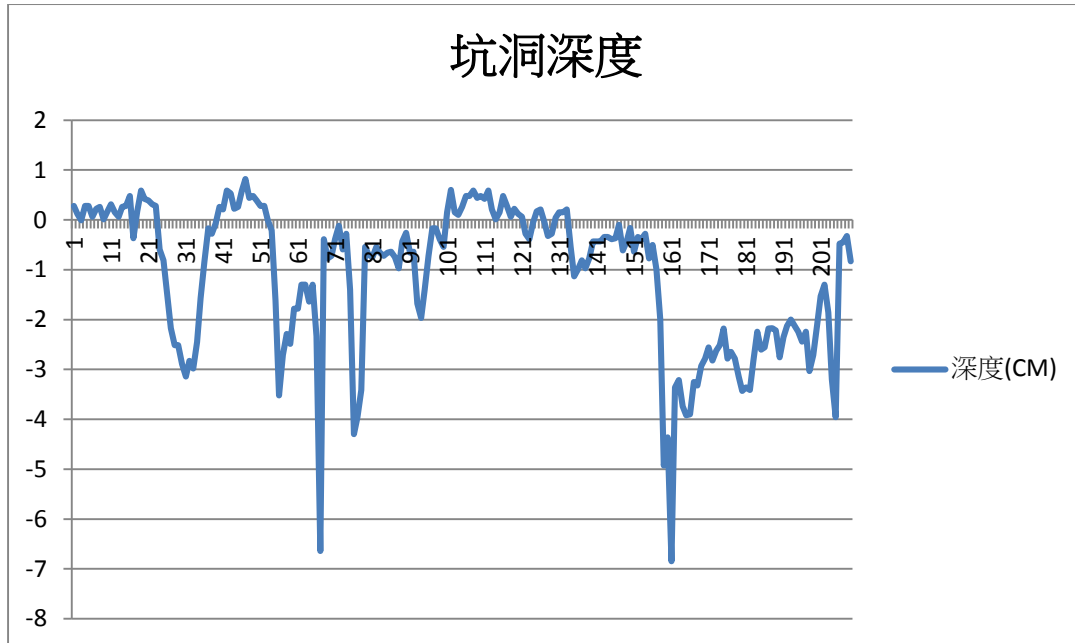
由於本機器人為一坑洞偵測裝置的模型，車體結構和大小都不適合直接用於真正的柏油路面上進行長距離測量，同時，為了得到更明顯的坑洞數據，偵測到有明顯差距的資料，便應用模擬路面來進行機器人的測試。

模擬路面長約 60 公分，其上有三個坑洞，長度分別為 3 公分、5 公分和 10 公分，深約 3 至 4 公分。機器人由模擬路面平台的一端行駛至另一端，超音波偵測器便會沿途測量數據，經過模擬路面坑洞的上方時得到之距離資料即可由公式： $D=X+6.65$ (D =坑洞深度， X =測得距離) 計算坑洞深度。



(圖十四：模擬路面上大、中、小三個坑洞)





(表三、四：模擬路面上超音波測得數據)

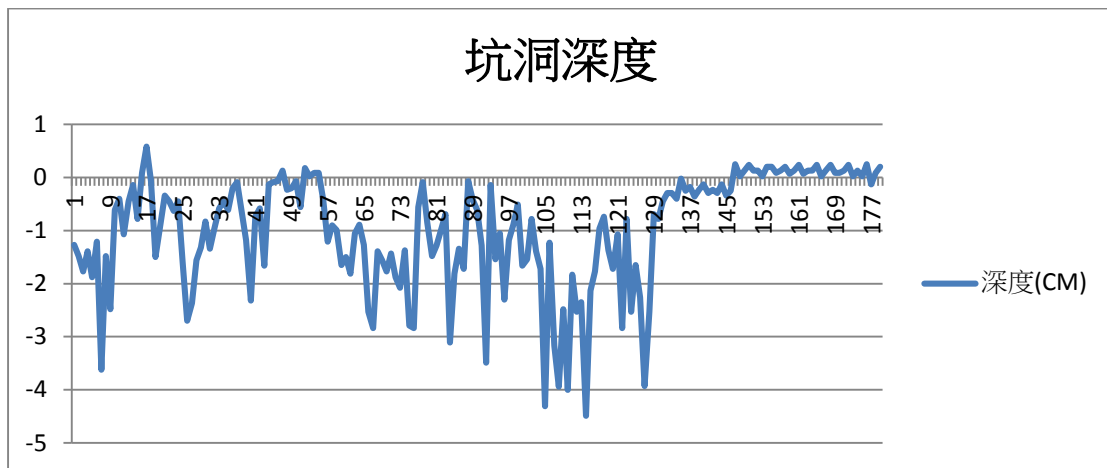
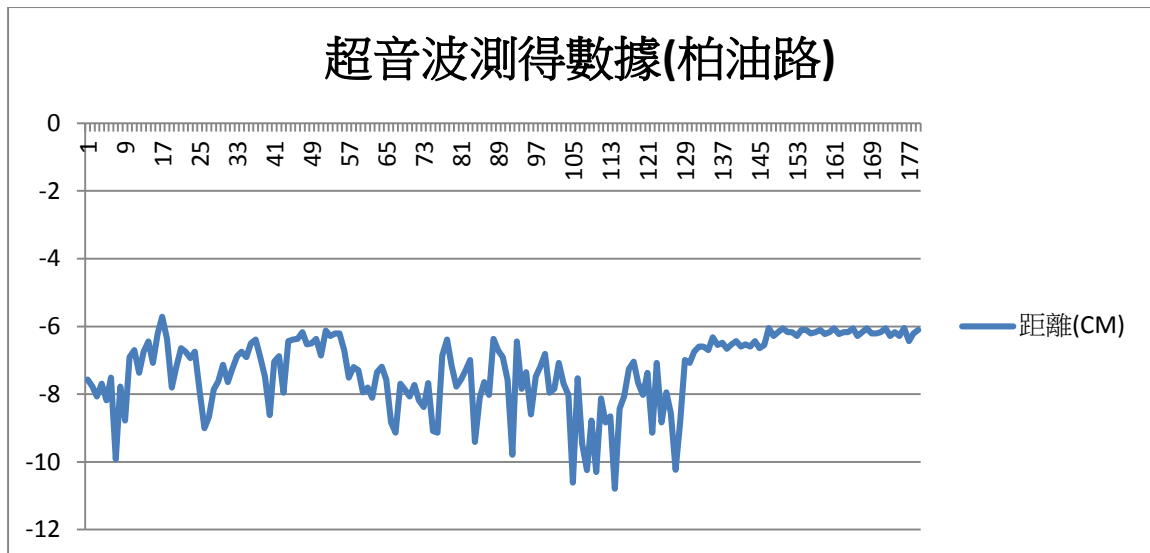
由(表三、四)可見三段數據的深度明顯與平面有差距，其即為坑洞的深度。對應(圖十四)中的三個坑洞，可發現數據凹陷段和圖中坑洞的位置、長度大致相同，除了少數幾個低於-4 或高於-1 的數據，測得坑洞深度大致上介於 2~4 公分的範圍內。

二、柏油路面

由於設計本系統的最終目的是要於公路路面上進行道路坑洞的偵測，所以在學校校園進行了柏油路面的測試。將坑洞偵測機器人於真正的柏油路面上測試時，由於自走車的輪子較小，抗震效果不如汽車，所以會使車體嚴重搖晃，影響偵測效果，產生超音波數據的誤差。



(圖十五：校園內柏油路坑洞)

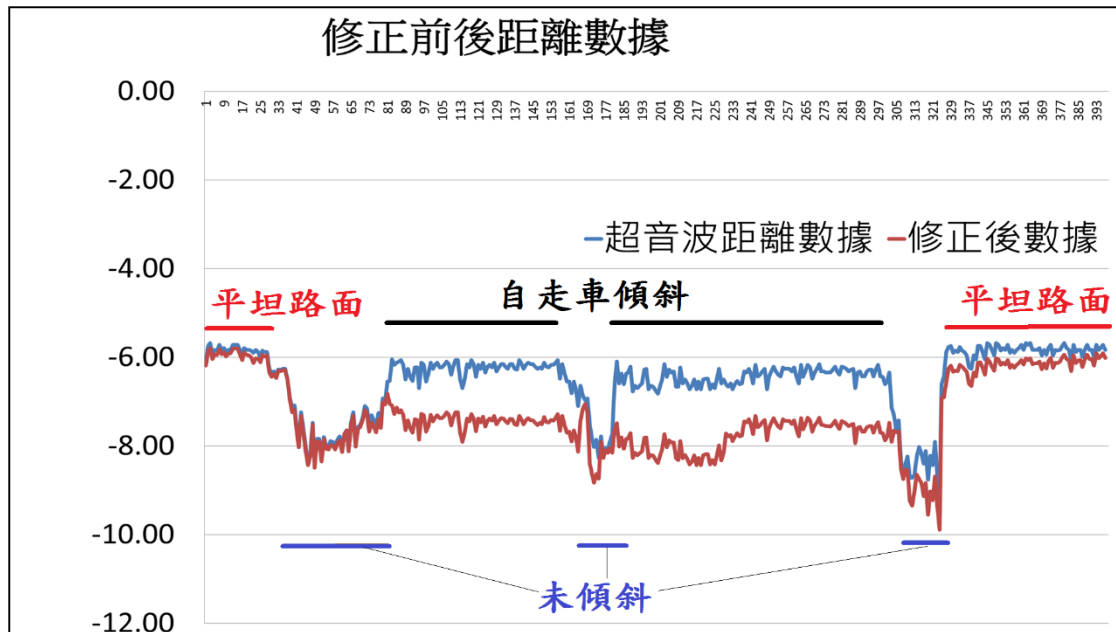


(表五、六：柏油路面上超音波測得數據)

因為機器人行進顛簸，而且校園路面坑洞不深，所以真正的柏油路面上測得的坑洞數據不如模擬路面清楚。雖然誤差頗大且數據不穩定，由(表五、六)仍可約略看到數據在第 57 筆至第 129 筆之間與標準距離有 1~3 公分的差距，對應(圖十五)的柏油路面，即為圖右半部的坑洞。

三、加裝陀螺儀

為了解決自走車顛簸或輪子陷入路面坑洞時造成的數據誤差，需要還原車體傾斜時的數據至車體水平時應測得的數據。加裝陀螺儀測量傾斜角度，並將測得數據帶入公式： $D=R\cos\theta+L\sin\theta$ (L 為自走車平台寬度)，即可得精確的坑洞數據 D。



(表七：以傾斜角度修正前後超音波測得數據)

由(表七)可見修正前後的距離數據。修正前，在輪子陷入坑洞、車體因此傾斜時，超音波模組測得的數據會失去精確度，如表中自走車傾斜時的測量數據，雖然當時路面有坑洞，卻逼近平坦路面的標準距離，完全無法用於判定坑洞。以陀螺儀測量傾斜角度並加以修正超音波數據後，新的結果就可以較為精準地表達出路面的坑洞情形，顯現出真正的坑洞數據。

陸、結論

由於道路坑洞對機車駕駛等用路人的安全構成了極大的危險，為了解決維修道路的諸多不便與低效率，本研究旨在研發一個可將道路坑洞數值化的系統，並製作出一個模型機器人。

一、系統初步架構

本研究使用 Arduino 整合系統並撰寫程式，利用超音波測距裝置與 RF 無線裝置進行偵測和數據傳輸，同時以 GPS 定位坑洞，但經過實測，在模擬路面及柏油路面上的偵測結果皆因外部因素會有誤差。尤其自走車傾斜後測得的數據和真實情況有不小的差別。

二、系統改進

此系統的缺陷可經由測量自走車傾斜角度修正。加裝陀螺儀後，本機器人具有更精準的測量能力，在平台因顛簸影響超音波數據時，仍能以陀螺儀測得傾斜角度，修正距離數據，得到較精確的坑洞數據。

柒、討論與應用

本系統作為一個非常方便的坑洞偵測及通報工具，有多方面的優勢。本機器人的系統運作簡單而有效率，結合精確的測量和即時的數據傳輸，可以有效測量並記錄坑洞的深度、大小、位置座標等。坑洞偵測機器人成本不高，與其他形式的坑洞偵測工具相比，更適合大規模推廣使用。若能以品質更好、更精準的零件改良，可作為搭配工務單位進行道路坑洞維修的輔助工具，未來具有許多發展空間。

一、與現行方法的差別

現行的坑洞偵測或通報系統有幾種方式，但都有其缺陷，使得坑洞偵測與通報的效率仍舊不高。

〈一〉肉眼觀察、民眾通報

現在許多地方政府使用民眾自行通報坑洞位置的系統，但是效率相較於坑洞偵測機器人卻過低。肉眼觀察到的坑洞主要都是大型坑洞，直徑較小但未來會增大的坑洞卻不會被注意到，不能防範於未然。再加上許多人就算看到坑洞也會嫌麻煩而不上網通報，這種方式的效率遠不如自行偵測、自行上傳資料的坑洞偵測機器人。

〈二〉震動測量

有一些工務單位會使用平坦儀等工具測量路面，是目前頗廣為使用的另一種坑洞偵測方式。但是由於此方式以行進在路面上的震動為測量指標，僅能得知一段路面的平坦度，也就是坑洞密度，而無法得知單一個坑洞的深度與大小，進行更精細的追蹤調查。坑洞偵測機器人以超音波探測路面，可以得到每個坑洞確切的深度、大小、位置等資訊，更能夠系統化的監控每個坑洞。

二、問題改進

由機器人的實測結果數據可見此系統的可行性，可用於測量路面坑洞的深度與大小，若可以解決一些因素，更可以到的到更精確、更大量的測量資料。

〈一〉傳動裝置行動穩定度：

由於自走車使用的輪子和底盤都不是為了柏油路面設計，在柏油路面上行進略顯吃力。不僅會因為摩擦力過大而車速不穩，而且缺乏汽車有的避震裝置，所

以行進很顛簸，在以陀螺儀校正後仍會造成些微誤差。

〈二〉自走車車速及大小：

自走車由於車速慢，往往一分鐘只可以行進不到十公尺，並不能有效率的測量動輒數百公尺長的道路之坑洞。同時，由於自走車體型小，容易因柏油路面的石粒造成顛簸，資料產生誤差。遇上超過自走車大小的大型坑洞時，也會直接全車陷入坑洞，反而測不出坑洞的凹陷程度。

為解決上述問題，本系統未來可進行更多裝置的加裝改造，以使其可適用於路面坑洞的實測。

1. 加速度計：

加裝加速度計以感測自走車車速，可以更精準的判斷每個數據的間隔時間所對應到的距離，並修正因車速改變而造成的誤差。加速度計同時也可以用於測量傾斜角度，與陀螺儀配合使用可互補長短，角度測量更精確。

2. 更平穩、更大型的平台：

若改善載具的行動力，使用馬力更強、底盤更高、避震性能更好的載具，提供更平穩的偵測平台，並加大載具體型，不僅可避免全車陷入坑洞，甚至也可以在一個平台上搭載數個坑洞偵測裝置，得到更準確的數據。因此，將坑洞偵測裝置應用於汽車等大型平台上，即可改進原本自走車的問題。

三、未來展望與應用

坑洞偵測機器人在現有功能外，未來若能擴充更多的元件，就能提供更精確和多元的資料。除了使用不同的偵測裝置校正數據精確度，更可以加裝其他功用的裝置，如：

一、資料庫：

通過收集多台機器人的測量數據，可以建立坑洞數據資料庫，容納大筆的坑洞資料，並結合電子地圖，透過坑洞座標標示坑洞位置，供民眾使用以避開坑洞密集的危險路段。也能讓坑洞維護權責單位透過 BIG DATA 大數據的分析，進行維護工作的安排，並進行各種坑洞方面進一步的研究。

二、行車「坑洞」紀錄器

本機器人的坑洞偵測與訊息傳輸裝置目前裝置於自走車上，但未來也可裝置

於腳踏車、汽機車等各式交通工具上，如同一台行車紀錄器一般，在車輛行進在路上的同時，便可記錄所經路段的路面坑洞。而且裝設本裝置非常方便，成本也不高，未來可以在車輛上大規模推廣，很快就可以建構一套完整且隨時更新資訊的坑洞資料庫。

捌、參考資料

一、林子翔、黃仁佑，超音波與 Arduino 嵌入式系統互動設計，逢甲大學自動控制工程學系專題製作專題論文，民 99 年

二、林俊傑、陳廷軒、何家安，Arduino 智慧型居家監控系統，朝陽科技大學學生專題，民 102 年

三、王國禎、楊烽正、余文俊，視窗介面微電腦控制實務，全華出版，民 93 年

四、孫駿榮、吳明展、盧聰勇，最簡單的互動設計 Arduino 一試就上手(第二版)，基峯出版，民 101 年

五、認識 Arduino，Cooper Maa，取自：<http://coopermaa2nd.blogspot.tw/>

六、Arduino - Home，取自：<http://arduino.cc/>

七、SeeedStudio-wiki，取自：http://www.seeedstudio.com/wiki/Main_Page

八、Ultrasonic Sensor，J Kwon，取自：
<https://jkwonkettering.wordpress.com/2012/06/14/67/>

九、A1 類交通事故變動概況，取自：交通部統計查詢網

<http://stat.motc.gov.tw/mocdb/stmain.jsp?sys=220&deflst=1&type=1&funid=mo8000&&funid=q250&oml=720&outkind=1&cycle=4&rdm=101pqiec>

十、宜蘭縣路平專案-道路養護管理系統網頁，取自：
http://mroad.e-land.gov.tw/ilpems_new/

十一、瀝青解析／瀝青混凝土 疊起道路千層糕，取自：聯合新聞網
http://mag.udn.com/mag/vote2009/storypage.jsp?f_ART_ID=476958