

空間探測系統設計與實作

趙志民、劉岳昕、吳添翔、姜承宏

國立臺灣海洋大學 資訊工程學系

cmchao@ntou.edu.tw, 00057128@ntou.edu.tw,
00057140@ntou.edu.tw, 00057141@ntou.edu.tw

摘要

擁有詳細正確的災變現場資訊，既能提升救災效率，又能大幅增加救災人員與受難者的存活率，因此勘查災變現場以提供救災人員足夠的資訊至關重要。未知密閉空間因可能有地形障礙、毒氣、可見度等問題，因此，對未知密閉空間的勘查與救災是極大的挑戰。本研究利用超音波距離感測器搭配自走車和 Zigbee 通訊模組設計了一個空間掃描器，透過本系統，即使在人員不易進入的空間，救災人員也能夠掌握該空間內的地形地物，預期應能提升實際救災行動的速度及安全性。

1 緒論

近年來，機器人的發展主軸已經由工業自動化機器人慢慢轉移到服務型機器人，而救災機器人是未來重要的一環。近年來的救災機器人皆有個重要的功能：探測空間並建構模擬地圖。建構模擬地圖不但能讓人員得到災區的資訊，更可以讓救災機器人自動導航與避障。

模擬地圖的建構通常使用雷射距離感測器、熱影像攝影機、光學攝影機來進行[1]，光學攝影機是目前最常使用的感測器。為了得到較精確的結果，救災機器人的系統對光學攝影機的依賴度相當大，雷射距離感測器往往用來輔助或是避障。然而光學攝影機的主要缺點在於處理資料量過多，且演算法較為複雜，量測的更新速度不夠快等[2]。此外，光學攝影機設備成本高，以及容易受光線強弱的影響，在外在光線不足的情況下，量測能力會大幅下降。

部分的機器人使用雷射距離感測器來進行模擬地圖的建構。測距所應用原理可概分為

時間量測(Time of Flight; TOF)、相位差量測、三角原理量測[3]。雷射的光源集中不易發散，精密度相當高，可透過不同角度所發射的雷射光，取得目標物的外型，且較不易受外界環境的干擾，例如光線不足的密室中，甚至在雨天、大霧等環境中操作，其效能亦幾乎不受影響[2]。使用相位差量測的雷射距離感測器，當電力不足時，因沒有充足的電力持續發射光源，測量距離會漸漸縮短[4]。使用 TOF 原理的雷射距離感測器，因為要利用光波的運行時間來計算距離，因此需要較多的觀察量，當測量時間太短，反射回來的資料不夠時，精準度不高[4]。雷射距離感測器屬於較精密的儀器，因此成本往往都很昂貴。

本系統使用超音波距離感測器，其原理與雷射距離感測器原理中的 TOF 相似，都是藉由發射與接收的時間差來計算感測器與目標物的距離。使用超音波測距的優點是成本遠低於其他測距儀器，且精確度可達公分等級，體積小又使用方便。例如，相較於光學攝影機，超音波距離感測器即使在無光線的環境，依然可進行量測。表 1 是不同的感測器比較表。

表 1：感測器比較

	超音波測距感測器	雷射測距感測器	光學攝影機
成本	低	極高	高
受環境影響	中	低	高
精確度	中	高	高

我們所設計的空間探測系統不但可應用於救災中，亦可應用於建築、空間設計等需建構出空間 3D 模型圖，測量施工範圍，或是需比較施工空間與設計圖等工作。本系統提供使用者低成本的空间感測器，以開發各種不同形式的應用。

2 文獻探討

目前用來進行模擬地圖建構的儀器，主要為雷射測距感測器、光學攝影機以及本系統所使用的超音波距離感測器，以下進一步探討前兩者的測量原理。最後比較現有的模擬地圖建構系統與本系統之優缺點。

2.1 雷射距離感測器

TOF 利用雷射的高方向性與高集中度，可以在發射雷射處接收目標物的反射能量，藉由計算發射與接收反射的時間差，得到目標物與感測器的距離，TOF 在遠距離的測量效果卓越。為了要取得範圍環境的資料，會另外安裝能旋轉的鏡面，其中鏡面材質依不同雷射光源決定[2]。雷射光擊中鏡面幾乎不會反射回發射器，因此可以完全將雷射光反射出去，另用鏡面的旋轉，便可以得到不同角度與障礙物的距離，進而得到障礙物的輪廓，如圖 1 所示。此外，可以照目標的遠近選擇不同功率的雷射發射器，當距離短時，可使用低功率的脈衝 He-Ne 雷射或是半導體雷射；距離較遠時，可使用功率大的脈衝式 Nd:YAG 雷射[3]。

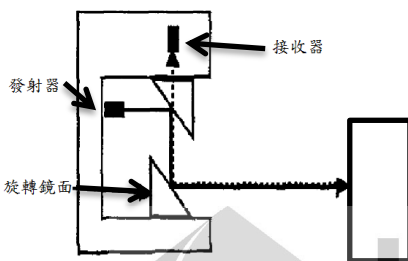


圖 1：雷射掃描原理示意圖

相位差量測乃是利用反射光與發射光之間的相位差來計算出待測物的距離，感測器內有相位檢測器，會測出發射與接收的相位差，

並藉此計算出距離。相位差量測有測量距離上的限制，測量範圍約為數十米，這種測距方法多應用在短距離。為了提高精準度，有必要進行多次的測量，因此無法做瞬間的測距[3]。

超音波測距亦有使用相位差的方法，計算發射波與反射波的相位差波形，為一脈波，使用高頻計數器針對此脈波進行計數，所得到的計數脈波為數個脈波，此脈波越多表示距離越遠，如圖 2 所示。

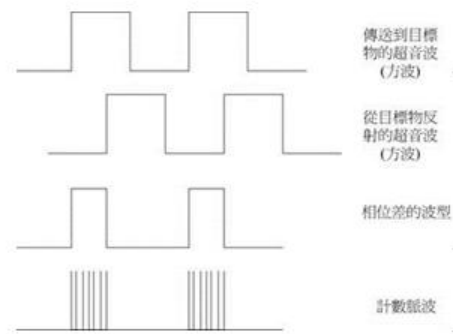


圖 2：超音波相位差測距法

三角雷射測距需搭配陣列式影像感測單元的雷射接收器[5]，當射出雷射光線後，經由目標物所反射的雷射光，會透過聚焦鏡聚焦於陣列式雷射影像感測單元，藉由判斷感測單元的位置，推算出距離，如圖 3 所示。當陣列式雷射影像感測單元有越高的解析度，整體測距儀的解析度越高。這種測距法精準度相當高，可更進一步的應用到雷射三維檢測系統及雷射三維影像雷達系統，但設備成本很高，因此多應用在精密模具業，或半導體電子業之 IC、SMT 电路板的檢測[3]。

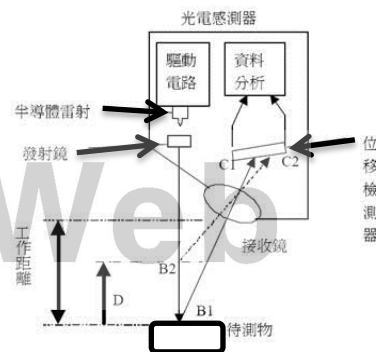


圖 3：三角雷射測距原理

2.2 光學攝影機測距

利用光學攝影機測距的方式，較常用的方法為利用單一光學攝影機與一個或數個雷射發射器所共同組成的系統，基本原理如下，先投射雷射光點，再利用光學攝影機擷取影像，經影像處理算出距離。為更進一步了解其運作過程與原理，本論文探討一個光學鏡頭與兩個雷射發射器所組成的測距系統。

圖 4 中，正下方圓形表示光學攝影機，雷射發射器發出兩道雷射光線照射到待測物的 A 點及 C 點，且此系統設計之發射角 $\alpha=10$ 度，擷取光學攝影機所照射的圖片中，兩投射點的位置和光學攝影機中心點連線，便可得到直角三角形 AGH 的 d_1 和直角三角形 CIH 的 d_2 值，此時根據三角函數的計算可得到 x_1 、 x_2 的值，進一步可推得直線 \overline{AD} 和 \overline{DC} 之值。此時因三角形 ADC 與三角形 EFC 為相似三角形，可得到光學攝影機擷取影像的面與待測物的夾角 θ 為：

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\overline{DC}}{\overline{AD}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{x_2 - x_1}{d_1 + d_2} \right) \quad (1)$$

最後即可求出 \overline{HB} 的數值：

$$\overline{HB} = x_1 + d_1 \tan \theta = \frac{2d_1^2}{(d_1 + d_2) \tan \alpha} \quad (2)$$

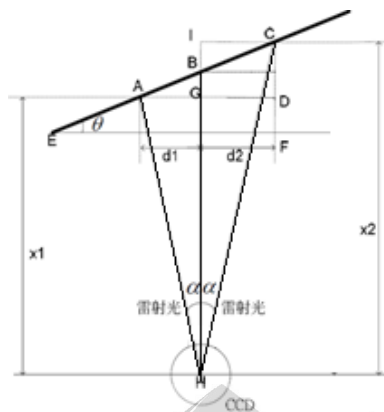


圖 4：雷射測距系統原理

由式 2 得到 \overline{HB} 之值並非正確的距離值，因廣角鏡頭會造成扭曲畸變，其主要成因是由於光束的傾斜度較大所引起的[6]，因此最後還必須針對扭曲畸變進行修正。

2.3 RescueRobots Freiburg

救災機器人 RescueRobots Freiburg 為 RoboCupRescue 2010 德國隊的作品，該機器人配備有履帶、IMU 慣性測量單元，以克服各種崎嶇不平的地形與障礙，機器手臂則可在發現受難者時給予協助與小型障礙物的排除，雷射距離感測器可進行 2D 模擬地圖的建構。而此機器人最大的特色在於 RescueRobots Freiburg 之控制與自動導航的能力，並使用人機介面(Human Robot Interface; HRI)、圖形用戶介面(GUI)來控制與顯示救援任務相關之資訊，自動導航方面包含建構 2D 模擬地圖、自動路徑規劃等。

RescueRobots Freiburg 的 2D 模擬地圖的建構是使用 Simultaneous Localization and Mapping(SLAM)的技術，收集雷射距離感測器的資訊與監測履帶移動的距離，來進行機器人的定位，便可建構出模擬地圖。若因地形崎嶇造成履帶空轉，RescueRobots Freiburg 則需重新確認掃描點與感測器資料，並運用演算法最小化雷射感測器與陀螺儀的誤差[1]。

RescueRobots Freiburg 的模擬地圖建構系統，可建構出精確的結果，但只可建構出 2D 的地圖資訊，且被設備成本高，體積重量大不方便攜帶。本系統可模擬出 3D 的空間資訊，在設備體積及成本上，更有絕對的優勢。

3 超音波空間探測系統

3.1 超音波距離感測器

超音波距離感測器基本原理是利用超音波喇叭發出一個短波，經超音波麥克風接收回音，便可得到回音來回的時間。

大部分的超音波感測器都有一些測量上的限制，這些限制可能會影響本系統的準確性。最主要的限制是當超音波距離感測器發出的超音波時，若與牆面的入射角過大，將因反射後的超音波能量過小，造成測量錯誤。測量角度限制為本系統研究過程中，初期遇到的主要問題。

我們首先測試入射角角度對感測器距離測量的影響。我們使用材質為 300 磅灰銅卡紙貼 E 浪(0.2cm)的紙箱，建立出一個 35cm x 55cm 的長方形空間，如圖 5 所示。我們將超音波距離感測器 (PING)))TM ultrasonic distance sensor) 放入此空間中三個相異的位置，在每一個位置進行以 10° 為 1 單位共旋轉 36 個單位的自轉，紀錄每次感測器的測量距離，並等比例縮小繪製成圖。測試結果如圖 6 所示。我們發現並非所有的距離測量值都正確：當入射角過大時，會造成感測器測量錯誤，且此錯誤值是比實際值大。因此可確認本系統需設計一個判斷有效值的演算法，過濾出有效值後，才能正確繪製未知空間的預估輪廓。

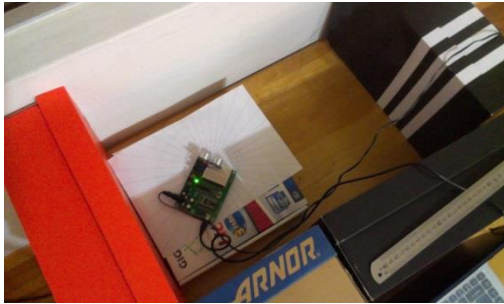


圖 5：入射角角度影響實驗環境

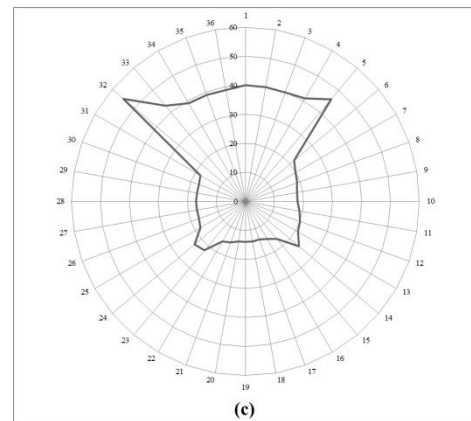
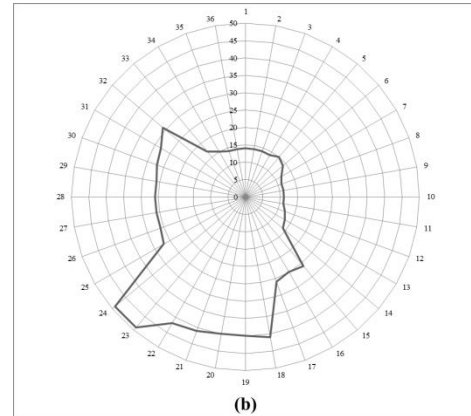
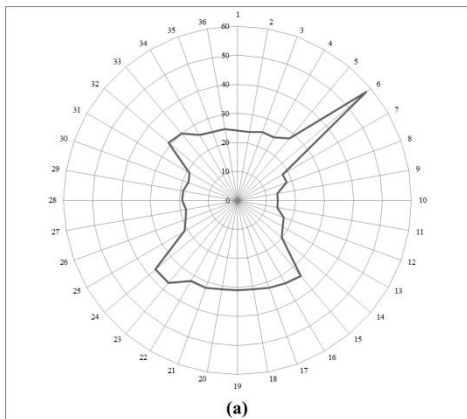


圖 6：入射角角度影響實驗結果

除了超音波距離感測器本身量測限制外，溫度也會造成距離測量的誤差。聲音在任意溫度的速度公式為：

$$C_{\text{air}} = 331.5 + (0.6 \times T) \text{ m/s} \quad (3)$$

其中 331.5 是音速在 0°C 時的速度(單位為 m/s)，T 為目前空氣溫度(攝氏)，而氣溫每升高 1°C ，音速就會增加 0.6m/s。

3.2 自走車系統設計

本系統擬將超音波距離感測器安裝在可經由使用者控制而移動之物體。自走車是地面上移動最方便的工具，因此本系統採用自走車來達成目標。

如前節所述，當入射角過大時，會造成測量錯誤。為克服此限制，本系統設計將超音波距離感測器安裝在自走車上，在未知空間中相異位置進行空間探測，以排除量測不正確的點。具體地說，在某次空間探測因入射角過大而無法得到有效值的點，藉由感測器的移動改變入射角角度後，就可能可以獲得該點的正确量測

值，透過多次移動自走車的位置所收集到的量測值，應能得到空間中大量的有效值。也就是每次空間探測經過有效點篩選演算法後，獲得的有效點可建構未知空間中的部份輪廓，多次進行空間探測後，應便可建構完整的空間輪廓。

自走車上安裝了無線通訊模組，讓使用者可無線控制自走車的移動。自走車測量得到之距離資料，也可經由無線通訊模組傳送回使用者端，透過有效點演算法判斷數值正確性後，便可繪製空間輪廓。自走車上還可安裝升降裝置，以升高或降低測量裝置，使超音波距離感測器能在空間中不同高度進行測量，收集不同高度的空間輪廓資訊。

3.3 有效點演算法

使用者端系統取得資料後，將執行有效點演算法以篩選出有效點。其中有效點是指被認定為正確值的點。有效點篩選演算法篩選規則如下：如果一個點 i 與後面連續的 x 個測量點，每相鄰兩點距離都不超過 ε ，其中 ε 為使用餘弦定理求出「相鄰兩點的距離測量值上限」，則此點 i 會被視為有效點。因測量次數相當密集，當測量值為正確值時，相鄰兩測量值的距離應很小，所以我們使用設定距離上限的方法，當作篩選的條件。而 x 的數值，是需經過多次實驗，且會因系統使用的器材和環境而有不同。 ε 值的計算方法如下：如圖 7 所示， a 、 b 為相鄰兩測量點 A、B 測量出之距離， θ 為 A、B 兩點與感測器所構成的夾角，因感測器每次旋轉角度皆相同，所以 θ 為定值，可透過餘弦定理(式 4)，計算出 A、B 兩點間 ε 值。

$$\varepsilon^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta \quad (4)$$

由式 4 可知，因 θ 為定值，當 a 、 b 值越大，感測器與障礙物之距離越長，所求出的 ε 值也會越大，因此任相鄰兩點間的 ε 值不一定相同。

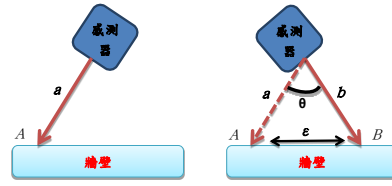


圖 7： ε 值的決定

3.4 有效點的偏移量修正

自走車藉由移動，在待測空間中的不同位置進行測量，以獲得大量的有效點，而這些有效點在進行繪圖前，需先進行與原點偏移量的修正。如圖 8 所示，自走車進行測量時，會建立一個二維座標系統，並將每個有效點進行座標化，當自走車位置由圖 8(a) 移動到圖 8(b)，對於待測空間中右上角相同的有效點，兩次測量所得到的 x 座標相異，若不修正，在進行繪圖時會產生錯誤。因此，在進行繪圖之前，必須先進行偏移量的修正。若我們將圖 8(a) 的自走車位置設為原點，則對圖 8(b) 右上角的有效點，我們需將其 x 座標減掉自走車向左移動的距離，才能進行下一步的繪圖。

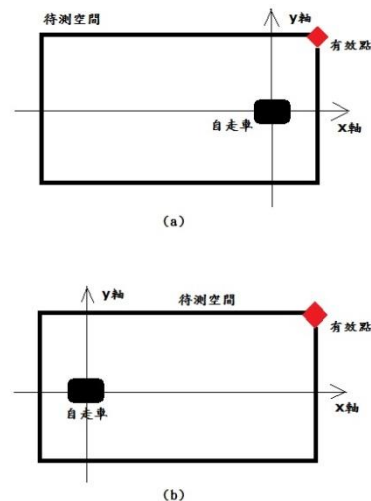


圖 8：偏移量的修正

3.5 有效點繪圖

透過有效值篩選演算法篩選出有效值後，將使用無線傳輸將這些有效點傳至使用者端電腦，並繪製成空間輪廓圖，在螢幕上顯示出未知空間的 3D 模型圖。有效點繪圖將使用類似 Section 3.1 所述的繪圖方式，其中相異處在

於只繪入修正過的有效點，同一高度的測量值繪製成一個平面。此外若需要較精準的繪圖結果，就需要較多的測量值來達成。

4 系統實作

我們使用超音波距離感測器 (PING)))TM ultrasonic distance sensor) 搭配 BB Car 自走車 (Boe Bot RoBot Kit) 組成空間掃描器，其中自走車中燒錄 BASIC Stamp 2 程式語言，以控制空間掃描器行為，搭配 Zigbee 通訊模組 (XBeeTM OEM RF Modules) 建立系統雛型，並使用 Java 語言接收回傳結果。回傳的測量資料經過有效值篩選與偏移量修正後，可在電腦上繪製出待掃描空間之輪廓圖。

4.1 空間掃描器實作

空間掃描器以 BB-Car 自走車為基礎，另安裝其他元件所構成，如圖 9 所示。BB-Car 自走車上裝載 BOE 載板 (BOE-USB)、BS2-IC 微控制器以及兩個 Parallax 旋轉伺服機 (Continuous Rotation Servo)，主要動力來源是使用 4 顆三號電池 (AA)。BS2-IC 微控制器中包含非揮發性的 Serial EEPROM，內含 BASIC 程式語言直譯器 (PBASIC) 與使用者的 BS2 程式，因此 BS2 程式能夠重複被使用且斷電後仍可保留，其中 BS2 程式為控制 BB-Car 行為的程式語言。空間掃描器除了 BB-Car 自走車本體，在自走車前端加裝一個 Parallax 旋轉伺服機，並將超音波距離感測器安裝在旋轉伺服機上，使系統能控制感測器進行旋轉。車體上的通訊系統使用的是 Zigbee 通訊模組 (XBeeTM OEM RF Modules)。超音波距離感測器所測得數值，可透過 Zigbee 傳送到使用者電腦，進行下一步驟的分析和繪圖。

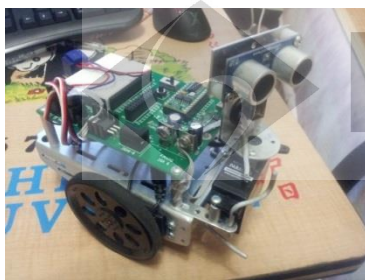


圖 9：空間掃描器

因溫度會造成距離測量的誤差，因此在操作超音波距離感測器時，必須修正溫度造成的誤差。本系統實作時，將空氣溫度假設為 22.2 °C，由式 3 可知音速 $C_{air} = 344.8\text{m/s}$ 。在 BASIC Stamp 2 程式中的 PULSIN Duration 參數 $t_{PULSIN-BS2}$ 是計算發出超音波與收到回音的時間差，計算單位為 $2\mu\text{s}$ ，因此將 $t_{PULSIN-BS2}$ 乘上 $2\mu\text{s}$ 就會得到超音波來回一趟的秒數。假設 C_{air} 是聲音在空氣中的速度， t (秒) 為感測器發射訊號到收到反射訊號時間，由式 5 可推得超音波距離感測器與障礙物距離 S_{object} (公分)：

$$S_{object} = \frac{100C_{air}t}{2} = \frac{100C_{air}t_{PULSIN-BS2}}{2} \times \frac{2}{1000000} = \frac{C_{air}t_{PULSIN-BS2}}{10000} = \frac{344.8t_{PULSIN-BS2}}{10000} = 0.03448t_{PULSIN-BS2} \quad (5)$$

最後得到 $S_{object} = 0.03448t_{PULSIN-BS2}$ 。

我們設定讓系統在 5 個相異處進行測量，因此當空間掃描器啟動時，系統會先記錄目前自走車與障礙物的距離 (D_{sd}) 並進行一次掃描，之後，自走車會往障礙物移動，停留在四個點上各執行一次掃描。這四個點到障礙物的距離分別是 $4/5$ ， $3/5$ ， $2/5$ ，和 $1/5$ 倍 D_{sd} 。開始進行一次空間探測時，BS2 程式會操控微控制器發出脈波，使自走車前端的旋轉伺服機開始等速旋轉，在旋轉的期間，安裝在旋轉伺服機上的超音波距離感測器會定時的進行一次距離測量，並透過 Zigbee 通訊模組傳送至使用者電腦，當旋轉伺服機完成一次旋轉 (轉動 360°)，我們設定感測器進行 140 次的測量，最後回傳一個終止字元，通知使用者端系統完成一次空間探測。

4.2 有效點篩選、繪圖實作

本系統使用 Java 來實作接收資料、有效點篩選及繪圖。使用者電腦端使用 USB 與 Zigbee 通訊模組使用 RS232 通訊協定相連接。為了使 Java 程式能夠接收到來自 Zigbee 的資料，我們使用了 Javatm Communications API

(comm.jar)，comm.jar 提供對 RS232 通訊的支持，因此 Java 程式便可接收自走車所傳的測量值。

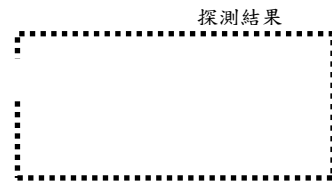
當自走車開始傳測量值到使用者端電腦，Java 程式先將所有測量值進行儲存，直到自走車完成 5 次測量後，便開始進行下一步驟的分析篩選。本系統實作 Section 3.3 的有效點演算法，我們將篩選條件的 x 設為 10，而 ε 值為相鄰兩點的距離測量值上限，由式 4 計算得知， ε 值如表 2 所示，當測量值越大，相鄰兩點的距離也會越大，因此 ε 也會越大。利用上述條件，系統將從大量的測量點篩選出有效值，以進行繪圖。

表 2： ε 值對照表(cm)

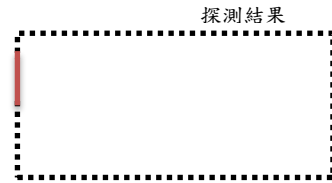
測量值	ε	測量值	ε
0~50	2.97	251~300	13.5
51~100	4.87	301~350	15.7
101~150	6.97	351~400	18.01
151~200	9.1	401~450	20.24
201~250	11.3	451~500	22.48

當篩選出有效值後，必須先修正因自走車移動產生的偏移量。我們將自走車原始的位置定為原點，自走車移動方向定為 Y 軸，建立二維座標系統，並將每個有效點座標化。當自走車移動到每個測量位置時，會回傳目前位置與原點的距離，將目前位置所測得的有效點之 Y 座標減掉回傳的距離，便可完成偏移量的修正。

本系統的繪圖系統使用 Java 程式語言，收集所有完成偏移量修正的有效點，繪製成一個平面。如圖 10(a)所示，若尚有部分區域系統無法得到有效點，則將會將相鄰兩有效點相連，創造出預測的區域，如圖 10(b)所示。因空間掃描系統對每次掃描所使用的測量值很多，因此需預測的區域往往是微小、破碎而不連續，所以幾乎不影響探測的結果。



(a)



(b)

圖 10：有效點預測

(a)無有效點區域(b)預測之區域

5 測試結果

我們使用本系統進行三次測試，分別在不同形狀的空間進行探測，以驗證本系統之可行性，我們並未在自走車上安裝升降裝置，因此僅測試單一平面的掃描。第一次測試使用與 Section 3.1 實驗相同的空間，測試環境如圖 5 所示，掃描結果如圖 11 所示，由結果可清楚得到一個矩形的輪廓。與圖 6 之結果比較可發現，利用本論文之有效點篩選法，可有效的過濾出正確的值，以組成準確的結果圖。



圖 11：第一次實驗測試結果

第二次測試之測試環境如圖 12 所示，掃描結果如圖 13 所示，測試環境為一梯形空間，由結果圖可看出下方為梯形短邊，上方為梯形長邊，與測量環境相同。第三次測試之測試環境如圖 14 所示，掃描結果如圖 15 所示，測試

環境為四邊形空間，四邊形之四個邊都不相等，而由結果圖可發現最下面的邊是最長的，與探測空間相同，因此仍可認定此測試結果正確。由三次的測試可得知，本系統測量得到之結果都正確反應出待測空間的輪廓，由此可證明本系統之可行性。



圖 12：第二次實驗測試環境



圖 13：第二次實驗測試結果



圖 14：第三次實驗測試環境

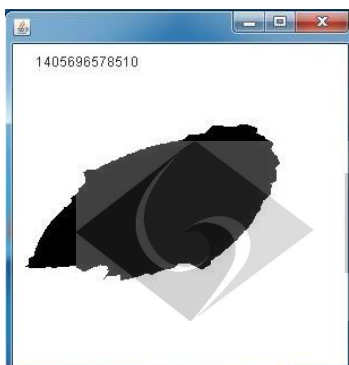


圖 15：第三次實驗測試結果

6 結論

本系統利用超音波距離感測器搭配自走車系統，探測未知空間的輪廓，加上運用有效點篩選法篩選出有效點、偏移量修正，在使用者端電腦顯示待測空間的 3D 示意圖。此設計提供低成本、體積小的空間掃描系統，不論是運用在救災機器人或建築業，提供使用者空間內部的資訊，皆可得到滿意的結果。

透過離型實作及測試的結果，我們確認了此系統可得到未知空間的輪廓，驗證了本論文中所用的有效點篩選法的可行性。本系統的優點包括設計程序簡單、只需給予適當的 ϵ 值，經過有效點篩選演算法就可使用，且設計過程不需要深厚的數學能力。

因超音波會受溫度的影響，未來的改善空間為在本系統加裝溫度感測器，動態調整溫度項，使測量結果更加精準。此外，本系統亦可加裝電子羅盤，使定位系統更加完善，與原點的距離可以更加準確。有效點篩選法加入更多策略，使探測結果更貼近實際空間。

參考文獻

- [1] Christian Dornhege, Johannes Bendler, Roxana Bersan, Philipp Blohm, Martin Gloderer, Andreas Hertle, Thomas Liebetraut, Diego Cerdan Puyol, Alexander Kleiner, and Bernhard Nebel, "RoboCupRescue 2010 - Robot League Team Rescue Robots Freiburg (Germany)", 2010.
- [2] 林子揚, "雷射測距儀應用於輪型機器人自動導航", 碩士論文, 國立中央大學電機工程學系, 2010.
- [3] 林建忠, "雷射測距技術與研究現況", Photonics Industry & Technology Development Association (PIDA), 1999.
- [4] 陳鴻聖, "免稜鏡測距技術介紹", 中華民國地籍測量學會會刊第二十四卷第一期, 2005.

- [5] 周明慶，“感測器應用與技術深入剖析”，
精密機械研發中心，2012。
- [6] 張經民，“以新型距離探測系統完成環境
辨識和即時車型機器人控制”，碩士論文，
國立中央大學電機工程系，2005。



