



# 行政院國家科學委員會專題研究計畫期中進度報告

## 感測網路分散式救援機器人研發－總計畫：感測網路分散式 救援機器人研發(1/3)

計畫編號：NSC 96-2218-E-009-020

執行期限：96/08/01~97/7/31

主持人：徐保羅 國立交通大學電機與控制工程系

### (一) 中文摘要

長久以來，災難後的救援一直為世界各國所重視，特別是在災難後的黃金48小時內的救援工作，更是影響受難人員生存的關鍵。透過日本阪神大地震、台灣921大地震、南亞大海嘯與最近發生的大陸四川512強震等國際重大災難的觀察，我們可以歸納：災區地形通常千變萬化且崎嶇難行；災區的建築物與地形極端不穩定；受難人員往往被層層壓覆於斷垣殘壁中。因此，很多災區的搜救工作就僅能依靠重型機具與救難犬，並且，救難人員須冒著生命危險於災難現場中進行危險救援工作。為減低救難風險，提高救難效率，因此，本計畫之感測網路分散式救援機器人，不但設計可順應災區地形運動的救援機器人主體，除可克服多種的複雜地形，更可發揮分散式救援的功能，並透過分析，以達到減重的設計。本計畫所設計之救援機器人，具備有影像、聲音、溫度、距離等感測功能，以及可透過802.11及ZigBee無線通訊系統，可傳播感知之訊息。此外，並透過虛擬實境之學習，提升救援機器人之判斷能力，建立輕巧具前瞻性與創新性的災難救援機器人。

**關鍵詞：**邊界元素法、救援機器人、ZigBee、802.11、虛擬實境，影像處理

### (二) 英文摘要

The disaster especially in earth quake has attracted a lot of attentions recently. Within the first forty-eight hours is considered as the golden time for saving lives after the catastrophe occurred. By observing global major disasters such as the great earthquake occurred at Osaka and Kobe in Japan, the 921 Earthquake in Taiwan, Tsunami in Southeast Asia, and the recent earthquake in Sichuan. Therefore, this study developed a rescue robot with control in a tough environment with sensing in image, voice, temperature, and distance, as well as the wireless communication in 802.11 and ZigBee. The mechanical design, the analysis of mechanics to reduce the design, and the visual training of the present robot will be applied to conduct the rescue task. In the first year, we have completed those individual work. In the next year, all four subprojects will be integrated with multiple rescue robots.

**Keywords:** Boundary Element Method, Rescue Robot, ZigBee, 802.11, VR, Image

### (三) 計畫背景及目的：

災難後的救援一直為世界各國所重視，特別是在極短時間內快速進行的救援工作，更是影響受難人員生存的關鍵。因此，本計畫主要目的，即是建立智慧型災難救援機器人所需的移動平台設計與控制技術，期望可結合日益成熟且多樣的感測技術，完成救援機器人的研發，在災難發生後的第一時間內，快速且自動的進行受難人員的搜救，降低救難人員的危險，提高受難人員的生存機率。透過日本阪神大地震、台灣 921 大地震與南亞大海嘯和日前的緬甸水災與四川 512 大地震等國際重大災難的觀察，我們可以歸納幾點災難環境的特性：

1. 災區地形通常千變萬化且崎嶇難行。
2. 災難的發生通常會持續一段時間，如大地震後的餘震。
3. 災區的建築物與地形極端不穩定。
4. 受難人員往往被層層壓覆於斷垣殘壁中。
5. 災難區域的通訊系統無法發揮作用。

因此，如圖(一)所示，很多災區的搜救僅靠重型機具與救難犬是不足的，並且，救難人員仍必須冒著生命危險於災害環境中進行救援工作。有鑑於此，世界各國的專家學者紛紛投入應用機器人技術於災難救援的研究[1]。



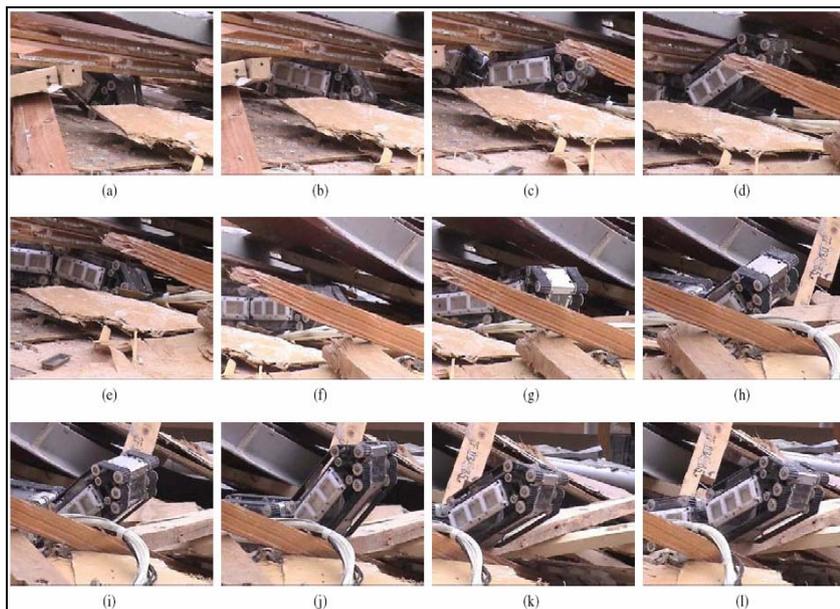
圖(一) 災區可能的地形

Tsukagoshi et al. (2005)，提出可應用於災害環境勘查的救援機器人[2]，如圖(二)所示，跳躍式的機構設計可克服災害環境的崎嶇地面，使救援機器在不同的作業點與範圍內進行搜救的任務。然而，該救援機器人僅能執行定點的局部搜救任務，並且不能深入災區內部，僅進行災區表面的搜救，使其救援任務受到極大的限制，因為大部分需進行重要救援任務的受難人員多被壓覆在倒塌的建築物內部。



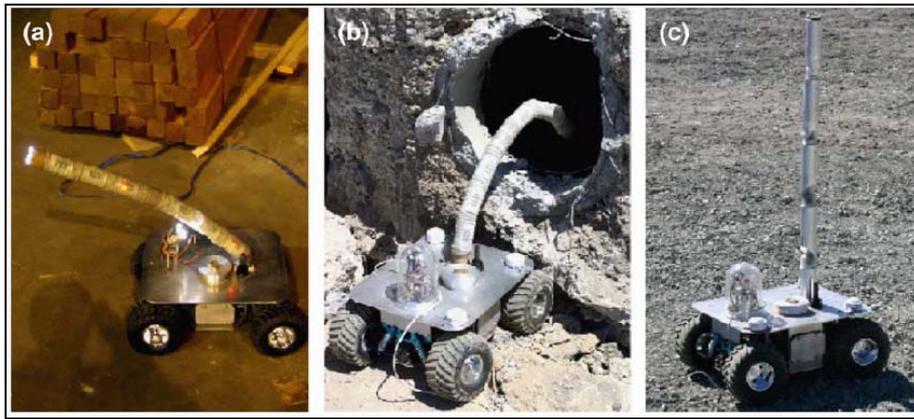
圖(二) 跳躍式救援機器人

為符合災區環境的運動特性，Haraguchi et al. (2005)提出雙驅動的履帶傳動系統 [3]，如圖(三)所示，配合多種感測融合技術可深入災區內部，克服複雜環境進行救援與環境資料收集。然而，僅藉由雙驅動的履帶傳動系統，仍然不能克服具有較大段差的災區環境，在不同的作業平面執行搜救任務。此外，具過彎打滑特性的履帶傳動系統在災區環境的運動中，亦將難以預測其可能的運動方向與模式。



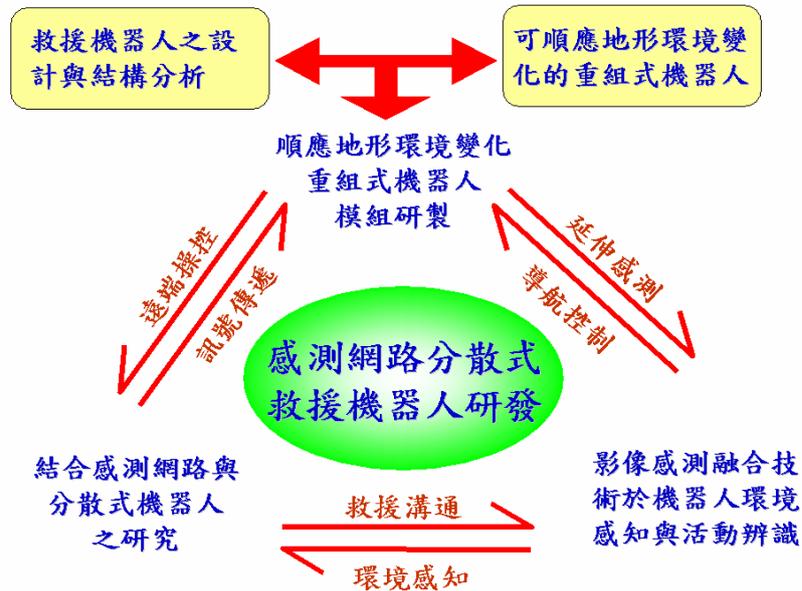
圖(三) 雙驅動的履帶傳動系統

Wolf et al. (2005)則結合多自由度(hyper-redundant)機械臂設計移動式救援機器人 [4]，如圖(四)所示，多自由度的機械臂結構可伸入災區救援。然而，該救援機器人仍僅能執行災區表面的局部搜救任務，並且多自由度機械臂亦不能深入災區內部，使其救援任務受到極大的限制。



圖(四) 多自由度機械臂設計移動式救援機器人

由於上述的救援機器人研究多著重於災害環境地形表面運動的克服，其作業方式將無法達到廣大且深入的救援範圍，因此對於受難人員的偵查與災害環境的資料收集極為有限。有鑑於此，本整合型研究計畫採用感測網路分散式救援機器人設計，透過分散式救援機器人的分散作業特性，以感測網路方式進行偵測與操控，使救援機器人可克服各種地形障礙，深入災區內部，擴大救援範圍。本計畫”感測網路分散式救援機器人研發”，整合四項子計畫，包括：”救援機器人之設計與結構分析(機械固力學門)”、”可順應地形環境變化的重組式機器人(自動化學門)”、”結合感測網路與分散式機器人之研究(控制學門)”、以及”影像感測融合技術於機器人環境感知與活動辨識(資訊學門)”，可建立輕巧具前瞻性與創新性的災難救援機器人研發，各子計畫間之關聯性與配合狀況如下圖(五)所示。



圖(五) 各子計畫間之關聯性與配合狀況

#### (四) 各子計畫研究方法及進度摘要：

針對本年度各子計畫

1. 子計畫一：救援機器人之設計與結構分析
2. 子計畫二：可順應地形環境變化的重組式機器人

3. 子計畫三：結合感測網路與分散式機器人之研究

4. 子計畫四：影像感測融合技術於機器人環境感知與活動辨識

以上四個子計畫分別綜合整理期中進度報告如下：

### 1. 子計畫一：救援機器人之設計與結構分析

由於救援機器人需要有輕巧之身軀始能達成在困難環境中之運動功能，因此本子計畫將採用邊界元素法(Boundary Element Method, BEM) [5,6]，對機器人做接觸面以及各重要元件的應力分析，以期設計一具有強度，且在惡劣環境下足以勝任救援任務之機器人。以二維邊界元素法(BEM)來分析救援機器人中各工件的受力情形。最常見的圓形環作應力分析，並進而求算具有裂縫的圓形環受力增加時，其第一、第二、第三、第四塑性鉸的生成位置，以及列連接面的應力分佈圖。再以救援機器人外側支撐架受力情形作應力分析，以作為往後更換更輕，但強度不變工件的依據。如表(一)研究結果證明，二維邊界元素法在救援機器人的工件應力分析上是強而有力的。繼續在未來的計畫中將現有之二維邊界元素法擴充為三維，並針對更多的元件加以分析，以求達到機器人輕巧但強度不減的目的。

表(一) 研究分析結果

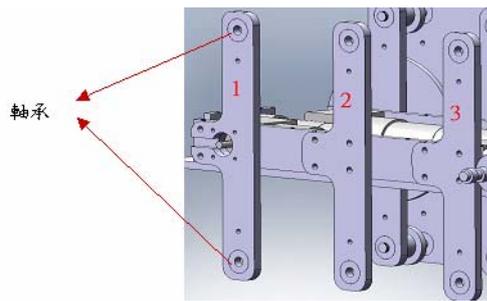
	a/t	$\theta$			
		0°	30°	45°	60°
theoretical	0.3	0.177	0.111	0.032	-0.070
	0.4	0.164	0.099	0.022	-0.078
	0.5	0.136	0.074	0.000	-0.096
BEM	0.3	0.171	0.110	0.031	-0.070
	0.4	0.162	0.098	0.022	-0.081
	0.5	0.136	0.069	-0.003	-0.090
accuracy	0.3	96.61%	99.09%	96.87%	99.99%
	0.4	98.78%	98.98%	99.99%	96.29%
	0.5	99.99%	93.24%	97.00%	93.75%

### 2. 子計畫二：可順應地形環境變化的重組式機器人

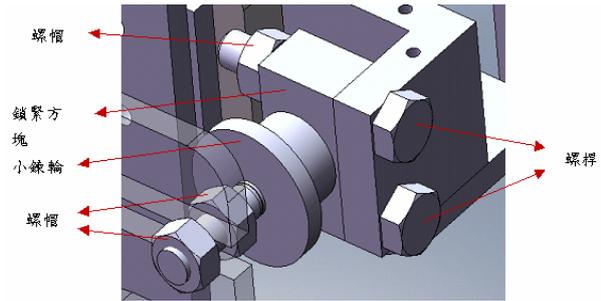
為配合災區複雜之地形，在機構方面設計，特別針對地形之複雜度進行機構上的設計，例如在傳動方面，採用的方式是履帶式傳動，在機器人機構方面，採取的是重組式機構。重組式機器人在機構上的反覆地修正設計，第三代設計(單節)如今已達到移動功能的目標，其移動的過程中，斜角的設計在越過障礙時已可達到順應地形的效果。但驅

動鍊輪前進的過程中，鍊條上安裝之防滑機構，尚未實際測試其效果，因此在防滑效果上的材料也需慎重選擇，提高地形上的確動能力，使動態移動上的誤差能降低。至於，重組機器人第三代設計(單節)概念與成果說明如下：

首先進行內部板件的改造，從先前由單一的板件，改為三小片的構造，藉此減少多餘的浪費，並在每片板件間，嵌入軸承，用來固定輪軸，減少轉動時的磨耗，如圖(六)所示，同時並將體積改為 345x220x215mm。接著改造皮帶繃緊的裝置，由原本的避震器改為螺紋鎖緊裝置，可以輕易的帶動鎖緊方塊，調節皮帶鬆緊度，然後藉由鎖在外板上的兩個螺帽，固定位置，如圖(七)所示。

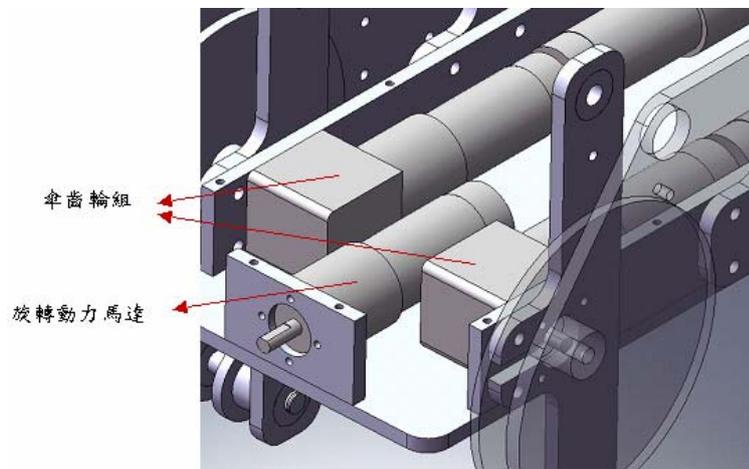


圖(六) 嵌入軸承之設計



圖(七) 螺紋鎖緊裝置

再來將馬達的前端加上一組傘齒輪，將馬達的輸出動力旋轉 90 度，便可以更有效的利用空間，如圖(八)所示。再來將皮帶改為鍊條，在鍊條上方有一個平面，可以用來安裝適合行走的材質，順應不同的地質，如圖(九)所示。

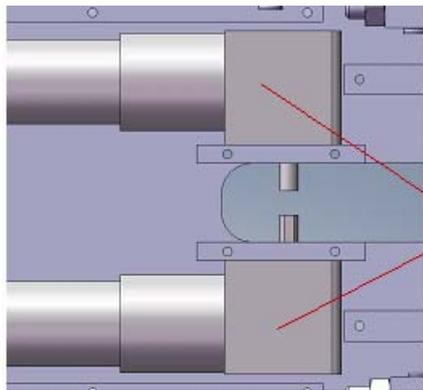


圖(八) 馬達之配置位置

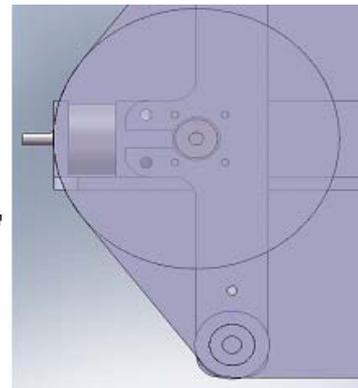


圖(九) 鍊條之設計

抬頭方面，由於使用蝸桿蝸輪組過於麻煩，所以打算直接在馬達的前面加上齒輪組增加扭力，不過這次使用兩個馬達同時帶動，是因為害怕用一顆馬達動力不夠驅動，配置如圖(十)所示。行走動力就直接由馬達驅動大鍊輪，然後就自然的在前面形成一個斜角，可以克服一些障礙，如圖(十一)所示。

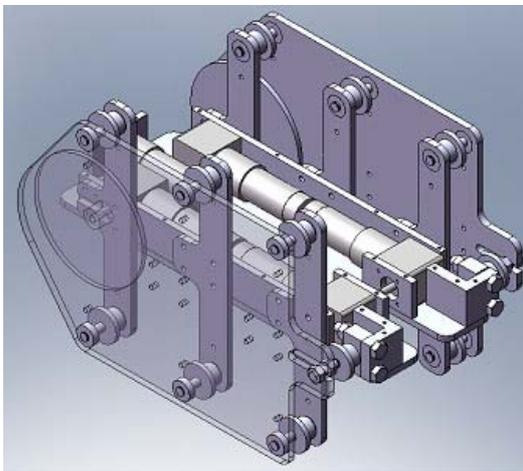


圖(十) 抬頭機構之設計

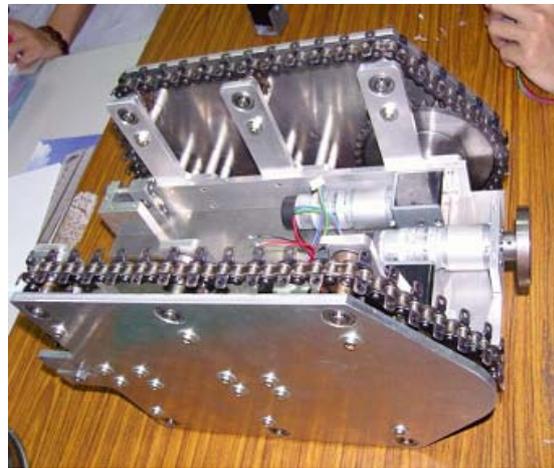


圖(十一) 斜角之設計

旋轉動力也直接由一顆馬達，配上齒輪箱減速後傳動。如圖(十二)所示。最後設計完成圖(十三)所示。



圖(十二) 設計完成圖



圖(十三) 實體成果圖

之後在單節機構上的修改，大致方向將朝向整體體積上的縮小以及重量上減輕，以配合在災區中地形需在坍塌瓦礫堆中，沿縫前進的需求；但從現今的機構設計上可知，機器人在體積上的設計已經盡量做到縮小的效果，所剩之空間大致只預留放置內部電路及電瓶，因此未來在體積上的縮小將是一個挑戰。

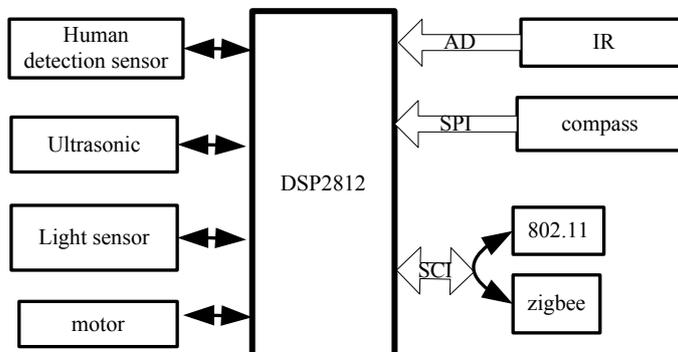
目前機構上的設計是以單節為一目標，因此在接下來之研究，將朝向多節機構上的連接及設計，在多節之間的連接問題，包括有現今所設計之抬頭機構及轉向機構上的連接問題，將是之後研究的重點主題。

### 3. 子計畫三：結合感測網路與分散式機器人之研究

利用其多節點的特性實現在機器人上而發展出分散式搜救機器人，不僅可以克服災區的複雜地形，更具備有 ZigBee 與 802.11 兩種無線傳輸介面，規劃經由 ZigBee 來得到機器人所感測到的資訊，再由 802.11 負責傳輸聲音與影像資料[7]。另外透過影像處理的技術，達到自動偵查移動生還者的功能。利用 ZigBee 來實現樹狀網路，如此不但可以延長傳輸的距離，並且可用於機器人定位。硬體選用 DSP 2812 為底層核心，整合了包括馬達控制、外部電路感測訊號擷取、無線模組訊號接收、數位濾波器以及控制演算法[8]，其

架構圖如圖(十四)所示。主要功能如下：

1. 感測器方面裝置了電子羅盤、超音波測距模組、紅外線測距模組與光感器，藉由擷取這些感測器資訊並且經過數位濾波處理之後，來判斷外界狀況。
2. 利用無線模組把機器人所有資訊回傳至電腦端，藉由電腦端可監控機器人目前整體狀態，並可從電腦端下達控制指令來達到救援機器人的行動控制。

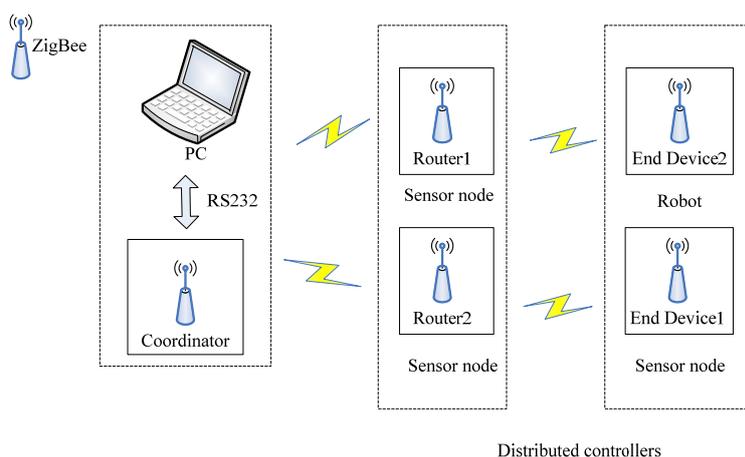


圖(十四)、 DSP 周邊架構圖

茲將成果摘要說明如下：

### 3.1 遠端控制系統

由 ZigBee 所構成的感測網路如圖(十五)所示，此網路包含有一個 Coordinator、兩個 Router、兩個 End device，機器人扮演其中一個 End device，剩下的兩個 Router 和另一個 End device 都扮演環境的感測節點，Coordinator 主要負責與 PC 端溝通，可由 PC 端的人機介面傳送遙控命令，包括對機器人的運動控制(可控速度)、機器人上的感測器監測(包括紅外線、超音波、電子羅盤、人體感測器、光感測器)、對另三個感測點的環境監測控制(包括溫度和環境的亮暗)。由於網路拓撲為樹狀網路，透過中間點 Router 的路由，即時機器人在很遠的地方，遠端遙控者依然可以隨意的控制機器人。



圖(十五) ZigBee 感測網路

### 3.2 網路訊號強度定位

運用 ZigBee 樹狀網路的特性與救援機器人上的感測器，在此提出一種新的定位方法：

- A. 在理想狀態下，在半徑等於  $r$  的距離之下收到的 RSSI 值都是一樣的，我們可以由 RSSI 公式得到距離。

$$RSSI = -(10 * n * \log_{10} d + A)$$

$n$ : 電磁波衰減係數

$d$ : 電磁波傳遞距離

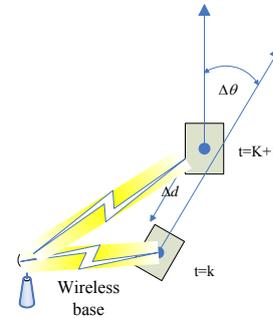
$A$ : 當距離等於一公尺時的信號強度

- B. 由安裝在機器人上得電子羅盤求得角度
- C. 由距離與角度可以求得相對於 base 的相對座標，如下圖(十六)所示。

$$x(k+1) = x(k) + \Delta d * \cos(\Delta\theta)$$

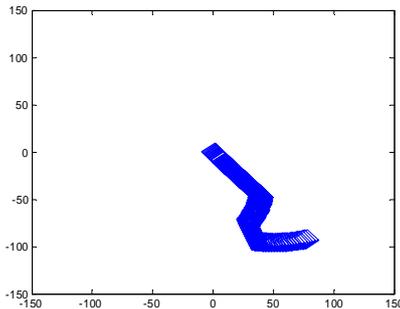
$$y(k+1) = y(k) + \Delta d * \sin(\Delta\theta)$$

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \Delta\theta$$

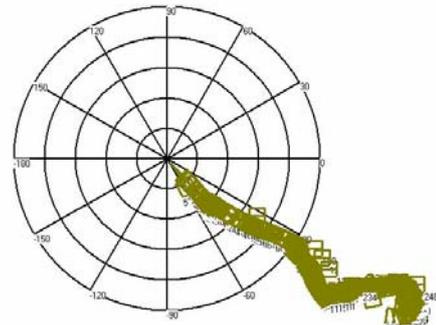


圖(十六)、定位示意圖

- D. 利用 ZigBee 樹狀網路的特性，可以將通訊範圍延伸，因此地圖可以延伸。其模擬與實驗結果如圖(十七)與圖(十八)所示：



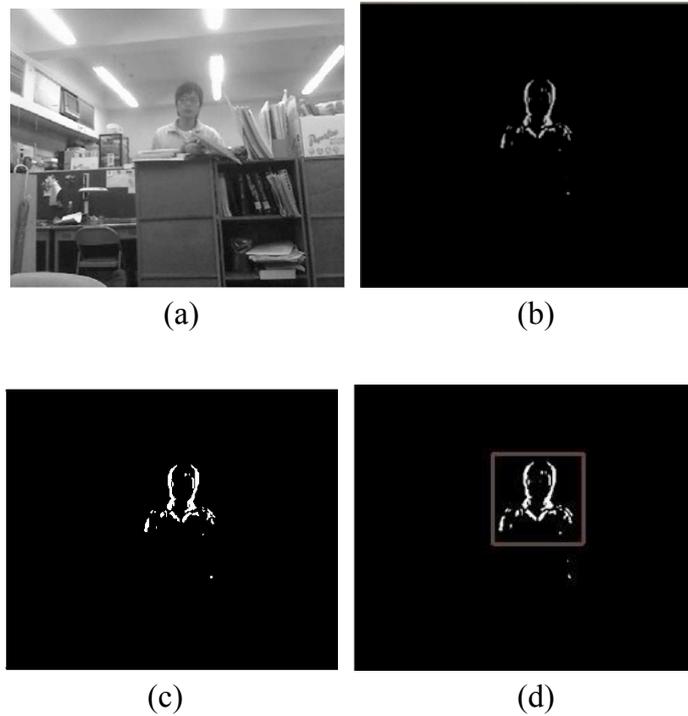
圖(十七) Matlab Simulation



圖(十八) 實際走的路徑

### 3.3 影音傳輸的功能

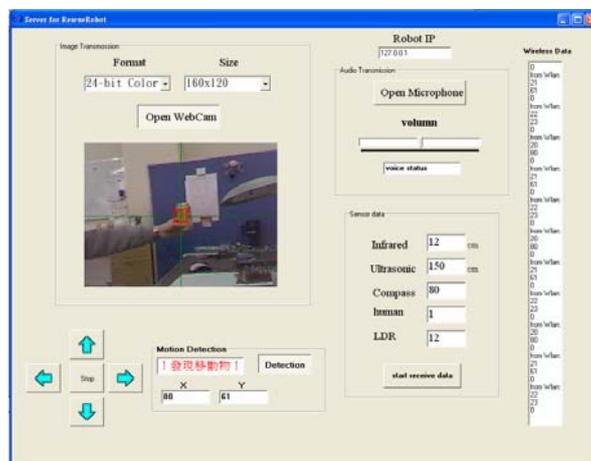
利用 802.11 介面達到影音傳輸的功能，即時影音我們使用 UDP 的封包方式來傳輸，雖然此通訊協定較不講究可靠度，但可以達到最即時的傳輸[9]。而在救難的現場因為環境有許多雜物與坍塌的碎石，救難人員有時會較難注意到生還者，所以利用影像處理的技術我們達到了動態偵測的功能。在螢幕上除了顯示機器人上 webcam 的影像並且強調正在移動的區塊，以協助救難人員發現生還者。使用 label 的方式將這些連通的區塊加以識別，已達到辨識物體的功能。將目標物影像分別對水平與垂直方向投影法取平均值，便可在影像中標示目標物之位置。流程中經過處理的影像如下圖(十九)。



圖(十九) (a)origin image (b)subtracted image (c)binary image (d)mark the moving object detected.

### 3.4 人機介面

經由人機介面如圖(二十)，可以得知從機器人身上所傳回來的影像聲音和各個感測器的資訊，另外亦可透過介面上的按鈕來操控遠端的機器人和監測各感測節點。



圖(二十) 人機介面 GUI

## 4. 子計畫四：影像感測融合技術於機器人環境感知與活動辨識

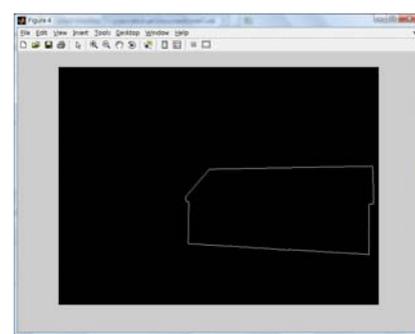
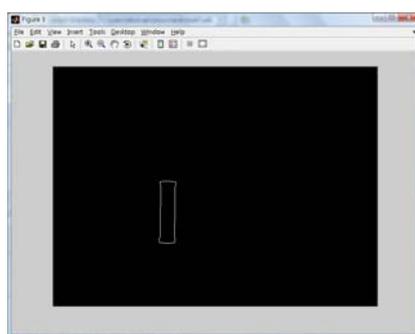
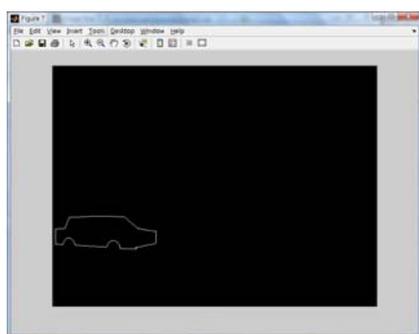
此研究計畫是發展一個機器人的智慧型代理人(Intelligent Agent)系統在3D地震災區虛擬環境中之認知與推理訓練。利用虛擬環境(Virtual environment)設計概念與影像處理(Image processing)的技術[10]，使機器人的智慧型代理人透過虛擬環境中的行為學習，認知與推理反覆訓練，以建立及增加智能判斷能力；達到機器人對周遭環境之感應與具有活動辨識的能力。機器人的智慧型代理人將融入此3D虛擬環境中；其虛擬環境是具有景深的三維立體(3D) 環境，運用在3D地震災區之虛擬環境中進行行為練習與智能訓練，此智慧型系統能學習和判斷在緊急情況的環境下，作出像大腦角色般的行為，如

同經過認知與推理執行動作與指令，判斷物體的大小、距離，根據所得到的資料來做出相對應的判斷並且執行向右轉、向左轉...等動作。此智慧型代理人如同機器人中的大腦代理人，具有大腦的功能，透過已設計好的3D模擬地震災區之虛擬環境，重複地進行人工訓練與行為學習和智能訓練，建立其認知與推理能力。

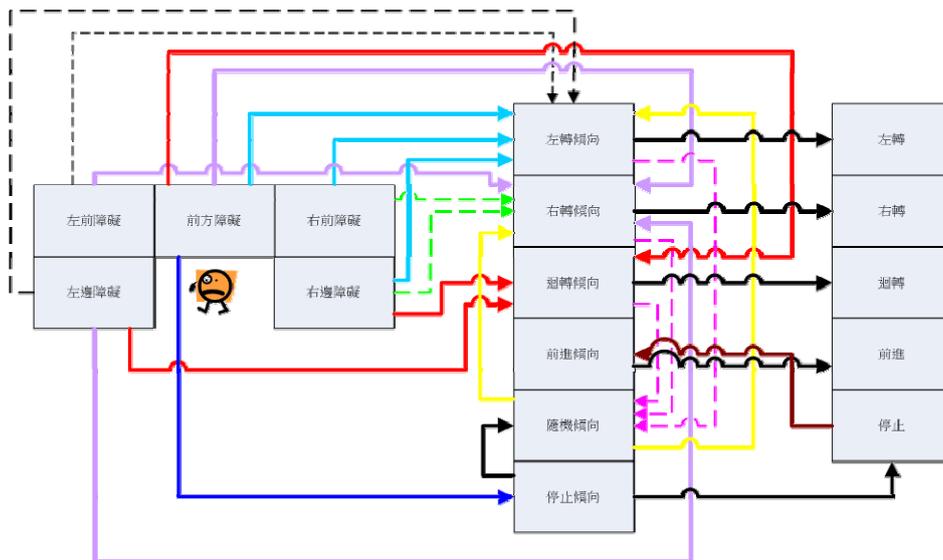
此智慧型代理人利用所建構之3D虛擬地震環境來搜集資料，並基於人類的思維模式，建立基本的辨識及判斷雛型，然而，災區的環境是千變萬化，目前尚欠缺適宜的管道來取得訓練資料，若能取得適宜的資料，俾能更接近人類真實的思維，因此，使用身歷其境的虛擬實境(immersive VR)設備來搜集影像處理的資料，是刻不容緩的事。此外，如何辨識目標及定位、解決「迷路」的問題、整合各種探測器的資料，及建立溝通系統，仍是未來需要努力的方向。因此，根據此研究計畫的第一年，共建立了四個模型：「虛擬地震環境模型建造」如圖(二十一)；基本「辨識系統」如圖(二十二)；基本「機器人的動態決策計畫能力系統」(包含「避障」與「到達目標」模型，分別如圖(二十三)與二十四)所示。



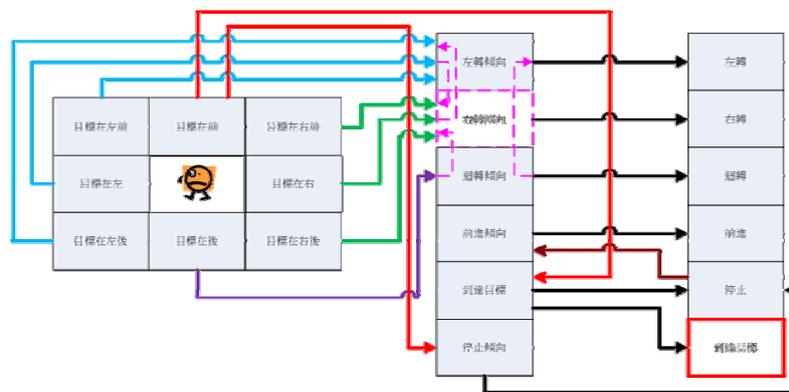
圖(二十一) 虛擬地震環境



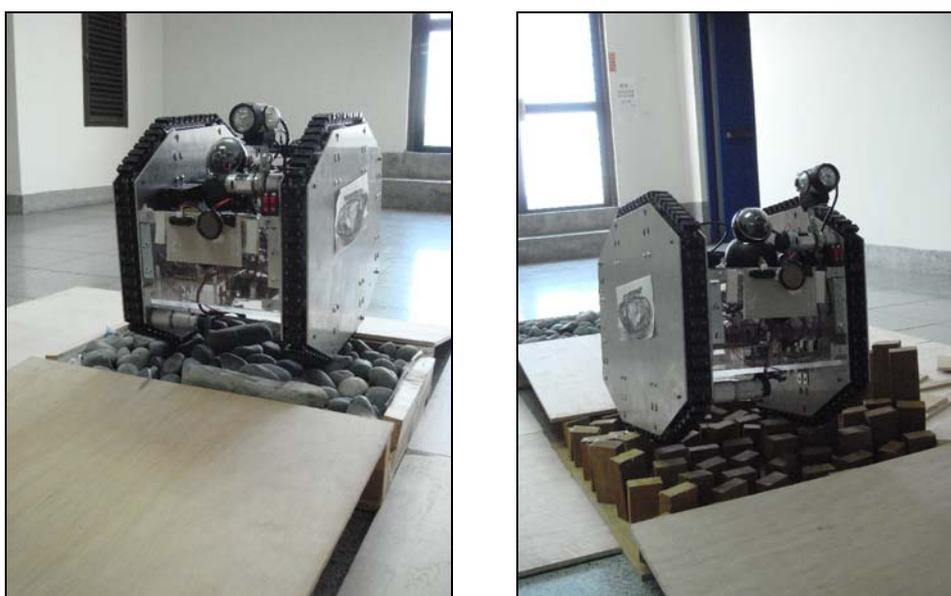
圖(二十二) 物件區分結果圖



圖(二十三) 避障模型



圖(二十四) 到達目標模型



圖(二十五) 重組式機器人單體救援環境整合測試

綜合各子計畫成果，重組式機器人單體救援環境整合測試如下圖(二十五)所示，對於各種崎嶇不平路面均可順利前進運動。

## (五) 結論：

此救援機器人單體採用履帶傳動系統作動測試結果驗證可因應多樣的災區環境。至於感測網路方面，也已完成 802.11 之無線網路軟硬體系統與 Zigbee 之感測網路軟硬體系統。同時發展完成無線網路系統之佈建系統，可將訊號透過中間通訊節點，完成與遠端系統之正常通訊。而救援機器人之人機操作虛擬環境方面，也完成 3D 虛擬物件及虛擬環境設計與製作，並整合單一和多種 3D 虛擬物件及三種虛擬空間之模型建立；完成初步地「辨識系統」與「機器人的動態決策計畫能力系統」。茲將結論綜合整理如下：

1. 結果驗證二維邊界元素法在救援機器人的工件應力分析上是強而有力的，已提供機構設計與分析的成果。
2. 重組式機器人基本架構已完成研究分析與建置測試，在機構上的設計與製作，如今已達到移動功能的目標。
3. 運用 ZigBee 與 802.11 兩種無線傳輸介面，規劃經由 ZigBee 來得到機器人所感測到的資訊，再由 802.11 負責傳輸聲音與影像資料。另外透過影像處理的技術，達到自動偵查移動生還者的功能與災區感測資料的收集。
4. 完成基本 3D 虛擬物件模組和模擬環境設計及製作與基本「辨識系統」與「機器人的動態決策計畫能力系統」之建立，使智慧型代理人具有初步的認知與推理能力。
5. 初步完成整合單體機器人之救援環境測試。

針對下年度工作展望將著重於感測網路分散式救援機器人多體系統，主要完成本計畫所提案之救援機器人多體雛形製作，包括：救援機器人單體以及轉向機構的設計與製作等。為因應較大段差的災區環境，機器人將可自動偵測接觸地面的段差，調整運動姿態及行進方向，使機器人能發揮最大的機動性與運動效能。感測網路方面，將結合救援機器人運動控制，完成救援機器人慣性導航之控制，可將機器人所走過之路徑傳回至救援基地。並與無線網路系統結合，完成無線網路感測系統與救援機器人之整合技術並建立聲音通訊之管道，完成以 ZigBee 建立基地與救援機器人間之無線通訊系統。救援機器人之人機操作虛擬環境方面，將完成智慧型代理人對多種 3D 物件及虛擬空間辨識能力與虛擬環境之使用者互動介面設計與溝通系統介面。

## (六) 參考文獻：

- [1] K. Tadakuma, "Joint Mechanism to Automatically Realize Multiple Configurations for a Connected Vehicle," *Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006. BioRob 2006. The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on*, February 20-22, 2006, pp.988- 994.

- [2] H. Tsukagoshi, M. Sasaki, A. Kitagawa, and T. Tanaka, "Numerical analysis and design for a higher jumping rescue robot using a pneumatic cylinder," *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, vol. 127, no. 2, pp. 308-314, 2005.
- [3] R. Haraguchi, K. Osuka, S. Makita, S. Tadokoro, "The development of the mobile inspection robot for rescue activity, MOIRA2," *Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Robotics*, pp. 498-505, 2005.
- [4] A. Wolf, H. H. Choset, J. H. B. Brown, R. W. Casciola, "Design and control of a mobile hyper-redundant urban search and rescue robot," *Advanced Robotics*, vol. 19, no. 3, pp. 221-248, 2005.
- [5] L. J. Young and Y. P. Tsai, "A Boundary Element Application for Mixed Mode Loading Idealized Sawtooth Fracture Surface," *Int'l J. of Solids and Structure*, vol. 36, pp. 3239-3252, 1999.
- [6] L.J.Young, "Plastic hinge development and crack stability analysis in a circular ring," *Int'l J. of Solid and Structure*, 38, pp. 1355-1367.
- [7] M. S. Gast, *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*, O'Reilly, 2002.
- [8] T. H. Lin, B. C. Wang, and P. L. Hsu, "Design of the Channel Allocation Procedure of the IEEE 802.11 Ad-hoc Networksfor Traffic Control Systems," *Proceedings of SICE-ICCAS International Joint Conference*, pp. 4949-4954, 2006.
- [9] N. Paragios and R. Deriche, "Geodesic Active Contours and Level Sets for the Detection and Tracking of Moving Objects", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 3, March, pp. 266-280, 2000.
- [10] M. David, Y. F. Cheng, M. G. Paul and P. Norman J., "Collaborative Virtual Environment Technology for People with Autism," *Focus on Autism & Other Developmental Disabilities*, vol. 20, Iss. 4, pp. 231-243, 2005.