

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

高活度大型核能組件內部管路之遙控探測技術研究
**Research on remote sensing in the pipes of high radiation large scale
nuclear power mechanism**

計畫編號：1042001INER036

受委託機關(構)：中原大學

計畫主持人：張政元

聯絡電話：03-2654838

E-mail address：ccy@cycu.edu.tw

核研所聯絡人員：蘇柏青

報告日期：104 年 11 月 27 日

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
貳、研究方法與過程.....	8
參、主要發現與結論.....	23
肆、參考文獻.....	48

中文摘要

本研究的主要內容是二自由度蛇型機器人的設計，利用蛇的運動形態與骨架結構來研究具有與蛇的功能相似的機器人。鑒於設計系統化，結構模組化以及針對探索未知的工作環境，蛇型機器人的研究開拓了仿生機器人研究的全新領域且具有廣泛的運用。根據以下的特點，如體積小，多自由度，重量較輕，操作簡單，可靠性高，價格便宜，容易安裝和維修；因此，我們開發了可以在管道內部移動的蛇型機器人。機器人是相同的模組化結構配合其特殊的連接組合方式來完成機構設計及規劃各種的運動模式。蛇體的特殊結構使其能夠順利地在狹小的空間和管道完成高穩定性的移動。為了驗證蛇型機器人的運動能力，我們對蛇型機器人的關節機構的設計和運動原理進行了討論。

本論文對於蛇型機器人主要功能的要求：設計運動模式並利用關節之間的擺動與蛇型機器人跟管道內部之間的磨擦力來前進；利用人機介面監控並操控蛇型機器人；以及安裝鏡頭模組、LED 照明、氣體感測器於管道內部的探勘。在本研究中，我們成功的驗證蛇型機器人的運動模式且實現在管道的探勘任務。

Abstract

Based on the requirements such as small size, multi-degree of freedom, light, simple, reliable, cheap and easy to install and maintain, we develop a small snake robot to simulate the motion of snakes. The robot is made up of several motors and able to complete various movements in specific connection ways. The structure of snake body enable it to move smoothly in narrow space such as pipes with high stability and reliability. To verify the effectiveness by executing cycle locomotions of snake-like robot, we have a discussion about the design of the robot's arthrosis mechanism and the movement principle are also discuss in this paper.

In this thesis, we require the snake-like robot to achieve some main features : Design snake-like robot's locomotions, use the swing between robot's arthrosis and the friction force between the inner tube to move forward; Use man-machine interface to monitor and control the snake-like robot; We install the camera module, LED lighting and gas sensor for the inner pipe's exploration. In this research, we successfully demonstrate snake-like robot's locomotions and achieve exploration mission in the pipeline.

壹、計畫緣起與目的

近年來由於科技快速的進步，關於機器人的研發越來越先進，日趨完善，加上人們對生活品質的要求越來越高，機器人在科技工業上以及生活中皆扮演重要的地位，使得機器人的應用層面越來越廣泛且生活化，機器人可以代替人類完成許多特定或是危險的工作任務，無論是在居家生活中或是星球的探索等等，都可以見到機器人的蹤跡。

傳統的設計方法已經不能滿足機器人在未知環境下作業的要求，要解決的主要問題之一就是能夠設計出新的運動架構及模式。目前已知的路上型機器人，通常是以自走車為主，如輪型、履帶型、二足人型與多足為主，這些移動方式有些能夠進行快速的移動，有些對於稍微崎嶇不平整的地面或許有良好的表現，但當機器人需要進入到複雜崎嶇的地面或是狹小且危險的管道內部空間的時候，這些移動方式往往便束手無策無法完成任務，或需要花費大量的時間才能通過，而選擇了避開障礙物、選擇其他的路徑，這將限制了機器人的行動能力。綜合以上的觀點所得到的結論將促使我們去進一步尋找更適合的運動模式與架構。

在仿生機器人學中，模仿蛇類架構而建構出來的蛇型機器人將逐漸具備上述的各項能力。蛇型機器人主要是模仿自然界中蛇的骨架與運動型態，具有多關節、多自由度等特點，可以同時具備多種運動模式，在許多領域具有廣泛的應用前景。

仿生機器人可以代替我們前往不適合人類活動的地形或是具有高危險性的環境來執行特殊的任務，每一種生物都有其特殊的體形以及專長來適應不同的環境，當必須在崎嶇不平的地形或是狹窄的

洞穴裡面來移動時，蛇可以藉由其特殊的體型優勢及身體可以任意彎曲的特性來克服環境的限制。如在有輻射、有爆炸可能性的管道中等危險環境下的偵查和採樣；在地震、土石掩埋以及火災後的災難現場搜尋受難者；在狹小和有毒等危險條件下的探勘和管道的疏通。它對地形的適應能力會較傳統無人載具的自走車來的更容易去操控。

搜救機器人中，模仿蛇類運動的蛇型機器人，其多關節的機構設計具有模組化、可串聯組裝等優點：(1) 根據不同的用途(場地或是運動模式的不同)，可以選用不同種類以及不同構造的關節。(2) 即使某一關節的伺服馬達出了故障，對整體的運動相較於自走車來說所造成影響較小，且發生故障的關節容易更換以及修理。(3) 蛇型機器人的結構可以大量生產，價格便宜，可靠性高，容易安裝和維修。

另外，在本研究中，我們所研製出來的蛇型機器人需具備以下幾項目標：身軀狹長、高自由度等特性，可以有利於複雜或是狹窄的環境運動；加上適當的感測器、攝影鏡頭以及 LED 照明裝備；透過外部的人機介面可以幫助救援人員方便操控及監看，作為救災的前鋒，探索人類無法進入的場所，獲得救援現場的第一手即時資訊，以利救災策略的擬定與選擇。

一、文獻探討

蛇型機器人是一種利用仿生的弦波傳遞方式來前進的機器人，不同於一般的輪式機器人或是履帶式的機器人，因此在設計蛇型機器人的結構以及規劃運動模式之前，我們必須對蛇的運動方式以及骨架的構造有充分的了解。

二、自然界中蛇的運動模式

自然界中的蛇類可以劃分成四種運動模式[1]，如圖 1-1 所示，分別為：(1) 風琴式前進；(2) S 形曲線前進；(3)側向滑行；(4) 蠕動前進。風琴式運動並不常見，此種運動方式主要是利用蛇身縱向摺疊成波浪狀，施力於地面，並利用摩擦力將身體往前拉直推進，在要跨越障礙物時需要更大的力氣撐住身體來使其往前運動，此運動非常沒有效率，且移動速度很慢；S 形曲線前進顧名思義是藉由摩擦力以 S 形左右擺動身體來前進，這是最常見到的運動方式，與其它運動模式相較最具有效率且最為迅速；側向滑行主要在較乾燥以及高溫的地面進行，前進方式尾部固定於地面，頭部擺向左邊或右邊並且固定不動，尾部再往欲前進方向移動，如此反覆循環而達到側向滑行運動，這是移動最迅速的運動方式之一；蠕動前進是利用是身體上下擺動來與地面產生摩擦力而往前推進的直線型運動，如同毛毛蟲般運動方式，這也是我們利用於蛇型機器人管道內部的主要運動模式，移動方式雖然較緩慢但卻是最穩定且不容易翻覆。

在仿生機器人學中，模仿蛇類架構而建構出來的蛇型機器人將逐漸具備上述的各項能力。蛇型機器人主要是模仿自然界中蛇的骨架與運動型態，具有多關節、多自由度等特點，可以同時具備多種運動模式，在許多領域具有廣泛的應用前景。

仿生機器人可以代替我們前往不適合人類活動的地形或是具有高危險性的環境來執行特殊的任務，每一種生物都有其特殊的體形以及專長來適應不同的環境，當必須在崎嶇不平的地形或是狹窄的洞穴裡面來移動時，蛇可以藉由其特殊的體型優勢及身體可以任意彎曲的特性來克服環境的限制。如在有輻射、有爆炸可能性的管道

中等危險環境下的偵查和採樣；在地震、土石掩埋以及火災後的災難現場搜尋受難者；在狹小和有毒等危險條件下的探勘和管道的疏通；代替拆彈小組執行防恐防爆和救援傷患的任務；在航太領域可用來對惡劣環境下的星球地表收集土壤樣本，或是人造衛星的機械手臂。它對地形的適應能力會較傳統無人載具的自走車來的更容易去操控。另外，蛇型機器人在軍事上同樣具有廣泛的用途，它可以是未來戰場上的重要偵搜武器。

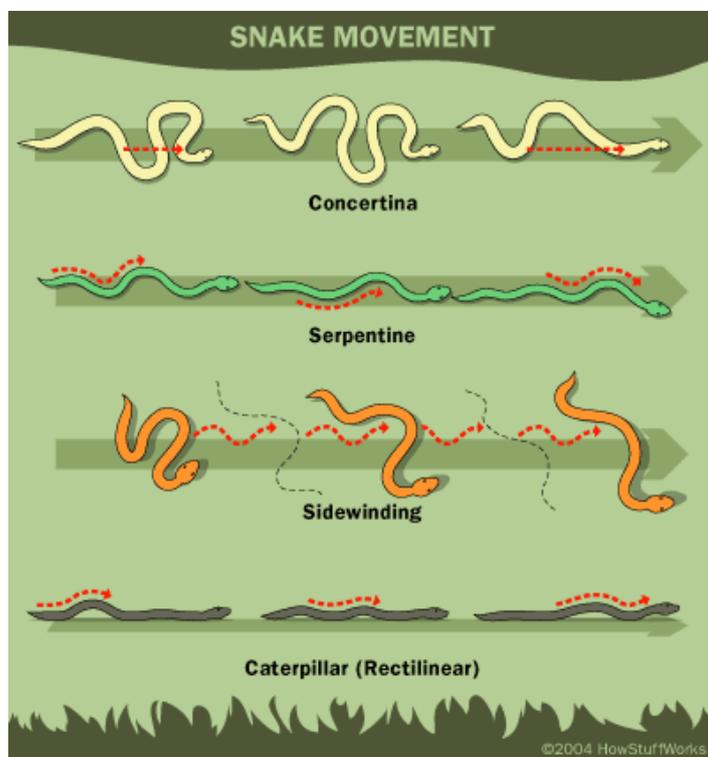


圖 1-1 蛇類的四種運動模式[1]

搜救機器人中，模仿蛇類運動的蛇型機器人，其多關節的機構設計具有模組化、可串聯組裝等優點：(1) 根據不同的用途(場地或是運動模式的不同)，可以選用不同種類以及不同構造的關節。(2) 即使某一關節的伺服馬達出了故障，對整體的運動相較於自走車來

說所造成影響較小，且發生故障的關節容易更換以及修理。(3) 蛇型機器人的結構可以大量生產，價格便宜，可靠性高，容易安裝和維修。

另外，在本研究中，我們所研製出來的蛇型機器人需具備以下幾項目標：身軀狹長、高自由度等特性，可以有利於複雜或是狹窄的環境運動；加上適當的感測器、攝影鏡頭以及 LED 照明裝備；透過外部的人機介面可以幫助救援人員方便操控及監看，作為救災的前鋒，探索人類無法進入的場所，獲得救援現場的第一手即時資訊，以利救災策略的擬定與選擇。

貳、研究方法與過程

一、系統架構

本研究系統架構分成兩個部分，控制端與機器人端：控制端負責對蛇型機器人下達命令和接受資料；機器人端則是由控制板 Serial Servo Controller 負責伺服馬達控制與蛇型機器人運動模式的展現，Arduino Nano 與氣體感測器、蜂鳴器之間的溝通，以及管道內影像回傳的部分，整體系統架構如圖 2-1 所示。

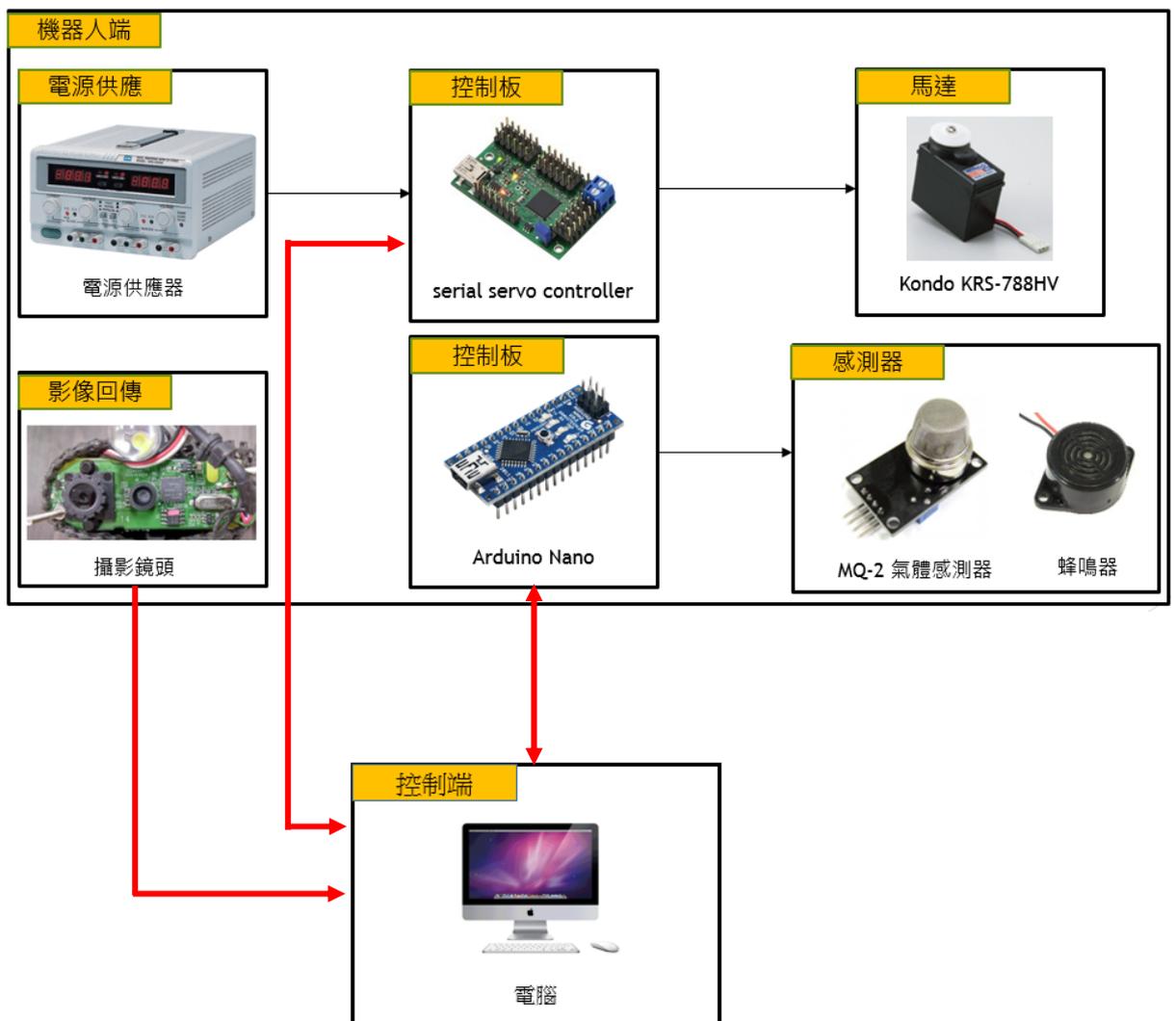


圖 2-1 整體系統架構

二、控制端系統架構

本研究使用桌上型電腦蛇型機器人進行控制，而桌上型電腦可以進一步接收機器人端攝影鏡頭回傳的影像。使用者可以透過電腦端對蛇型機器人下達指令，藉由人機介面的視訊回傳影像控制蛇型機器人於管道內部的行走方向，如圖 2-2 所示。另外，氣體感測器偵測管道內部危險氣體濃度，由人機介面顯示出濃度 ppm 值，並透過地圖定位協助使用者判斷出氣體洩漏的危險區域，如圖 2-3 所示。

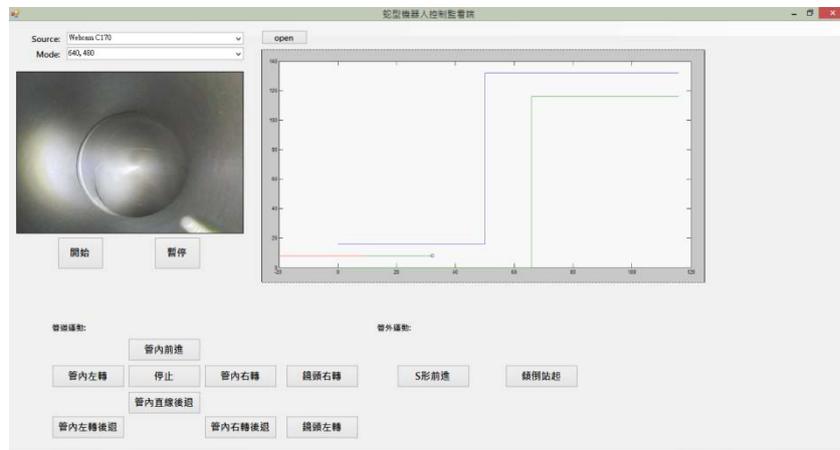


圖 2-2 蛇型機器人控制監看端

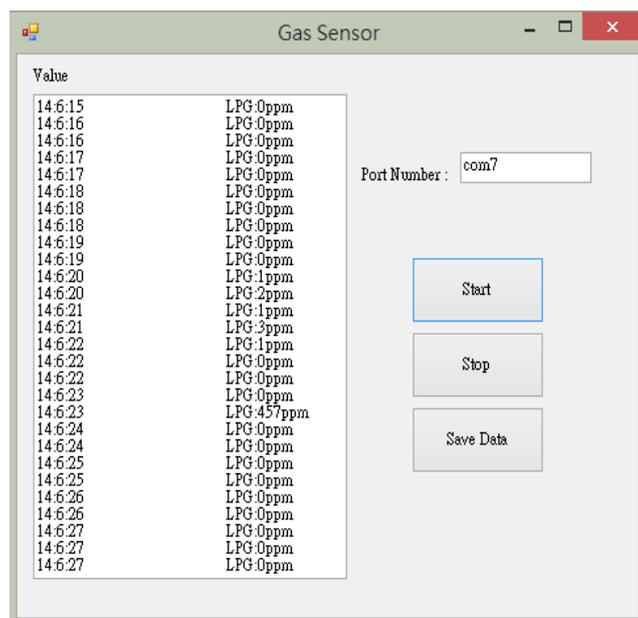


圖 2-3 氣體濃度人機介面

三、機器人端系統架構

本研究所使用的馬達控制板、攝影鏡頭模組與 Arduino Nano，其工作電壓為 5V，透過延長的 USB 線與電腦做連結並由電腦 USB 作為電源供應。伺服馬達的工作電壓為 10.8V，我們使用電源供應器經由馬達控制板為蛇型機器人上十顆伺服馬達供電。馬達控制板接收控制端的命令，接著對伺服馬達進行角度的控制，如圖 2-4(a) 所示。攝影鏡頭模組裝設於蛇型機器人的頭部，如圖 2-4(b) 所示，因機器人於管道內部運動故無法使用無線攝影鏡頭回傳影像。另外還安裝 LED 作為管道內部的照明，以協助影像可以清晰地呈現在人機介面上。Arduino Nano 負責接收氣體感測器的回傳值，氣體感測器安裝於蛇型機器人第三節上方，如圖 2-4(c) 所示，接著透過運算後轉換成 ppm 值，如超過一定的危險濃度範圍則會由蜂鳴器提醒使用者目前管道內部已經有危險氣體出現，需要嚴防爆炸的可能，以及對洩漏區域做紀錄方便日後的管道修繕。



(a)馬達控制板硬體配置 (b)攝影鏡頭模組與 LED 硬體配置



(c)氣體感測器硬體配置

圖 2-4 機器人端系統架構

表 2-1 蛇型機器人物件單價與數量

品項	數量	單價(NTD)
伺服馬達	10	3000
馬達金屬基座	10	350
U 型支架(關節)	10	250
Logitech C170 攝影機	1	550
MQ2 氣體感測器	1	180
Arduino Nano	1	450
馬達控制板(SSC)	1	1100

四、機器人機構設計

本研究設計的機器人，主要應用於管道內部的探勘，其機構設計如圖 2-5,2-6 所示。我們組裝 9 個單體模塊和 1 個頭部模塊，整體由 10 個伺服馬達所組成，以形成在我們的實驗中使用的蛇型機器人。隨著 yaw 自由度和 pitch 自由度的設計，我們的蛇型機器人有能力完成各種複雜的運動模式以及管道內部的運動。

(一)整體機構配置

蛇型機器人的頭部安裝了攝影機與 LED，回傳管道內部的影像以及提供照明；奇數顆伺服馬達上面安裝了矽膠墊，增加蛇型機器人在管道內部的摩擦力，可以更容易前進，不容易造成打滑，進而提高在管道內部的移動速度；定向輪安裝在偶數顆伺服馬達上面，提供蛇型機器人在管道內的平衡，不容易傾倒；馬達控制板裝設在蛇型機器人尾部，與 USB 連接，由外部的電腦控制每一顆伺服馬達的角度。

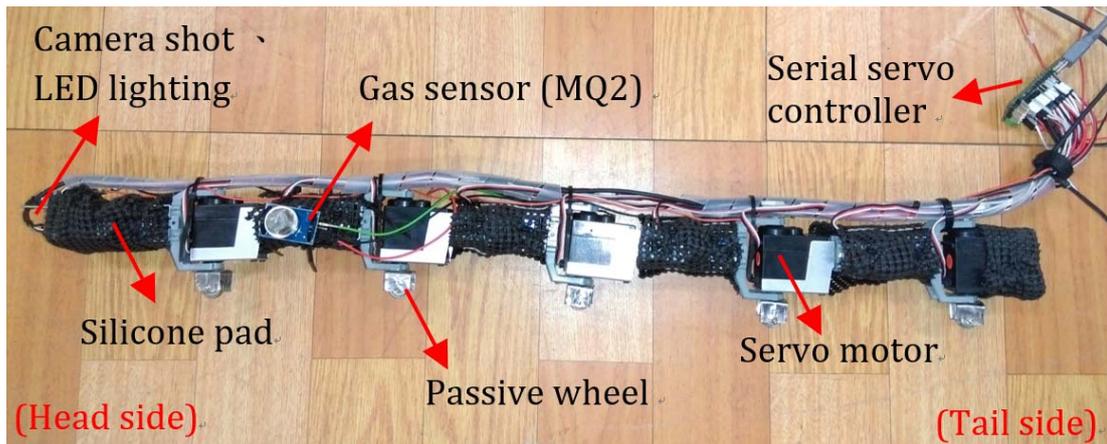


圖 2-5 蛇型機器人整體機構設計



圖 2-6 管外運動俯視圖

(二)單體設計

我們的蛇型機器人基本架構為伺服馬達串連而成，在我們的設計中，蛇型機器人經由 U 型支架(關節)以及金屬基座來連接[2]。金屬基座用來固定伺服馬達，U 型支架由塑膠所構成，並且與金屬基座鎖附在一起，透過這樣的組合便可以串接成蛇型機器人的整體結構。每一個單體都具有兩個活動關節，我們的結構設計由伺服馬達直接控制各關節以達到最佳的姿勢控制能力。

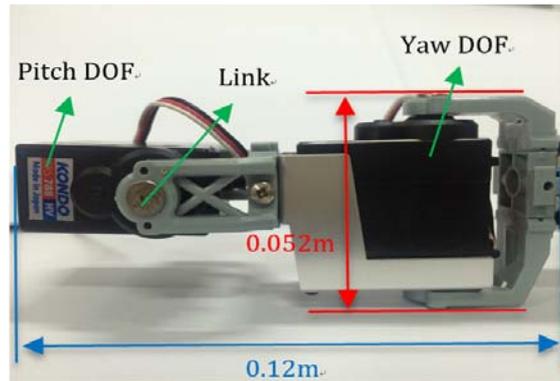


圖 2-7 單體的兩個自由度

每個單體長為 12 公分，寬 5.2 公分。圖 2-7 顯示了一個單體的兩個自由度，yaw 自由度和 pitch 自由度的設計[3]。所謂 pitch 與 yaw 是指馬達旋轉造成蛇型機器人上連桿相對地面的運動方向，其中 pitch 為抬升方向，yaw 為左右擺動方向。該單體是由兩個垂直接合的單體所組成，並且每個單體的馬達輸出軸可以分別承受橫擺運動和俯仰運動。每個單體由兩個伺服馬達，兩個金屬基座，以及兩個 U 型架所組合而成。

(三)定向輪設計

定向輪由四個部分所組成，分別是培林、套管、支架以及輪軸，如圖 2-8 所示。它的功能會因蛇型機器人不同運動模式而有不同功用。在管道內部主要的功能是用來讓蛇型機器人在管道內部可以保持平衡(因機器人上所有線路是由蛇的上半部來走線，容易造成重量的分配不均)，透過與管道曲面的支撐讓蛇型機器人不會翻覆造成行進困難；在管道外部我們改變不同的運動模式(S 形曲線前進)，一方面藉由定向輪增加蛇型機器人與地面之間的摩擦力(法線方向摩擦力增加，切線方向摩擦力減少)，另一方面藉由定向輪滑行的功用，進而增加移動的速度。組裝完成的定向輪我們將鎖附在蛇型機器人

偶數顆馬達的底部，如圖 2-9 所示。

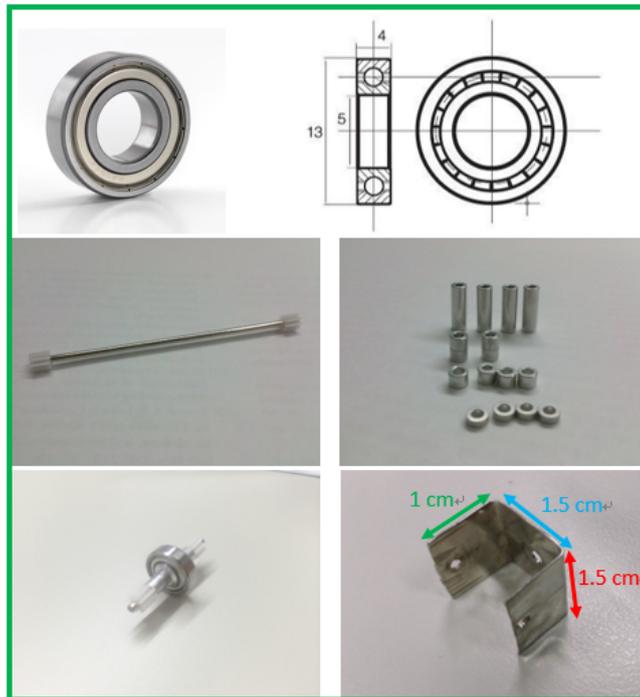


圖 2-8 定向輪設計

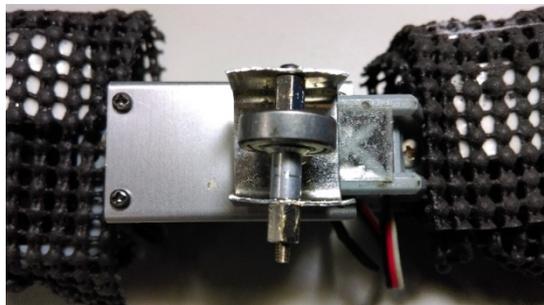


圖 2-9 定向輪裝設機器人底部

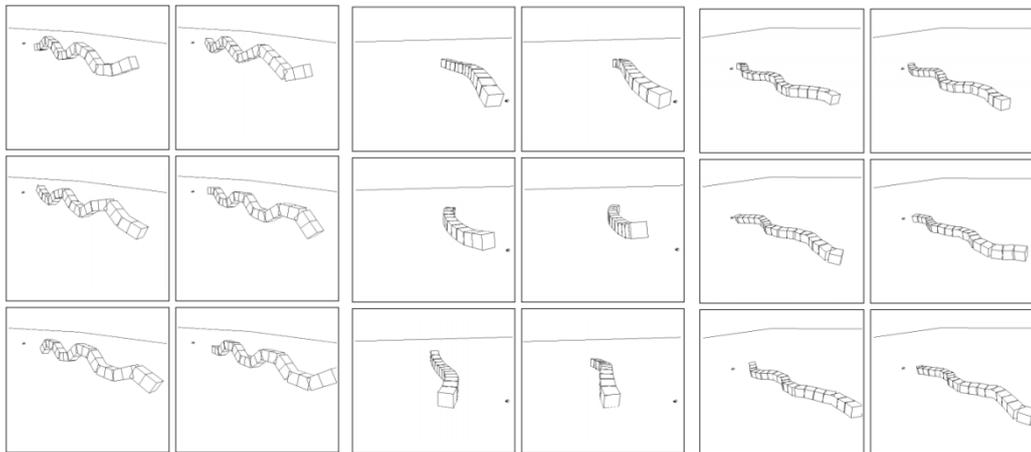
五、蛇形機器人的運動模式

就我們目前所研發出來的蛇型機器人來看，可以實現五種的運動模式，在這當中有模仿自然界中蛇類運動模式的，也有採用一些我們所自行設計出來的特殊運動模式。因此，將我們所設計出來的蛇型機器人的運動模式分為兩類，蛇類運動模式和機器蛇運動模式 [4~6]。其中我們的蛇型機器人模仿自然界中蛇類主要的運動模式有：

(一)、蠕動直線前進(Rectilinear)，如圖 2-10(a)所示。這是本研究主要深入探討的管道運動模式。相對於其他運動模式，是一種在管道內部前進移動效率比較高的運動模式，在採用這種運動模式時，蛇型機器人與管道之間只有少數的接觸點。

(二)、S 形曲線前進(Serpentine)，如圖 2-10(b)所示。這是本研究應用於管道外部的運動模式。採用這種運動模式時，蛇型機器人可以在平地上透過被動輪與地面接觸所產生的摩擦力爬行前進。運動中，按照一定的曲線產生的運動波形，在 Hirose 教授研究的機器蛇中，將其運動方程式設為一條正弦曲線。

(三)、側向滑移(Sidewinding)，如圖 2-10(c)所示。沿著身長方向產生正弦曲線，透過正弦曲線所產生的波動，並利用單體與單體之間的長度側向運動。利用身體與地面之間的滑動所產生的側向摩擦力來進行側向的移動，因此移動效率相對來說比較高。



(a) 蠕動直線前進 (b) S 形曲線前進 (c) 側向滑移

圖 2-10 蛇型機器人運動模式[4]

而機器蛇運動模式主要是我們在實際運用下所改良並透過觀察自然界蛇的運動之後，配合我們所製作出來的蛇型機器人以及所要

使用的場地進而所設計出來的一些新的運動模式，主要有：a.傾倒站起，是一種在蛇型機器人出管道後為了改變其運動姿態所研發出來的運動模式。在管道運動中蛇型機器人採用側躺的運動姿態執行蠕動前進，當出管道後為了讓蛇型機器人採取移動速度較快的 S 形曲線前進，必須使其運動姿態變為直立，定向輪接觸地面。b.左右轉向，在本研究中的蛇型機器人主要在管道中移動，因此為了配合管道的左彎以及右彎所設計的運動模式。藉由改變 Yaw 自由度的伺服馬達角度來完成此項運動模式。

當然在蛇型機器人的研究過程當中，所能實現的運動模式並不只以上這些，比如還有抬頭、爬階梯、翻滾等等。因此在本研究中僅舉例出我們所實現出來以及比較常見的運動模式。

1.數學動態模式的建立

我們使用了基礎正弦波運動來設計我們的蛇型機器人的動作。為了這個目的，運動算法首先是由兩個連續的步驟所組成。起初，蛇型機器人已經將設定在它的初始狀態(一直線)，並且正弦波可以適用於我們的蛇型機器人來向前移動。在該運動的初始階段，蛇型機器人的軀幹以及所有的每個單體應該如圖 2-11 表示成一個正弦曲線。之後，蛇型機器人進入第二階段，透過改變振幅的大小來設定我們的每一顆伺服馬達所需要的角度。

Serpentine locomotion 是蛇型機器人上最常見的運動方式，也是最有效的一種運動[7]。它依賴於身體與地面之間的摩擦力，以產生的推進力，類似正弦波運動。所有的計算是根據 Serpentine curve 的原理。這個原理為我們提供了理論基礎讓我們參考以及模擬運動軌跡。Serpentine curve 是一個平滑的正弦曲線，如圖 2-12 所示。根據

其原理，如公式(2-1)， t 是時間週期， B 是相鄰的關節之間的相角， w 是波的角速度。角度 o_1, o_2, \dots, o_i 表示為兩相鄰關節之間的角度， L_1, \dots, L_8 表示為關節，1~9 表示頭部以外的伺服馬達。

$$o_i(t) = -\sin(wt + iB) + R \quad (2-1)$$

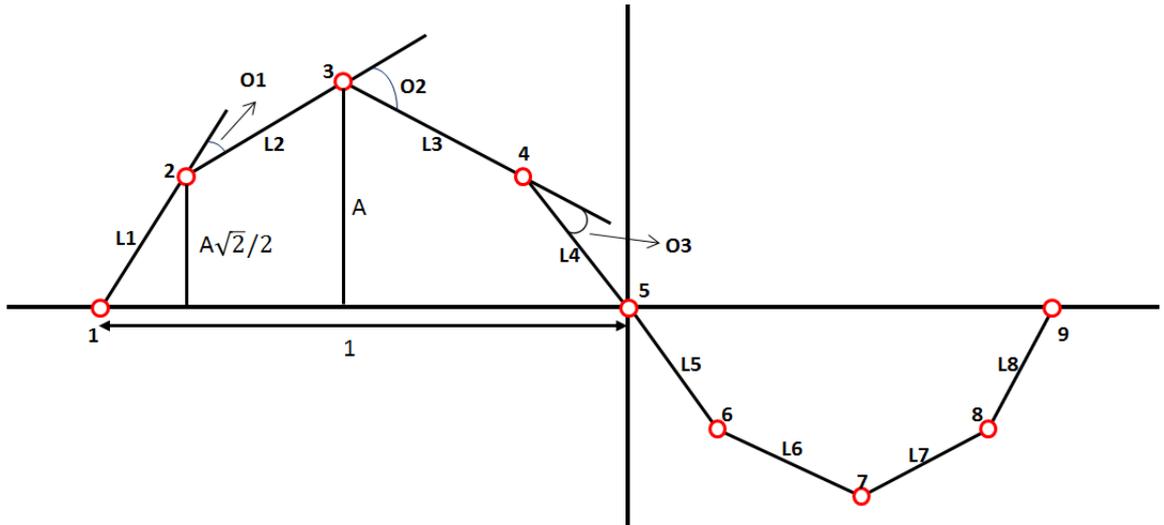


圖 2-11 Serpentine curve

透過公式(2-1)，我們可以推導出式(2-2)及式(2-3)以此類推。 t 是時間週期，參數的範圍我們定義為 $[1, N-1]$ ($N=8$)。A 是振幅大小。 B 是相鄰的關節之間的相角，我們定義為 $\frac{\pi}{4}$ 。 R 是關節相對的相位偏差角，我們定義為 $R=0$ 。 w 是波的角速度，我們定義為 $\frac{2\pi}{T}$ 。在我們的研究中，我們假定順時針旋轉為負，逆時針旋轉為正。

$$|o_1^0| = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} * 0 + \frac{\pi}{4}\right) = A \sin\frac{\pi}{4} = A\sqrt{2}/2 \quad (2-2)$$

$$|o_2^0| = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} * 0 + \frac{\pi}{4} * 2\right) = A \sin\frac{\pi}{2} = A \quad (2-3)$$

∴
∴

如圖 2-11 所示，我們將二分之一的波長定義為長度 1，並且均分成四小段為 1/4，接著利用式(2-2)以及式(2-3)所得到每個伺服馬達

與平衡位置的長度結果，經過反正切函數(\tan^{-1})，對邊和鄰邊這兩條直角邊的比值求出其夾角大小，我們經由改變振幅大小 A 來規劃出蛇型機器人不同的運動模式，依序去求出每個伺服馬達與關節之間的角度，如圖 2-12 所示。接著我們將求得的每個角度利用公式，如圖 2-13，轉換成 PWM 控制訊號，經由其 Duty Cycle 的比例來控制伺服馬達的位置。

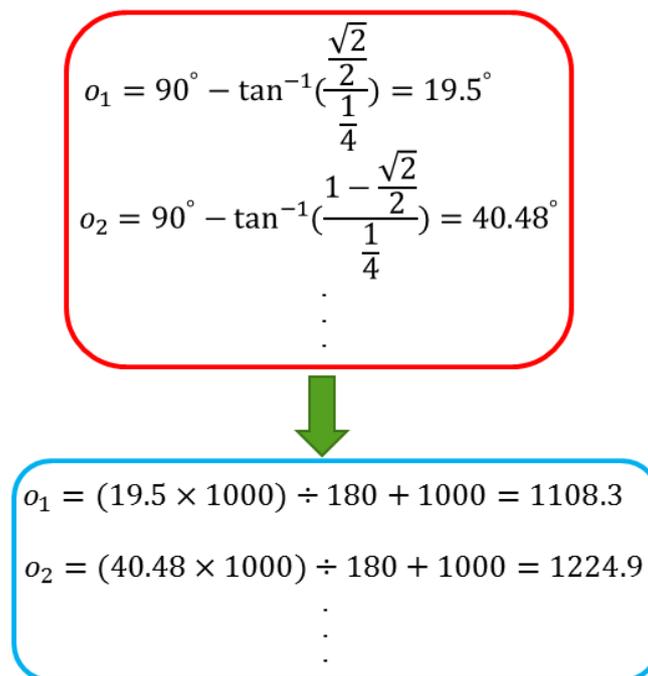


圖 2-12 角度轉換成 PWM 訊號

Angle & pulse width relationship

- $angle_{min} = 0$ degree
- $angle_{max} = 180$ degree
- $T_{min} = 1000\mu s$
- $T_{max} = 2000\mu s$
- $T_{want} = \frac{(angle_{want}) \times (T_{max} - T_{min})}{angle_{max}} + T_{min}$
- EX: $(90 \times 1000) / 180 + 1000 = 1500 \mu s$

圖 2-13 角度與 PWM 訊號的關係圖

2.控制方法

下表 2-2 為我們經過 Serpentine curve 方程式的運算後取得每個伺服馬達在每個時間點的角度之後，接著再經過公式計算出各個的 PWM 訊號後所整理出了結果。我們實驗的蛇型機器人總共有 10 節，其中包含了頭部以及尾部；在蛇型機器人運動的過程中將它畫分成 8 個週期，以 8 個週期為一個循環重複下去，形成一個類似於波的傳遞的運動型態，來使得機器人往前移動。

表 2-2 蛇型機器人 PWM 訊號控制

	週期0	週期1	週期2	週期3	週期4	週期5	週期6	週期7
頭部	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
第一節	1224.75	1108.25	1108.25	1224.75	1775.09	1891.75	1891.75	1775.09
第二節	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
第三節	1775.09	1224.75	1108.25	1108.25	1224.75	1775.09	1891.75	1891.75
第四節	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
第五節	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
第六節	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
第七節	1891.75	1891.75	1775.09	1224.75	1108.25	1108.25	1224.75	1775.09
第八節	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
尾部	1224.75	1775.09	1891.75	1891.75	1775.09	1224.75	1108.25	1108.25

本研究中，我們使用電腦端的人機介面透過馬達控制板去操控蛇型機器人上的 10 顆伺服馬達。馬達控制板最多可以控制 18 顆伺服馬達，輸出 PWM 控制訊號給伺服馬達。具有接腳可與其他單晶片做連結，但在本研究中主要透過 USB 與電腦端人機介面溝通，其詳細接腳如圖 2-14 所示。

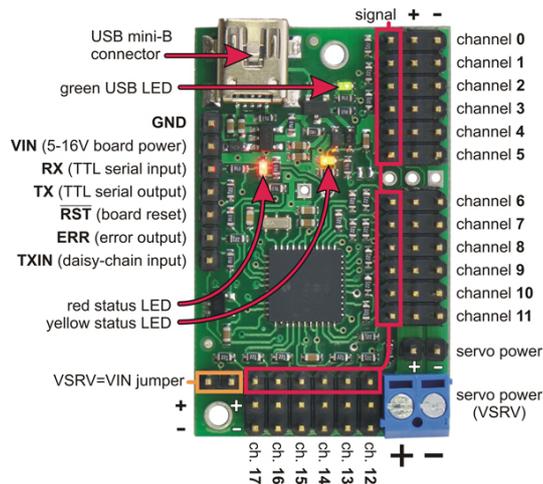


圖 2-14 馬達控制板接腳圖

伺服馬達的運作是控制一個連續脈波訊號，伺服馬達每秒接收 60 次脈波，而脈衝寬度決定了伺服馬達的轉角位置。我們所使用的每顆伺服馬達轉動的角度為 0 ~ 180 度，對應到的 PWM 訊號為 1ms~2ms，如圖 2-15 所示。1.5ms 對應到 0 度；1ms 對應到-90 度；2ms 對應到+90 度，所以每顆伺服馬達的角度經過計算出來後，必須再轉為 PWM 訊號來讓馬達控制板輸出訊號，進而控制伺服馬達所轉動的角度。

蛇型機器人管道內部運動的流程如圖 2-16 所示。在此控制流程下，我們由鏡頭判斷蛇型機器人的行進方向，透過人機介面的操控完成整個任務執行直到出管道。

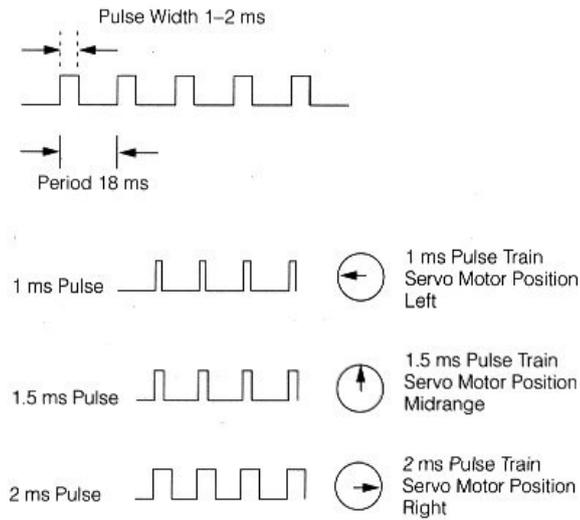


圖 2-15 PWM 訊號控制圖

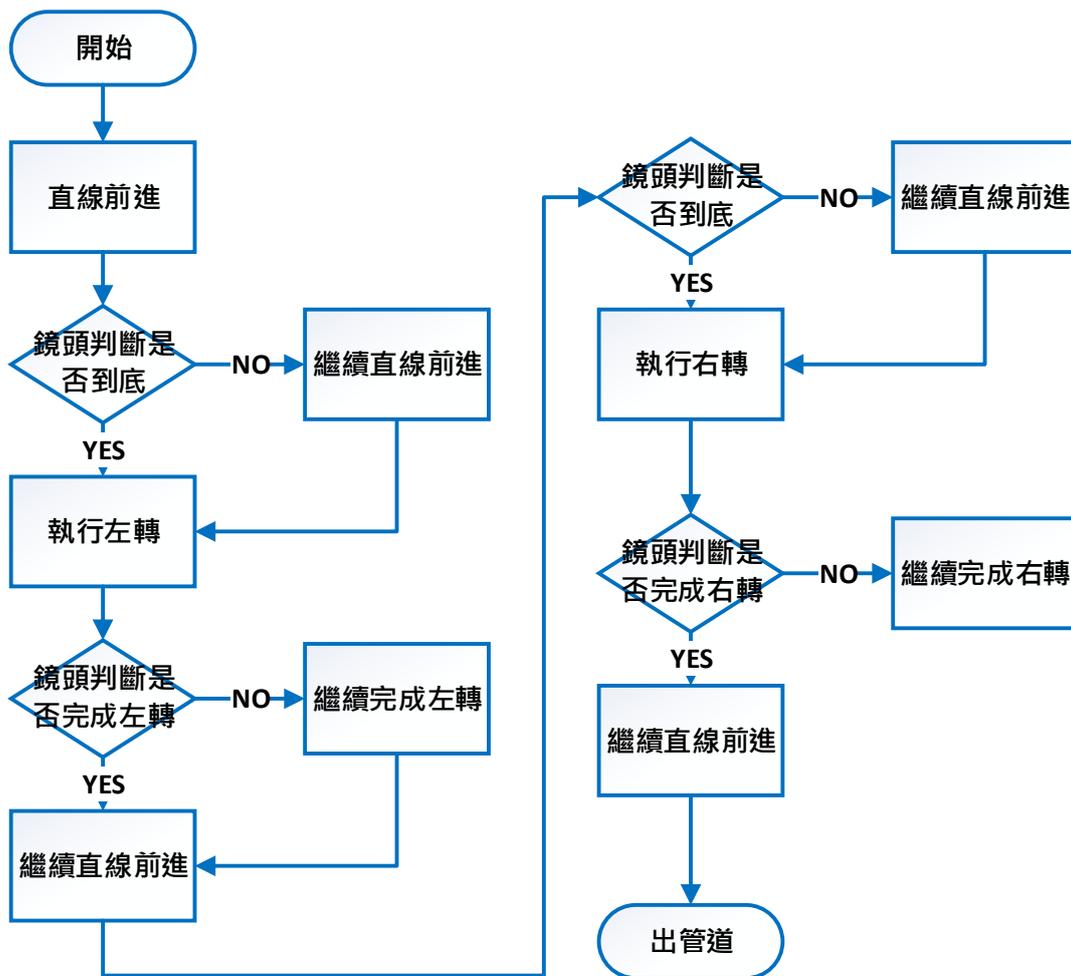


圖 2-16 蛇型機器人管道控制流程圖

首先蛇型機器人執行直線前進，透過控制鏡頭轉向判斷是否走到底，是的話則直接進行左轉，否的話則繼續直線前進。使用者經由鏡頭確認左轉動作完成後，則繼續執行直線前進，如此反覆的透過攝像鏡頭所回傳的畫面來判斷行走方向及操控蛇型機器人，直到走出管道。

參、主要發現與結論

一、介面設計

本研究的蛇型機器人控制監看端人機介面是使用 Visual Basic 2013 的程式語言來設計[8~12]，主要是提供一個圖形化視窗操作界面，讓使用者透過攝影鏡頭對機器人直接操作各種運動模式及氣體濃度資料和地圖定位的顯示，其介面包含：攝影鏡頭回傳畫面、運動模式指令選擇、氣體濃度顯示、地圖定位等功能。本論文所開發的人機介面，其畫面及主要功能如下所示：

(一)影像回傳介面設計

因蛇型機器人於管道內部執行探勘作業，由外部無法得知管道內部資訊，因此我們將攝影鏡頭裝設在蛇型機器人的頭部伺服馬達上，透過 USB 與電腦做連接顯示管道內部的畫面在人機介面上，使用者可由外部操控馬達的兩個自由度(Pitch and Yaw)，透過鏡頭上下左右移動來觀察行進方向。利用攝影鏡頭回傳的影像畫面，如圖 3-1 所示，方便使用者控制管道內的機器人執行直線前進以及左右轉，或者是閃避出現在管道中的障礙物。



圖 3-1 影像回傳畫面

另外，透過我們所設計的解析度調整，使用者可以按照自己電腦的效能做選擇，解析度越高畫面越清晰，但也越容易造成畫面延遲；相反的，解析度越低畫面越模糊，就不容易產生畫面延遲。以及加裝 LED 於管道內部照明，可以讓使用者更清楚地從介面上看到更加清晰的影像，如圖 3-2 所示。

其操作步驟如下所示：

Step 1：選取機器蛇上所加裝的攝像鏡頭(Webcam C170)，接著按照使用者的需求選取畫面的解析度。

Step 2：按下開始鍵即可顯示由機器蛇上所回傳管道內部的影像畫面。按下暫停鍵即停止影像畫面的回傳。



圖 3-2 影像回傳介面設計

(二)地圖定位介面設計

蛇型機器人主要的運動空間為管道內部，因此會有訊號屏蔽的問題產生故沒有相關感測器可以應用於管道內部的定位，所以我們先利用蛇型機器人在管道內部各個區域的移動速率，實際控制機器人於

我們所預先設定好的實驗環境中測試，透過碼表量測其移動的時間，如表 3-1 所示。

表 3-1 蛇型機器人管道內部移動時間

位置	花費時間
直線(50 cm)	20 秒
左轉	52 秒
直線(100 cm)	55 秒
右轉	35 秒
直線(50 cm)	12 秒
全程	2 分 47 秒

接著，我們使用 MATLAB 繪製出與實際實驗環境相同的管道地圖，紅框內的綠色線段代表蛇型機器人於管道中的位置，空心圓代表其頭部位置，後方紅色線段為走過的路徑，如圖 3-3 所示，再套用先前估算好的移動速率於管道地圖定位之中。管道中每個位置皆設定不同的移動速率以配合機器蛇實際運動的情形，並且納入使用者透過回傳影像控制鏡頭轉向觀察行進方向所造成的時間誤差，經實際測試定位誤差值落在 10 公分以內。

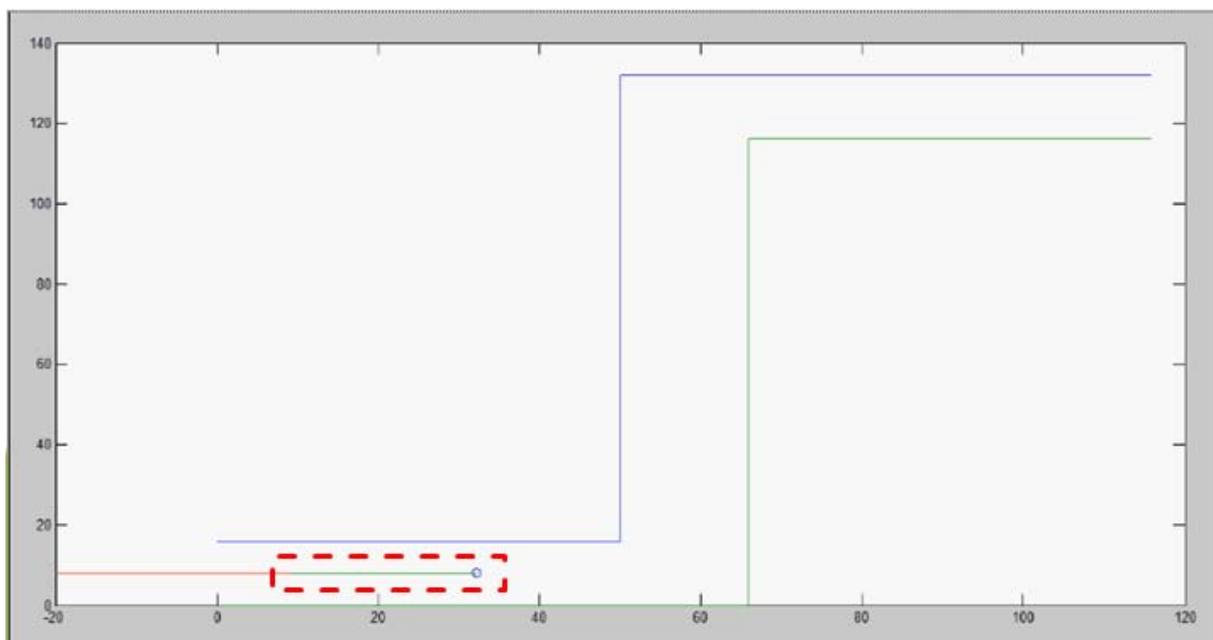


圖 3-3 地圖定位介面設計

(三)蛇型機器人動作控制介面

本研究中，蛇型機器人的運動主要分為兩個部分，管道運動與管外運動。1. 管道運動：透過攝影鏡頭監看管道內部狀況來給予不同的指令。每個按鍵皆與地圖定位做整合，按下管內前進、左轉及右轉鍵，蛇型機器人與地圖定位同步執行前進；按下停止鍵，蛇型機器人與地圖定為隨即停止。2. 管外運動：蛇型機器人出管道後執行傾倒站起，改變其運動模式為 S 形前進。對於管外的平面環境，S 形前進的運動模式具有移動迅速這項優點，移動速率為 20cm/s。

我們透過此人機介面經由 USB 與馬達控制板 SSC (Serial Servo Controller)做連接。並傳送 PWM 訊號給予伺服馬達，讓蛇型機器人執行各種運動模式的控制。介面分為兩大部分：管道運動與管外運動，如圖 3-4 所示，結合這兩個模式可以讓蛇型機器人具有更好的地面適應能力。



圖 3-4 動作控制介面設計

如果馬達控制板 SSC 沒有正確的經由 USB 與電腦控制端人機介面連接的話，便會跳出錯誤視窗，如圖 3-5 所示，提醒使用者檢查裝置是否正常聯接，SSC 是否正常運作或是其他線路的問題發生。



圖 3-5 蛇型機器人動作控制介面錯誤視窗

(四) 氣體偵測介面設計

本研究的機器人主要應用於管道內部探勘以及採樣作業，必須能夠從管道外部清楚的知道及時的危險氣體濃度，因此設計此人機介面方便使用者監看，如圖 3-6 所示。我們利用裝設於蛇型機器人身上的氣體感測器回傳訊號，透過 Arduino 的運算成 ppm 濃度之後，透過 USB 與電腦端連接顯示數值於人機介面上。並且，危險氣體超過 150ppm 左右，與 Arduino 連接的蜂鳴器會發出聲響，提醒使用者目前管道內部危險氣體已經超標須嚴防爆炸的可能，以及透過地圖定位紀錄氣體洩漏之區域，方便日後的管道維修工作。

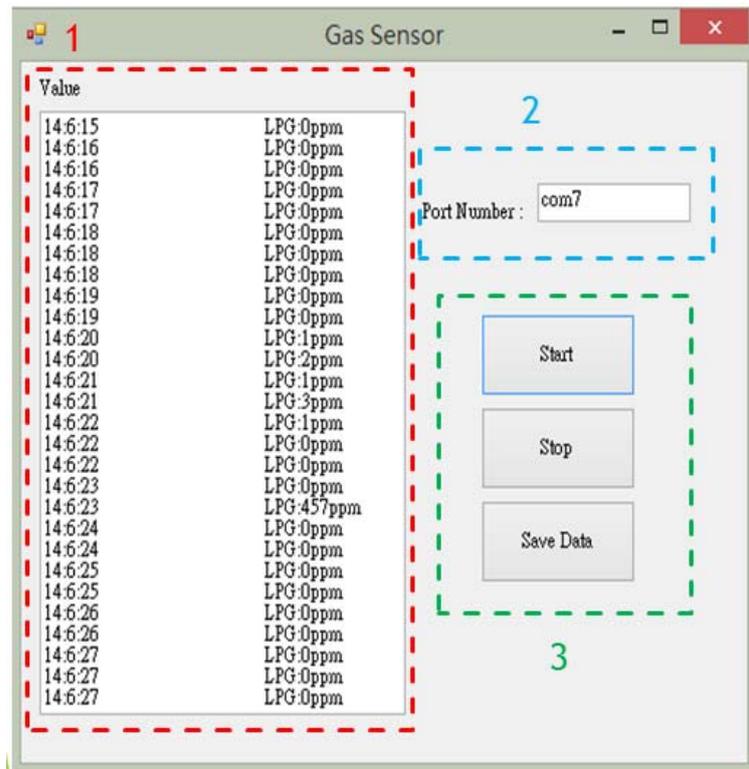


圖 3-6 氣體偵測介面設計

1. 透過此介面顯示出經由 Arduino 運算過後的氣體濃度 ppm 值。且標示出每筆資料所擷取的時間點，方便使用者作記錄。LPG：液化石油氣（Liquefied Petroleum Gas）。
2. 經由裝置管理員得知 Arduino 所在的串列埠為 com7，接著輸入於 Text Box 中。如 USB 未正確連接成功則會顯示 Error，如圖 3-7 所示。
3. 按下 Start 鍵，即開始進行濃度 ppm 的資料顯示；按下 Stop 鍵即停止動作。另外，為了方便使用者做後續的資料分析，按下 Save Data 鍵即可將所有資料儲存成 txt 檔，如圖 3-8 所示，每筆資料包含了擷取時間以及 LPG 的 ppm 濃度。

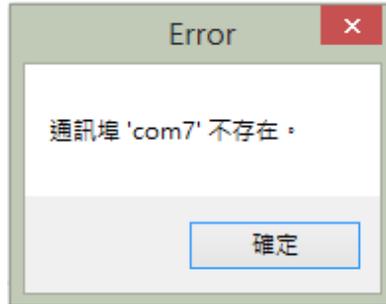


圖 3-7 連接錯誤視窗

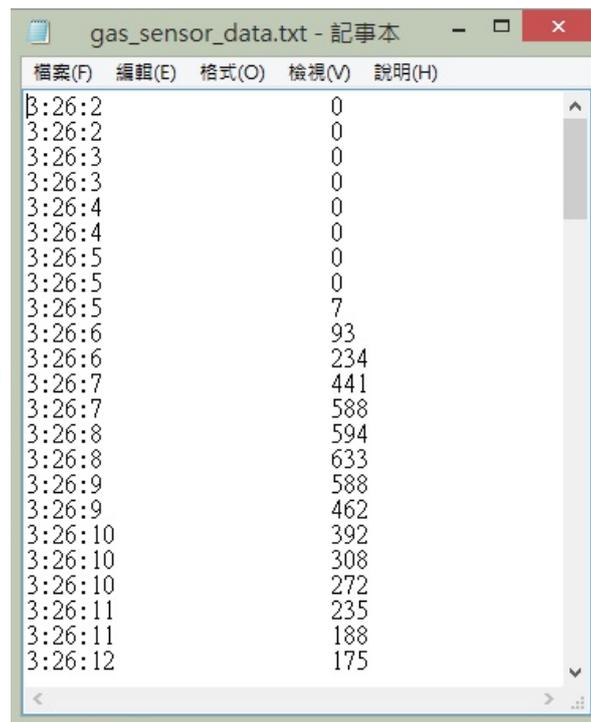


圖 3-8 氣體濃度資料

二、氣體偵測系統

我們透過感測器即時偵測出有害氣體的濃度，透過即時的數據資料讓使用者迅速掌握可燃性氣體濃度的異常變化，且儘速進行因應措施。因此我們的偵測系統具有以下實現：1. 能即時顯示管道目前的濃度值 2. 可使用人機介面進行操作 3. 可記錄偵測資料 4. 具有警報功能 5. 配合地圖定位顯示出危險氣體洩露區域。

本研究的氣體偵測系統其系統架構如下圖 3-9 所示，透過氣體感測器接收外在危險氣體，經由 Arduino 運算並轉換成 ppm 濃度值，

由人機介面顯示數值資訊。當濃度超過 150ppm 左右，蜂鳴器發出警示聲提醒使用者已經有危險氣體的洩漏。

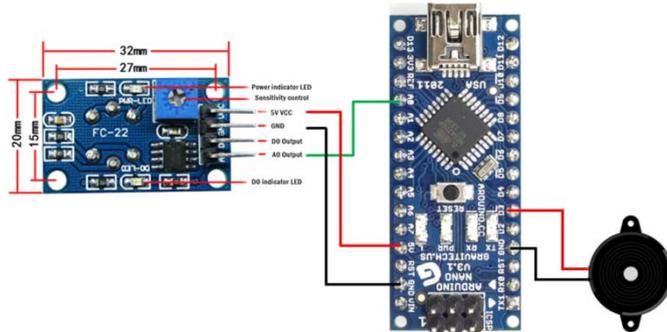


圖 3-9 氣體偵測系統

(一)電壓轉換 ppm 濃度

MQ-2 在溫度 20°C，相對濕度 65%，氧氣濃度 21% 下的阻值與 ppm 濃度的特徵關係圖如圖 3-10 所示：

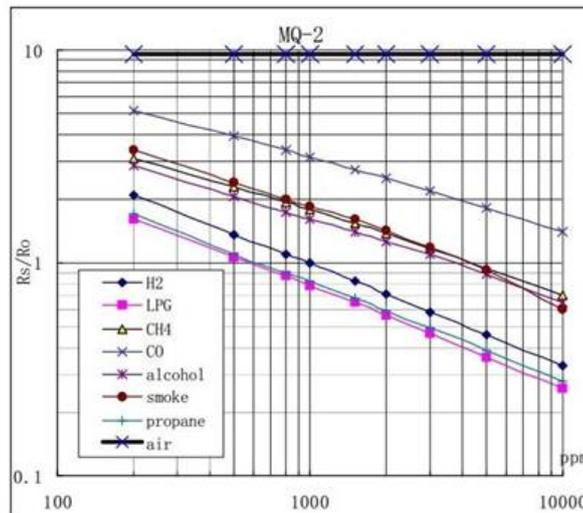


圖 3-10 阻值與濃度的特徵關係

圖 3-11 所示為氣體感測器的驅動電路，圖中的驅動電路是利用電阻分壓法，擷取隨氣體濃度變化的電壓，當危險氣體濃度上升時，A-B 兩端電阻值 R_S 下降於是 V_{RL} 也跟著下降 [13,14]，其分壓數學式如公式 (3-1) 所示。為避免空氣中的濕氣及灰塵附著在感測器的表面，影響到量測的精準度，所以在氣體感測器中加裝了一個加熱線圈(H)，這

個加熱線圈的功用可以使 SnO_2 組成的 n 型半導體表面所附著的濕氣及灰塵揮發掉。接著讓感測元件的工作電壓維持在 5V，隨著偵測到待測氣體時，阻抗變小，電流增加，在負載端的電壓也跟著微量升高，透過電壓與阻抗的變化由式(3-1)推算出 R_S 值，再帶入由廠商提供之數據清單式(3-2)推算出濃度 ppm 值。

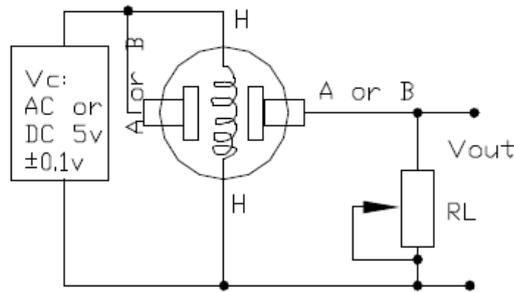


圖 3-11 氣體感測器驅動電路

$$V_{RL} = V_C \frac{R_S}{R_S + R_L} \quad (3-1)$$

$$C\% = 938.23 \times \left(\frac{R_S}{R_0}\right)^{-2.096} \quad (3-2)$$

R_0 ：氣體感測氣在空氣中的電阻值

R_S ：氣體感測氣在不同氣體，不同濃度下的電阻值

V_{RL} ：感測器回傳 Arduino 電壓

$R_L = 5k\Omega$

$V_C = 5V$

(二) 氣體偵測流程

氣體偵測流程如圖 3-12 所示。在整個管道探勘過程中，氣體感測系統持續偵測並與地圖定位配合。當有危險氣體洩漏時蜂鳴器發出警示聲，使用者按下人機介面的停止鍵，並記錄洩漏的區域。若無危險氣體洩漏，蛇型機器人則持續在管道內部前進直到出管道。

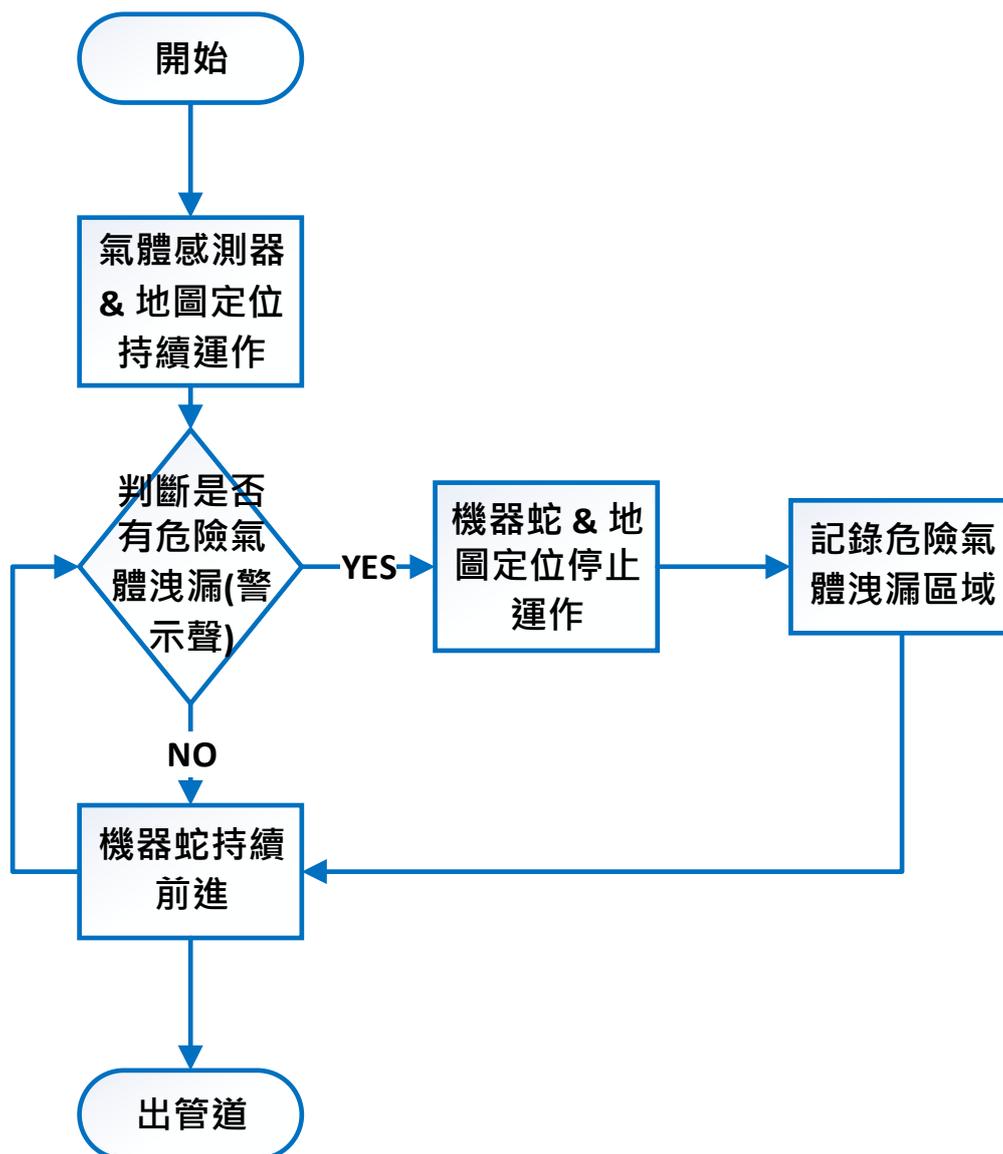


圖 3-12 氣體偵測流程圖

(三)氣體偵測系統實際操作

我們利用實際的管道執行氣體偵測的實驗，在透明的 6 吋 PVC 管上方鑽了四個直徑為 3mm 的孔洞，每個孔洞的距離皆為 20cm，如圖 3-13 所示。蛇型機器人移動到定點保持不動，由裝設在機器人上方的氣體感測器接收危險氣體的濃度，並由電腦端人機介面進行監看。

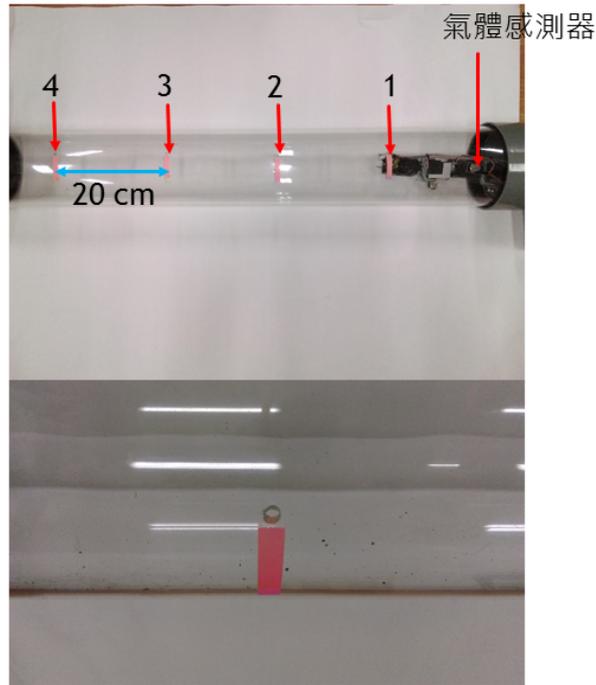


圖 3-13 氣體偵測實驗環境

實驗方法

1. 按下氣體偵測人機介面 START 按鍵後，馬上經由孔洞施放純丁烷瓦斯罐 1 秒鐘，依序施放完畢四個孔洞。
2. 每 0.2 秒讀取一筆濃度資料。
3. 按下人機介面 Save Data 按鍵分別儲存四個孔洞的濃度資料。



圖 3-14 純丁烷瓦斯罐

由儲存的四筆濃度資料畫出圖形後並進行分析，如圖 3-15 所示。越接近氣體感測器的位置丁烷氣體濃度越高，且響應時間越短。而

距離越遠的位置因為氣體在管道內發散的緣故，所以測得的濃度越低，且響應時間比較長。由此我們可以推斷管道中危險氣體主要的洩漏區域，並加以記錄方便日後的管道維修重點。

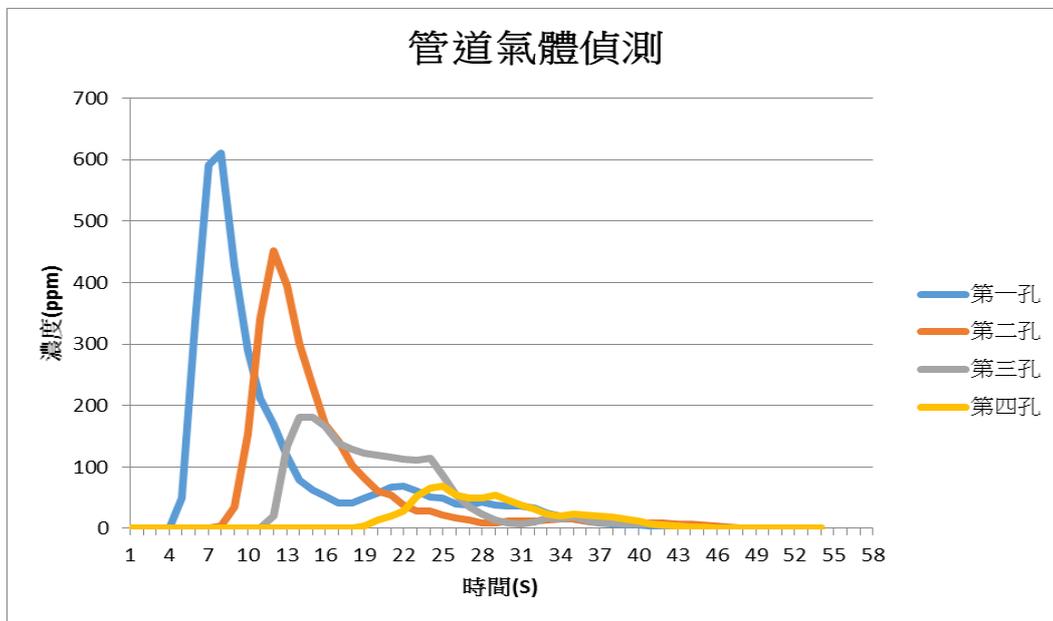


圖 3-15 管道氣體濃度資料

三、實驗結果

此部分將展示蛇型機器人在管道中的運動情形。我們模擬實際的管道線路，並使用最嚴苛的90°垂直轉彎，以確保在執行任務時能夠萬無一失的通過各種角度的管道。

(一)實驗環境介紹

實驗場地由直徑為 6 吋的 PVC 管所組合而成，如圖 3-16 所示。其分別由五個部分所組成：2 個 6 吋 90°灰色彎管、2 個 6 吋 50 公分透明直管、1 個 6 吋 100 公分透明直管。

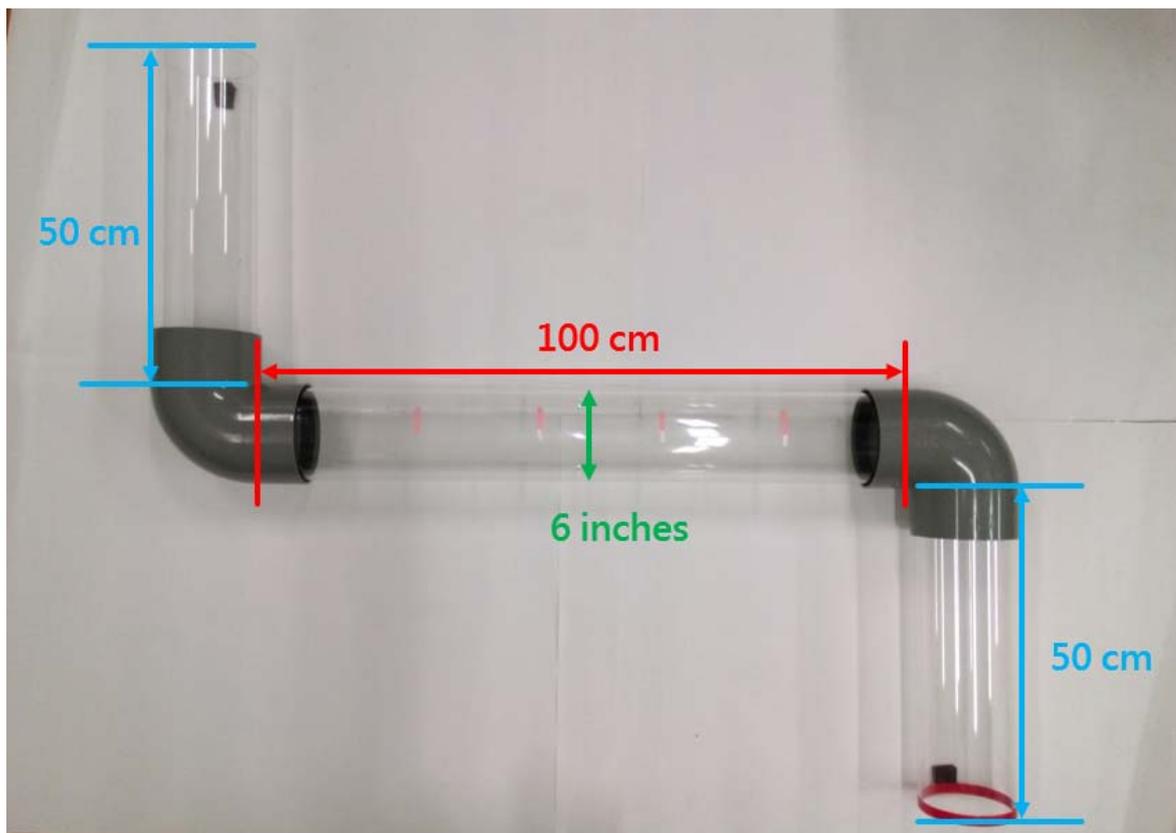


圖 3-16 實驗場地擷取圖

(二)管道內部運動

我們將蛇型機器人放入 6 吋的 PVC 管中，由電源供應器提供所有伺服馬達及 LED 的電源，馬達控制板經由 USB 與電腦連接，透過電腦端的人機介面直接對蛇形機器人進行管道內部運動的控制。其路徑內容包括：管道直線(50cm)、管道左轉、管道直線(100cm)、管道右轉、管道後退。

(1)管道直線(50cm)



(a)0 秒



(b)4 秒



(c)8 秒



(d) 12 秒



(e)16 秒



(f)20 秒



(g)24 秒

圖 3-17 管道直線(50cm) (a)0 秒(b)4 秒(c)8 秒(d)12 秒(e)16 秒(f)20 秒

(g)24 秒

(2)管道左轉



(a)5 秒



(b)10 秒



(c)15 秒



(d)20 秒



(e)25 秒



(f)30 秒



(g)35 秒



(h)40 秒



(i)45 秒

(j)50 秒



(k)55 秒

圖 3-18 管道左轉(a)5 秒(b)10 秒(c)15 秒(d)20 秒(e)25 秒(f)30 秒(g)35 秒(h)40 秒(i)45 秒(j)50 秒(k)55 秒

(3)管道直線(100cm)



(a)4 秒

(b)8 秒



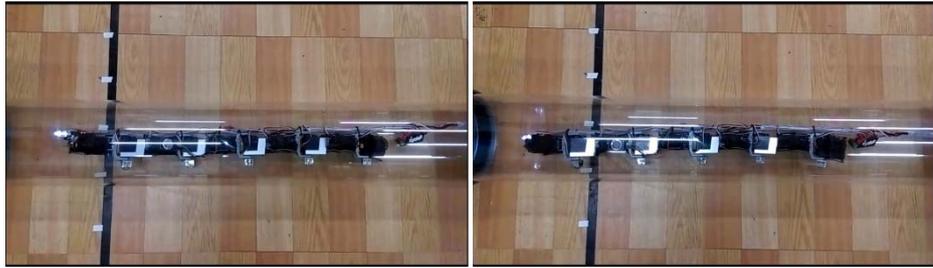
(c)12 秒

(d)16 秒



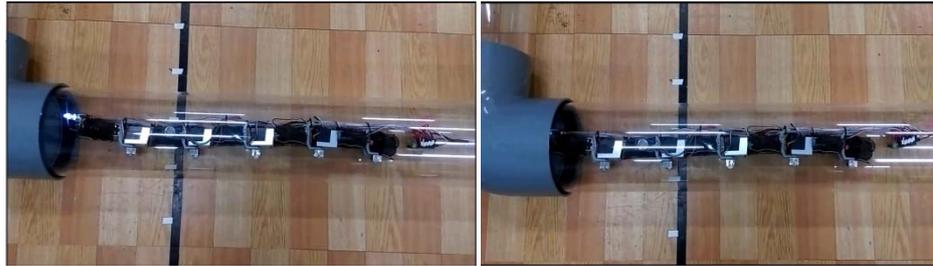
(e)20 秒

(f)24 秒



(g)28 秒

(h)32 秒



(i)36 秒

(j)40 秒



(k)44 秒

(l)48 秒



(m)52 秒

圖 3-19 管道直線(100cm) (a)4 秒(b)8 秒(c)12 秒(d)16 秒(e)20 秒(f)24 秒(g)28 秒(h)32 秒(i)36 秒(j)40 秒(k)44 秒(l)48 秒(m)52 秒

(4)管道右轉



(a)5 秒

(b)10 秒



(c)15 秒

(d)20 秒



(e)25 秒

(f)30 秒



(g)35 秒

圖 3-20 管道右轉(a)5 秒(b)10 秒(c)15 秒(d)20 秒(e)25 秒(f)30 秒(g)35 秒

(5)管道直線(50cm)



(a)4 秒



(b)8 秒



(c)12 秒

圖 3-21 管道直線(50cm) (a)4 秒(b)8 秒(c)12 秒

(6)管道後退



(a)5 秒



(b)10 秒



(c)15 秒



(d)20 秒



(e)25 秒



(f)30 秒



(g)35 秒



(h)40 秒



(i)45 秒



(j)50 秒



(k)55 秒



(l)1 分



(m)1 分 5 秒



(n)1 分 10 秒



(o)1 分 15 秒



(p)1 分 20 秒



(q)1 分 25 秒



(r)1 分 30 秒



(s)1 分 35 秒



(t)1 分 40 秒



(u)1 分 45 秒



(v)1 分 50 秒



(w)1 分 55 秒



(x)2 分



(y)2 分 5 秒

(z)2 分 10 秒

圖 3-22 管道後退(a)5 秒(b)10 秒(c)15 秒(d)20 秒(e)25 秒(f)30 秒(g)35 秒(h)40 秒(i)45 秒(j)50 秒(k)55 秒(l)1 分(m)1 分 5 秒(n)1 分 10 秒(o)1 分 15 秒(p)1 分 20 秒(q)1 分 25 秒(r)1 分 30 秒(s)1 分 35 秒(t)1 分 40 秒(u)1 分 45 秒(v)1 分 50 秒(w)1 分 55 秒(x)2 分(y)2 分 5 秒(z)2 分 10 秒

四、討論

我們透過電腦端人機介面操控蛇型機器人於管道內部運動中的各種動作，藉由裝設於機器人頭部的攝影鏡頭回傳的畫面來判斷蛇型機器人行走的方向。攝影鏡頭裝設在頭部伺服馬達關節上，因此我們可以從人機介面上調整頭部關節角度來改變鏡頭畫面的視角。LED 可以照明管道中陰暗的環境，使得畫面更加清晰明亮。

接著便著手於管道內部運動的實驗，我們選用最為嚴苛的實驗環境，以便日後實際應用於管道內部探勘任務時，能夠順利克服。轉彎處我們選擇曲率較大且角度垂直的彎管，一般工業管道的轉彎處皆採用曲率較小或是角度較大(較為平滑的 120°)的彎管。管道內部實驗主要分為四個運動部分：管道直線、管道左轉、管道右轉、管道後退，我們將一一進行討論。

(一)管道直線：按下人機介面按鍵「管內前進」，蛇型機器人執行前進動作，如圖 4-2、4-4、4-6 所示。蛇型機器人利用蠕動前進運

動模式，運動速度雖然緩慢，但在管道運動實驗中，此一運動模式最為穩定，可以確保機器人不會翻覆並成功執行任務。移動速度大約為 3cm/s。

(二)管道左轉：按下人機介面按鍵「管內左轉」，蛇型機器人執行左轉動作，如圖 4-3 所示。此一動作為本研究中最難克服的動作，因穩定機身的被動輪容易卡住 PVC 管的 90°轉彎處的凸出，所以與管道右轉比較起來我們設定較多的轉彎步驟去克服此一困難，因此管道左轉會花費較多的時間。移動速度大約為 1.2cm/s。

管道右轉：按下人機介面按鍵「管內右轉」，蛇型機器人執行右轉動作，如圖 4-5 所示。機器人與 PVC 管的 90°轉彎處的凸出接觸部位是機身上半部的線材，因此不會有卡住的情況發生，轉彎較為順利且快速。移動速度大約為 1.8cm/s。

(三)管道後退：按下人機介面按鍵「管內直線後退」、「管內右轉後退」、「管內左轉後退」，蛇型機器人執行後退動作，如圖 4-7 所示。當機器人執行完管道探勘任務時，此時機器人位在管道深處，因此透過此一動作使得機器人回到起點處。管道後退的動作是按照「管內前進」、「管內左轉」、「管內右轉」這三個動作，分別把動作流程做反向的排列所設定而成。管道後退整體的平均移動速度大約為 2cm/s。

我們依序改變蛇型機器人身上五顆 Yaw DOF 的伺服馬達旋轉角度，讓機器人呈現彎曲狀態，進而達成左轉或是右轉這兩個動作。在整個實驗過程中，使用者必須注意蛇型機器人後方延伸線材，管道前進時負責送線，後退時把線材往後拉，才不會造成蛇型機器人前進時因線材的重量移動困難，或是後退時因線材的堆積而造成無

法後退。另外，蛇型機器人在出管道後執行「傾倒站起」，改變其運動姿態，使得定向輪與地面接觸，接著便可執行「S形前進」此一運動模式，其移動速率為 20cm/s。因本研究著重於管道內部的運動、採樣，故便不多加敘述。

五、結論

本研究成功的實現蛇型機器人應用於管道內部的探勘。大部分的蛇型機器人只能用於開放環境的使用，而我們的蛇型機器人還可使用於管道內。首先依照不同的運動模式設計出相對應的機構，以利於適應各種的環境。我們使用旋轉幅度較小(180度)的伺服馬達完成蛇型機器人的各種動作，包含管道外部：S形曲線前進、蠕動前進、側向滑移、傾倒站起；管道內部：蠕動前進、左右轉向。

另外，我們設計人機介面應用於蛇型機器人的監看以及控制，透過攝影鏡頭回傳管道內部資訊及控制蛇型機器人於管道內的動作、LED照明管道內部陰暗環境，以及裝設氣體感測器用於偵測管道內部的有害氣體，透過蜂鳴器的警示提醒使用者並顯示濃度資料於人機介面上。最後透過分析與實驗，以實際的環境進行測試，證明我們的蛇型機器人能於狹窄且危險的管道內移動及執行危險氣體的採樣作業。

最後，目前我們所研製出來的蛇型機器人與自然界真實蛇類相比之下仍有許多無法克服的困難。真實蛇類的骨架結構，其脊椎骨的數量常達 160 個以上甚至可到 400 個以上，就目前的技術而言，仍然無法建構出如此複雜的機構設計。從運動模式來說，我們的蛇型機器人與真實蛇類相比之下，運動無法如此流暢、克服地形能力較弱、移動速度較慢。但整體而言，我們的蛇型機器人已經具備了

管道內部探勘的作業能力。

六、未來展望

本研究所設計的蛇型機器人，具有很寬廣的應用層面，初步完成管道內部、外部的運動及採樣功能，但還有需要改良的地方，才能使的蛇型機器人真正能夠達到適應各種地形。在機構設計方面，在具備承載能力的前提之下如何保證蛇型機器人的靈活性及耐用堅固程度。在運動模式方面，移動速度相較於輪型無人載具有明顯移動速度較慢的差別，透過改善運動模式的設計來提升其運動效率；增加蛇型機器人的運動模式，使其能夠爬階梯、翻滾或是爬樹來適應更多不同的環境。另外我們可以加上影像處理或加裝紅外線感測器、超聲波，使蛇型機器人可以自主辨識複雜的環境；或是改變裝設在蛇型機器人身上的感測器，使得機器人可以執行不同種類的探勘作業。即時定位與地圖創建都是蛇型機器人研製中值得進一步研究的地方。在實驗環境方面，設置具有斜坡的管道路徑或是加大管道的管徑，透過多種實驗環境的設置來確保蛇型機器人依然可以成功的執行探勘任務。

肆、參考文獻

1. HowStuffWorks Animals (n.d.). How Snakes Work. Retrieved October 8, 2015, from <http://animals.howstuffworks.com/snakes/snake3.htm>
2. S. Yu, S. Ma, B. Li and Y. Wang, “Locomotion Control and Gaits' Modality of a 3D Snake-like Robot”, SICE Annual Conference, Japan, pp. 3026–3030, Aug, 2008.
3. K. Melo, J. Leon, A. Dizeo, D. Roa, M. Parraga, D. Gonzalez and L. Paez, “The Modular Snake Robot Open Project: Turning Animal Functions into Engineering Tools”, 11th IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), Linkoping, pp. 2079-2082, October, 2013.
4. K.J. Dowling, Limbless Locomotion: Learning to Crawl with a Snake Robot; [PhD dissertation]. Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1997.
5. A. Maity, S. K. Mandal , S. Mazumder and S. Ghosh, “Serpentine Robot: An overview of Current Status & Prospect”, 14th National Conference on Machines and Mechanisms , India, pp. 272–278, December, 2009.
6. 何東海，「關於蛇形機器人結構、運動及控制的研究」，上海交通大學機械電子工程碩士論文，2005。
7. Y. Zhang, B.Y. Wei, J. Wang, Y.F. Liu, “Modularization Design of A Small Snake Robot for Diagnosis and Treatment”, 2009 IEEE International Symposium on IT in Medicine and Education (ITME), Jinan, pp. 1175–1180, August, 2009.
8. 陳立元，Visual Basic 自動控制與機器人應用，旗標出版社，台北，2008。

9. 王加松、俞熹、于兵，Visual Basic 聖經，佳魁資訊出版社，台北，2009。
10. 文淵閣工作室，Visual Basic2010 程式設計速學對策，基峰出版社，台北，2011。
11. 陳會安，Visual Basic 程式設計範例教本，旗標出版社，台北，2010。
12. 千展資訊，程者為王：Visual Basic2012 入門設計 128 招，上奇資訊，台北，2014。
13. 盧明智、陳致傳，感測器原理與應用實習，台科大股份有限公司，台北，2001。
14. 盧明智，電子實習與專題製作-感測器應用篇，全華出版社，台北，2002。