

第二十二屆旺宏金矽獎

作品企劃書

多節式輕型偵察車

Light-Weighted Articulated Rover

參賽組別：應用組

參賽編號：A22-098

隊 長：黃瑋翔

隊 員：卓冠廷、陳逸萱

摘要

本企劃提出了一款擁有獨特機構設計的多功能輕型偵察車，其車身分為兩節式，分別由兩顆主動輪帶動前行，前後兩節車體的中間輔以一組馬達搭配上蝸桿蝸輪的機構，使其能夠任意地改變車輛的姿態，去應付各式崎嶇地形，並且能夠跨越多樣的障礙物，使得本車的應用性更為廣泛。另外，車體上裝設景深攝影機，這讓車載電腦能夠實時地建構出當前地形，幫助車體決定當下的移動策略，並透過 Wi-Fi 通訊將即時影像回傳給使用者，藉此來達到在險惡地形或是斷垣殘壁中偵察、搜救的功能。

前言

在現今能夠跨越障礙物的輪型機器人中，大部分都是針對輪子來做設計與發想，像是主流有用三輪所組成的多輪型機器人 [1]，能夠自動地上下樓梯，抑或是擺脫傳統的輪子造型，以弧形輪輻作為主要輪的設計 [2]。這些其實都能夠有很好的應用性，但在廣泛性上或許就稍微缺乏了一些，像是遇到較為複雜的障礙物可能就無法順利通過了。

因此，既然能夠針對輪子來做改善，那是否我們能夠直接對車體本身來做改善呢？在上網搜尋資料的過程中發現一個很有趣的影片 [3]，其用樂高積木組成一輛雙節式的車子，並且能夠以遙控的方式控制前後節的夾角變化，再憑藉著樂高重量輕的優勢，就能簡單跨越各種困難的障礙物，甚至是一堵高於車身的牆對它來說都不是問題。這影片大大地激發了本團隊的靈感，決定仿造一台多節式的車子，並且在功能性上加以強化、擴大，如此一來，是否就能在現實生活中有更多應用呢？比方來說，像是災區搜救-能以靈活輕巧的車型進入狹小的斷垣殘壁之中，盡可能地在黃金搜救時間內救援更多受災者；或是地形探勘-搭配上車子能夠翻山越嶺的能力，克服各種地形障礙，並且初步描繪當下的地形資訊再回傳給使用者，達到實時的資訊共享。

本作品提出一雙節式多功能型偵察車，搭配上深度感測相機和前後輪軸上的 IMU 資訊來讓車子可以全自動地跨越障礙物，或是讓使用者配合相機畫面自行手動操作，來達到偵察探勘的目的。

目錄

摘要	I
前言	I
目錄	II
圖目錄	III
表目錄	IV
第一章 兩節式輕型偵察車.....	1
一、整體車身設計	1
二、中央關節	1
三、前後節機構與車輪配置	2
四、相機單軸穩定器	4
五、機構整合與其他硬體配重	5
第二章 硬體實現方式	9
一、馬達	9
二、通訊裝置和方式	9
三、馬達供電	10
四、車載電腦及供電	10
五、相機及深度感測元件	11
六、慣性量測單元 IMU	12
第三章 馬達控制與車體性能測試	14
一、馬達控制	14
二、運行方式	14
三、性能測試	14
第四章 車體程式設計與跨越障礙之決策邏輯	15

一、主控程式.....	15
二、車體姿態估計.....	15
三、車體行進策略.....	16
 第五章 實驗結果.....	18
實驗一 攀越紙箱:.....	18
一、實驗環境設置.....	18
二、實驗結果與討論.....	19
實驗二 爬樓梯:.....	20
一、實驗環境設置.....	21
二、實驗結果與討論.....	21
 第六章 結論.....	23
 第七章 參考資料.....	24

圖目錄

圖 1- 1 車體側向簡易示意圖	1
圖 1- 2 蝸桿蝸輪機構.....	2
圖 1- 3 轉軸間位置關係.....	2
圖 1- 4 轉軸支架等角視圖、與蝸桿蝸輪之配合圖.....	2
圖 1- 5 後節骨架示意圖	3
圖 1- 6 中心轉子馬達架等角視圖、與前節配合圖.....	3
圖 1- 7 車輪降低示意圖	4
圖 1- 8 相機單軸穩定器概念圖	4
圖 1- 9 相機單軸穩定器側視圖、等角視圖	5
圖 1- 10 整體機構等角視圖	6
圖 1- 11 整體機構側視圖	6
圖 1- 12 整體機構上視圖	6
圖 1- 13 車體展開姿態.....	7
圖 1- 14 車體收合姿態.....	7
圖 1- 15 硬體配置圖.....	8

圖 1- 16	全車實體圖.....	8
圖 2- 1	Dynamixel MX-28AR(2.0) / MX-106R(2.0)	9
圖 2- 2	Robotics U2D2	9
圖 2- 3	Slave Mode with Sync Cable	10
圖 2- 4	四軸專用 6S LiPo ELL MAX 22.2V 5800[mAh] 25C.....	10
圖 2- 5	NVIDIA Jetson Nano 裝於車上.....	11
圖 2- 6	Jetson Nano UPS 不斷電供應系統.....	11
圖 2- 7	Intel® RealSense D435i 示意圖	12
圖 2- 8	RealSense Viewer 示意圖	12
圖 2- 9	IMU 資訊、深度影像及 RGB 影像	12
圖 2- 10	x-IMU 產品圖	13
圖 2- 11	IMU 官方所提供之應用軟體.....	13
圖 4- 1	程式架構圖.....	15
圖 4- 2	車體姿態估測.....	16
圖 4- 3	RealSense 偵測距離示意圖	16
圖 4- 4	程式決策邏輯圖	17
圖 4- 5	較陡斜面之爬行方法	17
圖 5- 1	車子跨越紙箱過程	18
圖 5- 2	爬箱子過程中車體角度變化圖	19
圖 5- 3	車子攀爬樓梯過程	20
圖 5- 4	樓梯地形示意圖	21
圖 5- 5	爬樓梯過程中車體角度變化圖	21

表目錄

表 3- 1	自轉測試結果.....	14
--------	-------------	----

第一章 兩節式輕型偵察車

一、整體車身設計

為了提升車身對於地形的適應性，設計在車體中心增加一關節，使得車身可從中央關節分成前後兩節，兩節間的夾角可自由調整。前後共配置四輪，並且在中心處加裝攝影鏡頭。側向示意圖如圖 1-1。圖中紫色與綠色桿件分別為前後節，桿件末端各有兩個車輪、紅色為可調整桿件夾角的中心轉子、藍色為固定方向向前的攝影機。下面再詳述各部份如何實現。

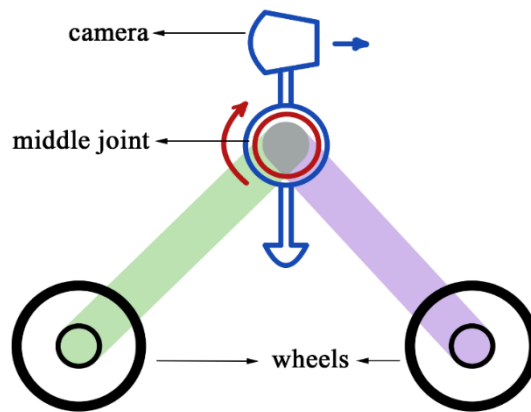


圖 1-1 車體側向簡易示意圖

二、中央關節

中央關節需要撐起前後節，馬達承受的力矩很大，而且本車的中央關節需要旋轉的角度範圍不大，因此決定採用蝸桿蝸輪機構，如圖 1-2。蝸桿蝸輪可在空間有限的情況下實現高減速比及高轉矩的目的，適合本車中心大扭力且旋轉角度範圍小的情況，其驅動馬達也可以移至前節上，達到簡化中心機構的目的。最終採用齒直角模數 1.25、減速比 40:1、條數 1 的蝸桿蝸輪，選擇 KHK 小原齒輪的 BG1.25-40R1J10 蝸輪、SW1.25-R1 蝸桿 [4] [5] [6]。

蝸輪之基準圓直徑為 50.09mm、蝸桿之基準圓直徑為 21mm，兩者的轉軸垂直但不相交，兩軸之間的距離為 $(50.09+21)/2=35.545$ mm，如圖 1-3。



圖 1-2 蝸桿蝸輪機構

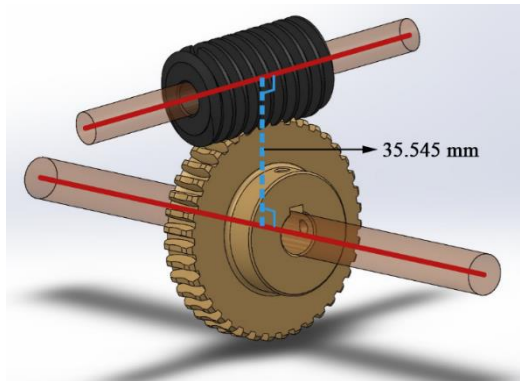


圖 1-3 轉軸間位置關係

為維持圖中轉軸之位置，我們設計了轉軸支架並在支架與轉軸之間配有軸承，此支架使用 3D 列印的方式製造，如圖 1-4。前節將與支架固定；後節將與蝸輪、蝸輪軸固定，此作法即可使蝸桿蝸輪的旋轉帶動前後節開合，蝸輪旋轉角度即為前後節夾角角度之變化量。

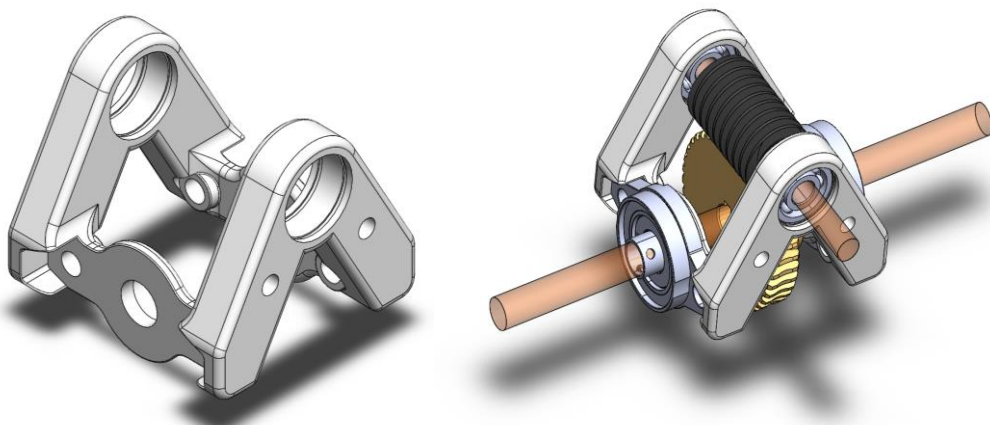


圖 1-4 轉軸支架等角視圖、與蝸桿蝸輪之配合圖

三、前後節機構與車輪配置

車體前後節為兼顧強度及輕量化的需求，採用了輕巧的 1515 鋁擠型作為主體架構，相對市面上常見的 2 系列、3 系列鋁擠型重量輕了許多，鋁擠型的擴充性對於後續其他硬體的安裝也十分方便。前後節各以兩支 1515 鋁擠型縱向形成骨架，橫向再鎖上壓克力板以確保鋁擠型之間平行，如圖 1-5。

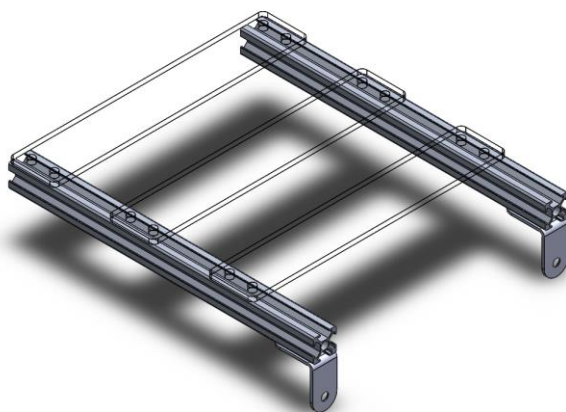


圖 1-5 後節骨架示意圖

前段提及的中心轉子馬達配置在前節，因此其馬達架需要能與兩隻鋁擠配合，並且使馬達驅動軸與蝸桿轉軸共線，我們為此設計了能將馬達固定在鋁擠型之間的 3D 列印馬達架，如圖 1-6，除了提供支撐馬達的功能外，也能代替壓克力板維持兩鋁擠之間的平行度。鋁擠間剩餘的位置可放置控制板、電池等等硬體。

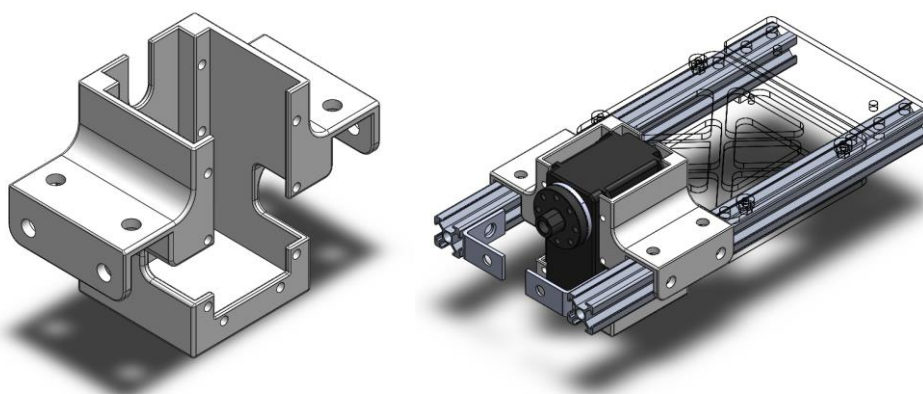


圖 1-6 中心轉子馬達架等角視圖、與前節配合圖

車體前後節為適應崎嶇地形進行開合時，部分姿態可能會造成底盤過低接觸到突出地形的情況，因此需要在車輪與車體之間架高，使得車輪轉軸低於前後節

之鋁擠型，進而達到底盤相對抬升的效果。我們採用的架高方式是將車輪馬達架往下設計，使馬達與車輪降低，如圖 1-7 所示，並且選用直徑 96mm 的大型攀爬車輪，車輪的大直徑與良好抓地力皆降低了地形變化對車體前進產生的影響。

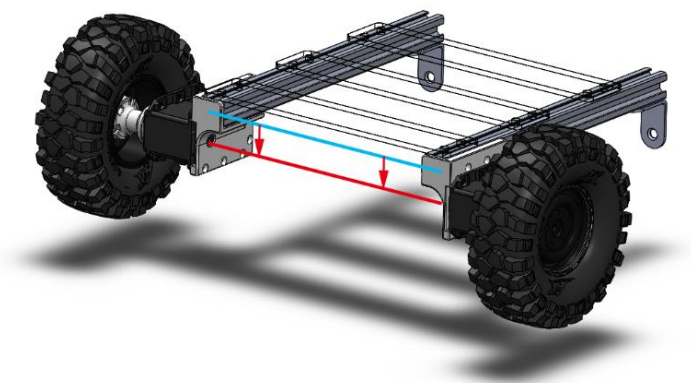


圖 1-7 車輪降低示意圖

四、相機單軸穩定器

由於車體在行進過程中會不斷變形，車體各部位會隨著前後節開合而有方向與角度的變化，因此無法找到一個適合的位置放置鏡頭，若放置在前節，收縮姿態時鏡頭就會拍地板，若放置在後節的話就會照向天空，為了解決這個問題，我們利用簡單的槓桿原理在車體中心設計一個可以保持相機方向的單軸穩定器，使鏡頭可以持續記錄前方的畫面，設計概念圖如圖 1-8。

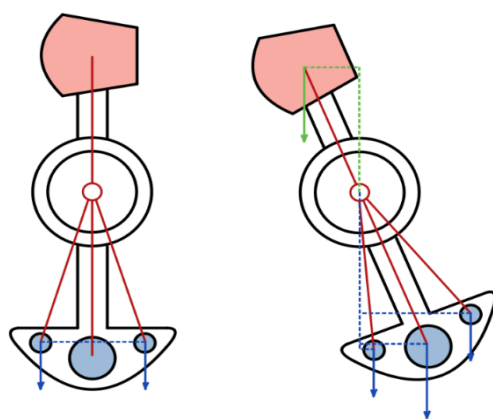


圖 1-8 相機單軸穩定器概念圖

上方紅色部分為相機 Intel® RealSense (約為 73g)，下方藍色部分為可調節重物，中間圓圈處配有軸承，使整體可以繞著中心軸自由轉動。下方重物部分分成中間大重物與兩側小重物，於直立平衡狀態時 (圖 1-8 左方)，相機與大重物相對中心支點力臂皆為 0，兩側小重物相對支點會產生力矩並且互相平衡維持穩定直立；當穩定器傾倒時 (圖 1-8 右方)，兩側小重物因傾倒產生的力臂較大，綜合下方重物所有藍色力矩，足夠將上方相機產生的綠色力矩抵銷，並回歸到直立平衡狀態。實際設計架構是由壓克力板和 3D 列印件組合而成，重物由螺桿、螺母、六角銅柱構成，方便隨時調整重物的重量，前後小重物的妥善配合也可以調整鏡頭的傾角，以達到最穩定的效果，如圖 1-9。

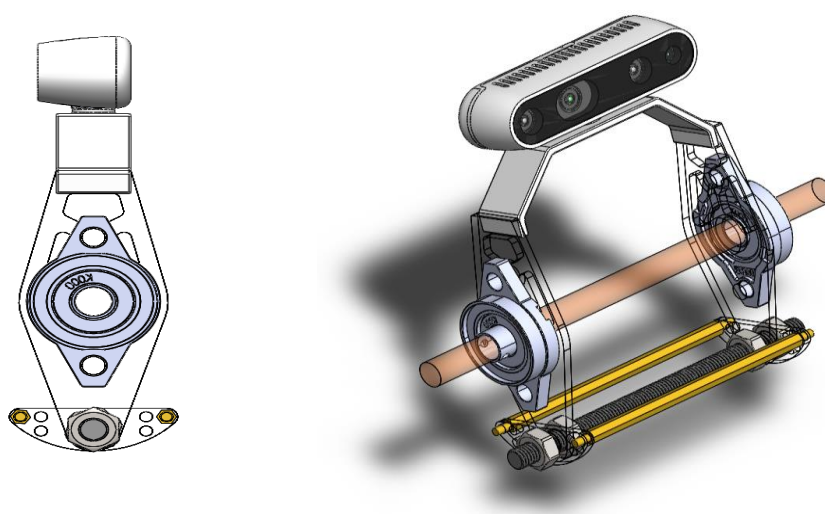


圖 1-9 相機單軸穩定器側視圖、等角視圖

五、機構整合與其他硬體配重

綜合上述幾段，將中心部分、相機單軸穩定器、前節、後節全部整合之後，各視圖如圖 1-10、圖 1-11、圖 1-12，車體前後節可以打開、收合，如圖 1-13、圖 1-14。



圖 1-10 整體機構等角視圖

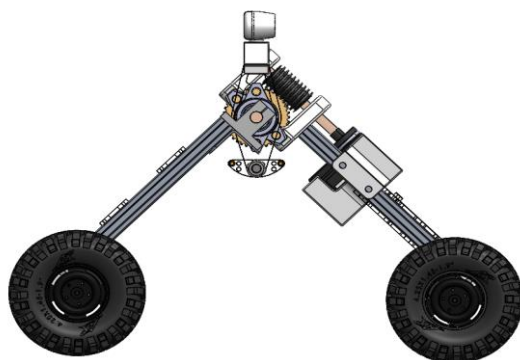


圖 1-11 整體機構側視圖

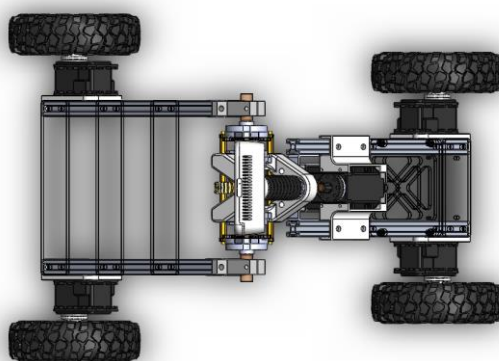


圖 1-12 整體機構上視圖



圖 1-13 車體展開姿態

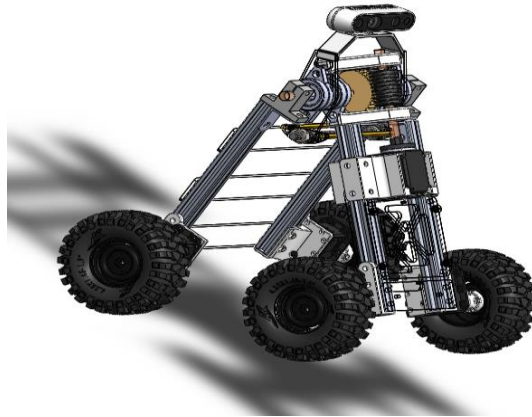


圖 1-14 車體收合姿態

車體上需要配置主控電腦 NVIDIA Jetson Nano、馬達電池、電腦電池、控制板 Arduino Mega 2560、兩個慣性量測單元 x-IMU，需要將這些硬體配置在前節或後節，前節的配重需要大於後節，使整體重心向前，在翻越崎嶇地形收合前後桿時才不會容易向後傾倒，提高穩定度與越野能力，因此我們將主控電腦 NVIDIA Jetson Nano、電腦電池放置在前節；馬達電池、Arduino Mega 放置在後節，IMU 則放置在前後節末端中心，以便感測兩節傾角，Arduino Mega 與 IMU 的重量輕可忽略不計，前節有 Jetson Nano、電腦電池和中心轉子馬達，後節則僅配有馬達電池的重量，達到整體重心向前的目的。所有硬體如圖 1-15，全車共重 3.6 kg。實體照如圖 1-16。

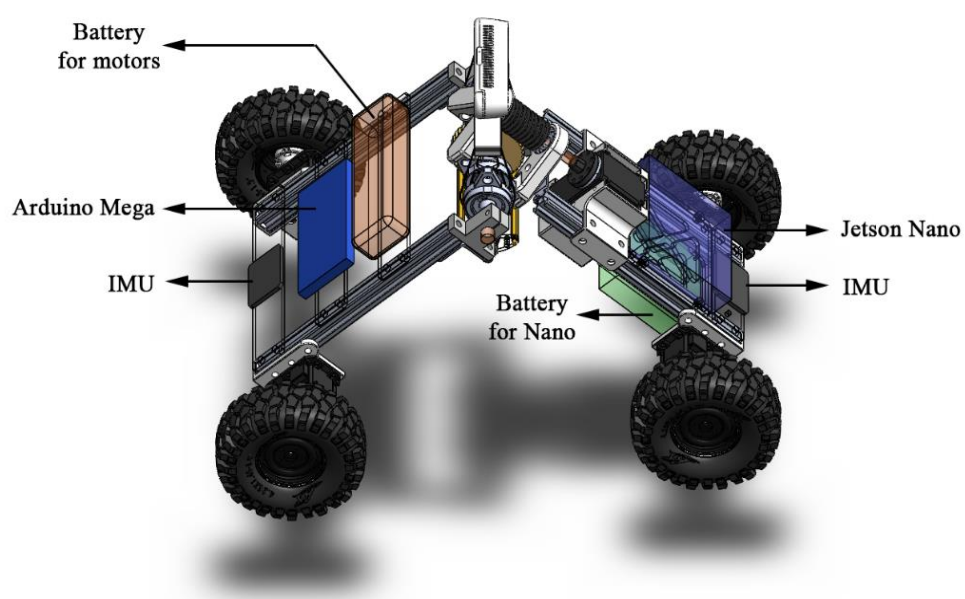


圖 1-15 硬體配置圖

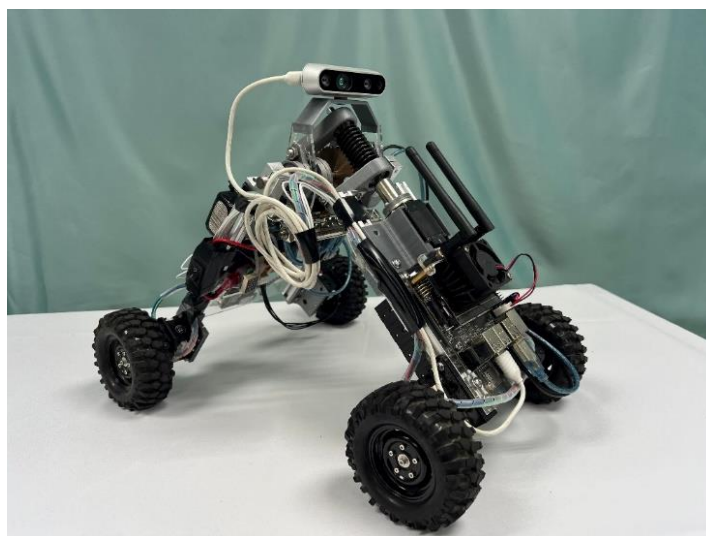


圖 1-16 全車實體圖

第二章 硬體實現方式

一、馬達

Robotics MX-28AR 和 MX-106，如圖 2-1，為此次使用的伺服馬達，供電皆為 12V，可提供約 2.5 [N.m] 以及 8.4 [N.m] 的扭力，重量分別為 77g 和 165g，由於主題為輕型偵察車，除了要將車體重量減輕，且考量到驅動輪並非像中央關節部分一樣，需要較大的扭力使車體兩端摺疊，因此採用前者作為動力來源，後者作為中央關節使用的制動器。



圖 2-1 Dynamixel MX-28AR(2.0) / MX-106R(2.0)

二、通訊裝置和方式

馬達間的通訊裝置選用的是 Robotics U2D2 [7]，利用 RS-485 的通訊協定，如圖 2-2。



圖 2-2 Robotics U2D2

所選用的這兩款馬達可以 Master/Slave Mode 將其串接在起，並以同步電纜 (Sync Cable) 連接，如圖 2-3，可省去額外線材的重量，再者，透過 Robotics U2D2，一款小型 USB 通訊轉換器，可做到 Control PC 和 Dynamixel 馬達之間的訊號傳輸。

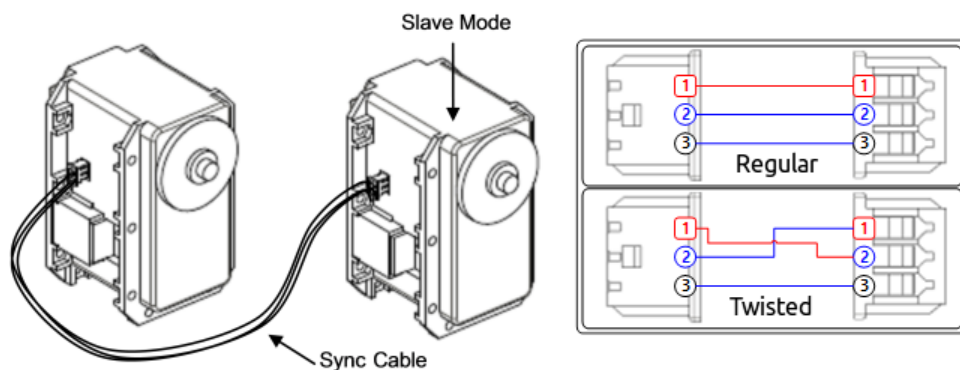


圖 2-3 Slave Mode with Sync Cable

三、馬達供電

本計畫所選用的電池為 6S LiPo ELL MAX 22.2V 5800mAh 25C，如圖 2-4，以這款電池供應五顆伺服馬達所需電量，從 Robotics e-Manual [8] [9] 上得知 MX-28AR 和 MX-106R 在 12V 供電的情況下所需電流分別為 1.4 A 跟 5.2 A，電流最大值需 10.8A，考量到中央傳動並非時刻轉動，因此假設兩者使用時間比為 8:2，電流平均使用量則為 5.52A，因此選用 5800mAh 容量的電池，約可供馬達轉動約 1 小時，非常充裕。



圖 2-4 四軸專用 6S LiPo ELL MAX 22.2V 5800[mAh] 25C

四、車載電腦及供電

車載電腦的部份採用 NVIDIA Jetson Nano，選用此款電腦的原因是本團隊經過實際測試之後，確定能夠順暢地運行我們的系統程式，且 Jetson Nano 具有體積小、重量輕的優勢，這對於我們車子的作動效率有不小的提升 [10]。

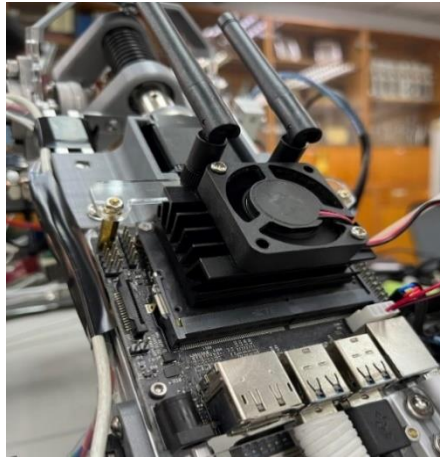


圖 2-5 NVIDIA Jetson Nano 裝於車上

電腦供電的部分選用 Waveshare 公司所推出的 UPS 不斷電供應系統，只要透過簡單的杜邦線做連接就能穩定的供電，另外電池的部份使用的是松下可充電鋰電池，其單顆的標準電壓為 3.7V、額定電容量為 3350mAh。除了供電之外，其上還有小小的 OLED 螢幕能即時地查看剩餘電量和 CPU 使用效率，在使用上可說是相當便利。



圖 2-6 Jetson Nano UPS 不斷電供應系統

五、相機及深度感測元件

經過考量及比對市面上的深度感測計後，團隊最終選擇採用 Intel® RealSense D435i 來作為我們的車載鏡頭，主要是因為此款鏡頭同時兼具了擷取 RGB 與點雲影像的功能，再加上官方提供完善的 RealSense SDK [11]，如此可以更方便去套用其功能，像是其開發的 RealSense Viewer 可供我們快速地調整相機參數，並且預覽即時影像畫面。另外，D435i 還結合了 IMU 的功能，提供了三軸陀螺儀和三維加速度資訊，這使我們擷取的點雲畫面更為精確，亦幫助偵察車更為準確地感知當前位置。



圖 2-7 Intel® RealSense D435i 示意圖

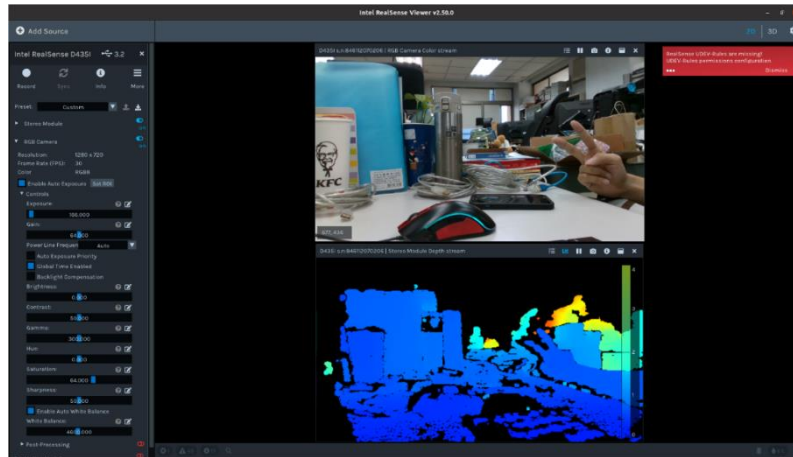


圖 2-8 RealSense Viewer 示意圖

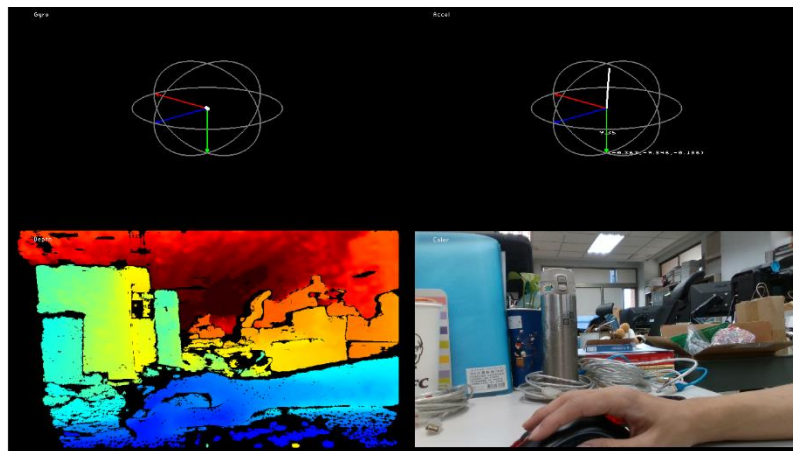


圖 2-9 IMU 資訊、深度影像及 RGB 影像

六、慣性量測單元 IMU

為了能夠更好得估測車體姿態，計算出當下該以何種策略來跨越障礙物，因此決定在車輛的車輪前後軸中央裝上 IMU，以前後節的角度來計算出車子的中間夾角，進而描繪出整台車的姿態。我們選用的 IMU 為 x-io Technologies 所生產之 x-IMU [12]，其提供了九個維度的資料，分別是三軸陀螺儀、三軸加速度計以及三軸磁力計，藉由這些資料，可以準確地計算出當前的 pitch、roll、yaw 三向

的角度，也因官方有提供完善的轉換函式庫，方便了在測量時的操作。另外，官方也有提供功能強大的 UI 介面，使我們能輕易地對 IMU 來做偏差的調整及校正，如圖 2-11 所示。

理論上來說，我們能夠直接透過 Jetson Nano 的 GPIO pin 腳來與 IMU 做連結溝通，但多次嘗試之下，程式方面一直有衝突且收到的資料傳輸斷斷續續的，因此改用 Arduino Mega 2560 作為中間的媒介來解決此問題。利用 Arduino 的 5V 腳位來對兩個 IMU 進行供電，避免掉電池供電不穩的問題，再來就是由 RX1 和 RX2 腳位來分別接收前後節 IMU 的資料，雖然多了一個部件，但通訊方面也相對穩定許多。

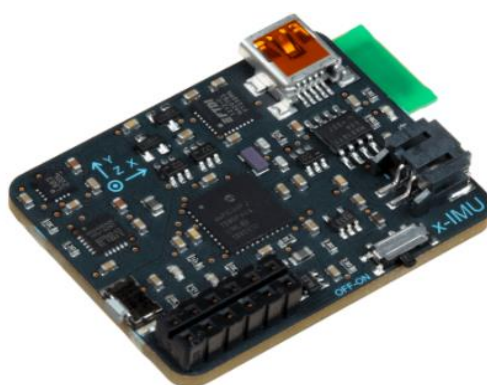


圖 2-10 x-IMU 產品圖

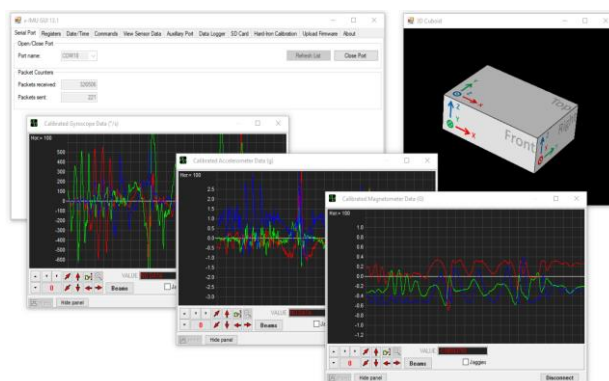


圖 2-11 IMU 官方所提供之應用軟體

第三章 馬達控制與車體性能測試

一、馬達控制

本次所使用的馬達控制方式為速度控制，Dynamixel MX 系列的馬達內部含有控制板，可另做開發並撰寫程式，這邊我們使用 Robotics Wizard 2.0 進行馬達 ID 和 Baud rates 設置，使操作者能根據給定的 ID 去控制馬達轉速，控制方式主要是透過 C++ 將官方給的 Dynamixel SDK [13] 進行包裝，再根據使用者需求寫成函示進行使用。由於車輪的轉動幅度超過 360° ，位置控制並不適用於偵察車，且考量到 Control PC 的運算效能以及希望能即時的修正目標方向上的偏差，因此我們選用速度上的 PD 控制。

二、運行方式

運行方式分為手動模式和全自動模式：

(一) 手動模式

基本的前後左右移動，可根據輸入的速度、方向行進或停止，此外，也可以操控中間關節的開合，使其可做到攀爬或穿越狹小地形的操作。

(二) 全自動模式

依據車載電腦計算出不同策略而做出相對應的動作。

三、性能測試

接著，針對車子的硬體性能進行測試，透過設計的測試項目，了解硬體誤差，再透過軟體去做修正，主要目的是自轉中心偏移量測試。本車自轉的方式，是讓前後節車輪軸中點作為旋轉中心，讓輪子分別向前與向後轉動，達到自轉目的。

透過自轉測試，可以了解到車子自轉能力的好壞，透過分析前者，對路徑規劃的實現有相當幫助。我們將車子的中心位置設為自轉中心，針對左右自轉，進行三次測試。實驗結果列於表 3-1，結果顯示此項誤差偏大，主要是因為我們前後節皆為主動輪，理當會產生兩個自轉中心，又因車體是剛性的且無法共轉，於是前後兩節就會與地面產生蠻大的相對運動，導致偏移量跟預期的結果差異甚大。

所以在這部分就要對我們的軟體進行修正，以確保車子所轉的角度是否符合我們預期結果。

表 3-1 自轉測試結果

	中心偏移量(cm)	
	左自轉	右自轉
測試 1	3.1	4.3
測試 2	4.5	6.0
測試 3	3.7	3.6
平均	3.77	4.63

第四章 車體程式設計與跨越障礙之決策邏輯

一、主控程式

我們的程式架構圖如圖 4-1 所示，最主要的是一個主程式，其中包含了控制五顆馬達的 Motor Union；接收 RealSense 資料的 RealSense Distance & RealSense Photo，分別用以處理深度資訊和所攝照片；接收 IMU 角度資訊的 XIMU；以及最核心計算車體動作策略的 Strategy。另外我們也有加入手動控制模式，以便於車子在發生不可預期意外時，可以馬上手動介入操作，抑或是在進行搜救任務時，可讓使用者操控車子，進行更為靈活的行動。

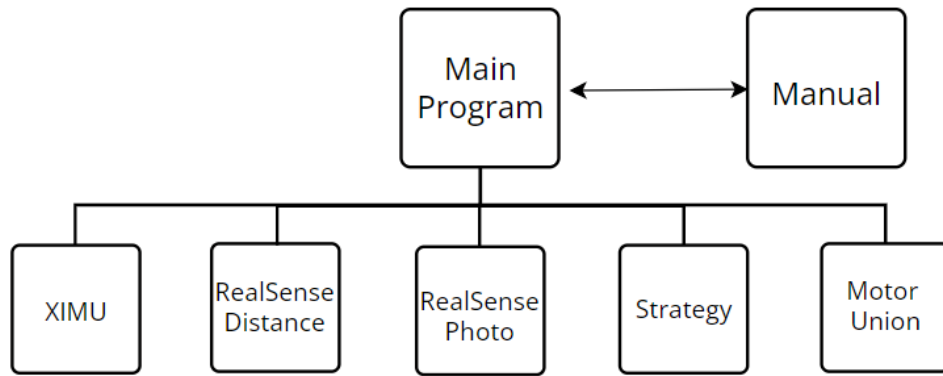


圖 4-1 程式架構圖

二、車體姿態估計

對於直行跨越障礙物的過程，最需觀測的就是車子前後節的俯仰角(pitch axis)，令前節與地面的夾角為 θ_{front} 、後節與地面的夾角為 θ_{rear} ，我們可以將車子前後節與地面夾角及車子中心夾角 θ_{center} 看作是一個三角形，因此可以輕易地由下列式子計算出車子的中心夾角。

$$\theta_{\text{center}} = 180^\circ - (\theta_{\text{front}} + \theta_{\text{rear}})$$

在得到三個夾角之後，加上車體的長度，我們就能勾勒出車體目前的姿態為何了。

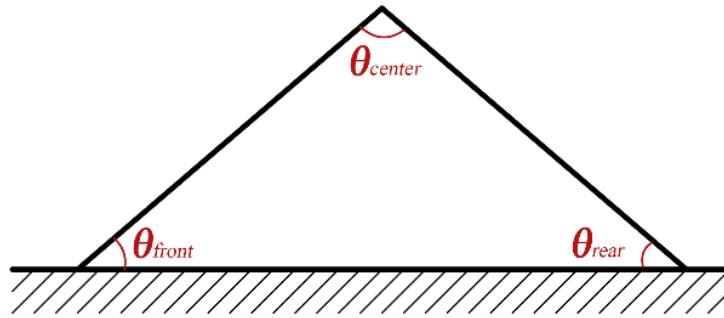


圖 4-2 車體姿態估測

三、車體行進策略

(一) 高度限制

首先，藉由 RealSense 持續進行量測，經由量測到的深度數值和高度，策略系統會判斷是否能夠跨越(經實測過後，車子所能跨越的最高障礙為 20cm)，因此若量測出來的障礙高度大於 20cm，就會執行避障的動作，讓車子選擇一條通行無阻的路行進。若量測出來的障礙物高度小於 20cm，便會直接讓車子執行跨越障礙物的動作，至於高度的量測我們選擇用較為簡易的方式來降低運算資源。裝設在車上 RealSense 有刻意向前傾斜 15° ，這是因為若與地面垂直的話，很容易就會忽略一些高度較低的障礙物，那經過我們實測之後發現傾斜 15° 是一個較好的選擇。以圖 4-3 為例，假設相機離地高度為 28cm，則我們可以由簡單的三角函數計算出，高為 20cm 的障礙最終能被 RealSense 量測到的距離為 30cm，這表示量測到的距離如果小於 30cm，偵查車就要執行避障的動作，而不能直接向前走。

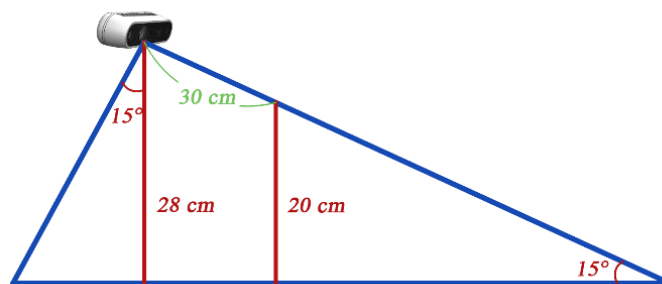


圖 4-3 RealSense 偵測距離示意圖

(二) 決策邏輯

跨越障礙物的程式流程圖如下所示：

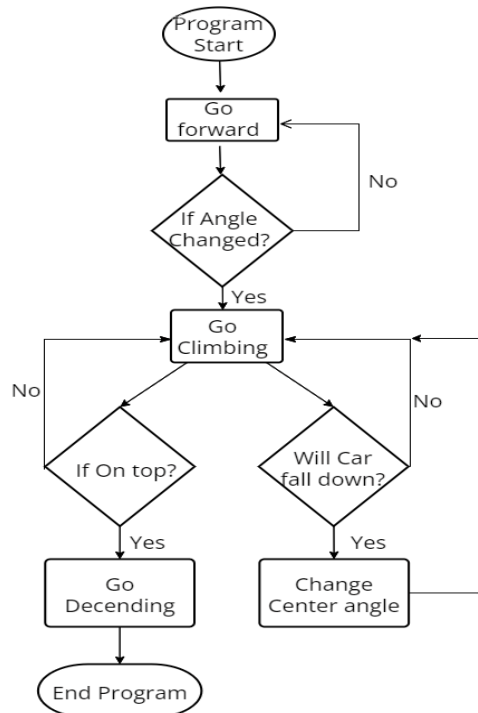


圖 4-4 程式決策邏輯圖

當車子在行進過程中，如果發現前後節的 IMU 角度改變超過閾值時，我們便能判斷車子此時已經接觸到障礙物(前輪爬上去)，進而策略程式就會將當前狀態改為“climbing”，接著就是讓車子持續往前爬行，並隨時監測車子的中心角度是否有超過臨界角(保守設為 85 度)，若超過臨界角即表示車子會有傾倒的風險，那此時就必須將車子的中心角度張開，以免發生翻車意外。

另外在爬行過程中，若遇到坡度較為陡峭或是垂直接面，會讓車子在爬行過程中進行角度閉合的動作，如圖 4-5 所示，如此便能讓車子的重心轉移，進而成功攀越障礙物。當車體已經完全在障礙物之上時，我們設計會讓車子在上面進行姿態調整，如此才能以較為安全的角度緩步下降，至於在下降的過程中，也會時時刻刻地監測車體中心夾角，若超過臨界角，同樣需要讓車子中心角度張開一些。圖 4-4，是車子跨越障礙物的決策邏輯圖。



圖 4-5 較陡斜面之爬行方法

第五章 實驗結果

本企劃主要目標，是希望能夠克服崎嶇地形和跨越障礙物，之前已介紹過機體設計，實現方法和策略。接下來我們將透過兩個實驗，來驗證所提方法之效果。

實驗一 攀越紙箱：

此處的實驗內容是爬紙箱的結果，會以紙箱來做實驗是因為車子在跨越紙箱的時會經歷上攀及下降的過程，如圖 5-1，因此能同時分析到兩種情形，紙箱的取得也相對容易，使我們能在實驗室中就能進行參數調整，至於其他障礙物的攀爬情形可見參賽影片。

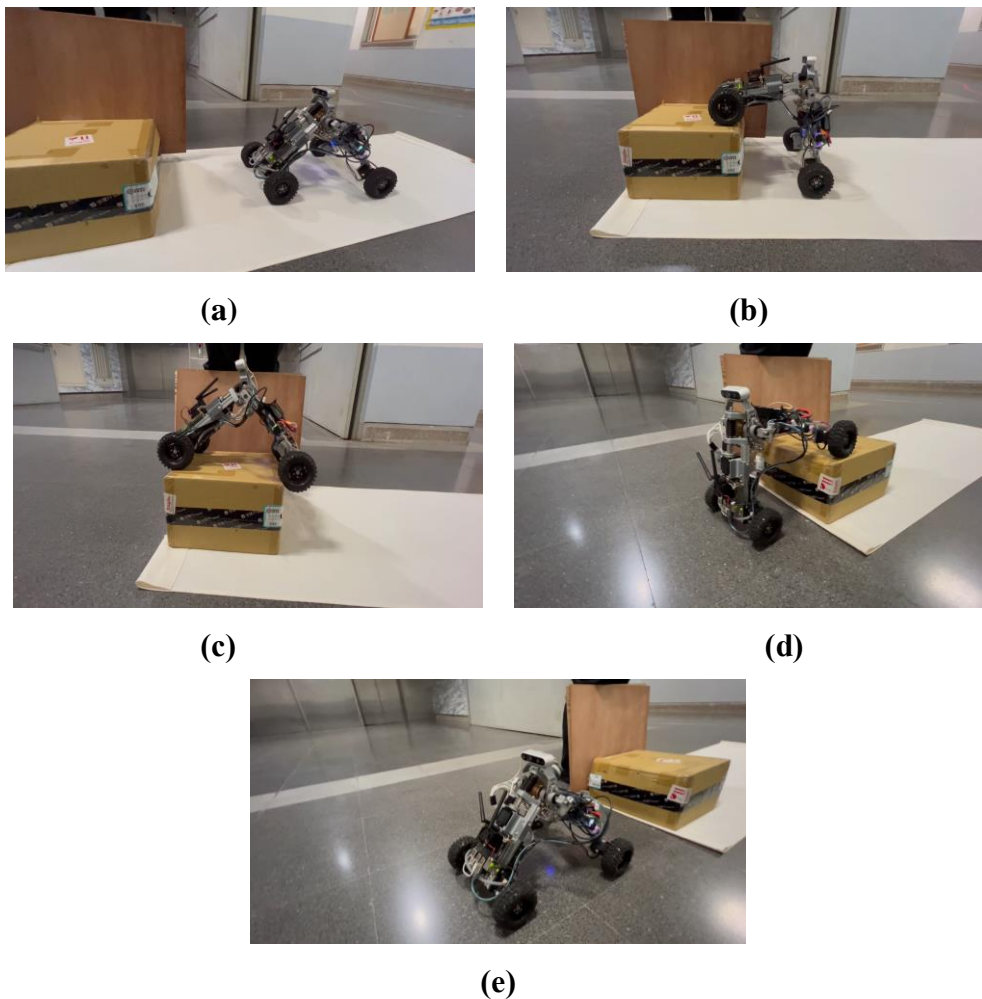


圖 5-1 車子跨越紙箱過程

(a) 為初始狀態 (b)為上攀姿態 (c)為攀爬至頂部 (d)為下降姿態 (e)為下降完成

一、實驗環境設置

本實驗所選用的障礙物為一高 18 公分、寬 30 公分、長 32 公分的紙箱，另外為了克服磁磚地面過於光滑的問題，我們有在地上鋪上地毯藉以增加摩擦力。

二、實驗結果與討論

(一)前後節角度與策略變化

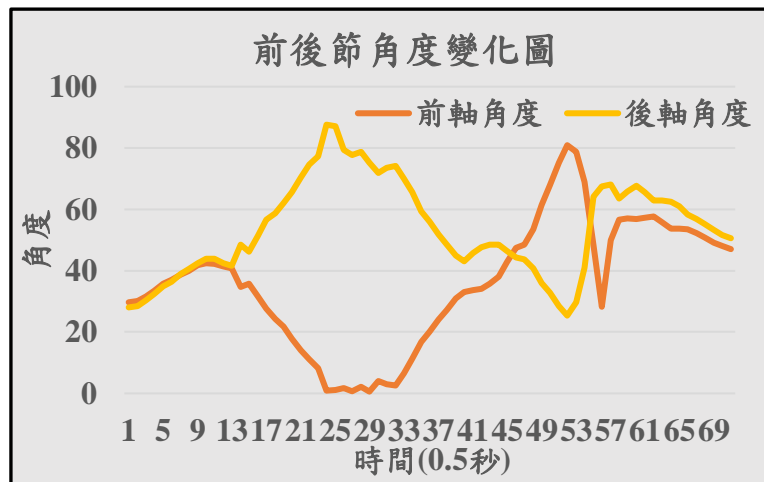


圖 5-2 爬箱子過程中車體角度變化圖

最一開始的角度變化是因為感知到車體過於水平，因此策略進入了“Adjust initial pose”，此策略是為了讓車體可以用較為穩定且適應性較高的角度來行走，此處我們所設的最佳角度為 40~50 度之間。調整過後我們的策略就進行到“On floor”的階段，此時車體緩慢前行。

接下來進入到第三階段“Climbing”(圖 5-2 第 13 時間點過後)，可以看到前後節角度皆以非常大的斜率往反方向變化，這是因為前輪已經接觸到障礙物並開始向上爬行了，因此前節角度會趨向水平角度來變化，至於後節則會越趨向垂直的 90 度，如圖 5-1 (b)。在第 24 時間點，因為後節角度將到達我們所設置的臨界角 85 度，所以策略進入了“Center angle open”來打開中心轉子的角度，避免車子往後傾倒。可以注意到在此之後，前節的角度以經趨於水平，表示前節已經完完全全地平躺在紙箱上，接下來就是要讓後節也向上攀升，策略此時進入到“Keep climbing”，讓後節能以更好的角度向上爬，另外也會針對中央關節做調整，使其能夠以夾取的方式向上，如圖 4-5。所以在這之後前後節的角度又會漸趨一致，直到車體完全攀上紙箱上面，如圖 5-1(c)，此時的策略為“On top”，會在紙箱頂部做角度的調整，因為這樣才能以較為安全的角度進行下降。

再來看到第 45 時間點過後，前節的角度快速上升，而後節的角度則下降，表示進入了“Descending”狀態，如圖 5-1(d)，至於在第 56 時間點，前節的角度突然掉到了 28.24 度，則是因為 IMU 的量測誤差所導致，並非車體角度的大幅度改變，在這之後，可觀察到前後節的角度又逐漸趨於一致了。當前後輪都接觸到地面之後，我們會讓車體再進行一次姿態調整，如同最開始所進行的方式，方能再以穩定角度行進。

實驗二 爬樓梯：

此處的實驗內容是爬樓梯的結果，以樓梯來做實驗是因為一般輪型車大多難以攀爬階梯地形，如圖 5-3，爬樓梯的項目對於輪型車越野能力相當有指標性。在車體行徑過程中會遇到連續重複階梯狀地形，這也更利於我們在數據分析上找到規律性。

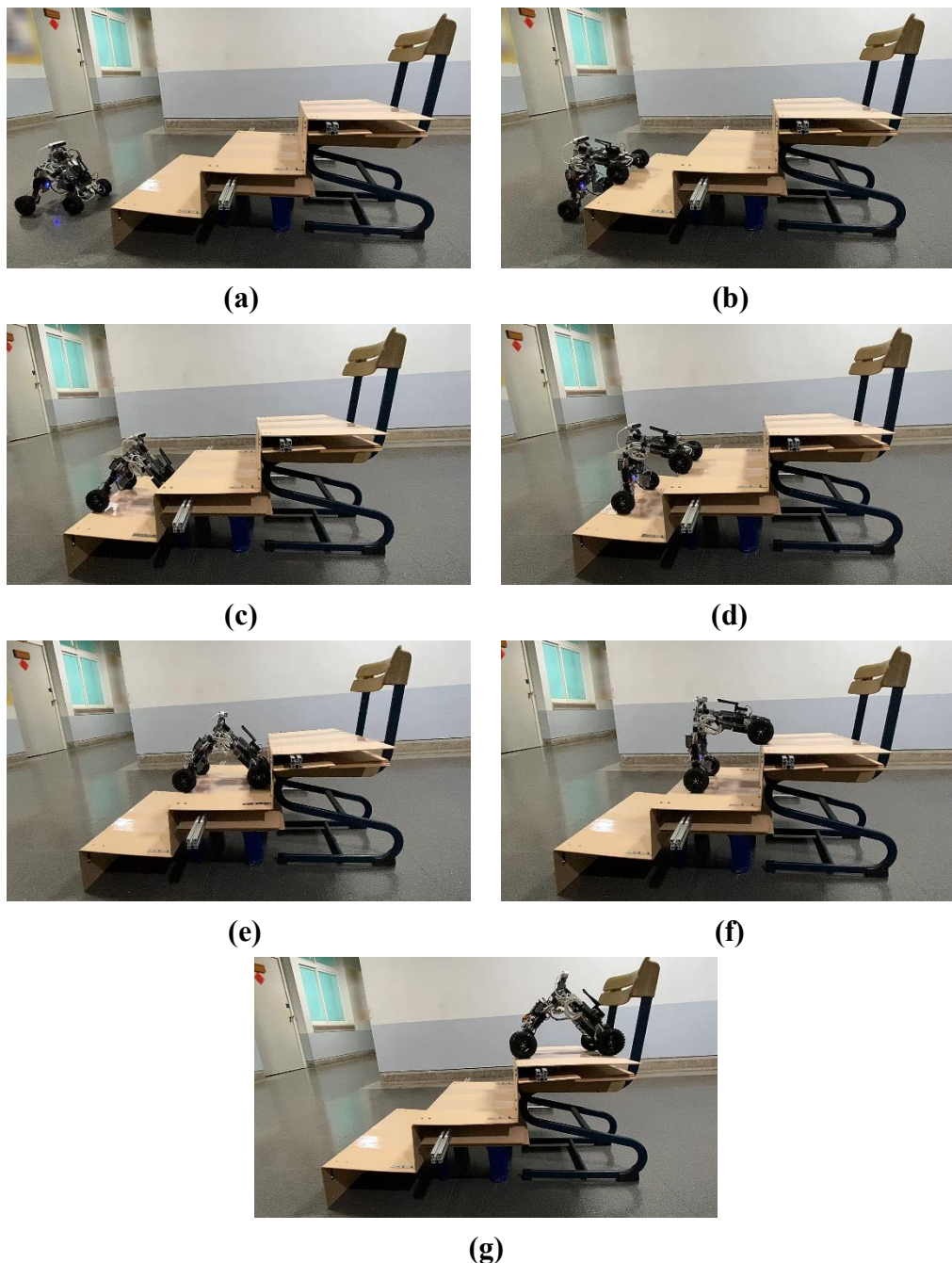


圖 5-3 車子攀爬樓梯過程

(a)為初始狀態 (b)為上攀第一階姿態 (c)為完成一階 (d)為上攀第二階姿態
(e)為完成二階 (f)為上攀第三階姿態 (g)為完成三階

一、實驗環境設置

本實驗自行製作的樓梯單階高為 18cm、寬為 40cm，如圖 5-4。沒有選用現成的樓梯是因為我們所找到的樓梯側階面都是超過 90° 的，並非與地面垂直，不利於本作品之運行，因此改用自行製作的三階樓梯。

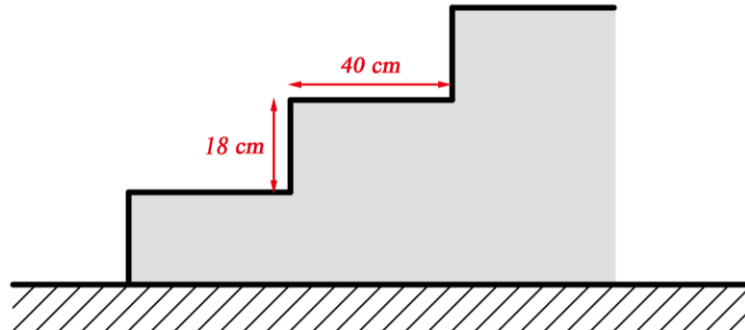


圖 5-4 樓梯地形示意圖

二、實驗結果與討論

(一)前後節角度與策略變化

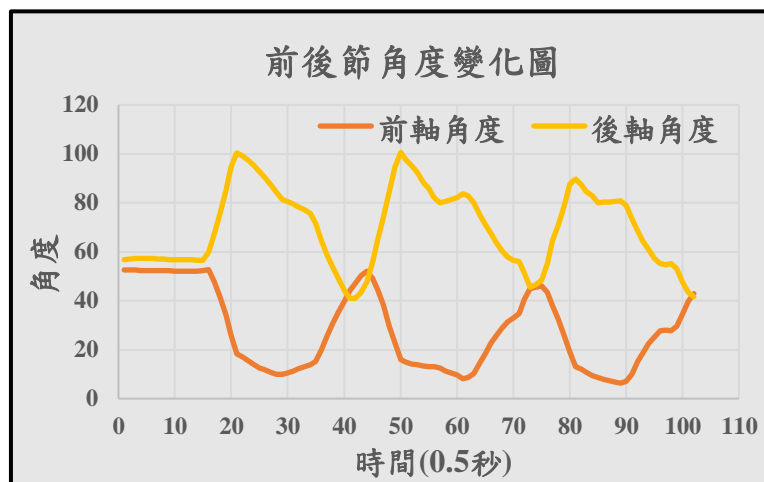


圖 5-5 爬樓梯過程中車體角度變化圖

一開始可以看到前後角度皆無變化，不同於實驗一開頭的初始姿態調整，本次實驗最初就在我們所設的最佳角度範圍內，因此就跳過了 “Adjust initial pose” 策略，直接開始前次實驗提到的 “On floor” 階段前行。從圖 5-5 看到前 15 個時間點的角度皆保持恆定，但兩者卻沒有完全重合，原因應為前後節車身長度不等所導致的。

在圖 5-5 第 16 至第 20 時間點為 “Climbing” 階段，前輪接觸到樓梯垂直面並爬升當中，在中心轉子沒有作動的情況下，車體視為剛體，前後角度變化量之絕對值相等，但由於前後節角度正方向定義不同，兩者斜率因而相差一個負號。

後節角度在第 21 時間點來到第一次峰值，後節角度以達到可能會傾倒的臨界角，為避免車體重心超出後輪接觸範圍而傾倒，中心轉子必須開始張開使 θ_{center} 增加，也就是“Center angle open”階段。來到第 29 時間點，中心角度已調整完畢，此時前輪在第一階上、後輪在地面，策略進入“Keep climbing”，前後輪皆在水平面前進，因此圖 5-5 第 29 至第 34 時間點間兩者的角度變化皆不大。第 35 時間點後輪接觸到了第一階的垂直面，同樣是在“Keep climbing”階段，第 35 至 40 時間點的斜率相對前段大了一些。

第 40 時間點時，後輪也已經爬上了第一階，但因為角度沒有在我們設定的最佳角度內，因此車體在第一階上收合中心轉子進行了初始姿態調整，可以在圖表上看到前後節在第 40 至第 44 時間點間角度同時上升，完成姿態調整之後再開始下一階的攀爬。

圖 5-5 整體可以看到三組形狀類似的圖形，即是分別在三階樓梯重複了上述動作，造成些許差異的原因在於自製樓梯架構不夠堅固，真直度、垂直度、平行度控管皆不嚴謹，木板階面偶爾產生凹陷、變形的狀況，因而導致三組數據的不同。第 40 至第 44 時間點的初始姿態調整也只有在第一階有發生，第二、三階爬上水平面時角度皆剛好落在最佳角度範圍內，圖表上就不會在二、三階看到短暫兩者角度同時上升的階段。

第六章 結論

本企劃旨在設計一具高度靈活性的多功能型雙節輕型偵察車，在一般輪型機器人的基礎上添加了中心可變形的自由度，此設計使得車體對於多變崎嶇的地形有更高的適應性，中心自由度可依據不同地形，結合感測器數據姿態判斷，歸納出合適的行進策略，大幅的拓展此偵察車在不同工作場域的應用範圍。

本車相對於其他越野偵察車體積、重量皆有一定的優勢，並成功地集結了速度、控制性、機動性、適應性於一身，輕量、敏捷而不失強度，還可以進行全自動行駛，亦可讓使用者親自手動操作，透過車上的鏡頭也能記錄下實地影像，代替人類到達危險或狹小的地形進行偵察的任務。

綜上所述，本作品未來若能再加入防水防塵的設計，使其更為堅固牢靠，應用性必定會大大地提升，也許有一天真的乘上太空梭，悠遊浩瀚無垠的星河，到遙遠的不毛之地-火星，替人類開拓一片新天地。

第七章 參考資料

- [1] A. M. M. Thu, M. T. S. Aung, and T. Okada, “Autonomous Stairs Ascending and Descending Algorithm for Tri-Star,” *2018 3rd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*, pp. pp. 328-333, 2018.
- [2] Y. Kim, J. Kim, H. S. Kim, and T. Seo, “Curved-Spoke Tri-Wheel Mechanism for Fast Stair-Climbing,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. pp. 173766-173773, 2019.
- [3] B. E. Channel, “Making Lego Car CLIMB Obstacles,” Brick Experiment Channel, 02 Jan 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=MwHHErfX9hI>.
- [4] KHK-小原齒輪工業株式會社, “蝸桿蝸輪,” KHK-小原齒輪工業株式會社, [Online]. Available: <https://khkchilun.com/wormgears.html>.
- [5] KHK-小原齒輪工業株式會社, “SW 蝸桿規格表,” KHK-小原齒輪工業株式會社, [Online]. Available: <https://khkchilun.com/pdf/vol3/sw.pdf>.
- [6] KHK-小原齒輪工業株式會社, “BG 蝸輪規格表,” KHK-小原齒輪工業株式會社, [Online]. Available: <https://khkchilun.com/pdf/vol3/bg.pdf>.
- [7] “ROBOTIS U2D2 e-Manual,” ROBOTIS, [Online]. Available: https://emanual.robotis.com/docs/en/parts/interface/u2d2/?fbclid=IwAR0nb-9phfLXGS4emE5SNBFF_h-37aI0nFXtKbUrLnHnk44jMZ2Gn9egk7U.
- [8] “ROBOTIS MX-28 e-Manual,” ROBOTIS, [Online]. Available: https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/mx/mx-28-2/?fbclid=IwAR1_znu-0i9suUmRedQxxRaWRzajrcd7hNZHab9EDGPB4uR6qQfWV_m3r10.
- [9] “ROBOTIS MX-106 e-Manual,” ROBOTIS, [Online]. Available: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/mx/mx-106-2/?fbclid=IwAR3MfGPrAN61LRKSc8P7boEvkrzpye55muzEXx5ngWZO-NiVaoXh-v31nxA>.
- [10] 曾俊霖, “使用 NVIDIA Jetson 機器學習專案, 結合 Intel RealSense D435 景深攝影機進行物件偵測與距離偵測,” CAVE Education, 17 May 2021. [Online]. Available: <https://www.rs-online.com/designspark/nvidia-jetson-intel-realsense-d435-cn>.
- [11] ev-mp, “Intel® RealSense™ SDK 2.0 (v2.50.0),” 11 Nov 2021. [Online]. Available: <https://github.com/IntelRealSense/librealsense/releases/tag/v2.50.0>.
- [12] “x-IMU,” x-io Technologies Limited, [Online]. Available: <https://x-io.co.uk/x-imu/>.
- [13] “DYNAMIXEL SDK -Manual,” ROBOTIS, [Online]. Available: https://emanual.robotis.com/docs/en/software/dynamixel/dynamixel_sdk/overv

iew/?fbclid=IwAR0Hc_c7NimFckFaeXg23EIEoEnps7j0hPJ3xhkP-kFe2IP2a3FZwk13fdc.

- [14] L. Ding, "Definition and Application of Variable Resistance Coefficient for Wheeled Mobile Robots on Deformable Terrain," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 36, no. 3, pp. pp. 894-909, June 2020.
- [15] "DARPA Robotics Challenge," Institute for Human and Machine Cognition, [Online]. Available: <http://robots.ihmc.us/drc>.
- [16] M. Tanaka, M. Nakajima, Y. Suzuki, and K. Tanaka, "Development and Control of Articulated Mobile Robot for Climbing Steep Stairs," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 2, pp. pp. 531-541, April 2018.
- [17] A. Bouton, C. Grand, and F. Benamar, "Design and Control of a Compliant Wheel-on-Leg," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 25, no. 5, pp.2354 - 2363, Oct. 2020.