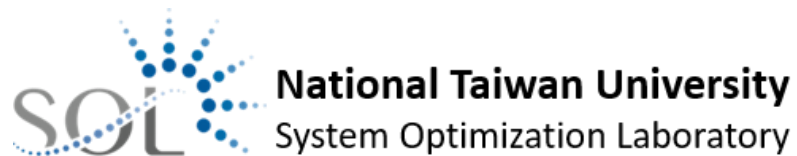


2020

# 工廠無人化載具之建構規劃 - 期末報告



委託單位：台達電子工業股份有限公司

主辦單位：國立台灣大學

嚴慶齡工業發展基金會 合設工業研究中心

主持人：台大機械系 詹魁元教授

研究人員：郭冠成 陳昱霖 游家權 劉員成 黃彥智

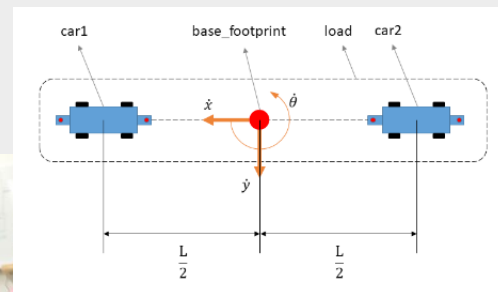
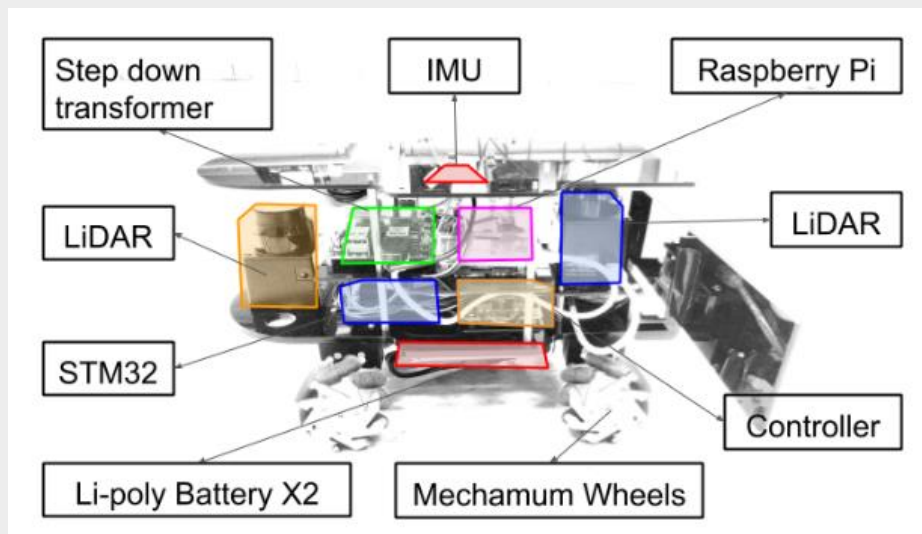
2020.10.22

# 摘要

1. 設計模組化的車輛單元，將載具分為動力單元 (載具) 與搬運單元 (層架)。  
優缺點
1. 單一載具搬運可承載約 70 公斤、兩台載具結合搬運可承載約 150 公斤。
1. 針對兩台載具的協同搬運，發展並實現了一種雙轉向、雙制動之移動機器人模型 (Double-Steering Double-Driving Mobile Robot) 運動規劃方法。

# 第一年度計畫成果

建構了兩台使用麥克納姆輪 (Mecanum Wheel) 的完整驅動 (Holonomic Drive) 載具，完成：實際地圖掃描建構、電腦模擬導航、動態避障、協同搬運 ... 等功能。



## 第二年度計畫目標

改善第一年度計畫成果，設計模組化車輛單元，將載具分為動力單元 (載具) 與搬運單元 (層架)，主要內容分為以下幾個部分：

- 載具建置
- 層架設計
- 載具與層架結合
- 結合後導航規劃
- 導航完成之載具脫離控制

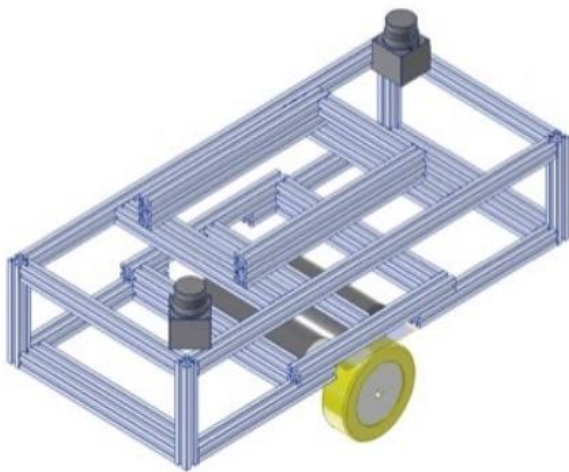
# 硬體部份

# 車身骨架

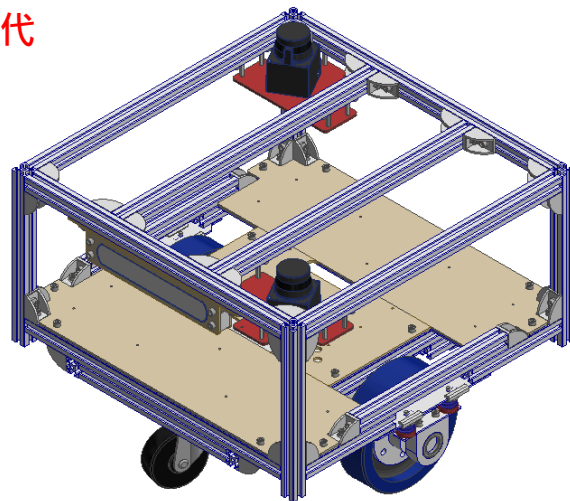
主要採用「鋁擠」作為骨架，並進行後續車體設計。

- ❖ 一代：主體為長方形，與層架結合後部分延伸出層架外，避免光達、相機遮蔽，但移動執行上會受到限制。  
車輪驅動使用皮帶輪，避免馬達直接受力影響。
- ❖ 二代：主體為正方形，與層架結合後完全位於層架底部，雖有光達、相機遮蔽問題，但移動執行上可完全執行各角度移動。  
刪除皮帶輪設計，降低維修成本，並加入懸吊系統，有效避免車體打滑現象。

一代

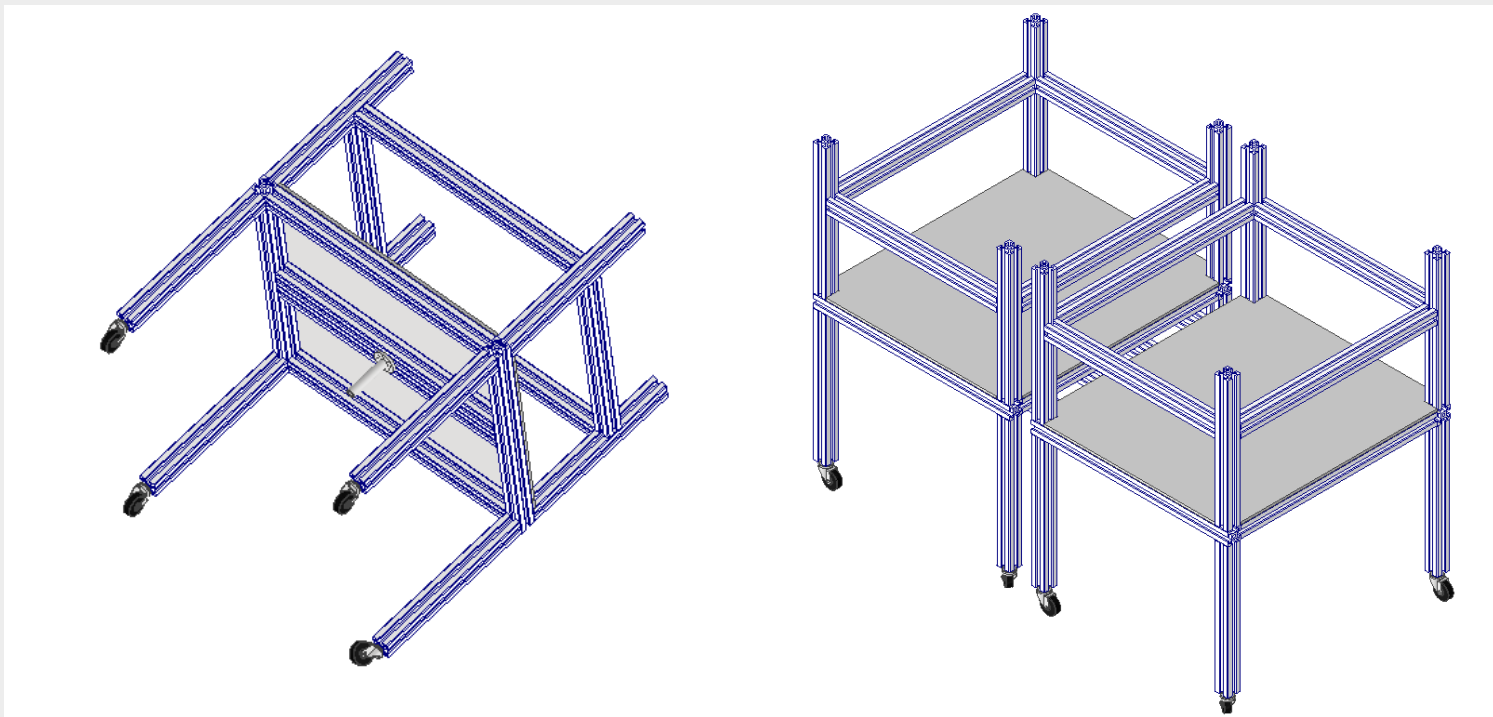


二代



# 層架

主要使用「鋁擠」組裝而成，在中間下方安裝一圓柱體或方柱體，為上述所提及之肋機構，用於與小車結合時的移動作用。



# 結合機構

1. 層架為被動元件，無任何機電配置。因此機器人上方加入閘門結合裝置與層架連結。

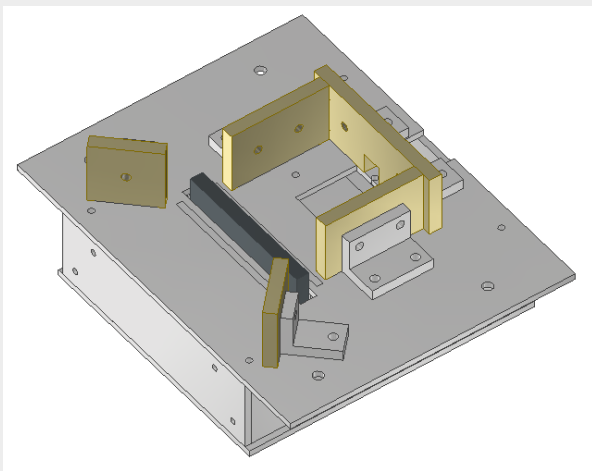
1. 考量連結後的移動自由度，移動機器人與層架之相關設計有以下的设计：

❖ 移動機器人

- I. Y形槽：導引層架肋機構進入結合軌道。（左圖：金黃色部分）
- II. 閘門：待層架肋機構抵達準備位置，閘門關閉，完成結合。（左圖：鐵黑色部分）

❖ 層架

- I. 方形肋：使單一機器人可直接對層架進行旋轉，達成朝向的控制。
- II. 圓柱肋：進行協同搬運時，可有效增加複數移動機器人的運行自由度。（右圖：示意動畫）

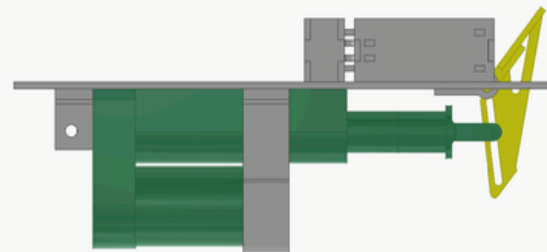




# 結合機構 - 閘門機構設計

Type 1. 線性馬達驅動 ( 如右上圖 )

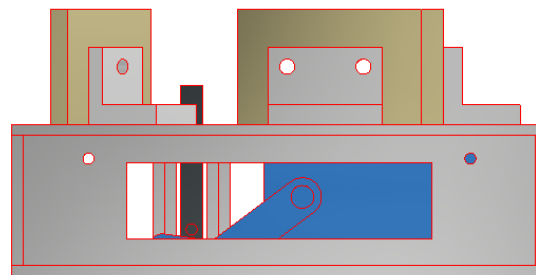
- ❑ 黃色：閘門
- ❑ 綠色：推桿
- ❑ 灰色：板材



Type 2. 伺服馬達驅動 ( 如右下圖 )

- ❑ 藍色：伺服馬達與擺臂
- ❑ 黑色：閘門

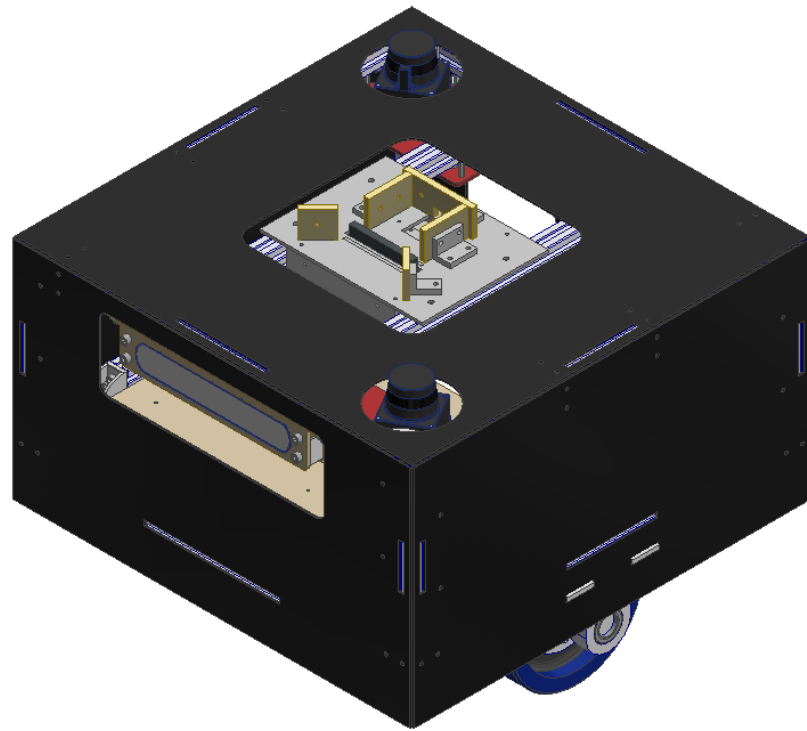
由於線性馬達驅動體積較大，不適合用於本期計畫之機器人實作上。另外，由於伺服馬達體積較小，且扭矩大小種類較多，因此使用於本期計畫。同時，為避免伺服馬達之輸出軸直接受力，機構設計上使用金屬板與槽的設計，讓受力主要落於金屬加工件上，避免伺服馬達損壞。



# 車殼

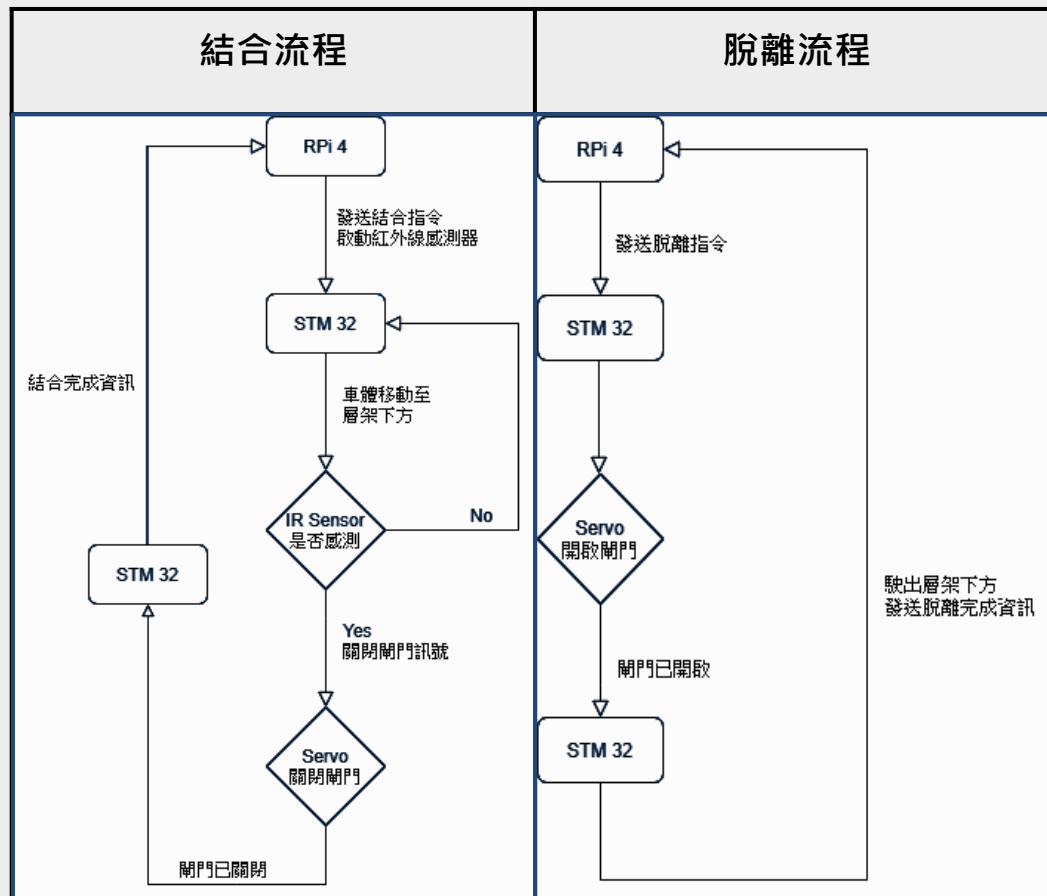
為保護內部電路與機電元件，車體外部會加裝上一外殼設計。

- 片裝板材設計：因車體為鋁擠骨架，故使用片裝設計外殼，將板材直接鎖至骨架上，方便組裝。
- 壓克力板材質：由於外殼若使用金屬材質，可能會導致金屬屏蔽效應，因此本計畫採用黑色壓克力板，可避免內部元件直接接觸外部環境，同時也可達到美觀效果，如右圖黑色板材部份。



# 層架結合控制

1. 欲進入結合模式時，運算單元 ( RPi 4 ) 會發送結合指令開啟紅外線感測器運作。
2. 相機、光達同時定位層架位置，機器人駛入層架底部。
3. 機器人頂端之紅外線感測器感測肋機構，伺服馬達將閘門關閉。
4. 微控制器 ( STM32 ) 回傳閘門關閉訊號至運算單元 ( RPi 4 ) 。
5. 完成結合控制。



# 底盤控制

## ➤ 馬達系統識別

- 輸入訊號：步階函數 [volt]
- 輸出訊號：馬達轉速 [rad/s]
- 訊號週期：25 [Hz]
- 辨識軟體：

*MATLAB System Identification Toolbox*

- 系統函數：

$$P(z) = \frac{0.3276z + 0.2155}{z^2 - 1.237z + 0.2814}$$

## ➤ 控制架構

- 輸入訊號：移動命令  $v : (m/s)$   $\omega : (rad/sec)$
- 根據差速輪控制公式，可轉換為車輪輸入訊號：

- 左輪輸入訊號：

$$r_{left} = v - \frac{\omega \times L}{2} \times \frac{1}{R}$$

- 右輪輸入訊號：

$$r_{right} = v + \frac{\omega \times L}{2} \times \frac{1}{R}$$

其中， $L$  為兩車輪距離， $R$  為車輪

半徑。

## ➤ PID Controller

依照PID公式，可得馬達期望電壓公式：

$$V(k) = V(k-1) + 0.018E(k) - 0.01689E(k-1)$$

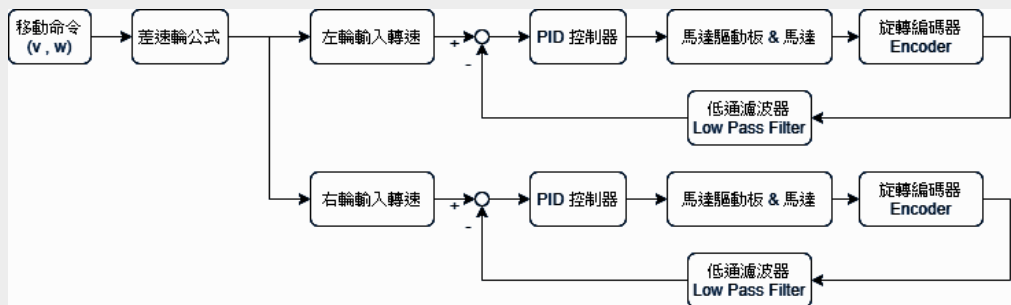
## ➤ Low Pass Filter

馬達輸出使用移動平均濾波器 (Moving Average Filter)  
· 依照下列公式進行濾波：

$$\omega_{filtered}(k) = \frac{\omega_{raw}(k) + 2\omega_{raw}(k-1) + \omega_{raw}(k-2)}{4}$$

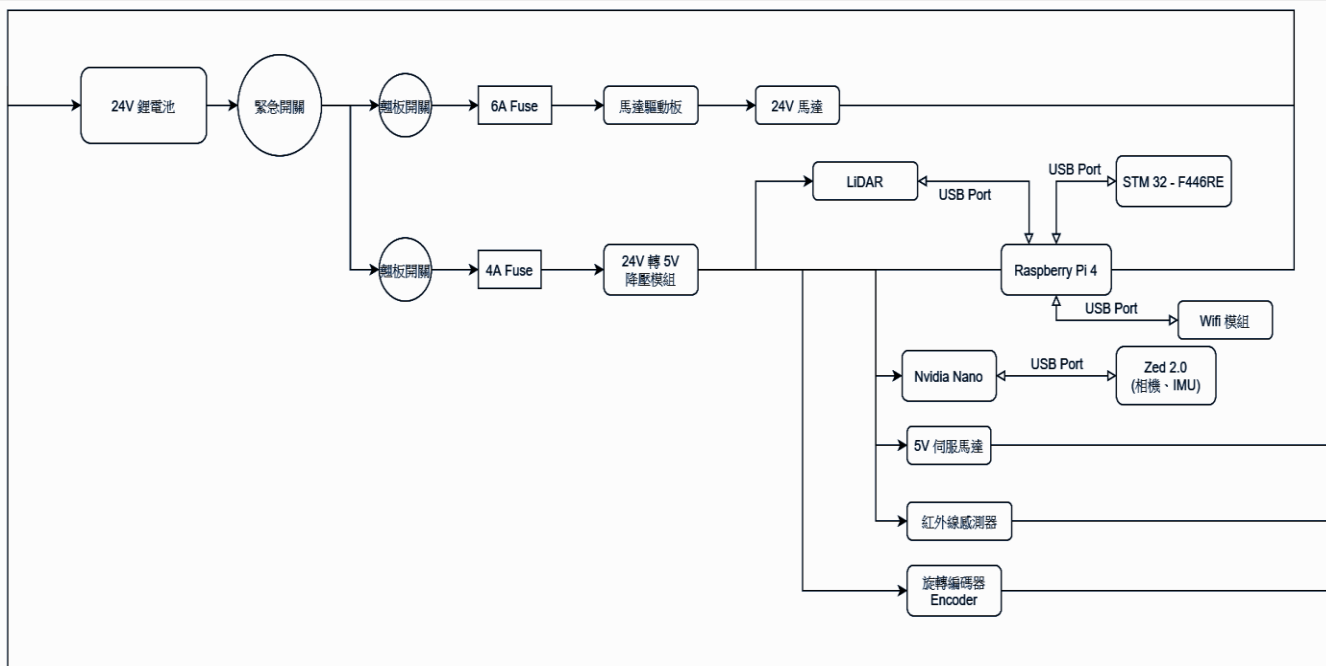
根據上式，可知馬達系統會有一個周期時間的延遲。

## ➤ 控制架構：



# 機電元件與配置

本次計畫使用之機電元件如右列表、電路配置如下圖所示。



感測器	數量	備註
旋轉編碼器 (Encoder)	2	
24 伏直流馬達 (24V DC Motor)	2	
馬達驅動控制板 (Motor Driver)	1	
慣性測量單元 (IMU)	1	內建於 Zed 相機。
光達 (LiDAR)	2	
Zed2 相機 (Camera)	1	
樹莓派 4 代 (Raspberry Pi 4)	1	
微處理器 (STM32 F446RE)	1	
微處理器 (Nvidia Nano)	1	
伺服馬達 (Servo)	1	
紅外線感測器 (IR Sensor)	1	
24 伏鋰電池 (24V Battery)	1	
24 伏轉 5 伏降壓模組 (24V to 5V Converter)	1	
24 伏轉 12 伏降壓模組 (24V to 12V Converter)	1	
緊急停止開關 (E-Stop Switch)	1	
翹板開關 (Rocker switch)	2	

# 軟體部份

# 運動分析

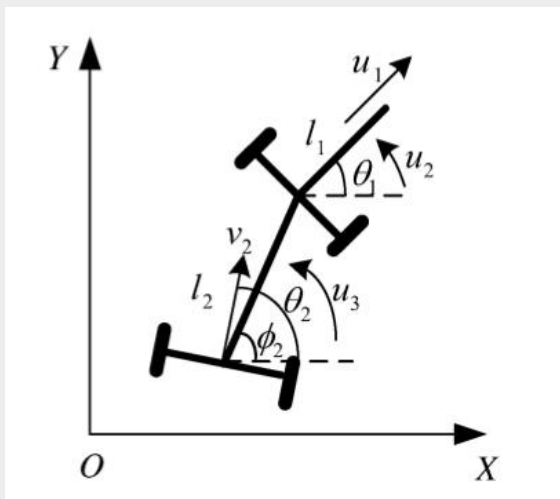
文獻 [1]，探討了 **Double-Steering** Tractor-Trailer Mobile Robot (DSTTMR) 的運動模型。

當  $(\theta_1 - \phi_2) - (\theta_2 - \phi_2)$  過大，會發生推力不足，等於  $\pi/2$  則產生死點。



Single-Steering

DSTTMR

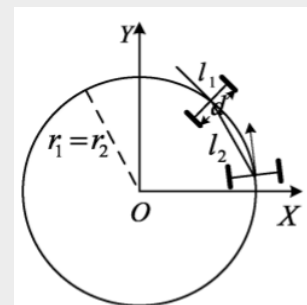
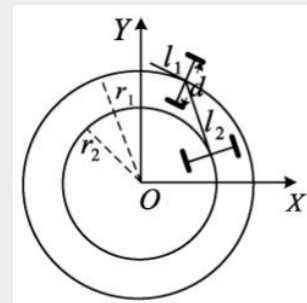


$$\mathbf{c} = [x_1, y_1, \theta_1, \theta_2, \phi_2]$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{l_2 \cos(\theta_2 - \phi_2)} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}$$

$$v_2 = u_1 \cdot \frac{\cos(\theta_1 - \phi_2)}{\cos(\theta_2 - \phi_2)}$$

Single-Steering



Double-Steering

[1] J. Yuan, F. Sun and Y. Huang, "Trajectory Generation and Tracking Control for Double-Steering Tractor-Trailer Mobile Robots With On-Axle Hitching", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, No. 12, Dec. 2015.

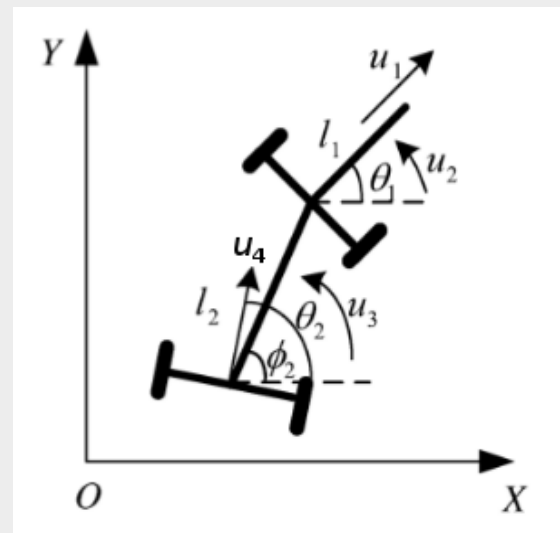
# 運動分析

本專案載具在結合層架後，兩台載具皆具有 Steering 與 Driving 功能，故稱為 **Double-Steering Double-Driving** Mobile Robot (DSDDMR)，可解決 DSTTMR 大角度受力與死點問題。

DSDDMR 三種運動模式：

1.  $\theta_1 - \phi_2 = -(\theta_2 - \phi_2) \rightarrow \text{Double-Steering}$
  2.  $(\theta_1 - \phi_2) = (\theta_2 - \phi_2)$
  3.  $\theta_1 - \phi_2 = \pm\pi/2$   
 $\theta_2 - \phi_2 = \mp\pi/2$
- } Double-Steering Double-Driving

DSDDMR

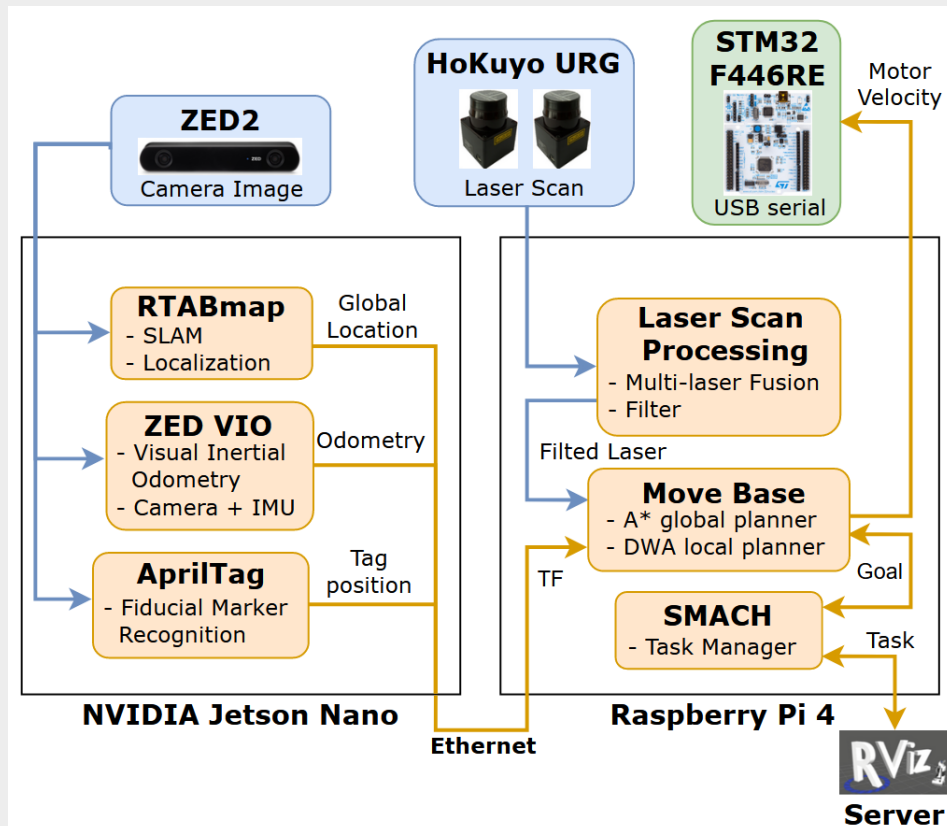


$$u_4 = u_1 \cdot \frac{\cos(\theta_1 - \phi_2)}{\cos(\theta_2 - \phi_2)}$$

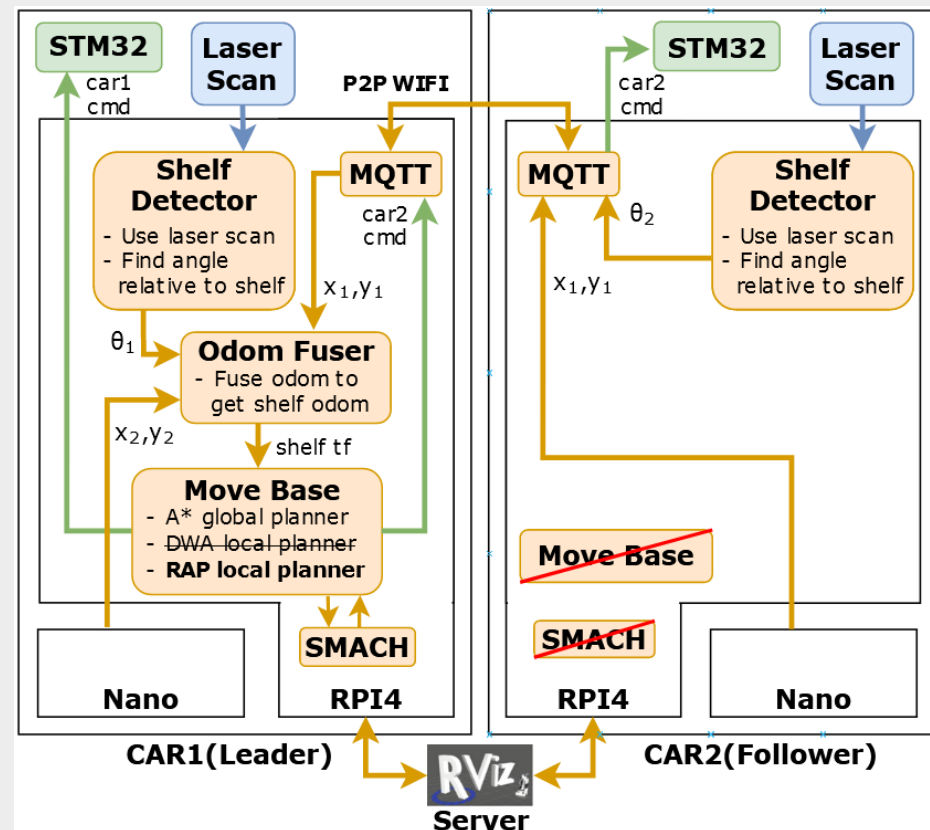


# 軟體架構圖

## 單台車之軟體架構圖



## 協同搬運之軟體架構

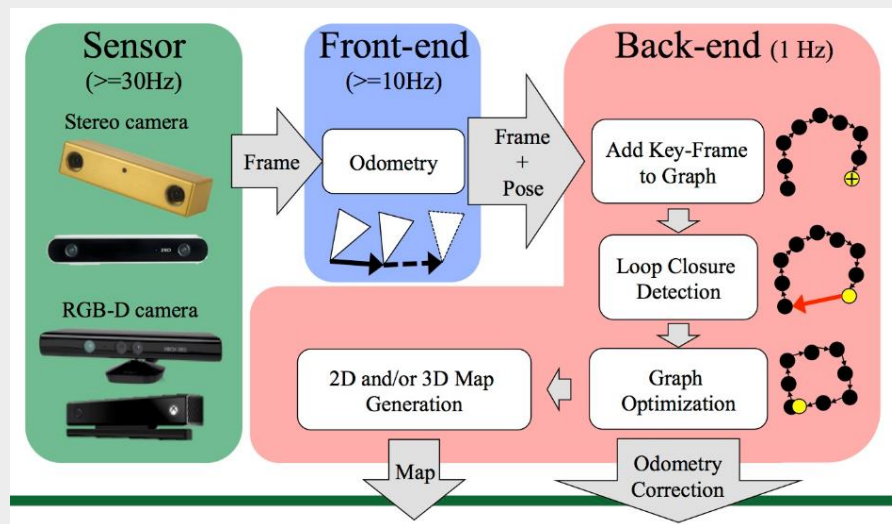


- Sensor
- Algorithm
- Command

# ZED 相機定位

RTAB-map (Real-Time Appearance-Based Mapping)，是一種 Visual SLAM 演算法，輸入深度相機影像與 Odometry 之後，即可得到由視覺特徵點組成的 Feature Map，往後在任務中進行導航時，即可利用 Feature Map 進行定位。

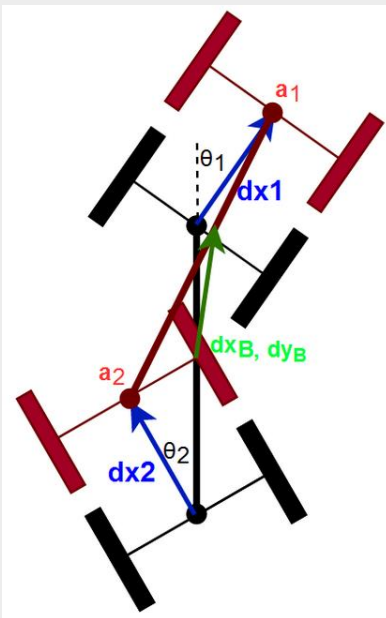
此處的相機來源使用 ZED2 雙目相機，Odometry 使用 ZED2 內建的 VIO (Visual Inertial odometry)



# Odom Fuser

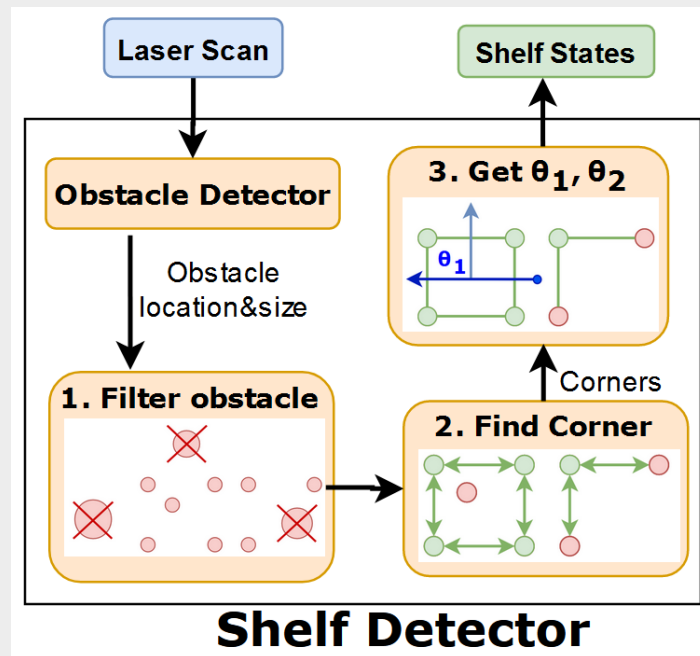
協同搬運時，兩台小車需要將定位資訊整合在一起，來得到整台大車的定位。

$$dx_b = \frac{dx_1 \cos \theta_1 - dx_2 \cos \theta_2}{2}$$
$$dy_b = \frac{dx_1 \sin \theta_1 - dx_2 \sin \theta_2}{2}$$
$$d\theta_b = \tan^{-1} \left( \frac{dx_2 \cos \theta_2 + dx_1 \cos \theta_1 + L}{dx_2 \sin \theta_2 + dx_1 \sin \theta_1} \right)$$



# Shelf Detector

用車上的Laser scan 來辨識層架的四支支柱，並以此找出小車與層架的相對夾角( $\theta_1, \theta_2$ )

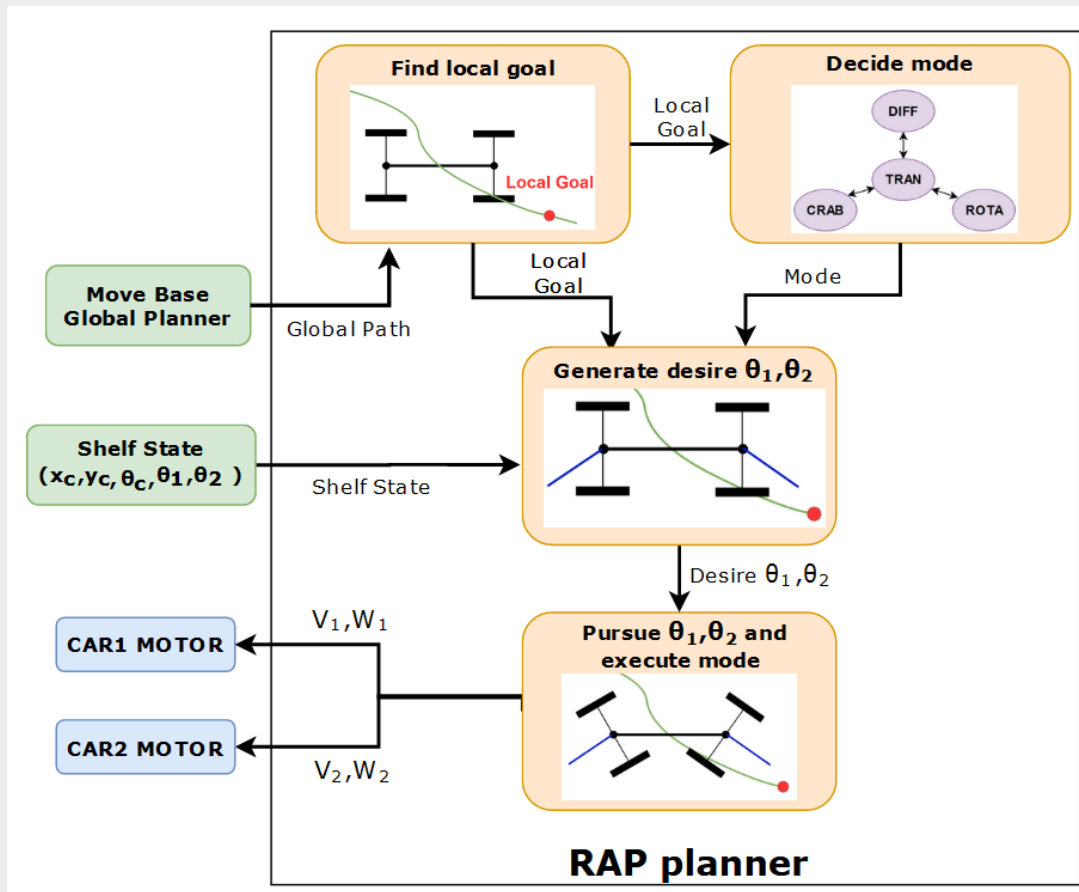


# 協同導航 (RAP Planner)

RAP (Relative angle pursuit) Planner 是一套專門為了(DSDDMR) 而設計的控制方法，此控制方法約可分成兩個層級。

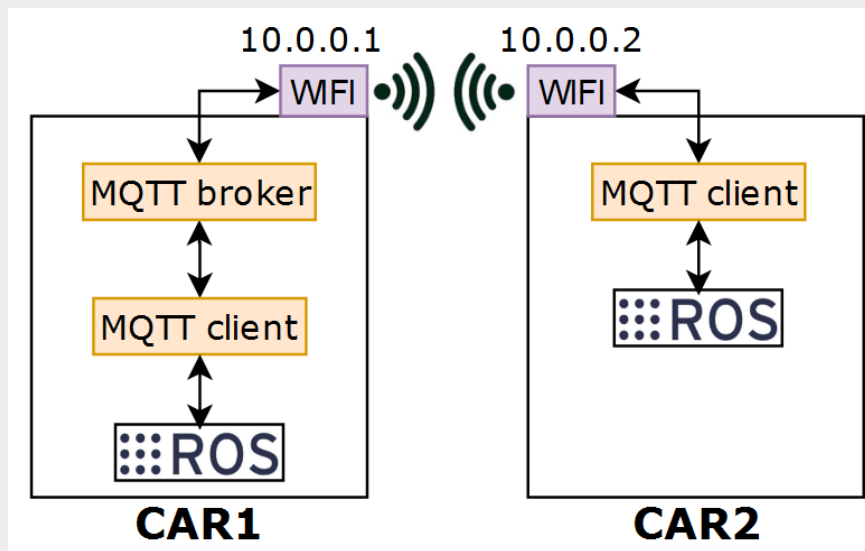
第一個層級會在 Global Path 上尋找可行的 Local Goal，並以此來決定控制器模式。

第二個層級會計算出前後兩台小車應該追逐的相對夾角與控制命令，同步驅動前後兩車的馬達，完成命令。

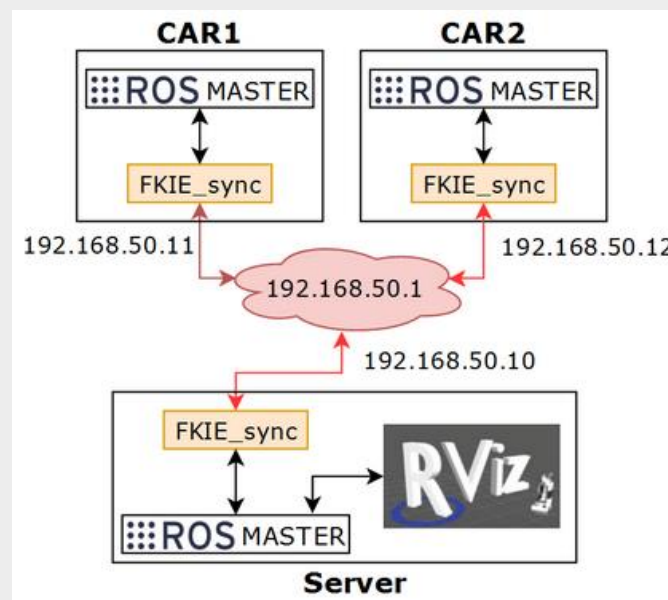


# 通訊與資料處理

MQTT 是輕量級通訊協定，應用於兩車間的 Peer-to-peer 通訊。負責傳送定位、發佈控制命令。



FKIE 能讓同個網域下的 ROS-MASTER 彼此溝通，應用於小車與 Server 溝通，負責將資料傳送到 Server 上進行數據視覺化。



# 有限狀態機

使用 ROS-SMACH 框架實現有限狀態機架構，主要分為三種模式：

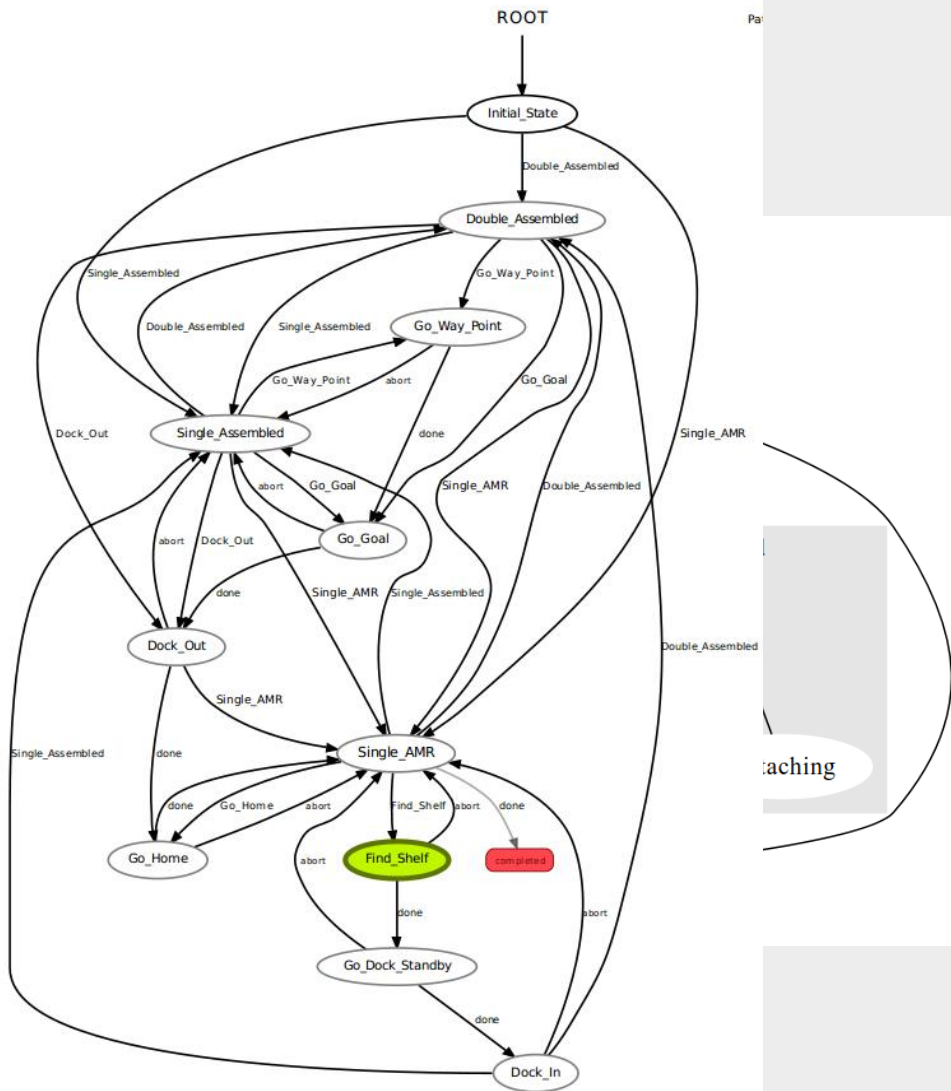
1. Single AMR
1. Single Assembled
1. Double Assembled

各個模式下，有三至四種狀態之間進行切換。

本次開發的重點在於 Double Assembled 模式下的通訊與運動規劃。

Navigation

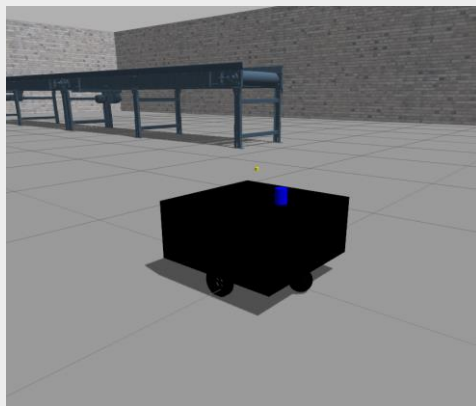
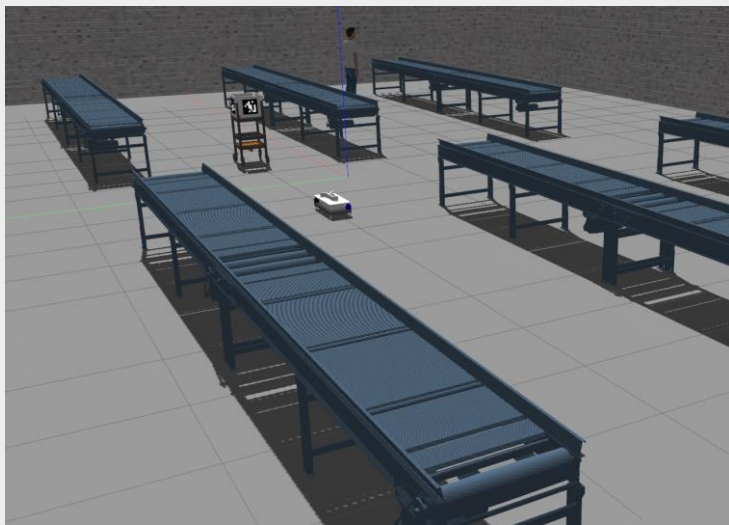
MC



taching

# 模擬環境

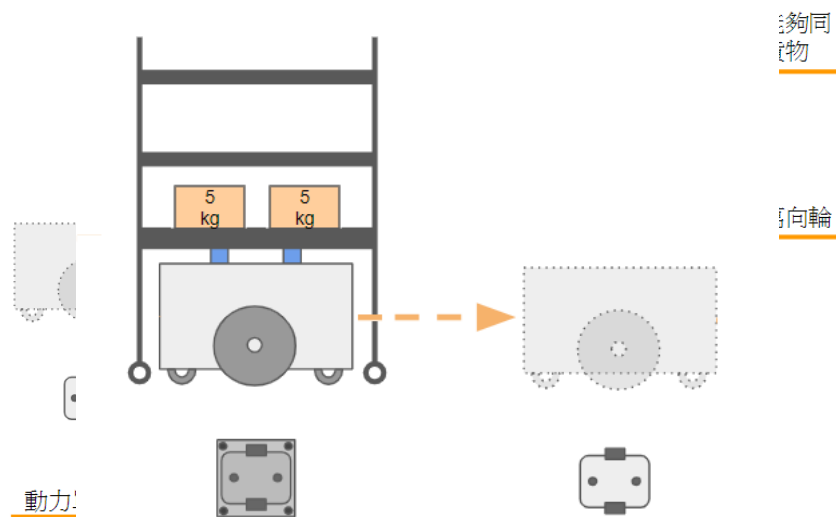
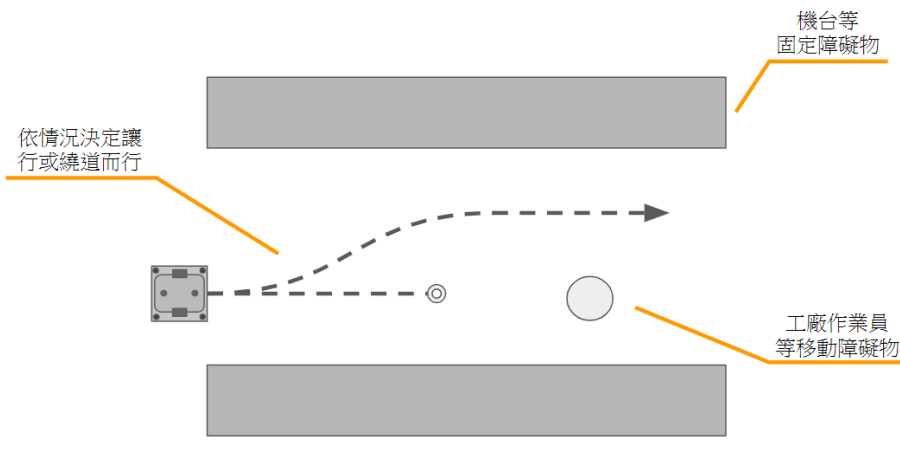
使用 Gazebo 軟體建構工廠生產線的模擬環境，建構了在現今生產線中無人載具可能會面臨的場景與障礙物。



# 實測情境

## 小型貨物運輸

1. 負重
2. 結合
3. 搬運
4. 脫離

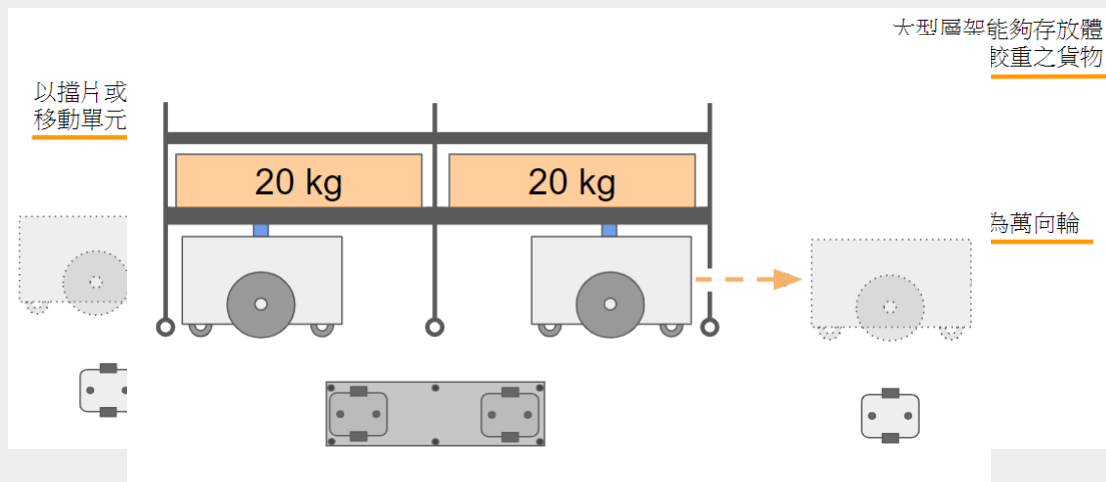
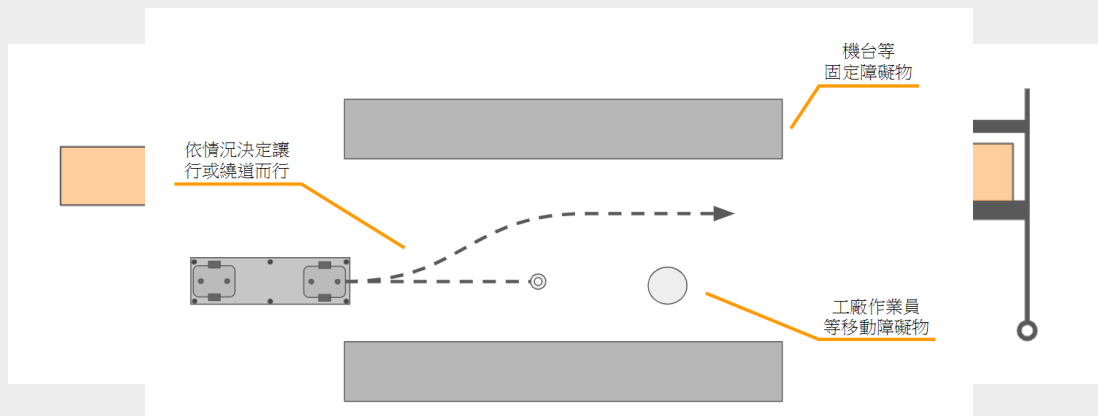




# 實測情境

## 大型貨物運輸

1. 負重
2. 結合
3. 搬運
4. 脫離



# 結論

特點：

1. 多機器人協同搬運。
2. 雙制動、雙轉向之移動模式有最大的移動自由度。
3. 模組化的載具單元，可大幅提昇載重負荷。

困難：

1. 目前依靠雙眼視覺相機定位，環境需有特徵。
2. 多機器協同合作會有定位困難、時間不同步、資料融合不易 ... 等問題。
3. 執行協同搬運時，當載具與層架夾角 90 度載具受力最不穩定。

改善方向：

1. 使用 ROS2 或其他種通訊方式。
2. 發展 Local Planner 避障的導航方法。