

## 第四章 規則控制器應用於超音波馬達定位控制

本章節將介紹規則控制器(Rule-based Controller, 簡稱 RBC), 並說明如何使用簡易的控制規則, 來自動產生控制信號, 可以有效的控制直線型超音波馬達 (Linear Ultrasonic Motor, 簡稱 LUSM) 定位, 當負載改變或 LUSM 的運動參數改變時, 依然可以改變其控制信號, 達到定位的要求。最後參考 RBC 控制 LUSM 的結果, 建立此超音波馬達定位的數學模型, 並使用 Microchip 公司所生產的 PIC18F452 微控制器為 RBC 的核心, 此微控制器具有 8-bit 資料寬度與 16-bit 指令寬度, 它是一顆高度整合型的微控制器, 本篇論文就所使用到的特殊功能, 做以下簡介:

1. 記憶體容量: 32K bytes 程式記憶體、1.5K bytes 資料記憶體與256 bytes EEPROM 資料記憶體的容量, 本控制器皆會使用到此3組記憶體。
2. 執行速度: 最高可輸入40MHz 震盪頻率、最短的指令週期0.1 $\mu$ s, 本控制器使用最高頻率運作。
3. 計數器(Timer): 內含4個Timer, 可選擇使用外部信號輸入或內部信號觸發, 外部信號輸入最高頻率為10MHz, 本控制器使用2個Timer。
4. 脈波調變輸出(Pulse Width Modulation, 簡稱PWM): 內含2組PWM, 最高解析度為10 bits; 使用8-bit解析度, PWM最高頻率輸出為156.25KHz; 使用10-bit解析度, PWM輸出的最高頻率輸出為39.06KHz; 本控制器使用2組PWM輸出。
5. 類比轉數位(ADC): 內含1個10-bit ADC, 可使用多工器選擇8組外部輸入, 本控制器使用1組類比信號輸入。

### 4.1 規則控制器應用於 LUSM 定位控制

如圖 4-1 所示, 為 RBC 應用於 LUSM 定位控制方塊圖, RBC 會不斷去送出控制電壓( $v_0$ )至 Driver, 當  $e(n)=0$  時, 也就是 LUSM 的期望值位置( $\bar{y}_d$ )等於實際值位置( $\bar{y}_s$ ), 則控制電壓為 0。

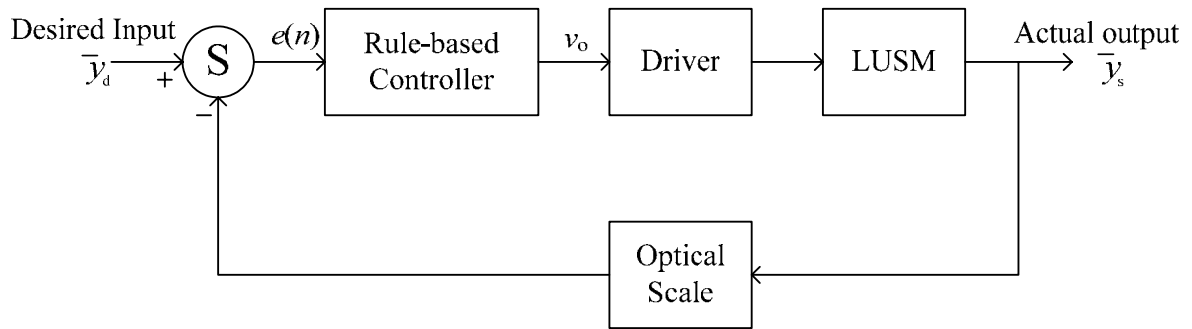


圖4-1 RBC 應用於 LUSM 定位控制方塊圖

## 4.2 LUSM 的非線性數學模型

如圖 4-2 所示，為 Nanomotion 公司所提供的 LUSM(HR4)數學模型，可以很清楚的觀察到 LUSM 數學模型的非線性，且當電壓約小於 1V 時，此時因 LUSM 輸出的動能無法克服靜摩擦力，所以在此區的電壓 LUSM 是完全靜止的，此區的電壓稱為死區電壓(Dead zone)，此電壓會隨著工作的時間、摩擦介質的溫度與負載的重量而改變，為了快速與準確的控制 LUSM，如何偵測死區電壓將是一件重要的工作，此電壓的偵測方法將在第 4.4 章節中詳細介紹。

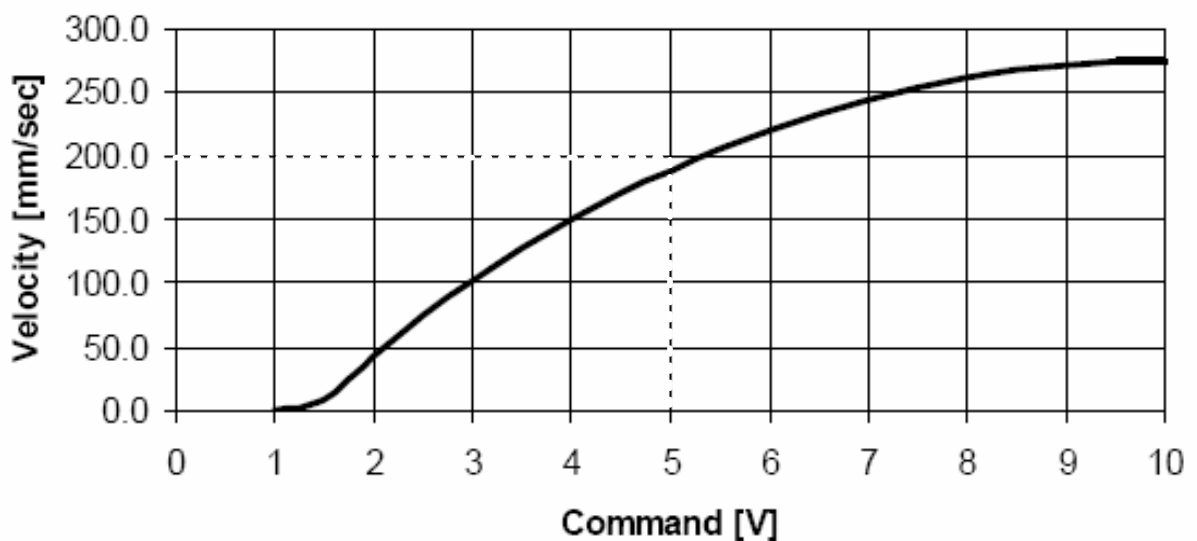


圖4-2 LUSM 控制電壓對應移動速度曲線圖

(圖片來源：Nanomotion 公司)

### 4.3 規則控制器的處理流程

RBC 的控制流程可分成 3 大部份，主程式、Timer 計數與中斷副程式如圖 4-3 所示，為規則控制器主程式流程圖：

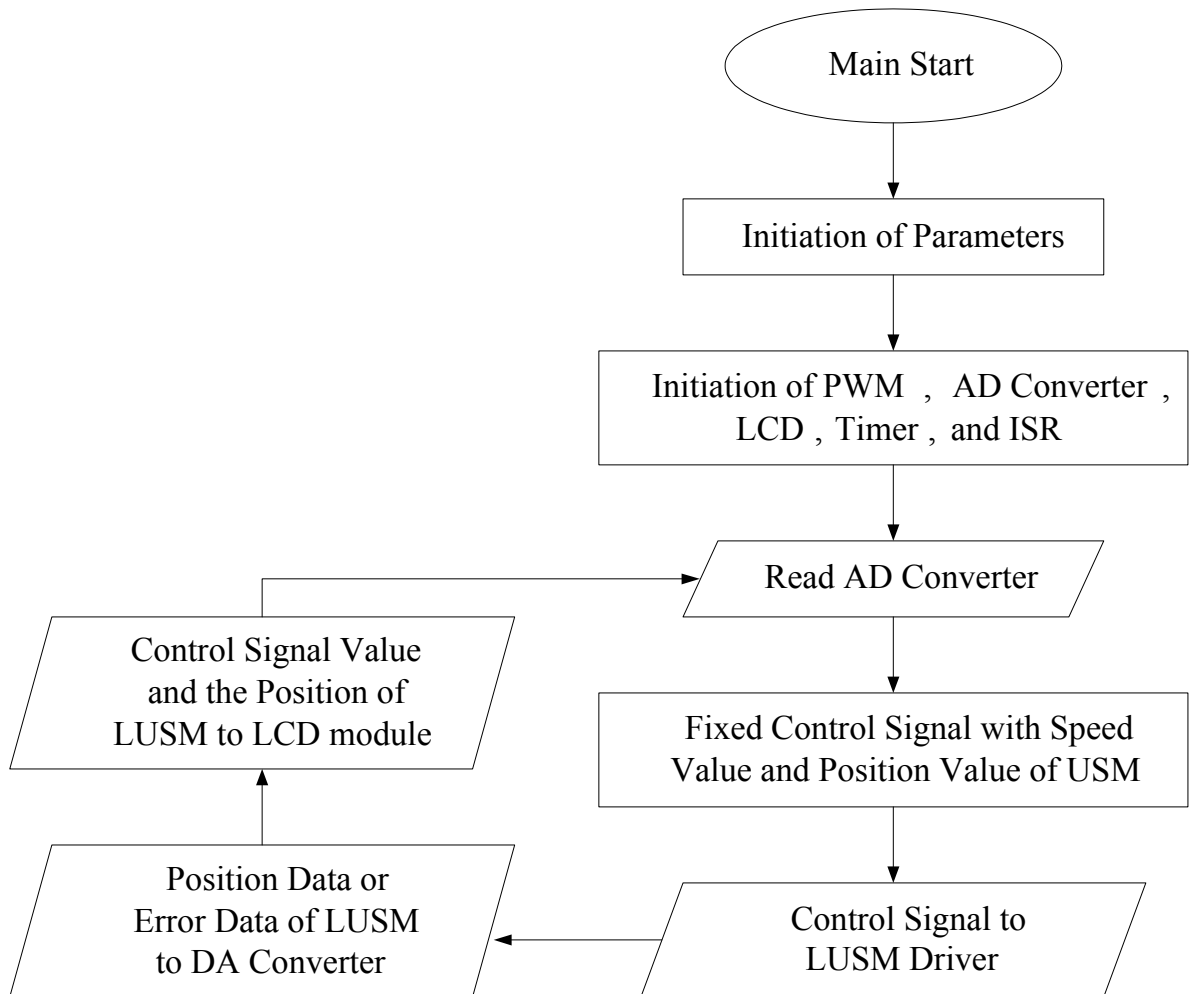


圖4-3 RBC 處理流程圖

1. Initiation of Parameters：將所需要使用的參數初始化。
2. Initiation of PWM, AD Converter, LCD, Timer, and ISR：將 PIC18F452 內部的 PWM, 功能開啟，並設定 8 bits 解析度；將 PIC18F452 內部的 AD Converter 功能開啟，並設定 10 bits 解析度；初始化外部的 LCD Module；將 PIC18F452 內部的 Timer 功能開啟並設定為外部信號觸發(接至光學尺的輸出信號)，並開啟 Timer 溢位時產生最高中斷向量。

3. Fixed Control Signal with Speed Value and Position Value of LUSM：控制器根據超音波馬達定位的位置與速度，修正控制信號的方法，將在第 4.4 節中說明。
4. Control Signal to LUSM Driver：將控制信號，透過 PWM 的方法送至超音波馬達驅動器。
5. Position Data or Error Data of LUSM to DA Converter：將 LUSM 現在的位置或起點與終點的相對距離  $l(n)$ ，輸出至 12 bits DA Converter，以便使用示波器觀察 RBC 追蹤期望值的響應曲線圖。
6. Control Signal and the Position Value of LUSM to LCD Module：將期望值 (LUSM 期望到達的位置)與實際值(LUSM 實際的位置)顯示在 LCD 模組觀察，並大約記錄下  $l(n)$ 與控制電壓，作為 CMAC 學習 LUSM 的數學模型。

### 4.3.1 Timer 執行流程圖

Timer 被啟動後，Timer 便獨立運作等待外部信號觸發(A Signal of Optical Scale)，不受主程式與中斷副程式影響，當外部信號觸發 3 次時，如圖 4-4 所示，代表 LUSM 移動的  $10\mu\text{m}$ (第 4.3.2 節說明)，此時會立刻產生溢位中斷，執行中斷副程式(Interrupt Service Require, ISR)，由中斷副程式判斷 LUSM 向左移動或向右移動(光學尺的信號 B 為 0，代表 LUSM 向右移動；光學尺的信號 B=1，代表 LUSM 向左移動)，Timer 控制流程如圖 4-5 所示。

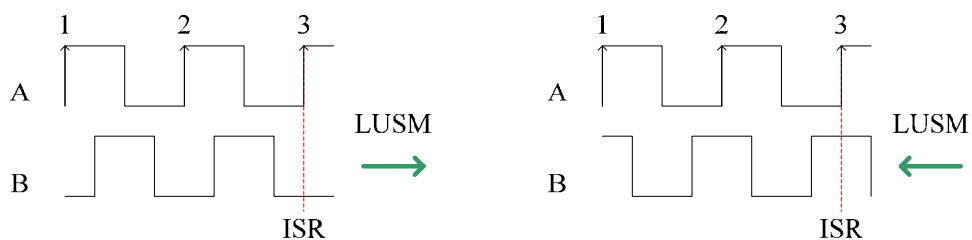


圖4-4 光學尺的信號輸出

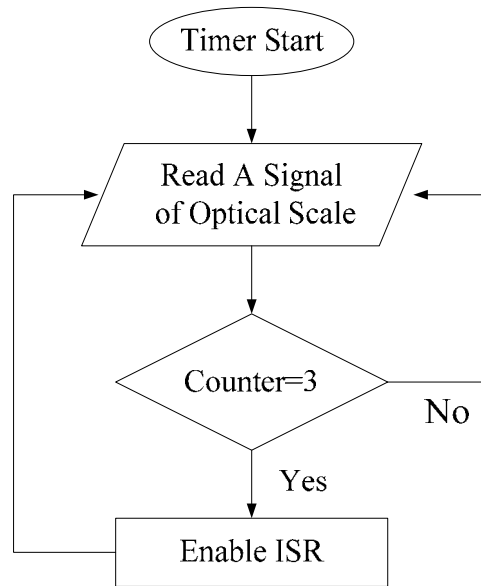


圖4-5 Timer 執行流程圖

### 4.3.2 中斷副程式的控制流程

如圖 4-6 所示，為中斷副程式流程圖，當 Timer 產生溢位時，會立刻去執行此中斷副程式，當此副程式在執行時，所有的中斷將會被停止，此副程式只須計算與儲存目前 LUSM 的位置(實際值)，並判斷是否與期望值相同，若相同，則立刻產生停止信號命令 LUSM 停止、重新啟動中斷功能、退出此中斷副程式；若不同，則重新啟動中斷功能、退出中斷副程式；其它的運算與信號控制皆在主程式執行，以減少執行此中斷副程式所需的時間。以 Microchip 公司所提供之 PIC18F452 技術手冊說明，依指令功能不同，每一個指令週期約在 0.1~0.3 $\mu$ s 間，本副程式約可以在 8 $\mu$ s 以內執行完畢。

如圖 4-2 所示，當控制器最高的輸出控制電壓為 5V，使得超音波馬達最高的移動速度約為 200mm/s，此時光學尺輸出的方波頻率為 60KHz，光學尺移動速度對應輸出方波頻率如圖 4-7 所示、計算如 4-3 式，遠比 PIC18F452(Timer1 在非同步計數模式下)可接受最高的外部觸發信號 16.66MHz 小；當 Timer 計數 3 次時，代表 LUSM 移動 10 $\mu$ m，如 4-4 式，所以最短的觸發週期為 50 $\mu$ s，如 4-5 式，遠大於中斷副程式執行所需的時間，以保證不會有資料遺失的情形發生。

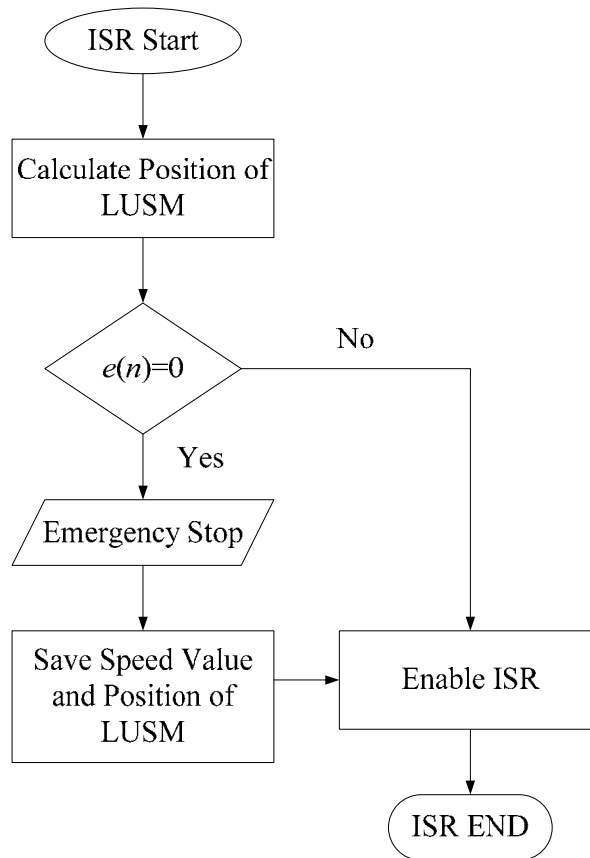


圖4-6 中斷副程式流程圖

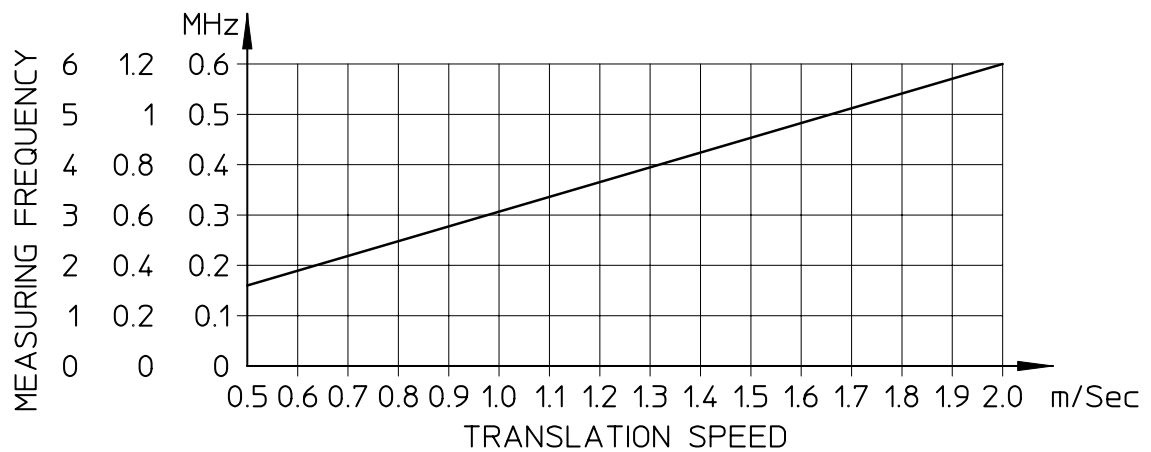


圖4-7 光學尺移動速度對應輸出頻率

(圖片來源：GIVI MISURE 公司)

$$f(200\text{mm/s}) = \frac{600\text{KHz}}{10} = 60\text{KHz} \quad (4-3)$$

$$f(10\mu\text{m}) = \frac{600\text{KHz}}{2000,00} = 3\text{Hz} \quad (4-4)$$

$$T(60\text{KHz}) = \frac{3}{60\text{K}} = 50\mu\text{s} \quad (4-5)$$

#### 4.4 規則控制器的誤差修正方法

經由多次反覆實驗發現，超音波馬達在定位的過程中，歸納出以下 4 種因素會造成定位少許的誤差，此誤差值也會因 LUSM 向右移動與向左移動而有所不同：

1. 微控制器的反應時間：微控制器需要時間將光學尺送回來的串列資料轉換成並列資料(實際值)，再將期望值與實際值做運算與比較，最後將結果透過 PWM 輸出至 LUSM 驅動器上，此信號會時間延遲的情形產生。
2. LUSM 驅動器的反應時間：LUSM 驅動器接收到控制信號輸出正弦波至 LUSM 也會有反應時間。
3. 摩擦力不同：在相同的控制條件下，LUSM 向左移動與向右移動所產生的定位誤差不同，因 LUSM 本身有不同大小的靜摩擦力與動摩擦力，且 LUSM 在不同位置時，本身的靜摩擦力與動摩擦力也會不同。
4. LUSM 的慣性：LUSM 也會因慣性大小的緣故，產生定位不同大小的誤差值，此誤差值  $error(v)$  與 LUSM 移動的速度、負載重量的大小有關。

綜合以上因素，可以得知第 1~3 項因素是無可避免的結果，而負載重量的改變是測試控制器性能的條件，唯有 LUSM 移動的速度是我們可以控制的變數，速度越慢，誤差越小，速度越快，誤差越大，為了快速又準確的將 LUSM 定位，本篇論文提出一套有效又簡易的修正方法，來修正超音波馬達因速度與慣性所產生的定位誤差。

當終點(期望值) 位於起點(實際值)右方時，控制器會送出一電壓來修正起點(實際值)與終點(期望值)的相對距離，此電壓由 0V 開始增加至 5V，若增加至 1.5V 時，LUSM 開始向右移動，此電壓稱為右移的死區電壓( $v_{sr}$ )，當下次 LUSM 需要向右移動時，控制電壓將會從  $v_{sr}$  開始增加，以減少控制器的反應時間；當終點(期望值) 位於起點(實際值)左方時，以相同的控制方法取得左移死區電壓( $v_{sl}$ )，並將  $v_{sr}$ 、 $v_{sl}$  分別儲存於記憶體中。

S: LUSM 的起點

E: LUSM 的終點

$v$ : LUSM 移動至終點前的速度

$error(v)$ : 在速度  $v$  停止時，所產生的定位誤差

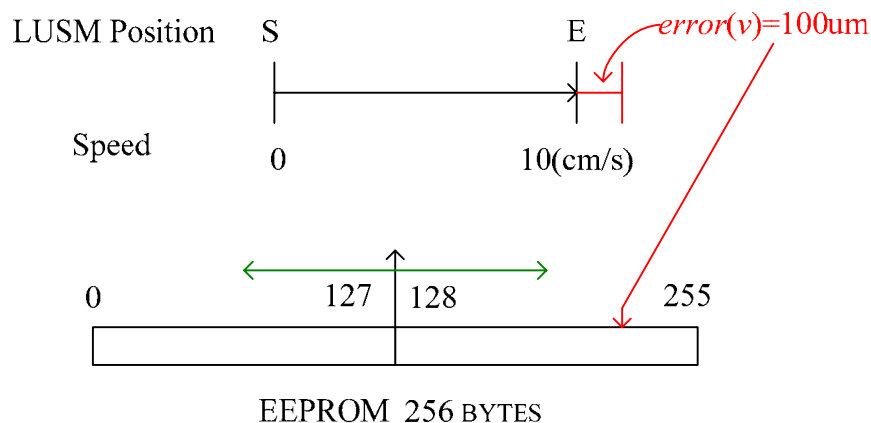


圖4-8 LUSM 定位誤差修正方法

如圖 4-8 所示，當 LUSM 由起點快速移至終點時，RBC 會送出一停止信號，此時 LUSM 會因停止時的速度與負載重量不同，產生不同大小的慣性位移，稱之為定位誤差值，為了修正此誤差值，將 LUSM 停止前的速度  $v$  當位址，誤差當資料  $error(v)$ ，存入 PIC18F452 微控制器內的 EEPROM，並將 EEPROM 等分為 2，



分別儲存向左位移與向右位移的定位誤差值，因為在第 3 項結論中可以發現 LUSM 向左移動與向右移動會產生不同的定位誤差，所以須將左移誤差與右移誤差個別儲存。主程式會反覆去比較目前 LUSM 移動的速度與 LUSM 距離終點的長度，是否與儲存在  $v$  位址的資料  $error(v)$  相同，若相同，則立刻送出一停止信號命令 LUSM 停止，LUSM 會因相同條件下產生相同慣性位移，可以有效提升定位性能，在 LUSM 數學模型或負載條件改變時，也會自動修正  $error(v)$  的權值，當下次遇到相同條件時，可以有效提升定位性能。