

# 太陽能農用機器人之研製

趙貴祥

張滄智

陳俊評

林書玄

國立勤益科技大學 電機工程系

chaokh@ncut.edu.tw { jackchan0210, max760905, angie0921127kimo }@yahoo.com.tw

## 摘要

本文之主要目的在於研製一太陽能農用除草機器人。文中使用太陽能電池對農用機器人供電及對電池充電，其太陽能電池使用 PIC18F8720 微控制器來控制升壓型轉換器之脈寬調變(PWM)信號，使得太陽能電池能在任何天氣條件下隨時以最大功率輸出。至於機器人本身之操控則使用 PIC16F877A 微控制器來進行控制，同時利用機器人本體之彩色智能攝影機回傳監控畫面，並以回傳之畫面與資料庫比對，進行圖形辨識進而拔除雜草。而遠端監控則採用藍芽所構成之無線感測網路系統，達成機器人行動之監控與操作。

**關鍵詞：**農用機器人、最大功率追蹤、太陽能電池、微控制器。

## 1. 研究動機與目的

台灣以農立國，近年來因為工業化發展、城鄉貧富差異大等因素，使得許多農家子弟向外發展，造成從事農業之人口不足，且有趨向老年化的現象。而經由新聞報導中亦時有耳聞，農民在中午工作時中暑不支倒地等意外頻傳。若能以機器代替人力，不僅使得人力不足之問題得以解決，亦能減少許多意外之發生。

近年來，由於石油價格飆漲，能源問題逐漸受到重視，綠色能源變成最流行之話題，其中又以太陽能最受到人們的喜愛，此乃因其來源取得容易、安全性高且不會造成環境污染，但其缺點為能量不易儲存，因此須藉由電力電子及電池儲能技術來儲存能量，以發揮太陽能之最大效能。

基於上述，本文研製一以太陽能供電之農用機器人，其具有巡視農田並辨識雜草及稻草之功能，進而完成拔除雜草之動作。且透過藍芽模組所構成的無線控制系統，本文設計一機器監控畫面，讓使用者可遠端監控機器人之動作情況，而在電源方面係採用太陽能電池供電，使得機器人在烈日下工作時，仍然可獲得充足之電力，以對機器人供電，並對電池充電，故可改善農田中電源不易取得及人力不足之問題，同時亦可達到節能減碳之成效。

## 2. 太陽能農用機器人之系統架構

本文所提之太陽能農用機器人，其硬體架構圖如圖 1 所示，該系統包括：機器人、藍芽模組、PIC 微控制器、太陽能電池、最大功率追蹤(MPPT)控制器、鎳氫充電電池、鎳氫電池充電電路及直流/直流轉換器(DC / DC Converter)等。

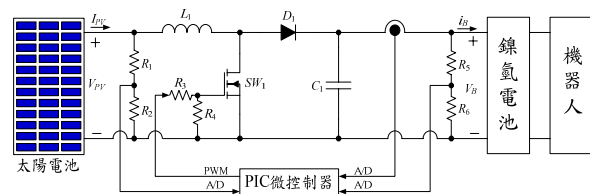


圖 1. 太陽能農用機器人之硬體架構圖

### 2.1 機器人設備

機器人構成之設備有藍芽模組、紅外線感測器、機械夾爪及彩色智能攝影機 [1]。

各項組件之功能敘述如下：

1. 藍芽模組：提供 Serial / Bluetooth 的切換，其藉由藍芽傳輸可使機器人之動態連結到手機 PDA 或者電腦。
2. 紅外線感測器：透過紅外線感應器，機器人便能分析與整個環境的距離。
3. 機械夾爪：當該機械爪上裝置有彈簧，使用者便不需要為了物件大小，而去控制機械爪的開合程度。
4. 彩色智能攝影機：可做即時圖形辨認，使機器人擁有能夠觀察彩色圖形並辨別圖形的智慧。

### 2.2 程式設計

程式設計部份可採用 Risbee 圖控式軟體、JAVA、Basic 或 C 語言。程式軟體有許多選擇，經由測試過後決定採用 C 語言來撰寫機器人的動作，並以 Microsoft Visual Studio 2005 軟體來設計程式，同時搭配 POB-TOOLS 的軟體進行編譯及燒入的動作。另外，亦進行機器人監控畫面之設計。

### 3. PIC 微控制器

#### 3.1 微控制器之基本組成

微電腦系統的分類中有所謂的多晶片系統、單晶片系統，而單晶片系統一般即通稱為微控制器。微電腦系統的基本組成如圖 2 所示，其中 CPU 為微電腦系統的核心，I/O 為 CPU 與外界溝通的管道，而記憶體則用來儲存所執行的程式碼或資料。

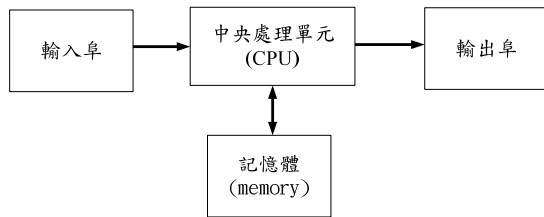


圖 2. 微電腦之基本組成

#### 3.2 主要特性

PIC18 為高性能的 RISC CPU，可由 C 的編譯器作最佳化的指令集，原始碼相容於 PIC16 及 PIC17，程式記憶體最大可達 128k bytes，而資料記憶體最大可達 3840 bytes。而 1k bytes 的 data EEPROM，最快可達 10MIPs，允許 DC~40MHz 振盪器輸入，並且內部具有 4 MHz~10 MHz 振盪器，而記憶體介面可擴充至 2M bytes 16 位元介面。

##### 3.2.1 週邊特點

PIC18 之週邊具有以下幾項特點：

1. 可提供 25mA/25mA 的高電流源/汲能力。
2. 擁有四個外部中斷功能。
3. 擁有 5 組計時計數模組：Timer1 與 Timer3 為 16 位元，並為次要時間振盪器，Timer2 與 Timer4 為 8 位元，Timer0 可規劃為 8 或 16 位元。
4. 擁有 5 組 CCP(捕捉/比較/PWM)模組，其各工作模式之解析度如下：
  - (1) 捕捉模式為 16 位元之解析度。
  - (2) 比較模式為 16 位元之解析度。
  - (3) PWM 輸出最大可達 10 位元之解析度。

##### 3.2.2 A/D 模式特點

有關 A/D 模式之特點說明如下：

1. 類比轉數位轉換器(ADC)為 10 位元之解析度，最多可達 16 通道，其示意圖如圖 3 所示。參考電壓可由供應的正負電源(V<sub>DD</sub> 及 V<sub>SS</sub>)或者外部輸入參考電壓(由 AN3 及 AN2 輸入)決定。
2. 可選擇 16 種低電壓保護單元(支援低電壓保護中斷)。
3. 雙類比較可控制輸入/輸出配置。

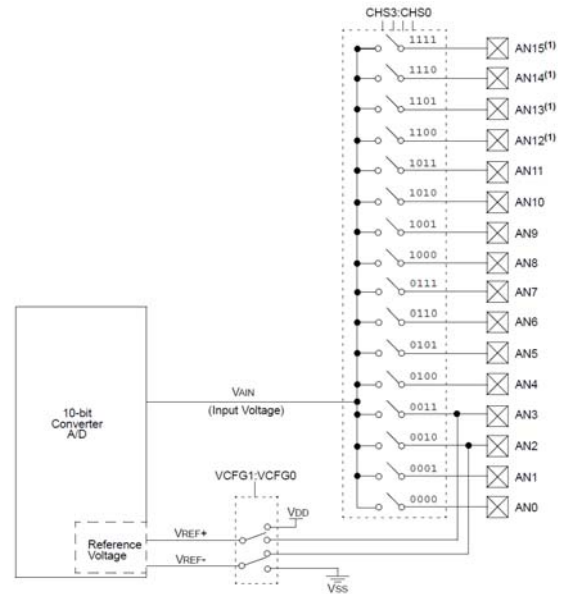


圖 3. 類比輸入通道示意圖

### 4. 太陽能充電電路

#### 4.1 太陽電池

太陽電池將接受的光能轉換成電能，且可視為由 P 型與 N 型半導體所組合而成。當太陽光照射時會產生電子電洞對，因而產生電流以供應給負載[2-5]。依照材料成份又可分为多晶矽、單晶矽、及非晶矽三種，其中又以單晶矽製成的轉換效率最高，但單晶矽的價格卻是最高的。其次為多晶矽再來為非晶矽，所以價格較為中等的多晶矽被廣泛接受使用，而非晶矽轉換效率低以及壽命較短，適合用於小功率電子產品。

根據一般常用太陽電池之物理特性數學模式，可知太陽電池輸出電壓與電流關係如式(1)所示。

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{qV_{pv}}{AK_bT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

其中：

$I_{pv}$ ：太陽電池的輸出電流(A)。

$V_{pv}$ ：太陽電池的輸出電壓(V)。

$I_{sat}$ ：太陽電池的逆向飽和電流。

$I_{ph}$ ：光電轉換電流。

$K_b$ ：波茲曼常數( $1.38 \times 10^{-23}$  J/°K)。

$q$ ：一個電子所含的電荷量( $1.6 \times 10^{-19}$  C)。

$T$ ：太陽電池表面溫度(°K)。

$A$ ：太陽電池的理想因數( $A=1 \sim 2$ )。

太陽電池之等效電路如圖 4 所示，其中  $I_{ph}$  為太陽電池產生之電流， $I_D$  為流過 PN 界面之電流， $R_{sh}$  與  $R_s$  分別為材料內部等效並聯與串聯阻抗， $I_{pv}$  與  $V_{pv}$  分別為太陽電池之輸出電流與電壓。

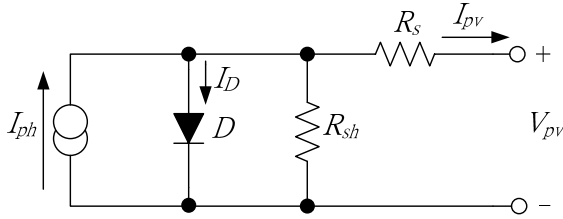


圖 4. 太陽電池之等效電路

## 4.2 太陽能最大功率追蹤

太陽電池輸出功率深受日照量與溫度影響，當溫度越高輸出功率降低，日照量越大輸出功率增加，太陽電池之輸出電流與輸出電壓的關係如圖 5 所示。為了使其能在當時日照量與溫度下輸出最大功率值，一般可調整與太陽電池連接之直流/直流轉換器(DC / DC Converter)的開關導通時間來達成此目標。

目前最大功率追蹤方法有定電壓法、擾動觀察法、增量電導法、功率迴授法、直線近似法、梯度法及模糊控制法等[6-8]，而本文將採用定電壓法。定電壓法之實施將首先量測出太陽電池在特定環境下之最大功率點的參考電壓，再藉由微控制器調整開關之導通時間，將太陽電池電壓固定在某固定電壓，使太陽電池能輸出最大功率。

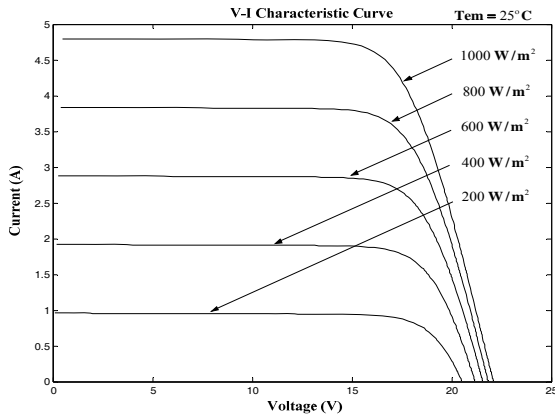


圖 5. 太陽電池輸出電流與電壓特性曲線圖

## 4.3 電池充電方法

目前較常採用之電池充電方法有以下幾種方法：

1. 定電流充電：即充電電流在充電過程中保持不變，當開始充電時，不會有大電流流入電池中，並且充電效率高，但要注意充電時間，若過充會導致電池內部的電解質滲出或毀損。
2. 定電壓充電：即保持固定的充電電壓，而此方法電路設計簡單，並不怕長時間的過度充電，但初期充電電流大，會造成電池的傷害，而充電末期之充電電流會很小，使充電時間過久。
3. 快速充電：即充電時以大於或等於其倍率充電電流充電，以達到減少充電時間之目的。

4. 分階段充電：開始以一定電流充電，充電一定時間後達到預定值時，改用另一電壓值充電的充電方法，如此可結合定電流及定電壓充電之優點[9]。

## 4.4 直流/直流轉換器[10]

本文係採用升壓型轉換器(Boost Converter)作電池充電控制。如圖 6 所示為升壓型轉換器之基本電路及其開關截止時與導通時之等效電路，其輸出電壓將大於輸入電壓。在分析電路前，先作以下五點假設：

1. 電路可操作於穩態下。
2. 定義切換週期為  $T$ ，開關導通時間為  $DT$ ，開關截止時間為  $(1-D)T$ ，其中  $D$  為責任週期。
3. 電感電流為連續(電流方向相同)。
4. 電容很大，輸出電壓  $V_o$  為定值。
5. 電路元件皆為理想元件。

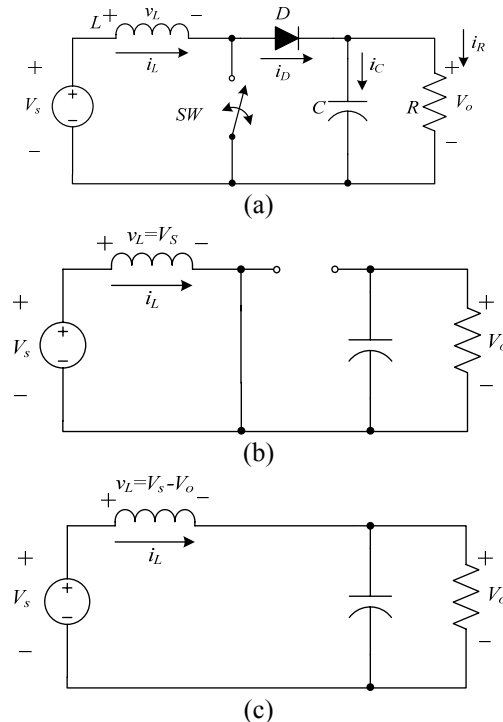


圖 6. 升壓型轉換器：(a)主電路；(b)開關導通時之等效電路；(c)開關截止時之等效電路

### 開關導通時之分析

當開關導通時，二極體( $D$ )逆向偏壓，故二極體截止，其等效電路如圖 6(b)所示。此時電流迴路之路徑由電源( $V_s$ )、電感( $L$ )與晶體開關( $SW$ )組成，電感上之電壓波形如圖 7(a)所示，並由克希荷夫電壓定律得

$$v_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \text{ 或 } \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (2)$$

因此，迴路中電感電流之變化率為正且定值，故當開關導通時電流會線性增加，其電感上之電流波形如圖 7(b)所示。而電感電流之變化率為

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \quad (3)$$

由(3)式可求得

$$(\Delta i_L)_{closed} = \frac{V_s DT}{L} \quad (4)$$

### 開關截止時之分析

由楞次定律(Lenz's Law)可得知，當開關由導通轉為截止時，因電感上之電流無法瞬間變化，故電感上感應負的電壓，因此二極體變成順向偏壓，並與電感形成一迴路。假設輸出電壓  $V_o$  為定值，則電感兩端電壓為

$$v_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (6)$$

電感電流之變化率為一負的定值，所以當開關截止時電流成線性下降變化，其電流波形如圖 7(b)在時間  $DT \sim T$  間所示。並由(6)式可得

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (7)$$

由(7)式解得

$$(\Delta i_L)_{open} = \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} \quad (8)$$

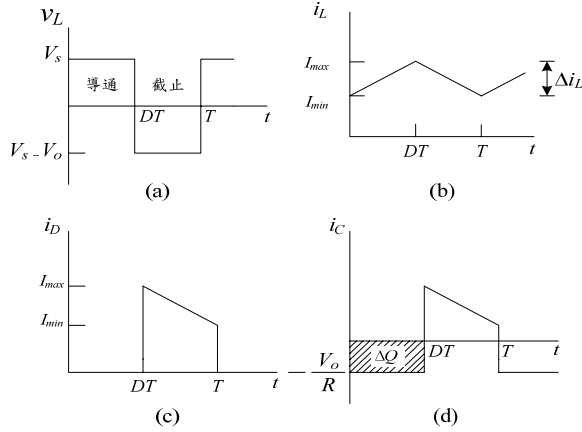


圖 7. 升壓型轉換器之波形：(a)電感電壓；(b)電感電流；(c)二極體電流；(d)電容電流

在穩態操作下，電感上之電流淨變化必須為零，利用(4)與(8)式得

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{V_s DT}{L} + \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad (10)$$

$$V_s DT + (V_s - V_o)(1-D)T = 0 \quad (11)$$

由(11)式可得知電感上之伏特-秒平衡，並可推得  $V_o$  為

$$V_o = \frac{V_s}{(1-D)} \quad (12)$$

因  $0 \leq D \leq 1$ ，故得  $V_s \leq V_o \leq \infty$ ，故此轉換器之輸出電壓恆大於或等於輸入電壓，因此其為升壓型轉換器。

表 1 為本文使用之太陽電池的規格，其將應用於接下來之升壓型轉換器元件的設計。

表 1 太陽電池規格

太陽電池	
額定最大輸出功率( $P_{max}$ )	1.26W
最大輸出功率點之電流( $I_{mpp}$ )	0.35A
最大輸出功率點之電壓( $V_{mpp}$ )	3.6V
短路電流( $I_{sc}$ )	0.43A
開路電壓( $V_{oc}$ )	4.5V

### 4.5 升壓型轉換器元件之設計

#### 電感設計：

由於能量不減定律，故輸入功率  $P_s$  等於輸出功率  $P_o$ ，即

$$V_s I_L = \frac{V_o^2}{R} = \frac{\left(\frac{V_s}{1-D}\right)^2}{R} = \frac{V_s^2}{(1-D)^2 R} \quad (13)$$

$$I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} \quad (14)$$

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (15)$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (16)$$

其中  $\Delta i_L$  選用  $(\Delta i_L)_{closed} = \frac{V_s DT}{L}$

且基於電流必須為連續，亦即電流為正，故  $I_{min} \geq 0$

$$I_{min} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s DT}{2L} \geq 0 \quad (17)$$

$$\frac{V_s}{(1-D)^2 R} \geq \frac{V_s DT}{2L} \quad (18)$$

$$\frac{V_s}{(1-D)^2 R} \geq \frac{V_s D}{2Lf} \quad (19)$$

$$L_{min} \geq \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (20)$$

### 電容設計：

由於開關的導通與截止會使得輸出電壓產生漣波，為了使輸出電壓更平穩，在大多數的直流/直流轉換器(DC / DC Converter)之輸出皆會並接一濾波電容來降低漣波電壓。由圖 7(d)，可計算出電容電荷之變化量( $\Delta Q$ )大小為

$$|\Delta Q| = \left(\frac{V_o}{R}\right)DT = C\Delta V_o \quad (21)$$

移項整理得

$$C = \frac{D}{Rf \frac{\Delta V_o}{V_o}} \quad (22)$$

經由上述推導可得電感及電容值，但於實際電路中仍需考慮耐壓及耐流，就電感的繞線線徑來說，必須先計算出電感電流之有效值後，再依需求選擇最適合的線徑，而電感電流有效值可由(23)式得到。

$$I_{L,rms} = \sqrt{(I_L)^2 + \left(\frac{\Delta i_L}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (23)$$

除了繞線線徑需大於  $I_{L,rms}$  外，其電感鐵心飽和電流亦必須大於  $I_{L,max}$ ，以及電感在開關導通與截止時分別承受  $V_s$  及  $(V_s - V_o)$  兩電壓值，故電感耐壓必須大於兩電壓值之最大值。

接著用於濾除輸出電壓漣波的濾波電容，其耐壓必須大於輸出電壓  $V_o$ ，及耐流必須大於電容電流有效  $I_{C,rms}$ ，其  $I_{C,rms}$  值可由(24)式求得。

$$I_{c,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[ \int_0^{DT} \left(\frac{V_o}{R}\right)^2 dt + \int_{DT}^T \left(i_L - \frac{V_o}{R}\right)^2 dt \right]} \quad (24)$$

由圖 6(b)得知，當開關導通時，將使得二極體截止，故二極體所承受之逆向偏壓值為輸出電壓  $V_o$ 。當開關截止時，二極體順向導通所流過的電流即為電感上流過之電流，且二極體只有在時間  $DT \sim T$  之間有電流流過，故除了耐壓必須大於  $V_o$  外，其耐流亦必須大於  $I_{D,rms}$ ，其關係式如(25)所示。

$$I_{D,rms} = \sqrt{(1-D)} I_{L,rms} \quad (25)$$

最後，由圖 6(b)及圖 6(c)得知，當開關導通時，其流過晶體開關的電流即為電感上流過的電流，且晶體開關只有在時間  $0 \sim DT$  之間才有電流流過，而當開關截止時，其晶體開關兩端承受的電壓即為  $V_o$ ，故晶體開關的耐壓必須大於  $V_o$  外，且其耐流亦必須大於  $I_{SW,rms}$ ，其關係式如(26)所示。

$$I_{SW,rms} = \sqrt{D} I_{L,rms} \quad (26)$$

根據電池電壓與充電電流，可計算出等效電阻為

$$R_B = \frac{V_B}{I_B} = \frac{9.6}{0.06} = 160\Omega \quad (27)$$

而開關之最大責任週期  $D_{max}$  為

$$D_{max} = 1 - \frac{V_{mpp}}{V_o} = 1 - \frac{3.6}{11} = 0.673 \quad (28)$$

而為了減少電路體積，故將開關切換頻率設為 50kHz，且輸出電壓漣波比設為 1%，將以上之值代入(20)式與(22)式中，便可得如表 2 所列之升壓型轉換器電路的元件規格。

表 2 升壓型轉換器電路的元件規格

電感	340 $\mu$ H	耐流 0.5A
電容	100 $\mu$ F	耐壓 35V
晶體開關	IRF-840	耐流 8A，耐壓 500V
二極體	FR157	耐流 1.5A，耐壓 200V

## 5. 實驗結果

### 5.1 程式動作設計

本文研製了一太陽能農用機器人，在撰寫機器人程式過程中，發現由 Risbee 這套軟體設計機器人動作功能時，其所提供機器人之辨識圖形只能使用軟體內定的辨識圖形，無法自行設計。因此本文改以 C 語言設計機器人的動作控制程式，經由了解軟體之規範，且不斷嘗試設計程式，完成自行設計圖形，使機器人能辨識圖形，並控制機器人之動作，再加以紅外線感測器增進其動作之準確性。

#### 5.1.1 機器監控畫面圖之操作

監控畫面的操作方法將搭配圖 8 來加以說明。首先先開啟機器人監控系統，在選擇連接埠及速度一欄中，選擇好電腦主機所外插之藍芽模組的連接埠，其速度則選擇機器人所接之藍芽模組的傳輸速度 115200 bauds，然後按下開始連結藍芽，一旦按下後將會出現連結藍芽成功之字形，在機器人伺服馬達之控制數值調整一欄裡，調整好初始機器人各個伺服馬達的角度，此處吾人選擇了 RC0 調整為  $128^\circ$  使控制鏡頭的馬達調整好角度，讓機器人行進時能有較佳的視野。而 RC1 為控制夾子上下擺動的伺服馬達，調整為  $130^\circ$  可使高度調到最好，使紅外線感測器能夠有較好的感測空間，至於調整 RC2 數值為控制機械夾爪開合的伺服馬達。最後再按下動作開始一欄中的按鍵即可開始控制太陽能農用機器人的動作，而欲使機器人停止動作，則再按相同按鍵即可。



圖 8. 機器人監控畫面圖

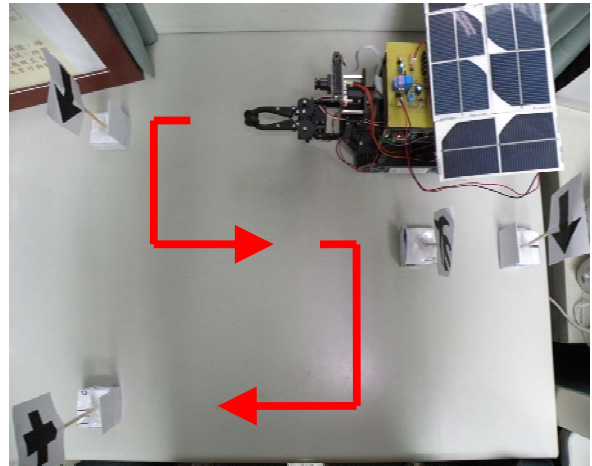


圖 10. 動作模擬場地

### 5.1.2 機器人動作

機器人之動作流程如圖 9 所示，並以圖 10 的動作模擬場地來作整體動作的說明，以接續上面所述機器監控畫面圖之操作。當按下動作鍵開始之後，機器人開始在動作模擬場地中開始執行動作，機器人開始向前行走巡視，模擬場地中有三行溝渠，行走路徑如箭頭所示，當到達該溝渠之盡頭時，機器人看到左箭頭將左迴旋走到下一行溝渠，繼續下一行溝渠行走，進行中當辨識到雜草則進行除草動作，然後繼續巡視行走，當再看到右箭頭符號代表已到此溝渠之盡頭，將右迴旋走到下一行溝渠繼續巡視，直到看到十字標示時，代表已全部巡視完畢，則回頭後停止等待下一次巡視命令，此時將可再由機器監控畫面來控制接下來之行程。

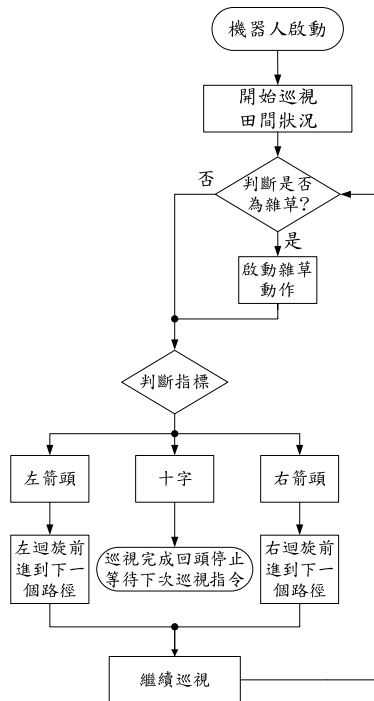


圖 9. 機器人執行除草動作之流程圖

### 5.2 太陽能充電電路

本文所研製之太陽能充電電路，其充電控制器之流程圖如圖 11 所示，係採用兩階段充電。剛開始充電時，採用定電流充電，使得充電時間較為快速，一旦到達設定之充電電壓時改採用定電壓充電，使電池不致產生過充現象，以增加電池使用之壽命，其詳細說明如下所述。

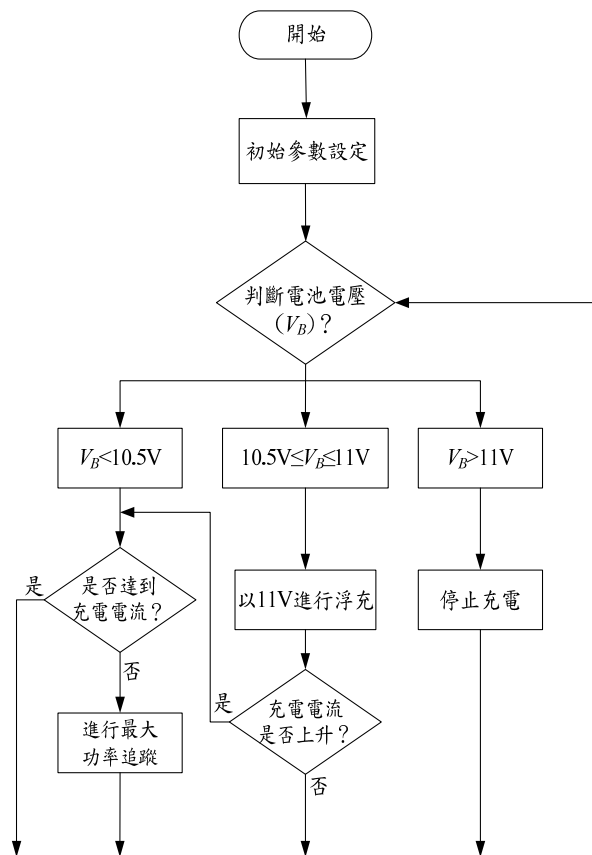


圖 11. 充電控制器之流程圖

當電池電壓小於 10.5V，則進入定電流充電模式，由於所設定之充電電流為 60mA，因此須再判斷充電電流是否已達設定值，成立則不進行最大功率追蹤，以免造成有過大充電電流對電池充電，然後繼續判斷電池電壓；若充電電流不超過設定之充電電流，則進行最大功率追蹤，以使太陽電池輸出最大功率對電池充電，達到定電流充電的目的。

圖 12 為採用定電壓法進行太陽能最大功率追蹤之實測圖。當日照強度改變時，藉由 PIC 微控制器調整適當責任週期之 PWM 信號，可使太陽電池維持在固定輸出電壓，並以最大功率輸出。

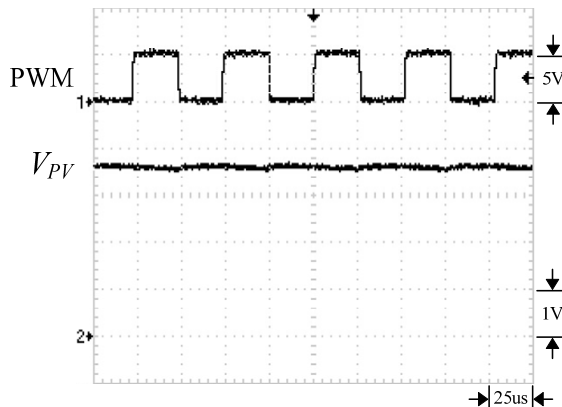


圖 12. 最大功率追蹤時，開關導通時間與太陽電池端電壓實測之波形

圖 13 為太陽電池進行最大功率追蹤下實測之輸出電壓、電流及功率波形。由圖中可觀得太陽電池之輸出電壓幾乎維持在定值，並與前述表 1 之太陽電池最大功率點電壓 3.6V 互相印證，可證明本文以定電壓法可達到太陽能最大功率追蹤。

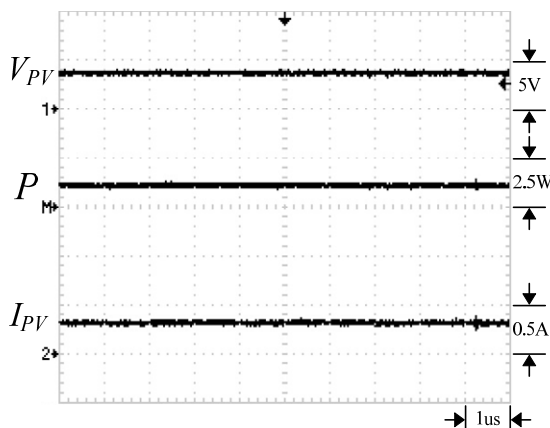


圖 13. 最大功率追蹤時，太陽電池輸出之電壓、電流及功率實測之波形

為了精準測量充電電流，故在電池前端串聯一個 0.1Ω 的電阻，並量測電阻兩端之電壓，便可計算出充電電流。而充電器對鎳氫電池以定電流充電下之實測波形如圖 14 所示，由圖中觀得電阻上之電壓為 6.04mV，故可算出充電電流約為 60mA。

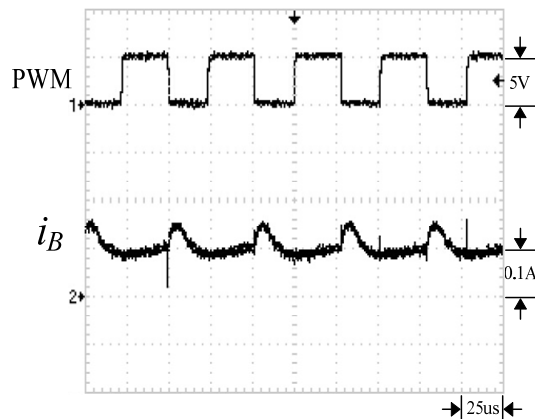


圖 14. 定電流充電時，開關導通時間與充電電流實測之波形

當電池電壓介於 10.5V ~ 11V 之間，則以定電壓 11V 模式進行浮充，其充電器對鎳氫電池進行浮充下之實測波形如圖 15 所示。由於機器人持續在動作，將導致電池電壓下降，使得充電電流上升，因此須再判斷充電電流是否上升，若成立則跳回定電流模式，再以定電流對電池充電，不成立則繼續判斷電池電壓。當電池電壓大於 11V 時則切離充電，以免造成電池過充之現象。本文所研製之太陽能農用機器人之外觀圖如圖 16 所示，而太陽能充電電路圖則如圖 17 所示。

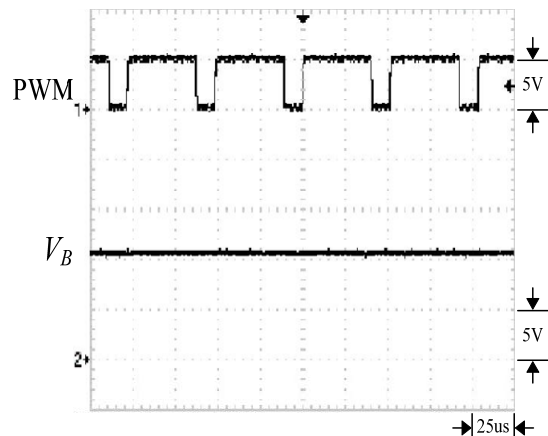


圖 15. 定電壓充電時，開關導通時間與浮充電壓實測之波形

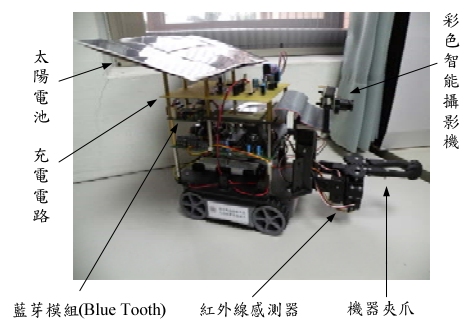


圖 16. 太陽能農用機器人之外觀圖

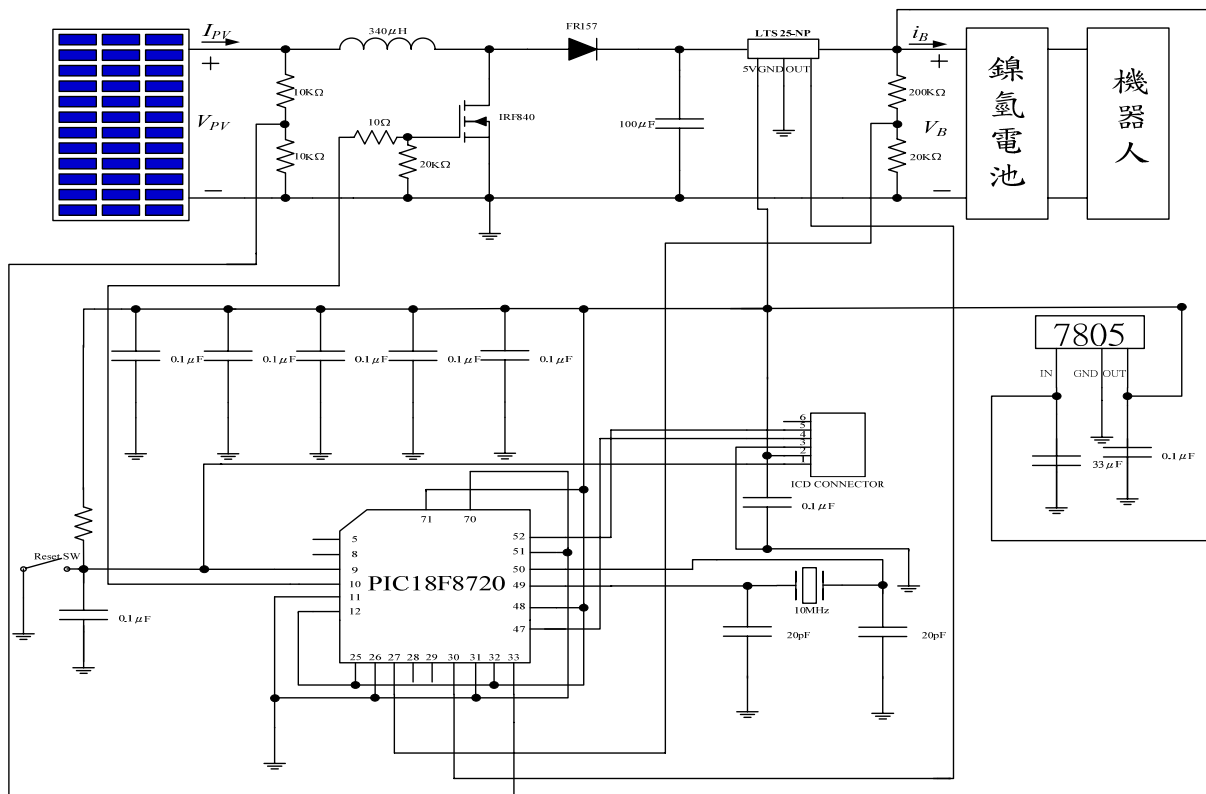


圖 17. 太陽能充電之電路圖

## 6. 結論

本文所研製之太陽能農用機器人，能透過智慧型鏡頭準確的辨識圖形，以達到分辨農作物及雜草，進而完成除掉雜草之動作。其電源採用太陽電池同時對機器人供電及鎳氫電池充電，並藉由 PIC 微控制器使太陽電池以最大功率輸出，以對鎳氫電池進行兩階段充電。藉由實測結果，證明了所研製之太陽能農用機器人的可行性，並期望所研製之太陽能農用機器人能用以改善目前農業人力老化與地球暖化之問題，進而對社會與大自然貢獻一份心力。

## 參考文獻

- [1] 皮托科技股份有限公司，智慧型機器人發展套件使用手冊。
- [2] 陳銘杰，結合風力發電機與太陽能電池模組之混合式充電系統之研製，國立東華大學，碩士論文，2006。
- [3] 楊素華、蔡泰成，太陽能電池，科學發展月刊，2005。
- [4] 認識太陽能電池，中華太陽能聯誼會，2009，<http://www.solar-i.com/know.html#2>。
- [5] 李仁豪，太陽能與市電併聯供電之智慧型交通號誌系統研製，國立勤益科技大學，碩士論文，2008。
- [6] 張建偉，太陽能電池最大功率點追蹤之研究，國立成功大學，碩士論文，2009。
- [7] T. T. Eswam and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22, No. 2, pp. 439-449, June 2007.
- [8] T. L. Kottas, Y. S. Boutalis, and A. D. Karlis, "New Maximum Power Point Tracker for PV Arrays Using Fuzzy Controller in Close Cooperation with Fuzzy Cognitive Networks," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 3, pp. 793-803, September 2006.
- [9] 劉景富，太陽能光電系統電池組充電器之研製，國立彰化師範大學，碩士論文，2004。
- [10] D. W. Hart, "Introduction to Power Electronics," 2nd Ed., Pearson Book Company, Taiwan, pp. 196-205, 2002.