

Direction Recognizing Ultrasonic Radar With The MSP430

極座標方位偵測型陣列超音波雷達(使用 MSP430)

Chien-Huan Peng, University of Huafan

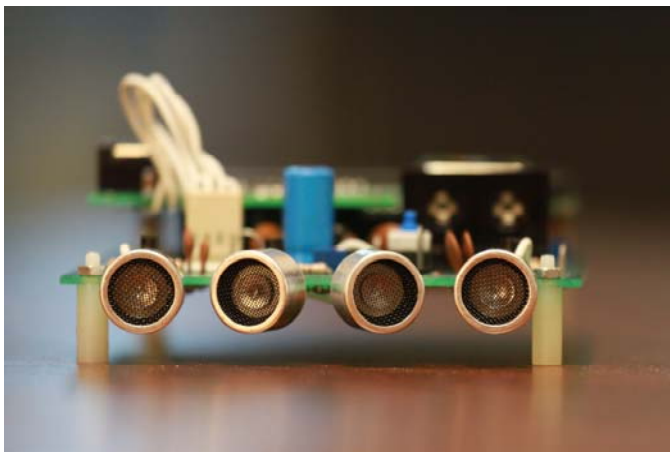
2009.10.7.

專題摘要：

MSP430 為業界廣泛應用於可攜式設備的微控制器，因模組十分齊全，極省電架構為最大特色。藉由極座標方位偵測型陣列超音波雷達作為主題來學習 MSP430F449 微控制器，並進行測距與方位判斷的實驗。學習 MSP430 微控制器程式撰寫、模組與 LCM 的使用以及微控制器的基本架構與原理。

使用強大的 Timer_B 計時器的多組抓取模組(capture)，可以解決連續的外部中斷反應上的問題，可以抓取多個計數值並供程式作運算及比較的動作，藉此達到方位的判斷及高解析度的距離顯示。

關鍵字: Msp430、超音波雷達、極座標、測距



MSP430 簡介：

德州儀器公司(Texas Instruments, TI)於 1996

年推出 MSP430 系列的混合信號微控制器

(mixed-signal MCU)，為了因應各種不同的需求，所以 MSP430 系列也發展出數種不同的系列並以不同型號來區分。MSP430 從設計階段就以低耗電量為考量，其 CPU 擁有的五段省電模式、模組化的架構、彈性的時脈，幫助使用者達成更省電的特性。本專題使用 MSP430F449 晶片，此一系列晶片另有 447、448 型號，這三種型號的晶片都內建其他晶片所沒有的 Timer_B7。Timer_B7 是附帶 7 個抓取、比較(capture、compare)暫存器的 16-bit 計時、計數器(timer、counter)，可以支援多重抓取/比較、PWM 輸出及區間計時(interval timing)等電子產品的需求。MSP430 被應用於業界所製造的永久密封性產品，如煙霧探測器、自動調溫器、安全設備等，還有在一些可攜式的醫療設備、醫療監控等。

以下為 MSP430F44 7~9 系列特徵[9]:

工作電壓介於 1.8V~3.6V。

一般模式下工作電流僅 280uA(1MHz, 2.2V)，省電模式下工作電流僅 1.1uA。

5 種省電模式，從待機恢復所需時間小於 6us。

16 位元 RSIC 架構，指令週期僅 125ns。

最大 60KB 程式記憶體，2048B 資料記憶體。

8 個通道(channel)的 12-bit ADC，其轉換速率最高可達每秒 20 萬次取樣(200ksps)。

基本計時器可做 8-bit 計時、計數。

計時器 A 可做 16-bit 計時、計數器，含有 3 組抓取、比較暫存器。

計時器 B 可做 8~16-bit 計時、計數器，含有 7 組抓取、比較暫存器。

內建獨立的硬體乘法器(hardware multiplier)，提供高速的乘加(multiply accumulate calculation,MAC)運算以支援數位信號處理的需要。

基本原理：

超音波換能器的特性類似音叉的原理，當有頻率相近的波長時會與其共鳴，利用這一點，先從晶片中產升一個 40kHz 的訊號，輸出給發射電路，使得超音波換能器與其共振，借此發射出超音波(如 圖 1 (c))接著讓系統進入休眠狀態等待回來的超音波。回波一來時接收器因為與回波產生共鳴，會(如 圖 1 (b) 的波形)，但是因為距離的關係這個波非常的微弱，所以必須要使用一級類比放大器及一個比較器來將此訊號放大至飽和(如 圖 1 (a))，使晶片較容易辨識出已收到回波，並進入距離估算的程序。

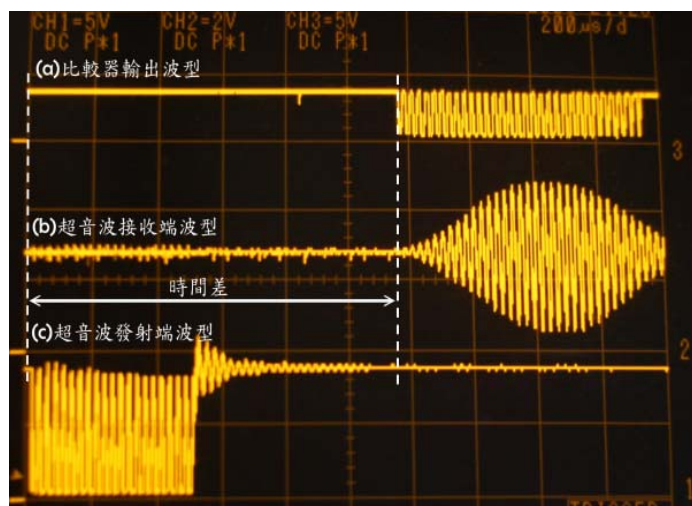


圖 1 波型圖

方位判斷的方法是採用多組超音波的收、發模組，將其抓取到回波的時間相互比較來辨識出相對位置。這邊使用最多可以支援到 6 組超音波模組的 Timer_B 來做多個外部的抓取中斷。因為 Timer_B 的抓取模組在使用外部中斷觸發儲存計數值的時候，是直接使用硬體做儲存計數值的動

作，所以不會有反應上的問題。本專題僅採用 2 組超音波收發模組，作為實驗性質的實作、測試與學習。

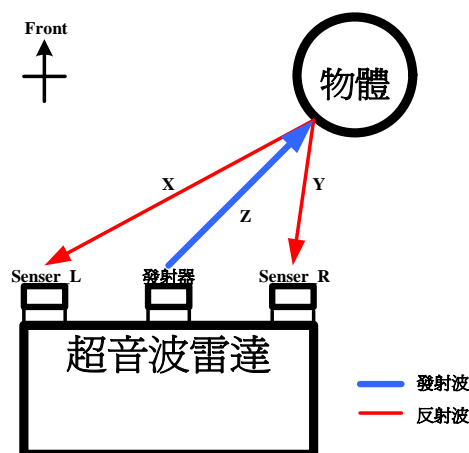


圖 2 多個接收器的反射與接收

判斷物體方位的方式為 X 的距離與 Y 的距離做比較的到結果，以圖 2 來說的話 Y 的距離會比 X 小，因此可以判斷出物體的位置在右前方，並藉由距離差判斷方向。

電路部分：

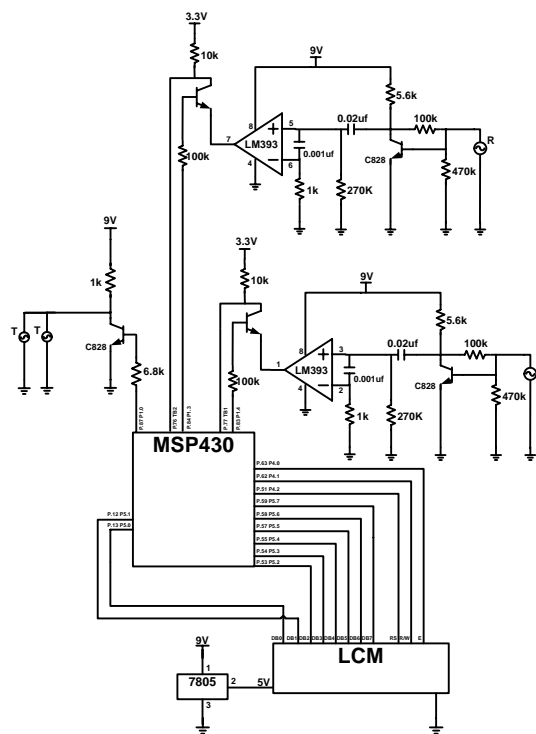


圖 3 電路總覽

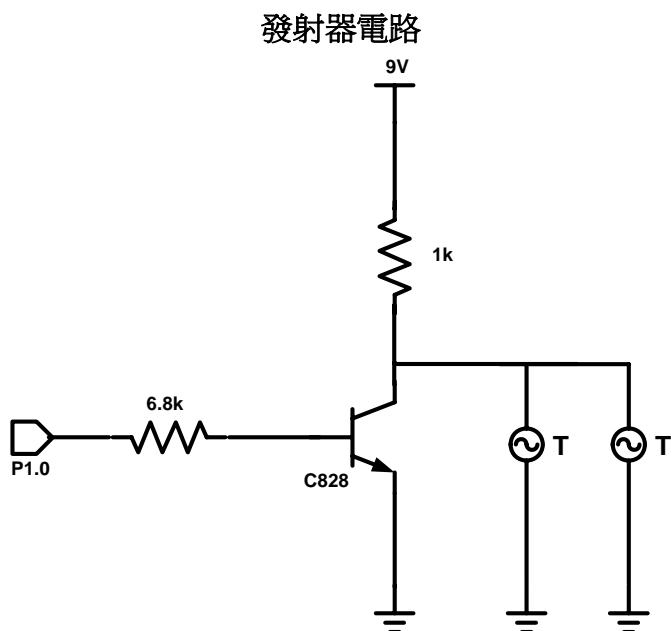


圖 4 發射端電路

因為MSP430的內部工作電壓為3.6V甚至更低，而外部電路電壓設定在9V，所以必需藉由P1.0所輸出的40KHz振盪訊號來控制電晶體C828以達到電壓隔絕的效果，也因為隔絕電壓，所以可以提高電壓以發射出更強的超音波。此電路可經由調整1K電阻的阻值或提高電路電壓來調整超音波的發射功率。並且這邊採用超音波發射器並聯的形式使發射的範圍更為廣泛。

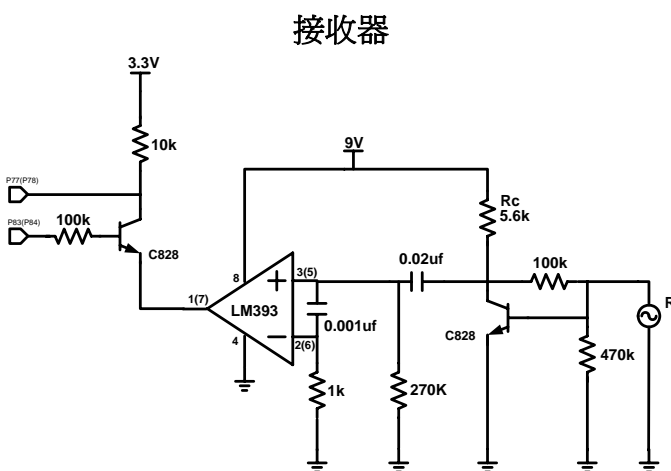


圖 5 新接收電路

回波由於距離的關係所以非常微弱，所以先

利用一個C828做第一級的類比訊號放大，再經由一個高通濾波器與低通濾波器，將雜訊濾掉後輸至LM393的”+”輸入極(腳位3),此輸入極與”-“輸入極(腳位2)做比較的動作，又因LM393為Open Collector(開放式C極如圖6)，只要C828的輸出稍微有些變化，LM393就會將輸出極(腳位1)的電壓拉到地，使MSP430產生負緣觸發的中斷，此動作算是將類比訊號轉為數位訊號，亦可稱為將訊號放大至飽和.藉由此動作產生負緣(如圖4(a))，使MSP430能做出偵測到訊號的負緣而進入中斷。

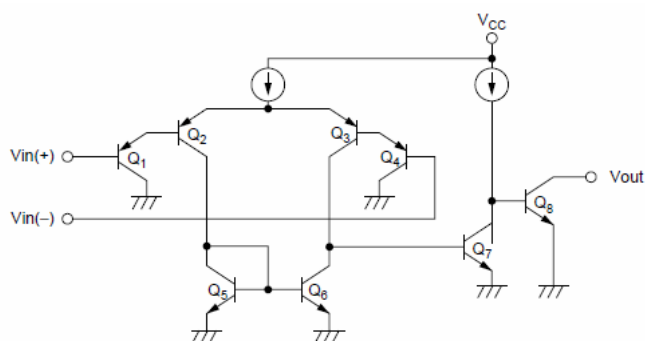


圖 6 LM393 電路[6]

由上圖圖6的Vout輸出極可以得知此電路為Open Collector的輸出。

Timer_B的中斷向量是共用的，因此必須讓它只發生一次中斷後便被禁能，在這邊採用硬體配合軟體的方式來做禁能。如圖7輸出的地方多接一個電晶體，並使用一組I/O Port來控制它來達到中斷禁能與致能的效果，其運作情況請參閱圖8。

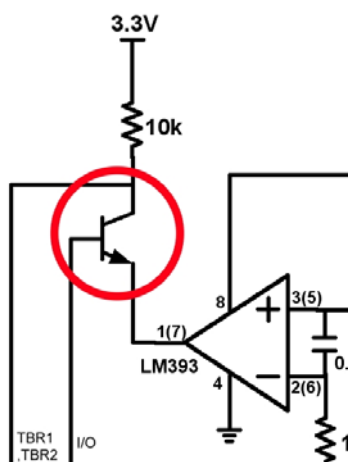


圖 7 硬體中斷電路

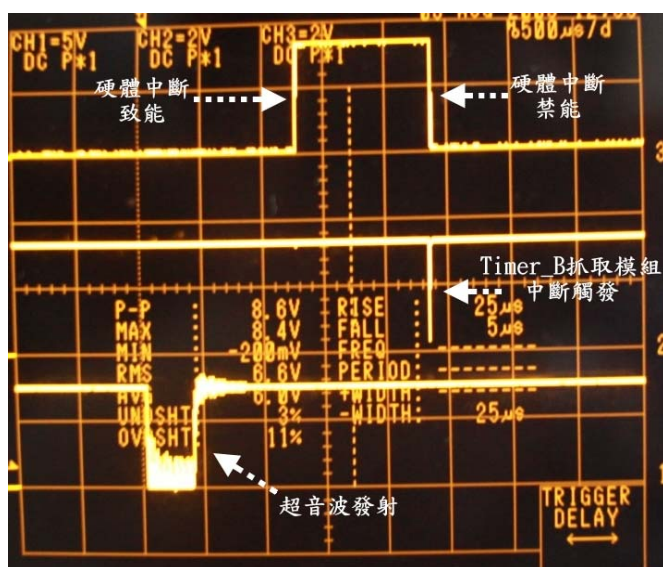


圖 8 硬體中斷運作圖

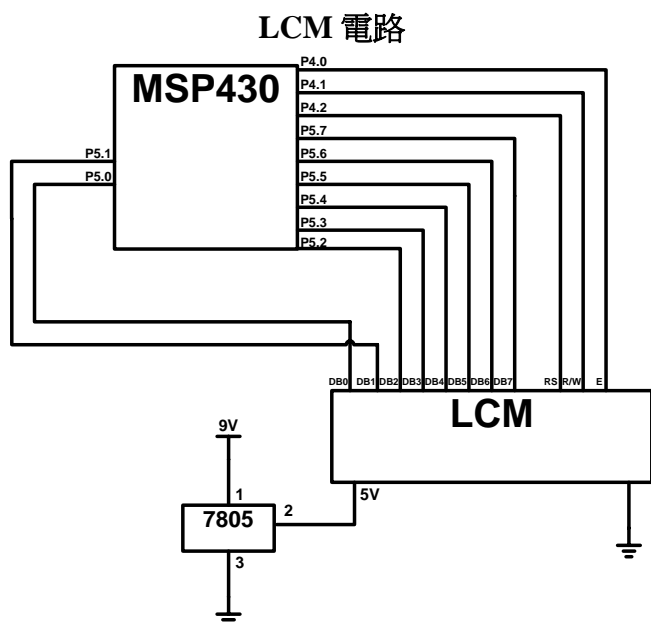
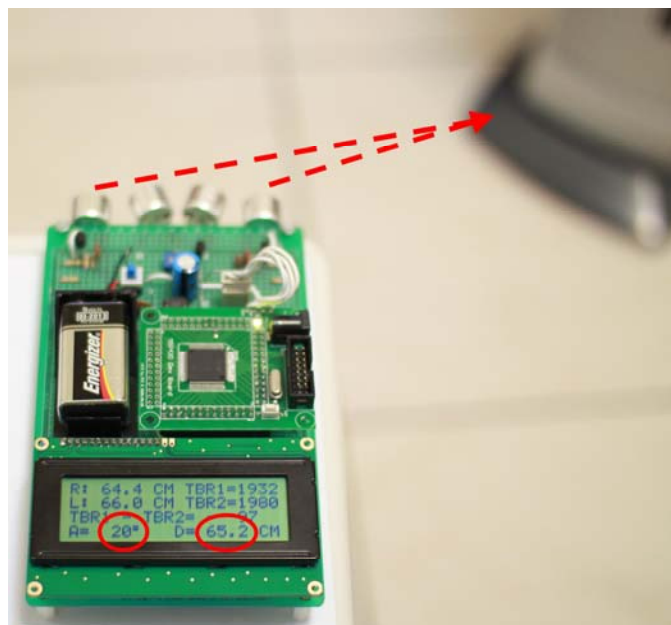


圖 9 LCM 與 MSP430 的接腳圖

RS、R/W 和 E 腳位為控制 LCM 的基本腳位分別接到 P4.0 ~ P4.2，而 DB0~DB7 則是資料的傳輸，分別接到 P5.0 ~ P5.7，7805 為一類比穩壓器供給 LCM 穩定的 5V 電壓[7]。

使用 LCM 型號為 NC2004A-GNN-P S，此種 LCD 因內建 CPU 和 RAM 故稱為 LCM，以下為其規格表。

- Character Type Dot Matrix LCD Module
- Eay interface of 4-bit or 8-bit
- Display character pattern : 5 × 7 font with cursor(208 kinds)
- The special character pattern can be programmable by Character Generator RAM directly.
- Internal Memory :
- Character Generator ROM (CGROM) : 10,080 bits (204 characters × 5 × 8 dot)
 - Character Generator ROM (CGRAM) : 64 × 8 bits (8 characters × 5 × 8 dot)
- Low power operation :
- Power supply voltage range : 2.8 ~5.5V (Vdd)
 - LCD drive voltage range : 2.2 ~ Vdd
- CMOS process
- Duty-cycle : 1/16



在操作此種 LCM 時還需要有一些時序的概念，每一個指令都有其運作的時間，所以在撰寫程式時因須顧慮這個問題，將在操作時頻繁的使用延遲的概念，稍後的流程圖將會介紹。

流程部分：

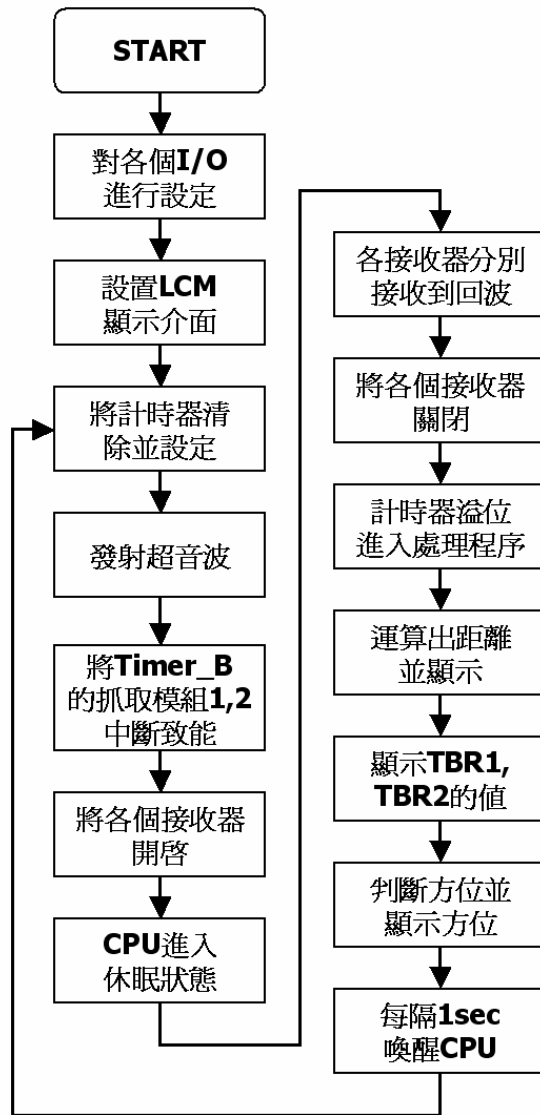


圖 10 簡易流程圖

主程式

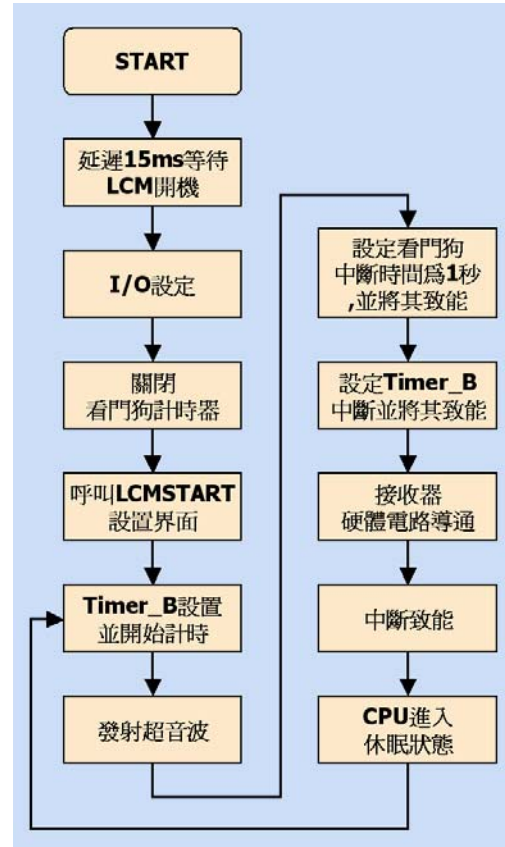


圖 11 主程式流程

主程式，前半段主要是做一些 I/O 以及 LCM 的初始設定等，後半段是超音波收發器以及計時器的中斷/設定，也是測距的主要迴圈。這邊使用強大的 Timer_B 的抓取模組來抓取計數值來做距離運算以及計時器溢位處理等。看門狗計時器則是負責在 CPU 休眠狀態時，每 1sec 強制喚醒 CPU，以進行下一波的測距動作。

注： P1.0 為發射模組

P1.4 為接收器開關 1

P1.3 為接收器開關 2

P2.2 為時間抓取模組 1

P2.3 為時間抓取模組 2

P4.0~P4.2 為 LCM 控制

P5.0~P5.7 為 LCM Data

TBIV 中斷

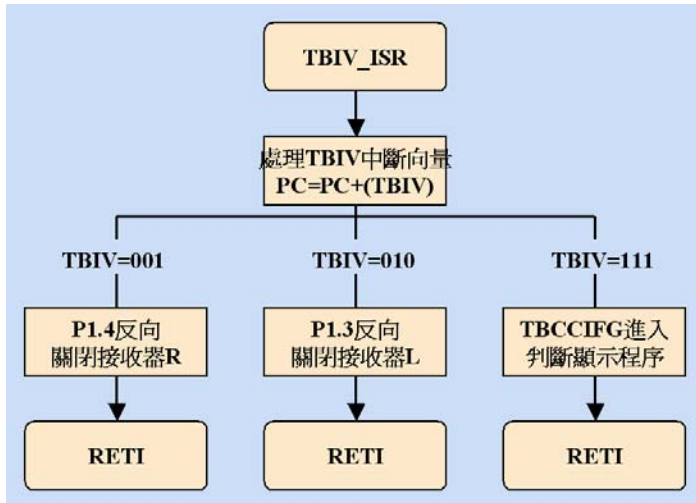


圖 12 TBIV 中斷流程

Timer_B 模組內部有多個中斷，中斷向量又是共同使用的，因此必須使用 PC 指標的方式來判斷是何者產生中斷。目前總共使用三個中斷，TBIV=001 為抓取模組 1、TBIV=010 為抓取模 2、TBIV=111 為計時器溢位。當接收電路產生負緣觸發的時候，抓取模組會自動將觸發時 TBR 的計數值分別儲存到抓取模組 1、2 的指定儲存位址，並將已經觸發過的抓取模組對應電路關閉。計時器溢位時，表示抓取模組不是都已經抓到計數值，就是有可能不在測定範圍內，所以這邊會作距離顯示、方位、距離判斷等處理程序。

TBCCIFG 中斷

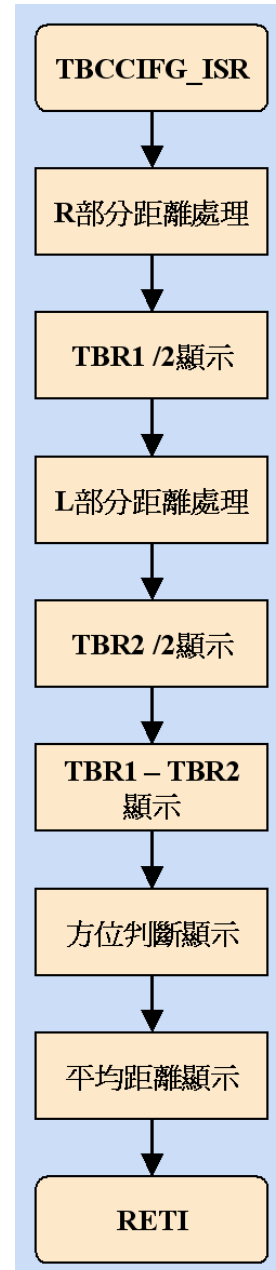


圖 13 TBCCIFG 中斷流程

Timer_B 的溢位中斷，當發射超音波後不管接收器有沒有接收到回波回來讓抓取模組觸發中斷，當計時器一計數到 65535，系統就會進入此一中斷程序。因為 TBCCIFG 的中斷處理程序較複雜，所以這個流程部分將細分為多篇，每一篇都代表圖 13 中的其中一個處理方塊。

TBCCIFG 中斷 - R、L 距離顯示

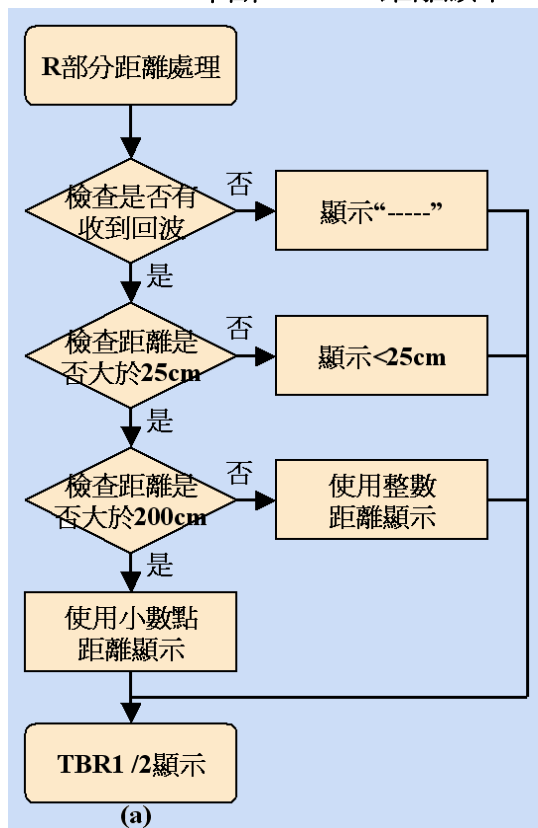


圖 14(a) 距離顯示流程(右邊)

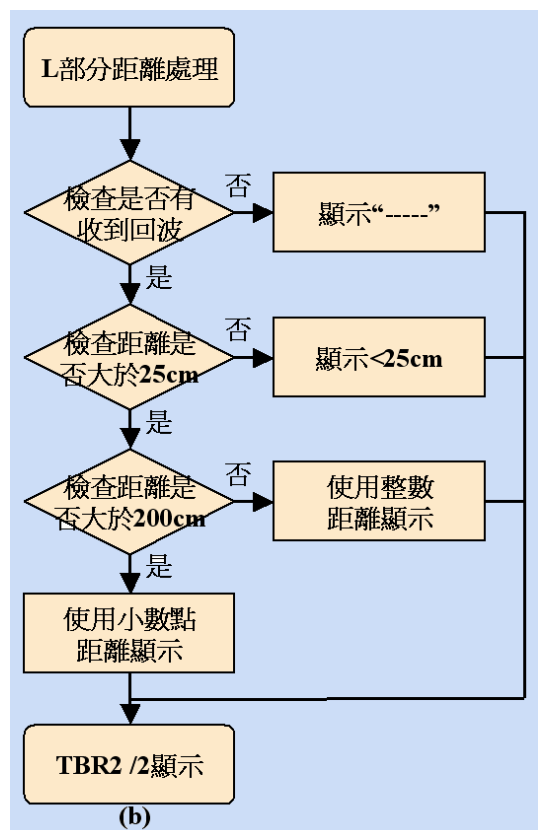


圖 14(b) 距離顯示流程(左邊)

圖 14(a) R 部分處理指的是將抓取模組 1(右邊接收器)所抓取到的計數值，先檢測其計數值，看是在哪一個距離範圍，再使用對應範圍的距離運算與顯示。圖 14(b) L 部分原理同 R 部分，不過他是使用抓取模組 2(左邊接收器)。

TBCCIFG 中斷 - TBR1、2 顯示

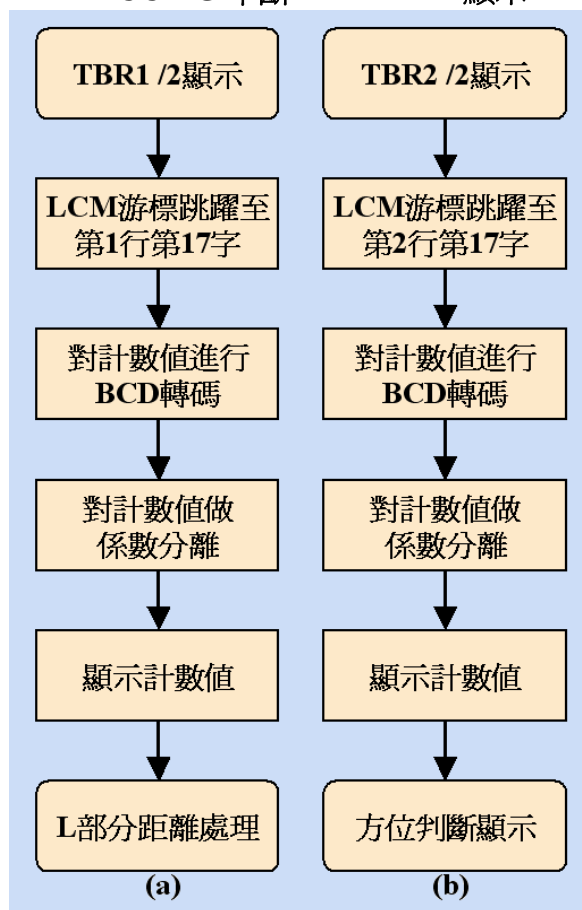


圖 15 計數值/2 顯示流程(a.模組 1、b.模組 2)

TBR1 顯示是將抓取模組 1 所抓取到的計數值，直接的貼上 LCM。TBR2 也同於 TBR1 的原理。但是有鑒於 LCM 顯示空間的大小，因此將其最小位元去掉，相當於將計數值除以 2 後顯示，所以只有四位，提供使用者作參考用。

TBCCIFG 中斷 - TBR1-TBR2 顯示

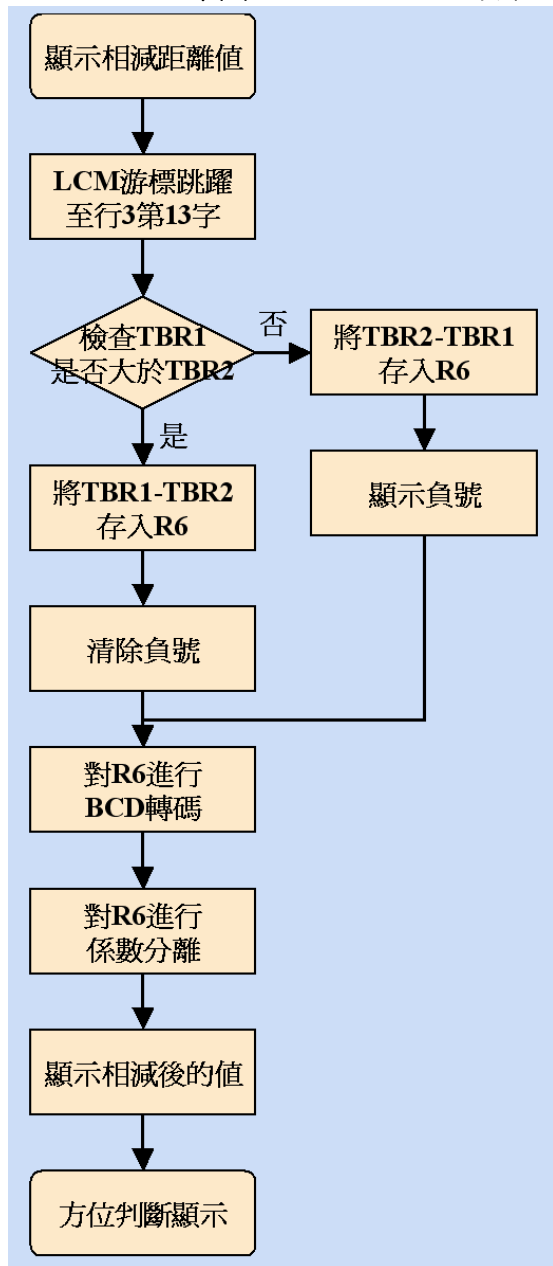


圖 16 模組 1 減模組 2 顯示流程

此部份也是供使用者參考，藉由微小的計數值變化可以看出物體的微小變化，例如斜面就可以明顯的看出相減後的數值蠻大的，以供方位判斷使用。

TBCCIFG 中斷 - 方位判斷顯示 1

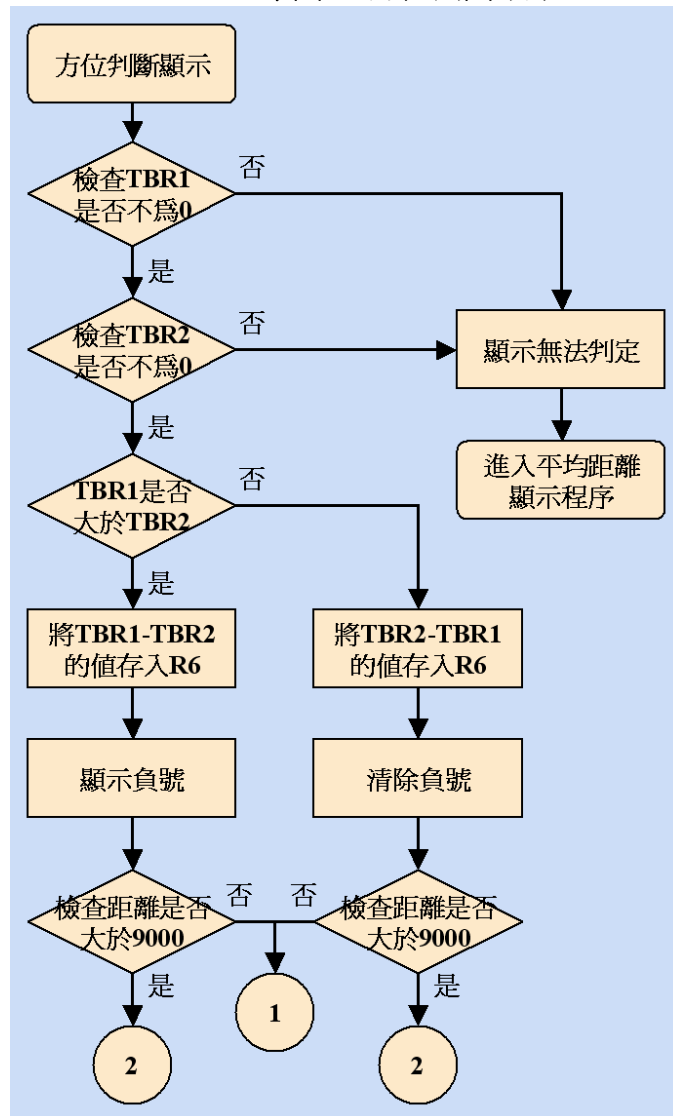


圖 17 方位判斷 1

因為僅使用簡單的方位判斷，所以這個流程一開始主要在判斷是否有其中一組抓取模組中的值為 0，只要有其中一組為 0，則顯示無法判定，若都有抓取到則開始進行相減的動作，並藉由判斷計數值的大小來比較出左右，若物體在左邊則先加上負號，隨後進入下一部處理。

TBCCIFG 中斷 - 方位判斷顯示 2

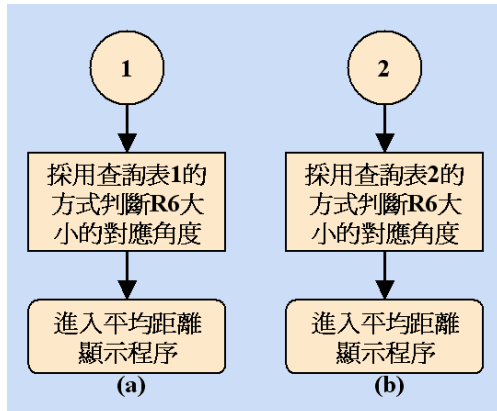


圖 18 方位判斷 2 流程(a.採用表 1,b.採用表 2)

第二部分主要是藉由左右相減後的計數值來查表的方式，找出約略的方位，並以 150CM 以內為一個標準(圖 18(a))，大於 150CM 則為另一個標準(圖 18(b))，但因為兩個偵測器的距離較短，所以當大於 150CM 以後，方位很容易飄忽不定。

TBCCIFG 中斷 - 平均距離顯示

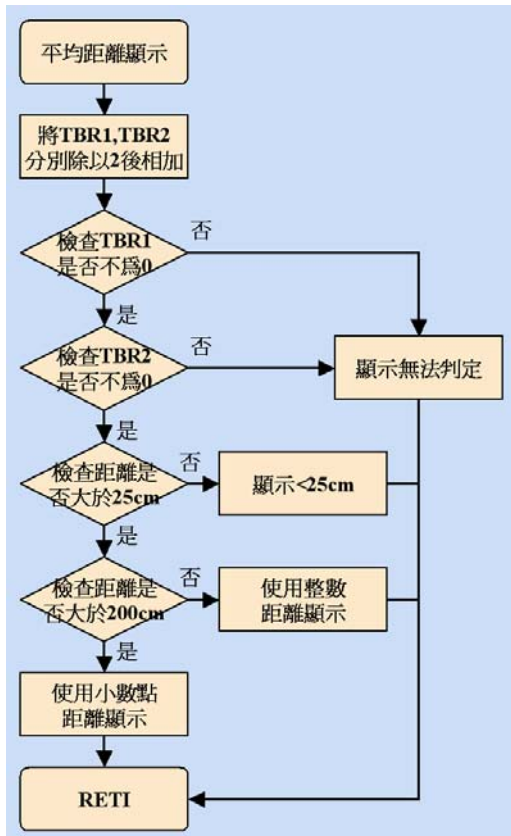


圖 19 平均距離顯示流程

將兩個計數值的平均貼上銀幕供使用者觀察及判斷，但是當兩個計數值差異過大時，系統會顯示無法偵測。

WDT 中斷

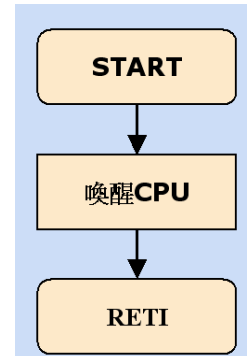


圖 20 WDT 中斷流程

WDT 中斷，它會在固定時間將 CPU 喚醒，使系統可以進行下一次的距離運算，所以更新距離的頻率主要是藉由它來控制。這邊是在進入中斷時將狀態暫存器 POP 出來，更改其設定後將其 PUSH 進去，當中斷結束後，CPU 會發現休眠模式被關閉，便會再度開始運作。

40kHz 震盪產生流程

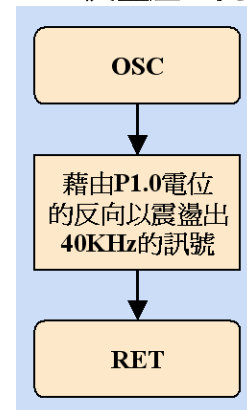


圖 21 40kHz 流程

圖 21 40KHz 頻率產生程式,在這邊採用延遲並將電位反向的方式來達到 40kHz 的訊號輸出，供給發射端電路使用，藉以發射超音波.發射脈波數的多寡也會影響發射的功率。

因為使用延遲的方式來達到 40kHz，也知道 MSP430 的指令週期約為 1us，可以得知 40k 的周期 $1s / 40k = 25\mu s$ ，所以每 12.5us 將電位反向一次。

```

DY3:    NOP                ;1 個指令週期
        NOP                ;1 個指令週期
        NOP                ;1 個指令週期
        NOP                ;1 個指令週期
        NOP                ;1 個指令週期
        NOP                ;1 個指令週期
        XOR.B    #00000001b,&P1OUT ;2 個指令週期
        DEC     R14         ;2 個指令週期
        JNZ     DY3        ;2 個指令週期
    
```

加總： $1\mu s \times 6 + 2\mu s \times 3 = 12\mu s$



圖 22 發射的超音波波形

由圖 22 可以看到非常準確的 40KHz，後面的抖動為超音波發射器的 Ringing 效應。

距離運算

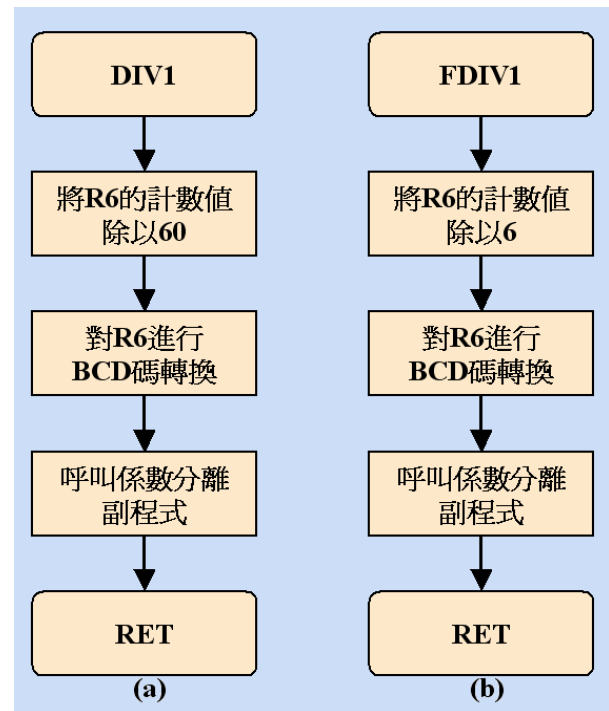


圖 23 距離運算副程式(a.整數、b.小數)

這個距離運算副程式，主要是採用 TI 網站所提供的高效能除法器[2]。

距離 > 200cm 使用 圖 23 (a) 整數運算流程，距離 < 200cm 則使用 圖 23 (b) 小數點運算流程。在距離運算的部分，計時器時脈為 1MHz。假設聲速為 340m/s 距離也 > 200cm，所以 $1048576 / 34000\text{cm} = 30.84 \text{ count/cm}$ ，表示說聲音每走 1cm 計數器計數 30.84 次，但因接收到的回波是經過物體所反射回來的，所以聲波行走的距離是兩倍，因此要將 $30.84 \text{ count/cm} \times 2 = 61.68 \text{ count/cm}$ ，再來只要將計數器內的計數值除以 61.68 就是要測量的距離，將其置入 LCM 即可。

而 BCD 的轉碼則是參考混合信號為控器[9]內的程式碼。

它可以將十六進制的值轉換成十進制，並以每 4 個 bit 儲存一個十進制的數字，供係數分離副程式使用。

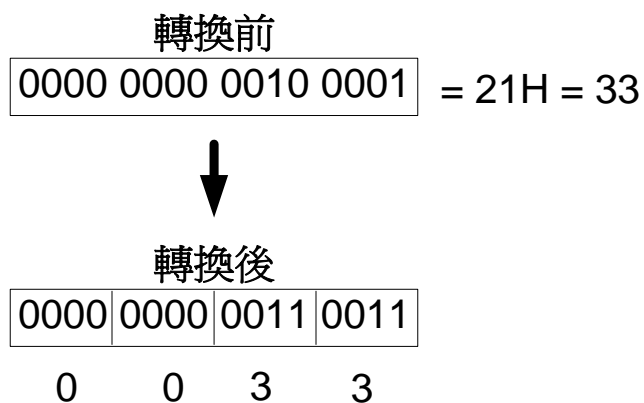


圖 24 BCD 轉碼示意圖

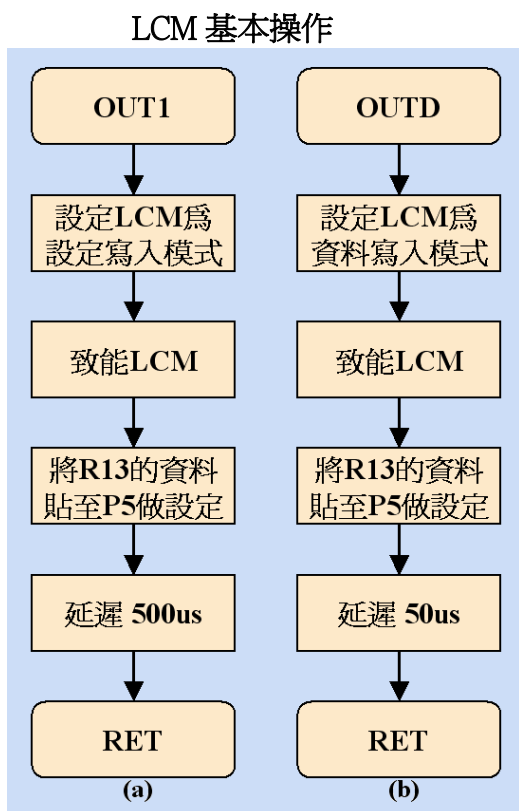


圖 25 LCM 基本控制流程(a.設定、b.顯示)[8]

圖 25 (a)用在 LCM 的設定模式，先設 RS=R/W=0,(RS=0 設定)(RW=0 寫入)，再將 LCM 致能，允許其作動後將的指令傳至 P.5 做出設定的步驟，又因為必須要給 LCM 運作時間,所以須等待 500us 才能再做下一次的指令輸入。

圖 25 (b)用在 LCM 的顯示模式，先設 RS=1，R/W=0,(RS=1 顯示)(RW=0 寫入)，再將 LCM 致

能，允許其作動後將要顯示的字元傳送至 P.5 做顯示，又因為必須要給 LCM 運作時間，所以須等待 50us 才能再做下一次的顯示指令輸入。

LCM 初始設定

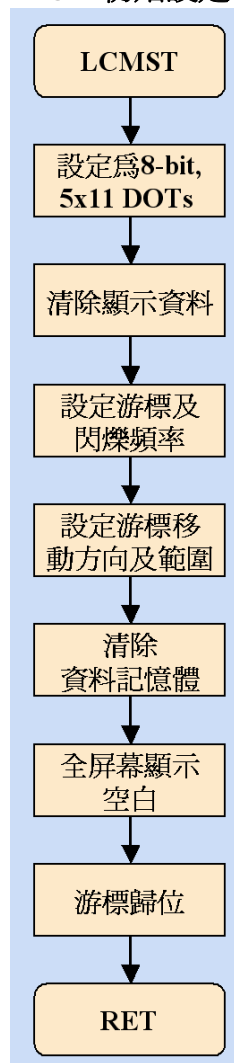


圖 26 LCM 內部設定流程

圖 26 為此種 LCM 啟動時所必須的基本設定，未做此一動作 LCM 無法使用。以上設定除了全屏幕顯示空白外均是使用副程式 OUT1 做設定。

LCM 介面顯示

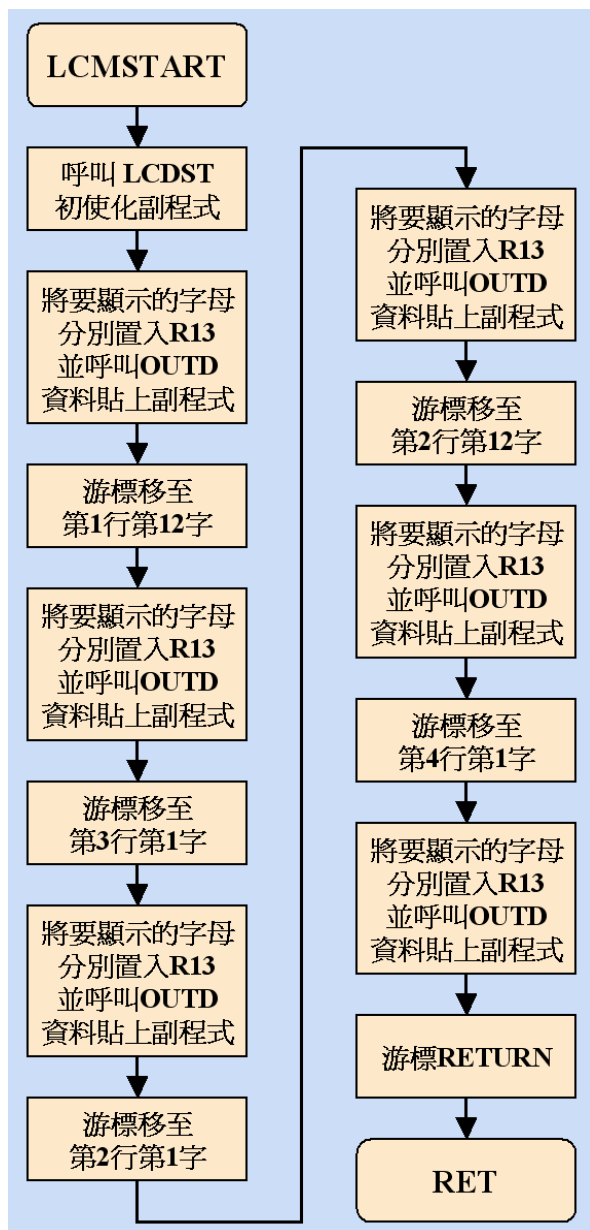


圖 27 LCM 介面顯示流程

此處是將已經預先設置好的字型在一開始 LCM 設定完後一一分別顯示，而後進入測距迴圈後此處就不作動，只有顯示距離部分有動作，藉此避免 LCM 看起來不斷的閃爍，增加可看性。預設介面第 1 行第 1 字起為”R: CM TBR1=”，第 2 行第 1 字起為”L: CM TBR2=”，第 3 行第 1 字起為”TBR1-TBR2=”，第 4 行第 1 字起為 A= D= CM。



圖 28 LCM 介面

LCM 整數顯示部分

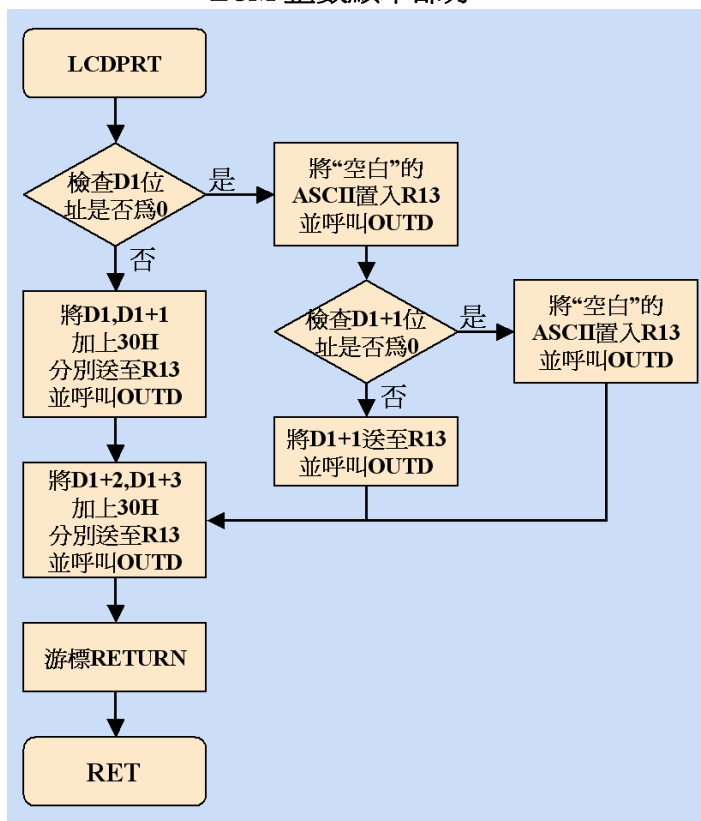


圖 29 顯示流程(整數)

上圖為整數運算的顯示流程，即是>200cm 的顯示方式，在這邊要移動到第二行第 9 格是因為第二行第 9 格開始是固定是顯示距離的地方，其餘為 LCM 介面顯示，此一移動游標的動作屬於 LCM 的設定，所以要使用 OUT1 這個附程式，而下面的距離值顯示部分則是呼叫 OUTD。

爲了讓最高位爲 0 時不顯示，所以在這邊對最高兩位(即 D1,D1+1)做出判斷式，若爲 0 就將此一記憶體位置放入空白的 ASCII 碼。

這個流程將 D1+X 分別送至 R13 的意思是將要顯示的數值先存放在指定的記憶體位址，這邊再逐一作出顯示的動作。

注：D1+X 爲運算後的距離值，經過係數分離程式後分別存在 D1~D1+3 記憶體位址的計數值，在這邊是做將其一一顯示的動作。

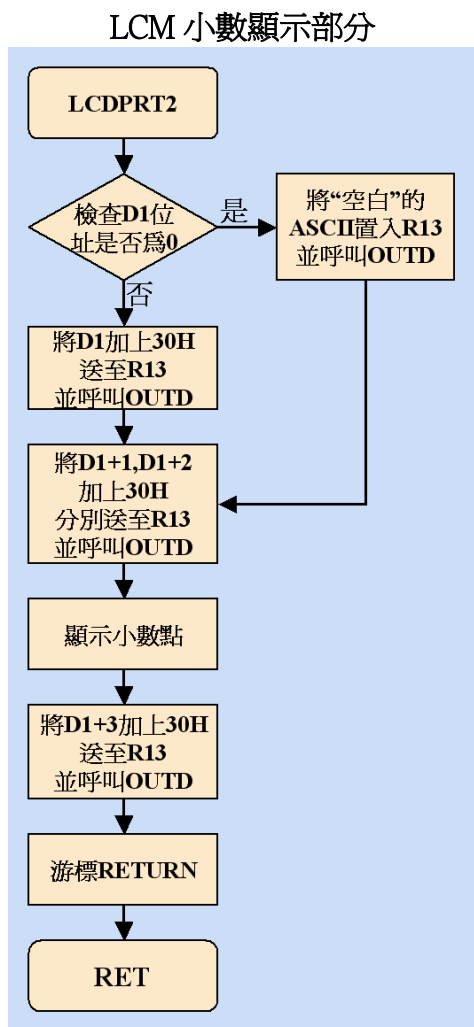


圖 30 顯示流程(小數)

圖 30 爲小數運算的顯示流程，即是<200cm 的顯示方式，大部份流程都與整數相同，只是在最低位元前面多了一個小數點顯示的步驟。

還有在最高位判斷是否爲 0 的地方，因爲最小距離 20.0cm 都會用到三位，所以這邊只對最高位作判斷，比整數少了一位。

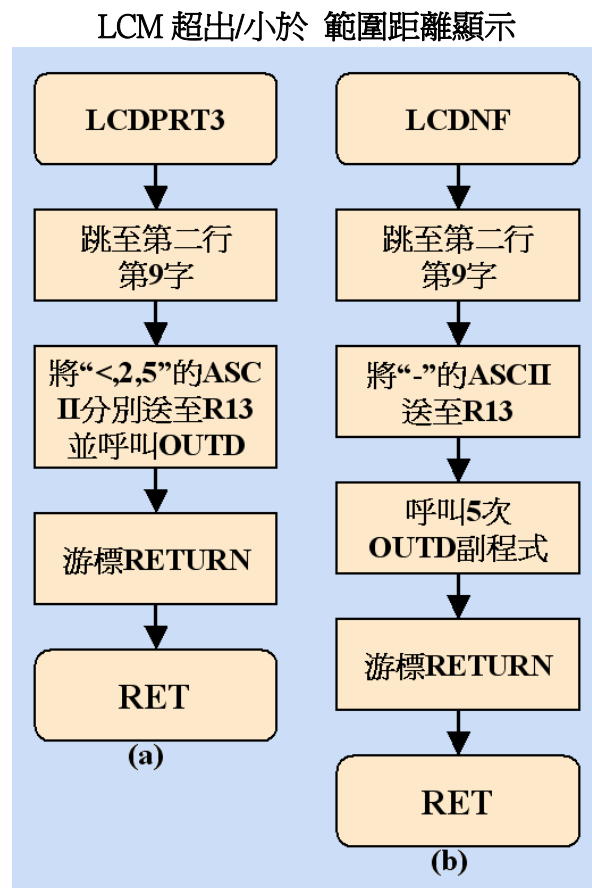


圖 31 顯示流程(a.小於/b.超出)

圖 31(a) 爲範圍<20 之顯示，即是計時器值小於 1200(20 公分)就會進入此流程，是預設好 ASCII 字型供程式使用。

圖 31(b) 爲未接收到超音波回波之顯示，計時器計數值超過 65535(10.92m)就會進入此流程.會超過此計數值的可能性很多，例如 反射物體非平面、吸收超音波、距離過遠能量消散等可性。

係數分離

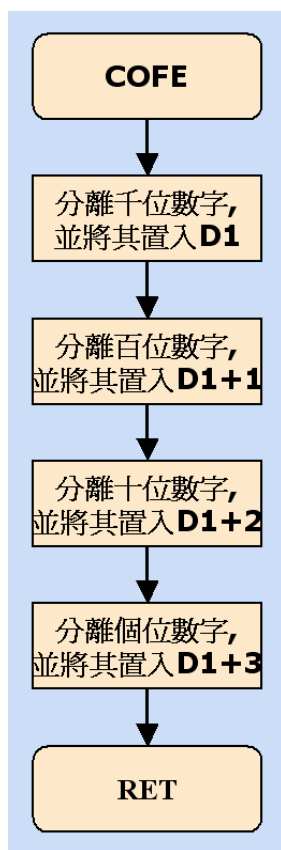


圖 32 係數分離流程[9]

圖 32 為係數分離程式，因為在 MSP430 中，運算都在同一個暫存器內，可是 LCM 顯示器一次只能貼一個字元，所以只好把暫存器內的值利用這個分離程式將他分開，讓我們得以分別貼上 LCM 顯示器。以 16 位元暫存器來說每 4 個位元代表一個數字，所以每次將最低的 4 個位元存到某個位址後必須對暫存器做右旋 4 次的動作，這樣就可以讓高位元降到低位元，接著存到某個位址，在這邊是以 D1 為儲存位址的起始位址，顯示四個數字即是將最低位存至 D1，第二位存至 D1+1...第四位存至 D1+3。當然數字可能會超過 4 個，你亦可增加其它暫存器，方法與上敘相同。

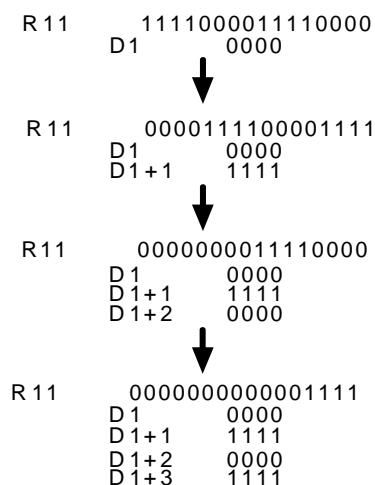


圖 33 係數分離示意圖[9]

由圖 33 可以清楚的看出，此一動作為每存至記憶體位置後就做四次右旋，使高位元降至低位元。

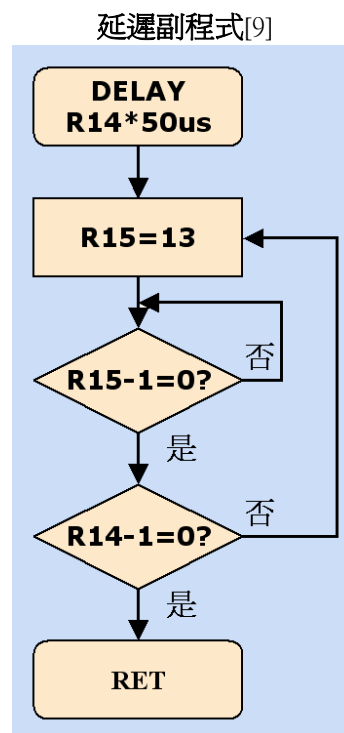


圖 34 延遲副程式流程

延遲副程式是讓 CPU 以空跑的方式，來達到時間延遲的目的，使用方法為，將你要 delay 的次數在呼叫副程式前放入 R14 而 delay 一次的時間為 50us。在使用 LCM 時為配合其工作，需頻繁的

使用此一延遲程序。

```
DY1:    MOV    #000013,R15    ;2 個指令週期
DY2:    DEC    R15            ;2 個指令週期
        JNZ    DY2            ;2 個指令週期
```

加總： $[(2\mu s + 2\mu s) * 13] + 2\mu s = 54\mu s$

每一迴圈延遲約 54us

結論：

測定距離的遠近，會因為發射波愈強的時候，超音波換能器的 Ringing 效應越嚴重，導致最小測定的距離拉長，若同時需要遠/近距離的測定，可使用軟體的方式來作出遠/近模式的選擇，藉由調整輸出給發射器的方波數以及發射電路上的電阻值(如下圖紅色圈起部分)來控制所需要的發射強度。

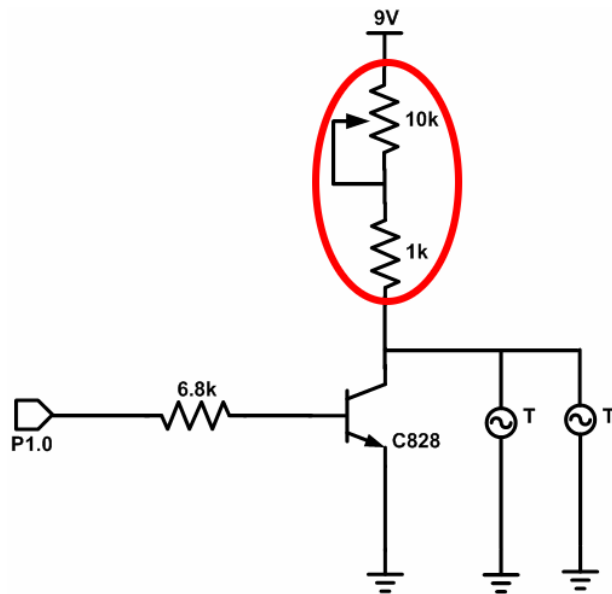
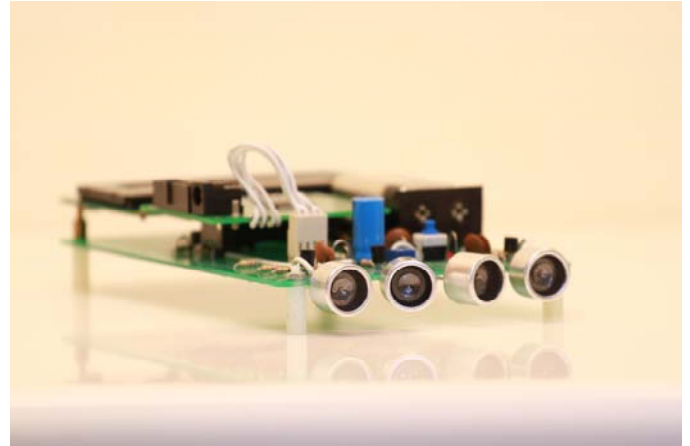


圖 35 發射器電阻(紅色圈起部分)

方位判斷部分，目前只能做到十個方位角的判斷，若需要精確且更多方位的判斷，可能要借助 DSP 以及一些演算法來處理繁鎖的數學運算。

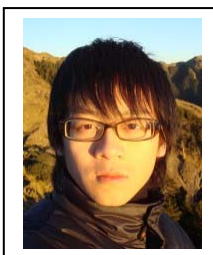
極座標方位偵測型陣列超音波雷達算是實驗性質的專題，可以將其應用於機器人上，使機器

人可擁有最多 6 組的發射器、接收器。並利用一些演算法使其做出廣範圍的障礙物判斷，做出閃避、跟隨等動作。甚至結合影像處理的人臉辨識，判斷出在什麼方位、距離的人是誰。



參考文獻：

- [1]Murugavel Raju," Ultrasonic distance with MSP430" Texas instruments application report,SLAA136A - October. 2001.
- [2]Kripasager venkat," Efficient multiplication and division using MSP430" Texas instruments application report,SLAA329 - September. 2006.
- [3]Texas instruments," MSP430x4xx Family" Texas instruments User' s Guide,SLAU056G - 2007.
- [4]Intelligent control technology Co.ltd ," MSP430 Ultra-EV Board Ver3.1" Intelligent control technology User' s Guide, November. 2006.
- [5]Microtips Technology inc ," LCD module specification for customer' s approval" Microtips Technology approval, 1999.
- [6]Hitachi," HA17393/A series dual comparators" Hitachi semiconductor , November. 2001.
- [7]Fairchild," LM78xx/LM78xxA 3-Terminal 1A positive voltage regulator" Fairchild semiconductor , March. 2008.
- [8]彭 元君," A10-0001A 超音波測距儀" 益眾科技股份有限公司, June. 2001.
- [9]孫 宗瀛,許 益敏 and 林 政緯," 混合信號微控器入門" 全華科技圖書股份有限公司, December. 2006.



Chien-Huan Peng was born in Hsinchu,Taiwan,on August 2, 1988. He study in Huaan University electro nic engineering ,2009. His research interest include mixed-mode signal-processing program.