

# 專題報告書

Special Topic on Implementation Report

基於空播超音波標靶之人體定位

與臉部方向偵測技術

Airborne Ultrasound Targeting Based Human Body Positioning  
and Facial Orientation Detection Technology

國立清華大學 電機工程學系

專題生 Author

111061130 沈牧群

111061232 廖桓毅

111061244 田仁泰

指導教授 Advisor

李夢麟 教授

中華民國一一四年九月

September 2025

## 一、摘要

本研究利用 HC-SR04 超音波模組與 STM32F407VET6，結合 TDOA 與聚焦技術進行三通道回波訊號擷取，以實現人體位置與臉部方向辨識。系統採單一 ADC 輪流取樣並透過 DMA 即時傳輸資料至 MATLAB，搭配帶通濾波、Hilbert 包絡分析與線性插值修正提升訊號品質。

在人體定位方面，本研究採用 TDOA (Time Difference of Arrival) 方法實現定位。系統利用單一 Tx 發射端與三個 Rx 接收端，透過計算各接收端間的訊號抵達時間差，進行三點定位，以推估人體位置。

在人臉姿態識別方面，則運用多 Tx 與 Rx 所構成的聚焦技術，藉由不同角度的回波訊號提升空間方向分辨率，並擷取各角度的特徵資料輸入機器學習模型分析。系統將姿勢分為正臉、左側臉與右側臉三類，用於訓練分類模型。

研究結果顯示，本系統能有效擷取多通道訊號，並透過波束聚焦顯著提升角度辨識精度；在有效量測範圍內，亦能準確實現人體位置判定與人臉方向感知。

## 二、研究動機與研究問題

隨著智慧設備與人機互動技術的發展，準確且高效的使用者定位已成為重要課題。現有定位方式主要包含影像識別、藍牙/UWB 與超音波測距。影像技術雖解析度高，但受限於隱私、功耗與光照條件；藍牙與 UWB 具低功耗特性，卻易受環境干擾，難以達到毫米級精度。相較之下，超音波測距兼具低功耗、高精度、隱私性佳與不受光線限制等優勢，展現獨特價值。

如今，超音波定位技術已被廣泛應用在醫學、聲學顯微鏡等領域，但應用於人體定位的技術卻相對甚少。因此，本研究將專注於 airborne ultrasound targeting 技術，透過 TDOA 技術與超音波陣列波束聚焦，實現對使用者的方向、距離及臉部朝向的偵測，並進一步探索其應用於空間音訊等領域的可能性。

## 三、研究方法與步驟

### (一) 分析 HC-SR04 電路圖並抓取內部訊號

我們使用 HC-SR04 超音波測距模組，並利用 Hspice 軟體模擬其電路，分析每個電路結構作用，結果如下：

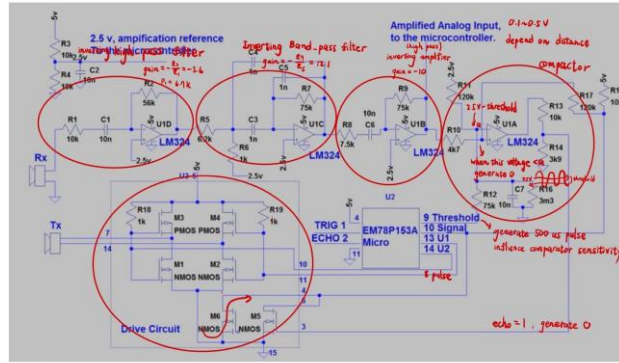


圖 3-1: HC-SR04 電路圖分析

由上述分析結果，我們發現其接收端內部有三級放大器，我們根據不同測試環境決定訊號放大的倍率。

- 在平面測試中，訊號強度充足，採取接收端第一級放大後的訊號(R5)。
- 在人臉測試中，因結構複雜導致反射訊號顯著減弱，故改採接收端第三級放大的訊號(R10)。

在訊號擷取過程中，Trigger 訊號的設定對發射與接收的時序控制至關重要，其準確性會影響發射與接收端的同步性，進而影響分析準確度。

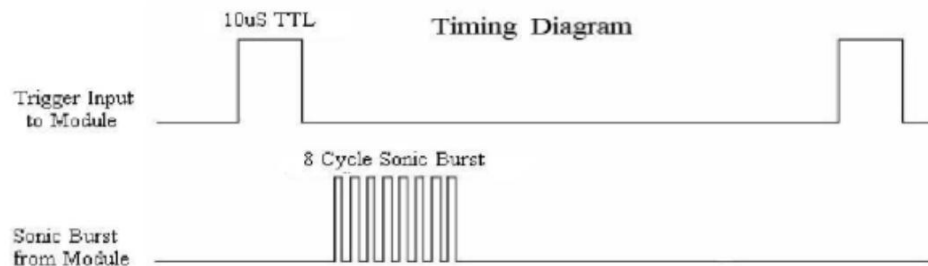


圖 3-2: HC-SR04 發射時序圖

HC-SR04 模組收到外部 trigger 訊號後，會發出 8 個持續 25us、頻率 40kHz 的方波，這些方波會引起感測器中的壓電片震盪，發出超音波訊號。

## (二) 使用 STM32f407VET6 實現三通道訊號採集

本研究以 STM32F407VET6 為主要控制平台，實現一次三通道的訊號擷取，並將資料傳輸至電腦端進行後續分析。研究步驟如下：

### 1. ADC 架構與取樣方式分析

- 了解 STM32 內部 ADC 的運作原理，包含單一 ADC 多通道輪流取樣，以及多個 ADC 並行取樣兩種方式。
- 經測試比較後，發現單一 ADC 多通道輪流取樣在本實驗中能提供較高的取樣率，因此採用此方式進行訊號擷取。
- 經過測試，STM32 最高的取樣速度為 400kHz，故本研究採用此頻率作為後續訊號擷取設定。

## 2. 發送 Trigger 訊號與資料擷取

在 STM32 發送 Trigger 訊號的同時，亦將該訊號作為內部 ADC 的觸發來源，並設定於觸發後擷取 1500 筆取樣點（3.75 ms）之數據，以確保完整波形的擷取。

## 3. DMA 技術應用

- 為了實現即時資料傳輸，本研究利用 STM32 內建的 DMA(Direct Memory Access)功能。
- 透過 DMA，擷取的資料能在不增加 CPU 負擔的情況下直接傳送至電腦端，並以 MATLAB 進行後續即時分析。

## 4. ADC 訊號正確性驗證

- 使用訊號產生器輸入已知訊號，分別測試三個通道 Rx 採集到的振幅大小、震幅波動、取樣頻率、以及取樣延遲。

表 3-1 ADC 正確性驗證

	ch1	ch2	ch3
振幅誤差(%)	14%	14%	14%
震幅波動(%)	1%	1%	0.5%
取樣頻率誤差(%)	1%	1%	1%
取樣延遲(us)	1.476us	1.476us	1.476us

- 小結：三個通道的採集結果整體一致，取樣延遲在 40 kHz 訊號頻率下可忽略不計。需特別注意的是，後續分析時須對量測振幅進行 14% 的誤差補償，以確保數據準確性。
- 驗證結果顯示 ADC 取樣數據與預期一致，確保系統能正確擷取多通道訊號。

## 5. 資料封包與傳輸

- 擷取完成後，將 ADC 快取資料整理為封包格式，透過串列介面傳輸至 MATLAB 端。
- MATLAB 負責進行後續的數據處理與分析。

### (三) 訊號特徵、訊號處理方法優化

在訊號傳輸至 MATLAB 後，為提升訊號品質與分析精度，本研究採用了以下方法：

#### 1. 頻帶濾波

由於原始訊號中含有雜訊，首先透過帶通濾波器保留 40kHz 附近的有效波形資訊，去除無關頻段的雜訊成分。

#### 2. 飽和修正

針對出現飽和的訊號區段，採用線性插值進行修正，使波形更接近原始真實值，進一步提升訊號品質。

#### 3. 包絡分析

為了更清楚地觀察與分析訊號特徵，使用 Hilbert Transform 將原始波形轉換為包絡訊號，利於後續能量與時序的分析。

#### 4. 元件靈敏度校正

由於不同 HC-SR04 感測元件存在靈敏度差異，實驗中先測量各元件間的能量偏差，再對各通道訊號加上適當的偏移量，以確保資料分析的一致性與準確性。

### (四) 人體定位

在訊號控制中，我給定 HC-SR04 一個 trigger 訊號，其會產生 8 個方波，隨後會有回波的訊號，回波訊號到八個方波結束的時間差和其距離有關。

因此我們透過，讀取每個 Rx 回波訊號震幅最大的時間點，算出距離後，分別以該 Rx 為圓心去化個圓，而圓周的交叉處即為物體的樣子，之後在 MATLAB 上把數據匯入並用圖像的方式呈現

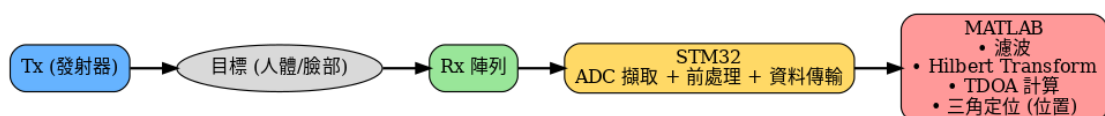


圖 3-3: 定位方法流程

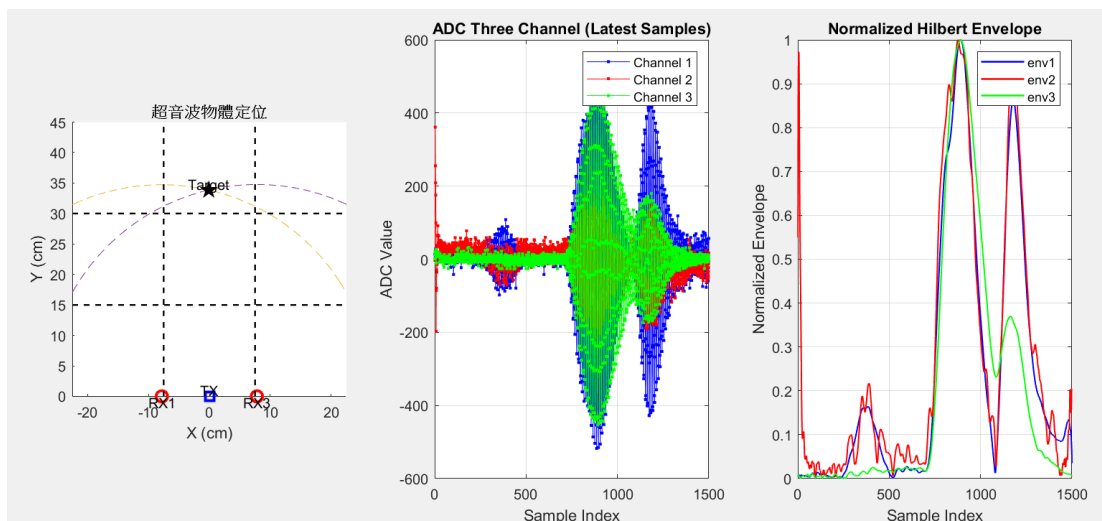


圖 3-4: 由超音波訊號得出物體的位置

在此部分的研究，為了驗證陣列設計對系統的影響，我們建立了不同種收發器排列方式（1Tx2Rx、1Tx3Rx），並比較兩種陣列的不同。

1. 1Tx 2Rx：Tx 位於中間，排列方式：R1 - 7.8cm - T - 7.8cm - R2
2. 1Tx 3Rx：Tx 位於中間，排列方式：R1 - 7.8cm - T - R2 - 7.8cm - R3

#### (五) 朝向辨識

在朝向辨識中，我們嘗試從多通道的回傳訊號中擷取訊號特徵，並建立一套可辨識物體正面、順時針與逆時針朝向的分析方法。

##### 1. 收發器陣列

在這部分研究中，我們使用了兩種陣列，這邊簡單介紹這兩種陣列的配置及優缺點。

- 1Tx 3Rx：(R1-7.8cm-T-R2-7.8cm -R3)

這配置旨在利用不同位置的 Rx 資料的差異，來達到辨識不同朝向的結果，故意讓配置不平衡的目的在於，讓順逆方向的訊號差異更明顯。

- 2Tx 3Rx：(R1-5.2cm-T1-5.2cm-R2-7.8cm-T2-5.2cm-R3)

然而，由於系統主要依靠反射訊號進行判斷，在不同姿態下回波能量可能不足或變化難以預測，進而影響特徵的穩定提取。為改善此問題，我們透過增加第二個發射器，使得波束能夠在特定方向上形成聚焦效應，並利用干涉削弱非目標方向的能量。此設計使回波在不同

朝向下具備更明顯的差異，有助於後續的方向辨識與分類模型訓練。

## 2. 訊號特徵

為了使不同朝向的反射訊號具備可量化的差異性，本研究定義了以下特徵：

(1) 到達時間差： $\Delta t_{Rx1-Rx2}$ 、 $\Delta t_{Rx1-Rx3}$ 、 $\Delta t_{Rx2-Rx3}$

將三個通道能量正規化後，比較三個接收器間的包絡線峰值出現時間，計算各峰值的 delay 作為到達時間差

(2) 能量比例：

計算各 Rx 波包的能量占比，藉此推測主要回波方向。

(3) 分類方法：

將延遲差與能量比例作為特徵向量，使用 SVM 或 CNN 進行分類。訓練資料集包含三種姿勢（正面、順時針、逆時針），每組 600 筆樣本。

(4) 實驗與模擬驗證：

為驗證系統的穩定性，我們以紙箱平面以及人臉作為測試對象，比較其在不同幾何條件下的辨識效果。

## 四、研究結果

### (一) 人體定位

實驗方法: 將 45 \* 45cm 的區域劃分為九宮格。進行九次測試，每次測試人頭分別移置九宮格中心的位置並取 100 筆資料，若 MATLAB 輸出的位置處在對應的九宮格內視為正確，並計算每個方格結果的正確率。

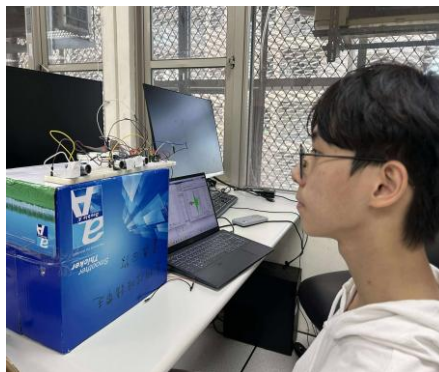
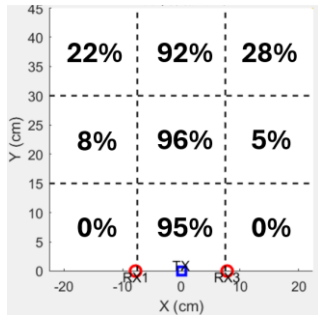
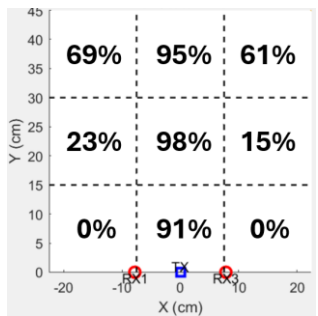


圖 4-1: 人體定位實驗配置

配置	正確率	結果分析
1Tx 2Rx:  Tx 位於中間，Rx 彼此距離 7.8cm		可以發現直排中間三方格的成功率接近 100%，然側邊定位的效果卻非常差。根據 HC-SR04 的 Beampattern，Tx 發射波型的能量會集中在 $\pm 15$ 度內。由於 15 度外的能量過小，導致回波無法正確判別 delay，因此左三與右三方格的正確率趨近於零。
1Tx 3Rx:  Tx 與其中一 Rx 位於中間，Rx 彼此距離 7.8cm		透過增設一個 Rx，我們偵測 3 個 Rx 回波並忽略過小的不可信訊號再進行定位。結果顯示增設 Rx 可以顯著提升測邊判定成功的機率。  還可以發現，側邊方格距離越遠，由於人頭越接近 Tx 端 $\pm 15$ 度的範圍，判定成功率也會顯著上升。

討論:

可以發現僅管直排中間的判定成功率接近百分之百，側邊兩排的判定成功率仍不合預期，並且增設 Rx 也僅能些微擴大偵測範圍，屬於治標不治本。後續應考慮採用指向角較大的發射器，並結合 beamforming 聚焦特定能量角度以實現更精準的定位。

## (二) 朝向辨識

在朝向辨識測試中，我們依序使用紙箱、人臉作為目標，以逐步驗證系統於不同幾何條件下的辨識能力。朝向分為正面(旋轉 $\pm 10$ 度以內)、順時針、逆時針，每組各收集 500 組資料作為訓練集，100 筆作為測試集計算判斷成功的機率。

### 1. 紙箱平面朝向測試

配置	使用模型	正確率	結果分析
1Tx	SVM	98%	朝向不同時各 Rx 的特徵非常明顯(如逆



3Rx			時針轉時，左側 Rx 能量會偏大，並且訊號到達時間為左中右)，因此輸入 SVM 後能夠很好的判斷出朝向。
2Tx 3Rx	SVM	87%	通過 2tx 的聚焦，理應讓能量集中於特定區域使的正確率提升，然實際上正確率卻下降了 10% 左右。這是因為改成 2Tx 後回波有時會出現兩個大小差不多的波峰，由於我們輸入 SVM 的到達時間差是根據波峰位置判斷的，因此有時得到的到達時間並不會準確，從而導致了判斷正確率的下降。

## 2. 人臉朝向測試

由於人臉是一個複雜的反射面，難以預測回波訊號的樣態，因此我們先使用 k-wave 波型模擬軟體來觀察人臉回波的特徵。

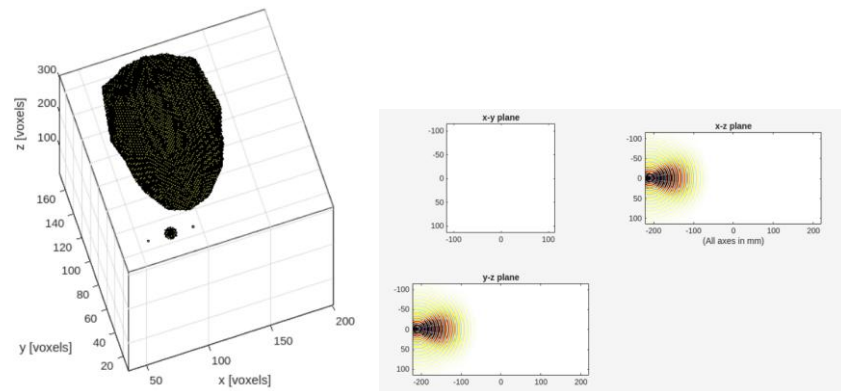


圖 4-3、4-4: k-wave 模擬示意圖

然而，經過模擬與實際測試後發現，人臉只需輕微旋轉幾度，Rx 的回波便會有大幅度的變化，因此特徵的規律變得不明顯，此時 SVM 分類器便無法發揮出預期的效能。

因此，我們改使用 CNN 分類器，並直接使用回傳的波形作為特徵。人臉距發射器固定為 32cm，正面、左側面、右側面每個方向取 400 個資料作為訓練集、100 筆作為驗證集、100 筆作為測試集以計算正確率。

配置	使用模型	正確率	結果分析
1Tx 3Rx	CNN	54%	可發現正確率不如預期(只比最低的 33% 高了 20%左右)，這是因為人臉是一個複雜的反射面，但 HC-SR04 打到的範圍卻很廣(幾乎整個人臉)，因此回波可能是額頭、鼻尖、耳朵等眾多反射訊號的合成，輕微的變動就會對波型造成大幅度的影響而難以判斷特徵。
2Tx 3Rx	CNN	78%	可以發現正確率相對於 1Tx 的配置提升了 20%左右。這是因為通過 2Tx 的聚焦，能量會集中在人臉的小區域範圍內，因此避免了人臉過多區域的反射訊號干擾分類器的判斷。

討論：

可以發現，紙箱朝向測試中 1Tx 的效果筆 2Tx 好，而人臉朝向測試中則相反。這是因為紙箱並非複雜反射面而是平滑斜面，儘管 Tx 發射的波型會打到大範圍面積，回傳的波型仍會有一定的規律，此時 2Tx 便會因回傳波型較複雜而使得正確率變低。然可以預期的是，由於我們的目標是複雜的反射面(人臉)，因此聚焦 (beamforming) 仍是不可少的一環。目前我們人臉測試的正確率仍不如預期，並且未來我們還需要讓分類器在不同距離下仍能正確分類 (目前只固定在 32cm)，因此我們需要改良我們的演算法與硬體配置，多角度 beamforming 的掃描便是我們未來的可選項。

## 五、後續研究方向

### (一) 硬體設備更改

在人體定位的研究結果顯示，現有 HC-SR04 發射器的指向角約為  $\pm 15^\circ$ ，在九宮格定位實驗中，僅能在中央直排獲得接近 100% 的成功率，而側邊區域因能量不足而導致定位失準，並且，我們也需要較廣的指向角以實現大角度的 beamforming。

因此我們改採用 TCT16(發射孔徑：16mm)發射器，以下是 TCT16 以及 HC-SR04 的 Beampattern 比較。

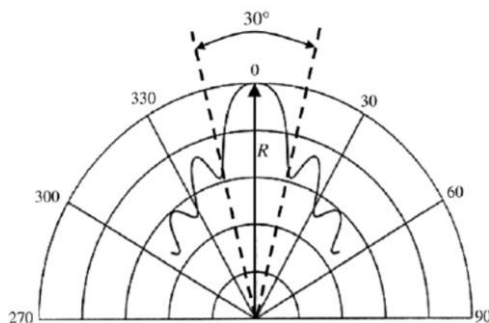


圖 5-1: HC-SR04 Beampattern

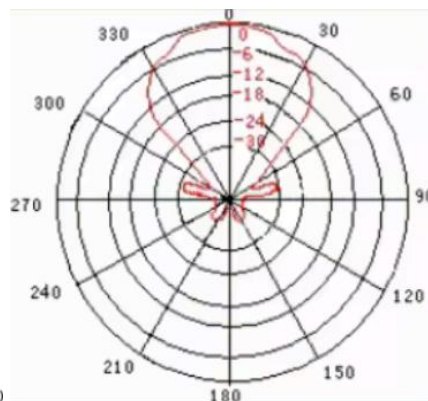


圖 5-2: TCT16 Beampattern

圖 5-1 與圖 5-2 分別展示 HC-SR04 與 TCT16 的 Beam Pattern。相較之下，HC-SR04 的能量集中在 $\pm 15^\circ$ 內，而 TCT16 則能在 $\pm 30^\circ \sim 40^\circ$ 的範圍內維持較高的聲壓，意味著其更適合應用於廣角定位與朝向辨識。

#### ● TCT16 操作方式

為了驅動 TCT16 超音波換能器，需要提供週期性觸發訊號(Trigger)以產生發射波形。由於 TCT16 有效發射需要較大的峰對峰電壓( $V_{pp}$ )。在本研究中，我們透過 STM32F407VET6 輸出低電壓(3.3v)PWM 方波作為基準訊號，並利用 MOSFET 作為開關元件，將 PWM 連接至 Gate 端，將低電壓 PWM 轉換為高電壓方波以驅動 TCT16。

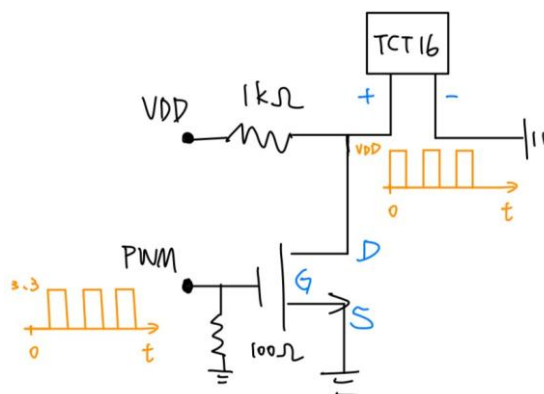


圖 5-3: TCT16 驅動電路

#### (二) Beamforming 實做

在前述研究中，我們已利用雙發射器(2Tx)架構實現  $0^\circ$  方向的能量聚焦。然而，Beamforming 的優勢在於可藉由調整各發射器的發射延遲(Phase Delay)，進一步控制超音波波束的主瓣方向，從而在不同角度上達到收發聚焦的效果。

假設兩個發射器之間的間距為  $d$ ，超音波傳播速度為  $v$ ，若欲將波束聚焦於角度  $\theta$ ，則所需的延遲時間差為：

$$\Delta t = \frac{d \cdot \sin \theta}{v}$$

而後在接收端(Rx)所收集的訊號經過 **對齊(Offset 補償)**與**疊加**後，可得到在目標方向上聚焦的回波。將不同角度的回波信號匯入 MATLAB，透過延遲補償與能量疊加繪製 **R- $\theta$  圖 (極座標圖)**，即可觀察物體在不同角度下的反射強度分布，進而描繪出目標的輪廓。

## 六、結論

本研究以 HC-SR04 超音波模組結合 STM32F407VET6 平台，實現三通道回波訊號擷取與姿勢辨識系統。透過分析超音波模組特性，選用單一 ADC 多通道輪流取樣與 DMA 傳輸技術，成功建立即時資料擷取與傳輸架構。為提升訊號品質，本研究進行帶通濾波、Hilbert 包絡分析、靈敏度補償與飽和插值修正，確保輸入機器學習模型之特徵具穩定性與可靠性。

在定位實驗中，結果顯示中軸區域的辨識率可達近 100%，但側邊區域受限於發射器指向角度，辨識率明顯下降。即便增設接收器可提升側邊判定率，整體偵測範圍仍受限於發射能量分佈，顯示未來可透過更寬指向角之發射器或多波束 Beamforming 技術改善覆蓋範圍。

於朝向辨識實驗中，對簡單平面目標（紙箱）而言，SVM 模型可達 98% 的高正確率；然而對複雜反射面（人臉），由於回波特性和高度非線性，SVM 效果不佳。改採 CNN 並結合雙發射器聚焦後，正確率提升至 78%，顯示聚焦能量有助於減少干擾並強化特徵辨識。

綜合以上結果，本研究證明以低成本超音波模組搭配適當訊號處理與機器學習模型，確實可實現基本的定位與朝向辨識功能。未來可進一步整合多角度 Beamforming 掃描技術與距離自適應分類器，以提升複雜場景下的穩定性與準確率。

## 七、參考文獻

- [1] Toa, M., & Whitehead, A. (2021). *Application Note Ultrasonic Sensing Basics*. <https://www.ti.com/lit/an/slaa907d/slaa907d.pdf?ts=1739815410379>
- [2] Chen, Y. H. (2014). 適用於超音波系統之低複雜度波束成像引擎演算法及架構設計 [doctoral dissertation, National Taiwan University]. Airiti Library.

<https://doi.org/10.6342/NTU.2014.02047>

- [3] B. D. Van Veen and K. M. Buckley, "Beamforming: a versatile approach to spatial filtering," in *IEEE ASSP Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 4-24, April 1988, doi: 10.1109/53.665.
- [4] Wang, T., Xiong, H., Ding, H., & Zheng, L. (2016). A Hybrid Localization Algorithm Based on TOF and TDOA for Asynchronous Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*, 4.
- [5] F. Bonanni, C. Ponzi and Q. H. Pham, "High Range Resolution (HRR) profiling within low elevation search mode," *2008 IEEE Radar Conference*, Rome, Italy, 2008, pp. 1-6, doi: 10.1109/RADAR.2008.4720946.
- [6] Zhenwei Miao, Wei Ji, Yong Xu and J. Yang, "A novel ultrasonic sensing based human face recognition," *2008 IEEE Ultrasonics Symposium*, Beijing, 2008, pp. 1873-1876, doi: 10.1109/ULTSYM.2008.0461.
- [7] Y. Xu, J. Y. Wang, B. X. Cao and J. Yang, "Multi sensors based ultrasonic human face identification: Experiment and analysis," *2012 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, Hamburg, Germany, 2012, pp. 257-261, doi: 10.1109/MFI.2012.6343000.
- [8] Abreu, D., Toledo, J., Codina, B., & Suárez, A. (2021). Low-Cost Ultrasonic Range Improvements for an Assistive Device. *Sensors*, 21(12), 4250. <https://doi.org/10.3390/s21124250>
- [9] A. García-Requejo, M. C. Pérez-Rubio, A. Hernández, W. M. D. Wright and L. Marnane, "Ultrasonic Device-Free Localisation System Modelling for Performance Analysis," *2023 13th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Nuremberg, Germany, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/IPIN57070.2023.10332222.