

# 國家科學及技術委員會補助專題研究計畫報告

## 設計具有邊緣運算能力之微型機動輻射偵檢器

報告類別：成果報告  
計畫類別：個別型計畫  
計畫編號：NSTC 112-2623-E-305-001-NU  
執行期間：112年01月01日至113年06月30日  
執行單位：國立臺北大學電機工程學系

計畫主持人：姚書農

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：王昱翔

本研究具有政策應用參考價值：否 是，建議提供機關核能安全委員會

(勾選「是」者，請列舉建議可提供施政參考之業務主管機關)

本研究具影響公共利益之重大發現：否 是

中華民國 113 年 03 月 26 日

中文摘要：這份研究旨在開發一種具有邊緣運算能力的微型機動輻射偵檢器設計。隨著輻射偵測的重要性日益突顯，本研究探索了一種革新性的方法，提高偵測器的效率和準確性同時降低製造成本。團隊設計了一種微型化、輕量化的偵測器，具有優越的移動性和省電性，能夠有效地檢測輻射值。同時，我們導入機器學習與邊緣運算技術，使偵檢器能夠在本地處理和上傳數據，降低因數據傳輸和資料處理而產生的延遲，及時預警核災的發生。最後蒐集的數據由終端伺服器進行機器學習。這種新型偵檢器的設計不僅能夠輕鬆布設於各種環境，甚是因為微型輕量的特性，所以可以架設機器人跟無人機，監測人無法到達的危險地區，提供了更高效的輻射監測解決方案。本研究所提出的設計為輻射偵測領域帶來了一種具有前瞻性和應用價值的新途徑。

中文關鍵詞：邊緣運算，輻射，機器學習，核災

英文摘要：This research aims to develop a miniature mobile radiation detector design with edge computing capabilities. As the importance of radiation detection continues to grow, this study explores an innovative approach to enhance the efficiency and accuracy of detectors while reducing manufacturing costs. The team has designed a compact and lightweight detector with superior mobility and energy efficiency, capable of quickly and accurately detecting radiation levels. Additionally, machine learning and edge computing technologies have been incorporated to enable the detector to process and upload data locally, reducing delays caused by data transmission and processing and providing timely warnings of nuclear incidents. The collected data is finally subjected to machine learning on the terminal server. The design of this new detector not only allows for easy deployment in various environments but also, due to its miniature and lightweight characteristics, can be mounted on robots and drones to monitor dangerous areas inaccessible to humans, offering a more efficient radiation monitoring solution. The proposed design in this study introduces a forward-looking and practically valuable approach to the field of radiation detection.

英文關鍵詞：edge computing, radiation, machine learning, nuclear incidents

## 設計具有邊緣運算能力之微型機動輻射偵檢器

### Edge Computing Platform for Mobile Radiation Detection Systems

#### 摘要

這份研究旨在開發一種具有邊緣運算能力的微型機動輻射偵檢器設計。隨著輻射偵測的重要性日益突顯，本研究探索了一種革新性的方法，提高偵測器的效率和準確性同時降低製造成本。團隊設計了一種微型化、輕量化的偵測器，具有優越的移動性和省電性，能夠有效地檢測輻射值。同時，我們導入機器學習與邊緣運算技術，使偵檢器能夠在本地處理和上傳數據，降低因數據傳輸和資料處理而產生的延遲，及時預警核災的發生。最後蒐集的數據由終端伺服器進行機器學習。這種新型偵檢器的設計不僅能夠輕鬆布設於各種環境，甚是因為微型輕量的特性，所以可以架設機器人跟無人機，監測人無法到達的危險地區，提供了更高效的輻射監測解決方案。本研究所提出的設計為輻射偵測領域帶來了一種具有前瞻性和應用價值的新途徑。

#### Abstract

This research aims to develop a miniature mobile radiation detector design with edge computing capabilities. As the importance of radiation detection continues to grow, this study explores an innovative approach to enhance the efficiency and accuracy of detectors while reducing manufacturing costs. The team has designed a compact and lightweight detector with superior mobility and energy efficiency, capable of quickly and accurately detecting radiation levels. Additionally, machine learning and edge computing technologies have been incorporated to enable the detector to process and upload data locally, reducing delays caused by data transmission and processing and providing timely warnings of nuclear incidents. The collected data is finally subjected to machine learning on the terminal server. The design of this new detector not only allows for easy deployment in various environments but also, due to its miniature and lightweight characteristics, can be mounted on robots and drones to monitor dangerous areas inaccessible to humans, offering a more efficient radiation monitoring solution. The proposed design in this study introduces a forward-looking and practically valuable approach to the field of radiation detection.

#### 前言

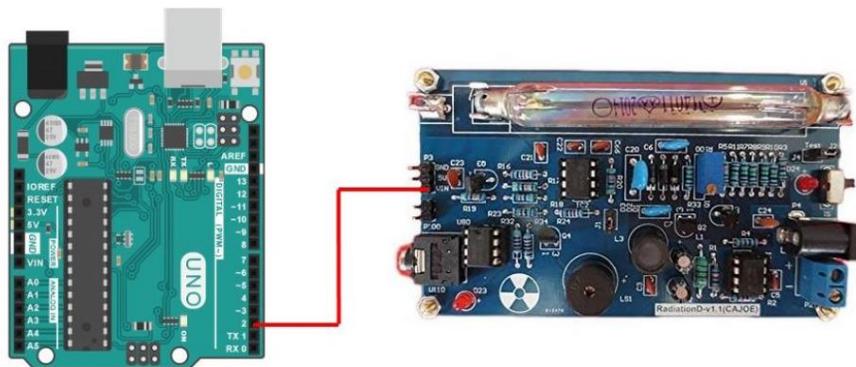
我國核能電廠陸續進入除役階段，各廠房系統設備將隨除役工作的進展於停用隔離後進行拆除，對於可發生游離輻射的設備與核廢料，應有嚴密的輻射劑量監測，以能在安全的前提下，如期如質完成除役作業。再者，臺灣周邊國家如日本共

33 座核能電廠機組，中國大陸共 55 座核能電廠機組，另外還有 15 座正在興建中。面對潛在的境外核災與輻射污染，我們更需要適時提出預警。因此本計畫發展、微型、機動、低成本、低功耗且有具人工智慧的即時輻射監測儀器，增加輻射監測密度，未來可以應用於輻射異常的緊急事故，提升預警能力，進而達到輻射防護之效能。現有監測站造價昂貴，所以數量有限，本計畫開發的微型機動偵檢器，因為成本較低，可以大量布放，雲端伺服器統整所有偵檢器的資料，可以對各新型偵檢器作校正。這種能力對於在災害現場、工業檢測或醫療應用中快速偵測輻射情況至關重要。透過這種新型設計，我們的目標是提供一個全新且高效的解決方案，以應對不斷變化和多樣化的輻射偵測需求，同時確保即時且準確的數據收集和分析。

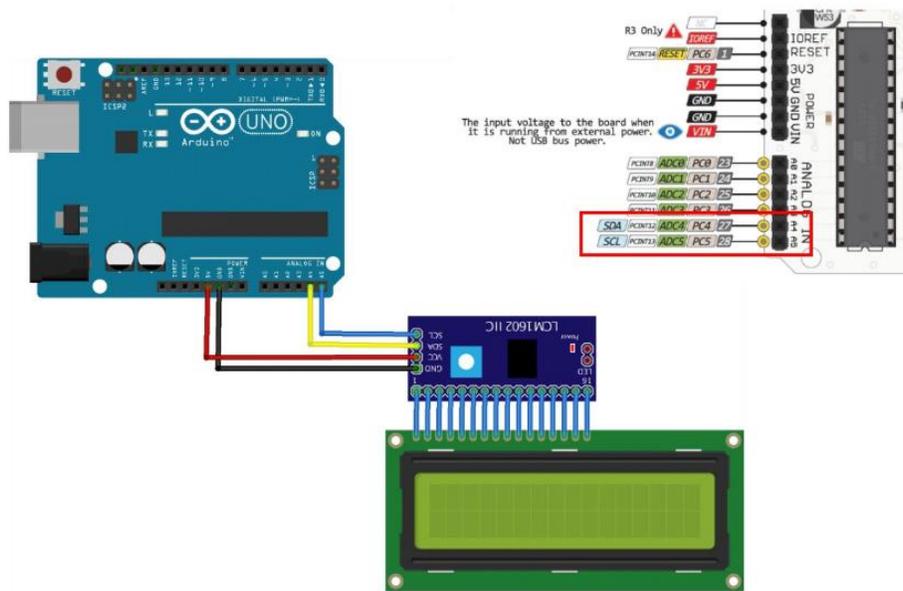
這種具有邊緣運算能力的微型機動輻射偵檢器的應用，對於全台 63 個輻射偵測站有著深遠的意義。它能夠協助監測人員及時獲取全台各地的輻射數據，迅速掌握輻射值變化趨勢，為公眾健康和 safety 提供重要參考。這對於應對突發事件或日常監測都具有重要價值。

## 主要內容

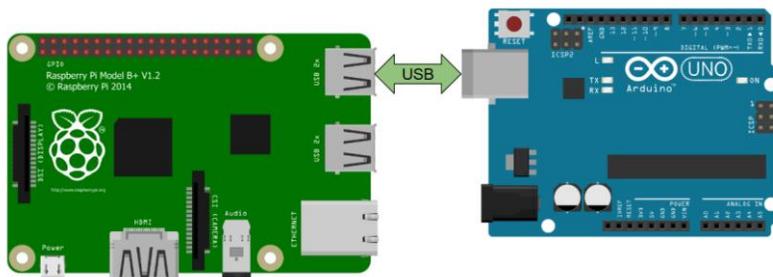
本年度計畫有兩大成果，分是是硬體輻射偵檢器實作與使用演算法對背景輻射值進行數值分析。在硬體電路方面選用 Geiger Counter Radiation-D v1.1 電路板如圖一右，因為電路板相容於多款蓋格管如：M4011、J305 及 SBM-20。其偵測到的數值以 Counts Per Minute (CPM) 為單位，不同蓋格管對於吸收輻射能量產生電脈衝的次數不一樣，所以每更換一種蓋格管就需要經過輻射校正室找出 CPM 與微西弗間的關係。Geiger Counter Radiation-D v1.1 電路板會傳輸到 Arduino 開發版如圖一左連接液晶顯示器如圖二，顯示所偵測到的輻射值。為了讓前端的偵檢器具有邊緣運算能力，Arduino 開發版還會透過 USB 傳輸將數值傳到樹梅派微電腦如圖三，所以所有的輻射值都會記錄在微電腦的資料夾內。在供電方面，因為所使用的電路系統皆是 5V 電壓，以市售的行動充電裝置即可，亦可連接太陽能板使用再生能源如圖四。



圖一 Geiger Counter Radiation-D v1.1 電路板連接 Arduino 開發板



圖二 Arduino 開發板以 LCD 螢幕顯示數值



圖三 Arduino 開發板連接樹梅派微電腦



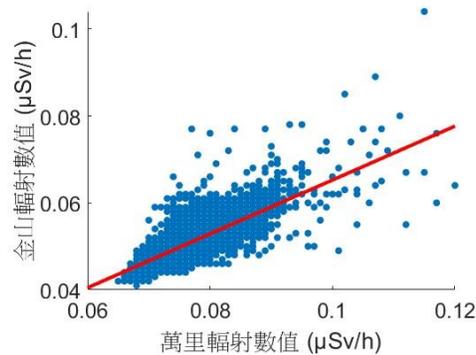
圖四 太陽能面板供電

在輻射值分析方面，團隊以核二廠鄰近六個測站做預測，取 2018 至 2022 年的輻射資料訓練預測模型。依序進行以下策略：

### 1. 特徵選擇與相關係數

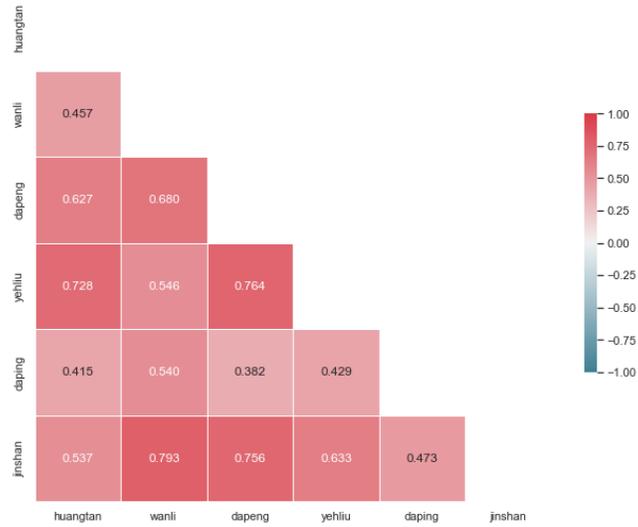
使用皮爾森相關係數(Pearson's correlation coefficient)[1]計算兩樣本間線性相關的程  
度如(一)式，定義為兩變數X和Y的共變異數(covariance)和兩變數的標準差相乘之比  
值。首先定義X和Y的平均值分別為 $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ ，標準差分別為 $\sigma_X$ 和 $\sigma_Y$ 。相關係數的值介  
於 $\pm 1$ 之間。圖五是金山和萬里的輻射數據散佈圖，兩數據的相關性為 0.79

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X-\bar{X})(Y-\bar{Y})]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (一)$$



圖五 金山和萬里的輻射數據散佈圖

接著分別計算核二廠附近的六個輻射測站的相關係數矩陣，並可視化成熱力圖如圖六。顏色深淺表示相關係數取絕對值後的大小，顏色越深表示相關係數取絕對值後越大。

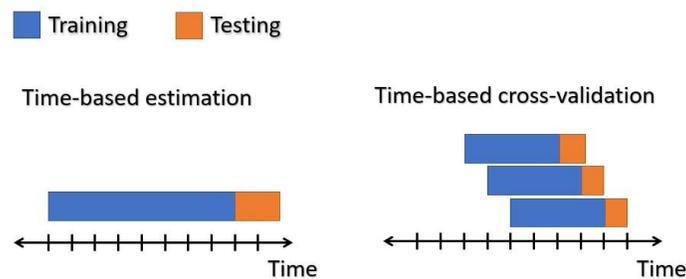


圖六 核二廠附近的六個輻射測站相關係數矩陣

## 2. 時間序列交叉驗證(Time series cross validation)

傳統的交叉驗證在隨機選擇訓練集和測試集時，可能違反了訓練集和測試集的時間順序(測試集在前訓練集在後)，導致模型過擬和。時間序列交叉驗證的示意圖如圖七。

因此本研究選擇時間序列交叉驗證，確保訓練集必定先於測試集[2]。首先將 2018 到 2022 年資料集先切割成五個相等大小的數據集，再將每個數據集內再次分為訓練集和測試集，可確保交叉驗證的結果更穩定。



圖七 時間序列交叉驗證的示意圖

## 3. 嶺回歸(ridge regression)

嶺回歸是一種用於線性回歸的正則化技術[3]，它在普通最小二乘法的基礎上加入了 L2 正則化項，使每一項變量的權重不會太大。這個正則化項有助於解決普通最小二乘法中可能出現過擬合(overfitting)和多重共線性(multicollinearity)的問題。

假設迴歸方程為：

$$Y = X\beta + b \quad (二)$$

其中 Y 為應變數，X 為自變數， $\beta$  為權重。欲以最小二乘法求  $\beta$  之估式，若特徵間多重共線性存在， $X^T X$  接近於奇異矩陣，可能導致無窮解，導致計算誤差。因此加入參數  $\lambda$ ：

$$\hat{\beta} = (X^T X + \lambda I_n)^{-1} X^T y \quad (三)$$

用觀測值 ( $x_{ij}$ ) 與預測值 ( $y_i$ ) 的最小二乘法又可列為：

$$\hat{\beta} = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^n x_{ij} \beta_j \right)^2 \quad (四)$$

最後以損失函數  $J_\beta(\beta)$ ，在最小二乘法的基礎上再加上 L2 作為懲罰項：

$$J_\beta(\beta) = \operatorname{argmin} \left\{ \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^n x_{ij} \beta_j \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^n \beta_j^2 \right\} \quad (五)$$

$\beta$  為模型權重

$\beta_j$  為共 n 項特徵中第 j 項特徵係數

$\lambda$  為 L2 正則化的參數，控制對  $\beta_j$  的懲罰強度，減少離群值對模型的影響

在本研究中使用之模型方程又可列為：

$$\operatorname{argmin}_\omega \|X\omega - y\|_2^2 + \alpha \|\omega\|_2^2 \quad (六)$$

X 為觀測值

y 為預測值

$\omega$  為權重

$\alpha$ 為 L2 正則化的參數，本研究設計模型從 $\log(10^{-10})$ 到 $\log(10^{10})$ 之間均勻分布取 41 個值，再以交叉驗證找出最合適之 $\alpha$ 值。

#### 4. 決定係數

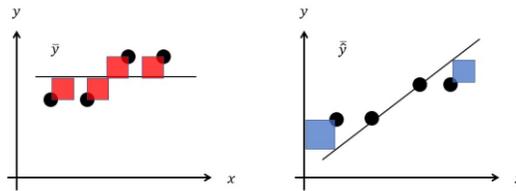
在迴歸模型中目標變異和預測誤差變異之差與目標變異的比例，用來評估模型預測性能，越趨近於 1 性能越好。假設一數據的觀測值為 $y_1, y_2, \dots, y_n$ ，與對應的模型輸出值 $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$ 。

首先計算總平方和( $SS_{tot}$ )與殘差平方和( $SS_{res}$ )，再計算 $1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}$ 。

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (七)$$

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (八)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (九)$$



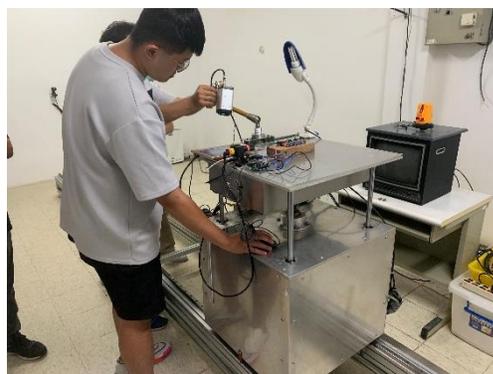
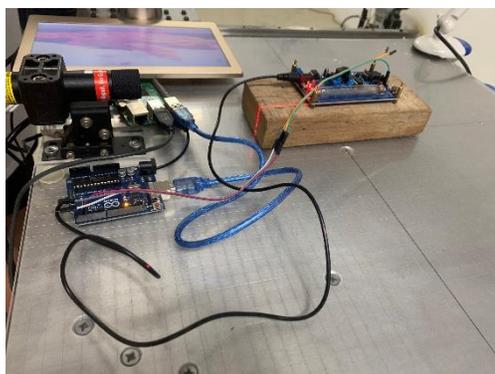
圖八 左圖和右圖分別為 $SS_{tot}$ 和 $SS_{res}$

#### 結果與討論

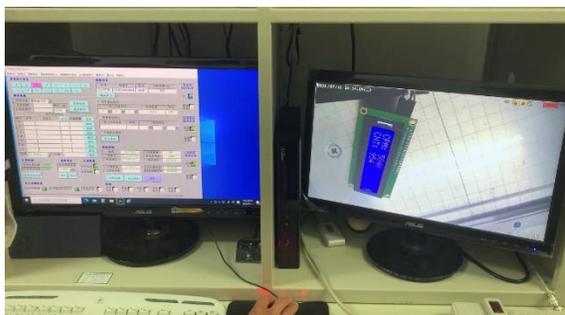
微型輻射偵檢器組合完成如圖九，並且攜帶至輻射偵測中心校正室如圖十，由於所設計的輻射偵檢器以 CPM 為單位，必須以線性回歸找出 CPM 與微西弗之間的單位轉換係數，在校正室內輻射劑量從 6 微西弗量測到 200 微西弗如圖十一(甲)，經回歸之後的轉換公式如圖十一(乙)，可見線性度良好。



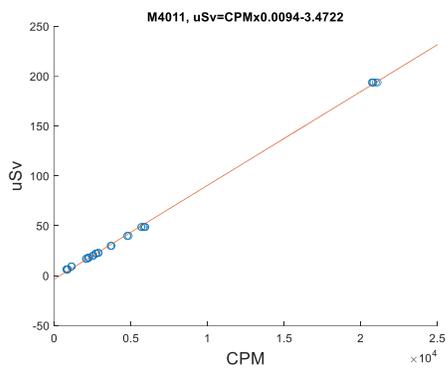
圖九 組裝完成的輻射偵檢器



圖十 輻射偵測中心校正自製輻射偵檢器



(甲)



(乙)

圖十一 (甲) 輻射劑量由低至高施打 (乙) CPM 與 uSv 線性回歸

由於本年度計畫主要專注在輻射偵檢器實作，如果等輻射偵檢器設計完成之後，將會沒有足夠時間蒐集背景輻射，所以研究團隊另外從核能安全委員會所開放的公開資訊下載核二廠附近的背景輻射值，包含核二廠周圍磺潭、萬里、大鵬、野柳、大坪、金山，共六個輻射測站從 2018 年至 2022 年的數據，每次假設一個測站的數值為未知，其他五個測站數據為已知，訓練模型後，並用決定係數( $R^2$ )評估模型訓練成效，如下表所示：

表一 核二廠鄰近六測站原始輻射數據預測結果

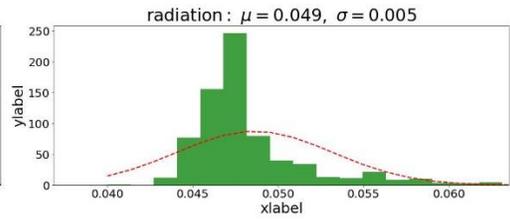
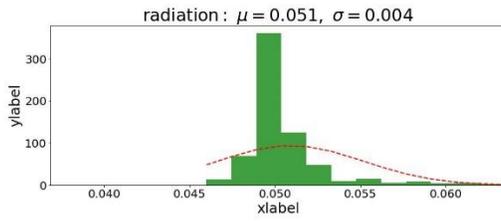
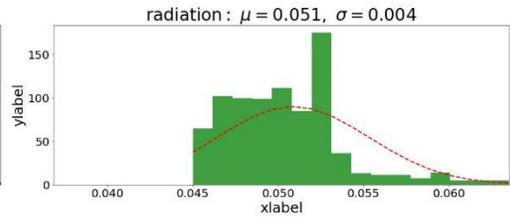
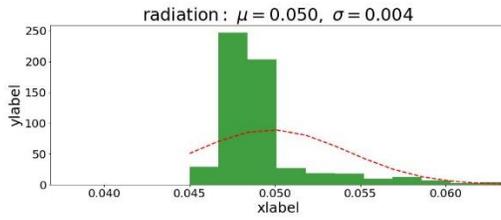
測站	回歸模型衡量
磺潭	Mean Absolute Error: 0.00235 +/- 0.00057 Root Mean Squared Error: 0.00322 +/- 0.00063 R2: 0.57672 +/- 0.29411 [0.25567008 0.82843742 0.83066989 0.18065201 0.78818732]
萬里	Mean Absolute Error: 0.00120 +/- 0.00020 Root Mean Squared Error: 0.00172 +/- 0.00032 R2: 0.56889 +/- 0.21804 [0.41197662 0.78605333 0.76569452 0.22338874 0.65735147]
大鵬	Mean Absolute Error: 0.00172 +/- 0.00091 Root Mean Squared Error: 0.00199 +/- 0.00103 R2: 0.54377 +/- 0.34345 [0.30144633 0.47528358 0.86328222 0.07886089 1. ]
野柳	Mean Absolute Error: 0.00129 +/- 0.00101 Root Mean Squared Error: 0.00155 +/- 0.00111 R2: 0.73607 +/- 0.31091 [0.13765194 0.7371818 0.90126147 0.90425767 1. ]
大坪	Mean Absolute Error: 0.00406 +/- 0.00164 Root Mean Squared Error: 0.00531 +/- 0.00223 R2: -0.06753 +/- 0.53785 [ 0.66137041 -0.16078071 0.02237344 -0.99384567 0.13322403]
金山	Mean Absolute Error: 0.00112 +/- 0.00017 Root Mean Squared Error: 0.00151 +/- 0.00021 R2: 0.53933 +/- 0.33205 [ 0.76798566 0.70187869 0.77268198 -0.10694455 0.5610246 ]

如進一步將六個測站輻射值以年為單位拆分，從 2019 到 2022 年共四年，x 軸為輻射值，對應 y 軸為樣本數，如表二所示，可見每年輻射量測並無明顯規律特徵，推測非常態分佈為成效不理想的原因之一。未來可置換成自製的輻射偵檢器，由研究團隊自行校正與負責故障排除，確保資料完善。甚至可以自行架設濕度、溫度、與大氣壓力的感測器，將氣候因素考量納入考量[4]，然後以機器學習模型進行訓練[5]。

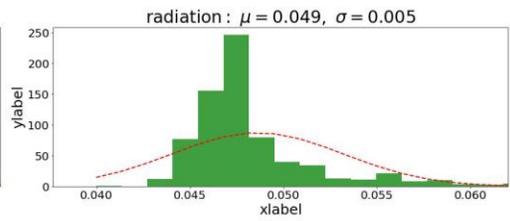
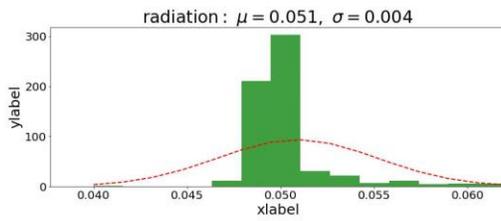
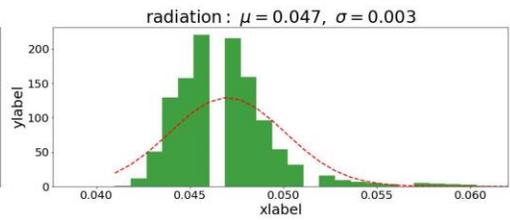
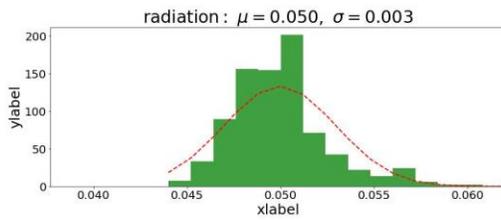
表二 統計各地每一年的輻射值

測站	每年輻射直方圖
礮潭	<p>radiation : <math>\mu = 0.053, \sigma = 0.006</math></p> <p>radiation : <math>\mu = 0.047, \sigma = 0.008</math></p> <p>radiation : <math>\mu = 0.048, \sigma = 0.006</math></p> <p>radiation : <math>\mu = 0.048, \sigma = 0.007</math></p>
萬里	<p>radiation : <math>\mu = 0.072, \sigma = 0.002</math></p> <p>radiation : <math>\mu = 0.074, \sigma = 0.003</math></p> <p>radiation : <math>\mu = 0.074, \sigma = 0.003</math></p> <p>radiation : <math>\mu = 0.075, \sigma = 0.003</math></p>

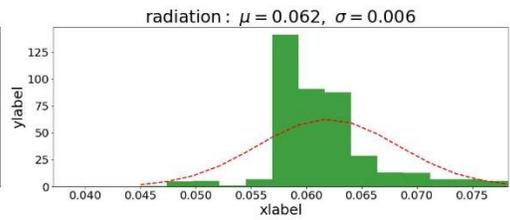
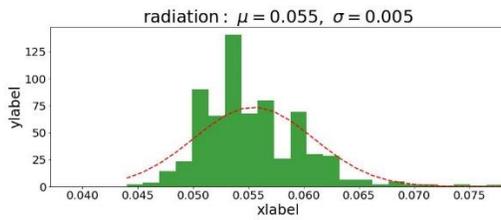
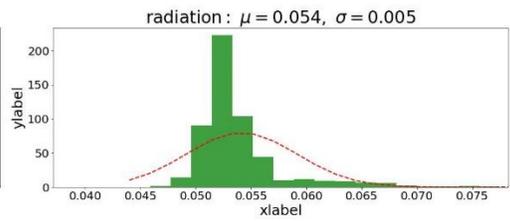
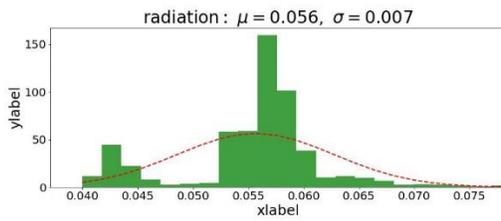
大  
鹏

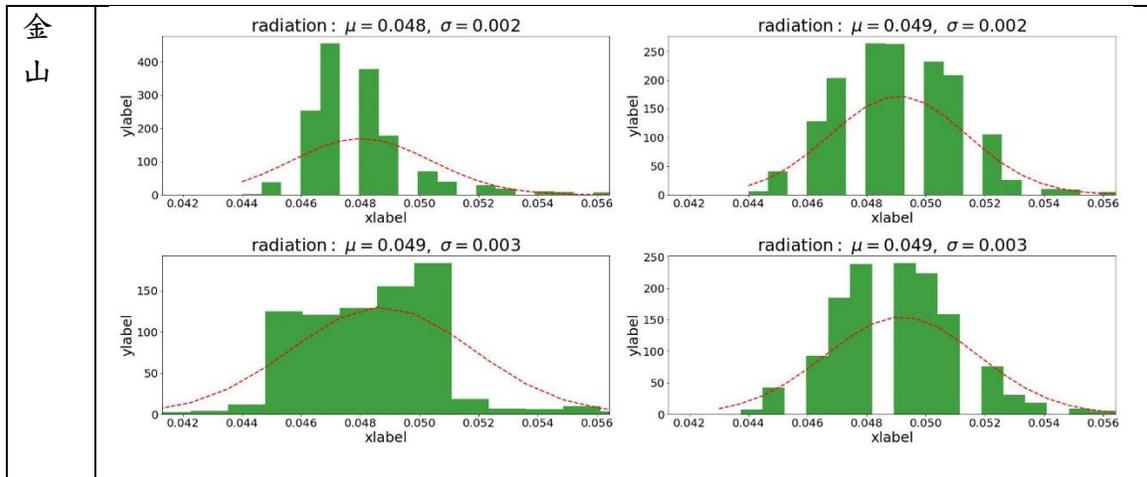


野  
柳



大  
坪





## 結論

本研究致力於設計一款具有邊緣運算能力的微型機動輻射偵檢器，並將其應用於全台 63 個輻射偵測站。透過利用嵌入式系統作為核心偵檢器，我們成功開發出一款具有高靈敏度的偵測工具。未來的工作可以集中在進一步優化雲端連線的穩定性和數據傳輸安全性，以確保數據在傳輸和存儲過程中的安全性和可靠性，雲端伺服器將以團隊所開發的偵檢器蒐集數據，進行更複雜的機器學習。同時在硬體方面，更深入地研究如何提高偵測器對不同類型輻射的敏感度和準確性，使其更適用於多樣化的應用場景。

這項研究展示了一種前瞻性的輻射偵測解決方案，整合了最新的偵測技術和機器學習功能，為輻射監測提供了更加全面和有效的解決方案，並對全台輻射檢測站的運作提供了重要的支援。

## 參考文獻

- [1] Karl Pearson, "Notes on regression and inheritance in the case of two parents," Proceedings of the Royal Society of London, vol. 58, pp. 240–242, June 1895.
- [2] Christoph Bergmeir, José M. Benítez, "On the use of cross-validation for time series predictor evaluation," Information Sciences, vol. 191, pp. 192–213, May 2012.
- [3] K.A. Venkatesh, Dhanajay Mishra, T. Manimozhi, "Model selection and regularization," Statistical Modeling in Machine Learning, pp. 159–178, January 2023.
- [4] M. Sinimaa, M. Spichakova, J. Belikov and E. Petlenkov, "Feature Engineering of Weather Data for Short-Term Energy Consumption Forecast," 2021 IEEE Madrid PowerTech, Madrid, Spain, 2021, pp. 1-6.

[5] Han Young Joo, Jae Wook Kim, So Yun Jeong, Young Seo Kim, Joo Hyun Moon, “Use of big data for estimation of impacts of meteorological variables on environmental radiation dose on Ulleung Island, Republic of Korea,” *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 53, no. 12, pp. 4189–4200, December 2021.

112年度專題研究計畫成果彙整表

計畫主持人：姚書農		計畫編號：112-2623-E-305-001-NU			
計畫名稱：設計具有邊緣運算能力之微型機動輻射偵檢器					
成果項目		量化	單位	質化 (說明：各成果項目請附佐證資料或細項說明，如期刊名稱、年份、卷期、起訖頁數、證號...等)	
國內	學術性論文	期刊論文	0	篇	
		研討會論文	0		
		專書	0	本	
		專書論文	0	章	
		技術報告	0	篇	
		其他	0	篇	
國外	學術性論文	期刊論文	2	篇	Shu-Nung Yao* and Chang-Wei Huang, "Head-Pose Estimation Based on Lateral Canthus Localizations in 2-D Images," IEEE Transactions on Human-Machine Systems, accepted. Shu-Nung Yao* and Chaoyun Liang, "Audio Augmented Reality in Smart Learning Environments," IEEE Transactions on Learning Technologies, vol. 16, no. 2, pp. 178-190, Apr. 2023.
		研討會論文	2		Shu-Nung Yao*, "Sound Design Toolkit for Metaverse" in Proc. ICSDII 2023: Proceedings of the International Conference On Sustainable Design and Innovative Industries, Taichung, Taiwan, Nov. 2023. Ting-Kai Hsu, Han-Chien Cheng, and Shu-Nung Yao*, "Detection of Bradycardia in Preterm Infants by using ECG and Respiratory Signals," in Proc. ECBIOS 2023: Proceedings of the 5th IEEE Eurasia Conference on Biomedical Engineering, Healthcare and Sustainability 2023, Tainan, Taiwan, June 2023.
		專書	0	本	
		專書論文	0	章	
		技術報告	0	篇	
		其他	0	篇	
參	本國籍	大專生	1	人次	鄧曉晴

與計畫人力		碩士生	1	王昱翔
		博士生	0	
		博士級研究人員	0	
		專任人員	0	
	非本國籍	大專生	0	
		碩士生	0	
		博士生	0	
		博士級研究人員	0	
		專任人員	0	
	其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)			