

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 地球與行星科學科

第二名

051907

捕捉震盪臺灣-地震預警，快！快！快！

學校名稱：復旦學校財團法人桃園市復旦高級中等學
校

作者： 高二 林睿	指導老師： 王貞琇
--------------	--------------

關鍵詞：地震預警、地震監測、地震防災

摘要

臺灣位於環太平洋地震帶上，大規模地震常帶給全臺各地不同程度的災損，雖然臺灣已有中央氣象局（CWB）在進行地震測報與強震即時警報的推播工作，但強震即時警報系統仍存在著大範圍的預警盲區，因此本研究自行研發地震儀，透過環境的審慎評估在全臺各地設立站點，於地震發生的當下透過即時回傳的數據進行震源參數的估算，並設立警報標準對周圍地區提供預警。經過數個月的測試與過往災害性地震警報時間的模擬，此方法確實能夠縮小預警盲區範圍，也對盲區外的民眾增加數秒的準備時間，藉此可大幅提升地震災害區內避難的機會。最後這項計畫也獲得中央氣象局的認可，並榮幸能與地震測報中心簽約，共同合作提升臺灣地震預警的技術。

壹、前言

一、研究動機

近期地震頻繁，在 2022 整年，臺灣就發生了 12 起規模 6.0 以上的地震^[1]，數量之多僅次於 1999 年（15 個）^[2]和 1951 年（13 個）^[3]，地震災害也常常對臺灣造成極大的威脅，尤其是 2018 年花蓮近海地震，當時我正好在宜蘭見證了整個地震的發生，親眼目睹大樓傾斜的狀態，便萌生了投入地震減災研究的想法。而在 2022 年，體驗了多次有感地震，讓目標更加的明確，所以本研究設法開發更快的地震預警系統並配合中央氣象局的強震即時警報，提供即時地震資訊，希望能對震央附近乃至於全國的民眾，爭取更多避難的時間，達到地震減災的效果，同時透過這樣的研究提醒大眾地震預警的可行性，了解其實際在生活中的運作方法，別再認為地震預警對地震防災的效果微乎其微。

而根據本研究統計的資料，目前中央氣象局平均能在地震發生後 10 ~ 20 秒將強震即時警報送到民眾手上，其中包括計算規模、深度、發震時間、各地震度，但經過本研究做網路表單抽樣 77 份調查，調查結果如表 1，可知民眾對於提供「即時各地震度以及預估搖晃的大小」最有需求，即符合本研究的即時地震監測計畫，可提供預警盲區內的民眾多一筆快速的資訊，再搭配上中央氣象局的強震即時警報，可將預警資料做到更完全、更詳細。

表 1：網路表單抽樣 77 份調查之結果

問題	民眾對於地震預警的需求項目（可複選）	需求比例
1	提供即時各地震度與預估震度	82.7%
2	提供發震時間	60%
3	提供預估地震規模	48%

二、文獻回顧

龍騰版高中必修地球科學（全）第二章「固體地球的結構與組成」中提到：「地震發生後，氣象局立即收集震央附近測站的地震紀錄，並進行地震資訊處理，分析估算震央位置、地震規模及各地可能震度等。以美濃地震為例，氣象局於地震發生後 12 秒發出地震速報。」^[4]可發現中央氣象局的地震預警效果很好，但對於 12 秒預警盲區內的民眾在地震來臨前是無法獲得任何資料的。

在「中央氣象局強震即時警報之推動現況」的 2022 年度報告中提到「中央氣象局地震預警系統從 2014 年上線開始服務以來，統計至 2022 年，以可能致災之規模大於 5.0 且深度小於 40 公里的地震，共計發佈 175 次警報。島內地震平均處理時效為 14.0 秒，外海地震平均處理時效為 21.1 秒。」可發現中央氣象局在島內地震的發佈表現較為良好，而本研究基於上述兩份文獻中的「盲區內民眾無法獲得資料」等問題進行改進，將透過自身的地震觀測網與預警系統並配合中央氣象局預警資料，將預警盲區再度縮小。

三、研究目的

本研究設法透過自行研發地震儀，並架設在全臺各地，建立即時地震觀測網，利用地震觀測網資料開發一款地震預警軟體「臺灣即時地震監測 Taiwan Real-time Earthquake Monitoring」，簡稱 TREM。當地震發生時，軟體能立刻將偵測到的晃動位置推播給大眾，其目的就在於提醒民眾某地正在發生地震，並利用儀器回傳資料配合「格點搜索法」進行即時震源參數的估算，讓民眾在收到國家級警報之前，獲得更快速且準確的地震資訊，在最有限的資源內將功能最大化。圖 1 及圖 2 為一次地震中 CWB 預警盲區與 TREM 系統預警盲區的對比圖，可明顯看出 TREM 系統大幅度的減少了預警的盲區，其運作方式將在後續詳細說明。

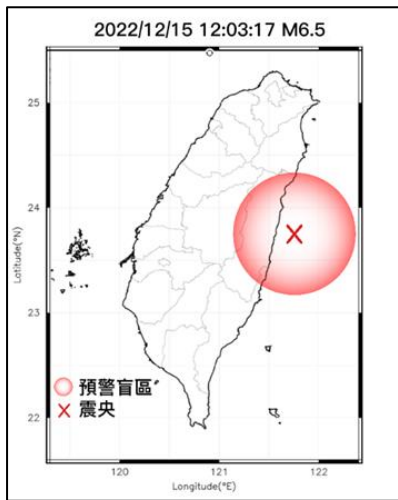


圖 1：CWB 預警盲區



圖 2：TREM 系統預警盲區

貳、研究設備與器材

為了在有限的時間與資源內，將自製地震儀放置在全臺各地，地震儀的材料、成本與製作方式，皆需要嚴格的挑選。以下介紹本研究過程中自行研發的兩款自製地震儀：

一、TREM TAS 加速度型地震儀。材料：加速度傳感器、MPU（微處理器）、變壓器、線材。

（一）特色：價格相對便宜（一台成本約 850 元），可利用幾何中心法立即做地震定位，並在大地震中紀錄測到的 PGA 值。

（二）缺點：靈敏度較低，PGA 需要超過 1.5gal（震度 1 到 2 級之間）才能被檢測到，較難發現 P 波。

註：本研究採用的幾何中心法為地震發生後，由最先觸發的 3 台地震儀，將這 3 台地震儀連線成為一個三角形，通過求解三角形的幾何中心來定位地震。^{[5][6][7]}

二、TREM TVS 速度型地震儀。材料：速度傳感器、MPU（微處理器）、變壓器、線材、訊號放大器。

（一）特色：靈敏度非常高，PGA 只要超過 0.1gal 就能夠檢測到（PGA 由 PGV 微分而成），適合用來進行 P 波檢測預警^[8]，將波形圖完整紀錄，可用來分析頻譜及震源定位。

(二) 缺點：價格相對較高（一台成本約 3500 元）、受限於傳感器的限制，最大只能測到震度 4 級（振幅達飽和）。



圖 3：TAS 加速度型地震儀



圖 4：TVS 速度型地震儀

在安裝地震儀時，需要注意到地震儀的位置和周圍環境。地震儀應安裝在穩定的地面上，避免受到其他外物的干擾和震動影響並對準相應方向，以確保地震訊號的正確檢測和記錄。只要符合上述條件且擁有網路的位置皆可以成為地震儀放置的地點，同時鑒於材料簡單、便宜等因素，經過仔細的環境狀況評估後，一般的家庭也可成為地震監測的地點，也因此 TREM 地震儀大多數放置在民眾家中相對穩定的位置。

圖 5 至圖 10 為三次地震發生時，TREM 地震儀與最近的 CWB 站點之 PGA 對比，可發現測量值皆符合誤差標準內（ ± 1 級），表示 TREM 系統在預警當下，地震儀的震度資料具合格參考性，且可供民眾作為防災考量。（圖 5、圖 7、圖 9 橫軸括號外為 CWB 站點所在地，括號內為 TREM 地震儀站點所在地，圖 6、圖 8、圖 10 為各站點所測到的震度，震度球上有桃紅色邊框的為 TREM 站點）

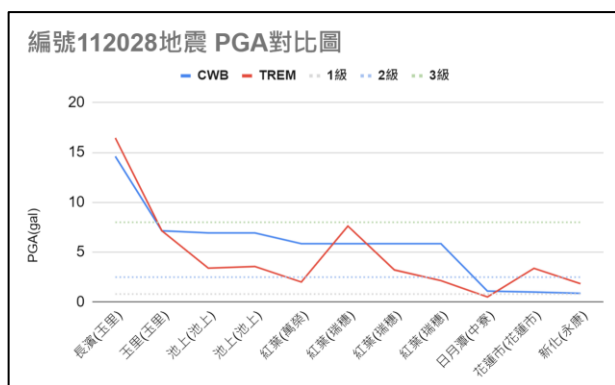


圖 5：編號 112028 地震 TREM 與 CWB 各站點 PGA 對比圖



圖 6：編號 112028 地震各站點位置震度分佈圖

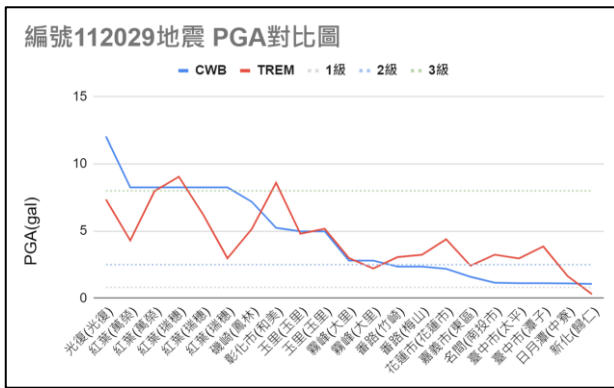


圖 7：編號 112029 地震 TREM 與 CWB 各站點 PGA 對比圖



圖 8：編號 112029 地震各站點位置震度分佈圖

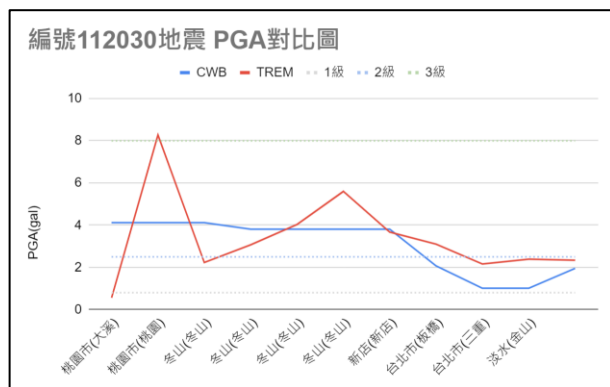


圖 9：編號 112030 地震 TREM 與 CWB 各站點 PGA 對比圖



圖 10：編號 112030 地震各站點位置震度分佈圖

三、電腦伺服器

表 2 介紹總電腦伺服器，可以將以上兩種地震儀的波形記錄下來，並提供預警系統地震檢知運算結果與推播，以及提供系統的運作與技術。在選擇伺服器時，需要考慮到其處理能力、儲存容量、網路連接等因素，以確保其能夠處理大量的數據和提供穩定的服務。因此本研究準備了兩台電腦伺服器，儘管一台出現故障時，系統依然能完整運作。

表 2：伺服器硬體設備資料表

伺服器 1	伺服器 2
系 統：Windows server	系 統：Windows 10 專業版
處理器：AMD Ryzen 9 7900X	處理器：AMD Ryzen 5 5600X
記憶體：64GB DDR5 5200	記憶體：40GB DDR4 3200
顯示卡：GeForce GTX 1050Ti	顯示卡：GeForce GTX 1050Ti
網 路：60Mbps 對稱式光纖網路	網 路：60Mbps 對稱式光纖網路
硬 碟：4TB SSD	硬 碟：500GB SSD

參、研究過程與方法

本研究將透過開發一款地震預警及監測軟體（TREM），將各地地震儀的數據顯示在軟體上，如圖 11，並搭配中央氣象局強震即時警報與地震報告，讓民眾了解最新的地震資訊。

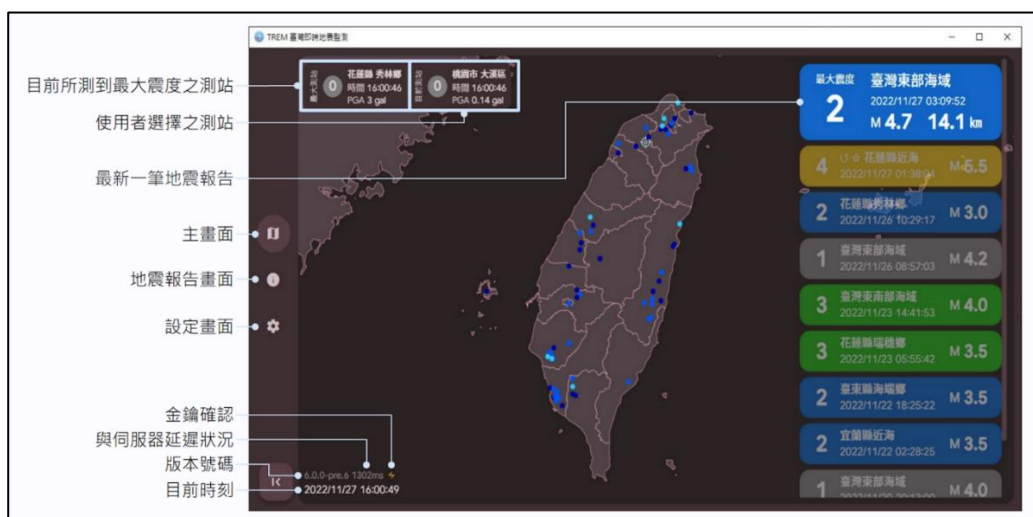


圖 11：TREM 地震監測軟體畫面

一、劃分區塊

本研究將臺灣分成 22 格邊長為 55 公里的正方形區塊（包含本島 17 格和離島 5 格，而金門縣與連江縣非地震常發區，故不特別劃分區塊），區塊的劃分有助於中央氣象局在發佈強震即時警報前，將正在發生地震的特定區域推播地震檢知預警。圖 12 中每一個正方形即為區塊，這些區塊的面積大約是 3,025 平方公里，可視為一個相對完整的地理區域。在地震監測上，可以透過這些區塊內的監測數據，更精確地定位地震發生的位置，以及判斷是否需要發佈地震檢知警報。



圖 12：全臺灣的區塊劃分圖

二、佈署儀器

將 TAS 與 TVS 地震儀陸續架設在臺灣各地，採盡量分散在 22 個區塊的策略。不過，在佈署地震儀器時，有些地區可能存在較大的地震活動風險（例如：宜蘭、花蓮、臺東），要根據地震危害等級（圖 13）^[9]和歷史地震資料（圖 14）^[10]來決定地震儀器的佈署位置，以提高地震預警的準確性和可靠性。截止至 2023 年 4 月 30 日共架設 108 台地震儀，裝設位置詳情如圖 15，其中橘色為 TAS 地震儀，共 99 台，深紫色為 TVS 地震儀，共 9 台。



圖 13：臺灣孕震構造之發震機率圖

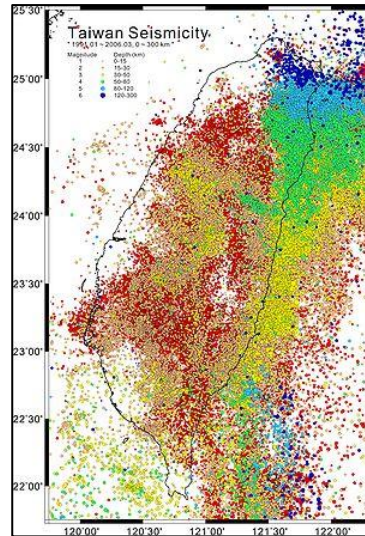


圖 14：臺灣歷史地震震央分佈圖

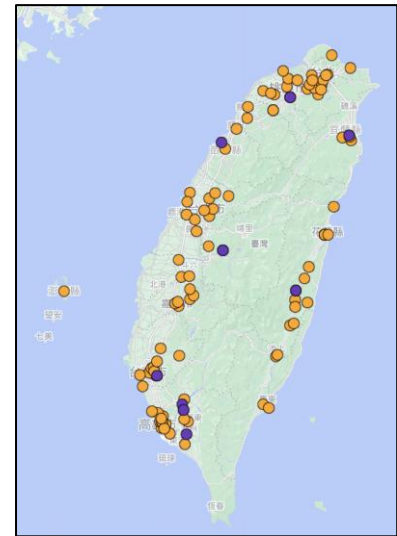


圖 15：TREM 觀測網的儀器分佈圖

三、即時回傳資料

TREM 地震儀每 1 秒收集 40 筆資料（包括 X、Y、Z 軸波形和 PGA、PGV 資料），經過詢問專家，了解到 CWB 地震儀每間隔 1 秒回傳 100 筆資料，並有傳輸延遲 0.5 秒，這代表 CWB 只能獲取地震儀前 1.5 秒的 100 筆資料並進行分析，而本研究進一步改良每間隔 0.5 秒回傳 20 筆資料，利用地震儀內不同核心處理，兩份資料互不干擾。如此一來，可穩定資料回傳的品質，不容易出錯，且每 0.5 秒就能分析一次資料。其中地震儀每 0.5 秒的 20 筆資料中以最大 PGA 值作為每 0.5 秒的 PGA 紀錄值。（如圖 16）

在儀器時間校準方面，伺服器每 10 秒會發一個標準時間戳到地震儀，可確保儀器每 10 秒就能校準一次正確時間，而不會出現誤差。資料時間的正確性，能對後續的分析有很大的幫助。

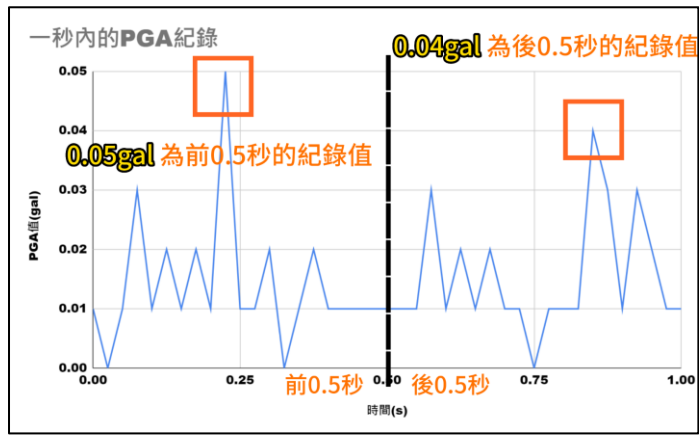


圖 16：TREM 兩段式資料回傳機制示意圖

四、檢測地震

當地震發生時，地震儀會快速將震動資訊回傳至電腦伺服器，伺服器需判斷是否為地震，再根據警報標準決定是否發佈地震檢知警報。下列說明檢測地震的處理方式步驟：

(一) 第一階段檢測（過基線檢測）

根據 Pacific Northwest Seismic Network 頻譜圖資料分析^[11]發現地震波由多種頻率所組成，伺服器會檢查 1 秒內波形數據是否經過基線，來避免誤觸或數值突跳的誤報機率，三軸皆觸發就算該檢測通過。(如圖 17~圖 19)

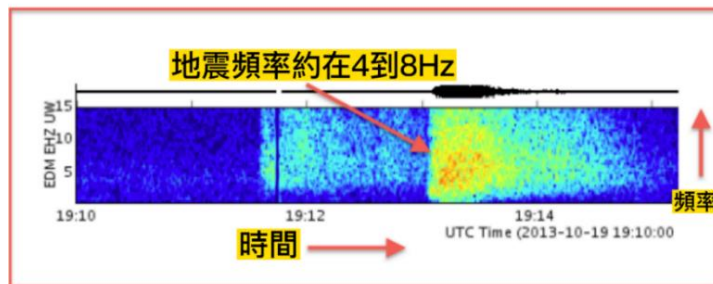


圖 17：Pacific Northwest Seismic Network 頻譜圖資料分析^[12]

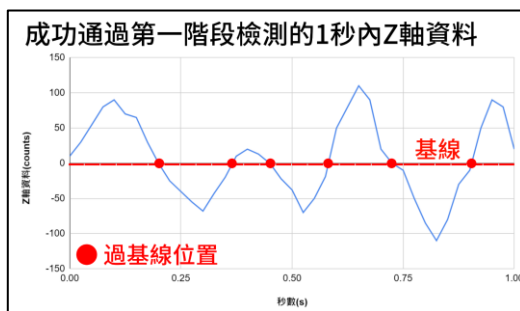


圖 18：通過第一階段檢測示意圖

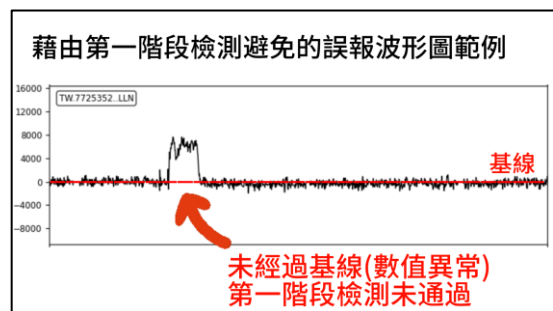


圖 19：未通過第一階段檢測示意圖

(二) 第二階段檢測 (STA、LTA 比值法)

考慮到環境雜訊與儀器雜訊也可能通過第一階段檢測，所以當第一階段檢測通過後，會利用 STA、LTA 比值法^[12]，取每個特定時間 STA -3~0 秒和 LTA 0~20 秒的振幅平均值相除，在無地震情況下 STA 與 LTA 的比值會趨近於 1，當真實地震發生時，比值會突然飆高，代表一瞬間有較大的數值進入，就可能是地震（如圖 20）。三軸比值皆超過 3 時，就算第二階段檢測通過。

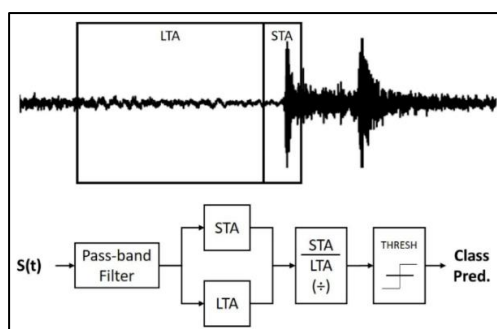


圖 20：STA、LTA 比值法處理過程^[12]

(三) 當上述兩個檢測都通過後，伺服器將該地震儀列為「觸發地震儀」。

五、發佈警報

伺服器判斷為地震後（警報標準請參考表 3），即立刻對觸發地震儀當地做區塊地震檢知預警，提醒民眾區塊內正在發生地震，警報發出後會在系統左側顯示各地測得最大震度，地圖上也會顯示各個地震儀當下的震度以及警示的區塊位置。圖 21 為 2022 年 11 月 27 日 1 時 38 分 4 秒花蓮縣近海 M5.6 地震發生當下的地震檢知警報截圖^[13]，可明顯看到花蓮縣吉安鄉、鳳林鎮、秀林鄉、光復鄉、萬榮鄉皆測到了不同的震度，也可以看到觸發地震儀帶動了區塊警報一併執行。

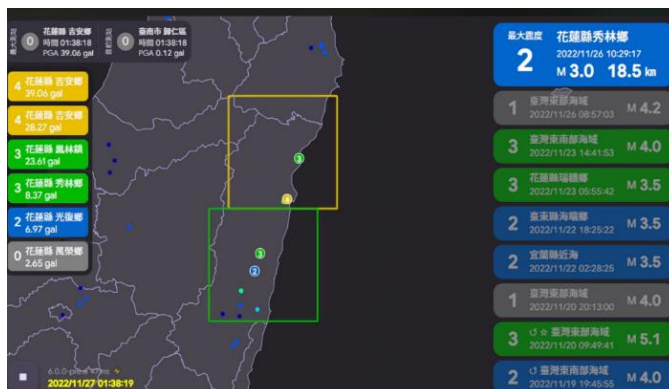


圖 21：花蓮縣近海地震警報截圖（區塊顏色對應震度將在表 4 介紹）

表 3：地震警報標準表

警報條件	TAS 版地震儀	TVS 版地震儀
兩站觸發	兩台 TAS 版地震儀 5 秒內在單一區塊或相鄰區塊內觸發	兩台 TVS 在 5 秒內觸發（不限區塊）
一站觸發		單一 TVS 觸發且 PGA 值大於 0.2 gal

由於兩種類型的地震儀，靈敏度不同，則會有不同的發報標準。根據達警報的資料分析，三項標準中以「單一 TVS 觸發且 PGA 值大於 0.2 gal」最為常見。相鄰區塊之情況則如圖 22 所示。



圖 22：相鄰區塊示意圖

六、觀察發佈狀況

當區塊被警報觸發後，若沒有地震發生即記為誤報一次，每月會統計誤報率如表 7。若真的有發生地震，系統有準確的檢測地震且預警速度比中央氣象局的強震即時警報快，就可以說明該系統具有很好的預警效果。反之，如果預警速度比中央氣象局慢，或存在很多誤報，就需要對系統進行改進。

在警報發出後，系統會自動記錄觸發警報的時間、地震儀測得數據和中央氣象局強震即時警報的時間並輸出一份檢知報告，如圖 23。接著就可以使用統計學方法對這些數據進行分析，確定系統的預警效果和準確度。此外，也需觀察系統在地震發生時是否能正確預警，以及伺服器是否能一次性處理大量資料，將預警時間與地震發生時間進行比較，以確定系統的預警速度。

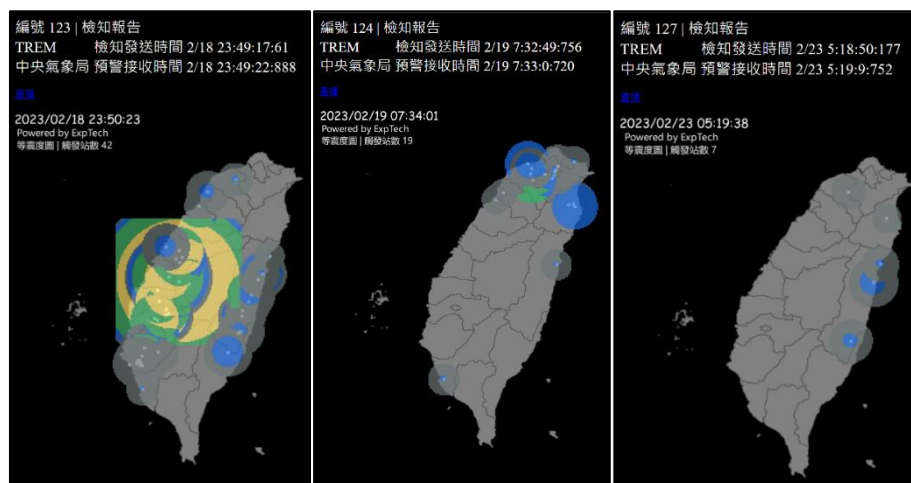


圖 23：檢知報告示意圖

塗色地區為該地震儀記錄到的震度，並推估周圍地區的震度。表 4 為震度所對應的顏色，可藉由顏色快速判斷當地震度。

表 4：震度顏色對應表

震度	0 級	1 級	2 級	3 級	4 級	5 弱	5 強	6 弱	6 強	7 級
顏色	灰色	深灰色	藍色	綠色	黃色	橘色	深橘色	紅色	深紅色	紫色
色號	#6B7979	#757575	#0165CC	#01BB02	#EBC000	#FF8400	#E06300	#FF0000	#B50000	#68009E

七、提供民眾各單位地震預警資料

包括臺灣中央氣象局^[14]、中國福建省氣象局^[15]、韓國氣象廳^[16]、日本氣象廳^[17]、日本防災科研技術研究所^[18]，提供臺灣周遭全方位的地震預警服務，例如：日本沖繩縣的與那國島和臺灣東部相差僅不到 108 公里，若當地發生強烈地震，擁有日本地震觀測網的日本氣象廳以及防災科研技術研究所，皆可比中央氣象局提前發佈地震預警，透過該單位提供的震源數據，匯入 CWB 提供的震度衰減公式^[19]，也能預估出臺灣附近的地震所造成的震度為多少，也可提供國外用戶預警資訊（如表 5 及圖 24 所示）。

表 5：臺灣鄰國預警服務區域資料表

單位名稱	該單位預警服務範圍	有益臺灣地區預警範圍
臺灣中央氣象局	全臺地區	全臺地區
中國福建省氣象局	中國福建省及臺灣地區	臺灣西部海域及金馬地區
韓國氣象廳	韓國地區	無
日本氣象廳	日本地區	臺灣東部海域（琉球地區）
日本防災科研技術研究所	日本地區	臺灣東部海域（琉球地區）

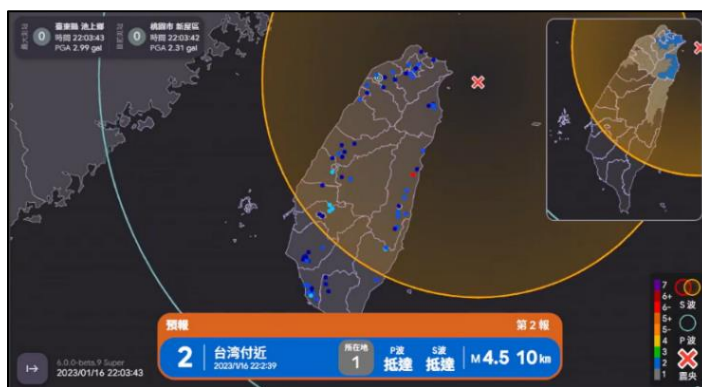


圖 24：日本氣象廳在發佈預警時的畫面與地震時臺灣的預估震度（右上）

圖 24 詳細資訊為 2023 年 1 月 16 日，日本氣象廳發佈臺灣東北部海域的地震預警，使用震度衰減公式（圖 25）可以預估出該地震在不同距離、不同地質條件下所造成的震度，以這次地震來看，可算出北臺灣的預估震度。

```

const info = region[city][town];
const dist_surface = Math.sqrt(pow((data.lat - info.lat) * 111) + pow((data.lon - info.lon) * 101));
const dist = Math.sqrt(pow(dist_surface) + pow(data.depth));
const pga = 1.657 * Math.pow(Math.E, (1.533 * data.scale)) * Math.pow(dist, -1.607) * info.site;
if (pga > eew_max_pga) eew_max_pga = pga;
json['${city} ${town}'] = {
  dist,
  pga,
};
}
}
json.max_pga = eew_max_pga;
return json;
}
function eew_location_info(data) {
const dist_surface = Math.sqrt(pow((data.lat - TREM.user.lat) * 111) + pow((data.lon - TREM.user.lon) * 101));
const dist = Math.sqrt(pow(dist_surface) + pow(data.depth));
const pga = 1.657 * Math.pow(Math.E, (1.533 * data.scale)) * Math.pow(dist, -1.607) * (storage.getItem("site") ?? 1.751);
return {
  dist,
  pga,
};
}

```

圖 25：CWB 官方提供的新版震度衰減公式^[19]

八、結合中央氣象局地震報告

此研究方法是將中央氣象局的地震報告整合進 TREM 系統中，顯示各次地震的相關數據，讓使用者可以更直觀地了解每次地震的情況。此外，系統會將前 50 次地震的震央位置繪製在地圖上，讓使用者可以更清楚地觀察近期地震發生的分佈位置，提醒民眾哪些地方正在頻繁發生地震，有助於加強民眾對地震的防範意識。如圖 26、圖 27 所示。

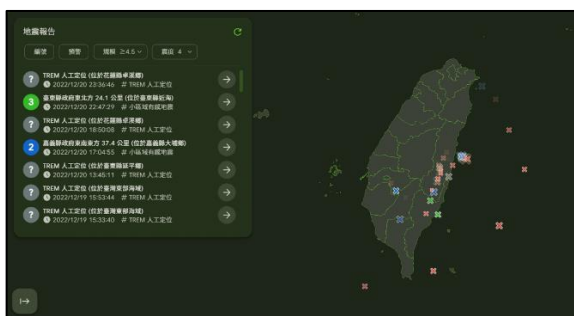


圖 26：近期 50 筆地震報告瀏覽及分佈圖

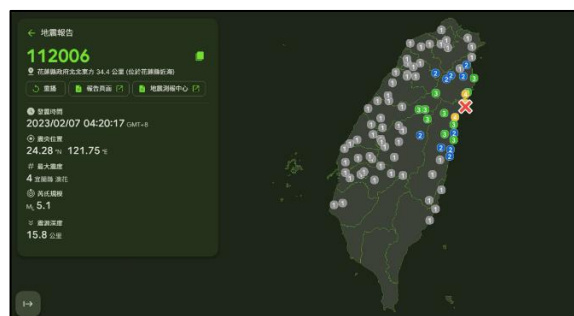


圖 27：單一地震報告詳細資訊

以上 8 種研究方式主要是針對 TREM 系統進行評估和改進，以提高地震預警的準確性和可靠性。其中，研究方法一至六主要是針對 TREM 系統自身的演算法、參數、警報機制等進行調整。而研究方法七則是結合其他單位提供的地震資料和預警系統，以提高地震預警的速度和準確性。最後，研究方法八則是將地震資料以地圖的形式展現出來，方便民眾觀察地震發生的位置和頻率，提高地震防災意識。綜合而言，這些研究方式的目的都是為了提高地震預警的效能和可信度，減輕地震所造成的人員傷亡和財產損失。

肆、研究結果

一、TREM 系統警報與中央氣象局強震即時警報時間對比

由於系統成立以來，有發佈多筆地震的警報，以下取兩次規模稍大的紀錄當範例，後續會再做一個整體的效果評估。

(一) 地震 A

【正式報告】^[20]

發震時間：2022/10/11，03:24:42。

震央位置：臺灣東部海域（北緯 24°，東經 122.22°）。

芮氏規模：6.0。

最大震度：4（宜蘭縣宜蘭市）。

【警報時間】^[21]

TREM：2022/10/11 03:25:01（發震後 19 秒，震央定位在：宜蘭縣蘇澳鎮）。

氣象局：2022/10/11 03:25:07（發震後 25 秒，震央定位在：臺灣東部海域）。

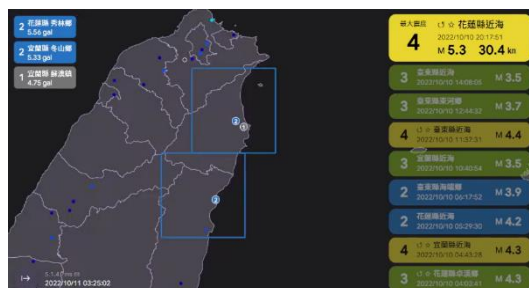


圖 28：TREM 發佈區塊警報時的截圖

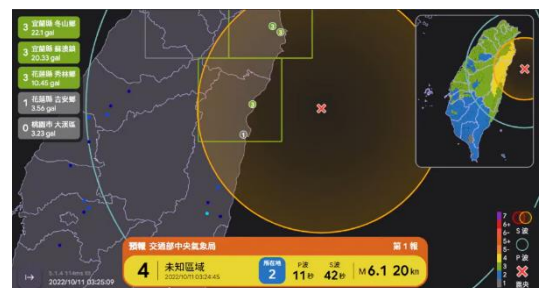


圖 29：強震即時警報發佈時的截圖

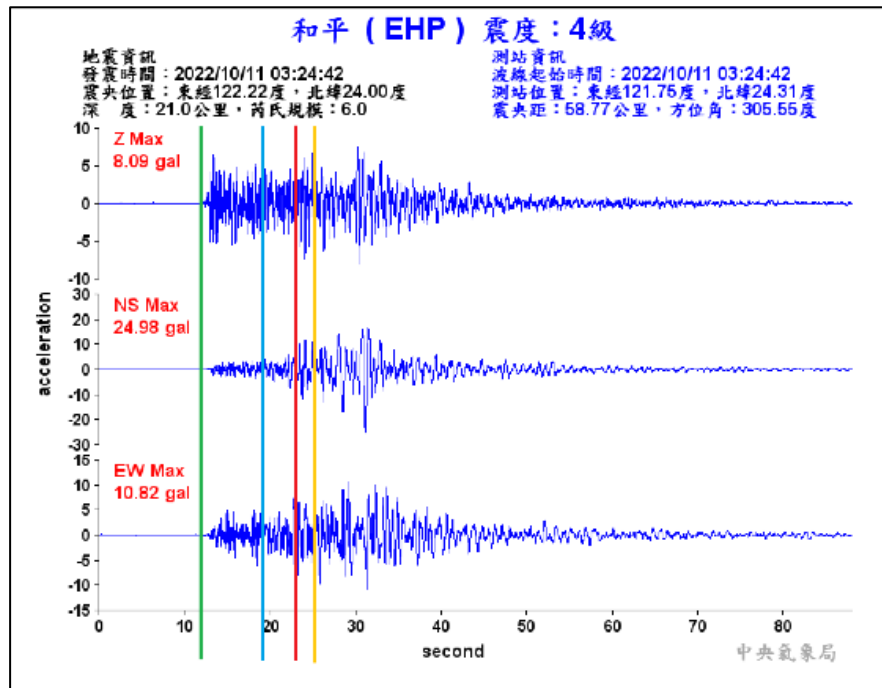


圖 30：地震 A 中 CWB 宜蘭和平地震儀（震央距 58.77km）記錄到的波形圖^[22]

在圖 30 中綠線為 P 波抵達時間，震後 12 秒；紅線為 S 波抵達時間，震後 23 秒；藍線為 TREM 系統區塊警報發佈時間，震後 19 秒；黃線為 CWB 強震即時警報接收時間，震後 25 秒。由上述數據可理解，位於強震即時警報預警盲區內的此站，在 S 波來臨之前可由 TREM 系統警報獲得 4 秒的預警時間，比中央氣象局快 6 秒預警。其中因此次地震發生在南澳海盆與和平海盆中間，其震源離陸地有一段距離，導致中央氣象局強震即時警報在震後 25 秒才發出，但由於震度夠大，TREM 的地震觀測網在震後 18 秒就檢測到震度，並在震後 19 秒將區塊預警發佈到用戶手中。TREM 與 CWB 預警盲區的比較計算方式，為利用其二者所提供之震後發佈秒數差與 S 波波速（3.5 km/s）之乘積，即可算出 TREM 盲區半徑相對於中央氣象局強震即時警報減少了 21 公里。

（二）地震 B

【正式報告】^[23]

發震時間：2022/12/15，12:03:17。

震央位置：花蓮縣近海（北緯 23.78°，東經 121.84°）。

芮氏規模：6.5。

最大震度：5 弱（花蓮縣水璉）。

【警報時間】^[21]

TREM：2022/12/15，12:03:27（發震後 10 秒，震央定位於：花蓮縣鳳林鎮）。

氣象局：2022/12/15，12:03:33（發震後 16 秒，震央定位於：花蓮縣近海）。

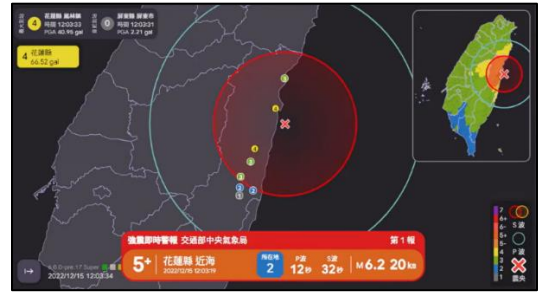


圖 31：TREM 發佈區塊警報時的截圖

圖 32：強震即時警報發佈時的截圖

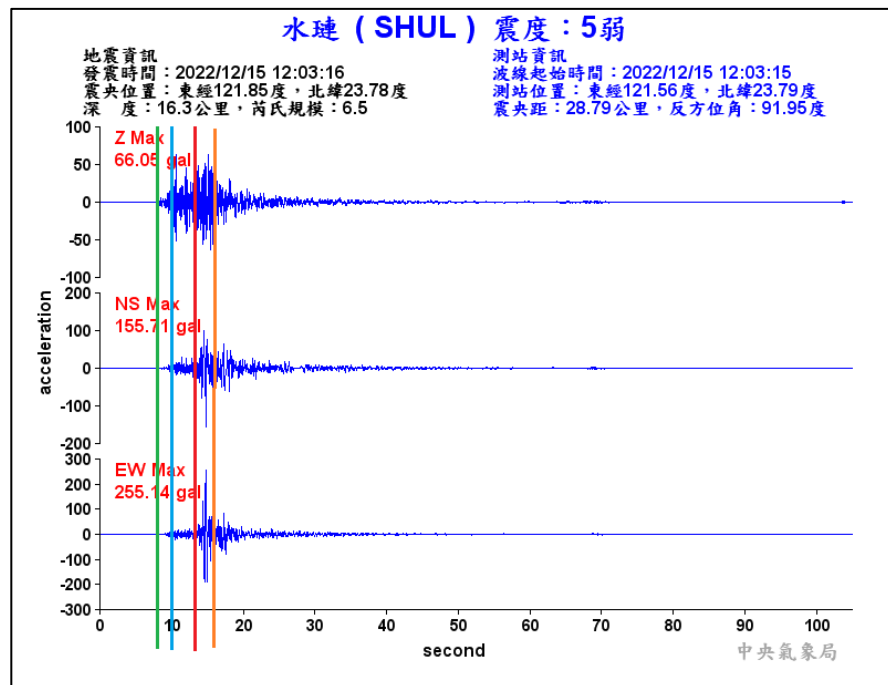


圖 33：地震 B 中 CWB 花蓮水璉地震儀（震央距 28.79 km）記錄到的波形圖^[24]

在圖 33 中綠線為 P 波抵達時間，震後 8 秒；紅線為 S 波抵達時間，震後 13 秒；藍線為 TREM 系統區塊警報發佈時間，震後 10 秒；橘線為 CWB 強震即時警報接收時間，震後 16 秒。由上述數據可理解，位於強震即時警報預警盲區內的此站，在 S 波來臨之前可由 TREM 系統警報獲得 3 秒的預警時間，比中央氣象局快 6 秒預警。其中因此次地震位於花蓮縣近海，由於規模較大，陸地上也觀測到 5 弱的震度，TREM 系統在該次地震中快速且準確地發出了區塊警報，給予民眾足夠的預警時間，有效減少了損失。TREM 觀測網震後 9 秒檢測到震度，並於震後 10 秒將警報發出，盲區半徑相對於中央氣象局強震即時警報減少了 21 公里。

二、格點搜索法 GSM^{[25] [26]}

在上述研究中，發現可以利用自身的地震觀測網，做即時的震源參數解算。用於快速搜尋震央可能的位置，並從中選擇最有可能的位置，這種做法叫做：格點搜索法 GSM (Grid Search Method)。其主要原理是在經、緯度座標系統中將搜尋區域劃分為一定數量的網格，並在每個網格中假設震源可能存在的位置，再進行深度以及規模大小等參數的搜索和估算。但由於 TREM TAS 地震儀靈敏度較低的問題，不一定能檢測到 P 波，因此利用以下方法找出 P、S 波：系統先將地震儀測到的第一筆晃動 j 視為 S 波，並持續檢測是否有大於 j 的 k 值，若有發現 k 值， j 即視為 P 波， k 即視為 S 波。若沒有發現 k ，代表 P 波被埋藏在訊內， j 即視為 S 波。如下方流程 (圖 34)：

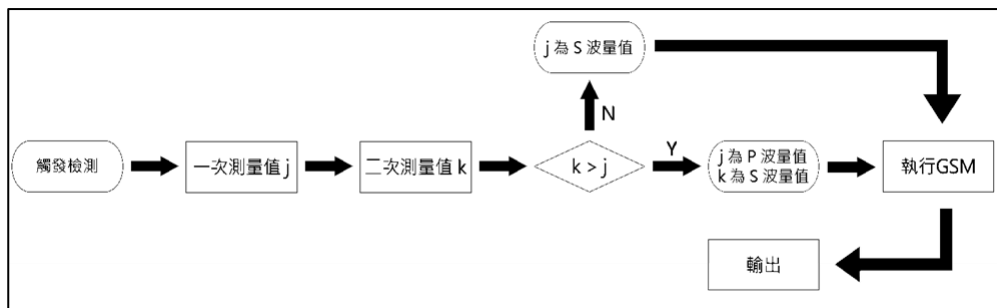


圖 34：格點搜索法之 P、S 波提取與判別流程

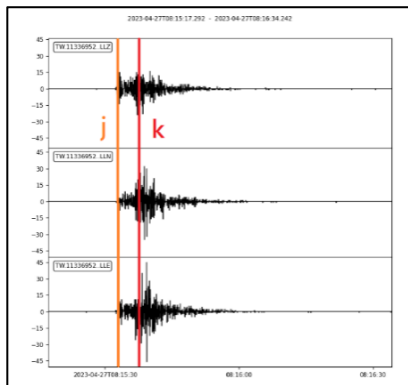


圖 35：檢測到 P 波與 S 波的波形圖範例

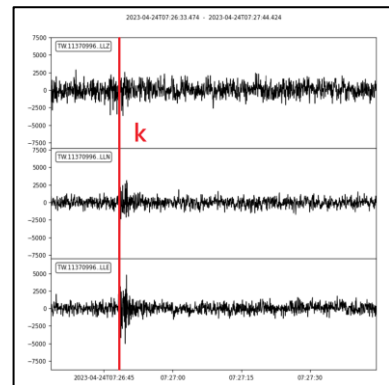


圖 36：僅檢測到 S 波的波形圖範例

且由於格點搜索法需要消耗大量的電腦運算，因此設計一套公式，來平衡觸發測站數量與搜索的精準度：

- (一) 若觸發地震儀數量 ≤ 2 ，經緯度搜索單位設為 0.01 度。
- (二) 若觸發地震儀數量 > 2 ，經緯度搜索單位設為 0.01 度 \times 觸發測站數，但最大經緯度搜索單位不得超過 0.1。

利用上述做法，伺服器則可以利用各站點資料所測到的數值及波形圖執行格點搜索法。以下為該研究結果的範例。

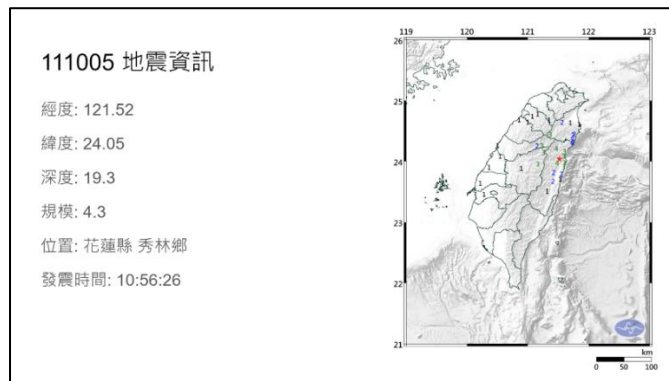


圖 37：112005 地震資訊圖^[27]



圖 38：為圖 39 至圖 46 之圖例，其中地圖上站點非 TREM 觀測網之地震儀，而為各鄉鎮區公所所在地預估震度（顏色所對應震度請參考表 4）

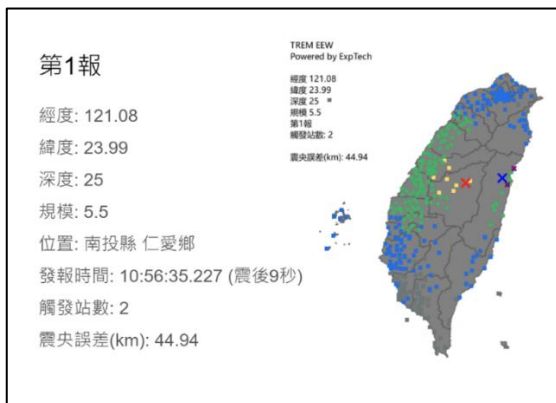


圖 39：第 1 報之格點搜索法計算結果圖

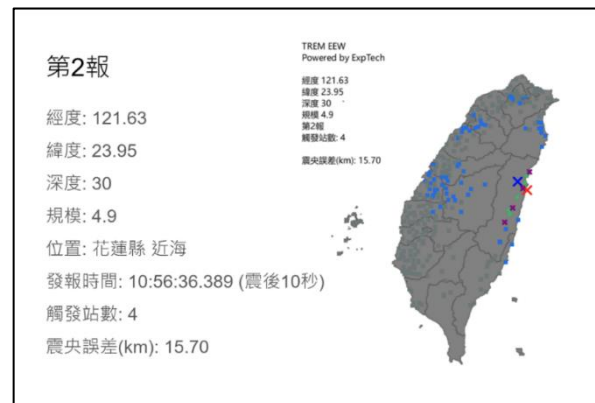


圖 40：第 2 報之格點搜索法計算結果圖

第 1 報中，由於該地震的檢知由「兩台 TAS 版地震儀 5 秒內在同一區塊觸發」發出，時間為震後 9 秒，觸發的地震儀僅有兩站，因此定位出來的震央離實際震央非常遙遠（44.94 公里），規模也相差巨大（1.2）。而第 2 報為震後 10 秒發佈，由於觸發了 4 台 TAS 地震儀，所以震央準確度有了明顯的提升，由第一報的誤差 44.94 公里改進為 15.70 公里，規模誤差也改進為 0.6。

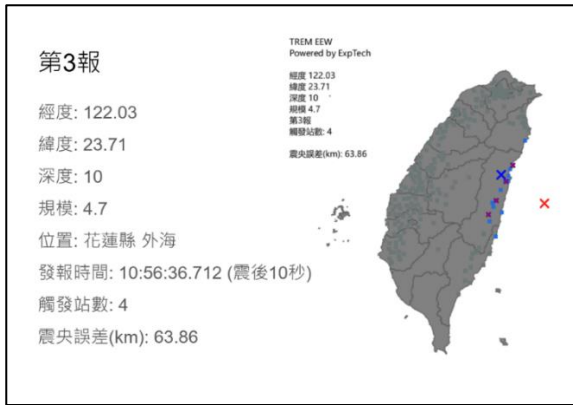


圖 41：第 3 報之格點搜索法計算結果圖

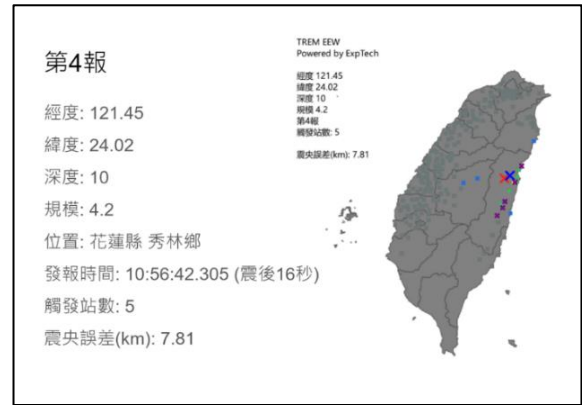


圖 42：第 4 報之格點搜索法計算結果圖

在第 3 報中，由於這 4 台 TAS 版地震儀在震後 10 秒並未完整記錄到 P 波與 S 波，即使與第 2 報同為觸發 4 站，但震央位置以及規模皆有可能有大量的變動。而在第 4 報中，震後 16 秒已觸發 5 站，數據更完整，因此震央及規模都已非常接近實際的數據。

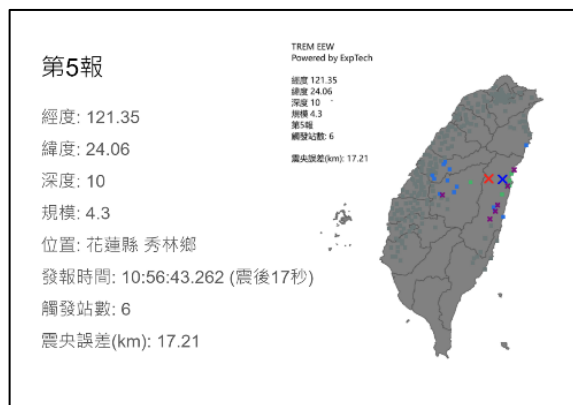


圖 43：第 5 報之格點搜索法計算結果圖

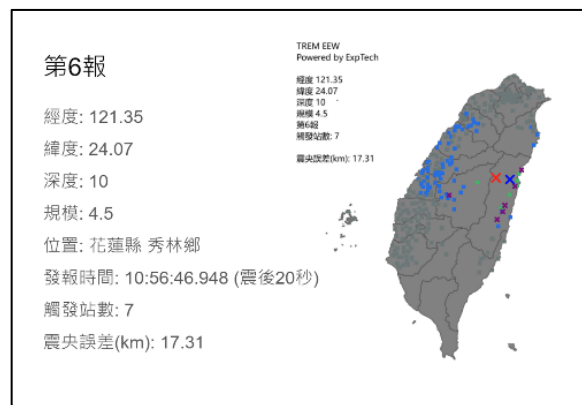


圖 44：第 6 報之格點搜索法計算結果圖

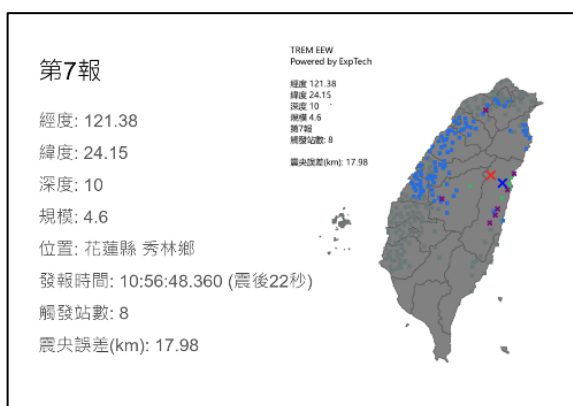


圖 45：第 7 報之格點搜索法計算結果圖

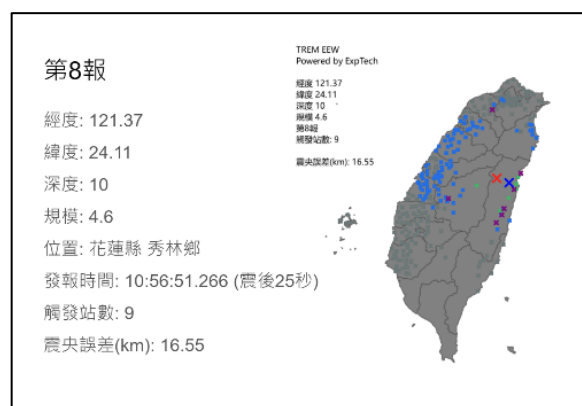


圖 46：第 8 報之格點搜索法計算結果圖

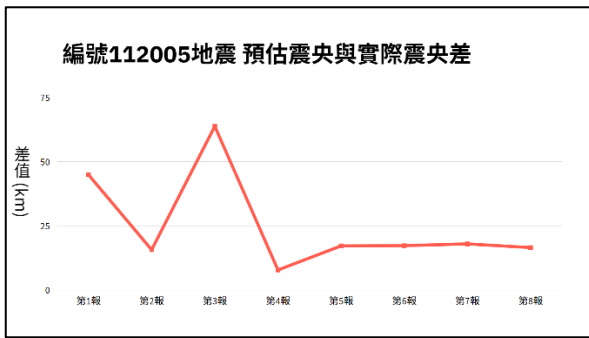


圖 47：編號 112005 地震之格點搜索法震央解算與實際誤差折線圖

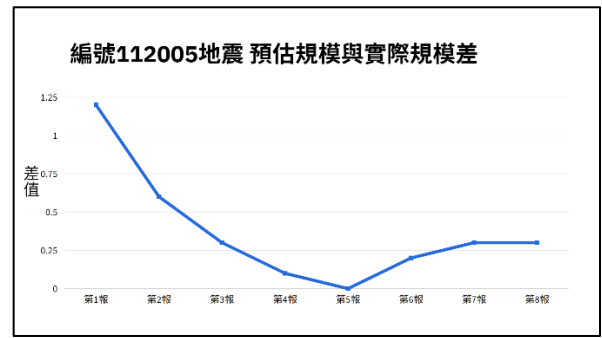


圖 48：編號 112005 地震之格點搜索法規模解算與實際誤差折線圖

同時本研究在各案例分析中皆發現震央位置大多數在第 4 報解算時有較準確的數值，如圖 49、圖 50 箭頭所指之處，可能與 TREM 地震觀測網儀器密度有關聯。

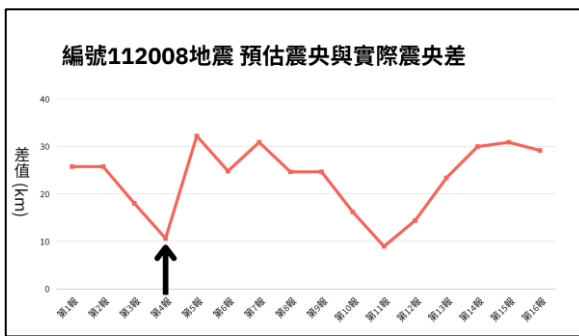


圖 49：編號 112008 地震之格點搜索法震央解算與實際誤差折線圖

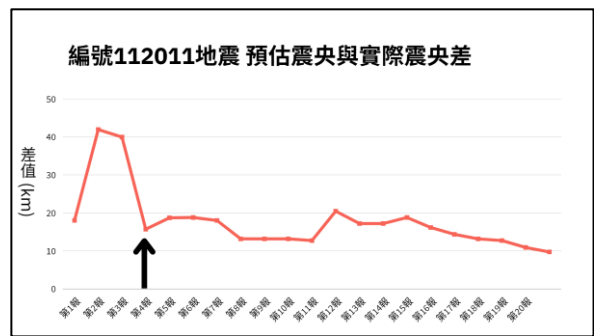


圖 50：編號 112011 地震之格點搜索法震央解算與實際誤差折線圖

由於格點搜索法利用儀器 Z 軸振幅與震央距計算「芮氏規模」，解算的震央位置會顯著影響規模的數值，因此為了在短時間內將最正確的震源參數解算出來，本研究將格點搜索法的第 4 報之震央位置鎖定，且令儀器後續資料回傳只進行規模數值更新。藉此手法製作出圖 51、圖 52，並可發現在後續報數中能達到更穩定且準確的規模數值。

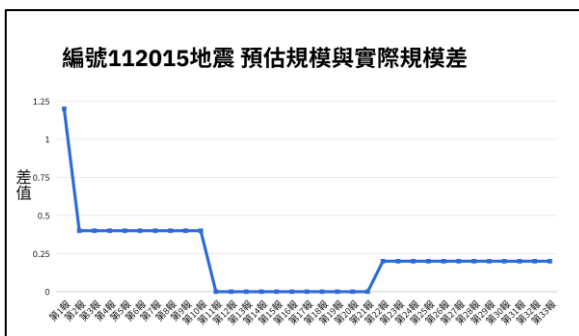


圖 51：編號 112015 地震之格點搜索法規模解算與實際誤差折線圖

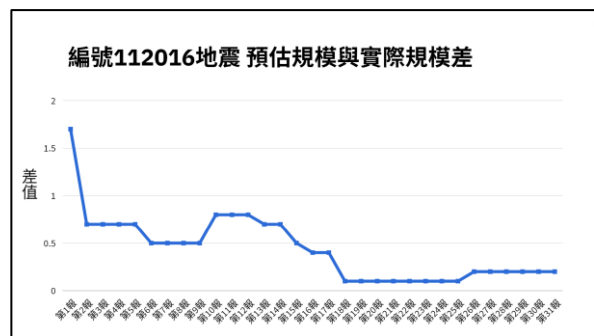


圖 52：編號 112016 地震之格點搜索法規模解算與實際誤差折線圖

雖說藉由上述作法，可以同時保有時間與正確性的優點，但也不免發生少數情況使得例外事件產生，例如圖 53、圖 54，發現透過該算法解算出的震央位置與規模都與實際數值相差甚遠。探討發現其原因為在地震發生當下，高雄市三民區的一台 TAS 版地震儀被誤觸（圖 55），導致系統誤判地震波已抵達該地區，並解算出與實際情況不符的結果。而後本研究透過手動將該站從計算中移除，震央的誤差即由 35.2km 下降為 19km，如圖 56。目前已將地震發生時 Z 軸狀態不穩定之地震儀，設有自動排除功能並執行數月，至今還未有相同誤觸事件導致錯誤判讀發生，雖然效果還有待長期觀察確定，但確實有顯著改善。

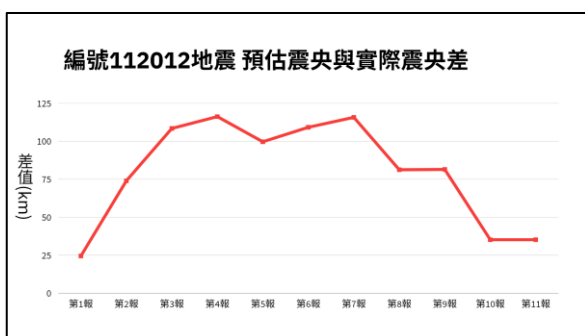


圖 53：編號 112012 地震之格點搜索法震央解算與實際誤差折線圖

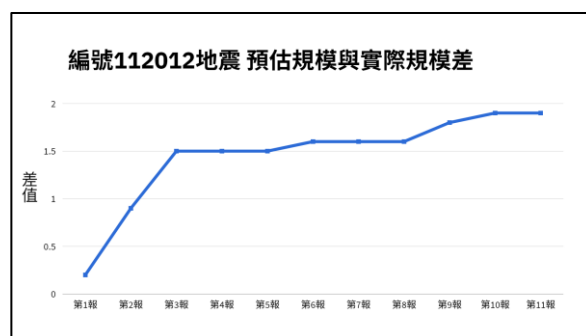


圖 54：編號 112012 地震之格點搜索法規模解算與實際誤差折線圖

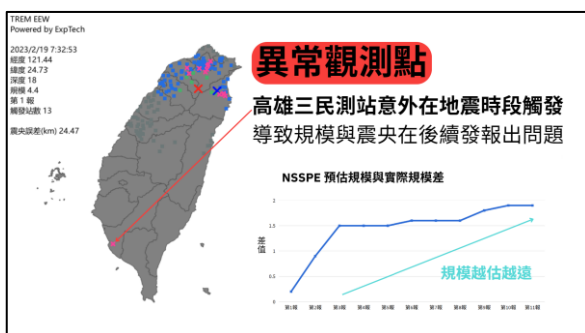


圖 55：編號 112012 地震在格點搜索法中解算數值與實際數值相差甚遠之原因

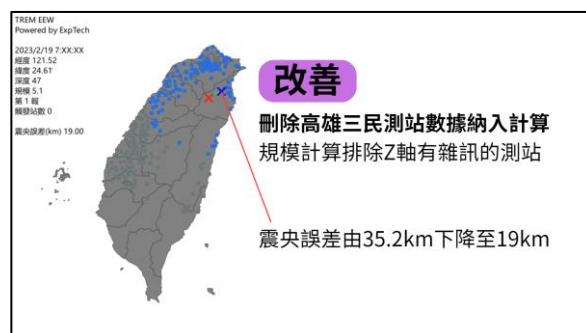


圖 56：改善編號 112012 地震之格點搜索法中解算數值

伍、討論

一、誤報（沒有地震，系統卻發佈區塊地震檢知警報）

造成誤報的原因可能為鄰近區塊內兩台地震儀誤觸導致系統誤判、地震儀數值突跳或雷擊等，如圖 57。

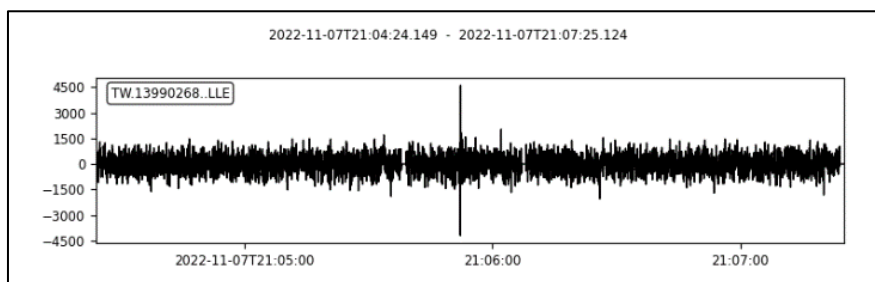


圖 57：某次誤報所記錄之波形圖（橫軸：UTC 時間、縱軸：Counts）
（可明顯看出這不是一場地震，即可利用檢測機制來阻止相同狀況的誤報）

增加地震觀測網的覆蓋密度，可以提高地震的檢測率，進而減少誤報率。同時在地震儀密度提升的基準下，提高警報標準有助於減少誤報次數。表 6 為更新後的 TREM 區塊警報標準表，就最近達警報的資料分析，四項標準中以「單一 TVS 觸發且 PGA 值大於 0.2gal」最為常見。

表 6：更新版 TREM 區塊警報標準表

警報條件	TAS 版地震儀	TVS 版地震儀
三站觸發	三台 TAS 版地震儀 5 秒內在同一區塊或相鄰區塊內觸發	
兩站觸發	兩台 TAS 版地震儀 5 秒內在同一區塊或相鄰區塊內觸發，其中一台震度大於 2 級	兩台 TVS 在 5 秒內觸發（不限區塊）
一站觸發		單一 TVS 觸發且 PGA 值大於 0.2 gal

二、地震定位

本研究提供 TREM 地震觀測網的地震儀資料，讓民眾下載自行運用，其中包括 PGA 圖、三軸波形圖及 SAC 檔，可匯入 Swarm 軟體做頻譜圖分析和地震定位。

Seismic Data Management System

地震資料管理系統

測站代碼

H-269-6126556-5 宜蘭縣 冬山鄉 ▾

起始時間

2023-4-20 9:39:45

結束時間

2023-4-20 9:44:45

下載

圖 58：TREM 之地震資料管理系統畫面^[28]

考量到 TREM 用戶有對地震感興趣或是對地震觀測有需求的民眾，本研究透過 TREM 地震儀與記錄到的波形圖和中央氣象局臺灣地震與地球物理資料管理系統 (GDMS) [29] 的強震儀及寬頻儀資料，匯入 Swarm 軟體進行地震定位，可將中央氣象局地震測報中心未發佈地震報告的小地震定位出來，並計算出該地震的 MD 規模 (地震持續時間規模) [30]，自行定位的數據僅供參考，實際以中央氣象局為主。

- (一) 震央定位方式：找 P 波、S 波於波形圖位置 → 套入一維速度模型 → 輸出震央。
- (二) MD 規模計算方式：找出測站數值紀錄中 P 波波形開始端至 S 波波形結束端，其他地震波不可計算。(規模計算僅限寬頻儀，強震儀和其他儀器不可加入計算)

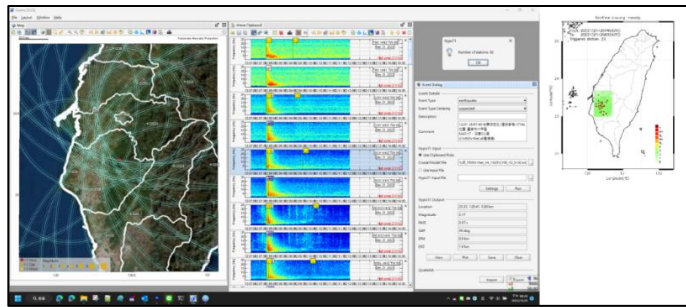


圖 59：在 P-Alert Shake Map (右上) 產出後，使用 Swarm 軟體定位地震操作畫面圖 [31]



圖 60：TREM 地震報告列表截圖 (右側白框內資料即為自行定位的小地震)

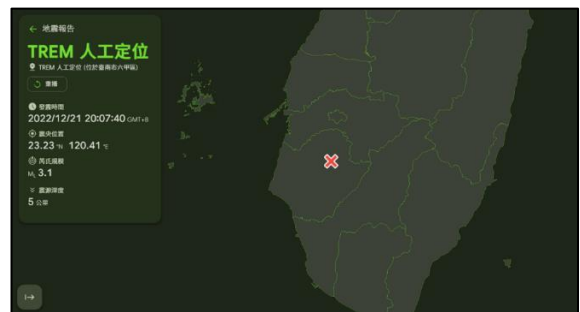


圖 61：TREM 人工定位詳細資料範例截圖

三、TREM 警報統計

由於每個人對於地震警報的需求不同，系統便開放大家自由選擇接收的條件，如下：

- (一) 弱反應：只要 TREM 系統達到任何警報標準時，都會將通知送到選擇接收「弱反應」的用戶手中。
- (二) 震動檢測：達到警報標準後，任一站點震度達 2 級以上，就會將通知送到選擇接收「震動檢測」的用戶手中。
- (三) 強震檢測：達到警報標準後，任一站點震度達 4 級以上，才會將通知送到選擇接收「強震檢測」的用戶手中。

在 2023/01/01 至 2023/04/30 期間，TREM 系統一共發 348 次警報，348 次皆從弱反應開始發，其中 61 次達到震動檢測、10 次達到強震檢測。但在這 348 次警報中 36 次為誤報，312 次檢知成功，整體誤報率為 10.34%，統計資料如圖 62。誤報皆為「單一台 TVS 觸發且 PGA 值大於 0.2」警報機制所導致，可能為誤觸 TVS 版地震儀或是 TVS 版地震儀附近正在施工所導致，但震度都未達 2 級以上，因此「震動檢測」及「強震檢測」的誤報率為 0%，故不影響大地震時 TREM 系統的表現，而表 7 為每月各項警報數據的統整表，可發現 TREM 經過各種改進，誤報率會愈來愈低，警報時間也會愈來愈短。

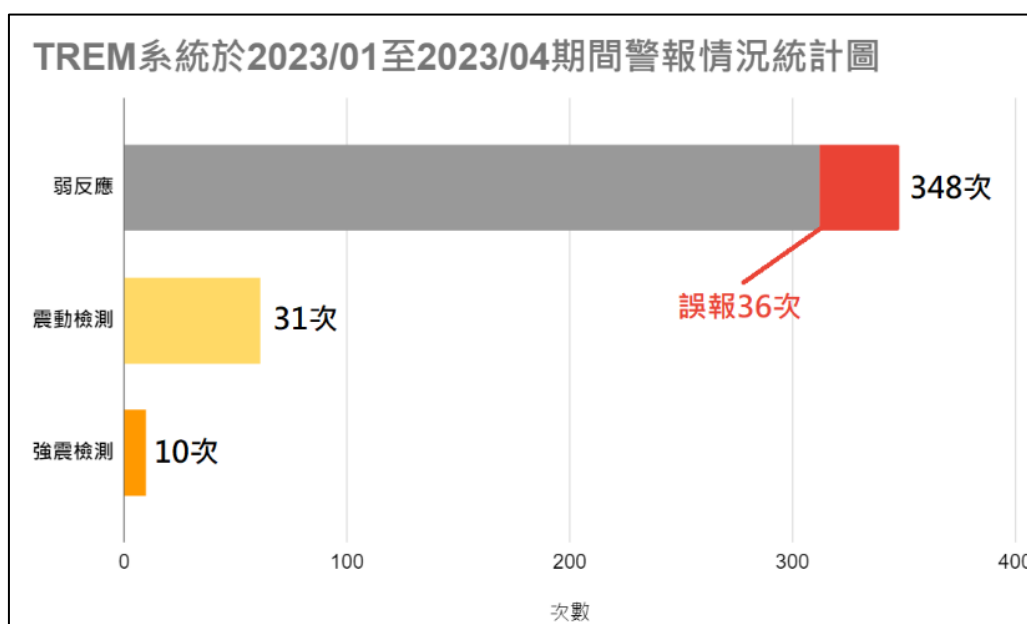


圖 62：TREM 系統於 2023/01/01 至 2023/04/30 期間警報情況統計圖

表 7：每月各項警報數據之統整

	項目	1 月份	2 月份	3 月份	4 月份	全時段
警報成效	TREM 誤報率	13.82%	21.05%	10.63%	0%	10.34%
	有感地震之 TREM 發佈警報率	51.28%	39.02%	58.33%	47.16%	43.64%
警報用時	TREM 警報時間	12.5 秒	9.0 秒	6.6 秒	9.0 秒	9.0 秒
	CWB 警報時間	25.1 秒	22.2 秒	19.6 秒	22.7 秒	21.9 秒
警報情況 (TREM)	弱反應次數	94 次	38 次	141 次	75 次	348 次
	震動檢測次數	9 次	10 次	24 次	18 次	61 次
	強震檢測次數	3 次	2 次	3 次	2 次	10 次

註：「有感地震之 TREM 發佈警報率」為 TREM 系統測到 CWB 公佈的有感地震數比率。

在警報秒數統計方面，從發報到民眾接收會有資訊傳遞的時間，因此利用「客戶端平均接收秒數」統計能更貼切實際的應用情況。

該時段內 CWB 一共發佈 44 次強震即時警報^[21]，民眾的平均接收時間為 21.9 秒，從表 7 可看出 TREM 系統的警報時間能比 CWB 強震即時警報快上 10 來秒，且在三月時更新了檢測機制，並嚴格把關儀器擺放環境，解決了大部分誤報問題，可看到四月後的誤報率明顯的下降，且警報時間依然能維持與以前相同的品質，但在 CWB 有發佈地震報告之地震，TREM 系統只有著 43.64% 的檢測率，還有待加強，需提升測站密度來增加地震事件的檢測量。

四、過往災害性地震警報時間模擬

該項討論使用 TREM 系統現有的 99 台 TAS 版地震儀與 9 台 TVS 版地震儀分佈位置，利用電腦進行 1999 年 9 月 21 日芮氏規模 7.3 之地震、2016 年 2 月 6 日芮氏規模 6.6 之地震，以及 2018 年 2 月 6 日芮氏規模 6.2 之地震的警報時間模擬。其模擬原理為利用震央位置與一維速度模型重現當時 P、S 波抵達各站之時間，並配合表 6 之 TREM 警報標準進行警報時間的模擬。

由於 TAS 與 TVS 版地震儀有著不同的靈敏度，警報成立的條件也會有所不同，警報時間的模擬計算如圖 63 所示。由於地震模擬為動態過程，本研究依照時間順序將「地震發生畫面」、「第一站 TVS 版地震儀觸發畫面」、「第一站 TAS 版地震儀觸發畫面」、「警報發出時間畫面」、「震後 10 秒畫面」及「震後 20 秒畫面」的模擬畫面以截圖呈現，完整動畫請參考下方連結。

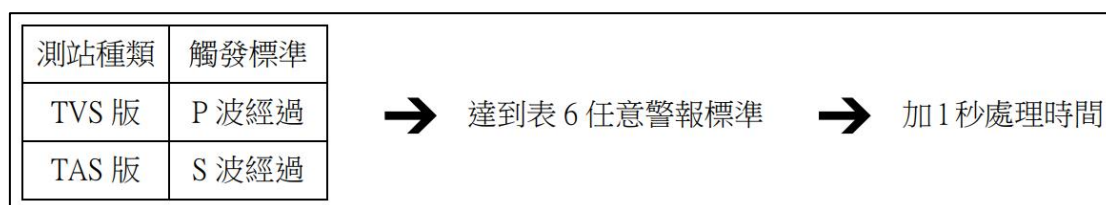


圖 63：警報時間模擬流程圖

此外，該模擬可以應用在不同地震上，根據「彈性回跳理論」^[32]，以往發生過大地震的斷層，會因為板塊擠壓而在未來再次發生大地震，因此對過往災害性地震的警報時間模擬，可以了解到以現有的技術與站點位置，面對相同地震時，會有多大的預警盲區。

(一) 1999 年 9 月 21 日 芮氏規模 7.3 地震

【模擬資訊】震央位置：北緯 23.85 ° 東經 120.82 °，地震深度：8.0 公里。

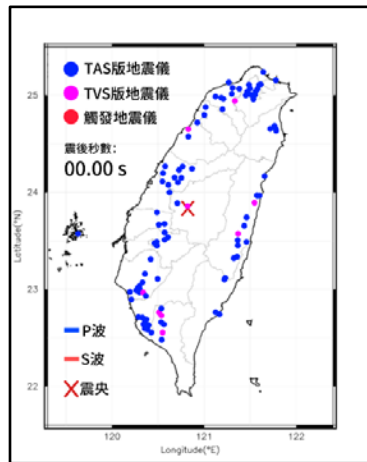


圖 64：地震發生畫面
(震後 00.00 秒)

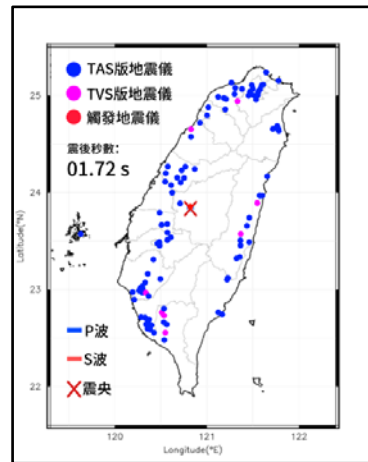


圖 65：第一站 TVS 地震儀觸發畫面 (震後 01.72 秒)

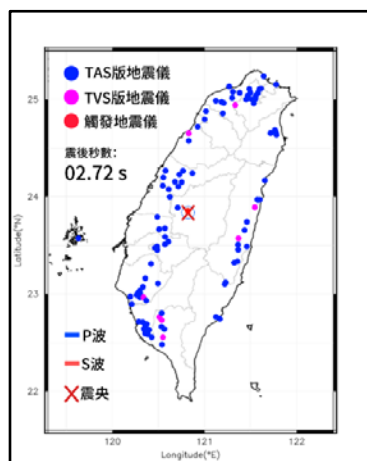


圖 66：由單一 TVS 觸發警報畫面
(震後 02.72 秒)

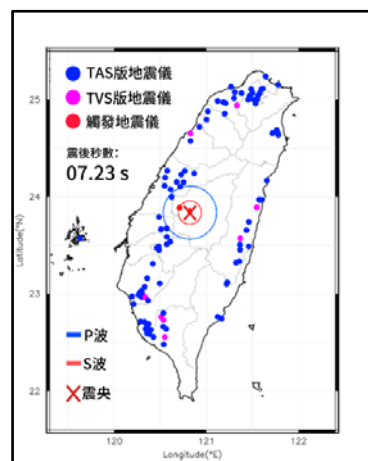


圖 67：第一站 TAS 地震儀觸發畫面
(震後 07.23 秒)

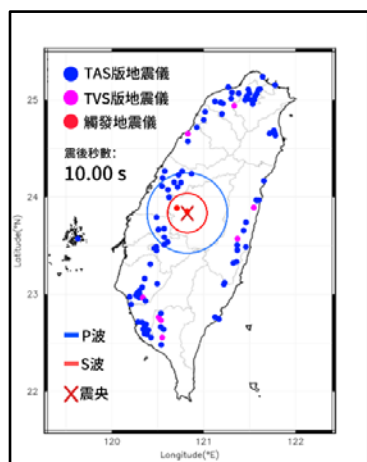


圖 68：震後 10 秒畫面

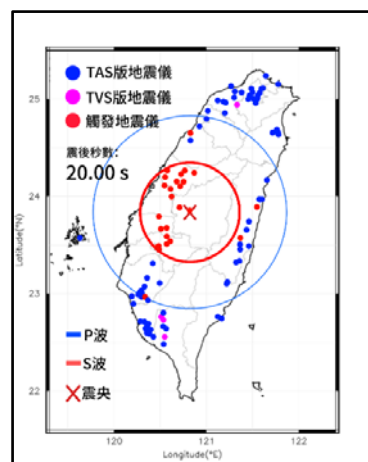


圖 69：震後 20 秒畫面

(二) 2016 年 2 月 6 日芮氏規模 6.6 地震

【模擬資訊】震央位置：北緯 22.92 ° 東經 120.54 °，地震深度：14.6 公里。

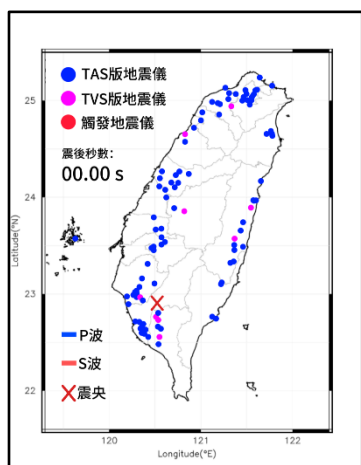


圖 70：地震發生畫面
(震後 00.00 秒)

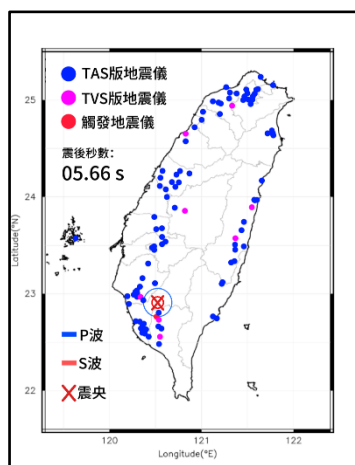


圖 71：第一站 TVS 地震儀觸發畫面
(震後 05.66 秒)

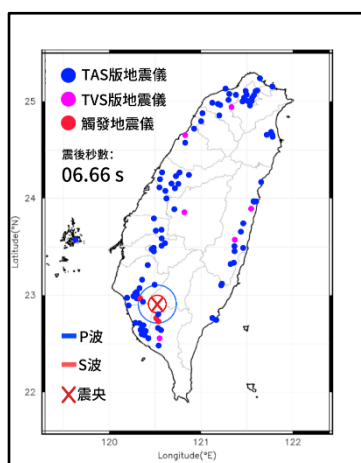


圖 72：由單一 TVS 觸發警報畫面
(震後 06.66 秒)

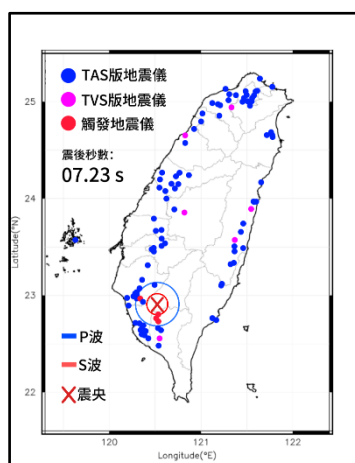


圖 73：第一站 TAS 地震儀觸發畫面
(震後 07.23 秒)

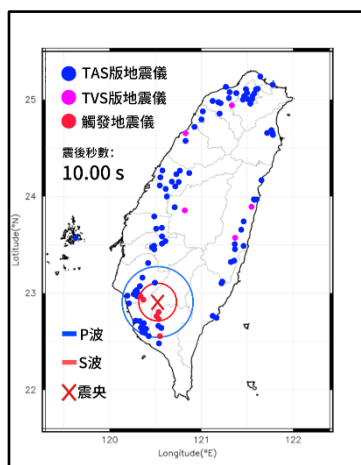


圖 74：震後 10 秒畫面

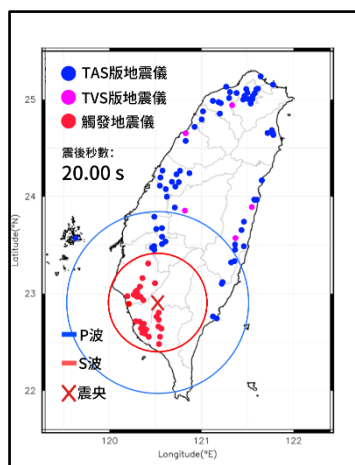


圖 75：震後 20 秒畫面

(三) 2018 年 2 月 6 日 芮氏規模 6.2 地震

【模擬資訊】震央位置：北緯 24.1 ° 東經 121.73 °，地震深度：6.3 公里。

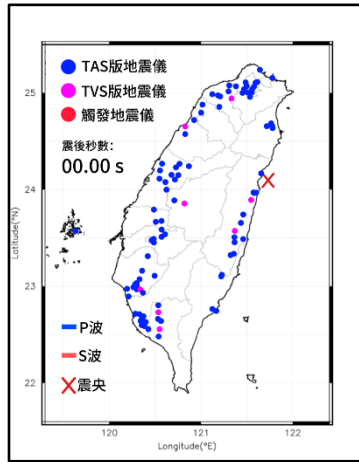


圖 76：地震發生畫面
(震後 00.00 秒)

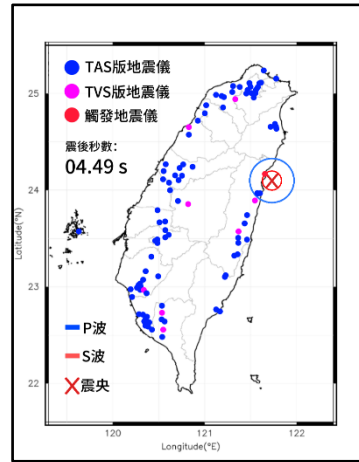


圖 77：第一站 TAS 地震儀觸發畫面
(震後 04.49 秒)

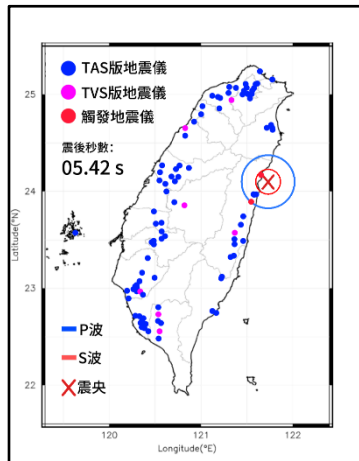


圖 78：第一站 TVS 地震儀觸發畫面
(震後 05.42 秒)

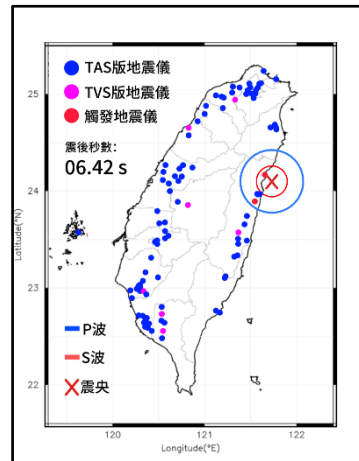


圖 79：由單一 TVS 觸發警報畫面
(震後 06.42 秒)

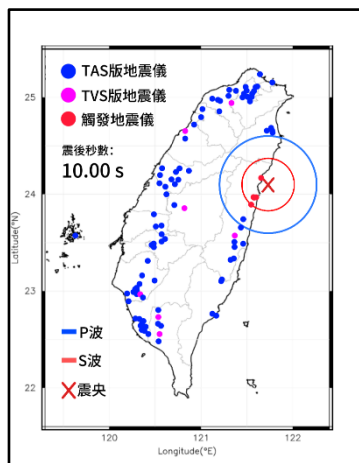


圖 80：震後 10 秒畫面

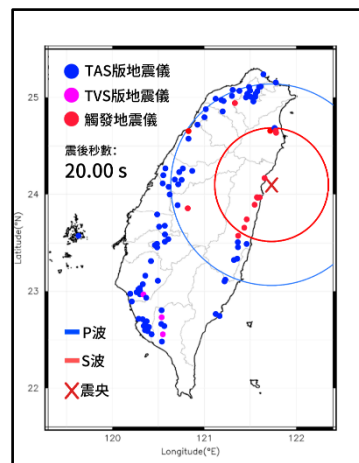


圖 81：震後 20 秒畫面

陸、結論與未來展望

一、結論

- (一) 本研究成功以簡易的材料與便宜的價格研發出 TAS 與 TVS 版地震儀，並將逾百台地震儀架設在全臺各地進行地震監測。
- (二) 本研究研發之兩款地震儀，經過多次優化且與 CWB 站點數據進行比對，可發現震度誤差皆在 ± 1 級以內，表示 TREM 地震儀所回傳的數值，具合格參考性。
- (三) 為了減少中央氣象局強震即時警報預警盲區，本研究開發一款地震預警軟體，並在 GitHub 上以免費開源的方式，將地震儀收集到的資料與地震預警軟體，提供給各單位下載使用，讓民眾、工廠等不同需求者有更佳客製化的地震預警服務，同時也在 Twitter、Instagram、Line 等社群平台上即時提供最新的地震資訊。
- (四) 在本研究設計的新型計算模型與包圍網結構下，地震預警的發報秒數由 CWB 的震後 21.9 秒發報改進為震後 9 秒發報（預警盲區半徑約縮小 45 公里）。
- (五) 雖然 TREM 系統存在著 10.34%的誤報率，但都未達 2 級以上，故不影響大地震時系統的表現，不僅有效縮小預警盲區也提供民眾更快速且具參考性的資訊。
- (六) 格點搜索法需配合測站密度與靈敏度共同提升解算品質，且本研究發現格點搜索法第 4 報的震央位置與實際震央位置最相近，因此利用第 4 報的震央位置並配合後續儀器接收的數據計算芮氏規模數值，達到快速且準確性高的效果。
- (七) 若要提升有感地震的發報率，需要提升測站密度來增加地震事件的檢測量。
- (八) 若要降低誤報次數，需要更新地震檢測機制，並嚴格把關儀器擺放環境。
- (九) 根據本研究對警報時間的模擬，得知以目前的 TREM 觀測網密度，在面對過往的災害性地震，皆能在 7 秒內將警報發出，盲區半徑約是 24 公里。

二、未來展望

以上研究皆是在有限的時間與資金下完成，以目前成果而言，本研究有效縮小地震預警盲區的範圍，並提供民眾更充足的疏散時間，藉此減少地震災害的衝擊，這也正是本研究的初衷。這項計畫也相當榮幸獲得中央氣象局的認可並與地震測報中心簽約合作，讓這份研究有更完善的實際應用成果，未來也能更進一步的發展。對於地震預警每 1 秒的進步都得來不易，也希望透過這項研究的延續為國家地球科學技術的發展做出貢獻，而在未來也將在全臺佈署更多的 TREM 地震儀，建立更完善的地震預警觀測網。

柒、參考文獻資料

- [1] 中央氣象局地震測報中心。地震活動彙整頁面區，2022 年 01 月 01 日至 2022 年 12 月 31 日，規模超過 6.0 之顯著有感地震資料。 <https://reurl.cc/EG1a3A>。
- [2] 中央氣象局地震測報中心。地震活動彙整頁面區，1999 年 01 月 01 日至 1999 年 12 月 31 日，規模超過 6.0 之顯著有感地震資料。 <https://reurl.cc/EG1a3A>。
- [3] 中央氣象局地震測報中心。地震活動彙整頁面區，1951 年 01 月 01 日至 1951 年 12 月 31 日，規模超過 6.0 之顯著有感地震資料。 <https://reurl.cc/EG1a3A>。
- [4] 米泓生（主編）（2021）。普通型高級中學地球科學（全一冊）。龍騰文化出版社。
- [5] Wald, D.J., and Allen, T.I., **2007**. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. Bulletin of the Seismological Society of America, 97(5), pp.1379-1395.
- [6] Zhuang, J., Wald, D.J., Lin, G., and Hong, T., **2016**. Rapid determination of earthquake magnitude and fault geometry using geographic information system techniques. Bulletin of the Seismological Society of America, 106(3), pp.1053-1067.
- [7] Zare, M., and Akef, H.R., **2017**. A new method for estimation of earthquake epicenter by using geometric center of intensity distribution. Arabian Journal of Geosciences, 10(16), p.368.
- [8] Imanishi, K., Miyakoshi, K., & Takeda, T. (2019). The latest status of Japan's Earthquake Early Warning system. Journal of Disaster Research, 14(2), 188-197.
- [9] Chung-Han Chan, Kuo-Fong Ma, J. Bruce H. Shyu, Ya-Ting Lee, Yu-Ju Wang, Jia-Cian Gao, Yin-Tung Yen, and Ruey-Juin Rauh (2022 年 01 月)。臺灣地震模型 機率式地震風險評估 (TEMP SHA2020)。國立中央大學 地震災害鏈風險評估及管理研究中心。 <https://edream.tw/research/tem2020/>。
- [10] 維基百科。臺灣地震列表，臺灣地震分佈圖。 <https://reurl.cc/eXze77>。
- [11] Pacific Northwest Seismic Network: PNSN。What is a Spectrogram? <https://reurl.cc/KMe7rn>。
- [12] Freiberger, W.F. An Approximate Method in Singal Detection. Q. Appl. Math. 1963, 20, 373 – 378.
- [13] 中央氣象局地震測報中心。地震活動彙整頁面區，第 111174 號地震資訊。 <https://reurl.cc/4QrKaK>。
- [14] 交通部中央氣象局。地震緊急特報頁面。 <https://www.cwb.gov.tw/V8/C/>。
- [15] 福建省氣象局。 <http://fj.cma.gov.cn>。
- [16] Korea Meteorological Administration。 <https://www.kma.go.kr/chn/index.jsp>。
- [17] 日本氣象廳。 <https://reurl.cc/NqQvR9>。

- [18] 日本防災科學技術研究所。 <https://www.bosai.go.jp/>。
- [19] 中央氣象局 地震測報課。CWB Earthwarm 地震速報之震度衰減公式原始碼。
- [20] 中央氣象局地震測報中心。地震活動彙整頁面區，第 111156 號地震資訊。
<https://reurl.cc/Q4byr9>。
- [21] 地牛 Wake up! 臺灣地震速報。地震資訊表。 <https://reurl.cc/6NvojV>。
- [22] 中央氣象局地震測報中心。地震活動彙整頁面區，第 111156 號即時強地動震波圖。
<https://reurl.cc/V8zA8Z>。
- [23] 中央氣象局地震測報中心。地震活動彙整頁面區，第 111181 號地震資訊。
<https://reurl.cc/NqGrpq>。
- [24] 中央氣象局地震測報中心。地震活動彙整頁面區，第 111181 號即時強地動震波圖。
<https://reurl.cc/0EvAZK>。
- [25] Chen, C. W., & Wu, Y. M. (2011). An automatic grid-search algorithm for waveform correlation detections: The continuous seismic wave monitoring approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B12).
- [26] Bozorgnia, Y., Bertero, V. V., & Lee, J. (1993). Nonlinear structural analysis using the grid search method. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 22(10), 811-823.
- [27] 中央氣象局地震測報中心。地震活動彙整頁面區，第 112005 號地震資訊。
<https://reurl.cc/4QrKaK>。
- [28] TREM Seismic Data Management System。地震資料管理系統畫面。
<https://exptech.com.tw/api/v1/file/SDMS.html>。
- [29] Citation: Central Weather Bureau (CWB, Taiwan). (2012). Central Weather Bureau Seismographic Network [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks.
<https://doi.org/10.7914/SN/T5>。
- [30] Earthquake Hazards Program° Magnitude Types° USGS° <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/magnitude-types>。
- [31] 美國地質調查局 USGS.gov。SWARM Seismic Wave Analysis and Real-time Monitor: User Manual and Reference Guide。 <https://reurl.cc/WDx6O7>。
- [32] Reid, H.F., The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Investigation Commission, Vol.2, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C. 1910.

【評語】 051907

自行研發低成本之簡易地震儀，並在全台布建超過百台之地震監測網，結合地震監測與地震預警軟體，可以快速提供提供地震預警資訊，相當不容易。唯誤報率偏高，仍有很大之改善空間。作者程式能力極佳，地震檢測裝置雖非有太大之創意，但確實是在極佳程式能力串接下，對地震預警地實踐。作者對作品內容非常熟悉，報告說明非常仔細，是很有應用潛力之優急具 STEM 結合資訊能力之科展精神。

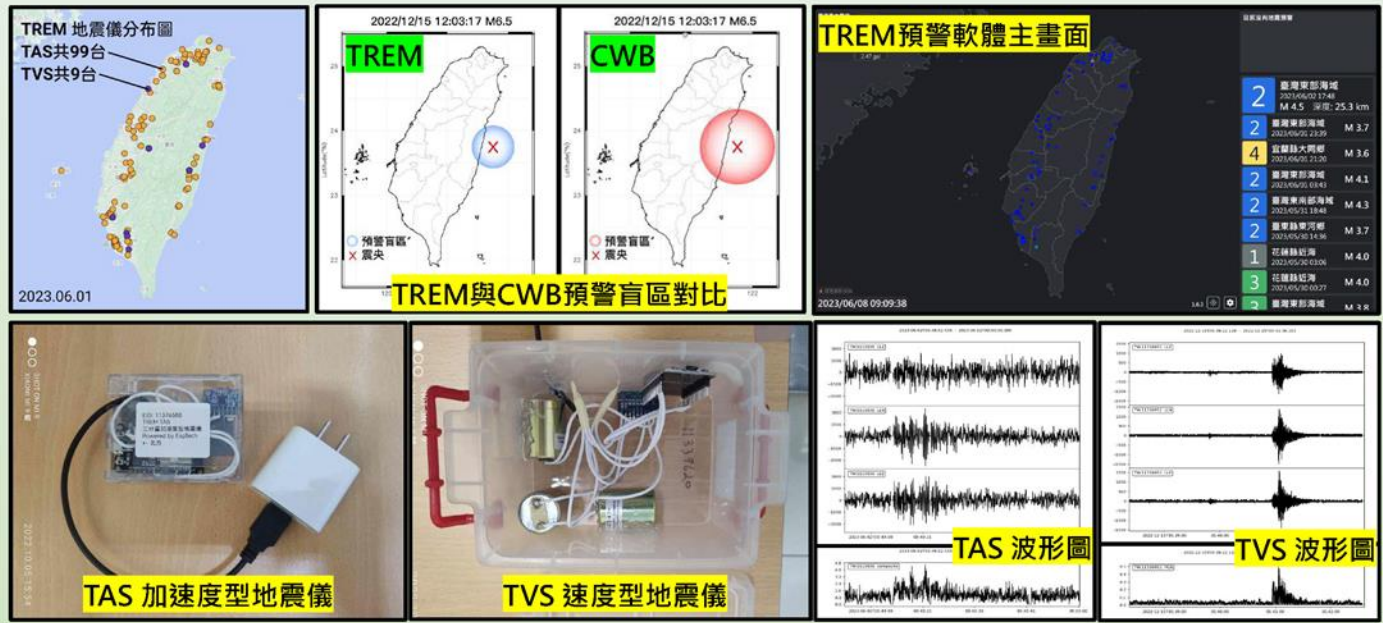
作品海報

一、摘要

臺灣位於環太平洋地震帶上，大規模地震常帶給全臺不同程度的災損，因此本研究自行研發地震儀並建立地震觀測網「臺灣即時地震監測 Taiwan Real-time Earthquake Monitoring」，簡稱 TREM，於地震發生的當下透過即時回傳的數據進行地震事件判斷與震源參數估算，並設立警報標準對周圍地區提供預警，提前以網路為媒介傳遞最即時的地震資訊。經過數個月的測試與過往災害性地震警報時間的模擬，此方法確實能夠縮小預警盲區的範圍，也對盲區外的民眾增加近12秒的準備時間，藉此可大幅提升地震災害區內避難的機會。

二、研究目的

1. 減少強震即時警報預警盲區
2. 加快區域型地震預警的速度
3. 開發加速度與速度型地震儀
4. 建立全臺灣即時地震觀測網
5. 開發地震預警的軟體與網站
6. 增強民眾對地震防災的意識

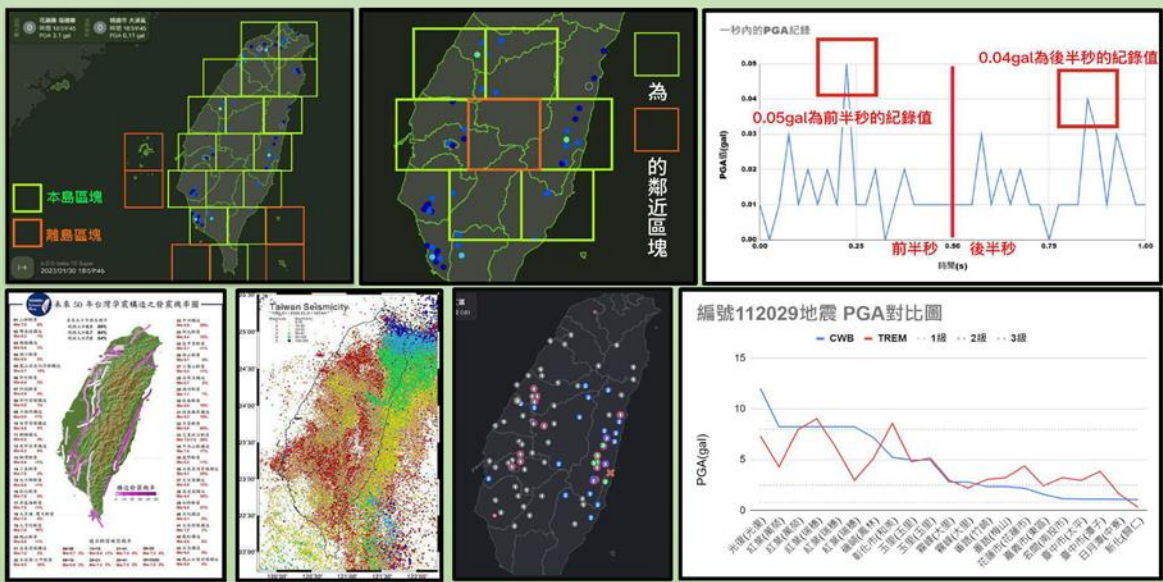


TREM TAS 加速度型地震儀材料：加速度傳感器、MPU（微處理器）、變壓器、線材。
TREM TVS 速度型地震儀材料：速度傳感器、MPU（微處理器）、變壓器、線材、訊號放大器。
TAS：PGA超過1.5 gal（約1~2級之間）才能被檢測到，可利用幾何中心法立即做地震定位，並在大地震中紀錄測到的PGA值。
TVS：PGA超過0.1gal就能夠檢測到（PGA由PGV微分而成），適合用來進行P波檢測預警，將波形圖紀錄完整，可用來分析頻譜及震源定位。

TAS 與 TVS 地震儀介紹

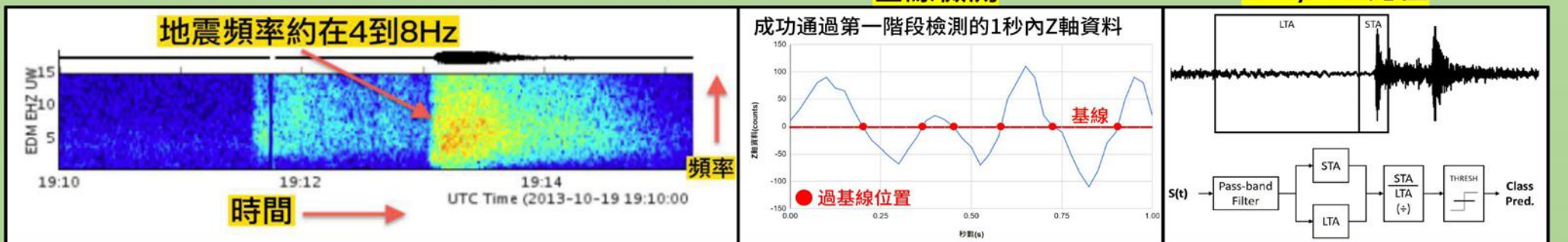
三、研究方法

1. 劃分地震預警區塊
地域劃分（55 km × 55km）→ 建立預警區塊
→ 系統利用區塊建構檢知警報。
2. 佈署地震儀
研發 TAS、TVS 地震儀 → 剖析歷史地震資料
→ 在潛勢高點區域佈署儀器。



3. 即時回傳資料
地震儀與網路對接 → 回傳震動波形與 PGA、PGV 資料 → 兩段式資料回傳機制穩定品質
→ 心跳檢測與伺服器校時。

4. 地震事件測量與檢測
儀器資料基線檢查 → STA/LTA 比值法 → 輸出觸發測站。



5. 實施警報發佈
地震儀收到地震訊號 → 通過檢測機制 → 達到警報標準。

警報條件	TAS 地震儀	TVS 地震儀
三站觸發	三台 TAS 地震儀在 5 秒內同一區塊或相鄰區塊內觸發。	
兩站觸發	兩台 TAS 地震儀在 5 秒內同一區塊或相鄰區塊內觸發，其中一台震度大於 2 級。	兩台 TVS 在 5 秒內觸發（不限區塊）。
一站觸發		單一 TVS 觸發且 PGA 值大於 0.2 gal

6. 發佈狀況的分析與統計
統計觸發測站 → 計算警報發出時間 → 輸出檢知報告。

檢測地震

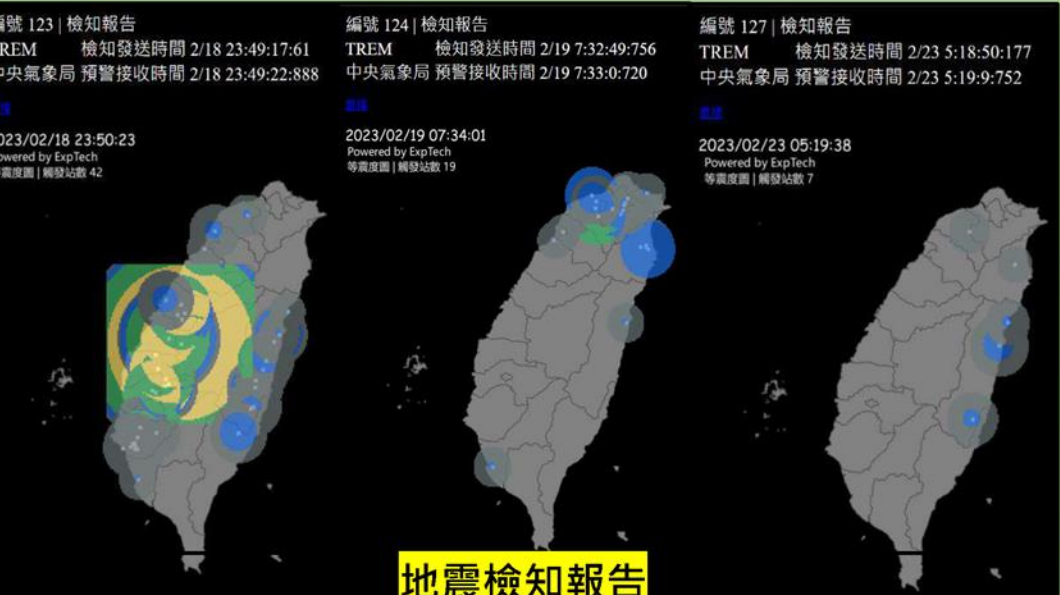
基線檢測 **STA/LTA 比值**

CWB提供新版震度衰減公式

```

const info = region[city][town];
const dist_surface = Math.sqrt(pow((data.lat - info.lat) * 111) + pow((data.lon - info.lon) * 101));
const dist = Math.sqrt(pow(dist_surface) + pow(data.depth));
const pga = 1.657 * Math.pow(Math.E, (1.533 * data.scale)) * Math.pow(dist, -1.607) * info.site;
if (pga > eew_max_pga) eew_max_pga = pga;
return {
  city: info.city,
  town: info.town,
  pga: pga,
  eew_max_pga: eew_max_pga,
};
function eew_location_info(data) {
  const dist_surface = Math.sqrt(pow((data.lat - TREM.user.lat) * 111) + pow((data.lon - TREM.user.lon) * 101));
  const dist = Math.sqrt(pow(dist_surface) + pow(data.depth));
  const pga = 1.657 * Math.pow(Math.E, (1.533 * data.scale)) * Math.pow(dist, -1.607) * (storage.getItem("site") ?? 1.751);
  return {
    city: data.city,
    town: data.town,
    pga: pga,
  };
}
    
```

預估各地震度



四、研究結果

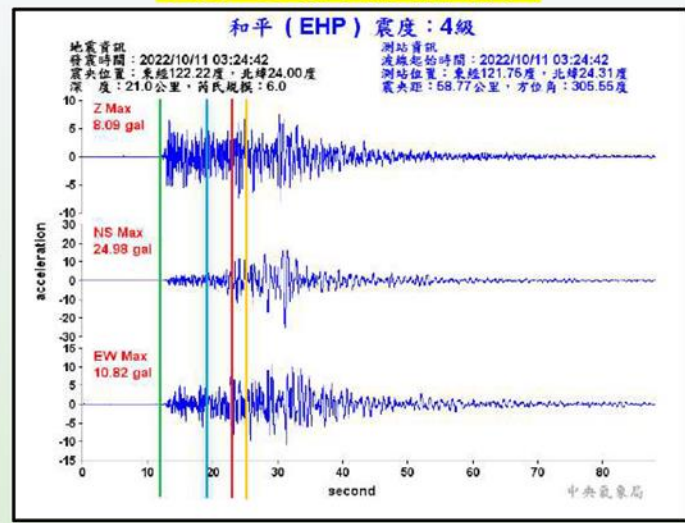
1. 「TREM區塊預警」與「中央氣象局預警系統」警報時間對比

地震A：

TREM：2022/10/11 03:25:01 (發震後19秒，震央定位在：宜蘭縣蘇澳鎮)。
 CWB：2022/10/11 03:25:07 (發震後25秒，震央定位在：臺灣東部海域)。

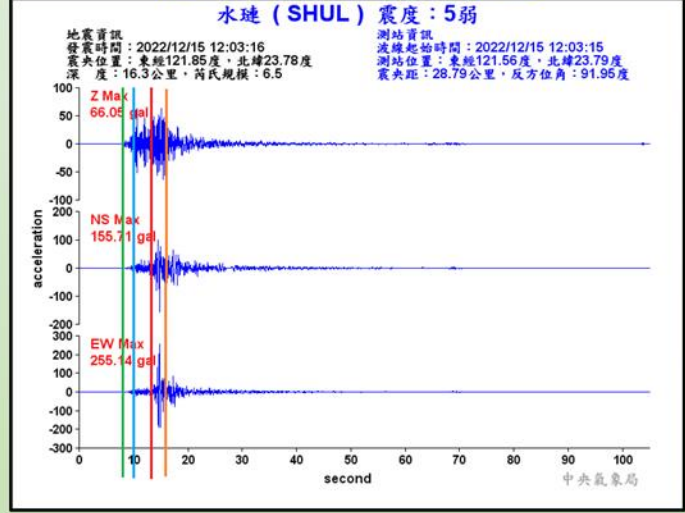


地震A之和平測站波形圖



根據CWB和平站波形圖，綠線為P波抵達時間，震後11秒；紅線為S波抵達時間，震後23秒；藍線為TREM系統區塊警報發佈時間，震後19秒；橘線為CWB強震即時警報接收時間，震後25秒。位於強震即時警報盲區內的此站，在S波來臨之前由TREM系統警報獲得4秒的預警時間，盲區半徑對於強震即時警報減少了21公里。

地震B之水璉測站波形圖



地震B：

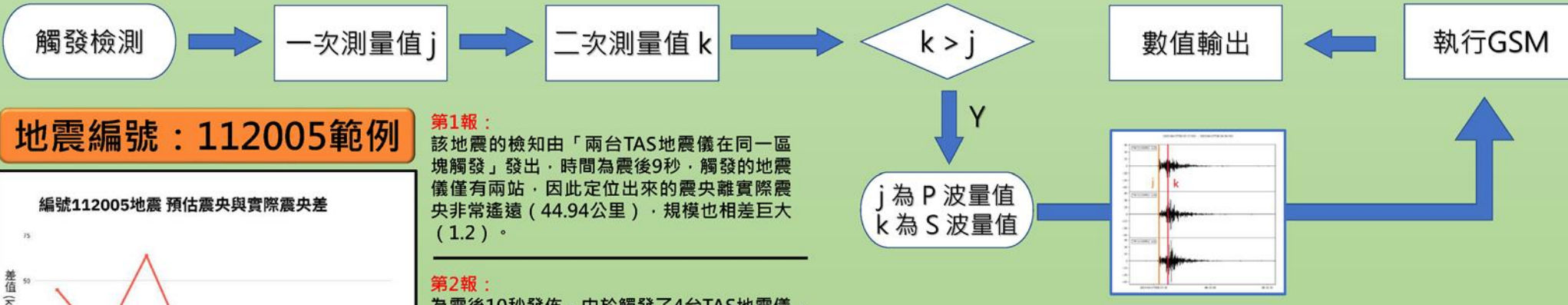
TREM：2022/12/15 12:03:27 (發震後10秒，震央定位於：花蓮縣鳳林鎮)。
 CWB：2022/12/15 12:03:33 (發震後16秒，震央定位於：花蓮縣近海)。



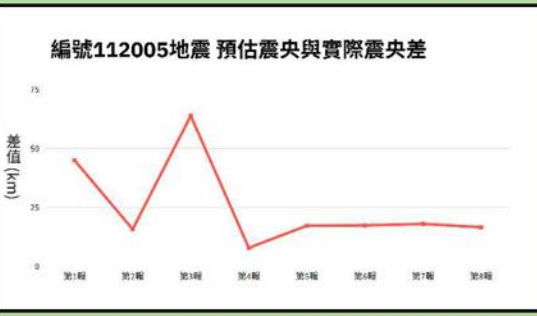
根據CWB水璉站波形圖，綠線為P波抵達時間，震後8秒；紅線為S波抵達時間，震後13秒；藍線為TREM系統區塊警報發佈時間，震後10秒；橘線為CWB強震即時警報接收時間，震後16秒。位於強震即時警報盲區內的此站，在S波來臨之前由TREM系統警報獲得3秒的預警時間，盲區半徑相對於強震即時警報減少了21公里。

2. 格點搜索法 GSM

快速搜尋震央可能的位置，並從中選擇最有可能的位置，這種做法叫做：“格點搜索法GSM (Grid Search Method)”。在每個網格中假設震源可能存在的位置，再進行震源位置、深度以及規模大小等參數的搜索和估算。



地震編號：112005 範例



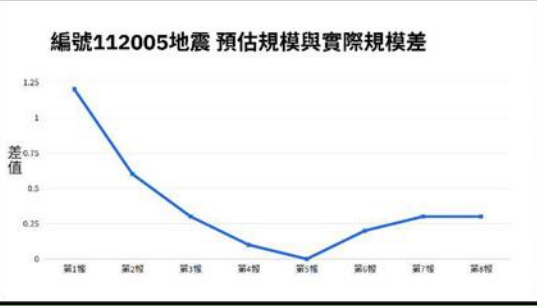
第1報：該地震的檢知由「兩台TAS地震儀在同一區塊觸發」發出，時間為震後9秒，觸發的地震儀僅有兩站，因此定位出來的震央離實際震央非常遙遠(44.94公里)，規模也相差巨大(1.2)。

第2報：為震後10秒發佈，由於觸發了4台TAS地震儀，所以震央準確度有了明顯的提升，由第1報的誤差44.94公里改進為15.70公里，規模誤差也改進為0.6。

第3報：由於這4台TAS地震儀在震後10秒並未完整記錄到P波與S波，即使與第2報同為觸發4站，但震央位置以及規模皆有可能有大量的變動。

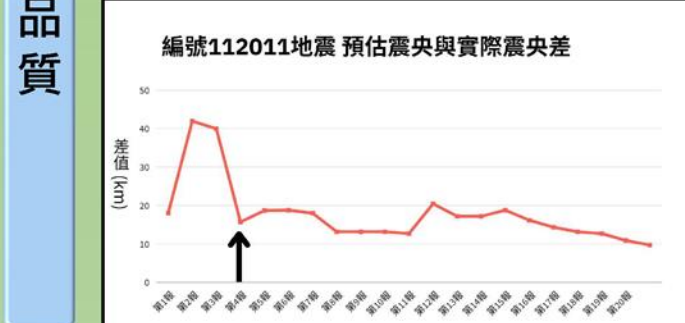
第4報：由於震後16秒已觸發五站，數據也更完整，因此震央及規模都已非常接近實際的數據。

第5~8報：震央位置與規模數值解算逐漸穩定。



發現第4報震央較準確

同時本研究在各案例中發現震央位置在第4報解算時會較準確，如下圖箭頭所指之處，可能與TREM地震觀測網密度有關聯。且格點搜索法利用儀器Z軸振幅與震央距計算「芮氏規模」，解算的位置會顯著影響規模。



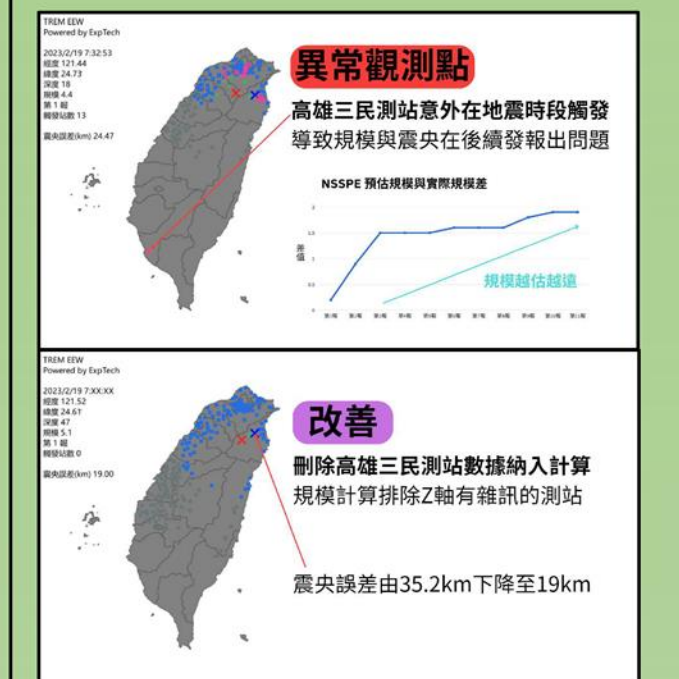
利用第4報震央解算規模

為了在短時間內將最正確的震源參數解算出來，本研究將格點搜索法的第4報之震央位置鎖定，且令儀器後續資料回傳只進行規模數值更新。藉此手法製作出兩張圖，可發現規模的解算能更快速的達到精確且穩定的數值。



例外情況

在地震發生當下，高雄市三民區的一台TAS地震儀被誤觸，導致系統誤判地震波已抵達該地區，並解算出與實際情況不符的結果。而後本研究透過手動將該站從計算中移除，震央的誤差即由35.2km下降為19km



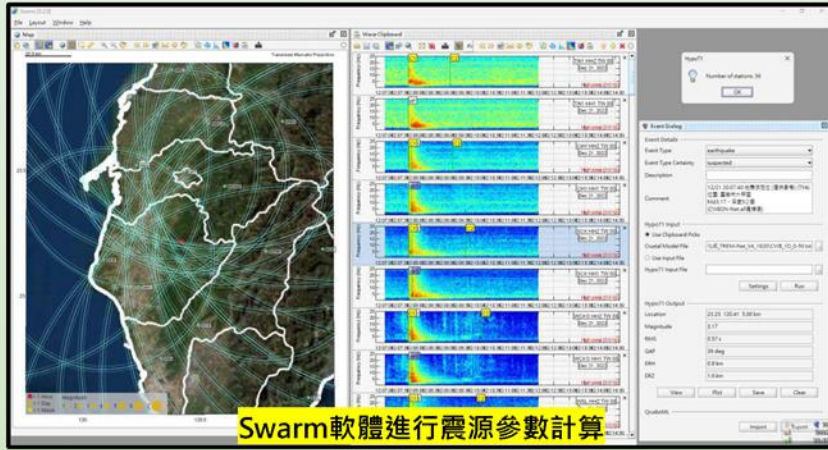
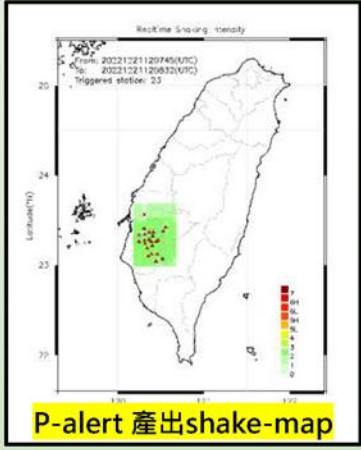
提升規模解算品質

五、討論

1. 本研究對CWB未發的小地震資訊計算處理方式

本研究提供TREM地震觀測網的地震儀資料，讓民眾下載自行運用，其中包括PGA圖、三軸波形圖及SAC檔，可以匯入Swarm軟體做頻譜圖分析和地震定位。

- (1) 資料獲取：GDMS → 離線資料下載
TREM → 波形圖資料下載網站
- (2) 震央定位：尋找P波、S波的位置 → 套入一維速度模型 → 輸出震央
- (3) 規模計算 (Md)：取出寬頻儀P波波形開始端至S波波形結束端，其他地震波不可計算。



Seismic Data Management System
地震資料管理系統

測站代碼
H-335-11339620-4 桃園市 大溪區

起始時間 2023-6-8 20:11:52
結束時間 2023-6-8 20:16:52

下載

右側白框為本研究自行定位之地震訊息

TREM 人工定位
2022/12/21 20:07:40
23.23 ~ 120.41
M 3.1
5公里

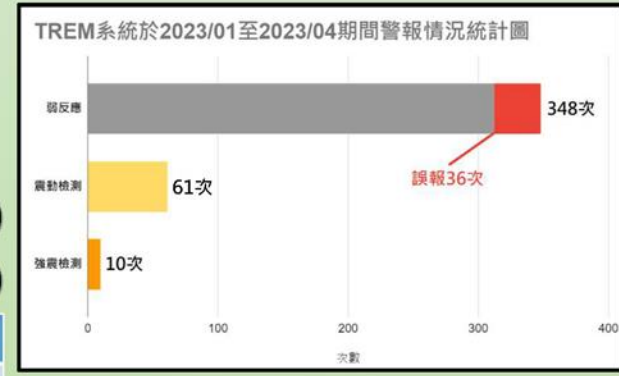
本研究自行定位之詳細地震資訊截圖

2. 警報統計

可依個人或企業背景自由選擇以下三種警報

- A. 弱反應 (0級以上會將通知送到選擇接收「弱反應」的用戶手中。)
- B. 震動檢測 (2級以上就會將通知送到選擇接收「震動檢測」的用戶手中。)
- C. 強震檢測 (4級以上才會將通知送到選擇接收「強震檢測」的用戶手中。)

	項目	1月份	2月份	3月份	4月份	全時段
警報成效	TREM誤報率(%)	13.82	21.05	10.63	0.00	10.34
	有感地震TREM發佈率(%)	51.28	39.02	58.33	47.16	43.64
警報用時	TREM警報時間(秒)	12.5	9.0	6.6	9.0	9.0
	CWB警報時間(秒)	25.1	22.2	19.6	22.7	21.9
警報情況 (TREM)	弱反應次數(次)	94	38	141	75	348
	震動檢測次數(次)	9	10	24	18	61
	強震檢測次數(次)	3	2	3	2	10



TREM系統

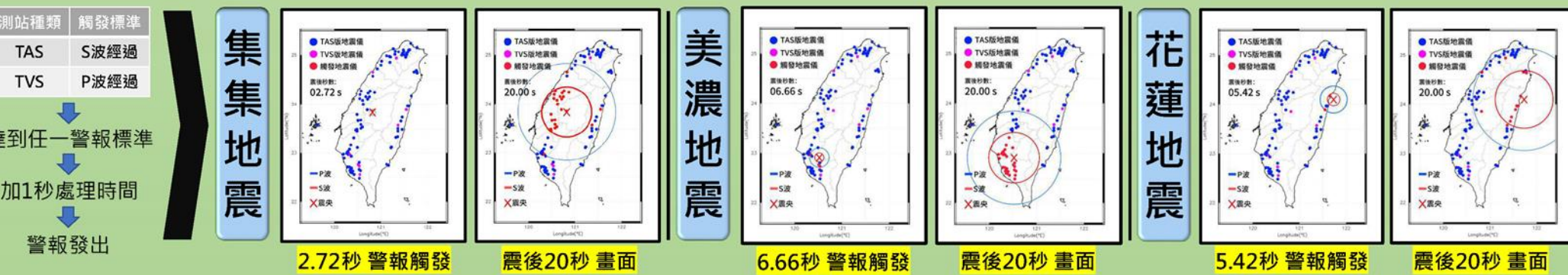
誤報：36次 皆未達2級

改進誤報問題

儀器環境 檢測機制 → 4月誤報率 0%

強震即時警報系統

共44次強震即時警報



測站種類 觸發標準

TAS S波經過
TVS P波經過

達到任一警報標準
加1秒處理時間
警報發出

集集地震 2.72秒 警報觸發 震後20秒 畫面

美濃地震 6.66秒 警報觸發 震後20秒 畫面

花蓮地震 5.42秒 警報觸發 震後20秒 畫面

六、結論與未來展望

- 1. 成功以簡易的材料與便宜的價格研發出地震儀，將超過百台地震儀架設在全臺各地進行地震監測，經過多次優化並與CWB站點數據比對，震度誤差皆在±1級以內，表示TREM地震儀資料具合格參考性。
- 2. 為了減少中央氣象局強震即時警報預警盲區，本研究開發一款地震預警軟體，並在GitHub上以免費開源的方式，將地震儀收集到的資料與地震預警軟體，提供給各單位下載使用，讓民眾、工廠等不同需求者有更好的客製化地震預警服務。
- 3. 在本研究設計的新型計算模型與包圍網結構下，地震預警的發報秒數由CWB的震後21.9秒發報改進為震後9秒發報 (預警盲區半徑約縮小45公里)。雖然TREM系統存在著10.34%的誤報率，但都未達2級以上，故不影響大地震時系統的表現，不僅有效縮小預警盲區也提供民眾更快速且具參考性的資訊。
- 4. 本研究發現格點搜索法第4報的震央位置與實際震央位置最相近，因此利用第4報的震央位置並配合後續儀器接收的數據計算芮氏規模數值，達到快速且準確性高的效果。
- 5. 根據本研究對警報時間的模擬，得知以目前的TREM觀測網密度，在面對過往的災害性地震，皆能在7秒內將警報發出，盲區半徑約是24公里。

以上研究皆是在有限的時間與資金下完成，以目前成果而言，本研究有效縮小地震預警盲區的範圍，並提供民眾更充足的疏散時間，藉此減少地震災害的衝擊，這也正是本研究的初衷。這項計畫也相當榮幸獲得中央氣象局地震測報中心的認可並與其簽約合作，讓這份研究有更完善的實際應用成果，未來也能更進一步的發展。對於地震預警每1秒的進步都得不來不易，也希望透過這項研究的延續為國家地球科學技術的發展做出貢獻，而在未來也將在全臺佈署更多的TREM地震儀，建立更完善的地震預警觀測網。

七、參考文獻

- 1. 中央氣象局地震測報中心。https://reurl.cc/8go10o
- 2. 米澤生 (主編) (2021)。普通型高級中學地球科學 (全一冊)。龍騰文化出版社。
- 3. Wald, D.J., and Allen, T.I., 2007. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. Bulletin of the Seismological Society of America, 97(5), pp.1379-1395.
- 4. Zhuang, J., Waki, D.J., Lin, G., and Hong, T., 2016. Rapid determination of earthquake magnitude and fault geometry using geographic information system techniques. Bulletin of the Seismological Society of America, 106(3), pp.1053-1067.
- 5. Zare, M., and Akef, H.R., 2017. A new method for estimation of earthquake epicenter by using geometric center of intensity distribution. Arabian Journal of Geosciences, 10(16), p.368.
- 6. Imanishi, K., Miyakoshi, K., & Takeeda, T. (2019). The latest status of Japan's Earthquake Early Warning system. Journal of Disaster Research, 14(2), 188-197.
- 7. Chung-Han Chan, Kuo-Fong Ma, J. Bruce H. Shyu, Ya-Ting Lee, Yu-Ju Wang, Jia-Cian Gao, Yin-Tung Yen, and Ruey-Juin Rauh (2022年01月)。臺灣地震模型標準式地震風險評估(TREM PSHA2020)。國立中央大學 地震災害風險評估及管理研究中心。https://e-cream.tw/research/tem2020/
- 8. 維基百科。臺灣地震列表。臺灣地震分布圖。https://reurl.cc/6Xze77
- 9. Pacific Northwest Seismic Network: PNSN - What is a Spectrogram? https://reurl.cc/KMe7m
- 10. Freiberger, W.F. An Approximate Method in Singal Detection. Q. Appl Math. 1963, 20, 373-378
- 11. 地牛Wake up! 臺灣地震速報。地震資訊表。https://reurl.cc/8Nvo1V
- 12. Chen, C. W., & Wu, Y. M. (2011). An automatic grid-search algorithm for wave-form correlation detections: The continuous seismic wave monitoring approach. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116(B12).
- 13. Bozorgnia, Y., Bertero, V. V., & Lee, J. (1993). Nonlinear structural analysis using the grid search method. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 22(10), 811-823.
- 14. TREM Seismic Data Management System。地震資料管理系統。https://exptech.com.tw/api/v2/file/SDMS.html
- 15. Citation: Central Weather Bureau (CWB, Taiwan). (2012). Central Weather Bureau Seismographic Network [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. https://doi.org/10.7914/SN/TS
- 16. Earthquake Hazards Program - Magnitude Types - USGS。https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/magnitude-types
- 17. 美國地震調查局USGS.gov - SWARM Seismic Wave Analysis and Real-time Monitor: User Manual and Reference Guide。https://reurl.cc/WDX607
- 18. Reid, H.F., The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Investigation Commission, Vol.2, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C. 1910.