

【實務論壇】

## 文物保存環境溫濕度監測的回顧與展望

Review and Prospect of Temperature and Humidity Monitoring of Cultural Properties Conservation Environment

張琳 Chang, Lin<sup>i</sup>

### ■ 摘要

國立故宮博物院典藏近 70 萬件冊文物，適當的預防性文物保存措施，不僅能減少善後性修復的工作，更是延續文物生命的關鍵。本文試探討 10 餘年來臺北故宮文物保存環境溫濕度監測數位化的緣起及物聯網於博物館之應用，乃至人工智慧大數據分析之運用，期能兼顧文物保存及營造舒適參觀環境之友善博物館。

**關鍵詞：**博物館、文物保存、溫濕度感測、物聯網、人工智慧

---

<sup>i</sup> 國立故宮博物院登錄保存處研究員（通訊作者 / linchang@npm.gov.tw）

收件日期：2020/10/20；接受日期：2021/2/26

## ■ Abstract

The National Palace Museum in Taipei houses a collection of 700,000 cultural relics. Appropriate preventive conservation measures can reduce future interventive conservation are key to extending the life of cultural heritage. This article discusses the origins of digitalization of temperature and relative humidity monitoring for the preservation of cultural relics in the National Palace Museum over the past 10 years, and the application of the Internet of Things in museums, as well as the application of artificial intelligence to big data analysis. It is anticipated that the preservation of cultural heritage and the creation of a friendly museum with a comfortable visitor environment can be realized.

**Keyword:** Museum, Conservation of Cultural Relics, Temperature and Relative Humidity Monitoring, Internet of Things, Artificial Intelligence

---

<sup>i</sup> Researcher, National Palace Museum (Corresponding Author / linchang@npm.gov.tw)

Received Date: 2020/10/20; Accepted Date: 2021/2/26

## 一、前言

博物館的文物展存環境溫濕度監測工作從早期的紙本記錄器，除了得定期巡檢溫濕度資料，大量的紙本需佔用保存空間與耗費人力管理，若欲搜尋特定時間的溫濕度資料如大海撈針，又因記錄器體積龐大難與文物並列監測，且電池消耗量大等侷限，逐漸以更小巧精美、可與文物並列的資料紀錄器（Datalogger）取代，但仍需人力定期讀取、下載、儲存，以取得連續的數位化溫濕度紀錄。直至 2000 年前後，網際網路漸臻發達，歐美國家開始以有線網路傳輸技術傳送溫濕度監測數據，建立即時感測、及時反應的機制，溫濕度資料數位化，搜尋更便捷、更節省管理人力及儲存空間。2008 年無線網路監測技術成熟，國立故宮博物院推動 U（Ubiquitous）化博物館，強化無線網路基礎建設，應用於文物保存、展示教育、典藏研究等領域，主動收集資訊與即時反饋，達到提升服務品質之目標。如今資訊科技已邁入人工智慧發展的新紀元，並藉由新興科技，有效控制成本，從現有的資訊中開發出更多價值與發展可能。本文試以國立故宮博物院（以下簡稱臺北故宮）早期佈建網路溫濕度監測系統，乃至現今人工智慧物聯網盛行，如何選擇合宜的網路傳輸技術，並應用人工智慧分析大數據擘畫未來智能博物館的願景。

## 二、回首來時路

博物館的文物展存環境溫濕度監測工作從早期的紙本記錄器、資料紀錄器（Datalogger），須耗費人力巡檢、下載及讀取溫濕度紀錄，判斷、發現問題後，啟動因應措施，未免亡羊補牢、無法即時應對處理。筆者 2006 年開始嘗試與元

智大學老人福祉科技研究中心合作研發以分散式資料伺服器（Distributed Data Server, DDS）為核心，具運算、儲存與網路功能的可攜式、彈性擴充的環境溫濕度監測系統，應用於臺北故宮文物庫房；後該系統更搭配無線感測網路（wireless sensor network, WSN）技術，於 2008 年臺北故宮文物於嘉義表演藝術中心展覽的機會，與另一套由資策會網路多媒體研究所合作開發的無線網路監測系統同時佈建於展場及展櫃內，併行測試比較上述兩套溫濕度監測系統的優缺點（張琳、楊哲彰、賴宏仁、徐業良，2009）。2008 年臺北故宮啟動 U 計畫建置全院無線網路，其中子計畫之一「故宮文物保存環境溫濕度感知監測系統」，即依據上述嘉義展覽的測試經驗，全面於正館佈建免於破壞陳列櫃的完整及密閉性的無線溫濕度感知系統，達到即時回傳、及時應變的目的（岩素芬、張琳、周泰銘、呂釗君、徐怡德，2010）。同時期，亦嘗試開發以安裝簡易、傳輸穩定、紀錄詳實、介面客製化為目標，能於臺北故宮文物外借國內、外展覽時，以遠端監測文物展示環境之無線溫濕度監測系統；然而，為確保網路或閘道器電力中斷時，數據至少可保存 5 天以上資料，並於網路或閘道器電力回復正常運作後，仍可將數據回傳至資料庫存檔所需配置的電池偌大，或借入方需提供電源以佈建資料接收閘道器等問題，而顯得窒礙難行。

2009 年開始建置的「故宮文物保存環境溫濕度感知監測系統」，搭配高精確度的溫濕度感測模組（溫度  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、相對濕度  $\pm 2\%$ ）的溫濕度紀錄器，能儲存 1,000 筆的溫濕度紀錄，以無線 Zigbee 網狀網路無線傳輸到資料收集器，然後將溫濕度資料透過展場無線網路、再經院內乙太網路傳

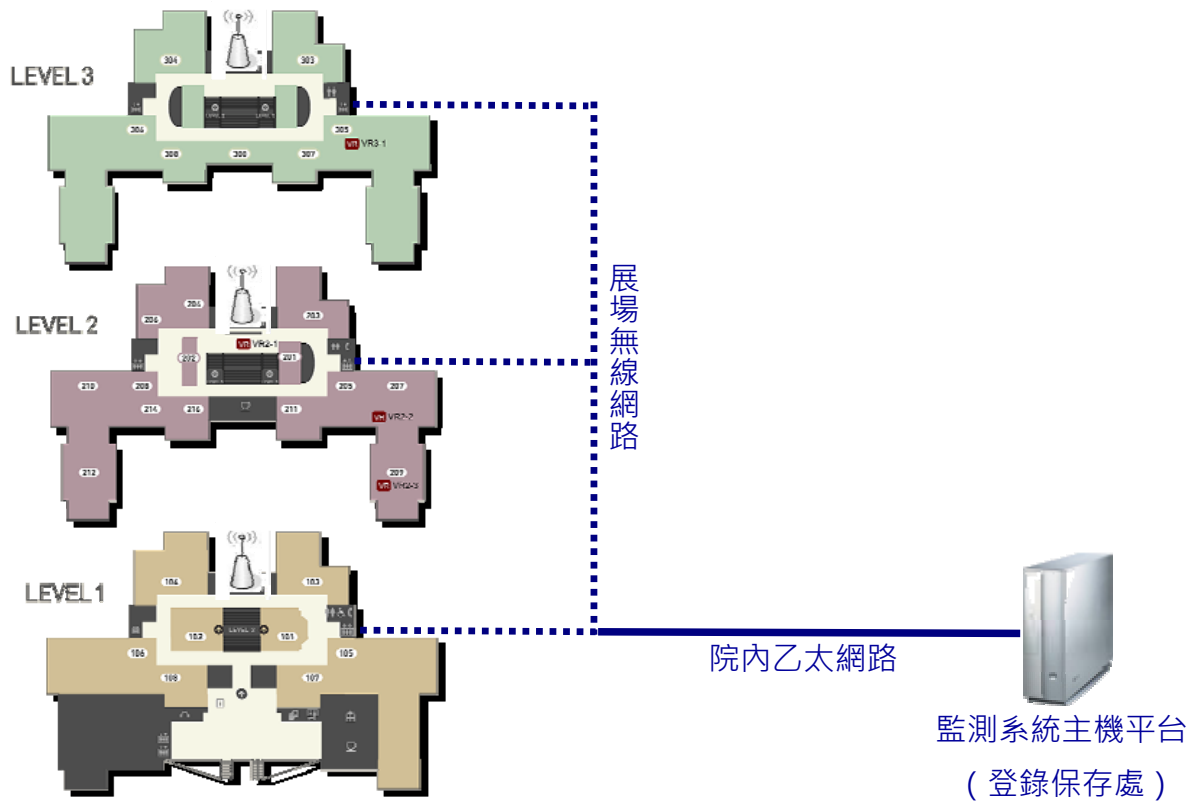


圖 1. 臺北故宮文物保存環境溫濕度感知監測系統架構圖（正館展場）

Fig 1. Floor plan and layout diagram of the temperature and humidity sensors and monitoring system at the National Palace Museum in Taipei (Main Exhibition Building). After Yen Sufen et al. (2010)

資料來源：摘自岩素芬等（2010）。

輸到遠端伺服器，即使斷電亦能在復電後回傳溫濕度資料，確保資料不流失（圖 1）；較同一年代中國秦始皇帝陵博物院建置環境監測系統，斷電造成資料缺失、供電不足停止數據記錄等問題，相對穩定、周全（李華，2020）。自 2010 年 3 月啟用迄今已 10 年餘的「故宮文物保存環境溫濕度感知監測系統」，目前仍可正常運作，惟因零組件老舊、溫濕度感測器模組老化、原始碼仍屬於開發業者，故調校費時、耗工，維修成本高。而今無線傳輸技術業已開發更低耗能、傳輸距離更遠者，正可汰舊換新，建置更適地性、功能更強的進化版文物展存環境的溫濕度監測系統。

### 三、當文物保存遇上人工智慧物聯網（Artificial Intelligence of Things, AIoT）

2005 年 11 月國際電信聯盟（International Telecommunication Union, ITU）發布《ITU 網際網路報告 2005：物聯網》，揭示「物聯網」時代的來臨。「故宮文物保存環境溫濕度感知監測系統」建置至今 11 年間的網路傳輸技術大躍進，研發趨向更低耗能、傳輸距離遠，並有更多的傳輸技術可提供評估適地性選擇。

物聯網的主要結構大致區分為三層：感知層（Sensor Level）、網路層（Network

Level) 及應用層 (Analysis Level)。

### 1. 感知層

目前市面上的溫濕度感測器硬體大多已臻成熟，差異性不大，市面上產品較 2010 年臺北故宮的無線溫濕度感知監測系統建置當時的選擇更多，但其中溫濕度感測器的精確度是不可或缺的首要條件；至於感測器所產生大量資料的儲存方式，自 2011 年雲端科技崛起後，透過雲端服務儲存及運算、管理資料，其保存較易受潮發霉的光碟及磁帶，或受震動損毀的硬碟等傳統資料保存方法來得安全有保障，降低資料遺失的風險；對管理、使用者而言，只要有網路的地方，即可隨時隨地取得正確、完整的資料，提高管理的便利與即時性；對系統維護者而言，可減低硬體維護的負擔；惟須建立安全的使用者登入驗證程序，並慎選資安管理良好、異地備份無虞的雲端服務廠商。

### 2. 網路層

Wi-Fi 自 1997 年發展迄今，目前仍是物聯網的基礎技術，相較於 2010 年臺北故宮建置無線網路感知系統時，傳輸速率更高、頻段選擇更多，可更快速傳輸資料，並可避免干擾。但 Wi-Fi 頻率越高，衰減越快，傳輸距離越短，穿透力也相對減低，易受監測環境的空間條件（如建築物隔間）影響。藍牙、Zigbee 是較低功耗射頻產品，具省電、低成本優勢，可以是小資料量、低功耗使用者較優選項。

除了 Wi-Fi 之外，低功耗廣域網路 (Low Power Wide Area Network, LPWAN) 也是可以提供資料量少的使用者更低功耗、更長傳輸距離的新選項 (表 1)。目前各種主要的 LPWAN 在系統維修與架設

的優缺點：

- (1) SIGFOX：其特色在於建立一個全球共通的 IoT 網路，再透過各地特許網路營運商提供服務；SIGFOX 在資料傳輸頻率和資料傳輸大小相對限制較多，相較於 LoRa 和 NBLoT 速率低 (適合傳小資料量) 和頻率低 (傳輸距離相對較遠)，日後的維修和架設可能因此受限。
- (2) LoRa (Long Range)：使用 LoRa 系統就如同 Wi-Fi 般，需架設基地台建置網路環境，理想傳輸距離可達數公里，但實際傳輸距離則視環境屏障與材質各異，但相對勝過 Wi-Fi、藍牙、Zigbee。臺灣使用 LoRa 的廠商相對多，之後維修與佈建選擇也相對較多。
- (3) 窄頻物聯網 (Narrow Band-IOT, NBLoT)：NBLoT 使用電信業者手機基地台，如室內訊號允許，不需額外架設基地台，同一場域的感測器可透由裝有電信業者 SIM 卡 (可能須付費) 的節點 (node) 上傳感測數據。此技術在臺灣尚屬成長階段，大多廠商都還處於驗證期。

2010 年臺北故宮完成的正館無線溫濕度感知監測系統其架構即是 Zigbee 搭配 Wi-Fi，在當時世界各大博物館尚處測試階段，正式跨出成功第一步。2017 年於臺北故宮文獻大樓展出的「大英博物館藏木乃伊—探索古代生活」特展，即利用藍牙溫濕度感測器，搭配產、官、學合作研發網路型藍牙接收器，順利完成遠端即時監測特展場溫濕度的任務，具體實現因時、因地、因物制宜地靈活應用科技於文物保存。

茲比較上述各通訊技術特性如表 1，使用者可就各應用環境的特性、資料傳輸量，選擇應用適當的通訊技術。

表 1. 各種主流通訊技術特性比較

Tab 1. Comparison of the characteristics of various mainstream wireless/radio communication technologies

分類	制定年代	通訊技術標準	傳輸距離 (因場域阻隔與否各異)	功耗 (收/傳)	最高傳輸速率
短距離	1999	Bluetooth <sup>1</sup>	1 公尺 - 3.8 公里	中低耗	24Mbps
	2004	Zigbee <sup>2</sup>	75-300 公尺	低功耗 *	250Kbps
	2009	Wi-Fi 4(802.11n)	10-100 公尺	高功耗	600Mbps
	2013	Wi-Fi 5(802.11ac)			6.9Gbps
	2019	Wi-Fi 6(802.11ax)			9.6Gbps
長距離 <sup>3</sup>	2010	SIGFOX	10-40 公里	10 / 10-50 毫安培 *	100bps
	2015	LoRa	5-20 公里	10.5 / 28 毫安培 *	50Kbps
	2016	NB-IoT	1-10 公里	46 / 74-220 毫安培 *	200Kbps

註：\* 具省電的休眠模式。

### 3. 應用層：

現今主要運用深度學習(Deep learning)、機器學習(Machine Learning, ML)等人工智慧(Artificial Intelligence, AI)方法分析、判讀多種回傳的大數據，提供各領域解決問題之參考。

在保存維護方面，未來或可串連溫度、相對濕度、光、三軸加速度感測器

(tri-axis acceleration sensor)、被動式紅外線(Passive Infrared, PIR sensor)等多種監測感知(Alsuhly & Khattab, 2018)，以應用於文物保存及安全維護範疇，如：文物展存環境監控、展場安全管理、文物受震位移監測、參觀者使用閃光燈的發現、人員標定與館方對應等，以現代科技替代高勞力的管理工作，都極具開發的意義(圖2)。

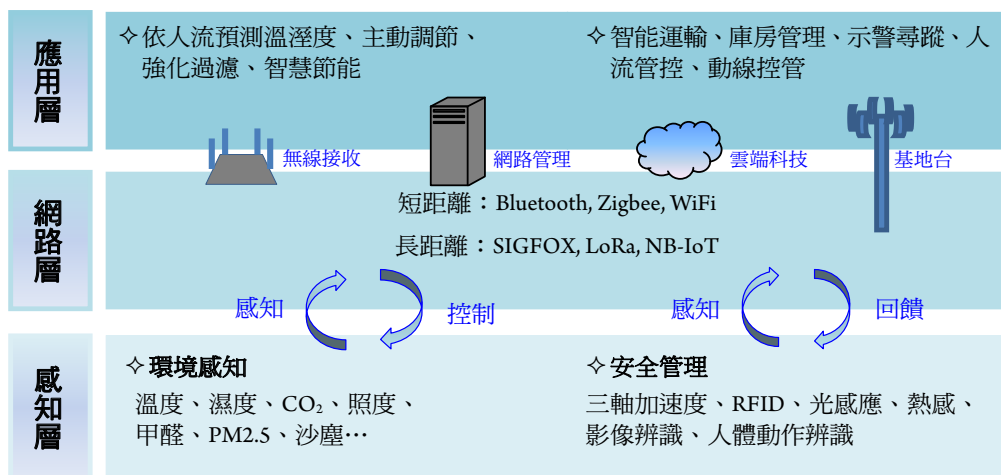


圖 2. 在人工智慧物聯網架構下，可應用於文物保存之範疇。

Fig 2. Artificial (AI) framework of the Internet of Things, applied to cultural relics preventive conservation. (Drawn by the author).

資料來源：作者繪製。

<sup>1</sup> 2020 年 7 月 18 日檢索自 <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/bluetooth-technology/range/#estimator>。

<sup>2</sup> 2020 年 7 月 18 日檢索自 Zigbee 聯盟：<https://zigbeealliance.org/zh-TW/solution/zigbee/>。

<sup>3</sup> Buurman et al.(2020); Mekkia et al.(2017).

#### 四、文物保存智能化的願景

國立臺灣史前文化博物館受文化部委任推動「國家考古遺址出土遺物典藏計畫」，於 2019 年底啟用以「全智能典藏管理監測系統」整合人臉辨識攝影機、無線射頻辨識（Radio Frequency Identification, RFID）感應器、溫濕度監測器、環景攝影機、智能典藏櫃等，打造全方位整合、自動化管理、智能監測與高效率作業能力的典藏庫，是人工智能應用於文物典藏的實例（文化部，2019）。

敦煌研究院在採用物聯網技術，建立敦煌石窟預警式監測系統，以各種監測設備，對洞窟外環境溫濕度、降雨量、岩體裂隙、沙塵、洪水、地震等進行監測，即時取得危害岩體和洞窟壁畫安全的變化數據，並在所有開放參觀的洞窟內即時監測溫濕度及二氧化碳的變化，以採取預防文物受害的必要措施。洞窟相對濕度或二氧化碳一旦超標，或遇極端氣候，監測系統自動發出警報，以暫停開放的管理措施，避免文物受到劣化因子威脅之風險（樊錦詩，2020）。

當參觀者踏進博物館開始，透過人手一機的行動設備或館內所建置具影像辨識之高階攝影機取得的大數據，分析參觀者在各陳列室或熱門展品的停駐時間，經由人潮熱區的感知與人流預測，建議並引導參觀動線，以達到主動分流的效果，避免人潮聚集；另一方面，由各展場參觀人數的預測，提前控制燈光照度，使參觀者逐步適應展場內光線，若一段時間內不會有參觀者，也可將文物照度減低，以免徒

耗電能，並可將文物年累積照度盡可能降低。此外，大量參觀者影響文物微氣候是不容忽視的，據實驗：40 名觀眾在展廳內滯留 10 分鐘後，溫度將急遽上升 4°C，相對濕度平均變化約 10%（郭宏，2001）。現行空調系統多是被動式反應啟動，往往熱門陳列室參觀者過多，造成室內二氧化碳濃度超標，<sup>4</sup> 輒有參觀者氣悶休克意外。若能整合歷年參觀人數與溫度、相對濕度及二氧化碳等大數據（如圖 3），經由 AI 的統計分析，結合展場人流動態，預測人流走向與空間溫、濕度及二氧化碳濃度變化，運算空調系統的啟動時機與各項環境參數，提前調整溫度、濕度及外氣交換比率，有助於提升參觀者之舒適感及愉悅感。

#### 五、結語

文物是人類智慧的結晶，透過文物讓人們認識各族群文化歷史，學習尊重與包容。讓文物走出博物館以饗世人，是當今博物館間交流的目的。現代科技日新月異，具備低功耗、快速的傳輸技術，透過雲端儲存、運算與管理，即使文物異地展覽，只要輕便的無線感知器與文物隨行，便能藉由所在地的無線網路跨越時空，即時追蹤所處環境的現況。

以 AIoT 分析大數據，建立主動式監控與預警，對文物展存環境能更密切掌握，不僅減輕人力的負擔，亦可避免文物遭受自然、人為破壞之風險。期由 AIoT 的超前部署，創造文物、博物館及參觀者皆贏的優化環境，將是智能博物館的未來願景。

<sup>4</sup> 行政院環保署 2017 年 1 月訂定博物館美術館等為「應符合室內空氣品質管理法之第二批公告場所第二批空氣品質列管場所」，室內二氧化碳濃度之標準值為 1000ppm。

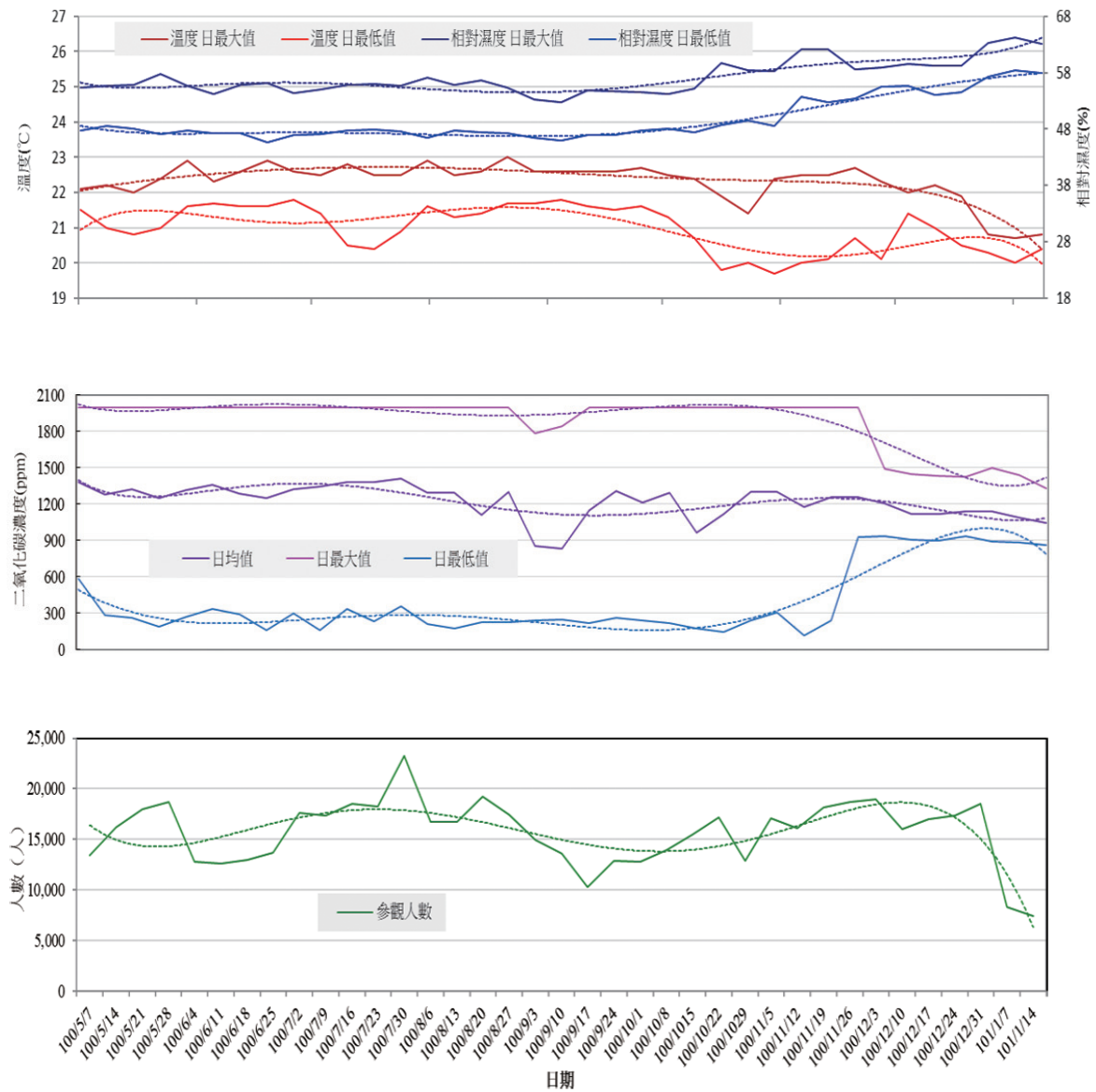


圖 3. 臺北故宮 2011 年 5 月 -2012 年 1 月周末進入正館參觀總人數（下圖），與熱門展廳之一的 106 陳列室溫度、相對濕度（上圖）及二氧化碳（中圖）之趨勢分析。

Fig 3. The total number of visitors to the main hall of the National Palace Museum in Taipei from May 2011 to January 2012\* (bottom), compared with the temperature and relative humidity (top) and carbon dioxide (middle) in Gallery 106 – one of the most popular exhibition halls. (Drawn by the author)

\* Note: The dates are shown according to the Minguo calendar with 1911 as year zero

資料來源：作者製圖。



## 參考文獻

- 文化部（2019）。〈國內博物館第一座全智能典藏庫 16 日史前館正式啟用！〉。2020 年 8 月 19 日檢索自文化部：[https://www.moc.gov.tw/information\\_250\\_107174.html](https://www.moc.gov.tw/information_250_107174.html)。
- 李華（2020）。〈物聯網技術在秦始皇帝陵博物院環境監測中的應用〉。《溫物保護與考古科學》，32（4），110-116。
- 岩素芬、張琳、周泰銘、呂釗君、徐怡德（2010）。〈博物館溫溼度 U 化的優質管理〉，《故宮文物月刊》，322，18-21。
- 張琳、楊哲彰、賴宏仁、徐業良（2009）。〈故宮文物借展環境無線監測系統之建置〉。《博物館與文化機構科技應用個案集》（頁 1-14）。臺北：博物館電腦網路協會臺灣分會發行。（2009 年博物館與文化機構科技應用研討會）。
- 郭宏（2001）。《文物保存環境概論》。北京：科學出版社。
- 樊錦詩（2020）。〈永久保存 永續利用——做好新時代敦煌文化的「繼承者、創新者、傳播者」〉。2020 年 8 月 19 日檢索自文旅中國：<https://www.ccmapp.cn/news/detail?id=a30aa839-a009-465f-8f36-1c3a8670358e&categoryid=10942-mssql&categoryname=%E8%AF%84%E8%AE%BA>。
- Alsuhly, G., & Khattab, A. (2018). An IoT monitoring and control platform for museum content conservation. (pp.196-201). International Conference on Computer and Applications (ICCA) Proceedings.
- Buurman, B., Kamruzzaman, J., Karmakar, G., & Islam, S. (2020). Low-Power Wide-Area Networks: Design Goals, Architecture, Suitability to Use Cases and Research Challenges Research Challenges. *IEEE Access*, 8, 17179-17220.
- Mekia, K., EddyBajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2017). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ScienceDirect ICT Express*, 5, 1-7.