

## 聲強感測器於戶外噪音場景之實際案例與應用

若從國際技術發展史、商品化設備現況與可追溯之學術文獻三個面向同時觀察，3D 聲強感測器在戶外噪音場景中的真正價值，不在於像麥克風陣列式聲學相機那樣直接生成高解析的多音源聲音影像圖，而在於以聲強向量、粒子速度或聲學向量資訊，提供主導噪音來向、低頻源辨識、背景事件排除及長時方向監測之能力。這一點在風機、道路交通及工地三大應用領域中都有明確跡象，而且其技術邊界也相當一致：當任務是辨識「主要聲音由哪裡來」、在高背景或多反射條件下確認主導事件方向，或在單點、低成本、長時條件下維持方向資訊輸出時，3D 聲強感測器具有明顯優勢；但當任務升級為「同一時間有哪些來源共同存在並各自分布於何處」的完整複合性音源分離時，國際主流仍然傾向以麥克風陣列與波束形成作為主體方法，而把聲強技術放在方向輔助、事件篩選或低頻補強的位置。

[1][2][3][4][5]

在風機噪音應用領域中，最具代表性的案例之一，是 Fernandez Comesana、Nambur Ramamohan、Perez Cabo 與 Carrillo Pousa 於 2017 年在第七屆 International Conference on Wind Turbine Noise 所提出的〈Modelling and localizing low frequency noise of a wind turbine using an array of acoustic vector sensors〉。這篇研究之所以重要，不只是因為它把 **acoustic vector sensors (AVS)** 真正帶進大型風機低頻噪源定位議題，更因為它明確證明了在低頻場景中，AVS 可以在遠小於傳統壓力式大孔徑陣列的幾何規模下，仍然保有對旋轉葉片沿線發射點的定位能力。Microflown 官方將此論文列為 **key paper**，說明其研究以 **acoustic vector sensors** 陣列處理大型風機聲場，並將 **beamforming** 套用於合成與實測資料，以定位移動葉片上的低頻噪源，同時指出此模型有助於理解特定機械缺陷如何改變聽感與音色。[6] 這裡必須特別精確指出，這個案例雖然使用的是 AVS 陣列而非單一點式 3D 聲強感測器，但其感測原理屬於聲學向量／粒子速度法，而非單純壓力陣列，因此在方法論上仍屬你所關注的聲強路徑延伸。[6]

這個風機案例對後續技術制度最重要的啟示，在於它直接揭示了低頻風機噪音的本質問題。風機低頻成分通常波長長、相干性高、且受旋轉與都卜勒效應影響，若使用純壓力式大孔徑陣列，不僅系統規模會快速膨脹，現地部署成本與幾何穩定性也大幅升高；相對地，AVS 透過聲壓與粒子速度的複合量測，可在較小孔徑下提供低頻方向資訊與定位能力，特別適合風機此類低頻、轉動、遠場與機械

缺陷交織的場景。[6] 這並不代表 AVS 就能在所有風機場景全面取代陣列，而是說明在低頻風機噪源辨識這個特定問題上，聲學向量法具備壓力陣列難以完全取代的技術優勢。這也是未來若要發展風機噪音「分離層」技術時，AVS 或 3D 聲強感測器最值得優先放入的方法論原因。[6]

另一個與風機高度相似、但更直接揭示戶外聲強法限制的案例，是 de Bree、Ostendorf 與 Basten 於 2009 年提出的 TNO 研究〈An acoustic vector based approach to locate low frequency noise sources in 3D〉。該研究使用 Microflown PU Mini 與防風罩組成的 3D acoustic vector setup，在戶外塔樓情境中進行低頻 tonal noise 來源定位，並以塔頂吊掛揚聲器作為已知校正源，地面設置感測器進行驗證。TNO 官方 PDF 明確記載，該方法在特定高頻條件下可以成功定位來源，但在 100 Hz 左右時，雖然仰角仍有一定正確性，方位角卻明顯偏差，作者將其歸因於地面反射、背景噪音與低頻訊噪比不足等因素。[7] 這一案例雖非真正風機量測，但其物理情境與風機塔筒、機艙共振、塔體反射與地面傳播問題高度相似，因此極具類比價值。從政策與工程角度看，這個案例最重要的訊息是：**3D 聲強感測器在戶外低頻定位上確實可用，但地面反射、背景干擾與低頻訊噪比不足，是任何現地應用都必須正面處理的三大限制。** [7]

若進一步看 2025 年的風機最新應用，Segovia Ramírez、García Márquez、Bernalte Sánchez 與 Peinado Gonzalo 在 *Measurement* 發表的〈Acoustic inspection system with unmanned aerial vehicles for offshore wind turbines: A real case study〉，則提供了另一條未來發展路徑。這篇文章並不是嚴格的 p-u 型 3D 聲強感測器案例，而是無人機 (UAV) 搭載聲學量測系統進行 offshore wind turbine 巡檢，並以 wavelet transform、濾波與機器學習分類器處理旋翼與海浪背景干擾。ScienceDirect 的摘要明確指出，該系統旨在擷取旋轉風機元件的聲學資料，並透過前處理去除無人機與環境噪音，以辨識風機健康狀態。[8] 這個案例的重要性在於，它雖然不是純 3D 聲強系統，卻顯示「遠端、無接觸、戶外移動式聲學巡檢」已經成為風機聲學診斷的重要方向。從方法論上看，若未來把真正的 3D AVS 或聲強向量感測器整合到 UAV 平台，便可能形成一種比當前固定式低頻 AVS 更具機動性的風機檢測框架。[8] 換言之，這篇論文對聲強技術的直接價值不在於它已經完成 3D 聲強化，而在於它證明了戶外風機聲學監測正在朝「行動化、即時化、智慧過濾」發展，為未來 3D 聲強感測器的移動化應用鋪路。[8]

在道路交通應用方面，目前國際上最有系統、最具持續性的戶外 AVS 研究群，確實集中於波蘭格但斯克理工大學 Szwoch 與 Kotus 團隊。這一系列研究的重要性，在於它不是停留在單一概念驗證，而是從車輛偵測、車速估計、路面濕滑偵測一路延伸到路面狀態評估，逐步證明 acoustic vector sensor 在智慧交通場景中的實際可用性。首先，在 2021 年 *Sensors* 期刊發表的〈Acoustic Detector of Road Vehicles Based on Sound Intensity〉中，作者以自製 acoustic detector 量測沿道路平行與垂直方向的 sound intensity，透過事件偵測與軌跡追蹤來完成車流計數。MDPI 與 PubMed 頁面都清楚記載，該方法在 24 小時、5905 輛車的戶外實測中，Precision、Recall 與 F1 約可達 0.95，並且在每小時 250–450 輛的密集車流下仍維持高水準表現。[9][10] 這篇研究的本質意義，不只是在「計數」上取得好成績，而是證明了利用聲強分析得到的向量資訊，可以在道路環境中把屬於道路方向的移動聲源從其他背景中拉出來，形成穩定可用的事件偵測邏輯。[9][10]

同年，Kotus 與 Szwoch 在 *Sensors* 發表的〈Estimation of Average Speed of Road Vehicles by Sound Intensity Analysis〉則進一步將道路 AVS 從車輛計數推向交通速度監測。論文摘要與 PubMed 資訊明確指出，該方法利用 passive acoustic vector sensor 測得兩個正交方向的 sound intensity，並藉由聲源位置隨時間變化推估平均車速。[11][12] 這一點對戶外 3D 聲強技術的實務意義非常大，因為它說明聲強或 acoustic vector 資料不僅能回答「有沒有車」、「從哪個方向來」，還能在一定程度上對移動來源進行動態幾何推估。當然，這仍然不是完整聲音影像圖意義下的多音源空間成像，但它證明了在道路交通這種高度方向化、移動化的場景中，AVS 類方法具有超越單一聲級計的訊息量。[11][12]

2023 年 Szwoch 與 Kotus 在 *Sensors* 又發表〈Detection of Water on Road Surface with Acoustic Vector Sensor〉，將 AVS 的用途進一步擴展到路面濕滑監測。MDPI 與 PubMed 資訊顯示，該研究的方法建立在頻域 sound intensity analysis 上，透過計算 individual spectral components 的 incoming sound direction，捨棄不屬於目標道路區段的頻譜成分，再分析特定頻帶的強度比，最後以中值濾波與移動平均做乾／濕判別，並得到約 0.89 的 F1 表現。[13][14] 這篇研究之所以對「複合性音源分離工具」的討論特別重要，在於它清楚展示了 AVS 的一個核心優勢：可以利用方向資訊進行空間過濾（spatial filtering），把不屬於目標道路方向的噪音成分排除，再對保留下來的道路聲學特徵做判讀。[13] 這與

傳統只看整體聲壓級的做法完全不同，也意味著在未來道路複合音場案件中，AVS 類感測器極可能成為「道路主音源貢獻度」或「背景方向排除」的重要工具。[13][14]

延伸到 2022 年在 *The Journal of the Acoustical Society of America* 發表的〈Assessment of road surface state with acoustic vector sensor〉，則可視為上述濕滑偵測研究的會議／摘要型延伸。AIP 出版頁面指出，該方法是利用 sound intensity analysis 被動監測道路表面狀態，設計目的正是讓感測器置於道路旁即可非侵入式地判斷路面狀態。[15] 這再次強化了一件事：在道路交通場景中，acoustic vector sensor 的國際研究已不再只是「能不能量」，而是逐步走向「能不能作為智慧城市道路狀態感知系統的一部分」。這種應用脈絡對未來噪音治理的直接意義，在於它使 3D 聲強技術不再只是被動聽音，而開始成為交通狀態與道路風險辨識的輔助層。[15]

除了交通監測本身，更值得注意的是 2022 年 *JASA* 的〈Source separation with an acoustic vector sensor for terrestrial bioacoustics〉。AIP 出版頁面與 PubMed 都指出，作者提出利用單一 acoustic vector sensor 分離不同聲源的貢獻，以解決複雜聲景中的重疊問題。[16][17] 雖然這篇研究的直接應用是 terrestrial bioacoustics，而不是道路或工地噪音，但其方法論價值極高。因為它證明 acoustic vector sensor 在戶外多聲源場景中，的確可以作為「source separation」的一環，而不只是單純的 direction-of-arrival 工具。[16] 當然，這裡的 source separation 與聲學相機式的多音源空間聲音影像圖仍有本質差異；它更接近利用向量資訊把不同方向成分分離開來，而不是完整重建所有來源的位置圖譜。然而，對你所關心的「未來複合性音源分離工具」而言，這篇研究非常值得納入，因為它說明單一 AVS 在戶外混合聲景中確實具備比傳統單麥更高的分離潛力。[16][17]

在工地與重工業應用方面，粒子速度與聲學向量法的價值通常在「高背景、強殘響、多源混合」條件下特別明顯。2015 年 Guiot、Fernandez Comesana、Korbasiewicz 與 Carrillo Pousa 於 *Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings* 發表〈Turbo-compressor and piping noise assessment using particle velocity based sound emission methods〉，由 Microflown 官方與 INCE 出版系統均可查證。論文摘要指出，該研究旨在評估 particle velocity based in-situ technique 對大型機械 sound power measurement 的可靠性，並展示 sound visualization 結果。[18][19] 更重要的是，這個案例來自高背景噪音、高殘響的

工業現場，其關鍵不只在測得聲功率，而在於成功區分壓縮機本體與製程管路的主導噪音來源。這代表在傳統壓力麥克風可能被強背景、反射與高 SPL 淹沒的場域中，particle velocity / sound intensity 路徑確實可以維持可用的來源辨識能力。[18] 這對工地情境的啟示非常直接：當現場存在大型機具、鋼構回響、臨時設施反射與多機具同時運轉時，粒子速度法可能比單純聲壓法更容易抓到主導異常來源。[18][19]

另一個工地相關案例是 Washington State Department of Transportation 所保存的〈Sound Pressure and Particle Velocity Measurements from Pile Driving at the Eagle Harbor Maintenance Facility〉。該 PDF 可直接由 WSDOT 官網取得，內容記錄了打樁作業的 sound pressure 與 particle velocity measurements，場景是 Washington State Ferries 維修設施的 pile driving，並用來評估 bubble curtain 的減噪效果。[20] 嚴格說，這份報告主要處理的是水下 / 近水域工程與生態影響，不是一般陸域工地住區噪音管理文件；但從技術面看，它證明粒子速度量測確實已在工程施工情境中作為衝擊型、低頻主導噪音的重要補充資訊使用。[20] 這類案例對陸域複合噪音治理的借鏡，不在於直接複製水下方法，而在於提醒我們：**當工地噪音具有強脈衝、低頻突出或結構耦合特性時，僅靠聲壓級往往不足，而粒子速度 / 聲強資訊能補足傳播方向與近場機理的判讀。** [20]

綜合風機、道路交通與工地三大類案例後，可以更清楚地重新界定 3D 聲強感測器在戶外噪音治理中的國際角色。風機領域強調低頻、轉動、缺陷與都卜勒效應，因此 acoustic vector sensor 或 particle velocity 法最有價值的地方在低頻噪源定位與機械異常理解。[6][7] 道路交通領域強調移動來源、主方向穩定、連續監測與背景過濾，因此 AVS 類方法最有價值的地方在車流偵測、車速估計、道路狀態判定與方向性空間過濾。[9][11][13][15] 工地與重工業領域則強調高背景、強殘響、多源混合與即時告警，因此粒子速度 / 聲強法最有價值的地方在異常主導源辨識與極端場景下的可運作性。[18][20]

因此，3D 聲強感測器及其延伸的 acoustic vector sensor 技術，在戶外噪音場景中已經展現出三種不可取代的價值。第一，是**主導方向判定**。第二，是**低頻或高背景條件下的來源辨識補強**。第三，是**把時間歷程監測提升為方向—事件—背景三者整合的智慧判釋流程**。[1][6][7][18] 但同時也必須維持專業上的節制與誠實：就目前可驗證的國際案例與官方產品定義來看，它們大多數仍不等於完整的多音源空間分布重建系統，真正要回答「同一時間有哪些來源共同存在並各自分布於

何處」，主流技術依然是麥克風陣列與波束形成，而 3D 聲強技術更適合被放在方向輔助、低頻補強、背景排除與特定場景分離層的位置上。[1][2][16]

若進一步對未來制度化做推論，最具可行性的做法不是把 3D 聲強感測器誇大為萬能設備，而是把它放進「Class 1 法定量測+陣列空間分離+聲強方向輔助」的三層架構之中。這樣的架構既符合目前國際案例的真實能力邊界，也最能回應你所關注的複合性音源分離需求。對風機而言，聲強/AVS 可優先放在低頻缺陷定位層；對道路交通而言，可放在方向扇區辨識與背景過濾層；對工地而言，可放在長時監測中的主導事件標記與高背景異常源辨識層。[6][9][18] 這樣既不會錯置設備角色，也能讓未來技術指引、修法條文與現場稽查流程都建立在可驗證的國際證據之上。

## 參考文獻

- [1] NTi Audio. (n.d.). *Noise Locator NLI*. NTi Audio.
- [2] NTi Audio. (n.d.). *Locate the noise. Understand the source. Meet the Noise Locator*. NTi Audio News.
- [3] Fernandez Comesana, D., Nambur Ramamohan, K., Perez Cabo, D., & Carrillo Pousa, G. (2017). *Modelling and localizing low frequency noise of a wind turbine using an array of acoustic vector sensors*. Proceedings of the 7th International Conference on Wind Turbine Noise.
- [4] International Organization for Standardization. (2002). *ISO 9614-3: Acoustics—Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity—Part 3: Precision method for measurement by scanning*. ISO.
- [5] Norsonic. (n.d.). *Sound intensity applications*. Norsonic.
- [6] Microflown Technologies. (n.d.). *Key paper: Modelling and localizing low frequency noise of a wind turbine using an array of acoustic vector sensors*. Microflown Resources.
- [7] de Bree, H.-E., Ostendorf, C., & Basten, T. (2009). *An acoustic vector based approach to locate low frequency noise sources in 3D*. TNO publication.
- [8] Segovia Ramírez, I., García Márquez, F. P., Bernalte Sánchez, P. J., & Peinado Gonzalo, A. (2025). Acoustic inspection system with unmanned aerial vehicles for offshore wind turbines: A real case study. *Measurement*, 251, 117226.

- [9] Szwoch, G., & Kotus, J. (2021). Acoustic detector of road vehicles based on sound intensity. *Sensors*, 21(23), 7781.
- [10] National Library of Medicine. (2021). *Acoustic detector of road vehicles based on sound intensity*. PubMed record.
- [11] Kotus, J., & Szwoch, G. (2021). Estimation of average speed of road vehicles by sound intensity analysis. *Sensors*, 21(16), 5337.
- [12] National Library of Medicine. (2021). *Estimation of average speed of road vehicles by sound intensity analysis*. PubMed record.
- [13] Kotus, J., & Szwoch, G. (2023). Detection of water on road surface with acoustic vector sensor. *Sensors*, 23(21), 8878.
- [14] National Library of Medicine. (2023). *Detection of water on road surface with acoustic vector sensor*. PubMed record.
- [15] Kotus, J., & Szwoch, G. (2022). Assessment of road surface state with acoustic vector sensor. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 152(4\_Supplement), A193.
- [16] Tolkova, I., & Klinck, H. (2022). Source separation with an acoustic vector sensor for terrestrial bioacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 152(2), 1123–1134.
- [17] National Library of Medicine. (2022). *Source separation with an acoustic vector sensor for terrestrial bioacoustics*. PubMed record.
- [18] Guiot, M., Fernandez Comesana, D., Korbasiewicz, M., & Carrillo Pousa, G. (2015). Turbo-compressor and piping noise assessment using particle velocity based sound emission methods. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 250(4), 2944–2952.
- [19] Microflown Technologies. (n.d.). *Turbo-compressor and piping noise assessment using a particle velocity based sound emission method* [PDF].
- [20] Washington State Department of Transportation. (2010). *Sound pressure and particle velocity measurements from pile driving at the Eagle Harbor maintenance facility* [Technical report].