

AI 在石化園區工業煙囪煙霧安全偵測 與其在事故歸因分析之研究

AI-Based Smoke Safety Detection in Petrochemical Industrial Chimneys and Its Application to Accident Attribution Analysis

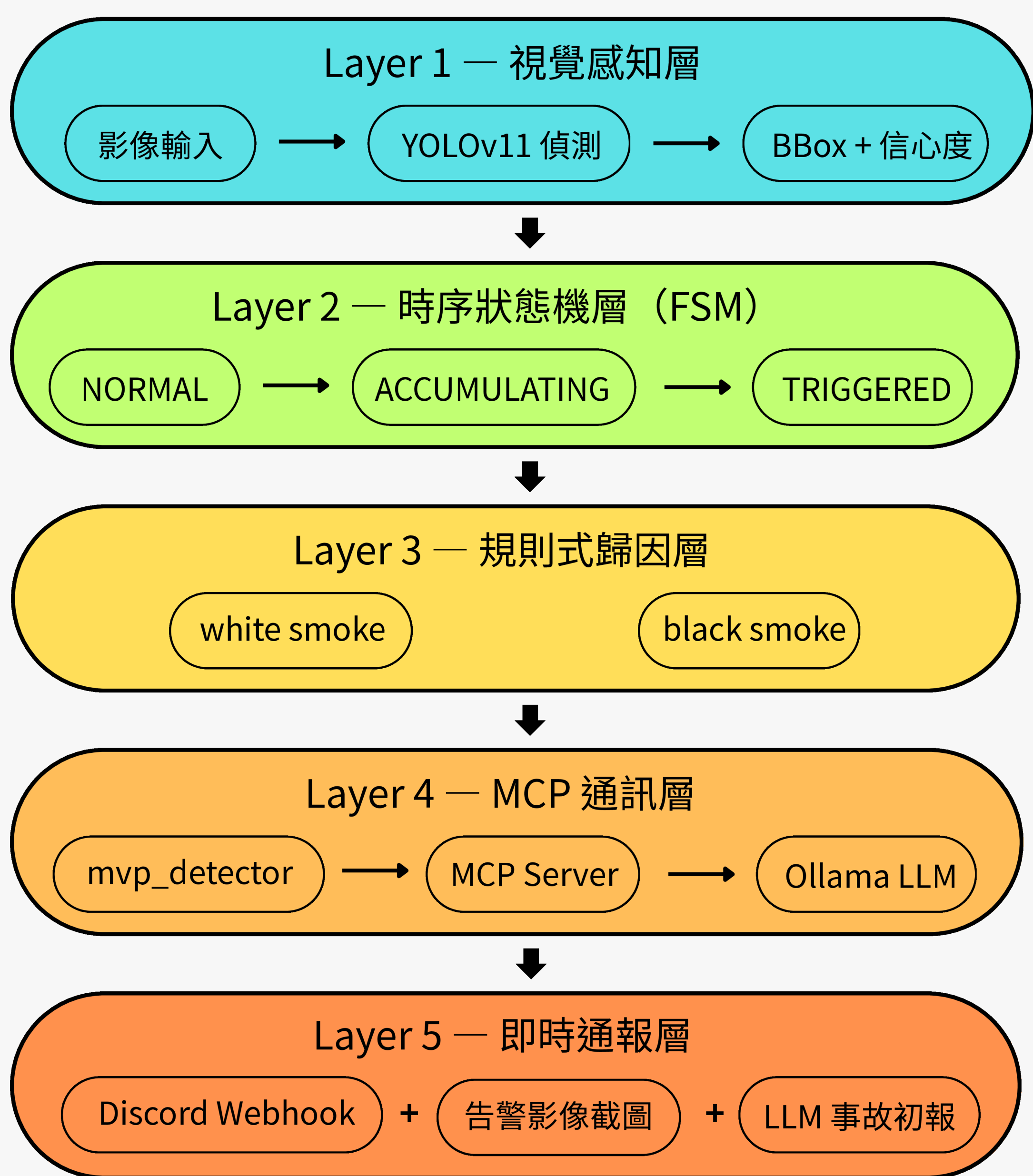
專題組員：溫品皓

指導教授：陳響亮 教授

一、研究動機與目的

- 動機：石化園區廢氣與煙霧排放嚴重威脅環境與居民健康，對企業來說異常排煙亦是設備故障、製程失控的徵兆。現行監控高度依賴廠區攝影機影像配合人工盯哨，不僅耗費大量人力成本，且管理人員透過肉眼觀測螢幕缺乏客觀標準與事故歸因分析之能力。
- 目的：此本研究實作一套自動化、客觀判定之邊緣端智慧預警系統。透過訓練 YOLOv11 進行環境感知，結合時序狀態機建立定量統計機制以過濾偶發干擾，並導入 **Model Context Protocol (MCP)** 協定標準化對接本地大語言模型 (LLM) Agent，研發出節省監控人力、客觀主動預警與科學歸因之工業安全防護網。

二、系統架構圖

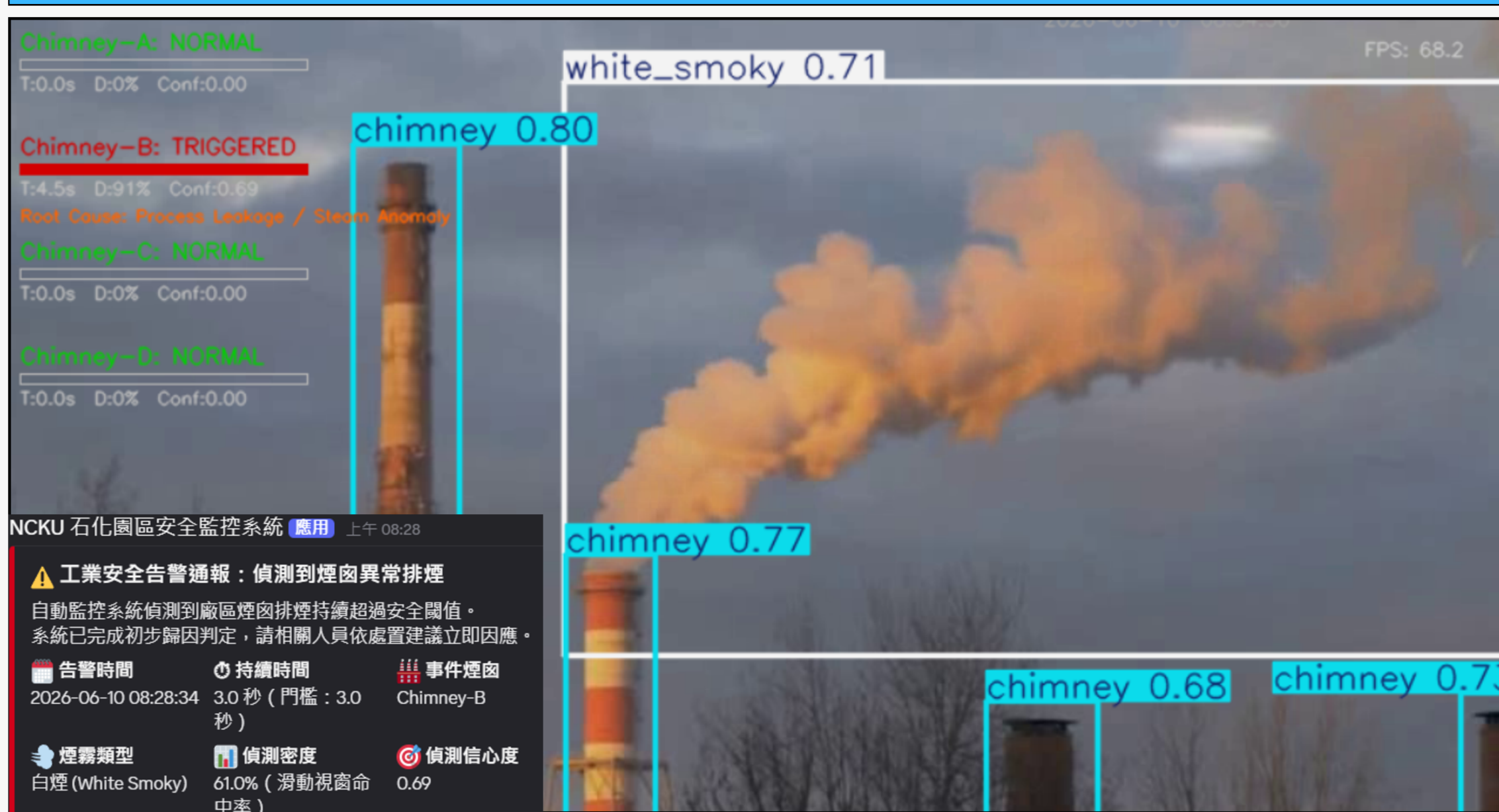


- 視覺感知層 (Perception Edge)：訓練 YOLOv11 模型對工業影片即時推論 (~70 FPS)，偵測 Chimney、White_smoky、Black_smoky 三類目標並輸出信心度。
- 時序狀態機層 (Temporal FSM)：每根煙囪配獨立 FSM，雙重門檻搭配 **Temporal Onset Priority** 防止煙霧飄移出錯。
- 規則式歸因層 (Rule-Based Attribution)：煙霧類型映射第一層工安指標，作為 MCP 深度歸因的先驗依據。
- MCP 通訊協定層 (MCP)：FastMCP 實作標準 MCP Server，get_latest_incident_log() 將 FSM 事件結構化為 JSON Context，降低 LLM KV-Cache 負擔並消除幻覺干擾。
- 即時通報層 (Alerting Application)：Ollama (Qwen2.5-7B) 作為 MCP Client 生成中文工安事故初報，Discord Webhook 非同步告警附帶現場截圖，60 秒冷卻防止連發。

三、實作技術與環境

- 開發環境：RTX 5060、Ollama、FastMCP、YOLOv11。
- 目標偵測：採用 Roboflow 公開資料集進行 YOLOv11 遷移學習，推論輸出 Bounding Box 座標、類別與信心度，作為下游狀態機的輸入訊號。
- 時序推論：滑動視窗 (Sliding Window) 密度估計搭配雙重動態門檻，有效過濾偶發誤報並鎖定事件源煙囪。
- LLM 整合：FSM 觸發時將事件欄位序列化為結構化 JSON，透過 stdio transport 傳遞給本地 Qwen2.5-7B-Instruct，生成格式固定的中文工安事故初報。
- 量化評估：設計 Ablation Study (N=30，隨機化執行順序，含熱身消除冷啟動偏差)，比較有無 MCP 結構化 Context 對 LLM 輸出品質的影響，指標涵蓋 Token 消耗量、幻覺率 (Hallucination Rate) 與格式一致性 (Output Format Compliance)。

四、成果展示



Ablation Study 實驗結果對比 (Structured vs Unstructured Context)			
模型：qwen2.5:7b-instruct N = 30 隨機化執行順序 temperature = 0			
指標	Baseline (無 MCP)	Proposed (有 MCP)	優化幅度
TTFT (首字延遲)	2.269 ± 0.032 s	2.267 ± 0.025 s	0.10%
總報告生成時間	8.85 ± 0.21 s	8.23 ± 0.05 s	+7.0%
Token 消耗量	412 ± 12 tokens	378 ± 7 tokens	+8.3%
推論速度	46.6 T/s	45.9 T/s	相當
幻覺率	0.2% ± 1.1%	0.0% ± 0.0%	完全消除
格式一致性	22.0% ± 11.0%	100.0% ± 0.0%	提升 4.5x

上圖：YOLOv11 偵測畫面，FPS 68.2。左下是 Discord Webhook 工安告警通報
上表：Ablation Study 量化實驗結果，有無 MCP 結構化 Context 對 LLM 輸出品質對比

五、結論與未來展望

- 結論：本研究整合 YOLOv11、時序 FSM 與 MCP 協定，實現石化園區煙囪異常排煙即時偵測與自動歸因，系統穩定運行於 ~70 FPS。規則式歸因提供第一層事故依據，並透過 MCP 將結構化 Context 傳遞至本地 LLM 生成事故初報，實現視覺感知到**事故歸因**的端到端自動化。Ablation Study 驗證 MCP 注入使 **LLM 幻覺率歸零、格式一致性提升 4.5 倍**。證明結構化資訊傳遞對邊緣端 LLM 可靠性具決定性影響。
- 未來展望：語義評估升級，引入 BERTScore 取代關鍵字匹配，強化幻覺率量測的嚴謹性。

Demo 影片：

