

# 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**

專題成員：溫品皓  
指導教授：陳響亮 教授



# 一、專題背景與動機

## 想解決什麼問題？

石化園區異常排煙→環境危害+設備故障早期徵兆

現行做法：人工盯盤攝影機，缺乏客觀標準與歸因能力

本研究目標：自動化、客觀判定、即時歸因的邊緣端智慧預警系統

## 為什麼這個主題值得研究或開發？

### 1.從「傳統盯盤」到「客觀主動預警」

徹底解決人眼長時間看監控畫面所造成的疲勞漏判，用演算法建立全天候不間斷的**定量統計標準**。

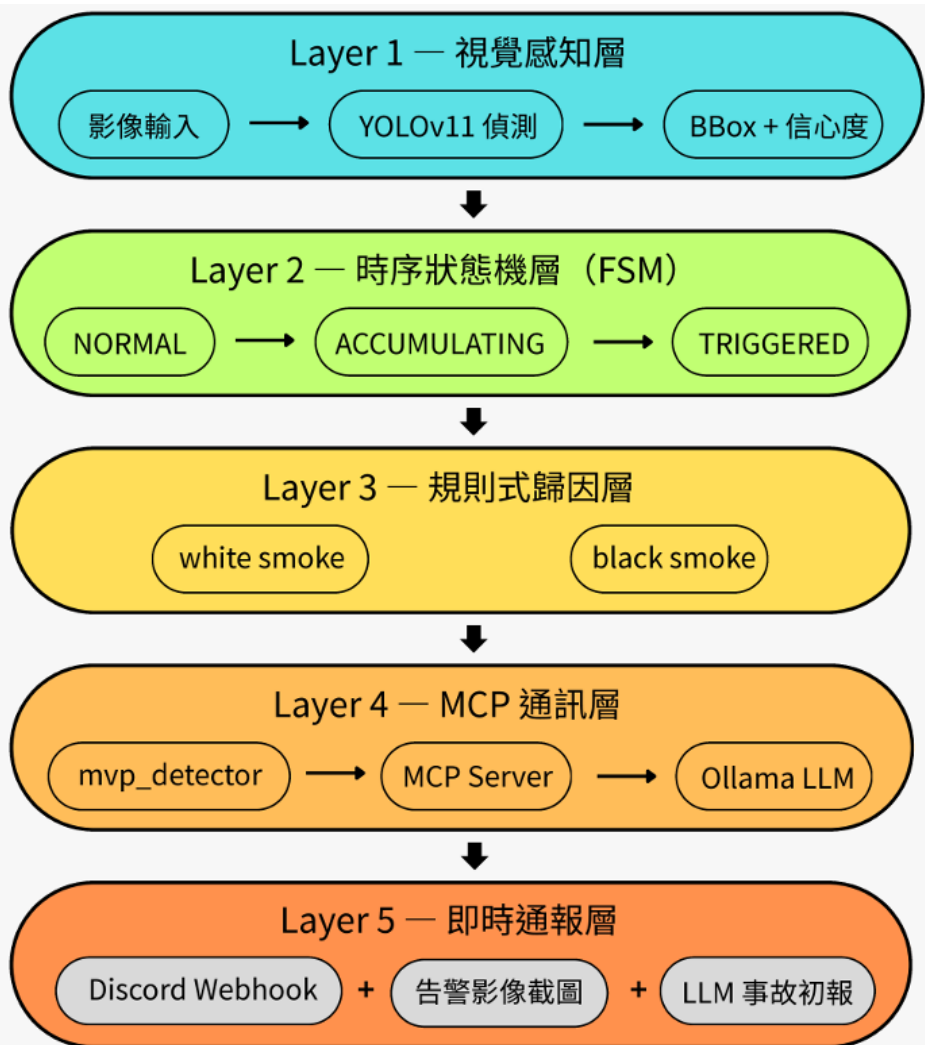
### 2.從「單幀影像感知」到「時序歸因」

突破傳統影像辨識只能看靜態畫面畫框的限制，透過**時序狀態機**紀錄污染軌跡

### 3.從「雲端隱私風險」到「零資安邊緣端落地」

導入 **MCP** 標準協定，在工廠邊緣端跑通本地大模型 Agent，消除 AI 的工安幻覺。

## 二、系統架構



**1.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。

**2.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。

**3.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。

**4.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。

**5.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、技術特色與創新

## 主要功能與研究方法

工業煙囪異常排煙即時偵測，觸發自動事故歸因與通報 設計 Ablation

Study (N=30) 量化驗證 MCP 結構化 Context 對 LLM 輸出品質的影響

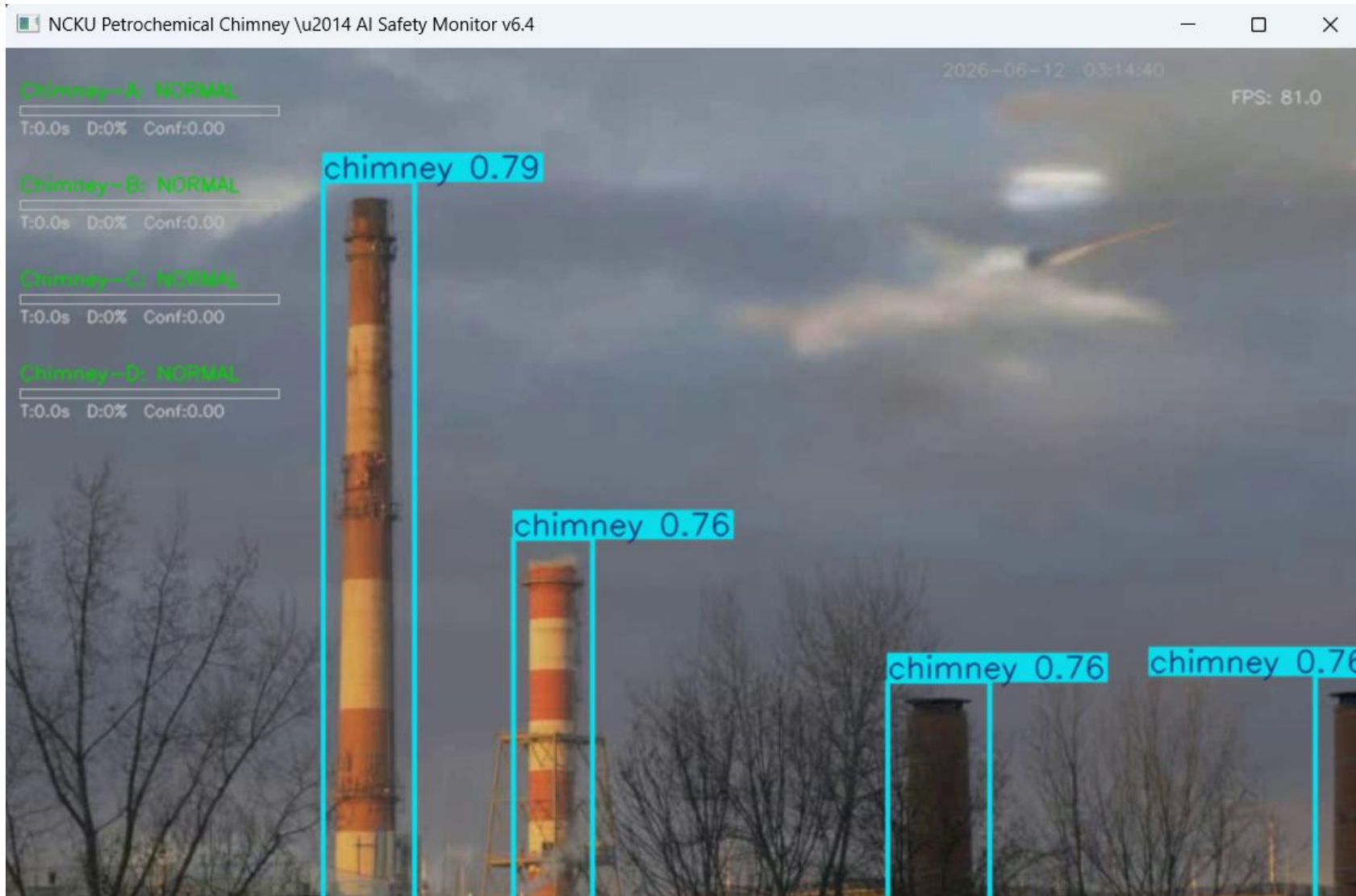
## 核心技術與工具

YOLOv11 (Ultralytics) + Roboflow 公開資料集遷移學習 有限狀態機 (FSM) + 滑動視窗密度估計 + Temporal Onset Priority FastMCP、Ollama (Qwen2.5-7B-Instruct)、Discord Webhook

## 創新之處

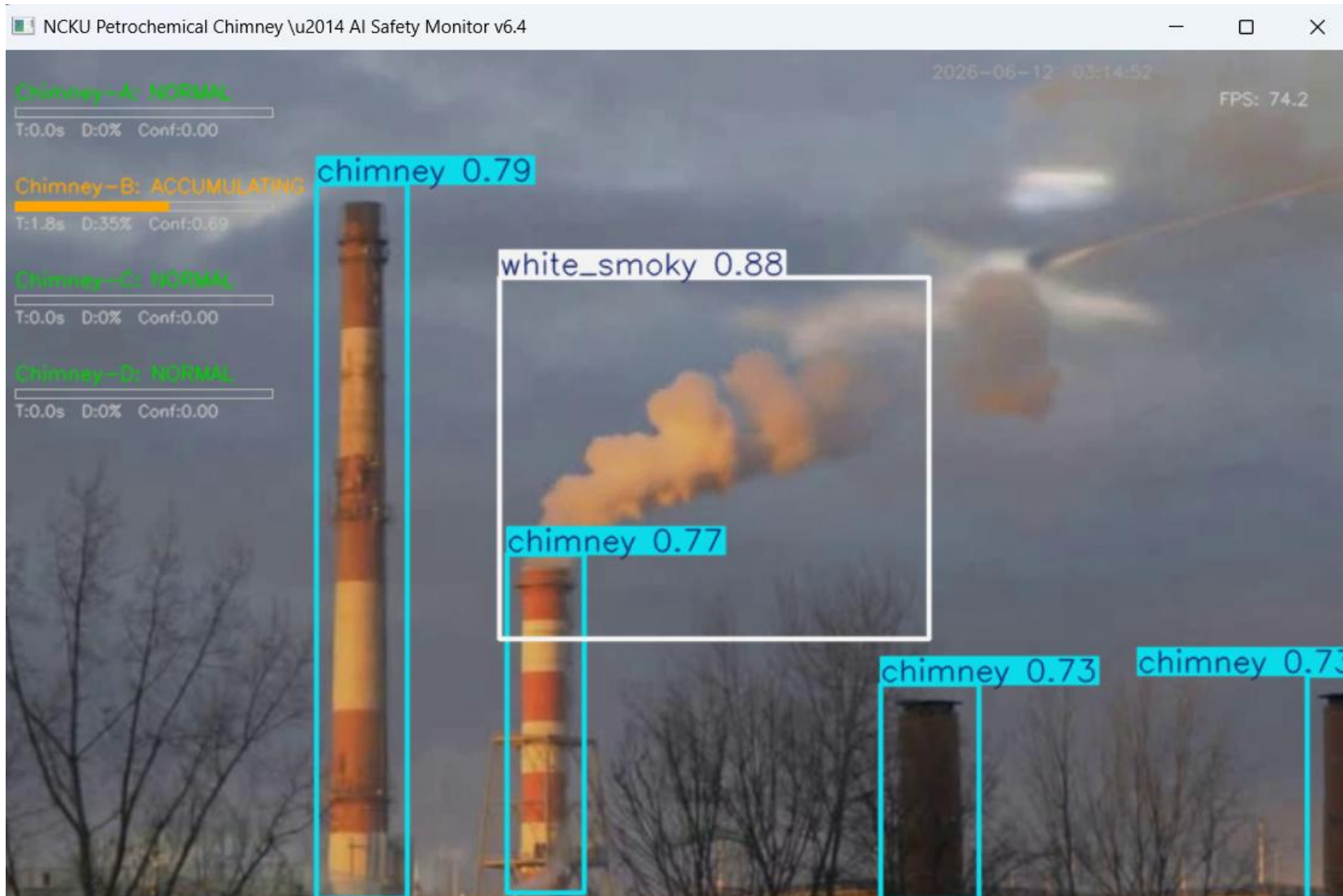
首次將 Model Context Protocol (MCP) 引入工業安全監控場景 以結構化 JSON Context 取代非結構化 Prompt，使 LLM 幻覺率歸零、格式一致性提升 4.5 倍 邊緣端本地 LLM 推論，無需雲端，符合工廠資安需求

# 四、系統實測成果



NOMAL 偵測畫面(無煙)

## 四、系統實測成果



Accumulating 偵測畫面(剛有煙)

## 四、系統實測成果



Triggered 偵測畫面(持續有煙)

# 四、系統實測成果

NCKU 石化園區安全監控系統 **應用** 上午 08:28

**⚠ 工業安全告警通報：偵測到煙囪異常排煙**  
自動監控系統偵測到廠區煙囪排煙持續超過安全閾值。  
系統已完成初步歸因判定，請相關人員依處置建議立即因應。

|                                      |                                     |                            |
|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| <b>📅 告警時間</b><br>2026-06-10 08:28:34 | <b>⌚ 持續時間</b><br>3.0 秒 ( 門檻：3.0 秒 ) | <b>🏭 事件煙囪</b><br>Chimney-B |
| <b>☁ 煙霧類型</b><br>白煙 (White Smoky)    | <b>📊 偵測密度</b><br>61.0% ( 滑動視窗命中率 )  | <b>🎯 偵測信心度</b><br>0.69     |

**🔍 歸因判定**  
製程洩漏或蒸氣溢散異常

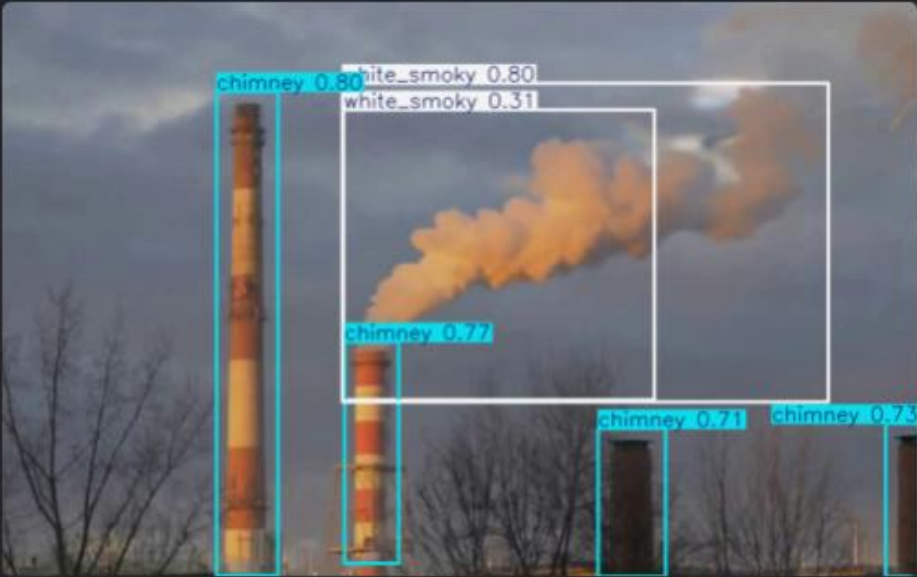
**🚦 風險等級**  
Level 2 — 中風險

**📋 建議處置**  
啟動洩漏排查程序，確認管線接頭與閥件密封狀態

**🖼 事件截圖**  
( 截圖已附於本則訊息下方 )

**⚙ 系統狀態**

STATUS : TRIGGERED  
SOURCE : YOLOv11 + Temporal FSM + Temporal Onset Priority



NCKU CSIE — AI Safety Monitor System v7 • 本通報由自動化系統產生，請人員現場複核後執行處置 • 今天 上午 02:04

上圖為Discord 告警截圖

# 四、系統實測成果

| 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 4.5× |
| 評分方式：語義同義詞群匹配 ( Semantic Section Coverage ) + 幻覺觸發詞偵測        |                    |                    |         |

左表為  
Ablation Study 數據

- Token 消耗降低 8.3%
- 幻覺率：0.2% → 0.0% ( 完全消除 )
- 格式一致性：22% → 100% ( 提升 4.5 倍 )

# 五、研究貢獻與未來展望

## 結論：

1. 實現視覺感知到事故歸因的端到端自動化防護鏈
2. MCP 結構化 Context 注入對邊緣端 LLM 可靠性具決定性影響
3. Ablation Study (N=30) 提供可重現的量化實驗依據

## 未來展望：

1. 引入 BERTScore 強化幻覺率量測嚴謹性
2. 擴展多攝影機、多廠區場景驗證泛化能力