

應用 **BERT** 模型於加密網路流量之行為特徵提取 與分類識別研究

基於 BERT 模型與輕量化時空 Adapter 架構研究

指導教授: 楊中平教授

專題成員: 李宗翰、簡翊恩

研究背景與動機

- ▶ 網路通訊協定已全面朝向**端對端加密 (E2E)** 發展以保護隱私。
- ▶ 傳統依賴連接埠或深度封包檢測 (DPI) 的辨識方法因無法解析內容已逐漸失效。
- ▶ 迫切需要能辨識「**應用行為**」而非單純依賴封包明文的深度學習模型。
- ▶ Transformer 具備強大特徵擷取能力，為加密流量分析帶來全新契機。



為何選擇 **BERT** 模型？



自注意力機制

BERT 具備強大的 Self-Attention 機制，有別於傳統 RNN/CNN，能更有效率地計算並分配特徵權重。



長距離依賴

能夠直接捕捉網路封包數據中的全域特徵與長距離依賴關係，不受限於局部時間窗。



序列上下文特徵

非常適合用於擷取網路封包的序列上下文，深入理解流量互動的隱含行為模式。

資料前處理創新技術

雙向標準化流合併

實作 Canonical Flow Keys，將網路通訊的正向與反向流量歸類為同一樣本。這能讓模型更全面地學習雙方對話的互動行為，而非單向特徵。

3D 特徵張量重塑

突破傳統 1D 序列限制，將五個以上連續封包組成 flow。資料轉換為 [封包數量 × 封包長度 × 隱藏維度] 例如 [N, 32, 128] 的固定規格 3D 張量，並以 Byte-to-ID 保留 Padding。

BERT-Flow 系統管線架構



第一階段：資料前處理端 (Preprocessing) 使用 Scapy 進行封包解析與過濾，執行雙向標準化流合併 (Canonical Flow)，最後進行張量重塑與 Token 化。

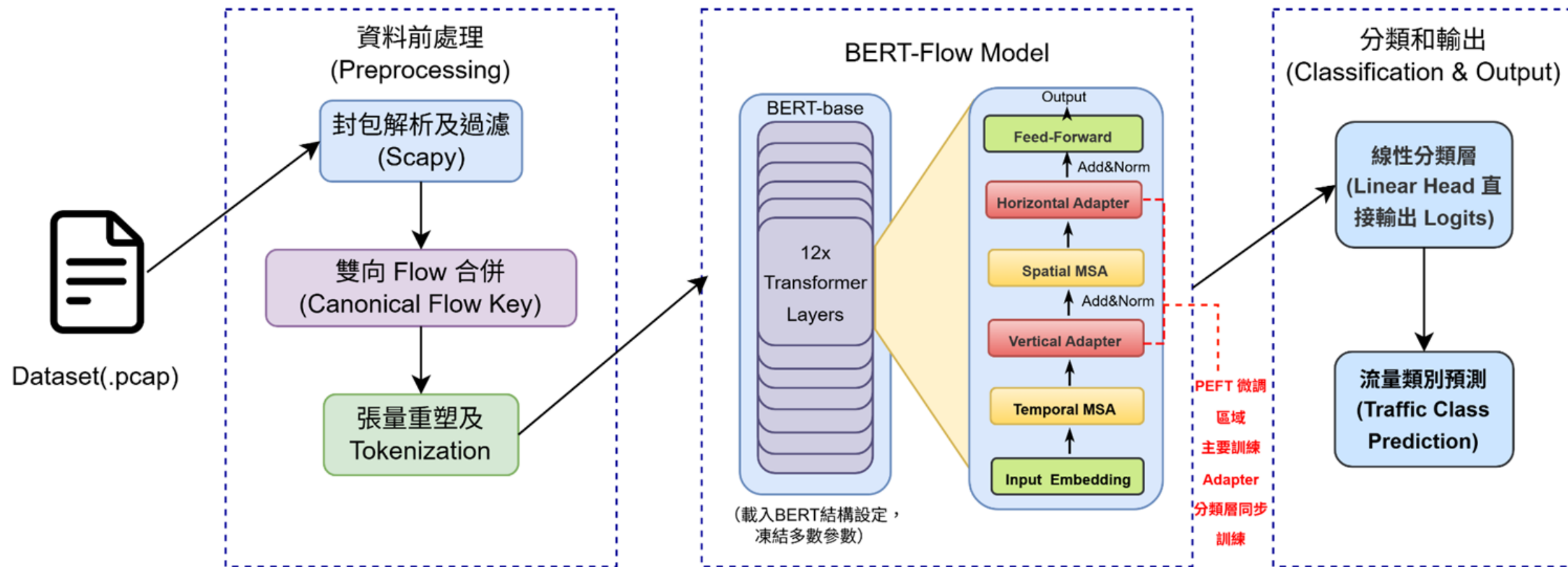


第二階段：BERT-Flow 核心模型端 單層 Transformer 結構，將注意力機制解耦為空間與時間，並嵌入針對性的 Horizontal 與 Vertical Adapter 進行特徵提取。



第三階段：分類輸出端 透過線性分類頭 (Linear Head 直接輸出 Logits) 處理提取出的特徵，最終輸出良性/惡意或特定應用程式的分類結果。

系統架構圖



輕量化時空 Adapter 設計

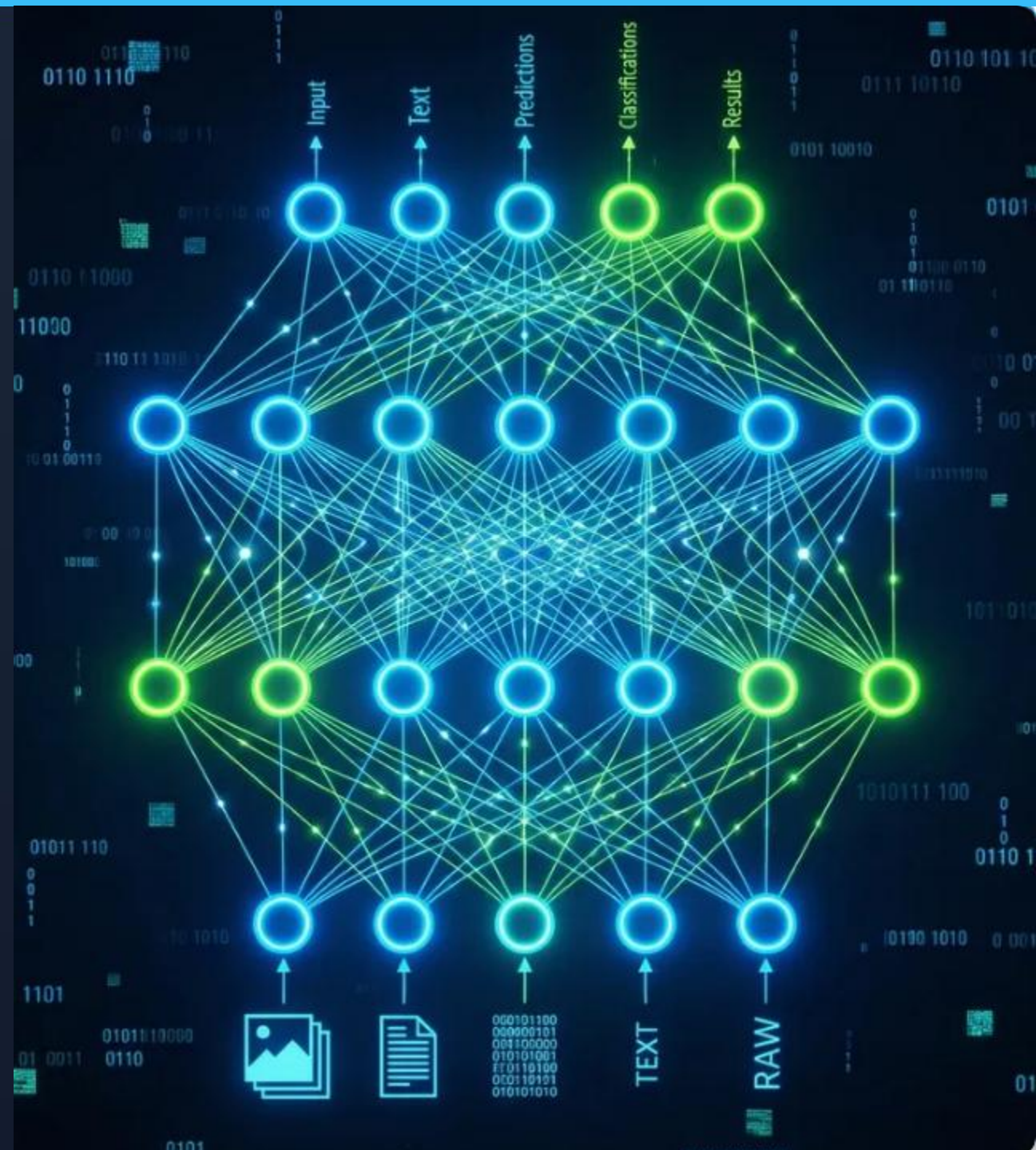
本專題採用參數高效微調 (PEFT) 策略，凍結原始 BERT 的大部分參數，大幅降低運算成本，並在 Transformer Layer 中嵌入兩個輕量化模組：

Horizontal Adapter (空間特徵)

放置於空間自注意力 (Spatial MSA) 之後，專注於理解「單個封包」內部的 Header 與 Payload 詳細內容特徵。

Vertical Adapter (時間特徵)

放置於時間自注意力 (Temporal MSA) 之後，專注於學習「封包之間」的時序關係，如流量到達間隔時間等動態行為。



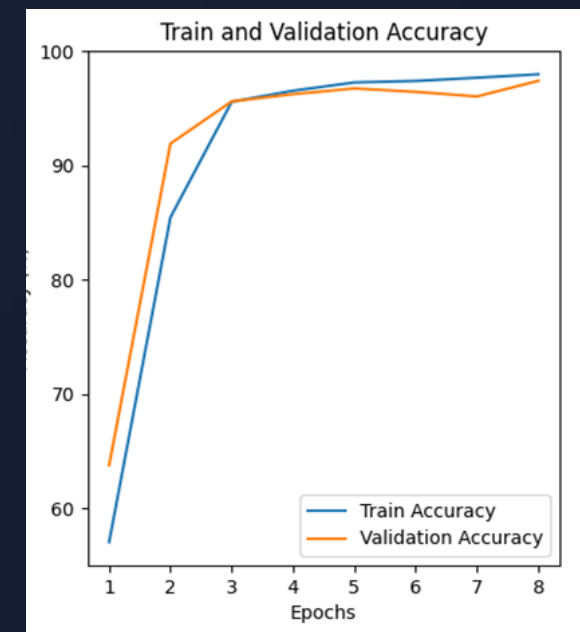
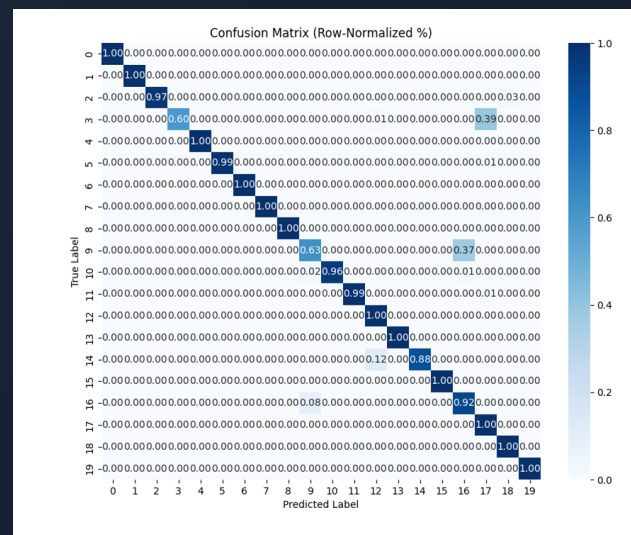
開發與測試環境配置

項目 (Category)	詳細規格 (Specification)
作業系統 (OS)	Ubuntu 24.04.4 LTS
程式語言 (Language)	Python
深度學習框架 (Framework)	PyTorch
網路封包處理工具 (Tool)	Scapy
預訓練基礎模型 (Base Model)	BERT-Base-Uncased

實驗結果：USTC-TFC2016

95.52%

整體測試準確率



惡意與正常流量分類

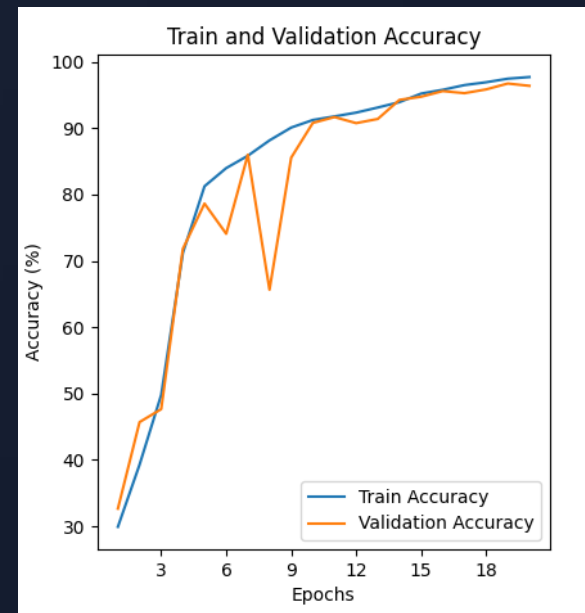
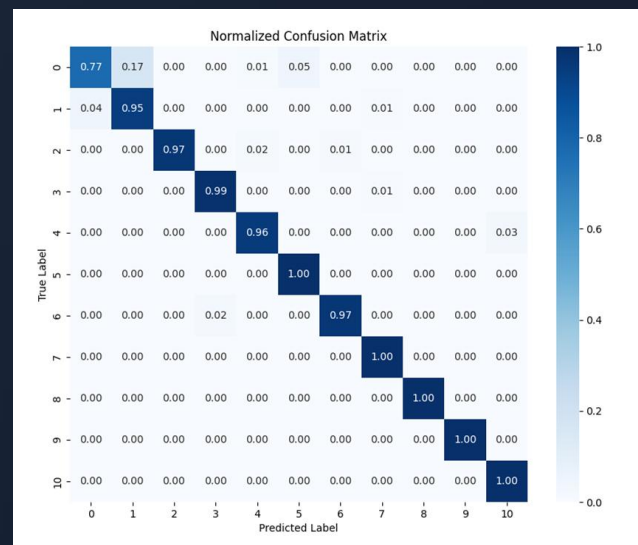
在 USTC-TFC2016 基準資料集上進行廣泛測試，模型有效區分惡意軟體流量與良性背景流量。

實驗結果證實，透過 3D 張量與時空特徵解耦，模型能以極高的精準度捕捉惡意網路行為的細微差異。

實驗結果：ISCX-VPN-Service

96.44%

應用服務分類準確率



11 類加密服務流量識別

在面對高度加密且行為複雜的 VPN 服務資料集時，模型展現出極佳的收斂速度與卓越的準確率。

這證明了輕量化 Adapter 不僅計算開銷低，更能有效挖掘 VPN 加密封包在空間與時間維度上的關鍵動態特徵。

專題結論與貢獻



優化後的 BERT-Flow 架構透過輕量化時空 Adapter 模組，成功在保留預訓練知識並顯著降低計算開銷的同時，於多個資料集上達成高準確率的加密流量分類。



— 專題研究總結

Q & A

感謝各位委員與聽眾的聆聽，歡迎提問與指教。

專題成員：李宗翰、簡翊恩 | 指導教授：楊中平教授

Image Sources



https://elements-resized.envatousercontent.com/elements-video-cover-images/446647f9-e741-485e-8e83-bebc5c54a9ae/video_preview/video_preview_0000.jpg?w=500&cf_fit=cover&q=85&format=auto&s=a54e8ab3ce74d8bae67ebd7f5bfbc62f497f327dbf3d3f1f5640b6be978e544
Source: elements.envato.com



https://media.easy-peasy.ai/766d00a0-4ce3-4b53-803e-5d357ab72326/f5636542-52e0-46b8-bb4e-a0aa73a84a7a_medium.webp
Source: easy-peasy.ai