

Final Project Report

主題：未來全自動城市治理系統（AI Governance Simulator） 之機器學習基礎與第一步模型化

1. AI 的未來能力：全自動城市治理系統

在未來二十年，我認為 AI 有可能達成一項目前仍無法實現、但對社會具有重大意義的能力：**全自動城市治理系統（AI Governance Simulator）**。

此系統能整合城市中的交通流量、能源需求、公共衛生、經濟活動與環境監測等多來源資料，建立高維度的因果模型，並在虛擬環境中模擬不同政策方案的長期影響。其核心目標是提出兼顧效率、公平與永續的政策建議。

具體應用情境包括：

- **交通政策模擬**：例如調整路權、改善公共運輸路線、調整停車費率，並預測其對通勤時間、污染與能源消耗的影響。
- **能源與永續管理**：在極端氣候情境下預測能源負載，協助城市在多目標下做出合理決策。
- **公共危機回應**：模擬傳染病政策、資源調度，以及政策對醫療負載與經濟活動的長期影響。

此能力的重要性在於：人類目前難以在高維且相互依存的社會系統中推估長期後果，而 AI 若能提供科學、可重現的治理建議，將有助於提升政策透明度與降低誤判，並協助城市朝向更永續的發展。

2. 所需成分與資源（Ingredients）

要實現上述願景，需要多層次且互相依存的成分：

(a) 資料

城市治理需要多模態資料：交通感測器、衛星影像、人口與經濟統計、氣候數據、社群互動訊號等。這些資料必須具有時間性（temporal）與空間性

(spatial) 結構，使模型能捕捉長期依賴與因果關係。

(b) 工具

- 時空模型 (**spatio-temporal models**)：如 GNN、transformer-based forecasting 模型，用於捕捉城市網路結構。
- 強化學習與多目標優化：用於政策試驗與 reward 設計。
- 生成模型 (**generative models**)：在資料不足的情況下補齊模擬環境。
- 因果推論工具：避免政策優化落入僅擬合相關性而非因果性的陷阱。

(c) 硬體與環境

需要大型模擬環境（類似城市版 OpenAI Gym 或 CityLearn）、雲端計算與即時資料串流架構。若要與真實城市互動，還需 IoT 感測設備與安全的決策部署介面。

(d) 學習架構

需整合 self-supervised（用於表徵學習）、RL（用於決策）與 meta-learning（用於快速適應新城市）。這些架構共同支持 AI 在複雜環境中學習有效策略。

3. 涉及的機器學習類型

此能力主要依賴 非監督式學習（理解資料結構）+ 強化學習（學策略）的組合。

- **非監督式學習**：用於找出隱含因素（如交通瓶頸、污染熱點）、壓縮高維資料並構建城市模型。
 - 資料來源：城市感測器、地圖網路、歷史資料
 - 目標訊號：資料本身的結構（例如 reconstruction loss、對比式學習目標）
- **強化學習**：用於探索各種政策並評估其長期獎勵。
 - 資料來源：模擬環境
 - 目標訊號：政策效果（交通效率、能源使用、排放、社會福祉）

- 學習需要與動態環境互動，因此 RL 是不可或缺的。
-

4. 第一個可實作的模型問題（**Solvable Model Problem**）

(a) 問題設計

為了建立最終系統的雛形，我將問題簡化為：

在一個簡化城市中，同時控制「交通流量」與「能源消耗」，使通勤時間與能源使用達到平衡。

此問題保留了多目標策略、環境動態與政策影響等核心概念。

輸入：狀態向量（交通擁塞程度、能源需求）

輸出：離散政策（調整交通偏置、能源稅率...）

目標：最小化 $\alpha * \text{travel_time} + \beta * \text{energy_cost}$

資料形式：由自建的 Python 模擬器生成的序列資料。

(b) 模型與方法

我選擇使用 **簡單的啟發式 RL 代理（FallbackModel）** 來取代沒安裝 RL library 情況下的 PPO。

理由：

- 可完全自行實作，不需額外套件
- 能清楚測試 reward 設計與環境反饋
- 能重現“學習策略”的行為雛形

(c) 實作與結果

已於 GitHub repo 中提供完整 Python 程式，其中包含：

- TrafficEnergyEnv 模擬環境
- FallbackModel 策略
- 多組測試（步進測試、基準測試、訓練測試）

結果顯示模型可在不同情境下穩定降低能源-交通損失，並可作為 RL 訓練的起點。

(d) 討論

透過此模型問題，我學到：

- reward 設計是治理類問題的核心，會極大影響行為
- 模型必須容納多變數間的 trade-off
- 簡化環境更能揭示完整系統的難點，例如：因果推論困難、多目標衝突與資料不足

此簡化問題讓我了解未來在真實城市治理系統中，最困難的不是模型規模，而是如何建構可信的模擬環境與正確的目標訊號。