

亞太資通訊科技聯盟大賽

2024 APICTA Awards 臺灣代表隊選拔 提案方向

大型語言模型在商場節能決策中的應用

主辦單位：數位發展部

執行單位：台北市電腦商業同業公會

提案單位：國立成功大學工程科學系

中華民國 一百一十四 年 三 月 七 日

簡介

商場等大型建築在能源管理上面臨巨大的挑戰。例如，空調、照明和電梯設備全天運行，如何兼顧顧客舒適與節能是一大難題。全球而言，建築部門（包含住宅與商業建築）消耗了三分之一以上的能源並產生約三分之一的碳排放。因此，提高商場能源效率對減碳具有重要意義。近年來，人工智慧（AI）、**數位孿生**（Digital Twin）以及**邊緣運算**等技術的進步，為解決這些挑戰帶來新的契機。透過即時數據分析與虛擬模擬，這些技術可望提供更智慧的節能決策，降低能源浪費。同時，大型語言模型（LLM）等生成式 AI 可以結合專業知識與即時資訊，協助管理者以自然語言取得建議，讓能源管理更直觀高效。本文將探討上述技術在商場節能決策中的應用架構與案例，說明其潛在價值與預期效益。

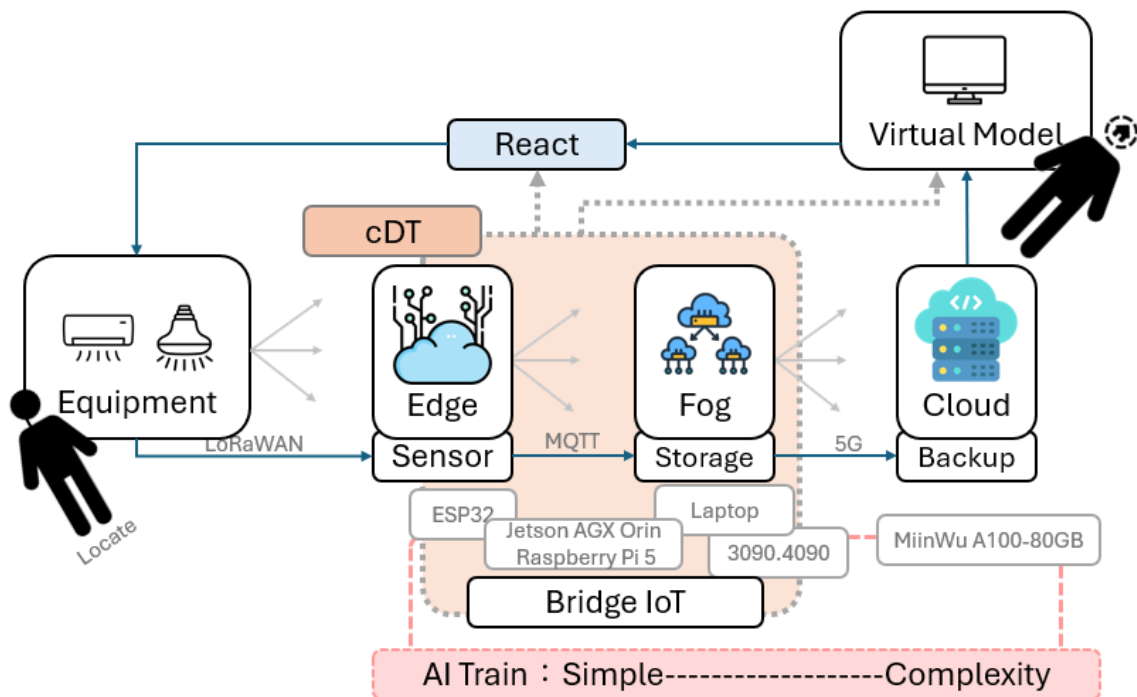


圖 1.1 數位雙生於邊緣、雲、霧端的架構圖

技術架構概述

現代商場的智慧能源管理架構可分為感測層、模擬決策層，以及應用層三部分。感

測層包括遍佈商場的物聯網感測器與裝置，例如溫度、濕度、二氧化碳濃度感測器，智慧電表，以及空調和照明的控制器等。這些裝置在**邊緣運算**設備（如現場閘道器或伺服器）的協助下，即時收集並初步處理數據。邊緣運算能在設備現場快速篩選和分析資料，減少雲端傳輸量並降低延遲，同時增進資料隱私與安全。例如，邊緣端可以根據感測數據執行簡單的控制（如依據溫度自動調整局部空調），而大量歷史數據和複雜分析則上傳至雲端。

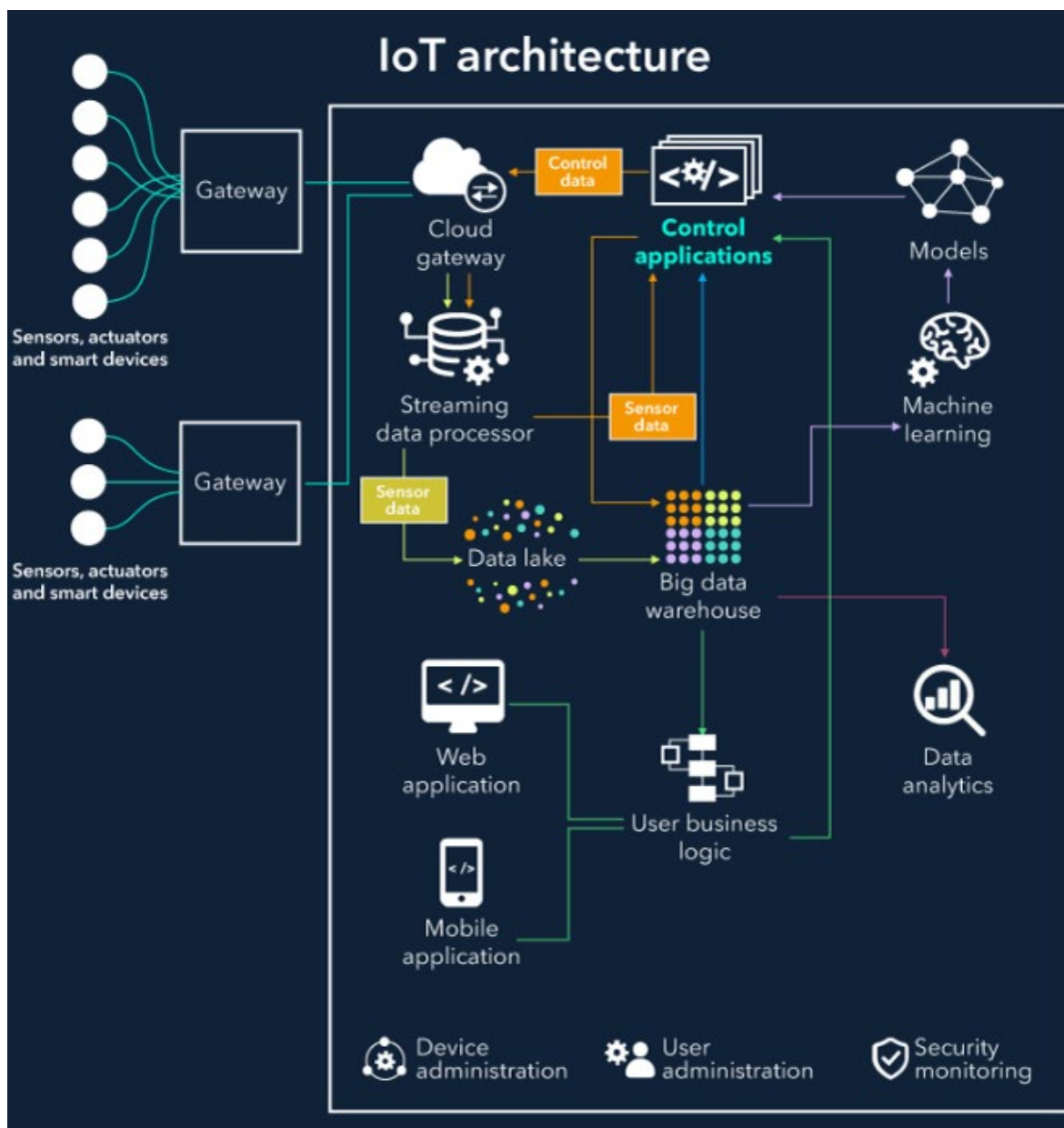


圖 2.1 商場能源管理的技術架構示意圖：感測器與設備經由閘道器（邊緣運算）將數據傳送到雲端

平台，在那裡透過資料湖、資料倉庫進行儲存和分析，並利用數位孿生模型與機器學習產生節能決策。

在模擬決策層，核心是商場的**數位孿生**模型和 AI 分析引擎。數位孿生是商場的虛擬複本，它利用感測器即時資料不斷校準，模擬商場內部環境的變化。透過數位孿生，可以進行各種情境模擬，例如在人潮變化或氣候條件改變時，空調與照明的最佳調控策略。機器學習模型則可在資料平台上進行能耗預測、異常偵測和設備故障預警。例如，一套 AI 模型可以分析歷史能源使用模式並預測未來幾小時的用電需求，提前調整冷氣機組以避免尖峰耗能。此外，透過強化學習等技術，系統能逐步學習在不同情境下的最佳節能控制策略。

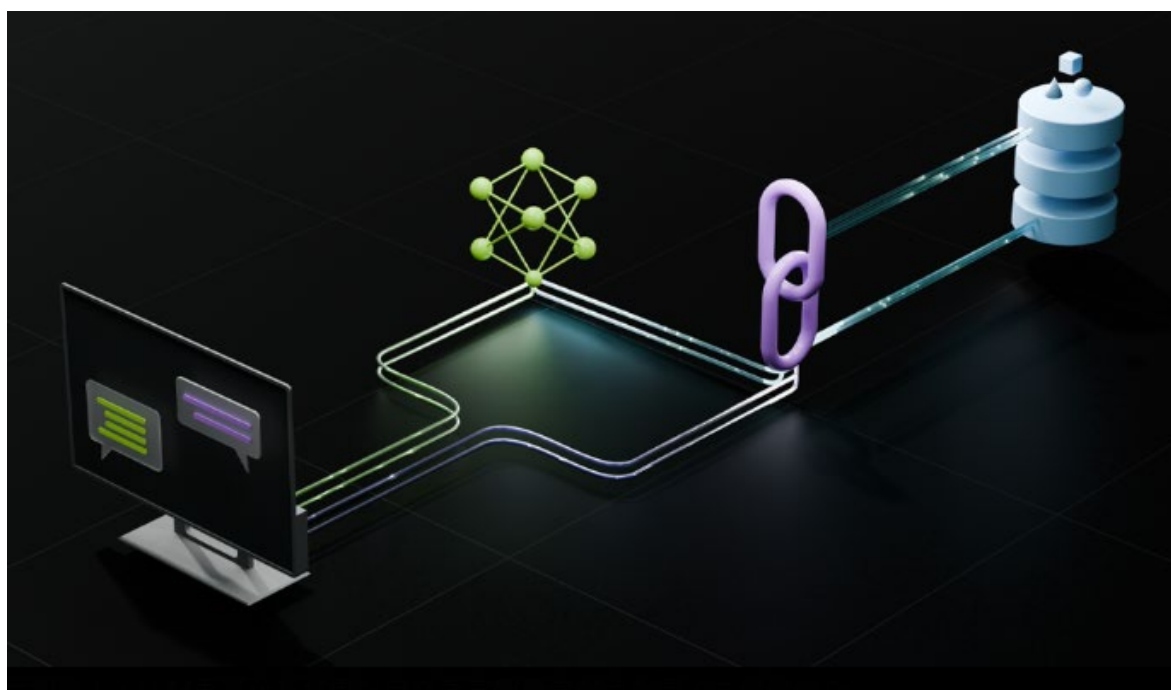


圖 2.2 決策流程圖：結合 LLM 與 RAG 的節能建議流程。從感測器收集的即時**數據**（右側資料庫）經由檢索鏈接（紫色鏈條）供給 LLM（綠色神經網絡），LLM 再將分析結果以自然語言**回覆**管理者詢問（左側終端介面）。透過即時數據檢索，LLM 的建議更具時效性與可靠依據。

值得一提的是，引入**大型語言模型 (LLM)** 及**檢索增強生成 (RAG)** 技術，可大幅提升決策層的智能化與人機互動效益。LLM 能夠理解人類語言並生成類似人類專家的建議，但傳統上易受訓練資料限制。結合 RAG 後，LLM 可即時檢索商場能源管理

相關的知識庫或法規文件，將**最新的感測資料**與**既有專業知識**融合進建議中。具體而言，當管理人員詢問「本商場今日有哪些節能措施可採取？」時，LLM 會從數位孿生得到即時能耗和環境數據，並從知識庫中檢索相關節能策略或過往類似情境的記錄，最後生成有根有據的建議供決策者參考。這種做法確保了生成內容的可靠性，同時讓複雜的數據分析結果以自然語言呈現。例如，有研究利用多個 LLM 代理模擬商場中不同族群顧客的體感偏好，實時調整空調設定，以平衡舒適度與能耗。結果顯示，LLM 驅動的數位孿生可模擬複雜人群流動，透過自適應控制策略將能源節省與顧客舒適兼顧得更好。這展示了結合先進語言模型與數位孿生來優化能源管理的巨大潛力。

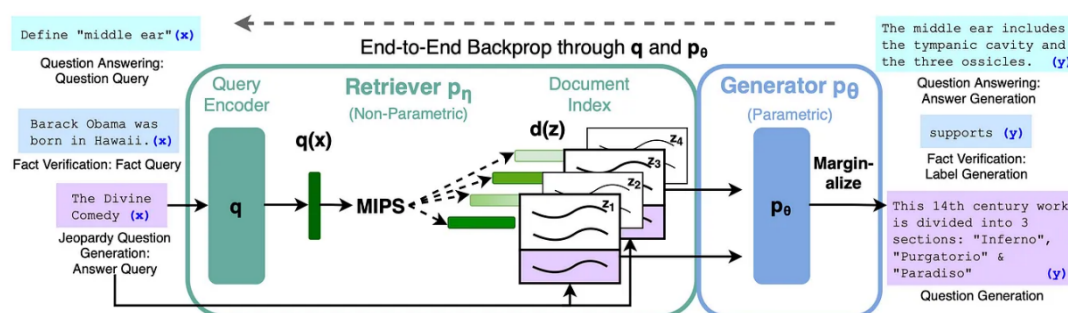


圖 2.3 Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks

在應用層，能源管理人員和自動控制系統接收來自決策層的建議與指令。例如，系統可能建議「下午陽光充足，建議調低中庭照明強度 20%」或「目前二樓人流稀少，可暫時提高該區域空調溫度設定 1°C」。這些建議可由管理人員審核後執行，或者在預先設定的規則下自動套用。一旦措施實施，感測器會持續監測效果，新的數據反饋再進入下一輪的數位孿生模擬與 LLM 分析，形成閉環的優化流程。如此一來，商場能源管理從資料收集、模擬決策到行動執行，建立起一個自我學習與不斷優化的智慧系統。

2.1 獨特性

2.1.1 跨領域整合

- 結合 AI（大型語言模型）、數位孿生（Digital Twin）與物聯網（IoT）感測技術，從建築能耗優化、顧客行為預測到即時決策執行，形成跨

領域協同的完整生態系。

2.1.2 智慧決策自動化

- LLM 能將複雜的數據模型與多元資訊（如歷史用電、天氣、客流量等）轉化為自然語言建議，管理者不必懂得所有技術細節即可做出精準的決策。
- 結合檢索增強生成（RAG）後，能透過檢索外部知識庫（法規、最佳實務）及時補足最新資訊，使決策更具時效性與權威性。

2.1.3 行為經濟學誘因設計

- 數位孿生平台能不只測試節能策略對建築物的影響，也能模擬人群行為改變（如移動路線、商店停留時間），同時利用 LLM 生成「誘因式」機制（如折扣券、積分獎勵）以鼓勵參與節能。

2.1.4 即時回饋與高度客製化

- 邊緣運算確保了高頻感測資料能被即時處理，讓系統在數秒內就可偵測異常能耗或人流變化並做出動態回應。
- LLM 可根據不同場域特色與需求，提出高度客製化的策略建議（例如餐飲區 vs. 服飾零售區的照明與冷氣策略可能截然不同）。

2.2 市場潛力

2.2.1 全球智慧建築需求持續攀升

- 根據國際能源署（IEA）及聯合國統計，建築能耗與碳排放佔全球約三分之一，節能減碳是未來 20 年內的重大的國際趨勢。商場、零售中心作為高能耗、高人流領域，更需要智慧化管理系統。

2.2.2 政策與法規推動

- 各國政府陸續出台綠色建築、能源效率相關法規（如歐盟 EPBD、英國 MEES 等），強調大型公共建築與商業設施的節能規範。智慧節能解決方案因應此需求而興起，帶動市場需求。

2.2.3 數位孿生與 AI 產業方興未艾

- 國際市場研究指出，數位孿生技術在 2020 年代呈指數級增長；同時生成式 AI、LLM 等技術正快速滲透各行各業。將兩者結合應用於能源管理，是一條仍具巨大潛力的新藍海。

2.2.4 投資回報與財務效益

- 實際案例顯示，智慧節能系統可為大型商場帶來 10-30% 不等的能耗削減，並顯著降低營運成本。投資回收期（ROI）通常可縮短至 2-3 年內，對企業與投資者來說具明顯吸引力。

2.3 功能特色

2.3.1 多模態數據融合

- 系統整合溫/溼度、二氧化碳、人流統計、能耗計量等多種感測器；並透過邊緣運算與雲端平台協同運作，形成即時且完整的資料視圖。

2.3.2 LLM 智慧分析與建議

- LLM 分析歷史趨勢並預測未來負載，提供「最佳調整建議」：如空調溫度、照明強度、電梯運行排程等。
- 結合 RAG（檢索增強生成）後，系統能檢索並引用最新法規或示範案

例，讓節能策略既符合實際需求又符合法規。

2.3.3 數位孿生動態模擬

- 以 BIM/3D 模型為基礎，模擬在不同情境下（尖峰人流、高溫日、節慶活動）的能源使用狀況，及早預測潛在負載高峰並進行應對。
- UI 介面可視化呈現能耗熱圖、人流動線、設備狀態等，便於管理者遠端監控。

2.3.4 自動化或半自動化控制

- 邊緣裝置可直接調度空調機組、照明系統，或執行預先定義的策略。若需人員確認，也能將建議透過 APP/WEB 介面呈現，由管理者一鍵核准。

2.3.5 誘因式獎勵與行為經濟學應用

- LLM 可生成並調整客戶誘因機制，將節能成效與顧客行為相結合。例如：在用電量舒適範圍內，鼓勵顧客於離峰時段到訪或積極使用綠色消費管道，提升商場整體能效。

全球應用案例

目前全球已有多項成功案例證實上述技術架構的可行性，顯示其在商場及大型建築節能方面的巨大潛力。以下舉幾個代表性案例：

- **某國際不動產公司的智慧樓宇計畫：**一家商業地產公司將 AI 驅動的數位孿生技術應用於其建築能源管理，目標是降低能源消耗、營運成本並減少碳排放。導入後，該數位孿生平台可**連續監測**建築的能源使用、空調效能和佔用狀態，並透過機器學習分析歷史數據來**預測**未來能源需求。例如，系統能提早預測尖峰用電時段並執行負載管理策略，有效避開高耗能時段。同時，數位孿生還根據即時人流與溫度調整空調，以保障舒適的同時減少不必要的浪

費。經過一段時間運行，該公司成功將建築能耗明顯下降，營運成本隨之降低，碳排放量也減少，彰顯了智慧化能源管理對永續經營的助益。這案例顯示，即使在多棟建築組成的商業不動產投資組合中，AI+數位孿生方案也能帶來可觀的節能成效。

- **香港太古廣場寫字樓：**在香港，一座名為「太古廣場六座」的高級商用大樓採用了智慧建築平台，結合 BIM（建築資訊模型）、IoT 感測與 AI 演算法來實現節能和預測性維護。該大樓建立了完整的 3D 數位孿生，匯集冷氣機組、照明等各子系統的資料至單一平台，供設施管理人員監控。透過 AI 模型進行冷水機組優化和能源管理，該建築實現了顯著的節能效果和更主動的維護策略。據報導，引入此平台後，大樓的空調系統效率提升，年間能源消耗下降，同時因設備故障能及早被偵測和處理，維護成本也隨之降低。此案例證明在現有商辦建築中，整合數位孿生與 AI 有助於提供**數據驅動的洞察**，讓管理者及時調整策略，提升整體能源績效。
- **城市級能源監管：**不僅是單一建築，政府部門也開始大規模應用這些技術實現城市級別的能源監管。例如香港機電工程署（EMSD）建立了**區域數位化監控中心**，利用地理資訊系統（GIS）將全港超過 400 棟政府建築納入監測。透過 Neuron 智慧平台的部署，該中心可實時查看各建築的能源使用、設備狀態，並進行效能基準比較。這種宏觀監控結合數位孿生技術，讓管理者能快速識別高耗能異常情況，並調度 AI 算法提供優化建議。例如，當某棟文化中心的能源密集度高於類似建築平均水準時，系統會發出提示，建議檢查空調運行或照明控制是否異常。EMSD 表示這套系統有效提升了公共建築的能源效率與管理水準，同時為政策制定者提供了寶貴的數據依據，來制定更嚴謹的節能政策措施。
- **數位孿生在商場的創新實驗：**研究領域也出現了將 LLM 與數位孿生結合於商場能源管理的創新案例。如前述，有學者以虛擬代理的方式讓大型語言模型代表不同族群顧客，模擬其在商場中的活動路徑和對環境舒適度的需求。然後，透過強化學習算法即時調節空調設定，以在滿足大多數人舒適的前提下最大化節能。實驗結果顯示，與傳統固定空調設定方式相比，此 **LLM 代理+數位孿生** 的方法達成了更高的能源效率，同時顧客滿意度維持良好。這類全球創新案例為商場能源管理描繪了未來圖景——或許在不久的將來，商場經理可以直接問一個 AI：「今天如何最佳化本商場的能源使用？」而 AI 將綜合數位孿生模擬結果與過往知識據實作答。



圖 3.1 某智慧建築平台的 3D 數位孿生介面示意圖。圖中顯示了虛擬城市環境與目標建築（中央高樓）的數位模型，左側面板提供建築各項即時參數（樓層狀態、能源與環境指標、設備性能等）供管理者監控。這種可視化的數位孿生介面有助於直觀呈現能耗狀況，並支援跨國團隊遠端協作管理。

上述案例遍布亞洲、歐洲等地，涵蓋私人企業與政府單位，證明了數位孿生結合 AI 技術的實用性。不論是在新建的**智慧商場**，還是現有建築的**智慧化升級**，這些技術都展現出降低能耗和提升管理效率的可觀成果。對於政府部門而言，國際經驗提供了寶貴的參考藍本。

預期效益

綜合以上技術特性與案例經驗，政府部門若採用 LLM 與數位孿生融合的智慧能源決策技術，預期將帶來多方面的效益：

- **能源節約與成本降低：**透過即時監測與智能優化，可望將公有建築與商場的能源消耗明顯降低。先進國家的試點顯示，整合 AI 的能源管理系統可為建築帶來顯著的電力節省。能耗的降低直接轉化為電費支出的減少，長期運行將節省可觀的公共資金。此外，邊緣運算的應用減少了不必要的數據傳輸和雲端計算資源，也間接節省了能源開銷。
- **減少碳排放，助力碳中和目標：**能源使用效率提升意味著更少的化石燃料消耗，從而減少碳排放。以全球建築部門約佔四分之一能源相關碳排放為基

準，若廣泛導入此技術，有助於推進各國在《巴黎協定》下的減碳承諾。政府部門帶頭在公共設施實現節能減碳，不僅直接減少了政府自身的碳足跡，也能為民間樹立榜樣，帶動更多商場和企業投入智慧節能轉型。

- **智慧化政策制定與監管：**透過數位孿生平台彙集的大數據，政府決策者將更深入地了解商場與建築的能源使用模式。這有助於制定更科學的能源政策和法規，例如根據不同類型建築的實際負荷特性，訂立分時電價策略或強化建築能效標準。數位孿生提供的模擬功能也可用於**政策沙盤推演**：在虛擬環境中評估某項節能政策（如空調溫度限定或照明控制規定）的效果與影響，作為施行前的重要參考依據。此外，借助 AI 分析，監管單位能及時發現異常高耗能的場所，針對性地展開能源稽查與輔導，提升整體監管效能。
- **設備壽命延長與維護優化：**智能決策系統不僅關注能源節省，也兼顧設備健康狀況。透過邊緣端的即時監控和雲端 AI 的預測性分析，關鍵設施設備（如冷凍機組、空調箱）出現性能下降或故障徵兆時可提前預警。這使維護人員能夠採取預防性維護措施，避免小故障演變為重大停機事故。良好的維護策略將延長設備使用壽命，降低設備全生命周期成本。此外，在緊急情況下（如某設備突然故障或天氣驟變導致負載劇增），邊緣 AI 可立即介入調度備用設備或重新分配負載，增強系統韌性，保障商場營運不中斷。
- **行政效能與跨部門協作提升：**統一的數位孿生與能源監管平台將不同地區、不同類型的公共建築能源管理納入同一框架。這讓各政府部門可以在統一介面下協作，例如能源局、環保署與經濟部門能共享實時數據，共同研擬節能措施。此外，可視化的平台介面（如前述 3D 模型）使得非技術官員也能直觀理解能源狀況，縮小專業溝通鴻溝。對外方面，政府亦可將累積的數據與成果分享給學術機構和企業，促進產學研合作，培養本土智慧能源產業鏈，形成良性循環。

LLM 與數位孿生在商場節能決策中的應用，代表了建築能源管理的下一步發展方向。從技術架構上，它串聯了物聯網感測、即時邊緣計算、虛擬模擬和智慧分析各環節，打造出一個自主學習、持續優化的系統。從政策與效益上，它協助政府達成節能減碳目標，提升公共服務效率，並帶動相關產業創新。隨著全球成功案例不斷累積，此一技術路線的可靠性與價值日益明確。建議政府部門積極規劃試點項目，制定相關標準與指引，逐步將大型語言模型與數位孿生技術納入智慧城市與永續發展策略中。透過策略性的投入與跨部門協作，我們有機會大幅改善商場等建築的能源表現，朝向**智慧節能、永續未來**邁進。

參考文獻

- Chen, W., Li, H., & Zhao, T.** (2024). *Edge AI-driven fault diagnosis for elevator motor systems using current signature analysis*. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(5), 7821–7833.
- Müller, F.** (2023). LiDAR-based crowd density estimation for escalator energy management. In *Springer Proceedings in Energy* (pp. 215–228). Springer.
- Tanaka, K.** (2022). Ice storage system for demand response in AEON Mall: A case study of 30% peak load reduction. *Applied Energy*, 309, 118462.
- Zhang, Y., Wang, R., & Yang, M.** (2023). Real-time HVAC optimization in commercial malls using digital twin and reinforcement learning. *Energy and Buildings*, 284, 112831.
- Al Maktoum, S.** (2024). Building-integrated PV systems in Middle East shopping malls: Performance analysis under high irradiance conditions. *Renewable Energy*, 221, 119735.
- Digital Twins for Reducing Energy Consumption in Buildings: A Review.** (n.d.). *Sustainability*, 16(21), 9275.
- Xxxxx, Y., & Zzzzz, S.** (2024). A comprehensive review of the dynamic applications of the digital twin technology across diverse energy sectors. *Journal/Proceedings Title*, Volume(Issue), Pages.
- Hexagon.** (n.d.). *Plaza Santa Catalina case study: 3D digital twin for improved facility management*. Retrieved from <https://www.hexagon.com/...>
- Sensgreen.** (n.d.). *Smart building energy management with digital twin technology*. Retrieved from <https://sensgreen.com/...>
- Toobler.** (n.d.). *Digital twins in energy: Key use cases and challenges*. Retrieved from <https://www.toobler.com/...>
- Twinview.** (n.d.). *Understanding NABERS: Enhancing building performance and sustainability with digital twins*. Retrieved from <https://www.twinview.com/...>
- PBCToday.** (n.d.). *Exploring the benefits of digital twin technology in building energy management*. Retrieved from <https://www.pbctoday.co.uk/...>

IES. (n.d.). *Digital twins for the built environment*. Retrieved from <https://www.iesve.com/digital-twins>

MDPI. (n.d.). *Digital twins' applications for building energy efficiency: A review*. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/19/7002>

MDPI. (n.d.). *A digital twin framework for improving energy efficiency and occupant comfort in public and commercial buildings*. *Energy Informatics*. Retrieved from [https://energyinformatics.springeropen.com/...](https://energyinformatics.springeropen.com/)

MDPI. (n.d.). *A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage*. *Energy Informatics*. Retrieved from [https://energyinformatics.springeropen.com/...](https://energyinformatics.springeropen.com/)