

國立成功大學

碩士論文

數位雙生技術中的自主學習與學習成效探討：

以照護教育中的模擬學習為例

*Exploring Self-Directed Learning and Learning Outcomes in Digital Twin*

*Technology: A Case Study of Simulation Learning in Care Education*

研究生：陳維誠

Student: Wei-Cheng Chen

指導教授：陳世曄

Advisor: Shih-Yeh Chen

中華民國 000 年 0 月

## 摘要

本研究旨在探討數位雙生技術如何應用於照護教育中，旨在提升學習者的學習成效與動機。隨著全球老齡化趨勢加劇，長期照護需求日益增加，傳統的教學方式難以應對日益複雜的照護情境。因此，本研究以自我決定理論作為理論框架，探討如何透過數位雙生技術滿足學習者的自主性、能力感及相關性需求，進而提高學習者的內在學習動機。數位雙生技術能將真實世界中的病患定位及周遭環境參數，透過虛擬化呈現，讓學習者在沉浸式虛擬環境中模擬實際照護情境，增強學習的真實感與參與度。

研究透過建立一個整合病患定位和周遭氣體質量的數位雙生模型，整合了護理人員位置、氣體監測、溫度與濕度等環境參數，並將其應用於虛擬學習環境中，提供學習者接近真實的模擬體驗。此系統不僅能即時反映環境變化，還結合了異常偵測技術，能夠在發現潛在問題時做出即時應對。研究結果顯示，數位雙生技術在照護教育中的應用，不僅顯著提升了學習者的學習參與度，還促進了其內在學習動機的增強。學習者在模擬學習過程中，能夠更主動參與，提升對真實照護情境的應對能力。此研究為未來長期照護教育提供了一個有效的教學模式，建議進一步探索數位雙生技術在其他教育領域中的應用潛力。

關鍵字：數位孿生 (DT)、自我決定理論 (SDT)、高齡照護領域 (Geriatric Care Education)、大型語言模型 (LLM)、環境監測

## 致謝

總覺得來日方長，隨著一字一句，終於也到我筆於此處。回首過種種，站在人生轉折的十字路口上，我對未來充滿疑惑，又不得不接受我只是在芸芸眾生的一個普通人而已。我很幸運在學業旅途中的最後一個階段，遇到可愛溫柔的人，感謝他們給我最好的回憶。誰的人生不迷茫，何況我又是一個在普通不過的小草，但幸運的是有人願意在我迷茫惶恐時，伸出一把手拉我。讓我度過充實且正面的這兩年。

桃李不言、下自成蹊，很感謝世曄老師。我其實想不出如何描述他，但如果是詞彙的話，應該是溫柔、堅定。他在淺移默化中影響的我。從這塊校園的出識，到筆於此處的當下。願意傾聽我的錯誤，給我們細心指導。幫助我們攻克難關。老師的諄諄教誨讓我受益匪淺。我心裡愧疚又很感激。待遇良師，何其有幸。也許過往的聊天紀錄中，玩笑與感謝好像已經不計其數了，但我還是想在致謝中表達對老師的感激，希望他保持這份作為導師的初衷，身體健康，工作順利。

風月一庭，作良友於心；書卷半踏，為嚴師於身。感謝槿峰老師一次又一次的指點迷津，感謝他願意照亮我的生活，讓我變得更加自信勇敢，感謝陪伴我們一起吃過飯，烤過肉。每一次勇敢都是成長，希望我能成為他希望成為的大人，願老師平安喜樂諸事順遂。

感謝一同來到實驗室的兩位學長，威仁、進賢。謝謝你們出現在我混沌的生活裡，這兩年我真的過得很開心。願友誼長存，前程似錦，每個人都成為自身理想的大人。

山水相逢，終有一別。花開花謝自有時，人來人往任由之。世間所有的安排都有各自的道理。如果無能為力，就順其自然；如果無心所恃，就隨遇而安。成長就是一個不斷學會告別的過程，有人走向山，有人走向海。書寫至此，最後向那些，深知我糟糕仍願意伸出援手拉我一把的人，表示深深的致意。

# Chapter 1 引言

## 1.1 研究背景與動機

全球人口高齡化趨勢正深刻改變醫療與照護體系的教育訓練需求，臨床實務能力的養成與同理心之培育在**高齡照護領域（Geriatric Care Education）**中日益受到重視。**高齡照護領域（Geriatric Care Education）**不僅要求醫護人員具備高度的專業知識與技能，亦須展現敏銳的情境判斷力與即時應對能力。教育訓練必須採納更多元的介入模式，以突破傳統講授為主的單向學習框架（Malik et al., 2025）。模擬式學習（Simulation-Based Learning, SBL）作為一種以臨床情境為核心的教育方法，強調真實情境的重現與行動導向的學習歷程，進而提升實務演練的真實性與整體學習成效（Jaenicke et al., 2025）。然而，當前的模擬式學習平台仍存在互動性不足、操作流程靜態單一，缺乏即時回饋與行為數據記錄等問題（Gomathi, 2024）。削弱學習成效的可評估性，也妨礙教學者根據學習歷程適應性調整的可能，進一步影響教育的個別化與精準化發展。鑑於上述困境，Irfan et al., (2025) 提出應朝向具備長期互動能力與個人化調整功能的數位學習介面進行開發，以營造更具回應性與彈性的訓練環境。當此類訓練場域能整合感測技術與虛實互動機制時，將有望提供更具臨場感與沉浸感的學習體驗，進一步提升學習動機與促進學習者的自我調節能力。

伴隨著 SBL 持續演進的背景下，源自工業 4.0 的數位孿生（Digital Twin, DT）為教育場域帶來全新契機（Nepomuceno et al., 2024）。DT 能整合實體感測器資料與虛擬模型狀態，進一步結合物聯網（IoT）與 MQTT 等邊緣通訊協定，促進教學場域中現實與模擬環境的無縫銜接。MQTT 憑藉其低延遲、高頻率與可擴展架構，廣泛應用於數位孿生導向之感測教學系統中，支持模擬平台即時互動與學習歷程追蹤（Simisterra-Batallas et al., 2025）。同時，為了有效承載此類高互動性學習場景，開發平台的選擇亦成為關鍵。Unity 作為主流沉浸式模擬開發環境，不僅具備高度擬真的場景建模能力，也能整合 IoT 串流與感測資料互動，支援即時腳本控制與複雜情境下的操作重現。不僅大幅提升 SBL 的沉浸感與情境真實性，亦滿足臨床與工程訓練中對安全性與擬真度的高標準需求（Constantinescu et al., 2024）。例如 Zhao et al. (2024) 藉由 Unity 開發數位孿生手術模擬系統，成功改善臨床場景的真實性與學習者的應變能力。Sarkar et al. (2024) 整合 IoT 感測資料與 AI，並藉由 MQTT 實現異常狀況即時警示與操作輔導，顯示出平台的互動深度與自適應潛力。

科技教育的深化過程中，若要促進學習者的持續參與、主動投入與內在動機，勢必須建立於堅實的心理學理論基礎之上。自我決定理論（Self-Determination Theory, SDT）則因此成為探討學習動機與**整合式模擬學習系統**之間關係的重要理論框架。SDT 主張：當學習環境能滿足個體之自主性（autonomy）、勝任感（competence）與關係感（relatedness）三項基本心理需求時，將能促進內在動機與長期學習參與（Howard et al., 2021）。為了回應此理論導向，SBL 的設計日益聚焦於打造能滿足上述心理需求的數位學習情境。其中 IoT、MQTT、Unity 與 DT 等技術的結合，恰可滿足 SBL 對擬真性、回饋性與可重構性的高度需求。IoT 提供多樣化感測資料的即時串流與裝置互聯能力，使學習者能與教學情境進行動態互動；MQTT 具備低延遲、

高頻率與可擴展性，廣泛應用於教學場域中的資料傳輸與即時溝通，支援模擬過程中的行為監控與學習歷程追蹤；Unity 具備高彈性場景建構與多模態感測資料整合能力，實現真實情境的模擬重現，並在低風險環境中支援複雜技能之反覆演；而 DT 進一步整合，將感測器資料映射至虛擬模型，實現虛實同步與決策支援，增強模擬學習場景的情境真實性與回應深度（Bracq et al.,2019; Dicheva et al., 2023）。

## 1.2 研究目的與問題

有鑒於上述技術應用與 SDT 的高度互補性與整合潛力，也為了回應臨床教育之實務挑戰與心理需求支持，本研究設計一套整合式模擬學習系統。該系統將 IoT 感測與超寬頻定位技術（UWB）藉由 MQTT 通訊方式導入至 Unity 開發引擎，並進行異常偵測，建構一個具備高度互動性、情境彈性與即時數據回饋能力的 DT 教學場域。在技術層面上，研究透過 IoT、UWB、MQTT 與 DT 的整合應用，實現環境參數的即時感知與虛擬模型的動態映射，強化模擬場域對現實情境的反應靈敏度與交互透明性；在理論層面上，研究以 SDT 作為基礎，結合心理量表評量與行為數據蒐集，構築一套可視化、數據驅動之學習歷程解釋架構，以強化教學成效的評估深度與學習者內在動機的理解。根據研究架構與實施目標，提出以下三項研究問題：

- ❖ RQ1：透過研究所開發整合式模擬學習系統之介入，是否對於護理生在臨床模擬環境中有良好的使用性體驗？
- ❖ RQ2：透過研究所開發整合式模擬學習系統之介入，是否能顯著提升護理生在臨床知識上的護理學習成效？
- ❖ RQ3：在整合式模擬學習系統介入下，互動經驗（Interaction Experience）如何透過動機與基本心理需求影響學習者的自主學習傾向？

## Chapter 2 文獻探討

### 2.1 疫情、高齡化與教育轉型下的模擬式學習（SBL）策略探析

隨著模擬式學習（SBL）在臨床教育中的應用迅速升溫，其背後反映的不僅是教學形式的技術創新，更是一種對結構性困境的回應。如圖 XX 所示，COVID-19、高齡社會的衝擊、以及臨床訓練需求的轉變，共同構成推動 SBL 興起的背景動因。COVID-19 徹底打亂護理生臨床實習安排，機構基於感染控制與病人安全考量，大量縮減實體接觸與操作機會，導致臨床教學幾乎停擺（Subramaniam et al., 2024），許多機構紛紛轉向模擬式訓練，以數位模擬、虛擬病人及高擬真模擬等方式維持學生的技能學習（Gardanova et al., 2023）。

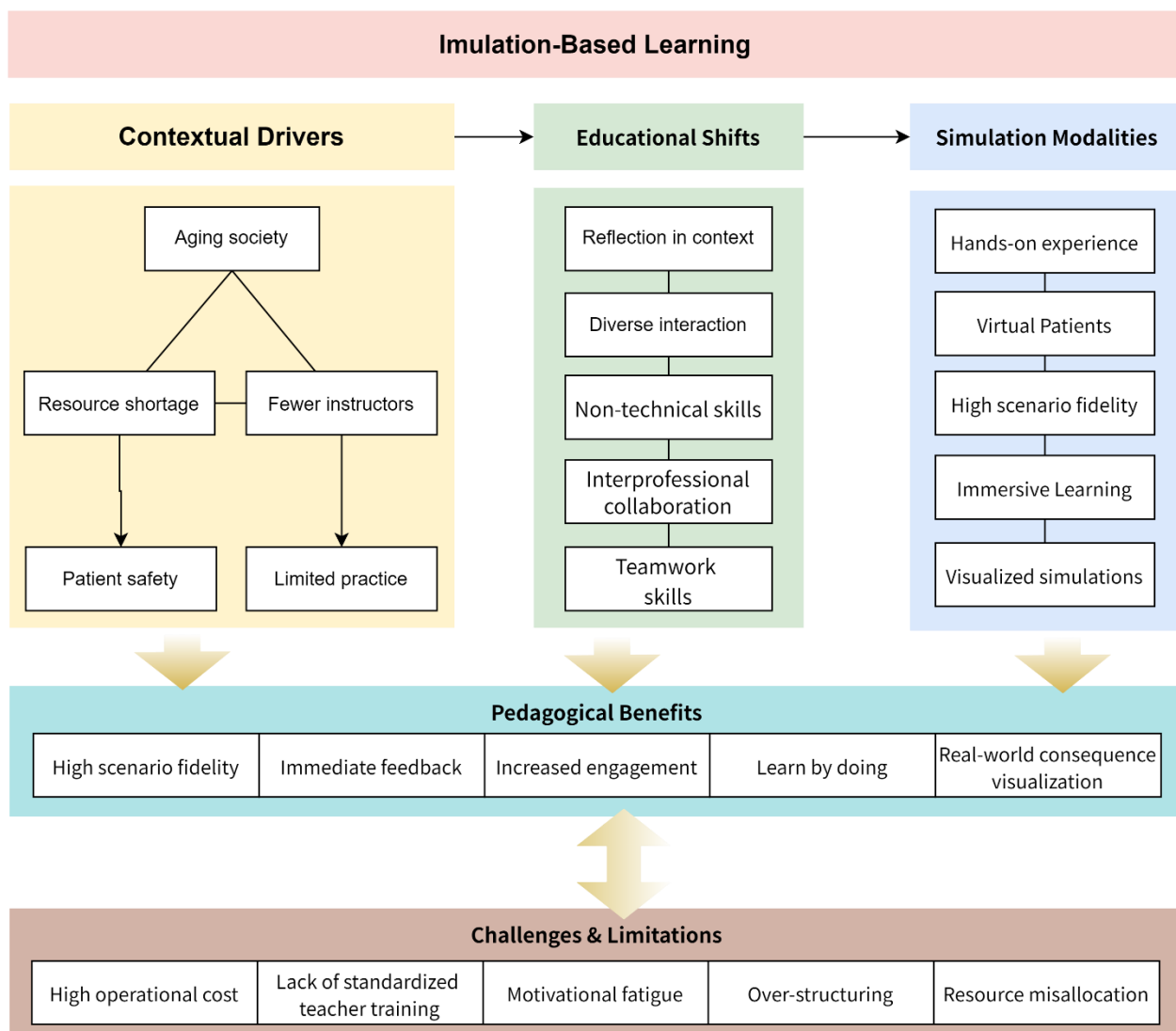
在教育轉型趨勢上，傳統高齡照護教育多側重知識記憶與技能操作；而當代臨床現場更強調學生在跨專業溝通、即時判斷與團隊協作上的能力發展（Ryan et al., 2022）。SBL 允許教學者設計多元挑戰情境，例如突發性心肺停止或倫理困境事件，使學生能在安全環境中反覆演練、強化臨床應變與非技術性能力，進而培育情境反思與專業素養（Komasawa, 2024; Zhao et al., 2024）。在人員培育上，高齡照護教育面臨龐大的知識體系快速更新與護理生學習負荷過重的矛盾。護理生在高壓學習環境中經常無法內化知識與自我照護能力，削弱臨床學習表現（Hwang et al., 2021）。語言上的溝通障礙也干擾了知識吸收，在中東與亞洲等地區，醫學生於非母語授課環境中，常因專業術語誤解而降低實務操作能力（Hamad et al., 2025）。資源限制與師資人力不足亦使許多院校無法提供足夠且多元的模擬或臨床實地訓練。例如 Braun et al., (2025) 在營養教育的研究中指出，臨床營養師在面對病患時常過度聚焦於資訊傳遞，卻忽略了溝通歷程中的情緒理解與互動負荷。若臨床學生缺乏實境模擬的演練歷程，便容易在實際照護病人時產生共情疲勞，進而削弱人際互動品質與照護溝通的敏感度（Salem et al., 2025）。SBL 的最大優勢在於能大幅降低學習環境中的實際風險，使護理生得以在無損病人安全的前提下進行臨床操作訓練。透過精心設計的情境模擬，護理生得以反覆練習關鍵技能，促進實務與情緒應對能力的同步發展。例如在產後大出血的應變訓練中結合 SBL 與案例式學習可以提升臨床反應速度與知識記憶深度，使學生更能將課堂所學轉化為臨床行動（Edwards et al., 2025）。

SBL 互動性雖高，但如何維持長期學習參與仍是一項挑戰。近期研究傾向透過沉浸式設計、即時回饋與反思機制作為補強策略（Keskitalo & Saukkoriipi, 2025）。Bø et al., (2022) 認為模擬互動性與情境可信度是參與持久性的關鍵預測因子。模擬真實程度愈高，學習者參與度與學習動機愈高。Romero-Castillo et al., (2024) 在護理教育實驗中指出，學生若在模擬後參與反思與自評活動，其學習動機維持時間明顯長於未進行反思者。此外，SBL 自身的昂貴維護成本，也是 SBL 難以推行至機構阻礙之一；在教育資源有限的環境中過度依賴高擬真模擬，也可能導致資源錯配與教育倫理質疑（Arun Babu & Sharmila, 2025）。Cook et al., (2013) 提到，需多 SBL 缺乏針對動機變化的長期更新與評估工具，教師難以調整教學策略。Canning and Prescott (2025) 則指出 SBL 過於結構化，缺乏臨場情境的真實壓力與複雜性，導致參與度與學習投入度不高。若模擬情境缺乏漸進式挑戰與回饋更新，學習者可能對重複性場景產



生動機疲乏，進而削弱原先激發的內在動機（Motola et al., 2013）。Joyce et al., (2025) 在模擬教學系統性回顧中指出，SBL 缺乏一致的教師訓練與評量標準，不僅影響教學品質，也限制跨單位共享教材與成果的可能性。

Figure 1 : Simulation-Based Learning 概念架構圖：驅動因素到教學效益與挑戰

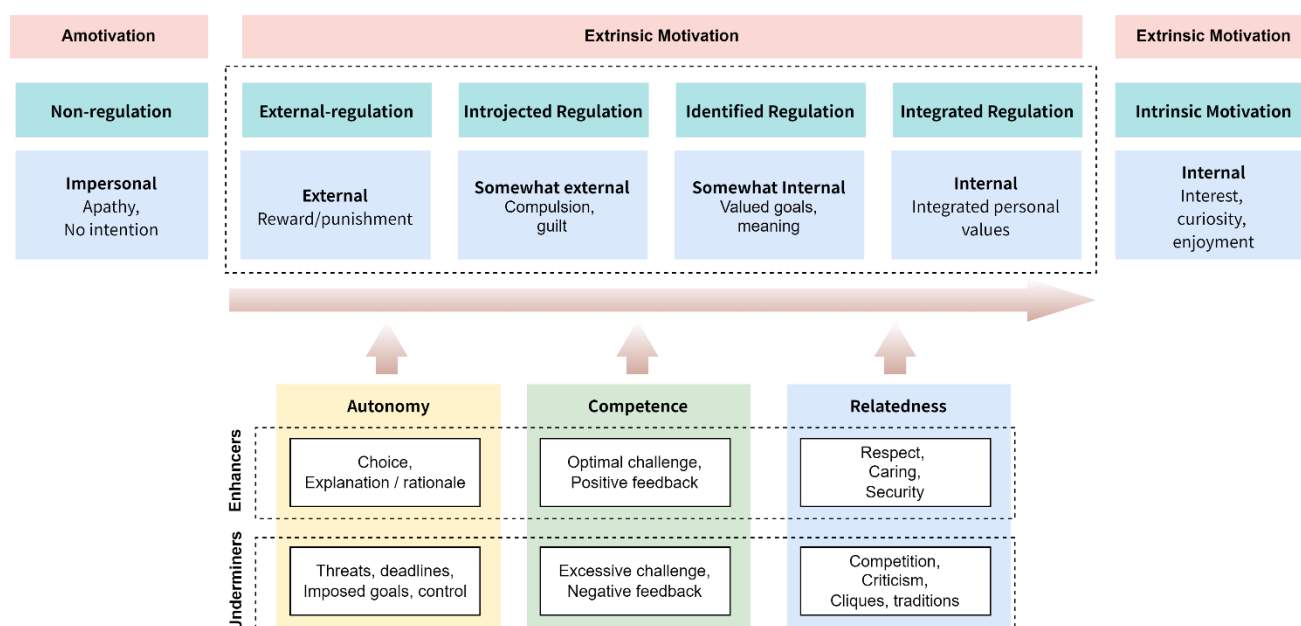


## 2.2 以自我決定理論為基礎的模擬式學習設計：自主性、勝任感與關係感的教學實作探究

自我決定理論（Self-Determination Theory, SDT）旨在闡明人類行為的動機來源（Ryan & Deci, 2020）。該理論主張，人類的最佳發展狀態需建立在三項基本心理需求的滿足之上：自主性（autonomy）、勝任感（competence）與關係感（relatedness）。如圖 XX 所示，自主性（autonomy）指個體行為出於自願、整合與自我選擇，而非受到外在壓力或操控，關乎行動的一致性與自我價值的認同，是內在動機（Intrinsic Motivation）產生的核心條件。勝任感（competence）描述個體在面對挑戰任務時所感受到的效能與成就感。當人們覺得自己能掌握環境或有效達成

目標時，會激發持續投入學習與成長的動力 (Vansteenkiste et al., 2020)。關係感 (relatedness) 指的是個體與他人建立有意義連結，以及被接納與理解的社會性需求。這項需求在社群互動與支持系統中扮演著關鍵角色 (Howard et al., 2017)。SDT 並非文化特定的產物，而是具備跨文化普遍性的心理需求框架。Howard et al., (2017) 在整合性統計分析指出，無論文化背景、年齡層或社會環境為何，SDT 所強調的三項基本心理需求，在預測個體的動機品質、心理健康與學習表現方面皆展現出高度一致的效果。Vansteenkiste et al., (2020) 進一步證實，SDT 是一種與人類基本生理需求相似的成長導向心理機制，其普遍性已在超過 80 個國家中被廣泛驗證。

Figure 2：自我決定理論動機模型與心理需求對應圖



在教育情境上，SDT 提供教育者設計課程與動機支持策略的理論依據，也預測學習者的持久投入與深度學習成果 (Hsu et al., 2019)。當教學環境能支持學生自主表達，提供具挑戰性但可達成的任務，並營造關懷互動的氛圍時，學生往往能展現出更高的學習動機、學習成就與情緒福祉。這樣的支持在知識快速變動與學習壓力沉重的當代教育情境中，顯得尤為關鍵。內在動機 (Intrinsic Motivation) 驅動不易受到短期獎懲機制干擾，具有更穩定與自我延續的學習效果。Wu and Dong (2024) 證實，當教師採取支持學生心理需求的教學行為時。例如允許學生參與決策、提供具建設性且非評判性的回饋，學生的自主動機與情緒調節能力會顯著提升。

在教學設計上，SDT 倡導結構性支持，即在保持教學清晰性與挑戰性的同時，允許學生有決策空間。Moll-Khosrawi et al., (2021) 提到，當情境設計中加入角色分化、情節分支與即時反饋時，學生不僅主觀投入度提高，客觀表現也隨之增強，並表現出更高的自我效能感。Almarwani et al., (2024) 則證實，透過開放性提問、同儕互評與情境角色扮演等策略，能有效強化學生的勝任感 (competence) 與關係感 (relatedness)。在高齡照護領域中，情感支持與社會連結所帶來的關係感 (relatedness)，往往能轉化為學生的專業認同，進而促進其長期的職涯承諾。儘管 SDT 在理論上強調心理需求的普遍性，但其實踐效果仍深受文化價值觀與



教育情境的影響。**Starko, (2021)** 在跨文化元分析中指出，東亞地區等集體主義文化上，學生對關係感 (relatedness) 的動機反應顯著高於自主性 (autonomy)；而西方文化則傾向於優先重視個體選擇權與自我導向。教育者若期望在不同文化脈絡中有效應用 SDT，需調整語言風格、課堂規則與評量機制。像是在集體導向社群中引導合作學習、強調團隊責任與互助目標，反而較能觸發內在動機，提升教學介入的接受度與效能。

同時，雖然 SDT 為理解學習動機與行為改變提供了堅實基礎，但其實踐仍有賴於數位科技與互動設計的介入，方能將抽象理論轉化為具體可行的學習體驗 (**Podolefsky, et al., 2013**)。心理機制需要透過技術設計，才可為新世代的教育模擬環境提供強有力的理論與實作支撐。**Jose et al. (2025)** 探討了 AI 如何藉由個人化互動與即時回饋促進學習者自主性與效能感。該研究透過追蹤學習行為與決策，動態調整學習內容與回饋語句，提升使用者的主控感，也增強其對學習成果的掌握。**Dai et al., (2025)** 則探究學生透過被動接受與主動請求 AI 回饋這兩種互動方式在學習成效上的差異。發現在後者中學習者的自我調節能力、自主感與學習成就均顯著提升，凸顯自主選擇回饋機制在 AI 教學設計中的價值。

此外，自我探索是促進學習者建構知識內涵與意義的重要過程。**Clément et al., (2024)** 指出，當教學系統提供使用者選擇機制時，不僅能提升學習成效，也能顯著強化內在動機，突顯內容主控權與多元學習路徑在自主學習中的關鍵性。挑戰性則被視為勝任感 (competence) 的核心驅動力，其發揮效果仰賴任務難度與個體能力之間的適度差距。**Hicke et al., (2025)** 開發的 MedSimAI 平台，透過模擬病患對話，即時生成回饋與練習機會，讓醫學生可自主決定練習的時機與內容。研究結果顯示，該系統能有效提升學生的練習頻率、對話流暢度與自我效能感，證實即時回饋設計有助於強化自主性 (autonomy) 與勝任感 (competence)。其中，有效回饋更被視為連結 SDT 核心需求的關鍵樞紐。回饋不應僅限於知識層面，亦需涵蓋情緒支持與關係感的維繫。例如在協作任務中設計同儕互評機制，或設立團隊貢獻回饋板，讓學生看見自身的價值貢獻，也有助於提升社會歸屬感與互動動力 (**Moll-Khosrawi et al., 2021**)。

鑑於上述探討，SBL 若要真正提升學習者的內在動機與持續參與，其設計必須對應 SDT 所揭示的三項基本心理需求。自主性 (autonomy) 作為持久動機的基礎，須建立於學習者感受到的選擇權與行動控制感。**Davies (2024)** 發現，提供自由選擇的教學情境顯著提升護理學生的控制感與動機強度，並減少對標準答案的依賴，培養開放性問題解決能力。當學生在 SBL 中依情境進行選擇、嘗試不同反應並即時觀察後果，將有效增強其自主性 (autonomy) 與責任感 (**Koh, et al., 2010**)；勝任感 (competence) 的養成取決於適當的挑戰水平與持續的正向回饋。SBL 透過任務遞進的結構設計與即時的表現回饋，協助學習者辨識自身的學習進展，進而強化成效感與自我效能感。**Stenseth et al., (2025)** 指出，當 SBL 提供明確的學習目標、動態錯誤提示與成就回饋時，能有效提升學生對臨床技能掌握的信心。即時的數據視覺化與個別化回饋，能將抽象的學習歷程具體化，幫助學生內化評量標準，並促進更深層次的學習動機與策略運用；關係感 (relatedness) 作為促進社會聯結與情緒交流的教學載體。SBL 透過團隊模擬演練、小組角色互換與後測反思討論，可建立學習者間的支持感與歸屬感。**Moll-Khosrawi et al., (2021)** 指出，反思階段為學習關係感 (relatedness) 的關鍵場域。學習者表現出對同儕理解、接納與共同進步的需求，亦為後續學習與職業發展提供心理韌性。SBL 的互動結構若能涵容社會情境複雜度，將有助於培養護理學生面對臨床溝通挑戰時所需之人際敏感度與情

緒調節力。

## 2.3 異常偵測作為高齡照護領域介入的行為診斷機制

在 SBL 中，科技導入的核心目的不僅限於重建場域情境，而是實現學習歷程的可視化，進而強化評量效度與教學適應性。知覺刺激不僅影響學習者的注意力分配，亦可實際加速反應行動（Ferreira, et al., 2019）。Jiang et al., (2021) 採用視覺統計學習的實驗設計，操控顯著的感知線索（如背景顏色）以強化特定視覺區域，並透過測量不同象限中目標出現時的反應時間，來評估學習效果。結果顯示，當可感知線索增加時，參與者對高機率象限的反應速度顯著提升。Liu et al. (2022) 則運用眼動追蹤技術，將 360° 虛擬實境應用於學習情境，並設計箭頭與文字標註作為視覺提示。研究結果發現，相較於未提供任何視覺提示的控制組，實驗組在學習過程中更能聚焦於關鍵資訊區域，學習測驗成績明顯提升，且認知負荷也有所降低。

高齡照護領域（Geriatric Care Education）中，風險環境因素如藥品揮發、溫濕度異常等，可能對病人安全與作業品質造成嚴重威脅（Abdulmalek, et al., 2022）。傳統教學多以靜態教材呈現這些風險因子，缺乏動態回饋與操作觸發機制，從而降低學習者的應變訓練機會。Badar and Mangoud (2024) 建議可導入基於物聯網（IoT-based）的環境感測系統，並結合聲光警示作為學習情境中的事件觸發依據。例如，當病房中氧氣濃度異常升高時，系統即啟動警示，學習者須判斷是否發生洩漏，並執行關閉閥門與現場疏散等應對措施。此類設計有助於訓練學生對環境異常的敏感度、風險評估能力與跨職种的協調應變（Jackson, 2022）。此外，醫療照護工作涉及高度的空間操作順序與巡查規範，諸如巡視動線、交接班流程與設備使用等，皆具高度標準化需求。為提升模擬教學在行為時序與空間規範訓練上的精準度，近年教學場域已逐步導入室內定位技術，如超寬頻（UWB）、低功耗藍牙（BLE）與無線射頻識別（RFID），以自動記錄行為歷程，並進行視覺化重建（Hailu et al., 2024）。Bibbò et al., (2022) 在高齡照護場域中設置超寬頻（UWB）發射器與可穿戴式接收裝置，以記錄學習者在工作區域的停留時間與動線分布，並透過軌跡比對分析學生是否完成完整的查房與照護任務。教師可依據行為熱區圖，辨識學生是否忽略高風險區域或未依循預定動線，進而提供個別化的回饋建議。此外，室內定位技術亦可與心率、語音等多元感測資料整合，進一步探索空間行為與情境壓力之間的關聯。例如學生在高壓任務區域（如緊急處置站）停留時，若同時觀察到其心率變異性（HRV）顯著改變，可能代表其在壓力情境下的調節與決策能力仍有待強化（Jacob et al., 2020）。

此外環境感測的價值不應僅限於靜態紀錄學習歷程，更在於對行為數據的異常偵測與判斷能力。唯有透過即時推論學習狀態與風險指標，方能將被動紀錄轉化為主動介入的策略支援。孤立森林演算法（Isolation Forest, IF）近年被廣泛應用於模擬學習場景中的行為異常偵測，特別適合高維感測資料中的罕見行為分析（Ting et al., 2021）。IF 屬於無監督式機器學習模型（Supervised Learning），其核心假設：異常資料點在整體資料集中出現頻率較低且與其他樣本分布差異較大，因此在構建隨機決策樹的過程中，其更容易在淺層節點即被區隔，相較於常態資料具有更短的平均路徑長度。IF 不需事先標註異常行為樣本，便可透過多棵隨機樹結構自動找出潛在異常行為，具有運算效率高與擴展性佳的優勢（Zamanzadeh et al., 2024）。其

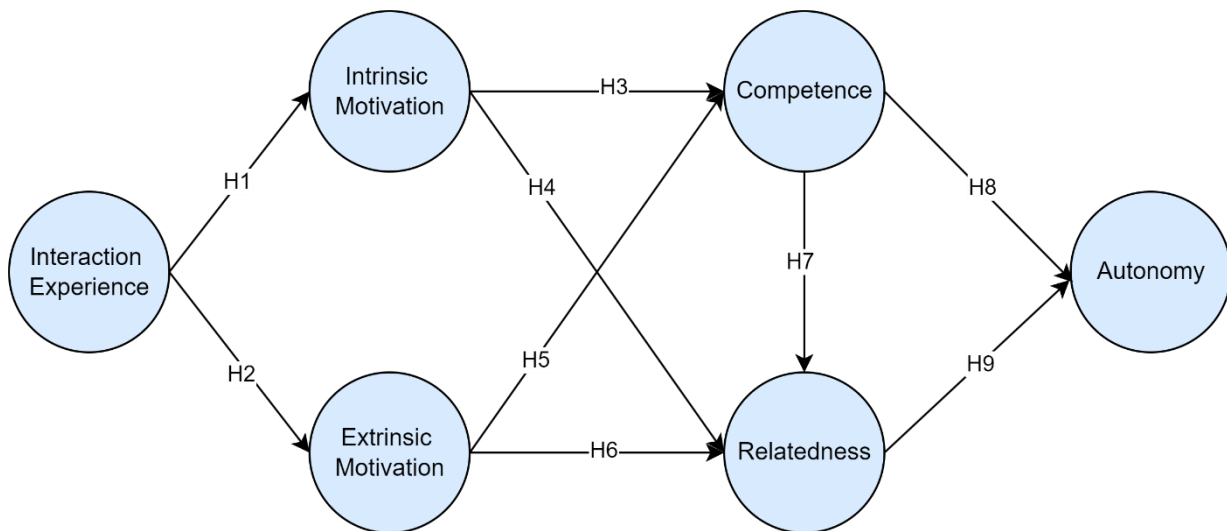
特性適合應用於教育模擬系統中處理生理、環境數據等大量感測器資料。[Zhang et al., \(2025\)](#) 在模擬手術教室為場域的研究中，應用 UWB 與慣性感測資料的行為監測系統，並使用 IF 辨識實習醫學生操作流程中的異常行為，例如器械使用順序錯誤與反應時間異常等。在非臨床情境中，IF 亦被應用於虛擬模擬課室，判斷學生的參與強度與學習策略異動。[Feng & Zhang \(2024\)](#) 在遠距虛擬科學模擬教學中，透過記錄學生與模擬實驗平台的互動點擊資料與滑鼠軌跡，建構行為特徵序列，並以 IF 篩選出表現異常者。值得強調的是 IF 雖具有廣泛適用性，但特徵設計階段仍需高度依賴領域知識。特徵若未能貼近學習者認知歷程或學習行為之邏輯結構，易導致誤判或解釋困難。若無法理解模型判斷依據，將不利於後續教學調整與回饋策略建構。[Lin et al., \(2023\)](#) 建議，IF 應用應加入可視化回饋儀表板與多層次分析模組，協助教師以圖形化方式理解模型輸出與學習行為對應關係。



### Chapter 3 Research Model and Hypotheses

本研究以 SDT 作為理論基礎，探討數位學生互動經驗如何透過學習動機，進一步滿足學習者的心理需求，包括自主性（autonomy）、勝任感（competence）與關係感（relatedness）。當學習者在學習過程中能夠感受到上述三種心理需求被滿足，便更容易產生內在動機（Intrinsic Motivation）進而提升學習表現與投入程度（Ryan & Deci, 2020）。研究建構之模型如圖 XX 所示。

Figure 3：模型架構圖



DT 在高齡照護領域（Geriatric Care Education）中展現高度互動性與臨場感，能為學習者創造貼近真實的學習情境，有效提升其投入程度與主動探索的動機（Yang et al., 2024）。其中 SBL 已被證實能強化學習者的自我效能與控制感（Negahban, 2024）。Hii and Yang (2025) 在探討虛擬實境應用於護理教學的研究中指出，臨場感（presence）與心流（flow）是促發內在動機的關鍵心理機制。這些心理狀態與內在動機（Intrinsic Motivation）高度相關，特別是在強調實作技能與臨床判斷的高齡照專業訓練中，其正向影響更為明顯。因此我們提出以下假設：

H1：數位科技所創造的互動經驗（Interaction Experience），能激發學習者的興趣與好奇心，進而提升其內在動機（Intrinsic Motivation）。

外在動機（Extrinsic Motivation）源於學習者對實務技能的職涯需求與外部肯定的期待。DT 具備高擬真與即時回饋的特性，能有效模擬臨床場域中的操作情境與決策歷程，進而強化學習者對未來職能的認同與投入感（Haleem, et al., 2023）。作為職場預演的平台，DT 不僅再現實際工作環境，也有助於學習者理解專業角色並建構實用性的知識架構（Spyrou et al., 2025）。Hazrat et al., (2023) 於工程教育的實證研究指出，模擬導向學習平台可提升學習者對知識未來應用性的評價，進而增強其參與動機與職場遷移效益。當學習者意識到 DT 所促成的學習成果可直接轉化為職涯競爭優勢，其外在動機（Extrinsic Motivation）也將相應提升。此類動機來源可能來自對職場適應力、證照取得、升遷機會或專業肯定等外部目標的期待。因此我

們提出以下假設：

H2：數位科技所創造的互動經驗（Interaction Experience），可能強化學習者對價值與職業優勢的認知，進而提升其外在動機（Extrinsic Motivation）。

內在動機（Intrinsic Motivation）指的是學習者因對活動本身的興趣、挑戰性或自我成就感而自發投入學習的傾向。當個體出於內在動機參與學習時，通常會展現更高的專注力、自我效能與學習持續性（Buch, et al., 2015）。在健康職類教育中，若臨床導師能透過支持自主性與能力發展的教學策略，有效激發學生的內在動機，將能顯著促進其在臨床學習中的勝任感與積極投入（Orsini, et al., 2015）。因此我們提出以下假設：

H3：內在動機（Intrinsic Motivation）透過增強學習者的投入與持續參與，能有效促進其在學習過程中建立勝任感（Competence）。

內在動機（Intrinsic Motivation）不僅能促進學習投入，也有助於強化個體與社會環境之間的正向連結。當學習者在內在動機的驅動下參與學習時，更傾向主動建立學習社群互動，並從中獲得情感支持與社會認同，進一步提升被理解與接納的心理感受（Cook & Artino, 2016）。Zhang, et al., (2025) 在大學生協作的研究指出，內在動機（Intrinsic Motivation）與團隊合作傾向之間呈高度正相關，興趣驅動的學習能強化彼此間的社會聯繫與互信基礎。此外，教師若本身具備高度內在動機，也更容易在教學互動中建立正向的人際支持系統與社會歸屬感（Yang, et al., 2024）。因此我們提出以下假設：

H4：內在動機（Intrinsic Motivation）對學習者的關聯性（Relatedness）具有正向影響，具高度內在動機的學習者更可能積極與他人互動，並強化其社會連結與情感歸屬。

外在動機（Extrinsic Motivation）雖然以報酬、考評或職涯利益為導向，但仍可在特定條件下正向影響學習者對自身能力的評價與信心。當學生因職涯需求或實習表現評比而投入學習時，其在技能掌握與問題解決能力上自我評價明顯提高，證實外在誘因可透過任務增強進而正向作用於勝任感（Liu, et al., 2023）。Shin et al., (2024) 在護理實習學生的研究指出，來自教師、機構的績效評量與正向回饋，能顯著提升學生的勝任感與自我效能。學生若明確了解所學內容與實際職能的對應關係，其行為將更具動機導向，並強化其對專業技能的自我掌握感（Marino-Jiménez et al., 2024）。因此我們提出以下假設：

H5：外在動機（Extrinsic Motivation）能激勵學習者更積極參與並提升技能，進而對勝任感（Competence）有正向影響

外在動機（Extrinsic Motivation）雖然以酬賞或義務為導向，當學習活動涉及團隊合作、群體任務或他人肯定時，也可能促進社會連結與歸屬感的形成。學習者若對外部評價高度敏感，將更積極參與社群活動，以獲得來自他人的認可與支持（Abdul et al., 2022）。Kusurkar, et al., (2013) 在醫學教育研究中指出，醫學生在臨床輪訓期間，若因表現評價受到導師肯定而激發學習動機，將更傾向於主動參與臨床學習活動，進而在與同儕與臨床指導者的互動中，培養更強的社會連結與合作意願。因此我們提出以下假設：



H6：外動機（Extrinsic Motivation）驅使學習者參與活動，增加與他人的聯繫，進而對關係感（relatedness）有正向影響。

勝任感（competence）為人際互動中的一項基礎條件，當勝任感（competence）提升後，學習者在人際互動情境中的自我呈現與溝通行為顯著增強，有助於建構更強的關係感（relatedness）（AI, 2022; Chen & Zhang, 2019）。Cheon et al., (2012) 在探討教師動機與社群互動的研究中提到，當個體因勝任感（competence）而感到價值時，更易產生社會連結與情感依附。因此我們提出以下假設：

H7：勝任感（Competence）能增強學習者與他人互動的信心與社會關係，並對關係感（relatedness）有正向影響。

勝任感（Competence）是自主行動的重要心理前提。當學習者在活動中感受到自身具備完成任務的能力，即表示其勝任感獲得滿足，將有助於促進自主性（Autonomy）的發展（Ryan & Deci, 2020）。Black and Deci (2000) 針對大學生學習動機的研究指出，當學生認為自己能勝任課堂任務時，較傾向主動設定學習目標與策略，而非被動接受外在指令。教師若能透過能力建構策略強化學生的勝任感，將有助於激發其自我決策、積極參與與創造性解決問題等自主學習行為。因此我們提出以下假設：

H8：勝任感（Competence）對自主性（Autonomy）具有正向影響；當學習者感知自己具備能力時，將更傾向展現自主選擇與主動行動的行為傾向。

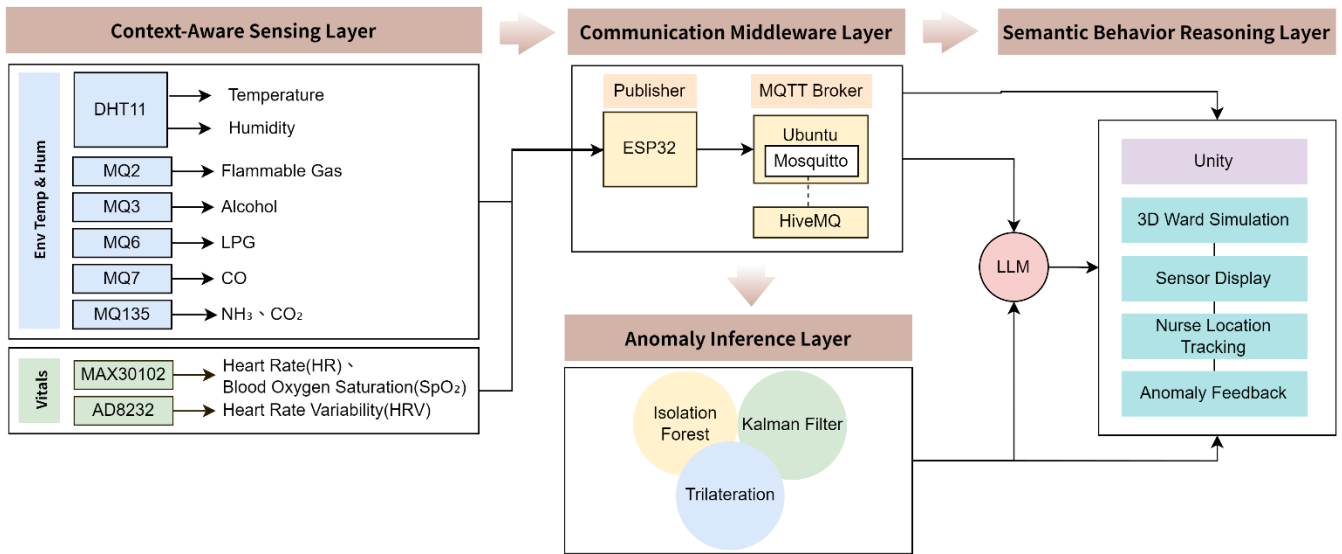
關係感（relatedness）指的是學習者在學習歷程中感受到被接納、理解與支持的社會性連結。這種正向的社會關係不僅有助於情緒穩定與心理安全感的建立，更能促進學習者自信地做出選擇，進而強化其行為的自主性（Autonomy）。Niemic and Ryan (2009) 指出，當學習者在支持性環境中感受到與他人的連結，會更願意承擔責任並主動參與學習，這正是自主性行為的重要基礎。因此我們提出以下假設：

H9：關係感（relatedness）對自主性（Autonomy）具有正向影響；當學習者感受到穩定的社會支持與情感連結時，更容易展現主動選擇與自我導向的學習行為。

## Chapter 4 System Architecture

本研究以模擬情境為核心，整合感測技術、行為偵測模組與學習分析引擎，構成一套具備即時反應與後設回饋功能的智慧護理模擬教學系統。系統架構如圖 XX 所示：系統整合情境感知感測層 (Context-Aware Sensing Layer)、通訊中介傳輸層 (Communication Middleware Layer)、異常推理層 (Anomaly Inference Layer) 與語意行為推理層 (Semantic Behavior Reasoning Layer) 等四大階層。

Figure 4：系統架構示意圖



### 4.1 情境感知感測層 (Context-Aware Sensing Layer)

在系統中，溫溼度等環境感測數據會通過 MQTT 協議傳送到虛擬機，最終整合至 Unity 平台的虛擬場景中。不僅可以真實反映當前物理場景的狀況，還可用於異常偵測，以便於監測系統運行狀態下的潛在問題。

#### 4.1.1 環境感測模組

為了模擬病房中的環境變化並即時蒐集空間資訊，系統以 DHT11 溫濕度感測器與 MQ 氣體感測器監控溫度、濕度與氣體濃度等環境參數，並將數據傳送至虛擬模擬場景中進行即時反應。DHT11 感測器內部整合了一個電容式濕度感測元件與 NTC（負溫度係數）熱敏電阻，能夠同步量測環境中的相對濕度與溫度。感測器內建的模擬-數位轉換器（ADC）可將所量得的模擬訊號轉為數位格式，並透過單總線協議（1-Wire Bus）與微控制器（如 ESP32、ESP8266）進行資料傳輸。氣體感測採用 MQ 系列的氣體感測器，該感測器屬於金屬氧化物半導體型（MOS-type）感測元件，核心材料為氧化錫（SnO<sub>2</sub>）。在無污染的空氣中，氧氣分子會吸附於 SnO<sub>2</sub> 表面並攫取自由電子，形成耗盡層而提高感測器電阻；當周圍出現可燃或還原性氣體（如 CO、LPG、NH<sub>3</sub>）時，氣體會與吸附的氧分子發生氧化反應，釋放電子回到材料中，使導電

性上升、電阻降低。其變化透過模擬-數位轉換後，傳送至微控制器進行分析。由於不同氣體的反應特性與靈敏度差異，各型號的 MQ 感測器（如 MQ-2、MQ-6、MQ-135）具備不同的偵測範圍與選擇性，研究中將根據實驗需求選擇合適型號，詳細比較如表 XX 所示。

*Table 1*：市售 MQ 系列氣體感測器型號、偵測對象與應用

型號	檢測氣體	濃度範圍 (ppm)	特點或應用
MQ-2	可燃性氣體（如甲烷、丁烷）、煙霧	200 - 10,000	適用於火災或氣體洩漏檢測
MQ-3	酒精	0.05 - 10 mg/L	用於酒精濃度檢測，如酒駕監測
MQ-6	LPG、丁烷、丙烷	300 - 10,000	適合檢測液化石油氣
MQ-7	CO	10 - 10,000	用於室內空氣品質監測
MQ-9	CO、可燃性氣體	10 - 1,000	適用於多氣體檢測
MQ-135	NH <sub>3</sub> 、CO <sub>2</sub> 、有機氣體	10 - 1,000	適合空氣品質監測

*Figure 5*：DHT11 Sensor

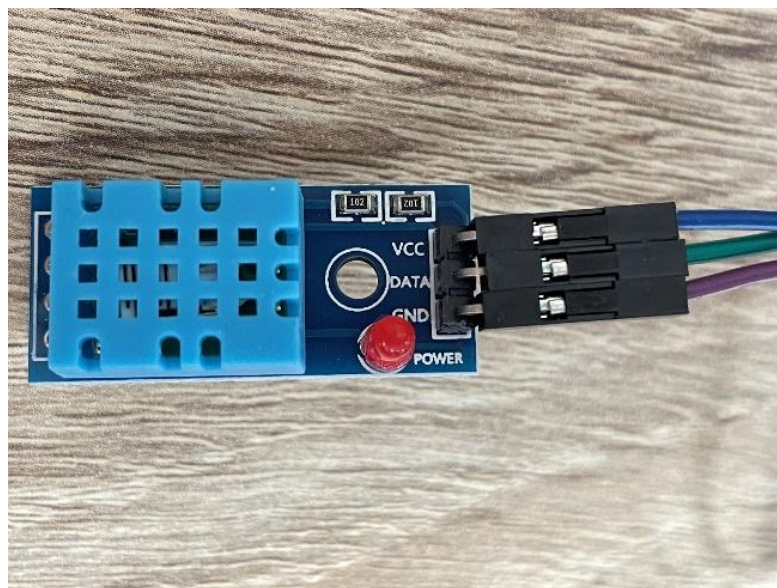
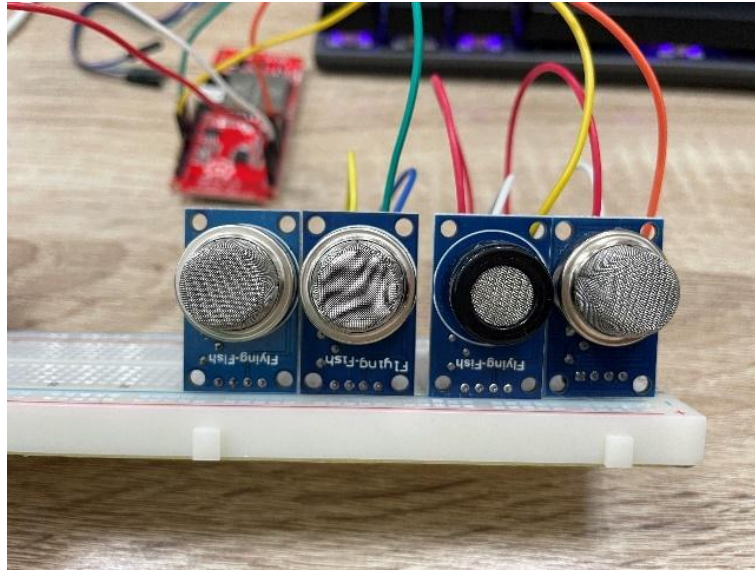


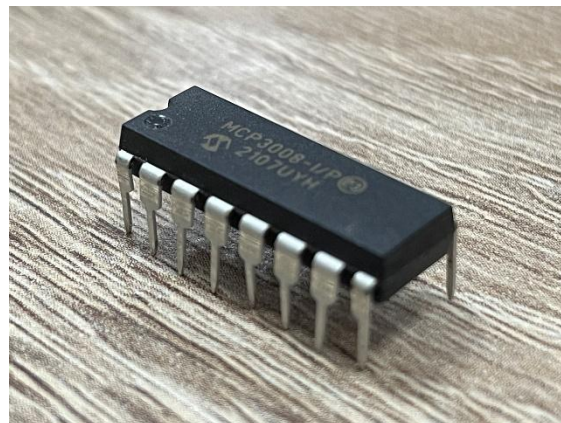


Figure 6 : MQ Sensor Module



初期系統架構中預設使用 Raspberry Pi 作為嵌入式控制單元。然而 Raspberry Pi 本身不具備模擬訊號的直接讀取能力，故需在整合 MQ 系列氣體感測器上額外配置 MCP3008 模擬-數位轉換器 (ADC)，以實現感測器模擬輸出訊號的數位化處理。隨著需求優化，系統核心模組更換為具備更高整合度的 ESP32 微控制器平台。ESP32 內建多組 12-bit ADC 模組，可直接讀取模擬感測器輸出，免除外接 ADC 轉換器之需求。

Figure 7 : MCP3008



#### 4.1.2 室內定位模組

為解決傳統室內定位技術在高複雜照護環境下之定位誤差與延遲過大問題，研究導入 Decawave DW3000 超寬頻 (Ultra-Wideband, UWB) 模組，並以 ESP32-S3 微控制器作為邊緣運算平台。DW3000 模組支援 IEEE 802.15.4-2011 UWB PHY，具備 500 MHz 頻寬，於視距 (line of sight, LoS) 條件下可達 10 cm 級定位精度，理論更新頻率可達上限 850 kbps。超寬頻 (Ultra Wideband, UWB) 是一種高頻寬且低功率的無線通訊技術，其以極短脈衝進行資料傳輸，具備奈秒級的時間解析度，能夠提供高精度的距離量測能力。相較於傳統如 Wi-Fi 或藍牙 (Bluetooth Low Energy, BLE) 等無線通訊技術，UWB 在抗多徑干擾能力、測距準確性與即時性方面展現更佳效能，因此被廣泛應用於室內定位與動態追蹤等場域。研究建置之定

位系統以 ESP32-S3 結合 DW3000 UWB 模組，構成一套包含多個固定式節點 (Anchors) 與移動裝置 (Tags) 的室內定位架構。定位技術採用到達時間差 (Time Difference of Arrival, TDoA) 為基礎，透過 Tags 發送 UWB 脈衝訊號後，由多個 Anchors 同步接收並記錄其到達時間。由於每個 Anchor 與 Tag 間的幾何距離不同，導致接收訊號時間略有差異，便可利用時間差進行距離差估測，計算公式如下：

$$\Delta d = C \times \Delta t = C \times (t_2 - t_1)$$

其中  $\Delta d$  為 Tag 與兩個 Anchor 間的距離差， $c$  為光速常數 (約  $3 \times 10^8$  m/s)，而  $t_1$ 、 $t_2$  分別為兩個 Anchor 接收到訊號的時間戳記。每一組時間差會對應到一條超雙曲線 (hyperbola)，Tag 的位置即位於滿足距離差的所有超雙曲線交點之處。當 Anchor 數量大於等於三時，系統即可透過多點三角定位 (Multilateration) 計算出 Tag 的絕對座標位置 (如圖 XX 所示)。與 ToF (Time of Flight) 或 AoA (Angle of Arrival) 等方法相比，TDoA 不需在移動端 (Tag) 實施精準時鐘同步，Anchor 間透過事先時間同步，Tag 僅需發送訊號即可完成定位流程。降低了硬體需求與計算複雜度，特別適用於資源受限的低功耗裝置。

Figure 8 : Diagram 1 of the ESP32 UWB DW3000

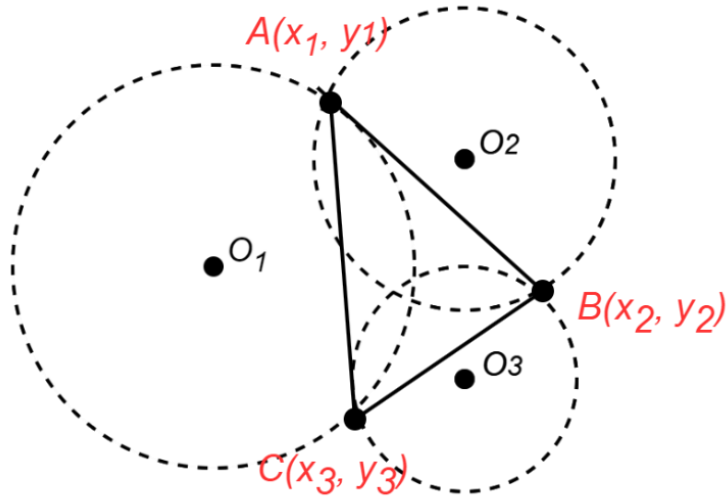


Figure 9 : Diagram 2 of the ESP32 UWB DW3000





Figure 10 : 三角定位原理示意圖



為進一步提高定位穩定性與動態追蹤準確性，系統亦整合 Kalman Filter 於多邊定位模組中。Kalman Filter 為一種基於線性高斯系統假設的遞迴式最佳估計方法，透過先驗預測與後驗觀測更新方式，在最小化均方誤差的前提下實現高效率的連續狀態估計。研究定義系統狀態向量如下：

$$x_k = [x \quad y \quad v_x \quad v_y]$$

其中， $x$  與  $y$  為目標位置， $v_x$  與  $v_y$  分別為對應軸向的速度。狀態轉移矩陣  $A$  建立於固定時間間隔  $\Delta t$  下之勻速移動假設，其轉移關係可表示為：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

觀測向量來自於經由 TDoA 計算之即時定位點  $z_k = [x, y]^T$ ，觀測矩陣  $H$  定義為：

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

也因此，Kalman Filter 的預測與更新方程分別如下所示：

預測階段：

$$\hat{x}_{k|k-1} = A\hat{x}_{k|k-1} \quad P_{k|k-1} = AP_{k-1|k-1}A^T + Q$$

更新階段：

$$K_k = P_{k|k-1} H^T (H P_{k|k-1} H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - H \hat{x}_{k|k-1})$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H) P_{k|k-1}$$

Kalman Filter 可針對連續時間序列下的雜訊與誤差進行平滑處理，有效補償因環境變化、多徑效應或觀測誤差所產生的位置漂移與突波。對於動態模型（例如等加速度模型）的動態更新，Kalman Filter 則能提供連續且穩健的估計軌跡。

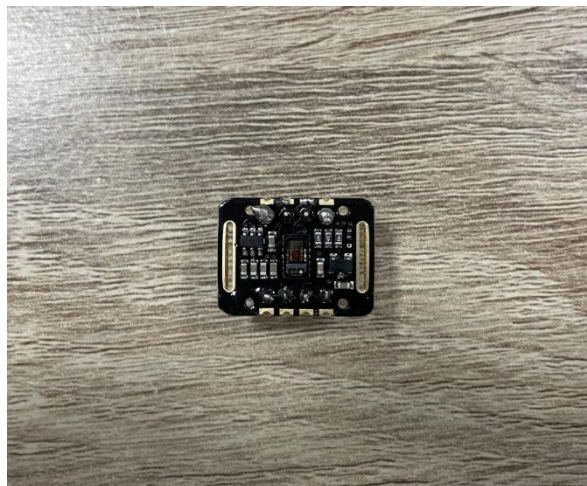
### 4.1.3 生理訊號感測模組

為了實現連續且非侵入式的個人生理監測，研究採用 MAX30102 與 AD8232 兩種感測器。MAX30102 為一種整合式光電容積描記法（Photoplethysmography, PPG）感測模組，內建紅光（660 nm）與紅外光（880 nm）LED 及光電二極體。能透過皮膚照射與反射原理，量測血液容積變化與含氧血紅素吸光差異，核心基於血氧飽和度（SpO<sub>2</sub>）與心率（Heart Rate, HR）在脈動血流造成的反射光強度週期變化。模組內部搭載類比前端與 18-bit ADC，可直接輸出數位化的 PPG 波形資料，透過 I<sup>2</sup>C 介面傳輸至微控制器。

由於含氧血紅素（HbO<sub>2</sub>）與去氧血紅素（Hb）在不同波長光下的吸收率不同，透過 Ratio-of-Ratios 模型可估算血氧飽和度（SpO<sub>2</sub>），公式如下：

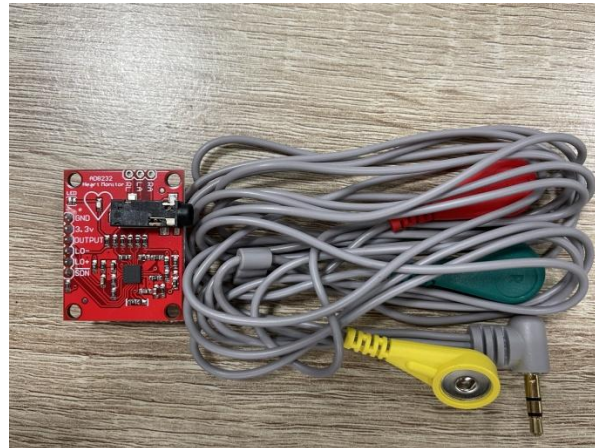
$$R = \frac{AC_{\text{Red}}/DC_{\text{Red}}}{AC_{\text{IR}}/DC_{\text{IR}}}$$

Figure 11 : MAX30102 Sensor



AD8232 為低功耗心電圖（Electrocardiogram, ECG）類比前端模組，支援單導程（Lead I）電位訊號擷取。其電路整合高增益放大器、低通與高通濾波器，能將人體心肌電活動所產生之微弱電位放大並穩定輸出。藉由電極貼片貼附於胸前區域，AD8232 可擷取 P 波、T 波等完整 ECG 波形，作為心律動態觀察與異常檢測基礎。AD8232 所測量之訊號，經由 ESP32 內建 ADC 轉換為數位訊號，進而計算心率（HR）與心律變異度（Heart Rate Variability, HRV）。

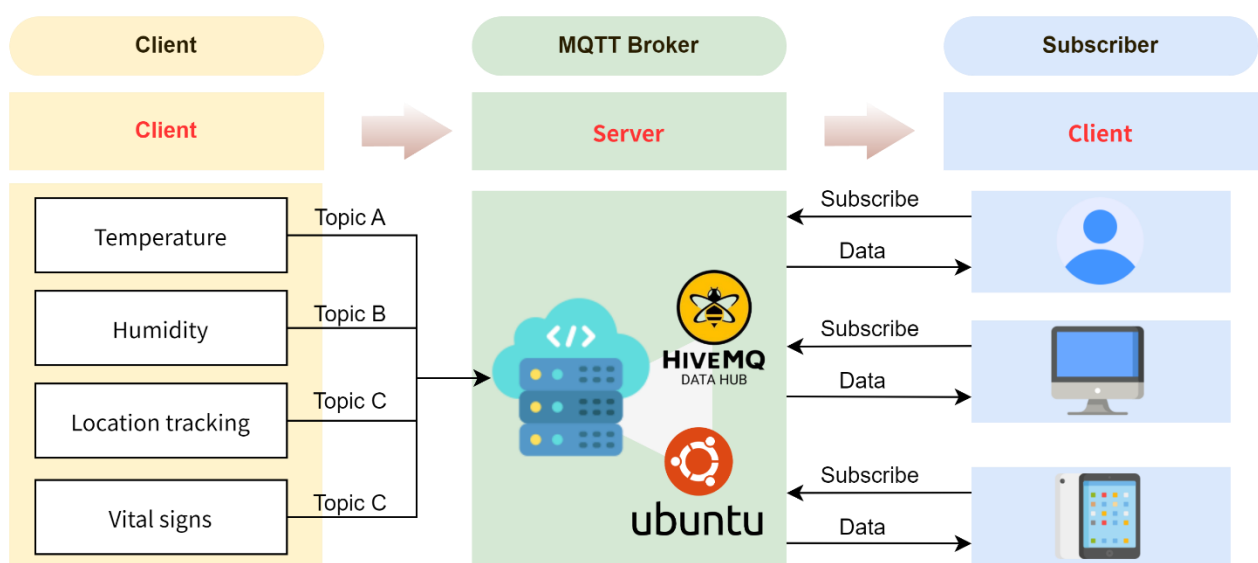
Figure 12 : AD8232 Senoer



## 4.2 通訊中介傳輸層（Communication Middleware Layer）

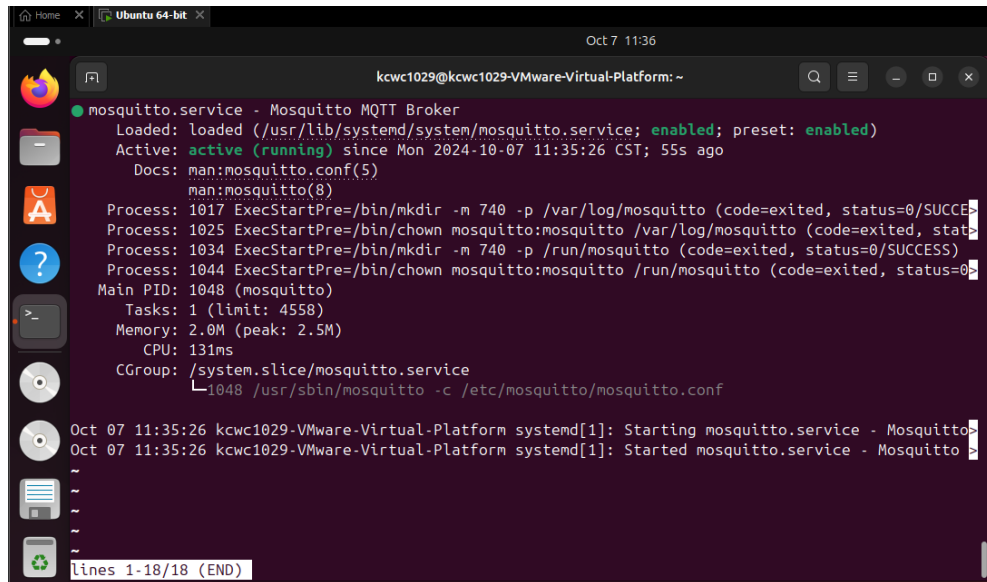
對於感測器與虛擬場景間的即時資料傳輸，本系統採用訊息佇列遙測傳輸協定（Message Queuing Telemetry Transport, MQTT）作為主要資料傳輸中介架構。MQTT 是一種基於發布（Publish）/訂閱（Subscribe）之輕量級應用層協定。適用於頻繁、小數據量、高即時性與低頻寬環境下的物聯網通訊需求。其核心結構由發布者（Publisher）、代理伺服器（Broker）與訂閱者（Subscriber）三個元件組成。

Figure 13 : MQTT 資料傳輸流程示意圖



在系統中，安裝於 ESP32-S3 微控制器上的各感測模組，定期將生理與環境資料封裝為 MQTT 訊息，透過 Mosquitto Broker 發布至特定主題 (Topic)。該 Broker 架設於 Ubuntu 虛擬機環境，接收來自多設備的即時訊息。Unity 則作為訂閱者，針對指定主題進行訊息接收與解析，進而同步更新虛擬場景中的數值呈現與互動狀態。

Figure 14 : Terminal Display of Mosquitto Server Status

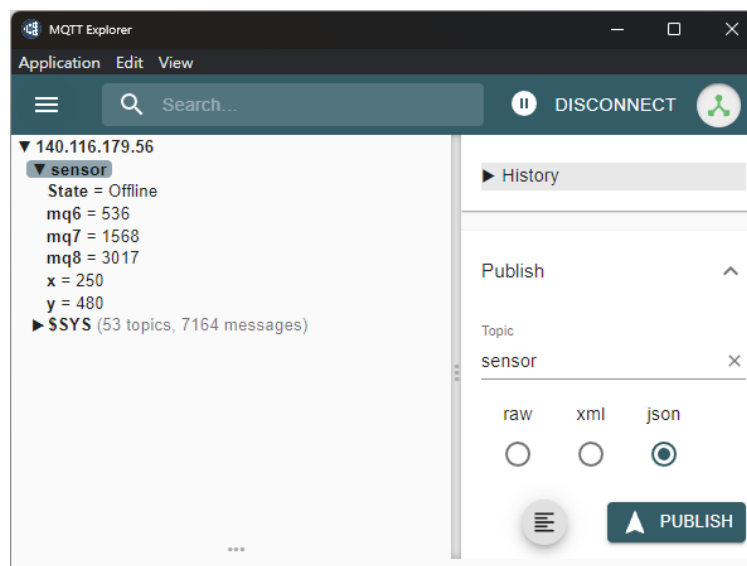
A terminal window titled 'Ubuntu 64-bit' showing the status of the 'mosquitto.service'. The output indicates the service is 'active (running)' and was started on 'Mon 2024-10-07 11:35:26 CST'. It lists the main PID as 1048 and shows the command being executed: '/usr/sbin/mosquitto -c /etc/mosquitto/mosquitto.conf'. The window also shows system logs for the service starting and running successfully.

```
mosquitto.service - Mosquitto MQTT Broker
Loaded: loaded (/usr/lib/systemd/system/mosquitto.service; enabled; preset: enabled)
Active: active (running) since Mon 2024-10-07 11:35:26 CST; 55s ago
Docs: man:mosquitto.conf(5)
      man:mosquitto(8)
Process: 1017 ExecStartPre=/bin/mkdir -m 740 -p /var/log/mosquitto (code=exited, status=0/SUCCESS)
Process: 1025 ExecStartPre=/bin/chown mosquitto:mosquitto /var/log/mosquitto (code=exited, status=0/SUCCESS)
Process: 1034 ExecStartPre=/bin/mkdir -m 740 -p /run/mosquitto (code=exited, status=0/SUCCESS)
Process: 1044 ExecStartPre=/bin/chown mosquitto:mosquitto /run/mosquitto (code=exited, status=0/SUCCESS)
Main PID: 1048 (mosquitto)
Tasks: 1 (limit: 4558)
Memory: 2.0M (peak: 2.5M)
CPU: 131ms
CGroup: /system.slice/mosquitto.service
        └─1048 /usr/sbin/mosquitto -c /etc/mosquitto/mosquitto.conf

Oct 07 11:35:26 kwcw1029-VMware-Virtual-Platform systemd[1]: Starting mosquitto.service - Mosquitto MQTT Broker.
Oct 07 11:35:26 kwcw1029-VMware-Virtual-Platform systemd[1]: Started mosquitto.service - Mosquitto MQTT Broker.
```

MQTT 的設計支援三種品質服務等級 (Quality of Service, QoS)：At most once (QoS 0)、At least once (QoS 1) 與 Exactly once (QoS 2)。與傳統基於輪詢的 REST API 或 HTTP 模式相比，MQTT 具有更低的封包開銷與連接管理負擔，顯著降低系統網路資源消耗，並提升資料即時傳遞效能。系統中不同感測器資料分別對應如 sensor/hr1, sensor/spo2, sensor/temp 等子主題，使得虛擬場景能依據不同生理訊號進行對應的情境模擬與介面互動。

Figure 15 : MQTT Explorer Subscription Interface



### 4.3 異常推理層（Anomaly Inference Layer）

異常偵測（Anomaly Detection）意指在數據中識別不符合預期行為的模式。這些不符合預期的模式通常被認為是問題的表現，並可能預示著某種風險或異常狀況的發生。不同的異常偵測類別如表 XX 所示。常應用於信用卡欺詐檢測、網絡安全入侵檢測、工業設備故障偵測、以及保險或醫療健康監測等。

Table 2 : Summary of anomaly types with definitions, detection methods, and references

種類	定義	常用偵測方法／ 型態	相關文獻
點異常（Point Anomalies）	單一資料點相較於其他點明顯異常，如瞬間濃度突升。	z-score、Isolation Forest、LOF、統計檢定	Kim et al., (2024)
集體異常（Collective Anomalies）	一群資料點即使單看不異常，但整體偏離正常模式，例如一段時間持續異常波動。	CAPA、LSTM-based detection、Sequential anomaly detection	Erkuş & Purutçuoğlu (2023)
模式異常（Pattern Anomalies）	資料行為模式本身與常規不同，像多個環境參數同時改變的非常規模式。	模式挖掘、頻繁項目組合	Park & Jang (2024)
情境異常（Contextual Anomalies）	在特定條件下才異常，如同一濃度在不同月份的意義不同。	Context-based、Bayesian	Birihanu & Lendák (2025)
連續異常（Sequential Anomalies）	連續資料段出現顯著不同於其他時間段的行為，如事件對計程車需求產生長時間異常。	LSTM、segment change point detection	Park & Jang (2024)

對於氣體濃度、溫度等環境感測資訊，其變化通常具有即時性且高度敏感的特性，因此需要能夠快速識別出單個數據點的異常狀況。基於這些需求。研究選用點異常（Point Anomalies）偵測作為主要方法，以便即時辨識出單個時間點上可能的異常變化。

為了實現精確而迅速的點異常偵測，我們選擇了孤立演算法（Isolation Forest）作為辨識手段。IF 是一種無監督的異常偵測方法，能夠根據數據分布迅速有效地辨識異常數據點，適合處理單個或少數樣本顯著異於其他樣本的情況。在 IF 中，數據集會被決策樹（Decision Tree）遞迴隨機劃分，直到每個數據點被孤立。異常點通常會靠見孤立樹（iTree）的根結點；而合理點則會遠離孤立樹的根節點。在 IF 中，每棵樹（iTree）透過隨機選擇一個特徵  $q$  和一個分割



值  $p$ ，將資料點  $x$  遞迴地劃分成左右子樹。若  $x[q] < p$ ，則進入左子樹  $T_l$ ，反之進入右子樹  $T_r$ ，直到：

- (1) 節點上的所有數據具有相同的值
- (2) 節點上只有一個資料點  $x$
- (3) 每棵樹 (iTree) 達到限制高度

而樣本  $X$  的路徑長度  $h(x)$  是透過根節點遍歷 iTree 到外部節點的根數衡量。路徑長度  $h(x)$  對應隔離敏感度，較短的  $h(x)$  意味隔離敏感度愈高。計算樣本  $X$  的異常分數  $S$  公式如下：

$$s(x, n) = 2^{\frac{E(h(x))}{c(n)}}$$

其中  $E(h(x))$  為樣本  $X$  的平均路徑長度 (從多棵隨機 iTree 中取得)， $n$  為樣本總數， $c(n)$  對應於  $n$  筆資料的平均路徑長度常數，用來標準化期望值。其公式為：

$$c(n) = 2H(n-1) - \frac{2(n-1)}{n}$$

其中  $H(i)$  是第  $i$  個調和數，近似為  $\ln(i) + \gamma$ ， $\gamma \approx 0.5772$  是歐拉-馬歇羅尼常數 (Euler-Mascheroni constant,  $\gamma$ )。

#### 4.4 語意行為推理層 (Semantic Behavior Reasoning Layer)

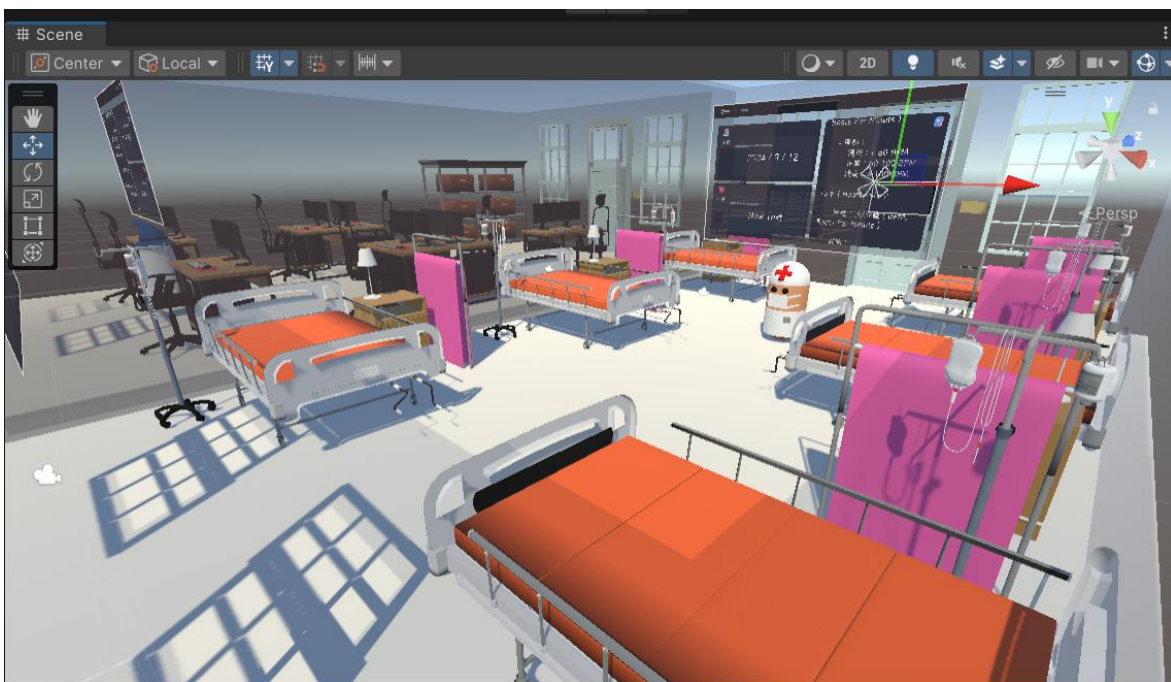
為了實現異常檢測數據推論高階語意行為敘述的轉換。系統將異常偵測所標定的異常事件與來自現場感測器之即時資料進行語意整合，並透過大型語言模型 (LLM) 進行敘事轉譯。最終傳遞至 Unity 虛擬環境中觸發對應視覺回應，實現具認知意涵的即時行為辨識與提示。系統採用 Meta 所開發的 LLaMA 3.2 3B 模型，其基 Transformer 架構。透過因果語言建模 (causal language modeling) 學習長距語境中詞彙的共現與邏輯關聯。模型在預訓練階段已具備語境推理與語句生成能力，但原始語料來自一般領域，對於醫護模擬場域中複雜的空間語義、感測資訊與異常敘述關聯，理解能力有限。為了提升模型對特定領域語境的適配性，研究透過 LoRA (Low-Rank Adaptation) 進行語意微調 (semantic fine-tuning)，包含教師針對模擬異常的實際敘述、操作語境與風險語意標註，強化模型對異常語義的判別能力，與增強 LLM 對虛擬模型中腳色的描述準確性。

LLM 所產生之自然語句，經由 MQTT 傳送至 Unity 模擬呈現。Unity 是一款功能強大的遊戲開發引擎，具備三維場景建構、物理模擬和即時渲染等功能，廣泛應用於各種虛擬現實和增強現實領域。本研究使用 Unity 建構模擬病房環境的整合式模擬學習平台。讓學習者能夠了解環境變化對病患健康狀態的影響。

Figure 16 : Diagram 1 of Simulated Ward Environment Construction



Figure 17 : Diagram 2 of Simulated Ward Environment Construction



為了進一步增強學習效果，Unity 中還加入了護理人員的即時位置，表現護理人員在 Unity 場景中的移動和感測器數據的即時顯示。學習者可以直觀地觀察護理人員在不同情況下的位置變化，增強了場景的真實感和沉浸感，幫助學習者更有效地學習如何應對各種突發狀況。

Figure 18 : Real-Time Environmental Sensor Display Interface

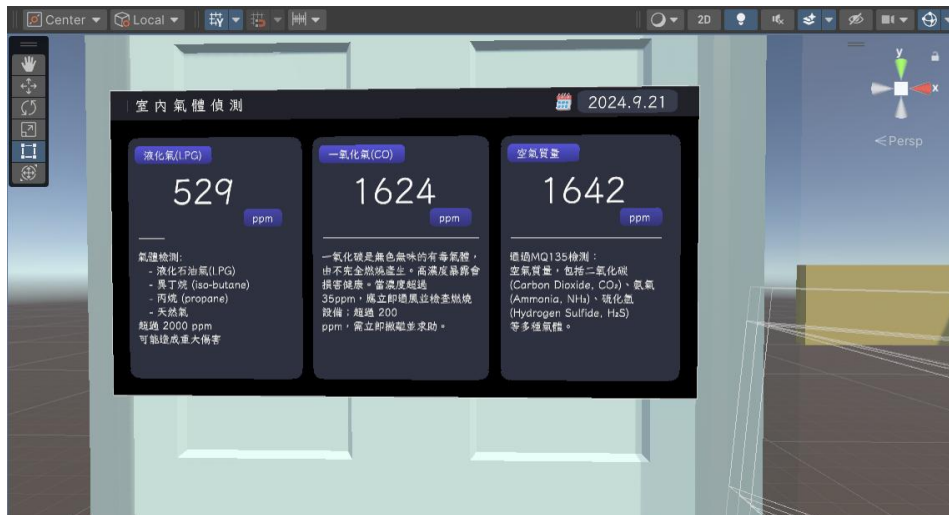
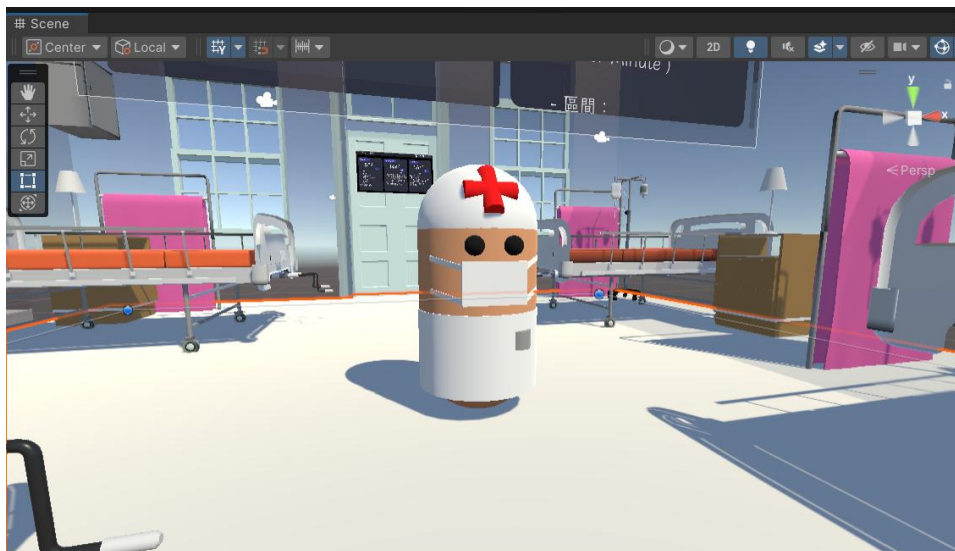


Figure 19 : Virtual Agent Interaction and Prompt-Driven Demonstration



## Chapter 5 Methodology

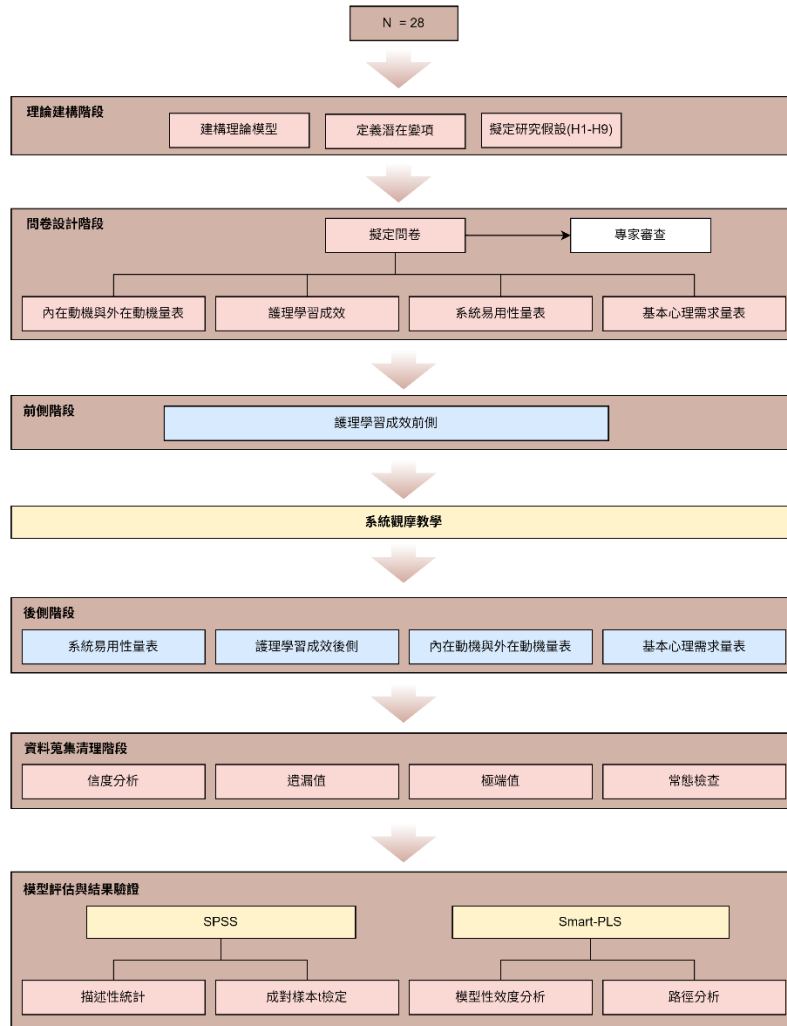
### 5.1 Participants

本研究共招募 28 位來自台灣南部某護理學校之實習護理生，皆為臨床實習經驗五年內的初階學習者，年齡介於 20 至 28 歲。參與者正處於專業護理培訓初期，具備基本理論知識，然實務經驗尚淺，正值技能建立與自我效能發展的關鍵時期。鑑於本研究旨在探討數位雙生技術對照護教育成效的影響，此階段學習者因實務與理論之間存在落差，故為評估新興教學技術介入成效的適切對象。數位雙生技術可望作為有效模擬工具，提升其應對實際照護情境之能力。研究進行前，研究團隊已向所有受試者完整說明研究目的、參與方式與權益保障，並取得其書面同意。本研究全程遵循教育研究倫理原則，強調受試者的參與自主性、個資保密與隨時退出之權利。

### 5.2 Experimental Design

研究流程如圖 XX 所示：研究採用單組前後測設計（single-group pretest–posttest design），旨在評估以 DT 與 LLM 核心的模擬學習系統對護理學生在學習成效、動機、系統認知與心理需求滿足等潛在變項上的影響。整體實驗流程分為理論模型建構、量表設計與驗證、前測實施、教學介入、後測施測，以及模型驗證與統計分析共六個階段。

Figure 20：實驗設計流程圖



在教學活動進行前，所有參與者需填寫學習成效前測量表，作為後續比較依據；活動介入結束後，參與者完成學習成效後測量表、系統易用性感受量表、內在與外在動機量表與基本心理需求滿足量表，量表皆採五點李克特量表李克特量表評分(1= 非常不同意,5= 非常同意)作為尺度依據。為處理與分析所得數據，研究採用 SPSS 26.0 作為前處理與初步統計分析工具。檢查資料完整性，排除遺漏值與極端離群值，並確認變項常態分布。並以 Cronbach's  $\alpha$  評估量表各構面的內部一致性，確保其信度達可接受水準。最後透過成對樣本 t 檢定檢視整合式模擬學習平台在學習成效上的影響是否具統計顯著性。

在結構模型建構與假設驗證方面，研究選擇使用 SmartPLS 4.0 作為主要分析工具，進行偏最小平方方法結構方程模型（Partial Least Squares Structural Equation Modeling, PLS-SEM）估計。PLS-SEM 為一種以變異最大化為目標的預測導向方法，特別適用於樣本數量較少、資料分布非正態，或研究模型結構較為複雜(如多層中介、多重形成式構念)之研究情境。相較於 AMOS、LISREL 等以共變異數為基礎的結構方程模型（Covariance-Based SEM, CB-SEM），PLS-SEM 不強制要求資料符合多變量常態分布，且對於測量錯誤的處理更具彈性。此外，PLS-SEM 在進行形成式構念（formative construct）建模上具備方法論上的優勢，允許研究者以指標組合定義構念，而非由構念反映指標，這一點對於教育與心理研究中常見的結構變項具高度適配性。



在 SEM 估計過程中，會先檢驗各指標之負荷量、組合信度（Composite Reliability）、平均變異抽取量（Average Variance Extracted, AVE）以及構面間區別效度（Fornell–Larcker 準則與 HTMT 值）等模型信效度。並透過 bootstrapping 重抽樣估算每一條結構路徑之參數、標準誤與 t 值，以判斷假設成立與否。同時報告模型之決定係數（ $R^2$ ）、效果量（ $f^2$ ）與預測關聯（ $Q^2$ ），作為模型整體適配性與預測效能的衡量指標。藉由 SPSS 與 SmartPLS 雙軟體的搭配運用，研究得以在描述性統計與結構推論層面皆具備嚴謹與細緻的驗證基礎。

### 5.3 Measurement Instrument

為評估研究對象在使用數位學生學習系統後的學習成效，本研究由兩位護理相關背景教師共同設計一份護理生數位學生學習成效量表（如 Appendix A 所示），針對 Geriatric Care Education 中認知、技能、態度與自我效能四個維度進行評量。量表共包含 12 項題目，採用五點式李克特量表（1 = 非常不同意，5 = 非常同意）。量表的內部一致性經由 Cronbach's  $\alpha$  檢定（ $\alpha = 0.83$ ）符合 Tavakol & Dennick (2011) 所建議之信度標準（ $\alpha \geq 0.80$ ），顯示量表具良好信度。

為衡量整合式模擬學習平台的互動體驗與易用性，研究基於 Bangor et al., (2008) 所設計系統易用性量表（SUS Scale）進行修改（如 Appendix B 所示）。主要測量研究對象在使用系統時的滿意度和易用性。量表共包含 10 項題目，採五點式李克特量表評分（1 = 非常不同意，5 = 非常同意），量表的內部一致性經由 Cronbach's  $\alpha$  檢定（ $\alpha = 0.84$ ）符合 Tavakol & Dennick (2011) 所建議之信度標準（ $\alpha \geq 0.80$ ），顯示量表具良好信度。

學習動機方面，研究基於 Duncan & McKeachie (2005) 所設計的學習動機量表（Motivated Strategies for Learning Questionnaire, MSLQ）進行修改（如 Appendix C 所示）。量表共包含 8 項題目，4 項內在動機（Intrinsic Motivation）與 4 項外在動機（Extrinsic Motivation）。採五點式李克特量表評分（1 = 非常不同意，5 = 非常同意）。量表的內部一致性經由 Cronbach's  $\alpha$  檢定（ $\alpha = 0.83$ ）符合 Tavakol & Dennick (2011) 所建議之信度標準（ $\alpha \geq 0.80$ ），顯示量表具良好信度。

最後，為探討學習者於使用過程中是否滿足自我決定理論（SDT）所提出的三大心理需求，研究基於 Schutte et al., (2018) 所設計的基本心理需求量表（Basic Psychological Needs Scale, BPNS）進行修改（如 Appendix D 所示）。量表包含自主性（autonomy）、勝任感（competence）與關係感（relatedness）三個面向共 15 題。自主性（autonomy）檢設良學習者在使用系統中，心理自我效能的程度，例如「我經常感覺自己能夠自由決定如何應用數位學生技術」；勝任感（Competence）測量學習者在使用系統時，對於自身能力的感受，例如「我能很好地應用數位學生技術進行工作」；關係感（relatedness）測量學習者與同儕在使用系統過程中的互動關係和情感連結，例如「我非常享受與其他同學一起討論如何使用數位學生」。研究採五點式李克特量表評分（1 = 非常不同意，5 = 非常同意）。量表的內部一致性經由 Cronbach's  $\alpha$  檢定（ $\alpha = 0.87$ ）符合 Tavakol & Dennick (2011) 所建議之信度標準（ $\alpha \geq 0.80$ ），顯示量表具良好信度。

## Chapter 6 Result

在模型驗證階段，研究使用 SPSS 26.0 與 SmartPLS 4.0 進行結構方程模型（SEM）分析，以建構理論模型並量化潛在變數之間的互相關係，從而探索數位雙生模型在照護教育中的應用效果。

### 6.1 系統易用性之描述性統計

在系統本身使用性方面，研究針對系統易用性量表進行描述性統計。研究結果指出：學習者在整體易用性感受量表的平均得分為 4.10（ $SD=0.23$ ），表示系統設計具備良好之直覺性與使用便利性。相對較低的標準差值亦指出受試者之間對系統易用性的觀感差異不大，呈現高度一致的正向體驗，為後續探討學習成效與使用動機奠定良好基礎。

Table 3：系統易用性之描述性統計

	Mean	SD	N
SUS Scale	4.10	0.23	28

### 6.2 學習成效之成對樣本 t 檢定分析

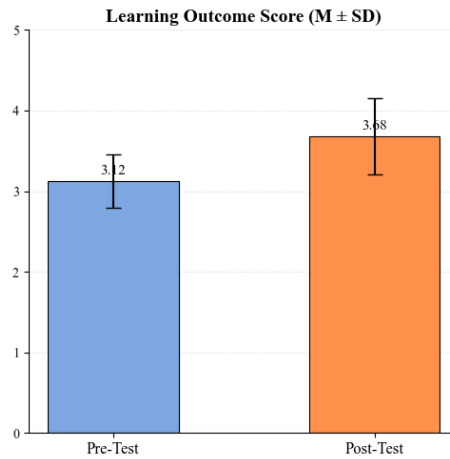
為了探究本系統介入是否可以影響學生的學習成效，研究使用成對樣本 t 檢定進行檢定。研究結果如表 XX 與圖 XX 所示：學習者在系統介入後之學習成效得分（ $M = 3.68, SD = 0.47$ ）顯著高於介入前的得分（ $M = 3.12, SD = 0.33$ ），差異達統計顯著（ $t = -4.756, p < .001^{***}$ ）

Figure 21：學習成效之成對樣本 t 檢定

	Mean (SD)		t	df	P
	前側 (n=32)	後側 (n=32)			
學習成效分數	3.12 (0.33)	3.68 (0.47)	-4.756	27	<.001***

\*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$

Figure 22：學習成效之描述性統計



### 6.3 模型與假說驗證

本研究依循 **Anderson & Gerbing (1988)** 所設計之兩階段方法 (Two-step approach)，透過結構方程式 (SEM) 探討模型中各變數之間的內部一致性信度 (Cronbach's Alpha)、收斂性度 (rhoA)、組合信度 (Composite Reliability, CR) 與均變異抽取量 (Average Variance Extracted, AVE) 作為模型評估標準。

收斂性度 (rhoA) 意指多項測量指標是否能有效反映相同的潛在變數 (latent construct)。具良好收斂效度的指標應呈現高度相關性，顯示其可共同聚焦於特定構念。透過評估收斂效度，可進一步驗證所採測量工具之信度與效度。

各維度結果如表 XX 所示：其中合成信度 (CR) 皆大於 0.7，且平均變異抽取量 (AVE) 皆大於 0.5，符合之建議，表明該模型具備良好的收斂效度。

Table 4：結構方程式 (SEM) 之各構面性效度

	Cronbach's Alpha	rho A	CR	AVE
Interaction Experience (IE)	0.88	0.91	0.92	0.61
Intrinsic Motivation (IM)	0.72	0.82	0.83	0.74
Extrinsic Motivation (EM)	0.78	0.82	0.85	0.60
Competence (C)	0.76	0.77	0.84	0.67
Relatedness (R)	0.79	0.92	0.85	0.59
Autonomy (A)	0.63	0.65	0.77	0.68

區別效度 (Discriminant Validity) 意指模型是否能清楚區分各維度。如果維度之間相關性過高，意味維度標存在重疊。研究依據建議，依據兩項標準來確認區別效度：(1) 各維度之負荷 (Cross Loading) 應大於在其他維度上的負荷值。(2) 各維度之 AVE 之平方根應大於其他矩陣相關係數。研究結果如表 XX 與表 XX 所示：本研究符合以上兩項指標，表明該模型具備良好的區別效度。

Table 5：結構方程式（SEM）之各構面交叉負荷（Cross Loading）

	SUS	IM	EM	C	R	A
Interaction Experience (IE)	<b>0.82</b>	0.34	0.3	0.28	0.27	0.25
Intrinsic Motivation (IM)	0.36	<b>0.78</b>	0.29	0.31	0.33	0.28
Extrinsic Motivation (EM)	0.29	0.28	<b>0.81</b>	0.27	0.25	0.26
Competence (C)	0.33	0.3	0.28	<b>0.85</b>	0.34	0.31
Relatedness (R)	0.28	0.32	0.31	0.36	<b>0.84</b>	0.3
Autonomy (A)	0.25	0.29	0.27	0.3	0.28	<b>0.77</b>

Table 6：結構方程式（SEM）之相關係數矩陣與 AVE 根號值

	SUS	IM	EM	C	R	A
Interaction Experience (IE)	<b>0.81</b>	0.56	0.5	0.48	0.45	0.42
Intrinsic Motivation (IM)	0.56	<b>0.78</b>	0.49	0.46	0.43	0.41
Extrinsic Motivation (EM)	0.50	0.49	<b>0.75</b>	0.42	0.4	0.38
Competence (C)	0.48	0.46	0.42	<b>0.80</b>	0.47	0.44
Relatedness (R)	0.45	0.43	0.4	0.47	<b>0.76</b>	0.43
Autonomy (A)	0.42	0.41	0.38	0.44	0.43	<b>0.72</b>

## 6.4 模型路徑分析

路徑分析著重探究於維度之間的關係強度。路徑係數可以幫助我們清楚了解不同維度之間是如何相互影響。研究在路徑分析中採取  $R^2$  與  $p$  值作為指標依據。 $R^2$  代表外在變數 (Exogenous Variable) 能解釋內在變數 (Endogenous Variable) 變異的程度，可以幫助我們了解到模型各維度之間能解釋多大比例的變異。是評估模型整體解釋力的一項重要標準。依據 Hair et al., (2019)) 之建議，採用拔靴法 (Bootstrapping) 進行 5000 次抽樣。結果如圖 XX 與表 XX 所示：

H1「DT 的互動經驗能激發內在動機」具正向影響獲得支持 ( $\beta = 0.68, t = 3.56, p < .01$ )，高品質的系統互動有助於提升學習者的內在驅力；但 H2「DT 互動經驗對外在動機具正向影響」不成立 ( $\beta = 0.22, t = 1.55, p = .541$ )，表示情境互動未能顯著激發以外在誘因為主的動機。

在內在動機部分：H3「內在動機對能力感具正向影響」成立 ( $\beta = 0.75, t = 4.22, p < .001$ )，反映當學習者對任務產生內在興趣時，能顯著強化其自我效能感；然而 H4「內在動機對關係感具正向影響」未達顯著 ( $\beta = 0.19, t = 1.71, p = .213$ )，表示內在動機並不直接影響其人際連結感知。

而外在動機部分：H5「外在動機對能力感具正向影響」成立 ( $\beta = 0.38, t = 2.05, p < .05$ ) 與 H6「外在動機對關係感具正向影響」亦獲支持 ( $\beta = 0.58, t = 3.02, p < .01$ )，說明外部回饋與



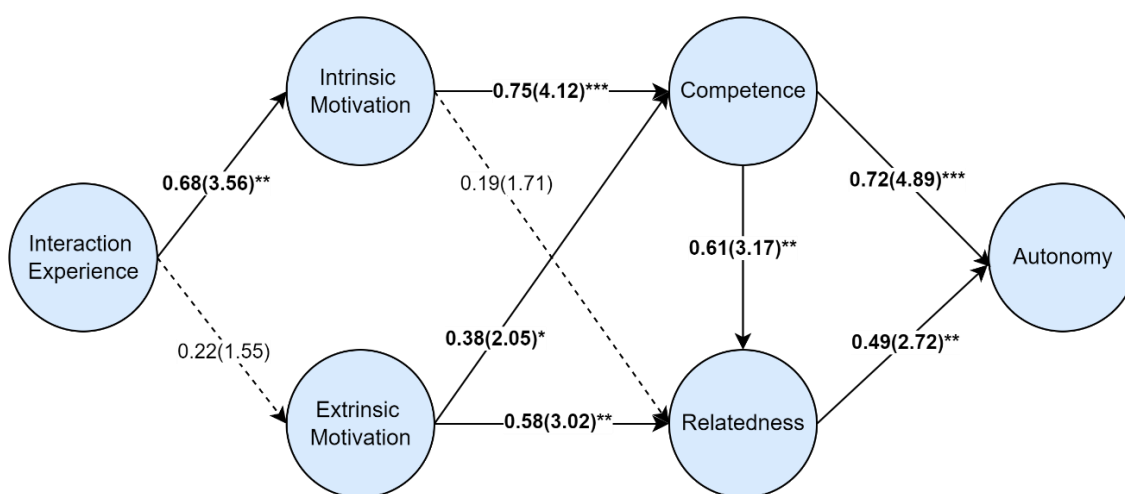
誘因能有效強化學習者的社會互動與能力建構。

在 SDT 部分：H7「能力感對關係感具正向影響」顯著（ $\beta = 0.61, t = 3.17, p < .01$ ），顯示個體在建立自我能力評價後，對人際互動連結的正向感知亦會隨之提升；H8「能力感對自主感具正向影響」則展現最強路徑（ $\beta = 0.72, t = 4.89, p < .001$ ），代表能力形成為推進自主學習的重要基礎。而 H9「關係感對自主感具正向影響」也獲支持（ $\beta = 0.49, t = 2.72, p < .01$ ），指出良好的社會支持環境能增強學習者的主動性與選擇感。

Table 7：研究模型路徑係數

	Original Sample	Sample mean	STDEV	T	p
Interaction Experience → Intrinsic Motivation	0.68	0.67	0.19	3.56	<.01**
Interaction Experience → Extrinsic Motivation	0.22	0.24	0.14	1.55	0.541
Intrinsic Motivation → Competence	0.75	0.74	0.18	4.22	<.001***
Intrinsic Motivation → Relatedness	0.19	0.21	0.11	1.71	0.213
Extrinsic Motivation → Competence	0.38	0.36	0.16	2.05	<.05*
Extrinsic Motivation → Relatedness	0.58	0.59	0.15	3.02	<.01**
Competence → Relatedness	0.61	0.62	0.17	3.17	<.01**
Competence → Autonomy	0.72	0.71	0.19	4.89	<.001***
Relatedness → Relatedness	0.49	0.50	0.18	2.72	<.01**

Figure 23：研究模型路徑係數



\* $p < .05$ . \*\* $p < .01$ . \*\*\* $p < .001$ .



## Chapter 7 Discussion

(RQ01)

根據研究結果，參與者普遍對本研究所開發之整合式模擬學習平台表達正向的使用經驗。該結果與 [Romero-Castillo et al., \(2024\)](#) 觀點一致，SBL 若具備直觀操作與明確回饋，有助於學習者建立穩定操作習慣並增強內在動機。描述性統計上的低標準差亦反映參與者在系統易用性觀感上有高度一致性，呼應 [Keskitalo & Saukkoriipi \(2025\)](#) 關於模擬環境中互動品質與界面設計對於學習者參與行為具有預測性的理論觀點。

系統提供簡易上手的操作介面與即時反饋機制，對應 [Jose et al. \(2025\)](#) 所強調之自主性支持設計原則，進而提升使用者對學習歷程的掌控感。學習者能在有限練習時間內迅速掌握任務結構與操作邏輯，進而產生明確的學習成就感，亦與 [Stenseth et al., \(2025\)](#) 關於動態回饋與技能建構之研究結果一致。感知性介面輔助任務導引則與 [Liu et al. \(2022\)](#) 所提出的知覺提示能提升資訊聚焦與學習效率的發現相符。對於多數處於高壓與時間限制情境中的護理學生而言，穩定的介面設計與脈絡化回饋不僅能降低操作焦慮，也有助於建構一致且具支持性的學習體驗 ([Hwang et al., 2021](#))。

(RQ02)

在臨床知識的護理學習成效上，[整合式模擬學習平台](#) 的介入對於提升臨床知識具備實質效果。SBL 能透過情境再現與任務導向訓練，促進學習者對抽象知識的理解與應用 ([Komasawa, 2024; Zhao et al., 2024](#))。SBL 整合知識、操作與情境判斷三者之間的學習過程，學生不僅被動接受知識，亦能主動建構與內化學習內容 ([Gardanova et al., 2023](#))。[整合式模擬學習平台](#) 以互動情境提供學習者回饋機制與反覆演練，強化學生臨床思維與問題解決能力。以 SDT 觀點而言，當學生在學習過程中獲得勝任感 (competence) 的滿足，即能有效提升學習動機與知識吸收能力 ([Vansteenkiste et al., 2020](#))。逐步提升知識掌握與錯誤修正訊息可顯著強化臨床技能學習者之知識統整能力與自我效能感 ([Stenseth et al., 2025](#))。

(RQ03)

在探討互動經驗、動機與基本心理需求對於基本心理需求上，根據 SEM 指出：學習者在[整合式模擬學習平台](#)中的互動經驗顯著正向影響其內在動機。此結果與 [Jose et al. \(2025\)](#) 研究呼應。[整合式模擬學習平台](#)透過即時回饋、動態情境與感知式提示設計，激發學習者的參與感與掌控感，進而引發學習者對任務的內在興趣與探索意願。根據 SDT，自主性 (autonomy) 是產生內在動機 (Intrinsic Motivation) 的關鍵條件當使用者在互動過程中感受到行動自由與選擇控制，將更傾向於主動參與學習 ([Ryan & Deci, 2020](#))。然而在互動經驗與外在動機 (Extrinsic Motivation) 的交互上並未顯著。在本研究中，學習者的參與動機較少來自於外部誘因或報酬機制，而是受到情境參與與任務挑戰所驅動。結果與 [Clément et al. \(2024\)](#) 觀點呼應。當學習系統提供高度互動與主動選擇機會時，學習者傾向產生內在驅動，而非依賴外部

控制或評分標準。有助於教育者重新思考教學設計中的激勵機制，避免過度依賴獎懲制度而忽略學習者的內在需求。

內在動機（Intrinsic Motivation）顯著影響勝任感（competence）與 Stenseth et al., (2025) 在 SBL 中強調即時回饋與個別表現追蹤有助於強化勝任感（competence）觀點一致。當學習者對任務本身產生興趣與熱情時，將更易於獲得成功的學習體驗與技能掌握。然而內在動機（Intrinsic Motivation）並未影響關係感（relatedness）。可能原因在於平台屬於個別操作導向之模擬系統，缺乏明確的同儕互動或合作任務設計，致使學習者雖對內容產生興趣，卻難以在學習過程中建立人際支持或社會連結。關係感（relatedness）仰賴互惠互動與社會回應，而非僅靠個體內在動機驅動（Howard et al.,2021）。

相較之下，外在動機（Extrinsic Motivation）對勝任感（competence）與關係感（relatedness）皆具顯著正向影響。當學習者受到外部誘因、評量標準或教師監督所驅動時，亦可能透過努力達成目標而感受到能力建構的滿足。外在動機（Extrinsic Motivation）所引發的社交互動、團隊責任與學習回饋有助於建構學習者的人際歸屬與參與感（Almarwani et al., 2024）。

而在 SDT 層面上，勝任感（competence）顯著影響自主性（autonomy），此結果與 Vansteenkiste et al., (2020) 研究呼應。當學習者建立對自己能力的正向評價時，將更有意願主動投入學習活動，並展現出較高程度的學習自律與責任感。尤其在臨床模擬任務中，技能成功的正向回饋有助於強化學習者的內控信念與決策信心，進一步推進其學習主體性。關係感（relatedness）亦對自主性（autonomy）展現顯著影響。說明學習者在感受到被理解、被接納與被支持的情境中，更容易展現主動學習行為，也印證 Moll-Khosrawi et al (2021) 之觀點，SBL 中的反思活動與團隊合作設計有助於形塑學習者的關係感知，進而強化其行動的內在驅力。



## Chapter 8 Conclusion

本研究針對模擬學習平台介入護理教育之應用效果進行系統性探究，結果顯示模擬平台的設計不僅具備操作直觀、回饋明確等功能特性，更能有效回應學習者的認知與情意需求，進而促進其主動學習行為的形成。

從使用性層面觀察，學習者對於整合式模擬學習平台呈現高度一致的正面評價，顯示其在操作邏輯、任務指引與介面友善性方面具有良好表現。平台所提供的感知線索、互動回饋與視覺輔助機制能有效引導學習者聚焦於任務目標，強化其資訊擷取與操作掌控能力，並減緩高壓情境下所可能引發之學習焦慮。在學習成效面向，學習者在完成模擬任務後，對護理情境的判讀能力與反應策略均有明顯進步，顯示平台所創造的重複性操作與即時回饋環境，能促進知識的內化與技能的自動化歷程。此種以情境再現為核心的學習設計，提供學習者主動試誤、持續調整與反思修正的機會，有助於建構更為穩固且可轉移至實務現場的專業知識體系。

此外，研究透過 SEM 釐清互動經驗與自主學習傾向之間的中介歷程。整合式模擬學習平台的互動經驗若具備高品質特徵，將可顯著強化學習者之內在動機，進而促使其在能力感、關係感與自主感等心理需求層面獲得滿足，最終推動其自主學習傾向的形成。儘管內外動機皆可透過不同路徑影響學習歷程，但研究顯示內在動機對能力感的影響較外在動機為強，意味著學習者若能從任務本身感受到挑戰性與意義，將更能激發其深層投入與長期學習傾向。外在動機雖也對能力感與關係感具正向影響，但其作用力相對較為間接且依賴外部誘因。在設計未來的模擬學習系統時，應優先考量如何透過互動設計激發內在動機，進而建構一個促進心理需求滿足的動態環境，以鞏固學習者的主動性與持久學習動力。

儘管研究成果顯示正向成效，仍應注意其潛在限制。第一，研究樣本主要來自單一校系與特定學科背景，族群組成上以單一性別為主，樣本代表性仍有待擴展。此侷限可能影響研究結果之外部效度，未來可考慮延伸至不同性別、科別與教育階段，以檢驗模型適用性與廣泛性。第二，研究主要採用自陳式問卷蒐集動機與心理需求相關資料，仍可能受到受試者主觀判斷與社會期望影響，未能涵蓋潛在的非顯性認知歷程或實際行為變化。未來可結合多元資料來源，如學習歷程紀錄、行為追蹤與認知生理訊號等，提升資料的真實性與解釋力。第三，學習成效的評估主要聚焦於短期知識表現，尚未涵蓋中長期的知識保持、技能應用與職場轉化能力。模擬學習雖可在短期內提升理解力與參與度，但其對於臨床思維、專業判斷與職場適應的長效影響仍有待後續追蹤。若能建立長期追蹤機制，將有助於更全面評估模擬平台在職前教育中的實質效能與可持續性價值。

綜上所述，研究不僅回應當代護理教育對情境實作與學習動力並重的需求，更提供理論與實務整合的設計參考。未來若能持續深化系統功能、擴展學習情境與強化資料分析架構，將有助於建立更為精緻且具教育意義的智慧學習模式，推動護理教育向高層次素養導向與個別化支持並進的方向邁進。

## Chapter 9 Reference

## Chapter 10 Appendix

### 10.1 Appendix A 護理生數位孿生學習成效量表

題號	題目
認知面向 (Cognitive Gains)：學習是否提升知識理解與照護判斷力。	
CG01	我更能理解與辨識不同照護場域的環境風險與變化。
CG02	我學會如何根據環境感測資料做出初步判斷。
CG03	數位孿生模擬提升我對照護相關理論知識的掌握。
技能面向 (Skill Acquisition)：實務操作與應變處理能力是否提升。	
SA01	我能更有效地做出臨床模擬環境中的照護決策。
SA02	使用數位孿生系統訓練有助於我提升照護技能。
SA03	異常警示功能提升了我對突發狀況的應變能力。
態度與投入面向 (Engagement and Motivation)：是否因系統使用提升主動學習與興趣。	
EM01	使用數位孿生系統讓我更投入於照護訓練中。
EM02	模擬互動讓我對照護工作產生更多興趣與認同。
EM03	我會主動探索系統中的各種功能以增進學習。
自我效能面向 (Self-Efficacy)：是否增強對自己照護能力的信心。	
SE01	經由此學習，我對未來臨床實習感到更有信心。
SE02	我認為我能獨立處理簡單的照護任務與異常狀況。
SE03	我相信我具備了基本的環境風險評估與應對能力。

### 10.2 Appendix B 系統易用性量表 (SUS Scale)

Item	Statement
SUS01	我會願意經常使用這個數位孿生系統來了解病人狀況。
SUS02	我覺得這個數位孿生系統相對容易使用。
SUS03	我認為這個數位孿生系統操作起來很方便。
SUS04	當我使用數位孿生系統時，有人幫助我才能更好地使用它。
SUS05	我覺得數位孿生系統的功能設計非常符合長照需求。
SUS06	我覺得這個系統與我目前的需求相一致。
SUS07	我可以輕鬆掌握這個系統的大部分操作功能。
SUS08	我覺得這個數位孿生系統的使用流程非常順暢。
SUS09	我有自信能夠熟練地使用這個數位孿生系統。
SUS10	我需要額外的幫助才能完全了解並使用這個數位孿生系統。

### 10.3 Appendix C 學習動機量表 ( Motivated Strategies for Learning Questionnaire, MSLQ )

Item	Statement
內在動機 ( Intrinsic Motivation )：個體基於興趣、熱情或內在滿足感而自主進行一項活動	
IM1	當我使用數位學生技術進行學習時，我會專心投入。
IM2	我願意重複使用數位學生技術來了解患者的狀況。
IM3	我覺得數位學生技術在長照教育中非常有趣。
IM4	我希望有更多機會來學習數位學生技術在長照中的應用。
外在動機 ( Extrinsic Motivation )：個體受到外部誘因或壓力驅使而從事活動，其目的是獲得獎賞或避免懲罰，而非活動本身的樂趣。	
EM1	我覺得使用數位學生技術來學習是件挑戰的事情。
EM2	即使數位學生技術很容易使用，我仍然不太想去使用它。
EM3	數位學生技術對我來說吸引力不大，除非有實際需求。
EM4	要我專注於使用數位學生技術並不容易。

### 10.4 Appendix D 基本心理需求量表 ( Basic Psychological Needs Scale, BPNS )

Item	Statement
自主性 ( autonomy )：學習者心理自我效能的程度	
C1	我的同事認為我能很好地應用數位學生技術進行工作。
C2	我有能力學會如何使用數位學生技術來改善長照中的患者管理。
C3	當我使用數位學生技術時，很多時候我能感受到自己的成就感。
C4	我經常感到在使用數位學生技術時能力不足。
C5	在日常工作中，我沒有太多機會展示我在數位學生技術方面的能力。
勝任感 ( competence )：學習者對於自身能力的感受	
R1	我非常享受與同事一起討論如何使用數位學生技術。
R2	我與其他使用數位學生技術的人通常能建立良好的合作關係。
R3	在應用數位學生技術時，同事們經常考慮到我的感受和建議。
R4	我的同事在數位學生技術的應用過程中對我都很友好。
R5	我覺得同事們在數位學生技術方面對我並不太友好。
關係感 ( relatedness )：學習者與同儕的互動關係和情感連結	
A1	在使用數位學生技術時，我經常感到有壓力。
A2	我通常很樂意表達自己對數位學生技術的想法和看法。
A3	在工作中，我經常需要被要求使用數位學生技術，而不是自願選擇。
A4	在使用數位學生技術時，我經常感覺自己能夠自由決定如何應用。



A5

我在應用數位孿生技術時，沒有太多機會自己決定具體的使用方式。