

從數位孿生到臨床應用： 以延展實境打造超音波導引手術 訓練平臺的沉浸式創新

郭庭均*

一、研究動機與背景：當傳統訓練遇上新興科技

(一) 臨床訓練的兩難：安全與實作的衝突

隨著現代醫療的進步與社會對病人安全意識的提升，傳統醫學教育中「學徒制」的臨床訓練模式正面臨嚴峻的挑戰。醫學生和年輕醫師過去透過在病患身上實作，從錯誤中學習的機會日益受限。醫療倫理的重視、醫療訴訟風險的增加，以及醫院對於訓練時數和場域的嚴格規範，使得新進人員的實作機會大幅銳減。

這種趨勢對於需要高度手眼協調和空間判斷力的「手術導向」臨床技能，特別是超音波導引下的侵入性處置，產生了顯著影響。超音波不僅是診斷工具，更是穿刺、切片、消融等精準介入治療的「視覺之眼」。然而，要熟練掌握這項技能，需要大量的、可重複的、且無風險的實踐。

(二) 科技的解答：延展實境 (XR) 與數位孿生 (Digital Twin)

近年來，以虛擬實境 (VR)、擴增實境 (AR) 和混合實境 (MR) 為核心的——延展實境 (eXtended Reality, XR)——技術迅速崛起。XR 能夠創造出高度沉浸感與互動性的虛擬或虛實整合環境，為醫學教育提供了突破困境的全新路徑。

本研究團隊長期深耕於內分泌與頭頸部腫瘤手術治療與醫學教育。我們觀察到甲狀腺疾病的普遍性與超音波在其中無可取代的重要性。因此，我們嘗試以使用者導向的設計思維，結合 XR 與人工智慧 (AI)，發展出一套全球首創、以「數位孿生 (Digital Twin)」為核心概念的甲狀腺超音波模擬教學模組，旨在建立一個高擬真、可重複、且能客觀評估的沉浸式訓練平臺。

* 國立臺灣大學醫學系外科臨床副教授、臺大醫院外科部主治醫師

(三) 核心概念：數位孿生 (Digital Twin)

本系統以「數位孿生」為核心，建立與臨床場景同步的虛擬分身。學員在實體模型上操作時，系統即時記錄其動作、器械位置、進針角度等數據，並在虛擬空間中建立精準的數位副本，與標準流程進行比對，提供毫秒級的精準回饋，讓使用者在「零風險」的環境下，熟練關鍵技能並即時修正錯誤。

二、教學模組設計與實施：虛實整合的沉浸式學習體驗

本教學模組的設計，是以認知學習理論與成人學習原則為基礎，採用「教學示範—引導練習—自主操作—回饋修正—再練習」的循環模式，並巧妙地整合了硬體、軟體與資料分析技術，創造出超越傳統的訓練環境。

(一) 高擬真實體模擬與多感官教具

1. 實體模擬頸部模型 (高擬真度)

利用高階 3D 列印與特殊矽膠材料，精細模擬頸部解剖結構，包括：甲狀腺、氣管、血管 (含模擬血流)、神經以及可穿刺的結節病灶。模型中嵌入了真實超音波可視材料，確保學員操作超音波探頭時，能在螢幕上獲得與真實人體無異的影像回饋。

2. 多感官強化教具 (趣味性與記憶)

為了提升學員對解剖空間的理解與趣味性，我們也使用了「食物解剖教具」，例如使用不同質地的果凍或肉類模擬甲狀腺組織以及腫瘤，進行剖切與探查，透過視覺、觸覺等多感官的體驗，增強學習者對組織結構差異的記憶強度與空間概念。

(二) 延展混合實境 (XR) 導引系統與跨平臺建置

本系統的核心在於其延展實境導引功能，它讓訓練不再受限於單一螢幕，而是將資訊「疊加」在實體模型上。

1. XR 空間對位與虛實整合

使用高階頭戴式顯示器 (例如 Microsoft HoloLens 或相似 XR 裝置)，透過空間對位系統，將複雜的解剖結構 (如血管走向、神經路徑)、標註資訊、操作步驟與 AI 輔助提示，即時疊加於實體模擬模型之上。學員可以一邊看著實體頸部模型，一邊看到虛擬的「透視圖」，達成真正手眼並用、虛實整合的訓練效果。

2. 跨平臺建置與遠距教學潛力

本模組的軟體設計具備高度的模組化與跨平臺兼容性。除了 XR 裝置，系統亦可支援平板 AR 或一般電腦螢幕。未來，結合 5G 與雲端串流技術，可發展為遠距教學模式，讓位處偏鄉或海外的醫學生和醫師，也能參與同步或非同步的模擬課程，打破醫療人才訓練的地理限制。

(三) AI 輔助與客觀技能評估

與傳統模型不同，本平臺具備強大的數據採集與分析能力，使教學評估從主觀經驗轉為客觀量化。

1. 數位回饋與操作紀錄

系統即時記錄學員的操作行為，包括：練習次數、總耗時、操作器械的路徑（如穿刺針軌跡）、進針的深度與角度、超音波探頭的移動穩定性等。並透過視覺化介面，提供即時回饋，協助學員立即修正技巧。

2. 深度學習 AI 評分系統

我們導入了深度學習（Deep Learning）模型，對學員操作進行客觀、量化的評分。評估維度涵蓋：目標病灶的定位準確性（是否正確避開重要結構）、進針穩定性（顫動幅度、路徑平穩度）與任務完成時間。這套 AI 評分機制，為教師提供一致且標準化的評估依據，也讓學員能清楚掌握自己的進步曲線。

三、成效評估與實證研究：XR 模組的卓越學習曲線

為了驗證本 XR 訓練模組的教學成效，我們針對第四年醫學生進行了一項嚴謹的準實驗研究，設計了三組進行比較：

組別	訓練模式	核心方法
傳統教學組	低度實作	紙本教材閱讀 + 教師口述示範
實體模擬組	中度實作	實體高擬真模型練習 + 教師示範
XR 延展實境組	高度沉浸式實作	XR 導引 + 實體模型 + AI 回饋完整操作

(一) 量化數據：顯著提升操作精準度與自信心

研究結果顯示，XR 延展實境模組在前後測分析中，三項關鍵指標的進步幅度皆顯著優於其他兩組。

1. 臨床技能信心量表：XR 組學員在訓練後對超音波導引處置的自信心提升幅度最大，這對於年輕醫師敢於承擔臨床任務至關重要。

2. **超音波影像辨識測驗**：XR 組在辨識複雜病灶、區分周邊重要解剖結構（如動靜脈、氣管、食道、喉返神經）的能力上表現最佳。
3. **實作操作評量表（由 AI 與盲法教師評分）**：尤其在操作技巧的精準度（進針點與路徑誤差）與穩定性方面，XR 組展現出最優異的表現。

（二）真實使用者的回饋：從緊張到自信的蛻變

本平臺已成功導入多場國內外臨床技能訓練課程，其最寶貴的價值來自於真實使用者的親身經驗。

1. 案例回饋

在一次超音波導引侵入性治療的教學演練中，一位缺乏經驗的 PGY 醫師因緊張導致穿刺針誤刺至錯誤的血管與神經附近。然而，在本平臺提供的 AI 即時錯誤偵測與 XR 視覺引導功能輔助下，他立即意識到操作錯誤，並能反覆觀看解剖結構、調整手法。經過兩週密集訓練後，該學員順利通過模擬測試。

學員回饋：「如果沒有這套系統，我根本不可能有上手的機會，也不會這麼快建立信心，更不敢自己嘗試操作。它讓我可以沒有病患風險的情況下，把所有可能發生的錯誤都犯過一遍，然後修正過來。」

學員回饋問卷亦顯示其對系統具備高度滿意度，認為系統具有互動性、真實感與學習效率。這些回饋不僅驗證了平臺的訓練成效，更凸顯了其能有效降低學習曲線、提升臨床操作信心與減少病人風險的價值。

四、倫理與永續：以人為本的模擬設計

本訓練平臺的設計，不僅考量了技術創新，更深刻體現了對倫理和永續發展的承諾。

（一）以數位取代消耗：永續與倫理的實踐

傳統的臨床技能訓練，常需仰賴昂貴且消耗性的材料，例如動物模型或高價人體解剖模型。這些模型不僅成本高昂，且涉及動物實驗的倫理爭議，同時也帶來環境負擔。

本系統透過「數位學生」技術，以高度擬真的數位模擬取代實體損耗。實體模型可重複使用，病灶（如結節）可透過虛擬疊加無限變換，不僅大幅降低了訓練成本，更重要的是：

1. **提升倫理性**：訓練過程完全不涉及動物實驗或人類遺體，符合當代醫學教育對倫理的最高標準。

- 2. 促進永續性：**減少一次性耗材的浪費，實現綠色、可持續的醫學教育模式。
- 3. 客製化訓練：**輕鬆客製不同難度、罕見病灶情境，提供比實體模型更廣泛、更多元的學習體驗。
- 4. 精準醫療／手術：**針對每位病患不同之病灶，可於術前無限次模擬演練，強化手術策略與準備。

(二) 臨床應用與跨領域協作的潛力

本模組雖以教學為出發點，但其核心技術具備延伸至臨床應用的巨大潛力。

- 1. 臨床操作導航：**未來可望與病房的即時超音波影像系統串聯，協助年輕醫師在實際病患身上操作時，提供即時的虛擬導航或 AI 輔助提示，降低罕見高風險操作的併發症風險。
- 2. 多單位跨領域協作：**此系統是典型的跨領域協作成果，由臨床醫師、醫學教育學者、工學院工程師與人機介面設計師共同開發。目前已與國立臺灣大學醫學院、加州大學聖地亞哥分校、哥倫比亞大學醫院等國內外單位展開多項合作計畫，持續強化演算法準確性與使用者體驗。

五、榮耀與展望：國科會亮點技術的未來藍圖

(一) 獲選國科會亮點技術與國際接軌

本團隊開發的「延展實境超音波導引手術訓練平臺」，因其高度創新性、明確的臨床價值與倫理永續性，榮獲國科會 2025 未來科技獎推薦為本屆重點推廣之亮點技術。

團隊受邀拍攝官方宣傳影片，並於國科會與活動官方網站上高規格推廣曝光，這不僅是技術實力的展現，更彰顯了其在提升臺灣醫療人才培育方面的社會價值與應用潛力。

(二) 專利布局與產業化落地

為了讓這項創新技術走出實驗室，並實現大規模應用，團隊已同步展開積極的多國專利布局：

- 1. 專利申請範圍：**涵蓋臺灣、美國、日本與歐盟等多個國家與地區。
- 2. 核心創新保護：**保護範圍包括模組設計、虛實整合系統、AI 即時輔助機制與客觀評分方法等核心創新。

我們正積極與國內外產業界洽談技術轉移與商品化，致力於推動技術孵化與臨床落地，期望將此平臺擴展至更多器官（如血管、淋巴結、體腔等），並最終導入至實際病房與全球教學醫院，真正發揮數位醫療的價值。

（三）結語：從模擬到臨床，科技讓醫學教育更溫柔

醫學是一門深具人文精神的專業，技術的革新不應只是「炫技」，而應回應臨床、病人與學習者的真實需求。

本研究團隊開發的 XR 模擬教學模組，透過結合數位學生與延展實境技術，成功地在病人安全與醫師訓練之間找到完美的平衡點。它不僅能提升年輕醫師的技能，更在無形中強化了他們的臨床同理心，因為他們在練習的過程中，無需承受對病患造成傷害的心理壓力。

我們相信，沉浸式醫學訓練是連結科技與人文的橋梁。未來，我們將持續優化此平臺，並歡迎來自教育、臨床與技術端的夥伴共同參與，建立一個以學習者為核心、可持續發展的醫學模擬教育新典範。