

超越視覺化：揭示擴增實境對產品設計機構學課程的學習情緒與學習成效之雙重影響

*馮嘉慧^{1,2}、林豪鏘¹、程筑鈺²、馮於懋²

¹國立臺南大學數位學習科技學系

²南臺科技大學創新產品設計系

*wanda@stust.edu.tw

摘要

本研究探討擴增實境（AR）技術應用於產品設計機構學課程對學習情緒與學習成效之影響。採準實驗設計，以 52 名產品設計系三年級學生為對象，分為實驗組（AR 輔助教學， $N = 23$ ）與控制組（2D 簡報教材， $N = 29$ ），進行六週教學介入。研究工具包含成就情緒量表（AEQ，涵蓋享受、希望、自豪三項正向情緒及憤怒、焦慮、羞愧、無望、無聊五項負向情緒）與基礎機構學習成就測驗，輔以半結構訪談深化情緒成因分析，並以獨立樣本 t 檢定及單因子共變數分析進行統計驗證。結果顯示：（1）學習情緒方面，實驗組正向情緒顯著高於控制組，負向情緒顯著降低（ $p < .05$ ， $\eta^2 = .558$ ）；（2）學習成效方面，以前測為共變項控制先備知識後，實驗組後測調整均值（62.78 分）顯著優於控制組（45.90 分）（ $p < .001$ ，Cohen's $d = 1.21$ ）。訪談結果顯示 AR 透過 3D 動態視覺化提升學習掌控感，進而降低焦慮與無聊情緒。本研究建構「情緒—認知—表現」整合架構，為設計教育數位轉型提供實證依據。

關鍵詞：擴增實境、機構學、學習情緒、學習成效、設計教育

Beyond Visualization: Unveiling the Dual Impact of Augmented Reality on Learning Emotions and Learning Achievement in Product Design Mechanisms Courses

*Chia-Hui Feng^{1,2}, Hao-Chiang Koong Lin¹, Chu-Yu Cheng², Yu-Mao Feng²

¹Department of Information and Learning Technology, National University of Tainan

²Department of Creative Product Design, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

This study examined the effects of applying Augmented Reality (AR) technology in a product design mechanisms course on students' learning emotions and learning performance. Using a quasi-experimental design, 52 third-year product design students participated in a six-week instructional intervention and were assigned to an experimental group (AR-enhanced group, $n = 23$) or a control group (2D presentation material, $n = 29$). Research instruments included the Achievement Emotions Questionnaire (AEQ, covering three positive emotions—enjoyment, hope, pride—and five negative emotions—anger, anxiety, shame, hopelessness, boredom), and a basic mechanism learning achievement test, supplemented by semi-structured interviews to deepen the analysis of emotional underlying causes. Statistical verification was conducted using independent-samples t -tests

Received: Oct. 12, 2025; first revised: Mar. 27, 2026; second revised: Apr. 20, 2026; accepted: Apr. 2026.

Corresponding author: .C.-H. Feng, Department of Creative Product Design, Southern Taiwan University of Science and Technology, Tainan 710301, Taiwan.

and one-way ANCOVA. The results revealed that: (1) regarding learning emotions, the experimental group exhibited significantly higher positive emotions and lower negative emotions than the control group ($p < .05$, $\eta^2 = .558$). (2) regarding learning performance, after controlling for prior knowledge using the pretest as a covariate, the adjusted posttest mean of the experimental group (62.78) was significantly superior to that of the control group (45.90) ($p < .001$, Cohen's $d = 1.21$). Qualitative interviews findings indicated that AR enhanced students' sense of control through 3D dynamic visualization, thereby reducing anxiety and boredom. This study constructs an integrated Emotion–Cognition–Performance framework, providing empirical evidence for the digital transformation of design education.

Keywords: Augmented Reality, Mechanism, Learning Emotions, Learning Outcomes, Design Education

壹、緒論

近年隨著人工智慧、虛擬實境（virtual reality）與擴增實境（augmented reality, AR）等沉浸式技術的迅速發展，產品設計與機構設計教育正逐漸朝向數位化與互動化的學習模式轉型。根據 Davila Delgado et al.（2020）的研究，AR 與 VR 在建築與工程領域的應用已被視為提升可視化、決策與操作效能的重要工具。在設計教育中，產品設計與機構類技術能使抽象的結構概念轉化為具體的操作體驗，促進學習者對空間構造與運動機制的理解（Hu et al., 2021）。此外，根據 Garzón et al.（2020）分析，AR 在教育中的運用已證實能顯著提升學習動機與學習成效，特別是在整合合作與探究式學習策略時效果尤為明顯。這些趨勢顯示，全球高等教育正從靜態的理論教學邁向以體驗為核心的數位互動教學，在產品設計與機械構造教育中，能回應產業跨域創新與實務技能的需求。

在這樣的教育與技術環境下，探討 AR 在設計學習中的應用具有技術革新的意義，也反映教育模式轉型的迫切性。Álvarez-Marín et al.（2023）指出，AR 能有效結合虛擬與真實環境，促進學習者對三度空間結構與力學關係的理解，進而提升工程教育的學習績效。然而，儘管多數研究證實 AR 在科學與工程領域的正面影響（Chu et al., 2020; Han et al., 2022; Solmaz et al., 2021），在產品設計相關領域中，關於 AR 如何影響學生學習情緒體驗的研究仍相對不足。由於設計教育強調創造性思維與情境感知，學習者的情緒參與與感知體驗往往是影響學習成效的關鍵因素（Gill et al., 2024）。因此，深入探討 AR 於設計教育中的情緒與學習表現，不僅能補足教育與設計領域的空缺，亦能為設計教育提供更具實證的教學模式。

當代設計科技學生多成長於數位原生世代，具備高度的視覺感知與互動媒介操作能力。沉浸式學習環境能激發學生在複雜機構與幾何學習中的主動探索與問題解決能力（Cui et al., 2025; Wang et al., 2018）。特別是在涉及空間推理與構造理解的課程中，AR 提供的即時視覺化與多感官回饋能有效降低認知負荷（Candido & Cattaneo, 2025），使學生能以更直覺的方式掌握機構原理與結構動態。此外，這類技術亦符合產業對設計人才跨域思維與數位整合能力的期待（Fan et al., 2024）。因此探討其在 AR 學習環境下的情緒變化與學習效能，不僅具備實際應用價值，也能回應教育數位轉型的社會需求。儘管過去的研究已廣泛探討 AR 於工程與製造教育的應用，如提升組裝效率（Chu & Ko, 2021）或支援工業訓練（Moghaddam et al., 2021），但針對學習情緒與動機層面的探究仍顯不足。Garzón et al.（2020）指出，多數 AR 教育研究偏重學習成就的量化分析，忽略了學習者的情感體驗與心理歷程。Hu et al.（2021）的研究顯示，非工程背景學生在使用 AR 學習結構系統時，情緒參與顯著影響其學習成果。由此可見，目前在設計教育領域中，如何結合情緒理論、學習動機與 AR 教學成效的整合研究仍屬缺口。此一缺口正是本研究的機會點，期望透過 AR 輔助的機構學教學活動，探討學生在學習過程中的情緒變化與學習表現之關聯，進而建構設計教育中情感與認知交互作用的理論模型。

綜合所述，本研究目的探討 AR 教學於產品設計學系機構課程中的學習情緒與學習成效影響。研究將比較簡報 2D 教材與 AR 輔助教學兩種模式在學習情緒體驗與學習成效上的差異，驗證 AR 於基礎機構

教學的學習情緒與教學成效。最終期望本研究成果能為設計教育現場，建立一個兼具理論與實踐價值的 AR 學習框架，促進設計人才在智能製造與跨域創新時代的專業發展。

貳、文獻探討

一、機械結構學習理論與模式

機構 (mechanism) 是由兩個或兩個以上的機件與接頭進行組合而成，是一種可動結構，在使用透過能量轉換的方式讓機件間保持相對運動，進而讓物體達到預期運動或限制運動之效果 (顏鴻森 & 吳隆庸, 1999)。機件又稱機械元件或剛體或抗力體，是一種不管受到任何外力，體內兩點間的距離都不會改變的物體，且大小、形狀、功能都不相同。在日常生活中的機件有無數種以下五大類應用為固定機件、傳動機件、連接機件、控制機件與流體機件，機構的運動型態旋轉、直線、曲線、搖擺運、間歇等運動。機構使用在專業機械應用上，在生活周遭產品上的整合應用如文具、玩具、工具、藝術創作與醫療領域。

工業 4.0 時代的未來工廠，一些少量系列或高客製化部件，也需要手動裝配，AR 輔助裝配，對於 AR 輔助評估是減少時間和錯誤，心智工作負擔也遠低於影片教學 (Loch et al., 2016)。擴增實境應用在複雜的機械組裝、維護和修理，不是藉由文字和圖片的說明，而是疊加在實際設備上的 3D 模型，顯示逐步步驟來完成任務，3D 模型亦可用動畫播放協助說明和指引，機構設計提供學習者新的空間對應學習方式，可視化輔助系統幫助學習者在空間對應，擴增實境技術應用在製造業培訓和智慧製造中可以協助技術人員訓練來越普及。

機械結構學習 (mechanism learning) 主要關注學生對機構運動原理、零組件關係與力學轉換的理解，屬於高度抽象與空間推理導向的學習領域。傳統教學多以平面圖說與靜態模型為主，使學習者在心理表徵與三維動態轉換間產生高認知負荷 (Wang et al., 2018)。學者普遍認為，學習者若能以具體操作與即時回饋方式建構動態心智模型，將有助於概念遷移與問題解決能力的發展 (Han et al., 2022)。本研究因此將機械結構學習界定為「結合認知與感知互動歷程，透過動態觀察與操作模擬以形成機構運作原理之心智表徵」，此定義強調視覺化與動覺體驗於理解過程的核心地位。

在教育心理學與工程教學領域，機構學學習理論可追溯至建構主義與多媒體學習理論。Sweller (1988) 的認知負荷理論與 Mayer (2022) 的多媒體學習理論皆指出，當教材結合文字與動畫時，可促進學習者以雙通道處理方式整合訊息，降低外在負荷並提升遷移表現 (Candido & Cattaneo, 2025)。Wang et al. (2018) 在互動式機構教學中發現，當學生以 AR 操作連桿機構或凸輪運動時，其對動力傳導與角度關係之理解顯著高於僅觀看靜態 PPT 者。此結果與 Solmaz et al. (2021) 在工程模擬輔助教學中的觀察一致，顯示動態視覺化與即時操控是促進深層理解的關鍵要素。這些研究奠定了將感知操作與認知推理結合的學習模式基礎，亦為本研究設計 AR 互動介面以支援機構學習的理論依據。

另一方面，機械結構學習理論強調動態視覺化與即時操作對概念理解的關鍵作用。簡報教材依賴學生將 2D 圖面內化為 3D 運動圖像，易造成理解落差與情緒挫折 (Chu & Ko, 2021)。相對地，AR 環境能以 3D 視角呈現機構運作，透過即時互動與多通道刺激降低外在認知負荷、提升正向情緒，促進心智模型形成與遷移學習 (Garzón et al., 2020)。此外，Cui et al. (2025) 針對設計課程發現，AR 輔助可提升創造性思維與結構推演表現，顯示機構學習不僅是技能訓練，更是多層次的認知建構與情緒調節歷程。

然而，過去研究亦呈現若干不足。部分研究指出 AR 學習並非在所有學習成就面向皆顯著，尤其在高複雜度任務中，學習者可能因介面交互過多而增加外在認知負荷 (Candido & Cattaneo, 2025; Moghaddam et al., 2021)。此外，Han et al. (2022) 指出，在操作性課程中，若缺乏指導策略，學生易陷於被動觀看，無法形成高層次概念思維，顯示機械結構學習需整合引導式探索與情境化實作，方能充分發揮數位科技的教育效能。基於上述理論框架，本研究假設在基礎機構課程中，AR 學習相較於傳統教材教學能帶來更高的學習成效與情緒投入。

二、AR 技術與教育應用

擴增實境 (augmented reality, AR) 具有基本特徵，由一個虛擬環境 (virtual environments) 或虛擬現實，沈浸與環境混成虛擬物疊加在現實世界的合成，特徵為真實和虛擬的組合、即時互動、以三維註冊與定位擴增實境 (Azuma, 1997)。資訊疊加 (digital overlay) 於真實環境之中，觸發即時 (real time) 互動視野，以行動裝置彈性和靈活方式來使用 AR 體驗，更發展使用共同視野 3D 深度感知 (depth-sensing) 攝影機轉譯環境，智慧型手機與 AR 配合已經是數位探索的延伸，能夠察覺情境脈絡 (context)，創造更深的沈浸感受，虛擬跟真實之間就更無界限，產生一種智能意識在環境中協助探索 (Papagiannis, 2017)。

教育上應用通常以將虛擬物件即時疊加並與真實情境互動為核心特徵，形成結合視覺、位置與時間對應的學習媒介 (Garzón et al., 2020; Wang et al., 2018)。AR 以行動載具或頭戴式裝置呈現之即時互動環境，透過標記 (marker) 或無標記追蹤於真實場域疊加機械結構與運動示意模型，支援操作觀察、參數操控與歷程回饋。AR 是教育環境中新的可視化技術之一，逐漸擴及到不同研究如醫療應用、細菌教學 (Hung et al., 2017)、物理磁性教學 (Liu et al., 2020)、植物細胞生物課程受到 AR 影響增進課程成功和學習動機影響 (Erbas & Demirel, 2019)，與物理力學上 (Yehia et al., 2022)，視覺和互動功能提供更好的呈現模式，使學習者的控制和反饋是解釋強化的學習者動機所的主要因素，教材高互動等於高度學習動機，這種互動式多媒體學習系統，將顯著提高使用者的學習態度，又可以增強學習者的學習成就 (Kettanurak et al., 2001)。

在教育重要性方面，研究指出 AR 能增進學習成就、動機與參與度，並特別在協作與探究導向的教學策略下展現較高效果 (Garzón et al., 2020; Wang et al., 2018)。產業面向亦將 AR 視為工業 4.0 與智慧製造的人機協作關鍵技術，可用於流程可視化、知識傳遞與現場訓練，帶動教育與職場接軌 (Eswaran & Bahubalendruni, 2022; Fan et al., 2024)。對於強調空間推理、結構理解與跨域整合的產品設計與機構課程而言，AR 具備以視覺化與情境化方式降低抽象度與提升互動性的優勢，其學術與實務之「熱門、貢獻與可擴散」價值已逐漸獲致共識 (Álvarez-Marín et al., 2023; Garzón et al., 2020)。

既有實證顯示，AR 能改善結構與機構學習表現與學習經驗。例如，在結構系統課程中，使用行動 AR 之學習者有顯著後測進步，且介面與情境真實感影響學習感受 (Hu et al., 2021)。在機械裝配情境，AR 提升裝配品質與速度並強化學習興趣 (Han et al., 2022)，AR 亦能在幾何與程式學習情境帶來顯著學習增益與可用性評價 (Hwang et al., 2024; Sharma et al., 2022)。另一方面，也有研究指出 AR 與簡報方法在時間效率上未必有差異，但錯誤率可明顯下降 (Moghaddam et al., 2021)，在遮蔽與受限視野的裝配任務中，雖可藉手部引導降低尋位時間，但配準誤差仍影響手眼協調 (Chu & Ko, 2021)。在認知層面，依循多媒體學習原則設計時，AR 與影片在「外在認知負荷」可能相當，顯示介面與訊息設計是影響學習負荷的關鍵 (Candido & Cattaneo, 2025)。

從文獻中學習歷程中情緒體驗如何與績效連動，仍缺乏以情緒與動機指標並行量測的研究。認知與介面負荷、追蹤精度與回饋設計對效果的調節機制尚待釐清 (Chu & Ko, 2021; Solmaz et al., 2021)。本研究據研究流程設計前後測、控制與實驗組比較聚焦於 AR 對產品設計學生機構學習之情緒—成效關聯與空間認知能力之調節，用以回應上述理論缺口。在理論支撐上，本研究以認知負荷理論與多媒體學習原則作為概念，透過適切訊息組織、標示與多餘控制以降低外在負荷並促進有意義學習 (Candido & Cattaneo, 2025, 2025b; Wang et al., 2018)。同時，AR 教育之元分析所示之協作與探究取向優勢，將學習動機與情緒體驗視為中介指標 (Garzón et al., 2020)，並連結產業導向之即時回饋與情境化支援觀點 (Eswaran & Bahubalendruni, 2022; Fan et al., 2024)。據此形成本研究之假設：AR 基礎機構教學在良好介面與任務設計下，透過提升正向情緒與學習投入，優於簡報教材教學之學習成效。

三、AR 於產品設計機構學習教學

AR 在產品設計機構學習的整合模式，強調以沉浸式互動技術作為概念理解、結構觀察與情緒促進的整合教學媒介。機構學作為產品設計教育的重要基礎，其內容涉及零件連桿、運動轉換與力學原理，屬

於高度空間推理與結構抽象性學習領域 (Wang et al., 2018)。2D 簡報教材與靜態模型雖能呈現理論架構，卻無法滿足學生對 3D 構造與動態運動的理解需求。AR 可將虛擬結構即時疊加於真實環境，使學習者得以觀看、操控與驗證結構動態，從而形成立體化的心智模型與更高層次的認知參與 (Hu et al., 2021)。因此，本研究將 AR 於機構學教學的整合模式界定為，結合 AR 視覺化、互動操作與學習情緒回饋的學習框架，以促進產品設計學生的結構理解、學習情緒投入與學習成效的表現。

從學理基礎觀點，AR 整合模式建立於數位科技學習與認知負荷理論，Candido and Cattaneo (2025) 指出，若 AR 教材設計符合多媒體原則如訊息整合、標示、控制，能有效降低外在認知負荷，並提升遷移表現。同時，體驗學習理論提供理論支撐，學生需透過操作、觀察與反思之循環過程，將外顯知識內化為結構化理解。Wang et al. (2018) 與 Han et al. (2022) 之研究證實，互動式 AR 能幫助學生在觀察運動關係與力學互作時建立具體的心智表徵，使抽象原理更具象化。此外，Garzón et al. (2020) 的元分析指出，當 AR 與協作與探究取向結合時，對學習動機與情緒成效具有最大化的正面效果，提供本研究教學設計的重要依據。

在教學應用面，AR 整合機構學的實作模式通常包含三個層次。首先是概念建構層，以 AR 視覺化展示零組件運動與連桿關係，讓學生能以多視角觀察機構結構。其次是互動操作層，學生透過觸控或手勢操作改變參數如角度、運動軌跡，以形成動態回饋。最後是情緒回饋層，透過遊戲化任務或即時評量界面促進學習者的投入與成就感 (Gill et al., 2024)。Cui et al. (2025) 在 AR 加法製造教育研究中發現，AR 組學生於創造性設計及結構理解上顯著優於傳統教學，並在問卷中呈現更高的學習興趣與正向情緒。此三層整合架構可有效連結認知理解與情感體驗，形成動機、情緒與成效的正向循環。

然而，文獻亦揭示部分限制。Moghaddam et al. (2021) 發現，雖然 AR 可降低錯誤率並提升操作正確性，但在學習時間與效率上不一定顯著優於傳統訓練。Chu and Ko (2021) 指出，在遮蔽或高複雜度機構裝配任務中，AR 手部引導可改善定位準確度，但若追蹤誤差過高反而增加學習者挫折感與情緒負荷。這些結果顯示，AR 整合模式需平衡認知負荷與介面複雜性，並在教學設計上加入適度的引導與回饋機制，避免情緒耗損。本研究據此發展之研究流程，將 AR 整合於基礎機構教學中，並以準實驗法設計，驗證學習情緒與學習成效的關係，以回應既有研究中對學習情緒機制的未解問題 (Candido & Cattaneo, 2025; Garzón et al., 2020)。

四、擴增實境在教育情境中對學習情緒的影響

AR 作為結合虛擬與實體環境的互動技術，能在即時情境中疊加數位資訊，提供學習者高度沉浸與真實感 (Lampropoulos et al., 2024)。在教育應用 AR 不僅提升學習者的專注與參與，更能激發多元的情感反應，如樂趣、好奇與熱情，進而促進內在學習動機與持續投入 (Gómez-Ríos et al., 2025; Olea-Ibarra et al., 2025)。Park and Yun (2023) 研究發現，正向情緒如興奮與驚喜能強化記憶與理解，而積極的情緒體驗亦能提升對新技術的接受意願，使 AR 學習成為增進學習興趣與自我效能的重要途徑。然而，若 AR 設計缺乏認知與情感平衡，可能導致焦慮、挫折或無聊等負面情緒，進而降低學習成效 (Lin et al., 2020; Olea-Ibarra et al., 2025)。此現象顯示了情感過載 (affective overload) 的潛在風險 (Garzón et al., 2020; Olea-Ibarra et al., 2025; Pekrun, 2006)，當感官刺激過度強烈時，學習者的注意力可能被分散，反而不利於知識的內化。部分研究亦指出，過度的娛樂化與互動性雖能提升短期投入，卻未必帶來深層理解 (Olea-Ibarra et al., 2025)。因此，AR 的教育設計需兼顧情緒調節與學習目標的一致性，以避免外在刺激削弱學習焦點。AR 在教育中的情感影響具多面性，一方面能透過互動與新奇性激發正向學習情緒，另一方面若設計不當，則可能造成認知負荷與情緒失衡。在學習環境中適度引導情緒投入，確保學習任務的深層理解，為 AR 教學應用與學習情緒研究的重要方向。

五、學習情緒對學習成效之影響

情緒在學習過程中佔有重大的影響力，學習時的情緒對學習者的動機有重要貢獻，在學習時減少破壞性和分散注意力影響學習成果 (LeBlanc et al., 2017; Pekrun et al., 2011; Schutz & Lanehart, 2002)。Pekrun

et al. (2011) 編製了 AEQ 學習情緒量表 (Achievement Emotions Questionnaire, AEQ)，將學習者在學習時常見的 8 種情緒享受、希望、自豪、憤怒、焦慮、無聊、羞辱和絕望做為量表的測驗標準，並以此量表評估學習情緒 (Pekrun et al., 2011)。教育和心理學研究的揭開了情緒與學習之間的密切關係，在解決問題的過程中最常出現的情緒是沮喪和困惑，消極的成就情緒會令人沮喪，並可能導致動力和信心下降，困惑如沒被解決就會轉為消極情緒，但困惑解決後就會轉變為積極情緒 (Di Leo et al., 2019)。積極的成就情緒可以成為學習的強大動力，並有助於成就感和自我價值感肯定，增強信心以及追求目標的願望。教師可以觀察現場情緒從過程中做出改變 (Petrovica et al., 2017)。情緒對於注意力、想像力、創造力與記憶的方式更是影響深遠，因此情緒與學習是連帶相互影響的關係 (Goebel & Maistry, 2019)。學習者對學習活動的情緒反應會影響其對學習活動的投入與堅持，具有正向情緒的學習者會較願意接受學習上的挑戰 (Meyer & Turner, 2002)。

AR 融入教學後，因其沉浸、互動與情境化特質，常被報導能提升學習動機與參與度，進而帶動成效 (Garzón et al., 2020)。在設計與工程情境中，AR 遊戲化或任務導向活動也被發現能提高可用性感與學習者的投入，對初學者特別具吸引力 (Gill et al., 2024; Sharma et al., 2022)。本研究因此將學習情緒界定為學習者在機構學習中對教材與活動所產生的正負向情感體驗，並探討其與成效之關聯。情緒—成效的連結機制，來自 AR 之情境真實性與介面體驗所誘發的正向情感。Hu et al. (2021) 顯示，在結構系統學習中，真實情境與使用介面是驅動知覺學習成效的關鍵設計構面。Gill et al. (2024) 以 UDL 觀點設計 AR DfMA 活動，指出多模態與協作任務可提升內在動機並營造包容的活動情緒氛圍。跨領域的 STEM-ARNutri 課程亦發現，AR 結合探究歷程能同步改善知識、態度與行為，顯示情感與成效可同向提升 (Kalimuthu et al., 2023)。

就實證而言，多項工程與機械領域研究支持情緒/動機與成效的正向關係。Han et al. (2022) 在機械裝配課程中，AR 組於裝配品質與速度表現較佳，且問卷顯示興趣與自我效能感提升。Hu et al. (2021) 發現 AR 組後測顯著進步，且背景知識與 AR 使用經驗並未削弱學習感受之形成，凸顯設計層面比個體既有經驗更能影響學習情緒。以程式教學為例，AR 嚴肅遊戲讓低基礎者進步更顯著，學習者主觀回饋亦偏正向 (Sharma et al., 2022)。在物理教育中，結合 AR 與虛擬模擬的探究活動能同時提升學習動機與創造力，並帶來更佳表現 (Rizki et al., 2025)。

然而，並非所有研究都呈現一致的優勢。Candido and Cattaneo (2025) 多媒體學習原則設計教材，結果顯示 AR 與影片在外在認知負荷相近，保留與遷移表現未見一致差異，情緒增益不一定線性轉化為成效。Moghaddam et al. (2021) 在製造訓練發現，AR 與 2D 簡報教材說明在時間與學習曲線相近，但錯誤率大幅下降，顯示成效指標可能呈現分化；同時，介面配準與遮蔽條件下的手眼協調失配亦可能引發認知負荷重的挫折 (Chu & Ko, 2021)。此類結果提醒研究須同時觀察情緒、負荷與多元成效指標，釐清何種設計條件下情緒最能轉化為表現。

綜整上述脈絡，本研究主張 AR 在良好介面與情境設計下，能透過提升正向學習情緒與動機來促進機構學習成效；然其效果受介面負荷與學習者特質影響，可能改變情緒與成效的關聯強度 Hu et al. (2021)。基於此，本研究在控制與實驗條件下，同步衡量情緒體驗與表現，並參照認知負荷與多媒體學習原則以降低外在干擾 Candido and Cattaneo (2025)，以檢驗 AR 是否相對傳統教學在學習情緒與成效上具優勢及，回應既有研究關於情緒作用機制的爭議 (Garzón et al., 2020; Moghaddam et al., 2021)。

綜合而論，AR 於產品設計機構學教學的整合模式可視為一個跨層次學習框架，結合認知、情感、互動三構面，實務面結合即時互動與情緒激發策略。本研究預期，AR 能透過提升學生的情緒參與與機構運作理解力，進而促進學習成效。該整合模式不僅提供教育者可操作的教學架構，也為設計學與工程教育中 AR 應用提供新的理論參照與實證基礎。

參、研究方法

一、研究參與者

本研究的研究對象為 52 名就讀於南臺科技大學設計學院產品設計系大學三年級學生，所有參與者皆具設計學習背景，且未曾修習過基礎機構學課程，以確保受試者在機構原理知識上具相同先備知識。依準實驗研究設計分為實驗組與控制組，如圖 1。實驗組以 AR 輔助教學 23 名學生，控制組以 2D 簡報教材講授 29 名學生，因課程既有班級結構限制，無法隨機分派。受測者於實驗前皆簽署研究參與同意書。

圖 1

控制組受測者（左圖）與實驗組受測者（右圖）

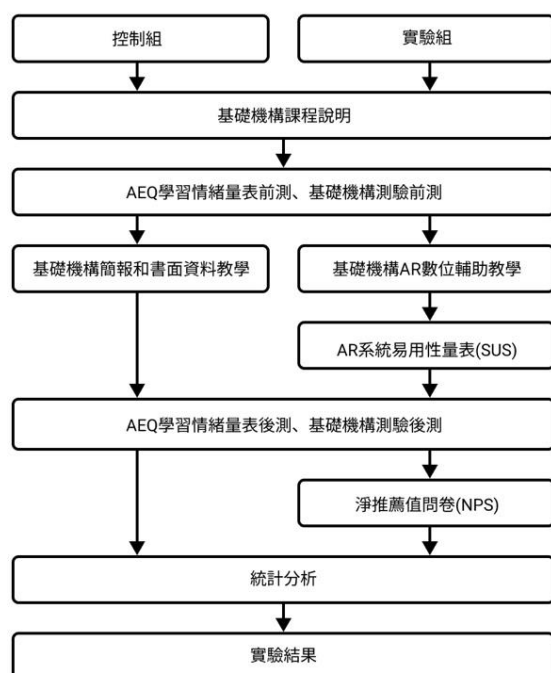


二、研究流程

本研究主要驗證以 2D 簡報和 AR 輔助教學於基礎機構教學後的學習成效研究流程圖，如圖 2 所示。以準實驗法分成控制組與實驗組兩組，研究歷程包含課程導入、前測、教學實施與後測四階段。每組都將進行六週的課程，每週 80 分鐘。控制組以基礎機構 2D 簡報教材，實驗組則是 AR 基礎機構教學軟體中包含課程內容做為輔助學習教材，該 AR 教材使學生能即時觀察連桿、齒輪與凸輪等機構的運動與結構變化，符合 Wang et al. (2018) 所強調的即時回饋與互動式視覺化學習特性。

圖 2

研究流程圖



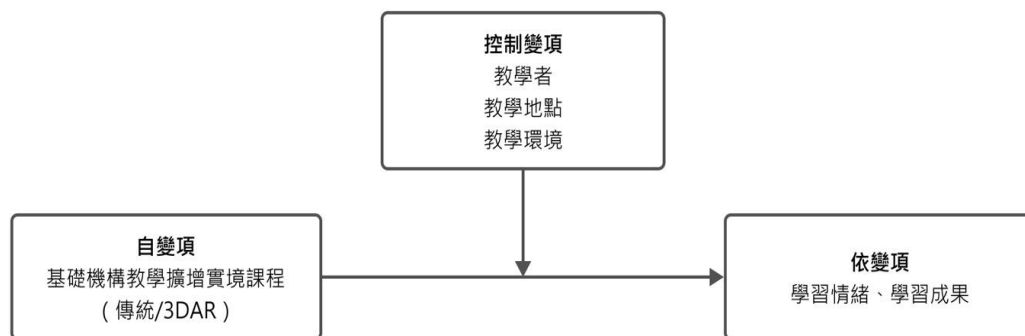
首先，在課程開始前，兩組學生共同接受基礎機構課程說明，以確保學生理解課程目的、內容與評估方式。隨後進行前測階段，兩組皆需填寫 AEQ 學習情緒量表以測量學習前的情緒狀態，並進行基礎機構測驗以評估學生在課程開始前對機構概念的理解程度。六週課程內容兩組都相同導入兩組間教材差異，待課程結束後，兩組學生均進行後測，包括 AEQ 學習情緒量表與基礎機構測驗以比較學習前後的情緒變化與學習成效。另外針對實驗組學生測 AR 教材系統易用性量表（System Usability Scale, SUS）與軟體淨推薦值問卷（NPS），用以評估 AR 系統的教學軟體易用性體驗與接受程度。SUS 於分析系統操作的便利性與介面友善度，而 NPS 則衡量學生願意向他人推薦該系統的意願，以評估學習者對 AR 系統的接受度及使用體驗（Fan et al., 2024）。所有問卷與測驗資料皆以量化進行分析，最終依據分析結果提出研究結果，作為未來 AR 於產品機構設計教育中應用的實證依據。

三、研究變項

本研究之主要目的在於探討 AR 融入基礎機構教學，對產品設計系學生學習情緒與學習成效之影響。研究採準實驗設計變項架構圖，如圖 3 所示。自變項為基礎機構教學 AR 課程型態，包含兩種教學模式：2D 簡報教材與 AR 輔助教學與學習，以檢驗不同教學介入對學習情緒及成效的影響。依變項為學生的學習情緒與學習成效。學習情緒透過 AEQ 學習情緒量表測量，評估學生在學習過程中的愉悅、焦慮與投入等心理狀態；學習成效則以基礎機構知識測驗評估其概念理解與運用能力。為確保實驗條件一致，設置控制變項包括同一位授課教師、教學地點與教學環境，避免外在環境因素干擾教學結果。透過此研究變項設計，可清楚界定 AR 教學介入在情感與認知層面之影響，學習表現的可行性與實證價值。

圖 3

研究變項架構圖



四、課程內容

本課程基礎機構教學為產品設計系學生所開設選修專業基礎課程，課程為期六週，在培養學生對機構原理與運動結構的基本理解，並建立其將工程概念應用於產品設計的能力，課程內容如表 1。課程設計以由淺入深的方式進行，從基礎概念、機件識圖到各類機構的應用，逐步引導學生掌握機構運作原理與應用思維。第一週機構介紹說明機構的定義、結構關係與設計流程，並探討機構在產品設計中的應用範疇。第二週機件與簡圖教授常見機件種類、接頭形式及機構簡圖繪製方法，使學生能以工程視角表達設計構想。第三週連桿機構介紹連桿結構類型、應用實例與運動鏈的設計原理，培養學生分析運動傳遞的能力。第四週凸輪機構講述凸輪類型與從動件運動特性，說明其在控制與自動化設計中的應用。第五週齒輪機構重點在於齒輪構造、傳動比與中心距分析，強化學生在動力傳輸與機械整合的設計基礎。第六週其他機構則綜合介紹棘輪、螺旋、撓性與鏈條機構等，擴展學生對多樣化基礎機構學的理解。

表 1

基礎機構課程表

週次	課程名稱	課程內容	週次	課程名稱	課程內容
第一週	機構介紹	1. 機構與結構定義 2. 機構設計流程 3. 產品機構的應用	第四週	凸輪機構	1. 凸輪機構種類 2. 從動件類型 3. 凸輪機構應用
第二週	機件與簡圖	1. 機件種類 2. 接頭種類 3. 機構簡圖畫法	第五週	齒輪機構	1. 齒輪部位介紹 2. 齒輪機構種類 3. 齒輪系 4. 轉速比與中心距 5. 齒輪機構應用
第三週	連桿機構	1. 連桿機構種類 2. 連桿機構應用 3. 運動鏈	第六週	其他機構	1. 棘輪機構 2. 螺旋機構 3. 撓性機構 4. 鏈條

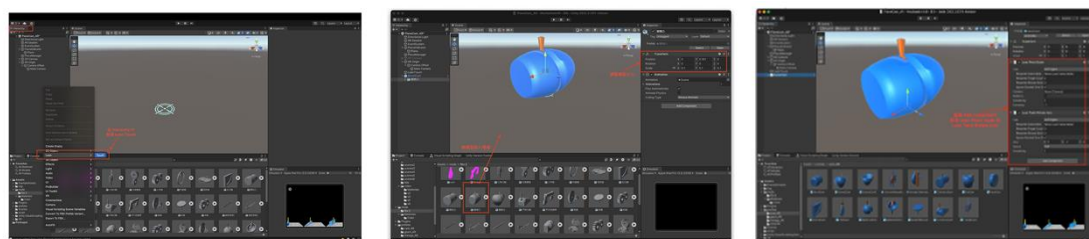
五、研究工具

(一) AR 軟體開發工具

建立可支援機構教學的 3DAR 學習系統，本研究採用 Blender 與 Unity 作為主要開發平台，如圖 4。Blender 是一款開源的 3D 建模與動畫製作軟體，具備完整的模型建構、動畫設計與材質渲染 (rendering) 功能支援教學應用，其操作介面開放且模組化，特別適合教育場域中學生使用 (Solmaz et al., 2021)。在本研究中，Blender 主要用於繪製與動畫化各類基礎機構模型，包括連桿、齒輪與凸輪等，確保其運動模擬符合實際機構動態特徵。完成 3D 模型後，資料被匯入 Unity 開發引擎進行 AR 整合。Unity 為目前最普及的跨平台互動內容開發平台之一，支援 C# 語法擴充與 ARKit 等 AR 模組整合。本研究透過 Unity 建構互動介面，設定機構模型的動態參數與運動路徑，並建立觸控操作與即時視覺回饋的學習環境。Unity 的高擴充性與模組化架構使其能有效結合教學內容與互動設計，適用於教育型 AR 教材的開發 (Solmaz et al., 2021)。

圖 4

AR 機構軟體開發工具-Unity



(二) 機構 AR 教學軟體實機畫面

完成開發後，AR 應用程式匯入 Apple Xcode 平台上開發、測試和應用程式，版本安裝至 Apple iPad 設備中進行操作與展示。學習者啟動程式後，首頁畫面，如圖 5 所示。機構 AR 主畫面提供學習者點選機構類別選項，機構課程表中的課程簡報、連桿機構、凸輪機構、齒輪機構與其他機構都在此介面中切換。使用者點選任一項後，系統會進入對應的機構分類頁面。顯示各子類別的 AR 模型縮圖。學習者可依學習需求選擇特定機構主題進入 AR 操作畫面，透過鏡頭辨識與空間平面定位功能，即可將虛擬機構模型置入真實環境中 360 度展示，學習者可以隨不同角度觀察到機構的運動行為。在學習互動過程中，學生可透過手勢縮放、旋轉與移動模型，觀察不同角度下的運動軌跡與結構關係。此機構模型具備 360

度全景觀察走動觀察機構的運動與即時動畫功能，讓學生能以空間探索方式理解各元件間的動力傳遞與相互作用。此學習模式同時結合了可視化與體驗式學習的特性，對應 Wang et al. (2018) 與 Hu et al. (2021) 所指出之 AR 在機構教育中能促進結構理解與情緒投入的優勢。

圖 5

實驗組機構擴增實境教材（本研究自行開發）



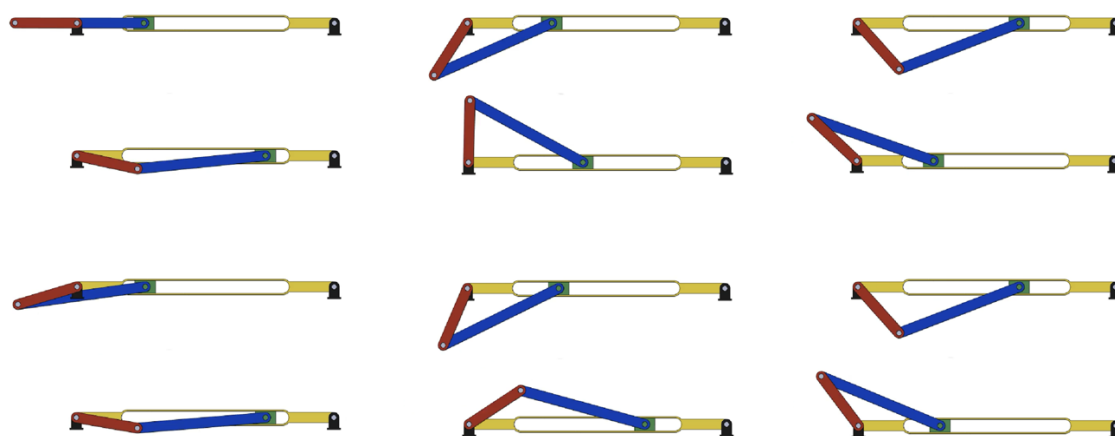
（三）控制組機構 2D 動畫教學

控制組之教學媒材採用以 Microsoft PowerPoint 製作之 2D 動畫簡報教材，共計 190 頁，涵蓋六週基礎機構課程內容，包含機構定義與設計流程、機件與接頭種類、連桿機構、凸輪機構、齒輪機構，以及棘輪、螺旋與撓性機構等特殊機構。在教材設計上，為使學生能理解機構的運動方式，簡報中針對各類機構的核心運作原理製作 2D 動畫，例如四連桿機構的曲柄旋轉與搖桿擺動對應關係、凸輪與從動件的接觸運動過程、齒輪嚙合時的轉速傳遞方式，以及曲柄滑塊機構的往復直線運動等，均以逐格動畫的方式呈現，如圖 6 所示。使學生能在課堂中透過觀看影片式播放理解各機構的動態行為，彌補純靜態圖示在運動方向與時序表達上的不足。

授課形式為教師於課堂中同步播放投影片並進行口頭講解，每節課程時長 40 分鐘，教學期間共進行六週，與實驗組課程時數保持完全一致，以確保兩組在教學時間與知識覆蓋範圍上的等效性。控制組學生在觀看 2D 動畫教材的過程中屬於被動接收模式，僅能依照教師播放的固定視角與速度進行觀察，無法自行調整視點方向、操控機構運動速度或進行互動，此特性與實驗組使用 3DAR 軟體可進行 360 度旋轉觀察及即時互動操作之學習模式形成對照，亦是本研究探討兩種教學媒材對學習成效與學習情緒產生差異之關鍵操弄條件。

圖 6

控制組教學簡報-曲柄滑塊機構（本研究自行建模）



（四）研究量表

本研究所使用之量化資料主要來自四項具信效度之標準化測驗與量表，分別用以測量學生的學習情緒、學習成效、系統可用性與推薦意願。

1. AEQ 學習情緒量表 (AEQ)

本研究採用 Pekrun et al. (2011) 基於情緒控制價值理論 (Control-Value Theory) 所發展之 AEQ 量表，以衡量學生在學習過程中的情緒狀態。量表涵蓋享受、希望、自豪、憤怒、焦慮、無聊、羞辱與絕望八個情緒構面共 30 題。正向情緒（如享受、希望、自豪）被認為有助於提升學習動機與投入度，而負向情緒（如焦慮、無聊、羞辱與絕望）則可能降低學習意願與表現，其中負向情緒題目採反向計分處理，使總量表分數方向一致，分數越高代表整體學習情緒越正向。量表採五點李克特量表 (Likert Scale)，從「非常不同意」至「非常同意」五級評分，並採正反向題降低反應偏誤。AEQ 在先前研究中顯示具良好信度與效度，Cronbach's α 均高於 0.80 (Hu et al., 2021)。

2. 學習成效測驗卷 (Mechanism Learning Achievement Test)

學習成效測試問卷以台灣中國機械工程學會人才證照考試歷屆題庫，依課程內容編製前後測以機構學習成效測驗卷選擇題而成，用以評估學生在不同教學介入後的認知學習成果。前測與後測各由 20 題單選題組成，每題配分 5 分，總分 100 分。題目範圍涵蓋連桿機構、凸輪機構與齒輪機構的基本運動原理與應用。測驗內容經三位具機構與產品設計專業背景之教師審查，以確保題項的內容效度。前測用於掌握學生原有的基礎知識作為共變數，後測則作為學習成效的主要評估依據，並比較不同教學法對學生學習成果之影響 Wang et al. (2018)。

3. 系統易用性量表 (SUS)

為評估學生對 AR 機構輔助教學軟體的使用體驗，本研究於教學活動後要求實驗組學生填寫 SUS 問卷 (Brooke, 1996)。該量表包含 10 項陳述句，以五點李克特量表進行評分，其中 1 代表「非常不同意」，5 代表「非常同意」。題項中同時包含正向與反向敘述以避免應答偏誤。依標準化計算方式折算後可得 0 至 100 的整體分數，分數越高代表系統的易用性與使用滿意度越佳。根據既有研究，70 分以上即代表系統具有良好的可用性 (Solmaz et al., 2021)。

4. 淨推薦值問卷 (Net Promoter Score, NPS)

NPS 由 Reichheld (2003) 提出，是衡量使用者對產品或服務推薦意願的常用指標。本研究使用單題 NPS 問卷詢問實驗組學生：「您有多大可能將這款 AR 基礎機構教學軟體推薦給其他人？」請受試者以 0（極不可能）至 10（極有可能）進行評分。統計計算 9-10 分視為促進者 (promoters)，0-6 分為批評者 (detractors)，7-8 分為中立者 (passives)，以促進者比例減去批評者比例得出 NPS 值。此指數可反映學習者對 AR 教學系統的整體滿意度與潛在推廣意圖。

綜合上述，本研究四項量表涵蓋 AEQ、學習成效測驗、SUS 與 NPS 等多重面向，能有效評估 AR 教學對學生情緒與學習成果的整體影響。各量表經信度檢定後 Cronbach's α 均高於 0.80，顯示具良好內部一致性與測量穩定性 (Candido & Cattaneo, 2025; Garzón et al., 2020)。

（五）研究統計分析

本研究採用 SPSS 21.0 統計軟體進行量化資料分析，以驗證兩組教學對學生學習情緒與學習成效之影響。首先進行描述性統計分析，以了解控制組與實驗組在前測與後測中的平均值與標準差，並檢驗資料分布與基本統計特徵。接著進行組內迴歸同質性檢定，以確認兩組在前測分數的同質性與共變假設是否成立。為排除前測差異的影響，採用單因子共變數分析 (Analysis of Covariance, ANCOVA)，以前測成績作為共變項，以獨立樣本 t 檢定和成對樣本 t 檢定比較兩組教學介入對後測學習成效的影響，確保結果具統計效度。

肆、結果

本研究結果在探討 AR 教學對產品設計系學生在基礎機構學習情緒與學習成效上的影響。研究對象為南臺科技大學產品設計系三年級學生共 52 名，採準實驗設計進行教學，資料分析方法包括組內迴歸同質性檢定、ANCOVA、成對樣本 *t* 檢定、獨立樣本 *t* 檢定，以及 AR 機構教學軟體的系統 SUS 與 NPS 的分析結果。

一、受測者基本資料

本研究的受試者為南臺科技大學創新產品設計系三年級學生。控制組包含男性 4 名與女性 25 名，實驗組則有男性 9 名與女性 14 名，兩組合計共 52 名學生，如表 2 所示。

表 2

受測者描述性統計表

組別	男	女	<i>N</i>
控制組	4	25	29
實驗組	9	14	23

二、學習情緒研究結果

(一) AEQ 學習情緒分析描述性統計表

在進行共變數分析之前，表 4 呈現實驗組 (*N* = 23) 與控制組 (*N* = 29) 在 AEQ 學習情緒量表之前測、後測及後測調整分數的描述性統計資料。由表 3 可知，兩組在前測情緒平均值上，控制組 (*M* = 3.35, *SD* = 0.32) 略高於實驗組 (*M* = 3.08, *SD* = 0.41)，顯示兩組在教學介入前存在些微差異，因此以前測分數作為共變項以控制此初始差異的影響。後測調整均值 (即排除前測差異後之估計邊際平均值) 顯示，實驗組 (*Madj* = 3.35, *SE* = 0.059) 明顯高於控制組 (*Madj* = 2.73, *SE* = 0.052)，兩組調整後差距達 0.62 分，反映 AR 教學介入對學習情緒的實質效益。以下表 3 進一步以共變數分析檢驗此組別差異的統計顯著性。

表 3

學習情緒量表前測、後測及後測調整均值描述性統計

變項	組別	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
前測分數	控制組	29	3.35	.32
	實驗組	23	3.08	.41
後測分數	控制組	29	2.7	.22
	實驗組	23	3.35 ^a	.41
後測調整均值	控制組	29	2.73 ^b	
	實驗組	23	3.35 ^b	

註：^a後測個別情緒分量表數值詳見表 5；^b後測調整均值為以前測情緒平均值為共變項之 ANCOVA 估計邊際平均值

(二) AEQ 學習情緒分析組內迴歸同質性考驗

本研究採用單因子共變數分析檢驗實驗組 (*N* = 23) 與控制組 (*N* = 29) 在 AEQ 學習情緒量表後測結果之差異。以學習情緒後測平均值為依變項 (*Y*)，學習情緒前測平均值為共變項 (*X*)，控制組與實驗組作為自變項。兩組進行組內迴歸係數同質性考驗，以檢驗兩組學生在前測與後測學習情緒間的迴歸關係是否一致。如表 4 所示，組別與前測情緒分數之交互作用項未達顯著水準 ($F(1,49) = 0.796, p = .377 > .05$)，表示兩組在迴歸斜率上未達顯著水準，符合共變數分析的迴歸同質性假設。前測情緒與後測情緒之間的關係在不同教學組別中具有相同的迴歸趨勢，顯示組別效應不會因前測分數不同而產生交互影

響。因此，本研究可將前測情緒平均值納入共變項，以控制前測差異對後測結果的影響，並進一步進行 ANCOVA 檢驗，以探討不同教學組別在學習情緒表現上的差異。此一結果與 Hu et al. (2021) 在結構系統教學研究中的發現相符，亦呼應 (Candido & Cattaneo, 2025) 指出的情緒效應受教學互動設計與介面認知負荷影響之觀點。從教育心理學角度來看，情緒在學習歷程中具延續性與累積性 (Pekrun et al., 2011)，因此在短期教學介入下，學生的整體情緒變化仍可能呈現穩定趨勢。

表 4

AEQ 學習情緒量表之組內回歸係數同質性考驗

變異來源	SS	df	MS	F	p
組別	.244	1	.244	3.100	.085
前測分數	.144	1	.144	1.831	.182
組別 * 前測分數	.063	1	.063	.796	.377
誤差 (組間)	3.777	48	.079		

實驗組 (N=23)、控制組 (N=29)

(三) AEQ 學習情緒分析後測之共變數分析結果

AEQ 學習情緒量表後測之共變數分析結果，主要檢驗在控制前測分數影響後，不同教學組別學生在學習情緒上的差異情形。由表 5 可見，組別 ($F(1,49) = 61.867$, $p < .001$)，達顯著水準，表示在排除前測差異後，實驗組與控制組在學習情緒後測平均表現上達顯著水準。換言之，不同教學方式對學生的學習情緒產生明顯影響。進一步觀察效果量 ($\eta^2 = .558$)，顯示組別因素對學習情緒後測變異的解釋力達 55.8%，屬於高效果量水準，代表 AR 教學介入對提升學生學習情緒具有實質而顯著的影響。此結果在控制前測條件下，實驗組學生的學習情緒顯著優於控制組，顯示本研究所採用的 AR 教學策略能有效促進學習情緒的正向發展，驗證了教學介入在情緒層面上的實際成效與教育應用價值。

表 5

AEQ 學習情緒量表-後測之共變數分析結果

變異來源	SS	df	MS	F	p
共變數 (前測分數)	0.144	1	0.144	1.831	.182
組別	4.848	1	4.848	61.867	.001
誤差 (組間)	3.840	49	.078		

實驗組 (N=23)、控制組 (N=29)

(四) AEQ 學習情緒分析獨立樣本 t 檢定分析結果

本研究再以獨立樣本 t 檢定分析實驗組 AR 數位輔助教學 (N = 23) 與控制組 2D 簡報教材教學 (N = 29) 在 AEQ 學習情緒量表八個情緒向度後測結果之差異，以探討 AR 教學對學生學習情緒的影響。根據表 6 所示的獨立樣本 t 檢定結果，進一步計算效果量 Cohen's d，依據 Cohen (1988) 之效果量判斷標準 (小效果量： $d = 0.20$ ；中效果量： $d = 0.50$ ；大效果量： $d = 0.80$)，結果顯示正向情緒 (享受、希望、自豪) 之平均效果量為 Cohen's $d = 0.74$ ；負向情緒 (焦慮、羞愧、無望、無聊) 平均效果量為 Cohen's $d = 1.13$ ；整體 AEQ 學習情緒之效果量 Cohen's $d = 0.96$ ，顯示 3DAR 教學在提升學生學習情緒方面具顯著實質影響。兩組學生在正向情緒 (享受、希望、自豪) 與部分負向情緒 (焦慮、羞愧、無望、無聊) 各項達顯著水準 ($p < .05$)；憤怒向度之組間差異未達顯著水準 ($t = 1.125$, $p = .266$)，顯示 AR 教學在情緒層面上具明顯優勢。

在正向情緒方面，實驗組在享受 ($M = 4.14$, $SD = 0.36$, $t = -2.280$, $p = .027$)、希望 ($M = 4.07$, $SD = 0.40$, $t = -3.052$, $p = .004$) 與自豪 ($M = 3.74$, $SD = 0.60$, $t = -2.596$, $p = .013$) 三個面向的得分皆顯著高於

控制組。此結果顯示，AR 數位輔助教學能提升學生在學習過程中的愉悅感、自我效能與任務掌握信心，使學生對機構學習保持積極與投入的情緒狀態，與 Wang et al. (2018) 的研究結果相符，指出 AR 環境能透過即時回饋與可視化操作激發學生的學習動機與情感參與，促進更高層次的學習投入。

在負向情緒方面，憤怒向度 ($M = 2.39, t = 1.125, p = .266$) 之組間差異未達顯著水準，顯示兩組學生在學習憤怒情緒上無顯著差異。然而，實驗組的焦慮 ($M = 2.39, t = 3.490, p = .001$)、羞愧 ($M = 2.48, t = 3.156, p = .003$)、無望 ($M = 1.92, t = 3.965, p < .001$) 與無聊 ($M = 1.76, t = 5.438, p < .001$) 平均均顯著低於控制組，顯示 AR 教學能有效減輕學生在 2D 簡報教材講述式教學中常出現的焦慮、挫折與倦怠感。這一結果呼應 Candido and Cattaneo (2025) 的觀點，認為 AR 結合多媒體學習原則可降低外在認知負荷，進而減少負面情緒的產生。此 AR 教學不僅能強化正向情緒體驗，還能顯著降低多項負向情緒反應，顯示 AR 數位輔助學習在促進情緒平衡與動機維持方面具高度效益。此發現與 Garzón et al. (2020) 的元分析結論一致，證實 AR 能提升學習者情緒投入與互動參與，創造更具沉浸性與支持性的學習環境，促進學習效能與情感滿意度。

表 6

AEQ 學習情緒-獨立樣本 t 檢定分析結果

學習情緒	組別	M	SD	t	df	p	$Cohen's d$
享受	控制組	3.8879	.44111	-2.280	50	.027	0.63
	實驗組	4.1413	.36013				
希望	控制組	3.7586	.29407	-3.052	50	.004	0.86
	實驗組	4.0652	.40433				
自豪	控制組	3.3189	.55860	-2.596	50	.013	0.74
	實驗組	3.7391	.59581				
憤怒	控制組	2.5431	.50475	1.125	50	.266	0.31
	實驗組	2.3928	.45689				
焦慮	控制組	2.8534	.47332	3.490	50	< .001	0.97
	實驗組	2.3931	.47154				
羞愧	控制組	2.9712	.53325	3.156	50	.003	0.89
	實驗組	2.4818	.57238				
無望	控制組	2.5000	.44487	3.965	50	< .001	1.12
	實驗組	1.9166	.58387				
無聊	控制組	2.5776	.51367	5.438	50	< .001	1.54
	實驗組	1.7609	.55636				

實驗組 ($N=23$)、控制組 ($N=29$)

三、機構學習成效測驗結果

為探討不同教學模式對學生基礎機構學習成效之影響，本研究以前後測成績進行分析，分別採用成對樣本 t 檢定與獨立樣本 t 檢定，以比較各組內及組間的學習成效差異。控制組採用 2D 簡報教材，實驗組則採用 AR 數位輔助教學，在檢驗 AR 教學是否能有效提升學生之學習表現，實驗結果如下。

(一) 基礎機構學習成效描述性統計

在進行共變數分析之前，表 7 呈現兩組受試者在學習成效測驗之前測、後測的描述性統計資料。由表 7 可知，控制組前測 ($M = 37.41, SD = 10.32$) 與實驗組前測 ($M = 39.78, SD = 12.75$) 相近，顯示兩組先備知識具可比性。後測調整均值（排除前測差異後的估計邊際平均值）控制組為 45.90 分，實驗組為

62.78 分，差距達 16.88 分，後測調整分數比直接後測更精確反映了 AR 教學介入的真實效益，因已統計排除了兩組原有先備知識的差異。

表 7

學習成效測驗前測、後測及後測調整分數描述性統計

	組別	N	M	SD
前測分數	控制組	29	37.41	10.32
	實驗組	23	39.78	12.75
後測分數	控制組	29	45.52	14.84
	實驗組	23	63.26	14.27

(二) 基礎機構學習成效分析

1. 學習成效組內迴歸同質性考驗

本研究為確認不同教學模式對學生基礎機構學習成效的比較具合理性，針對實驗組 AR 數位輔助教學 ($N = 23$) 與控制組 2D 簡報教材 ($N = 29$) 進行組內迴歸同質性檢定，學生在基礎機構學習上的先備知識是否相同，藉以確認後續教學成效比較的合理性，以檢驗兩組在前測與後測分數間的迴歸關係是否一致。編製前後測機構學習成效測驗卷，並進行迴歸斜率同質性檢定，以驗證兩組學生在前測與後測成績間的線性關係是否相同。

依共變數分析假設，若迴歸線斜率間的交互作用達顯著，則表示不合同質性假設；反之，若交互作用不顯著，則代表迴歸關係一致，可進行後續共變數分析。檢定結果顯示，組別與前測分數之交互作用項未達顯著水準 ($F(1,48) = 0.606, p = .440 > .05$)，如表 8 所示。此結果指出，控制組與實驗組在前測與後測之間的迴歸趨勢一致，前測表現對後測結果的影響方向相同，顯示兩組學生在基礎知識水準上具有可比性，符合迴歸同質性假設，因此可進行後續共變數分析，以探討不同教學模式對學習成效的實際影響。

表 8

學習成果組內迴歸係數同質性考驗

變異來源	SS	df	MS	F	p
組別	758.799	1	758.799	3.777	.058
前測分數	935.313	1	935.313	4.656	.036
組別 * 前測分數	121.843	1	121.843	0.606	.440
誤差 (組間)	9643.371	48	200.904		

實驗組 ($N=23$)、控制組 ($N=29$)

2. 學習成效共變異數分析結果

為探討不同教學模式對學生基礎機構學習成效的影響，本研究以學習成效後測為依變項，前測分數為共變項，進行 ANCOVA 分析，以控制學生先備知識的影響。分析結果如表 9 所示，前測分數之共變項達顯著水準 ($F(1,49) = 4.428, p = .041 < .05$)，顯示學生的原有基礎能力對後測成績具顯著影響。進一步觀察組別主效應，結果顯示不同教學方式之間的差異顯著 ($F(1,49) = 18.128, p < .001$)，表示 AR 數位輔助教學顯著優於 2D 簡報教材教學，對學習成效產生正向影響。效應量 $\eta^2 = .270$ ，屬中度效果，顯示教學法差異對學習成果具有實質影響力。學習成效結果在控制前測影響後，實驗組學生於基礎機構後測成績顯著高於控制組，代表 AR 結合 3D 互動學習能有效強化學生對機構概念的理解與操作能力，並提升學習表現。此結果與 Wang et al. (2018) 的研究一致，說明 AR 教學能透過可視化與即時回饋促進知識內化與學習成效提升。

表 9

學習成效測驗-共變異數分析結果

變異來源	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
共變數(前測分數)	882.462	1	882.462	4.428	.041
組間效果(組別)	3612.771	1	3612.771	18.128	< .001
組內(誤差)	9765.214	49	199.290		

實驗組 ($N=23$)、控制組 ($N=29$)(三) 控制組學習成效成對樣本 t 檢定

基礎機構教學控制組學生採 2D 簡報教材與講述式教學進行六週課程，其前後測結果，如表 10。成對樣本 t 檢定結果顯示，控制組學生的學習成效顯著提升 ($t(28) = -2.964, p = .006 < .01$)。前測平均數為 $M = 37.41$ ($SD = 10.32$)，後測平均數為 $M = 45.52$ ($SD = 14.84$)，顯示學生透過課堂講授與練習能有效理解基礎機構的結構原理與應用方法。此結果符合一般教學理論中指導與練習對學習表現的觀點。然而，雖整體學習成效有所進步，但進步幅度相對有限，顯示單純以講述與投影片為主的學習方式，雖可建立基礎機構知識，但在空間理解與動態概念掌握上仍存在一定限制條件。

表 10

控制組學習成效成對樣本 t 檢定分析表

組別	前測		後測		<i>t</i>	<i>df</i>	<i>p</i>
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>			
控制組 學習成效 ($N = 29$)	37.41	10.32	45.52	14.84	-2.964	28	.006

(四) 實驗組學習成效成對樣本 t 檢定

實驗組採用 AR 基礎機構教學輔助學習，學生可透過 Apple iPad 操作 AR 模型觀察各類機構 3D 動態運動結構，強化空間理解與動態推理。成對樣本 t 檢定結果顯示，實驗組學生的學習成效顯著提升 ($t(22) = -6.642, p < .001$)，如表 11。前測平均數為 $M = 39.78$ ($SD = 12.75$)，後測平均數為 $M = 63.26$ ($SD = 14.27$)，成績提升達 23.48 分。結果顯示 AR 學習輔助工具能有效促進學生對機構運動關係、結構連接及功能設計的理解。這與 Candido and Cattaneo (2025) 研究結果一致，即 AR 能結合多媒體互動與即時回饋，有效降低認知負荷並促進深層理解。由此可見 AR 教學有效促進學生在知識理解與操作能力上的表現，體現出兼具互動性、沉浸性與高教學成效的學習模式。

表 11

實驗組學習成效成對樣本 t 檢定分析表

組別	前測		後測		<i>t</i>	<i>df</i>	<i>p</i>
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>			
實驗組 學習成效 ($N = 23$)	39.78	12.75	63.26	14.27	-6.642	22	.001

(五) 學習成效測驗後測獨立樣本 t 檢定

為進一步比較兩組學生在教學方法介入後的學習成果差異，以獨立樣本 t 檢定分析學習成效後測結果，如表 12。結果顯示實驗組顯著優於控制組 ($t(50) = -4.355, p < .001$)，如表 12 所示。控制組後測平均數為 $M = 45.52$ ($SD = 14.84$)，實驗組為 $M = 63.26$ ($SD = 14.27$)，兩組差異顯著，效果量 Cohen's $d = 1.21$ ，屬高度效果量，代表 AR 數位輔助教學對學習成效具有強烈正向影響。這結果顯示學生在 AR 環境中能以互動式操作深化概念理解，強化理論與實作連結。與 Garzón et al. (2020) 及 Hu et al. (2021) 的研究一致，本研究證實 AR 技術不僅提升學習成效，也促進學生主動探索與情感投入，展現顯著的學習優勢。

表 12

學習成效後測獨立樣本 *t* 檢定分析表

	控制組 (N = 29)		實驗組 (N = 23)		<i>t</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	Cohen's <i>d</i>
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>				
學習成效	45.52	14.84	63.26	14.27	-4.355	50	.001	1.21

(六) 學習成效後測調整平均數與前後測變化分析結果

在共變數分析架構下，後測調整平均數 (adjusted posttest means) 方能真實反映兩組在先備知識均等條件下的學習成效差異。如表 13 所示，以前測分數為共變項，控制於全樣本前測平均分數 (grand mean = 38.46) 後，實驗組後測調整平均數 ($M_{adj} = 62.78$, $SE = 2.95$, 95% CI [56.84, 68.71]) 顯著高於控制組 ($M_{adj} = 45.90$, $SE = 2.63$, 95% CI [40.62, 51.18])，兩組調整後差距達 16.88 分， $F(1, 49) = 18.128$, $p < .001$, $\eta^2 = .270$ ，屬中至大效果量。兩組 95% 信賴區間完全不重疊 (控制組上限 51.18 < 實驗組下限 56.84)，進一步確認組間差異具高度統計顯著性。此結果說明，在統計控制學生原有先備知識水準後，AR 數位輔助教學對學習成效仍具顯著且具實質意義的正向影響，證實教學介入效果並非由兩組初始能力差異所驅動，而是來自 AR 教學本身之實質效益 (Stevens, 2002)。

表 13

學習成效後測調整平均數分析摘要表

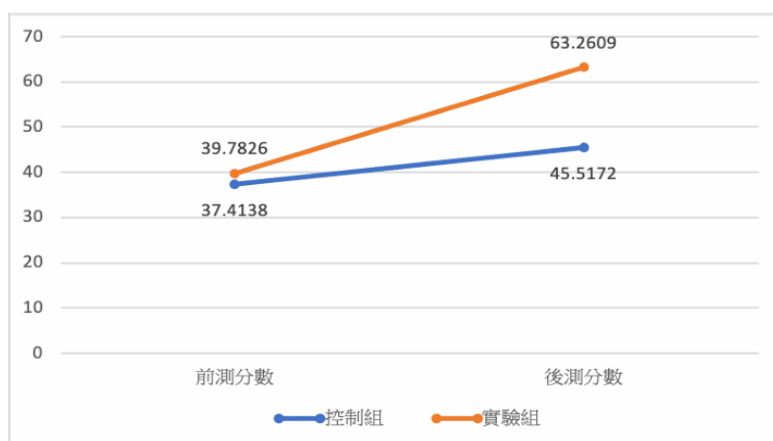
組別	<i>N</i>	前測 <i>M (SD)</i>	後測 <i>M (SD)</i>	後測調整均數 <i>M_{adj} (SE)</i>	95% CI
控制組	29	37.41 (10.32)	45.52 (14.84)	45.90 (2.63)	[40.62, 51.18]
實驗組	23	39.78 (12.75)	63.26 (14.27)	62.78 (2.95)	[56.84, 68.71]
兩組差距		2.37	17.74	16.88	

進一步觀察各組原始前後測變化，可作為調整均數之對照參考。實驗組後測平均數 ($M = 63.26$, $SD = 14.27$) 較前測 ($M = 39.78$, $SD = 12.75$) 進步達 23.48 分， $t(22) = -6.642$, $p < .001$ ；控制組後測 ($M = 45.52$, $SD = 14.84$) 較前測 ($M = 37.41$, $SD = 10.32$) 僅進步 8.10 分， $t(28) = -2.964$, $p = .006$ ，兩組原始進步幅度差距達 17.74 分，如圖 7。此結果與後測調整均數之分析方向完全一致。

綜合調整均數與原始進步幅度兩項分析，一致顯示 AR 學習能顯著促進學生在基礎機構知識與理解能力上的學習成效。透過 3D 互動機構模型與動畫學習，學生能觀察機構件運動軌跡、理解連桿機構結構原理，進而將抽象理論具體化。相較之下，2D 簡報教材講授法雖能提供理論框架，但在動態認知與空間推理上仍不足。此驗證結果表明，AR 教學模式不僅強化知識掌握，也提升學生的學習動機與參與度，與 Wang et al. (2018) 及 Hu et al. (2021) 的研究一致，展現其在設計教育中的應用價值與成效潛力。

圖 7

控制組與實驗組前測、後測統計分析結果

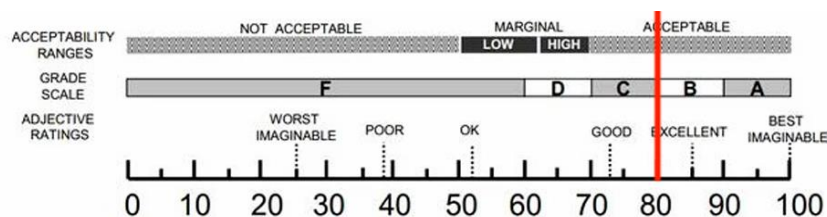


（七）SUS 易用性分析

本研究針對實驗組使用之 AR 機構教學輔助軟體進行 SUS 易用性評估，以了解學生在實際操作系統時的使用體驗與介面易用性。實驗組共 23 名學生參與評估，分析結果顯示 SUS 易用性平均得分為 80 分，如紅線所示，介於等級 C 與 B 之間，屬於「良好」（Good）等級，如所示。Brooke（1996）之評定標準，得分超過 70 分即代表系統具良好可用性，80 分則屬高使用滿意度區間，如圖 8。此結果顯示，本研究開發之 AR 教學系統在操作流暢性、介面設計與互動回饋方面皆獲得正向評價，學生普遍認為系統直觀、功能明確，能有效輔助機構學習，達到良好的使用體驗與教學支援效果。

圖 8

SUS 易用性分析結果對照表



（八）淨推薦值分析

根據本研究對實驗組 23 名學生進行的淨推薦值（NPS）分析結果，受測者在評分上呈現明顯的集中分布特徵。整體而言，評分介於 7 至 8 分的受試者人數最多，共 11 人，占總樣本的 48%，屬於被動推薦者（passives），代表其對系統持中度滿意態度但推薦意願有限。評分為 0 至 6 分的批評者（detractors）共有 5 人，占 22%，顯示部分學生對系統操作或學習體驗尚存改進空間。評分為 9 至 10 分的推薦者（promoters）共有 7 人，占 30%，該群學生對 AR 教學系統的整体體驗高度肯定，具有主動推薦意願。

綜合分析下推薦者比例高於批評者 8%，顯示系統整體評價趨向正面，受測者對於 AR 基礎機構教學軟體與學習應用抱持良好印象，具實際使用可行性。批評者 22% 可能在學習過程中出現情感或認知過載。部分受測者在操作 3D 模型與同時理解機構原理時，會感受到資訊處理負擔（Gómez-Ríos et al., 2025）。這與情感過載（affective overload）概念一致，即過強的感官刺激雖能提升臨場感，但也可能分散注意力、降低學習愉悅度。

（九）質化訪談結果：AR 學習情緒成因分析

為深入詮釋 AEQ 量化結果之情緒成因，本研究依後測成績高（ ≥ 70 分）、中（60–69 分）、低（ < 60 分）三層次，從兩組各抽取一位受測者進行半結構式訪談（共六位），並以主題分析法歸納情緒驅動因素。訪談結果顯示，控制組受測者對簡報教學的情緒反應集中於倦怠與理解受阻：受測者 01 明確表示「利用簡報學習會覺得比較無聊，缺少互動的感覺」，受測者 02 指出「只用簡報講解比較無法理解，雖然有圖片影片輔助，但可能無法快速的理理解」，受測者 03 則說明「上課時有時會聽不太懂，單純看圖片和影片比較沒有記憶點」，三者均指向靜態二維教材在機構課程中無法提供足夠的認知支撐，進而誘發焦慮（控制組 $M = 2.85$ ）、無聊（控制組 $M = 2.58$ ）與無望（控制組 $M = 2.50$ ）等負向情緒反應，與 Pekrun et al.（2011）所指出負向情緒源於學習者感知掌控感不足之論點相符。

相對地，實驗組受測者的正向情緒觸發點集中於 AR 的功能性效能而非單純新鮮感，受測者 01 表示「結合 AR 的互動因此並不會覺得那麼無聊，而且可以看到機構實際長什麼樣子以及理解怎麼運作」，受測者 02 強調 AR「可以讓不懂機構的人，能更清楚瞭解機構是如何運作的」，受測者 03 則指出「可以邊玩邊學習，有個東西可以让你直接觀察，比起透過文字去想像來的有趣」，顯示 AR 透過 3D 動態視覺化提供的即時互動鷹架，將原本需費力想像的機構運動轉化為可直接觀察與操作的具體體驗，使學習者感知到掌控感與自我效能的提升，此與 Pekrun（2006）控制價值理論中「可控性感知促進享受與自豪情緒」的預測相符，亦解釋了實驗組在享受（ $M = 4.14$ ）、希望（ $M = 4.07$ ）與自豪（ $M = 3.74$ ）三項正向

情緒，以及焦慮（ $M = 2.39$ ）、無聊（ $M = 1.76$ ）與無望（ $M = 1.92$ ）三項負向情緒上均顯著優於控制組（ $p < .05$ ）的量化結果；然而受測者亦指出部分殘餘負向情緒源於教學設計層面而非 AR 模式本身：受測者 01 提到「上課速度可以再慢一點，太快的話很容易忘記」，受測者 03 反映「裡面很多專業術語很難懂」，受測者 02 則希望「軟體可以上架，讓我在在家也可以學習與複習」，此類設計錯位所致的認知負荷干擾，與 Candido 與 Cattaneo（2025）所指出的外在認知負荷殘餘效應相呼應，顯示 AR 情緒效益的充分發揮有賴於教學節奏調控、詞彙鷹架補強與學習管道延伸等系統性設計優化。

伍、討論

本研究目的在探討 AR 教學在機構學習中對學生學習情緒與學習成效之影響，並與 2D 簡報教材教學進行比較。研究結果顯示，AR 教學能顯著提升學生在機構學習上的認知表現，與 Wang et al.（2018）與 Hu et al.（2021）的研究一致。實驗組學生在 AR 環境中能透過空間互動操作理解機構結構與運動關係，有助於形成正確的認知心理模型。根據 Candido 與 Cattaneo（2025）的多媒體學習理論，結合視覺化、互動與即時回饋的學習歷程可降低外在認知負荷、強化內化理解。本研究延伸此觀點，指出 AR 能透過具體操作與即時回饋促進機構原理的動態思考，使抽象理論具體化，進而提升學習深度與產品設計遷移能力。

在學習情緒方面，結果顯示實驗組學生的正向情緒（享受、希望、自豪）顯著高於控制組，而負向情緒（焦慮、無聊、羞愧、無望）顯著降低，與 Pekrun et al.（2011）情緒控制價值理論的預測相符。AR 互動情境使學生產生學習掌控感與成就感，強化了學習動機與情緒投入。此結果亦與 Hu et al.（2021）與 Garzón et al.（2020）研究一致，顯示當學習環境兼具互動性與沉浸性時，學生的學習滿意度與情緒正向反應會顯著提升。在本研究 AR 在教學中不僅提升認知表現，更能作為情緒催化因子，促進學習動機與持續投入。認知負荷理論與情緒學習觀點整合，提出 AR 學習不僅是資訊呈現的工具，更是認知與情緒共構的學習媒介。過去研究多聚焦於學習成效，本研究則證實 AR 在學習過程中能同時激發情緒投入與促進認知成長，支持 Candido 與 Cattaneo（2025）所提的情感中介模型，其中情緒在 AR 學習中的顯著效果量（ $\eta^2 = .558$ ）顯示情緒參與為學習成效的重要預測因子，拓展了 AR 教育研究中「情緒—認知—表現」三者關聯的理論基礎。

在實務應用上，研究結果顯示 AR 教學主要貢獻，在教學成效上，AR 可透過 3D 視覺化展示複雜機構運動，使教師能即時示範與講解，降低抽象概念理解困難。在學習參與與動機方面，SUS 易用性平均得分 80 分及 NPS 正向分佈顯示學生普遍認為 AR 系統易用、互動性佳，能提升專注度與持續學習意願。最終，在課程創新層面，AR 的互動模組能延伸至產品設計、工程模擬與專題製作，形成可重複、可延展的沉浸式學習環境，促進產品設計數位轉型與創新教學模式。本研究的實務貢獻亦延伸至產業與教育應用，研究結果提供一個 AR 具體模型，說明 AR 如何支援設計與工程教育中的技能訓練與專業培育，特別適用於工業設計、機械組裝與商品原型製造等領域。研究結果呼應 Fan et al.（2024）與 Eswaran and Bahubalendruni（2022）的觀點，指出 AR 能在工業 4.0 教育轉型中，作為促進技術理解與創新學習的關鍵媒介，兼具教育與產業價值。

本研究驗證 AR 教學能顯著促進學生的學習情緒與學習成效，不僅回應了研究問題，更在教育現場提供了 AR 融入設計專業課程的實踐依據，深化學習者對機構原理的理解與掌握。研究結果顯示，AR 不僅是資訊傳遞的教學媒介，更是整合情緒體驗與知識建構的學習生態系—透過即時互動與 3D 視覺化，使學習者在情感投入與認知理解兩個層面同步獲得提升。AR 系統所展現的沉浸性、互動性與高教學成效等特質，為產品設計與工程教育領域提供了具體可操作的創新教學模式，並為未來教育科技的發展與跨域應用奠定了實證基礎。

陸、結論與未來建議

本研究結果顯示，AR 教學能有效提升學生的認知理解與學習表現，同時增進學習情緒的正向發展。

實驗組學生在學習成效測驗中表現顯著優於控制組，顯示 AR 的即時回饋與可視化特性有助於學生建立正確的空間概念與動態思維，進而促進機構原理的內化與知識遷移。學習情緒方面，AR 環境提升了學生的愉悅感、自豪感與專注度，減少學習機構相關專業領域的焦慮與倦怠等負面情緒，證實沉浸式互動學習能強化學習動機與持續投入。

本研究確立了 AR 教學在設計教育中的理論與實證基礎，證明 AR 能作為兼具互動性、沉浸性與高教學成效的教學媒介。其貢獻在於建立情緒—認知—表現三者整合的教學架構，突破工程機構教學以 2D 靜態圖教材為主限制，使學生能以操作與觀察的方式進行主動探索學習。本研究結果顯示，AR 能有效支援產品設計教育與工業培訓場域，促進科技輔助學習的實踐。

然而，本研究存在若干限制。樣本數僅 52 人，實驗組 23 名學生規模偏低，結論普適性有待驗證；課程僅六週，無法排除好奇心態對情緒測量之干擾，亦未能觀察長期變化趨勢；此外，本研究未納入空間能力測量，相關調節效果未能獲得實證檢驗。未來研究建議擴大樣本、延長時程，並同步施測空間能力量表，以建構更完整的 AR 學習理論模型。

在未來研究方向上，AR 系統主要聚焦於機構作動呈現，尚未涵蓋力學、環境與物理模擬等要素。未來可在 VR 或 AR 中加入可調整物體重量、材質與環境參數的模擬功能，以重現真實操作條件，提升學習的真實感與應用性。同時，可開發產品組裝模擬，讓學生能自行設計與組裝機構和結構，培養創造性思維與批判設計思考的能力。除機構教學外，亦可將機械製程及力學原理整合至 AR 內容，使學生能以跨領域的方式理解結構與動能運作，達到理論與實務並重的教學目標。本研究驗證 AR 結合數位教學能顯著提升學習成效與情緒體驗，展現高互動性與沉浸性的教學優勢。AR 系統為設計與工程教育提供了創新教學範式，並為未來教育科技整合及產業應用提供實證基礎與發展方向。

致謝

本研究由教育部實踐計畫技術專案技術實作補助實驗經費（計畫編號：PSK1123455），特此致謝。

參考文獻

顏鴻森、吳隆庸（1999）。*機構學*。東華書局。

Álvarez-Marín, A., Velázquez-Iturbide, J. Á., & Castillo-Vergara, M. (2023). The acceptance of augmented reality in engineering education: The role of technology optimism and technology innovativeness. *Interactive Learning Environments*, 31(6), 3409–3421. <https://doi.org/10.1080/10494820.2021.1928710>

Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(4), 355–385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>

Brooke, J. (1996). SUS: A quick and dirty usability scale. In P. W. Jordan, B. Thomas, I. L. McClelland, & B. Weerdmeester (Eds.), *Usability evaluation in industry* (pp. 189–194). Taylor & Francis.

Candido, V., & Cattaneo, A. (2025). Applying cognitive theory of multimedia learning principles to augmented reality and its effects on cognitive load and learning outcomes. *Computers in Human Behavior Reports*, 18, 100678. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2025.100678>

- Chu, C.-H., & Ko, C.-H. (2021). An experimental study on augmented reality assisted manual assembly with occluded components. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 685–695. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.04.003>
- Chu, C.-H., Liao, C.-J., & Lin, S.-C. (2020). Comparing augmented reality-assisted assembly functions—A case study on Dougong structure. *Applied Sciences*, 10(10), 3383. <https://doi.org/10.3390/app10103383>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Cui, J., Mantelet, F., Jean, C., Lou, R., & Segonds, F. (2025). Exploring the usability and creativity enhancement of augmented reality in additive manufacturing-based product design. *Computers in Human Behavior Reports*, 20, 100816. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2025.100816>
- Davila Delgado, J. M., Oyedele, L., Beach, T., & Demian, P. (2020). Augmented and virtual reality in construction: Drivers and limitations for industry adoption. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(7), 04020079. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001845](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001845)
- Di Leo, I., Muis, K. R., Singh, C. A., & Psaradellis, C. (2019). Curiosity... confusion? Frustration! The role and sequencing of emotions during mathematics problem solving. *Contemporary Educational Psychology*, 58, 121–137. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2019.03.001>
- Erbas, C., & Demirer, V. (2019). The effects of augmented reality on students' academic achievement and motivation in a biology course. *Journal of Computer Assisted Learning*, 35(3), 450–458. <https://doi.org/10.1111/jcal.12350>
- Eswaran, M., & Bahubalendruni, M. R. (2022). Challenges and opportunities on AR/VR technologies for manufacturing systems in the context of Industry 4.0: A state-of-the-art review. *Journal of Manufacturing Systems*, 65, 260–278.
- Fan, H., Zhang, H., Ma, C., Wu, T., Fuh, J. Y. H., & Li, B. (2024). Enhancing metal additive manufacturing training with the advanced vision language model: A pathway to immersive augmented reality training for non-experts. *Journal of Manufacturing Systems*, 75, 257–269. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.06.007>
- Garzón, J., Kinshuk, Baldiris, S., Gutiérrez, J., & Pavón, J. (2020). How do pedagogical approaches affect the impact of augmented reality on education? A meta-analysis and research synthesis. *Educational Research Review*, 31, 100334. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100334>
- Gill, A., Irwin, D., Towey, D., Zhang, Y., Long, P., Sun, L., Yu, W., & Zheng, Y. (2024). Implementing universal design through augmented-reality game-based learning. *Computers & Education: X Reality*, 4, 100070.
- Goebel, J., & Maistry, S. (2019). Recounting the role of emotions in learning economics: Using the threshold concepts framework to explore affective dimensions of students' learning. *International Review of Economics Education*, 30, 100145. <https://doi.org/10.1016/j.iree.2018.08.001>
- Gómez-Ríos, M., Paredes-Velasco, M., Velázquez-Iturbide, J., & Martínez, M. (2025). Augmented reality for learning algorithms: Evaluation of its impact on students' emotions using artificial intelligence. *Applied Sciences*, 15(14), 7745. <https://doi.org/10.3390/app15147745>
- Han, P. F., Zhao, F. K., & Zhao, G. (2022). Using augmented reality to improve learning efficacy in a mechanical assembly course. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 15(2), 279–289. <https://doi.org/10.1109/TLT.2022.3166556>

- Hu, X., Goh, Y. M., & Lin, A. (2021). Educational impact of an augmented reality (AR) application for teaching structural systems to non-engineering students. *Advanced Engineering Informatics*, 50, 101436. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101436>
- Hung, Y. H., Chen, C. H., & Huang, S. W. (2017). Applying augmented reality to enhance learning: A study of different teaching materials. *Journal of Computer Assisted Learning*, 33(3), 252–266. <https://doi.org/10.1111/jcal.12173>
- Hwang, W. Y., Lin, Y. J., Utami, I. Q., & Nurtantyana, R. (2024). Smart geometry learning in authentic contexts with personalization, contextualization, and socialization. *IEEE Transactions on Learning Technologies*. <https://doi.org/10.1109/TLT.2023.3307614>
- Kalimuthu, I., Karpudewan, M., & Baharudin, S. M. (2023). An interdisciplinary and immersive real-time learning experience in adolescent nutrition education through augmented reality integrated with science, technology, engineering, and mathematics. *Journal of Nutrition Education and Behavior*, 55(12), 914–923.
- Kettanurak, V., Ramamurthy, K., & Haseman, W. D. (2001). User attitude as a mediator of learning performance improvement in an interactive multimedia environment: An empirical investigation of the degree of interactivity and learning styles. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54(4), 541–583. <https://doi.org/10.1006/ijhc.2001.0457>
- Lampropoulos, G., Fernández-Arias, P., Antón-Sancho, Á., & Vergara, D. (2024). Affective computing in augmented reality, virtual reality, and immersive learning environments. *Electronics*, 13(15), 2917. <https://doi.org/10.3390/electronics13152917>
- LeBlanc, S., Uzun, B., Pourseied, K., & Mohiyeddini, C. (2017). Effect of an emotion regulation training program on mental well-being. *International Journal of Group Psychotherapy*, 67(1), 108–123. <https://doi.org/10.1080/00207284.2016.1203585>
- Lin, H. C. K., Lin, Y. H., Wang, T. H., Su, L. K., & Huang, Y. M. (2020). Effects of incorporating AR into a board game on learning outcomes and emotions in health education. *Electronics*, 9(11), 1752. <https://doi.org/10.3390/electronics9111752>
- Liu, Q., Geertshuis, S., & Grainger, R. (2020). Understanding academics' adoption of learning technologies: A systematic review. *Computers & Education*, 151, 103857. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.103857>
- Loch, F., Quint, F., & Brishtel, I. (2016). Comparing video and augmented reality assistance in manual assembly. In *Proceedings of the 12th International Conference on Intelligent Environments* (pp. 147–150). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IE.2016.31>
- Mayer, R. E. (2022). The future of multimedia learning. *The Journal of Applied Instructional Design*, 11(4), 69–77.
- Meyer, D. K., & Turner, J. C. (2002). Discovering emotion in classroom motivation research. *Educational Psychologist*, 37(2), 107–114. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3702_5
- Moghaddam, M., Wilson, N. C., Modestino, A. S., Jona, K., & Marsella, S. C. (2021). Exploring augmented reality for worker assistance versus training. *Advanced Engineering Informatics*, 50, 101410. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101410>

- Olea-Ibarra, D., Hartmann, C., & Bannert, M. (2025). The role of enjoyment and epistemic emotions in middle school AR learning: A quasi-experimental field study. *Journal of Computer Assisted Learning*, 41(2), e70016. <https://doi.org/10.1111/jcal.70016>
- Papagiannis, H. (2017). *Augmented human: How technology is shaping the new reality*. O'Reilly Media.
- Park, S., & Yun, H. (2023). Relationships between students' affective experiences and technology acceptance in augmented reality design training in higher education. *Educational Technology Research and Development*, 72(2), 479–501. <https://doi.org/10.1007/s11423-023-10298-x>
- Pekrun, R. (2006). The control-value theory of achievement emotions: Assumptions, corollaries, and implications for educational research and practice. *Educational Psychology Review*, 18(4), 315–341. <https://doi.org/10.1007/s10648-006-9029-9>
- Pekrun, R., Goetz, T., Frenzel, A. C., Barchfeld, P., & Perry, R. P. (2011). Measuring emotions in students' learning and performance: The Achievement Emotions Questionnaire (AEQ). *Contemporary Educational Psychology*, 36(1), 36–48.
- Petrovica, S., Anohina-Naumeca, A., & Ekenel, H. K. (2017). Emotion recognition in affective tutoring systems: Collection of ground-truth data. *Procedia Computer Science*, 104, 437–444. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.157>
- Reichheld, F. F. (2003). The one number you need to grow. *Harvard Business Review*, 81(12), 46–55.
- Rizki, I. A., Mirsa, F. R., Islamiyah, A. N., Saputri, A. D., Ramadani, R., & Habibulloh, M. (2025). Ethnoscience-enhanced physics virtual simulation and augmented reality with inquiry learning: Impact on students' creativity and motivation. *Thinking Skills and Creativity*, 57, 101846. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2025.101846>
- Schutz, P. A., & Lanehart, S. L. (2002). Introduction: Emotions in education. *Educational Psychologist*, 37(2), 67–68. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3702_1
- Sharma, V., Bhagat, K. K., Huang, H. H., & Chen, N. S. (2022). The design and evaluation of an AR-based serious game to teach programming. *Computers & Graphics*, 103, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2022.01.002>
- Solmaz, S., Alfaro, J. L. D., Santos, P., Van Puyvelde, P., & Van Gerven, T. (2021). A practical development of engineering simulation-assisted educational AR environments. *Education for Chemical Engineers*, 35, 81–93.
- Stevens, J. (2002). *Applied multivariate statistics for the social sciences* (4th ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257–285.
- Wang, Y., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2018). Enhancing mechanisms education through interaction with augmented reality simulation. *Computer Applications in Engineering Education*, 26(5), 1552–1564.
- Yehia, A., Chao, J., Lyons, C., Dizaji, M. S., & Harris, D. (2022, August). A case study on leveraging augmented reality for visualization in structural design. In *2022 ASEE Annual Conference & Exposition*.