

# 基於虛實共存環境的空間認知模式探究：以建築系低年級設計課程的遠距教學環境建構為例

蕭吉甫<sup>1</sup>，陳欣道<sup>2</sup>，柯純融<sup>3</sup>，張登文<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 淡江大學建築學系助理教授，chifu\_research@gmail.com(通訊作者)

<sup>2</sup> 淡江大學建築學系大專生，dao95099@gmail.com

<sup>3</sup> 淡江大學建築學系副教授，146736@mail.tku.edu.tw

<sup>4</sup> 國立雲林科技大學數位媒體設計系所教授，tengwen@yuntech.edu.tw

## 摘要

從 2019 年開始新型冠狀病毒(Covid-19)快速蔓延，導致大多數學校為了配合政府防疫政策將原本的實體教學模式改為遠距教學(Distant Learning)。對建築系工作室(Studio)教學模式，造成巨大的影響。因此，本研究以低年級設計課程學員為對象，通過前後測的方式，驗證虛實共存環境(Co-existing Environment)技術對於學員空間認知能力的影響。本研究分為 3 個部分：(1)基於傳統基本設計中的單元化形式操作題目，發展出「轉換認知」、「尺度推算」、「完整量體」、與「單元拆解」4 種不同的空間認知選擇測驗題庫；(2)對應於測驗題庫，規劃出「調整模型比例」、「改變模矩單元」、「模型間開闢」、「調整單元組織規則」等 4 種不同的數位孿生模型(Digital Twin Model)沉浸體驗；(3)基於建築系低年級學員在體驗混合實境(Mixed Reality)體驗的認知變化，探究學員在經歷過虛實共存活動後，對其空間認知能力之影響。本研究通過空間認知能力的前後測答題成果、與使用者活動軌跡發現：使用 MR 技術有助於提高學生在 2D 和 3D 空間之間的認知轉換能力，並且有助於學生更好地理解空間中不同元素之間的互動關係。此外，在 MR 技術中適當引入與基本家具尺寸相仿的虛擬元件模塊，也可以幫助學生用堆疊的分式理解空間尺度。

**關鍵詞：**遠距教學、虛實共存環境、空間認知、數位孿生模型、混合實境。

## An Investigation of the Spatial Cognitive Model Based on the Co-existing Environment: An Example for the Construction of a Distance Learning Environment in a Junior Architecture Department Design Course

Chi-Fu Hsiao<sup>1</sup>, Xing-Dao Chen<sup>2</sup>, Chun-Hung Ko<sup>3</sup>, Teng-Wen Chang<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Dept of Architecture, Tamkang University, Assistant Professor, chifu\_research@gmail.com(Corresponding author)

<sup>2</sup> Dept of Architecture, Tamkang University, Undergraduate Student, dao95099@gmail.com

<sup>3</sup> Dept of Architecture, Tamkang University, Associate Professor, 146736@mail.tku.edu.tw

<sup>4</sup> Dept of Digital Media Design, National Yunlin University of Science and Technology, Professor, tengwen@yuntech.edu.tw

## ABSTRACT

The rapid spread of the new coronavirus (covid-19) has impact on the studio teaching mode of architecture departments. This study was conducted to verify the impact of coexisting environment technology on the spatial reasoning ability of students through a pre- and post-test. This study includes 3 parts: (1) developing 4 different types of spatial reasoning test; (2) build MR experiences corresponding to each test; (3) explores the impact of immersive activities on students' spatial cognition abilities. The findings indicate that in a MR environment, students' spatial reasoning activities involve more than just static observation behaviors. They also consciously adjust virtual objects while observing the space. The study found that using of MR technology can improve students' ability to convert between 2D and 3D space and help students better understand the interaction between different elements in space. In addition, introducing virtual component modules, similar in size to basic furniture in MR technology can help students understand spatial scales using stacked fractions. These results were derived from the pre- and post-test results of spatial reasoning abilities and user activity trajectories.

**Keywords:** Distant Learning、Co-existing Environment、Spatial Reasoning、Digital Twin Model, Mixed Reality.

## 1 研究背景

在 2019 年新型冠狀病毒(Covid-19)流行初期，台灣是少數幾個學校正常運作的國家之一，為了確保學生和教職員工的安全，台灣教育部制定了應對 Covid-19 的一般指南。該指南規定了每所大學的工作組設置、一般衛生措施、通風和衛生原則、疑似病例報告流程、隔離措施、停課政策和補課方式(Cheng, Wang, Shen, & Chang, 2020)。而在 2021 年中旬 Covid-19 在台灣之疫情嚴峻升溫，全台疫情警戒提升至第三級，為遵守防疫規範大多數學校都採用了遠距教學方式，並將線上點名、屏幕講課和全班同步線上視頻討論等教學方法取代了傳統的實體上課。而隨著遠距教學環境的全面施行，則暴露出當前設計學院的工作室文化對於數位化工具的適應性不足(Wu, 2021)。

### 1.1 設計學院的工作室文化

工作室文化被建築學者視為建築教育的核心，它是與同學或老師進行設計討論過程裡重要的空間場域。Vowles 指出，建築系學生的學習，往往發生在相互討論之間，除了項專業者學習之外，與工作室中同儕互動的學生比獨立工作的學生更能茁壯成長(Vowles, Low, & Doron, 2012)。設計工作室既是一個學習環境，更是一個複雜的社會環境，學員即使在指定的課程時間之外，也可以在沒有老師在場的情況下與同學一起工作。

然而，自 2019 年疫情肆虐開始，傳統設計工作室被迫被線上教學取代；學生們只能在指定的時間內通過各種應用程序與設計導師保持聯繫，並在電腦螢幕上展示與討論他們自己已完成的作品，因此失去了在傳統工作室和同學們「邊做邊學」的學習方式，也無法了解其他同學們目前的設計進度。

Alnusairat 指出，線上教學除了失去和同儕間相互學習的機會外，和設計老師的學習也充滿了限制。雖然設計課程教師仍能通過各種策略將傳統媒材進行數位化、包括掃描草圖、對手工模型照相、或是用數位模型檢視，然而在線上教學中，大多數設計老師仍然只能使用螢幕和口頭講述與學員溝通，當反饋僅限於一種形式時，學生往往難以建構老師對抽象空間的描述(Alnusairat, Al Maani, & Al-Jokhadar, 2021)。這些線上教學產生出的問題包括，不熟悉的技術因素、同學間互相學習的喪失、有限制的教學模式、高度的電腦技術依賴、以及學生間良性競爭的削弱。

## 1.2 虛擬設計工作室

有鑑於此，虛擬設計工作室(Virtual Design Studio, VDS)的概念開始被應用在建築學院的設計教學現場中。Rodriguez 提出的 VDS 較為廣泛地指涉各種引入數位化工具的教學和學習形式。只要參與者的交流和合作是通過非同步數字工具進行調解，從而得以克服地理或空間障礙即可指稱知。(Rodriguez, Hudson, & Niblock, 2018)。

VDS 主要聚焦於學習時間的彈性與自由度，允許學生隨時進行隔離學習，並使用視頻會議和 Skype 和 Facebook 等社交網絡等互動技術與教師和同學交流。許多學校甚至將 VDS 的概念擴大到大部分的教學業務上，例如英國的開放式大學(Open University, OU)，便創建了整合性的線上工作室工具(Open Design Studio, ODS)，讓學生可以在上傳並在一個群組中與同儕和老師分享作品。在當前的技術環境底下，ODS 的主要功能是以視覺方式交流和共享數位作品，學生可以在查看其他學生的工作時產生內在的動機並達成自我技術的比較(Jones, Lotz, & Holden, 2021)。

### 1.3 空間認知與沉浸式環境

然而，對於設計學院，尤其是建築系而言，三維空間的設計討論，本就難以單純通過平立剖面圖面進行表達，往往需要通過實體模型的製作輔助，才能有效檢視學員對空間組織與構成方式的有效理解。尤其對低年級的設計學員而言，如何從平面的呈現上，評判學員是否對於三維空間組織的正確理解與認識，讓多數的設計老師仍傾向通過面對面的交流與模型輔助，協助確認設計學員對空間敏感度與操作技術的認知。

面對前述困難，Tang 提出混合實境(Mixed Reality, MR)與虛實共存(Co-existing Reality, XR)技術，能有效協助教師與學員進行空間認知與組織模式的交流。他指出，MR 將現實世界和虛擬世界融合到一個新的環境中，而 XR 技術則讓使用者與虛擬數位內容進行動態互動；Tang 認為將 MR 技術融入設計學習歷程，不但通過其沉浸式的環境帶給學生更高的參與度，更有效明瞭地進行教材傳達；而 XR 技術更能夠協助老師們在需要交流討論時，為學員帶來更真實直接的體驗反饋(Tang, Au, & Leung, 2018)。

因此，本研究擬探討後疫情時代下，應如何通過 MR 與 XR 技術應用，提供低年級的設計

學員更完善的 VDS 環境，探究如何通過線上教學模式，整合設計教學目標與數位工具。

## 2 文獻探討

### 2.1 空間認知教學與測驗方法

Tepavčević 探討了建築教育中製作過程對學生空間認知的影響，並分析了幾所澳大利亞和亞洲建築學校在教學中使用製作過程的方式。他認為，當代的建築設計思維模式一直在繪畫和製作、視覺和材料之間搖擺不定。在數位時代的教學法模型(Pedagogical Model)中，應拓展傳統的紙張導向設計思考(Paper-Based Design Thinking, PDT)模型，並進一步通過做中學(Learning by Making, LBM)模型引入先進的參數化設計方法和製造技術。Tepavčević 認為，強化數位實踐經驗與協作，不僅帶來新的設計思維模式，也有機會調和設計過程中真實與想像的雙重特質。(Tepavčević, 2017)。

Ramful 曾基於心理旋轉 (Mental Rotation)、空間定向 (Spatial Orientation)、空間視覺化 (Spatial Visualization) 發展出一個空間認知能力測試工具 (Spatial Reasoning Instrument, SRI)。他認為基於上述三項構面，能夠有效地測試學員在數學、科學、技術、工程等相關科目的空間操作和任務執行能力 (Ramful, Lowrie, & Logan, 2017)。

此外，Cho 則是針對大一建築專業的學生使用包括：Torrance 創造性思維(Torrance Tests of Creative Thinking, TTCT)、心理旋轉、紙摺(Paper Folding)、建築空間能力(Architectural Spatial Ability Test, ASAT)、空間尺度認知、空間組織規則、物件空間想像(Object-Spatial Imagery Questionnaire, OSIQ)等綜合性測試測試，並將它們與設計工作室課程的最終成績進行比較。結果發現創造力、空間能力和視覺認知風格等觀察得分能力與工作室課程成績之間沒有相關性；但是，Cho 也指出一般空間能力確實和物件位移、空間模矩、卡扣空間想像、與單元組織規則等概念存在正相關(Cho, 2017)。

### 2.2 體驗式教學環境

工作室是建築教育的核心，Kurt 指出，建築課程以「邊做邊學為重點的設計工作室模式」為基礎，提供了合作、感受、建構主義、專注於問題的體驗式教學環境(Kurt, 2009)。工作室當中的學員除了進行學習之外，該場景中更涉及了無數的社交、再現、和體驗活動。因

此設計工作室的空間環境通常是為了支應交流、協作和分享。

Vyas 認為工作室環境是一種基於持續性對話、評論彼此工作而促進溝通技術的學習場域。設計者在工作室中存放的各種設計草圖、繪圖、故事板、拼貼畫、實體草模、環境地形、與大樣模型等不同的表現形式被附加到工作室空間中，這些製品的存在標誌著每位學員的價值感、恥辱感、公共可用性和知識地標，有助於支持設計學院之於教學環境所蘊含的溝通和協調意義(Vyas, van der Veer, & Nijholt, 2013)。

Sidawi 表示工作室內的交流和討論對於開發創新的設計方案有很大的幫助，因此學生待在學院工作的時間往往比宿舍還長。部分學生表示每當做完一個設計方案時，他們會將其展示給其他同學並得到反饋(Sidawi, 2012)。此外，Świeściak 也指出，學生喜歡在教師和同學的附近面對面討論新的設計替代方案，他們會提出問題、針對可能的問題展示動手解決方案、提供反饋並引發反思。根據學生的說法，親臨現場並獲得即時反饋也會影響他們在設計工作室期間的積極性和注意力水平(Komarzyńska-Świeściak, Adams, & Thomas, 2021)。作為一個互動空間，在參與者之間建立牢固的聯繫，學生們可以在此開展設計工作、與朋友交流、討論和分享。這些主要依賴於非結構化和短暫的活動的社會活動較能在線上環境中被體現出來(Ceylan, Şahin, Seçmen, Somer, & Süher, 2021)。

針對上述這些對面對面交流的依賴，都暗示著設計教育需要基於工作室場域中的練習，使得設計教育者很難將技術驅動的變革轉變為在線教學。

Gogu & Kumar 的研究表示，唯有學生參與度高且教師反饋即時，設計中的線上合作才有可能成功完成。以工作室為基礎的藝術、建築和設計教學的特點已被確定為支持互動、主動學習以及社會參與，同伴學習和小組討論是學習過程中不可或缺的一部分。當前的線上課堂雖然提供了隨時隨地教學和學習的便利，節省了時間和精力，但唯有通過具有回饋性的混合實境空間體驗，才有機會在缺失社交活動的沉浸式線上環境中，體現出設計與空間的認知與理解，進而有助於學生更好地參與課堂與空間認知的建構(Gogu & Kumar, 2021)。

## 2.3 混合實境(MR)

MR 結合了虛擬世界和真實世界，並創建了一種不同於傳統的環境體驗，使得虛擬對象和真實空間可以共存，並且即時相互作用(Wang & Dunston, 2008)。由於 MR 允許更程度的數位整合，因此得以作為一種具有回饋與真實空間疊合的嶄新教學環境。

Hosny 在其前瞻性的技術報告中曾指出，使用 MR 的優勢在於可以刺激視覺、聽覺、觸覺等感官，從而實現更有效的學習活動。結合真實和虛擬環境可以使學生更積極地參與學習過程，並且激發創造力。此外，MR 技術也可以有效用於增強合作任務，例如建築系學生可以同時查看現實環境，以及疊加在環境上的數位模型。此外，當團隊中的成員圍坐在桌子旁能夠同時看到彼此，而三維模型則漂浮在他們中間，這使得對話行為可以更接近真實的面對面合作，而不是盯著屏幕的討論(Hosny & Abdelmohsen, 2004)。

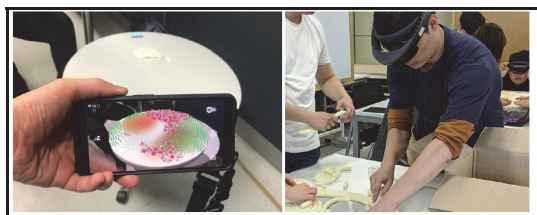


圖 1. MR 技術運用於景觀建築設計應用，資料來源：(Lee et al., 2021)

隨著數位技術的快速進步，Lee 將 MR 技術通過三維應用軟體的外掛套件 fologram 應用在景觀建築設計上。fologram 允許多個設備同時進行，Vermisso 指出這種同時檢視技術的重要性，在於當所有使用者們可以即時查看相同的模型時，能夠有效地在設計發展的交流討論上，為團隊成員帶來更多的參與度、並降低抽象、錯誤的討論目標(Vermisso, Thitisawat, Salazar, & Lamont, 2020)。

而 Emo 則進一步表示，當設計團隊的參與者都被分配頭像後，不但使討論過程可以更加生動，還可以讓學員與老師在演示期間更有參與感，並且沉浸在混合實境中交流與評論的氛圍中(Emo, Gerber, & Hölscher, 2021)。

此外，Lee 則指出通過穿戴/或手持式裝置、和三維應用軟體之間建立的數據連接，學習者能夠通過在物理材料和虛擬模型間的來回發展來檢驗設計成果。在成果討論的過程中，學員與教師必此之間不需要任何圖紙作為媒介，而是直接檢視立體模型並進行有效的修改

(Lee, Hahm, & Jung, 2021)。

## 2.4 虛實共存環境

除了與真實環境疊合的 MR 技術之外，虛實共存環境的開發，則是進一步加入互動回饋，為當代的建築學習環境提出了不同於傳統工作室的可能性：Sepasgozar 指出虛實共存在建築學習的應用，可能會改變基於實踐的課程之教育方法。通過在虛實共存環境中展示 MR 技術，能夠協助老師向初級的設計學員溝通空間組織的架構、描述空間氛圍，並根據沉浸式體驗快速建構出學員對空間環境溝通體系(Sepasgozar, 2020)。

通過在 MR 環境中加入數位孿生(Digital Twin, DT)的即時反饋機制，能夠更有效地實現世界與虛擬世界交互和融合的沉浸體驗(Chen, 2021)。DT 是多物理場、多尺度、超保真的模擬環境，通過架設感測器，以及隨處運算技術的整合應用，能夠即時將環境中的各項數據資料記錄下來成為數位孿生模型(Digital Twin Model, DTM) (Tao, Zhang, Liu, & Nee, 2019)。DTM 可以根據機能需求，應用於定義各種不同尺度、不同目的性空間的指涉，並將數字產品模型擴展到系統模型(Schleich, Anwer, Mathieu, & Wartzack, 2017)上。

Hsiao 的案例則演示出這種新形態的共存交互工作流程的可能應用策略，幫助設計師了解材料成分的變形狀態，並幫助工作人員達到預期的效果。此文獻提出了沉浸式交互環境的可能性和靈活性，這種基於團隊的製造方法可以幫助設計師在團隊中的工作，因為它縮小了虛擬與現實、反射與自動化以及人與機器之間的差距(Hsiao, Lee, Chen, & Chang, 2020)。

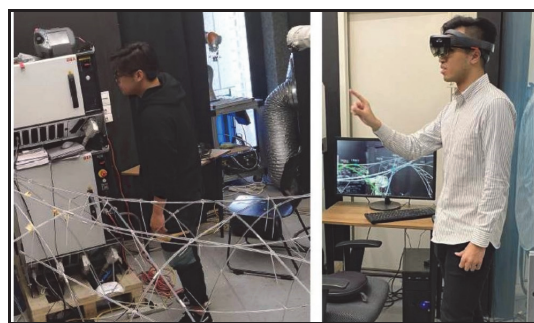


圖 2. 身體運動驅動機械手臂運動狀況，資料來源：(Hsiao et al., 2020)

結合 MR 與 DTM 技術，也可以稱之為延展實境(Extended Reality, XR)，協助將過去只存在於設計學員腦海中，尚未明確的物件，通過實體與虛擬世界透過數據即時傳輸，使其同步

存在於現實和虛擬世界。而教師引導者，則能夠通過觀察虛擬空間與學員間的互動，要求學員說明、標記自己對空間的認知內容，並通過虛實共存環境達成共識，協助教師理解學員對腦海中想像空間的可能樣態。Darwish 便指出，XR 的使用已經讓當代的建築教育得以開始朝向參與式方式進行學習。XR 允許學生在實際尺度上體驗他們的設計項目，並協助教育者更有效地確認學員的設計成果。Darwish 通過實驗的前後測結果，說明了在建築教育的早期設計工作室中實施 XR 技術及其對學生整體空間能力水平的影響的優勢 (Darwish, Kamel, & Assem, 2023)。

Chen 指出這種基於 DT 與 MR 的教學模式，可以模擬學生從課後自學、課內學習到課後復習的全過程。他指出，模擬結果可以引導教師從多個維度、多角度了解學生的學習過程，進而發現學生喜歡的學習方式、腦海中存在卻不知如何表達的問題 (Chen, 2021)。

## 2.5 小結

根據文獻回顧內容，本研究了解到後疫情時代下，工作室教學的新形態需求，包括有效的社交討論互動、多元的學習方式和即時的反饋等等。而在數位工具的文獻收集與理解後，基於 MR 技術(1)允許高程度的數位整合、(2)虛擬和真實可以共存且即時相互作用、(3)高同步的交流與評論，等等優勢，本研究認為 MR 技術適合作為新型態虛擬工作室之策略。為印證此論點，本研究將繼續以建築系低年級的設計發展與認知變化為例，實際測試與探討 MR 技術之應用對於設計學員空間認知能力之影響。

## 3 虛實共存環境的空間認知模式

### 3.1 研究對象

本次研究的對象為建築系一年級學生，以建築設計(一)課程中的「砌築：織理與物件」設計題目作為研究範圍。透過新型態虛擬教學模式，研究學生在空間體驗方式上的學習成效。

在此研究中，我們選擇低年級學生作為受試者，因為他們對於建築設計領域的操作與空間認知還不夠熟練。因此，對於新型態的空間體驗方式會較感興趣，進而影響其對空間尺度與空間感的認識，也可以更有效地判斷研究成效之差異。

如前所述，本研究以設計題目「砌築：織理與物件」為研究範圍，此設計題目要求學生在兩周內理解單元物的織理性與組構性，並以灌注體為操作單元，思考如何由已知單元堆疊產生具有連續性的整體型態，並且訓練學員能展現其組合形態特徵，進而達成空間之多變性練習。

- (1) 學習單元物體在不同比例(局部、全體)、不同角度(等角、消點)、不同面向(側視、上視、透視)轉換時的認知方法。
- (2) 針對建築的空間尺度與人體尺度概念，希望透過模矩單元之堆疊來讓學生辨識自身與空間的關係，並了解空間尺度推算的基本觀念。
- (3) 通過將完型量體進行拆解與拉開的設計操作動作，使學生了解單元量體間的卡扣關係，進而思考「實空間」與「虛空間」的對應邏輯。
- (4) 在學生理解單元間的組織邏輯與規則後，進一步探討當單元的數量與規則增加時，如何組構成連續的組織形態，並塑造出不同的空間型態。

### 3.2 研究流程與系統

在確認上述研究對象與目標課程後，本研究參考 Assessment Center、UKCAT 的空間認知與感知測試題庫 (Spatial Reasoning and Awareness Test) 進行研擬，通過測試-重測試法 (Test-Retest) 提供給 20 位建築系學員進行皮爾森積差相關係數 (Pearson product-moment correlation coefficient) 的信度測試值為 0.65 具高度一致性。

在測驗題與體驗內容的設計規劃上，本研究與建築設計(一)的指導老師討論教學目標，以在質性上確保其內容效度(Content Validity)與構念效度(Construct Validity)效度。並歸納出 20 題的單選選擇題題庫，每題皆有四個答案可供圈選。此外，基於教學內容與教學目標，20 題的題庫又可區分為四種題型，包括：(1) 轉換認知、(2) 尺度推測、(3) 量體完整性、以及(4) 單元拆解；分別對應虛實整合體驗操作中的四種互動操作：(1) 單元移動縮放、(2) 空間模矩尺度判斷、(3) 虛實量體卡扣空間、(4) 單元組織規則研擬四個項目。

最後，本研究藉由 fologram 技術作為虛實整合體驗的媒介，並通過不同的前後測驗題庫作為 MR 技術對空間認知能力影響的檢證回

測手段。在測驗成績與體驗紀錄的檢驗下，本研究能清楚釐清受試者在不同型態的空間認知有何差異與轉變。此外，本研究並通過學生反饋與觀看軌跡的資訊上，基於受試者客觀與主觀兩個層面分析探討，進而更全面地了解沉浸式體驗與空間感知的關聯性。

試驗活動於 3 公尺見方的圖書室空間當中執行。本試驗為質性調查，受試者一共 6 人，分為 2 組，每組 3 人。總體流程圖如下圖 3，受測者執行時間為 40 分鐘，包括：受試者進行前測試題 10 分鐘、做完前測後 20 分鐘為受試者使用 fologram 進行空間體驗、並於最後 10 分鐘提供受試者進行後測之測驗。

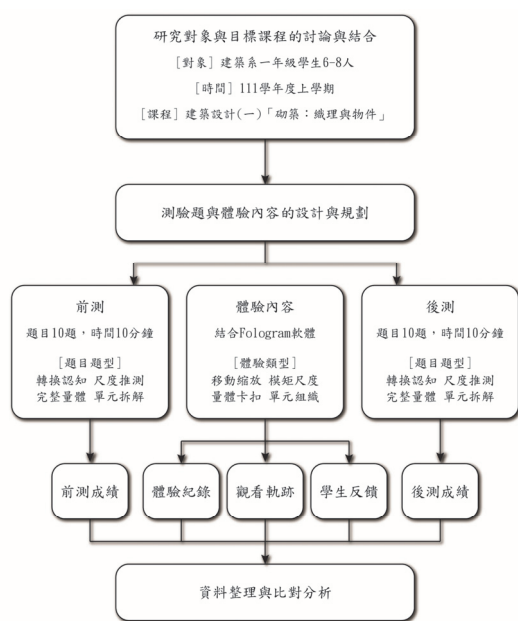


圖 3. 本研究流程圖，本研究整理

### 3.3 空間認知模式測試

本研究的測驗目的主要是瞭解學生對於空間思維和感知方面的能力，並透過答題的正確與否對比，更加直觀地比較空間能力的提升和改變。在題目類型的設計上，主要針對虛實共存環境的體驗內容進行設計，分類出以下四種題型：(1)轉換認知、(2)尺度推測、(3)完整量體、(4)單元拆解。

(1) 轉換認知：此題型聚焦於單一物體在透視圖、側視圖和俯視圖之間的切換。採用不規則的量體作為題目主體，讓受試者依據量體的缺角和空隙所呈現的線索判斷答案。透視圖有整體等角透視和局部消點透視兩種，檢驗受試者對於物體和環境的距離關係能力，以及在轉換「局部」和「整體」時的認知方法。

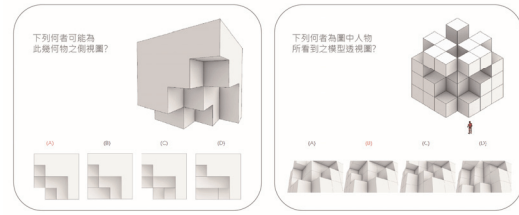


圖 4.「轉換認知」測驗題型，本研究整理

(2) 尺度推測：建築空間中尺度的認知是建築設計的基礎。此題型之目的在於檢驗受試者對於人體和家具的基本尺度了解，並通過小尺度參照物的累加和堆疊推算出大尺度的空間規模。



圖 5.「尺度推測」測驗題型，本研究整理

(3) 完整量體：此題型要求受試者思考當一個完整量體被拆分為兩塊不同的量體後，兩者之間存在的互補和卡扣關係。出題方式是通過其中一部分量體的幾何線索尋找另一部分量體，或者給予量體拉開後的裂縫空間讓受試者判斷兩者是否能組成一個完整的量體。

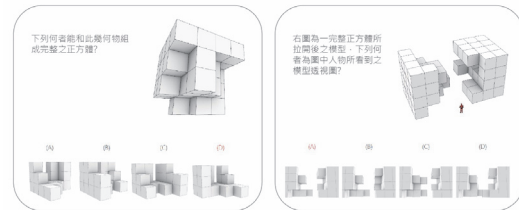


圖 6.「完整量體」測驗題型，本研究整理

(4) 單元拆解：此題型又分為兩種拆解方式，第一種是將聚合體拆解為單元體，第二種是將單元體拆解為展開圖。對於前者，受試者需要理清聚合體的組織邏輯，並對應單元體的組織可能性；對於後者，則需要檢驗受試者對於三維空間的假想能力，並需要清楚梳理每個面和折線的空間關係。

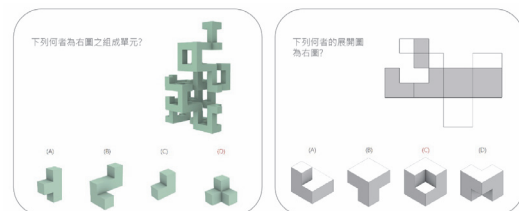


圖 7.「單元拆解」測驗題型，本研究整理

### 3.4 建構虛實共存的數位孿生場景

本研究使用 520cm x 490cm 大小的建築系圖書館空間進行測試。具體配置如下圖 8：將長形方桌椅 U 型排列，圍塑出中間的虛擬模型空間，並讓受測者受試者坐在圖中左方面對投影螢幕的位置。與此同時，虛擬模型定位點的 QR code 則是放置於桌面角落。

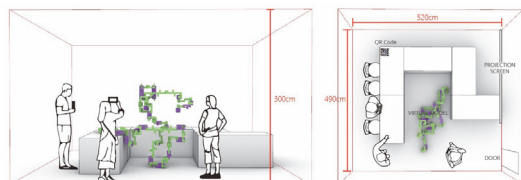


圖 8. 使用者與空間之相對關係圖，本研究整理

在完成前測後的 20 分鐘內，受試者會體驗虛擬空間。研究人員將 fologram 手機應用程式的連結投影到投影幕，並協助受試者瞭解初步的軟體操作方法和網路設置。在受試者通過與 wifi 連結後，可以將虛擬模型下載到移動裝置的數位孿生空間中，接著引導受試者移動到桌面上的 QR code 旁掃描定位點，以確保虛擬模型在實體空間中定位正確。以上流程將在四種不同的虛實干涉體驗中重複執行。

### 3.5 虛實共存空間體驗內容

在受測者成功定位模型位置後，研究人員先示範與指導參數的操作，並讓受試者自由走動與觀看虛擬空間與模型。每次體驗城市的内容約 5 分鐘，依序展示設計題目「砌築：織理與物件」中，四種主要的空間認知教學目標：(1) 單元移動縮放、(2) 空間模矩尺度判斷、(3) 虛實量體卡扣體驗、(4) 單元組織規則研擬。

- (1) 單元移動縮放：下圖 9 為體驗活動的執行示意圖。本體驗項目在互動操作上主要為體驗滑動、旋轉與縮放畫面中的虛擬模型，讓受試者先初步的熟悉數位工具的使用模式。操作介面中可調整的參數為模型的縮放比例，受試者除了能直觀的對模型任意放大縮小外，也能透過參數的調整來控制模型的精確比例。

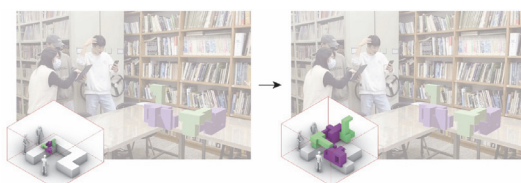


圖 9. 移動縮放的空間認知場景，本研究整理

本體驗以教學目標 1 為出發點，藉由在空

間中虛擬模型的自由操控與變換，讓受試者快速體驗物體在不同狀態下的認知方法。體驗中的目標模型，為研究課程中「砌築：織理與物件」的範例單元，其中兩種單元分別以兩種不同的方式組構在一起，因此受試者在體驗的過程中也能對其之後的設計發展產生不同的啟發性。

在與測驗題的對應上，本體驗與題型 1「轉換認知」相互關聯，題型 1 中物體不同視圖的轉換考題，可以透過虛擬模型的移動、旋轉與縮放，更直觀的讓受試者了解空間與模型的關聯概念。

- (2) 空間模矩尺度判斷：本體驗示意圖如下圖 10，主要藉由調整模矩單元的數量參數，讓單元從測試空間的角落開始堆疊與增殖。本例主要使用邊長為 50 公分的正方體單元，其增殖規則，會優先沿著空間的邊緣生長，接著再隨機由起始角落向外蔓延直到佈滿整個測試空間。而單元間皆為通過碰撞規則定義限制銜接方式，不會產生卡扣與重疊的情況。

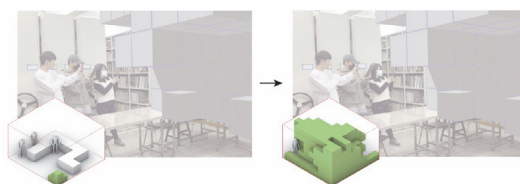


圖 10. 模矩尺度的空間認知場景，本研究整理

本體驗以教學目標 2 為出發點，透過模矩單元疊加並填滿整個空間，讓受試者了解到空間的疊加性與分割性，並且可以透過小的物件尺度去推算大的空間尺度，進一步辨識人體尺度與空間尺度之關聯。

在與測驗題的對應上本體驗與題型 2「尺度推測」相互關聯，利用虛擬模型的量變操作，可以啟發受試者對於空間尺度的推算概念。

- (3) 虛實量體卡扣空間：本體驗為第 3 項體驗活動，其設置如下圖 11 所示，主要針對一完整量體被拆解拉開後所產生的空間關係做體驗。體驗上可調整的數值有(1)X 軸方向之位移量、(2)Y 軸方向之位移量、(3)縮放比例等三項參數，經由 X、Y 軸的位移控制可決定量體的完整與分裂程度，並透過縮放比的調整，能與測試場域產生新的空間關係。

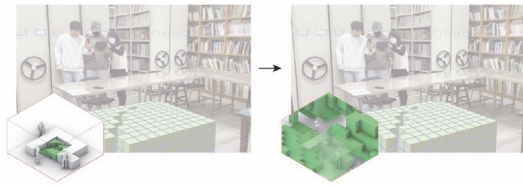


圖 11. 量體卡扣的空間認知場景，本研究整理

本體驗以教學目標 3 為出發點，通過將虛擬完型量體的拉開，使學生了解單元量體間的卡扣關係，接著將模型尺度放大並疊合到測試空間中，讓受試者能穿梭與體驗模型拉開後的裂縫空間，進而用身體尺度去感受實與虛的空間對應關係。

在與測驗題的對應上本體驗與題型 3「完整量體」相互關聯，題型中檢驗的量體互補關係，可以透過實際的拉開虛擬模型來探討；而題型中要求判斷答案的裂縫空間，也可以透過尺度的縮放來檢視學習。

- (4) 單元組織規則研擬：本體驗包含三項調整參數，分別為：(1)單元數量、(2)模型尺度、(3)組織模式、以及重置規則。主要延續體驗 1 的範例單元作為體驗中的目標模型。通過不同組構規則模式的切換，來產生複雜的組構樣態，並讓受測者通過參數變化與虛擬模型的預判過程，思考規則與

組織模式的可能關聯性如下圖 12。

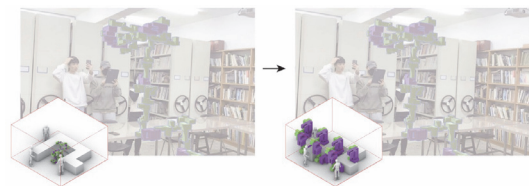


圖 12. 複合組織的空間認知場景，本研究整理

本體驗之構想以建築設計題目「砌築：織理與物件」最後的成品在思考上有相同的關聯性。首先在「組織模式」為體驗 1 之邏輯規則模式時，受試者可以了解到組織規則與整體樣態之間的關係，並且在規則限制下單元會以相同的迴圈邏輯持續生長；而在「組織模式」為隨機運算模式時，則可以透過不規則的組織樣態來啟發受試者對於其設計題目之想像。當小尺度的單元操作理解後，可以調整「模型尺度」的參數值讓單元聚合物放大到空間尺度，進而了解不同樣態的聚合物會塑造出何種不同的空間型態。在與測驗題的對應上本體驗與題型 4「單元拆解」相互關聯，題型中檢驗受試者對於單元間的組構與相對關係，可透過觀察虛擬模型的數量生長過程來了解與學習。

表 1. 本研究受測者前後測答題成果

受測者	轉換認知		尺度推測		完整量體		單元拆解		答對題數	
	前測	後測	前測	後測	前測	後測	前測	後測	前測	後測
學生A	75%	100%	50%	50%	100%	100%	50%	50%	70%	80%
學生B	75%	50%	0%	50%	100%	100%	50%	0%	40%	50%
學生C	75%	25%	100%	50%	100%	0%	50%	0%	60%	20%
學生D	50%	100%	100%	0%	100%	100%	50%	100%	70%	80%
學生E	100%	75%	50%	0%	100%	100%	100%	100%	90%	70%
學生F	50%	75%	50%	50%	50%	100%	0%	50%	40%	70%
學生G	100%	100%	0%	100%	100%	50%	50%	100%	70%	90%
學生H	75%	75%	100%	100%	50%	100%	100%	100%	80%	90%
學生I	75%	50%	50%	100%	100%	50%	100%	50%	80%	70%
學生J	50%	50%	50%	100%	50%	50%	100%	100%	60%	70%
學生K	50%	75%	0%	100%	50%	50%	100%	50%	50%	70%
學生L	75%	100%	50%	0%	100%	75%	50%	100%	60%	80%

本研究整理

#### 4 成果整理與分析

本研究記錄了 12 位受試者在實驗過程中的答題結果，並按照題目類型進行整理，如上表 1。其中每次測驗皆包含 10 道題目。在這 10 道題目中，除了「轉換認知」類型的題目有 4 道之外，其餘題目均為 2 道。

根據上表所整理的前後測答題結果，可以發現扣除掉極端值學生丙之外的學生，普遍在後測的答對題數上比起前測皆有一定的進步。而學生 C 在後測答題時，其錯誤率相較於前測異常的高，本研究欲在後續與各員進一步進行回饋討論時，該員也表現出消極性的態度。因此，本研究在表 2 的比較表單中，加入了前後測的平均值、標準差、變異數、以及成對雙樣

本 t 檢驗 (paired t-test)後得出的 p 值(p-value)。

縱觀兩次答題結果，除了「完整量體」項目外，後測的平均得分，皆比前測要高。此外，在排除極端值後，本研究發現到前後測平均分數差表現出顯著的提升；此外，全局答對率的 p 值落在 0.04，可以看出受測者在通過 MR 技術介入前後認知能力測試結果，表現出較佳的前後相關性。本研究基於設計題目「砌築：織理與物件」中的「轉換認知」、「尺度推測」、「完整量體」、與「單元拆解」等題型相對應體驗項目上的前後測表現，臚列學員樣本在認知能力上的改變與推論如下：

- (1) 「轉換認知」題型中的「單元移動縮放」體驗，同時也是受測同學首次嘗試並學習適應 MR 技術的階段。根據前後測平均值的變化以及較低的 p 值數據，本研究推測沉浸體驗中，使用者通過控制並觀察虛擬模型彼此交互影響的過程，能夠有效地對低年級學員在 2 維 3 維度空間認知轉換能力上取得一定程度的提升作用。
- (2) 在本研究的 4 類空間題型項目中，「尺度推測」類型在前後測間的進步幅度最大，

本研究推測通過沉浸體驗，學員們能夠開始理解用模矩單元的堆疊，進行空間尺度計算的感知方法。然而，本類型項目的答對比例也同時也是所有題型中最低的，顯見低年級學員對於空間中各種家具或身體的基本尺度仍欠缺有系統組織的資料。

- (3) 「完整量體」題型中，學員的前後測表現出差異不大，此外其平均得分更為 4 類型中最高的，顯示出學員本身對於完整量體間，相互互補的關係，原先即擁有較佳的感知能力。在相對應的體驗例中，主要是通過 MR 模型量體間凹凸的關聯線索，理解實空間與虛空間的對應關係。
- (4) 「單元拆解」題型，對應到「組織規則研擬」體驗，則是基於教學目標，期待受測同學開始思考使用參數化規則發展聚合性空間設計方法的概念。
- (5) 在前述兩者「完整量體」、與「單元拆解」題型項目中，其 p 值均大於 0.5，本研究推測受測者在這兩個體驗階段，花費更多時間在習慣操作方法，與重構新的空間認知與設計策略，故並未在前後測的答題中顯現出受沉浸式體驗的明顯影響。

表 2. 本研究受測者前後測之比較分析答題成果

分析項目	轉換認知	尺度推測	完整量體	單元拆解	答對題數
前測平均值	71%	50%	83%	67%	64%
後測平均值	73%	58%	73%	67%	70%
前測標準差	17.2%	35%	23.6%	31.2%	15%
後測標準差	23.8%	40%	31.4%	37.3%	18.3%
前測變異數	3%	12.5%	5.6%	9.7%	2.2%
後測變異數	5.7%	16%	9.9%	13.9%	3.3%
p值	0.809	0.658	0.408	1	0.33
排除學員C作為極端值的狀況					
前測平均值	70%	45%	82%	68%	65%
後測平均值	77%	59%	80%	73%	75%
前測標準差	17.9%	33.4%	24.1%	32.1%	15.6%
後測標準差	19.8%	41.7%	23.4%	32.8%	10.8%
前測變異數	3.2%	11.2%	5.8%	10.3%	2.4%
後測變異數	3.9%	17.4%	5.5%	10.8%	1.2%
p值	0.391	0.493	0.821	0.724	0.041

本研究整理

#### 4.1 空間認知測驗侷限與修正

在整個試驗活動完成後，本研究依據測

驗題的討論、出題、測驗與反饋等各階段中，所產生的問題與可改進的部分做梳理，並整理如下：

- (1) 在「轉換認知」題型中，色調為灰階的模型在明暗的差別上較為不明顯，使受試者在閱題與判斷上略為吃力。題目中 45 度等角透視的模型會造成物件前後疊加的觀看錯覺，導致受試者對於題目的誤解與判斷上的困難。
- (2) 在「尺度推測」題型中，參照物與題目答案之比例若相差太多，會使受試者累加時所產生的誤差太大，造成答案判斷的偏差與錯誤。
- (3) 在「完整量體」題型中，量體的格線在消點透視的變形下部分會較為模糊，使受試者在答題上較為困難。
- (4) 在「單元拆解」題型中，展開圖僅使用白與灰兩種色調表示，讓受試者在假想空間摺疊中需花較多時間思索與判斷。

本研究測驗題部分的樣本數為前後各 10 題，在答題數據取樣的數目上略為缺少，因此在研究成果的收集與分析上會較為侷限。

## 4.2 虛實共存體驗建構策略

在體驗活動的設計、體驗與反饋階段中，本研究將遇到的問題與可改進的部分依序列出，並整理如下：

- (1) 在「單元移動縮放」體驗中，範例單元的初始狀態為相互卡扣在一起，受試者可以透過拉開單元來了解模型的卡扣方式。但虛擬模型彼此間並沒有碰撞參數，因此很常造成模型的形體重疊，並無法呈現真實物體間的摩擦與碰撞反饋。
- (2) 在「虛實量體卡扣空間」體驗中，由於測試空間書櫃與桌面上有些許雜物，讓體驗時的虛擬模型在空間的尺度疊合上，產生視覺上的偏移與誤差。
- (3) 在「量體卡扣」體驗中，當模型尺度放大並疊合到空間中時，模型的外圍部分會超出整個測試空間的邊緣，因而造成體驗上的不協調感。
- (4) 在「單元組織規則研擬」體驗中，雖可透過體驗內容發現單元組織的眾多可能性，但虛擬模型間並未考慮實際的物理特性，因此呈現的許多聚合型態無法在現實生活中實踐，使得受試者在體驗與設計題目中產生落差。而單元量體在數量增加生長後，有時會與測試空間的桌椅雜物重

疊，造成視覺上的偏差。

- (5) 此外在環境設置階段中，若同時有三台以上的行動裝置連接 fologram 體驗內容時，軟體就會產生延遲與當機的情況。而在空間的設置上，定位 QR code 的位置距離虛擬模型區域稍遠，讓受試者在體驗上的動線略為不流暢。

## 4.3 空間認知活動受沉浸體驗影響關聯性

本研究在執行過程中，發現到在虛實共存與互動技術反饋的沉浸體驗環境下，空間認知活動不只是靜態的觀賞行為，而是一段動態變化與調整的過程。得利於數位技術，本研究使用 fologram 將行動裝置的運行軌跡記錄下來，並表現為行為意圖與距離熱圖，進一步分析在沉浸式體驗中，受測者的行為活動如何與注意力焦點相互影響，如圖 13。



圖 13. (左)學生沉浸式體驗實況、(右)裝置軌跡紀錄狀況，本研究整理

- (1) 單元移動縮放：本體驗模式將定位 QR Code 置於空間平面的西北方，因此所有體驗的觀看軌跡皆以定位 QR Code 附近為出發點，加上體驗空間中桌子的排列位置對於受試者的移動有阻擋效果，因此在觀看軌跡的分布上會集中於測試空間的西側座位區，如下圖 14(左)。  
行為意圖：模型的觀看軌跡路徑多分布於空間西側，其主要原因為在「移動縮放」體驗中通過各種滑動、旋轉與縮放虛擬模型的手勢即可改變空間體驗，讓受測者習慣於定點觀察空間與模型的變化關係。  
距離熱圖：此體驗之距離熱圖中一半以上的觀看點皆呈現黃紅色，說明受試者在體驗時大部分皆以近距離式的方式來觀看模型，以便探討與操作單元量體型態上的移動與變化。

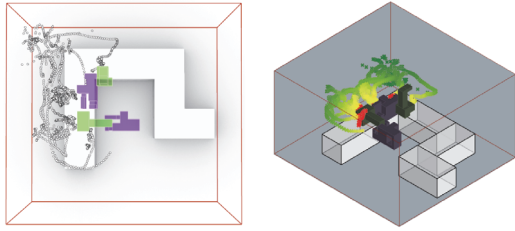


圖 14、(左)單元移動縮放體驗活動軌跡、(右)模型空間與受測者距離關係熱圖，本研究整理

- (2) 空間模矩尺度判斷：本體驗模式的觀看軌跡點多為小群體分布，且彼此間無連續點相連。這說明受試者在觀看此體驗內容時，多以相同的面向和角度觀察虛擬模型的變化，如下圖 15。

行為意圖：軌跡分布中位於桌子的外圈部分為掃描定位 QR Code 後的體驗出發點，而內圈部分則為受試者欲更接近模型位置所移動到的定點。受試者多藉由從更高的觀看角度俯視拍攝模型的生長變化。距離熱圖：本體驗內容主要讓受試者透過模矩單元的堆疊去比較空間家具與尺度之間的關係，軌跡點的颜色皆為表示與模型距離較遠的綠色，契合上述所說受試者主要探討模型與空間之整體關係，受測者在體驗沉浸空間時會與模型保持一定距離再做觀看。

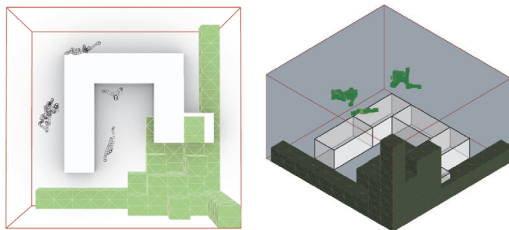


圖 15、(左)空間模矩尺度體驗軌跡、(右)模型空間與受測者距離關係熱圖，本研究整理

- (3) 虛實量體卡扣：此體驗中模型在最小尺度時已填滿桌子所圍塑出的內圈空間，所以受試者在掃描完定位 QR Code 後不需往內移動便可觀察到模型的整體變化，如下圖 16。

行為意圖：軌跡點分布位置類似於第一例「移動縮放」，兩者皆集中在有定位 QR Code 的西側空間，而在垂直向度上「量體卡扣」的軌跡點掠過了四項體驗中最高的紀錄位置，說明當虛擬模型尺度放大並疊合到空間中時，觀看軌跡紀錄仍然維持在座位區範圍而沒有向外延伸。

距離熱圖：此體驗主要協助受測者在面對卡接的量體被拉開後，所產生的空間關係做探討，當模型在拉開的過程中受試者往往嘗試從較高的角度來觀看模型的裂縫空間，並且，受試者與模型的距離會隨著模型放大而接近甚至重疊，造成圖中觀看軌跡多為表現為近距離的紅色與黃色。

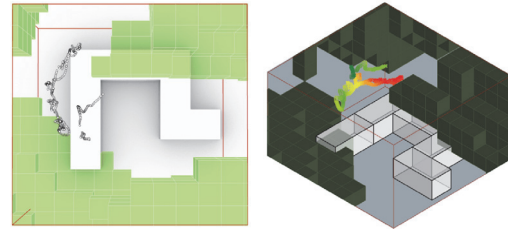


圖 16、(左)虛實量體卡扣空間體驗軌跡、(右)模型空間與受測者距離關係熱圖，本研究整理

- (4) 單元組織規則研擬：本體驗項目的紀錄軌跡分布範圍為四項體驗中最廣，並且穿梭於虛擬模型的四面八方，表示受試者在體驗時有依據虛擬模型的參數變化，頻繁地調整觀看位置與觀看角度，下圖 17。

行為意圖：觀看軌跡的紀錄掠過大範圍的空間面積並且彼此相連，說明受試者在測試空間中有較大的活動範圍和移動距離，同時也表示他們在不同的位置中會轉變不同的觀看角度來閱讀模型。

距離熱圖：此體驗透過組織邏輯的調整而產生不同單元在空間中的聚合樣態，受試者會開始依照聚合物的不同型態移動到不同的位置角度觀看理解，其中觀看軌跡點綠色與黃紅色的比例分布約各佔一半，推斷受試者在體驗中採用了多樣的觀看距離和視角，其中包括近距離觀察單元間的組織關係，以及嘗試從較遠的距離來探討整體聚合物的型態特性。

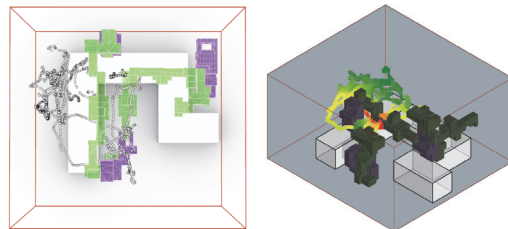


圖 17、(左)單元組織規則研擬體驗軌跡、(右)模型空間與受測者距離關係熱圖，本研究整理

表 3. 本研究成果

測驗題型	MR體驗活動內容	前後測答對率變化	教學目標
轉換認知	改變觀察位置 參數調整模型比例	70% -> 77%	學習理解觀察者在不同比例、不同視角、與不同距離面對空間對象時的認知差異。
尺度推測	改變觀察位置 改變模矩單元數量	45% -> 59%	基於對環境中模矩單元既有尺寸的理解，讓學生通過參照物與空間的堆疊關係來推算空間尺度。
完整量體	改變觀察位置 改變完整模型間開闔距離	82% -> 80%	利用完整量體進行拆解、拉扯的抽象動作，使學員思考「實空間」與「虛空間」的對應邏輯。
單元拆解	改變觀察位置 參數調整單元組織規則	68% -> 73%	基於量體組織邏輯，進一步探討當單元的數量與規則增加時，如何組成連續的組織形體。

本研究整理

## 5 結論

本研究基於低年級設計課程題目「砌築：織理與物件」的設計教學目標，發展輔助學員的虛實共存體驗，以供未來建築設計課程參考。本研究規劃出「調整模型比例」、「改變模矩單元」、「完整模型間開闔」、「調整單元組織規則」等四種不同的沉浸式體驗，分別對應「轉換認知」、「尺度推算」、「完整量體」與「單元拆解」不同的空間認知測驗題之檢驗，來探討大一受試者在經歷過虛實共存活動後，對其空間認知能力建構之影響，如表 3 所示。在執行過程中，本研究發現到在虛實共存與互動技術反饋的沉浸體驗環境下，空間認知活動不只是靜態的觀賞行為，而是一段動態變化與調整的過程。以下，本研究臚列解析學員樣本在各題型中，體驗學習過程與認知能力上的變化發現：

- (1) 「轉換認知」項目：受測同學能夠通過本項目相應的體驗流程嘗試並學習適應 MR 技術。通過前後測的數據顯示，在使用者控制、觀察並體驗沉浸式空間模型的過程後，能夠一定程度地提升學員在 2 維與 3 維空間的認知轉換能力。另外，藉由使用者軌跡紀錄則發現，學員在之後的體驗中都會自主改變位置，並配合參數調整模型比例；一邊變化自身與模型之間的尺度關係，一邊不斷重構自身與環境的關係。

- (2) 「尺度推測」項目：表現出最低的答對率，而在沉浸體驗後，則是在答對比率上取得最顯著的提升。本研究認為，對低年級的學生而言，沉浸式體驗可以有效協助學員理解：通過模矩單元的堆疊，協助計算空間尺度的空間認知方法。然而，即便在理解觀察環境的方法之後，仍然需要學員們對空間中的各種元素(門、窗、家具)進行基本尺度資料的建構。另一方面，也有受測者表示，測驗題目與體驗內容本身受到透視效果的影響，難以抽象地在腦海中虛擬地用堆疊方式建構空間尺度。在教學者不能即時親身提供協助的教學場景中，可以進一步思考加入一些基本家具元件的模塊，以輔助應用於空間尺度認知的教學。

- (3) 「完整量體」題型項目：學員的前後測結果，表現出低年級學員對於完整量體間互補關係擁有較佳的掌握與理解能力。然而，通過軌跡紀錄顯示，在相對應的沉浸體驗過程中，學員的觀察行為往往侷限在觀察「物件」的方法來進行：學員會爬到高處，由上方檢視量體間開闔的關係，而非低下身體，將自身置於量體間的縫隙「空間」進行觀察。建議未來的相關研究者，可以在加入使用者的視角分享介面，以利教學者通過共享畫面，引導學員們嘗試使用不同角度進行沉浸式空間的體驗。

- (4) 「單元拆解」題型項目所對應的「組織規則研擬」體驗，主要是基於教學目標，期待受測同學開始思考使用參數化規則發展聚合性空間設計方法的概念。此體驗的活動軌跡分布最廣，除了近距離觀察單元間的組織關係外，也積極嘗試從較遠的距離來探討多個單元組織變化與空間共存時，各種空間體驗的可能性。

## 誌謝

本研究感謝「科技部大專學生研究計畫」支持，淡江大學建築系一年級工作室的配合，並向本文匿名審查委員致上謝意。

## 參考文獻

- Alnusairat, S., Al Maani, D., & Al-Jokhadar, A. (2021). Architecture students' satisfaction with and perceptions of online design studios during COVID-19 lockdown: the case of Jordan universities. *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research*, 15(1), 219-236. DOI:10.1108/ARCH-09-2020-0195
- Ceylan, S., Şahin, P., Seçmen, S., Somer, M. E., & Süher, K. H. (2021). An evaluation of online architectural design studios during COVID-19 outbreak. *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research*, 15(1), 203-218. DOI:10.1108/ARCH-10-2020-0230
- Chen, X. (2021, 17-21 Aug. 2021). *Research on the Reform of Hybrid Teaching Mode Based on Digital Twin*. Paper presented at the 2021 16th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). DOI:10.1109/ICCSE51940.2021.9569412
- Cheng, S. Y., Wang, C. J., Shen, A. C., & Chang, S. C. (2020). How to Safely Reopen Colleges and Universities During COVID-19: Experiences From Taiwan. *Ann Intern Med*, 173(8), 638-641. DOI:10.7326/m20-2927
- Cho, J. Y. (2017). An investigation of design studio performance in relation to creativity, spatial ability, and visual cognitive style. *Thinking Skills and Creativity*, 23, 67-78. DOI:10.1016/j.tsc.2016.11.006
- Darwish, M., Kamel, S., & Assem, A. (2023). Extended reality for enhancing spatial ability in architecture design education. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(6), 102104. DOI:10.1016/j.asej.2022.102104
- Emo, B., Gerber, A., & Hölscher, C. (2021). *User-centred spatial thinking in architectural design with mixed reality*. Paper presented at the 39th eCAADe Conference, Novi Sad, Serbia, 8-10 September 2021. DOI:10.52842/conf.ecaade.2021.2.115
- Gogu, C. V., & Kumar, J. (2021, 2021//). *Social Connectedness in Online Versus Face-to-Face Design Education: A Comparative Study in India*. Paper presented at the Design for Tomorrow—Volume 2, Singapore. DOI:10.1007/978-981-16-0119-4\_33
- Hosny, S., & Abdelmohsen, S. (2004). Integrating Intelligent Mixed Reality in Architectural Education: A Theoretical Model. *Al Azhar University Engineering Journal*, 557-568. ISSN:1687-8418
- Hsiao, C.-F., Lee, C.-H., Chen, C.-Y., & Chang, T.-W. (2020). *A Co-existing Interactive Approach to Digital Fabrication Workflow*. Paper presented at the Proceedings of CAADRIA2020, Bangkok, Thailand. DOI:10.52842/conf.caadria.2020.1.105
- Jones, D., Lotz, N., & Holden, G. (2021). A longitudinal study of virtual design studio (VDS) use in STEM distance design education. *International Journal of Technology and Design Education*, 31(4), 839-865. DOI:10.1007/s10798-020-09576-z
- Komarzyńska-Świeściak, E., Adams, B., & Thomas, L. (2021). Transition from Physical Design Studio to Emergency Virtual Design Studio. Available Teaching and Learning Methods and Tools—A Case Study. *Buildings*, 11(7). DOI:10.3390/buildings11070312
- Kurt, S. (2009). An analytic study on the traditional studio environments and the use of the constructivist studio in the architectural design education. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 1(1), 401-408. DOI:10.1016/j.sbspro.2009.01.072
- Lee, Y., Hahm, S., & Jung, J. (2021). Holographic construction of generative landscape design using augmented reality technology. *Journal of Digital Landscape Architecture*, 212-218. DOI:10.14627/537705018
- Ramful, A., Lowrie, T., & Logan, T. (2017). Measurement of Spatial Ability: Construction and Validation of the Spatial Reasoning

- Instrument for Middle School Students. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 35(7), 709-727. DOI:10.1177/0734282916659207
- Rodriguez, C., Hudson, R., & Niblock, C. (2018). Collaborative learning in architectural education: Benefits of combining conventional studio, virtual design studio and live projects. *British Journal of Educational Technology*, 49(3), 337-353. DOI:10.1111/bjet.12535
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 66(1), 141-144. DOI:10.1016/j.cirp.2017.04.040
- Sepasgozar, S. M. E. (2020). Digital Twin and Web-Based Virtual Gaming Technologies for Online Education: A Case of Construction Management and Engineering. *Applied Sciences*, 10(13). DOI:10.3390/app10134678
- Sidawi, B. (2012). The Impact of Social Interaction and Communications on Innovation in the Architectural Design Studio. *Buildings*, 2(3), 203-217. DOI:10.3390/buildings2030203
- Tang, Y. M., Au, K. M., & Leung, Y. (2018). Comprehending products with mixed reality: Geometric relationships and creativity. *International Journal of Engineering Business Management*, 10, 1847979018809599. DOI:10.1177/1847979018809599
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415. DOI:10.1109/TII.2018.2873186
- Tepavčević, B. (2017). Design thinking models for architectural education. *The Journal of Public Space*, 2(3), 67-72. DOI:10.5204/jps.v2i3.115
- Vermisso, E., Thitisawat, M., Salazar, R., & Lamont, M. (2020). Immersive Environments for Persistent Modelling and Generative Design Strategies in an Informal Settlement. In (pp. 766-778). DOI:10.1007/978-3-030-29829-6\_59
- Vowles, H., Low, J., & Doron, H. R. (2012). Investigating Architecture Studio Culture in the UK: A Progress Report. *Journal for Education in the Built Environment*, 7(2), 26-49. DOI:10.11120/jebe.2012.07020026
- Vyas, D., van der Veer, G., & Nijholt, A. (2013). Creative practices in the design studio culture: collaboration and communication. *Cognition, Technology & Work*, 15(4), 415-443. DOI:10.1007/s10111-012-0232-9
- Wang, X. & Dunston, P. S. (2008). User perspectives on mixed reality tabletop visualization for face-to-face collaborative design review. *Automation in Construction*, 17(4), 399-412. DOI:10.1016/j.autcon.2007.07.002
- Wu, S. Y. (2021). How Teachers Conduct Online Teaching During the COVID-19 Pandemic: A Case Study of Taiwan. *Frontiers in Education*, 6. DOI:10.3389/feduc.2021.675434