

沉浸式虛擬實境結合同儕交互指導策略對國小學生學習成效、動機、自我效能 與認知負荷之影響-以力學課程為例

Effects of Immersive VR Combined with Reciprocal Peer Tutoring on Elementary School Students' Learning Performance, Motivation, Self-Efficacy, and Cognitive Load in a Mechanics Course

陳振遠¹, 孫之元^{2*}

¹桃園市立幸福國民小學

^{1,2}陽明交通大學 教育研究所

*jerrysun@nycu.edu.tw

【摘要】 近年，沉浸式虛擬實境(VR)已廣泛應用於教育領域，沉浸式 VR 藉由高度擬真環境與互動功能，提供更多操作與模擬物理實驗的學習機會，但對國小學生的學習效益仍有待商榷，因此本研究將採用沉浸式 VR 結合同儕交互指導策略來提升國小生的科學學習成果，並探討不同學習模式對學生的影響。研究結果顯示，國小學生透過沉浸式 VR 結合同儕交互指導策略進行學習，其能有效提升力學概念的學習成效與自我效能，且並不會增加額外的認知負荷，因此本研究提出之方法能進一步擴展沉浸式虛擬實境在國小教育現場的實踐價值。

【關鍵字】 沉浸式虛擬實境；同儕交互指導策略；物理課程；科學學習自我效能

Abstract: In recent years, immersive virtual reality (VR) has been widely applied in the field of education. By providing highly realistic environments and interactive functionalities, immersive VR offers more learning opportunities for simulating physical experiments. However, the effectiveness for elementary school students' learning outcomes remains open to debate. This study integrates immersive VR with reciprocal peer tutoring to enhance elementary students' science learning outcomes and attitudes, while also exploring the impact of different learning modes on students. The results show that elementary students learning through immersive VR combined with reciprocal peer tutoring can significantly improve their Learning effectiveness and self-efficacy, without experiencing additional cognitive load. Thus, this study highlights the practical value of immersive VR in elementary education.

Keywords: immersive virtual reality, reciprocal peer tutoring, physics course, science learning self-efficacy

1. 研究動機與目的

近年因科技進步，使 STEM（科學、技術、工程和數學）領域的相關職業與產業同步蓬勃發展，但過去研究卻發現，學生對於 STEM 領域的學習興趣逐漸降低，並對於物理等自然學科感到困難與排斥（Bennett & Hogarth, 2009），而為解決此問題，我們能導入新科技來提升學生對於物理學科的參與度、學習動機與表現，改善學生對於相關職業與領域的認同（Korlat et al., 2024）。

虛擬實境 (Virtual Reality, VR) 技術藉由電腦、平板或頭戴式顯示器 (Head-mounted display, HMD) 等設備建構 3D 立體的仿真世界，讓使用者有不同的沉浸與互動體驗 (Makransky & Petersen, 2021)。而在科學教育中，沉浸式虛擬實境能呈現抽象與真實課堂中難以觀察的現象 (Georgiou et al., 2021)，也能進一步提供學生進行模擬實驗 (Korlat et al., 2024)，並藉由提升學生與教材的互動性，促進科學概念的學習 (Sun et al., 2023)。但新科技要能有效融入課堂，重點在於需結合適當的教學策略 (Tsivitanidou et al., 2021)，並可進一步提供師生或同儕互動模式來增進學習效益 (Matovu et al., 2023)。

同儕交互指導 (Reciprocal Peer Tutoring, RPT) 是一種合作學習策略，能提升學生在資訊科技與困難學科上的學習參與度及興趣 (Bakare & Orji, 2019)，且 RPT 應用於國小課堂中能有效提升科學的學習表現 (Shafiq et al., 2021)，而 Cheng 與 Ku (2009) 研究也顯示，採用 RPT 進行教與學，能促進創新科技融入教學的有效性。因此本研究將於國小科學課程中導入頭戴式顯示器，探討沉浸式虛擬實境對學生在物理概念的學習成效與態度影響，並進一步結合同儕交互指導策略，期待增進創新科技在教學應用上之價值。

2. 文獻探討

2.1. 沉浸式 VR 於科學教育上的應用

美國國家科學基金會 (National Science Foundation, NSF) 報告指出，國中小的科學教育是學生未來投入 STEM 領域學習與工作的基礎，也影響著國家未來競爭力，因此我們需促進國小學生的在科學等課程的投入度與學習表現 (Rotermund & Burke, 2021)，進而提升學生未來投入相關領域的學習興趣 (Şenler & Çalışkan, 2024)。物理學是一門抽象且複雜的學科，需藉由實驗的視覺化呈現來協助學生連結概念與理論 (Korlat et al., 2024)，但在一般教學中的實驗課程可能因為器材數量不足、操作具有危險性或指導人力不足等因素，使學生無法實際操作實驗，導致學習興趣低落與難以習得科學技能 (Rasheed et al., 2021)。而近年虛擬實境 (VR) 技術的成熟與廣泛應用於教育領域，其提供的擬真情境與互動體驗，能協助學生探究抽象的科學概念 (Liu et al., 2022; Sun et al., 2023)，並提供操作與模擬實驗的機會

(Makrasky et al., 2019)，進而促進不同教育階段學生的物理學習表現 (Georgiou et al., 2021; Liu et al., 2022; Rasheed et al., 2021)。

隨著科技進步與資源投入，虛擬實境 (VR) 設備已從低沉浸感的桌上型電腦 VR 系統轉變為以頭戴式顯示器 (Head-mounted display, HMD) 為主的高沉浸式 VR 系統 (Makrasky et al., 2019)。沉浸式 VR 營造出 3D 擬真環境，能讓使用者投入進行各種模擬實驗，為科學教育提供不同的學習體驗 (Tsivitanidou et al., 2021)。過去研究指出，沉浸式 VR 的新穎性能帶給學習者樂趣與參與度，提升學習動機 (Albus et al., 2021)，其擬真與互動性也能增進學生的自我效能 (Makrasky & Petersen, 2021)，但沉浸式 VR 對於科學學習成效的影響卻有不一樣的結果 (An & Kaplan-Rakowski, 2024; Georgiou et al., 2021)，其原因可能在於，沉浸式 VR 的新穎功能與介面會分散學習者的注意力 (Albus et al., 2021)；沉浸式 VR 可能呈現過多媒體資訊與互動功能，產生不必要的認知負荷，影響使用者在教材中的學習狀況 (An & Kaplan-Rakowski, 2024; Makrasky et al., 2019)；研究也發現，新科技需要搭配合適的教學法，才能改善設備缺點與提升學習效果 (Georgiou et al., 2021; Makrasky & Petersen, 2021)。

在沉浸式 VR 的實踐研究中，建議在課堂中提供師生或同儕互動與指導回饋的機會，其能促進學習者反思學習歷程 (Matovu et al., 2023)，也藉由同儕鷹架的支持，能降低學生在 VR 教材中的認知負荷 (An & Kaplan-Rakowski, 2024)，提升科學概念的學習成效 (Tsivitanidou et al., 2021)。此外，目前對於沉浸式 VR 如何有效應用於國小教育階段之研究較少 (Liu et al., 2022; Matovu et al., 2023)，因此有必要進行更深入之探究，擴展沉浸式 VR 的教育價值。

2.2. 同儕交互指導策略在教學上的應用

合作學習已是國中小課堂的有效學習策略，同儕間的互動能促進學生提問、思考與分享等主動學習行為，也藉由同儕的協助，學生能完成更困難的學習任務，提升學習表現 (Cheng & Ku, 2009)。過去研究發現，在課堂中使用虛擬實境 (VR) 時結合不同的合作或同儕輔導策略，能提升學習參與度與表現 (Chen et al., 2023)，並進一步深化實作技能、溝通與問題解決等高階能力 (Paulsen et al., 2024)。

Pigott 等 (1986) 提出同儕交互指導 (Reciprocal Peer Tutoring, RPT) 策略，讓學生在小組中輪流擔任教學者與學習者的角色，藉由彼此互相教與學的過程，提升不同程度學生的數學表現。同儕交互指導策略能滿足不同的學習需求，提高學生的課堂參與度，增進學生的科學概念理解與資訊技能掌握度 (Bakare & Orji, 2019)，且在物理等較為困難之科目，RPT

策略能有效提升學生的學習信心與成績 (Alemu, 2020)。研究發現，當我們在實驗課程中導入 RPT 策略，能促進小組內每位成員主動參與討論與實驗操作，深化物理課程的理論知識與實踐技能 (Muñoz-García et al., 2013)。在國小階段，RPT 策略應用於數學活動 (Thurston et al., 2020) 與科學課程 (Shafiq et al., 2021) 等不同領域皆有正面影響。

科技與合作學習策略的結合能降低技術使用門檻，並培養學生成為善用科技的終身學習者 (Cheng & Ku, 2009)，Oikarinen 等 (2022) 的研究將科技工具與 RPT 策略結合應用於國小數學課程中，結果顯示教學者透過指導精進自己的數學概念並熟練技能，而學習者藉由觀察與同儕回饋進行學習，並在討論過程中增進概念理解，其策略也進一步提升國小生的反思、社交與資訊能力。此外，研究也指出 RPT 策略應用於國小課程的效果大於其他教育階段 (Zeneli et al., 2016)，因此建議於國小不同學科使用同儕交互指導策略 (Shafiq et al., 2021)，故本研究將同儕交互指導策略與沉浸式 VR 結合，探討其對國小學童力學概念學習之影響。

3. 研究設計

3.1 實驗設計與研究參與者

本研究為了解沉浸式 VR 結合同儕交互指導策略對國小學童在物理概念學習的影響，並探討學習動機、科學學習自我效能與認知負荷之差異，採用準實驗研究法，共分成四組進行教學實踐與比較，其分別為實驗組 3 (使用沉浸式 VR 結合 RPT 策略進行學習)；實驗組 2 (使用沉浸式 VR 進行學習)；實驗組 1 (使用桌上型電腦 VR 結合 RPT 策略進行學習)；對照組 (使用桌上型電腦 VR 進行學習)。本次採用之沉浸式 VR 設備為 Meta Quest 2 頭戴式 VR，使用之學習教材分為桌上型電腦 VR 版本與沉浸式 VR 版本，兩種版本學習內容皆一致，且經由資深教師審核，其適合國小生進行力學概念學習。

本次研究對象為臺灣北部某國小六年級學生 (平均年齡 12 歲)，其實驗組 3 (25 人)，實驗組 2 (24 人)，實驗組 1 (24 人)，對照組 25 人。參與實驗之學生皆已有相關 VR 設備操作與進行學習之經驗。



圖 1 實驗組 3-沉浸式 VR 結合 RPT 策略



圖 2 實驗組 1-桌上型電腦 VR 結合 RPT 策略

3.2. 研究工具

本研究採用「力學概念測驗卷」評估學習成效，其測驗題目依自然領域課程與 VR 教材內容進行設計，並邀請兩位具有 10 年以上國小自然領域教學經驗之教師協助審題，故測驗題目具有專家效度。

「學習動機量表」參考由 Sun 與 Hsieh (2018) 改編之量表，再由國小資深教師針對字句修改，以符合國小生之認知程度。量表採用 6 點李克特量表進行動機評估，其 Cronbach's α 值為.93，具高度一致性。

本研究使用之「科學學習自我效能量表」來源為游師柔、葉宣靈與孫之元 (2020) 改編之量表，並邀請兩位資深國小自然教師協助修改字句，以符合本研究之實驗情境所需。量表為李克特氏 6 點量表，整體 Cronbach's α 值為.93，具有高度一致性。

為探討不同組別之認知負荷程度，本研究使用「認知負荷量表」進行評估，採用之量表參考 Sun、Yu 與 Chao (2019) 改編之量表再進行字句調整。採用 6 點量表形式，其 Cronbach's α 值為 .94，具有高度一致性。

本研究為進一步了解學生真實感受，採用教師課室觀察、開放式問卷與訪談收集質性資料，以供研究結果佐證。

4. 研究結果與討論

4.1 學習成效分析

本研究採用 ANCOVA 分析學生在不同組別的力學課程學習成效。首先檢驗組內迴歸係數的同質性，結果顯示迴歸係數共有同質性 ($F=0.23, p>.05$)，可繼續進行 ANCOVA 分析，以排除前測對實驗結果之影響。結果如表 1 所示，實驗組 3 後測成績的調整平均值和標準誤分別為 75.06 和 11.26；實驗組 2 後測成績的調整平均值和標準誤分別為 70.15 和 7.73；實驗組 1 後測成績的調整平均值和標準誤分別為 70.17 和 9.84；對照組後測成績的調整平均值和標準誤分別為 65.40 和 11.88。各組別間有顯著差異 ($F=7.08, p<.01$)。

表 1 各組後測成績之 ANCOVA 分析結果

組別	人數	平均數	標準誤	調整後平均數	F	事後比較
實驗組 3 (沉浸式 VR 結合 RPT 策略)	25	75.40	11.26	75.06	7.08**	實驗 3>實驗 2=實驗 1>對照組
實驗組 2 (沉浸式 VR)	24	71.04	7.73	70.15		
實驗組 1 (桌上電腦 VR 結合 RPT 策略)	24	69.46	9.84	70.17		
對照組 (桌上電腦 VR)	25	64.88	11.88	65.40		

** $p<.01$

在成效方面，確認各組間有顯著差異後，本研究進行事後比較，結果顯示實驗組 3 的後測成績顯著大於實驗組 2，實驗組 1 的後測成績大於對照組，我們能發現 RPT 策略與不同沉浸感的 VR 結合，能有效提升國小學生在 VR 環境中的學習成效，因此當新科技與合作策略結合，藉由同儕間的指導、互動與回饋，能促進學生的學習表現 (An & Kaplan-Rakowski, 2024; Bakare & Orji, 2019; Matovu et al., 2023; Tsivitanidou et al., 2021)，也證明 RPT 策略的導入能有效幫助學生物理概念的學習 (Alemu, 2020)。

進一步比較不同沉浸感 VR 的差異，根據實驗組 3 與對照組的事後比較顯示，高度沉浸感的 VR 教材提供更加擬真與互動的情境，能協助國小學生深入理解科學知識，此與過去研究一致 (Liu et al., 2022)。此外，我們也發現實驗組 2 與實驗組 1 的後測成績並無顯著差異，表示在低沉浸式 VR 中導入合適的教學策略，其成效不亞於單純的使用高沉浸式 VR 設備進行學習，因此在 VR 導入教學時更要注重課程與教學設計，才能讓新科技有效的提升學習 (Makransky & Petersen, 2021)。

4.2 學習動機分析

本研究採用 ANCOVA 分析學生在不同組別的學習動機差異。分析結果顯示迴歸係數共有同質性 ($F=1.96, p>.05$)，故本研究繼續進行 ANCOVA 分析，以排除前問卷對實驗結果之影響。

ANCOVA 結果顯示，實驗組 3 後問卷分數的調整平均值和標準誤分別為 5.42 和 0.31；實驗組 2 後問卷分數的調整平均值和標準誤分別為 5.01 和 0.71；實驗組 1 後問卷分數的調整平均值和標準誤分別為 5.04 和 0.89；對照組後問卷分數的調整平均值和標準誤分別為 5.07 和 0.77。研究結果發現，各組別在學習動機上並無顯著差異 ($F=1.89, p>.05$)，其結果與 Cheng 和 Ku (2009) 的研究一致，新科技結合 RPT 策略並不影響學生的整體學習動機。

本研究進一步採用成對樣本 t 檢定來探討學生在不同學習模式下的動機改變狀況，其結果如表 2 所示。分析結果顯示，雖然各組間無顯著差異，但學生在經歷不同學習方式，對於科學學習動機都有顯著提升，此研究結果與 Liu 等人 (2022) 的研究一致，不同形式之 VR 教材皆能有效提升學生的科學學習動機。彙整學生回饋與教師觀察結果，也能發現學生在各組中都展現高度投入及興趣（實驗組 3-學生 2：比以前課程好玩，我想要繼續學；觀課教師：學生展現不同於傳統實驗的熱情與投入度，並有更多的討論等學習行為），因此不同形式之 VR 學習環境。都能提供學生有益的學習 (Chen et al., 2023)。

表 2 各組別學習動機的成對樣本 t 檢定結果

組別	變項	人數	平均數	標準差	t 值
實驗組 3 (沉浸式 VR 結合 RPT 策略)	後測-動機問卷得分	25	5.39	0.61	4.06**
	前測-動機問卷得分	25	4.19	1.43	
實驗組 2 (沉浸式 VR)	後測-動機問卷得分	24	5.06	0.72	3.41*
	前測-動機問卷得分	24	4.52	0.86	
實驗組 1 (桌上電腦 VR 結合 RPT 策略)	後測-動機問卷得分	24	5.07	0.89	2.19*
	前測-動機問卷得分	24	4.42	1.65	
對照組 (桌上電腦 VR)	後測-動機問卷得分	25	5.03	0.77	4.27**
	前測-動機問卷得分	25	4.15	1.26	

* $p<.05$, ** $p<.01$

4.3 科學學習自我效能分析

本研究採用 ANCOVA 分析學生在不同組別的科學自我效能差異。分析結果顯示迴歸係數共有同質性 ($F=2.44, p>.05$)，故本研究繼續進行 ANCOVA 分析，以排除前問卷對實驗

結果之影響。結果如表 3 所示，實驗組 3 後問卷分數的調整平均值和標準誤分別為 5.44 和 0.57，根據事後比較，實驗組 3 的科學自我效能顯著高於其他三組 ($F=3.88$, $p<.05$)。

研究結果顯示，沉浸式 VR 結合同儕交互指導策略 (RPT)，有效提高國小學生在力學單元學習時的科學自我效能，其與 Makransky 和 Petersen (2021) 的研究一致，表示更高程度的互動與回饋，能提高學習者的自我效能感。且 Cheng 與 Ku (2009) 研究也指出，當學生能從同儕獲得學習上的協助，就能擁有較高的自我效能感來完成學習任務。因此沉浸式 VR 的高度擬真環境搭配同儕指導，能給予國小生在物理等困難科目的學習上極大的助益。

表 3 各組科學學習自我效能之 ANCOVA 分析結果

組別	人數	平均數	標準誤	調整後平均數	F	事後比較
實驗組 3 (沉浸式 VR 結合 RPT 策略)	25	5.46	0.57	5.44	3.88*	實驗 3>實驗 2 實驗 3>實驗 1 實驗 3>對照組
實驗組 2 (沉浸式 VR)	24	5.07	0.46	5.07		
實驗組 1 (桌上電腦 VR 結合 RPT 策略)	24	5.01	0.84	5.01		
對照組 (桌上電腦 VR)	25	4.85	0.82	4.86		

* $p<.05$

4.4 認知負荷分析

本研究採用 One-way ANOVA 分析學生在不同組別的認知負荷差異。在 Levene 檢定的結果不顯著 ($F=1.00$, $p>.05$)，表示各組變異數據有同質性。ANOVA 分析顯示，在認知負荷上，四組間並無顯著差異 ($F=0.38$, $p>.05$)，其表示本研究在 VR 學習環境結合以同儕為主的相互教學鷹架，並不會產生額外的認知負荷，並能協助學生完成較為困難的學習任務，其與 An 和 Kaplan-Rakowski (2024) 的研究結果一致。

此外，本研究使用的 VR 設備與教材經由專家審核，其內容符合國小學生認知與操作程度，故沉浸式 VR 與桌面型 VR 相比，並不會造成國小學生過多的認知負荷，避免了 Makransky 與 Petersen (2021) 研究所提到的沉浸式 VR 缺點。

5. 結論與建議

過去對於不同沉浸感虛擬實境技術應用於教學的研究有不同成果，因此本研究於國小科學課程中導入頭戴式顯示器 (HMD)，以了解高度沉浸式之虛擬實境對學生在物理概念的學習成效與態度影響，研究發現沉浸式 VR 提供擬真與互動的實驗情境，能有效協助國小學生深入理解力學知識。此外，本研究也發現，當新科技配合良好的教學設計，非沉浸式 VR 也能有良好的學習效果。

接著，本研究為進一步提升新科技之學習效果，我們於教學中結合同儕交互指導 (RPT) 策略，探討沉浸式 VR 結合作業教學法實踐於國小教學現場之效益。研究結果顯示，透過沉浸式 VR 結合 RPT 策略進行學習之學生，其力學概念學習成效與科學自我效能顯著高於其他組別，且 VR 高度擬真環境與同儕互動指導並不會增加額外的認知負荷，因此對於物理等較為困難之學科，沉浸式 VR 搭合作業學習策略能有效促進國小學生的學習表現與態度。

最後，本研究主要以國小高年級學生為研究對象，並將課程主軸限縮於物理概念之學習，未來可增加不同年級學生與課程主題進行比較分析，且本研究只探討動機與自我效能等因素，

針對其他態度變項未有著墨，可再深入探討學習者不同的學習狀態與感受，以擴展沉浸式 VR 的教育價值。

致謝

本研究感謝國家科學及技術委員會（NSTC 112-2410-H-A49-019-MY3 和 MOST 111-2410-H-A49-018-MY4）與教育部（114 年 5G 新科技學習示範學校）計畫之支持，以及感謝國立陽明交通大學互動學習科技與動機研究室 (<https://iltm.lab.nycu.edu.tw/>) 成員之協助，謹此致謝。

參考文獻

- 游師柔、葉宣靈、孫之元（2020）。STEM 模式整合穿戴式擴增實境和穿戴式虛擬實境應用於科學教育：探討科學學習自我效能來源對高中生科學學習自我效能和學習成效之影響。《數位學習科技期刊》，12（3），25-57。 <https://doi.org/10.3966/2071260x2020071203002>
- Albus, P., Vogt, A., & Seufert, T. (2021). Signaling in virtual reality influences learning outcome and cognitive load. *Computers & Education*, 166, 104154.
- Alemu, M. (2020). Improving secondary school students physics achievement using reciprocal peer tutoring: A multi-level quasi-experimental study. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 16(4), em1832.
- An, Y., & Kaplan-Rakowski, R. (2024). Examining adults' enjoyment, challenges, and cognitive load in informal learning with high-immersion virtual reality. *TechTrends*, 68(6), 1118-1128.
- Bakare, J., & Orji, C. T. (2019). Effects of reciprocal peer tutoring and direct learning environment on sophomores' academic achievement in electronic and computer fundamentals. *Education and Information Technologies*, 24(2), 1035-1055. <https://doi.org/10.1007/s10639-018-9808-1>
- Bennett, J., & Hogarth, S. (2009). Would you want to talk to a scientist at a party? High school students' attitudes to school science and to science. *International Journal of Science Education*, 31(14), 1975-1998. <https://doi.org/10.1080/09500690802425581>
- Chen, C.-Y., Chang, S.-C., Hwang, G.-J., & Zou, D. (2023). Facilitating EFL learners' active behaviors in speaking: a progressive question prompt-based peer-tutoring approach with VR contexts. *Interactive Learning Environments*, 31(4), 2268-2287.
- Cheng, Y.-C., & Ku, H.-Y. (2009). An investigation of the effects of reciprocal peer tutoring. *Computers in Human Behavior*, 25(1), 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2008.06.001>
- Georgiou, Y., Tsivitanidou, O., & Ioannou, A. (2021). Learning experience design with immersive virtual reality in physics education. *Educational Technology Research and Development*, 69(6), 3051-3080. <https://doi.org/10.1007/s11423-021-10055-y>
- Korlat, S., Kollmayer, M., Haider, C., Hlavacs, H., Martinek, D., Pazour, P., & Spiel, C. (2024,). PhyLab – a virtual reality laboratory for experiments in physics: a pilot study on intervention effectiveness and gender differences. *Frontiers in Psychology*, 15, 1284597.
- Liu, R., Wang, L., Koszalka, T. A., & Wan, K. (2022). Effects of immersive virtual reality classrooms on students' academic achievement, motivation and cognitive load in science lessons. *Journal of Computer Assisted Learning*, 38(5), 1422-1433.
- Makransky, G., & Petersen, G. B. (2021). The cognitive affective model of immersive learning (camil): a theoretical research-based model of learning in immersive virtual reality. *Educational Psychology Review*, 33(3), 937-958. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2>

- Makransky, G., Terkildsen, T. S., & Mayer, R. E. (2019). Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning. *Learning and Instruction*, 60, 225-236.
- Matovu, H., Ungu, D. A. K., Won, M., Tsai, C.-C., Treagust, D. F., Mocerino, M., & Tasker, R. (2023). Immersive virtual reality for science learning: Design, implementation, and evaluation. *Studies in Science Education*, 59(2), 205-244.
<https://doi.org/10.1080/03057267.2022.2082680>
- Muñoz-García, M. A., Moreda, G. P., Hernández-Sánchez, N., & Valiño, V. (2013). Student reciprocal peer teaching as a method for active learning: an experience in an electrotechnical laboratory. *Journal of Science Education and Technology*, 22(5), 729-734.
- Oikarinen, R. M., Oikarinen, J. K., Havu-Nuutinen, S., & Pöntinen, S. (2022). Students' collaboration in technology-enhanced reciprocal peer tutoring as an approach towards learning mathematics. *Education and Information Technologies*, 27(6), 7519-7548.
- Paulsen, L., Dau, S., & Davidsen, J. (2024,). Designing for collaborative learning in immersive virtual reality: a systematic literature review. *Virtual Reality*, 28(1), 63.
- Pigott, H. E., Fantuzzo, J. W., & Clement, P. W. (1986). The effects of reciprocal peer tutoring and group contingencies on the academic performance of elementary school children. *Journal of applied behavior analysis*, 19(1), 93-98.
- Rasheed, G., Khan, M., Malik, N., & Akhunzada, A. (2021). Measuring learnability through virtual reality laboratory application: a user study. *Sustainability*, 13(19), 10812.
- Rotermund, S., & Burke, A. (2021). *Elementary and Secondary STEM Education. Science & Engineering Indicators 2022*. NSB-2021–1. National Science Foundation. Retrieved from <https://ncses.nsf.gov/pubs/nsb20211>
- Şenler, B., & Çalışkan, C. (2024). Enhancing 21st-century skills, STEM attitudes, and career interests through STEM-based teaching: A primary school intervention study. *International Primary Education Research Journal*, 8(2), 221-232.
- Shafiq, M., Hassan, N., Liaqat, N., & Naeemullah, D. M. (2021). Impact of reciprocal teaching strategy on students academic achievement in the subject of general science at elementary level. *International Research Journal of Education and Innovation*, 2(3), 139-153.
- Sun, J. C.-Y., & Hsieh, P.-H. (2018). Application of a gamified interactive response system to enhance the intrinsic and extrinsic motivation, student engagement, and attention of english learners. *Journal of Educational Technology & Society*, 21(3), 104-116.
<http://www.jstor.org/stable/26458511>
- Sun, J. C.-Y., Ye, S.-L., Yu, S.-J., & Chiu, T. K. F. (2023). Effects of wearable hybrid AR/VR learning material on high school students' situational interest, engagement, and learning performance: the case of a physics laboratory learning environment. *Journal of Science Education and Technology*, 32(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10956-022-10001-4>
- Sun, J. C.-Y., Yu, S.-J., & Chao, C.-H. (2019). Effects of intelligent feedback on online learners' engagement and cognitive load: the case of research ethics education. *Educational Psychology*, 39(10), 1293-1310. <https://doi.org/10.1080/01443410.2018.1527291>
- Thurston, A., Roseth, C., Chiang, T.-H., Burns, V., & Topping, K. J. (2020). The influence of social relationships on outcomes in mathematics when using peer tutoring in elementary school. *International Journal of Educational Research Open*, 1, 100004.
- Tsivitanidou, O. E., Georgiou, Y., & Ioannou, A. (2021). A learning experience in inquiry-based physics with immersive virtual reality: student perceptions and an interaction effect between

conceptual gains and attitudinal profiles. *Journal of Science Education and Technology*, 30(6), 841-861. <https://doi.org/10.1007/s10956-021-09924-1>

Zeneli, M., Thurston, A., & Roseth, C. (2016). The influence of experimental design on the magnitude of the effect size -peer tutoring for elementary, middle and high school settings: A meta-analysis. *International Journal of Educational Research*, 76, 211-223.