

基於數位雙生的智慧製造教學平台設計與學習成效

Design of a Digital Twin–Based Smart Manufacturing Teaching Platform and Its Learning Effectiveness

林煜凱¹，黃思豪¹，許于仁²，賴嘉宏^{1*}

¹ 臺灣勤益科技大學 智慧自動化工程系

² 臺灣高雄科技大學 資訊工程系

* Yuren925@gmail.com

【摘要】隨著智慧製造與工業 4.0 技術的發展，機電整合系統在工程教育中的重要性日益提升。然而，在教學過程中，學生直接操作實體設備進行系統測試與程式除錯，常因操作不熟或控制邏輯錯誤導致設備碰撞、機構干涉或系統損壞，進而增加設備維護成本並影響學習效率。因此，建立安全且可重複驗證的工程實驗環境成為機電整合教育的重要課題。近年來，數位學生技術已成為智慧製造與工業系統中的關鍵研究主題，其應用範圍涵蓋設備監測、製程優化與系統模擬等領域(Kaur et al., 2025)。透過建立實體設備的虛擬模型，可在虛擬環境中模擬設備運動與控制流程，學生能先於虛擬環境完成系統測試與控制程式驗證，再將結果部署至實體設備。以智慧倉儲系統為案例，建構結合 PLC 控制與數位學生模擬的機電整合教學平台。系統驗證該模式能有效降低設備碰撞風險並提升學生對系統運作與控制邏輯的理解。

【關鍵字】 數位雙生；元宇宙教育；智慧倉儲；PLC 控制；影像辨識

Abstract: With the rapid development of smart manufacturing and Industry 4.0 technologies, mechatronic systems have become increasingly important in engineering education. However, when students directly operate physical equipment for system testing and program debugging, improper operations or incorrect control logic may lead to equipment collisions, mechanical interference, or system damage, resulting in higher maintenance costs and reduced learning efficiency. This study proposes a digital twin–based mechatronics teaching platform that integrates PLC control with virtual simulation. Using a smart warehouse system as a case study, a virtual model is established to simulate equipment motion and control processes, allowing students to validate programs in a virtual environment before deployment to physical equipment. Experimental results indicate that the proposed approach effectively reduces collision risks and improves students' understanding of system operations and control logic..

Keywords: digital twin, metaverse education, smart warehouse, PLC control, machine vision

1. 前言

隨著智慧製造與工業 4.0 技術的快速發展，自動化設備與機電整合系統已成為現代工程教育的重要核心內容。機電整合系統結合機械設計、電控系統、感測技術與資訊通訊技術，使設備能夠實現自動化控制與智慧化運作。對於工程領域學生而言，理解機電系統之運作原理與控制邏輯，是培養智慧製造與自動化技術能力的重要基礎。

然而，在實際教學過程中，學生在操作機電整合設備進行系統測試與程式除錯時，常因控制邏輯設計不當或操作經驗不足，導致設備碰撞、機構干涉或系統異常。例如在輸送與搬運系統中，若運動路徑規劃不當或感測器觸發條件設定錯誤，可能造成搬運機構與設備之間的干涉甚至碰撞。此類問題不僅可能造成設備損壞，也會增加教學設備維護成本，並影響實驗與教學效率。

因此，如何在工程教育中建立一個安全且可重複驗證的學習環境，成為機電整合教學的重要課題。近年來，數位學生與沉浸式科技的發展，使虛實整合的教學模式得以實現。數位學生技術透過建立實體設備的虛擬模型，使系統能在虛擬環境中模擬機械運動、控制流程與感測器反應。學生可在虛擬平台中進行設備操作與控制程式測試，提前發現潛在的碰撞問題與控制錯誤，再將驗證完成的控制邏輯部署至實體設備，藉此降低設備損壞風險並提升系統開發效率。

在智慧製造與物流自動化領域中，智慧倉儲系統是一個典型的機電整合應用案例，近年研究亦指出數位學生技術可有效提升倉儲系統的運作效率與永續管理能力(Maesschalck et al.,2025)。智慧倉儲系統通常包含輸送系統、搬運機構、感測器模組、PLC 控制系統與影像辨識技術等設備，其運作涉及多軸運動控制、資料通訊與自動化流程管理。本研究所建立之智慧倉儲教學平台結合影像辨識與 PLC 控制技術，可完成貨物辨識、入庫分類與出庫搬運等作業流程，並將設備運作狀態與系統資訊即時回傳至資料庫與監控介面。此類系統不僅可應用於物流自動化，也能作為機電整合工程教育的重要實驗平台。

然而，在智慧倉儲系統開發過程中，設備運動路徑與控制流程設計往往相當複雜。例如在貨物搬運過程中，搬運裝置需同時考慮座標定位、運動順序與感測器觸發條件。若控制流程設計不當，可能導致設備運動衝突或機構干涉。透過虛擬模擬平台進行系統驗證，可有效降低設備測試風險並提升開發效率。利用 CIROS 等模擬平台，可以在虛擬環境中重建倉儲設備結構與運動軌跡，提前檢查機構干涉與控制邏輯問題，以降低系統開發過程中的除錯時間與設備風險。

基於上述背景，我們以機電整合工程教育為應用情境，結合數位學生技術與虛實整合學習環境，建立一套智慧倉儲教學平台。系統透過虛擬模擬與實體設備同步運作，使學生能在虛擬環境中進行控制程式設計與設備操作模擬，並在驗證完成後將控制策略部署至實體系統。透過此種虛實整合的教學模式，提供安全且可重複驗證之學習環境，也能提升學生對機電整合系統架構與控制邏輯的理解能力，進而培養其在智慧製造與自動化系統開發領域的實務能力。

2. 研究問題

在機電整合工程教育中，學生通常需要透過實體設備操作與控制程式設計來理解自動化系統的運作原理。然而，在實際教學過程中，設備操作與系統測試往往涉及多種機電設備與控制系統，若缺乏適當的模擬與驗證環境，容易產生設備風險與學習障礙。因此，本研究針對機電整合教學過程中的實際情境，歸納出以下幾項主要問題。

首先，設備碰撞與機構干涉是機電整合實驗中常見的風險。當學生在設計控制流程或運動路徑時，若缺乏完整的系統模擬與驗證，可能導致搬運機構或輸送系統在運作過程中發生碰撞或干涉。此類問題不僅可能造成設備損壞，也會影響實驗安全與教學進度。

其次，控制程式除錯成本較高。在傳統教學環境中，學生通常需要反覆修改 PLC 控制程式並於實體設備上進行測試。若 PLC 控制邏輯錯誤不僅影響系統運作效率，亦可能造成潛在安全風險，相關研究已針對 PLC 邏輯漏洞進行掃描與分析(Sinico et al.,2023)降低除錯過程耗費的大量時間與設備資源。

第三，機電整合設備的建置與維護成本相對較高。智慧倉儲系統通常包含輸送設備、搬運機構、感測器模組與 PLC 控制系統等多種設備，一旦設備在實驗過程中發生損壞，不僅會增加維修成本，也可能影響教學設備的長期使用。

最後，傳統工程教育環境通常缺乏完整的虛擬模擬平台，使學生難以在實際設備操作之前進行系統驗證與流程模擬。因此，在系統開發初期若缺乏虛擬測試環境，學生較難理解機電系統中的設備互動關係與控制流程。

3. 理論架構

系統主要包含輸送設備、直角座標搬運機構、氣壓夾爪裝置、PLC 控制系統以及虛擬模擬平台等組件。為了建立完整的虛實整合系統，本研究從機電系統運動模型、控制系統模型、數位孿生模型以及元宇宙學習環境四個面向建構理論架構。

3.1 機電系統運動模型

輸送機構與機械手臂為主要的機電整合設備，其運動行為主要由馬達驅動並透過機構傳動完成貨物搬運。因此以建立輸送系統與機械運動之基礎運動模型。輸送帶系統的線速度可表示為方程式(7)：

$$v = r\omega \quad (7)$$

v 為輸送帶線速度 (m/s)， r 為輸送滾輪半徑 (m)， ω 為馬達角速度 (rad/s)。馬達角速度與轉速之間的關係可表示為方程式(8)：

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (8)$$

N 為馬達轉速 (RPM)

系統採用直角座標搬運機構，由 X 軸、Z 軸及 Y 軸三個線性運動軸組成，並搭配夾爪機構完成貨物抓取與搬運作業。直角座標系統透過三個線性軸的組合運動完成定位，因此其末端位置可直接表示為三維座標可表示為方程式(9)：

$$P(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $z(t)$ 分別表示三個軸向的位置。貨物抓取裝置採用雙動氣壓缸夾爪，氣壓缸

的輸出推力主要由氣壓與活塞有效面積決定，其基本關係式如方程式(10)：

$$\overline{F} = \overline{P} \overline{A} \quad (10)$$

$\overline{F}$ 氣缸推力 (N)、 $\overline{P}$ 氣壓 (Pa)、 $\overline{A}$ 活塞有效面積 (m²)。對於雙動氣壓缸而言，其推動與回程的有效面積不同，因此可表示為推動行程如方程式(11)、回程行程如方程式(12)：

$$\overline{A}_1 = \pi \frac{\overline{D}^2}{4} \quad (11)$$

$$\overline{A}_2 = \pi \frac{\overline{D}^2 - \overline{d}^2}{4} \quad (12)$$

$\overline{D}$ 為活塞直徑， $\overline{d}$ 為活塞桿直徑。氣壓缸的運動速度與氣體流量相關，其活塞速度可表示為方程式(13)：

$$\overline{v} = \frac{\overline{Q}}{\overline{A}} \quad (13)$$

$\overline{v}$ 為活塞速度 (m/s)， $\overline{Q}$ 為氣體流量 (m³/s)， $\overline{A}$ 為活塞有效面積 (m²)。當已知氣缸行程 $\overline{L}$ 與活塞速度 $\overline{v}$ 時，其運動時間可表示為方程式(14)：

$$\overline{t} = \frac{\overline{L}}{\overline{v}} \quad (14)$$

3.2 控制系統模型

在 PLC 控制系統中，控制策略的選擇會直接影響系統的軌跡追蹤精度與穩定性，例如 PID 控制與模型式控制在不同應用場景下具有不同的性能表現(Drissi Elbouzidi et al.,2025)。因 PLC 控制系統屬於離散時間控制系統，其動態行為可表示為離散狀態空間模型如方程式(15)和方程式(16)：

$$\overline{x}(k+1) = \overline{A} \overline{x}(k) + \overline{B} \overline{u}(k) \quad (15)$$

$$\overline{y}(k) = \overline{C} \overline{x}(k) + \overline{D} \overline{u}(k) \quad (16)$$

$\overline{x}(k)$ 為系統狀態向量， $\overline{u}(k)$ 為控制輸入， $\overline{y}(k)$ 為系統輸出， $\overline{A}, \overline{B}, \overline{C}, \overline{D}$ 為系統矩陣。PLC 會依據系統流程控制輸送帶停止並啟動搬運裝置進行貨物抓取。其邏輯可表示為方程式(17)：

$$\overline{M} = \overline{S}_1 \wedge \overline{S}_2 \quad (17)$$

$\overline{S}_1$ 為貨物感測器， $\overline{S}_2$ 搬運裝置待命訊號， $\overline{M}$ 搬運機構啟動訊好，透過 PLC 控制系統，可協調輸送設備與搬運裝置的運作順序，使整體系統能夠穩定運作。

3.3 數位孿生系統

數位孿生系統透過建立實體設備的虛擬模型，使虛擬系統能夠同步反映實體設備的運作狀態。包含實體、虛擬、資料同步等部分整體系統可表示為方程式(18)：

$$DT(t) = f(P(t), S(t), C(t)) \quad (18)$$

$DT(t)$ 為數位孿生模型， $P(t)$ 為實體設備狀態， $S(t)$ 為感測器資料， $C(t)$ 為控制系統資料

透過上述模型，可估算夾爪在抓取與放置貨物時的動作時間，可用於分析搬運效率與循環時間。在數位孿生系統中，該氣壓缸模型亦可同步建立於虛擬環境中，使模擬系統能夠更準確地反映實體設備的運動行為。

3.4 元宇宙學習環境模型

將數位孿生技術整合至元宇宙學習環境中，形成一種虛實整合的教學架構。學生可透過虛擬模擬平台操作智慧倉儲系統，並即時觀察設備運作狀態。當學生完成虛擬環境中的控制程式設計與系統測試後，控制策略可部署至實體設備進行驗證。整體學習流程可表示為方程式(19)：

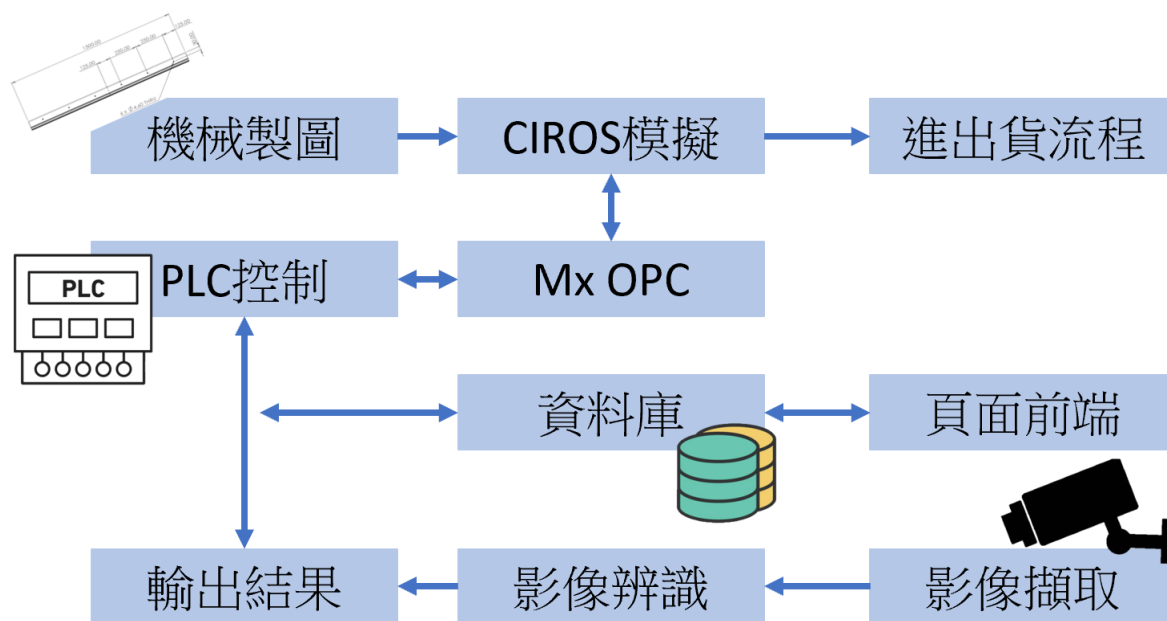
$$L = f(V, S, P) \quad (19)$$

L 為學習成果， V 為虛擬模擬環境， S 為系統操作實驗， P 為實體設備操作，透過此模式，學生可先在虛擬環境中進行系統模擬與控制程式設計，再將驗證完成的控制邏輯部署至實體設備。此種虛實整合教學模式可降低設備碰撞風險，並提升學生對機電整合系統運作原理的理解。

4. 技術與方法

架構主要包含機電學習環境、數位孿生系統資、料同步機制以及學習成效評估等模組，整體流程可分為以下幾個階段如圖 5。並分為幾個模組可分開學習。

圖 5
系統架構示意圖



4.1 實體設備模組

模組包含 PLC 控制設備、感測器系統、氣壓模組以及輸送與搬運機構等設備。PLC 控制設備作為整體自動化系統之控制核心，負責執行設備控制邏輯並協調各模組之運作流程，使輸送設備、搬運裝置與氣壓系統能依照既定作業順序運行。感測器系統主要用於偵測貨物位置與設備運作狀態，例如透過光電感測器偵測輸送帶上的貨物並將訊號回傳至控制系統，以作為設備動作判斷之依據。輸送與搬運機構則負責完成貨物之移動與定位作業，透過輸送設備將貨物運送至指定位置，再由直角座標搬運裝置搭配氣壓夾爪完成抓取與放置動作。氣壓模組提供夾爪機構所需之動力來源，使夾爪能依控制指令進行開合並完成貨物搬運流程。透過上述設備整合，可建立一套具備基本智慧倉儲作業流程之機電整合實驗平台，使系統能模擬實際物流搬運過程，並作為後續虛擬模擬與數位孿生系統建立之實體基礎。

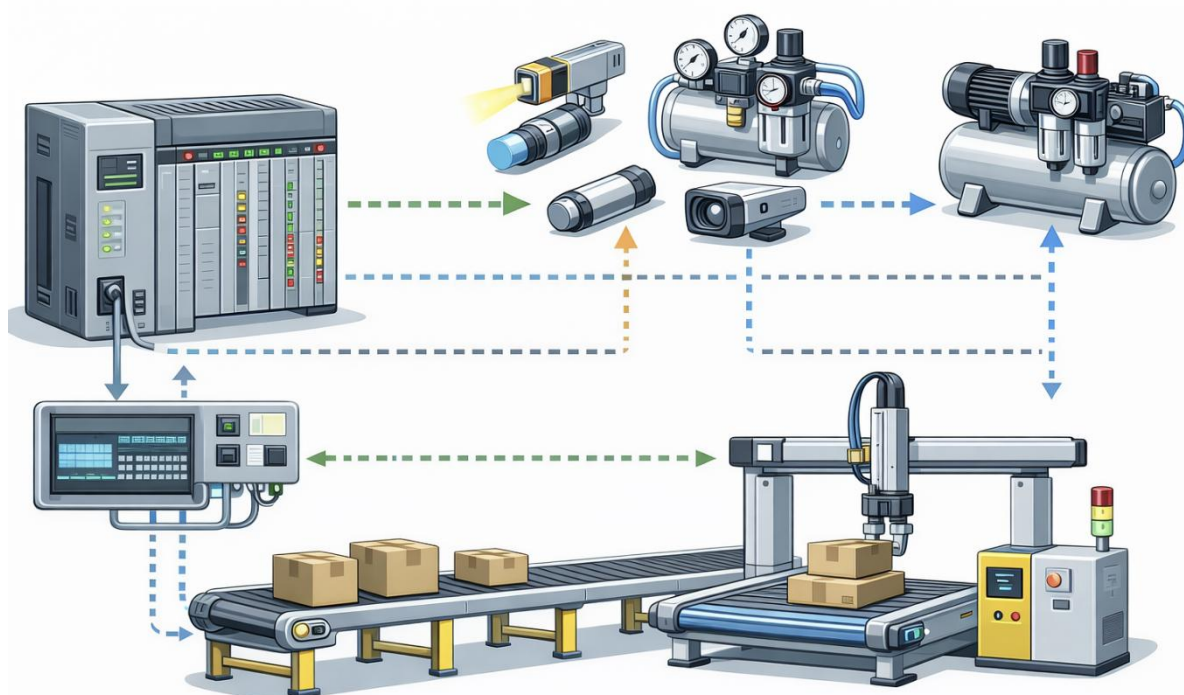
4.2 控制系統模組

採用 PLC 作為主要控制核心，透過 PLC 程式設計實現輸送系統、搬運機構與氣壓模組之控制邏輯。PLC 系統可接收來自感測器之訊號，並依據系統流程判斷設備運作狀態，進而控制馬達與氣壓裝置完成相對應的動作。

在控制流程中，PLC 需協調各設備之運作順序，例如輸送帶運行、貨物定位、夾爪抓取以及貨物放置等動作。透過 PLC 控制系統，可確保整體運作的穩定性與安全性。控制系統模組之架構如圖 6 所示。

圖 6

控制系統示意圖

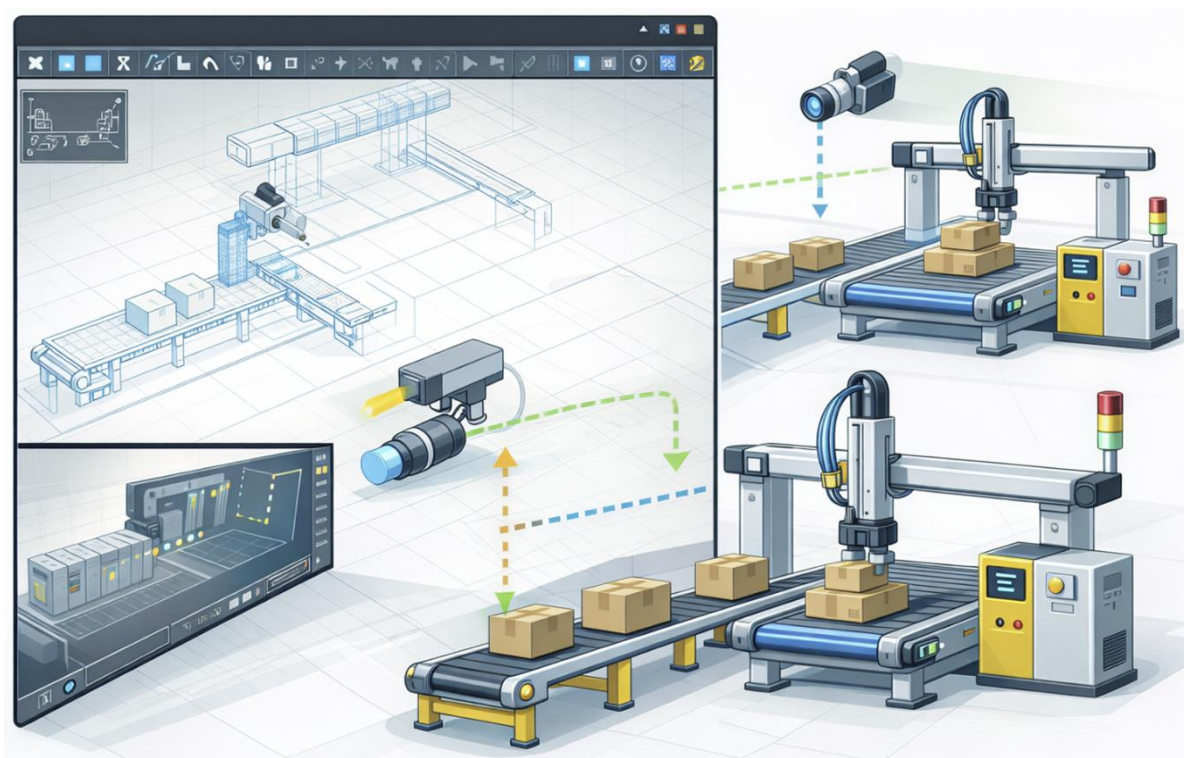


4.3 虛擬模擬模組

透過機械製圖建立設備模型，並將模型匯入模擬平台中，建構完整的虛擬系統。在模擬環境中，可模擬輸送系統運動、夾爪搬運動作以及整體物流流程，使學生能夠在虛擬環境中觀察設備運作情形並進行控制程式測試。透過此方式，可提前發現可能發生的碰撞或控制邏輯錯誤，降低實體設備測試時的風險。虛擬模擬系統架構如圖 7 所示。

圖 7

模擬端示意圖



4.4 資料同步模組

主要負責實體系統與虛擬系統之間的資料交換，使數位孿生系統能夠即時反映設備運作狀態。研究透過 OPC 通訊架構建立 PLC 與模擬平台之間的資料連接，使實體設備的感測器資料與控制訊號能夠同步傳輸至虛擬系統。當 PLC 控制設備運作時，相關資料會同步更新至虛擬模型，使虛擬系統能即時顯示設備運作狀態。此外，虛擬系統中的控制測試結果亦可回傳至控制系統進行驗證，形成完整的虛實整合架構。資料同步架構如 8 所示。

圖 8

資料同步示意圖



4.5 學習成效模組

主要用於評估學生在虛實整合教學環境中的學習成果。透過建立量化評估指標，並設計對照實驗比較傳統教學模式與數位雙生教學模式之差異。學生可先於虛擬環境中進行系統操作與控制程式設計，再將驗證完成的程式應用於實體設備。在教學過程中，能透過虛擬模擬觀察設備運作原理，並理解機電整合系統中的控制邏輯與設備互動關係。與傳統直接操作實體設備的教學方式相比，此種虛實整合模式能降低設備碰撞風險，同時提升學生對系統架構與控制流程的理解能力。

實驗採用對照組與實驗組設計，透過統計方法（如獨立樣本 t 檢定）分析兩組在各項指標上的差異，以驗證數位雙生教學模式之有效性。透過量化分析結果，可客觀評估虛實整合學習環境在提升學習效率與降低操作風險方面的實際效益。

5. 結果與討論

結果顯示，導入數位雙生教學平台後，學生在機電整合設備操作過程中的錯誤率顯著降低，設備碰撞與機構干涉事件明顯減少。與傳統教學模式相比，虛實整合學習環境能有效縮短任務完成時間與 PLC 控制程式之除錯次數，顯示學生可透過虛擬模擬階段提前辨識並修正控制邏輯錯誤，降低實體設備測試之風險與成本。

學生可於虛擬空間中進行多次實驗與參數調整，並即時觀察不同操作條件下系統行為之變化，提升對系統動態特性之理解能力。在系統層面，數位雙生架構透過即時資料同步機制，使虛擬模型能準確反映實體設備之運作狀態，學生可藉由比對虛實系統之對應關係，建立完整之系統認知與分析能力。從學習成效分析，虛實整合與沉浸式互動設計能有效提升學生學習參與度與探索動機，並透過即時回饋機制強化抽象概念之理解。

沉浸式學習環境之設計需兼顧教學策略與技術整合，若僅強調技術展示而缺乏明確教學目標與任務導向設計，則其對學習成效之提升將受到限制。綜合上述結果，未來研究可進一步整合問題導向學習與專題導向學習等教學策略，並結合數位雙生與沉浸式技術，發展具高互動性與高效學習成效之智慧教育模式。

6. 教學應用與未來發展

未來研究可將虛擬模擬平台進一步結合其他教學器材

1. 跨領域教學整合：將數位雙生平台延伸至智慧製造、智慧工廠與機器人控制等應用場域，建構多系統整合之工程教育環境，提升學生跨領域系統整合能力。
2. 沉浸式技術導入：結合 VR/AR 等沉浸式技術，強化虛實互動體驗，使學生能更直觀理解複雜機電系統之運作機制與動態行為。
3. 學習分析與個別化教學：導入學習歷程數據分析機制，追蹤學生操作行為與學習成效，進一步發展個別化教學策略與智慧化學習評估系統。

致謝

本研究承蒙國家科學及技術委員會補助計畫（計畫編號：NSTC 114-2410-H-167-008）經費支持，特此致謝。

參考文獻

- Drissi Elbouzidi, A., Rosin, F., Pellerin, R., Lamouri, S., & Ait El Cadi, A. (2025). Leveraging digital twins for enhanced sustainable warehouse management. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 17, 100287. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100287>
- Kaur, H., & Bhatia, M. (2025). Digital twins: A scientometric investigation into current progress and future directions. *Expert Systems with Applications*, 265, 125917. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125917>
- Maesschalck, S., Staves, A., Derbyshire, R., Green, B., & Hutchison, D. (2023). Walking under the ladder logic: PLC-VBS: A PLC control logic vulnerability scanning tool. *Computers & Security*, 127, Article 103116. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103116>
- Sinico, T., Neto, P., & Boschetti, G. (2025). Impact of control strategy on trajectory tracking performance in open PLC-based robot controllers: A comparison of PID and model-based control. *Results in Engineering*, 107664. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107664>