

Composer 應用於板金折彎機之虛實整合教學平台

Application of Composer in a Virtual–Physical Integrated Teaching Platform for Sheet Metal Bending Machines

林冠銘，蔡崑飛，賴嘉宏*

臺灣勤益科技大學智慧自動化工程系

* chlai@ncut.edu.tw

【摘要】在探討 Composer 應用於板金折彎機之數位雙生教學平台，建構虛實整合之學習環境。隨著智慧製造與工業 4.0 技術之發展，板金加工在製造產業中扮演關鍵角色，而折彎機為板金成形製程中不可或缺的重要設備之一。然而，在傳統板金折彎教學中，學生多於未充分理解設備操作原理與製程參數之前，即直接進行實機操作，容易因折彎順序規劃不當、模具選用錯誤、後擋料定位不精確或控制參數設定不當，導致模具干涉、工件碰撞、折彎角度誤差，甚至造成設備損壞與人員安全風險。為解決上述問題，本研究導入 Composer 技術，建立板金折彎機之虛擬模型，透過數位雙生概念，完整模擬折彎機滑塊運動、模具配置關係、板材變形行為以及後擋料定位系統，並可於虛擬環境中進行折彎流程規劃、工步設計與加工參數驗證。同時，系統亦可進行干涉檢查與動作模擬，使學生能在安全且可重複操作的環境中理解設備運作邏輯與製程原理。透過虛擬模型與實體設備之整合，學生可先於 Composer 環境中完成折彎流程設計與模擬測試，確認與參數正確後，再進行實機操作，不僅可降低試誤次數，也能有效減少材料浪費與設備損耗。此外，本研究亦探討虛實整合教學模式對學生學習成效之影響，包括對折彎製程理解、設備操作能力與安全意識之提升。研究結果顯示，該教學平台能有效提升學生學習效率與實務應用能力，並降低教學過程中之設備風險，具有良好的教學應用價值與推廣潛力。

【關鍵字】數位雙生；元宇宙教育；折彎參數；Composer；參數調整

Abstract: This study explores the application of Composer in a digital twin-based teaching platform for press brake machines, aiming to construct an integrated virtual-physical learning environment. With the advancement of smart manufacturing and Industry 4.0 technologies, sheet metal processing plays a critical role in the manufacturing industry, and press brakes are indispensable equipment in sheet metal forming processes. However, in traditional sheet metal bending instruction, students often operate actual machines without fully understanding the principles of machine operation and process parameters. This can lead to improper bending sequence planning, incorrect die selection, inaccurate back gauge positioning, or improper control parameter settings, resulting in die interference, workpiece collisions, bending angle errors, and even equipment damage and safety risks.

To address these issues, this study introduces Composer technology to establish a virtual model of a press brake machine. Based on the concept of a digital twin, the system comprehensively simulates the ram motion of the press brake, die configuration relationships, sheet metal deformation behavior, and the back gauge positioning system. Within the virtual environment, users can perform bending process planning, operation sequence design, and process parameter validation. Additionally, the system enables interference checking and motion simulation, allowing students to understand equipment operation logic and process principles in a safe and repeatable environment.

Through the integration of virtual models and physical equipment, students can first complete bending process design and simulation testing within the Composer environment. After verifying correctness, they can proceed to actual machine operation. This approach not only reduces trial-and-error iterations but also effectively minimizes material waste and equipment wear. Furthermore, this study investigates the impact of the virtual-physical integrated teaching model on students' learning outcomes, including improvements in their understanding of bending processes, equipment operation skills, and safety awareness.

The results indicate that the proposed teaching platform significantly enhances students' learning efficiency and practical application capabilities, while reducing equipment-related risks during instruction. It demonstrates strong educational value and high potential for broader implementation.

Keywords: digital twin, metaverse education, bending parameters, Composer, parameter adjustment

1. 前言

隨著智慧製造與工業 4.0 的快速發展，製造產業正逐步朝向自動化、數位化與智慧化邁進，其中板金加工在各類工業產品製造中扮演關鍵角色，廣泛應用於電子機殼、機械結構件、汽車零組件及航太產業等領域(Tao et al.,2018)。而在板金加工流程中，折彎製程為影響產品品質與結構精度的重要關鍵之一，其中折彎機（Press Brake）更是不可或缺的核心設備。折彎機透過上模與下模之配合，將平板材料加工成特定角度與形狀，其加工精度直接影響產品的組裝品質與外觀(Kritzinger et al.,2018)。

在傳統教學環境中，板金折彎技術多以實體設備操作為主要學習方式，學生透過實際上機進行折彎練習，以累積操作經驗。然而，此種教學方式存在數項限制與風險。首先，學生在尚未充分理解設備運作原理與製程參數之前，即進入實機操作，容易因折彎順序規劃不當、模具配置錯誤或後擋料定位不精確，而造成模具干涉或工件碰撞(Jones et al.,2020)。其次，錯誤的折彎參數設定，如下壓深度過大或角度補償不足，亦可能導致工件報廢，增加材料成本浪費。此外，折彎機屬於高壓設備，若操作不當，亦可能對人員安全造成潛在威脅。因此，在教學過程中如何降低設備風險與材料損耗，同時提升學生學習效率，成為重要課題。

本研究導入 Composer 技術，建構板金折彎機之數位雙生教學平台。Composer 可用於建立機械設備之三維模型與動作模擬，並整合控制邏輯與運動行為，使系統能呈現設備實際運作狀態(Liu et al.,2021)。本研究利用 Composer 建立折彎機虛擬模型，包含滑塊（Ram）上下運動機構、上模與下模之幾何關係、後擋料定位系統以及板材折彎行為，並於虛擬環境中模擬完整折彎流程。

在虛擬模擬過程中，學生可進行折彎工步規劃，包括折彎順序設計、後擋料位置設定及折彎角度調整，並透過系統進行干涉檢查，確認工件與模具之間是否發生碰撞。同時，系統亦可模擬折彎過程中板材之變形情形，使學生能直觀理解折彎角度變化與回彈現象。此外，透過多次虛擬測試，學生可反覆修正參數設定，建立正確的製程觀念與操作邏輯，而不需承擔實體設備操作所帶來的風險與成本(Fuller et al.,2020)。

完成虛擬模擬與驗證後，學生再將已確認之折彎參數與流程應用於實體折彎機操作。此種「先虛擬、後實體」之教學模式，可大幅降低試誤次數，減少材料浪費，並降低設備碰撞與損壞風險(Negri et al.,2017)。同時，學生在實機操作前已具備基本概念與流程認知，使學習過程更具系統性與效率。

此外，本研究亦關注虛實整合教學模式對學習成效之影響，透過比較傳統教學與導入 Composer 教學平台之學習結果，分析學生在折彎製程理解、設備操作能力、問題判斷能力及安全意識等方面之提升情形。預期透過本研究所建構之數位雙生教學平台，不僅能強化學生對板金折彎技術之掌握，也能培養其在智慧製造環境下之實務應用能力。

綜上所述，本研究以 Composer 為核心工具，結合數位雙生技術，建構板金折彎機虛實整合教學平台，期望透過虛擬模擬與實體操作之結合，提升教學品質與學習成效，並降低設備風險與成本。未來亦可進一步擴展至其他板金加工設備，如雷射切割機、沖床及自動化上下料系統，建立完整之智慧製造教學環境，提升工程教育之整體效能與實務連結性。

2. 研究問題

在板金折彎教學過程中，學生多半缺乏實際操作經驗與製程理解，於尚未熟悉設備操作流程與安全規範之前即進行實機操作，容易因動作判斷錯誤或流程規劃不當，導致折彎機滑塊與模具之間產生干涉，甚至造成工件與設備碰撞。此外，錯誤的操作方式亦可能引發設備異常或潛在安全風險，不僅影響教學進行，也增加設備維護與人員安全之隱憂。

首先，板金折彎製程涉及多項關鍵參數之整合與控制，包括折彎角度設定、板材厚度與材質特性、模具選用、模具開口尺寸、下壓深度以及後擋定位等因素，上述參數彼此之間具有高度關聯性，且不同材料在折彎過程中會產生不同程度的回彈現象，使得實際折彎角度與理論值產生差異。對於初學者而言，如何在多重變因中進行正確判斷與補償設定具有相當難度，往往需透過反覆試誤才能逐步掌握。

其次，實體折彎機設備與模具成本高昂，板材材料亦具一定成本，若在教學過程中因操作錯誤或參數設定不當導致工件報廢，不僅造成資源浪費，也增加教學單位之經濟負擔，且頻繁錯誤操作亦可能加速設備磨耗，提升維修與保養成本，進而影響設備使用壽命與整體教學品質。

最後，傳統教學模式多仰賴實體設備進行示範與操作練習，缺乏可於操作前進行驗證與模擬之學習工具，使學生難以在安全環境中理解折彎製程與設備運作邏輯，亦無法進行重複練習與錯誤修正，進而降低學習效率與理解深度。

因此，基於上述問題，本研究探討如何透過 Composer 技術建構板金折彎機之虛實整合教學平台，藉由數位雙生概念建立虛擬模型，使學生可於虛擬環境中進行折彎流程規劃、參數設定與干涉檢查，並於完成驗證後再進行實機操作，以降低試誤成本並提升學習效率。

此外，為使研究目標具體且可驗證，本研究進一步從以下三個面向評估教學成效：

- (1) 學習成效提升：評估學生在折彎製程原理理解、參數設定能力及操作流程判斷上的進步情形，並透過學習前後測結果進行比較分析。
- (2) 操作錯誤降低：透過系統紀錄學生於虛擬模擬與實機操作過程中的錯誤次數（如模具干涉、參數設定錯誤等）、操作時間與任務成功率，分析虛實整合教學對降低錯誤行為之效果。

(3) 安全意識提升：評估學生對設備操作安全規範之認知與實際應用能力，包括是否能遵循正確操作流程、避免危險行為及正確應對異常狀況，並透過觀察紀錄與問卷方式進行分析。

透過上述具體評估指標，本研究期望能系統性驗證虛實整合教學模式在提升學習成效、降低操作錯誤及強化安全意識等方面之實際效果，進而提升板金折彎教學之整體品質與應用價值。

3. 理論架構

本研究理論架構主要由四個部分所組成。首先，板金折彎機運動模型用於分析滑塊運動、模具幾何關係及折彎角度變化，以建立折彎製程之基礎運動與成形機制。其次，控制系統模型涵蓋折彎機控制器、後擋料定位及安全控制機制，用以描述設備運作流程與控制邏輯。第三，數位雙生模型透過 Composer 建立虛擬折彎機，模擬加工流程並進行干涉檢查，以驗證製程可行性。最後，虛實整合學習模型結合虛擬模擬與實體設備操作，使學生能先於虛擬環境中進行測試，再應用於實機操作，以提升學習成效與操作安全性。

3.1 滑塊位移模型

板金折彎機運動模型主要用於描述折彎機在加工過程中之機械運動行為，包含滑塊 (Ram) 上下運動、上模與下模之幾何關係、板材受力變形情形，以及折彎角度之變化。透過建立運動模型，可進一步分析折彎過程中各項參數之關聯性，作為虛擬模擬、參數設定與製程驗證之基礎。在板金折彎加工中，滑塊受驅動系統控制沿垂直方向運動，帶動上模向下接近下模，使板材在模具作用下產生塑性變形，最終形成所需角度。因此，滑塊位移量、模具開口寬度、板材厚度與折彎角度之間存在密切關係。以滑塊垂直方向位移作為主要運動變數，則滑塊位置可表示為時間方程式 $y(t)$ 為時間 t 時滑塊之位置， y_0 為初始位置， v 為滑塊下行速度。若考慮加速度變化，則可進一步表示為(1)：

$$y(t) = y_0 - vt \quad (1)$$

V_0 為初速度， a 為滑塊加速度。此式可用以描述折彎機在快速下行、減速接觸及加壓折彎等不同階段之運動狀態。藉由滑塊位置隨時間之變化，可模擬上模與板材接觸之時機，以及後續折彎過程中之下壓深度。(2)：

$$y(t) = y_0 + V_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (2)$$

3.2 折彎角度幾何模型

在幾何關係方面，折彎角度與下壓深度具有直接關聯。對於 V 型折彎而言，折彎角度 θ 會隨上模壓入下模深度 h 的增加而改變，其關係可由幾何近似表示為 V 為下模開口寬度， h 為上模壓入深度。由此可知，當下壓深度增加時，板材彎曲程度提高，折彎角度將隨之改變。方程式如下(3)：

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{v}{2R}\right) \quad (3)$$

板材厚度 t 與模具開口寬度 v 亦會影響折彎半徑與成形結果。一般而言，內彎半徑 R 可近似表示為 (4)：

$$R = kv \quad (4)$$

k 為與模具型式及材料性質相關之比例常數。當模具開口寬度增加時，所形成之內彎半徑亦隨之增大，進而影響最終折彎角度與工件外形精度。因此，在建立折彎機運動模型時，必須同時考量模具幾何尺寸與材料厚度對折彎成形之影響。

3.3 折彎力模型

在受力分析方面，折彎機所需折彎力 F 可作為判斷加工可行性與設備負載的重要依據。常見 V 型折彎之折彎力估算公式如下(5)：

$$F = \frac{K\sigma_b L t^2}{v} \quad (5)$$

F 為折彎力， K 為折彎係數， σ_b 為材料抗拉強度， L 為折彎長度， t 為板材厚度， v 為下模開口寬度。由公式可知，折彎力與板材厚度平方成正比，與模具開口寬度成反比，亦即板材越厚、折彎長度越長，所需折彎力越大；而模具開口越寬，所需折彎力則相對降低。此一關係對於設備選用、模具搭配及加工參數設定。

3.4 回彈補償模型

板金材料在折彎完成後通常會產生回彈 (Springback) 現象，使實際折彎角度與目標角度之間存在差異。若以回彈角 $\Delta\theta$ 表示，則可寫為：整體學習流程可表示為方程式(6)：

$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_t \quad (6)$$

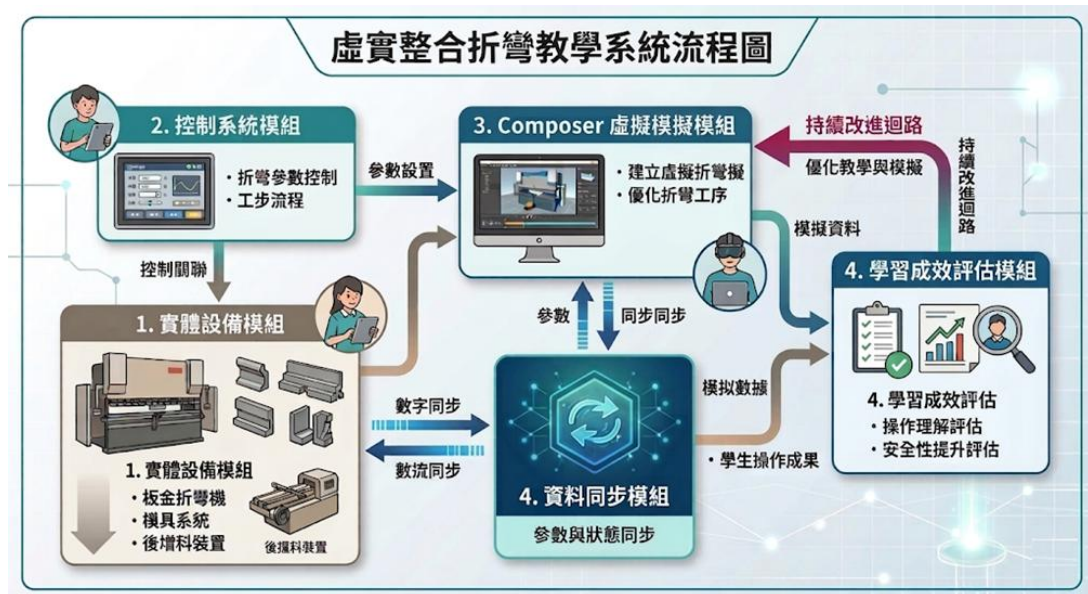
θ_f 為成形後實際量測角度， θ_t 為目標折彎角度。為補償回彈效應，實際加工時常須先設定較小或較大的預折彎角度，使卸載後工件回彈至設計值。由於回彈量會受到材料彈性模數、降伏強度、板厚與內彎半徑等因素影響，因此在虛擬模型中納入回彈估算，可提升折彎模擬之準確性。

4. 技術與方法

架構主要包含折彎學習環境、Composer 虛擬模擬模組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 1。並分為幾個模組可分開學習

圖 1

系統架構示意圖



4.1 實體設備模組

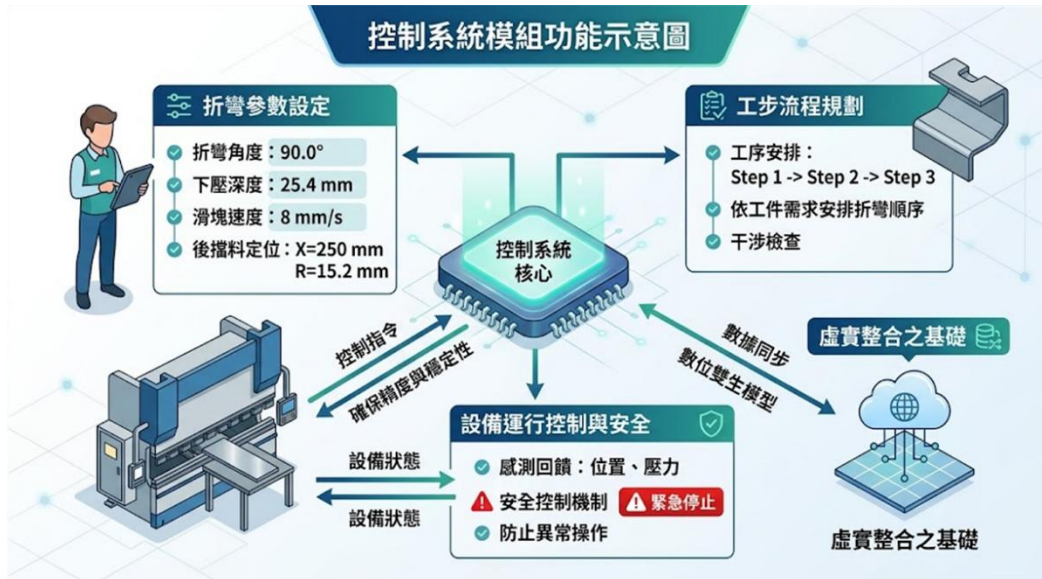
實體設備模組為本研究教學平台之核心基礎，主要包含板金折彎機本體、模具系統與後擋料裝置。折彎機透過滑塊（Ram）帶動上模進行上下運動，配合下模使板材產生塑性變形，其設備性能與精度直接影響加工品質與穩定性，因此學生需理解其基本結構、滑塊行程控制、壓力輸出及操作流程等原理。模具系統包含上模與下模，其幾何形狀與尺寸將影響折彎角度、內彎半徑及成形品質，學生需依板材特性選擇適當模具，並掌握模具開口寬度與折彎角度之關係。此外，模具安裝與對位精度亦為關鍵因素，配置不當將導致加工誤差或設備損壞。後擋料裝置則負責板材定位，透過多軸調整確保加工精度與重複性。整體而言，實體設備模組不僅提供實際操作平台，亦作為虛擬模擬之對應基礎，透過與控制系統及數位雙生模型整合，可建立完整虛實對應關係，提升教學真實性與應用價值。

4.2 控制系統模組

控制系統模組為板金折彎機運作與製程控制之核心，主要負責折彎參數設定、工步流程規劃及設備運行控制。操作人員可透過系統設定折彎角度、下壓深度、滑塊速度及後擋料位置等參數，並依工件需求安排折彎順序，以確保加工精度與穩定性。此外，系統整合感測回饋與安全控制機制，即時監控設備狀態並防止異常操作，提升加工安全性與可靠性，並作為虛實整合之重要基礎。圖 2 所示。

圖 2

控制系統示意圖

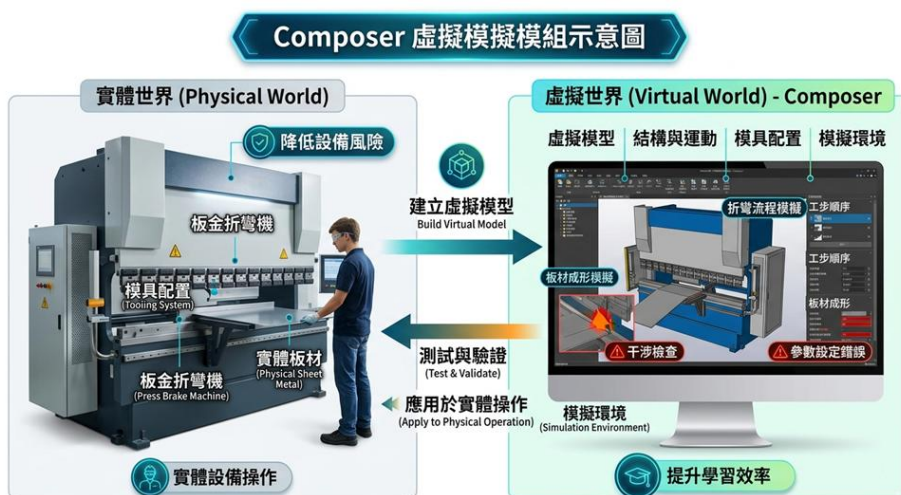


4.3 Composer 虛擬模擬模組

Composer 虛擬模擬模組主要利用 Composer 建立板金折彎機之虛擬模型，將實體設備的結構、模具配置與運動方式於虛擬環境中呈現。透過此模組，可模擬折彎流程、工步順序及板材成形過程，並檢查加工中是否發生干涉或參數設定錯誤。學生可先於虛擬環境中進行測試與驗證，再將結果應用於實體設備操作，以降低設備風險並提升學習效率。虛擬模擬系統架構如圖 3 所示。

圖 3

模擬端示意圖



4.4 資料同步模組

資料同步模組主要負責虛擬系統與實體設備之間的資訊傳遞與即時對應，使兩者在參數與運作狀態上保持一致。透過此模組，可將折彎角度、下壓深度、後擋料位置等控制參數由虛擬環境傳送至實體設備，並同步回傳設備運行狀態與感測資料至虛擬模型進行顯示與分析。此機制可提升模擬與實際操作的一致性，並作為虛實整合系統運作的重要橋樑。資料同步架構圖 4 所示。

圖 4

資料同步示意圖



5. 結果與討論

研究結果顯示，學生在進行虛擬模擬操作後，對折彎製程流程、設備運作原理及參數設定之理解均有顯著提升。透過虛擬環境之折彎流程模擬與干涉檢查，學生能於實機操作前預先發現模具配置不當或折彎順序錯誤等問題，有效降低實際操作之錯誤發生率。在操作安全方面，虛擬模擬提供無風險之練習環境，使學生可反覆嘗試並即時修正錯誤，進而提升安全意識與操作信心。此外，透過資料同步機制，虛擬模型與實體設備能維持良好一致性，使學習經驗得以順利轉移至實機操作。然而，虛擬與實際結果仍存在差異，主要受材料回彈與設備精度影響，顯示後續仍需優化模型準確度。相較於既有數位雙生應用於工程教育之研究，本研究強調「先虛擬、後實體」之教學模式，並整合 Composer 建構完整折彎模擬系統，在提升學習效率與降低設備風險方面具體展現其教學價值與應用貢獻。

6. 教學應用與未來發展

未來研究可進一步導入虛擬實境 (VR) 或擴增實境 (AR) 技術，以提升學習沉浸感與操作互動性，使學生能於更貼近實際情境之環境中進行訓練，強化對設備操作流程與製程原理之理解。同時，可結合即時回饋機制與情境模擬設計，使學習者在操作過程中即時獲得錯誤提示與修正建議，進一步提升學習成效與安全意識。此外，本研究亦可擴展至其他製程設備，如沖床、雷射加工或自動化產線系統，建構多元化之虛實整合教學平台，以驗證不同製造情境下之應用可行性。未來亦可導入學習歷程數據分析與人工智慧技術，建立個人化學習模型，依據學生操作行為提供適性化教學內容與建議。透過上述發展方向，可進一步提升教學平台之智慧化程度與應用廣度，並強化其在工程教育與智慧製造領域之實務價值。

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)、「教育部產業學院智慧機械手臂應用與感測技術產業實務人才培育專班」與「智慧科技應用計畫-產業知識加值應用-齒輪傳動系統振動特性分析與 AI 輔助診斷方法產學合作計畫」經費支持, 特此致謝。

參考文獻

- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *IEEE Access*, 9, 146107–146121. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3121988>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>