

結合教育機器人與 4C/ID 架構之 Arduino 實作學習系統

Integrating Educational Robots and the 4C/ID Model to Support Complex Skill Development in Arduino-Based Hands-on Learning

吳昱靜，邱敏棋*

1 嶺東科技大學資訊科技系

2 臺中科技大學多媒體設計系

*minky413@gmail.com

【摘要】 隨著程式設計與實作導向課程的普及，Arduino 與電子元件操作已成為重要的實作學習情境。然而，學習者在實作過程中需同時處理元件辨識、電路配置與程式邏輯等多重任務，容易因流程複雜或理論與實務銜接不易而產生學習困難。為回應此問題，本研究以四元素教學設計模型(4C/ID)為理論基礎，結合教育機器人之多模態互動特性，開發一套支援電子元件實作之學習系統。系統整合影像辨識與學習資源資料庫，依循 4C/ID 架構規劃學習任務、資訊支援、程序支援與部分任務練習，透過機器人即時引導，協助學習者降低操作難度，循序建構元件辨識、接線與程式應用之完整能力。

【關鍵字】 四元素教學設計模型；教育機器人；程式設計；Arduino 實作學習

Abstract: With the widespread adoption of programming- and practice-oriented courses, Arduino-based activities and electronic component manipulation have become important contexts for hands-on learning. However, learners often encounter difficulties when simultaneously handling component identification, circuit configuration, and programming logic due to procedural complexity and gaps between theory and practice. To address this issue, this study adopts the Four-Component Instructional Design (4C/ID) model as its theoretical foundation and integrates the multimodal interactive features of educational robots to develop a learning system for electronic component practice. The system combines image recognition with a learning resource database and structures learning tasks, supportive information, procedural guidance, and part-task practice to support learners in progressively developing integrated operational competencies.

Keywords: Four-Component Instructional Design Model (4C/ID); Educational Robots; Programming; Arduino-Based Hands-on Learning

1. 前言

在現代資訊教育中，程式設計逐漸成為學習者必備的核心能力之一，學習程式設計被認為有助於促進邏輯思維、問題解決能力以及數位素養的發展(Nouri et al., 2020; Sun et al., 2022)。隨著越來越多教育場域將程式設計納入正式課程，如何讓初學者理解抽象語法與多步驟實作流程，成為教學與系統開發的重要議題(Medeiros et al., 2019)。Arduino 因其操作簡易、易於擴充且能直接與實體操作連結，常被視為協助學習者理解硬體控制與程式邏輯的重要工具(Jang et al., 2018)。然而，許多初學者在面臨電子元件辨識、接線流程與程式語法邏輯時仍可能感到困難，進而降低其操作信心(Lapierre et al., 2024)。電子元件種類多樣，使初學者需同時掌握名稱、用途與正確接線方式，對缺乏先備知識者而言往往是一大挑戰(Peppler et al., 2023)。研究指出，當學習者無法正確辨識元件或理解其用途時，常導致後續接線錯誤、程式功能無法正常執行，進而影響整體學習成效(Alessandrini, 2023)。因此，若能提供一套協助初學者逐步建構元件辨識、電路邏輯與程式架構理解的學習工具，有助於降低初學者的挫折感，並提

升其操作的正確性與穩定性。此外，研究亦指出，初學者若能在操作過程中獲得即時回饋，能更有效修正錯誤並促進自我調整，而即時性的回饋指引對技能建構過程尤為關鍵(Qadir et al., 2020)。

近年來，教育機器人因具備語音辨識、多模態互動與即時回饋等特性，逐漸被應用於不同學習場域，以提升學習者之學習動機與參與度(Fung et al., 2025; Younis et al., 2023)。機器人的互動特性能透過提問、引導或示範協助學習者釐清操作流程，並以具體方式呈現抽象概念，使其更容易掌握關鍵步驟(Wang et al., 2023)。研究顯示，學習者在與機器人互動的過程中，能獲得更高程度的專注力與參與感，而此種具情境性的互動有助於提升認知投入與操作正確性(Al Hakim et al., 2022)。教育機器人的即時回饋機制能引導學習者逐步完成電子元件辨識、電路配置與程式邏輯推演等流程，逐步累積其操作能力。在此趨勢下，教育機器人已逐漸被視為協助初學者理解硬體操作與程式控制的重要互動介面(Moraiti et al., 2022)。

針對多步驟且具複雜性的技能建構需求，四元素教學設計模型(Four-Component Instructional Design Model, 4C/ID)提供了一套以任務分析為核心的架構，可協助設計者將複雜技能拆解為可管理、可支援與可練習的結構化流程(Costa et al., 2022)。4C/ID 模型在任務結構化、資訊組織與程序引導上的特性，能為多步驟操作系統的規劃提供清晰邏輯，並協助建構支援學習者進行實作的學習系統(Frerejean et al., 2019)。相關研究指出，當系統的開發能依循 4C/ID 模型所提出的任務結構化思維，能讓使用者在操作過程中獲得更清晰的概念流程與操作理解，降低在技能建構過程中的認知負荷(Mulders, 2022)。以 Arduino 為基礎的學習情境中，若系統能依照 4C/ID 模型之四大組成元素進行開發，有助於整合元件辨識、電路操作與程式邏輯理解，提升系統在支援學習者學習上的學習成效。基於上述，開發能支援學習者從元件辨識到接線操作，再到程式撰寫的互動式系統，對於改善學習者的操作困難與提升其技能建構具有重要價值。因此，本研究旨在以 4C/ID 模型為開發架構，建置一套整合教育機器人互動、元件識別支援與 Arduino 實作引導的學習系統，以協助學習者循序理解並完成相關操作任務。

2. 文獻探討

2.1. 程式設計

程式設計在資訊科技領域中扮演重要角色，被視為培養邏輯推理、問題解決能力的核心技能之一(Ciftci & Bildiren, 2020; Yildiz Durak, 2020)。對初學者而言，程式語法、指令結構與邏輯的理解是建立後續應用能力的基礎，而有效的程式設計學習方式通常需要結合理論概念與實際操作(Noh & Lee, 2020)。Arduino 作為一款開放式硬體平台，具有操作簡易、擴充性高與能直接連結實體裝置等特性，已廣泛應用於程式設計與電子實作教育中(Roumen & Fernaeus, 2021)。透過 Arduino，學習者能將程式碼直接與感測器、LED、馬達等電子元件連結，使抽象的程式概念能透過實體操作呈現，進而提升學習者對程式控制邏輯的理解(Tupac-Yupanqui et al., 2022)。研究指出，在 Arduino 實作過程中，電子元件辨識、電路配置與程式邏輯常相互依存，學習者需要在多項技能之間建構整體概念(Chou, 2018)。對此，透過適當的資訊呈現與操作引導，能有效釐清程式碼與硬體操作之間的關聯，協助學習者建立完整的控制流程(Omar, 2018)。綜上所述，在程式設計與 Arduino 的整合應用中，適當的學習支援方式能讓學習者在理解程式、操作電路與觀察執行結果之間建立有意義的關係，並逐步累積程式控制與裝置操作的能力。因此，結構化資訊、引導式步驟與互動式介面的整合，能在多步驟的程式與電路操作中提供學習者有效的引導流程。

2.2. 教育機器人 (Educational Robots)

隨著教育科技的持續發展，教育機器人逐漸被引入各類教學情境，成為支持教學與學習過程中的教育科技工具(Ioannou & Makridou, 2018)。教育機器人具備語音辨識、多模態互動與即時回饋等功能，被視為能強化學習者學習動機、促進互動參與並提升知識應用能力的工具。綜觀近年文獻，Augello et al. (2020) 指出教育機器人已成為國際研究的重要議題，研究範疇涵蓋課堂互動、學習動機與高層次思維能力之培養，顯示其在教育場域中具有多面向的應用潛力。在相關研究中，Hsiao et al. (2019)將教育機器人融入 6E 教學模式以設計學習活動，結果顯示學習者在學習表現及學習動機上皆有明顯提升，並促進其探究與反思歷程。Kert et al. (2020)的研究亦指出，參與教育機器人操作活動的學習者在學習成績、運算思維與概念理解方面皆有正向成長，顯示教育機器人在支持邏輯推理與知識建構上具關鍵價值。另一方面，Qu 與 Fok (2022)研究指出，學習者與機器人互動時能展現較高的學習投入與批判性思維，並在問題解決與運算思維能力上獲得明顯提升。在程式設計方面，Chen 與 Chung (2023)將概念圖融入教育機器人程式設計課程，結果顯示此策略不僅能提升學習者的運算思維與問題解決能力，也有助於深化其對程式結構的理解。綜合上述研究可知，機器人輔助教學已展現跨領域與跨年齡層的應用成效，不僅能增進學習者的學習動機與專注力，亦能促進高層次思維的發展，包括運算思維、邏輯推理與問題解決能力。

2.3. 四元素教學設計模型(Four-Component Instructional Design Model)

四元素教學設計模型(Four-Component Instructional Design Model, 4C/ID)由 Van Merriënboer(1997)提出，其理論基礎源自認知負荷理論與專家知識發展相關研究，旨在處理由多項相互關聯的操作要素所組成的複合性任務。依據 4C/ID 模型理論，進行複合性任務時不應拆解為零散的片段，而應以完整且具功能性的任務作為核心，讓使用者能在近真實的操作情境中逐步形成整體性的能力(Frerejean et al., 2021)。4C/ID 模型由四項核心元素組成，分別為學習任務(learning tasks)、資訊支援(supportive information)、程序支援(procedural information)以及部分任務練習(part-task practice)(Xu et al., 2025)。其中，學習任務提供整體技能的情境架構，強調使用者應在真實或近真實的任務中整合多項操作需求；資訊支援主要呈現概念性與策略性的背景知識，讓使用者能理解操作背後的原理與原因；程序支援則提供逐步引導或即時提示，適用於需要系統化或步驟明確的操作流程；部分任務練習則聚焦於重複性高、需自動化的操作，以提升使用者的穩定性與熟練度(Vandewaetere et al., 2015; Van Merriënboer et al., 2003)。四項元素相互配合，使複雜技能的呈現形成結構化之架構。在程式撰寫與電子電路操作的情境中，使用者往往需要同時處理元件辨識、接線與程式邏輯推理等多項操作，這符合 4C/ID 模型所定義的複合性任務特徵。此模型所提出的任務結構化概念與系統化思維，能作為開發此類系統的重要參考，使多階段操作得以依序呈現，並以適當的資訊支援與程序提示協助使用者逐步完成操作流程。因此，本研究採用 4C/ID 模型作為系統開發的概念基礎，用以規畫電子元件識別、接線引導與程式撰寫等操作任務之流程，以建立具有結構性與一致性的學習系統。

3. 系統設計與開發

3.1. 系統架構

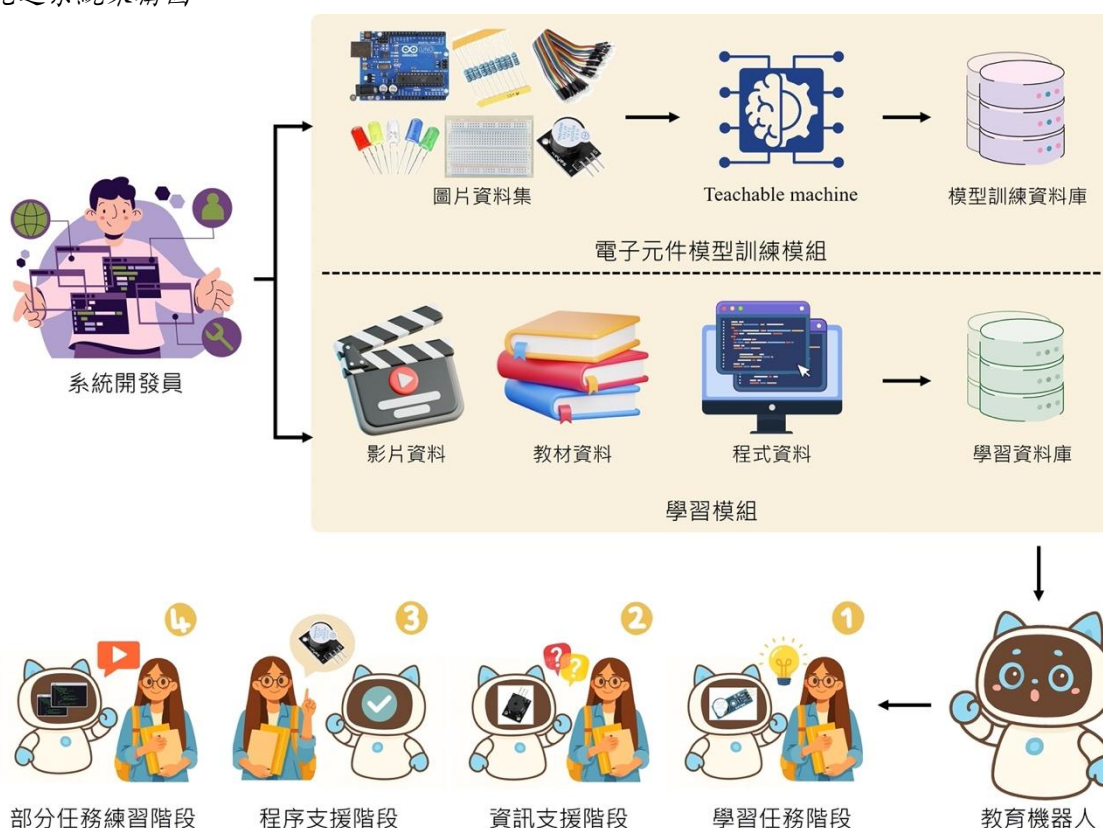
本研究設計之學習系統以教育機器人為互動核心，整合影像辨識模型與學習資源資料庫，系統設計工具使用凱比機器人(Kebbi Robot)進行系統實作，透過其互動流程引導學習者理解電子元件之特性，並進行基礎操作練習。系統架構如圖 1 所示。系統中包含電子元件模型訓練模組，本研究蒐集多種電子元件的圖片資料，例如 Arduino UNO 開發板、LED、電阻、麵包板與連接線等，並以 Teachable Machine 進行影像模型訓練。完成訓練後，模型存放於模型訓練資料庫，作為機器人在教學過程判斷學習者元件選擇的參數依據，使其能即時比對並提

供電子元件是否判斷正確的回饋。系統亦設計學習資源模組，用以存放課程所需的影片教材、講義內容及程式碼資料等教學資源。所有教材統一管理並儲存於學習資料庫，供教育機器人在教學流程中依學習情境使用，以達到元件講解、操作示範與概念補充等功能。

教育機器人在系統中扮演教學情境呈現與互動引導的角色，負責整合模型訓練資料庫與學習資料庫中的內容，並依照本研究設計之教學內容與互動情境進行教學活動。機器人會展示電子元件圖片、介紹元件特性及用途，並辨識學習者手中的元件是否正確。此外，機器人也會播放教學影片、提供接線指引與示範程式，並透過互動式問答引導學習者完成學習活動。本模組旨在提升教學的即時性、互動性與學習回饋能力，使學習者能在自然的互動過程中完成接線任務與初步程式操作。整體而言，本系統架構透過模型訓練模組與學習模組結合機器人互動，形成一套具示範性、辨識能力與引導回饋機制的學習系統，使學習者能在循序引導下建構電子元件相關知識並完成基礎操作任務。

圖 1

本研究之系統架構圖



3.2. 基於 4C/ID 模型之系統開發設計

本研究在系統開發規劃上，採用 Van Merriënboer 提出之四元素教學設計模型(Four-Component Instructional Design Model, 4C/ID)作為設計依據。該模型以複雜技能學習為核心，主張透過整體任務設計與分層支援機制，引導學習者逐步建構概念理解與操作能力，適用於需整合多項知識與實作技能之學習情境。電子元件學習涉及元件辨識、功能理解與操作應用等多重技能，因此本研究依據 4C/ID 模型之四項構面，將系統功能加以結構化，並規劃為學習任務、部分任務練習、資訊支援與程序支援四類模組。系統開發過程中，透過此四項構面統整學習活動、教材呈現方式與互動機制，使系統功能在教學過程中具備一致的流程規劃與明確的學習目的。透過此設計方式，系統能夠在提供完整學習任務的同時，兼顧概念性理解與操作引導，形成具層次性的學習支援架構。

(1) 學習任務階段(learning tasks)

學習任務為 4C/ID 模型的核心階段，此階段旨在提供具整體性與真實情境的任務，使學習者能在完成任務的過程中，同時整合相關知識與操作技能。本研究於此階段將電子元件辨識與基礎操作情境設計為完整的學習任務。學習者需在教育機器人的引導下，依序完成指定的學習活動，包含電子元件選取、特性認知與功能確認等一系列學習活動，而非僅針對單一知識點進行練習。在系統設計上，學習任務由教育機器人進行引導，機器人會展示指定之電子元件圖片，並說明其用途與應用情境，接著引導學習者實際拿取對應元件進行辨識與確認。同時，機器人透過影像辨識模型判斷學習者的選擇是否正確，並提供即時回饋，使學習者能在互動過程中修正操作行為。此設計具備明確的任務目標與操作情境，使學習者能在完整的互動流程中，逐步建立對電子電路系統運作的整體性認知。符合 4C/ID 模型中整體任務(Whole-task)的教學原則。

圖 2

學習任務階段設計之程式碼範例與操作示意圖



(2) 資訊支援階段(Supportive Information)

資訊支援主要用於提供學習者解決非例行性問題所需的概念性知識與心智模型，協助其理解操作背後的原理與原因，屬於概念層次的學習支援。在 4C/ID 模型中，資訊支援的功能並非即時指導操作，而是協助學習者建立正確的領域知識結構，使其能在面對實作問題時進行合理推論。在本研究中，資訊支援內容整合於學習資源模組中，包含電子元件功能說明、基本電路概念與相關應用介紹等教材。教學流程中，教育機器人會於學習者進入實際操作前，透過語音說明搭配教材影片進行概念講解，使學習者能先理解電子元件的用途與運作原理，再進入後續的操作情境。此設計有助於學習者將操作行為與概念性知識相互連結，建立對電子元件與電路系統之正確認知，避免學習者僅依循指示進行機械式操作。

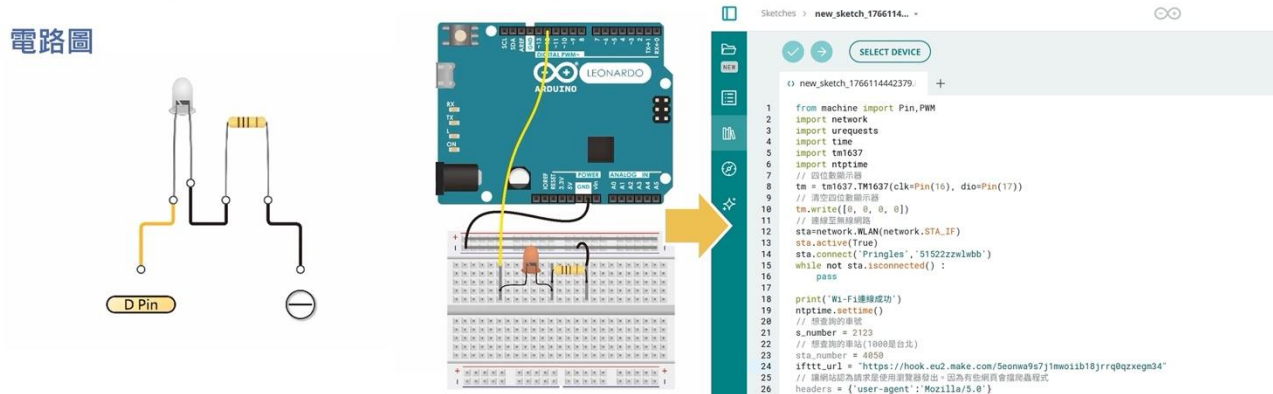
(3) 程序支援階段(Procedural Information)

程序支援旨在針對學習任務中的例行性操作提供即時且具體的步驟指引，作為學習者於操作過程中的鷹架支援，其重點在於協助學習者掌握操作流程與執行方式。通常以剛好及時(Just-in-Time)的方式呈現，即在學習者實際執行操作的當下提供必要的輔助，以降低操作錯誤並減少非必要的摸索時間。在本研究中，程序支援階段主要應用於硬體接線與程式撰寫的操作引導。當學習者進入實作階段時，教育機器人會播放教師預先錄製好的教學影片與程式碼示範，內容包含 Arduino UNO 開發板與感測器的正確接線方式與操作注意事項，以及不同實際應用情境下的程式邏輯說明。此設計作為程序性鷹架，提供學習者在面對繁瑣的接線與語

法細節時具體且視覺化的參考依據，使其能依循正確流程完成實作任務。隨著學習者對接線流程與程式操作之熟練度逐步提升，此類程序支援可適時降低提供頻率，促使學習者逐漸由依賴指引轉為自主操作，最終能獨立完成應用實作。

圖 3

實作教學影片示意圖



(4) 部分任務練習階段(Part-task Practice)

部分任務練習著重於針對學習過程中需高度熟練、且具重複性特徵的子技能進行訓練，其目的在於降低學習者在執行整體任務時所產生的認知負荷。本研究將電子元件辨識視為進行後續操作與任務學習前需優先熟練的重要基礎技能，因此規劃為部分任務練習階段的主要學習內容，作為銜接學習任務與後續操作活動的重要基礎。在系統設計上，本研究透過電子元件模型訓練模組結合影像辨識技術，將教育機器人作為互動式練習引導工具。教學過程中，機器人會隨機呈現電子元件圖片或提出辨識提示，學習者需舉起對應之實體元件讓機器人進行辨識，系統則依據辨識結果即時提供正確或修正回饋。透過高頻率且重複性的辨識操作，學習者能逐步熟悉電子元件之外觀特徵與基本差異，建立對電子元件的穩固認知，使其在進入完整學習任務或較複雜操作時，能將所認知的相關知識集中於操作理解與流程判斷，提升整體學習效率。

4. 結論

本研究旨在以初學者在 Arduino 與電子元件實作學習中常見之操作困難，結合教育機器人互動特性與四元素教學設計模型(4C/ID)，建構一套支援電子元件辨識、接線操作與程式撰寫之學習系統。本研究透過系統化之教學設計架構與機器人即時互動引導，將多步驟且具複雜性的實作流程加以結構化，讓學習者在學習過程具備較高的可理解性與操作連貫性。在系統設計層面，本研究將 4C/ID 模型之四項構面具體轉化為對應之系統功能，包含學習任務、部分任務練習、資訊支援與程序支援。在學習任務階段，引導學習者於完整情境中整合電子元件辨識與操作學習任務活動；部分任務練習階段，協助學習者建立對電子元件的穩固認知；在資訊支援階段，提供必要之概念性說明以支持理解；並於程序支援階段，透過教育機器人即時呈現教師預錄之接線與程式教學說明影片，作為操作當下之程序性鷹架。此一設計使各項教學支援能於適當時機提供，避免學習者在操作過程中產生不必要的認知負荷。

此外，本研究整合影像辨識模型與教育機器人互動機制，使系統能即時辨識學習者所選取之電子元件，並提供即時回饋與引導。相較於傳統以教師示範為主的教學方式，本系統能在學習者操作過程中提供持續且具體的引導，有助於學習者逐步修正錯誤並建立正確的操作流程。透過機器人作為教學情境呈現與互動引導的媒介，學習活動能夠在具體操作與即時回饋中進行，以此提升學習過程中的穩定性與連續性。整體而言，本研究以 4C/ID 模型作為系統

設計與流程規劃的理論依據，將其四項構面轉化為對應之系統功能，並將其落實於實際的 Arduino 與電子元件學習情境中。本研究處於系統開發階段，後續將規劃進行實際教學應用，並透過量化測驗方式驗證系統對學生學習成效之影響，以進一步評估其在學習情境中的應用成效。

參考文獻

- Al Hakim, V. G., Yang, S. H., Liyanawatta, M., Wang, J. H., & Chen, G. D. (2022). Robots in situated learning classrooms with immediate feedback mechanisms to improve students' learning performance. *Computers & Education*, 182, 104483. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104483>
- Alessandrini, A. (2023). A study of students engaged in electronic circuit wiring in an undergraduate course. *Journal of Science Education and Technology*, 32(1), 78–95. <https://doi.org/10.1007/s10956-022-09994-9>
- Augello, A., Daniela, L., Gentile, M., Ifenthaler, D., & Pilato, G. (2020). Editorial: Robot-assisted learning and education. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 591319. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.591319>
- Chen, C.-H., & Chung, H.-Y. (2023). Fostering computational thinking and problem-solving in programming: Integrating concept maps into robot block-based programming. *Journal of Educational Computing Research*, 62(1), 186–207. <https://doi.org/10.1177/07356331231205052>
- Chou, P.-N. (2018). Skill development and knowledge acquisition cultivated by maker education: Evidence from Arduino-based educational robotics. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 14(10), Article em1600. <https://doi.org/10.29333/ejmste/93483>
- Çiftci, S., & Bildiren, A. (2020). The effect of coding courses on the cognitive abilities and problem-solving skills of preschool children. *Computer Science Education*, 30(1), 3–21. <https://doi.org/10.1080/08993408.2019.1696169>
- Costa, J. M., Miranda, G. L., & Melo, M. (2022). Four-component instructional design (4C/ID) model: A meta-analysis on use and effect. *Learning Environments Research*, 25(2), 445–463. <https://doi.org/10.1007/s10984-021-09373-y>
- Frerejean, J., van Geel, M., Keuning, T., Dolmans, D., van Merriënboer, J. J. G., & Visscher, A. J. (2021). Ten steps to 4C/ID: Training differentiation skills in a professional development program for teachers. *Instructional Science*, 49(3), 395–418. <https://doi.org/10.1007/s11251-021-09540-x>
- Frerejean, J., van Merriënboer, J. J. G., Kirschner, P. A., Roex, A., Aertgeerts, B., & Marcellis, M. (2019). Designing instruction for complex learning: 4C/ID in higher education. *European Journal of Education*, 54(4), 513–524. <https://doi.org/10.1111/ejed.12363>
- Fung, K. Y., Fung, K. C., Lui, T. L. R., Lau, W. W. F., Lee, T. Y., & Chow, B. W. Y. (2025). Exploring the impact of robot interaction on learning engagement: A comparative study of two multi-modal robots. *Smart Learning Environments*, 12, 12. <https://doi.org/10.1186/s40561-024-00362-1>
- Hsiao, H. S., Lin, Y. W., Lin, K. Y., Lin, C. Y., Chen, J. H., & Chen, J. C. (2019). Using robot-based practices to develop an activity that incorporated the 6E model to improve elementary school students' learning performances. *Interactive Learning Environments*, 30(1), 85–99. <https://doi.org/10.1080/10494820.2019.1636090>

- Ioannou, A., & Makridou, E. (2018). Exploring the potentials of educational robotics in the development of computational thinking: A summary of current research and practical proposal for future work. *Education and Information Technologies*, 23(6), 2531–2544. <https://doi.org/10.1007/s10639-018-9729-z>
- Jang, Y., Kim, J., & Lee, W. (2018). Development and application of internet of things educational tool based on peer to peer network. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 11(6), 1217–1229. <https://doi.org/10.1007/s12083-017-0608-y>
- Kert, S. B., Erkoç, M. F., & Yeni, S. (2020). The effect of robotics on six graders' academic achievement, computational thinking skills and conceptual knowledge levels. *Thinking Skills and Creativity*, 38, 100714. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2020.100714>
- Lapierre, H. G., Charland, P., & Léger, P. M. (2024). Looking “under the hood” of learning computer programming: The emotional and cognitive differences between novices and beginners. *Computer Science Education*, 34(3), 331–352. <https://doi.org/10.1080/08993408.2023.2214033>
- Medeiros, R. P., Ramalho, G. L., & Falcão, T. P. (2019). A systematic literature review on teaching and learning introductory programming in higher education. *IEEE Transactions on Education*, 62(2), 77–90. <https://doi.org/10.1109/TE.2018.2864133>
- Moraiti, I., Fotoglou, A., & Drigas, A. (2022). Coding with block programming languages in educational robotics and mobiles, improve problem solving, creativity & critical thinking skills. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 16(20), 59–78. <https://doi.org/10.3991/ijim.v16i20.34247>
- Mulders, M. (2022). Vocational training in virtual reality: A case study using the 4C/ID model. *Multimodal Technologies and Interaction*, 6(7), Article 49. <https://doi.org/10.3390/mti6070049>
- Noh, J., & Lee, J. (2020). Effects of robotics programming on the computational thinking and creativity of elementary school students. *Educational Technology Research and Development*, 68(1), 463–484. <https://doi.org/10.1007/s11423-019-09708-w>
- Nouri, J., Zhang, L., Mannila, L., & Norén, E. (2020). Development of computational thinking, digital competence and 21st century skills when learning programming in K-9. *Education Inquiry*, 11(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/20004508.2019.1627844>
- Peppler, K. A., Sedas, R. M., & Thompson, N. (2023). Paper circuits vs. breadboards: Materializing learners' powerful ideas around circuitry and layout design. *Journal of Science Education and Technology*, 32(4), 469–492. <https://doi.org/10.1007/s10956-023-10029-0>
- Qadir, J., Taha, A. E. M., Yau, K.-L. A., Ponciano, J., Hussain, S., Al-Fuqaha, A., & Imran, M. A. (2020, June). Leveraging the force of formative assessment & feedback for effective engineering education. *2020 ASEE Virtual Annual Conference Content Access*, Virtual On line. <https://doi.org/10.18260/1-2--34923>
- Qu, J. R., & Fok, P. K. (2022). Cultivating students' computational thinking through student–robot interactions in robotics education. *International Journal of Technology and Design Education*, 32, 1983–2002. <https://doi.org/10.1007/s10798-021-09677-3>
- Roumen, G. J., & Fernaeus, Y. (2021). Envisioning Arduino action: A collaborative tool for physical computing in educational settings. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 29, Article 100277. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2021.100277>
- Sun, L., Guo, Z., & Zhou, D. (2022). Developing K-12 students' programming ability: A systematic literature review. *Education and Information Technologies*, 27, 7059–7097. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-10891-2>

- Tupac-Yupanqui, M., Vidal-Silva, C., Pavesi-Farriol, L., Sánchez Ortiz, A., Cardenas-Cobo, J., & Pereira, F. (2022). Exploiting Arduino features to develop programming competencies. *IEEE Access*, 10, 20602–20615. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3150101>
- van Merriënboer, J. J. G. (1997). *Training complex cognitive skills: A four-component instructional design model for technical training*. Educational Technology Publications.
- Wang, K., Sang, G.-Y., Huang, L.-Z., Li, S.-H., & Guo, J.-W. (2023). The effectiveness of educational robots in improving learning outcomes: A meta-analysis. *Sustainability*, 15(5), 4637. <https://doi.org/10.3390/su15054637>
- Yildiz Durak, H. (2020). The effects of using different tools in programming teaching of secondary school students on engagement, computational thinking and reflective thinking skills for problem solving. *Technology, Knowledge and Learning*, 25, 179–195. <https://doi.org/10.1007/s10758-018-9391-y>
- Younis, H. A., Ruhaiyem, N. I. R., Ghaban, W., Gazem, N. A., & Nasser, M. (2023). A systematic literature review on the applications of robots and natural language processing in education. *Electronics*, 12(13), 2864. <https://doi.org/10.3390/electronics12132864>
- Omar, H. M. (2018). Enhancing automatic control learning through Arduino-based projects. *European Journal of Engineering Education*, 43(5), 652–663. <https://doi.org/10.1080/03043797.2017.1390548>
- Xu, H., Deng, T., Xu, X., & Zhang, W. (2025). Integrating 4C/ID model into computer-supported formative assessment system to improve the effectiveness of complex skills training for vocational education. *Education and Information Technologies*, 30, 5921–5964. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-13037-8>
- Vandewaetere, M., Manhaeve, D., Aertgeerts, B., Clarebout, G., van Merriënboer, J. J. G., & Roex, A. (2015). 4C/ID in medical education: How to design an educational program based on whole-task learning: AMEE Guide No. 93. *Medical Teacher*, 37(1), 4–20. <https://doi.org/10.3109/0142159X.2014.928407>
- Van Merriënboer, J. J. G., Kirschner, P. A., & Kester, L. (2003). Taking the load off a learner's mind: Instructional design for complex learning. *Educational Psychologist*, 38(1), 5–13. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_2