

AI 支持的反馈对探究式学习中概念图构建的影响研究

Effects of AI- supported Feedback on Concept Mapping in Inquiry-Based Learning

白现萍^{1,2}, 欧阳璠^{1*}

¹ 浙江大学教育学院

² 新疆师范大学教育科学学院

* fanouyang@zju.edu.cn

【摘要】 本研究探讨了不同类型的 AI 反馈对探究式学习 (IBL) 中概念图构建的影响。设计了三种反馈类型：无 AI 反馈、AI 支持的单向反馈和 AI 支持的双向反馈，并采用多模态学习分析方法进行比较分析。结果表明，AI 支持的单向反馈促进了学生的认知和行为，情绪压力较小；AI 支持的双向反馈促进了学生的元认知发展，但情绪压力较大；无 AI 反馈未能显著促进参与，并导致较大情绪波动。基于此，研究提出了相应的教学和分析方法建议。

【关键词】 探究式学习 (IBL)；计算机支持的概念图；AI 支持的反馈；多模态学习分析

Abstract: This study explores the impact of different types of AI feedback on concept mapping in Inquiry-Based Learning (IBL). Three feedback types were designed: no AI feedback, AI-supported one-way feedback, and AI-supported two-way feedback, and a multimodal learning analysis method was employed for comparative analysis. The results indicated that AI-supported one-way feedback promoted students' cognitive and behavioral engagement with minimal emotional stress; AI-supported two-way feedback enhanced students' metacognitive engagement, though it resulted in higher emotional stress; no AI feedback did not significantly promote engagement and led to greater emotional fluctuations. Based on these findings, the study offers insights into teaching strategies and analytical methods.

Keywords: Inquiry-based learning (IBL), Computer-supported concept map, AI-supported feedback, Multimodal learning analytics

1. 引言

探究式学习 (IBL) 通过鼓励学生提出问题、调查和构建知识，提升了学生的学习参与度、成绩和解决问题的能力。然而，学生在面对复杂任务时难以独立完成高质量的探究任务，且成功的探究式学习需要良好的信息搜索和过滤能力、持续的内在动力以及充分的指导支持 (Litmanen et al., 2012)。概念图通过图形化方式将复杂知识可视化，帮助学生直观理解概念间的层级关系和联系 (Novak & Cañas, 2008)。在探究式学习中，概念图能够系统化零散知识点，形成完整知识网络，促进学生深入理解概念间的内在联系，从而发展高阶思维能力。计算机支持的概念图 (CSCM) 帮助学生可视化信息和概念，有助于对探究内容的理解和构建 (Chang & Yang, 2023)。然而，知识的视觉呈现并不总能保证高质量的探究式学习 (Liang et al., 2021)。为了提高探究式学习的有效性，AI 支持的反馈 (如单向和双向反馈) 被用来激发学生的高阶思维和自主学习能力。先前的研究对 AI 支持的反馈的效果持不同观点：一些研究认为 AI 支持的反馈提供了个性化和及时反馈，可以提高学习效果 (Khaddage & Melki, 2024)，而另一些研究认为其存在过渡依赖 AI 的风险，降低学生的自主学习能力 (Li et al., 2024)。本研究在概念

图制作平台中嵌入三种反馈类型(无反馈、AI支持的单向反馈、AI支持的双向反馈),并利用多模态学习分析方法来探讨这些反馈对探究式学习的影响。本研究为未来教育教学中使用AI支持的反馈提供了理论和实践见解。

2. 研究现状

2.1. 反馈和AI支持的反馈

反馈是影响学习的关键因素之一。从认知主义角度来看,反馈是提供有关个人表现或理解方面的信息(Hattie & Timperley, 2007);从建构主义角度来看,反馈可以被定义为一种过程,关注学习过程中的行为(Winstone et al., 2022);从社会建构主义角度来看,反馈是学生通过持续对话共同构建知识的过程(Askew & Lodge, 2000)。本研究认为,反馈是学生通过持续对话主动构建知识的过程,并通过理解和解释与表现相关的信息来促进学习。反馈可以由教师、同伴和技术提供,其中技术支持的反馈通过学习分析和AI算法生成实时、针对性的反馈,克服了教师和同伴反馈的局限性(Liu et al., 2023)。尽管基于AI的反馈系统在教育中得到广泛应用,但大多数反馈仍为结果性、静态和单向的,其有效性较低。

2.2. 探究式学习和概念图

探究式学习是一种以学生为中心的教育方法,强调通过主动探索和发现问题培养学生的批判性思维、问题解决能力和自主学习能力(Pedaste et al., 2015)。成功的探究式学习往往与精心的教学设计,技术增强的学习环境和教师的指导和支持有关。在探究式学习中,计算机支持的概念图构建平台常被用来帮助学生促进知识整合、增强记忆和理解以及减少认知负荷。

2.3. 计算机支持的概念图构建和AI支持的反馈

在探究式学习中,尽管计算机支持的概念图有助于提升学习效果,但在提供及时反馈,个性化指导,动态适应性以及持续的高质量学习等方面,往往会遇到挑战(Wang, 2019)。其中技术支持的反馈机制可以评估学生的学习效果,提供及时反馈,激发学生的学习兴趣,引导学生思考和反思(Lazonder & Harmsen, 2016)。近年来,AI支持的反馈系统在教育中得到广泛应用,尤其是在探究式学习中。从反馈的交互方向来看,AI支持的反馈分为单向和双向。具体来讲,AI支持的单向反馈主要通过提供纠正错误、激励进步等信息来帮助学生(Winstone et al., 2022),而AI支持的双向反馈则注重与AI的互动交流,解决复杂问题(Su et al., 2023)。研究发现,两种反馈对学生学习表现和概念图构建有不同影响,例如某些研究表明AI支持的单向反馈可以提高学生的学习成绩和自我效能,而其他研究则认为单向反馈和双向反馈对学习效果没有显著影响(Guo et al., 2023)。此外,有研究指出,AI支持的反馈可能并未显著改善探究式学习中概念图的构建过程,甚至可能增加师生之间的信任危机。因此,需要进一步探索不同类型的AI反馈对探究式学习的影响。

2.4. 多模态学习分析

多模式学习分析(MMLA)在测量探究式学习(Inquiry-Based Learning)方面提供了多种有效方法,克服了传统学习测量依赖单一数据来源(如日志数据或自我报告问卷)的局限性(Song et al., 2022),如无法捕捉探究式学习过程中的动态性和多维性。MMLA通过综合多模态数据和多样化的分析策略,能够更深入地理解学习过程和结果,为教育研究提供有价值的见解。然而,在探究式学习中整合多种模态数据探究学习过程的研究较少。因此,本研究在学生的探究学习过程中同时收集了录屏数据和心率数据,以增加对探究学习过程的细粒度监测,并为多模态学习分析在探究式学习中的应用提供更多实证依据和理论支持。

本研究开发了一种AI支持的反馈工具,该工具能够根据学生的文本输入生成概念图,并通过对话互动支持和改进反馈。研究探究了三种条件:无AI反馈、AI支持的单向反馈和AI

支持的双向反馈。使用了多模态学习分析方法来收集和分析多种数据类型,探究三种反馈条件对探究环境下概念图构建过程的影响。

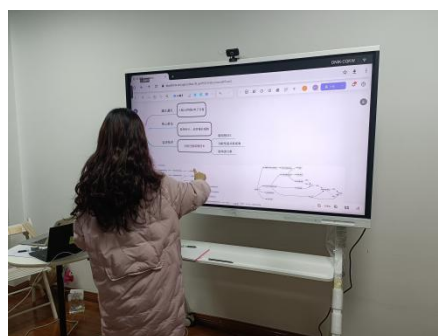
3. 研究方法

3.1. 研究环境和研究对象

本研究主要是在一个交互式白板上构建概念图。主要分为两个阶段:首先,学生观看学习视频(主题是与生物相关的科学知识)(见图 1a);其次,学生在交互式白板上利用在线概念图制作平台工具构建概念图(见图 1b)。该平台可在构建概念图的过程中提供概念图反馈和 AI 对话交流功能,帮助学生构建概念图。研究人员在中国某顶尖综合型大学招募了 60 名在校生。60 名学生被随机分为 3 组:对照组(无 AI 反馈)($N=20$);实验组 1(AI 支持的单向反馈)($N=20$);实验组 2(AI 支持的双向反馈)($N=20$)。



(a) 观看视频



(b) 构建概念图活动

图 1. 概念图构建活动

3.2. AI 反馈工具的设计

本研究开发了一种 AI 反馈工具,可根据文本输入自动生成概念图,并实现学生与 AI 的互动(见图 2)。概念图反馈利用 Python 与提示语来实现,重点是将文本的关键概念及其关系进行可视化呈现。提示语使生成的概念图反馈更符合人类的认知逻辑。此外,对话功能通过嵌入概念图平台的智能问答工具来实现,使学生能够直接与 AI 互动。研究团队以 AI 反馈工具为基础设计了三种反馈方式,即无 AI 反馈(提供基于文本的反馈)、AI 支持的单向反馈(提供 AI 处理过的概念图反馈)和 AI 支持的双向反馈(提供 AI 处理过的概念图反馈,同时可以与 AI 对话)(见图 3)。

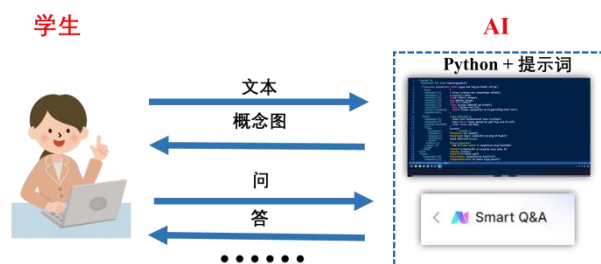


图 2. AI 反馈工具功能设计

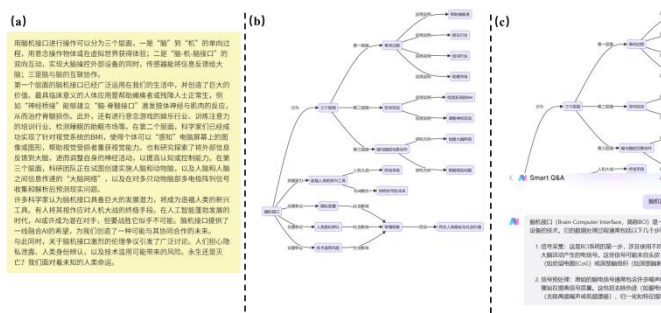


图 3. 三种反馈类型. (a) 无 AI 反馈, (b) AI 支持的单向反馈, (c) AI 支持的双向反馈

3.4. 数据收集和分析

本研究收集学生概念图构建过程中的录屏数据和心率数据。录屏数据是指学生在构建概念图过程中的操作行为,从白板屏幕的录制($N=60$)中收集。心率数据指的是学习活动中的

PPG, 由定制设计的腕带(Erband)收集。我们使用了点击流分析、频域分析、趋势分析和认知网络分析等分析方法来分析数据。

针对研究问题,我们分析了不同条件下学生探究学习过程中的屏幕记录数据和PPG信号。首先,基于先前的研究(Ouyang et al., 2021),制定了一个编码框架,从行为、认知和元认知三个维度对屏幕录屏记录进行分析(见表 1),对上面三个维度的编码进行了认知网络分析(ENA),以确定三种情况的认知结构差异。其次,我们使用频域分析法(FDA),并采用滑动窗口法,窗口长度为 30 秒,步长为 20 秒,将原始 PPG 信号分解为低频(LF)和低频(HF),采用的是中科心研的数据处理平台。

表 1. 行为、认知和元认知参与度的编码框架

维 子维度	编码	描述
度		
行 添加节点	AaN-B	一名学生在概念图上添加了一个节点。
为 添加连接	AaC-B	一名学生在概念图上添加了链接。
重组和重新布局	RaR-B	一名学生拖动了节点或链接;一名学生删除了节点或链接。
参考反馈意见编辑文本	RF-B	一名学生根据完全反馈意见编辑文本。
结合反馈和自己的理解 编辑文本	RFR-B	一名学生根据反馈意见并结合自己的理解编辑文本。
认 记忆和理解	RU-C	一名学生在概念图上创建了记忆和理解的观念或观点。
知 应用和分析	AA-C	一名学生在概念图上创建了应用和分析的观念或观点。
综合和评估	SE-C	一名学生在概念图上创建了综合和评价的观念或观点。
元 查看反馈	VF-M	一名学生在反馈区拖动屏幕或查看反馈区。
认 参考反馈构建概念图	CCF-M	一名学生在观看反馈后为概念图添加了结构和框架,包括节点和连接。
知 修改概念图	MC-M	一名学生修改已完成概念图的结构、框架和文本。
观察概念图	OC-M	一名学生将屏幕拖到概念图构建区,或将视线注视在概念图构建区。

4. 研究结果

4.1 不同的反馈条件对学生的行为、认知和元认知参与度的影响

从行为、认知和元认知三个维度对学生的概念图构建过程进行了认知网络分析。ENA 图显示,三种情况具有相似的认知结构。三种条件下的网络中心点在第一个维度(x)上似乎存在一些差异。然而,无 AI 反馈条件和 AI 支持的单向反馈条件的网络中心点在第一个维度(x)上存在差异。为了评估统计意义,进行了独立样本 t 检验,结果显示在第一个维度上没有差异(meanNA=0.05, meanAOF=-0.05; p=0.24; t=1.20)(见图 4a)。三组的认知网络结果还表明,与 AI 支持的单向反馈条件(见图 4c)和 AI 支持的双向反馈条件(见图 4d)组的学生相比,无 AI 反馈条件(见图 4b)组的学生 CCF-M&RFR-B 连接更强。此外,与无 A 反馈条件和 AI 支持的单向反馈条件相比, AI 支持的双向反馈条件下 VF-M&RFR-B, AaN-B&RFR-B 以及 CCF-M&RFR-B 的联系更强。

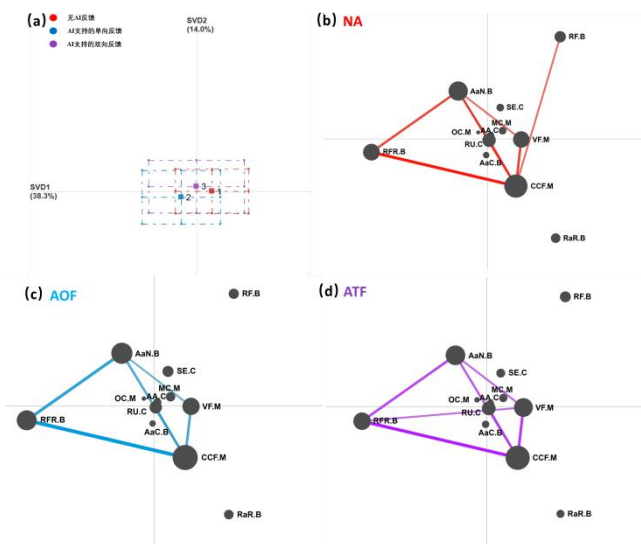


图 4. 三种条件下的认知网络图谱。(a) 中心点分布图, (b) NA 条件下的平均网络图, (c) AOF 条件下的平均网络图, (d) ATF 条件下的平均网络图。注. 仅绘制强度超过 0.2 的链接。

此外, 本研究还构建了减法认知网络来进一步探究三种反馈条件下学生概念图构建过程的差异。首先, 当比较 AI 支持的双向反馈条件和 AI 支持的单向反馈条件时(见图 5a), AI 支持的单向反馈条件下的学生比 AI 支持的双向反馈条件下的学生有更强的 RFR-B & AaN-B 和 RFR-B & CCF-M 连接, 而 AI 支持的双向反馈条件下的学生有更强的 VF-M & RU-C 连接。其次, 比较 AI 支持的双向反馈条件和无 AI 反馈条件(见图 5b), AI 支持的双向反馈条件下的学生在 VF-M 和 OC-M 方面的联系更强, 而无 AI 反馈条件下的学生在 AaN-B & RFR-B 以及 RFR-B & RaR-B 方面的联系更强。第三, 当比较 AI 支持的单向反馈条件和无 AI 反馈条件时(见图 5c), AI 支持的单向反馈条件下的学生在 AaN-B & SE-C 和 SE-C & CCF-M 之间有更强的联系, 而无 AI 反馈条件下的学生在 CCF-M & RU-C 和 RU-C & RF-B 之间有更强的联系。总体而言, 认知网络结构表明, 在 AI 支持的双向反馈条件下, 学生倾向于查看反馈和观察概念图; 而在 AI 支持的单向反馈条件下, 学生倾向于添加节点, 根据反馈创建概念图, 并在综合和评价层面形成认知结构。相反, 在无 AI 反馈条件下, 学生倾向于根据反馈绘制概念图, 并在记忆和理解层面形成认知结构。

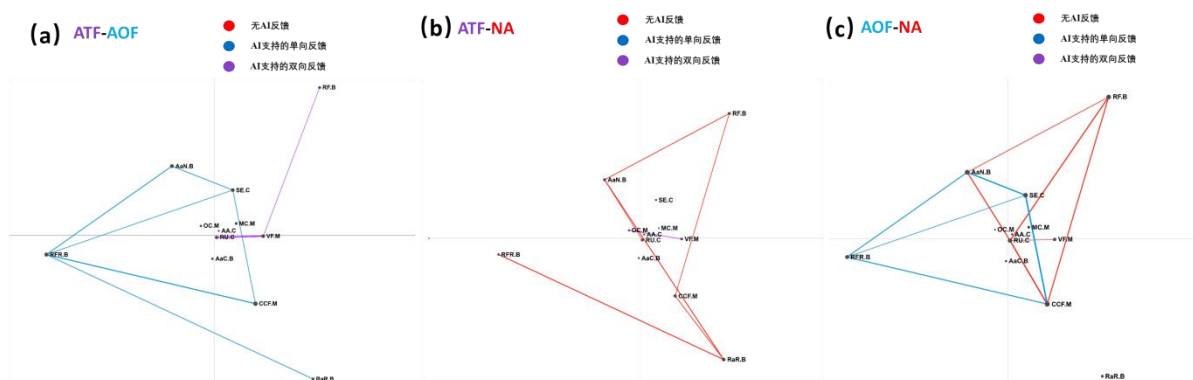


图 5. 平均网络对比详情: (a) ATF 与 AOF 之间的减法网络; (b) ATF 与 NA 之间的减法网络; (c) AOF 与 NA 之间的减法网络。注. 链接强度高于 0.03 的被绘制在减法的网络中。

4.2.2 不同的反馈条件对学生心率的影响

对三种反馈条件的 LF/HF 比值进行了趋势分析(见图 6)。AI 支持的双向反馈条件的 LF/HF 比值在整个学习过程中最为稳定, 在最后 15 分钟略有波动, 在最后 10 分钟达到峰值。

总体平均值高于其他两种条件。AI 支持的单向反馈组的平均值低于其他两种反馈。相反，无 AI 反馈组的总体 LF/HF 比值最大(见图 8)。

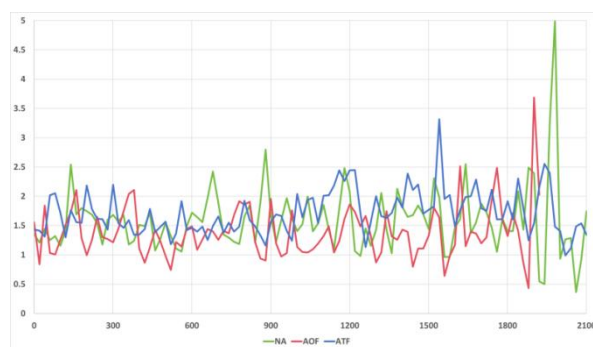


图 6. 三种不同反馈下学生的 LF/HF 比值趋势分析

5. 讨论和启示

这项研究表明，将 AI 支持的反馈是嵌入到在线概念图构建平台中，能显著影响学生的探究学习过程。结果发现，AI 支持的单向反馈提高了学生的行为和认知参与度，同时学生的情绪表现出较低的压力水平，原因可能是 AI 生成的概念图反馈给学生提供了清晰的结构化指导，帮助了理解和组织知识，从而降低了认知负荷和情绪压力。相比之下，AI 支持的双向反馈增加了元认知参与，表现出更高的情绪压力水平，原因可能是 AI 提供的概念图反馈和对话反馈，要求学生进行即时反思和回应，促进了学生的元认知能力和自我调节能力，要求学生不断调整思维和策略，导致情绪压力上升。无 AI 反馈组的学生表现出更大的情绪波动，但认知、行为和元认知参与度却没有得到提高，原因可能是文本反馈缺乏结构化和即时性，无法提供有效的学习支持，导致学生在学习过程中感到迷茫和焦虑，从而引发情绪波动。这些发现凸显了 AI 反馈在促进探究学习过程中的作用，同时也提醒了双向反馈可能增加学生的情绪压力。

本研究提出了对未来探究式学习的教学和分析方面的启示。从教学角度看，教师应理解 AI 支持的反馈的优缺点，合理应用，利用单向反馈提供及时指导，双向反馈促进元认知和自我调节。从分析角度看，探究式学习过程的动态复杂性要求多模态数据分析，如皮肤电活动、眼动追踪等，以更精准地捕捉学习行为和多维互动(Moundridou et al., 2024)。多模态数据整合能够揭示学习模式的细节和潜在关系，未来应结合机器学习和深度学习等技术，开发更有效的多层次学习行为模型，追踪探究式学习过程中的动态变化(Mu et al., 2020)。

6. 研究结论和局限

本研究开发了一个 AI 工具，设计了三种反馈类型，探讨其对探究式学习过程的影响。研究发现，AI 支持的单向反馈促进了学生的行为和认知参与度，并降低了学生的情绪压力。AI 支持的双向反馈促进了学生的元认知发展，但是学生的情绪压力较大。无 AI 反馈对学生的行为、认知和元认知参与没有促进效果。本研究存在两个局限：首先，样本量较小、研究时间较短，建议未来增加样本量、延长研究周期并进行纵向分析；其次，多模态数据的复杂性可能导致过度解读。未来研究应加强数据校准和理论验证，以确保准确性和可解释性。本研究证实了 AI 支持的反馈对探究式学习有积极影响，并为未来的研究和应用提供了方向。

参考文献

Al Mamun, M. A., Lawrie, G., & Wright, T. (2020). Instructional design of scaffolded online learning modules for self-directed and inquiry-based learning environments. *COMPUTERS*

& *EDUCATION*, 144, 103695.

- Askew, S., & Lodge, C. (2000). Gifts, ping-pong and loops – linking feedback and learning. In *Feedback For Learning* (pp. 1–17). Routledge.
- Chang, C.-Y., & Yang, J. C. (2023). Concept mapping in computer-supported learning environments: A bibliometric analysis. *Interactive Learning Environments*, 31(10), 6678–6695.
- Darvishi, A., Khosravi, H., Sadiq, S., Gašević, D., & Siemens, G. (2024). Impact of AI assistance on student agency. *Computers & Education*, 210, 104967.
- Dobber, M., Zwart, R., Tanis, M., & van Oers, B. (2017). Literature review: The role of the teacher in inquiry-based education. *Educational Research Review*, 22, 194–214.
- Fu, S., Gu, H., & Yang, B. (2020). The affordances of AI-enabled automatic scoring applications on learners' continuous learning intention: An empirical study in China. *British Journal of Educational Technology*, 51(5), 1674–1692.
- Gijlers, H., & de Jong, T. (2013). Using Concept Maps to Facilitate Collaborative Simulation-Based Inquiry Learning. *The Journal of the Learning Sciences*, 22(3), 340–374.
- Guo, K., Zhong, Y., Li, D., & Chu, S. K. W. (2023). Effects of chatbot-assisted in-class debates on students' argumentation skills and task motivation. *Computers & Education*, 203, 104862.
- Hagemans, M. G., van der Meij, H., & de Jong, T. (2013). The effects of a concept map-based support tool on simulation-based inquiry learning. *Journal of Educational Psychology*, 105(1), 1–24.
- Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The Power of Feedback. *Review of Educational Research*, 77(1), 81–112.
- Hooda, M., Rana, C., Dahiya, O., Rizwan, A., & Hossain, M. S. (2022). Artificial Intelligence for Assessment and Feedback to Enhance Student Success in Higher Education. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022(1), 5215722.
- Khaddage, F., & Melki, A. (2024). *Utilising AI Tools and ChatGPT in Inquiry-Based Learning: A Paradigm Shift in Computer Science Education*. 213–218.
- Lazonder, A. W., & Harmsen, R. (2016). Meta-Analysis of Inquiry-Based Learning: Effects of Guidance. *Review of Educational Research*, 86(3), 681–718.
- Lee, H.-Y., Chen, P.-H., Wang, W.-S., Huang, Y.-M., & Wu, T.-T. (2024). Empowering ChatGPT with guidance mechanism in blended learning: Effect of self-regulated learning, higher-order thinking skills, and knowledge construction. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 21(1), Article 1.
- Li, P.-H., Kinshuk, & Huang, Y.-M. (2024). Enhancing ChatGPT in POE Inquiry Learning for STEM Education to Improve Critical Thinking Skills. In Y.-P. Cheng, M. Pedaste, E. Bardone, & Y.-M. Huang (Eds.), *Innovative Technologies and Learning* (pp. 30–39). Springer Nature Switzerland.
- Liang, H.-Y., Hsu, T.-Y., & Hwang, G.-J. (2021). Promoting children's inquiry performances in alternate reality games: A mobile concept mapping-based questioning approach. *British Journal of Educational Technology*, 52(5), 2000–2019.
- Litmanen, T., Lonka, K., Inkinen, M., Lipponen, L., & Hakkarainen, K. (2012). Capturing teacher students' emotional experiences in context: Does inquiry-based learning make a difference?

Instructional Science, 40(6), 1083–1101.

- Liu, Y., Xiong, W., Xiong, Y., & Wu, Y. B. (2023). Generating timely individualized feedback to support student learning of conceptual knowledge in Writing-To-Learn activities. *Journal of Computers in Education*.
- Moundridou, M., Matzakos, N., & Doukakis, S. (2024). Generative AI tools as educators' assistants: Designing and implementing inquiry-based lesson plans. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 7, 100277.
- Mu, S., Cui, M., & Huang, X. (2020). Multimodal data fusion in learning analytics: A systematic review. *Sensors (Switzerland)*, 20(23), 1–27. Scopus.
- Novak, J. D., & Cañas, A. J. (2008). *The theory underlying concept maps and how to construct and use them*.
- Ouyang, F., Chen, Z., Cheng, M., Tang, Z., & Su, C.-Y. (2021). Exploring the effect of three scaffoldings on the collaborative problem-solving processes in China's higher education. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 18(1), 35.
- Pedaste, M., Mäeots, M., Siiman, L. A., de Jong, T., van Riesen, S. A. N., Kamp, E. T., Manoli, C. C., Zacharia, Z. C., & Tsourlidaki, E. (2015). Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. *Educational Research Review*, 14, 47–61.
- Schroeder, N. L., Nesbit, J. C., Anguiano, C. J., & Adesope, O. O. (2018). Studying and Constructing Concept Maps: A Meta-Analysis. *Educational Psychology Review*, 30(2), 431–455.
- Shen, H., Kneare, T., Ghosh, R., Alkie, K., Krishna, K., Liu, Y., Ma, Z., Petridis, S., Peng, Y.-H., Qiwei, L., Rakshit, S., Si, C., Xie, Y., Bigham, J. P., Bentley, F., Chai, J., Lipton, Z., Mei, Q., Mihalea, R., ... Jurgens, D. (2024). *Towards Bidirectional Human-AI Alignment: A Systematic Review for Clarifications, Framework, and Future Directions* (No. arXiv:2406.09264). arXiv.
- Song, Y., Cao, J., Yang, Y., & Looi, C.-K. (2022). Mapping primary students' mobile collaborative inquiry-based learning behaviours in science collaborative problem solving via learning analytics. *International Journal of Educational Research*, 114, 101992.
- Su, Y., Lin, Y., & Lai, C. (2023). Collaborating with ChatGPT in argumentative writing classrooms. *Assessing Writing*, 57, 100752.
- Tam, A. C. F. (2024). Interacting with ChatGPT for internal feedback and factors affecting feedback quality. *Assessment & Evaluation in Higher Education*, 0(0), 1–17.
- Wah, C., Samuel Kai, Reynolds, Rebecca B, Tavares, Nicole J, Notari, Michele, & A Lee, Celina Wing Yi. (2021). *21st Century Skills Development Through Inquiry-Based Learning: From Theory to Practice—PHBern*. Springer International Publishing.
- Wang, S. (2019). *Providing Intelligent and Adaptive Support in Concept Map-based Learning Environments*. Arizona State University.
- Winstone, N., Boud, D., Dawson, P., & Heron, M. (2022). From feedback-as-information to feedback-as-process: A linguistic analysis of the feedback literature. *Assessment & Evaluation in Higher Education*, 47(2), 213–230.
- Worsley, M., & Blikstein, P. (2018). A Multimodal Analysis of Making. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 28(3), 385–419.