
OEA | DT-OCS框架：告别硬件束缚，引领光学计算的离线优化与高效任务开发

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41492.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

OEA | DT-OCS框架：告别硬件束缚，引领光学计算的离线优化与高效任务开发。

Opto-Electronic

Advances论文推荐清华大学陈宏伟教授团队和国防科技大学团队提出数字孪生光学计算系统（DT - OCS），构建了与实体光学计算系统相对应的高保真数字孪生模型，显著降低了任务训练、优化与开发过程对物理硬件的依赖，为光学计算技术在高效任务开发和离线优化领域开辟了全新的应用生态。

Digital twin optical computing system

Run Sun^{1,2†}, Yuemin Li^{1,2†}, Tingzhao Fu^{3*}, Wencan Liu^{1,2}, Sigang Yang^{1,2} and Hongwei Chen^{1,2*}

Abstract: Optical computing systems (OCS) are promising accelerators for artificial intelligence due to their high bandwidth, low latency, and inherent parallelism. However, in existing OCS implementations, task development often requires direct participation of physical hardware during training and optimization, tightly coupling development workflows to device access and limiting offline design, reproducible benchmarking, and parallel exploration. Here, we propose a Digital Twin Optical Computing System (DT-OCS), a system-level, measurement-driven digital surrogate that emulates the end-to-end input-output behavior of a specific physical OCS under different operating configurations. DT-OCS is implemented as a differentiable software module, enabling fully offline task training and configuration optimization. The optimized configuration parameters can be directly transferred to the physical OCS without hardware-in-the-loop retraining. We validate DT-OCS on a high-speed optical computing system operating at 10 GHz and equipped with a silicon-based integrated computing chip. Representative tasks, including image classification and temporal strategy generation, are evaluated. Across all tasks, the transferred models closely match the performance of their digital-twin counterparts after direct parameter transfer. These results demonstrate that DT-OCS enables a hardware-decoupled and fully offline development paradigm for optical computing systems. The DT-OCS implementation is released as open-source code to facilitate reuse and further development.

Keywords: digital twin system; high-speed optical computing; transfer training method

DOI: [10.29026/oea.2026.250254](https://doi.org/10.29026/oea.2026.250254) | CSTR: [32247.14.oea.2026.250254](https://cstr.cn/32247.14/oea.2026.250254)

Citation: Sun R, Li YM, Fu TZ et al. Digital twin optical computing system. *Opto-Electron Adv* 9, 250254 (2026).

¹Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; ²Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Beijing 100084, China; ³College of Advanced Interdisciplinary Studies & Hunan Provincial Key Laboratory of Novel Nano-Optoelectronic Information Materials and Devices, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China.

[†]These authors contributed equally to this work.

*Correspondence: TZ Fu, E-mail: futingzhao@nudt.edu.cn; HW Chen, E-mail: chenhw@tsinghua.edu.cn

文章 Sun R, Li YM, Fu TZ et al. Digital twin optical computing system. *Opto-Electron Adv* 9, 250254 (2026).

第一作者：孙润，李悦旻

通信作者：符庭钊，陈宏伟

研究背景

随着人工智能和深度学习的快速发展，传统电子计算系统在处理大规模数据和复杂计算任务时面临显著瓶颈。为突破这些限制，光学计算（optical computing）逐渐成为重要的发展方向。光学计算利用光波的物理特性，如干涉、衍射等，实现数据处理；相较于电子计算，具有更高速度、更优能效和更强并行处理能力。尤其在图像处理、机器学习，以及大数据分析等领域，光学计算展现出广阔的应用前景。

然而，现有光学计算系统仍面临一个突出挑战：计算任务的开发高度依赖实体硬件平台。在传统光计算框架下，多位用户若需使用同一套光学硬件开展研究，往往只能依次排队上机。每位用户都需要先占用设备进行参数加载，再依据实验输出反复调参，并进行在线误差校准，之后才能开展正式计算。当前一位用户完成调试和计算后，下一位用户往往还需要重新调整系统状态，难以直接接续开展任务。久而久之，整个平台容易陷入排队等待—反复调试—重复校准的循环，不仅设备占用时间长、试错成本高，也使不同任务难以并行推进，严重制约了研究效率和系统应用的灵活性。

为了克服上述挑战，数字孪生光学计算系统（DT-OCS）被提出。DT-OCS通过构建与实体光学计算系统相对应的数字孪生模型，在数字平台上复现实体系统在不同配置参数下的输入输出响应，从而能够在数字域内完成任务的离线仿真、训练与优化。如果把实体光学计算系统比作一台昂贵而繁忙的真机，那么DT-OCS就像它的一台高保真模拟器。研究者不必每次都占用真实硬件进行试错，而是可以先在数字环境中完成任务训练、参数优化和效果验证，最后再将优化结果部署到实体系统中。这样一来，任务开发在训练和优化阶段对硬件的依赖大大降低，避免了传统光学计算中长期占用硬件进行在线优化和反复调试的局限。DT-OCS不仅提升了任务开发效率，也使多个任务并行设计与验证成为可能，从而提高了光学计算系统研究的灵活性，并有助于加快其应用拓展与技术发展。

这项工作的意义不仅在于提出了一个新的模型，更在于为光学计算系统提供了一种可共享、可复用的数字化开发范式。它相当于为传统依赖实体硬件的光学计算平台配备了一套数字开发套件，使研究者能够在统一的数字环境中开展任务训练、性能验证和方法比较，而不必每次都从真实硬件出发重复试错。

从更长远的角度看，一个成熟的光学计算平台不应只有实体硬件，还应同时提供与其计算行为相对应的数字模型。正如现代交通不仅依赖真实道路网络，也依赖同步更新的数字地图，未来的光学计算系统也应具备硬件平台+数字孪生模型的双重形态。只有这样，更多研究者才能围绕同一平台开展协同开发、统一验证和公平比较，从而推动光学计算从单一实验系统走向可共享、可扩展的通用研究平台。

本文亮点

清华大学陈宏伟教授团队和国防科技大学团队提出了数字孪生光学计算系统（DT-OCS），为光学计算技术在高效任务开发和离线优化领域开辟了全新的应用生态。该工作以 Digital Twin Optical Computing System 为题，发表在 Opto-Electronic Advances 2026年第7期。

DT-OCS框架采用数字孪生技术，构建了与实体光学计算系统相对应的高保真数字孪生模型，显著降低了任务训练、优化与开发过程对物理硬件的依赖。基于这一框架，研究者能够在离线环境中独立开展任务训练和参数优化，并支持多个任务并行开发，从而有效提升了光学计算系统的研究效率与应用灵活性。

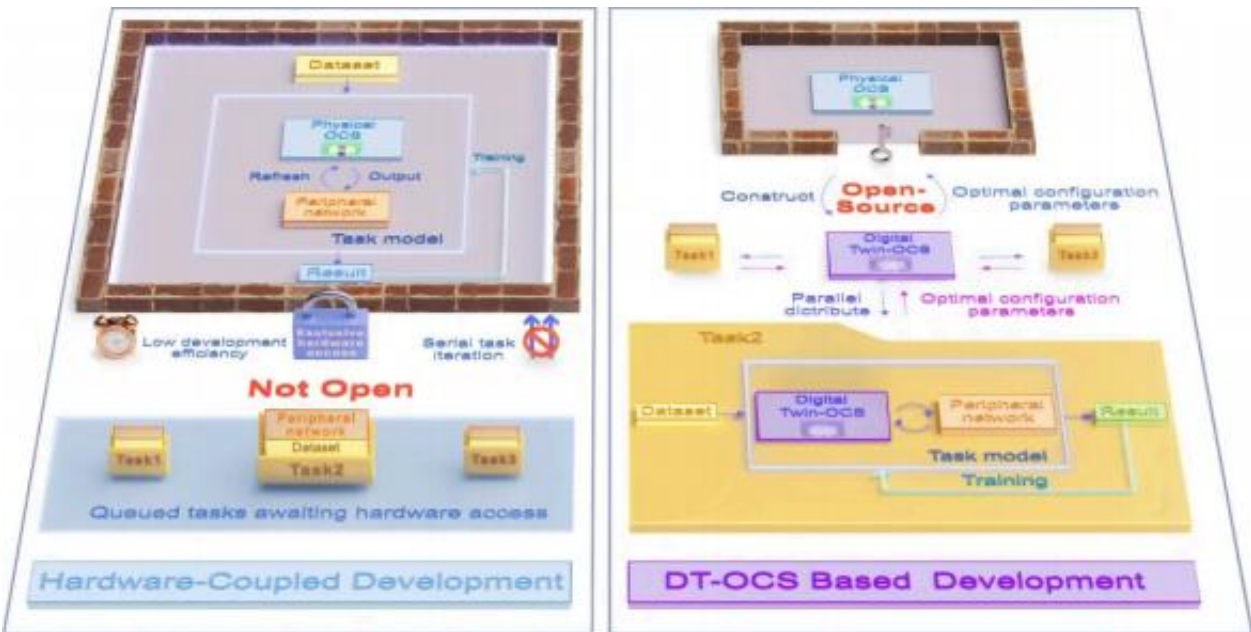


图1数字孪生光学计算系统的应用框架

DT-OCS框架的核心优势在于将任务开发过程从实体硬件中解耦出来。传统光学计算系统在任务训练和参数优化过程中，往往需要反复调用实体设备进行配置、测量和调整，不仅周期长、效率低，也难以支持多个任务同时开展。针对这一问题，DT-OCS通过构建实体光学计算系统的数字孪生模型，在数字域中高保真复现系统在不同配置参数下的输入输出响应，使任务训练与优化能够主要在离线环境中完成。研究者无需持续占用实体硬件即可开展任务训练、参数优化和方案验证，并支持多个任务并行推进，从而显著提升光学计算系统的开发效率与应用灵活性。

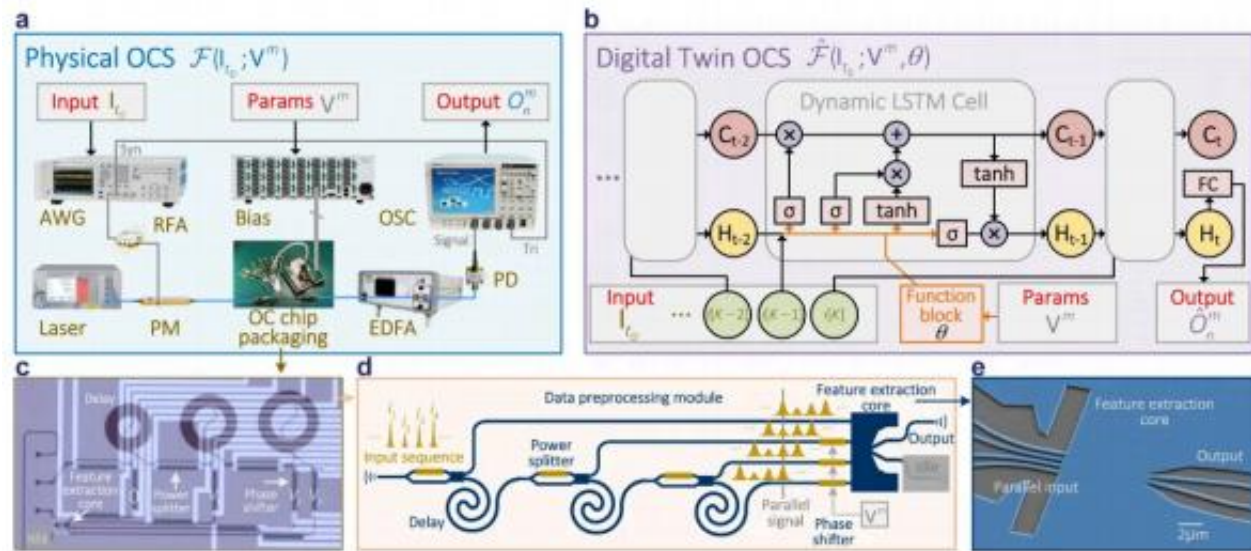


图2实体光学计算系统与数字孪生

该研究通过实验验证了DT-OCS应用框架的有效性

。研究团队以搭载硅光特征计算芯片的高速光学计算系统为实验平台，展示了 DT-OCS 在图像分类和时序决策任务中的应用。实验结果表明，基于 DT-OCS 完成任务训练与优化后，所得配置参数可直接迁移至实体系统中使用，且实体系统的任务性能与数字模型预测结果高度一致，验证了 DT- OCS 在任务应用层面的高保真性与高可转移性。同时，由于任务训练与优化主要在数字域中完成，不同任务可并行开展，从而有效缩短整体开发周期，提升研究效率。

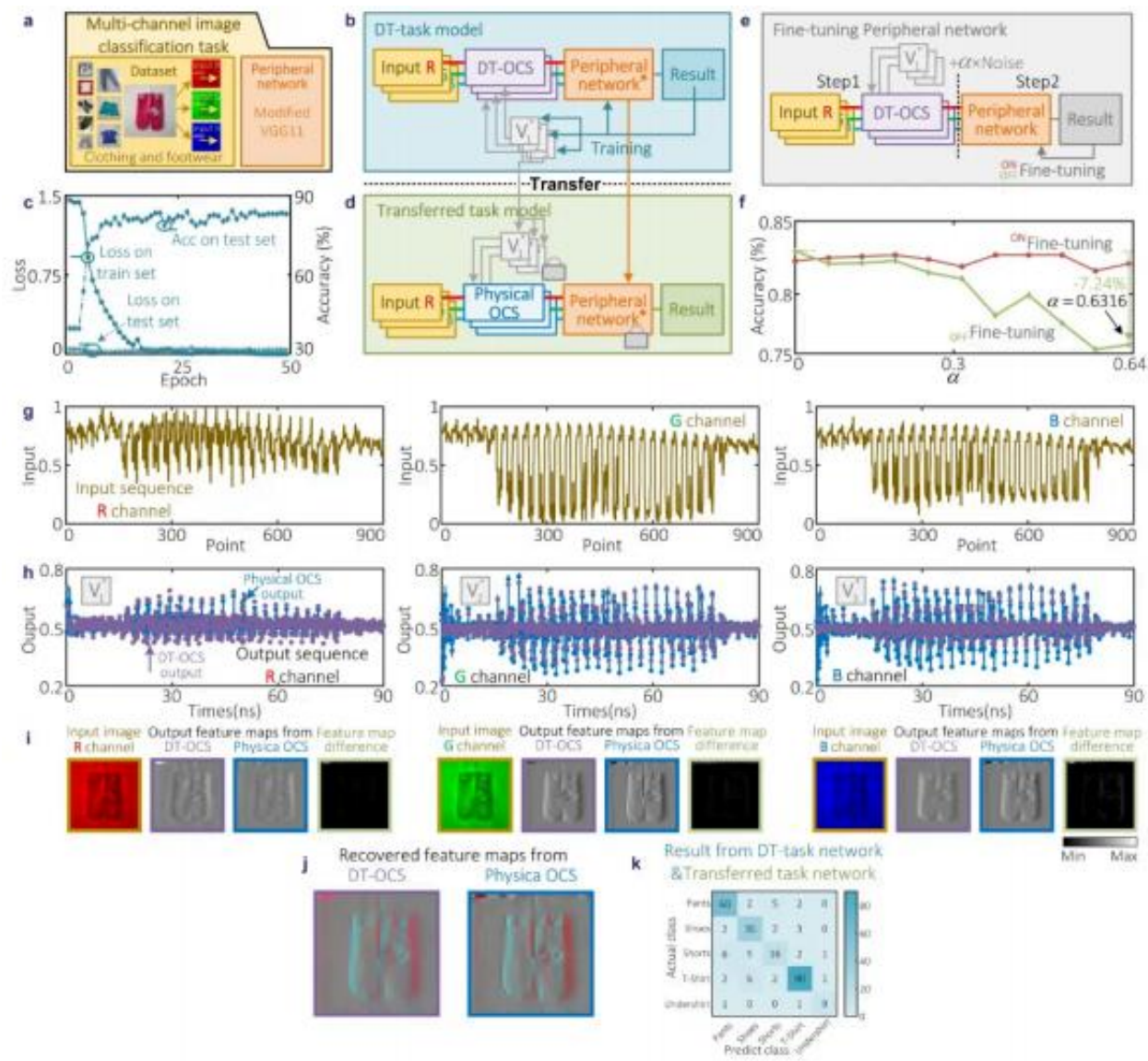


图3数字孪生系统支持彩色服饰分类任务的离线训练与最终部署

DT-OCS框架的意义不仅在于提升了任务开发效率，更重要的是推动了任务设计与计算系统设计的分离。在传统光学计算研究中，任务验证通常依赖具体硬件平台，研究过程容易受到设备资源和实验条件的限制，也不利于不同任务之间进行广泛而可复现的比较。DT-OCS框架的开源性进一步强化了其方法价值和推广意义。该研究不仅提出了数字孪生建模思路，还将DT-OCS框架及相关任务数据集向研究社区开放，使其不再局限于单一实验平台内部使用，而是能够作为可复现、可调用、可扩展的软件资源被更广泛地共享和验证。

，使研究者能够在脱离实体硬件的条件下完成任务设计、训练与验证
，从而为更大范围的任务探索和应用测试创造条件。与此同时
，这项工作也提出了一种新的光学计算应用范式
：未来的光学计算系统不仅应具备实体硬件能力
，还应提供计算层级等效的开源数字模型。只有这样
，光学计算平台才能真正从依赖实验条件的专用装置
，发展为可共享、可复现、可扩展的新型计算资源。

研究团队简介

清华大学电子工程系陈宏伟教授课题组长期从事光子计算与光电融合信息处理方向的研究，致力于发展新型高速、低功耗的光学计算体系结构及其在人工智能中的应用。团队围绕集成光子计算芯片、光学神经网络、光学特征计算引擎，以及光电混合智能计算系统等方向开展系统性研究，在高速光信号处理与光子计算架构方面形成了特色研究方向。

团队成员由教师、博士后，以及博士和硕士研究生组成
，依托清华大学电子工程系和北京信息科学与技术国家研究中心开展科研工作。近年来，团队在光子计算与光电智能信息处理领域取得了一系列研究成果，在 Opto-Electronic Advances、Nature Communications、Advanced Photonics、Light: Science Applications

等国际期刊发表多篇论文，并承担国家重点研发计划、国家自然科学基金等科研项目。团队同时积极推动光子计算系统与人工智能应用的结合，探索光电融合计算的新体系与新方法。



陈宏伟，清华大学电子工程系长聘教授



符庭钊，国防科技大学副教授。主要从事光学神经网络、光计算、智能光子芯片等方面研究工作。目前在Opto-Electronic Advances、Nature Communications、Light：Science Applications、Advanced Photonics等学术期刊发表论文30余篇，申请或授权国家发明专利10余项。



孙润



李悦旻



长按识别此二维码，直达全文

来源：光电期刊

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发