arXiv:2603.21496v1 [cs.RO] 23 Mar 2026

精密光学系统的闭环机器人装配、对准与自恢复框架

Seou Choi★、Sachin Vaidya★、Caio Silva、Shiekh Zia Uddin、
Sajib Biswas Shuvo、Shrish Choudhary 和 Marin Solja˘ci´c

摘要—机器人自动化已改变化学和材料科学等领域的科学工作流程，但作为高精度领域的自由空间光学仍主要依赖人工操作。光学系统对空间与角度公差要求严格，其性能受紧密耦合的物理参数支配，因此实现可泛化的自动化尤其具有挑战性。在本研究中，我们提出一种机器人框架，用于精密光学系统的自主构建、对准和维护。我们的方法结合层次化计算机视觉系统、优化程序和定制工具，以实现这些功能。作为一项代表性演示，我们从随机分布的组件出发，全自主构建了一个桌面激光腔。该系统可执行多项任务，包括激光束居中、多光束的空间对准、谐振腔对准、激光模式选择，以及从人为引入的失准和扰动中自恢复。通过为高度敏感的光学系统实现闭环自主运行，本研究为自主光学实验奠定了基础，可应用于多个技术领域。项目链接：
h
t
t
p
s://
anonymous.4open.science/r/AutomateOptics-7C7C/

I. 引言

机器人自动化正在日益改变化学、材料科学和生物学领域的科学工作流程 [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]。自主合成平台如今可以在极少人工干预的情况下执行复杂的反应序列，机器人显微镜系统则可大规模开展自适应表征。这些系统利用机器人学、感知、规划和反馈控制方面的进展，加速科学发现，同时提高可重复性。在高度规范化的实验室环境中，机器人技术使实验能够抽象为可编程流程，从而减少人为引入的变异，并以难以通过人工操作实现的速度进行迭代优化。尽管取得了这些进展，各学科实现的自动化程度仍参差不齐。

光学是最基础、却最少实现自动化的实验领域之一。自由空间光学系统支撑着众多科学领域，包括量子信息、原子与分子物理、材料表征与光谱学、显微学和天体物理学 [10], [11], [12]。此外，稳定的光学装置对于工业应用至关重要，例如激光制造系统、生物医学成像、半导体制造、光通信，以及各种商业光子器件的原型开发，因此自动化极具价值。

在实验室中，人们会精心搭建光学装置，以探索新的配置、测量方法和假设。然而，光学实验是一个对精度要求极高的领域，受到严格的空间与角度公差约束，并且这些公差与物理可观测量直接相关。组件发生数十至数百微米的位移，或出现不到一度的角度偏差，都可能使光学系统完全无法使用。此外，光学本身具有可重构性，且组件种类繁多：不同组件的几何形状、灵敏度和所需精度差异很大。这些特点使得通用型光学自动化尤具挑战性。要实现成功的自动化，必须整合感知、亚毫米级操作、实时反馈和迭代式闭环优化，而不能仅仅依赖简单的拾取与放置操作。

在本研究中，我们通过一种专为复杂且任意的光学系统的组装、对准和维护而设计的机器人框架，应对这些挑战。我们的方法融合了精简但实用的实验室布局、分层计算机视觉与操作系统，以及定制工具，以实现对光束传播和对准进行闭环控制所需的精度。作为对该平台能力严格且具有代表性的演示，我们展示了从零开始自主构建、对准和维护桌面激光腔的过程，也就是从实验室工作空间中随机分布的光学元件开始。该系统能够对腔元件进行空间对准、通过角度优化建立谐振腔稳定性、进行模式选择，并在发生人为诱发的失准或外部扰动后自动恢复。通过在一项传统上被认为高度敏感且依赖专业经验的任务中实现闭环自主运行，本研究为实现完全自主的光学实验室迈出了切实的一步。

★ 这些作者贡献相同。Seou Choi、Sachin Vaidya、Caio Silva、Shrish Choudhary 和 Marin Solja˘ci´c 任职于美国马萨诸塞州剑桥市麻省理工学院电子学研究实验室，邮编 02139。Sachin Vaidya 和 Marin Solja˘ci´c 任职于美国马萨诸塞州剑桥市麻省理工学院美国国家科学基金会人工智能与基本相互作用研究所（IAIFI）及物理系，邮编 02139。Shiekh Zia Uddin 任职于诺基亚贝尔实验室。Sajib Biswas Shuvo 任职于亚利桑那州立大学电气、计算与能源工程学院。
{seouc130, svaidya1}@mit.edu

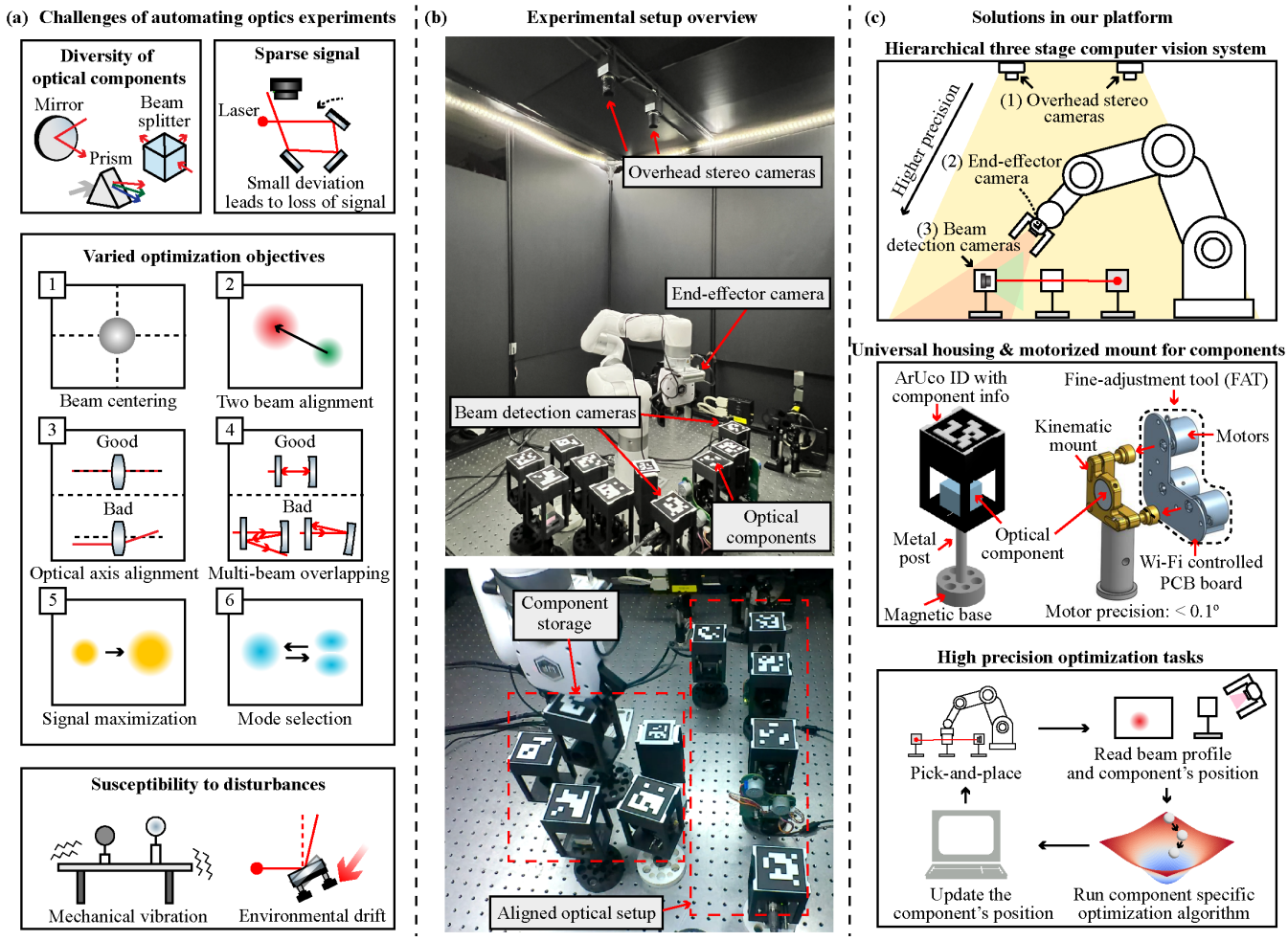


图1：（**a**）与可重构光学实验自动化相关的挑战，以及（**b**、**c**）本研究提出并实现的解决方案概述。

II. 相关工作

A. 自由空间光学自动化平台

此前一项关于光学人工智能驱动机器人技术的研究提出了一种通用框架，整合生成式人工智能、计算机视觉和机器人操作，以自动化光学实验的设计、组装和测量 [13]。该研究构建了一个模块化平台，由基于基准标记的元件识别、用于位姿估计的计算机视觉，以及用于抓取和放置操作的机械臂组成。演示内容包括自主组装干涉仪和 4f 成像系统等简单光学系统，以及自动化光束表征、偏振映射和光谱学等任务。

在该平台中，机器人操作仅限于按顺序拾取与放置光学元件以及执行简单的对准流程，这些操作通常与实时光学反馈相互隔离。本研究采用反馈驱动策略，旨在实现高精度光学系统的全面自动化，并应对实验光学中遇到的所有主要挑战（见第III节）。这一目标通过以下三个关键方向实现：(i) 将光学实验模块化，拆分为更小的自动化任务，(ii) 将光学对准形式化为一个优化问题，以及 (iii) 对外部扰动下的光学装置进行主动监测和自恢复。

B. 光学中的任务专用自动化

光学系统的自动对准已在若干范围较窄、针对特定任务的情境中得到研究，尤其是采用强化学习（RL）或基于模型的控制。Sorokin 等人展示了利用在离散动作空间中运行的强化学习智能体对准光学干涉仪 [14]。Makarenko 等人将这一框架扩展至连续动作空间，并纳入光束发散控制 [15]。Fang 和 Savransky 将焦平面传感与卡尔曼滤波相结合，用于可重构光学系统的自动对准 [16]。Mareev 等人和 Wang 等人分别研究了基于强化学习的自调节光学系统和光束线对准 [17], [18], ，而 Burkhardt 等人则研究了利用强化学习进行主动透镜对准 [19]。其他研究还包括噪声驱动条件下的无模型强化学习 [20], 、用于相干光束合成的深度强化学习 [21], ，以及紧凑型实验平台

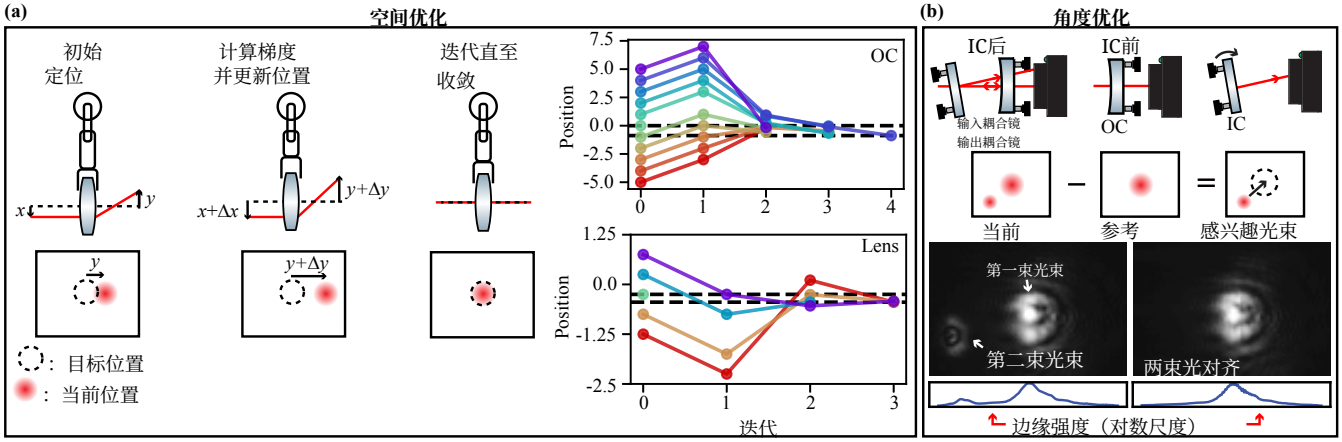


图 2：通过**(a)** 空间优化和**(b)** 角度优化进行高精度自动化光学实验。对于**(b)**中的相机图像，原始图像经过对数强度变换增强：$I_{\text{processed}} = \log(1+10I_{\text{raw}})/\log(1+10)$，其中 $I_{\text{processed}}$ 和 I_{raw} 分别是处理后图像和原始图像的归一化强度。OC：输出耦合镜，IC：输入耦合镜。

例如 Raspberry Pi 自动对准器 [22]。Barwicz 等人展示了自动化、高通量的光子封装流程 [23]。

这些工作共同表明，基于学习的控制和自动化能够在狭窄且重复的光学任务中实现对准。在这些工作中，对准问题通常被简化为在已组装完成的系统中调节少量执行器。相比之下，我们的框架能够在系统级实现可泛化的自主构建和装置稳定。

III. 问题定义

在系统层面对自由空间光学实验实现自动化，会带来与传统机器人操作任务存在根本差异的挑战。光学实验具有高度可重构、精度受限的特点，并受紧密耦合的物理可观测量支配。我们归纳出实现可泛化光学自动化必须应对的四项普遍挑战（图 1(a)）。

光学元件的多样性：光学实验由各种各样的组件构成，包括反射镜、透镜、分束器、非线性晶体、滤光片、相机和探测器；这些组件在几何形状、光学功能和对准灵敏度方面各不相同。它们不仅尺寸和形状不同，位置偏差对系统级行为的影响也各不相同。因此，机器人系统必须能够应对这种多样性，例如采用标准化操作，同时又不牺牲可重构实验布局所需的灵活性。

稀疏信号：光信号对组件微小的空间或角度扰动通常呈现高度非线性响应。亚毫米级平移或不到一度的旋转，都可能使检测到的信号完全消失。此外，许多可测量量只能提供稀疏或间歇性的反馈，只有当组件处于参数空间的狭窄区域内时，才会出现可测量信号。

多样化的优化目标：光学实验还需要多样且依赖具体情境的优化准则；即使在同一装置中，不同组件的优化准则也可能存在显著差异。这些准则包括使光束沿预定义轴居中、对准多束光束、使光轴与光束路径匹配、实现多光束空间重叠、最大化光学信号，或针对特定光学空间模式进行优化。

易受扰动影响：自由空间光学系统本质上容易受到环境扰动的影响，包括机械振动和热漂移。轻微扰动就可能使对准偏离运行容差，导致实验装置无法使用。在传统实验室实践中，恢复操作依赖人工，且通常是在问题发生后才采取应对措施。因此，要实现有意义的光学自动化，就必须持续监测，并具备检测、诊断和纠正偏差的能力，以维持实验装置的长期稳定性。

IV. 方法与解决方案

本文介绍我们的机器人框架，它结合了结构化硬件设计、计算机视觉和基于反馈的优化。这些方面旨在应对上文讨论的光学自动化所面临的所有根本挑战。

A. 平台概述

机械臂：核心操作单元是一台 7 自由度（DOF）的 UFACTORY xArm7 机械臂，臂展为 61 厘米，标称精度为 ±0.1毫米，负载能力为3.5 千克。机械臂配备了一个末端执行器，可用于抓取和搬运组件（图1（b））。

计算机视觉系统：为缓解光信号稀疏的影响，我们采用由三个子系统组成的层次化计算机视觉系统：用于粗略位姿估计和工作空间监控的顶部双目4K摄像头、用于精确抓取的末端执行器激光雷达相机，

以及用于空间和角度优化期间提供光学反馈的光束检测相机（图1（c），上图）。

模块化光学组件基础设施：为了可靠地操作各类光学组件，同时不牺牲可重构性，我们将所有光学组件（包括带有运动学安装座的组件）放置在定制的3D打印外壳中，这些外壳采用标准化几何结构（图1(c)，中）。每个外壳均配有用于识别的ArUco基准标记 [24]，以及一个内嵌钕磁铁的磁性底座，底部覆有橡胶以防滑动。这些外壳和底座易于部署，并与标准光学实验室完全兼容。

精细调节工具（FAT）：为了实现涉及多个组件的复杂优化流程，我们开发了一种定制的Wi-Fi控制电动工具，可与标准光学组件运动学安装座上的精细调节旋钮配合使用。这样，系统便可远程调节特定组件，并结合机械臂执行取放操作（图1(c)，中部和底部）。

B. 光学元件的空间和角度优化

在拾取与放置光学元件的过程中，系统性偏移和随机不确定性都会影响光学装置的对准。后者源于计算机视觉系统的累积误差、机械公差以及机械臂运动的不确定性，并会在整个工作流程中传播。前者则源于人工将组件组装到外壳内时发生的人为误差（这是一次性任务）；组装过程中，外壳中心与光学元件中心之间可能出现失准。为实现光学装置所含组件的高精度定位，我们的平台采用空间和角度优化方案（图2），旨在减轻系统性偏移和随机不确定性的影响。下面将结合具有代表性的实验演示，介绍相关流程。

空间优化方案通过机械臂与光束检测相机之间的闭环反馈运行（图2(a)）。在另外两台相机的辅助下，机械臂将组件（例如透镜）放置在光束路径上的初始位置。然而，不可避免的误差会导致组件中心偏离预定的光束路径（偏差量为 x）。这会使光束在检测相机上偏离目标中心（偏差量为 y）。为校准系统响应，机器人首先对组件进行扰动，使其位移 Δx；该位移量大于机械臂的精度，同时又足够小，以确保光束仍处于光束检测相机的视场内。由此，光束位置相应发生偏移（偏移量为 Δy）。根据系统对这次扰动的响应，系统采用基于一阶牛顿法的方法，计算下一次迭代所需的校正移动量：$-\Delta x(y+\Delta y)/\Delta y$。

图中右侧两个面板2(a) 展示了两个组件在不同初始位置下的空间优化过程

表 I：空间优化结果

Type	初始位置 范围（mm）	组件放置 精度（mm）	光束中心 精度（mm）
OC	-5 到 5	±0.28	±0.14
Lens	-1.25 到 0.75	±0.074	±0.31

。优化持续进行，直到当前光束位置与目标位置之间的距离小于光束腰。表I 展示了空间优化方法的结果。优化后，两个组件均可实现亚毫米精度定位。

图中说明了角度优化过程 2 (b) 以对准光学谐振腔为例。光学谐振腔由两面反射镜组成，其对准通过在空间上重合两束不同的光束来实现：主光束部分透过输入耦合器（IC）和输出耦合器（OC）反射镜（图中较大的光束2(b)），以及由两面反射镜之间的内部反射产生的次级光束（图中较小的光束 2(b)）。为分离次级光束，我们的平台会存储一张仅包含主光束的参考图像，该图像在放置输入耦合器（IC）之前拍摄。将此参考图像从实时相机画面中减去后，系统便能在优化过程中定位次级光束。系统采用贝叶斯优化算法，最小化两束光束质心之间的距离。每次迭代时，FAT 会旋转控制反射镜角位置的旋钮，并根据两束光束之间距离的更新结果，确定下一次迭代中每个电机的旋转角。

如图 2(b) 所示，经过优化后，光束实现了完美对准；由于两束光具有高度的空间重叠，因此呈现出干涉图样。以次级光束的十种不同初始位置为起点，角度优化过程在 5.5 ± 0.5次迭代内成功使两束光重叠，成功率达到100%。调整 OC 的方向时，也可采用类似的优化过程：使用分束器（BS）采集参考图像，以及两束光同时存在时的后续图像。值得注意的是，当光束远非完美高斯形状时，我们的方法仍表现出极佳效果，而这在实际光学任务中十分常见。

V. 结果

充分发挥我们平台的全部能力后，我们现展示一个全面的流程，用于完全自主地构建一个具有代表性且技术要求高的光学装置：光泵浦桌面激光腔（图3（a））。这一基础装置体现了自由空间光学系统所面临的全部挑战，因此可作为该领域机器人自动化的代表性基准。图3（a）还展示了组装与对准过程中所采用的多种优化目标（图中的交叉引用编号1（a））。激光腔组装首先将光束检测相机大致置于预期光束路径上（目标1）。激光振荡

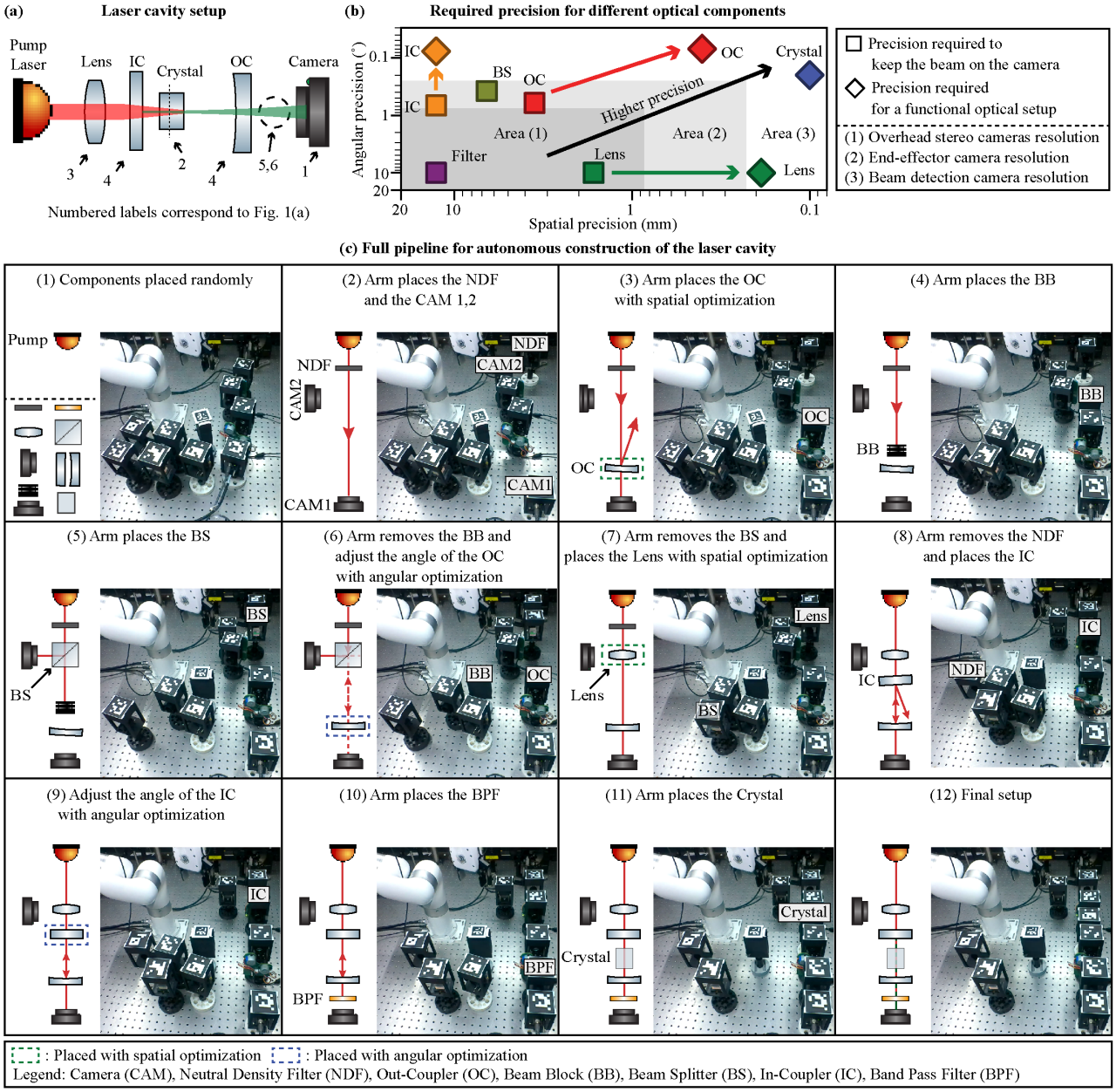


图 3：（a）激光腔装置的基本架构及其相关对准目标。（b）该装置中各类光学元件放置所需的空间和角度精度。每个组件的精度均根据实验中实际使用的组件计算得出。（c）该装置的自主构建流程。两个不同成功试验中各步骤的视频可在项目页面中找到。

当泵浦光束（红色）与谐振腔内部产生的激光束（绿色）实现对准时发生（目标2）。为此，将泵浦光束聚焦到晶体内部的透镜光轴应与泵浦光束对准（目标3），同时还应精确对准谐振腔，以使激光束与晶体之间发生多次往返相互作用（目标4）。相机观测到激光信号后，必须调节组件参数，以增强激光信号并选择特定的激光模式（目标5和6）。

图 3（b）量化了不同的精度要求针对该任务中的光学元件。对于辅助组件（例如滤光片或分束器），只要入射到其上的光束仍处于光束探测相机的视场内（标准 1，方形标记），其功能便能保持正常。这些容差处于立体相机（深灰色区域）和末端执行器相机（浅灰色区域）的分辨率范围内，因此可以采用标准的视觉引导抓取与放置来完成对准。相比之下，激光腔组件在对准过程中对微小的光束位移高度敏感（标准 2，菱形标记）。应用这一更严格的精度标准，需要基于光束检测相机的反馈进行闭环优化

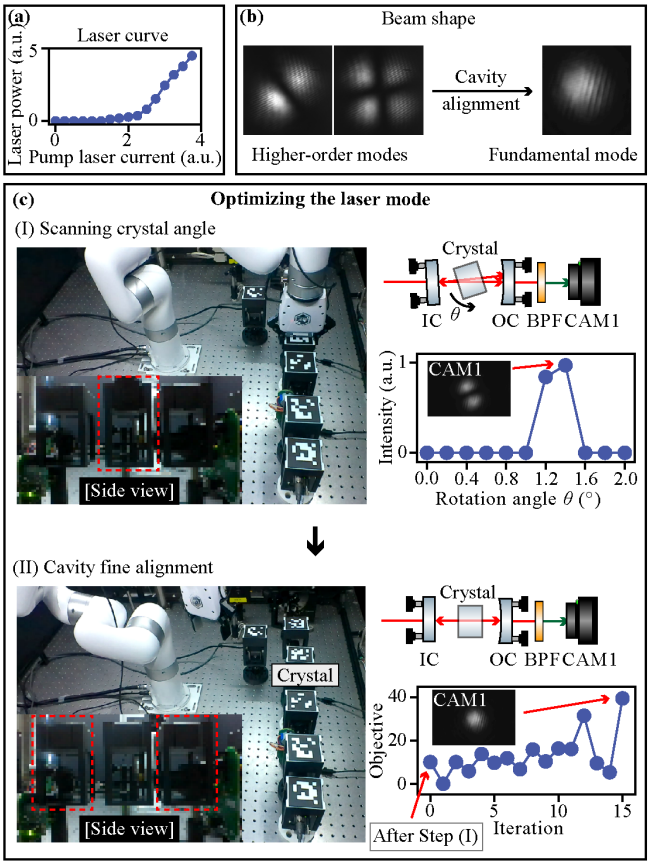


图 4：**(a)** 观测到的激光功率曲线显示出明显的阈值。**(b)** 由于轻微失准，激光在高阶腔模下振荡。**(c)** 结合使用机械臂和 FAT，优化激光模式。

（白色区域）。

A. 激光腔组装的综合流程

在组装激光腔之前，必须测量泵浦激光器在实验室坐标系中的光束路径，作为参考。为此，机械臂夹持光束检测相机，并将其放置在多个平面内坐标处（即 (x, y) 坐标）。在每个坐标处，调整机械臂的位置，使光束居中落在光束检测相机上。根据这些测量结果进行线性拟合，以获取激光束路径，并据此确定实验室坐标系中所定义的光学装置各组件的初始位置。

用户提供实验布局后，平台无需任何人工干预即可构建激光腔，并执行所有必要的反馈和优化步骤。构建过程始于用户将十个光学元件随机放置在光学平台上（图 3(1)）。系统将用户提供的实验布局（例如光学元件之间的距离）转换为实验室坐标。随后，通过拾取与放置操作定位两台反馈检测相机（CAM1、CAM2）和一个中性密度滤光片（NDF）（图3(2)）。在对准过程中，需要使用 NDF 以避免相机饱和。系统接收来自 CAM1 的图像，以确定泵浦光束的参考坐标。随后，机械臂拾取并放置 OC，并执行空间优化程序，以确保优化后的光束与参考光束之间的距离小于泵浦光束腰（图 3(3)）。在对 OC 进行角度对准之前，在 NDF 与 OC 之间放置一个光束阻挡器（BB）（图3(4)），这样，在放置 BS 后，CAM2 仅检测直接来自泵浦光束的主光束（图3(5)）。为支持后续阶段对 OC 进行高效的角度优化，需要调整 BS 的位置，使主光束能够照射到 CAM2 的中心附近。移除 BB 后，CAM2 同时检测主光束和由 OC 反射的次级光束（图 3(6)）；随后，系统利用在步骤 5 中测得的参考光束运行角度优化算法。完成该对准后，机械臂移除 BS 并放置透镜（图3(7)），将泵浦光束聚焦到后续阶段放置晶体的位置。为确保与激光模式实现最大空间重叠，通过空间优化调整透镜的位置。随后放置 IC（图 3(8)），并优化其角度方向以形成光学谐振腔（图3(9)）。放置带通滤光片（BPF）以将激光信号与泵浦光束分离，并仅通过 CAM1 观测生成的激光信号（图 3(10)），随后放置掺钕钇铝石榴石晶体（图 3(11)）。如下一节所述，可调节晶体的位置和腔参数（即由 FAT 控制的 IC 和 OC 的方向），以使激光信号最大化并优化激光模式。图4(a)给出了显示预期阈值行为的激光功率曲线，表明在最终装置中确实观察到了成功的激光振荡（图 3(12)）。

B. 模式选择与输出功率最大化

除光学谐振腔几何结构外，晶体的角度取向也是另一个调节参数，它决定了激光模式的功率和形状。当谐振腔和晶体正确对准以支持最佳激射条件时，系统倾向于基模，其呈现高斯强度分布，如图 4（b）右图所示。相反，晶体和/或谐振腔失准会促进高阶模式的放大，如图4（b）左图所示。激光模式接近基模的程度由光束质量因子 M^2量化，其中 $M^2 = 1$表示衍射极限高斯光束，而较高的数值则表明光束轮廓中存在高阶模式。因此，对准激光腔时的首要目标是实现信号强度最大的基模。

图 4(c) 展示了精细调整

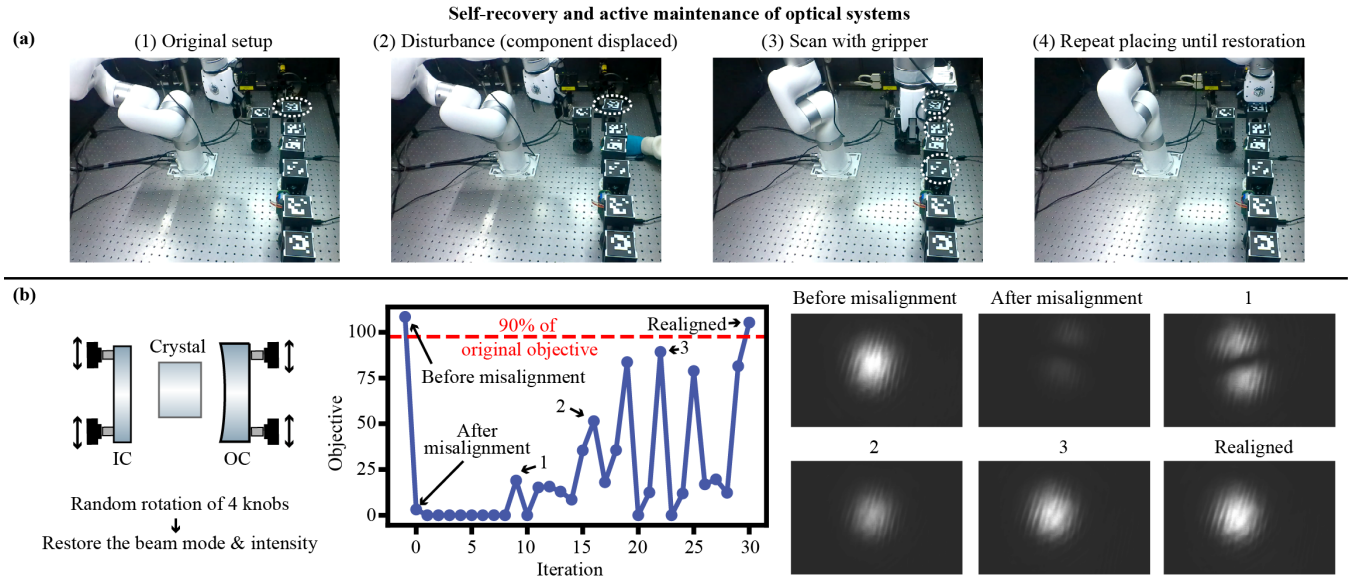


图 5：实验装置对（**a**）元件位移和（**b**）镜面调节旋钮模拟漂移的自恢复。

激光腔以使基模下的输出功率最大化的流程。该流程通过机械臂与 FAT 的协同作用完成。首先，旋转输入耦合镜上的一个旋钮，使谐振腔失准。作为优化的第一步，机械臂以 0.2° 为步进，对晶体进行粗略角度扫描，并在每一步通过 CAM1 记录激光束图像（图 4(c)）。由于初始失准，只有在狭窄的角度范围内（$\theta = 1.2° \sim 1.4°$）才能观察到激光信号，且处于高阶模式。当机械臂确定晶体的最佳方向后，松开末端执行器，并通过 FAT 执行贝叶斯优化，以控制腔镜上的旋钮。目标函数定义为光束强度平方根 I与光束质量因子 M^2之比：$\sqrt{I}/M^2$。经过这一优化后，激光腔支持基模高斯模式。

C. 外部扰动下的自恢复

光学实验室中的自主运行不仅需要初始组装与对准，还需要在外部扰动下维持功能的能力。光学实验对机械扰动、热漂移和缓慢的参数波动高度敏感。微小的位移就可能显著降低输出质量，甚至经常导致信号完全消失。在传统设置中，从此类事件中恢复需要人工操作且耗时较长，因为元件配置和系统响应都不会被持续记录。因此，实现自恢复对于光学系统的长期稳定性、远程操作和可重复性至关重要。

本节将介绍我们的平台如何通过持续监测，促进受扰光学装置的自恢复。图 5展示了在两种灾难性场景下重建装置的概念验证实验。

在图5(a) 中，我们模拟透镜因意外人为操作而发生位移的情况（～ 厘米 尺度）。透镜发生位移后，系统便启动重建。末端执行器相机测量影响激光腔性能的关键光学元件（透镜、输入耦合镜和输出耦合镜）的当前位置。通过将当前位置与失准发生前存储的原始位置进行比较，系统可以识别错位的元件并执行纠正措施。

由于机械臂运动的有限精度会导致一次拾取与放置尝试无法实现完美恢复，因此系统在将元件从位移后的位置移回原始位置后，会执行重新对准程序。如果初始拾取与放置操作后激光信号仍未恢复，便会启动重新对准程序，并持续执行直至激光信号恢复。在此过程中，机械臂夹持元件，对其进行平移，并将其重新定位到相同的平面内坐标。完整的重建流程（图5（a）中的步骤（1）至（4））在 10 次独立试验中得到验证，结果如表II所示。在恢复激光信号方面，成功率达到 100%；其中 40% 的试验通过一次拾取与放置操作即可恢复（即无需执行重新对准程序）。其余情况下也可通过重新对准程序中的 2.7 ± 1.4 次拾取与放置操作恢复信号。平均恢复时间与图 3中透镜空间优化所需的时间相近，表明恢复过程可以在与完整激光器构建中单个步骤相近的时间尺度内完成。

图5（b）展示了光学谐振腔发生严重失准后的重建过程，例如由环境中的随机扰动所致。具体做法是随机将四个反射镜旋钮分别向任意方向旋转

表 II：位移恢复结果

成功 rate	尝试期间 重新对准程序	平均 恢复时间	透镜优化 时间（见图 3(7)）
10/10	2.7 ± 1.4	2.83 分钟	2.6 分钟

表 III：环境漂移恢复结果

成功 rate	迭代次数 恢复过程中	平均 恢复时间	谐振腔对准 时间（见图3（9））
9/10	12 ± 9	3.05 分钟	2.83 分钟

30° 至 60°。这种扰动会导致激光振荡完全消失，因而检测不到信号。为恢复谐振腔对准，我们运行了与图4所示类似的贝叶斯优化程序。目标函数设为 I/M^2，收敛阈值设为初始目标函数的 90%，以促进收敛，同时考虑到系统起始时可能已处于全局最优位置的情况。表III 展示了从 10 组不同的随机旋钮位置开始，对激光腔重新对准进行测试的实验结果。在大多数情况下，系统都能在与初次构建时进行谐振腔对准所需时间相近的时间内恢复激光信号（图3（9））。图5 的中间图和右图展示了其中一次尝试。激光束恢复了高斯形状，光束强度也逐渐接近原始光束的强度。

这些结果共同表明，我们的平台还能够持续维护复杂的光学实验，从而在无需人工干预的情况下实现稳定的长期运行。

VI. 结论

我们开发了一种机器人框架，能够自主构建、对准并维护精密自由空间光学装置，并通过从零开始构建桌面激光腔对其进行了演示。从随机分布的组件开始，该系统能够在无需人工干预的情况下完成组装、闭环光学对准、模式优化，并从扰动中自恢复。这一成果表明，传统上依赖人工专业知识的高度复杂光学实验，可以转化为反馈驱动的自主工作流程。

我们并未将光学实验视为一种手工技艺，而是证明它可以分解为具有可测量目标、并以物理可观测量为基础的迭代对准流程的子任务。由此，该框架消除了实现光学领域可扩展实验室自动化的最后一道障碍。展望未来，将预测性光学模拟、智能体人工智能或基于学习的策略纳入工作流程，可进一步简化光学实验的设计与执行，并提升其性能。此外，与远程接口集成以构建“云实验室”，将使更多人能够使用复杂的光学仪器。

更广泛地说，我们的工作展现了一种实验室的未来图景：实验配置不再是静态的人工构造，而是能够动态控制、持续运行并自我纠正的系统。在自由空间光学这样精度受限的领域实现自主化，为通用机器人系统迈出了切实的一步，使其能够可靠地执行并维护复杂的科学实验。

致谢

作者感谢 Ryan Lopez、Sahil Pontula、Serena Landers、David Dai 和 Hae Won Lee 在本项目期间进行的启发性讨论。S.C. 感谢韩国高等研究基金会海外博士奖学金的资助。S.V. 和 M.S. 感谢美国国家科学基金会通过合作协议 PHY-2019786（美国国家科学基金会人工智能与基本相互作用人工智能研究所，http://iaifi.org/）提供的支持。本研究部分得到美国陆军 DEVCOM 陆军研究实验室陆军研究办公室通过麻省理工学院士兵纳米技术研究所，依据合作协议编号 W911NF-23-2-0121 提供的资助。我们还感谢 Parviz Tayebati、麻省理工学院本科生研究机会计划（UROP）以及麻省理工学院生成式人工智能影响联盟（MGAIC）提供的支持。作者还感谢壳牌国际勘探与生产公司的资助。

参考文献

[1] C. W. Coley 等，《基于人工智能规划的有机化合物流动合成机器人平台》，《科学》，第 365 卷，第 6453 期，文章编号 eaax1566，2019年。[2] Z. Zhang 等，《用于多元素电催化剂发现的多模态机器人平台》，《自然》，第 647 卷，文章编号 396，2025年，第 8089 期，页码 390。[3] K. Angers 等，《RoboCulture：用于自动化生物实验的机器人平台》，*arXiv* 预印本 *arXiv:2505.14941*，2025年。[4] N. J. Szymanski 等，《用于加速合成新型材料的自主实验室》，《自然》，第 624 卷，文章编号 91，2023年，第 7990 期，页码 86。[5] B. P. MacLeod等，《用于加速发现薄膜材料的自驱动实验室》，《科学进展》，第 6 卷，文章编号 eaaz8867，2020年，第 20 期。[6] J. T. Rapp、B. J. Bremer 和 P. A. Romero，《自驱动实验室自主探索蛋白质适应度景观》，《自然·化学工程》，第 1 卷，第 1 期，页码 97–107，2024年。[7] S. Kandel 等，《用于自主高分辨率扫描显微术的人工智能驱动工作流演示》，《自然·通讯》，第 14 卷，第 1 期，文章编号 5501，2023年。[8] G. Tom 等，《面向化学和材料科学的自驱动实验室》，《化学评论》，第 124 卷，第 16 期，页码 9633–9732，2024年。[9] K. Darvish 等，《ORGANA：用于自动化化学实验和表征的机器人助手》，《*Matter*》，第 8 卷，第 2 期，2025年。[10] T. E. Northup 和 R. Blatt，《利用光子传输量子信息》，《自然·光子学》，第 8 卷，第 5 期，页码 356–363，2014年。[11] H. Balasubramanian 等，《展望光学显微学的未来：万物、万处、同时》，《通讯·生物学》，第 6 卷，第 1 期，文章编号 1096，2023年。[12] W. Kaiser，《光刻光学向先进极紫外光刻的发展：助力摩尔定律延续六十年》，《*IEEE* 电子器件杂志》，第 2 卷，文章编号 34，2024年，第 1 期，页码 23。[13] S. Z. Uddin 等，《光学人工智能驱动机器人技术》，*arXiv* 预印本 *arXiv:2505.17985*，2025年。[14] D. Sorokin、A. Ulanov、E. Sazhina 和 A. Lvovsky，《Interferobot：利用强化学习智能体对准光学干涉仪》，载于《神经信息处理系统进展》，第 33 卷，页码 13238–13248，2020年。

[15] S. Makarenko、D. I. Sorokin、A. Ulanov 和 A. Lvovsky，《通过光束发散控制和连续动作空间对准光学干涉仪》，载于机器人学习会议（*CoRL*）论文集，页码 918–927，2022年。[16] J. Fang 和 D. Savransky，《利用焦平面传感和卡尔曼滤波自动对准可重构光学系统》，《应用光学》，第 55 卷，第 22 期，页码 5967–5976，2016年。[17] E. Mareev 等，《基于强化学习的自调节光学系统》，载于*Photonics*，第 10 卷，第 10 期，文章编号 1097，2023年。[18] S. Wang、S. Dai、J. Jiang、S. Wu、Y. Peng 和 J. Zhang，《面向光束线自主对准的动作注意力深度强化学习》，*arXiv* 预印本 *arXiv:2411.12183*，2024年。[19] M. Burkhardt 等，《利用强化学习主动对准透镜系统》，arXiv 预印本 arXiv:2503.02075，2025年。[20] L. Richtmann 等，《利用带噪声动作的无模型强化学习实现光学领域的自动化实验控制》，*arXiv* 预印本 *arXiv:2405.15421*，2024年。[21] H. T¨unnermann 和 A. Shirakawa，《用于相干光束合成应用的深度强化学习》，*Optics Express*，第 27 卷，第 17 期，页码 24223–24230，2019年。[22] R. S. Mathew、R. O’Donnell、D. Pizzey 和 I. G. Hughes，《Raspberry Pi 自动对准器：用于激光束自动对准的机器学习》，*Review of Scientific Instruments*，第 92 卷，第 1 期，2021年。[23] T. Barwicz 等，《自动化高通量光子封装》，*Optical Fiber Technology*，第 44 卷，页码 24–35，2018年。[24] S. Garrido-Jurado 等，《遮挡情况下高可靠性基准标记的自动生成与检测》，*Pattern Recognition*，第 47 卷，第 6 期，页码 2280–2292，2014年。