arXiv:2611.29639v1 [physics.acc-ph] 22 Nov 2026

SLAC东部束流倾倒区（BDE）四足机器人的首次现场测试：加速器运行机器人技术的试验场

预印本

M. Bai、M.A.Montironi、A. Saad、
T.Thayer*SLAC国家加速器实验室

2026年11月24日

摘要

在大型粒子加速器设施中部署现场机器人技术，有望显著提升运营效率、促进设施可持续性，并减少人员暴露于辐射及其他危害的风险。随着关键基础技术日趋成熟，现场机器人技术正逐步应用于各类工业领域。然而，加速器设施在采用这类系统时仍持谨慎态度，主要顾虑包括成本与投资回报之间的权衡，以及设备碰撞风险。此外，SLAC远程操作加速器监测平台 ROAM [1] 的运行经验凸显了若干关键技术挑战，包括耐辐射性，以及封闭加速器区域内网络连接不佳 [2]。本文介绍了近期在 SLAC束流倾倒区东部（BDE）设施开展的一次测试驾驶的结果，测试对象是配备 SPOT机械臂载荷的波士顿动力 SPOT 四足机器人。我们评估了在加速器环境中部署四足野外机器人的技术可行性和运行方面的考量。此外，我们还报告了若干关键的实际挑战，例如防护服会妨碍导航传感器工作，以及在无照明空间中进行低光照红外导航。最后，我们概述了未来在加速器设施中开展常规现场机器人作业时，朝自适应学习和自主执行方向发展的潜在路径。

1 引言与动机

高能粒子加速器设施中的日常搜索、检查和维护程序，传统上需要人员进入封闭隧道、束流线和辐射控制区。过去几十年来，这些做法已被证明行之有效，但随着加速器设施在规模和技术复杂性方面不断扩展，所需的运营工作量也大幅增加。近期对高能物理在研究、设施和项目方面的预算分配进行的十年期追踪表明，设施运行 [3]有所增加。这种持续扩张显著推高了运行成本。在预算受限的情况下，开发能够将运营支出维持在

可持续水平的方法，对于保障核心研究与开发的资金至关重要，最终将加速科学发现和技术进步。

除了成本可持续性之外，传统维护模式还需要定期停机，既用于计划维护，也用于应对意外技术问题。对于非计划干预，典型的工作流程是停止加速器运行，等待辐射水平降至可接受的阈值，再派遣主题专家（SMEs）检查并维修设备/系统。在许多情况下，机器断电后，初步调查却发现没有明显故障。因此，在机器保持运行的同时进行远程监测和诊断，能够显著提升运营效率，最大限度地增加可供科研用户使用的束流时间。考虑到高能粒子加速器全天候运行，此类计划外干预的影响在非工作时段运行期间尤其不利，因为主题专家通常无法立即到场。此外，由于加速器环境存在较高的辐射

*本研究得到了 SLAC资源的支持，包括计算资源 来源

水平以及高压设备、狭窄且高度拥挤的旧式空间等物理危害，现行做法不可避免地使人员面临安全风险。遵守由此产生的多层监管保障措施，还会进一步增加对设施资源和运行吞吐量的要求。

将这些任务 转变为自主和/或远程操控的现场机器人技术，可直接应对两项关键需求 s:

- 运营效率与可持续性：在机器人任务期间持续、客观且可重新配置的数据采集，以更高频率、一致地采集机器和环境状况数据，补充人工观察，从而实现基于状态的预测性维护，同时缩短设施停机时间。
- 环境、辐射安全与危害缓解：自主或远程操控的现场机器人检查可减少人员进入危险环境和辐射水平较高区域的需求。

SLAC用于自主和远程监测的自研机器人平台

受这些迫切需求的推动，SLAC的运动控制专家着手开发定制轮式机器人平台，该平台由商用现货组件和开源软件框架构成。研究人员建造了两台定制的远程操作加速器监测（ROAM）移动平台，配备专用传感器套件， [1] [2] 用于在加速器屏蔽结构内开展辐射测绘、环境监测和视觉检查。这些系统在SLAC 直线加速器综合设施的多个地点进行了评估，获得了以下运行观察结果和成果：

- ROAM确立了远程移动能力、有线/无线通信以及耐辐射传感器载荷的基准要求。
- 辐射敏感性：在隧道中长时间暴露期间，车载商用电子设备容易受到辐射导致的性能退化影响。
- 网络带宽限制：地下加速器屏蔽结构中的无线信号衰减和带宽限制，制约了实时高清视频流传输。

尽管最初取得了令人鼓舞的成果，ROAM平台并未持续投入常规部署——尽管商业自主导航技术迅速发展，其他加速器设施也出现了类似情况。现场机器人技术在加速器环境中的广泛应用，主要受到两个方面的制约：

- 成本与投资回报：虽然专用机器人技术的初期集成成本可能相当高，但如果多条束流线和用户设施共享核心导航、检查及数据处理框架，就能最大限度地提高投资回报。
- 设备碰撞风险：加速器隧道内设有灵敏且价值高昂的设备（例如低温模块、射频腔和精密磁体），因此必须严格确保零碰撞。在具有代表性的退役环境中（例如 SLAC 东部束流倾倒区）验证机器人导航，可提供关键的真实环境数据，以便在部署到运行中的隧道之前评估障碍物检测与避让能力。

2 SPOT 在东部束流倾倒区（BDE）的近期 TestVoyage

2023 年，SLAC设施运营部采购了一台波士顿动力 SPOT 四足机器人，并配备关节式第五臂有效载荷；其最初目标是让 SPOT 能够开启高压断路器，作为标准认证程序的一部分。近期，SPOT 已提供给加速器管理部使用。与此同时，A终端站（ESA）在成功恢复由 SLAC 超导直线加速器输送至 ESA 的多吉电子束后，已恢复科学运行 [4]。因此，整个 ESA 区域都必须遵守加速器运行安全规程；这些规程要求在每次束流运行干预期间进行搜索巡查，以防止人员受到辐射暴露。

作为其旧有基础设施的一部分，ESA综合区包含东部束流倾倒区（BDE），该设施最初设计用于将兆瓦级的高能电子束输送至兆瓦级束流倾倒器。图1展示了BDE相对于ESA的位置。尽管这台大功率束流倾倒器已停用数十年，BDE束线仍被划定为三级人员防护安全区。在过去十年中，其结构和电气基础设施已严重老化；尤其是现场没有固定照明，而且集水坑（一个位于地面以下的蓄水坑）区域通道受限，为人员进入带来物理危害。由于旧束流倾倒器泄漏氚水，集水坑区域也被划定为放射性污染区。尽管如此，作为一条已退役的高功率电子束线，BDE为验证自主机器人

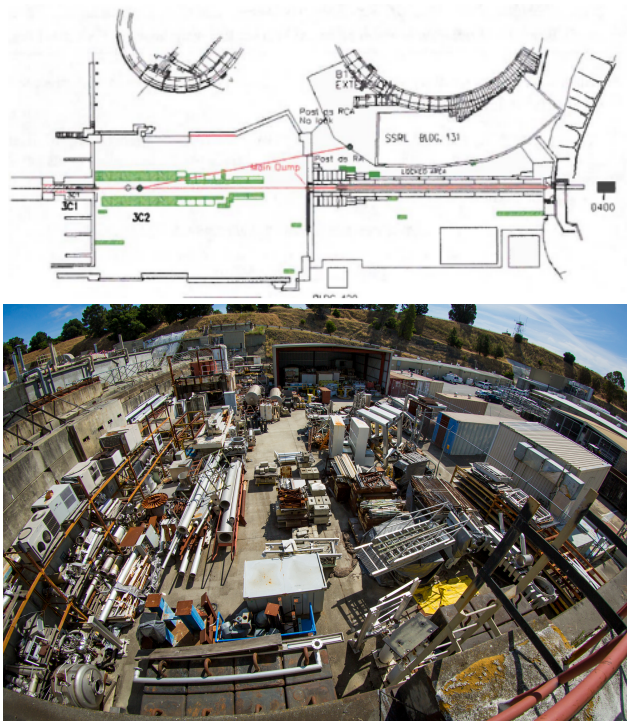


图 1：ESA 与 BDE 设施概览。图的上半部分展示 ESA 的整体布局（位于图示左侧），下半部分则为 BDE 隧道外围栏区域的俯视图，对应于图 1 上半部分右下方的区域。

在真实隧道环境中的导航能力提供了独特机会，同时无需冒损坏仍在运行的高价值加速器设备的风险。该环境可提供宝贵的实测数据，用于在实际部署到隧道之前评估障碍物检测和碰撞规避能力。

受这一机遇的启发，我们在 BDE 全域开展了首次 SPOT 测试行程，以评估四足野外机器人在真实加速器环境中的表现，测试范围涵盖开放地面区域和封闭隧道区段。图 1 展示了 BDE 相对于 ESA 的位置。

用于此应用的 SPOT 机器人配备了用于操作的“SPOT Arm”以及“SPOT Cam+IR”载荷，后者由可见光和红外（IR）相机组成，并安装在平移-变焦-倾斜（PZT）平台上（图 2）。机械臂和相机载荷均安装在机器人背部，并在测试期间用于采集样本图像和尝试开门。操作员通过手持控制器上的 SPOT APP用户界面观看机器人摄像头的实时画面，以控制 SPOT 机器人。机器人与手持控制器之间的本地无线网络连接使任务即使在现场 WiFi 不可用时也能继续进行，但操作员必须待在机器人附近。机器人的移动和障碍物规避由其专有软件管理。尽管现有载荷和软件能够支持机器人执行“自动巡行”任务，但在首次部署期间并未测试此功能。机器人制造商将“自动巡行”定义为：沿预先规划的路径记录并重放自主任务，并在预先定义的数据采集位置执行任务。

此次测试行程持续约 33 分钟，期间通过 SPOT 的主控制界面操控机器人。图 3 展示了 SPOT 的首次行程路线。主要亮点和运行成果包括：

- 全区域穿行：SPOT 成功穿行整个 BDE设施及狭窄的地下隧道，全程未发生碰撞，且仅需团队成员提供少量人工清障协助。
- 不平地形导航：如图 4 所示，SPOT 在不平整地面、散落杂物和地面高度变化等环境中展现出稳健的移动稳定性。
- 定向检查能力：SPOT 移动至面向束流倾倒器的平台旁，并部署其第五臂载荷，采集集水坑区域的高分辨率视觉和热成像检查数据，如图 5 所示。



图 2：测试中使用的 SPOT 机器人配置。图中标出了 SPOT机械臂和 Cam+IR 载荷。

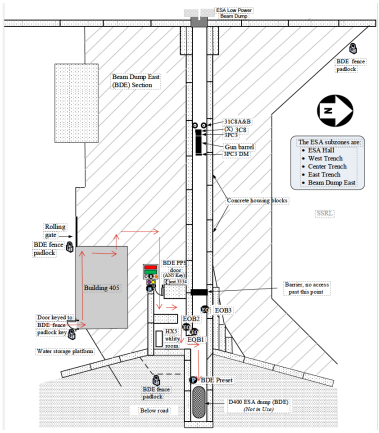
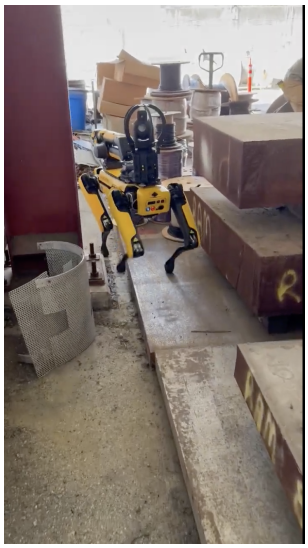


图 3：BDE 平面图。红色箭头表示 SPOT 行进的路线。



(a) SPOT 在 405号建筑内行进；不平整的地面和存放的设备限制了可通行路径。



(b) SPOT 沿着 BDE隧道行进；沿途存在不平整的地面和多处障碍物。

图 4：SPOT 在 405号建筑内以及沿着 BDE隧道前往集水坑区域的途中，穿越不平整且有障碍物的地面。

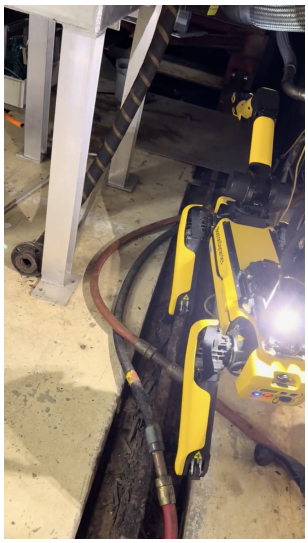




图 5：SPOT 位于 BDE 集水坑区域前方，正在测试机械臂有效载荷。该载荷可配备摄像头或其他传感器，用于探索测绘该区域和检测人员是否存在的可能性。

尽管此次初步 BDE 测试运行确认了基本可行性，但在全面投入运营之前，仍发现了若干需要持续研发解决的关键技术挑战：

- Physical and S_{ensor} Integrati
  on– 防护服重新设计：为保护机器人免受污染或粉尘环境影响而使用的防护服，无意中遮挡了机载光学传感器和导航传感器。未来修订防护服时，必须集成多光谱传感器窗口，以确保导航功能完整。– 空间包络与间隙裕度：SPOT 默认的避障软件采用保守的空间间隙包络。为避开一处铺设网状金属地板的区域，需要进行有针对性的引导。此外，现场还临时搭建了一条坡道，使 SPOT 能够安全越过过大的障碍物。总之，若要在实际环境中部署，还需进一步开发并验证机器人导航能力。– 狭窄无照明空间中的低照度/红外导航：尽管配备了集成照明，SPOT 在狭窄、无照明的通道中仍出现视觉感知能力下降的情况。这影响了操作员通过控制界面远程操控机器人的能力。为成功穿行该环境，不得不增加额外照明。建议升级多光谱主动照明，和/或增配激光雷达。

- 控制与数据架构
  – 控制器独立性与自主性：当前部署依赖通过手持控制器进行实时远程操控。要实现与设施的全面集成，机器人必须能够依靠无GPS环境测绘和自适应路径规划自主执行任务。– 远程部署与数据管理：任务期间收集的传感器数据存储在手持控制器本地。为远程触发任务、实时传输数据，并将检查数据存入设施数据库以进行自动异常检测和长期趋势分析，需要一个集中式软件应用程序。– 网络连接：BDE 区域缺乏电力，也导致无法连接网络（WiFi）。要实现与设施的全面集成，需要一种机器人平台，能够在已知网络连接点之间离线运行时继续自主作业。

3 结论与未来研发路线图

在 SLAC 的 BDE设施开展的首次测试行程，证明了部署四足野外机器人技术用于日常加速器巡检和环境监测在技术上可行且具有潜力。此次试验表明，SPOT 等现代足式平台具备必要的机动性和灵活性，能够在初次测试期间穿行于复杂、杂乱的加速器环境，包括狭窄通道和不平坦地形，且未发生碰撞。

为缓解成本和投资回报方面的顾虑，我们提出两项互补策略。首先，美国能源部 (DOE) 各加速器设施之间开展跨机构合作，有助于共享核心软件框架和运营工作流程。其次，整合自适应在线学习，使野外机器人能够自主适应特定的隧道环境，从而减少对人工预先规划的依赖。

此外，还必须系统性地解决辐射退化和连接限制相关的技术局限。

因此，未来的研发工作将重点关注：

- 为加速器环境中的现场机器人技术开发自适应学习框架。
- 建立统一的远程任务控制架构。
- 对关键机器人子系统的耐辐射性进行定量评估。
- 集成抗辐射传感器载荷，以延长运行寿命。
- 探索地下移动网络增强方案，以确保遥测可靠。

4 致谢

参考文献

[1] T. Thayer 等，《ROAM：远程操作加速器监测器》，MESA 2022 会议论文集，2022[2] T. Thayer 等，《远程操作加速器监测器（ROAM）机器人的部署与运行》，ICALEPCS2024 会议论文集，2023[3] R. Rameika，《美国参与 FCC》，第四届美国 FCC 会议，2026[4] T. Markiewicz 等，《LESA 设施概述》，SLAC LESA（直线加速器 A 终端站）设施测试束机会研讨会，2025