arXiv:2603.01982v1 [cs.RO] 2 Mar 2026

从运输到操作：将磁悬浮转变为磁性机器人学

Lara Bergmann[1], Noah Greis[1], 和 Klaus Neumann[1,2]

摘要——磁悬浮（MagLev）系统从根本上提高了工业自动化中机内物料流的灵活性。因此，这些系统能够实现动态吞吐量优化，这对高混合、低批量制造尤为有益。迄今为止，MagLev 装置主要用于机内运输，而其操作潜力尚未得到充分探索。本文介绍了六自由度平台 MagBot，这是一种低成本的六自由度并联机构，可将两个移动器耦合成一个复合机器人平台。实验表明，六自由度平台 MagBot 的定位精度达到亚毫米级，并支持通过对接站全自动取放，从而实现对机器的快速、可重复重构。与单移动器相比，所提出的平台显著扩展了可达工作空间、负载能力和功能灵巧性。通过统一运输与操作，本研究推动磁悬浮迈向磁性机器人学，从而实现更加灵活、高效且适应性更强的制造解决方案。

I. 引言

通过改变机内物料流，磁悬浮（MagLev）为高混合、低批量的工业自动化提供了所需的固有灵活性。这些磁悬浮系统由静态电机模块（称为瓷砖）和运动器组成，运动器包含多个哈尔巴赫阵列 [1]。运行期间，瓷砖会产生电磁场，从而在六个维度上精确控制运动器（见图 1）。模块化瓷砖几乎可以排列成任意平面构型，并且可以灵活地在瓷砖表面添加或移除不同尺寸的运动器，因此这类系统具有很强的可重构性。目前已有多种用于工业应用的磁悬浮系统，例如 XBot（Planar Motor）、XPlanar（倍福自动化）、ACOPOS 6D（B&R 工业自动化）和 ctrlX FLOW^{6D} （博世力士乐）。这些灵活的运输系统天然具备操作能力，但目前尚未得到充分利用。尽管运动器的工作空间会因所用磁悬浮系统而略有不同，但总体而言其工作空间非常有限，限制了系统的操作能力。因此，已有一些尝试旨在弥补这些局限，但工作空间的维度仍然有限 [2], [3]。为扩展各个维度上的工作空间，并提升相较于单移动器的有效载荷和功能灵巧性，我们提出了六自由度平台 MagBot（见图2），一种低成本并联机构，具有六个自由度（DoF），可将两个运动器耦合为一个复合机器人平台。六自由度平台 MagBot 的设计与上述所有磁悬浮系统兼容。此外，我们开发了对接站，运动器可在其中自主放下或拾取六自由度平台 MagBot，如图1所示。因此，机器可以轻松重新配置，从而缩短换型时间：适应新产品或变体变得更快，所需工程时间更少。通过在机内物料流领域将运输与操作统一到单一范式中，我们将磁悬浮转变为磁性机器人学。因此，磁性机器人学使制造系统能够同时更加敏捷、高效和灵活。总之，我们的工作做出了以下贡献：

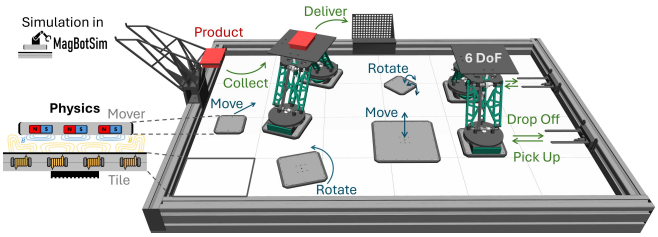


图1. 磁性机器人学示意图。六自由度平台 MagBot 将两个运动器耦合在一起，并设有对接站以实现可重构性。

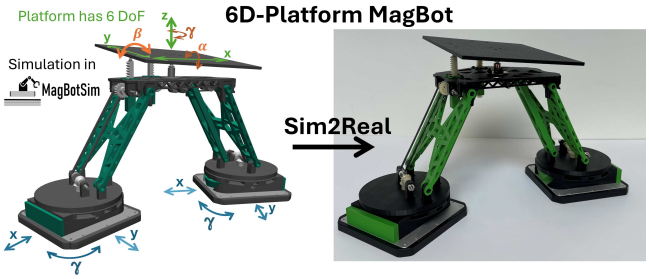


图2. 仿真（左）与现实（右）中的六自由度平台 MagBot。该平台具有6个自由度，并由运动器的x轴、y轴和 γ轴控制。

- 设计并制造了六自由度平台 MagBot，包括专用对接站，以实现可重构性。
- 开发并实现了用于六维运动控制的逆运动学控制器。
- 创建了基于物理的六自由度平台 MagBot 仿真，并将其集成到 MagBotSim [4] 中。
- 开展了严格的实验，以量化平台的精度并评估其适用性。

视频、CAD文件、组件清单和组装

*本研究未得到任何组织的资助[1]Lara Bergmann、Noah Greis 和 Klaus Neumann 就职于 CITEC、比勒费尔德大学技术学院，33619 比勒费尔德，德国 {lara.bergmann, noah.greis, klaus.neumann}@uni-bielefeld.de[2]Klaus Neumann 就职于弗劳恩霍夫 IOSB-INA，32657 莱姆戈，德国

本文已提交至 IEEE，供其考虑发表。版权可能在未另行通知的情况下转让，届时本版本可能不再可访问。

六自由度平台 MagBot 的说明可在此处获取：https://sites.google.com/view/6d- platform-magbot?usp=sharing

II. 相关工作

磁悬浮。关于磁悬浮的最新研究主要聚焦于单个移动器的硬件开发和底层控制 [1]，[5]，[6]。从磁性机器人学的角度来看，考虑高动态性和平滑性等系统特定要求的轨迹规划仍鲜有研究 [7]，[8]。与研究磁性微型机器人轨迹规划和物体操作的医疗应用相比 [9]，[10]，[11]，，我们考虑的是规模更大、性能更强且用于工业领域的磁悬浮系统。因此，医疗应用场景中的方法无法直接迁移。为推动工业磁悬浮系统相关方法的开发，我们推出了 MagBotSim [4]，——一种面向磁性机器人学的基于物理的仿真，并展示了磁悬浮系统能够通过推动来操作物体。此外，我们还提出了协作式物体操控，并明确将通过并联机构耦合运动器列为未来的研究方向。本研究在此基础上，推出六自由度平台 MagBot，这是首个将两个运动器耦合起来的可重构六自由度运动机构。

六自由度运动学。Steward 平台 [12]，HEXA 机器人 [13]（DELTA 机器人的六自由度变体 [14]）以及 Hexapteron [15] 都是广为人知的六自由度运动机构。然而，它们都安装在固定基座上。Triple Scissor Extender [16] 是另一种安装在直线滑台上的六自由度运动机构，但直线滑台的长度有限，因此限制了机器人的工作空间。相比之下，我们的六自由度平台 MagBot 可通过对接站重新配置，并安装在两个非固定的运动器上。事实上，运动器的工作空间（也就是六自由度平台 MagBot 的工作空间）在 x 轴和 y 轴方向上可以任意扩展，因为它仅受各方向上瓷砖数量的限制。其他六自由度运动学机构，例如 3-PPRS [17] 或 3-PPSR [17]，，由三条串联链组成，分别安装在三个基座上，这些基座可相对彼此沿 x 轴和 y 轴方向移动。由于磁悬浮系统的运动器不仅可以沿 x 轴和 y 轴方向移动，还可以绕运动器的 z 轴旋转，因此我们可以省去第三个基座及其相关链条，从而简化逆运动学控制器和运动机构本身。

可重构机器人。PuzzleBot [18]，FreeBOT [19]，3D M-Blocks [20],Slimebot [21]，Swarm-Bot [22]，或 M-TRAN III [23],等可重构机器人通常由多个构件（模块）组成，这些构件既可以自主运行，也可以通过连接和断开连接来改变其物理构型。由于每个模块都能独立移动，因此必须包含电子器件，例如处理器、执行器以及用于与其他模块通信的部件。相比之下，我们的六自由度平台 MagBot

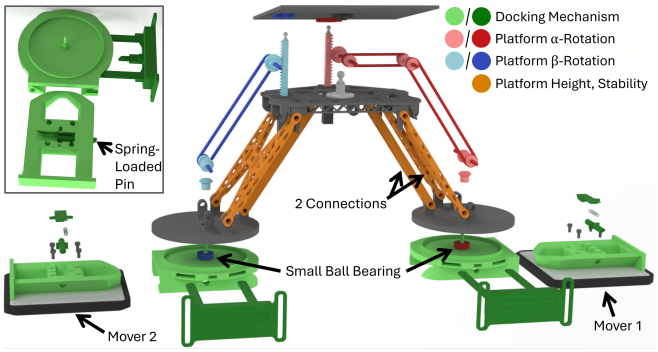


图 3. 六自由度平台 MagBot 的分解视图及对接机构示意图（左上）。用于对接、平台的 α 和 β 旋转、高度与稳定性的部件以不同颜色标示。

不包含任何额外的电子器件，因为执行器已由磁悬浮系统以运动器的形式提供。此外，MagBot 之间无需无线通信，因为磁悬浮系统会提供所有运动器的位置，因此每个控制周期都能精确、全局地获取这些位置。此外，六自由度平台 MagBot 的可重构性指的是对机器的调整，而非形状变化或多个模块之间的连接。因此，我们的六自由度平台 MagBot 与磁悬浮系统共同构成了一种特殊的可重构机器人。

III. 设计决策

六自由度平台 MagBot 的设计遵循以下条件：

- 占地面积小（仅耦合两个运动器）
- 自给自足（无需电池，无需驱动）
- 可重构性（拾取/放下对接站）
- 兼容性（与上述所有磁悬浮系统）
- 经济性（低成本、轻量化、3D 打印）
- 鲁棒性（高动态性、耐久性、可维修性）

在本文中，α、β和 γ 分别表示绕x轴、y轴和z轴的旋转，如图2所示。

A. 六自由度平台

由于我们的目标是将磁悬浮系统的运动器用作按并联机构定义的六自由度平台 MagBot 的执行器，因此无需额外驱动。具体而言，平台由运动器的 x、y 和 γ 轴控制。需要沿 x 和 y 方向重新定位运动器，以调整平台在 x、y 和 z 方向的位置；平台的 z 位置则通过改变两个运动器之间的距离来调整。从机械结构上看，运动器通过一个等腰梯形相连（见图 3），其中橙色标记的部件通过转动副与灰色部件连接。我们在运动器与平台之间的两侧各使用两个橙色所示的连接（见图 3），以稳定平台并防止其倾斜。平台的 α 和 β 旋转与运动器的 γ 旋转耦合（运动器1： α 旋转，运动器2： β 旋转）。从机械结构上看，我们使用球

轴承，位于图 3 底部灰色和浅绿色部件之间，以深蓝色和红色标出。连接浅绿色和灰色部件时，浅绿色部件的轴穿过灰色部件，并装有锥齿轮（浅蓝色/浅红色）。每侧的第二个锥齿轮通过 $90°$ 带动运动器的 γ 旋转，从而驱动下方的轴。旋转通过齿形带传递到第二根轴上。这些轴上装有与齿条啮合的直齿轮。齿条上下垂直移动时，顶部平台会根据运动器的旋转方向，沿 $\pm\alpha$ 和 $\pm\beta$ 方向旋转。图 3 中，所有用于将运动器的 γ 旋转传递到平台的相关部件均以红色（平台 α 旋转）和蓝色（平台 β 旋转）标出。将运动器的 γ 旋转传递出去的总体思路对于 α 和 β 类似。主要区别在于，为了正确转动平台，α 需要两条齿形带，而 β 只需要一条。平台由三个球铰支撑：一个位于平台中心，另外两个安装在齿条上。后两者可沿直线移动，从而使平台能够旋转。通过让运动器沿圆周在 x 和 y 方向移动，可以改变平台的 γ 旋转。不过，由于存在机械耦合，还需要利用运动器的 γ 旋转，对平台的 α 和 β 旋转进行补偿。

B. 对接机构

为了使机器易于重构，我们设计了一种对接站，可自主放下或拾取六自由度平台 MagBot。对接机构是图 3 中以绿色显示的自锁式导轨系统。该导轨系统由两个部分组成，形成燕尾接头：第一部分通过螺钉固定在移动器上，并滑入作为六自由度平台 MagBot 一部分的第二部分（见图 3 左上角）。移动器上的部件内部装有一个小型弹簧销。当弹簧销卡入 MagBot 部件的孔中时，机构便会锁定。为了使机构解锁并能自主放下六自由度平台 MagBot，我们设计了一个以深绿色标示的对接站（见图 3）。该对接站可滑入 MagBot 对接部件的凹槽，并配有一个反向销，用于推回弹簧销，从而解锁上述 MagBot 和移动器部件。对接站的叉臂由不锈钢板加固，可承载六自由度平台 MagBot。我们想强调的是，该对接机构不仅适用于六自由度平台 MagBot，也适用于其他需要安装在移动器上的 MagBot 或工具，从而确保机器具备可重构性。

C. 与不同磁悬浮系统的兼容性

六自由度平台 MagBot（包括对接站）无需重大改造即可兼容所有上述磁悬浮系统。可能只需调整拧在移动器上的部件的螺孔，因为使用其他磁悬浮系统时，运动器上的孔位可能有所不同。

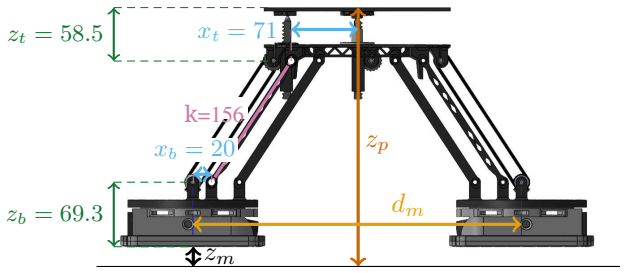


图 4. 带有变量 d_m（运动器间距）、z_p（平台高度）和 z_m（运动器飞行高度）的六自由度平台 MagBot。所有数值单位均为毫米。

D. 成本与重量

由于运动器的有效载荷有限，六自由度平台 MagBot 的主要部件采用 PETG 耗材以 20% 的填充率进行 3D 打印，以确保稳定性。此外，除螺钉、滚珠轴承和球头外，所有其他部件均由塑料制成。为减轻重量，我们决定在六自由度平台 MagBot 的底座部件中使用小型滚珠轴承（见图 3）。因此，一个六自由度平台 MagBot 的重量约为 1.09 kg。请注意，该重量由两个运动器分担。此外，六自由度平台 MagBot 成本较低，每个 MagBot 的成本约为 240 美元。使用 3D 打印和塑料部件以及小型滚珠轴承，会以牺牲精度为代价。不过，我们表明，除同步 α 轴与 β轴旋转外，平台的定位精度可达到亚毫米/亚度范围（见第 VII-A、VII-B 节），足以满足大多数工业应用的需求。尽管如此，未来的工作仍应研究采用不同材料制造精度更高的六自由度平台 MagBot，但这可能会增加 MagBot 的成本。

IV. 逆运动学控制器

我们为六自由度平台 MagBot 构建了一个逆运动学控制器，即该控制器接收平台的设定姿态，并输出两个运动器各自的 x、y 位置以及 γ 旋转。运动器的 α 和 β 旋转始终设为 $0°$。在以下方程中，下标 p 和 m 分别表示平台和运动器的目标位置。两个运动器分别用下标 1 和 2 区分，其中运动器 1 与平台的 α 旋转相耦合。平台的 z 位置 z_p 取决于运动器间距 d_m 和运动器的目标飞行高度 z_m（见图 4）：

$$d_m = 2\left(x_b + x_t + \sqrt{k^2 - (z_p - z_m - z_b - z_t)^2}\right) \quad (1)$$

其中，x_b、x_t、z_b和 z_t 表示x方向和z方向上的已知距离（见图4）。利用 d_m，可按如下方式计算所需的移动器x、y和 γ位置：

$$x_{m,1} = x_p - \frac{d_m}{2}\cos(\gamma_p) \quad (2)$$

$$x_{m,2} = x_p + \frac{d_m}{2}\cos(\gamma_p) \quad (3)$$

$$y_{m,1} = y_p - \frac{d_m}{2}\sin(\gamma_p) \tag{4}$$

$$y_{m,2} = y_p + \frac{d_m}{2}\sin(\gamma_p) \tag{5}$$

$$\gamma_{m,1} = -s_a \cdot \alpha_p + \gamma_p \tag{6}$$

$$\gamma_{m,2} = -s_b \cdot \beta_p + \gamma_p \tag{7}$$

其中， s_a 和 s_b 表示传动比。将 γ_p 加到式6和式7中，可补偿平台 γ旋转引起的 α和 β旋转。该逆运动学控制器可与任何轨迹规划方法配合使用，只要该方法能确保两个运动器之间的距离保持在最小值和最大值范围内，从而避免MagBot受损。

V. 工作空间、动力学与有效载荷

如表 I 所示，与单个移动器相比，六自由度平台 MagBot 扩大了磁悬浮系统的工作空间并提升了有效载荷。由于我们的实验采用倍福 XPlanar 系统，因此我们将可搭载两个 APM4330-0000-0000 动子的六自由度平台 MagBot，与单个同类型移动器进行比较。磁悬浮系统的磁悬浮瓦片布局可以灵活配置，因此 x 轴和 y 轴方向的工作空间仅受各方向瓦片数量的限制。工作空间主要在 z、 α 和 β 方向上扩展。 γ 维度上的工作空间取决于磁悬浮系统。由于平台绕 γ 轴旋转也会导致平台绕 α 轴和 β 轴旋转，移动器需要通过绕 γ 轴旋转进行补偿，以保持所需的平台绕 α 轴和 β 轴旋转。因此，只有当磁悬浮系统支持移动器在瓦片的任意位置绕 $360°$ 轴旋转时，平台才可能绕 $360°$ 轴旋转。使用搭载 APS4322-0000-0000 瓦片的倍福 XPlanar 系统（即我们实验室的系统）时，移动器只能在特定位置绕 $360°$ 轴旋转，也就是说，在瓦片的每个位置，移动器只能绕 $\pm 10°$ 轴旋转。然而，这是磁悬浮系统特有的限制，与能够绕 $360°$ γ 轴旋转的六自由度平台 MagBot 的设计无关。

六自由度平台 MagBot 可以在平台的任意 z 位置移动最大 2 kg 的有效载荷，且载荷位于平台中心。请注意，单个移动器只有在特定的 1 毫米飞行高度下，最大有效载荷才为 1.8 kg。在更高的飞行高度下，移动器的有效载荷会降低。我们观察到，从机械角度来看，六自由度平台 MagBot 能够可靠地承载 2 kg 的有效载荷，但底层磁悬浮控制器的参数需要仔细调试（参见第 VII-C 节）。此外，我们可以使用 Beckhoff XPlanar 系统，以磁悬浮系统的完整动力学驱动六自由度平台 MagBot，即最大速度为 2 m/s，最大加速度为 10 m/s^2 。因此，根据我们的经验，就有效载荷和动力学而言，限制因素是磁悬浮系统本身，而非六自由度平台 MagBot。

VI. 仿真

为了推动磁性机器人学中运动规划方法的发展，我们开发了一个 MuJoCo [24] 模型

表 I 工作空间与有效载荷

		单移动器	六自由度平台 MagBot
工作空间	x	受瓷砖布置限制	受瓷砖布置限制
	y	受瓷砖布置限制	受瓷砖布置限制
	z	1 - 5 毫米	205 - 280 毫米
	α	$\pm 5°$	$\pm 14°$
	β	$\pm 5°$	$\pm 14°$
	γ	$\pm 10°$ （到处）	$\pm 360°$
		$\pm 360°$ （在特定位置）	
最大负载（平台中心）		1.8 千克（如果为 $z = 1$毫米，否则更少）	2 kg（在平台 z 轴位置的每个点）

表 II 平台定位精度

单轴运动	
x	0.44625 ± 0.33566毫米
y	0.73238 ± 0.58874毫米
z	0.298 ± 0.29879毫米
α	$0.66504 \pm 0.59081°$
β	$0.37873 \pm 0.30644°$
γ	$0.03046 \pm 0.02348°$
多轴运动	
x,y-圆 + z 中正弦	0.64346 ± 0.27036毫米
螺旋线	0.73013 ± 0.51699毫米
余弦于 α + 正弦于 β	$1.11194 \pm 0.31887°$

六自由度平台 MagBot 的模型，如图2所示，该模型与逆运动学控制器一同集成在 MagBotSim [4] 库中。MagBotSim [4] 专为磁性机器人学设计，采用开源形式，可通过 PIP 安装。此外，MagBotSim 支持常见的强化学习（RL）API，例如 Gymnasium [25]和 PettingZoo [26] ，从而支持 MagBot 的智能运动规划方法开发，因为强化学习通常用于物体操作 [27], [28], [29] 和路径规划 [30], [31]。有关仿真中的六自由度平台 MagBot 的信息，请访问：https://ubi- coro.github.io/MagBotSim/magbots.html。

VII. 实验

在所有实验中，我们使用由 APM4330-0000-0000 动子和 APS4322-0000-0000 瓷砖组成的 Beckhoff XPlanar 系统，并在 TwinCAT3 中集成了逆运动学控制器。实验装置配置为 4 块瓷砖×3 瓷砖的布局。运动器的目标 z 轴位置（图 4 中的 z_m ）设为 1毫米，因为运动器在该飞行高度下最稳定，且能够承载最大有效载荷。在实验中，我们使用了传动比 $s_a = 0.119$ 和$s_b = 0.131$ （式 6、7）。我们通过将惯性测量单元芯片置于平台中央，分别单独旋转每个运动器，以 $10°$ 为增量从 $0°$ 旋转至 $130°$，测量α 轴和 β 轴的旋转角度，并使用记录的数据进行线性回归，从而估算出这些数值。除非另有明确说明，我们对运动器的 α 轴和β 轴使用底层控制参数集 1（见表 III）。

A. 单轴定位精度

为了使用我们的逆运动学控制器测量平台的定位精度，我们用VICON运动捕捉系统（MX T20相机，Nexus 2.6.1）测量了实际平台位姿（位置和姿态），并

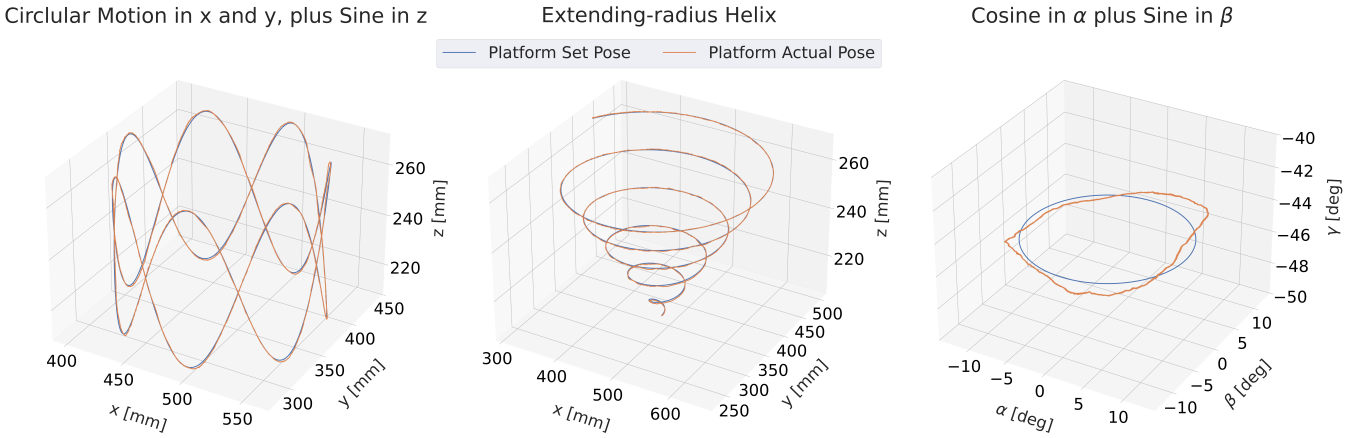


图 5. 使用 TwinCAT3 中的逆运动学控制器进行平台多轴运动。平台的实际位置由 VICON运动捕捉系统测量，而平台的设定位置可直接从 TwinCAT3 获取。

记录了TwinCAT3中可用的平台设定姿态。在我们的单轴实验中，我们将每个平台轴从其最小可能位置移动到最大可能位置共10次，同时所有其他轴的设定位置保持不变。对于每个平台轴，我们在不同位置多次重复这些最小—最大运动：x轴在10个不同的y位置，y轴在10个不同的x位置，z轴在25个不同的x和y位置，α轴在2个不同的x、y和γ位置，β轴在2个不同的x、y和γ位置，以及γ轴在25个不同的x和y位置。移动器的最大设定速度对于平移运动和旋转运动分别为0.5m/s和20°/s。需要注意的是，对α轴和β轴的测量仅在运动器的360°旋转可用的某些位置才可行。表 II给出了平台各轴设定位置与实际位置之间的平均绝对误差以及相应的标准差。x方向的精度优于y方向的精度，因为两个运动器的设定y位置相等，因此在运动过程中，力垂直施加于图 3中以橙色标示的部件。同样，β的精度优于α的精度。造成这一结果的原因是，使用了两条齿形带来耦合平台的α旋转与移动器的γ旋转（见图 3，红色部件），而β旋转仅使用一条齿形带。此外，在实验中，我们发现平台的α旋转比β旋转具有更大的间隙，从而导致轻微的响应延迟。表 II 还表明，γ的精度显著优于α和β，因为γ的精度主要取决于磁悬浮系统的定位精度。这些系统通常因无摩擦运动 [5] 以及高精度的位置反馈而具有较高的定位精度，而在α和β的情况下则会涉及齿形带等部件。总之，我们的单轴测量表明，该平台可以以亚毫米/亚度精度进行控制；考虑到六自由度平台 MagBot的所有部件成本低廉且主要为3D 打印，这一精度已经非常高。

B. 多轴定位精度

除了单轴实验外，我们还测量了平台在多个轴同时运动时的定位精度，同样使用 VICON运动捕捉系统。我们进行了图 5 所示的三种不同运动：

1. x 和 y 方向做圆周运动，同时 z 方向做正弦运动 2. x、y 和 z 方向做半径扩展螺旋线运动（高动态性） 3. α 方向做余弦运动，β方向做正弦运动

表 II 显示，第一种运动的定位精度处于 x 和 y 方向单轴精度的范围内，而螺旋运动的精度接近 y 方向的单轴精度，但这两种运动的精度均达到亚毫米级。需要注意的是，与第一种运动相比，螺旋运动的动态性显著更高（见视频），这解释了其精度略低的原因。不过，由于这两种运动都仅涉及平移轴，即 x、y 和 z 轴，因此这些结果处于预期范围内。第三种运动仅涉及旋转轴，即α和β。表 II 和图 5 表明，这种运动的精度不及前述运动，是唯一未达到亚度级精度的运动。3D 打印组件存在细微误差，导致平台旋转运动不平顺；此外，前述单轴实验中β的定位精度略高于α的原因，以及运动器的位置滞后误差，也都可以解释这一结果。不过，未来工作应研究如何消除这些误差，例如采用比 3D 打印组件更轻、但制造精度更高的部件。

C. 低级控制参数

当六自由度平台 MagBot 带载荷或不带载荷使用时，一旦运动器开始悬浮，XPlanar默认低级控制参数就会导致强烈振荡。因此，我们针对运动器的α-轴和β-轴调校了控制参数，并为带载荷和不带载荷的 MagBot 找到了两组新的参数组，如表 III 所示。表 III 中列出的参数仅用于运动器的α-轴和β-轴。对于其他所有运动器轴，XPlanar默认参数保持不变。为研究



图6. 平台中心放置了1 kg有效载荷的六自由度平台 MagBot。

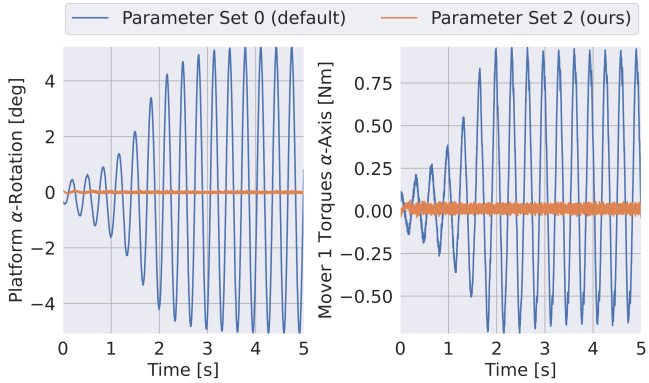


图7. 在不同底层控制参数下，携带1 kg有效载荷时的平台 α-旋转（左）和运动器扭矩（右）。

使用 1 kg 有效载荷时不同参数组之间的差异，我们使用 VICON 运动捕捉系统测量了平台的 α 旋转，因为该轴对振荡尤其敏感；此外，还记录了 MagLev低级控制器施加在运动器1的 α轴上的扭矩。如图6所示，砝码被粘在平台上，以防砝码掉落损坏瓷砖。由于使用了有效载荷，我们将 XPlanar默认参数与参数集2进行比较。图 7（左）中的结果清楚地显示，使用默认参数时平台会发生振荡。相比之下，使用我们的新参数组时，振荡显著减弱，系统因此保持稳定。有趣的是，图7（右）所示的运动器扭矩也呈现出相同的现象。这样，无需 VICON系统等外部反馈，仅依据磁悬浮系统提供的数据，就能调校底层控制参数。因此，未来的工作可着重于根据运动器扭矩动态调整控制参数，例如根据有效载荷进行调整。

D. 运动器力和负载放置

基于这一结果，我们研究了能否根据 MagLev 低级控制器施加于两个运动器的力和扭矩，找到与有效载荷在 MagBot平台上的位置相关的规律。为此，我们将一个 0.5 kg 的有效载荷放置在平台上的九个不同位置，如图 8（右上）所示，

表III 移动器 α-轴和 β-轴的控制参数组

参数集	用途	K_p	T_n	T_v	T_1
0（默认）	基线	35.0	0.03	0.015	0.001
1（我们的方法）	无负载的MagBot	25.0	0.12	0.04	0.015
2（我们的方法）	携带有效载荷的MagBot	22.0	0.12	0.06	0.01

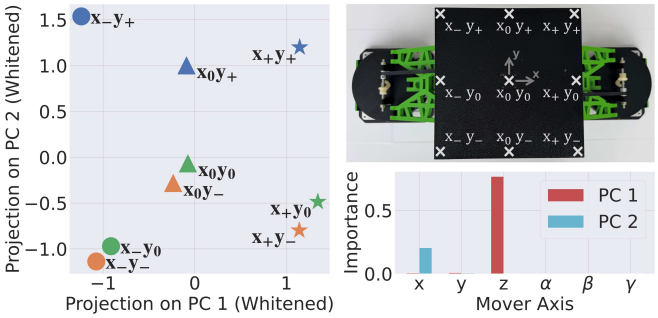


图 8.（右上）平台上的有效载荷位置。（左）使用主成分分析计算得到的二维空间中，平均运动器作用力旋量差值的投影（见公式 8）。（右下）运动器作用力旋量各部件对主成分分析模型的重要性。

使用控制参数集2（见表 III）让运动器悬浮在 1 毫米的高度（不再移动），并记录 MagLev 低级控制器施加于两个运动器的力旋量。平台的设定位置设为 (480.0,360.0,205.0,0.0,0.0,0.0)（单位：毫米）。对于九个数据集中的每一个，我们都计算了两个运动器的力旋量之间的平均差：

$$\Delta_{\mathcal{F},i} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(\mathcal{F}_{j,1} - \mathcal{F}_{j,2}) \in \mathbb{R}^6 \qquad (8)$$

其中 $i = 1,...,9$ 表示数据集的索引，$n \in \mathbb{N}$表示数据集中的样本数，而 $\mathcal{F}_{j,1} \in \mathbb{R}^6$和 $\mathcal{F}_{j,2} \in \mathbb{R}^6$ 分别表示运动器1和运动器2数据集中的第 j 个力旋量。为了将数据投影到二维空间，我们对 $\Delta_{\mathcal{F}} = [\Delta_{\mathcal{F},1}, ..., \Delta_{\mathcal{F},9}]^T$使用主成分分析（PCA）进行线性降维，其中上标 T表示转置。图 8（左）展示了投影后的数据，可以清楚地看出有效载荷在平台上的位置模式。第二行和第三行中的有效载荷位置明显可区分，但彼此接近，因为平台 α旋转所用的齿条以及平台安装其上的球铰分别位于有效载荷位置 x_0y_- 和 x_0y_0 下方，而 x_0y_+下方没有齿条。图 8（右下）显示，$\Delta_{\mathcal{F}}$ 的 z 分量和 x 分量对主成分分析模型最为重要，因为一旦将有效载荷放置在平台上，运动器就必须相互作用以维持平台的 z 位置；而平台的 z 位置取决于两个运动器 d_m 之间的距离以及运动器的飞行高度 z_m（见图 4 和公式 1）。有效载荷的位置决定了哪个运动器需要进行更多或更少的补偿，从而改变公式 8 中计算出的差值。这项研究清楚地表明，可以在运动器的力旋量中找到与有效载荷位置相关的模式，

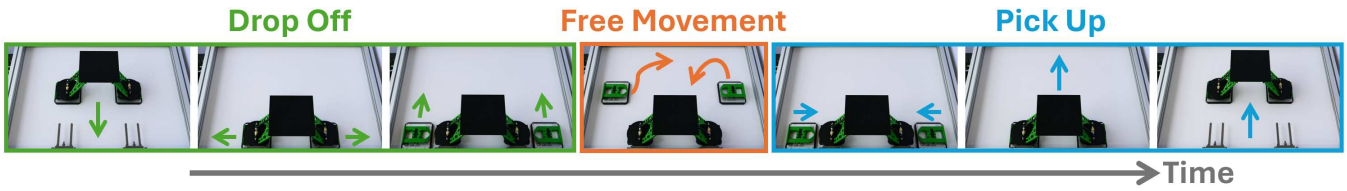


图 9. 六自由度平台 MagBot 的放下和拾取过程（蓝色）示意图。放下后，运动器可以自由移动（橙色）。

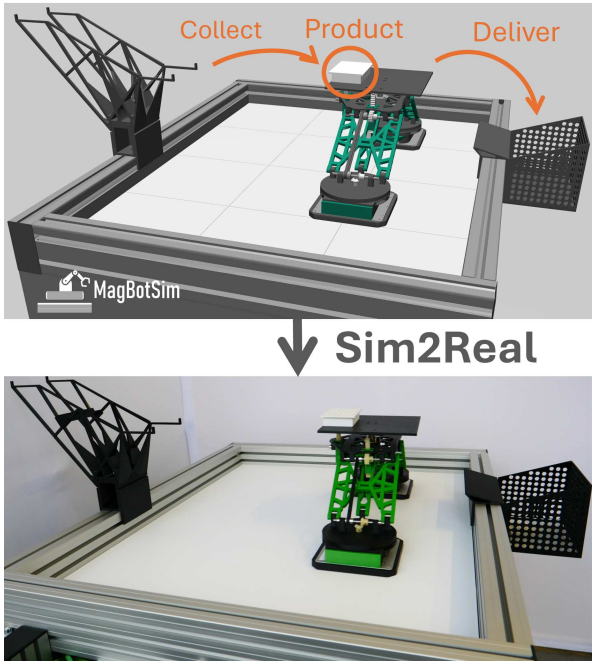


图 10. MagBotSim [4] 中建模的应用示例（上）及真实系统（下）。该任务是在无需额外送料技术的情况下收集并交付产品。

从而无需使用外部的、通常基于视觉的反馈系统来测量有效载荷的位置。因此，未来的工作可以利用这一结果估算有效载荷的位置，并研究是否也能确定有效载荷的重量。这有助于规划平台轨迹，例如避免有效载荷掉落。

E. 通过对接站实现可重构性

如图 9 所示，我们通过对六自由度平台 MagBot 各进行 10 次拾取和放下，测试了对接站。两种情况下的成功率均达到 100%，充分证明了其重构能力。我们发现，必须相对精确地安装对接站，以避免振动或底层动子控制器的位置滞后误差。由于精确移动至对接站属于轴孔装配任务，未来工作应着重于应用现有算法，例如 [29]，，以避免上述情况。

F. 应用示例

由于六自由度平台 MagBot 面向工业应用场景而设计，我们展示了一个应用示例，其中 MagBot 拾取一个产品并将其送入容器，如图 10 所示。我们进行了 10 次试验，测量拾取并运送产品所需的时间。每次运行均成功，耗时 4.298 秒，对应的吞吐量约为每分钟 14 个产品。该应用示例也可以通过仿真复现（见图 10 ）。请注意，由于工作空间有限，单移动器无法完成这项任务。在磁悬浮系统中，机器通常会使用额外的送料技术来弥补工作空间有限的问题。然而，与磁悬浮动子相比，机器人等送料技术成本高、速度慢。相比之下，六自由度平台 MagBot 成本低，可充分利用磁悬浮运动器的全部动力学特性，并且无需额外的送料技术，就能扩展机器针对特定任务的能力，正如我们的应用示例所强调的那样。此外，MagBot 还能缩短产品加工时间，因为产品运输和加工步骤可以同时进行，例如在运输过程中混合液体。因此，可重构 MagBot 的应用显著降低了机器的成本和占地面积，为依赖送料机构的传统机器提供了一种经济高效的替代方案。

VIII. 结论与未来工作

本文介绍了六自由度平台 MagBot，这是一种低成本的六自由度并联机构，可将磁悬浮系统的运动器耦合成一个复合机器人平台。此外，我们设计并建造了一个对接站，可自动放下或取回六自由度平台 MagBot，使机器能够轻松重新配置。六自由度平台 MagBot 重量轻，因为它不包含电子器件，且大多数组件采用 3D 打印或塑料制成。此外，我们将六自由度平台 MagBot 的 MuJoCo 模型集成到 MagBotSim 库中，并实现了一个逆运动学控制器。利用该控制器，我们证明，除平台同时绕 α 轴和 β 轴旋转的情况外，六自由度平台 MagBot 的平台定位精度可达到亚毫米级/亚度级。未来的工作应研究如何提高后一种情况下的定位精度。我们还发现，要避免振荡，必须仔细调节底层磁悬浮控制器的控制参数。此外，我们证明，调节这些参数不需要外部反馈，例如 VICON系统，因为振荡也会清楚地反映在磁悬浮控制器施加于移动器的力旋量中。我们还展示了，可以从磁悬浮控制器的力旋量中找到与有效载荷在

MagBot平台上的位置相关的模式。六自由度平台磁机器人为未来研究提供了多种方向。首先，由于六自由度平台磁机器人将运动器耦合成复合机器人平台，它打破了标准多智能体系统中运输与操作的经典分离模式，为新的运动规划方法留下了空间；这类方法还需考虑磁悬浮系统的高动态特性。其次，这些运动规划方法还必须提供强有力的安全保证，才能使 MagBot 用于工业应用。第三，人机交互与协作——包括可靠的用户识别、易于指导、顺畅且安全的交接互动，以及利用模仿学习获取符合人类偏好的行为等主题——在磁悬浮系统和 MagBot 领域仍鲜有研究。总之，六自由度平台 MagBot 显著扩展了磁悬浮系统的可达工作空间、有效载荷和功能灵巧性，从而实现运输与操作的统一，使制造系统更加灵活、高效且适应性强。

参考文献

[1] X. Lu 和 I.-u.-r. Usman，《用于平面运动平台的六自由度直驱技术》，CIRP年鉴，第 61 卷，第 1 期，第 359–362 页，2012年。[2] X. Lu、P. Tang、A. H. Slocum 和 R. Chen，《用于制造、使用和控制机器人装置的方法》，美国专利申请公开 US20200030995A1，2020年。[3] X. Lu、G. Williamson、K. Xiao、A. Slocum、P. Tang 和 B. Long，《机器人装置及其制造、使用和控制方法》，美国专利申请公开 US20220212883A1，2022年。[4] L. Bergmann、C. Grothues 和 K. Neumann，《MagBotSim：面向磁性机器人学的物理仿真与强化学习环境》，arXiv 预印本 arXiv:2511.16158，2025年。[5] C. Trakarnchaiyo、Y. Wang 和 M. B. Khamesee，《通过增强力旋量—电流解耦设计紧凑型平面磁悬浮系统》，Applied Sciences，第 13 卷，2370，2023 4，第 . 页。[6] P. Hartmann、J. Strangh¨oner 和 K. Neumann，《工业级六自由度磁悬浮系统的端到端低层神经网络控制》，arXiv 预印本 arXiv:2509.01388，2025年。[7] M. Pierer Von Esch、E. Nistler、A. V¨olz 和 K. Graichen，《基于灵敏度的分布式非线性模型预测控制：悬浮式平面运动系统的实验结果》，IEEE Transactions on Control Systems Tech-nology，第 33 卷，第 3 期，第 1110–1118 页，2025年。[8] K. Janning、A. Housin、C. Schulte、F. Erkens、L. Frenken、L. Herbst、B. Nießing 和 R. H. Schmitt，《经磁力平面驱动系统实验验证的多智能体路径搜索冲突型模型预测控制》，Frontiers in Control Engineering，第 6 卷，第 1645918 页，2025年。[9] O. Isitman、G. Alcan 和 V. Kyrki，《磁性胶囊机器人操作的轨迹规划与控制》，《IEEE Robotics and Automation Letters》，第 10 卷，第 5 期，第 4666–4673 页，2025年。[10] M. Sallam、M. A. Shamseldin 和 F. Ficuciello，《使用人工势场算法和自适应非线性PID控制磁性微载体的自主导航与控制》，Frontiers in Robotics and AI，第 11 卷，第 1439427 页，2024年。[11] L. Song、Y. Dai、L. Wang、W. Zhang、Y. Ji、Y. Cao、J. Wei、F. Wang、J. Zhong、J. Yang 和 L. Feng，《基于电磁线圈的自适应磁悬浮胶囊机器人运动控制》，IEEE Transactions on Automation Science and Engineering，第 20 卷，第 4 期，第 2720–2731 页，2023年。[12] D. Stewart，《六自由度平台》，Proc. of the Institution of Mechanical Engineers，第 180 卷，386，1965 1，第 371 页。[13] F. Pierrot、A. Fournier 和 P. Dauchex，《面向高速应用的全并联六自由度机器人》，载于 IEEE 国际机器人与自动化会议（ICRA）论文集，1991年，第 1288–1293 页。[14] R. Clavel，《一款四自由度快速并联机器人的设计》，博士学位论文，洛桑联邦理工学院，洛桑，1991年。

[15] N. Seward 和 I. A. Bonev，《一种运动学模型简单的新型六自由度并联机器人》，载于 IEEE 国际机器人与自动化会议（ICRA）论文集，2014年，第 4061–4066 页。[16] D. J. Gonzalez 和 H. H. Asada，《Triple Scissor Extender：一种六自由度举升与定位机器人》，载于 IEEE 国际机器人与自动化会议（ICRA）论文集，2016年，第 847–853 页。[17] X.-J. Liu 和 J. Wang，《并联运动学：类型、运动学与优化设计》，施普林格，2014年。[18] S. Yi、Z. Temel 和 K. Sycara，《PuzzleBots：机器人群体的物理耦合》，载于 IEEE 国际机器人与自动化会议（ICRA）论文集，2021年，第 8742–8748 页。[19] G. Liang、H. Luo、M. Li、H. Qian 和 T. L. Lam，《FreeBOT：一种具有任意连接点的自由形态模块化自重构机器人——设计与实现》，载于 IEEE/RSJ 国际智能机器人与系统会议（IROS）论文集，2020年，第 6506–6513 页。[20] J. W. Romanishin、K. Gilpin、S. Claici 和 D. Rus，《3D M-Blocks：可通过三维空间中的枢转实现运动的自重构机器人》，载于 IEEE 国际机器人与自动化会议（ICRA）论文集，2015年，第 1925–1932 页。[21] M. Shimizu 和 A. Ishiguro，《一种能够实时自适应重构的变形虫状模块化机器人》，载于 IEEE/RSJ 国际智能机器人与系统会议（IROS）论文集，2009年，第 1496–1501 页。[22] F. Mondada、G. C. Pettinaro、A. Guignard、I. W. Kwee、D. Floreano、J.- L. Deneubourg、S. Nolfi、L. M. Gambardella 和 M. Dorigo，《SwarmBot：一种新的分布式机器人概念》，《Autonomous Robots》，第 17 卷，第 193–221 页，2004年。[23] H. Kurokawa、K. Tomita、A. Kamimura、S. Kokaji、T. Hasuo 和 S. Murata，《M-TRAN III模块化机器人系统的分布式自重构》，《The International Journal of Robotics Research》，第 27 卷，第 3-4 期，第 373–386 页，2008年。[24] E. Todorov、T. Erez 和 Y. Tassa，《MuJoCo：一种用于基于模型控制的物理引擎》，载于 IEEE/RSJ 国际智能机器人与系统会议（IROS）论文集，2012年，第 5026–5033 页。[25] M. Towers、A. Kwiatkowski、J. Terry、J. U. Balis、G. De Cola、T. Deleu、M. Goul¯ao、A. Kallinteris、M. Krimmel、A. KG、R. Perez-Vicente、A. Pierr´e、S. Schulhoff、J. J. Tai、H. Tan 和 O. G. Younis，《Gymnasium：强化学习环境的标准接口》，arXiv 预印本 arXiv:2407.17032，2024年。[26] J. Terry、B. Black、N. Grammel、M. Jayakumar、A. Hari、R. Sullivan、L. S. Santos、C. Dieffendahl、C. Horsch、R. Perez-Vicente、N. Williams、Y. Lokesh 和 P. Ravi，《PettingZoo：用于多智能体强化学习的 Gym》，载于《Advances in Neural Information Processing Systems》，第 34 卷，2021年，第 15 032–15 043 页。[27] M. Iannotta、Y. Yang、J. A. Stork、E. Schaffernicht 和 T. Stoyanov，《上下文能否弥合现实差距？上下文感知策略的仿真到现实迁移》，arXiv 预印本 arXiv:2511.04249，2025年。[28] L. Bergmann、D. Leins、R. Haschke 和 K. Neumann，《面向精度的机器人推物强化学习模型》，载于 IEEE 国际先进机器人与机电一体化会议（ICARM）论文集，2025年，第 758–765 页。[29] J. Strangh¨oner、P. Hartmann、M. Braun、S. Wrede 和 K. Neu-mann，《SHaRe-RL：面向高接触工业装配任务的结构化交互式强化学习》，arXiv 预印本 arXiv:2509.13949，2025年。[30] H. Guan、Y. Gao、M. Zhao、Y. Yang、F. Deng 和 T. L. Lam，《AB-Mapper：基于注意力机制和BicNet的动态环境多智能体路径规划》，载于 IEEE/RSJ 国际智能机器人与系统会议（IROS）论文集，2022年，第 13 799–13 806 页。[31] M. Damani、Z. Luo、E. Wenzel 和 G. Sartoretti，《PRIMAL 2：通过强化学习与模仿学习实现终身多智能体寻路》，《IEEE Robotics and Automation Letters》，第 6 卷，第 2 期，第 2666–2673 页，2021 年。