面向月球应用的模块化等周软体机器人桁架

Mihai Stanciu[1], Isaac Weaver[1], Adam Rose[1],James Wade[1],Kaden Paxton[1],Chris Paul[1],Spencer Stowell[1], Nathan Usevitch[1]*, *IEEE* 会员

arXiv:2602.02915v1 [cs.RO] 2 Feb 2026

摘要—我们介绍一种大型机器人系统，专为月球应用设计，具有轻量化、模块化和可重构的结构。该系统由类似桁架的机器人三角形组成，这些三角形由连续的充气织物管构成，管件穿过两个机器人滚轮单元和一个连接单元。新开发的球形关节可使多达三个三角形在一个顶点处连接，从而能够建造超出单个八面体规模的桁架组件。放气后，三角形可收纳至约等于滚轮单元的体积，收纳体积与展开体积之比达到 1:18.3。充气后，滚轮单元夹持管件，局部降低弯曲刚度，从而形成有效关节。随后，电动机驱动滚轮单元沿管件移动，通过以相同速率延长一条边并缩短另一条边来移动夹持点，同时保持周长恒定（等周）。这一形状变化过程无需额外压缩空气，因此系统在初次充气后即可无系绳运行。我们展示了该系统的两种应用：一种具有 12 个自由度的太阳能阵列，可倾斜至 60° 并扫掠 360°；另一种是采用步进滑移步态的 14 自由度运动装置。这种模块化、形状自适应系统应对了可持续月球作业和未来太空任务的关键挑战。

索引词—空间机器人学与自动化；软体机器人材料与设计；软体机器人应用

I. 引言

ESTABLISHING 在月球上建立永久性人类驻留点，是太空探索的一项关键目标 [1]。为确保月球前哨站能够高效运行，需要能够与宇航员安全互动或自主完成任务的适应性结构和机器人。为应对这一挑战，我们开发了一种等周充气式机器人桁架，旨在作为可重构结构运行，能够调整形状以执行适合月球任务的各种工作。这种机器人结构具有 14 个主动自由度，在某些构型下高度超过 3.5 米，并且可以配置成多种形状。这种充气式软体机器人结构相比传统结构具有显著优势，包括轻量化设计和紧凑的收纳体积，这两点对于太空旅行都至关重要。其柔顺性和模块化特性使其非常适合需要可靠、适应性强且能够与人类安全协同工作的环境。在月球上，安全性、空间利用效率和多功能性都至关重要，这种模块化等周充气式机器人提供了一种有价值的解决方案。

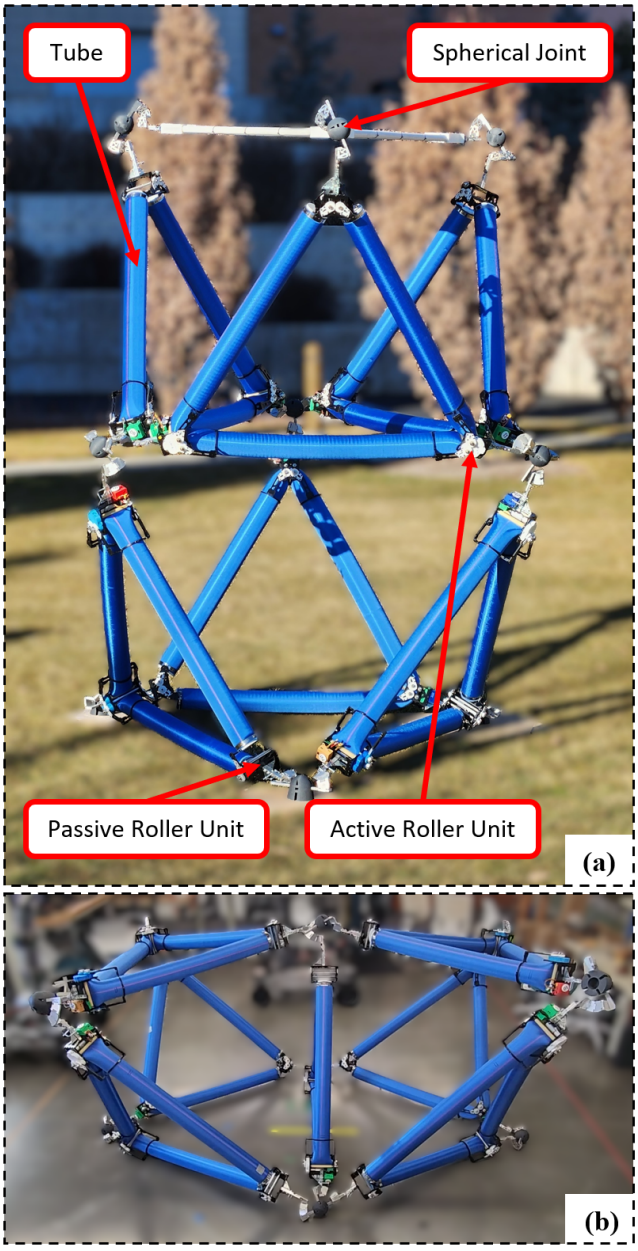

图 1. 等周桁架机器人及其主要子系统：充气管件、球形关节以及主动和被动滚轮单元。a) 太阳能阵列构型。b) 运动构型。

本研究得到 NASA Grant No. 80NSSC20M0103、2024 NASA BIG Idea Challenge 和 NASA Grant No. 80NSSC26K0260 的支持[所有作者均来自杨百翰大学 Ira A. Fulton School of Engineering 机械工程系，位于美国犹他州普罗沃

* 通讯作者：nathan_usevitch@byu.edu，(801) 422- 0814

如图 1a 所示，该机器人由弯折成三角形的充气织物管构成，并通过球形关节连接，形成桁架结构。每个三角形的两个顶点处各设有一个主动滚轮单元，可沿管件平移；被动单元则连接管件的两端，从而闭合成三角形。主动单元沿管件移动时，会改变每个三角形的边长，进而在保持周长不变的同时重塑桁架的整体构型。为该机器人专门设计的球形关节，可在每个顶点处连接相邻三角形的滚轮单元，从而搭建桁架。本文讨论桁架机器人的两种构型，具体为图 1a 所示的太阳能阵列和图 1b 所示的运动构型。太阳能阵列由 6 个三角形（12 个可控自由度）组成，形成上下堆叠的两个八面体；它们共用一个中间虚拟三角形，顶部设有一块静态等边太阳能板。运动构型由 7 个三角形（14 个可控自由度）组成，形成两个关于共同的中间三角形对称的八面体。

A. 相关研究

1) 月球结构：为开发能够支持宇航员在月球长期考察期间执行任务的月球结构，研究人员开展了大量研究。此后，已有多项关于月球结构的研究发表，内容包括栖息舱 [2], [3]，太阳能阵列 [4]，以及旨在支持科学数据采集的构造 [5]。这些结构包括使用月球材料（如月壤）建造的整体连续式设计 [6], 、桁架等多构件结构 [7], 、可展开结构 [8], 以及充气结构 [9], [10]。

桁架、可展开结构和充气结构因其轻量化设计、紧凑的存储方式和模块化特性，成为月球应用和太空旅行的首选。由于具备这些优势，负责建造此类桁架结构的月球宇航员只需花费极少时间进行组装 [3]。

2) 月球机器人：面向月球应用的机器人系统已开发数十年。这些系统不仅为人类宇航员提供了在月球基地执行建造和维护任务的有前景的替代方案 [11], ，还为探测 [12], [13],、样本采集与运送 [14], 以及地形测绘 [15]创造了新的可能性。在所有应用中，月球机器人旨在降低人类人员面临的风险和资源需求，同时拓展月球任务的运行能力。

实施月球机器人面临的一项主要挑战在于其高度专业化。文献中包含许多针对特定任务量身设计的方案；然而，大多数方案在预定功能之外的适应性有限，这凸显了对更通用机器人系统的需求。 [14],中提出的多机器人系统就是一种应对这一局限的方案，它通过采用多种机器人构型来执行采样作业：先勘察地形并制定计划，再采集和处理样本。另一项重大挑战是确保这些系统能够成功送达月球表面并投入运行。据 [16], 报道，自2019年以来发射的月球机器人任务中，近一半因坠毁或通信中断而失败。这些问题凸显了对模块化机器人系统的需求：这类系统送达月球后，可以重新配置以执行月球基地所需的各种任务。

3）桁架机器人：文献中已提出若干可重构桁架机器人的概念与设计，这类机器人通常称为可变几何桁架（VGT）[17]–[19], ，其中一些专为太空应用开发 [20], [21]。这些系统通常由刚性线性执行器组成，可通过伸缩改变桁架几何形状。此类设计虽然具有较高的结构刚度和可控运动学，但依赖刚性构件和线性执行器，因此存在执行器行程限制、收纳性约束，以及与人发生高冲击碰撞所带来的更高安全风险。这些局限限制了 VGT 可实现的几何形状、连续变形能力和安全性，进而妨碍其适应性、紧凑运输潜力，以及在人周围安全运行的能力。

Usevitch等人 [22] 提出了一种无缆软体桁架机器人，以等周加压管件取代刚性构件。通过采用等周管件，该架构保留了传统 VGT 的几何可控性，实现了超越纯线性执行器所能达到的更大运动范围，同时利用了软体结构的柔顺性和轻量化特性。Hancey等人 [23] 提出了采用带簧元件实现等周构件的另一种方案；这类元件沿长度方向表现为刚性梁，但在顶点处受到挤压时会呈现局部柔顺性。两种设计都展示了通过对等周构件进行机械驱动来实现形状重构的概念，凸显了可部署且具有韧性的桁架架构的潜力。然而， [22], [23]仅展示了八面体，重点在于验证等周方法的可行性，而非拓展其功能或模块化程度。

B. 贡献

在 [22], 奠定的基础上，我们将等周桁架的概念扩展至包含新功能，并展示其在月球任务场景中的新颖应用。我们的主要贡献如下：

- 重新设计了机器人，使其采用模块化设计，能够在月球环境中轻松组装，并可紧凑收纳，具有较高的收纳态与展开态体积比，适合航天运输。
- 开发了一种新型球形关节，可在节点处连接三个或更多部件，同时保持虚拟旋转中心。
- 通过构建堆叠八面体并验证其执行复杂运动的能力，展示了超越单个八面体的可扩展结构。这些运动包括伸展、扭转、顶面倾斜、扫掠和运动。
- 通过采用高压管路、加固并提升性能和可靠性，较以往工作有所改进[22]

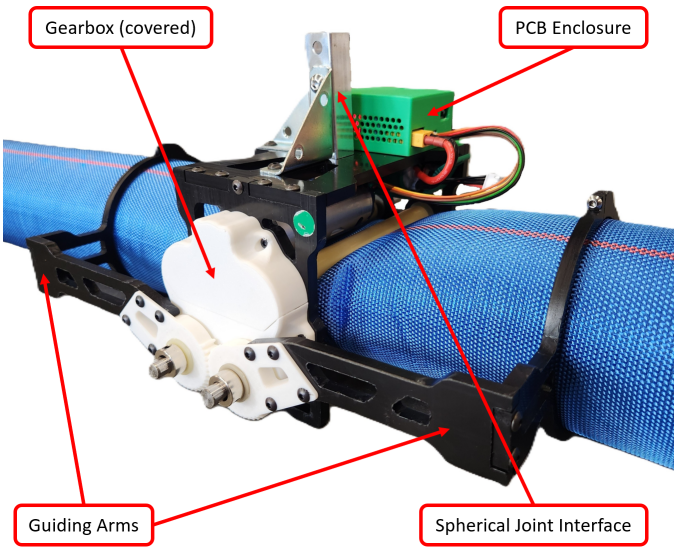

图2. 主动滚轮单元的外部部件。

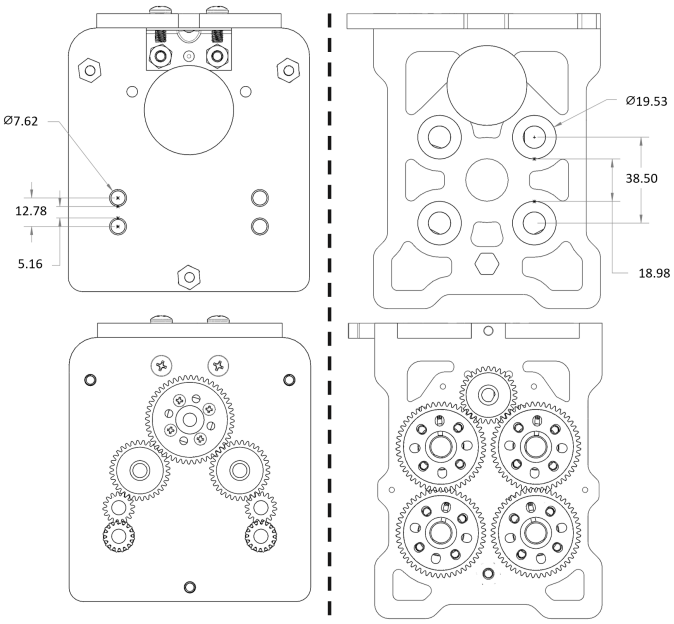

图3。 [22] 中的主动滚轮设计（左）与本文设计（右）的比较。上方图示显示滚轮轴之间的尺寸，下方图示显示齿轮系之间的差异。

同时减轻滚轮单元的重量，并为主动单元采用更坚固的齿轮系，从而显著提升承载能力和驱动可靠性。

II. 方法

A. 设计

我们首先介绍用于构建机器人各子系统的方法，包括滚轮单元、管件和球形关节，以及用于表征其运动学和动力学的建模技术。

1) 滚轮单元：滚轮单元构成了一个子系统，负责弯曲管件并将其塑造成所需的构型。该系统使用两种滚轮单元：主动滚轮由电机驱动，沿管件移动；被动滚轮则连接管件的两端，使其形成三角形。

这两种滚轮单元都必须足够轻，以减轻结构承受的载荷，同时又要足够坚固，能够承受通过球形关节接口传递的载荷。主动单元还必须承受管件内部压力作用于滚轮轴时产生的张力。被动滚轮单元则必须承受回弹效应产生的应力；这种效应发生在加压管件从自然的线性状态弯曲成三角形时。回弹效应会产生内部作用力，试图使管件恢复原来的未弯曲形状。由于管件固定在被动单元上，这会给被动单元带来额外应力。

图2所示的主动滚轮单元必须执行两项对于改变每个三角形形状至关重要的不同功能。首先，它会沿管形成局部夹点，从而降低管的弯曲刚度，并充当三角形相邻边之间的有效关节。其次，主动单元必须在不打滑或卡滞的情况下，沿管移动控制器指定的距离，使结构能够根据控制指令改变形状。

分析 [22] 表明，主动滚轮单元沿管形成夹点的能力主要取决于两个参数：滚轮轴之间的间隙高度以及滚轮轴直径。模型表明，减小间隙高度和滚轮轴直径，可以降低弯曲管所需的力矩，从而使滚轮单元能够更高效地沿管移动。[22] 中所述的设计采用滚轮轴中心距 12.7 mm、滚轮轴直径 7.62 mm（6.35 mm 钢轴直径，外覆 + 0.6 mm 厚橡胶套），形成 5.1 mm 的间隙。尽管这种构型有效地减小了弯曲力矩，却因需要加入两个惰轮而大幅增加了齿轮系的复杂性，并导致轴挠曲显著，使最大工作压力受限于 41 千帕。

由于机器人的整体结构强度会随管内压力的增加而提高，本文采用了不同的设计权衡。本文选择了更大的间隙高度和滚轮轴直径，以实现更高压力下的运行，但代价是弯曲力矩增加。如图3所示，当前设计中两根滚轮轴的中心距为38.5 mm，轴直径为19.5 mm（10 mm钢轴直径 + 4.75 mm厚橡胶套），从而形成19 mm的间隙高度。这种设计权衡使桁架能够在更高的管内压力下运行，同时大幅降低主动滚轮单元齿轮系的复杂性。

主动滚轮的建造分为三个子组件：底盘（如图4b所示）、滚轮（如图4c所示）和导向臂。

底盘由三个激光切割的聚甲醛（POM）部件组成，包括两块侧板和一块顶板。它为印刷电路板、电池、60RPM电机（ServoCity638320）和球形关节提供结构支撑及安装界面。每对侧板都经过整体加工，以确保

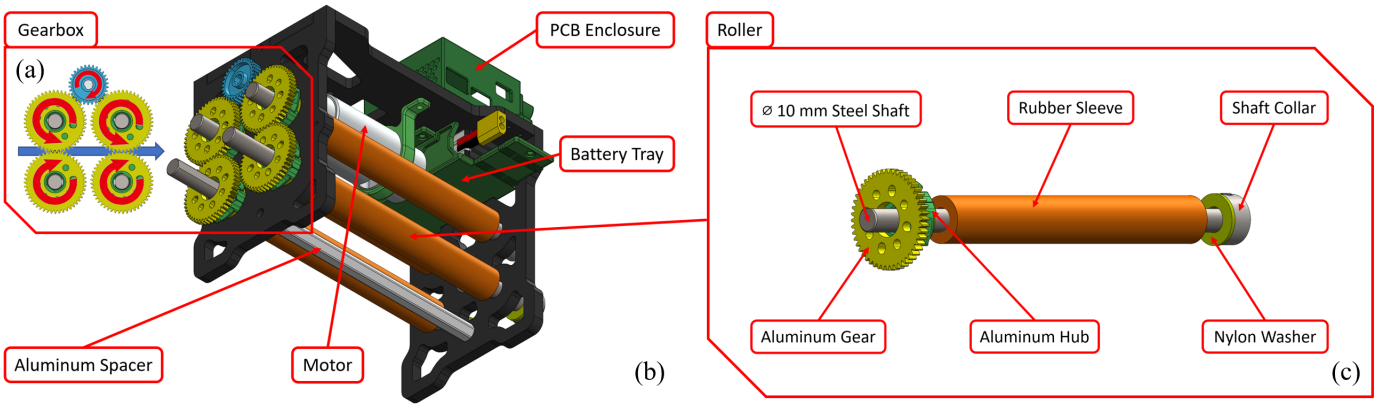

图4. 主动单元及其子组件的建造与运行。a）变速箱组件（已移除变速箱盖）及其运动，说明每个齿轮如何被驱动以产生管的直线运动。b）主动滚轮单元的结构，突出显示其各个部件。c）滚轮轴结构的详细视图。

滚轮轴孔同心且齿轮啮合精准；聚甲醛（POM）的自润滑特性还可进一步减少摩擦，并免去使用滚珠轴承的需要。底部的铝制垫片可确保平行对齐并提高刚度。

如图4c所示，滚轮轴由四根精密加工的10mm碳钢轴（McMaster8632T38）组成，外包乳胶橡胶套（McMaster 5234k46），以提高与管的牵引力。铝制夹紧轮毂（ServoCity 1301-0016-0010）用于将铝制齿轮（ServoCity 2302-0014-0048）安装到钢轴上。如图4a所示，这些齿轮依次啮合，使滚轮旋转并产生直线拉动运动，从而驱动管穿过该单元。

图2所示的导向臂通过齿轮机构耦合运动，使管弯曲时桁架各顶点处的角度保持平分。导向臂长度略有不同，因此组件在收纳时可以紧凑折叠。

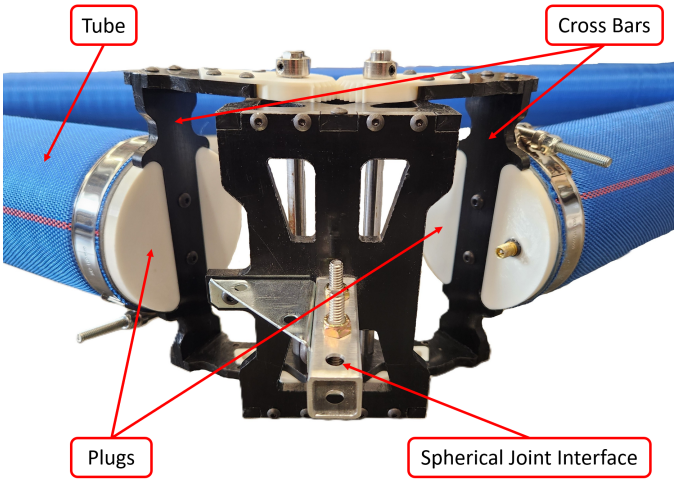

图5. 被动滚轮单元，展示了管两端之间的连接、塞头、用于将管固定到被动单元上的横杆，以及用于连接球形关节的界面。

被动滚轮单元是主动单元的简化版本，其主要功能是连接管的两端，如图5所示，从而使每个三角形成为一个连续子结构。该连接通过将管密封在用螺栓固定于横杆上的塞头周围来形成，横杆直接连接到被动滚轮臂。

表I 当前设计与 [22]中的设计在滚轮单元和三角形质量方面的比较

系统	初始设计 [22]	最终设计	减重
主动单元	2.83 千克	1.98 千克	31%
被动单元	1.6 千克	1.0 千克	38%
三角形	7.26 千克	4.96 千克	32%

被动滚轮单元由与主动单元相同的子组件组成，只是进行了简化，因为被动单元不需要电机、变速箱或电子设备。此外，由于管不会穿过被动单元，因此仅使用两个不带橡胶套的轴来安装导向臂。

最新的滚轮单元设计采用了更轻的组件，并运用拓扑优化，相较于 [22],实现了显著的减重，如表I所示。这些改进使主动和被动滚轮单元的质量分别减轻了31%和38%。

2) 管材结构：机器人的主要结构部件是充气管，必须保持足够的内部压力，以抵抗施加载荷下的屈曲、弯曲和扭转。充气管穿过滚轮后，会形成边长和角度各异的三角形，具体取决于主动单元的位置。

我们选用的管材设计是一种现成的商用排水软管，外层采用尼龙以确保结构完整性，内衬则采用气密聚氨酯。所用管件长3.65米、直径100毫米、壁厚1.6毫米。管端用定制堵头密封，再用两个螺栓将其连接到被动滚轮的横杆上，如图5所示。

这些定制堵头采用增韧聚乳酸，通过增材制造制成。打印完成后，使用 Diamant 的 Dichtol 对塞头进行密封，以确保气密性。定制堵头分为两种：一种配有施拉德

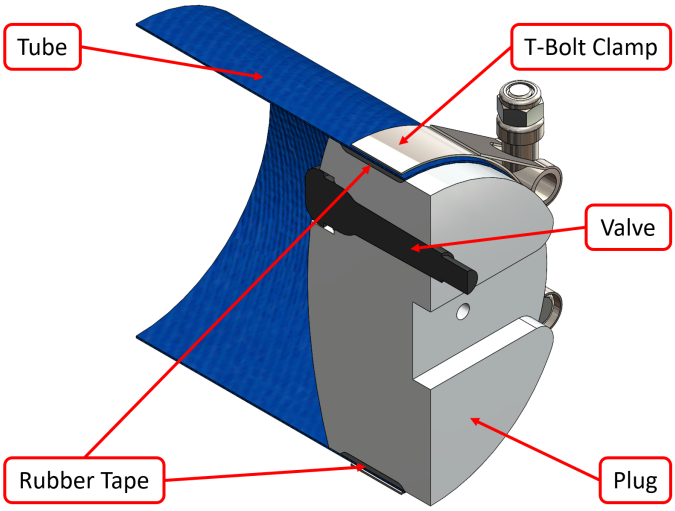

图 6. 沿管中心的剖面图，展示了使用 T 型螺栓夹和橡胶带将管压紧在塞子上所形成的密封。

阀门以便充气，另一种则没有其他附加功能。

为在塞子与管之间形成气密密封，沿塞子的圆周缠绕一条橡胶密封带。随后将 T 型螺栓夹紧固在管上，使管压紧橡胶带。如图 6 所示，这一组件形成气密密封，使管能够保持内部压力。

3) 球形关节：球形关节是连接三角形的连接点，使机器人能够在每个顶点处自由运动，并在改变形状时实现多种构型。对于先前在 [22], 中介绍的单个八面体，在一个角处相交的三角形最多为 2 个。在这种情况下，带轴向旋转的传统关节（由枢转运动与相连轴绕其纵轴独立旋转相结合而成）可提供三个旋转自由度：偏航、俯仰和横滚。然而，在单个顶点需要连接两个以上构件的构型中，例如堆叠八面体，带轴向旋转的铰链关节就不再适用，因为它一次只能连接两个三角形。为解决这一局限，我们开发了一种新型模块化球形关节，其概念和运动学行为与 [24] 中的关节相似。尽管它能实现相同的运动，但其机械结构有所不同，因此可使多个构件在共享一个虚拟旋转中心的情况下连接到单个顶点，同时保持所需的运动范围。

保持虚拟旋转中心是关键的设计准则。如果不保持这种对齐，面板之间不同的旋转中心会引入不必要的自由度，从而导致不稳定性、振动和不可预测的运动。因此，为确保运动一致，图7a所示的臂部设计由四块刚性楔形面板组成，它们通过销接关节串联连接，边缘间隔为 20°，并朝向该虚拟中心。远端连接板通过叉销与滚轮连接，如图7b所示，便于组装和拆卸。这一特性支持机器人的模块化，使穿戴着笨重手套的宇航员能够根据需要快速将三角形重新配置成各种结构。近端连接板将关节臂固定在一个中央球形节点上，该节点连接所有相交的臂，并确保面板运动过程中虚拟旋转中心始终位于球体的几何中心，如图7c和7d所示。

虽然该关节为机器人桁架提供了足够的运动能力，但仍需进一步探究改变面板数量、角度和材料对关节运动范围及载荷特性的影响，以了解这种新型关节的潜力。

4) 电子设备与软件：每个主动滚轮单元都配有一块定制印刷电路板（PCB）。该印刷电路板采用 Arduino Nano、半桥电机驱动器、2.4 GHz 无线电模块、3 节 1300 mAh 锂离子聚合物电池，以及一台配有增量式编码器的 60 RPM 行星直流电机。每块印刷电路板均安装在底盘顶板上对应的主动滚轮单元上。

我们通过向各个主动滚轮单元发送速度指令来控制机器人。这些速度指令通过无线电，经串行连接传送至各主动单元，并由 PID 速度控制器执行。或者，控制器也可以接收目标管长，从而将各单元定位到指定位置。

B. 建模

1) 机器人定义：我们用三个变量及其相互关系来描述机器人的运动学：节点位置、边长以及滚轮沿管件的位置。该机器人表示为一个图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$，其中 $\mathcal{V}$ 表示节点集合，$\mathcal{E}$ 表示边集合。边具有方向性，每三条有向边构成一个环，对应于机器人中的一根实体管（即前三条边定义第一个三角形，接下来的三条定义第二个三角形，以此类推）。

节点位置收集在向量 $x \triangleq [p_1^\intercal, p_2^\intercal, \ldots, p_n^\intercal]$ 中，其中 $p_i \in \mathbb{R}^3$ 表示节点 i 的位置。边长向量 L 定义如下：

$$L_k = \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|, \quad \forall k \in \mathcal{E}, \{i,j\}_k \tag{1}$$

节点速度与边长向量变化率之间的关系在 [22] 中给出，如下：

$$\dot{L} = R(x)\dot{x} \tag{2}$$

其中 $R(x)$ 为缩放刚度矩阵。

机器人中每个实体三角形的角上都装有一个滚轮单元。我们将每个滚轮单元沿管的位置向量记为 d_{all}。滚轮单元位置与边长之间的关系如下：

$$\dot{L} = B_{all}^T \dot{d}_{all} \tag{3}$$

其中，矩阵 B_{full} 是图的有向关联矩阵。在实际应用中，三个滚轮单元之一是连接管两端的被动单元，因此无法沿管移动（$d_i = 0$）。因此，我们删除 d_{all} 中对应被动滚轮单元的条目，以及 B_{full} 中对应的列，得到以下关系：

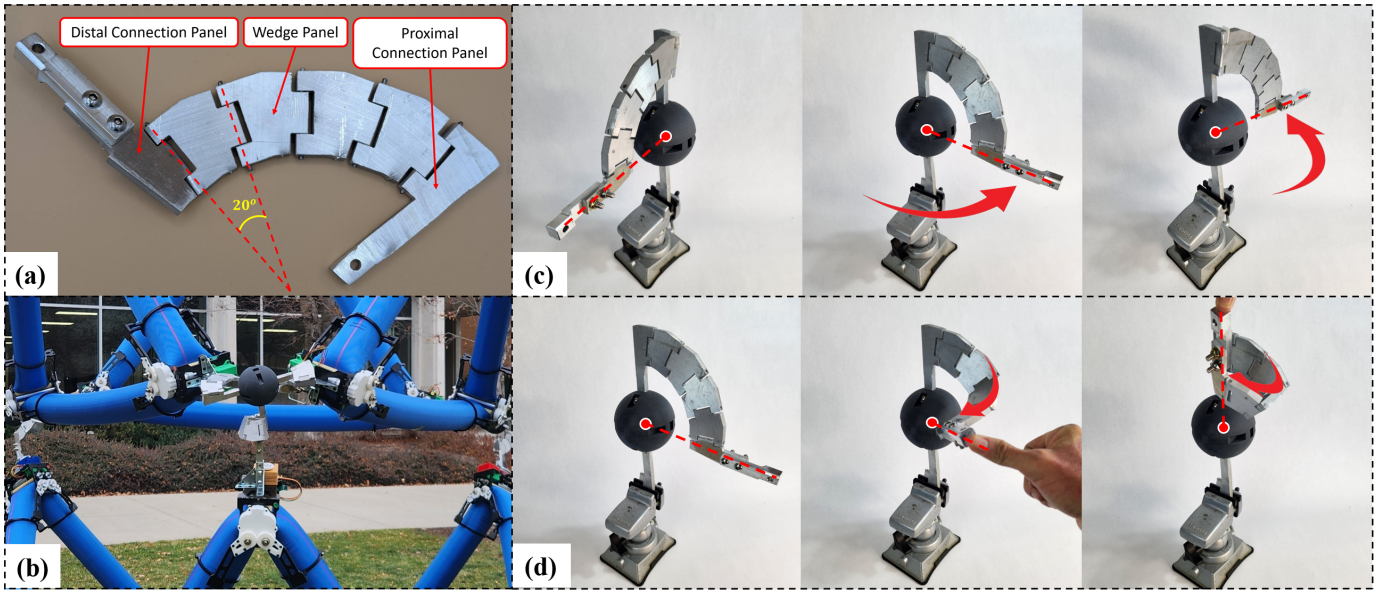

图 7. 球形关节的建造、连接与运动。(a) 机械臂组件。(b) 一个球形关节连接三个三角形。(c) 球形关节的扫掠运动，其中红色圆点（带白色边框）标示虚拟中心，红色虚线标示远端面板的中心轴。(d) 球形关节的卷曲运动。

$$\dot{L} = B_{active}^{T} \dot{d}_{active} \tag{4}$$

2）逆运动学：现在，我们推导用于控制机器人的逆运动学。该过程允许在笛卡尔空间中指定期望运动，并计算实现该运动所需的主动单元速度。这一公式基于 [25], ，其中采用了类似的方法来描述各种等周机器人的工作空间。

在我们的情形中，一个节点被约束为遵循指定速度，与地面接触的节点被约束为保持静止，每个三角形的周长则被约束为保持不变。其余节点的速度通过对所有节点的笛卡尔速度向量 $\dot{x}$ 求解以下带线性约束的二次规划得到。

$$\begin{aligned} \min_{\dot{x}} \quad & \|R(x)\dot{x}\|^2 \\ \text{s.t.} \quad & A_{\text{move}}\dot{x} = b_{\text{move}}, \quad \text{(move)} \\ & A_{\text{fixed}}\dot{x} = 0, \quad \text{(fixed)} \\ & PR(x)\dot{x} = 0 \quad \text{(perimeter)} \end{aligned} \tag{5}$$

第一个“移动”约束对目标节点施加指定的笛卡尔速度，使得 $\dot{p}_{\text{move}} = b_{\text{move}}$。矩阵$A_{\text{move}} \in \{0,1\}^{3\times 3n}$ 的每行包含一个非零元素，其值为 1，用于选取指定节点的三个笛卡尔速度分量。

第二个“固定”约束要求一部分节点保持静止。令 $\mathcal{F} = \{i_1, \ldots, i_m\} \subset \{1, \ldots, n\}$表示固定节点的索引。定义选择矩阵 $S \in \{0,1\}^{m\times n}$ ，其第 k行是标准基向量 $e_{i_k}^{\top}$。该约束可表示为：

$$A_{\text{fixed}}\dot{x} = 0, \qquad A_{\text{fixed}} \triangleq S \otimes I_3. \tag{6}$$

第三个约束要求机器人中的每个实体三角形周长保持不变。令 $P = I_{n_{\text{triangles}}} \otimes [1 \quad 1 \quad 1]$，其中 $n_{\text{triangles}}$ 是三角形的数量。由于 $R(x)\dot{x}$ 给出边长变化率向量，因此周长约束可表示为：

$$P\dot{L} = PR(x)\dot{x} = 0. \tag{7}$$

这确保每个三角形的三条边长变化率之和为零，从而在运动过程中保持等周性质。

随后，利用得到的节点速度计算所需的主动单元运动。通过节点到滚轮的映射矩阵 B，可根据笛卡尔节点速度求得这些致动器速度。由于 $B^{\top}$ 通常是非方阵，因此采用摩尔–彭若斯伪逆，

$$\dot{d} = B_{\text{active}}^{\dagger\top}\dot{x}. \tag{8}$$

伪逆公式隐式地编码了哪些滚轮处于主动状态。随后，将得到的滚轮位移或速度指令发送给机器人执行。

3) 积分： 将期望运动离散为增量时间步。在每个时间步 k，求解一个约束优化问题，以获得笛卡尔速度 $\dot{x}_k$，然后对其积分以更新桁架构型，

$$x_{k+1} = x_k + \Delta t\, \dot{x}_k. \tag{9}$$

通过这一过程，可以提取最终构型 x_{final} 或完整的速度序列 $\{\dot{x}_k\}$ 。

III. 结果

本节展示实验结果，以证明充气桁架机器人的功能能力和运动行为。结果量化了系统级性能，包括功耗、组装便捷性和储存效率，并通过实验验证了下蹲与伸展等关键动作，以及

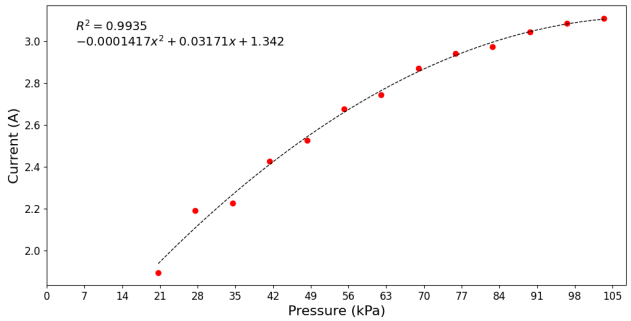

图 8. 电机以不同压力沿管件移动时的驱动电流。图中显示了二阶多项式拟合。



图 9. 模块重新定向。(a) 被动滚轮安装在地面上。(b) 扶住结构，同时旋转三角形。(c) 被动滚轮安装在顶部。

扭转、顶平面操作和运动。这些结果共同突显了该机器人的模块化组装、储存能力，以及通过协调的几何重构实现多样化、与任务相关运动的能力。

A. 功能能力

1) 主动滚轮单元的强度和效率：为评估滚轮单元的耐久性，我们将一个主动单元安装在一根加压至 221 千帕的管件上进行测试，该压力是系统工作压力 76 千帕的 2.9 倍。管件在此高压下保持了两小时，期间滚轮单元一直静止不动。测试期间及结束后，我们密切观察该单元是否出现明显的弹性变形或蠕变迹象；未发现此类情况。

电机驱动滚轮移动时所消耗的电流与管件内的压力直接相关。随着管内压力升高，管件会以更大的力将滚轮推开，从而增加滚轮与聚甲醛底盘之间的摩擦。摩擦增大后，电机需要输出更大的扭矩来驱动机构，导致电池的电流消耗增加。图 8 展示了主动单元在一根弯曲角度为 $60°$ 、压力在 21 至 103 千帕之间且每次递增 7 千帕的单个八面体基管上横滚时的电机电流。在 76 千帕的工作压力下，电机的电流约为 2.94 安培。

假设无线电模块的平均工作电流为 11.3 mA，电机的平均工作电流为 2.94 A，则一块 1300 mAh 的电池可支持约 26.4 分钟的连续运行。实际上，主动滚轮仅以短促的脉冲（10–15 秒）运行，以重新构型机器人，因此系统的运行时间显著长于连续运行估算值。

2) 模块化：所有球形关节臂和三角形单元均配备标准化的叉耳销连接，因此结构中的任意位置都可以连接任意三角形。除了能够快速组装和拆卸外，这种模块化设计还有助于高效进行现场维修。例如，如图 9 所示，可通过重新调整相应三角形的朝向来适应发生故障的滚轮模块。也可以采用相同的方法，用功能正常的三角形完全替换受损的三角形。这一能力提升了系统可靠性，并支持针对收纳、展开或技术故障恢复进行快速重构。

3) 收纳与展开比：充气式机器人系统的一项主要优势是能够以紧凑构型收纳，随后展开至大得多的工作体积。这一特性对月球有效载荷运输尤为有利，因为可用的发射容积受到严格限制。因此，该设计优先考虑紧凑收纳性，以提高运输效率并最大限度地提升收纳与展开体积比。

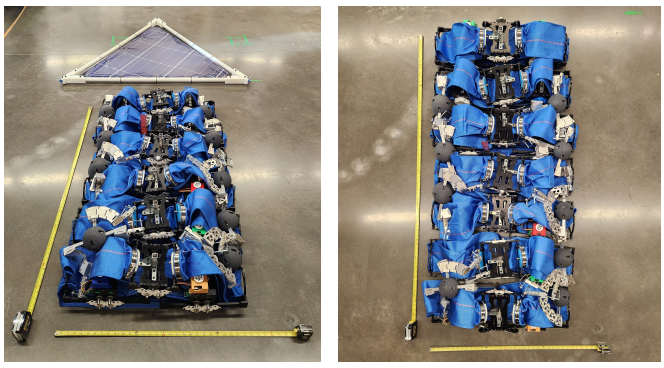

图10. 收纳构型。(a) 收纳后的太阳能阵列构型（6 个三角形加太阳能板）。(b) 收纳后的运动构型（7 个三角形）。

每个三角形测得的收纳体积为 0.043 m^3，占地面积为 0.15 m^2, ；拆卸后的太阳能板（三角形彼此未连接）收纳体积为 0.038 m^3 ，占地面积为 0.87 m^2。如图 10a 所示，太阳能阵列构型的总收纳体积可控制在 0.30 m^3, ，同时占地面积与太阳能板相当，因为三角形可以堆叠在太阳能板上。对于支持运动的构型，机器人可收纳在体积为 0.301m^3 、占地面积为 1.05 m^2, 的空间内，如图 10b 所示。

太阳能阵列和运动构型的展开体积均通过将结构建模为边长为 1.8 m 的两个正八面体进行估算，该边长等于三角形边长加上滚轮单元至球形关节中心距离的两倍。由此得出展开体积为 5.5 m^3, , 收纳体积与展开体积之比约为 1:18.3。目前，展开这两种构型需要

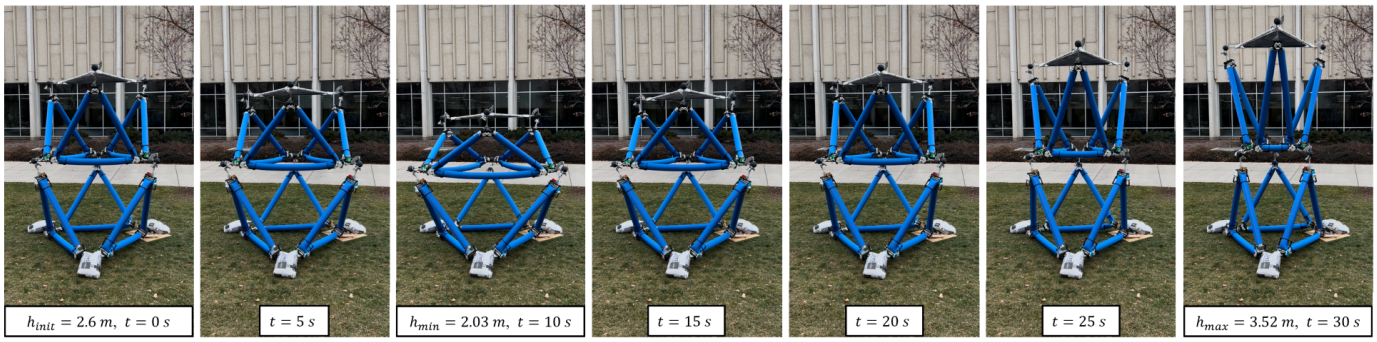

图 11. 固定于地面的桁架机器人下蹲与伸展运动，每隔 5 秒标注时间和高度。为避免倾斜，机器人固定在地面上。

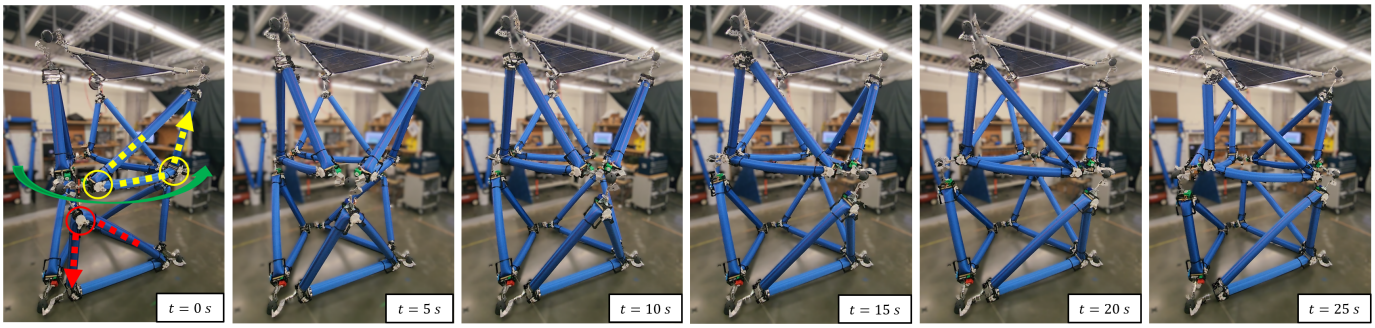

图 12. 桁架机器人的扭转运动，时间戳间隔为 5 秒，展示了中间平面内每个节点逆时针旋转 120° 。箭头指示被圈出的主动单元拉动管的方向。

三名人员，这促使未来的工作致力于实现自主展开，以减轻宇航员的工作负担并提高月球任务的运行效率。

B. 太阳能阵列构型

我们首先展示太阳能阵列构型的结果。该构型由两个堆叠的八面体单元组成，其中顶部三角形被替换为代表太阳能阵列的刚性面板。这个顶面可以代表太阳能阵列、科学仪器或通信设备，这些设备需要对准目标，或在不同位置和方向之间移动。此机器人构型包含 12 个主动滚轮模块，属于 6 个充气三角形。我们对该构型可能实现的运动进行了表征。

底部八面体中的三角形加压至 76 千帕，以提高结构强度；而底部八面体中的三角形加压至 41 千帕，以降低电机的扭矩需求。在这些实验中，我们用沙袋约束底部的三个节点，使其相对于地面固定。

1) 下蹲与伸展：通过改变上方三个三角形各自底边的长度，机器人可以下蹲或向上伸展，如图 11 所示。伸展过程中，三角形由等边三角形变为锐角等腰三角形；下蹲过程中，则由等边三角形变为钝角等腰三角形。在地面固定的太阳能阵列构型中，与地面接触的关节被限制为不能向任何方向平移，机器人可达到的最小下蹲高度为 2.03 m，最大伸展高度为 3.52 m，对应的垂直运动范围约为 1.5 m。伸展受到各三角形底边长度的限制：一旦构成底边的两个滚轮单元相互接触，底边便无法进一步缩短。下蹲则受到三角形底边允许延长的最大长度限制，超过该长度就会违反三角不等式约束。如果允许下方关节在地面上滑动，底部八面体也能对垂直运动范围有所贡献。仿真表明，机器人可达到的最小高度为 1.22 m，最大高度为 4.20 m，垂直运动范围总计约为 3.0 m。

2) 扭转：桁架机器人可以使顶部和底部部分一起扭转，也可以使它们各自独立扭转。在图 12 中，顶部三角形中的管件移动，使每个三角形的右侧边长增加、左侧边长缩短，同时保持底边长度不变。底部三角形则以相反方向遵循相同的模式，但仅有一个主动单元参与驱动。这样，任一八面体都可以独立地顺时针或逆时针扭转。由于这两种运动方向相反，在整个运动过程中，桁架的顶平面不会旋转，而中间平面会逆时针旋转 120° 。可以调整此驱动模式，使两个八面体朝同一方向扭转，或使其中一个保持固定而另一个扭转，从而能够控制结构的顶部或中间平面旋转。可实现的扭转运动范围受限于三角形边长在违反三角不等式约束之前允许的变化

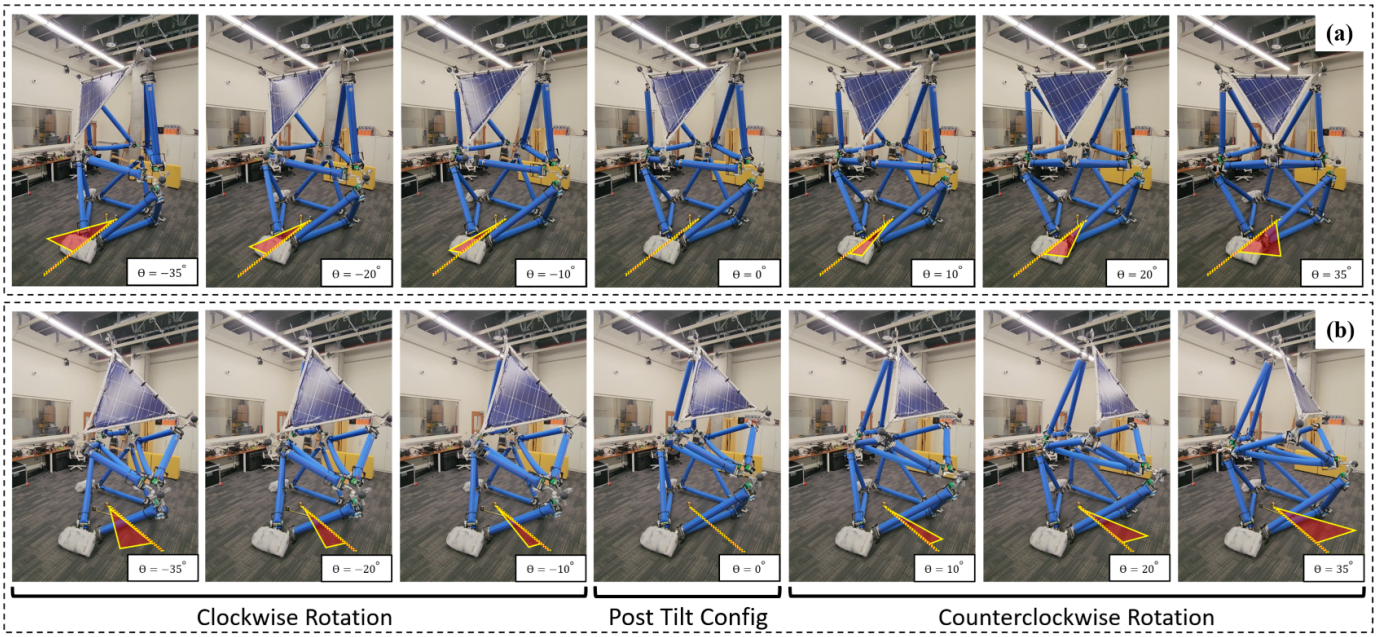

图 13. 桁架机器人的顶平面在 a) 关节或 b) 边上进行扫掠运动。倾斜后，通过调整底部八面体中的三角形，顶平面从 0° 顺时针扫掠至 +35°，并从 0° 逆时针扫掠至 −35°。

违反三角不等式约束之前的长度。

3) 顶平面的倾斜与扫掠： 桁架机器人可以倾斜并扫掠其顶平面，以调整其位置和方向。倾斜可以围绕关节或边进行。如图 14a 所示，围绕关节倾斜是通过伸展与倾斜关节相对的两个三角形，同时使与该关节相连的三角形下蹲来实现的，相对于地面可达到 65° 的最大倾斜角。如图 14b 所示，围绕边倾斜是通过伸展与该边相对的三角形，同时使与倾斜边相连的两个三角形下蹲来实现的，可达到 62°的最大倾斜角。在这两种倾斜模式下，都会调整底部三角形，使质心向结构中心移动，从而减小倾斜关节或边正下方三角形所承受的载荷。

扫掠运动通过按照上一节所述的模式扭转底部三个三角形来实现。扫掠可实现最高达 35° 的旋转，方向为顺时针或逆时针；该旋转角度通过太阳能板法线在地面上的投影之间的夹角来测量。由于 IV-A 节所讨论的失效机制，最大扫掠角度限制为 35°。因此，尽管扫掠范围仅限于 ±35°，机器人仍可将其顶平面倾斜至三个上部关节或边中的任意一个；由于顶平面为固定的等边三角形，这些位置之间的间隔为 60°。如图 13a 所示，机器人能够绕关节倾斜并扫掠；如图 13b 所示，也能够绕边倾斜并扫掠。每次倾斜和扫掠均可实现 70° 的扫掠角度，因此机器人的有效旋转覆盖范围达到360°。

C. 运动

该运动构型由七个三角形组成，形成两个通过共用中心三角形连接的对称八面体。这种对称性使该结构更适合类步行运动。

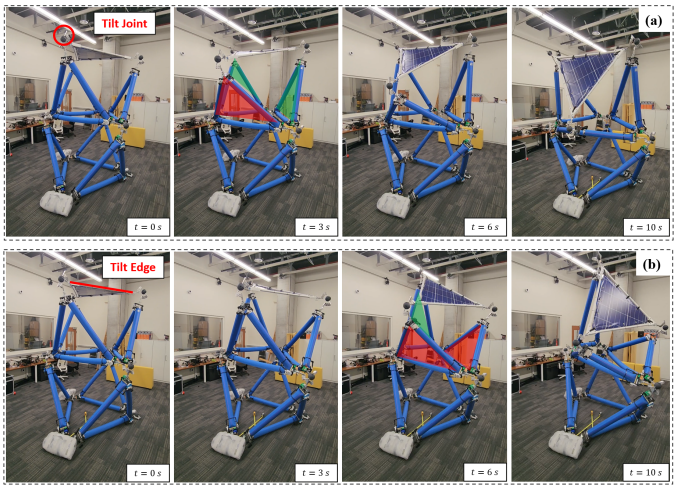

图 14. a) 桁架机器人的顶平面绕关节倾斜。b) 桁架机器人的顶平面绕边倾斜。通过选择性地下蹲（红色）和伸展（绿色）顶部三角形来实现倾斜。

前进运动通过图15所示的指令序列实现：右腿向前迈步、左腿向前迈步、后部中心节点向前滑动，然后复位。这些运动使用II-B2中详述的逆运动学进行计算。为使侧足前进，顶部中心节点向一侧横向移动，从而将质心转移到支撑节点上方。

移动质心可使对侧节点被抬起、向前平移并重新放回地面，如图16所示，从而使该脚有效前进0.61 m。随后将顶部中心节点移至相反一侧，并对



图15. 桁架机器人在两个运动循环中的向前运动序列。初始参考位置由最前方球形关节处的黄线标示。该步态包括先迈出右脚，随后迈出左脚，然后将后脚向前迈出，最后复位至初始构型。

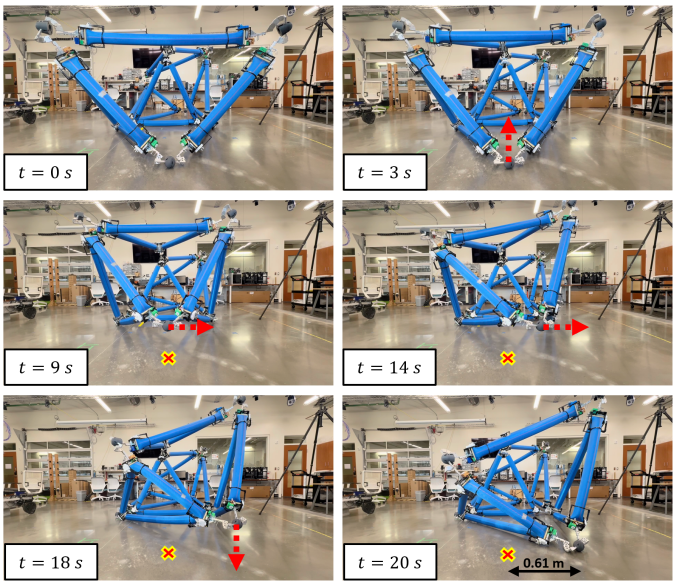

图16. 机器人在0–3秒内将质心移向迈步脚的对侧，从而开始迈步。随后，它将目标节点抬离地面，向前平移，再放回地面。该节点的初始位置由红色 ×标示。

另一侧足重复相同操作。接下来，机器人下侧的后部中心节点向前滑动。机器人随后复位至其初始构型，在该环重复之前将最前方节点向前推进。每个运动环在26 s的持续时间内产生0.46 m的净向前位移。

IV. 讨论

A. 失效模式

第三-B3节所述的扫掠运动被限制在 ±35° ，因为更大的旋转会在球形关节臂与管的界面处产生较高的弯矩。如图17a所示，这些力矩会使主动滚轮单元的臂压入管中，从而产生应力集中。应力集中会损害管件的结构完整性，导致过载三角形屈曲，并最终造成桁架坍塌。

尽管单个三角形失效会导致整个机器人坍塌（如图17b所示），但加压管件的柔性特性可减弱冲击，有助于在地面接触时保护滚轮单元免受损坏。此外，管件具有固有的回弹效应，因此只需极少的力气即可重新竖立该结构，两个人即可完成。在月球任务背景下，这些优势会因低重力而进一步增强

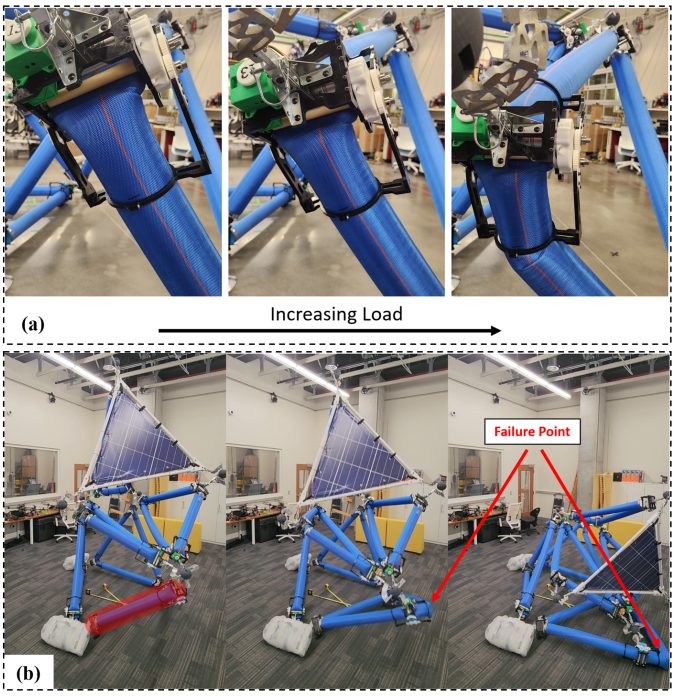

图17. 三角形失效。a) 主动滚轮的导向臂引起的横向载荷下管的屈曲。b) 桁架机器人发生坍塌，过载三角形和失效点以红色突出显示。

在月球上，使宇航员能够在坍塌后相对轻松地重新调整桁架机器人的位置。

V. 结论

本研究展示了充气式等周桁架构型，其设计超越了[22] 中提出的单八面体系统。定制球形关节可使三个三角形连接于单个顶点。所得结构保持了紧凑体积，实现了1:18.3 的收纳体积与展开体积之比。三角形、滚轮单元和关节之间采用标准化接口，便于模块化搭建、重构及更换受损部件，从而提升系统的稳健性和适应性。下蹲、扭转、倾斜与扫掠以及运动等实验演示表明，该系统能够有效控制位置和方向，支持太阳能阵列展开、起重机式行为和地形交互等任务。这些结果表明，充气式等周桁架有望成为适用于未来月球任务的可重构结构。

VI. 致谢

作者感谢 Ivy Running、Ashleigh Cerve、Logan Yang、Jayden Coe、Henry Smith、Brian Bodily、Simon Charles、Bryce Parkinson、Eli Francom、Jared Berger 和 Katie Varela 提供的工程技术帮助。

参考文献

[1] 美国国家航空航天局，“NASA 2022财年战略计划”，NASA，《FY22-SP战略计划》，2023年，查阅日期：2026年1月22日；引用其第14页的“战略目标与目的”。[2] H. Benaroya，“月球栖息地：问题与概念简述”，《REACH》，第7卷，第14–33页，2017年。[3] F. Ruess、J. Schaenzlin 和 H. Benaroya，“ 月球栖息地的结构设计 ”，《航空航天工程学报》，第 19 卷，202，2006 3，133第–页。[4] E. Halbach、D. Inocente、M. Haney、N. Katz 和 G. I. Petrov，“月球村的太阳能电池阵列构型”，载于 ICES，2020年。[5] S. Bandyopadhyay、P. Mcgarey、A. Goel、R. Rafizadeh、M. Delapierre、M. Arya、J. Lazio、P. Goldsmith、N. Chahat、A. Stoica 等，“月球背面月球陨石坑射电望远镜（LCRT）的概念设计”，载于 IEEE 航空航天会议，2021年。[6] G. Cesaretti、E. Dini、X. De Kestelier、V. Colla 和 L. Pambaguian，“利用一种新型 3 450，2014 93，430 d 打印技术制造月壤前哨站建筑构件”，《航天学报》，第 pp. – 卷。[7] B. Nunan、J. Corbin、Z. Arzt、J. Seymour、R. Wainner、C. Hessel、P. Warren 和 M. Stern，“以 LHT-1月壤模拟物为原料制造的百米尺度四面体桁架结构”，载于 AIAA SCITECH，2024年。[8] L. Brennan、R. Siecinski、M. Tremayne、A. Patel、P. Patel、S. Singh、B. Basily 和 H. Benaroya，“月球栖息地结构及展开机构的机械设计”，《航天学报》，第213卷，第102–120页，2023年。[9] P. Gruber、S. H¨auplik、B. Imhof、K. ¨Ozdemir、R. Waclavicek 和 M. A. Perino，“载人月球基地的可展开结构”，《航天学报》，第61卷，第1-6期，第484–495页，2007年。[10] Q. Wang、P. Feng、K. Jansen 和 C. Bao，“新型可刚化充气式月球居住系统：设计概念与材料表征”，《材料与设计》，第246卷，文章编号113289，2024年。[11] A. Austin、B. Sherwood、J. Elliott、A. Colaprete、K. Zacny、P. Metzger、M. Sims、H. Schmitt、S. Magnus、T. Fong 等，“月球表面机器人作业 2”，《航天学报》，第176卷，第424–437页，2020年。[12] P. F. Miaja、F. Navarro-Medina、D. G. Aller、G. Le´on、A. Camanzo、C. M. Suarez、F. G. Alonso、D. Nodar、F. Sauro、M. Bandecchi 等，“Robocrane：为探测机器人提供月球表面与月球洞穴之间电力和通信链路的系统”，《航天学报》，第192卷，第30–46页，2022年。[13] T. S. Vaquero、G. Daddi、R. Thakker、M. Paton、A. Jasour、M. P. Strub、R. M. Swan、R. Royce、M. Gildner、P. Tosi 等，“Eels：具备任务与运动规划能力的冰世界探测自主蛇形机器人”，《科学·机器人学》，第9卷，第88期，2024年。[14] M. Eich、R. Hartanto、S. Kasperski、S. Natarajan 和 J. Wollenberg，“面向未知环境中月球样品采集的协同多机器人任务”，《现场机器人学杂志》，第31卷，第1期，第35–74页，2014年。[15] J.-M. Park、S. Hong 和 H.-S. Shin，“面向月球永久阴影区机器人探测的低照度增强地形测绘试点研究”，《遥感》，第15卷，第13期，2023年。[16] S. A. Chien、G. Visentin 和 C. Basich，“利用空间机器人学探索地球之外”，《科学·机器人学》，第9卷，2024年。[17] M. D. Rhodes 和 J. Mikulas, M. M.，“可展开可控几何桁架梁”，NASA兰利研究中心，美国弗吉尼亚州汉普顿，NASA-TM-86366技术备忘录，1985年6月，登录号85N27934。[18] K. Miura、H. Furuya 和 K. Suzuki，“变几何桁架及其在可展开桁架和空间起重机臂中的应用”，《航天学报》，第12卷，第7-8期，第599–607页，1985年。[19] A. Spinos、D. Carroll、T. Kientz 和 M. Yim，“变拓扑桁架的拓扑重构规划”，《机构与机器人学杂志》，第13卷，第4期，文章编号040902，2021年。[20] G. J. Hamlin 和 A. C. Sanderson，“TETROBOT模块化机器人学：原型与实验”，载于《IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议论文集》（IROS ’96）。日本大阪：IEEE，1996年11月。

[21] S. Curtis、M. Brandt、G. Bowers、G. Brown、C. Cheung 和 C. Cooperider，《用于太空探索的四面体机器人技术》，载于*IEEE* 航空航天会议论文集。IEEE，2007年3月。[22] N. S. Usevitch、Z. M. Hammond、M. Schwager、A. M. Okamura、E. W. Hawkes 和 S. Follmer，《一种无系留等周软体机器人》，《科学·机器人学》，第5卷，第40期，2020年。[23] J. Hancey、F. Lundgreen 和 N. Usevitch，《基于卷尺弹簧的等周机器人设计与控制》，《*IEEE*机器人与自动化快报》，第11卷，第1期，2026年1月。[24] S. Jeong、B. Kim、S. Park、E. Park、A. Spinos、D. Carroll、T. Tsabedze、Y. Weng、T. Seo、M. Yim、F. C. Park 和 J. Kim，《变拓扑桁架：硬件概述、重构规划与运动》，载于*2018*年 第*15*届国际普适机器人会议（*UR*）。美国夏威夷州檀香山：IEEE，2018年，第610–615页。[25] N. Usevitch、I. Weaver 和 J. Usevitch，《等周机器人用可三角分解图》，《*IEEE*机器人与自动化快报》，第10卷，第12期，第12 716–12723页，2025年12月。

VII. 作者简介

Mihai Stanciu 于2024年获得杨百翰大学机械工程理学学士学位。该校位于犹他州普罗沃市。他目前在柔顺机构与机器人实验室攻读机械工程理学硕士学位。其研究兴趣包括软体机器人设计、机械部件优化和制造。

Isaac Weaver 于2024年获得杨百翰大学机械工程理学学士学位。该校位于犹他州普罗沃市。他目前在柔顺机构与机器人实验室攻读机械工程理学硕士学位。其研究兴趣包括软体机器人仿真与建模、柔顺机构设计和产品设计。

Adam Rose 于2024年获得杨百翰大学机械工程理学学士学位。该校位于犹他州普罗沃市。他目前在柔顺机构与机器人实验室攻读机械工程哲学博士学位。其研究兴趣包括柔顺机构设计和下肢假肢设计。

James Wade 目前正在杨百翰大学攻读机械工程理学学士学位。他的研究兴趣包括机器人学与控制。

Kaden Paxton 目前正在杨百翰大学攻读机械工程理学学士学位。他的研究兴趣包括机器人学与机械设计。

Chris Paul 于2024年获得杨百翰大学机械工程理学学士学位。他的研究兴趣包括软体机器人学与印制电路板设计。

Spencer Stowell 于2024年获得杨百翰大学（犹他州普罗沃）机械工程理学学士学位，目前正在柔顺机构与机器人实验室攻读机械工程哲学博士学位。他的研究兴趣包括软体机器人仿真与建模、机器学习，以及下肢假肢的机械优化。

Nathan Usevitch 于2015年获得杨百翰大学机械工程理学学士学位，并于2017年和2020年分别获得斯坦福大学机械工程理学硕士学位和哲学博士学位。他目前是杨百翰大学机械工程系的助理教授。他的研究兴趣包括新型机器人系统的设计、软体机器人学和模块化机器人学。