

编号：

哈尔滨工业大学

大一年度项目立项报告

项目名称：基于折纸设计的探月工程可折叠机械爪

项目负责人：李雪婷 学号：1190302320

联系电话：__ 电子邮箱

院系及专业：智能装备

指导教师：王黎钦 职称：教授

联系电话：__

电子邮箱：__

院系及专业：机电工程学院机械设计系

哈尔滨工业大学基础学部制表

填表日期： 2019 年 11 月 15 日

一、项目团队成员（包括项目负责人、按顺序）

姓名	性别	所在院系	学号	联系电话	本人签字
李雪婷	女	智能装备	1190302320		
王添运	男	智能装备	1190302109		
梁耀朗	男	智能装备	1190302122		

二、指导教师意见

签 名：_____

年 月 日

三、项目专家组意见

批准经费：_____元

组长签名：_____（ 学部盖章 ）

年 月 日

目录

引言.....	1
第 1 章 立项背景.....	1
1.1 项目背景.....	1
1.2 研究目的及意义.....	3
1.3 研究趋势.....	3
1.3.1 剪叉式缩放机构.....	3
1.3.2 移动副和转动副混合的缩放机构.....	5
1.3.3 几种新型的折叠缩放结构.....	6
1.3.4 一种自锁可展开机械臂的折叠机构.....	6
1.3.5 折纸在机械爪、机器人领域的应用.....	7
1.3.6 小结.....	8
第 2 章 项目研究内容和实施方案.....	9
2.1 研究内容.....	9
2.1.1 研究方向.....	9
2.1.2 折纸与机构间的转换.....	9
2.1.3 一种简单的可动折纸机械爪结构.....	10
2.2 项目流程.....	11
2.3 实施方案.....	12
2.3.1 折痕图的设计.....	12
2.3.2 实验检验.....	12

2.3.3 分析与优化.....	12
第 3 章 进度安排.....	12
第 4 章 中期及结题预期目标.....	13
4.1 中期目标.....	13
4.2 结题目标.....	13
第 5 章 经费安排.....	13
第 6 章 参考文献.....	13

引言

根据机电学院大一年度科技创新项目要求，选择登月营地物品抓取机械手爪作为题目。根据官方文件，应当满足以下三点要求：

- (1) 机械爪抓取对象为建设营地使用的小型设备工具及月球表面材料。
- (2) 机械爪能够帮助完成营地建设等任务的机械动作。
- (3) 项目组应查阅有关资料，根据月球表面的特定工作条件提出工作对象，设定机械手爪运动。要求在说明书中给出相关解说。

选择该项目进行研究主要出于以下几点考虑：

1. 我校向来立足航天、服务国防，选择该项目可以与学校的主流研究方向有效对接，进而高效利用学校丰富的技术沉淀与已有经验，以此更好地完成本项目。
 2. 登月营地物品抓取机械手爪是一个较为容易发挥想象力的题目，因为当前并没有运行在舱外的抓取登月营地物品的机械手爪。再者，考虑到此次大赛的重点在于“创新”，选择该项目更易切入大赛主题。
 3. 这一项目要求更多的专业知识作支撑，能更好地契合此次活动“锻炼大一学生技术能力”的目的。
- 经过讨论，最终确定将“探月工程可折叠机械手爪”作为题目进行研究。

一、立项背景

1.1 项目背景

21 世纪，中国开展月球探测，在 2007 年-2018 年的十年间，成功实施了 6 次月球任务，实现了月球环绕，月球软着陆，月面巡视等多项技术突破。月球是人类探测次数最多、探测成果最为丰富的地外天体。再者，月球资源勘探和开发利用是未来发展的热点，目前正处于从科学探索向勘探应用发展的阶段，而月球基地具有较强的月面探测能力和空间探测能力，也可作为月球资源开采、利用的试验站，也可开展试验性生产等，因此，建立月球基地可协助全面、系统地开展月球就位探测和空间探测^[1]。

永久性月球基地的建筑形式可简单归结如下^[2]：

表 1-1 几种月球基地的结构特点^[1]

枕状充气式月球基地	内部由光纤构成，呈絮状排列，外部加载了土被进行防护。它取代了传统的球状膨胀式方法，能使宇航员居住面积最大化，并具有能耐压和伸长的特性，以及良好的吸光性和持久性，现已通过了许多地面复杂环境的测试
承压的薄膜状结构月球基地	由充满结构型的泡沫材料组成，内部材料能相互挤压展开，圆环形地基能适应不同情况的压力环境。其薄膜单元由坚硬、无弯曲、能轴向拉长而不能受压的光纤所构成
装配式的月球基地	采用不同几何学配置的八位元三维空间设计理念，且各位元是捆绑在一起的，既能做砌块又能做月台扩充结构的空间框架单元。基地的形状方案主要有四面体、六面体以及八面体。它是一种可扩展月台的理想结构
混凝土式的月球基地	采用月球的天然资源材料（土被和薄膜型的物质）作为基地的基础材料结构以及防护物，以硫磺取代水作为混凝土材料的粘合物，由机器人采取分层式的建造模式
移动式月球基地	有可移动式的永久性、半永久性月球基地两种形式，可根据任务条件和危险情况进行随处移动，但空间大小受限，进行月壤耕作和制造业也难以实现
熔岩管道式月球基地	位于月表下，比较适合作为“前哨战”。安全和可靠性比较好，可利用光能把土被变成建筑成份，是基地建设的长远发展途径

其中，枕状充气式月球基地已经通过了许多地面复杂环境的测试，暂且假定月球基地最终呈现方式为此种情况，展开下面的讨论。

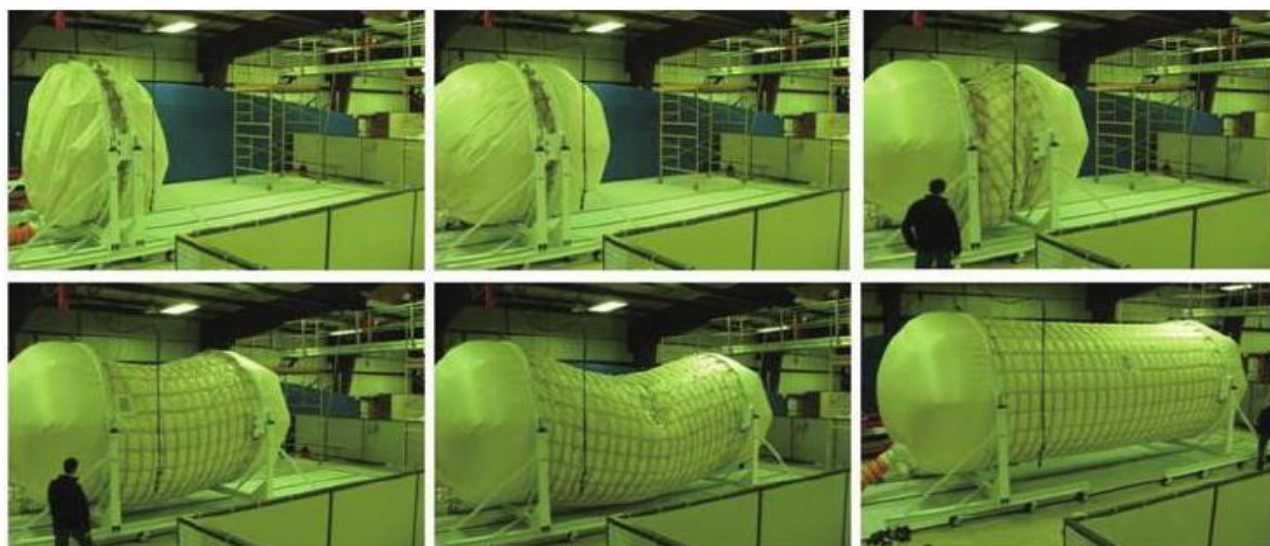


图 1-1 枕状充气式月球基地概念图

经过一段时间的技术积累，此种基地完全可以在新型材料的辅助作用下自行展开成为半永久或永久性基地^[3]。

因此，可以设计一种能够抓取小型实验器具、辅助组装仪器的机械手爪。由于此手爪属于航天所用机构，它应当满足以下几个基本特点：①占用空间小 ②密度较低 ③抗逆性高（耐腐蚀、耐受高/低温 等）。后两点都可以通过选择或者开发各种新型材料来达到预期效果，在此着重满足第一个要求。

1.2 研究目的及意义

由于月球环境十分复杂，在月面进行长期的勘探研究工作需要多种不同的机械爪协助研究人员进行工作，而目前的大部分机械爪均具有功能专一化的特点，不能适应过多的抓取对象，要解决这一问题，可以尝试携带多种机械爪，但这样的做法势必会增大发射的负担，占用巨大的空间，如何能够在尽量节约空间的前提下携带尽可能多的不同功能的机械爪是值得研究的课题。

占用空间小、质量轻、结构可靠是航天用机械结构的普遍特征。随着新型材料的迅速发展，减重问题有望得到一定程度上的解决。在此背景下，使机构结合新型材料进行折叠来减少其所占用的空间将有重要的应用价值。因此，本次研究专注于借助折叠机构的设计减少各种不同功能的探月工程机械爪占用的体积。

很多学者和研究人员已经提出了各种折叠缩放机构，但这些机构主要依靠传统的机械结构进行实现。基于折纸设计的结构在航天领域已经有了应用场景，如太阳能帆板的折叠与展开。折纸机构有众多优点，如折展比大，可适应不同场景，容易进行试验检验等，但当前的折纸机构都是静态的结构，如何能够结合折纸机构与新型材料并使之转化为动态结构值得进行研究。

1.3 研究趋势

考虑到可以折叠或收缩的机构在实际应用中用途广泛，各国学者对不同的折叠缩放机构进行了深入的研究。近年来，随着新型材料与新型动力的研究成果不断涌现，开始有研究人员对与新型材料结合的折叠机构进行研究，与折纸这门古老的东方艺术相结合的工程也成为热门。下面列举并分析国外学者所研究的几种折叠缩放机构及部分应用。

1.3.1 剪叉式缩放机构

在缩放折叠机构的设计中，剪叉式缩放机构是最传统、应用最广泛的一种。例如日常生活中的伸缩门，如图 1-2。

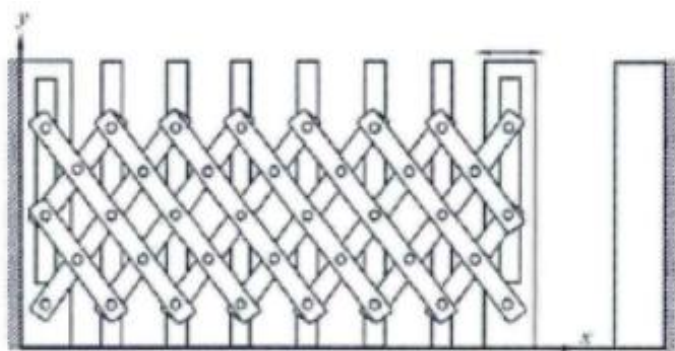


图 1-2 剪叉式缩放机构在伸缩门上的应用

Gantes 和赵景山^[4-5]等人又先后对这种剪叉式单元 (scissor-like element, SLE) 的空间拓展及转角连接方式进行了进一步研究。获得了一系列能够支持构想该种折展机构的理论数据。

Hoberman^[6]的一项专利提出了一种缩放机构，其各边是一个剪叉式机构链，通过特殊铰点的连接，构造出一个空间上的环形缩放机构。基于这个原理，提出了一类多边形或多面体缩放机构。机构可以依据几何条件沿着需要方向延伸，而且其整体自由度为 1，如图 1-3。

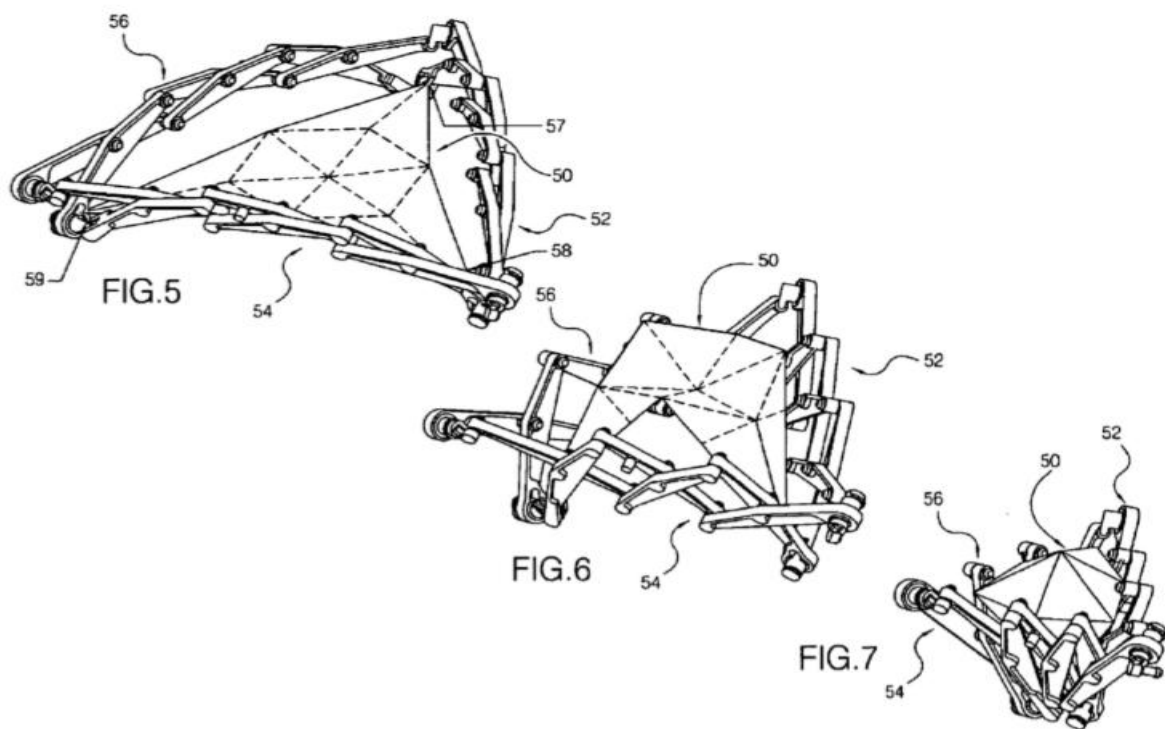


图 1-3 空间环形缩放机构^[7]

G. Kiper 等人^[7-8]设计出与剪叉式单元环形布置不同的中心放射构型，如图 1-4 所示。这种缩放机构由曲柄滑块机构演变而来，通过约束的方式可以将滑块略去得到纯转动副的机构。这种方式能够构成不同样式的多种单自由度缩放机构，而相应的会具有更加丰富的空间缩放机构。

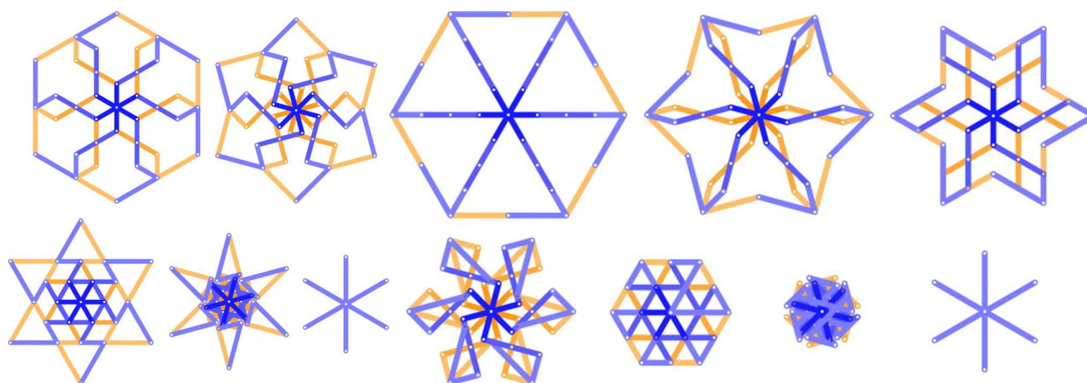


图 1-4 不同样式的单自由度缩放机构变形过程

1.3.2 移动副和转动副混合的缩放机构

转动副和移动副各自具有运动特点，将这两种运动副结合，便得到新的一类缩放折叠机构，如图 1-5。Puthurlogathan^[9]结合了这两种运动副的特点，设计了一种缩放机构，这种机构的缩放比大、灵活度高，结构强度也很高，已经用于帐篷和桅杆，如图 1-6。

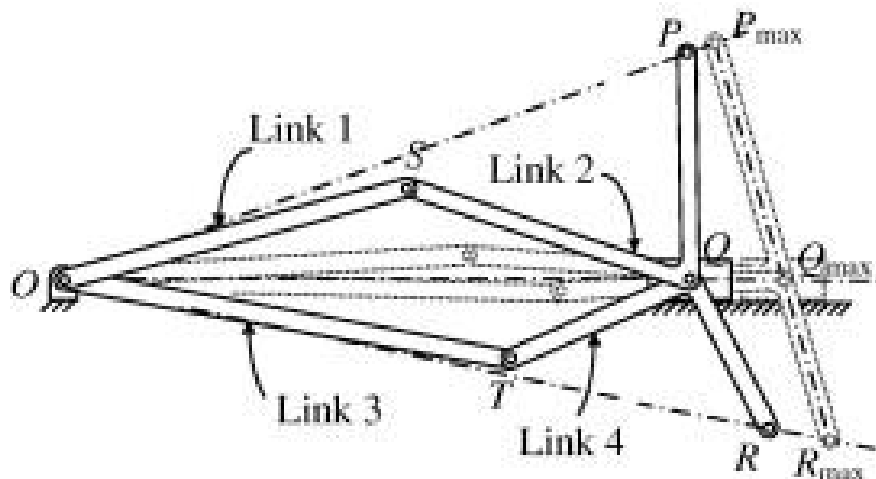


图 1-5 转动副和移动副相结合的缩放机构

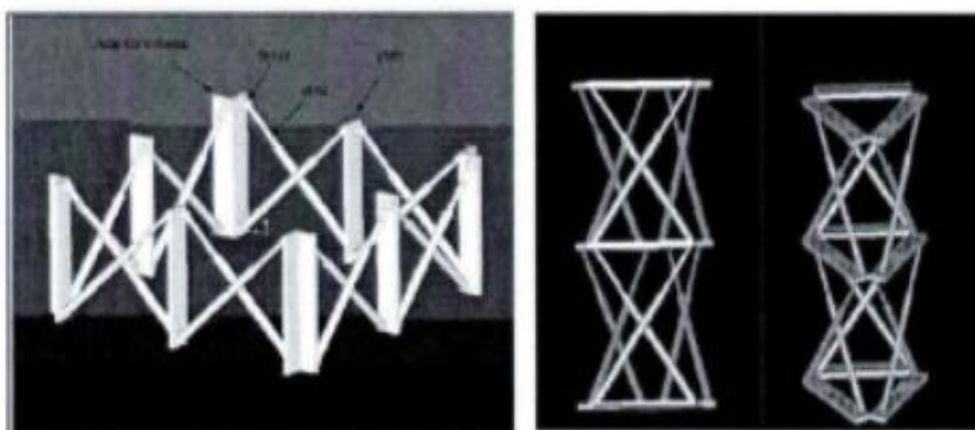


图 1-6 具有缩放能力的帐篷和桅杆

1.3.3 几种新型的折叠缩放机构

Fuller^[10]提出一种绳索张拉机构，用以实现空间大缩放比的折叠缩放。这类缩放机构依靠绳索的张紧力控制展开变形，其生产成本较低而且便于使用。Tibert^[11]对这种机构进行了研究和应用，如图 1-7 所示，特殊材料做成的记忆合金空间缩放机构也在深入研究开发当中，并且这类技术已经在星球探测器上实现应用。这类机构仅需要一个开关控制便可以实现不需要额外能量的变形功能。

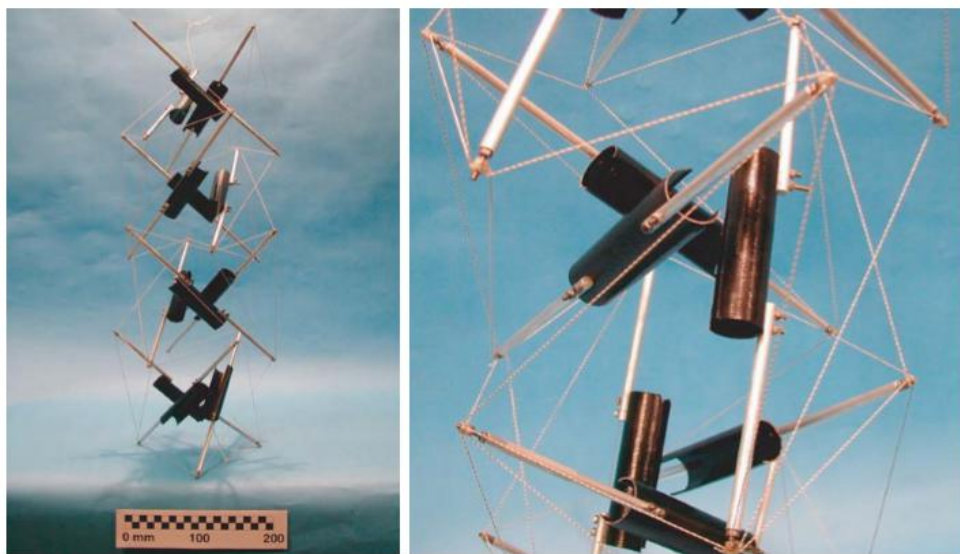


图 1-7 特殊材料制成的缩放机构^[12]

1.3.4 一种自锁可展开机械臂的折叠结构

国立韩国首尔大学的研究者 Suk-Jun Kim, Dae-Young Lee 等 在 Science Robotics 上发表了 An origami-inspired, self-locking robotic arm that can be folded flat 的文章^[12]。文章主要内容是利用折纸结构及磁铁实现伸缩设计的可重复使用的自锁可展开机械臂，如图 1-8。该伸缩臂是由多个碳纤维复合材料矩形套管组成，该装置以电线和马达控制，伸缩形态下的长度为 20cm，伸展形态下的整体长度可达 90cm，机械臂伸展后套管之间会自动锁死。其末端配备机械爪，在伸缩机械臂的助力下能抓紧目标物件。

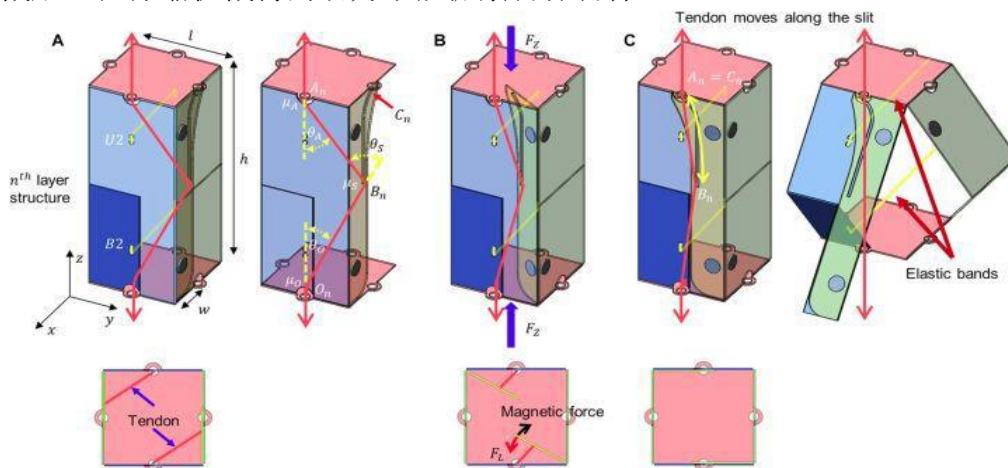
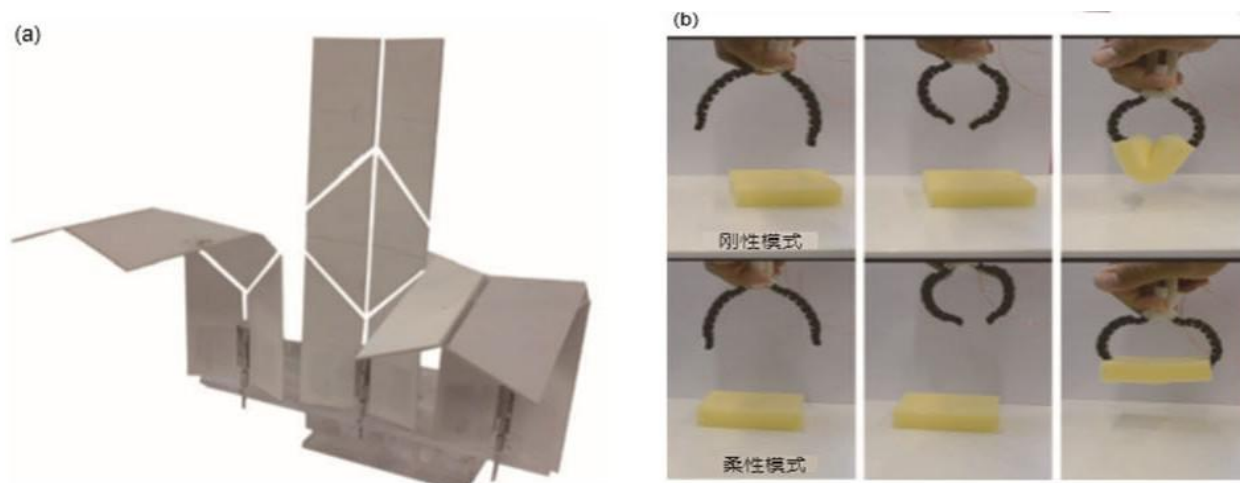


图 1-8 利用折纸结构设计的自锁可展开机械臂原理图

1.3.5 折纸在机械爪/机器人领域的应用

在机械爪领域,以折纸结构为基本骨架,通过金属丝等方式驱动,可实现弯曲、伸缩、抓取等操作,提高机械手的自适应性和抓取的精确性.例如,Paik 团队设计了两种折纸机械手,一种是根据两顶点 Miura 折痕图案设计的三指折纸机械手^[13],如图 1-9(a)。另一种是具有多种抓持构态及可调刚度的丝驱动折纸机械手^[14-16],如图 1-9(b)所示。通过调节刚度,后者可实现柔性模式下小物体的抓取及刚性模式下大物体的抓取,



(a) 基于 Miura 折痕图案的三指折纸机械手^[13];

(b) 具有多抓持构态及可调刚度的折纸机械手^[14]

图 1-9 折纸机械手

目前机器人制造高度专业化、耗时且昂贵,现有的快速成型技术(如 3D 打印)使得复杂几何形状的加工过程更加简单快捷;然而,它们仅限于一种或两种材料,不能无缝集成有源元件.在此背景下,Felton 等人和 Onal 等人提出了一种替代方法^[17-18],称为可打印机器人.他们利用平面制造方法获得集成机电层压板,随后按照折纸的方式将其折叠成三维爬行机器人.该机器人采用五层材料复合而成,通过内嵌在印制电路板(PCB)中的加热元件实现聚苯乙烯(PSPS)收缩,进而实现折纸机器人的自折叠过程,如图 1-10 所示.他们用此方法设计了一系列折纸机器人,如自折叠纸鹤、自折叠灯具及自折叠自主导航机器人等.

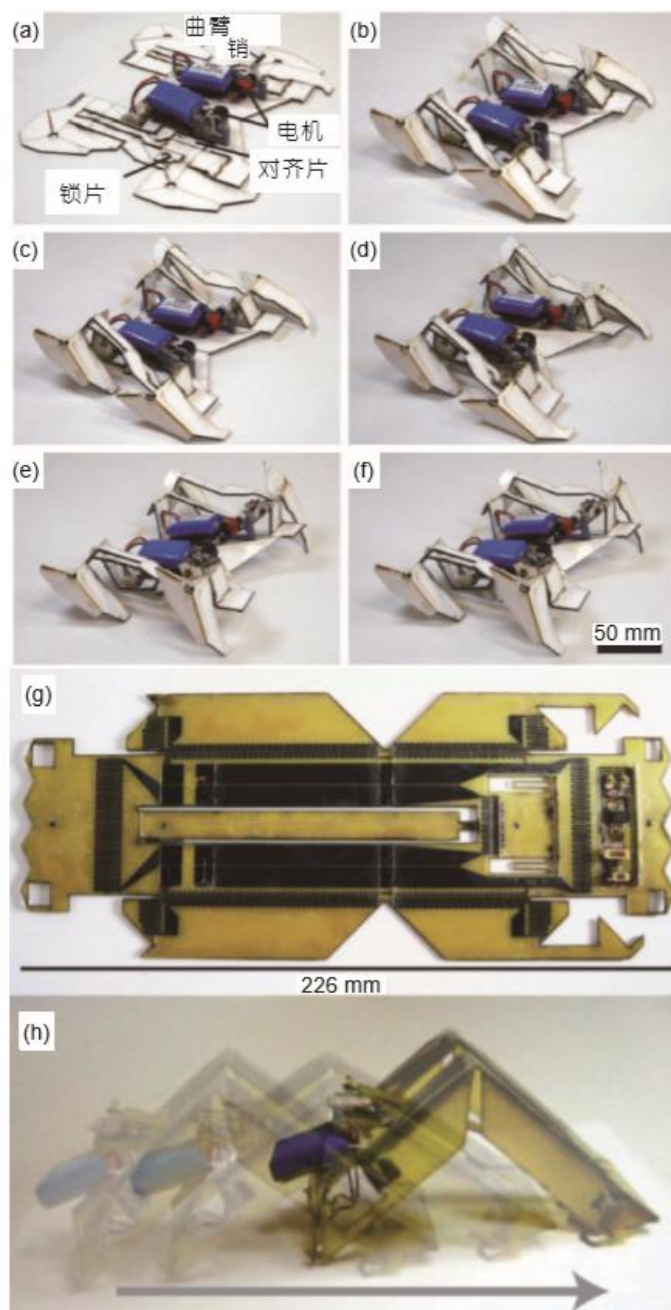


图 1-10 自折叠折纸机器人

1.3.6 小结

对于缩放折叠机构的设计日渐丰富，人们更加希望完善其研究。移动副缩放折叠机构的伸缩比受制于伸缩杆件的伸缩比；多自由度变形能为缩放折叠机构提供更大的变形能力，却会引入更多更复杂的控制；新型材料的使用也将会是缩放折叠机构的一个发展方向；仿生学更会为缩放折叠机构提供更丰富的方案；而对于杆件结构和杆件连接方式同样具有丰富的创造空间。

二、项目研究内容和实现方案

2.1 研究内容

2.1.1 研究方向

近年来，各种新型折展机构不断出现，同时，新型材料的发展给更先进的折展机构提供了技术保障。基于折纸(origami)的折展结构在这样的背景下有了广泛应用的可能，Robert J Lang 等人^[19]已经尝试将折纸与数学相结合，开发出系统的折纸结构设计方法。由此，围绕折纸结构按照“设计折痕图-实验验证-理论分析”的步骤展开设计。

2.1.2 折纸与机构间的转换

折纸可以简单地划分为静态折纸和动态折纸。其中，动态折纸是用于制造机构的最理想状况。本课题讨论动态折纸如何等效转换为机构。

在此引入折痕图(Crease Pattern, CP)的概念。折痕图是将折纸展开后得出的折痕组合成的图像，可以通过对折痕图进行设计进而间接地对折成的最终形状进行设计。

先来看一个简单的动态折纸的例子。如图 2-1，这是一种简单的折纸机构。

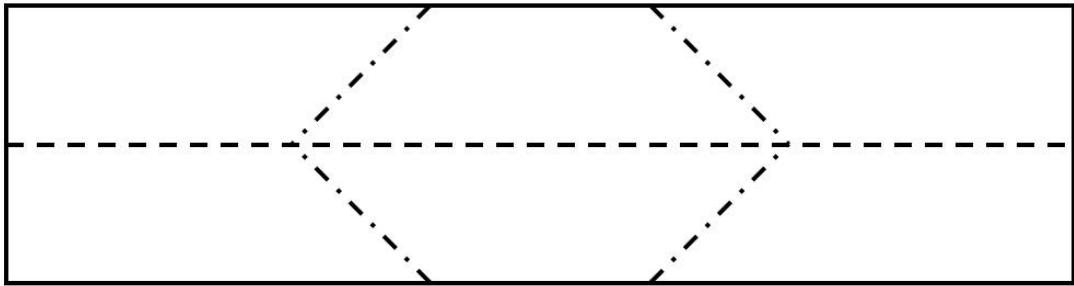


图 2-1 简单折纸机构折痕图

这个机构可以实现简单的由平面向立体的转化，它的两种形态如图 2-2。

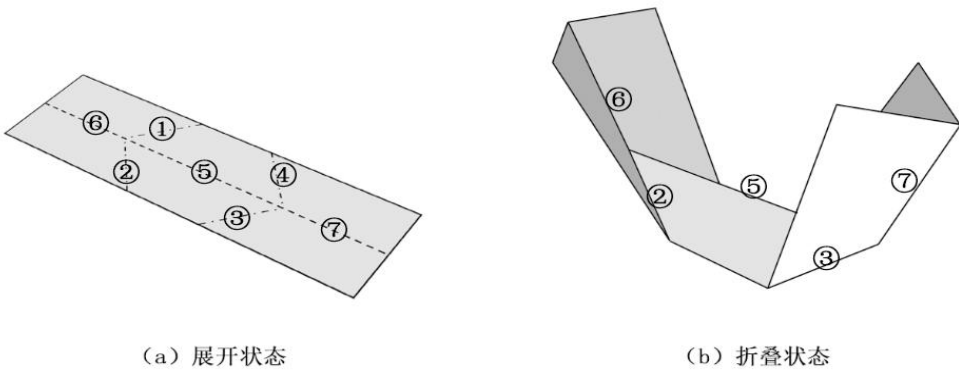


图 2-2 简单折纸机构的两种形态

经过分析，我们发现在折纸的过程中，仅存在两个重要构件：纸板和折痕。在运动时，由于仅有纸面绕折痕转动，原有折纸上的每一个折痕可以等效为一个铰链，每一个纸板可以等效为一个杆件。等效转化过程如图 2-3 所示。

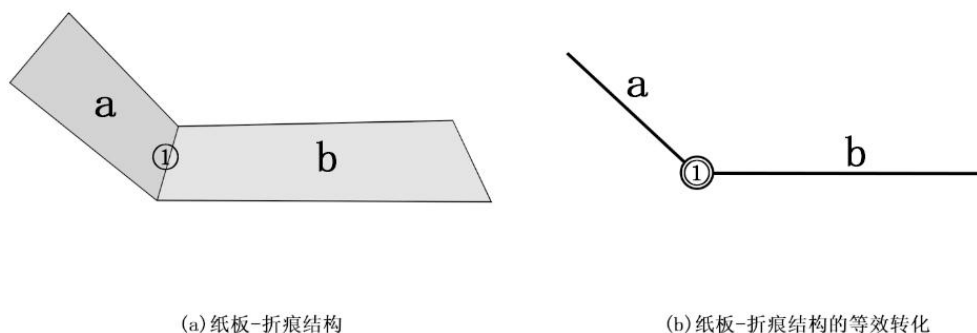


图 2-3 折纸机构的等效转化

经过以上分析，不难看出折纸在机构创新方面有重要意义。通过折纸转化的机构有众多优点：结构功能相对可靠，容易进行实验检验，能满足折叠要求。

2.1.3 一种简单的可动折纸机械爪结构

我们注意到一种简单的方式可以实现机械爪夹持的基本功能，如图 2-4 所示为该种结构的折痕图。

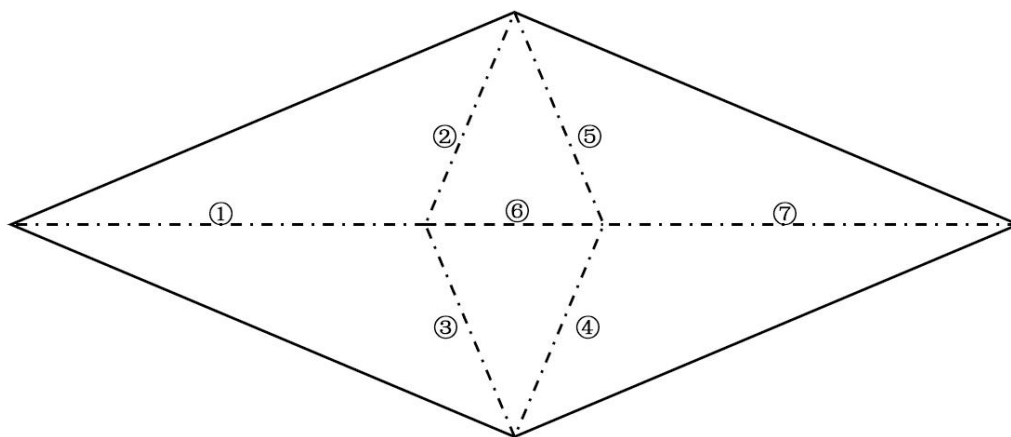


图 2-4 简单的折纸机械爪折痕图

这样的机构可以视作一种二爪的夹持用机械爪，我们按照上文方法将它转化成杆件和铰链组成的机构，如图 2-5 所示。

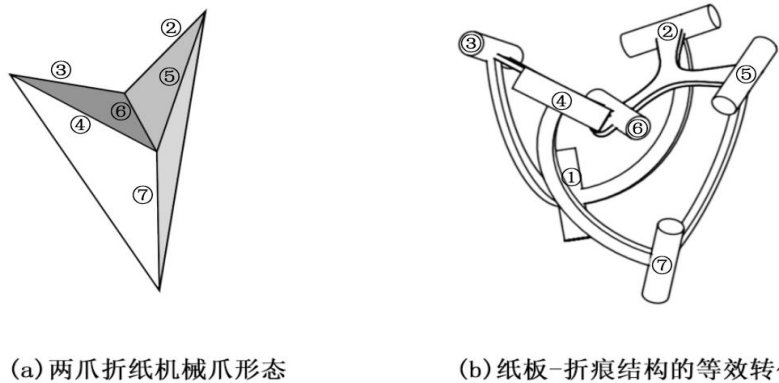


图 2-5 简单折纸机械爪和其等效机构

可以验证这类机构可正常运作，若稍作改进，即可得到一种单自由度驱动的二爪机械手。

2.2 项目流程

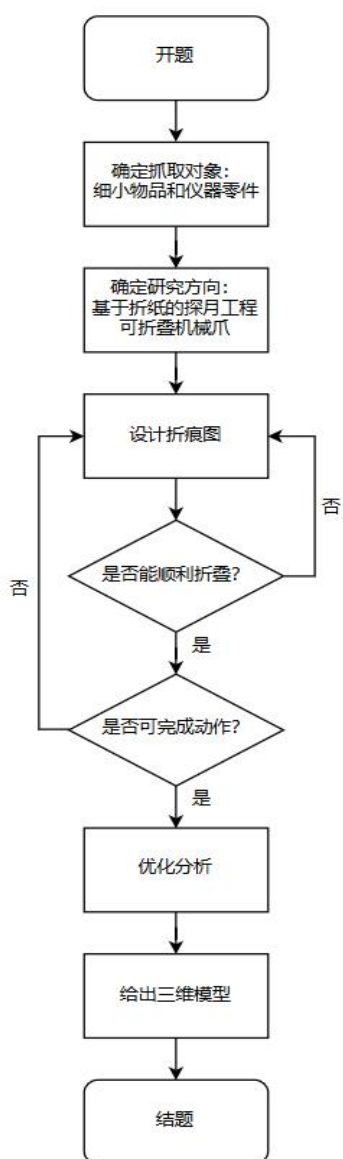


图 2-6 工作流程图

2.3 实现方案

2.3.1 折痕图的设计

由于已经提出了一种简单的可动折叠结构，接下来将对其进行拓展，探索可动多爪应如何实现。现代折纸已经与数学紧密结合，并发展出了“折纸数学”这一学科。借鉴这一思路，我们可以从结果出发，设计好要实现的结构，进而反推出应有的折痕图。

2.3.2 实验检验

设计出大致折痕图后，将进行折叠实验和可动性实验两部分实验。折叠实验即保证机械爪在收缩的过程中不会受到自身阻碍，能够顺利地自动折叠。可动性实验要求该机械爪能够完成夹持物品并转移的基本功能，满足一定的刚度要求，保障工作任务顺利进行。两个实验都能满足要求，则进入优化分析阶段。

2.3.3 分析与优化

假定已经设计出了一种能够执行任务的机械爪，应对其进行结构上的分析和优化。这一部分将利用数学和物理方法对该机械爪进行建模计算，在不改变基本结构的基础上尽可能增大其夹持力，最终得出合适的模型，并将其以三维模型的方式进行呈现。

三、进度安排

（1）2019 年 11 月—2020 年 1 月

调查文献，展开机械臂及末端执行器创新结构的初步设计，体现其折叠功能及轻量化设计，并确认所使用的机构、材料。

（2）2020 年 2 月—2020 年 3 月

绘制出末端执行器的设计图，并结合应用场景进行细节优化，制作出仿真视频，并对项目内容进行初步汇总。

（3）2020 年 3 月—2020 年 6 月

进行对机械爪的最终检验，确保在月球环境下的正常应用，并进行数据整理，准备结题。

四、中期及结题预期目标

4.1 中期目标

- 1、初步掌握 Autodesk Inventor 软件的使用方法，能完成简单三维模型的制作。
- 2、给出几种针对不同抓取目标的可折叠机械爪。
- 3、明确末端执行器的材料性质。
- 4、初步实现对末端执行器及机械臂结构的创新，并绘制出机械爪的草图及设计建模。

4.2 结题目标

- 1、提出并应用至少一种创新的折叠缩放机构及对其进行设计改进的方法。
- 2、保证机械爪在月球上的正常运作，实现预期目标。
- 3、完成最后的细节考察及优化，绘制出机械爪的最终设计图。
- 4、完成简单的数学建模。
- 5、给出完整的三维模型和应力分析。

五、经费安排

申请经费人民币 300 元，作为在两校区间往返的车旅费，以便与导师交流及研讨学习。单次出租车价格约 15 元，共可计 20 次。

六、参考文献

- [1]. 袁勇, 赵晨, 胡震宇. 月球基地建设方案设想[J]. 深空探测学报, 2018, 5(04): 374-381.
- [2]. 邓连印, 郭继峰, 崔乃刚. 月球基地工程研究进展及展望[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(02): 25-30.
- [3]. Lin T D, Senseney J A, Arp L D, Lindbergh C. Concrete lunar base investigation[J]. ASCE Journal of Aerospace Engineering, 1989, 2 (1) .
- [4]. Gantes C, Connor J J, Logcher R D. Simple friction model for scissor pe mobile structures[J] Journal of engineering mechanics, 1993, 119(3): 456-475.
- [5]. ZHAO J S, Chu F L, FENG Z J. The Mechanism Theory and Application of Deployable Structures Based on SLE[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 324-335.

- [6]. HOBERMAN C. Folding Covering Panels for Expanding Structures[P]. United States Patent, US 6,834,465 B2, Dec. 28, 2004.
- [7]. KIPER G SOYLEMEZ E, KISISEL A U O. A Family of Deployable Polygons and Polyhedral[J], Mechanism and Machine Theory, 2008, 627–640.
- [8]. KIPER G SOYLEMEZ E, KISISEL A U O. Polyhedral Linkages Synthesized Using Cardan Motion Along Radial Axes[J]. 12th IFToMM World Congress, Besancon France, June 18–21, 2007.
- [9]. PUTHURLOGANATHAN K. Design of Closed-loop Deployable Structures for Tents and Masts [D]. University of Florida, U. S. A, 2004.
- [10]. FULLER R B. Tensile-integrity Structures[P]. U. S. Patent 3,063,521. 1962–11
- [11]. TIBERT G Deployable Tensegrity Structures for Space Applications[D]. Royal Institute of Technology, Department of Mechanics, Doctoral Thesis, Stockholm, 2002.
- [12]. Robotics; Studies from Seoul National University Add New Findings in the Area of Robotics (An origami-inspired, self-locking robotic arm that can be folded flat) [J]. Journal of Robotics & Machine Learning, 2018.
- [13]Zuliani F, Liu C, Paik J, et al. Minimally actuated transformation of origami machines. IEEE Robot Autom Lett, 2018, 3: 1426 – 1433
- [14] Firouzeh A, Paik J. Grasp mode and compliance control of an underactuated origami gripper using adjustable stiffness joints. IEEE/ASME Trans Mechatron, 2017, 22: 2165 – 2173
- [15]Firouzeh A, Paik J. An under-actuated origami gripper with adjustable stiffness joints for multiple grasp modes. Smart Mater Struct, 2017, 26: 055035
- [16]Firouzeh A, Salerno M, Paik J. Stiffness control with shape memory polymer in underactuated robotic origamis. IEEE Trans Robot, 2017, 33: 765 – 777
- [17]. Felton S, Tolley M, Demaine E, et al. A method for building self-folding machines. Science, 2014, 345: 644 – 646
- [18]. Felton S M, Tolley M T, Onal C D, et al. Robotself-assembly by folding: A printed inchworm robot. In: 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2013. 277 – 282
- [19]LANG R J, Origami7 Volume 2: Mathematics[M].