

上海交通大学

学生实习报告

实习单位：上海交通大学弗劳恩霍夫协会智能制造创新中心

实习时间：19/06/2023 至 14/07/2023

学院(系)：机械与动力工程学院

专 业：试点班-机械工程

学生姓名：顾恩霖 学号：520020910120

20/07/2023

实习报告主要包括实习目的与任务、实习单位、实习内容、实习收获等

(建议 5000 字以上)

从 2023 年 6 月 26 日到 2023 年 7 月 14 日,我在弗劳恩霍夫协会进行了为期四周的实习。在这段时间里,我参与了一个气动直线快速驱动单元设计与实现的项目,从理论推导、结构设计、控制编程、样机搭建、实验测试到答辩汇报,我经历了一个完整的工程项目的流程,收获了很多知识和技能,也感受了很多困难和挑战。在这里,我对我的实习经历进行一个总结和反思。

一、实习目的与任务

我的实习目标是学习和掌握气动直线快速驱动单元的机构设计与实现的方法和技巧,提高我的工程能力和创新能力。柔性气动执行器尽管具备安全、高效等诸多优点,其运动精度低,响应慢等问题依然长期存在。常见的直线气动单元如气动人工肌肉需要的工作压强极大,限制了其应用场景。因此,引入刚柔耦合机构实现低压响应的直线气动单元将具有重要研究意义。

我的具体任务是:

- 根据给定的需求和条件,建立物理模型,推导出腔体内部的压力与高度之间的关系;
- 设计出合理的机构结构,并用 SolidWorks 进行三维建模和仿真;
- 根据机构结构,选择合适的电磁气阀、传感器、单片机等元件,并用 arduino 进行控制编程;
- 根据三维模型,用 3D 打印机打印出样机,并将各个元件安装到样机上;
- 根据实验方案,对样机进行不同压强、不同位移下的力测试,并采集和分析实验数据;
- 根据实验结果,总结出结论和建议,并制作答辩幻灯片,进行终期答辩;

二、实习工作内容总结

在实习期间,我按照实习目的的顺序,逐步完成了每个阶段的工作。在这个过程中,我遇到了很多问题和困难,也得到了很多帮助和指导。以下是我对每个阶段的工作内容和心得体会的简要描述。

1. 文献调研

在开始工作之前,我进行了文献调研,查找是否有类似的文献、创新点是不是已经被用掉了。

我首先查阅了 IEEE 上关于折纸的文章,发现了很多有用的信息和灵感。我了解了一些折纸的基本概念和数学原理,比如折痕图、平面多边形的折叠定理、三浦折纸法等。我还看到了一些很复杂的折纸艺术作品,比如三浦公亮的龙、Robert Lang 的昆虫等,我非常佩服他们的创造力和技巧。

然后我又查阅了很多关于折展机构 (deployable mechanism) 的文章,这是一种可以由一种状态变化为另一种状态的机构,比如太阳能电池板、心脏支架、防弹盾牌等。我发现了一些很有趣的设计和应用,比如可以随着小孩长大的衣服、

可以作为 bellow 的 magic ball 结构、可以减少 buckling propagation 的海洋管道等。

在这个方向上，我这种用于交互的刚体与折纸耦合的构型应该还是比较新颖的。所以，我可以开始我的工作。在开始工作之前，我重点学习了两篇文献：

“A Pneumatic/Cable-Driven Hybrid Linear Actuator With Combined Structure of Origami Chambers and Deployable Mechanism”介绍了一种新型的气动/缆驱动混合线性执行器，它的结构是由折纸腔室和被动展开机构组合而成的。这种执行器可以在缆绳和压缩空气的联合驱动下产生双向运动，同时可以产生推力和拉力。这种结构具有高径向刚度和高伸缩比，而且不会发生径向膨胀。这种执行器的位置可以通过一个简单的策略在整个运动范围内控制，而且驱动压力可以低至 2 kPa。

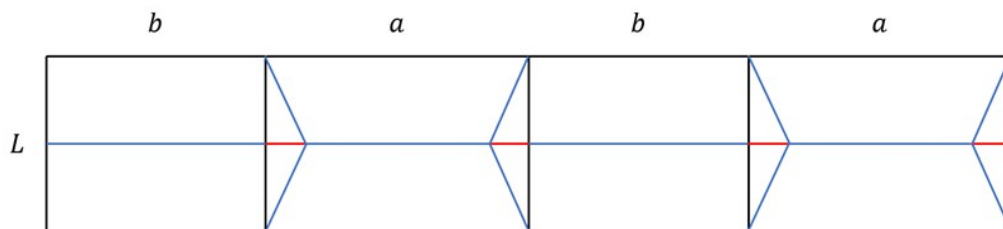
“Origami-Inspired Soft Actuators for Stimulus Perception and Crawling Robot Applications”介绍了一种基于折纸的软体执行器，它可以感知外界刺激，并驱动机器人爬行。它由两层材料组成，一层是可折叠的硅胶，另一层是可变电阻的碳黑。当电流通过碳黑时，它会产生热量，使硅胶膨胀或收缩。这样，执行器就可以实现不同的形变和运动。

2. 理论推导

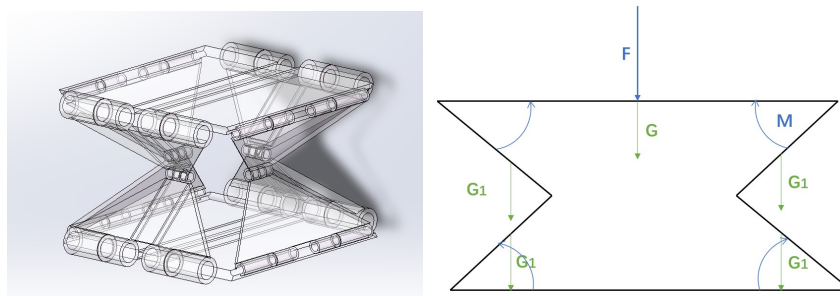
在这个阶段，我首先查阅了相关的文献资料，了解了电磁气阀的工作原理、腔体的运动方程、压强与电压之间的转换关系等基本知识。然后，我根据给定的需求和条件，建立了一个简化的物理模型，假设腔体为一个折纸，且折纸为刚体，其底部连接一个电磁气阀。我用数学符号表示出腔体内部的压强 P 、高度 H 等变量，并列出了它们之间的约束条件和关系式。接着，我利用牛顿第二定律、理想气体状态方程、欧姆定律等物理定律和公式，推导出了腔体内部压强 P 与高度 H 之间的关系式。最后，我用 Matlab 对这些关系式进行了数值计算和图形绘制。

我的建模思路如下：

假设织物服装像折纸结构一样，那么我们就可以得到折叠机构的图案。完全展开的盒子的高度记为 L ，矩形的长和宽记为 a 和 b ，满足 $a \geq b$ 。 b 边的两个对角连杆连接到织物服装上，另外两边不受约束。选择机构的高度 h 作为自变量。建立一个数学几何模型，来描述样品的形状和变化。我先进行了几何分析，利用几何关系和三角函数，得到了样品的体积与高度的关系。



刚体机构建模如下：



我使用虚功原理对带有扭簧的刚性结构进行力学分析。虚功原理是一种分析静力平衡问题的方法，它利用了力和位移之间的关系，可以简化计算过程。通过这次分析，我对我的设计有了更完善和准确的理解和计算。我也发现了一些可以改进的地方，比如如何选择合适的扭簧刚度、如何平衡机构的稳定性和灵活性等。

然后列写一些主要结论。

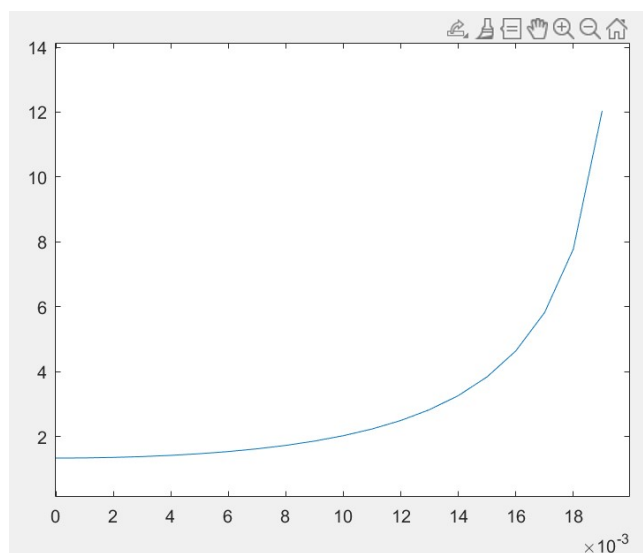
按照此建模，则体积表达式如下：

$$V = -\frac{h^3}{3} + \left(ab + \frac{L^2}{3}\right)h - \frac{a+b}{2}h\sqrt{L^2 - h^2}$$

同时，气压产生的轴向刚度如下：

$$E_1 = \frac{dF}{dh} = \frac{PdV}{dh} = P(-h^2 + ab + \frac{L^2}{3} + \frac{a+b}{2} \frac{h^2}{\sqrt{L^2 - h^2}} - \frac{a+b}{2} \sqrt{L^2 - h^2})$$

在 $a = b = L = 20mm$ 的情况下，E1-h 图：



可以求得力 F 表达式（忽略重力）：

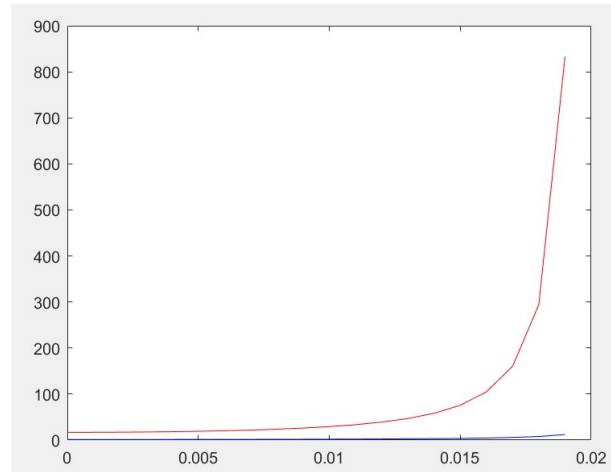
$$F \approx 4M \frac{d\theta}{dh} = \frac{4M}{\sqrt{L^2 - h^2}}$$

则刚体扭簧产生的轴向等效刚度如下：

$$E_2 = \frac{dF}{dh} = \frac{d}{dh} \frac{4G\theta}{\sqrt{L^2 - h^2}}$$

$$= 4G \frac{d \arcsin\left(\frac{h}{L}\right)}{dh \sqrt{L^2 - h^2}} = \frac{4G}{L^2 - h^2} \left(1 + \frac{h}{\sqrt{L^2 - h^2}} \arcsin\left(\frac{h}{L}\right)\right)$$

在求得刚度后，进行绘图对比气压与扭簧产生的刚度体现，红色为 E2，蓝色为 E1：



进一步地，气压-高度表达式如下：

$$P = \frac{-\frac{M}{\sqrt{L^2 - h^2}} + F + G + 4G_1}{-h^2 + ab + \frac{L^2}{3} + \frac{a+b}{2} \frac{h^2}{\sqrt{L^2 - h^2}} - \frac{a+b}{2} \sqrt{L^2 - h^2}}$$

对于一个机械设计为 $a = b = 0.06\text{m}$, $L = 0.04\text{m}$, $F = 0\text{N}$, $G+4G = 0.1\text{N}$, $M = 9.375\text{E-}4(\pi - \arcsin(h/L))$ 的模型，有

$$P = \frac{0.1 - 9.375 \times \frac{10^{-4} (\pi - \arcsin \frac{h}{L})}{\sqrt{L^2 - h^2}}}{\frac{1}{1875} + 0.0036 + \frac{0.06h^2}{\sqrt{0.0016 - h^2}} - 0.06\sqrt{0.0016 - h^2} - h^2}$$

可惜，由于后面的实验阶段的结果发现，正压腔体的表现比负压腔体好得多，所以负压腔体的推导最终没能用上。

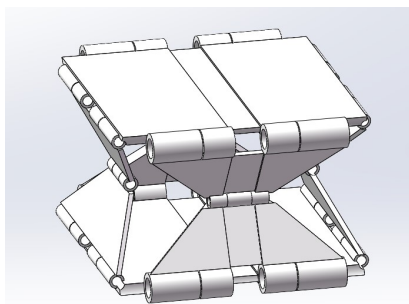
在这个阶段，我学习了很多有关电磁气阀控制腔体高度的理论知识，也锻炼了我的物理建模和数学推导的能力。我发现，理论推导是工程设计的基础和前提，它可以帮助我们分析问题、确定参数、预测结果、优化方案等。同时，我也意识到了理论推导的局限性和不足，它往往需要做一些简化和假设，忽略一些非线性和随机的因素，因此它不能完全反映实际情况，需要结合实验验证和调整。

3. 结构设计

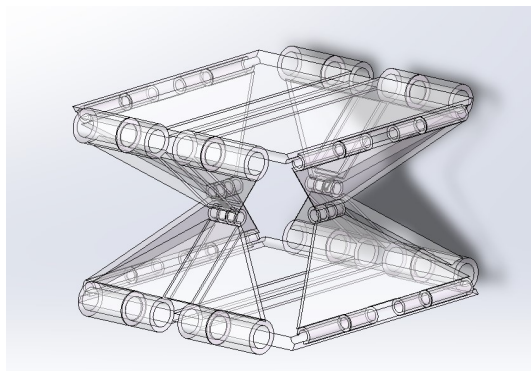
在这个阶段，我设计出了合理的机构结构，并用 SolidWorks 进行了三维建模和仿真。我对这些部件进行了三维建模，并将它们组装成一个完整的机构。我还用 SolidWorks 对机构进行了运动仿真和应力分析，检查了机构的运动范围、

运动速度、运动干涉、应力分布等参数，并对机构进行了一些优化和改进。

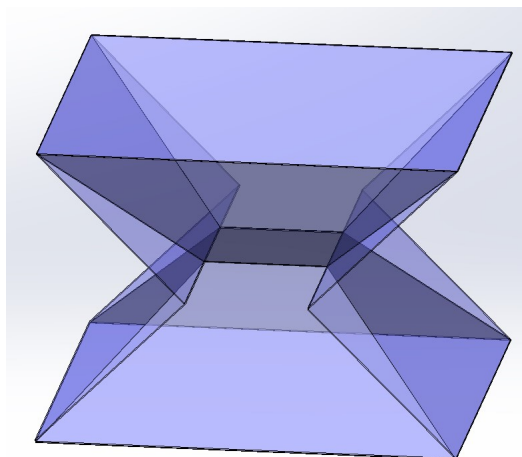
我的机构结构主要如下图所示：



上图是一个初步的微型单元。最开始是时候，想法是越小型越好，但由于做微型单元的时候发现强度很差，所以不得不放弃这一思路，直接将尺寸放大两倍，如下图所示：



这一版设计的折痕是：



在这个阶段，我学习了很多有关结构设计和三维建模的方法和技巧，也锻炼了我的创造力和美感。我发现，结构设计是工程设计的核心和灵魂，它可以帮助我们实现我们的想法和目标。同时，我也意识到了结构设计的复杂性和难度，它需要考虑很多因素和约束条件，并进行多次修改和调整。

4. 控制编程

在这个阶段，我根据机构结构，选择合适的电磁气阀、传感器、单片机等元件，并用 arduino 进行控制编程。我的控制目标是根据给定的目标高度，控制电

磁气阀给腔体施加合适的压强，使得腔体的高度达到目标高度，并保持稳定。我的控制方法是采用比例-积分-微分（PID）控制器，根据腔体的高度与目标高度之间的偏差，计算出电磁气阀的电压，并通过 SPI 接口发送给电磁气阀。LTC2664 是一种 16 通道、16 位、 $\pm 10\text{V}$ 数字模拟转换器（DAC），它可以通过 SPI 接口与 arduino 进行通讯。SPI 是一种串行外围设备接口（Serial Peripheral Interface），它可以实现主从设备之间的高速双向数据传输。

我用 arduino IDE 编写了控制代码，并将其上传到 arduino MEGA 上。我的代码主要分为三个部分：

定义引脚和变量：我将数字引脚 9 定义为电磁气阀的输出引脚，数字引脚 2 和 3 定义为按钮的输入引脚。我还定义了一些常量和变量，如 DAC 地址、SPI 速度、目标高度、PID 参数等。

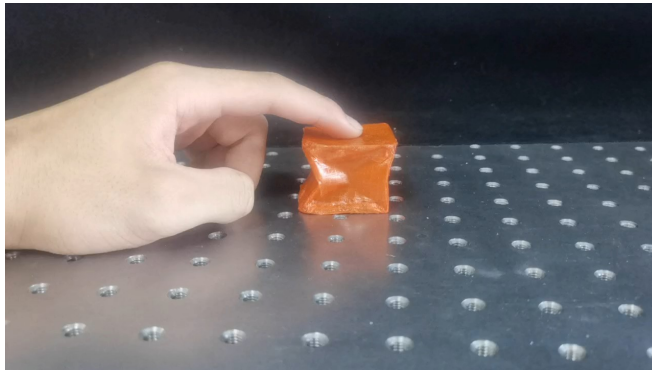
初始化 SPI 和 DAC：我在 `setup()` 函数中初始化 SPI 和 DAC，并设置 DAC 输出范围为 $\pm 10\text{V}$ 。

控制电磁气阀：我在 `loop()` 函数中根据按钮的状态来控制电磁气阀。当电磁气阀打开时，我用传感器读取腔体的气压，并用 PID 控制器计算出电磁气阀的电压，并向 DAC 发送。

在这个阶段，我学习了很多有关控制编程的知识和技能，也锻炼了我的逻辑思维和编程能力。我发现，控制编程是工程设计的重要组成部分，它可以帮助我们实现我们的控制目标和功能。同时，我也意识到了控制编程的复杂性和难度，它需要考虑很多因素和条件，并进行多次调试和优化。

5. 样机搭建

在刚开始的时候我就设计了一个原理验证样机，用小刚性片和胶水直接粘到布料上：

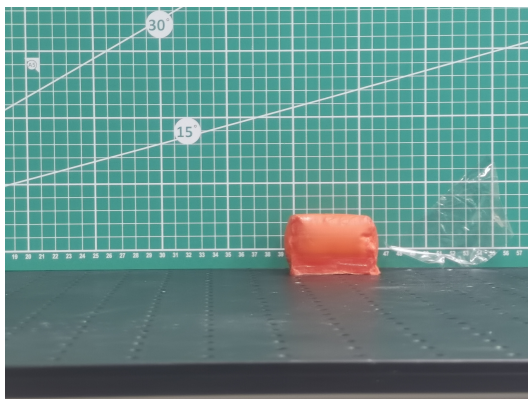


这一版的样机差强人意，最起码验证了直线驱动的可行性，但也告诉了我，如果不用刚性的机构进行约束，则不可能做到比较好的精度。所以，我才开始设计打印件的样机。

对于正式设计的样机，我根据三维模型，用 3D 打印机打印出样机，并进行样机装配。由于 3D 打印机的数量有限，而且打印时间较长，所以我需要等待一段时间才能拿到我的打印件。在等待的过程中，我对我的代码进行了一些修改和优化，以提高其性能和稳定性。

当我拿到我的打印件后，我先检查了它们的尺寸和形状是否与我的设计一致，并对它们进行了一些修整和处理。然后，我按照我的设计图纸，将扭簧与打印的各个部件组装起来，并用碳管做成的轴、螺丝、胶水等固定住。

我的样机如下：



在这个阶段，我学习了很多有关样机搭建的方法和技巧，也锻炼了我的动手能力和细心程度。我发现，样机搭建是工程设计的实践和验证，它可以帮助我们检验我们的设计是否可行和有效。同时，我也意识到了样机搭建的细节和重要性，它需要考虑很多因素和条件，并进行多次检查和测试。

6. 实验测试

在这个阶段，我根据实验方案，对样机进行不同压强、不同位移下的力测试，并采集和分析实验数据。我的实验目标是测试腔体的力与压强和位移之间的关系，并与我的理论推导进行比较。我的实验方法是采用最原始的方式，用一块带有网格的塑胶板作为高度的依据，使用砝码代替力传感器，拍摄照片作为实验数据。

我先用手调节控制气阀给腔体施加不同的压强，然后用砝码压在腔体上面，模拟不同的外力。我用塑胶板上的网格来测量腔体的高度变化，并用相机拍摄每个状态下的照片。我重复了多次实验，以保证数据的准确性和可靠性。

在实验中我发现，0 度扭簧的样机性能更加好，所以我打算采用 0 度扭簧。但这就意味着我需要使用正压控制腔体，之前的理论推导与代码都不能使用了，需要重新来过。

然后，我用 Excel 对实验数据进行了整理和分析，得到了腔体的力与压强和位移之间的关系曲线。我还计算了腔体的刚度和阻尼系数，以评价机构的性能。

displacement (cm)		load (kg)	
		3	5
pressure (kpa)	30	0.5	0.7
	40	0.4	0.5
	50	0.25	0.5

最大负载 $\leq 8\text{kg}$ ，末端刚度随着气压变化不是很明显。负压的理论推导中已经可以看到，最主要的刚度来源是刚体机构，而气压提供的刚度的百分比远远比不

上刚体机构。这个实验结果在这个方面可以大致印证我的理论推导是合乎逻辑的。

在这个阶段，我学习了很多有关实验测试的方法和技巧，也锻炼了我的观察能力和分析能力。我发现，实验测试是工程设计的检验和完善，它可以帮助我们验证我们的理论和结构是否符合实际情况，并发现其中的问题和不足。同时，我也意识到了实验测试的难度和局限性，它需要考虑很多因素和条件，并进行多次重复和比较。

6. 答辩汇报

在这个阶段，我根据实验结果，总结出结论和建议，并制作答辩幻灯片，进行终期答辩。我介绍了我的机构原理、结构、控制方法、实验方案、实验结果和结论。我还展示了我的样机和实验照片，以证明我的工作的有效性和创新性。

在这个阶段，我学习了很多有关答辩汇报的方法和技巧，也锻炼了我的表达能力和沟通能力。我发现，答辩汇报是工程设计的总结和展示，它可以帮助我们向别人介绍我们的工作内容和成果，并得到他们的反馈和建议。同时，我也意识到了答辩汇报的重要性和难度，它需要考虑很多因素和条件，并进行多次准备和排练。

三、取得的成果与收获

通过这次实习，我设计并实现了一个基于电磁气阀控制腔体高度的机构，它可以根据给定的目标高度，控制腔体的高度，并保持稳定。这个机构具有简单、高效、稳定等特点。

同时，我完成了一次成功的终期答辩，向答辩委员会展示了我的实习成果，并得到了他们的认可和赞扬。这次答辩可以作为我的实习评价，也可以作为我的演讲经验和自信心的提升。

我也学习和掌握了很多有关电磁气阀控制腔体高度的机构设计与实现的知识和技能，包括物理建模、数学推导、结构设计、三维建模、控制编程、样机搭建、实验测试、答辩汇报等。这些知识和技能可以为我今后的学习和工作提供很大的帮助和支持。

我结识和交流了很多来自不同背景的师兄和同学，他们给了我很多帮助和指导，也给了我很多启发和鼓励。我与他们建立了良好的友谊和合作关系，也拓展了我的视野和思维。