

蜘蛛手机器人的设计与应用

组名：北大第一鸡舍

组员：谭博文、陈奕好、骆春阳、刘孟昊、高旻焱



各组员工作：

谭博文：设计机构的逆运动学求解方法并完成 matlab 代码

陈奕好：solidworks 三维建模并完成 3D 打印

骆春阳：设计 python 代码进行运动学仿真

刘孟昊：分析逆运动学求解中的几何关系并计算空间方程

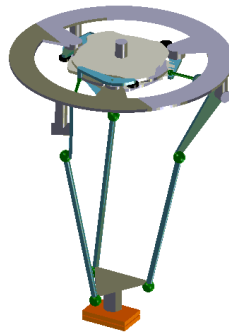
高旻焱：设计凸轮并绘制凸轮图像

一、应用场景及现实意义

蜘蛛手机器人具有工作速度高，精度高的优点，可以极大地减少工作周期。在生产制造中具有重大用处，比如，在物流仓储中，蜘蛛手可高效分拣、码垛货物。制造业里，能进行零部件组装和成品搬运。

蜘蛛手可以具有多个自由度，具有高度的灵活性，可以用于各种用途，比如作为新型抓娃娃机的操作机器人，增加了可玩性与操作性；在工厂中可以做到工作空间内任意位置的分拣货物、安装操作等等。但是在许多流水线中，蜘蛛手只需要重复一个单一动作即可，这似乎只需要一个自由度，可以省去一部分电机的成本，实现最大化的经济效益。

我们小组希望研究蜘蛛手的运动轨迹，进行动态仿真和实物化，分析单自由度蜘蛛手的可行性与实用性，并期望在拟合出单自由度蜘蛛手后，将其拓展成多个自由度的更加灵活的机器人，再以抓娃娃机为例进行仿真测试。

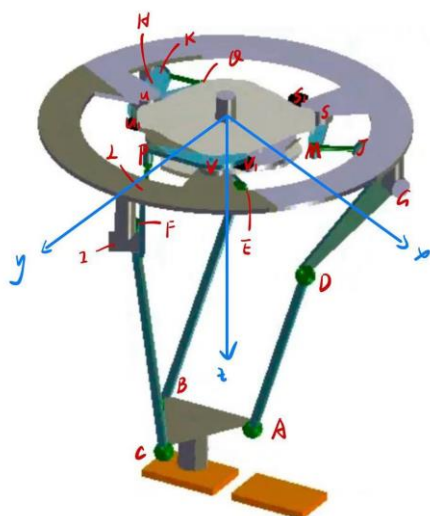


二、各构件设计与逆运动学求解

（一）、构建设计

在建模求解各构件运动关系及约束时，我们小组首先试图运用机械设计基础课程中学到的复平面代数法求解，但在分析机构运动的过程中发现并不存在一组闭环共面运动的构件，因此无法应用；此后又考虑了机器人学概论课程中学到的 DH 参数法（Denavit-Hartenberg 法），却又在机构分析中发现机构中存在如球铰这样的空间副而无法运用。最终，我们小组诉诸于最朴素的立体几何分析法，试图通过建立约束方程以确定各个关节点相对于固定参考

系的三维坐标，进而确定各个构件的位置与姿态，分析过程如下：



如左图，在机构顶端凸轮圆心处建立立体直角坐标系。图中的构件（括号里为旋转对称的构件）包括：顶部基座、底部末端执行器 $\triangle ABC$ 、直连杆 AD （ BE 、 CF ）、L形连杆 DGJ （ EHK 、 FIL ）、直连杆 JM （ KQ 、 LP ）、L形连杆 $MSS1$ （ $QUU1$ 、 $PVV1$ ）、顶部的三个凸轮。其连杆系中的关节 A 、 D 、 J 、 M （及其各自旋转对称点）为球铰，关节 G 、 S （及其各自旋转对称点）为转动副。设置各构件参数为： $AB=BC=AC=7.5$ ， $AD=BE=CF=20.8$ ， $DG=EH=FI=10.8$ ， $GJ=HK=IL=4.4$ ， $JM=KQ=LP=4.2$ ， $MS=QU=PV=5.3$ ， $SS1=UU1=VV1=2.5$ ，凸轮基圆半径 $r=5$ ， $\angle DGJ=90^\circ$ ， $\angle MSS1=150^\circ$ 。

（二）、逆运动学求解

在求解各点坐标时，以 A 到 $S1$ 的连杆系为例：首先由末端执行器 $\triangle ABC$ 的目标位置确定其中心 O 的坐标，根据目标， $\triangle ABC$ 在三维空间中平动，因此可以推出 A 点坐标；由于 G 点固定在基座上，为了确定 D 点坐标需要三个约束关系，分别是 AD 杆长固定关系、 DG 杆长固定关系以及 DG 保持在固定平面内（对于 DG 人为设定为平行于 yOz 平面），由此可解出 D 点坐标；进而由 DGJ 共面关系、 JG 杆长固定关系及 $\angle DGJ$ 固定关系可推出 J 点坐标；在求解 M 点坐标时与求解 D 点坐标类似，通过两个杆长和一个固定平面运动关系可解出；而求解 $S1$ 点坐标与求解 J 点坐标同理，通过杆长、共面、定角三个约束关系可求解得出。由此，可以完成从末端执行器到驱动空间的逆运动学解析求解。

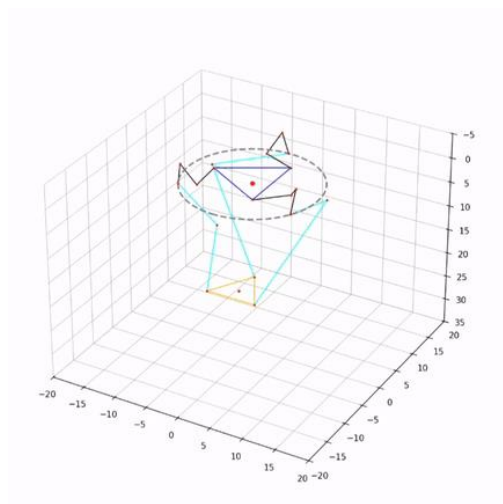
按照类似的方法，通过输入末端执行器 O 点在目标路径上的各个途经点坐标，可输出 $S1$ 、 $U1$ 、 $V1$ 点的坐标，从而设计凸轮在不同转角对应的径向长度，以此设计凸轮轮廓。

（三）、求解中的多解问题

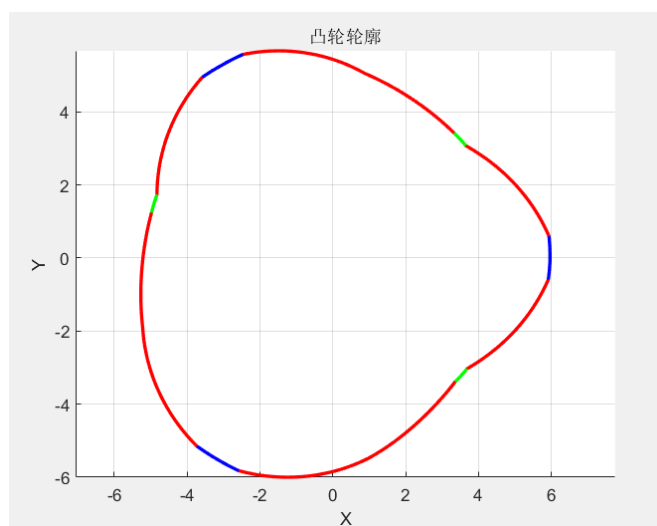
在逆运动学求解的过程中，存在部分多解问题。例如计算 D 、 E 、 F 、 J 、 K 、 L 、 M 、 P 、 Q 点的坐标时，使用几何法计算的过程中存在多解问题。我们采取人工分析判断的方式，采取粗略估计的方法找出一些参考平面进行约束，例如对于 D 点的坐标，要求其在平面 $Y_d=0$ 的上方，即约束 D 点纵坐标大于零，从而舍去多解。因此，当更改执行器运动路径时，可能面临约束条件不再适用的情况，需要进一步人工估算参考平面处理多解问题。

三、 驱动方案

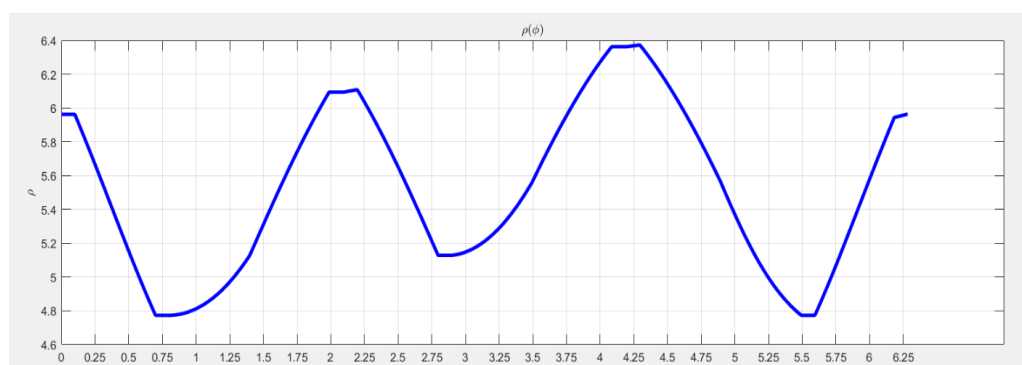
（一）、凸轮驱动



三个凸轮分别和 S1, V1, U1 三个点接触，推动 SS1, VV1, UU1 三根杆进行定轴转动，进而驱动整个机构的运动。不同于尖顶对心的情形，此时无法直接写出凸轮轮廓函数的解析解。为了得到所需的凸轮轮廓，以推动 SS1 的凸轮 1 为例，我们根据一个周期中末端执行器的运动轨迹，计算了 S1 的运动轨迹，由此根据空间中两点的距离公式，计算点 S1 在对应时刻和坐标原点的距离，该距离表示此时凸轮需要的 ρ 值，进而得到凸轮轮廓（下图）。



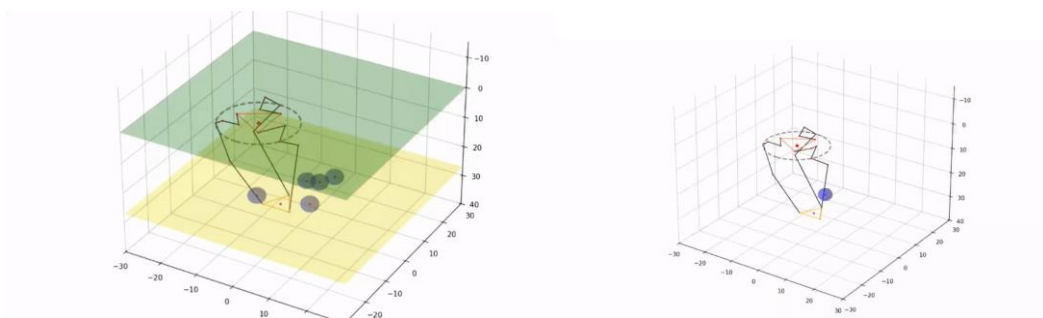
为了让凸轮轮廓更加平滑，机构的运动更加平缓，我们设置了三个远休止角和三个近休止角。蓝色部分代表凸轮处于远休止角，此时末端执行器在三个目标位置；绿色部分代表凸轮处于近休止角，此时末端执行器处于路径中的过渡位置。此时 ρ 与 ϕ 的关系如下图所示。



解决了一个凸轮之后,我们需要用三个凸轮来分别驱动 SS1, VV1, UU1 三根连杆的运动。考虑到凸轮的厚度问题,它们不可能在同一个平面中完成驱动。为了保证三根连杆可以在同一个平面中运动,我们需要对它们进行一定的改进。以 SS1 为例,我们将一个 L 形的杆和 SS1 固连,使这根 L 形杆的末端 S2 位于点 S1 正下方适当高度,凸轮推动 S2 点运动进而驱动整跟杆的运动。通过改变这根 L 形杆的形状,我们可以控制 S1S2, V1V2, U1U2 为不同长度,进而使 S2, V2, U2 三个点位于不同平面中,却不影响 SS1, VV1 和 UU1 的共面。三个凸轮分别和 S2, V2, U2 三个点进行接触并驱动相应连杆的运动,这根 L 形杆使得一个凸轮只能和一个点进行接触,保证了三对凸轮和连杆的控制相互独立。这样就解决了凸轮自身厚度带来的影响。

最后我们只需要考虑三个凸轮的摆放,根据对 S1, V1, U1 三个点的轨迹的计算,三个凸轮的运动的相位差为 $2\pi/3$, 因此只需要在初始时刻让 S1 和 $\rho(0)$ 、U1 和 $\rho(2\pi/3)$ 、V1 和 $\rho(4\pi/3)$ 处接触即可完成期望的驱动。

(二)、电机驱动



在 S、U、V 三个旋转关节插入三个电机,将末端执行器 $\triangle ABC$ 由刚体更换为可以电控收缩的装置。对于末端执行器需要抵达的任意位置,给出到达该位置所对应的轨迹在三维空间的轨迹方程,可以通过代码(见附录)计算出末端执行器到达指定位置且 $\triangle ABC$ 收缩时,每一个电机所需转过的角度,若要求末端执行器的轨迹方程为分段函数,则通过多端循环代码先后运行。即该方案末端执行器可精确到达工作空间内任意位置,并实现对目标物品的抓取功能,可应用于抓娃娃机等现实场景。

四、 运动仿真

这一部分我们通过 Python 语言实现。

(一) 关于蜘蛛手的轨迹仿真:

通过逆运动学求解大量散点的具体位置,并将这些散点以动画的形式表现出来,来观察实现该装置的可行性。

核心代码部分有两块:

1. 将合适的点连线,组成关节结构,这样在动画中会清晰地现实各杆件的运动轨迹。

```

# 绘制两点连接线
for i in range(-1, 2):
    ax.plot([line_sum[i][-1][0], line_sum[i + 1][-1][0]],
            [line_sum[i][-1][1], line_sum[i + 1][-1][1]],
            [line_sum[i][-1][2], line_sum[i + 1][-1][2]], color='b', linewidth=1)

for i in range(-1, 2):
    ax.plot([line_sum[i][0][0], line_sum[i + 1][0][0]],
            [line_sum[i][0][1], line_sum[i + 1][0][1]],
            [line_sum[i][0][2], line_sum[i + 1][0][2]], color='orange', linewidth=1)

mode.plot_triangle_and_circle_3d(ax, [line_sum[0][2][0], line_sum[0][2][1], line_sum[0][2][2]],
                                [line_sum[1][2][0], line_sum[1][2][1], line_sum[1][2][2]],
                                [line_sum[2][2][0], line_sum[2][2][1], line_sum[2][2][2]])

```

2. 已知某一弯折杆件为刚体结构，计算其夹角是否为恒定值，确认其精度。

```

for i in range(-1, 2):
    angle_new = mode.calculate_angle(line_sum[i][2] - line_sum[i][1], line_sum[i][3] -
line_sum[i][2])
    if angle_sum:
        # 精度
        if abs(abs(angle_sum) - abs(angle_new)) > 0.0001:
            angle_sum = angle_new
            print(angle_sum)
    else:
        angle_sum = angle_new
        print(angle_new)

```

89.99999509315808

在精度为 10 的-4 次幂级别，是稳定而精确的。
原杆件的夹角应是 90 度，精度可靠。

（二）拓展：抓娃娃机

```

mode.plot_triangle_and_circle_3d(ax, [line_1[2][0], line_1[2][1], line_1[2][2]],
                                [line_2[2][0], line_2[2][1], line_2[2][2]],
                                [line_3[2][0], line_3[2][1], line_3[2][2]])

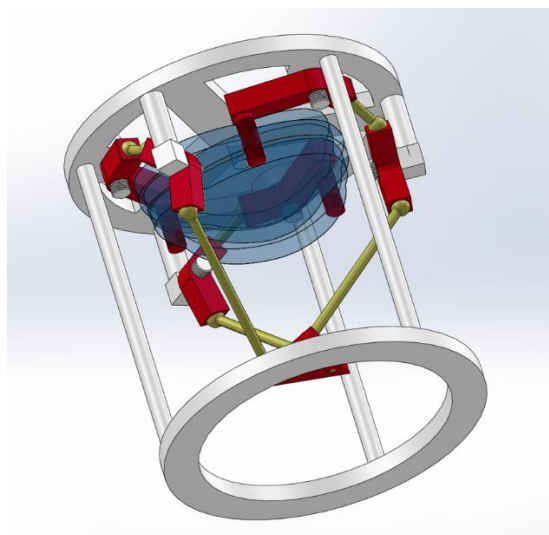
# 追踪球
mode_ball.plot_sphere(ax, [target[0], target[1], target[2]], 4 / (3 ** 0.5))
mode_ball.plot_xy_plane_1(ax, 0, 0, line_1[2][2])

for i in ball:
    mode_ball.plot_sphere(ax, i, 4 / (3 ** 0.5))
mode_ball.plot_xy_plane(ax, ball[0][0], ball[0][1], ball[0][2])

```

核心部分没有改变，但是为了观察整体抓娃娃机和球的移动，要动态追踪球的位置，以及将抓娃娃机和球的平面画出来，以更好观察其运动轨迹。

五、机构综合介绍与三维建模



图一：Delta 机械手的 solidworks 建模

（一）、项目背景与目标

Delta 机械手是一种高精度、高速的平行机械机构，广泛应用于自动化装配、搬运、分拣等领域。本次设计目标是：

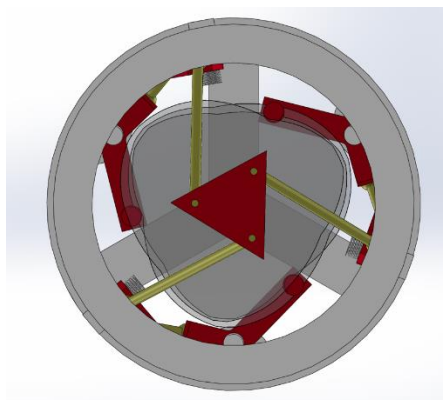
1. 使用 SolidWorks 软件完成 Delta 机械手的三维建模。
2. 设计机械手的主要运动机构，包括基座、动平台、连杆、凸轮安装座等组件。
3. 验证装配设计的可行性，确保运动学功能符合设计要求。

（二）、设计方法与流程

设计流程：

1. 需求分析与参数确定

- 工作空间：圆柱形工作范围。
- 负载能力：最大负载 2kg。
- 材料：关键运动部件和基座使用 PLA。

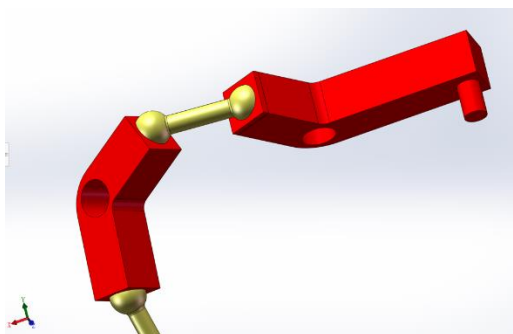


图二：三角板为动平台

2. 核心部件设计

使用模块化设计思路，分为以下几个主要部分：

- **基座 (Base)**
提供整个机械手的稳定支撑，包含伺服电机的固定安装孔。
- **动平台 (End Effector)**
用于抓取负载，设计成轻量化结构，减少惯性影响。
- **连杆 (Linkages)**
四杆机构设计，采用平行连杆保证动平台的稳定性。



图三：连杆细节

- **凸轮座**
设计凸轮座与机架的连接组件，确保动力传递的可靠性。

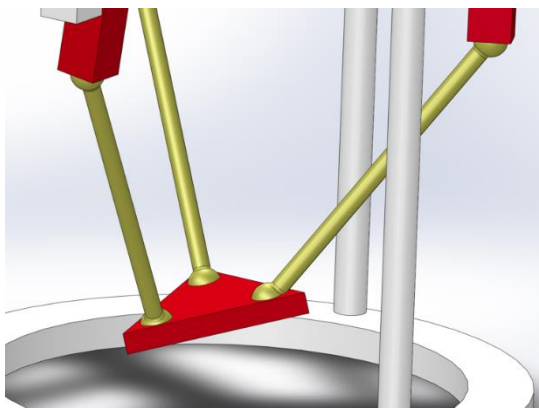
详细的零件可见 BOM:

项目号	零件号	说明	数量
1	机架		1
2	顶盖		1
3	70-35转角1球铰2转轴		3
4	圆球杆42mm		3
5	40-35转角2球铰1转轴		3
6	圆球杆158mm		3
7	三角板		1
8	凸轮		3

表一：Detla 机械手的 BOM

3. 装配体创建与运动仿真

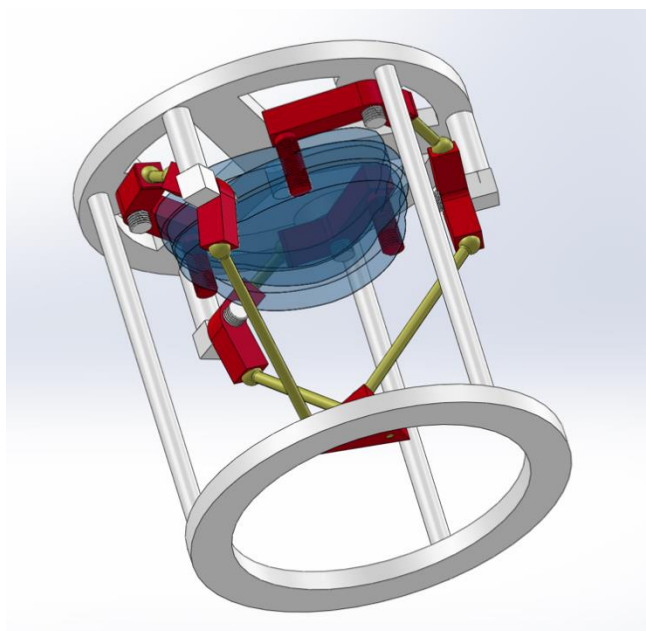
使用 SolidWorks 的装配功能完成部件间的配合，并通过运动分析模块验证运动范围和连杆稳定性。



图四：灵活的动平台

2.2 设计示意图与注释

整体装配体示意图



图五：Delta 机械手的装配体

标注说明

1. **基座 (Base):** 圆形基座结构，包含三个均布的连杆安装孔和支撑柱，以及凸轮安装位点。
2. **连杆 (Linkages):** 上下连杆采用轻量化设计，安装有球铰用于高自由度运动。
3. **动平台 (End Effector):** 包含抓取工具的固定接口，设计为多孔式便于扩展。

主要部件设计细节

1. 基座设计



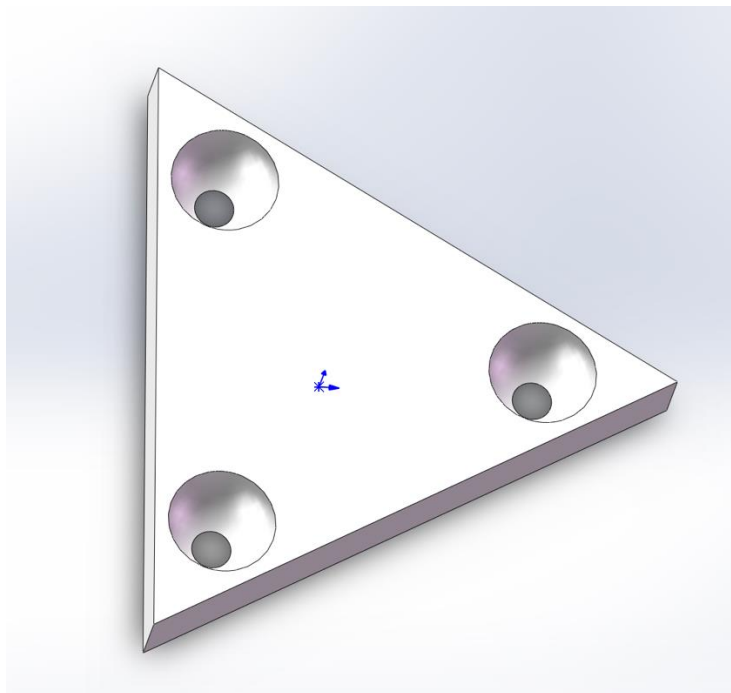
图六：机架的三维模型和俯视图

- 直径：280mm，厚度 15mm，材料 PLA。
- 支撑柱和底部采用一体设计，顶部基座相连。

2. 动平台设计

(图示：动平台的三维模型和轻量化结构示意图)

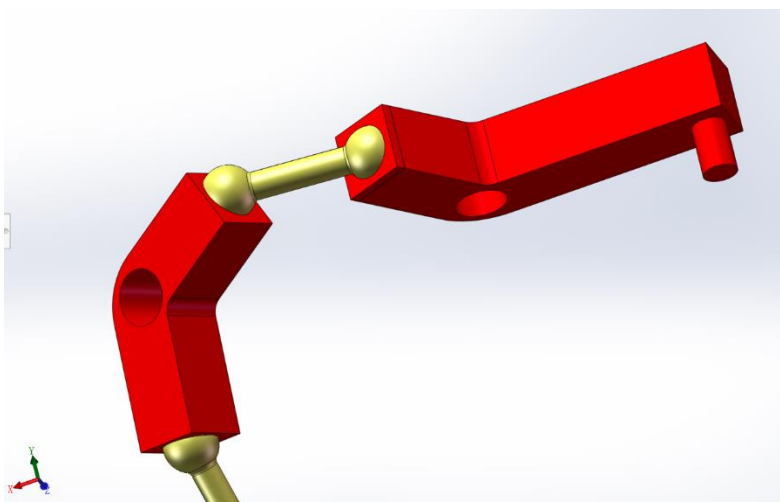
- 边长：85mm，厚度 10mm，材料 PLA。
- 增加了洞穿结构以减轻质量，同时保证强度。



图七：动平台设计

3. 连杆设计

(图示：连杆结构与球铰连接处的局部放大图)



- 经过反复实验调整，最终确定参数。上连杆 46mm，下连杆长度为 158mm，直径 8mm，材料为 PLA。
- 球铰直径 16mm，保证多自由度运动。

3. 小结与展望

1. 设计成果

- 完成了 Delta 机械手的 SolidWorks 建模与运动仿真分析。
- 各部件设计合理，装配后无干涉，运动学功能符合要求。

2. 后续改进方向

- 进一步优化轻量化设计，减小惯性对高速运动的影响。
- 制作物理样机，结合 3D 打印验证设计可行性。
- 深入研究控制算法，实现机械手的精准控制。

说明：solidworks 三维建模模型的凸轮建模部分与理想中（前文“凸轮驱动”板块）设想略有不同。

六、附录（见附件）

目录：

- （一）、材料清单 BOM
- （二）、逆运动学求解代码（通过执行器位置求解驱动空间参数）
- （三）、逆运动学求解代码（凸轮方案运动功能设计）
- （四）、逆运动学求解代码（电机方案运动功能设计）
- （五）、运动仿真代码
- （六）、凸轮形状设计