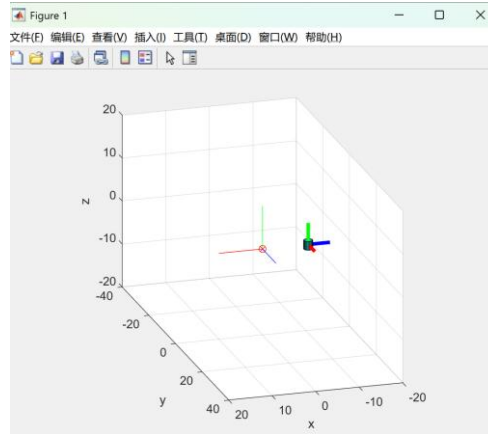


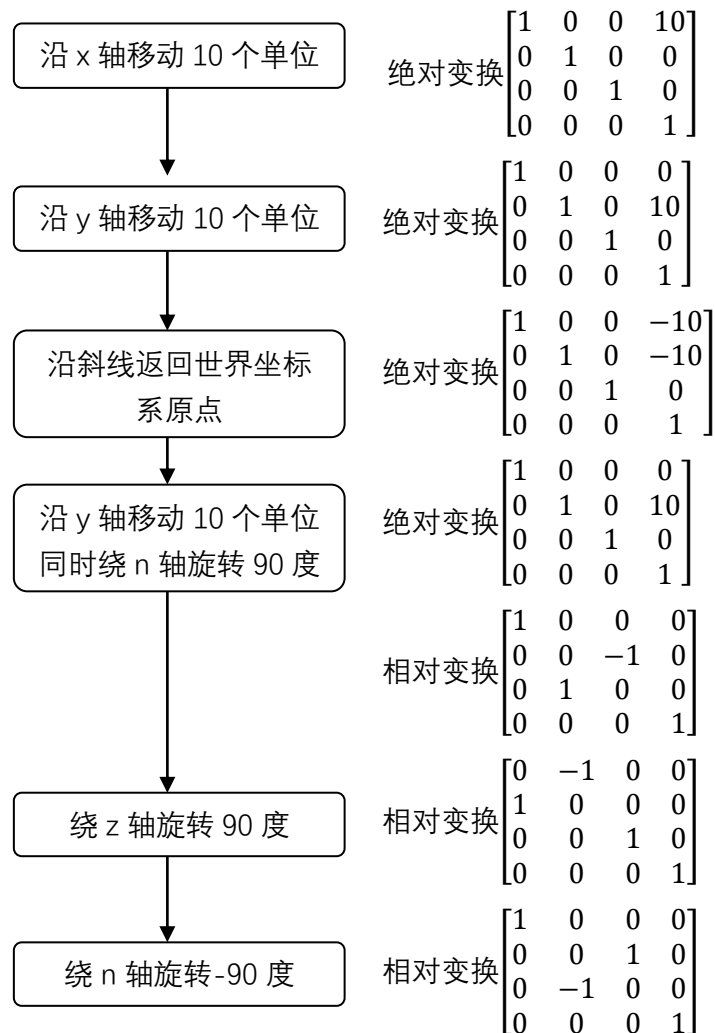
仿真实验一 机器人正运动学分析

任务一：例程 Mov_Frame_Lnya.m

1.1 运行例程



1.2 流程图及对应齐次变换矩阵



任务二：IRB2600 正运动学建模及仿真

以下选取 IRB 2600ID-8/2.00 的尺寸等相关参数

2.1 分析用户手册

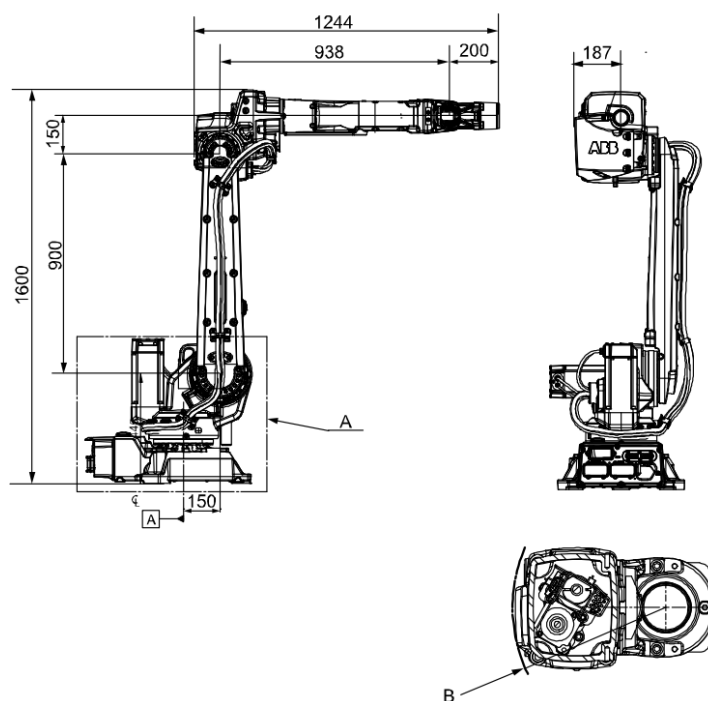
2.1.1 IRB2600 的基本性能指标

自由度	6																					
重复定位精度 (mm)	0.023																					
重复路径精度 (mm)	0.27																					
最大负载(kg)	8																					
手腕扭矩 (Nm)	轴 4 和轴 5 为 31.4 轴 6 为 10.2																					
轴最大速度	<table><tr><th>轴运动</th><th>工作范围</th><th>轴最大速度</th></tr><tr><td>轴 1 旋转</td><td>+180° 至 -180°</td><td>175°/s</td></tr><tr><td>轴 2 手臂</td><td>+155° 至 -95°</td><td>175°/s</td></tr><tr><td>轴 3 手臂</td><td>+75° 至 -180°</td><td>175°/s</td></tr><tr><td>轴 4 旋转</td><td>+175° 至 -175°</td><td>360°/s</td></tr><tr><td>轴 5 弯曲</td><td>+120° 至 -120°</td><td>360°/s</td></tr><tr><td>轴 6 翻转</td><td>+400° 至 -400°</td><td>500°/s</td></tr></table>	轴运动	工作范围	轴最大速度	轴 1 旋转	+180° 至 -180°	175°/s	轴 2 手臂	+155° 至 -95°	175°/s	轴 3 手臂	+75° 至 -180°	175°/s	轴 4 旋转	+175° 至 -175°	360°/s	轴 5 弯曲	+120° 至 -120°	360°/s	轴 6 翻转	+400° 至 -400°	500°/s
轴运动	工作范围	轴最大速度																				
轴 1 旋转	+180° 至 -180°	175°/s																				
轴 2 手臂	+155° 至 -95°	175°/s																				
轴 3 手臂	+75° 至 -180°	175°/s																				
轴 4 旋转	+175° 至 -175°	360°/s																				
轴 5 弯曲	+120° 至 -120°	360°/s																				
轴 6 翻转	+400° 至 -400°	500°/s																				
工作空间	<div>IRB 2600ID-8/2.00, 工作范围图例</div> <p>The diagram illustrates the work envelope of the IRB 2600ID-8/2.00 robot arm. It shows the arm's configuration with dimensions: a base width of 1700, a reach of 1051, an offset of 539, a total reach of 2000, a maximum height of 2295, and a minimum height of 1321. The work envelope is depicted as a shaded area within a larger circle.</p>																					

2.1.2 关节构型和连杆尺寸等关键参数

用户手册尺寸图：

尺寸 IRB 2600ID-8/2.00



从图中可以得到连杆尺寸：

连杆	连杆尺寸(mm)
关节 1-关节 2	$\sqrt{150^2 + 445^2}$
关节 2-关节 3	900
关节 3-关节 4	150
关节 4-关节 5	938
关节 5-TCP	200

用户手册中各轴工作范围：

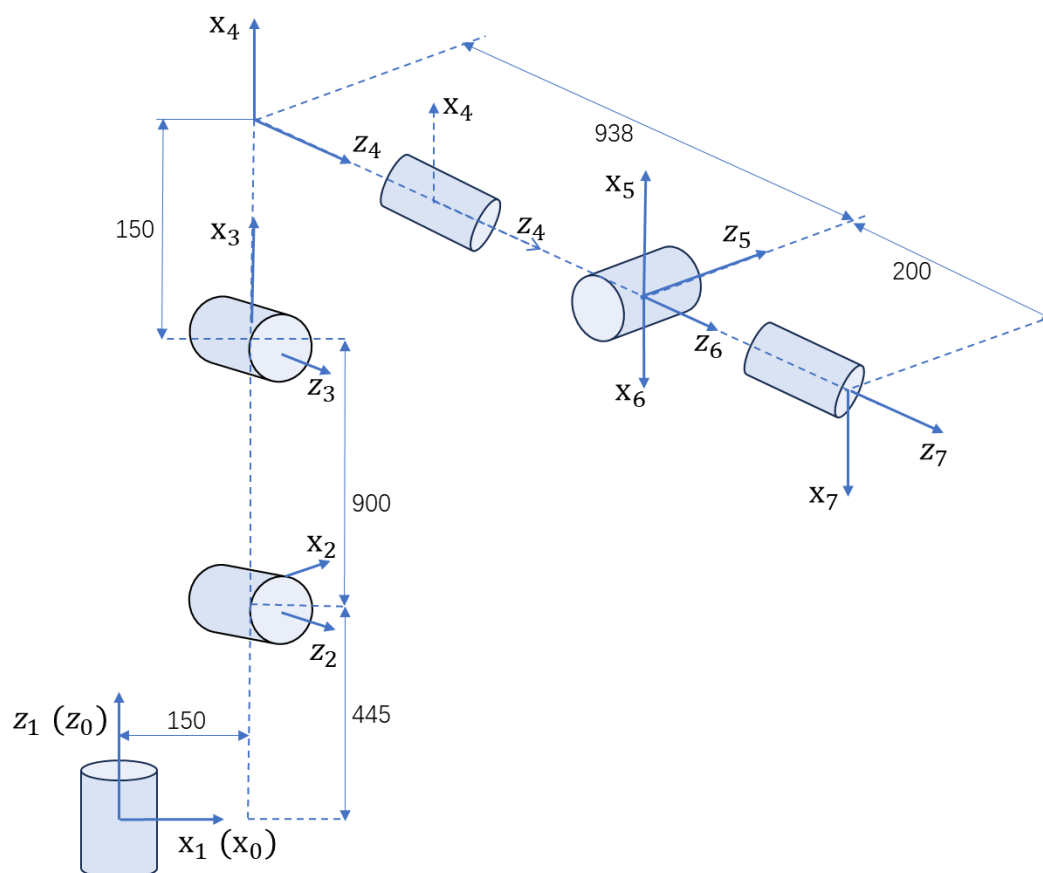
轴运动	工作范围	轴最大速度
轴 1 旋转	+180° 至 -180°	175°/s
轴 2 手臂	+155° 至 -95°	175°/s
轴 3 手臂	+75° 至 -180°	175°/s
轴 4 旋转	+175° 至 -175°	360°/s
轴 5 弯曲	+120° 至 -120°	360°/s
轴 6 翻转	+400° 至 -400°	500°/s

关节构型：

关节	运动范围	功能	位置
关节 1	+180°至-180°	底座水平旋转	/
关节 2	+155°至-95°	下臂俯仰	高度 445mm 偏置 150mm
关节 3	+75°至-180°	上臂俯仰	/
关节 4	+175°至-175°	上臂旋转	偏置 150mm
关节 5	+120°至-120°	上臂弯曲	/
关节 6	+400°至-400°	工具旋转	/

2.2 用 DH 法进行正运动学建模

建模：



DH 参数表：

关节	θ	d	a	α
0-1	0	0	0	0
1-2	$0^\circ(\theta_1)$	445	150	90°
2-3	$90^\circ(\theta_2)$	0	900	0
3-4	$0^\circ(\theta_3)$	0	150	90°
4-5	$0^\circ(\theta_4)$	938	0	90°
5-6	$180^\circ(\theta_5)$	0	0	90°
6-TCP	$0^\circ(\theta_6)$	200	0	0

对应的齐次变换矩阵：

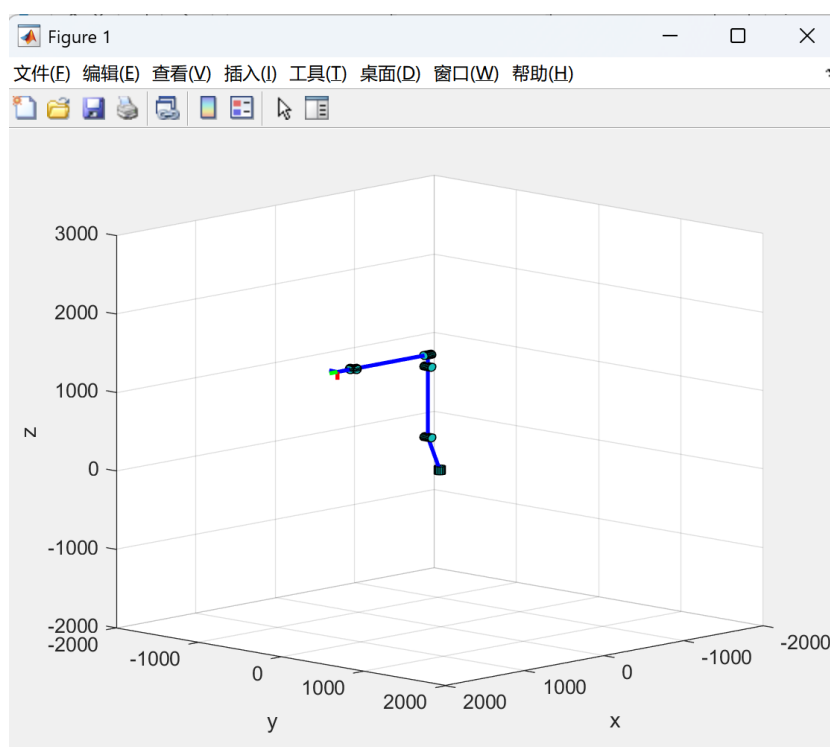
n 关节到 n+1 关节的齐次变换矩阵 ${}^nT_{n+1}$ 表达式为：

$$\begin{bmatrix} C\theta_n & -C\alpha_n S\theta_n & S\alpha_n S\theta_n & a_n C\theta_n \\ S\theta_n & C\alpha_n C\theta_n & -S\alpha_n C\theta_n & a_n S\theta_n \\ 0 & S\alpha_n & C\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

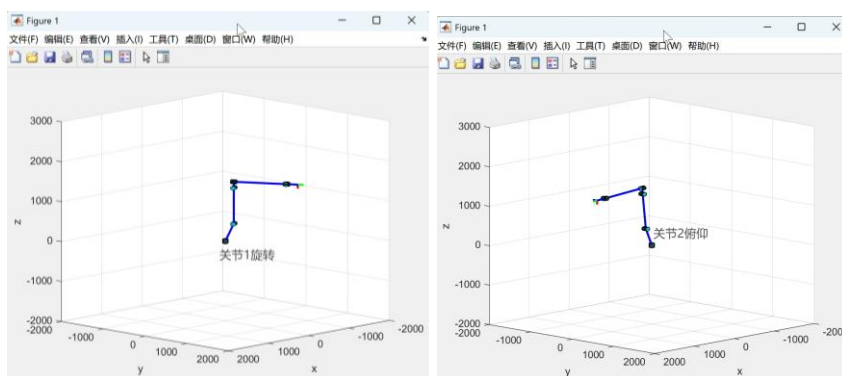
关节	齐次变换矩阵	代入初始 θ
0-1	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
1-2	$\begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & 150C\theta_1 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & 150S\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 445 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 150 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 445 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
2-3	$\begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & 900C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & 900S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 900 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
3-4	$\begin{bmatrix} C\theta_3 & 0 & S\theta_3 & 150C\theta_3 \\ S\theta_3 & 0 & -C\theta_3 & 150S\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 150 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
4-5	$\begin{bmatrix} C\theta_4 & 0 & S\theta_4 & 0 \\ S\theta_4 & 0 & -C\theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 938 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 938 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
5-6	$\begin{bmatrix} C\theta_5 & 0 & S\theta_5 & 0 \\ S\theta_5 & 0 & -C\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
6-TCP	$\begin{bmatrix} C\theta_6 & -S\theta_6 & 0 & 0 \\ S\theta_6 & C\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 200 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 200 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

2.3 IRB2600 正运动学仿真

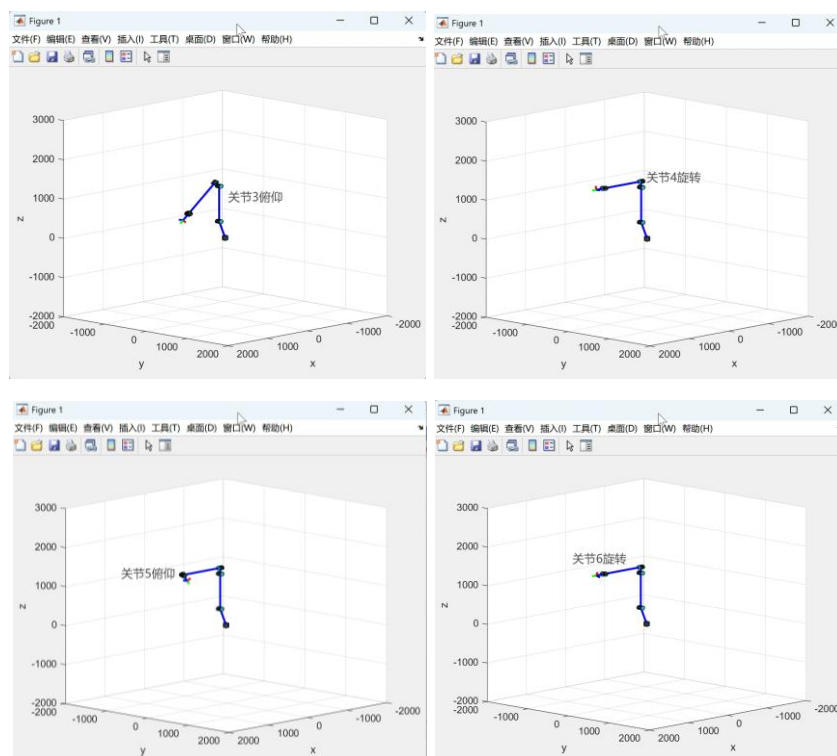
Mov_IRB2600_Rob_Lnya.m 由 Mov_3DOF_Rob_Lnya.m 改写而来。有关逆运动学部分的代码为下个实验内容，暂时省略。在 DHfk6Dof_Lnya.m 和 Build_IRB2600_Robot_Lnya.m 函数中增加关节角参数，由三自由度改写成六自由度。为了在机械臂末端工具安装点绘制末端坐标系表示末端位姿，增加了三个虚拟关节，使用 Connect3D 函数连接关节但不绘制圆柱体即可，红色为 x 轴、蓝色为 y 轴、绿色为 z 轴。关节布局如图所示。下图为设置机器人关节初始角度后机器人的姿态，与机器人原型一致，此时 $\theta_2=90^\circ$, $\theta_5=180^\circ$ 。仿真运动部分，仿照原有程序，利用循环结构，并按照用户手册各个关节的工作范围修改相关代码。运行程序，发现关节转动与机器人原型一致。



连环图如下所示：



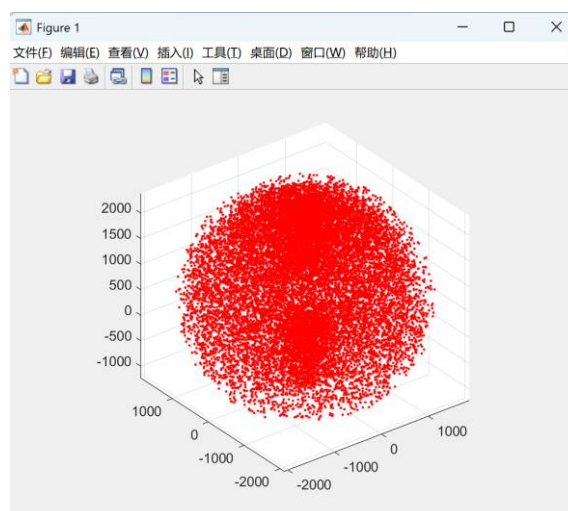
关节 1 可以 360°旋转，关节 2 可以向下 155°、向后 95°。



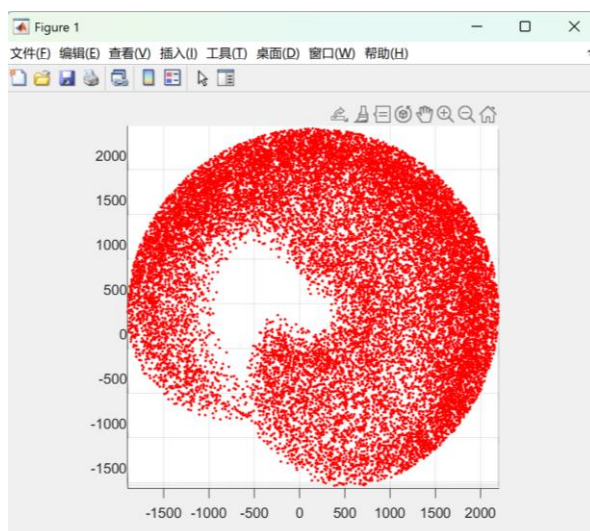
关节 3 可以向下 75°、向后 180°，关节 5 可以上下 120°；关节 4 可以顺时针、逆时针旋转 175°，关节 6 可以顺时针、逆时针旋转 400°。旋转可以观察红色的 x 轴确定旋转角度。

任务三：IRB2600 工作空间分析

立体图如图所示。

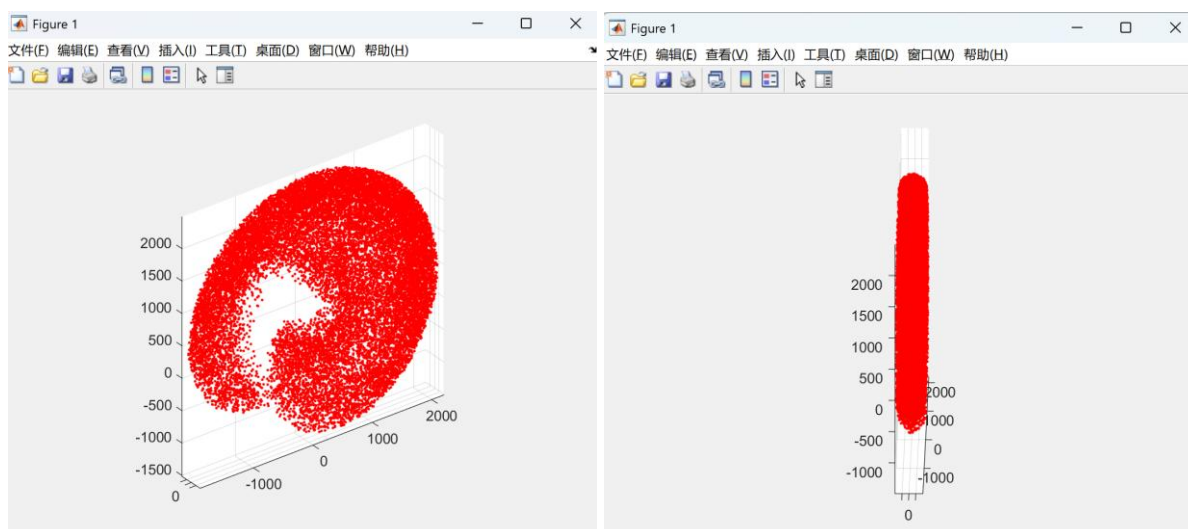


为更直观展示工作空间，将机器人第 1 关节角度置零，得到剖面图。

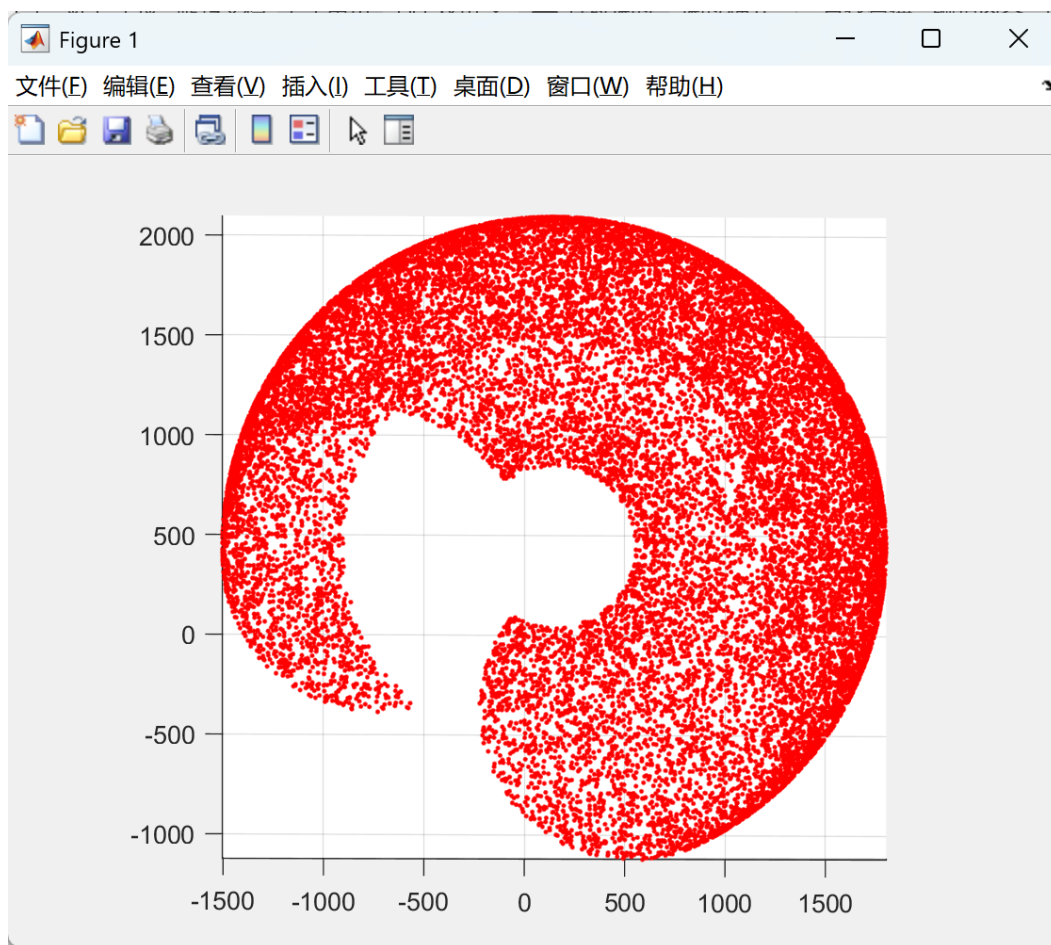


该剖面图具有“厚度”，是因为关节 5 在非水平时带动关节 6 和末端左右摆动。

立体图和俯视图：



为更直观展示工作空间，在视觉上除去“厚度”的影响，将第 5 关节也置零，得剖面图，通过坐标轴读数，其形状和尺寸大小与用户手册一致。



工作空间边缘形状是由**连杆长度，关节构型，关节运动范围**决定。连杆长度决定工作空间的大小；关节构型决定形状，关节型机器人形状为圆形；关节活动范围限制了部分工作空间。

附加任务一：利用 Matlab 符号运算，整理末端工具安装点位置向量的解析表达式；

末端工具安装点相对于基坐标系的齐次变换矩阵 0T_6 是各相邻关节齐次变换矩阵的乘积，即 ${}^0T_6 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6 \cdot {}^6T_{TCP}$ ，其第四列的前三个元素构成末端工具安装点位置向量。

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} {}^0R_6 & {}^0P_6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

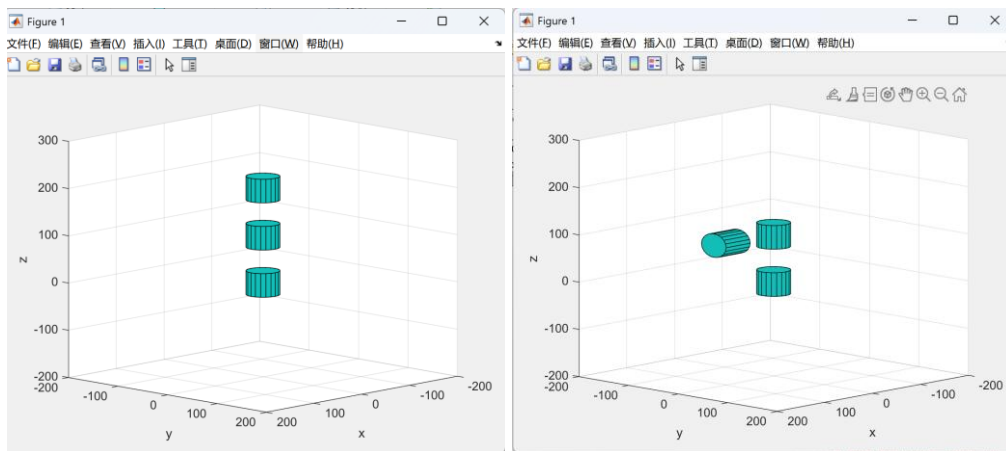
$$\begin{aligned} P_x = & 150 \cdot \cos(\theta_1) + 900 \cdot \cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2) + 150 \cdot \cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) + \\ & (938 \cdot \cos(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) - 200 \cdot \cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \cdot \cos(\theta_5)) + \\ & (100 \cdot \cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \cdot \sin(\theta_5) + 200 \cdot \cos(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot \cos(\theta_4) \cdot \sin(\theta_5)) - \\ & 200 \cdot \cos(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot \sin(\theta_4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_y = & 150 \cdot \sin(\theta_1) + 900 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2) + 150 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) + \\
& (938 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) - 200 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \cdot \cos(\theta_5)) + \\
& (100 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \cdot \sin(\theta_5) + 200 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot \cos(\theta_4) \cdot \sin(\theta_5)) - \\
& 200 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot \sin(\theta_4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_z = & 445 + 900 \cdot \sin(\theta_2) + 150 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) - 938 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) + \\
& 200 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot \cos(\theta_5) - 100 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot \sin(\theta_5) + \\
& 200 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \cdot \sin(\theta_4) \cdot \sin(\theta_5) + 200 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \cdot \cos(\theta_4)
\end{aligned}$$

附加任务二：

5.1 天舟转位

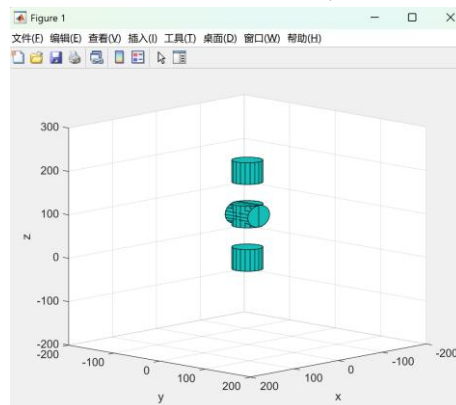


在天宫的位置设置了两个虚拟的关节并使它们不可见，其中一个绕 x 轴旋转 90 度使天舟二号可以按照规定旋转。另外一个绕 x 轴旋转 -90 度，回到原来的方向。然后沿 z 轴移动可以建立姿态正确的天舟二号。

```

Link(3) = struct('name','TianZhou', 'th', 0*ToRad, 'dz', 0, 'dx', 0, 'alf',90*ToRad,'az',UZ); %TianGong TO V1
Link(4) = struct('name','TianZhou', 'th', 0*ToRad, 'dz', 0, 'dx', 0, 'alf',-90*ToRad,'az',UZ); %V1 TO V2
Link(5) = struct('name','TianZhou', 'th', 0*ToRad, 'dz', 100, 'dx', 0, 'alf',0*ToRad,'az',UZ); %TianGong TO TianZhou

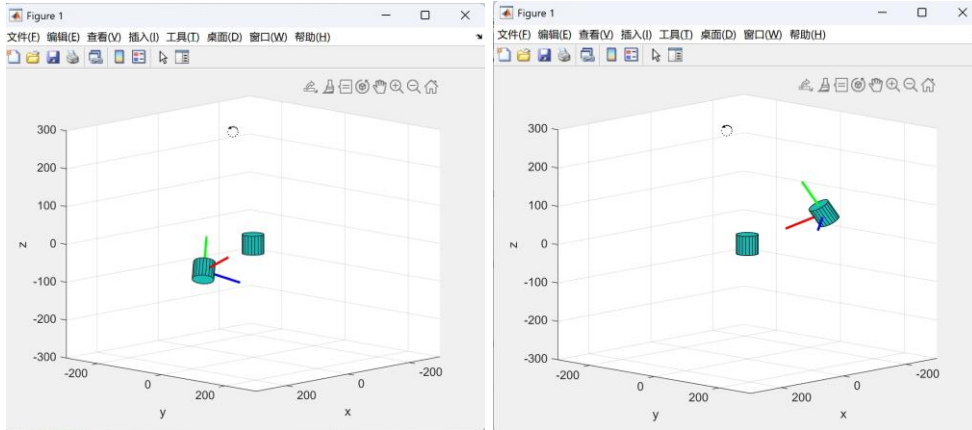
```



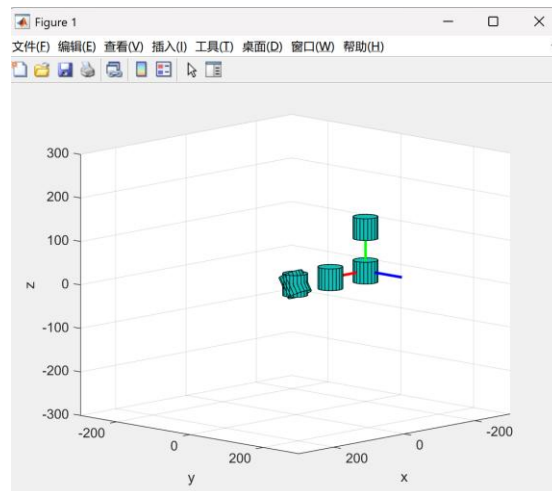
天舟的转位是通过设置的第一个虚拟关节俯仰完成的，转位后天舟二号的 y 轴与天宫 z 轴同向，天舟二号的 x 轴与天宫 x 轴保持平行同向。

2、飞行轨道

在航天器设置了末端坐标系观察 x 轴（红色）的指向。



在地球的位置设置了一个虚拟的关节并使它不可见，该关节绕 x 轴旋转 30 度使运动轨迹满足轨道面的倾斜角。



航天器绕轨道运行是由该倾斜的虚拟关节旋转完成的。为保证旋转时 x 轴始终指向地心，航天器还需要以两倍的角速度反向自转（th4）。

```
for i=0:stp:360
    if i==360
        DHfk_Guidao_Lnya(th2 +i,th4-2i,0);
    else
        DHfk_Guidao_Lnya(th2 +i,th4-2i,1);
    end
end
```

心得感想

通过本次仿真实验，我深入理解了机器人正运动学的原理和使用。通过 `Mov_Frame_Lnya.m` 例程，我认识了变换矩阵对机器人位姿变化的影响。我还通过 DH 法对 IRB2600 机器人进行正运动学建模，构建 DH 参数表和齐次变换矩阵。这个过程我不仅尝试了 DH 建模方法，也学习到了如何阅读机器人数据手册，从而查找其基本性能指标、关节构型和连杆尺寸等关键参数来帮助建模。从理论到实际，将抽象的运动学理论具象化，有效地强化我的学习效果。

这次实验对我的 Matlab 编程能力也有很大的提升，对程序的改写，从三自由度到六自由度的转变，让我熟悉了代码编写和修改技巧，提高了在 Matlab 环境下的编程能力。在这个过程中，我学会了如何根据实际需求调整代码结构、增加关节角参数，以及实现机器人的仿真运动。

在分析 IRB2600 工作空间时，通过对立体图、剖面图和俯视图的观察与分析，我掌握了绘制机器人工作空间的方法，学会了如何从不同角度观察和理解机器人的运动范围，认识到连杆长度、关节构型和关节运动范围对工作空间的影响。

附加任务则进一步拓展了我的思维。在天舟转位和飞行轨道相关任务中，通过模拟实际运动场景，使我学会了运用机器人运动学知识解决复杂的实际问题，培养了我的创新思维和工程应用能力，让我认识到机器人技术在航天等领域的拓展应用和重要价值。

本次实验也让我认识到自己的不足之处。在代码编写过程中，有时会因为对实际运动场景的理解不够深入，导致程序出现错误。在分析复杂运动场景时，对细节的理解比较生疏，需要反复推理，效率较低。在今后的学习中，我将加强对专业知识的学习，提高代码编写的熟练度和准确性，注重细节，不断提升自己解决复杂问题的能力。

这次实验真的是一次非常宝贵的学习经历。