

华中科技大学

大学生创新训练项目结题报告

项目名称：基于手眼协调与关节柔顺的智能跟踪式充电机器人技术研究

所属一级学科：机械工程

项目负责人：费智鹏

专业：机械设计制造及其自动化

院系：机械学院

申请资助经费：20000 元

指导老师：赵兴炜

导师所在单位：机械科学与工程学院

实施起止时间：2023. 3. 10-2024. 3. 10

填表时间：2023. 4. 17

华中科技大学本科生院编制

一、项目成员							
申 请 人 或 团 队	姓名	学号	年级	QQ	所在院(系)、专业	联系电话	项目分工
	费智鹏	U202110833	大三	2931221930	机械学院（机器人）	15399927780	机械臂操作与 控制
	陈星宇	U202110867	大三	2028631291	机械学院（机器人）	15141778117	机械臂操作与 控制
	陈彬	U202110898	大三	348569476	机械学院（机器人）	15073843476	机械臂操作与 控制
	秦靖凯	U202110875	大三	1299804650	机械学院（智能制造）	15239013126	视觉识别
	李昊轩	U202110805	大三	1310428263	机械学院（智能制造）	13722793684	视觉识别
团队名称：FOCUS 团队电动汽车无人充电项目组							
指 导	姓名：赵兴炜	年龄：34	工作单位：机械科学与工程学院				

项目综述：

本项目旨在通过自动充电设备和控制策略的优化，推广自动充电技术的使用。采用六轴协作机械臂作为主要载体，适配深度相机进行数据采集，以混合视觉伺服控制为核心，结合卡尔曼滤波对目标位置进行估计，实现闭环控制，从而达到较高的控制精度。通过柔顺的末端专用夹具的设计，适配不同型号的充电口，提高充电的适用性和可调整性。项目可行性较高，并有望推进新能源汽车的智能化进程，提高用户的驾驶体验。

一、研究内容

本创新项目主要研究**混合视觉伺服（Hybrid visual servoing, HVS）**结合**六轴串联机械臂**对充电接口进行**视觉识别**并控制机械臂完成充电动作的过程以及充电枪夹具和**末端柔顺机构**的设计。具体内容如下：

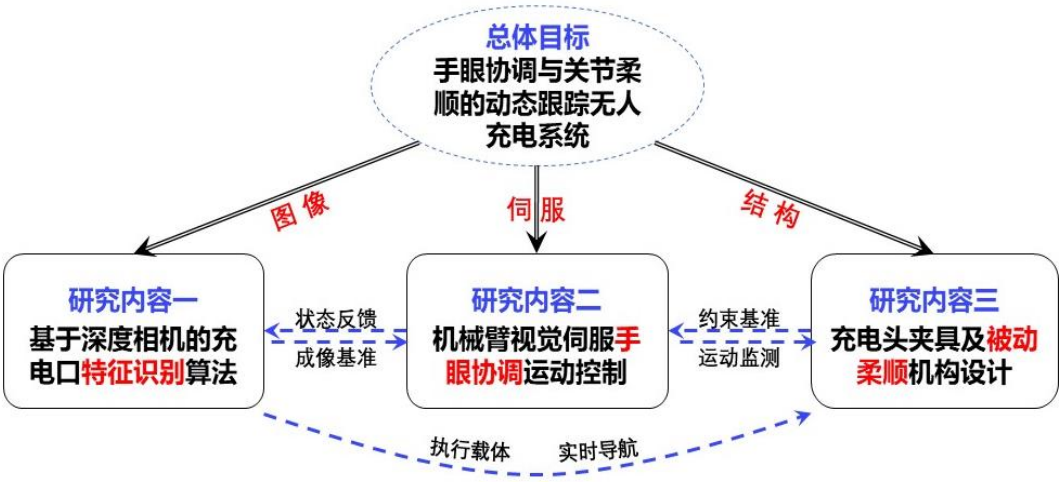


图 1 研究内容框图

1、深度相机接口特征识别算法。根据相机安装位置的不同，可以分为眼在手上(eye-in-hand)和手在眼外(eye-to-hand)两种结构。本创新项目计划使用**手在眼外（eye-to-hand）**结构。

2、机器人手眼协同标定算法。由于相机被固定在机械臂末端执行器上，在机械臂运动过程中相机易受振动的影响，从而改变标定好的手眼关系，目标物可能脱离视场，并且目标物图像可能出现运动模糊导致视觉位置精度下降，需要合理设计机械臂运动速度和机械臂**手眼位置关系**。

3、机器人视觉伺服算法。通过深度相机所反馈的充电口位姿数据，将数据输入视觉伺服系统，再通过**滤波和 PID 控制**输出得到一系列平滑目标点，使机械臂不断向充电口靠近，最终伺服引导机械臂将充电枪插入充电口。

4、六轴串联机械臂高精度运动学建模。建立六轴机械臂的运动学模型，对其进行分析和优化，通过**点位控制、轨迹规划、路径规划**等手段实现机械臂的运动控制。利用视觉伺服所给出的定点输入关节角的位置信息来控制机械臂的伺服运动。

5、机器人末端柔顺及充电枪夹具设计。目前电动汽车的充电方式主要分为直流和交流两种，而直流充电枪和交流充电枪有所不同，为满足批量生产要求，需要设计一款**通用并且满足相关强度**的充电枪夹具。当机械臂接近目标物时相机视野很可能无法完全覆盖目标物，相机获取的目标物坐标数据不全并且误差较大，需要通过**末端柔顺机构补偿相机的误差**，使充电枪顺利插入充电口。

二、研究目的

汽车，是人们出行的重要交通工具。随着科技的不断发展，汽车的动力来源已不再只有汽油与柴油这类一次性能源，天然气、电力等新能源驱动的汽车慢慢走进了人们的日常生活。但是在平时，加气站、充电桩等基础设施的建设速度并不能跟得上新能源汽车的普及速度。充电站等基础设施的建设存在着较大的难题，存在着找充电桩难、各式充电桩操作不统一、充电平台拥堵等问题，其中最为主要的困难

就是建设充电站需要大量的资金并且需要配备大量的充电值守人员，**人力成本过高且效率低下，充电服务能力过低。**

车辆无人驾驶也是汽车发展的一大趋势，包括美国、日本、德国、中国等在内的国家和地区都在进一步加快无人驾驶领域的布局，开展了无人驾驶车辆智能水平评价研究。目前而言，无人充电技术的研究和投入使用具有着很大的战略和实际价值。

若要进一步扩大我国的新能源汽车的市场，就要解决充电站等基础设施的建设问题，而解决这一问题的最主要的部分就是解决建设充电站并维护的成本与充电服务带来的单位时间的收益问题。因此，为提高充电站的充电服务效率并降低人工值守成本，**我们将对机械臂对汽车充电口的动态跟踪展开研究。**



图 2 固定式充电系统



图 3 自动充电系统

本项目将分为**视觉识别与机械臂操作控制**两组开展。视觉方面从识别汽车充电口入手，识别完成后在 ROS 平台将识别的结果发送到机械臂控制节点，作为机械臂的眼睛指引机械臂的精准移动。机械臂方面利用 ROS 平台实现到充电口的视觉伺服控制，并控制充电头顺利、稳定地与汽车充电口对接。最终两部分共同完成一套完整的**基于手眼协调与关节柔顺的动态跟踪无人充电系统。**

三、研究路线

研究路线主要分为四个方面：

3.1、深度相机特征识别算法：

- 1、利用 OpenCV 库中的标定方法**对相机内参进行标定。**
- 2、实现对**充电口特征**的精确识别，以便找到目标对象。
- 3、实现对**充电口三维位置数据**的获取，为机械臂的运动提供坐标点。

3.2、机器人视觉伺服控制算法：

- 1、实现输入深度相机的 RGB 彩色图像和深度图像，以及机械臂的关节角信息，**输出机械臂的运动速度。**
- 2、**建立机械臂的运动学模型**，对其进行分析和优化，通过点位控制、轨迹规划、路径规划等手段实现机械臂的运动控制。
- 3、实现在机械臂运动过程中**对坐标点位置数据的不断矫正**，使得机械臂可以更加精准的对准充电口。
- 4、**融合 PID 控制与滤波处理**的方式对算法进行修改，以求获得更好的坐标精度。

3.3、高精度机器人手眼标定算法：

- 1、确定需要使用哪种视觉传感器、标定精度等，并掌握手眼标定的基础算法，如正交投影法、4 点法和最小二乘法等。
- 2、**确定 RGB 相机坐标系下充电口的位置和姿态。**
- 3、确定 RGB 相机坐标系和机械臂的基坐标系之间的变换关系，**将目标物的姿态由 RGB 相机坐标系转换到机械臂的基坐标系下。**
- 4、构建混合视觉伺服运动控制器，得到并不断更新机械臂速度。

3.4、机器人末端柔顺机构设计：

- 1、被动柔顺机构的主要特点是柔性，因此其结构**必须具有足够的柔性和柔韧性。**

2、选择具有高可靠性、高精度和高精度的机构组件，并且能够控制机构的运动轨迹和速度。

3、优化设计各项参数，如机构长度、关节位置、材料分布等。优化时考虑到机构工作所需要的特性，如角度、力矩、速度等，对机构所受的载荷进行结构计算和材料力学计算。

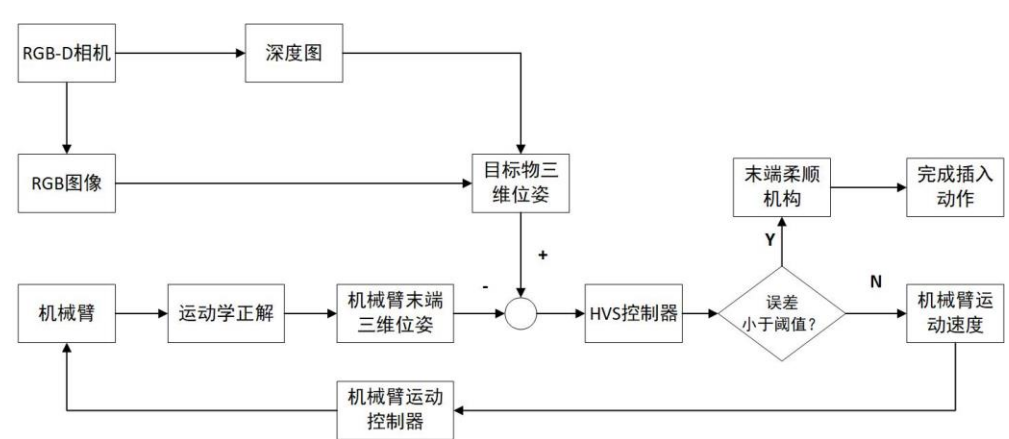


图 4 项目实施方案

四、项目创新以及特色

1、深度相机特征识别算法。采用**轮廓特征识别算法**，该算法从深度图像中提取物体的轮廓信息，通过计算物体周长、面积等特征进行识别。并采用标记点提取方法通过将点云数据中的特征点提取出来，计算充电口的位置、半径、法向量方向等特征，并进一步识别轮廓特征，最后结合点云数据的特点进行优化，以提高识别的准确性和稳定性。

2、机器人视觉伺服控制算法。采用**混合视觉伺服技术 (Hybrid visual servoing, HVS)**，一方面，将传统的开环控制系统变为更可靠的闭环控制系统，可以在复杂的环境和条件下正常运行，提升了跟踪的准确性与鲁棒性；另一方面，针对智能充电过程中对对接精度与跟踪速度的较高要求，采用结合了基于位置的视觉伺服 (PBVS) 与基于图像的视觉伺服 (IBVS) 优点的混合视觉伺服技术。通过快速调

整机械臂的位置和位姿实现对充电接口的精确对接，同时对视觉信息的实时捕捉可以实现更高的精度，具有更加广泛的应用前景与实用价值。

3、高精度机器人手眼标定算法。采用**眼在手外 (eye-to-hand)** 的手眼协调技术，将相机固定在机械臂之外，利用深度相机所采集到的数据，通过笛卡尔空间内的机械臂坐标变换求解出相机与机械臂末端坐标系的标定矩阵，然后通过视觉伺服过程对充电口进行精确的对接。对于深度相机所获取的原始数据，**进行滤波处理，再通过 PID 控制**给出机械臂运动的目标点，加强了运动的稳定性。

4、机器人末端柔顺机构设计。设计了特定的**末端被动柔顺机构**，能够被动补偿插头动作时的误差，实现充电头与充电口的精确对接动作；在一定程度上避免机械臂损害充电口的情况发生，被动柔顺具有很好的适应性和变形性能，可以在更为复杂的环境下实现无人充电这一任务。并设计了集充电头更换装置和被动柔顺机构于一体的末端机构执行机构，在机械设计过程中，对末端执行机构进行了应力强度校核与机构选型，通过固定摄像头获取的数据反馈至视觉伺服系统，将充电头送至充电口，再通过柔顺机构减小偏差，使得充电动作完整连贯。实现了智能的汽车充电过程，有效的解决了当前电动汽车市场快速发展带来的部分问题，具有广阔的市场与前景。

五、研究方法以及研究成果

1、深度相机的特征识别算法：

对充电口的识别而言，深度相机可以采用**轮廓特征识别法**，深度相机的轮廓特征识别具体算法一般分为两个步骤：**图像处理和特征提取**。在图像处理阶段，深度相机通过采集传感器产生的图像进行处理，得到三维模型数据。在特征提取阶段，通过对三维模型数据进行处理，识别出轮廓特征。

电车的充电口中具有许多的圆形特征，这使得我们可以采用霍夫变换进行特征圆的识别。霍夫变换可以在 openCV 中进行调用，下图是我们得到的识别效果

图：



图 5 对静止充电口图像的视觉识别

但是仅仅基于霍夫变换只能识别出二维的圆特征，而当充电口的位置不变而姿态变化的情况下，充电枪并不能很好的和充电口进行对接，于是我们采用了在充电口周围布置特征点的方式，先按阈值，识别出四个绿色圆，然后链接圆心形成一个四边形。下图是我们测试的识别效果：

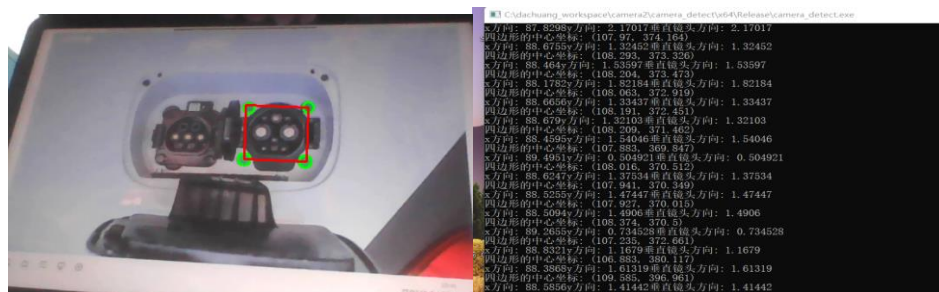


图 6 加入特征点后的识别效果

2、机器人视觉伺服控制算法

视觉伺服的控制方法按照输入控制器误差信号的不同可以分为以下三类：基于位置的视觉伺服(position based visual servoing, PBVS)、基于图像的视觉伺服(image based visual servoing, IBVS)以及混合视觉伺服(homography visual servoing, HVS)。PBVS 控制器设计简单，且能够避开机器人的奇异位姿，实现机械臂在笛卡尔空间的运动轨迹最优，其运动轨迹为直线，但是运动的准确度较差。

IBVS 规划的空间轨迹通常不是最优的，还可能出现机器人的奇异位姿。HVS 综合了 PBVS 和 IBVS 的优点，扩大了系统的收敛域，增强了鲁棒性。但是 HBVS 中单应性矩阵的计算和分解计算量较大，且每一次循环都要进行计算，实时性较差。

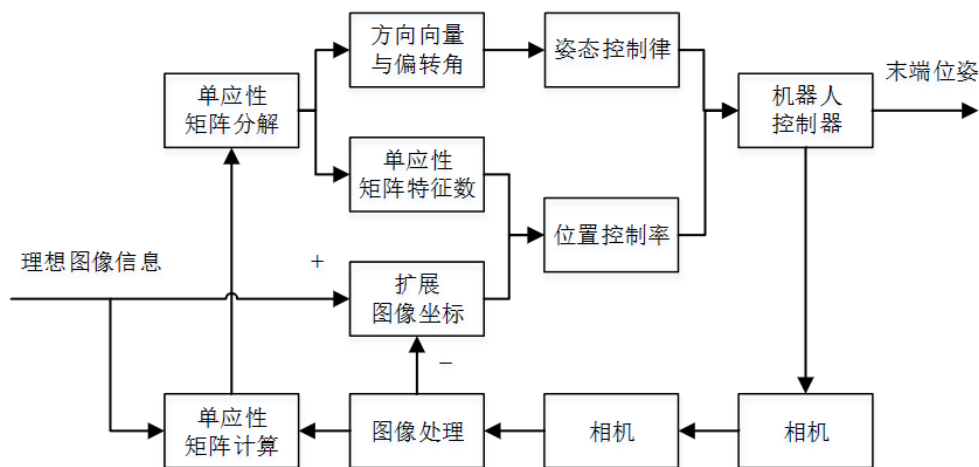


图 7 混合视觉伺服流程图

由于本项目对对接精度要求较高，对实时性要求不大，故采用 HVS 方式最为合适。

由于深度相机所获取到的原始充电口点坐标会由于相机位置误差以及充电口速度不均匀性导致微小轨迹偏移，如果直接将原始目标点给入视觉伺服控制，会导致机械臂运动抖动较大，不利于跟踪运动，故需要引入滤波。较为符合该项目的滤波方案有均值漂移滤波(Mean-shift)、卡尔曼滤波(Kalman Filter)、粒子滤波(Particle Filter)等。在滤波的基础上引入控制方案，为机械臂运动给出平滑运动轨迹点。

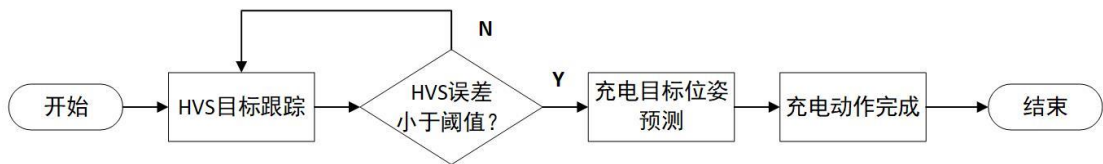


图 8 视觉伺服控制策略

3、机器人手眼标定算法

视觉伺服跟踪抓取系统根据相机安装位置的不同，可以分为眼在手上(eye-in-hand)和手在眼外(eye-to-hand)两种结构。对于该项目，充电口位于三维空间中，并且不一定保持静止。如果采用 eye-in-hand 的结构形式，机械臂和相机都存在运动，目标物容易超出视野，当机械臂接近充电口时相机视野很可能无法完全覆盖目标物，并且对相机对焦范围和对焦精度的要求更大，需要更大的光圈与更好的内部处理器。而采用 eye-to-hand 的安装方式，**图像出现模糊的可能性更小，而且目标物不容易超出视野**，虽然存在机械臂遮挡目标物的情况，但这通常出现在跟踪完成之后，此时只需要进行简单的插入动作，并且可以通过历史信息推测充电口位置，也有被动柔顺机构进行辅助插入保证精度。一个 look-and-move 视觉伺服系统主要有以下几个具体步骤：1、图像识别。2、图像处理。3、决定控制信号。4、传送信号到机器人。

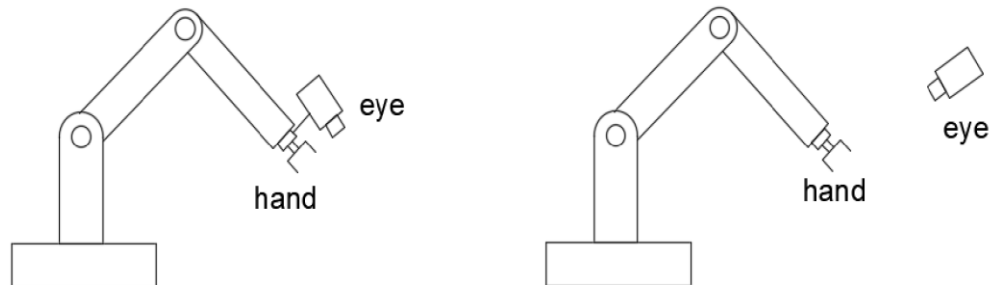


图 9 两种手眼标定系统：eye-in-hand(左) eye-to-hand(右)

在手眼标定的系统中，我们需要标定相机的内参和外参，内参即相机的焦距、畸变参数等；外参即相机坐标系、像素坐标系、机器人末端坐标系的相对位姿关系。相机的集合成像模型如下：

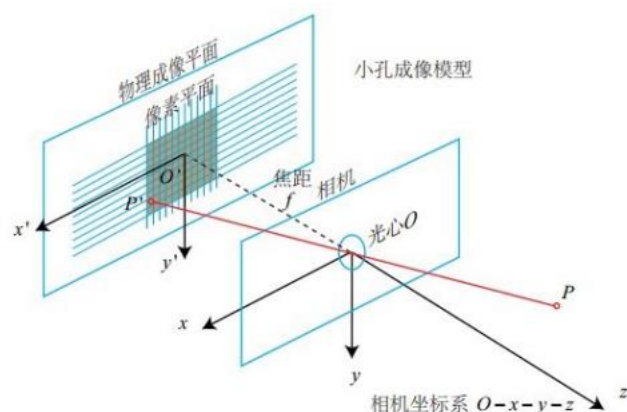


图 10 相机的集合成像模型

对于 Eye-in-hand 手眼标定方式，需要求解工业机器人的末端坐标系与相机坐标系之间的坐标转换关系。Eye-in-hand 手眼标定的原理示意图如图 1 所示。这其中有几个坐标系，基础坐标系（用 base 表示）是机器臂的基底坐标系，末端坐标系（用 end 表示）是机器臂的末端坐标系，相机坐标系（用 cam 表示）是固定在机器臂上面的相机自身坐标系，标定物坐标系（用 cal 表示）是标定板所在的坐标系。任意移动两次机器臂，由于标定板和机器臂的基底是不动的，因此对于某个世界点，其在 base 坐标系和 cal 坐标系下的坐标值不变，在 end 坐标系和 cam 坐标系下的坐标值随着机器臂的运动而改变。根据这一关系，可以求解出 end 坐标系和 cam 坐标系之间的转换矩阵。具体求解过程如下。

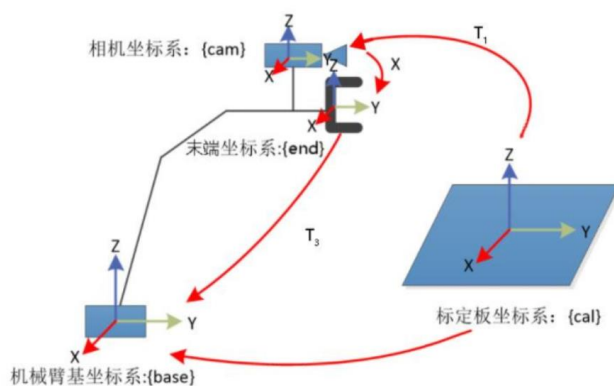


图 11 相机各坐标系关系示意图

对于像素坐标系和世界坐标系的关系，我们用如下公式来表示：

$$\begin{bmatrix} \mu \\ \nu \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & c_x \\ 0 & \frac{1}{dy} & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \boldsymbol{\theta}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

式中， $P_W = (X_w, Y_w, Z_w)$ 为物体在世界坐标系下的坐标。

我们在 ROS 操作系统中，采用 ROS 官方提供的用于双目和单目摄像头标定的功能包——camera_calibration 库进行相机标定。

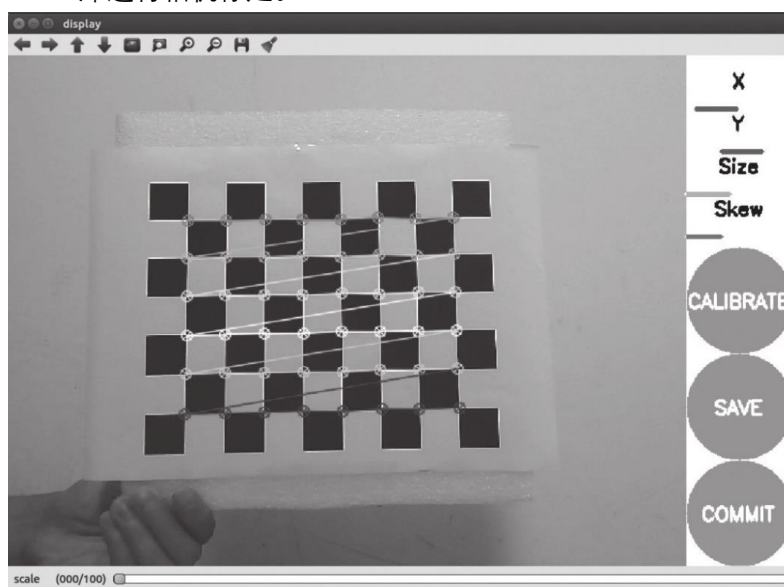


图 12 相机标定图

最后，我们得到如下图所示的标定 yaml 文件：

```
image_width: 640
image_height: 480
camera_name: head_camera
camera_matrix:
  rows: 3
  cols: 3
  data: [439.6234769999068, 0, 329.1354526492094, 0, 439.1576335614732, 286.8884640124577, 0, 0, 1]
  # [fx 0 cx; 0 fy cy; 1]
distortion_model: plumb_bob
distortion_coefficients:
  rows: 1
  cols: 5
  data: [0.08472154338835937, -0.06381372340459442, 0.006147385036118425, 0.001012179978188733, 0]
  # [k1 k2 p1 p2 k3]
rectification_matrix:
  rows: 3
  cols: 3
  data: [1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1]
projection_matrix:
  rows: 3
  cols: 4
  data: [453.465576171875, 0, 329.3728335279593, 0, 0, 449.7862854003906, 289.5592830521382, 0, 0, 0, 1, 0]
```

图 13 相机内参标定文件

4、末端柔顺机构设计

我们采用末端夹具的柔顺性设计，使得其可以在插入是具有一定的可调整性，可自调整性以及专用夹具的设计可以避免型号不同，而产生的工具坐标系与机械臂末端坐标系的相对位姿变化，实现较好的适用性。

我们在柔顺机构的末端，采用弹簧进行位移的补偿，在前端采用线控的折纸机构进行姿态的补偿。柔顺机构建模如图所示：

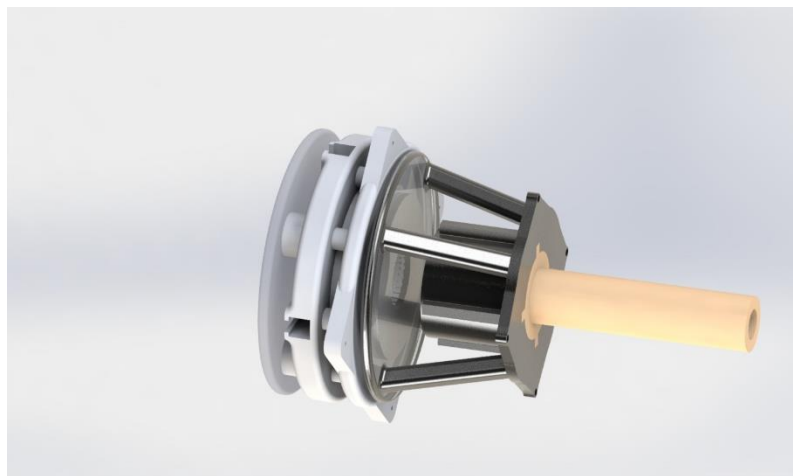


图 14 柔顺机构示意图

我们对零部件进行打印并安装充电枪，实物图如图所示：



图 15 柔顺机构实物图

5、真实机械臂驱动方式

我们在 ROS 操作系统下进行机械臂仿真与控制，采用 python 编程，其中主要使用 ur_rtde 接口进行真实机械臂驱动。

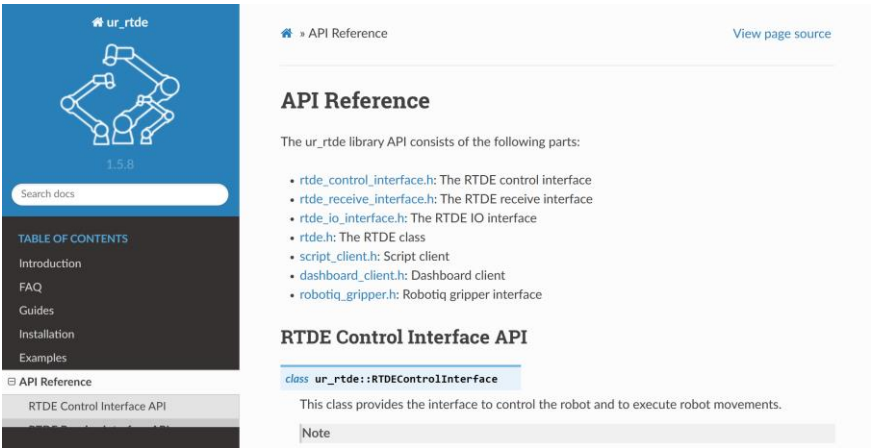


图 16 ur_rtde 界面

6、机械臂仿真与实验效果

我们在 Gazebo 软件中对 ur5 机械臂进行仿真控制，效果如下：

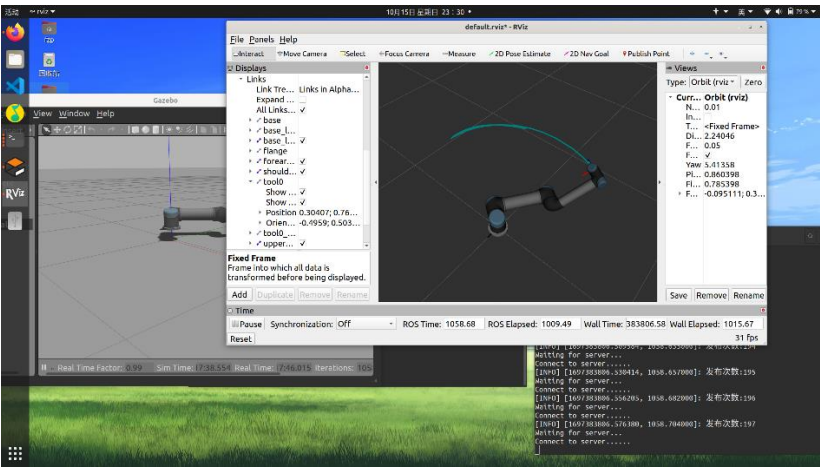


图 17 Gazebo 仿真画面

操控真实机械臂进行伺服控制的成果如下：



图 18 实机效果图