加油杆的运动控制算法

本文档用于分析设计基于机器人的加油杆自动对接算法设计。加油杆以刚性方式固定安装在机器人的末端，加油杆末端安装有深度相机，用于检测跟踪飞机受油孔。

1. 坐标系定义

在该问题中，存在以下坐标系：

1) 机器人坐标系，以机器人的基座为原点，记作。该坐标系中，机械臂向前伸展方向为X轴，垂直大地向上为Z轴。机器人的姿态角是以大地坐标系为基准，但是需要注意的是，我们习惯的欧拉角是以飞机机体坐标系为参考，俯仰角围绕Y轴，滚转角围绕X轴。而在机器人坐标系中，俯仰角围绕Y轴，且正俯仰角导致加油杆低头。滚转角围绕X轴。在后续计算中需要对此加以注意。

2) 加油杆末端坐标系，记作，其方向定义与一致。机器人将加油杆末端设置为TCP，应当对其进行标定校准。需要注意的是，加油杆在安装时，应当尽量确保油杆坐标系与机器人末端坐标系的方向完全一致，从而确保其姿态准确。

3) 相机坐标系，记作，需要相对加油杆末端坐标系进行标定。



图1. 坐标系定义

2. 给定加油杆姿态和伸缩量时的机器人控制

真实加油机上，加油杆末端铰接在机身上，可以在一定范围内伸缩。用机器人模拟时，由于油杆本身无法伸缩，因此需要由机器人改变位姿以模拟。在机器人坐标系中设定一个虚拟锥尖，模拟加油杆在飞机上的铰接点。机器人运动时，应当使加油杆的延长线总在该锥尖汇聚。



图2. 加油杆运动模拟原理

假设虚拟锥尖在机器人坐标系中的坐标是，相当于偏移控制的初始位置，即将TCP点设置在真实杆的末端，当伸缩量L为0时,当前TCP点所在位置。加油杆姿态为(没有滚转)，加油杆始端距离虚拟锥尖的伸出量为。计算加油杆末端在机器人坐标系中的坐标：

机器人坐标系中的旋转矩阵为

由于加油杆滚转角恒定为，因此旋转矩阵简化为

加油杆末端相对虚拟锥尖的坐标为

加油杆末端在机器人坐标系中的坐标为

由于加油杆坐标系与机器人坐标系方向一致，因此姿态角不需要进行变换。机器人的控制位姿为

3. 基于视觉跟踪控制机器人

假设机器人手眼标定已经完成，深度相机观测到的目标坐标已被转换到加油杆末端坐标系中。在加油杆末端坐标系中，目标坐标为。该坐标为目标与加油杆末端的偏移量。



对于实际加油杆，应当通过目标在平面上的坐标，控制油杆的俯仰角和偏航角，使油杆末端对准目标点，然后令油杆伸出，插入受油孔中。因此，控制系统采取增量控制，包含三个独立控制量。

机器人模拟加油时，需要通过位姿变化模拟上述控制量。假设加油杆前一时刻的状态为，控制增量为，则机器人的位姿为。加油杆的新状态为。将该状态带入式1，即可得到机器人的新控制量。

4. 深度相机的标定

相机的标定参见《深度相机条件下的机器人手眼标定》。这里重点考虑欧拉角和平移量的初值设定。由图1可知，欧拉角的初值为，平移量为。

目标点相对于虚拟椎尖之间的偏移量

根据得到的偏移量算出偏航角为arctan（y/x）俯仰角为arctan（z/x）L=(x^2+y^2+z^2)^1/2

根据得到的角度减去当前的角度即可得到控制偏移量，根据偏移量大小设置不同的步长（即固定频率下的变化速率）越接近目标变化越慢。