《机器人学导论》课程设计

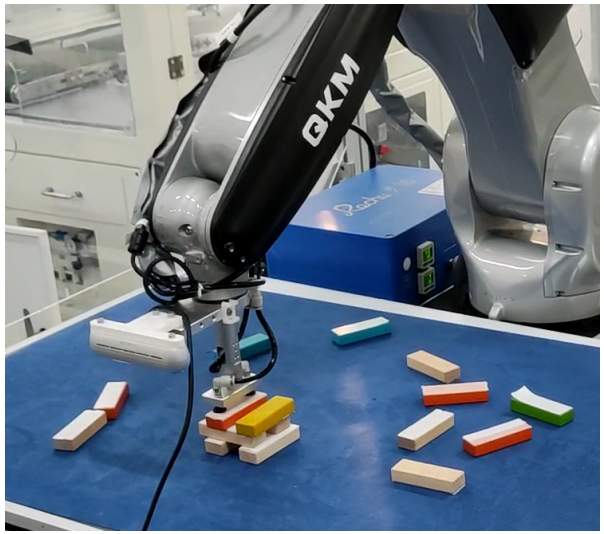
肖书奇

2021 年 6 月 11 日

目录

堆积木

- Intel Realsense D455 相机
- QKM SI7400 开放式六轴串联机器人



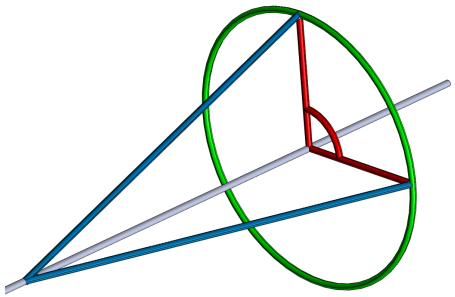
要求：

1. 积木随机散落桌面上；
2. 可以指定积木的搭建方法；
3. 越高越好，越快越好。

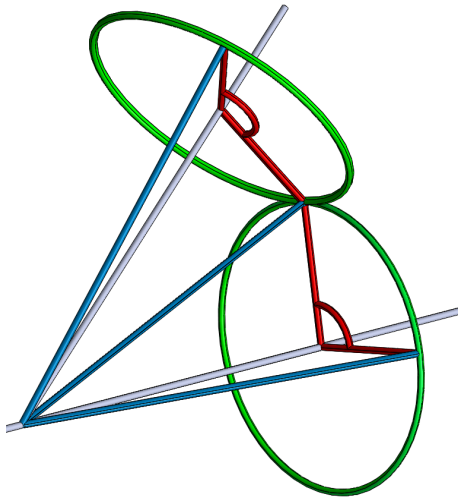
子任务与解决方案

	子任务	解决方案
1	手眼标定	迭代法解 Perspective-n-Point 问题
2	物体识别	HSV 颜色分割与矩形识别
3	逆运动学	旋量理论与 Paden-Kahan 子问题求解
4	路径规划	凸优化求解含约束条件的几何中点
5	轨迹规划	操作空间下梯形速度规划
6	网络通信	Socket 实现 TCP、FTP 协议
7	底层控制	控制器样条拟合 Ping-pong buffer 点位文件
8	仿真	齐次变换求解正运动学；欧拉角可视化

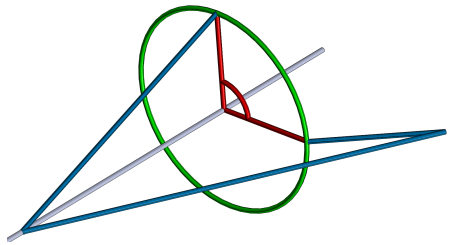
逆运动学：旋量理论与 Paden-Kahan 子问题求解



$$e^{\hat{\xi}\theta}p = q$$



$$e^{\hat{\xi}_1\theta_1}e^{\hat{\xi}_2\theta_2}p = q$$



$$\|q - e^{\hat{\xi}\theta}p\| = \delta$$

路径规划：围绕最优搭建中心的分段直线

关键是确定“积木塔”的位置

- 与各个积木初始位置的距离之和最小
- 不可与积木初始位置重叠

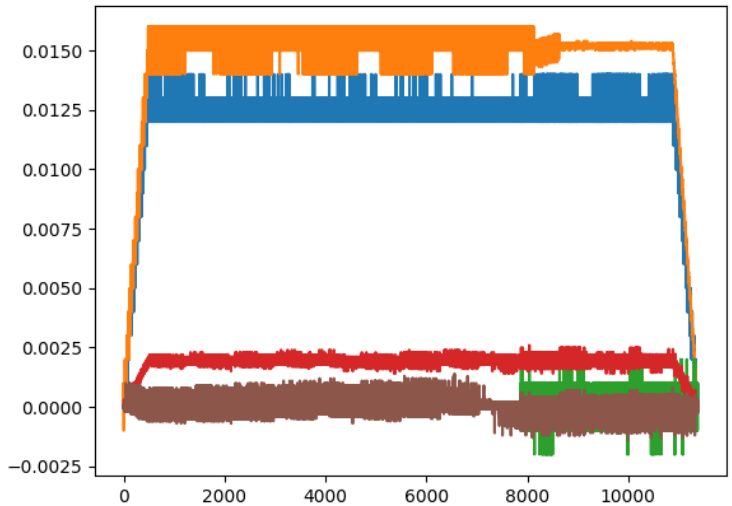
$$p = [x, y, z, r, p, y]^T, \quad f(p) = \sum_{i=1}^{N} \|p - q_i\|$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & \|p - q_i\| \geq k \\ \min \quad & f(p) \end{aligned}$$

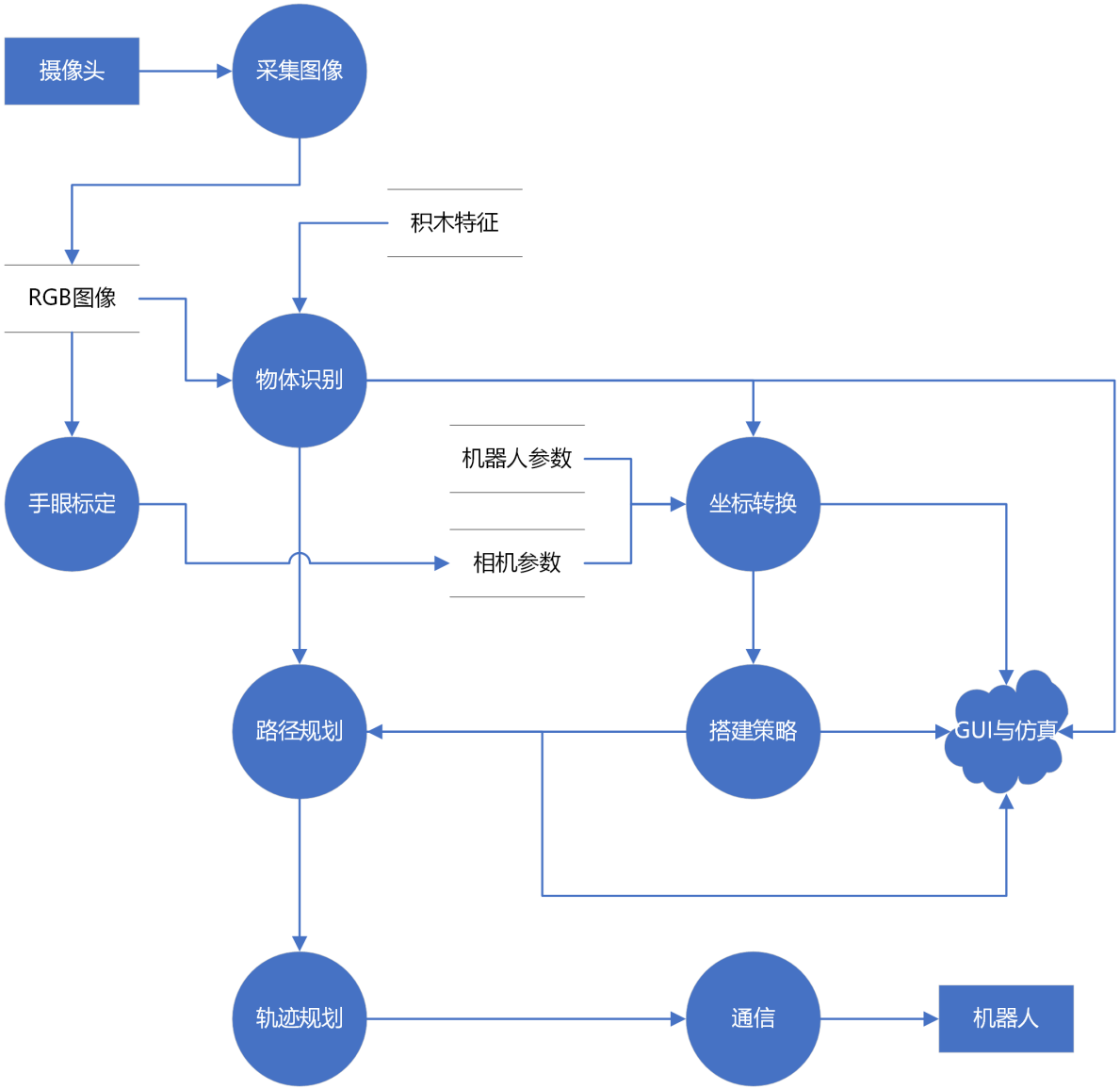
- 含简单约束的凸优化问题，用数值方法求解
- 自行编写的算法时间复杂度为 $O(MN^2)$
  M 为搜索范围，N 为物体数目。

轨迹规划:操作空间,梯形速度

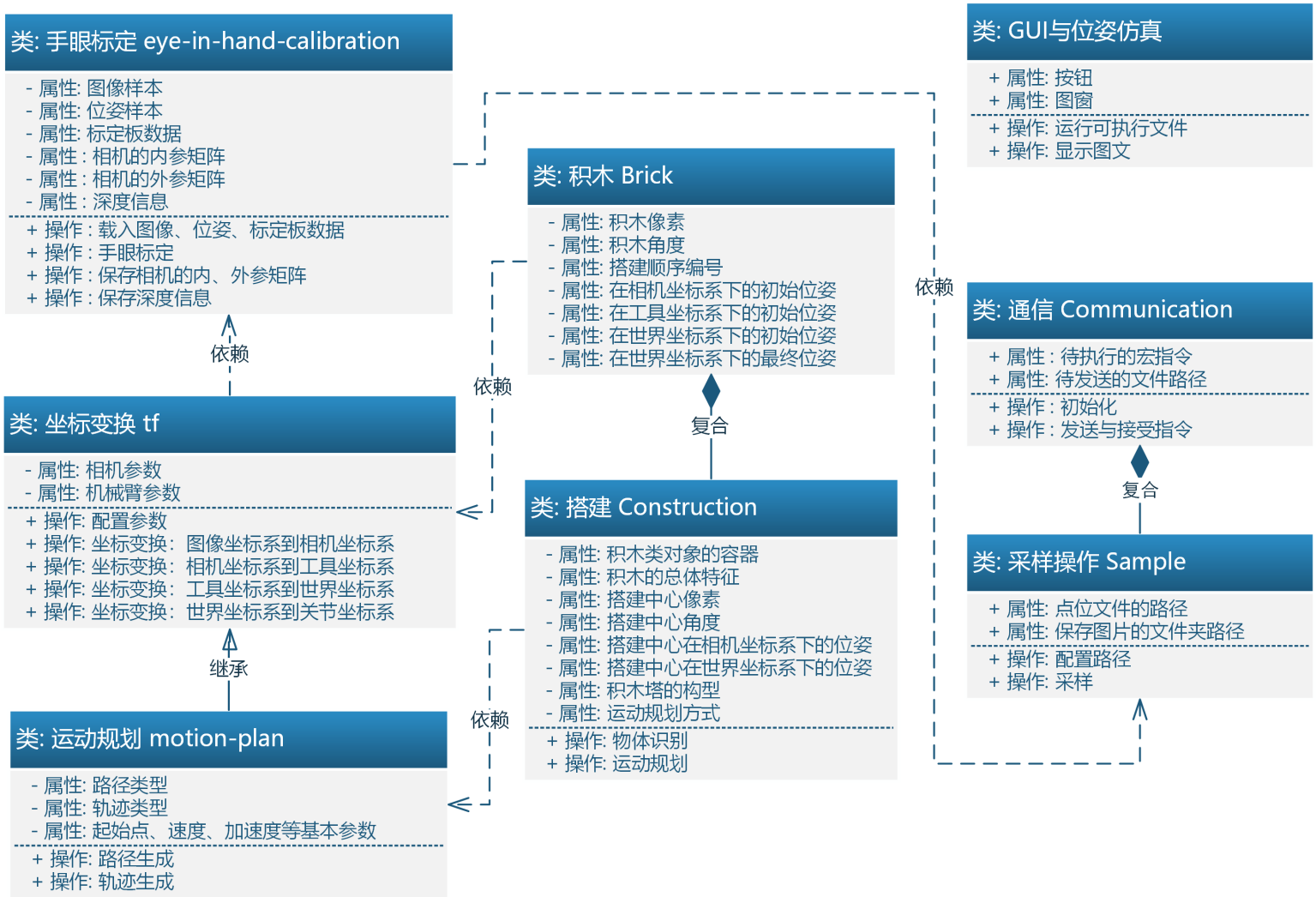
$$\vec{x}(n+1)-\vec{x}(n)=\begin{cases}\frac{1}{2}a_{acc}\vec{k}t_s^2(2n+1) & 0<n<N_{acc}\\ v\vec{k}t_s & N_{acc}<n<N_{dec}\\ v\vec{k}t_s-\frac{1}{2}a_{dec}\vec{k}t_s^2(2n+1-2N_{dec}) & N_{dec}<n<N\end{cases}$$



系统设计:UML 数据流图



系统设计：UML 类图


类: 手眼标定 eye-in-hand-calibration
- 属性: 图像样本
- 属性: 位姿样本
- 属性: 标定板数据
- 属性 : 相机的内参矩阵
- 属性 : 相机的外参矩阵
- 属性 : 深度信息
+ 操作 : 载入图像、位姿、标定板数据
+ 操作 : 手眼标定
+ 操作 : 保存相机的内、外参矩阵
+ 操作 : 保存深度信息
依赖
类: 坐标变换 tf
- 属性: 相机参数
- 属性: 机械臂参数
+ 操作: 配置参数
+ 操作: 坐标变换：图像坐标系到相机坐标系
+ 操作: 坐标变换：相机坐标系到工具坐标系
+ 操作: 坐标变换：工具坐标系到世界坐标系
+ 操作: 坐标变换：世界坐标系到关节坐标系
继承
类: 运动规划 motion-plan
- 属性: 路径类型
- 属性: 轨迹类型
- 属性: 起始点、速度、加速度等基本参数
+ 操作: 路径生成
+ 操作: 轨迹生成
依赖
依赖
依赖
类: 积木 Brick
- 属性: 积木像素
- 属性: 积木角度
- 属性: 搭建顺序编号
- 属性: 在相机坐标系下的初始位姿
- 属性: 在工具坐标系下的初始位姿
- 属性: 在世界坐标系下的初始位姿
- 属性: 在世界坐标系下的最终位姿
复合
类: 搭建 Construction
- 属性: 积木类对象的容器
- 属性: 积木的总体特征
- 属性: 搭建中心像素
- 属性: 搭建中心角度
- 属性: 搭建中心在相机坐标系下的位姿
- 属性: 搭建中心在世界坐标系下的位姿
- 属性: 积木塔的构型
- 属性: 运动规划方式
+ 操作: 物体识别
+ 操作: 运动规划
类: GUI与位姿仿真
+ 属性: 按钮
+ 属性: 图窗
+ 操作: 运行可执行文件
+ 操作: 显示图文
依赖
类: 通信 Communication
+ 属性 : 待执行的宏指令
+ 属性: 待发送的文件路径
+ 操作 : 初始化
+ 操作 : 发送与接受指令
复合
类: 采样操作 Sample
+ 属性: 点位文件的路径
+ 属性: 保存图片的文件夹路径
+ 操作: 配置路径
+ 操作: 采样

工程实现

- C++17 编写，MinGW g++ 构建；
- GUI 与位姿仿真使用 Python 编写。

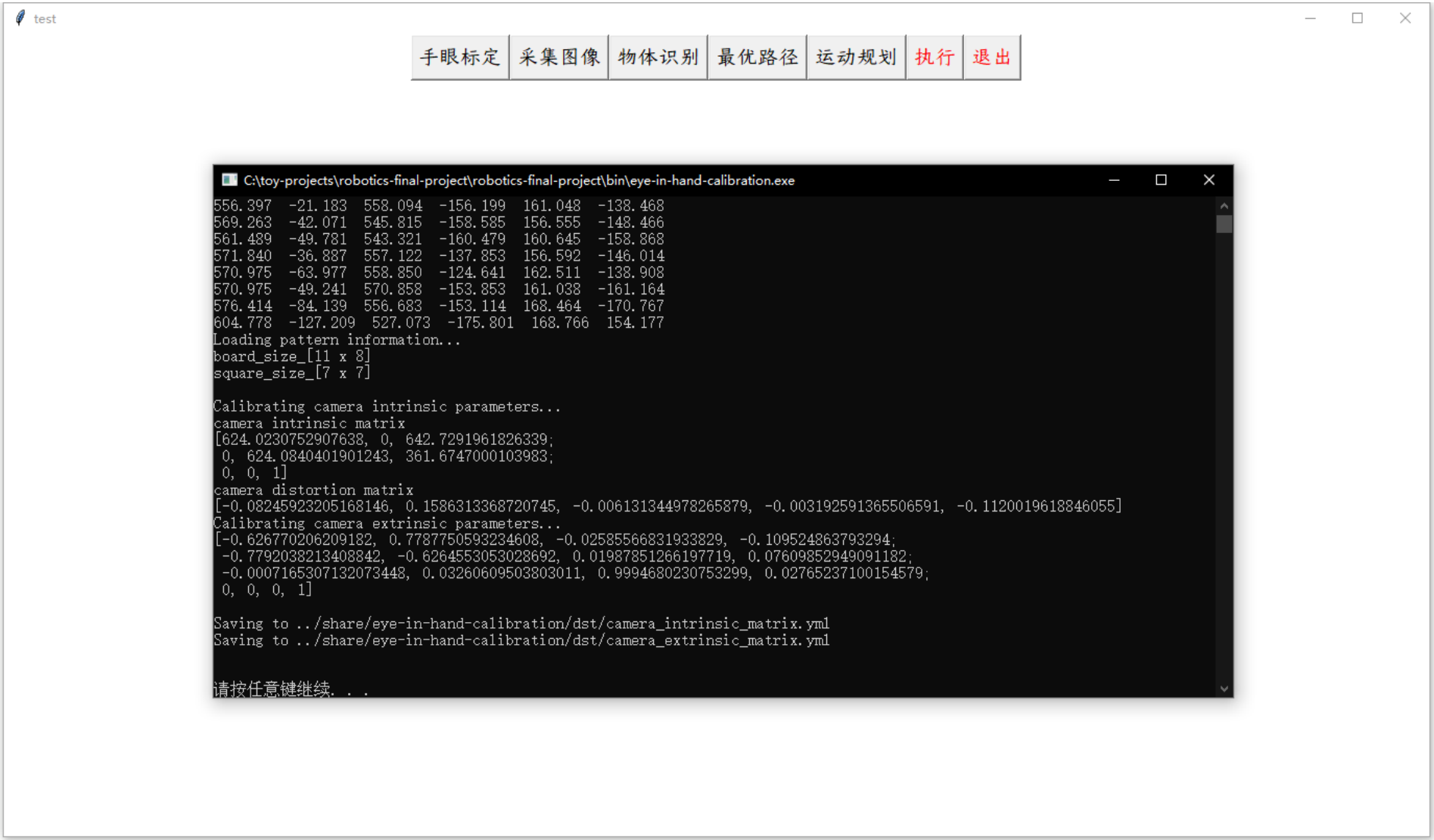
```cpp
// Sampling for eye-in-hand calibration
Sample calibration_sample("../share/eye-in-hand-calibration/src",
                          "../share/eye-in-hand-calibration/src/rpy.txt");
calibration_sample.~Sample();

// Calibration
EyeInHandCalibration calibration("../share/eye-in-hand-calibration/src", 11, 8, 7, 7);
calibration.Calibrate("../share/eye-in-hand-calibration/src");
calibration.~EyeInHandCalibration();

// Sampling for construction
Sample src_sample("../share/sample",
                  "../share/sample/rpy.txt");
src_sample.~Sample();

// Detection, Generating trajectories, Log
Construction construction;
construction.BricksDetection();
construction.Solution();
construction.Log();

// Ping-Pong buffer application
Communication ppb_application;
ppb_application.SendInstruction("[0# System.Auto 1]");
ppb_application.SendInstruction("[0# PPB.Enable 1,1]");
ppb_application.SendInstruction("[0# Robot.Frame 1,1]"); // joint space

int traj_num = 0; // the number of trajectories
for (const auto &entry : std::filesystem::directory_iterator("../share/motion-plan/dst"))
{
    if (entry.path().extension() == ".txt")
    {
        std::cout << entry.path() << std::endl;
        FtpControl::Upload("192.168.10.101", "data", entry.path().string(), std::to_string(traj_num) + ".txt");
    }
    traj_num++;
}
for (size_t i = 0; i < traj_num; i++)
{
    ppb_application.SendInstruction("[1# PPB.ReadFile 1,/data/" + std::to_string(i) + ".txt]");
    // 1 - move to the first point in the file, 0 - right-hand frame, 1 - rpy representation
    ppb_application.SendInstruction("[2# PPB.J2StartPoint 1,0,1]");
    ppb_application.SendInstruction("[3# PPB.Run 1]");
    ppb_application.SendInstruction("[4# WaitTime 2000]");
}
```

主函数

```
include
├ ...
src
├ ...
test
├ ...
share
├ eye-in-hand-calibration
| ├ dst
| | ├ camera_extrinsic_matrix.yml
| | ├ camera_intrinsic_matrix.yml
| | ├ offset.txt
| └ src
| | ├ 01.png
| | ├ 02.png
| | ├ ...
| | └ rpy.txt
├ motion-plan
| ├ simulation
├ target-recognition
| ├ dst
| └ src
└ log.txt
bin
├ ...
lib
├ ...
```

文件树

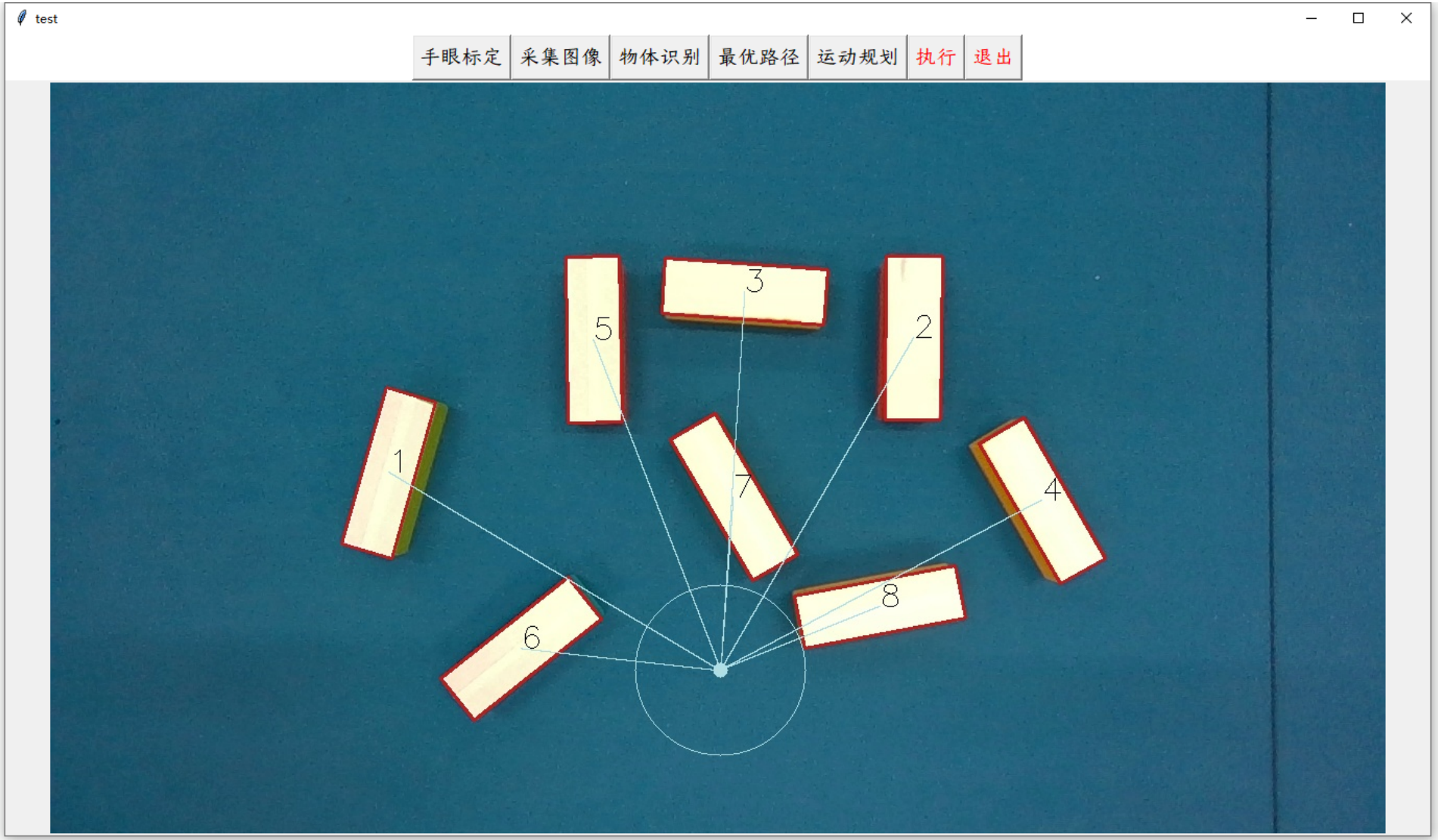
GUI 演示:手眼标定


test
手眼标定
采集图像
物体识别
最优路径
运动规划
执行
退出
C:\toy-projects\robotics-final-project\robotics-final-project\bin\eye-in-hand-calibration.exe
556.397 -21.183 558.094 -156.199 161.048 -138.468
569.263 -42.071 545.815 -158.585 156.555 -148.466
561.489 -49.781 543.321 -160.479 160.645 -158.868
571.840 -36.887 557.122 -137.853 156.592 -146.014
570.975 -63.977 558.850 -124.641 162.511 -138.908
570.975 -49.241 570.858 -153.853 161.038 -161.164
576.414 -84.139 556.683 -153.114 168.464 -170.767
604.778 -127.209 527.073 -175.801 168.766 154.177
Loading pattern information...
board_size_[11 x 8]
square_size_[7 x 7]
Calibrating camera intrinsic parameters...
camera intrinsic matrix
[624.0230752907638, 0, 642.7291961826339;
0, 624.0840401901243, 361.6747000103983;
0, 0, 1]
camera distortion matrix
[-0.08245923205168146, 0.1586313368720745, -0.006131344978265879, -0.003192591365506591, -0.1120019618846055]
Calibrating camera extrinsic parameters...
[-0.626770206209182, 0.7787750593234608, -0.02585566831933829, -0.109524863793294;
-0.7792038213408842, -0.6264553053028692, 0.01987851266197719, 0.07609852949091182;
-0.0007165307132073448, 0.03260609503803011, 0.9994680230753299, 0.02765237100154579;
0, 0, 0, 1]
Saving to ../share/eye-in-hand-calibration/dst/camera_intrinsic_matrix.yml
Saving to ../share/eye-in-hand-calibration/dst/camera_extrinsic_matrix.yml
请按任意键继续. . .

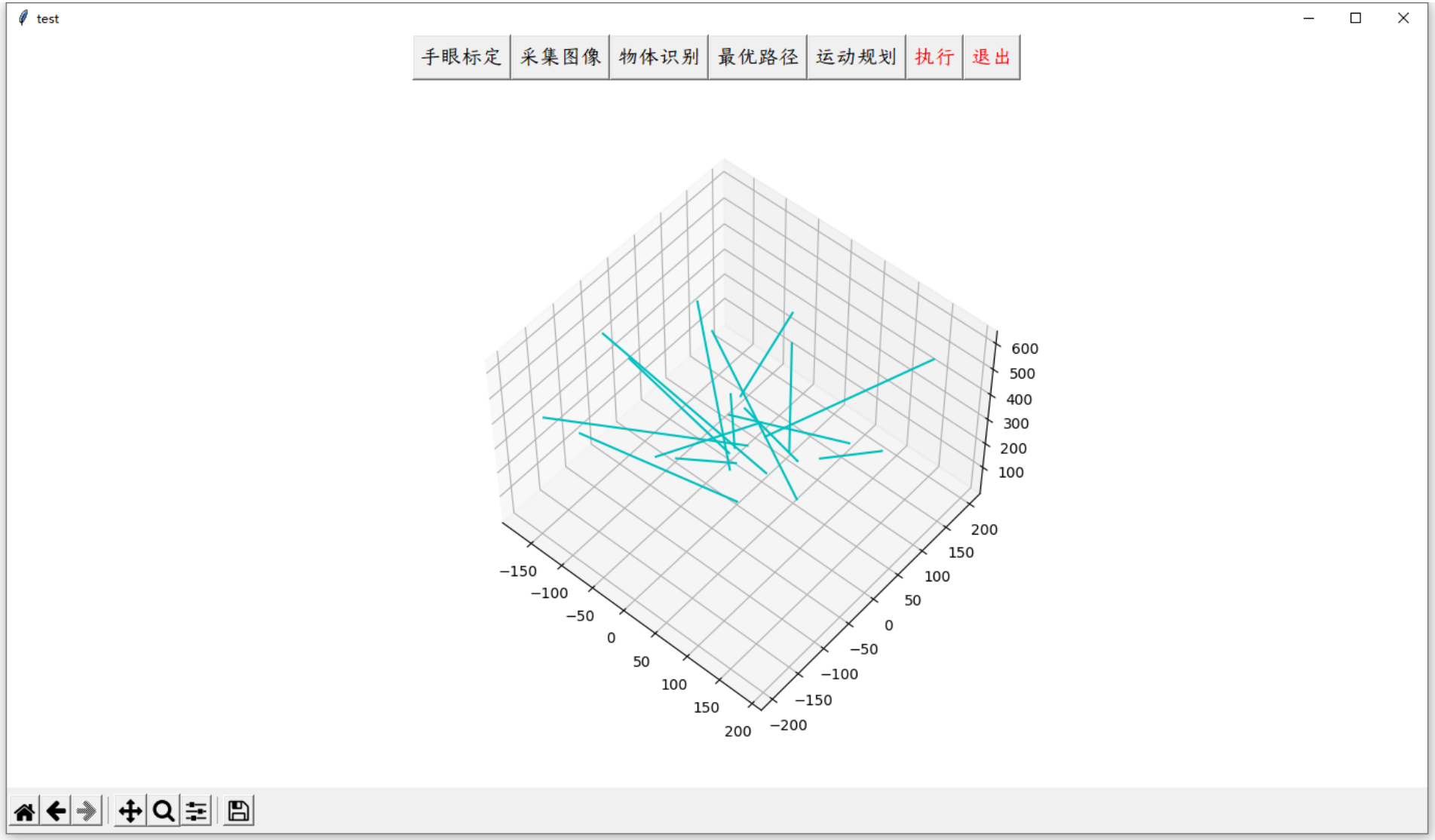
GUI 演示:采集图像

GUI 演示:物体识别

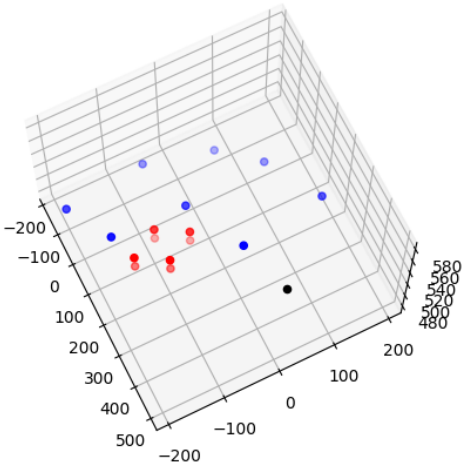
GUI 演示:最优搭建中心

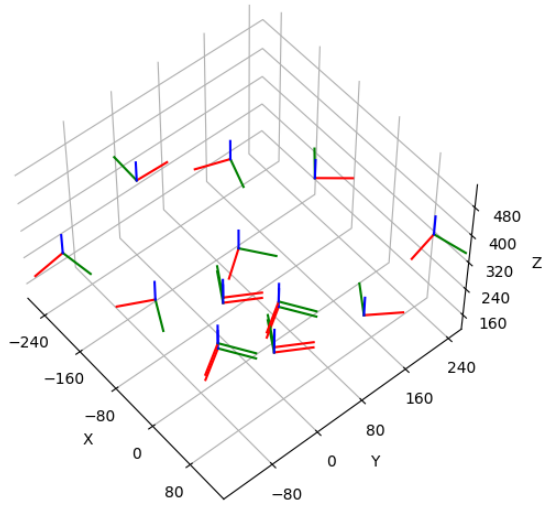


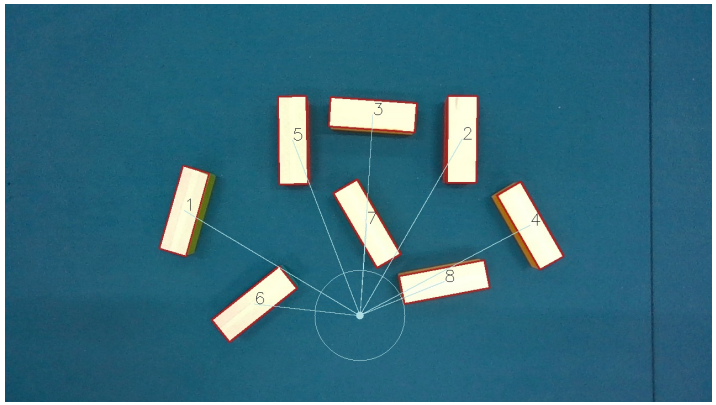
GUI 演示:路径规划


test
手眼标定
采集图像
物体识别
最优路径
运动规划
执行
退出
600
500
400
300
200
100
200
150
100
50
0
−50
−100
−150
−200
−150
−100
−50
0
50
100
150
200

GUI 演示:起点终点的刚体位姿仿真







总结

特色

1. 面向对象的系统设计与实现；
2. 路径规划：凸优化；
3. 刚体位姿的简单可视化仿真；
4. 图形用户界面；

待改进

1. 优化轨迹规划，物体识别等方法；
2. 利用 Realsense 相机的深度信息提升精度；
3. 完善仿真功能；
4. 项目的可维护性；
5. 跨平台；

The End