

# 遨博视觉机器人标品-AUBO-i5-V-2in1 视觉定位精度测试

霍霄<sup>1,\*</sup>, 谢肇阳<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 遨博智能科技有限公司

Version December 1, 2022

## 目录

1 简介	1
2 测试设备介绍	2
2.1 测试硬件设备组成	2
2.2 测试软件组成	3
2.2.1 AuboVision 插件	3
2.2.2 上位机软件	4
2.2.3 在线编程工程示例	4
3 测试方案	4
3.1 特征码定位	5
3.2 模板定位	6
4 数据分析	8
4.1 位置精度分析	8
4.2 姿态精度分析	8
4.2.1 欧拉角法	8
4.2.2 向量夹角法	9
5 视觉引导精度测试结果	9
5.1 特征码定位	9
5.1.1 开环验证	9
5.2 模板定位	10
5.2.1 开环验证	10
6 视觉引导计算时间测试结果	11
6.1 特征码定位	11
6.1.1 开环验证	11
6.2 模板匹配定位	12
6.2.1 开环验证	12
7 测试结果总结	13
7.1 AuboVision 视觉引导定位精度	13
7.2 AuboVision 视觉引导计算时间	13

## 1 简介

在大规模定制生产模式下,产品更新速度快、迭代频繁、多品种小批量订单增多,导致产品线生命周期缩短、工件外形尺寸差异不断增大、无序分拣场景不断增加。智能机器人可以直接读取产品设计信息、模型信息、工艺设计信息、生产管理指令信息,与人工左操作相比,减少教育培训、计划下发反馈等信息传递环

节，实现产品全生命周期的信息集成，奠定工业互联网实施基础，还可取消一些专用工装的制造更换，以自动化、智能化、数字化手段，综合达到降本增效、提高产线柔性、敏捷相应市场需求变化的目的。

在实际应用场景中，工业视觉相机常以“眼在手上”或“眼在手外”的形式与协作机器人进行协同工作，目的是弥补误差、提高执行工作的成功率、稳定工作节拍。

遨博视觉机器人 AUBO-i5-V-2in1 采用“眼在手上”相机安装方式，使用二合一控制器，实现视觉机器人的控制、视觉引导等功能。

在本工作中，对遨博视觉机器人 AUBO-i5-V-2in1 的特征码定位、模板匹配定位的性能进行测试，目标是获得特征码定位、模板匹配定位的定位精度与视觉算法计算时间。

## 2 测试设备介绍

### 2.1 测试硬件设备组成

测试设备为遨博视觉机器人，其组成部分包括 AUBO-i5 六关节协作机械臂，机械臂增高柱，视觉相机。遨博视觉机器人使用一台二合一控制器进行控制，控制器实物图如所示

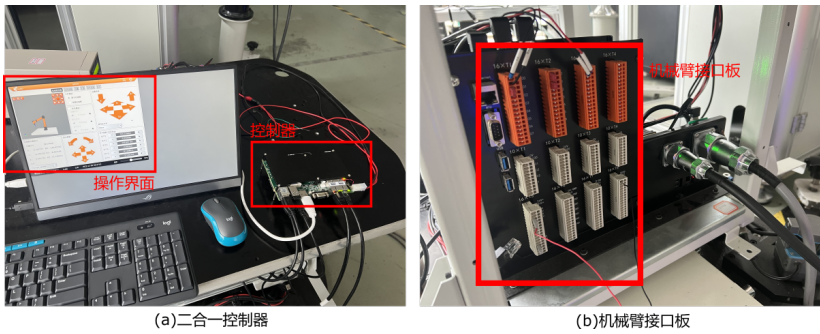


Figure 1: 遨博视觉机器人二合一控制器实物图

海康 2D 视觉相机安装与机械臂末端法兰，型号为 MV-CA060-11GM，使用千兆网口与机器人控制器通信，使用 12V 直流供电。

此外机械臂末端法兰安装有 Aruco 二维码支架，支架上粘贴单个标准 Aruco 二维码，在测试过程中，先使用 AuboVison 视觉插件进行视觉引导，机械臂携带二维码运动至 3D 相机扫描范围内，由 3D 相机进行点云获取。

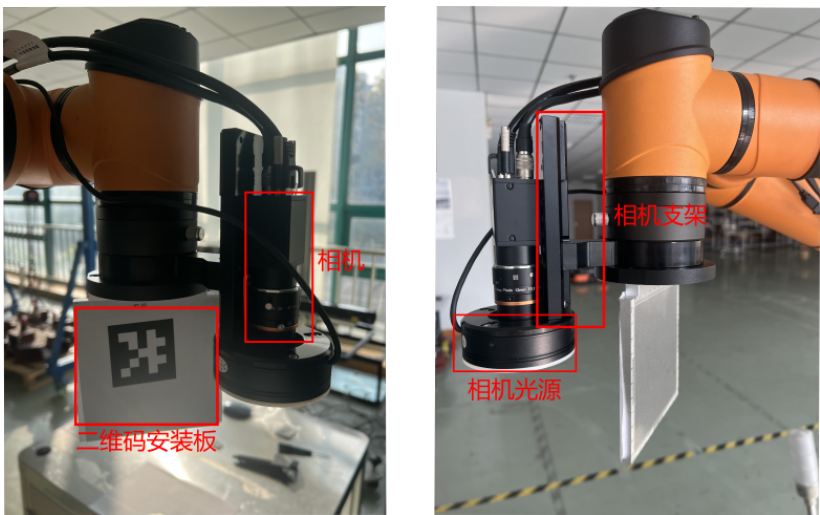


Figure 2: 机械臂法兰末端组件实物图

在测试场景中，布置有一台 3D 相机，型号为 PhoXi 3D Scanner L，固定在由型材搭建的相机支架上，其工作内容为获取点云数据。



Figure 3: 3D 相机安装图

在测试场景中，布置有一台数据处理的工控机，指一台上位机，上位机使用 ubuntu 系统，工作内容为启动 3D 相机扫描点云，以及点云数据的处理和位姿数据存储。

## 2.2 测试软件组成

### 2.2.1 AuboVision 插件

在测试过程中使用 Aubovision 插件，插件运行于视觉机器人控制器中，其功能包括初始化/断开设备、模板匹配定位、特征码定位、相机标定、相机配置以及机械臂示教。Aubovision 插件界面如图 4所示：

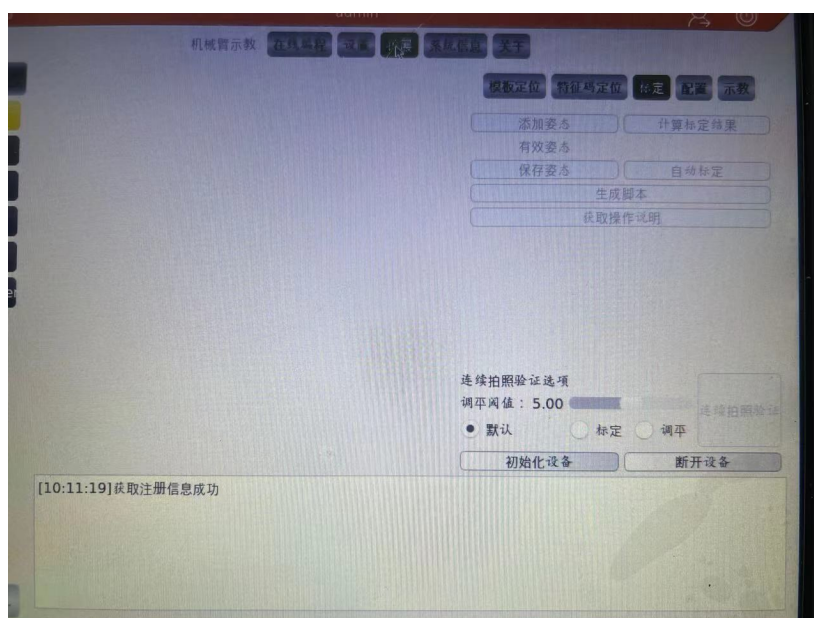


Figure 4: AuboVision 插件界面

在测试过程中，首先使用标定板完成相机手眼标定，完成标定后选择模板定位或特征码定位功能，按操作步骤说明进行模板制作、视觉引导路点添加、生成脚本。等待脚本生成结束，在示教器在线编程工程中调用插件生成的对应脚本。

2.2.2 上位机软件

在测试过程中使用一个上位机软件，其功能包括获取可用的设备名称、连接/断开设备、启动 3D 相机扫描点云、扫描图像显示、Aruco 二维码识别并计算其位置姿态以及数据存储。

上位机软件界面如图所示：



Figure 5: 上位机软件界面

2.2.3 在线编程工程示例

在测试过程中，使用一套在线编程工程，由遨博视觉机器人执行，工程结构如下：

Algorithm 1 在线编程 Aubovision 视觉引导时间统计	
1:	% 初始化
2:	Arm_Move_to: Ready_Point    % 机械臂运动至准备点位
3:	Loop    % 循环次数: 无限
4:	Script: Time_Stamp_Arm    % 记录机械臂运动时间
5:	Arm_Move_to: Camera_Point    % 机械臂运动至拍照点位
6:	Script: Time_Stamp_Camera    % 记录视觉算法计算时间
7:	Script: AuboVision Serve    % 运行视觉服务
8:	Script: Time_Stamp_Arm    % 记录机械臂运动时间
9:	Arm_Move_to: Vision_Point    % 机械臂运动至视觉引导点位

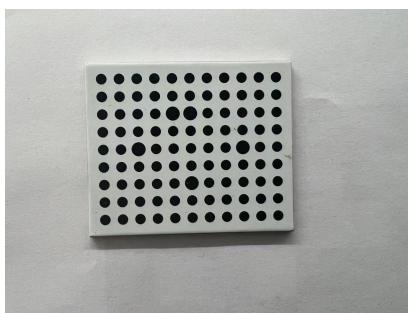
3 测试方案

测试内容分为，特征码定位测试与模板定位测试。

在测试工作开始前，首先进行手眼标定。手眼标定操作流程具体步骤如下（可通过点击界面中“获取操作说明”按钮获得）：

- 1. 在连续拍照验证选项中选择标定，点击连续拍照验证按钮进行连续拍照。

2. 移动机械臂使如图所示标定板进入相机视野，并保证标定板中特征点全识别



3. 在下方文本框，提示识别单图成功后，点击添加机器人姿态。
4. 变化机器人姿态，重复 2、3 步骤 15 次
5. 保存机器人姿态，计算标定结果
6. 自动标定验证

### 3.1 特征码定位

特征码定位是通过识别下图中的特征码，通过视觉算法处理，对机械臂运动进行引导。

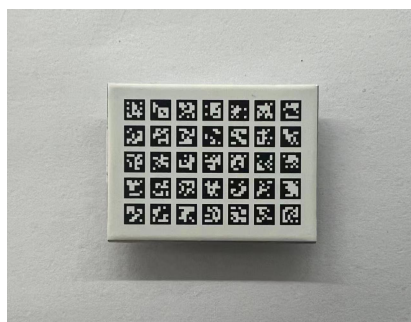


Figure 6: 特征码标定板

特征码定位操作流程具体步骤如下（可通过点击界面中“获取操作说明”按钮获得）：

1. 进行相机手眼自动标定
2. 选择拍照位，特征码与相机成 45 度左右（确保可以识别出  $x,y,z$  轴，避免相机光轴与特征码平面垂直拍摄）
3. 制作模板、保存参数
4. 开环验证模板（若模板制作成功，保持特征码不动，机械臂应保持在拍照位；移动特征码后机械臂将跟随移动。）
5. 验证成功后，添加需要变换姿态的路点（通过示教获得）。若验证失败，重复 2，3，4 步骤。
6. 生成脚本

在测试过程中，特征码固定于测试台面上，机械臂首先运动至拍照位对特征码进行拍照，执行视觉脚本，通过视觉引导机械臂携带二维码运动至后续测量点位，3D 相机进行扫描、存储数据。





(a) 拍照位



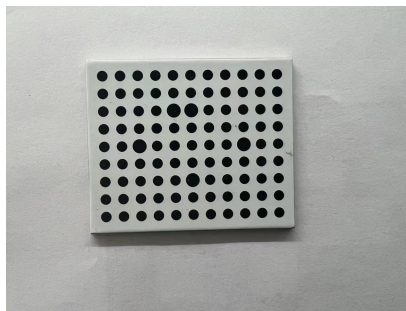
(b) 示教位

Figure 7: 特征码定位测试场景

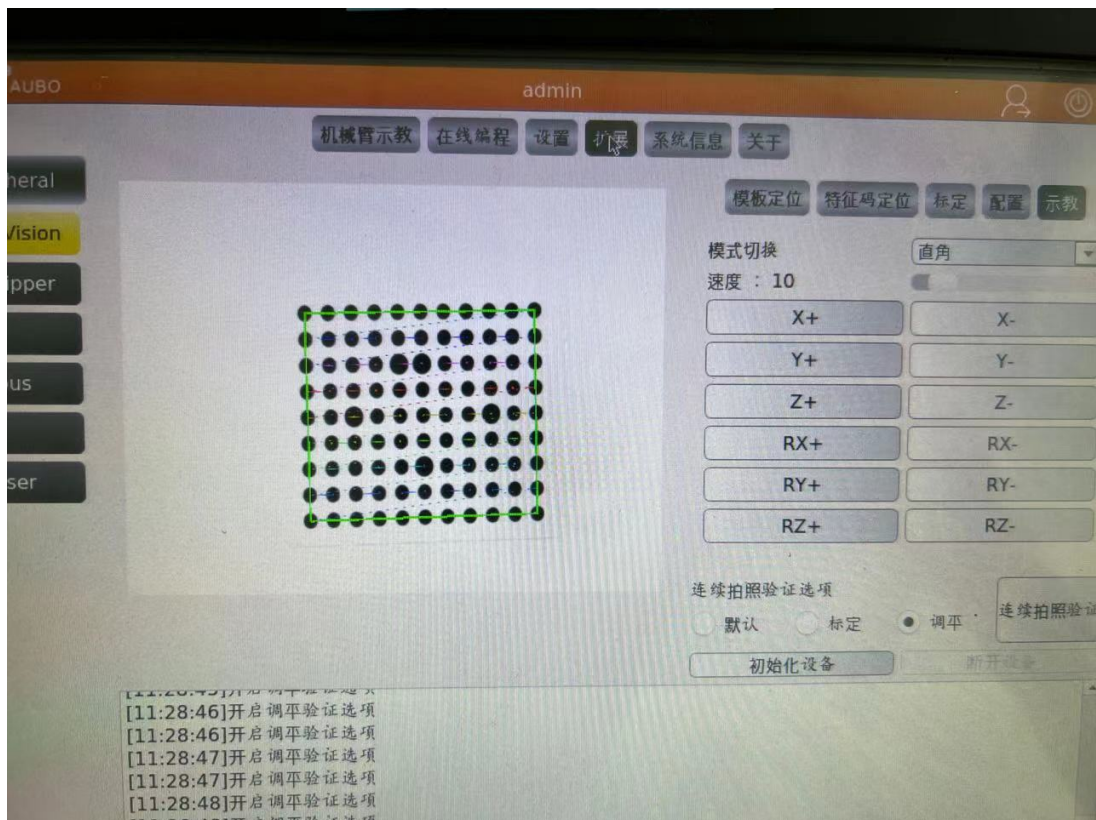
### 3.2 模板定位

模板定位要求相机拍照时相机光轴与模板平面垂直，通过 2D 视觉引导机械臂进行运动。模板定位操作流程具体步骤如下（可通过点击界面中“获取操作说明”按钮获得）：

1. 选择拍照验证选项中的调平选项
2. 点击连续拍照验证按钮进行连续拍照
3. 使用如图标定板进行手动调平，即使相机光轴垂直于目标模板的平面



若调平完成，图像中标定板将被绿色方框围起。



4. 调平完成后，点击连续拍照按钮停止连续拍照。
  5. 点击 2D 标定，等待标定完成
  6. 标定完成后，将需要制作的模板移入相机视野，拍照，在插件图像中手动拖拽图形 ROI 框选模板范围
  7. 点击模板制作（ROI），等待制作完成后，保存参数
  8. 开环验证模板（若模板制作成功，保持模板不动，机械臂应保持在拍照位；
  9. 验证成功后，添加需要变换姿态的路点。若验证失败，重新制作模板
  10. 生成脚本
- 在测试过程，使用如图 8所示工件作为模板。



Figure 8: 模板匹配使用工件

在测试过程中，遨博视觉机器人基座固定在测试台边，目标工件固定于测试台面上，机械臂首先运动至拍照位对工件进行拍照，执行插件生成的脚本，通过视觉引导机械臂携带二维码运动至后续测量点位，3D 相机进行扫描、存储数据。



(a) 拍照位



(b) 示教位

Figure 9: 模板定位测试场景

## 4 数据分析

通过上述测试方案，每轮测试可以获得机械臂末端携带二维码的位姿数据。其中二维码位置由识别出的第一个角点在相机坐标系下的 3D 坐标  $(x, y, z)$  表示，姿态有两种定义方式：第一种由二维码在相机坐标系下的欧拉角  $(R_x, R_y, R_z)$  表示，第二种由每次测量出的二维码坐标系的 x 轴与示教位的二维码坐标系 x 轴的向量夹角表示。

### 4.1 位置精度分析

对于每组测试数据进行归一化处理，即减去示教点位的测量数据，目的是去除系统误差、环境噪声等因素。

$$x_{normalized} = x_{measured} - x_{teach}$$

$$y_{normalized} = y_{measured} - y_{teach}$$

$$z_{normalized} = z_{measured} - z_{teach}$$

使用归一化处理后的数据计算点  $(x_i, y_i, z_i)$ ，其中  $x_i \in x_{normalized}, y_i \in y_{normalized}, z_i \in z_{normalized}$ ，到示教点位的欧式距离：

$$EuclideanDistance = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$$

所有点距离示教点位的欧式距离的平均值为  $\mu_{pos}[mm]$ ，标准差为  $\sigma_{pos}[mm]$ ，视觉引导的位置定位误差  $\epsilon_{pos}[mm]$  定义为：

$$\epsilon_{pos} \in [\mu_{pos} - 3\sigma_{pos}, \mu_{pos} + 3\sigma_{pos}][mm]$$

### 4.2 姿态精度分析

#### 4.2.1 欧拉角法

$$Rx_{normalized} = Rx_{measured} - Rx_{teach}$$

$$Ry_{normalized} = Ry_{measured} - Ry_{teach}$$

$$Rz_{normalized} = Rz_{measured} - Rz_{teach}$$

视觉引导的姿态定位误差由  $\epsilon_{Rx}, \epsilon_{Ry}, \epsilon_{Rz}$  描述，其中：

$$\epsilon_{Rx} \in [\mu_{Rx} - 3\sigma_{Rx}, \mu_{Rx} + 3\sigma_{Rx}][deg]$$

$$\epsilon_{Ry} \in [\mu_{Ry} - 3\sigma_{Ry}, \mu_{Ry} + 3\sigma_{Ry}][deg]$$

$$\epsilon_{Rz} \in [\mu_{Rz} - 3\sigma_{Rz}, \mu_{Rz} + 3\sigma_{Rz}][deg]$$



### 4.2.2 向量夹角法

对于每一组测试，计算二维码坐标系 x 轴与示教位的二维码坐标系 x 轴的向量夹角。

$$\cos(\angle(\vec{x}_{teach}, \vec{x}_{measured})) = \frac{\vec{x}_{teach} \cdot \vec{x}_{measured}}{|\vec{x}_{teach}| |\vec{x}_{measured}|}$$

$$\angle(\vec{x}_{teach}, \vec{x}_{measured}) = \arccos\left(\frac{\vec{x}_{teach} \cdot \vec{x}_{measured}}{|\vec{x}_{teach}| |\vec{x}_{measured}|}\right)$$

平均向量夹角值为  $\mu_{ori}[deg]$ ，标准差为  $\sigma_{ori}[deg]$ ，视觉引导的姿态定位误差  $\epsilon_{ori}[deg]$  描述定义为：

$$\epsilon_{ori} \in [\mu_{ori} - 3\sigma_{ori}, \mu_{ori} + 3\sigma_{ori}][deg]$$

## 5 视觉引导精度测试结果

### 5.1 特征码定位

#### 5.1.1 开环验证

测试结果如下所示：

以  $3\sigma$  范围为准，视觉引导位置定位误差为： $\epsilon_{pos} \in [-0.033, 0.111][mm]$ ，使用欧拉角法：姿态定位误差为： $\epsilon_{Rx} \in [-0.025, 0.177][deg]$ ， $\epsilon_{Ry} \in [-0.337, 0.088][deg]$ ， $\epsilon_{Rz} \in [-0.517, 0.657][deg]$ ，使用向量夹角法：姿态定位误差为： $\epsilon_{ori} \in [-0.312, 0.701][deg]$

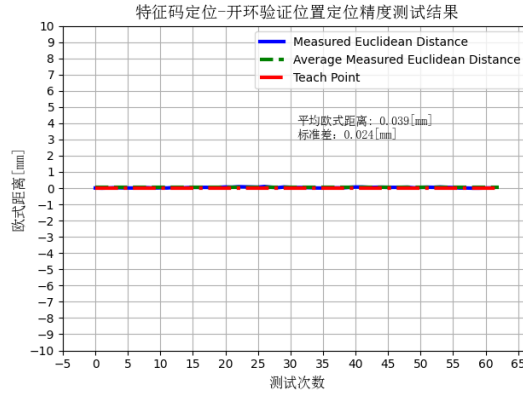


Figure 10: 特征码定位 - 位置精度测试结果 - 开环验证

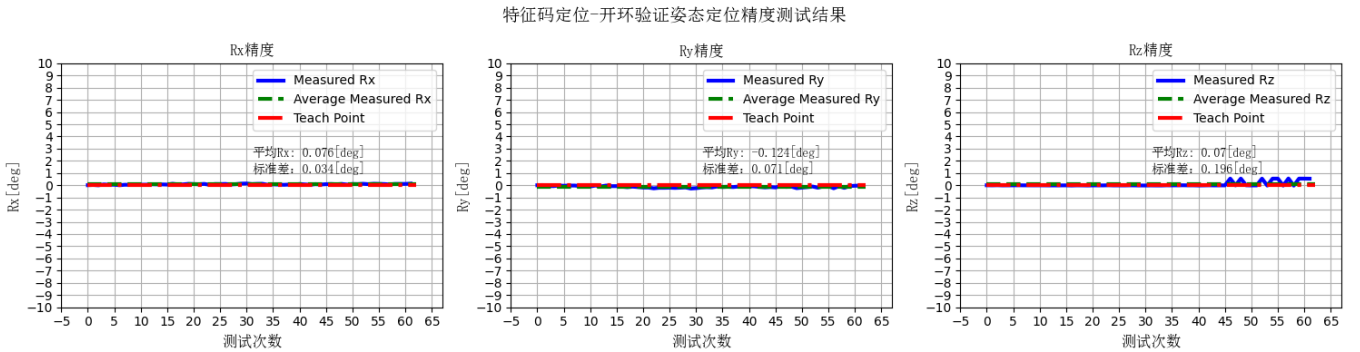


Figure 11: 特征码定位 - 姿态精度测试结果 - 欧拉角法 - 开环验证

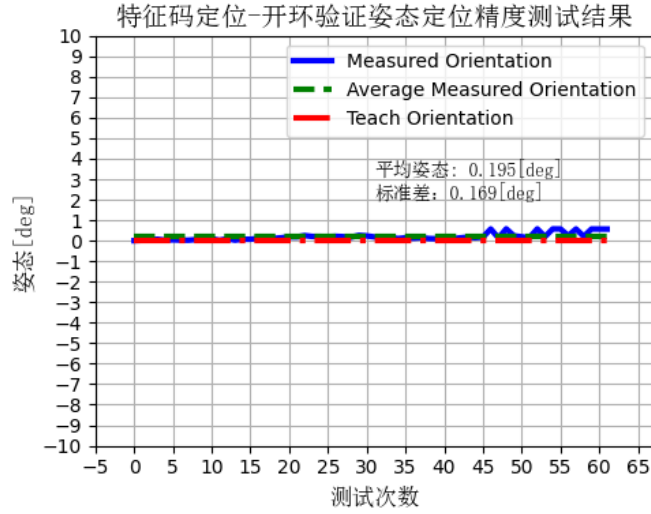


Figure 12: 特征码定位 - 姿态精度测试结果 - 向量夹角法 - 开环验证

## 5.2 模板定位

### 5.2.1 开环验证

测试结果如下所示:

以  $3\sigma$  范围为准, 视觉引导位置定位误差为:  $\epsilon_{pos} \in [-0.031, 0.094][mm]$ , 使用欧拉角法: 姿态定位误差为:  $\epsilon_{Rx} \in [-0.197, 0.037][deg]$ ,  $\epsilon_{Ry} \in [-0.131, 0.211][deg]$ ,  $\epsilon_{Rz} \in [-0.009, 0.042][deg]$  使用向量夹角法: 姿态定位误差为:  $\epsilon_{ori} \in [0, 0.164][deg]$

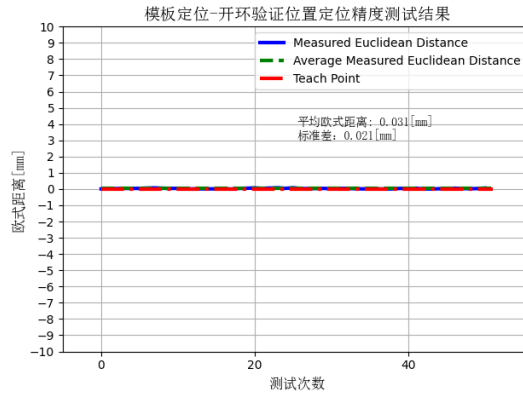


Figure 13: 模板定位 - 位置精度测试结果 - 开环验证

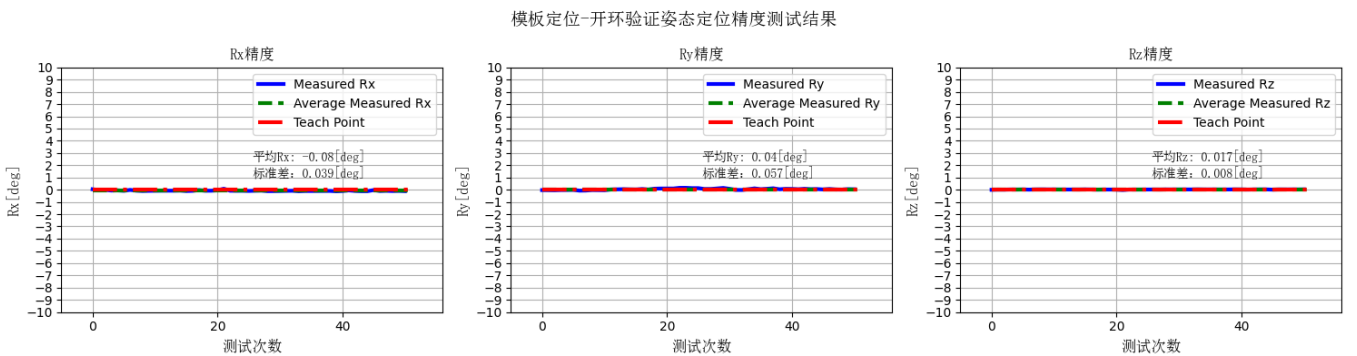


Figure 14: 模板定位 - 姿态精度测试结果 - 欧拉角法 - 开环验证

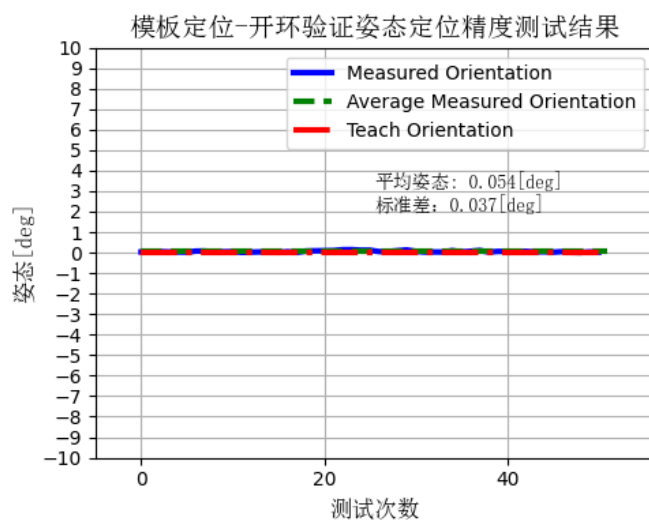


Figure 15: 模板定位 - 姿态精度测试结果 - 向量夹角法 - 开环验证

## 6 视觉引导计算时间测试结果

测试结果分为特征码定位计算时间与模板定位计算时间。

### 6.1 特征码定位

#### 6.1.1 开环验证

测试过程中，视觉机器人各部件用时甘特图统计如下：

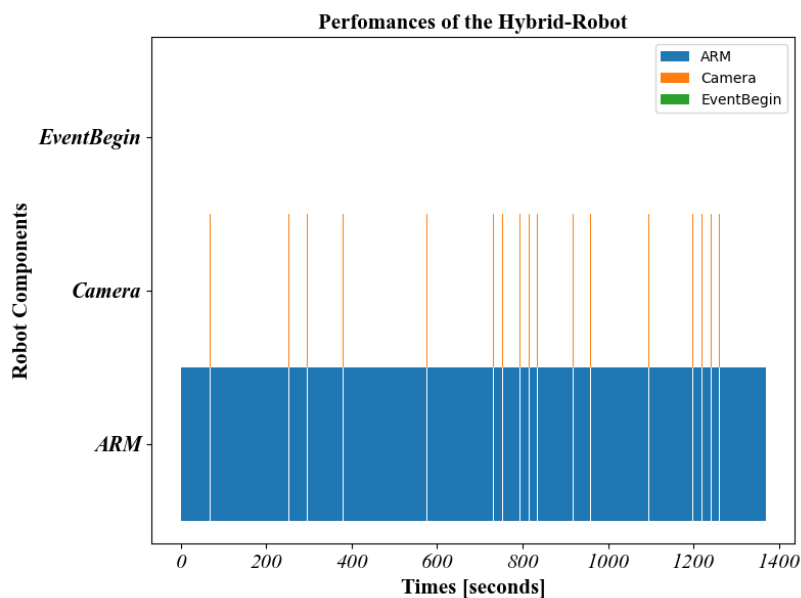


Figure 16: 特征码定位-开环验证机器人各部件用时统计

其中，特征码定位视觉计算时间统计如下：

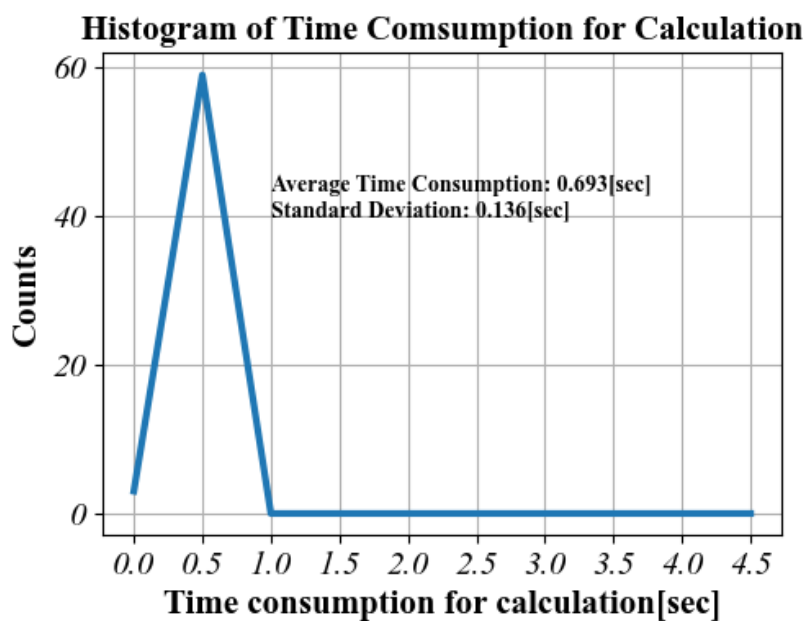


Figure 17: 特征码定位-开环验证视觉计算时间直方图统计

## 6.2 模板匹配定位

### 6.2.1 开环验证

测试过程中，视觉机器人各部件用时甘特图统计如下：

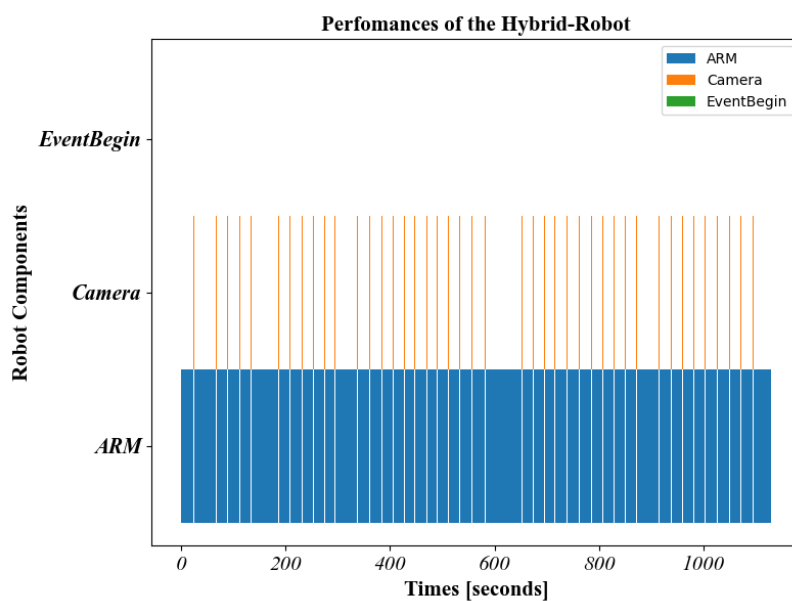


Figure 18: 模板定位-开环验证机器人各部件用时统计

其中，模板匹配定位视觉计算时间统计如下：



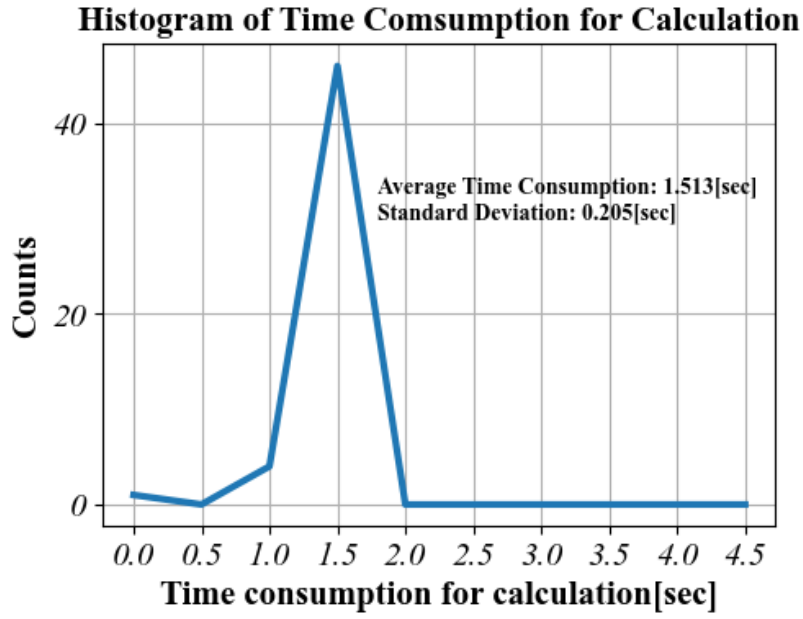


Figure 19: 模板定位-开环验证视觉计算时间直方图统计

## 7 测试结果总结

### 7.1 AuboVision 视觉引导定位精度

AuboVision 视觉插件特征码定位、模板匹配定位精度统计如下表：

Table 1: AuboVision 视觉引导定位精度

测试项目	位置误差 [mm]	姿态误差-欧拉角法 [deg]	姿态误差-向量夹角法 [deg]
特征码定位-开环验证	$[-0.033, 0.111]$	$\epsilon_{Rx} \in [-0.025, 0.177]$ $\epsilon_{Ry} \in [-0.337, 0.088]$ $\epsilon_{Rz} \in [-0.517, 0.657]$	$[-0.312, 0.701]$
模板匹配定位-开环验证	$[-0.031, 0.094]$	$\epsilon_{Rx} \in [-0.197, 0.037]$ $\epsilon_{Ry} \in [-0.131, 0.211]$ $\epsilon_{Rz} \in [-0.009, 0.042]$	$[0, 0.164]$

### 7.2 AuboVision 视觉引导计算时间

AuboVision 视觉插件特征码定位、模板匹配定位的计算时间统计如下表：

Table 2: AuboVision 视觉引导计算时间

测试项目	平均时间 $\mu$	标准差 $\sigma$	$\mu \pm 3\sigma$
特征码定位-开环验证	0.693[sec]	0.136[sec]	[0.285, 1.101][sec]
模板定位-开环验证	1.513[sec]	0.205[sec]	[0.898, 2.128][sec]

在测试统计的视觉计算时间中，包含 0.01[sec] 的等待时间，目的是确保工程稳定运行。