04 手部模型标定

1 前置条件

1.1 设备与佩戴

表 1 标定前设备与佩戴要求

项目	要求
传感器固定	手套与各传感器在标定期间及之后的使用期间保持相对位置不变
佩戴状态	手套贴合、无滑动；发现滑动先重新固定再标定
数据状态	五指数据均有效、置信度稳定达标；使用腕部接收器时其数据同样有效稳定
动作空间	预留完整的四指屈伸与拇指对指空间

1.2 软件与环境

- 算法端使用与手套配套的正式发布版本，不混用不同版本的标定产物；
- 标定状态目录可写（默认位于本机用户数据区，可用环境变量 `GLOVE_KINEMATICS_STATE_DIR` 指定）；
- 原始数据默认经 UDP 发送至 `127.0.0.1:12345`，处理后数据发布端口默认 `23456`，两个端口不能相同；
- 清理电磁跟踪干扰源，避免标定期间碰撞、遮挡佩戴者手部。

1.3 用户与左右手

- 一次标定会话只处理一只手，左右手由数据流携带的手别信息决定；
- 上游只发送本次目标手的数据流；
- 每位佩戴者的每只手各有一套独立标定，互不通用。

2 标定流程

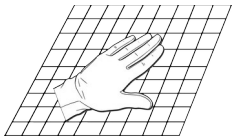
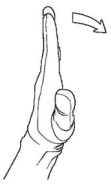
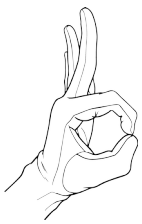
2.1 流程总览

以标定模式启动算法端后，佩戴者按屏幕中文提示依次完成下列动作，动作全部由系统自动判定：

```
等待数据流 -> 零位 -> 四指屈伸 -> 拇指依次对四指 -> 系统自动处理 -> 激活生效 -> 实时工作
```

2.2 动作要领

表 2 标定动作要领

顺序	动作	图示	执行要点
1	平放		手指自然伸直，保持静止；避免紧绷、抖动和明显弯曲
2	四指根部弯曲		伸直 → 四指根部向掌心弯曲 → 伸直，连续完成两次屈伸；其余指节尽量伸直，手掌和手腕不动
3	拇指与食指对指		拇指指腹轻触食指指腹，保持稳定
4	拇指与中指对指		先完全松开上一组，再轻触中指指腹

顺序	动作	图示	执行要点
5	拇指与无名指对指		完全分开后按新提示轻触，避免同时碰到其他指腹
6	拇指与小指对指		按图示自然对指，保持稳定，不用力挤压

通用要求：

- 每个动作前有约 1 秒准备倒计时，倒计时结束后再开始动作；
- 全程自然、放松，不刻意用力，接触时不要挤压或搓动手指；
- 每组对指完成后完全松开、五指充分分开，看到下一指提示再做下一组；
- 每个动作由系统自动判定合格；不合格会自动要求重做，无需人工判断；
- 佩戴者只需跟随屏幕提示与实时数值反馈（距离、保持时长等）调整动作。

2.3 过程反馈

标定期间屏幕持续显示当前阶段、动作提示、数据状态与失败次数；接触动作附实时距离与保持时长反馈。系统自动重试失败动作，同一动作连续失败 3 次进入暂停状态，等待人工指令（见 5.1 节）。

2.4 完成与生效

标定成功的唯一判定依据是屏幕出现 `CALIBRATION_ACCEPTED`。

未出现 `CALIBRATION_ACCEPTED` 时标定未生效，需重新标定。

2.5 产物与自定义手型

每次成功标定自动生成一份标定 urdf 文件，保存在用户数据目录的标定产物区，按左右手分开存放。写入过程自带校验与回退，不会损坏已有文件。

特殊手型可由专业人员修改个人几何配置文件后重新标定；修改基础模型或关节参数后必须重新标定。

2.6 手套 urdf 示例

以下为默认 urdf 可视化示例：

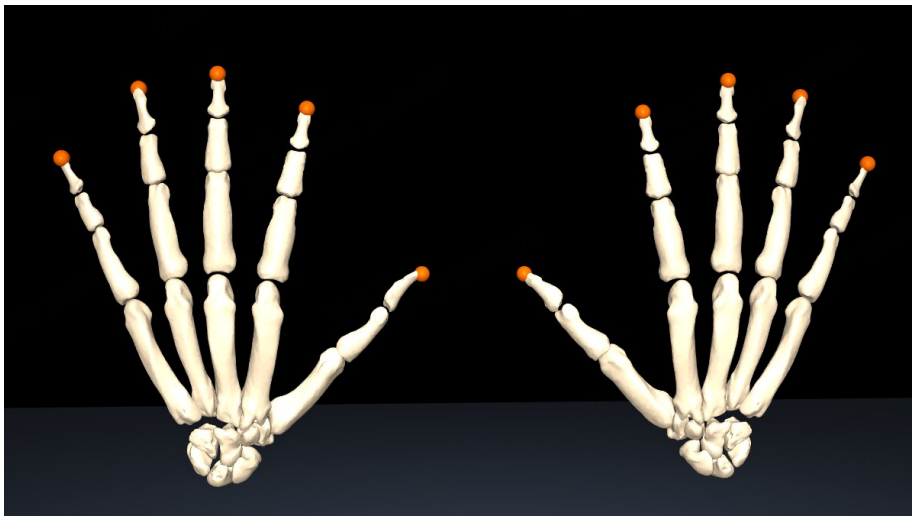


图 1 默认 urdf 可视化示例（左右手骨骼模型）

3 结果验证

通过标准：屏幕出现激活完成消息（2.4 节）+ 下表人工验收无异常，两者缺一不可。标定过程中的数据质量与结果校验均由系统自动完成，全部通过后才会激活。

3.1 验收动作

表 3 结果验收动作与通过标准

验证对象	动作	通过标准
关节	复现零位姿势，再四指缓慢屈伸	可视化手型与真手一致，关节角平滑、无异常张开
指尖	拇指依次对四指并轻触	模型指尖与真手真实贴合，不悬空、不穿透

验证对象	动作	通过标准
骨骼	五指张开、握拳	各指节长度与真手一致，无拉伸、错位
腕关节	手腕自然平放（配置腕部接收器时）	腕姿态输出非空且稳定；输出为空见 5.2 节

配套检查：遥操接收端持续输出帧号与关节角；帧号允许跳变、不允许倒退。

3.2 记录要求

- 验收存疑或标定异常时，在暂停状态保存诊断文件并随工单归档；
- 需要复现时，同步录制原始数据、处理结果与元数据，三者作为一组归档；
- 正式验收应对录制数据执行离线复算回归，任一帧处理失败即判不通过。

4 重新标定条件

出现以下任一情况必须重新标定：

表 4 重新标定触发条件

触发条件	说明
更换佩戴者、手套或传感器	标定结果不通用
传感器安装位置或方向变化、手套滑动	先重新固定再标定
模型/固件/协议升级	旧标定被系统拒绝使用，属预期防护
生效标定损坏、缺失	系统启动时报错要求标定

判定原则：

- 仅重启程序、穿戴与安装未变化时，无需重新标定；
- 系统不会在标定效果差时静默退回通用模型，必须重新标定；
- 拿不准时先做 3.1 节指尖验收：对指明显不准即应重新标定。

5 异常处理

5.1 暂停状态操作

标定动作连续失败 3 次进入暂停状态，可用命令：

表 5 暂停状态命令

命令	作用
r	重试当前动作
b	返回上一动作（其后已采数据作废）
l <路径>	校验一份已有标定文件（仅验证、不启用）
d <路径> / q	保存诊断文件并退出

5.2 常见异常

表 6 常见异常与处理方式

现象	处理
停留“等待数据流”，提示延迟/断开	检查上游是否只发送本次目标手、地址端口是否正确；数据恢复后当前动作自动重来
数据质量持续偏低	检查佩戴与传感器固定，清理干扰源；置信度门限不可调低
零位、屈伸反复重来	按提示放松、放慢、加大幅度，跟随屏幕反馈调整
对指“等待分开”或保持反复中断	五指充分张开后再靠近；自然接触不用力挤压
系统提示重做某一指 / 全部对指	按提示重做即可；反复失败检查对应传感器是否松动
提示“标定激活失败”	确认无其他标定进程、存储可写后重试；仍失败保存诊断上报
启动时报错要求标定	生效与备用标定均缺失或无效：重新标定或按第 7 节恢复

现象	处理
加载时报不兼容	属预期防护：按提示重新标定，不得手工修改标定文件
腕关节姿态输出为空	未配置腕部接收器，或腕零位未达标；如需腕输出，检查其佩戴后重新标定

5.3 问题解决路径

操作人员按屏幕提示自查 → 仍无法解决时保存诊断文件 → 连同标定文件路径与录制数据一并转技术支持。

6 SDK 工具链标定

本章承接《Omniglove SDK 使用说明》第 9 章的内容。SDK 工具链标定与前 5 章的算法端标定是两套独立机制：算法端按第 2 章屏幕引导流程产出标定 urdf；SDK 工具链通过 Linux 命令行工具完成采集、拟合、candidate 保存与设备部署，二者产物互不通用。

6.1 工具与操作前提

Linux `omniglove_calibration_tool` 完成六动作采集、拟合、candidate 保存与激活；`omniglove_bone_deploy_tool` 将已保存 candidate 部署到对应设备。公开 C API 提供标定 blob/phase 控制及 BONE 读写，见《Omniglove SDK 使用说明》第 8 章。

1. 安装匹配架构的 SDK 和 udev 规则，重新插拔手套。
2. 关闭其他设备程序，保持恰好一个设备成功初始化。
3. 正确佩戴手套，保持稳定供电和连接，准备当前用户可写的工作目录。
4. 以普通用户运行工具，按终端引导操作；不使用 `sudo`。

6.2 六动作采集

从 Linux 平台目录启动：

```
./bin/omniglove_calibration_tool --work-dir ./calibration-output
```

表 7 SDK 六动作采集阶段

阶段	动作与检查
零位	平放零位，按引导保持稳定
四指动作	四指同步屈伸两次
拇指对指 1	拇指与食指接触
拇指对指 2	拇指与中指接触
拇指对指 3	拇指与无名指接触
拇指对指 4	拇指与小指接触

动作进度和质量反馈由 CLI 输出。流中断、序号缺口、低置信度、动作错误或静止度不足会使当前连续窗口失效；按引导重做当前动作。

6.3 产物与质量检查

默认 `publish=save` 在主机保存 candidate 并切换 active manifest，不写设备。主机 candidate 的激活不能等同于设备 BONE 已更新。建议为每次标定使用独立工作目录，保留 capture、candidate、manifest 和完整终端输出。

表 8 产物质量门限契约

项目	当前契约
capture artifact schema	v2
candidate schema	v3
坐标约定	right-handed TX；位置毫米转米；姿态 ZYX yaw/pitch/roll
零位五指位置／姿态 p95 门限	3 mm／3°
相邻帧位置／姿态 p95 门限	1.6 mm／2°
腕部姿态 p95 门限	3°

表中数值为当前工具的质量门限。部署前核对 candidate schema、设备身份和手别；旧 schema 不会按当前可写格式处理。

6.4 立即写入与延迟部署

保存后立即写入设备时，显式选择 save-and-device：

```
./bin/omniglove_calibration_tool \
  --work-dir ./calibration-output \
  --publish save-and-device
```

工具先保存主机 candidate，再编码并写入 BONE v4，最后完整回读并逐字节比较。

延迟部署已保存 candidate：

```
./bin/omniglove_bone_deploy_tool \
  --candidate ./calibration-output/candidates/candidate-....ogcal
```

将占位文件名替换为实际生成文件。部署工具核对设备身份和手别，仅写入精确匹配的设备，并验证完整回读。默认长 payload 显示 32 字节预览；诊断时可使用 `--full-payload`。

写入失败不会删除已保存 candidate。保留完整工作目录与错误输出，按《Omniglove SDK 使用说明》附录 B.2 排查后重新部署；仅保存 candidate 或完成写请求均不等于设备回读验证成功。

6.5 诊断输入

UDP 输入仅用于诊断和回放，正常实物标定使用自动发现的设备：

```
./bin/omniglove_calibration_tool \
  --source udp --listen 127.0.0.1 --port 45550
```