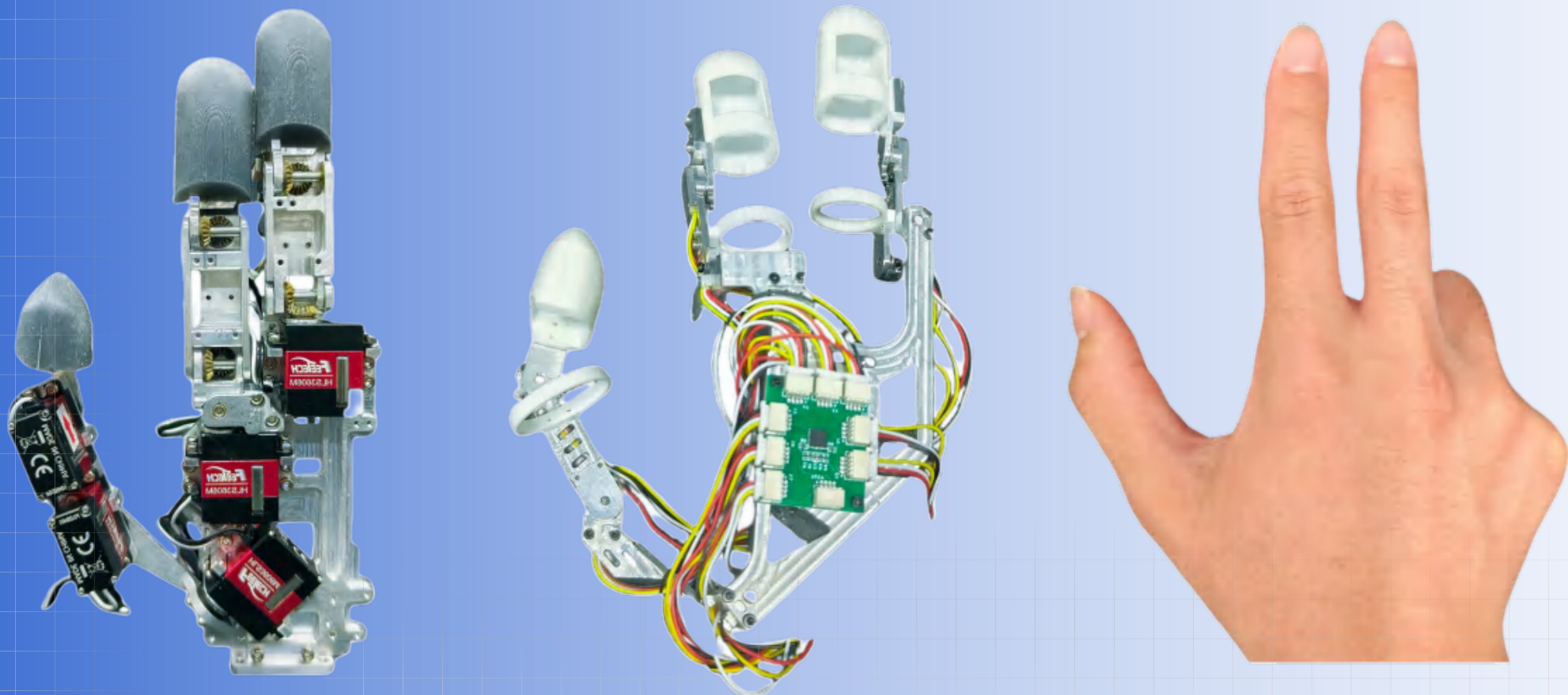


# Wearable Dexterity

## 三指灵巧手与同构可穿戴外骨骼



### 项目背景与介绍 Introduction

#### 【灵巧手本体】

在机器人操作（**Manipulation**）领域，**灵巧手本体是目前实现复杂操作的核心瓶颈之一**。学界和业界现有的灵巧手本体，很难兼顾**高自由度** | **结构尺寸紧凑** | **低成本**这三个关键要素，加之触觉传感器等其他技术环节的不成熟，目前市面上的灵巧手本体都不尽如人意。

如；学术界的开源代表Leap Hand和其对标的韩国Allegro Hand，以及国内帕西尼等4指灵巧手，体积远超人手较为笨重；市场出货量最多的因时等品牌的6DOF欠驱连杆灵巧手，则难言灵巧，很难完成除抓取以外的操作任务。

所以科研和产业界均急需一款**低成本且足够灵活轻盈的灵巧手本体**，以开展后续算法研究与应用落地。

#### 【遥操作与Retargeting】

另一方面，关于灵巧手的控制与遥操作，目前主流的方式为**采集人手关键点后做运动学重定向（Retargeting）**，常见的人手采集方式有RGB/RGB-D相机、VR头显、惯性动捕手套或光学动捕，均需专门部署环境场地或购买第3方配件，存在**环境部署依赖和成本高的**缺点；更关键的问题在于retargeting算法，重定向对于跳舞或拳击等大骨架的运动任务表现尚佳，而对于手内的精细操作，retargeting稍有误差就是抓住or没抓住的区别，依靠**纯运动学Retargeting实现精细灵巧操作的挑战较大**。



英国Shadow Hand 21自由度绳驱灵巧手，一双售价高达50万人民币



韩国Allegro Hand



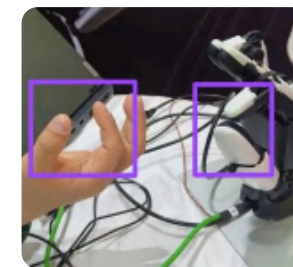
国产帕西尼



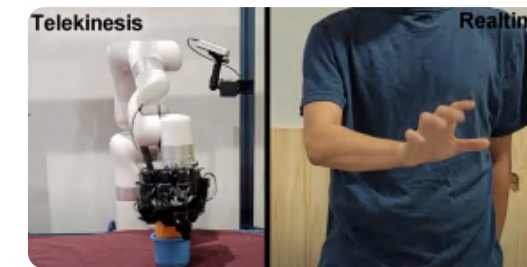
Leap Hand与其他类似本体



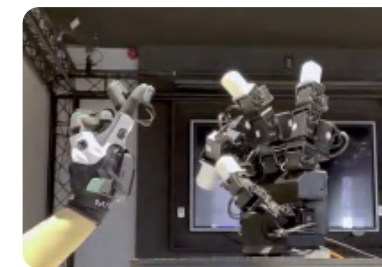
现有的灵巧手难以兼顾的三大要素



Vision Pro & 星纪元XHand VR 遥操Retargeting failure case --对指不稳定



环境相机遥操--部署麻烦且人手必须正对摄像头



Manus动捕手套遥操-- 成本高且retargeting不精确



【新的灵巧手设计范式——从同构可穿戴出发】

故本项目共设计：

三指灵巧手

+

同构可穿戴外骨骼

一套两件真机系统

结构拓扑

三指8DOF，可实现前期定义的手内灵巧操作**动作集(in-hand manipulation)**，满足功能且不冗余

尺寸

将灵巧手和外骨骼一同考虑，以**同构可穿戴为目标进行设计**，灵巧手和外骨骼**尺寸接近175cm男性人手且结构拓扑同构**

遥操控制

人手可自然穿戴遥操三指手或进行数据采集，直接**joint copy—控一无需Retargeting解算**

成本

整套系统成本低且模块化，三指手和外骨骼全套**BOM成本在5000人民币左右**，且初代设计将全部开源，旨在为学界业界提供一套功能齐全且性价比出众的平台性硬软件系统

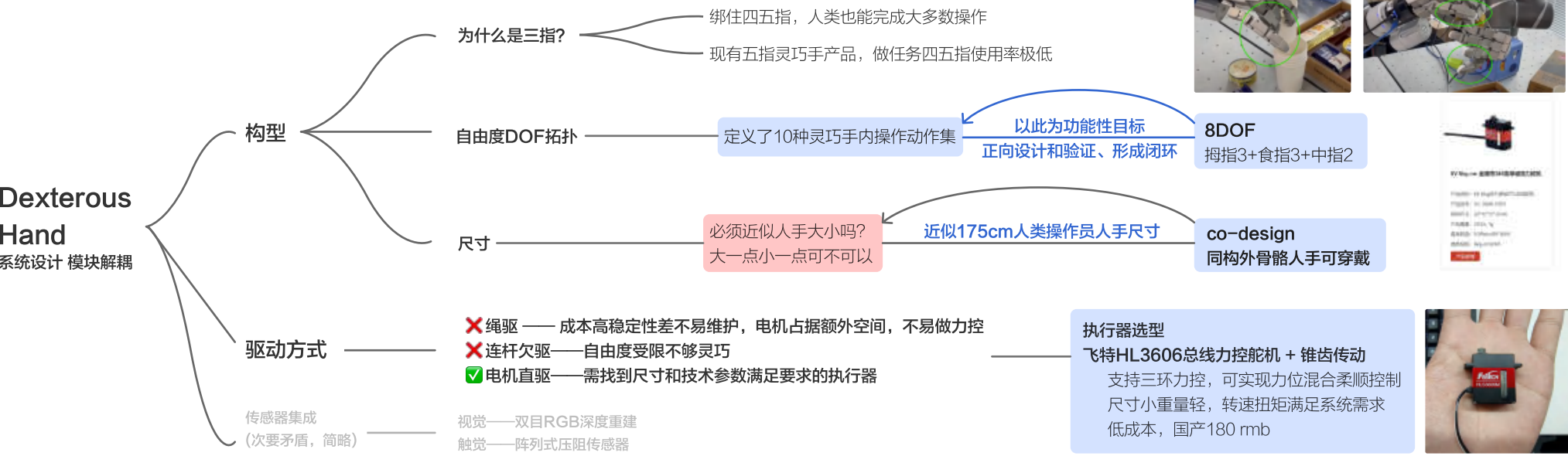
另，该思路已被25年5月最新论文dexUMI写入future work——**面向外骨骼同构可穿戴，co-design外骨骼和灵巧手**

<https://arxiv.org/html/2505.21864v1>

SECTION1

三指灵巧手

灵巧手系统设计 System Design and Decoupling



快速原型与功能验证 Fast Prototyping

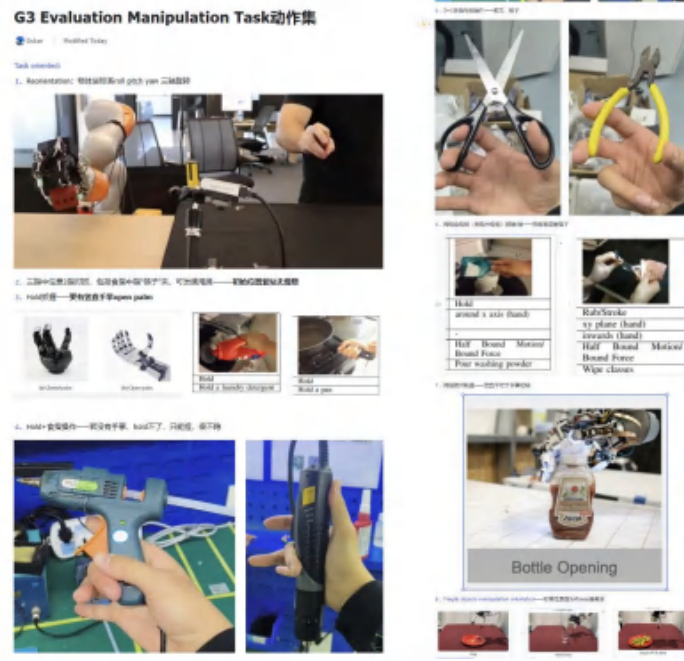
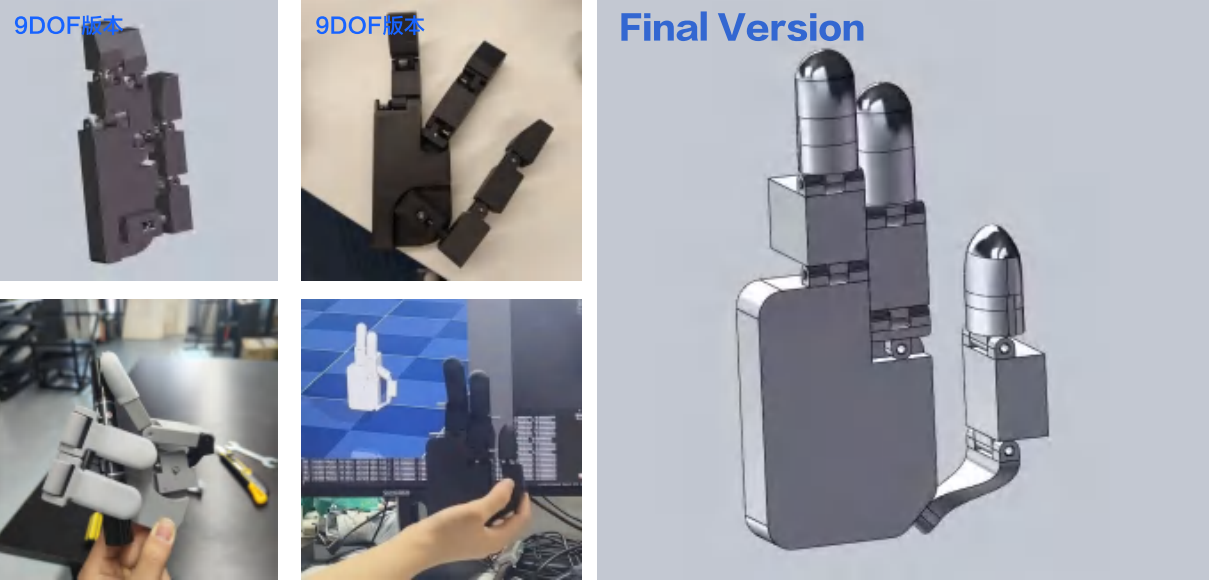
定义10种灵巧操作动作集——作为整机功能目标

1. Reorientation：物体坐标系roll pitch yaw 三轴手内旋转
2. 三指中任意2指对抓，包括食指中指"筷子"夹
3. Hold抓握——要有竖直手掌open palm
4. Hold+食指操作——拇指中指手掌hold，食指解放操作
5. 2+1手指内收操作——剪刀，钳子
6. 拇指食指侧，拇指中指侧 接触捏住
7. 拇指“开瓶盖”类型操作，侧向拨动
8. 易碎品操作——指尖以及手掌需要柔性表面
9. 拇指可达性——拇指可沿食指侧面全段滑移
10. 最大张开姿态——拇指<->食指中指 最大距离>10cm

快速原型——3D打印Toy model

**Fast Prototyping 方法论：**3D打印简易无源三指手玩具模型，能反映自由度拓扑即可，用漆花销连接各零件作为旋转轴，人手拨动该toy model，能完成动作集中的任务则验证该构型设计

✓ 经多轮迭代，最终锁定为三指8DOF设计

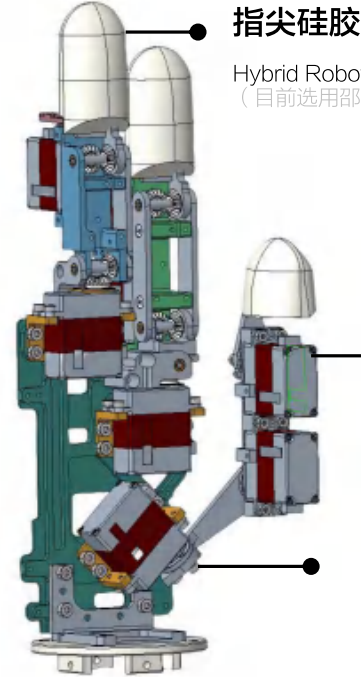


用toy model 进行任务实验




原型机设计 High-Fidelity Prototype

【整机3D与实物】



指尖硅胶

Hybrid Robotics, 拟人手表面自适应形变, 做被动柔顺控制  
(目前选用邵氏硬度5A硅胶, 其他材料如人体硅胶迭代中)



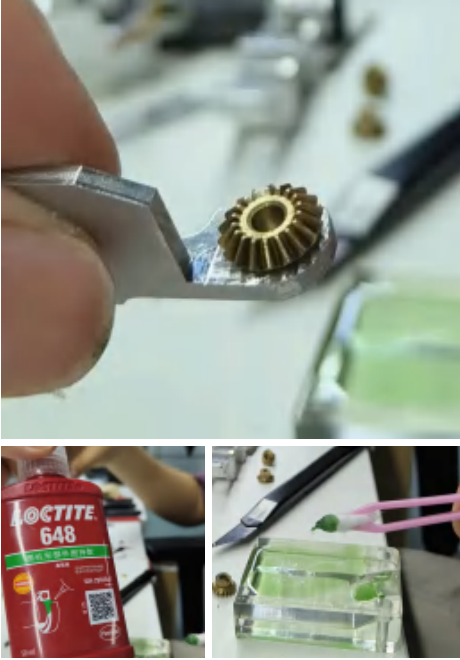
飞特HL3606 x8

总线力控舵机, 可实现三环力位混合柔顺控制

结构件CNC

主体铝合金6061, 轴系铜套减小摩擦

【组装特写--固持胶】

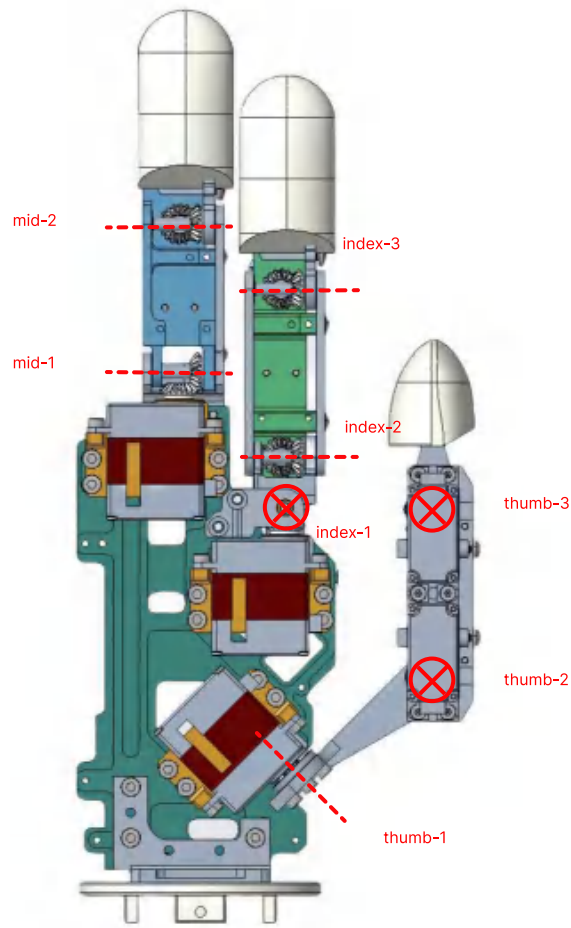


【8DOF与姿态展示】



8自由度各自运动视频  
<https://pan.baidu.com/s/1NKo0wf-QasSbvBdtZsSU6Q?pwd=6666>

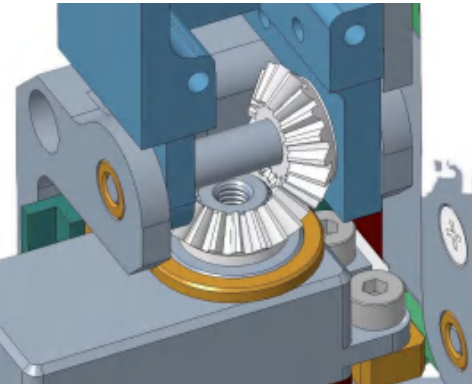
【典型 / 拟人姿态】



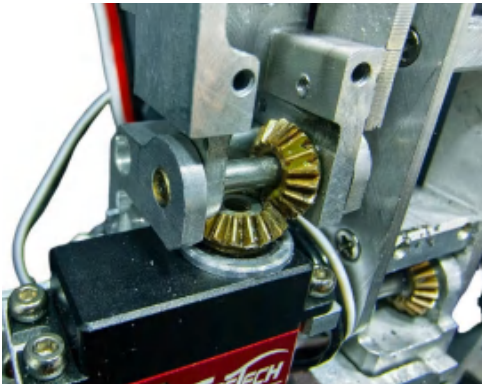
【初代外观渲染图展示】（非本人制作）



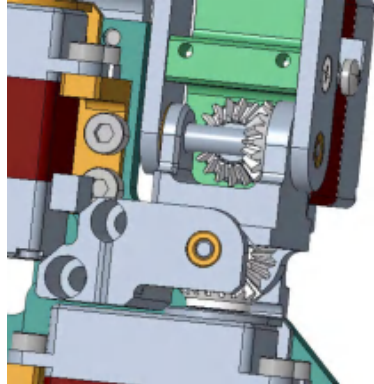
【锥齿轮啮合】



3D模型图



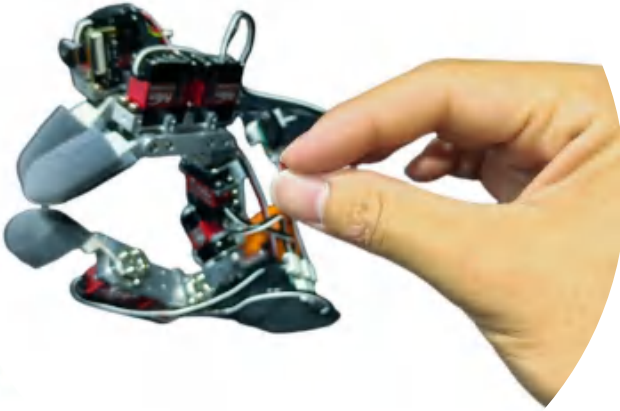
实拍图



3D模型图

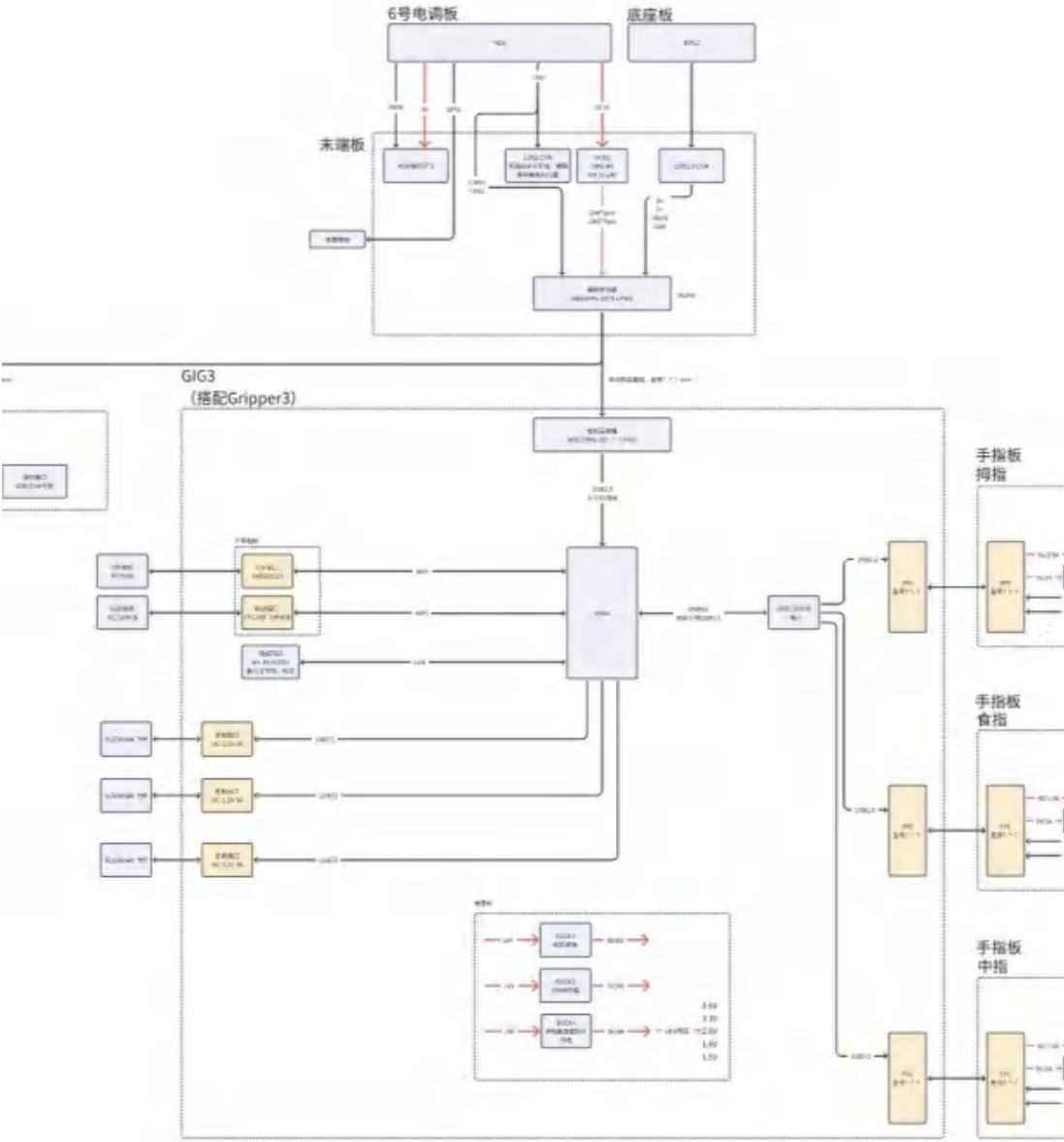


实拍图





硬件拓扑 Hardware Topology （与硬件同事合作完成 | 部分截图）

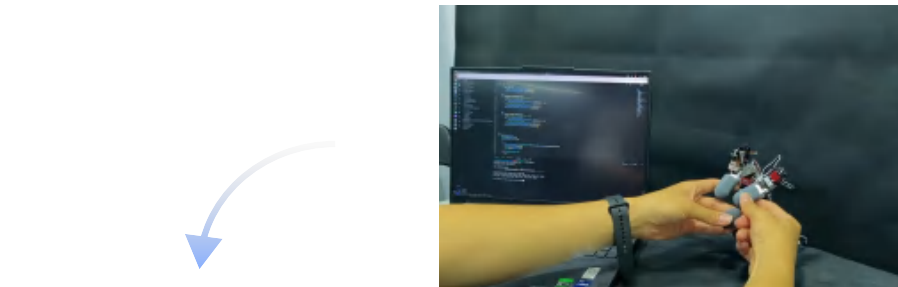


软件开发 | 老化测试例 Software Development

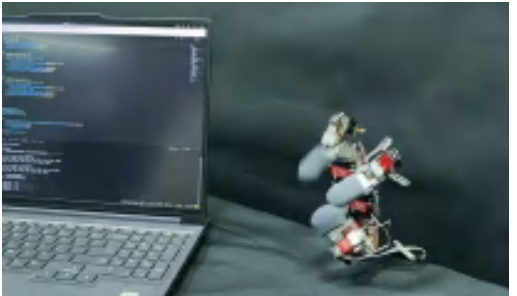
- 1 程序初始化后，舵机关闭扭矩输出，用户可手动设置2个起止位置，并按下Enter记录；
- 2 再次按Enter，舵机打开扭矩输出，三指手往复运动并记录往返次数



手动设置起止位置



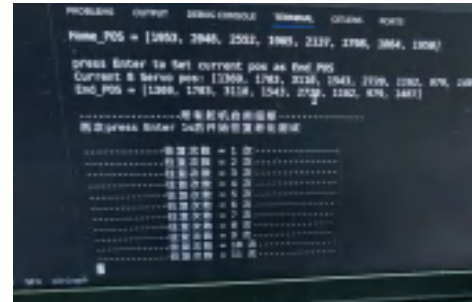
往复运动并记录次数



往复运动并记录次数



老化测试Demo视频  
<https://pan.baidu.com/s/1xqTmZpOvYQNpL1FhwURPk?pwd=6666>

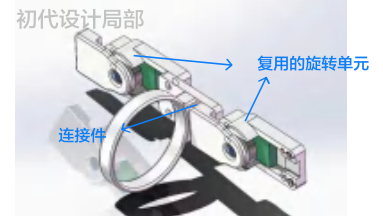


# SECTION 2

## 可穿戴外骨骼

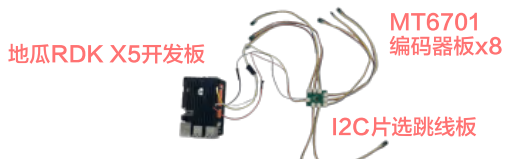
### 系统设计 System Design and Decoupling

#### 结构设计



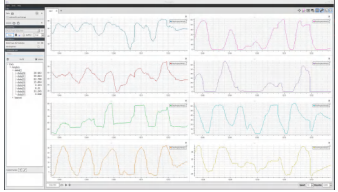
旋转单元：磁编码器&径向磁铁 | 同心，轴承 | 上下部分丝滑旋转  
模块化设计：旋转单元模块化复用8次，修改构型只需调整连接件，便于迭代

#### 电子硬件



关节角测量：磁编码器MT6701，14位绝对值编码器，误差典型值  $\pm 1^\circ$ ，I2C通信  
硬件拓扑：地瓜RDK--I2C片选板--编码器x8

#### 软件通信



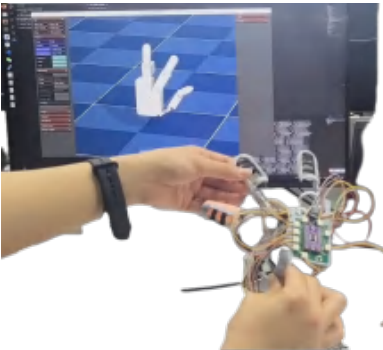
内部I2C：使用smbus库，利用片选芯片为8个编码器附ID 0-7读取寄存器角度值  
对外ROS2：ROS2 topic 发送8个关节角，稳定100Hz发送频率

### 快速原型 Fast Prototyping

Key Methodology：利用3D打印 & Mujoco仿真器

【软件通信 | 功能验证】

3D打印外骨骼+编码器  
ROS2通信遥操Mujoco三指手toy model模型  
一控一验证软件链路



【结构设计 | 穿戴调整】

3D打印无源外骨骼，使用mock旋转单元，与真机尺寸一致，迭代连接件，调整至人穿戴舒适的构型；后续以此为基准设计外骨骼和三指手真机



3D打印零件



整机完成

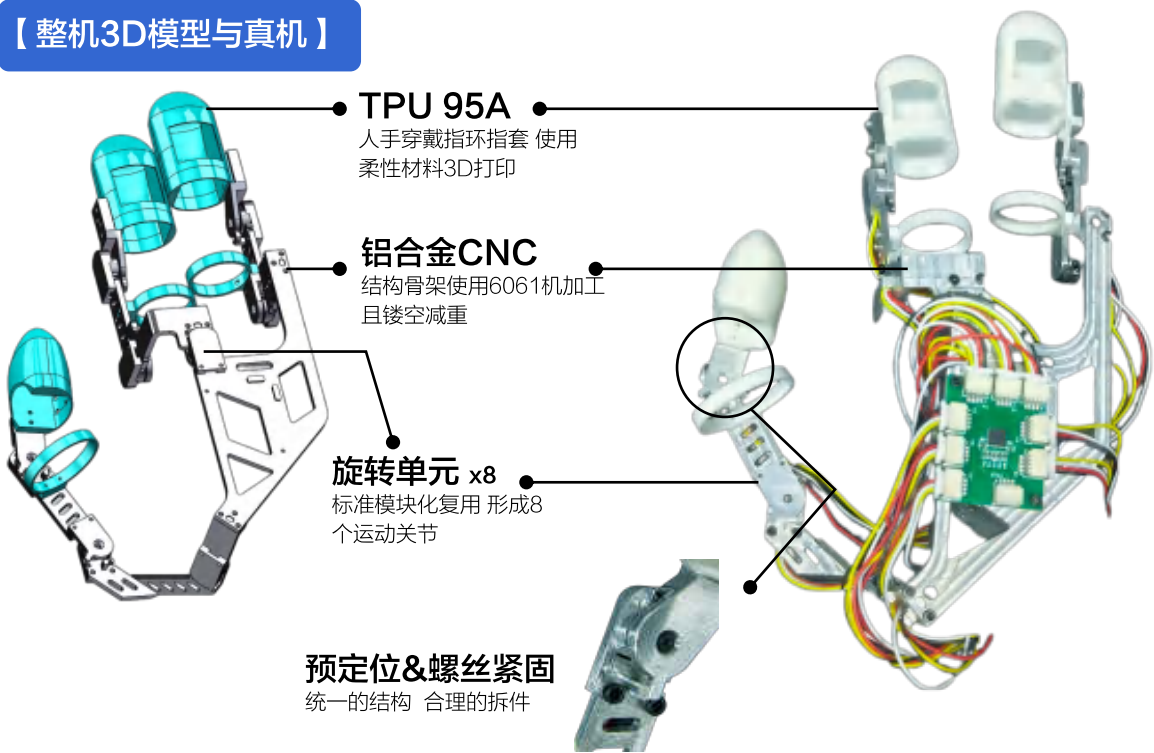
单指实验

简易四五指平台&腕带

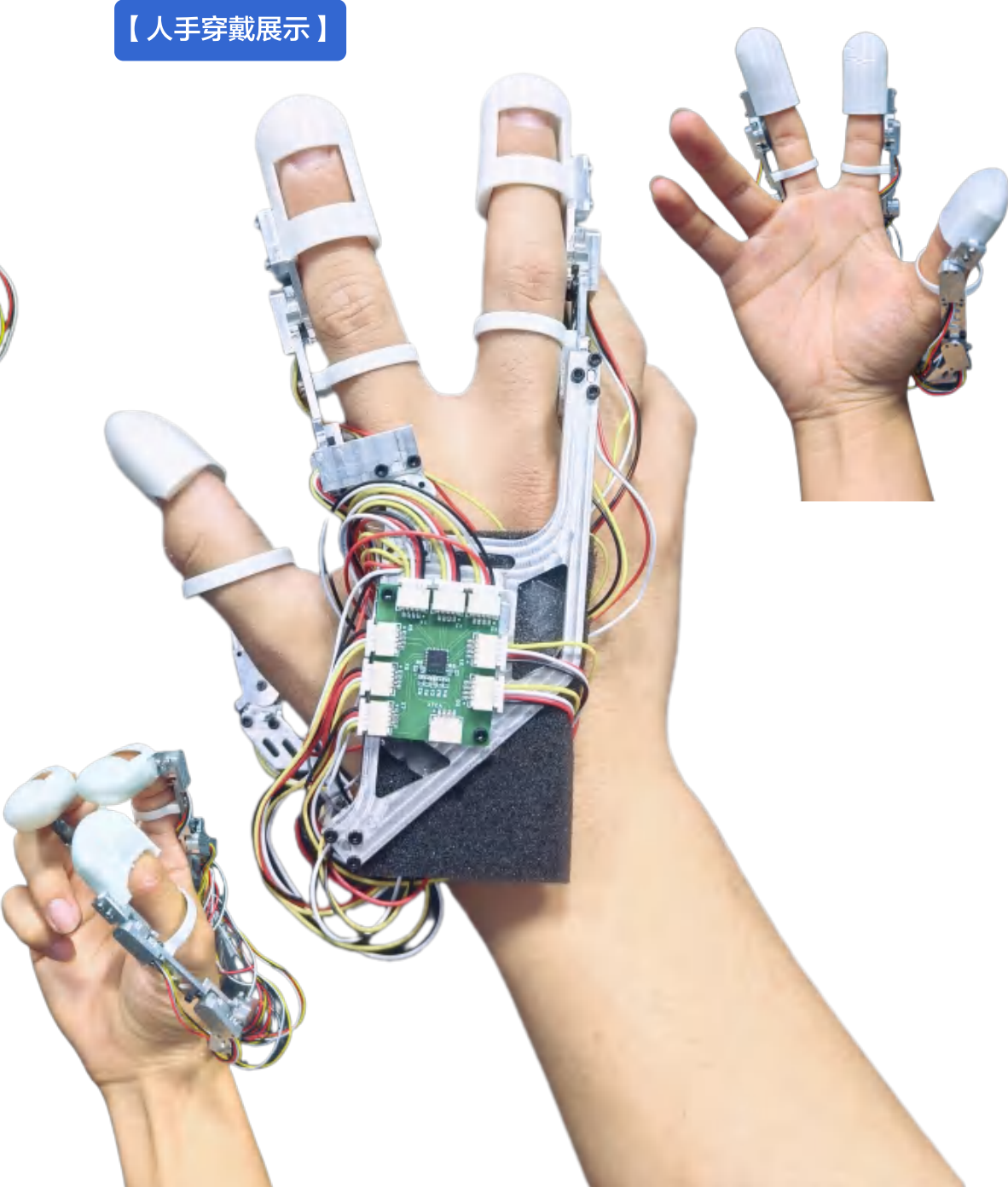


原型机设计 High-Fidelity Prototype

【整机3D模型与真机】



【人手穿戴展示】

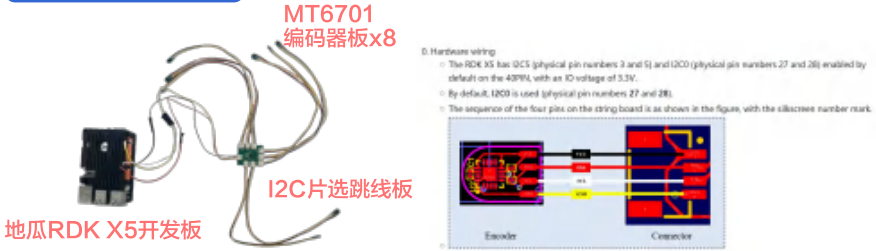


【旋转单元结构】

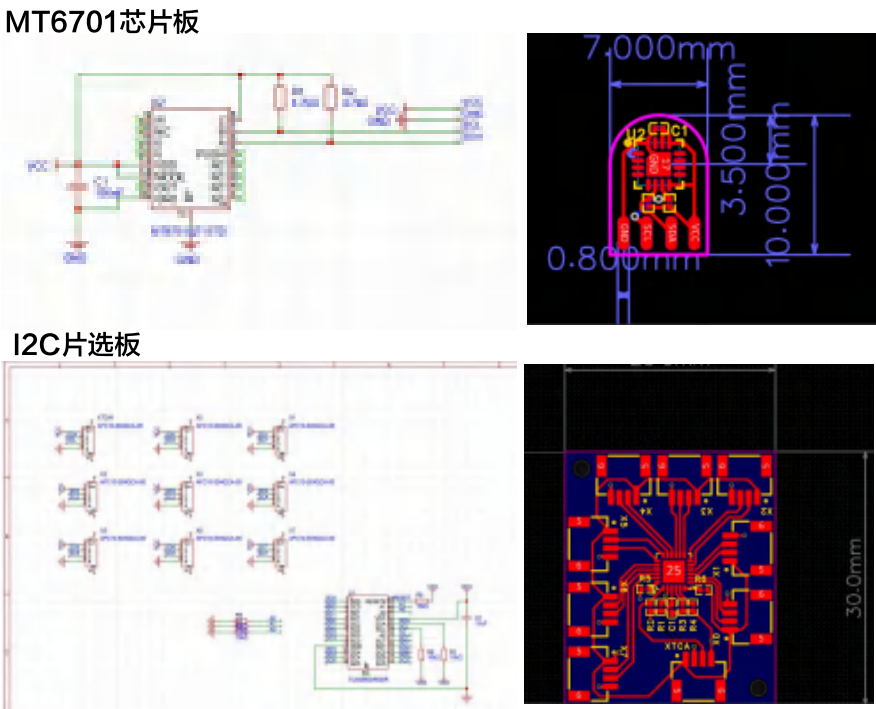


硬件设计 Hardware Design

【拓扑与接线】



【原理图与layout】

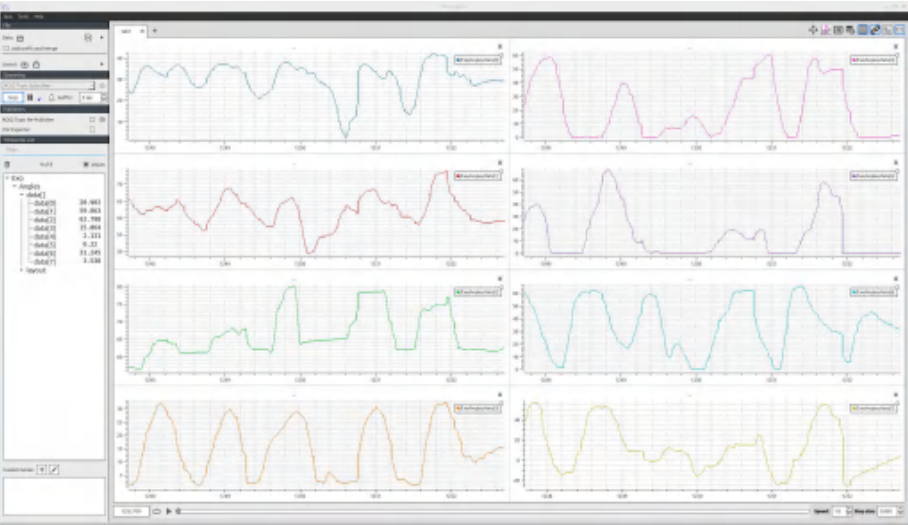
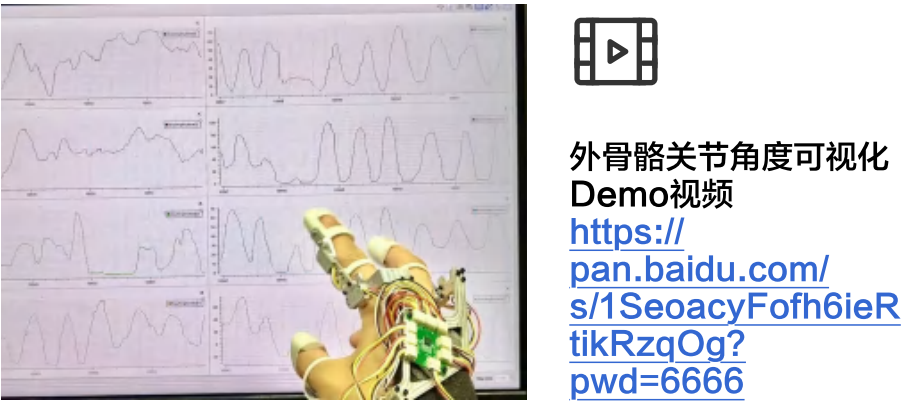


Github open-sourced repo coming soon ...

软件通信 Software and Communication

ROS2通信 | Plotjuggler可视化

ROS2 topic Float32MultiArray 消息类型 | 100hz发布频率 |  
发布8个关节角  
人手穿戴实时运动 | 数据采集



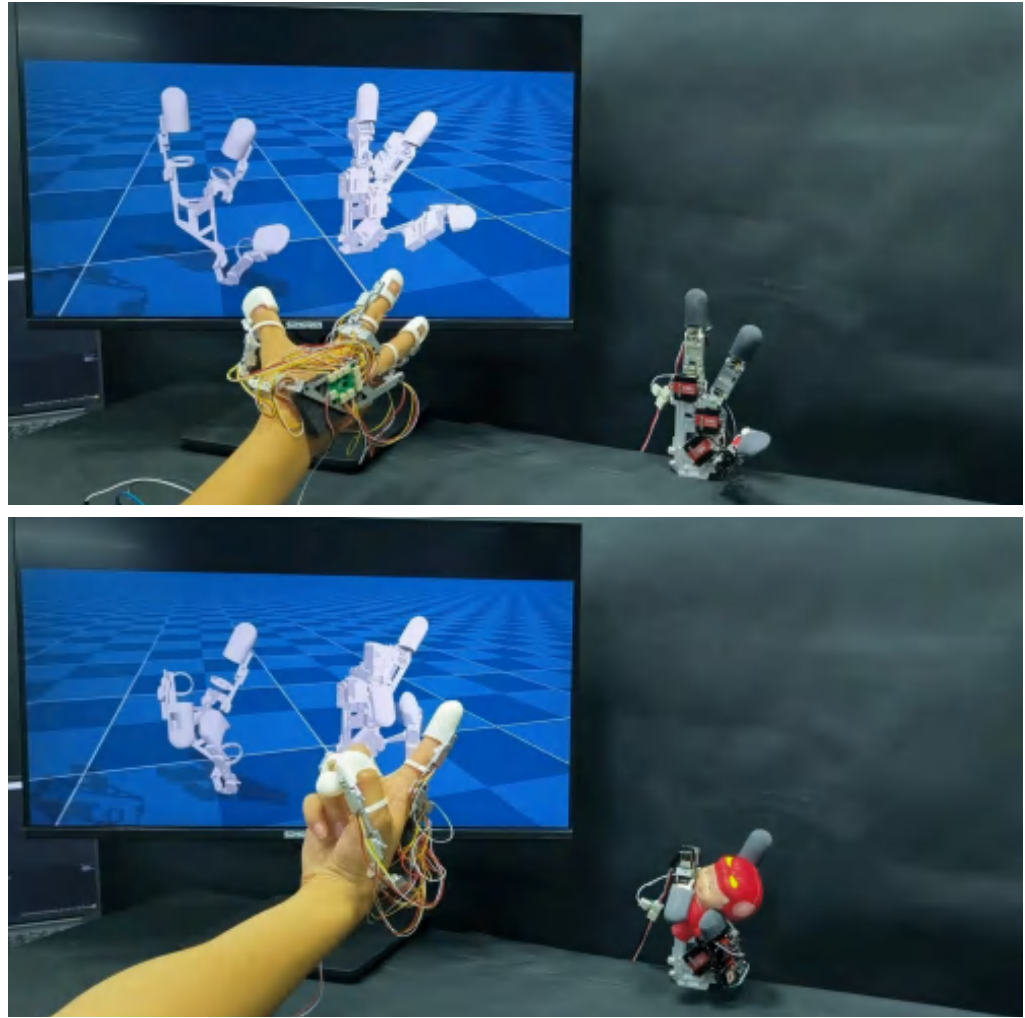
Github open-sourced repo coming soon ...



系统联调与遥操作 Teleoperation ✔ 本节配合视频感受更佳

【外骨骼&三指手 真机&仿真遥操联调】

高动态响应 | 整手100hz控制频率 | Mujoco仿真与真机联动

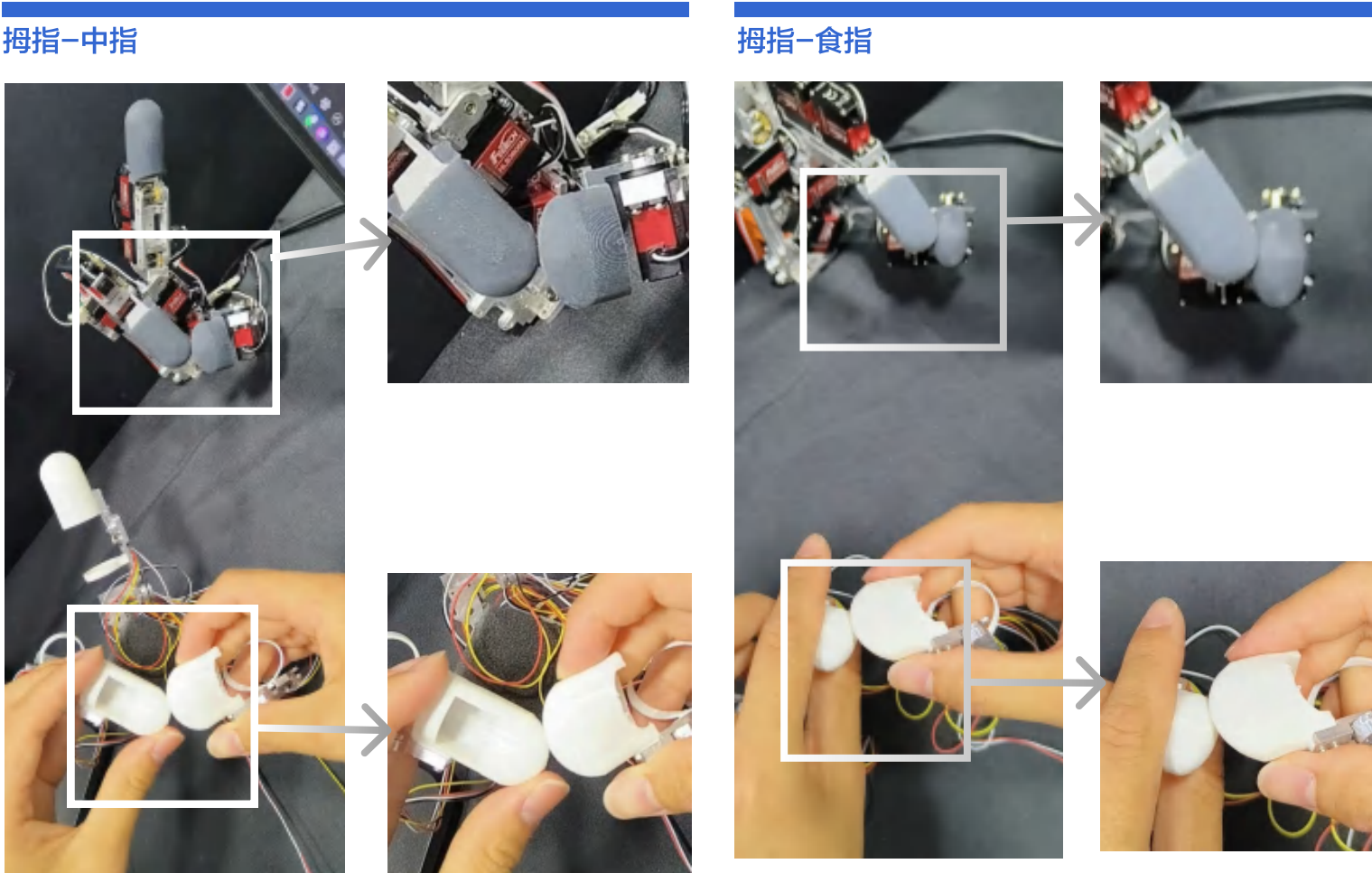


Mujoco & 真机 遥操联调Demo视频  
<https://pan.baidu.com/s/1pkzcPE3UZPq5n8Qrj60CDA?pwd=6666>



【同构验证 | 对指实验】

拇指-中指 | 拇指-食指 外骨骼&三指手指尖同时对碰 | 验证同构

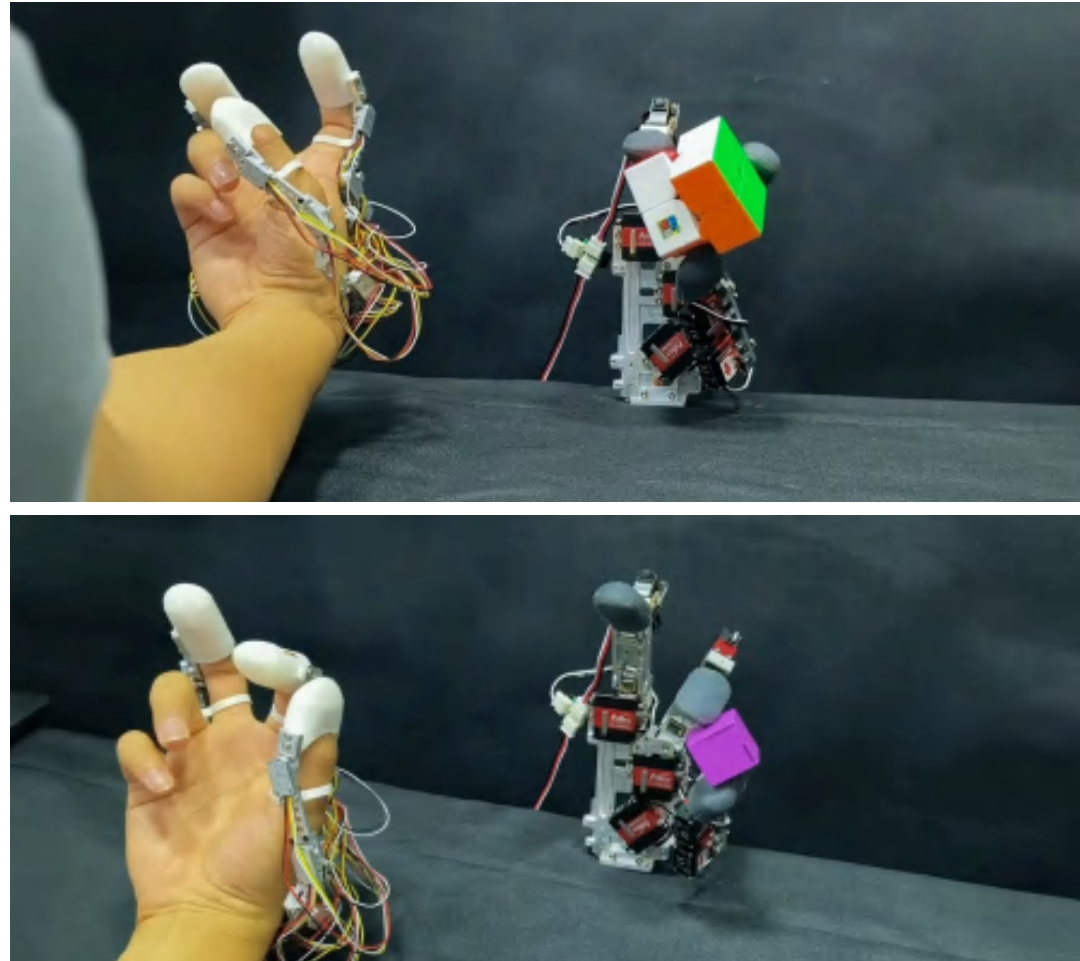


对指实验同构验证Demo视频  
<https://pan.baidu.com/s/1KJstGzDaT748VyrNQkcXgA?pwd=6666>



【灵巧操作任务 | 功能展示】

魔方拨动Flipping | 方块旋搓Reorientation



魔方拨动Demo视频  
[https://pan.baidu.com/s/1LO-qpk695cOYfo\\_HCyH-ww?pwd=6666](https://pan.baidu.com/s/1LO-qpk695cOYfo_HCyH-ww?pwd=6666)



方块旋搓Demo  
<https://pan.baidu.com/s/1-aKqJTHhwsPRuLW3rug ehA?pwd=6666>