

基于软磁弹性体的触觉传感器及其抓取应用

夏子炜

2025.10.15



目录



1. 研究背景
2. 当前研究进展
3. 总结展望

听觉
1961

视觉
1967

嗅觉
2004

触觉
2021

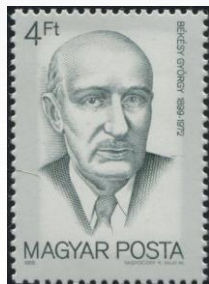
环境交互

接触（按压、震动）

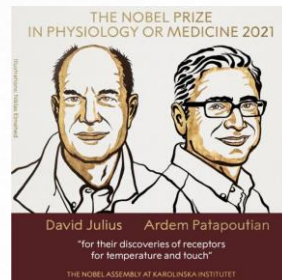
温度、湿度

纹理、粗糙度、材质

本体感觉（位置、姿态）



理查德·阿克塞尔（左）和琳达·巴克



感受器



视觉



听觉



嗅觉



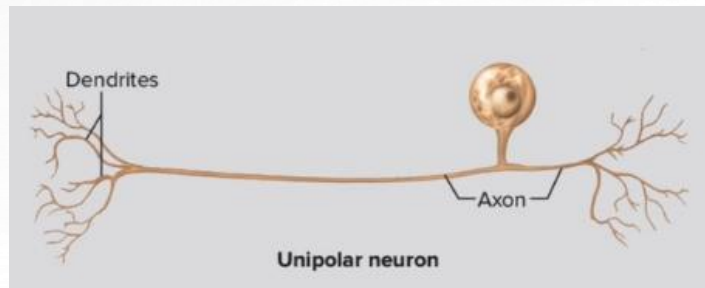
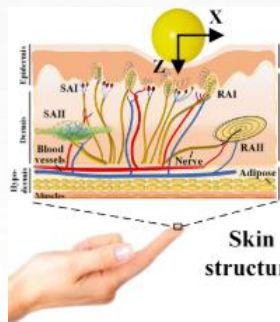
味觉



触觉

感知通路

Tactile for Human



皮肤“感受器”

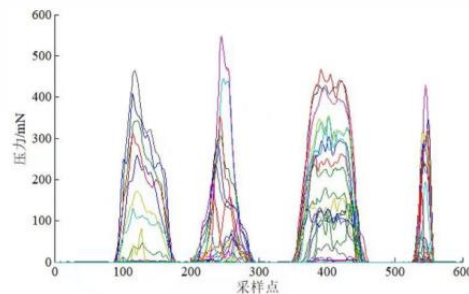
物理刺激

神经电化学信号

大脑处理

感知结果

Tactile for Robotic



触觉传感器

接触信号

电信号

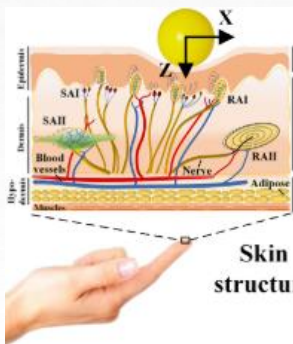
上位机处理

感知结果

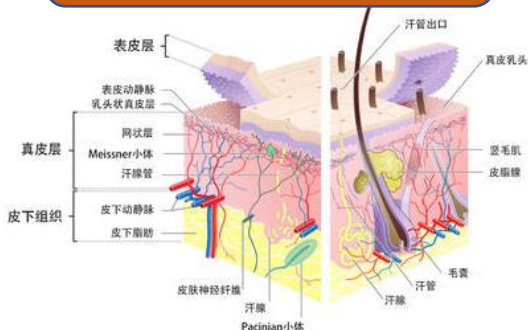
与人类的触觉感知总体流程相似，机器人触觉感知通常采取将外部的接触信号转化为电信号的方式，后续通过对电信号的特征提取，得到接触信号中的触觉信息。

人类的感知能力

感知外部环境



皮肤感知



皮肤内的多类感受器

皮肤感知

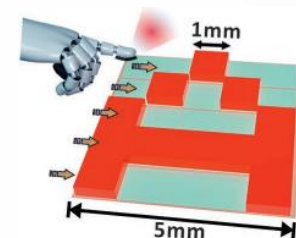
机械刺激

温度、湿度

痛觉

触觉传感器

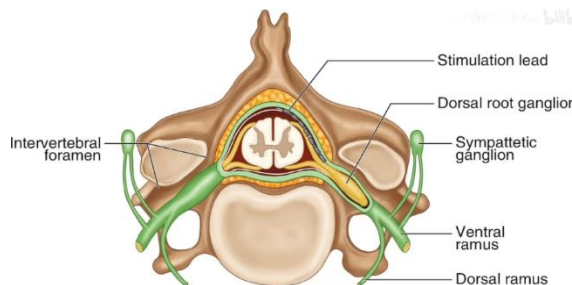
对应



感知自身姿态



运动感知



脊髓背根神经节感觉细胞

运动感知

静态肢体位姿

动态肢体位姿

关节传感器

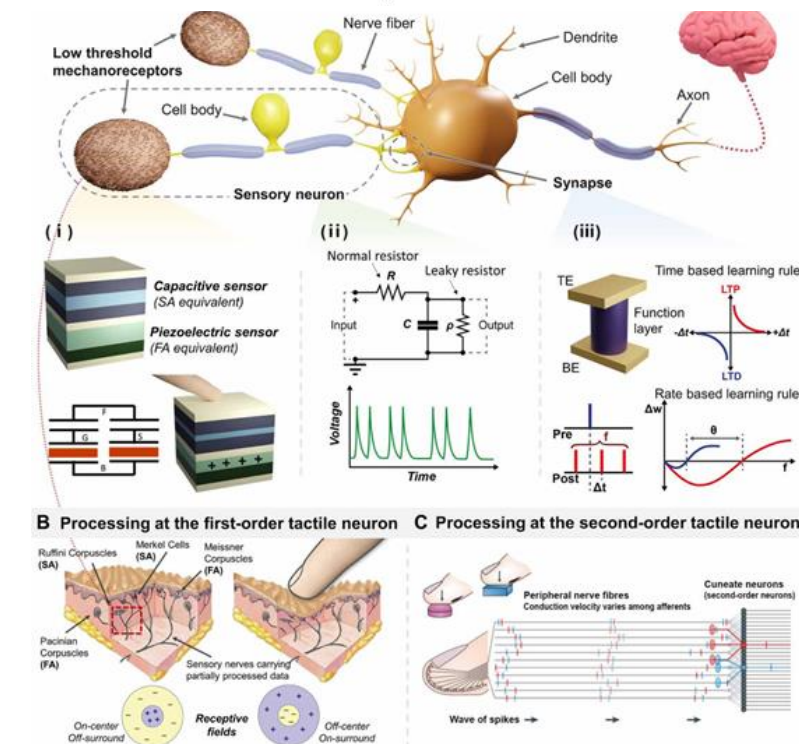
对应



SENSORS

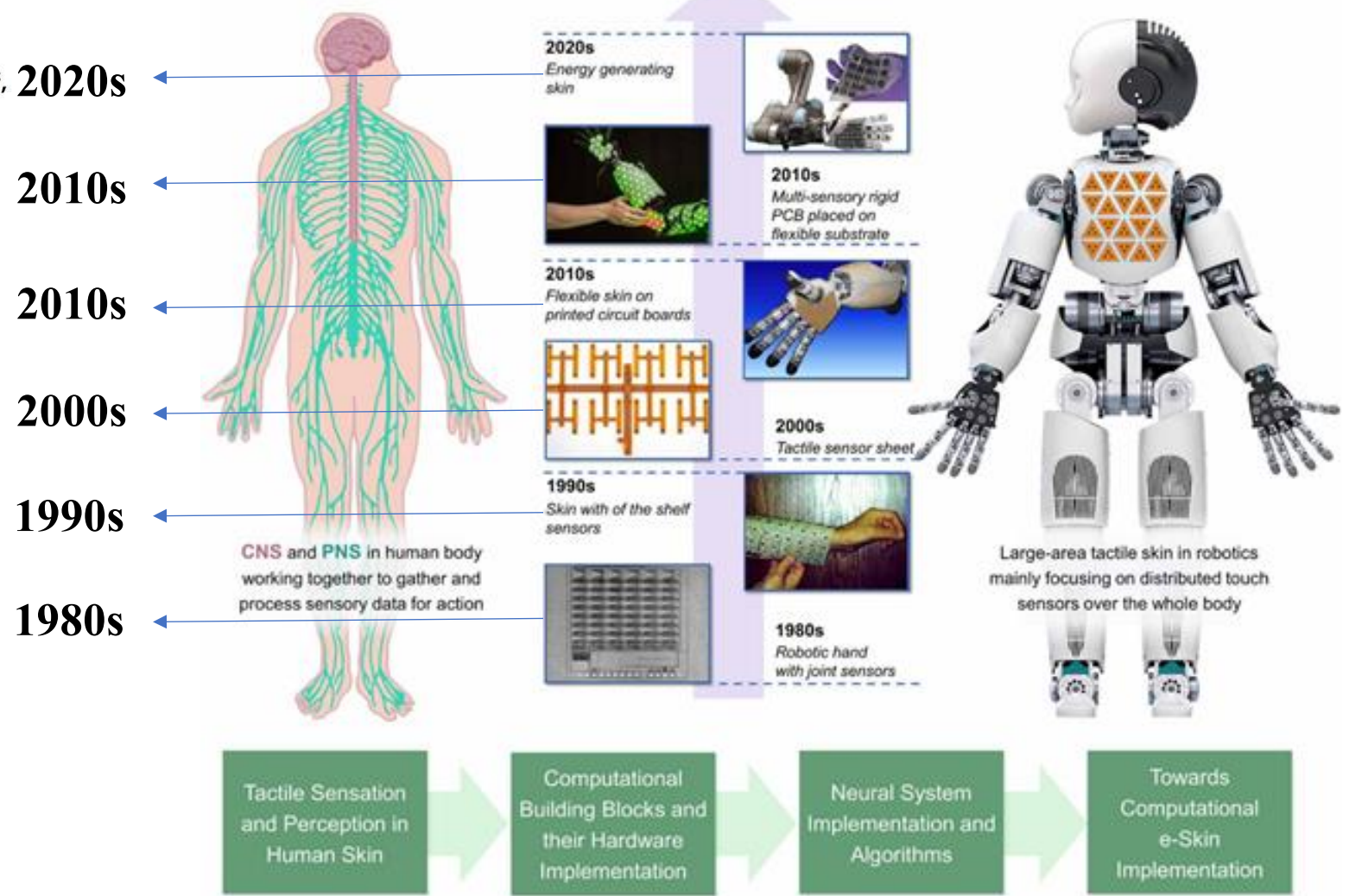
Neuro-inspired electronic skin for robots

Fengyuan Liu^{1†}, Sweetey Deswal^{1†}, Adamos Christou¹, Yulia Sandamirskaya², 2020s
Mohsen Kaboli^{3,4}, Ravinder Dahiya^{1*}

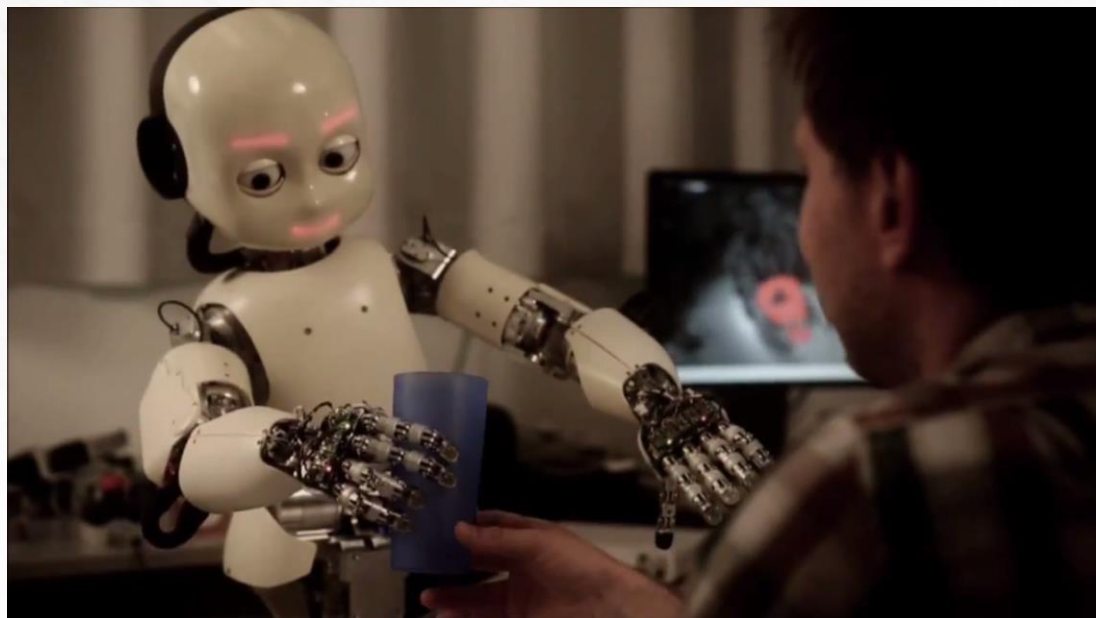


人体皮肤触觉数据处理的神经通路及其使用基本器件和电路的简单实现方案。

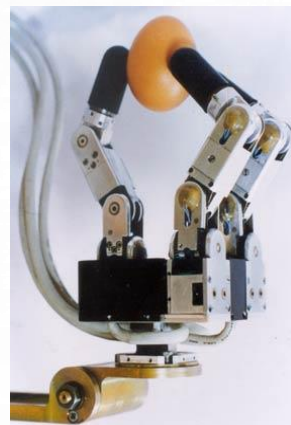
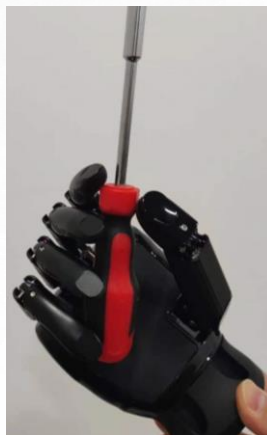
触觉与操作之间仍存在一定的差距



触觉传感器：机器人与环境交互的必要条件，机器人落地应用的必要条件。



触觉传感器是提供交互的信息的核心器件



触觉感知的应用

抓住（视觉）



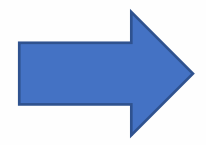
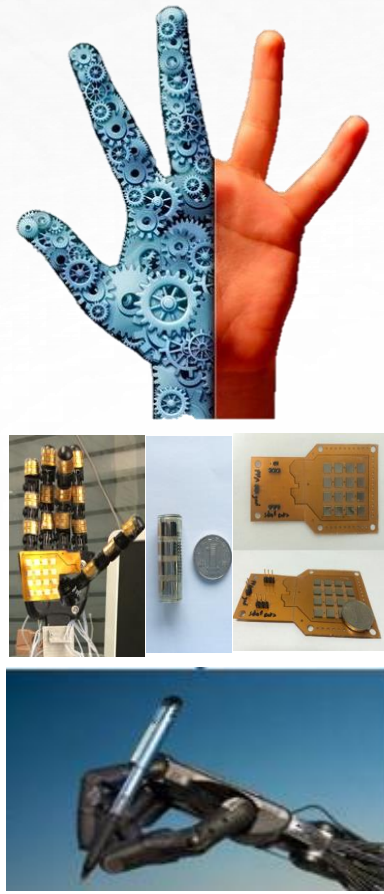
抓稳（触觉）



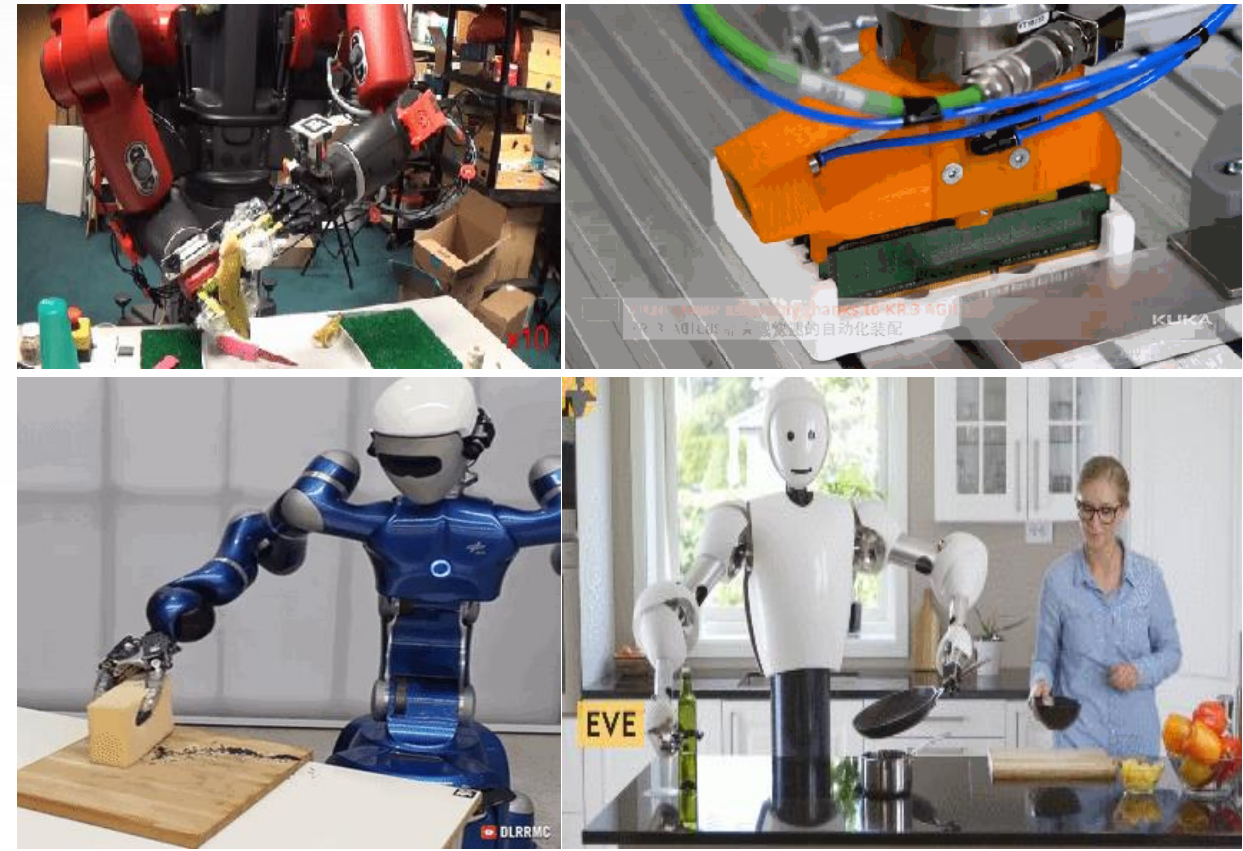
操作（大模型）



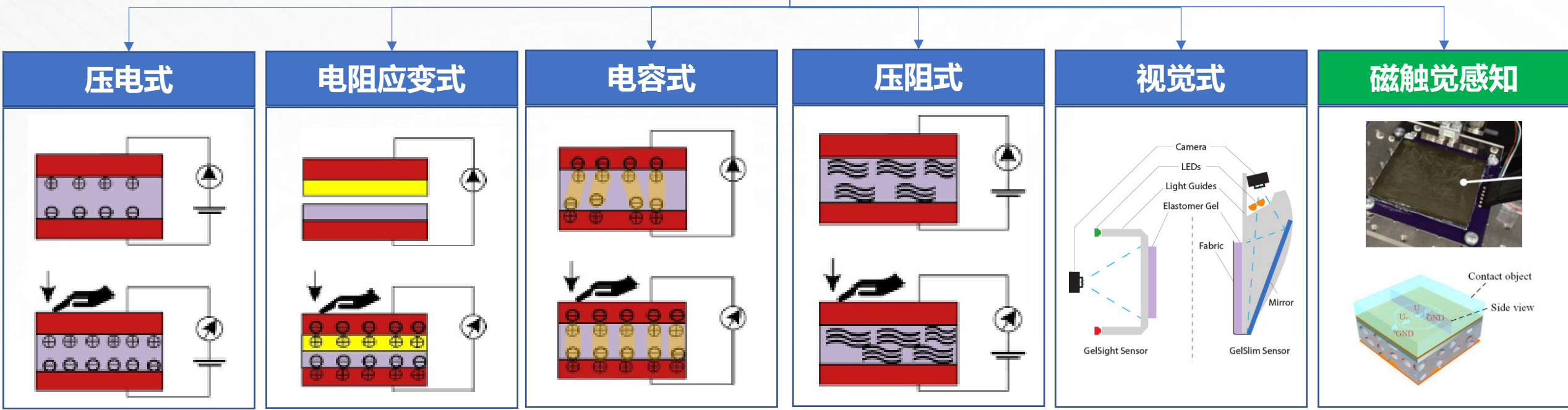
机器人触觉



机器人触觉感知操作



机器人的触觉感知



性能指标

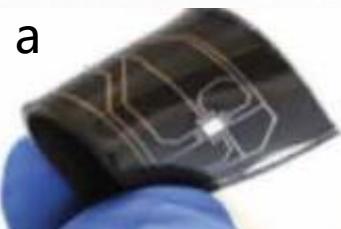
稳定与可靠

灵敏与量程

动态与迟滞

触觉传感器发展趋势

■ 柔性化

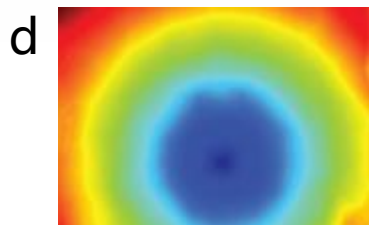


- 保障传感器在复杂表面正常工作

■ 多功能



纹理、温度



接触力分布

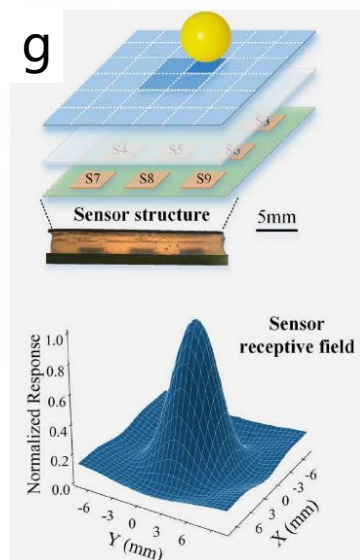
- 获取多模态信息

■ 大面积



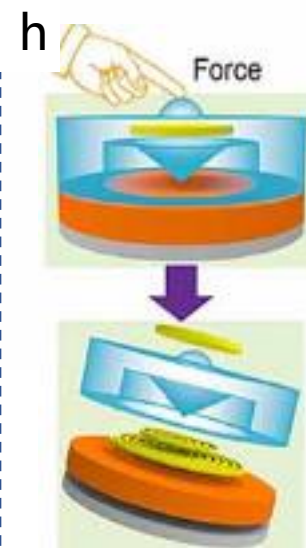
- 获取大范围的触觉信息

■ 高灵敏度



- 精细操作、灵巧操作

■ 高安全性



- 保障操作的安全性

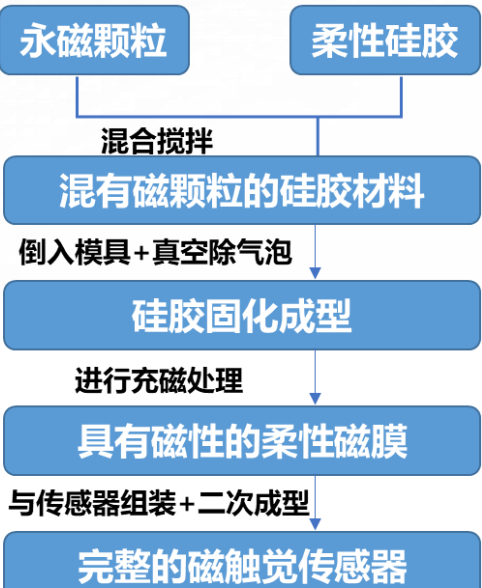
关键问题：大范围触觉感知及触觉识别

研究目标

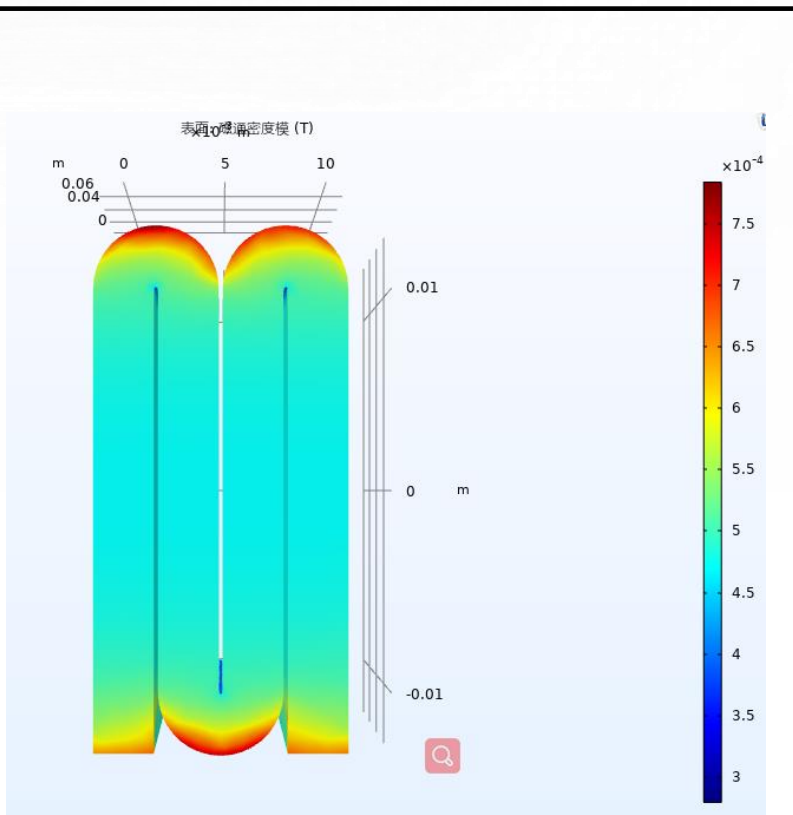
结合磁触觉传感器的优势，实现一款**可扩展性强、安全性高、检测模态多、感知精度高**的可用于大范围检测柔性磁触觉传感器

研究思路

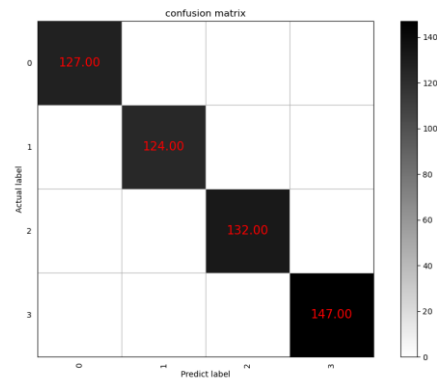
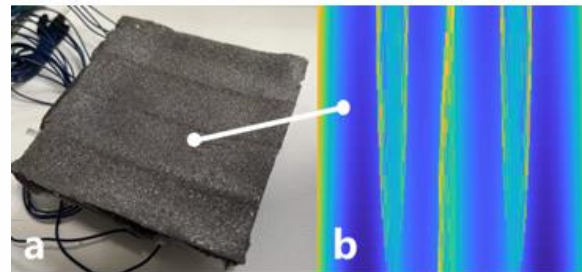
磁触觉传感器整体制作流程



磁触觉手掌结构设计

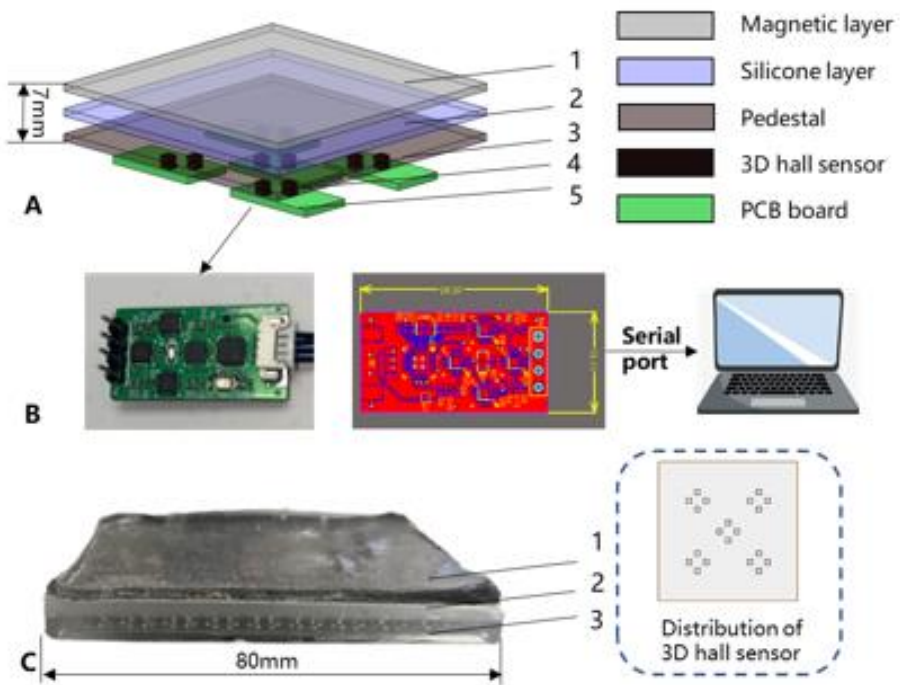


磁场分布优化及感知算法



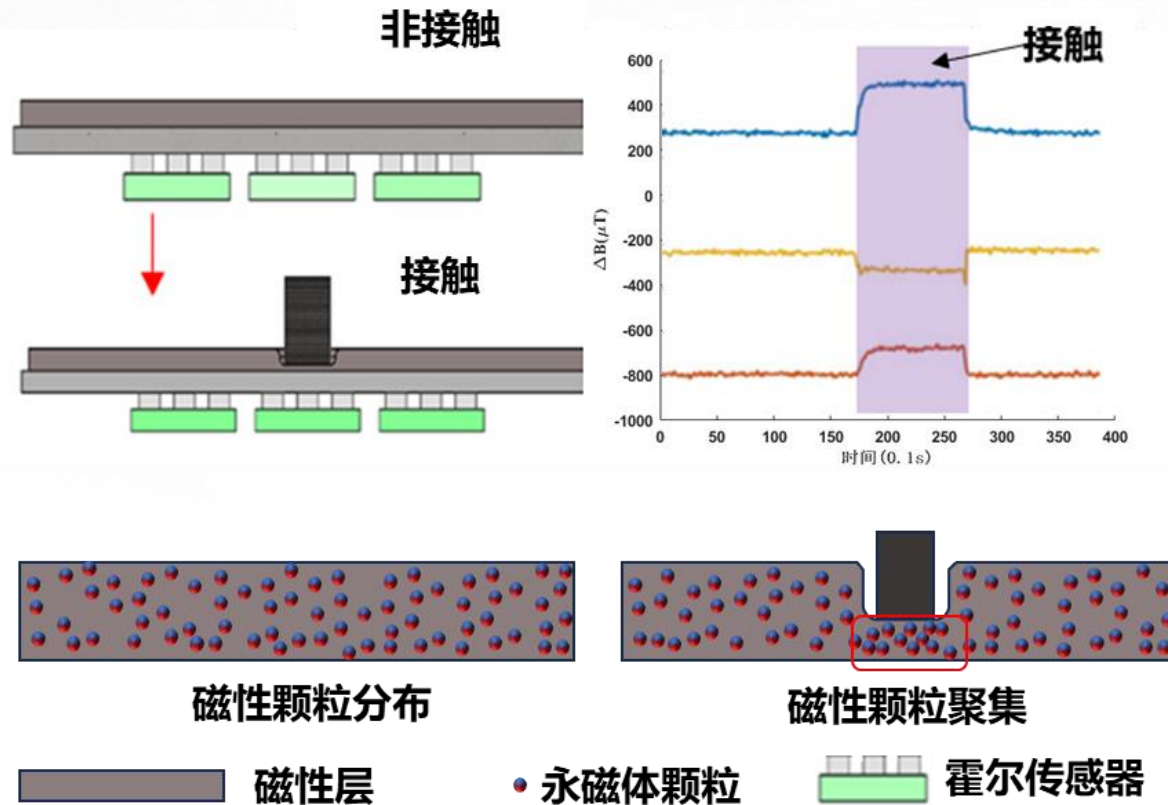
一体化集成测试

磁触觉传感器设计方案

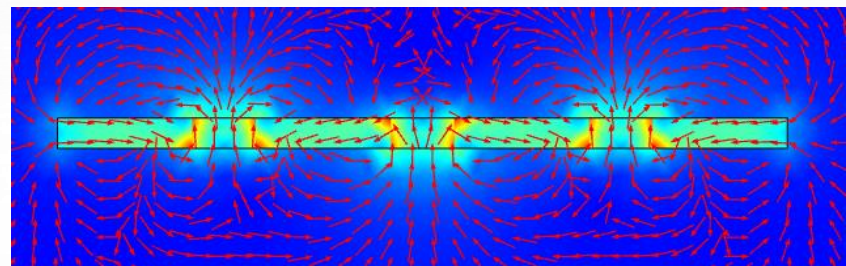
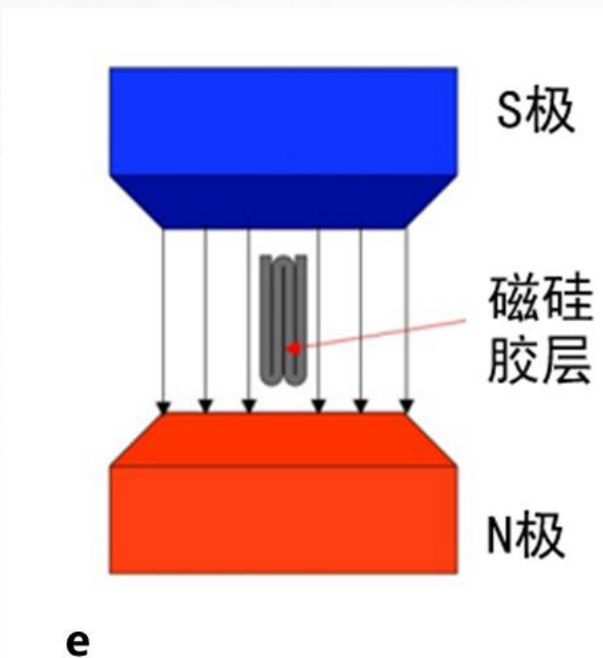
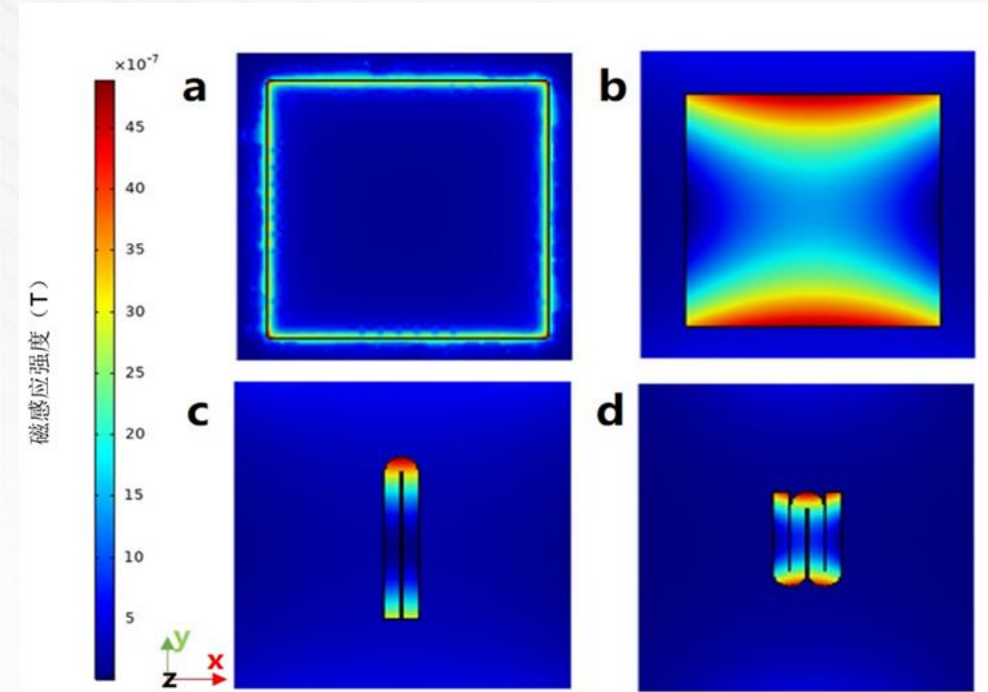


主要结构：

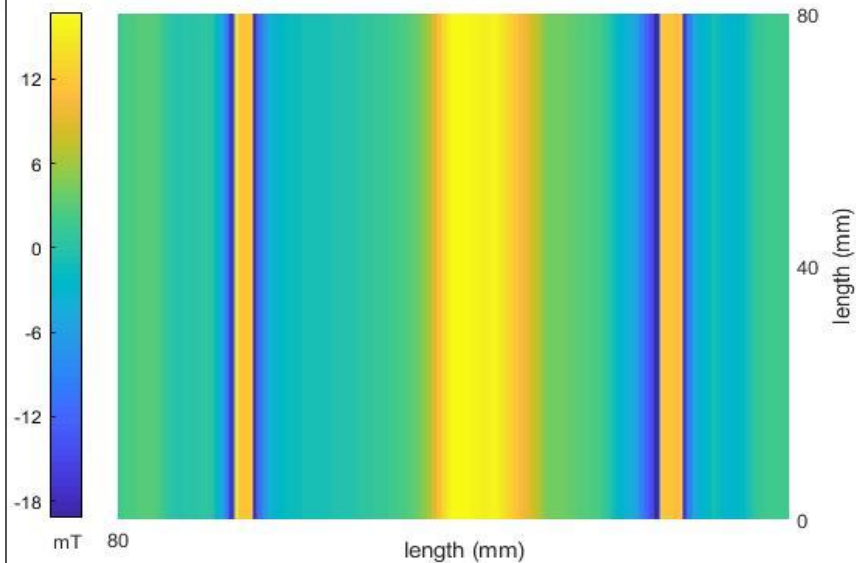
- 磁性层：用于检测接触信号
- 霍尔传感器：检测磁信号的变化
- 支撑层：用于霍尔传感器的固定



- 传感器的磁场分布：多磁极磁场
- 响应速度较快：可以及时响应接触信号



a

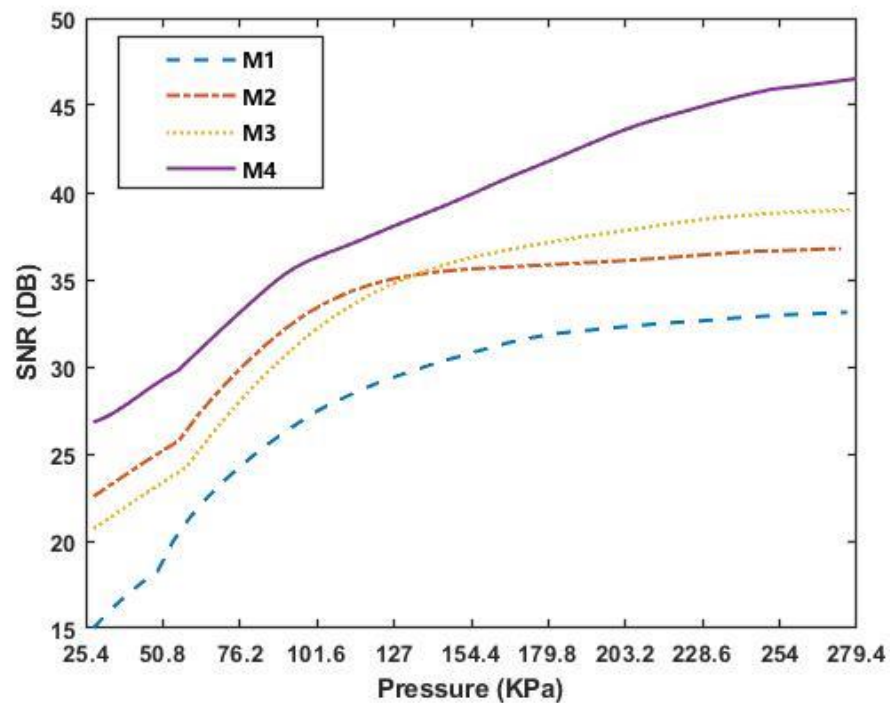


b

$$\Delta B_{hall} = \iiint_{\Omega} \frac{B_{particle}}{(dx^2 + dy^2 + (z - \Delta z)^2)^{3/2}} dv - \iiint_{\Omega} \frac{B_{particle}}{(dx^2 + dy^2 + z^2)^{3/2}} dv$$

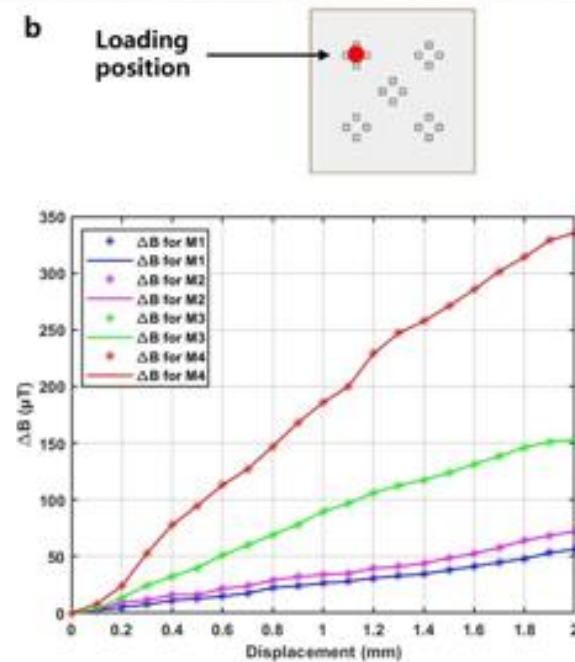
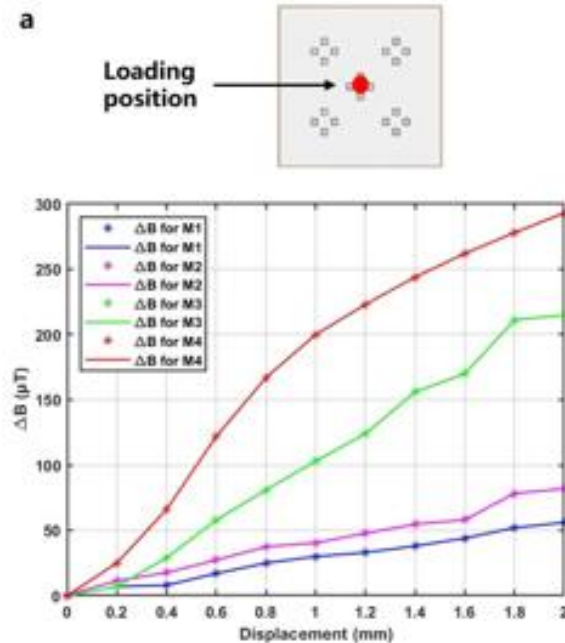
磁场分布优化

将磁性层采用的传统的单级充磁方式进行了改进及优化：改变充磁方式为多级充磁。
改良后的传感器表面磁场分布为多磁极分布，磁场强度值也有显著的提升。



信噪比 (SNR) :

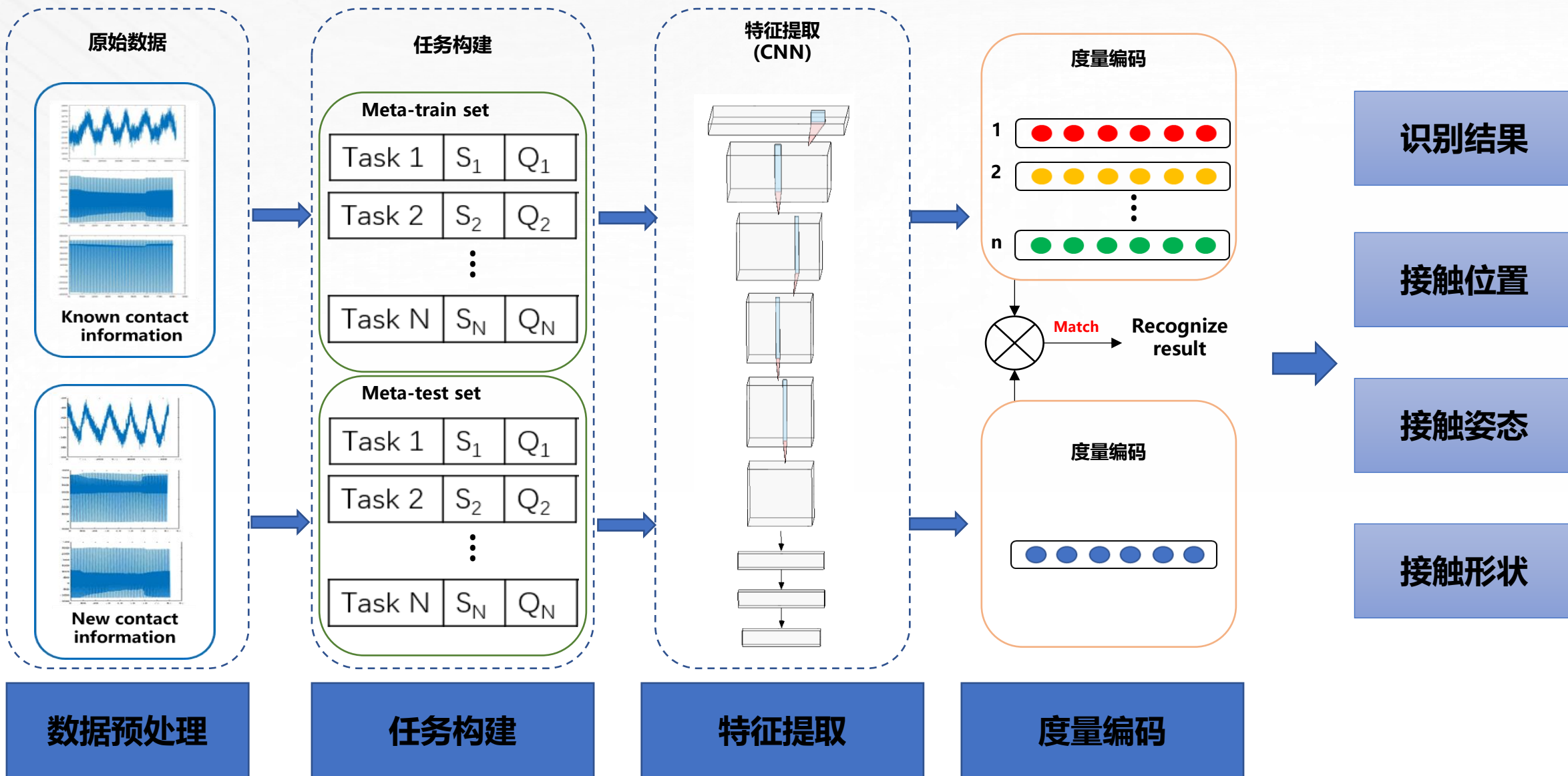
改良后的磁性层制作的传感器，触觉信号所包含的**噪声更少**。

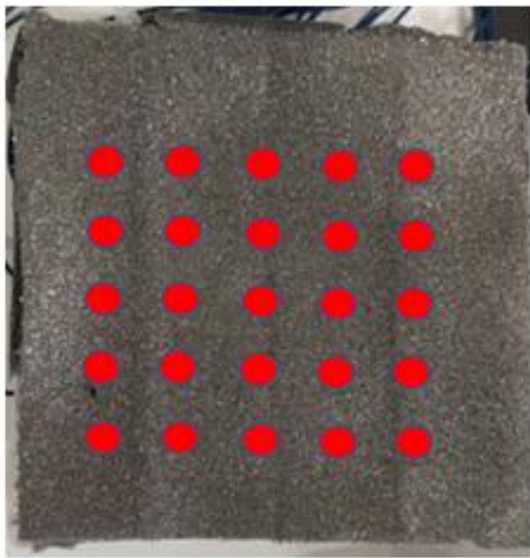
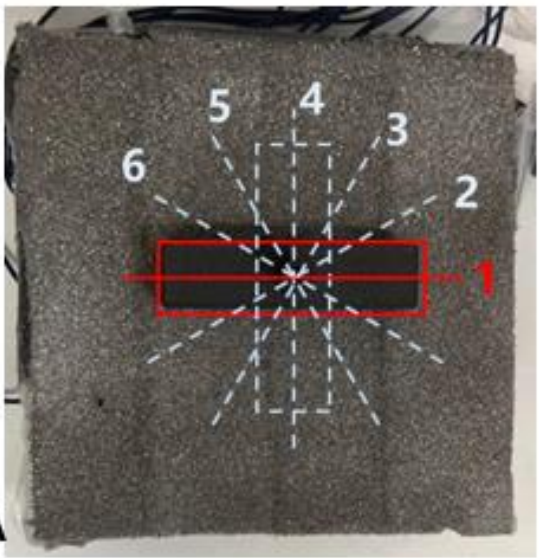
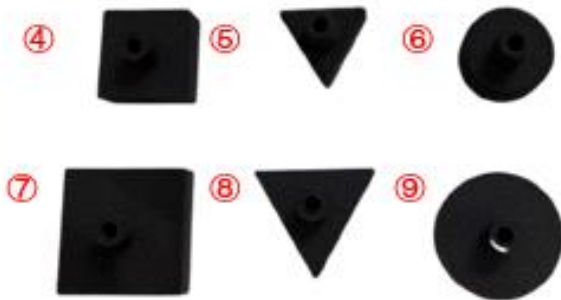


灵敏度 (Sensitivity) :

改良后的磁性层制作的传感器，对触觉信号的感知更加敏感，**更利于提取触觉特征**。

优化后的传感器在：灵敏度、信噪比等指标方面得到了较大的提升，数据稳定性更高





6-ways accuracy(%)	1-shot	3-shots	5-shots
Measuring head 1 and 2 → 3	91.25	94.64	97.88
Measuring head 1 and 3 → 2	91.86	95.12	98.14
Measuring head 2 and 3 → 1	91.78	94.76	98.28

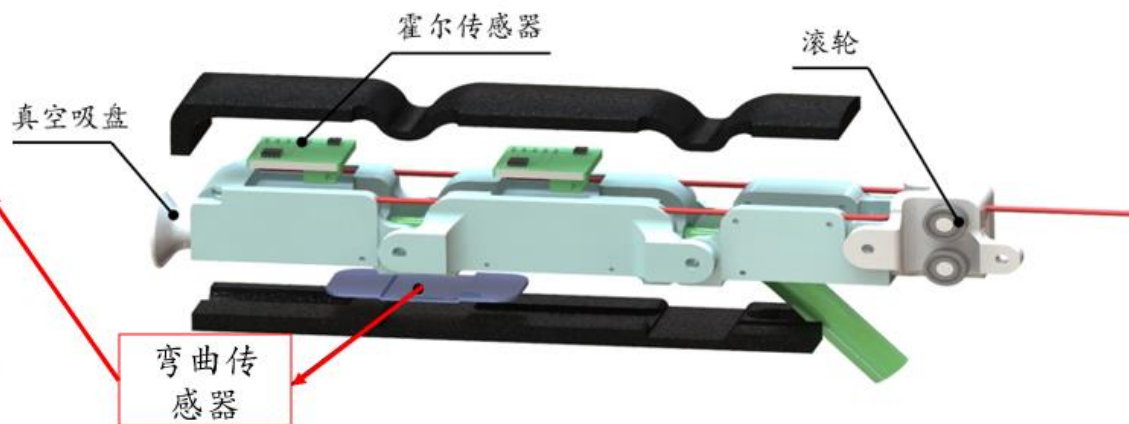
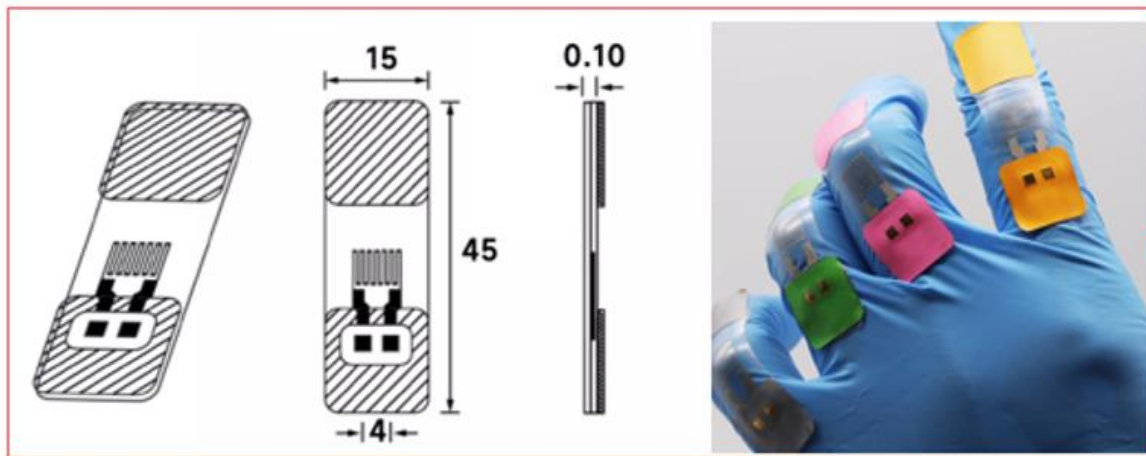
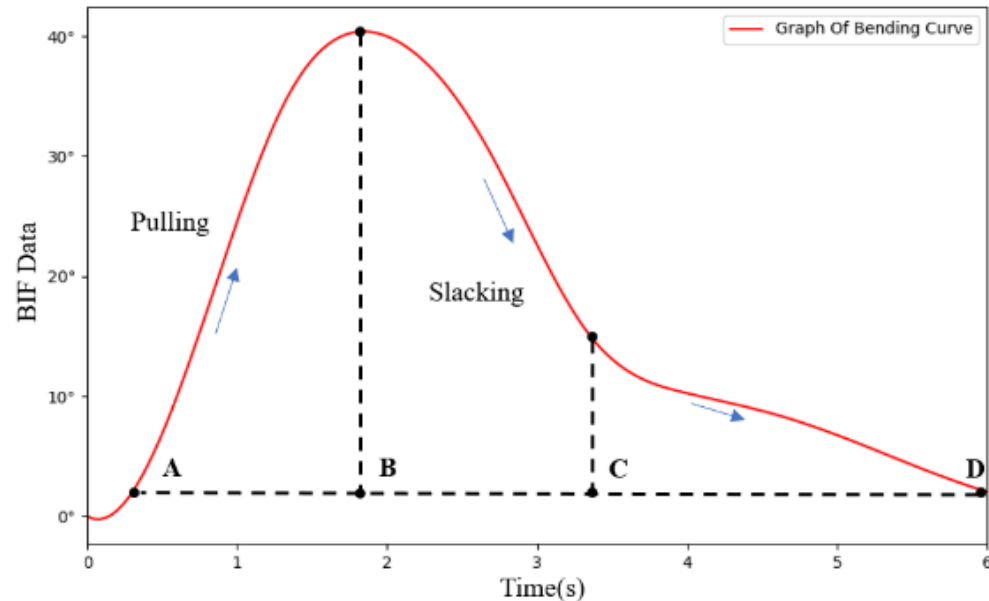
accuracy(%)	Measuring head 1 and 2 → 3	Measuring head 1 and 3 → 2	Measuring head 2 and 3 → 1
Pronet(1-shot)	91.25	91.86	91.78
Pronet(3-shot)	94.64	95.12	94.76
Pronet(5-shot)	97.88	98.14	98.28
KNN (K-NearestNeighbor)	92.85	93.54	93.07
CNN	89.15	87.58	90.47

采集了9类触头的接触信息：包括接触位置、接触姿态两部分内容

测试结果：能较为准确的完成不同触头的接触位置识别任务。
在姿态、形状两个识别任务上表现良好。

分别对不同的形状、姿态特征进行交叉验证，基于本文提出的方法，相比于传统深度学习方法，触觉特征识别准确率提升了10%，最高可达98%。

- 优化**磁性层材料和阵列**结构,设计异形分布式触觉阵列,便于不同场合压力感知测量需求。
- 开发了专用**集成数字接口**,降低功耗;设计柔性电路接口,方便与外部处理器通信。
- **多模态集成**,利用薄膜弯曲传感器检测弯曲状态,利用磁触觉传感器检测接触力。



磁触觉皮肤——力控感知

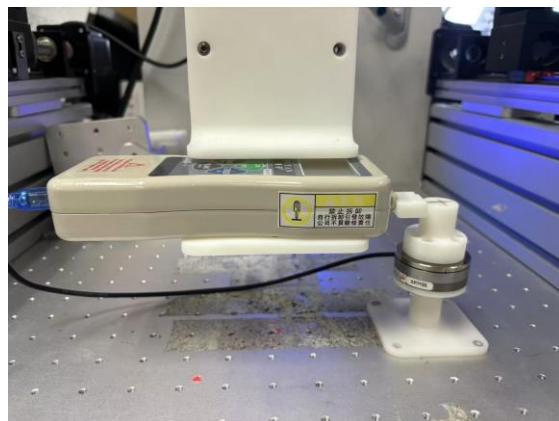


北京邮电大学
Beijing University of Posts and Telecommunications

人工智能学院



法向力校准

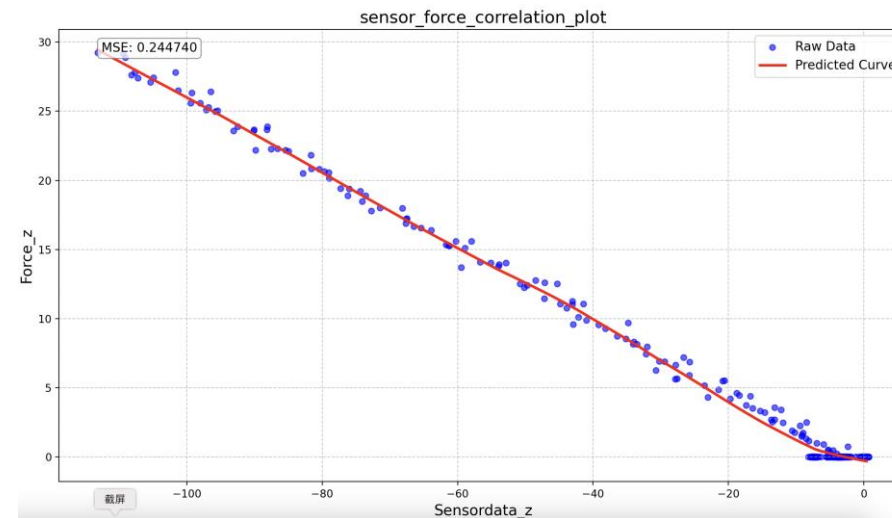


切向力校准

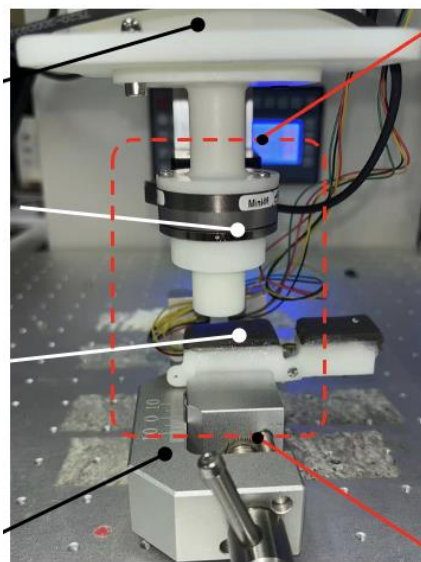
数据采集

训练

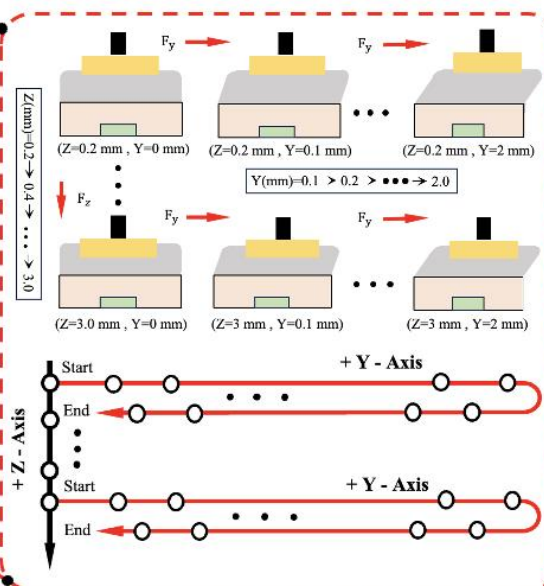
重映射



拟合结果



力数据采集



采集采集流程

采集流程

- 力传感器向下压
- 切向位移
- 采集数据

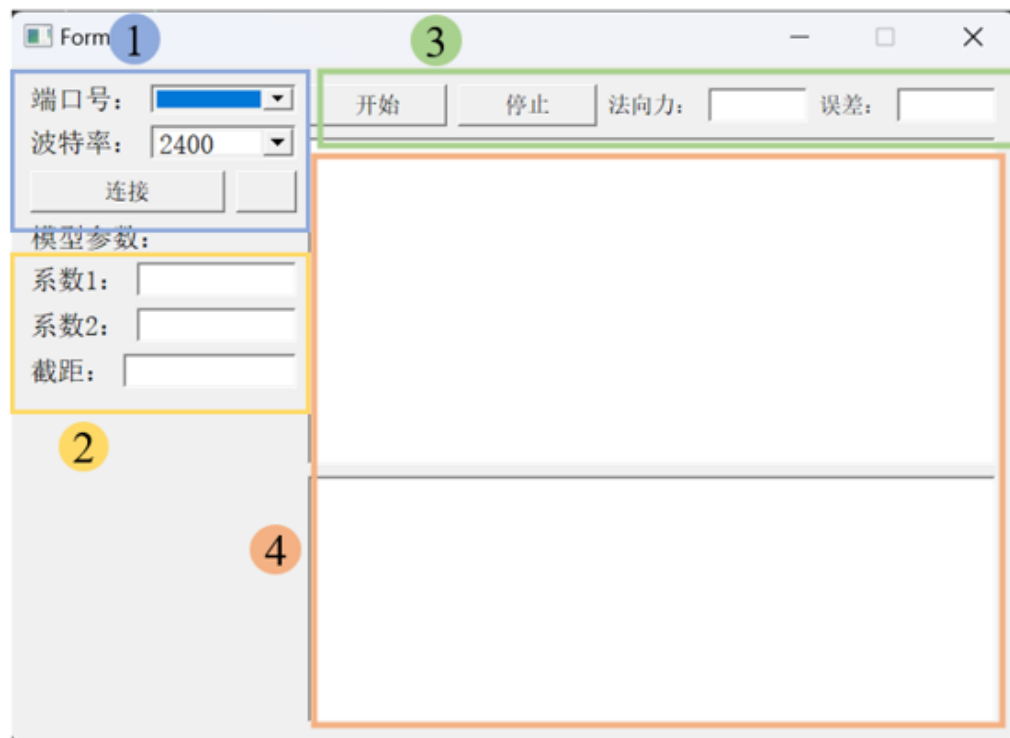
磁触觉皮肤——法向力标定



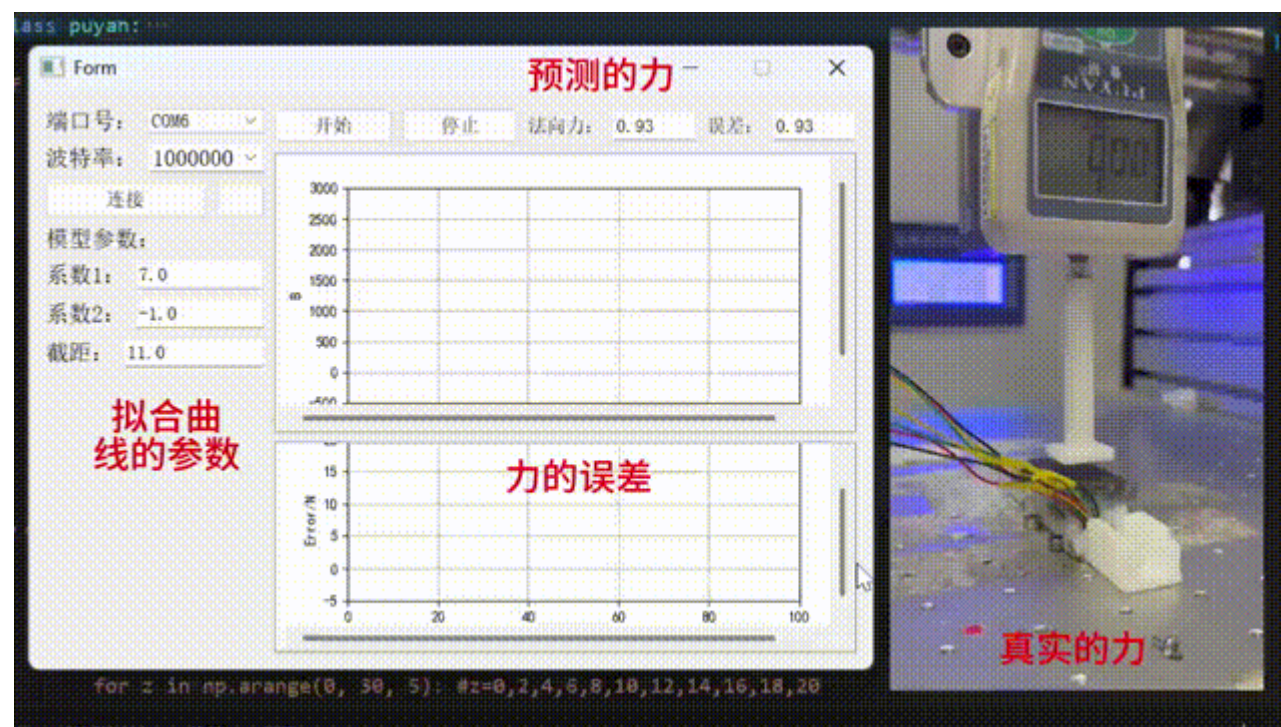
北京邮电大学
Beijing University of Posts and Telecommunications

人工智能学院

上位机界面



拟合结果



串口通讯

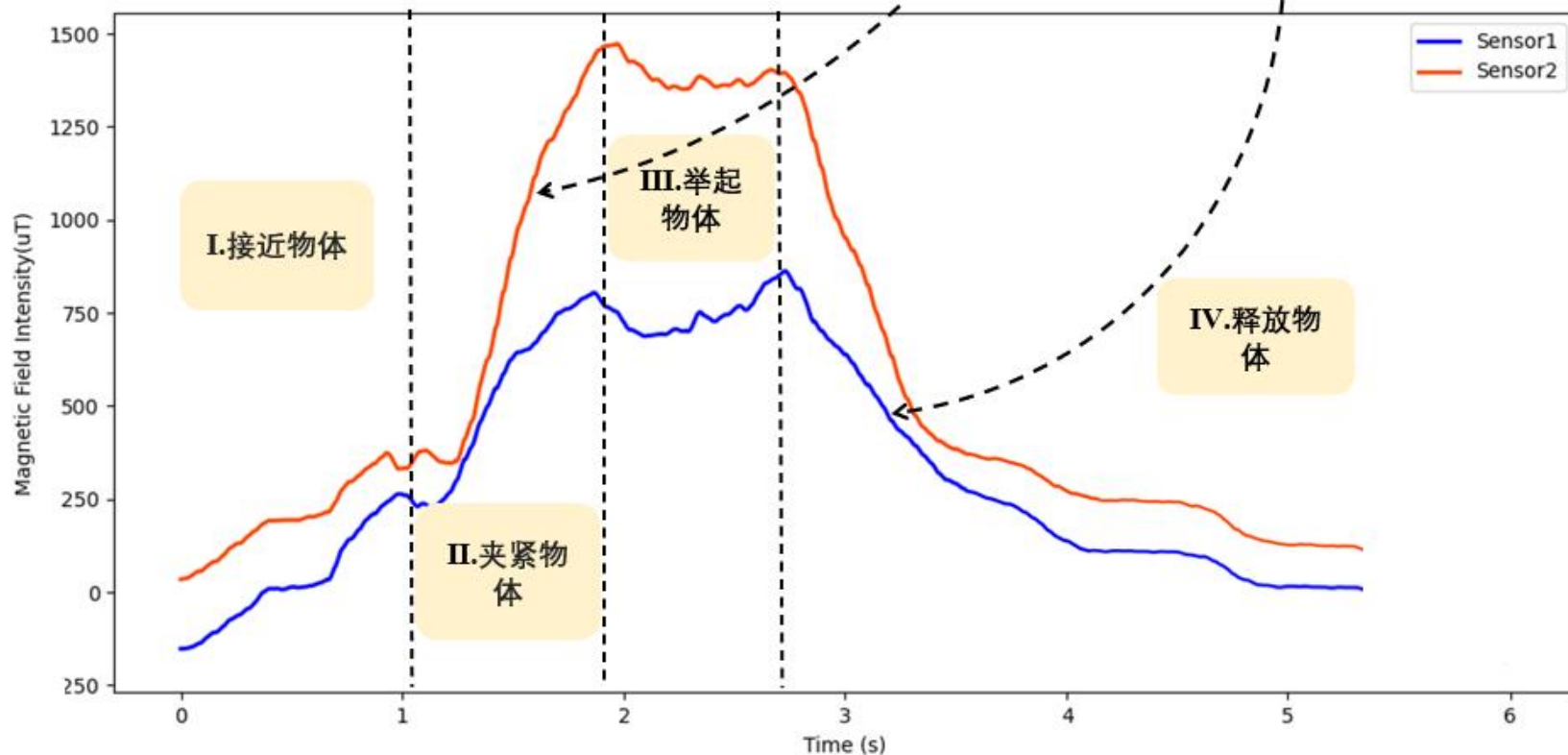
数据采集

感知算法

可视化结果



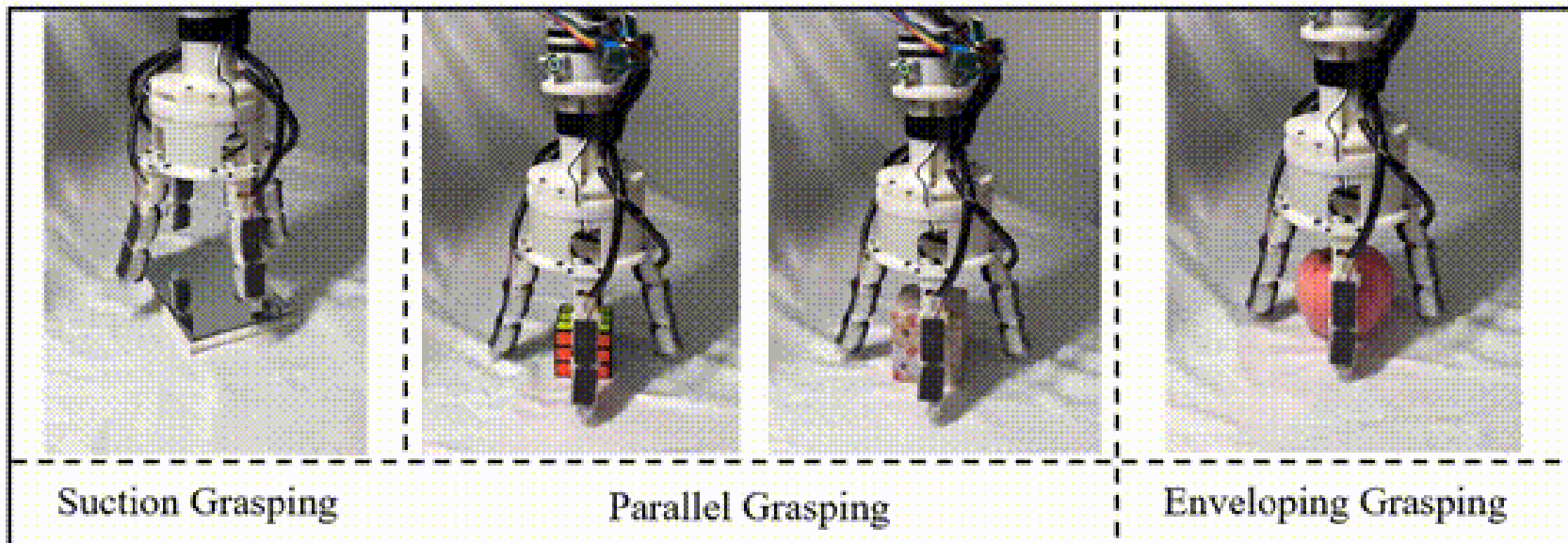
I. 接近物体 II. 夹紧物体 III. 举起物体 IV. 释放物体



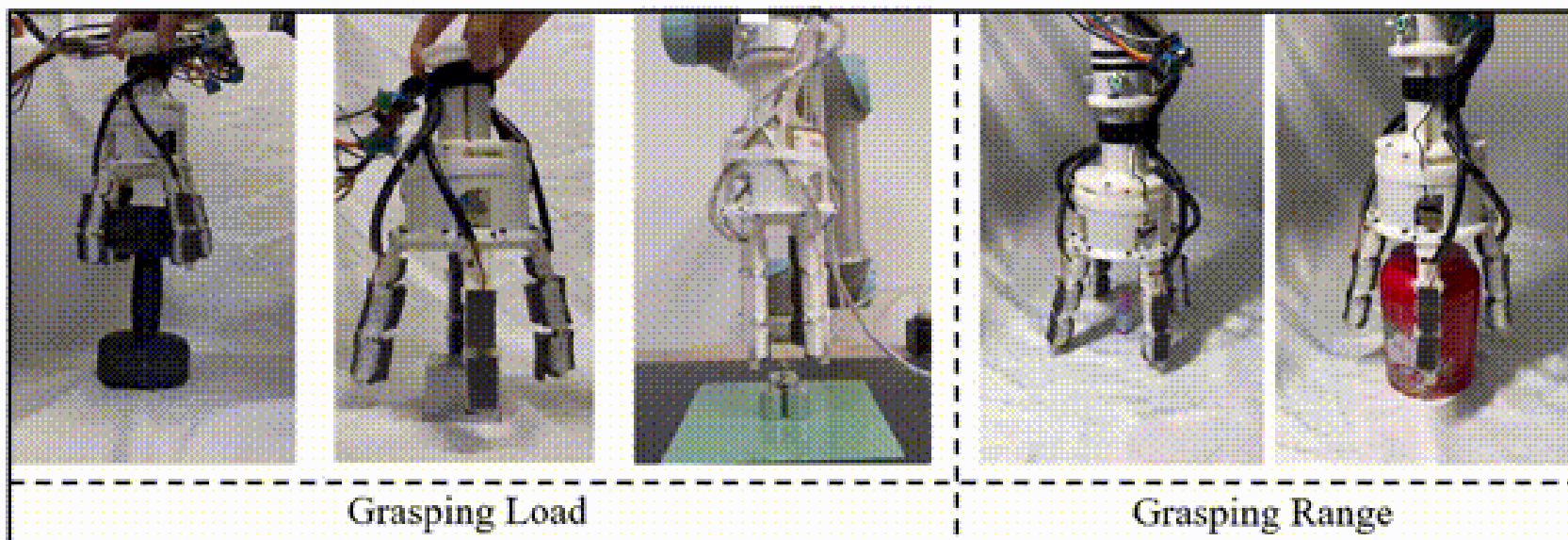
平行抓取与包络抓取会对磁性硅胶薄膜产生挤压。将平行抓取分为四个阶段：

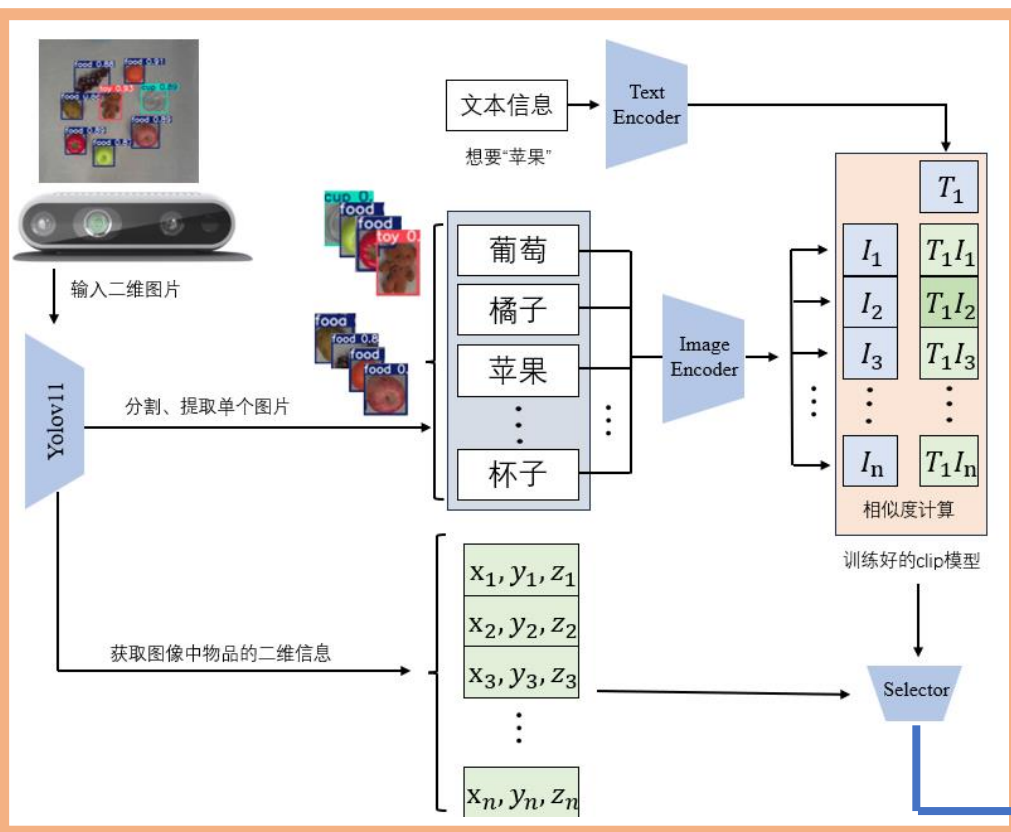
1. 接近物体
2. 夹紧物体
3. 提起物体
4. 释放物体

Grasping Mode



Performance Testing





视觉抓取模块

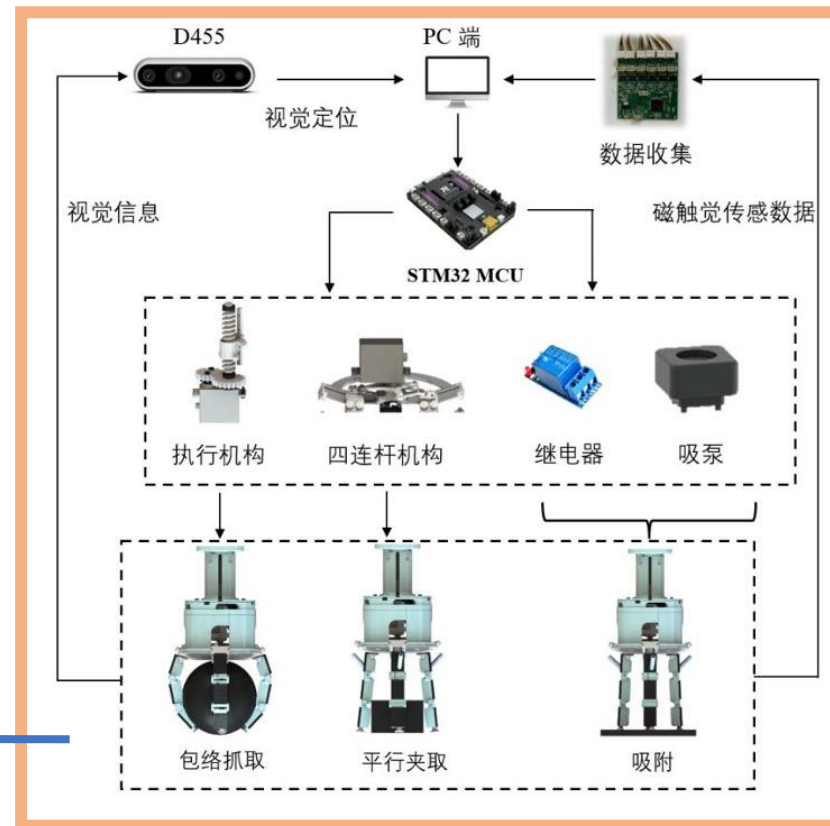
识别物体，框选物体，坐标信息

三维坐标信息



机械臂

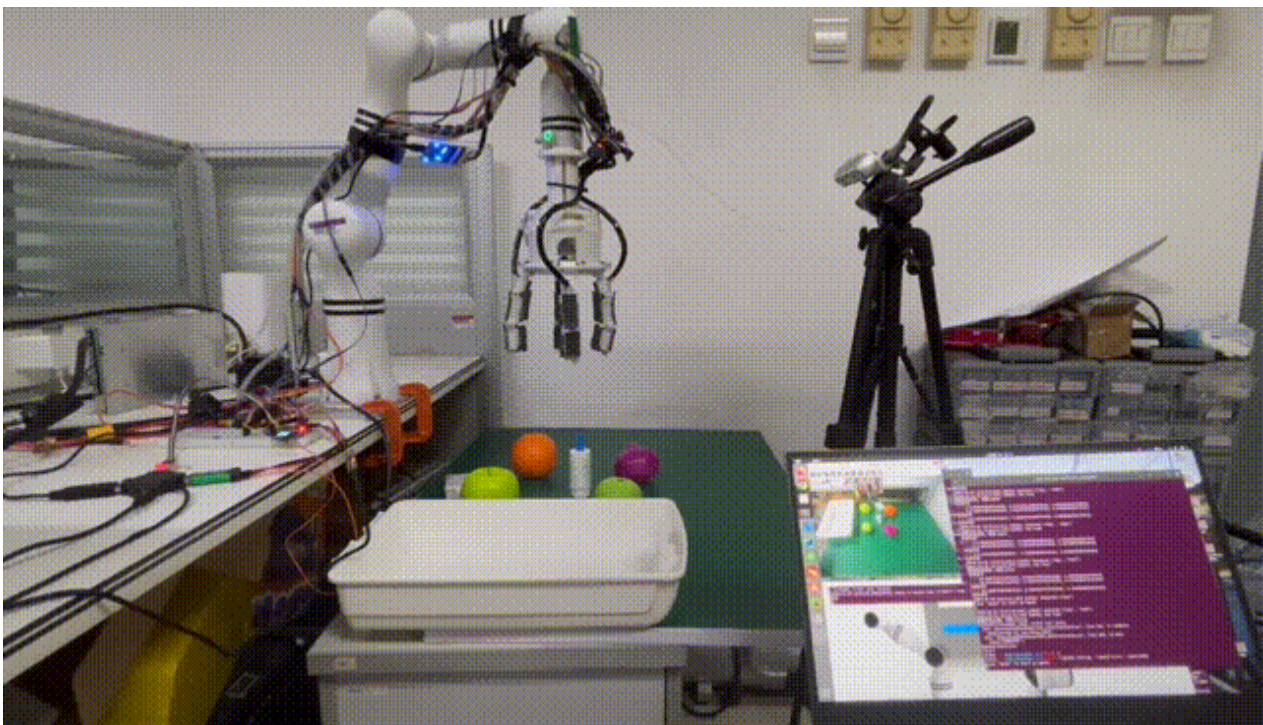
抓取操作



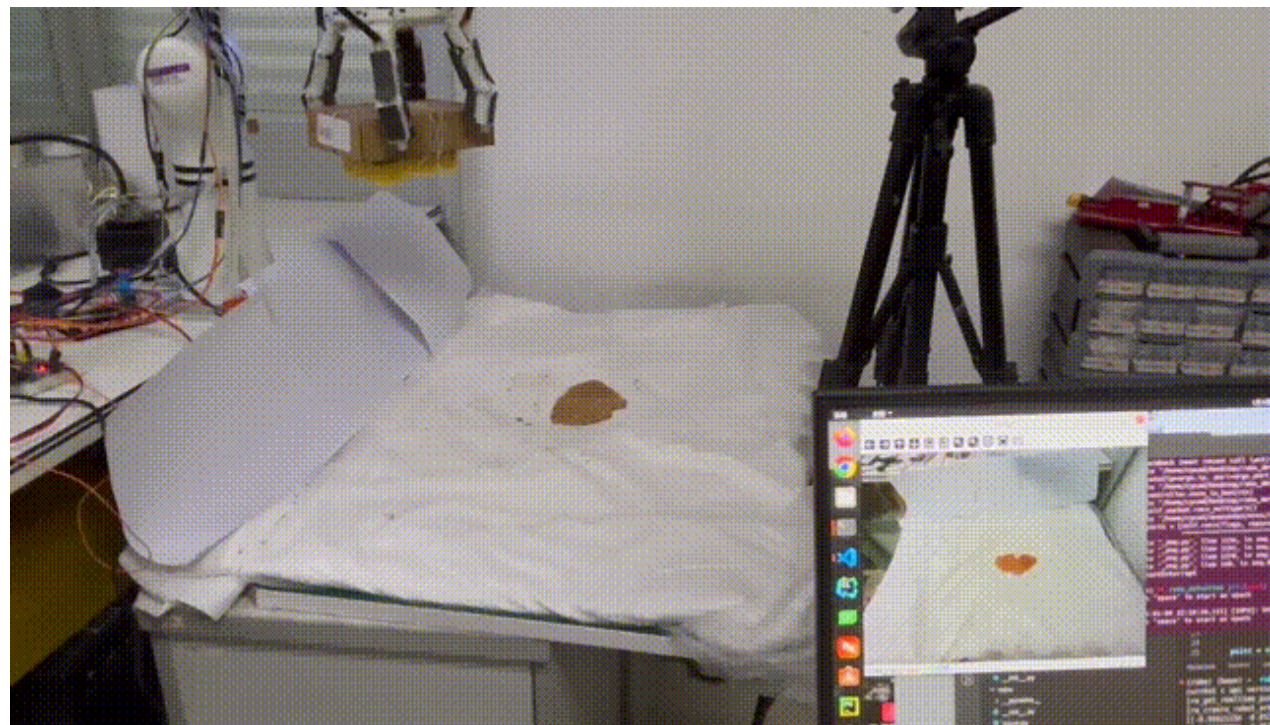
底层抓取硬件

动作执行

完成操作



物体识别抓取



擦拭油污实验

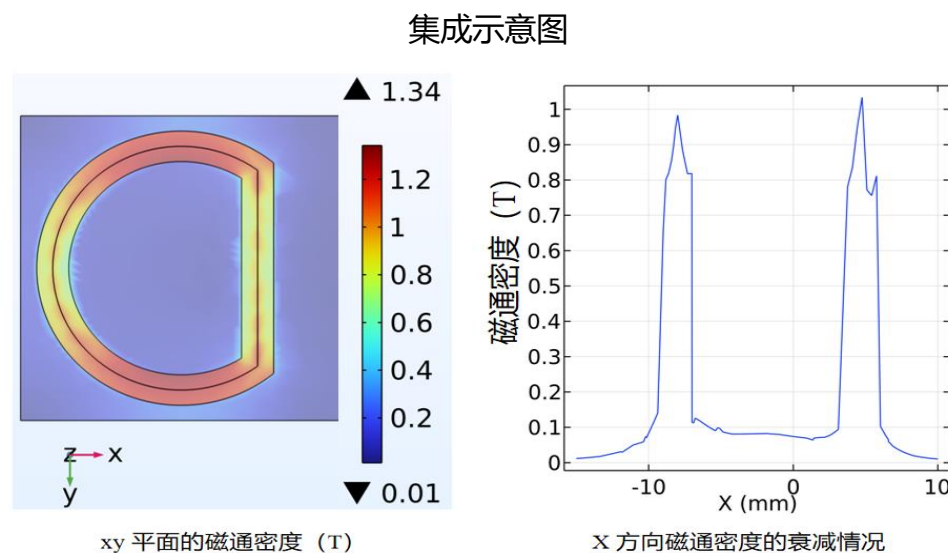
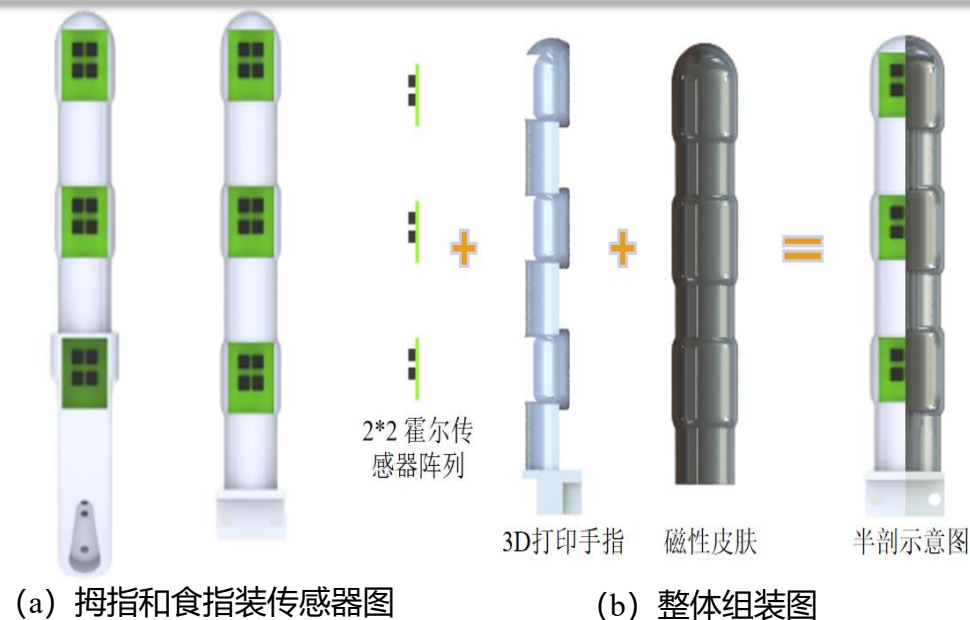
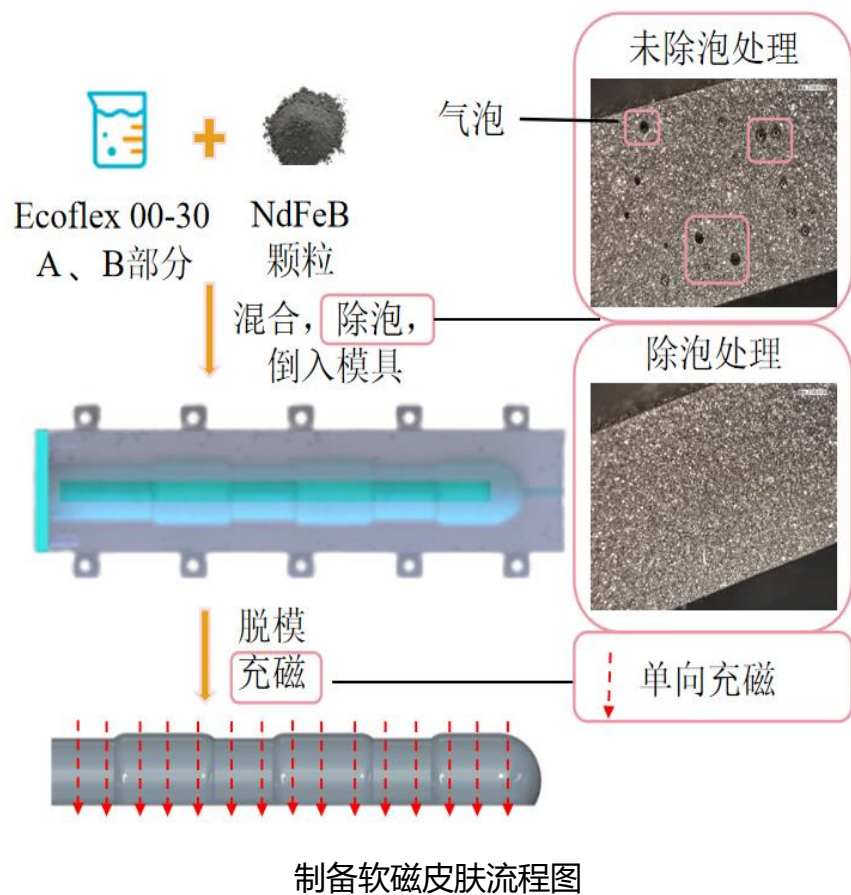
磁触觉皮肤——全域感知



北京邮电大学
Beijing University of Posts and Telecommunications

人工智能学院

原理：当皮肤与物体发生接触或产生变形时，内部磁性颗粒发生位移重组，磁场分布发生改变，三维霍尔传感器可以检测出磁场的变化。



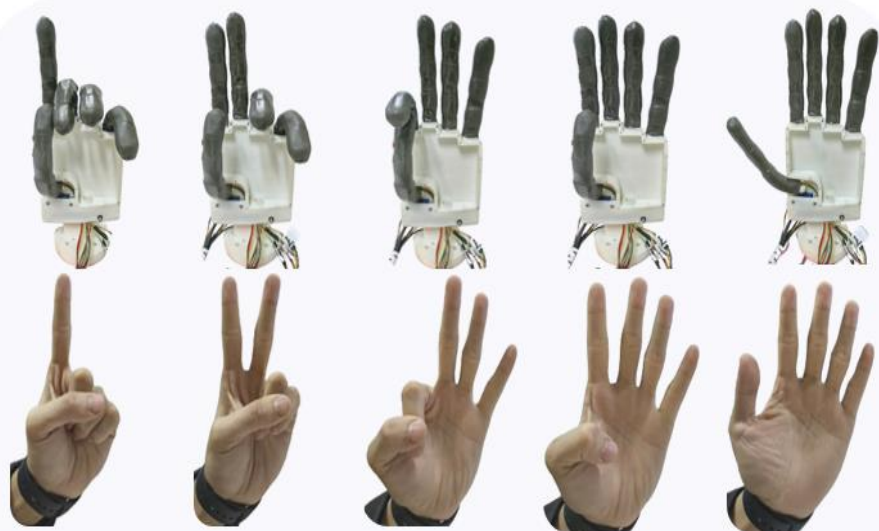
Comsol仿真结果图

磁触觉皮肤——触觉感知及运动感知

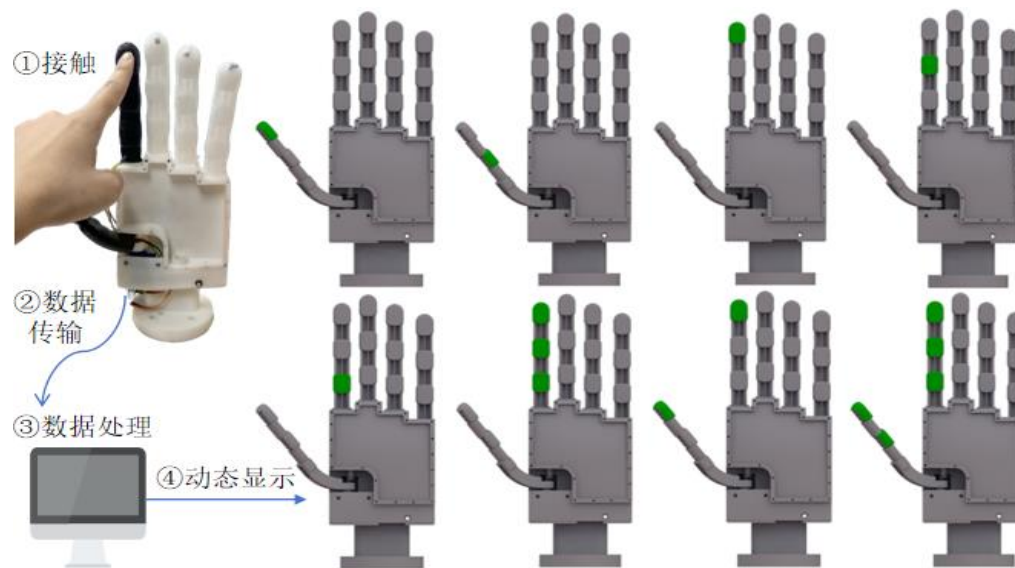


北京邮电大学
Beijing University of Posts and Telecommunications

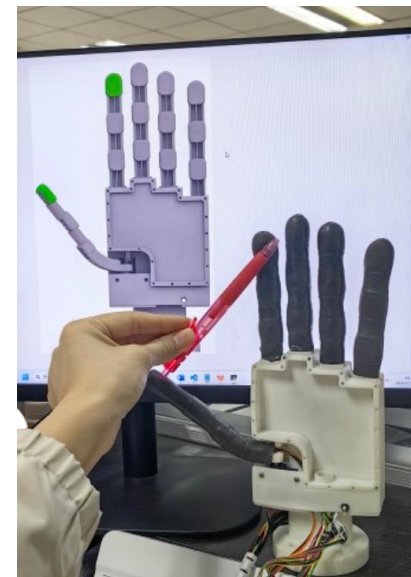
人工智能学院



灵巧手和人手的手势图



动态显示接触部位图



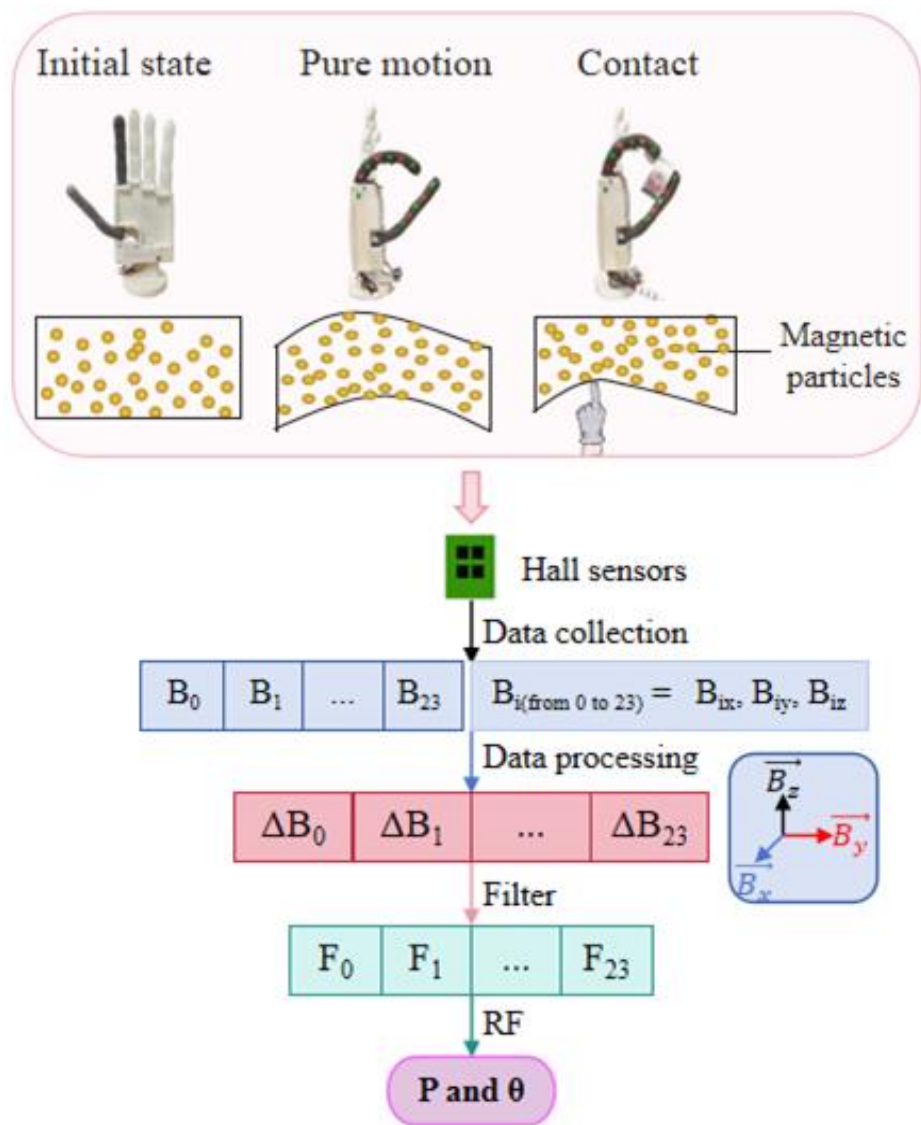
动态显示接触部位实验效果图

触觉感知

运动觉感知

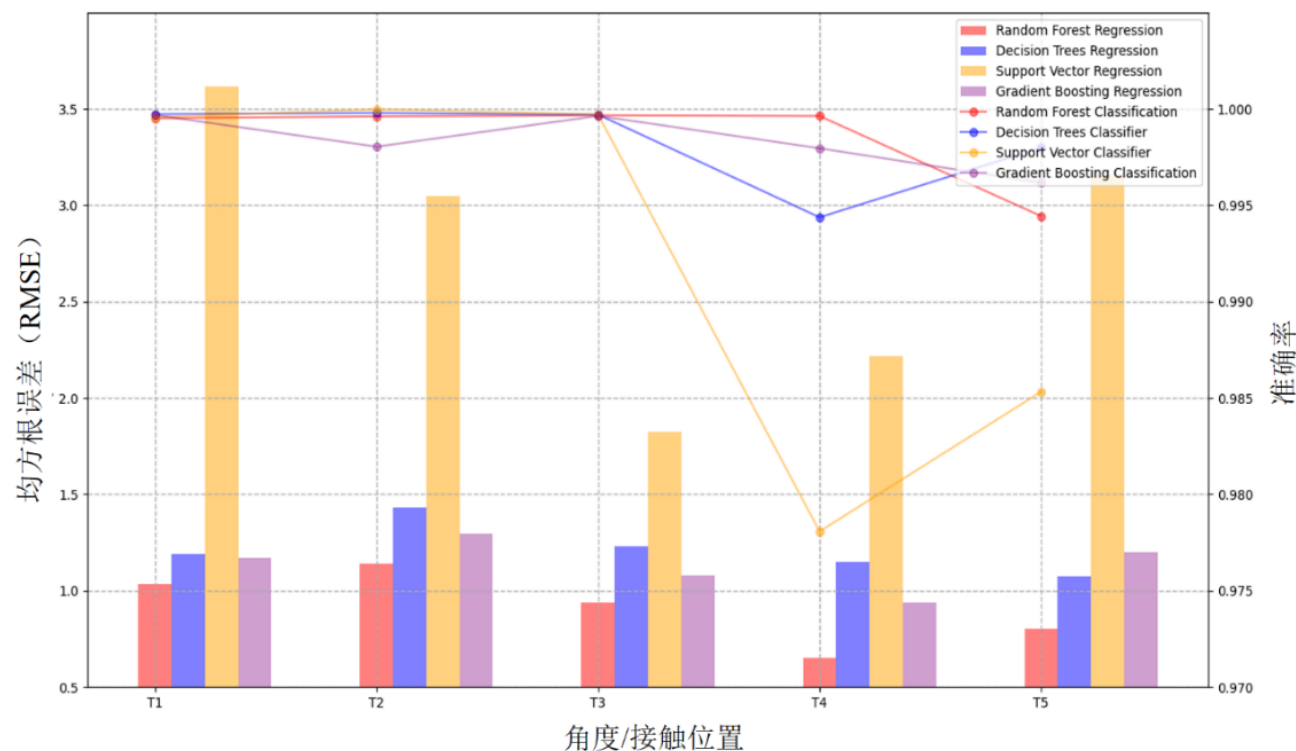


Kinovea标记关节角



触觉和运动觉的网络框架优化图

对于接触位置分类的正确率最低优于99.4%；对于关节角的拟合， $RMSE = 0.9 \pm 0.2^\circ$ 。



触觉和运动觉的网络框架优化图

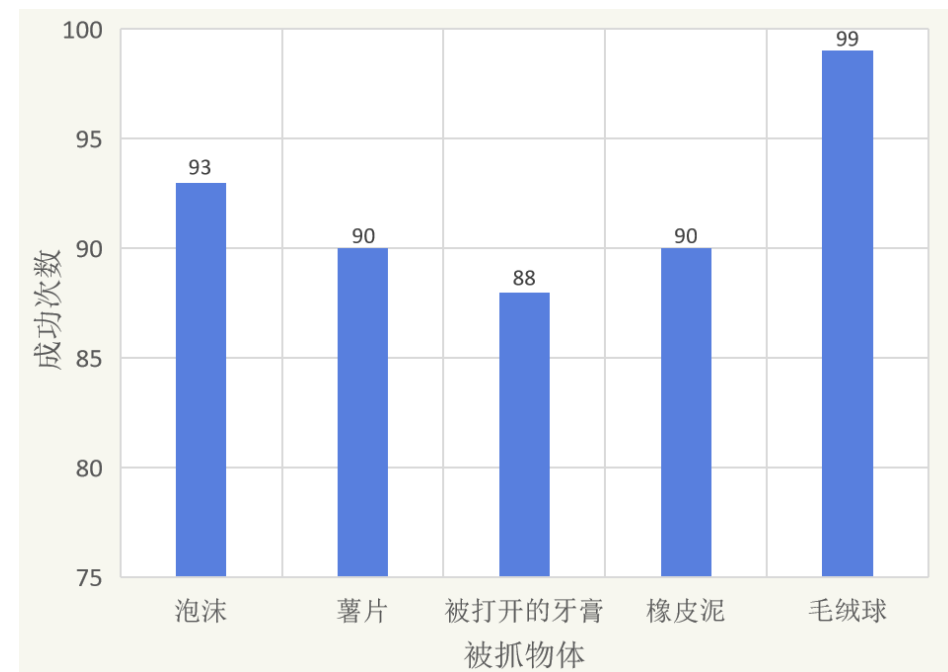
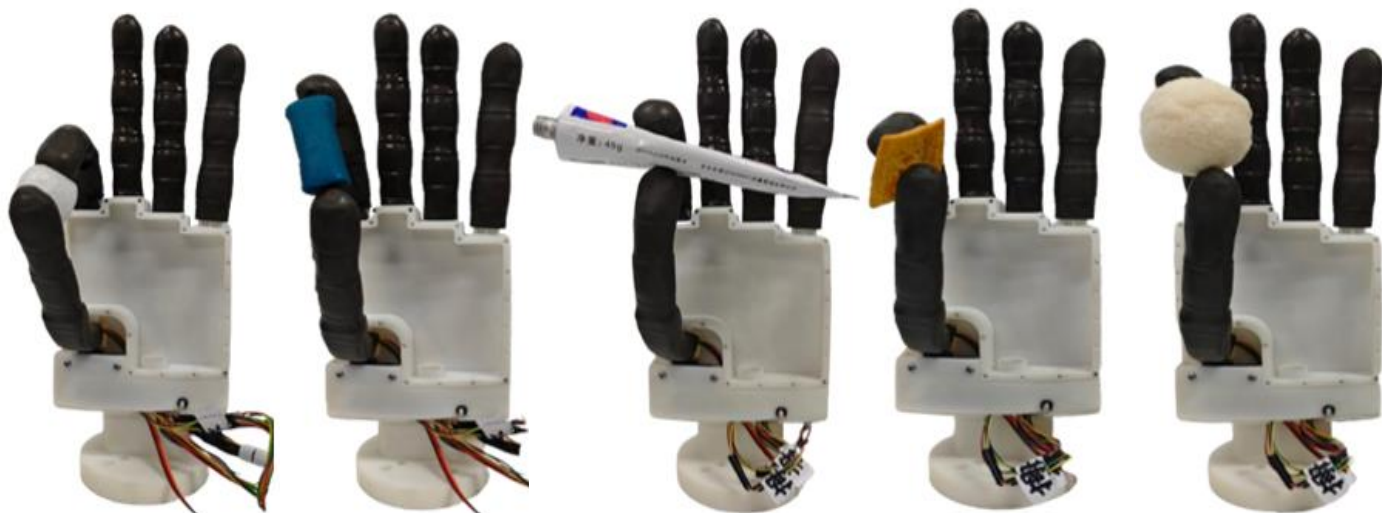
灵巧手抓取操作



物体操作分类表

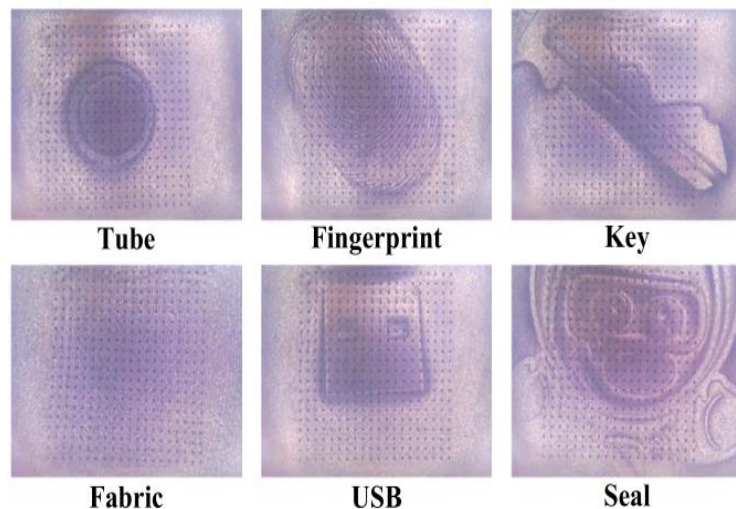
物体	重量（g）	体积（cm ³ ）	操作类别
剪刀	81.79	214×83×15	勾取
购物袋	222.47	200×100×360	
胶带	16.46	91×91×9	
护手霜	21.46	20×20×117	捏取
长尾夹	1.34	15×7×27	
身份证	6.64	85×54×1	
苹果	304.73	76×82×66	包络
纸杯	3.83	75×75×81	
鼠标	73.59	50×95×45	
笔	12.38	145×16×16	夹取
吸管	1.83	284×14×3	
手套	2.00	65×65×1	

灵巧手表面的皮肤具有柔软、弹性和可变形的特性，能够更好的适应不同形状的物体表面。用相同的按压力接触物体时，软磁皮肤能减小损坏物体的风险，为灵巧手和物体提供一定的保护和缓冲效果。



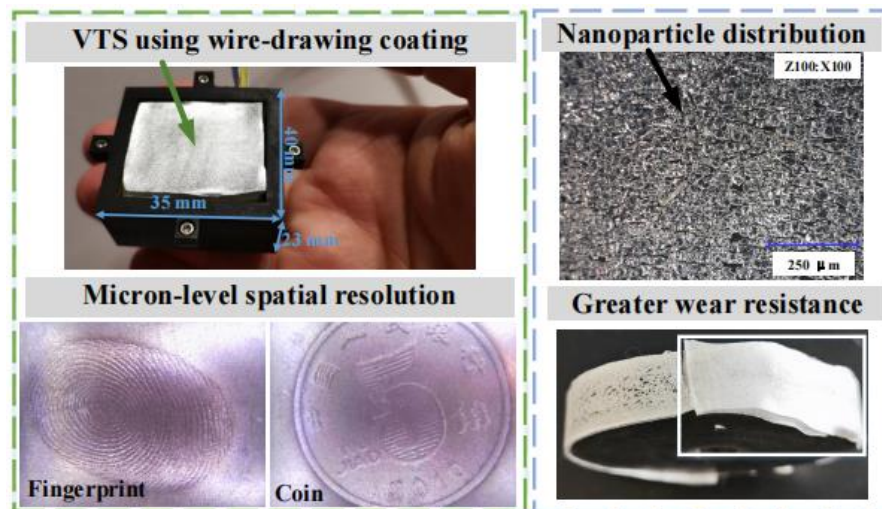
我们对上述五种物体进行抓取操作，每种物体进行100次，以在抓住后轻微摇晃10 s，保持稳定抓握不掉落且平稳放下后无破损、明显或不可逆形变为标准，测试抓取成功率。测试结果如图5.10，对**泡沫、橡皮泥、打开的牙膏、薯片、毛绒球**的**抓取成功分别为93%、90%、88%、90%和99%**。

高分辨率

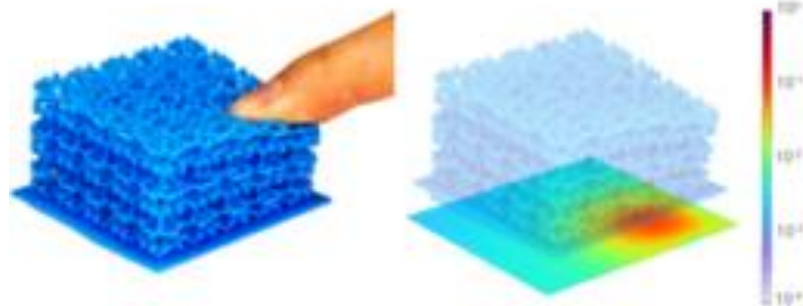


视触觉

集成简单

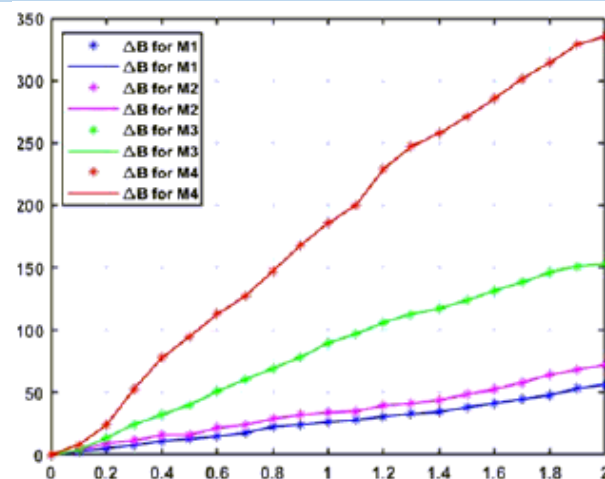


响应迅速

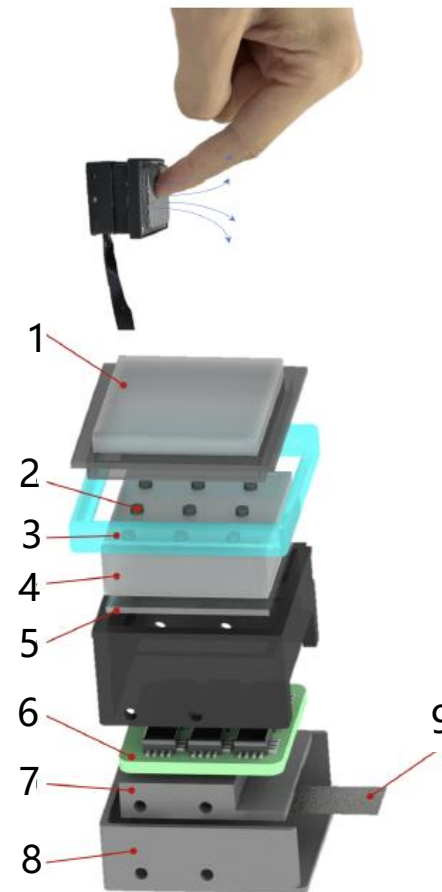


磁触觉传感器

高灵敏度



融合



磁触觉_视触觉融合——结构设计



北京邮电大学
Beijing University of Posts and Telecommunications

人工智能学院

Material Production:



Pour In



Magnetic Particle

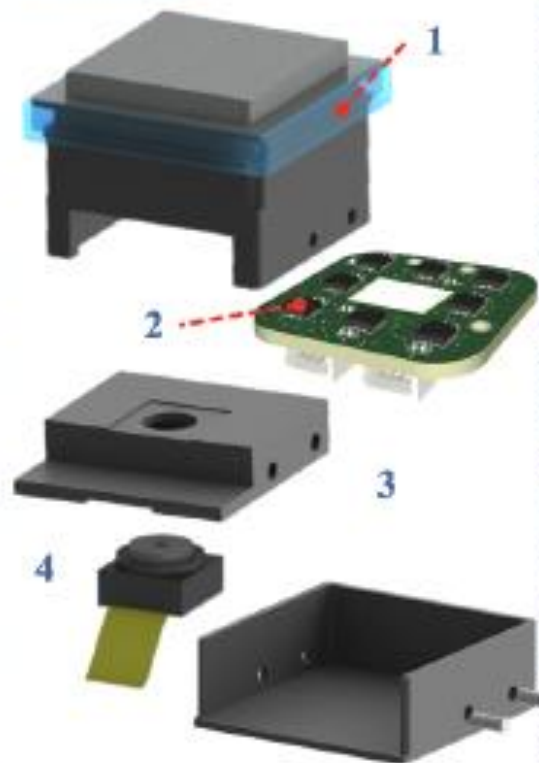
Pour again

Welding

Spray

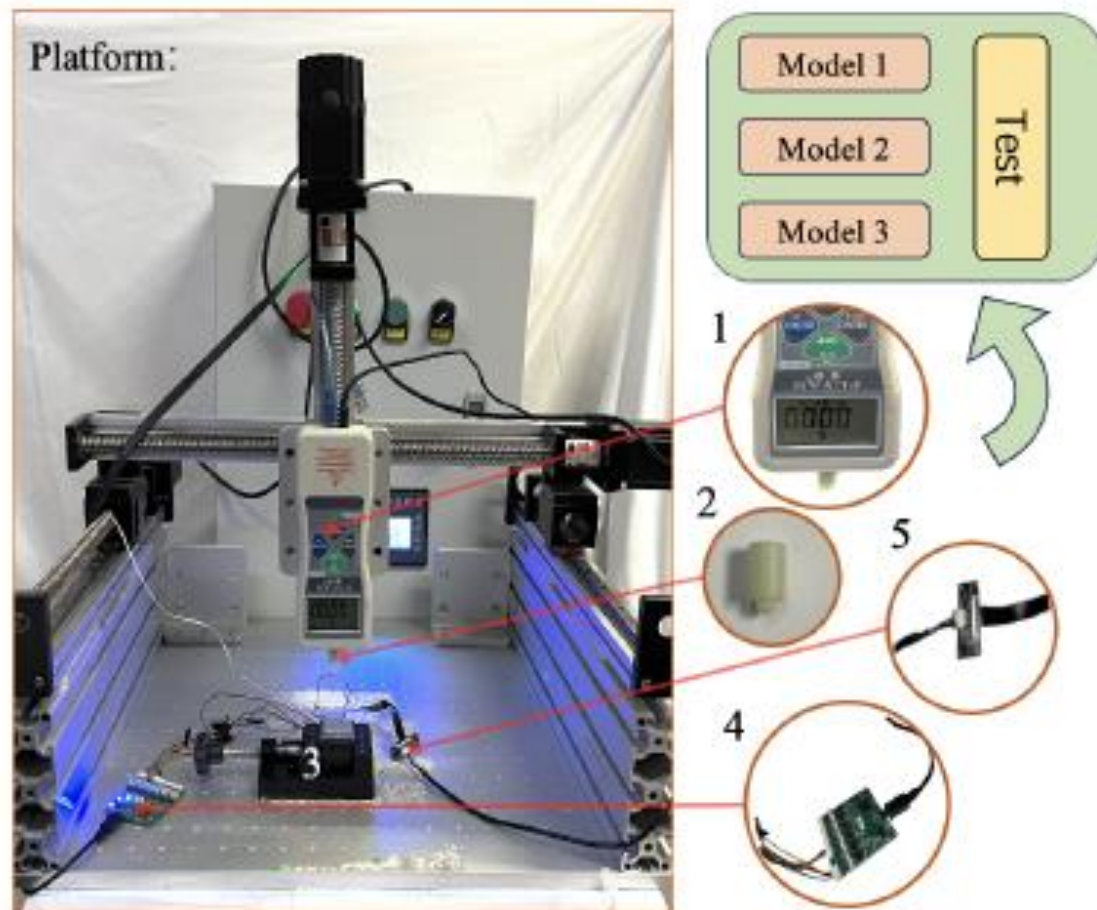
MagicGel

Assemble:

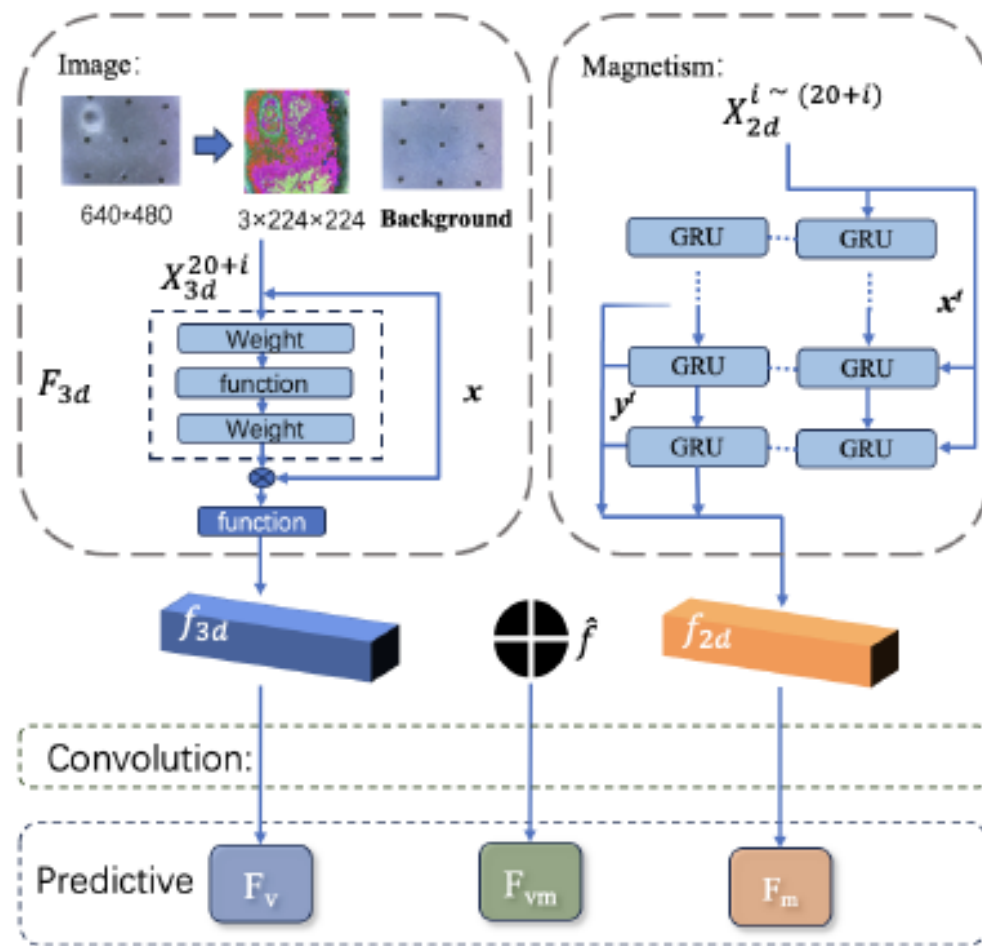


- 1. Light
- 2. Hall Sensor
- 3. Supporting Components
- 4. Camera

整体结构方案



标定试验台



特征融合方法

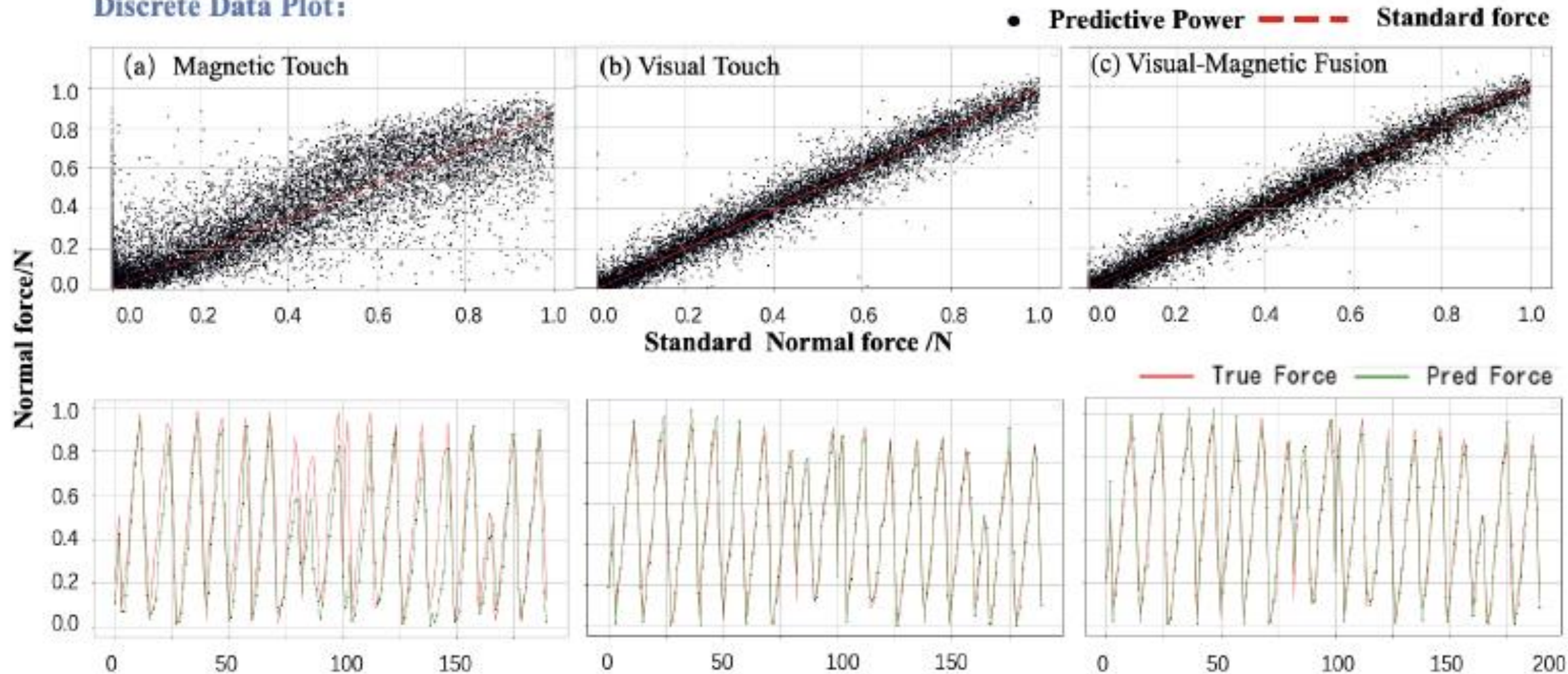
磁触觉_视触觉融合——感知结果



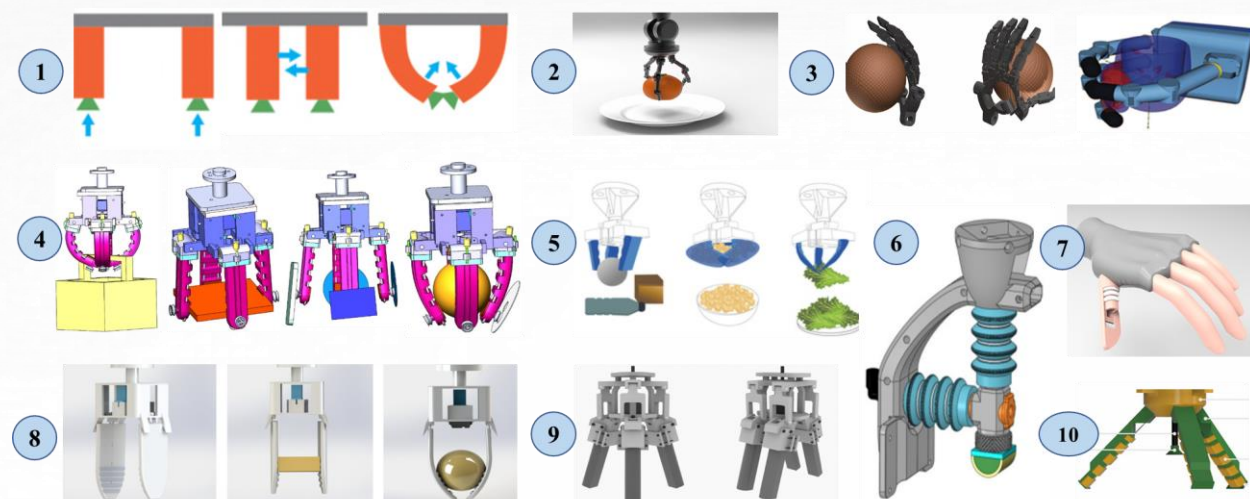
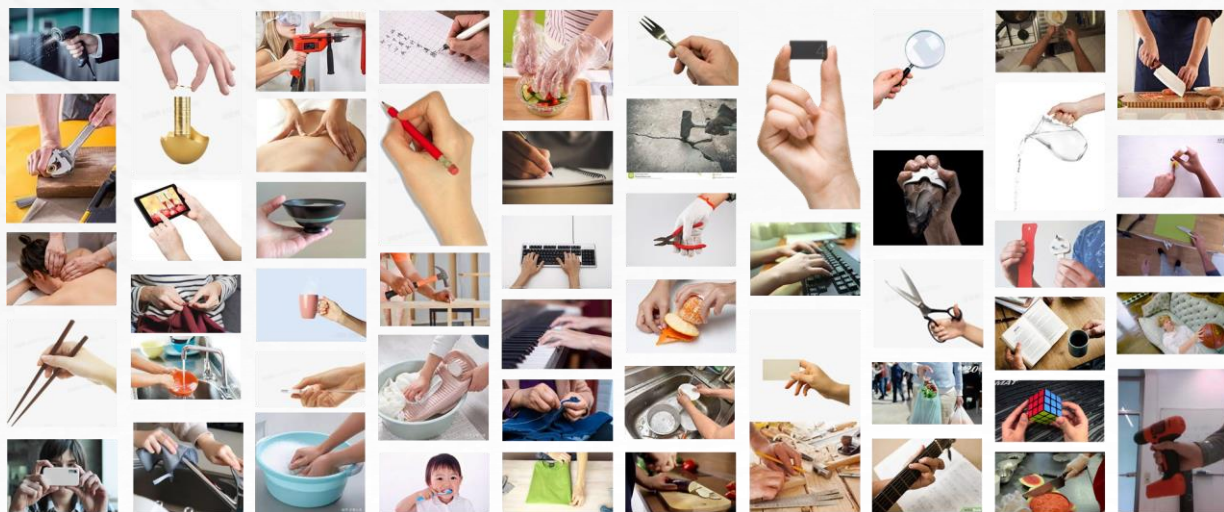
北京邮电大学
Beijing University of Posts and Telecommunications

人工智能学院

Discrete Data Plot:



机器人通用操作大模型，促进机器人服务各行各业，服务千万家庭



通用操作离不开触觉，触觉驱动AI是新的发展点！



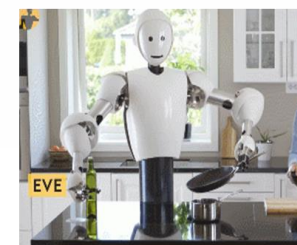
工具操作



酒店服务



家居服务



开放厨房



商店服务



工业生产



公共服务



开放办公



Thanks!