



光大证券  
EVERBRIGHT SECURITIES

# 经典五指灵巧手拆机：科研及通用篇 ——人形机器人专题（三）



作者：光大环保电新 殷中枢、黄帅斌

2023年11月26日



证券研究报告

更多免费行业报告

并购家

www.ipoipo.cn

# 并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

## ■ 科研/通用型五指灵巧手应用概述

## ■ 科研/通用型五指灵巧手应用案例

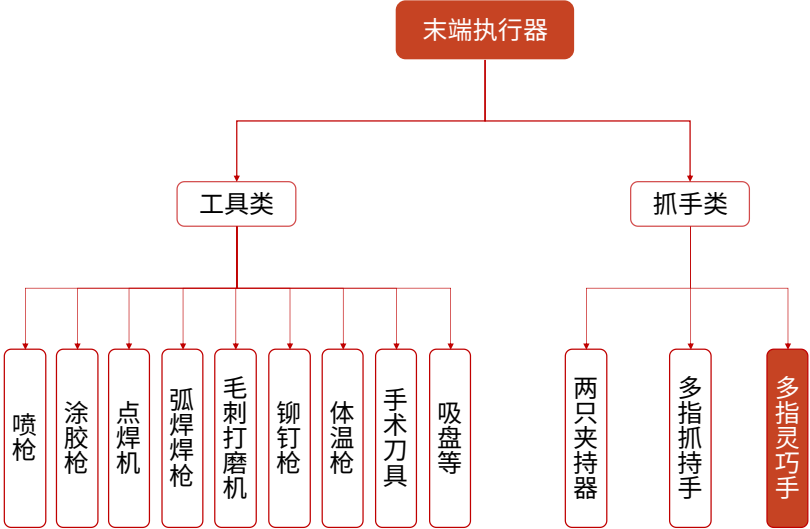
## ■ 投资建议

## ■ 风险分析



与航空航天、医疗假肢领域有所不同，通用/科研领域五指灵巧手并没有相对确定的应用方向。整体来看，以工业夹具类企业、科研院校为主体，发展出两类路线。工业夹具方面，目前市场应用以气动夹爪和电动夹爪为主。作为协作机器人的终端执行器，夹具为了适应更复杂的工作环境，逐步朝着五指灵巧手进化；科研院校方面，普遍处于实验室阶段，并尝试进行产业化。从全球范围来看，美国、德国、意大利、日本等地高校在相关研究方面较为靠前。

图1：机器人末端执行器



资料来源：蔡世波《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》

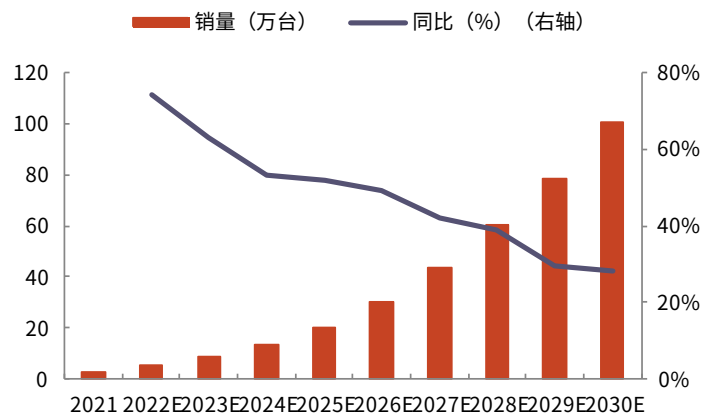
图2：从夹持器到灵巧手



资料来源：蔡世波《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》

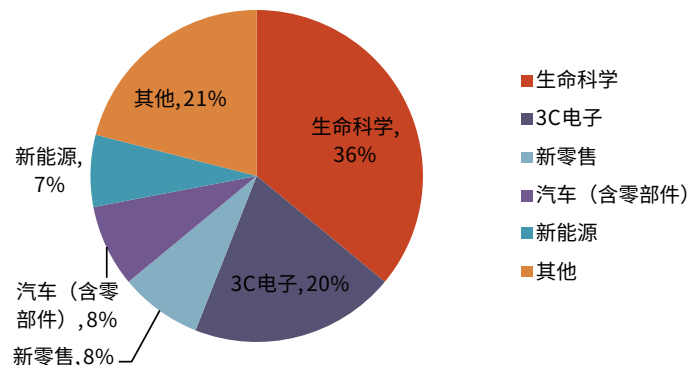


图3：中国电动夹爪市场销量预测



资料来源：GGII

图4：2021年中国电动夹爪下游市场分布情况（按销量）



资料来源：GGII

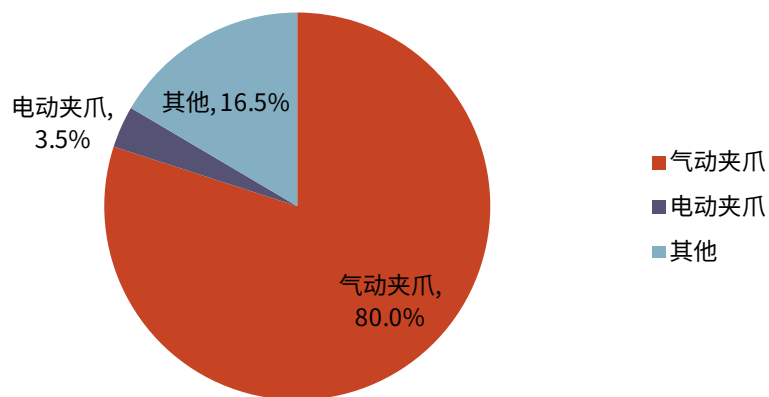
根据不同夹爪驱动力来源和抓取方式上的差异，可以将夹爪分为气动夹爪、液压夹爪、电动夹爪、电磁夹爪、真空夹爪以及电磁吸盘等。相比于气动夹爪，电动夹爪起步相对较晚。电动夹爪的兴起很大程度是受到以协作机器人为代表的柔性化生产工具发展的带动，经过数年的发展，电动夹爪的应用边界逐渐扩展，从机器人逐步延伸到工业自动化领域。

从市场规模及增速来看，2021年，受益于下游制造业及医疗领域的需求带动，中国电动夹爪市场迎来高增长，GGII数据显示，2021年中国电动夹爪市场销量约为3.1万台，同比增长77.14%，市场规模约为3.35亿元，同比增长59.52%。

GGII数据显示，2021年我国电动夹爪下游市场中，生命科学与3C电子行业占据超过50%市场份额，市场份额分别为36%和20%。新零售、汽车、新能源等行业中电动夹爪渗透率相对较低，市场份额分别为8%、8%、7%。主要是由于可应用电动夹爪的新零售场景暂未实现规模化复制，汽车、新能源行业中主要以气动夹爪占据主要市场份额。随着未来电动夹爪对气动夹爪的替代性逐渐增强，预计汽车、新能源等行业的市场份额将进一步提升。

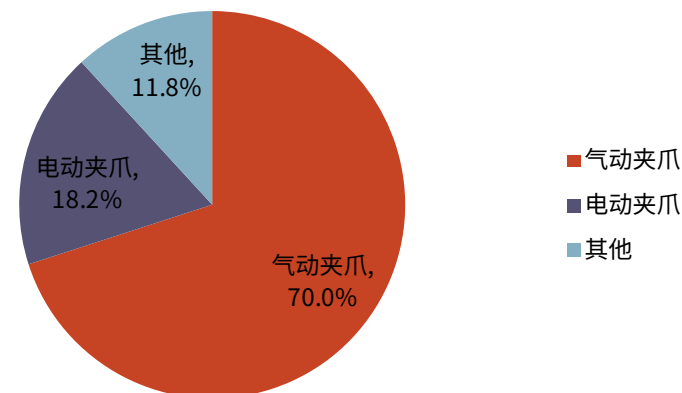


图5：中国市场夹爪应用市场结构（2021年）



资料来源：高工机器人

图6：海外市场夹爪应用市场结构（2021年）

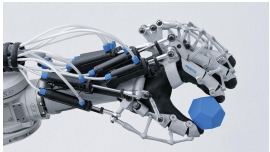


资料来源：高工机器人

在上述下游行业中，电动夹爪主要通过两种方式实现设备智能化、产线智能化的目的，分别为：集成于生产设备中实现抓取功能，例如应用于生命科学领域的试管抓取环节；以及与协作机器人、SCARA机器人，小六轴机器人相结合，使机械臂能够更好地完成分拣、抓取、上下料等工作。

从市场结构来看，目前气动夹爪依然占据绝大部分市场份额，2021年中国市场标准化气动夹爪占比超过80%，电动夹爪占比仅为3.5%左右；海外市场标准化气动夹爪占比超过70%，电动夹爪占比约为18.2%。

表1：从夹爪到灵巧手

| 主营业务    |       | 原产品                                                                                 | 灵巧手产品                                                                                 |
|---------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| schunk  | 电动夹具  |   |    |
| festo   | 气动夹具  |   |    |
| robotiq | 电动夹爪  |   |    |
| 因时      | 电动夹爪  |  |   |
| 思灵      | 协作机器人 |  |  |

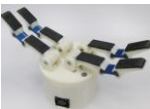
随着智能制造的兴起和工业机器人的普及，作为机器人末端执行器的工业夹爪需求快速提升。行业内涌现出因时（2016年成立，2021年A轮融资）、钧舵（2018年成立，2023年B轮融资）、大寰（2016年成立）、知行（2018年成立）等专业从事电动夹爪产品的企业。2022年12月19日，由深圳市大寰机器人科技有限公司牵头发起、深圳市人工智能产业协会组织会员单位共同起草的《平行电动夹爪技术规范》团体标准正式发布。海外则有robotiq、schunk、festo、SMC、Onrobot等老牌夹持器企业。

夹持器企业在与工业机器人特别是协作机器人的长期配套过程中，积累了大量的末端传感、姿态控制、与机器人本体配套部署的经验，产品具备从夹具到灵巧手的进化的基础，有望成为未来人形机器人领域灵巧手的重要参与方。

资料来源：各公司官网



表2：高校及机器人公司研发灵巧手案例

| 灵巧手                | 机构                                                           | 代表作                                                                                   |
|--------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Shadow Hand        | Shadow Robot Company                                         |    |
| SoftHand Pro       | IstitutoItalianodiTecnologia（意大利理工学院）；UniversitàdiPisa（比萨大学） |    |
| Pisa//IIT SoftHand | IstitutoItalianodiTecnologia（意大利理工学院）；UniversitàdiPisa（比萨大学） |    |
| Qbhand             | IstitutoItalianodiTecnologia（意大利理工学院）；UniversitàdiPisa（比萨大学） |    |
| Ritsumeikan Hand   | Ritsumeikan University（立命馆大学）                                |    |
| SDM hand           | Yale University（耶鲁大学）                                        |   |
| Washington Hand    | University of Washington（华盛顿大学）                              |  |
| Casia hand         | 中科院自动化所                                                      |  |

高校是灵巧手研发过程中的重要推动力。作为一种前沿产品，由于缺乏产业化基础，过去几十年灵巧手科技发展的大量资金和智力投入来自于科研院校。代表性的产品有：Pisa/IIT的SoftHand系列产品、Ritsumeikan University的Ritsumeikan Hand、University of Washington的Washington Hand、中科院自动化所的Casia hand等。高校研发的灵巧手产品往往作为实验平台，用来探索结构设计、把握控制、传感系统、动力学等方面的科研经验。而在产品应用层面则具备一定的普适性。

- 科研/通用型五指灵巧手应用概述
- 科研/通用型五指灵巧手应用案例
- 投资建议
- 风险分析



图7：四个版本的Shadow Hand

Shadow Dexterous Hand    Lite model    Extra Lite model    Super Lite model



资料来源：Shadow Robot官网

作者：Shadow Robot Company（英国）；

发明初衷：为了设计出能够在人类生活中高效执行任务的机械手；

发明历程：公司于2004年推出首个灵巧手，目前公司还推出了Lite、Extra Lite 和Super Lite版本；

## Shadow Dexterous Hand的详细参数

设计层面：高度仿生，5指结构，共有24个关节，大拇指有5个关节，食指、中指、无名指、小指各有4个关节，手掌靠近小指的部位有一个关节，手腕有2个关节；为欠驱动结构，具有24个DOF和20个DOA，接近人体工程学。（注：DOF为手指关节的自由度，DOA为由驱动器控制的自由度。若DOA小于DOF，则为欠驱动结构；若DOA等于DOF，则为全驱动结构）；

结构形式：驱动器外置；

动力源：电机驱动，手腕处有20个直流电机；

传动方案：腱传动，一共有38根腱绳，这与驱动器外置的设计结构相关；

传感器：共有129个传感器。大拇指关节和腕部关节各有2个霍尔效应传感器，其它关节各有1个，共26个传感器霍尔效应传感器。电机带有40个肌腱张力传感器，每个电机还有1个温度、1个电压和1个电流传感器，电机共有100个传感器。手掌有1个IMU传感器芯片，可以测量俯仰、偏航和翻滚，共有3个传感器；

应用领域：商业化产品，主要应用于科研领域，被用作研究和开发工具以及AI和机器学习的测试硬件，还是Shadow 遥控操作系统的关键组件



表3：不同版本 Shadow Hand配置

|             | Shadow Hand                | Shadow Hand-Lite | Shadow Hand-Extralite | Shadow Hand-Superlite |
|-------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|
| 自由度(DOF)    | 20个驱动自由度和另外4个欠驱动关节，总共24个关节 | 16个关节/13个自由度     | 12个关节/10个自由度          | 8个关节/7个自由度            |
| 总重 (kg)     | 4.3                        | 2.4              | 2.1                   | 1.8                   |
| 手指数量        | 4+1（拇指）                    | 3+1（拇指）          | 2+1（拇指）               | 1+1（拇指）               |
| 执行器数量       | 20个直流电机                    | 13个直流电机          | 10个直流电机               | 7个直流电机                |
| 手指关节数量      | 4                          | 4                | 4                     | 4                     |
| 拇指关节数量      | 5                          | 4                | 4                     | 4                     |
| 腕关节数量       | 2                          | 0                | 0                     | 0                     |
| 指尖压力传感器数量   | 5                          | 4                | 3                     | 2                     |
| 惯性测量单元(IMU) | 1                          | 1                | 1                     | 1                     |
| 腱负载传感器数量    | 40                         | 26               | 20                    | 14                    |
| 通过主机控制回路速率  | 1kHz（EtherCat协议）           | 1kHz（EtherCat协议） | 1kHz（EtherCat协议）      | 1kHz（EtherCat协议）      |
| ROS开源平台     | √                          | √                | √                     | √                     |
| 轻松集成到机器人手臂上 | √                          | √                | √                     | √                     |
| 可使用其他组件升级   | √                          | √                | √                     | √                     |



图8：SCHUNK SVH Hand



资料来源：SCHUNK公司官网

作者：SCHUNK公司（德国）

设计层面：高度拟人，为五指结构；欠驱动结构，该灵巧手具有20个关节和9个驱动器，其中拇指具有两个驱动器。

结构形式：驱动器外置

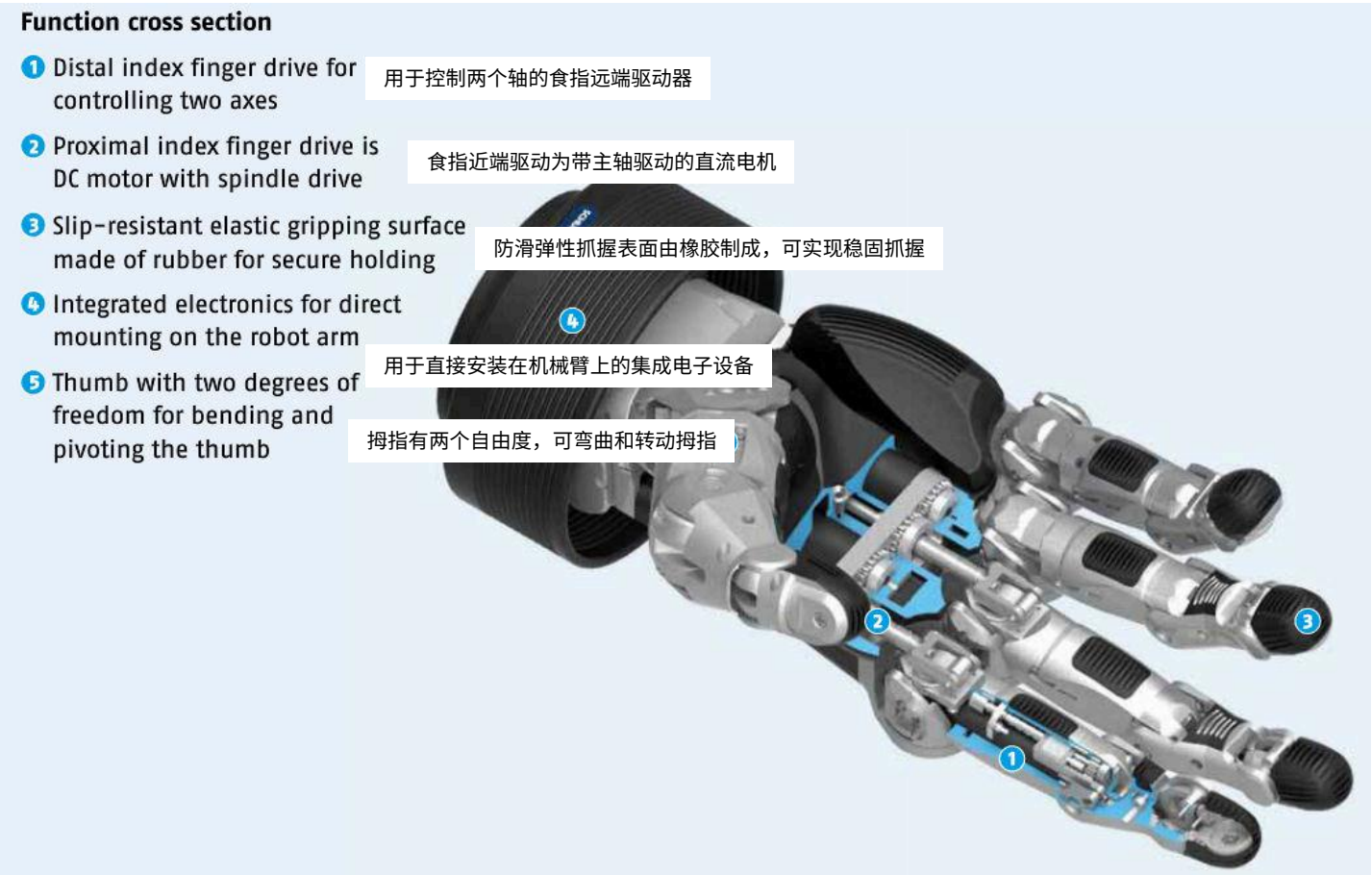
动力源：电机驱动，直流电机

传动方案：齿轮/连杆传动

应用领域：商业化产品，用于拾取和运输结构复杂的不同工件或物体



图9：SCHUNK SVH Hand



资料来源：SCHUNK公司官网  
请务必参阅正文之后的重要声明

表4：SCHUNK SVH Hand参数表

| 指标        | 参数    | 指标     | 参数  |
|-----------|-------|--------|-----|
| 总长度（mm）   | 242.5 | 拇指自由度  | 2   |
| 宽度（mm）    | 92    | 食指自由度  | 2   |
| 手指数量      | 5     | 中指自由度  | 2   |
| 关节数       | 20    | 无名指自由度 | 1   |
| 手指最宽处（mm） | 92    | 小指自由度  | 1   |
| 与人手比例     | 1:1   | 展开自由度  | 1   |
| 自由度       | 20    | 重量（kg） | 1.3 |

资料来源：SCHUNK公司官网

SCHUNK SVH Hand重1.3kg，拥有5根手指，其中拇指、食指、中指各拥有2个自由度，无名指、小指各拥有1个自由度。食指、中指中放置用于控制两个轴的远端驱动器，防滑弹性抓握表面由橡胶制成，可实现稳固抓握。拇指有两个自由度，可实现弯曲和转动。



图10: Softhand Pro



作者：Istituto Italiano di Tecnologia（意大利理工学院）；Università di Pisa（比萨大学）

发明初衷：验证Softhand具备成为不需要复杂操作的假肢的潜力

设计层面：高度仿生，5指结构，具有仿生的19个自由度，仅由一个电机驱动

结构形式：驱动器内置

动力源：电机驱动

传动方案：腱传动

应用领域：目前还处在测试阶段，计划用作假肢



图11: Pisa//IIT SoftHand

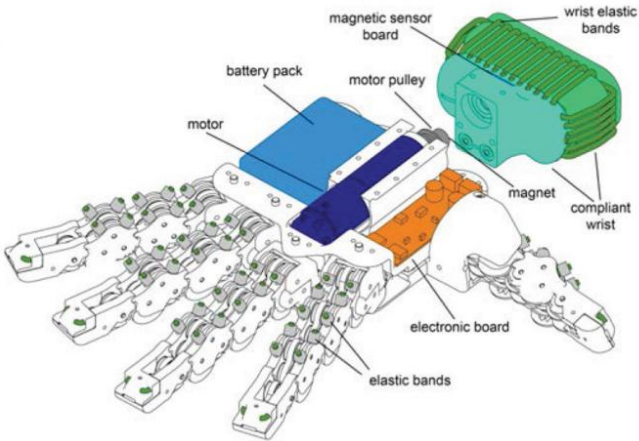


作者：Istituto Italiano di Tecnologia（意大利理工学院）；Università di Pisa（比萨大学）  
发明初衷：设计一款鲁棒性、易于操控、抓取通用性高且接近人手的工业抓取器  
发明历程：SoftHand于2012年被发明；2016年发布了Pisa//IIT SoftHand2，比之前的版本多了1个驱动器  
设计层面：欠驱动结构，具有19个关节，仅由一个驱动器驱动；采用了CORE关节；核心理念为软协同，手的位置不是预先确定的，而是根据身体与环境的交互确定。（CORE: compliant rolling-contacts elements，兼容滚动触点元件）  
结构形式：驱动器内置  
动力源：电机驱动，采用Maxon RE-max21直流电机（6W），减速比84:1，配备12位磁编  
传动方案：腱传动，手的驱动通过一根单根肌腱实现，肌腱动作使手指和拇指弯曲，抵消韧带的弹力，并在不需要差速器的情况下实现自适应欠驱动  
传感器：配有力/力矩传感器，为三维传感器  
商业化与否：具有商业化版本

资料来源：Claudio Castellini 《Proceedings of the first workshop on Peripheral Machine Interfaces: Going beyond traditional surface electromyography》

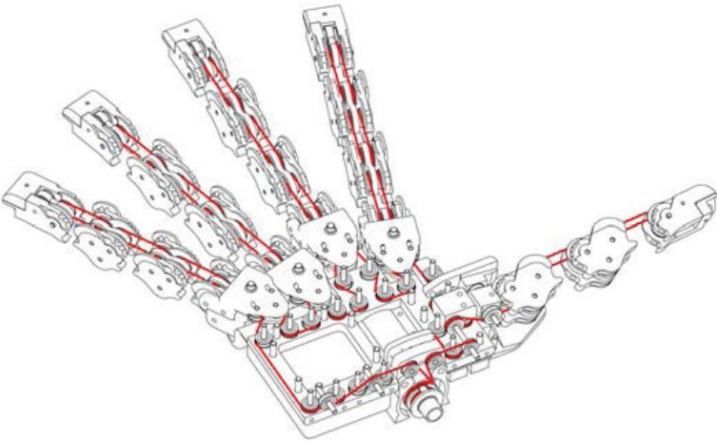


图12: Pisa//IIT SoftHand的内部结构



资料来源: M.G. Catalano 《Adaptive synergies for the design and control of the PisaIIT SoftHand》

图13: Pisa//IIT SoftHand的肌腱布线



资料来源: M.G. Catalano 《Adaptive synergies for the design and control of the PisaIIT SoftHand》

Pisa//IIT SoftHand的核心理念是自适应与协同。可以根据物体形状自动改变手的动作。通过耦合滚动凸轮与CORE关节的应用,使得Pisa//IIT SoftHand具备防冲击与自动复位的特性。

图14: Pisa//IIT SoftHand的接头可以任意方向弯曲

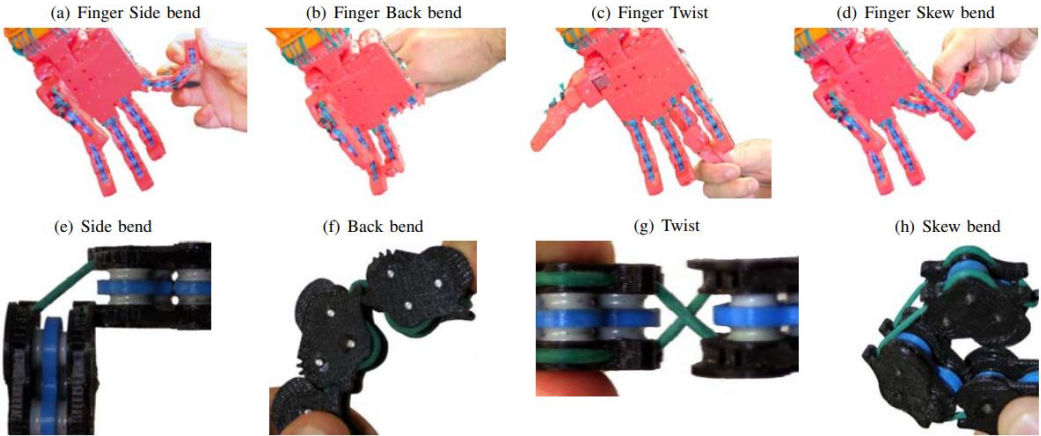
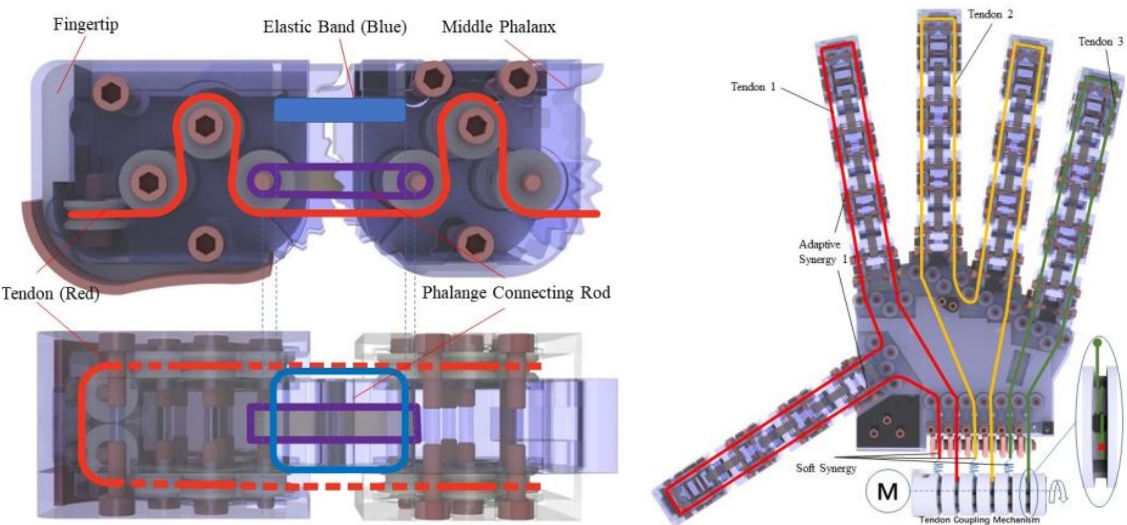




图15：模块化指尖和中指骨的侧视图和俯视图



注：肌腱布局（红线）、弹性带（蓝色方框）和指骨连接杆（紫色方框）

资料来源：Haoran Li 《BRL/Pisa/IIT SoftHand: A Low-cost, 3D-Printed, Underactuated, Tendon-Driven Hand with Soft and Adaptive Synergies》

图16：单个指尖的分解图

|      |                                                           |               |
|------|-----------------------------------------------------------|---------------|
| 种齿轮  | 行星齿轮箱 GP 32 A Ø32 mm, 0.75 - 4.5 Nm, 金属材质<br>产品编号: 166156 | 单价: RMB 1,320 |
| 电机   | RE 30 Ø30 mm, 石墨电刷, 60 Watt<br>产品编号: 268215               | 单价: RMB 3,252 |
| 种传感器 | 编码器MR,型号L, 1024脉冲, 3通道, 带线性驱动Line Driver<br>产品编号: 225787  | 单价: RMB 1,155 |

资料来源：Haoran Li 《BRL/Pisa/IIT SoftHand: A Low-cost, 3D-Printed, Underactuated, Tendon-Driven Hand with Soft and Adaptive Synergies》



图17: QB Softhand Industry



资料来源: IIT官网; QB Softhand官网

图18: QB Softhand Research



资料来源: IIT官网; QB Softhand官网

图19: QB Softhand2 Research



资料来源: IIT官网; QB Softhand官网

作者: Istituto Italiano di Tecnologia (意大利理工学院); Università di Pisa (比萨大学)

发明初衷: 设计Softhand的商业化版本, 应用于工业领域

发明历程: QB Softhand包括三个版本: QB Softhand Industry、QB Softhand Research、QB Softhand2 Research。

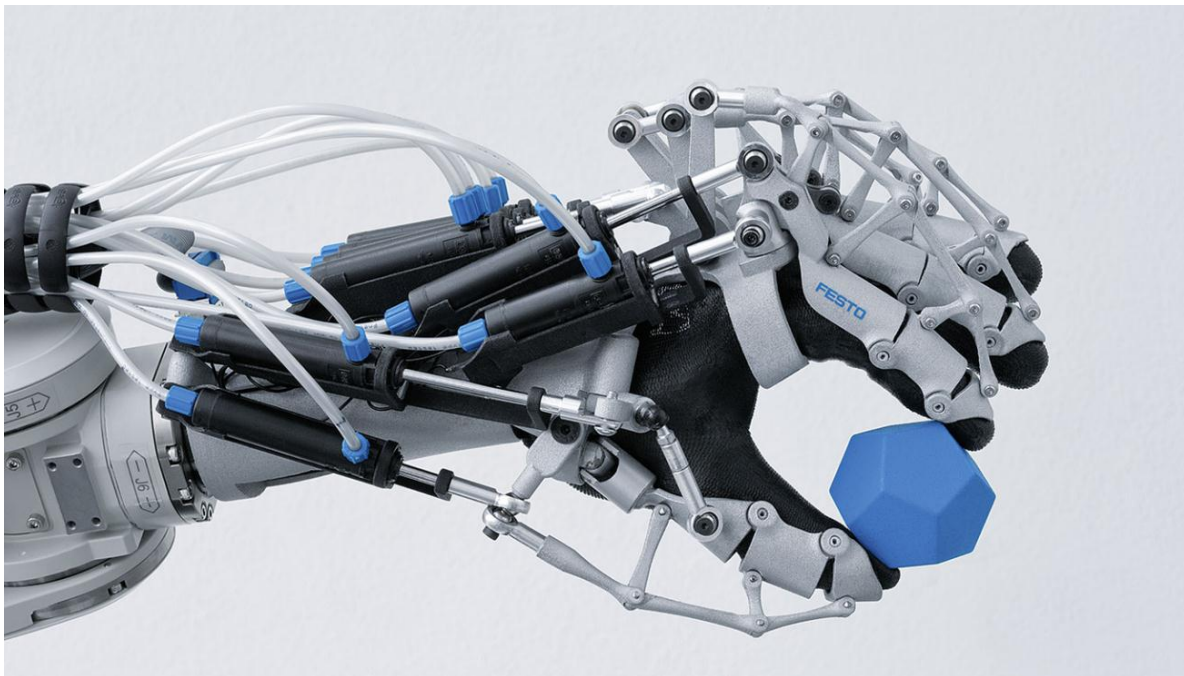
设计层面: 均为欠驱动结构, 具有19个自由度和1个驱动器; 高度仿生, 五指结构; QB Softhand Industry、QB Softhand Research都具有1个软协同, QB Softhand2 Research具有2个软协同。

动力源: 电机驱动

应用领域: 商业化产品, QB Softhand Industry应用于工业领域, 包括测试、质检、研发等领域; QB Softhand Research、QB Softhand2 Research应用于研究领域, 主要用于科研、教育领域。



图20: Festo ExoHand



资料来源: Festo官网

作者: Festo (德国)

设计层面: 具有人类手的主要生理自由度, 支持人手抓握和处理物体的各种技术; 欠驱动结构

动力源: 气动驱动

传动方案: 连杆传动

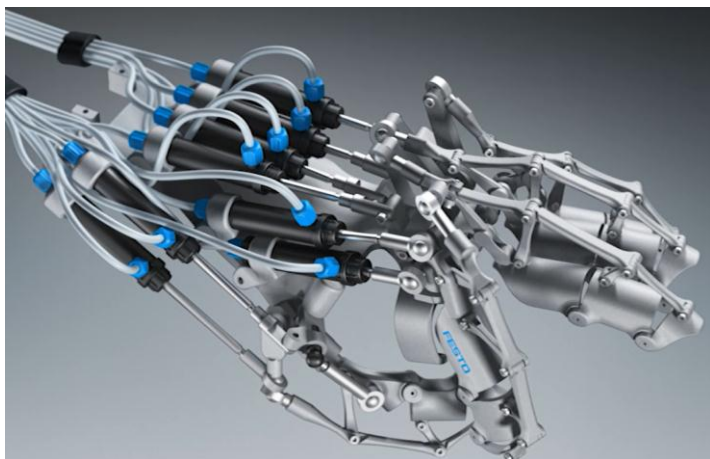
结构形式: 驱动器外置

传感器: 每只手8个线性电位计作为位移传感器, 每只手有16个压力传感器

应用领域: 商业化产品, 用于装配、远程操作、服务机器人、医疗领域



图21: FESTO ExoHand



资料来源: FESTO官网

图22: 比例控制阀



资料来源: FESTO官网

图23: CoDeSys 控制器



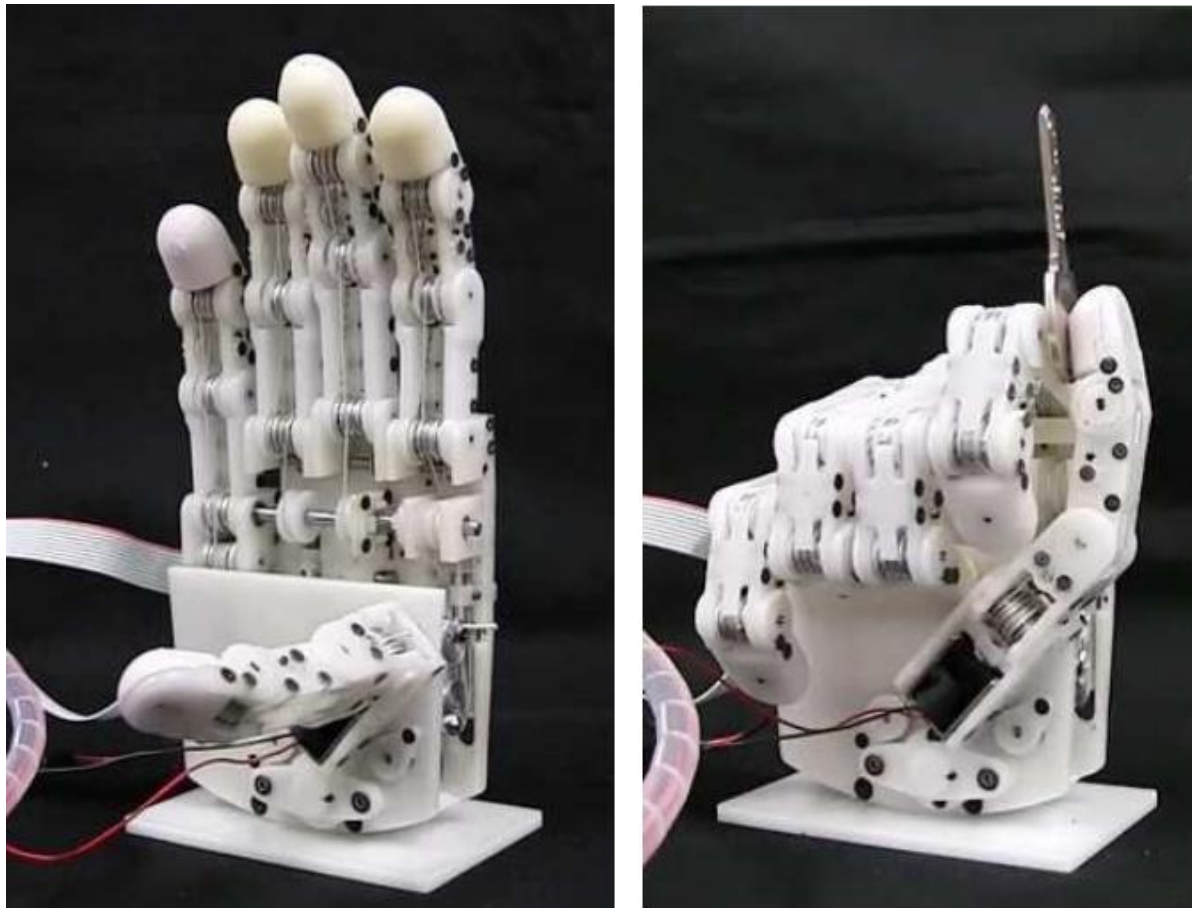
资料来源: FESTO官网

基于气动驱动的灵巧手是近年来的研究热点，典型的有Festo的气动灵巧手、上海交大联合MIT开发的气动灵巧手等。

ExoHand的形状可适应人手，并且由聚酰胺使用选择性激光烧结工艺（SLS）制成。外骨骼上安装了八个气动执行器，使手指能够精确地移动、打开和关闭。腔室中的压力通过压电比例阀进行控制。线性电位计可检测手指的位置并确定执行器施加的力。CoDeSys控制器处理所有位置和力值，并实现秒针的精确对准。



图24: Ritsumeikan Hand



作者：立命馆大学（日本）

发明初衷：设计了一只具有拇指内收/外展功能的五指欠驱动手

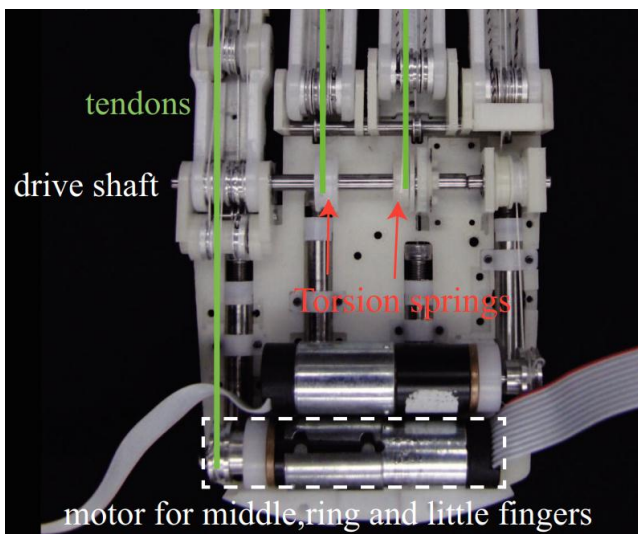
设计层面：使用三个致动器和一个电磁阀，用于两指和三指的精确抓握、强力抓握和需要改变拇指的侧向夹持4种功能；欠驱动结构，具有4个DOF（拇指1个+食指1个+其余手指1个）和3个DOA（拇指2个+手指1个）。

传动方案：腱传动

资料来源：Kazuki Mitsui 《An under-actuated robotic hand for multiple grasps》

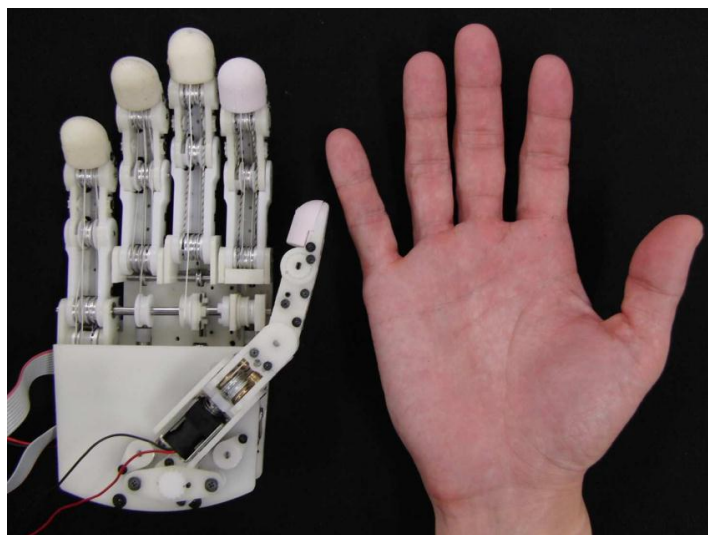


图25: Ritsumeikan Hand中指、无名指、小指联动



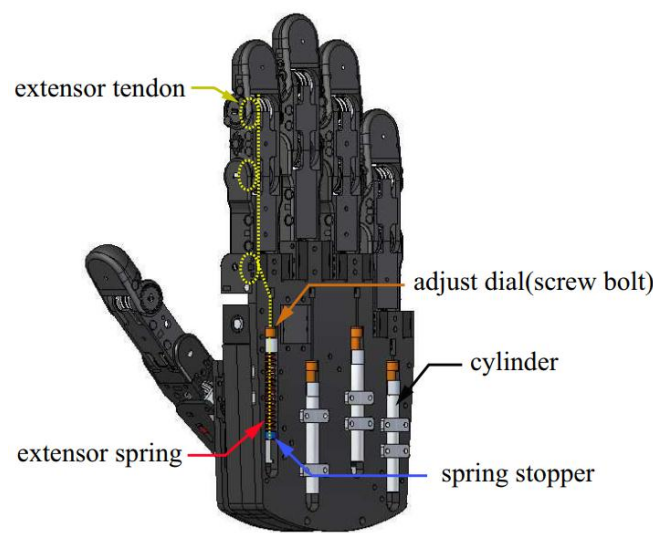
资料来源: Kazuki Mitsui 《An under-actuated robotic hand for multiple grasps》

图26: Ritsumeikan Hand与人手比较



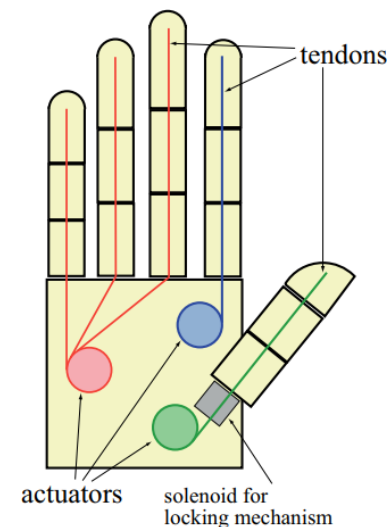
资料来源: Kazuki Mitsui 《An under-actuated robotic hand for multiple grasps》

图27: Ritsumeikan Hand伸肌弹簧



资料来源: Kazuki Mitsui 《An under-actuated robotic hand for multiple grasps》

图28: Ritsumeikan Hand执行器布置

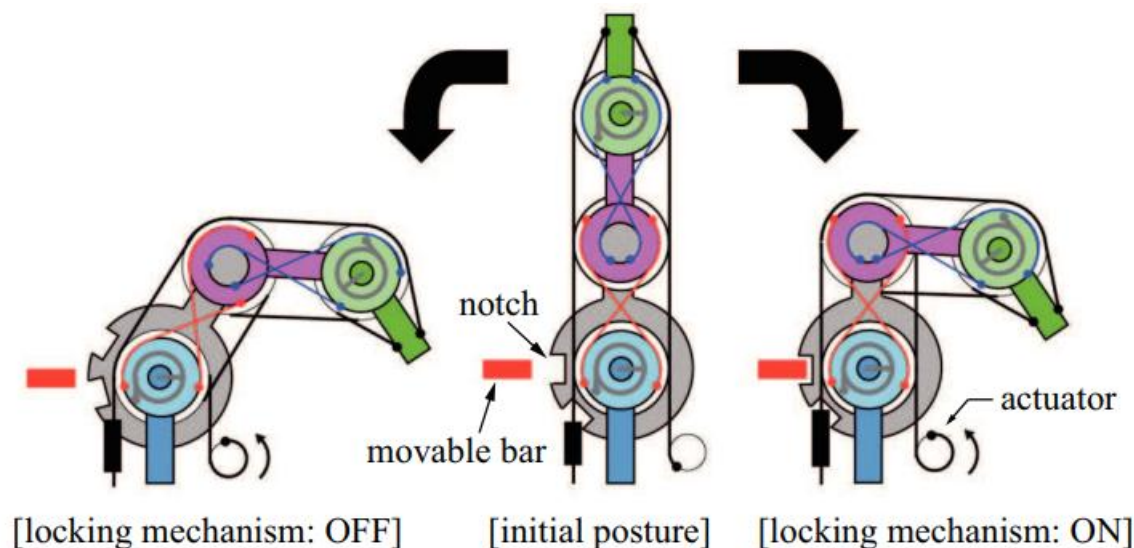


资料来源: Kazuki Mitsui 《An under-actuated robotic hand for multiple grasps》

Ritsumeikan Hand设置三个驱动器，一个负责中指、无名指、小指，一个负责食指，一个负责拇指。其中指、无名指、小指由一根驱动轴相连，并最终由一个驱动器驱动，驱动器与驱动轴之间使用腱连接。为了保证手能够自适应地抓取物体，中指和无名指与驱动轴之间插入弹性元件。当手抓握球等凸形物体时，中指和无名指通常先于小指接触物体而停下，小指将继续运动。

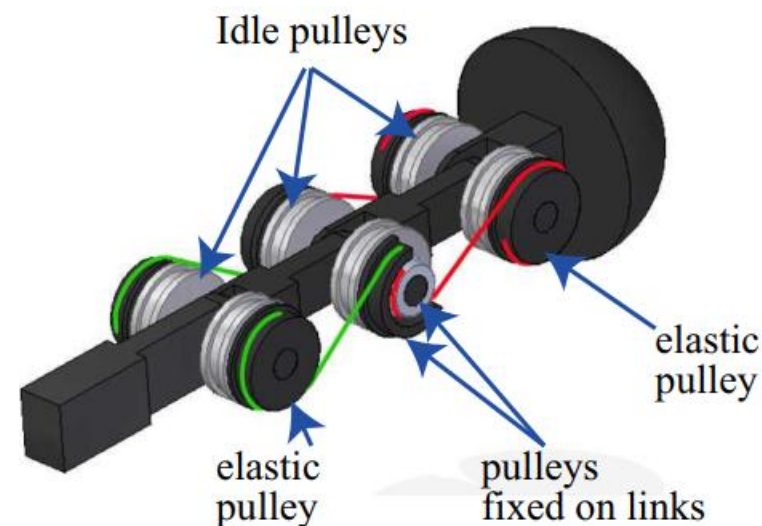


图29: Ritsumeikan Hand拇指锁定机构



资料来源: Kazuki Mitsui 《An under-actuated robotic hand for multiple grasps》

图30: Ritsumeikan Hand手指肌腱布线

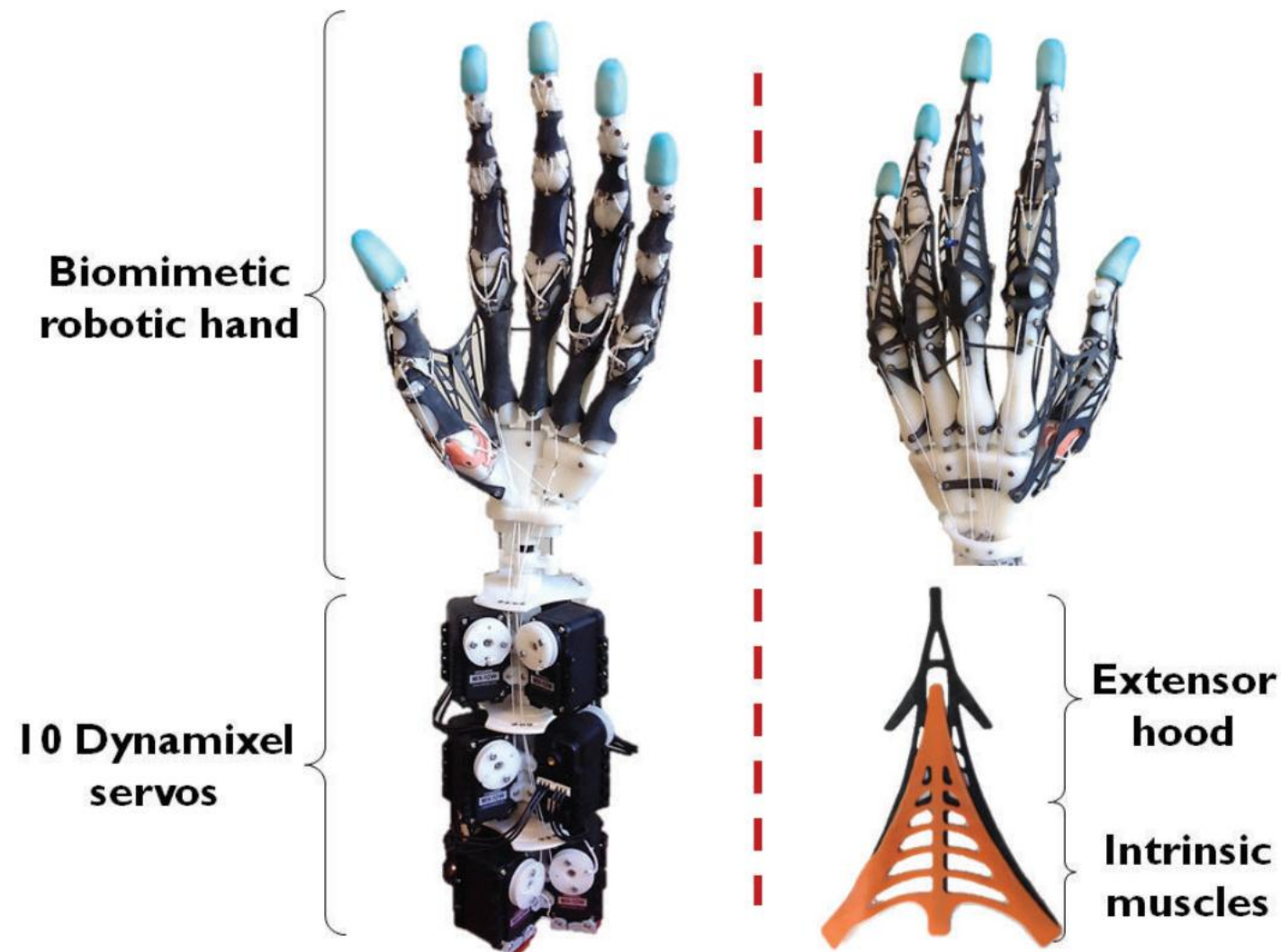


资料来源: Kazuki Mitsui 《An under-actuated robotic hand for multiple grasps》

Ritsumeikan Hand在设计方面有两个创新点。一是拇指锁定机构。一般情况下，拇指需要两个独立驱动的自由度，以实现外展/内收以及屈曲/伸展两个维度的运动，但为了尽可能少地使用驱动器，减轻手的重量，Ritsumeikan Hand通过拇指锁定机构实现了一个驱动器带动两个维度的运动。原理在于当CM（掌指关节）到达适当位置，电磁阀驱动横杆插入关节上的凹口将其固定，其余关节可自由弯曲；拇指驱动器位于手掌背面，使用一个驱动器+一个电磁阀替代了传统的双驱动器结构；二是在手指的PIP（近端关节）设置了由内滑轮和外滑轮组成的双滑轮传动装置。从而实现了滑轮层数减少，手指直径缩小。

# Washington Hand

图31: Washington Hand



作者：华盛顿大学（美国）

发明初衷：验证“人类手部的生物力学是手部灵活性的重要组成部分，可以通过高度仿生设计来复制”，降低人手和机器人的不匹配

设计层面：5指结构；欠驱动设计

结构形式：驱动器外置

动力源：电机驱动，有10个伺服电机

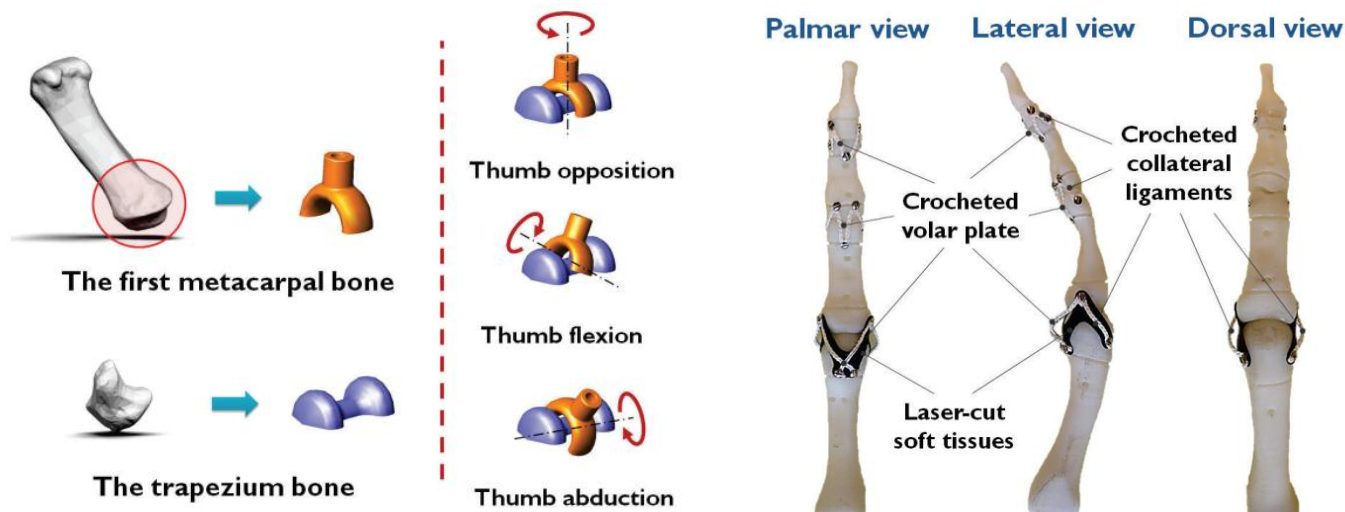
传动方案：腱传动

应用领域：还未商业化。未来将与生物学和组织工程的研究人员合作，进一步探索其作为神经假体和肢体再生融合领域的生物制造设备/支架的潜力

资料来源：Zhe Xu 《Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration》

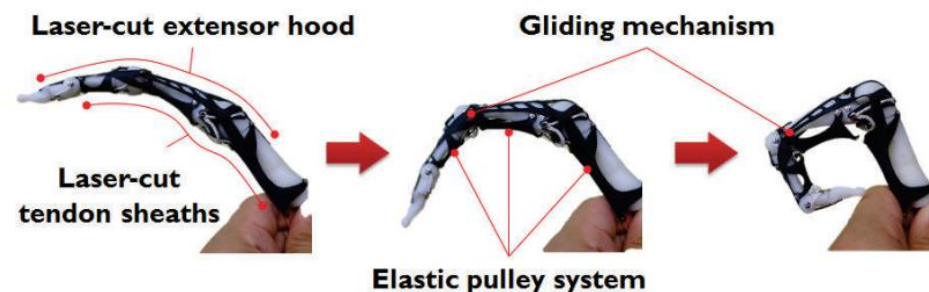


图32: Washington Hand手指骨架



资料来源: Zhe Xu 《Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration》

图33: Washington Hand的腱鞘结构

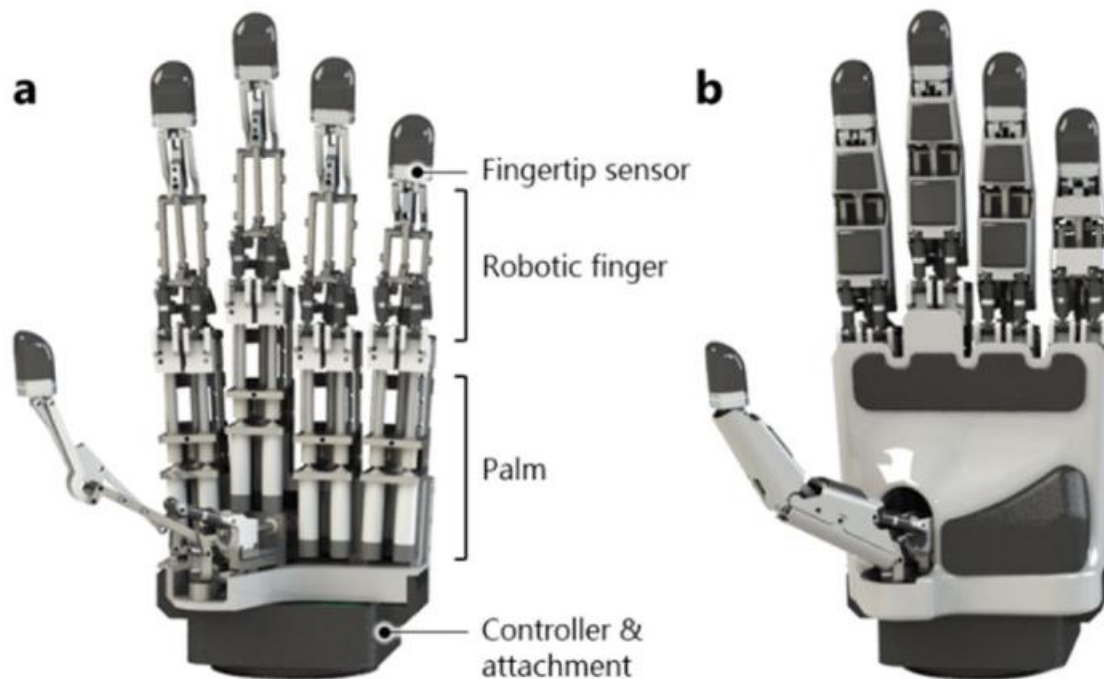


资料来源: Zhe Xu 《Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration》

Washington Hand手指骨架充分模仿人体结构。使用钩编韧带来模拟指骨关节处的掌侧韧带和侧韧带，激光切割橡胶片用于模拟软组织，提供类似人类的顺应性。肌腱方面，使用三块激光切割橡胶片来模拟弹性滑轮机构。由高强度Spectra 弦（屈服强度200 N）制成的屈肌腱通过几个铆钉加固端口穿过橡胶腱护套。由于在设计结构上充分模仿人手结构，Washington Hand被评价为在设计和运动上最精确的仿人机器手。



图34: IDLA hand



作者：韩国亚洲大学

设计层面：5指结构；15个自由度（20个关节），重1.1kg

指尖力：28N（伸展姿态）、34N（弯曲姿态）

结构形式：驱动器内置

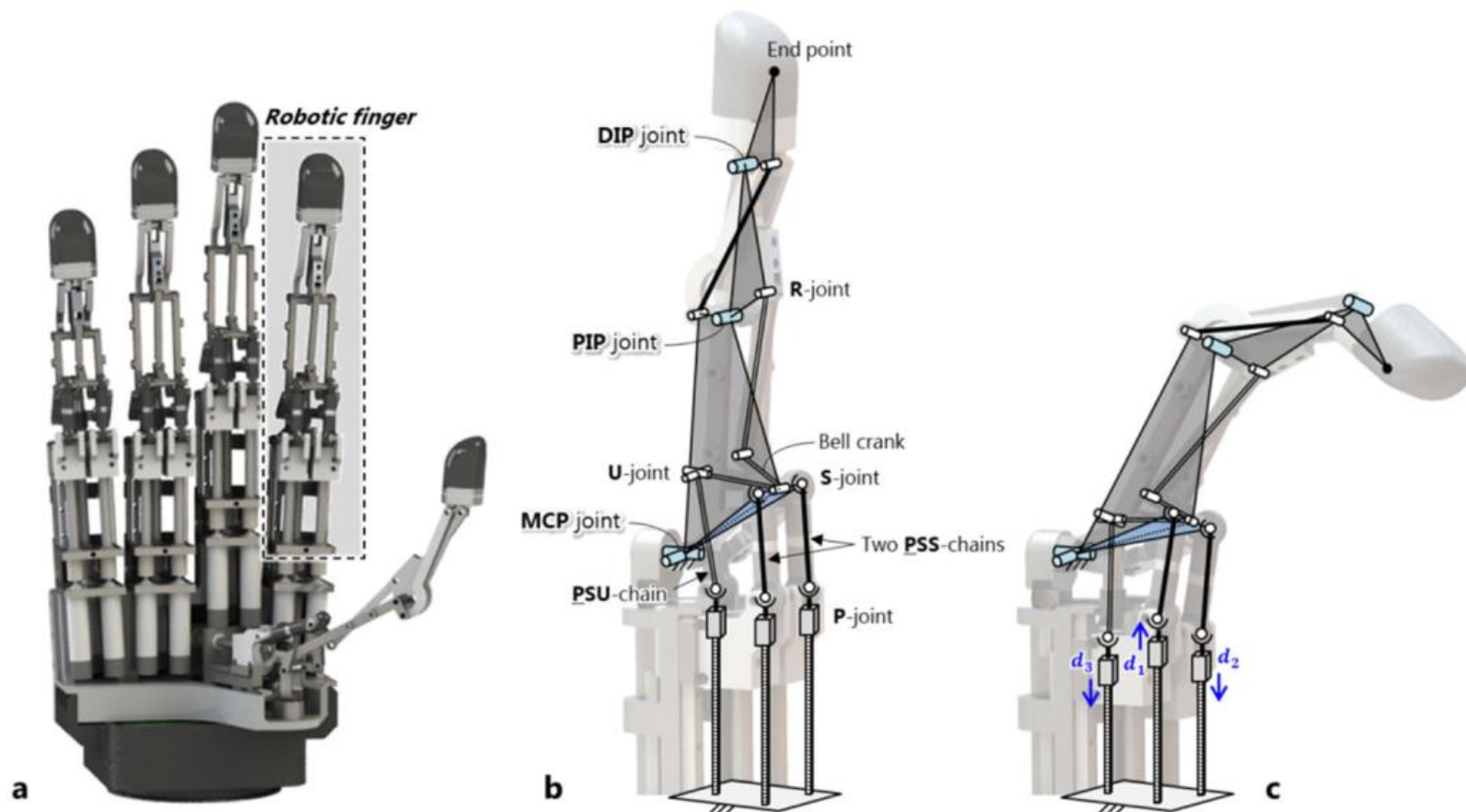
动力源：电机驱动，有15个直流电机

传动方案：连杆传动

资料来源：Uikeyum Kim 《Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand》



图35: IDLA hand手指运动结构



独特的连杆设计：

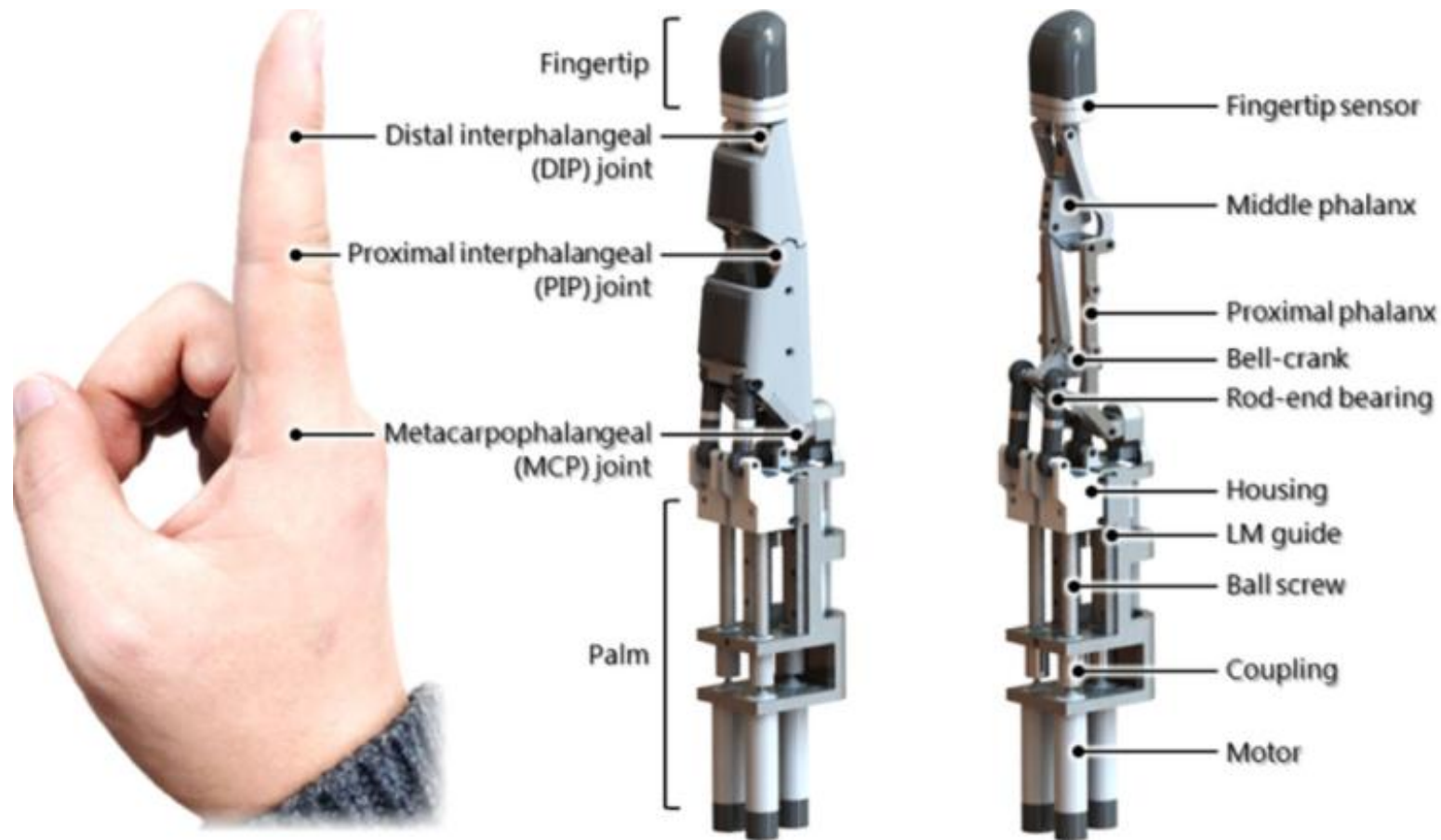
MCP（掌指关节）的运动不会影响PIP（近端关节）的运动。当 $d_1$ 和 $d_2$ 同时同向运动，MCP关节实现屈曲/伸展；当 $d_1$ 和 $d_2$ 同时反向运动，MCP关节实现外展/内收；当 $d_3$ 运动，实现PIP和DIP的屈曲/伸展。整个手指系统由并联机构产生2自由度的MCP运动，由串联机构产生1自由度的PIP运动。

资料来源：Uikyum Kim 《Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand》

请务必参阅正文之后的重要声明



图36: IDLA hand的驱动器配置



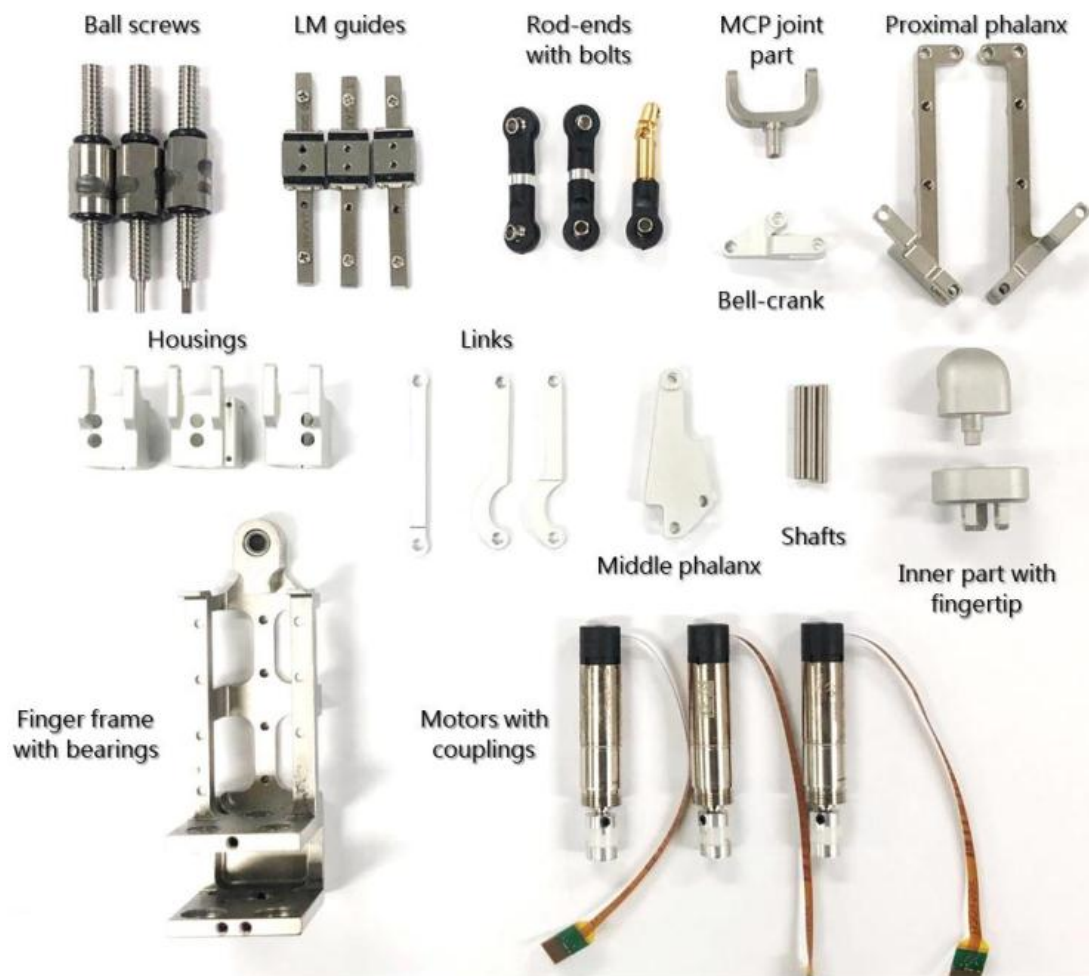
## 驱动器:

手指采用模块化设计，所有的手指结构相同。驱动层面，在手掌侧有三套电机(DCX 8 M, Maxon, 直径8mm)、三个编码器 (ENX 8 mag, Maxon)、三个变速箱 (GPX8, Maxon, 16:1)、三个联轴器、三个滚珠丝杠 (SR0401K, KSS)、三个LM导轨(LWL3, IKO) 和一个手掌框架。

资料来源: Uikyum Kim 《Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand》



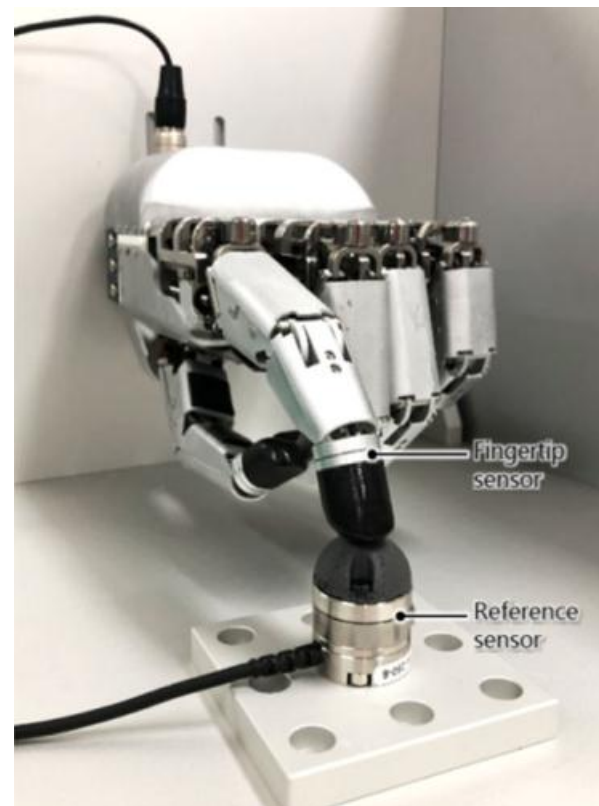
图37: IDLA hand机械零件



资料来源: Uikyum Kim 《Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand》

请务必参阅正文之后的重要声明

图38: IDLA hand力控测试



IDLA hand的五个指尖上各安装一个F/T传感器。伸展姿势中最大指尖力28N，弯曲姿势中为34N。

资料来源: Uikyum Kim 《Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand》



图39: NAIST Hand



作者：奈良科学技术大学 (NAIST)

设计层面：4指结构；12个自由度，每个手指3个DOF（MCP2个，PIP与DIP耦合）

结构形式：驱动器内置

动力源：电机驱动，有12个直流电机

传动方案：连杆传动

资料来源：Jun Ueda 《Development of the NAIST-Hand with Vision-based Tactile Fingertip Sensor》



图40: NAIST Hand 手指模块

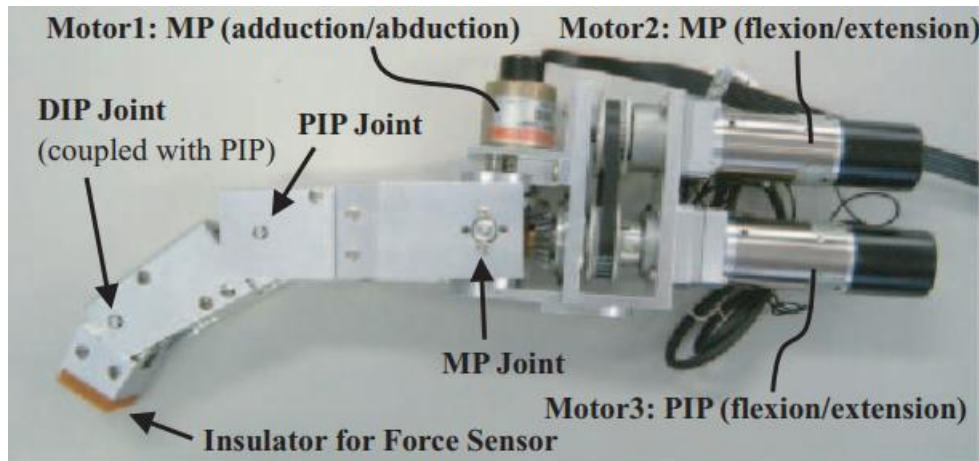
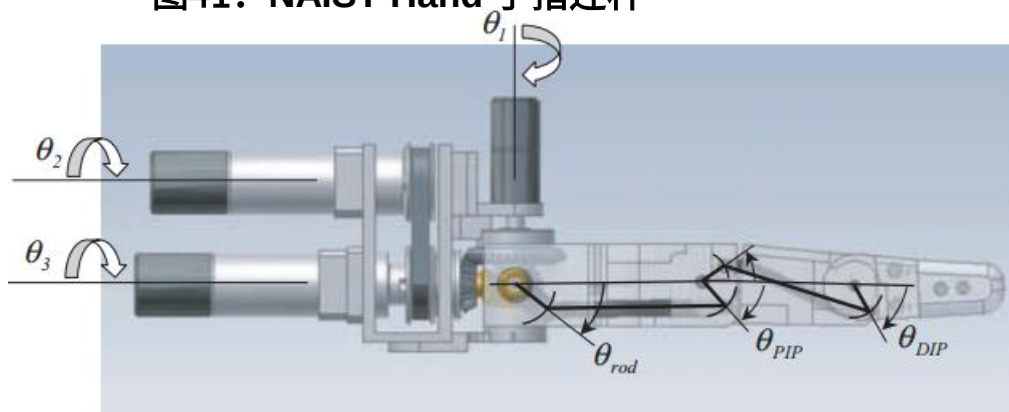


图41: NAIST Hand 手指连杆



模块化手指:

电机1、2、3分别用于MP（内收/外展）、MP（屈曲/伸展）、PIP（屈曲/伸展）。电机2和3使用两台直流电机（2.6W）+谐波减速器（CSF-mini, gear-ratio 50:1）+编码器（360 pulse/rev）。电机2的输出轴通过两个皮带轮和同步带与电机3同轴齿轮连接。电机1使用带有编码器（16脉冲/转）的齿轮电机（1.9W，齿轮比1670:1）。考虑到屈伸运动所需的扭矩应大于内收外展运动所需的扭矩，因此电机1使用更紧凑的电机。在指尖处附有一块绝缘体板作为力传感器。

资料来源: Jun Ueda 《Development of the NAIST-Hand with Vision-based Tactile Fingertip Sensor》



图42: NAIST Hand基关节

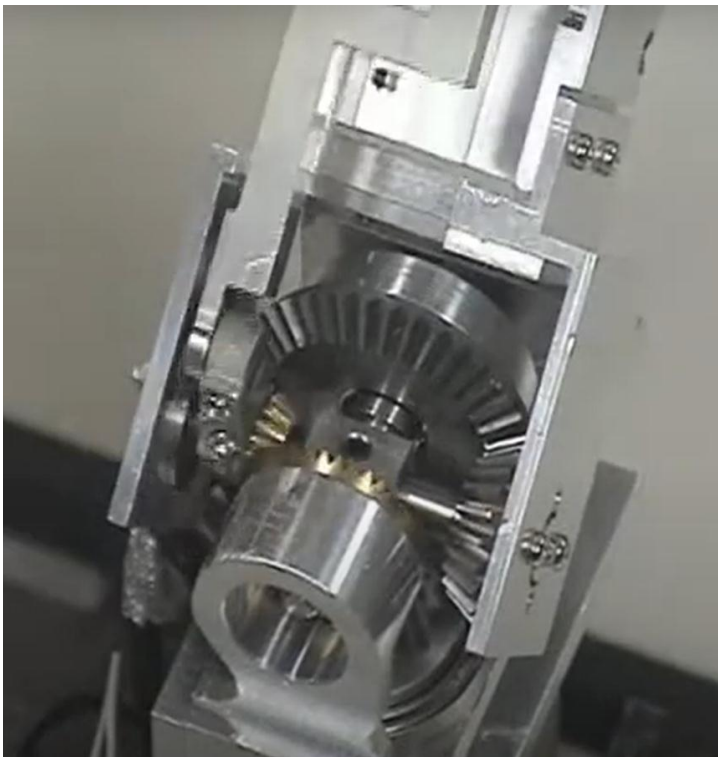
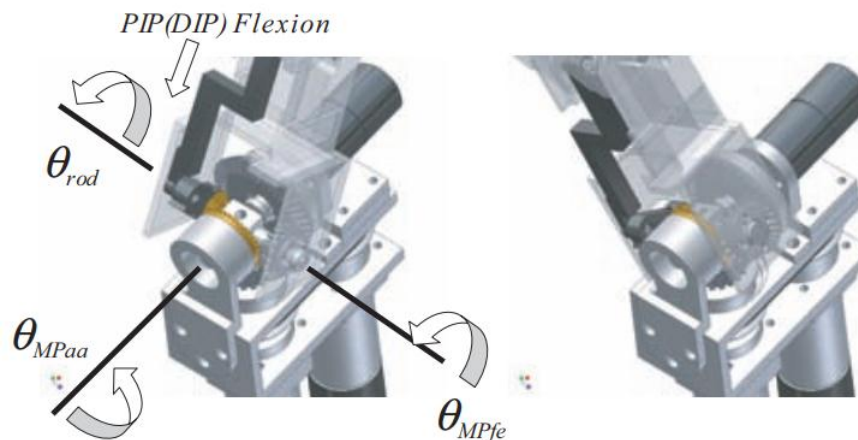


图43: NAIST Hand三轴驱动机构

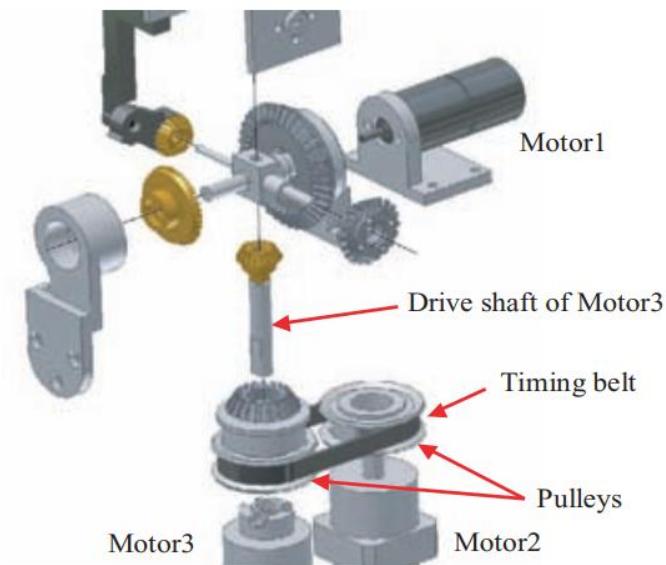


资料来源: Jun Ueda 《Development of the NAIST-Hand with Vision-based Tactile Fingertip Sensor》

MP关节锥齿轮结构:

在MP关节中, 由三个锥齿轮组成两对不同的齿轮组合。电机1直接驱动 $\theta_{MPaa}$ 。电机2的输出轴通过两个皮带轮和同步带与电机3同轴锥齿轮连接, 然后通过两个锥齿轮驱动 $\theta_{MPfe}$ 。电机3的输出轴穿过与电机2连接的齿轮和皮带轮, 通过两个锥齿轮驱动 $\theta_{rod}$ 。

图44: NAIST Hand三轴驱动机构组成



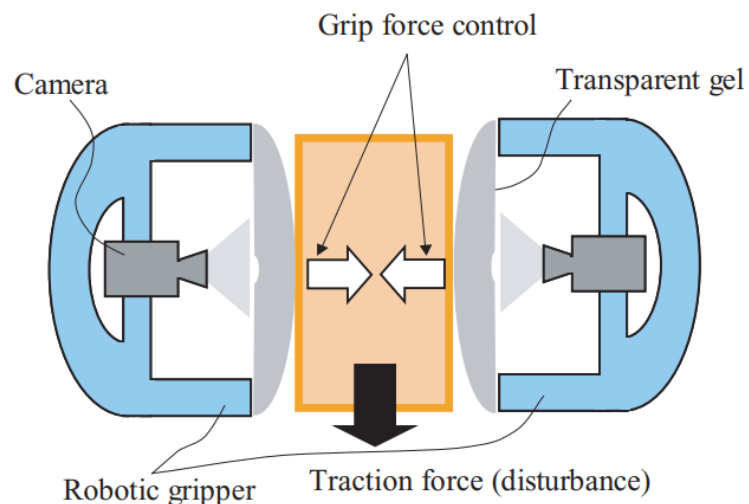
资料来源: Jun Ueda 《Development of the NAIST-Hand with Vision-based Tactile Fingertip Sensor》

资料来源: Jun Ueda 《Development of the NAIST-Hand with Vision-based Tactile Fingertip Sensor》

请务必参阅正文之后的重要声明

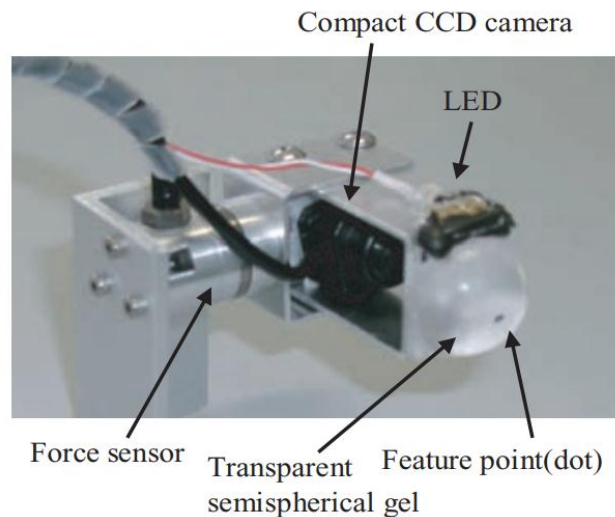


图45：基于视觉的触觉与握力控制示意图



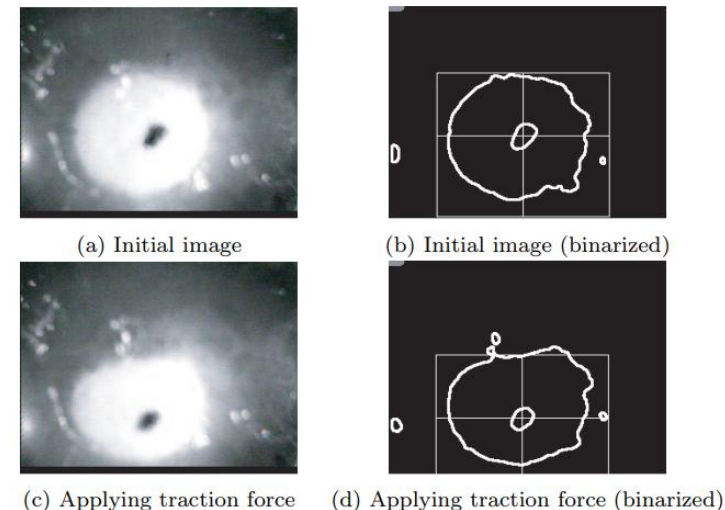
资料来源：Jun Ueda 《Development of the NAIST-Hand with Vision-based Tactile Fingertip Sensor》

图46：基于视觉的原型指尖传感器



资料来源：Jun Ueda 《Development of the NAIST-Hand with Vision-based Tactile Fingertip Sensor》

图47：基于视觉的传感器接触区域图像



资料来源：Jun Ueda 《Development of the NAIST-Hand with Vision-based Tactile Fingertip Sensor》

使用透明半球形凝胶，通过小型CCD相机从指尖内部测量接触面积。在凝胶的顶点处绘制有特征点。LED嵌入凝胶中，可提高接触区域图像的对比度。力传感器支撑该装置以测量施加在凝胶上的外力。图47(a)显示了当传感器压在刚性墙壁上时相机的初始图像，即没有切向力的图像。图47(b)显示出了通过图像处理检测到的接触区域的边缘和特征点。图47 (c) 和 (d) 显示了施加牵引（切向）力后的图像。再次检测接触面积a的半径和特征点的相对位移 $\delta$ ，即可对滑移量做出估计。相对位移 $\delta$ 可以通过“偏心率”计算，“偏心率”是弹性半球变形的指标。



图48：因时科技灵巧手



因时机器人

作者：因时科技

发明初衷：设计出一款低成本的灵巧手

发明历程：2017年，因时科技推出了首代灵巧手，包括10自由度的开发版（适合进行二次开发或作为设计参考）和6自由度的产品版（适合应用）；2019年，因时科技推出了第二代灵巧手和快速版无影手。目前，公司在售的有RH56DFX和RH56BFX两个版本。

设计层面：欠驱动结构，单手具有6个自由度和12个关节；集成度高，采用创新型直线驱动设计，内部集成了6个力控微型伺服电缸，电缸内部集成了电机、减速器、丝杆结构、传感器及伺服控制系统；外观高度仿真。

结构形式：驱动器内置

动力源：电机驱动，空心杯电机

传动方案：蜗轮传动

传感器：内置于微型伺服电缸内，产品内部集成了6个力传感器，可以实时反馈手指的受力情况。

应用领域：商业化产品。可应用在服务机器人末端执行器、假肢、教育科研装备、特种工业。其中，RH56DFX抓握力大，速度适中，适用于机器人或假肢的抓取；RH56BFX速度快、抓握力较小，适用于弹钢琴、猜拳、手势舞等场景。

资料来源：因时科技官网



图49：思灵灵巧手



资料来源：思灵机器人官网

表5：思灵灵巧手参数

| 指标       | 参数    |
|----------|-------|
| 主动自由度/关节 | 6/15  |
| 指尖输出力    | 15N   |
| 整手重量     | 490g  |
| 五指完全闭合时间 | 1s    |
| 力传感器精度   | 0.5N  |
| 通信波特率    | 1Mbps |

资料来源：思灵机器人官网

由 4 个模块化的多关节手指和 1 个具有主动对掌功能的拇指组成，整手外观上略小于正常成年男性手，具有拟人的外观和功能。五个手指均具有仿人型的运动轨迹，得益于拇指的对掌性，五指灵巧手可以复现多种人手的抓取类型。5 个手指均集成有力传感器和位置传感器等，可实现多传感器融合的抓取算法，以保证机器人手与环境交互的柔顺性。



表6：科研及通用领域灵巧手应用案例总结

| 灵巧手                | 国家  | 是否商业化 | 驱动    | 传动    | 高校                                                                      | 企业                   | 重量    | 最大抓握力(N) | 手指数量(个) | DOF(自由度) | DOA(为由驱动器控制的自由度) | 执行器数量(个) |    |    |
|--------------------|-----|-------|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------|----------|---------|----------|------------------|----------|----|----|
| Shadow Hand        | 英国  | √     | 欠     | 腱     |                                                                         | Shadow Robot Company | 4300g |          | 5       | 24       | 20               | 20       |    |    |
| SCHUNK SVH Hand    | 德国  | √     | 全/欠结合 | 齿轮/连杆 |                                                                         | SCHUNK Company       | 1300g |          | 5       | 20       | 9                | 9        |    |    |
| SoftHand Pro       | 意大利 | 科研    | 欠     | 腱     | Istituto Italiano di Tecnologia (意大利理工学院)；<br>Università di Pisa (比萨大学) |                      |       |          | 5       | 19       |                  | 1        |    |    |
| Pisa/IIIT SoftHand | 意大利 | √     | 欠     | 腱     | Istituto Italiano di Tecnologia (意大利理工学院)；<br>Università di Pisa (比萨大学) |                      |       |          | 20      | 5        | 19               | 1        |    |    |
| Qbhand             | 意大利 | √     | 欠     | 腱     | Istituto Italiano di Tecnologia (意大利理工学院)；<br>Università di Pisa (比萨大学) |                      |       |          | 5       | 19       |                  | 1        |    |    |
| FestoExoHand       | 德国  | √     | 欠     | 连杆    |                                                                         | Festo Company        |       |          | 5       |          |                  | 8        |    |    |
| Ritsumeikan Hand   | 日本  | 科研    | 欠     | 腱     | Ritsumeikan University                                                  |                      |       |          | 440g    | 5        | 15               | 6        | 3  |    |
| Washington Hand    | 美国  | 科研    | 欠     | 腱     | University of Washington                                                |                      |       |          |         | 5        |                  |          | 10 |    |
| IDLA hand          | 韩国  | 科研    | 全     | 连杆    | Ajou University (韩国亚洲大学)                                                |                      |       |          | 1100g   | 34       | 5                | 20       | 15 | 15 |
| NAIST Hand         | 日本  | 科研    | 全     | 连杆    | Nara Institute of Science and Technology (奈良科学技术大学)                     |                      |       |          |         | 4        | 16               | 12       | 12 |    |
| 因时科技灵巧手            | 中国  | √     | 欠     | 齿轮/连杆 |                                                                         | 因时科技                 |       |          | 5       | 12       | 6                | 6        |    |    |
| 思灵灵巧手              | 中国  | √     | 欠     | 齿轮/连杆 |                                                                         | 思灵机器人                | 490g  | 15       | 5       | 16       | 6                | 6        |    |    |

资料来源：光大证券研究所整理

- 科研/通用型五指灵巧手应用概述
- 科研/通用型五指灵巧手应用案例
- 投资建议
- 风险分析



人形机器人与人工智能技术不断突破，产业链正处于放量前夕，相关产业链面临巨大投资机遇。五指灵巧手作为人形机器人与外界交互的重要媒介，是机器人功能性的直接体现。这决定了在不同的应用场景下，五指灵巧手的设计要求必然有所差别。

科研/通用型五指灵巧手领域主要由两类主体推动，即工业夹具类企业、科研院校。近年来，随着协作机器人的发展，电动夹具类产品市场需求快速提升。为了应对不规则物体的抓取，夹具类产品从二指、三指向五指灵巧手进化。短期内，电动夹具仍是企业重要的业务支撑，依托与机器人本体配套部署的经验，未来夹具类企业的灵巧手产品具备一定市场竞争力。科研院校的灵巧手产品往往处于实验室阶段，市场化程度不高，但却提供了丰富的设计方案和实证数据，是未来产业化产品的重要来源。

从已商品化的灵巧手案例来看，呈现两极分化态势：1) 极简版。如意大利Pisa/IIT的SoftHand系列，以单个电机驱动整个手，不但具备成本、重量优势，同时具备柔顺性。2) 功能版。如英国Shadow Hand，使用20个电机及腱驱动，实现了24 DOF灵巧手，大大拓宽了产品使用范围。整体来看，灵巧手设计的依托点仍在于使用场景，未来有望呈现百花齐放的市场格局。

国产零部件厂商投资机会体现在：1) 空心杯电机：建议关注鸣志电器、鼎智科技、伟创电气、拓邦股份；2) 行星减速器、丝杠：建议关注中大力德、双环传动、贝斯特；3) 传感器：建议关注柯力传感。

- 科研/通用型五指灵巧手应用概述
- 科研/通用型五指灵巧手应用案例
- 投资建议
- 风险分析



- (1) 产业化进程不及预期：目前人形机器人产业链成本仍较高，尚未具备确定的应用场景，若产业化进程不及预期，可能对供应链企业造成不利影响；
- (2) 竞争加剧风险：产业界对人形机器人高度关注，若后续丝杠、空心杯电机、减速器等领域竞争加剧，可能对供应链企业造成不利影响；
- (3) 核心技术进步不及预期：人形机器人的产业化推进有赖于AI、自动驾驶、以及相关零部件的核心技术持续进步，若后续核心技术进步不及预期，可能对产业链落地造成负面影响。

# 衷心 感谢

光大证券研究所



电新环保研究团队

## 殷中枢（首席分析师）

📄 执业证书编号：S0930518040004  
☎ 电话：010-58452071  
✉ 邮件：yinzs@ebcn.com

## 黄帅斌（分析师）

📄 执业证书编号：S0930520080005  
☎ 电话：0755-23915357  
✉ 邮件：huangshuaibin@ebcn.com

## 和霖（分析师）

📄 执业证书编号：S0930523070006  
☎ 电话：021-52523853  
✉ 邮件：helin@ebcn.com

## 郝骞（分析师）

📄 执业证书编号：S0930520050001  
☎ 电话：021-52523827  
✉ 邮件：haoqian@ebcn.com

## 陈无忌（分析师）

📄 执业证书编号：S0930522070001  
☎ 电话：021-52523693  
✉ 邮件：chenwuji@ebcn.com

## 分析师声明

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，以勤勉的职业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。负责准备以及撰写本报告的所有研究人员在此保证，本研究报告中任何关于发行商或证券所发表的观点均如实反映研究人员的个人观点。研究人员获取报酬的评判因素包括研究的质量和准确性、客户反馈、竞争性因素以及光大证券股份有限公司的整体收益。所有研究人员保证他们报酬的任何一部分不曾与、不与、也将不会与本报告中的具体的推荐意见或观点有直接或间接的联系。

## 行业及公司评级体系

买入—未来6-12个月的投资收益率领先市场基准指数15%以上；  
增持—未来6-12个月的投资收益率领先市场基准指数5%至15%；  
中性—未来6-12个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至5%；  
减持—未来6-12个月的投资收益率落后市场基准指数5%至15%；  
卖出—未来6-12个月的投资收益率落后市场基准指数15%以上；  
无评级—因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。  
基准指数说明：A股市场基准为沪深300指数；香港市场基准为恒生指数；美国市场基准为纳斯达克综合指数或标普500指数。

## 特别声明

光大证券股份有限公司（以下简称“本公司”）成立于1996年，是中国证监会批准的首批三家创新试点证券公司之一，也是世界500强企业——中国光大集团股份公司的核心金融服务平台之一。根据中国证监会核发的经营证券期货业务许可，本公司的经营范围包括证券投资咨询业务。

本公司经营范围：证券经纪；证券投资咨询；与证券交易、证券投资活动有关的财务顾问；证券承销与保荐；证券自营；为期货公司提供中间介绍业务；证券投资基金代销；融资融券业务；中国证监会批准的其他业务。此外，本公司还通过全资或控股子公司开展资产管理、直接投资、期货、基金管理以及香港证券业务。

本报告由光大证券股份有限公司研究所（以下简称“光大证券研究所”）编写，以合法获得的我们相信为可靠、准确、完整的信息为基础，但不保证我们所获得的原始信息以及报告所载信息之准确性和完整性。光大证券研究所可能将不时补充、修订或更新有关信息，但不保证及时发布该等更新。

本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次发布时光大证券研究所的判断，可能需随时进行调整且不予通知。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。客户应自主作出投资决策并自行承担投资风险。本报告中的信息或所表述的意见并未考虑到个别投资者的具体投资目的、财务状况以及特定需求。投资者应当充分考虑自身特定状况，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，本公司及作者均不承担任何法律责任。

不同时期，本公司可能会撰写并发布与本报告所载信息、建议及预测不一致的报告。本公司的销售人员、交易人员和其他专业人员可能会向客户提供与报告中观点不同的口头或书面评论或交易策略。本公司的资产管理子公司、自营部门以及其他投资业务板块可能会独立做出与本报告的意见或建议不相一致的投资决策。本公司提醒投资者注意并理解投资证券及投资产品存在的风险，在做出投资决策前，建议投资者务必向专业人士咨询并谨慎抉择。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问或金融产品等相关服务。投资者应当充分考虑本公司及本公司附属机构就报告内容可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一信赖依据。

本报告根据中华人民共和国法律在中华人民共和国境内分发，仅向特定客户传送。本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、复制、转载、刊登、发表、篡改或引用。如因侵权行为给本公司造成任何直接或间接的损失，本公司保留追究一切法律责任的权利。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。