

行业研究

动力、传动、传感：灵巧手分析框架与零部件选型

——人形机器人行业系列报告（二）

要点

机器人多指灵巧手是一种高度灵活、复杂的末端执行器，因其能够模仿人手的各种灵巧抓持和复杂操作能力，得到持续的研发投入和广泛关注。从应用领域来看，目前灵巧手实现成熟应用的领域主要有：航空航天、医疗假肢、工业及科研领域。

灵活度设计：灵活度设计是一个取舍与平衡的过程，原因在于更多的灵活度意味着更强的功能性，但背后需要更多的驱动器与更复杂的结构，必然带来鲁棒性的下降。对于功能性的衡量，通常采用 Cutkosky 抓取分类法。多数高灵活度灵巧手需要面临的一个任务是单关节双自由度的实现，目前具有代表性的传动形式有三种：（1）双轴正交结构；（2）球/孔结构；（3）差动齿轮组。

动力源：包括选择动力源的种类、位置及数量，以及适配的减速器。目前电机驱动已成为主流驱动方式。电机类型包括直流无刷电机、无框力矩电机、空心杯有刷电机、空心杯无刷电机，减速器类型包括谐波减速器和行星减速器。

传动结构：传动系统的设计不仅决定了灵巧手的机械结构，而且直接影响到灵巧手的抓取稳定性和灵活性。腱传动对于空间狭小、传动精密的灵巧手空间设计较为友好，关键在于腱绳材料的选择；连杆、齿轮等传动方式更为直接，但对空间、设计的要求较高。

传感系统：根据传感器在机器人手中的布局和功能，可将传感器分为两类：内在传感器和外在传感器。内在传感器反馈机器人本体的运动或动态信息，如手关节角度、关节扭矩和肌腱应变，而外在传感器感知外部环境，如压力、力、温度和平滑度。

行业判断：1) 作为人形机器人与外界交互的重要媒介，灵巧手是机器人功能性的直接体现。这一方面决定了其在人形机器人体系中的重要地位，另一方面预示着五指灵巧手与人形机器人功能对应，在硬件层面可选的方案数量将大于其他部位；2) 五指灵巧手可以不依附于人形机器人而单独存在，如机械臂、远程操作手套、假肢等，这决定了五指灵巧手的远期市场容量的进一步扩大；3) 五指灵巧手作为一个功能单元，相较人形机器人其他部位，其自身零部件数量更多，硬件结构更为复杂，需要集合整手的运动控制、末端传感、人机交互等，最终可能造成五指灵巧手环节的竞争更加多层次，也容易演化成为单独环节。

投资建议：

- 1) 动力源。建议关注：空心杯电机领域的鸣志电器、鼎智科技、伟创电气、拓邦股份；直流无刷电机领域的德昌股份；无框力矩电机领域的步科股份；减速器环节：行星减速器建议关注中大力德、双环传动；谐波减速器建议关注绿的谐波；丝杠建议关注贝斯特；
- 2) 传动结构。主要集中在腱绳材料，建议关注钢丝方案的大业股份，潜在超高分子量聚乙烯纤维材料受益标的同益中、恒辉安防；
- 3) 传感系统。建议关注：（一）六维力传感器：柯力传感、东华测试、八方股份；（二）触觉传感器：汉威科技、奥迪威；（三）身体平衡（IMU）：华依科技、芯动联科。

风险分析：（1）产业化进程不及预期；（2）竞争加剧风险；（3）核心技术进步不及预期。

电力设备新能源
买入（维持）

作者

分析师：殷中枢

执业证书编号：S0930518040004
010-58452071yinzs@ebscn.com

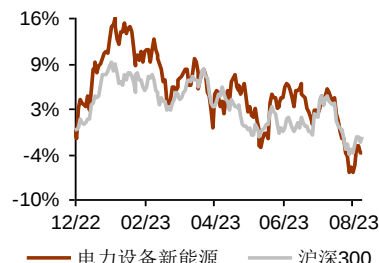
分析师：黄帅斌

执业证书编号：S0930520080005
0755-23915357huangshuaibin@ebscn.com

分析师：和霖

执业证书编号：S0930523070006
021-52523853helin@ebscn.com

行业与沪深 300 指数对比图



资料来源：

相关研报

经典五指灵巧手拆机：科研及通用篇——人形机器人专题（三）（2023-11-27）
经典五指灵巧手拆机：医疗假肢篇——人形机器人专题（二）（2023-11-18）
经典五指灵巧手拆机：航空航天篇——人形机器人专题（一）（2023-11-16）

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

投资聚焦

随着大模型等 AI 技术取得突破性进展，作为其重要载体的人形机器人受到广泛关注。2023 年 10 月，工信部印发《人形机器人创新发展指导意见》，称人形机器人有望成为继计算机、智能手机、新能源汽车后的颠覆性产品。为此，我们撰写一系列有关人形机器人的报告，对相关产品、技术进行梳理，并提示相关的投资机会。

我们的创新之处

我们创新性提出人形机器人灵巧手的分析框架，从灵活度设计、动力源、传动结构、传感系统四个层次进行了阐述，同时结合已有的灵巧手案例，对各方面设计结构进行说明。

股价上涨的催化因素

- (1) 重大节点性事件催化。人形机器人产业正处于产业化前夕，容易受到重大节点性事件催化，如特斯拉举办 AI DAY，Optimus 产品发布新进展，以及其他国内外人形机器人厂商发布新产品等；
- (2) 人形机器人技术取得突破性进展。人形机器人的成熟建立在 AI 大模型、自动驾驶等多项前沿技术之上，底层技术的快速成熟有助于进一步推动人形机器人产业化落地；
- (3) 订单与投资。随着人形机器人在诸多场景落地，产业将迎来实质性落地。如果行业内披露相关订单、投资计划，将对股价形成催化。

投资观点

- (1) 动力源。建议关注空心杯电机领域的鸣志电器、鼎智科技、伟创电气、拓邦股份；直流无刷电机领域的德昌股份；无框力矩电机领域的步科股份；减速器环节：行星减速器建议关注中大力德、双环传动；谐波减速器建议关注绿的谐波；丝杠建议关注贝斯特；
- (2) 传动结构。主要集中在腱绳材料，建议关注钢丝方案的大业股份，潜在超高分子量聚乙烯纤维材料受益标的同益中、恒辉安防；
- (3) 传感系统。建议关注：（一）六维力传感器：柯力传感、东华测试、八方股份；（二）触觉传感器：汉威科技、奥迪威；（三）身体平衡（IMU）：华依科技、芯动联科。

目 录

1、 机器人灵巧手设计与关键技术.....	6
1.1、 灵巧手发展历史	6
1.2、 灵巧手的分析框架	7
2、 欠驱动与全驱动：灵活度设计.....	9
2.1、 全手自由度设计	9
2.2、 单关节双自由度实现	11
2.3、 自由度优先级	12
3、 动力源	13
3.1、 动力源分类	13
3.2、 动力源位置及数量	15
3.3、 电机与减速器选型	17
4、 传动.....	23
4.1、 腱传动	24
4.2、 连杆传动	26
4.3、 齿轮传动	27
4.4、 特斯拉灵巧手	27
5、 传感器	28
5.1、 灵巧手的感知系统	28
5.2、 外部传感器	29
5.2.1、 触觉传感器	29
5.2.2、 接近传感器	33
5.3、 内部传感器	34
5.3.1、 力/力矩传感器	34
5.3.2、 动作传感器	35
6、 投资建议.....	37
7、 风险分析.....	40

图目录

图 1: 机器人末端执行器.....	6
图 2: 灵巧手发展历程	7
图 3: 灵巧手分析框架	8
图 4: 人手自由度分析	9
图 5: 人手骨骼结构.....	9
图 6: 人手六种基本抓取模式	10
图 7: 人手常用动作及比例.....	10
图 8: Cutkosky 抓取分类法.....	10
图 9: Robonaut 2 主手指（食指+中指）	11
图 10: Omni hand.....	11
图 11: DLR Hand II.....	12
图 12: BH-985 灵巧手自由度配置	12
图 13: McKibben 人工肌肉结构.....	13
图 14: FESTO ExoHand	13
图 15: 微液压驱动的仿生灵巧手	14
图 16: The new FRH-4 hand	14
图 17: 采用记忆合金驱动的 Hitachi 灵巧手.....	14
图 18: 驱动器内置与外置.....	15
图 19: DLR-I 灵巧手	16
图 20: HIT/DLR Hand II 灵巧手原型	16
图 21: 不同灵巧手驱动器数量统计	17
图 22: maxon EC flat 32/45 盘式电机	19
图 23: HIT/DLR Hand II 灵巧手的基关节部分.....	20
图 24: HIT/DLR Hand II 灵巧手的驱动和传动系统	20
图 25: Dexhand 手指驱动原理.....	20
图 26: Dexhand 手指驱动单元.....	20
图 27: I Limb Ultra hand 手指结构	21
图 28: IDLA hand 的驱动器配置.....	21
图 29: 有刷空心杯电机结构图	21
图 30: 无刷无齿槽电机结构图	21
图 31: 不同电机参数比较（转子惯量）	22
图 32: 不同电机参数比较（转矩密度）	22
图 33: 灵巧手机械传动结构	23
图 34: Pisa/IIT SoftHand 的肌腱布线	25
图 35: 腱绳传动手指	25
图 36: 连杆传动手指示意图	26
图 37: bebionic 连杆	26
图 38: 齿轮传动灵巧手	27
图 39: 特斯拉每个灵巧手具有 6 个执行器	28

图 40: 蜗轮蜗杆传动原理图	28
图 41: 灵巧手的感知系统	28
图 42: HIT/DLR Hand II 灵巧手的传感器系统	29
图 43: 触觉传感器的发展过程	30
图 44: CALT-18 仿人灵巧手微型指尖二维力传感器	31
图 45: 指尖六维力/力矩传感器原型及弹性体	31
图 46: DLR/HIT Hand II 型五指灵巧手指尖用柔顺性触觉传感器	31
图 47: 腾讯 TRX-Hand	31
图 48: Biotac 多模态传感器	32
图 49: GelSight 多模态传感器	32
图 50: 智元机器人 SkillHand	32
图 51: OmniTact 视触觉传感器	32
图 52: 仿生摩擦纳米发电机电子皮肤	33
图 53: 自解耦软磁皮肤	33
图 54: 接近传感器	33
图 55: 腾讯灵巧手 TRX-Hand 掌心处安装接近传感器	33
图 56: 具有轮辐形挠曲件的光学扭矩传感器	34
图 57: 腱张力传感器结构与弹性体	35
图 58: 微型光学腱张力传感器	35
图 59: 关节角度位置传感器	36
图 60: 关节角度位置传感器	36
图 61: 用于测量肌腱曲率的弯曲传感器	36
图 62: 灵巧手设计框架	39

表目录

表 1: 常见几种动力源的特点比较	13
表 2: 典型灵巧手与配套电机	17
表 3: 灵巧手涉及电机的详细参数	18
表 4: 不同电机类型对比	19
表 5: 不同传动方式对比	23
表 6: 不同灵巧手的传动系统	24
表 7: 腱绳驱动灵巧手中腱绳材料的选择	26
表 8: 不同触觉传感器技术路线特性比较	29
表 9: DLR Hand II 每个手指中的传感器配置	34
表 10: 常用腱绳张力测量方式	34
表 11: 常用位置传感器及其特点	35

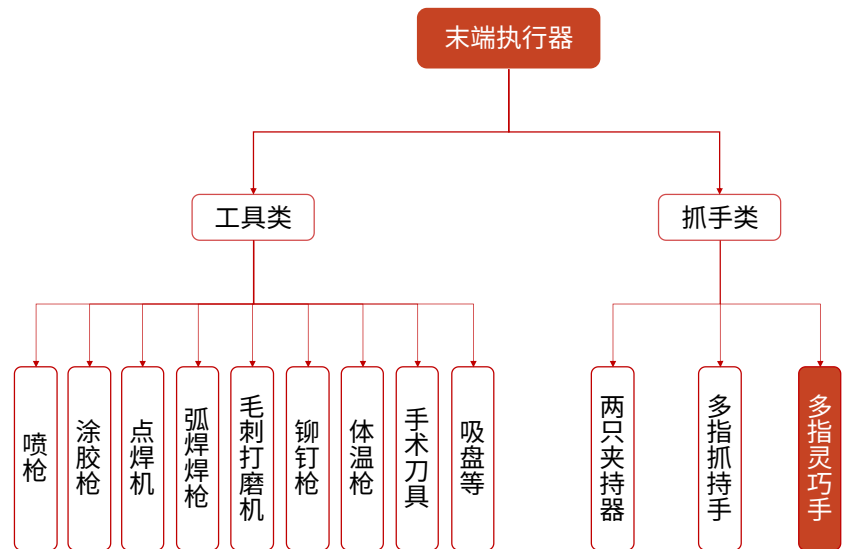
1、机器人灵巧手设计与关键技术

机器人中操作和动作决策的执行输出工具在机器人学领域被称之为末端执行器(End-Effector)。末端执行器是机器人执行部件的统称，一般安装于机器人腕部的末端，是直接执行任务的装置。末端执行器作为机器人与环境相互作用的最后环节与执行部件，对提高机器人的柔性和易用性有着极为重要的作用，其性能的优劣在很大程度上决定了整个机器人的工作性能。

末端执行器按其功能可以分为两大类，即：工具类和抓手类。工具类末端执行器是根据具体工作需求专门设计并预留标准化接口的机器人专用工具，可以直接实现具体的加工工种、生产工艺或日常动作；抓手类机器人末端执行器恰如人的双手，担负着执行各种动作、抓持和操作的任務。

机器人多指灵巧手是一种高度灵活、复杂的末端执行器，因其能够模仿人手的各种灵巧抓持和复杂操作能力，得到持续的研发投入和广泛关注。

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》

1.1、灵巧手发展历史

20 世纪 70 年代，在日益增长的工业需求的推动下，灵巧手的概念逐步形成，并产生了许多简单的灵巧手。这一时期的代表性成果有日本的 Okada Hand 和通用公司(GM)的 Handyman Hand 等。

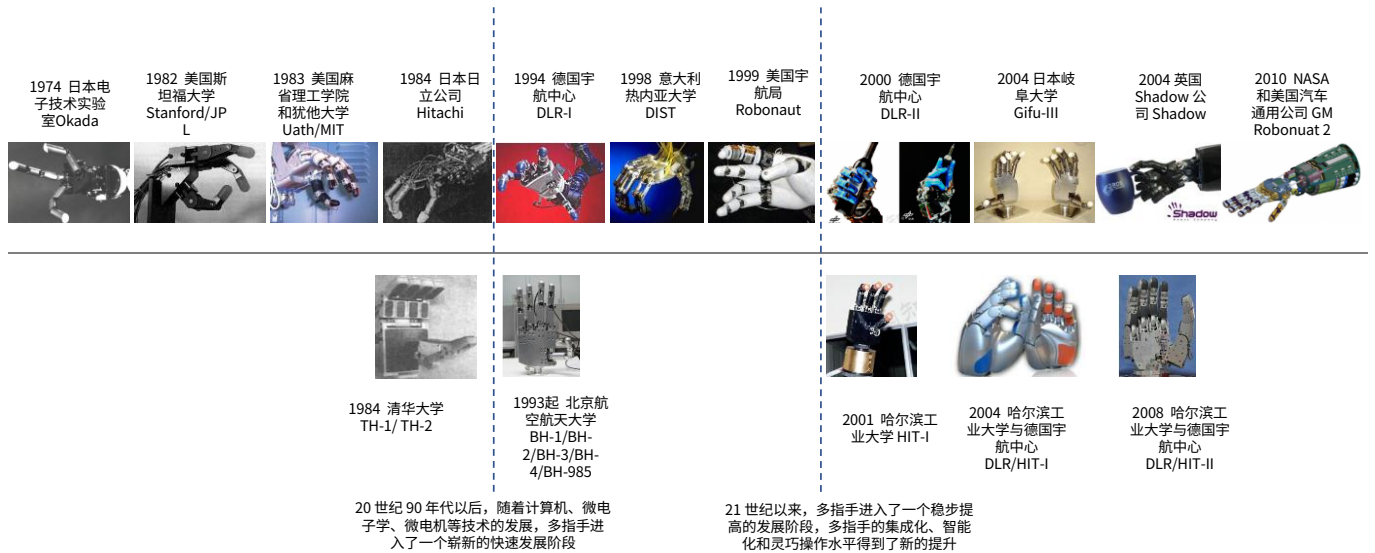
20 世纪 80 年代，随着相关技术的快速发展，灵巧手的应用范围逐渐扩大，很多国家和地区都开始着手于灵巧手的研制。这一时期的灵巧手不但具备了多手指、多自由度，而且初步具备了力/力矩、位置感知功能。由于技术水平的限制，驱动元件（如电机、气压驱动（气动）肌肉等）尺寸较大，为保证灵巧手尺寸与重量，采用腱驱动将驱动元件放置在灵巧手外是当时的主流设计思路，主要代表性成果有 Utah/MIT Hand、Stanford/JPL Hand 等。

20 世纪 90 年代，随着驱动元件体积减小与电气系统集成度的提高，灵巧手体积迅速减小，并且在手指数目、自由度数、传感器的丰富程度等方面有所提高。这一时期的灵巧手开始注重手掌的构型设计，以提高灵巧手的抓取能力，代表作品

有 UB-II Hand、DLR-I Hand、DIST Hand 等。由于采用了新型的驱动器，DLR-I Hand 得以将驱动系统、电气系统以及传感器系统都集成在灵巧手内部，被认为是当时世界上最复杂、集成度最高的灵巧手。

21 世纪以来，多指手进入了一个稳步提高的发展阶段，多指手的集成化、智能化和灵巧操作水平得到了新的提升。由于实现了电气系统的完全集成化和数字化，DLR-II 手与主处理器之间的连线数量从 DLR-I 手的 400 多条减少到 8 条。

图 2：灵巧手发展历程



资料来源：吕博瀚《空间机器人多自由度灵巧手关键技术研究》、蔡世波《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》

1.2、灵巧手的分析框架

从应用领域来看，目前灵巧手实现成熟应用的领域主要有：航空航天、医疗假肢、工业及科研领域。

航空航天领域对性能的要求较高，对成本不敏感，如美国宇航中心（NASA）的 Robonaut Hand、德国宇航中心（DLR）的 DLR Hand、Dexhand；医疗假肢是目前少有的已实现商业化批量制造的领域，如 ottobock 的 Bebionic Hand、Michelangelo Hand；工业领域灵巧手目前由少数协作机器人夹爪企业所引领，如 SCHUNK 公司的 SCHUNK SVH Hand、Festo 公司的 Festo ExoHand；而科研领域主要由全球知名高校主导，灵巧手的设计思路较为开阔。

从灵巧手设计层面来看，主要有全驱动和欠驱动两种。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。

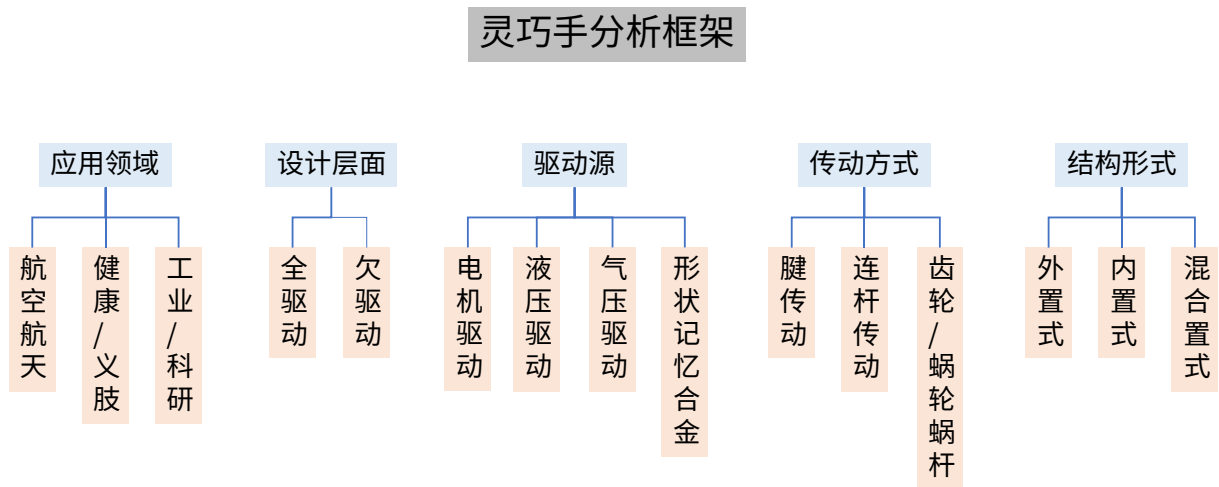
全驱动手的代表包括 Robonaut Hand、Shadow Hand、DLR Hand II 等，分别使用了 14/20/12 个驱动器，通过对每个自由度的独立控制，达到对灵巧手出色的掌控效果。但考虑到鲁棒性和功能性之间的取舍，欠驱动灵巧手成为更主流的选择。其优势在于通过合理的结构设计以少于手指关节自由度的驱动器，从而降低整只手的系统复杂度，同时提高可靠性。

从驱动源来看，目前灵巧手的驱动源包括电机、液压、气压、形状记忆合金等。

从传动方式看，灵巧手的传动方式主要包括腱传动、连杆传动、齿轮/蜗轮蜗杆等。

从结构形式来看，主要有外置式、内置式、混合置式。随着电机和控制电路的小型化发展，除了某些全驱动/腱绳传动的灵巧手外，内置式已成为灵巧手设计的发展趋势。其优点在于，通过将驱动、传动装置放置于灵巧手内部，可实现灵巧手的模块化设计，有利于灵巧手与机器人本体的无缝切换。

图 3：灵巧手分析框架



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》、光大证券研究所绘制

2、欠驱动与全驱动：灵活度设计

从自由度与原动机数量上来看，可将其划分为欠驱动灵巧手和全驱动灵巧手。

欠驱动灵巧手原动机的数量少于被控制的灵巧手自由度，没有驱动源的关节则是进行耦合随动。全驱动灵巧手则是原动机数量与被控制灵巧手的自由度数量相等。

欠驱动灵巧手优点在于易于控制，但拟人性不强，稳定性有所欠缺。由于耦合关节结构简单，所占空间小并具备可控性，如今大部分灵巧手都是欠驱动灵巧手。相对于欠驱动灵巧手，全驱动灵巧手的手指更加灵活，省去了无驱动手指关节的耦合机构，但由于驱动器增多，导致体积变大、安装困难并且灵巧手的控制变得更加繁琐。

2.1、全手自由度设计

人手骨骼结构：

手指：食指、中指、无名指和小指分别由 3 块指骨和一块掌骨组成，三块指骨分别为远节指骨（Distal phalange）、中节指骨（Intermediate phalange）和近节指骨（Proximal phalange）。拇指：除了掌骨以外，只包含近节指骨和远节指骨 2 块指骨，两个指骨之间的关节是指间关节（Interphalangeal joint，简称 IP 关节）。

人手自由度分析：

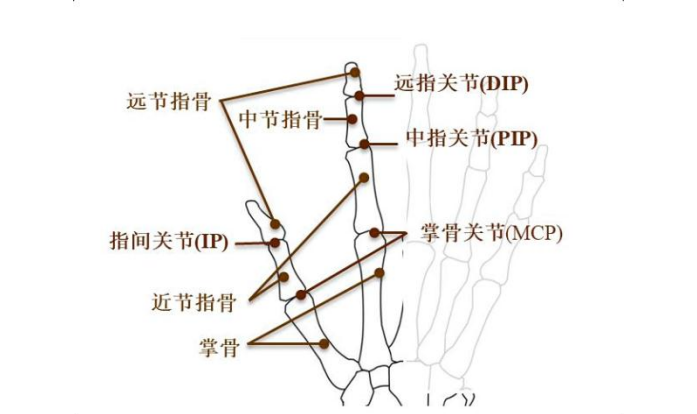
IP 关节和 PIP 关节分别有 1 个自由度，能够完成屈曲 / 伸展运动。而 MCP 关节具有 2 个自由度，可以完成屈曲/伸展和侧向摆动的动作。因此，对于食指、中指、无名指和小指，每个手指具有 4 个自由度。拇指中的关节依次是指间关节和掌骨关节。其中指间关节有 1 个自由度，MCP 关节具有 2 个自由度，掌骨和手腕骨指间的关节具有 2 个自由度，共计 5 个自由度。整个手具备 21 个自由度。

图 4：人手自由度分析



资料来源：小米技术微信公众号

图 5：人手骨骼结构



资料来源：郑悦《高仿生性能假肢设计研发及应用研究》

Taylor 等将人手抓取归纳为六种基本抓取模式，分别为圆柱抓取(Cylindrical)、指尖抓取(Tip)、胡克抓取(Hook)、掌心抓取(Palmar)、球形抓取(Spherical)及侧向捏取(Lateral)。这些抓取模式可以实现日常生活中人手的大部分功能。除胡克抓取外，其余五种抓取模式均需要拇指参与。

从有拇指参与的抓取模式中可以发现，拇指主要集中两种姿态(拇指的姿态是指掌骨的姿态)附近。

(1) 姿态 T-I-M。在该姿态下，拇指与食指和中指之间的交互起主要作用。在这一姿态附近可以实现指尖抓取、掌心抓取和侧向捏取，例如握笔和指尖操作一些小的物体等。

(2) 姿态 T-M-R。拇指与中指和无名指之间的交互起主要作用。在这一姿态附近可以实现圆柱抓取和球形抓取，例如抓取矿泉水瓶和网球等类型的物体。

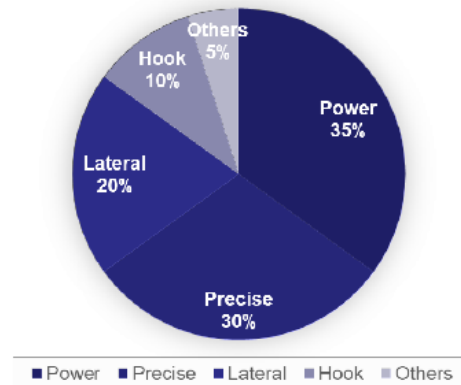
相关统计表明，力量抓握、精捏和侧捏这三个的动作占比高达 85%，因此，灵活运动的拇指、食指和中指是完成动作的关键。

图 6：人手六种基本抓取模式



资料来源：王海荣《仿人型灵巧手拇指灵巧性设计方法的研究》

图 7：人手常用动作及比例

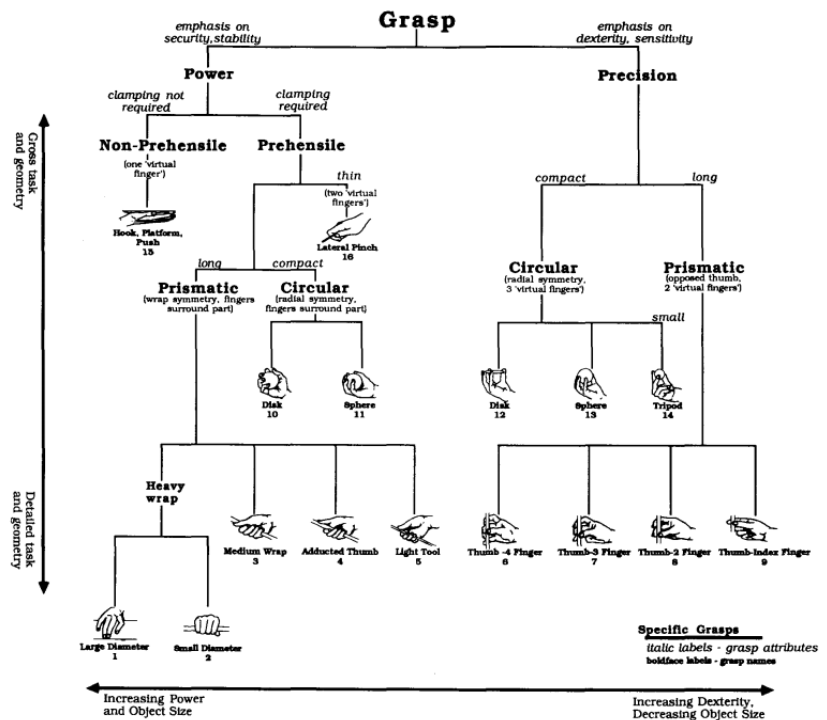


资料来源：郑悦《高仿生性能假肢设计研发及应用研究》

对于灵巧手自由度及功能的评估，通过采用 Cutkosky 抓取分类法。在该分类方法中，手的抓取动作按照从力量型到精确型被分为 16 种。

例如，针对 SCHUNK 五指灵巧手的抓取任务评估表明，SCHUNK 五指灵巧手可以完成 Cutkosky 抓取分类法中的 14 种。

图 8：Cutkosky 抓取分类法



资料来源：MARK R. CUTKOSKY《On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks》

2.2、单关节双自由度实现

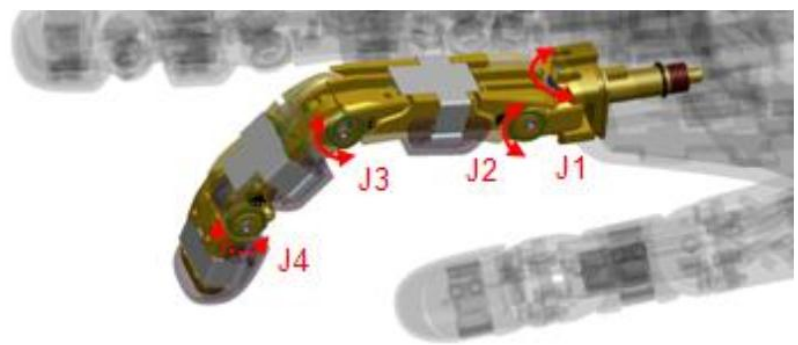
拇指：对掌运动是拇指的基本运动，通过对掌运动拇指可与其他 4 指接触形成钳状，它是实现人手功能的基础。这说明，拇指的双自由度处于较为优先的位置。

手指：手指拥有两种运动形式，通过各指节旋转副的屈曲/前伸运动以及通过手指末端球形副的侧摆运动。

要实现单个关节的双自由度运动，具有代表性的传动形式有三种：

（1）实现外展/内收和翘曲的两个轴正交，但却不是相互交叉的。它们在轴线位置上有一定的距离，并且分别由单驱动器驱动，如 Salisbury 手。这种结构可以使手指结构简单化，但降低了手指的灵活性，同时对驱动系统有更高的要求。

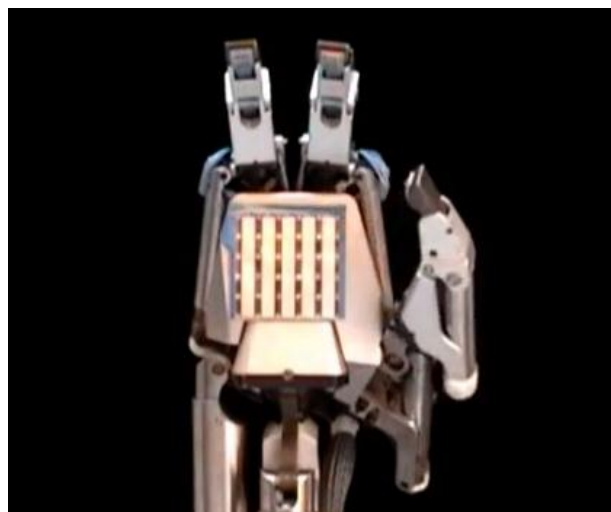
图 9: Robonaut 2 主手指（食指+中指）



资料来源：L. B. Bridgwater 《The Robonaut 2 Hand – Designed To Do Work With Tools》

（2）球/孔结构，如 Omni 手。这种结构可以使手指的运动具有更大灵活性和适应性，也可以使手指的计算机控制简化。同时，它所具有的机械限位可以避免手指产生过度的伸展。虽然这种结构有很好的紧凑性和灵活性，但结构复杂，增加了手指的加工难度和成本。

图 10: Omni hand

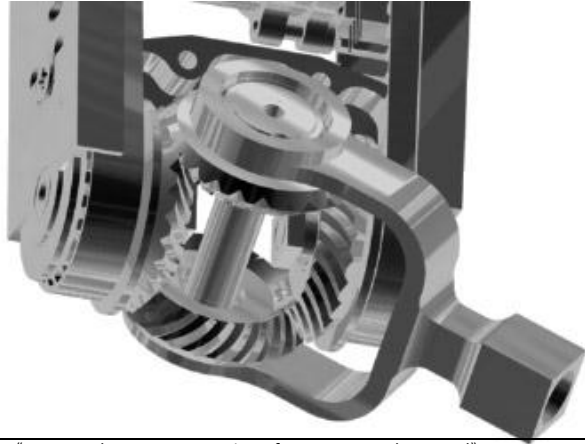


资料来源：roboticastreet

(3) 四个齿轮组成的差动结构。这种基关节的两个自由度通过 4 个相互啮合的伞齿轮来实现。灵巧手基关节采用锥齿轮差动结构不但能够有效减小灵巧手的外形尺寸，而且能够有效提高基关节的承载载荷。

通常情况下包含两个主动轮和两个从动轮。当主动轮同向转动时，实现基关节俯仰方向的运动；当主动轮逆向运动时，实现基关节侧摆方向的运动。

图 11：DLR Hand II



资料来源：J. Butterfa 《DLR-Hand II: Next Generation of a Dextrous Robot Hand》

2.3、自由度优先级

BH-985 共有 5 个手指和 16 个关节，配置有 10 个驱动源。拇指、食指和中指有 3 个关节自由度和 3 个驱动源，其余两个手指采用一个驱动源耦合传动。

从图 12 中可见，手指关节可分为双驱动关节、单驱动关节、耦合随动关节。

- (1) 从手指自由度优先级方面考虑，通常大拇指根部关节的双自由度拥有最高优先级。主要是由于拇指在各种抓握中占据的重要角色；
- (2) 而手指根部的双自由度是区分高级灵巧手的一个重要特征。经典的六电机方案（特斯拉 Optimus）在拇指配置双电机，其他手指各配置一个电机，即根部关节单电机驱动。而在 4 根手指中，食指、中指所发挥的功能通常要高于无名指、小指；
- (3) 远端关节通常处于优先级最后，作为耦合随动关节。

图 12：BH-985 灵巧手自由度配置



资料来源：严玺《仿人灵巧手的结构设计及其控制研究》

3、动力源

3.1、动力源分类

按驱动方式，灵巧手动力源可分为电机驱动、气压驱动（气动）、液压驱动与形状记忆合金驱动。

表 1：常见几种动力源的特点比较

驱动源	输出力	运动精度	响应速度	体积
液压驱动	大	高	慢	大
气压驱动	小	低	快	大
电机驱动	较大	高	快	小
形状记忆合金	大	低	快	小

资料来源：孙成远《腿驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》

基于气压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。

英国 Shadow 公司研制出一款基于 McKibben 气动人工肌肉的灵巧手 Shadow Hand，该灵巧手具有高达 20 个自由度，且每个自由度都是由一个独立的 McKibben 气动人工肌肉结构进行驱动，几乎可以模仿人手能够完成的所有动作。

Festo 软体神经假肢手具有六个主动自由度，在气压驱动下可实现多种灵巧抓握手势。每个手指具有内嵌多段分布式硬质结构层的纤维增强软体结构，在气压驱动下具有一个弯曲自由度。特别是拇指具有一个额外的自由度，用于实现对掌运动。此外，手指固有的柔顺性使其在面对柔软、易碎物体时也能够进行自适应抓握。

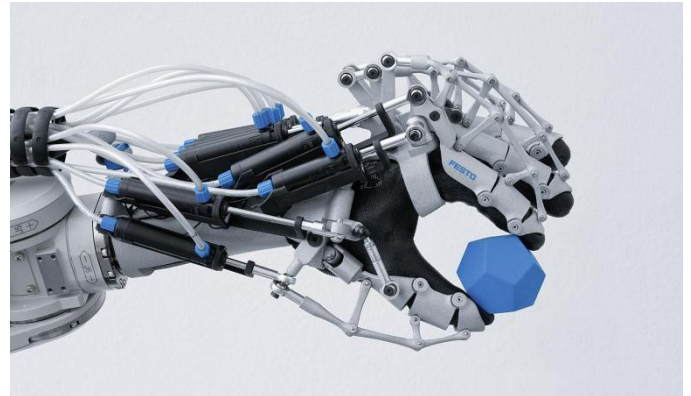
气压驱动的灵巧手是比较接近人体肌肉驱动的一种方式，具有易于控制、能量储存方便、柔性等特点，但其刚度低、动态性能差，且装配较难并无法精确运动，从而难以广泛应用于工业生产中。

图 13：McKibben 人工肌肉结构



资料来源：武子龙《机械传感一体化的仿生灵巧手设计与运动控制》

图 14：FESTO ExoHand



资料来源：Festo 官网

液压驱动是指为了完成能量的传递、增强和积压，通过液体介质的静压力来实现的驱动方式，通常在一定的机械和电子系统内使用较多。为得到较大操作力，一般使用液压马达等作为驱动装置，能驱动较大的负载，但因有较大的泄露和流体

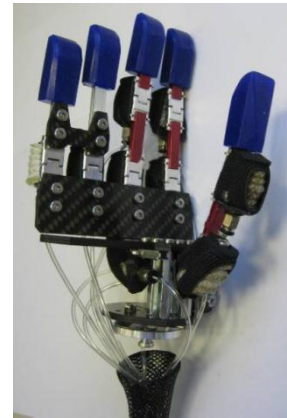
阻力的影响，故效率不高。并且因为液体存在可能泄漏和被压缩的缺点，所以导致传动比不够精确，并且体积大、成本高和易污染。

图 15：微液压驱动的仿生灵巧手



资料来源：武子龙《机械传感一体化的仿生灵巧手设计与运动控制》

图 16：The new FRH-4 hand



资料来源：I. Gaiser《A new anthropomorphic robotic hand》

形状记忆合金(SMA)具有方向灵活度高、变形量大和可迅速进行变位的特性。它是一种能记忆任何形状，即便产生变形，只要将其加热到某一合适温度时，就能恢复为变形之前外形的特殊合金。形状记忆合金驱动技术即为这种驱动器进行的驱动技术。因此，它具有位移较大、功率重量比高、变位迅速、方向自由的特性。对于机器人进行高速度及高精度的小负载装配任务非常合适，但形状记忆合金的缺点是造价高，并且易产生疲劳，寿命较低。

日本的 Hitachi 灵巧手，就是采用形状记忆合金驱动。

图 17：采用记忆合金驱动的 Hitachi 灵巧手



资料来源：严玺《仿人灵巧手的结构设计及其控制研究》

电机驱动是目前多指灵巧手的主要驱动方式，具有驱动力大，控制精度高、响应快、模块化设计、易于更换维护等优点。

作为灵巧手典型代表的 Stanford/JPL 手、DLR 手和 NASA 手均采用电机作为驱动源。体积小、输出力大的电机及集成驱动芯片的采用使电机、驱动电路板能与手指机械本体融为一体，利于实现多指灵巧手手指的模块化控制。

综合比较驱动器类型，电机驱动的综合性能更好，具有标准化、稳定可靠、精度高、响应快、驱控一体等优势，是目前技术成熟、应用广泛的一种驱动方式，为大多数灵巧手采用。

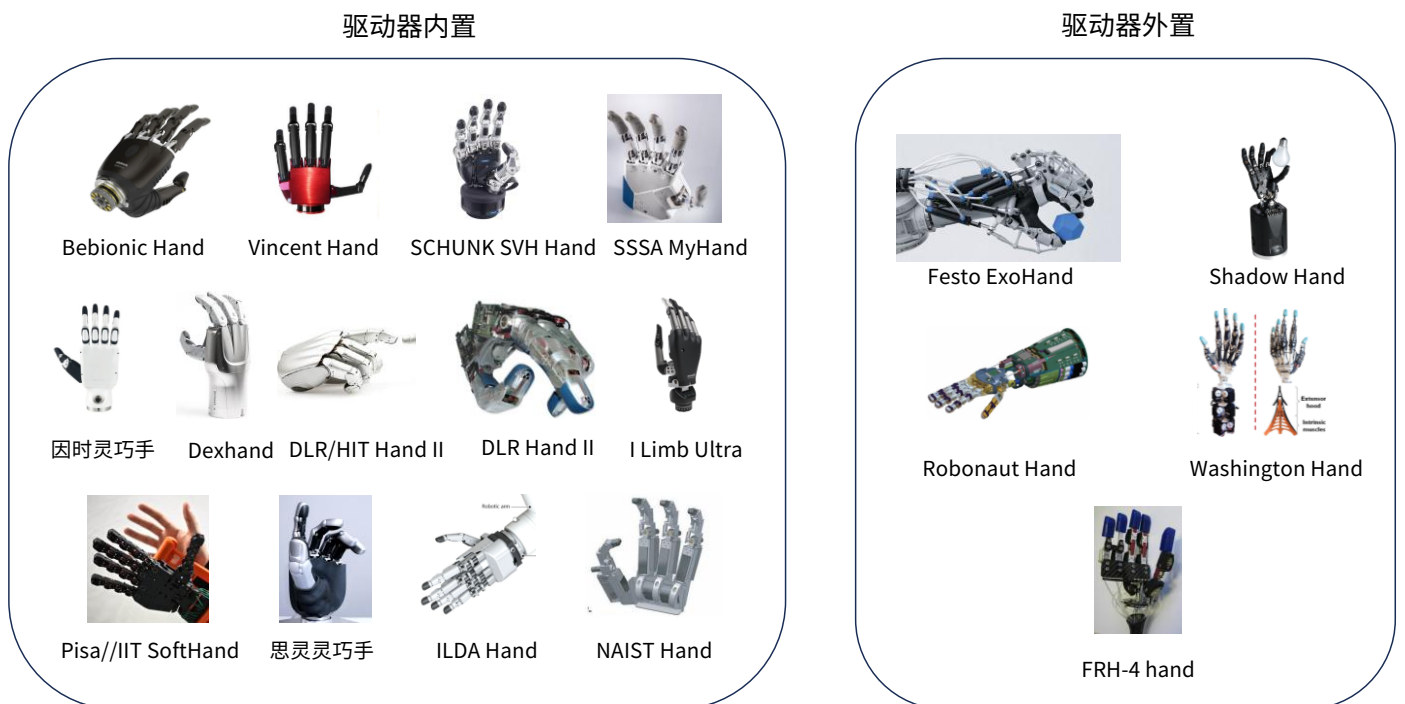
3.2、动力源位置及数量

按结构形式，灵巧手可分为驱动器外置式、驱动器内置式与驱动器混合置式。

早期的多指灵巧手一般将驱动器外置，主要是受驱动器结构尺寸影响，难以嵌入手指内。外置式的典型代表 NASA 手和 Shadow 手，其突出的优点是灵巧手的仿人化程度较高，灵巧手本体内没有需要布置的器件，可以缩减手本体的体积，做到接近人手的外形，自由度的布置也很灵活。

同时也具有以下缺点：第一，驱动器与手本体之间空间距离较远，必须借助腱实现两者的连接，不可避免地具有腱传动的相关弊病。第二，可维护性差。当某根腱断裂时，必须进行灵巧手整体的拆卸，工作量大。

图 18：驱动器内置与外置



资料来源：《经典五指灵巧手拆机：航空航天篇——人形机器人专题（一）》、《经典五指灵巧手拆机：医疗假肢篇——人形机器人专题（二）》、《经典五指灵巧手拆机：科研及通用篇——人形机器人专题（三）》、光大证券研究所整理

随着材料、工艺技术的发展，驱动器的尺寸逐渐减小，机器人多指灵巧手逐渐走向驱动器内置式。

内置式的多指灵巧手的出现，除能够有效地克服由于绳索驱动带来的缺点外，还具备下列优势：

- 1、由于驱动器集成在手指内部，因此集成度较高，简化手指同外部的软硬接口，便于手指模块化设计；
- 2、高集成度带来的好处就是手指间互换性增强，便于维护和实际应用；
- 3、能够作为一个局部自主系统同任何机器人手臂通过标准接口相连。

当然内置式灵巧手也同样存在一些问题，比如目前由于驱动器的不同及系统结构设计的思路不同导致灵巧手的整体外形尺寸较大，这也是内置式灵巧手的最大问题。

1998 年，DLR 新型驱动器的研制成功，使得灵巧手的所有驱动器、传动装置、传感器系统及电器系统都集成在灵巧手的内部。因此，被公认为是当时世界上最复杂、智能化和集成度最高的灵巧手。

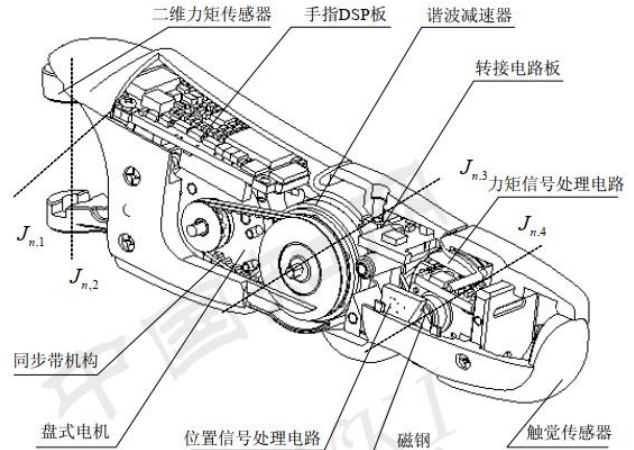
典型的内置式灵巧手 HIT/DLR-II，整体尺寸为人手的 1.5 倍。具有 1 个独立的手掌和 5 根模块化手指，每根手指集驱动、传感、控制等为一体，具有 4 个关节和 3 个自由度。其中，拇指与手掌之间有一个类似人手的外张/收敛自由度，可以通过配置拇指的位置来满足不同的抓取要求。

图 19：DLR-I 灵巧手



资料来源：樊绍巍《类人型五指灵巧手的设计及抓取规划的研究》

图 20：HIT/DLR Hand II 灵巧手原型

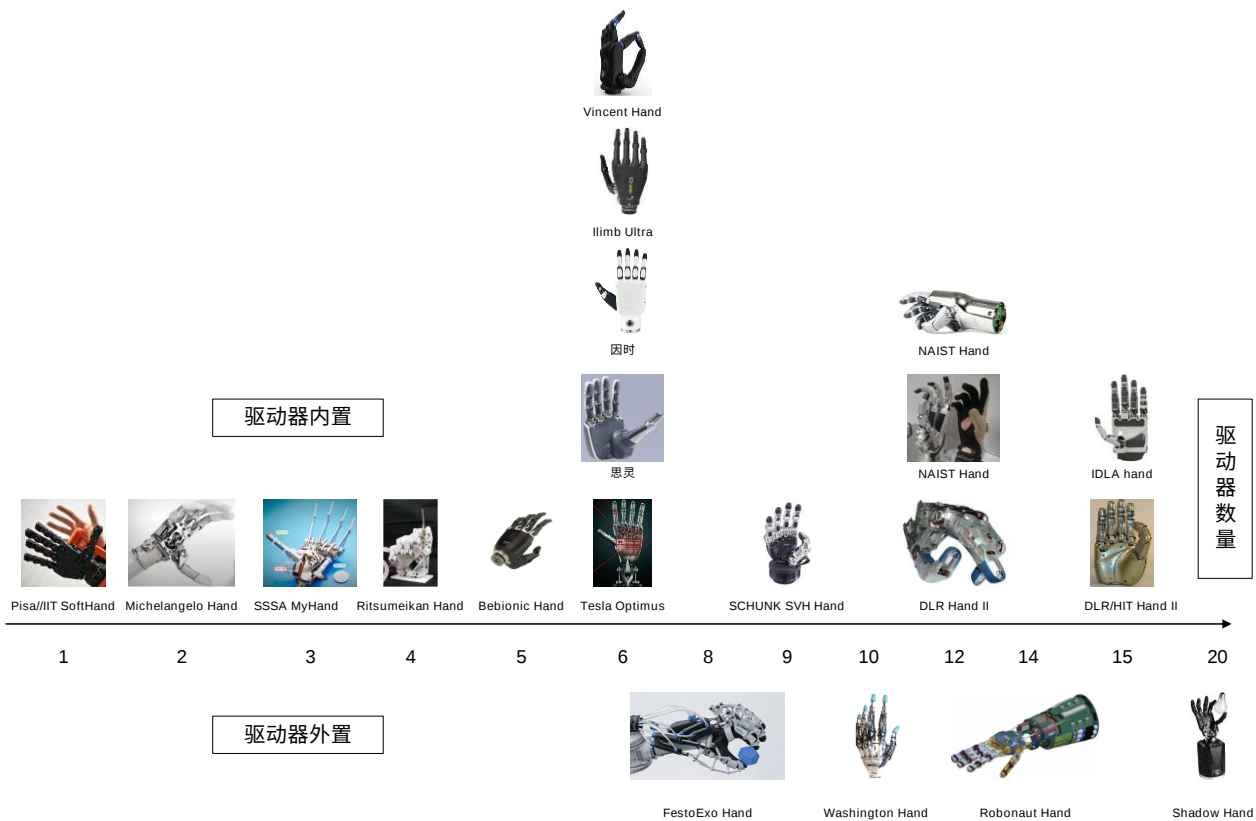


资料来源：樊绍巍《类人型五指灵巧手的设计及抓取规划的研究》

动力源位置及数量的一般性规律：

- 1) 对于非电机驱动（如气压、液压），往往采用驱动器外置；对于电机驱动的灵巧手，外置+腱绳传动普遍适用于驱动器数量较多的情况（如 10 个以上驱动器）；内置式则适用于 1-15 个电机的各类型灵巧手；
- 2) 6 电机方案是较为经典的一种配置类型。即拇指 2 个+其他手指各 1 个；
- 3) 在追求高自由度的情景下，可采用单手指 3 电机方案，在 4 指/5 指灵巧手中分别使用 12/15 个电机。

图 21：不同灵巧手驱动器数量统计



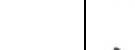
资料来源：《经典五指灵巧手拆机：航空航天篇——人形机器人专题（一）》、《经典五指灵巧手拆机：医疗假肢篇——人形机器人专题（二）》、《经典五指灵巧手拆机：科研及通用篇——人形机器人专题（三）》、光大证券研究所整理

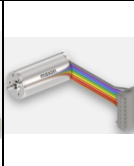
3.3、电机与减速器选型

在现代灵巧手的发展过程中，电机驱动逐渐成为主流驱动方式。作为灵巧手典型代表的 Stanford/JPL 手、DLR 手和 NASA 手均采用电机作为驱动源。体积小、输出力大的电机及集成驱动芯片的采用，使电机、驱动电路板能与手指机械本体融为一体，利于实现多指灵巧手手指的模块化控制。

从已有案例的电机选型来看，灵巧手用到的电机有直流无刷电机、无框力矩电机、空心杯有刷电机、空心杯无刷电机。

表 2：典型灵巧手与配套电机

灵巧手	DLR/HIT Hand II	Dexhand	Pisa//IIT SoftHand	Vincent Hand	Michelangelo Hand	Ilimb Ultra	RIC Arm		IDLA hand
灵巧手图片									
灵巧手推出时间	2006	2012	2012	2010	2012	2013	2016	2016	2021
电机	EC 20 flat	Robodrive ILM 25	Maxon RE-MAX 21	Maxon RE10	EC 45 flat	Maxon RE10	Maxon EC 10	Maxon EC 8	Maxon DCX 8M

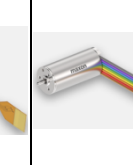
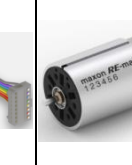
电机类型	直流无刷电机	无框力矩电机	空心杯有刷 (石墨电刷) 电机	空心杯有刷 (稀有金属电 刷) 电机	直流无刷电机	空心杯有刷 (稀有金属电 刷) 电机	空心杯无刷电 机	空心杯无刷电 机	空心杯有刷 (稀有金属电 刷) 电机
编号	351101		250000	118382	200189	118394	315170	283831	
电机图片									
标称电压(V)	24	24	4	2.4	12	4.5	12	6	2.4
标称电流(A)	0.163	4.3	0.72	0.367	2.02	0.462	1.66	1.76	0.345
额定功率(W)	3	80	6	0.75	30	1.5	8	8	0.5
直径(mm)	20	25	21	10	45	10	10	16	8
长度(mm)	10.4	15.2	31.5	17	16.25	24.6	25.7	36	16
搭配减速器	谐波减速器 (100:1)	谐波减速器 HFUC8(100:1)	行星齿轮 (16:1)(MaxonG PX8)		谐波减速器 HFUC8(100:1)(CSD-14-100-2A -R)		行星齿轮(4:1)	行星齿轮(16:1)	

资料来源：maxon 官网、TQ 官网、光大证券研究所整理

从电机外形来看，灵巧手存在着两种方案：

- 1) 扁平电机，即直流无刷电机、无框力矩电机，普遍搭配谐波减速器，两者之间可以轴心垂直，也可以平行放置，并通过传动带实现耦合；
- 2) 细长电机，即空心杯有刷电机和空心杯无刷电机，而空心杯有刷电机的电刷又分为稀有金属电刷和石墨电刷。空心杯电机普遍搭配行星齿轮减速器。

表 3：灵巧手涉及电机的详细参数

	Robodrive ILM 25	EC 20 flat	EC 45 flat	Maxon RE10	Maxon RE10	Maxon EC 10	Maxon EC 8	Maxon RE-MAX 21	Maxon DCX 8M
电机图片									
电机类型	无框力矩电机	直流无刷电机	直流无刷电机	空心杯有刷 (稀有金属电 刷) 电机	空心杯有刷 (稀有金属电 刷) 电机	空心杯无刷电机	空心杯无刷电机	空心杯有刷 (石墨电刷) 电机	空心杯有刷 (稀有金属电 刷) 电机
转子惯量 (gcm ²)	2.3	3.84	92.5	0.102	0.0671	0.0691	0.85	2.57	0.0384
重量(g)	25	15	75	10	7	13	52	42	4.4
转子惯量 /重量	9.2%	25.6%	123.3%	1.0%	1.0%	0.5%	1.6%	6.1%	0.9%
额定转速 (rpm)	13530	3830	2800	6530	1630	41700	7120	10700	4780
额定转矩 (mNm)	63	3.78	54.7	1.48	0.757	1.74	7.66	1.91	0.653
峰值扭矩 (mNm)	204	/	/	3.04	0.924	12	19.2	45.4	1.13
扭矩常数 (mNm/A)	14.7	/	25.5	3.3	2.14	2.12	4.61	3.35	1.95
最高效率	86%	55%	75%	76%	66%	78%	69%	79%	72%
机壳-环 境热阻 (K/W)	/	19.2	6.69	37.5	45.5	39.8	17.7	28	101

绕组-机壳热阻 (K/W)	/	8.41	3.92	9	19.5	5.1	1.41	8	16.9
转矩密度 (mNm/g)	2.52	0.25	0.73	0.15	0.11	0.13	0.15	0.05	0.15
极对数	7	4	8	1	1	1	1	1	1

资料来源：maxon 官网、TQ 官网、光大证券研究所整理；带底色数据为数值突出或显著较大的数字

直流无刷电机、无框力矩电机呈现双高特点：高转子惯量、高转矩密度。

表 4：不同电机类型对比

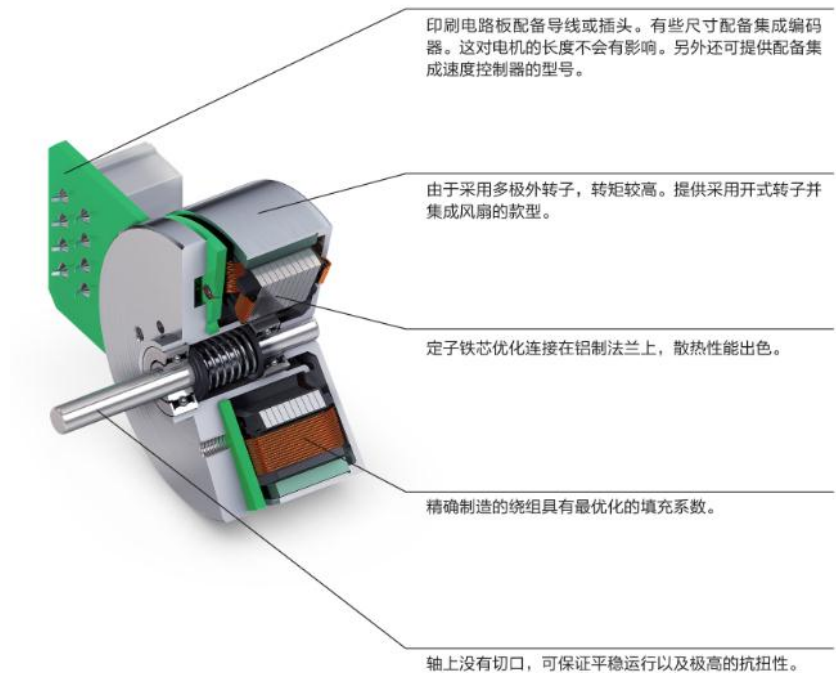
	转子	定子	转子惯量	转矩密度
直流无刷电机	永磁体	铁芯+绕组	高	高
无框力矩电机	永磁体	铁芯+绕组	高	高
空心杯电机（有刷）	空心杯	永磁体	低	低
空心杯电机（无刷）	永磁体	空心杯	低	低

资料来源：maxon 官网、TQ 官网、光大证券研究所

➤ 盘式电机（直流无刷电机）

盘式电机在 maxon 产业手册中属于 EC flat 系列，本质上属于直流无刷电机。带有定子铁芯绕组+永磁体转子，采用内外转子设计结构，转速可达 20000rpm，尤其适于空间狭小的应用场合。

图 22：maxon EC flat 32/45 盘式电机



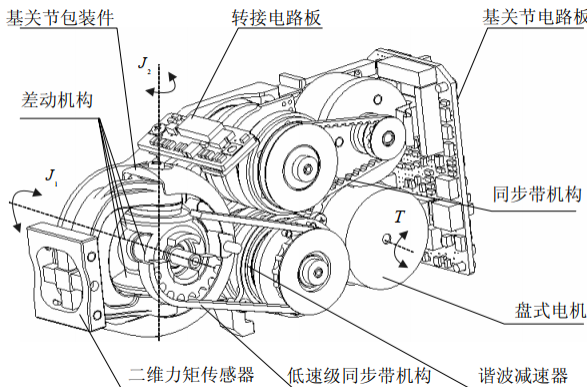
资料来源：maxon 官方微信公众号

已有的灵巧手案例中，DLR/HIT Hand II、Michelangelo Hand 均使用了盘式电机。

DLR/HIT Hand II:

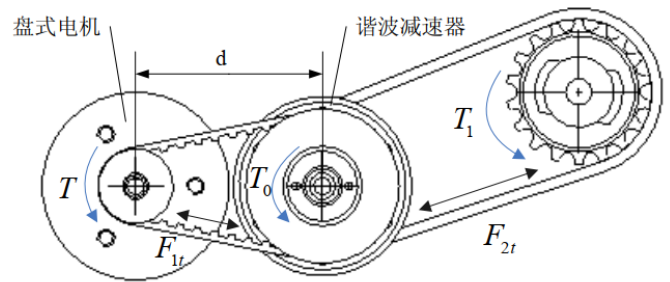
模块化手指基关节的驱动器和传动系统中，两个内置位置传感器的盘式电机（型号：EC-20flat）和谐波减速器并排横卧于手指后侧。手指单元的驱动器同样是盘式电机，该电机横卧于第一关节内部、谐波减速器横卧于手指第三关节处，二者之间通过同步带结构连接。

图 23: HIT/DLR Hand II 灵巧手的基关节部分



资料来源：樊绍巍《类人型五指灵巧手的设计及抓取规划的研究》

图 24: HIT/DLR Hand II 灵巧手的驱动和传动系统



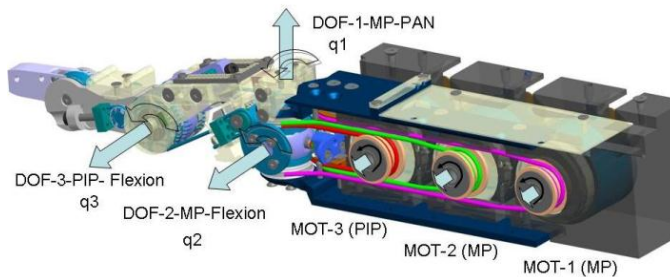
资料来源：樊绍巍《类人型五指灵巧手的设计及抓取规划的研究》

➤ 无框力矩电机

已有的灵巧手案例中，Dexhand、Spacehand 使用了同一款无框力矩电机——Robodrive ILM 25。在上述两款灵巧手中，无框力矩电机与传动比 100:1 的谐波减速器 HFUC 8 结合，组成圆柱体驱动单元，提供 2.4Nm 的连续扭矩，峰值高达 9Nm。

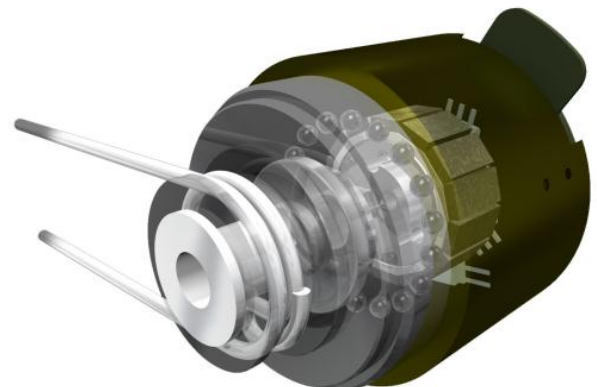
Dexhand 中，该驱动单元直径为 27 毫米、长度为 17.5 毫米、重 46 克；后续的 Spacehand 中，该驱动单元直径 27 毫米、长度 20 毫米、重量 50 克。

图 25: Dexhand 手指驱动原理



资料来源：Maxime Chalon《Dexhand:a Space qualified multi-fingered robotic hand》

图 26: Dexhand 手指驱动单元

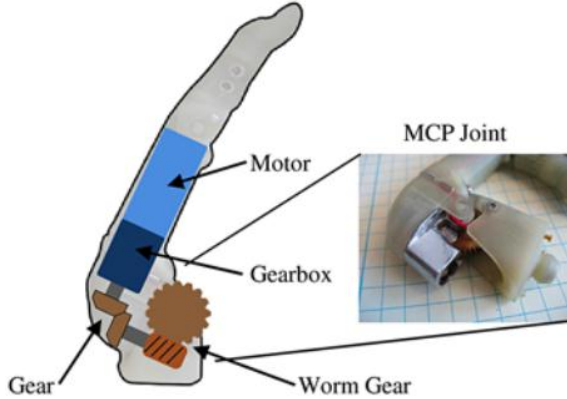


资料来源：Maxime Chalon《Dexhand:a Space qualified multi-fingered robotic hand》

➤ 空心杯电机（有刷/无刷）

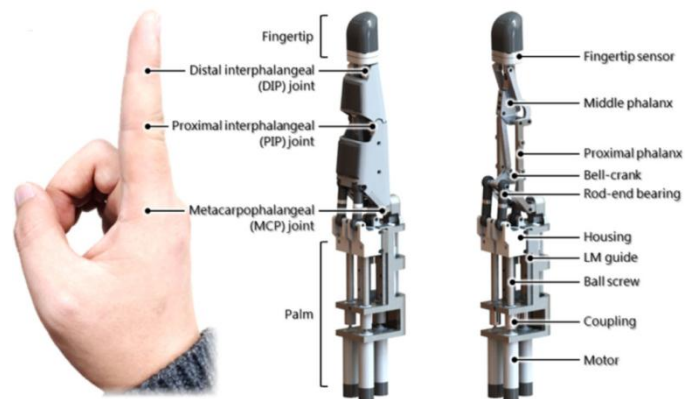
空心杯电机在灵巧手中得到广泛应用，已有的灵巧手案例中，Pisa//IIT SoftHand、Vincent Hand、Ilimb Ultra、IDLA hand 均使用了空心杯有刷电机，而 RIC Arm 则使用了空心杯无刷电机。

图 27: I Limb Ultra hand 手指结构



资料来源: Joseph T. Belter 《Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands》

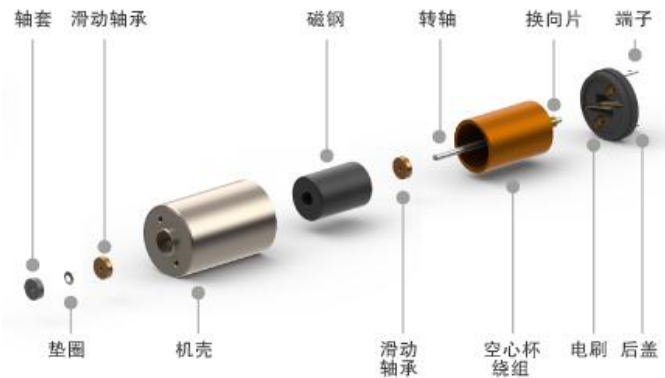
图 28: IDLA hand 的驱动器配置



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

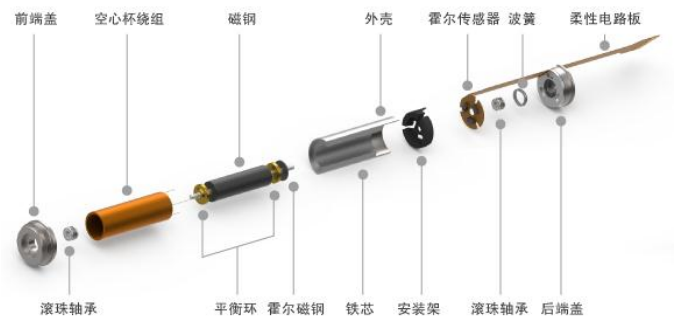
空心杯电机分为有刷和无刷两种，有刷电机转子无铁芯，无刷电机（又称无刷无齿槽电机）定子无铁芯。有刷空心杯电机利用碳刷（或者金属电刷）和换向器的配合来完成换向，无刷空心杯电机没有这种物理结构，线圈导线直接连接到控制器，通过处理连接板上的霍尔反馈的位置信号完成换向。

图 29: 有刷空心杯电机结构图



资料来源: 鸣志电器官网

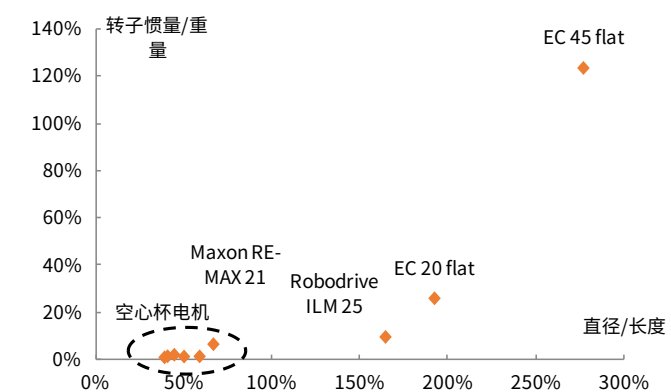
图 30: 无刷无齿槽电机结构图



资料来源: 鸣志电器官网

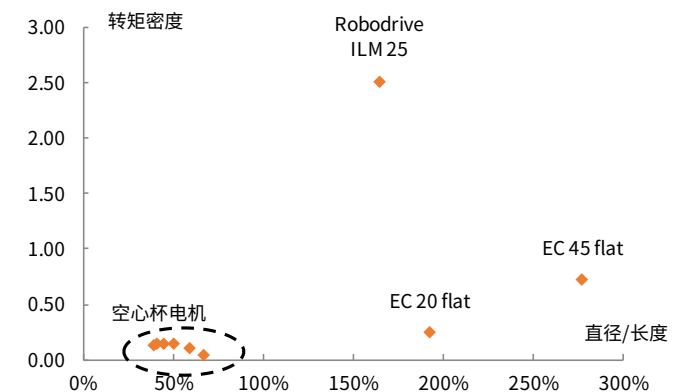
空心杯电机的优点包括：无齿槽效应（低速运行平稳、低振动、低噪音、转子可控制在任意位置），结构紧凑（磁路设计更优、功率密度更高、温升低、效率高），低电感（高动态响应、高加速度）。

图 31：不同电机参数比较（转子惯量）



资料来源：Maxon 官网、TQ 官网、光大证券研究所整理

图 32：不同电机参数比较（转矩密度）



资料来源：Maxon 官网、TQ 官网、光大证券研究所整理

4、传动

按灵巧手手指的传动方式可分为腱绳传动、连杆传动与齿轮传动。传动系统负责把驱动器产生的动力以一定的方式传递到手指关节，从而使关节做相应的运动。因此，传动系统的设计不仅决定了灵巧手的机械结构，而且直接影响到灵巧手的抓取稳定性和灵活性。

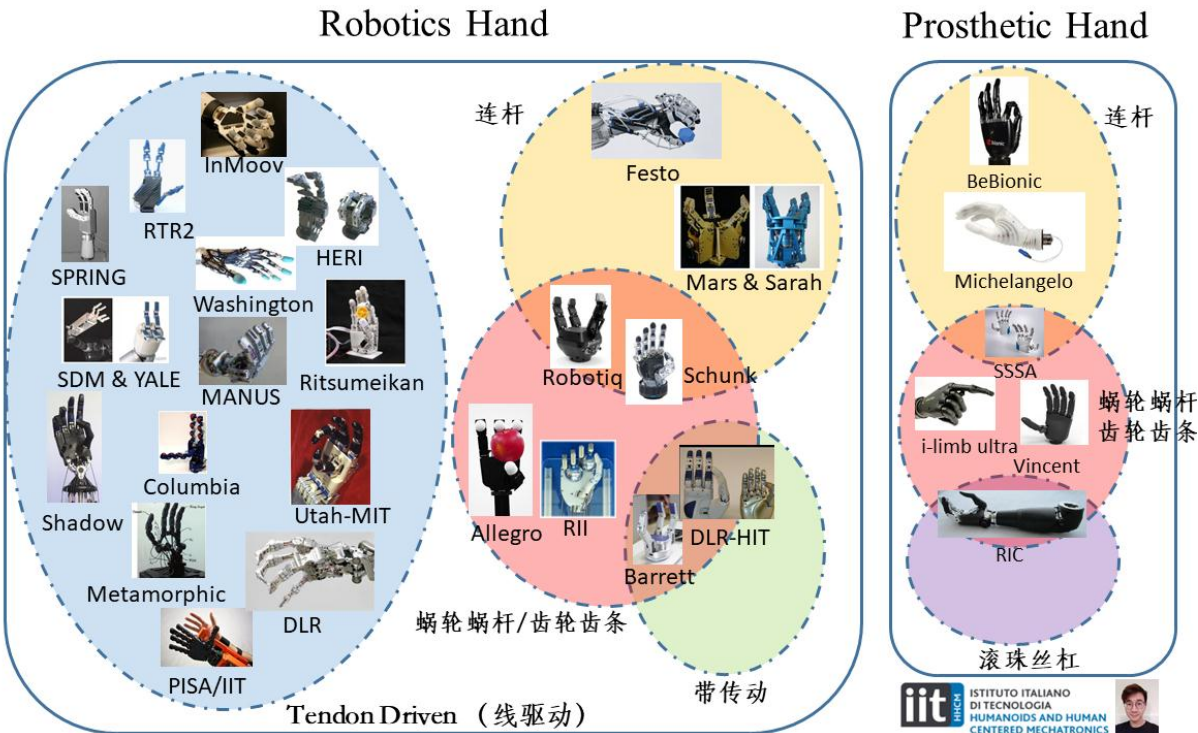
表 5：不同传动方式对比

传动方式	特点	缺点
腱传动	由腱（钢丝绳、迪力马绳等）加上滑轮或者软管实现传动。腱一般具有很高的抗拉强度和很轻的重量，容易实现多自由度和远距离动力传输，节省空间和成本，是一种柔顺传动方式	腱本身的刚度有限，影响位置精度；控制时需要一定的预紧力，容易产生摩擦；腱的布局容易产生力矩和运动的耦合。这些因素都增加了手爪抓取控制的难度和复杂性
连杆传动	采用平面连杆机构传动，刚度好、出力大、负载能力强、加工制造容易、易获得较高的精度，构件之间的接触可以依靠几何封闭来实现，能够较好实现多种运动规律和运动轨迹的要求	结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击性能较弱，对手内空间配置要求较高
齿轮/蜗轮蜗杆传动	驱动器通过齿轮或蜗轮蜗杆将旋转变成直线运动，拉动驱动器和手指之间的弹簧来驱动手指产生动作，手指部分采用金属连接，各个手指动作相互独立，具有多种的抓取构形，和别的多指灵巧手相比，驱动更加灵活，但是手指的闭合时间较长	结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击性能较弱，对手内空间配置要求较高，手指的结构比较复杂，容易出现故障
人工肌肉（液压/气压）	液压驱动和气动的驱动方式是近年来兴起的一种重要的驱动方式，是模拟人肌肉的一种驱动方式	由于材料和技术的限制，这些“人工肌肉”技术还远远不能满足机器人手爪实现可靠、快速和精确地抓取功能

资料来源：小米技术微信公众号《机器人中的“百达翡丽”——五指精密仿生灵巧手技术浅析》

已有案例表明，（1）腱传动灵巧手的案例占比较大；（2）在医疗假肢领域极少采用腱传动。主要原因在于，相比连杆、齿轮等传动方式，腱传动对于空间狭小、传动精密的灵巧手空间设计较为友好，但传动效率与可靠性较差。

图 33：灵巧手机械传动结构



资料来源：任颢宇《对于 30 种机械手的归类与分析——从假肢（Prosthetic）和机器人（Robotics）两个应用领域讨论》

表 6：不同灵巧手的传动系统

	灵巧手	国家	一级传动	二级传动
航空航天	Robonaut Hand	美国	腱	
	DLR Hand I	德国	齿轮	连杆
	DLR Hand II	德国	同步带	腱
	dexhand	德国	腱	
	DLR/HIT Hand II	中国	齿轮/带	
医疗假肢	Bebionic Hand	德国	丝杠	连杆
	Michelangelo Hand	德国	凸轮	连杆
	Ilimb Ultra	英国	蜗轮蜗杆	腱
	Vincent Hand	德国	蜗轮蜗杆	腱
	RIC Arm	美国	滚珠丝杠	连杆
	SSSA MyHand	意大利	蜗轮蜗杆	连杆/日内瓦结构
通用/科研	Shadow Hand	英国	腱	
	SCHUNK SVH Hand	德国	丝杠	连杆
	Soft HandPro	意大利	腱	
	Pisa//IIT SoftHand	意大利	腱	
	Qbhand	意大利	腱	
	FestoExo Hand	德国	连杆	
	Ritsumeikan Hand	日本	腱	
	Washington Hand	美国	腱	
	IDLA hand	韩国	连杆	
	NAIST Hand	日本	连杆	
	因时科技灵巧手	中国	齿轮/连杆	
	思灵	中国	齿轮/连杆	

资料来源：《经典五指灵巧手拆机：航空航天篇——人形机器人专题（一）》、《经典五指灵巧手拆机：医疗假肢篇——人形机器人专题（二）》、《经典五指灵巧手拆机：科研及通用篇——人形机器人专题（三）》、光大证券研究所整理

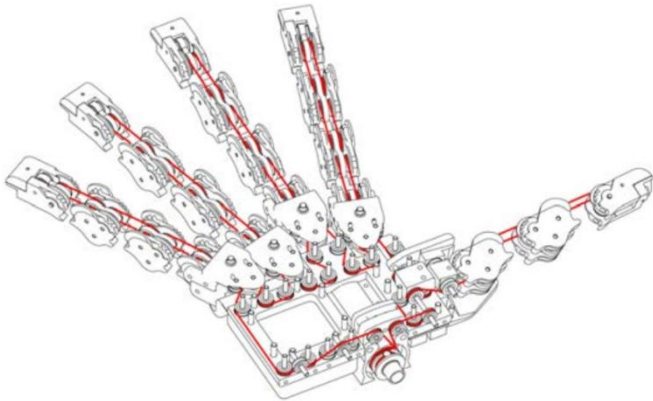
4.1、 腱传动

腱绳传动是指通过腱绳和缠绕腱绳的辅助装置把驱动源的力矩传送到手指各个关节上的传动方式，由于传动腱绳具有较高的柔性以及较小的尺寸，使得腱绳传动对驱动器和减速机构的结构尺寸要求较低，并且传动路线灵活多样，但也具有以下缺点：难以对绳索结构进行预紧，并且所有的绳索都具备弹性，致使传感器无法准确反应手指关节位置的信息，使精确控制难于实施。

腱驱动控制系统采用由微型伺服力矩电机、微型滚珠丝杠减速器和高强度碳氟纤维腱组成的解决方案。

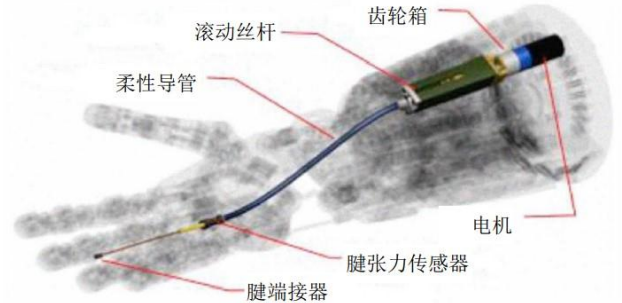
NASA Robonaut 2 灵巧手的优点：灵巧手采用腱传动配合连杆耦合传动的方式，驱动电机以及电气控制系统安置于手臂内部，可采用较大功率的电机，从而提高灵巧手的抓握力，节约了手指和手掌内部空间，有利于实现灵巧手的小型化、拟人化设计。此外，灵巧手具有较高的自由度，使得灵巧手具有更为灵活的工作空间，满足空间在轨服务精细作业的任务需求。

图 34: 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》

图 35: 腱绳传动手指



资料来源: 韩如雪《腱驱动空间多指灵巧手感知与控制关键技术研究》

► 腱绳材料选择

在腱传动灵巧手中，腱绳材料的选择至关重要。因为腱绳涉及动力传递，且作为末端传递单元，直接影响手指执行效果的精度，所以腱绳需要满足的要求包括：

- 1) 高强度：需承受 80N 以上的力；
- 2) 低耐磨：连续施加 36000 次循环的恒定拉力（10h）；
- 3) 固定表面摩擦系数低；
- 4) 可以承受小的弯曲半径；
- 5) 易于实现终止；
- 6) 抗蠕变性（可通过闭环策略进行补偿）。

通过对已有腱传动灵巧手案例中腱绳材料的统计，我们发现：

- 1) 腱绳材料整体分为不锈钢、高分子纤维两大类，其中高分子纤维使用更为广泛；
- 2) 高分子纤维中以 Dyneema 和 Spectra®两种纤维为主流，分别为帝斯曼和霍尼韦尔生产的超高分子量聚乙烯纤维材料；
- 3) 早期使用的腱绳材料有特氟龙、芳纶纤维、涤纶等，但因性能方面不如超高分子量聚乙烯纤维而被淘汰；
- 4) ZYLON 纤维在长期作业方面优于超高分子量聚乙烯纤维，在某些恶劣场景、长期高负载运行情况下可以代替超高分子量聚乙烯纤维。

表 7：腱绳驱动灵巧手中腱绳材料的选择

绳 驱方案	时间	牌号	材料	设计初衷	指尖力
Utah-MIT	1982	Dacron and Kevlar	聚酯纤维（涤纶）+芳纶纤维（凯夫拉）	科研	
DLR	1998	Spectra®	高强度聚乙烯纤维	航空（太空操作）	30N（DLR HAND II）
Robonaut 2 Hand	2010	Teflon™ with Vectran™	特氟龙+芳纶纤维	航空（太空操作）	
SDM hand	2010	尼龙涂层不锈钢缆	不锈钢丝	工业	
David's Hand I	2010	钢丝		航空（太空操作）	20N 指尖力
Metamorphic hand	2011	CarlStahl®不锈钢丝	不锈钢丝（直径 0.5mm）	科研	
Dexhand	2012	Dyneema	超高分子量聚乙烯纤维	航空（太空操作）	25N
PISA/IIT	2012	Dyneema	超高分子量聚乙烯纤维	工业	Z 轴抓力 20N，换电机后最高可达 28N
Yale	2013	Spectra®	高强度聚乙烯纤维	科研	10N
David's Hand II	2014	Dyneema	超高分子量聚乙烯纤维	航空（太空操作）	40N 指尖力
Washington Hand	2016	Spectra®	高强度聚乙烯纤维	科研	
Spacehand	2019	ZYLON 纤维	聚对苯撑苯并二噁唑	航空（长期太空操作）	

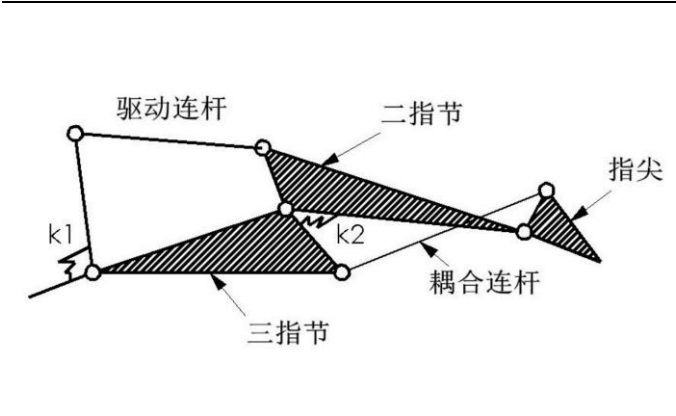
资料来源：《经典五指灵巧手拆机：航空航天篇——人形机器人专题（一）》、《经典五指灵巧手拆机：医疗假肢篇——人形机器人专题（二）》、《经典五指灵巧手拆机：科研及通用篇——人形机器人专题（三）》、光大证券研究所整理

4.2、 连杆传动

连杆传动是指灵巧手采用多个连杆串并联混合的形式传递运动和力矩，传递的刚性比较强，手指具备较大的抓取力，并且结构比较紧凑，但连杆手指受连杆尺寸以及传动误差的影响，不易实现远距离操作，抓取稳定范围较小。

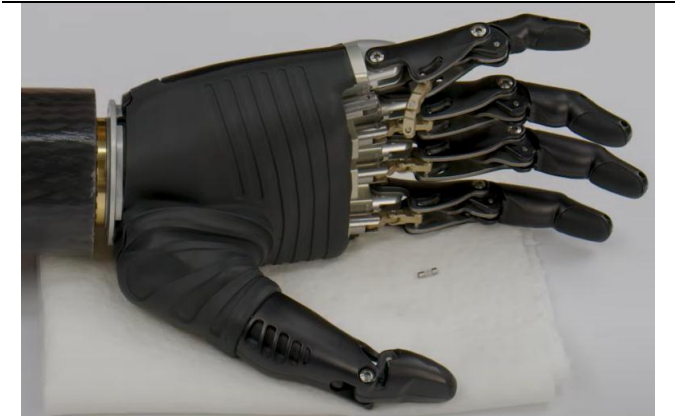
连杆传动中的指尖、二指节、三指节均为不同形状的三角形连杆，驱动连杆以及耦合连杆为直线形式，K1 以及 K2 为复位弹簧，当 K1 处的驱动连杆顺/逆时针转动时，手指做屈曲/前伸运动。

图 36：连杆传动手指示意图



资料来源：严玺《仿人灵巧手的结构设计及其控制研究》

图 37：bebionic 连杆



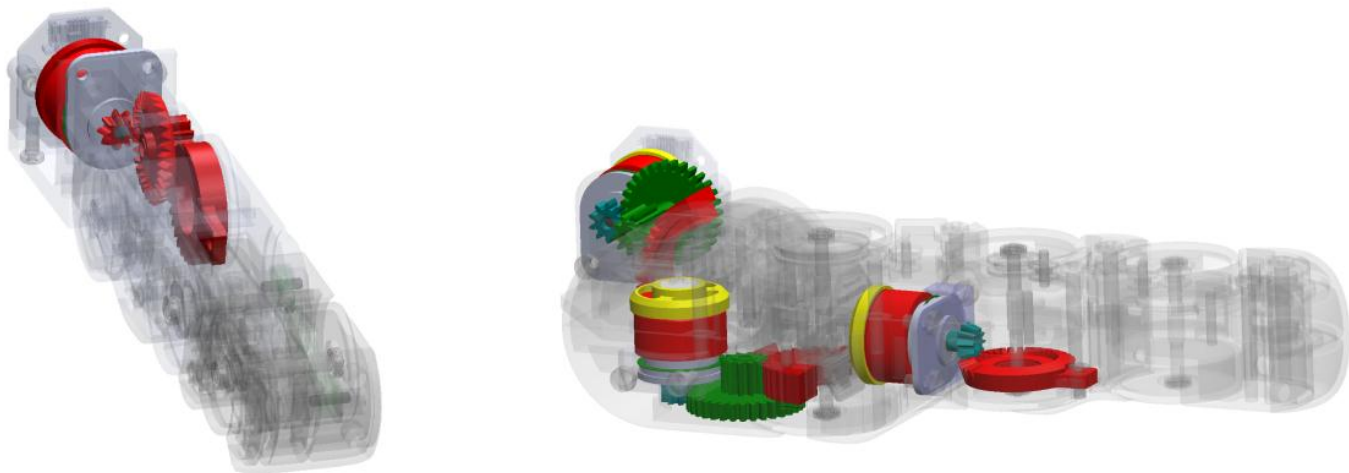
资料来源：Youtube 平台 Ottobock Professionals 官方主页

4.3、 齿轮传动

齿轮传动的优点是能进行精确传动，传递效率高、稳定性好。但也存在结构相对复杂，使灵巧手的惯性增大、自重增大的缺点。且当灵巧手需要的手指较长时，传递所需的相应齿轮数目也会增多，这极大限制了齿轮链传动结构的应用。

通过对以上几种主流灵巧手的驱动及传动方式的介绍可知，这些方法都已有较多使用案例，其展现出的特性也各有不同，而且不同的驱动及传动方式，对灵巧手的性能也有所制约和影响。

图 38：齿轮传动灵巧手



资料来源：Giulio Cerruti 《Design and Control of a Dexterous Anthropomorphic Robotic Hand》

4.4、 特斯拉灵巧手

在灵巧手机械传动系统的设计中，Utah/MIT 手、DLR I 手、NASA 手均采用腱（绳索）传动的方式，其主要原因是受到驱动源、驱动电路板以及减速结构等的体积限制，使得这些部件不能集成到手掌或手指内部而需要放在灵巧手以外的空间。

但是，腱传动在实现空间布置自由的同时，存在不可忽视的缺陷：连接复杂、可靠性差；由于腱的柔性，使得控制精度低、存在迟滞等。相对于腱传动方式，DLR II 手、GIFU II 手等采用齿轮、齿形皮带等直接传动的方法，具有腱传动无法比拟的优点：可靠性高、迟滞小等。同时，直接传动方式对驱动、减速结构与转动关节的空间位置有较高的要求，一般将电机、减速结构等集成在手掌或手指内部时，可以采用直接传动的方式。

因此，在电机、减速结构等体积不能做得更小的情况下，腱传动与直接传动相结合的方法将会保留两者的优点，凸显其独特的优势。

特斯拉 Optimus 产品的灵巧手具有 6 个执行器，操作 5 根手指，其中拇指分配 2 个执行器，其他手指各分配 1 个执行器。手指执行器采用空心杯电机+蜗轮蜗杆传动+腱传动。一方面，特斯拉 Optimus 采用了经典的六电机方案，在电机数量有限的情况下最大程度上实现手指自由度；另一方面，蜗轮蜗杆的不可反驱动特性使得灵巧手可以在抓握完成后实现无功耗保持。

图 39：特斯拉每个灵巧手具有 6 个执行器



资料来源：Tesla AI Day 2022

图 40：蜗轮蜗杆传动原理图



资料来源：金属加工微信公众号

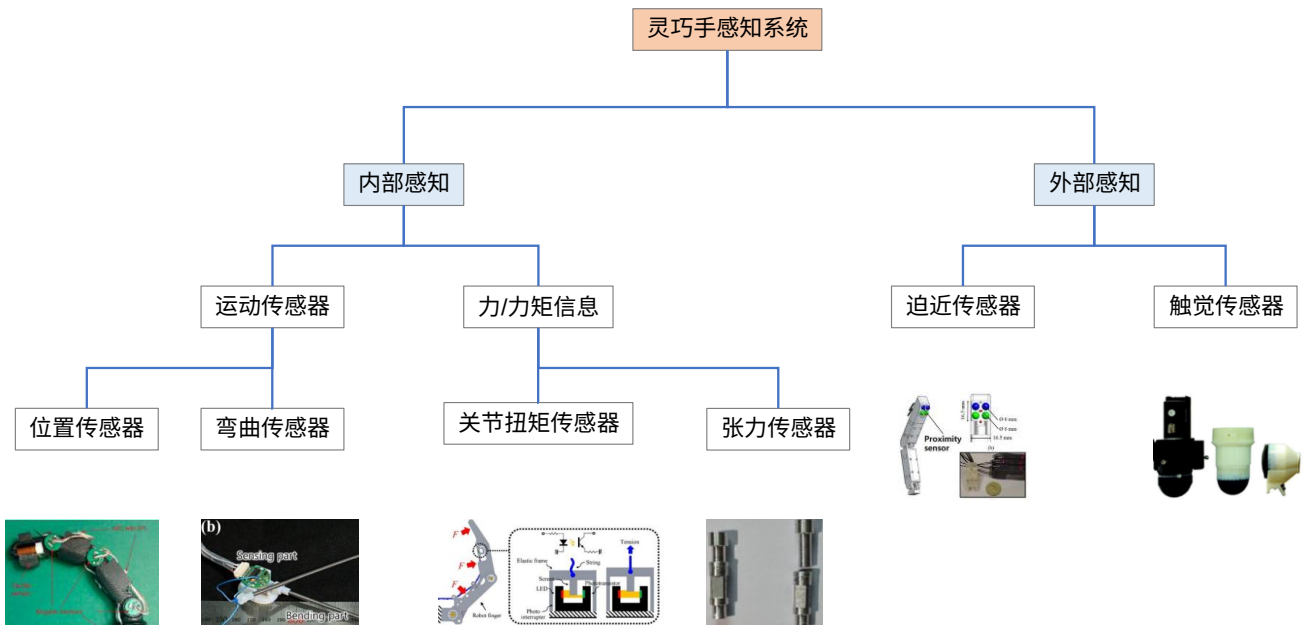
5、传感器

5.1、灵巧手的感知系统

根据传感器在机器人手中的布局和功能，可将传感器分为两类：内在传感器和外在传感器。

内在传感器反馈机器人本体的运动或动态信息，如手关节角度、关节扭矩和肌腱应变，而外在传感器感知外部环境，如压力、力、温度和平滑度。

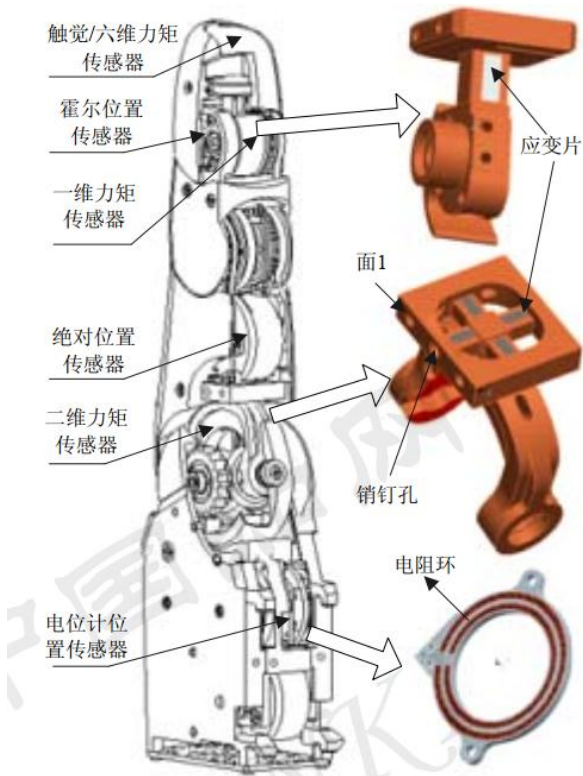
图 41：灵巧手的感知系统



资料来源：Ziwei Xia 《Dexhand - a Space qualified multi-fingered robotic hand》、光大证券研究所整理

以 HIT/DLR Hand II 灵巧手为例，内部感知系统包括霍尔位置传感器、电位计位置传感器、一维/二维力矩传感器，外部感知系统包括触觉传感器、指尖六维力矩传感器。

图 42: HIT/DLR Hand II 灵巧手的传感器系统



资料来源: 樊绍巍《类人型五指灵巧手的设计及抓取规划的研究》

5.2、外部传感器

5.2.1、触觉传感器

对于人手来说, 触觉系统能够提供丰富的信息, 如存在、位置、形状、缺陷、温度和纹理等。人手的灵巧程度取决于其复杂的结构和强大的触觉系统。

作为机器人感知外部环境的方式之一, 触觉传感器在描述物体的几何特征、物理属性以及刻画接触动态过程有着独特的优势。通过对触觉信息的有效分析不仅能够提高机器人对外部环境的感知能力而且对优化人机交互过程以及提高仿生灵巧手精细操作都有着重要的意义。

目前主流的触觉传感器根据其工作原理可以分为压阻式触觉传感器、压电式触觉传感器、电容式触觉传感器、电磁式触觉传感器以及基于光学的触觉传感器等。

压电触觉传感器是基于压电效应原理, 即在外界力的作用下, 压电材料表面因形变会产生电压。它的频率响应好, 测量范围大, 但分辨率不是很理想。压阻式触觉传感器基于压阻效应原理, 即施加外力时会产生自身电阻的变化。它测量范围大, 鲁棒性好, 但是迟滞效应较大。电容式触觉传感器利用电容的变化来测量接触力。其空间分辨率高, 功耗低, 但抗干扰能力差。基于光学原理的触觉传感器靠检测光的参数变化间接感知外界的接触信息, 优点是抗干扰能力强, 具有很高的空间分辨率。

表 8: 不同触觉传感器技术路线特性比较

工作原理	调节参数	优点	缺点
压阻式	电阻值	噪声干扰小、易结构化、频率响应快、空间分辨率高	可重复性差、迟滞、功率消耗高、工艺复杂
压电式	电荷	可靠性高、动态范围大、频率响应高、灵敏度高	空间分辨率差、仅适用动态检测且检测电路复杂

电容式	电容值	灵敏度高、空间分辨率高、动态范围大	存在寄生电容、对噪声敏感、测量电路复杂
光学式	强度、相位、偏振	空间分辨率高、无电磁干扰、响应速度快	对光源和探测器的要求高
电磁式	磁场强度	灵敏度高，体积小	结构设计复杂，分辨率低
电感式	自感强度	动态范围大	体积较大、空间分辨率较低
超声式	超声波	空间分辨率高，不受电磁干扰	空间布线困难，存在滞后和非线性，易受外部超声干扰

资料来源：高帅康《基于多模态触觉感知的机器人物体识别研究》

从功能角度看，触觉传感器的发展经历了三个阶段：

(1) 早期的触觉传感器聚焦于对指尖力的测量（基于压电效应）。虽然可以检测力的方向，但对接触位置的检测不太可靠；

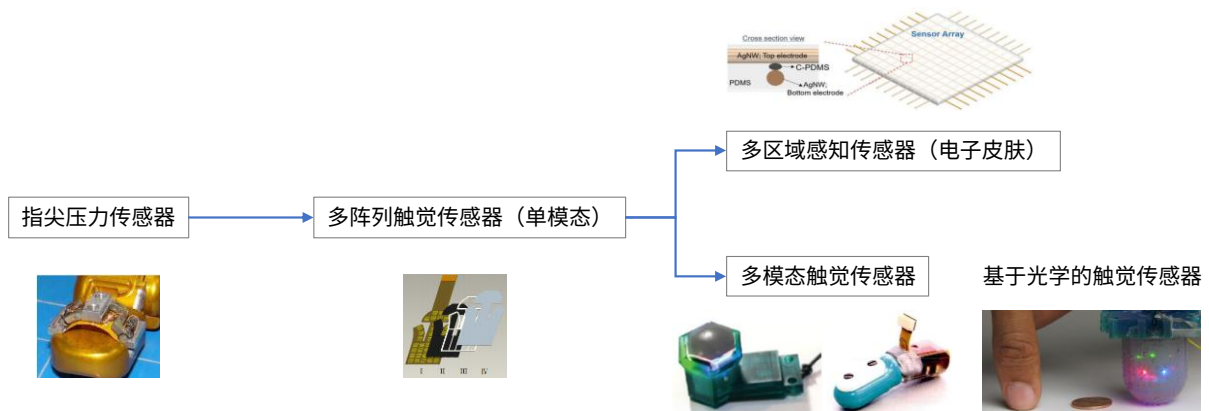
(2) 多阵列传感器为目前多数灵巧手所配备，可以同时感知力与力的位置，但缺点是通常只能感知单模态信息；

(3) 第三阶段有两个发展方向：

发展方向之一是：同时获取多种触觉信息的多模态传感器；

发展方向之二是：多区域感知（如覆盖整个机器人手的电子皮肤，而不是仅限于指尖感知）。

图 43：触觉传感器的发展过程



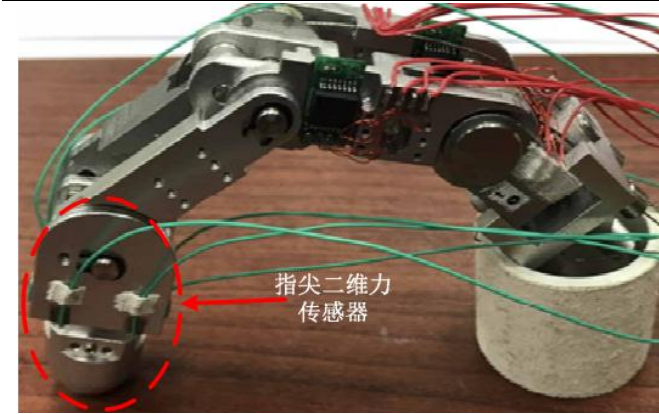
资料来源：Ziwei Xia《Dexhand: a Space qualified multi-fingered robotic hand》、光大证券研究所整理

➤ 指尖力的测量：

早期触觉传感器研究的主要方向是压力和力的测量。这些传感器多基于压电效应，被安装于指尖，用于测量指尖多维力。这类传感器虽然可以检测力的方向，但对于接触位置的检测不太可靠。因此下一代产品的研究更多集中在阵列触觉传感器上。

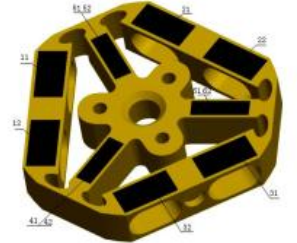
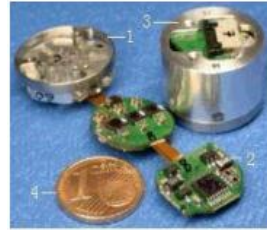
触觉传感器以指尖力的测量为主，使用的传感器包括一维、二维、六维力/力矩传感器。

图 44: CALT-18 仿人灵巧手微型指尖二维力传感器



资料来源: 吕博瀚《空间机器人多自由度灵巧手关键技术研究》

图 45: 指尖六维力/力矩传感器原型及弹性体



资料来源: H. Liu《Multisensory Five-Finger Dexterous Hand: The DLR/HIT Hand II》

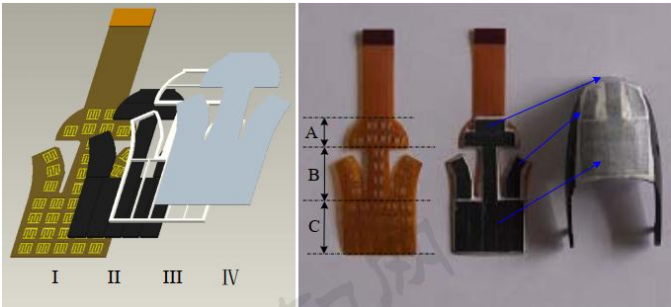
➤ 多阵列触觉传感器:

多阵列触觉传感器的出现,是为了克服第一代指尖力传感器无法检测接触位置的缺陷。

从底层原理上看,多阵列触觉传感器放弃了传统的应变片/弹性体路线,而是使用柔性材料,在指尖处覆盖压阻单元点阵列,从而满足对接触位置的分辨率。

腾讯灵巧手 TRX-Hand: 在指尖、指腹和掌面均覆盖了自研的高灵敏度柔性触觉传感器阵列。

图 46: DLR/HIT Hand II 型五指灵巧手指尖用柔顺性触觉传感器



资料来源: 樊绍巍《类人型五指灵巧手的设计及抓取规划的研究》

图 47: 腾讯 TRX-Hand



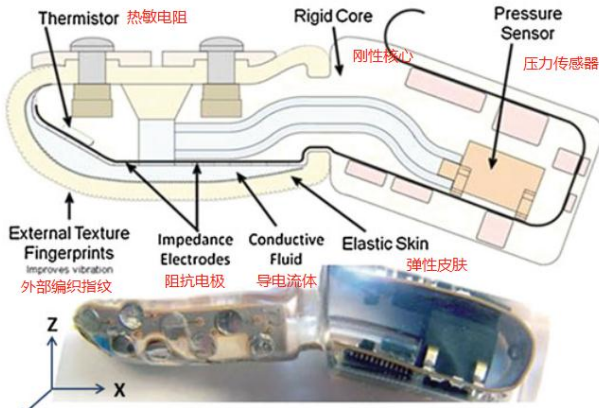
资料来源: 腾讯 RoboticsX 实验室

➤ 多模态传感器

多阵列触觉传感器通常感知单模态信息。然而,当人类抓住一个物体时,它的重量、大小、温度、质地等都会被同时感知。因此,对于机器人手来说,同时获取多模态触觉信息也很重要。

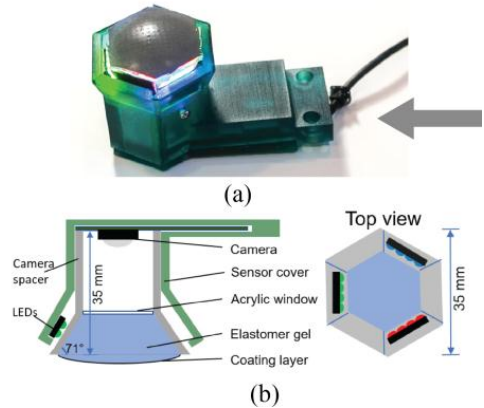
光学的触觉传感器是一类较为经典的多模态传感器。研究人员可以从光学触觉传感器获得更多有用的信息,包括但不限于接触位置、温度、粗糙度、刚度、纹理和形状。

图 48: Biotac 多模态传感器



资料来源: B. Siciliano 《The Human Hand as an Inspiration for Robot Hand Development》

图 49: GelSight 多模态传感器



资料来源: Wenzhen Yuan 《GelSight: High-Resolution Robot Tactile Sensors for Estimating Geometry and Force》

物体软硬属性的辨识及稳定抓握运动控制是优化仿生灵巧手人机交互能力的一个重要方向。相对于触觉传感器，视觉传感器的发展相对成熟，因此很多的辨识算法都是基于视觉信息进行分析。

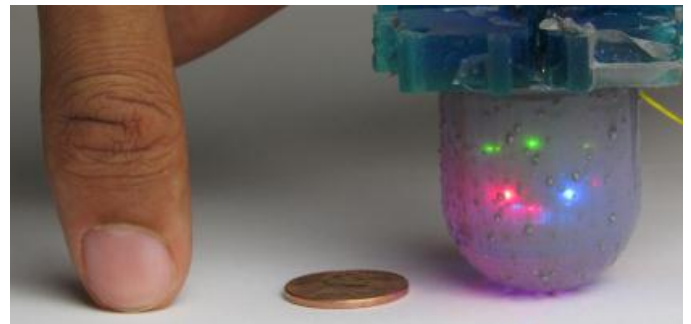
如智元机器人的“远征 A1”机器人的“Skillhand 灵巧手”采用了基于视觉的指尖传感器。但目前视觉依然无法很好的解决复杂背景等外部环境因素带来的影响，而基于触觉信息则可以避免这些问题，同时还能够感知视觉信息无法感知的一些信息，如物体的软硬程度或者表面纹理等。

图 50: 智元机器人 SkillHand



资料来源: 智元机器人, 光大证券研究所

图 51: OmniTact 视觉触觉传感器

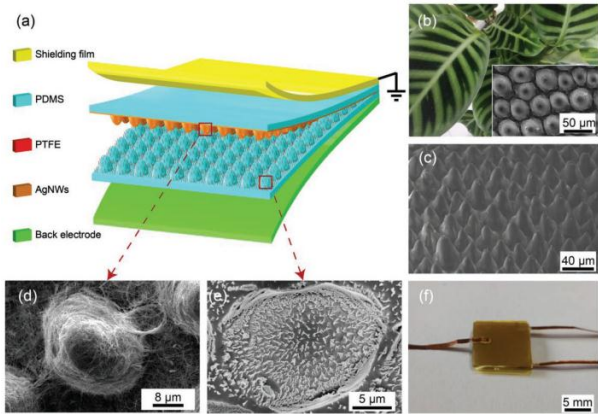


资料来源: Akhil Padmanabha 《OmniTact: A Multi-Directional High-Resolution Touch Sensor》

➤ 多区域感知传感器

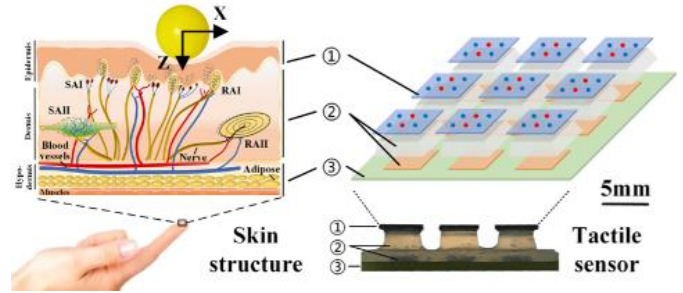
多区域感知是触觉感知的另一个研究方向。研究人员专注于可以覆盖整个机器人手的电子皮肤，以检测触觉感知，而不是仅限于指尖感知。

图 52：仿生摩擦纳米发电机电子皮肤



资料来源：Guo Yao 《Bioinspired triboelectric nanogenerators as self-powered electronic skin for robotic tactile sensing》

图 53：自解耦软磁皮肤



资料来源：Youcan Yan 《Soft magnetic skin for superresolution tactile sensing with force self-decoupling》

5.2.2、接近传感器

接近传感器用于为机器人提供检测表面和物体的能力。在抓取或操纵物体之前，感知物体与机器人手之间的相对位置。借助接近传感器，机械手可以在操作之前估计物体的位置、形状和其他物理信息。对于灵巧手来说，提前了解这些信息有助于提升操作的成功率。

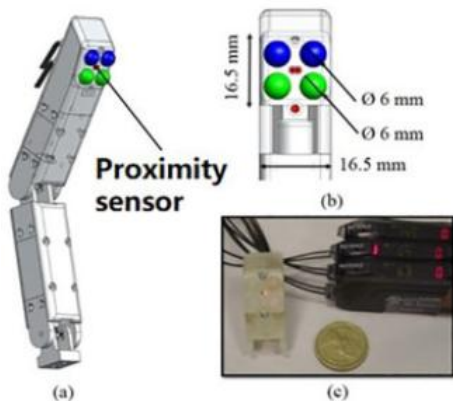
腾讯灵巧手 TRX-Hand：

掌心处安装有微型激光雷达和接近传感器，同时每一个关节均集成了角度传感器，保证灵巧手在抓取和操作过程中能准确地感知自身与物体状态信息。

Jelizaveta Konstantinova 提出，接近传感器的使用有助于在执行动作时在线规划和调整抓取策略，尤其是面对未定义物体。其设计的接近传感器由一对光纤组成，其终端位于指尖表面的中间。

该传感器的传感原理与光强调制相同，以物体本身作为反射表面来测量与物体的距离。通常情况下，即使是较暗的材料，也不能完全吸收光线。因此，由发送光纤发射的光束的一部分被反射，然后被接收器检测到。通过这种方式，可以检测到位置接近的物体，并确定物体的距离。

图 54：接近传感器



资料来源：Jelizaveta Konstantinova 《Force and Proximity Fingertip Sensor to Enhance Grasping Perception》

图 55：腾讯灵巧手 TRX-Hand 掌心处安装接近传感器



资料来源：腾讯 RoboticsX 实验室

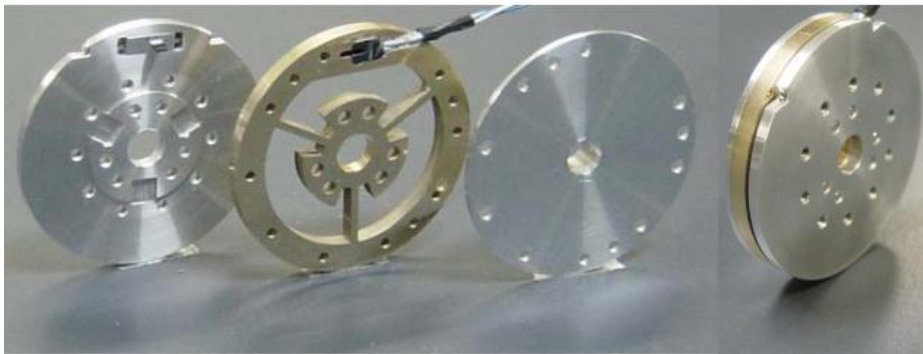
5.3、内部传感器

5.3.1、力/力矩传感器

➤ 关节扭矩传感器

关节扭矩属于内部传感器的一种，用于提供灵巧手关节处收到的实时扭矩信息，这对于灵巧手稳定、灵活的抓取和操作来说是必需的。

图 56：具有轮辐形挠曲件的光学扭矩传感器



资料来源：Dzmitry Tsetserukou 《Optical torque sensors for implementation of local impedance control of the arm of humanoid robot》

在 DLR Hand II 中，每个手指配备 3 个使用了基于应变计的关节力矩传感器。

表 9：DLR Hand II 每个手指中的传感器配置

传感器类型	数量/手指	参数
关节位置	3	110°(10 bit)/ 120°(10 bit)
关节力矩	3	2.4;4.8N(11 bit)
力/力矩	1	10-40N;150 Nmm(11 bit)
电机速度	3	
温度	6	0-125°C(8 bit)

资料来源：德国宇航中心官网

➤ 腱绳张力传感器

肌腱只能提供一个方向的力，并且肌腱路径中的摩擦损失很难建立精确的数学模型。因此研究人员通常使用张力传感器来测量肌腱张力。

常用腱绳张力测量方式包括串联弹性体、包覆弹性体、偏置引导轮等。

表 10：常用腱绳张力测量方式

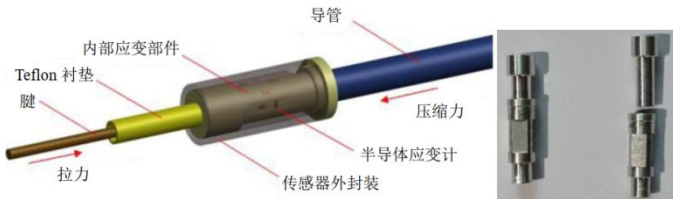
名称	机构简图	特点
串联弹性体		测量精度高、传动系统动态性能差、结构体积大、电路易疲劳
包覆弹性体		结构尺寸小、摩擦严重
偏置引导轮		结构尺寸较小、摩擦较小、传动系统动态性能好

资料来源：孙成远《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》

腱张力传感器的设计是实现手指力反馈控制的关键，Robonaut 2 hand 使用弹性体构建腱张力传感器，通过测量导管对传感器的作用力，得到腱绳张力。

博洛尼亚大学设计的 UBH-IV hand 使用了基于窄视角光电元件的特性来测量由腱张力引起的柔顺框架的非常小的变形，从而得到腱绳张力。

图 57：腱张力传感器结构与弹性体



资料来源：韩如雪《腱驱动空间多指灵巧手感知与控制关键技术研究》

图 58：微型光学腱张力传感器



资料来源：G. Palli《Miniaturized Optical-based Force Sensors for Tendon-driven Robots》

5.3.2、动作传感器

➢ 位置传感器

关节角位置传感器是实现灵巧手位置闭环控制的关键。关节位置传感器布置在驱动器末端，通过检测驱动输出端的角度位置，间接获得关节角度位置。常用的角度位置传感器有电位计式传感器、编码器和磁敏传感器等。

表 11：常用位置传感器及其特点

传感器类型	特点
电位计式传感器	结构简单、成本低、尺寸较大、寿命短
编码器	精度高、灵敏度高、尺寸大、环境要求苛刻
磁敏传感器	灵敏度高、响应快、微型化、功耗低

资料来源：孙成远《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》

The Robonaut2 Hand 采用磁钢和霍尔传感器的设计方案，传感器核心部分是霍尔敏感元件，当手指关节运动时，磁钢相对于霍尔传感器发生旋转运动，霍尔传感器周围的磁场变化导致其输出信号的变化，通过相关标定处理，即可得到精确的关节角度。

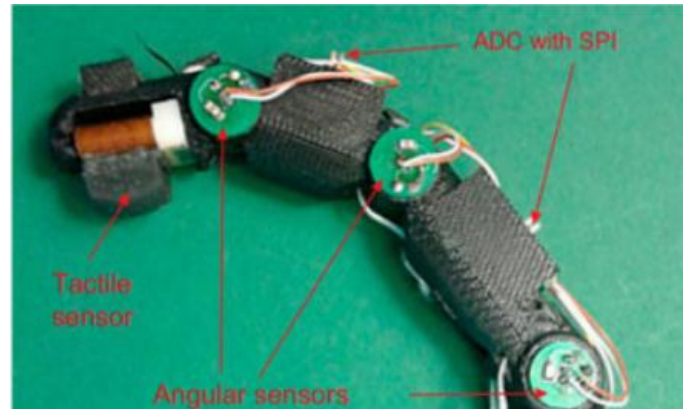
博洛尼亚大学设计的 UBH-IV hand 使用了基于光学测量的关节角度位置传感器。其主要原理为，关节角度变化导致 LED 发出的光被部分遮挡，通过测量通过光功率的大小反推出关节角度变化量。

图 59：关节角度位置传感器



资料来源：韩如雪《腱驱动空间多指灵巧手感知与控制关键技术研究》

图 60：关节角度位置传感器



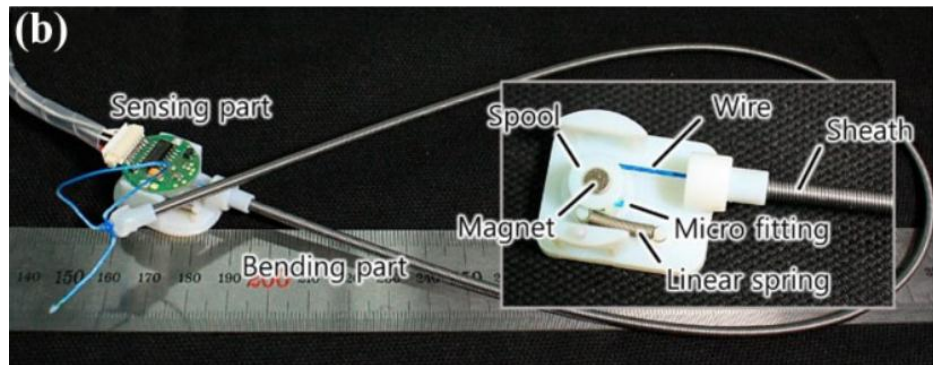
资料来源：Ziwei Xia《A review on sensory perception for dexterous robotic manipulation》

➤ 弯曲传感器

对于腱驱动的机械手来说，腱绳的位移总是随着套管形状的变化而变化，这种位置误差可能导致控制精度下降。因此，仅利用腱绳张力信息进行控制可能会产生误差。

弯曲传感器具有高分辨率和大弯曲感应范围。在使用弯曲传感器后，无需直接测量输出张力，即可精确控制腱绳的张力。

图 61：用于测量肌腱曲率的弯曲传感器



资料来源：Ziwei Xia《A review on sensory perception for dexterous robotic manipulation》

6、投资建议

从应用领域来看，目前灵巧手实现成熟应用的领域主要有：航空航天、医疗假肢、工业及科研领域。

航空航天领域对性能的要求较高，对成本不敏感，如美国宇航中心（NASA）的 Robonaut Hand、德国宇航中心（DLR）的 DLR Hand、Dexhand；医疗假肢是目前少有的已实现商业化批量制造的领域，如 ottobock 的 Bebionic Hand、Michelangelo Hand；工业领域灵巧手目前由少数协作机器人夹爪企业所引领，如 SCHUNK 公司的 SCHUNK SVH Hand、Festo 公司的 Festo ExoHand；而科研领域主要由全球知名高校主导，灵巧手的设计思路较为开阔。

从灵巧手设计层面来看，主要有以下几个层面：

- 1) 灵活度设计。灵活度设计是一个取舍与平衡的过程，原因在于更多的灵活度意味着更强的功能性，但背后需要更多的驱动器与更复杂的结构，必然带来鲁棒性的下降。对于功能性的衡量，通常采用 Cutkosky 抓取分类法。多数高灵活度灵巧手需要面临的一个任务是单关节双自由度的实现，目前具有代表性的传动形式有三种：（1）双轴正交结构；（2）球/孔结构；（3）差动齿轮组；
- 2) 动力源。包括选择动力源的种类、位置及数量，以及适配的减速器。目前电机驱动已成为主流驱动方式。电机类型包括直流无刷电机、无框力矩电机、空心杯有刷电机、空心杯无刷电机，减速器类型包括谐波减速器和行星减速器；
- 3) 传动结构。传动系统的设计不仅决定了灵巧手的机械结构，而且直接影响到灵巧手的抓取稳定性和灵活性。腱传动对于空间狭小、传动精密的灵巧手空间设计较为友好，关键在于腱绳材料的选择；连杆、齿轮等传动方式更为直接，但对空间、设计的要求较高；
- 4) 传感系统。根据传感器在机器人手中的布局和功能，可将传感器分为两类：内在传感器和外在传感器。内在传感器反馈机器人本体的运动或动态信息，如手关节角度、关节扭矩和肌腱应变，而外在传感器感知外部环境，如压力、力、温度和平滑度。

综上，我们认为，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。

五指灵巧手的投资机会主要体现在：

- 1) 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。这一方面决定了其在人形机器人体系中的重要地位，另一方面预示着五指灵巧手与人形机器人功能对应，在硬件层面可选的方案数量将大于其他部位；
- 2) 五指灵巧手可以不依附于人形机器人而单独存在，如机械臂、远程操作手套、假肢等，这决定了五指灵巧手的远期市场容量的进一步扩大；
- 3) 五指灵巧手作为一个功能单元，相较人形机器人其他部位，其自身零部件数量更多，硬件结构更为复杂，需要集合整手的运动控制、末端传感、人机交互等，最终可能造成五指灵巧手环节的竞争更加多层次，也容易演化成为单独环节。

表 12：灵巧手相关上市公司业务进展

	公司	整体实力	相关进展
空心杯电机	鸣志电器	公司是运动控制领域的综合制造商，专注于运动控制、智能 LED 照明控制和工业设备管理的关键部件制造。	公司的空心杯无齿槽电机基于公司在控制电机领域的技术储备和产品开发平台打造，在工控自动化，移动机器人，高端医疗仪器以及实验室装备，智能汽车电子及自动驾驶激光雷达等新兴高附加值应用领域布局。公司的步进电机、无刷电机、空心杯电机、无刷无齿槽电机、驱动与控制系统、精密直线传动系统和减速机产品在移动机器人的移动控制模块、关节模组、手指模组等主要运动功能模块中广泛适用。
	鼎智科技	公司是以微特电机为主要构成的定制化精密运动控制解决方案提供商，主要从事线性执行器、混合式步进电机、直流电机、音圈电机及其组件等产品的设计、研发、生产和销售。	公司的滑动丝杆、行星滚柱丝杆、空心杯电机、精密齿轮箱等产品可用于人形机器人。目前公司与多个机器人厂家有序接洽中，样品测试阶段进展顺利。
	伟创电气	公司专注于电气传动和工业控制领域，主营业务为变频器、伺服及控制系统等产品的研发、生产及销售。	公司切入机器人产业链，目前主要是以机器人配套为主，主要面向移动类、协作类、服务类的机器人领域，提供低压伺服、空心杯电机、特种无框力矩电机、轴关节、伺服一体轮等核心部件。
	拓邦股份	公司主营业务为智能控制系统解决方案的研发、生产和销售，即以电控、电机、电池、电源、物联网平台的“四电一网”技术为核心，面向家电、工具、新能源、工业、智能解决方案等五大行业提供各种定制化解决方案。	公司将加大人形机器人领域的战略洞察，聚焦资源，利用积累多年的空心杯及伺服技术，紧跟头部客户的技术动态，深入理解产品，从部件能力提升到模组再到整体解决方案能力。
无框力矩电机	步科股份	公司主要从事工业自动化控制核心部件与数字化工厂软硬件的研发、生产、销售以及相关技术服务，并为客户提供自动化控制、数字化工厂解决方案。	公司无框力矩电机产品已经实现工业平台化的生产和销售，2023 年前三季度出货约 1 万套，产品销售具有一定的规模，公司在市场的验证过程中积累了丰富的经验。
直流无刷电机	德昌股份	公司主要从事电机相关的家用电器产品及汽车零部件产品的设计、制造业务。	2017 年，公司创办“德昌科技”，正式切入汽车零部件领域，从事汽车 EPS 无刷电机、制动电机的研发生产，致力于成为具有国际竞争力的国内 EPS 电机行业领导企业。
行星减速器	中大力德	公司是一家集电机驱动、微特电机、精密减速器的研发、制造、销售、服务于一体的机电自动化企业，	公司从 2008 年开始研发减速器，目前已经批量销售行星减速器、RV 减速器、谐波减速器。
	双环传动	公司专注于齿轮传动产品制造，目前的主要产品为乘用车齿轮、商用车齿轮、工程机械齿轮、减速器及其他产品。	控股子公司环动科技积极应对新的市场机遇和挑战，在机器人精密减速机业务持续发力，紧密协同机器人核心战略客户，加速拓展机器人减速机谱系。在国家重大攻关项目及省重点研发计划项目支持下，不断补齐重载工业机器人所需 RV 减速机产品，快速迭代优化产品性能。谐波减速器业务已实现多型号稳定供货，产能得以释放并快速提升。
谐波减速器	绿的谐波	公司是一家专业从事精密传动装置研发、设计、生产和销售的高新技术企业，产品包括谐波减速器及精密零部件、机电一体化执行器、微型电机伺服装置、智能自动化装备等。	公司通过自主创新、自主研发，发展完善了新一代谐波啮合“P 齿形”设计理论体系、新一代三次谐波技术、机电耦合技术、轴承优化、独特材料改性技术、齿廓修形优化技术、协同高效润滑技术及超精密制造加工工艺等核心技术。
滚珠丝杠	五洲新春	公司主要生产轴承及汽车配件等高端精密零部件。为德国舍弗勒和瑞典斯凯孚两家轴承制造商提供轴承套圈。	公司研发的各类丝杠类产品主要面向新能源汽车产业和机器人产业。公司 T 型螺纹丝杠开发完成并向客户送样，行星滚柱丝杠零部件向下游重要客户多次送样，公司的短期目标是切入主流客户产业链。
	贝斯特	公司业务分为三大板块：一、各类精密零部件、智能装备及工装夹具等原有业务；二、新能源汽车零部件业务；三、工业母机领域，全面布局直线滚动功能部件，产品包括：高精度滚珠/滚柱丝杠副、高精度滚动导轨副等。	公司通过设立全资子公司“无锡宇华精机有限公司”全面布局直线滚动功能部件（产品包括：高精度滚珠/滚柱丝杠副、高精度滚动导轨副等），公司生产的滚珠丝杠副、直线导轨副等产品首台套已实现成功下线，部分产品已在送样验证过程中。
	恒立液压	经过 30 多年的专注与创新，从液压油缸制造发展成为集液压元件、精密铸件、液压系统等产业于一体的大型综合性企业，主要市场涵盖 20 多个国家和地区，产品遍及工程机械、农业机械、工业工程、海洋工程、能源科技、隧道工程等众多行业。	公司拟投资 15 亿元建设线性驱动器项目，预计 2024 年第二季度投产。项目达产后将形成年产 104,000 根标准滚珠丝杠电动缸、4,500 根重载滚珠丝杠电动缸、750 根行星滚柱丝杠电动缸、100,000 米标准滚珠丝杠和 100,000 米重载滚珠丝杠的生产能力。
腱绳材料	大业股份	公司主营业务为胎圈钢丝、钢帘线以及胶管钢丝的研发、生产和销售，产品主要应用于乘用车轮胎、载重轮胎、工程轮胎以及航空轮胎等各种轮胎制品。	公司建立了柔性化生产体系，根据不同客户的技术参数要求，在同一条生产线上通过设备调整来完成不同规格产品的批量生产任务，既满足客户多样化的定制需求。
	同益中	公司为专业从事超高分子量聚乙烯纤维及其复合材料研发、生产和销售的国家高新技术企业，凭借二十余年在行业的深耕和技术积淀，成为行业内少数可以同时实现超高分子量聚乙烯纤维及其复合材料规模化生产的企业，拥有超高分子量聚乙烯纤维行业全产业链布局。	可以规模化生产从 5D 到 6,000D 不同规格的超高分子量聚乙烯纤维，以及防弹专用超高强度纤维、高耐磨特性的绳缆专用纤维、有色纤维、耐割专用纤维等特色产品。
	恒辉安防	公司对战略新材料产业超高分子量聚乙烯纤维及其复合材料持续投入，在新材料产业化及在其他领域的应用方面不	产品 BT30 以其密度低、耐紫外线、柔软、高强耐磨、抗酸碱腐蚀等性能，可广泛应用于安全防护服、高端家纺、工业绳缆等。

		断实现突破，已实现超高分子量聚乙烯纤维及其复合纤维的量产及销售。	
力/力矩传感器	柯力传感	公司是智能传感器行业领军企业，主要研制和生产各类型物理量传感器，以及不同工业物联网系统及多场景应用解决方案。	公司在目前已有的微型、扭矩、多维力等高端力学传感器品类基础上，加快自主研发，积极寻求与各大机器人厂商的商务合作。根据客户的不同需求，公司已经进行了多款扭矩传感器、多维力传感器等产品的送样和试制。
	东华测试	公司是国内领先的结构力学性能研究和电化学工作站整体解决方案提供商，30 余年来，公司始终专注于智能化测控系统的研发、生产和销售。	公司传感器包括加速度传感器、速度传感器、位移传感器、应变传感器、转速传感器、压力传感器及各类缓变量传感器等。
	八方股份	公司主要从事电踏车（即电动助力车）电机及配套电气系统的研发、生产、销售和技术服务，公司产品主要应用于电踏车。	公司拥有较强的设计研发能力，是全球少数掌握力矩传感器核心技术的企业之一，产品技术指标达到国际先进水平。
动作传感器	华依科技	公司专注于汽车动力总成智能测试领域，致力于提供业界领先的汽车动力总成智能测试设备及测试服务。	公司 IMU 产品精度保持行业领先，从而实现应用层产品的率先落地。目前公司 IMU 产品已达到量产条件。公司获得奇瑞汽车、智己汽车定点，标志着公司惯导产品正在加速落地。
	芯动联科	公司主营业务为高性能硅基 MEMS 惯性传感器的研发、测试与销售。	公司 MEMS 惯性传感器目前已应用于无人系统、机器人、自动驾驶、商业航天、船舶、石油勘探、高速铁路、地质勘探、应急通信、灾情预警等诸多领域。
触觉传感器	汉威科技	公司以传感器为核心，将传感技术、智能仪表技术、数据采集技术、地理信息和云计算等物联网技术紧密结合，形成了“传感器+监测终端+数据采集+空间信息技术+云应用+AI”的系统解决方案，业务应用覆盖传感器、智能仪表、物联网综合解决方案、公用事业及居家智能与健康等行业领域。	控股子公司苏州能斯达积极拓展柔性微纳传感器的应用场景，不断优化“柔性感知技术+采集系统+人机交互”的解决方案，与小米科技、九号科技、深圳科易机器人等积极开展业务合作。
	奥迪威	公司是专业从事智能传感器和执行器及相关应用的研究、设计、生产和销售的高新技术企业。主要产品包括测距传感器、流量传感器、压触传感器及执行器、雾化换能器及模组、报警发声器等，广泛应用于汽车电子、智能仪表、智能家居、安防和消费电子等领域。	公司陆续推出适应于各种应用场景下的技术创新，如：智能驾驶方向 AK II 传感器、机器人防撞与触控感应、医疗成像传感器模组等。

资料来源：各公司公告、光大证券研究所整理

图 62：灵巧手设计框架



资料来源：光大证券研究所绘制

建议关注：

- 1) 动力源。空心杯电机领域的鸣志电器、鼎智科技、伟创电气、拓邦股份；直流无刷电机领域的德昌股份；无框力矩电机领域的步科股份；减速器环节：行星减速器建议关注中大力德、双环传动；谐波减速器建议关注绿的谐波；丝杠建议关注贝斯特、恒立液压；
- 2) 传动结构。主要集中在腱绳材料，建议关注钢丝方案的大业股份，潜在超高分子量聚乙烯纤维材料受益标的同益中、恒辉安防；
- 3) 传感系统。（1）六维力传感器：柯力传感、东华测试、八方股份；（2）触觉传感器：汉威科技、奥迪威；（3）身体平衡（IMU）：华依科技、芯动联科。

7、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。

行业及公司评级体系

评级	说明
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。	

分析、估值方法的局限性说明

本报告所包含的分析基于各种假设，不同假设可能导致分析结果出现重大不同。本报告采用的各种估值方法及模型均有其局限性，估值结果不保证所涉及证券能够在该价格交易。

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推荐意见或观点有直接或间接的联系。

法律主体声明

本报告由光大证券股份有限公司制作，光大证券股份有限公司具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格，负责本报告在中华人民共和国境内（仅为本报告目的，不包括港澳台）的分销。本报告署名分析师所持中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格编号已披露在报告首页。

中国光大证券国际有限公司和 Everbright Securities(UK) Company Limited 是光大证券股份有限公司的关联机构。

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本报告中所载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。

光大证券股份有限公司版权所有。保留一切权利。

光大证券研究所

上海

静安区南京西路 1266 号
恒隆广场 1 期办公楼 48 层

北京

西城区武定侯街 2 号
泰康国际大厦 7 层

深圳

福田区深南大道 6011 号
NEO 绿景纪元大厦 A 座 17 楼

光大证券股份有限公司关联机构

香港

中国光大证券国际有限公司
香港铜锣湾希慎道 33 号利园一期 28 楼

英国

Everbright Securities(UK) Company Limited
6th Floor, 9 Appold Street, London, United Kingdom, EC2A 2AP