

机器人行业研究

买入（维持评级）

行业深度研究

证券研究报告

机械组

分析师：满在朋（执业 S1130522030002） 联系人：房灵聪

manzaipeng@gjzq.com.cn

fanglingcong@gjzq.com.cn

机器人灵巧手的发展历程及未来发展方向探讨

投资逻辑：

本篇报告聚焦机器人灵巧手，主要探讨灵巧手的演变历程、分类方式以及未来有可能的发展方向。

■ 什么是机器人灵巧手？

- 综合机器人学和运动学理论，我们认为灵巧手是指指数不少于3，自由度不低于9的末端执行器。
- 从技术角度看，自20世纪70年代以来，多指灵巧手的研究经历了三个阶段：（1）20世纪70年代——20世纪90年代，灵巧手开始搭载电机、腱绳等驱动器或传动系统部件，可以完成基本的抓持等动作。（2）20世纪90年代-2010年，受益嵌入式硬件的发展，灵巧手具备更高的系统集成度和更加丰富的感知能力。（3）2010年至今，通过欠驱动等结构设计来简化系统、提高鲁棒性是近十年灵巧手设计的重要方向。

■ 机器人灵巧手有哪些类型？

- 根据驱动器位置分为驱动器内置、外置和混合置灵巧手，内置微型驱动器有望成发展方向。（1）驱动器外置具有外观设计拟人化、驱动器选型自由、可以采用更大的驱动电机等优势，但存在驱动器与手本体距离远，须借助腱绳连接、可维护性差等缺点。（2）驱动器内置利于传感器直接测量、利于更换维护，但通信和控制难度大，灵巧手尺寸偏大，关节灵活度下降。（3）驱动器混合置可以提高手指输出力矩、控制体积大小，但仍需借助腱绳传动。因此，在灵巧手内安装微型驱动器，既能保证传感器直接测量，又能减少灵巧手体积，有望成为未来发展方向。
- 根据驱动器类型分为电机驱动、气压驱动、液压驱动和形状记忆合金驱动，电机驱动是主流。（1）电机驱动具有标准化、稳定可靠、精度高、响应快、驱控一体等优势，是灵巧手主要驱动方式，缺点在于质量体积大、成本高。（2）气压/液压驱动灵巧手具有输出功率密度大、易于实现远距离控制以及输出力大等优点，但由于气压/液压的控制相对较难导致灵巧手运动过程不平稳，无法进行手指位置的精确控制。（3）形状记忆合金具有驱动速度快、负载能力强等优势，但存在疲劳和寿命问题。
- 根据传动方式分为腱传动、连杆传动、齿轮/蜗轮蜗杆传动。（1）腱传动对手指关节远距离驱动，可以减小手指的尺寸，具有结构紧凑、研制灵活等优势，缺点在于控制精度不高、抓取力不大，腱绳易磨损。（2）连杆传动易于实现强力抓取、迟滞性较低，传动精确，但传动机构复杂，对零部件的制造精度要求高且拟人性不足。（3）齿轮/蜗轮蜗杆传动较为精密、传递效率高、稳定性好，但存在结构复杂，使灵巧手的惯性增大、自重增大的缺点。

■ 灵巧手未来有哪些发展方向？

- 方向1：内置微型驱动器：可以避免因腱绳连接带来的设计难度大的缺点，同时利于传感器直接测量，方便维修。
- 方向2：多感知能力融合：利于提高灵巧手精细抓取能力和智能化水平，是未来灵巧手发展的另一重要方向。
- 方向3：多自由度：自由度是灵巧手灵巧性的决定因素，提升自由度是未来灵巧手的又一发展方向。

投资建议

机器人灵巧手核心零部件包括伺服电机、传感器、减速器、滚珠丝杠等。考虑当前灵巧手零部件市场空间大，且随着人形机器人产业链发展成长前景较好，建议重点关注：空心杯电机领域的鸣志电器、拓邦股份、江苏雷利；传感器领域的柯力传感、汉威科技；减速器领域的绿的谐波、双环传动；滚珠丝杠领域的秦川机床、恒立液压。

风险提示

人形机器人发展不及预期，国产替代进展不及预期，行业竞争加剧。

内容目录

1. 什么是机器人灵巧手？	4
1.1 灵巧手是指数 ≥ 3 ，自由度 ≥ 9 的末端执行器	4
1.2 机器人灵巧手的前世今生	4
2. 机器人灵巧手有哪些类型？	6
2.1 根据灵巧手驱动器位置划分	7
2.2 根据灵巧手驱动器类型划分	9
2.3 根据灵巧手传动方式划分	12
3. 灵巧手未来有哪些发展方向？	15
3.1 方向 1：内置微型驱动器	15
3.2 方向 2：多感知功能融合	16
3.3 方向 3：多自由度	17
4. 投资建议	18
5. 风险提示	18

图表目录

图表 1：灵巧手是特殊的末端执行器	4
图表 2：日本 TWENDY-ONE 灵巧手拥有 4 指、13 个自由度	4
图表 3：机器人两指夹持器	4
图表 4：多指抓持手分类	5
图表 5：初始阶段的多指灵巧手	5
图表 6：第二阶段系统集成度更高、感知能力更加丰富的多指灵巧手	6
图表 7：欠驱动灵巧手代表产品	6
图表 8：机器人多指灵巧手分类	7
图表 9：DARPA Extrinsic 及其驱动模块 Cobot	7
图表 10：Robonaut 2 灵巧手结构图	7
图表 11：Dexhand 灵巧手	8
图表 12：DLR/HIT-II 灵巧手及其关节传动结构	8
图表 13：DLR/HIT II 灵巧手手指结构	8
图表 14：意大利 iCub 机器人及其灵巧手	9
图表 15：韩国 RoboRay 机器人及其灵巧手	9
图表 16：Stanford/JPL Hand 结构图	9
图表 17：德国 DLR-I Hand 示意图	10

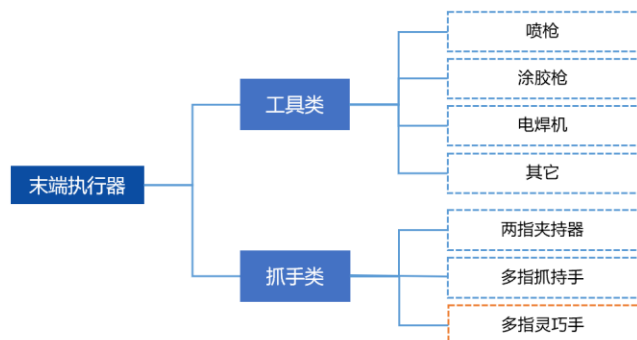
图表 18: 德国 Festo 公司研制的气动仿生灵巧手.....	10
图表 19: 上海交大联合 MIT 开发的气压驱动灵巧手.....	10
图表 20: Stefan Schulz 等人研制的微液压驱动的仿生灵巧手.....	11
图表 21: 日本 Hitachi 灵巧手.....	11
图表 22: 中国计量大学基于 SMA 驱动的四指灵巧手.....	11
图表 23: 电机驱动综合性能相对更好.....	11
图表 24: 特斯拉 Optimus 等机器人灵巧手采用电机驱动.....	12
图表 25: 腱传动原理.....	12
图表 26: Utah/MIT 灵巧手.....	13
图表 27: CEA dexterous 灵巧手.....	13
图表 28: Shadow Hand 仿生灵巧手.....	13
图表 29: 连杆传动手指.....	14
图表 30: 连杆传动的灵巧手结构透视图.....	14
图表 31: KIST Hand 灵巧手.....	14
图表 32: Panipat Wattanasiri 等人研制的灵巧手.....	14
图表 33: 齿轮传动手指.....	15
图表 34: HIT/DLR-I 灵巧手.....	15
图表 35: BH-985 灵巧手.....	15
图表 36: 因时机器人灵巧手内部结构.....	16
图表 37: 因时机器人微型伺服电缸.....	16
图表 38: 因时机器人灵巧手.....	16
图表 39: 机器人传感器分类.....	16
图表 40: 腾讯 TRX-Hand 指尖触觉传感器自动化标定.....	17
图表 41: 腾讯 TRX-Hand 灵巧手.....	17
图表 42: 人手有 21 个自由度.....	17
图表 43: Shadow 灵巧手.....	18
图表 44: Shadow 手指结构图.....	18
图表 45: 重点公司估值表.....	18

1.什么是机器人灵巧手？

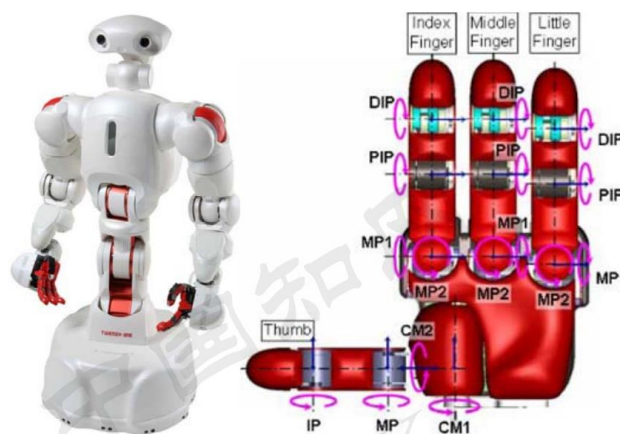
1.1 灵巧手是指数 ≥ 3 ，自由度 ≥ 9 的末端执行器

灵巧手是机器人操作和动作执行的末端工具，在机器人学领域属于末端执行器的范畴。从运动学的观点看，灵巧手需满足两个条件：指关节运动时能使物体产生任意运动、指关节固定时能完全限制物体的运动，按照运动学理论，满足上述条件至少要3个手指和9个自由度。因此，我们定义灵巧手是指数 ≥ 3 ，自由度 ≥ 9 的末端执行器。例如日本的 TWENDY-ONE 机器人，其灵巧手拥有4根手指和13个自由度。

图表1：灵巧手是特殊的末端执行器



图表2：日本 TWENDY-ONE 灵巧手拥有4指、13个自由度



来源：《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》，国金证券研究所

来源：《仿人型灵巧手拇指灵巧性设计方法的研究》，国金证券研究所

1.2 机器人灵巧手的前世今生

从形态和功能上看，灵巧手经历了两指夹持器、多指抓持手和多指灵巧手三个发展阶段：

■ 两指夹持器

两指夹持器通过模仿手指的夹持运动来抓持物体，能够在执行动作的同时夹住和松开目标物体。其优点是结构简单，运动形式稳定，工作可靠，在工业现场常应用于目标零部件的夹取、搬运、换位、装配等。但由于缺乏手指的灵活性，不能对复杂形状的目标进行抓持，无法对目标物体实施操作。该类夹持器已有多种标准化的产品，例如德国 SCHUNK 公司的气动平行爪夹持器、FESTO 公司的气动夹持器等。

图表3：机器人两指夹持器



来源：《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》，国金证券研究所

■ 多指抓持手

多指抓持手按照功能不同分为联动型抓持手、多关节手指抓持手和软体多指抓持手。

- 联动型抓持手一般为三指或四指结构，工作原理与两指夹持器一样，由于采用多指设计，可以对目标物体实施多触点抓持，提高了抓持的成功率和可靠性，但是依然缺乏灵活性和目标物体的适应性。

- 多关节手指抓持手在其手指上设置多个关节,具有对目标物体进行仿形接触和抓持的可能性,扩大了抓持范围,能够提高抓持的稳定性和可靠性。
- 软体多指抓持手在抓取物体时可根据物体形状更自然妥帖地调整形态,在操作易碎品或不规则物体(如鸡蛋、蔬果、个性化零件等)方面具有优势。

图表4: 多指抓持手分类



来源: 科工世界, 工业机器人, 国金证券研究所

■ 多指灵巧手

机器人多指灵巧手的研究始于 20 世纪 70 年代, 一共经历了三个阶段:

- 第一阶段是从 20 世纪 70 年代——20 世纪 90 年代。这一阶段有 3 款典型代表产品, 分别是日本的 Okada、美国的 Stanford/JPL 和 Utah/MIT。这三只灵巧手是研究初始阶段的典型代表, 为后续仿人型多指灵巧手研究建立了理论基础。
 - 1) 1974 年日本“电子技术实验室”成功研制了 Okada 灵巧手, 它有 3 根手指和 1 个手掌, 拇指有 3 个自由度, 另外两根手指各有 4 个自由度。手指的每个关节由电机驱动, 通过钢丝和滑轮机构实现运动和动力传递, 可以完成螺栓拧进螺母等操作。
 - 2) 20 世纪 80 年代初美国斯坦福大学成功研制了 Stanford/JPL 灵巧手, 该手有 3 个手指, 每指有 3 自由度, 手指使用 $n+1$ 腱 (n 个手指) 设计, 即每个手指采用 4 条腱绳传递运动和动力, 整手使用 12 个直流伺服电机作为关节驱动器。与 Okada 相比, Stanford/JPL 手的灵活性有较大的改善, 但其控制系统也更为复杂。
 - 3) 1982 年美国麻省理工学院和犹他大学联合研制了 Utah/MIT 灵巧手, 该手具有 4 个手指, 每个手指有 4 个自由度, 采用 $2n$ 腱 (n 个手指) 传动设计, 整手共 32 个驱动器。手指的配置类似人手的拇指、食指、中指和无名指, 都连接手掌且相对于手掌进行运动。

图表5: 初始阶段的多指灵巧手



来源: 小米技术微信公众号, 国金证券研究所

- 第二阶段是从 20 世纪 90 年代到 2010 年。受益嵌入式硬件的发展, 这一阶段的多指灵巧手有着更高的系统集成度和更加丰富的感知能力。例如:

- 1) 美国研制了用于国际空间站舱外作业的宇航员灵巧手 Robonaut hand, 由 1 个手腕和 5 个手指组成, 共 14 个自由度, 由于使用了腱绳张力传感器, 整手的运动控制更加准确。
- 2) 德国宇航中心先后研制成功了 DLR-I 和 DLR-II 灵巧手, 共集成了 25 个传感器, 包括类似人工皮肤的触觉传感器、关节扭矩传感器、位置传感器和温度传感器等, 灵巧手在灵活性和感知能力方面有显著提升。
- 3) 意大利 IIT 研制的 iCub 灵巧手集成了 12 个触觉传感器, 48 个压力传感器和 17 个位置传感器以实现灵巧的操作和丰富的感知能力, 系统集成度的提高和感知能力的丰富使得多指手在操作时更加灵巧。

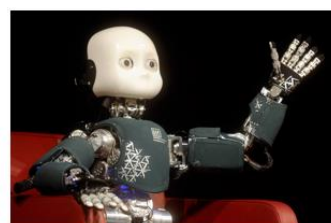
图6: 第二阶段系统集成度更高、感知能力更加丰富的多指灵巧手



美国 Robonaut hand



德国 DLR-I 和 DLR-II



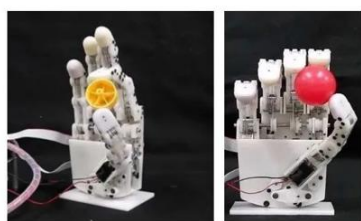
意大利 IIT-iCub

来源: 小米技术微信公众号, 国金证券研究所

- 第三阶段是从 2010 年至今。第二阶段高度系统集成的灵巧手具有灵活性和功能性的优势, 但是系统的复杂性导致制造成本较高, 并且降低了系统的可靠性和易维护性。因此, 简化系统、提高鲁棒性是近十年灵巧手设计的一个重要方向。例如, 立命馆大学设计的 Ritsumeikan Hand、以及 HERI Hand、SPRING hand 等灵巧手采用了欠驱动 (驱动器数量少于手指关节自由度) 的结构设计实现了系统简化。

欠驱动手虽然以简化的系统实现了抓取任务, 但是由于欠驱动自身特性使得操作能力受到限制, 所以目前灵巧手难以同时具备鲁棒性和功能性。

图7: 欠驱动灵巧手代表产品



立命馆大学设计的 Ritsumeikan Hand



HERI Hand 灵巧手



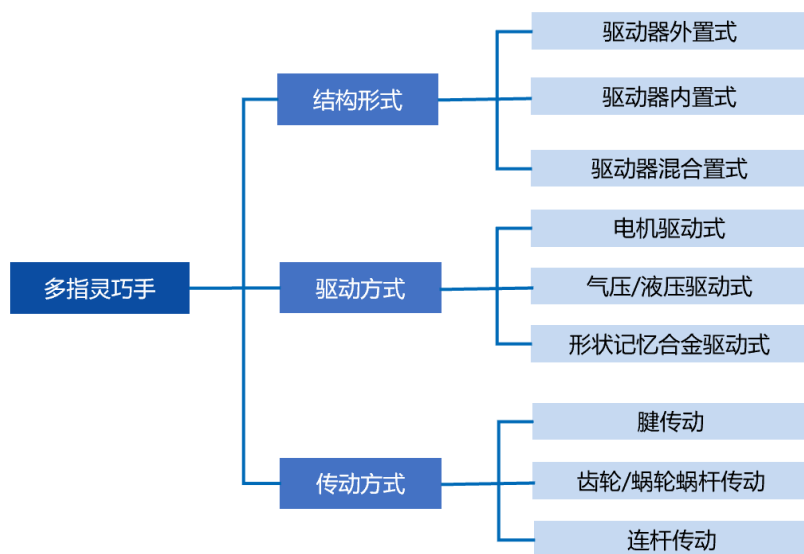
SPRING hand 灵巧手

来源: 国际金属加工网, 国金证券研究所

2. 机器人灵巧手有哪些类型?

机器人灵巧手在体积、重量、灵活性和可操作性等各项性能指标上存在较大区别, 这主要是因为灵巧手采用的驱动系统不同。灵巧手的驱动系统由驱动器和传动系统两部分组成。驱动器是驱动系统的核心部件, 用以产生运动和力; 传动系统将运动和力从驱动器传递到灵巧手手指的关节。灵巧手在驱动器位置、驱动器类型、传动方式方面存在多种方案, 据此可将灵巧手分为若干种类型。

图表8: 机器人多指灵巧手分类



来源: 智星崛起, 国金证券研究所

2.1 根据灵巧手驱动器位置划分

灵巧手可根据驱动器位置分为驱动器内置式、驱动器外置式和驱动器混合置式灵巧手。

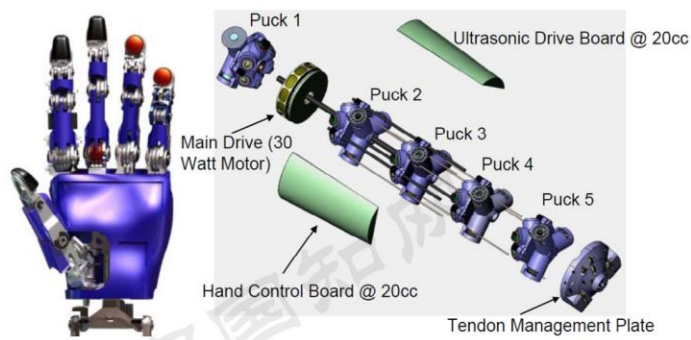
■ 驱动器外置

驱动器外置灵巧手有两个优点: 第一, 驱动器外置使得机械手本体的设计可以在足够的空间内展开, 从而使得灵巧手的外观设计更加拟人化, 手指本体更加纤细。第二, 驱动器选型可以更加自由, 可以采用更大的驱动电机, 从而增大手指的输出力。

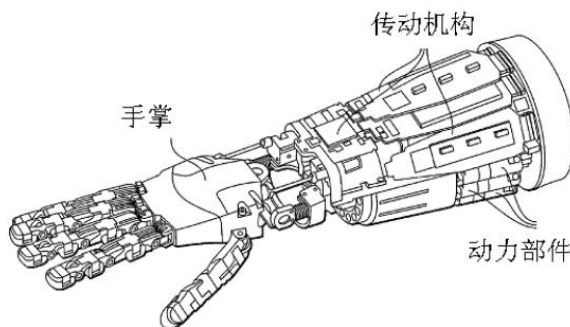
驱动器外置灵巧手的典型代表产品包括美国的 DARPA Extrinsic 灵巧手、NASA (美国宇航中心) 和 GM (通用公司) 联合研制的 Robonaut 2 灵巧手。

- DARPA Extrinsic 灵巧手由美国国防部研制, 该手具有 5 个手指, 其电机和传动系统都集成在前臂, 被称为 Cobot。前臂 Cobot 由 1 个 30W 的动力电机和 15 个操纵电机组成。动力电机是 Cobot 的主驱动元件, 沿该电机的输出轴布置着 5 个圆盘, 每个圆盘内都集成有 3 个 CVT 装置。CVT 装置由操纵电机、位置传感器、动力传动球、操纵辊和同步齿轮组成的, 能够根据需要调整转矩和速度。
- Robonaut 2 是 NASA 和 GM 联合研制的灵巧手, 该手有 18 个活动关节、12 个自由度, 手与腕部的所有电机和电路以及电源线和来自上臂的通讯都集成在前臂内, 其中, 电源线有 6 根。手的有效负载超过 9kg, 手指在充分伸展时可以承受 2.25kg 的指尖力, 指尖速度超过 200mm/s。

图表9: DARPA Extrinsic 及其驱动模块 Cobot



图表10: Robonaut 2 灵巧手结构图



来源: 《仿人型灵巧手拇指灵巧性设计方法的研究》, 国金证券研究所

来源: 《空间机器人多自由度灵巧手关键技术研究》, 国金证券研究所

驱动器外置灵巧手也有两个缺点: (1) 驱动器与手本体之间距离远, 必须借助腱实现两者的连接, 传感器获得信息并不能反映灵巧手手指关节位置和关节驱动力, 增加了控制器设计的难度。(2) 可维护性差, 当某跟腱断裂时, 必须进行灵巧手整体的拆卸, 工作量大。

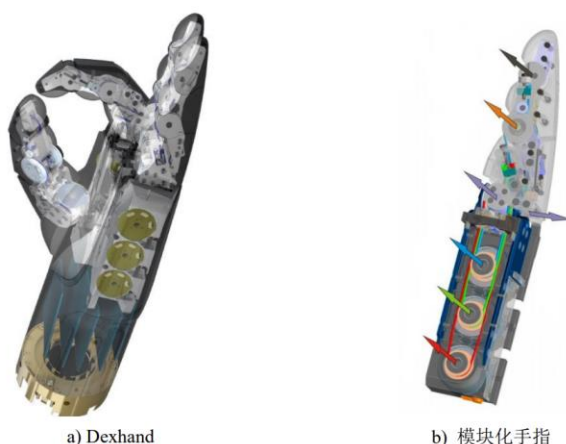
■ 驱动器内置

相比驱动器外置,驱动器内置式灵巧手各关节具有较好的刚性,更利于传感器的直接测量,且模块化设计利于更换维护。但是驱动器的内置分布让通信和控制难度加大,手指尺寸及灵巧手整手尺寸较大,关节灵活度下降。

驱动器内置式灵巧手典型代表产品包括德国宇航中心(DLR)于2011研制的面向空间应用的多指灵巧手Dexhand,以及哈尔滨工业大学和DLR公司研制的DLR/HIT II。

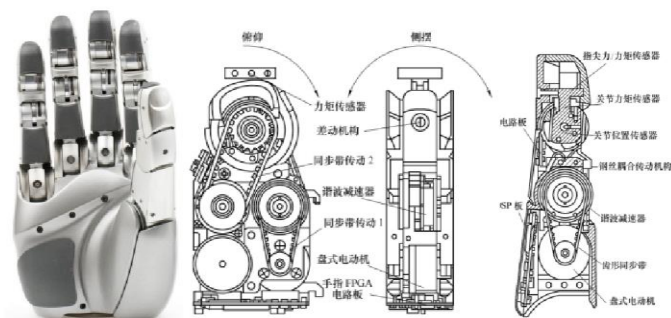
- 德国宇航中心研制的DLR/HIT II灵巧手为了应对复杂的空间环境,将驱动器及电气系统都集中在手掌内,并通过2mm厚的铝质外壳来屏蔽电磁干扰,降低温度影响。
- DLR/HIT II灵巧手尺寸为人手的1.5-2倍,具有1个独立的手掌和5根模块化手指,每根手指集驱动、传感、控制等为一体。其中,拇指与手掌之间有一个类似人手的外张/收敛自由度,可以通过配置拇指的位置来满足不同的抓取要求。

图表11: Dexhand 灵巧手



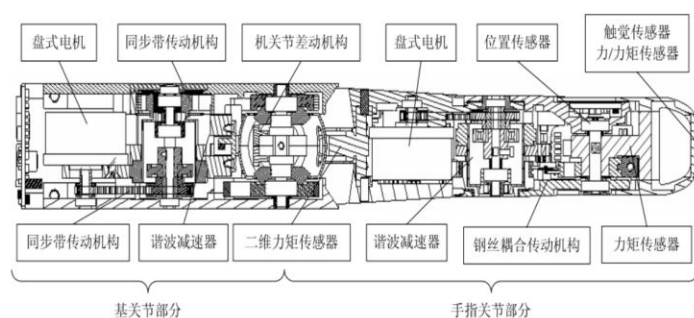
来源:《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》,国金证券研究所

图表12: DLR/HIT-II 灵巧手及其关节传动结构



来源:智星崛起,国金证券研究所

图表13: DLR/HIT II 灵巧手手指结构



来源:《仿人灵巧手的结构设计及其控制研究》,国金证券研究所

■ 驱动器混合置

部分灵巧手采用驱动器外置和内置相结合的方式,这种设计可以提高手指的输出力矩,保证较高自由度的同时,控制体积大小。例如意大利的iCub和韩国的RoboRay灵巧手。

- 意大利iCub灵巧手有20个活动关节、9个自由度。9个电机只有2个集成在手掌内,另外7个集成在前臂里。
- 韩国三星公司2014年研制了RoboRay灵巧手,该手具有五根手指,12个自由度,7个大载荷的驱动器放置在前臂内,提供主要的抓取力,实现包络抓取,并将5个小载荷的驱动器放置在手掌内,用来改变手指姿态,实现精确抓取。

图表14: 意大利 iCub 机器人及其灵巧手



图表15: 韩国 RoboRay 机器人及其灵巧手



来源:《仿人型灵巧手指灵巧性设计方法的研究》, 国金证券研究所

来源:《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》, 国金证券研究所

混合置式灵巧手将一部分驱动器放在手臂,既保证了驱动力,也降低了灵巧手本体的体积,使得灵巧手更加拟人化。同时,灵巧手本体内置一部分驱动器,也有利于传感器的直接测量。但另一方面,混合置灵巧手仍然具有外置式的缺点,例如需要借助腱绳传动,增加了维修难度。从未来的发展趋势上看,随着微驱动、微传动器件技术提升,多指灵巧手的研究将会向着模块化、微机电集成化方向发展。

2.2 根据灵巧手驱动器类型划分

常见的灵巧手驱动器包括电机驱动、气压驱动、液压驱动和形状记忆合金驱动。其中,电机驱动为主要驱动方式。

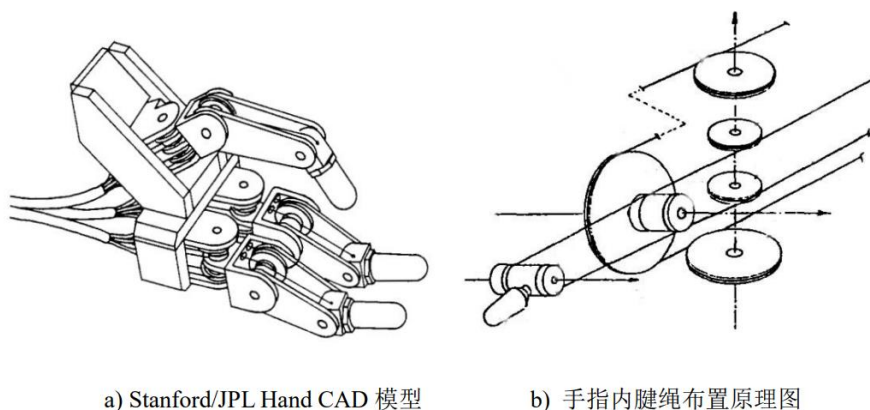
■ 电机驱动

电机驱动是利用电动机产生的力或力矩,直接或经过减速机构驱动工业机械手,以获得所需的位置、速度、加速度。电机驱动是技术较为成熟、应用广泛的一种驱动方式,为大多数灵巧手所采用。

电机驱动的灵巧手的驱动形式可以分为旋转型驱动和直线型驱动。

- 采用旋转型驱动的灵巧手以 Stanford / JPL 手为代表,其驱动系统由直流电机和齿轮减速机构组成,因而体积较大,驱动系统只能放在手掌部位,通过腱进行手指关节的远距离驱动。

图表16: Stanford/JPL Hand 结构图



a) Stanford/JPL Hand CAD 模型

b) 手指内腱绳布置原理图

来源:《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》, 国金证券研究所

- 近年来,微型驱动器和减速器的发展为手指驱动系统的微型化和集成化创造了条件。例如,德国的 DLR 灵巧手采用直线型驱动器来驱动关节,其直线驱动器将旋转电机、旋转直线转换结构和减速机都集成在灵巧手内部。该灵巧手采用了模块化的设计思想,由四根完全相同的手指组成,每根手指有 4 个关节,3 个自由度,末端的 2 个关节仿照人手设计成 1:1 的耦合运动。

图表17: 德国 DLR-I Hand 示意图



来源:《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》, 国金证券研究所

■ 气压/液压驱动

气压/液压驱动灵巧手的工作原理是通过动力元件推动工作介质(液体或气体)在缸体内产生压力差而驱动执行元件, 与其他驱动方式相比, 液压和气压驱动具有输出功率密度大、易于实现远距离控制以及输出力大等优点。

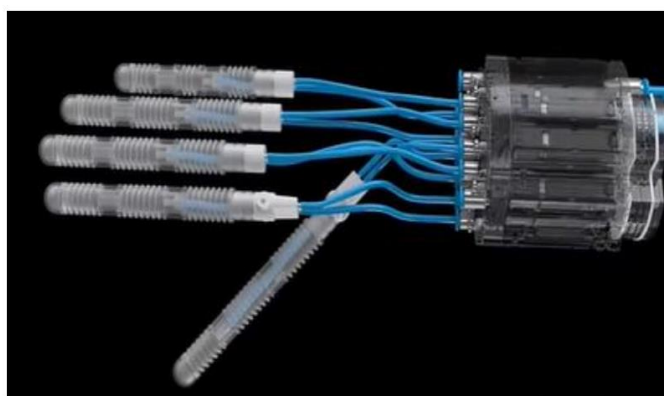
➤ 气压驱动

气压驱动灵巧手的典型代表有德国 Festo 公司的气动灵巧手、上海交大联合 MIT 开发的气动灵巧手等。

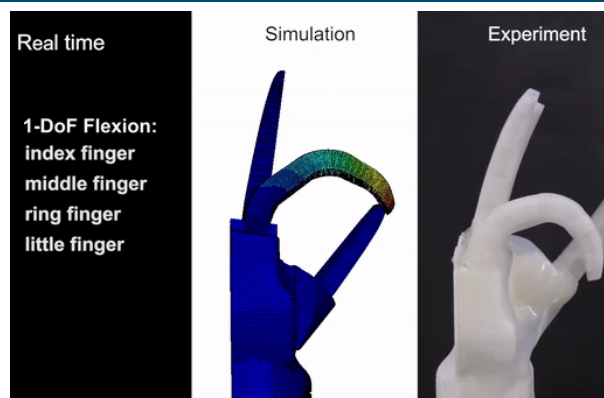
以德国 Festo 灵巧手为例, 该手采用柔性硅胶和气动波纹管材料作为手骨骼框架, 具有极强的柔顺性和安全性。当波纹管构成的密闭空间内充满气体时, 在压力差的作用下波纹管发生形变使手指产生弯曲运动; 反之, 当气体从波纹管构成的密闭空间内排除时, 手指恢复初始伸展状态。此外, 拇指和食指还具备特殊的气动单元结构使其不仅能够实现伸屈运动还可横向移动, 同时通过合理的布局和结构设计, 整个灵巧手的 12 个自由度仅由 8 个气动制动器就能完成驱动。

这种气压驱动的仿生灵巧手存在两方面不足: (1) 由于气压的控制相对较难导致灵巧手运动过程中会出现不平稳的情况; (2) 气压驱动的相关驱动元件体积较大, 不便于实现机械和驱动单元的集成化设计。

图表18: 德国 Festo 公司研制的气动仿生灵巧手



图表19: 上海交大联合 MIT 开发的气压驱动灵巧手



来源:《机械传感一体化的仿生灵巧手设计与运动控制》, 国金证券研究所

来源: 智星崛起, 国金证券研究所

➤ 液压驱动

在气压驱动的启发下, Stefan Schulz 等人研制出微液压驱动的仿生灵巧手。该仿生灵巧手共有 8 个关节, 关节处集成有柔性流体执行器, 执行器由集成在手掌内部的微型液压系统进行驱动。当充液时, 手指关节处的柔性流体执行器会产生压力差从而驱动手指关节产生弯曲运动。当放液时, 柔性流体执行器内的压强减小, 此时手指关节在关节处嵌入扭簧产生的扭力作用下恢复到初始的状态。

液压驱动设计存在以下3点不足：(1)与气压驱动类似，液压驱动依然会存在运动不平稳现象，导致仿生灵巧手无法进行手指位置的精确控制；(2)将液压驱动元件集成到手指指体结构中造成手指结构冗杂，影响灵巧手的抓握性能。(3)液压系统集成在手掌内部，高度集成化、轻量化的设计，导致灵巧手的抓握输出力较小。

图表20: Stefan Schulz 等人研制的微液压驱动仿生灵巧手

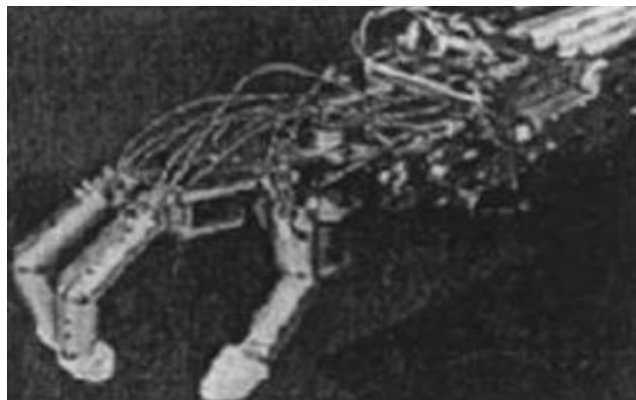


来源：《机械传感一体化的仿生灵巧手设计与运动控制》，国金证券研究所

■ SMA（形状记忆合金）驱动

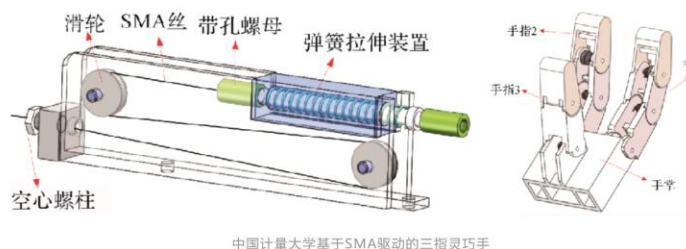
形状记忆合金是一种能记住自身形状的一种合金，当其发生永久变形后，若加热到某一温度变形前的形状，具有驱动速度快、负载能力强等优势，但与其他金属一样，存在疲劳和寿命问题。日本在1984年成功研制了Hitachi手，该手由3个4自由度手指和1个拇指构成，采用了形状记忆合金（SMA）驱动。国内中国计量大学等也有相关研究，研发出了基于形状记忆合金的三指灵巧手，通过增加SMA的使用量来实现较大驱动位移输出。

图表21: 日本 Hitachi 灵巧手



来源：《基于并联手指结构的机器人灵巧手的设计与研究》，国金证券研究所

图表22: 中国计量大学基于 SMA 驱动三指灵巧手



中国计量大学基于SMA驱动三指灵巧手

来源：智星崛起，国金证券研究所

综合比较四种驱动器类型，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。

图表23: 电机驱动综合性能相对更好

驱动方式	优点	缺点
电机驱动	标准化、稳定可靠、精度高、响应快、驱控一体	质量体积大、成本高
气压驱动	能量存储方便；传动介质获取方便；抗燃、防爆及不污染环境	驱动器的动态性能较差
液压驱动	稳定性好、可靠性强、阻转能力强，驱动器的结构简单并且价格便宜	存在较大的泄漏流量，微型阀对污染物十分敏感
形状记忆合金驱动	驱动速度快、负载能力强	存在疲劳和寿命问题

来源：《机器人多指灵巧手及其驱动系统研究的现状》，《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》，国金证券研究所

例如，思灵机器人 20 年推出的五指灵巧手 Dexterity Hand、因时机器人 21 年推出的五指灵巧手 RH56DFX 系列，以及 22 年特斯拉推出的 Optimus 均采用电机驱动方案。

图表24：特斯拉 Optimus 等机器人灵巧手采用电机驱动



特斯拉Optimus



思灵Dexterity Hand



因时RH56DFX

来源：思灵机器人官网，因时机器人官网，特斯拉 AI Day，国金证券研究所

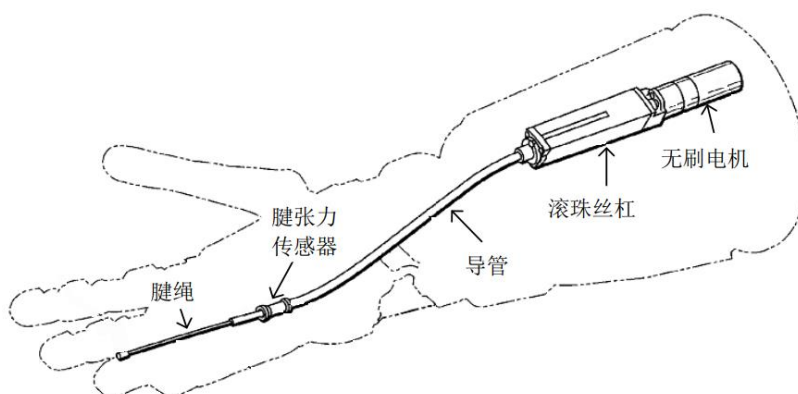
2.3 根据灵巧手传动方式划分

机器人灵巧手抓取的稳定性和灵活性指标主要取决于传动系统，按照传动方式不同，可将灵巧手分为腱传动、连杆传动、齿轮/蜗轮蜗杆传动等类型：

■ 腱传动

腱传动是最常用的灵巧手驱动方式，其工作原理为：置于灵巧手前臂中的电机通过齿轮箱驱动滚珠丝杠，通过滚珠丝杠上的螺母把转动变为平动，腱绳形成一个腱环套在螺母上，螺母拉动连接在灵巧手手指指骨上的腱绳，实现手指绕关节轴的转动运动。其中为了引导腱绳的走线，避免腱绳之间的干扰，一般采用腱绳外包裹导管的形式。

图表25：腱传动原理



来源：《腱驱动空间多指灵巧手感知与控制关键技术研究》，国金证券研究所

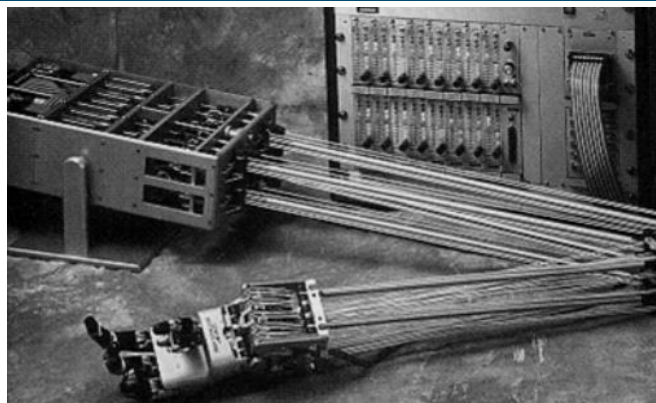
腱传动的优点较多，主要包括：（1）可以使驱动器和手指本体分离，对手指关节进行远距离驱动，从而减小手指的尺寸和质量；（2）结构紧凑、研制灵活、成本低；（3）腱传动使一种零回差的柔顺传动方式，可以简化力控制器的设计。其缺点在于控制精度不高、抓取力不大，腱绳需要额外的张紧装置、易磨损。

综合来看，腱传动优势较为明显，为大部分灵巧手所采用。例如 Utah/MIT、CEA dexterous、PISA/IIT Soft、DLR_Hand Arm System，以及商用化的 shadow hand 等都采用腱绳驱动。

- Utah/MIT 手由麻省理工学院和犹他大学于 1980 年联合研制，该手 4 个手指完全相同，每个手指都连接到手掌并且相对于手掌进行运动。该手采用气动伺服缸作为手指关节的驱动元件，通过腱和滑轮实现远距离传动。为达到最大的操作度，该手采用了 2N 型腱驱动系统，每个关节通过一对运动方向相反的腱进行驱动。

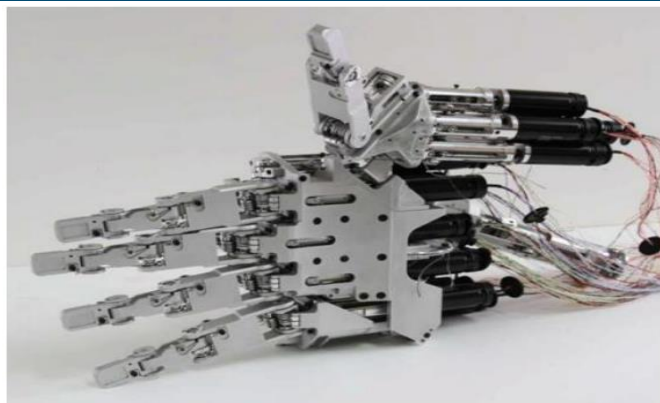
- CEA dexterous 灵巧手由西班牙国防中心大学与法国交互式机器人实验室于 2014 年设计，该灵巧手采用了腱传动，其特点在于三轴单元位于手指 MP 关节处，通过巧妙地引导腱绳穿过 MP 关节，避免了腱绳之间的耦合运动，使得每个驱动器可以独立地驱动 1 个自由度，降低了控制难度。
- Shadow Hand 灵巧手由英国 Shadow 公司于 2004 年研制，由灵巧手本体和 2 个自由度的手腕组成。该手采用腱绳驱动，所有驱动器放置在灵巧手外，有效减小了灵巧手本身的尺寸。

图表26: Utah/MIT 灵巧手



来源：《空间机器人多自由度灵巧手关键技术研究》，国金证券研究所

图表27: CEA dexterous 灵巧手



来源：《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》，国金证券研究所

图表28: Shadow Hand 仿生灵巧手



来源：《机械传感一体化的仿生灵巧手设计与运动控制》，国金证券研究所

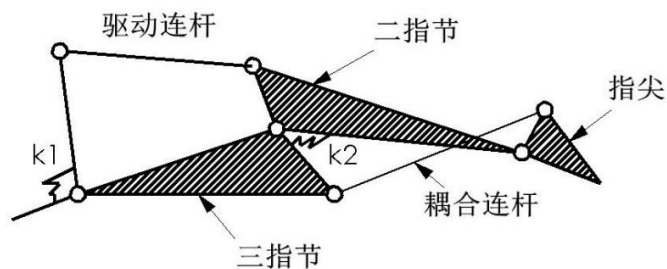
■ 连杆传动

灵巧手可以采用多个连杆串并联混合的形式传递运动和力矩，以一个手指为例，其工作原理为：手的指尖、二指节、三指节为不同形状的三角形连杆，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。

其优点在于：第一，连杆传动由于连杆机构的刚度大，易于实现强力抓取物体，并且迟滞性较低，传动精确，易于达到较高的动态响应。第二，除拇指单独驱动之外，其余四指可以由一个电机共同驱动，降低了购买电机所带来的成本。

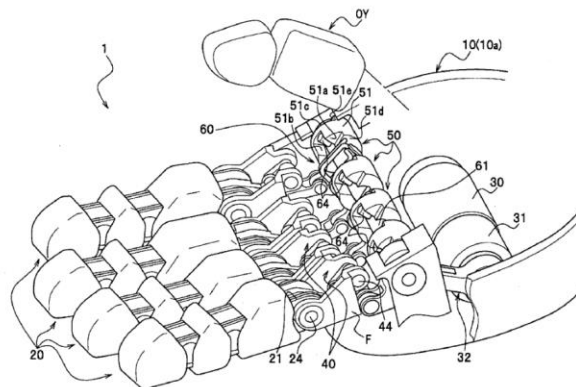
其缺点包括：第一，传动机构较为复杂，对零部件的制造精度要求高。第二，柔性较差，灵巧手在抓握不规则形状物体时的包络性和自适应性较差。第三，拟人性不足，受机械机构的限制，手指小型化和拟人化的实现较为困难。

图表29: 连杆传动手指



来源:《仿人灵巧手的结构设计及其控制研究》, 国金证券研究所

图表30: 连杆传动的灵巧手结构透视图

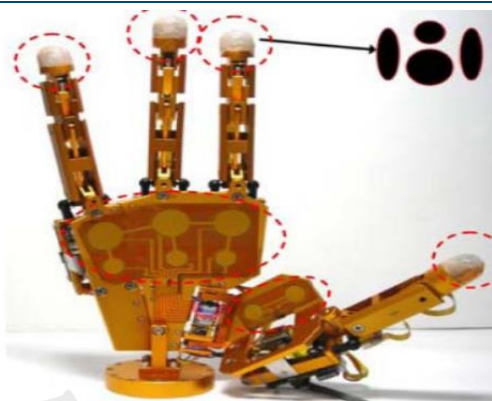


来源:《空间机器人多自由度灵巧手关键技术研究》, 国金证券研究所

采用连杆传动的代表案例有韩国科学技术研究院开发的 KIST Hand 灵巧手和 Panipat Wattanasiri 团队研发的仿生灵巧手。

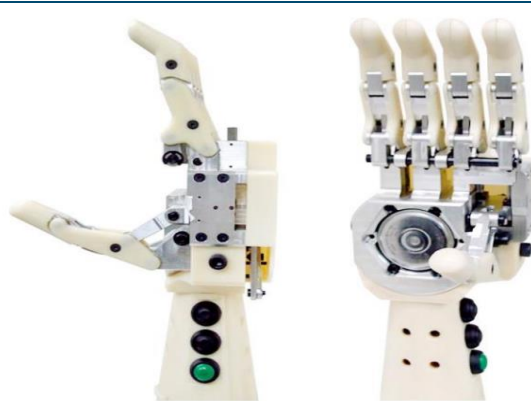
- KIST Hand 由韩国科学技术研究院开发, 该手的基关节运动由 2UPS-RR 并联机构实现, 手指的运动由耦合连杆实现。
- Panipat Wattanasiri 团队研发的仿生灵巧手采用曲柄滑块连杆机构, 每根手指各有一个伸曲自由度。整个仿生灵巧手的 6 个自由度运动通过凸轮滑块机构进行耦合, 实现仅通过集成在手掌中部的单个直流无刷电机进行驱动。

图表31: KIST Hand 灵巧手



来源:《仿人型灵巧手拇指灵巧性设计方法的研究》, 国金证券研究所

图表32: Panipat Wattanasiri 等人研制的灵巧手



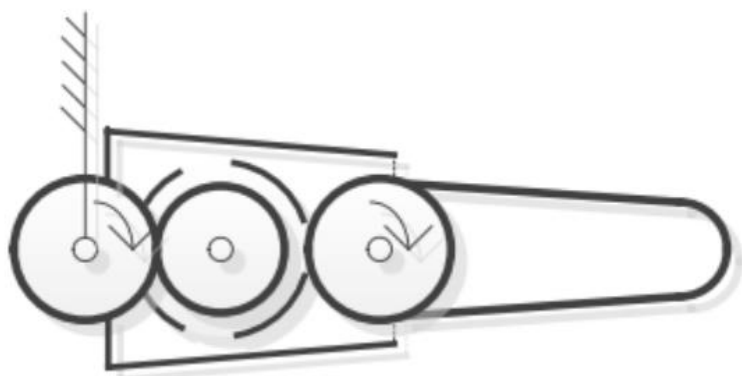
来源:《机械传感一体化的仿生灵巧手设计与运动控制》, 国金证券研究所

■ 齿轮/蜗轮蜗杆传动

齿轮/蜗轮蜗杆传动工作原理为: 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。

和其他传动方式相比, 齿轮传动的优点是能进行精确传动, 传递效率高、稳定性好。但另一方面, 齿轮传动存在结构相对复杂, 使灵巧手的惯性增大、自重增大的缺点。并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, 较大限制了齿轮链传动机构的应用。

图表33: 齿轮传动手指

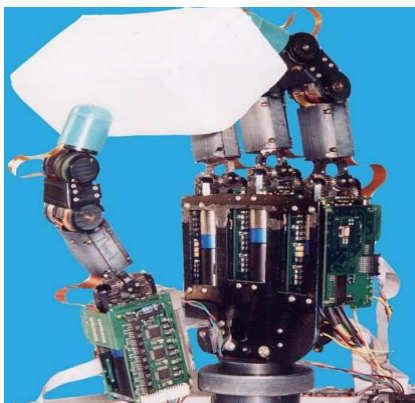


来源:《仿人灵巧手的结构设计及其控制研究》, 国金证券研究所

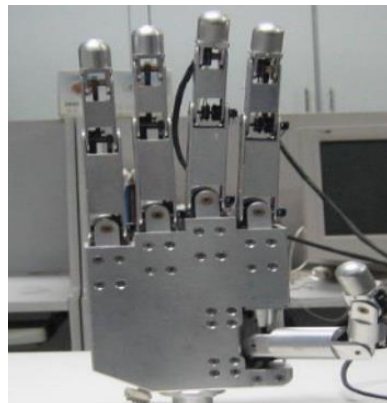
例如:

- 哈工大(HIT)联合德国宇航中心(DLR)共同研发的HIT/DLR-I 灵巧手,该手有4根手指,每根手指具备3自由度,选取齿轮以及连杆传动,指尖关节为连杆耦合,伞齿轮组成的差动机构耦合则来完成基关节的2个自由度。
- 北航研制的BH-985 灵巧手,该手共有5个手指和1个手掌,每个手指有3个关节,驱动电机置于手掌内,通过齿轮传动将动力传输到各个关节。

图表34: HIT/DLR-I 灵巧手



图表35: BH-985 灵巧手



来源:《仿人灵巧手的结构设计及其控制研究》, 国金证券研究所

来源:《仿人灵巧手的结构设计及其控制研究》, 国金证券研究所

3.灵巧手未来有哪些发展方向?

3.1 方向 1: 内置微型驱动器

驱动器外置式灵巧手便于安装较大功率的驱动电机,但一般需要借助腱绳连接灵巧手本体和电机,设计和维修难度加大。如果内置驱动器,虽然利于传感器直接测量,方便维修,但往往导致手指尺寸较大,关节灵活度下降。因此,在手掌或者手指安装微型驱动器是灵巧手未来发展的一个重要方向。

在内置微型驱动力领域,代表产品是因时机器人灵巧手。因时是国内机器人核心零部件及末端执行器供应商,其微型伺服电机体积小,采用驱控一体化设计,功率密度高,精度达 $\pm 0.02\text{mm}$ 。因时机器人灵巧手内部装有6个小型伺服驱动器,集成无刷电机、行星减速机、直线导轨、绝对位置检测传感器和力传感器,除大拇指拥有2个驱动器外,其余四指各配备1个驱动器。

因时机器人灵巧手将微型驱动器等部件置于手掌内部,在控制灵巧手体积的同时,也利于传感器直接测量,方便维修,预计将成为未来灵巧手设计的重要方向。

图表36：因时机器人灵巧手内部结构



来源：因时机器人，国金证券研究所

图表37：因时机器人微型伺服电机



来源：因时机器人，国金证券研究所

图表38：因时机器人灵巧手

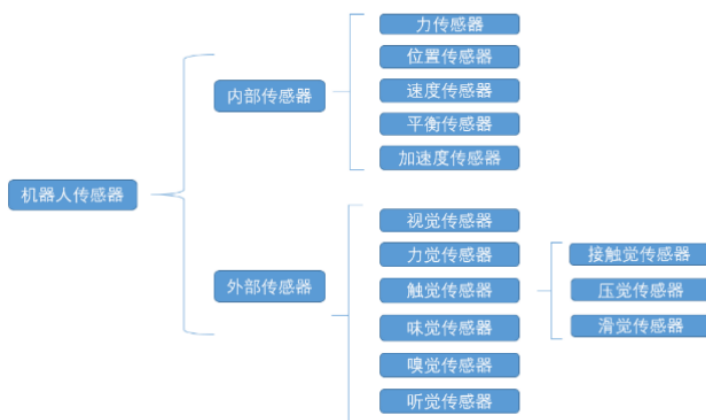


来源：因时机器人，国金证券研究所

3.2 方向 2：多感知功能融合

机器人传感器分为内部传感器和外部传感器。内部传感器包括力、位置、速度、加速度等传感器，主要用于感知机器人自身状态，以实现自身动态平衡等。外部传感器包括视觉、触觉、听觉、嗅觉、味觉等传感器，用于感知外部环境，如障碍物的位置远近、形状颜色、接触受力情况等。

图表39：机器人传感器分类



来源：国金证券研究所

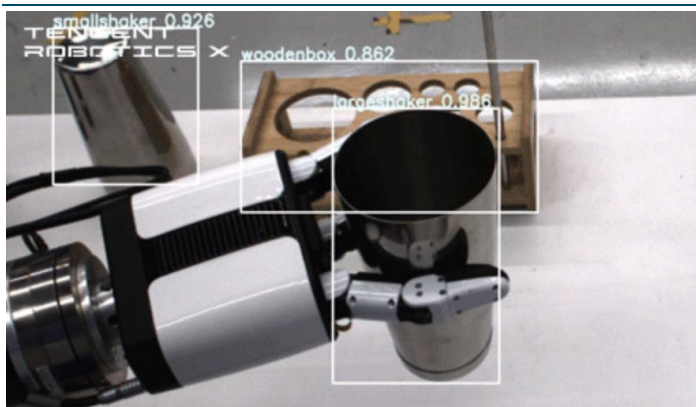
力传感器和位置传感器可以帮助灵巧手完成抓取作业任务，触觉传感器能够检测灵巧手与

被操作物体的接触状态、位置和被操作物体的物理特征，并根据这些物理特征实现对操作物体的目标识别。因此，多感知能力融合是提高机器人灵巧手精细抓取能力和智能化水平的重要因素，也是未来灵巧手发展的另一重要方向。

例如，2023 年 4 月，腾讯 Robotics X 实验室推出自研机器人灵巧手 TRX-Hand。该手在指尖、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，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。

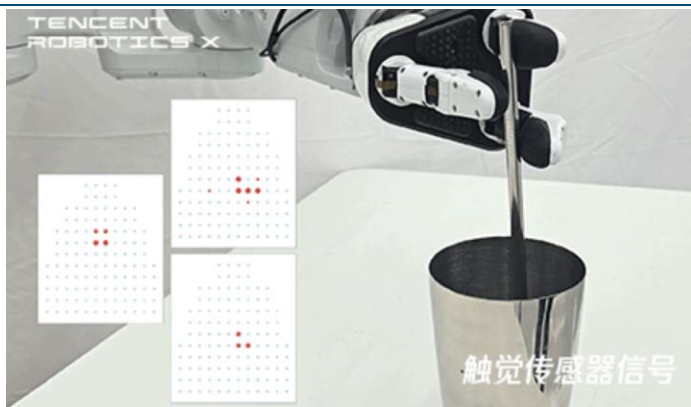
此外，腾讯 Robotics X 实验室对不同传感器进行了建模与标定，采用多传感器信息融合技术，使机器人能在各种操作任务中更全面及时地感知物体信息、自身运动状态以及环境的物理交互，从而更可靠地完成任

图表40：腾讯 TRX-Hand 指尖触觉传感器自动化标定



来源：腾讯 RoboticsX 实验室，国金证券研究所

图表41：腾讯 TRX-Hand 灵巧手



来源：腾讯 RoboticsX 实验室，国金证券研究所

3.3 方向 3：多自由度

人手食指、中指、无名指和小拇指各有 3 个弯曲/伸展自由度，在指根关节各有 1 个外展/并拢自由度，共 16 个自由度。大拇指有 5 个自由度，具体可分为弯曲/伸展自由度、外展/并拢自由度和旋转自由度，合计共 21 个自由度。这种多自由度的特点使人手能够灵活的完成各种抓握任务以及精细复杂的操作。

图表42：人手有 21 个自由度



来源：小米技术，国金证券研究所

类似人手，自由度是多指灵巧手灵巧度的决定因素，提升自由度是未来灵巧手的又一发展方向。

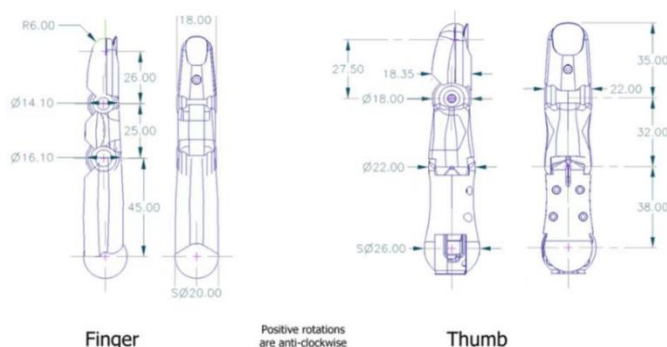
该方向的代表案例是英国 shadow 公司研制的 shadow hand，该手本体具有 18 个自由度，数目接近人手。其中，拇指具有 5 个自由度，其余四根手指皆具有 3 个自由度，小拇指根部有 1 个对掌自由度。这些自由度意味着每根手指可以独立地外展、内收，从而进行多种精巧的手部动作。对掌自由度又使得拇指可以与小指相对，赋予了该手更多类似人手的运动方式。较高的自由度不仅使其可以进行 24 种运动，也便于其适应对于各种物体的抓握与操作。此外，该手腕部还具有 2 个自由度，更增强了其灵活性。

图表43: Shadow 灵巧手



来源: Shadow 官网, 国金证券研究所

图表44: Shadow 手指结构图



来源: Shadow 官网, 国金证券研究所

4.投资建议

机器人灵巧手核心零部件包括伺服电机、传感器、减速器、滚珠丝杠等。考虑当前灵巧手零部件市场空间大,且随着人形机器人产业链发展成长前景较好,建议重点关注:空心杯电机领域的鸣志电器、拓邦股份、江苏雷利;传感器领域的柯力传感、汉威科技;减速器领域的绿的谐波、双环传动;滚珠丝杠领域的秦川机床、恒立液压。

图表45: 重点公司估值表

领域	代码	公司	市值 (亿元)	归母净利润 (亿元)				PE			
				2022	2023E	2024E	2025E	2022	2023E	2024E	2025E
空心杯电机	603728.SH	鸣志电器	274.85	2.47	4.02	6.13	8.55	111.17	68.30	44.84	32.13
	002139.SZ	拓邦股份	146.89	5.83	8.16	11.21	14.05	25.21	18.00	13.10	10.46
	300660.SZ	江苏雷利	107.12	2.59	3.48	4.61	5.58	41.40	30.74	23.24	19.19
传感器	603662.SH	柯力传感	87.77	2.60	3.45	4.24	5.26	33.73	25.41	20.69	16.68
	300007.SZ	汉威科技	57.10	2.76	3.77	3.66	4.85	20.67	15.16	15.59	11.78
减速器	688017.SH	绿的谐波	229.06	1.55	2.80	3.58	4.40	147.49	81.82	63.93	52.12
	002472.SZ	双环传动	261.07	5.82	8.06	10.58	13.51	44.85	32.38	24.69	19.32
滚珠丝杠	000837.SZ	秦川机床	136.94	2.75	3.32	4.41	6.00	49.80	41.25	31.05	22.82
	601100.SH	恒立液压	910.02	23.43	28.23	32.51	35.77	38.84	32.24	27.99	25.44

来源: , 国金证券研究所 (除秦川机床、恒立液压, 其余公司取 wind 一致预期, 估值日期为 2023 年 7 月 20 日)

5.风险提示

- 人形机器人发展不及预期风险。人形机器人处于发展初期,风险较大,若未来发展不及预期,电机、传感器、减速器、滚珠丝杠等核心零部件需求不及预期,影响相关公司业绩。
- 国产替代不及预期风险。目前在电机、减速器等领域国内部分国内企业已经步入第一梯队,但未来如果技术研发滞后,或导致国产替代进展不及预期,影响企业业绩增长。
- 行业竞争加剧风险。随着需求的变化,灵巧手零部件细分市场如果竞争加剧,则存在企业盈利能力下降风险。

行业投资评级的说明：

买入：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 15%以上；

增持：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 5%—15%；

中性：预期未来 3—6 个月内该行业变动幅度相对大盘在 -5%—5%；

减持：预期未来 3—6 个月内该行业下跌幅度超过大盘在 5%以上。

特别声明：

国金证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

本报告版权归“国金证券股份有限公司”（以下简称“国金证券”）所有，未经事先书面授权，任何机构和个人均不得以任何方式对本报告的任何部分制作任何形式的复制、转发、转载、引用、修改、仿制、刊发，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。经过书面授权的引用、刊发，需注明出处为“国金证券股份有限公司”，且不得对本报告进行任何有悖原意的删节和修改。

本报告的产生基于国金证券及其研究人员认为可信的公开资料或实地调研资料，但国金证券及其研究人员对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。本报告反映撰写研究人员的不同设想、见解及分析方法，故本报告所载观点可能与其他类似研究报告的观点及市场实际情况不一致，国金证券不对使用本报告所包含的材料产生的任何直接或间接损失或与此有关的其他任何损失承担任何责任。且本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次公开发布时的判断，在不作事先通知的情况下，可能会随时调整，亦可因使用不同假设和标准、采用不同观点和分析方法而与国金证券其它业务部门、单位或附属机构在制作类似的其他材料时所给出的意见不同或者相反。

本报告仅为参考之用，在任何地区均不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告提及的任何证券或金融工具均可能含有重大的风险，可能不易变卖以及不适合所有投资者。本报告所提及的证券或金融工具的价格、价值及收益可能会受汇率影响而波动。过往的业绩并不能代表未来的表现。

客户应当考虑到国金证券存在可能影响本报告客观性的利益冲突，而不应视本报告为作出投资决策的唯一因素。证券研究报告是用于服务具备专业知识的投资者和投资顾问的专业产品，使用时必须经专业人士进行解读。国金证券建议获取报告人员应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。报告本身、报告中的信息或所表达意见也不构成投资、法律、会计或税务的最终操作建议，国金证券不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。

在法律允许的情况下，国金证券的关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，并可能为这些公司正在提供或争取提供多种金融服务。

本报告并非意图发送、发布给在当地法律或监管规则下不允许向其发送、发布该研究报告的人员。国金证券并不因收件人收到本报告而视其为国金证券的客户。本报告对于收件人而言属高度机密，只有符合条件的收件人才能使用。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，国金证券股份有限公司客户中风险评级高于 C3 级（含 C3 级）的投资者使用；本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，不应被视为对特定客户关于特定证券或金融工具的建议或策略。对于本报告中提及的任何证券或金融工具，本报告的收件人须保持自身的独立判断。使用国金证券研究报告进行投资，遭受任何损失，国金证券不承担相关法律责任。

若国金证券以外的任何机构或个人发送本报告，则由该机构或个人为此发送行为承担全部责任。本报告不构成国金证券向发送本报告机构或个人的收件人提供投资建议，国金证券不为此承担任何责任。

此报告仅限于中国境内使用。国金证券版权所有，保留一切权利。

上海	北京	深圳
电话：021-60753903	电话：010-85950438	电话：0755-83831378
传真：021-61038200	邮箱：researchbj@gjzq.com.cn	传真：0755-83830558
邮箱：researchsh@gjzq.com.cn	邮编：100005	邮箱：researchsz@gjzq.com.cn
邮编：201204	地址：北京市东城区建国门内大街 26 号	邮编：518000
地址：上海浦东新区芳甸路 1088 号	新闻大厦 8 层南侧	地址：深圳市福田区金田路 2028 号皇岗商务中心
紫竹国际大厦 7 楼		18 楼 1806