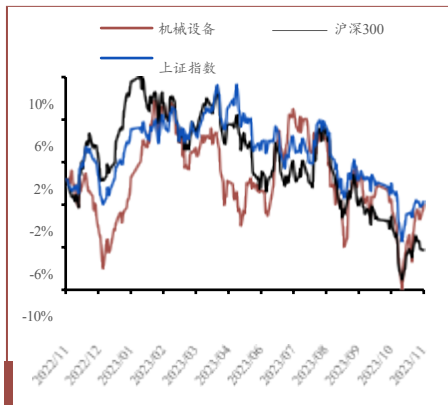


**投资评级:看好(维持)**

■ 证券研究报告

最近 12 月市场表现


**分析师 余炜超**

 SAC 证书编号: S0160522080002  
 shewc@ctsec.com

**分析师 刘俊奇**

 SAC 证书编号: S0160523060002  
 liujq@ctsec.com

**分析师 孟欣**

 SAC 证书编号: S0160523090002  
 mengxin@ctsec.com

**联系人 孙瀚栋**

sunhd@ctsec.com

## 机器人新型末端执行器，国内外研究进展加速

### 核心观点

- ❖ **灵巧手是机器人新型末端执行器，在机器人与环境的交互中起关键作用。** 灵巧手以人手的结构和功能为模仿对象，在机器人与环境的交互中起着关键作用。“灵巧”指的是手的姿势可变性，这种可变性越高，则认为手就越灵巧。机器人灵巧手从结构和功能上参考人手，能够灵活操作对象，实现对物体的灵活抓取，满足多种工作需求。多指灵巧手最普遍的手指数目为 3-5 个，各手指具有 3 个关节，手指关节的运动副都是采用转动副。机器人灵巧手作为一种新型的末端执行器，在机器人与环境的交互中起着关键作用。
- ❖ **灵巧手是机器人研究的重要课题，近年来国内外研究进展加速。** 自 20 世纪 70 年代起，国内外对灵巧手展开了大量研究，从三指到五指，从工业到生活，从简单的抓取到灵巧操作，以期解决复杂的实际作业问题。海外灵巧手研究历经了 50 余年的发展，从开始简单的机械手发展成现在的高科技人形仿生灵巧手，国内灵巧手的研究则是从 2000 年左右由研究机构和部分高等院校相继开展，近年来，海外具有代表性的灵巧手厂商包括 SCHUNK、Shadow Robot、qb Robotics、Clone Robotics 等；国内包括蓝胖子机器智能（dorobot）、因时机器人、腾讯 RoboticsX 实验室等也陆续公布灵巧手领域的相关产品和研究成果。随着人形机器人产业化的加速，国内外对灵巧手领域的研究也呈现出加速趋势。
- ❖ **人形机器人赋予灵巧手千亿级市场规模。** 灵巧手作为机器人执行末端，是人形机器人必不可少的部件，根据因时机器人网上报价，单只灵巧手价格约为 5 万元，如果未来人形机器人销量到达百万台，对应灵巧手市场规模将达到 1000 亿元。需要注意的是，未来人形机器人可能会应用到各种场景，对应的灵巧手配置各不相同，我们预计单价也会有较大的差别。
- ❖ **投资建议：** 灵巧手具有较长的研发历史，也有较多研发成果，掌握空心杯电机、精密齿轮箱、编码器、驱动、传感器、弹簧等核心部件的公司更有希望占据行业领导地位。同时如果灵巧手得到大量应用，我们预计对相关产业链公司的制造能力有一定考验，具备稳定的、优秀的量产化能力的公司有望突围。建议关注空心杯电机/编码器/驱动器领域的鸣志电器、鼎智科技、禾川科技、伟创电气、拓邦股份，传感器领域的柯力传感、汉威科技，弹簧领域的美力科技、华纬科技。

### 相关报告

1. 《AGI+机器人行业深度报告》 2023-11-13
2. 《工信部印发人形机器人指导意见，产业化加速》 2023-11-10
3. 《力传感器深度研究报告》 2023-10-06

❖ **风险提示：** 特斯拉人形机器人量产进展不及预期；灵巧手降本速度低于预期；制造业景气度恢复低于预期等。

**表 1：重点公司投资评级：**

代码	公司	总市值 (亿元)	收盘价 (11.15)	EPS (元)			PE			投资评级
				2022A	2023E	2024E	2022A	2023E	2024E	
603728	鸣志电器	307.70	73.25	0.59	0.63	0.97	56.19	117.17	75.15	未覆盖
873593	鼎智科技	41.00	42.20	2.91	2.35	3.11	68.64	34.44	26.20	未覆盖
688320	禾川科技	68.33	45.25	0.65	0.77	0.88	72.00	59.18	50.94	未覆盖
688698	伟创电气	85.41	40.62	0.78	1.04	1.45	26.55	41.06	29.45	未覆盖
002139	拓邦股份	132.03	10.40	0.46	0.49	0.64	22.54	21.27	16.18	未覆盖
603662	柯力传感	105.03	37.18	0.92	1.12	1.40	17.86	33.26	26.51	未覆盖
300611	美力科技	24.34	11.53	-0.20	0.26	0.46	-39.45	42.15	23.83	增持
001380	华纬科技	46.22	35.86	1.17	1.26	1.78	0.00	28.36	20.17	未覆盖

数据来源：iFinD，财通证券研究所（未覆盖公司预测数据来自 iFinD 一致预期）

## 内容目录

1	灵巧手是人形机器人重要的运控交互部件，近年来海内外研究进展加速	5
1.1	灵巧手是机器人的新型末端执行器，在运控交互中起关键作用	5
1.2	灵巧手是机器人研究的重要课题，近年来国内外研究进展加速	7
1.3	目前学术上的研发方向及难点	9
2	机器人灵巧手的分类与商业化应用	13
2.1	机器人灵巧手的分类	13
2.1.1	自由度数量	13
2.1.2	驱动方式	15
2.1.3	机械传动形式	17
2.1.4	感知技术	18
2.2	机器人灵巧手的商业化应用	19
2.2.1	国外案例	21
2.2.2	国内案例	24
3	投资建议	27
3.1	人形机器人赋予灵巧手千亿级市场规模	27
3.2	关注掌握灵巧手核心技术以及批量化制造能力的公司	27
4	风险提示	28

## 图表目录

图 1. 典型的两指夹持器	6
图 2. 典型的多指抓持手	6
图 3. 代表性的多指灵巧手产品	6
图 4. 国外灵巧手的发展历程	8
图 5. 国外灵巧手的发展历程	9
图 6. 通过触觉感知重建模型	10
图 7. 通过触觉稳定器控制物体	11

图 8. 多层次的人手和机器人手结构对比.....	12
图 9. 机器人灵巧手的分类 .....	13
图 10. 人手的自由度分布 .....	14

图 11. SCHUNK SVH 五指伺服电动机械抓手 .....	16
图 12. Stefan Schulz 等研制的液压驱动仿人机器人.....	16
图 13. Festo BionicSoftHand 气动灵巧手 .....	16
图 14. 中国计量大学基于 SMA 驱动的四指灵巧手 .....	16
图 15. 灵巧手传感器分类 .....	18
图 16. SVH 结构图 .....	21
图 17. Shadow Hand 外观尺寸图 .....	22
图 18. qb SoftHand 产品系列 .....	23
图 19. Clone Hand 外观图 .....	24
图 20. Dexterity Hand 外观图 .....	25
图 21. RH56BFX 系列/ RH56DFX 系列外观图.....	25
图 22. DoraHand 外观图 .....	26
图 23. TRX-Hand 外观图 .....	27
表 1. 机器人末端执行器的分类情况.....	5
表 2. 抓手类末端执行器的分类情况.....	5
表 3. 多指灵巧手的发展脉络.....	7
表 4. 全驱动灵巧手与欠驱动灵巧手对比情况.....	14
表 5. 灵巧手两种驱动方式的对比情况.....	15
表 6. 灵巧手各类驱动源的比较情况.....	17
表 7. 灵巧手的各类传动方式对比情况.....	17
表 8. 灵巧手的各类感知方法对比.....	19
表 9. 国外灵巧手产品梳理 .....	19
表 10. 国内灵巧手产品梳理.....	20
表 11. 人形机器人灵巧手市场规模测算表.....	27

# 1 灵巧手是人形机器人重要的运控交互部件，近年来海内外研究进展加速

## 1.1 灵巧手是机器人的新型末端执行器，在运控交互中起关键作用

**灵巧手是机器人的一种新型末端执行器。**一般而言，机器人与环境交互的方式主要包括：移动行走、视觉等信息的获取、决策的执行输出。末端执行器 (End-

Effector) 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。

表1. 机器人末端执行器的分类情况

分类	具体内容	应用示例
工具类	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	喷枪、涂胶枪、点焊机、弧焊焊枪、毛刺打磨机、铆钉枪、体温枪、手术刀具、吸盘等。
抓手类	恰如人的双手，担负着执行各种动作、抓持和操作的任务	两指夹持器、多指抓持手、多指灵巧手

数据来源：蔡世波等《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》，财通证券研究所

**灵巧手以人手的结构和功能为模仿对象，在机器人与环境的交互中起着关键作用。**“灵巧”指的是手的姿势可变性，这种可变性越高，则认为手就越灵巧。机器人灵巧手从结构和功能上参考人手，能够灵活操作对象，实现对物体的灵活抓取，满足多种工作需求。多指灵巧手最普遍的手指数目为3-5个，各手指具有3个关节，手指关节的运动副都是采用转动副。

表2. 抓手类末端执行器的分类情况

分类	驱动方式	优点	缺点
两指夹持器	一般采用电机或气缸作为驱动，机构原理以多连杆机构和气缸为主	结构简单，运动形式单一稳定，工作可靠，可在工业现场被大量应用	缺乏手指的灵活性，不能对复杂形状的目标进行抓持，更无法对目标物体实施操作
多指抓持手	其基本原理与前述两指夹持器一样，由多连杆驱动或气缸驱动	多指抓持手在目标适应性、抓持稳定性等方面已经有了大幅度的提升，并且得到了企业界和用户的认可	这类多指手的功能依然停留在实现目标物体的抓持范畴，还不具有对目标物体的操作能力
多指灵巧手	主要的驱动方式包括4种：液压驱动、电机驱动、气压驱动、形状记忆合金驱动	高度系统集成的灵巧手具有灵活性和功能性的优势	不能实现人手的自由灵活程度和操作能力，并且价格昂贵，推广应用难度较大

数据来源：蔡世波等《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》，财通证券研究所

**两指夹持器：**是抓持物体进而操控物体的装置，模仿的是手指的夹持运动。它能够在执行某些动作的同时夹住和松开目标物体。应用于机器人的末端夹持器一般采用电机或气缸作为驱动，机构原理以多连杆机构和气缸为主。例如德

SCHUNK 公司的气动平行爪夹持器、FESTO 公司的气动夹持器、亚德客手指气缸等。



图1.典型的两指夹持器



数据来源：蔡世波等《多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》，财通证券研究所

图2.典型的多指抓持手



数据来源：蔡世波等《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》，财通证券研究所

**多指抓持手：**一般为三指或者四指抓持手，主要包括联动型抓持手、多关节手指抓持手、软体多指抓持手等，其基本原理与前述两指夹持器一样，由多连杆驱动或气缸驱动实现多指的同步运动。例如 Righthand Robotics 公司的 ReFlex TakkTile 三指手、苏州钧舵机器人有限公司的均巧三指手、德国 SCHUNK 公司的 3-fingergripper hand SDH 等。

**多指灵巧手：**机构形式是多指多关节，并且最普遍的是手指数目为 3~5 个，各手指具有 3 个关节，手指关节的运动副都是采用转动副。灵巧手主要的驱动方式包括 4 种：液压驱动、电机驱动、气压驱动、形状记忆合金驱动。如日本“电子技术实验室”的 Okada 灵巧手、美国斯坦福大学研制成功了 Stanford/JPL 灵巧手、美国麻省理工学院和犹他大学联合研制的 Utah/MIT 灵巧手等。

图3.代表性的多指灵巧手产品



数据来源：蔡世波等《人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》，财通证券研究所

## 1.2 灵巧手是机器人研究的重要课题，近年来国内外研究进展加速

自 20 世纪 70 年代起，国内外对灵巧手展开了大量研究，从三指到五指，从工业到生活，从简单的抓取到灵巧操作，以期解决复杂的实际作业问题。

表3.多指灵巧手的发展脉络

灵巧手名称	主要研发单位	研究年份	手指个数	关节数目	自由度
Okada Hand	日本电工实验室	1974	3	11	11
SALISBURY Hand	斯坦福大学	1983	3	9	9
Belgrade/USC Hand	贝尔格莱德大学	1988	5	15	15
UB Hand	博洛尼亚大学	1992	3	13	11
NTU Hand	台湾大学	1996	5	17	17
DIST Hand	热那亚大学	1998	4	16	16
Robonaut Hand	NASsA	1999	5	22	14
LMS Hand	普瓦提埃大学	1998	4	16	16
GIFU Hand	日本岐阜大学	2001	5	20	16
DLR Hand	德国宇航中心	2001	4	17	13
High Speed Hand	东京大学	2003	3	8	9
Keio Hand	庆应义塾大学	2003	5	20	20
Yokoi Hand	东京大学	2004	5	15	11
Robotic Hand MA-1	加泰罗尼亚理工大学	2004	4	16	16
BH985 Hand	北京航空航天大学	2005	5	20	11
MAC-HAND	意大利热那亚大学	2005	4	12	12
NAIST-HAND	日本奈良先端科学技术大学	2005	4	16	12
SKKU Hand II	韩国成均馆大学	2006	4	13	10
HEU Hand II	哈尔滨工程大学	2006	3	9	9
SAH	Schunk 公司	2007	4	16	13
LARM Hand	Cassino 大学	2010	3	9	12
KNTH	K. N. Toos 科技大学	2011	3	6	9
Metamorphic Hand	天津大学	2013	4	12	16
Barret Hand	巴雷特技术公司	2013	3	9	9
Ritsumeikan Hand	日本立命馆大学	2013	5	16	20

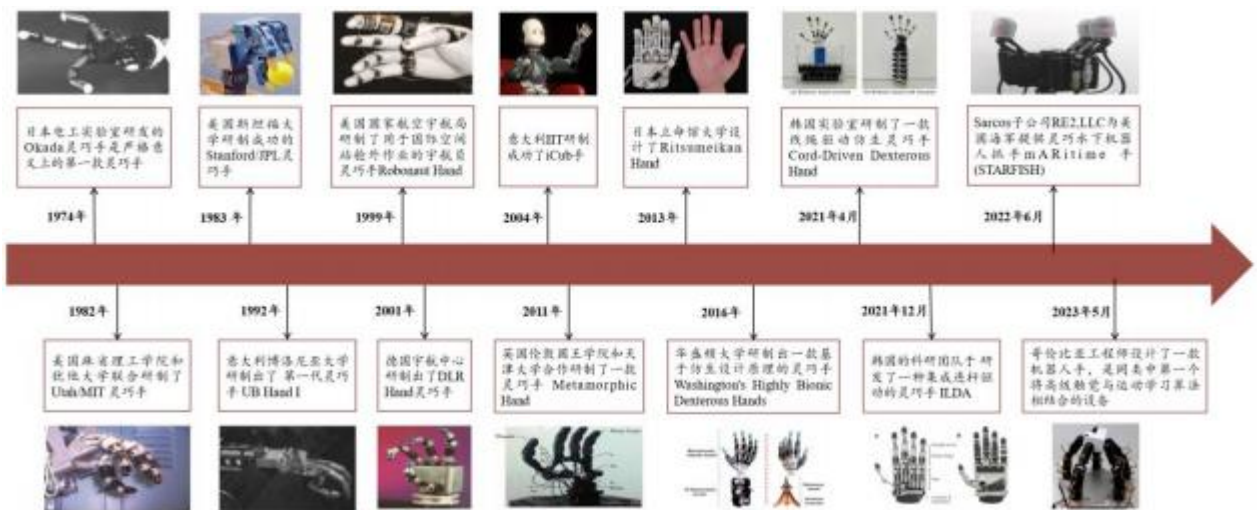
Pisa/IIT Soft Hand	意大利	2014	5	19	21
ISR-Soft Hand	美国	2014	5	15	21
Washington Hand	华盛顿大学	2016	5	15	21
SSSA-My Hand	ScuolaSuperiore Sant'Anna	2016	5	10	21
HERI Hand	意大利	2017	3	12	15
Shadow Hand	Shadow 公司	2019	5	24	20
欠驱动灵巧手	河北工业大学	2020	5	15	15
软体仿人手	上海交通大学	2020	5	15	11
Anthropomorphic Robot Hand	韩国	2021	5	15	20
ILDAHand	韩国	2021	5	20	15

数据来源：刘伟、肖钊、瞿寅朋、许守亮《机器人灵巧手研究综述》，财通证券研究所

海外灵巧手研究历经了 50 余年的发展，从开始简单的机械手发展成现在的高科技人形仿生灵巧手。(1) 20 世纪 70 年代，日本“电子技术实验室”研制出了 Okada 灵巧手，该灵巧手具有 3 个手指和一个手掌，拇指有 3 个自由度，另外两

个手指各有 4 个自由度，采用电机驱动和肌腱传动方式。(2) 20 世纪 80 年代，美国斯坦福大学研制成功 Stanford/JPL 灵巧手，该手有 3 个手指，每指各有 3 自由度，采用 12 个直流伺服电机作为关节驱动器，采用腱驱动系统传递运动和动力；美国麻省理工学院和犹他大学联合研制Utah/MIT 灵巧手，该手具有完全相同的4 个手指，每个手指有 4 个自由度，为后续仿人型多指灵巧手研究建立了理论基础。(3) 20 世纪末，随着嵌入式硬件的发展，多指灵巧手的研究向着高系统集成度和丰富的感知能力提升的方向发展，进入了快速发展阶段。(4) 近年来，高度系统集成的灵巧手具有灵活性和功能性的优势，但是复杂的系统导致了高额的制造成本并且降低了系统的可靠性和易维护性。因此近 10 年，多指灵巧手设计的一个重要方向是简化系统、提高鲁棒性。

图4.国外灵巧手的发展历程



数据来源：小米技术公众号、刘伟等《机器人灵巧手研究综述》，Kazuki Mitsui 等《An under-actuated robotic hand for multiple grasps》，Gagan Khandate 等《Sampling-based Exploration for Reinforcement Learning of Dexterous Manipulation》，Sarcos 官网、Navalnews 官网、财通证券研究所

国内灵巧手的研究则是随着国外研究的不断推进。在 2000 年左右国内一些机器人研究机构和部分高等院校相继开展了机器人多指灵巧手的研究工作。

- (1) 2001 年，哈工大（HIT）联手德国宇航中心（DLR）共同研发了一种利用齿轮以及连杆传动的 HIT/DLR 灵巧手。DLR 有 4 根手指，每根手指有 3 个自由度。指尖部分采用多连杆耦合机构，基础关节的 2 个自由度通过差动机构耦合来完成。
- (2) 2005 年，北京航空航天大学机器人研究所仿照 Stanford/JPL 手研制出了 BH-

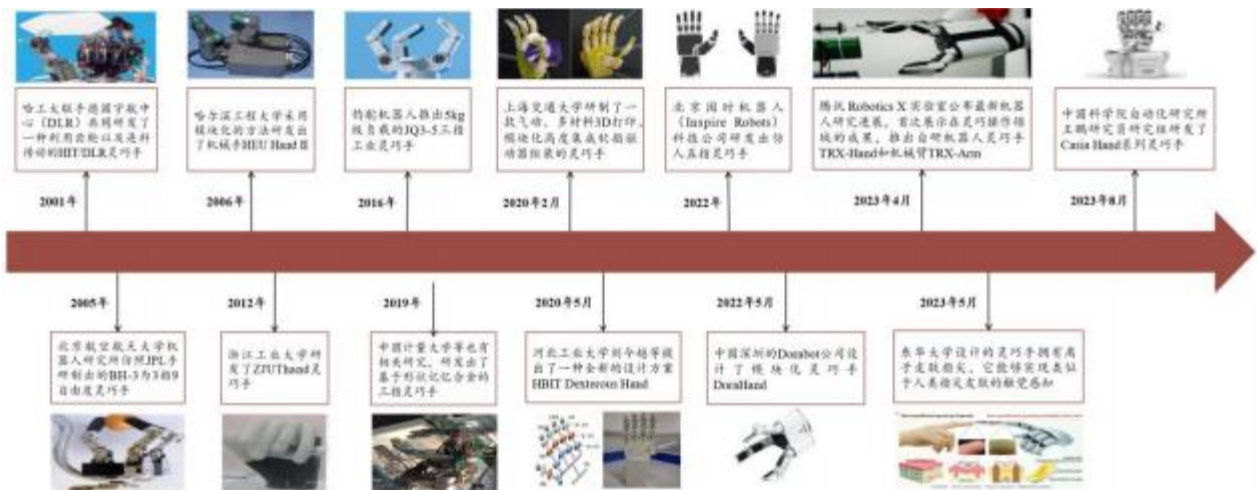
3 为 3 指 9 自由度灵巧手。BH 灵巧手主要用于多指手的操作理论研究；通过数据手套可实现远距离控制。最新一代灵巧手 BH-985，其具有 5 个手指，外形尺寸约为人手的 1.5 倍，质量小于 1.5kg，采用内置的 Maxon 直流伺服



电机驱动，用齿轮、连杆和钢丝传动。

- (3) 2022年5月23日，DoraHand是由中国深圳的Dorabot公司设计的模块化灵巧手。鉴于其5mm的厚度，指尖可以在一些狭小的空间中使用。为了提供类似人类的能力，这款手配备了一个高度敏感的0.3mm薄膜力传感器，作为触觉传感器，可同时感知力和位置。
- (4) 2022年，北京Inspire机器人科技公司研发的灵巧手。它有5个手指、6个自由度和灵活的抓取能力，大小接近人类的手。拇指手指有2个自由度，而其他手指只有1个自由度。6个带有肌腱的微型线性致动器用于驱动手指。这款灵巧手的效率很高，可以用于假肢、服务机器人和教学等领域。
- (5) 2023年4月25日，腾讯RoboticsX实验室公布最新机器人研究进展，首次展示在灵巧操作领域的成果，推出自研机器人灵巧手TRX-Hand和机械臂TRX-Arm。其中，灵巧手TRX-Hand拥有像人手一样灵活的操作能力，可适应不同场景，灵活规划动作，自主完成操作。而机械臂TRX-Arm针对人居环境自主研发，拥有七自由度和拟人的特性，具有运动灵巧、爆发力强、触控一体以及柔顺安全等特点。

图5.国外灵巧手的发展历程



数据来源：小米技术公众号，腾讯 RoboticsX 实验室公众号，高工机器人公众号，中国科学院自动化研究所官网，刘伟等《机器人灵巧手研究综述》，李达宏等《新型形状记忆合金驱动器与三指灵巧手设计》，Qingxin Meng 等《Dexterous Underwater Robot Hand: HEU Hand II》，Haiyan Qiao 等《Non-equilibrium-Growing Aesthetic Ionic Skin for Fingertip-Like Strain-Undisturbed Tactile Sensation and Texture Recognition》，财通证券研究所

### 1.3 目前学术上的研发方向及难点

虽然灵巧手的应用需求凸显并日趋旺盛，这些需求也引领着机器人多指灵巧手的研发方向和发展趋势，但目前的技术和产品依然存在诸多问题和挑战，亟待解决。

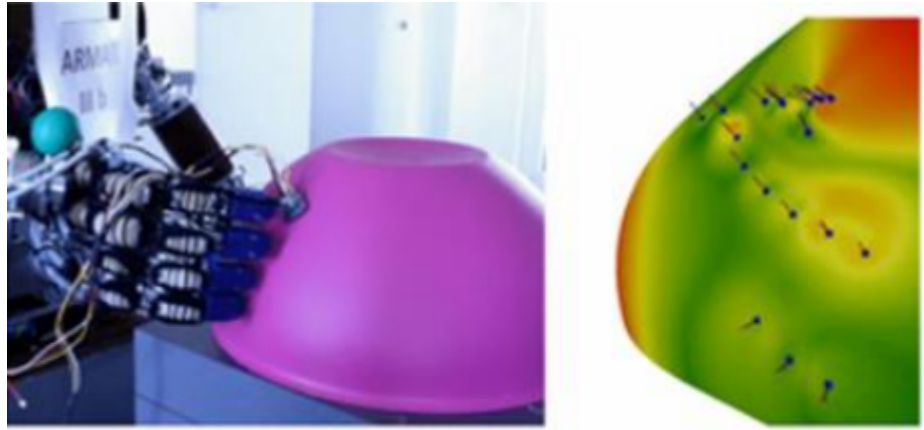


**1. 深度仿生：**多指灵巧手最初是从结构，特别是外形上进行仿生设计。随着更多更复杂的应用功能需求提出，研究人员逐渐开始从人手内在结构、驱动和传动原理等方面思考其仿生结构的设计，并逐步延伸到复合材料、智能材料的研制和设计，智能材料的研究又反过来影响多指灵巧手的仿生设计；同时，对于人手操作过程的研究，也应属于机器人多指灵巧手仿生研究的重要范畴，会在很大程度上决定多指灵巧手的仿生程度并成为重要的衡量指标。

**2. 柔性感知技术：**由于人手结构精巧复杂、功能多样、感觉丰富，实现仿生的机器人灵巧手必然需要像人类皮肤一样能够感知丰富信息的柔性感知技术和传感器。灵巧手触觉传感器用于实时传输与物体的接触信息，目前还面临着几个巨大的挑战需要克服。

- (1) **理解高级语义信息。**机器人需要从低级感官数据中提取任务需求和人类偏好等高级语义信息，首先要知道被操作的对象是什么，需要进行什么样的操作，即任务要求。
- (2) **跨模态算法，不同的感觉模式间的知识传递。**人类不是通过单一的感官形态来探测物体，而是通过多种感官整合信息，例如触觉/味觉/视觉/声音信息等都可以帮助人类理解物体。例如，视觉数据提供的几何属性，与触觉数据提供的物理属性(如重量或硬度)是互补又共存的，整合多种感知模式的传感器可以解决单一传感器的局限性，并获得更加丰富的环境信息，但对不同模态信息建立统一的特征表示和关联关系的方法仍需进一步探索。

图6.通过触觉感知重建模型



数据来源：刘伟、肖钊、瞿寅朋、许守亮 《机器人灵巧手研究综述》，财通证券研究所

- (3) **探索中的安全性问题。**在机器人手与物体的物理交互和触觉探索过程中，需要保证机器人手及其周围环境的安全。一方面，要及时采集触觉信号并传递给控制器的同时，也需要有避免不必要伤害的能力。另一方面，由于对象模型是未知的，机器人可能会违反一些关键的约束。如果在勘探过程中发生意外损伤，具有一定的自愈能力和拉伸能力可以保证系统的安全性。
- (4) **提升触觉传感器的灵活性。**因为手的表面通常是不规则的，与刚性传感器相比，柔性传感器更容易与手的表面集成。柔性传感器可以放置在整个手掌表面，而不是指尖，接触信息更加丰富。触觉传感器的其他性能也需要进一步提高，如自愈能力和自功率。具有自修复能力的触觉传感器可以提高其对非结构环境的适应能力。

图7.通过触觉稳定器控制物体



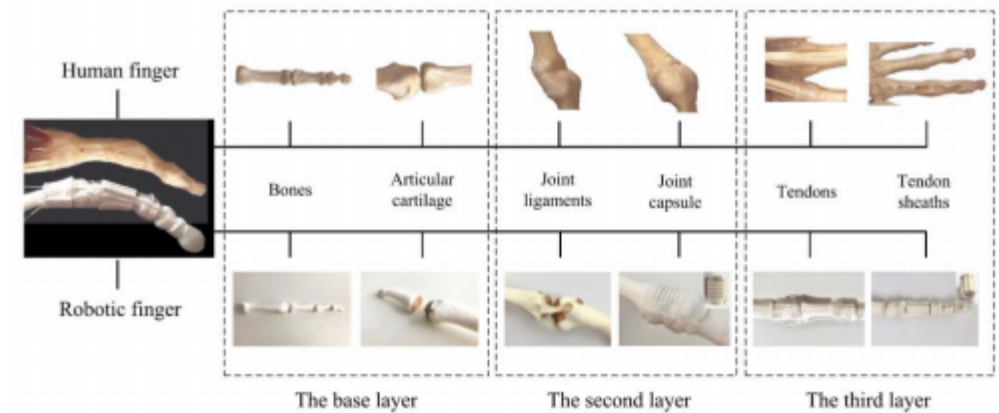
数据来源：Ziwei Xia 等《A review on sensory perception for dexterous robotic manipulation》，财通证券研究所

3. **成本控制：**现有的机器人多指灵巧手的销售价格普遍较高。例如：哈尔滨工业大学-德国宇航中心合作开发的 HIT/DLR 灵巧手售价在 90 万元人民币以上，Shadow Dexterous Hand 报价约 30 万美元，德国 SCHUNK 公司的 SVH 五指手报价 70 万元人民币以上。高昂的价格是推广应用一大障碍，许多多指手产品也仅仅在科研实验室里用于科学研究和应用基础开发。近年来，各类科研机构开始投入研发低成本的机器人多指手，从材料、加工方式、驱动器件、

感知器件等方面进行低成本化设计和制造，开发了一些样机，但其灵活性、感知丰富性和可靠性等指标普遍较低。所以，如何在性能和成本之间取得合理的平衡也是值得研究的课题。

4. **新材料的应用**：大部分灵巧式机械手的研究都是通过骨架结构以及橡胶等其他软体材料来模拟人手的外形。对于抓/握/捏/拧等日常手部动作来说，虽然可以有效进行，但是在实际应用过程中依然存在着包络性、灵活性和稳定性差等问题。如果要保持灵巧性和抓取的稳定性，根据仿生学对生物机体环境适应性强、高效能、身体结构合理等特点进行模拟及研究，开发出一种新型材料并用于灵巧式机械手的研发，可最大化生物优势。目前，中外通过研发还原肌肉纤维、结构组织等已在拾取装置实际使用中获得较好的效果。

图8.多层次的人手和机器人手结构对比



数据来源：Yiming Zhu 等《An Anthropomorphic Robotic Finger With Innate Human-Finger-Like Biomechanical Advantages PartI: Design, Ligamentous Joint, and Extensor Mechanism》，财通证券研究所

## 2 机器人灵巧手的分类与商业化应用

### 2.1 机器人灵巧手的分类

机器人灵巧手作为一种新型的末端执行器，在机器人与环境的交互中起着关键作用。根据自由度数量、驱动方式、机械传动形式以及感知技术的不同，灵巧手可以分为若干类型。

图9.机器人灵巧手的分类



数据来源：刘伟等《机器人灵巧手研究综述》，小米技术公众号，财通证券研究所

#### 2.1.1 自由度数量

机器人灵巧手从结构和功能上参考人手，能够灵活操作对象，实现对物体的灵活抓取，满足多种工作需求。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。我们暂且定义每根手指屈曲的方向为 Pitch，侧摆的方向为 Roll，那么对于 Pitch 方向的自由度，每根手指都有 3 个，共 15 个，对于 Roll 方向的自由度，大拇指有 2 个自由度，其余手指各 1 个，共 6 个。整手通过这 21 个自由度，实现了复杂多变的人手运动形式。由于真实人手的高自由度、结构紧凑、复杂等特征，绝大多数机械手都无法完美复制人手的功能，其设计和功能都是在某些特定场合和功能要求下的简化和权衡。根据严玺《仿人灵巧手的结构设计及其控制研究》，在通常情况下，灵巧手只需要 3 根 3 自由度的手指即可完成大多数任务。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/015313000331011311>