

具身智能还差一“手”

本报记者 杨鹏岳

当人形机器人已经在工厂里自如行走,仍在实验室里打磨的灵巧手便成了具身智能“木桶”上最短的那块木板。作为人形机器人与物理世界交互的“最后一厘米”,灵巧手正成为具身智能赛道的核心技术高地。进入2026年,灵巧手市场与资本交出一季度融资额近50亿元的成绩单,行业预计全年销量将突破7万只,市场前景乐观。然而,热闹之下暗藏寒意——特斯拉Optimus受手部技术瓶颈拖累多次“跳票”,让这场灵巧手量产攻坚战远比想象中艰难。

“冰与火”交织之下,业界将目光投向灵巧手产业前线:绳驱、连杆、直驱,哪一种路线能率先跑通?成本、使用寿命、算法,哪一道关隘最难逾越?当行业站在从“做出来”到“卖出去”的临界点上,这些追问的答案,正在决定具身智能究竟能走多远。



灵巧智能的灵巧手DexHand021 Pro集成多模态感知,可完成毫米级精密操作

路线之争：一道没有标准答案的选择题

当前灵巧手技术路线远未收敛,腱绳(绳驱)、连杆、直驱三大方案各有拥趸。

在押注绳驱的企业中,其出发点和实现路径迥异。

浙江灵巧智能科技有限公司联合创始人兼CEO周晨的逻辑是从“软件定义硬件”出发——“具身智能跟汽车或者工业机器人先硬件后软件的逻辑不一样,是软件定义硬件,更准确地说是模型定义硬件。”绳驱天然更接近人手的驱动方式,对物理世界的不确定性有更好的响应能力,同时,绳驱手方案可以实现更高的单根手指功率密度,整手的降本潜力更大,与机器人集成后的使用能耗也更低。

北京星际光年科技有限公司聚焦绳驱灵巧手技术方案,更看好绳驱的“性能上限”。其联合创始人周佳琪直言,“绳驱在技术上确实比直驱和连杆方案要难上几个数量级,对控制算法的要求也呈指数级上升,但它的性能上限也高得多。特斯拉在去年年中宣布全面转向绳驱路线,实际上也是看中了它的物理上限。”不过,星际光年也清醒地意识到单一的驱动路线无法覆盖全场景、

全维度的市场需求,因此其以场景痛点为核心,认为绳驱是现阶段更适配产业化落地的优选路线,并在绳驱路线上做了算法和硬件结构的技术突破,如“驱手分离”方案与“绳索全自动自张紧算法”,同时布局了直驱产品线作为补充。

帕西尼感知科技(天津)有限公司则选择了截然不同的连杆方案。在该公司采集中心总监林统看来,腱绳方案爆发力强但使用寿命受限,直驱方案控制优秀但输出上限不足;相比之下,连杆方案是兼顾高性能、长使用寿命与高稳定性的最优解,更契合现阶段产业化落地与长期部署的商业化需求。他强调,技术路线的收敛绝非单纯取决于机械结构,而是取决于算法能否真正驾驭硬件。灵巧手的终极比拼,不仅是单一的物理参数,而是整套软硬件系统在真实复杂场景中的综合表现。

而浙江强脑科技有限公司选择了“全直驱+可反驱”的独特路线。强脑科技合伙人何熙昱锦表示,这一选择不仅仅是硬件层面的决策,更是从算法可训练性角度倒推出的结果。可反驱关节在运动过程中

能够同步采集动作轨迹与接触力感数据,天然适配模仿学习和强化学习的训练需求,也大幅降低了仿真环境向真实部署迁移的难度。“未来具身智能的发展越来越依赖模仿学习和强化学习,而硬件能力直接决定机器人学习和执行动作的上限。”她说道。

综观多家企业的技术路线选择,实质上对应着三种不同的产业哲学:绳驱追求物理性能的极致上限,连杆押注现阶段的工程可靠,直驱则为算法的可训练性让渡了部分性能空间。专家指出,未来2~3年,行业不会快速收敛到单一路线,而是会根据应用场景形成差异化发展格局。

这意味着,在相当长一段时间内,市场将同时容纳多种技术方案,各自的演进迭代将比“谁对谁错”更有意义。不过,无论选择哪条路,产业都必须面对一个更为残酷的现实:如果做不出来、造不便宜、用不长久,再完美的技术方案也只能停留在实验室。特斯拉Optimus的一再跳票,恰恰印证了从技术验证到规模化量产之间,横亘着一道远比路线选择更为艰险的鸿沟。

量产之困：当“做出来”遇到“卖出去”

灵巧手从实验室走向量产,面临从技术研发、工程量产到市场接受三个层面的挑战。

首先是技术极限的突破——驱动微型化、传动可靠性、感知与控制算法的协同,每一项都足以构成“卡脖子”难题。以特斯拉在灵巧手研发上的困境为例,周晨认为,特斯拉推迟量产和开源灵巧手设计的底层逻辑是同样的,它在设计灵巧手时低估了绳驱灵巧手量产的难度,还是传统的功能实现和量产降本两者课题分离的思路,但在绳驱灵巧手上需要从一开始就把量产可行性作为重要的设计限制条件。

周晨进一步指出,“最难啃的骨头”其实是感知硬件(触觉传感器)和驱动模型的映射适配。他表示,人手的触觉和灵巧手的触觉短期很难做到近似,最难的部分是:如何把手对客观物理世界从感知到操作的闭环,在灵巧手不同的感知器和操作能力上进行迁移和复现。“就像鸽子可以靠身体感受地球磁场实现导航,人类需要依赖指南针来实现同样的导航目的。两者本体不同,但目的一致,这种迁移是最难的部分。”

何熙昱锦从系统工程角度呼应了这一判断:“这些问题本质上不是孤立存在的。如果一定要说灵巧手最难啃的‘骨头’,我认为是在有限体积内实现接近人手水平的综合能力。”机器人灵巧手需要在很小的空间

内,同时完成驱动、传动、感知和控制系统的集成。她指出,对于具身智能来说,真正的挑战在于让机器人既能“动起来”,又能“感知到”,还能“学得会”。因此,未来灵巧手竞争的关键,不会是单一部件参数的领先,而是机械结构、传感系统与智能算法的闭环融合能力。

如果说技术挑战考验的是研发能力的上限,那么量产考验的则是工程体系的成熟度。多位受访者不约而同地将“批量一致性”视为核心瓶颈。

林统直言,灵巧手本质上是高密度的精密机电系统,如何在海量生产中确保每一只手的长期稳定性、可靠性以及跨批次的一致性,才是真正决定产业化落地速度的关键。

何熙昱锦进一步指出,实验室里做出一只性能优秀的灵巧手并不困难,难的是生产成千上万只产品时,依然能够保证性能一致性、可靠性和成本可控。这背后考验的是设计、工艺、供应链和质量管理的综合能力。“未来行业竞争的重点将逐步从单点技术创新转向工程化和产业化能力建设。”

再进一步,即便技术攻关和工程体系都到位了,还有一个更根本的问题需要回答——市场为什么需要灵巧手?

现在的灵巧手产业,类似智能手机的发展早期。随着供应链的逐步完善与平台

化方案的普及,行业将迎来明显的降本拐点。林统认为,未来3~5年,灵巧手的整体成本曲线将进入稳步下降区间,当具备高自由度、精细力控、高运动能力的灵巧手,单手成本逐步控制在5000~10000元时,行业将迎来真正意义上的大规模普及与爆发。

值得关注的是,多位受访者都强调了一个反直觉的判断:成本不是普及的最大障碍。

周晨的比喻最为犀利:“灵巧手普及的主要问题不是成本,目前即使免费提供灵巧手,还是没办法普及。就像如果没有司机,免费送车也没人能开上路。”他认为从“做出来”到“卖出去”的关键是“软硬一体的、灵巧操作模型的能力,挑战主要来自数据和模型方面”。

何熙昱锦则补充了一个容易被忽视的维度——用户的隐性成本。客户的实际成本不只是采购价格本身,还包括从拿到产品到真正跑通应用场景所需的开发时间和人力投入。对于许多中小企业和研究机构来说,这部分隐性成本往往不亚于硬件本身。

综合来看,灵巧手的量产困境并非单一的“技术攻关”或“降本增效”问题,而是一个涉及技术突破、工程体系建设、用户生态培育的系统工程,其中任何一个环节的缺失,都可能成为产业化的瓶颈。

从指标竞赛到系统能力：重新定义“灵巧”

当量产问题逐步解决之后,一个更深层的问题浮出水面:什么样的手才算“真正灵巧”?

行业正在经历一场从“参数崇拜”到“任务能力”的观念转变。当前市场上灵巧手自由度从6~42个不等,但受访企业一致认为,自由度的堆砌并不等同于灵巧性的提升。

“6自由度严格来讲不算灵巧手。42个自由度其实是冗余设计。”周晨从生物力学角度分析道,人手的22个自由度本质是为了实现对任意物体在三维世界中6个自由度的锁定和调整,至少需要三根三关节手指,至少12个自由度。真正必要的自由度在20个左右。

林统则从控制角度指出,自由度并不直接等同于灵巧度。当自由度超过一定阈值后,盲目堆自由度不仅会导致硬件成本增加,还会显著提升控制算法的复杂度,在实际作业中反而可能降低任务的成功率。何熙昱锦也强调,有一个常见误区,就是认为自由度越多越先进。事实上,如果控制能力跟不上,过多自由度反而会增加系统复杂度和故障率。

如果说自由度的讨论反映了行业对“硬件指标”的反思,那么灵巧手与机器人“大脑”的协同,则进一步将讨论从硬件拉向了系统层面。

周晨指出,灵巧手与机器人大脑的协同需要在端侧部署“感知/操作”模型,这样大脑拆解的任务链里的具体动作才能真的在物理世界中完成。据悉,灵巧智能在人手感知和操作的数据采集、端侧模型训练范式上重点投入,成果已经开源。

何熙昱锦强调,再先进的灵巧手,如果没有智能决策能力,也只能完成预设动作;而再强大的大模型,如果无法通过灵巧手与物理世界交互,也难以真正实现具身智能——未来竞争的关键是从感知、决策到执行的闭环能力。

成本才需要标准化。

何熙昱锦则提出了一条务实的路径:先在软件和数据层面形成事实上的互通,再逐步向硬件接口延伸。她指出,标准化的最终目的不是统一产品形态,而是降低协作成本、提升产业效率。在这一进程中,软件层面的互通往往比硬件接口的统一更容易实现。

上述判断为尚在技术演进期的行业提供了一种更灵活的标准化思路——不急于统一硬件形态,而是先在开发和数据层面降低协作门槛。沿着这一思路,关于产业终局的判断也逐渐清晰:灵巧手赛道目前有三种打法——独立集成商、整机厂自研和零部件企业向下延伸。

周晨判断,未来独立集成商的产品会是主机厂的主流选择,少数整机厂有能力研发自己的灵巧手,零部件企业会回归其专业的零部件生产能力。

何熙昱锦则预测行业将呈现“两极化”趋势:头部机器人整机厂会坚持核心部件自研,以获得系统级优势;另一方面,也会出现一批专业化灵巧手企业,成为行业级供应商,为多个机器人平台提供解决方案。

两种判断虽有差异,但指向了一个共同趋势:独立灵巧手企业将在产业生态中占据重要位置,其核心竞争力不在于某一次技术突破,而在于能否同时具备核心技术、量产能力和生态合作能力。

关于未来3~5年的突破方向,多家受访企业的判断颇为一致——触觉感知。

林统认为,“高精度触觉的普及化”将是最具决定性的突破。真实物理世界中,绝大多数精细操作本质上都离不开触觉的闭环反馈。未来人形机器人之间的核心差距,在于对物理世界交互逻辑的深度理解,高精度触觉感知正是开启这一核心能力的钥匙。

至于灵巧手真正的“放量时刻”,各家企业都保持了审慎态度。

周晨表示,灵巧手的放量时刻会是灵巧操作模型技术收敛之后,硬件成熟是必要非充分条件。

林统认为,放量需要两个条件同时成熟:一是供给端的自我迭代,灵巧手在工作寿命、生产成本与运行可靠性上必须达到严苛的工业级标准;二是需求端的规模效应,人形机器人市场的万台级交付形成强大的规模化牵引。

何熙昱锦给出了相对乐观的判断——真正的放量时刻,需要三个条件同时成熟:首先是应用场景明确,机器人能够持续创造商业价值;其次是整机成本下降,达到市场可接受水平;第三是灵巧操作能力足够成熟,能够稳定完成真实环境中的复杂任务。如果这三个条件逐步具备,预计未来3~5年灵巧手市场将进入快速增长阶段。



星际光年推出“驱手分离”架构的Panthion系列绳驱灵巧手



灵巧手被视作人形机器人与物理世界交互的“最后一厘米”