

结合艺用解剖原理的人形机器人灵巧手形态设计

Artistic Anatomy-based Morphological Design of Humanoid Robotic Hands

张升化 Zhang Shenghua 王红光 Wang Hongguang 叶林奇 Ye Linqi 马文甲 Ma Wenjia

内容摘要：

灵巧手是人形机器人的核心功能执行终端，在当前相关产业迅速发展的推动下，其功能不断取得突破。但灵巧手形态表现作为人机交互的重要一环，尚未受到与其价值相匹配的充分重视。本文提出了一种灵巧手的形态设计创新方法，该方法通过感性工学定量分析感性描述、建立美学模板、进行工程转化，挖掘出艺用解剖原理与灵巧手形态设计的关联，从而将其运用到灵巧手造型、比例、结构等形态要素的设计过程中。基于该方法研制出的灵巧手，在保持功能可靠性的同时，实现了视觉美感的显著提升。

关键词：灵巧手、形态设计、感性工学、艺用解剖原理

DOI:10.16272/j.cnki.cn11-1392/j.2025.08.014

灵巧手作为人形机器人核心功能执行末端，近两年呈现出蓬勃发展的态势，是具身智能人形机器人领域重要的产业布局。^[1]灵巧手的抓取、操作等实用性能是当前研究的焦点^[2]，但其形态表现作为视觉感知与情感传递的关键载体，尚未受到充分重视。在形态表现层面增强灵巧手美感，提高拟人动作合理性，能够引发用户积极心理反应，促进自然情感联结的建立。

如何在兼顾灵巧手功能性指标的同时实现优秀的形态表现，始终是笔者关注的核心课题。2025年1月，笔者带领艺术、工程团队开始灵巧手A的研发工作。研发伊始，基本要求即已确定：设计优美的形态，对标行业先进技术水准，以美学与功能的双高表现实现差异化。

一、基于研究现状的思考

1. 研究现状：现有灵巧手普遍存在造型臃肿、比例失调、尺寸过大、结构失真等形态问题，从当前国内外知名灵巧手与190毫米长男性手对比（图1），可直观地看出它们在造型比例、尺寸、姿态等方面的整体表现。

2. 认识错位与理论缺失。形态不单指它的造型，还与内部结构息息相关，结构与造型有着与生俱来的联系。^[3]而当前机器人的造型研究多聚焦于外观的形、色、质^[4]，并未充分重视结构与造型的一体性关联。针对人形机器人灵巧手形态设计方法，目前学术研究存在空白。

3. 方法论缺少。在广泛的工业设计中，对复杂对象进行造型设计时，由于功能导向的需求，目前大多采取先确定产品功能结构模块，再进行外观设计的路径。^[5]这种流程导致各环节间缺少交叉协作。通过对现有

灵巧手的对比分析可以发现，其设计普遍有功能导向特点，在美学层面存在明显的妥协。

事实上，工业设计领域一直在倡导艺术美学与科学技术融合的设计理念^[6]，而灵巧手未展现出美学与工程的良好平衡。究其原因，还是在于主观感受性强、缺乏量化的美学评价，在严格的技术约束、科学客观性要求限制下，难以顺利实现工程转化。

二、美学向工程转化的挑战

1. 手部形态美学评价的感性特点

手部是人体中动作幅度最大的部分，它在传神中起着重要的作用，手可以说是“情感的触角”^[7]。艺术作品很注重对手部形态的表现，著名典故“黄筌改画”描述了吴道子所绘钟馗“以左手捉鬼，以右手执其鬼目，

张升化，上海大学上海美术学院
王红光，清华大学机械工程学院
叶林奇，上海大学未来技术学院
马文甲（通讯作者），清华大学美术学院



1 知名品牌灵巧手与人手对比



② 艺用解剖对手部形体结构、动态关系的抽象归纳

③ 现有部分灵巧手组成的调查样本及其基于 Likert 量表的评分情况

笔迹遒劲，实绘事之绝格也”[8]。画家通过对手部的刻画来表现钟馗的孔武有力。唐代诗人白居易在《霓裳羽衣歌》中以“小垂手后柳无力”来描绘舞者的纤纤玉手。在雕塑艺术中，观音、文殊菩萨之手类似古代仕画中的纤秀之手，天王、金刚、力士之手却强调其肌肉质感。上述对手部形态的刻画、描述或塑造，往往都是基于审美经验进行的夸张或强调，带有浓厚的主观感性色彩。

2. 工程技术的科学客观性与技术实现约束

灵巧手研发作为应用科学的重要实践领域，科学客观性是其根基，这意味着工程过程高度依赖实验数据、理论模型和计算验证，排斥主观臆断和模糊经验，这与感性美学的工作方式有较大差异，需要探索基于二者共性逻辑的内在关联，产生交叉协作的工作方法。同时，技术实现面临多方面约束，远非理论上的理想状态。能够兼顾各项技术指标的设计方案具有极高的实现难度。[9] 这迫使工程师必须在科学原理允许的范围内，进行大量的权衡、优化，甚至妥协，寻求在多重限制条件下的最优解。因此，在这种多重限制下实现美学的工程转化面临很大难度。

3. 二者结合的难点：方法探索与双高评价

从上述分析可知灵巧手形态设计面临的核心挑战：感性美学如何量化及其怎样向工程技术转化。其中关键点在于，需要找出阻碍对美学进行工程转化的最大难点。最终，二者结合后能否达到很好的平衡，在于能否满足美学标准与工程性能指标的双高评价要求。

三、定量分析感性描述、构建美学模板与设计制作

笔者通过深入研究灵巧手产品发现，工程技术从手部解剖结构中脱离出抓握、操控等核心生物力学功能，将骨骼与肌腱网络简化为可驱动关节结构与转动机制。这种转化提取与艺用解剖原理对人类手部形体结构的抽象归纳认识[10]（图2），在核心原理上展现出深刻的关联：二者都不追求绝对的物质复制，而是通过对生物结构本质的提炼与功能抽象来实现认知目标。那么，基于这种内在关联，是否可以把艺用解剖的美学表达认识经验运用到灵巧手形态设计之中呢？

1. 对感性描述进行定量分析

为了进一步深入挖掘这一关联，笔者基于已有的灵巧手样本，以感性工学的研究方法设计了调查模型，对灵巧手的形态表现进行了量化研究。

在服务场景下，机器人的亲和形态显得尤其重要。灵巧手如何区别于工业机器人功能终端的冰冷感与机械感，表现“美感与亲和力”是研究的核心。笔者团队选择8个研究样本，以调查问卷的形式，采用语义差异法考察各个灵巧手的“美感与亲和力”表现。30名受试者对样本进行了五级 Likert 量表评分，评分范围为：-10分（无美感与亲和力）至10分（美感与亲和力极好），以此初步标定各样本的形态表现。（图3）

样本群评分值整体偏低，反映出受试者对样本群的总体评价不高。基于这种情况，笔者团队立刻意识到，那些影响评分的细节可能就是灵巧手A实现差异化的关键。由此团队决定提取出得分较高的样本8、样本4、样本5、样本3，组成第二轮测试样本，采用问卷调查进一步提炼出影响现有灵巧手形态评价的要素。

在调查中，笔者以“哪个细节最影响灵巧手的美感与亲和力？”的设问进行，从受试者的回答中提取了一系列关键表述，将这些关键表述进行整合，进一步归纳为四大要素：（1）比例；（2）外观造型；（3）构造；（4）运动仿生。四大要素指向最终的“高拟人仿生度”要求。（表1）调查反映出用户对灵巧手形态表现的评价，是参照人类手部这样一个生物体客观对象进行的。灵巧手的自由度会增加，大小、形状更加拟人化，系统集成度更高，结构会更加精细化，是重要的发展趋势。[11] 即灵巧手越来越像人手，无论在工程技术层面还是在美学审美层面，都是统一的认识。这一实际需求促使工程与美学的融合产生明确的目标导向。

四大要素的提炼印证了笔者的设想：艺用解剖原理可以通过转译，有效迁移至灵巧手的形态设计。因为艺用解剖原理也是针对造型比例、结构动态进行处理的认识方法论。为了使最终的灵巧手各方面表现得“像人手”，笔者团队结合功能需求与技术现实，进一步以层次分析法对调查所得的感性描述进行推论，从基层开始逐层拓展推论，解析子阶层，直至最终得出清晰的工程转化指标。（表2）至此，建立起工程转化的量化框架。通过对指标层数据提取、验证与标定，结合“像人手”的要求，团队逐渐凝练出阻碍美学进行工程转化的最大难点——驱动系统在小尺寸空间内的高密度集成。

2. 构建标准手部美学模板

通过层次分析推论，笔者团队明确了灵巧手A的研发路径。首先需要构建标准手部美学模板（以下简称“美学模板”），以三维数字模型的方式建立数据基础与造型依据。美学模板以艺用解剖原理为指导，充分兼顾工程技术实现需求，形成从整体到局部的系统形体表征。（图4）其

核心工作聚焦于以下两个维度：

(1) 标定基础比例数据。如前文所述，与人手等大是美学与工程学共同追求的目标，实现这个目标主要存在的挑战是驱动系统的高密度集成。如何有效地减少外形尺寸和结构复杂度一直是国内外研究机构研究的重点，要想减小外形尺寸，不但要创新型的结构设计，也要重新选择驱动器、减速器、传感器及电气系统等。^[12]笔者通过研究现有灵巧手样本发现，最小的灵巧手长度约为 210 毫米，其内部尚有空间可以压缩。通过对灵巧手 A 驱动系统设计预期的仔细论证，工程团队认为，可以在类人手各尺寸范围内高密度集成驱动系统。最终，美学模板尺寸设定为 190 毫米长，与我国成年男子手部尺寸相当。^[13]手长是一个最为重要的基准，笔者以此基准结合艺用解剖中的比例分割原理，确定出整手其他各部分的尺寸。

(2) 归纳通用美学形体。男性与女性手部形态各有特点。男性手形体感较强，骨节结构较为清晰。女性手形体感较为收敛，整体观感较为匀称纤细。基于灵巧手的通用需求，美学模板在形体特征上平衡了男女手部特点，在功能指标上兼顾了结构稳定性与操作精度，在视觉观感上平衡了厚重度与纤细感。

美学模板的价值在于，不仅把大家普遍觉得好看的手的形态规律总结出来，避免了设计者个体的主观臆断，更能耦合工程实现的技术需求，为后续灵巧手设计构建了兼具美学完整性与工程可行性的转化模型，降低了工程技术与美学表现协调的工作难度。在设计制作阶段，笔者将美学模板进一步转化为可制造的实体结构。(图 5)

3. 设计制作

笔者团队在设计制作阶段集中解决了驱动系统在小尺寸空间内的高密度集成问题。这一阶段也体现了艺用解剖原理的抽象归纳认识在结构设计中的运用。下文按照设计流程的先后顺序对核心内容进行描述。

步骤一：复杂运动的转译与复杂关节的几何化重构

人类手部运动复杂，它的面积只占全身不到 5%，却承担了身体 57% 的功能。^[14]手部结构构造的复杂性是决定手部复杂运动的基础，灵巧手 A 要实现小尺寸空间内的高密度集成，完全模拟人手结构与运动既不现实也非必

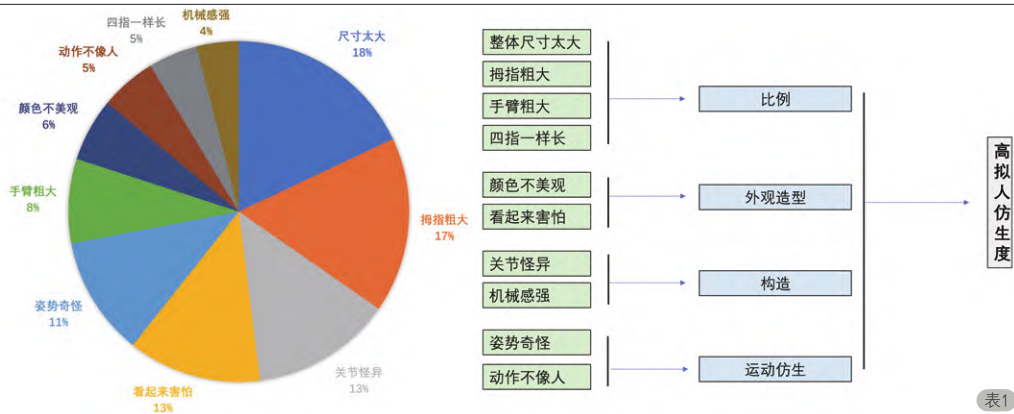


表1

基层	美感与亲和力、高拟人仿生度									
指示层	高度集成									
分解层	比例外观					结构				
要素层	比例		外观造型			构造		运动仿生		
认识层	艺用解剖抽象归纳处理等方法									
导向层	比例关系与整手美学模板			硬质材料，非撞色		拟人形体与关节结构		“灵巧”性、直接力传导，内置驱动		
拓展层	整手与各部位黄金比例			平衡男女手部形态特征		抽象转译几何化关节轴		模拟肌肉与筋腱拉伸		模拟骨骼关节运动
技术层	指长、掌长与掌宽掌厚	各指节长、直径变化趋势；掌弧、各曲面曲率	男性手掌宽厚稳重的观感；结构清晰；形体强烈	女性手掌纤细柔长的观感；形态视觉统一感强	非正交关节轴向正交关节轴转化，减少体积、与制造难度	映射自由度，满足精细操作需求	抽象复杂结构，设计连杆、旋臂；采用全主动、分布式驱动，模拟人手各部分独立功能与分布式驱动			归纳人手骨骼复杂构造，改变掌腕骨、掌指关节“滚动+滑动”运动方式为“转动”方式，满足工程实现要求
指标层	细节数据提取、验证与标定									

表2

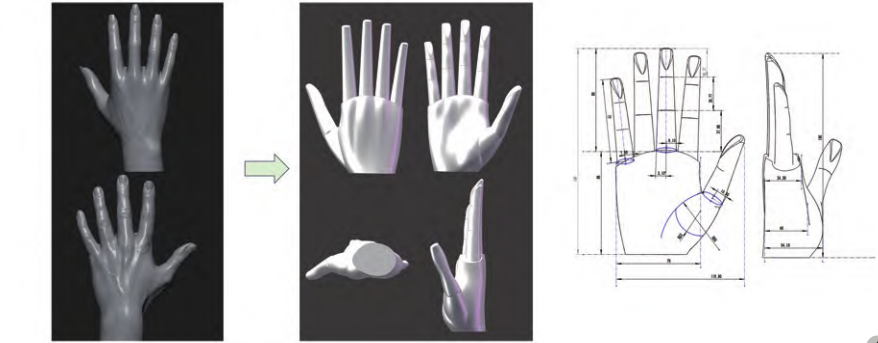
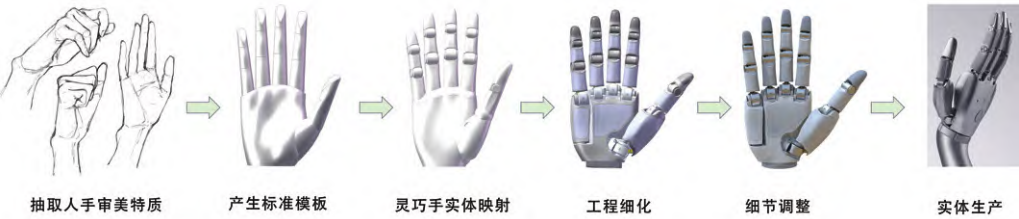
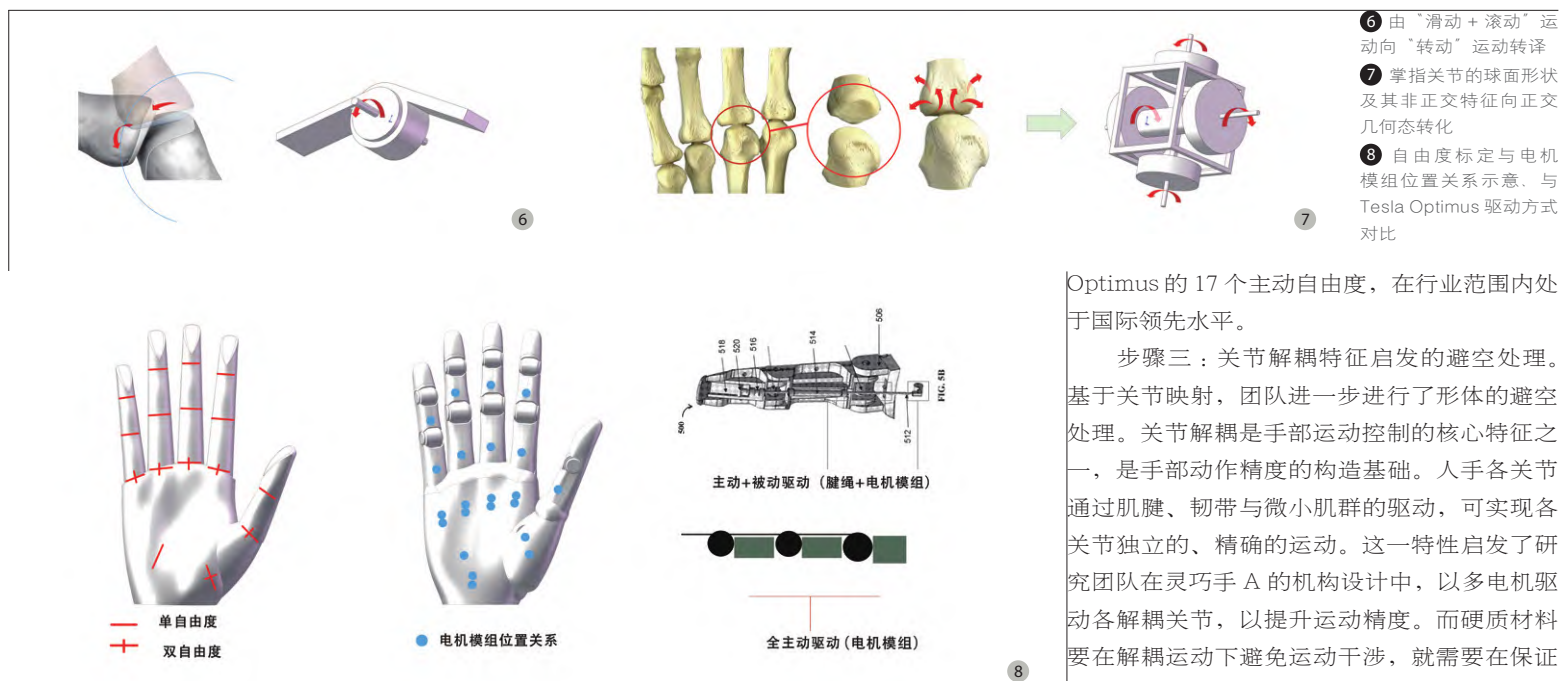


表1 第二轮样本的关键要素凝练
表2 层次分析推论表
4 平衡男女手部形态特点的标准手部美学模板建模及其尺寸标注
5 灵巧手 A 设计流程示意



5



要。那么就需要立足于工程现实要求，对手部运动进行转译，对复杂结构进行重构，面向小空间布局进行结构创新设计。这既是灵巧手结构工程实施的先行工作，也是结构工程设计的指导原则。它决定了灵巧手最终能否准确复现人手的运动学特征，实现运动形态的有效映射。

(1) 滑动、滚动运动向转动运动的转译。手部掌骨、指骨形状复杂，关节面之间的球面接触导致运动学关系并非单一形式，而是呈现“滚动+滑动”的特点。现有的结构工程难以在紧凑的空间内精确模拟这种运动形式。虽然“滚动+滑动”运动形式复杂，但掌指、手指各关节在视觉表征上却呈现出旋转运动的特点，而旋转运动在工程实现层面可通过轴转动机构来模拟。(图6)这种特殊运动形式就被抽象转化为可实施的工程解决方案。

(2) 非正交关节轴的运动特征提取。人手掌指关节轴具有非正交特点，既不互相垂直也不互相平行，这种构造使手指具备复杂的运动模式，例如屈伸、内收外展、旋转运动，以及它们之间的随机组合。工程上实现这种复合运动需要类球形关节等复杂的机械设计，无法满足灵巧手的稳定性、经济性、空间集成、机构冗余等工程要求。考虑到一些细微运动在灵巧手应用场景中并不常用，适当的简化就成为合理的工作。笔者团队抽取出手掌指关节最重要的

两个运动特征：屈伸与侧摆。既保留了关键的动态功能，又可在工程上实现正交关节几何态转化。(图7)借此方法，实现了手部掌指关节的结构与动作特征映射。

步骤二：分布式驱动引导下的关节映射。人类手部复杂动作的实现依赖于多个肌肉、筋腱、韧带的协同工作。这种分布式驱动的解剖学特征使手部既可完成强力抓握，又可做到细致捏取。因此，恰当转译人手分布式的驱动特征，对实现灵巧手A的灵巧性和力量要求至关重要。现有灵巧手自由度普遍较低，与人手差距较大，重要原因是在狭小的空间内很难实现人手多自由度关节的结构转化。根据前述研究内容，笔者团队归纳出6个正交关节轴以匹配6个双自由度，10个轴转动关节轴以匹配10个单自由度，借此将人类手部关节特征与运动关系转化为总计22个自由度，完整实现人手关节映射。(图8)团队通过22个电机模组匹配，以分布式驱动的方式，实现22个自由度的全主动驱动。相比于以Tesla Optimus为代表的“主动+被动”分布与集中并置的驱动方式^[15]，此设计最大程度地消除了耦合干扰，使灵巧手A实现了对人手精确运动与细致姿态的模拟。根据目前已公开的数据，灵巧手A实现人手大小空间的内置22个全主动自由度，优于知名先进灵巧手如Shadow Hand的外置20个主动自由度、Tesla

Optimus的17个主动自由度，在行业范围内处于国际领先水平。

步骤三：关节解耦特征启发的避空处理。基于关节映射，团队进一步进行了形体的避空处理。关节解耦是手部运动控制的核心特征之一，是手部动作精度的构造基础。人手各关节通过肌腱、韧带与微小肌群的驱动，可实现各关节独立的、精确的运动。这一特性启发了研究团队在灵巧手A的机构设计中，以多电机驱动各解耦关节，以提升运动精度。而硬质材料要在解耦运动下避免运动干涉，就需要在保证整体曲线流畅连贯的前提下，对关节处进行避空，以保障各部分在运动时能够互相避让，减少机构干涉损伤部件的风险。例如在握拳时，第五掌骨可以向掌内屈弯，以收到更好的抓握效果。根据这一关节解耦特性，将第二至第四掌骨归纳为刚性体，独立出第五掌骨，以允许其进行内屈运动，并在其对应的灵巧手A手掌区域进行了避空处理。灵巧手在抓握时，第五掌骨区域可以内屈，具有很好的仿生姿态。但这一生物学特征在现有的灵巧手产品中并未受到广泛重视。(图9)

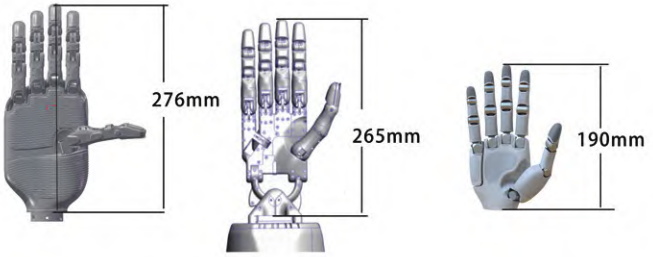
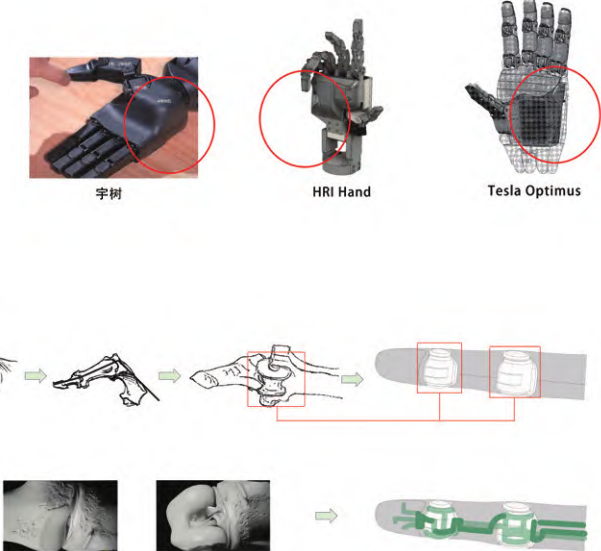
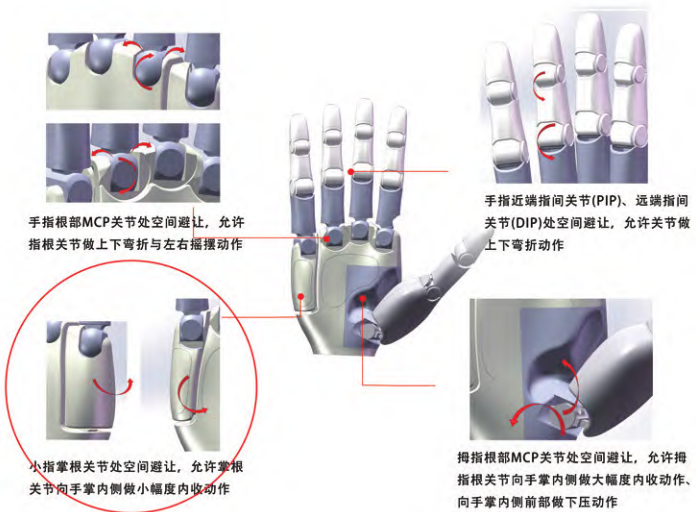
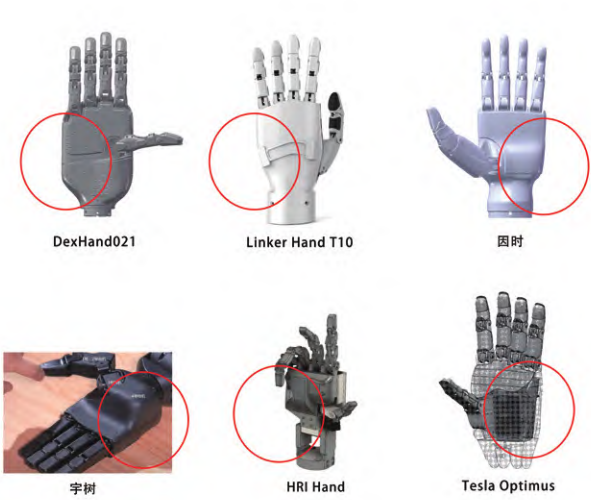
步骤四：机构整合与机电集成。机构整合与机电集成面向灵巧手A各部分工作的最终拟合。机构整合的核心在于，实现灵巧手机械结构及其运动的仿生拟态。例如笔者团队基于艺用解剖形体认识方法，设计了仿生关节运动链系，采用“卯扣”式构型映射关节的形态与功能。这一设计对形态美学的影响是重大的，前文问卷调查中受试者认为的“关节怪异”，就指出了某些灵巧手关节构造与人们视觉审美经验不相符的现象。在机电集成方面，团队通过驱动单元（集成自研伺服电机与减速机构）的拓扑优化与紧凑排布，实现了肌肉-肌腱系统的动力学等效。灵巧手A采用了受人体关节韧带分布特点启发的电气线束布局方法(图10)，此方法提高了内部空间的利用率，也优化了整体形态的视觉协调性，针对当前小空间集成难

9 与现有产品相比,灵巧手 A 第五掌指形体避空及其关节解耦仿生优化

10 以食指为例,受解剖特点启发的“卵扣”关节机构设计与电气线束分布示意

11 灵巧手 A 与 DexHand、Shadow Hand 的尺寸对比

12 以电子皮肤塑形为例的细节推敲调整



点,提供了一种解决思路。相比于 DexHand、Shadow Hand 等知名产品,机电系统高密度集成使灵巧手 A 在整手尺寸方面表现优秀。(图 11)

步骤五:调整定型。在完成灵巧手 A 主体与各模块的集成后,设计进入最后的精细化调整阶段。这一阶段需要针对形态、运动逻辑与材料适配性进行系统优化。例如,曲面衔接处的连续性需经过拓扑检测,确保平滑过渡;对于运动区域,则要通过运动仿真检查微小位移下的潜在干涉,并不改变整体拓扑的前提下,进行局部重构。电子皮肤的敷设需同步考虑手掌基底的曲率变化与皮肤应变阈值,实现无应力贴合。(图 12) 经过验证后,所有功能指标在装配体层面获得统一实现。灵巧手 A 最终定型、完成生产。

四、实物发布及与同类产品横向对比

灵巧手 A 是一款面向精细操作场景的功能执行末端,它虽然定位为精细操作,但同时兼顾了力量需求,不仅可以搭配人形机器人,也可以拓展搭配多轴机械臂等平台进行应用。凭借高自由度、仿人化设计和智能操控能力,在科研与教育、服务与家庭场景、工业制造与装配、医疗与健康、太空与深海探索、危险救援与军事、艺术与创意等多个领域展现出广泛的应用潜力。

灵巧手 A 制作完成后,笔者团队再一次以语义差异法设计了问卷调查,将其投入样本,与首次调查时评分较好的 4 个样本进行比较。此次重新随机选取 20 名公共场所工作人员作为受试者,仍以“美感与亲和力表现”进行评分,Likert 五级量值也保持一致。通过统计,灵巧手 A 得分遥遥领先。(图 13) 此测试证明了灵巧手 A 形态表

现优秀。

2025 年 5 月 19 日,灵巧手 A 在 IEEE 国际机器人与自动化大会(ICRA 2025)上正式发布。(图 14) ICRA 是机器人学和自动化领域最具影响力、规模最大、学术水平最高的会议之一,每年吸引全球数千名研究人员、工程师和企业代表参与。灵巧手 A 在展会中与多款灵巧手产品同台竞技,其优秀的形态和表现受到国际行业参会者的广泛好评^[16],为进入应用领域奠定了初步的用户基础。灵巧手 A 在性能上也达到了设计预期,与现有灵巧手的性能指标相比并不逊色,并且拥有多项先进功能(表 3),尤其在尺寸、全主动自由度、动态触觉、分布式内置驱动等方面特色突出。至此,灵巧手 A 实现了美学表现与功能指标双高评价的预设目标。



样本	3	4	5	8	灵巧手 A
评分	75	95	115	110	185

13

产品	自由度	驱动方式	传感	输出力	速率	精度	灵敏度
Shadow Hand	20 主动、4 被动	分布式、外置	触觉	N/A	N/A	N/A	N/A
DH2012	12 主动、8 被动	集中式 + 分布式、内置	触觉	15Kg	N/A	N/A	N/A
Unitree Dex5	16 主动、4 被动	集中式 + 分布式、内置	触觉	N/A	N/A	N/A	N/A
智元	12 主动、7 被动	集中式 + 分布式、内置	视觉、触觉	N/A	N/A	N/A	N/A
MagicHand S01	11 主动	集中式、内置	电流、触觉	5kg	N/A	N/A	N/A
XHAND1	12 主动	集中式、内置	N/A	单手 80N、负载 20Kg	N/A	N/A	N/A
DH-ROBOTICS	6 主动、5 被动	集中式、内置	力传感	N/A	N/A	N/A	N/A
eHand-6	6 主动	集中式、内置	触觉	单手 10N、负载 5kg	N/A	N/A	3N-10N 动态力控
RH56E2	6 主动	集中式、内置	触觉、力传感	单指尖力 30N	N/A	重复定位 ±0.2mm	N/A
兆威机电	17 主动	集中式、内置	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
灵巧手 A	22 主动	分布式、内置	动态触觉阵列 (DTA)	单指尖力 20N	4Hz/秒	1 毫米空间分辨率	6,000 级压力, 180 Hz 帧率

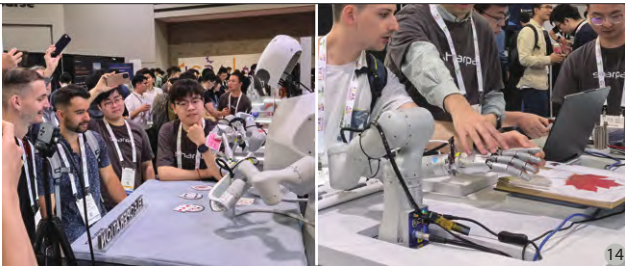
表3

13 与第二轮问卷中表现较优秀的样本相比，灵巧手 A 的得分情况 14 2025 ICRA，灵巧手 A 依托 6 轴机械臂平台进行现场展示 (表3) 灵巧手 A 与部分现有灵巧手的主要功能指标对比，数据来源于各产品官网 (截至 2025 年 7 月)

结语

结合艺用解剖原理产生的灵巧手形态设计方法采用了并行交叉、工程技术与艺术美学互相嵌套的工作路径。未来有必要进一步扩大研究范围、深入研究方法、进行长周期动态跟随。本文关于灵巧手形态的设计方法通过实证检验，证明了其应有的价值，即使美学认知跳出单纯模仿外形的状态，升维成将形式美学规律转化为工程策略的核心逻辑，在严谨理性的工程技术和人们对“美”的感性期待之间，找到了一个巧妙的平衡点。

* 基金项目: 本文为 2021 年教育部首批新文科研究与改革实践项目“艺术与科技结合的雕塑教学拓展”(编号: 2021160029)、2024 年上海市新一代信息技术领域技术攻关项目“科技创新行动计划”(编号: 24511103304) 的研究成果。



14

注释：

[1] 华经产业研究院：《2025 年中国灵巧手行业发展现状、竞争格局及趋势预测》[EB/OL]，https://roll.sohu.com/a/897308852_120928700，2025-05。

[2] 刘伟、肖钊、瞿寅朋、许守亮：《机器人灵巧手研究综述》[J]，《机械传动》，2024 年第 48 卷第 9 期，第 167—176 页。

[3] 梁健、晓杰：《基于结构优化的特征驱动工业机器人造型设计》[J]，《机械设计》，2021 年第 38 卷第 12 期，第 133—139 页。

[4] 朱彦：《基于感性工学的家庭服务机器人外形设计研究》[J]，《包装工程》，2015 年第 36 卷第 14 期，第 50—54 页。

[5] 马磊、干静、朱启豪、刘伟：《机械产品外观设计的模型转换方法研究》[J]，《机械设计与制造》，2018 年第 8 期，第 133 页。

[6] 马骏：《关于现代工业设计的探讨——艺术与科学融合》[J]，《武汉工业学院学报》，2007 年第 26 卷第 2 期，第 43—53 页。

[7] 再萌：《谈造型艺术中手的描绘》[J]，《南京艺术学院学报》(美术与设计)，1982 年第 1 期，第 34 页。

[8] [宋]郭若虚：《图画见闻志 (锤馗样)》[M]，桂林：广西师范大学出版社，2023，影印本，卷六。

[9] 香磁磁业：《机器人灵巧手研究综述》[EB/OL]，<https://mp.weixin.qq.com/s/89Wi6WHpT1cIN3LinTsWZA>，2025-02。

[10] [美]乔治·伯里曼：《伯里曼画手》[M]，晓鸥、辛昕、小野译，南宁：广西美术出版社，2010，第 55 页。

[11] 同 [2]。

[12] 樊绍巍、刘伊威、金明河、兰天、陈兆、刘宏、赵大威：《H I T / D L R H a n d I I 类人五指灵巧手机构的研究》[J]，《哈尔滨工程大学学报》，2009 年第 30 卷第 2 期，第 171—177 页。

[13] 国家标准化管理委员会：《成年人手部尺寸分型》GB/T 16252-2023 [EB/OL]，<https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=6DE16314F086E873A15D70A5467B8EFF>，2023-08。

[14] 严雪芹、曹松梅、周芳芳、朱丽群、陈成、朱梦雪、张艳红、梁怡青、柏素萍：《手部烧伤患者手功能早期康复管理的最佳证据总结》[J]，《中华护理杂志》，2025 年第 60 卷第 8 期，第 998—1004 页。

[15] Tesla, Inc: Underactuated hand with cable-driven fingers (WO2024/073138A1) [P], World Intellectual Property Organization. 2022-04。

[16] Sharpa: SharpaWave at ICRA 2025 , Dexterity, AI & Tactile Sensing! [EB/OL]，<youtube.com/watch?v=-6Jeb9NOcLA>，2025-05。