

【工业设计】

人体数据驱动的鼠标形态概念设计

苏建宁, 张志鹏, 李雄
(兰州理工大学, 兰州 730050)

摘要: **目的** 为适应不同人群的手型和使用鼠标时的操作习惯, 构建数据驱动的形态生成系统, 辅助设计师进行鼠标形态创新设计, 有效提升鼠标形态方案的人机合理性。**方法** 采用实验测量方式提取用户使用鼠标时的特征形态数据, 利用参数化脚本技术模拟用户使用鼠标场景, 包括用户操作方式、手型尺寸等, 探索手部行为与鼠标形态的人机关系, 构建一种人体数据驱动的鼠标形态生成系统, 对获取的方案进行实体评估验证。**结果** 利用人体数据驱动可生成多款鼠标形态, 算法生形具有良好的适应性。**结论** 基于 Grasshopper 建立的用户行为模拟器可有效探索用户在使用鼠标时的行为方式, 构建的鼠标形态生成算法具有快速响应特征, 可依据用户手势行为进行鼠标形态设计, 快速获得适合用户的概念形态方案。

关键词: 数据驱动; 鼠标形态; 人机工程; 算法生形; 概念设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)20-0084-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.20.009

Conceptual Design of Mouse Shape Driven by Human Body Data

SU Jian-ning, ZHANG Zhi-peng, LI Xiong
(Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

ABSTRACT: Its aim is to adapt to the hand shape of different people and the operating habits when using the mouse, to build data-driven shape generation system, to assist designers in the innovative design of mouse shape, and effectively improves the man-machine rationality of the mouse shape scheme. The experimental measurement method and the parameterized design technology were used to extract the shape feature data and simulate the scenario of users' while using the mouse, including the users' operating habits and hand size. The ergonomics relationship between hand's moving and mouse shape was explored and the generative rules of mouse form driven by human body data were constructed. The visualization programming platform Grasshopper was used to establish the generative system of mouse form conceptual design driven by human data, which can simulate the user's behavior effectively. The ergonomic rationality of the obtained mouse form conceptual schemes was verified by evaluating the schemes physically. The method can be applied in mouse form conceptual design based on users' human body data so as to obtain the conceptual schemes with good adaptability quickly.

KEY WORDS: data driven; mouse shape; ergonomics; algorithm generating; concept design

传统的形态创新过程, 主要凭借设计师的知识和经验完成^[1]。计算机辅助设计的发展在一定程度上帮助设计师拓宽了设计思路, 提升了设计的灵活性。随着科技的发展, 产品设计越来越强调设计的科学性^[2]。传统以设计师经验为主导的设计在概念创新阶段可靠性较低, 而数据驱动的设计方法将计算机和用户需

求、交互数据等信息融入制造业中, 逐步实现了数字化生产过程, 以快速响应动态的市场变化^[3]。另一方面, 产品健康和舒适度成为用户越来越关注的重点内容^[4], 产品作为服务于人类活动的物, 在生成和转化过程中须按照一定的人体尺度展开^[5]。因此, 将人体数据作为驱动产品形态的动力, 有助于提高产品与人

收稿日期: 2022-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52165033)

作者简介: 苏建宁(1974—), 男, 教授、博士生导师, 主要从事感性工学、智能设计等方面的研究。

体的人机协同度。

目前数据驱动的产品设计研究主要集中于结构、性能、用户感性需求等方面, 例如 Lin 等^[6]提出了数据驱动的产品创新设计 UNISON 框架, 以捕获设计因素、用户需求和用户偏好, 从而推导出设计规则以指导产品设计; Usama 等^[7]基于数据驱动的思想, 探索了以用户偏好和阻力系数为导向的汽车侧轮廓设计, 在验证其有效性的基础上进行了方案预测; Chien 等^[8]基于产品视觉审美特征与用户体验的关系, 提出了一种数据驱动的产品设计框架, 用于捕捉产品的视觉审美用户体验, 从而有效识别用户偏好, 并将其反映至产品概念设计中。数据驱动设计的方法、应用、案例研究等, 已经成为众多研究者研究的热点, 对产品的创造力和设计效率有着重要的影响。

在提高人体与产品舒适度方面, 国内外学者较多引入数字化模拟、人体测量技术使设计方案更加符合人机工程的要求^[5], Kakizaki 等^[9]通过人体数字化模型模拟研究了飞机空难和救援过程, 以获得更精确的疏散和救援数据; 徐永昌等^[10]使用基于 3D 草图的逆向设计方法, 实现了个性化鞋楦的创建和再设计; 张芳兰等^[11]运用逆向化技术对裸足矫形器(AFO)进行了重建, 实现了 AFO 的定制化设计; Zhang 等^[12]将拓扑优化技术应用于基于扫描的人体防护具设计; Ahmed 等^[13]在其研究中构建了一种人机工学的原型计算设计方法, 以期在原型建立之前考虑与人体数据相关的问题, 在一定程度上辅助设计师更好地体现以人为中心的数字化原型设计。上述以人体数据驱动的设计主要关注个体用户以及特定场景的设计, 而将人体数据信息应用于辅助概念形态创新以提高产品人机协同性的研究相对较少。

产品形态已不仅是围合内部结构的表层空间状态, 更是集科学、技术、生理、心理、设计于一体的具有生命力的有机体^[4]。为了给用户提供更安全、高效、舒适的体验空间, 设计师应当更加关注人体数据与产品之间的相互适配问题。鼠标作为计算机的重要配件和交互接口, 日益受到人们的关注和重视。自 1986 年世界上第一款鼠标上市之后, 其经历了机械、光机、光电鼠几代变化后在使用方式上趋于稳定, 并逐渐形成以平行鼠标为主的趋势。然而, 随着人们长期使用平行式鼠标, 出现了如关节炎、腕管综合症等职业综合症^[14], 使用户对鼠标形态的选择越来越重视。不同人群使用鼠标的大小、习惯不尽相同, 因此, 鼠标形态的设计更需要关注用户生理参数、使用行为, 才能为用户提供更好的体验设计。本研究从数据驱动的角度出发, 分析人体数据、用户使用行为与形态生成之间的关系, 借助参数化脚本技术建立鼠标形态生成系统, 从而为设计师在概念创新阶段更好地融入人机因素、生成更加合理的形态方案提供新方法。

1 鼠标形态中的人机问题

鼠标作为与电脑交互频繁的设备之一, 在操作过程中与人的前臂、手腕、手掌、手指等部位都会发生联系。鼠标形态中的人机工程设计要求手部与鼠标形态尽可能贴合, 在长时间使用过程中避免用户肌肉劳损、筋络不畅等症状。随着用户在电脑使用过程中的时间逐渐变长, 对于鼠标的品质要求逐渐提升, 包括操作舒适感、灵活移动和准确定位。不同类型的鼠标为用户带来不同的使用方式, 而选择鼠标取决于用户的使用习惯以及个性心理需求。目前在市面中最为普遍的鼠标主要有传统平行式鼠标和垂直式鼠标两种。

1.1 平行式鼠标

大多数用户使用平行式鼠标, 能够高效地进行操作和移动。鼠标底面与桌面、人的手掌面可看作是平行的关系, 使用时人的手臂扭转一定的角度, 前臂尺骨与桡骨存在一定的交叉扭曲, 长此以往会导致手臂经络受阻, 损害人体健康, 如图 1a 所示。此外, 在操作过程中手臂与桌面形成一定的夹角, 同时手背需背屈一定的高度, 使手臂的重量集中于腕部。随着使用频率的增加, 手腕、手臂会非常容易出现关节麻痺、肿胀、疼痛等症状, 久而久之就会出现“鼠标手”^[15]。

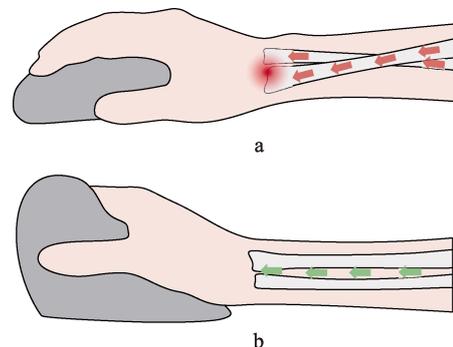


图 1 鼠标形态中的人机问题
Fig.1 Influence of mouse shape on ergonomics

1.2 垂直式鼠标

垂直鼠标在使过程中用户的手掌与桌面接近垂直状态, 对手部骨骼经脉的舒适性进行了提升, 让使用者处于比较放松的状态, 减少了使用传统鼠标进行移动和点击时所需要的握力, 如图 1b 所示。然而, 在 Annina 等^[14]的研究中表明, 不同的用户在使用垂直鼠标过程中会表现出不同的使用效率, 在较高频率的操作过程中, 垂直式鼠标表现出较弱的操控性。

综上所述, 不同人群依据自身的手型大小和使用习惯等选择鼠标形态和鼠标样式, 平行和垂直形式的鼠标各有优势, 本研究基于人体数据, 探索数据驱动下鼠标形态与目标人群的人机协同关系, 以提升鼠标人机系统效能。

2 研究流程

数据驱动的概念在用户需求挖掘、机械性能优化、系统性能评估等方面已得到应用^[16-17]，实现了生产过程的数字化，同时连接用户、产品和生产过程，有效提高了计效率。产品作为服务于人的“物”，在设计、生产、制造等方面都与人体密切相关，而人体是一个具有大量尺寸、曲面变化极其丰富的有机体，利用人体数据驱动产品形态不仅能有效提升产品的服务性能，而且能更大程度上关注用户的生理差异，更好地体现了人本智能设计的理念。

本研究将人体数据应用于鼠标形态概念创新中，从而减少概念设计中人机工程的模糊性，整体研究流程如图2所示。首先分析总结用户在使用鼠标时手部的主要运动关节部位并简化其运动过程，利用手部基准数据在软件中完成手部动作仿真模拟；然后利用油泥模型实验模拟探究用户群使用鼠标时的行为，从而获取模型特征点数据；再者以统计获取的模型特征点生成形态变化区间并以手部对应点为参考建立形态生成规则，构建形态生成系统；最后通过参数调整获取代表性样本并对其进行评估验证。

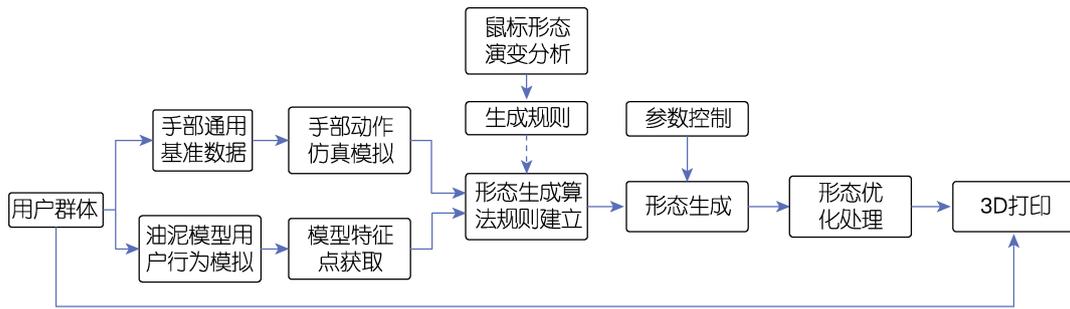


图2 研究流程
Fig.2 Research flow chart

3 手部动作仿真模拟

Grasshopper 是一款与 Rhino3D 建模软件紧密集成的算法生成编辑器，其可以完整记录起始模型和最终模型的构建过程，通过改变相关变量对生成形态进行灵活有效地控制。为了探究手部动作与鼠标形态的人机关系，本研究利用 Grasshopper 进行手部动作模拟，以人体数据驱动的方式建立几何特性和交互之间的对应关系，对用户使用场景进行特性匹配，从而生成相应的概念形态方案。

3.1 手部模拟数据准备

鼠标作为与手型产生密切交互的产品，其形态与手长、手宽等参数直接相关。人体手部共有 27 块骨骼和 19 个主要关节点，其中 5 块掌骨和 14 块指骨为本研究主要的模拟对象，掌骨和指骨分布如图 3a 所示。依据容纳绝大多数用户手型的原则，以较大尺寸的手型数据为基准并参考手部 X 光片绘制模拟骨架，如图 3b 所示。

3.2 手部动作模拟器构建

在抓握鼠标、控制运动和功能操作过程中，主要

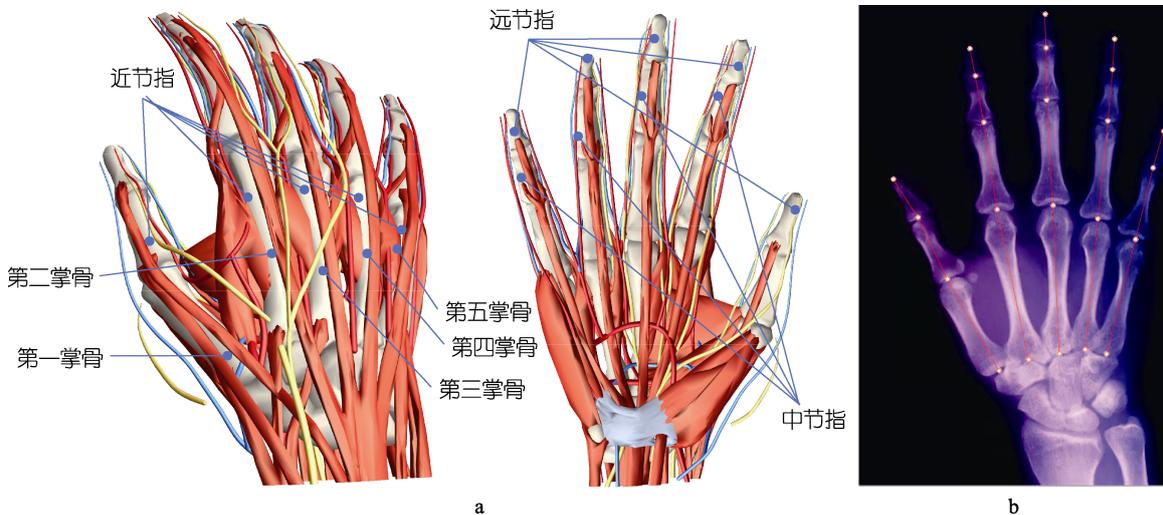


图3 手型模拟数据准备
Fig.3 Hand simulation data preparation

以适合手掌仰角、手臂旋转角度的方式抓握并匹配鼠标形态, 因此, 本研究通过手掌轴向旋转、手掌径向旋转及指骨实际运动进行模拟器构建。以工作平面为基准, 对已准备的手部骨骼数据进行自由度设置。首先, 对掌骨进行自由度设计, 掌骨分为第一掌骨、第二掌骨、第三掌骨、第四掌骨、第五掌骨, 在手部运动过程中第一掌骨连接大拇指可以上下左右运动, 而第二至第五掌骨作为支撑手掌的主体在运动过程运动幅度较小, 因此, 将第二至第五掌骨作为一个整体

进行 X、Y、Z 坐标方向的自由度设置。设置掌骨俯仰运动: 以 Y、Z 平面内运动进行俯仰角度设置, 以较大尺度为基准将俯仰角度设置为 0~0.61 rad (0~35°)。模拟手臂旋转运动: 以平行 Y 轴方向进行手臂旋转模拟并设置其角度为 0~1 rad (0~90°)。随后, 依据关节对各近节指、中节指、远节指进行方向自由度运动设计, 完成对手部各节点运动的模拟。建立手部运动模拟器以及手部关节运动参数区间, 如图 4 所示。

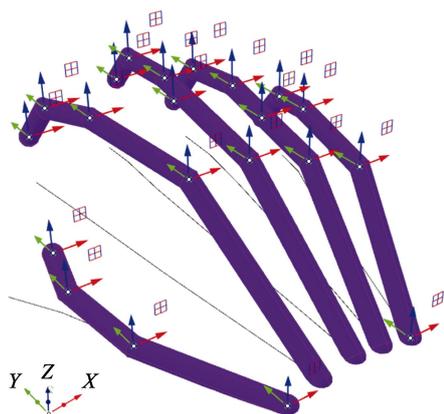


图 4 手部运动模拟器
Fig.4 Hand motion simulator

4 手部特征数据获取

在产品使用过程中, 行为信息是以人为本的产品设计核心信息的组成部分。鼠标形态在具体化设计中, 可通过多种方式体现。以实体模拟的方式获取个性化形态方案具有针对性较强、获取方便、高效等特点, 但获取的形态与实际产品所应有的特征和型面要求具有一定的差距, 且在创新方面受个人因素影响较大, 无法快速直观地响应不同用户的需求。因此, 本研究通过特征数据统计结合软件模拟的方式辅助生成鼠标形态方案, 借助构建的手部运动模拟器对设计参数进行控制, 直观地进行形态创新设计。

4.1 鼠标使用场景模拟

鼠标为一般工业产品, 为了获取用户群在操作鼠标时的动作行为特征区间, 依据产品设计中人机工程一般性原则, 选取了平均年龄 24 岁, 百分位大致分布在大、中、小的 4 位男性和 4 位女性代表用户进行实验。首先, 在实验前告知每位用户实验的目的及内容, 然后为每位用户提供充足的油泥材料, 允许用户通过 DIY 多次抓握油泥, 寻找自己最舒适的鼠标形态, 如图 5 所示。

4.2 特征数据提取

借助取型器等测量工具对油泥模型的轮廓从俯

视、侧视、顶视图中进行提取, 利用 Grasshopper 进行形态描绘并对型值曲线进行对齐处理, 如图 6 所示。



图 5 用户 DIY 鼠标油泥模型
Fig.5 User DIY mouse clay models

在获取用户轮廓曲线后, 由于所包含的信息较多, 对于多用户的特征无法统一描述, 因此需要对其进行简化处理。分别选取正视图和侧视图特征线 (非闭合曲线) 中 0、0.25、0.5、0.75、1 型值点处, 以及俯视图特征线 (闭合曲线) 中 0、0.25、0.5、0.75 型值点处, 共计 112 个点作为型值点变化范围。分别统计坐标值域区间, 结果见表 1。

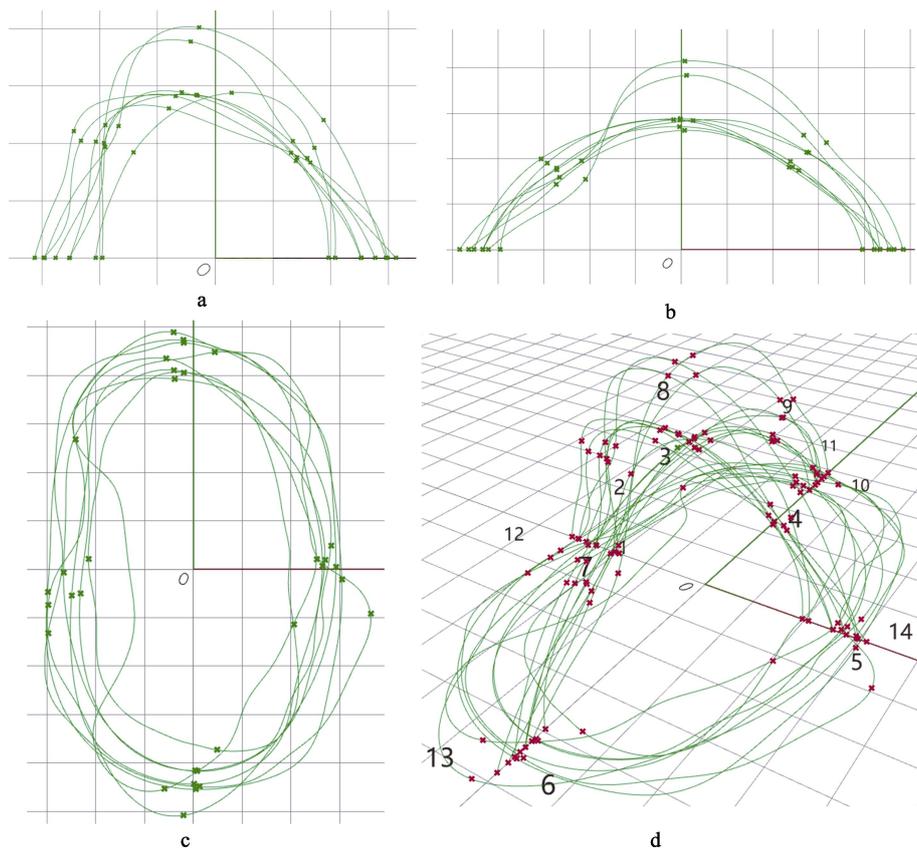


图6 型值曲线描绘与特征点提取
Fig.6 Curve data description and feature points extraction

表1 型值点区间
Tab.1 Interval of date points

坐标轴		X		Y		Z	
视图	序号	min	max	min	max	min	max
正视图型值点	1	-31.3	-19.6	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	-24.5	-14.2	0.0	0.0	18.4	23.2
	3	-8.1	2.8	0.0	0.0	26.1	40.2
	4	13.1	18.7	0.0	0.0	16.6	24.1
	5	19.6	31.3	0.0	0.0	0.0	0.0
侧视图型值点	6	0.0	0.0	-48.5	-39.6	0.0	0.0
	7	0.0	0.0	-30.7	-21.0	14.3	20.0
	8	0.0	0.0	-1.7	2.5	26.2	41.5
	9	0.0	0.0	23.5	31.7	17.4	25.2
	10	0.0	0.0	39.6	48.5	0.0	0.0
俯视图型值点	11	-5.6	4.3	39.3	48.9	0.0	0.0
	12	-29.9	-21.6	-13.3	26.8	0.0	0.0
	13	-6.0	4.8	-50.8	-37.3	0.0	0.0
	14	20.5	36.3	-11.5	4.8	0.0	0.0

5 鼠标形态生成系统构建

在鼠标诞生初期,其形态为外形方正的木质方盒,随后出现了塑料型方盒、圆润型方盒等,从1995年开始鼠标相关设计逐渐趋于成熟,其形态开始更加

关注与人体之间的匹配性和协调性,向更加人机的方向发展。1999年微软与安捷伦公司合作推出了Intellimouse Explorer光学鼠标,奠定了现代鼠标的基本形态。从发展过程来看,鼠标形态是从几何形态逐渐向更符合人体数据的有机形态演进的;而从计算机数字化生形的角度来看,现代形态较为复杂的鼠标也可

以逐步抽象为几何形态, 如图 7 所示。两者在形态发生上有着一定的共性, 这为自动化形态生成提供了依据。

传统以 CAD 为主的产品形态建模作为强有力的辅助设计工具, 在一定程度上方便了设计师草图形态

的表达, 可以与工程师进行直观的交流, 但无法全面地将人体数据、工程知识、设计原理以及专家经验等融入几何模型中^[18]。因此, 在高效设计、协同创新、知识重用等方面存在一定的局限性。

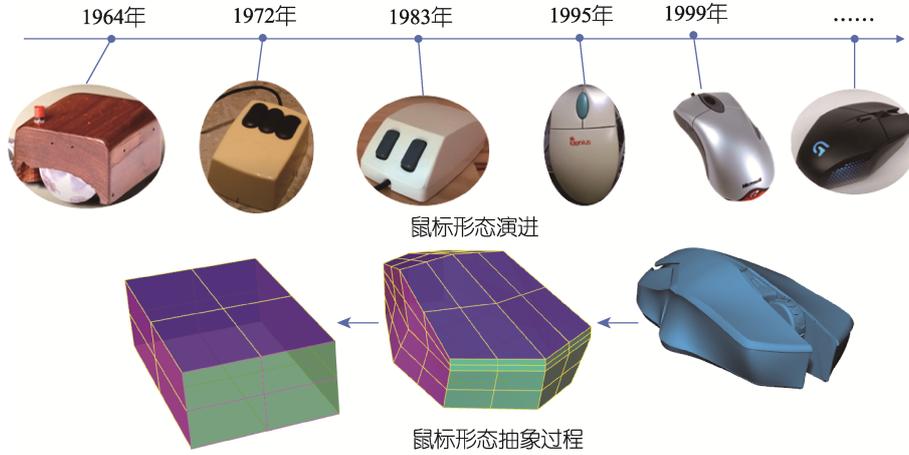


图 7 鼠标形态推演过程
Fig.7 Mouse shape deduction process

算法是指按照一定顺序和逻辑组织在一起的操作指令, 能够完成某个特定的任务, 算法生形是指通过构建产品形态的参数关系和生成规则, 由计算机程序的运算而生成形态^[19]。这种创新设计方式可以将概念设计中模糊化、非结构化的知识通过数据驱动和设计规则进行表达处理, 从而辅助设计师更有效地完成创新设计任务。此外, 通过调节参数与计算机之间的交互, 可快速产生符合要求的形态方案, 以此进行高效的创新设计。

本研究运用 Grasshopper 可视化编程语言编写相关算法, 进而构建数据驱动的鼠标形态生成系统。

5.1 鼠标基本几何形态生成

首先, 以获取的用户特征点和手部关节点为依据建立鼠标形态生成算法规则, 利用 Point Surface 运算

器分别对相应的特征点进行连接, 建立鼠标几何形态切割面 (如图 8 所示), 并依据表 1 设置相应的参数区间。其中, 面特征的每个顶点由最接近的关节点和型值点建立而成, 当调整手部参数时, 能够保证生成的鼠标形态有效跟随手部动作的变化而变化。然后, 围绕模拟器的中心绘制包裹手部模拟器的球形基本体, 通过建立的形态切割面对球体进行切割运算, 利用 Distance 运算器测量被分割块体与球心的距离, 结合 Larger Than、Gate Not、Dispatch 三个运算器选择保留的几何体。通过逐步进行的关系运算, 最终获得鼠标基本几何形态, 过程如图 9 所示。

5.2 鼠标形态细分处理

建立的几何形态具有鼠标的基本特征, 但在用户实际使用过程中几何形态面与手部的贴合度较

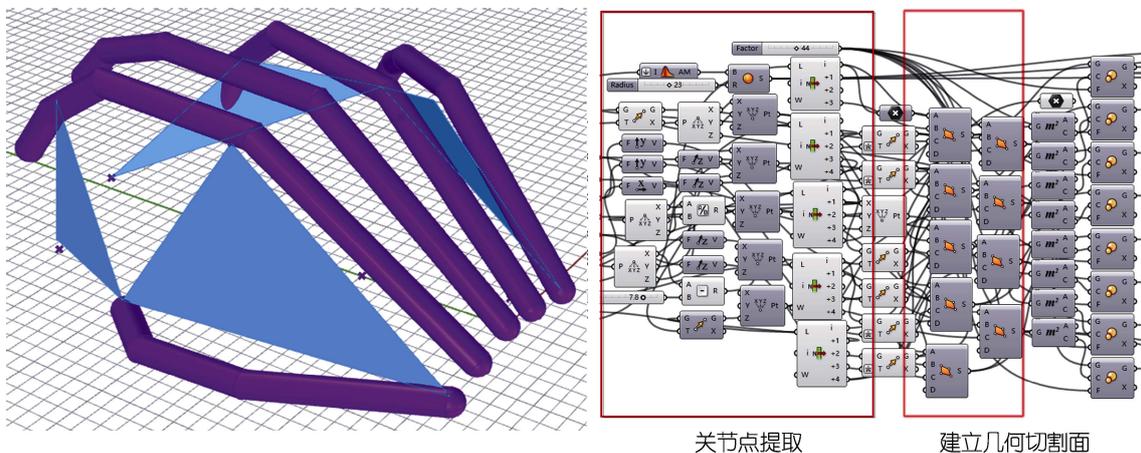


图 8 鼠标几何形态切割面构建
Fig.8 Construction of mouse geometry cutting surface

低,需进一步进行细分处理。首先利用 Mesh Brep 运算器将 Brep 模型转换为可进行细分运算的 Mesh 几何体,然后使用 Weaverbird 插件中 Weaverbird's

Catmull-Clark Subdivision 运算器对几何形态进行细分(如图 10 所示),获得的形态展现出了鼠标主要的形态特征。

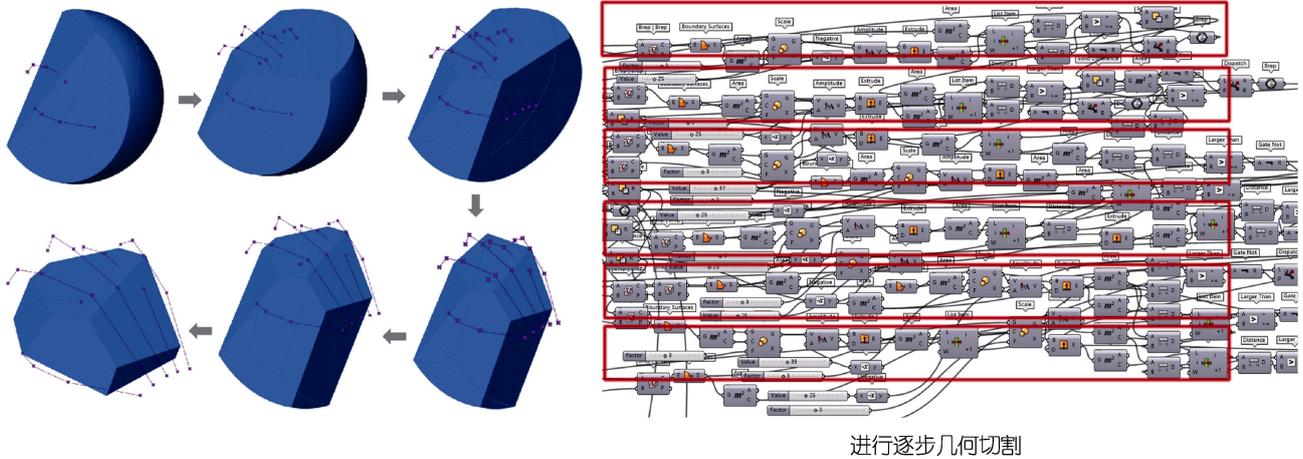


图 9 鼠标基本几何形态获取过程
Fig.9 Acquisition process of mouse basic geometry

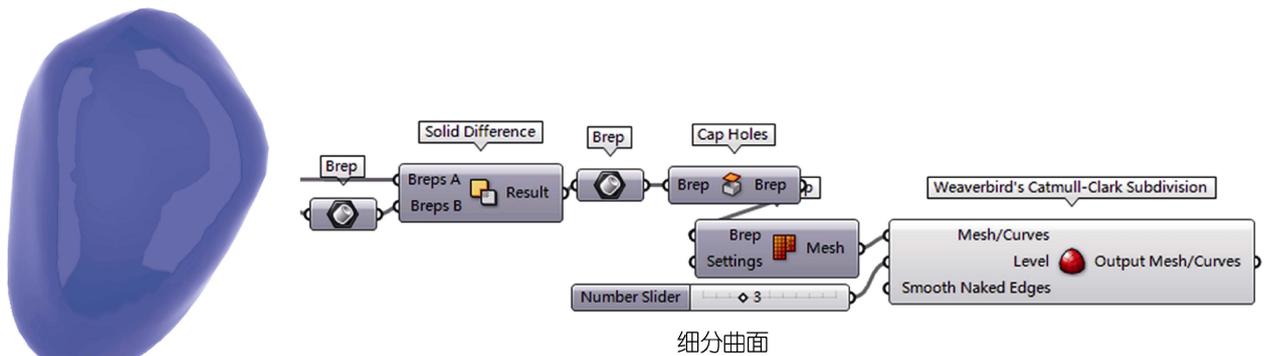


图 10 鼠标形态细分处理
Fig.10 The mouse form subdivision process

6 鼠标样本形态验证

为进一步验证形态方案的人机合理性,通过调节模拟器参数分别得到 2 款平行式鼠标(见图 11 中的①③)和 2 款垂直式鼠标(见图 11 中的②④),并 3D 打印成型进行评估测试。共邀请人体百分位基本均匀分布的 20 位用户(10 位男生和 10 位女生)对生成的 4 款鼠标形态的大小适合度和表面贴合度指标进行模拟使用测评。U1—U20 用户按手型依次从小到大排列,测评结果见表 2。结果显示,大手型受试者较多选择了尺寸相对较大的③④号方案,小手型受试者较多选择了尺寸相对较小的①②号方案,所有选中的方案表面贴合度评价均比较高,整体在舒适度和使用效率之间表现出良好的人机协同度。由此表明,数据驱动的形态概念设计方法具有良好的适应性,能够有效提高设计效率。



图 11 生成的鼠标样本
Fig.11 Generated mouse form samples

表 2 方案测评
Tab.2 Schemes scoring evaluation

类型	标号	测项	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13	U14	U15	U16	U17	U18	U19	U20
平行式鼠标	1号鼠标	人机	8	8	8.5	8.5	6	8.5	8	8.5	6.5	8	6.5	9	8	6	8	8	7	7.5	7.5	6
		贴合度	9	6	7	8.5	6.5	8	7.5	8	6	8.5	7	8.5	8.5	6.5	9	6	7.5	7	7.5	8.5
	2号鼠标	人机	8	9	6.5	9	8	8	8	7.5	6	8	8	8.5	7	5	8	7	7	6	8.5	7
		贴合度	6	7.5	6.5	9	8	7.5	8.5	7.5	6	8	9	9.5	9	7	8	7	8	8.5	8	8
垂直式鼠标	3号鼠标	人机	6.5	7	6	7.5	7.5	7	5.5	6	9	7	6	7	8.5	7	9	9	7	8	8	8
		贴合度	8	5.5	6.5	7	7.5	6.5	6	6.5	8.5	6.5	6	6	8.5	8	8	8.5	6	7	9	9.5
	4号鼠标	人机	6.5	6	6	8	7	6.5	5	5.5	8	7	6	8.5	6	8	7.5	5	8	6.5	7.5	9
		贴合度	7	8	6	7.5	7.5	6	6	6	8.5	7	6.5	7	6.5	9	8	7	7	7.5	8	8.5
终选	满意度较好	1	2	1	2	2	1	2	1	3	1	2	2	3	4	3	3	4	3	3	3	4
	满意度较差	4	3	4	3	1	4	4	4	1	3	3	3	4	1	2	4	3	2	1	1	

7 结语

数据驱动的形态生成方式, 为设计师进行形态探索提供了一种更高效的方法, 有效提高了形态概念设计的效率。本研究从数据驱动的角度出发, 以用户使用鼠标时的特征形态数据为基础, 利用 Grasshopper 对使用行为进行模拟, 构建了一种人体数据驱动的鼠标形态生成系统, 可以辅助设计师在概念创新阶段更好地融入人机因素, 有效提升设计方案的合理性, 为数据驱动的形态概念设计提供了一种新方法。随着传感设备逐渐成熟, 数据驱动的形态生成设计将在更广阔的空间得到发展, 也将逐步得到实际应用。

参考文献:

[1] GIRONIMO G, LANZOTTI A, MARZULLO D, et al. Iterative and Participative Axiomatic Design Process in Complex Mechanical Assemblies: Case Study on Fusion Engineering[J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJDeM), 2015, 9(4): 325-338.

[2] 陈波, 林春花, 孙秋霞. 基于设计科学的产品设计研究方法综述[J]. 包装工程, 2019, 40(18): 20-27.
CHEN Bo, LIN Chun-hua, SUN Qiu-xia. Summary of Product Design Research Methods Based on Design Science[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(18): 20-27.

[3] FENG Yi-xiong, ZHAO Yu-liang, ZHENG Hao, et al. Data-Driven Product Design Toward Intelligent Manufacturing: A Review[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(2): 172988142091125.

[4] 靳文奎, 何人可. 人体工学适配设计机制与理念演变[J]. 包装工程, 2021, 42(12): 78-83.
JIN Wen-kui, HE Ren-ke. Evolution of Ergonomic Fit Design Mechanism and Concept[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(12): 78-83.

[5] 靳文奎, 何人可. 三维人体数据驱动产品设计研究[J]. 包装工程, 2018, 39(8): 117-120.

JIN Wen-kui, HE Ren-ke. 3D Anthropometry Body Data-Driven Product Design[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(8): 117-120.

[6] LIN Kuo-yi, CHIEN Chen-fu, KERH R. UNISON Framework of Data-Driven Innovation for Extracting User Experience of Product Design of Wearable Devices[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 99: 487-502.

[7] USAMA M, ARIF A, HARIS F, et al. A data-driven interactive system for aerodynamic and user-centred generative vehicle design[C]//2021 International Conference on Artificial Intelligence (ICAI). Islamabad, Pakistan. IEEE, 119-127.

[8] CHIEN Chen-fu, KERH R, LIN Kuo-yi, et al. Data-Driven Innovation to Capture User-Experience Product Design: An Empirical Study for Notebook Visual Aesthetics Design[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 99: 162-173.

[9] KAKIZAKI T, ENDO M, URUI J. Experimental Study of an Airplane Accident Evacuation/Rescue Simulation Using Three-Dimensional Kinematic Digital Human Models[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2015, 15(3): 1-10.

[10] 徐永昌, 成思源, 杨雪荣. 基于3D草图的个性化鞋楦设计[J]. 包装工程, 2019, 40(4): 252-257.
XU Yong-chang, CHENG Si-yuan, YANG Xue-rong. Design of Personalized Shoe last Based on 3D Sketch[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(4): 252-257.

[11] 张芳兰, 陈瑞营, 邵帅, 等. 基于参数化逆向建模的踝足矫形器设计[J]. 图学学报, 2020, 41(1): 141-147.
ZHANG Fang-lan, CHEN Rui-ying, SHAO Shuai, et al. Ankle-Foot Orthosis Design Based on Parametric Reverse Modeling[J]. Journal of Graphics, 2020, 41(1): 141-147.

[12] ZHANG Yun-bo, KWOK T H. Customization and Topology Optimization of Compression Casts/Braces on Two-Manifold Surfaces[J]. Computer-Aided Design, 2019, 111: 113-122.

(下转第 101 页)