

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.02.009

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:王旭鹏,李琳,王芸倩,赵嘉鑫. 适老化矫形康复类可穿戴产品的设计方法研究[J]. 西安理工大学学报, 2024, 40(2):234-241.

WANG Xupeng, LI Lin, WANG Yunqian, ZHAO Jiabin. Research on the design methods for elderly-oriented wearable orthopedic rehabilitation products[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(2): 234-241.

适老化矫形康复类可穿戴产品的设计方法研究

王旭鹏^{1,2}, 李琳^{1,2}, 王芸倩^{1,2}, 赵嘉鑫²

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学 艺术与设计学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了满足健康老龄化背景下,老年人群对矫形康复类可穿戴产品不断增长的使用需求,解决现有产品设计中存在的品类细分与设计方法相对缺失、与用户个性化需求不匹配等问题,本文从适老化、矫形康复及可穿戴角度出发,在挖掘核心需求要素基础上提出了“核心需求+三化四性”设计原则;基于肢体形态扫描、NURBS 曲面重构、误差分析及优化设计等技术构建了多学科交叉融合的创新设计方法;综合主观舒适性、功能量表、步态、肌电、足压等实验制定了主客观评价方法;进而创新性地提出了适老化矫形康复类可穿戴产品的设计方法,并以足形矫正器为例,进行了矫形康复产品创新设计实践及实验验证。研究结果表明,本文提出的设计方法可有效满足矫形康复类可穿戴产品设计及评价要求,同时也为其它适老化康复类可穿戴产品的设计提供了理论依据。

关键词: 适老化; 矫形康复; 可穿戴产品; 设计方法

中图分类号: TU241.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2024)02-0234-08

Research on the design methods for elderly-oriented wearable orthopedic rehabilitation products

WANG Xupeng^{1,2}, LI Lin^{1,2}, WANG Yunqian^{1,2}, ZHAO Jiabin²

(1. Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Faculty of Art and Design, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to meet the growing demand of the elderly for the use of orthopedic and rehabilitation wearable products in the context of successful ageing, and to solve the problems in the existing product design, such as the relative lack of category segmentation and design methods, and the mismatch with the user's personalized needs, this paper proposes the design principle of "core demand add three modernizations and four characteristics" based on the excavation of core demand elements from the perspective of aging, orthopedic rehabilitation and wearable. Based on the techniques of body shape scanning, the NURBS surface reconstruction, error analysis and optimization design, an innovative design method for multidisciplinary cross integration is constructed. Subjective and objective evaluation methods are developed by integrating subjective comfort, functional scale, gait, electromyography, foot pressure and other experiments. In addition, the design paradigm of wearable orthopedic rehabilitation products for the elderly has been innovatively proposed. Taking foot orthotics as an example, the innovative design practice and experimental verification of orthopedic rehabilitation products are carried out. The results show that the

收稿日期: 2022-12-02; 网络首发日期: 2023-04-24

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20230424.1401.006.html>

基金项目: 教育部基金资助项目(21XJC760003); 陕西高校青年杰出人才配套基金资助项目(106-451420001)

通信作者: 王旭鹏,男,博士,教授,研究方向为机械系统动力学、人体运动生物力学、创新设计与仿真。

E-mail: wangxupeng@xaut.edu.cn

design paradigm proposed in this paper can effectively meet the design and evaluation requirements of orthopedic rehabilitation wearables and also can provide a theoretical basis for the design of other aging rehabilitation wearables.

Key words: elderly-oriented; orthopedic rehabilitation; wearable products; design methods

随着我国老龄化进程的加剧,老年人健康、医疗保健问题逐渐成为社会发展的重要挑战^[1]。

老年人因为骨质疏松导致生理功能减退,容易发生外伤,会因轻微外力作用或意外跌倒引发骨折,是老年人最常见疾病之一,且在老年骨折患者中,下肢骨折约占 70%。传统预制型矫形器不能满足患者术后康复期固定矫正的个性化需求,直接影响了治疗效果与恢复周期^[2]。骨质疏松也会导致老年人慢性背痛和脊椎骨折,其中椎体骨折是最常见的骨质疏松性骨折类型,只有三分之一的椎体骨折能够得到临床诊断,且椎体骨折也会导致胸椎或腰椎后凸及肺活量减少。因此,脊柱矫形器已被开发用于治疗骨质疏松症、脊椎骨折和背痛患者,用以增加背部伸肌力量,改善姿势和肺功能^[3]。统计显示,老年人另一个常见疾病——糖尿病在我国第七次人口普查中约占到 60 岁以上老年人 30%^[4],糖尿病易引发严重的并发症糖尿病足,最终导致足溃疡甚至截肢。设计合理的足部矫形辅具可有效帮助糖尿病患者卸载足底区域高压,优化足底压力分布,降低足溃疡发生率和复发率、延缓足溃疡恶化和截肢周期^[4]。同时,结合足部生理参数监测、主动防护等功能,能够增加矫形器康复治疗的有效性。上述老年疾病带来的医疗、经济压力及丧失独立生活能力等问题对患者、家庭及社会造成极大困扰。因此,国内外学者面向老年人下肢矫形康复产品逐渐展开研究。

Li 等^[5]利用逆向工程技术与可视化编程软件,提出了一套手部矫形器自动建模方法,能够实现个性化定制,并显著提高了穿戴的舒适性。Santos 等^[6]结合三维扫描与 3D 打印技术,评估了一种康复医学定制产品的制造方法,并为脑瘫患者定制了高匹配度的膝关节定位矫形器。Xu 等^[7]为证实定制型矫形器对扁平足患者足底压力和舒适度的影响关系,对比足底 10 个区域的峰值压力、峰值力和峰值接触面积三种数据,验证了矫形器对足底中部跖骨压力的减轻,从而减少了症状性扁平足的损伤。2020 年,Huang 等^[8]在方法上实现了创新,采用双向重复测量方差分析方法,比较穿平底和足弓支撑矫形器在斜面和水平面上的参数,证明了穿着足弓支撑矫形器有助于更均匀地分布整个脚的足底压力。Alin 等^[9]针对患有骨质疏松症和背痛的老年女性,对比分析了脊柱矫形器与物理治疗设备训练

的差异,发现通过脊柱矫形器训练背部伸肌可能成为老年骨质疏松症患者(伴或不伴椎体骨折)设备训练的另一种有效训练方法,并计划进一步对佩戴脊柱矫形器进行定性研究。

综上所述,国内外研究者就老龄化背景下常见疾病(肢体与脊柱骨折、骨性关节炎及糖尿病)已开展矫形康复产品研制。与国外相比,国内研究起步较晚,更多研究尚在实验室或临床验证阶段。此外,尚无研究者从设计方法的视角,对适老化矫形康复类可穿戴产品进行理论和实证研究。

因此,本文拟从核心需求分析与设计原则、多学科交叉融合创新设计方法、矫形康复效果主客观评价方法三方面开展研究,提出适老化矫形康复类可穿戴产品设计方法,并通过设计实践进行实证,以期为此类产品研发提供理论依据。

1 核心需求要素与设计原则

挖掘老年人在脊柱骨折与劳损、下肢骨折、骨性关节炎、糖尿病足等方面矫形康复的核心需求要素,进而在核心需求要素与多维度评价指标驱动下,建立与之匹配的设计原则,是开展适老化矫形康复类可穿戴产品设计的基础和重点之一。

1.1 核心需求要素

图 1 所示为核心需求要素挖掘方法及流程。

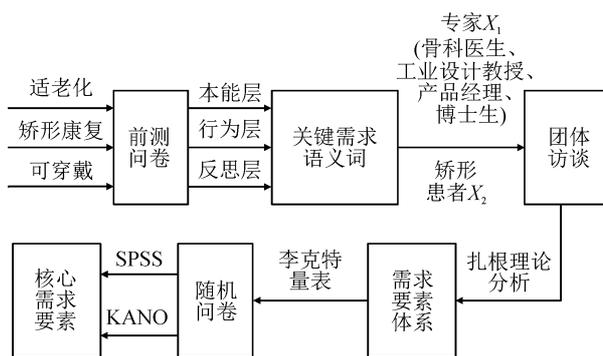


图 1 核心需求要素挖掘方法及流程

Fig. 1 Mining methods and processes of core demand elements

首先,从适老化、矫形康复及可穿戴因素出发,按每个因素大于等于 5 项设定开放式问题,邀请骨科医生、矫形康复产品设计师、拟进行矫形康复的患者进行前测阶段问卷调研,且各类调研样本均大于等于 3 人。其次,对问卷结果从用户本能层、行为层

及反思层三个层面需求进行梳理^[10],获得对应的关键需求语义词。再次,邀请骨科医生、工业设计专业教授或副教授、矫形康复产品经理及工业设计博士 X_1 名,为了便于后续数据归一化处理,建议样本总量 $X_1=10$,参考关键需求语义词,选择医院骨科拟进行矫形康复的患者 X_2 名($X_2=nX_1, n=1,2,3$),开展开放式团体访谈,并利用扎根理论分析方法对访谈结果进行分析,获得患者对矫形康复类可穿戴产品递阶层次结构的需求要素体系。最后,根据需求要素体系生成李克特量表调查问卷,向所在区域老年人进行随机问卷调查,并利用 SPSS 对问卷结果进行统计分析,进而结合 KANO 模型挖掘老年人对矫形康复类可穿戴产品的核心需求要素。

1.2 “核心需求+三化四性”设计原则

基于 1.1 中核心需求要素,以及适老化、通用化、个性化、可行性、易用性、功能性及体验性等原则约束下的多维度评价体系,构建核心需求要素和多维度评价协同驱动下的、面向适老化矫形康复类可穿戴产品的“核心需求+三化四性”设计原则,见图 2。



图 2 “核心需求+三化四性”设计原则

Fig. 2 Design principle of “core demand add three modernizations and four characteristics”

1.2.1 适老化原则

适老化设计应重点考虑解决老年人因生理机能衰退导致生理、认知、行动速度及操作能力等方面退化的共通性问题^[10]。因此,对于适老化矫形康复类可穿戴产品设计,应在考虑老年人生理和心理因素的基础上,融合矫形康复产品医疗功能为主导的理性思考,以及关怀患者心理需求为主导的感性思考,让患者对矫形产品建立信任与信心。

1.2.2 通用化与个性化原则

矫形康复类可穿戴产品设计时,一方面应考虑其作为辅助康复产品、穿戴产品的共性特征,另一方面要考虑患者性别、身高、体重、患病程度等个体差异及个性化需求。因此,设计参数既要以 95%男性和 5%女性体征参数为依据开展通用化设计,又要充分考虑到患者个体的差异性,通过 CT、三维扫描等技术手段获取患者个体参数,结合患者差异化需求开展个性化设计。

1.2.3 可用性与易用性原则

作为矫形康复产品,在产品使用寿命周期内能够安全、可靠地助力患者实现(如肢体骨折、椎体骨

折及劳损、糖尿病足)矫形康复,或抑制病情恶化,是其可用性的首要衡量指标。同时,综合考虑老年患者自理能力、生活习惯及操作习惯,特别像脊柱矫形康复产品,需要经常拆卸和穿戴,应尽量保证操作步骤少、简单且充分考虑容错性。

1.2.4 功能性与体验性原则

在考虑不同类型矫形康复产品(固定矫形、脊椎矫形、足弓及足压矫形等)医疗功能的同时,作为可穿戴产品,特别是面向老年用户的辅助康复产品,其穿戴舒适性、与患者间适配性及人-机运动协调性,都会对患者穿戴体验产生显著影响,特别是针对老年患者,良好的穿戴体验感将对其生理、心理乃至康复效果产生正激励。

2 多学科交叉融合创新设计方法

适老化矫形康复类可穿戴产品设计过程涉及到计算机科学、应用数学、机械工程、设计学、材料科学、应用力学、运动生物力学以及临床医学等多个学科领域的研究,因此,其设计方法有别于其他适老化产品或可穿戴产品,一定是多学科交叉融合创新,具体设计方法及流程见图 3。

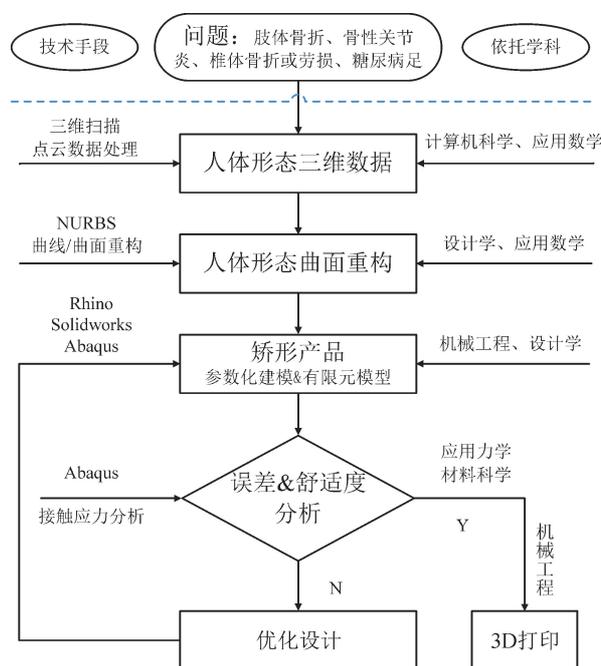


图 3 多学科交叉融合创新设计方法及流程

Fig. 3 Innovative design method and process of multidisciplinary cross integration

2.1 基于三维扫描的形体数据获取

为了提高矫形康复产品与患者间穿戴匹配性,助力矫形康复效果,采用三维扫描技术采集患者准确的形态参数,见图 4。



图4 不同部位矫形康复形态数据采集
Fig. 4 Orthopedic rehabilitation morphology data collection for different parts

下文以膝关节固定护具为例进行创新设计方法及流程阐述。将扫描得到的点云数据导入 Geomagic Studio 软件进行预处理。首先,去除孤立点云和噪点;其次,进行点云封装生成多边形面片;再次,进行边界处理、空洞修补及模型表面光滑处理;最后,创建局部坐标系,通过调整使模型主视图与世界坐标系保持一致,最终实现所需形体模型,具体流程见图 5。

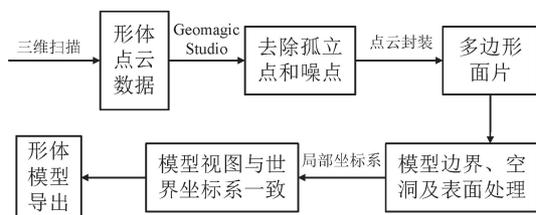


图5 点云数据预处理流程
Fig. 5 Processing flow of point cloud data

在上述点云预处理过程中,主要采用双边滤波算法对模型边缘进行处理,其表达式为^[11]:

$$I_p = \frac{\sum_{\vec{q} \in S} \|\omega_s(\vec{P} - \vec{q})\| \omega_r(I_{\vec{p}} - I_{\vec{q}}) I_{\vec{q}}}{\sum_{\vec{q} \in S} \|\omega_s(\vec{P} - \vec{q})\| \omega_r(I_{\vec{p}} - I_{\vec{q}})} \quad (1)$$

式中: P 为当前点; I 为目标点云; ω_s 和 ω_r 为权值函数。

采用双边滤波算法计算得到的点云保存了点云边缘的作用,其输出值不会改变。进一步采用基于曲率估算的点云精简算法,精简得到的人体不同部位点云模型,以膝关节固定护具为例,图 6 为点云数模型预处理过程。

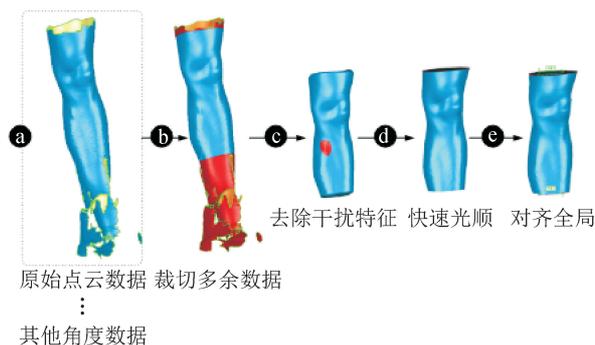


图6 膝关节点云数模型预处理
Fig. 6 Preprocessing of point cloud model for knee joint

2.2 基于 NUBRS 曲面的形态重构

非均匀有理 B 样条 (non uniform rational B-spline, NURBS) 是由 u, v 方向控制的双参数四边域曲面,具有很强的几何直观性、灵活操控性和计算稳定性,其对应的曲线和曲面方程为^[11]:

$$P(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i d_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)}, \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (2)$$

$$p(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} d_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)} \quad (3)$$

式中: i 为节点序号; ω_i 和 $\omega_{i,j}$ 为权因子; d_i 和 $d_{i,j}$ 为控制点; $N_{i,k}(u)$ 为 i 节点的 u 方向 k 次 B 样条基函数。

因此,本研究中采用 NURBS 理论和技术,完成矫形康复产品快速、精确的重构大数据量、复杂点云模型曲面,实现产品的逆向设计。见图 7,对经过点云数据预处理的模型,依次进行①模型与世界坐标系统一化处理、②形态 NUBRS 曲线构造以及③形态 NUBRS 曲面重构。

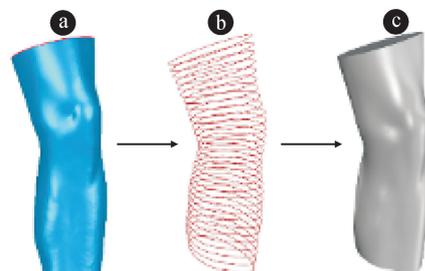


图7 膝关节形体 NURBS 曲线和曲面生成
Fig. 7 NURBS curve and surface generation of knee joint shape

2.3 矫形康复产品初步设计及误差分析

见图 8,对经过 NUBRS 曲面重构后的形态模型,在任一 3D 建模软件中通过“偏移厚度”方式实

现固定护具的实体模型创建。在此基础上,对原始的点云数据曲面和 NUBRS 曲面进行误差分析,借助误差最大值、最小值、平均值及标准差,初步对矫形康复产品进行设计分析,考虑到后期穿戴的舒适性,要求许用误差值不大于 5%。若局部区域误差值超出设计要求,则需对 NUBRS 曲线和曲面参数进行调整,直至满足误差要求。

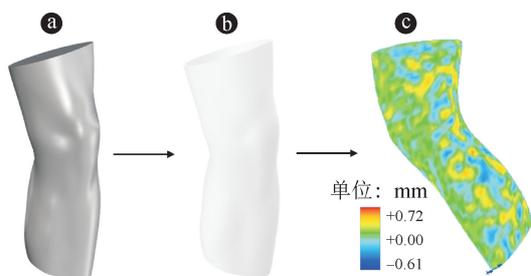


图 8 膝关节矫形康复产品初步设计及误差分析
Fig. 8 Preliminary design and error analysis of knee orthopedic rehabilitation products

2.4 矫形康复产品拓扑优化与舒适度评价

将矫形康复产品初步设计模型按照功能进行区域划分,进而对固定、装配操作以外区域进行拓扑优化,实现轻量化设计,见图 9。同时,借助有限元方法对穿戴后接触压力进行模拟计算,并以此作为指标参数进行穿戴舒适度客观评价;参考服装舒适压力范围 1.96~3.92 kPa,不适压力介于 5.88~9.8 kPa,定义压力区间 $[5.88, \infty)$ kPa 为穿戴不舒适区域,压力区间 $(-\infty, 1.96]$ kPa 为穿戴后固定矫形功能弱区域,介于两者之间为舒适区域,若矫形护具满足舒适度要求,则可以采用 3D 打印方式进行快速加工。

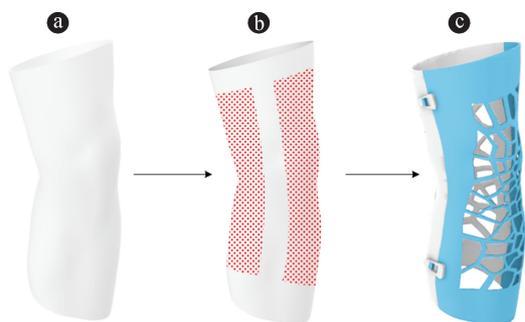


图 9 膝关节矫形康复产品拓扑优化
Fig. 9 Topology optimization of knee orthopedic rehabilitation products

2.5 矫形康复产品功能和性能主客观评价

如何准确并科学地对矫形康复产品功能、性能进行评判是本研究重点之一。因此,本文在传统医学 CT 和 MRI 客观评价和功能量表主观评价基础上,提出针对不同的矫形康复产品,一方面引入主客

观穿戴舒适性评价,另一方面,通过步态分析、足压分析、肌电分析等实验测试进行客观评价,见图 10。

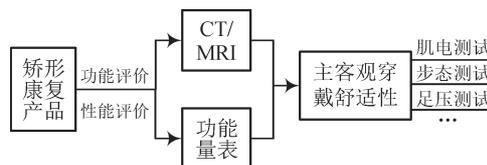


图 10 矫形康复产品主客观评价方法
Fig. 10 Subjective and objective evaluation methods for orthopedic rehabilitation products

3 设计实践

以某高足弓受试者为例,按照上述设计方法,进行足弓矫形器设计及实验研究。

3.1 足弓矫形器设计

3.1.1 足部扫描

在足矢状面一侧分别于舟状结节(NAVT)、内侧跟骨点和大母脚趾的关节处粘贴光标点以便精确划分足弓曲线。在足底足后跟点和食指拇指趾尖点贴光标,两点连接为脚轴方向以建立局部足部坐标系。此外,前脚掌、后足跟和外侧纵弓处贴光标辅助足弓区域的快速识别。图 11 所示为手持式三维扫描仪扫描足部点云数据过程。



图 11 三维扫描采集足部点云数据
Fig. 11 3D scanning collecting foot point cloud data

3.1.2 点云数据处理

将扫描所获点云数据导入 Geomagic Studio 软件,按照前文双边滤波算法进行预处理,得到封装后的足部多边形面片模型;进一步对模型表面进行平滑处理,并将脚轴处建立的局部坐标系与世界坐标系重合,实现模型摆正,见图 12。

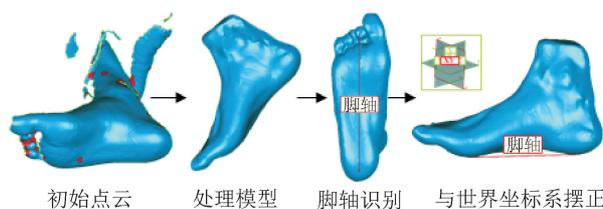


图 12 足部点云数据模型
Fig. 12 Point cloud model of foot

3.1.3 足型特征提取

依据内侧纵弓、外侧纵弓、横纵弓及相关识别足弓的特征点,将足部点云模型划分获得仅足弓部分。

同时,依据特征点自动提取足长、足宽和足弓曲线等足部参数和特征曲线,见图 13^[12]。

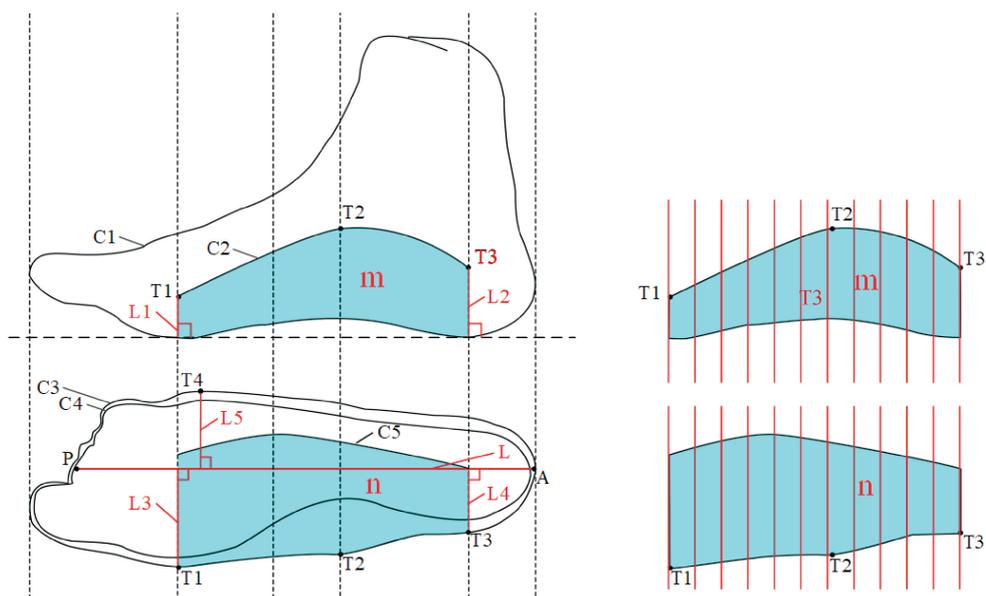


图 13 三维足弓参数提取
Fig. 13 3D arch parameter extraction

3.1.4 NURBS 曲线曲面拟合

以三维足弓空间曲线参数坐标作为 NURBS 曲线的型值点集坐标,采用积累弦长参数化法构造节点矢量。以首末端点切矢条件为边界条件构造附加方程,获得三次 NURBS 曲线的控制顶点。进而选择积累弦长参数化方法构造三次 NURBS 曲线,其两端节点的重复度为 4,构造出节点矢量 u ,根据双三次 NURBS 曲面矩阵构造方程,并在 MATLAB 软件环境下通过编程计算构造足弓部分区域 u 向、 v 向曲线和曲面。图 14 为双三次 NURBS 足弓部分区域曲面^[12]。

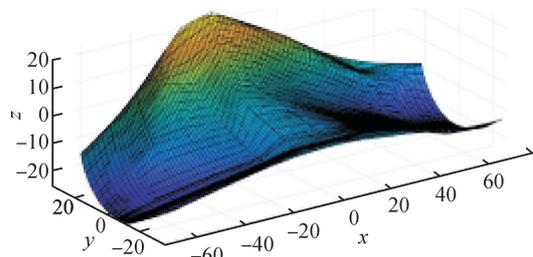
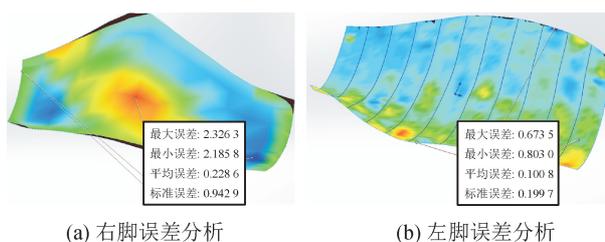


图 14 双三次 NURBS 足弓部分区域曲面
Fig. 14 Bicubic NURBS arch region surface

3.1.5 误差分析

对 NURBS 曲面重构后的足弓部分区域曲面与原始点云数据对应的多边形网格模型进行误差分析,以 z 方向上的绝对误差作参考,分析结果见图 15^[12]。右脚足弓模型最大、最小、平均和标准误差值分别为 2.326 3 mm、2.185 8 mm、-0.228 6 mm

及 0.942 9 mm;左脚对应误差值为 0.673 5 mm、-0.803 0 mm、-0.100 8 mm 和 0.199 7 mm。拟合误差分析结果可知,所构造的足弓部分区域 NURBS 曲面与原多边形曲面片误差较小,符合足弓贴合要求。



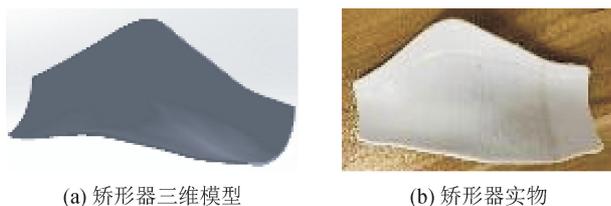
(a) 右脚误差分析 (b) 左脚误差分析
图 15 多边形网格曲面与 NURBS 曲面间误差分析
Fig. 15 Error analysis between polygonal mesh surface and NURBS surface

3.1.6 矫形器建模及制作

基于上述 NURBS 曲面重构后的足弓曲面,通过偏置 3 mm 完成矫形器三维建模,并采用 3D 打印方式完成加工,材料选用热塑性聚氨酯弹性体 (TPU),邵氏硬度定为 95,见图 16 所示^[12]。

3.2 足弓矫形器实验验证

下文中将分别开展静态和动态足压测试实验,以足压、压力中心轨迹曲线及压强时间积分曲线作为参考指标,对矫形器有效性进行客观分析及评价。



(a) 矫形器三维模型

(b) 矫形器实物

图 16 足弓矫形器模型

Fig. 16 Foot arch orthosis model

图 17 为足压测试实验场景图,图 18 为穿戴矫形器前后的双足静态压力分布图。对比分析可知穿戴矫形器后,左足足跟部位压力集中状况得到明显改善,同时,左右足的压力分布对称性提升。

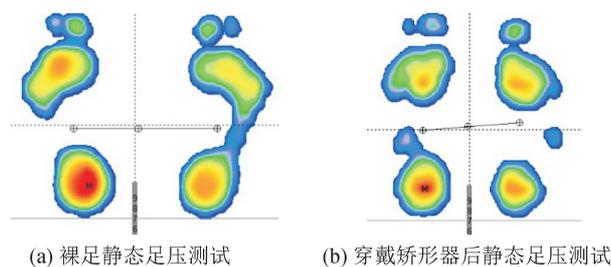


(a) 静态足压测试

(b) 动态足压测试

图 17 足压测试实验场景图

Fig. 17 Diagram of foot pressure experiment



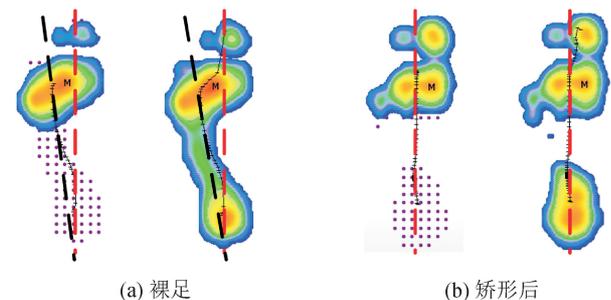
(a) 裸足静态足压测试

(b) 穿戴矫形器后静态足压测试

图 18 穿戴矫形器前后静态足压测试对比

Fig. 18 Comparison of static foot pressure tests before and after wearing orthosis

图 19 为穿戴矫形器前后动态足压实验过程足底压力中心轨迹变化图,对比分析可知受试者裸足时足底压力中心轨迹(COP)有明显的偏移,在穿戴矫形器后足力线明显摆正,且前脚掌的压力集中有明显减轻。



(a) 裸足

(b) 矫形后

图 19 足底压力中心轨迹变化图

Fig. 19 Diagram of plantar pressure center trajectory

图 20 所示为受试者裸足和佩戴矫形器状态下左脚的压强时间积分曲线,显然佩戴矫形器后足底压强时间积分值明显降低,且压强时间积分曲线较为平缓。

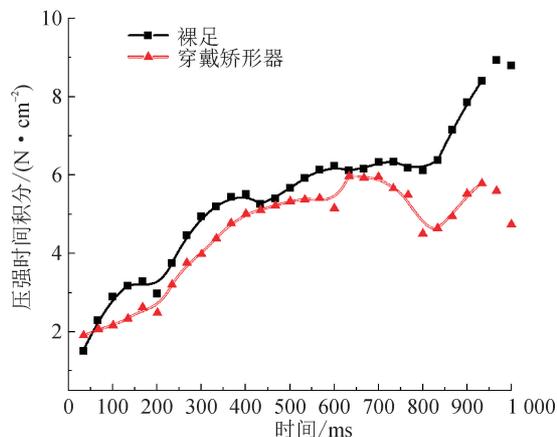


图 20 足底压强时间积分曲线

Fig. 20 Time integral curve of plantar pressure

4 结论

老龄化问题给全人类在社会和经济发展中带来了诸多挑战,特别是脊柱骨折与劳损、下肢骨折、骨性关节炎、糖尿病足等老年常见疾病给老年患者、家庭及社会造成极大困扰。因此,如何科学地开展面向健康老龄化背景下的矫形康复类可穿戴产品设计及评价研究,对于老年疾病辅助康复、提升老年人群生活质量,均具有重要的意义。本文在对适老化矫形康复类可穿戴产品核心需求梳理的基础上,提出了“核心需求+三化四性”设计原则,以及多学科交叉融合创新设计方法,进而确立了适老化矫形康复类可穿戴产品的设计方法。并以高足弓受试者为例,通过足弓矫形器设计实践对本文提出的设计方法进行实证研究,通过仿真分析和实验验证发现:①按照本文设计方法研发的足弓矫形器能够有效优化足底压力分布;②穿戴矫形器后动态足压中心轨迹(COP)较裸足时明显摆正;③穿戴矫形器后足底压力集中有明显缓解。

需要指出的是,本研究虽从设计方法的视角对适老化矫形康复类可穿戴产品进行理论和实证创新性研究,但此类产品设计、功能及性能实证受诸多因素制约和影响,团队将在后续研究中继续探索并完善。

参考文献:

- [1] 胡湛, 彭希哲, 吴玉韶. 积极应对人口老龄化的“中国方案”[J]. 中国社会科学, 2022(9):46-66,205.

- HU Zhan, PENG Xizhe, WU Yushao. On the "Chinese Approach" to actively addressing population ageing [J]. *Social Sciences in China*, 2022(9):46-66, 205.
- [2] JIMENEZ-PEREZ I, GIL-CALVO M, QUESADA J I, et al. Foot orthosis in running[M]//SUBIC A. *Materials in sports equipment*. Second Edition. 2019: 451-485.
- [3] FERNANDEZ M L, LOZANO R M, DIAZ M I, et al. How effective is orthotic treatment in patients with recurrent diabetic foot ulcers? [J]. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 2013, 103 (4): 281-290.
- [4] CHARANYA G, PATIL K M, NARAYANAMURTHY V B, et al. Effect of foot sole hardness, thickness and footwear on foot pressure distribution parameters in diabetic neuropathy[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H, Journal of Engineering in Medicine*, 2004,218(6): 431-443.
- [5] LI Jianyou, TANAKA H. Feasibility study applying a parametric model as the design generator for 3D-printed orthosis for fracture immobilization[J]. *3D Printing in Medicine*, 2018, 4: 1.
- [6] SANTOR S, SOARES B, LEITE M, et al. Design and development of a customised knee positioning orthosis using low cost 3D printers[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2017, 12(4): 322-332.
- [7] XU Rui, WANG Zhonghan, REN Zhenxiao, et al. Comparative study of the effects of customized 3D printed insole and prefabricated insole on plantar pressure and comfort in patients with symptomatic flatfoot[J]. *Medical Science Monitor*, 2019, 25: 3510-3519.
- [8] HUANG Yuping, PENG H T, WANG Xin, et al. The arch support insoles show benefits to people with flatfoot on stance time, cadence, plantar pressure and contact area[J]. *PLoS ONE*, 2020, 15(8): e0237382.
- [9] ALIN C K, UZUNEL E, KRONHED A C G, et al. Effect of treatment on back pain and back extensor strength with a spinal orthosis in older women with osteoporosis: a randomized controlled trial[J]. *Archives of Osteoporosis*, 2019, 14: 5.
- [10] 陈涵,沈雷,刘妍兵. 低龄老年人智能可穿戴产品可持续设计研究[J]. *针织工业*, 2022(2): 58-62.
CHEN Han, SHEN Lei, LIU Yanbing. Sustainability design research of intelligent wearable devices for light-aging people [J]. *Knitting Industry*, 2022(2): 58-62.
- [11] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//Sixth International Conference on Computer Vision, IEEE,1998:839-846.
- [12] 王芸倩. 基于足压与步姿分析的足弓矫形器参数化设计研究[D]. 西安:西安理工大学,2022.
WANG Yunqian. Research on parametric design of foot arch orthosis based on foot pressure and gait analysis [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.

(责任编辑 王绪迪)

(上接第 233 页)

- [10] JIANG Wei, LIU Bo, LI Qing, et al. Weight of energy consumption parameters of rural residences in severe cold area [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021,26:101131
- [11] 王昱迪,许国强,王凯. 内蒙古草原牧区住宅墙体节能方案与经济效益评价[J]. *建筑经济*, 2021, 42(S1): 350-353.
WANG Yudi, XU Guoqiang, WANG Kai. Energy saving scheme and economic benefit evaluation of residential wall in Inner Mongolia Grassland Grazing Area [J]. *Construction Economics*, 2021, 42 (S1): 350-353.
- [12] 宋平,唐鸣放,郑开丽. 重庆农村住宅热环境实测与评价[J]. *建筑科学*,2015,31(6):118-123.
SONG Ping, TANG Mingfang, ZHENG Kaili. Actual measurement and evaluation of thermal environment of rural residential buildings in Chongqing[J]. *Building Science*,2015,31(6):118-123.
- [13] 内蒙古自治区住房和城乡建设厅. 农村牧区居住建筑节能设计标准:DBJ 03-78-2017 [S]. 北京:中国建材工业出版社,2017.
- [14] 李金平,李红博,郑健,等. 架空炕与传统落地炕热性能对比试验[J]. *农业工程学报*,2017,33(14):210-216.
LI Jinping, LI Hongbo, ZHENG Jian, et al. Contrast test of thermal properties of suspended kang and traditional landed kang [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (14): 210-216.
- [15] 金鑫,谭羽非,于克成. 北方农宅吊炕与土暖气联合供暖系统测试分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*,2019,51(4):179-186.
JIN Xin, TAN Yufei, YU Kecheng. Test and analysis of the thermal performance of combined elevated kang and radiator heating system in northern rural areas [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51 (4):179-186.

(责任编辑 王绪迪)