

虚实结合的可穿戴产品适合性检验研究

王海宁, 池卓哲

(湖南大学, 长沙 410082)

摘要: **目的** 为了更科学地研究和检验可穿戴产品的适合性, 提出一种适合性检验方法, 能够精确保留现实环境中的产品佩戴关系, 并能将现实与虚拟的适合性检验研究相结合, 得到合理的适合性检验结果。**方法** 以虚拟现实眼镜的适合性检验为例, 通过高精度的三维测量技术将现实环境中的人、产品以及人—产品佩戴关系转化为三维虚拟信息, 并以人—产品佩戴三维模型为参考基准对齐人和产品的虚拟模型, 得到保留现实佩戴关系的人—产品佩戴模型组, 再应用偏差分析法得出人—机佩戴区域的可视化适合性结果和统计数据, 结合主观评价方法进一步分析产品的适合性。**结论** 虚实结合的产品适合性检验方法可在虚拟环境中高精度地保留现实环境中的人—产品佩戴关系, 并能得到可视化的适合性检验结果, 为检验和指导产品的适合性提供依据。

关键词: 可穿戴产品; 适合性检验; 三维测量; 偏差分析; 虚拟现实眼镜

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)12-0084-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.12.011

Fit Test Method Study of Wearable Products by Combining Virtuality and Reality

WANG Hai-ning, CHI Zhuo-zhe

(Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: In order to study and test the fit of wearable products more scientifically, a fit test method need to be proposed, which can accurately retain the wearing relationship from real environment, and combine the fit test research both virtuality and reality to get reasonable fit test results. Then a fit test of the virtual reality headset was taken as an example to illustrate the method. By using high-precision three-dimensional measurement technology, human, products and human-product wearing relationship from reality were transformed into 3D virtual information. By using the three-dimensional model of human-product wearing as a reference to establish the virtual model of human and products, the model group of human-product wearing which containing real wearing relationship was obtained. And visualized fit results and statistical data of human-product wearing area were obtained by deviation analysis method. Then combined with the subjective evaluation method, fit of the products was analyzed further. The fit test method of products by combining virtuality and reality can obtain the human-product wearing relationship from reality with high precision in virtual environment. And it can obtain the visual fit test results and provides basis for the test and guidance of product suitability.

KEY WORDS: wearable products; fit test; three-dimensional measurement; deviation analysis; virtual reality headset

产品与人体对应部位的适合性决定着用户使用时舒适度、稳定性和安全性等因素^[1-2]。不适合人体形态的产品, 尤其是可穿戴产品(如可穿戴设备和穿戴式防护用品等)会产生如呼吸器漏气、耳机脱落、

氧气面罩压迫鼻梁和鞋子穿戴不舒适等问题^[3-6], 因此产品在投入使用前需要进行适合性检验^[7-8]。传统检验产品适合性的方法往往通过主观评价^[6], 即通过多个被试对佩戴的产品进行主观评分从而获得产品

收稿日期: 2021-02-09

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2018WK2032)

作者简介: 王海宁(1984—), 男, 山东人, 博士, 湖南大学副教授, 主要研究方向为人机交互与用户体验、人体测量学与人因工程。

的适合性结果。随着计算机辅助设计 (CAD) 和计算机辅助工程 (CAE) 技术的广泛应用, 基于数字仿真的适合性检验方法如有限元分析、偏差分析等逐渐被人机工程领域应用^[2,9-11], 用于判断产品和人体接触区域的适合性, 并将适合性分析结果量化和可视化。然而, 由于仿真过程往往脱离实际环境, 仿真时的佩戴状态不能精确对应被试在现实环境中的佩戴状态, 此时需要一种适合性检验方法, 在能够进行客观适合性检验的同时, 也能和实际环境中的佩戴关系保持一致, 从而将现实与虚拟的主客观适合性检验相互结合, 得到更合理的适合性检验结果和改进设计结论。

1 方法

研究提出一种虚实结合的产品适合性检验方法, 该方法在 Ellena 等人的用于产品适合性计算的偏差分析法^[11]的基础上进行延伸, 拓展了其人体佩戴区域和产品的适用范围, 并应用于适合性检验领域。虚实结合的可穿戴产品适合性检验方法流程见图 1。

1) 确立对象。选择需要适合性检验的产品, 并确定人与产品的佩戴区域, 及佩戴区域分别对应的人体区域和产品区域。

2) 化虚为实。三维测量技术近年来也逐渐被人机工程和产品领域应用^[12-14], 高精度的三维测量设备可将现实世界中的三维位置关系转换为高精度的虚拟三维数据, 便于后期在 CAD 软件中进行仿真和数据分析。在现实环境中, 使用三维测量设备将佩戴区域相关人体部位进行扫描, 处理后得到该部位的局部人体三维模型, 并将产品各部件扫描并生成产品三维模型, 便于后期对齐校准和分析。

3) 虚实结合。使用三维测量设备还可获取和现实环境中高精度的人—产品佩戴关系, 以保证虚拟仿真环境和现实环境中的佩戴关系一致, 获得可靠的适合性分析结果。由于三维测量设备在对佩戴状态进行扫描时不能区分佩戴时的人和产品, 因此, 需要在现实环境中, 被试按照佩戴规范佩戴待测试的产品后, 将被试佩戴产品时的状态扫描, 得到人—产品佩戴三

维模型, 此时被试可对产品进行测试或主观评价实验等; 在虚拟环境中, 以人—产品佩戴三维模型为参考基准, 将局部人体三维模型与产品三维模型对齐校准, 得到具有现实佩戴关系的局部人体三维模型以及产品三维模型组合, 即人—产品佩戴校准模型组。

4) 适合性分析。在虚拟环境中, 将人—产品佩戴校准模型组导入 CAD 软件进行适合性分析, 得到可视化和量化的适合性分析结果, 该结果可结合现实环境中的主观评价等实验研究对产品的适合性进行综合分析, 从而对改进产品适合性提出指导性建议。

2 方法应用实例

2.1 确立对象

近年来以虚拟现实 (VR) 眼镜为主的头部可穿戴设备有了越来越多的市场需求, 用户在 VR 眼镜的人机舒适体验层面也提出了更高的要求。适合性较差的 VR 眼镜会影响佩戴舒适度^[15], 并会产生漏光现象, 影响使用时的沉浸感^[16], 厂商在设计 VR 眼镜时需要考虑消费群体的脸型以获得更高的适合性^[17]。

选取市场上现有的 VR 眼镜 A 和 B 作为研究案例, 对虚实结合的适合性检验方法进行说明。两款用于对比的 VR 眼镜见图 2。VR 眼镜 A 是一款带式一体机, 主要面向欧美消费人群, 鉴于国人和欧美白人的头型存在差异^[18], 国人在佩戴 VR 眼镜 A 时, 在面贴 (VR 眼镜与人面部之间接触的过渡部件) 区域会出现明显的鼻部漏光和压力不舒适现象。而 VR 眼镜 A 的中国版——VR 眼镜 B 针对国人的头面部形态特点对面贴部件进行了定制设计, A、B 两款 VR 眼镜主要在面贴形态上有所差异, 且面贴通用。

在 VR 眼镜 A 和 B 的基础上确定进行适合性检验的对象, 用于适合性研究 VR 眼镜面贴见图 3。首先佩戴区域对应的人体区域为头面部; 其次 VR 眼镜与人头面部直接接触的面贴形态对适合性起着关键作用, 故确定佩戴区域对应的产品区域为面贴的贴合面。因此头面部和 VR 眼镜的面贴贴合面为适合性检验的主要对象。

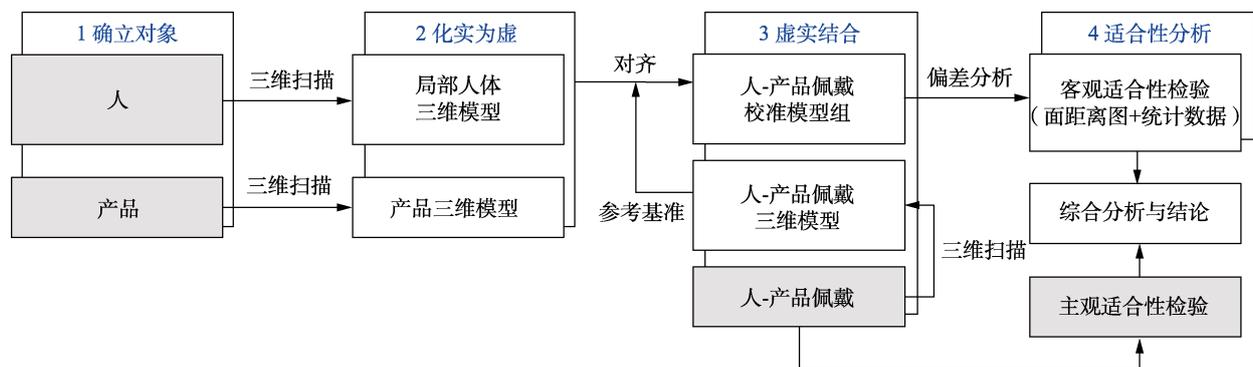


图 1 虚实结合的可穿戴产品适合性检验方法流程

Fig.1 Flow of fit test method of wearable products by combining virtuality and reality



图2 两款用于对比的VR眼镜
Fig.2 Two VR headsets for comparison

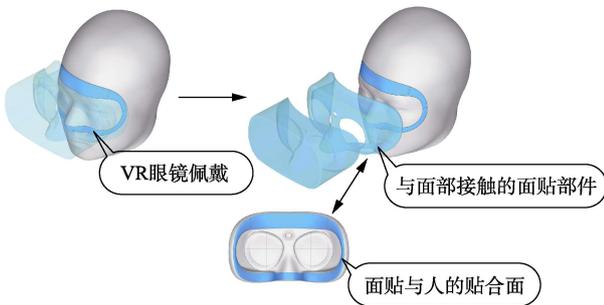


图3 用于适合性研究VR眼镜面贴
Fig.3 Facial interface of VR headset for fit test

2.2 化实为虚

首先需要确定参与适合性检验的被试,并获取被试的虚拟三维数据,因VR眼镜主要在头面部佩戴,故选择获取被试的头面部三维数据。本研究在前期建立的中国三维人头数据库(2200人样本)和测量分析的基础上^[19],根据ISO DIS 18526-4-2018定义的与VR眼镜佩戴区域相关的眼面部人体测量学尺寸^[20],并采用ISO TS 16976-2-2015的主成分分栏法进行分层抽样。主成分分栏法是一种应用多维尺寸数据对数据库人群进行头面部分类的方法,根据分类后各头面部类型包含数据库人群的数量,最终按照性别和数量比例确定适合性检验的分层抽样(一般为25人样本)条件^[21-22]。研究在遵循主成分分栏分层抽样条件的基础上,要求被试有一定VR眼镜使用经验,眼镜无斜视状况,最终招募并筛选了25名参与适合性检验的被试,其中男性12名,女性13名,年龄在20~31岁,每个被试均通过非接触扫描仪获取了头部扫描数据。用于适合性检验的人头三维模型见图4,原始扫描点云在Artec Studio 12中经过模型处理后获得高精度的人头三维模型,并统一建立基于法兰克福平面(以人头左右耳屏点和左侧眶下点为基准建立的水平面)的三维坐标系^[13]。

VR眼镜的虚拟化过程见图5,VR眼镜A和B(如图2)均包含主体、面贴和头带3个主要部分。



图4 用于适合性检验的人头三维模型
Fig.4 3D head model for fit test

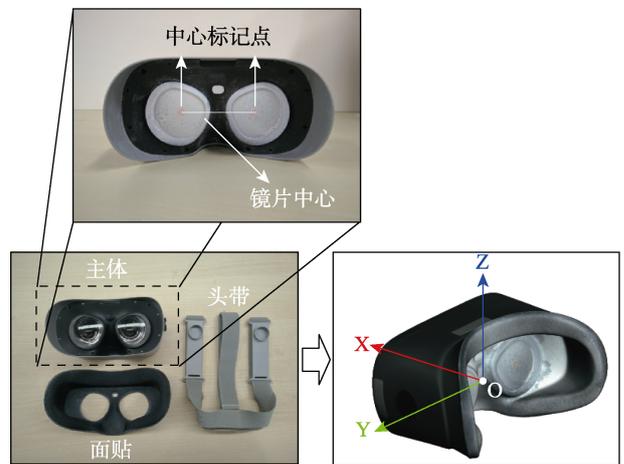


图5 VR眼镜的虚拟化过程
Fig.5 Virtualization process of VR headset

VR眼镜的主体除了承载光学组件和电子元器件外还用于维持软质面贴的形态,头带用于佩戴时的头部固定,而面贴则用于面部固定与贴合,遮挡外界光线。在对VR眼镜扫描之前需要制作用于佩戴规范的佩戴标记,以保证不同被试佩戴的一致性。VR眼镜正确佩戴的关键在于用户双眼对准两块镜片中心,可获得观看时的最佳清晰度和视场角。于是在VR的主体镜片上做标记以便于现实环境中被试统一按照佩戴规范进行佩戴,最后对VR眼镜A和B的主要部件进行三维扫描和处理,得到各部件的高精度三维模型,并根据产品对称面和两镜片中心点建立产品的三维坐标系。

2.3 虚实结合

2.3.1 现实环境中的适合性检验与佩戴位置关系获取

在现实环境中,每个被试按随机顺序佩戴VR眼镜A和B,每次佩戴时按照统一的佩戴规范,双眼对准VR镜片中心,并调整至合适的头带松紧度(两次佩戴保持头带松紧度一致),在适当活动后眼镜无滑

脱现象，佩戴后让被试对每次佩戴的面贴适合性进行主观适合性检验。参考 Lee 等人的人机适合性评估方法^[5]，检验内容包括：面贴整体区域的整体不匹配度（0 分为完全适配，1 分为略微不匹配，4 分为中度不匹配，7 分为极其不匹配），反应被试对产品的适合性整体偏好；并对面贴整体区域及 6 个分区的压力不舒适度（0 分为完全舒适，1 分为略微不舒适，4 分为中度不舒适，7 分为极其不舒适）和漏光程度（0 分为无漏光，1 分为略微漏光，4 分为中度漏光，7 分为极其漏光）进行主观评分，适合性检验面部分区见图 6。6 个分区为前额（1）、右颧（2）、左颧（3）、右颧（4）、左颧（5）和鼻部（6）。佩戴时的佩戴区域往往存在压力不舒适部位和易泄漏部位等关键区域，针对关键区域进行适合性分析可以更有效地进行设计改良。在每次佩戴和主观评分完成后对佩戴 VR 眼镜的被试进行扫描，人与 VR 眼镜佩戴关系扫描见图 7，并对每次进行佩戴的扫描点云数据进行处理，得到包含现实环境精准佩戴位置关系的人—产品佩戴三维模型。

人—产品佩戴模型校准流程见图 8。对于每次佩戴，以人—产品佩戴三维模型为参考基准，在 CAD 软件中将被试的人头三维模型和 VR 眼镜的三维模型

（包含分区面贴贴合面）进行对齐，并检验对齐后模型和人—产品佩戴三维模型的匹配性，确保佩戴区域周围的对齐偏差绝对值在 0.2 mm 以内^[11]，保证在虚拟适合性检验时的人与产品的佩戴精准地保留现实中的佩戴位置关系。在对齐检验后得到人—产品佩戴校准模型组。

2.3.2 基于佩戴位置关系的虚拟适合性检验

人—产品佩戴校准模型组保留了现实环境中的佩戴位置关系，人—产品佩戴模型 3 种佩戴状态见图 9，此时产品与人主要存在 3 种状态。（1）间隙状态。该状态下的佩戴区域存在间隙，理论上对应现实佩戴关系中的佩戴空隙，在现实环境中，存在空隙的区域由于没有和人体贴合，会产生局部泄漏（如漏气、漏光和漏水等）现象，同时此区域基本上不会产生接触压力。（2）干涉状态。该状态下的佩戴区域存在干涉，理论上对应现实佩戴关系中的佩戴紧密贴合区域，在现实环境中，紧密贴合区域由于形变产生的应力，使得接触压力增大，同时此区域的泄漏现象较少，在一定情况下可提供稳定佩戴需要的摩擦力。理想的佩戴状态应当在提供适当稳定性的前提下尽量减少紧密

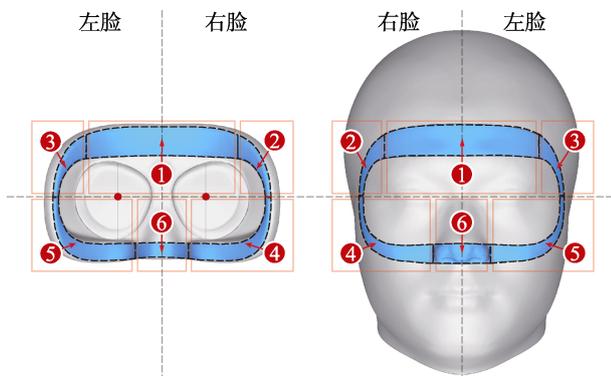


图 6 适合性检验面部分区
Fig.6 Facial areas for fit test



图 7 人与 VR 眼镜佩戴关系扫描
Fig.7 Scanning of wearing relationship between human and VR headset

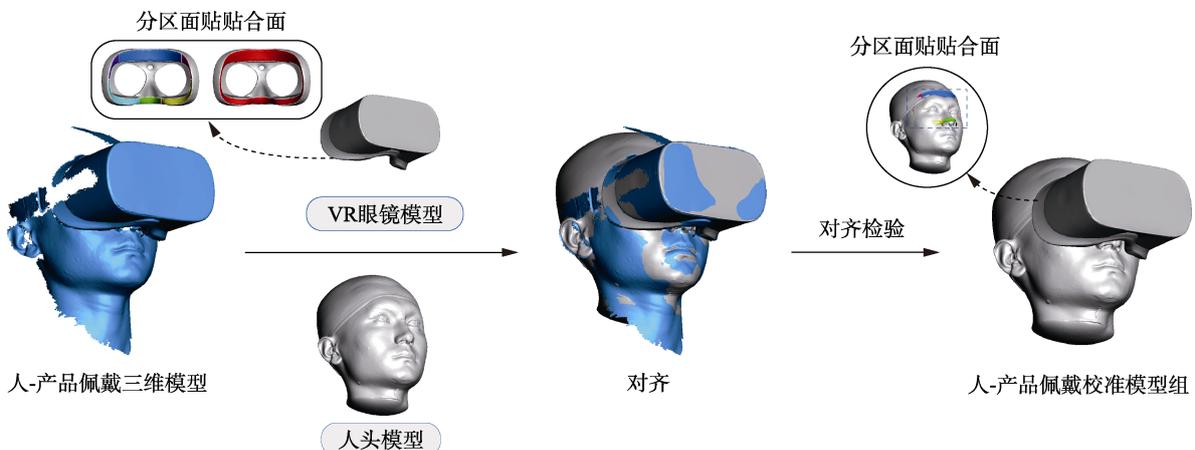


图 8 人—产品佩戴模型校准流程
Fig.8 Calibration process of human-product wearing model

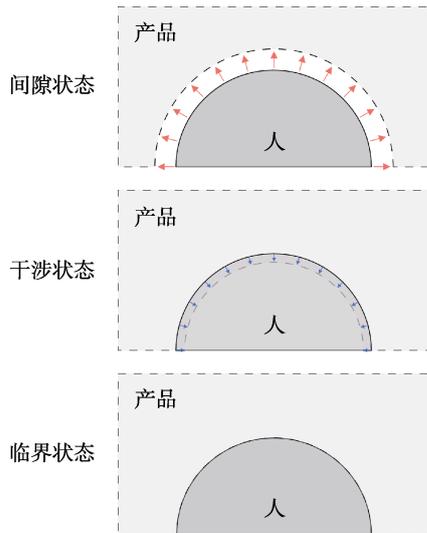


图9 人—产品佩戴模型3种佩戴状态
Fig.9 Three wearing states of human-product wearing model

贴合区域，以保证佩戴时的舒适度。(3) 临界状态。该状态下的佩戴区域处于间隙和干涉的临界状态，理论上对应现实佩戴关系中的临界贴合区域，在现实环境中，临界贴合区域由于形变量微小产生的接触应力及其局部压力也较轻微，同时由于佩戴空隙较少，此区域的泄漏现象较少，能提供佩戴的摩擦力较少。

在包含现实环境佩戴关系的人—产品佩戴校准模型组中，将其人头模型和面贴贴合面模型导入CATIA V5R21，通过偏差分析^[11]功能计算出人头的佩戴区域与分区面贴贴合面的面距离图和统计数据。

面距离图指选定区域的产品贴合面与人的佩戴区域之间数个观测点之间的距离转换形成的可视化

图像，偏差分析可得到的结果见图10。以整体区域贴合面的面距离图为例，红色代表着该区域处于间隙状态（距离为正值），蓝色代表着该区域处于干涉状态（距离为负值），绿色代表着该区域处于临界状态（距离接近于零）。面距离图可用于产品适合性的定性分析，VR眼镜面贴贴合面的面距离图结果对比见图11。从同一被试佩戴VR眼镜A和VR眼镜B生成面贴贴合面的面距离图可以看出，VR眼镜B相比A对于该被试的适合性更高，在鼻梁区域的间隙更小，在颧骨和颞骨区域的干涉也 smaller。统计数据包括分布不均匀性、间隙均值和干涉均值。分布不均匀性指整体区域贴合面数个观测点之间的距离的标准差，是反应贴合面的整体适合性的一个因素^[11]；间隙均值指选定区域中面距离为正值部分的统计均值，反应选定区域的间隙状态；干涉均值指选定区域中面距离为负值部分的统计均值，反应选定区域的干涉状态。分布不均匀性、间隙均值和干涉均值可用于客观适合性检验的数据统计，以定量分析产品的适合性。

2.4 适合性分析

2.4.1 主观适合性结果

在整体不适配度上，VR眼镜A的平均得分为6.4，VR眼镜B的平均得分为5.4，B相比A减少了15%，但不适配度分值仍偏高。压力不舒适度评分结果见图12，压力不舒适度评分均值在整体区域上，VR眼镜A的得分为5.0，B的得分为4.0，B相比A减少了20%，但仍存在中度不舒适，且A和B在左右颧骨区域的压力不舒适度最大。漏光程度评分结果见图13，漏光程度评分均值在整体区域上，VR眼镜A的得分为6.4，B的得分为4.5，B相比A减少了

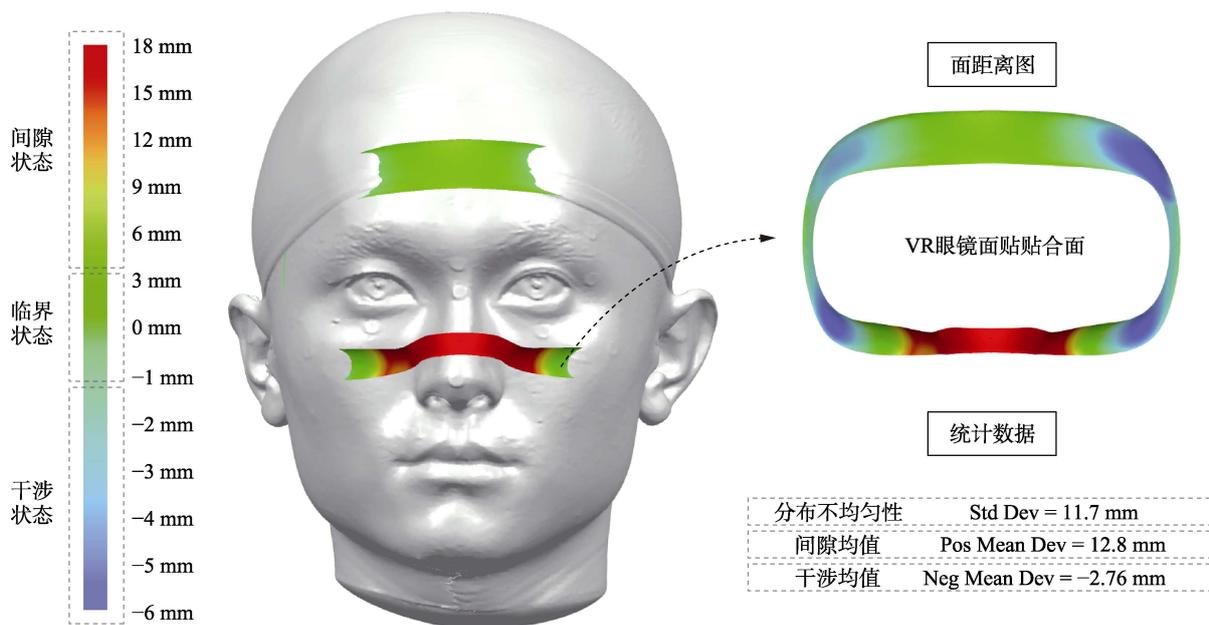


图10 偏差分析可得到的结果
Fig.10 Deviation analysis results

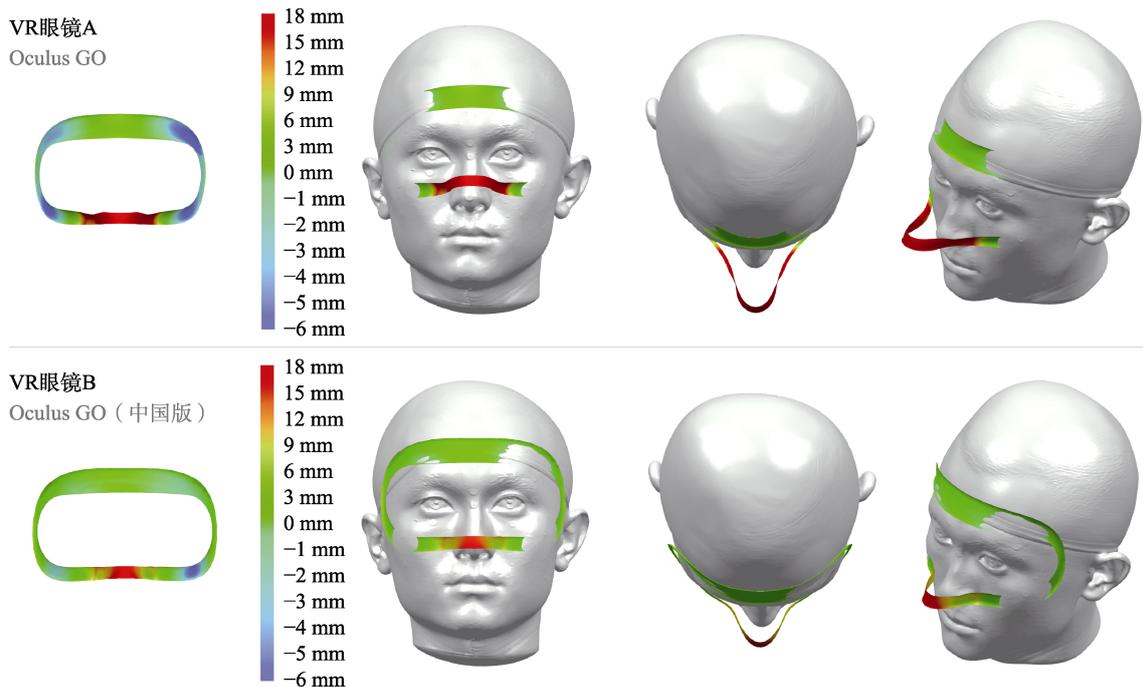


图 11 VR 眼镜面贴贴合面的面距离图结果对比

Fig.11 Comparison of distance map results of fitting surface of VR headset facial interface

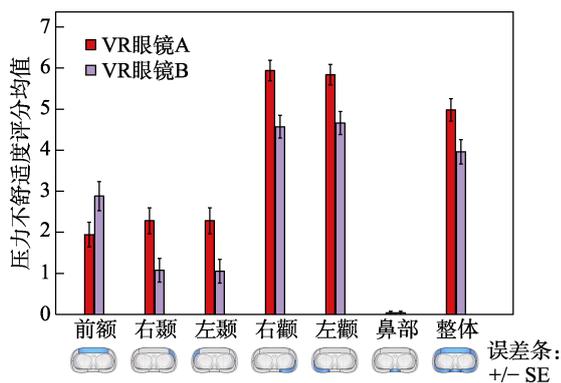


图 12 压力不舒适度评分结果

Fig.12 Score results of discomfort caused by contact pressure

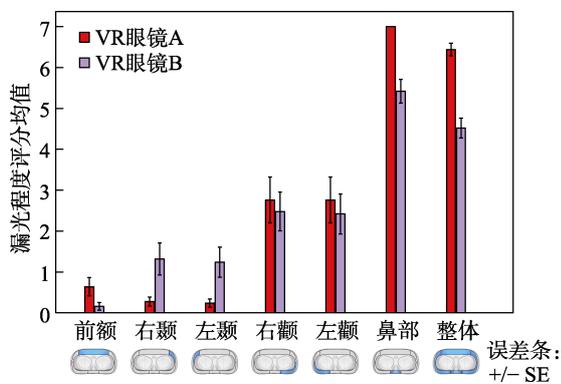


图 13 漏光程度评分结果

Fig.13 Score results of light leakage

30%，但仍存在中度漏光现象，且 A 和 B 在鼻部区域的漏光程度最大。

2.4.2 客观适合性检验结果

在整体区域的分布不均匀性上，VR 眼镜 A 的均值为 10.9 mm，VR 眼镜 B 的均值为 5.4 mm，B 相比 A 减少了 50%。干涉均值结果见图 14，干涉均值在整体区域上，VR 眼镜 A 的均值为 3.9 mm，B 的均值为 3.1 mm，B 相比 A 减少了 21%，A 和 B 在左右颞骨区域的干涉均值最大。间隙均值结果见图 15，间隙均值在整体区域上，VR 眼镜 A 的均值为 11.9 mm，B 的均值为 5.5 mm，B 相比 A 减少了 54%，A 和 B 在鼻部区域的间隙均值最大。

2.4.3 综合分析结论

从主客观适合性检验结果可以看出，整体上 VR 眼镜 B 的面贴适合性的主观偏好更高，同时在客观数据上显示 B 的适合性相比 A 有一定改善，但其仍存在一些适合性问题。在左右颞骨区域仍存在中度的压力不舒适现象，在左右颞骨区域仍存在一定的干涉（3.2~4.0 mm）。这些干涉对应现实佩戴中人机佩戴产生的形变，从而产生一定的接触压力，可通过增大贴合区域面积来减少压力值的大小，如增大面贴贴合面的宽度，也可以通过改进面贴形态以在佩戴时增加面部其他区域的接触面积，如增大前额和左右颞区域的接触面积，以避免左右颞区域局部压力过大的现象。在漏光程度方面，VR 眼镜 B 的面贴相比眼镜 A 有了一定改善，但在鼻部区域仍存在中度以上的漏光现象，主要是由于鼻部的间隙均值较大，VR 眼镜 A 的间隙均值达到 27.6 mm，B 的间隙均值为 11.7 mm，说明存在一定的改进空间，可以根据鼻部人体测量学

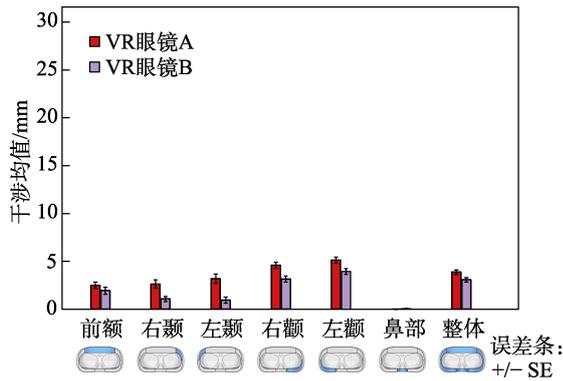


图 14 干涉均值结果

Fig.14 Results of mean value of interference distance

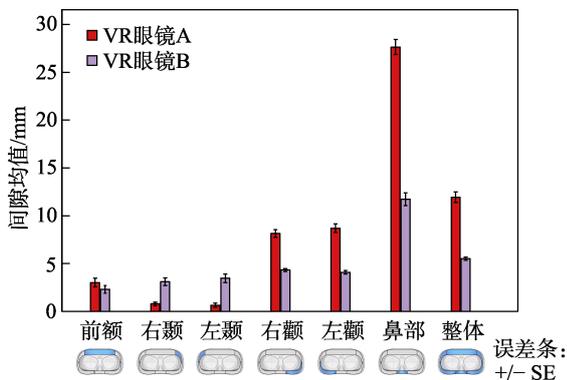


图 15 间隙均值结果

Fig.15 Results of mean value of gap distance

进行尺寸改进,也可以通过改进设计结构(如鼻部遮光部件^[16])来避免鼻部漏光现象。

客观适合性检验的分布不均匀性、干涉均值和间隙均值等可以对产品的适合性进行客观定量分析,也可以一定程度上解释主观适合性检验的整体不适配度、压力不舒适度和漏光现象。如在干涉值最大的左右颞区域对应的压力不舒适度评分也最高,在间隙值最大的鼻部区域对应的漏光程度也最高。但因同一被试对于面部不同区域压力及漏光的敏感程度存在差异,现阶段研究中的客观统计数据并不能完全代替主观评价,客观适合性检验结果需要与主观结果相互补充,从而得出对产品的设计有指导价值的结论。

3 结语

研究基于可穿戴产品的佩戴特点、三维测量技术和CAD偏差分析法,提出了虚实结合的适合性检验方法。主要适用于可穿戴产品的适合性检验,并以VR眼镜的适合性检验为例对方法进行阐述,通过高精度的三维扫描技术将现实环境中的佩戴关系转化为虚拟信息,并利用偏差分析法得出佩戴区域的可视化适合性结果和统计数据,与主观适合性检验结果相结合得出产品适合性改进结论。相比传统适合性检验方法,虚实结合的适合性检验方法具备以下创新点。

(1)可高精度地保留现实环境的佩戴关系,在虚拟环境中完成适合性测量,从而降低实验成本,提升产品研发效率。(2)可生成可视化结果,根据贴合面的面距离图可以直观地得到定性分析结果。(3)具备可拓展性,可结合主观评价、产品对比、分区检验等进行进一步研究,为产品的适合性提出设计改良指导。

虚实结合的适合性检验方法未来会在在动态佩戴关系和材料应用范围方向进行进一步研究。目前该方法在人与可穿戴产品之间的静态佩戴关系上进行了适合性研究,并且当前研究的偏差分析法对可穿戴产品的类型有一定要求。产品的佩戴区域对应部件为硬质材料(如半入耳式耳机),或是有硬质部件包裹的软质材料(如头盔内衬、VR眼镜面贴),以维持佩戴区域部件的贴合形态,并能限制在佩戴时的形变量,保证距离分析的正常计算,增加偏差分析结果的可靠性。而未来需要对无硬质部件包裹的软质材料的适合性分析继续进行研究,提高方法的适用范围和可靠性。

参考文献:

- [1] PANG T Y, LO T S T, ELLENA T, et al. Fit, Stability and Comfort Assessment of Custom-fitted Bicycle Helmet inner Liner Designs, Based on 3D Anthropometric Data[J]. *Applied Ergonomics*, 2018(68): 240-248.
- [2] SKALS S, ELLENA T, SUBIC A, et al. Improving Fit of Bicycle Helmet Liners Using 3D Anthropometric Data[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2016(55): 86-95.
- [3] LEI Z, YANG J, ZHUANG Z, et al. Simulation and Evaluation of Respirator Faceseal Leaks Using Computational Fluid Dynamics and Infrared Imaging[J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 2013, 57(4): 493-506.
- [4] JI X, ZHU Z, GAO Z, et al. Anthropometry and Classification of Auricular Concha for the Ergonomic Design of Earphones[J]. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 2018, 28(2): 90-99.
- [5] LEE W, YANG X, JUNG D, et al. Ergonomic Evaluation of Pilot Oxygen Mask Designs[J]. *Applied Ergonomics*, 2018(67): 133-141.
- [6] AU E Y L, GOONETILLEKE R S. A Qualitative Study on the Comfort and Fit of Ladies' Dress Shoes[J]. *Applied Ergonomics*, 2007, 38(6): 687-696.
- [7] GBZ/T 276-2016, 自吸过滤式呼吸防护用品适合性检验颜面分栏[S].
GBZ/T 276-2016, Fit Test Panels for Self-inhalation Air-purifying Respiratory Protective Equipment[S].

(下转第97页)