

三维人体扫描技术及其在服装领域的应用

苏军强, 赵晓露, 沈津竹, 王宏付

(江南大学 纺织服装学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:针对三维人体扫描技术在实际应用中产生的一些共性问题,从三维人体扫描技术的原理、影响测量精度的相关因素、典型性研究方向及其面临的问题3个方面进行梳理,着重从便携式人体测量设备开发、虚拟人台开发、服装样板自动生成、服装功效学评价、国民体型测量与服装号型更新以及在服装教育领域的应用6个方面进行总结梳理,为三维人体扫描技术在服装领域的应用提供思路。

关键词: 三维人体扫描;服装;应用;虚拟人台;样板自动生成

中图分类号: TS 941.26 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2019)01-0033-07

3D Human Body Scanning Technology and Its Applications in Garment Field

SU Junqiang, ZHAO Xiaolu, SHEN Jinzhu, WANG Hongfu

(School of Textile and Clothing, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Aiming at the common problems in the applications of 3D human body scanner, this paper summarized the mechanism, relating factors that affecting measurement accuracy, main research areas and the problems of the 3D human body scanning technology. The study focused on 6 points: the development of portable anthropometry device, virtual manikin development, automatic generation of garment pattern, clothing ergonomics evaluation, anthropometry, update of clothing size, and its application into clothing education area. The purpose of this study was to provide a reference for the application of 3D human body scanning technology in the field of clothing.

Key words: 3D human body scanning, clothing, application, virtual human platform, template automatic generation

近年来,随着计算机技术和光学三维测量技术的发展,基于光学测量的各种技术和设备不断出现。面向个性化量体的三维人体扫描技术是三维光学测量在服装制造领域的重要应用方向。由于市场上的品牌多样,所宣传的技术原理及称谓不统一,同时由于三维扫描设备对使用环境的一些特殊要求,目前三维人体扫描技术在实际应用中到达了瓶颈期,部分消费者对三维扫描技术的先进性、适用性及其前景持有一定的怀疑态度。

文中从三维人体扫描技术的原理、测量精度的密切影响因素、典型性应用及适用领域等方面进行梳理,以期为三维人体扫描技术在服装领域的应用提供一定的参考和指导。

1 三维人体扫描技术的原理及影响因素

光学三维测量是用光学原理采集物体表面三维空间信息的方法和技术。关于三维人体扫描技术的原理,陈益松等^[1]进行了较为系统的论述,并对其采用的技术及主流设备进行了分类,如图1所示。

文献[1]指出,共线方程是三维光学测量的基本原理:任何三维测量的结构光透射位置、被测量物体位置和拍摄位置都成三角关系,都属于三角测量的范畴。主动三维测量的三角关系是从双相机被动测量原理演变而来。

收稿日期:2018-06-29; 修订日期:2018-12-30。

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20151191)。

作者简介:苏军强(1976—),男,副教授,硕士生导师。主要研究方向为数字化人体与服装工程技术。

Email:jqsu@jiangnan.edu.cn

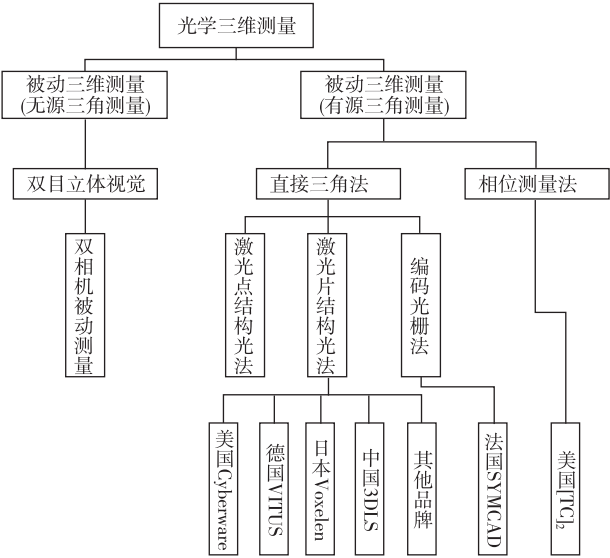


图 1 光学三维测量技术原理及分类

Fig. 1 Principle and classification of the optical 3D measurement technology

1.1 共线方程

摄影测量中有 3 个不同层次的坐标系:物空间坐标系、相机坐标系、图像坐标系。共线方程实际是通过相机坐标系作为中间坐标系来建立图像坐标系与物空间坐标系之间的关系^[1]。共线方程的齐次坐标矩阵表达式为

$$z_0 \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix}$ 为投影矩阵, (x_w, y_w, z_w) 为物点空间的位置坐标; (u, v) 为拍摄图像的空间点对应的像素坐标。 z_0 为中间转换坐标系(相机坐标系)的 Z 轴坐标,消去 z_0 ,式(1)转换为 2 个线性方程式,即:

$$\begin{bmatrix} um_{31} - m_{11} & um_{32} - m_{12} & um_{33} - m_{13} \\ um_{31} - m_{21} & um_{32} - m_{22} & um_{33} - m_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14} - um_{34} \\ m_{24} - um_{34} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可知,物点在像点和光心的连线上,但是物点的深度却无法确定。因此,单台相

机无法实现对空间物点定位。

使用 2 台(含)以上、处于不同位置的相机对同一物点进行测量时,则可以得到多组共线方程。从数学模型来说,当有 $2i(i \geq 2)$ 个代数方程时,物点坐标 P 即可解析出来。多台相机对空间物点 P 成像的原理如图 2 所示,物点 P 为相机光心 O_i 和相应的像点 P_i 组成的射线的交点。

就测量原理而言,三维测量技术均是采用以共线方程为基础的技术形式对被测物进行全方位测量。市场根据三维技术原理研发的测量仪器包括结构光三维扫描仪、激光三维扫描仪和三坐标测量机 3 类。三维扫描技术在遥感、工程测绘、建筑测量、文物古迹修复、美容医疗、虚拟仿真、游戏动漫等产业已有较为广泛的应用。

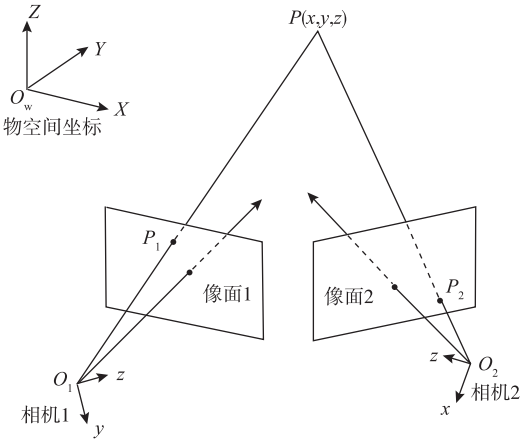


图 2 多相机交会确定物点的原理

Fig. 2 Schematic diagram of multiple cameras intersecting to determine object points

1.2 影响三维人体扫描精度的因素

人体体表形态复杂,既具有相对光滑的几何平面,又存在腋窝、裆底、臀股沟、下颌底、肩头等遮蔽、反凹角、马鞍形特殊区域,同时人体属于面积较大的被扫描件。因此,市场上的三维人体扫描仪均使用多单元联合的形式,实现对人体全方位的测量。同时,人体体表形态是随着人体生理过程不断变化的,并且测量过程中人体不同的站姿、肌肉紧张程度、呼吸深度等,会显现出不同的体表形态,进而影响到测量的精度。由此可见,三维人体测量是一个人体、设备、软件综合作用的过程,影响其测量精度的因素也多与这 3 个要素有关。

1.2.1 人体站姿与晃动 人体扫描时,扫描对象的站姿对于图像采集及后续特征点、特征部位判断至关重要。扫描站姿多参照现行标准 ISO 20685—2010^[2]执行,但是在实际操作中,被测者对标准的理解和掌握程度不够,仍是影响测量精度的主要因

素之一,存在的主要问题包括:①上臂与躯干打开角度过小,会影响胸围、上臂围、腋底点位置的判定和相应测量结果的准确;②双腿站立角度过小,轻则会影响裆底点判定,致使腿部内长的测量结果不准确,重则会影响对臀部形态的重构,如前后裆的形态和尺寸;③下颌底内收过度,会造成颈部扫描“空洞”过大,影响到颈部围度测量结果和形态的重构;④肌肉紧张过度,尤其是健壮男性体,会造成体表形态异常,从而影响最终的测量精度。

人体扫描时的无意识晃动是扫描误差的另一个主要影响因素。由三维人体扫描的原理可知,人体全身扫描实质是通过计算机对多台光学三维单元进行联动控制,再通过计算机软件实现自动拼接,获得精确完整的人体点云数据。而在扫描过程中,人体总会不可避免地有晃动、摇摆等无意识动作,当晃动超过一定程度则会成为影响测量结果准确性的重要因素。由晃动带来的测量误差较大,主要表现在:①前臂端的测量误差;②躯干围度的测量误差;③颈围的测量误差。

1.2.2 设备完成扫描的时间 由上述晃动带来的测量误差推断可知,设备完成扫描的时间也是影响测量精度的关键因素。

目前,无论是激光片光法还是编码光栅法,其完成扫描的时间都在秒级,可划分为 $3\text{ s} < t \leq 5\text{ s}$, $5\text{ s} < t \leq 10\text{ s}$, $t > 10\text{ s}$ 3 类。在此过程中,人体晃动所带来的测量误差将不可避免,并且一定会对测量结果产生影响。YU W 等^[3]经过多年的研究发现,设备获取人体体表形态的时间是影响三维人体测量精度的最关键因素。微软公司推出的 Kinect 体感设备,具有红外识别和深度感知功能,该设备抓取人体图像的时间极快,一般在零点几秒至几秒之内完成。因此,近年来,利用多台 Kinect 体感设备进行三维人体测量^[4-7],成为发展的新方向,实际应用效果较好。文献[4]针对 Kinect 扫描较大面积物体时数据精度偏差严重的情况,通过在人体前后分别配置上下 4 台 Kinect 的方式,减小其扫描范围的同时,快速(3 s 以内)抓取人体体表数据。Kinect 4 个部分的数据通过两两校准,自动拼接成一个完整人体数据。之后,将扫描得到的人体点云进行去噪处理,并使用 SCAPE 模型和迭代最近点查找方法得到最终的人体点云。与传统的三维人体扫描设备相比,其硬件设备成本明显较低,其提出的人体模型重建方法数据采集简单、重建时间短,是值得继续深入研究的方向。

1.2.3 软件对特征点的识别 获取人体体表图

像,只是人体识别的必要步骤,如何准确识别人体的特征点和特征部位,是关乎测量精度的另一个核心问题。关于人体体表特征点识别,大概有两类方法:①贴标记点法。该方法是在扫描前,将人体特征点部位粘贴若干个标记点,这些标记点在扫描后具有清晰、易识别的特征,可以较为容易地被图像识别软件捕获。其优点是人体特征点易于识别,测量精度较高,但是缺点也非常明显,粘贴标记点需要较长时间,同时对人体特征点的识别需要较强的经验。②几何特征判定法。主要依靠人体特征部位的统计规律,先大致确定特征点或者特征部位的范围,然后采用包围盒法逐渐缩小范围,依靠特征部位的几何特征以及统计规律的双重约束,实现对特征点、特征部位的判定,从而实现对这些部位的自动测量。该方法的优点是测量效率高,对操作人员的技能要求低,缺点是测量精度对软件的算法、人口统计规律的准确性和适用性要求较高。

1.3 内置人体模型和算法

就市场上主流人体扫描仪的内置人体模型和算法而言,不同品牌供应商所依据的人体模型不同,多是依据本国人体统计学数据建立模型并制定数据提取算法的。由于模型和算法的不同,针对同一被扫描体,不同的扫描设备会出现输出数据不一致的问题。

因此,有学者专门针对三维扫描输出数据的有效性开展研究。郭盼盼等^[8]针对 50 名青年女体,采用手工、基于普通照片的二维非接触式人体测量和三维人体扫描仪(SYMCAD),分别对实验对象进行量体。实验结论显示,3 者数据均存在差异,从统计分析的趋势来看,二维测量结果总体上大于手工测量结果,三维测量结果总体上小于手工测量结果。可能导致这种差异的原因之一:数字化图像处理过程中阴影的处理技术及相应的算法值得关注和进一步研究。

在扫描设备精度设置方面,有学者提出应当针对数据使用目的的不同而有所差别。英国曼彻斯特大学的 GILL S 等^[9]认为将所有的扫描数据都适用于产品开发是错误的,用于样板开发的数据应与用于号型系统的数据有所不同。但问题在于现有的三维扫描应用偏向于人体体型调查和号型系统修正或完善。文中分别采用来自 Size Stream 和 [TC]2 的三维人体扫描仪数据,与 6 种传统制版方法所需的数据进行对比。研究发现,服装制版所必需的一些数据(侧颈点到后腰的距离、肩峰点到前中的距离),并不能直接从现有的扫描系统内获取;

一些数据(后横、臂根深、小肩宽、前横、前胸宽)与手工测量数值具有一致性偏差。

由此可见,三维扫描设备内置人体模型、数据稳定性、测量精度仍存在继续完善的需求,相关研究学者应给予足够的重视。

2 在服装领域的应用与开发

随着定制化市场的发育和成长,如何发挥三维人体扫描技术的优势,在便捷化人体测量设备、服装定制样板快速生成、虚拟服装展示、服装号型更新和优化方面进行数据的应用、挖掘与开发工作,是近年来服装领域探索的热点问题。

2.1 便捷式人体测量

近年来,服装定制需求成为服装行业发展的新趋势,国内涌现出了一批致力于实现服装规模化定制和生产的企业。三维人体扫描技术、远程量体技术、智能量体等概念和相关解决方案不断创新,但就相关企业实际运作的情况而言,远程定制人体测量仍然是基础性难题,没有得到很好的解决。

从技术原理来看,采用三维人体扫描设备,是保证测量精度和数据可靠性的最优选择。为了求得精度和易用性的平衡,市场上开发了移动式 and 便携式三维人体扫描设备。为了实现对团体定制用户的上门量体服务,有厂商开发了车载移动式三维扫描设备。Scanliner 是全球第一辆卡车装备的三维人体扫描系统^[10]。采用的扫描仪是德国 Tecmath 公司生产的 Vitus Smart,其在十几秒内便可以完成人体的全身测量。扫描数据通过车载电脑系统和互联网系统,可实时传输回生产部门,保障生产时效。近年来,青岛酷特智能股份有限公司也开发了类似的测量设备,即酷特“魔幻工厂”移动大巴^[11],将三维扫描系统移植到移动大巴内,在实现上门量体服务的同时,将测量数据直接传回生产工厂数据中心,另外客户还可以通过手机端获取量体数据并进行款式选择。此类设备所需的测量空间普遍偏大,需要能够完整拍摄到人体,一般最小为宽度方向长度 \times 人体与扫描单元的距离 \times 身高方向长度 $=1\text{ m}\times1.5\text{ m}\times1.9\text{ m}$ 。缺点是设备需要经常校准,测量数据稳定性较差。

如何缩小设备体积和测量所需的空间,实现便捷、便携的目标,成为三维人体扫描设备发展的另一个方向。Space vision 公司生产的“3D Body Scanner Traveling Type”便携式三维人体扫描仪^[12],由3~4个(可选)扫描单元组成,每个完整的扫描

单元高约200 cm,可以被拆散为3段,每段内都是1个完整的“投射光源——捕捉相机”单元,可以扫描7 cm(宽) \times 20 cm(深) \times 65 cm(高)的范围;每段的质量仅为3.1 kg,折叠后的体积仅为旅行箱的大小,质量30~40 kg左右。

除此之外,一些应用于工业零部件扫描的设备,经过一定程度的改造,也被陆续引入服装人体测量领域。北京博维恒信科技发展有限公司推出的3D CaMegacp 系列^[13]和加拿大 Creaform 公司推出的 GO! SCAN^[14]手持三维人体扫描系统,采用双目立体视觉原理,设备外形小巧,质量轻,可随身携带;无需标定,开机即可使用;操作简单,无需专业技能。美国 FARO 公司推出的8轴 Design ScanArm 2.5C 远程轴便携式扫描仪^[15],可以进行全彩色人体测量。该系统可以提供2.5,3.5,4.0 m的臂长选择,扫描速度达600 000 点/s(2 000 点/行·帧 \times 300 帧/s),配合3D System 公司的 Geomagic 软件可以实现对人体扫描的操作和交互性数据分析。

便携性是该类产品的优势,但扫描时间普遍较长,完成一个完整的人体扫描,需要十几分钟甚至更久,成为这类设备在服装定制领域应用的主要障碍。

2.2 虚拟人台(个性化人台)

一直以来,通过三维扫描数据构建个性化虚拟仿真人台,是服装领域进行个体化定制的首要需求。相关研究多从计算机技术出发,在高仿真曲面虚拟人台构建方面的研究成果发布较多^[16-18],且在一些商业软件(如 Clo 3D, Optitex, Marvelous, Vidya 等)系统中已有应用。

虚拟仿真人台需要与服装面料的材质、纹理、性能等指标的仿真项目对接,才可能完成虚拟服装设计等目标。由于相关研究的不完善,虚拟仿真人台及相关服装设计,仅作为实物设计与检验的参考,在实际工作中尚未见独立应用的案例。

随着3D打印技术的出现,有研究人员提出将3D人体扫描与3D打印技术相结合,制造出面向定制应用的个体化实体人台。该思路具有应用价值,但3D打印材料及成本是主要的限制因素。深圳市广德教育科技有限公司推出的3D打印服装人台模型生产系统,采用该思路进行实验并研发了“3D打印+硅胶体表层”的高仿真个体化人台。北京博维恒信科技发展有限公司正在试验的基于“3D打印+泡沫成型”的个体化人台,采用最为普通的泡沫颗粒成型技术,将单台的生产成本控制在200元左右,是值得关注的研究方向。

2.3 服装样板自动生成

在三维人体模型上进行3D服装设计,再利用曲面展开技术将设计的结果展平到2D服装样板,从而实现由3D点云数据到2D服装样板的开发过程,是服装样板自动生产研究的重要思路。

从可展性的角度而言,曲面可分为可展曲面和不可展曲面^[19-24]。可展曲面的展平,理论上可以通过建立曲面的数学模型,使展开曲面与原始曲面完全一样;不可展曲面展开主要采用化曲为直、以直线代替曲线的近似展开方法。三维服装模型多是不可展曲面。根据近年来的研究成果,不可展曲面的近似展开有几何展开法、力学展开法和几何展开力学修正法^[25]。

已有研究表明,有关服装样板自动生成技术研究工作,均存在一定的困难和局限性,或依赖于传统的制板经验,或倾向于计算机模拟技术,实际应用效果不佳。面向服装定制应用的人体曲面展开技术,仍是应用研究的难题之一。

2.3.1 基于放码的方法 该方法认为个性化定制,可以通过在传统号型系列样板生成规则的基础上进行适当修改来实现。其根本依据是个体化与标准人体(或号型系列)的差异关系,即先按照标准人体放码,再将个体化部位数据与标准部位数据对比,再就异常之处进行修改。该方法虽然可以实现个体化样板,但是放码点位置、放码量值、放码规则的确定等都由制板师单独计算和判断,其对制板技术人员的经验要求非常高,基本没有规范和标准可以依据。

2.3.2 基于参数化方法 该类思想将服装样板的生成看作是参数化图形关系建立的过程,个体化体现为参数值和参数关系的不同。如果能够利用图论等^[26]理论实现对制板过程参数化描述,则个体化样板的自动生成只需根据体型与样板的关系,调整绘图参数即可实现。但服装纸样受服装款式、材料等较多因素的综合影响,纸样图形的规律性不明显;同时,服装款式变化丰富,参数设计中的约束关系和尺寸驱动较复杂,所以该方法仅用于结构形式比较固定的西服、衬衫等产品。

2.3.3 基于人工智能的方法 此方法是用BP神经网络、模糊逻辑等人工智能技术建立专家制板系统^[27],实现机器对服装款式设计的理解,快速完成个体化服装样板的开发工作。该类方法经过十几年的研究积累,近年来表现出走出实验室开始产业应用的趋势。

此类方法面临的主要问题是:服装样板的合体

性评价和实验的样本量与流行性的矛盾。服装样板合体性评价,涉及美学、服装造型学、柔性材料力学等多种学科知识,是专家制板系统必不可少的基础,但是当前技术尚无法建立行业通用的评价系统。同时,人工智能需要通过服装款式识别实验训练“类人智能”,工作量较大,且由于服装的流行性,所建立的专家知识库会滞后于服装的流行,致使人工智能识别结果的价值降低。利用人工智能实现个体化样板,值得关注,但仍有很长的路要走。

2.4 服装功效学评价

将三维人体扫描技术应用于服装(尤其是功能性服装)的测试,是该技术的另一应用领域。田苗等^[28]探讨了三维动作捕捉仪在服装工效学评价中的应用。在生物力学和运动学中,采用三维动作捕捉仪进行不同负重或行走状态下的身体模式分析、动作分析、平衡判定,及身体不同截面方向、特定关节的运动学特征分析的案例,为相关研究提供了启发。面对国民健康需求的增长,文章提出将三维动作捕捉仪与各种健康监测设备相结合,通过功效学评价,实现运动装结构和功能的改善或进行智能服装设计;与行走模式步态分析等生物力学和运动学理论相结合,提高工装类服装结构设计的科学性,利用功效学评价减少职业伤害,改进服装及装备设计的科学性,更好地进行服装功能性设计。

除此之外,将三维扫描设备与动作捕捉技术相结合,进而与动画服装设计相结合,也是三维人体扫描技术的应用方向之一。

2.5 国民体型测量与服装号型更新

作为国家信息基础设施的一部分,国外的政府、服装及与人体设计相关行业较早认识到国民体型普查的重要性,并将人体数据作为一项重要的基础数据资源。服装号型系统是服装制造的基础性数据标准,其准确性与服装的适体性和销售的成功率关系密切;而准确的号型系统依赖于大量、及时、精确和科学的国民体型计测工作,它对于服装款式设计和工业化生产具有重要的指导作用。

多个工业发达国家采用三维人体扫描技术开展了国民体型普查和服装号型标准更新的工作。影响较大的项目有英国的Size UK、美国的Size USA、法国的Size France。此外,亚洲的日本、韩国、泰国,南美洲的巴西,大洋洲的澳大利亚等国家也陆续开展了此类工作。

在这些项目中,英国的Size UK项目首开利用三维人体扫描仪进行大规模人体普查工作的先河,成为此类国民体型普查工作的成功范例^[29]。Size

UK 项目于 2000—2002 年开展,共计扫描了 11 000 个人体(其中女体占比 50%,男体占比 50%;年龄在 16~90 岁,不包括儿童),扫描状态分为两种:站姿和坐姿。然后利用计算机软件在每个站姿人体上提取了 130 个身体部位的尺寸,同时利用手工测量方法,量取 8~10 个人体数据。这些扫描数据,包括号型和体型数据、三维点云数据,均保存在 UK National Sizing Survey (<http://www.sizemic.eu/>) 数据库内,可以进行在线访问和数据挖掘工作。

为方便某些公司进行数据挖掘工作,以更好地获取体型和号型信息,Size UK 项目提供在线访问原始数据的服务。如此大量、准确和价格相对低廉的数据,不仅能用于服装行业,还能用于诸如安全座椅设计、飞机座舱设计及其他人体工学办公场所的设计。

此外,3D 扫描系统还能用于且促进网络定制工作。随着测量成本的大幅下降,人们服装消费可以步入“走进附近的购物中心,扫描人体,在线下单,坐等收货”的定制模式,而且该定制产品是最大程度适应个体的定制产品,与现有购买成衣的模式及效果大为不同。

2.6 在服装教育领域的应用

在三维人体扫描技术发展的过程中,其初始目的和主要应用方向多集中于工业生产领域。但在其应用的过程中发现,没有受过服装专业教育或培训的工人很难领悟和恰当使用该项技术。因此,近几年,国外开始探索将三维人体扫描技术与服装专业教育相结合的路径。美国康奈尔大学的 ASHDOWN S P 等^[30]提出了“从 3D 扫描到触觉模型”的教学改革。自 2007 年开始,康奈尔大学与艾尔朗(Alvanon)公司开展合作,应用艾尔朗公司专门为教育而提供的半身人台扫描数据进行教学。较之全身模型,学生可以利用较少的材料、时间和空间在半身模台上进行实验和设计。学生通过数字化仪将设计好的样板转换并录入 CAD 系统,再放大出全身尺码规格。该项教育革新在康奈尔大学运行情况良好,在服装产品设计和服装样板生成方面效率和效果均较好,正在陆续推广到世界各地。

3 结 语

针对三维人体扫描技术在实际应用中出现的一些共性问题,文中首先探讨了三维人体扫描技术的原理,并指出了与测量精度密切相关的影响因素:人体站姿与晃动、设备完成扫描的时间、软件对特征点的识别与算法模型。基于影响因素,硬件方

面,从便捷式人体测量设备的开发展开研究;软件方面,从虚拟人台、服装样板自动生成、服装功效学评价 4 方面研究存在的主要难点和值得继续研究的方向。在三维扫描数据产业化应用,以国民体型测量与服装号型更新、服装专业教育 2 个方向为例,介绍了三维扫描数据在国内外的独特应用方面。在进行上述 6 个方面的论述时,指出了各领域存在的主要研究难点和进一步研究方向,以此为三维人体扫描技术在服装领域的应用提供方向性的指导。

参考文献:

- [1] 陈益松,夏明. 光学三角测量法及其在人体测量中的应用[J]. 纺织学报,2012,33(12):95-101.
CHEN Yisong, XIA Ming. Optical triangulation and its applications in body measurement[J]. Journal of Textile Research,2012,33(12):95-101. (in Chinese)
- [2] 人类工效学技术委员. 对国际兼容的人体测量数据库的 3-D 扫描方法[S]. 日内瓦:国际标准化组织,2010.
- [3] YU W, XU B. Surface reconstruction from two-view body scanner data[J]. Textile Research Journal,2008,78(5):457-466.
- [4] 周瑾,潘建江,童晶,等. 使用 Kinect 快速重建三维人体[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2013,25(6):873-879.
ZHOU Jin, PAN Jianjiang, TONG Jing, et al. Fast 3D human body reconstruction from kinects[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics,2013,25(6):873-879. (in Chinese)
- [5] 马旋,薛原,杨若瑜. 基于 Kinect 的人体实时三维重建及其应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2014,26(10):1720-1726.
MA Xuan, XUE Yuan, YANG Ruoyu. Kinect-based real-time 3D reconstruction of human and its application[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics,2014,26(10):1720-1726. (in Chinese)
- [6] CHEN G, LI J, WANG B, et al. Reconstructing 3D human models with a kinect[J]. Computer Animation and Virtual Worlds,2016,27(1):72-85.
- [7] DESAI K, PRABHAKARAN B, RAGHURAMAN S. Combining skeletal poses for 3D human model generation using multiple kinects[C]//Proceedings of the 9th ACM Multimedia Systems Conference. New York: [s. n.], 2018:40-51.
- [8] 郭盼盼,刘国联. 基于青年女体的人体测量数据可靠性分析[J]. 北京服装学院学报(自然科学版),2015,35(2):35-40.
GUO Panpan, LIU Guolian. Reliability analysis of the data based on the measurement of young female body[J].

- Journal of Beijing Institute of Clothing Technology, 2015, 35(2):35-40. (in Chinese)
- [9] GILL S, AHMED M, PARKER C J, et al. Not all body scanning measurements are valid: perspectives from pattern practice[C]//International Conference and Exhibition on 3d Body Scanning and Processing Technologies. Montreal: [s. n.], 2017:43-52
- [10] 孔凡栋,张欣,吴宇. 移动式三维人体扫描系统比较及在服装业中的应用[C]//2005 现代服装纺织高科技发展研讨会论文集. 西安:[出版者不详], 2005:187-192.
- [11] 刘艳杰,朱楠. 青岛红岭集团:“魔幻工厂”开启新制造时代[EB/OL]. (2016-04-29) [2018-06-08]. http://epaper.gmw.cn/gmrb/html/2016-04/29/nw.D110000gmrb_20160429_7-05.htm?div=-1.
- [12] KAMESHIMA H, HAYASHI M, NISHIO Y, et al. A portable 3D body scanner and its application[C]//Asian Workshop on 3D Body Scanning Technology. Tokyo: [s. n.], 2012:16-18.
- [13] 北京博维恒信科技发展有限公司. 手持三维扫描系统[EB/OL]. (2016-09-09) [2018-03-14]. http://www.3dcomega.com/cn/products_info.php?id=88&type=news.
- [14] 小城. Creaform 发布新一代 3D 便携式扫描仪 Go! SCAN[J]. 航空制造技术, 2014(10):24-24.
XIAO Cheng. Creaform launches a new generation of 3D portable scanners Go! SCAN[J]. Aeronautical Manufacturing Gechnology, 2014(10):24-24. (in Chinese)
- [15] FARO A. Deploy cobalts on robots[EB/OL]. (2018-01-11) [2018-05-22]. <https://www.faro.com/en-sg/>
- [16] 杨莉. 成衣用立体裁剪人台的研发与应用[D]. 北京:北京服装学院, 2017.
- [17] 施霞萍,陈利杰. 基于通用型人体模板数据库的三维服装人台生成[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(11):153-156, 183.
SHI Xiaping, CHEN Lijie. 3D clothing mannequin generation based on universal-type human body template database[J]. Computer Applications and Software, 2013, 30(11):153-156, 183. (in Chinese)
- [18] 黄海峤,王英男. 基于可展曲面的 3D 服装原型建模与服装样板生成[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2011, 37(6):720-726.
HUANG Haiqiao, WANG Yingnan. Developable surface-based 3D prototype garment development and pattern generation[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2011, 37(6):720-726. (in Chinese)
- [19] 樊劲,周济,王启付,等. 基于弹簧质点模型的二维/三维映射算法[J]. 软件学报, 1999, 10(2):140-148.
FAN Jin, ZHOU Ji, WANG Qifu, et al. 2D/3D isometric transformation using spring-mass system[J]. Journal of Software, 1999, 10(2):140-148. (in Chinese)
- [20] ZHUANG M, ZHANG X, FANG J. The optimum flattening for undeveloped 3D body surface based on energy[C]//5th International Conference on Industrial and Information Systems. Mangalore: IEEE Conference Record. 2010: 6-9.
- [21] MACCARTNEY J, HONDS B K, SEOW B L, et al. An energy based model for the flattening of woven fabrics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 40(3):312-318.
- [22] MACCARTNEY J, HONDS B K, SEOW B L. The flattening of triangulated surfaces incorporating darts and gussets[J]. Computer-Aided Design, 1999, 31(4):249-260.
- [23] MCCARTNEY J, HINDS B K, CHONG K W. Pattern flattening for orthotropic materials[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(6):631-644.
- [24] WANG C L, SMITH S F, YUEN M F. Surface flattening based on energy model[J]. Computer Aided Design, 2002, 34(11):823-833.
- [25] 苏军强. 基于局部特征分析的个体化青年女装样板生成规则研究[D]. 苏州:苏州大学, 2014.
- [26] 曹文丽,修毅. 基于图论的服装纸样参数化设计模型[J]. 北京服装学院学报(自然科学版), 2008, 28(1):13-17.
CAO Wenli, XIU Yi. A parametric design model based on graph in apparel pattern[J]. Journal of Beijing Institute of Clothing Technology (Natural Science), 2008, 28(1):13-17. (in Chinese)
- [27] SU J, LIU G, XU B. Development of individualized pattern prototype based on classification of body features[J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2015, 27(6):895-907.
- [28] 田苗,李俊. 三维动作捕捉仪在服装工效学评价中的应用[J]. 服装学报, 2016, 1(1):30-34.
TIAN Miao, LI Jun. Application of 3D motion capture on ergonomic evaluation of the clothing[J]. Journal of Clothing Research, 2016, 1(1):30-34. (in Chinese)
- [29] BOUGOURD J, TRELEAVEN P. UK national sizing survey-size UK[C]//3rd International Conference on 3D Body Scanning Technologies. Switzerland: International Journal of Clothing Science and Technology, 2010:327-337.
- [30] ASHDOWN S P, VURUSKAN A. From 3D scans to haptic models: apparel design with half scale dress forms[C]//International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies. Montreal: [s. n.], 2017:31-41. (责任编辑:卢杰,邢宝妹)