

## 基于服装个性化智能定制的三维人体测量系统物-像结构算法的研究

王悦, 任军, 马飞, 吴龙

引用本文

王悦, 任军, 马飞, 吴龙. 基于服装个性化智能定制的三维人体测量系统物-像结构算法的研究[J]. 计算机科学, 2024, 51(6A): 230600233-5.

WANG Yue, REN Jun, MA Fei, WU Long. Study on Object Image Structure Algorithm of 3D Human Body Measurement System Based on Personalized Intelligent Customization of Clothing [J]. Computer Science, 2024, 51(6A): 230600233-5.

---

## 相似文献推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### 基于概率误差的三维室内定位系统最优布站方法

Optimal Station Layout Method for 3D Indoor Positioning System Based on Error Probability  
计算机科学, 2024, 51(6A): 230700148-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230700148>

### 基于统计分析的仿射运动估计快速算法

Fast Algorithm for Affine Motion Estimation Based on Statistical Analysis  
计算机科学, 2024, 51(6A): 230400081-8. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230400081>

### 基于多类型计算重写的浮点表达式精度优化方法

Floating-point Expression Precision Optimization Method Based on Multi-type Calculation Rewriting  
计算机科学, 2024, 51(4): 86-94. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.221200072>

### 过程间流敏感的指针分析技术研究

Survey of Interprocedural Flow-sensitive Pointer Analysis Technology  
计算机科学, 2023, 50(12): 1-13. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.221000195>

### 一种基于时效近邻可信选取策略的协同过滤推荐方法

Time-effective Nearest Neighbor Trusted Selection Strategy Based Collaborative Filtering Recommendation Method  
计算机科学, 2023, 50(11A): 220800199-11. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220800199>

# 基于服装个性化智能定制的三维人体测量系统物-像结构算法的研究

王悦 任军 马飞 吴龙

西安工程大学服装与艺术设计学院 西安 710048

(ourfool@163.com)

**摘要** 目前,我国基于服装个性化智能量身定制的理念日趋完善。但是,在消费者目标尺寸自动获取方面仍然缺乏实用的设备和技术,成为了大多数企业个性化智能定制发展的一个瓶颈,其根本原因是缺少实用性强的个性化智能定制系统。人体动态测量与其他工业产品精密测量相比具有自身独有的特殊性和困难。在探讨了现有的光学类基于个性化智能定制系统的现状的前提下,针对目前存在的激光三维人体扫描测量系统普遍存在硬件设备庞大、结构复杂的问题,对文中提出的基于个性化智能定制系统进行了原理设计,建立了系统的物-像结构算法的数学模型。该算法采用了扫描单元旋转的测量方式,使系统能够在垂直方向上获得较大的测量范围,目的是使系统采用较小的硬件获取满意的三维人体空间坐标,有利于节省竖直空间、减小体积。该算法已成功应用于基于服装个性化智能定制系统。为了验证本算法的精度,设计与法国力克系统的三维人台对比扫描实验,实验数据验证了本系统结构算法的精度、工程实用性和可靠性。

**关键词:** 人体测量;非接触式测量;服装个性化量身定制;精度;线结构光测量法

**中图分类号** TP391.9

## Study on Object Image Structure Algorithm of 3D Human Body Measurement System Based on Personalized Intelligent Customization of Clothing

WANG Yue, REN Jun, MA Fei and WU Long

College of Apparel and Art Design, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China

**Abstract** At present, the concept of personalized intelligent customization based on clothing in China is becoming increasingly perfect. However, in terms of automatic measurement of customer body size, China still lacks practical equipment and technology. The fundamental reason is that China's clothing industry still lacks practical 3D human body measurement systems. Human body measurement has its own unique characteristics compared to other industrial product measurements. Based on the analysis of existing optical 3D human body scanning measurement systems, this paper addresses the common problems of complex structural design and large volume in existing laser 3D human body scanning measurement systems. The principle design of a portable human body scanning measurement system is carried out, and a mathematical model of the system is established. This algorithm adopts an active pitch rotation scanning measurement method, which enables the system to obtain a larger measurement range in the vertical direction and obtain satisfactory 3D human point cloud data with the least number of devices, which is beneficial for saving space and reducing volume.

**Keywords** Anthropometry, Non-contact measurement, Personalized and customized clothing, Accuracy, Linear structured light measurement method

### 1 引言

目前,针对非接触式人体测量仪进行的对比评测仅针对测量环节,评估一套非接触式人体测量仪主要看以下几个性能指标:1)数据精度;2)扫描时间与系统运算速度;3)工程实用性;4)价格。人体是柔性的动体,而且人体体积较大(相对于一般的工业产品机械零部件的体积而言),使测量过程具有难度。目前非接触式人体测量仪主要采用光学测量法,而光学测量法的基本原理是物距越小,精度越高。在人体测量时,由于人体体积大,物距增大,因此数据精度是系统的关键技术难点。

国外的非接触式人体测量仪在数据精度、扫描时间与系统运算速度方面达到了很高的水平,但是,系统仍普遍存在以下不足:1)采集图像时对安装环境要求很高。例如,西安工程大学花费近百万元购买的法国 Vitus Smart 激光三维人体测量仪需要专门的测试室,对温度、震动等环境参数都有较高的要求<sup>[1]</sup>。2)设备的购买价格、校正与标定费用昂贵。3)非接触式人体测量仪普遍硬件装置庞大、固定安装的过程复杂,占地面积大。4)系统关键技术卡脖子,国外公司未公布源程序代码,造成后序的二次开发与应用研究的难度较大。5)新兴的基于红外深度传感器的手持式人体测量仪的研究也逐渐问世,但在提高数据精度、确保数据拼接匹配的同时兼顾提高运

基金项目:陕西省教育厅青年创新团队建设科研计划项目(22JP027)

This work was supported by the Shaanxi Provincial Department of Education Youth Innovation Team Construction Research Program Project (22JP027).

通信作者:王悦(ourfool@163.com)

算速度上仍比较欠缺。

我国高校和研究机构也研制了一批非接触式人体测量仪,且同类测量仪的单项技术指标水平很高,但测量仪仍存在体积大、数据精度低、扫描时间长与系统运算速度慢、制造成本昂贵等问题<sup>[2-3]</sup>。

基于服装个性化智能定制系统首先要解决的技术瓶颈是原理设计,这既是扫描仪快速、精确地提取被测体空间坐标的关键技术之一,在很大程度上也决定了扫描仪的适用范围、构型、性能和开发成本。目前非接触式人体测量仪至少采用3个扫描单元,扫描单元以一定的夹角分布在被测体四周,扫描单元采用垂直机械滑轨来获取目标对象的三维数据,因而存在系统基本结构占用的空间大、体积庞大和安装复杂等问题<sup>[4]</sup>。

## 2 系统原理设计

如图1所示,基于服装个性化智能定制的三维人体测量系统分为硬件开发和软件开发两个模块。

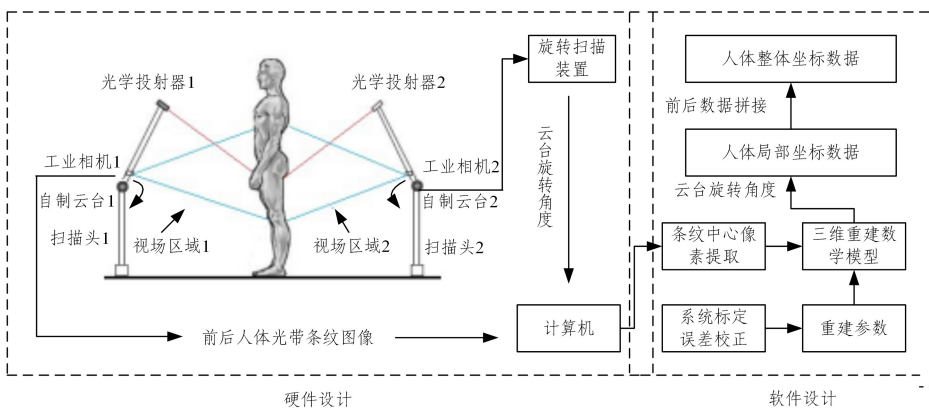


图1 系统的总体方案设计示意图

Fig. 1 Overall scheme diagram of the system

图2为本扫描硬件的设计原理示意图,即在扫描对象的前、后分别摆放一个扫描头。每个扫描头包括1个光学发射器、1部工业相机、1个数控云台和1个支架。其中,光学发射器固定在工业相机的正上方,固定装配在机械臂上,使其相对位置保持不变,以上部件统称为采样装置。采样装置安装在自行研发的一维数控云台上,云台安装在三脚架上。

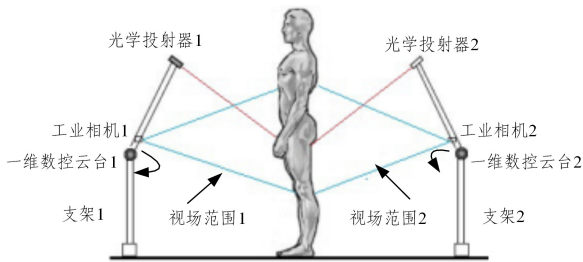


图2 硬件的原理设计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hardware principle design

在自行研发的一维数控云台的驱动下,两个采样装置实现沿着云台旋转中心的一维旋转运动。在此过程中,光学发射器发射出的激光从上至下扫过被测体全身。同时,联动工业相机通过系统控制输入的时间间隔将被人体体表所调制的光学图像采集标记,获取了一系列的目标人体图像,并将目标人体图像传送至电脑。

第二个环节是系统首先对目标人体图像进行预处理,提

硬件开发包括:摆放在人体前、后的两个扫描头(扫描头由工业相机和旋转扫描三脚架组成)、数控云台、标定反光板。

硬件模块的主要内容是:控制器实现对工业 CCD 相机运动中旋转角度和顺逆方向的控制;确保前、后相机对被测者线激光图像的同步采集;将获取的有效被测者线激光图像和数控云台旋转步长角( $\theta_{step}$ )存储到计算机中,带入数学模型进行求解。

软件开发包括:图像预处理和被测者空间坐标求解、一维数控云台控制指令的设计、理想状态下的模拟重建;机械误差插值校正计算模块前、后点云数据插值拟合与显示模块。

软件模块的主要任务是:实现对被测者线激光图像激光光线单像素坐标的提取,并根据数学运算、标定数据和机械误差校正后的数据,计算出云台旋转角度( $\theta$ )位置处的三维坐标;根据前、后扫描头的空间定位,将前、后人体三维坐标统一,插补缺失数据,最终获取完整的人体三维坐标信息,通过点云图重构人体。

取出单像素的激光线中心坐标,以此进行人体三维坐标的重建;根据三维坐标重建模型、系统参数标定值和机械误差校正数值,最终可以算出目标单像素坐标对应的被测对象的三维坐标。

每完成某一数控云台旋转角度下的三维坐标重建之后,将其带入系统的局部与整体坐标变换公式,系统可以获得全部数控云台旋转角度范围内的空间坐标。

根据前、后两套硬件装置的相对位置关系,将两套被测对象空间坐标数据拼接到同一个世界坐标系下,完成对两个视角下的被测人体空间数据的合并,以点云图的形式重构表面。

本系统设计了前、后两套扫描硬件(共两个工业相机)180°分布在测量对象的前后方位。不可避免,被测对象两侧的少部分数据会缺失,即存在“测量盲区”现象。基于相同高度下被测体盲区数据处于同一封闭区域,且该区域的边界部分都有前、后扫描装置获取的截面数据,可以采用插值补偿算法填补“测量盲区”。插值补偿算法是根据边界离散截面数据适当延伸形成封闭的被测人体截面线。

由于人体具有连续性,或称为光滑性,因此“测量盲区”的形状与周边的形状具有延续性,而采用 B-样条插值延伸补偿算法能够实现系统测量数据的完整性。

## 3 物-像数学模型的建立

首先,本文定义出如图3表示的坐标关系,假设  $O_w$  一

$X_w, Y_w, Z_w$  为被测体坐标系,被测体坐标系原点为  $O_w$ ,即一维数控云台中心至地面的垂足,坐标系的垂直正上方向是  $O_w Y_w$  轴,深度正方向是  $O_w Z_w$  轴,指向被测量对象,通过“右手法则”可确定出  $O_w X_w$  轴。

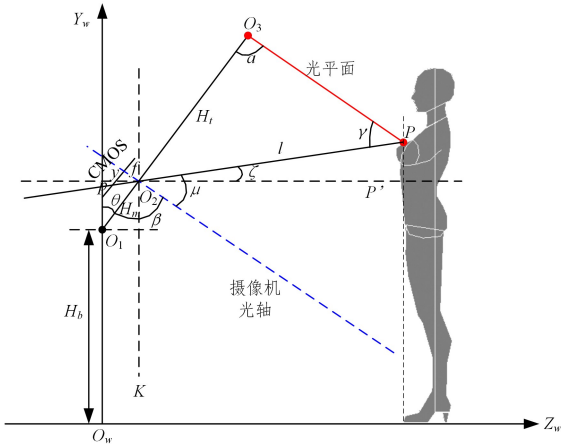


图3 被测体坐标系  $Y_w Z_w$  平面下的数学关系

Fig. 3 Mathematical relationship in  $Y_w Z_w$  plane of the measured body coordinate system

如图3所示,将光学投射器中心、工业相机光心与目标人体被测点之间的数学关系投影到被测体坐标系的  $Y_w Z_w$  平面。

假设一维数控云台的旋转中心为  $O_1$ 、工业相机光心位置是  $O_2$ 、光学投射器为  $O_3$ ,光学投射器发出的激光面与目标对象相交时呈现出一条光带。为了保证基于服装个性化智能定制的三维人体测量系统的精度,需要将采集的被测对象光带图像中的光带转换为真实、准确的单像素点集,以满足计算时的需要。人体激光光带可以通过图像的预处理,提取出中心位置的单像素光条。假设  $P$  点为该单像素光条上任意一点,  $P$  点在工业相机像面上的投影点为  $p$  点,坐标为  $p(x, y)$ ,单位是 mm。

在建立基于服装个性化智能定制的三维人体测量系统的模型之前,对系统参数进行定义:

- (1) 一维数控云台中心位置至地面的垂足 ( $H_b$ )。
- (2) 一维数控云台中心位置至相机光心的距离 ( $H_m$ )。
- (3) 相机光心到光学投射器中心的距离 ( $H_t$ )。
- (4) 一维数控云台的旋转角度 ( $\theta$ ),  $\theta$  为机械臂  $O_1 O_3$  与被测人体坐标系  $Y_w$  轴夹角。
- (5) 工业相机的焦距 ( $f$ )。
- (6) 激光面与机械臂的夹角 ( $\alpha$ )。
- (7) 工业相机光轴与机械臂夹角 ( $\beta$ )。

在被测体坐标系下,基于以上具有明确物理含义的参数,即可构建出稳定的三维重建数学模型,推导过程如下。

根据光学原理可知:

$$\angle \mu = \arctan\left(\frac{y}{f}\right) \quad (1)$$

根据几何原理可知:

$\angle \beta + \angle \mu = \angle \alpha + \angle \gamma$ ,  $\alpha, \beta$  和  $\mu$  角可测知,则  $\angle \gamma = \angle \beta + \angle \mu - \angle \alpha$ 。

如图3所示,在  $\Delta O_2 O_3 P$  中,根据几何定理可知  $\frac{\sin \alpha}{l} =$

$\frac{\sin \gamma}{H_t}$ , 则:

$$l = \frac{\sin \alpha \times H_t}{\sin \gamma} \quad (2)$$

通过  $O_2$  点做与  $Z_w$  轴垂直的垂足  $O_2 K$ ,通过  $O_2$  点做与  $Y_w$  轴垂直的垂足  $O_2 P'$ 。由于一维数控云台的旋转角度为已知量,则  $\angle O_1 O_2 K = \angle \theta$ ,则  $\angle \zeta = \angle \beta + \angle \mu - \angle \theta - \frac{\pi}{2}$ 。

在  $\Delta O_2 P P'$  中,根据几何定理有:

$$|O_2 P'| = l \cdot \cos \zeta \quad (3)$$

综合式(1)式(3),即推导出目标点  $P$  点的  $Z_w$  坐标和  $Y_w$  坐标:

$$Z_w = H_m \times \sin \theta + l \times \cos \zeta \quad (4)$$

$$Y_w = H_b + H_m \times \cos \theta + l \times \sin \zeta \quad (5)$$

如图4所示,以相同的方法将工业相机、光学投射器与被测点  $P$  点三者的数学关系投射到被测体坐标系的  $X_w Z_w$  面上。

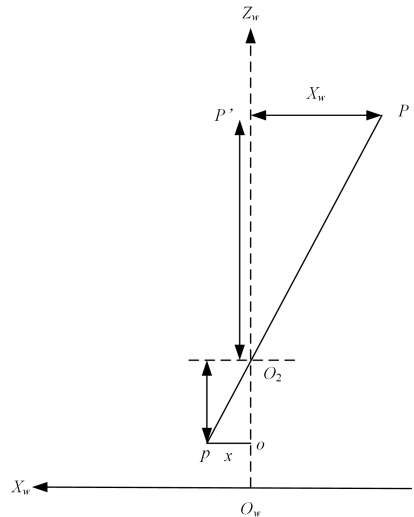


图4 被测体坐标系  $X_w Z_w$  平面下的数学关系

Fig. 4 Mathematical relationship in  $X_w Z_w$  plane of the measured body coordinate system

由于  $\Delta O_2 P' P$  和  $\Delta O_2 o p$  是相似三角形,再通过式(3)可以计算出  $|O_2 P'|$ 。

由于  $\cos \mu = \frac{f}{|O_2 p|}$ ,可知  $|O_2 p| = \frac{f}{\cos \mu}$ ,  $|O_2 o| = |O_2 p| \times \cos \zeta = \frac{f \cdot \cos \zeta}{\cos \mu}$ ,  $|o p| = |x|$ 。

根据几何定理可知,  $\frac{|O_2 P'|}{|O_2 o|} = \frac{|P' P|}{|o p|}$ ,  $|P' P| = \frac{|o p| \times |O_2 P'|}{|O_2 o|}$ 。

综合以上推导,可以计算出目标点  $P$  的  $X_w$  坐标,即:

$$X_w = \frac{x \cdot l \cdot \cos \mu}{f} \quad (6)$$

通过式(1)式(6)的过程进行空间坐标重建时,参数  $H_b, H_m$  和  $H_t$  通过光学测距仪和游标卡尺等多次测量取均值获取;镜头焦距、 $\alpha$  交角和  $\beta$  交角通过标定可获得;工业相机的 CCD 平面坐标  $(x, y)$ ,可由人体激光光带单像素提取算法得到;一维数控云台旋转角度由计算公式可以准确算出。

综上所述,利用三维重建数学算法的式(1)式(6)进行人体空间模型的重构时,前期可以在一维数控云台初始状态下,标定出光学投射器的参数  $\alpha$  和工业相机光平面参数  $\beta$ ,再根据旋转步长和采集图像有效数量确定出每一帧图像的  $\theta$

值,系统就可以计算出前、后局部世界坐标系下两组三维重建坐标。这种重建算法的特点是快速,因为回避了重复标定射线模型和光平面约束模型的繁琐过程。

#### 4 误差对比实验分析

基于服装个性化智能定制的三维人体测量系统包括4个环节:原理设计、重建算法的实现、硬件开发和自主研发的一维数控云台控制系统、人体激光光带单像素提取算法和机械误差插值补偿。

在此基础上,根据系统在纺织服装等领域的实际应用需求,开发出一种测量精度较高的高性价比便携系统,如图5所示。

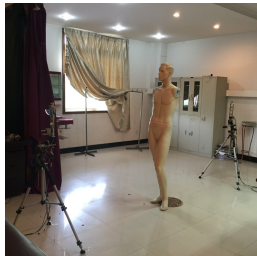


图5 本系统误差对比试验的场景图

Fig. 5 Scenario diagram of error comparison experiment in this system

为了论证基于服装个性化智能定制的三维人体测量系统的精度,本文以身着紧身衣的工作人员为目标对象,论证重建的三维人体数据的精度。因此,本文设计了精度误差对比实验,对同一个目标对象的重建数据进行了量化对比。

在参照系统的选取上,本项目选择了法国力克激光扫描仪。力克扫描仪采用4台光学投射器,虽然该系统硬件庞大,但数据形式有三维坐标点云数据的模式,且测量结果在X轴、Y轴和Z轴3个方向的测量精度较高,误差可控制在0.5 mm以内。

在纺织服装领域的人体测量具有一定的复杂性,为了使本系统的人体重建数据具有可靠性,本实验在目标人体体表设计若干标记点,以此作为观测点。

精度误差对比实验的操作流程如下:1)在身着紧身衣的工作人员身上粘贴11个服装设计用测量点(简称标记点);2)先后选用基于服装个性化智能定制的三维人体测量系统和法国力克扫描仪对工作人员进行三维测量后,可获得两组含有人体黏贴点的重建数据;3)对两组重建数据进行X轴、Y轴和Z轴3个方向的误差分析。由于本系统建立的坐标体系与法国力克系统定义的坐标体系不同,因此,需要在统一坐标系后,对两个测量系统获取的重建数据进行误差分析,其数据结果的对比表如表1所列。

表1 被测者重建数据

Table 1 Reconstructed data of subjects

(cm)

| 序号 | 人体标记点        | 基于服装个性化智能定制的<br>三维人体测量系统测量结果 |        |        | 法国力克测量仪 |        |        | 重建对比误差     |            |            |
|----|--------------|------------------------------|--------|--------|---------|--------|--------|------------|------------|------------|
|    |              | $X_1$                        | $Y_1$  | $Z_1$  | $X_2$   | $Y_2$  | $Z_2$  | $\Delta X$ | $\Delta Y$ | $\Delta Z$ |
| 1  | 颈椎点          | 1.25                         | 148.88 | 102.64 | 1.30    | 148.73 | 102.51 | -0.05      | 0.15       | 0.13       |
| 2  | 颈侧点(left)    | 7.11                         | 147.57 | 104.22 | 7.34    | 147.41 | 104.19 | -0.23      | 0.16       | 0.03       |
| 3  | 颈侧点(right)   | -8.63                        | 146.01 | 104.15 | -8.80   | 145.88 | 104.11 | 0.17       | 0.13       | 0.04       |
| 4  | 肩峰点(left)    | 18.84                        | 142.02 | 106.78 | 19.01   | 142.21 | 106.60 | -0.17      | -0.19      | 0.18       |
| 5  | 肩峰点(right)   | -19.84                       | 142.05 | 106.52 | -20.07  | 142.16 | 106.45 | 0.23       | -0.11      | 0.07       |
| 6  | 腰点(left)     | 15.29                        | 110.10 | 93.44  | 15.14   | 110.27 | 93.32  | 0.15       | -0.17      | 0.12       |
| 7  | 腰点(right)    | -14.95                       | 110.58 | 93.21  | -14.90  | 110.76 | 93.29  | -0.05      | -0.18      | -0.08      |
| 8  | 臀部后突点(left)  | 10.75                        | 90.80  | 132.34 | 10.96   | 90.67  | 132.23 | -0.21      | 0.13       | 0.11       |
| 9  | 臀部后突点(right) | -11.08                       | 90.44  | 133.17 | -11.18  | 90.58  | 133.20 | -0.10      | -0.14      | -0.03      |
| 10 | 膝盖中点(left)   | 12.30                        | 40.95  | 105.15 | 12.43   | 40.92  | 105.20 | -0.13      | 0.03       | -0.05      |
| 11 | 膝盖中点(right)  | -10.91                       | 40.61  | 105.37 | -11.17  | 40.45  | 105.22 | 0.26       | 0.16       | 0.15       |

注: $\Delta X=X_1-X_2$ ,  $\Delta Y=Y_1-Y_2$ ,  $\Delta Z=Z_1-Z_2$ 。

图6所示为基于服装个性化智能定制的三维人体测量系统采集的人体光带图像,图7所示为基于服装个性化智能定制的三维人体测量系统重建的三维人体点阵图。

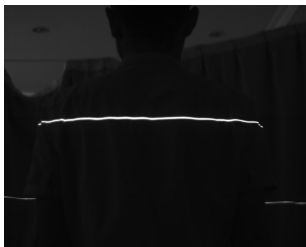


图6 本系统扫描头获取的人体肩部激光光带图像

Fig. 6 Laser strip image of human shoulder obtained by the scanning head of this system

根据表1的数据,目标体膝盖中点(右)水平方向坐标值 $X_w$ 的误差数据相对较大, $\Delta X_{\max}$ 为0.26 cm;在肩峰点(左边)竖直方向坐标值 $Y_w$ 的数据误差相对较大, $\Delta Y_{\max}$ 为-0.19 cm;在肩峰点(左侧)处深度坐标值 $Z_w$ 的数据误差相对较大,

$Z_{\max}$ 为0.18 cm。

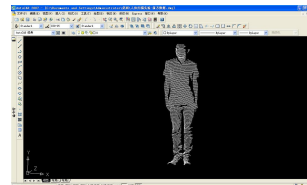


图7 本系统重建的三维人体点阵图

Fig. 7 3D human body lattice reconstructed by this system

为了进一步分析基于服装个性化智能定制的三维人体测量系统的实际测量精度,针对以上11个人体基准点,通过分析重建坐标的绝对误差和相对误差。11个人体基准点(参数为 $N$ )的绝对误差计算式如下:

$$T_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_i)^2 + (\Delta Z_i)^2} \quad (7)$$

人体基准点(参数为 $N$ )的相对误差计算式如下:

$$t_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\left(\frac{\Delta X_i}{X_{2i}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y_i}{Y_{2i}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Z_i}{Z_{2i}}\right)^2} \quad (8)$$

根据表 1 中的重建数据,将其代入式(7)、式(8),则 11 个人体基准点的绝对误差  $T_w$  为 0.17 cm,相对误差  $t_w$  为 0.21%。本次实验中两个系统采集的水平、垂直和深度坐标值及其重建误差的比较情况如图 8 所示。

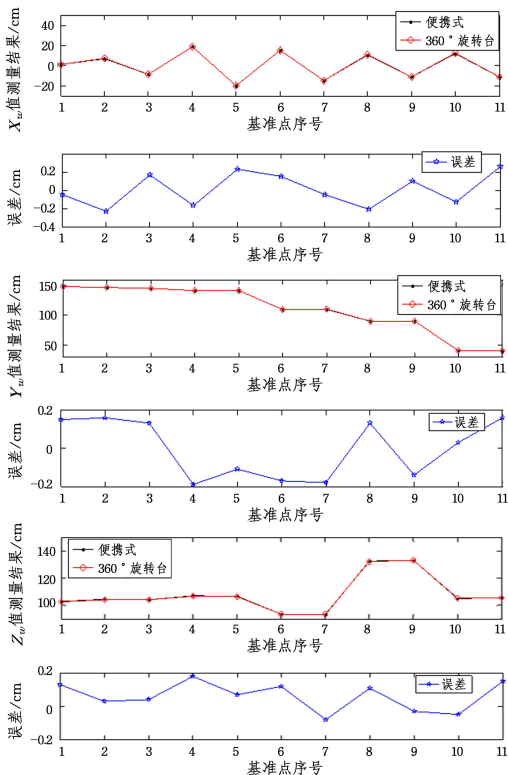


图 8 两系统水平、垂直和深度坐标值的对比示意图

Fig. 8 Schematic diagram of comparison of horizontal, vertical, and depth coordinate values between two systems

基于服装个性化智能定制的三维人体测量系统对于大尺寸纺织服装用人体三维重建时的绝对误差小于 2 mm,相对误差小于 1%,符合服装企业的工业化设计生产等领域的需求。

**结束语** 在基于服装个性化智能定制的三维人体测量系统的构建下,通过设计目标人体的三维重建测量实验,并与法国力克软件的扫描结果进行了对比分析,论证了服装个性化智能定制的三维人体测量系统算法的测量精度和使用可靠性。

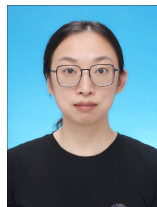
### 参 考 文 献

[1] ZHU X Y, TIAN G G, YI M M, et al. Application of networked 3D virtual fitting technology [J]. Shandong Textile Economy, 2022, 234(8): 34-36.

[2] LUO L H. Research on Automatic Acquisition Method of Clothing Collar Line Based on eMTM [J]. Computer Application and Software, 2010, 27(7): 77-80.

[3] GUO Y X, ZHANG W, LIU Y M, et al. Current Status and Comparison of 3D Human Body Measurement Technology [J]. International Textile Journal, 2016(8): 38-46.

[4] LU Y H, SONG G W, LI J. A novel approach for fit analysis of thermal protective clothing using [J]. Applied Ergonomics, 2014, 4(7): 1-8.



**WANG Yue**, born in 1986, Ph.D, lecturer. Her main research interests include clothing CAD technology and non-contact measurement technology of human body.