

文章编号 1004-924X(2016)增-0551-08

## 数字散斑三维人体快速扫描方法

王永信<sup>1,2</sup>, 卢秉恒<sup>1,2\*</sup>, 梁 晋<sup>1,2</sup>, 冯 超<sup>1,2</sup>, 刘世凡<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学机械工程学院, 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西, 西安 710049;  
2. 广东顺德西安交通大学研究院, 广东, 佛山 528300)

**摘要:**为了弥补传统人体扫描方式难以实现快速、全身人体扫描的不足,提出了一种数字散斑三维人体快速扫描方法。首先,提出了一种基于种子点的数字图像相关匹配算法,以求解相关匹配非线性优化初值。其次,采用基于摄影测量的大视场多相机标定策略,并根据双目立体视觉原理重建人体三维点云。最后,根据以上关键技术并借助VS2010开发环境,研制出XTBodyscan三维人体快速扫描系统。为验证本文方法的可行性和标定精度,实施了4次人体扫描和10组系统标定实验。实验结果表明,本文方法能够在0.1s内完成人体全身扫描,标定误差小于0.1 pixels,可以实现人体全身、快速、细节特征保持的三维人体扫描,具有非接触、无伤害和体验度高等优点,为人体快速3D反求提供了一种有效方法。

**关键词:**人体扫描;种子点;散斑匹配;相机标定;三维点云

**中图分类号:** TB811; TP23 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0551

## Fast scan method of digital speckle and three-dimensional human body

WANG Yong-xin<sup>1,2</sup>, LU Bing-heng<sup>1,2\*</sup>, LIANG Jin<sup>1,2</sup>, FENG Chao<sup>1,2</sup>, LIU Shifan<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering,  
School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
2. Guangdong Shunde Xi'an Jiaotong University Academy, Foshan 528300, China)  
\* Corresponding author, E-mail: bhlu@mail.xjtu.edu.cn

**Abstract:** To make up for disadvantage of traditional human body scan way that it is difficult to realize the fast and whole body scan, fast scan method of digital speckle and three-dimensional human body is put forward. Concerned matching algorithm of digital image on the basis of seed point is put forward to solve initial value of nonlinear optimization of concerned matching. Adopt large visual field and multiple camera calibration strategy based on photogrammetry, and reestablish three-dimensional point cloud of human body according to binocular stereoscopic vision theory. Make use of VS2010 development environment, and develop XTBodyscan three-dimensional human body fast scan system. 4 human body scans and 10 groups of system calibration experiments are implemented to verify feasibility and calibration accuracy of the scan method. Experimental result shows that method in this paper can finish the whole body scan of human body within 0.1s and calibration error is lower than 0.

收稿日期:2016-04-20;修订日期:2016-05-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51421004);中央高校基本科研业务费专项资金资助;广东省公益研究与能力建设专项资金资助项目(No. 2014A010104003)

1pixels. Three-dimensional human body scan of the whole body with fast speed and detail feature kept can be realized, having advantage of non-contact, no damage and high experience, which provides an effective method for fast 3D reverse engineering of human body.

**Key words:** human body scan; seed point; speckle matching; camera calibration; three-dimensional point cloud

## 1 引言

随着 3D 反求技术的快速发展,三维人体快速扫描被广泛应用于 3D 打印、激光内雕、服装制衣、医疗整形等领域;此外,随着人们生活品质的提高,个性化私人定制正逐渐走进人们的日常生活,因此,快速获取人体全身三维数字化模型,具有重要的理论和实际意义<sup>[1-2]</sup>。

现有人体扫描方法主要包括光栅投影测量法、激光扫描测量法和红外测量法等<sup>[3-4]</sup>。法国 Telmat 公司的 SYMCAD 系统,扫描人体阴影获取人体图像,通过计算可生成 70 多个人体尺寸数据<sup>[5]</sup>。美国纺织与服装技术协会的 TC2 系统,采用莫尔投射原理,通过计算投射到人体表面的变形黑白莫尔条纹获取人体三维点云数据<sup>[6-8]</sup>。美国 Cyberware 公司的 WB4 全身扫描仪,采用激光扫描三角测量技术,可在 17 s 内完成大范围(直径 1.2 m、高 2 m)扫描,精度可达 5 mm<sup>[9]</sup>。日本 Hamamatsu 公司的 Body Line(BL)系统,采用红外发射二极管,无需标记便可获取三维数据<sup>[10]</sup>。另外,德国 Vitronic 公司 VITUS-3D、Techmath 公司 Ramsis、美国 Laser Design、日本 Hamano 公司 Voxelan,均采用激光投射获取人体三维数据,单次扫描时间为几秒到十几秒<sup>[11-13]</sup>。与国外相比,国内的人体三维测量研究起步较晚,如总后军需装备研究所和北京服装学院共同研制的“人体尺寸测量系统”,采用“双视点投影光栅三维测量”原理,通过普通白色光源,摄取测量对象前后投影光栅的相位变化,来获取人体三维信息<sup>[14]</sup>;香港理工大学制衣系研制的采用固定光源技术的 CubiCam 人体三维扫描系统,运用大范围的光学设计,能够在较短时间内获取高分辨率的图像以此进行三维测量<sup>[15]</sup>。上述人体扫描系统主要用于实时性要求不高的应用场合,扫描用时最短也需几秒,有些只能获取人体局部点云数据,同时细节特征集中部位如头发、脸等存在扫描失真。

本文针对三维人体快速扫描需求,提出了基于种子点的数字图像立体匹配和大视场多相机标定方法,实现了一种三维人体快速扫描方法。该方法通过利用平面标定板对系统所有相机进行全局标定,采用基于种子点的数字图像相关立体匹配策略,实现人体数字散斑图像立体匹配,经双目立体视觉技术重建出人体全身三维数字化点云模型。人体扫描实验表明,本文方法可在极短时间内(小于 1 s)实现人体全身扫描,且较好保留人体细节特征,为人体三维非接触式测量提供了有效手段。

## 2 三维人体快速扫描系统

### 2.1 系统组成

三维人体快速扫描系统 XTBodyScan,主要包括 4 个测柱、面部测头、控制箱、显示屏、电脑和人体扫描软件(基于 Windows7 环境,利用 VS2010 开发),如图 1 所示。其中,4 个测柱包括上、下两个测头,每个测头包括 2 个黑白相机、1 个彩色相机和主动散斑投射器。扫描时,人体位于体验位置,所有测头同步、全方位、多视角采集

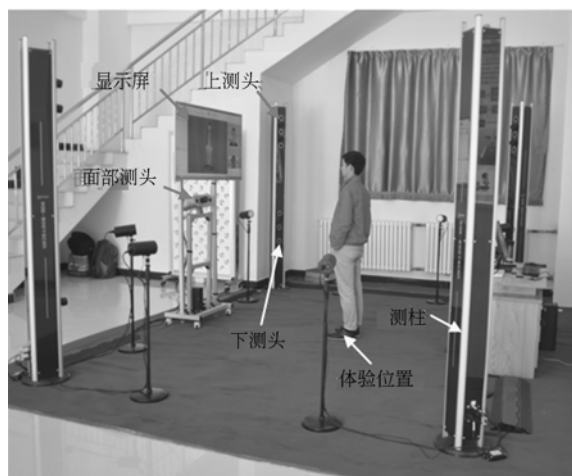


图 1 三维人体快速扫描系统

Fig. 1 3D XTBodyScan system

人体表面信息,经相关算法重建出人体三维数字化点云模型。

## 2.2 扫描原理

首先,利用平面标定板对系统进行大视场多相机标定,获取所有相机的内、外方位参数。其次,主动散斑投射器向人体表面瞬时投射散斑,控制所有相机全方位、多视角采集人体全身散斑图像和彩色图像;采用基于种子点的数字图像相关法,实现散斑图像对应点的立体匹配,网格节点扩散后经双目立体视觉技术重建出人体三维点云。最后,对人体点云进行去噪、孔洞修复等后处理操作,进而得到人体三维数字化模型。测量原理如图 2 所示。

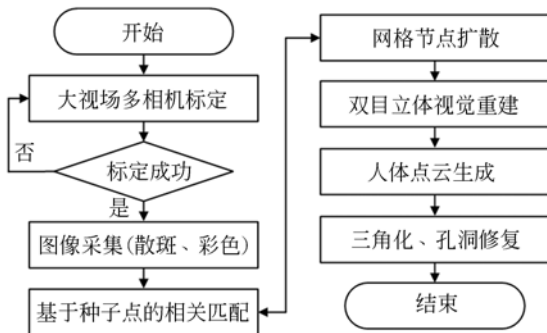


图 2 扫描原理流程图

Fig. 2 Scanning principle flow diagram

## 3 关键技术

人体表面单点三维坐标重建原理:首先对人体扫描系统进行全局标定,其次采用基于种子点的数字图像相关法实现左右两幅散斑图像对应点匹配,最后,基于双目立体视觉原理重建出人体表面单点三维坐标。

### 3.1 大视场多相机标定

相机标定作为双目立体视觉重建的基础,直接影响人体扫描效果,为此提出了一种 10 参数镜头畸变模型和基于摄影测量的大视场多相机标定方法。

#### 3.1.1 镜头畸变模型

因实际成像模型为非理想小孔成像模型,加之由于物镜畸变等因素存在,使得各像点在像平面上相对理论位置也存在偏差,以及为提高标定

精度,本文选用 10 参数镜头畸变模型,具体包括 3 个径向畸变参数、2 个切向畸变参数、2 个薄棱镜畸变参数、2 个主点坐标和焦距:

$$\begin{aligned} \Delta y_r &= K_1 yr^2 + K_2 yr^4 + K_3 yr^6 \\ \Delta x_t &= B_1 (r^2 + 2x^2) + 2B_2 xy \\ \Delta y_t &= 2B_1 xy + B_2 (r^2 + 2y^2), \quad (1) \\ \Delta x_p &= E_1 x + E_2 y \\ \Delta y_p &= 0 \end{aligned}$$

其中:  $K_1, K_2, K_3$  为径向畸变参数,  $B_1, B_2$  为切向畸变参数,  $E_1, E_2$  薄棱镜畸变参数,  $(x_0, y_0)$  为主点坐标,  $f$  为焦距。

对于外方位参数,即实现世界坐标系到相机坐标系的转换,可通过正交旋转矩阵  $R$  和平移变换矩阵  $T$  转换实现:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix}. \quad (2)$$

#### 3.1.2 基于摄影测量的大视场多相机标定

首先,设计一种带有编码点的平面标定板,采用 XTDP 系统进行摄影测量计算,获取编码点三维坐标;然后,在如图 1 所示体验位置处依次改变标定板姿态,同步控制相机采集黑白和彩色图像,识别编码点的编码信息;最后,选用上述 10 参数镜头畸变模型,对采集图像组依次进行标定运算,解算出相机内参数,并全局定向出所有相机在统一坐标系下的外方位参数,最终实现大视场多相机标定。

### 3.2 基于种子点的数字图像相关匹配

利用主动散斑投射器,向被扫描人体表面投射散斑图案,每个测头的左右相机同步采集带有散斑图案的黑白图像,采用基于种子点的数字图像相关技术,实现左右数字散斑图像对应点的关联匹配。

数字图像相关法的基本原理如图 3 所示,左为参考图像(左相机采集),右为目标图像(右相机采集)。在参考图像中,取以待匹配点  $C(x_0, y_0)$  为中心的  $(2M+1) \times (2M+1)$  大小矩形子图像作为参考图像子区,通过一定搜索方法,并按预先定义的相关系数进行相关计算,在目标图像中查找与参考图像子区相似程度最大的以点  $C'$  为中

心的目标图像子区,则点  $C'$  即为点  $C$  在目标图像中的对应点。

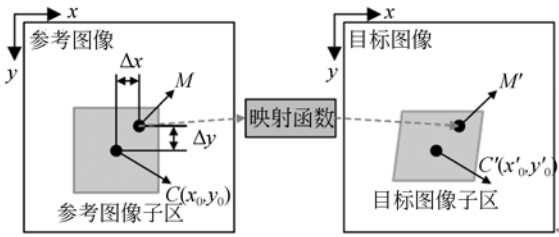


图 3 数字图像相关法原理图  
Fig. 3 DICM principle diagram

为评价两个图像子区的相似性,选用引入线性光强变化模型的最小距离平方和系数作为图像匹配相关系数:

$$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - r_0 - r_1 \times g(x_i', y_j')]^2, \quad (3)$$

其中:  $f(x_i, y_j)$  和  $g(x_i', y_j')$  分别为左右图像上对应点的灰度值,  $r_0$  和  $r_1$  用于补偿由于光照和相机光圈差异引起的灰度线性变化。

相关系数选定后,需要通过相关搜索方法求取相关系数的极值。利用最小二乘迭代法(ILS)求解式(3)极值时,传统方法为通过粗匹配得到  $u, v$  初值,其余未知参数取固定值:

$$\begin{cases} u_x = u_y = v_x = v_y = r_0 = 0 \\ r_1 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

然而粗匹配方法因只考虑了未知参数  $u$  和  $v$ ,所得初值精度较低,易导致迭代次数增加甚至不收敛。为提高初值精度,本文采用一种基于种子点的初值计算方法。

基于种子点的人体散斑图像匹配过程为:计算区域划分完毕后,先对参考图像的种子点(如图 4,标号为 1 的洋红色矩形框)进行立体匹配(即用整像素搜索方法求取种子点在目标图像上的位置初值),然后用最小二乘迭代法对其进行精确匹配;种子点匹配完毕后,利用相邻点位置的连续性,根据种子点的临近点(上、下、左、右共 4 个临近点,标号为 2 的棕色矩形框)与种子点在参考图像上的距离,可得其临近点在目标图像上的位置初值;再以此初值作为最小二乘迭代算法的初值对临近点优化匹配;利用种子点将这 4 个临近点

匹配成功后,又可以这 4 个点作为种子点为其临近点(标号为 3 的绿色矩形框)提供相关初值,如此不断向外扩散,直至所有点匹配完毕。

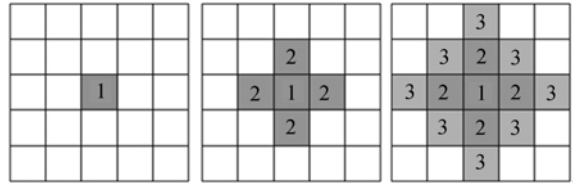


图 4 基于种子点的数字图像相关匹配  
Fig. 4 DIC matching based on seed points

### 3.3 双目立体视觉重建

双目立体视觉的基本原理与人类双目视觉的立体感知过程类似,即从两个视点观察人体表面得到不同视角下的散斑图像,通过计算分析左右散斑图像同一像点的视差来获取人体表面三维信息。图 5 为双目立体视觉原理示意图,  $O_w X_w Y_w Z_w$  为物方世界坐标系,  $O_l X_l Y_l Z_l$  为左相机坐标系,  $O_r X_r Y_r Z_r$  为右相机坐标系,  $OUV$  为像平面坐标系。物方点  $P(x_w, y_w, z_w)$  在左右相机中对应的像点分别为  $P_1(u_1, v_1)$ 、 $P_2(u_2, v_2)$ , 直线  $O_l P_1$  和直线  $O_r P_2$  相交于  $P$  点。如果已知  $P_1$  和  $P_2$  的图像坐标和相机内、外参数(内参数包括相机焦距、主点坐标和镜头畸变,外参数指左右相机坐标系间的旋转矩阵  $R$  和平移矩阵  $T$ ),即可利用三角测量原理解算出  $P$  点在物方世界坐标系下的三维坐标。

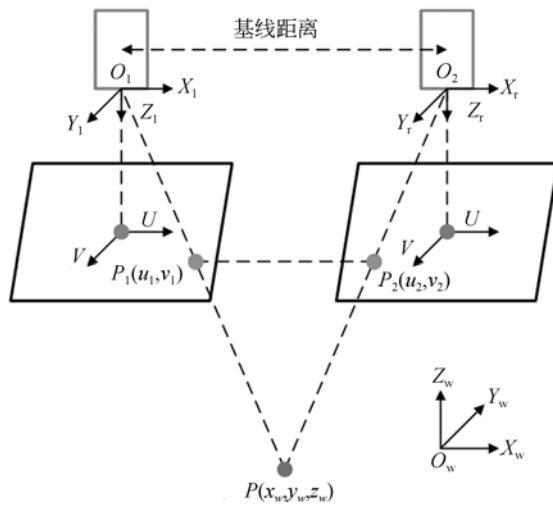


图 5 双目立体视觉原理  
Fig. 5 Binocular stereo vision principle

### 3.4 人体全身点云重建

首先对左右散斑图像(单测头)进行网格划分得到稀疏网格节点(图 6 中红色点),然后对稀疏网格节点进行扩散采样得到密集网格节点(图 6 中蓝色点),最后采用单点三维重建方法对上述网格节点进行重建,得到该测头视觉范围内人体局部三维点云;以此类推,重建出其他测头视觉范围内人体局部点云,再将各局部点云融合为一幅人体全身点云,实现三维人体扫描。

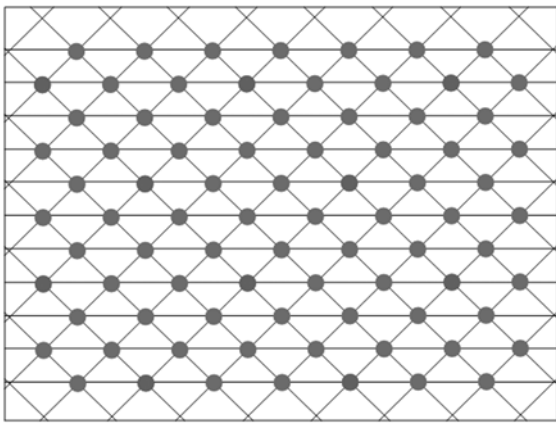


图 6 网格节点扩散采样

Fig. 6 Grid nodes diffusion sampling

## 4 实验结果及分析

### 4.1 人体扫描步骤

1. 利用平面标定板,采用大视场多相机标定法,对 XTBodyScan 系统进行标定,获取所有相机内、外方位参数。

2. 新建人体扫描工程,设置相关扫描参数。

3. 控制相机全方位、多视角采集人体数字散斑图像和彩色图像。

4. 采用基于种子点的数字图像相关匹配和双目立体视觉技术,重建人体三维点云。

5. 对点云模型进行三角化,及相关后处理操作。

6. 输出人体三维数字化模型(支持 STL、OBJ 等主流三维数字几何格式)。

### 4.2 人体扫描实验

为验证本系统采用基于种子点的数字图像相关匹配和双目立体视觉技术,在人体三维点云重建方面的可行性,现挑选 4 个对象采用 5.1 节所述步骤进行人体扫描实验(个体在身高、着装、姿态等方面均存在差异),扫描结果如图 7、8、9、10 所示。

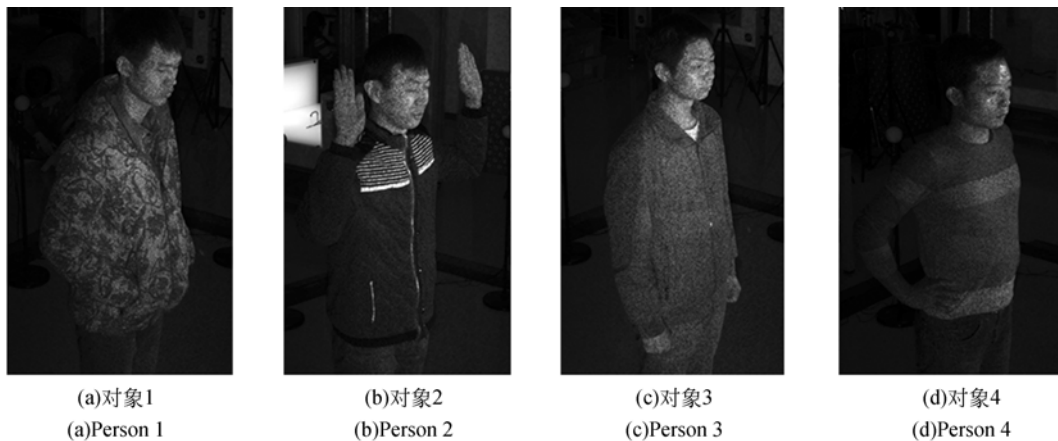


图 7 人体数字散斑图像

Fig. 7 Body digital speckle image

上述 4 个对象均分别在 1s 内完成扫描过程,据此可以有效避免因人体晃动而带来的重建误差,同时 1s 的时间可以使人尽早从站立扫描中解脱出来,大幅增加了扫描体验感。图 7 为投射在人体表面的数字散斑图像,衣服、皮肤、头发等都

含有纹理清晰的散斑图像,且不同布料质地对散斑清晰度影响较小,为后续的数字图像相关匹配提供了高质量的原始图像。图 8 所示为人体点云模型,基于种子点的数字图像相关匹配与双目立体视觉技术,可以重建出比较完整的人体全身点

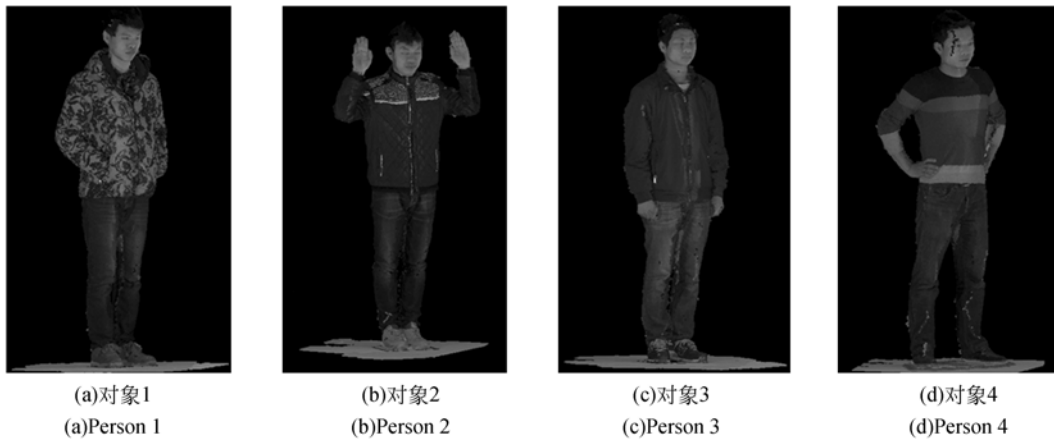


图 8 人体点云模型  
Fig. 8 Body point cloud model

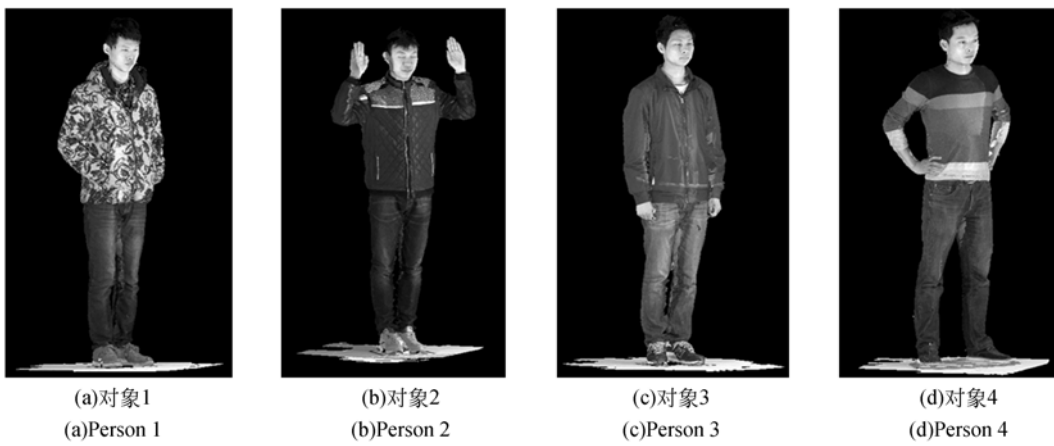


图 9 人体三角网格模型  
Fig. 9 Body triangular mesh model

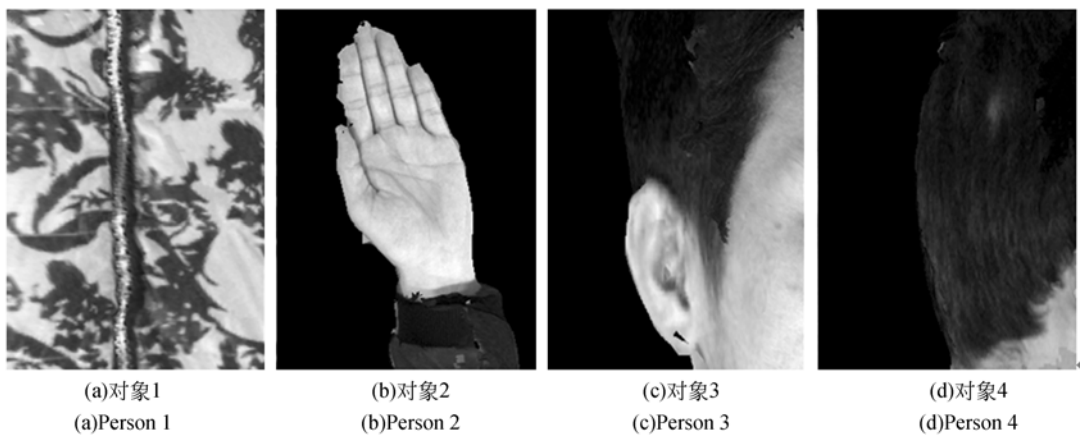


图 10 人体局部细节特征  
Fig. 10 Body local detail features

云数据,对于头发、衣角、衣服褶皱等弱匹配区域,采用本文所提关键技术可以较好重建该区域点云

信息,同时对于不同身高、姿态、胖瘦的人体,具有较强的鲁棒性;此外,4幅点云模型均没有出现错

位现象,因此可以验证所提标定方法的有效性。图 9 所示为人体三角网格模型,它为人体点云模型三角化后获得,可以提升人体数字模型的显示效果、去除噪点以及应用于 3D 打印等。图 10 为人体局部细节特征,在诸如花色纹理衣服、关节手指、人脸鬓角和头发等细节特征丰富的区域,可以有效重建出相关数据和纹理信息。

### 4.3 标定实验

为验证本文所提标定方法的精度和稳定性,利用图 6 所示平面标定板,采用 3.3.2 节所述标定原理,进行 10 次系统标定实验,标定结果如 11 所示。

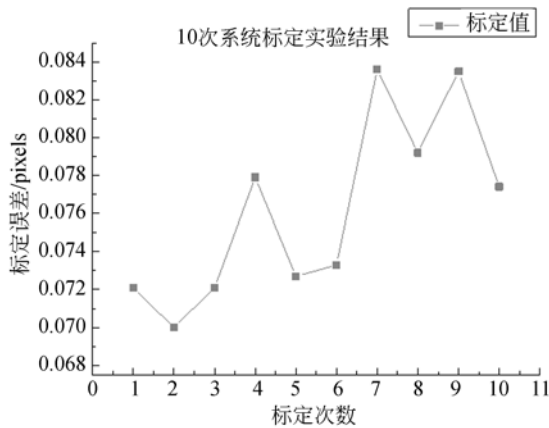


图 11 10 次系统标定结果

Fig. 11 10 times system calibration results

由图 11 可知,10 次标定结果最大值为 0.083 6 pixels,平均值为 0.076 2 pixels,10 次标定结果均小于 0.5 pixels(如果标定结果小于 0.5 pixels 则标定成功),实际标定结果远小于标定成功阈值,说明了大视场多相机标定法稳定和具有较高精度。

为进一步说明所提标定方法的可行性,以面部测头为例(1 号测头),给出其第 7 次(标定结果最大 0.083 6 pixels)的相机内方位参数值,如表 1 所示。

### 参考文献:

- [1] SZELISKI R. *Computer vision: algorithms and applications*[M]. London: Springer Science & Business Media, 2010.
- [2] LANMAN D, TAUBIN G. *Build your own 3D scanner: 3D photography for beginners*[C]. ACM

表 1 面部测头相机内参数

Tab. 1 Facial measuring cameras inside parameters

内参数	黑白相机 1	黑白相机 2	彩色相机
$f/\text{pixels}$	4 314.564	4 302.972	4 308.092
$x_0/\text{pixels}$	24.392	-15.580	-30.507
$y_0/\text{pixels}$	-6.539	16.068	9.252
$K1/10^{-9}$	-4.159	-3.885	-5.731
$K2/10^{-16}$	6.676	-7.769	-1.088
$K3/10^{-21}$	-4.111	-3.549	4.352
$B1/10^{-7}$	2.165	-2.895	-1.222
$B2/10^{-7}$	1.367	2.447	-5.865
$E1/10^{-4}$	3.766	2.626	6.172
$E2/10^{-5}$	3.920	3.641	-5.957

采用基于摄影测量的大视场多相机标定策略,可以在选定 10 参数镜头畸变模型下,解算出所有相机的内、外方位参数,为点云的三维重建奠定基础。

## 5 结 论

本文针对三维人体快速扫描需求,提出了一种数字散斑三维人体快速扫描方法,研制了用于人体三维快速扫描的实验系统,并分别进行了 4 次人体扫描和 10 组系统标定实验。实验结果表明:单次人体扫描用时均小于 1 s;基于种子点的数字图像相关匹配方法,能够获取较优非线性初值,使重建的人体三维点云更完整;此外,采用基于摄影测量的大视场多相机标定策略,使系统标定精度小于 0.1 pixels。不仅能够快速实现人体全身扫描,而且还能较好保持人体细节特征与获得高的体验度,为解决其他高精密器件、人体等特殊对象的 3D 反求提供了一种参考方案,同时对人体 3D 打印、个性化定制、影视动画等具有重要应用价值。

SIGGRAPH 2009 Courses, New York, 2009: 8.

- [3] SIMMONS K P. *Body measurement techniques: a comparison of three-dimensional body scanning and physical anthropometric methods*[D]. North Carolina: North Carolina State University, 2001.
- [4] CHOATE A G. Optical and digital processing techniques in a machine vision metrology system[J]. *Optical Engineering*, 1989, 28 (12): 2813-11-

- 281311.
- [5] PINTI A, RENESSON J L, LÉBOUCHER J, *et al.*. Inertia parameter calculation using a SYM-CAD optical scanner [J]. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2005, 8 (S1): 213-214.
- [6] SIMS R E, MARSHALL R, GYI D E, *et al.*. Collection of anthropometry from older and physically impaired persons: Traditional methods versus TC2 3D body scanner [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2012, 42(1): 65-72.
- [7] GROGAN S, GILL S, BROWNBRIDGE K, *et al.*. Women's long-term reactions to whole-body scanning a mixed methods approach[J]. *Clothing and Textiles Research Journal*, 2016, 34(1): 61-73.
- [8] LEŠNIK B, ŽVAN M. The influence of body dimensions on success in younger categories in alpine skiing [J]. *Research in Physical Education, Sport & Health*, 2014, 3(2):3-8.
- [9] XU B G, FREELAND J H, PEPPER M R, *et al.*. Evaluation of adult body adiposity, size, and shape by stereovision imaging [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2012, 41(1): 1-10.
- [10] ISTOOK C L, HWANG S J. 3D body scanning systems with application to the apparel industry [J]. *Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal*, 2001, 5 (2): 120-132.
- [11] RODRÍGUEZ J C, SERGIYENKO O Y, PRECIADO L C B, *et al.*. Optical monitoring of scoliosis by 3D medical laser scanner [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 54: 175-186.
- [12] CLARKSON S, WHEAT J, HELLER B, *et al.*. Assessing the suitability of the Microsoft Kinect for calculating person specific body segment parameters [J]. *Computer Vision-ECCV 2014 Workshops*, 2014: 372-385.
- [13] GU B F, LIU G L. Research on structural design of pants and pattern generation system [J]. *Journal of Multimedia*, 2013, 8(6): 809-815.
- [14] 王永进. 动态人体尺寸的测量方法 [J]. *纺织学报*, 2013, 34(4): 104-110.  
WANG Y J. Study of body anthropometrical method in motion state [J]. *Journal of Textile Research*, 2013, 34(4):104-110. (in Chinese)
- [15] YU W, NG R, YAN S. CubiCam: a new approach of 3D body scanning system [J]. *Journal of Hong Kong Polytechnic University*, 2002, 28: 55-62.

#### 作者简介:



王永信(1966—),男,陕西渭南人,硕士,高级工程师,主要从事 3D 打印增材制造技术、逆向工程与检测技术、快速模具技术、数控机床技术等方面的研究。E-mail: wangyongxin126 @ 126.com



卢秉恒(1945—),男,安徽亳州人,博士,院士,博士生导师,主要从事增材制造(3D 打印)、数控装备于智能制造、微纳制造和生物制造等。E-mail: bhlu@mail. xjtu. edu. cn