

基于 Intel Real Sense 3D 实感技术的 三维脚型测量与重构

陈超奇, 李新华, 梅星宇, 许平

(安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039)

摘要: 提出一种基于 Real Sense 技术的足部参数测量方法, 仪器装置携带方便、成本低廉、操作简洁; 该算法运用 Intel Real Sense 技术, 搭建了使用多台 SR300 的足型重建系统; 该系统首先将从深度图像中获取的各个足面轮廓点云在系统规定世界坐标系内叠加融合, 然后用 ICP 算法进行精准配准完成对点云的融合, 最后得到完整足部轮廓点云并根据定义计算足部围度等足部系列参数; 在进行重建的过程中运用纹理贴图技术进行渲染, 得到 3D 图像; 实验表明, 该系统能够快速精确地完成三维脚型恢复和足部特征参数的提取, 具有很好的鲁棒性。

关键词: 足面扫描; Real Sense; 三维重构; 参数测量

Three-Dimensional Foot-type Measurement and Reconstruction Based on Intel's Real Sense 3d Technology

Chen Chaoqi, Li Xinhua, Mei Xingyu, Xu Ping

(Ministerial Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing,
Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: In this paper, a convenient method based on Real Sense technology of foot parameter measuring is put forward, which not only has relatively low cost, but also has simple operation. This algorithm uses the Intel Real Sense technology to build a foot reconstruction system using multiple SR300. The system first combines the full-face contour points obtained from the depth image into the system-defined world coordinate system, and then uses the ICP algorithm to perform the precision registration to complete the integration of the point cloud, finally obtain the complete foot contour point cloud according to the definition of foot circumference and other foot series parameters. In the process of reconstruction using texture mapping technology to render 3D images. The result shows that the system not only can achieve foot three dimensional reconstruction and the extracting of characteristic parameter quickly and exactly, but also has good robustness.

Keywords: foot scan; real sense; three-dimensional reconstruction; parameter measurement

0 引言

随着计算机视觉的发展, 深度图像中三维点云的配准^[1-2]在三维重构中占据着越来越重要的角色在三维建模与场景复原应用中有着广泛的应用。其中找到各点云之间相对应的点在二维、三维空间内的对应关系一直都是计算机视觉中要解决的基本问题^[3]。三维重构就是依据获取的富含深度信息的图像来对物体进行三维信息复原的过程, 可以应用各个领域, 比如根据获取的深度图可以开发光探测和测距(激光雷达)传感器^[4-7], 任务跟踪, 人机交互性游戏开发, 三维重构等。三维重构主要包括两个方面: 1) 点云配准; 2) 点云融合。点云配准找到空间中两个点之间的想对应关系。点云融合融合检测到

的所有点集, 最终获得完整的模型。

SR300 视觉传感器能够同时采集二维 RGB 及深度图像信息^[8-9]。目前, 国内外在这方面的研究都取得了一些进展, 如障碍物的检测^[10]、手关节跟踪^[11]、手势识别^[12]、人体复健^[13]等。传统的果实定位采用双目视觉技术, 但需要进行相机标定, 计算复杂, 且仅能在可见光范围内识别。使用 SR300 传感器无需进行参数标定即可获得深度数据实现番茄三维定位, 减少了光线的干扰, 同时 SR300 传感器相对于 Kinect 传感器还具有廉价且购买方便的优势。

脚型三维形状测量技术是制鞋业、足患诊疗康复以及足部生物力学分析研究等领域的基础技术。早期往往采用人工测量, 存在劳动强度大、效率低、精确差等缺陷, 且缺乏对足部形态的整体特征信息的描述。随着测量技术的发展, 出现了利用扫描技术^[14-15]、拍照合成技术^[16]、倒模技术等技术手段, 提高了测量效率和精度。其中利用光电扫描的非接触式三维脚型扫描技术较为常见。Silvia Menato 和 Giuseppe Landolfi^[17]等人开发的通过 3D 脚扫描应用程序获取个性化的足部三维模型, 精度达到 0.15 mm 但耗时长达 15 分钟。

本系统针对 Real Sense SR300 相机对足型三维重建进行了研究, 实现了一种多视角实时三维脚型建模系统, 能够快速、

收稿日期: 2017-08-13; 修回日期: 2017-08-30。

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目(1704a0902026); 安徽大学电子信息工程学院研究生学术创新研究基金项目奖(yqh100224)。

作者简介: 陈超奇(1990-), 男, 安徽省阜阳市人, 硕士研究生, 主要从事三维重构方向的研究。

李新华(1970-), 男, 安徽省铜陵市人, 博士, 副教授, 主要从事图像处理, 体能测试与脚型测量等方向的研究。

精确并且安全可靠地对足部进行三维重构以及相关足部参数提取。运用多个 Real Sense SR300 在开放空间下无遮挡地扫描脚型通过对足部点云数据获取、去噪、平滑、修复以及渲染贴图等步骤,实现了脚型的三维重构和足部参数提取。实验结果表明,该系统不仅具有计算精度高、处理速度快的优点,而且具有较强的鲁棒性。

1 RealSense SR300

本文研究都是由 4 台 SR300 实感摄像机构成的图像获取系统,SR300 有 3 个镜头,中间是分辨率为 1 920 * 1 080 的 RGB 摄像头,左右两侧分别为红外线发射器和红外线摄像机如图 1 所示,获取深度图像的核心技术是光编码技术,深度测量原理是三角测距原理。SR300 设备的红外线发射器(IR Laser Projector)发射的“结构光”,经物体反射后会被红外线传感器(IR Camera Lens)接收。由于红外线到反射物体表面的距离不同,红外传感器捕到的“结构光”图案的位置和形状会发生变化,根据这些由实感图像处理芯片就能计算出物体表面的空间信息,再用三角测距原理进行“深度”计算,进而重现 3D 场景。

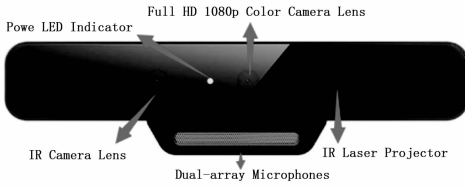


图 1 RealSense SR300

1.1 SR300 标定

本系统是采用 4 个 SR300 构成的成像获取系统如图 2,所以相机间的内、外参数标定是保证系统保证测量准确度的重要环节。

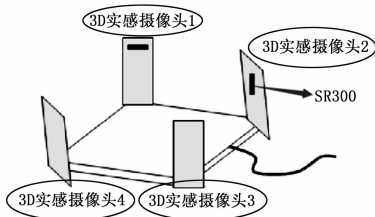


图 2 图像获取系统

通过 Real Sense 的 SDK 可以获得 SR300 原始红外图,但由于红外发射器的功率小以及受红外发射器点阵图的干扰,相机抓取的棋盘图非常不稳定导致标定结果偏差很大。为解决该问题使用以下方案:将 SR300 相机红外发射器当住,使用红外补光灯照射标定板,这样就能得到清晰的标定板红外图像再结合单个相机使用 Zhang 标定法^[18]标定,对相机进行初始化,获得相机摄像头焦距 f_u 、 f_v ,摄像头 u 轴与 v 轴方向的尺度因子 f/dx 和 f/dy 以及摄像头主点坐标 (t_u, t_v) 。

就单个摄像机而言,摄像机外参数标定所要解决的问题就是摄像机坐标系相对于世界坐标系的位置参数,对多摄像机系统外参数是指各个摄像机间的相对位置参数。通常有了各自摄像机相对于世界坐标系的外参数之后,可利用世界坐

标系作为中介,将双摄像机间的外参数求出。假设 4 个相机分别为 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 。使用一种基于立体标定件的双摄像机外参数标定法^[19]分别获得 4 个相机的外参数依次为: (R_1, T_1) 、 (R_2, T_2) 、 (R_3, T_3) 、 (R_4, T_4) 以及相对于相机 C_1 的各个相机的空间几何位置分别为 (R_{12}, T_{12}) 、 (R_{13}, T_{13}) 、 (R_{14}, T_{14}) 。

1.2 投影建模

相机投影模型是将空间内一点 $P(X, Y, Z)$ 根据相机内参数矩阵得到与投影像平面内点 (x, y) 之间的关系,即根据深度数据获得对应的像平面像素:

$$\Delta: R^3(X, Y, Z) \rightarrow R^2(x, y) \quad (1)$$

$$x = \frac{X * f_u}{z} + t_u \quad (2)$$

$$y = \frac{Y * f_v}{z} + t_v \quad (3)$$

根据相机获取的像平面像素点 (x, y) 从而获得该点所对应的深度值,即 T 的逆变换:

$$\Delta^{-1}: R^2(x, y, z) \rightarrow R^3(X, Y, Z) \quad (4)$$

$$X = \frac{x - t_u}{f_x} * Z \quad (5)$$

$$Y = \frac{y - t_v}{f_y} * Z \quad (6)$$

$$Z = Z \quad (7)$$

1.3 姿态建模

在初始化的世界坐标系中相机的姿态为:

$$Q_{wvc} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & t_x \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & t_y \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{wvc} & t_{wvc} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $Q_{wvc} \in S_E(3)$, R_{wvc} 、 t_{wvc} 分别为世界坐标系到相机坐标系下的 $3 * 3$ 的旋转矩阵和 $3 * 1$ 的平移向量, wvc 表示从世界坐标系到相机坐标系。

根据矩阵指数函数得到:

$$Q_{wvc} = exp(G) \quad (9)$$

其中:

$$G = \begin{bmatrix} 0 & \mu_6 & -\mu_5 & \mu_1 \\ -\mu_6 & 0 & \mu_4 & \mu_2 \\ \mu_5 & \mu_5 & 0 & \mu_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, μ_1 、 μ_2 、 μ_3 为世界坐标系下的平移量; μ_4 、 μ_5 、 μ_6 为相机坐标系下的旋转变量。

可以得到相机坐标系下的点 p_c 与世界坐标系下的点 p_w 的关系为:

$$p_c = Q_{wvc} * p_w \quad (11)$$

使用相机标定内外参数将每台 SR300 传感器的点云数据由图像坐标系转换到世界坐标系中,即将多组点云数据合并到同一个坐标系中表示。调整算法如下:

- 1) 创建点云 P_1 、 P_2 、 P_3 、 $P_4 \in R^3$ 保存相机 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 抓取的深度点云数据;
- 2) 遍历相机 C_2 抓取的点云数据集,依次对点云顶点 $P(x, y, z) \in P_2$ 作 $[R_{12} | T_{12}]$ 变换,得到变换后的点 $P^*(X,$

Y, Z),

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = [R_{12} | T_{12}] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

然后将 P_2 加入到 P_1 中去。

3) 重复操作相机 C_3 、 C_4 抓取的点云 P_3 、 P_4 。

2 总体方案设计

2.1 硬件平台设计

系统选用 4 个 Intel RealSense SR300 3D 实感摄像头作为三维脚型测量的立体视觉传感元件, 包括足部待测平台 (100 cm * 100 cm) 且中心画有 80 cm * 80 cm 的正方形扫描区域以及两个脚型区域作为目标测量区域, 相机安装在四根支撑杆顶端、四根相机支撑杆 (15 cm、25 cm 各两根) 安装至平台 4 个顶角处如图 3 所示。4 个视角互补的 3D 实感摄像头同步获取不同视角下被测物体的图像点云, 包括坐标、色彩和深度信息, 利用深度增强摄影模块同步记录照片的 3D 深度信息, 后期三维脚型测量分析程序利用定点拍摄获取到的 3D 增强照片的深度信息完成脚型的三维重构和足部关键尺寸和角度信息的提取。

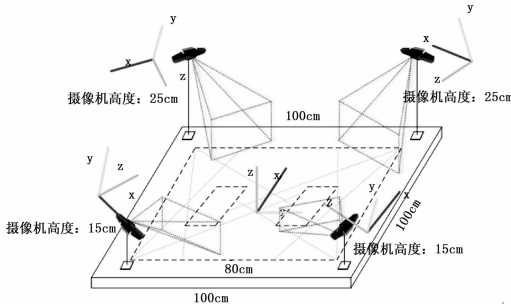


图 3 系统结构示意图

2.2 系统软件流程

已有的诸多光学扫描技术和三维重构算法, 多局限在密闭暗箱空间下进行测量, 受光源精度、标定物、背景光和物体表面漫反射等影响, 获取的图像噪声难以抑制。本算法运用 3D 实感摄像头, 同时获取红外光和可见光图像, 实现在开放空间下的光学检测, 简化测量过程, 通过图像点云数据的滤波处理、边缘识别、去噪、光滑以及点云修复精确重构出三维模型。

2.2.1 三维脚型重构技术方案

该系统持续跟踪摄像机的 6 自由度 (DOF) 姿态, 并将场景的新视点转换为基于全局的基于表面的表示。当传感器打开时, 它会产生许多深度图像帧。对于每一个深度图像帧, 我们应该处理如下:

1) 首先我们将 SR300 中获取的原始深度帧数据转换为以米为单位的浮点数据帧, 得到第 i 时刻的图像 $D_i'(p)$, 包含的像素点表示为 $p(x, y)^T$, 然后采用双边滤波^[20]法对深度浮点图像进行平滑去噪。它是一种用于边缘保持平滑的简单的非迭代方案。为了获得更好的滤波效果, 双边滤波结合了域和范围滤波。在本文中, 我们在高斯情况下使用双边滤波, 可以描

述为:

$$D_i(p) = \frac{1}{W_p} \sum_q N_{\sigma_i}(\|p - q\|) N_{\sigma_r}(\|D_i'(p) - D_i'(q)\|) D_i'(q) \quad (13)$$

其中: $D_i(p)$ 表示去噪后的深度浮点图像, $N_{\sigma}(t) = \exp\left(\frac{1}{2} - t^2 \sigma^{-2}\right)$, W_p 标准化常数。

2) 然后将包含去噪后浮点类型数据的平面坐标系映射到相机坐标系:

$$v_i(p) = D_i(p) \mathbf{K}^{-1} [p^T, 1]^T \quad (14)$$

最终得到一个点击映射 v_i , 其中 $v_i(p)$ 是映射后的三维点云集, \mathbf{K} 是 SR300 红外摄像机的固有校准矩阵。 \mathbf{K}^{-1} 是其逆矩阵。

每个顶点对应的标准化向量是在相邻的映射顶点之间使用一个叉积计算的:

$$n_i(p) = (v_i(x+1, y) - v_i(x, y)) \times (v_i(x, y+1) - v_i(x, y)) \quad (15)$$

$n_i(p)$ 表示每个顶点对应的标准化向量, 该过程在 GPU 线程中并行计算。

3) 最后把相机坐标系点云转化为全局坐标系下, \mathbf{M}_i 为第 i 时刻相机的刚体旋转矩阵。

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} R_i & t_i \\ O^T & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

R_i 、 t_i 为 i 时刻相机的 3×3 旋转矩阵和平移向量。相应的点云与向量转换如下:

$$V_i(p) = \mathbf{M}_i V_i(P) \quad (17)$$

$$N_i(p) = R_i n_i(p) \quad (18)$$

$V_i(p)$ 、 $N_i(p)$ 均为全局坐标系下的点集和相应的向量。

本系统的三维重建最重要的一步是根据深度图像来解决复杂自由形态曲面配准问题。主要使用了 ICP 算法, 这是一个解决复杂配准问题的关键方法算法, 主要用于解决基于自由形态曲面的配准问题如图 4。

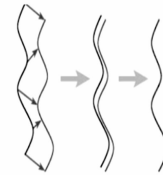


图 4 ICP 算法配准两条曲线

设点集 P 中有 N_p 个数据点, 有 $\{p_i\}$ 表示; 这些点集来自模型 X , X 中包含 N_x 个数据点, 用 $\{x_i\}$ 表示。给定一个刚体变换, 用矢量表示 $q = [q_R | q_T]$, 将该刚体变换应用到点集 P 中, 对变换后的 P 中的任意一点, 在 X 中寻找起最近点, 然后由找到的最近点求得欧氏距离平方和:

$$f(q) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|X_i - R(q_R)P_i - q_T\|^2 \quad (19)$$

为了最小化 $f(q)$, 需要首先得到场景点集与模型点集的重心:

$$\mu_p = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} p_i, \mu_x = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} x_i \quad (20)$$

通过重心来计算两个数据集间的互协方差矩阵:

$$\begin{aligned} \sum_{px} &= \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} [(p_i - \mu_p)(x_i - \mu_x)] = \\ &= \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} [p_i x_i^T] - \mu_p \mu_x^T \end{aligned} \quad (21)$$

通过 \sum_{px} 的反对称矩阵 $A_{ij} = (\sum_{px} - \sum_{px}^T)_{ij}$ 构造矢量 $\Delta = [A_{23} \ A_{33} \ A_{12}]^T$, 由此列矢量, 便可获得一个 4×4 对称矩阵, 其中 I_3 表示 3×3 恒等矩阵:

$$Q(\sum_{px}) = \begin{bmatrix} tr(\sum_{px}) & & & \Delta^T \\ & \Delta & & \\ & & \sum_{px} + \sum_{px}^T - tr(\sum_{px})I_3 & \\ & & & \end{bmatrix} \quad (22)$$

矩阵 $Q(\sum_{px})$ 的最大特征值所对应的单位特征向量 $q_R = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]$ 即为由单位 4 元数来表示的最有旋转, q_R 可以通过一个变换转成 3×3 的矩阵形式, 旋转矩阵得到后, 再根据 $q_T = \mu_x - R(q_R) \mu_p$ 便可得到对应的平移向量。

重复以上迭代过程, 直到最近点的欧氏距离平方和收敛到指定的阈值。

最终得到完整点云数据, 如图 5、6 所示。



图 5 配准前



图 6 配准后

对于合并之后的点云数据采用纹理贴图技术进行渲染得到一个 3D 立体的场景视图。纹理贴图技术是计算机图形学领域里广泛使用的一项 3D 渲染技术, 它的主要作用是简化三维场景模型, 提高场景渲染的真实感。纹理恢复是将纹理空间中的纹理像素映射到屏幕空间中的像素的过程。在对空间点云进行网格化后, 纹理的恢复就变成了寻找纹理图像坐标与网格坐标对应关系的映射过程, 如图 7。

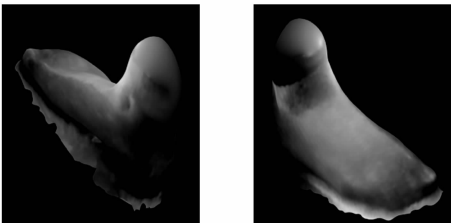


图 7 渲染后足部模型

2.2.2 足部关键脚型参数的计算

在测量和计算足部关键脚型参数时, 以足底轮廓中过第二趾前端中心与后跟端点的连线为轴线, 将此轴线作为测量足长、足宽的基准线如图 8。根据量脚选鞋/量脚制鞋垫的需要, 以及国民脚型调查、足部形态学研究的需要, 通过三维点云的坐标映射和空间维度计算, 计算足长、足宽、跖趾围、跖围、踵宽、足弓高(内踝高)、足背高、足背长、足弓长、外弓角

度等足部关键脚型参数。

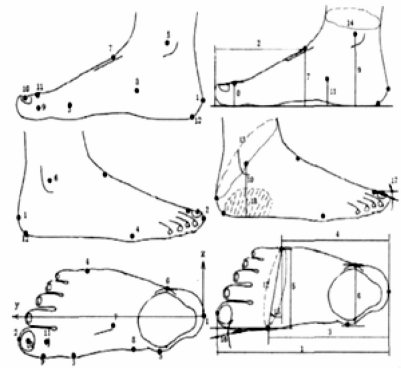


图 8 足部关键点示意图

本文对足部扫描图像的处理与这些关键点的自动求解^[21-23], 实验结果如图 9、10 所示。

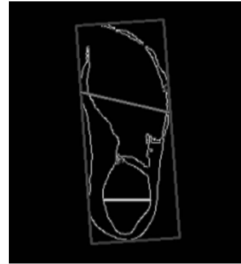


图 9 足长、足宽、足跟宽、足斜宽



图 10 足弓高、足背高、足背长、足弓长

3 实验结果

本系统实现了上述图 9、图 10 中参数的自动测量, 并选择了三组人员进行了测量, 这项研究依据的客观参考标准有: 1) 精度允许在两个欧盟一半号码(3.33 毫米)之间; 2) 实验的可重复性; 3) 数据采集独立于测量方法的个体间和个体内变化; 4) 广泛采用。精度允许两个欧半号码之间指的是精度要满足在 3.33 毫米以内。可重复性指的是实验可以多次(至少三次)的测量。数据采集独立性是指相同的个体在量时与不同个体在测量时采集到的数据不会相互影响广泛采用是指该系统能够在不同环境条件对用户进行测量。我们选择 50 位正常足型的人员做为待测者, 可以先用测量工具根据 C. Wit-an 和 S. Xiong^[24] 等人提出的足部参数标准手工获取测量数据并与该系统获取的参数做对比。

首先根据测得的数据计算各个参数的变异数分析, 变异系数和极差、标准差和方差一样, 都是反映数据离散程度的绝对值。其值越小, 离散程度越小, 数据越集中。表 1 的数据统计表明, 10 个脚型参数的标准差和变异系数均较小, 数据集中, 离散程度小。

$$\text{变异系数} = \frac{\text{标准差}}{\text{均值}} \times 100\% \quad (23)$$

表 2 为两名随机被测试人员在传统手工方式下足部参数的测量结果, 以及系统 5 次参数测量结果的对比。通过大量重复性测试, 所有参数计算误差均小于 1 mm, 参数计算结果满足测量需求。

表1 参数分析 cm

名称	系统测量参数均值	标准差	变异系数
足长	24.02	0.05	0.21
足宽	9.96	0.14	1.40
足背长	14.39	0.12	0.83
足横宽	8.54	0.12	1.40
足跟宽	5.11	0.08	1.57
足弓宽	4.45	0.14	3.15
跖趾围长	23.88	0.28	1.17
足弓围长	24.55	0.44	1.80
足背高	7.90	0.15	1.90
跖趾高	3.57	0.19	5.32

表2 被测人员的手工与系统测量结果

名称	手工测量均值	系统测量参数均值	偏差
足长	24.01	24.04	-0.03
足宽	9.28	9.26	0.02
足背长	14.39	14.45	-0.06
足横宽	8.90	8.94	-0.04
足跟宽	5.66	5.61	0.05
足弓宽	4.58	3.49	0.09
跖趾围长	24.27	24.18	0.09
足弓围长	23.72	23.65	0.07
足背高	8.10	8.08	0.02
跖趾高	3.15	3.23	-0.08

4 总结

本系统针对 Real Sense SR300 相机对足型三维重建进行了研究, 实现了一种多视角实时三维脚型建模系统, 能够快速、精确并且安全可靠的对足部进行三维重构以及相关足部参数提取。实验过程中只需自然站立在测量平台的指定位置, 然后开启扫描功能, 该系统就能够通过 4 个 SR300 相机同时对双脚进行实时的彩色图像抓拍以及相对应的深度数据存储然后进行点云的去噪、平滑、配准、修复、渲染, 最终获得逼真的 3D 立体图像, 还可以通过旋转获得多视角的三维图像同时完成相关足部参数的提取。结果表明该系统多个相机同时工作大大缩短了重构时间也提高了重构精度能够高效、精确以及具有较高鲁棒, 能够通过较大规模人群三维脚型建模与个体穿着舒适性的大数据学习, 确定个性化鞋垫的结构参数和不同负重区域的材质弹性, 据此建立生物力学适应性好的个性化鞋垫生成模型, 作为对接鞋垫设计软件的核心模块, 推动鞋业科技升级。

参考文献:

[1] He B W, Lin Z M, Li Y F. An automatic registration algorithm for the scattered point clouds based on the curvature feature [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 46: 53-60.

[2] Cai J, Dong L, Sun X P. Parallel soft assign algorithm for 3D human ear point clouds registration [J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34 (10): 3629-3634.

[3] Tevs A, Berner A, Wand M, et al. Animation Cartography & Mdash; Intrinsic Reconstruction of Shape and Motion [J]. 2012, 31 (2): 1-15.

[4] Mendes E. ICP-based pose-graph SLAM [A]. 2016 IEEE Inter-

national Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SS-RR) [C]. 2016, 10 (1095): 195-200.

- [5] 钟泽宇, 周海婷, 古炜豪, 等. 基于 Kinect 传感器的机械手自主抓取技术研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2016 (7): 123-126.
- [6] 张洪, 郑梓均, 孙春龙. Kinect 深度测量的系统误差补偿研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2015 (12): 120-122.
- [7] 蓝箭, 孙娟, 杨裕炳, 等. 基于 Kinect 骨骼追踪的控制方法的研究 [J]. 仪表技术, 2014 (8): 20-22.
- [8] 薛彦涛, 吕洪波, 孙启国. 基于 Kinect 深度数据的移动机器人障碍检测方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (2): 61-63.
- [9] Khoshelham K, Elberink S O. Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications [J]. Sensors, 2012, 12 (2): 1437.
- [10] 赵美荣, 田卫萍, 熊风光, 等. 基于 Kitnect 和 Unity 的虚拟手抓取碰撞检测算法 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (6): 2076-2078.
- [11] 魏元, 韩燮, 况立群. 三维人手关节节点的提取研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (2): 561-564.
- [12] 周天彤, 徐飞林, 张旖帆, 等. 基于 unity 与 kitnect 的交警手势识别仿真系统的设计和实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 5: 156-159.
- [13] Chang Y J, Chen S F, Huang J D. A Kinect-based system for physical rehabilitation: a pilot study for young adults with motor disabilities. [J]. Research in Developmental Disabilities, 2011, 32 (6): 2566-2570.
- [14] Shih N J, Kuo H C, Chang C F. 3D scan for special urban evening occasion [A]. 2016 International Conference on Applied System Innovation (ICASI) [C]. 2016: 1-4.
- [15] Stefan P E. 3D face and hand scans acquisition system dedicated for Multimodal Biometric identification [A]. MIXDES [C]. 2016: 389-393.
- [16] Jurdjani D, Dany Laksono. Open source stack for Structure from Motion 3D reconstruction: A geometric overview [A]. 2016 6th International Annual Engineering Seminar (InAES) [C]. 2016, 10: 196-201.
- [17] Menato S, Landolfi G, Alge M, et al. Empowering widespread shoe personalization via a 3D foot scanning App [A]. ICE [C]. 2014: 1-7.
- [18] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (11): 1330-1334.
- [19] 周立丽, 车仁生. 一种基于立体标件的双摄像机外参数标定法 [J]. 宇航计测技术, 2005, 25 (4): 1-4
- [20] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images [A]. Proceedings of the International Conference on Computer Vision (ICCV) [C]. 1998: 839-846.
- [21] 刘国忠, 王伯雄, 史辉, 等. 激光扫描足部三维测量方法及其应用 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2008, 48 (5): 821-823.
- [22] 刘国忠, 王伯雄, 史辉, 等. 三维足型测量系统足部参数自动提取方法 [J]. 中国生物医学工程学报, 2009, 28 (1): 79-81.
- [23] 王俊青, 周旭, 姚志明, 等. 基于计算机视觉的脚型参数测量系统的设计与实现 [J]. 仪表技术, 2012 (7): 40-44.
- [24] Witana C, Xiong S, Zhao J, et al. Foot measurements from 3D scans: a comparison and evaluation of different methods [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2006, 10: 708-807.