

基于线结构光扫描的足背三维轮廓重构

李新华¹, 袁振宇¹, 张 涛^{2,3}, 姚志明³

(1. 安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039; 2. 中国科学技术大学自动化系, 合肥 230027;
3. 中国科学院合肥智能机械研究所, 合肥 230031)

摘 要: 针对人体足背的三维建模问题, 提出一种基于线结构光扫描的新型重构及测量方案。采用 2 台高分辨率 CMOS 摄像头, 从不同角度拍摄照射在足背上的线结构光线, 通过灰度重心法细化图像中的结构光线, 经坐标转换获得足背的点云数据。对足背点云数据后跟处的盲区采用最小二乘曲线拟合法进行修复, 并运用三维 Delaunay 网格化算法实现曲面重构, 获得完整的足背三维轮廓。实验结果表明, 该方案程序运行稳定, 足部主要参数的绝对误差均小于 4 mm, 具有较高的测量精确度。

关键词: 线结构光扫描; 三维重构; 足背点云; 曲线拟合; 曲面重构; 参数测量

Instep 3D Outline Reconstruction Based on Line-structured Light Scanning

LI Xin-hua¹, YUAN Zhen-yu¹, ZHANG Tao^{2,3}, YAO Zhi-ming³

(1. Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, China;
2. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
3. Institute of Intelligence Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

【Abstract】 Aiming at the problem of human instep 3D modeling, a new scheme that uses line-structured light scanning to reconstruct 3D model and measure parameters is presented. Line structure light photos are taken by 2 high resolution CMOS cameras from different angles. To get the point cloud data of instep, the scanning images are thinned by gray-gravity method and image coordinates is transformed to world coordinates. The least squares curve fitting algorithm is used to fix the blind data in human heel zone. And the 3D Delaunay triangulation algorithm is used to restructure the curved face of instep and get a complete human instep 3D model. Experimental result shows that the running of the scheme is stable, the absolute error of the main parameters of foot is less than 4 mm, and it has high accuracy.

【Key words】 line-structured light scanning; 3D reconstruction; instep point cloud; curve fitting; surface reconstruction; parameter measurement

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2014.02.053

1 概述

自从基于计算机视觉^[1]的三维重构技术被引入足部模型重建^[2-3]研究领域以来, 已经取得了长足的发展与进步。在国外, 加拿大的 Vorum 公司^[4]、德国的 Vitronic 公司^[5]开发的三维非接触式激光扫描测量仪器通过激光扫描的方式获取质量较高的足部三维模型。在国内方面, 文献[6]研究开发的基于光切法的足部三维测量仪, 以及文献[7-8]研制的基于激光线和力传感原理的足三维扫描仪都能获得精度较高的足部三维重建效果。这些仪器在构造上都选择了多组激光光源产生扫描光线, 并且都安装了 3 个以上的高分辨率摄像头, 这使得开发出来的设备成本较高, 且装置的复杂度也较高。这在一定程度上影响了该类设备在实际应

用中的推广与普及的速度。

本文采用特制的线结构激光光源^[9], 通过双摄像头采集激光扫描图像, 在所建立的足背模型基础上完成相关足部参数的测量, 以降低仪器的成本与复杂度, 同时达到较高的测量精度。

2 重构设计方案与原理

2.1 足背三维重构方案的组成结构

整个足背三维重构方案的硬件环境包括扫描平台、2 个 CMOS 摄像头、导轨及固定在导轨顶端的一对线结构光源, 如图 1 所示。2 个 CMOS 摄像头分置于平台两侧, 与一对线结构光源构成的线结构光扫描平面垂直。导轨保持匀速滑动, 带动线结构光平面移动扫描整个足背部, 通过 CMOS

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172127); 中科院仪器研制基金资助重大项目(JCKY2012034)

作者简介: 李新华(1968 -), 男, 副教授, 主研方向: 数字图像处理, 计算机视觉; 袁振宇、张 涛, 硕士研究生; 姚志明, 博士

收稿日期: 2012-12-24 **修回日期:** 2013-02-25 **E-mail:** lixinhua163@163.com

摄像头的动态拍摄获取整个足背部的轮廓信息, 用于足背三维模型的重建及足背相关参数的测量。

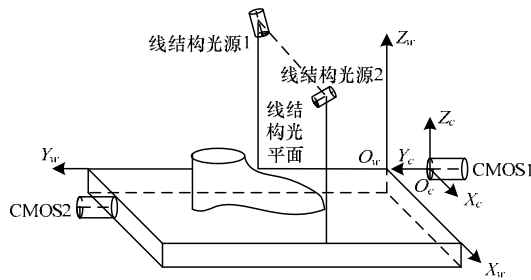


图1 足背三维重构平台结构

2.2 重构原理

本文重构方案的坐标关系如图2所示, 空间坐标系 X_w, Y_w, Z_w, O_w 的零点定于扫描平台的一角, 其与摄像机坐标系 X_c, Y_c, Z_c, O_c 满足一个绕 Z_w 轴旋转加平移变换的关系, 关系式为:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & X_{\text{off}} \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & Y_{\text{off}} \\ 0 & 0 & 1 & Z_{\text{off}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, CMOS1 坐标系相对空间坐标系只有平移变换没有旋转变换所以 θ 值为 0, CMOS2 坐标系绕 Z_w 轴旋转的 θ 角度为 180° 。

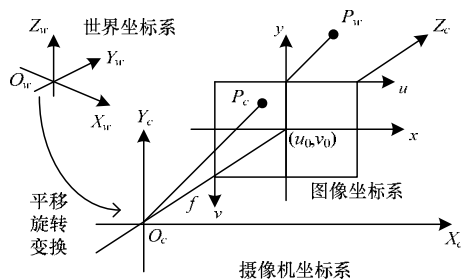


图2 足背三维重构平台结构原理

由于结构光平面在摄像机上的成像满足正交原理, 不考虑摄像机畸变因子, 可以将摄像机模型简化为理想的小孔成像模型, 即式(2)的第2个等号左侧部分。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = Z_c \begin{bmatrix} 1/f & 0 & 0 \\ 0 & 1/f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = Z_c \begin{bmatrix} d_x/f & 0 & -u_0 d_x/f \\ 0 & d_y/f & -v_0 d_y/f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, x, y 分别为照片上点坐标; f 为 CMOS 摄像头的焦距。再考虑进像素坐标系与图像坐标系的转换关系, 摄像机坐标系的坐标可直接由像素坐标转化得到(式(2)第2个等号右侧部分); $f/d_x, f/d_y$ 分别称为 u 轴与 v 轴方向的尺度因子; (u_0, v_0) 称为主点坐标, 这4个参数在一起构成四参数的摄像机内参数模型, 可以通过张正友标定法标

定获得。

式(2)的推导没有考虑摄像机的畸变情况, 在实际应用中, 摄像头存在着切向和径向的非线性畸变。用 (x'_c, y'_c) 表示经过畸变校正后的图像坐标, (x, y) 表示图像坐标, 则可用下式进行畸变校正:

$$x'_c = x + [2p_1y + p_2(r^2 + 2x^2)] + x[k_1r^2 + k_2r^4] \quad (3)$$

$$y'_c = y + [2p_2x + p_1(r^2 + 2y^2)] + y[k_1r^2 + k_2r^4] \quad (4)$$

其中, $r^2 = x^2 + y^2$; k_1, k_2 为径向畸变因子; p_1, p_2 为切向畸变因子。

将一帧图像的像素坐标变换为空间上一个结构光切面的空间坐标的坐标, 再把所有帧图像依次变换叠加, 得到整个足部模型的空间三维点云数据。

3 三维重构

3.1 结构光图像的处理

由于人的足背皮肤存在漫反射, 因此投射在足背上的结构光带通常较宽, 如图3(a)所示, 而恢复空间点云的理想线光源图像应为一个像素宽度的光带图像。所以, 需要对原始拍摄的图片进行细化处理。

细化的流程如下:

(1)对灰度化的原始结构光图像用最大类间方差阈值算法(大津阈值法)得到光带区域与背景区域的阈值 T , 进而通过阈值分割得到光带的区域图, 如图3(b)所示。

(2)对光带图像进行骨架提取, 所使用的算法为灰度重心法, 即以灰度为权值的加权重心法。对于大小为 $m \times n$ 像素的灰度图像 $I(i, j)$ 中的第 k 列, 其灰度重心横坐标 x_k 为:

$$x_k = \frac{\sum_{i=0}^m i \cdot M(i, k)}{\sum_{i=0}^m M(i, k)} \quad (5)$$

其中, 权值 $M(i, j)$ 为:

$$M(i, j) = \begin{cases} I(i, j) & I(i, j) \geq T \\ 0 & I(i, j) < T \end{cases} \quad (6)$$

所得细化后的效果如图3(c)所示。

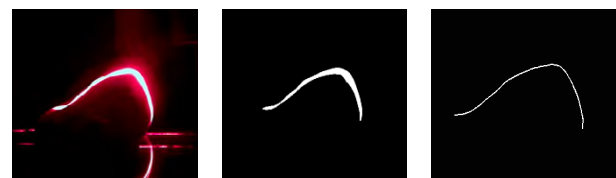


图3 线结构光带的提取与细化

3.2 盲区数据的拟合修复

完成前后2个摄像头拍摄的所有结构光图像的细化工作后, 对于每张图, 通过式(1)~式(4)的坐标变换后即可得到重构出的三维足背的空间点云信息。为了使前后2个摄像

头拍摄信息达到最大化,2 个摄像头采取了错位的放置方法(见图 1),同时,受测的足部也需要倾斜一定角度放置。但是这种检测方法会导致足后跟处的一小部分信息缺失,由于缺失区域较小,且该区域特征复杂度不大,因此可对该部分采用逐层曲线拟合的方式进行修复。

逐层曲线拟合的具体步骤为:

(1)沿 Z_w 轴(垂直地面向上)方向,把足部的点云数据均匀分割成若干层,取每层后跟部分的若干点,作为拟合的原始数据。

(2)分别对每层的数据用曲线进行拟合,再从拟合出来的曲线中选若干代表性的点作为该层的拟合点。

(3)把所有拟合点补回原始点云数据,完成修复。

常见的曲线拟合的方法包括插值和逼近两大类^[10],它们的共同点都是通过已知一些离散点集上的约束,求取一个定义在连续集合上的未知连续函数,从而达到获取整体规律的目的。插值拟合法要求所求的曲线函数严格经过约束点,而逼近只要求曲线函数接近约束点,符合约束点趋势,且误差在某种度量意义下最小。

为了选择一种最适合足跟修复的拟合方法,本文选用了拉格朗日插值法、三次样条插值法、三次均匀 B 样条曲线逼近法、最小二乘逼近法这 4 种常用插值逼近方法进行对比实验。实验的数据选取了后跟处具有代表性的一层。实验结果对比如图 4 所示,拉格朗日插值、三次样条插值拟合出的曲线虽然严格经过了约束点,但因为左右约束点间距较大,曲线发生了走样,与后跟处的形状不吻合。三次均匀 B 样条曲线虽形状较接近后跟,但由于拟合曲线处于约束点的内部,也不能满足要求。最小二乘逼近选取了圆作为逼近曲线,虽然拟合曲线未能严格经过约束点,但形状最为接近后跟处,因此最终选用最小二乘逼近法作为曲线拟合的算法。对每层拟合数据进行叠加后可以得到如图 5(b)所示效果。

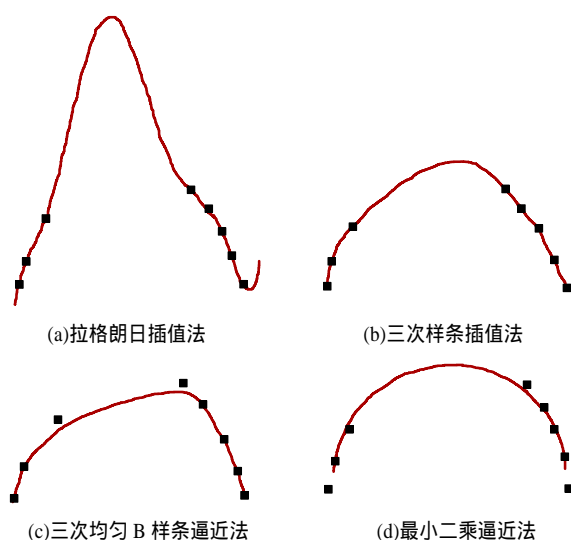


图 4 4 种曲线拟合效果比较

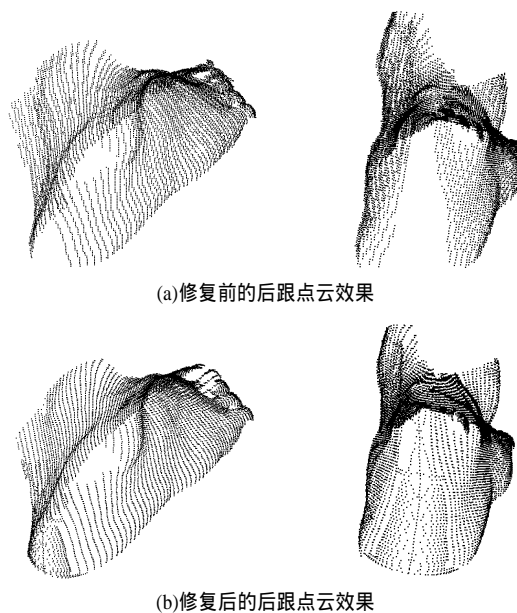


图 5 足跟部点云拟合修复前后效果对比

3.3 点云数据网格化与纹理贴图

通过上述处理获得的是散乱的足背点云数据,点与点之间没有建立联系。为了精确表述足背模型的细节,首先需要散乱点云通过三角网格化^[11-12](又称三角剖分)的方式重构曲面,然后在其基础上进行纹理贴图。

散乱数据的三角剖分实质就是以三角网格反映数据点与其邻近点之间的拓扑连接关系,这种正确的拓扑连接关系将有效揭示散乱数据点云所表述的原始物体表面的形状和拓扑结构。目前,三角剖分已被广泛应用在地理信息系统、有限元分析、虚拟现实、影像处理以及逆向工程等领域^[13]。

三角剖分目前以 Delaunay 三角化最为常用。主要因为它具有以下 2 个重要性质:(1)空外接圆性质:在由点集 v 所形成的 Delaunay 三角网中,其每个三角形的外接圆均不包含点集 v 中的其他任意点;(2)最大的最小角度性质:在由点集 v 所能形成的三角网中, Delaunay 三角网中三角形的最小角度是最大的。这 2 个性质保证了 Delaunay 三角剖分能够尽可能最大限度保证网格中三角形能够最接近等边三角形,并且经证明,在不多于 3 个相邻点共圆的欧几里德平面中, Delaunay 三角网是惟一的。因此, Delaunay 三角网格具有极大的应用价值。

本文分别选用了二维投影 Delaunay 三角化与三维 Delaunay 三角化这 2 种常用的空间 Delaunay 三角化方法进行对比实验。二维投影 Delaunay 三角化算法对点云进行三角剖分时,只是简单地将所有的三维散乱点投影至 $X_wO_wY_w$ 平面,忽略其 Z_w 值。然后在平面上进行二维 Delaunay 三角化,得到空间点云的拓扑关系后,映射回三维空间。实验中发现,多个投影点在垂直投影方向出现重叠时,网格化错误明显,在后跟部位表现较为明显,材质映射后曲面表现粗糙(图 6(a)~图 6(c))。三维 Delaunay 三角

化由于是直接对空间点云进行操作, 通过寻找满足空外接球性质(每个空间四面体的外接球均不包含点集 v 中的其他任意点)的四面体的方式进行网格化。实验所得网格质量较好, 材质映射后表面也较为光滑(图 6(d)~图 6(f))。所以, 最

终选用三维 Delaunay 三角化作为足背曲面重构的算法。
在网格化的基础上, 找到网格坐标系与纹理图像坐标系的关系, 就能实现足背纹理图像的映射, 纹理映射的最终结果如图 6(g)所示。

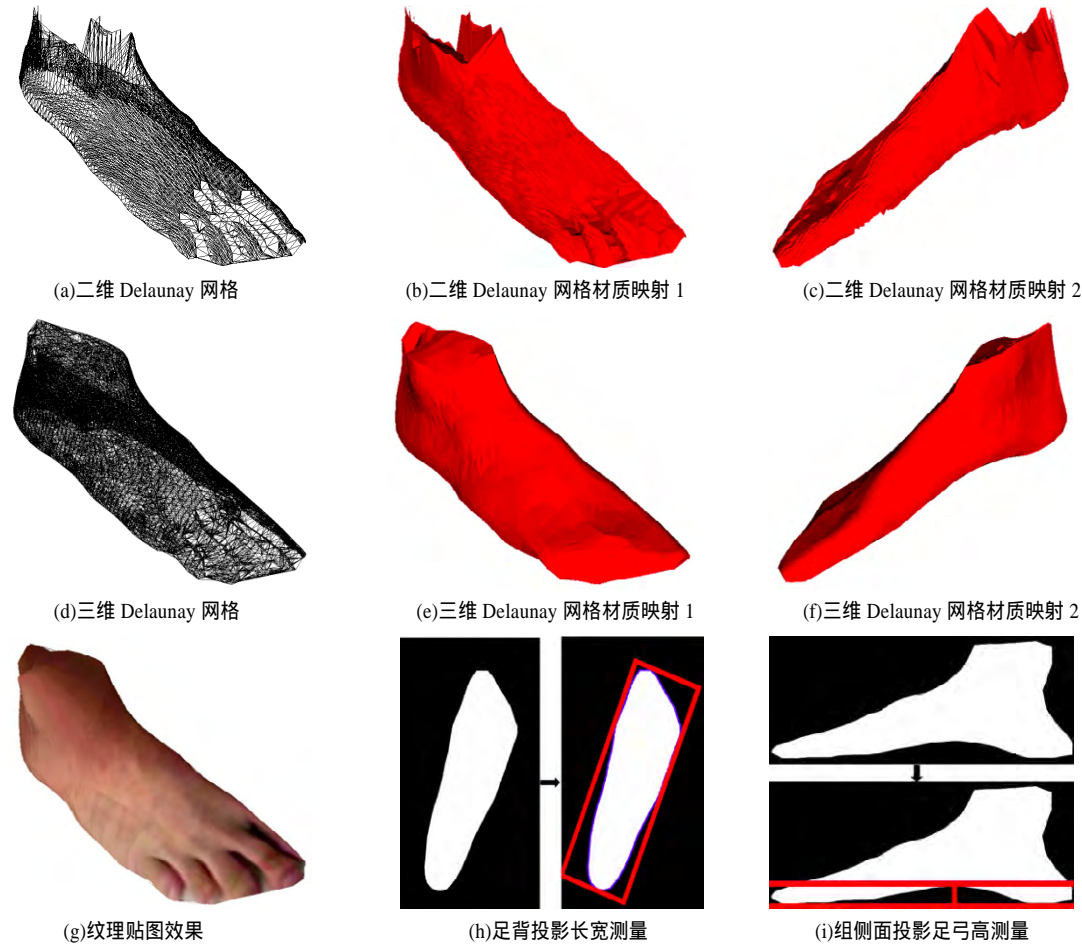


图 6 足背曲面重构效果对比及参数测量

4 主要参数的测量

在获取完整的足背点云信息后, 即可利用该数据进行足部相关参数的测量。在制鞋领域里最为关键的足部参数为足部的长度、脚掌的宽度以及足弓的高度。

对于长度与宽度信息的测量, 可以先把足部点云投影到 $X_wO_wY_w$ 平面上, 投影点云的外轮廓点即为足部的轮廓点的投影。由于本文系统所获得的足部点云是在足部倾斜放置时扫描所得, 不能通过简单地对足部最前点与最后点坐标相减来得到长度信息。需要把足部摆正后再进行测量。本文引入了最小面积外接矩形法在无需旋转足部投影的情况下即可获得足部的长度与宽度信息。因为只有在脚正放

时, 外接矩形的面积达到最小, 最小面积外接矩形框的长和宽被用来表示足部的长度与宽度, 如图 6(h)所示。

足弓测量的方法类似, 即把足弓侧的最外侧轮廓点投影到 $Z_wO_wY_w$ 平面上, 求得最高点离检测平台的高度, 作为足弓的高度, 如图 6(i)所示。

本文选取了 2 名测试对象, 分别用传统的人工方式与本文测量系统检测方式对两人的足长、足宽及足弓高进行了多次测量, 取其平均值作为测量结果, 对比见表 1。结果表明, 人工测量参数与系统测量参数的绝对误差在 4 mm 以内, 达到了很高的精确度, 足部后跟处的最小二乘曲线拟合修复并没有对检测的精确度造成很大影响。

表 1 参数测量结果 cm

检测方式	足部长度		足部宽度		足弓高度	
	受测者 A	受测者 B	受测者 A	受测者 B	受测者 A	受测者 B
人工测量	24.800	22.900	8.800	7.900	0.150	0.140
仪器测量	24.402	22.525	8.645	7.752	0.157	0.134
绝对误差	-0.398	-0.375	-0.155	-0.148	+0.007	-0.006

(下转第 255 页)

5 结束语

本文提出了一种基于八叉树快速构建三维地质剖面的算法, 该算法将八叉树快速搜索的优点和画廊看守算法健壮性和自适应性的优点相结合, 快速而有效地解决了三维地质剖面的构建问题, 为地质剖面 and 地质填图的自动化生成提供一种更快捷的方法。从实验的结果可以看出, 该算法对于复杂地质体模型(实验中所用的地质体网格模型所包含的三角形的数量均超过 10 000)的剖切不但是可行的, 而且是有效的。对于一些带有孔洞现象的剖面也能正确生成。后续工作的重点是将算法应用到实际中, 结合相关工程项目验证并改进算法。

参考文献

- [1] 武 强, 徐 华. 虚拟地质建模与可视化[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] Coelho L C G, Gattass M, Figueiredo L H. Intersecting and Trimming Parametric Meshes on Finite-elements Shells[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000, 47(4): 777-800.
- [3] Lindenbecka C H, Ebert H D, Ulmera H. A Program to Clip Triangle Meshes Using the Rapid and Triangle Libraries and the Visualization Toolkit[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(6): 841-850.
- [4] 陈国良, 刘修国, 尚建嘎, 等. 三维地质结构模型的切割分

析技术及方法[J]. 计算机工程, 2007, 33(20): 184-186.

- [5] 王建芳, 包世泰, 余应刚, 等. 基于 GIS 模版的地质剖面图模型及其实现[J]. 测绘科学, 2008, 33(5): 184-186.
- [6] 谭正华, 王李管, 熊书敏, 等. 一种新的复杂地质体采矿工程剖面图自动生成方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(3): 1092-1097.
- [7] Dunn F, Parberry I. 3D 数学基础: 图形与游戏开发[M]. 史银雪, 陈 洪, 王荣静, 译. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [8] Delame T, Roudet C, Faudot D. From a Medial Surface to Mesh[J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31(5): 1637-1646.
- [9] Wang Zheng, Ren Gaojun, Zhao Liangeng. Fast Parallel Algorithm of Triangle Intersection Base on GPU[J]. Physics Procedia, 2012, 33(1): 548-554.
- [10] de Berg M, Cheong O. 计算几何算法与应用[M]. 邓俊辉, 译. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [11] 李学军, 黄文清. 平面区域三角化快速算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(2): 233-238.
- [12] 曾 薇, 孟祥旭, 杨承磊, 等. 平面多边形域的快速约束 Delaunay 三角化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(9): 1933-1940.
- [13] 毕 林, 王李管, 陈建宏, 等. 快速多边形区域三角化算法与实现[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 3030-3033.

编辑 金胡考

(上接第 249 页)

5 结束语

本文综合计算机视觉中的三维重构技术与计算机图形学的三维修复建模技术, 实现了一种新型的足背三维轮廓重构方法。该方法利用 CMOS 摄像头结合线结构光源扫描, 在极小区域修复的情况下完成了足背轮廓的三维重构, 并能配以纹理贴图用于效果展示。同时, 该系统还能基于重构模型进行足部相关参数的测量。实际测试表明, 该方法的程序运行稳定, 参数测量精度较高。今后可以在此足背轮廓三维模型的基础上, 针对更多足部相关参数进行测量, 以及对足部的形态进行分析研究。

参考文献

- [1] 马颂德, 张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] Patino A, Meneses J. Optic System for the Measurement of Metrological Parameters of the Foot[C]/Proc. of SPIE'04. [S. l.]: IEEE Press, 2004: 84-90.
- [3] Witana C P, Xiong S P, Zhao J H, et al. Foot Measurements from Three-dimensional Scans: A Comparison and Evaluation

of Different Methods[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2006, 36(9): 789-807.

- [4] 孔维敬, 吴禄慎. 基于激光扫描的足部三维测量仪设计[J]. 机械设计与制造, 2009, (3): 217-219.
- [5] 张 云, 谢 红, 吴海燕. 基于三维足部测量的数字化制鞋研究[J]. 上海工程技术大学学报, 2011, 25(1): 54-59.
- [6] 居 琰, 汪同庆, 王贵新, 等. 脚型三维轮廓测量技术研究及系统实现[J]. 光电工程, 2002, 29(6): 21-24.
- [7] 刘国忠, 王伯雄, 史 辉, 等. 激光线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): 820-823.
- [8] 贾倩倩, 王伯雄, 史 辉, 等. 基于光切法的全三维量脚制鞋系统的设计和实现[J]. 微计算机信息, 2010, 26(2): 1-3.
- [9] 宋大虎, 李忠科, 程春霞. 基于线结构光的三维坐标测量技术研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(22): 291-292.
- [10] 孙家广. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [11] 郭美社. 牙模数据拼合重建系统的研究与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [12] 谭云兰, 李光耀, 夏洁武, 等. Delaunay 三角网高效构建及