

文章编号 1004-924X(2007)01-0084-05

基于激光三维扫描的人体特征尺寸测量

田庆国,葛宝臻,杜 朴,郁道银,吕且妮

(天津大学 精仪学院光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:提出了一种利用三维人体点云数据测量人体关键尺寸的方法。应用线结构光激光三维扫描仪对特定站姿的人体进行扫描,获得完整三维人体点云。根据人体视线和脚尖的同向性及两腿的自然分开特征,对点云进行方位调整,使人体朝向 z 轴正方向。利用手动删除和最大连通域删除相结合删除噪声点。确定人体的6个特征点和20个特征平面,分别应用对应截面 y 坐标差值法测量长度尺寸,凸壳法测量截面周长,测量了34个人体关键长度和周长,对影响测量精度的因素进行了分析。结果表明,典型尺寸测量误差小于3%,可满足人类工效学等领域快速测量人体特征尺寸的要求。

关键词:人体尺寸;测量;凸壳法;三维点云;激光三维扫描

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A

Measurement of human figure size based on laser 3D scanning

TIAN Qing-guo, GE Bao-zhen, DU Pu, YU Dao-yin, LU Qie-ni

(*Key Laboratory of Opto-electronics Information and Science of Education Ministry,
Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: A measuring approach for figure size from 3D human point cloud is presented. Using a light-stripe 3D laser scanning system to scan the desired pose of body, human's three-dimensional coordinates are obtained without loss. Based on the directions of eyesight and the natural separating of two legs, the human's orientation is adjusted to facing z positive direction. Applying manual method and maximal connectivity domain method to delete noisy points, 6 figure points and 20 figure planes are labeled on human silhouette. Two different section planes' y coordinates are used to obtain one length size of human and a method, called convex hull method, to measure body section's girth, respectively. Using this technique, the 34 key figure lengths and girth sizes can be measured, and the factors affecting measurement precision can be analyzed. Measurement results show that the typical measurement error of this method is lower than 3% and can meet the requirement of industry.

Key words: human figure size; measurement; convex hull method; 3D point cloud; laser 3D scanning

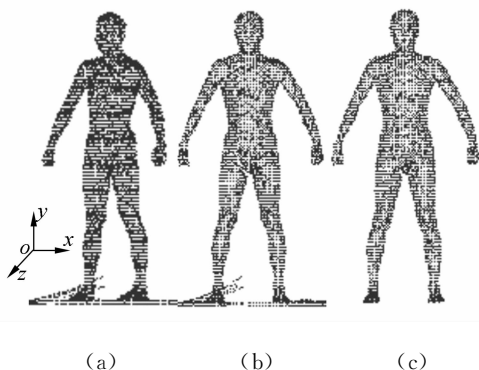
1 引 言

随着激光扫描方法和计算机可视化技术的发展,出现了很多通过各种原理获取物体三维点云信息的方法,如尤红建等^[1]高分辨率航空 CCD 图像和机载稀疏激光扫描测距数据自动提取城市建筑物三维信息的论述;叶海加等^[2]对双目 CCD 结构光三维测量系统中的立体匹配问题的研究等。另一方面,测量物体的三维尺寸数据,对三维物体进行定量的描述变得越来越重要,而传统的尺寸测量方法测量速度慢、精度低、自动化程度不高,很难满足对同一类物体批量快速测量的要求。利用三维点云数据对物体进行测量可以较好地解决传统测量方法的不足。例如周会成等^[3]利用三维点云计算了活塞腔的体积;冯丽爽等^[4]提出将激光线结构光传感器应用于 BGA 芯片管脚三维尺寸的测量,介绍了测量原理和系统结构,推导了测量数学模型;郭鸿等^[5]介绍了一种用于发动机气缸垫及其类似的大尺寸平面薄板状零件测量的基于图像处理的激光扫描三维尺寸测量技术。本文针对人类工效学领域^[6]和服装计算机辅助设计行业^[7]要求对人体多个关键尺寸快速批量测量的需求,提出了通过线结构光激光三维扫描传感器获取人体海量点云数据,然后对点云数据预处理以删除噪声点、方位调整以及确定人体特征点和关键平面^[8,9],进而完成人体关键尺寸自动测量的方法。

2 三维人体点云数据的预处理

本文处理的人体点云数据是应用葛宝臻等^[10]设计的结构光激光三维扫描仪获得的。在扫描过程中,上肢与人体成 $30 \sim 45^\circ$,下肢自然分开使两脚与肩平齐,保证不丢失人体腋窝处和大腿内侧数据。图 1(a)是某人体三维点云数据。在人体轮廓三维扫描过程中人的朝向是随意的,但是在寻找人体特征点的过程中,需要人体有特定的朝向,因此需要方位调整,可以分两步进行:

(1)在人体膝盖附近做一平行于 XOZ 平面的截面和人体下肢相交,形成两条封闭轮廓线,分别称为左肢轮廓线和右肢轮廓线。取这两条轮廓线的几何中心点 $p_l(x_l, y, z_l)$ 和 $p_r(x_r, y, z_r)$ 。通



(a) 原始点云数据 (b) 方位调整之后的点云数据
(c) 删除噪声之后的点云数据
(a) original point cloud (b) point cloud after orient-adjusting (c) point cloud after deleting noise

图 1 人体三维点云数据及预处理

Fig. 1 Human body's 3D point cloud and preprocess

过观察可知,当人体朝向 X 轴正方向或负方向时,线段 $\overline{p_l p_r}$ 与 OZ 轴正方向成 0° 或 180° 。据此,以一定的角度步长旋转人体,当 $\overline{p_l p_r}$ 和 OZ 轴夹角等于 0° 或 180° 时停止,此时人体朝向一定在 X 轴的两个方向之一。

(2)因为人脚尖朝向和视线基本一致,可以据此将人体旋转到 Z 轴正方向。在人的脚踝附近做平行于 XOZ 的平面,取相交轮廓线的几何中心 $p_a(x_a, y, z_a)$ 。在人体的脚底附近取 X 坐标最大和最小的点(为了减小噪声点的影响,可以取平均),记为 $p_1(x_1, y, z_1)$ 和 $p_2(x_2, y, z_2)$ 。如果 $\|x_a - x_1\| > \|x_a - x_2\|$, p_1 必是脚尖点,否则 p_2 是脚尖点。当脚尖点 x 坐标大于 x_a 时,将人体绕 y 轴顺时针旋转 90° (从 y 轴正方向向负方向看),否则逆时针旋转 90° ,这样就将人体旋转到朝向 Z 轴正方向了,如图 1(b)所示。

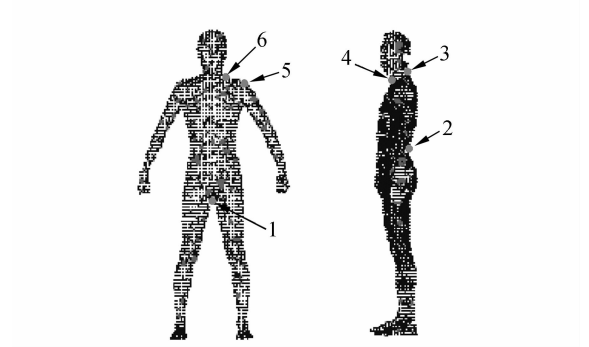
另外,在人体扫描过程中,由于杂散光影响和一些不想要的物体(如人站立的基台)的存在,人体点云数据中不可避免地存在噪声点。删除噪声的方法很多,这里采用手动删除和最大连通域相结合的方法删除噪声,删除噪声之后的点云数据如图 1(c)所示。

3 人体关键尺寸测量

3.1 人体特征点和特征平面的确定

为了测量人体尺寸,首先需要确定人体轮廓

上的特征点和特征平面。这些特征点如图 2 所示。



1. 分叉点 2. 肚脐对应的后腰点 3. 颈部后点 4. 颈部前点 5. 肩与前臂交点 6. 悬挂点
1. Crotch point 2. Bellybutton back point 3. T-point 4. V-point 5. W-point 6. Hanging point

图 2 人体特征点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of figure points on human body

提取人体特征点的过程是相似的,下面仅以提取分叉点为例说明提取特征点的步骤。

- (1) 设置初值 $y_{\text{pos}} = (y_{\text{max}} - y_{\text{min}}) / 2$;
- (2) 以 $y = y_{\text{pos}}$ 作平行于 XZ 平面的截面,计算该截面与人体的交点,同时求出交点集合的中心坐标 $c(x, y, z)$;
- (3) 计算每个交点 p_i 到中心 c 的 x 方向距离 $\text{dist}_i = \|x_{p_i} - x_c\|$,如果所有的 dist_i 均大于给定阈值 thre ,则令 $\text{CrotchPointX} = X_c$,保存 y_{pos} 后转步骤(4),否则 $y_{\text{pos}} = y_{\text{pos}} - \text{step}$ 转步骤(2);

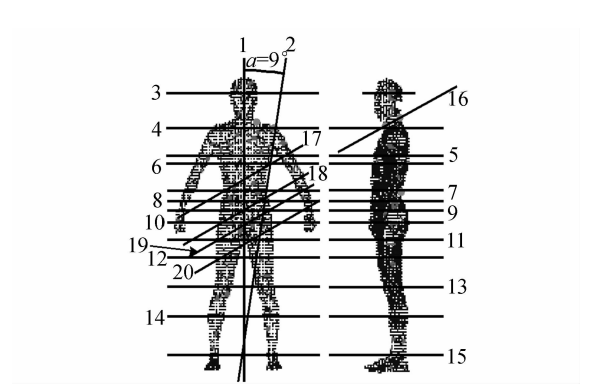


图 3 人体特征平面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of feature planes on human body

(4) 以 $y = y_{\text{pos}} + \text{step}$ 作平行于 XZ 平面的横截人体的平面并计算与人体的交点,在满足 $\|x_{p_i} - \text{CrotchPointX}\| \leq \text{thre}$ 的交点中,具有最小 z 坐标的点即为分叉点。

计算出所需人体特征点之后,可以很方便地确定人体的特征平面。图 3 是测量人体关键尺寸用到的 20 个人体特征平面。表 1 是图 3 中对应特征平面的截面名称一览表。

表 1 图 3 所示人体特征平面一览表

Tab. 1 Figure planes' name in Fig. 3

序号	特征平面名称	序号	特征平面名称	序号	特征平面名称
1	分叉点 X 平面	8	腰下围平面	15	踝围平面
2	肩和上臂交平面	9	臀围平面	16	颈围截面
3	头围平面	10	臀下围平面	17	上臂中截面
4	肩平面	11	分叉点 Y 平面	18	肘围截面
5	胸围平面	12	大腿中部平面	19	前臂中截面
6	胸下围平面	13	膝围平面	20	腕围截面
7	腰围平面	14	小腿中部平面		

3.2 凸壳法测量人体截面周长

确定了人体的特征点和特征平面之后,长度的测量是简单的。如计算膝高的公式为:

$$H_{\text{knee}} = y_{\text{knee}} - y_{\text{min}}, \quad (1)$$

式(1)中 y_{knee} 表示膝围截平面的 y 坐标, y_{min} 表示人体三维点云数据中 y 坐标的最小值, H_{knee} 表示膝高。人体其他长度测量与此类似,下面着重介绍人体截面周长测量方法—凸壳法。凸壳法测量截面周长的基本思想是寻找包围人体截面交点的最小凸包围盒,然后对凸包围盒计算周长。

令特征截面与人体的交点集合为 $P = \{p_i = (x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, n\}$,点集 P 在 XY 平面上的投影点集为 $Q = \{q_i = (x_i', y_i'), i = 1, 2, \dots, n\}$ 。在预处理阶段先计算点集 Q 的中心坐标 q_c ,然后将点集 Q 围绕 q_c 逆时针排序,如果角度一样,按到中心点 q_c 的距离从小到大排序。凸壳法测量周长的示意图如图 4 所示,具体算法如下:

- (1) 从排序好的点集 Q 中取出前两点 q_0 和 q_1 ,保存在凸壳点链表 pConvexHull 中,记为 h_0 和 h_1 ,设置点集 Q 和凸壳点链表的计数器分别为 $i = 2$ 和 $k = 2$;

- (2) 如果 $i < n$, 取点集 Q 中的点 q_i ; 如果 $i = n$, 取 $q_i = q_0$ 保存在 ConvexHull 中, 记为 h_k , 同时 $k = k + 1$;
- (3) 如果 $k > 2$, 取出点 $h_{k-3}, h_{k-2}, h_{k-1}$; 如果 $\Delta h_{k-3} h_{k-2} h_{k-1}$ 的面积 $S > 0$, 转(5), 否则转(4);
- (4) 令 $h_{k-2} = h_{k-1}, k = k - 1$, 返回(3);
- (5) $i = i + 1$, 如果 $i \leq n$, 返回(2), 否则转(6);
- (6) 计算 pConvexHull 中相邻两点的距离和得到人体特征截面多边形的周长, 算法结束。

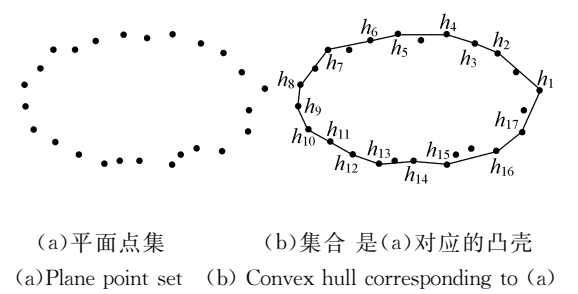


图 4 平面点集和与其相对应的凸壳

Fig. 4 Plane point set and corresponding convex hull

4 人体关键尺寸测量结果和误差分析

4.1 人体尺寸测量结果

用 C++ 语言实现上述算法, 对大量的人体点云数据进行尺寸测量。表 2 是图 1(a) 所示人体点云的关键尺寸。

表 2 图 1(a) 人体的关键尺寸 未注单位: cm

Tab. 2 Human figure sizes in Fig. 1(a) unit unmarked: cm

头 部 主 要 尺 寸					
头高	26.5	头围	54.6	颈围	37.6
躯 干 主 要 尺 寸					
身高	179.6	躯干纵 周长	159.8	脐高	107.7
前胸长	45.5	后背长	46.1	袖孔高	23.1
前胸宽	38.3	后背宽	38.2	身体倾角(°)	8.52
胸围	92.4	胸下围	88.4	腰围	73.5
腰下围	75.2	臀围	90.1	臀下围	94.7
上 肢 主 要 尺 寸					
半肩宽	22.9	斜半肩宽	23.9	上臂长	36.9
下臂长	31.1	上臂围	28.6	肘围	24.9
下臂中围	25.5	腕围	16.7		
下 肢 主 要 尺 寸					
会阴高	81.2	裆深	26.5	膝高	43.7
大腿围	60.5	大腿中围	43.9	膝围	33.8
小腿中围	33.5	踝围	29.3		

4.2 误差分析

影响人体尺寸测量精度的因素主要有两方面, 一是三维点云获取过程, 另外是测量过程^[7]。

本文用线结构光激光三维扫描仪完成人体扫描的时间大约在 17 s 左右, 在这个过程假设人体不会有姿势和位置的变化。但是在实际扫描时, 很难保证人体静止不动, 这样就会给后续的测量带来影响。另一方面, 在测量人体某些部位的尺寸时, 需要人体有特定的姿势。例如测量手臂的长度和截面周长, 要求手臂必须是伸直而且和躯干成一定夹角。手臂伸不直将直接影响臂长的测量; 手臂和躯干的夹角太小会导致上臂围和躯干不能分开, 从而导致测量误差较大。

在测量过程中引入的误差主要包括方法误差和离散误差。方法误差体现为用凸壳法计算截面周长时是寻找包围截面交点的最小凸包围盒, 如图 4(b) 所示, 显然这样的处理方法会导致测量结果偏大。

人体横截面是连续的光滑曲线, 用分段直线代替光滑曲线计算周长势必带来离散误差。光滑曲线周长为

$$\text{Girth} = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \Delta L_i, \tag{2}$$

离散误差可以表示为:

$$e = \sum_{i=1}^N \Delta L_i - \text{Girth} = \sum_{i=1}^N \sqrt{[(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2]} - \text{Girth}, \tag{3}$$

在式(3)中, 当 $i = N$ 时, $i + 1$ 又开始取第一个点, 以形成封闭多边形。从式(3)可以看出, 扫描时两点间的间距愈小, 离散误差愈小。离散误差会使测量结果偏小。

5 结 论

本文给出了用线结构光激光三维扫描仪获得人体三维点云, 然后测量人体关键尺寸的方法。该方法确定了描述人体关键部位的 6 个特征点和 20 个特征平面, 测量和计算了人体 34 个关键尺寸。整个过程包括三维扫描时间 17 s 左右, 数据预处理少于 1 s, 测量时间少于 5 s, 能够满足人体关键尺寸快速自动测量的要求。应用该方法测量了 100 组数据(男女各 50 人)。关键尺寸, 如身高、胸围、腰围以及臀围和真实人体尺寸相比较,

误差均在 3% 以内,说明该方法能够满足精度要求。另外该扫描系统和测量方法还能够用于其他相对大型物体的尺寸测量,日益显示出设备简单,算法可靠,测量速度快,精度高等优点。

参考文献:

- [1] 尤红建,张世强.组合 CCD 图像和稀疏激光测距数据的建筑物三维信息提取[J]. 光学 精密工程,2006,14(2):297-302.
YOU H J, ZHANG SH Q. Reconstructing 3D buildings based on airborne CCD image and laser scanning rangefinder data[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 297-302. (in Chinese)
- [2] 叶海加,陈昱,邢渊.双目 CCD 结构光三维测量系统中的立体匹配[J]. 光学 精密工程,2004,12(1):71-75.
YE H J, CHEN G, XING Y. Stereo matching in 3D measurement system using double CCD structured light[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1):71-75. (in Chinese)
- [3] 周会成,陈吉红,黄生华,等.用三维点云计算活塞腔的体积[J]. 现代测量与实验室管理,2003,(2):16-17.
ZHOU H CH, CHEN J H, HUANG SH H, *et al.*. Calculating piston's volume using 3D point cloud[J]. *Mod. Meas. Lab. Manag.*, 2003, (2):16-17. (in Chinese)
- [4] 冯丽爽,孙长裤,叶声华.BGA 芯片管脚三维尺寸测量技术[J]. 工具技术,2000,34(5):29-31.
FENG L SH, SUN CH K, YE SH H. Three-dimensional measuring technology for BGA chip leads[J]. *Tool Eng.*, 2000, 34(5):29-31. (in Chinese)
- [5] 郭鸿,邓烽,张靖,等.基于图像处理的激光扫描三维尺寸测量技术的研究[J]. 工具技术,2004,38(11):75-78.
GUO H, DENG F, ZHANG J, *et al.*. Research on laser scanning 3D measurement technology based on image processing[J]. *Tool Eng.*, 2004, 38(11):75-78. (in Chinese)
- [6] 刘宝善,郭小朝,马雪松.中国男性飞行员人体尺寸测量实用性特征[J]. 人类工效学,2002,8(4):1-3.
LIU B SH, GUO X CH, MA X S. Practical feature of human body sizes measurement from Chinese male pilots[J]. *Ergonomics*, 2002, 8(4):1-3. (in Chinese)
- [7] 邹红芳.人体尺寸测量 CAT 及服装 CAD 系统[J]. 安徽机电学院学报,2000,15(4):29-31.
WU H F. CAT for measuring figure size and system of clothing CAD[J]. *J. Anhui Inst. Mech. Electric. Eng.*, 2000, 15(4):29-31. (in Chinese)
- [8] SOLINGER J. *Apparel manufacturing handbook: analysis, principles and practice*[M]. Columbia, SC: Bobbin Media Corp, 1988.
- [9] TAYLOR P J, SHOBEN M M. *Grading for the fashion industry: the theory and practice*[M]. Cheltenham: England Thornes, 1990.
- [10] 葛宝臻,孙明睿,吕且妮,等.光带法激光三维人体扫描系统研究[J]. 光电子·激光,2003,14(7):733-736.
GE B ZH, SUN M R, LU Q N, *et al.*. Research of a laser 3D body scanning system by light stripe method[J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2003, 14(7): 733-736. (in Chinese)

作者简介:田庆国(1973—),男,在读博士生,主要研究方向为计算机可视化和图像图形学. E-mail: tianqg_zhwx@163.com