

线激光人体三维扫描仪多传感器同步标定方法

李云鹏 田庆国 张翔宇 魏耀林 葛宝臻

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 为了快速准确标定线激光人体三维扫描仪, 提出一种使用精密移动陶瓷量块标定靶的多传感器同步标定方法。利用线激光在陶瓷量块 4 个方向产生的 V 形光带顶点作为标定点, 由位于扫描仪 4 个立轴上的 8 个 CCD 相机同时记录 V 形光带图, 采用灰度质心算法和双直线拟合求交点的方法提取 V 形光带角点的亚像素坐标, 与二维平移台对应的世界坐标, 形成精密标定点对。基于针孔摄像机模型, 采用 Levenberg-Marquardt (LM) 非线性优化算法得出每个 CCD 的标定矩阵, 完成多传感器同步标定。使用与标定点坐标不同的特征点对标定结果进行了验证, 结果表明, 各传感器的平均投影误差优于 0.3480 mm, 标准差优于 0.2524 mm。

关键词 机器视觉; 同步标定; 陶瓷量块; 人体三维扫描仪

中图分类号 TP791 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1008006

Multi-Sensor Synchronous Calibration Method for Line Laser Human-Body 3D Scanner

Li Yunpeng Tian Qingguo Zhang Xiangyu Wei Yaolin Ge Baozhen

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education,

School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract In order to calibrate line laser human-body 3D scanner quickly and accurately, a multi-sensor synchronous calibration method which uses ceramic gauge block is proposed. V-shaped laser stripe which is made by line laser projection on ceramic gauge block is used as calibration point. 8 CCDs are distributed on 4 uprights, and capture V-shaped light stripe simultaneously to record V-shaped laser stripe pattern. Use gray centroid algorithm and dual fitting line intersection method to extract the light band's sub-pixel-precision center grid. In order to obtain precision calibration point grid pairs, the grids are paired with 2D translation stage's world grids. Based on pinhole camera model and using Levenberg-Marquardt (LM) nonlinear optimization algorithm, all sensors' calibration matrices are obtained. The calibration results are tested by feature points which are different from calibration points, and the result shows that all sensors' average projection errors are less than 0.3480 mm, standard deviations are less than 0.2524 mm.

Key words machine vision; synchronous calibration; ceramic gauge block; human-body 3D scanner

OCIS codes 150.1488; 150.4232; 150.6910

1 引言

线激光人体三维扫描仪可广泛应用于人体工学设计、电子化量身定制(eMTM)、三维试衣与快速成衣系统以及人体动画制作等领域^[1-4]。其原理是激光器发出的线激光被待测人体表面调制, CCD 相机

采集人体表面散射的变形光带, 从变形的光带信息恢复待测人体的三维轮廓信息, 获得三维点云数据。为了得到完整的人体表面三维点云, 采用多组三维传感器并辅以机械扫描装置。人体表面三维轮廓数据获取的关键技术之一, 是线激光人体三维扫描仪

收稿日期: 2013-02-26; 收到修改稿日期: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61027012, 61177002)

作者简介: 李云鹏(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事三维数字化技术研究。E-mail: liyunpengtj@139.com

导师简介: 葛宝臻(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事粒度检测和三维数字化技术等方面的研究。

E-mail: gebz@tju.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

的标定。所谓标定,一是传感器每个 CCD 摄像机内部参数的标定,以及传感器每个 CCD 像素坐标系和世界坐标系之间变换关系的标定;二是多传感器数据坐标统一到同一世界坐标系下。

标定方法主要有 Tsai 的两步法^[5]和张正友的平面标定法^[6],以及基于这些方法的改进方法。这些方法使用固定或移动的一维、二维和三维标定靶:如两正交一维物体组成的 T 字靶^[7];用于标定多摄像机的自由运动一维靶^[8];传统固定棋盘格靶^[9];渐变圆形格标定靶^[10];自由移动的二维同心圆靶^[11];带有特征点的同心圆靶^[12];可旋转的二维动态精密靶^[13]以及空间球形标定靶^[14]等。

多传感器坐标统一方法,主要有三类^[15]:1) 对于无公共视场的多传感器标定,使用经纬仪与传感器同步测量标志点,达到坐标系的同名统一^[16];2) 利用自由移动一维标定靶作为中介,多次移动标定靶,求解出摄像机间的坐标变换矩阵,达到坐标统一^[8];3) 直接使用三维动态精密标定靶在同一世界坐标系下对多传感器进行标定,无需坐标转换^[13]。

本文针对线激光人体三维扫描仪的特点,使用陶瓷量块作为标定靶,在二维电动平移台的驱动下,可提供任意多个高精度的世界坐标点;根据陶瓷量块表面的良好散射特性和 V 形光带特征,采用灰度质心算法和双直线拟合求交点算法相结合的 V 形光带角点亚像素坐标提取算法;利用非线性优化求解世界坐标与像素坐标的数学关系,完成 8 个 CCD 的标定,实现人体扫描仪中 4 组传感器的同步标定。该方法一次调试即可完成标定,不仅减少了调节误差,而且大大缩短了标定时间。

2 标定原理

2.1 人体三维扫描仪同步标定原理

人体三维扫描仪中的一组三维传感器如图 1(a)所示,两个 CCD 相机相对于半导体线激光器发出的水平光平面对称。扫描仪的 4 组传感器分布如图 1(b)所示,4 组三维传感器围成一正方形,保证 4 个激光光平面到同一水平位置,同时在 4 个方向提供标定靶,同时标定四组传感器。基于针孔摄像机模型,三维传感器采集变形光带位图的过程相当于从世界坐标系 $X_w Y_w Z_w$ 到计算机像素坐标系 uv 的线性变换过程。如果设光平面上 $Z_w = 0$, 该变换关系可表示为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 s 是一比例常数; (u, v) 是像素坐标,以像素为单位; (X_w, Y_w) 是世界坐标,以 mm 为单位; \mathbf{H} 为 3×3 的单应矩阵,元素为 $h_{ij} (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3)$ 。矩阵 \mathbf{H} 中有 9 个未知数,通常采用 Levenberg-Marquardt (LM) 非线性优化算法求解矩阵 \mathbf{H} ^[17], 目标函数可定义为:

$$\sum_{i=1}^n \| m_i - m(\mathbf{H}) \|^2, \quad (2)$$

式中 n 是标定点对的个数, m_i 是像素坐标系中第 i 个标定点, $m(\mathbf{H})$ 代表对应世界坐标点经 \mathbf{H} 矩阵投影到像素坐标系中的点, $\| \cdot \|$ 代表两点之间的欧氏距离。优化的过程就是使(2)式的目标函数达到最小。

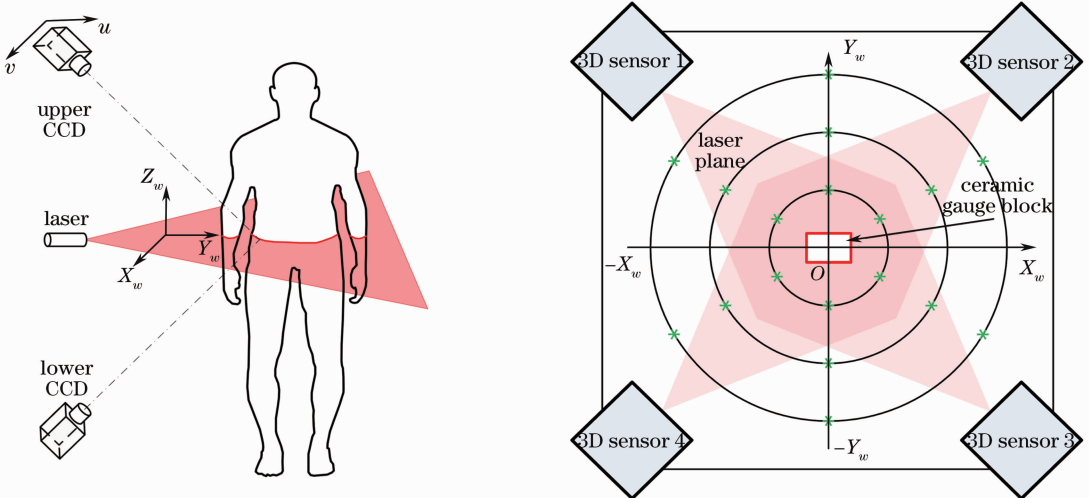


图 1 (a)一组三维传感器和(b)多传感器同步标定的示意图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of one group 3D sensor and (b) multi-sensor synchronous cablration

图 2 为精密移动的陶瓷量块靶标实物图,二维平移台驱动矩形陶瓷量块靶标按预定轨迹(如同心圆环)运动。陶瓷量块的每条竖直棱边朝向一组三维传感器,水平光滑面和陶瓷量块竖直棱边相交,形成如图 3 所示 V 形光带,其顶点作为标定点。在圆形轨迹的每个节点[图 1(b)中的“*”标记点]位置,4 组三维传感器中的 8 个 CCD 相机同步采集 V 形光带位图,同时记录该节点的世界坐标。提取位图中 V 形光带顶点像素坐标,得到标定点对。最后利用(1)式和(2)式完成 CCD 的标定。由于 4 组传感器是在同一世界坐标系中同步完成标定点对的采集,因此在完成 CCD 标定的同时也实现了多传感器的全局标定。

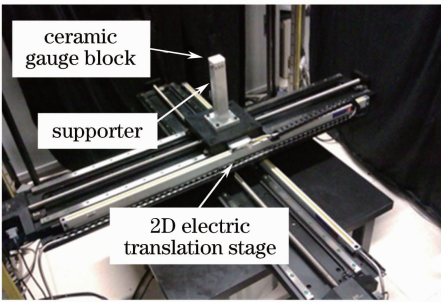


图 2 陶瓷量块靶标和二维平台照片

Fig. 2 Photo of 2D translation stage with ceramic target

2.2 V 形光带顶点亚像素坐标提取

光带中心的提取算法有:极值法^[18]、灰度质心

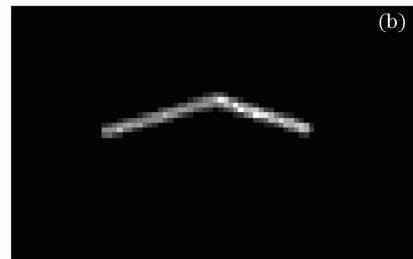
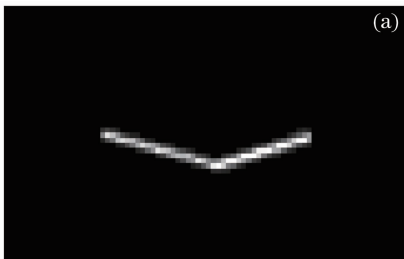


图 4 V 形光带位图。(a) 上 CCD 采集;(b) 下 CCD 采集

Fig. 4 V-shape laser stripe image. (a) By upper CCD; (b) by lower CCD

提取 V 形光带顶点像素坐标的步骤分以下 3 步:

1) 计算光带中心线。由于 V 形光带形状简单,因此采用精度较高且运算速度快的列扫描灰度质心算法计算光带中心线,可达到亚像素精度。灰度质心法计算公式为

$$\begin{cases} u_c = u_i \\ v_c = \frac{\sum_{j=1}^n I(u_i, v_j) \cdot v_j}{\sum_{j=1}^n I(u_i, v_j)} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $I(u_i, v_j)$ 为坐标 (u_i, v_j) 处的灰度值, u_i 为横坐

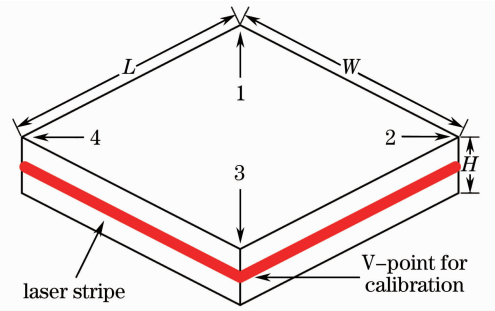


图 3 陶瓷量块上 V 形光带示意图

Fig. 3 Schematic diagram of V-shape laser stripe on ceramic target

法^[19]、方向模板法^[20]、曲线拟合法^[21]、海森矩阵法^[22]等。其中,曲线拟合法和海森矩阵法的稳健性较好,能较为精确地获取光带中心坐标。但在光带几何形状简单且处理实时性要求较高的条件下,灰度质心法也可获得较好的效果。

考虑线激光在陶瓷量块形成的 V 形光带基本均匀,每个边为单一直线的特点,提出了采用灰度质心算法和双直线拟合求交点相结合的方法,该方法充分利用整条 V 形光带的灰度信息,在采用灰度质心算法提取光带中心线的基础上,分别拟合 V 形光带的两边并求交点作为 V 形光带的顶点。

图 4 为一组三维传感器中的上下 CCD 相机实际采集的 V 形光带位图,其中上 CCD 采集的光带成正 V 字形,下 CCD 采集的光带成倒 V 字形。

标, v_j 为纵坐标, n 为光带在列方向的宽度。

2) 直线段拟合。根据 CCD 采集 V 形光带位图的特点,对上 CCD 采集的 V 形光带位图,在已提取的光带中心线中找出纵坐标最小的点,如图 5 中的红色圆圈点 A。点 A 也是近似的 V 形光带的顶点。基于顶点 A 将光带中心线分成左右两部分,即点 A、B 之间的光带中心线和点 A、C 之间的光带中心线。最后利用最小二乘算法拟合得到两条直线,如图 5 中的 l_{left} 和 l_{right} , 直线方程分别为 $y = k_{left}x + b_{left}$ 和 $y = k_{right}x + b_{right}$ 。对下 CCD 采集的 V 形光带位

图,处理方法类似,只是改为找光带中心线中纵坐标最大的点。

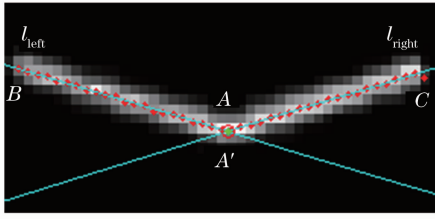


图 5 V 形光带顶点亚像素坐标提取示意图

Fig. 5 Schematic diagram of extraction of V-shape laser stripe vertex

3) 计算两条直线 l_{left} 和 l_{right} 的交点,得到 V 形光带顶点亚像素坐标。交点计算公式为

$$\begin{cases} u_{peak} = -\frac{b_{right} - b_{left}}{k_{right} - k_{left}} \\ v_{peak} = \frac{k_{right}b_{left} - k_{left}b_{right}}{k_{right} - k_{left}} \end{cases} \quad (4)$$

图 5 中绿色实心点 A' 即为提取出的 V 形光带顶点。

3 实验结果与分析

3.1 实验装置介绍

为验证所提出的标定方法,以本实验室自主研发的线激光人体三维扫描仪样机为实验装置。扫描仪样机如图 6 所示:4 根立轴围成一正方形,每个立轴上安装一组三维传感器,为方便后面的研究,各三维传感器中上 CCD 标号分别为 0~3,对应下 CCD 的标号为 4~7。在精密运动装置的驱动下,传感器

上下运动以实现对人体表面的扫描,扫描大小为 $\phi 1000 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$,CCD 相机型号为 Adimec 1000 m/D,分辨率 $1004 \text{ pixel} \times 1004 \text{ pixel}$,配焦距为 6 mm 的镜头。



图 6 人体三维扫描仪

Fig. 6 Human-body 3D scanner

如图 2 所示,二维电动平移台行程为 1000 mm,安装光栅尺,其精度为 $1 \mu\text{m}$,可以得到标定点高精度的世界坐标。标定靶选择 0 级陶瓷量块,三维尺寸为 $40 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ 。

3.2 标定实验与结果分析

在标定点采集过程中,二维平移台驱动标定靶沿同心圆环轨迹运动,同心圆半径为 $N \times 50 \text{ mm}$, N 为同心圆环序号,取值 1~8。在每个圆环上,以 $10^\circ + M \times 20^\circ$ 间隔设置节点, M 为 $[0, 17]$ 内的整数。包含坐标原点,每个 CCD 采集的标定点总数为 145 个。图 7 是 CCD 0 采集的 V 形光带位图并提取顶点后的像素坐标分布情况。表 1 是 CCD 0 采集的标定点世界坐标和像素坐标。

表 1 CCD 0 采集的标定点世界坐标和像素坐标

Table 1 World and pixel coordinate of calibration points for CCD 0

Point No.	World coordinates /mm		Pixel coordinates /pixel		Point No.	World coordinates /mm		Pixel coordinates /pixel	
	X_w	Y_w	u	v		X_w	Y_w	u	v
1	0.0000	-0.0100	525.3912	139.4750	2	-8.6790	-49.2110	490.7680	132.3050
3	-24.9950	-43.3000	484.6301	136.5135	4	-38.2960	-32.1230	483.2114	141.2490
5	-46.9800	-17.0860	486.9546	145.8983	6	-49.9960	0.0150	495.4907	149.7988
7	-46.9690	17.1020	508.1640	152.5629	8	-38.2860	32.1410	522.9456	153.6532
		⋮					⋮		
139	306.4110	257.1100	852.1198	125.7740	140	375.8800	136.8040	792.4162	94.8108
141	400.0000	-0.0040	715.6320	73.3563	142	375.8560	-136.7950	629.6987	60.5395
143	306.4030	-257.0960	540.0096	55.8147	144	200.0060	-346.3900	450.6463	59.0042
145	69.4630	-393.9200	363.4822	70.0061					

使用 OpenCV 函数库中的 cvFindHomography() 函数实现满足式(2)的 LM 非线性优化,完成 CCD 的标定。8 个 CCD 的标定结果如表 2 所示。

表 2 8 个 CCD 的标定矩阵
Table 2 8 CCDs' calibration matrices

CCD No.	h_{11}	h_{12}	h_{13}	h_{21}	h_{22}	h_{23}	h_{31}	h_{32}	h_{33}
0	0.8708	0.3317	525.37	-0.1244	0.1092	139.44	0.0006	-0.0005	1.0000
1	-0.3023	0.8584	509.89	-0.0848	-0.0974	179.36	0.0005	0.0005	1.0000
2	-0.8811	-0.3096	513.12	0.0944	-0.0789	201.70	-0.0006	0.0006	1.0000
3	0.3271	-0.8792	511.85	0.0752	0.0787	204.93	-0.0006	-0.0006	1.0000
4	0.8682	0.3087	544.38	0.6442	-0.6258	802.28	0.0006	-0.0005	1.0000
5	-0.3180	0.8689	510.47	0.6444	0.6552	846.52	0.0005	0.0005	1.0000
6	-0.8935	-0.3168	528.96	-0.6642	0.6715	832.58	-0.0005	0.0006	1.0000
7	0.3324	-0.8732	515.67	-0.6486	-0.6680	816.32	-0.0005	-0.0006	1.0000

通常采用重投影误差评价标定结果^[17]。为说明标定结果对整个测量面上的点均有效,重新采集与标定不一样的特征点,采用这些点向世界坐标的投影误差评价标定结果。特征点在同圆心环上的位置定义为 $M \times 20^\circ (M=0, 1, \dots, 17)$, 同心圆环的

半径为 $N \times 50 \text{ mm}$, $N=1 \sim 8$, 总计 144 个位置。采用 2.2 节的方法计算特征点的像素坐标, 并通过对应的标定矩阵投影到世界坐标系, 得到投影世界坐标点 $(X_{p,i}, Y_{p,i}), i=1 \sim 144$ 。以投影误差及其标准差作为评价指标, 其定义为

$$\begin{cases} E_{r_i} = \sqrt{(X_{r,i} - X_{p,i})(X_{r,i} - X_{p,i}) + (Y_{r,i} - Y_{p,i})(Y_{r,i} - Y_{p,i})} \\ \bar{E}_{rr} = \frac{1}{n} \sum E_{r_i} \\ \sigma = \sqrt{\frac{\sum (E_{r_i} - \bar{E}_{rr})^2}{n - 1}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 E_{r_i} 代表世界坐标下真实点与投影点之间的距离, 即投影误差, $(X_{r,i}, Y_{r,i})$ 是光栅尺测量得到的世界坐标, \bar{E}_{rr} 代表投影误差平均值, σ 代表投影误差标准差, n 是采样点数。

表 3 给出 8 个 CCD 投影误差最大值、最小值、平均值以及标准差。从表中可以看出, 每个 CCD 的平均投影误差均优于 0.3480 mm, 标准差均优于 0.2524 mm, 最大投影误差为 1.5913 mm, 最小投影误差为 0.0037 mm, 其中, 最大投影误差发生在 2 号 CCD, 使用误差理论的 3σ 准则对 2 号 CCD 的投影

误差进行分析, 根据表 3 的标准差为 0.2295 mm, $3\sigma=0.6885 \text{ mm}$, 最大投影误差 $1.5913 \text{ mm} > 0.6885 \text{ mm}$, 落在 $\pm 3\sigma$ 以外, 其概率为 0.3%, 可视作偶然粗大误差, 对于 2 号 CCD, 99.7% 的点的投影误差小于 0.6885 mm。因此, 应用所提出的标定方法可以得到较好的结果。图 8 是 CCD 0 采集的特征点和投影点世界坐标分布图。图中小圆圈表示原始特征点, 黑点表示投影世界坐标点。从图中可以看出, 黑点全部在圆圈的圆心附近, 直观地验证了标定结果的精度。

表 3 8 个 CCD 的投影误差
Table 3 8 CCDs' projection error

CCD No.	Minimum error / mm	Maximum error / mm	Average error / mm	Standard deviation / mm
0	0.0308	1.2753	0.3196	0.2139
1	0.0050	1.1183	0.2718	0.1857
2	0.0286	1.5913	0.3480	0.2295
3	0.0278	0.7064	0.1955	0.1155
4	0.0253	0.9240	0.2286	0.1585
5	0.0119	1.3582	0.3118	0.2206
6	0.0037	1.4669	0.3100	0.2524
7	0.0072	1.0688	0.2656	0.1543

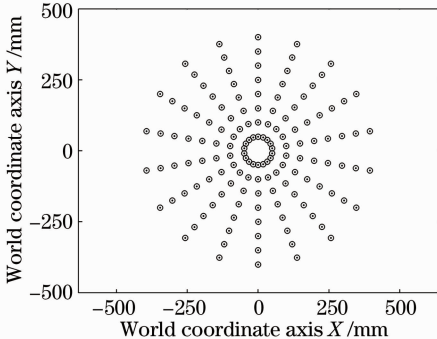


图 8 CCD 0 的特征点和投影点世界坐标分布

Fig. 8 CCD 0's feature points and projective points distribution on world grids

3.3 真人扫描实验

为了进一步验证所述方法的有效性,将表 2 的标定矩阵应用于扫描仪,对真人模特进行了扫描实验。扫描得到的人体表面点云模型如图 9(a)所示,包含 1278761 个顶点。在图 9(a)中三个横线位置,

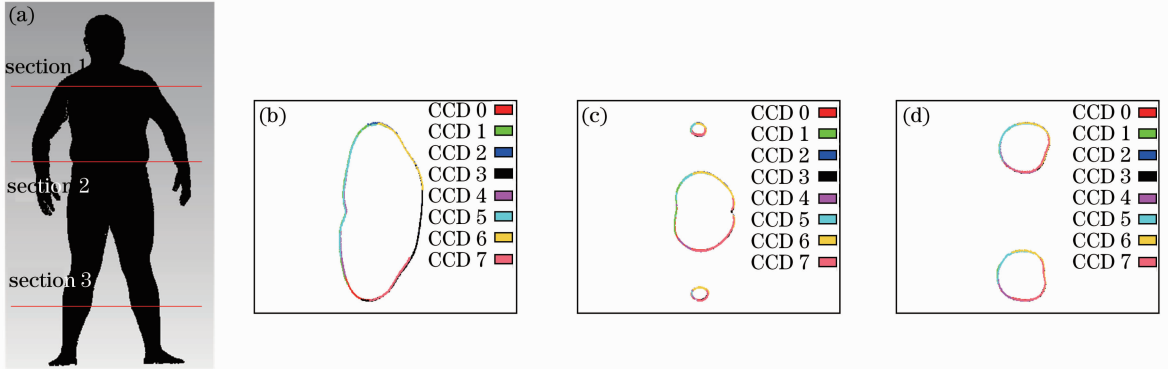


图 9 三维人体扫描仪扫描实例。(a) 真人模特三维点云;(b) 截面 1;(c) 截面 2;(d) 截面 3

Fig. 9 Scanning example of 3D human body scanner. (a) 3D point cloud of real model; (b) section 1; (c) section 2; (d) section 3

4 结 论

针对线激光人体三维扫描仪多传感器标定过程复杂的问题,提出采用二维电动平移台驱动矩形陶瓷量块标定靶实现多传感器的同步标定方法,该方法无需单独局部标定,仅需一次作业,实现 4 组传感器的 8 个 CCD 同时标定。通过全局标定效果验证实验及投影误差分析表明,8 个 CCD 的平均投影误差均优于 0.3480 mm,标准差均优于 0.2524 mm。通过对真实人体的扫描实验及 3D 点云数据结果分析表明,不同 CCD 扫描得到的点云拼接效果良好,证明了所提出方法可靠有效。

参 考 文 献

- 1 Naoufel Werghi. Segmentation and modeling of full human body shape from 3-D scan data: a survey[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2007, 37(6): 1122-1136.
- 2 J Shin, S Ozawa. The feature points extraction for the apparel manufacture from 3D human body scan data[C]. Proceedings of the Ninth IASTED International Conference on Computer Graphics and Imaging. Anaheim, CA, USA: ACTA Press, 2007. 35-40.
- 3 Mingzhu Li, Zhangping Lu, Liqing Huang. An Approach to 3D Shape Blending Using Point Cloud Slicing[C]. Proceedings of the 2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009. 919-922.
- 4 Yan Jiang, Zhengdong Liu, Chunli Chen. Modeling Human Body for Virtual Try-On System[C]. Proceedings of the 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems, Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society, 2009. 441-446.

分别截取一层点云,其结果分别如图 9(b),(c)和(d)所示。不同 CCD 采集的点云用不同颜色标识。从图 9(b),(c)和(d)可以看出,不同颜色点云重合效果良好,点云数据已被正确地拼接到一起,反映了人体表面的特征,说明多传感器全局标定是有效的。

- 5 Roger Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- 6 Z Zhang. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 7 Xue Junpeng, Su Xianyu. Camera calibration with single image based on two orthogonal one-dimensional objects[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0115001.
薛俊鹏, 苏显渝. 基于两个正交一维物体的单幅图像相机标定[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0115001.
- 8 Fu Qiang, Quan Quan, Cai Kaiyuan. Multi-camera Calibration Based on Freely Moving One Dimensional Object[C]. Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, Yantai, China, 2011, 6: 5023-5028.
付强, 全权, 蔡开元. 基于自由运动的一维标定物的多摄像机标定[C]. 中国自动化学会控制理论专业委员会. 中国自动化学会控制理论专业委员会 D 卷[C]. 中国自动化学会控制理论专业委员会, 2011, 6: 5023-5028.
- 9 Yang Xingfang, Huang Yumei, Gao Feng, et al.. New corner detection algorithm of chessboard Image for camera calibration [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1109-1113.
杨幸芳, 黄玉美, 高峰, 等. 用于摄像机标定的棋盘图像角点检测新算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1109-1113.
- 10 Liang Li, Yin Dongfei, Wang Chuan. Design and detection methods for accurate camera calibration targets[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(4): 82-85.
梁力, 尹东斐, 王川. 高精度摄像机标定模板的设计及识别算法[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(4): 82-85.
- 11 Wang Huifeng, Wang Bingjian. Camera radial distortion calibrating method based on moving characteristic target[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512007.
王会峰, 王炳健. 移动特征靶标的摄像机径向畸变标定[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512007.
- 12 Chen Xinyu, Ma Zi, Chen Tianfei. Calibration model for line structured light vision sensor [J]. Optics and Precision

- Engineering, 2012, 20(11): 2345–2352.
- 陈新禹, 马孜, 陈天飞. 线结构光传感器模型的简易标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2345–2352.
- 13 Ge Baozhen, Li Xiaojie, Qiu Shi. Camera lens distortion correction based on coplanar point direct liner transformation[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 488–494.
- 葛宝臻, 李晓洁, 邱实. 基于共面点直接线性变换的摄像机畸变校正[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 488–494.
- 14 Wang Lin, Cao Jianfu, Han Chongzhao. A calibration algorithm for 3D laser scanner based on spatial sphere[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(4): 79–85.
- 汪霖, 曹建福, 韩崇昭. 基于空间球的三维激光扫描仪标定算法[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(4): 79–85.
- 15 Zhang Guangjun. Vision Measurement[M]. 1st Edition, Beijing: Science Press, 2005. 180–206.
- 张广军. 视觉测量[M]. 第一版, 北京: 科学出版社, 2005. 180–206.
- 16 Zhang Hongtao, Duan Fajie, Wang Xueying, *et al.*. Technique of unifying the coordinates of multi-sensor visual measuring system[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(4): 1301–1304.
- 张洪涛, 段发阶, 王学影, 等. 多传感器视觉测量系统坐标统一技术研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(4): 1301–1304.
- 17 Guo Tao, Da Feipeng, Fang Xu. Camera calibration under small field of view[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0808001.
- 郭涛, 达飞鹏, 方旭. 小视场环境下的摄像机标定[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0808001.
- 18 Sun Changku, Ye Shenghua. Laser Measurement Technology [M]. 1st Edition, Tianjin: Tianjin University Press, 2001. 129–139.
- 孙长库, 叶声华. 激光测量技术[M]. 第一版, 天津: 天津大学出版社, 2001. 129–139.
- 19 Wang Shun, Xu Jingzhu, Zhang Yixin, *et al.*. Reliability evaluation method and application for light-stripe-center extraction[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1115001.
- 王顺, 徐静珠, 张益昕, 等. 结构光光条中心点信度评价方法与应用[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1115001.
- 20 Hu Bin, Li Dehua, Jin Gang, *et al.*. New method for obtaining the center of structured light stripe by direction template[J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(11): 59–60.
- 胡斌, 李德华, 金刚, 等. 基于方向模板的结构光条纹中心检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(11): 59–60.
- 21 Xie Zexiao, Xin Yuexiang, Jin Ming, *et al.*. Influence on the accuracy of structured-light sensors by the brightness of laser stripe[J]. Optical Technique, 2008, 34(12): 52–54.
- 解则晓, 辛悦向, 金明, 等. 光条亮度对线结构光测量精度的影响[J]. 光学技术, 2008, 34(12): 52–54.
- 22 Zhang Xuping, Wang Jiaqi, Zhang Yixin, *et al.*. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315002.
- 张旭苹, 汪家其, 张益昕, 等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315002.

栏目编辑: 李文喆