

超大尺度线结构光传感器三维测量系统外参数标定

解则晓, 朱瑞新*, 张安祺

中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100

摘要 为了满足大型自由曲面工件高精度实时三维测量的需求,设计了一种超大尺度线结构光传感器三维测量系统,并提出一种基于一维靶标的传感器外参数的现场标定方法。实验结果表明,该方法的标定精度与基于平面靶标的方法相当,且其一维靶标的高精度制作更容易,外参数的现场标定过程操作更方便,更适合超大尺度线结构光传感器的现场标定。

关键词 测量; 超大尺度线结构光; 外参数现场标定; 一维靶标; 消隐点

中图分类号 TP212.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1004003

Extrinsic Parameters Calibration of Three-Dimensional Measurement System for Ultra-Large Scale Line-Structured Light Sensor

Xie Zexiao, Zhu Ruixin, Zhang Anqi

College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

Abstract In order to meet the requirements of high-precision real-time three-dimensional measurement of large-size free-form surface workpieces, a three-dimensional measurement system for an ultra-large scale line-structured light sensor is designed and an onsite calibration approach for the extrinsic parameters of this sensor based on one-dimensional targets is proposed. The experimental results show that the proposed calibration method has a equivalent accuracy to compare with that of the planar-target-based method. Moreover, the proposed calibration method is easier for the accurate fabrication of the one-dimensional targets, more convenient for the onsite calibration process of the extrinsic parameters, and more suitable for the calibration of ultra-large scale line-structured light sensor.

Key words measurement; ultra-large scale line-structured light; extrinsic parameters onsite calibration; one-dimensional target; vanishing point

OCIS codes 120.5800; 150.1488; 150.6910; 120.4820

1 引言

线结构光传感器具有非接触性、高效率、高精度等特点,被广泛应用于逆向工程和质量控制中,是解决在线测量问题的有效方案之一。对于工业生产中大型自由曲面工件(如大型铸件、动车车门等)的三维高精度在线实时测量,小视场线结构光传感器无法满足其高效测量的要求,需要使用超大尺度线结构光传感器^[1-4]。线结构光传感器由摄像机和线激光器组成,通过标定出线结构光传感器的内参数,利用摄像机内参数和激光光面在摄像机坐标系下的方程,能测得工件某一截面的三维信息;为获得物体的整体三维形貌,通常将线结构光传感器与高精度平移或旋转运动机构结合,并标定出摄像机坐标系与运动机构之间的关系^[5-6],即线结构光传感器的外参数。

收稿日期: 2017-05-04; 收到修改稿日期: 2017-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(61571478)

作者简介: 解则晓(1968—),男,博士,教授,主要从事机器视觉、机器人控制及机器人测量方面的研究。

E-mail: xiezexiao@ouc.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zrxjanel226@163.com

对于线结构光的光面参数标定,刘震等^[7-8]采用平面靶标进行了标定,而超大尺度线结构光光面参数的现场标定需要使用高精度、大尺寸的靶标,为了便于现场操作,主要考虑一维靶标。周富强等^[1-2]以一维靶标上特征点间的距离为约束进行了标定;刘冲等^[3]采用多个自由组合且相对位置固定的一维靶标进行了大尺度线结构光传感器的标定。

对于平移扫描的线结构光传感器外参数的标定,通常使用辅助设备将扫描方向与激光平面调整至垂直,不同传感器位置下采集到的三维数据可以直接通过平移统一到基准坐标系下^[9],该方法的测量精度依赖于校准精度,系统校准难度大。Santolaria 等^[10]使用带有非共面特征点的三维靶标,通过激光投射在靶标上形成非共线标定点,由三坐标测量机测得靶标位置,从而完成了线结构光传感器内外参数的同步标定,其标定过程复杂。Che 等^[11-12]以标准球为靶标,球心视为标定点,通过三坐标测量机控制传感器采集标准球轮廓,拟合最大圆的圆心来计算球心,每次只能得到一个标定点,且标定点的提取过程复杂。Cui 等^[13]使用一个有刻痕的立体靶标,通过扫描靶标表面的不同区域获取多个标定点,能一次性求解标定点。Xie 等^[14]采用二维平面靶标,通过交比不变原理,获得了标定点在图像坐标系和世界坐标系中的位置,完成了小视场线结构光传感器内外参数的同步标定。曾祥军等^[5]采用平面靶标标定系统的平移扫描方向,拟合了不同位置下拍摄的靶标上同一特征点在摄像机坐标系下的直线方程,直线的方向即平移扫描方向。上述方法均采用三维靶标或二维靶标进行线结构光传感器外参数的标定,但对于超大尺度的线结构光传感器,大尺寸三维或二维精密靶标的加工制作困难,且现场标定时操作不便。陈新禹等^[6]采用一维靶标,利用调和共轭理论和交比不变性求出了靶标消隐点,实现了平移轴的标定,但只能解决小视场内测量系统的标定问题。

针对大型工件的在线实时测量问题,本文设计了一种超大尺度线结构光传感器三维扫描测量系统,并针对超大尺度线结构光传感器外参数的现场标定问题,提出了一种基于一维靶标的标定方法。靶标在测量范围内固定,扫描轴带动线结构光传感器平移,摄像机拍摄一系列靶标图像;利用靶标上同一特征点的图像运动轨迹,求解出特征点在摄像机坐标系下的空间运动轨迹的消隐点,利用消隐点的性质标定出扫描轴在摄像机坐标系下的扫描方向。该方法所使用的靶标制作容易,现场标定操作方便。

2 系统组成及工作原理

2.1 系统组成

如图 1(a)所示,超大尺度线结构光传感器由 CCD 摄像机和线激光投射器组成,摄像机与激光器固定在一个水平支架上,二者之间的距离 L_0 为 660 mm,摄像机光轴与激光光面的角度 θ 为 45° ,传感器的最近测量距离 L_1 为 800 mm,最远测量距离 L_2 为 1200 mm,工作深度 L_3 为 400 mm,工作范围内最短激光条长度 L_4 为 800 mm,最长激光条长度 L_5 为 1200 mm。

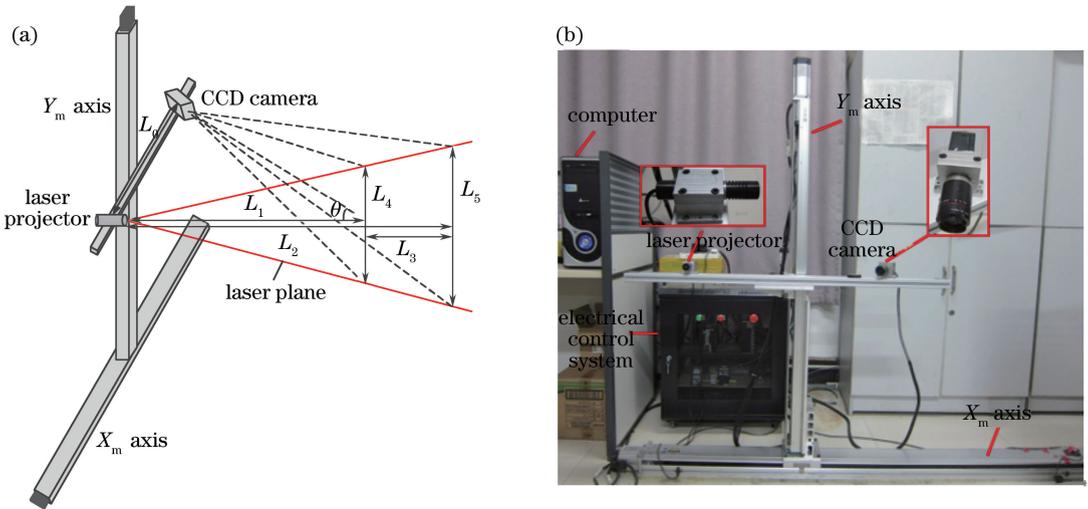


图 1 超大尺度线结构光传感器三维测量系统。(a)线结构光传感器测量范围;(b)系统实物图
Fig. 1 Three-dimensional measurement system with ultra-large scale line-structured light sensor.
(a) Measurement range of line-structured light sensor; (b) physical map of system

L_4 为 580 mm, 最长激光条 L_5 长度为 780 mm; 运动机构由 X_m 轴、 Y_m 轴平移运动平台及其电气控制系统组成, 将超大尺度线结构光传感器固定在 Y_m 轴上, 运动平台可以带动线结构光传感器作上下、左右平移, 以实现大型工件的扫描测量, 系统实物图如图 1(b) 所示。

2.2 系统工作原理

线结构光扫描测量系统的数学模型如图 2 所示, 其中 ouv 为像素坐标系, OXY 为图像坐标系, $o_c x_c y_c z_c$ 为摄像机坐标系; $o_w x_w y_w z_w$ 为测量系统的基准世界坐标系, 取为初始测量时的摄像机坐标系; π_s 为激光平面, π 为图像平面。

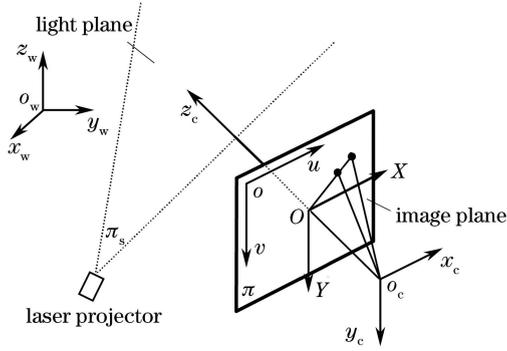


图 2 线结构光扫描测量系统的数学模型

Fig. 2 Mathematical model of line-structured light scanning measurement system

固定被测工件, 将激光投射在工件表面上, 通过摄像机拍摄光条图像, 利用导轨带动线结构光传感器作上下、左右平移, 使激光平面扫描工件, 并提取图像中的光条。通过线结构光内参数标定, 可确定摄像机内参数及结构光光面在摄像机坐标系下的方程 $z_c = A_c x_c + B_c y_c + C_c$, 其中 A_c, B_c, C_c 为光面方程的系数, 从而可将光条上的二维点转化为摄像机坐标系下的三维坐标 (x_c, y_c, z_c) 。通过结构光外参数的标定, 可确定平移扫描轴与摄像机坐标系间的关系, 从而将不同位置下测得的三维坐标统一到系统基准世界坐标系下, 实现工件的三维扫描。因此, 超大尺度结构光内外参数的标定是系统进行三维扫描测量的关键, 其中内参数标定采用文献[4]中的方法, 本文重点研究外参数标定。

3 系统外参数标定

为满足超大尺度线结构光传感器外参数现场标定的需要, 使用图 3 所示的一维靶标进行标定。靶标上的特征点为具有唯一身份的编码点, 编码点由中间亮圆及与其同心的编码带组成, 其背景是边长为 38.5 mm 的黑色正方形, 编码点的高精度提取操作方便^[15]。编码点在靶标上的位置无需精确确定, 靶标制作简单, 操作灵活方便。



图 3 一维靶标实物图

Fig. 3 Physical map of one-dimensional target

一维靶标固定于测量空间内某一位置, 线结构光传感器在运动平台驱动下沿扫描方向平移, 相当于传感器不动而靶标沿扫描方向的反方向移动。求出靶标上编码点的空间运动轨迹在摄像机坐标系下的方向, 就相当于求出了系统扫描轴运动方向的反方向。

设摄像机在 m 个不同测量位置下共抓取了 m 幅靶标图像。如图 4 所示, 靶标上的两个编码点 A, B 在不同摄像机位置下的空间点 A_i, B_i 组成了空间运动轨迹 L_A, L_B , 而 A_i, B_i 的像点 a_i, b_i 构成了图像运动轨迹 $l_a, l_b (i=1, 2, 3, \dots, m)$ 。由消隐点性质可知, l_a, l_b 交于空间平行直线 L_A, L_B 的消隐点 e 。向量 $\vec{o_c e}$ 与平行直线束 L_A, L_B 的方向相同, 表示平移运动轴的扫描方向。

理论上由两个编码点的图像运动轨迹便可求得消隐点, 但考虑到点数太少时单个点的误差对标定结果

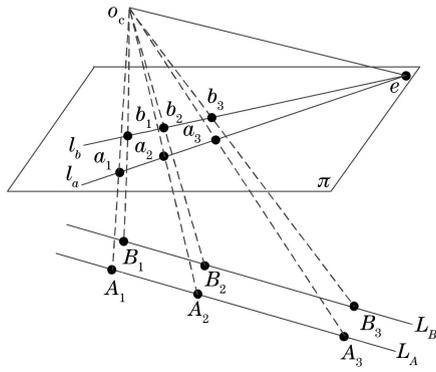


图 4 线结构光传感器外参数标定原理示意图

Fig. 4 Schematic of extrinsic parameter calibration principle in line-structured light sensor

的影响较大,故扫描方向标定时要保证提取出靶标上的所有 n 个编码点,并且将靶标在摄像机视场范围内自由摆放 k 个不同的位姿,在每一个位姿下重复上述拍摄、提取编码点过程,一共得到 $(n \times k)$ 条二维直线。

理想情况下 $(n \times k)$ 条直线相交于同一点,但由于存在环境噪声、运动平台定位误差、镜头畸变、编码点图像提取误差等问题, $(n \times k)$ 条空间平行直线并不相交于同一点,最佳消隐点到 $(n \times k)$ 条直线的距离之和应最小^[16]。通过 $(n \times k)$ 条直线中相邻两条直线两两相交求得 $(n \times k - 1)$ 个消隐点,以 $(n \times k - 1)$ 个消隐点位置的均值作为最佳消隐点的初值,通过 LM(Levenberg-Marquardt) 优化算法,求得最佳消隐点 e 在 ouv 坐标系下的坐标 (u_e, v_e) 。待优化的目标函数为

$$F(u_e, v_e) = \sum_{j=1}^{n \times k - 1} \frac{(a_j u_e + b_j - v_e)^2}{a_j^2 + 1}, \quad (1)$$

式中 a_j, b_j 为第 j 条直线在像素坐标系 ouv 下的直线方程 $v = a_j u + b_j$ 的参数 $(j = 1, 2, \dots, n \times k - 1)$ 。

结合摄像机内参数,可求得最佳消隐点在摄像机坐标系下的坐标,则平移扫描轴在系统基准世界坐标系 $o_w x_w y_w z_w$ 下的扫描方向可表示为

$$\vec{o_c e} = (e_1, e_2, e_3) = \left(\frac{u_e - u_0}{N_x}, \frac{v_e - v_0}{N_y}, f \right), \quad (2)$$

式中 N_x, N_y 分别为图像坐标系 OXY 中 X, Y 轴上每毫米对应的像素数, u_0, v_0 为相机主点在像素坐标系 ouv 中的坐标, f 为摄像机焦距。

系统扫描方向与摄像机坐标系轴夹角的余弦可表示为

$$(\cos \theta_x, \cos \theta_y, \cos \theta_z) = \left(\frac{e_1}{\sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2}}, \frac{e_2}{\sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2}}, \frac{e_3}{\sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2}} \right), \quad (3)$$

式中 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 分别为系统扫描方向与摄像机坐标系 x_c, y_c, z_c 轴的夹角。

由结构光内参数可求得在当前测量位置下,投射在被测物体表面的激光点在摄像机坐标系中的三维坐标 (x_c, y_c, z_c) 。设 d_i 为扫描测量时第 i 个测量位置距初始测量位置的距离,则第 i 次测量得到的激光点在系统世界坐标系下的坐标 (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}) 为

$$\begin{cases} x_{wi} = x_c + d_i \cos \theta_x \\ y_{wi} = y_c + d_i \cos \theta_y \\ z_{wi} = z_c + d_i \cos \theta_z \end{cases} \quad (4)$$

重复上述测量过程,可以得到被测物体表面整体的三维形貌。

4 实验与精度分析

超大尺度线结构光传感器主要由加拿大 Point Gray Research 公司的 GRAS-20S4M-C 的摄像机、日本 KOWA 公司的 15R001 6449 工业镜头、线激光器组成。CCD 阵列的像元尺寸 d 为 $4.4 \mu\text{m}$, 则 $N_x = N_y = 1/d$, 摄像机图像分辨率为 $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$; 镜头焦距的标称值为 12 mm ; 激光器的输出功率为

200 mW, 投射出的激光波长为 650 nm。二维运动机构采用深圳菲格斯公司的两轴直线滑台, 两运动轴的最大速度为 $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 重复定位精度为 $\pm 0.01 \text{ mm}$, X_m 、 Y_m 轴的最大行程分别为 1350 mm、1050 mm; 使用日本松下公司生产的伺服驱动器和电机及深圳雷赛科技公司的 DMC2610 运动控制卡实现电机控制。

4.1 标定实验

在标定出摄像机内参数^[17]和光面参数^[4]的基础上, 利用所提出的方法标定线结构光传感器的外参数。固定靶标, 在扫描轴的带动下平移线结构光传感器, 摄像机抓取一系列靶标图像, 此为—组图像; 变换靶标位置和姿态, 为保证编码点的提取精度, 应使靶标平面的法向量与投影方向的夹角在 70° 以内^[18]; 重复上述拍摄过程, 获取多组靶标图像。得到 X_m 、 Y_m 轴在摄像机坐标系下的扫描方向, 三次标定结果见表 1。

表 1 线结构光传感器的外参数标定结果

Table 1 Extrinsic-parameter calibration results of line-structured light sensor

Calibration No.	X_m -axis calibration result			Y_m -axis calibration result		
	$\cos \theta_x$	$\cos \theta_y$	$\cos \theta_z$	$\cos \theta_x$	$\cos \theta_y$	$\cos \theta_z$
1	0.003299	-0.841863	0.539682	-0.999865	-0.013807	0.008895
2	0.003291	-0.841790	0.539796	-0.999874	-0.013357	0.008542
3	0.003229	-0.841863	0.539682	-0.999883	-0.013062	0.007935

4.2 系统精度测试实验

采用图 5 所示的三个标准球进行系统精度实验, 为防止球面的镜面反射, 在标准球的表面均匀喷涂白色哑光漆。三个标准球 A、B、C 的半径 R 和球心距 D 由三坐标测量机测得: $R_A = 30.2000 \text{ mm}$, $R_B = 30.1860 \text{ mm}$, $R_C = 30.1860 \text{ mm}$, $D_{AB} = 151.7630 \text{ mm}$, $D_{AC} = 220.0790 \text{ mm}$, $D_{BC} = 221.4900 \text{ mm}$ 。

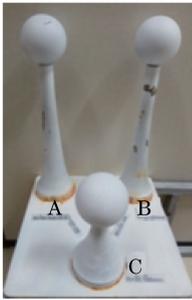


图 5 用于测试系统精度的三个标准球

Fig. 5 Three standard balls for accuracy test of system

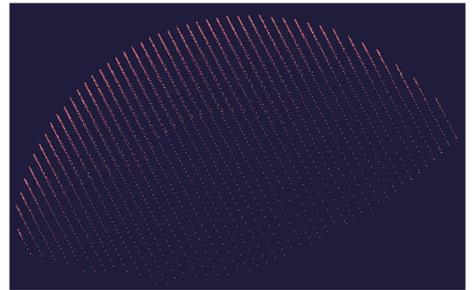


图 6 标准球上的点云数据

Fig. 6 Point cloud data on standard ball

在 Imageware 软件中打开标准球上的点云数据, 其中一个球的点云如图 6 所示。拟合上述点云数据, 得到点云偏差的分布情况, 如图 7 所示, 其中正法向、负法向的点云最大偏差分别为 0.2330 mm 、 -0.2858 mm 。

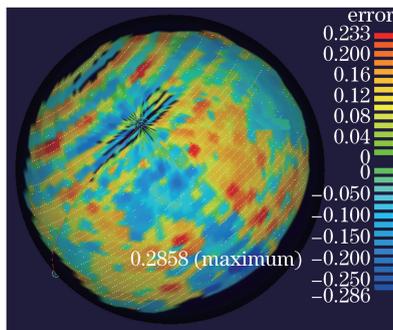


图 7 点云与其拟合球面的误差分布

Fig. 7 Error distribution between fitted sphere and point cloud

在系统测量范围内, 测量图 5 中相对位置固定的三个标准球, 并将结果与文献^[5]中基于平面靶标标定外参数的测量结果进行对比, 见表 2。以 A_i 、 B_i 、 C_i 分别表示第 i 次测量的 A、B、C 球 ($i = 1, 2, 3, 4, 5$), 以

d_1 、 d_2 分别表示正法向、负法向的点云最大偏差。正、负法向点云的最大偏差来自于单个点,是由图像噪声、标准球表面的喷漆不均匀导致的,可视为系统的随机误差。

表 2 正法向及负法向点云最大偏差

Table 2 Maximum deviations between fitted sphere and point cloud in positive and negative normal directions

No. of ball position	Ball name	Proposed method		Calibration based on planar target	
		d_1 /mm	d_2 /mm	d_1 /mm	d_2 /mm
1	A ₁	-0.2305	0.2469	-0.2361	0.2442
2	B ₁	-0.2505	0.2147	-0.2474	0.2533
3	C ₁	-0.2330	0.2343	-0.2635	0.2546
4	A ₂	-0.2667	0.2525	-0.2825	0.2502
5	B ₂	-0.2721	0.2550	-0.2724	0.2495
6	C ₂	-0.2692	0.2554	-0.2427	0.2451
7	A ₃	-0.2469	0.2346	-0.2474	0.2327
8	B ₃	-0.2100	0.2450	-0.2028	0.2444
9	C ₃	-0.2409	0.2108	-0.2343	0.2207
10	A ₄	-0.2506	0.2268	-0.2633	0.2370
11	B ₄	-0.2385	0.2379	-0.2738	0.2547
12	C ₄	-0.2384	0.2392	-0.2621	0.2505
13	A ₅	-0.2637	0.2503	-0.2649	0.2497
14	B ₅	-0.2772	0.2578	-0.2691	0.2801
15	C ₅	-0.2641	0.2516	-0.2480	0.2481
Maximum deviation		-0.2772	0.2578	-0.2825	0.2801

每个球面上点云的标准偏差如图 8(a)所示,其值在 0.040~0.055 mm 之间;拟合球半径与球的标准半径之差表示球的形状偏差,其值在 -0.15~+0.15 mm 之间,如图 8(b)所示。

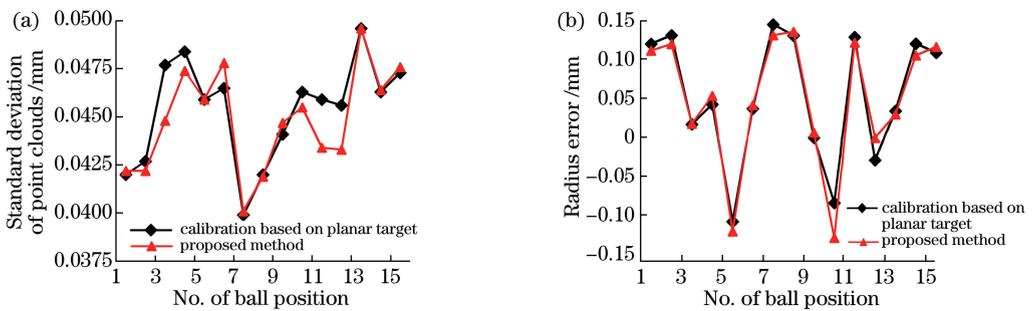


图 8 系统误差分析。(a)点云的标准差;(b)球半径误差

Fig. 8 Error analysis of system. (a) Standard deviation of point clouds; (b) ball radius error

测量 AB, AC, BC 球之间的球心距,以 M 表示测量的球心距,以 E 表示测量所得的球心距与标准球心距之间的偏差,球心距偏差反应了测量系统的空间精度,见表 3,其值在 0.70 mm 以内。

点云标准偏差、半径误差及球心距误差由扫描得到的球上所有点计算得到,不易受到单个点精度的影响,可视为系统误差。综合表 2,3 和图 7,8 的数据分析可知,所提的方法与基于平面靶标的外参数标定方法的测量精度及稳定性相当。

4.3 工件实测实验

扫描图 9 所示的工件,工件长约为 600 mm,宽约为 390 mm,扫描轴速度设为 $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,故扫描用时

100 s。在 Imageware 软件中打开扫描得到的三维点云数据,扫描工件采集的有效点数为 1374044,测量结果如图 10 所示。

表 3 球心距误差

Table 3 Errors of sphere centre distance

Name of balls	No. of ball position	Proposed method		Calibration based on planar target	
		M/mm	E/mm	M/mm	E/mm
AB	1	152.3632	0.3002	152.3728	0.3098
	2	152.3153	0.2523	152.3403	0.2773
	3	152.3282	0.2652	152.3295	0.2665
	4	152.2602	0.1972	152.3061	0.2431
	5	152.2546	0.1916	152.2648	0.2018
AC	1	220.9260	0.5470	220.8853	0.5063
	2	220.8260	0.4470	220.7825	0.4035
	3	221.0032	0.6242	220.9811	0.6021
	4	220.8063	0.4273	220.7513	0.3723
	5	220.7008	0.3218	220.6896	0.3106
BC	1	222.2010	0.4110	222.2173	0.4273
	2	222.0818	0.2918	222.0779	0.2879
	3	222.3490	0.5590	222.3612	0.5712
	4	222.0962	0.3062	222.0860	0.2960
	5	221.9301	0.1401	221.9981	0.2081
Maximum deviation		-	0.6242	-	0.6021



图 9 被测工件实物图

Fig. 9 Physical map of measured work piece

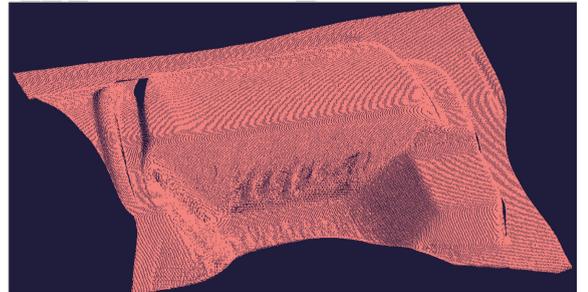


图 10 被测工件的测量效果图

Fig. 10 Measurement effect image of measured work piece

5 结 论

设计了一种超大尺度线结构光传感器三维测量系统,系统测量的最近距离为 800 mm,最远距离为 1200 mm,测量范围内最短激光条长为 580 mm,最长激光条长为 780 mm,满足大型自由曲面高效测量的需求。提出了一种基于一维靶标的超大尺度线结构光传感器外参数的标定方法。实验证明,所提出的标定方法相对于基于平面靶标的标定方法,具有相当的精度和稳定性,且无需计算靶标相对于摄像机坐标系的旋转和平移矩阵,计算过程简单;其一维靶标制作容易,操作灵活,更适合超大尺度线结构光传感器的现场标定。

参 考 文 献

[1] Zhou Fuqiang, Cai Feihua. Calibrating structured-light vision sensor with one-dimensional target[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 7-12.
周富强, 蔡斐华. 基于一维靶标的结构光视觉传感器标定[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 7-12.

[2] Wei Z, Cao L, Zhang G. A novel 1D target-based calibration method with unknown orientation for structured light vision sensor[J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(4): 570-574.

[3] Liu Chong, Sun Junhua, Liu Zhen, et al. A field calibration method for line structured light vision sensor with large

- FOV[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(1): 106-112.
- 刘冲, 孙军华, 刘震, 等. 大视场线结构光视觉传感器的现场标定[J]. *光电工程*, 2013, 40(1): 106-112.
- [4] Xie Zexiao, Liu Jingxiao. Calibration technology for line structured light sensor with large scale[J]. *Chinese J lasers*, 2015, 42(12): 1214001.
解则晓, 刘静晓. 超大尺度线结构光传感器现场标定技术[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1214001.
- [5] Zeng Xiangjun, Huo Jincheng, Wu Qingyang. Calibrate method for scanning direction of 3D measurement system based on linear-structure light[J]. *Chinese J lasers*, 2012, 39(1): 0108002.
曾祥军, 霍金城, 吴庆阳. 线结构光三维测量系统扫描方向的标定[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0108002.
- [6] Chen Xinyu, Ma Zi, Chen Tianfei, *et al.* Novel calibration method for axes in line structured light vision measurement system[J]. *Chinese J lasers*, 2012, 39(11): 1108014.
陈新禹, 马孜, 陈天飞, 等. 线结构光视觉测量系统运动轴线的简易标定方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108014.
- [7] Liu Zhen, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong, *et al.* An accurate calibration method for line structured light vision sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3124-3128.
刘震, 张广军, 魏振忠, 等. 一种高精度线结构光视觉传感器现场标定方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3124-3128.
- [8] Chen Tianfei, Zhao Jibin, Wu Xiang. New calibration method for line structured light sensor based on planar target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0112004.
陈天飞, 赵吉宾, 吴翔. 基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0112004.
- [9] Xie Z, Wang J, Zhang Q. Complete 3D measurement in reverse engineering using a multi-probe system[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 45(12/13): 1474-1486.
- [10] Santolaria J, Pastor J J, Broseid F J, *et al.* A one-step intrinsic and extrinsic calibration method for laser line scanner operation in coordinate measuring machines[J]. *Measurement Science & Technology*, 2009, 20(4): 045107.
- [11] Che C, Ni J. Ball-target-based extrinsic calibration technique for high-accuracy 3-D metrology using off-the-shelf laser-stripe sensors[J]. *Precision Engineering*, 2000, 24(3): 210-219.
- [12] Xie Z, Zhang C, Zhang Q. A simplified method for the extrinsic calibration of structured-light sensors using a single-ball target[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44(11): 1197-1203.
- [13] Cui Z, Liu Y, Li X. A novel extrinsic calibration method for robotic systems with structured light sensors[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2015: 15806767.
- [14] Xie Z, Wang X, Chi S. Simultaneous calibration of the intrinsic and extrinsic parameters of structured-light sensors[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2014, 58(4): 9-18.
- [15] Xie Zexiao, Gao Xiang, Zhu Ruixin. Efficient extraction and robust recognition algorithm of circle coded target[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(3): 559-566.
解则晓, 高翔, 朱瑞新. 环状编码标记点的高效提取与鲁棒识别算法[J]. *光电子 • 激光*, 2015, 26(3): 559-566.
- [16] Lu Jin, Sun Huibin, Chang Zhiyong. A novel method for camera calibration with orthogonal vanishing points[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0208001.
卢津, 孙惠斌, 常智勇. 新型正交消隐点的摄像机标定方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0208001.
- [17] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [18] Zhou Ling, Zhang Liyan, Zheng Jiandong, *et al.* Automated reference point detection in close range photogrammetry [J]. *Journal of Applied Science*, 2007, 25(3): 288-294.
周玲, 张丽艳, 郑建冬, 等. 近景摄影测量中标记点的自动检测[J]. *应用科学学报*, 2007, 25(3): 288-294.