

文章编号 1004-924X(2014)06-1477-09

用于工业三维点测量的接触式光学探针

李磊刚*, 梁 晋, 唐正宗, 郭 成, 胡 浩
(西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:为了快速、准确地获得大尺寸工业产品或带有深槽孔工件的关键点三维坐标,本文基于工业近景摄影测量理论、立体视觉技术等,研究并实现了两种工业便携式、接触式光学探针测量系统。研究了测量系统涉及的探针设计、探针标定以及三维点解算等关键技术,设计了点阵式和手持相机式两种适用于不同工业场合的工业探针。针对点阵式探针的测量,提出了一种用于解算探针坐标系与世界坐标系相对关系的点云匹配方法。此外,采用拟合虚拟球的方法准确标定了两种探针的内部参数。最后,通过对比标准球与三坐标测量机的测量结果,得到系统的测量精度可达 0.1 mm/m。该精度满足一般大、中型工件的三维点测量精度标准。

关键词:光学探针;点阵式探针;手持相机式探针;点云匹配;探针标定

中图分类号:TH721;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142206.1477

Optical and contact probe for industrial measurement of 3-D points

LI Lei-gang*, LIANG Jin, TANG Zheng-zong, GUO Cheng, HU Hao

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

* Corresponding author, E-mail: liracfd@foxmail.com

Abstract: To accurately obtain the 3-D coordinates of key points of large-size industrial products or some work pieces with deep holes, two kinds of optical, contact and portable probe systems were studied and implemented based on the theory of close-range photogrammetry and stereo vision technology. The key technologies applied in the systems were studied, including probe design, probe calibration and 3-D point reconstruction. Two kinds of probes, dot-matrix and hand-camera, were designed to apply to different industrial product measurements. Then, for the dot-matrix probe measurement, a point cloud registration method was proposed to solve the relationship between probe coordinate system and world coordinate system. Besides, a method of fitting the virtual ball was used to calibrate two probes. Finally, four standard balls were measured in an accuracy test. The comparison results from three-coordinate measuring machine show that the measurement accuracy of the system can be up to 0.1 mm/m. It suggests that the system has met the general accuracy standards of the three-dimensional point measurement of medium and large sized products.

Key words: optical probe; dot-matrix type probe; hand-camera type probe; point cloud registration; probe calibration

收稿日期:2013-09-29;修订日期:2013-10-24.

基金项目:国家科学自然科学基金资助项目(No. 51275378, No. 51275389)

1 引言

三维点测量技术主要用于检测作业工具、作业或控制对象和目标物体的空间位置、姿态和运动轨迹,通过观测和计量作业和目标物体来完成作业规划、性能检测和状态监控,目前已广泛应用于工业、军事、医疗和科研等领域。该技术主要分为接触式和非接触式两类。接触式方法的典型代表是三坐标测量机,它的超高精度($\leq 2.5 \mu\text{m}$)一直是定位行业的标准,但该方法存在装卡复杂,效率低,不可移动,价格昂贵等缺点。非接触测量方法的典型代表为全站仪,经纬仪等光学测量设备,它们具有大量程、便携、可移动等优势,但精度都较低。

二十世纪六七十年代,立体视觉计算理论被提出^[1],三维测量技术随之得到了更深层次的发展^[2]。其中,基于近景摄影测量理论的视觉测量方法以其非接触性、速度快、低成本,自动化程度高等特点,在工业测量领域得到了快速发展与应用^[3]。近景摄影测量方法从类型上可分为主动式和被动式两种。主动式测量系统使用结构光照射被测物体,用摄像机获取物体图像,通过数学模型来获得它的空间位置,如激光扫描三维视觉测量^[4]、基于多频相移光栅扫描的三维光学点云测试^[5]。被动式测量系统则直接采用物体的自身特征或人造特征,用图像处理的方法对特征进行识别、测量,从而获得物体关键点的空间位置,如通过粘贴标志点进行三维点测量的近景摄影测量技术^[6]。然而,不论是主动式还是被动式测量技术,都必须依靠物体表面的规则特征进行测量。由于不能主动指定测量位置,现有技术很难测量带有深孔、槽等复杂特征的物体。

光学探针是一种由可观测标记点定位所连接空间物体的方法。它根据探针上空间位置相对固定的一组标志点的坐标信息建立一个探针坐标系,确定探针尖端在探针坐标系中的坐标;定位时根据当时标志点的空间坐标计算出世界坐标系和探针坐标系的变换关系,就能够通过坐标转换得到探针尖端在世界坐标系中的坐标信息^[7]。这方面研究在国外起步较早,R. W. H. 提出了一种

专用于医学领域的探针技术^[8],通过该方法来确定脑外科手术中脑部病灶的位置。但是这种方法的测量精度受制于探针的制造工艺,要保证 3 个球体标志物的中心同探针尖端严格共线非常困难。德国 Gom 公司研发的基于立体视觉原理的光栅扫描系统 ATOS 中已经成功引入了探针定位功能,但其价格比较昂贵。相比之下,国内在该方面的研究比较滞后。上海交通大学罗毅等人提出了一种结合机器视觉的探针定位方法^[7],此方法解决了医用探针准确度因制作工艺而无法提高的问题,但是其测量精度依旧很低,无法满足工业测量需求。本文基于近景摄影测量技术,研究开发了一种便携式、接触式光学探针测量系统。该系统能快速、准确地测量大尺寸工业产品或带有深孔、槽等复杂结构的工件。

2 测量原理

基于近景摄影测量的光学探针通过单个或多个相机采集影像,采用一定的理论算法解算出探针自身坐标系相对于世界坐标系的位置关系,然后根据已标定的探针内参数(测量头在探针坐标系中的位置),间接求取探针测量头在世界坐标系中的三维坐标。其中,关键技术是探针标定以及探针坐标系的定位。本文提出了两种探针坐标系定位方法,并在此基础上设计了两种工业探针测量系统,即点阵式探针和手持相机式探针。

2.1 点阵式探针

点阵式探针是使用散乱分布的标志点,采用空间点云配准来进行探针坐标系定位的方法。其定位原理如图 1 所示,首先,利用摄影测量方法获得探针上所有标志点在自身坐标系中的准确三维

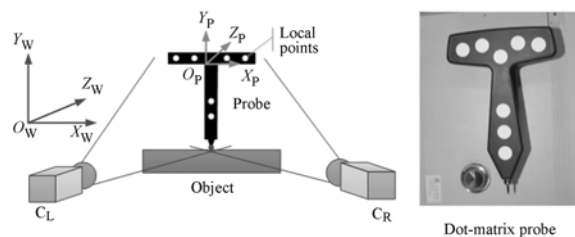


图 1 点阵式探针测量原理

Fig. 1 Measurement principle of dot-matrix probe

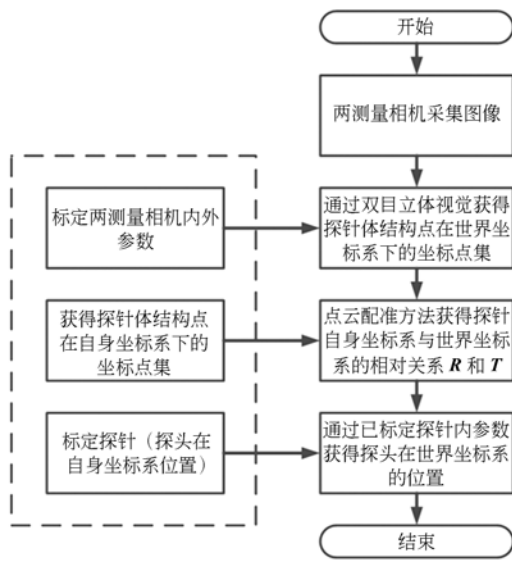


图 2 点阵式探针测量流程

Fig. 2 Measurement process of dot-matrix probe

坐标;然后,通过固定并已标定的双相机或多相机采集探针影像,检测影像中标志点的像素坐标,利用经典立体视觉方法解算出探针上所有标志点在空间中的三维坐标;最后,使用快速配准方法解算两份点云的相对关系,即探针坐标系与世界坐标系的关系。测量流程如图 2 所示,虚线框部分是系统测量前期完成的标定工作。详细过程描述

$$AA = \begin{bmatrix} M_{L(0,0)} - M_{L(2,0)} u_L & M_{L(0,1)} - M_{L(2,1)} u_L & M_{L(0,2)} - M_{L(2,2)} u_L \\ M_{L(1,0)} - M_{L(2,0)} v_L & M_{L(1,1)} - M_{L(2,1)} v_L & M_{L(1,2)} - M_{L(2,2)} v_L \\ M_{R(0,0)} - M_{R(2,0)} u_R & M_{R(0,1)} - M_{R(2,1)} u_R & M_{R(0,2)} - M_{R(2,2)} u_R \\ M_{R(1,0)} - M_{R(2,0)} v_R & M_{R(1,1)} - M_{R(2,1)} v_R & M_{R(1,2)} - M_{R(2,2)} v_R \end{bmatrix},$$

$$BB = \begin{bmatrix} u_L M_{L(2,3)} - M_{L(0,3)} \\ v_L M_{L(2,3)} - M_{L(1,3)} \\ u_R M_{R(2,3)} - M_{R(0,3)} \\ v_R M_{R(2,3)} - M_{R(1,3)} \end{bmatrix}.$$

Step5. 使用快速配准方法匹配点云 Q 和 P , 获得配准后点云 Q_n 和 P_n , 其中 n 是成功匹配点的个数。

Step6. 采用奇异值分解法 (Singular Value Decomposition, SVD) 求解 Step5 所得的两组点云 Q_n 和 P_n 之间的旋转矩阵 R_p 和平移矩阵 T_p 。详细计算过程如下:

(1) 计算三维点云 Q_n 和 P_n 各自的质心 $\overline{\mu}_q$ 和

如下:

Step1. 准确标定两测量相机 C_L 和 C_R 的内、外参数 $(A_L, R_L, T_L), (A_R, R_R, T_R)$ 。本文通过研究小组开发的柔性相机自标定技术完成,主要理论和方法参见文献[2]和文献[9]。

Step2. 使用摄影测量方法精确解算探针体上所有标志点在自身坐标系下的准确三维坐标。本文采用自主研发的系统 XJTUDP 完成该部分,主要理论参见文献[6]。

Step3. 标定探针,获得探针测量头在自身坐标系下的准确三维坐标 X_p 。

Step4. 检测识别相机 C_L 和 C_R 采集图像上所有标志点的二维坐标,结合已知的相机内、外参数,使用立体视觉中的三维重建理论解算探针体上所有标志点在世界坐标系下的准确坐标值 P 。详细解算过程如下:

(1) 构造两相机的投影矩阵 M_L 与 M_R :

$$\begin{cases} M_L = A_L [R_L | T_L] \\ M_R = A_R [R_R | T_R] \end{cases} \quad (1)$$

(2) 通过两个相机图像点坐标 $(u_L, v_L), (u_R, v_R)$ 和两相机投影矩阵,计算出三维物体点坐标 W :

$$W = (AA^T * AA)^{-1} * AA^T * BB, \quad (2)$$

其中:

$\overline{\mu}_p$:

$$\begin{cases} \overline{\mu}_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \\ \overline{\mu}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \end{cases} \quad (3)$$

(2) 令三维点云 Q_n 和 P_n 做相对于各自质心的平移,得到新的点云 Q_n' 和 P_n' :

$$\begin{cases} Q_n' = Q_n - \overline{\mu}_q \\ P_n' = P_n - \overline{\mu}_p \end{cases} \quad (4)$$

(3) 利用新的点云 Q_n' 和 P_n' 构造矩阵 M , 并对其进行 SVD 分解:

$$\begin{cases} M = Q_n' (P_n')^T \\ M = U \Lambda V^T \end{cases} \quad (5)$$

(4) 计算 R_p 和 T_p 。

$$\begin{cases} R_p = VU^T \\ T_p = \overline{\mu_p} - R_p \overline{\mu_q} \end{cases} \quad (6)$$

Step7. 使用已知的探针测量头坐标 X_p 和 Step6 获得的旋转矩阵 R_p 与平移矩阵 T_p , 获得待测量点在世界坐标系中的位置 X_w :

$$X_w = R_p X_p + T_p. \quad (7)$$

2.2 手持相机式探针

手持相机式探针是使用固定在探针上的摄像机, 采用摄影测量中空间后方交会进行探针坐标系定位的方法。其定位原理如图 3 所示, 首先, 利用摄影测量方法获得布置在测量空间中的全局标志点, 并将其转换到特定的坐标系下; 然后, 通过固定在探针上的相机采集空间图像, 检测识别标志点的像素坐标, 利用空间后方交会方法定位相

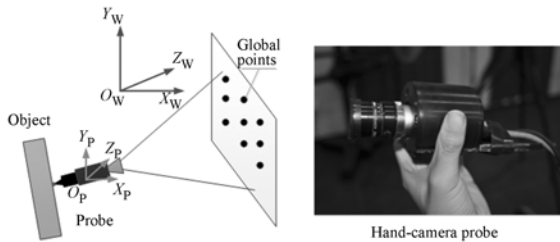


图 3 手持相机式探针测量原理

Fig. 3 Measurement principle of hand-camera probe

机坐标系与世界坐标系的关系, 即探针坐标系与世界坐标系的关系。测量流程如图 4 所示, 虚线框中是系统测量前期完成的标定工作。详细过程描述如下:

Step1. 准确标定探针相机的内参数。方法同点阵式探针相同。

Step2. 在测量空间布置一系列位置不动的全局点, 使用摄影测量方法(XJTUDP)精确测量其准确的三维坐标。

Step3. 标定探针, 获得探针测量头在自身坐标系下准确的三维坐标 X_p 。

Step4. 检测识别图像上所有标志点的二维坐标 L , 结合已知的相机内参数和三维坐标 G , 使用摄影测量中的单像空间后方交会方法解算探针坐标系相对世界坐标系的旋转矩阵 R_p 与平移矩阵 T_p 。

单像空间后方交会方法是把一张照片覆盖的一定数量的控制点的像点坐标作为观测值, 以求

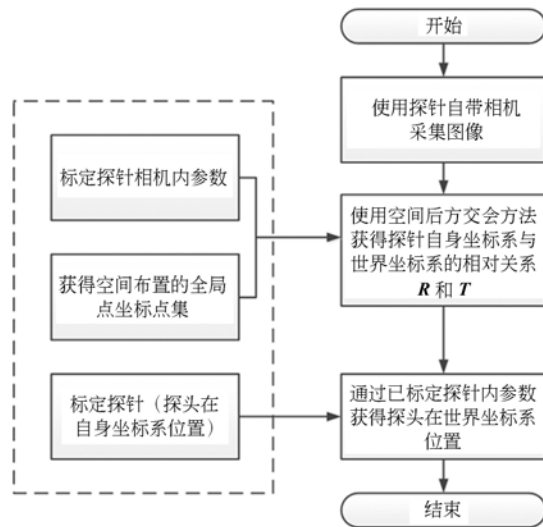


图 4 手持相机式探针测量流程

Fig. 4 Measurement process of hand-camera probe

解该像片内、外方位元素的过程, 是基于共线方程的光束平差过程。仅仅解算外方位元素的单像空间后方交会, 是单像空间后方交会的特例。在这种情况下, 内方位元素和控制点坐标已知, 对应的光束平差方程可表示为:

$$V = At - L, \quad (8)$$

其中: V 是像点坐标残差, A 为外参数偏导矩阵, t 为外参数改正数, L 是实际图像点。

因为外方位元素只有 6 个未知数, 所以计算至少需要 3 个控制点。单像空间后方交会算法是对非线性方程进行线性化后的迭代运算, 因此需要未知数的初值。本文使用摄影测量中的三角锥算法来计算初值^[10]。

Step5. 使用已知的探针测量头坐标 X_p 和 Step4 获得的旋转矩阵 R_p 与平移矩阵 T_p , 获得待测量点在世界坐标系中的位置 X_w :

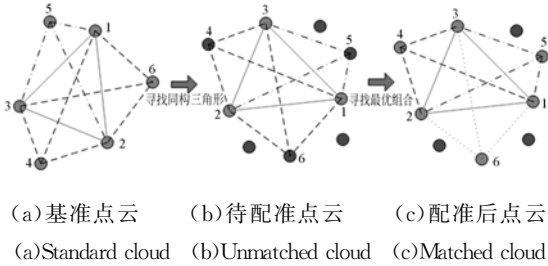
$$X_w = R_p X_p + T_p. \quad (9)$$

2.3 三维点空间匹配

三维点空间匹配就是建立不同视场下点云的对应公共点集。假定在一个视场 A(坐标系 A) 中识别出物体表面上 n 个标志点, 在另一个视场 B(坐标系 B) 中识别出物体表面上的 m 个标志点, 并且保证视场 A 和视场 B 有重叠部分(即其中有部分点在基准坐标系下是同一个点), 配准的目标就是获得视场 A 和视场 B 中的公共点集。其基本原理是: 利用公共标志点中任意两点之间空间距离不变的基本特征, 寻找两点集之间的最大同

构映像子集^[11]。

针对探针三维点的匹配,定义探针体上标志点在自身坐标系下的点集为 Q ,世界坐标系下测量获得的所有标志点点集为 P , Q 为小样本, P 为大样本。匹配原理如图 5 所示。



(a)基准点云 (b)待配准点云 (c)配准后点云
(a)Standard cloud (b)Unmatched cloud (c)Matched cloud
图 5 点云匹配原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of point cloud matching

详细匹配流程如下:

Step1. 建立 P 与 Q 中“点对”列表 D_Q 和 D_P , 并按照点点距离值进行排序。与此同时,为每个点 p_i 和 q_i 创建其相关“点对”列表。

Step2. 寻找同构三角形 T 。在两个点集中,寻找对应的全等三角形,即三角形各个边的长度偏差小于阈值 α ,一般设定为 0.5 mm。

Step3. 寻找最优配准组合。基于同构三角形,根据与已知三角形顶点的距离,以小样本 Q 源,在 P 中寻找其他对应点。如果满足:

$$\frac{m}{n} \geq r,$$

则表示匹配成功。其中, m 为成功匹配点个数, n 为 Q 总个数, r 为最佳匹配阈值,一般设定为 0.6。

3 探针标定

探针标定的目标是获得探针测量头在其自身坐标系中的位置。本文通过拟合空间虚拟球的方法来标定探针,其原理如图 6 所示。首先固定探针头,使探针体围绕测量头在空间中任意旋转,此时,探针坐标系的原点将在同一个球面上,采用一定的测量手段获得探针自身坐标系在世界坐标系中的位置(平移矩阵 R 与旋转矩阵 T)。然后,通过获得的一系列平移矩阵 T 拟合空间球,所得球中心坐标即为探针测量头在世界坐标系中的位置。最后,根据已知的探针自身坐标系与世界坐标系关系,计算出探针测量头在自身坐标系下的位置。具体步骤为:

Step1. 标定准备。标定相机,解算空间全局点等,具体步骤同 2.1 和 2.2 节中所述。

Step2. 固定探针头,使探针体围绕测量头在空间中任意旋转,在此过程中不断解算探针自身坐标系在世界坐标系中的位置(旋转矩阵 R 与平移矩阵 T)。对于点阵式探针,计算方法如 2.1 中 Step4-Step6 所述;移动相机式探针如 2.2 节中 Step4 所述。

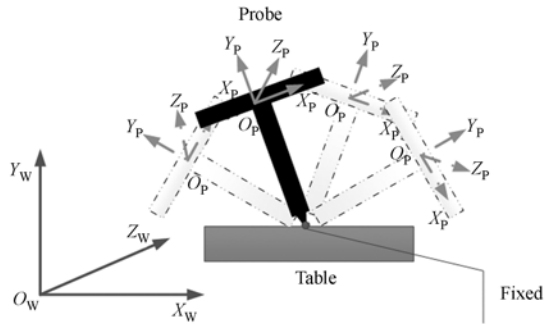


图 6 探针标定原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of probe calibration

Step3. 用 Step2 获得的平移矩阵集合 $\{T_i\}$ 拟合空间球,得到球心在世界坐标系中的坐标 X_s 。然后,再通过 Step2 获得的探针坐标系与世界坐标系的相对关系 $\{R_i\}$ 和 $\{T_i\}$,求解球心在探针坐标系下的坐标 X_p 。

$$X_p = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} [R_i^{-1}(X_s - T_i)]}{n}. \quad (10)$$

4 系统实现与精度验证

基于上文描述的测量原理,自主开发了一套接触式光学探针测量系统,开发平台为 Visual Studio C++ 2010。其中,点阵式探针系统由 4 个测量相机和 1 个手持探针组成,相机位置可以随意调整。测量时,其空间位置可由分布在工作台上的若干编码标志点实时定向获得,系统软硬件和测量过程如图 7 所示。手持相机式探针由一个带有相机的手持探针和空间布置的若干编码标志点组成,系统软硬件和测量过程如图 8 所示。

两套系统均使用 BASLER-GigE 系列工业相机,型号为 acA-1600-20gm,幅面为 1 624 × 1 236,相机镜头分别为施耐德 8 mm 和 12 mm 定焦镜头。



图 7 点阵式探针系统组成及测量过程

Fig. 7 System components and measurement process of dot-matrix probe

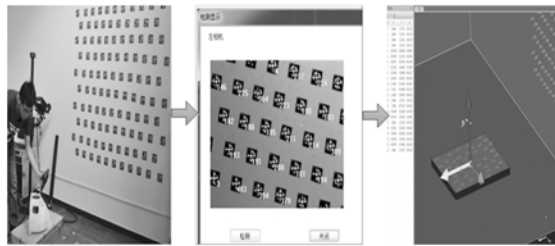
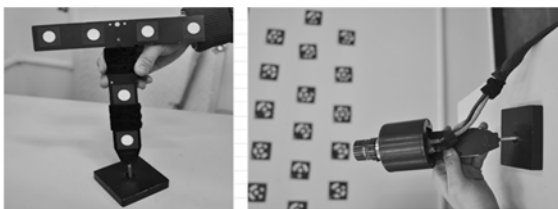


图 8 手持相机式探针系统组成及测量过程

Fig. 8 System components and measurement process of hand-camera probe

4.1 探针标定

使用第 3 节所述方法对两种探针进行标定,如图 9 所示。相机采集 100 种不同状态,计算获得的两个探针内参数如表 1 所示。



(a)点阵式探针 (b)手持相机式探针
(a)Dot-matrix type (b)Hand-camera type

图 9 探针标定过程

Fig. 9 Sites of probe calibration

表 1 探针标定结果

Tab. 1 Results of probe calibration (mm)

探针类型	C_x	C_y	C_z
点阵式	236.302 9	0.603 8	-3.405 8
手持相机式	1.489 4	-23.723 4	205.218 7

4.2 精度验证实验

为了验证系统的测量精度,本文使用传统光

学设备精度测试方法——测量标准球。如图 10 所示,对图中 4 个钢球的直径和球心间距进行测量,然后与三坐标测量机的测量结果进行对比,直接反应本系统的测量精度。图中上方所列数据即为三坐标测量机的测量结果,实验的测量幅面为 2 m×1.5 m。

本实验分 3 次进行,每次实验都对探针进行一次标定。使用两测量系统分别测量 4 个球(A, B, C, D)的直径和 A-D, B-C 的球心间距,每个球进行 100 次表面点测量并拟合球心。球直径测量结果表 2 所示,球心间距测量结果如表 3 所示。

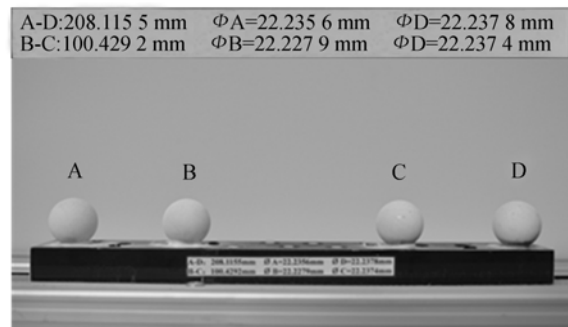


图 10 精度实验用标准球

Fig. 10 Standard balls for accuracy testing

由表 2 可知,直径测量精度保持在 0.15 mm 左右,最高一次可达到 0.1 mm,多次测量的跳动偏差在 0.05 mm 左右。通过分析可知,该测量结果与 3 次实验的标定精度相关,如果标定的探头坐标稍有偏差,会直接反应到所测球直径上,如第三次实验的标定精度稍高,得到的球直径数据就比较高。因此,本系统可通过多次标定来获得较高的测量精度。

由表 3 可知,系统在距离测量方面的精度可以达到 0.05 mm。该测量结果与探针标定的精度相关性不高,探头的偏差会引起球直径的偏差,但球心距是相对值不会受到影响。

综合分析,该系统的三维点测量精度可以达到 0.2 mm/2 m。由于视觉测量系统的测量精度基本上与幅面成正比,因此,该测量精度换算到标准幅面下为 0.1 mm/m。

表 2 标准球直径测量结果

Tab. 2 Measurement results of diameters of four standard balls (mm)

球类别	标准值	实验编号	测量值	偏差	标准差	平均偏差	
A	22.235 6	点阵式	1	22.395 1	0.159 5	0.044 3	0.163 4
			2	22.455 2	0.219 6		
			3	22.346 8	0.111 2		
		手持式	1	22.325 2	0.089 6		
			2	22.428 3	0.192 7		
			3	22.321 5	0.085 9		
B	22.227 9	点阵式	1	22.356 2	0.128 3	0.044 9	0.148 1
			2	22.440 5	0.212 6		
			3	22.331 2	0.103 3		
		手持式	1	22.352 1	0.124 2		
			2	22.486 2	0.258 3		
			3	22.335 8	0.107 9		
C	22.337 2	点阵式	1	22.402 1	0.164 7	0.049 4	0.161 8
			2	22.458 2	0.220 8		
			3	22.237 4	0.099 8		
		手持式	1	22.408 3	0.170 9		
			2	22.451 5	0.214 1		
			3	22.329 6	0.092 2		
D	22.237 8	点阵式	1	22.415 5	0.177 7	0.064 9	0.188 9
			2	22.511 2	0.273 4		
			3	22.353 4	0.115 6		
		手持式	1	22.375 6	0.137 8		
			2	22.405 2	0.167 4		
			3	22.349 1	0.111 3		

表 3 球心间距测量结果

Tab. 3 Measurement results of distance between standard balls (mm)

类别	标准值	实验编号	测量值	偏差	标准差	平均偏差	
A-D	208.115 5	点阵式	1	208.167 4	0.051 9	0.004 6	0.057 7
			2	208.178 6	0.063 1		
			3	208.173 5	0.058 0		
		手持式	1	208.159 8	0.044 3		
			2	208.195 3	0.079 8		
			3	208.102 6	-0.012 9		
B-C	100.429 2	点阵式	1	100.458 2	0.029 0	0.010 3	0.034 8
			2	100.475 6	0.046 4		
			3	100.451 1	0.029 1		
		手持式	1	100.469 8	0.040 6		
			2	100.495 7	0.066 5		
			3	100.426 9	-0.002 3		

4.3 应用实验

为了验证本系统对深孔、槽等特征的测量能

力,对一机械零件的深槽部分进行了测量,如图

11 所示。零件槽深度 $H=20$ mm,槽间距 $D=6$

mm。对槽面进行密集点测量,结果如图 11(b)所示。可以看出,系统能准确测量该零件深槽内侧面点。

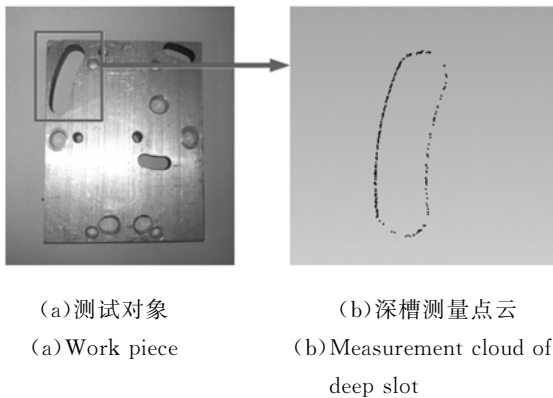


图 11 带深槽孔工件轮廓点测量

Fig. 11 Measurement of surface points for work piece with deep slots

参考文献:

- [1] 钱曾波, 邱振戈, 张永强. 计算机立体视觉研究的进展[J]. 测绘学院学报, 2001, 18 (4): 267-272. QIAN Z B, QIU ZH G, ZHANG Y Q, *et al.*. Reviewing the difficult problems facing the researchers of stereoscopic vision[J]. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 2001, 18 (4): 267-272. (in Chinese)
- [2] 胡浩, 梁晋, 唐正宗, 等. 大视场多像机视频测量系统的全局标定[J]. 光学 精密工程, 2012, 20 (2): 369-378. HU H, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Global calibration for multi-camera video grammetric system with large-scale field-of-view[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (2): 369-378. (in Chinese)
- [3] 冯文灏. 近景摄影测量的基本技术提要[J]. 测绘科学, 2000, 25(4):26-30. FENG W H. The main points of elementary techniques in close-range photogrammetry[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2000, 25 (4): 26-30. (in Chinese)
- [4] 冯萍, 魏振忠. 光笔式大视场三维视觉测量系统[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(9):2217-2224. PENG P, WEI ZH ZH. Light probe based large FOV 3D vision measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (9): 2217-2224. (in Chinese)
- [5] 梁晋, 肖振中, 臧顺来, 等. 外差式多频相移技术的三维光学点云测量研究[J]. 锻压技术, 2008, (1):143-147. LIANG J, XIAO ZH ZH, ZANG SH L, *et al.*. Study on 3D optical points dense cloud measuring system based on heterodyne multiple frequency phase shift technology[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2008(1):143-147. (in Chinese)
- [6] ZHANG D H, LIANG J, GUO C, *et al.*. Exploitation of photogrammetry measurement system[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49 (3): 037005-037011.
- [7] 罗毅, 刘宏建, 刘允才. 一种新的探针定位方法[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(6):638-642. LUO Y, LIU H J, LIU Y C. New probe positioning method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12 (6):638-642. (in Chinese)
- [8] GRIMSON W E L, ETTINGER G J, WHITE S J, *et al.*. An automatic registration method for frameless stereotaxy, image guided surgery, and enhanced reality visualization[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1996, 15(2):129-140.

5 结 论

针对工业测量领域大幅面或者带有槽孔工件的三维点测量需求,本文基于工业近景摄影测量理论和立体视觉技术提出并实现了两种工业便携式、接触式光学探针测量系统。对系统涉及的探针设计、探针标定以及三维点解算等关键技术进行了研究。最后,用该系统测量标准件,并与三坐标测量机所得结果进行比对,获得系统的测量精度可达到 0.1 mm/m,满足一般大幅面工件的点测量精度要求。

- [9] XIAO Z, JIN L, YU D, *et al.*. A cross-target-based accurate calibration method of binocular stereo systems with large-scale field-of-view[J]. *Measurement*, 2010, 43 (6): 747-754.
- [10] 肖振中. 基于工业摄影和机器视觉的三维形貌与变形测量关键技术研究[D]. 西安:西安交通大学, 2010.
- XIAO ZH ZH. *Study on the Key Technologies of 3D Shape and Deformation Measurement Based on Industrial Photogrammetry and Computer Vision*[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University. 2010. (in Chinese)
- [11] 梁新合, 宋志真. 改进的点云精确匹配技术[J]. *装备制造技术*, 2008(3):41-42.
- LIANG X H, SONG ZH ZH. An improved point cloud precisely matching technology[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2008(3): 41-42. (in Chinese)

作者简介:

李磊刚(1987—),男,陕西宝鸡人,博士研究生,2009年,2010年于西安交通大学分别获得学士、硕士学位,主要从事三维光学测量方面的研究。E-mail: liracfe@foxmail.com

导师简介:

梁 晋(1968—),男,河南郑州人,博士,教授,博士生导师,1990年、1993年、2001年于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事机电控制、机器视觉等方面的研究。E-mail: liangjin@mail.xjtu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)