

文章编号 1004-924X(2013)09-2217-08

# 光笔式大视场三维视觉测量系统

冯 萍\*, 魏振忠

(北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要:**针对先进制造业对大型装备大范围精密尺寸测量需求,根据双目立体视觉测量原理设计了一种光笔式大视场三维视觉测量系统。基于透视投影变换下的时针顺序和共线性不变量设计了光笔特征点空间分布模式,实现了特征点的准确识别与接触探头坐标的计算。应用双目立体视觉传感器的透视投影和齐次坐标三维测量模型,以一维基线尺靶标自由移动和基准长度约束为核心,通过本质矩阵  $E$  的线性求解结合非线性优化实现了其结构参数的现场精确标定。研制了由光笔、双目立体视觉测量系统、便携式三脚架、一维基线尺靶标和测量软件构成的大视场三维视觉测量系统,完成了机器人本体表面三维数据的稠密测量实验,在  $7\text{ m} \times 4.7\text{ m}$  测量范围内系统的测量精度优于  $0.2\text{ mm}$ 。实验显示设计的光笔式大视场三维视觉测量系统在光笔结构、发光点识别方法和系统标定方法上均具有新的思路。

**关键词:**三维视觉测量;大视场;光笔;标定;光斑识别

**中图分类号:**TP242.6;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132109.2217

## Light probe based large FOV 3D vision measurement system

FENG Ping\*, WEI Zhen-zhong

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology of the Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

\* Corresponding author, E-mail: fengping@buaa.edu.cn

**Abstract:** To meet the requirements of large-scale equipment for large scope precise measurement in advanced manufacturing industry, a light probe based large Field of View(FOV) 3D vision measurement system based on the binocular stereo vision principle was proposed. The spatial distribution mode of the character points on the light probe was determined according to the invariants of clockwise direction and colinearity under a perspective projection, by which the character points were recognized and the coordinates of the probe were calculated. By using a 3D measurement model based on perspective projection and the homogeneous coordinates of a binocular stereo vision sensor, the structure parameters of the binocular stereo vision sensor were calibrated through linearly solving the essential matrix  $E$ , further following with nonlinear optimization by freely moving a 1D target with known precise length. A true large FOV 3D vision measurement system was constructed, which consists of a light probe, a binocular 3D vision measurement system, a portable tripod, a 1D target and a set of measurement software. The real experiment to measure the dense 3D data was performed on a robot body surface in a field of  $7\text{ m} \times 4.7\text{ m}$  and the accuracy better than  $0.2\text{ mm}$  was achieved. These results show that the designed system has improvement in the light probe structure, recognition methods of luminous points and the system calibration methods.

收稿日期:2013-02-21;修订日期:2013-04-22.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项——列车轮对/车体运动状况在线运动测试仪(No. 2012YKU14032)

**Key words:** 3D vision measurement; large Field of View (FOV); light probe; calibration; light spot recognition

## 1 引言

目前,在以大型飞机、船舶、机车等为代表的现代大型装备制造业领域,大范围现场高精度测量技术在装配、对接和质量控制等任务环节中的需求越来越多。现有的大范围三坐标测量技术及系统主要有:三坐标测量机(CMM)<sup>[1-2]</sup>、双电子经纬仪测量系统<sup>[3-5]</sup>、关节臂坐标测量系统<sup>[6-8]</sup>、激光跟踪仪<sup>[9-10]</sup>、室内 GPS 系统<sup>[11-13]</sup>以及流动式三维扫描测量系统<sup>[14-15]</sup>。三坐标测量机通过控制精密三轴机械运动,完成探头与被测物体表面接触点的三维坐标测量,测量精度很高,常作为小批量或单件装备的比对计量用基准设备。当测量范围较大时,三坐标测量机的本机尺寸会变得很庞大,成本也急剧增加,因此无法用三坐标测量机实现测量。双电子经纬仪测量系统基于前方交汇原理,通过两台电子经纬仪的望远镜,由人工同时瞄准被测工件上的突出特征点,如角点、交叉点或人工标志点等实现三维坐标测量,测量效率低且重复性不好。关节臂坐标测量系统依靠控制柔性关节臂的精确运动,通常用于精确测量较小尺寸范围的工件,大范围测量则难以保证高的精度。激光跟踪仪是目前大型工件装配对接采用最广泛的光学测量设备,它具有测量范围大、精度高的特点。但激光跟踪仪通常价格昂贵,一台跟踪仪仅能跟踪测量一个靶球,且无法测盲孔,测量中的遮挡问题也未有效解决。室内 GPS 测量系统的基本原理与全球定位系统类似,使用红外脉冲激光发射器代替卫星,可对被测物进行 360°空间测量;安装到位后无需转站,一次安装、多次使用,可消除转站造成的误差,并可通过增加接收器在一定程度上解决测量遮挡问题,但仍无法测量盲孔,且成本昂贵。流动式三维扫描测量系统主要应用于工件表面三维形貌的稠密测量,一般要求测量距离较近,且数据处理时间相对较长,不适合应用在仅需少量关键特征点的场合。

综上所述,现有的大范围三坐标测量技术及系统在测量范围、测量精度、现场柔性、测量遮挡和盲孔及成本等几项关键指标上,均难以同时满足大型装备装配对接的需求。随着高分辨率 CMOS 成像芯片技术的发展及其成本的降低,大

范围高精度视觉测量成为可能,并随之出现了基于双目立体视觉和柔性光笔相结合的大视场三维视觉测量模式。在该模式下,具有特定空间拓扑几何约束的柔性光笔,可随被测工件表面的空间分布自由改变自身方位,由高精度双目立体视觉测量系统方便测得工件上测量点(包括遮挡点、深盲孔等)的三维坐标,从而更好地满足大型装备装配对接测量任务的需求。具有代表性的有 AICON MoveInspect HR<sup>[16]</sup>测量系统。本文设计了光笔式大视场三维视觉测量系统,该系统在光笔结构、发光点识别方法和系统标定方法上均有新思路,具有测量范围大、精度高、运用范围广等优点。

## 2 系统总体结构设计

如图 1 所示,光笔式大视场三维视觉测量系统主要由双目立体视觉测量系统、柔性光笔、数据处理计算机构成。另外,还有用于系统校准用的一维基线尺靶标和平面靶标。

测量系统的基本工作原理为:两台高分辨率数码相机构成可实现空间三维坐标测量的双目立体视觉系统,由液晶显示器构成的平面靶标实现相机内部参数的标定,由一维基线尺靶标实现系统结构参数的标定。柔性光笔由精密接触探头和发光二极管(LED)发光点构成,共形成 6 个空间特征点,它们的空间相对位置由机械加工保证,由双目立体视觉测量系统测得 LED 发光点的空间坐标,即可精确计算接触探头的空间坐标,实现工



图 1 光笔式大视场三维视觉测量系统组成

Fig. 1 Configuration of light probe based large FOV 3D vision measurement system

件表面被接触点的测量。柔性光笔的设计使测量系统可适应工件表面大的深度变化,并解决遮挡和盲孔测量问题,如图2所示,因而具有很好的现场适用性。

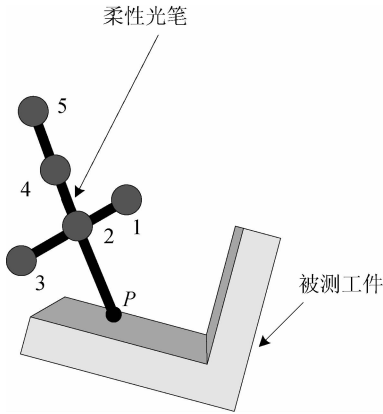


图2 光笔与工件表面接触测量示意图

Fig. 2 Sketch of contact measurement between light probe and part surface

### 3 光笔设计

光笔实质上是测量特征点的发生装置,高精度的三坐标测量提供高质量成像的空间特征点。同时,空间拓扑的结构设计使光笔具备了良好的现场测量柔性,不仅避免了测量遮挡问题的发生,而且可以测量盲孔。光笔的拓扑结构设计一方面应使接触探头  $P$  点的坐标可计算,另一方面应使5个LED发光点易于识别。本文设计的光笔结构如图2所示,1,2,3,4,5为5个LED发光点,它们与接触探头  $P$  点为共面设计,它们之间的距离精确已知。其中,点2,4,5和点  $P$  共线(设为  $L_1$ ),点1,2,3也共线(设为  $L_2$ )。

#### 3.1 接触探头 $P$ 点的计算

设  $P$  点与5个LED发光点之间的距离分别为  $D_{p1}, D_{p2}, D_{p3}, D_{p4}, D_{p5}$ , 点  $P$  和点1,2,3,4,5的空间坐标分别为  $(x_p, y_p, z_p)$  和  $(x_i, y_i, z_i)$  ( $i=1,2,\dots,5$ ), 则有如下约束成立:

$$\|x_p - x_i\|^2 = D_{pi}^2, \quad (1)$$

其中:  $x_p$  为待求点,  $x_i$  为已知点,  $D_{pi}$  已知。若5个LED发光点的空间三维坐标均由双目立体视觉测量系统测得,则  $x_p$  可求。由于点1,2,3和点2,4,5分别线性相关,即存在下列约束:

$$\begin{cases} x_1 = \alpha_1 x_2 + \beta_1 x_3 \\ x_2 = \alpha_2 x_4 + \beta_2 x_5 \end{cases}, \quad (2)$$

其中:  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  ( $i=1,2$ ) 为不为零的常数。因此,5个已知的距离  $D_{pi}$  ( $i=1,2,\dots,5$ ) 形成5个如式(1)的约束等式,其中只有3个是独立的。因此,柔性光笔在实际使用时应避免仅有3个共线LED发光点可见的情况,至少应有4个发光点同时可见。

#### 3.2 LED 发光点的识别

柔性光笔上5个LED发光点被成像后,形成亮度突出的椭圆形光斑。本文采用文献[17]的方法获得了高精度的光斑中心图像坐标。在此基础上,根据LED发光点的空间拓扑约束在透视投影变换下的不变量识别光斑,即实现图像中光斑与光笔上LED发光点的准确对应,从而确定  $D_{pi}$  以实现接触探头  $P$  点的空间三维坐标计算。

光笔上5个LED发光点的空间拓扑约束存在的透视投影不变量具备两个性质:

(1)共面点的时针顺序在透视投影变换下保持不变<sup>[18]</sup>,即点按顺时针或者逆时针排列的顺序保持不变。

(2)点的共线性保持不变<sup>[19]</sup>,即原来共线的点仍然保持共线。

基于上述两个性质,首先识别光笔中的发光点2(如图2所示)。发光点2分别与发光点1,3以及发光点4,5共线。因此,发光点2同时满足两个共线约束。取5个发光点图像坐标中的任意一个,记为  $I_1$ ,其它4个点分别记为  $I_2, I_3, I_4, I_5$ , 并做如下的矢量角度计算:

$$\cos \theta_{ij} = \frac{(\mathbf{I}_1 \mathbf{I}_i)^T (\mathbf{I}_1 \mathbf{I}_j)}{\sqrt{[(\mathbf{I}_1 \mathbf{I}_i)^T (\mathbf{I}_1 \mathbf{I}_i)] [(\mathbf{I}_1 \mathbf{I}_j)^T (\mathbf{I}_1 \mathbf{I}_j)]}} \quad (i, j = 2, 3, 4, 5, \text{且 } i \neq j), \quad (3)$$

其中:  $\mathbf{I}_1 \mathbf{I}_i, \mathbf{I}_1 \mathbf{I}_j$  为光笔发光点图像形成的矢量,  $\theta_{ij}$  为矢量  $\mathbf{I}_1 \mathbf{I}_i$  与  $\mathbf{I}_1 \mathbf{I}_j$  的夹角。若有3个由式(3)计算的角度  $\theta_{ij}$  满足  $0 \leq \theta_{ij} \leq \Delta\theta$  ( $\Delta\theta$  为设定的一个接近零的阈值)或者  $\Delta\theta \leq \theta_{ij} \leq \pi$  ( $\Delta\theta$  为设定的一个接近且小于  $\pi$  的阈值),则可以确定  $I_1$  为发光点2的图像点。否则,改变  $I_1$ ,重复上述计算。

发光点2的图像点确定后,仍然记为  $I_1$ ,下面确定发光点4和5的图像点。在上述识别发光点2的过程中,若有两矢量  $\mathbf{I}_1 \mathbf{I}_i$  和  $\mathbf{I}_1 \mathbf{I}_j$  的夹角  $\theta_{ij}$  满足  $0 \leq \theta_{ij} \leq \Delta\theta$ ,则点  $I_i$  和  $I_j$  即为发光点4和5的图像点。进一步做距离计算,若有:

$$\|\mathbf{I}_1 \mathbf{I}_i\| < \|\mathbf{I}_1 \mathbf{I}_j\|, \quad (4)$$

则点  $I_i$  为发光点4对应的像点,点  $I_j$  为发光点5对应的像点。反之,则点4和5的对应关系对调。

由此可知,另外的两个像点即为发光点 2 和 3 对应的像点。

记发光点 2 和 5 对应的像点分别为  $I_2$  和  $I_5$ , 以矢量  $I_2 I_5$  为参考矢量,计算  $I_5$  与发光点 2 和 3 对应的像点形成的两个矢量分别与矢量  $I_2 I_5$  的夹角(逆时针),按照式(3)计算得到的角度  $\theta_{ij} < 90^\circ$  的矢量像点为发光点 1 对应的像点,另一个为发光点 2 对应的像点。

## 4 系统测量模型

设大视场双目立体视觉测量系统的两个摄像机坐标系分别为  $o_1 x_1 y_1 z_1$  和  $o_r x_r y_r z_r$ , 图像坐标系分别为  $O_1 X_1 Y_1$  和  $O_r X_r Y_r$ , 如图 3 所示。

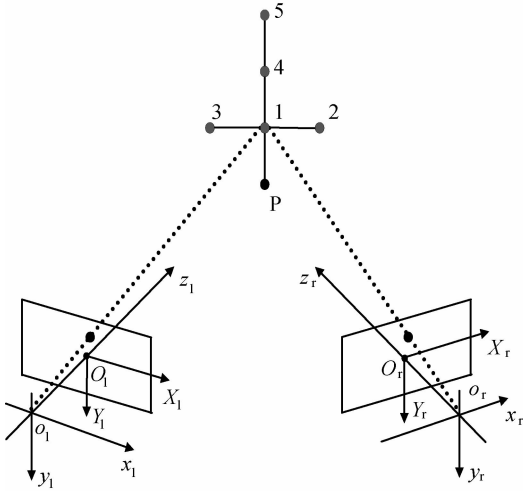


图 3 大视场双目立体视觉测量系统测量模型

Fig. 3 Measurement model of large FOV binocular stereo vision system

将世界坐标系  $oxyz$  建立在左摄像机上,左摄像机的标定矩阵为  $K_l$ ,右摄像机的标定矩阵为  $K_r$ ,大视场双目立体视觉测量系统的测量模型可表示为:

$$\begin{cases} \rho_l \tilde{X}_l = K_l \tilde{x}_l = K_l [I | 0] \tilde{x}_1 \\ \rho_r \tilde{X}_r = K_r \tilde{x}_r = K_r [R | -RC_r] \tilde{x}_1 \end{cases}, \quad (5)$$

其中:  $\rho_l, \rho_r$  为不为零的比例常数,  $\tilde{X}_l, \tilde{X}_r$  分别为左右摄像机图像点的齐次坐标,  $\tilde{x}_l, \tilde{x}_r$  分别为左右摄像机坐标系下三维物点的齐次坐标,  $\tilde{x}$  为世界坐标系下三维物点的齐次坐标,  $I$  为单位矩阵,  $R$  为右摄像机坐标系到世界坐标系的旋转变换矩阵,  $C_r$  右摄像机坐标系的原点在世界坐标系下的

齐次坐标。为表达方便,令  $T = -RC_r$ 。

式(5)中,  $\rho_l, \rho_r$  和  $\tilde{x}$  为待求量,即自由度有 5 个;而且式中的每个等式可以提供 3 个独立的约束,两个等式可以提供 6 个独立的约束。因此,由式(5)可确定  $\tilde{x}$ ,实现三维测量。

## 5 测量系统标定

标定是获得系统测量模型式(5)中模型参数  $R$  和  $T$  的过程。而摄像机的标定矩阵  $K_l$  和  $K_r$ , 即内部参数的标定已经完成。本文提出  $R$  和  $T$  的标定采用线性解析与非线性优化相结合的方法,线性解析完成非线性优化初值的求解,在此基础上通过非线性优化获得精确解。

### 5.1 由本质矩阵 $E$ 线性求解 $R$ 和 $T$ 的初值

双目立体视觉传感器的本质矩阵  $E$  满足如下约束:

$$\hat{X}_l^T E \hat{X}_r = 0, \quad (6)$$

其中:  $\hat{X}_l, \hat{X}_r$  分别为左右摄像机的归一化图像坐标。  $E$  由  $R$  和  $T$  确定,求得  $E$  即可获得  $R$  和  $T$ 。  $E$  的具体定义如下<sup>[20]</sup>:

$$E = [T]_{\times} R, \quad (7)$$

其中:  $[T]_{\times}$  为由平移矢量  $T$  形成的反对称矩阵。

采用如图 4 所示的一维基线尺靶标进行标定。已知两特征点  $P_1$  和  $P_2$  之间的精确空间距离,将该靶标在测量视场内至少摆放 5 个不同位置上,由  $P_1$  和  $P_2$  对应的像点坐标及已知的标定矩阵  $K_l$  和  $K_r$ ,结合式(6)形成线性方程组即可求得相差一个比例因子意义下的本质矩阵  $E$ 。进一步结合式(7)对本质矩阵  $E$  进行奇异值分解<sup>[21]</sup>,可求得旋转矩阵  $R$  和相差一个比例因子的平移矢量  $T'$ (这里令  $T' = \alpha T, \alpha$  为比例因子),可作为进一步优化求解的初值。



图 4 标定用一维基线尺靶标

Fig. 4 1D target with known precise length for calibration

### 5.2 非线性优化求 $R$ 和 $T$ 的精确解<sup>[7]</sup>

将式(6)中的  $E$  写为关于  $R$  和  $T$  的 11 维矢

量  $\mathbf{x}$ , 即:

$$\mathbf{x} = [t'_y, t'_z, r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8, r_9]^T. \quad (8)$$

由于  $\mathbf{T}' = \alpha \mathbf{T} = [1, t'_y, t'_z]$ 。式(6)可以改写为:

$$f(x) = \hat{\mathbf{x}}_i^T [(1 - \hat{\mathbf{X}}_r t'_z) \mathbf{R}^2 - (t'_y - \hat{\mathbf{Y}}_r t'_z) \mathbf{R}^1 - (\hat{\mathbf{Y}}_r - \hat{\mathbf{X}}_r t'_y) \mathbf{R}^3] = 0. \quad (9)$$

其中:  $\mathbf{R}^i (i=1, 2, 3)$  为旋转矩阵  $\mathbf{R}$  的行构成的矢量。

考虑旋转矩阵  $\mathbf{R}$  的正交性, 即  $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}$ , 得到 6 个等式约束, 为:

$$o_i(x) = 0, (i = 1, 2, \dots, 6). \quad (10)$$

为进一步加强对目标函数的代表性, 一维基线尺靶标摆放在不同位置时, 特征点  $P_1$  和  $P_2$  之间的距离随摆放位置变化的分散性应越小越好, 具体表示为:

$$e_i(x) = d_1^2 - d_i^2 = 0, \quad (11)$$

其中:  $d_1^2$  表示一维基线尺靶标第 1 个摆放位置时特征点  $P_1$  和  $P_2$  之间距离的平方,  $d_i^2$  表示一维基线尺靶标第  $i (i \neq 1)$  个摆放位置时特征点  $P_1$  和  $P_2$  之间距离的平方。

根据式(9)、(10)、(11)建立目标函数, 为:

$$\min F(x) = \sum_{i=1}^{2N} \lambda_1 f_i^2(x) + \sum_{i=1}^6 \lambda_2 o_i^2(x) + \sum_{i=1}^{N-1} \lambda_3 e_i^2(x), \quad (12)$$

其中:  $N$  为一维基线尺靶标摆放的位置数,  $\lambda_i (i=1, 2, 3)$  为罚因子。

基于式(12), 以 4.1 节求得的  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}'$  的线性解为初值, 采用 Levenberg-Maquart 优化算法可得到关于  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}'$  的精确解。由  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}'$  求得的一维基线尺靶标特征点  $P_1$  和  $P_2$  的距离  $d'$  及它们之间的标准距离  $d$ , 可求得比例因子  $\alpha$ , 从而求得精确的  $\mathbf{T}$ , 由此完成标定。

## 6 测量系统搭建及实验

### 6.1 系统搭建

图 1 为构建的大视场双目立体视觉测量系统, 其各部分如图 5 所示。两台 EOS 5D 数码相机的分辨率均为  $4\,368 \text{ pixel} \times 2\,912 \text{ pixel}$  (图 5(a)), 镜头为 Cannon EF-24-105 mm f/4 IS

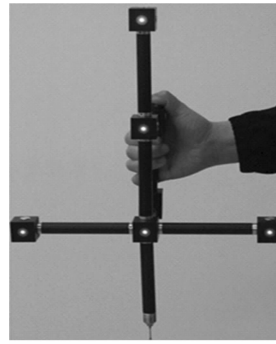
USM, 基线距离约为 3 m。一维基线尺靶标如图 5(b)所示, 两特征点之间的距离为 1 234.15 mm, 精度为 0.01 mm。柔性光笔如图 5(c)所示, 用碳纤维材料加工, 其特征参数如表 1 所示, 由高精度三坐标测量机测得。图 5(d)为采用 19" LG L1972H LCD 形成的平面靶标, 分辨率为  $1\,280 \text{ pixel} \times 1\,024 \text{ pixel}$ , 像素点距离为 0.294 mm, 精度为 0.01 mm。



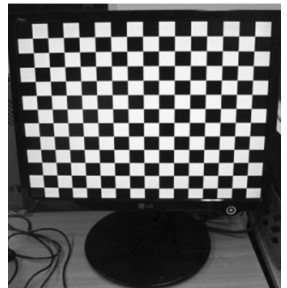
(a) EOS 5D 数码相机  
(a) EOS 5D digital camera



(b) 一维基线尺靶标  
(b) 1D target with known precise length



(c) 柔性光笔  
(c) Flexible light probe



(d) LG L1972H LCD 平面靶标  
(d) LG L1972H LCD planar target

图 5 测量系统局部放大图

Fig. 5 Portional enlargement of measurement system

表 1 柔性光笔特征参数数据

Tab. 1 Parameters of flexible light probe

特征点	特征点中心坐标/mm		
	x	y	z
1	139.098 3	-0.000 1	0.000 0
2	0.003 7	0.002 3	0.000 0
3	-138.557 7	-0.308 9	0.000 0
4	1.779 4	139.159 9	0.000 0
5	3.572 5	277.513 9	0.000 0

## 6.2 测量实验

### 6.2.1 相机内部参数标定

将图 5(d)所示的平面靶标在  $7\text{ m} \times 4.7\text{ m}$  的测量视场内摆放 50 次,用文献[22]中的标定方法得到两台数码相机的内部参数,如表 2 所示。

表 2 测量系统相机内部参数的标定结果

Tab. 2 Calibrating inner parameters of cameras in measurement system

相机	左相机	右相机
$\alpha$	4 133.28	4 266.53
$\beta$	4 137.96	4 271.42
$\gamma$	0.00	0.00
$u_0$	220 7.71	2 188.34
$v_0$	1 455.35	1 477.55
$k_1$	-0.040	-0.027
$k_2$	0.144	0.159

表 2 中, $\alpha, \beta$  分别为  $u$  轴和  $v$  轴上的尺度因子, $\gamma$  为  $u$  轴和  $v$  轴的不垂直因子, $(u_0, v_0)$  为摄像机的光心, $k_1, k_2$  为镜头畸变系数。

### 6.2.2 系统结构参数标定

在  $4\text{ m} \times 2.7\text{ m}, 5\text{ m} \times 3.3\text{ m}, 6\text{ m} \times 4\text{ m}, 7\text{ m} \times 4.7\text{ m}$  4 个不同测量范围对测量系统的结构参数进行标定,一维基线尺靶标共摆放 50 次。在此基础上,测量参加标定的 30 个位置和未参加标定的 20 个位置的一维基线尺靶标特征点并计算其距离,与特征点标准距离进行比对后计算 RMS

误差( $\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - d)^2}$ , 其中  $N$  表示位

置数, $d_i$  表示由标定测量模型计算得到的第  $i$  个位置一维基线尺靶标的长度, $d$  表示一维基线尺靶标的标准长度),作为标定精度和测量精度。结构参数、优化迭代次数及标定和测量精度结果如表 3 所示。其中,每个测量范围的第一列数据为线性标定结果,第二列为优化后的结果。

表 3 测量系统结构参数标定和精度评价结果

Tab. 3 Calibrating parameters of measurement system and their accuracy estimation

结构参数	$4\text{ m} \times 2.7\text{ m}$		$5\text{ m} \times 3.3\text{ m}$		$6\text{ m} \times 4\text{ m}$		$7\text{ m} \times 4.7\text{ m}$	
	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final
$r_1$	-0.946	-0.945	-0.944	-0.945	-0.947	-0.945	-0.941	-0.941
$r_2$	-0.010	-0.014	0.013	-0.015	-0.012	-0.013	-0.011	-0.012
$r_3$	0.325	0.327	0.329	0.327	0.322	0.328	0.339	0.339
$r_4$	0.007	0.003	0.033	0.003	0.005	0.004	0.003	0.004
$r_5$	-1.000	-0.999	-0.991	-0.999	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
$r_6$	-0.012	-0.034	0.133	-0.036	-0.021	-0.030	-0.026	-0.023
$r_7$	-0.325	-0.328	-0.328	-0.327	-0.322	-0.328	-0.339	-0.339
$r_8$	0.010	0.031	-0.137	0.033	0.018	0.028	0.023	0.020
$r_9$	-0.946	-0.944	-0.935	-0.944	-0.946	-0.944	-0.941	-0.940
$t_x$	-0.987	-3 306.796	-0.988	-3 105.317	-0.984	-3 112.679	-0.985	-3 259.183
$t_y$	0.010	43.541	0.008	58.552	0.006	28.164	0.010	-18.877
$t_z$	-0.158	-436.925	-0.157	-427.507	-0.179	-423.287	-0.175	-507.029
优化叠代次数	677		1 207		1 543		1 803	
标定 RMS/mm	0.06		0.08		0.11		0.14	
测量 RMS/mm	0.08		0.12		0.15		0.18	

由表3可知,随着测量范围的增大,优化迭代次数的增加,系统标定和测量精度均有所降低,但测量精度优于0.2 mm。

### 6.2.3 测量实验

在测量系统的测量范围为7 m×7 m情况下,对一台ABB 1410工业机器人本体表面的三维形貌进行了测量实验,共获得了3 000个点,点云数据及渲染结果如图6所示。实验中,柔性光笔每移动到一个点位,测量系统测得光笔上5个LED发光点的三维坐标,据此计算出接触探头P点的三维坐标,即机器人本体表面点的三维坐标。为评价测量精度,计算每个点位5个LED发光点之间的距离,与标准距离进行比对并获得RMS误差,图7给出了其中383个点位的RMS误差曲线。

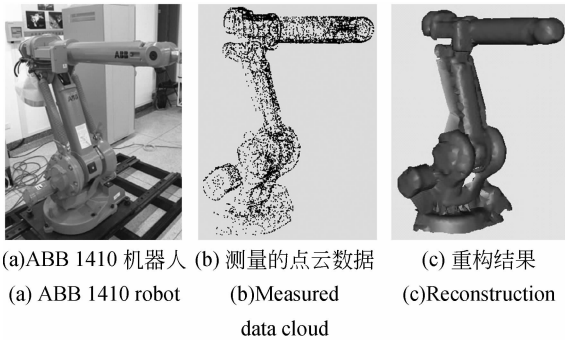


图6 ABB 1410 机器人本体表面的三维测量结果

Fig.6 3D measurement of body surface of ABB 1410 robot

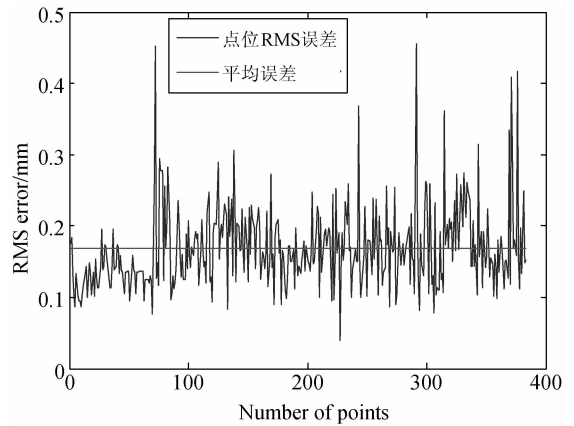


图7 383个点位测量的RMS误差曲线

Fig.7 RMS error curve of 383 measured points

## 7 结 论

本文所建立的光笔式大视场三维视觉测量系统,在7 m×4.77 m的测量范围内的测量精度优于0.2 mm,能够很好地满足飞机、船舶、机车等大型装备制造中对接与装配的现场高精度测量需求。随着数码相机分辨率的不断提高(如Nikon D800已达3 600万像素),在保证测量精度的前提下,测量系统的测量范围还可进一步扩大,从而适应测量更大尺度规模的装备。本文所研制的柔性光笔发光特征点的分布模式仍需进一步改进,以更好保证特征点识别的准确性。

## 参考文献:

- [1] 杨洪涛. 坐标测量机误差建模与修正技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2007:1-4.  
YANG H T. *Research on Error Model Building and Error Correcting Technique of Coordinate Measuring Machines*[D]. Herfei: Herfei University of Technology, 2007:1-4. (in Chinese)
- [2] 张望先,仲思东,隋莉斌,等. 基于三坐标测量机的大尺寸非接触测量[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(5): 112-115.  
ZHANG W X, ZHONG S D, SUI L B, *et al.*. Noncontact measurement of big dimension object based on coordinate measuring machine [J]. *Journal of Wuhan University*, 2004, 37(5): 112-115. (in Chinese)
- [3] 周虎,郝继贵,张滋黎,等. 激光电子经纬仪动态跟

踪引导系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(15): 2671-2678.

- ZHOU H, ZHU J G, ZHANG Z L, *et al.*. Design of dynamic tracking and guiding system for laser-electronic theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(15): 2671-2678. (in Chinese)
- [4] KAKNEN H, REITERER A. Videotheodolite measurement systems-state of the art [C]. *ISPRS, Commission V Symposium, Dresden Germany: CRC Press*, 2006: 142-146.
- [5] WALSER B H. *Development and calibration of an image assisted total station* [D]. Zurich: Swiss federal institute of technology, 2004.
- [6] 王学影,刘书桂,王斌,等. 关节臂式柔性三坐标测量系统的数学模型及误差分析[J]. 纳米技术与精密工程, 2005, 3(4): 262-267.  
WANG X Y, LIU SH G, WANG B, *et al.*. Mathe-

- matical model and error analysis of the articulated arm flexible CMM[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2005,3(4): 262-267. (in Chinese)
- [7] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 17-19.  
ZHANG G J. *Vision Measurement* [M]. Beijing: Science Press, 2008:17-19. (in Chinese)
- [8] FARO Technologies Inc.. Introducing FARO® CAM2® SmartInspect [Z/OL]. <http://www.faroasia.com/home/cn>. [2013-04-10]
- [9] 王为农, 苏永昌, 任国营. 激光跟踪仪的动态特性研究[J]. 计量学报, 2007,28(1): 34-37.  
WANG W N, SU Y CH, REN G Y. A study on dynamic character of laser tracker[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007,28(1):34-37. (in Chinese)
- [10] 甘霖, 李晓星. 激光跟踪仪现场测量精度检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2009,135(15):612-614.  
GAN L, LI X X. Site measuring accuracy testing of laser tracker [J]. *Journal of Beihang University*, 2009,135(15): 612-614. (in Chinese)
- [11] 朱永国. 飞机大部件自动对接若干关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011:1-8.  
ZHU Y G. *Research on some key techniques on aircraft large part automatic joining* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011:1-8. (in Chinese)
- [12] ZOU J H, XU G K, LI G L, *et al.*. The iGPS measurement technology application for the aircraft flexible joint assembly[R]. SAE10AMAF-0015, 2010.
- [13] 钟凯, 李中伟, 史玉升, 等. 组合式大尺寸三维测量系统中的结构参数标定算法[J]. 天津大学学报, 2011,44(5): 425-429.  
ZHONG K, LI ZH W, SHI Y SH, *et al.*. Calibration algorithm of structure parameters in combined large-scale 3D metrology system[J]. *Journal of Tianjin University*, 2011,44(5): 425-429. (in Chinese)
- [14] SUN J H, ZHANG G J, WEI ZH ZH, *et al.*. Large 3D surface measurement using a mobile coded light-based stereo vision system[J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2006, 132 (2): 460-471.
- [15] GOM mbH-Gesellschaft for Optische Messtechnik [Z/OL]. <http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/atos.html>. [2013-04-10]
- [16] ALCON and Breuckmann [Z/OL]. <http://www.aicon3d.com/products/moveinspect-technology/moveinspect-hr/at-a-glance/moveinspect-hr-functional-principle.html>. [2013-04-10]
- [17] 魏振忠, 高明, 张广军, 等. 一种光斑中心的亚像素提取方法[J]. 光电工程, 2009,36(4):111-121.  
WEI ZH ZH, GAO M, ZHANG G J, *et al.*. Subpixel extraction method for the center of light-spot image[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2009,36(4):111-121. (in Chinese)
- [18] SHARP C S, SHAKERNIA O. A vision system for landing an unmanned aerial vehicle[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Korea, May 21-26, 2001*: 1720-1727.
- [19] 孙即祥, 王晓华. 模式识别中的特征提取与计算机视觉不变量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 272-313.  
SUN J X, WANG X H. *Feature Extraction in Pattern Recognition and Computer Vision Invariants* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001:272-313. (in Chinese)
- [20] HARTLEY R, ZISSERMAN A. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. 2nd ed.. Cambridge: Cambridge Press, 2003:239-261.
- [21] HARTLEY R I. In defense of the eight-point algorithm [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 19 (6): 580-593.
- [22] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, 2000, 22 (11): 1330-1334.

#### 作者简介:



冯萍(1982—),女,山东青岛人,硕士,实验师,2009年于北京科技大学获得硕士学位,主要从事精密测量及实验研究。E-mail: fengping@buaa.edu.cn



魏振忠(1972—),男,山东青岛人,博士,教授,博士生导师,主要从事机器视觉、光电精密测量等方面的研究。E-mail: zhenzhongwei@buaa.edu.cn