

文章编号: 1001-3806(2013)04-0523-06

## 基于靶标的三目视觉 3 维坐标测量系统

张绍兵,熊显名\*,蒋曲博,张文涛,胡放荣

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院,桂林 541004)

**摘要:** 为了解决复杂环境中大视场、高精度、非接触 3 维测量问题,采用三目摄像机结构,通过靶标成像来测量被测点 3 维坐标的测量系统。测量时摄像机采集测量靶标的图像,计算机通过图像处理的方法获取测量靶标上标志点的 3 维坐标,并提出基于被测点与标志点间距离方程与直线约束的被测点求解优化方法。测量系统通过高精度光栅位移平台带动测量靶标移动来完成测试。结果表明,测量系统在视场范围、测量精度、使用灵活性等方面有较大的改进,能够测量视场深度从 2m~5m 范围内的视场,测量精度优于 0.2mm。

**关键词:** 测量与计量;图像处理;3 维坐标测量;三目视觉;测量靶标

**中图分类号:** TN911.73      **文献标识码:** A      **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.04.024

### Trinocular vision 3-D coordinate measuring system based on target

ZHANG Shao-bing, XIONG Xian-ming, JIANG Qu-bo, ZHANG Wen-tao, HU Fang-rong

(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of the large field of view, high-precision and non-contact 3-D measurement in the complex environment, a trinocular measuring system was put forward, in which the 3-D coordinates of the measured point were measured by analyzing target images. When under the measurement, the camera captured images of the measurement target, while the computer obtained the 3-D coordinates of the mark points in the measurement target by means of image processing, and an optimized method for solving the measured points was proposed based on the distance between the measured points and mark points, as well as linear constraint. The measurement target can be moved with the platform of the high precision grating ruler and measurement can be carried out. As shown in the experiment, the 3-D measurement system has a greater improvement in the field range, measurement accuracy, operation flexibility and so on. Its measurement accuracy is higher than 0.2mm in the depth of field ranging from 2m to 5m within the viewing field.

**Key words:** measurement and metrology; image processing; 3-D coordinate measurement; trinocular vision; measurement target

### 引 言

基于计算机视觉的 3 维坐标测量技术<sup>[1]</sup>具有精度高、量程大、通用性强等特点,因此目前被广泛地应用于汽车、航空和机械制造业等领域。当前国内外 3 维坐标测量技术发展劲头十分迅猛,非接触式 3 维测量技术具有探测速度快、测量的柔性好、测量精度高、量程大等优点,必将成为未来一个重要的发

展方向。在 3 维坐标测量方面,清华大学、北京航空航天大学、天津大学、浙江大学、中国科学院模式识别国家重点实验室等科研院所和高校积极从事该领域的科研开发工作,并取得了一些不错的进展。基于靶标的 3 维坐标测量技术是通过摄像机采集手持式靶标的图像,后由计算机得到被测点坐标。目前,基于手持式靶标的 3 维坐标测量系统多采用单目或双目摄像机结构,天津大学 LIU 等人<sup>[2-3]</sup>采用单目摄像机和直线光笔完成测量过程,中国海洋大学 XIE 等人<sup>[4]</sup>也对基于光笔的双目摄像机坐标测量系统进行了研究。单目视觉坐标测量系统具有携带方便、使用简单等优点,但有效视场较小,不能满足大测量视场的要求,精度有限且系统的可靠性由单个摄像机决定。双目视觉坐标测量系统<sup>[5]</sup>用视差原理求解空间坐标,扩大了有效视场范围,提供了一

基金项目:广西省科学研究与技术开发计划资助项目  
(桂科攻 11107001-40)

作者简介:张绍兵(1988-),男,硕士研究生,主要从事光电检测、图像处理方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: xmxiong@guet.edu.cn

收稿日期:2012-09-07;收到修改稿日期:2012-11-05

种提高3维坐标测量系统性能的可行性思路。

鉴于此,本文中给出了一种基于靶标成像的三目摄像机3维坐标测量方案,该方案拥有更广阔的测量范围以及在不稳定环境中更高的可靠性,同时能够给予手持靶标更多的灵活性。

## 1 测量系统构成

基于靶标的三目视觉3维坐标测量系统如图1所示,其主要由测量靶标、3台摄像机、帧同步触发装置、图像采集卡和计算机组成。测量靶标与被测物接触的位置为微小的球形触头,测量靶标上装有5个标志点,标志点为红外发光二极管或者白色发光二极管,标志点呈十字形分布在同一个平面上,长轴上标志点的中心和测量靶标触点近似处于一条直线上,且各个标志点中心和测量靶标触点之间的距离已知。测量时,测量靶标置于摄像机公共视场中,测量靶标触点接触被测物表面,帧同步触发装置控制摄像机同时采集测量靶标上标志点的图像信息,图像采集卡将图像输送到电脑上处理,求解触点的3维坐标,即被测物体表面的3维坐标。由于摄像机是通过采集测量靶标上标志点的图像来计算被测点3维坐标,而不是直接采集被测物体表面数据来获取3维坐标,故而能够减小环境光对测量的影响。

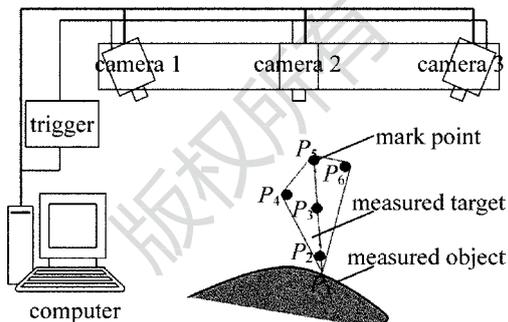


Fig. 1 Structure of the measuring system

## 2 视觉测量原理

### 2.1 双目视觉测量原理

双目立体视觉测量<sup>[1,6-7]</sup>是基于视差原理,由多幅图像获取物体3维几何信息。在计算机视觉系统中,双目立体视觉测量一般由双目摄像机从不同角度同时获取周围景物的两幅数字图像,已知两摄像机之间位置关系,便可以获取两摄像机公共视场内物体特征点的3维坐标。当两个摄像机不做特殊要求摆放时,如图2所示。设左摄像机  $O_1-x_1y_1z_1$ ,位于

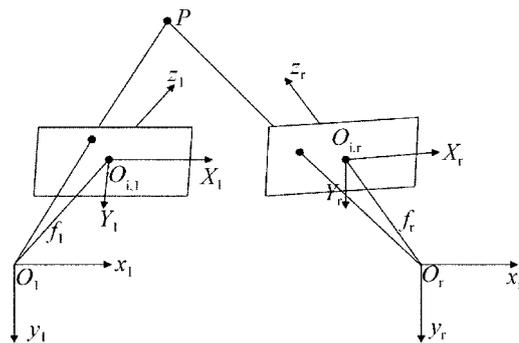


Fig. 2 Binocular vision measurement model

世界坐标系  $O-XYZ$  的原点处且无旋转,图像坐标系为  $O_{i,1}-X_1Y_1$ ,有效焦距为  $f_1$ ,右摄像机坐标系为  $O_r-x_r y_r z_r$ ,图像坐标系为  $O_{i,r}-X_r Y_r$ ,有效焦距为  $f_r$ ,设  $P$  点为视场中的一点,该点在摄像机坐标系  $O_1-x_1y_1z_1$  与  $O_r-x_r y_r z_r$  下的坐标分别为  $(x_1, y_1, z_1)$  和  $(x_r, y_r, z_r)$ ,在图像坐标系为  $O_{i,1}-X_1Y_1$  与  $O_{i,r}-X_r Y_r$  下的坐标分别为  $(X_1, Y_1)$  和  $(X_r, Y_r)$ ,由摄像机透视变换模型有:

$$s_1 \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$s_r \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_r & 0 & 0 \\ 0 & f_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $s_1, s_r$  为比例参量,  $O_1-x_1y_1z_1$  与  $O_r-x_r y_r z_r$  坐标系之间的相互位置关系可通过空间转换矩阵  $M_{1,r}$  表示为:

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{bmatrix} = M_{1,r} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$[R \quad T] \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $R, T$  分别为  $O_1-x_1y_1z_1$  与  $O_r-x_r y_r z_r$  坐标系之间的旋转矩阵和平移变换矢量。由(1)式~(3)式可知,对于  $O_1-x_1y_1z_1$  坐标系中的空间点,两摄像机像素点之间的对应关系为:

$$s_r \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_r & 0 & 0 \\ 0 & f_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 f_r & r_2 f_r & r_3 f_r & t_x f_r \\ r_4 f_r & r_5 f_r & r_6 f_r & t_y f_r \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 X_1 / f_l \\ z_1 Y_1 / f_l \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

解析(4)式,可得空间点 3 维坐标为:

$$\begin{cases} x = z_1 X_1 / f_l \\ y = z_1 Y_1 / f_l \\ z = \frac{f_l(f_l t_x - X_1 t_z)}{X_1(r_7 X_1 + r_8 Y_1 + r_9 f_l) - f_r(r_1 X_1 + r_2 Y_1 + r_3 f_l)} \end{cases} \quad (5)$$

如果已知焦距  $f_l, f_r$  和空间点在左、右摄像机中的图像坐标以及左右摄像机之间的旋转矩阵  $R$  和平移矢量  $T$ , 就可以得到被测物体点的空间 3 维坐标。其中焦距  $f_l$  和  $f_r$  通过摄像机标定<sup>[1,8]</sup> 获得,左、右摄像机间的旋转矩阵  $R$  和平移矩阵  $T$  通过系统标定获得<sup>[1]</sup>。

### 2.2 三目视觉测量

系统采用的三目视觉<sup>[9]</sup> 是建立在双目视觉基础上,摄像机光轴之间互为夹角,组成 3 个双目视觉测量系统。如图 3 所示,虚线为摄像机光轴,C 区域为 3 个双目测量系统的公共视场,B 区域为两个双目视觉测量系统的公共视场,这些区域都是系统的有效测量区域。相对于单个双目视觉测量系统,三目视觉测量系统中不同的双目视觉系统视场间互相弥补,扩大测量视场,使靶标在测量中拥有更大灵活性,降低靶标在摄像机测量系统中移动时视场和视角的限制。在三目视觉测量系统中,各个系统都能够独立完成测量过程,在不稳定的工业环境中可靠性更高,即使有一台摄像机不能工作,另外两台摄像机也能够组成双目测量系统,虽然系统有效视场减小,但精度可以保持,仍能够继续进行测量作业;从另一方面来讲,这种结构也有利于系统功能的进一步完善,如将测量靶标采用多面标志点,并在靶标中安装 2 维激光轮廓传感器,可以完成大型轮胎表面 3 维轮廓扫描作业。

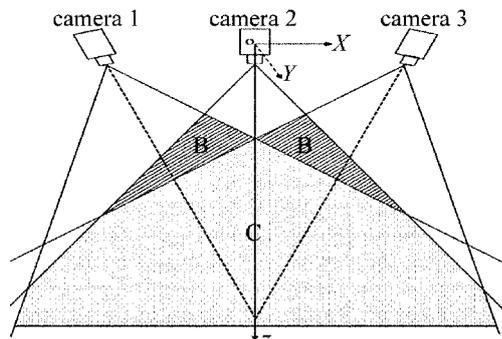


Fig. 3 Distribution diagram of viewing field in the trinocular system

### 3 基于距离方程和直线约束的被测点 3 维坐标求解

摄像机采集的图像经过图像处理,获取测量靶标上的标志点中心在每个摄像机中投影坐标,利用靶标上标志点中心的排列顺序以及极线约束<sup>[10]</sup>,对不同图像中的同一个标志点中心投影进行匹配,并通过(5)式求解标志点中心的 3 维坐标。如图 4 所示,靶标上 5 个标志点中心的 3 维坐标分别为  $P_2(x_2, y_2, z_2), P_3(x_3, y_3, z_3), P_4(x_4, y_4, z_4), P_5(x_5, y_5, z_5), P_6(x_6, y_6, z_6)$  以及触点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 。根据空间几何关系:在 3 维空间中,各个标志点间以及触点与各个标志点之间的距离固定不变且直线关系保持不变。设触点与标志点之间的距离为:  $|\overrightarrow{P_1 P_2}| = d_2, |\overrightarrow{P_1 P_3}| = d_3, |\overrightarrow{P_1 P_4}| = d_4, |\overrightarrow{P_1 P_5}| = d_5, |\overrightarrow{P_1 P_6}| = d_6$ , 根据距离关系建立以  $x_1, y_1, z_1$  的未知数的距离方程组:

$$\begin{cases} (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 = d_2^2 \\ (x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 + (z_1 - z_3)^2 = d_3^2 \\ (x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2 + (z_1 - z_4)^2 = d_4^2 \\ (x_1 - x_5)^2 + (y_1 - y_5)^2 + (z_1 - z_5)^2 = d_5^2 \\ (x_1 - x_6)^2 + (y_1 - y_6)^2 + (z_1 - z_6)^2 = d_6^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中,空间点  $P_2(x_2, y_2, z_2), P_3(x_3, y_3, z_3), P_4(x_4, y_4, z_4), P_5(x_5, y_5, z_5), P_6(x_6, y_6, z_6)$  在摄像机坐标系中的图像坐标以及  $d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$  已知,将方程展开,整理可得:

$$\begin{cases} 2(x_3 - x_2)x_1 + 2(y_3 - y_2)y_1 + 2(z_3 - z_2)z_1 = r_3^2 - d_3^2 - r_2^2 + d_2^2 \\ 2(x_4 - x_2)x_1 + 2(y_4 - y_2)y_1 + 2(z_4 - z_2)z_1 = r_4^2 - d_4^2 - r_2^2 + d_2^2 \\ 2(x_5 - x_2)x_1 + 2(y_5 - y_2)y_1 + 2(z_5 - z_2)z_1 = r_5^2 - d_5^2 - r_2^2 + d_2^2 \\ 2(x_6 - x_2)x_1 + 2(y_6 - y_2)y_1 + 2(z_6 - z_2)z_1 = r_6^2 - d_6^2 - r_2^2 + d_2^2 \end{cases} \quad (7)$$

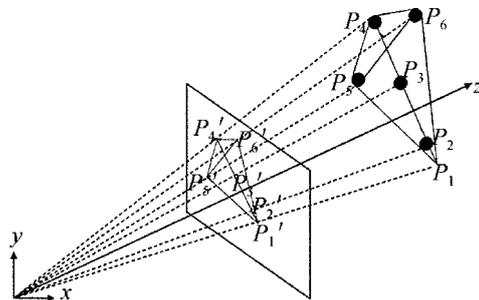


Fig. 4 Diagram of measurement target projection in camera image plane

式中,  $r_i^2 = (x_i + y_i + z_i)^2, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。(7) 式为超定方程组, 可以通过最小二乘法<sup>[11]</sup>得到 3 维坐标  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 。实际上由于实际测量中各种因素的干扰, 方程可能并不存在真正有意义的解, 即: 求解的 3 维坐标和长轴上的标志点中心不在一条直线上, 或者说  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  并不是上述方程组的解。通过几何分析, 可以从以下两方面对  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  进行约束并建立相关方程: 触点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  在长轴标志点中心组成的空间直线上, 触点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  所在的直线约束方程可以通过对  $P_2(x_2, y_2, z_2), P_3(x_3, y_3, z_3), P_4(x_4, y_4, z_4)$  进行最小二乘直线<sup>[11]</sup>拟合获得, (8) 式为其参量方程, 其中  $x_0, y_0, z_0$  为直线上一点的 X 轴、Y 轴、Z 轴坐标,  $m, n, l$  为直线在 X 轴、Y 轴、Z 轴上的方向数,  $t$  为参量方程的参量:

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + lt \\ y_1 = y_0 + mt \\ z_1 = z_0 + nt \end{cases} \quad (8)$$

触点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  使 (7) 式等号两端的差值平方和最小, 结合 (7) 式, 整理后获得触点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  的距离约束目标方程:

$$\min \left\{ \sum_{i=3}^6 [2(x_i - x_2)x_1 + 2(y_i - y_2)y_1 + 2(z_i - z_2)z_1 - r_i^2 - d_i^2 - r_2^2 + d_2^2] \right\} \quad (9)$$

联合直线约束方程 (8) 式与距离约束目标方程 (9) 式, 通过多次迭代即可获得实际中被测点的 3 维坐标  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 。

#### 4 实验结果

实验现场如图 5 所示, 采用 3 台微视图像公司



Fig. 5 Testing site

500 万像素、千兆网接口大面阵黑白工业摄像机 MVC5000SAC, 12mm 固定焦距 Computar 镜头, Intel 千兆网接口卡, 以 ATmega8 单片机为核心的帧同步触发装置以及摄像机底座、支架等组成测试系统, 其中, 3 台摄像机处于同一平面上, 相邻摄像机之间的间距为 800mm, 中间摄像机光轴与两边摄像机的光轴夹角为 81°。系统采用平面黑白棋盘格为标定物并利用 Opencv 视觉处理库<sup>[12]</sup>完成摄像机以及系统参量的标定过程。

#### 4.1 有效视场区域测试

视场的有效性是以靶标在固定位置、一定角度范围内旋转都能够正确被测量为标准, 靶标旋转的角度范围为: 在测量靶标平行 X-Y 平面的基础上, 沿 Z 轴能够旋转 360°, 沿 X 轴、Y 轴分别能够顺时针最大旋转 45°, 逆时针最大旋转 45°。测试结果如表 1 所示, 可以看出, 相对于单个双目视觉测量系统, 在该系统中, 靶标能够有效被测量的视场增加了 1 倍, 从而保证靶标平面可以在更大视场中从多角度被测量, 从而实现被测物体中隐蔽位置的测量, 即增加了靶标测量的灵活性。如果靶标采用多面标志点设计, 可以实现测量靶标在视场中任何位置的测量。

Table 1 Viewing field range of binocular system and trinocular system

depth of viewing field/mm	effective viewing field of	
	binocular system (width × height) /mm × mm	trinocular system (width × height) /mm × mm
2000	610 × 405	1170 × 760
3000	790 × 510	1590 × 1050
4000	980 × 650	1810 × 1185
5000	1150 × 820	2120 × 1300

#### 4.2 重复性测试

为验证测量系统的稳定性, 即单点重复性, 将测量靶标固定于摄像机视场中, 保证测量靶标与摄像机阵列不动, 连续采集测量 20 次, 得到被测点 3 维坐标在 X 轴、Y 轴、Z 轴的变化情况。图 6 中给出视场近处和远处的重复性测试结果, 视深 2.3m 附近、4.6m 附近的重复性误差在 X 轴、Y 轴、Z 轴的偏差分别为 0.03mm, 0.04mm, 0.03mm 和 0.06mm, 0.08mm, 0.08mm, 通过对比可以看出, 测量系统的稳定性随着视场深度的增加而降低。其主要原因在于随着视场距离的增加, 标志点中心坐标提取的稳定性以及精度下降。

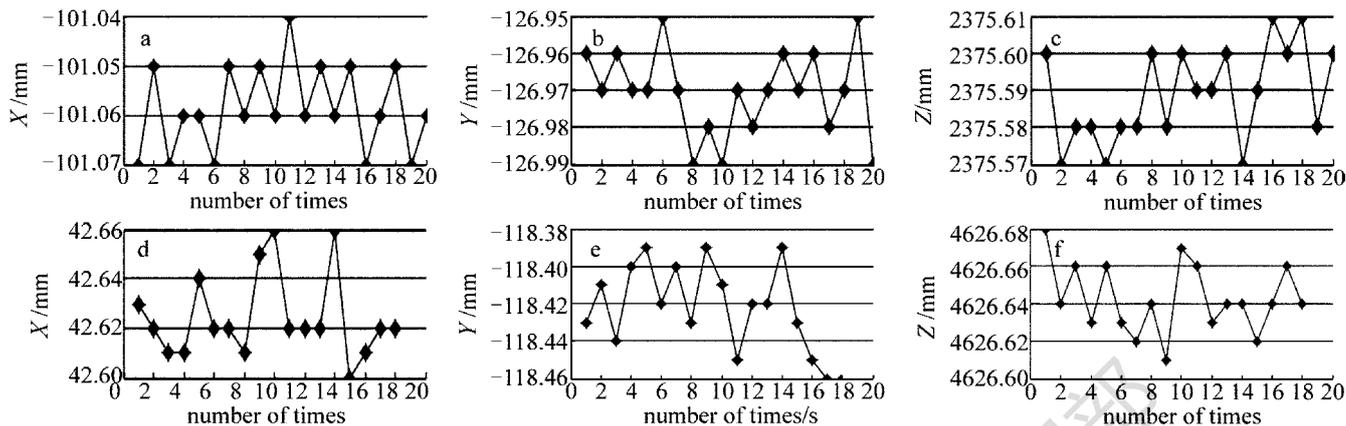


Fig. 6 Repeatability test

a ~ c—the result of repeatability test around 2.3m viewing field d ~ f—the result of repeatability test around 4.6m viewing field

4.3 精度测试

为了验证测量系统在整个视场中的精度, 实验中采用移动靶标的方式测量相对位移精度, 将测量靶标固定于有效量程为 500mm、精度为 0.01mm 的光栅尺位移平台上, 由位移台带动测量靶标在不同情况下移动, 对比测量结果与位移台实际移动距离的差距。测试主要包括不同视场深度下与不同移动距离下的系统精度测试, 能够在一定程度上说明测量系统在不同视场深度下受图像处理、系统结构参量、参量标定以及 3 维求解精度等方面的影响。表 2 与表 3 中给出了系统在两种测试方法的部分结果, 在硬件不变以及摄像机之间结构关系固定的情况下, 系统精度随着视场深度以及移动距离的增加而降低, 其主要原因在于摄像机镜头畸变未完全矫正、系统结构参量存在误差以及图像处理中标志点中心的提取精度随距离增加而降低。由数据来看, 在整个视场中系统测量精度优于 0.2mm。

Table 2 System accuracy test in the different depth of viewing field

depth of viewing field/m	moving displacement of positioning system/mm	displacement measurement of system/mm	absolute error/mm
2.3	10.00	9.98	0.02
2.8	10.00	10.01	0.01
3.3	10.00	10.04	0.04
3.8	10.00	10.03	0.03
4.6	10.00	10.05	0.05
5.0	10.00	10.09	0.09

Table 3 System accuracy test in the different moving distance in 4.6m viewing field

moving displacement of positioning system/mm	displacement measurement of system/mm	absolute error/mm
3.00	2.97	0.03
24.20	24.22	0.02
49.31	49.35	0.04
81.50	81.57	0.07
124.94	125.04	0.10
188.06	187.98	0.08
201.89	201.98	0.09
236.84	236.96	0.12
291.70	291.58	0.12
374.82	374.95	0.13

5 结论

测量系统采用三目摄像机结构, 是对基于光笔的单目或者双目视觉测量系统的一种改进与提高, 扩大了视场测量范围、提高了测量靶标的测量灵活度以及系统可靠性。系统采用平面靶标设计, 合理利用平面上直线与距离的约束关系来求解、优化被测点坐标, 保证计算得到的被测点坐标的有效性。实验结果表明, 基于靶标的三目视觉 3 维坐标测量系统的测量精度优于 0.2mm, 同时, 若进一步提高摄像机以及系统参量的求解精度, 可以获得更好的测量精度。

参考文献

[1] BOSCH J A. Coordinate measuring machines and systems[M]. New York, USA: CRC Press, 1995: 496.  
 [2] LIU S G, PENG K, HUANG F S, et al. A portable 3-D vision coordinate measurement system using a light pen[J]. Key Engineering Materials, 2005, 295/296: 331-336.

- [3] HUANG F S, QIAN H F. Single camera 3-D coordinate vision measuring system using a light pen[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(4): 69-72 (in Chinese).
- [4] XIE Z X, JIN M, XIN Y X. Study on 3-D-coordinate measurement technology using light pen based on binocular stereoscopic vision system[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(8): 896-899 (in Chinese).
- [5] ZHANG Z J, YU Q B, ZHANG Z Q. Research on probe imaging vision coordinate measurement with binocular cameras[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2004, 18(4): 305-310 (in Chinese).
- [6] WANG J H, HAN H Y, WANG C P, *et al.* Theoretic research on double-CCD stereoscopic measurement system [J]. Electronics Optics and Control, 2007, 14(4): 94-96.
- [7] LI Z Q, YANG G S. Research of depth information measurement based on binocular convergent camera system[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(30): 65-66 (in Chinese).
- [8] LI W, LIU X X, QIANG X F. Comparison of planar-pattern-based camera calibrate techniques[J]. Laser Journal, 2006, 27(2): 54-55 (in Chinese).
- [9] ZHANG G X, ZHANG H W, LIU Z, *et al.* A trinocular vision probe for sculptured surface measurements [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2004, 2(3): 204-209 (in Chinese).
- [10] LI X Z, ZHANG G J. Trinocular stereo matching method based on edge segment[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(2): 23-26 (in Chinese).
- [11] SUN W, ZHOU Z, LU N, *et al.* A product design strategy based on combination of design of experiment and inversion of partial least square model[J]. CIESC Journal, 2010, 61(1): 110-115 (in Chinese).
- [12] BRADSKI G, KAEBLE A. Learning open CV: computer vision with the open CV library [M]. Sebastopol, California, USA: O'Reilly Media Inc, 2008: 375-404.