

基于异面交会模型的立体视觉像机站位优化研究

王 伟¹ 于之靖² 郭 寅^{3*} 杨学友¹

¹ 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072
² 中国民航大学航空自动化学院, 天津 300300
³ 清华大学精密仪器系, 北京 100084

摘要 高精度的摄影测量中, 双目视觉测量是一种高效可行的测量方法。为了研究测量中双像机位置关系对测量结果的影响, 将像机标定、定向及图像坐标提取等干扰因素作为理想量来考虑, 从双像机交会测量的数学模型出发, 综合双像机光轴的交会角、像机视场角以及红外发光二极管(LED)的发光角等方面因素, 通过分析双像机在不同位置关系下对测量区域中红外 LED 控制点进行测量的结果及精度, 最终给出双目视觉测量中像机站位的优化策略。

关键词 机器视觉; 摄影测量; 站位优化; 异面交会

中图分类号 P234.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0408001

Study on the Camera Stations' Optimization of Stereoscope System Based on Plane Intersection Model

Wang Wei¹ Yu Zhijing² Guo Yin³ Yang Xueyou¹

¹ State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² Department of Aviation Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China
³ Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract In the high-precision photogrammetric, binocular vision measurement method is an efficient and feasible method. In order to explore the effect of the location relationship between cameras on measurement results, the interference factors such as camera calibration, orientation and image coordinate extraction are considered as ideal values. From the perspective of mathematics model of interchange measurement the measurement results and accuracy are analyzed through combining the main factors such as the camera field angle, merging angle and radiant angle of infrared light emitting diode (LED). It ultimately gives the stations optimization strategy by analyzing the measuring results and accuracy of the infrared LED in the measurement area which are fixed as control points at various locations between the cameras.

Key words machine vision; photogrammetric; stations optimization; plane intersection

OCIS codes 150.0155; 150.1135; 150.1488

1 引 言

立体视觉测量是基于立体视差原理, 利用空间相互关系已知的多个摄像机获取同一被测场景的图像, 解算被测物体的三维几何信息, 其中双目立体视

觉是最经典的视觉测量模型。影响双目立体视觉测量精度的因素主要包括: 系统建模误差, 像机内参和外参标定误差^[1-2], 其中对于内参的高精度标定则存在较多的方法^[3-5], 应用这些方法可以有效地

收稿日期: 2013-09-29; 收到修改稿日期: 2013-11-01

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51225505)、国家自然科学基金(U1333105)

作者简介: 王 伟(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事摄影测量和光电精密测量方面的研究。

E-mail: tju_wangwei@tju.edu.cn

导师简介: 杨学友(1949—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机控制与视觉检测技术等方面的研究。

E-mail: xueyou@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: guoyin@tsinghua.edu.cn

降低内参标定误差带来的影响;对于图像处理误差于之靖等^[6]通过插值方式增加处理的数据,张广军等^[7-8]通过对基础算法进行改进,提高了图像处理精度;而对于双像机的方位关系对测量精度的影响研究较少。本文以异面交汇模型为基础分析讨论双像机位置关系对测量精度影响,据此可以扩展到多目视觉测量站位的优化。

2 基础知识

2.1 双目立体视觉测量模型

双目立体视觉通过模仿人类双眼获取三维信息,其测量模型示意图如图 1 所示。两个摄像机与被测物体在空间形成一个三角形,利用空间点在两摄像机像平面上成像点坐标求出空间点的三维坐标。设 $O_{c1}-X_1Y_1Z_1$ 为摄像机 1 坐标系,有效焦距为 c_1 ,像平面坐标系为 $O_1-X_1Y_1$; $O_{c2}-X_2Y_2Z_2$ 为摄像机 2 坐标系,有效焦距为 c_2 ,像平面坐标系为 $O_2-X_2Y_2$,将摄像机 1 坐标系作为双目视觉传感器坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 。

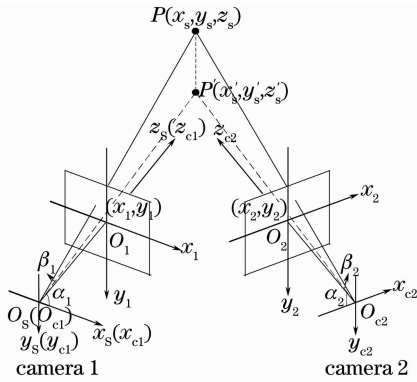


图 1 双目立体视觉测量模型

Fig. 1 Model of a stereoscopic system measurement

为了便于计算,将空间中的点投影到像平面的像面坐标 (X, Y) 转换为摄像机坐标系下的水平和垂直角度值 (α, β) 。其中 α 表示空间点的成像光束在面 XOZ 下的投影与 X 轴正向的夹角, β 表示空间点的成像光束与其在面 XOZ 下投影的夹角。

2.2 异面交汇解算模型

异面交汇点坐标测量法是利用两组水平和垂直角计算出其视准轴所在直线参数的方法,该方法在两直线公垂线上选取特定点坐标作为被测标识点坐标值,且充分利用了两组空间角度信息,为双像机测量系统坐标计算提供了一种有效的途径。异面交汇测量法的原理如图 2 所示。

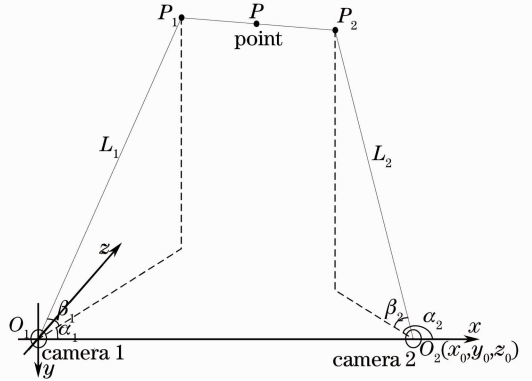


图 2 异面交汇测量模型

Fig. 2 Model of nonplanar intersection measurement

在图 2 中,假设世界坐标系定在像机 1 坐标系,则像机 2 坐标系原点在世界坐标系下坐标为 (x_0, y_0, z_0) 。经图像坐标转换后,测量目标 P 的方位角和高低角分别为 $(\alpha_1, \beta_1), (\alpha_2, \beta_2)$,成像光束 1 和光束 2 指向目标的直线分别为 L_1 和 L_2 。在理想情况下 L_1 和 L_2 应相交于 P 点,但实际情况中两直线无法严格相交,而是呈异面关系。

设直线 L_1 方向矢量为 (m_1, n_1, p_1) ,直线 L_2 的方向矢量为 (m_2, n_2, p_2) ,目标点 $P(x, y, z)$ 在 P_1P_2 连线上。假设两像机的测量精度相同,则点 P 的三维坐标可表示为^[9]

$$\begin{cases} x = 0.5(m_1 a + m_2 b + x_0) \\ y = 0.5(n_1 a + n_2 b + y_0) \\ z = 0.5(p_1 a + p_2 b + z_0) \end{cases}, \quad (1)$$

式中

$$\begin{cases} m_1 = \cos \alpha_1 \\ n_1 = -\tan \beta_1 \\ p_1 = \sin \alpha_1 \end{cases}, \quad \begin{cases} m_2 = \cos \alpha_2 \\ n_2 = -\tan \beta_2 \\ p_2 = \sin \alpha_2 \end{cases}$$

$$a = \frac{x_0(m_1 n_2^2 + m_1 p_2^2 - m_2 n_1 n_2 - m_2 p_1 p_2)}{(m_1^2 + n_1^2 + p_1^2)(m_2^2 + n_2^2 + p_2^2) - (m_1 m_2 + n_1 n_2 + p_1 p_2)^2} + \frac{y_0(n_1 m_2^2 + n_1 p_2^2 - m_1 m_2 n_2 - m_1 p_1 p_2)}{(m_1^2 + n_1^2 + p_1^2)(m_2^2 + n_2^2 + p_2^2) - (m_1 m_2 + n_1 n_2 + p_1 p_2)^2} + \frac{z_0(p_1 m_2^2 + p_1 n_2^2 - m_1 m_2 p_2 - p_2 n_1 n_2)}{(m_1^2 + n_1^2 + p_1^2)(m_2^2 + n_2^2 + p_2^2) - (m_1 m_2 + n_1 n_2 + p_1 p_2)^2}$$

$$b = \frac{x_0(m_1 n_1 n_2 + m_1 p_1 p_2 - m_2 n_1^2 - m_2 p_1^2)}{(m_1^2 + n_1^2 + p_1^2)(m_2^2 + n_2^2 + p_2^2) - (m_1 m_2 + n_1 n_2 + p_1 p_2)^2} +$$

$$\frac{y_0(n_1 m_1 m_2 + n_1 p_1 p_2 - n_2 m_1^2 - n_2 p_1^2)}{(m_1^2 + n_1^2 + p_1^2)(m_2^2 + n_2^2 + p_2^2) - (m_1 m_2 + n_1 n_2 + p_1 p_2)^2} +$$

$$\frac{z_0(p_1 m_1 m_2 + p_1 n_1 n_2 - p_2 m_1^2 - p_2 n_1^2)}{(m_1^2 + n_1^2 + p_1^2)(m_2^2 + n_2^2 + p_2^2) - (m_1 m_2 + n_1 n_2 + p_1 p_2)^2}$$

成像光束的交会角即为两异面直线的交会角可表示为

$$\gamma = \arccos \frac{m_1 m_2 + n_1 n_2 + p_1 p_2}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2} \cdot \sqrt{m_2^2 + n_2^2 + p_2^2}} = \arccos \frac{\cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \tan \beta_1 \tan \beta_2}{\sqrt{1 + \tan^2 \beta_1} \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \beta_2}} \quad (2)$$

2.3 控制光源——近红外 LED 特性

为保证图像处理精度和测量自动化的可靠实现,通常在被测物上设置光学控制点来产生明显的图像特征。经常使用的点状光源主要有半导体激光器(LD 光源)和红外发光二极管(红外 LED 光源),如图 3 所示。

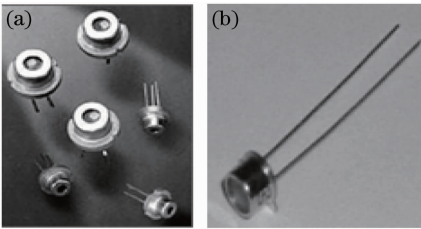


图 3 点状光源。(a) 半导体激光器;
(b) 红外发光二极管

Fig. 3 Point source of light. (a) Semiconductor laser;
(b) infrared light emitting diode

点状半导体激光器有很多优点^[10],对于如图 3 (b)所示的红外发光二极管(LED),不仅具有点状半导体激光器的优点,还具有低功耗、耐振动、可靠性好、寿命长、亮度高、显示清晰、感应快等特点。除此之外,相比于点状半导体激光器,红外 LED 还有两个明显优势:

1) 无预热时间。红外 LED 不需预热时间便能达到稳定状态,而点状半导体激光器需要约 20 分钟的预热时间;

2) 成像光斑质量好^[11]。

在高精度测量中一般使用红外 LED 作为控制光源,其在 CCD 平面上的光斑能量分布可近似地认为是二维高斯分布,对高精度像机单点测量重复性在 0.01 pixel 左右^[2,12-13]。

同时,红外 LED 有一定的发光角度,一般是在 30°~55°之间。实验中选用了发光角较大的 55° LED 作为控制光源。

3 双像机测量误差模型分析

3.1 控制点光源质量对图像提取精度的影响

使用红外 LED 作为空间中测量控制点时,还要考虑 LED 发光角度对光点成像质量的影响。West 等^[14]的研究表明,通过控制光源质量可以影响图像处理的精度。当 LED 正对像机时,即像机的中轴线与 LED 发光中轴线重合时,光点成像效果如图 4 (a)所示;当像机的中轴线与 LED 发光中轴线的夹角接近于 LED 的最大发光角时,光点成像效果如图 4(b)所示。

图 4(a)所示的激光点图像的提取坐标与实际位置吻合度较高,而 4(b)所示的激光点图像的提取坐标与实际位置会有较大的偏差。所以 LED 的空间摆放位置对立体视觉测量精度影响较大,摆放位置不当,会影响提取精度甚至激光点不可视。

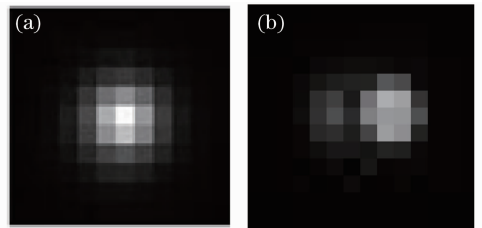


图 4 点状光源成像图片。(a) 正入射时;
(b) 夹角入射时
Fig. 4 Images of the point source of light. (a) Normal incident; (b) incident with an angle

3.2 公共区域内测量误差模型的建立

采用双像机进行测量时,公共区域是两个对接的锥形区域。图 5 所示的是俯视图,其黑色阴影区域是两像机视场的公共区域,黄色阴影区域 ABCD 为有效的测量区域(一般为避免镜头边缘较大的畸变,采用像机视场的中心区域进行测量)。测量过程中要确保测量目标在公共区域,这样才能使测量目标中的点能够同时在双像机中成像。

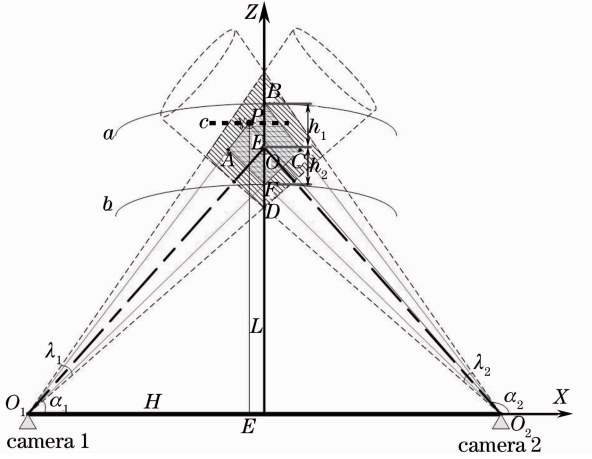


图 5 双像机测站交会区域俯视图

Fig. 5 Top view of the cross section of two cameras

建立如图 5 所示坐标系 $O-XYZ$, 设定双像机等高放置, 面 $ABCD$ 在面 XOZ 上。则两个像机中轴线的夹角为 θ , 而点 P 处成像光束的夹角设为 γ , 则有

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 = \alpha_2 - \alpha_1, \quad (3)$$

式中 γ_1 对应 $\angle O_1PE$, γ_2 对应 $\angle O_2PE$

设定此时垂直角 β 均为零, 整理(1)式得

$$\begin{cases} x = 0.5 \left[\frac{-x_0 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) + 2z_0 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} + x_0 \right] \\ y = 0.5y_0 \\ z = 0.5 \left[\frac{-2x_0 \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 + z_0 \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} + z_0 \right] \end{cases} \quad (4)$$

则因为图像提点误差所引入的水平角 α_1 和 α_2 的误差 $\Delta\alpha_1$ 、 $\Delta\alpha_2$ 对被测点坐标值的影响可以表示为

$$\begin{cases} \Delta x = 0.5 \sqrt{\left[\frac{x_0 \sin(2\alpha_2) - 2z_0 \cos^2 \alpha_2}{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)} \Delta\alpha_1 \right]^2 + \left[\frac{-x_0 \sin(2\alpha_1) + 2z_0 \cos^2 \alpha_1}{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)} \Delta\alpha_2 \right]^2} \\ \Delta y = 0 \\ \Delta z = 0.5 \sqrt{\left[\frac{-2x_0 \sin^2 \alpha_2 - z_0 \sin 2\alpha_2}{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)} \Delta\alpha_1 \right]^2 + \left[\frac{2x_0 \sin^2 \alpha_1 + z_0 \sin 2\alpha_1}{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)} \Delta\alpha_2 \right]^2} \end{cases} \quad (5)$$

4 仿真实验

4.1 双像机站位优化仿真分析

对于特定的像机及镜头, 其视场角 λ 固定; 而对于特定的测量目标, 测量目标到两像机基线的距离 L 固定。因而两个像机的摆放角度和基线距离将对测量结果和精度产生一定影响。

当两摄像机摆放好后, 建立如图 5 所示的笛卡尔坐标系, 即两摄像机对称分布在原点两侧, 其连线与 X 轴平行, 与水平面平行并垂直于 X 轴为 Z 轴, Y 轴由右手定则确定。

根据(5)式如图 6 所示曲线, 在测量距离 $L = 5$ m 恒定的情况下, 随着基线距离和测量点位置的变化, 同一输入误差所引入的测量误差将发生变化。图 6(a)、(b)中横坐标表示被测点在图 5 所示坐标系下 X 方向的坐标值(其中测点 Y 、 Z 值恒定, 分别为 0 和 L), 即移动被测目标使其在测量区域中沿平行于 X 轴方向运动(其运动路线如图 5 中粗虚线 c 所示); 纵坐标表示水平角 α_1 和 α_2 的误差 $\Delta\alpha_1$ 、 $\Delta\alpha_2$ 所引入的坐标值误差(其中 $\Delta\alpha_1$ 、 $\Delta\alpha_2$ 设定为 2 角秒)。

由于设定测量区域在 XOZ 平面, 所以测量过程中存在 X 和 Z 两个方向的误差。图 6 中(a)、(b)为不同基线距情况下 X 、 Z 两个方向上的测量误差为了清晰地显示误差的变化, 分别选取位于测量区域中心

(图中 o 表示)和边缘(图中 $*$ 表示)的测量点来描述误差变化情况, 结果如图 6 中(c)、(d)所示(其中横坐标表示两像机基线距离, 纵坐标表示被测点位的测量误差值), 如图 6(c)、(d)可以看出: 随着两摄像机基线距离的增大, 位于中心区域的被测点位的 X 方向测量误差逐渐增大, 而位于边缘区域则情况是测量误差由大变小再增大; Z 方向的测量误差(中心和边缘区域)均有从大变小而又缓慢增大的趋势。

由以上结果可知, 在实际测量中, 选择合适的基线距可以优化测量精度, 如上述仿真中在测量距离为 5 m 时, 选取 9 m 左右的基线距测量精度最高。但实际测量中并不能随意选择基线距, 对于红外 LED 控制光源, 其有一定的发光角度(一般是在 $30^\circ \sim 55^\circ$ 之间), 较好的成像则单点测量重复性在 0.01 pixel 左右, 所以若双像机基线距过大, 则像点提取精度较差甚至双像机不能同时观察到控制点。

在公共区域 $ABCD$, 制约测量区域中 LED 成像质量的临界点是位置 D 。如果在位置 D 能够很好地成像, 则在测量区域中均可。设 LED 的最大发光角为 ω , LED 的可用旋转角度为 ν , 则红外 LED 发光角中轴线与成像光束的夹角应小于 $1/2(\omega - \nu)$ 。

综上所述, 在设置像机位置关系时, 在测量区域中, 应尽量满足 $\gamma \leq \omega - \nu$ 的关系。

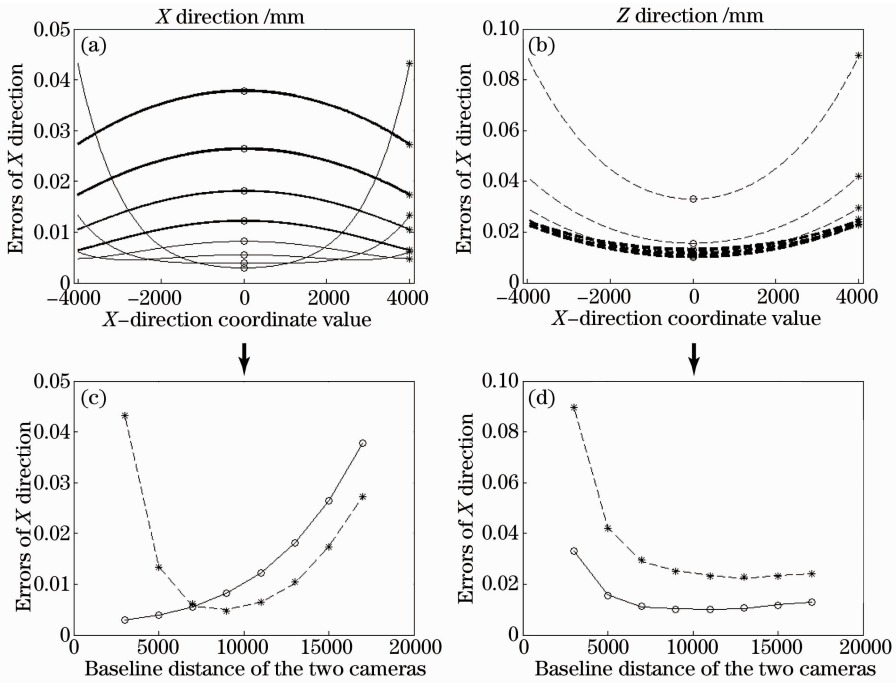


图 6 在不同基线距下测量误差分布曲线图(X 和 Z 方向)

Fig. 6 Errors of coordinate as the baseline distance changes (X and Z directions)

4.2 测量区域整体误差仿真分析

假定临界点 D 距离基线为 5 m, 则根据计算两像机的基线距应不大于 4.66 m. 考虑到像机的视场角 $\lambda_1 = \lambda_2 = 20^\circ$, 且主要的测量区域是 $a \sim b$ (如图 5 所示, 对应的是像机镜头的中心区域, 即视场角 $\pm 8^\circ$), 则实际的临界点为 F , 所以基线距可以适当增大以提高测量精度, 后面的仿真分析中设置基线

距 $H = 6$ m, 则对应视场角 $\pm 8^\circ$ 的测量区域前后部分长度 h_1, h_2 分别大约是 3.3 m 和 9.1 m, 有效测量区域 $ABCD$ 对应的位置坐标为 $A(-1.49, 0, 9.74), B(0, 0, 18.9), C(1.49, 0, 9.74), E(0, 0, 9.8), F(0, 0, 6.5)$ (单位均为 m).

根据(8)式分析得到的整个测量区域的误差分布情况, 如图 7 所示.

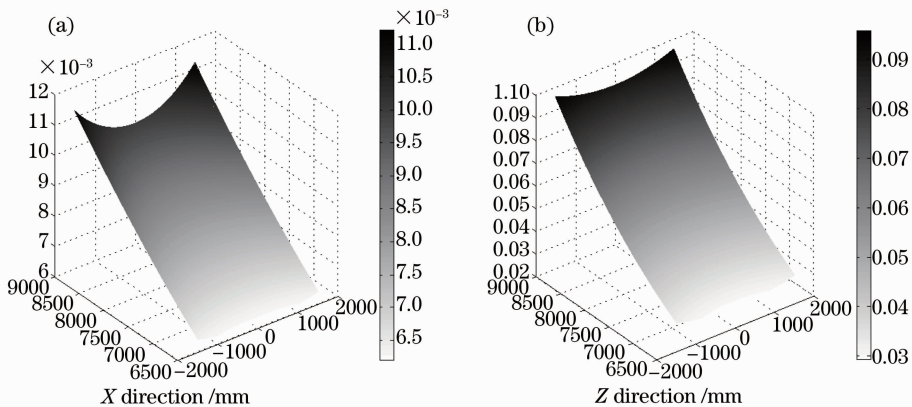


图 7 误差分布图(测量区域: X 方向距离 3000 mm, Z 方向距离 2500 mm)

Fig. 7 Errors distribution (measuring area: X direction distance is 3000 mm, Z direction distance is 2500 mm)

根据图 7 可以发现随着测量深度增加, 误差急剧增大, 其原因是随着测量距离的增加, 角度偏差所带来的坐标测量误差逐渐增大; Z 方向误差明显大于 X 方向误差, 这与 3.1 中的仿真分析结果相符; 即随着两侧距离(X 方向)的增加, 误差逐渐增大.

5 结 论

根据以上分析, 对于双像机测量站位可采用以下方式进行优化:

- 1) 在其他测量条件相同时, 随着双像机基线距

的增加, Z 轴上同一个点位的 X 方向测量精度逐渐变差, 而 Z 方向测量精度逐渐变好, 一般认为当两个方向的测量精度相当时, 此基线距为最佳;

2) 在满足测量需求的前提下, 尽量使用双像机测量交会区域的前半部分;

3) 对于一个固定被测点位, 双像机相对位置呈对称分布时测量结果最佳(如图 5 所示, 若被测点为 E , 则最佳位置关系为两像机摆放位置关于 Z 轴对称; 在不考虑畸变随成像区域不同而变化的情况下, 像机姿态随意)。

参 考 文 献

- 1 Yu Qifeng, Shang Yang. Videometrics: Principles and Researches[M]. Beijing: Science Press, 2009.
于起峰, 尚 洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- 2 Zhang Guangjun. Machine Vision[M]. Beijing: Science Press, 2008.
张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- 3 Yu Zhijing, Pan Xiao. Camera internal-parameters calibration based on the onstruction of initial measurement network[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112003.
于之靖, 潘 晓. 基于构建初始测量网络的相机内部参数校准[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112003.
- 4 Hou Junjie, Wei Xinguo, Sun Junhua. Calibration method for binocular vision based on matching synthetic images of concentric circles[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315003.
侯俊捷, 魏新国, 孙军华. 基于同心圆合成图像匹配的双目视觉标定[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315003.
- 5 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.
- 6 Yu Zhijing, Chen Gang, Che Rensheng, *et al.*. Bilinear interpolation centroid algorithm using for circular optical target location[C]. Second International Conference on Image and Graphics, 2002, 4875: 333-339.
- 7 Lei Ming, Zhang Guangjun. Image orientation algorithm with subpixel accuracy based on correlative matching method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(5): 108-113.
雷 鸣, 张广军. 基于互相关的图像匹配亚像素定位[J]. 光电工程, 2008, 35(5): 108-113.
- 8 Wei Zhenzhong, Gao Ming, Zhang Guangjun, *et al.*. Sub-pixel Extraction method for the center of light-spot image[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(4): 7-12.
魏振忠, 高 明, 张广军, 等. 一种光斑图像中心的亚像素提取方法[J]. 光电工程, 2009, 36(4): 7-12.
- 9 Zhang Zili. Study on the Large-Scale Space Coordinate Measurement Method Based on Vision Guidance[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. 32-34.
张滋黎. 基于视觉引导的大尺度空间坐标测量方法研究[D]. 天津大学, 2010. 32-34.
- 10 Wang Luwei. Development of semiconductor lasers and their applications[J]. Journal of Chengdu University, 2003, 22(3): 34-38.
王路威. 半导体激光器的发展及其应用[J]. 成都大学学报, 2003, 22(3): 34-38.
- 11 Zou Jian. Study on the Precision Amelioration of Optical Coordinate Measuring[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
邹 剑. 光学数码坐标测量精度改进研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- 12 Jorge Ares, Justo Arines. Influence of thresholding on centroid statistics; full analytical description [J]. Appl Opt, 2004, 43(31): 5796-5805.
- 13 Yang Yong, Wang Yanlei, Li Ming, *et al.*. Research of high-accuracy digital image correlation measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(2): 197-201.
杨 勇, 王琰蕾, 李 明, 等. 高精度数字图像相关测量系统及其技术研究[J]. 光学学报, 2006, 26(2): 197-201.
- 14 G A West, T Clarke. A survey and examination of subpixel measurement techniques[C]. Bellingham: Society of Photooptical Instrumentation Engineers, 1990. 456-463.

栏目编辑: 李志兰