

大视场 LCOS 拼接星模拟器标定方法

张晓娟^{1,2}, 张国玉^{1,3}, 孙高飞^{1,3}, 刘石^{1,3}, 郑茹^{1,3}, 高玉军⁴

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 吉林电子信息职业技术学院, 吉林 吉林 132021; 3. 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022; 4. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:介绍了一种大视场 LCOS 拼接星模拟器的标定方法, 以及标定系统的组成和原理。为了使星模拟器获得更大的视场宽度, 提出将两片 LCOS 拼接使用。对各种拼接误差进行分析, 并给出了标定方法。对系统的焦距测量误差及畸变误差和拼接物像的成像关系进行了分析, 建立了星间角距数学模型, 并通过大量的测量数据, 经计算得到最优精度下模型中的各个参数。实验结果表明: 经过标定后, 星模拟器的星间角距模拟精度得到显著提高, 测量误差优于 20"。

关键词: LCOS; 拼接; 星模拟器; 标定

中图分类号: V524.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)11-2996-06

Calibration of star simulator based on LCOS splicing technology with wide-field

Zhang Xiaojuan^{1,2}, Zhang Guoyu^{1,3}, Sun Gaofei^{1,3}, Liu Shi^{1,3}, Zheng Ru^{1,3}, Gao Yujun⁴

(1. College of Optical and Electronical Information Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Jilin Technology College of Electronic Information, Jilin 132021, China; 3. Optical Measurement and Control Instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center, Changchun 130022, China; 4. Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A calibration method of a large field LCOS splicing star simulator as well as the structure and principle of the calibration system were introduced. In order to make the star simulator to obtain a larger width of the field of view, proposing the connection technique of two LCOS was proposed. A variety of splicing errors were analyzed and then the calibration method was gave out. The focal length measurement error, distortion error and the imaging relationship error brought by the spliced LCOS were analyzed, a mathematical model of the angular distance between stars was established. Moreover, the various parameters of the model under the optimal accuracy were calculated by using a large number of the measurement data. Experimental result shows that, after calibration, the accuracy of angular distance between stars from the star simulator is significantly improved and the measurement error is better than 20".

Key words: LCOS; splicing; star simulator; calibration

收稿日期: 2013-03-09; 修订日期: 2013-04-13

作者简介: 张晓娟(1970-), 女, 博士生, 主要从事航天地面标定及仿真试验研究。Email: jlxj2008@126.com

导师简介: 张国玉(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事空间科学与技术、光电仪器与检测技术等方面的研究工作。

Email: zhgy@cust.edu.cn

0 引言

星模拟器是一种在实验室条件下模拟星空,实现星敏感器地面标定工作的仪器^[1]。近年来,伴随星敏感器精度的不断提高,要求星模拟器的模拟精度也越来越高,星模拟器正朝着大视场、高精度、体积小且具有实时星图变换的方向发展^[2]。

星模拟器按星图显示的不同,分为静态星模拟器和动态星模拟器。它们的组成都包括五个部分,分别是电源、光源、滤光片、星图显示器件和准直光学系统。其中,电源的作用是驱动光源,使光源发出亮度均匀的光线,经过滤光片后实现恒星所需要的模拟光谱,点亮星图显示器件。星图显示器件将模拟的星图信息通过准直光学系统,以平行光的形式出射,由此实现了对无穷远星图的模拟。从基本组成和工作原理可以看出,实时星图变换靠星图显示器件来实现,而星图模拟精度则受到星图显示器件和准直光学系统的共同影响^[3]。

文中主要针对动态星模拟器的星图显示进行研究。星图显示器件是动态星模拟器的关键技术,也就是微显示器投影技术,目前主要有四种类型,一个是微型投影管,由于功耗大,显示均匀性差等原因,目前已经被淘汰;第二个是 LCD 显示器,由于 LCD 显示屏是透射显示方式,其显示分辨率、图像亮度、光利用率等都有局限;第三是基于 DLP 技术的显示器件,由于体积小、便于携带、亮度高,已经得到广泛的应用。但是 DLP 技术是基于 MEMS 技术,当物理分辨率达到 $1\ 280 \times 1\ 024$ 以上时,在技术上由于 MEMS 利用机械运动的方式来调制光,当环境振动增加时图像的显示不可避免地带来一些噪声^[4];第四种是新兴的 LCOS 微显示器投影技术,LCOS 结合了半导体集成电路的 CMOS 工艺技术和主动矩阵液晶技术,在显示分辨率方面具有突出的优势。

目前,国内动态星模拟器的研制工作中,显示器件主要选用 TFT-LCD,受到它们自身像素尺寸 ($14\ \mu\text{m}$) 的影响,导致星图模拟精度不高。为了提高星图模拟精度,提出使用新型显示器件——LCOS。与传统的显示器件相比,LCOS 具有更小的像素尺寸 ($8.5\ \mu\text{m}$),但是国内研制的 LCOS 分辨率不高,通常为 $1\ 920 \times 1\ 080$,配合准直光学系统使用在星模拟

器中,发现系统的视场宽度不够。为了克服这一缺陷,提出对 LCOS 进行拼接使用。文中就是针对 LCOS 拼接中存在的各种误差进行标定,确保 LCOS 能够提供模拟精度高、像面大且信息量多的星图显示^[5]。

1 LCOS 拼接原理及误差分析

LCOS 的拼接原理如图 1 所示。将背光板、PBS、LCOS1 和 LCOS2 如图放置。根据 PBS 透射 P 偏振光并反射 S 偏振光的性能特点,背光板发出的光经过 PBS 后,S 偏振光被反射以点亮 LCOS1,P 偏振光被透射以点亮 LCOS2。被点亮的两块 LCOS 再经过 PBS 在 Q 面成像,其中 LCOS1 经过 PBS 后 P 偏振光被透射,在 Q 面形成像 1;而 LCOS2 经过 PBS 后 S 偏振光被反射,在 Q 面形成像 2。最后通过对两块 LCOS 位置的精准调节,完成其在 Q 面的像拼接。图中实线部分为 LCOS1 的光路,虚线部分为 LCOS2 的光路。

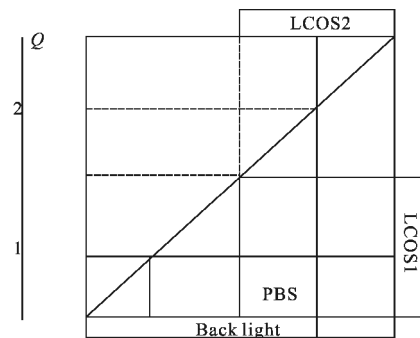


图 1 LCOS 器件的拼接原理图

Fig.1 Principle diagram of splicing for LCOS

经过 LCOS 拼接后的星模拟器,两路成像很难保证灵敏度、线性、光谱特性、几何畸变等非一致性因素的影响。尤其是配合准直光学系统使用时,两片 LCOS 是否能够同时位于焦面位置且没有倾斜,两片 LCOS 的亮度是否相同等,都是应在使用前进行校准的误差因素。具体的拼接误差包括以下几个方面。(1) 焦面位置的误差:包括对准误差和调焦误差,其中对准误差中包括重合度误差 Δ_1 ,调焦误差则主要是指共面误差 Δ_2 和平行度误差 Δ_3 。(2) 像面亮度误差:由于 LCOS 芯片中填充了液晶,需要偏振光点亮,所以必须在光路中加入了起偏器和检偏器,形成

偏振场。这个偏振场里的光学器件如果存在双折射现象,则会伴随光线产生双折射现象而造成光延迟,后果就是对比度和光效率的同时下降。两片 LCOS 分置于 PBS 的两侧时,将产生不同的光延迟现象,进而造成像面亮度差异巨大,影响星图模拟质量^[6]。

(3) 光学系统误差:通过 LCOS 给出的模拟星图经过准直光学系统后,将受到各种像差的影响,最终导致星点位置模拟的差异而使星图模拟精度降低。

(4) 像素尺寸误差:LCOS 在制作时,不可避免地存在像素尺寸的制作误差,可作为星模拟器系统的系统误差考虑。

2 标定系统的组成

为了对 LCOS 拼接时产生的各种误差进行标定,研究一套实验室标定系统,基本组成如图 2 所示。主要由以下五个部分组成:平行光管、导轨、标定软件、标定计算机和调整装置。



图 2 标定系统工作原理图

Fig.2 Working principle diagram of calibration system

首先,利用可调焦的平行光管观测星模拟器产生的模拟星图,通过对平行光管的焦面调整量计算,实现标定两片 LCOS 焦面位置的目的,并且得到准直光学系统实际的焦距值。然后,将标定系统中的平行光管换成经纬仪(徕卡 TM5100A 型,测量精度 0.5"),由计算机控制系统生成所需的标定星图,对星图中的模拟星点逐一观测并记录。最后,将得到的观察数据带入用于标定的数学模型,得到待测星模拟器的所有标定参数,进而实现高精度的星图模拟。

3 标定方法

大视场 LCOS 拼接星模拟器的精度主要受焦距和畸变的影响。考虑到文中系统中的像面是由两片 LCOS 拼接实现的,保证两片 LCOS 同时处于光学系统的焦面位置是进行其他标定之前必须要完成的工作^[7]。

3.1 两片 LCOS 的拼接误差及其焦面位置误差的标定方法

两片 LCOS 的拼接原理如图 1 所示。其中,以 LCOS1 作为基准,用平行光管观察,将 LCOS1 精确地定位在焦面位置,并且通过标定软件的控制,点亮中心十字和边缘位置的像素,显示的图像如图 3 所示。然后,点亮 LCOS2,并且显示与 LCOS1 相同的图像,通过调整机构,完成两个像面的拼接,图 4 为拼接完好的理想像面。

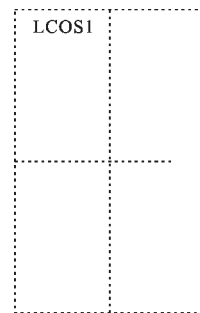


图 3 LCOS1 在焦面位置时的标定星图

Fig.3 Star map for calibration on focal plane

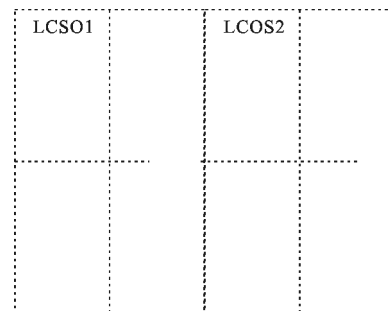


图 4 LCOS1 和 LCOS2 不存在误差

Fig.4 No errors between LCOS1 and LCOS2

然而,在实际的拼接中,不可避免地存在焦面位置误差。图 5 所示为重合度误差 Δ_1 ,图 6 所示为调焦误差,其中包括共面误差 Δ_2 ,它使得 LCOS2 的成像

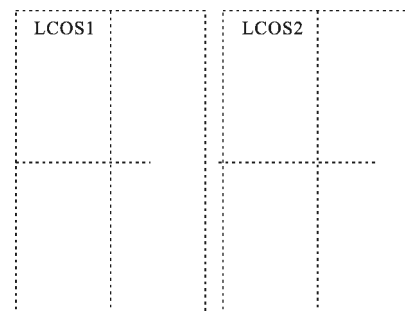


图 5 LCOS1 和 LCOS2 存在重合度误差

Fig.5 Error of coincidence between LCOS1 and LCOS2

清晰度差,即 LCOS2 没有置于焦面位置;平行度误差 Δ_3 则反映为两块 LCOS 的不平行度。

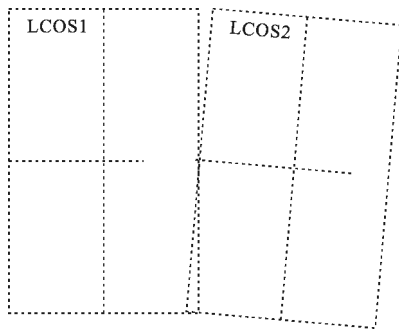


图 6 LCOS1 和 LCOS2 调焦误差

Fig.6 Error of focusing between LCOS1 and LCOS2

标定焦面位置误差的方法是在利用平行光管看清像面后,再利用徕卡经纬仪测量两片 LCOS 中心竖线的距离,通过计算每对对应位置的角距值,来反复调整 LCOS2,直到每对相对位置的角距值都相等^[8]。

3.2 两片 LCOS 的背景亮度误差的标定方法

完成两片 LCOS 的拼接后,观察像面会发现,它们之间存在明显的亮度误差。为了将亮度误差抵偿,在 LCOS1 的前面加入 $\lambda/2$ 玻片,旋转玻片直到两片 LCOS 的亮度相同,至此达到了标定背景亮度的目的。

3.3 光学系统焦距误差及畸变误差的标定方法

对于光学系统的焦距和畸变主要通过软件进行抵偿。从成像模型出发,分析焦距和畸变对系统精度的影响,分析数学模型后,找到抵偿的方法。图 7 为不考虑像面倾斜和旋转,而只考虑焦距误差 Δf 和畸变误差的大视场 LCOS 拼接星模拟器的实际成像原理图。

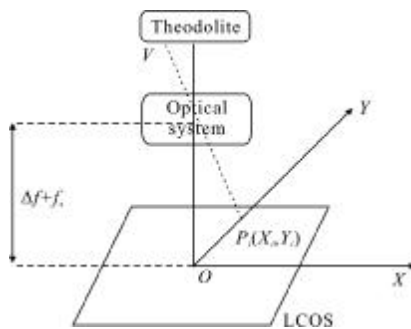


图 7 大视场 LCOS 拼接星模拟器的实际成像原理图

Fig.7 Principle of actual imaging for star simulator based on LCOS splicing technology with wide-field

标定焦距误差时,使用徕卡经纬仪对待测点进行测试。为了减小光学系统像差对焦距测量值造成的影响,应尽量选取主点 O 附近的模拟星点进行测试。得到各个模拟星点的坐标表示为 $P_i(\alpha_i, \beta_i)$,其中 α_i 为经纬仪测得的方位值, β_i 为经纬仪测得的俯仰值。与 LCOS 像面上的直角坐标对应关系符合公式(1)。

$$\alpha = \arctan x / (f + \Delta f) \quad \beta = \arctan y \cos \alpha / (f + \Delta f) \quad (1)$$

理论上,模拟星点间的实际星间角距应与各点给出的理论星间角距值相等,所以根据公式(1)结合公式(2),计算任意两个被测点 $P_1(\alpha_1, \beta_1)$ 和 $P_2(\alpha_2, \beta_2)$ 之间的实际星间角距。通过修正焦距变换量 Δf ,使得实际星间角距值与理论星间角距 γ 值相等,由此完成对焦距的标定。

$$\cos \theta = \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \sin \delta_1 \sin \delta_2 \quad (2)$$

式中: $\delta_1 = 90^\circ - \beta_1$, $\delta_2 = 90^\circ - \beta_2$ 。

对光学系统畸变的标定,应在对其他所有参数都标定完成后进行。畸变分为径向畸变和切向畸变。通常情况下来看,径向畸变是影响星模拟器精度的重要因素,而且,星像点越是远离主点,径向畸变越是严重。而相对径向畸变来说,切向畸变对星像点位置的影响就微乎其微了,所以在标定畸变参数中,通常忽略切向畸变。

利用徕卡经纬仪测量星点,考虑畸变影响后的被测点为 $P_r(\alpha_r, \beta_r)$,其中 α_r 为经纬仪测得的方位值, β_r 为经纬仪测得的俯仰值。与 LCOS 像面上的直角坐标对应关系符合公式(3)。

$$\alpha = \arctan[(x + \Delta x_r)] / f \quad \beta = \arctan[(y + \Delta y_r) \cos \alpha] / f \quad (3)$$

式中: Δx_r 和 Δy_r 分别表示在 x 轴和 y 轴方向上的畸变量。

根据公式(2)计算实际星间角距值后,通过与理论星间角距值的对比,完成对畸变标定的区域划分,并对不同区域给出不同的畸变标定方程。分区越小标定精度越高,但是过多的分区将引入过量的标定公式写入星图显示软件,将导致星图刷新率降低,影响动态星模拟器的星图显示性能。

3.4 像素尺寸误差的标定方法

大视场 LCOS 拼接星模拟器的星图显示器件的像素尺寸为 $8.5 \mu\text{m}$,其误差在 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$,该项误差在星图显示精度计算中,应被作为系统误差处理。

4 标定结果

星模拟器的标定精度用实际模拟的星间角距精度来评价,它能够同时反映出焦距和畸变的标定效果。待标定的大视场 LCOS 拼接星模拟器的视场为 $10.5^\circ \times 10.5^\circ$, 拼接后像素排列为 1920×1920 , 像素尺

寸为 $8.5 \mu\text{m}$, 焦距为 90.86 mm 。利用标定方法中对 LCOS 拼接的要求,进行像面拼接后,再根据光学系统的成像模型分析给出焦距和畸变的标定值,其中焦距标定值为 89.73 mm ,畸变的分区标定,按图 4 所示,分为八个区域进行标定,标定方程如表 1 所示。

将标定后的参数供给星模拟器使用,利用徕卡

表 1 分区标定畸变的标定方程

Tab.1 Calibration equation of distortion for division

Region	Calibration equation of distortion
1	$Q = -2.23 \times 10^{-16} \times y^5 - 3.1334 \times 10^{-13} \times y^4 + 1.332 \times 10^{-10} \times y^3 - 2.556 \times 10^{-8} \times y^2 + 1.0936 \times 10^{-6} \times y - 1.29 \times 10^{-3}$
2	$Q = -1.268 \times 10^{-13} \times x^5 + 2.36 \times 10^{-10} \times x^3 - 1.452 \times 10^{-7} \times x^2 + 2.5867 \times 10^{-5} \times x + 2.1083 \times 10^{-4}$
3	$Q = -5.042 \times 10^{-14} \times x^4 - 8.7136 \times 10^{-11} \times x^3 - 4.783 \times 10^{-8} \times x^2 - 5.629 \times 10^{-6} \times x + 6.95 \times 10^{-4}$
4	$Q = 1.22 \times 10^{-16} \times y^5 + 1.6568 \times 10^{-13} \times y^4 + 4.858 \times 10^{-11} \times y^3 - 9.9218 \times 10^{-9} \times y^2 - 1.68 \times 10^{-6} \times y - 9.064 \times 10^{-4}$
5	$Q = -2.48 \times 10^{-15} \times y^4 - 5.786 \times 10^{-13} \times y^3 + 1.0056 \times 10^{-8} \times y^2 - 1.2787 \times 10^{-5} \times y + 3.1416 \times 10^{-3}$
6	$Q = -3.936 \times 10^{-17} \times x^5 - 4.283 \times 10^{-14} \times x^4 - 5.396 \times 10^{-12} \times x^3 + 2.97 \times 10^{-9} \times x^2 + 4.7438 \times 10^{-7} \times x - 8.9837 \times 10^{-4}$
7	$Q = 5.0512 \times 10^{-16} \times x^5 - 9.14856 \times 10^{-13} \times x^4 + 5.7976 \times 10^{-10} \times x^3 - 1.527 \times 10^{-7} \times x^2 + 1.0825 \times 10^{-5} \times x - 1.105 \times 10^{-3}$
8	$Q = 1.0069 \times 10^{-14} \times x^4 + 1.175 \times 10^{-11} \times x^3 + 8.1836 \times 10^{-10} \times x^2 - 6.534 \times 10^{-7} \times x - 1.092 \times 10^{-3}$

经纬仪测量任意一副星图的实际星间角距值,并将每对星点的测量值通过公式(2)计算出实际星间角距值,再与理论星间角距值对比后,得到星模拟器经过标定后的误差值,如表 2 所示。

表 2 标定前后的星间角距值对比

Tab.2 Comparison before and after calibration of angular distance between stars

Star point	Theory of angular distance between stars/ ($^\circ$)	Angular distance between stars before calibration/ ($^\circ$)	Angular distance between stars after calibration/ ($^\circ$)
1	0.513 6	0.500 7	0.508 8
2	1.524 7	1.516 8	1.520 1
3	1.494 9	1.487 5	1.499 1
4	2.641 4	2.658 7	2.643 5
5	2.015 5	2.006 8	2.018 1
6	1.984 4	1.996 8	1.987 9
7	2.548 6	2.552 7	2.552 7
8	2.963 2	2.969 8	2.968 3
9	3.579 2	3.592 1	3.581 3
10	4.152 1	4.158 7	4.156 9

从表中的数据可以看出,将标定后的参数应用于大视场 LCOS 拼接星模拟器后,显著提高了星模拟器的星间角距模拟精度,星间角距的误差值从 $40''$ 降低至 $20''$ 以内。由此可见,针对拼接的两片 LCOS 给出的焦面位置误差、焦距测量误差和畸变误差的标定方法可行,保证了星模拟器能够给出较高的星间角距模拟精度。

5 结论

为了提高星模拟器的模拟精度,提出了使用新型显示器件——LCOS,其优势在于像素尺寸小。针对目前可使用的 LCOS 存在分辨率不高导致星模拟器视场宽度不够的问题,提出将两片 LCOS 进行拼接后使用。分析各种拼接误差、星模拟器焦距测量误差和光学系统畸变误差后,给出大视场 LCOS 拼接星模拟器的标定方法,并应用于工程项目中。从标定结果来看,通过该标定方法获得的星模拟器的模拟精度已有显著提高,满足工程应用需求,为星模拟器的星图显示提供了一种新途径。

参考文献:

- [1] Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Fan Qiaoyun, et al. Ground function test method of star sensor using simulated sky image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 1087-1091. (in Chinese)
魏新国, 张广军, 樊巧云, 等. 利用仿真星图的星传感器地面功能测试方法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 1087-1091
- [2] Sun Gaofei, Zhang Guoyu, Zheng Ru. Star sensor calibration reasarch and development [J] *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2007, 15(11): 1668-1703.
孙高飞, 张国玉, 郑茹, 等. 星传感器标定方法的研究现状与发展趋势[J]. *长春理工大学学报*, 2010, 33(4): 1668-1703.
- [3] Sun Gaofei, Zhang Guoyu, Jiang Huilin, et al. Design of very high accuracy star simulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1730-1735. (in Chinese)
孙高飞, 张国玉, 姜会林, 等. 甚高精度星模拟器设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1730-1735.
- [4] Wang Chen, Wang Hongqiang, Chen Minghua, et al. Effect of image processor's noise on magnitude sensitivity of star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 858-862. (in Chinese)
王辰, 王宏强, 陈明华, 等. 成像器噪声对星传感器星等灵敏度的影响[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 858-862.
- [5] Li Haichao, Hao Shengyong, Zhu Qi. Fast seamless mosaic algorithm for multiple remote sensing images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1381-1386. (in Chinese)
李海超, 郝胜勇, 朱琦. 多片遥感图像的快速无缝拼接方法[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1381-1386.
- [6] Li Qinghua, Huang Yuanqing. Light energy in LCOS optical mechnism and solution project [C]//*Digital Manufacture and Other Advanced Manufacture Technique*, Fujian Province Association for Science and Technology Annual Meeting, 2005. (in Chinese)
林庆华, 黄元庆. LCOS 光机中的光能问题和解决方案[C]//福建省科协 2005 年学术年会“数字化制造及其它先进制造技术”专题学术会议, 2005.
- [7] Wang Jun, Feng Wei, Liu Jinguo, et al. A calibration of multi-CCD ballistic camera with wide field of view and high precision [J]. *Optica & Optoelectronic Technology*, 2004, 2(6): 7-9.
- [8] Yang Zhen, Li Guangyun, He Lei. Measurement methods and precision analysis of optical collimation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 282-286. (in Chinese)
杨振, 李广云, 贺磊. 光学准直测量方法与精度分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(2): 282-286.