

提高激光扫描投影系统精度的方法研究

曲松, 李丽娟, 侯茂盛, 郭丽丽

长春理工大学光电工程学院光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 在激光扫描投影校准过程中, 激光投影的光斑大小直接影响校准精度, 进而影响投影系统的投影精度。为达到激光扫描投影系统对精度的要求, 提出了一种能提高激光扫描投影精度的方法, 即采用固定倍率准直扩束镜组和动态聚焦镜组相结合的方式, 在减小激光束发散角和激光投影光斑的同时, 使投影系统在投影工作距离上具有足够的焦深, 以获得较大的激光能量密度, 进而实现平场聚焦。利用 ZEMAX 光学设计软件进行了仿真并通过实验进行了验证, 在 4~5 m 的工作距离上, 激光束经过固定倍率准直扩束镜组及动态聚焦镜组后, 有效减小了激光束发散角及投影光斑大小, 提高了目标定位点上投影光斑的能量密度, 最终使激光扫描投影系统满足了对投影精度的要求。

关键词 激光光学; 激光扫描投影; 准直扩束镜; 动态聚焦镜; 投影精度

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.020801

Methods to Improve Accuracy of Laser Scanning Projection System

Qu Song, Li Lijuan, Hou Maosheng, Guo Lili

Key Laboratory of Photoelectric Measurement and Control and Optical Information Transfer Technology, Ministry of Education, School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In the progress of laser scanning projection calibration, the accuracy of the calibration is directly affected by the light spot size of the laser projection, and then affects the projection accuracy of the projection system. In order to meet the requirements of the laser projection scanning system for accuracy, a method of improving the accuracy of the laser scanning projection is proposed. That is, the method of combining the fixed magnification collimation beam expander lens group and the dynamic focusing lens group reduces the laser beam divergence angle and laser projection spot at the same time, and the projection system in the projection of the working distance has sufficient depth of focus. Which can obtain a larger laser energy density, and then achieve the field of focus. The theoretical results are simulated and verified by using the ZEMAX optical design software through the experiment. In 4-5 m working distance, after the laser beam passes through a fixed radio collimating beam expander and the dynamic focusing lens group, it effectively reduces the laser beam divergence angle and projection light spot size, then improves the energy density of projection spot on the target locating point. Finally, the laser scanning projection system meets the requirements of the projection accuracy.

Key words laser optics; laser scanning projection; collimating beam expander mirror; dynamic focusing mirror; accuracy of projection

OCIS codes 140.3300; 080.1005; 120.1680; 110.6880

收稿日期: 2017-10-19; **收到修改稿日期:** 2017-11-09

基金项目: 国家 863 计划(2015AA23XX)

作者简介: 曲松(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光三维投影与数字化装配方面的研究。

E-mail: 18004428038@163.com

导师简介: 李丽娟(1972—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电精密测量与数字化装配、无损检测等方面的研究。

E-mail: custjuan@126.com(通信联系人)

1 引言

激光扫描投影系统主要由可调谐激光器模块、双轴扫描振镜模块、反馈光强探测模块、驱动控制模块以及数据处理模块组成。该系统可以将计算机辅助设计(CAD)模型以激光束轮廓线的形式按照 1:1 的比例精确地成像到工作面上,有效地将 CAD 工程设计与激光辅助制造衔接起来^[1]。该技术广泛应用于航空航天制造工程中的飞机零部件装配、复合材料铺层、图案喷涂等工作中。

激光扫描投影系统的校准标定直接影响其投影精度。激光扫描投影系统校准是通过扫描待投影工作面上已知世界坐标信息的目标定位点,利用激光扫描投影系统的光强探测装置获取目标定位点反馈的光强信息来判定目标定位点的几何中心,从而计算出待投影工作面与投影系统之间的相对位置关系,完成激光扫描投影系统的校准工作^[2]。在目标定位点的扫描标定过程中,如果激光束投影光斑较大,能量密度小,则投影系统利用目标点反馈的光强确定目标定位点中心位置时会存在较大的误差,最终造成投影系统投影精度不高。典型的激光扫描投影系统中的激光器会输出方向性较好的细激光束,有着 2 mrad 左右的发散角,并利用定焦场镜从而实现投影激光束的会聚。在投影工作面上的激光光斑直径约为 2 mm 左右,在精密投影过程中,还需进一步减小光斑直径同时提高能量密度,以提高投影精度。

本文通过在激光扫描投影系统中增加反伽利略型准直扩束镜组来进一步减小激光发散角;设计动态聚焦镜组替代定焦物镜,使投影系统在投影工作距离上具有足够的焦深^[3]。通过减小激光扫描投影系统的投影光斑尺寸来增大投影光斑能量密度^[4],从而提高系统的投影精度。

2 准直扩束镜组及动态聚焦镜组

2.1 准直扩束镜组

常用的光学准直扩束系统采用倒置的望远镜设计方式,即光束从透镜 L_2 中入射,从透镜 L_1 中射出,这样就可以减小光束的发散角^[5]。由图 1 的光路可知:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{\theta_2}{\theta_1} = \beta, \quad (1)$$

式中 β 为望远镜镜组的角放大率, f_1 、 f_2 分别为物镜和目镜的焦距。激光束通过该镜组后,此时的发散角为 $1/\beta$,光束直径变为原来的 β 倍,达到了准直

扩束的目的。结合投影系统的尺寸限制,选择反伽利略型准直扩束系统。透镜 L_1 的像方焦点和透镜 L_2 的物方焦点重合在镜组一侧,减小了扩束系统的整体尺寸,满足了投影系统整体尺寸限制。反伽利略型准直扩束系统如图 2 所示。

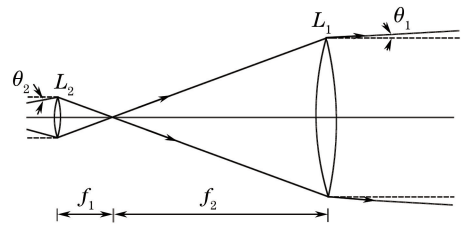


图 1 望远镜光路图

Fig. 1 Optical path diagram of the telescope

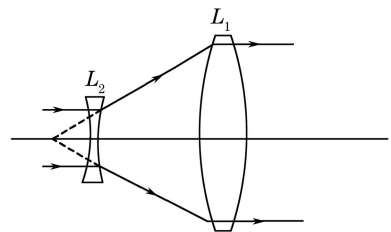


图 2 反伽利略型准直扩束系统

Fig. 2 Anti-Galilean collimating expansion system

激光投影系统的光源采用具有高准直性的 532 nm 激光器,出射激光束线宽为 3 mm,发散角为 2 mrad 左右。由于投影系统的光路限制,设计激光束经扩束镜组后的扩束尺寸为 9 mm,从而可知发散角减小为原来的 1/3 左右。

2.2 动态聚焦镜组

动态聚焦镜组是在普通聚焦透镜前加一个可移动透镜,构成可变焦距组合透镜。可移动透镜固定在高精度一维线性位移平台上,该平台具有微米级双向移动重复精度。工作距离不同,可控制位移平台移动改变动态聚焦镜组的间距,从而保证在待投影工作面上的准确聚焦。动态聚焦投影系统原理图如图 3 所示。

动态聚焦镜组采取负透镜和正透镜的组合方式,其中负透镜为可移动透镜,固定在线性位移平台上。动态聚焦镜组的焦距由两透镜间的间距来确定。可利用正切法计算动态聚焦镜组间距与投影工作距离的关系^[6]。理想光路图如图 4 所示,负透镜焦距为 f_3 ,正透镜像方焦距为 f_4' ,激光束入射到负透镜的高度为 h_1 ,出射光线与光轴夹角为 U_1' ,负透镜出射光线以 U_2 角入射到正透镜,光线入射正透镜高度为 h_2 ,出射光线与光轴夹角为 U_2' ,正负透镜间距为 d ,组合透镜组焦点与正透镜间的距离为 s 。

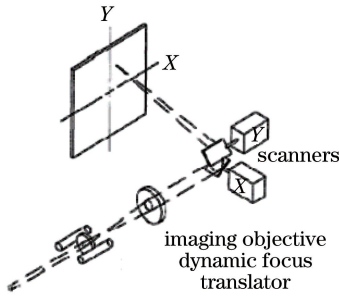


图3 动态聚焦投影系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of dynamic focusing projection system

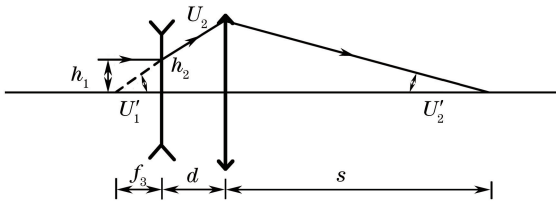


图4 动态聚焦镜组理想光路图

Fig. 4 Ideal optical path diagram of dynamic focusing lens
任取入射高度 h_1 , 根据双透镜组合镜组的正切法有:

$$\begin{cases} \tan U'_1 = \tan U_2 = \frac{h_1}{f_3} \\ h_2 = h_1 - d \tan U'_1 = s \tan U'_2, \\ \tan U'_2 = \tan U_2 + \frac{h_2}{f'_4} \end{cases} \quad (2)$$

则动态聚焦镜组间距 d 与投影工作距离 s 满足^[7]:

$$s = f_3(f'_4) - d(f'_4/f_3) + (f'_4) - d, \quad (3)$$

3 ZEMAX 仿真与实验

3.1 ZEMAX 优化仿真

激光扫描投影系统工作距离为 4~5 m。当动态聚焦镜组间距 d 发生变化时,投影聚焦距离 s 也对应发生变化。在工作距离上,扩束比为 3,聚焦镜组间距 d 和投影聚焦距离 s 的理论对应关系如表 1 所示。

表 1 动态聚焦镜组间距 d 和投影聚焦距离 s

Table 1 Dynamic focusing lens group spacing d and projection focusing distance s

d /mm	s /mm
51.64	4200
51.53	4400
51.42	4600
51.32	4800

设计初始数据并利用 ZEMAX 进行优化仿真,设定接收面距离分别为 4200, 4800 mm。改变动态聚焦镜组间距,在满足像质评价条件下,使接收面光斑尺寸较小且具有足够焦深、能量密度较大。不同距离接收面光斑与波象差如图 5 所示。

由图 5 可知,在不同距离接收面上,可通过改变动态聚焦镜组间距,在接收面上得到满足要求的激光光斑。光斑有效半径小于 0.5 mm,最大均方根(RMS)值为 0.1683 λ ,波象差均小于 $\lambda/4$,能量密度大且满足像质评价要求^[8]。

根据 ZEMAX 理论优化结果进行加工样本校

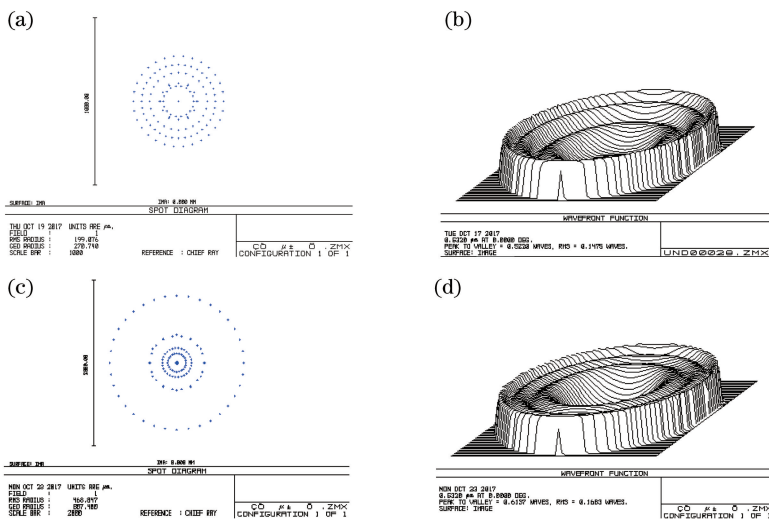


图5 不同距离接收面光斑及波象差。(a) 4200 mm 距离光斑;(b) 4200 mm 距离波象差;
(c) 4800 mm 距离光斑;(d) 4800 mm 距离波象差

Fig. 5 Light spot and wave aberration of receiving surface at different distances. (a) Spot at the distance of 4200 mm; (b) wave aberration at the distance of 4200 mm; (c) spot at the distance of 4800 mm; (d) wave aberration at the distance of 4800 mm

对,最终确定实际透镜规格。各透镜直径均为25.4 mm,准直扩束镜由焦距为 -50.8 mm的双凹透镜和焦距为150 mm的平凸透镜组成。其中,双凹透镜参数为:曲率半径52.15 mm,中心厚度3 mm,边厚15.77 mm;平凸透镜参数为:曲率半径82.62 mm,中心厚度2.95 mm,边厚2 mm。动态聚焦镜组由焦距为100 mm的平凸透镜和焦距为 -50.8 mm的平凹透镜组成。其中,平凸透镜参数为:曲率半径51.64 mm,中心厚度3.54 mm,边厚2 mm;平凹透镜参数为:曲率半径25.84 mm,中心厚度2 mm,边厚5.22 mm。

3.2 实验结果

图6即为激光扫描投影系统实验装置图。其中a为准直扩束镜组,b为动态聚焦镜组。动态聚焦镜组的可移动透镜固定在高精度一维线性位移平台上,该平台可进行微米级一维线性运动。

用激光扫描投影系统分别在4200,4400,4600,4800 mm的距离上进行投影,接收面上贴有标准坐标纸,借此可以估读投影光斑尺寸的大小。图7即为利用动态聚焦镜组在不同距离上获取的最佳投影光斑实验图。

从图7中可以看出,在工作距离上,激光投影光

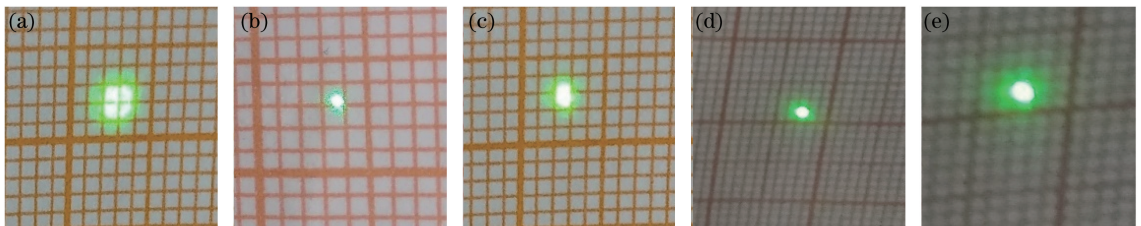


图7 不同距离上投影光斑实验图。(a) 未加扩束镜组;(b) $s=4200$ mm;(c) $s=4400$ mm;(d) $s=4600$ mm;(e) $s=4800$ mm

Fig. 7 Experimental plots of projected spot at different distances. (a) System without collimated beam expander group; (b) $s=4200$ mm; (c) $s=4400$ mm; (d) $s=4600$ mm; (e) $s=4800$ mm

4 结 论

本文阐述了投影系统的投影光束发散角及投影光斑能量密度对投影精度的影响,介绍了反伽利略型准直扩束镜组可以减小激光束发散角的原理,利用实验室现有透镜,搭建扩束比为3的准直扩束镜组;以高精度一维线性位移平台为依托,设计了满足工作距离要求的动态聚焦镜组,使系统在投影工作面上具有足够的焦深、获得了较小直径的投影光斑且增大了投影光斑的能量密度。利用ZEMAX软件进行仿真实验,验证了增加准直扩束镜组和动态聚焦镜组的可行性,为提高激光扫描投影系统的投影精度提供了一种简单有效的方法。

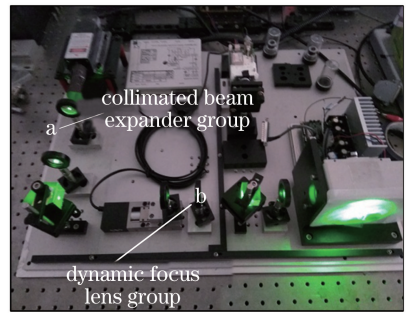


图6 激光扫描投影系统实验装置图

Fig. 6 Experimental setup of laser scanning projection system. 斑能量密度大,在激光扫描投影系统中未加准直扩束镜组时,投影光斑直径为2 mm左右;增加准直扩束镜组和动态聚焦镜组后,在4200 mm的工作距离上,投影光斑直径为0.7 mm左右;在4400~4800 mm距离上,投影光斑直径均为1 mm左右,投影光斑能量较为集中。

综上,ZEMAX仿真实验均证明了激光扫描投影系统通过增加准直扩束镜组和动态聚焦镜组,可以减小投影光斑直径,并使投影系统在投影工作距离上具有足够焦深,增大了投影光斑的能量密度^[9],为系统后续的精确校准及高精度投影奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Sun J H. Research of digital positioning laser 3D projection technology [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 23-30. 孙佳慧. 数字定位激光3D投影技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 23-30.
- [2] Kaufman S P. Apparatus and method for projecting a 3D image: US6547397B1 [P]. 2003-04-15.
- [3] Yan H F, Chen J M, Shao J. Study on laser dots marking based on dynamic focusing galvanometer system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0903006. 晏恒峰, 陈继民, 邵军. 基于后动态聚焦振镜系统激

- 光打点优化研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0903006.
- [4] Li D H. Study on large scale 3D laser dynamic scanning processing system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 13-15.
李东华. 激光大尺度三维动态扫描加工系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 13-15.
- [5] Sun C K. Laser measurement technology [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001:113-115.
孙长库. 激光测量技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001: 113-115.
- [6] Yu D, Tan H Y. Engineering optics [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006: 26-29.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 26-29.
- [7] Ehrmann J S. Optics for vector scanning[C]. SPIE, 1991, 1454: 245-252.
- [8] Xiao Z X. Engineering optics design [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008: 138-149.
萧泽新. 工程光学设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 138-149.
- [9] Wang R M, Lu B H. Analysis of several dynamic focusing systems for laser scanning [J]. Applied Laser, 1998, 18(1): 10-12.
王瑞敏, 卢秉恒. 用于激光扫描的几种动态聚焦系统分析[J]. 应用激光, 1998, 18(1): 10-12.