

引用格式: HOU Mao-sheng, CHEN Yu-qing, LIU Da-li, *et al.* Deviation Correction of Laser Scanning Projection Image Based on Time Compensation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(4):0411002

侯茂盛, 陈雨情, 刘大礼, 等. 基于时间补偿的激光扫描投影图形偏差校正研究[J]. 光子学报, 2020, **49**(4):0411002

基于时间补偿的激光扫描投影图形偏差校正研究

侯茂盛¹, 陈雨情¹, 刘大礼², 孙明利¹, 史铮雪¹, 李丽娟¹

(1 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, 长春 130022)

(2 北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要:为了解决自研的激光扫描投影系统在实际扫描投影零部件外形轮廓时会存在拖尾、缺失和非预期的圆角过渡等图形偏差,严重影响投影出零部件外形轮廓的形状准确度的问题,通过分析拖尾和缺失偏差、转角偏差产生的原因,研究了基于时间补偿的激光扫描投影图形偏差校正方法,得出了补偿时间与采样率间的关系,建立了时间补偿与投影图形转角角度间的数学模型.应用所研究方法在自主搭建的激光扫描投影系统中进行验证实验,并与国外 FARO 激光扫描投影系统的投影图形进行对比.实验结果表明:对优化投影路径后的 5 行 5 列棋盘格图形进行投影时,比较偏差补偿前后实际投影图形效果,补偿后的投影图形形状准确度优于 0.5 mm.基于时间补偿的激光扫描投影偏差校正方法可以有效地补偿拖尾和缺失偏差、能够优化非预期的转角偏差,该方法应用于自主研发的激光扫描投影系统能够显著提高投影图形准确度,具有良好的实际应用价值.

关键词:激光扫描投影;偏差校正;时间补偿;拖尾;缺失;转角

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20204904.0411002

Deviation Correction of Laser Scanning Projection Image Based on Time Compensation

HOU Mao-sheng¹, CHEN Yu-qing¹, LIU Da-li², SUN Ming-li¹,
SHI Zheng-xue¹, LI Li-juan¹

(1 *Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

(2 *Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China*)

Abstract: The accuracy of projected patterning is seriously influenced by several problems in practice, such as tailing, missing and corner deviations. In order to solve the above mentioned problem based on the self-developed laser scanning projection set-up, the causes of tailing, missing and corner deviation are theoretically analyzed, then, the correction method of projection patterning deviation is studied based on time-compensated technology. Furthermore, the relationship between compensation time and sampling rate is obtained, and the mathematical model between compensation time and angle of projected patterning is established. Finally, the studied method is applied to the self-developed set-up of laser scanning projection, and the actual projected patterning are compared with the patterning which is projected by the FARO laser scanning projection system. The results show that the method can effectively eliminates the tailing and missing deviations, can compensate the corner deviation satisfactorily when projected checkerboard patterning with 5 rows and 5 columns. Compared the projected patterning

基金项目: 国家自然科学基金(No.61805022), 吉林省科技发展计划重点科技攻关项目(No.20160204052GX)

第一作者: 侯茂盛(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为先进光学仪器与精密测量. Email: houmsh@cust.edu.cn

收稿日期: 2019-11-29; 录用日期: 2020-01-28

<http://www.photon.ac.cn>

before and after compensation for deviation, the accuracy of projection patterning is better than 0.5 mm. The studied method can improve accuracy of projected patterning significantly when applied to the self-developed set-up of laser scanning projection. Moreover, the studied method has good value for practical application.

Key words: Laser scanning projection; Deviation correction; Time compensation; Trailing; Missing; Corner

OCIS Codes: 110.5100; 120.4640; 140.7300; 280.3400

0 引言

激光扫描投影技术能够建立激光扫描投影系统与待装配零部件的位姿关系,并依据该零部件的 CAD 数模驱动双轴振镜使激光器出射的激光光束被快速转折^[1],从而在目标位置上准确地循环扫描绘制出与零部件 CAD 数模完全相同的零部件轮廓外形,直观的零部件轮廓线框图形状和精确的位置信息能够使操作人员摆脱图纸和工艺文件的束缚,更精准高效地完成零部件的装配.激光扫描投影技术现已广泛应用于先进制造领域,如在各种飞行器的制造装配过程中,用于各个零部件孔位的定位^[2]、飞机导管支架装配^[3]等;在汽车制造装配过程中,则广泛用于零部件的安装定位、检验和修配等.

国外学者分别对激光扫描投影仪器的最高扫描速度,“智能识别”零件的几何形状^[4-5]等方面进行研究.国内方面,多针对激光扫描投影系统在先进制造工业中的相关应用开展初步尝试.长春理工大学课题组近年来在激光扫描投影技术与仪器研发方面开展了大量工作,先后研究了基于四元数法的坐标转换参数求解方法^[6];研究了改进 Fleury 算法优化扫描投影路径^[7];研究了结合激光测距的新型激光扫描投影系统与标定方法^[8];研究了一种激光 3D 投影观测值与校准参数相结合的激光投影校准模型的建立方法^[9]等.然而,在自主研发该仪器系统过程中,发现激光扫描投影仪器在投影复杂的零部件轮廓时,实际得到投影图形的成像质量很低,存在较严重的偏差,例如:部分投影线条在首尾两端存在缺失或溢出,在图形的锐角拐角处易出现非预期的圆角过渡等.上述问题严重影响了投影图形的形状和位置准确度,致使自主研发的激光扫描投影技术在实际装配现场应用中的普适程度不足,无法实现更为精准的先进化、智能化辅助装配.

为解决上述问题,提出并研究一种基于时间补偿的偏差校正方法,分析并建立扫描投影速度与时间补偿的数学模型,研究在空白跳转线的两端和转角处添加适当时间延迟,以消除拖尾和缺失偏差、大幅度减小转角偏差的方法,从而改善激光扫描投影系统的投影图形准确度.

1 投影图形偏差分析及补偿

1.1 激光扫描投影系统原理

本课题组自主研究搭建的激光扫描投影系统原理如图 1 所示,主要由激光器、聚焦模块、扫描振镜模块、靶标点、测量控制模块、CAD 数模、被投影工件、单探测器光强探测模块等组成.激光器出射的光线由聚焦模

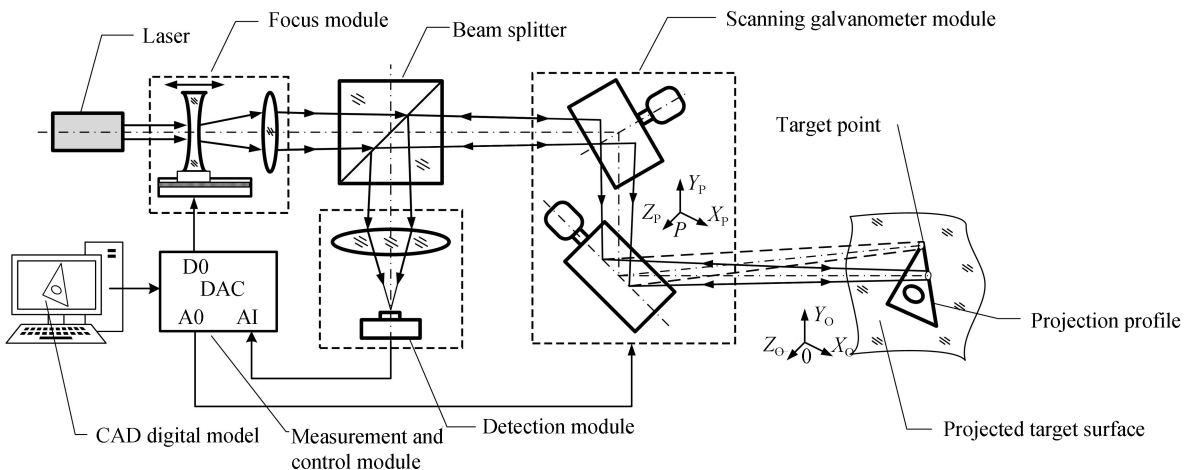


图 1 激光扫描投影系统的原理图

Fig.1 Schematic diagram of laser scanning system

块实现在被投影面上的精准汇聚,扫描振镜将激光光束偏转完成对各个靶标点的扫描,扫描探测得到的各靶标点中心坐标与振镜偏转角度相联合,通过最优化解算得出由投影仪器坐标系 $P-X_P Y_P Z_P$ 与被投影目标坐标系 $O-X_O Y_O Z_O$ 间的转换关系,再依据导入 CAD 数模中各投影控制点的三维位置信息驱动扫描振镜实现激光光束精准角度的快速偏转,从而可在目标物体上扫描投影出清晰明亮的零部件外形轮廓线框。

在激光扫描投影系统中,影响扫描投影图形准确度的因素主要有振镜位置、速度和加速度等动态响应特性,激光器开闭响应时间以及扫描路径的运动方式。课题组通过研究改进的 Fleury 算法已解决激光扫描投影图形的路径规划问题,由扫描路径和扫描方式引起的“频闪”问题在一定程度上得到了改善^[8,10]。但由振镜转角位置、速度和加速度响应特性,激光器开闭响应时间以及振镜响应延迟时间和激光器开闭延迟时间的配合关系等引起的图形形状偏差仍待研究和解决。

其中,将振镜对驱动信号的动态响应不足而导致图形出现直角变圆角或锐角变圆角的这类偏差定义为转角偏差;将振镜的位置与激光器开闭响应时间的不匹配,导致投影光线出现拖尾和缺失的这类现象称之为拖尾和缺失偏差,如图 2 所示。

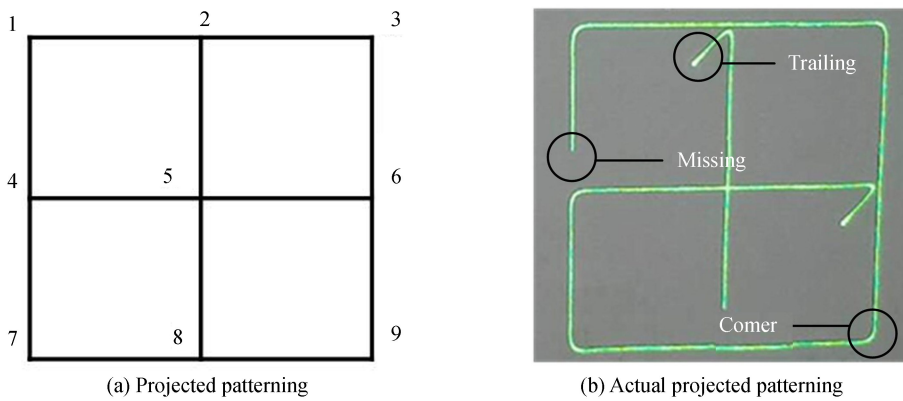


图 2 投影误差
Fig.2 Projection error

1.2 拖尾和缺失偏差

在激光扫描投影系统的投影过程中,振镜做高速转角运动时仍存在惯性的影响,这会导致振镜对数据采集卡发出命令信号的响应出现延迟或过冲,时间延迟与开闭激光器的响应时间不一致^[11],就会导致投影出的图形形状与理论的数模文件存在相应偏差。若激光器开闭响应时间早于振镜到达预期位置的响应时间,即产生缺失现象,若激光器开闭响应时间慢于振镜到达预期位置的响应时间,即产生拖尾现象。为消除上述拖尾和缺失偏差,拟研究在跳转线两端点设置适当时间延迟的方法以解决问题,并进一步对不同板卡采样率下的最优延迟时间进行优化。

1.3 转角偏差

在数据采集卡中输入如图 3(a)所示的驱动信号从而控制二维振镜振动,光学振镜的角振子数学模型为^[12]

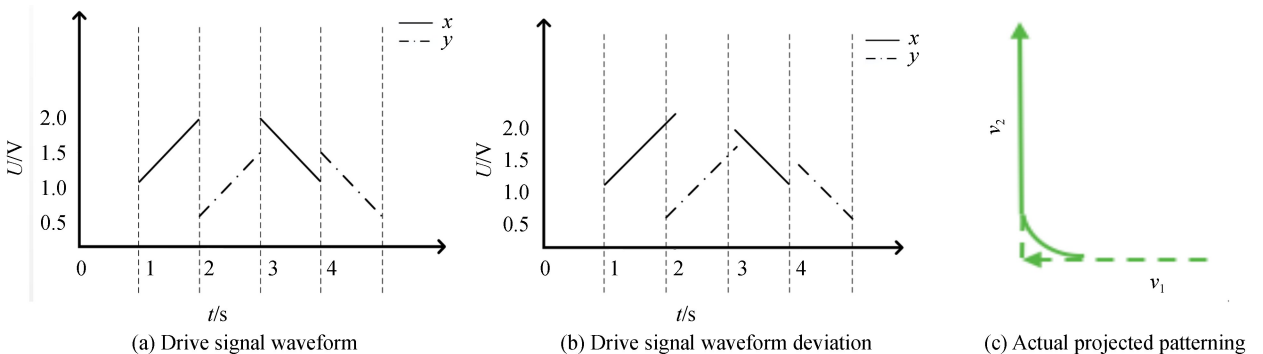


图 3 转角偏差的成因
Fig.3 Causes of corner deviation

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + P \frac{d\theta}{dt} + D\theta = \frac{DU}{KR} \quad (1)$$

式中, J 为转动惯量, P 为阻尼系数, D 为弹性系数, K 为角灵敏度, U 为输入电压, R 为电阻. 由式(1)可知驱动信号波形会发生如图 3(b)所示的偏差, 导致投影精度降低.

数据采集卡在驱动振镜进行扫描投影时, 因振镜对板卡驱动信号的动态响应不足, 导致投影图形中矢量线条的夹角受到影响进而产生偏差, 将此偏差定义为转角偏差, 该偏差严重影响了激光扫描投影系统投影图形的形状准确度.

为补偿转角偏差, 考虑在拐角处添加适当的时间延迟, 使振镜有充足的时间改变运动状态并稳定地达到预期的转角位置, 遵循 CAD 数模驱动的路径完成更精准的图形绘制^[13]. 更进一步地, 还需要对于不同角度情况下的时间补偿值需要进行研究和优化.

2 投影图形偏差实验

2.1 拖尾和缺失偏差补偿实验

为寻找拖尾和缺失偏差的最佳时间补偿, 设计了如图 4(a)所示带有空白跳转线的投影图形进行补偿试验, 图 4(b)为投影图形的驱动信号波形.

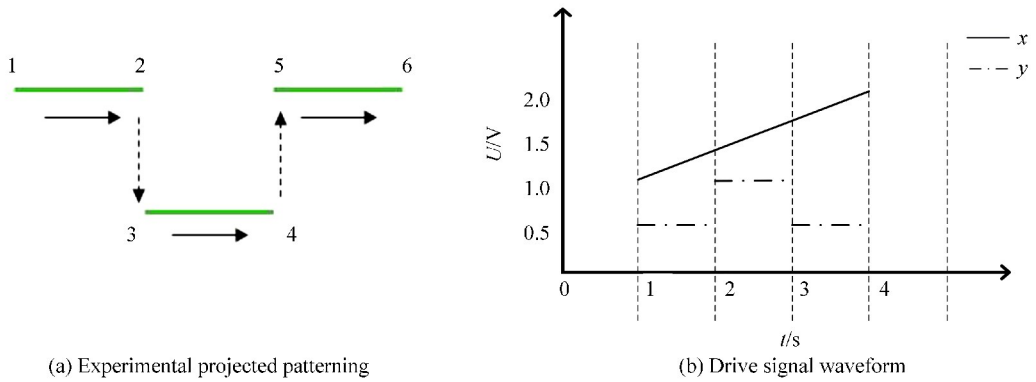


图 4 投影图形与驱动信号
Fig.4 Projected patterning and drive signal

本补偿实验采用的数据采集卡模拟输出采样率分别为 25×10^3 sample/s, 40×10^3 sample/s, 50×10^3 sample/s, 75×10^3 sample/s, 100×10^3 sample/s. 最后, 采集投影出来的图形, 如图 5 所示.

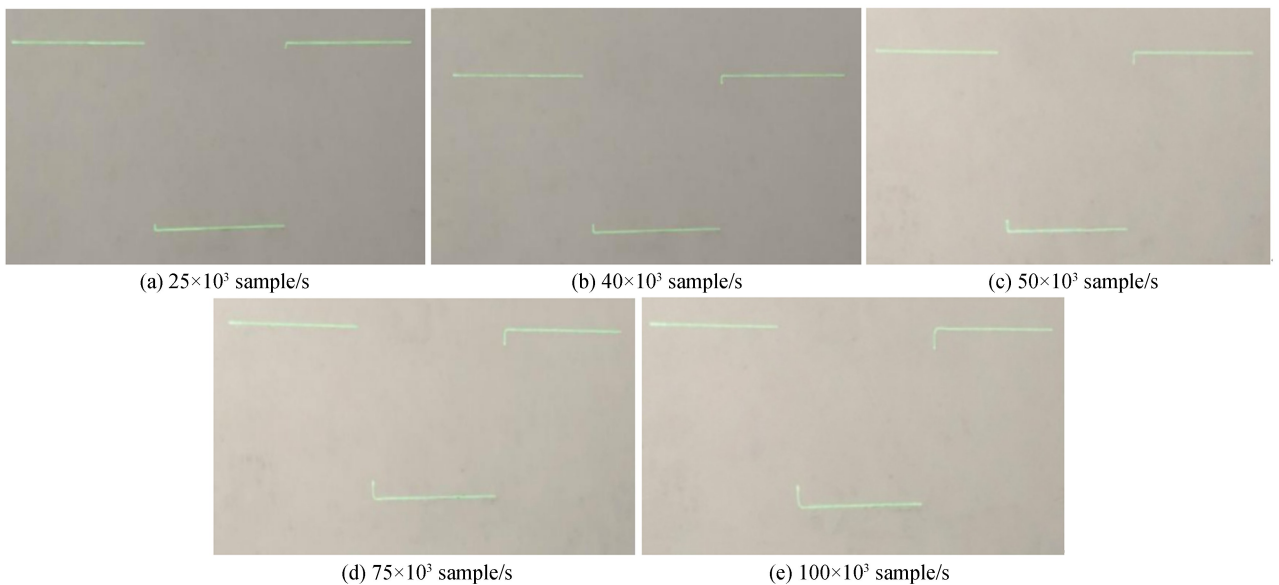


图 5 扫描速度对激光开闭误差的影响
Fig.5 Effect of scanning speed on laser opening and closing error

由图 5 可知,采样率为 25×10^3 sample/s 时,投影线条的拖尾和缺失部分并不显著,然而当采样率达到 75×10^3 sample/s、 100×10^3 sample/s 时,拖尾和缺失所带来的误差影响已经无法忽略,严重影响着投影图形的形状准确度.究其原因则是当扫描投影该图形的扫描控制点数量已确定时,创建用于驱动扫描振镜转动的模拟输出信号的采样速率与激光器开闭的响应速度存在相互制约关系,当系统选用的激光器开闭响应速度不变,而模拟输出信号的采样速率增大,整幅投影图形的扫描时间缩短,单位时间内扫描经过的路程越长,那么在投影图形中空白跳转线的首尾两端就会形成越明显的拖尾和缺失.

本实验采取的补偿方法是在投影图形的空白跳转线的两端点处添加一定数量的投影点,激光光束对这些点进行扫描可以增加扫描时间.同时,由于是在空白线处增加投影点,所以对整体的投影图形没有影响.同理,增加扫描时间也能够弥补振镜由于惯性带来的拖尾和缺失.但是应该在空白跳转线端点处添加多少个投影点,即增加多长的时间延时,需要通过试验进行研究验证.

将系统的采样率设置为 25×10^3 sample/s,且在空白跳转线的端点处依次增加 0.02 s 的时间间隔.先在空白跳转线的端点处添加一个投影点,再对其投影图像进行分析;逐渐增加投影点的数量,直至拖尾和缺失的现象不再存在同时不会出现“频闪”现象,因此认为该延迟时间是采样率为 25×10^3 sample/s 时的最佳延迟时间.

完成优化的投影图形如图 6 所示.当采样率为 25×10^3 sample/s 时,并在空白跳转线端点处添加 0.08 s 延迟后,投影图形中的拖尾和缺失的问题可以得到解决.

同理,将系统的采样率设置为 40×10^3 sample/s、 50×10^3 sample/s、 75×10^3 sample/s、 100×10^3 sample/s,通过实验可得到采样率的最佳延迟时间并将数据绘制成图,如图 7 所示.

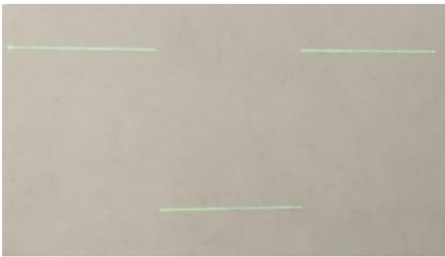


图 6 添加时间补偿后的投影图形

Fig.6 Projected patterning with time-compensated

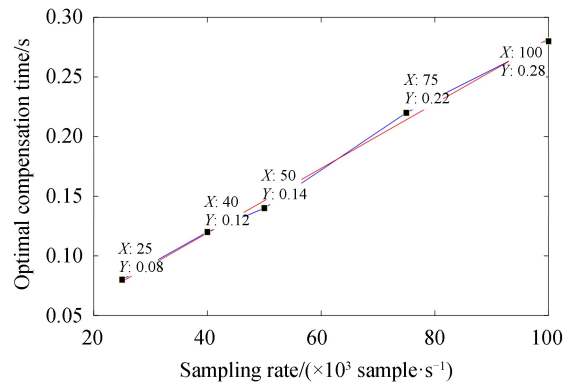


图 7 各采样率对应的最佳补偿时间

Fig.7 Optimal compensation time for each scanning speed

通过对数据进行拟合可以得到最佳补偿时间和激光扫描投影系统控制板卡采样率的关系,为

$$t = 0.0272f_s + 0.0106 \quad (2)$$

式中, t 为补偿时间(s), f_s 为采样率($\times 10^3$ sample/s).

2.2 转角偏差补偿实验

为研究转角偏差的补偿和优化,采用路径优化后的角度递增变化的连续扫描投影图形,并设计系列实验用以寻找最佳的时间补偿.采用如图 8(a)所示的投影图形进行实验,将系统的采样率设置为 100×10^3 sample/s.

如图 8(b)所示,实际得到的投影图形与理论的投影图像相比,在拐角处并不一致,这是由于振镜存在转动惯性,无法完成相应速度和方向的快速改变^[14].为分析转角偏差对投影图形的影响,本实验选取了多个不同角度的投影图形,将系统的采样率设置为 100×10^3 sample/s.如图 8 所示为以 10° 为间隔, $10^\circ \sim 150^\circ$ 不同角度的投影图形.

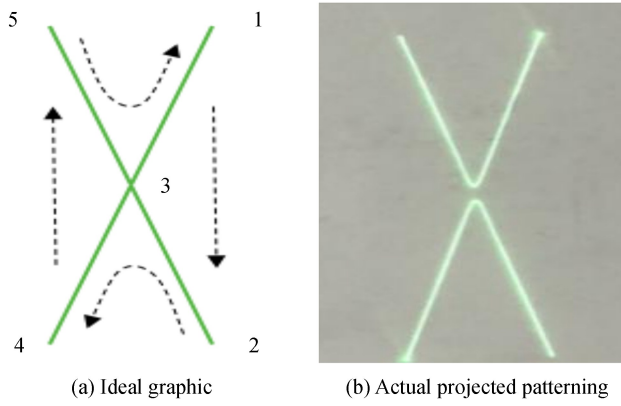


图 8 转角偏差对投影图形的影响

Fig.8 Influence of corner deviation on projected patterning

如图 9 所示,在采样率一定的情况下,两条投影线相交的角度影响转角偏差的大小,且锐角的偏差影响比钝角的偏差影响要更大.

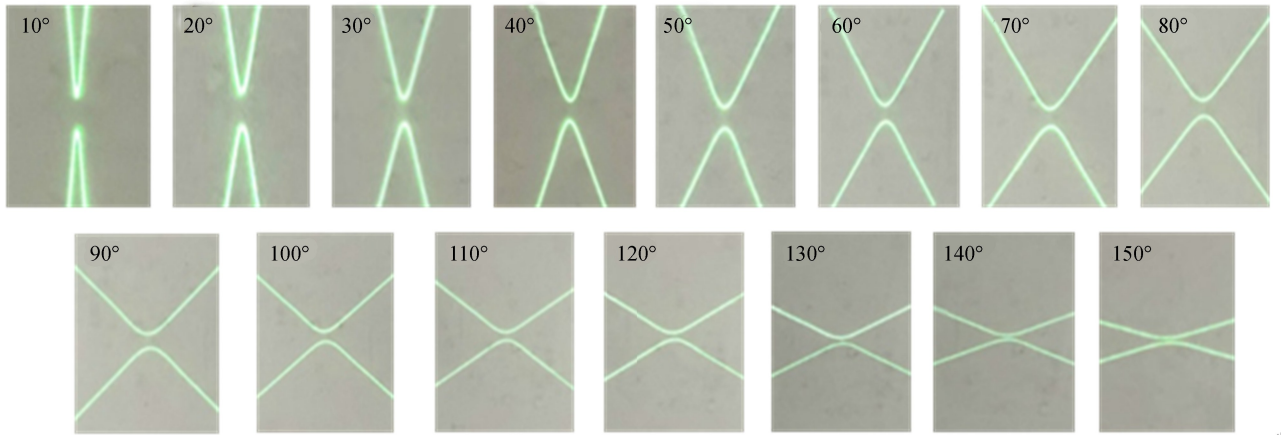


图 9 不同角度的转角偏差

Fig.9 Angle deviation at different angles

为补偿转角偏差,依次增加投影点用于补偿转角偏差.如图 10 所示为采样率 100×10^3 sample/s 时,各个角度添加投影点后,消除了转角偏差的投影图形.

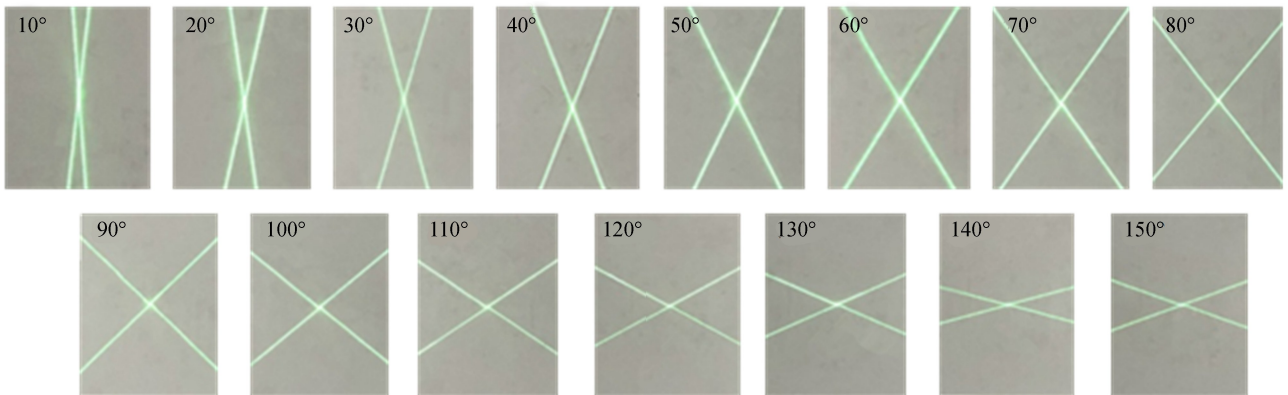


图 10 不同角度的最佳补偿时间

Fig.10 Optimal compensation time at different angles

将图 10 中的最佳延迟时间进行数据拟合,如图 11 所示.

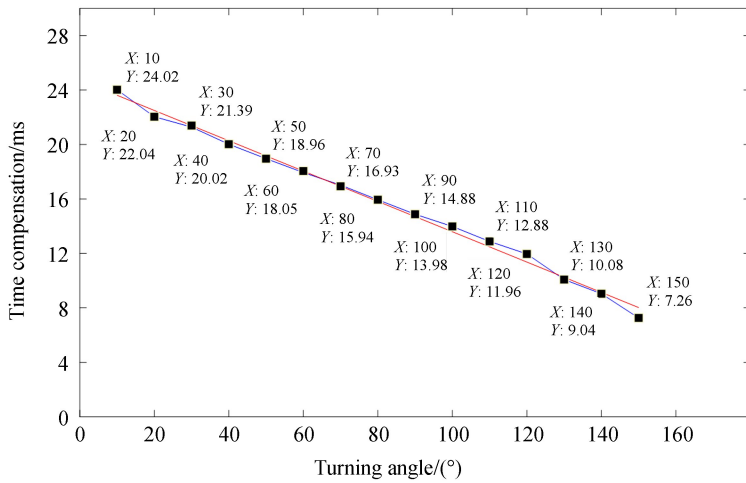


图 11 不同角度对应的最佳补偿时间

Fig.11 Optimal compensation time for different angles

通过对数据进行处理和分析得到最佳补偿时间与投影图形的转角角度成正比,得到公式

$$t = -0.129\theta + 25.804 \quad (3)$$

式中, t 为补偿时间(ms), θ 为转角角度(°).

3 验证实验

为进一步验证所研究方法对复杂图形投影图形偏差优化的有效性和普适性,选取如图 12(a)所示的 5 行 5 列棋盘格投影图形,该图形具有较复杂的扫描路径点序,并包含多个直角和转折交汇特征.分别使用如图 12(b)所示的美国 FARO 激光扫描投影仪 Tracer SI 与图 12(c)所示的课题组自主研发激光扫描投影系统对上述路径优化后的 5 行 5 列棋盘格图形进行投影并对比实际投影图形质量.

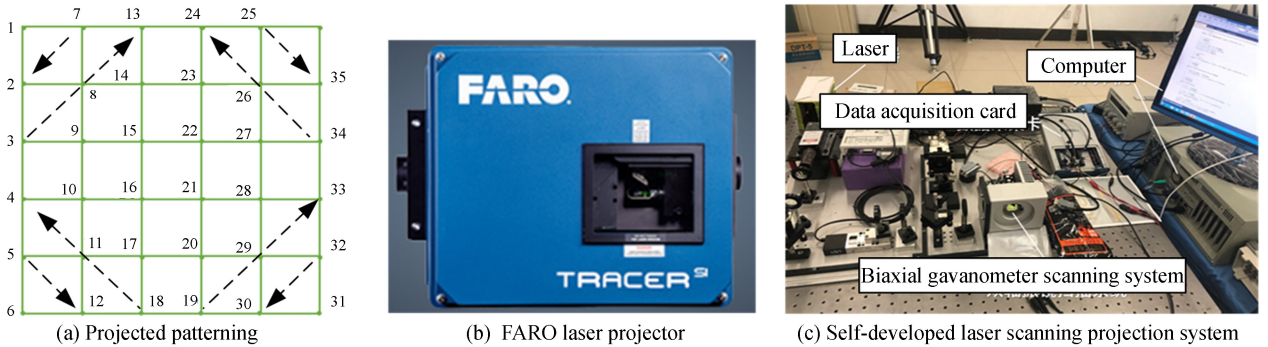
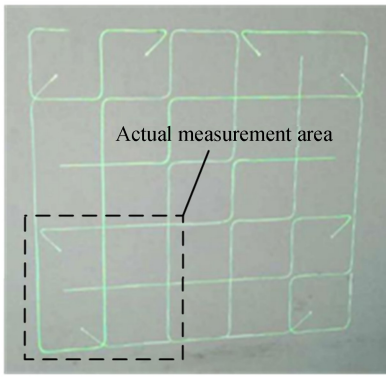


图 12 投影图形以及激光扫描投影系统

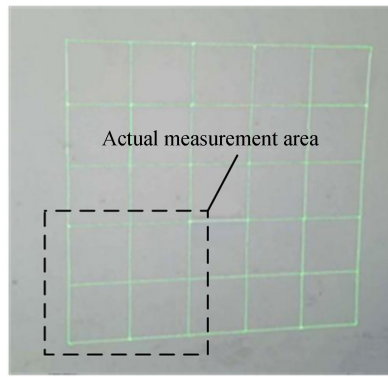
Fig.12 Projected patterning and laser scanning projection system

图 13 为 FARO 激光扫描投影仪和自主研发激光扫描投影系统的实际投影图形.

图 13(a)中的投影图形无法达到较满意的投影效果,存在较多的拖尾、缺失和转角偏差等.而自主研发激光扫描投影系统通过采用时间补偿的偏差校正方法,消除了拖尾、缺失偏差、大幅度减小了转角偏差,最后得到的实际投影图形跟理论的投影图形几乎一致,达到了理想的效果,如图 13(b)所示.



(a) Projected patterning of the FARO laser projector



(b) Projected patterning of the laser scanning projection system

图 13 实际投影图形
Fig.13 Actual projected patterning

为定量分析上述研究投影图形偏差校正方法能够实现的投影图形形状准确度,重复进行 3 次 5 行 5 列棋盘格图形的投影实验.然后,采用 API Radian 激光跟踪仪和手持探针设备对补偿校正前和补偿校正后的实际投影图形位置进行测量,获取的测量数据则采用专为三维测量应用和分析配套的专业测试计量软件 Spatial Analyzer 进行平均位置偏差的对比.如图 14 所示为选取投影图形左下角 2 行 2 列图形区域的平均位置偏差对比图.

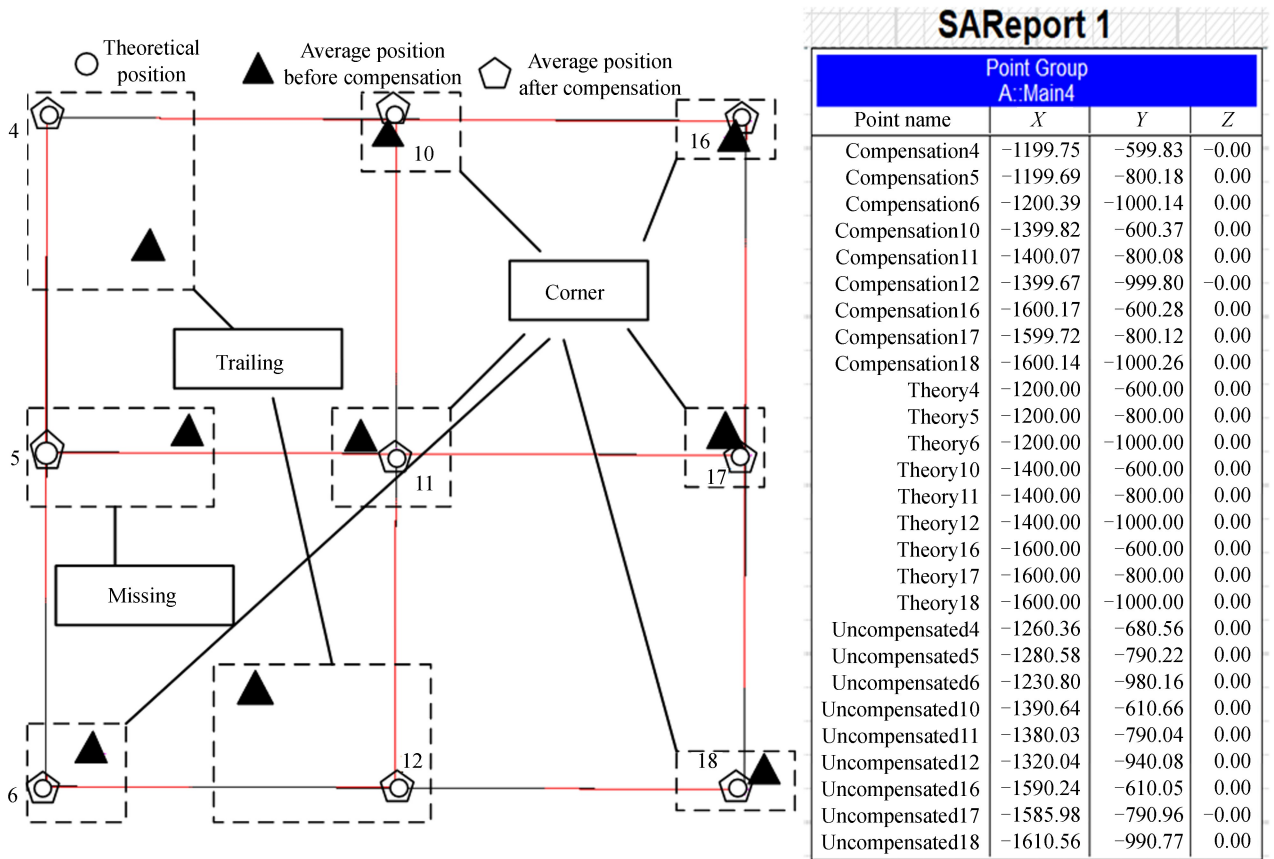


图 14 补偿校正前后的平均位置偏差对比
Fig.14 Comparison of average position deviation before and after compensation correction

表 1 所示,在自主搭建的激光扫描投影系统中应用所研究的图形偏差校正方法可补偿拖尾、缺失和圆角等图形形状偏差,将补偿后实际投影图形的各边长与理论投影图形的各边长相比较,得出实际投影各图形边长的最大偏差为 0.5 mm,可验证所研究投影图形偏差校正方法可以提高激光扫描投影系统的投影图形形状

准确度.

表 1 数据偏差对比
Table 1 Data comparison

Items	Theoretical position	Position before compensation	Deviation type	Deviation/mm	Position after compensation	Patterning after compensation
4	(-1 200, -600)	(-1 260.36, -680.56)	Tailing deviation	100.66	(-1 199.75, -599.83)	Without tailing deviation
5	(-1 200, -800)	(-1 280.58, -790.22)	Missing deviation	81.17	(-1 199.69, -800.18)	Without missing deviation
6	(-1 200, -1 000)	(-1 230.8, -980.16)	Corner deviation	36.64	(-1 200.39, -1000.14)	Without corner deviation
10	(-1 400, -600)	(-1 390.64, -610.66)	Corner deviation	14.19	(-1 399.82, -600.37)	Without corner deviation
11	(-1 400, -800)	(-1 380.03, -790.04)	Corner deviation	22.31	(-1 400.07, -800.08)	Without corner deviation
12	(-1 400, -1 000)	(-1 320.04, -940.08)	Tailing deviation	99.9	(-1 399.67, -999.8)	Without tailing deviation
16	(-1 600, -600)	(-1 590.24, -610.05)	Corner deviation	14.01	(-1 600.17, -600.28)	Without corner deviation
17	(-1 600, -800)	(-1 585.24, -790.96)	Corner deviation	17.3	(-1 599.72, -800.12)	Without corner deviation
18	(-1 600, -1 000)	(-1 610.56, -990.77)	Corner deviation	14.02	(-1600.14, -1000.26)	Without corner deviation

4 结论

本文研究了一种基于时间补偿的激光扫描投影系统投影图形偏差校正方法,首先分析了激光扫描投影系统在投影复杂图形时存在拖尾、缺失和转角偏差的原因,然后通过相关实验建立了偏差补偿数学模型,得出了时间补偿的方法,最后通过投影 5 行 5 列棋盘格的复杂图形对所研究方法进行验证实验,并与国外激光扫描投影系统的实验结果进行了对比,验证了所研究方法的优越性,较好地解决了拖尾、缺失现象,较大程度地降低了转角偏差,提高了投影图形的精度和清晰度,能够将该方法应用于自主研发的激光扫描投影系统中,未来应用于实际制造装配现场中可解决零部件的精准、智能、高效定位装配难题。

参考文献

- [1] HOU Mao-sheng, YANG Fan, SUN Ming-li, *et al.* Research on dynamic focusing technology applied to laser scanning projection instrument [J]. *Applied Optics*, 2018, **39**(5): 605-612.
侯茂盛,杨帆,孙明利,等.应用于激光扫描投影仪器的动态聚焦技术研究[J].应用光学,2018,**39**(5):605-612.
- [2] CHEN Guo-qiang, LI Hui, XU Ning. Application of laser projection technology in assembly connection[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2015(S2): 20-22.
陈国强,李辉,余宁.激光投影技术在装配连接中的应用[J].航空制造技术,2015(S2):20-22.
- [3] WANG Sheng, WU Jun-hao, NIU Run-jun, *et al.* Research and application of laser projection technology in aircraft conduit mounting [J]. *Navigation and Control*, 2018, **17**(3): 48-54.
王声,吴军豪,牛润军,等.激光投影技术在飞机导管支架安装中的研究与应用[J].导航与控制,2018,**17**(3):48-54.
- [4] RUEB K D, BIANCHIN E S. Laser projector with brightness control and method[P]. 2008.
- [5] COBBJ M. System for assembling aircraft[P]. 2013.
- [6] GUO Li-li, LI Li-juan, HOU Mao-sheng, *et al.* Spatial positioning accuracy analysis of intelligent laser 3D projection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(8): 131-139.
郭丽丽,李丽娟,侯茂盛,等.智能激光 3D 投影空间定位精度分析[J].红外与激光工程,2018,**47**(8):131-139.
- [7] HOU Mao-sheng, SUN Ming-li, YANG Fan, *et al.* Laser scanning projection path planning method based on improved Fleury algorithm [J]. *Applied Optics*, 2019, **40**(3): 493-499.
侯茂盛,孙明利,杨帆,等.基于改进 Fleury 算法的激光扫描投影路径规划方法[J].应用光学,2019,**40**(3):493-499.
- [8] HOU Mao-sheng, LIU Ji-qiang, LIU Da-li, *et al.* Research on calibration technology of laser scanning projection system based on laser ranging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, **46**(10): 1004002.

- 侯茂盛,刘继强,刘大礼,等.基于激光测距的激光扫描投影系统标定技术研究[J].中国激光,2019, **46**(10): 1004002.
- [9] GUO Li-li, LI Li-juan, QIAO Xiao-li, *et al.* High precision calibration modeling method for laser 3D projection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(1): 0112001.
- 郭丽丽,李丽娟,乔晓丽,等.激光 3D 投影高精度校准建模方法[J].光子学报,2018,**47**(1): 0112001.
- [10] SUN Ming-li. Research on laser scanning projection path optimization method based on euler loop[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- 孙明利.基于欧拉回路的激光扫描投影路径优化方法研究[D].长春:长春理工大学,2019.
- [11] ZHUGE Xiang-bin, WU Da-yuan, SHI Bao-ju. Study on improving the optical scanners output characteristics in laser large screen display[J]. *Chinese Journal of Laser*, 1990(3): 182-185.
- 诸葛向彬,吴大元,石宝驹.激光大屏幕显示中改善振镜输出特性曲线的研究[J].中国激光,1990(3):182-185.
- [12] MARSHALL G F, STUTZ G E. Handbook of optical and laser scanning[M]. 2011: CRC Press.
- [13] ZHAO Wen-lu, LIU Bo, ZHONG Guo-hui, *et al.* Optimization of laser marking corner interpolation algorithm [J]. *Electromechanical Information*, 2012(3): 124-125.
- 赵文路,刘勃,钟国辉.激光标记拐角插补算法的优化[J].机电信息,2012(3):124-125.
- [14] PURKHETA, HALABI O, TADAHIRO F, *et al.* Accurate and efficient drawing method for laser projection[J]. *Journal of the Society for Art and Science*, 2008, **7**(4): 155-169.