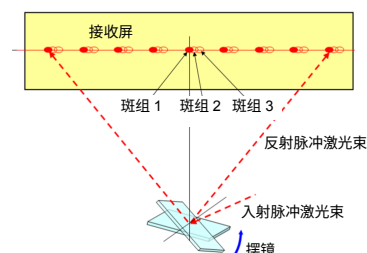


DOI: 10.12086/oe.2018.180052

高频摆镜的多时序闪频激光测试

蔡怀宇^{1,2}, 梁志敏^{1,2*}, 黄战华^{1,2}, 郎明远^{1,2}¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;²光电信息技术教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072

摘要: 为解决目前摆镜检测系统采样率低, 难以满足高频摆镜测量需求的问题, 根据等效采样原理, 设计了基于高速激光闪频技术的多时序高精度非接触式摆镜检测系统。该系统首先利用激光脉冲控制电路实现多时序的闪频激光照明, 在 CCD 靶面上获得光斑位置图像; 然后, 根据激光光斑成像位置计算摆镜的摆角, 并依照相邻光斑位置之间的时间间隔得到角速度。实验结果表明: 检测系统的角度分辨力为 0.005° , 动态采样时间间隔可以达到百微秒量级, 角速度测量误差小于 $\pm 7\%$ 。该系统提高了摆镜测量的采样率, 满足了高频摆镜测试的要求。

关键词: 摆镜; 高频; 闪频技术; 多时序测量

中图分类号: TN206; TH712

文献标志码: A

引用格式: 蔡怀宇, 梁志敏, 黄战华, 等. 高频摆镜的多时序闪频激光测试[J]. 光电工程, 2018, 45(7): 180052

Multi time sequence flashing laser test for high frequency swing mirror

Cai Huaiyu^{1,2}, Liang Zhimin^{1,2*}, Huang Zhanhua^{1,2}, Lang Mingyuan^{1,2}¹College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology (Tianjin University),

Ministry of Education, Tianjin 300072, China

Abstract: In order to solve the problem of low sampling rate and to meet the requirements of high frequency swing mirror measurement, based on the principle of equivalent sampling, a multi time series high accuracy non-contact swing mirror detection system is designed. First, with the laser pulse control circuit, multi time sequence flashing laser lighting is achieved and the spot position is obtained on the CCD target plane. Then, according to the image of the laser spot position, calculate the mirror swing angle and angular velocity by the time interval between adjacent spot positions. The experimental results show that the angle resolution of the detection system is 0.005° . The time resolution can reach the microsecond order, and the angular velocity measurement error is less than $\pm 7\%$. The system improves the sampling frequency of swing mirror measuring and meets the requirements of high frequency swing mirror test.

Keywords: swing mirror; high-frequency; flash frequency; multi timing measurement

Citation: Cai H Y, Liang Z M, Huang Z H, *et al.* Multi time sequence flashing laser test for high frequency swing mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(7): 180052

收稿日期: 2018-01-09; 收到修改稿日期: 2018-03-23

作者简介: 蔡怀宇(1965-), 女, 博士, 教授, 主要从事光电成像与检测技术、信息光学和图像处理等方面的研究。

E-mail: hycail@tju.edu.cn

通信作者: 梁志敏(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: liangzhimin@tju.edu.cn

1 引言

高频高精度摆镜广泛应用于激光标刻^[1]、高速摄影^[2]、激光雷达^[3]、球幕投影^[4]等系统之中,摆镜的性能直接影响各系统的精度和可靠性。为了对摆镜的性能做出准确评价,需要对摆镜进行充分的测试。在摆镜的各项技术指标中,摆动角速度是影响系统工作的主要因素。因此,测量系统主要通过对摆镜工作状态下角速度的测量来实现对其性能的测试评价。

角速度是角位移对时间的导数,角速度的测量是通过对角度测量结果进行差商间接实现,所以要实现摆镜角速度的检测,首要问题是实现摆镜摆角的精准测量。在光学式角度测量系统中,目前主要采用的方法有环形激光器、干涉法、自准直法等^[5]。环形激光器能实现大测角范围的高精度连续角度测量,但其接触式测量引入的转动惯量会影响扫描反射镜的运动性能^[6]。干涉法测量精度极高,但是其测角范围很小,无法实现摆镜大角度的测量^[7]。随着 CCD 技术的高速发展,基于 CCD 与自准直法相结合的非接触式动态测量的应用越来越多^[8-9]。长春理工大学研制的扫描反射镜摆角动态测试系统^[10],测量角度为 $\pm 12^\circ$,其角度分辨力为 0.01° ,静态测角精度为 0.04° ,但被测摆镜工作频率仅达到 10 Hz,其采样频率为 200 Hz。中国科学院长春光学与精密机械物理研究所利用特殊设计的反射镜阵列通过对线阵 CCD 的复用实现了对大测角范围的要求^[11],其角度分辨力为 $2.5''(0.0007^\circ)$,静态测角精度为 $3''(0.0008^\circ)$,角速度检测精度优于 $\pm 7\%$,但是所测摆镜的角速度为 $0.2^\circ/\text{s}$,采样频率为 12 Hz,仅适用于低速摆镜测试。

上述系统仅适用于工作频率较低的摆镜,通常摆镜测试系统的采样率主要受限于 CCD 帧频而无法满满足高频摆镜测量过程中对采样率的要求,也难以实现摆镜均匀性的测量,单纯地提高相机帧频会增加测试成本。此外,由于摆镜是连续摆动的,所以接收屏上的激光斑处于运动状态,在摆幅一定的条件下,摆镜的角速度随着其摆动频率的增加而增加,而当前系统中多采用常亮激光照明,由于摄像机的曝光时间有限,当摆镜连续摆动且频率较高时,CCD 曝光时间内采集到的图像将是一段亮线,无法得到各个时刻光斑的准确位置,也就无法对高频摆镜进行测试。针对上述两个问题,本文利用等效采样和闪频激光点阵思路,设计了一种多时序的高精度非接触式摆镜动态特性检测系统,并对高频摆镜角速度进行了相关测量实验。

2 测量原理

2.1 系统测量基本原理

系统测量原理如图 1 所示,从激光器发出的细平行激光入射到摆镜的转轴中心,由摆镜反射后的光线投射到接收屏上。设摆镜摆轴中心到接收屏的距离为 R ,反射光垂直照射在接收屏中心 O 处时的摆镜位于初始位置 1,当摆镜在电机的驱动下摆动时,激光光斑在接收屏上的位置也随之发生变化,摆镜摆过一定角度 θ 到达位置 2 时,反射光照射在接收屏 O' 处,光斑位置与中心的偏移量为 H 。

由反射定律和几何关系可以得到:

$$H = R \tan 2\theta \quad (1)$$

对式(1)求反函数,可以得到摆镜摆过的角度:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{H}{R} \right) \quad (2)$$

摆动角度 θ 是关于时间 t 的函数,因此令其对时间求导就可以得到摆镜摆动的角速度 ω 。通常,对于瞬时角速度的测量,是用两时刻间的平均角速度近似表示,即:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \approx \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (3)$$

由式(3)可知,要获得摆镜的角速度需要准确测量各时刻的摆角以及相邻摆角间的时间间隔,而且只有当采样点之间的时间间隔足够小时,才能更为准确地得到摆镜各时刻的瞬时角速度,但是受相机帧频、光斑大小等因素的影响,采样间隔不能够无限小。

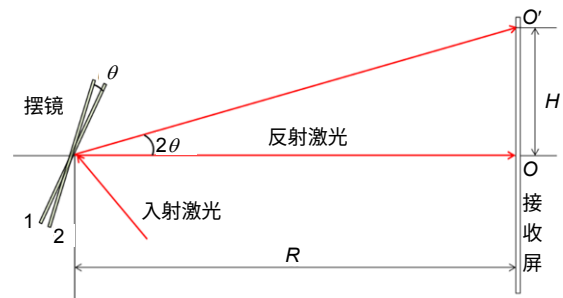


图 1 测量原理

Fig. 1 Principle of the measurement system

2.2 多时序闪频激光点阵测量原理

为了准确获得各时刻的摆镜角度,需要确保 CCD 相机采集到的光斑图像为分立的亮斑。本文提出了采用高速激光闪频技术进行测量的方法。使用闪频激光照明,以闪频激光持续时间代替一般测量系统中的相机曝光时间。由于闪频激光持续时间只有微秒量级,所以即使摆镜角速度很快,光照时间内光斑在 CCD

上的图像运动距离仅为几个像素,位移量相较于光斑尺寸可忽略不计,所以仍可以将采集到的图像视为一个斑点,通过图像采集和处理,可以获得其精确位置。同时,由于光斑移动量很小,所以在图像处理过程中不会引入由于因光斑运动造成图像形变而产生的测量误差。此外,由于闪频激光的持续时间远小于相机的曝光时间,通过调整激光光斑大小及脉冲周期,可以在一帧图像中同时采集多个相互独立的光斑图像,提高系统的采样率。

实时采样与等效采样是采样技术中的两种基本方式。对于更高工作频率的摆镜,当实时采样难以实现高频摆镜测量对采样率的要求时,对于重复性良好的摆镜,可以利用等效采样原理完成对其角度的更小时时间间隔采样。设摆镜角度随时间变化为周期性信号 $\theta(t)$, 其周期为 T , 即:

$$\theta(t) = \theta(nT + t) \quad (4)$$

设采样脉冲信号为 $f(t)$, 其采样间隔为 $T_f = nT + \Delta t$, 在采样间隔点得到信号:

$$\begin{aligned} \theta_n(\Delta t) &= \theta(nT + \Delta t)f(nT + \Delta t) \\ &= \theta(\Delta t)f(nT + \Delta t) \end{aligned} \quad (5)$$

当 n 取不同的值时,分别表示在不同的摆镜周期上进行采样,当改变 Δt 时,这些采样点分别取自摆镜周期的不同时刻,最终将采集到的 $\theta_n(\Delta t)$ 重新组合,即可得到待测的信号 $\theta(t)$, 并实现对其间隔为 Δt 的采样^[12]。

基于此原理,本文提出了多时序的测量方法。如图2所示,以各周期内的摆镜启动时刻为基准,每经过一个周期,闪频激光的启动时刻依次延迟一个微小单位时间 Δt , 这个延迟就是等效采样的采样间隔。这些取自不同周期的光斑位置均可认为是同一周期内不同时刻采集所得。通过此方式进一步缩小采样间隔至 Δt , 提高了采样率,以适应更高频率的摆镜测量要求。

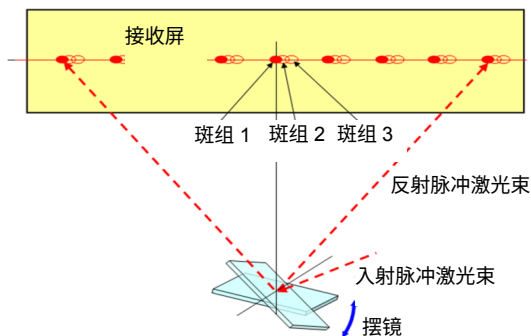


图2 多时序闪频激光反射点测量原理

Fig. 2 Principle of the multi time flash laser reflection point measurement

利用闪频激光技术,在一帧图像中同时采集多个独立的光斑图像;基于等效采样原理,提高了系统的采样率,减小了采样间隔。将二者结合起来,测量所需周期数=闪频激光周期/等效采样的间隔,在提高采样率的同时,大大减小测量所需的摆镜周期。

3 多时序闪频测量系统

3.1 系统测量总体方案

图3为摆镜测量系统的结构图,该系统主要由控制电路、激光器、接收屏、CCD相机、计算机等部分组成。控制电路驱动激光器产生闪频激光,经摆镜反射后投射在接收屏上,当摆镜在电机的驱动下摆动时,激光光斑在接收屏上的位置也随之发生变化,CCD相机进行图像采集并上传至计算机处理,获得最终的测量结果。

该系统选用的 CCD 相机分辨率为 1280×960 , 像元尺寸为 $6.45 \mu\text{m}$, CCD 的靶面尺寸为 $8.256 \text{ mm} \times 6.192 \text{ mm}$, 接收屏成像范围为 $100 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 。通过调节镜头及物像距,使其对整个接收屏成像,则成像镜头的垂轴放大率需为

$$\beta = \frac{2y'}{2y} = -\frac{8.256}{100} = -0.08256。$$

选用焦距 $f' = 22 \text{ mm}$ 的镜头,计算可得当物距 $l = -288.5 \text{ mm}$, 像距 $l' = 23.8 \text{ mm}$ 时,满足放大率的要求。此时,CCD 上两个像元的中心距对应接收屏上的距离为 0.08 mm 。根据该系统设计要求,摆镜转角的测量分辨率为 $\delta = 0.005^\circ = 0.087 \text{ mrad}$, 则系统中摆镜到接收屏距离至少为 $R = 0.08 \text{ mm} / (2 \times 0.087 \text{ mrad}) = 459 \text{ mm}$, 为了便于计算,取 $R = 500 \text{ mm}$, 此时,系统的摆角测量范围为 $A = \pm 2.5^\circ$ 。设摆镜工作频率为 F , 则接收屏上光斑移动速度为

$$v = 4.4FR \times 2。$$

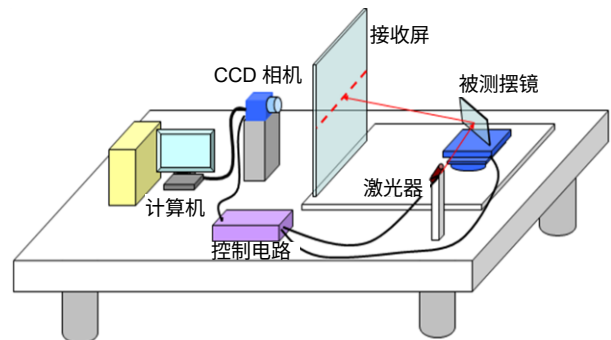


图3 摆镜角度测量系统结构示意图

Fig. 3 Scheme of angle measurement system for swing mirror

测量系统的闪频激光脉宽设为 $10\ \mu\text{s}$, 为忽略光斑运动造成的形变, 考虑到光斑的尺寸, 令光斑在激光持续时间内的位移对应于 CCD 的 3 pixels 以内, 即接收屏上位移在 $0.24\ \text{mm}$ 以内, 可以得到系统的最大可测摆频为 $137\ \text{Hz}$ 。

由于 CCD 上采集到的光斑是有一定尺寸的, 所以要保证高质量的测量精度, 就需要计算机对光斑图像进行处理。目前光斑中心位置计算方法的测量精度都可以达到亚像素水平, 其中, 重心法具有计算简单、数据量小等优点, 且其提取误差一般约为 $0.2\ \text{pixels}^{[13]}$, 因此本文选用重心法对图像进行处理以计算光斑中心位置。

3.2 多时序闪频激光测量控制

测量系统控制通过基于 8051 与复杂可编程逻辑器件(complex programmable logic device, CPLD)的嵌入式系统实现, 其中 CPLD 负责控制整个系统的时序。由于本测量系统采用闪频激光照明, 可在在一帧图像内采集到多个光斑图像, 为确定采集到的图像中光斑产生的先后顺序, 要保证摆镜正程和返程分开进行测量; 同时, 要确保在摆镜的一个正程(或返程)内相机处于曝光时间, 以得到该周期内全部光斑的位置图像。

基于此测量要求, 设计了闪频激光控制电路。以正程测量为例, 系统的时序逻辑见图 4。CPLD 接收摆镜的正返程信号(摆镜正程时该信号为高电平, 返程为低电平), 将该信号延迟一个脉冲并取反后, 与原信号做“与”运算, 即可得到该周期内的摆镜正程启动时刻的脉冲信号, 并以此脉冲信号作为 CCD 相机开始曝光采集图像的触发信号; 在采集各帧图像的同时, 以启动时刻的脉冲信号为基准, 由计时器依次产生等效采样所需的取样间隔 $n\Delta t$, 在经过所需延迟后, 控制电路生成激光脉冲信号控制激光器的亮灭, 以实现多时序的闪频激光的控制功能。同理, 若接收到的摆

镜的正返程信号取反, 即可实现对摆镜返程的测量。

4 实验与分析

摆镜测量系统的实验平台如图 5 所示。为验证测量系统的精度, 选用线性度为 99.9% 的摆镜作为被测对象, 保证摆镜在其线性段内能够以设定的角速度进行摆动。考虑到被测摆镜自身工作频率的限制, 本文主要对工作在 $25\ \text{Hz}$ 和 $50\ \text{Hz}$ 下的摆镜进行测试, 振幅为 $\pm 2.5^\circ$ 。

4.1 系统标定测试

将摆镜置于光学转台上, 并使摆轴通过光学转台的回转中心, 组成测试系统的标定装置。以反射光垂直照射在接收屏上时的摆镜位置为初始位置, 令光学转台从初始位置以 0.5° 为步长分别依次转动至 $+2.5^\circ$ 和 -2.5° , 将其作为标准值, 并测量相应角度下的光斑位移量, 测量结果如表 1 所示。

利用表 1 中光学转台的读数与光斑位移的测量值进行拟合, 得到角度 θ -光斑位移 H 的拟合结果:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{H + 0.0232}{497.7494} \right) \quad (6)$$

4.2 摆镜动态角速度测试

理论上采样时间间隔越小, 越能准确表示摆镜的瞬时角速度, 但是系统对角速度测量的误差受其测角误差和采样时间间隔的影响。当角度测量精度一定时, 采样时间间隔越小, 其误差对角速度检测的影响越大。因此, 考虑到系统测角的精度, 经过实验对比, 当一个摆镜周期内采集 100 个角度位置, 即相邻采样点时间间隔为摆镜周期的 $1/100$ 时, 既可以满足对摆角测量均匀性的要求, 又能将角速度测量误差控制在一个较小的范围内。对于 $50\ \text{Hz}$ 的摆镜, 系统的采样时间间隔设为 $200\ \mu\text{s}$; 对于 $25\ \text{Hz}$ 的摆镜, 系统采样时间间隔设为 $400\ \mu\text{s}$ 。

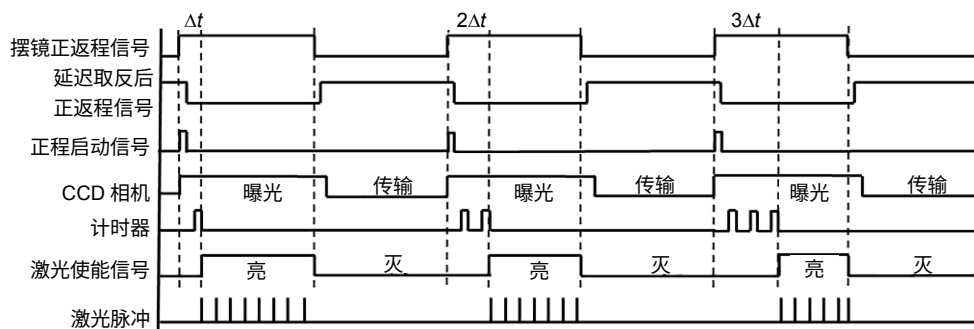


图 4 CPLD 时序逻辑图

Fig. 4 The logic of CPLD time series

图 6、图 7 分别为 CCD 相机对工作在 50 Hz 下摆镜的正程和返程采集到的接收屏上的光斑图像(仅截取有光斑部分), 同一图像中相邻光斑间的时间间隔设置为 1 ms, 相邻图像中光斑产生时间依次延迟为 200 μ s。图 8 为综合正返程测量后, 系统测得的工作在 50 Hz 下摆镜摆动时的角度-时间曲线及摆镜瞬时角速度-时间曲线。

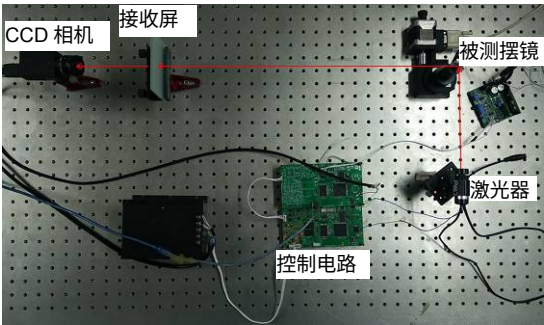


图 5 测量系统实物图
Fig. 5 Photo of measurement system

同理, 对工作在 25 Hz 下摆镜进行了测试, 其角度-时间曲线及相应的摆镜瞬时角速度-时间曲线如图 9, 等效采样间隔为 400 μ s。

由于摆镜在最大摆角附近并非匀速摆动, 所以为了验证测试系统对角速度检测的精度, 分别使用其正返程中间的线性段(正返程中间 80%部分)进行测量误差分析, 结果如表 2 所示。

表 1 转角位置与光斑位移
Table 1 Angle positions and spot displacements

角度值/(°)	光斑位移/mm	角度值/(°)	光斑位移/mm
0.00	0.0000	0.00	0.0000
0.50	8.6498	-0.50	-8.6465
1.00	17.3091	-1.00	-17.3131
1.50	25.9429	-1.50	-25.9805
2.00	34.9149	-2.00	-34.9716
2.50	43.4685	-2.50	-43.6283

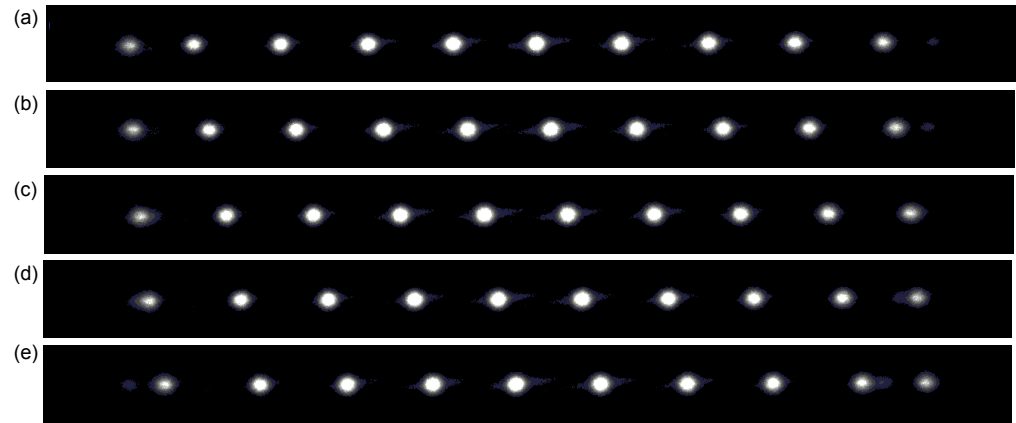


图 6 正程光斑图像。(a) 无延迟; (b) 延迟 200 μ s; (c) 延迟 400 μ s; (d) 延迟 600 μ s; (e) 延迟 800 μ s
Fig. 6 Photos of light spots in positive direction. (a) No delay; (b) Delay 200 μ s; (c) Delay 400 μ s; (d) Delay 600 μ s; (e) Delay 800 μ s

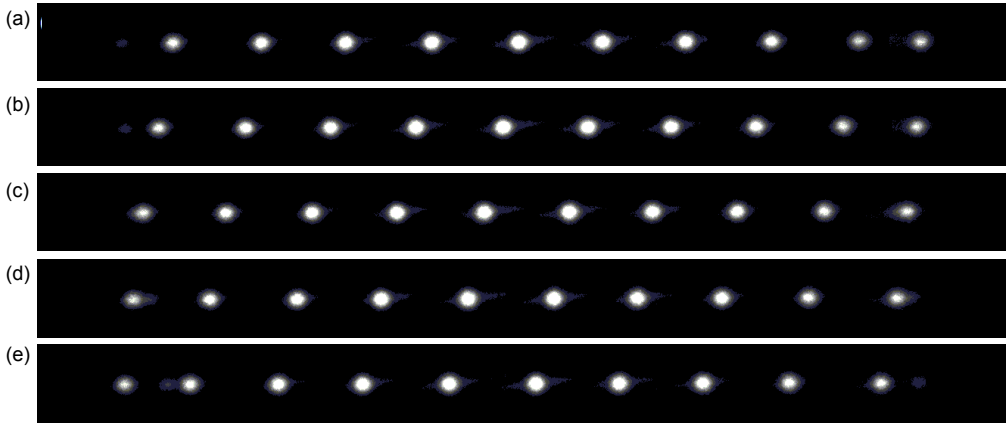


图 7 返程光斑图像。(a) 无延迟; (b) 延迟 200 μ s; (c) 延迟 400 μ s; (d) 延迟 600 μ s; (e) 延迟 800 μ s
Fig. 7 Photos of light spots in negative direction. (a) No delay; (b) Delay 200 μ s; (c) Delay 400 μ s; (d) Delay 600 μ s; (e) Delay 800 μ s

由图 8 与图 9 可以看出,对于两种不同工作频率下的摆镜,系统对摆镜线性部分测量的角速度值均在 $\pm 7\%$ 公差带内。由表 2 可得,测量结果的变异系数(标准差与平均值的比值)在 2.85% 以内,其三倍标准差(3σ)均小于平均值的 8.5%,测量误差满足要求。

5 结 论

针对目前摆镜测试系统采样率低的缺点,本文设计了一种新的摆镜测量系统。通过将等效采样原理与激光闪频技术相结合,实现普通帧频 CCD 相机对高

频摆镜的参数测量。依照实验原理搭建了摆镜测试系统,并对工作在不同频率下的摆镜进行了测量实验。实验结果显示,检测系统的角度分辨力为 0.005° ,采样间隔可低至百微秒量级,角速度测量误差在 $\pm 7\%$ 以内。本文所设计的系统满足高频摆镜动态测量的要求。

本文验证了系统对高频摆镜角速度的测量,系统各个指标还可以进一步提高。如通过选用更高分辨力的 CCD、更精准的系统标定等来优化系统的分辨力和测角精度,在此基础上可以进一步减小采样时间间隔,适应更高频率的摆镜测试。

表 2 测量结果分析

Table 2 Analysis of measured results

摆镜状态	摆镜角速度/($^\circ\cdot\text{ms}^{-1}$)	测量平均值/($^\circ\cdot\text{ms}^{-1}$)	标准差/($^\circ\cdot\text{ms}^{-1}$)	变异系数/%
50 Hz 正程	0.50	0.5043	0.0142	2.82
50 Hz 返程	-0.50	-0.5030	0.0128	-2.55
25 Hz 正程	0.25	0.2526	0.0072	2.83
25 Hz 返程	-0.25	-0.2518	0.0071	-2.82

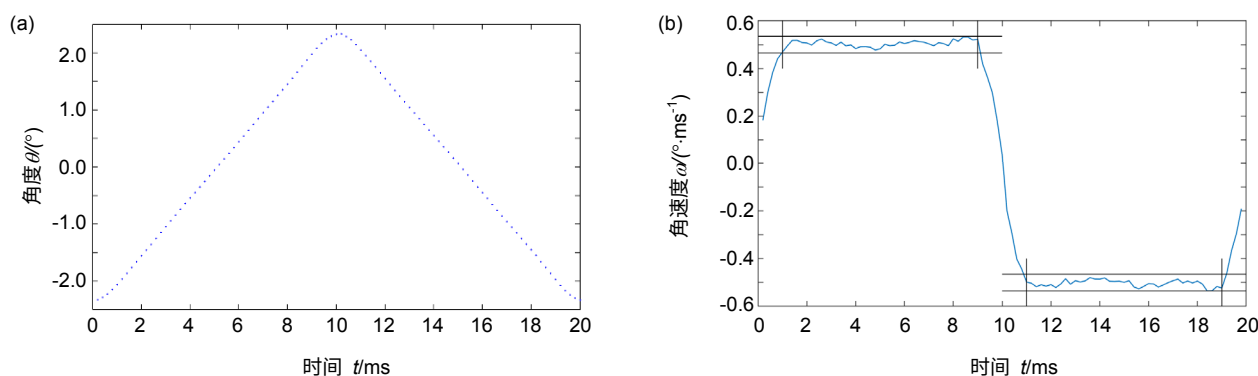


图 8 摆镜 50 Hz 时测量值。(a) 角度; (b) 角速度

Fig. 8 Measured values of swing mirror at 50 Hz. (a) Angle; (b) Angular velocity

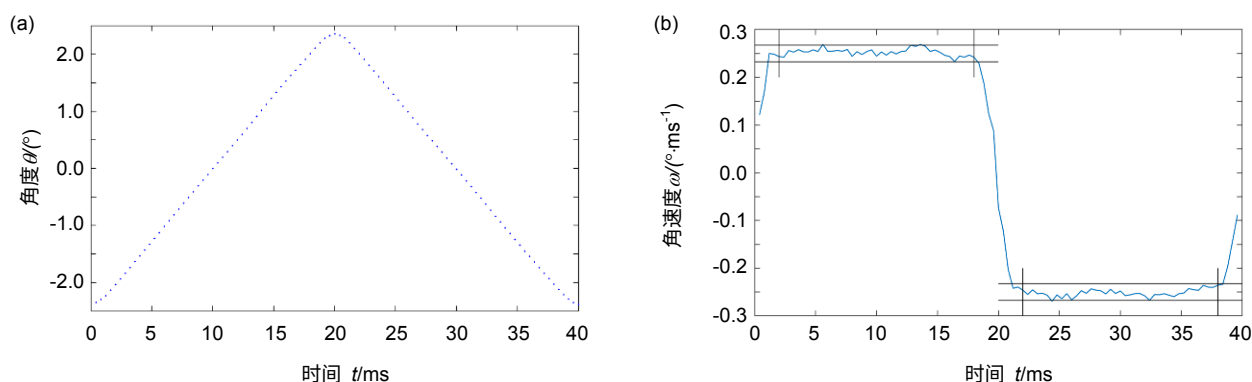


图 9 摆镜 25 Hz 时测量值。(a) 角度; (b) 角速度

Fig. 9 Measured values of swing mirror at 25 Hz. (a) Angle; (b) Angular velocity

参考文献

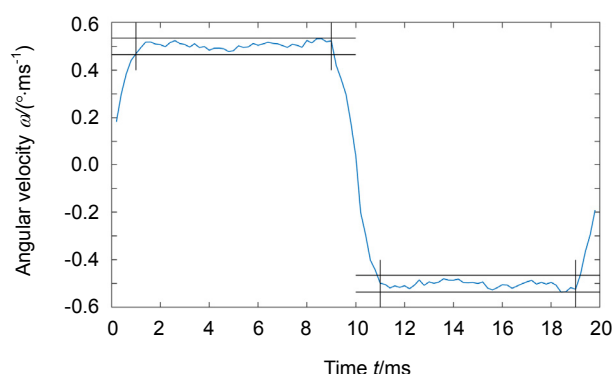
- [1] Xu B Z, Liu T G, Wang M, *et al.* Research on laser marking technology for free-form surface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(8): 2165–2169.
许宝忠, 刘铁根, 王萌, 等. 空间自由曲面激光标刻技术研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2165–2169.
- [2] Zhao H X, Zhao J K, Tian L D, *et al.* Detection of angular tracing precision of rotating mirror house in streak camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(12): 3303–3308.
赵怀学, 赵建科, 田留德, 等. 转镜式高速摄影机角跟踪精度的检测[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(12): 3303–3308.
- [3] Ravindra Singh R, Mudgil A, Prakash C, *et al.* Precision gimbaled mirror control in remote sensing LIDAR for environmental monitoring[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, **6409**: 64091F.
- [4] Huang Z H, Zhang C, Cai H Y, *et al.* The research of joint control algorithm of moving target dome projection based on two-axis turntable[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, **41**(9): 32–37.
黄战华, 张超, 蔡怀宇, 等. 基于二轴转台的运动目标球幕投影联合控制[J]. *光电工程*, 2014, **41**(9): 32–37.
- [5] Pu Z B, Tao W, Zhang Z. Angle measurement with optical methods[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(2): 168–171.
浦昭邦, 陶卫, 张琢. 角度测量的光学方法[J]. *光学技术*, 2002, **28**(2): 168–171.
- [6] Filatov Y V, Loukianov D P, Probst R. Dynamic angle measurement by means of a ring laser[J]. *Metrologia*, 1997, **34**(4): 343–351.
- [7] Ikram M, Hussain G. Michelson interferometer for precision angle measurement[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(1): 113–120.
- [8] Wang W Q, Liu G D, Pu Z B, *et al.* Measurement of two-dimensional small angle by means of matrix CCD[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, **25**(2): 134–135, 138.
王雯倩, 刘国栋, 浦昭邦, 等. 利用面阵 CCD 测量小角度的研究[J]. *半导体光电*, 2004, **25**(2): 134–135, 138.
- [9] Shi Y L, Gao Y G, Zhang L, *et al.* Improvement of measuring accuracy of CCD laser autocollimator by changing hardware parameters[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(4): 726–732.
史亚莉, 高云国, 张磊, 等. 提高 CCD 激光自准直测角精度的硬件方法[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(4): 726–732.
- [10] Zhang G Y, Jiang H L, Xu X P, *et al.* Laser dynamic testing method for swing angle of scanning mirror of infrared earth sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 875–881.
张国玉, 姜会林, 徐熙平, 等. 红外地球敏感器扫描镜摆角激光动态测试方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 875–881.
- [11] Wang Y, Yan C X, Hu C H, *et al.* Non-contact rotation angle measurement system for scanning mirrors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(4): 850–855.
王洋, 颜昌翔, 胡春晖, 等. 非接触式扫描反射镜转角测量系统[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(4): 850–855.
- [12] Qiu D Y, Tian S L, Ye P, *et al.* Research and implementation of a random equivalent time sampling based on parallel structure[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, **35**(7): 1669–1675.
邱渡裕, 田书林, 叶芃, 等. 基于并行结构的随机等效时间采样技术研究与实现[J]. *仪器仪表学报*, 2014, **35**(7): 1669–1675.
- [13] Jin Z L. Error analysis of centroid algorithm based on CCD[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, **32**(1): 38–44.
金占雷. CCD 光斑质心算法的误差分析[J]. *航天返回与遥感*, 2011, **32**(1): 38–44.

Multi time sequence flashing laser test for high frequency swing mirror

Cai Huaiyu^{1,2}, Liang Zhimin^{1,2*}, Huang Zhanhua^{1,2}, Lang Mingyuan^{1,2}

¹College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology (Tianjin University),
Ministry of Education, Tianjin 300072, China



Measurement value of angular velocity for swing mirror 50 Hz

Overview: The angular velocity of swing mirror and its uniformity have an important influence on the working quality of the system. Some research institutions have studied the angle measurement of the swing mirror. But for the dynamic swing mirror, especially the high frequency swing mirror, because of the CCD frame rate, the common test system cannot meet the requirement of high sampling rate in the measurement process. In order to solve the problem of low sampling rate in current swing mirror detection system, a multi time series high accuracy non-contact detection system for swing mirror is designed, which is based on the principle of equivalent sampling.

In the measuring system, when the laser is reflected by the swing mirror, a light spot is obtained on the receiving screen. The position of the spot moves with the swing of the swing mirror. The angle of the swing mirror is calculated by the position of the laser spot, and the angular velocity is obtained according to the adjacent angles and the interval time. In order to adapt to high frequency swing mirror, we realized flashing laser lighting with the designed laser pulse control circuit to replace the camera exposure time in the general measurement systems with the laser pulse duration, and acquired the separate light spot images by adjusting the laser spot size and the pulse cycle. At the same time, in order to improve the sampling rate of the system, we used time sequence logic control circuit to generate multi time pulse signal and achieve the equivalent sampling, so as to improve the sampling rate of the system and meet the test demands.

In order to confirm the feasibility of the test method, the test system was set up and was used to test the swing mirror at different working frequencies. The experimental results show that the angle resolution of the detection system is 0.005° . The time resolution can reach the microsecond order, and the angular velocity measurement error on different frequencies is less than $\pm 7\%$. In summary, we believe this system and method can improve the sampling rate of the swing mirror measurement and have the adjustable sampling frequency can meet the dynamic non-contact measurement requirements with high frequency angular speed and amplitude and other parameters under different working frequencies.

Citation: Cai H Y, Liang Z M, Huang Z H, *et al.* Multi time sequence flashing laser test for high frequency swing mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(7): 180052

* E-mail: liangzhimin@tju.edu.cn