

doi:10.3788/gzxb20184709.0911002

## 线阵图像采集系统外触发延时时间的确定

马卫红, 田会, 董涛, 倪晋平

(西安工业大学 陕西省光电测试与仪器技术重点实验室, 西安 710021)

**摘 要:**针对高速线阵相机实际应用中的可靠触发问题,提出了一种高速线阵图像采集系统外触发延时时间的测试方法,提供有效触发设置参数,可靠捕获动态目标,采用双区截光幕准确获得飞行目标速度,其中第二个光幕同时提供图像采集外触发信号,依据区截装置参数及目标速度计算出采集系统接收到触发信号时刻;对序列线阵图像分析,以获得实际图像开始采集时刻,进而得到线阵图像采集系统外触发延时时间.对行频 64 000 的具体型号采集系统外触发延时时间进行了实际测试,测试结果与分析表明,该系统图像采集存在延时,平均延时时间为 152  $\mu\text{s}$ ,方差为 3.3  $\mu\text{s}$ ,延时测试精度小于 1 个行周期.分析了引入延时测试误差的因素及作用原理,通过 10 000 lps 和 50 000 lps 两种行频的线阵相机延时测试系统误差分析实例,给出了测试系统参数的一般确定方法.

**关键词:**延时测量;成像系统;线阵;触发;图像分析

**中图分类号:** TB853.1+7; TM935.45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2018)09-0911002-7

## Checkout of External Trigger Delay in Linear Image Acquisition System

MA Wei-hong, TIAN Hui, DONG Tao, NI Jin-ping

(Shaanxi Province Key Laboratory of Photoelectric Measurement and Instrument Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Aiming at effective external trigger of high speed linear image acquisition system in practical application, a trigger delay checkout method was presented, for setting the trigger correctly and getting dynamic target image reliably. A double screens device is used to obtained velocity of dynamic target, the second screen provide trigger signal to linear image acquisition system, the time that system received trigger signal is computed according to target velocity and screens parameters; the time that system start to capture is computed by analysis of sequence linear image captured by system, then trigger delay is checked out. For a specific type linear image acquisition system with 64 000 line per second (lps), trigger delay is measured, the test results analysis show that the linear image acquisition system has external trigger delay, the average delay time is 152  $\mu\text{s}$ , the delay variance is 3.3  $\mu\text{s}$ , and the delay error is less than 1 line scan cycle. The factors leading to measurement errors and action principle are analysed, and a common method to design measurement system parameters are presented by two external trigger delay measurement precision analysis examples of line scan camera with 10 000 lps and 50 000 lps line scan frequency.

**Key words:** Delay measurement; Imaging system; Line array; Triggers; Image analysis

**OCIS Codes:** 110.2970; 110.2960; 010.3920; 120.1880; 100.2960

## 0 引言

高速线阵图像采集系统通常由线阵相机、图像采集卡和外触发装置组成<sup>[1]</sup>.线阵相机的光敏面是一个线形阵列,目前的线阵相机传感器类型多为 CCD 或 CMOS,每次成像获得一行图像,是空间上的一个平面经过

基金项目:陕西省科学技术研究发展计划项目(No.2014K05-41)和陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(No.15JS036)资助

第一作者(通讯作者):马卫红(1976—),女,副教授,博士,主要研究方向为光电测试与图像处理. Email: cmcwlh@163.com

收稿日期:2018-02-28;录用日期:2018-05-18

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

光学镜头在线阵相机线形光敏面上的投影.与面阵相机相比,线阵相机在一维上的像元数能做到更多,可以实现更高采样率.目前 2K,4K 像元的工业线阵相机已经比较普遍,8K,10K 的线阵相机也已经应用在多个领域,这样的分辨率是目前面阵相机在任何一个方向上都难达到的.在一些领域,利用线阵相机的一维高分辨率特性,有效避免了多个相机视场拼接引入的结构及调整复杂性.另外由于线阵相机每次完成采集后,只需要传递一行像素,因此具有更高的采集频率,能够以更高的时间分辨率捕获到线形视场内场景的快速变化.鉴于以上优点,线阵相机的应用越来越多.由于线阵相机每次只能采集到单行图像,通常应用在相机和目标具有相对运动的图像采集需求中,一般有两种情况.第一种,相机位置固定不动,目标相对运动,如生产线上工业品数量及品质的在线监测中<sup>[2]</sup>,运动目标的图像捕获及运动参数分析中<sup>[3]</sup>,脉冲放电过程、爆炸场等瞬态场景变化中的信息分析<sup>[4-5]</sup>等等.第二种应用,目标位置不发生变化,相机位置变化,如航天推扫相机、轨道检测小车<sup>[6]</sup>等就是由于相机的移动,使得每次获得的场景位置不同,成像的线视场推扫过目标,从而通过采集到的多行连续图像拼接获得场景连续二维信息.由于人眼对一行图像信息的感知度很差,通常会将连续采集的多行图像序列排放显示.如果在调试或使用过程中,相机和目标的位置没有相对变化,那么线阵相机采集到的每行图像就是相同的.

为了避免处理大量冗余数据,在一些高速运动目标探测或瞬态过程分析应用中,由外触发装置提供准确的触发信号启动采集图像<sup>[7-12]</sup>,以确保线阵相机在一定行数的扫描中可靠采集到目标影像.理论上接收到外触发信号,线阵相机应该立即启动采集,然而由于电路响应、系统处理时间等因素,从触发装置发出触发信号到线阵图像开始正式采集存在一定延时,这个延时必须考虑在触发设置中.触发延时设置过短,目标有可能没有被采集到就结束了设定行数的采集;触发延时设置过长,目标已经穿过视场,采集才开始启动,只能采集到部分或完全不能采集到目标影像.加大采集行数可以有效提高目标捕获率,然而这样一方面会增加分析数据量,影响测试效率;一方面在连续目标探测需求中,可能由于目标经过相机视场时间间隔短,下一个触发信号到来时,相机还没有完成上一次触发的采集,而造成漏采集,因此线阵相机触发延时时间的测定非常必要,尤其在高速高频目标的采集中.目前针对线阵相机的测试多集中在像元尺寸标定,相机内外参数测试<sup>[13-18]</sup>,行频测试<sup>[19]</sup>,性能<sup>[20]</sup>测试上.延时时间的测试必须准确得到触发器发出延时信号时刻和系统开始采集时刻,线阵图像采集系统的触发延时时间通常在亚毫秒级,测试难度高,目前尚未发现有相关测试方法报道.依据触发过程和线阵图像特点,本文给出了一种基于高速运动目标捕获与图像分析的线阵相机触发延时时间测试装置和方法.

## 1 测试原理

### 1.1 采集系统

线阵图像采集系统通常由线阵相机、图像采集卡与控制箱组成,如图 1 所示.当外触发器探测到目标经过时,即时发送触发信号给相机,或通过图像采集卡发送给相机,触发相机采集,相机采集到图像经图像采集卡将图像数据传输给控制箱,进而完成图像采集和分析.为了确保相机可靠采集到目标图像,必须正确设置触发信号延时时间.

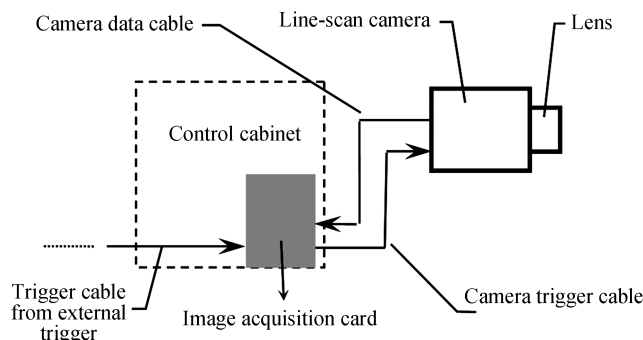


图 1 线阵图像采集系统一般组成  
Fig.1 Line-scan imaging system

线阵相机每次采集一行图像,为了查看方便,通常设置将固定行数的图像顺序排列,显示为一幅二维图像.图2是线阵相机采集到的序列线阵图像,图中每行的图像数据是线阵相机采集到的空间上线视场的一行图像,每行图像的采集时间相隔一个行周期,图像中最下面一行是最早采集的行,依次向上.通常情况下,线阵图像采集系统应用在相机和目标处于相对运动的场合中.图2中的图像是相机视场固定,目标位置变化的情况下,运动目标穿过线视场过程的多行图像.无目标穿过时,固定视场的场景没有变化,所以每行图像是一样的,目标穿过时,留下目标的影像,见图2中的黑色区域.目标越长,速度越慢,采集到含有目标影像的行数越多.

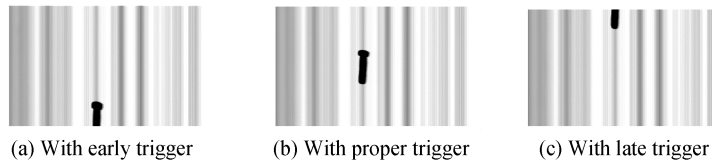


图2 线阵相机图像采集到的运动目标穿过视场的多行影像  
Fig.2 Image of flying object captured by line-scan camera

为了可靠地捕获到目标,在线阵相机前段设置外触发源,当外触发源探测到目标经过时刻,再依据外触发源位置、目标标称速度信息计算出理论上目标经过线阵相机视场的时间,加上这个时间延时后,发出触发信号,触发线阵相机开始采集.图2(a)是触发信号过晚采集到的图像,当相机接收到触发信号开始采集时,目标中的部分区域已经穿过视场;图2(b)是触发信号合适时采集到的目标图像;图2(c)是触发信号过早采集到的图像,当相机接收到触发信号开始采集时,目标还有一段时间进入视场,采集结束后,相机已经停止采集,只采集到部分目标的影像.为了可靠捕获到目标,触发信号设置还必须充分考虑到具体系统中可能存在的延时.

### 1.2 延时确定方法

触发延时时间  $t$  表示为外触发源发出触发信号的时刻  $T_1$  与相机开始采集之间的时刻  $T_2$  间隔.理论上,当触发源发出触发信号后,相机应该立刻开始采集,然后由于电子器件特性,两个时刻之间存在间隔.如果能够准确获知这个间隔,就能通过触发延时设置,可靠获得目标影像.根据线阵图像特点和触发工作方式,本文设计了一种线阵相机外触发延时时间测试装置.如图3,延时时间测试装置包括两组相同的探测单元和一组用于线阵相机照明的线光源.每组探测单元由一列探测器和一个线形光源组成,光源提供均匀稳定的平行光,与探测器形成光幕.光源1和探测器1组成第一组探测单元,光源2和探测器2组成第二组探测单元.光源3为线阵相机提供均匀稳定的照明.

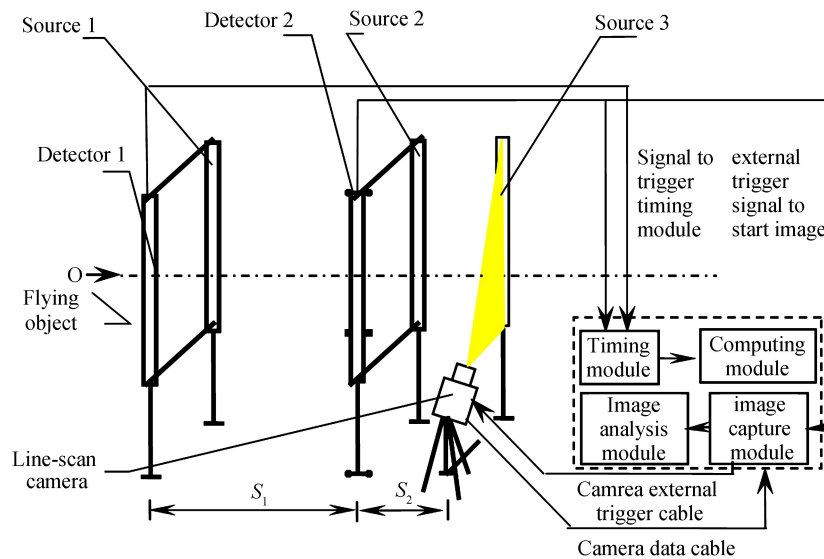


图3 线阵相机外触发延时测试系统框图  
Fig.3 Measurement System schedule of trigger delay of line-scan camera

平行放置两组探测单元,精确测量两组探测单元间距  $S_1$ .调整线阵相机及光源组成的光幕亦平行于探测单元光幕,精确测量探测单元 2 与线阵相机采集幕面间距  $S_2$ .目标发射端位于第一组探测单元前方,使得探测单元位于飞行目标中间弹道.垂直于探测单元发射飞行目标.当飞行目标通过第一组探测单元时,会改变探测器 1 接收的光信号,在这个时刻触发计时模块开始计时,探测器 2 记录飞行目标穿过第二组探测单元的时间  $t_1$ ,依据两个探测光幕的距离  $S_1$  和时间  $t_1$ ,可以计算出目标的速度为

$$V = \frac{S_1}{t_1} \quad (1)$$

在目标穿过第二组探测单元的同时,触发线阵相机图像采集系统,采集图像.目标应该会在穿过探测单元 2 之后

$$t_2 = \frac{S_2}{V} \quad (2)$$

时穿过线阵相机视场.触发方式都设置为目标前端触发,如果不存在触发延时,当线阵以行周期  $p$  采集图像时,理论上会在第

$$n_1 = \frac{t_2}{p} + 1 \quad (3)$$

行开始采集到目标影像.当目标穿过线阵相机视场时,线阵相机捕获到具有良好对比度的目标影像.对线阵相机采集到的序列线阵图像进行处理分析,获得捕获目标的开始行号  $n_2$ ,触发延时  $t$  即为

$$t = (n_2 - n_1) \cdot p \quad (4)$$

将式(2)和(3)代入式(4)中,得

$$t = (n_2 - 1) \cdot p - \frac{S_2}{V} \quad (5)$$

这样知道了线阵相机的行周期,通过飞行目标速度的解算和序列线阵图像分析,就可以获得线阵相机图像采集系统的外触发延时时间.

## 2 测试实验与结果分析

### 2.1 实验与结果

为了验证方法的有效性,在实验室进行了测试实验.对由自行设计的外触发装置、加拿大 Dalsa 公司的 X64 Xcelera-CL PX4 DUAL 型采集卡、P2-42-02K40 型线阵 CCD 相机组成的线阵图像采集系统进行了外触发延时时间的测试.

双区截测速装置中的两个光幕分别作为第一组探测单元和第二组探测单元,用于测试动态目标速度,探测单元 1 和探测单元 2 间距  $S_1 = 602$  mm,探测单元 2 距线阵图像采集光幕间距  $S_2 = 240$  mm.与探测器 2 相连的外触发装置即为线阵相机的外触发源,探测器 1 和探测器 2 相连的触发装置相同.垂直于探测单元发射动态目标,当穿过第一组探测单元时,探测器 1 接收到目标信号,作为触发信号触发探测器 2 开始计时,探测器 2 记录下目标通过第二组探测单元的时间  $t_1$ ,从而计算出目标速度,同时触发开始线阵图像采集.动态目标直径 4 mm,长度 4 mm,标称速度 150 m/s.线阵相机像素 2 048,采样率 40 MHz,测试实验中,设置相机行频 64 000 f/s,每次采集行数 64 行.图 4 是线阵相机采集到的连续 64 行图像,当目标还没有穿过视场和完全穿过视场后,因为背景固定,采集到的图像是一样的.实验中目标小且速度快,仅有 3~5 行图像含有目标影像.经过背景差分分析,获得目标最始端出现的行  $n_2$ .



图 4 飞行目标的连续多行图像  
Fig.4 Sequence line image of flying object

表 1 给出了 6 次实验的测试结果.6 次测试中,目标的实际速度不同,均值为 137.54 m/s,由此计算得到目标从第一组探测单元到第二组探测单元的时间  $t_1$  也不相同.因为准确测得了目标速度,结合第二组探测单元距线阵相机视场的距离  $s_2$ ,可以分别计算出目标在图像中理论出现的行  $n_1$ .因为速度不同,各次实验中,

目标出现在序列图像中的行也不同.实际图像分析也表明每次实验采集到的序列图像中,目标出现的行各不相同.6次试验结果均表明,外触发信号发出时刻与相机开始采集时刻存在延时,6次实验平均延时152.13  $\mu\text{s}$ ,6次实验结果方差为3.3  $\mu\text{s}$ .

表1 外触发延时测试实验结果  
Table 1 Measurement results of external trigger delay

No.	$t_1/\text{ms}$	$V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$t_2/\text{ms}$	$n_1$	$n_2$	$t/\mu\text{s}$
1	4.143	145.29	1.652	113.4	103	152.5
2	4.425	136.03	1.764	121.0	121	147.3
3	4.228	142.40	1.685	115.7	105	156.6
4	4.577	131.52	1.825	125.1	115	149.0
5	4.409	136.53	1.758	120.6	110	155.6
6	4.510	133.47	1.798	123.3	113	151.8
Average	4.382	137.54	1.747	119.85	111.17	152.13
RMS						3.3

## 2.2 误差分析

对实验进行误差分析,对式(5)求偏导得

$$\Delta t = \sqrt{(p \cdot \Delta n_2)^2 + [(n_2 - 1) \cdot \Delta p]^2 + \left(-\frac{\Delta S_2}{V}\right)^2 + \left(\frac{S_2}{V^2} \cdot \Delta V\right)^2} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,延时测试误差与相机行采集周期、目标出现行图像分析精度、目标速度测试误差和第二探测单元到线阵相机视场的距离  $S_2$  有关.相机行采集周期是行频的倒数,行频误差与相机数据率有关,这里认为是一个数据采集周期,也就是数据率的倒数.相机的精确行频可以实时读出,以降低误差.数字图像中目标出现的行与图像处理算法有关,考虑到本应用是处于光学镜头大景深状态下,且目标顶部形状可能存在的不对称,不进行亚像素分析,目标出现行的定位误差为0.5.实验中采用双区截测速装置中的起始靶和终止靶作为第一组探测单元和第二组探测单元,该装置测速精度1%.第二探测单元到线阵相机视场的距离  $S_2$  经过实际测量为602 mm.  $S_2$  的误差与测量方法有关,本文采用卡尺配合激光投影测量,测量误差小于1 mm.将以上数据代入式(6)计算出

$$\begin{aligned} \Delta t &= \sqrt{\left(\frac{1}{64\,000} \times 0.5\right)^2 + \left((111.17 - 1) \times \frac{1}{4 \times 10^7}\right)^2 + \left(\frac{1}{137.54} \times 10^{-3}\right)^2 + \left(\frac{0.26}{137.54^2} \times 137.54 \times 10^{-3}\right)^2} = \\ &= \sqrt{(7.81 \times 10^6)^2 + (2.75 \times 10^6)^2 + (7.27 \times 10^6)^2 + (1.89 \times 10^6)^2} = \\ &= 1.12 \times 10^{-5} \text{ s} \end{aligned}$$

延时测试误差小于行周期  $1/64\,000 = 1.56 \times 10^{-5} \text{ s}$ ,符合实际应用中有线扫描相机的延时设置需求.

从计算过程可以看出,对测试精度影响较大的是目标出现行的定位误差和第二组探测单元到线阵相机视场的距离误差,同时从计算过程中的第3、4项可以看出,在  $S_2$  距离误差和目标速度误差一定的情况下,目标速度越大,测试精度越高.行定位误差很难提高,行频误差与使用的线阵相机自身性能有关.为了提高测试精度,应该尽量减小第二组探测单元到线阵相机视场的距离  $S_2$ 、提高的  $S_2$  准确度和增加目标速度.下面逐一分析认为其他系统参数确定的情况下,第二探测单元到线阵相机视场的距离  $S_2$  和目标速度存在不同误差时引入的延时结果测试误差.

误差分析表明,待测相机的行频越高,延时测试时,要求目标的速度越高,第二组探测单元到线阵相机视场的距离  $S_2$  越小.下面以待测相机行频分别为10 000 lps和50 000 lps时,优化延时测试系统参数的方法.式(6)中,依据误差大小规律,第一项误差为行周期的一半,分配第二至第四项为行周期的均为二分之一,也就是在待测相机行频分别为10 000 lps和50 000 lps时,各项引入的延时误差分别均小于  $5 \times 10^{-5} \text{ s}$  和  $1 \times 10^{-5} \text{ s}$ .从而使得系统总误差小于一个行周期.

依据式(6)中第3项,图5给出了第二探测单元到线阵相机视场的距离  $S_2$  含1 mm,2 mm,3 mm误差情况下,目标速度引入的测试延时误差.可以看出,  $S_2$  误差越大,引入的延时测试误差越大,在相同的  $S_2$  误差情况下,目标速度越大,延时测试精度越高.测试行频10 000 lps的线阵相机时,如果第二探测单元到线阵相机视场的距离  $S_2$  误差小于1 mm,则目标速度的最低要求是16 m/s,而如果第二探测单元到线阵相机视场的

距离  $S_2$  误差在 3 mm, 则目标速度的最低要求是 56 m/s. 测试行频 50 000 lps 的线阵相机时, 如果第二探测单元到线阵相机视场的距离  $S_2$  误差小于 1 mm, 则目标速度的最低要求是 96 m/s, 而如果第二探测单元到线阵相机视场的距离  $S_2$  误差在 3 mm, 则目标速度的最低要求是 296 m/s, 对目标速度要求太高.

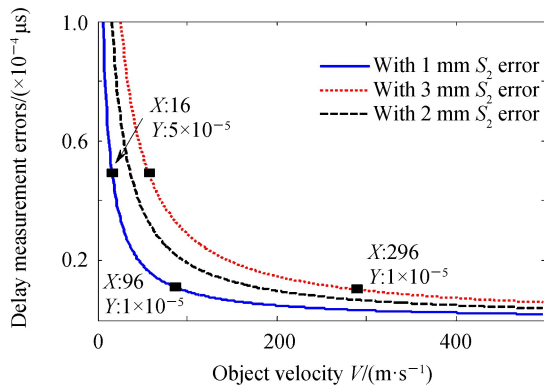


图5 不同目标速度引入的延时测试误差

Fig.5 Delay errors resulted in object velocity with various  $S_2$  errors

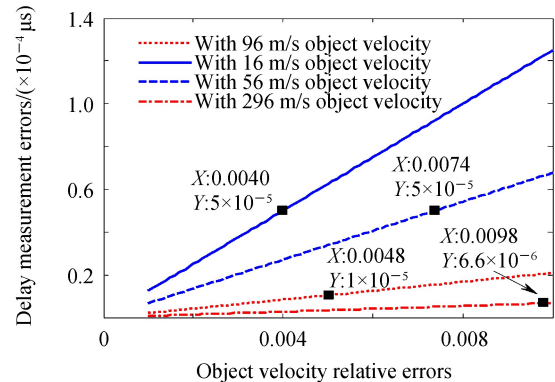


图6 不同目标速度下目标相对误差引入的延时测试误差

Fig.6 Delay errors caused by object velocity errors with various object velocity

依据式(6)第四项,从系统机械结构设计上考虑,第二探测单元到线阵相机视场  $S_2$  设定为 200 mm, 绘制了不同速度下,速度误差引入的延时测试误差曲线,如图6所示.从图6可以看出,目标速度越高,目标速度误差引入的延时测试误差就越小.测试行频为 10 000 lps 的线阵相机,目标速度为 16 m/s 时,目标速度标定误差需要在 0.4% 之内,而如果目标速度提高到 56 m/s,目标速度标定误差可以在 0.74% 之内.对于低行频相机而言,可以适当提高目标速度,降低对速度标定误差的要求.测试行频为 50 000 lps 的线阵相机,目标速度为 96 m/s 时,目标速度标定误差需要在 0.48% 之内,而如果目标速度提高到 296 m/s,目标速度标定误差可以到 1% 甚至更高.对于高行频相机,需要通过分析曲线图,依据目标能获得的可行速度,在提高目标速度和降低速度标定误差中确定最佳系统参数.

### 3 结论

提出了一种线阵图像采集系统外触发延时时间的测试方法.该方法通过对运动目标速度的准确测试和线阵图像捕获分析,获得触发信号发出时刻与图像开始采集时刻差.目标即时速度用于计算触发后目标到达线阵相机的理论时刻,序列线阵图像分析用来提取出目标实际到达时刻,从而计算出线阵图像采集系统外触发延时时间.该方法与线阵相机实际使用状态一致,延时数据有效实用.

进行了具体线阵图像采集系统外触发延时时间测试,多次实验结果表明:图像采集确实存在延时,行频 64 000 lps 的线阵图像采集系统的平均延时时间 152  $\mu s$ ,方差 3.3  $\mu s$ .误差分析表明实验测试误差为 11.2  $\mu s$ ,小于一个线阵相机行周期.

目标速度及其标定误差、第二探测单元距线阵相机视场幕面的距离  $s_2$  及其标定误差影响延时测试精度.在测试条件许可的情况下,提高目标速度能够有效提高测试精度,并降低系统对目标速度标定误差和  $s_2$  测试误差的要求.在实际测试中,需依据待测相机行频,目标速度的标定精度和  $s_2$  的标定精度综合确定目标速度,以保证待测相机外触发延时测试精度.

#### 参考文献

- [1] MA W H, DONG T, TIAN H, et al. Line-scan CCD camera calibration in 2D coordinate measurement[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **124**(17): 4795-4798.
- [2] XU Jia-yuan, SUN Ran, TIAN Yu-peng, et al. Correction of rolling wheel images captured by a linear array camera[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(33): 9736-9740.
- [3] WU Pei, WANG Yan-jie, SUN Hong-hai, et al. Calibration Method for linear array camera of intersection measurement system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(6): 0612003.  
吴培,王延杰,孙宏海,等. 交汇测量系统线阵相机标定方法[J]. 光子学报, 2016, **45**(6): 0612003.
- [4] LIU Shun-xin. Design and characteristics analysis for the image collection system of vacuum area [D]. Dalian University of Technology, 2006.

- 刘顺新. 真空电弧图像采集系统的设计及特性分析[D].大连理工大学,2006.
- [5] WANG Qing-you, ZHANG Sheng-bin, GUO Qing, *et al.* Synchronization data acquirement of femtosecond pulse second harmonic light-intensity distribution[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(6):603-605.  
王庆有,张盛彬,郭青,等. 飞秒脉冲激光二次谐波光强分布同步数据采集[J]. 光电子·激光,2002, **13**(6):603-605.
- [6] WU Lu-shen, ZHU Lei, CHEN Hua-wei. Design of track image acquisition system based on linear-array CCD Camera [J]. *Railway Standard Design*, 2014, **58**(08):55-59.  
吴禄慎,朱磊,陈华伟. 基于线阵 CCD 相机的轨道图像采集系统设计[J]. 铁道标准设计,2014, **58**(08):55-59.
- [7] LUO Ying, TAN Pei-yan, LIU Lin, *et al.* Improvement of exposure performance of linear array CIS camera by two-trigger method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(2):245-251.  
罗颖,谭沛岩,刘霖,等. 用二次触发法改进接触式传感器线阵相机的曝光性能[J]. 光学精密工程,2014, **22**(2):245-251.
- [8] DAI Jing-song, DONG Yong-ming, WANG Mao-sen. Multi-camera triggering and controlling system of gun test field based on FPGA[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2014, **33**(3):69-71.  
戴劲松,董永明,王茂森. 基于 FPGA 的火炮实验场多相机触发控制系统[J]. 兵工自动化,2014, **33**(3):69-71.
- [9] ZHOU Wei-xiang, WU Kai-hua CAI Xin, *et al.* Research for multi-channel wheelset image acquisition trigger system [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, **31**(6):800-804.  
周威祥,吴开华,蔡鑫,等. 轮对多通道图像采集触发技术研究[J]. 机电工程,2014, **31**(6):800-804.
- [10] LI Chao, LIU Shu-chang, LIU Peng, *et al.* Research of camera synchronous capture system under external trigger mode[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2014, **28**(04):339-344.  
李超,刘树昌,刘鹏,等. 外触发方式下相机同步抓拍系统研究[J]. 测试技术学报,2014, **28**(4):339-344.
- [11] ZHU Yin-fei. Research and design of high precision pulse delay generator for ultra high speed framing camera[D]. University of Electronic Science and Technology of China. 2013.  
朱寅非. 超高速分幅相机中高精度脉冲延时发生器的研究和设计[D].电子科技大学,2013.
- [12] JI Hong-bin, ZHANG Hui-bo, DAI Shi-jie, *et al.* Binary spatiotemporal encoded method used for uneven fringes phase unwrapping[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(4):0417004.  
冀红彬,张慧博,戴士杰,等. 用于非均匀条纹的二值时空编码相位展开方法[J]. 红外与激光工程,2017, **46**(4):0417004.
- [13] WU Guo-dong, HAN Bing, HE Xu. Calibration of geometric parameters of line-array CCD camera based on exact measuring angle in lab[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(10):1628-1632.  
吴国栋,韩冰,何煦. 精密测角法的线阵 CCD 相机几何参数实验室标定方法[J]. 光学精密工程,2007, **15**(10):1628-1632.
- [14] HAN You-mei, WANG Liu-hao, ZHONG Ruo-fei. The calibration of the line scan camera based on laser scanner[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, **39**(6):631-635.  
韩友美,王留召,钟若飞. 基于激光扫描仪的线阵相机动态高精度标定[J]. 测绘学报,2010, **39**(6):631-635.
- [15] WANG Lan, SUN Bo, LONG Chang-yu, *et al.* A novel method for calibrating intrinsic parameters of linear array cameras based on collinear feature points[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(6):1878-1883.  
王澜,孙博,隆昌宇,等. 一种基于共线特征点的线阵相机内参标定方法[J]. 红外与激光工程,2015, **44**(6):1878-1883.
- [16] WANG Zi-chen, DAI Ming, WANG Yong-gang, *et al.* A line-scan camera calibration method based on virtual stereo pattern[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, **24**(05):867-873.  
王子辰,戴明,汪永阳,等. 一种基于虚拟立体靶标的线阵相机标定方法[J]. 光电子·激光,2013, **24**(5):867-873.
- [17] SUN Bo, Zhu Ji-gui, REN Yu, *et al.* A novel method for calibrating linear array cameras based on laser tracker[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **25**(2):311-316.  
孙博,郝继贵,任瑜,等. 一种利用激光跟踪仪标定线阵相机的方法[J]. 光电子·激光,2014, **25**(2):311-316.
- [18] ZHAO Xiao-li, ZHOU Pu-cheng, XUE M-ogen. A kind of linear array camera field self calibration method for electro-optical vertical target system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(7):59-66.  
赵晓理,周浦城,薛模根. 一种用于光电立靶系统的线阵相机现场自标定方法[J]. 光电工程,2016, **43**(7):59-66.
- [19] CONNEELY M, ROLFSNES H O, MAIN C, *et al.* On the accuracy of framing-rate measurements in ultra-high speed rotating mirror cameras[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(17):16432-16437.
- [20] PENG Bo-dong, SHENG Liang, ZHANG Mei, *et al.* Sweep nonlinearity measurement of streak camera working at microsecond level[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, **26**(8):154-158.  
彭博栋,盛亮,张美,等. 延时法测量条纹相机  $\mu\text{s}$  档扫描非线性[J]. 强激光与粒子束,2014, **26**(8):154-158.

**Foundation item:** Shaanxi Foundation for Development of Science and Technology (No.2014K05-41), Research Foundation for Key Laboratory of Education Bureau of Shaanxi Province, China (No.15JS036)

引用格式:MA Wei-hong, TIAN Hui, DONG Tao, *et al.* Checkout of External Trigger Delay in Linear Image Acquisition System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9):0911002

马卫红,田会,董涛,等.线阵图像采集系统外触发延时时间的确定[J].光子学报,2018, **47**(9):0911002