

视轴抖动对成像质量影响的研究

王婉婷^{1,2} 郭 劲¹ 姜振华¹ 王挺峰¹ 王 锐¹ 孙 涛¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 为了对振动图像进行稳像处理及相机平台稳定装置的设计提供理论依据,研究了视轴抖动对成像质量的影响。分析了视轴抖动的原因及特点,在此基础上,提出了按图像灰度算法分析振动模糊图像的方法。利用仿真模型获得了视轴抖动情况下,不同抖动参数所对应的模糊图像的仿真图。搭建了一套振动成像实验装置,在实验中加入不同的振动源,可以得到不同振源下的模糊图像。利用图像的灰度均方误差评价成像质量,结果表明:在误差允许范围内,不论是在实验条件下,还是在仿真条件下,视轴抖动对成像质量影响的结果基本一致,从而验证了仿真算法的正确性。在实际应用中,可以通过仿真来分析视轴抖动对成像质量的影响。

关键词 图像处理;运动模糊;图像灰度;均方误差;视轴抖动

中图分类号 TP751 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0409001

Study of Image Quality Degraded by Los Jitter

Wang Wanting^{1,2} Guo Jin¹ Jiang Zhenhua¹ Wang Tingfeng¹ Wang Rui¹ Sun Tao¹

(¹ State Key Laboratory of Laser Interaction with Mater, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to realize the image stabilization and provide theory basis for the damping device design of camera platform, the impact of los jitter on image quality is analyzed. The reason how the los jitter produces and the characteristics of los jitter are analyzed. Based on the analysis, a new algorithm of the analysis of vibration blurred images based on the image gray-scale is proposed. The simulation results of blurred image caused by los jitter are obtained according to the simulation model. A set of vibration imaging device is built to verify the simulation results, and the device can get a blurred image by loading a vibration. Using mean square error (MSE) to measure image quality, the results show that in the range of permitted errors, the results of the impact of los jitter on image quality between simulation and experiment remain the same, which indicates the correctness of the simulation analysis. In practical applications, this method can effectively simulate the impact of los jitter on image quality.

Key words image processing; image blurring; image gray; mean square error; los jitter

OCIS codes 100.2000; 120.7280; 100.2960; 110.3000

1 引 言

目前,利用相机采集图像的技术已经广泛应用于航空、遥感等高分辨力成像系统中^[1],但是相机在工作期间,由于受姿态调整动量轮、调姿推力器、相机扫描机构及外部冲击振动等因素的影响,相机平台会产生不同频率的振动^[2-3],在光学成像系统上体现为视

轴的抖动。视轴抖动会导致目标与相机之间产生相对运动,使目标的像在成像过程中偏离原始位置,从而造成图像模糊,影响成像质量^[4-9]。在实际系统中,虽然视轴抖动可以通过采用合理的被动减振和主动稳定技术来抑制,但是无法完全消除。且高分辨力成像系统对视轴稳定性有很高的要求,即使小幅值的

收稿日期: 2013-08-05; **收到修改稿日期**: 2013-09-25

基金项目: 吉林省科技支撑计划(20126015)

作者简介: 王婉婷(1990—),女,硕士研究生,主要从事快速反射镜光束稳定控制方面的研究。

E-mail: wangwanting0907@163.com

导师简介: 郭 劲(1964—),男,博士,研究员,主要从事光电对抗技术方面的研究。E-mail: guojin_1964@126.com

抖动,也会对成像质量造成很大的影响。因此,研究视轴抖动对成像质量的影响对提高成像系统的分辨力和相机平台稳定装置的设计具有重要意义。

国内外对视轴抖动及其对成像质量的影响研究比较多,但是在分析的过程中作者研究的侧重点不一样。Hadar等^[10-13]从理论上分析了振动引起的像移变化对成像质量的影响,并利用调制传递函数(MTF)作为像质的评价标准,但未给出仿真结果;王晓燕等^[14-15]利用将点扩展函数(PSF)和原始图像作卷积的方法分析了平台振动对成像质量的影响,但是局限于高频正弦振动;张秉仁等^[16]从像素运动的角度分析了运动造成的图像模糊问题,但仅侧重于一维和二维匀速直线运动。

本文提出了基于图像灰度计算的运动模糊图像仿真算法,从图像灰度的角度分析了振动频率、振幅等参数的变化对成像质量的影响,实现了正弦激励情况下视轴抖动对成像质量影响的分析。为了验证仿真方法的正确性,采用灰度均方误差作为评价指标,结果表明实验结果和仿真结果能很好地吻合,对进一步研究图像复原算法^[17]具有重要的意义。利用运动图像模糊算法进行仿真分析,还能够灵活、有效地控制参数,为相机稳定平台设计提供了理论依据。

2 仿真模型分析

视轴抖动主要是由相机平台及其内部振动引起的,此时相机和目标之间的相对运动体现为:相机运动,目标静止。在分析视轴抖动对成像质量影响的过程中,由于相机的运动不容易控制,因此,为了简化分析过程,将相机和目标之间的相对运动近似等效为:相机静止,目标运动。

目标振动时,常见的振动形式为:沿任一坐标轴方向的振动和绕任一坐标轴的转动^[1-2],如图1所

示。在垂直于光轴Z的平面上,X轴和Y轴的分析过程相同,且任何一种振动形式都可以分解为若干正弦振动,因此,这里以沿Y轴方向的正弦振动为例进行分析。

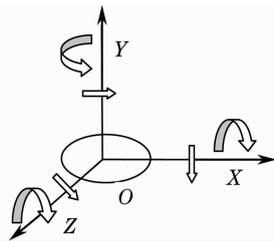


图1 振动形式

Fig.1 Form of vibration

2.1 相机成像原理

利用相机对图像进行采集的过程中,在一次曝光时间内,相机各感光像素接收目标发射出的光,并将光强转换为电信号输出,经数模转换,以数字图像方式进行存储和显示^[18]。但是,当目标与相机之间存在相对运动时,在一次曝光时间内,特定像素的视场范围内所对应的目标将偏离原始位置,对相邻的几个像素曝光,最终导致图像模糊^[19]。为了计算模糊图像各像素的灰度值,首先需要知道目标亮度、曝光时间和图像灰度之间的关系。根据相机成像原理,图像灰度 P 与目标亮度 M_1 及曝光时间 t_e 成正比^[20],即

$$c \times M_1 \times t_e = P, \quad (1)$$

式中 c 为相机的成像系数,由相机的性能决定。根据(1)式,为获得模糊图像各像素的灰度值,需要计算曝光时间内,相机每个像素接收到的光强。

相机成像光学系统示意图如图2所示。若相机的像素间隔为 a ,像素尺寸为 b ,成像系统焦距为 f_e ,目标与光学系统之间的距离为 L ,则某一像素对应的物面尺寸为

$$\Delta b = bL/f_e. \quad (2)$$

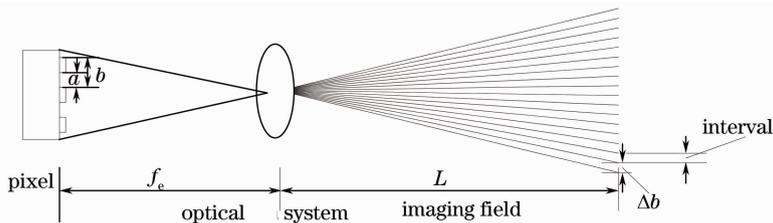


图2 成像光学系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the imaging system

2.2 图像灰度计算

以像素暗区的中心为原点建立直角坐标系,如图3所示。当目标与相机之间存在着振幅为 A ,频率为 f ,相位为 ϕ 的正弦相对运动时,假设相机平台

静止,目标运动,则目标上每一点的振动都可以表示为

$$y = x_0 + A\sin(2\pi ft + \phi), \quad (3)$$

式中 $T = 1/f$ 为正弦振动周期, x_0 为目标上某一点

在 y 轴上的初始位置。由(3)式可以得到运动目标上某一点停留在每个像素的时间。

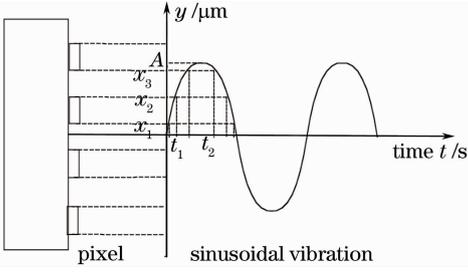


图3 正弦振动

Fig.3 Sinusoidal vibration

为了得到每个像素接收的光强,需要计算曝光时间内目标上所有点在每个像素停留的时间。此时,最准确的方法是按照(3)式直接计算目标上所有点在每个像素停留的时间,但是这种方法计算量非常大,在实际计算中不可能实现。为了利用算法实现对运动模糊图像的仿真,需要采用简化的方法进行处理,即:对目标整体分块,求取长度为 Δb 的目标上所有点在曝光时间内停留在每个像素的时间,最后计算出每个像素上接收的总光强。

相机成像器件是由多个独立的感光单元排列而成,如图4的黑色区域所示。以 n 取 1024 为例,感光单元用矩阵表示为 $\mathbf{C}_{1024 \times 1024}$ 。按照上述分块思想,将目标按 Δb 分为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 记为矩阵 $\mathbf{D}_{1024 \times 1024}$, 如图5所示。此时矩阵 \mathbf{C} 上坐标为 (k, r) 的像素和矩阵 \mathbf{D} 上坐标为 (k, r) 的目标存在着——对应关系。

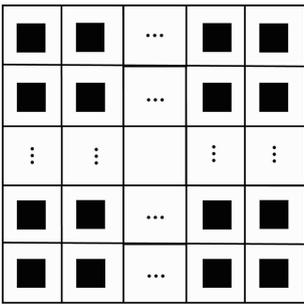


图4 像素排列(1024 pixel×1024 pixel)

Fig.4 Pixel array (1024 pixel×1024 pixel)

若相机的曝光时间为 t_e , 存在视轴抖动时,曝光时间内的视轴抖动按振动周期的不同分两种情况:当 $T \leq t_e$ 时,曝光时间内的目标振动为高频正弦振动,目标的相对位移为峰-谷之间的最大位移;当 $T > t_e$ 时,曝光时间内的目标振动为低频正弦振动,目标的相对位移是一个随机变量,位移的大小取决于初始曝光时间,当曝光时间分布在正弦振动平

$\mathbf{D}(1,1)$	$\mathbf{D}(1,2)$	...	$\mathbf{D}(1,1023)$	$\mathbf{D}(1,1024)$
$\mathbf{D}(2,1)$	$\mathbf{D}(2,2)$	...	$\mathbf{D}(2,1023)$	$\mathbf{D}(2,1024)$
\vdots	\vdots		\vdots	\vdots
$\mathbf{D}(1023,1)$	$\mathbf{D}(1023,2)$	...	$\mathbf{D}(1023,1023)$	$\mathbf{D}(1023,1024)$
$\mathbf{D}(1024,1)$	$\mathbf{D}(1024,2)$	...	$\mathbf{D}(1024,1023)$	$\mathbf{D}(1024,1024)$

图5 目标分块(1024 pixel×1024 pixel)

Fig.5 Target block array (1024 pixel×1024 pixel)

衡位置的两侧时,目标的相对位移最大^[21]。此时,由目标的相对位移可以求得长度为 Δb 的运动目标依次经过的像素个数 i 。

目标静止时,相机采集到的原始图像用灰度矩阵表示为 $\mathbf{P}_{1024 \times 1024}$, 由(1)式可知,在相机的曝光时间内,每个有效像素对应的目标亮度为

$$\mathbf{M}_1(k, r) = \mathbf{P}(k, r) / t_e, \quad 1 \leq k \leq 1024, 1 \leq r \leq 1024. \quad (4)$$

某一像素对应的目标亮度为

$$\mathbf{M}'_1(k, r) = \frac{\mathbf{P}(k, r)}{t_e} \times \frac{b}{b-a}, \quad 1 \leq k \leq 1024, 1 \leq r \leq 1024. \quad (5)$$

$x_0 \in [0, \Delta b]$ 时,将 x_0 细分为 N 块,第 s 块目标在第 m 个像素停留的时间为 $t_s(m)$, 则长度为 Δb 的运动目标在第 m 个像素停留的时间为

$$t(m) = \sum_{s=1}^N t_s(m). \quad (6)$$

目标运动过程中,矩阵 \mathbf{D} 上坐标为 (k, r) 的目标在依次经过的每个像素上停留的时间为 $t(k, m)$, 其中 $1 \leq k \leq 1024, k \leq m \leq k+i-1$ 。

将目标按像素的物面尺寸分块后,每一小块在依次经过的每个像素上停留的时间是相同的,因此,矩阵 \mathbf{D} 上坐标为 (k, r) 的目标在依次经过的每个像素上停留的时间可表示为

$$t(k, m) = t(m-k+1), \quad 1 \leq k \leq 1024, k \leq m \leq k+i-1. \quad (7)$$

由(1)式和(7)式可得视轴抖动引起的模糊图像的灰度矩阵为

$$\mathbf{P}'(k, r) = \sum_{m=k}^{k+i-1} \sum_j \frac{\mathbf{M}'_1(j, r)}{N} \times t(k, m), \quad 1 \leq j \leq 1024, 1 \leq k \leq 1024+i-1, 1 \leq r \leq 1024, \quad (8)$$

式中 $\mathbf{M}_1(k, r)$ 、 $\mathbf{M}'_1(k, r)$ 表示亮度矩阵, $\mathbf{P}'(k, r)$ 表示灰度矩阵。

2.3 评价指标

为了验证仿真模型的正确性,利用图像灰度的均方误差(MSE,记为 M_{SE})对成像质量进行评价,其中, M_{SE} 表示为

$$M_{SE} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Q_{i,j} - Q'_{i,j})^2, \quad (9)$$

式中 $Q_{i,j}$ 为第一幅图像的灰度矩阵元, $Q'_{i,j}$ 为第二幅图像的灰度矩阵元, $M \times N$ 为图像的总像素数。

MSE 越大,说明视轴抖动造成的图像失真程度越大。在下面的分析中,将仿真结果和原始图像之间的灰度均方误差定义为 MSE-Sim,实验结果和原始图像之间的灰度均方误差定义为 MSE-Exp。

3 仿真结果

基于上述模型,获得了视轴抖动造成的失真图像的仿真图。分析了振动频率、振幅和相机曝光时间对成像质量的影响。仿真模型中,相机的参数设置如表 1 所示。

表 1 相机参数

Table 1 Camera parameters

$b / \mu\text{m}$	$a / \mu\text{m}$	f_e / mm	$n \times n$
12.4	6.9	200	1024 × 1024

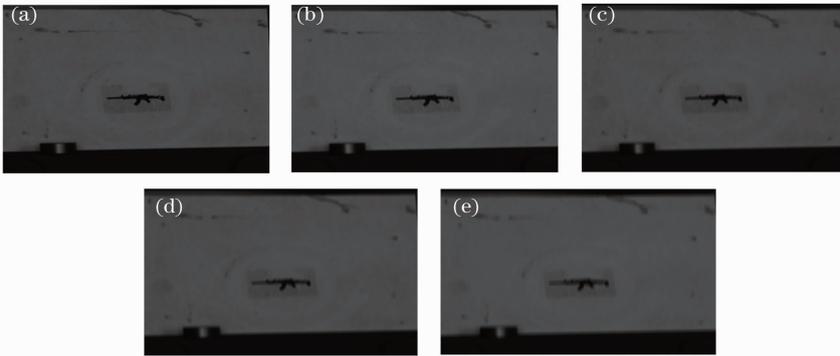


图 7 仿真结果。(a) $f=10$ Hz; (b) $f=20$ Hz; (c) $f=30$ Hz; (d) $f=40$ Hz; (e) $f=50$ Hz

Fig. 7 Simulation results. (a) $f=10$ Hz; (b) $f=20$ Hz; (c) $f=30$ Hz; (d) $f=40$ Hz; (e) $f=50$ Hz

图像灰度均方误差 MSE-Sim 与频率的关系如图 8 所示,结果显示,在 50 Hz 范围内,随着频率的增加, MSE-Sim 逐渐增大,且 MSE-Sim 与频率近似呈线性关系。表明频率越大,图像模糊程度越大。

3.2 振幅对成像质量的影响

设定频率为 20 Hz,曝光时间 t_e 为 3800 μs ,光学系统与目标之间的距离为 2000 mm,按振幅变化对原始图像仿真,得到的仿真结果分别如图 9(a)~(c)所示。对比图 6(a)可知,随着振幅的增大,图像模糊程度逐渐增大。当振幅为 1 mm 时,仿真结果和原始图像基本一致;当振幅为 2 mm 时,图像中目

当相机的曝光时间为 3800 μs ,光学系统与目标之间的距离 L 分别为 2000 mm 和 1500 mm 时,利用相机测得的静止原始图像分别如图 6(a)和(b)所示。

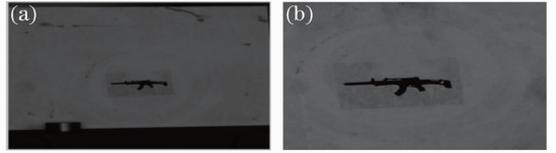


图 6 原始图像。(a) $L=2000$ mm; (b) $L=1500$ mm

Fig. 6 Original images. (a) $L=2000$ mm;

(b) $L=1500$ mm

在实际系统中,针对 500 Hz 以内的中、高频率的振动,采用被动减振技术可将振动频率衰减到 50 Hz,以此为标准将仿真频率定在 0~50 Hz。

3.1 频率对成像质量的影响

设定振动幅值为 3 mm,曝光时间为 3800 μs ,光学系统与目标之间的距离为 2000 mm,按频率变化对原始图像仿真,得到的仿真结果如图 7(a)和(b)所示,对比图 6(a)可知,当频率为 10 Hz 时,仿真结果和原始图像基本一致;当频率为 20 Hz 时,图像边缘模糊,且随着频率的增大;模糊程度逐渐增大,当频率达到 50 Hz 时,图像中目标整体模糊。

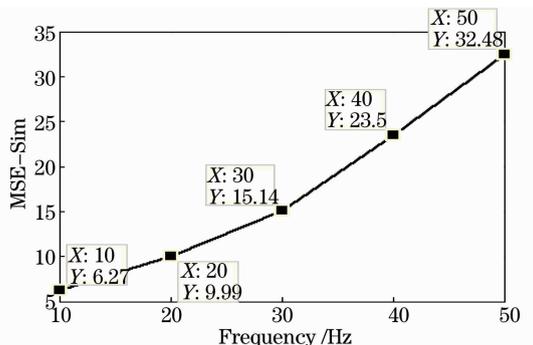


图 8 灰度均方误差与频率的关系

Fig. 8 Relationship between mean square error and frequency

标边缘出现模糊;当振幅为 5 mm 时,图像中目标整体出现模糊。

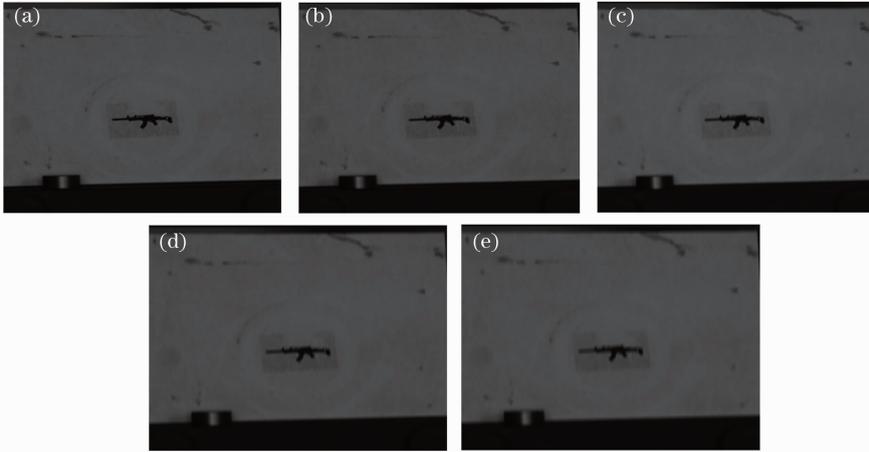


图 9 仿真结果。(a) $A=1$ mm; (b) $A=2$ mm; (c) $A=3$ mm; (d) $A=4$ mm; (e) $A=5$ mm

Fig. 9 Simulation results. (a) $A=1$ mm; (b) $A=2$ mm; (c) $A=3$ mm; (d) $A=4$ mm; (e) $A=5$ mm

图像灰度均方误差MSE-Sim与振幅的关系如

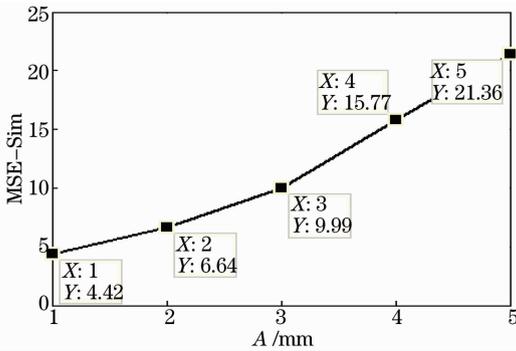


图 10 灰度均方误差与振幅的关系

Fig. 10 Relationship between mean square error and amplitude

图 10 所示,结果显示:在 5 mm 振幅范围内,MSE-Sim 与振幅近似呈线性关系变化,振幅越大,MSE-Sim 越大,从而表明随着振幅的增大,图像模糊程度越大。

3.3 曝光时间对成像质量的影响

设定频率为 50 Hz,振幅为 3 mm,光学系统与目标之间的距离为 1500 mm,按曝光时间变化对原始图像进行仿真,得到的仿真结果分别如图 11(a)、(b)所示。对比图 6(b)可知,图像模糊程度随着曝光时间的增大而增大,当曝光时间低于 $2700 \mu\text{s}$ 时,图像模糊程度逐渐由不模糊向目标边缘模糊过渡,当曝光时间高于 $2700 \mu\text{s}$ 时,图像的模糊程度逐渐由目标边缘模糊向目标整体模糊过渡。

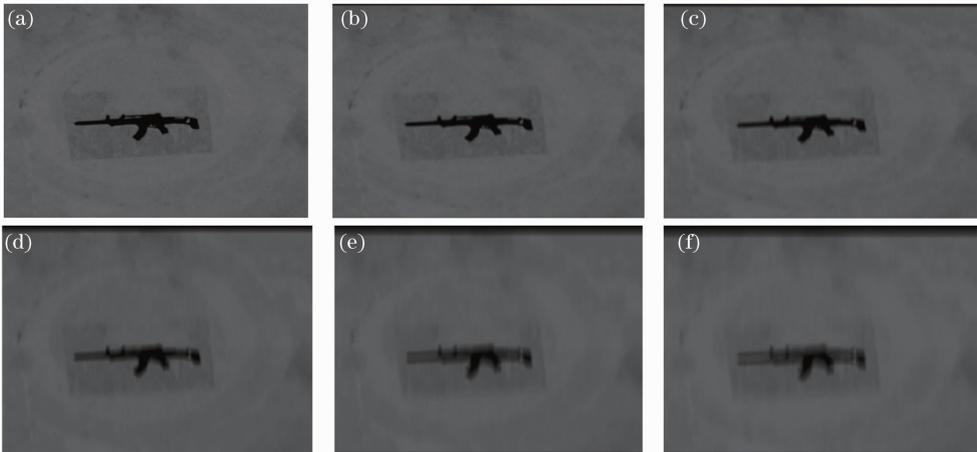


图 11 仿真结果。(a) $t_e=400 \mu\text{s}$; (b) $t_e=1600 \mu\text{s}$; (c) $t_e=2700 \mu\text{s}$; (d) $t_e=3800 \mu\text{s}$

(e) $t_e=5000 \mu\text{s}$; (f) $t_e=6000 \mu\text{s}$

Fig. 11 Simulation results. (a) $t_e=400 \mu\text{s}$; (b) $t_e=1600 \mu\text{s}$; (c) $t_e=2700 \mu\text{s}$; (d) $t_e=3800 \mu\text{s}$;

(e) $t_e=5000 \mu\text{s}$; (f) $t_e=6000 \mu\text{s}$

图像灰度均方误差 MSE-Sim 与曝光时间的关系如图 12 所示,结果显示,MSE-Sim 随着曝光时间的增大而增大。说明曝光时间越大,图像模糊程度越大。

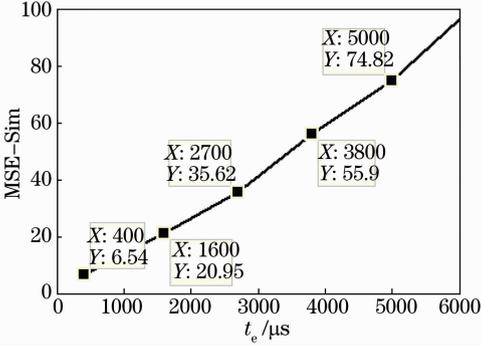


图 12 灰度均方误差与曝光时间的关系
Fig. 12 Relationship between mean square error and exposure period

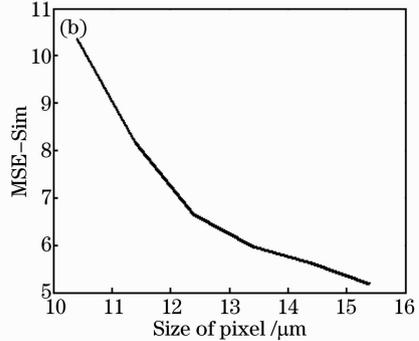
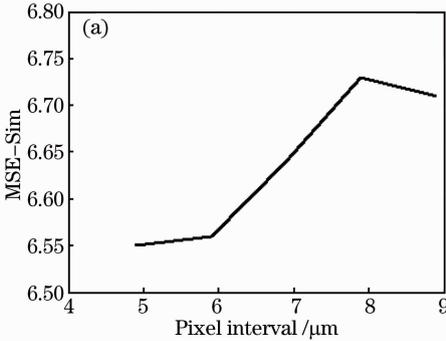


图 13 灰度均方误差与(a)像素间隔和(b)像素尺寸的关系

Fig. 13 Relationship between MSE-Sim and (a) pixel interval, (b) size of pixel

视轴抖动过程中,相机和目标之间的相对运动体现为:相机运动,目标静止。若相机的振动参数不变,仅变化相机焦距和目标距离,由(5)式可知,某一像素对应的目标亮度不变。由图 2 得物面上目标相对于相机运动的振幅变为

$$A_1 = AL/f_e. \quad (10)$$

某一像素对应的物面尺寸为

$$\Delta b_1 = bL/f_e, \quad (11)$$

则目标运动经过的像素数 i 为

$$i = A_1/\Delta b_1 = A/b. \quad (12)$$

说明目标运动经过的像素数和目标距离及相机焦距无关。若相机上每一点的振动情况表示为

$$y = x_0 + A\sin(2\pi ft + \varphi). \quad (13)$$

等效到物面上,目标相对于相机的振动情况表示为

$$yL/f_e = x_0L/f_e + AL/f_e\sin(2\pi ft + \varphi). \quad (14)$$

化简得

$$y = x_0 + A\sin(2\pi ft + \varphi). \quad (15)$$

表明目标运动在每个像素位置停留的时间与目标距

3.4 其他参数对成像质量的影响

除了振动频率、振幅和曝光时间之外,系统中还存在其他参数,如像素间隔、像素尺寸、目标距离以及相机焦距等,为了使仿真结果更具可信性,进一步仿真分析了像素间隔、像素尺寸、目标距离以及相机焦距对成像质量的影响。

图像灰度均方误差 MSE-Sim 与像素间隔的变化关系如图 13(a)所示。由图 13(a)可知像素间隔每变化 $1 \mu\text{m}$,MSE-Sim 变化 0.09 左右,说明像素间隔对成像质量基本上无影响。这主要是因为目标运动经过的像素数不变。

图像灰度均方误差 MSE-Sim 与像素尺寸的变化关系如图 13(b)所示,可知,MSE-Sim 随着像素尺寸的增大而减小。这主要是由于目标运动经过的像素数随着像素尺寸增大而减少引起的。

离和相机焦距无关。由(8)式知最终得到的图像灰度矩阵不变。因此,相机焦距和目标距离对成像质量没有影响。

由仿真分析结果可知,在其他参数不变时,频率越大,图像模糊程度越大;振幅越大,图像模糊程度越大;曝光时间越大,图像模糊程度越大。仅变化目标距离或者相机焦距,图像模糊程度不变;仅增大像素尺寸,图像模糊程度变小;仅变化像素间隔,图像模糊程度基本不变。

4 实验结果

利用相机、计算机和激振器等搭建了一套振动成像实验装置,该实验通过分析视轴抖动对成像质量的影响,不仅可以验证仿真分析的正确性,还可以为相机平台稳定装置的设计提供理论依据。为产生视轴抖动效果,使相机平台与目标之间处于相对运动状态,实验中保持相机静止,将目标固定在激振器上,在给定振幅和频率的情况下,激振器驱动目标做

正弦运动。相机采集振动引起的模糊图像,经过图像采集卡显示、保存在计算机中,并记录实验过程

中,目标运动的振幅和频率。该实验装置的实物图和原理示意图如图 14(a)和(b)所示。

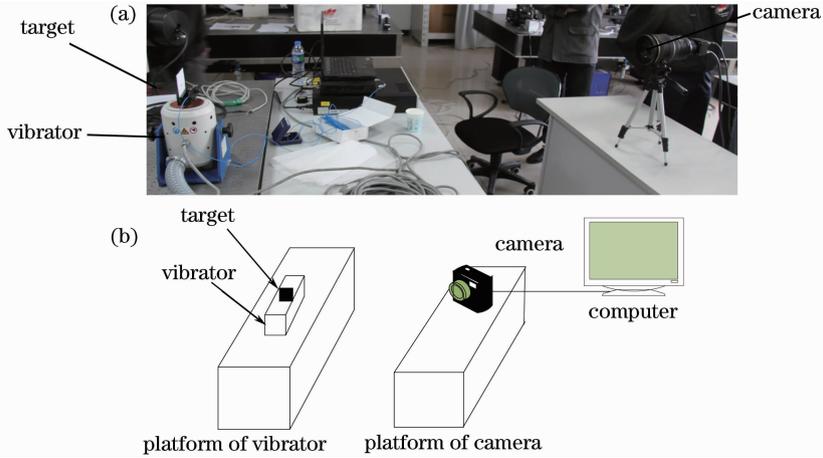


图 14 (a)振动成像实验实物图和(b)原理示意图

Fig. 14 (a) Device of vibration imaging experiment and (b) schematic diagram of vibration imaging experiment

按表 1 中的数据设置相机的参数和按仿真过程中的数据设置振动参数,得到了不同振动参数所对应的实验结果。

结果如图 15 所示。与图 6(a)进行比较,可以看出频率为 10 Hz 时,实验结果与原始图像基本一致。当频率为 20 Hz 时,图像中仅目标边缘出现模糊。和图 7(a)、(b)对比可知,实验结果和仿真结果模糊程度变化趋势基本一致。

4.1 频率对成像质量的影响

振动频率为 10 Hz 和 20 Hz 时视轴抖动的实验

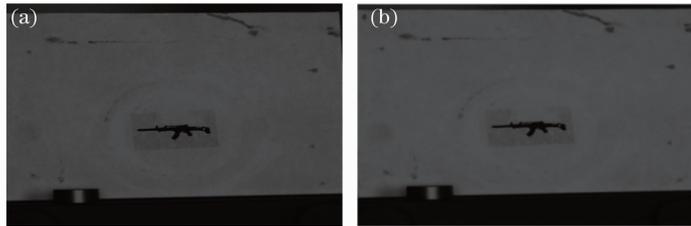


图 15 实验结果。(a) $f=10$ Hz, $A=3$ mm; (b) $f=20$ Hz, $A=3$ mm

Fig. 15 Experimental results. (a) $f=10$ Hz, $A=3$ mm; (b) $f=20$ Hz, $A=3$ mm

图像灰度均方误差 MSE-Exp 与频率的关系如表 2 所示,由表中数据可知,频率越大, MSE-Exp 就越大。和图 8 对比可知, MSE-Sim 和 MSE-Exp 的变化趋势基本一致。当频率为 10 Hz 时,均方误差 MSE-Exp 与 MSE-Sim 之间的误差为 1.02;当频率为 20 Hz 时,均方误差 MSE-Exp 与 MSE-Sim 之间的误差为 0.94。这是因为实验过程中,一方面,受

环境因素如光线变化的影响,导致相机采集的图像在背景亮度上有差别;另一方面,当振动周期大于曝光时间时,曝光时间内的目标运动发生在一个振动周期的某段地方,如果曝光时间的初始时刻不同,那么像移量也不相同,从而造成低频振动时图像模糊程度的随机性。上述两个方面的变化都可能导致实验结果和仿真结果之间有误差。

表 2 灰度均方误差与频率的关系

Table 2 Relationship between mean square error and frequency

f / Hz	A / mm	φ / ($^{\circ}$)	t_e / μ s	L / mm	MSE-Exp
10	3	0	3800	2000	7.29
20	3	0	3800	2000	10.93

4.2 振幅对成像质量的影响

图 16 是振幅分别为 1、2、3 mm 时视轴抖动的实验结果。对比图 6(a)可以看出随着振幅的增大,图像模糊程度逐渐增大,当振幅为 1 mm 时,实验结果和

原始图像基本一致;当振幅为 2 mm 时,图像中仅目标边缘较小范围模糊;当振幅为 3 mm 时,图像中目标边缘较大范围模糊;和图 9(a)~(c)对比可知,实验结果和仿真结果模糊程度变化趋势基本一致。



图 16 实验结果。(a) $f=20$ Hz, $A=1$ mm; (b) $f=20$ Hz, $A=2$ mm; (c) $f=20$ Hz, $A=3$ mm

Fig. 16 Experimental results. (a) $f=20$ Hz, $A=1$ mm; (b) $f=20$ Hz, $A=2$ mm; (c) $f=20$ Hz, $A=3$ mm

图像灰度均方误差 MSE-Exp 与振幅的关系如表 3 所示,从表中数据可知,振幅越大, MSE-Exp 越大。和图 10 对比可知,随着振幅的增大, MSE-Sim 和 MSE-Exp 的变化趋势基本一致,当振幅为 1 mm

时,均方误差 MSE-Exp 与 MSE-Sim 之间的误差为 0.95;当振幅为 2 mm 和 3 mm 时, MSE-Sim 和 MSE-Exp 的误差分别为 0.67 和 0.94。表明 MSE-Sim 和 MSE-Exp 的数值大小相似。

表 3 灰度均方误差与振幅的关系

Table 3 Relationship between mean square error and amplitude

f /Hz	A /mm	φ /($^{\circ}$)	t_e / μ s	L /mm	MSE-Exp
20	1	0	3800	2000	5.37
20	2	0	3800	2000	7.31
20	3	0	3800	2000	10.93

4.3 曝光时间对成像质量的影响

图 17 是曝光时间分别为 400 μ s 和 3800 μ s 时视轴抖动的实验结果。与图 6(b)相比可知,曝光时间越大,图像模糊程度越大。曝光时间为 400 μ s

时,实验结果与原始图像基本一致,曝光时间为 3800 μ s 时,图像中目标整体出现模糊,模糊程度较大。和图 11(a)、(d)对比可知,实验结果和仿真结果的模糊程度变化趋势基本一致。

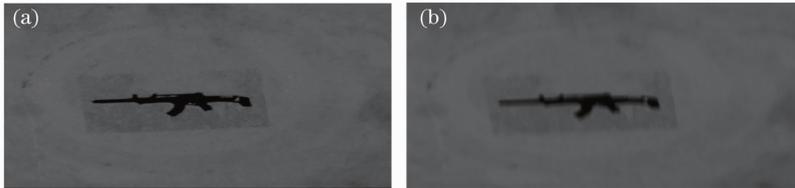


图 17 实验结果。(a) $f=50$ Hz, $t_e=400$ μ s; (b) $f=50$ Hz, $t_e=3800$ μ s

Fig. 17 Experimental results. (a) $f=50$ Hz, $t_e=400$ μ s; (b) $f=50$ Hz, $t_e=3800$ μ s

图像灰度均方误差 MSE-Exp 与曝光时间的关系如表 4 所示,从表中数据可以看出,曝光时间越大, MSE-Exp 越大。和图 12 对比可知, MSE-Sim 和 MSE-Exp 的变化趋势基本一致,当曝光时间为

400 μ s 时, MSE-Sim 和 MSE-Exp 之间的误差为 0.78,当曝光时间为 3800 μ s 时, MSE-Sim 和 MSE-Exp 之间的误差为 1.97。从而表明 MSE-Sim 和 MSE-Exp 在数值上基本一致,波动范围较小。

表 4 灰度均方误差与曝光时间的关系

Table 4 Relationship between mean square error and exposure period

f /Hz	A /mm	φ /($^{\circ}$)	t_e / μ s	L /mm	MSE-Exp
50	3	0	400	1500	7.32
50	3	0	3800	1500	57.87

由实验结果可知,当其他参数不变时,频率越大,图像模糊程度越大;振幅越大,图像模糊程度越大;曝光时间越大,图像模糊程度越大。该结论可为下一步进行相机平台稳定设计奠定基础。

仿真结果基本吻合;由 MSE-Sim 和 MSE-Exp 的对比可知,在误差允许范围内, MSE-Sim 和 MSE-Exp 在数值和变化趋势上基本一致,从而说明了仿真方法的正确性,表明了本文的仿真方法能有效地模拟视轴抖动对成像质量的影响。

将实验结果和仿真结果对比可知,实验结果和

5 结 论

从图像灰度角度提出了一种运动模糊图像仿真算法,分析了视轴抖动过程中,振动频率、振幅和相机曝光时间的变化对成像质量的影响,得到了视轴抖动造成的失真图像的仿真图,结果表明:在其他参数不变时,频率越大,图像模糊程度越大;振幅越大,图像模糊程度越大;曝光时间越大,图像模糊程度越大。通过和实验结果对比验证了仿真方法的正确性,且该方法能灵活、有效地控制运动参数,还可以为模糊图像进行稳像处理和相机平台稳定装置的设计提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 Tang Qiuyan, Tang Yi, Cao Weiliang, *et al.*. Analysis and simulation of images degraded by complex vibration[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(7): 125-130.
唐秋燕,唐 义,曹玮亮,等. 复杂振动引起的图像退化分析与仿真[J]. 光电工程, 2011, 38(7): 125-130.
- 2 Xu Peng, Huang Changning, Wang Yongtian, *et al.*. Modulation transfer function in push-room cameral limits resulting from mechanical vibration[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(3): 259-263.
徐 鹏,黄长宁,王涌天,等. 卫星振动对成像质量影响的仿真分析[J]. 宇航学报, 2003, 24(3): 259-263.
- 3 Sun Hui, Lang Xiaolong, Li Zhiqiang, *et al.*. Measurement for los stabilization accuracy of electro-optical imaging system on moving carrier[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(9): 2131-2137.
孙 辉,郎小龙,李志强,等. 动载体光电平台视轴稳定精度的检测[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2131-2137.
- 4 Jiagu Wu, Zhenzhen Zheng, Huajun Feng, *et al.*. Restoration of TDI camera images with motion distortion and blur[J]. Opt & Laser Technol, 2010, 42(8): 1198-1203.
- 5 Zhao Yanyan, Yuan Yan, Su Lijuan. Point spread function estimation of blurring due to uniform linear motion in arbitrary direction[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0809003.
赵妍妍,袁 艳,苏丽娟. 任意方向匀速直线运动模糊的点扩展函数估计[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0809003.
- 6 Fu Zhongliang, Feng Huajun, Xu Zhihai, *et al.*. Restoration of image blurred by any form motion in two-dimension[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 369-372.
付中梁,冯华君,徐之海,等. 二维任意运动形式模糊图像的恢复[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 369-372.
- 7 Liu Zhiming, Zhu Ming, Chen Li, *et al.*. Long range analysis and compensation of smear in sweep aerial remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0711001.
刘志明,朱 明,陈 黎,等. 长焦距全景式航空遥感图像拖影分析及补偿抑制方法[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0711001.
- 8 Wang Jun, Wang Jiaqi, Lu E, *et al.*. Calculation of optical transfer function with two-dimensional image motion[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(5): 581-585.
王 俊,王家琪,卢 镠,等. 图像二维运动时光学传递函数计算[J]. 光学学报, 2001, 21(5): 581-585.
- 9 Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(12): 1585-1589.
王家琪,于 平,颜昌翔,等. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1585-1589.
- 10 Hadar O, Dror I, Kopeika N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibration, part IV: real-time numerical calculation of optical transfer functions and experimental verification[J]. Opt Eng, 1994, 33(2): 566-578.
- 11 Qian Yixian, Liang Wei, Gao Xiaodong. Numerical analysis of dynamic modulation transfer function for high-resolution aerial camera[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 192-195.
钱义先,梁 伟,高晓东. 高分辨率航空相机动态调制传递函数数值分析[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 192-195.
- 12 Geng Wenbao, Zhai Linpei, Ding Yalin. Analysis of influence of vibration transfer function in optics imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 314-320.
耿文豹,翟林培,丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 314-320.
- 13 Qian Yixian, Cheng Xiaowei, Gao Xiaodong, *et al.*. Effect of vibration on imaging quality of airborne CCD camera [J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(11): 55-58.
钱义先,程晓薇,高晓东,等. 振动对航空 CCD 相机成像质量影响分析[J]. 光电与控制, 2008, 15(11): 55-58.
- 14 Wang Xiaoyan, Yan Jiqing, Tang Yi, *et al.*. Simulation and analysis of high frequency sinusoidal vibration blurred images[J]. Optical Technique, 2011, 37(3): 346-350.
王晓燕,闫吉庆,唐 义,等. 高频振动模糊图像仿真与分析[J]. 光学技术, 2011, 37(3): 346-350.
- 15 S Wang, B Guan, G Wang, *et al.*. Measurement of sinusoidal vibration from motion blurred images[J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(9): 1029-1040.
- 16 Zhang Bingren, Chen Liming, Gao You. Image blurring technique based on pixel motion and its restoration technology [J]. Computer Engineering, 2004, 30(8): 21-22.
张秉仁,陈里铭,高 游. 基于像素运动的图像模糊机理与恢复技术[J]. 计算机工程, 2004, 30(8): 21-22.
- 17 Saifollah Rasouli, Mohammad Taghi Tavassoly. Determination of vibration parameters of a large-scale structure by measuring the visibility changes on the time-averaged images of a sinusoidal pattern fixed on it[J]. Opt Eng, 2008, 47(5): 053603.
- 18 Zhao Guijun. Study on dynamic imaging on push-broom TDI CCD optical remote sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(2): 291-296.
赵贵军. 推扫型 TDI CCD 光学遥感器动态成像研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 291-296.
- 19 Feng Huajun, Deng Qin, Zheng Zhenzhen, *et al.*. Analysis of the simulation model based on remote sensing imaging under vibration[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(2): 1-7.
冯华君,邓 勤,郑珍珍,等. 卫星颤振光学成像仿真模型分析[J]. 光电工程, 2013, 40(2): 1-7.
- 20 Gao Yuan, Lin Zaiping, Li Jun, *et al.*. Imaging simulation algorithm for star field based on CCD PSF and space target's striation characteristic [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2008, 23(3): 58-62.
高 源,林再平,李 骏,等. 基于 CCD 点扩散和拖尾特性的星空模拟方法研究[J]. 电子信息对抗技术, 2008, 23(3): 58-62.
- 21 Li Haoyang, Liu Zhaojun, Xu Pengmei. Influence of satellite jitter on imaging quality of space-born remote sensing system[J]. Computer Simulation, 2012, 29(1): 25-27.
李浩洋,刘兆军,徐彭梅. 平台颤振对空间光学遥感器成像质量的影响[J]. 计算机仿真, 2012, 29(1): 25-27.

栏目编辑:何卓铭