

文章编号: 1001-4888(2016)02-0217-07

成像光路布置对数字相机热致 测量误差影响规律的研究^{*}

马沁巍, 顾昊, 马少鹏

(北京理工大学 宇航学院力学系, 北京 100081)

摘要: 研究了数字相机成像系统中物距和成像系统固定方式两个因素对相机自发热导致的图像变形误差的影响规律, 通过分析得到了热致图像“虚变形”与物距的倒数关系并进行了实验检验。推导了固定位置位于镜头上时图像“虚变形”的表达式并进行了实验验证。研究表明, 无论是成像系统的固定点位于相机上还是镜头上, 自发热都会使得图像发生一个虚的膨胀变形, 其大小与镜头接口的热膨胀参数和像距有关。本研究得到的模型和规律为指导实际光测力学应用中的光路布置以减小数字相机自发热导致的测量误差提供了理论依据。

关键词: 光测力学; 数字相机; 自发热; 图像虚变形

中图分类号: O348.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-246

0 引言

光测力学^[1-3]方法基于光的干涉原理或利用图像分析方法来测量力学量, 如应力、应变、位移等。以图像为信息载体的光测力学方法, 待测量的力学量都需要通过分析图像来获得。因此, 图像的获取严重影响着光测力学测量结果的精度, 甚至决定着实验的成败。目前, 光测力学中图像采集均使用数字 CCD 或 CMOS 相机, 除了普通成像系统中成像器件的位置误差^[4]、镜头的畸变误差^[5]等之外, 数字相机特有的一些成像误差, 如相机的热成像噪声^[6]等也会对光测力学测量精度造成影响。近期的研究工作表明^[7-17], 数字相机采集过程中自发热会引起图像“虚变形”, 从而导致光测力学的测量产生系统误差。

Beyer^[7]等人发现 SONY-XC77CE 数字相机在开机 4 个小时后采集到的图像发生最大 0.25pixel 的“虚移动”。Robson^[8]等人发现 Pulnix TM6CN 数字相机在开机 3 个小时后采集到的图像发生最大约 4pixels 的“虚移动”。Podbreznik^[9, 10]等人发现低成本数字相机在开机后自发热使机体升温约 40℃, 图像发生最大约 2.5pixels 的“虚移动”。Ma^[11]等人发现 Imperx-16M3-L 数字相机在开机后自发热使机体升温约 12℃, 导致图像产生约为 15μm/℃ 的“虚膨胀”。关于造成上述图像“虚变形”的原因, Smith^[12]、Yu^[13]和 Pan^[14, 15]等人通过标定实验发现成像系统的参数会随着相机温度升高发生变化。Handel^[16]针对两种特殊的相机结构给出了造成上述成像参数变化原因的一种猜测。Ma^[17]等人通过实验证实数字相机机身和接口的热膨胀变形是造成图像“虚变形”的原因, 同时给出了“虚变形”与温度及相机结构和成像系统参数间的关系。分析其研究结果可知, 这种相机自发热引起的图像变形不仅与相机本身的构造有关, 而且与成像系统的布置, 如成像系统的固定位置以及成像系统的像距和物距有关。

为了深入理解相机自发热引起的光测力学误差, 同时指导光测力学实验的实施, 本文系统研究了测

^{*} 收稿日期: 2015-12-29; 修回日期: 2016-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(11372038, 11402023)资助

通讯作者: 马少鹏(1974—), 男, 博士, 教授。主要从事光测力学方法方面的研究工作。Email: masp@bit.edu.cn

量光路布置对相机自发热导致的图像变形的影响;分析了物距对图像“虚变形”的影响规律,并通过实验进行了验证;推导了成像系统固定位置改变时图像“虚变形”的表达式,并进行了实验验证。

1 数字相机自发热导致图像变形的原理及模型

文献[11]的研究表明,相机自发热会导致成像系统各个器件的温度发生改变。图 1(a)为由 Imperx-16M3-L 数字相机和 Sigma macro 105mm 镜头组成的成像系统在开机之后的温度变化曲线,结果显示:自发热导致机身温度在前 1.5 个小时上升约 12°C ,之后逐渐趋于平缓;镜头接口的温度与相机机身变化规律相同,但是在数值上略小;镜头温度几乎不变。用此成像系统采集一固定不变形标志物(如固定在墙上的散斑图),然后用图像分析软件计算其变形,此变形即为相机自发热导致的“虚变形”,可导致光测力学结果的系统误差。图 1(b)为数字相机机身温度及图像变形量随时间的变化曲线,结果显示图像在 x 和 y 两个方向的变形量与温度变化存在很好的相关性,而剪切变形量很小,几乎为零。

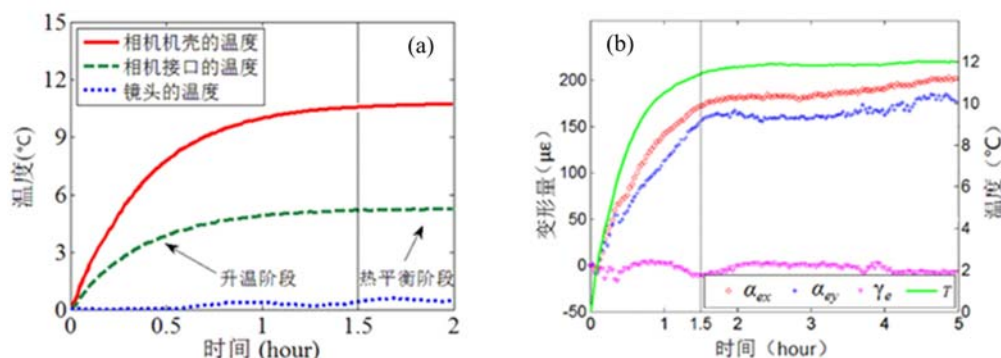


图 1 数字相机开机后各个器件的温度变化及其引起的“虚变形”: (a) 成像系统中各器件的温度变化规律, (b) 数字相机机身温度及热致图像变形演化 (α_{ex} 为 x 方向变形量, α_{ey} 为 y 方向变形量, γ_e 为剪切变形量)。

Fig. 1 The temperature induced “virtual deformation” by camera self-heating: (a) the temperature variation of the camera components, (b) the evolution of the “virtual deformation” with camera temperature variation (α_{ex} is the deformation in x direction, α_{ey} is the deformation in y direction, γ_e is the shear deformation)

文献[17]揭示了相机自发热导致图像变形的机理,即相机机壳和镜头接口发生热膨胀,导致成像芯片和镜头在空间中发生微小移动(如图 2(a)所示),相当于光路中成像平面和等效光心的移动,从而引起成像参数(像距 v 及物距 u)的变化。

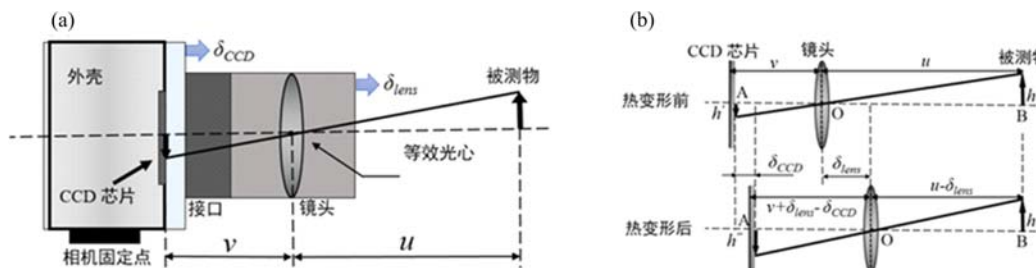


图 2 成像器件热变形导致的成像参数变化(固定点位于相机上的情况): (a) 相机器件热致运动引起成像参数变化的物理模型, (b) 相机器件热致运动引起的物距和像距变化的光路图^[17]

Fig. 2 The variation of the imaging parameters induced by the thermal deformation of camera components (fix position on the camera): (a) the schematic diagram of physical model, (b) the optical pathway diagram

如果成像系统的固定点在相机上,则成像光路各参数的变化如图 2(b)所示,即镜头和芯片同时向前移动,镜头的移动量 δ_{lens} 为成像芯片的移动量 δ_{CCD} 与接口热膨胀量 δ_{mount} 之和。上述的器件热致移动会导致物距 u 减小,像距 v 增加。可以推导得到图像的变形量 α_e 与成像参数和成像器件热变形参数间

的关系为:

$$\alpha_e = \left(\frac{k_{\text{lens}}}{u} + \frac{k_{\text{mount}}}{v} \right) T_{\text{CCD}} = r_e T_{\text{CCD}} \quad (1)$$

其中, $k_{\text{lens}} = \delta_{\text{lens}} / T_{\text{CCD}}$ 为镜头移动量随机壳温度的变化率; $k_{\text{mount}} = \delta_{\text{mount}} / T_{\text{CCD}}$ 为接口热膨胀量随机壳温度的变化率^[17]。式(1)显示相机自发热导致的图像变形误差与相机机壳温度 T_{CCD} 呈线性关系, 可以定义图像随温度的变形率

$$r_e = \frac{k_{\text{lens}}}{u} + \frac{k_{\text{mount}}}{v} \quad (2)$$

来表征不同的成像系统由相机自发热导致的图像变形误差的严重程度。上式中的成像系统热变形参数 k_{lens} 和 k_{mount} 需要通过标定来获得。文献[17]中给出了标定此参数的具体方法: 首先开启相机, 之后使用高精度位移传感器测量成像系统中镜头的移动量 δ_{lens} 和成像芯片的移动量 δ_{CCD} , 同时记录相机机壳温度。实验结束后, 对移动量和机壳温度进行线性拟合, 计算得到的斜率就是相对应的热变形参数。

2 成像系统固定点位置改变对图像变形误差的影响

本文第一部分中关于图像变形误差的推导是基于成像系统固定点在相机上的情况, 这是大多数成像系统的固定模式。但在某些特殊的测量应用中, 如使用长工作距离显微镜头、长焦镜头时, 镜头尺寸和重量都很大, 固定点需要设置在镜头上, 如图 3(a) 所示。

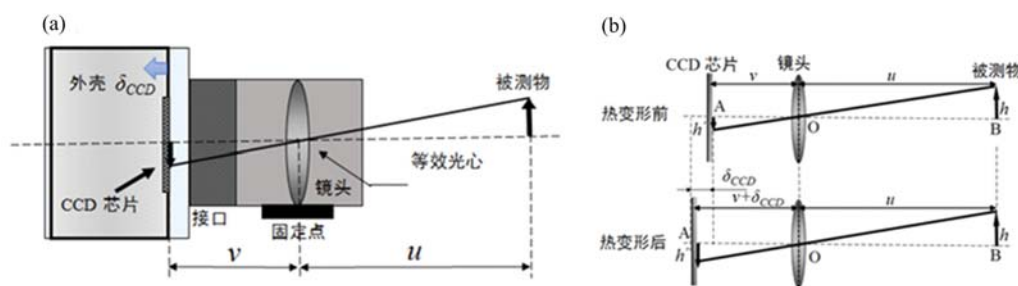


图3 成像器件热变形导致的成像参数变化(固定点位于镜头上的情况): (a) 相机器件热致运动引起成像参数变化的物理模型, (b) 相机器件热致运动引起的像距变化的光路图

Fig. 3 The variation of the imaging parameters induced by the thermal deformation of camera components (fix position on the lens): (a) the schematic diagram of physical model, (b) the optical pathway diagram

如图 3(b) 所示, 在这种固定方式下, 当相机内部发热时, 连接 CCD 芯片的顶板由于镜头被固定而无法向前运动, 反而会由于接口的膨胀向后运动。此时成像系统光心不动, 成像靶面向远离被测物方向移动, 芯片的移动量 δ_{CCD} 与接口热膨胀量 δ_{mount} 相等, 从而导致物距 u 不变, 像距 v 增加。对于这种情况, 图像变形量可表示为:

$$\alpha_e = \frac{h'' - h'}{h'} = \frac{\delta_{\text{mount}}}{v} = \frac{k_{\text{mount}}}{v} T_{\text{CCD}} \quad (3)$$

由此, 图像随温度的变形率可以写为:

$$r_e = \frac{k_{\text{mount}}}{v} \quad (4)$$

从式(4)可以看出, 对这种固定方式, 相机自发热导致的图像变形仅与镜头接口的热膨胀参数和像距有关, 与物距无关。下面用实验对式(4)的理论推导进行验证。实验的具体布置如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 将数字相机(Imperx-16M3-L, 分辨率 4872×3248 pixels)和镜头(Sigma 105mm)组合成的成像系统固定于光学平台上。使用特殊装置将镜头固定, 与之相连的相机悬空不受任何约束。在镜头前方放置一个绘制有棋盘格靶标的刚性平板, 调整镜头焦距得到清晰的图像。在相机上布置温度传感器记录相机自发热时的温度变化情况。实验开始后, 打开相机采集图像, 同时记录机壳温度, 实验持续约 2 小时。

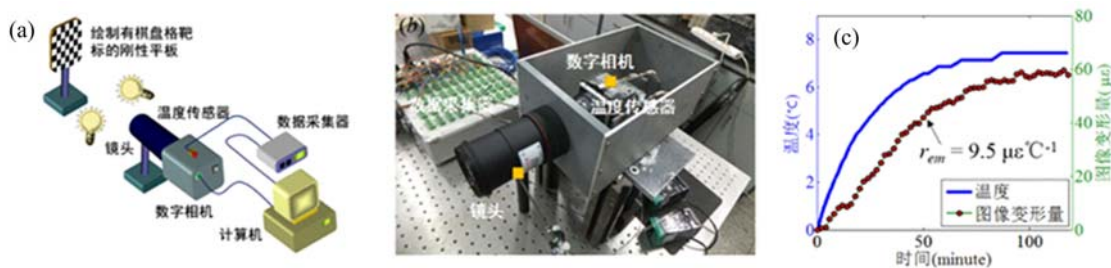


图 4 固定位置在镜头上时相机自发热导致图像变形验证实验:(a)实验布置示意图,
(b)实验现场照片,(c)相机自发热导致的图像变形随时间的变化曲线

Fig. 4 The experiment to verify the model (fix position on the lens): (a) the schematic diagram of experimental setup, (b) the photo of experimental setup, (c) the variation of image “virtual deformation” with camera temperature

实验结束后,对成像系统采集到的图像进行处理,使用 Harris 算子^[18]提取图像中格子的角点坐标并计算位移场,之后对其进行拟合得到实测的图像变形量随时间变化曲线如图 4(c)所示。观察图 4(c)可以发现,图像的变形量随时间的变化规律与机壳温度随时间的变化规律比较一致。对实测的图像变形量和相机机壳温度的关系进行线性拟合,可以得到实测的图像变形率 r_{em} 为 $9.5 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。同时,根据实测的像距($v=150\text{mm}$)以及标定出的成像系统的热变形参数($k_{\text{mount}} = 1.3 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}^{-1}$),由式(4)可以计算出理论的图像变形率 r_e 为 $8.7 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}^{-1}$,二者比较吻合,说明了本文所给出的模型的正确性。另外,文献[17]中给出固定点位于相机上的情况下图像的变形率为 $11.9 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}^{-1}$,此数值比固定点位于镜头情况下的数值稍大。对比式(2)与式(4)可知,导致这种差别的原因因为式(4)中缺少了 k_{lens}/u 这一项的影响。

3 成像系统物距对图像变形误差的影响

在绝大多数实际的光测力学实验中,成像系统固定点在相机上。通过观察式(2)可以发现, r_e 不仅与成像系统硬件的热变形参数有关,而且与测量光路的布置(物距 u , 像距 v)有关。一旦成像系统硬件选定,与之相关的热变形参数 k_{mount} 和 k_{lens} 均不会发生变化,如不考虑特殊的像距会在调节中发生变化的微距镜头,则成像光路中的像距 v 也是不变的。因此,式(2)可以改写为:

$$r_e = \frac{a}{u} + b \quad (5)$$

其中, $a = k_{\text{lens}}$, $b = k_{\text{mount}}/v$, 二者均为常数。此时物距 u 的变化会导致 r_e 的变化,也就是说用同一相机对不同远近的物体进行测量,自发热导致的变形误差将会有不同。更为重要的是,图像随温度的变形率 r_e 与物距 u 之间成倒数关系,即 r_e 将会随着物距的增大而不断减小。对于一个使用望远成像系统进行测量的情况来说,物距 $u \rightarrow \infty$, 式(5)中的 r_e 将成为一个常数

$$r_{e\infty} = b \quad (6)$$

为了验证上面所推导出的规律,设计一个特殊的实验来考察物距对于图像变形误差的影响。实验的布置如图 5(a)所示,实验现场如图 5(b)所示。将数字相机(Imperx-16M3-L, 分辨率 $4872 \times 3248\text{pixels}$)和镜头(Sigma, 焦距 $28 \sim 300\text{mm}$)组合成的成像系统固定于光学平台上。在数字相机上布置一个温度传感器(K 型热电偶, 温度分辨率 $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$)。在镜头前方放置一个绘制有棋盘格靶标的刚性平板。实验中像距 v 固定为 15cm , 通过改变刚性平板距离相机的位置调整物距分别为 0.4m 、 1.9m 、 2.8m 、 4.2m 、 8m 及 10m , 调整焦距得到清晰的图像。相机开机后连续采集图像,同时记录相机机壳的温度。

测量得到的各种物距下图像的变形量、相机机壳温度随时间变化曲线如图 6 所示。对某一物距下实测的图像变形量和相机机壳温度的关系进行线性拟合,可以得到实测的图像变形率 r_{em} 。同时,根据实测的物距以及标定出的成像系统的热变形参数($k_{\text{lens}} = 4.4 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}^{-1}$, $k_{\text{mount}} = 1.3 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}^{-1}$),由式(2)可以计算出理论的图像变形率的理论值 r_{et} 。

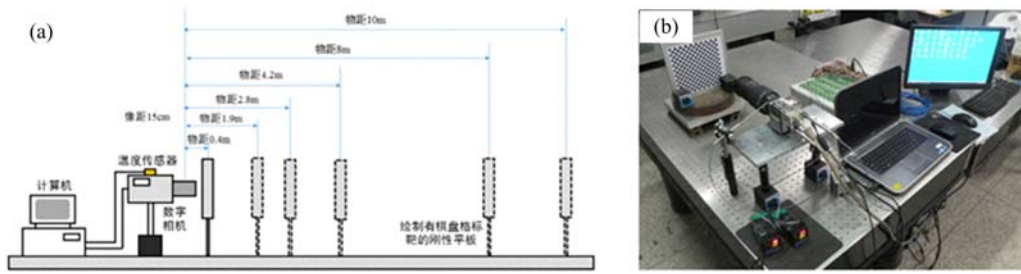


图5 图像随温度的变形率与成像系统物距间关系验证实验:

(a)实验布置及物距选择示意图,(b)实验现场

Fig. 5 The experiment to verify the relationship between the image deformation rate and the object distance:

(a) the schematic diagram of experimental setup, (b) the photo of experimental setup

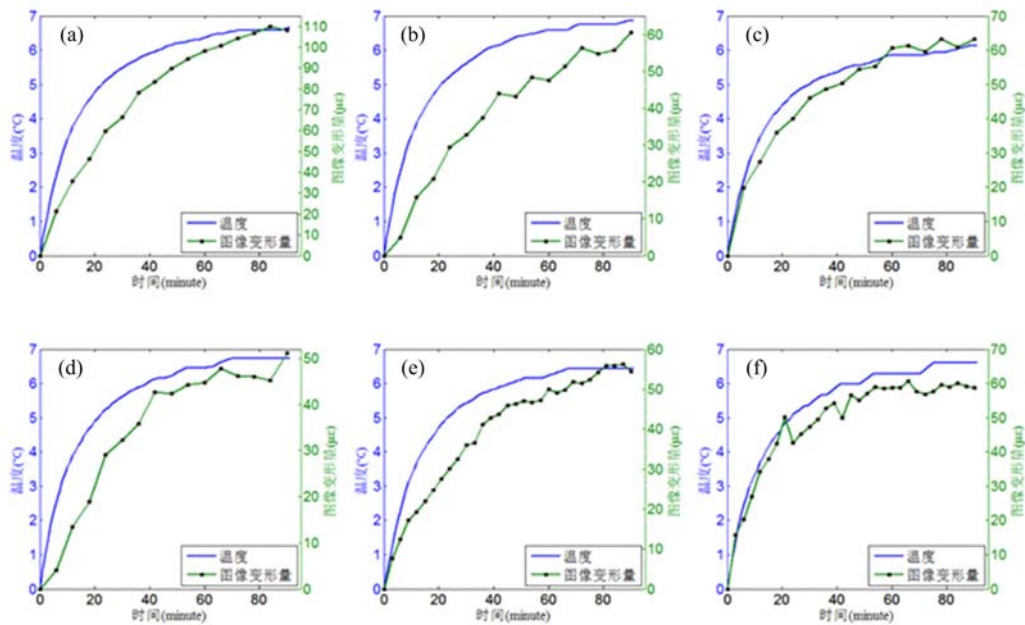


图6 不同物距下图像变形量、机壳温度随时间变化的曲线:

(a)物距 0.4m,(b)物距 1.9m,(c)物距 2.8m,(d)物距 4.2m,(e)物距 8m,(f)物距 10m

Fig. 6 The variation of image “virtual deformation” and camera temperature with time under different

object distance: (a) 0.4m, (b) 1.9m, (c) 2.8m, (d) 4.2m, (e) 8m, (f) 10m

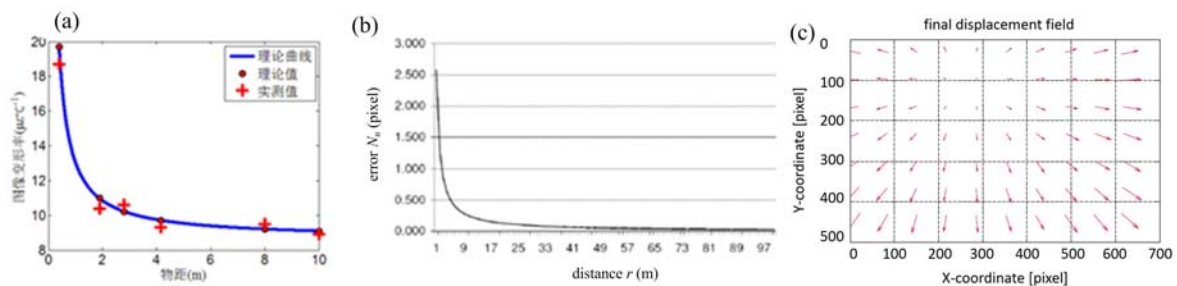


图7 实测和理论图像变形率的对比:(a)不同物距下理论图像变形率与实际图像变形率对比曲线

(图中星号位置为大物距下的结果),(b)文献结果^[9], (c)自发热导致的图像位移分布^[16]

Fig. 7 The comparison between the theoretical and experimental image deformation rate: (a) the comparison curve,

(b) the result from the literature^[9], (c) the distribution of displacement induced by camera self-heating^[16]

将不同物距下的实测和理论图像变形率绘制成图7(a)所示曲线,可以发现实测值与理论值吻合较好。同时,实测图像变形率与物距呈倒数关系,验证了上文中对该规律理论推导的正确性。图7(b)为Podbreznik^[9]等人测量得到的相机自发热时某点像素移动量随相机与被测物之间距离(物距)的变化关

系。考虑到图 7(c)中显示的自发热导致的图像位移分布,某点像素移动量的变化可与本文中的图像变形等效,因此图 7(b)也从另外一个角度证明了本文中推导的物距与图像变形间的倒数关系模型的正确性。

综上可知,在成像器件热变形参数及像距不变的情况下,相机自发热导致的图像变形率与物距成倒数关系。对于远距离情况下的测量(望远系统测量),图像变形率较小且趋于一个常数,对于超近距离测量(显微系统测量),图像变形率会变得很大。在精密的光测力学实验中,尤其是近距离的显微光测力学实验中,需要校正这种相机热致误差,具体的校正方法参见文献[17,19]。

4 结论与讨论

数字相机的自发热会引起相机结构的热变形,引起成像光路参数发生改变,从而导致所采集的图像发生“虚变形”,这种“虚变形”会对光测力学方法的测量结果造成系统误差。本文在前期研究的基础上,系统研究了成像系统固定方式和成像系统物距两个因素对数字相机自发热导致的图像变形误差的影响规律。本文研究表明,无论是成像系统的固定点位于相机上还是镜头上,自发热都会使得图像发生一个虚的膨胀变形,其大小与镜头接口的热膨胀参数和像距有关;对于绝大多数情况下使用的成像光路布置,即固定点位于相机上且像距不变,数字相机自发热导致的图像变形率与物距成倒数关系。因为物距的减小会导致图像“虚变形”急剧增大,相对于望远系统的远距离测量来说,显微测量系统中的热致图像变形误差会更大,因此应格外注意此类测量中热致误差的校正。

参考文献:

- [1] Sharpe W N. Handbook of Experimental Solid Mechanics[M]. New York: Springer, 2007.
- [2] 于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009 (YU Qifeng, SHANG Yang. Videometrics: Principles and Researches[M]. Beijing: Science Press, 2009(in Chinese))
- [3] 金观昌. 计算机辅助光学测量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007 (JIN Guanchang. Computer-aided optical metrology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007(in Chinese))
- [4] 孟利波, 金观昌, 姚学锋. DSCM 中摄像机光轴与物面不垂直引起的误差分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(11):1930—1936 (MENG Libo, JIN Guanchang, YAO Xuefeng. Errors caused by misalignment of the optical camera axis and the object surface in the DSCM [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46(11):1930—1936 (in Chineses))
- [5] Pan B, Yu L P, Wu D F, et al. Systematic errors in two-dimensional digital image correlation due to lens distortion [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(2):140—147.
- [6] Widenhorn R, Blouke M M, Weber A, et al. Temperature dependence of dark current in a CCD [C]. Proceedings of SPIE 4699, 2002.
- [7] Beyer H A. Geometric and radiometric analysis of a CCD-Camera based photogrammetric close-range system [D]. Institut fur Geodasie und Photogrammetrie, ETH, Zurich, 1992.
- [8] Robson S, Clarke T A, Chen J. Suitability of the Pulnix TM6CN CCD camera for photogrammetric measurement [C]. Proceedings of SPIE 2067, 1993.
- [9] Podbreznik P, Potocnik B. Influence of temperature variations on calibrated cameras [J]. International Journal of Computer and Information Science and Engineering, 2008, 4:261—267.
- [10] Podbreznik P, Potocnik B. Assessing the influence of temperature variations on the geometrical properties of a low-cost calibrated camera system by using computer vision procedures [J]. Machine Vision and Applications, 2012, 23:953—966.
- [11] Ma S P, Pang J Z, Ma Q W. The systematic error in digital image correlation induced by self-heating of a digital camera [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23:025403.
- [12] Smith M J, Cope E. The effects of temperature variation on single-lens-reflex digital camera calibration parameters [J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2010, 38(5): 554—559.

- [13] Yu Q F, Chao Z C, Jiang G W, et al. The effects of temperature variation on videometric measurement and a compensation method [J]. *Image and Vision Computing*, 2014, 32:1021–1029.
- [14] Pan B, Shi W T, Lubineau G. Effect of camera temperature variations on stereo-digital image correlation measurements [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(34):10089.
- [15] 江天云, 潘兵, 夏勇 等. 三维数字图像测量系统稳定性的实验研究[J]. *实验力学*, 2014, 29(6):703–710 (JIANG Tianyun, PAN Bin, XIA Yong, et al. Experimental study of the stability of three-dimensional digital image processing system[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2014, 29(6):703–710(in Chineses))
- [16] Handel H. Analyzing the influences of camera warm-up effects on image acquisition [J]. *IPSI Transaction on Computer Vision and Application*, 2009, 1:12–20.
- [17] Ma Q W, Ma S P. Camera self-heating induced systematic error for photomechanic methods and its compensation [J]. *Optics Express*, 2013, 21(6):7686–7698.
- [18] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector [C]. *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*, 1988.
- [19] Pan B, Yu L P, Wu D F. High-accuracy 2D digital image correlation measurements with bilateral telecentric lenses: error analysis and experimental verification [J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53:1719–1733.

On the Influence of Imaging Light Path Layout on Thermo-Induced Measurement Error of Digital Camera

MA Qin-wei, GU Hao, MA Shao-peng

(Department of Mechanics, School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, the influence of two important factors in digital camera imaging system, i. e. object distance and fixed form of imaging system, on measurement error due to image distortion induced by spontaneous heating is investigated. Through analysis, the reciprocal relationship between thermo-induced image virtual deformation and object distance was obtained and verified experimentally. When the fixed position is at the lens, the image virtual deformation expression was derived, and its validation was also verified by experiment. Experimental results show that no matter what the imaging system fixed position is on the camera or on the lens, the spontaneous heating will make the image a virtual expansion distortion, and its size is related to the thermal expansion parameter of lens mount interface and image distance. Above results may provide the theoretical evidence for reducing digital camera thermo-induced measurement error through imaging light path layout in photomechanics application.

Keywords: photomechanics; digital camera; spontaneous heating; virtual image distortion