

文章编号: 0253-2239(2006)04-0531-5

高速分幅成像系统中多路图像性能不一致的校正方法研究*

江孝国¹ 王 远¹ 张开志¹ 郭宝平² 石金水¹ 李成刚¹

(¹ 中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)
(² 深圳大学光电子研究所, 深圳 621900)

摘要: 针对用于获取具有时间分辨能力的序列图像的高速分幅相机而言,其图像处理主要包括了图形的几何形变校正、图形位置配准、一幅图像中各像元响应的平场校正及各幅图像响应一致性的校正等内容,不仅要解决每幅图像本身的问题,还要解决各幅图像间的形态对比的问题。通过对这些处理目的所涉及的方法逐一进行进一步的研究,所获得的处理方法用于实际图像的处理获得了比较好的效果,大幅度提高了图像间的相关度和一致性,为解决多路成像系统图像性能不一致的现象提供了有效的方法,达到了实际应用的水平。

关键词: 成像系统; 高速分幅相机; 响应非均性; 平场校正; 几何校正

中图分类号: TN818 文献标识码: A

Calibration Method for Non-Uniformity between Multiple Images from a High-Speed Multi-Frame CCD Camera

Jiang Xiaoguo¹ Wang Yuan¹ Zhang Kaizhi¹ Guo Baoping² Shi Jinshui¹ Li Chenggang¹

(¹ Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)
(² Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

Abstract: For the high-speed multi-frame camera used to capture time-resolved sequence images, the main image processing includes geometric distortion calibration, image pixel position arrangement, flat-field correction for photo-response non-uniformity between the pixels in one image and the response calibration between different sequence images. These processings can meet the demand not only on each image itself but also on the morphological comparison of sequence images. The image processing method developed from related methods to solve the above problems provides an effective way to calibrate the non-uniformity and correlation coefficients between images, and can be used to acquire the uniformity of the sequence images in the multi-images system in the practical applications.

Key words: imaging system; high-speed multi-frame camera; photo-response non-uniformity; flat-field correction; geometric distortion calibration

1 引 言

在有超高速的时间分辨要求(幅频达到每秒 10^8 幅)^[1]的摄影技术中,用到的主要设备是高速分幅(扫描)相机,通常一次只能获取多到十余幅、少的只有2~3幅的序列图像,图像间隔时间一般为10~100 ns左右,曝光时间为5~10 ns。高速分幅成像系统一般是由多路分光成像光学系统、高速电子快门及 CCD 相机组成,而高速电子快门又主要由微通道板(MCP)或像增强器构成^[2]。由于实际的原因(如

光学元件加工工艺、装配),高速分幅相机中各路在分光光路、高速电子快门及图像像元响应等性能方面存在不一致的问题,主要表现为图像亮度偏移、不均匀,各图像位置错位,各图像亮度不一致,各图像幅面不一致等现象;在需要进行序列图像相互比较及定量处理的情况下,应对各幅图像进行修正(包括了图像像元响应的平场校正、图形的几何变形校正、图像位置配准等内容)以获得高质量的、可作精密测量的图像数据,并因此提高测量的精度。针对不同的系统,有

* 国家 863-807 计划资助课题。

作者简介: 江孝国(1968~),男,四川乐至县人,副研究员,主要从事 CCD 测量系统设计及应用的研究。

E-mail: j_xg_caep@sina.com

收稿日期: 2005-06-20; 收到修改稿日期: 2005-08-26

不同的方法对图像的不一致性进行处理^[3,4],但都是解决图像性能的某一些方面的问题;对于多幅序列图像的上述问题,则需要找到新的完整的处理方法。本文针对一种八幅高速分幅相机系统^[5],就上述问题在处理的各方面进行了初步研究,所研究的方法用于实际图像的处理获得了比较好的效果。

2 高速分幅相机系统结构

高速分幅成像系统的典型结构如图 1 所示。该系统主要分为三大部分:成像主物镜、分光光路(含对应的成像光学系统)及镜头耦合(ICCD)相机。主要工作原理:主物镜将物体成像于其像面上,该像面正好是分光光路系统物方透镜的等效前焦平面,所以由主物镜得到的像再次被分光光路系统物方透镜变换成平行光束,分光系统中的多面体棱镜对这些平行光束进行分光,经分光棱镜分光后的各路光线呈等效同轴平行传输,并进入镜头耦合相机的成像镜头,由于镜头耦合相机的光电阴极位于镜头的后焦平面上,因此经分光后的各平行光又成像在镜头耦合相机的光阴极上,图像由镜头耦合相机读出并数字化、存贮在计算机中。

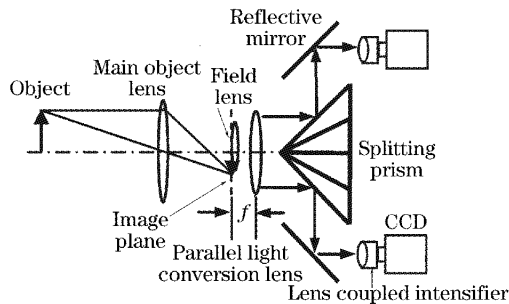


图 1 高速分幅相机结构

Fig. 1 Structure of high-speed multi-frame CCD camera

以间隔时间 10 ns、曝光时间 3 ns 的条件所获得的静态物像(标准分辨率板)的典型序列图像如

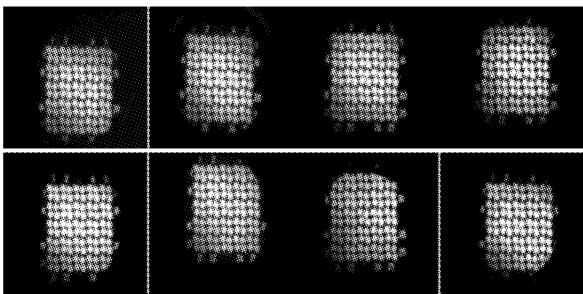


图 2 高速分幅相机获取的典型序列图像

Fig. 2 Typical sequence images captured by the high-speed multi-frame camera

图 2 所示,这些图像反映了前面已阐述的所有问题:图像亮度偏移、不均匀,各图像位置错位,各图像亮度不一致,各图像幅面不一致等。

3 图像处理总体要求

对于一幅图像的校正,主要完成图像的几何失真、亮度校正就可以达到获得反映物体真实几何形状参量及灰度(亮度、照度)的目的。而对于由高速分幅相机获得的系列图像的处理而言,要复杂得多:1)每一幅图像必须经过图像的几何失真、照度校正处理过程。2)各幅图像之间的响应一致性应作归一化处理,并且要在一定程度上达到绝对测量的目的。3)各幅图像间幅面存在的大小差异、图像旋转及平移等现象应予以校正,并对图像进行精确配准以获取图像间的变化。

3.1 图像的平场校正^[6]

图像的平场校正是解决一幅图像中各个像元间响应不一致的主要处理方法,利用平场校正方法对各个像元间响应存在较严重非均匀性(甚至包括背景响应)的图像进行处理可以得到响应均匀化的图像,这种处理相当于照度校正处理,其校正表达式如下:

$$\frac{X(x,y)}{X_0} = \frac{G(x,y) - G_B(x,y)}{G_R(x,y) - G_B(x,y)}, \quad (1)$$

式中 $G_B(x,y)$ 是暗本底图像灰度分布, $G_R(x,y)$ 是对应于光照条件为 X_0 的参考图像, $G(x,y)$ 是被用来校正的图像,对应的光照条件为 X 。关键在于获取参考图像时,光照水平不要太低但也不要使图像饱和;虽然经过平场校正后的图像是相对值图像,但并不会对图像处理产生不良影响。图 3 显示了平场校正的效果,在含背景的参考图像中,像元的响应明显地是很不均匀的;但经平场校正后的图像则显得响应非常均匀,即使是那些响应严重偏离了正常范围的像元(如用作几何参考的细丝部分)也能被校正,如图 3 所示;针对叠加了有效图像信号的图像,经平场校正后,改善的效果是明显的,如图 3 所示;在这样的图像中,采用简单的减法扣除背景图像的办法是不行的,因为它不具有叠加性^[7],而在一定程度上

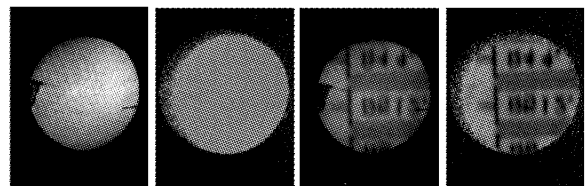


图 3 平场校正效果

Fig. 3 Flat-field image correction effect

将图像背景看作像元响应的一部分,采用平场校正则是有效的。

3.2 图形的几何变形校正^[6]

对于有严重几何畸变的图形而言,几何变形的校正是获得物体真实形状的必要手段。原则上讲,几何变形的校正通过一定的几何运算就可以到达目的;而几何运算包括两个独立的算法:1)定义空间变换本身的算法,它解决图像几何变形的问题,这是一个随处理目的不同而不同的算法。2)图像灰度插值的算法,它解决图像亮度失真的问题。

作为一般变换,控制栅格插值是一种计算简单的几何校正方法,并且它可以保证变换的连续性;在该算法中主要用到了双线性的空间变换:

$$G(x, y) = F(x', y') =$$

$$F(ax + by + cx + d, ex + fy + gx + h), (2)$$

双线性的空间变换由 a 到 h 的八个系数定义,原则上是将输入图像中的四个点变换到输出图像中的四个点,而输入图像中的四个点构成的四边形内的任何点均可按照该变换关系变换到输出图像中对应四边形的内部相应位置,如图 4 所示。具体的作法如下:1)确定失真图像中的四个点 $(x_a, y_a) \sim (x_d, y_d)$,它们构成一个四边形(不一定为矩形)。2)确定上述四个点对应的标准矩形栅格上的四个顶点 $(x_1, y_1) \sim (x_4, y_4)$ 的坐标。3)由 1)和 2)可得到两组含有四个未知系数的线性方程组:

$$\begin{cases} x_1 = ax_a + by_a + cx_a + d, \\ x_2 = ax_b + by_b + cx_b + d, \\ x_3 = ax_c + by_c + cx_c + d, \\ x_4 = ax_d + by_d + cx_d + d, \\ y_1 = ex_a + fy_a + gx_a + h, \\ y_2 = ex_b + fy_b + gx_b + h, \\ y_3 = ex_c + fy_c + gx_c + h, \\ y_4 = ex_d + fy_d + gx_d + h, \end{cases} (3)$$

通过解上述线性方程,可以得到变换所需的八个系数。4)对该四边形内部所有的点 (x, y) 进行变换可以得到对应的变换结果 (x', y') 。5)要对整幅图像进

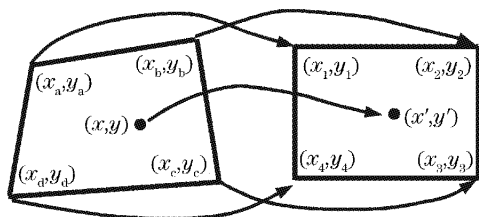


图 4 控制栅格插值的空间变换过程

Fig. 4 Space transform progress of the grid interpolation

行变换,可以选定一系列的相邻四边形重复 1)~4)的过程即可。

3.3 图像的配准

在一幅几何形状不失真的图像中主要作平移和旋转。平移的算法可用下式表示:

$$\begin{bmatrix} a(x, y) \\ b(x, y) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. (4)$$

该算法表示点 (x_0, y_0) 被平移到了座标原点,由此可以推广到任意平移的情况。如果图像有几何放大或缩小的问题,可以用下式来解决:

$$\begin{bmatrix} a(x, y) \\ b(x, y) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/c & 0 & x_0 \\ 0 & 1/d & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. (5)$$

该算法表示了图像在 x 轴方向放大 c 倍,而在 y 轴方向上放大了 d 倍;由此可以推广到轴对称变换的情况。而图像绕原点顺时针旋转 θ 时,可以用下式表示:

$$\begin{bmatrix} a(x, y) \\ b(x, y) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. (6)$$

对于一幅需要平移和旋转的图像,通过上述各式的有效组合就可以到达:

$$\begin{bmatrix} a(x, y) \\ b(x, y) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_0 \\ 0 & 1 & -y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. (7)$$

该式描述的算法为:1)图像中的参考点 (x_0, y_0) 平移至座标原点,2)平移后的图像绕座标原点顺时针旋转 θ 的角度,3)再将旋转后的图像恢复到原来的位置。根据实际的图像处理需要,可以由该式来构造所需要的复合变换方式。所选取的参考点间的关联程度越高越好,它对图像配准的程度有决定性的作用,如果能明确得到像元大小量级的参考点则最好。

图像配准工作包括了两部分工作:1)各路光学系统的横向放大率的归一化校正;2)在横向放大率已经校正的情况下,各图像几何位置的配准则包括了图像平移、旋转。在高速分幅相机中,各路对应的成像光路是有一定的独立性,其参量不可能完全一致;在宏观上讲,这种差别体现在成像物距和各路光学系统的焦距上,表现为各幅图像不一样大;而不重合的光轴可能导致所得图像位置发生偏移。图 2 中

各幅图像位置发生偏移和旋转的情况是非常明显的,相比之下,图像大小的差别和几何畸变现象还不是特别明显,经核实有 2% 以内的变化,如表 1 所示,表中数据是相对于第一幅图像的,在精密的图像处理中,这是需要消除的。

表 1 图像幅面比例

Table 1 Image area ratio

1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
1.000	1.020	0.990	0.989	0.990	1.002	1.015	0.998

3.4 图像响应一致性校正

在调试时尽量使系统各路增益一样,但不可能真正做到一致(尤其在高速快门状态下),需要在图像处理上作校正工作;选择已经过平场校正的序列图像中的某一幅(第一幅)作为参考图像,取该图像的平均值 G_{R1} 为标准响应值,将其它图像的响应(也取平均值,设为 G_{Ri})对 G_{R1} 归一化即可得到各图像相对于第一幅图像的比值 R_i ,在获得图像数据 G_i 后乘以该比值即可得到校正后相对于第一幅的响应值 G'_i :

$$R_i (i \neq 1) = G_{Ri} / G_{R1}, \quad (8)$$

$$G'_i (i \neq 1) = R_i \cdot G_i. \quad (9)$$

静态序列图像经过平场校正、图像配准及响应一致性校正后,各图像间的相关程度(形态和灰度)得到大幅度的提高。

4 动态测量结果校正实例

图 5 是在神龙一号加速器^[9]上获得的电子束在约 90 ns 内打靶过程的序列图像,图像幅间间隔时间为 10 ns、曝光时间为 3 ns,图中亮斑为电子束斑,亮环为靶片的边沿。明显地,在原始图像中无法判断电子束的运动情况和束流变化情况;经处理后,准确地获得了电子束在 90 ns 内中心位置、束斑直径、束斑形状、束流强度的变化情况,从而为加速器的精密调试提供参考,也为电子束性能研究提供实验数

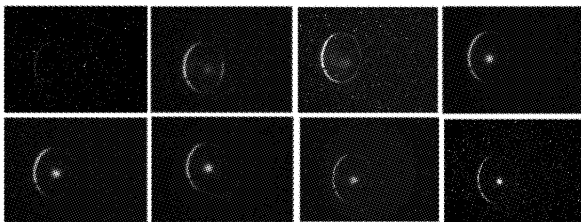


图 5 神龙一号时间分辨的电子束原始束斑图像
Fig. 5 Original image of time-resolved beam profile of Dragon-I

据。图 6 是经过上述一系列校正处理后的图像,从中得到了电子束中心的运动轨迹(如图 7 所示)、束斑形态的变化过程等详细的数据,首次定量地描述了电子束的螺旋状(Corkscrew)运动和束斑大小变化的情况,并且说明了电子束在相应时间内的束心运动的半径在约 0.5 mm 的范围内,解决了电子束晃动量判断的难题。

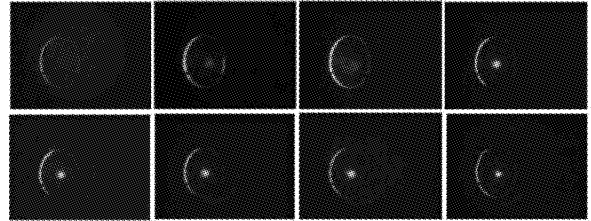


图 6 校正后的神龙一号时间分辨的电子束束斑图像
Fig. 6 Corrected time-resolved electron beam profile image of Dragon-I

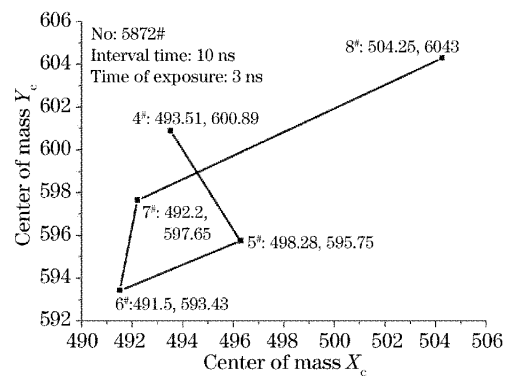


图 7 神龙一号电子束运动轨迹

Fig. 7 Electron beam centroid trajectory of Dragon-I

5 结 论

以高速分幅相机为例,阐述了多路图像性能不一致的校正处理方法,并在测量加速器电子束束斑运动的实际应用中获得了较好的效果,不仅获得了电子束束斑的形貌变化,而且还获得了束斑中心运动的情况。在形态学上讲,图像的几何变形及校正处理解决的是图像本身的问题,图像的位置偏移、旋转、配准处理则解决了图像间的形态对比的问题,而图像及图像间响应的不一致性处理解决的则是在一定意义上的绝对测量的问题,这些处理在序列图像的处理中占据重要地位,其根本目的都是为了得到更准确的结果;上述综合处理方法较好地解决了这两方面的问题,为电子束参量定量测量的精密化奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 Tan Xianxiang. *High Speed Optical Photogrammetry* [M]. Beijing: Science Press, 1992. 89~129 (in Chinese)
谭显祥. 光学高速摄影测试技术[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 89~129
- 2 Xiang Shiming, Ni Guoqiang. *The Principle of Photoelectronic Imaging Devices* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. 77~95, 177~195 (in Chinese)
向世明, 倪国强. 光电子成像器件原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 77~95, 177~195
- 3 Jia Dongyao, Ding Tianhuai. A novel method for dynamic calibrating non-uniform of multiple CCD imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 485~490 (in Chinese)
郑东耀, 丁天怀. 多路 CCD 成像非一致性动态校正新方法[J]. 光学学报, 2005, **25**(4): 485~490
- 4 Yu Yang, Huang Weiyi. High similarity gray-scale image recognition with modified morphological correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1362~1367 (in Chinese)
余 杨, 黄惟一. 改变形态学相关算法以识别高相似度灰度图像[J]. 光学学报, 2002, **22**(11): 1362~1367
- 5 Jiang Xiaoguo, Deng Jianjun, Shi Jinshui *et al.*. Time-resolved measurement system for electron beam profile of high current LIA [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(7): 1070~1074 (in Chinese)
江孝国, 邓建军, 石金水 等. 具有时间分辨能力的强流电子束束剖面测量系统[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(7): 1070~1074
- 6 Jiang Xiaoguo, Qi Shuangxi, Wang Wanli *et al.*. Flat-correction method for fiber optic taper coupled CCD camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1239~1242 (in Chinese)
江孝国, 祁双喜, 王婉丽 等. 光纤耦合 CCD 相机的平场校正方法研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(10): 1239~1242
- 7 Zheng Jun, Zhang Wei, Ma Zhaorui *et al.*. Background estimation technique based on sequential image time stability [J]. *J. Tsinghua University (Sci & Tech)*, 2005, **45**(5): 601~605 (in Chinese)
郑 军, 张 伟, 马兆瑞 等. 基于序列图像时间稳定性特征的背景估计技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, **45**(5): 601~605
- 8 K. R. Castleman. *Digital Image Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. 115~127
- 9 Deng Jianjun, Ding Bonan, Wang Huacen *et al.*. Physical design of the Dragon-I linear induction accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2003, **15**(5): 502~504 (in Chinese)
邓建军, 丁伯南, 王华岑 等. “神龙一号”直线感应加速器物理设计[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(5): 502~504

征 订 启 事

第十七届全国激光学术会议于 2005 年 10 月 19~22 日在四川绵阳富乐山大酒店召开。本次会议由中国光学学会与中国电子学会联合主办。共有 350 多名来自高校、研究所以及公司激光领域的研究人员参加了本次会议。

本次大会共收到论文 330 篇,《中国激光》将其中的优秀论文 126 篇汇编成册,以增刊形式出版了《第十七届全国激光学术会议论文集》,为广大激光工作者提供了一份有价值的参考资料。

按照研究方向,论文集分为激光物理、非线性光学、高能固体激光与超短脉冲激光、新型激光器、激光技术及晶体材料、激光应用、光束传输、激光薄膜及元器件等专栏。较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果,显示了激光科学技术对国家十一五规划、国家 863 计划、国家 973 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

论文集共计 462 页,进口雅光纸精印,定价 100 元。欢迎订阅。

电话:021-69918427

电子信箱:gexiaohong@siom.ac.cn

地址:上海 800-211 信箱

邮政编码:201800

联系人:葛晓红