

文章编号 1004-924X(2015)10-2997-07

高动态调光成像系统畸变的自校正

吴 培^{1,2*}, 王延杰¹, 孙宏海¹, 何舒文^{1,2}, 张 雷^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:针对基于数字微镜器件(DMD)的高动态成像系统在光学设计过程中由二次倾斜造成的畸变,建立了一套基于区域的系统畸变自校正模型。首先,根据像素级区域调光高动态系统中光路设计的特点,分析了畸变产生的原因。考虑不同种类畸变模型产生的原因及特点,结合系统自身的优势,建立了一种基于区域的畸变校正函数模型。为了解决在校正过程中某一点存在多次赋值或者未赋值的情况,采用逆推校正的方法逆向求解畸变参数,进行畸变校正。最后,利用数字微镜器件(DMD)自身投影标定模板的方法,实现了系统畸变的自校正设计。实验结果表明:校正后的系统像元误差为 0.87 pixel。与传统的畸变校正模型相比,该模型可以有效解决系统中的倾斜畸变、径向畸变以及偏心畸变,且畸变校正过程不依赖外部环境,校正过程快、可靠性高,满足了 DMD 高动态系统像素级调光的要求。

关键词:高动态成像;调光成像;畸变校正;畸变模型;数字微镜器件

中图分类号:V248.1;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152310.2997

Self-distortion correction of high dynamic dimming imaging system

WU Pei^{1,2*}, WANG Yan-jie¹, SUN Hong-hai¹, HE Shu-wen^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

** Corresponding author, E-mail: wupei210@mail.ustc.edu.cn*

Abstract: For the distortion caused by a secondary incline in optical design for a high dynamic dimming imaging system based on Digital Micromirror Device (DMD), this paper establishes a self-distortion correction model based on regioning. According to the optical path design characteristics of the high dynamic dimming imaging system, the reasons of distortion were analyzed. By taking the causes and features of different types of distortion models into account, a model was established based on distortion correction function region by combination with the characteristics of the system itself. To solve the problems of over-assignment or un-assignment in correction processing, a reverse correction method was used to solve the distortion parameters and to complement the distortion correction. Finally, the self-projection by DMD was used to calibrate the displaying template and to realize the design of self-distortion correction system. The experimental results show that the pixel error of system after

收稿日期:2014-11-28;修订日期:2015-01-20.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA7031010B)

correction is 0.87 pixel. As compared with the traditional correction model, the model overcomes the slope distortion, radial distortion and the eccentric distortion and the distortion correction process does not depend on external environment, so it has fast and reliable correction procedure and meets the requirements of high dynamic dimming imaging systems.

Key words: high dynamic imaging; dimming imaging; distortion correction; distortion model; Digital Micro-mirror Device(DMD)

1 引言

动态范围是评价光电成像设备性能的重要参数之一。在深空探测、太阳活动观测、火箭导弹航空航天器发生过程等高动态辐射能量的辐射特性测量应用中,光学成像设备需要具有更高的辐射能量测量动态范围,才能够更加准确地观察和测量强辐射目标的不同谱段特性。因此,迫切需要解决空间探测光电成像设备强弱目标同时探测的问题,以便提高光电成像设备的可探测动态范围。

目前,国外学者提出了许多相应的技术手段^[1,2]。本课题组早期利用 TI 公司的数字微镜阵列(Digital Micro-mirror Device, DMD)空间光调制器,设计了一款基于 DMD 的像素级区域调光高动态范围成像系统,提出了相应的自适应动态范围成像方法,使动态范围达到了 130 dB 以上^[3,4]。在该系统中,核心器件 DMD 上的每一个微镜都与图像像元一一对应,在一帧图像中通过调整像素点所对应的 DMD 微镜的翻转状态和翻转时间就可以实现对图像传感器像素点的光强控制。

在基于 DMD 的高动态调光系统中,DMD 微镜阵列与图像传感器像元的匹配精度直接影响了系统在调光过程中调光区域对准的准确程度。然而在实际系统中,由于结构设计的限制,使得采集到的图像存在着一种特殊畸变。对于这种畸变采用常规的校正方法效果不理想,会影响调光系统的像元匹配精度,从而导致调光效果不理想。因此,寻找一个适合系统自身的畸变模型对系统进行畸变校正是提高其调光精度的关键。近年来,在畸变校正领域,国内学者针对不同的光学系统做了大量的研究。吴国栋^[5]通过分析离轴三反时间延迟积分 CCD(Charge Coupled Device)相机的光学系统和像面拼接方法,提出了相应的畸变模型,有效解决了系统的标定问题。胡浩^[6]针对显

微立体视觉系统,采用非参数化的光学畸变模型,提出了一种基于样条函数的畸变校正方法。上述方法都是针对特定的应用背景提出的。

针对 DMD 的高动态成像系统,本文首先分析了系统中畸变产生的原因和畸变种类,然后提出了一种基于区域的自适应畸变校正模型。最后通过实际实验验证了提出的模型的性能。

2 系统概述

本系统主要由一次成像光学系统(成像物镜)、二次成像光学系统(转置镜)、无效光吸收装置、机械结构、DMD 调光装置、sCMOS 成像装置和图像采集、处理及调光控制系统组成。系统组成框图如图 1 所示。

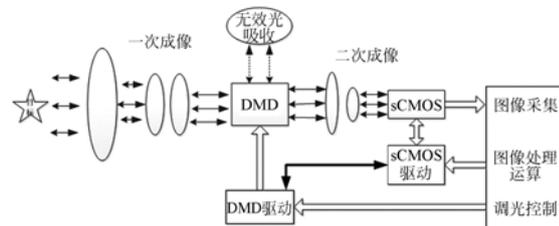


图 1 系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of system composition

该系统采用 DMD 作为空间光强调制器件,经过一次成像物镜光学系统,将高动态场景目标成像到 DMD 调光靶面,DMD 在系统区域调光驱动控制下,将无效光反射到无效光吸收装置中。有效光经过二次转置成像系统,将最终调制光强后的图像投射在 sCMOS 图像传感器的靶面上,然后利用 sCMOS 图像传感器作为高动态高灵敏度的成像装置,将最终获得的图像数据输出给图像采集系统,图像采集及恢复系统将采集到的图像进行处理,根据 sCMOS 相机采集到的灰度图像,经过调光算法运算,得到 DMD 的掩模图像,最后通过 DMD 驱动装置对 DMD 进行空间光强

调制控制,从而实现调光的闭环控制。图像恢复软件将 sCMOS 采集到的图像和 DMD 的掩模图像进行最终的高动态图像合成和恢复,获得最终区域调光后的高动态成像数据。

系统的光学设计如图 2 所示,场景经一次成像物镜垂直照射到 DMD 靶面上,DMD 将光线以 12° 反射经二次成像物镜照射到 sCMOS 传感器上,sCMOS 靶面与光线也有一定角度的倾斜。

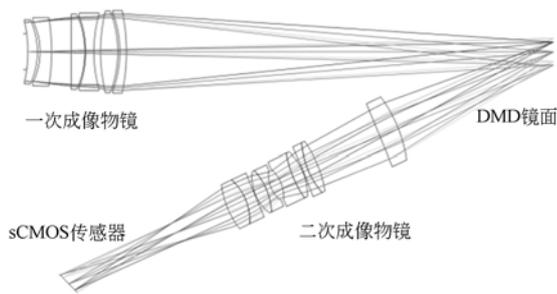
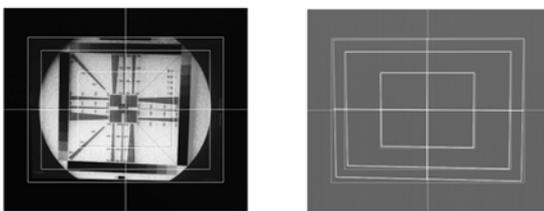


图 2 DMD 高动态调光系统光路图

Fig. 2 Light path of high dynamic dimming system with DMD

3 畸变原因分析

图 3 所示的两幅图像中,图 3(a)是系统拍摄到的实物标定模板,图 3(b)是将标准回字格投影到 DMD 上采集到的图像。图中白线所示的三圈回字格为参考标线,不存在畸变时,采集到的 DMD 投影图像应与参考标线重合。由图 3 不难看出,两幅图像都存在着一程度的畸变。



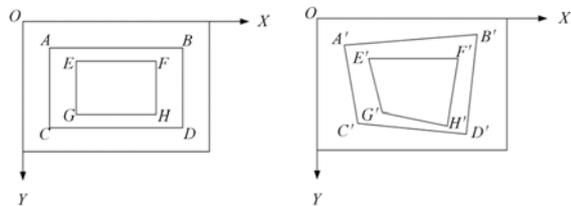
(a)实物标定板 (b)DMD 投影的图像
(a)Real calibration board (b) Image projected by DMD

图 3 图像畸变示意图

Fig. 3 Schematic diagram of image distortion

理想情况下,相机拍摄到的 DMD 图像应为矩形框,如图 4(a)所示,然而由于畸变的存在,实

际采集的图像如图 4(b)所示。可以看出,回字格边框存在着不同程度的倾斜,并且倾斜不关于中心对称。在传统的畸变校正中,畸变大体可以分为^[7]:径向畸变、偏心畸变、薄棱镜畸变和倾斜畸变。其中径向畸变是由于镜头存在形状缺陷而关于摄像机镜头的主光轴对称;偏心畸变是由于光学系统中的各透镜的光心并没有完全在同一条直线上产生的;薄棱镜畸变是由于透镜自身在加工和制作过程中的方法不完善导致的;不同于以上 3 种畸变,倾斜畸变是由于物体与相机之间存在着方位关系变化,使拍摄到的图像存在着一定程度的倾斜所导致的。



(a) 标准图像 (b)采集到的图像
(a) Standard image (b) Collected image

图 4 DMD 成像系统畸变示意图

Fig. 4 Schematic diagram of distortion for DMD imaging system

在基于 DMD 的高动态调光成像系统中,一次成像物镜和二次成像物镜均经过高精度的装调,精度已经达到了亚像素级。但是如图 2 所示的光路中,DMD 镜面与二次成像物镜光轴,二次成像物镜的光轴与 sCMOS 传感器都存在着一程度的倾斜。另外,DMD 是沿着微镜对角线方向翻转的。这两种特殊情况是造成系统畸变的主要原因,远大于成像物镜自身所造成的畸变。因此,在校正系统畸变的过程中,本文将整个光路系统作为一个整体进行校正,即校正 DMD 与光学系统耦合之后的畸变。

4 图像畸变模型

针对各类畸变,学者们做了许多相关研究,建立了许多数学模型^[8-10],使畸变可以通过多项表达式来表示。径向畸变 δ_r ,偏心畸变 δ_d ,薄棱镜畸变 δ_p 以及倾斜畸变 δ_t ,忽略高阶项分别可以表

示如下形式:

$$\begin{cases} \delta_{xr} = k_1 x(x^2 + y^2) \\ \delta_{yr} = k_2 y(x^2 + y^2) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \delta_{xd} = p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy \\ \delta_{yd} = p_2(x^2 + 3y^2) + 2p_1 xy \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \delta_{xp} = s_1(x^2 + y^2) \\ \delta_{yp} = s_2(x^2 + y^2) \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \delta_{xd} = a_0 x + a_1 y + a_2 xy + a_3 \\ \delta_{yd} = b_0 x + b_1 y + b_2 xy + b_3 \end{cases}. \quad (4)$$

采用如图 5 所示的标定模板,共三圈回字格和过中心的十字线,回字格关于图像中心对称,线宽为 1 pixel 且各边缘位置已知。为了使系统标定快速准确,并且不依赖于外场环境实现自校正设计,本文利用 DMD 投影出此标定模板,将传感器采集到的畸变图像作为系统的畸变图像,通过求解参数即可完成系统的校正过程。

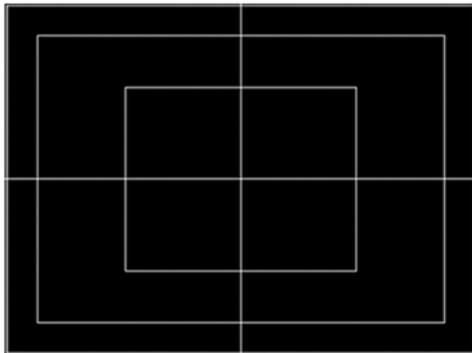


图 5 标定模板

Fig. 5 Calibration template

在畸变模型的研究过程中,首先仅考虑倾斜畸变,对每圈回字格的倾斜畸变分别校正;然后提取校正后的三圈回字格以及中心的角点坐标,与理想角点坐标建立映射函数 Δ 。实验发现其为关于横纵坐标对称的抛物线,与坐标所处的区域有关, Δ 即为区域修正参数,可表示为:

$$\begin{cases} \Delta_x = a_0 x^2 + a_1 x + a_2 \\ \Delta_y = b_0 y^2 + b_1 y + b_2 \end{cases}. \quad (5)$$

最后建立的畸变校正模型为:

$$\delta = \delta_i + \Delta. \quad (6)$$

忽略高阶项,展开多项式为:

$$\begin{cases} \delta_{mx} = a_0 x^2 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 \\ \delta_{my} = b_0 y^2 + b_1 x + b_2 y + b_3 xy + b_4 \end{cases}. \quad (7)$$

在 DMD 高动态成像系统中,设传感器接收到的畸变图像为 $f(x, y)$,理想图像为 $g(u, v)$,其中 (u, v) 与 (x, y) 分别表示畸变前后图像中同一个控制点的坐标,经过畸变,两组坐标不再相等,而是产生了一种映射关系,表示为:

$$\begin{cases} u = h_1(x, y) \\ v = h_2(x, y) \end{cases}. \quad (8)$$

在通常情况下, $h_1(x, y)$ 和 $h_2(x, y)$ 的映射关系用多项式即可逼近,结合 DMD 高动态成像系统特点,本文在 (u, v) 与 (x, y) 之间建立如下畸变模型,显式的表示为:

$$\begin{cases} u = a_0 x^2 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 \\ v = b_0 y^2 + b_1 x + b_2 y + b_3 xy + b_4 \end{cases}, \quad (9)$$

其中: a_i 和 b_i 为畸变系数,它们可以通过已知的控制点坐标待定系数求解。

5 图像畸变校正

5.1 校正系数求解

由公式(9)可知,图像畸变校正的过程就是推导畸变图像的像素点在理想图像中对应位置的过程。要找到其中的映射关系,关键就是要确定公式(9)中的畸变系数 a_i 和 b_i 。

根据式(9)可知,只需取 5 个点就可以求得畸变系数。但由于取到的角点可能会存在一定的误差,为了提高畸变参数的精度,利用最小二乘法,取多于 5 个点进行多项式拟合,求得最优解^[11]。

5.2 逆推校正

对畸变图像进行校正时,根据式(9)求得的系数遍历畸变图像上每一点,求得相应的 (u, v) 后,对其赋值。但是这种方法中,像素点的关系并不是一一对应的,畸变图像中的两个点在校正后可能映射到同一个点,使得有些点被多次赋值,而有些点未被赋值。针对这种情况,本文将标准图像与畸变图像的位置互换,即认为标准图像是由畸变图像畸变产生的^[12]。则公式(9)就变为:

$$\begin{cases} x = a_0 u^2 + a_1 u + a_2 v + a_3 uv + a_4 \\ y = b_0 v^2 + b_1 u + b_2 v + b_3 uv + b_4 \end{cases}. \quad (10)$$

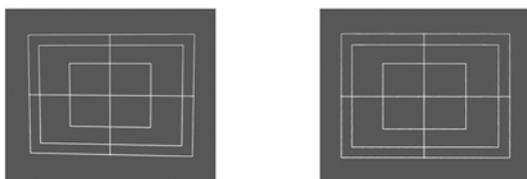
利用公式(9)遍历标准图像中的每一个点 (u, v) , 将畸变图像中 (x, y) 所对应的像素值赋给点 (u, v) 。这种方法可以保证校正后图像的每个点都被赋值, 且仅被赋值一次, 从而有效地避免了图像噪声, 保证图像的平滑。

5.3 图像插值

根据公式(9)从标准图像推导出的畸变图像中对应的坐标往往不是整数, 为了获取相应的像素值, 常采用灰度插值法来为像素点赋值。常用的灰度插值方法有最近邻法, 双线性插值法, 三次样条插值法等等^[13,14]。最近邻插值算法最简单, 它将离它映射到的位置最近的输入像素的灰度值作为插值结果。对于二维图像, 最近邻插值法在待测样点周围 4 个相邻像素点中选择距离其最近的一个相邻点的灰度值作为待测样点的像素值。双线性插值要经过三次插值才能获得最终结果, 它是对最近邻插值法的一种改进, 先对两水平方向进行一阶线性插值, 然后再在垂直方向上进行一阶线性插值。三次样条插值可使插值得到的函数更加光滑。不仅考虑到周围 4 个直接相邻像素点灰度值的影响, 还考虑到它们灰度值变化率的影响。它的计算精度高, 得到的边缘更加平滑。故本文采用三次样条插值方法来为像素点赋值。

6 实 验

令一束平行光垂直入射到 DMD 高动态调光系统的镜头上, 将图 5 所示标定模板显示在 DMD 上, 传感器采集到的图像如图 6(a)所示。提取图像中的各角点坐标, 精确到亚像素级, 接着, 将它们代入式(9)计算畸变参数, 并用最小二乘法求得



(a) 畸变图像 (b) 校正图像
(a) Distorted image (b) Corrected image

图 6 图像校正结果

Fig. 6 Image correction results

最优解。根据求得的畸变参数遍历标准图像, 将所得的图像进行高斯滤波得到最后的图像。图 6 (b)为校正后的模板图像。

将畸变校正前后的图像角点与其理想坐标进行误差分析, 如表 1 所示。

表 1 畸变前后误差分析

Tab. 1 Error analysis of distortion before and after corrections

畸变误差	校正误差	畸变误差	校正误差
5.83	0.00	5.66	1.00
11.18	1.00	7.07	0.00
30.48	0.00	8.94	1.00
4.47	1.41	5.10	1.41
11.40	1.41	6.71	1.00
23.43	1.41	8.25	1.41
1.00	1.41	1.00	0.00
2.24	1.00	7.07	1.00
10.77	1.41	9.06	1.00
5.83	1.00	2.83	0.00
5.10	1.41	5.66	1.00
5.10	1.41	10.20	0.00
7.07	0.00		
平均误差		8.06	0.87

可以看出畸变图像平均像素误差在 8 pixel, 最大时能达到 30 pixel, 修正后平均误差小于 1 pixel, 达到了系统像素级调光的要求。最大误差仅为 1.41 pixel, 此时校正后的点与理想点的位置关系是斜 45° 对角线。

改变回字格的大小, 令 DMD 投影如图 7 所示的回字格。

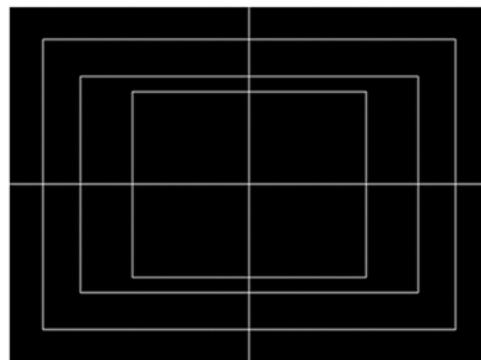


图 7 改变尺寸的模板

Fig. 7 Template after changing size

重新提取校正前后的图像角点坐标,进行误差分析,结果如表 2 所示。

表 2 改变模板尺寸后畸变校正前后误差分析

Tab. 2 Analysis of errors with and without distortion corrections after changing template size

畸变误差	校正误差	畸变误差	校正误差
5.66	0.00	9.22	1.00
11.70	1.00	24.41	1.41
9.43	1.00	3.00	1.00
9.85	1.00	11.66	0.00
5.39	1.00	9.06	1.00
5.39	1.00	11.00	1.00
5.39	1.00	9.22	0.00
12.53	0.00	12.08	1.00
2.83	1.41	6.71	1.00
12.37	1.00	6.08	1.00
7.07	1.00	13.42	1.41
17.00	0.00	5.66	1.41
1.41	1.41		
平均误差		9.10	0.88

通过对比发现,两组不同大小的回字格经校正后,畸变度量基本一致,校正后的畸变误差为系统误差。

利用所求参数对系统进行校正后,拍摄的实际景物如图 8 所示。经验证其精度满足系统像素级调光要求。

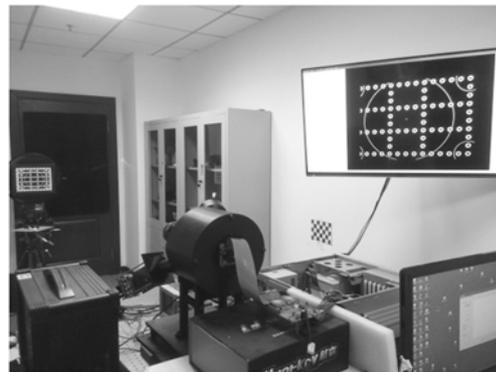


图 8 实际系统校正结果

Fig. 8 Correction results of actual system

7 结 论

在基于 DMD 的像素级区域调光高动态范围成像系统这一新领域,针对其由于光学系统设计以及镜头自身等因素造成的独特畸变这一新问题,提出了一种基于区域的畸变模型,建立了一种不依赖于外界的系统自校正方法。与传统的校正方法相比,该畸变模型简单,可以有效校正系统中的倾斜畸变、径向畸变和偏心畸变,通过设计的标定模板可以快速进行畸变校正,并且能够很直观地判定校正后的精度。实验证明,本方法可以有效校正 DMD 高动态成像系统的畸变,并将精度控制在一个像元以内,满足系统后续处理的要求。

参考文献:

- [1] 修吉宏,黄浦,李军,等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1365-1373.
XIU J H, HUANG P, LI J, *et al.*. Radiometric calibration of large area color CCD aerial mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1365-1373. (in Chinese)
- [2] 张雷,丁亚林,张洪文,等. 基于单帘快门的数字相机调光系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1265-1271.
ZHANG L, DING Y L, ZHANG H W, *et al.*. Adjustable exposure system for digital camera based on single curtain type shutter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1265-1271. (in Chinese)
- [3] 王延杰,陈怀章,刘艳滢,等. 数字微镜器件在高动

态辐射场景成像探测系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2508-2517.

WANG Y J, CHEN H ZH, LIU Y Y, *et al.*. Application of DMD to high dynamic scene image detection system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2508-2517. (in Chinese)

- [4] 陈怀章,王延杰,孙宏海,等. DMD 结合图像传感器的高动态场景成像探测[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3402-3409.

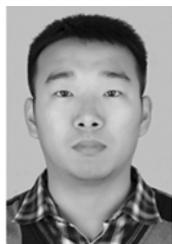
CHEN H ZH, WANG Y J, SUN H H, *et al.*. High dynamic range imaging detection based on DMD and image sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3402-3409. (in Chinese)

- [5] 吴国栋. 离轴三反时间延迟积分 CCD 相机内方位元素和畸变的标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 462-467.

WU G D. Calibration of inner orientation parameters

- and distortion for three-mirror off-axis TDICCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 462-467. (in Chinese)
- [6] 胡浩,梁晋,唐正宗,等. 显微立体视觉小尺度测量系统的标定[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 1985-1994.
HU H, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Calibration of stereo microscope measurement systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 1985-1994. (in Chinese)
- [7] 贾丹. 摄像机现场标定算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
JIA D. *Study on Algorithm of on-the-Job Camera Calibration*[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. (in Chinese)
- [8] 黄军辉,王昭,薛琦,等. 基于有理函数式镜头畸变模型的摄像机标定[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0508001.
HUANG J H, WANG ZH, XUE Q, *et al.*. Calibration of camera with rational function lens distortion model[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(5): 0508001. (in Chinese)
- [9] 姚娜,林招荣,任超锋,等. 一种适合摄像机非线性畸变校正的畸变模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2014(2): 171-178.
YAO N, LIN ZH R, REN CH F, *et al.*. A distortion model suitable for nonlinear distortion correction of digital video camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014(2): 171-178. (in Chinese)
- [10] 陈卫兵. 实时图仿真中畸变模型的分析与建立[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(6): 168-171.
CHEN W B. Distortion model analysis and establishment for real-time image simulation[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(6): 168-171. (in Chinese)
- [11] 邹乐强. 最小二乘法原理及其简单应用[J]. *科技信息*, 2010(23): 282-283.
ZOU L Q. Simple application and principle of least square method [J]. *Science & Technology Information*, 2010(23): 282-283. (in Chinese)
- [12] 牛建军,刘上乾,姚荣辉,等. 高准确度光电成像测量系统图像畸变校正算法[J]. *光子学报*, 2006, 35(9): 1317-1320.
NIU J J, LIU SH Q, YAO R H, *et al.*. Algorithm for image correction in high precision imaging measurement system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(9): 1317-1320. (in Chinese)
- [13] 符祥,郭宝龙. 图像插值技术综述[J]. *计算机工程与设计*, 2009, 30(1): 141-144, 193.
FU X, GUO B L. Overview of image interpolation technology [J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, 30(1): 141-144, 193. (in Chinese)
- [14] 行薇. 图像插值技术在图像处理中的应用[M]. 长春: 长春理工大学, 2012.
XING W. *The Application of Image Interpolation Technology in Image Processing*[M]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

作者简介:



吴培(1990—),男,河北衡水人,博士研究生,2008年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事图像处理、高动态调光成像等方面的研究。E-mail: wupei210@mail.ustc.edu.cn

导师简介:



王延杰(1963—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事实时图像处理、电视跟踪和自动目标识别技术的研究。E-mail: wangyj@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:李自乐)

(版权所有 未经许可 不得转载)