

# 光学全息图像的校正与再现识别

汤林<sup>1</sup> 陶少华<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中南大学物理与电子学院, 湖南 长沙 410083  
<sup>2</sup> 中南大学物理与电子学院 超微结构与超快过程研究所, 湖南 长沙 410083)

**摘要** 当印制在商品、证件和文档等物品上的光学全息图被拍摄或复制时,由于光学成像质量或拍摄条件的影响,采集的全息图像会产生畸变。据此,提出了一种全息图失真校正的方法。该方法首先运用图像处理技术,提取出所需要的全息图目标场景,然后在被提取出的全息图上确定全息图场景的边界,并在边界上自动搜索到4个顶点和4个中点的位置以及相对应的理想点的位置,最后进行投影失真校正和非线性失真校正。与其他图像畸变校正方法相比,该方法无需准备高精度标定模板,且校正和识别过程中只需用到一幅目标全息图像。实验证明,该方法能够很好地识别畸变的光学全息图,且具有效率高、快捷、识别效果好的优点。

**关键词** 全息术;光学全息图;图像畸变;图像识别;图像解密

**中图分类号** O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.060901

## Image Correction and Reconstruction of Optical Holograms

Tang Lin<sup>1</sup> Tao Shaohua<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China  
<sup>2</sup> Institute of Super Microstructure and Ultrafast Process, School of Physics and Electronics,  
Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

**Abstract** Images captured from optical holograms printed on goods, documents, personal identity cards, etc. would be distorted due to the imaging quality of the optical system and the influence of shooting conditions. A distortion correction method for the captured optical holograms is proposed. Firstly, an image pre-processing technique is used to extract the target hologram and the boundary of the target hologram is determined. Then four vertexes and midpoint positions of the hologram and the corresponding ideal points can be sought automatically. The holograms with projection distortion and nonlinear distortion are corrected by using different polynomial models. Compared with the other methods, the proposed one is simpler and faster, as it does not need the high-precision calibrating module and deals with an object's hologram only in calibrating and recognizing process. The experiments show that the corrected holograms can be recognized clearly. The proposed method has the advantages of high efficiency, fast speed and high-recognition rate.

**Key words** holography; optical hologram; image distortion; image recognition; image decryption

**OCIS codes** 090.1760; 090.1000; 090.1995; 090.2870

## 1 引言

近年来,光学全息技术在图像加密/解密、信息存储、信息显示等领域得到广泛的应用<sup>[1~5]</sup>,如光学全息图已用于商品防伪、证件加密以及金融信息隐藏等多方面。当用照相机或者扫描仪对打印在商品、证件和文档等物品上的全息图进行采集、复制时,由于成像系统的质量、拍摄环境以及拍摄过程中人为因素的影响,使采集到的数字全息图像产生失真或畸变。若直接用此数字全息图进行计算机再现<sup>[6]</sup>,则再现图像会相当模糊甚至无法识别。特别地,在对已加密的全息图进行恢复时,必须使已恢复的全息图与密钥全息图具有相同

收稿日期: 2013-01-24; 收到修改稿日期: 2013-03-06; 网络出版日期: 2013-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(61178017)和湖南省自然科学基金重点项目(11JJ2039)资助课题。

作者简介: 汤林(1987—),男,硕士研究生,主要从事光学全息图恢复方面的研究。E-mail: tanglin09@163.com

导师简介: 陶少华(1970—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光学信息处理方面的研究。E-mail: eshtao@csu.edu.cn

的尺寸和像素,且加密像素与密钥像素值需一一对应。但是,由于图像像素大小、图像质量和冗余背景信息等多种因素,会使 CCD 采集的图像失真,无法直接用于全息图的数字加密和解密。

目前,国内外还没有专门针对全息图畸变校正的研究,但对于普通图像的畸变校正研究较多,主要可分为两类。第一类是采用一些标定模板的方法,如平面网格图、同心圆环和点阵图等,根据模板上特征点的位置与其理想点之间的对应关系结合高阶多项式模型或神经网络模型等来确定其畸变参数,然后对其进行校正<sup>[7~12]</sup>。但是,高精度模板在制备和维护过程中需要较高的费用,且一旦对模板取样则只能对在该模板取样时的特定环境下所拍摄的图像实施校正才有意义,因此该方法的实用性受到限制,且无法实时应用。第二类是无需标定模板,但需靠多幅图像点之间的对应关系并利用 Kruppa 方程<sup>[13]</sup>、共面方程<sup>[14]</sup>等进行标定。一般地,这类方法需对被拍摄的物体采集几十幅图像才能进行校正。因此,其校正过程比较繁琐,实用性也不高。更重要的是,应用上述两类方法校正拍摄的全息图时计算量比较大,而且校正后的全息图因冗余信息的存在或者全息图边缘信息的缺失导致无法再现全息图的隐藏信息。此外,由于加密全息图识别的要求更加严格,利用上述方法更加无法精确恢复本来信息,因此即使拥有密钥全息图,也难以对其进行解密。

为此,本文提出了一种专门针对拍摄的全息图进行校正的方法。该方法在整个校正过程中无需制备高精度模板来提前对摄像机进行标定,也不需要从不同角度采集多幅图像进行校正。本方法只需使用一幅拍摄的全息图像就可自动对该图像进行恢复校正和识别。

## 2 全息图校正原理

本文提出的全息图像自动校正方法的流程为:首先对拍摄的一幅全息图像预处理,提取出需要的全息图目标场景,然后对其进行投影畸变校正,最后进行非线性畸变校正。

### 2.1 全息图预处理

一般地,在所拍摄的图像中,除了所需的全息图信息外还包含其他多余的信息,如边框、背景等。这些冗余信息不利于全息图的再现或解密,因此需要预先把全息图从场景中提取出来。鉴于全息图与其他图像相比连通性比较好,本文提出了一种提取全息图的方法。首先将采集的全息图像二值化(对于彩色图像先灰度化,再二值化),并采用 Canny 算子<sup>[15]</sup>对其做边缘提取。然后用一个  $2 \times 2$  的正方形结构元素做一次形态学膨胀运算。膨胀是将与物体接触的所有背景点合并到该物体中,使其边界向外扩张的过程。由于全息图为条纹状结构且排列比较紧密,经膨胀后会使得全息条纹融合到一起。然后用 8 邻域连通图像,连通运算能对二值图像中各个分离部分进行标记,将全息图与图像中其他无用信息区分开来。由于图像经边缘提取及膨胀后,目标全息图部分的连通区较其他部分要大,因此,选择一个最大连通区,并将其其他连通区的像素值置为 0,就可准确定位到目标全息图。然后,分别对其进行水平方向和垂直方向的投影,找到目标场景在整幅图像的起始点的像素  $(x, y)$  并求出目标场景的长度和宽度。最后根据求出的参数对原图像做裁剪运算就能将全息图提取出来。假设 CCD 采集的全息图为输入图像,提取出的全息图目标场景为输出图像,则其预处理流程图如图 1 所示。

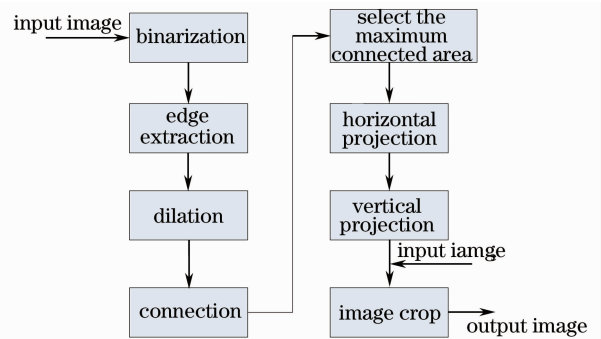


图 1 预处理流程图

Fig. 1 Flow chart of pre-processing for a distorted hologram

### 2.2 投影畸变校正

当摄像机光轴未与所拍摄物垂直时会引起投影失真,导致拍摄图像发生倾斜、变形等。投影失真的数学模型为<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} u = ax + by + cxy + d \\ v = ex + fy + gxy + h \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $x, y$  为输入点像素坐标,  $u, v$  为基准点像素坐标,  $a \sim h$  为投影失真参数。采集的全息图像经预处理后的图像用图 2 表示,矩形  $ABCD$  为裁剪后得到的图像,四边形  $EFHG$  是全息图目标场景图像。由(1)式可知要

求出  $a \sim h$  这 8 个参数至少需 4 对控制点,因此,只要在全息图中找到  $A \sim H$  这 8 个顶点便可对其实施校正。点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为图像的 4 个顶点,其像素坐标可直接求取。为确定  $E \sim H$  4 个全息场景顶点,需先找到全息场景的四条边界。将图像  $ABCD$  二值化,对图像的每一列从上往下进行遍历直到搜索到第一个像素值为 0 为止,这样便可确定上边界  $EF$ 。在某些情况下,得到的上边界可能是  $GEF$  或  $EFH$ ,即两条边界连在一起,但只需仍将其作为上边界存储即可。同理可寻得全息场景的其他三条边界。在上边界  $EF$  上找与点  $A$  距离最小的点设为全息场景的一个顶点  $E'$ 。用类似的方法可找到全息场景的另外 3 个顶点  $F'$ 、 $G'$ 、 $H'$ 。将全息场景的四个顶点设为输入点,图像中  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  4 个点设为标准点便可求出投影失真参数。搜索到的全息场景 4 个顶点与其实际的顶点之间可能存在约 0.5 pixel 的误差,对其循环校正两次便可消除。

### 2.3 非线性畸变校正

由于摄像机光学镜头透镜组的成像质量不完善,拍摄的图像会发生弯曲,出现非线性失真。所拍摄的图像除了有投影畸变以外,还可能存在着一定程度的非线性畸变。对于非线性失真校正,Tsai<sup>[17]</sup>曾指出引入过多的非线性参数不仅不能提高精度,反而会引入解的不稳定。因此,本文只考虑径向畸变,其数学模型<sup>[18]</sup>如下式所示:

$$\begin{cases} x' = x + kx(x^2 + y^2) \\ y' = y + ky(x^2 + y^2) \end{cases} \quad (2)$$

式中所用的坐标系为摄像机坐标系; $x, y$  为图像理想点的坐标; $x', y'$  为图像实际点坐标; $k$  为径向畸变参数。对于图像非线性畸变,本文提出的校正方法如下:

- 1) 确定经投影失真校正后的全息图像场景的边界(其方法与在投影失真校正中确定边界的方法一样)。
- 2) 在图像上生成两条对角线和两条中线,并分别找到对角线与中线在图像上的顶点  $M_i(x_i, y_i)$ ,其中  $i = 1, 2, \dots, 8$ 。将这 8 个点从上往下依次标记为  $M_1 \sim M_8$ 。
- 3) 分别自动搜索每条对角线与全息场景边界的交点以及每条中线与全息场景边界的交点。由于边界是不连续的,若无交点,则可用  $3 \times 3$  的模块由对角线或中线从顶点处往图像中心方向进行遍历,遇到第一个交点时结束,得到交点  $M'_i(x'_i, y'_i)$ ,其中  $i = 1, 2, \dots, 8$ 。交点  $M'_i$  的标记顺序与  $M_i$  相同。
- 4) 逐个求取点  $M_i(x_i, y_i)$  与点  $M'_i(x'_i, y'_i)$  之间的水平距离或垂直距离  $\delta_i$ , 有

$$\delta_i = \begin{cases} |x'_i - x_i| & i = 1, 2, 3, 6, 7, 8 \\ |y'_i - y_i| & i = 4, 5 \end{cases} \quad (3)$$

为使校正后的全息图像边缘信息不丢失取其最大值  $\delta_m$ 。则与  $M'_i(x'_i, y'_i)$  相对应的理想点坐标为

$$\begin{aligned} N_1(x_1 + \delta_m, y_1 + \delta_m), N_2(x_2 + \delta_m, y_2), N_3(x_3 + \delta_m, y_3 - \delta_m), N_4(x_4, y_4 + \delta_m), \\ N_5(x_5, y_5 - \delta_m), N_6(x_6 - \delta_m, y_6 + \delta_m), N_7(x_7 - \delta_m, y_7), N_8(x_8 - \delta_m, y_8 - \delta_m). \end{aligned}$$

- 5) 将理想点  $N_i$  与实际点  $M'_i$  的像素坐标转为图像坐标系中的坐标,代入(2)式,即可求出径向畸变参数  $k$ ,并取其平均值作为最终的  $k$  值。

## 3 实验仿真

通过用 CCD 采集显示或打印在不同物质上的全息图进行实验模拟。首先采用 Gerchberg-Saxton (GS) 算法通过计算机生成一幅原始全息图<sup>[6]</sup>(二值图像),图像大小为  $418 \text{ pixel} \times 418 \text{ pixel}$ ,如图 3(a)所示。对全息图上的像素值做傅里叶变换实现数字再现<sup>[6]</sup>,再现结果显示为“1234”,如图 3(b)所示。

将图 3(a)显示在电脑屏幕上,然后用分辨率为  $1200 \text{ pixel} \times 1600 \text{ pixel}$  的 CCD 对其拍摄,采集到的图像如图 4(a)所示。拍摄的图像存储为一数字全息图,其灰度值为  $0 \sim 255$ 。从图 4(a)中可以看到图像除了含有

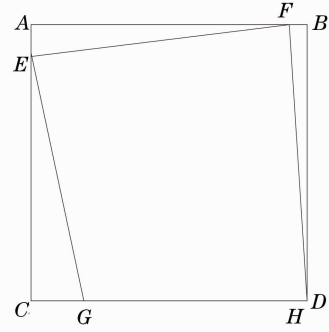


图 2 全息场景示意图

Fig. 2 Holographic scene sketch

全息图原始信息外,还包含了许多无用信息如电脑显示器、窗帘等。其次,图像中还存在投影失真,出现了倾斜畸变,使得全息图像上点的位置发生了改变。这些冗余信息以及全息图上点位置的变化将会影响全息图的数字再现,使其无法识别。尤其是对加密的全息图,由于在解密时是将全息图与密钥图做运算,因此全息图上像素点的位置必须与密钥图像上像素点的位置相对应才能解密,如果全息图上点位置排列错位将无法解密。将图 4(a)进行傅里叶变换,其再现结果如图 4(b)所示。可见,再现结果基本识别不出“1234”,故需对全息图进行校正。

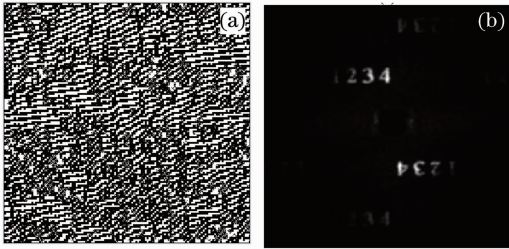


图 3 (a) 计算机生成的全息图;(b) 再现结果

Fig. 3 (a) A computer-generated hologram;

(b) reconstruction result

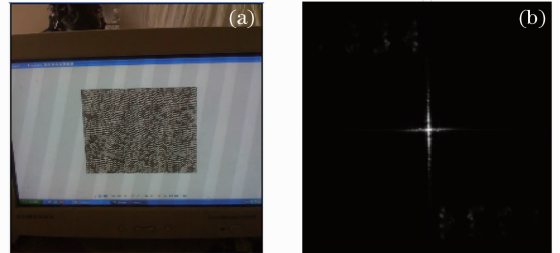


图 4 (a) CCD 采集屏幕上的全息图;(b) 再现结果

Fig. 4 (a) Hologram captured from a computer screen;

(b) the reconstruction result

为了对图 4(a)进行校正,首先需将图像进行预处理,裁剪掉边框以外的信息,完好地提取出全息图目标场景,且不引起全息图信息丢失。预处理后得到的图像如图 5(a)所示。将图 5(a)与图 3(a)相比,可以发现投影失真使得图 5(a)中的全息图上点的位置发生了变化。因此,需对图 5(a)利用本文的投影畸变校正方法进行校正。校正后得到的图像如图 5(b)所示,从中可以看到图像的倾斜畸变得以消除。因图像中基本上不存在非线性失真,所以并未对其进行非线性失真校正。对图 5(b)进行傅里叶变换,其光强分布结果如图 5(c)所示。从图中可以看到经校正后的全息图,其再现图像能很好地识别。

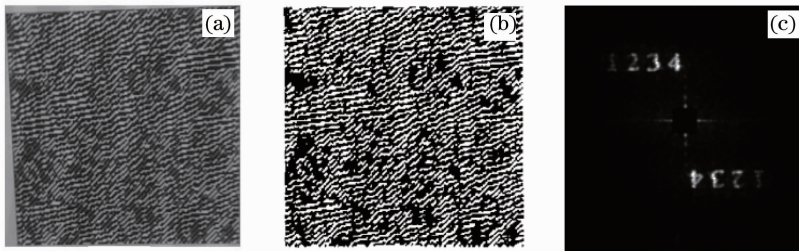


图 5 校正与再现全息图。(a) 预处理结果;(b)投影失真校正结果;(c) 再现结果

Fig. 5 Correction and reconstruction of hologram. (a) Pre-processed result; (b) correction for the projection distortion;

(c) reconstruction result

为了进一步验证本文全息图像校正方法的可行性,将图 3(a)打印在纸张上,然后用分辨率为  $2592 \text{ pixel} \times 1944 \text{ pixel}$  的 CCD 进行采集,得到的灰度图像(灰度值  $0 \sim 255$ )如图 6(a)所示。图 6(a)中除了含无用信息、梯形畸变外,全息图还因纸张的变形以及镜头畸变等原因出现了非线性失真,比图 4(a)畸变更复杂。同样地,如果直接对其进行数字再现,结果如图 6(b)所示。尽管图 6(b)中全息图隐藏的信息的轮廓能被模糊地识别出来,但仍无法辨别,并且,若图 6(a)被加密,由于图像存在畸变和冗余信息,将不能直接解密得到再现信息。

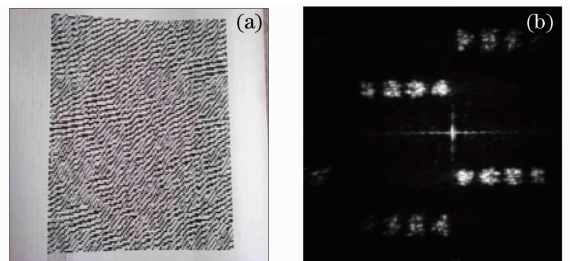


图 6 (a) CCD 采集打印在纸张上的全息图;(b) 再现结果

Fig. 6 (a) A hologram acquired by CCD and

printed on a paper; (b) reconstruction result

首先对图 6(a)进行预处理,得到的图像如图 7(a)所示,可见目标全息图被裁剪出来。但是,图 7(a)中全息图像呈梯形状且边界有凹陷,既有投影畸变还存在非线性畸变。根据校正流程先将其做投影失真校正后得到

图 7(b)。由图 7(b)可以看出全息图梯形畸变得到了校正,但是图像边缘的凹陷仍然存在。若不校正直接做傅里叶变换,结果还是不能辨别。利用前述的非线性畸变校正方法对图 7(b)进行非线性失真校正,求出  $\delta_m = 20$ , 径向畸变参数  $k$  如表 1 所示。经非线性模型校正后的图像如图 7(c)所示,从图中可知全息图边缘信息没有缺失。对图 7(c)数字再现得到的结果如图 7(d)所示。可见,校正后的全息图能清晰地再现出隐藏的信息。

表 1 径向畸变参数

Table 1 Radial distortion parameters

$k_1/10^{-7}$	$k_2/10^{-7}$	$k_3/10^{-7}$	$k_4/10^{-7}$	$k_5$	$k_6/10^{-7}$	$k_7/10^{-7}$	$k_8/10^{-7}$
2.5578	2.5578	1.9476	2.5319	0	5.7838	6.5550	4.2848

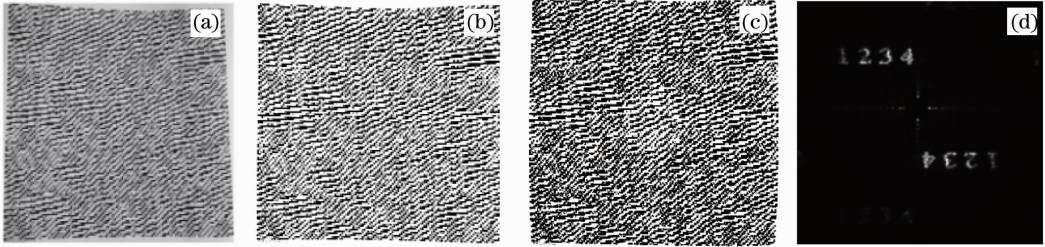


图 7 全息图校正与识别。(a) 预处理结果;(b) 投影失真校正结果;(c) 非线性失真校正结果;(d) 识别结果

Fig. 7 Correction and recognition of hologram. (a) Pre-processed result; (b) correction for the projection distortion; (c) correction for the nonlinear distortion; (d) reconstruction result

用均方误差(MSE)来衡量图像恢复效果。设  $f(i, j)$  ( $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M$ ) 为原始图像,  $f'(i, j)$  ( $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M$ ) 为要评价的图像。则 MSE 为

$$E_{\text{MS}} = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [f(i, j) - f'(i, j)]^2. \quad (4)$$

将图 3(a)、4(a)、5(b)、6(a)、7(c)统一为  $418 \text{ pixel} \times 418 \text{ pixel}$  的二值图像,以图 3(a)即计算机生成的原始全息图作为参考图像。分别计算 CCD 采集的显示在电脑屏幕上的全息图校正前后相对于图 3(a)的 MSE,则图 4(a)的 MSE 为 0.6781,相应的校正后的图像即图 5(b)的 MSE 为 0.2459。图 4(a)经校正后误差减小了 43.22%。分别计算 CCD 采集的打印在纸张上的全息图校正前后相对于图 3(a)的 MSE,则图 6(a)的 MSE 为 0.6964,相应的校正后图像即图 7(c)的 MSE 为 0.2780。图 6(a)经校正后误差降低了 41.84%。同时,校正后的全息图的像素点恢复较好,更接近原始全息图上的像素点,从而使经校正后的全息图能被加密/解密。由此可知,经校正后全息图的失真较小,图像质量得到改善。将校正前的全息图数字再现结果与校正后的比较,可以看到,校正后的全息图的数字再现图像更清晰,再现效果更好。

## 4 结 论

通过对全息图像上特征点的搜索,利用校正模型可直接对 CCD 拍摄的全息图像的畸变(投影畸变和非线性畸变)实施校正,从而避免了制备昂贵、高精度的标定模板,且只需一幅全息图像即可校正。实验表明,校正后全息图的边缘信息不会产生失真,再现图像识别率高。因此,本文的校正方法可实际应用于数字全息图,而且操作简单易行,算法运行速度快。

## 参 考 文 献

- 1 Bahram Javidi, Takanori Nomura. Securing information by use of digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 28~30
- 2 Xi Sixing, Sun Xin, Liu Bing *et al.*. New image encryption technology of image based on computer generated hologram[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(4): 040902
- 3 席思星, 孙欣, 刘兵等. 基于计算全息的双随机相位图像加密技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(4): 040902
- 4 J. F. Heaue, M. C. Bashaw, L. Hesselink. Encrypted holographic data storage based on orthogonal-phase-code multiplexing[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(26): 6012~6015
- 5 Chen Daqing, Zhou Hao, Tao Zhi *et al.*. Fourier computer-generated hologram digital watermarking with nonlinear amplitude limiting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0207002

- 陈大庆, 周 皓, 陶 智 等. 非线性限幅傅里叶计算全息的数字水印方法[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0207002
- 5 Wang Hui. Development status of digital holography and its application in 3D display and detection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(8): 19~25
- 王 辉. 数字化全息及其在三维显示和检测中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(8): 19~25
- 6 Shaohua Tao. A practical holographic encryption/decryption technique[C]. Optics InfoBase Conf. Biomedical Optics, 2012. JM3A. 57
- 7 Wang Hongzhi, Li Meijing, Zhang Liwei. The distortion correction of large view wide-angle lens for image mosaic based on openCV[C]. 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, 2011. 1074~1077
- 8 K. Vijayan Asari, Sanjiv Kumar. A new approach for nonlinear distortion correction in endoscopic images based on least squares estimation[J]. *IEEE Trans. Medical Imaging*, 1999, **18**(4): 345~354
- 9 Li Jinhui, Han Huangpu. Calibrating aberrations and visual angles in the CCD imaging optical system[J]. *J. Xi'an Technological University*, 2012, **32**(2): 99~102
- 李晋惠, 韩黄璞. CCD 光学系统成像畸变量与视场角的标定[J]. 西安工业大学学报, 2012, **32**(2): 99~102
- 10 Chao Zhang, P. James. Nonlinear distortion correction in endoscopic video images[C]. IEEE International Conference on Image Processing, 2000. 439~442
- 11 Junhee Park, Seong-Chan Byun. Lens distortion correction using ideal image coordinates[J]. *IEEE Trans. Consumer Electronics*, 2009, **55**(3): 987~991
- 12 Wang kena, Zou Beiji, Huang Wenmei. A distorted image correction method based on neural networks[J]. *J. Image and Graphics*, 2005, **10**(5): 603~607
- 王珂娜, 邹北骥, 黄文梅. 一种基于神经网络的畸变图像校正方法[J]. 中国图象图形学报, 2005, **10**(5): 603~607
- 13 Lei Cheng, Hu Zhanyi, Wu Fuchao. A novel camera self-calibration technique based on the Kruppa equations[J]. *Chinese J. Computers*, 2003, **26**(5): 587~597
- 雷 成, 胡占义, 吴福朝. 一种新的基于 Kruppa 方程的摄像机自标定方法[J]. 计算机学报, 2003, **26**(5): 587~597
- 14 Zhang Zhengyu, Huang Shijie, Luo Chuan *et al.*. Nonlinear distortion correction of camera based on coplanar condition equations[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0115002
- 张征宇, 黄诗捷, 罗 川 等. 基于共面条件的摄像机非线性畸变自校正[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0115002
- 15 J. Canny. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **8**(6): 679~698
- 16 Zhang Zheng, Wang Yanping, Xue Guixiang. Digital Image Processing and Computer Vision—Visual C++ and Matlab Realization[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010. 128~129
- 张 铮, 王艳平, 薛桂香. 数字图像处理与机器视觉—Visual C++与 Matlab 实现[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010. 128~129
- 17 R. Y. Tsai. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[C]. IEEE Conference of Computer Vision and Pattern Recognition, 1986. 364~374
- 18 Yang Biwu, Guo Xiaosong. Overview of nonlinear distortion correction of camera lens[J]. *J. Image and Graphics*, 2005, **10**(3): 269~274
- 杨必武, 郭晓松. 摄像机镜头非线性畸变校正方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2005, **10**(3): 269~274