

基于上下文的黑白散斑图像压缩

李东晖*

重庆大学计算机学院, 重庆 400030

摘要 利用动态激光散斑的统计特性,研究了黑白散斑图像的无失真压缩问题,设计了黑白散斑图像无失真编码器。编码器由图像切割、位移估计、预测、上下文形成与熵编码组成,主要特点包括散斑位移估计的快速算法、基于散斑统计特性的优化预测以及自适应算术编码。介绍了编码器的工作过程以及对应的工作原理,并进行了实验验证,实验结果显示,黑白散斑图像无失真编码器的压缩性能取得了较大的提高。

关键词 图像处理; 图像压缩; 黑白激光散斑图像; 散斑相关

中图分类号 TN919.81

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.121010

Context-Based Bi-Level Speckle Image Compression

Li Donghui*

College of Computer, Chongqing University, Chongqing 400030, China

Abstract The problem of lossless compression of bi-level speckle images is studied with the statistical properties of dynamic speckle. A bi-level speckle image distortion coder is designed, which consists of image cutting, displacement estimation, prediction, context formation and entropy coding. The main features include the fast algorithm of speckle displacement estimation, the optimized prediction based on the statistical characteristics of speckle, and the adaptive arithmetic coding. The working process and principle of the coder are introduced. The experimental results show that the compression performance of the bi-level speckle image distortion-free encoder is greatly improved.

Key words image processing; image compression; bi-level speckle image; speckle correlation

OCIS codes 100.2000; 100.2960; 110.2960

1 引言

激光散斑图像是数字激光散斑测量法^[1-3]产生的一种特殊的数字图像,可分为灰度散斑图像与黑白散斑图像,对灰度散斑图像进行处理可获得黑白散斑图像,例如水平切法^[4]、阈值法^[5]等。测量过程中会产生大量的数据,例如,若每毫秒采集一幅大小为 500 pixel×500 pixel、每像素 8 bit 的散斑图像,那么,在 1 s 内共产生 2 Gbit 的数据,但是经过图像压缩之后,数据量可减少约 38%^[6],图像压缩能够降低数据量,因此具有较大的实用价值。

激光散斑图像压缩可分为灰度图像压缩与黑白图像压缩,灰度散斑图像无失真编码器相比 JPEG_LS 编码器^[7]的压缩效率可提高 24%^[8],利用高精

度的散斑位移测量方法,压缩性能进一步提高了 11%^[6]。黑白图像与灰度图像有各自的压缩标准,灰度图像压缩标准包括 JPEG、JPEG2000 和 JPEG_LS 等,黑白图像压缩标准有 JBIG、T.80 和 T82 等,这些压缩标准广泛应用于计算机、消费电子与电信领域,但是,它们对黑白散斑图像的压缩效率很低,本文着重研究提高压缩效率,并设计了黑白散斑图像无失真编码器(CBSIC)。黑白散斑图像与灰度散斑图像具有相似的相关特性与预测模型,它们的预测模型仅运算不同,黑白图像进行异或运算,而灰度图像进行减法运算^[6,8];黑白图像是一种小符号集信源,因此可使用算术编码^[9],而灰度(彩色)图像位移估计方法不能直接应用于黑白图像,因此,对于黑白激光散斑图像,可使用统计方法进行散斑位移估计^[4-5]。

收稿日期: 2018-06-04; 修回日期: 2018-06-21; 录用日期: 2018-07-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费(CDJZR10180011)

* E-mail: lidonhui@163.com

2 编码器描述

图1为CBSIC的结构示意图,CBSIC由5个部分组成,即图像切割处理、散斑预测、散斑位移估计、上下文形成和熵编码。由于解码是编码的逆,因此图1没有包含解码。编码器工作过程:1)灰度图像

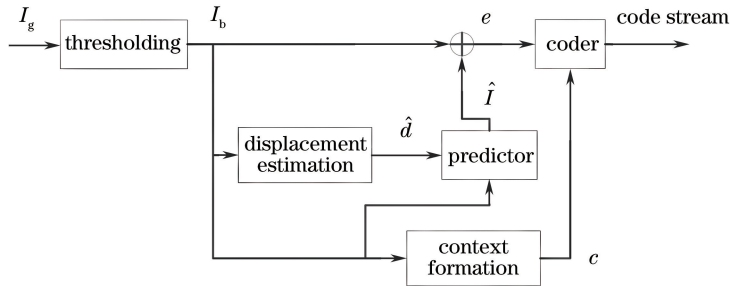


图1 CBSIC 的结构

Fig. 1 Structure of CBSIC

使用上下文建模能够提高编码效率,上下文建模需要定义上下文模板,通过上下文模板选择邻居像素,通常来说,上下文模板包含的像素数量要适中,CBSIC的上下文模板如图2所示,其中“P”表示编码像素,“X”表示构成上下文的像素,由于黑白图像像素值为0或1,因此10个“X”总共有1024个不同的取值,上下文模板包含的像素数量若太大则增加计算与存储要求,反之则会降低编码效率,因此,需要对其进行优化,CBSIC使用了JBIG定义的上下文模板^[10]。熵编码使用了Q编码器^[11],Q编码器是一种广泛使用于黑白图像编码的二进制自适应算术编码器。

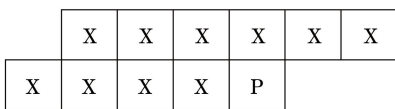


图2 上下文模板

Fig. 2 Template for the context

3 散斑预测

3.1 散斑统计特性

图3为散斑产生示意图,若入射光源为高斯相干光源,被照射目标做面内移动,那么散斑亮度的归一化时空相关函数可以表示为^[12]

$$r(\mathbf{X}, \tau) = \exp\left(-\frac{|\mathbf{v}|^2 \tau^2}{\omega^2}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 \omega^2}{\lambda^2 R^2} |\mathbf{X} - \sigma \mathbf{v} \tau|^2\right), \quad (1)$$

式中: \mathbf{X} 是观察平面上两点之间的位移; τ 为时间间隔; \mathbf{v} 为目标的运动速度; ω 为光束在目标平面的宽

I_g 经过图像切割处理之后转换为黑白散斑图像 I_b ;

2) 计算散斑位移估计 $\hat{\mathbf{d}}$, 散斑预测器使用散斑位移估计对图像进行预测 \hat{I} , 预测残差 e 为原始图像与预测图像的差值;3) 熵编码器基于上下文对预测残差进行编码并输出码流。

度; λ 为光束波长; R 为目标平面到观察平面的距离; $\sigma=1+R/\rho$,其中 ρ 为光束在目标平面的波前曲率半径。

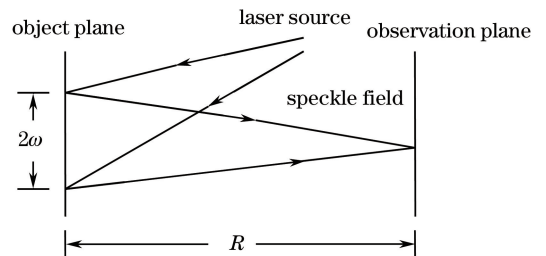


图3 散斑的产生

Fig. 3 Formation of speckle

在(1)式中,若 $\mathbf{X} = \sigma \mathbf{v} \tau$, 则 $r(\mathbf{X}, \tau)$ 取极大值且极大值为

$$r(\sigma \mathbf{v} \tau, \tau) = \exp\left(-\frac{|\mathbf{v}|^2 \tau^2}{\omega^2}\right) = \exp\left(-\frac{|\mathbf{X}|^2}{\sigma^2 \omega^2}\right). \quad (2)$$

3.2 散斑预测

若 I_i 和 I_{i-1} 分别表示相隔时间为 τ 采集到的两幅散斑图像,那么,由(2)式可知,两点 $I_i(\mathbf{p})$ 和 $I_{i-1}(\mathbf{p} - \sigma \mathbf{v} \tau)$ 之间的相关函数为极大值,因此,可用前一刻采集的激光散斑图像对当前像素进行预测即

$$\hat{I}_i(\mathbf{p}) = I_{i-1}(\mathbf{p} - \hat{\mathbf{d}}), \quad (3)$$

式中 $\hat{I}_i(\mathbf{p})$ 为 $I_i(\mathbf{p})$ 的预测, $I_{i-1}(\mathbf{p})$ 为发生位移前采集的散斑图像的像素, $\hat{\mathbf{d}}$ 为散斑位移估计。

对于黑白图像,预测误差可表示为

$$e(\mathbf{p}) = I_i(\mathbf{p}) \oplus \hat{I}_i(\mathbf{p}). \quad (4)$$

4 散斑位移估计

由(3)式可知,散斑预测需要位移估计 $\hat{\mathbf{d}}$,位移估计可通过统计方法获得。

把灰度图像 $I_g(\mathbf{p})$ 转换为黑白图像 $I_b(\mathbf{p})$,即

$$I_b(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1, & I_g(\mathbf{p}) \geq \bar{I}_g, \\ 0, & I_g(\mathbf{p}) < \bar{I}_g, \end{cases} \quad (5)$$

式中 \mathbf{p} 为像素位置, \bar{I}_g 为灰度图像的平均亮度。

令 I_i 与 I_{i-1} 分别表示散斑位移前后产生的黑白图像,用 S_i 与 S_{i-1} 分别表示 I_i 与 I_{i-1} 中值为1的像素集合,即

$$S_i = \{\mathbf{p} \mid I_i(\mathbf{p}) = 1\}, \quad (6)$$

$$S_{i-1} = \{\mathbf{p} \mid I_{i-1}(\mathbf{p}) = 1\}, \quad (7)$$

得到位移集合为

$$S_d = \{\mathbf{d} \mid \mathbf{d} = \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{i-1}, \mathbf{p}_i \in S_i, \mathbf{p}_{i-1} \in S_{i-1}\}. \quad (8)$$

为了计算散斑位移,定义

$$h: S_d \rightarrow N, \quad (9)$$

式中 N 为有限正整数集合,表示位移发生的次数。

则散斑位移估计为

$$\hat{\mathbf{d}} = \{\mathbf{d} \mid \mathbf{d} \in S_d, h(\mathbf{d}) \text{ is the maximum}\}, \quad (10)$$

式中 h 可通过两种方法获得。

方法一^[4-5]。对于 $\mathbf{d}_i \in S_d$:

$$h(\mathbf{d}_i) = 0, \quad (11)$$

$$h(\mathbf{d}_i) = h(\mathbf{d}_i) + 1, \text{ if } \mathbf{d} = \mathbf{d}_i. \quad (12)$$

首先, h 被初始化为0,然后,若 $\mathbf{d} = \mathbf{d}_i$ 出现一次,则 $h(\mathbf{d}_i)$ 增1,(12)式的计算规模为 $O(L^2)$,其中 L 表示图像包含的像素的数量。

方法二。 h 表示为

$$h(\mathbf{d}) = \sum_{\mathbf{p}} I_i(\mathbf{p}) \wedge I_{i-1}(\mathbf{p} - \mathbf{d}). \quad (13)$$

首先对 I_{i-1} 做平移,然后 I_{i-1} 与 I 进行与运算,(13)式的计算规模为 $O(L)$,与方法一相比,方法二计算规模小、较为快速。

5 实 验

图4所示为散斑图像采集系统,平面物体被固定在可控平台上,并随着平台一起移动。激光器(波长为633 nm,输出功率为10 mW)发出的激光照射到目标粗糙表面后被散射,在不远处的 CCD 照相机可拍摄到激光散斑图像,CCD 照相机具有 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 阵列,像素大小为 $7.5 \mu\text{m} \times 7.5 \mu\text{m}$ 。散斑最小移动距离为 $0.1 \mu\text{m}$,散斑大小约为 $20 \mu\text{m}$ 。图像采集卡 V512 对 CCD 照相机拍摄到的激光散斑图像进行采集,并将采集图像以 bmp 的格式存储在计算机中,以便进一步分析处理。

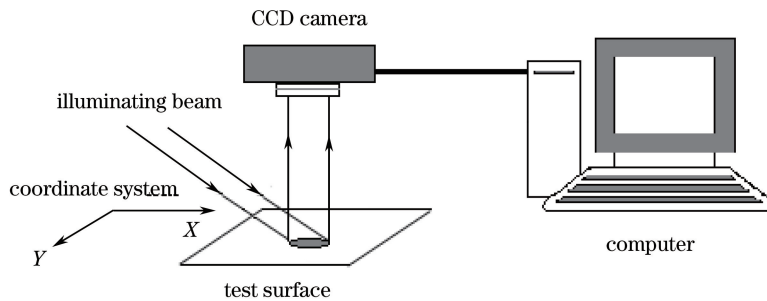


图4 实验系统示意图

Fig. 4 Schematic of experimental system

对灰度图像进行切割处理得到的黑白图像即压缩图像,如图5所示,图像大小为 $375 \text{ pixel} \times 375 \text{ pixel}$ 。为了验证CBSIC的压缩性能,将CBSIC与JBIG^[10]进行对比,JBIG是一种高性能的黑白图像无失真压缩标准。表1为实验结果,第1列(d_x, d_y)表示散斑位移,其中 d_x 与 d_y 分别为水平与垂直方向的移动距离;第2~4列 $r_{\text{CBSIC}}, r_{\text{JBIG}}, r_{\text{JBIG}}^*$ 分别为CBSIC、无预测的JBIG与有预测的JBIG压缩黑白散斑图像所取得的比特率;第5列是CBSIC对

JBIG的压缩编码增益 $G = r_{\text{JBIG}} - r_{\text{CBSIC}}/r_{\text{JBIG}} \times 100\%$;最后一行是编码器对所有位移图像压缩的平均比特率。由表1可知,CBSIC较之JBIG获得了平均58.3%的压缩编码增益,较大的增益表明CBSIC的压缩性较好。从散斑统计特性可知,散斑时间相关性大于空间相关性,CBSIC的预测是基于时间相关性,而JBIG的预测则是基于空间相关性,因此,CBSIC预测更加准确,预测误差较小,编码效率更高。由表1第2列可知,随着散斑位移的增加,

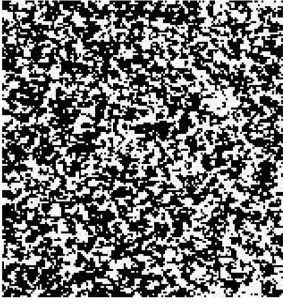


图5 黑白激光散斑图像

Fig. 5 A bi-level speckle image

表1 所提出的 CBSIC 的压缩性能

Table 1 Compression performance n of the proposed CBSIC

Displacement (d_x, d_y)	$r_{\text{CBSIC}} / (\text{bit} \cdot \text{pixel}^{-1})$	$r_{\text{JBIG}} / (\text{bit} \cdot \text{pixel}^{-1})$	$r_{\text{JBIG}}^* / (\text{bit} \cdot \text{pixel}^{-1})$	$G / \%$
(7.5, 0)	0.2134	0.8372	0.8397	74.51
(15.0, 0)	0.2705	0.8351	0.8383	67.61
(22.5, 0)	0.3125	0.8312	0.8337	62.40
(15.9, 15.9)	0.3256	0.8361	0.8372	61.06
(21.2, 21.2)	0.6198	0.8371	0.8393	25.96
Average	0.34836	0.83534	0.83764	58.30

6 结 论

基于上下文的 CBSIC 能够对黑白散斑图像进行有效压缩,压缩性能的提高主要来自于准确且快速的散斑位移估计算法、基于散斑统计特性的优化预测以及自适应算术编码。实验结果显示,与 JBIG 相比,CBSIC 的压缩性能提高了 58.3%,不但具有较好的压缩性能,而且计算复杂度较低。

参 考 文 献

- [1] Cai H Y, Guo Z D, Huang Z H, *et al.* Phase modulation method to suppress decorrelation phenomenon in speckle pattern interferometry measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(4): 041203.
蔡怀宇, 郭震东, 黄战华, 等. 抑制散斑干涉测量中退相关的相位调制方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(4): 041203.
- [2] Zhao M L, Ma X, Zhang Z B, *et al.* Three-dimensional shape absolute measurement based on laser speckles[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0208001.
赵明路, 马骁, 张子邦, 等. 激光散斑三维形貌绝对测量技术[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0208001.
- [3] Zhao R, Sun P. A new method for deformation phase measurement by speckle correlation theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0612004.

压缩比特率随之增加。这个现象可从(2)式得以解释:相关函数极值随着位移增大而减少,预测准确性降低,导致编码效率降低。另外,由表1第3列可知,JBIG 的压缩比特率与散斑位移无关,这是由于 JBIG 的压缩性能仅取决于散斑空间特性。表1第4列对编码器进行了典型预测^[10],这是一种图像的行预测,在散斑随机分布特性下,相邻两行相同的可能性非常小,因此,典型预测并没有提高编码效率,反而由于添加冗余数据,增加了数据量,导致总编码效率降低。

赵冉, 孙平. 一种基于散斑相关理论测量变形相位的新方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0612004.

- [4] Takai N, Asakura T. Displacement measurement of speckles using 2D level-crossing technique [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(22): 3514-3519.
- [5] Li D H, Guo L, Qiu T. Digital speckle displacement measurement by a thresholding technique [J]. *Proceeding of SPIE*, 2006, 6150: 615059.
- [6] Li DH. Improved compression efficiency of lossless compression of laser speckle images by subpixel-accuracy displacement estimation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 631-636.
- [7] Weinberger M J, Seroussi G, Sapiro G. The LOCO-I lossless image compression algorithm: principles and standardization into JPEG-LS [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(8): 1309-1324.
- [8] Li D H. Lossless compression of digital speckle images based on speckle correlation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2): 484-487.
李东晖. 基于散斑相关的数字激光散斑图像无失真压缩[J]. *中国激光*, 2010, 37(2): 484-487.
- [9] Sayood K. *Introduction to data compression*. [M]. San Francisco: Morgan Kaufmann publishers, 2000.
- [10] International Organization for Standards/International Electrotechnical Commission. *Progressive bilevel image compression: ISO/IEC 11544[S/OL]*. [2018-06-04]. [https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-](https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso)

iec:11544:ed-1:v1:en.

- [11] Pennebaker W B, Mitchell J L, Langdon G G, *et al.*
An overview of the basic principles of the q-coder
adaptive binary arithmetic coder[J]. IBM Journal of

Research and Development, 1988, 32(11): 717-726.

- [12] Asakura T, Takai N. Dynamic laser speckles and
their application to velocity measurements of diffuse
object[J]. Applied Physics, 1981, 25(1): 179-194.