

文章编号: 0258-7025(2010)02-0484-04

基于散斑相关的数字激光散斑图像 无失真压缩

李东晖

(重庆大学计算机学院, 重庆 400030)

摘要 激光散斑图像压缩对降低数据存储量具有重要的意义。设计了一种激光散斑图像无失真编码器,它由激光散斑位移估计、像素预测和 Golomb 编码组成。首先估计散斑位移;然后,根据激光动态散斑相关函数设计预测模型,并以预测模型为基础进行像素预测;最后,对预测误差进行 Golomb 编码。该编码器的主要特点包括使用数字散斑相关方法估计散斑位移,以及基于动态散斑相关函数极值的时间预测。实验结果显示,在压缩激光散斑图像时,激光散斑图像无失真编码器在压缩性能方面取得了较大的提高。

关键词 激光技术;无失真压缩;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/CJL20103702.0484

Lossless Compression of Digital Speckle Images Based on Speckle Correlation

Li Donghui

(College of Computer, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract Compression of speckle images is significant to storage reduction of measurement systems. We propose a coder for lossless compression of laser speckle images, which is based on speckle displacement estimation, temporal prediction and the Golomb coding. Firstly, speckle displacements are estimated for each subblock. Next, according to correlation properties of dynamic speckle, we set up the prediction model which predicted current pixels model. Finally, prediction errors are coded by the Golomb coding. Key features of the proposed speckle image coder include the estimation of speckle displacement by digital speckle image correlation method and the prediction modeling based on the extremum of the dynamic speckle correlation function. Experimental results show that the proposed coder provides good improvement in compression coding efficiency of laser speckle images.

Key words laser technique; lossless compression; laser speckle image; speckle correlation

1 引 言

数字激光散斑相关方法(DSCM)是一种非常有用的光学测量技术,它主要用于对材料或者结构表面在外载或其他因素作用下的变形场进行测量,具有全场测量、非接触、光路相对简单以及对测量环境无特别要求等突出优点。该技术自从 20 世纪 80 年代初出现以来,在工程应用、固体力学问题研究以及材料性能分析等领域得到了越来越多的关注^[1~5]。然而,在实验阶段和一些应用中(如振动测量)往往要处理大量的散斑图像^[6,7],例如,如果系统产生 512 幅数字散斑图像,每幅散斑图像的大小为

512 bit \times 512 bit,那么总数据量约为 128 Mbit。对于系统产生的数字散斑图像可以将它们存储在计算机中,以便将来进一步地分析处理,在这种情况下就可能面临数据存储的问题,为了降低存储量,可以对散斑图像进行压缩。虽然图像的有失真压缩可以获得较大的压缩比,然而有失真压缩会造成图像失真,而图像失真会导致测量性能下降^[8],在一些应用中,例如高精度测量,这往往是不允许的。因此,需要使用图像无失真压缩技术对散斑图像进行压缩。

本文主要研究动态激光散斑的性质并设计数字激光散斑图像专用无失真编码器。信源建模是数据

收稿日期:2009-01-09;收到修改稿日期:2009-04-23

作者简介:李东晖(1973—),男,博士,讲师,主要从事图像处理及激光散斑测量等方面的研究。E-mail:liiyah@163.com

压缩的关键问题之一,在数据压缩中,数据是以一种预先定义的顺序(例如,自上而下从左到右的顺序)依次进行处理的,处理每个数据时,会用顺序在其前面的数据对其进行预测,并希望预测得越准确越好。在压缩激光散斑图像时,关注激光散斑亮度时空相关特性,而激光散斑亮度时空相关特性不但与目标的运动有关,而且也取决于光学系统的设置。在一定的光学设置下,可以观察到“平移”动态散斑,它具有如下性质:散斑场中的两点之间具有较大的时空相关性^[9]。根据激光散斑时空相关性建立预测模型,并以此为基础设计激光散斑图像无失真编码器。

2 激光散斑图像无失真编码器

数字激光散斑图像无失真编码器由散斑位移估计、时间预测和 Golomb 编码^[10]组成,如图 1 所示。在编码端,首先将散斑图像划分为互不重叠、大小相同的分块,并对每个分块进行散斑位移估计,如图 2 所示。分块中的向量表示散斑位移;然后用参考像素对当前像素进行预测;最后对预测误差进行 Golomb 编码。散斑位移估计与编码一起传送到解码端,可由预测误差、散斑位移估计和已经解码的参考散斑图像构造出与原始散斑图像完全相同的散斑图像。

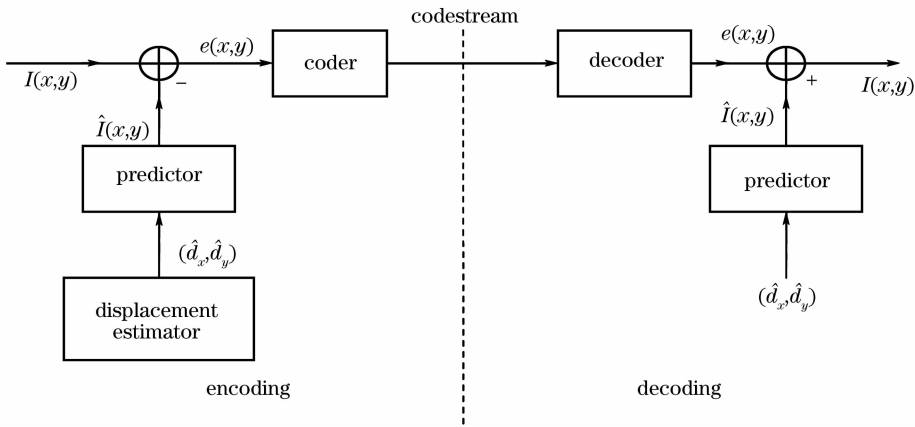


图 1 激光散斑图像的编解码

Fig. 1 Encoding and decoding speckle images

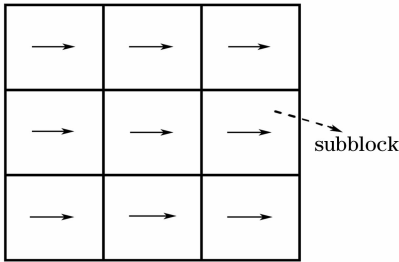


图 2 被划分成互不重叠、大小相同的散斑图像

Fig. 2 Speckle image which is divided into equal-size and non-overlapping subblocks

2.1 激光散斑位移估计

数字散斑相关方法通过分析发生位移前后的两幅散斑图像之间的相关系数而得到散斑位移估计,相关系数表示为^[11]

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}] \times [g(x_i^*, y_j^*) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x_i^*, y_j^*) - \bar{g}]^2}} \quad (1)$$

式中 f 和 g 分别表示发生位移前后的两幅数字散斑图像, \bar{f} 和 \bar{g} 为它们的平均亮度。

由(1)式计算得到的散斑相关系数分布具有主峰值高以及收敛速度快的特点,因而能够进行准确的散斑位移估计。

2.2 预测和编码

如图 3 所示,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^[9]

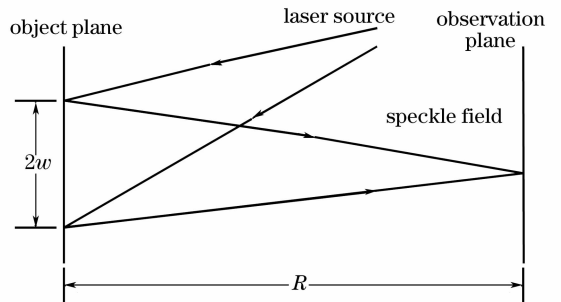


图 3 散斑的产生

Fig. 3 Formation of speckle

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

式中 \mathbf{X} 为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 4 显示一幅典型的激光散斑图像^[2]。

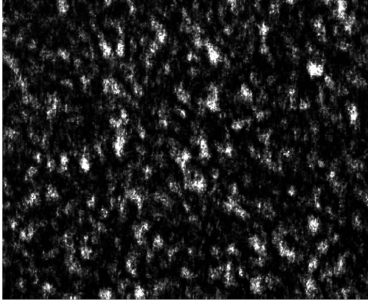


图 4 激光散斑图像

Fig. 4 Laser speckle image

在(2)式中, 令 $\tau = 0$, 则得到激光散斑空间相关函数

$$r(\mathbf{X}, 0) = \exp\left(-\frac{|\mathbf{X}|^2}{\Delta x^2}\right), \quad (3)$$

式中 $\Delta x = \frac{\lambda R}{\pi \omega}$, 相当于散斑大小, 表示激光散斑的空间相关性。

如果观察平面上的两点之间的位移为 \mathbf{X} , 它的方向和目标移动方向一致, 并且 $|\mathbf{X}| = \sigma |\mathbf{v}| \tau$, 那么 $r(\mathbf{X}, \tau)$ 取极大值且极大值为

$$r(\sigma \mathbf{v} \tau, \tau) = \exp\left(-\frac{|\mathbf{v}|^2 \tau^2}{\omega^2}\right) = \exp\left(-\frac{|\mathbf{X}|^2}{\sigma^2 \omega^2}\right). \quad (4)$$

若 I_i 和 I_{i-1} 分别表示相隔时间为 τ 采集得到的两幅激光散斑图像, 那么两点 $I_i(x, y)$ 和 $I_{i-1}[(x, y) - \sigma \mathbf{v} \tau]$ 之间的相关函数为极大值, 因此可以用前一时刻采集的激光散斑图像的像素对当前像素进行预测

$$\hat{I}_i(x, y) = I_{i-1}[(x, y) - (\hat{d}_x, \hat{d}_y)], \quad (5)$$

式中 $\hat{I}_i(x, y)$ 为当前像素 $I_i(x, y)$ 的预测, $I_{i-1}(x, y)$ 为前一时刻采集的散斑图像的像素, (\hat{d}_x, \hat{d}_y) 为当前像素所在分块的散斑位移估计。称 I_{i-1} 为 I_i 的参考图像, $I_{i-1}[(x, y) - (\hat{d}_x, \hat{d}_y)]$ 为 $I_i(x, y)$ 的参考像素。图 5 显示了(5)式所表示的像素预测。

预测误差 $e(x, y) = I_i(x, y) - \hat{I}_i(x, y)$ 。最后, 对预测误差 $e(x, y)$ 进行 Golomb 编码^[10, 12], Golomb 编码具有计算复杂度低的优点。

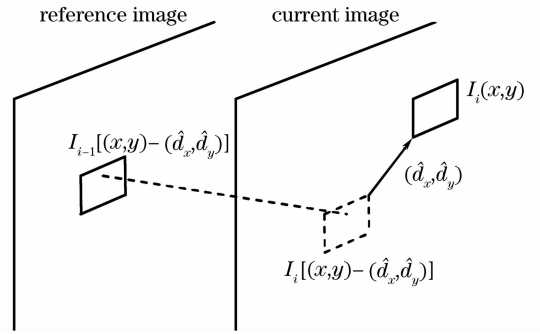


图 5 用参考像素预测当前像素

Fig. 5 Prediction of the current pixel by reference pixel

3 实验

为了验证激光散斑图像无失真编码器, 建立了一个光学和分析系统, 如图 6 所示。一个平面物体被固定在一个可控平台上并且可以随着平台一起移动。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之后被散射, 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 格式存储在计算机中, 以便于对其作进一步分析处理。

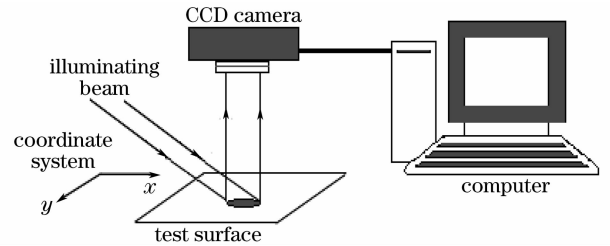


图 6 实验系统示意图

Fig. 6 Setup of experiment

用于编码的原始散斑图像大小为 $375 \text{ pixel} \times 375 \text{ pixel}$, 散斑图像分块大小为 $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$ 。每个分块用 6 bit 表示散斑位移(各用 3 bit 表示水平和垂直方向移动的距离), 这相当于增加 $6/(15 \times 15) = 0.0267 \text{ bit/pixel}$ 的附加信息, 可见增加的附件信息量很小。

为了验证本文设计的激光散斑图像无失真编码器, 分别对 6 种位移的激光散斑图像分别进行编码, 实验结果如表 1 所示。与 JPEG_LS 无失真编码器^[12](目前的数字图像标准无失真编码器)对激光散斑图像的压缩比特率 $k_{\text{JPEG_LS}}$ 比较, 本文设计的激

光散斑图像无失真编码器压缩比特率 k 的压缩性能提高率 $G = \frac{k_{\text{JPEG_LS}} - k}{k_{\text{JPEG_LS}}} \times 100\%$ 平均约为 24.6%。本文设计的编码器压缩激光散斑图像之所以能够获得较小的比特率, 主要是因为它以动态激光散斑相关函数的极大值为基础建立预测模型, 能够较为准确地对当前像素进行预测; 而 JPEG_LS 编码器使用的是 MED 空间预测器, 其预测准确性取决于激光散斑图像的空间相关性, 而激光散斑图像的空间相关性由散斑大小表示。

从(4)式及表 1 可见, 随着位移增大, 相关函数极大值减小, 预测准确度会降低, 而导致 k 增大。另外, 由于 JPEG_LS 编码器进行空间预测, 空间预测与散斑位移无关, 因而 $k_{\text{JPEG_LS}}$ 在各种散斑位移下近似相等。

表 1 激光散斑图像无失真编码器的压缩性能

Table 1 Lossless compression rate of laser speckle images

Displacement (d_x, d_y)	$k_{\text{JPEG_LS}}/(\text{bit/pixel})$	$k/(\text{bit/pixel})$	$G/\%$
(7.5, 0)	6.2508	4.2008	32.7963
(15.0, 0)	6.2398	4.6128	26.0751
(22.5, 0)	6.2301	4.8257	22.5427
(7.5, 7.5)	6.2388	4.4730	28.3041
(15.0, 15.0)	6.2422	4.8897	21.6676
(22.5, 22.5)	6.2506	5.2244	16.4182
Average	6.2421	4.7044	24.6340

4 结 论

自行设计了一种数字激光散斑图像无失真编码器, 编码器由散斑位移估计、时间预测和 Golomb 编码组成。准确的激光散斑位移估计和基于动态散斑相关函数极大值的预测使得编码器能够较为准确地进行像素预测。实验结果显示, 在压缩激光散斑图像时, 与 JPEG_LS 标准无失真编码器相比较, 设计的编码器的压缩性能取得了较大的提高 (G 平均约

为 24.6%), 设计的数字激光散斑无失真编码器不但具有较好的压缩性能, 而且具有较低的计算复杂度。

参 考 文 献

- 1 Fang Zhang, Wenyao Liu, Lin Xia *et al.*. Homomorphic partial differential equation filtering method for electronic speckle pattern interferometry fringes based on fringe density [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(3):210~213
- 2 M. Francon. *Laser Speckle and Applications in Optics* [M]. Henri H. Arsenaault transl.. New York: Academic Press, 1979
- 3 Qiu Tian, Guo Li, Li Donghui *et al.*. Digital speckle marginal correlation measuring method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1092~1096
邱 天, 郭 立, 李东晖 等. 数字散斑的边缘相关测量法 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1092~1096
- 4 Qiankai Wang. A new method of studying the statistical properties of speckle phase [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1):5~8
- 5 Yan Haitao, Wang Ming. Orientation of mouse using digital speckle correlation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3):467~471
闫海涛, 王 鸣. 数字散斑相关方法实现鼠标定位原理 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3):467~471
- 6 F. Chen, C. T. Griffen. Digital speckle interferometry: some developments and applications for vibration measurement in the automotive industry [J]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(5):1390~1397
- 7 Donghui Li, Li Guo. Kalman filtering techniques for reducing variance of digital speckle displacement measurement noise [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(8):453~456
- 8 J. Widjaja. Effects of image compression on digital specklegrams [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, **39**(4):501~506
- 9 T. Asakura, N. Takai. Dynamic laser speckles and their application to velocity measurements of diffuse object [J]. *Appl. Phys.*, 1981, **25**:179~194
- 10 S. Golomb. Run-length encodings (Corresp.) [J]. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 1966, **12**(3):399~401
- 11 Xing Dai, Yan Cheong Chan, Alex Chun Kwan So. Digital speckle correlation method based on wavelet-packet noise-reduction processing [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(16):3474~3482
- 12 M. J. Weinberger, G. Seroussi, G. Sapiro. The LOCO-I lossless image compression algorithm: principles and standardization into JPEG-LS [J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2000, **9**(8):1309~1324