

文章编号: 1002-2082(2008)02-0207-04

不同光照条件下 CCD 相机时间噪声 和空间噪声的研究

韩采芹^{1,2}, 李 华¹, 朱顺一¹, 沈忙作¹

(1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 四川理工学院, 四川 自贡 643000)

摘 要: 在用 CCD 相机进行目标探测时, 多数情况下目标的背景具有一定的照度, 这个照度会对探测结果产生影响。为了了解背景对探测结果的影响, 通过建立 CCD 相机三维噪声模型及其测试系统, 在不同光照条件下对 CCD 相机的时间噪声和空间噪声进行了测量与分析。给出了测试系统的结构框图和部分测试结果, 得到了对 CCD 输出质量产生主要影响的噪声以及时间噪声和空间噪声随光照度变化的规律。测试结果表明: 随着 CCD 相机光敏面光照度的提高, 空间噪声和时间噪声均升高, 符合 CCD 相机的实际性能。

关键词: CCD 相机; 时间噪声; 空间噪声; 三维噪声

中图分类号: TN206

文献标志码: A

Temporal noise and spatial noise of CCD camera at different illuminance

HAN Cai-qin^{1,2}, LI Hua¹, ZHU Shun-yi¹, SHEN Mang-zuo¹

(1. Institute of Optics and Electronics, CAS, Chengdu 610209, China;

2. Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: To study the influence of background on detection, a 3-D noise model and a measurement system were established. The temporal noise and spatial noise of CCD camera were measured and analyzed at different illuminances. The block diagram of the test system and some test results are given. The dominant noise which influences the output quality of CCD image was found, the dependence of temporal noise and spatial noise on illuminance was obtained. Measurement results indicate that the spatial noise and temporal noise increase with the increase of illuminance on the active area of CCD camera. It is consistent with the performance of CCD cameras.

Key words: CCD camera; temporal noise; spatial noise; 3-D noise

引言

噪声特性的评价是成像系统综合性能评价的重要环节^[1]。分析噪声特性可进一步深刻认识成像的特性, 为研制新型光电成像系统以及成像系统的质量评价提供切实可行的客观依据。CCD 相机信号产生的电噪声和光学噪声均被描述为时间域随

机过程和空间域随机过程, 所以在成像系统中, 图像噪声实际上应按时空域随机过程统一描述。成像系统在图像信号输出时伴随着各种噪声即时空同一的随机噪声^[2-9]。

自三维噪声模型建立以来, 人们就致力于时间噪声和空间噪声的研究, 但是这些都只是针对微光

CCD 器件。本文根据文献[10]中的图像噪声理论,提出在一定光照条件下,数字 CCD 相机的时空域三维图像噪声理论模型,并对数字 CCD 相机的空间噪声、时间噪声和平均时间噪声进行了分析和测量。

1 三维噪声测量模型

采集 CCD 相机输出端数据,然后对采集的数据按照三维噪声模型进行处理。设在一定均匀照明下,连续采集 T 帧具有 $X \times Y$ 个像素的图像。每一幅二维图像具有 X 行 Y 列,共 $X \times Y$ 个信号值, T 帧图像共有 $X \times Y \times T$ 个具有三维坐标的输出信号值(见图 1)。为区别于三维立体图,把这种图像称为三维结构图像。

其中任一点的坐标为 (x, y, t) , $x = 1, 2, \dots, X$; $y = 1, 2, \dots, Y$; $t = 1, 2, \dots, T$ 。任一点的信号

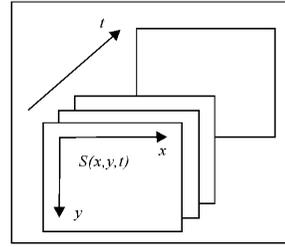


图 1 T 帧图像输出信号

Fig. 1 Output signal of T frame images

值记为 $S(x, y, t)$ 。

定义 $\bar{S} = \frac{1}{XYT} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T S(x, y, t)$, 为 T 帧图像的所有像素点输出信号灰度值的平均。

取 CCD 相机输出信号的均方差值表示总噪声,则噪声均方值 σ^2 为

取 CCD 相机输出信号的均方差值表示总噪声,则噪声均方值 σ^2 为

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{1}{XYT} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T (S(x, y, t) - \bar{S})^2 = \frac{1}{XYT} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T (S(x, y, t) - \bar{S}(x, y) + \bar{S}(x, y) - \bar{S})^2 = \\ &= \frac{1}{XYT} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T (S(x, y, t) - \bar{S}(x, y))^2 + \frac{1}{XYT} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T (\bar{S}(x, y) - \bar{S})^2 + \\ &= \frac{2}{XYT} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T (S(x, y, t) - \bar{S}(x, y))(\bar{S}(x, y) - \bar{S}) \end{aligned} \quad (1)$$

(1) 式中 $\bar{S}(x, y)$ 的物理意义为 T 帧图像在 (x, y) 点信号的时间平均值:

$$\bar{S}(x, y) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T S(x, y, t) \quad (2)$$

考虑到噪声在时间、空间水平和垂直方向是三维相互正交的,那么(1)式中各交叉项的乘积之和为零,因而(1)式可改写为

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{1}{XYT} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T (S(x, y, t) - \bar{S}(x, y))^2 + \\ &= \frac{1}{XYT} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T (\bar{S}(x, y) - \bar{S})^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $S(x, y, t) - \bar{S}(x, y)$ 为某一帧图像在 (x, y) 点信号值与 T 帧图像在 (x, y) 点信号平均值之差,体现的是时间域噪声特性。因此,在一定曝光量下,CCD 相机每个像素点的时间噪声为

$$\sigma_t^2(x, y) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (S(x, y, t) - \bar{S}(x, y))^2 \quad (4)$$

那么,在一定曝光量下,CCD 相机的平均时间噪声为

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{XY} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sigma_t^2(x, y) \quad (5)$$

(3) 式中 $\bar{S}(x, y) - \bar{S}$ 为 (x, y) 点 T 帧图像信号平均值与所有图像信号总平均值之差,体现了空间域噪声特性,那么空间噪声 σ_r^2 为

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{XY} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (\bar{S}(x, y) - \bar{S})^2 \quad (6)$$

运用上述公式可以得到某照度下图像输出信号的总平均值 \bar{S} , T 帧图像在 (x, y) 点信号的平均值 $\bar{S}(x, y)$, 时间噪声 $\sigma_t^2(x, y)$, 平均时间噪声 σ_t^2 , 空间噪声 σ_r^2 和总噪声 σ^2 。

2 测量系统

图 2 为 CCD 相机时间噪声和空间噪声测量系统原理框图。光源由 25 个发光二极管(LED)组成,用来提供均匀光场,测量得到光照度的不均匀性为 0.1%,时间稳定性为 0.74%。通过改变稳压电源的电压,从而在 CCD 相机光敏面处获得变化的光照度。CCD 相机和光照度计放在导轨上,测量时先将光照度计的探头放置在光源所对应的中心处,测出光照度,移走光照度计,在不改变光照度的情况下,再将待测 CCD 相机的光敏面放置在相同位置处。

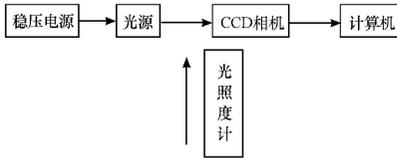


图2 CCD 相机时间噪声和空间噪声测量系统

Fig. 2 Diagram of temporal noise and spatial noise measurement system of CCD camera

CCD 相机输出的信号通过图像采集卡转换成数字信号后送入计算机,从而获得CCD相机在该

照度下各光敏元实际测得的灰度值。

3 时间噪声和空间噪声测量与分析

运用上述测试装置测试了不同光照条件下 Dalsa 相机的时间噪声和空间噪声。首先使CCD 相机无任何光输入,连续采集 100 帧图像;然后改变入射到 CCD 相机的光照度,连续采集 100 帧图像。采集完后根据(3),(4),(5)和(6)式分别计算 CCD 相机的平均时间噪声 σ_t^2 ,空间噪声 σ_r^2 和总噪声 σ^2 ,结果如表 1 所示。

表1 Dalsa 相机测试结果

Table 1 Tested results of Dalsa camera

| $H/(lx \cdot ms)$ | σ_t^2 | σ_r^2 | σ^2 | $H/(lx \cdot ms)$ | σ_t^2 | σ_r^2 | σ^2 |
|-------------------|--------------|--------------|------------|-------------------|--------------|--------------|------------|
| 0.000 | 1.019 | 1.214 | 2.233 | 12.070 | 12.046 | 229.094 | 241.140 |
| 0.209 | 1.437 | 1.914 | 3.351 | 14.375 | 14.253 | 332.837 | 347.090 |
| 0.753 | 1.911 | 2.366 | 4.277 | 15.462 | 15.456 | 385.088 | 400.544 |
| 2.420 | 3.420 | 10.438 | 13.858 | 17.372 | 17.095 | 487.543 | 504.638 |
| 3.827 | 4.783 | 24.886 | 29.669 | 19.211 | 18.977 | 581.987 | 600.964 |
| 5.168 | 5.947 | 42.747 | 48.694 | 21.461 | 20.891 | 746.335 | 767.226 |
| 7.323 | 7.804 | 86.449 | 94.253 | 22.499 | 14.397 | 559.026 | 573.423 |
| 8.482 | 8.869 | 115.112 | 123.981 | 23.989 | 2.592 | 19.438 | 22.030 |
| 10.729 | 10.992 | 185.207 | 196.199 | 25.787 | 0.002 | 0.974 | 0.976 |

注: H 为曝光量; σ_t^2 为平均时间噪声均方值; σ_r^2 为空间噪声均方值; σ^2 为总噪声。

从测试结果可以得出以下结论:曝光量为零时,平均时间噪声均方值和空间噪声均方值都很小。随着光照度的增大,平均时间噪声均方值和空间噪声均方值也随着增大,但是空间噪声均方值比平均时间噪声均方值增大得快,所以对 CCD 图像质量产生主要影响的噪声是空间噪声。当光照度增大到 CCD 相机的信号接近饱和的时候,平均时间噪声均方值和空间噪声均方值都快速减小。

图3是在 12.070 lx · ms 曝光量下时间噪声均方值 $\sigma_t^2(x, y)$ 的三维分布。它的 z 轴表示所在像点

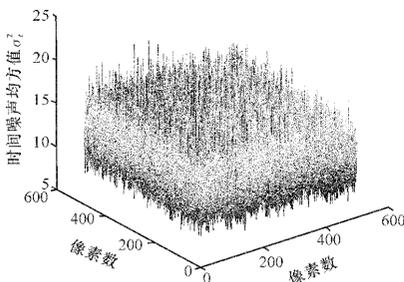


图3 时间域噪声三维结构图

Fig. 3 Three-dimensional structure of noise in time domain

时间域噪声的均方值,而且图中每一点代表此点在所在的行列坐标点上 CCD 相机对应位置所具有的时间域噪声均方值情况。从图中可看出,时间噪声均方值在像面上是比较均匀的。

由(6)式可看出,空间噪声是用 CCD 相机的响应不均匀性来描述的。图4是在 12.070 lx · ms 曝光量下 100 帧图像平均信号的三维分布。从图中可看出,每个像素点的平均信号是不一样的,即 CCD 相机的响应是不完全均匀的。

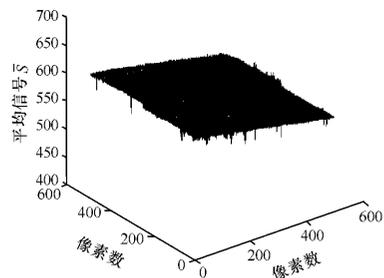


图4 平均信号三维结构图

Fig. 4 Three-dimensional structure of mean signal

4 结论

本文采用发光二极管产生均匀光场。在实验室内,根据成像系统噪声理论,对 CCD 相机器件进行了评价,得到较为满意的结果,而且具有很好的重复性。这种方法不但能评价科学级 CCD 相机噪声,对普通 CCD 相机也完全适用。本工作对进一步研究 CCD 相机噪声与曝光量的关系具有实际意义。

参考文献:

[1] 李华,沈忙作. 高温条件下数字 CCD 相机噪声特性研究[J]. 光电工程, 2005, 32(增刊):104-108.

LI Hua, SHEN Mang-zuo. Research of noise characteristic of digital CCD camera in high temperature environment [J]. Opto-Electronic Engineering, 2005,32(sup):104-108. (in Chinese)

[2] 孙玉杰,汪岳峰,牛燕雄. 电视跟踪系统视频信噪比测试研究[J]. 光电子·激光, 2003, 14(14): 430-431.

SUN Yu-jie, WANG Yue-feng, NIU Yan-xiong. Study on testing video signal to noise ratio of television tracking system [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2003,14(14):430-431. (in Chinese)

[3] 李升才,金伟其,张长泉. 微光成像系统三维噪声测量极其分析[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(5): 439-442.

LI Sheng-cai, JIN Wei-qi, ZHANG Chang-quan. The 3-D noise measurement and analysis of low-light-level imaging system[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2005,25(5):439-442. (in Chinese)

[4] 张伟,汪岳峰,雷鸣. 像增强器三维噪声测试技术[J]. 军械工程学院学报, 2002,14(1):29-32.

ZHANG Wei, WANG Yue-feng, LEI Ming. Noise measuring technology of imaging intensifier with three dimension [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2002, 14(1): 29-32. (in Chinese)

[5] 李永远,谢小平. CCD 输出信号处理[J]. 应用光学, 1997,18(1):21-23.

LI Yong-yuan, XIE Xiao-ping. Processing of CCD output signal[J]. Journal of Applied Optics,1997,18(1):21-23. (in Chinese)

[6] 张伟,汪岳峰,董伟. 利用帧积分法去除微光图像噪声研究[J]. 应用光学, 2002,23(3):28-29.

ZHANG Wei, WANG Yue-feng, DONG Wei. Low-light-level image processing with the method of frame integral[J]. Journal of Applied Optics, 2002, 23(3):28-29. (in Chinese)

[7] 张伟,汪岳峰,董伟. 用光电倍增管测量微光像增强器噪声[J]. 应用光学, 2002,23(3):26-27.

ZHANG Wei, WANG Yue-feng, DONG Wei. Testing of image intensifier noise with multiplier phototube[J]. Journal of Applied Optics, 2002,23(3):26-27. (in Chinese)

[8] D'AGOSTINO J, WEBB C. 3-D analysis framework and measurement methodology for imaging system noise[J]. SPIE,1991,1488:110-121.

[9] BAI Lian-fa, GU Guo-hua, CHEN Qian, et al. 3-D test and analysis on time space SNR of low-light-level camera[J]. SPIE,2000,4223:178-182.

[10] 张保民. 成像系统分析导论[M]. 北京:国防工业出版社,1992.

ZHANG Bao-min. Introduction of imaging system analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1992. (in Chinese)