

CCD 噪声标定及其在边缘定位中的应用

丁晓华 李 由* 于起峰 冯卫东

(国防科大航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 成像过程中的 CCD 噪声将给图像测量结果带来误差, 因此能否有效地抑制这些噪声是提高测量精度的关键。分析了 CCD 暗电流噪声和随机噪声的特性, 并针对各自特性提出了相应的噪声标定技术以及抑制方法。结合精密图像测量任务, 分别研究了暗电流噪声和随机噪声对一维边缘定位、结构光相移法相位提取的影响。通过仿真和实验, 比较了噪声抑制前后的测量结果, 结果表明, 噪声抑制后边缘定位精度有很大的提高, 证实了该 CCD 噪声标定技术和抑制方法的有效性和必要性。

关键词 光学测量; 边缘定位; CCD 噪声; 噪声标定; 噪声抑制

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A

CCD Noise Calibration and its Application in Edge Location

Ding Xiaohua Li You Yu Qifeng Feng Weidong

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The CCD noise from imaging process brings error to the results of optical measurement, so that noise suppression is a key to improve measurement accuracy. The characteristic of dark current noise and random noise is analyzed, and noise calibration and suppression techniques to each component are proposed respectively. The influence of CCD noise on optical measurement tasks, such as edge location and phase extraction of structural-light phase-shift method, is investigated. Simulation and experimental results show that the edge location accuracy is greatly improved by means of CCD noise calibration and suppression. Therefore, the validity and necessity of the proposed method is well confirmed.

Key words optical measurement; edge location; CCD noise; noise calibration; noise suppression

1 引 言

电荷耦合器件(Charge coupled device, CCD)作为成像设备被广泛地应用于精密工业图像检测、图像测量等以图像分析处理为基础的领域。在成像过程中 CCD 噪声将污染图像, 给图像测量带来误差。由于在精密工业检测如工件变形、位移检测中, 要求非常高的图像测量精度(有时甚至需要达到 0.01 pixel), 在进行精密图像测量前对 CCD 相机的噪声特性和噪声水平进行标定^[1], 综合噪声对图像测量影响大小得出测量的有效精度, 判定 CCD 相机

能否满足测量精度要求^[2]。根据标定的 CCD 噪声模型采用相应的降噪方式可以降低噪声对精密测量的影响, 使普通廉价的 CCD 相机能够应用在精密图像测量项目中。同时 CCD 噪声参量也是供图像分析算法如阈值选取^[3]、维纳滤波^[4]、卡尔曼滤波、滤波器设计等参考的重要参量。

本文研究了三台相机(“MVS1000”, “AVT Marlin131b”, “AVT Dolphin”)的噪声模型以及各种性质噪声对图像测量的影响, 列举了针对特定噪声的标定方法和抑制^[5]方法, 给出了实验结果。

收稿日期: 2007-03-23; 收到修改稿日期: 2007-08-14

作者简介: 丁晓华(1978—), 江西兴国, 博士研究生, 主要从事精密图像测量方面的研究。

E-mail: jackding1978@163.com

导师简介: 于起峰(1958—), 男, 山东威海人, 教授, 博士生导师, 主要从事实验力学和摄影测量方面的研究。

E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

* 通信联系人。E-mail: liyou@nudt.edu.cn

2 CCD 成像模型

常用 CCD 成像公式为

$$s(x, y) = tG(x, y)I(x, y) + B(x, y) + D(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

式中 $s(x, y)$ 为图像 (x, y) 点的灰度值, $B(x, y)$ 为灰度偏置, t 为曝光时间, $D(x, y)$ 为暗电流, $G(x, y)$ 为增益或灵敏系数, $I(x, y)$ 为到达 CCD 的光通量, $n(x, y)$ 为随机噪声, 包括量化误差、电流噪声等, 是一个服从泊松分布的随机变量, 可近似认为服从高斯分布。

CCD 成像的目的是得到图像点灰度值和被测目标点光强之间的关系, (1) 式中 $tG(x, y)I(x, y)$ 表示的正是这种理想的关系, 而其他几项则是 CCD 的噪声, 应该抑制。定义(1)式的中间两项

$$d(x, y) = B(x, y) + D(x, y), \quad (2)$$

为 CCD 的暗电流噪声, 简称为暗噪声, 反映的是没有任何光照到达 CCD 感光元的情况下 CCD 的输出, 与 CCD 各感光元(各像素)自身评品质有关。由此, 为简化起见将(1)式改写为

$$s(x, y) = tG(x, y)I(x, y) + d(x, y) + n(x, y). \quad (3)$$

3 噪声标定方法

3.1 暗噪声

为了标定 CCD 的暗噪声, 在镜头光圈关闭的情

况下采集 M 幅图像。因为光圈关闭, 所以 $I(x, y) = 0$, 此时 CCD 的灰度输出值为

$$s_i(x, y) = d(x, y) + n(x, y). \quad (4)$$

将采集的 M 幅图像平均得到暗噪声

$$\hat{d}(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M s_i(x, y) = d(x, y) + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M n(x, y), \quad (5)$$

由(5)式可得到暗噪声估计的误差为

$$\sigma_d = \sigma_n \sqrt{1/M}, \quad (6)$$

式中 σ_n 为随机噪声 $n(x, y)$ 的均方差。

关闭三个相机的镜头光圈, 固定曝光时间 30 ms, 图像大小 1024 pixel \times 768 pixel, 连续采集 20 幅 8 位灰度图像求平均得到的暗噪声估计图(为了显示效果对暗噪声估计图进行了直方图均衡处理)如图 1 所示 (g_{\max} 为最大灰度值), 除了“MVS1000”相机有个别点噪声超出 100 外, 其余点的噪声均小于 20。可以看到, 暗噪声在空间位置上分布不均匀, 有的地方会出现明暗变化, 这也说明不同 CCD 暗噪声图有较大的差别, 这由 CCD 品质决定。

采集图像减去暗噪声估计图得到暗噪声抑制结果(为了显示效果对原图进行了线性增强处理), 如图 2 所示。

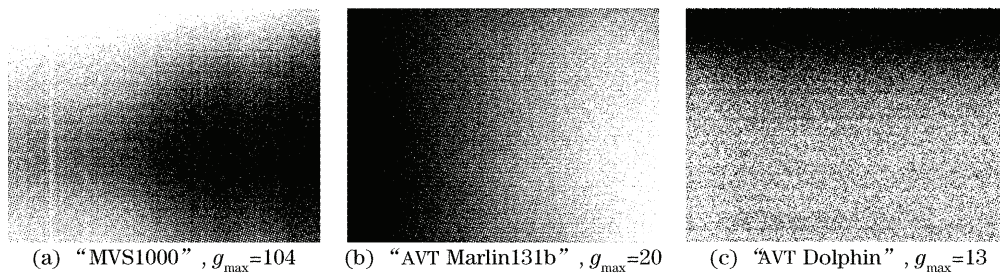


图 1 暗噪声图

Fig. 1 Dark noise map

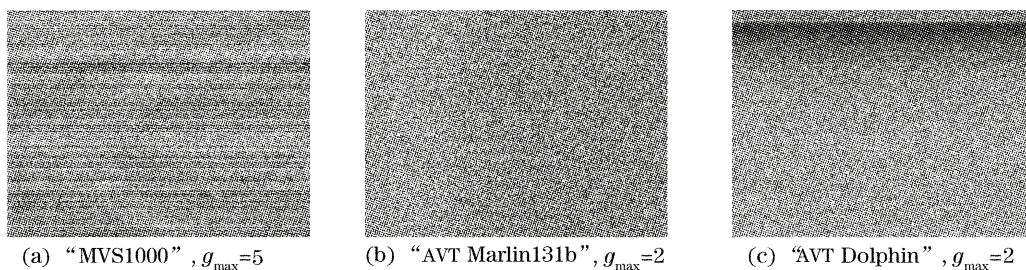


图 2 暗噪声抑制结果

Fig. 2 Results of restrained dark noise

3.2 随机噪声

在测量环境中固定 CCD 拍摄 N 幅固定场景

图, 场景图应包含尽量多的灰度等级以考察随机噪声与图像灰度之间的关系。实验拍摄的是一组含有

不同明暗程度的灰度条。

平均 N 幅图像得到图像中每个点的灰度均值为

$$s_m(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i(x, y), \quad (7)$$

对每点计算灰度方差得到图像中每个点的随机噪声均方差估计：

$$\sigma_n(x, y) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [s_i(x, y) - s_m(x, y)]^2}. \quad (8)$$

每一灰度等级 g 对应随机噪声均方差为

$$\sigma_n(g) = \frac{1}{s_g} \sum_{i=1}^{s_g} \sigma_n(x_i, y_i), \quad (9)$$

式中 (x_i, y_i) 为灰度均值为 g 的所有像素, s_g 为像素个数。

为了标定相机的随机噪声, 分别用三个相机连续拍摄 20 幅静止场景, 场景中包含一组明暗程度不同的灰度条。图 3 显示了标定结果, 每点噪声均方差估计值都乘以 30, 可以看出随机噪声强度随对应点灰度强度变化。图 4 显示了三台相机随机噪声随灰度变化的标定结果。

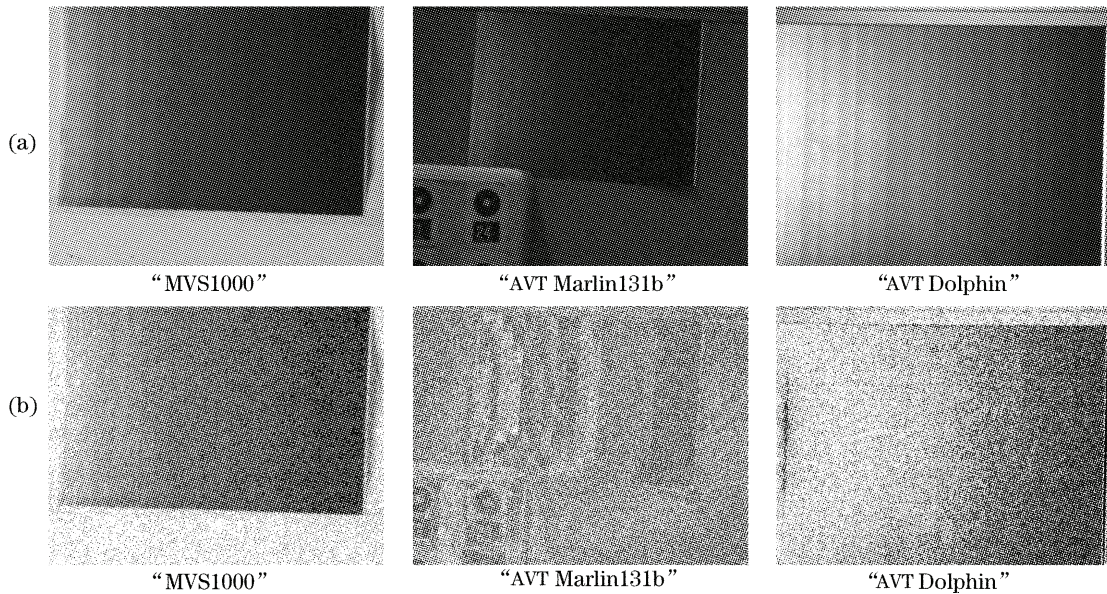


图 3 均值图像(a)和随机噪声标准差图像(经线性增强处理)(b)

Fig. 3 Mean images(a) and standard deviation of random noise images (linearly enhanced for display) (b)

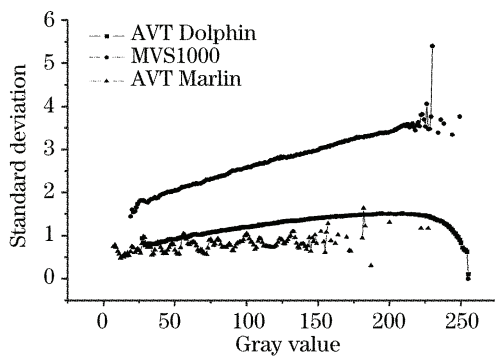


图 4 图像灰度与随机噪声标准差的关系

Fig. 4 The relationship between gray value and its standard deviation of random noise

4 噪声抑制

暗噪声是加性时不变的固定偏差, 将采集图像减去标定的暗噪声图像即得到抑制暗噪声图像:

$$s_{\text{dark_free}}(x, y) = s(x, y) - d(x, y). \quad (10)$$

对于静态测量, 如工业检测中静止工件的测量,

拍摄一组序列图 s_i , 在时间序列上对序列图进行均值滤波:

$$s_{\text{noise_reduction}}(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M s_i(x, y), \quad (11)$$

或者中值滤波:

$$s_{\text{noise_reduction}}(x, y) = \{s_i(x, y)\}, \quad (12)$$

可以有效的降低随机噪声, 降噪图像的随机噪声水平可以由(6)式估计。

对于动态测量, 被测目标在图像中的位置随时间变化, 图像点在时间轴上的相关性减弱, (11)式、(12)式将引起目标边缘处模糊, 此时应用时空域运动补偿滤波可以有效地降低噪声, 滤波器中阈值根据标定的 $\sigma_n(g)$ 来确定。

5 噪声对精密图像测量的影响

精密图像测量根据目标在 CCD 图像中的理想灰度分布 $tG(x, y)I(x, y)$ 来精确定位目标点位置, 由(3)式可知 CCD 噪声 $n(x, y)$ 和 $d(x, y)$ 会影响目

标图像的灰度分布,从而引起目标的定位误差。下面分析的边缘点定位受两种不同 CCD 噪声的影响,为了简化只考虑一维理想阶跃边缘点的提取。

5.1 暗噪声的影响

5.1.1 暗噪声对边缘点定位的影响

边缘点在 $x=0$ 处的一维理想阶跃边缘模型为

$$f(x) = \begin{cases} L, & x \leq 0 \\ L+c, & x > 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中 L 为边缘的低灰度级, c 为边缘的衬比度。

暗噪声在空间非均匀分布,其灰度在空间上呈明暗变化,如图 1,这种明暗变化出现在边缘附近会使边缘灰度分布发生变化,引起边缘提取的误差。为了分析简单,用一维跃函数简化其一维模型,表征其空间明暗变化,

$$d(x) = \begin{cases} 0 & x < x_{\text{low}} \\ L_d, & x_{\text{low}} \leq x \leq x_0 \\ L_d + c_d, & x_0 < x \leq x_{\text{up}} \\ 0, & x_{\text{up}} < x \end{cases} \quad (14)$$

式中 L_d 为暗噪声的低灰度级, c_d 表示暗噪声的不均衡性, x_0 为暗噪声阶跃位置, x_{low} 、 x_{up} 分别为暗噪声的起始和终止位置。

由(1)式可知暗噪声为加性噪声,它使理想阶跃边缘模型变为

$$f_d(x) = f(x) + d(x). \quad (15)$$

用高斯一阶导数滤波器^[2,6]得灰度

$$g(x) = -\frac{x}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right). \quad (16)$$

对一维边缘滤波,响应的极值点即为边缘点。而已知一维理想边缘的滤波响应为 $g(x)$ 与 $f(x)$ 的卷积为

$$g * f = \int g(p-x)f(x)dx. \quad (17)$$

受暗噪声影响边缘的滤波响应为

$$r(p) = g * f_d = \int g(p-x)f(x)dx + \int g(p-x)d(x)dx, \quad (18)$$

(17)式、(18)式的解析表达式复杂,边缘点为使(18)式取最值的点 p_{max} 。边缘点位置主要受 c 、 c_d 、 x_0 影响。为了考察暗噪声对不同衬比度理想阶跃边缘的影响,固定 $c_d=10$, $x_0=1$, $L_d=0$, $L=10$ 分

别取 c 等于 200、100、50、10,根据(18)式计算边缘点。表 1 列出了计算结果[(18)式的最值点,其中(16)式中 $\sigma=3$),理想边缘点为 $p=0$ 。理想边缘衬比度越大,受暗噪声影响越小。

表 1 暗噪声对不同衬比度边缘点定位的影响

Table 1 Influence of dark noise on edge location with different contrasts

c	200	100	50	10
$p_{\text{max}}/\text{pixel}$	0.038	0.075	0.143	0.500

为了考察不同强弱的暗噪声对理想阶跃边缘的影响,固定 $c=200$, $x_0=1$, $L_d=0$, $L=10$,分别取 c_d 等于 5、10、15、20 计算边缘点。表 2 列出了计算结果,理想边缘点为 $p=0$ 。暗噪声衬比度越大,对理想边缘的影响也越大。

表 2 暗噪声不均衡性对边缘点定位的影响

Table 2 Influence of different dark noise disequilibrium on edge location

c_d	5	10	15	20
$p_{\text{max}}/\text{pixel}$	0.019	0.038	0.057	0.075

图 5 显示了不同位置暗噪声对理想阶跃边缘的影响,固定 $c=200$, $c_d=10$, $L_d=0$, $L=10$,取 x_0 等于 0.1~3.0。图中横轴为 x_0 ,纵轴为提取的边缘点位置 p ,理想边缘点为 $p=0$ 。当暗噪声位置在理想边缘点附近时对边缘点的影响较大,当暗噪声逐渐靠近或远离边缘点位置时其对边缘点的影响也逐渐变小。

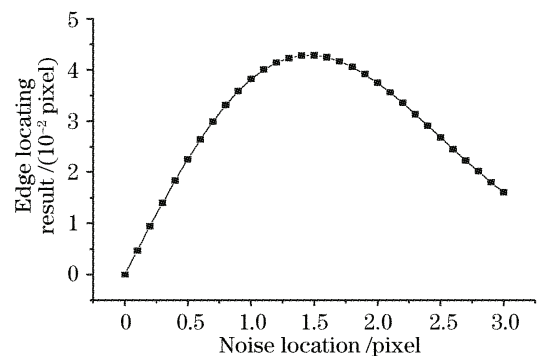


图 5 暗噪声位置与边缘点位置的关系

Fig. 5 The relationship between dark noise location and the edge location

5.1.2 暗噪声对结构光相移法相位提取的影响

相位提取是结构光相移法三维形面测量^[7~10]的重要环节。考虑 CCD 噪声,相位计算公式为

$$p(x, y) = -\text{atan} \left\{ \frac{\sum_{i=0}^{N-1} [\hat{g}_i(x, y) + d(x, y) + n_i(x, y)] \sin(\Delta\phi_i)}{\sum_{i=0}^{N-1} [\hat{g}_i(x, y) + d(x, y) + n_i(x, y)] \cos(\Delta\phi_i)} \right\}, \quad (19)$$

式中 $\hat{g}_i(x, y)$ 为第 i 次相移图像理想灰度, $\Delta\phi_i$ 为第 i 次相移量, 单位为弧度, N 为相移次数。通常采用均匀整周期相移, 即 $\Delta\phi_i = 2\pi i/N$, 此时

$$\sum_{i=0}^{N-1} d(x, y) \cos(\Delta\phi_i) = \sum_{i=0}^{N-1} d(x, y) \sin(\Delta\phi_i) = 0. \quad (20)$$

由此可见, 暗噪声不引起相位求解误差。

5.2 随机噪声的影响

5.2.1 随机噪声对边缘点定位的影响

一维理想阶跃边缘如 (13) 式, 随机噪声使理想阶跃边缘变为

$$f_n(x) = f(x) + n(x), \quad (21)$$

同样使用高斯微分滤波器进行边缘点提取, $n(x)$ 是服从高斯分布的白噪声, 引起边缘点在真值附近抖动。

制作理想阶跃边缘仿真图, 加入不同水平的随机噪声, 考察边缘点受随机噪声的影响。仿真图依照 $L = 10, c = 200$, 边缘点位置 $p = 50$ 制作。参照“MVS1000”相机的随机噪声标定结果加入随机噪声, 即在边缘的亮区域加入 $\sigma = 4$ 的随机噪声, 在边缘的暗区域加入 $\sigma = 1$ 的随机噪声。图 6 显示了仿真实验结果, 其中横轴为实验次数(序号), 纵轴为提

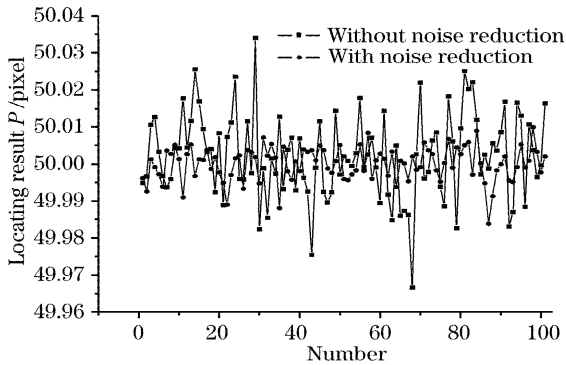


图 6 随机噪声对边缘点的影响仿真图

Fig. 6 Simulated influence image of random noise on edge location

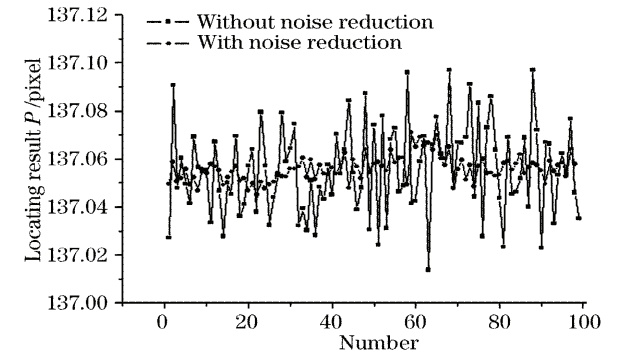
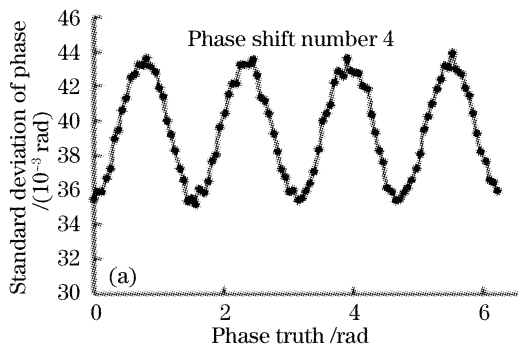


图 7 随机噪声对边缘点的影响实际图

Fig. 7 Real image of random noise's influence on edge location

5.2.2 随机噪声对结构光相移法相位提取的影响

$\sum_{i=0}^{N-1} n_i(x, y) \cos(\Delta\phi_i)$, $\sum_{i=0}^{N-1} n_i(x, y) \sin(\Delta\phi_i)$ 为高斯随机噪声, 由 (19) 式可知, 它将会引起相位求解误差。为了考察随机噪声对结构光相移法相位提取的影响, 进行了仿真实验, 叠加高斯白噪声, 具体仿真数据生成公式:

$$\begin{cases} g_i(x, y) = \hat{g}_i(x, y) + G[0, a\hat{g}_i(x, y)], \\ \hat{g}_i(x, y) = 127 + 127 \cos[\phi(x, y) + 2\pi i/N], \end{cases} \quad (22)$$

式中 $\hat{g}_i(x, y)$ 为理想灰度, $\phi(x, y)$ 为理想相位值, a 为噪声强度系数, $G[0, a\hat{g}_i(x, y)]$ 为 0 均值、均方差为 $a\hat{g}_i(x, y)$ 的高斯白噪声。 $\phi(x, y)$ 从 0 变化到 2π , 相移次数从 4 到 30, 进行了多组仿真实验, 每组实验重复 10000 次, 统计相位提取标准差。图 8 给出了

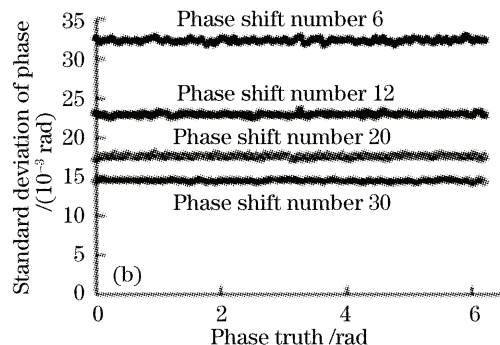


图 8 随机噪声引起的相位求解标准差随相位真值的变化

Fig. 8 The relationship between phase truth and standard deviation of resulting phase caused by random noise

$a = 0.05$ 时均方差随相位真值的变化,图 9 给出了 $a = 0.05$ 时均方差随相移次数的变化。

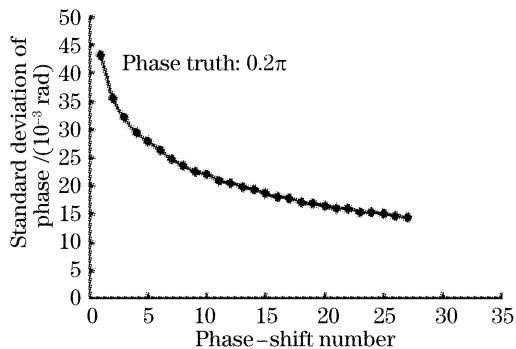


图 9 随机噪声引起的相位求解标准差随相移次数的变化
Fig. 9 The relationship between phase-shift number and standard deviation of resulting phase caused by random noise

由实验结果可知,随机噪声引起的相位误差为 0 均值的随机误差,当相移次数为 4 时,随机误差的均方差会随着相位真值出现明显的波动,但随着相移次数的增加,其均方差的大小和波动幅度逐渐减小。

6 结 论

暗噪声在空间上是非均匀分布的固定噪声,基本不随时间变化,对精密图像测量如一维边缘定位、结构光相移法相位提取产生固定的偏差,偏差值与图像衬比度、暗噪声强度及暗噪声位置有关。在不同灰度值点的随机噪声有所不同,其对精密图像测量的影响也是一个随机偏差。在图像精密测量前有必要对 CCD 噪声特别是暗噪声部分进行标定,以抑制其对图像测量带来的固定偏差。随机噪声的标定能够给出该 CCD 是否满足测量要求的评判依据,随机噪声估计值也能够为其他图像处理提供可靠的

噪声估计参量。暗噪声和随机噪声可以通过简单有效的算法得以抑制,图像测量的精度将随之提高。

参 考 文 献

- 1 Yang Yong, Wang Yanlei, Li Ming *et al.*. Research of high-accuracy digital image correlation measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 197~201
杨 勇,王琰蕾,李 明 等. 高精度数字图像相关测量系统及其技术研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 197~201
- 2 C. Steger. Removing the bias from line detection[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997. 116~122
- 3 A. M. Borneo, L. Salinari, D. Sirtori. An innovative adaptive noise reduction filter for moving pictures based on modified duncan range test[J]. *ST J. System Research*, 2000, **1**(1): 14~22
- 4 N. Wiener. *Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series* [M]. Cambridge: MIT Press, MA, 1949
- 5 Zhang Wentao. Sub-pixel resolution of CCD in optical communication[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(6): 788~790
张文涛. 空间光通信中 CCD 亚像素的分辨率[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 788~790
- 6 J. Canny. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **8**(6): 679~698
- 7 G. Wiora. High resolution measurement of phase-shift amplitude and numeric object phase calculation[C]. *Proc SPIE*, 2000, **4117**: 289~299
- 8 Kang Xin, He Xiaoyuan. Two-step phase-shifting technique for phase measurement profilometry by grating projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 75~79
康 新,何小元. 两步相移实现投影栅相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 75~79
- 9 Wang Liwu, Su Xianyu, Zhou Libing. Correction algorithm of random phase shifting errors in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 614~618
王立无,苏显渝,周利兵. 相位测量轮廓术中随机相移误差的校正算法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 614~618
- 10 Pan Wei, Zhao Yi, Ruan Xueyu. A new method for getting high precision phase in structural light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 687~691
潘 伟,赵 毅,阮雪榆. 结构光测量中获取高精度相位的新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 687~691