

文章编号: 1007-2780(2012)05-0708-05

高斯滤波器在子弹三维图像特征提取中的应用

乔培玉^{1,2}, 何 昕^{1*}, 魏仲慧¹, 王方雨¹, 林为才¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 为了弹痕的自动比对, 建立了基于结构光的子弹三维纹理信息获取系统。由于在采集三维信息时子弹的中轴线与采集系统的 y 坐标轴很难做到完全重合, 这需要进行相应的坐标旋转, 尤其是在子弹变形时, 无法利用子弹近似圆柱提取这一信息, 这都给弹痕提取带来了很大的困难。本系统采用高斯逼近滤波器的方法获取高斯滤波中线, 然后将三维弹痕信息与高斯滤波中线相减, 进而提取出子弹的弹痕信息。利用冲激响应不变法设计了十二级的 IIR 型数字高斯滤波器, 所设计的高斯逼近滤波器最大幅度偏差只有 1.38%, 大大优于 ISO11562 规定的 2.5% 的最大幅度偏差。此方法使得弹痕提取过程更简单, 提取结果更精确, 对后续弹痕比对的准确率有明显的提升。

关 键 词: 三维纹理; 弹痕特征; 高斯滤波器; 高斯滤波中线

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20122705.0708

Application of Gaussian Filter in Extracting Bullet Feature of 3-D Bullet Image

QIAO Pei-yu^{1,2}, HE Xin^{1*}, WEI Zhong-hui¹, WANG Fang-yu¹, LIN Wei-cai¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to compare the bullet automatically, the 3D texture information acquisition system of the bullet based on the structure light is established. Because the central axis and acquisition system axis y is difficult to completely overlap when we acquired three-dimensional information of bullets, so the corresponding coordinate rotation is need, especially when the bullet was deformed, it is unable to utilize the information that the bullet is approximate a cylindrical, this is very difficult for bullet extraction. Therefore this paper used the Gaussian approximation filter to get the mean line determined by Gauss filter, and then 3-D bullet information subtracts from mean line determined by Gauss filter, the bullet texture was extracted. Twelve order IIR digital Gauss filter is designed using the impulse response method, its amplitude transmission characteristic deviation is less than 1.38%, significantly better than the ISO11562 specified 2.5%. This method makes the bullet extraction process more simply, and the extraction result is more accurately, improving the accuracy of bullet comparison obviously.

Key words: 3-D texture; bullet feature; Gaussian filter; mean line by Gaussian filter

收稿日期: 2012-02-28; 修订日期: 2012-03-20

基金项目: 公安部科技资助项目

作者简介: 乔培玉(1984—), 男, 山东菏泽人, 博士研究生, 主要从事光电测量及数字图像处理方面的研究。

* 通讯联系人, E-mail: hexin6627@sohu.com

1 引言

枪弹头痕迹比对检验学在公安实践中可以判断发射枪支以证实犯罪,而传统的利用显微镜的比对方法效率很低,尤其是对子弹保存提出了很高的要求,一旦子弹发生锈变,将很难进行比对工作。为了克服此弱点,国外从80年代就开始了全国性弹痕计算机跟踪系统的组建。这其中三坐标测量仪和激光共焦显微镜是应用最多的解决方案,以美国财政部的研究枪支管理局与加拿大Forensic技术公司合作开发的IBIS系统为代表,在世界范围内获得了广泛的应用。

在国内,基于计算机的弹痕比对主要是以二维的灰度图像为基础进行弹痕比对,该方法受光照影响较大,同时丢失了弹痕最重要的深度信息,因此比对结果不够理想。基于弹痕深度信息在弹痕比对中的重要性,我们提出了光学非接触测量的方法,使用投影光栅相移测量技术来获取子弹的三维纹理信息,进而提取出子弹的弹痕深度特征。传统的方法是对弹痕图像进行坐标旋转,然后基于椭圆拟合的方法进行弹痕的特征提取,但若子弹发生了形变,此方法将不再适用。其他的比如基于遗传算法进行的三维曲面配准,小波变换法等都存在着计算量大,精度低的缺点。本文提出首先把三维深度信息映射到二维灰度图像,图像的灰度值将代表子弹的深度信息,使用高斯滤波器进行拟合高斯滤波中线的方法,提取准确,快速,对发生形变的子弹的图像都能够准确提取出弹痕特征,能够满足弹痕比对的需要。

2 高斯滤波器

以高斯函数为权函数的滤波器称之为高斯滤波器^[2],其权函数表达式为:

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

其中, σ 为分布参数,当 $\sigma=3$ 的高斯函数曲线如图1所示,在曲线的中心区域 6σ 的宽度范围内,高斯曲线所包围的面积占据了整个曲线面积的99.73%,通常规定在这个区间内的权函数对滤波起主要作用,通过改变 σ 可以改变高斯曲线的形状,也就可以对信号进行相应的滤波。

高斯滤波函数为最小的脉宽变化与带宽变化之积,所以在传输响应意义上的最优滤波器只有

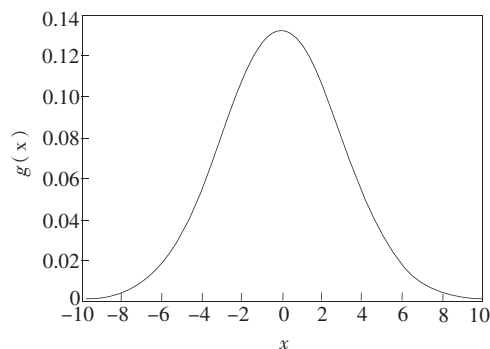


图1 高斯函数曲线

Fig. 1 The curve of Gaussian function

高斯滤波器^[1],因此对于本系统来说,高斯滤波器是最好的选择。

3 一维高斯滤波器的设计

国际标准ISO11562明确规定,以高斯滤波器作为建立表面轮廓基准线的滤波器,规定的权函数为:

$$h(t) = \frac{1}{\alpha\lambda_c} e^{-\pi(t/\alpha\lambda_c)^2} \quad (2)$$

其中 t 为空间域的变量, α 是一常量, λ_c 是截止波长。当 $\lambda=\lambda_c$ 时,高斯滤波器的幅度传输值为50%,因此 $\alpha=0.4697$ 。

对 $h(t)$ 进行傅里叶变换可得:

$$H(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-j\Omega t} dt = e^{-\pi\left(\frac{\Omega}{\alpha\lambda_c}\right)^2} \quad (3)$$

由关系式 $\Omega/\Omega_c = \lambda_c/\lambda$ 可得:

$$H(\lambda_c/\lambda) = e^{-\pi\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^2} \quad (4)$$

$$H(N_c/n) = e^{-\pi\left(\frac{n}{N_c}\right)^2} \quad (5)$$

设表面的轮廓信号为 $x(t)$,经过高斯滤波器后得到的结果即为高斯滤波中线,记为 $y_m(t)$,则它们之间的关系如下式:

$$y_m(t) = x(t) \times h(t) = x(t) \times \left[\frac{1}{\alpha\lambda_c} e^{-\pi\left(\frac{t}{\alpha\lambda_c}\right)^2} \right] \quad (6)$$

其频域表达式为:

$$Y_m(\Omega) = X(\Omega) \cdot H(\Omega) \quad (7)$$

其中 $Y_m(\Omega)$ 为高斯滤波中线的傅里叶变换, $X(\Omega)$ 为表面轮廓的傅里叶变换。

本文以巴特沃思滤波器的构造去逼近上述的高斯滤波器,采用归一化方法,函数如下:

$$H_{\beta_1}(\Omega) = \frac{1}{1 + \beta_1(\Omega/\Omega_c)^2} \quad (8)$$

其中, Ω_c 为截止频率, β_1 为调整系数, 要求 $\Omega = \Omega_c$ 时, 逼近滤波器的对数幅频特性为 -3dB 。对本系统的子弹纹理信息来说, 每一列采集的点数为 564 个点, 相邻点的间距为 $2.75 \mu\text{m}$, 根据先验知识, 选定截止波长为 $\lambda_c = 172 \mu\text{m}$, 因此截止波长内的点数为 $N_c = 62$, 每一列的长度为 $9N_c$, 利用冲激响应不变法进行逼近滤波器的设计, 取滤波器的级数为 12 级, 幅度传输特性为:

$$|h_d(e^{j\frac{2\pi}{n}})|^{24} = \left[\frac{a^2}{1 + (1-a)^2 - 2(1-a)\cos\frac{2\pi}{n}} \right]^{12} \quad (9)$$

其中, $a = 2\pi/(\sqrt{\beta_1} \times N_c)$, $\beta_1 = 0.0905$, n 和 N_c 分别为 λ 和 λ_c 内的采样点数量。其幅度特性和幅度偏差曲线如图 2 和图 3 所示。

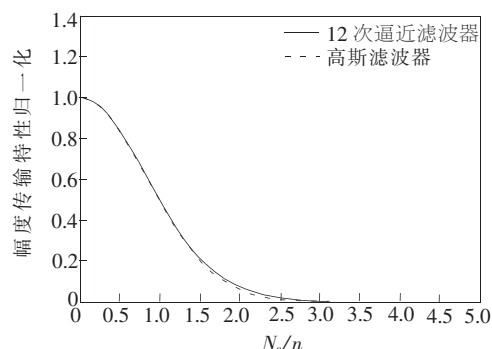


图 2 高斯滤波器与逼近滤波器

Fig. 2 Gaussian filter and approximation filter

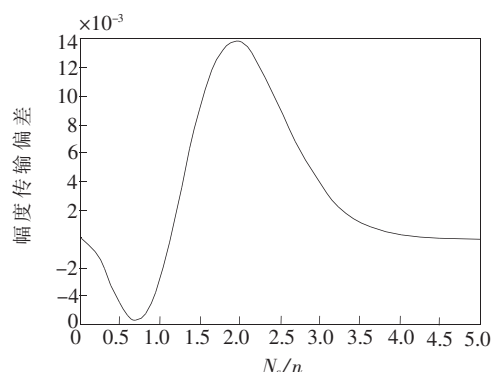


图 3 幅度偏差曲线

Fig. 3 Curve of amplitude deviation

由幅度传输偏差曲线可以看到, 设计的高斯逼近滤波器与高斯滤波器最大的偏差为 1.38% 。利用上述高斯逼近滤波器, 对三维弹痕的切面曲线进行高斯滤波, 如图 4, 可得其高斯滤波中线,

如图 5, 弹痕切面曲线与高斯滤波中线如图 6 所示。

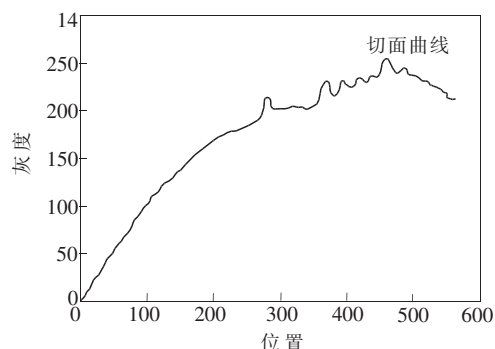


图 4 子弹切面曲线

Fig. 4 Curve of bullet section

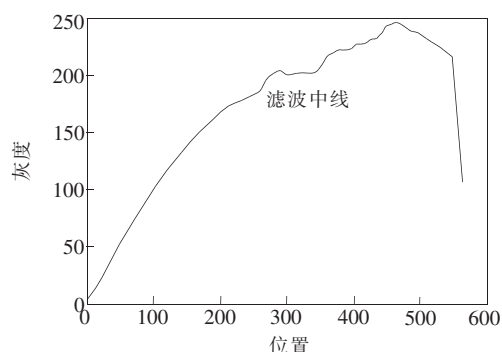


图 5 高斯滤波中线

Fig. 5 Mean line determined by Gaussian filter

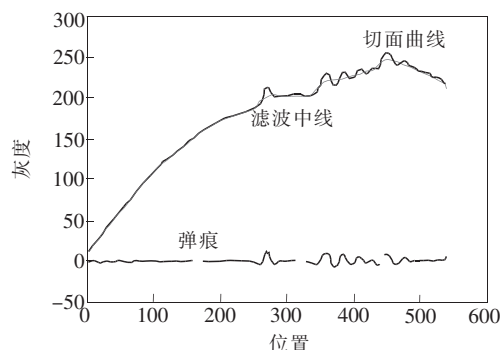


图 6 弹痕曲线

Fig. 6 The curve of bullet

由于数字滤波器对有限长的输入信号进行滤波在两端存在的边界效应问题, 这由滤波中线图可以清楚的看到, 不能看作有效的输出。由弹痕结果图像可以看到, 高斯滤波中线法完全能够提取出有效弹痕, 与前面所讲的拟合椭圆法相比, 此方法不仅算法简单, 精度高, 还能应用于子弹变形时的情况, 大大提高了算法的使用范围。

4 二维高斯滤波器的设计

在一维空间内,由于信息量少,数据具有局部的特征,不能够反映整体的弹痕特征,因此需要进行二维的弹痕提取。将一维权函数扩展到二维空间,就能实现对弹痕的二维整体提取,这样也更能反映弹痕的真实情况。根据 ISO11562 规定的一维高斯滤波器的权函数,可推出二维高斯滤波器权函数如式(10):

$$h(x, y) = \frac{1}{\beta_{xx}\lambda_{yx}} \exp\left\{-\frac{\pi}{\beta}\left[\left(\frac{x}{\lambda_{xx}}\right)^2 + \left(\frac{y}{\lambda_{yx}}\right)^2\right]\right\} \quad (10)$$

其幅度传输特性为:

$$H(\lambda_x, \lambda_y) = \exp\left\{-\pi\beta\left[\left(\frac{\lambda_{xx}}{\lambda_x}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_{yx}}{\lambda_y}\right)^2\right]\right\} \quad (11)$$

其中, λ_{xx} 和 λ_{yx} 分别是 X 和 Y 方向的截止波长,当

$$H(\lambda_x, \lambda_y) = \exp\left(-\pi\beta\left[\left(\frac{\lambda_{xx}}{\lambda_x}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_{yx}}{\lambda_y}\right)^2\right]\right) = \exp\left(-\pi\beta\left(\frac{\lambda_{xx}}{\lambda_x}\right)^2\right) \cdot \exp\left(-\pi\beta\left(\frac{\lambda_{yx}}{\lambda_y}\right)^2\right) = H(\lambda_x) \cdot H(\lambda_y) \quad (12)$$

由上式可以看到,二维高斯滤波器可以分离成 X 方向和 Y 方向的一维高斯滤波器,因此,根据前

$\lambda_x = \lambda_{xx}, \lambda_y = \infty$ 或者 $\lambda_y = \lambda_{yx}, \lambda_x = \infty$ 时,滤波器的传输值为 50%, 因此,可解得 $\beta = 0.2206$, 其幅度传输特性如图 7 所示。

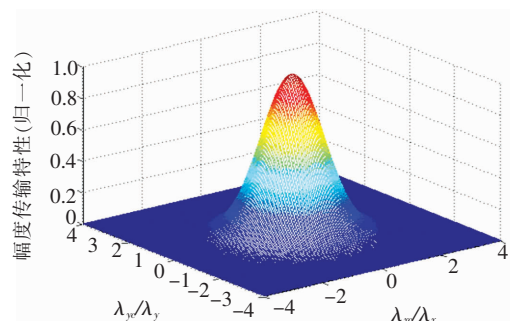


图7 二维高斯滤波器幅度传输特性

Fig. 7 Amplitude transmission characteristics of 2D Gaussian filter

根据公式可以推导出如下结论:

面讲述的一维高斯滤波器的设计,可以得出二维逼近高斯滤波器的权函数如式(13):

$$\left|H_d(e^{j\frac{2\pi}{n_x}}, e^{j\frac{2\pi}{n_y}})\right|^{24} = \left|H_d(e^{j\frac{2\pi}{n_x}})\right|^{24} \cdot \left|H_d(e^{j\frac{2\pi}{n_y}})\right|^{24} = \left[\frac{a^2}{1 + (1-a)^2 - 2(1-a)\cos\frac{2\pi}{n_x}}\right]^{12} \cdot \left[\frac{a^2}{1 + (1-a)^2 - 2(1-a)\cos\frac{2\pi}{n_y}}\right]^{12} \quad (13)$$

其中, $a = 2\pi(\sqrt{\beta_1} \times N_c)$, $\beta_1 = 0.0905$, n_x 和 N_{cx} 分别为 X 方向 λ_x 和 λ_{cx} 内的采样点数量, n_y 和 N_{cy} 分别为 Y 方向 λ_y 和 λ_{cy} 内的采样点数量。其幅度特性和幅度偏差曲线如图 8、图 9 所示。

从图 8 可以看出,最大的幅度偏差为 1.35%, 远小于 2.5% 的 ISO11562 的要求。此处取 $N_{xx} = 62, N_{yy} = 62, n_x = [1, 2, \dots, 30], n_y = [1, 2, \dots, 30]$, 三维弹痕数据为 756×564 组数据,由于滤波器存在的边界效应问题,采取对首尾的数据进行截断的方式进行处理,结果如图 10~11 所示。

由图 12 可以看出,所设计的二维 12 级高斯逼近滤波器能够准确地提取弹痕信息,省去了椭

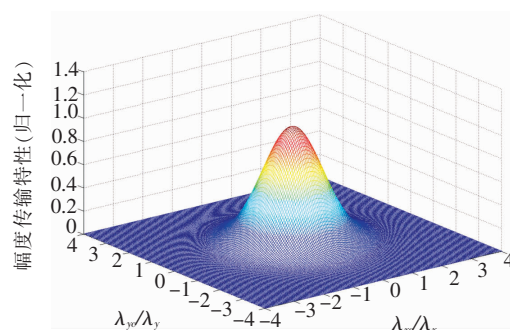


图8 二维高斯逼近滤波器幅度传输特性

Fig. 8 Amplitude transmission characteristic of 2D Gaussian approximation filter

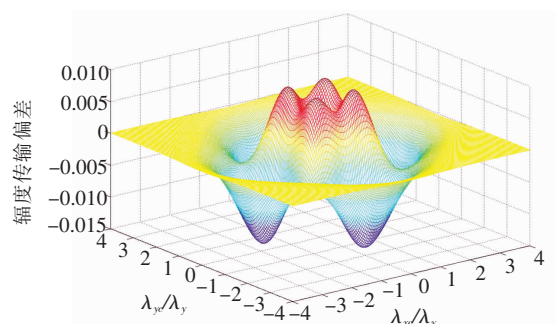


图 9 幅度传输特性偏差

Fig. 9 Amplitude transmission characteristic deviation

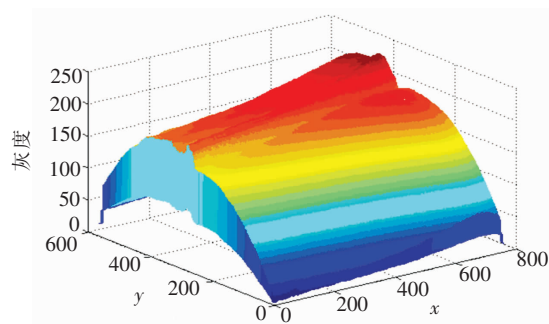


图 11 高斯滤波参考面

Fig. 11 Reference surface of Gaussian filter

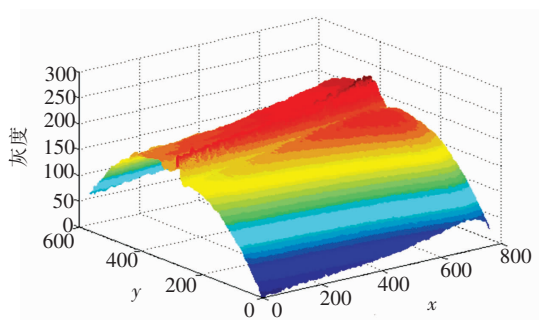


图 10 子弹三维表面形貌

Fig. 10 3D surface topography of the bullet

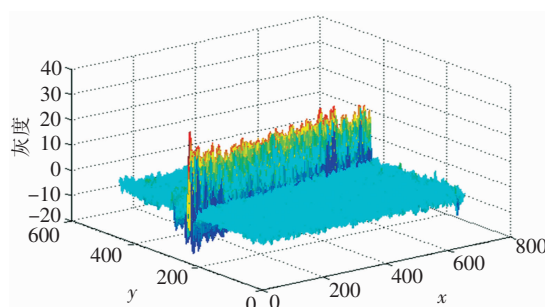


图 12 三维弹痕信息

Fig. 12 3D bullet texture information

圆拟合法的坐标旋转和平移步骤,直接进行高斯滤波,过程简单,精度高,同时对于发生形变的子弹也完全适用,这是椭圆拟合法所做不到的。

4 结 论

根据子弹三维纹理信息数据精度高的特点,提出了利用高斯逼近滤波器的方法提取弹痕,设计了 IIR 型十二级数字高斯逼近滤波器,与 ISO11562

标准规定的高斯滤波器的权函数幅度最大偏差为 1.38%,大大优于规定的 2.5% 的最大偏差。用逼近滤波器来建立子弹表面的轮廓中线,同时将一维高斯滤波器推广到二维,建立了子弹三维表面形貌测量的参考面。实验结果表明,此方法能够有效地提取弹痕信息,精度高,计算量小,对于发生形变的子弹也能够准确地提取弹痕信息,这对于后续的弹痕比对奠定了非常好的基础。

参 考 文 献:

- [1] 鲁静. 基于三维激光彩色扫描仪的公安子弹综合检测软件系统关键算法研究和实现 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [2] 权贵秦, 安毓英, 王凤琴. 双参考面 FTP 法测量弹痕轮廓 [J]. 西安电子科技大学学报, 2007, 34(5): 805-808.
- [3] 曾文涵, 郭军. 弹头发射痕迹计算机识别系统的研制 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(6): 40-42.
- [4] 贺力克, 周华祥. 一种基于统计模型和时序分析的弹痕比对方法 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2011, 34(2): 30-36.
- [5] 许景波. 高斯滤波器逼近理论与应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [6] 詹永鑫, 郑学仁, 陈建宾. 基于亮度分量的快速图像增强方法 [J]. 液晶与显示, 2010, 25(2): 273-277.
- [7] 张静, 张浩. 三维表面测量中的高斯滤波快速算法 [J]. 工具技术, 2011, 45(9): 83-86.
- [8] 许景波, 袁怡宝, 朴伟英, 等. 表面粗糙度测量中的高斯滤波快速算法 [J]. 计量学报, 2005, 26(4): 309-312.
- [9] 李显凌. 基于改进 MC 算法的 CT/MR 图像三维重建 [J]. 液晶与显示, 2011, 26(5): 683-687.
- [10] 戴路, 金光, 徐伟, 等. 基于 Matlab 虚拟实现 3D 动画现实模块的卫星地面仿真系统 [J]. 液晶与显示, 2011, 26(5): 688-692.