文章编号:1007-2780(2014)05-0761-07

采用区域特征匹配的三维弹痕自动配准

韩冬松[1,2,3],何 昕[1*],魏仲慧[1],李一芒[1]
(1.中国科学院 长春光学精密机械及物理研究所,吉林 长春 130033;
2.中国科学院大学,北京 100049
3. 中国人民解放军防化研究院,北京 102205)

摘要:针对三维枪弹痕迹比对中的数据配准问题,提出了一种采用区域特征匹配的配准算法。在通过干涉仪获取枪弹痕迹三维数据后,首先采用基于剪切波的多尺度几何分析方法对数据去噪,以保证去除噪声的同时减少有效信息的损失,然后采用改进的一维高斯滤波器分离三维枪弹痕迹中的轮廓信息和纹理细节,另外,将三维弹痕纹理信息进行分区,并通过纹理信息中擦划痕迹明显的特征区域进行数据配准,最后,在配准过程中引入齐次变换矩阵以提高配准精度,并采用计算不同数据间互相关测度值的方法评价配准效果,通过纹理信息的配准结果完成原始三维枪弹痕迹的配准。实验结果表明,所提出的配准算法能够提高弹痕自动比对正确率,在现有样本及自动比对方法情况下,能够将比对正确率从90%提高至98%。

关 键 词:三维枪弹痕迹;区域特征;数据配准;剪切波
中图分类号:TP394.1 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/YJYXS20142905.0761

Automatic registration of 3-D bullet marks by matching regional features

HAN Dong-song[1,2,3], HE Xin[1*], WEI Zhong-hui[1], LI Yi-mang[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130022, *China*;
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *Research Institute of Chemical Defense of PLA, Beijing* 102205, *China*)

Abstract: For 3D bullet marks on data registration problem, a registration algorithm by matching regional features is proposed. After 3D data of bullet marks obtained through interferometer, first of all, multi-scale geometric analysis based on shearlet is adopted to remove the noise while reducing the loss of effective information; and then, the contour and texture of bullet marks is separated by an improved one-dimensional Gaussian filter. Besides, this paper partitions the texture information of 3D bullet marks, and makes the use of obvious effect of the brush strokes from texture information of the feature area for data registration. Finally, we introduce the homogeneous transformation matrix in registration process for improving the registration accuracy, compute the cross-correlation values of different data to evaluate registration effect, and complete the original 3D bullet marks registration

收稿日期:2014-04-23;**修订日期**:2014-07-25.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.60878052)
*通信联系人,E-mail: hexin6627@sohu.com

according to the effect of texture registration. Experimental results show that the proposed registration algorithm can improve the accuracy of automatic bullet marks registration, the existing sample and automatic registration method can improve the correct rate from 90% to 98%.

Key words: 3D bullet marks; regional features; data registration; shearlet

1 引 言

枪弹头痕迹是涉枪案件中的重要线索和证据,弹痕比对检验学在公安实践中可以判断发射枪支以证实犯罪。传统的基于实物的弹痕比对依赖人的主观判断,基于二维图像的弹痕比对所面向的对象是弹痕的反光特性而非真实形貌,因此国内外学者根据枪弹痕迹的三维形貌开展枪弹比对的研究工作[1-2]。

三维弹痕数据的配准是三维弹痕自动比对中的关键技术,未经过配准而直接进行痕迹比对是不科学和无意义的。目前国内外三维弹痕自动比对系统所采用的配准方法都是通过硬件实现的,如加拿大的法医技术公司(Forensic Technology)和我国的安徽国盾高科技公司所采用的技术路线都是通过调整载物台的位置和姿态以控制不同待测弹头的位置和姿态保持一致。上述方法对硬件尤其是夹持弹头的载物台有很高的精度要求,且容易受到环境等因素的干扰。而采用计算机对三维弹痕数据进行配准可以在实现配准的同时降低对数据采集系统的要求。

国内外学者在三维数据配准领域进行了很多有意义的研究和实践工作,Nyúl LG 等提出的基于体素相似性的配准方法目前广泛应用于医疗影像配准中,BESL P J 等提出的迭代最近点(Iterative Closest Point,ICP)算法广泛应用在三维点云配准领域,而我国孙军华等学者提出的基于分层块状全局搜索的三维点云自动配准方法同 ICP 算法相比有更高的精度[3-5]。上述算法应用于三维弹痕配准时存在如下问题,由于弹头上擦划痕迹在尺寸方面与弹头本身体积相比非常细小,因此采用体素相似性的配准方法很难对同一型号的弹头进行配准;而 ICP 算法和基于分层块状全局搜索的配准方法则需要待配准对象包含明显特征,且配准过程相对复杂。

针对以上问题本文提出一种采用区域特征匹配的配准算法,首先通过改进的高斯滤波器分离三维数据中的弹头轮廓信息和因擦划产生的纹理信息,分离后截取纹理信息中特征最为丰富的区域,通过多项式拟合方法确定痕迹的位置和方向,最后以多条痕迹的组合特征作为基准通过旋转平移等操作完成两组三维弹痕数据间的配准。

2 弹痕数据预处理

2.1 弹痕三维数据的数学模型

通过菲索型干涉仪并采用四步相移技术对弹头进行测量能够获得一组 $3\times n$ 的二维数据以矩阵方式记为:

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} d_{11},d_{12},\ldots,d_{1n} \\ d_{21},d_{22},\ldots,d_{2n} \\ d_{31},d_{32},\ldots,d_{3n} \end{bmatrix},$$

其中:$d_{1i,(i=1,2,..n)}$,$d_{2i,(i=1,2,..n)}$,$d_{3i,(i=1,2,..n)}$ 分别表示测量点在摄像机坐标系下的位置坐标。矩阵 $\boldsymbol{D}$ 包含测量点在空间内完整的三维信息,但数据形式不适应计算机进行滤波、旋转、平移、显示等操作,因此需将矩阵 $\boldsymbol{D}$ 进行一定形式的变换以适应计算机处理。分析矩阵 $\boldsymbol{D}$ 可得如下性质:

$$\exists k,t\in N^{+},s.t.\begin{cases} k\cdot t=n; \\ \forall i,j(i=0,1,\ldots,t-1;j=1,2,\ldots,k-1) \\ d_{1,i\cdot k+j+1}-d_{1,i\cdot k+j}=d_{2,(i+1)\cdot k+j}-d_{2,i\cdot k+j}\equiv \\ \Delta d\in \text{const}; \end{cases} \tag{1}$$

根据上述性质,可将矩阵 $\boldsymbol{D}$ 转换成 $t\times k$ 阶矩阵:

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix} j_{11},j_{12},\ldots,j_{1k} \\ j_{21},j_{22},\ldots,j_{2k} \\ \ldots,\ldots,\ldots \\ j_{t1},j_{t2},\ldots,j_{tk} \end{bmatrix},$$

其中:$j_{ij}=d_{3,i\cdot(k-1)+j}$,以 j_{11} 为原点,规定矩阵行方向为 x 轴,自左向右为正方向,列方向为 y 轴,自上而下为正方向,行列间距用式(1)中的 Δd 表示,那么 $J(x,y)$ 在数据形式上即可包括所有采集得到的三维信息,而 $J(x,y)$ 的矩阵形式在数据格

式方面便于计算机进行处理。

2.2　采用多尺度分析的数据去噪

$J(x,y)$可拆分成 2 部分表示，如式(2)所示：

$$J(x,y)=F(x,y)+N(x,y), \tag{2}$$

其中：$F(x,y)$表示的是真实的枪弹痕迹三维信息，$N(x,y)$表示噪声。在枪弹痕迹的三维信息采集时，噪声的主要来源是测量系统的不确定度，这些噪声通过改进操作及测量方法，能够一定程度上得到削弱。在实际的测量过程中，噪声是对结果产生很大影响的随机信号，所以需要对 $J(x,y)$进行去噪处理，使 $J(x,y)$中 $N(x,y)$分量尽量减少。小波变换以其良好的时频特性和多分辨率特性被广泛应用于各个领域的图像去噪，但信号处理中常用小波只有“水平”、“垂直”、“对角”3 个有限方向的空间解析能力，这使小波变换在进行图像结构的曲线和直线的奇异性表示时效果不佳，且不能有效提取图像的纹理和边缘信息，小波变换在空间方向辨析能力的不足，使二维张量小波在处理含“线奇异”的函数时不能达到最优的非线性逼近。，剪切波(Shearlet)与小波变换相比，对图像的表示同时具有多分辨、局域性和方向性等优点。剪切波变换定义如下：

$$SH_{\Psi}f(a,s,t)=<f,\Psi_{a,s,t}>\ a>0,s\in\mathbf{R},t\in\mathbf{R}^2. \tag{3}$$

式中：$\Psi_{a,s,t}(x)=|\det\boldsymbol{M}_{as}|^{1/2}\Psi(\boldsymbol{M}_{as}^{-1}(x-t))$，并且 $\boldsymbol{M}_{as}=[a,a^{1/2}s;0,a^{1/2}]$，令 $\boldsymbol{B}_s=[1,s;0,1]$，$\boldsymbol{A}_a=[a,0;0,a^{1/2}]$，则 $\boldsymbol{M}_{as}=\boldsymbol{B}_s\boldsymbol{A}_a$，所以每一个 $\boldsymbol{M}_{as}$ 矩阵包含 2 个矩阵：各向异性膨胀矩阵 $\boldsymbol{A}_a$ 和剪切矩阵 $\boldsymbol{B}_s$，每个剪切波变换 $\Psi_{a,s,t}(w)$在不同尺度、相对原点对称、沿着 s 的斜率方向的梯形区域上支撑。所以，剪切波变换是一个参数尺度 a、方向 s、位置 t 的函数集合。剪切波域去噪即从观测系数 y 中得到真实系数 w 的估计 $\hat{w}(y)$。根据统计学中最大后验估计理论：

$$\hat{w}(y)=\mathrm{sign}(y)\cdot(|y|-T)_+. \tag{4}$$

其中：T 表示阈值。

2.3　基于高斯滤波的弹头擦划痕迹分离

通过剪切波去噪后得到的弹痕三维信息用 $F(x,y)$表示，可以分为轮廓和纹理两部分组成。实际待比对对象是枪弹坡膛痕迹的相似度而非弹头轮廓。因此在配准前将轮廓信息和纹理信息分离后，利用纹理信息中的特征进行配准。弹头的轮廓和坡膛痕迹本质上是波长不同的数字信号，可以通过滤波的方法对其进行分离。

由于高斯滤波器相移为零，时频宽积同其他滤波器相比最小，其冲激与阶跃响应效果好，被称为是一种理想的时域响应滤波器，在几何测量领域，通常要求滤波过程应尽量减小对原始的几何形状的形变，因此高斯滤波器更加适合枪弹痕迹比对前进行轮廓信息与纹理信息的分离。空间域下的高斯滤波器表示为：

$$h(t)=\frac{1}{\alpha\lambda_c}\mathrm{e}^{-\pi(t/\alpha\lambda_c)^2}. \tag{5}$$

采用冲激响应不变法，设计 32 级逼近滤波器，幅度传输特性可由式(6)表示：

$$|H_d(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{n}})|^{24}=\left[\frac{a^2}{1+(1-a)^2-2(1-a)\cos\frac{2\pi}{n}}\right]^{32}. \tag{6}$$

在一维空间下，数据一般具有局部性，由于信息量少而不能够反映整体的枪弹痕迹尤其是膛线痕迹特征，因此需要在对枪弹痕迹进行二维提取。将一维权函数扩展到二维空间以实现对枪弹痕迹的整体提取，更接近真实情况。二维高斯滤波器通过变换可以分离成 x、y 两个方向的一维滤波器，根据前文所述，不同方向级联形式的二维逼近高斯滤波器权函数为：

$$|H_d(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{n_x}},\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{n_y}})|^{64}=|H_d(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{n_x}})|^{64}\cdot|H_d(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{n_y}})|^{24}=\left[\frac{a^2}{1+(1-a)^2-2(1-a)\cos\frac{2\pi}{n_x}}\right]^{32}\cdot\left[\frac{a^2}{1+(1-a)^2-2(1-a)\cos\frac{2\pi}{n_y}}\right]^{32}. \tag{7}$$

式中：$a=2\pi/(\sqrt{\beta_4}\times N_c)$，$\beta_4=0.090\ 5$，$n_x$ 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。

按上述方式设计的 32 级逼近滤波器对 $F(x,y)$进行滤波可以分离轮廓信息和纹理信息，但由于实际弹痕纹理同 x 轴或 y 轴平行，二维滤波器不能按纹理方向提取有效信息，反而会损失一部分细节信息。本文设计分别采用 x 方向和 y

方向上的一维滤波器对去噪后的弹痕数据进行滤波，并截断边缘，可得到弹痕纹理信息 $I(x,y)$：

$$I(x,y)=\begin{cases}0,(x<5\text{ or }x>k-5\text{ or }y<5\text{ or }y>t-5)\\ 1-F(x,y)\times\left[\dfrac{a^2}{1+(1-a)^2-2(1-a)\cos\dfrac{2\pi}{n_x}}\right]^{32}\times\left[\dfrac{a^2}{1+(1-a)^2-2(1-a)\cos\dfrac{2\pi}{n_y}}\right]^{32},\text{other}\end{cases}. \tag{8}$$

3 弹痕三维数据配准

3.1 配准算法设计

经过高斯滤波后分离得到的弹痕纹理信息 $I(x,y)$中，包含子弹发射时同枪膛产生的擦划痕迹，这也是 $I(x,y)$中最重要的特征信息。因此设计选取 $I(x,y)$中痕迹特征最明显的区域作为特征区域，通过坐标变换实现不同弹头间表面纹理的配准。将达到最佳配准效果的坐标变换矩阵应用在原始三维弹痕信息配准中，算法流程如图 1 所示。

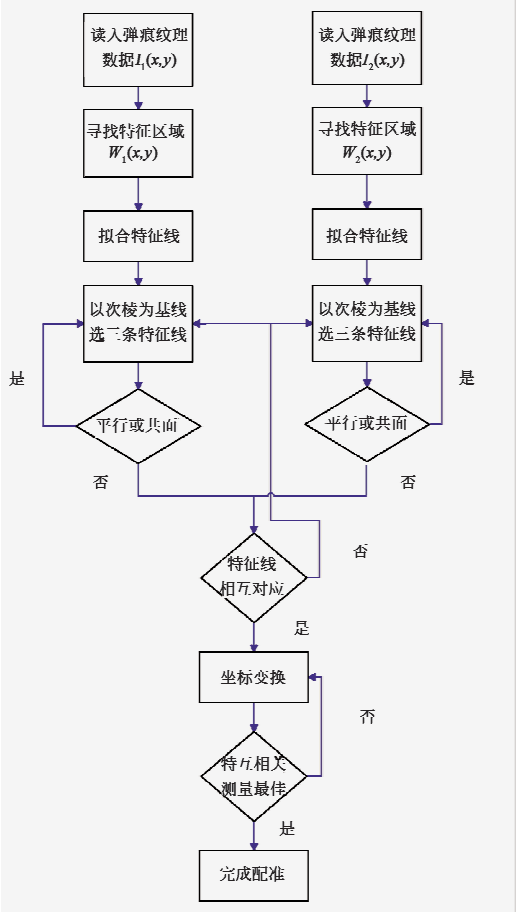


图 1 三维弹痕配准算法流程图

Fig. 1 Flow sheet of the registration of 3D bullet

在枪弹痕迹的三维测量时，以次棱为基准，能够作为判别依据的坡膛痕迹信息集中在次棱线的一侧，在实际处理时需对 $I(x,y)$进行区域分割，保留坡膛信息，记为 $W(x,y)$。次棱线及其一侧的擦划痕迹都可用基于最小二乘法的线性拟合公式求出痕迹所在直线的方程，通过直线方程确定坐标变换矩阵。由于数据采集过程中光学系统和配套硬件的各项参数保持不变，因此在配准时只考虑旋转、平移操作而不需考虑放大缩小操作。初步配准后以两组待配准数据间的互相关测度作为配准效果的评判标准，最后求出最佳坐标变换矩阵。

3.2 坐标变换矩阵

采用齐次坐标变换矩阵对三维数据进行旋转、平移等操作是调整位置和姿态的常用方法。齐次坐标变换矩阵(HTM)是在机器人运动学中用来描述刚体空间位置和姿态关系的 4×4 矩阵，其齐次变换坐标可以表示为：

$$\boldsymbol{W}_o(x,y)=\boldsymbol{H}\boldsymbol{W}_n(x,y), \tag{9}$$

其中：$\boldsymbol{H}$ 为变换矩阵，$\boldsymbol{W}_o(x,y)$为变换前矩阵，$\boldsymbol{W}_n(x,y)$为变换后矩阵。齐次坐标变换矩阵 H 能够描述矩阵沿各坐标轴的平动(记为 $\Delta x,\Delta y,\Delta z$)和绕个坐标轴的转动(记为 $\Delta\theta_x,\Delta\theta_y,\Delta\theta_z$)。$\boldsymbol{H}$ 可分解为平移变换矩阵 $\boldsymbol{T}$ 和绕各坐标轴的旋转变换矩阵 $\boldsymbol{R}_x$、$\boldsymbol{R}_y$、$\boldsymbol{R}_z$：

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}1&0&0&\Delta x\\0&1&0&\Delta y\\0&0&1&\Delta z\\0&0&0&1\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{R}_x=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&\cos(\Delta\theta_x)&-\sin(\Delta\theta_x)&0\\0&\sin(\Delta\theta_x)&\cos(\Delta\theta_x)&0\\0&0&0&1\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{R}_y = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_y) & 0 & \sin(\Delta\theta_y) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\Delta\theta_y) & 0 & \cos(\Delta\theta_y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{R}_z = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_z) & -\sin(\Delta\theta_z) & 0 & 0 \\ \sin(\Delta\theta_z) & \cos(\Delta\theta_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

通过拟合得到的特征线可以求得变换矩阵中 Δx，Δy，Δz 和 $\Delta\theta_x$，$\Delta\theta_y$，$\Delta\theta_z$ 的值。

3.3　互相关测度计算

通过拟合得到的特征线求取变换矩阵并不一定是能够得到最佳配准结果的变换矩阵，需要在一定范围内调节变换矩阵中的参数以达到最佳配准结果。本文引入互相关测度以评价配准结果的好坏。定义两组相同维数相同大小的数据互相关测度如下：

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (W_{1mn} - \bar{W}_1)(W_{2mn} - \bar{W}_2)}{\sqrt{\sum_m \sum_n (W_{1mn} - \bar{W}_1)^2 \sum_m \sum_n (W_{2mn} - \bar{W}_2)^2}},$$

其中：$\bar{W}_1$，$\bar{W}_2$ 分别为矩阵 $W_1(x,y)$ 与 $W_2(x,y)$ 中各元素的算术平均值。当两组有效弹痕纹理信息互相关测度达到最大时认为变换矩阵能够将待配准数据的姿态和位置调整至最佳。

4　实验结果与分析

在 PC 机上使用 MATLAB 平台完成相关实验。采集某手枪弹头的原始数据后，对其直接进行三维显示，结果如图 2 所示。从图中可以看出显示效果与手枪弹头表面轮廓不符，证明原始数据不适应直接进行三维显示。

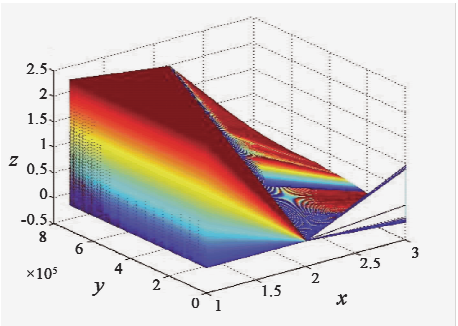


图 2　原始数据三维显示结果

Fig. 2　3D display of the original data

将原始数据转换为计算机能够识别的三维数据后显示结果如图 3 所示。从图中可以看出弹头的轮廓和表面纹理信息，采用 2.2 中所述方法对数据进行去噪并同均值滤波法处理结果比较如图 4 所示。配准结果如图 5 所示，为了更直观地表示配准后的结果，将三维深度信息映射至灰度域内并按灰度图像方式显示配准结果如图 6 所示。

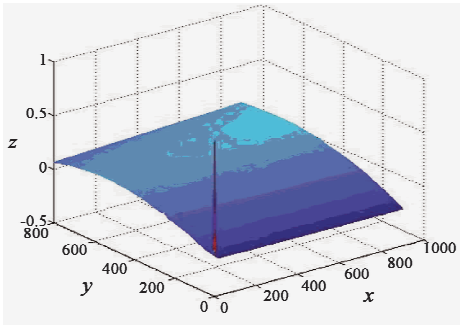
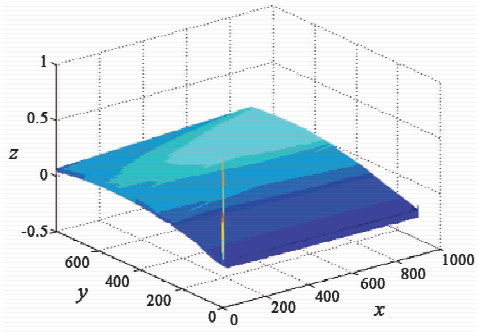


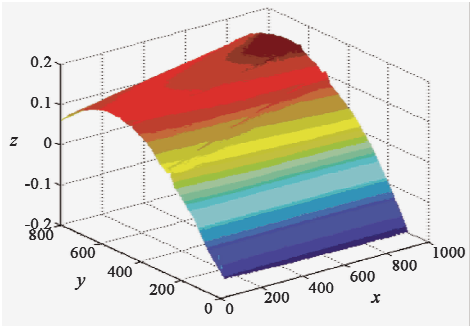
图 3　变换后数据三维显示结果

Fig. 3　3D display of the data after transforming



(a)均值滤波结果

(a)Result of using 2D mean filter



(b)本文所提算法结果

(b)Result of using the proposed method

图 4　去噪结果对照

Fig. 4　Results of de-noising method

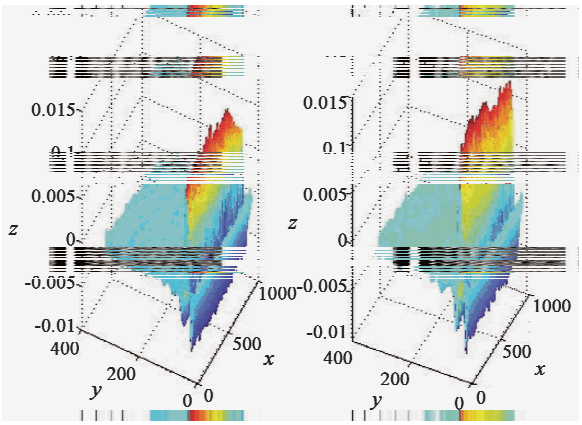


图 5 弹痕三维纹理配准结果

Fig. 5 3D display of the registration

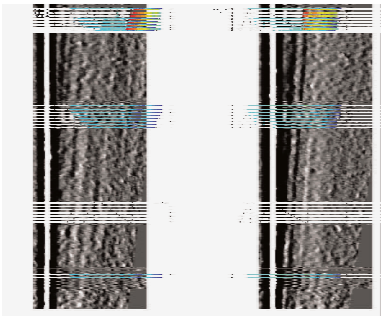


图 6 弹痕三维纹理二维配准结果

Fig. 6 2D display of the registration of the 3D

针对弹头样本分别设计基于本文配准方法的弹头痕迹比对实验和原始三维弹头比对实验，结果如表 1 所示，其中 D1 与 D2 为同一支枪发射的子弹弹头痕迹数据集，D1 与 D3 为同一型号不同枪支发射的子弹弹头痕迹数据集，D1 与 D4 为不同型号不同枪支发射的子弹弹头痕迹数据集，每组数据集内样本个数为 100，共计 400 发子弹。表 1 列出了 D1 与其他 3 组数据集间的互相关测度值。

表 1 互相关度比较结果

Tab. 1 Comparison results of the correlation

本文/原始	最高	最低	平均值
D2	0.92/0.84	0.72/0.64	0.88/0.75
D3	0.61/0.52	0.34/0.20	0.50/0.33
D4	0.33/0.28	0.12/0.05	0.19/0.11

根据互相关测度计算结果制定弹痕比对策略，从表 1 可以看出采用本文配准算法能够消除不同比对情况下互相关测度值的重叠，能够将比对正确率从 90%提高至 98%。

5 结 论

三维枪弹痕迹比对在涉枪刑事案件侦破过程中有着重要的实用价值，三维弹痕自动配准是三维枪弹痕迹比对过程中的关键技术。本文提出了一种采用区域特征匹配的弹痕三维数据配准算法。通过剪切波阈值变换对数据进行去噪，避免弹头纹理信息的丢失。去噪后采用一维高斯滤波器从不同方向提取弹痕纹理信息，避免了轮廓信息对互相关测度的影响，最后通过齐次变换矩阵将不同弹痕三维数据调整至同一位置和姿态。实验表明，本文所提方法应用于计算机对枪弹痕迹自动比对时，能够将比对正确率从 90%提高至 98%。目前，该配准方法已经应用于某型三维枪弹痕迹自动比对系统中。

参 考 文 献：

[1] Forensic Technology. A superior solution: What makes forensic technology's IBIS TRAX-3D the most advanced ballistic imaging solution in the world today [EB/OL]. http://www.forensictechnology.com,2009.

[2] 狄芳，顾辉. 弹痕三维数据与图像处理研究[J]. 兵工自动化，2011，30(12)：41-43.
Di F, Gu H. 3D data and image processing research on the bullet mark [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2011, 30(12): 41-43. (in Chinese)

[3] Nyúl L G, Udupa J K, Saha P K. Incorporating a measure of local scale in voxel-based 3-D image registration [J]. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 2003, 22(2): 228-237.

[4] Besl P J, Mckay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.

[5] 孙军华，谢萍，刘震，等. 基于分层块状全局搜索的三维点云自动配准[J]. 光学精密工程，2013，21(1)：174-180.

Sun J H, Xie P, Liu Z, *et al*. Automatic 3D point cloud registration based on hierarchical block global search [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 174-180. (in Chinese)

[6] 李一芒，何昕，魏仲慧. 采用三维形貌特征匹配的弹痕自动比对[J]. 哈尔滨工程大学学报，2013，34(3)：1-7.
Li Y M, He X, Wei Z H. Automatic comparison of bullet marks by matching 3-D topography of different bullets [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(3): 1-7. (in Chinese)

[7] 张明照，牟建华，刘扬，等. 应用复 Morlet 小波变换分析条纹图相位[J]. 光学精密工程，2012，20(3)：643-650.
Zhang M Z, Mou J H, Liu Y, *et al*. Phase extraction for fringe patterns based on complex Morlet wavelet transform [J]. *Optics and Precision Engineering*. 2012, 20(3): 643-650. (in Chinese)

[8] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 2 版. 北京：电子工业出版社，2007：276-322.
Gonzalez R C. *Ditital Image Processing* [M]. 2nd Ed. Beijing: Pubushing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)

[9] Guo K, Labate D. Optimally sparse multidimensional representation using shearlets [J]. *SIAM J. Math Anal*. 2008, 39(1): 298-318.

[10] 王雷，李彬，田联房. 基于平移不变剪切波变换的医学图像融合[J]. 华南理工大学学报：自然科学版，2011，39(12)：13-18.
Wang L, Li B, Tian L F. Medical image fusion based on shift-invariant shearlet transformation [J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2011, 39(1): 298-318. (in Chinese)

[11] 杨国梁，雷松泽. 基于贝叶斯估计自适应软硬折衷阈值 Curvelet 图像去噪技术[J]. 西安工程大学学报，2011，25(6)：857-861.
Yang G L, Lei S Z. The image denoising method of soft and hard adaptive thresholding based on curvelet transform and Bayesian estimation [J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2011, 25(6): 857-861. (in Chinese)

[12] 乔培玉. 基于三维形貌的弹痕比对系统的研究[D]. 北京：中国科学院大学，2012.
Qiao P Y. Research on ballistics of bullet comparing system based on three dimensional surface topography [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)

作者简介：韩冬松(1987－)，男，吉林白城人，博士研究生，主要从事动态干涉仪方面的研究。E-mail: 281054872@qq.com

何昕(1966－)，男，吉林长春人，研究员，博士研究生导师，主要从事光学精密仪器、光电测控设备等方面的研究。E-mail: hexin6627@sohu.com