

文章编号 1004-924X(2014)07-1946-09

融合纹理特征与深度信息的足迹自动比对算法

凌剑勇^{1,2*}, 何 昕¹, 魏仲慧¹, 李一芒¹, 梁国龙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. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:讨论了刑事案件侦破过程涉及的足迹检验方法。考虑现有的足迹比对研究没有将足迹的深度信息与纹理信息分离后进行比对,提出了一种融合纹理特征与深度信息的比对方法来实现足迹的自动比对功能。该方法通过四步相移补偿法来获取真实足迹特征的三维信息;利用改进的二维高斯滤波器分离足迹的表面纹理特征与深度信息。最后,采用区域互相关测度分别计算不同三维足迹信息中纹理信息之间和深度信息之间的相似度,并按一定策略将量化的相似度信息转化为定性的判别结果。实验结果表明,提出的方法能够有效分离足迹中的纹理信息和深度信息,并能通过软件编程实现计算机对足迹的自动比对。与传统的针对二维图像灰度信息的足迹对比方法相比,提出的算法能够描述真实的足迹形貌,在现有数据集范围内,自动比对正确率不低于 90%;加入人工干预后,比对正确率可达 100%。得到的结果验证了提出方法的有效性。

关键词:足迹检验;自动比对;纹理特征;深度信息;三维信息

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142207.1946

Footprint automatic alignment algorithm fusing texture features and depth information

LING Jian-yong^{1,2*}, HE Xin¹, WEI Zhong-hui¹, LI Yi-mang¹, LIANG Guo-long¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: yongy0216@gmail.com*

Abstract: The footprint detection methods in criminal cases were discussed. As existing footprint comparison does not separate the footprint depth information and texture information, a comparison method fusing texture features and depth information was proposed to achieve automatic comparison of footprints. First, 3-D information of a footprint was obtained through four-step phase shift compensation method to retain much 3-D information of the footprint, and a 2-D variable-scale Gaussian filter was designed to separate footprint surface texture features and depth information. Finally, the regional cross-correlation measurement method was used to calculate the similarity of texture information and the depth information of the 3-D footprint, and the similarity information was quantized and translated in qualitative results by proposed strategy. Experimental results show that

收稿日期:2013-05-16;修订日期:2013-06-13.

基金项目:国防科技预研基金资助项目(No. 1040603)

the proposed method can separate the texture and depth information of footprints effectively, and footprint comparison is realized automatically by computer software. Comparing to the traditional method of 2-D image grayscale information, the proposed algorithm describes the footprint information more completely. The accuracy rate of automatic comparison is higher than 90%, and the accuracy rate of comparison reaches 100% after adding human intervention based on the existing database, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: footprint detection; automatic comparison; texture feature; depth information; 3-D information

1 引言

足迹是人在刻板式动力定型作用下产生的痕迹,它既包含痕迹特征,也包含步法特征。足迹检验被广泛应用于刑事案件的侦破过程,其检验结果在刑事诉讼中有着重要意义。传统针对现场或实物的人工检验方法效率低,且需要鉴定人员有丰富的经验,而通过计算机实现足迹的自动比对则能够提高效率,并使鉴定过程客观化。目前我国关于足迹检验主要通过图像处理技术对拍摄获得的足迹二维图像进行处理与分析,其主要是通过分析足迹纹理特征,比对鞋或鞋印之间的纹理相似度。文献[1]做了相关研究,但由于采集足迹图像时易受光线等外界条件干扰,导致信噪比较低。为了分辨细微特征,达到更好的视觉效果,需对图像进行增强。图像增强过程即是二维信号处理过程,它虽然可以提高图像信噪比,但会损失一定信息;另外,二维足迹图像本身也缺少深度方向的信息,而三维足迹信息能够获得足迹表面的真实纹理特征而非反光特性,同时还能够获得足迹深度方向的信息。因此采用三维足迹信息作为足迹比对与鉴定的原始数据在信息量上较二维足迹图像更具科学性、丰富性和完整性。

闫旭琴^[2]等人设计的足迹比对系统采用的是传统的二维图像,其主要技术路线是比对足迹图像中的纹理特征点,但实际采集的足迹样本往往受到环境等因素影响,不能保证纹理信息的完整和清晰。董菲菲^[3]、蒋晓玲^[4]等人设计的足迹三维比对系统,是通过分析足迹纹理立体信息进行足迹相似度比对;这种方法能够更客观地反映鞋印的立体信息,但由于其没有考虑到鞋印磨损度、以及现场环境等因素,还是无法更客观地描述足迹的立体信息如何反映人的体貌特征。而国外相

关学者如 Sargur N. Srihari^[5]、Sarah^[6]等人的研究充分考虑了足迹纹理信息比对过程中的特征点提取算法。他们的方法通过比较区域性相似度,匹配局部相似度,提取轮廓特征点等多种匹配融合算法大大提高了纹理比对有效性,但还是不能反映施力者的体貌特征。尽管文献[7-8]进行的足迹比对研究工作利用了三维测量数据,但没有真正意义上将纵向的深度信息利用完全。针对国内外有关足迹比对的研究都没有将足迹的深度信息与纹理信息分离后进行比对这一不足,本文提出一种基于三维足迹信息的足迹自动比对算法。该方法通过四步相移法获取三维足迹信息,采用改进的二维高斯滤波器分离足迹三维信息中的纹理信息与深度信息,最后采用区域互相关测度分别计算不同三维足迹信息间纹理信息和深度信息的相似度,并按一定策略将量化的相似度信息转化为定性的判别结果。

2 足迹三维数据数学表达

通过投影光栅相移三维测量法测量足迹表面纹理后,能够获得一组 $3 \times n$ 的二维数据,其以矩阵方式记为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n} \\ a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2n} \\ a_{31}, a_{32}, \dots, a_{3n} \end{bmatrix},$$

其中 $a_{1i}, (i=1, 2, \dots, n)$, $a_{2i}, (i=1, 2, \dots, n)$, $a_{3i}, (i=1, 2, \dots, n)$ 分别表示第 i 个测量点在测量系统坐标系中到 yoz , xoz , xoy 3 个平面的距离。矩阵 \mathbf{A} 虽然包含了测量点的三维信息,但其形式不适于在计算机上对足迹三维信息进行显示,旋转,平移,滤波等操作。因此需将矩阵 \mathbf{A} 进行变换以适应计算机处理。分析矩阵 \mathbf{A} 可得如下性质:

$$\exists k, t \in \mathbf{N}^+, \text{ s. t.}$$

$$\begin{cases} k \cdot t = n \\ \forall i, j (i=0, 1, \dots, t-1; j=1, 2, \dots, k-1) \\ a_{1, i \cdot k + j + 1} - a_{1, i \cdot k + j} = a_{2, (i+1) \cdot k + j} - a_{2, i \cdot k + j} \\ \equiv \Delta a \in \text{const}; \end{cases} \quad (1)$$

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

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1k} \\ b_{21}, b_{22}, \dots, b_{2k} \\ \dots & \dots \\ b_{t1}, b_{t2}, \dots, b_{tk} \end{bmatrix},$$

其中 $b_{ij} = a_{3, i \cdot (k-1) + j}$ 。以 b_{11} 为原点,在矩阵行方向自左向右建立 x 轴,列方向自下而上建立 y 轴,通过行间距与列间距表征式(1)中的 Δa ,则 $B(x, y)$ 可以完全、直观地表示三维测量结果中各点的位置关系与深度信息,同时 $B(x, y)$ 在形式上更便于计算机对数据进行各种处理操作。

3 足迹特征提取

比较所测得的三维点云数据,能够更直观清楚地获得具有深浅和纹理两部分独立特征的信息。线性滤波法足迹比对过程中,为保证进行后期比对的样本不出现误差,首先要使进行比对的各组足迹数据所处的观测位置及姿态一致,但现场采集很难保证这两点。由于数据是通过移动式硬件设备采集的,采集效果受环境制约,从而不能保证每个现场采集样本的采集位置都相同,所以在对数据进行比对前,需对三维数据进行图像配准处理。传统的足迹比对是基于二维灰度信息进行特征点提取、配准,而基于足迹三维信息的比对是获取足迹的深度信息,因此传统的配准方法将不再适用。三维信息的配准计算主要有两种方法:一是基于几何特征的配准计算,二是基于体素特征的配准计算^[9-10]。基于几何特征的配准算法需要提取出物体的几何特征,然后再进行匹配;而基于体素特征的配准算法则是直接利用足迹深度信息进行相似度计算。由于基于几何特征的配准算法需要物体具有明显的几何特征,因此本系统采用了基于体素特征的配准计算方法对数据进行配准。

3.1 基于高斯滤波器的三维特征提取

通过对测量数据的转换处理,得到足迹的三

维测量信息 $B(x, y)$,其表达式如下:

$$B(x, y) = F(x, y) + N(x, y), \quad (2)$$

其中: $F(x, y)$ 表示真实足迹三维信息; $N(x, y)$ 表示数据中存在的噪声。本文采用加权中值滤波算法对三维信息进行滤波去噪预处理。预处理后得到的足迹三维信息 $F(x, y)$ 包含深度信息和足迹纹理两部分。深度信息反映了现场采集到足迹信息的深浅特性,分离出的足迹纹理也是实际比对中的重要对象。深度信息和足迹纹理本质上是波长不同的信号,可以通过滤波的方法对其进行分离。

由于高斯滤波器^[11]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原始几何形状的形变,因此高斯滤波器更加适用于足迹比对;同时在表面粗糙度的测量中,国际标准 ISO11562 也明确规定,把高斯滤波器所得的滤波中线作为表面粗糙度测量领域的评定中线。

以高斯函数为权函数的滤波器称为高斯滤波器,其权函数的表达式为:

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (3)$$

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:

$$h(t) = \frac{1}{\alpha\lambda_c} e^{-\pi(t/\alpha\lambda_c)^2}, \quad (4)$$

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 $\alpha = 0.4697$ 。其频域表达式为:

$$Y_m(\Omega) = X(\Omega) \cdot H(\Omega), \quad (5)$$

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。利用冲激响应不变法进行逼近滤波器^[12]的设计,取滤波器的级数为 16 级,幅度传输特性为:

$$\left| H_d(e^{j\frac{2\pi}{n}}) \right|^{32} = \left[\frac{a^2}{1 + (1-a)^2 - 2(1-a)\cos\frac{2\pi}{n}} \right]^{16}. \quad (6)$$

在一维空间内,由于信息量少,数据具有局部性,不能够反映整体的足迹特征。将一维权函数扩展到二维空间,就能实现对足迹的二维整体提取,因此更能反映足迹的真实情况。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,根据前面讲述的一维高斯滤波器的设计方法,可以得出二维逼近高斯滤波器的权函数如下:

$$\begin{aligned}
 & |H_d(e^{j\frac{2\pi}{n_x}}, e^{j\frac{2\pi}{n_y}})|^{32} = \\
 & |H_d(e^{j\frac{2\pi}{n_x}})|^{16} \cdot |H_d(e^{j\frac{2\pi}{n_y}})|^{16} = \\
 & \left[\frac{a^2}{1+(1-a)^2-2(1-a)\cos\frac{2\pi}{n_x}} \right]^{16} \cdot \\
 & \left[\frac{a^2}{1+(1-a)^2-2(1-a)\cos\frac{2\pi}{n_y}} \right]^{16}, \quad (7)
 \end{aligned}$$

其中: $a=2\pi/(\sqrt{\beta_1} \times N_c)$; $\beta_1=0.0905$.

本文针对足迹纹理信息的方向性特征,设计了一种基于传统二维高斯滤波器的改进型滤波器,即将原有的二维滤波器转换为相互独立的两次一维滤波器进行卷积,从而能够保证横向及纵向分别进行卷积,以便在 x 方向和 y 方向分别提取纹理信息,再采用前文所述的 16 级逼近二维高斯滤波器对 $F(x, y)$ 进行滤波,以去除深度信息。将滤波器转化为形如二维高斯滤波器的二维滤波器的对 $F(x, y)$ 进行滤波,可以分离出原始数据的高频信息及低频信息,即足迹纹理信息和深度信息 $I(x, y), T(x, y)$, 分别如公式(8)、(9)所示:

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= F(x, y) \times \\
 & \left[\frac{a^2}{1+(1-a)^2-2(1-a)\cos\frac{2\pi}{n_x}} \right]^{16} \otimes \\
 & \left[\frac{a^2}{1+(1-a)^2-2(1-a)\cos\frac{2\pi}{n_y}} \right]^{16}. \quad (8) \\
 T(x, y) &= F(x, y) \times \\
 & \left\{ 1 - \left[\frac{a^2}{1+(1-a)^2-2(1-a)\cos\frac{2\pi}{n_x}} \right]^{16} \otimes \right. \\
 & \left. \left[\frac{a^2}{1+(1-a)^2-2(1-a)\cos\frac{2\pi}{n_y}} \right]^{16} \right\}. \quad (9)
 \end{aligned}$$

通过式(8)、式(9)的改进,能够完成对三维图像数据的多方向纹理提取,通过高斯拟合的方法,分离出深度与纹理信息。

3.2 有效足迹特征提取与比对

本文通过计算两组足迹三维信息的互相关度完成足迹三维信息的比对^[13-14]。对分离出的足

迹三维信息及纹理信息均采用比较互相关度方法进行比对,互相关度的计算公式如下所示:

$$R = \frac{\sum_m \sum_n (G_{1nm} - \bar{G}_1)(G_{2nm} - \bar{G}_2)}{\sqrt{\sum_m \sum_n (G_{1nm} - \bar{G}_1)^2 \sum_m \sum_n (G_{2nm} - \bar{G}_2)^2}} \quad (10)$$

$G(x, y)$ 在数学表达上是二维矩阵形式,因此在计算有效足迹纹理信息间相关度时采用二维矩阵互相关算法,即计算 $G_1(x, y)$ 与 $G_2(x, y)$ 的互相关度 R ,其中 \bar{G}_1, \bar{G}_2 分别为矩阵 $G_1(x, y)$ 与 $G_2(x, y)$ 中各元素的算术平均值。由此得到的足迹纹理信息 $I(x, y)$ 的互相关度用 R_{texture} 表示;足迹深度信息 $T(x, y)$ 的互相关度用 R_{depth} 表示。

3.2.1 足迹深度信息特征分析

足迹的深度信息能够直观地反映人整个脚的用力特性,通过观察各个分离出的足迹深度信息可以发现,所有足迹深度信息的外轮廓均呈现长腰型。一般而言,任意一个足迹的深度信息均可被人为地划分成 4 个区域,即:脚尖区域、前脚掌区域、足弓区域、脚跟区域。如图 1 所示,其中 4 个区域所占的相对长度分别近似为:足迹总长的 10%, 40%, 15% 和 35%。

利用高斯滤波可以分离出足迹深度信息,得到深浅程度不同的区域,按由深入浅的顺序排列依次为:脚掌区域、脚跟区域、脚尖区域、足弓区域。经分析可知,在足迹三维测量过程中,通过选取不同的权重可以突出有效比对区域;通过分离出的足迹深度信息可以判断个人体重及走路习惯,通过现场足迹信息的相对比例能客观地描述犯罪嫌疑人的步法特征。足迹深度信息表达式为 $T(x, y)$ 。

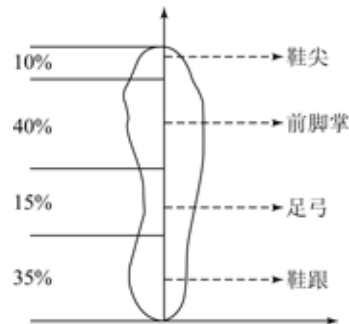


图 1 足迹深度信息有效区域划分图

Fig. 1 Effective regional division diagram of depth information for footprint

3.2.2 足迹纹理信息特征分析

虽然并没有明确的定义,但在计算机图形学中,纹理一般是指物体表面或结构的一种基本属性。由于纹理形式的多样性,目前仍没有一个正式的有关纹理的定义,但其可以总结归纳为以下 4 点特征:

(1) 足迹纹理存在局部序列性,并在该序列大的区域中连续重复。

(2) 不能单一当成点进行处理,更应体现为区域特性。

(3) 各个部分大致是均匀分布的统一体,有大致相同的尺寸。

(4) 具有方向性、深度性、密度性和粗糙程度等特征。

三维数据显示的并非真正的二维图像,因此不能通过灰度值对三维数据进行处理。经过去噪处理、高斯滤波器分离提取纹理信息、图像配准等预处理后,对足迹三维纹理信息在 0~255 的灰度级上进行拉伸,实现三维信息的二维表示。此时的图像由于进行了信息分离能够直观地表示出足迹纹理信息。对所采集的足迹纹理信息进行分析,其可分为闭合曲线和非闭合曲线两大类,经过初始判断后,进一步分类。由于花纹鞋底样式层出不穷,很难将它们具体归一化为涵盖所有类型的统一类别,这里将现有的各种鞋底花纹归纳为点形、交织形、直线形、弧形、波形、弧波形、圆形、以及图案型等。

对 10 种常见花纹纹理的描述进行操作。在足迹纹理信息比对过程中,由于所提供足迹的三维信息经过高斯滤波处理后,通过展平、拉伸得到的是三维信息的二维表示,并不能仅用传统的图片处理的方法进行处理,所以本文参考足迹纹理分类及识别方法,首先对进行比对的足迹纹理进行纹理形状的识别,在所得识别率、相似度最高的 5 个足迹纹理中,逐一计算各纹理信息与目标足迹的纹理信息的 $I(x, y)$ 的互相关度。

3.3 改进的三维足迹比对策略

在传统的二维纹理图像比对以及现有鞋印三维测量的相关研究的基础上,本文提出了一种融合足迹三维数据深度信息特征及纹理特征的比对

策略。足迹三维数据的深度信息能够反映出人本身的相关特征,通过比较点云中各部分的互相关度来客观地描述 2 个足迹间各部分的相似度,可排除纹理及不同采集环境的影响;而在剥离了深度信息及排除光照影响等因素后,纹理相似度能够更客观准确地反映两个足迹间的相似度。

本文利用互相关度以及纹理特性归纳的方法对足迹信息进行比对,通过比较被测样本与所提供测试样本集中各样本的相似度来确定足迹的测试结果。另外,本文还通过调整两部分权值来确定最终结果。比对过程流程图如图 2 所示:

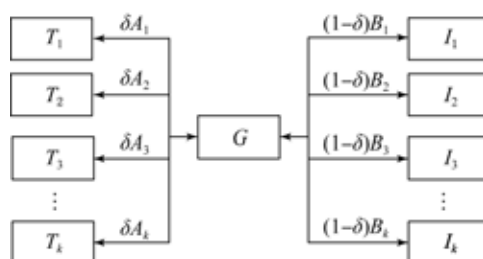


图 2 足迹三维数据比对流程图

Fig. 2 Comparison flowchat of footprint 3D data

图 2 中, G 表示待测足迹; $T_i (i=1, \dots, k)$, $I_i (i=1, \dots, k)$, $A_1 \sim A_k$ 表示被测足迹深度信息样本集各样本间的相似度, $B_1 \sim B_k$ 表示被测足迹纹理信息样本集各样本间的相似度。由于深度信息能够更客观地反映人的体貌特征,所以权值 δ 取值一般为 0.5~1。具体根据现场采集的数据进行调整,以提高识别准确率。

4 实验结果与分析

本文在配置为 Intel(R)Xeon(R) CPU 5110 @ 1.60GHz, 2.00 GB 内存的 PC 机上使用 MATLAB(R2010)平台,通过编写图形化用户接口(GUI)程序,以及三维点云成像软件 surfacer 完成相关实验。

所采集足迹原始数据的三维显示结果如图 3 所示。图 3 表明原始数据格式不能通过计算机直接显示,显示结果与足迹三维形貌不符。

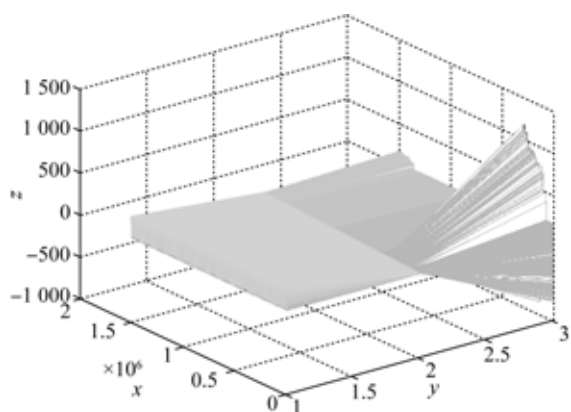


图 3 原始数据三维显示结果
Fig. 3 3D display of original data

采用 2.1 节所述的方法对原始数据进行转化,其转化结果记为 $B(x, y)$, 所得结果的软件三维显示如图 4 所示。

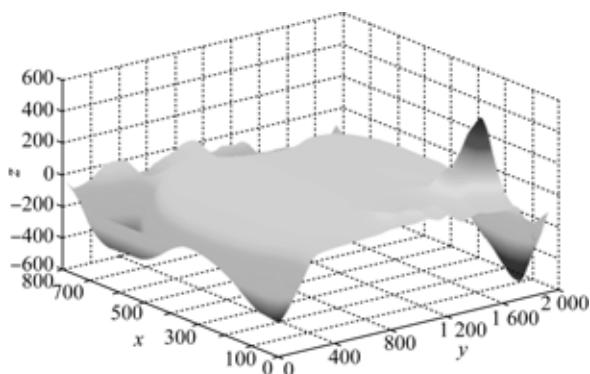
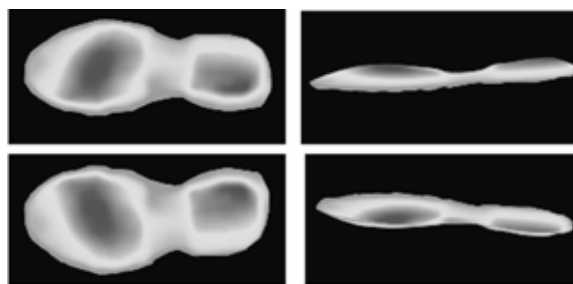
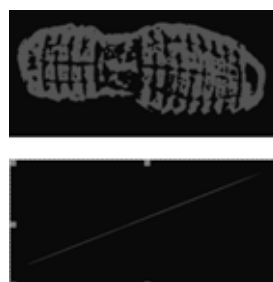


图 4 变换后数据三维显示结果
Fig. 4 3D display of data after transforming

采用本文方法将足迹三维数据分离为深度信息及纹理信息,它们分别为三维形貌显示和三维显示,结果如图 5 所示。足迹三维信息按 0~255 灰度拉伸后的二维显示结果如图 6 所示。其中:图 5(a)所示的是通过高斯滤波分离得到的足迹深度信息的三维显示,由图 5(a)能够清楚地观察到足迹的高低深浅、各部分用力分布特征,并且不包含任何纹理信息。而图 5(b)则是通过高斯滤波得到的足迹纹理信息。如图 5(b)中第二幅图所示,表面纹理信息以切片式的提取出来,显示为一个平面,从而很好地排出了深度信息的干扰。



(a) 足迹深度信息显示结果
(a) Results of depth information of footprint



(b) 足迹纹理信息显示结果
(b) Results of texture information of footprint
图 5 足迹深度信息、纹理信息三维显示结果

Fig. 5 3D display of footprint



(a) 三维深度信息的二维表示
(a) 2D representation of 3D depth information



(b) 三维纹理信息的二维表示
(b) 2D representation of 3D texture information
图 6 足迹三维深度、纹理信息的二维表示结果

Fig. 6 2D representation results of 3D topography of a footprint

通过二维高斯滤波分离出足迹的深度信息和纹理信息后,为进行下一步比对运算,需要对每幅三维图像进行图像配准,并截取有效的足迹深度信息及纹理信息进行互相关测度计算。图像配准过程及显示如图 7 所示。本文选取两组足迹三维数据按上述操作计算出的深度互相关测度为 0.908 2,纹理互相关度为 0.843 3,它们的二维显

示比较结果如图 8(a)所示,三维显示比较结果如图 8(b)所示。

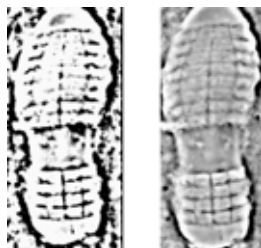
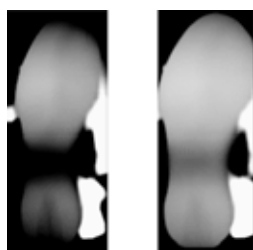


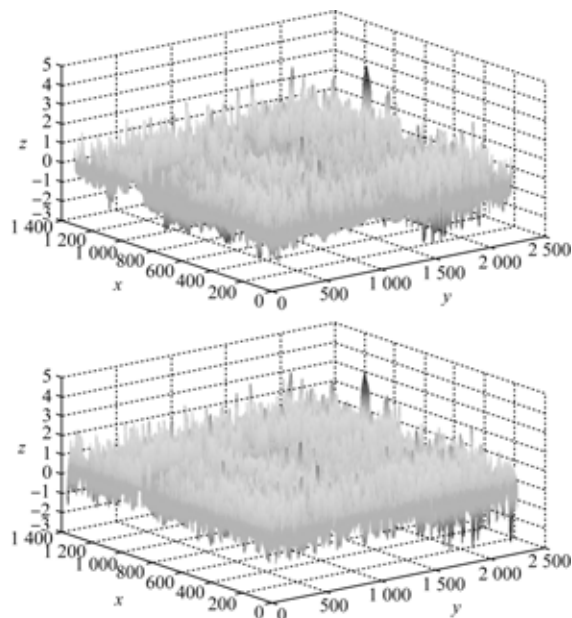
图 7 足迹三维深度信息、纹理信息配准

Fig. 7 Registration results of 3-D topography for footprint



(a)三维深度信息的二维表示

(a)2D representation of 3D depth information



(b)三维深度信息

(b)3D depth information

图 8 足迹三维深度信息比较结果

Fig. 8 Comparison results of 3D depth information for footprint

为将定量互相关测度信息进行定性判别,进行了如下实验。主要设计了 4 类情况,即同鞋同人,不同鞋不同人,同鞋不同人,不同鞋不同人。选取 10 人,两种鞋,在雪地、石膏和沙地 3 种背景下进行足迹三维测量采样。将 10 人平分为两组,分别穿两种鞋,组成 4 组测试组。由于初始步伐和结束步伐往往会出现用力不均、下意识调整等因素,不能完全反映个人的真实信息。为避免误差,每组测试对象走 100 步,利用测试设备采样其中第 40~70 步,各采集 30 组组成测试样本集,共 120 组。具体过程由 ABCDE 被测对象分别穿甲鞋、乙鞋,FGHIJ 分别穿甲鞋、乙鞋,在雪地环境下进行测量。测量数据依次记为样本集 D1、D2、D3、D4,4 种实验进行分离比较,即 D1 与 D2,D1 与 D3,D1 与 D4。对测试样本集 D1、D2、D3、D4 按照本文方法进行处理,由每组测试集分离出的足迹深度信息和纹理信息组成新的样本集,即 (D11, D12)、(D21, D22)、(D31, D32)、(D41, D42)。实验中,对每个待测足迹的三维数据进行相同操作,得到各测试样本深度信息的互相关度,以及纹理信息的互相关度,分别如表 1、表 2 所示。

表 1 足迹深度信息互相关度计算结果

Tab.1 Results of depth information correlation for footprint

	最高互相关度	最低互相关度	平均值
D21	0.934 5	0.794 5	0.864 5
D31	0.356 6	0.105 2	0.230 9
D41	0.156 0	0.064 5	0.400 5

表 2 足迹纹理信息互相关度计算结果

Tab.2 Results of texture information correlation for footprint

	最高互相关度	最低互相关度	平均值
D22	0.512 3	0.282 4	0.397 4
D32	0.912 2	0.819 5	0.865 9
D42	0.375 2	0.149 3	0.262 3

实验结果表明,在已有数据范围内和同样环境下,对于同人同鞋(D1 与 D2),由本文的算法计

算得出的深度互相关度不低于 0.75,纹理信息互相关度不低于 0.8;同一种鞋,不同人之间(D1 与 D3)的深度信息相关度不超过 0.4,但最低值不低于 0.1,纹理信息相关度普遍大于 0.3,但不超过 0.55;不同人不同鞋之间(D1 与 D4)的深度信息相关度基本小于 0.2,纹理信息相关度小于 0.4。通过将实验数据与真实结果进行比较,能够得出以下结论:单纯比对深度信息可以反映出人的体重、走路习惯、脚掌用力分布等特征,能客观反映嫌疑人的个人信息;而比较纹理信息则能够客观反映两双鞋之间的相似程度,判断是否为现场留下的足迹,从而能够直观反映出足迹的可视特征的相似程度。通过分析实验数据,提出以下判定规则:在通过计算机软件进行相关度自动比对时,当深度信息的互相关测度大于 0.75,则判定两足迹为同一人,而小于 0.75 时,则判定为不同人;当纹理信息的互相关度大于 0.8,则判定两双足迹为同一双鞋,而小于 0.8,则判定为不同鞋。通过比较实验比对结果与真实结果发现,真实结果受采集环境、样本完整性等影响,往往会出现深度信息符合判定标准,而纹理信息不符合判定条件,或纹理信息在判定范围内,而深度信息没有达到标准的情况。本文针对这一情况,设定了足迹深度信息与纹理信息相融合的比对策略。分析大量实验经验显示,权值 δ 取值为 0.6 时,深度信息与纹理信息融合效果最佳,根据现场足迹信息的完整性及粒度性,深度信息权重提高至 0.6~0.8,就能够提高所采集到的不完整证据的正确识别率。

参考文献:

- [1] RAINER G, BJÖRN E, HEIKO S, JOACHIM H. Comparison and classification of 3D objects surface point clouds on the example of feet[J]. *Machine Vision and Applications*, 2011, 22: 235-243.
- [2] 闫旭琴. 自动鞋印分析与比对系统中的关键技术的研究与实现[D]. 青岛: 山东科技大学, 2007.
- YAN X Q. *The research and implementation of the major techniques in automatic shoeprint analyzing and matching system* [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2007. (in

Chinese)

当深度信息互相关度小于 0.75,大于 0.6,而纹理信息在判定范围内时,其平均互相关度大于 0.68,也判定为同人同鞋;当纹理信息互相关度小于 0.8,大于 0.7,而深度信息在判定范围内时,其平均互相关度大于 0.71,判定为同人同鞋。如果允许人工干预,则将足迹深度信息互相关度设定为 0.5~0.7、足迹纹理信息互相关度设定为 0.6~0.8,比较结果交由经验丰富的痕迹学家进行判别。采用上述策略对 120 组实验数据进行判别,将比对结果与真实结果进行比较,由计算机获取的结果显示其正确率最高达到了 95.6%,加入人工干预后,正确率可达 100%。

5 结 论

本文提出了一种融合图像纹理信息与深度信息实现足迹自动对标的算法,该算法基于三维形貌特征的足迹自动比对和先前的足迹纹理比对方法,将原始的三维形貌特征转化为矩阵形式,并通过滤波处理去除噪声;然后选取合适的采样参数对滤波后数据进行二维高斯滤波,提取并分离足迹深度信息和足迹纹理信息。通过图像配准后,对足迹深度信息和纹理信息进行互相关度计算实现比对。实验结果表明,应用所提算法通过计算机技术进行三维足迹自动比对时,正确率可达到 90%以上,较之原有单一比对方法的 80%,有了显著提高,加入人工干预后,正确率可达到 100%,能够满足公安系统在足迹比对方面的要求。

Chinese)

- [3] 董菲菲. 基于三维鞋印的鞋底花纹分类及模块设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
- DONG F F. *Classification of sole patterns from a 3-Dimensional shoe model and module design*[D]. Nanchang: The University of Nanchang, 2010. (in Chinese)
- [4] 蒋晓玲. 基于图像处理技术的足迹检验系统的设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- JIANG X L. *Design and implementation of footmark technology*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

- [5] YI T, SARGUR N S, HARISH K, JASON J C. Footwear print retrieval system for real crime scene marks [C]. *IWCF 2010*, 2011, 88-100.
- [6] SARAH R, SIMON R, WESLEY V, *et al.*. Reliability of a two-dimensional footprint measurement approach [J]. *Science and Justice*, 2010, 113-118.
- [7] 郭威. 立体痕迹三维数据化检验初探[J]. *中国人民公安大学学报:自然科学版*, 2008, 4:12-13.
GUO W. 3D-based digitalized examination on stereoscopic traces [J]. *Journal of Chinese People's Public Security University: Science and Technology*, 2012, 4:12-13. (in Chinese)
- [8] 郭威, 丁锰, 杜春勇. 一种三维测量和检验枪弹痕迹的方法[J]. *中国人民公安大学学报:自然科学版*, 2009, 2:5-7.
GUO W, DING M, DU CH Y. 3D-based measurement and examination of firearms traces[J]. *Journal of Chinese People's Public Security University: Science and Technology*, 2009, 2: 5-7. (in Chinese)
- [9] 王欣, 张明明, 于晓, 等. 应用改进迭代最近点方法的点云数据配准[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20 (9): 2068-2077.
WANG X, ZHANG M M, YU X, *et al.*. Point cloud registration based on improved iterative closest point method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (9): 2068-2077. (in Chinese)
- [10] 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匹配[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21 (1):174-180.
SUN J H, XIE P, LIU ZH, *et al.*. Automatic 3D point cloud registration based on hierarchical block global search [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (1):174-180. (in Chinese)
- [11] *A Superior Solution: What Makes Forensic Technology's IBIS TRAX-3D the Most Advanced Ballistic Imaging Solution in the World Today* [R]. <http://www.forensictechnology.com>, 2009.
- [12] 乔培玉. 基于三维形貌的弹痕比对系统的研究 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
QIAO P Y. *Research on ballistics of bullet comparing system based on 3-D surface topography* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, China, 2012. (in Chinese)
- [13] 李平, 魏仲慧, 何昕, 等. 基于自适应互信息测度法的弹壳比对[J]. *光电工程*, 2012, 39(12):42-48.
LI P, WEI ZH ZH, HE X, *et al.*. Cartridge case comparison based on adaptive mutual information measure method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(12):42-48. (in Chinese)
- [14] SHEIDA H, RIAN M S, JOHN B. The interpretation of shoeprint comparison class correspondences [J]. *Science and Justice*, 2012, 52:243-248.

作者简介:



凌剑勇(1985—),男,汉族,吉林长春人,博士研究生,主要从事三维测量、图像处理和数据挖掘等方面的研究。
E-mail: yongye0216@gmail.com



何昕(1966—),男,汉族,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事图像处理、光电测量等方面的研究。
E-mail: hexin6627@sohu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)