

特征选取方法说明

一、图像灰度特征选取

对于图像灰度特征，本研究共分为灰度分布特征、灰度统计特征、灰度差分统计特征三个部分进行选取，其选取方法及结果分别如下文和表 1 所示。

1、灰度分布特征

灰度分布特征指选区图像中每个灰度级别内像素点的个数占像素总数的分布情况，可直接显示灰度直方图，它描述了一幅灰度图像中的灰度级与出现这种灰度的概率之间的关系，实际上反映了不同人行走，足迹压痕的轻重不同、分布不同，此特征较为稳定。

设 (x,y) 为灰度图像中的一点， $f(x,y)$ 为该点的灰度，其离散取值为变量 r ，即图像中像素的灰度级别。对于本研究中的平面赤足迹灰度图像，进行滤波、除噪等预处理后，灰度值范围是 $0\sim 255$ ，将其设定为 10 级作归一化处理， r 的范围为： $0\leq r\leq 1$ 。可用概率密度函数 $P_r(r)$ 来表示平面赤足迹图像中的灰度分布特点（ 10 维）：

概率密度函数：

$$P_r(r) = \frac{n_r}{n} \% \quad (1)$$

其中， n 为像素总数， n_r 为平面赤足迹图像中第 r 级灰度所包含的像素个数。

2、灰度统计特征

基于统计学原理描述平面赤足迹灰度图像中足迹灰度分布情况（ 4 维）：

1) 平均灰度值：

$$m = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N n_r \quad (2)$$

2) 能量：

$$e = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N n_r^2 \quad (3)$$

3) 标准方差：

$$s = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N [n_r - m]^2 \quad (4)$$

4) 平均残差：

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N |n_r - m| \quad (5)$$

式中, $N=10$, 为灰度级数, n_r 为平面赤足迹灰度图像中第 r 级灰度所包含的像素个数。

3、灰度差分统计特征

用于描述平面赤足迹灰度图像的纹理特征(4维), 设 (x, y) 为图像中一点, $f(x, y)$ 为该点的灰度, 该点与和它只有微小距离的点 $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ 的灰度差分 $g_{\Delta}(x, y)$ 为:

$$g_{\Delta}(x, y) = g(x, y) + g(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (6)$$

设灰度差分值的取值可能性共有 m 种, 令点 (x, y) 为全图上移动的动点, 计算出 $g_{\Delta}(x, y)$ 取各个像素的次数, 以得到 $g_{\Delta}(x, y)$ 取值的概率 $P_{\Delta}(i)$, 由此可得出 $g_{\Delta}(x, y)$ 的直方图。当取得较小值 i 的概率 $P_{\Delta}(i)$ 较大时, 表明图像的纹理较粗糙, 概率较小时, 纹理较细。

1) 对比度:

$$CON = \sum_{i=1}^m i^2 P_{\Delta}(i) \quad (7)$$

2) 角度方向二阶矩:

$$ASM = \sum_{i=1}^m [P_{\Delta}(i)]^2 \quad (8)$$

3) 熵:

$$ENT = \sum_{i=1}^m P_{\Delta}(i) \lg P_{\Delta}(i) \quad (9)$$

4) 平均值:

$$MEAN = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m i P_{\Delta}(i) \quad (10)$$

表 1 基于图像灰度特征的赤足迹特征参数

Table.1 Characteristic parameters of barefoot footprints based on image grey scale features

序号	特征参数名称	字母表示	计算方法说明	属性
1	概率密度函数 1	$P_r(1)$	$\frac{n_1}{n} \%$	百分比

2	概率密度函数 2	$P_r(2)$	$\frac{n_2}{n} \%$	百分比
3	概率密度函数 3	$P_r(3)$	$\frac{n_3}{n} \%$	百分比
4	概率密度函数 4	$P_r(4)$	$\frac{n_4}{n} \%$	百分比
5	概率密度函数 5	$P_r(5)$	$\frac{n_5}{n} \%$	百分比
6	概率密度函数 6	$P_r(6)$	$\frac{n_6}{n} \%$	百分比
7	概率密度函数 7	$P_r(7)$	$\frac{n_7}{n} \%$	百分比
8	概率密度函数 8	$P_r(8)$	$\frac{n_8}{n} \%$	百分比
9	概率密度函数 9	$P_r(9)$	$\frac{n_9}{n} \%$	百分比
10	概率密度函数 10	$P_r(10)$	$\frac{n_{10}}{n} \%$	百分比
11	平均灰度值	m	$\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N n_r$	数值
12	能量	e	$\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N n_r^2$	数值
13	标准方差	s	$\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N [n_r - m]^2$	数值
14	平均残差	δ	$\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N n_r - m $	数值
15	对比度	CON	$\sum_{i=1}^m i^2 P_{\Delta}(i)$	数值
16	角度方向二阶矩	ASM	$\sum_{i=1}^m [P_{\Delta}(i)]^2$	数值
17	熵	ENT	$\sum_{i=1}^m P_{\Delta}(i) \lg P_{\Delta}(i)$	数值
18	平均值	MEAN	$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m i P_{\Delta}(i)$	数值

二、长宽角度特征选取

人在运动过程中，足受接触面条件、行走姿态等影响，所形成的赤足足迹会发生微弱的改变，这种变异是正常的，也是不可避免的。在现场检验过程中，检验人员通常会人为修正这些误差，以避免错误结论。但在本研究中，由于所有特征均由计算机编程自动识别、提取，只需要事后做很少一部分误差修正。故而很小的误差也可能导致实验数据的大幅变动。因此，对特征点的选取，必须严格依据足迹学中平面赤足足迹特征的分类标准和计算机模式识别的技术要求，其选取方法及结果分别如图 1 表 2 所示。具体操作步骤如下：

(1) 足长：垂直于足迹中心线（Y 轴）且与赤足足迹最长趾前缘和跟后缘相切的两条直线间的距离。令足迹最长趾前缘切点为 P，则足长为 OP。

(2) 跖宽：平行于足迹中心线（Y 轴）且与掌内缘和掌外缘相切的两条直线间的距离。令掌内缘切点为 S_1 ，掌外缘切点为 S_2 ，则跖宽为 S_1S_2 。

(3) 各趾头长：为便于计算机自动识别与提取，将各趾长定义为各趾区域最大内切圆的直径，从第一趾到第五趾其长度分别为 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 。另定义各趾头中心为其内切圆圆心，分别为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 。

(4) 足跟后缘点到各趾中心的距离：连通坐标原点与各趾中心点的线段距离，分别为 OT_1 、 OT_2 、 OT_3 、 OT_4 、 OT_5 。

(5) 足弓宽：为便于计算机自动识别与提取，将其定义为平行于足迹中心线（Y 轴）且与弓区内缘和弓区外缘相切的两条直线间的最短距离，经两切点分别为 M_1 、 M_2 ，则足弓宽为 M_1M_2 。

(6) 跖区内、外缘点至跟后缘点的距离：即连通坐标原点与跖区内、外缘点的线段距离，分别为 OS_1 、 OS_2 。

(7) 足跟宽：为便于计算机自动识别与提取，将其定义为与跟区跟后缘、跟内缘、跟外缘内切的最大椭圆横轴长，定义椭圆的内、外顶点为 G_1 、 G_2 ，则足跟宽为 G_1G_2 。另令其椭圆圆心为 T_6 。

(8) 圆心距：第一趾内切圆圆心至足跟椭圆圆心的距离，即 T_1T_6 。

(9) 足跟椭圆内、外顶点至足掌内、外缘的距离：即椭圆的内、外顶点至足掌内、外缘凸点的距离，该距离分别为 G_1S_1 、 G_2S_2 。

(10) 跖跟距：掌区内、外缘连线中点至跟区椭圆圆心的距离，令掌区内、外缘连线中点为 F，则跖跟距为 FT_6 。

(11) 跖中点至各趾头中心距：掌区内、外缘连线中点与各趾中心点的线段距离，分别为 FT_1 、 FT_2 、 FT_3 、 FT_4 、 FT_5 。

(12) 特殊角：足掌内缘最凸点和第一趾内缘最凸点连线，与足掌内缘最凸点和足跟内缘最凸点的连线的夹角角度，定义为 $\angle 1$ 。根据形状分析中关于锥线的描述，可将前述线段 G_1S_1 定义为内锥线长，线段 G_2S_2 定义为外锥线长，分别求内锥线、外锥线与 X 轴所成锐角的角度，分别定义为 $\angle 2$ 、 $\angle 3$ 。

通过上述操作，共计 28 个特征在 MATLAB 里上述参数线的量化数据便可全部计算出，从而为基于长宽、角度特征的平面赤足迹身份信息识别工作提供科学的依据。



图 1 长宽特征示意图

Fig.1 Schematic diagram of length and width features

表 2 基于长宽角度特征的赤足足迹特征参数

Table.3 Characteristic parameters of barefoot footprints based on aspect angle features

序号	特征参数名称	字母表示	计算方法说明	属性
19	赤足足长	OP	垂直于足迹中心线（Y 轴）且与赤足足迹最长趾前缘和跟后缘相切的两条直线间的距离	距离
20	赤足跖宽	S_1S_2	平行于足迹中心线（Y 轴）且与掌内缘和掌外缘相切的两条直线间的距离	距离
21	第一趾长	C_1	第一趾区域内切圆的直径	距离
22	第二趾长	C_2	第二趾区域内切圆的直径	距离
23	第三趾长	C_3	第三趾区域内切圆的直径	距离
24	第四趾长	C_4	第四趾区域内切圆的直径	距离

25	第五趾长	C_5	第五趾区域内切圆的直径	距离
26	跟后缘至一趾中心距	OT_1	连通坐标原点与第一趾中心点的线段距离	距离
27	跟后缘至二趾中心距	OT_2	连通坐标原点与第二趾中心点的线段距离	距离
28	跟后缘至三趾中心距	OT_3	连通坐标原点与第三趾中心点的线段距离	距离
29	跟后缘至四趾中心距	OT_4	连通坐标原点与第四趾中心点的线段距离	距离
30	跟后缘至五趾中心距	OT_5	连通坐标原点与第五趾中心点的线段距离	距离
31	赤足弓宽	M_1M_2	平行于足迹中心线（Y轴）且与弓区内缘和弓区外缘相切的两条直线间的最短距离	距离
32	跖内缘至跟后缘距	OS_1	连通坐标原点与跖区内缘点的线段距离	距离
33	跖外缘至跟后缘距	OS_2	连通坐标原点与跖区外缘点的线段距离	距离
34	赤足跟宽	G_1G_2	与跟区后缘、内缘、外缘内切的最大椭圆横轴长	距离
35	圆心距	T_1T_6	第一趾内切圆圆心至足跟椭圆圆心的距离	距离
36	内锥线长	G_1S_1	跟区椭圆的内顶点至跖内缘最凸点的距离	距离
37	外锥线长	G_2S_2	跟区椭圆的外顶点至跖外缘最凸点的距离	距离
38	跖跟距	FT_6	跖区内、外缘连线中点至跟区椭圆圆心的距离	距离
39	跖中点至一趾中心距	FT_1	跖区内、外缘连线中点至第一趾中心点的距离	距离

	趾中心距		离	
40	跖中点至二趾中心距	FT_2	跖区内、外缘连线中点至第二趾中心点的距离	距离
41	跖中点至三趾中心距	FT_3	跖区内、外缘连线中点至第三趾中心点的距离	距离
42	跖中点至四趾中心距	FT_4	跖区内、外缘连线中点至第四趾中心点的距离	距离
43	跖中点至五趾中心距	FT_5	跖区内、外缘连线中点至第五趾中心点的距离	距离
44	特殊角 1	$\angle 1$	足跖内缘最凸点和第一趾内缘最凸点连线，与足跖内缘最凸点和足跟内缘最凸点连线的夹角角度	角度
45	特殊角 2	$\angle 2$	内锥线与 X 轴所成锐角角度	角度
46	特殊角 3	$\angle 3$	外锥线与 X 轴所成锐角角度	角度

三、几何形态特征选取

为了准确表述几何形态特征，本文采用平均曲率、周长、矩形度、复杂度和宽高比对几何形态特征进行描述。其选取方法及结果分别如图 2、表 3 所示。

1、平均曲率

曲率主要描述了曲线的凸凹性。若曲率大于零，则曲线的凹向指向该点法线的正方向；若曲率小于零，则曲线的凹向指向该点法线的负方向。故而曲率是一个边界描述指标，根据曲率可以判断边界斜率的变动。由于足迹边缘形态变化众多，幅度较明显，仅描述某一点的曲率并无实际意义，可用平均曲率对其进行描述。

平均曲率(mean curvature) 是在微分几何学中一个“外在的”弯曲测量标准，它局部描述了当一个曲面嵌入周围空间（比如二维曲面嵌入三维欧几里得空间）时的曲率，用 $k(t)$ 表示。曲率的计算公式为：

$$k = \left| \frac{d\delta}{ds} \right| = \left| \frac{\frac{y''^2}{1+y'^2} dx}{\sqrt{1+y'^2} dx} \right| = \left| \frac{y''}{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}} \right| \quad (11)$$

描述了 AB 曲线上的平均弯曲程度，则平均曲率的计算公式为：

$$\bar{k} = \frac{\Delta\delta}{\Delta s} \quad (12)$$

2、周长

边缘轮廓的周长定义为包围区域内部像素的边界长度，用 fl_h 表示。根据区域的周长可以判别简单形状和复杂形状的物体。简单形状区域的周长较短，复杂形状区域的周长较长。可将整个赤足足迹轮廓分段分区，每个部分的边缘轮廓较短，可采用统计边界上的像素数来大致表示边界长度。

设 L 为平面 xOy 中的一条简单、光滑的弧线， $f(x, y)$ 在 L 上有界，在 L 上任意插入一点列 M_1, M_2, \dots, M_n ，把 L 分成 n 个小弧段 ΔL_i 的长度为 ds ，又 $M_i(x, y)$ 是 L 上的任一点，作乘积 $f_i(x, y)ds$ ，并求和即 $\sum f_i(x, y)ds$ ，记 $\lambda = \max(ds)$ ，若 $\sum f_i(x, y)ds$ 的极限在当 $\lambda \rightarrow 0$ 的时候存在，且极限值与 L 的分法及 M_i 在 L 上的取法无关，则称极限值为 $f(x, y)$ 在 L 上对弧长的曲线积分，记为 $\int f(x, y)ds$ ，其中 $f(x, y)$ 叫做被积函数， L 叫做积分曲线，对弧长的曲线积分也叫第一类曲线积分。周长的表达式为：

$$fl_h = \int f(x, y)ds \quad (13)$$

(3) 矩形度

矩形度定义为区域面积与区域最小外接矩形面积的比值，它描述了目标区域在其外接矩形中占有的程度。矩形度 R 的计算式为

$$R = \frac{A_0}{A_{mer}} \quad (14)$$

式中： A_0 为目标区域面积； A_{mer} 为区域最小外接矩形面积； R 的取值范围为 $R \in [0, 1]$ 。

(4) 复杂度

复杂度定义为区域的周长平方与面积比值，它描述了区域边界的复杂程度。复杂度 C 的计算式为

$$C = \frac{p^2}{A} \quad (15)$$

式中： p 为区域周长； A 为区域面积。

(5) 宽高比

宽高比定义为区域最小外接矩形宽度与高度（长度）的比值。宽高比 r_a 的计算式为

$$r_a = \frac{W}{H} \quad (16)$$

其中， W 和 H 分别为区域最小外接矩形宽度和高度（长度）。通过宽高比 r_a 可以将细长的区域和圆形或方形的区域区分开。



图 2 几何形态特征示意图

Fig.2 Schematic diagram of geometric shape features

表 3 基于形态特征的赤足足迹特征参数

Table.3 Characteristic parameters of barefoot footprints based on morphological features

编号	特征参数名称	字母表示	计算方法说明	属性
47	跖前缘平均曲率	$k(1)$	$\bar{k} = \frac{\Delta\delta}{\Delta s}$	像素
48	跟后缘平均曲率	$k(2)$	$\bar{k} = \frac{\Delta\delta}{\Delta s}$	像素
49	跖内缘最凸点至足跟部椭圆内端点之间曲线平均曲率	$k(3)$	$\bar{k} = \frac{\Delta\delta}{\Delta s}$	像素

50	第一趾周长	$f1_1$	$\int f(x, y)ds$	像素
51	跖弓跟区周长	$f1_2$	$\int f(x, y)ds$	像素
52	跖弓跟区域矩形度	R	$R = \frac{A_0}{A_{mer}}$	数值
53	跖弓跟区域复杂度	C	$C = \frac{P^2}{A}$	数值
54	跖弓跟区域宽高比	r_a	$r_a = \frac{W}{H}$	数值
