

文章编号: 0253-2239(2010)10-2994-06

# 基于手部尺寸特征的手形认证方法

苑玮琦 董 茜\*

(沈阳工业大学视觉检测技术研究所, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要** 针对手形几何特征可测量的优点以及现有手形认证方法的局限性,提出了一种基于手部尺寸特征的手形认证方法。通过曲率角定位特征点,由特征点计算出手的不同部位的尺寸,再由这些尺寸构成相对长度特征向量,最后通过计算特征向量之间的欧氏距离实现手形认证。用该方法,在仅有5个特征参与匹配的情况下达到了91.08%的识别率,11个特征参与匹配时达到93.27%的识别率。结果表明,手的尺寸特征可以作为手形认证的一部分有效特征,应用该方法在选取的特征数较少的情况下即可得到较高的识别效果,且该方法实现简单、运算量小,具有实用性的特点。

**关键词** 医用光学与生物技术;生物特征识别;手形认证;尺寸特征;相对长度

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.2994

## Hand Shape Verification Method Based on Hand Geometry Feature

Yuan Weiqi Dong Qian

(Computer Vision Group, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China)

**Abstract** A method for personal identification based on hand geometric feature according to the measurable characteristic of hand shape is presented. Firstly feature points are localized by using curvature, according to which the absolute length of some parts of hand can be calculated. Then an eigenvector composed of relative lengths is obtained. The relative lengths in the eigenvector are generated from the absolute lengths of some parts of hand. At last, personal identification is achieved by computing Euclidean distance between eigenvectors. In the experiment, the accurate recognition rate is 91.08% by using only five characters, and 93.27% when the character number used to identify is 11. The experimental results show that, personal identification can be achieved by using the relative length of hand geometric feature. It can reach a high recognition rate only by use a few characters using the method proposed, and the method is easy to realize with characteristic of high utility.

**Key words** medical optics and biotechnology; biological-feature recognition; hand shape identification; geometry feature; relative length

## 1 引 言

生物特征识别技术是利用人自身的生理或行为特征进行身份识别的技术。每种生物特征都具有各自的优点和局限性<sup>[1]</sup>。与其它生物特征相比,手形生物特征具有以下优点:1)可接受程度高、识别匹配速度快<sup>[2,3]</sup>;2)易于采集,对采集设备要求不高,可以在低分辨率图像中提取出来;3)易于与其它生物特征识别技术联合起来使用<sup>[46]</sup>。虽然手形特征不

具备指纹、虹膜特征那样高度的唯一性,但对于要求不是很高的移民和门禁控制等应用方面具有绝对的优势。

目前的手形认证算法主要有2种:

1)基于点匹配的手形认证方法<sup>[7]</sup>。该方法将手指轮廓点集作为特征,使用点对点匹配的方法进行认证。它的特征数多不利于传输和存储,特征匹配<sup>[8]</sup>算法计算量大,由于匹配前需要解决旋转、平移

收稿日期: 2009-11-10; 收到修改稿日期: 2010-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(60672078,60972123)资助课题。

作者简介: 苑玮琦(1960—),男,博士,教授,主要从事机器视觉检测、生物特征识别等方面的研究。

E-mail: yuan1960@126.com

\* 通信联系人。E-mail: marylight@163.com

和缩放问题,不仅会大大增加算法的复杂性和处理时间,而且难以保证 2 幅图像在位置上的精确配准,会给后续的特征点匹配带来误差。

2) 基于特征矢量的认证方法<sup>[24]</sup>。使用手不同部位的几何尺寸作为特征,特征数少并且有利于传输和存储,匹配算法简单。但以往基于特征矢量的方法需要在采集台上设置固定栓来固定手的摆放位置和方向,且需要用户进行很好的配合,这样用户会觉得使用起来很不方便。

除以上 2 类外,郭振滨等<sup>[9]</sup>提出一种基于曲线拟合的方法,利用手指拟合曲线的系数作为匹配特征,将待匹配的手指进行归一化映射和仿射变换,通过解四元优化问题寻找最优解,最终求得 2 条欲匹配曲线的部分曲线在仿射变换下的最小距离。由于含有归一化映射和仿射变换以及求解优化问题的过程,因此计算复杂度较高。顾理等<sup>[10]</sup>提出基于模板匹配的方法,将手指轮廓图像作为模板,将 2 幅待匹配的手指图像先进行方向对准,然后在区域内部遍历搜索最大相似位置。顾理等<sup>[11]</sup>还提出将点匹配和矢量匹配融合的方法,其中用到的点匹配方法也是在区域内部搜索最大相似位置。上述几种方法均需要进行方向对准以及搜索求取最优解的过程,计算量与时间较大,不利于实际应用。

针对现有手形认证方法的不足,本文针对无固定栓、非接触条件下采集的手形图像,提出了用手的各部位尺寸之间的比值作为相对长度特征,进而构成相对长度特征向量来进行身份认证的方法。使用各长度间的比值作为特征既能保留手形的主要特征信息,又能够抵消在同一平面内的平移、旋转和缩放的影响,且实现简单,特征数少,适合于实际应用。

通过大量观察不同人的手形发现,每个人不同手指的长度比值、宽度比值、手指宽度与长度的比值、手指长度与手掌宽度的比值等特征存在差异性。因此本文利用这些特征,分别构成 3 个包含不同特征个数的特征组合,然后分别用每个特征组合作为手形匹配特征各进行了两组实验:1) 通过在图上标记特征点测量出尺寸特征进行识别实验,验证本文选取的特征组合的区分能力;2) 通过本文算法提取特征进行自动识别实验,验证本文算法的可行性。

## 2 实验测量方法

实验图库全部采用香港科技大学提供的手形数

据库<sup>[12]</sup>。它包括 254 个人,且每个人 10 幅右手的图像,图像分辨率为 640 pixel×480 pixel。原始图像如图 1 所示。

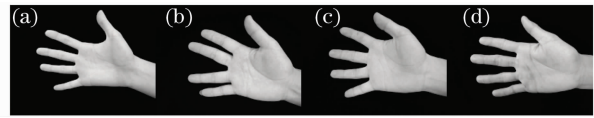


图 1 手形图库样本

Fig. 1 Samples of hand shape picture bank

与虹膜<sup>[13,14]</sup>、指纹等特征不同的是手的尺寸特征具有可测量的优点,这就为检测正确提取手形特征下的识别效果提供了有利条件。因此先用标点测量的方法得到所需的特征,然后计算特征提取正确情况下的识别结果。由于大拇指活动过于灵活,只对其余 4 个手指提取特征。首先在图像上标记出除大拇指以外每个手指的 1 个指尖点和 2 个指根点,以及手掌宽度的上下各 1 个边缘点。通过标记的特征点计算出各绝对长度,包括每个手指的长度、手指的不同部位的宽度以及手掌宽度(图 2),然后将绝对长度之间的比值作为相对长度,再由相对长度构成特征向量。

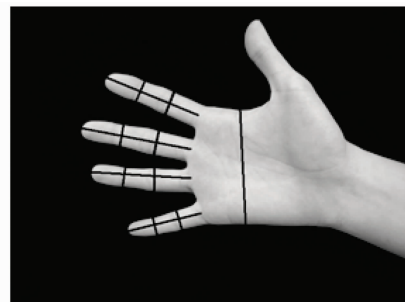


图 2 测量绝对长度特征示意图

Fig. 2 Schematic of absolute-length feature measurement

## 3 自动识别方法

### 3.1 预处理

提取特征前需先对原始手形图像进行一系列的预处理,找到关键特征点。首先对图像进行二值化及中值滤波,二值化处理使用 Otsu 方法<sup>[15]</sup>,中值滤波是为了滤除噪声引起的小孔洞<sup>[16]</sup>。然后对滤波后的二值图像用轮廓提取<sup>[17]</sup>算法提取出手形轮廓,用轮廓跟踪算法将手形轮廓表示为欧氏空间中的有序点集,进而在轮廓图像上进一步定位出特征点。手形自动识别过程如图 3 所示。

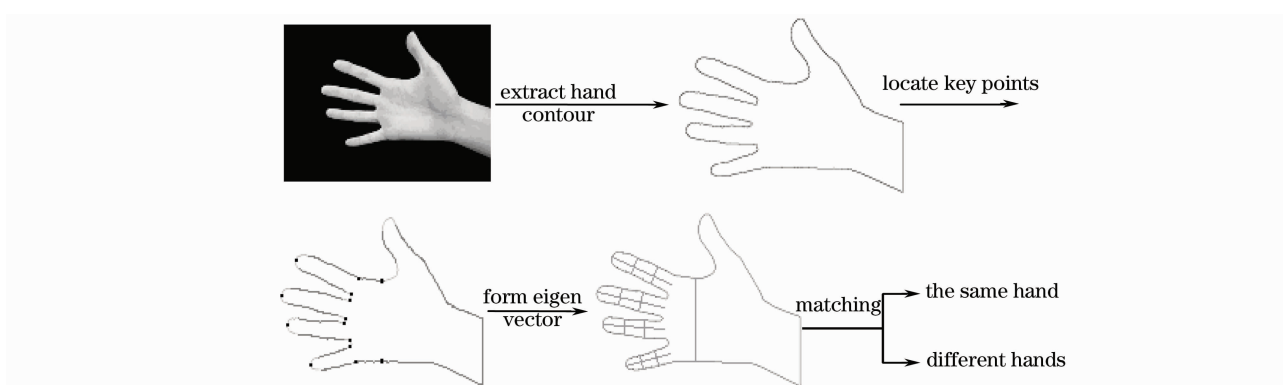


图 3 手形自动识别过程

Fig. 3 Automatic identification process of hand shape

### 3.2 定位特征点

#### 3.2.1 手指特征点的定位

通过计算找到手形轮廓线上弯曲程度比较大的区域,即可得到指尖和指根区域,然后在这些区域中进一步定位指尖和指根点。曲率和曲率角是用来表示曲线弯曲程度的参数,但在实际应用中计算较为复杂,因此用 2 个向量之间的夹角来替代曲率角,如图 4(a)所示。 $\zeta(s)$  代表  $F$  点两侧向量  $\mathbf{FF}_1$  和  $\mathbf{FF}_2$  之间的夹角,夹角越大表示曲线在该点处的弯曲程度越小;夹角越小表示曲线的弯曲程度越大。计算公式如下:

$$\zeta(s) = \arccos\left(\frac{\mathbf{FF}_1 \cdot \mathbf{FF}_2}{|\mathbf{FF}_1| \cdot |\mathbf{FF}_2|}\right). \quad (1)$$

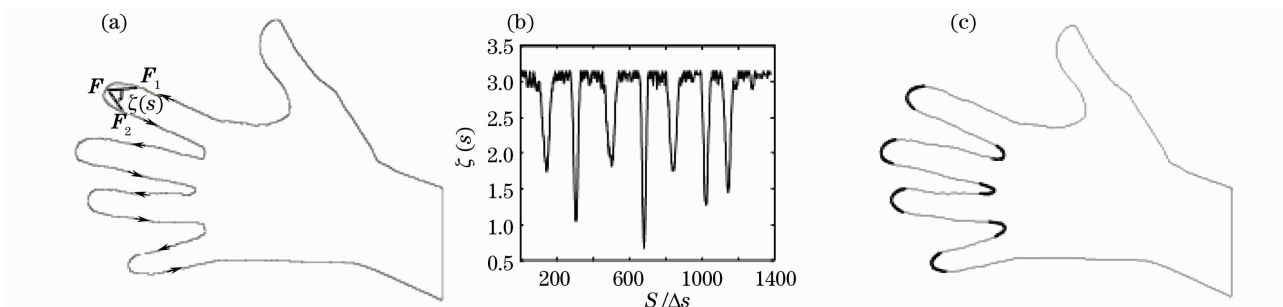


图 4 寻找曲率变化明显区域。(a) 手形轮廓曲线上  $\zeta(s)$  计算示意图;(b) 图 4(a) 中手指轮廓取  $\Delta s=20$  的  $\zeta(s)$  曲线图;(c) 曲率变化明显的区域

Fig. 4 Searching zone with the obvious change of curvature. (a) calculate  $\zeta(s)$  on the traced hand contour; (b)  $\zeta(s)$  of the finger contour in Fig4(a) with  $\Delta s=20$ ; (c) detected corners (marked as thick dots) on the traced contour

然后将找到的曲率变化明显的各区域的中间点作为找到的角点  $P$  (即指尖点或指根点)。为了区分各角点  $P$  是指尖点还是指根交叉点,需要构造由点  $P$  和  $P$  所在的曲率变化明显区域的两侧端点组成的三角形,并寻找三角形的质心。如果质心在手指轮廓内则为指尖点,否则为指根交叉点。由此可得到 4 个指尖点  $T_i (i=1, 2, 3, 4)$  和 3 个指根交叉点  $C_i (i=1, 2, 3)$ 。由于手指根部连接处的非线性活

取  $F$  与  $F_1, F$  与  $F_2$  之间的轮廓点数  $\Delta s=20$  (为实验得出的经验值)。对手形轮廓线上从拇指指根点开始延逆时针方向逐点计算曲率角(拇指指跟点的定位方法见 3.2.2 节),得到的曲率角曲线如图 4(b)所示。图中呈向下尖峰状区域即为指根或指尖所在的弯曲程度较大的区域。可设定一个阈值 [本文取 2.5 为经验值,换算成对应的曲率角角度为  $(\pi \times 2.5)/3.14 = (180^\circ \times 2.5)/3.14 \approx 143.3^\circ$ ], 曲率角小于该阈值时,认为该点属于指根或指尖区域。遍历结束后寻找到 7 个曲率变化比较明显的区域,如图 4(c)所示。

动,通过曲率方法找到的指根交叉点只能用于分开邻近手指,因此为了准确确定指根点需进一步定位,定位步骤如下:

1) 在已确定的指根交叉点  $C_i (i=1, 2, 3)$  处沿边界向前和向后各扫描若干像素点,扫描的像素点个数为该指跟区域像素点个数 [即图 4(c) 中被描黑的指根区域] 的一半。连接该指根交叉点与扫描终止点之间的线段,在该线段两端点之间的手形轮廓

上,寻找距离该线段最远的点,(即为精确指根点)由此可得到指根点  $V_{iU}(i=2,3,4), V_{iD}(i=1,2,3)$ 。

2) 确定食指和小拇指的外边界指根点。以食指为例,连接点  $T_1$  和点  $V_{1D}$  得到线段  $T_1V_{1D}$ ,以  $T_1$  为圆心,  $|T_1V_{1D}|$  为半径沿逆时针方向画圆,与手形轮廓的第一个交点即为食指的外边界点  $V_{1U}$ ,使  $|T_1V_{1D}| = |T_1V_{1U}|$ 。小拇指做类似处理得到外边界点  $V_{4D}$ ,使  $|T_4V_{4D}| = |T_4V_{4U}|$ ,如图 5 所示。从而寻找到四指的指尖点  $T_i(i=1,2,3,4)$  和指根点  $V_{iU}, V_{iD}(i=1,2,3,4)$ 。

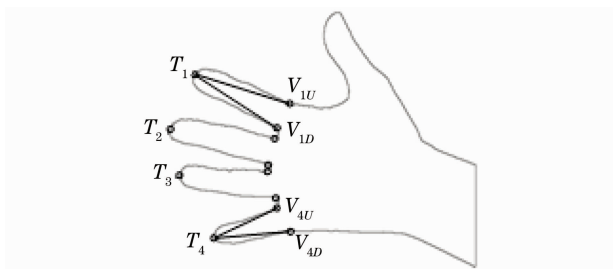


图 5 定位指尖点和指根点

Fig. 5 Localization of fingertip points and valley points

### 3.2.2 手掌宽度的定位

用扫描线法自右向左逐列扫描手形轮廓图像,找到第一列出现 3 个以上轮廓点的位置,将该列自下而上的第 2 个轮廓点定为大拇指与食指交叉的指根点(图 6),图 6 中  $B$  点即为找到的拇指指根点。连接过食指外指根点与小指外指根点的直线  $V_{1U}V_{4D}$ ,计算出该直线的斜率,然后找到拇指指根点  $B$  与食指外指根点  $V_{1U}$  连线的中点  $O$ ,过  $O$  点做直线  $V_{1U}V_{4D}$  的平行线交手形轮廓图像于  $M_1, M_2$  两点,将  $M_1, M_2$  之间的线段长度定为手掌宽度。

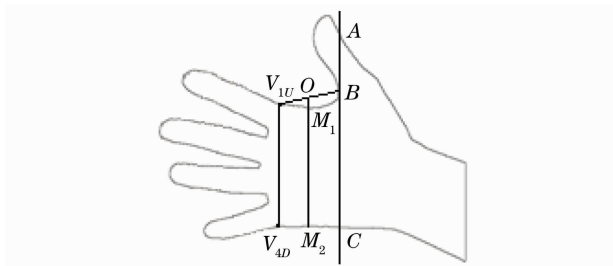


图 6 手掌宽度的定位

Fig. 6 Localization of palm width

### 3.3 特征向量的构成

由 3.2 节方法定位出的特征点计算出各绝对长度,再由绝对长度的比值构成相对长度特征,进而构成特征向量。提取的绝对长度共 13 个,分别为除大拇指外其余 4 个手指的长度、每个手指的  $1/3, 2/3$  长度处的 2 个宽度和 1 个手掌宽度。选取的相对长

度特征有 4 类,包括不同手指的长度之比、不同手指的宽度之比、手指宽度与手指长度之比、手指长度与手掌宽度之比,分别构成了 3 组特征向量进行识别实验。3 组特征向量的构成如下:

1) 特征向量 1:食指长度/中指长度;无名指长度/中指长度;小指长度/中指长度;手指平均宽度/手指平均长度;中指长度/手掌宽度。

2) 特征向量 2:食指长度/中指长度;无名指长度/中指长度;小指长度/中指长度;食指宽度/中指宽度;无名指宽度/中指宽度;小指宽度/中指宽度;手指平均宽度/手指平均长度;中指长度/手掌宽度。

3) 特征向量 3:食指长度/中指长度;无名指长度/中指长度;小指长度/中指长度;手指平均宽度/手指平均长度;中指长度/手掌宽度;食指宽度 1/中指宽度 1;无名指宽度 1/中指宽度 1;小指宽度 1/中指宽度 1;食指宽度 2/中指宽度 2;无名指宽度 2/中指宽度 2;小指宽度 2/中指宽度 2。

其中,手指平均宽度为 4 个手指的 8 个宽度的平均值,手指平均长度为 4 个手指长度的平均值。特征向量 2 中食指宽度、中指宽度、无名指宽度和小指宽度分别指其  $1/2$  长度处的宽度。特征向量 3 中手指宽度 1 和手指宽度 2 分别指每个手指  $1/3, 2/3$  长度处的宽度。“/”为除号,3 组特征向量的特征个数分别为 5, 8 和 11。

### 3.4 认证决策

采用欧氏距离作为认证决策。设某用户注册的特征向量是  $\{d_i, i=1, 2, \dots, n\}$ ,待认证的手形特征向量是  $\{d'_i, i=1, 2, \dots, n\}$ ,其中  $n$  表示特征向量的维数,2 个特征向量的欧氏距离  $D$  越小,表明 2 个特征向量越贴近。当  $D$  小于某一阈值  $T$  时,则判断为同一人的手,否则为不同人的手。计算公式为

$$D = \sum_{i=1}^n \sqrt{(d_i - d'_i)^2}. \quad (2)$$

接受者操作特性(ROC)曲线是对识别系统的一种最常用的评价方法,能有效地表征一个识别系统的性能。选取等错误率情况下(即误识率与误拒率相等)的距离作为判决阈值,如图 7(b)所示。图中 2 条曲线误识率(FAR)和误拒率(FRR)交点处对应的欧氏距离即为所选取的判决阈值。

## 4 实验结果及分析

为充分验证所提取特征的有效性,用香港科技大学的手形图像库进行了验证实验。图库中包括 254 个人,每人 10 幅右手图像,图像分辨率为

640 pixel×480 pixel。实验对图库图像进行两两匹配,计算在等错误率(EER)情况下的正确识别率(ARR)。将来自同一个人手不同图像间的匹配作为类内匹配;将不同人手的图像之间的匹配作为类间匹配。对图库中 254 个人的手形图像进行测量实验,并分别计算 3 组特征的认证结果;再从图库中选取 180 个人应用文中算法进行自动识别实验,验证特征提取的准确程度。

#### 4.1 测量实验

对图库中 254 个人的 2540 幅图像,用第 2 节提到的测量方法得到所需的各个相对长度特征,组成

表 1 实际测量与自动识别对应关系表

Table 1 Relation table of actual measure and automatic recognition

Method	Eigen vector	Character number	EER /%	ARR /%
Actual measure	1	5	7.88	92.29
Actual measure	2	8	6.34	93.81
Actual measure	3	11	5.83	94.38
Automatic recognition	1	5	9.16	91.08
Automatic recognition	2	8	7.68	92.52
Automatic recognition	3	11	6.92	93.27

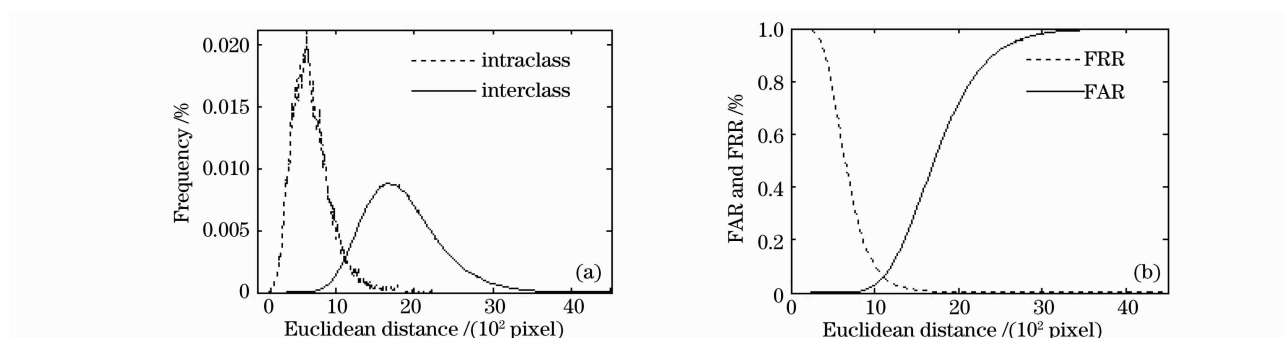


图 7 特征向量三的实际测量实验结果。(a) 距离分布曲线图;(b) ROC 曲线

Fig. 7 Measurement results of eigen vector three. (a) Distance distribution; (b) ROC curvature

#### 4.2 自动识别实验

从手形库中选取了 180 个人,每人 10 幅右手图像,共 1800 幅图像,应用第 3 节的自动识别方法提取特征。对选取的 3 个特征向量分别进行匹配实

选取的 3 组特征向量,分别进行匹配实验。每组特征向量共进行  $C_{2540}^2 = 3224530$  次匹配实验,其中类内匹配为  $254 \times C_{10}^2 = 11430$  次,类间匹配为  $C_{2540}^2 - 254 \times C_{10}^2 = 3224530 - 11430 = 3213100$  次。实验结果如表 1 所示。仅列出了第 3 组特征向量的类内与类间距离分布曲线如图 7(a) 所示,等错误率曲线如图 7(b) 所示,ARR 是正确识别率。本文 FAR 为错误识别个数/类间匹配次数,FRR 为错误拒绝个数/类内匹配次数,ARR 为  $1 - [(\text{错误拒绝次数} + \text{错误接受次数}) / \text{总匹配次数}]$ 。

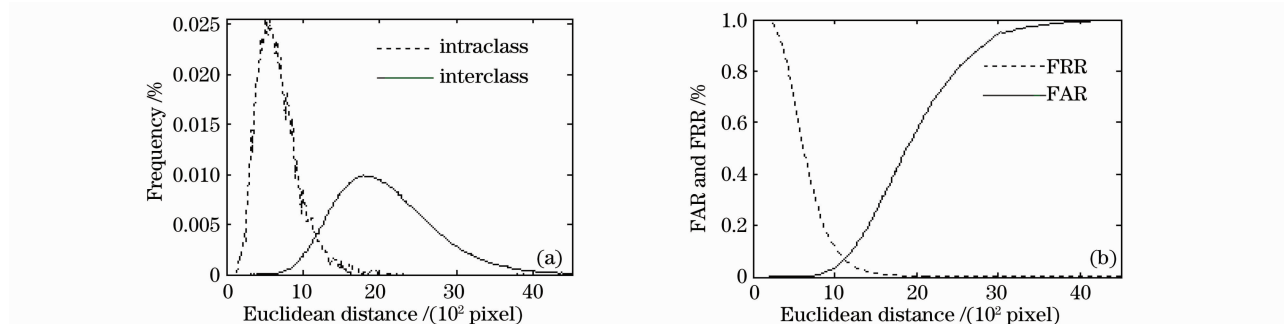


图 8 特征向量三自动识别实验结果。(a) 距离分布曲线图;(b) ROC 曲线

Fig. 8 Automatic recognition results of eigen vector three. (a) Distance distribution; (b) ROC curvature



从图 7(b), 图 8(b) 中, 阈值  $T$  (横坐标) 越大, 误拒率越小, 误识率越大;  $T$  越小误拒率越大, 误识率越小。在实际应用中, 一般先统计出错误率曲线, 然后根据系统的实际需要适当调整阈值大小。实验中均选取最佳阈值 (即 FAR 等于 FRR 时的阈值), 匹配结果如表 1 所示。

从表格中的实验结果可以看出, 采用文中介绍的自动识别方法, 算法自动提取特征构成的 3 个特征向量得出的识别率与实际测量得出的识别率相差均不超过 1.5%, 说明这种方法是可行的。在用测量方法提取特征的情况下, 选取的 3 组特征分别达到了 92.29%, 93.81% 和 94.38% 的识别率; 自动识别情况下分别达到 91.08%, 92.52% 和 93.27% 的识别率, 说明本文选取的特征组合是有效的。仅用 5 个特征进行匹配认证时就可达到 91.08% 的识别率, 选用 11 个特征时可达 93.27% 的识别率, 具有较好的识别结果。

## 5 结 论

针对手指自然张开状态、无固定栓和非接触条件下采集的手形图像进行研究, 采用手部几何尺寸的相对长度作为特征, 使得本文方法不受采集时手的平移、旋转 (在同一平面内旋转, 且大方向不变) 和缩放的影响。选取多种不同长度的比值作为特征, 分别由 5, 8 和 11 个相对长度特征构成 3 组特征向量, 应用实际测量和自动识别方法分别进行实验。自动识别方法得出的识别率与实际测量得出的识别率之差均不超过 1.5%, 说明本文的方法是可行的。使用本文的方法, 在仅有 5 个特征参与匹配的情况下即可得到 91% 以上的识别率, 当选取 11 个特征时可达 93.27% 的识别率, 说明了本文选取的特征组合的有效性和可行性。本文的方法计算简单, 选取的特征数少, 方便特征的传输和存储, 有利于硬件实现, 具有实用性的特点。在选取特征数较少的情况下即可达到较高的识别效果, 可以作为一种有效的手形认证方法, 也可作为手部多生物特征识别中的一种有效特征。

**致谢** 感谢香港科技大学提供的手形图像库, 使得本文实验顺利完成。

## 参 考 文 献

1 J. G. Daugman. High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence [J]. *IEEE Trans. Pattern*

- Analysis and Machine Intelligence*, 1993, **15**(11): 11451161
- 2 Raul Sanchez-Reillo, Carmen Sanchez-Avila, Ana Gonzalez-Marcos. Biometric identification through hand geometry measurements [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(10): 11681171
- 3 Raul Sanchez-Reillo. Hand geometry pattern recognition through Gaussian mixture modeling [C]. Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference on Pattern Recognition, Washington, USA: IEEE Computer Society Press, 2000. 29372940
- 4 A. K. Jain, A. Ross, S. Pankanti. A prototype hand geometry based verification system [C]. Proc. of 2nd Int'l Conference on Audio-and Video-Based Biometric Person Authentication (AVBPA), Washington D. C. 1999. 166171
- 5 T. Savic, N. Pavesic. Personal recognition based on an image of the palmar surface of the hand [J]. *Pattern Recognition*, 2007, **40**: 31523163
- 6 A. Uhl, P. Wild. Personal recognition using single-sensor multimodal hand biometrics [C]. Proc. 3rd Internat. Conf. on Image and Signal Processing, France, 2008. 396404
- 7 Anil K. Jain, Nicolae Duta. Deformable matching of hand shapes for verification [C]. IEEE Internat. Conf. on Image Processing, Kobe, Japan, 1999. 857861
- 8 Yang Zhanlong, Guo Baolong. Image mosaic technique on pseudo-zernike moments of interest points [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 15481552
- 杨占龙, 郭宝龙. 基于兴趣点伪泽尼克矩的图像拼接 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 15481552
- 9 Guo Zhenbin, Qiu Zhengding. A new hand shape biometric verification method based on curve fitting [J]. *J. Computer Research and Development*, 2005, **42**(11): 18701875
- 郭振滨, 裴正定. 基于曲线拟合的手形生物特征认证新算法 [J]. *计算机研究与发展*, 2005, **42**(11): 18701875
- 10 Gu Li, Zhuang Zhenquan. A method of hand shape verification based on template matching rules [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, **41**(6): 8588
- 顾 理, 庄镇泉. 一种基于模板匹配的手形认证算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2005, **41**(6): 8588
- 11 Gu Li, Zhuang Zhenquan, Zheng Guangyong et al.. Algorithm for hand shape matching based on feature fusion [J]. *Computer Applications*, 2005, **25**(10): 22862288
- 顾 理, 庄镇泉, 郑光勇 等. 基于特征融合的手形匹配算法 [J]. *计算机应用*, 2005, **25**(10): 22862288
- 12 UST Hand Image database [DB/OC]. [http://visgraph.cs.ust.hk/biometrics/Visgraph\\_web/index.html](http://visgraph.cs.ust.hk/biometrics/Visgraph_web/index.html)
- 13 Yuan Weiqi, Xu Lu, Lin Zhonghua. Iris identification method based on gray surface matching [J]. *Acta Optical Sinica*, 2006, **26**(10): 15371542
- 苑玮琦, 徐 露, 林忠华. 基于灰度曲面匹配的虹膜识别方法 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 15371542
- 14 Yuan Weiqi, Bai Yun, Ke Li. Analysis of relationship between region of iris and the accuracy rate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 937942
- 苑玮琦, 白 云, 柯 丽. 虹膜区域选取与识别率对应关系分析 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 937942
- 15 N. Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, **9**(1): 6266
- 16 Shen Tingmei, Gu Ying, Wang Tianshi et al.. Speckle reduction in optical coherence tomography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 14371440
- 沈婷梅, 顾 瑛, 王天时 等. 光学相干层析成像中散斑噪声减小算法 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 14371440
- 17 Wang Haihong, Zeng Ni, Lu Wei et al.. Edge detection of laser imaging radar based on wavelet transform and mathematical morphology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 903906
- 王海虹, 曾 妮, 陆 威 等. 基于小波变换和数学形态学的激光成像雷达图像边缘检测 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 903906