

# 基于薄板样条形变模型的活体指纹检测方法

申请号：[200710062828.X](#)

申请日：2007-01-18

**申请(专利权)人** [中国科学院自动化研究所](#)  
**地址** 100080北京市海淀区中关村东路95号  
**发明(设计)人** [田捷](#) [张阳阳](#) [杨鑫](#) [陈新建](#)  
**主分类号** [G06K9/00\(2006.01\)I](#)  
**分类号** [G06K9/00\(2006.01\)I](#)  
**公开(公告)号** 101226589  
**公开(公告)日** 2008-07-23  
**专利代理机构** [中科专利商标代理有限责任公司](#)  
**代理人** [周国城](#)

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.  
G06K 9/00 (2006.01)



## [12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200710062828.X

[45] 授权公告日 2009年12月23日

[11] 授权公告号 CN 100573553C

[22] 申请日 2007.1.18

[21] 申请号 200710062828.X

[73] 专利权人 中国科学院自动化研究所

地址 100080 北京市海淀区中关村东路95号

[72] 发明人 田捷 张阳阳 杨鑫 陈新建

[56] 参考文献

CN1404002A 2003.3.19

US2005/0157913A1 2005.7.21

Fingerprint matching by thin - plate spline modelling of elastic deformations. Asker M. Bazen, Sabih H. Gerez. PATTERN RECOGNITION SOCIETY, Vol. 36. 2003

基于TPS模板的弹性形变指纹的匹配算法的研究. 史锦珊, 孟祥菊. 传感技术学报, 第4期. 2004

指纹识别技术的新进展. 田捷, 陈新建, 张阳阳, 杨鑫, 何余良, 李亮, 谢卫华, 郑志鹏. 自然科学进展, 第16卷第4期. 2006

审查员 李秀改

[74] 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司

代理人 周国城

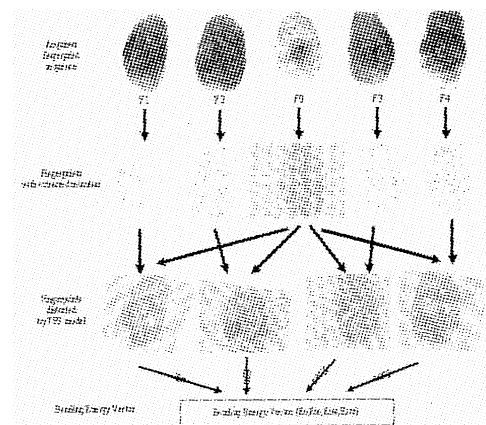
权利要求书2页 说明书13页 附图5页

[54] 发明名称

基于薄板样条形变模型的活体指纹检测方法

[57] 摘要

本发明公开一种基于薄板样条形变模型的活体指纹检测方法,采集待测手指的指纹序列并预处理;对形变前后的指纹图像进行配准,选取对应的细节特征点对作为估算薄板样条模型的基准点对;采用改进的薄板样条模型描述指纹的形变;基于模型参数计算待测指纹在各个方向上的形变能量,构成整体弯曲能量向量;分别在真假指纹形变库上训练,得到弯曲能量向量空间分布;分别计算待测的弯曲能量向量到真假弯曲能量模糊特征集的相似度;选取合适的阈值得到检测结果。本发明能将假指纹从活体指纹中检测出来,实时和有效的实现活体指纹检测,提高了自动指纹识别系统的安全性,拓宽了其应用范围,在生物特征识别领域具有重要的应用价值。



1、一种基于薄板样条形变模型的活体指纹检测方法，其特征在于，包括步骤：

步骤 1：采集待测手指的指纹序列并进行预处理，包括一幅正常采集指纹和多个方向上的形变指纹；

步骤 2：对形变前后的指纹图像进行配准，选取对应的细节特征点对作为估算薄板样条模型的基准点对；

步骤 3：针对指纹图像形变时无尺度变换的特点，采用两个约束条件的薄板样条模型对指纹图像插值得到指纹形变；指纹图像的形变程度基于薄板样条模型的整体形变能量  $E = E_x + E_y$  来衡量，其中薄板样条模型在  $x$ ,  $y$  方向上的形变能量为  $E_x$ 、 $E_y$ ，由坐标变换函数在整个曲面表面上的二阶偏导的积分给出，通过解一组线性方程组求出最小弯曲能量，利用得到的指纹形变及计算出的弯曲能量值，计算待测指纹在各个方向上的形变能量，构成整体弯曲能量向量；

步骤 4：分别在真假指纹形变库上训练，得到弯曲能量向量空间分布；分别计算待测的弯曲能量向量到真假弯曲能量模糊特征集的相似度；选取合适的阈值得到检测结果。

2. 按照权利要求 1 所述的活体指纹检测方法，其特征在于，所述采集待测手指的指纹序列包括步骤：

被采集人员手指放松并放在采集仪器上，提取为正常情况下的指纹；从多个方向对手指施加压力，使手指得到最大程度的形变，采集得到手指的形变指纹序列。

3. 按照权利要求 1 所述的活体指纹检测方法，其特征在于，所述形变前后的指纹图像配准步骤包括：

采取针对弹性形变的三角匹配算法，从两幅指纹图像中选取对应的细节特征点对，作为计算薄板样条模型参数的基准点；

细节点均匀分布的前提下，计算细节点在形变前后的位置偏移量，用于反映指纹的形变信息。

4. 按照权利要求 1 所述的活体指纹检测方法，其特征在于，改进薄

板样条模型的约束条件如下：

1) 基于多参考点的整体配准方法，计算指纹图像间的旋转平移向量，获得薄板样条模型中的刚性变换参数矩阵；

2) 针对指纹预处理和特征提取中存在误差而导致的细节点坐标的偏移，采取松弛的薄板样条模型，得到刚性变换矩阵函数，计算松弛薄板样条模型的变换参数，其中松弛参数的取值与变换的平滑程度成正比。

5. 按照权利要求 1 所述的活体指纹检测方法，其特征在于：待测指纹序列整体弯曲能量向量的计算包括：

分别计算待测手指在多个方向上形变前后指纹图像的形变能量；

构成整体弯曲能量向量，用特征矢量计算衡量待测手指的弹性形变弯曲能量值的大小。

6. 按照权利要求1所述的活体指纹检测方法，其特征在于：形变前后指纹图像的形变能量的计算包括：

用薄板样条模型的整体形变能量来衡量形变前后指纹图像间的形变程度，定义为薄板样条模型在x，y方向上的最小弯曲能量之和；

当薄板样条模型参数为零矩阵时，弯曲能量为0，薄板样条模型退化为刚性变换。

7、按照权利要求1所述的活体指纹检测方法，其特征在于，采取模糊相似度分类方法进行活体指纹判别，包括步骤：

计算待测手指的整体弯曲能量相对于真、假指纹形变特征序列的隶属程度；

分别在采集的真、假指纹形变库上进行训练，得到真、假指纹形变模式的参数空间，其中的全部元素组成了模糊特征集；

采用柯西形式的隶属度函数，并调整输入指纹到真、假特征空间隶属度的权重，将待测手指和真、假手指的相似度映射成归一化的标量；

观察形变指纹特征参数空间内训练样本点的分布，找到合适的阈值，进行活体指纹判别。

## 基于薄板样条形变模型的活体指纹检测方法

### 技术领域

本发明属于生物特征识别领域，涉及图像处理、模式识别、计算机技术等前沿知识，特别涉及到利用薄板样条（TPS）模型描述指纹形变及形变能量向量的模糊分类。

### 背景技术

由于指纹具有唯一性和稳定性的优点，而且采集方便，成本低廉，所以非常适合取代传统的口令作为可靠的身份认证手段。将待匹配的指纹图像输入计算机，通过可靠有效的指纹识别算法，可以在短时间内完成任何人的身份识别。指纹识别技术主要包括指纹图像采集、指纹图像增强、指纹图像特征提取、数据储存、指纹特征的比对与匹配等步骤。随着计算机技术的进步和模式识别方法的发展，自动指纹识别系统的性能日益完善，已达到了实用化的要求，其应用领域也日益广阔。自动指纹识别的应用不再仅局限于法律、公安领域。它可作为计算机确认用户的手段，可作为访问网络资源的信息安全技术，还可用于银行ATM卡和信用卡使用的确认、各类智能IC卡的双重确认、雇员证明和家用电子门锁等许多方面。

然而人造假指纹的出现，使自动指纹识别系统自身的安全可靠性受到了极大的挑战和威胁。指纹传感器的安全性令人担忧，前人的研究工作表明指纹传感器很容易被假指纹（例如硅胶指纹）所欺骗。至今有不少用假指纹成功入侵指纹识别系统的案例。假指纹的制作方法有两种：利用真实手指按压的模具复制和采用物体表面残留的指纹痕迹复原，制作材料有橡胶、明胶、硅胶等。2000年Putte等采用简易的材料制成假指纹，并在六种不同的指纹采集仪上进行测试。实验结果表明其中的五种采集仪都将假指纹误认为真正的指纹。2002年T.Matsumoto等人的实验表

明, 对于11中不同类型的指纹采集仪, 采用真实手指按压模具制成的假指纹通过系统认证的概率大于70%, 而采用残留指纹复原制成的假指纹通过系统认证的概率大于60%。后来针对不同类型指纹采集仪的大量攻击性实验都证明了假指纹对现有的自动指纹识别系统安全性的严重挑战。假指纹已经成为制约指纹识别技术发展的瓶颈之一。只有解决了活体指纹的实时检测问题, 指纹识别技术才能在需要高安全和高可靠识别的领域真正得到广泛应用。

活体指纹检测确保只有“真”的指纹能够通过采集系统的检测, 从而用来进行注册、比对和认证。目前已有些研究人员从事这方面的工作, 提出的活体指纹检测方法可分为两类: 基于辅助硬件的和基于手指(指纹)本身特性的。在基于辅助硬件的活体指纹检测方法中, Putte等利用真实指纹与人造指纹之间的温度差异, 通过硬件检测手指温度实现活体指纹检测, 但容易受外界温度的影响; D. Maltoni等利用指纹采集时真假皮肤对光吸收、反射、折射情况的参数差异, 检测手指表面的光学特征来辨认指纹, 但存在光学特征参数与皮肤相似的假指纹的干扰; P. D. Lapsley等测量待测手指内的血压数值, 判断指纹是否来自真实手指, 但容易被覆有足够薄的假指纹膜的手指攻击; Denis Baldisserra等利用电子嗅觉装置采集待测手指的气味特征, 通过区分真实皮肤和制作假指纹材料的气味进行活体指纹检测, 但无法适应气味仿真假指纹的攻击。基于手指(指纹)本身特性的活体指纹检测方法不需要特殊硬件的支持, Antonelli利用真假手指的弹性差异, 采集待测手指的在按压旋转过程中一系列指纹图像, 计算指纹各部分的位置偏移特征矢量并进行分类, 可有效的进行活体指纹检测, 但需要对指纹偏移进行跟踪, 计算复杂度高; Matsumoto等采用高分辨率的指纹采集仪, 通过观察指纹图像上汗孔分布的情况, 判断其是否来自于真实手指, 但选取合适的材料, 可制造出粗略复制汗孔的假指纹。R. Derakhshani等观察采集过程中汗液分泌导致的指纹图像灰度变化, 实现活体指纹检测, 但对特别干或特别湿的指纹效果不佳。

综合以上分析研究我们发现, 目前国际上已有活体指纹检测技术还未能实际解决指纹的辨伪安全问题。采用硬件检测人体手指的温度、气

味、电阻等静态物理特征以区分假指纹的方法，无法避免制作更仿真的假指纹进行识别攻击。而且需要特殊硬件的支持，提高了指纹识别系统的成本，不易推广。而基于指纹本身特性的检测方法，可能不适应特殊皮肤状况的指纹或者不具有实时性。活体指纹检测成为指纹识别领域亟待解决的难点之一。

## 发明内容

针对假指纹造成的自动指纹识别系统的安全性挑战问题，本发明的目的是有效和实时的对输入指纹进行真实性判断，为此，本发明提出一种基于指纹本身弹性形变特征的活体指纹检测方法。

为了实现所述的目的，本发明提供的基于薄板样条形变模型的活体指纹检测方法包括步骤：

步骤 1：采集待测手指的指纹序列并进行预处理，包括一幅正常采集指纹和多个方向上的形变指纹；

步骤 2：对形变前后的指纹图像进行配准，选取对应的细节特征点对作为估算薄板样条模型的基准点对；

步骤 3：采用改进的薄板样条模型描述指纹的形变；基于模型参数计算待测指纹在各个方向上的形变能量，构成整体弯曲能量向量；

步骤 4：分别在真假指纹形变库上训练，得到弯曲能量向量空间分布；分别计算待测的弯曲能量向量到真假弯曲能量模糊特征集的相似度；选取合适的阈值得到检测结果。

优选地，所述的形变指纹图像序列采集包括步骤：

被采集人员手指放松并放在采集仪器上，提取为正常情况下的指纹；从多个方向对手指施加压力，使手指得到最大程度的形变，采集得到手指的形变指纹序列。

优选地，所述的指纹图像配准步骤包括：

采取针对弹性形变的三角匹配算法，从两幅指纹图像中选取对应的细节特征点对，作为计算薄板样条模型参数的基准点；

细节点均匀分布的前提下，计算细节点在形变前后的位置偏移量，用于反映指纹的形变信息。

优选地，由于指纹形变时不存在尺度变换，得到改进薄板样条模型的约束条件如下：

1)基于多参考点的整体配准方法，计算指纹图像间的旋转平移向量，获得薄板样条模型中的刚性变换参数矩阵；

2)针对指纹预处理和特征提取中存在误差而导致的细节点坐标的偏移，采取松弛的薄板样条模型，得到较平滑的刚性变换矩阵函数，计算松弛薄板样条模型的变换参数，其中松弛参数的取值与变换的平滑程度成正比。

优选地，待测指纹序列整体弯曲能量向量的计算包括：

分别计算待测手指在多个方向上形变前后指纹图像的形变能量；

构成整体弯曲能量向量，用特征矢量计算衡量待测手指的弹性形变弯曲能量值的大小。

优选地，形变前后指纹图像的形变能量的计算包括：

用薄板样条模型的整体形变能量来衡量形变前后指纹图像间的形变程度，定义为薄板样条模型在x, y方向上的最小弯曲能量之和；

当薄板样条模型参数为零矩阵时，弯曲能量为0，薄板样条模型退化为刚性变换。

优选地，采取模糊相似度分类方法进行活体指纹判别，包括步骤：

计算待测手指的整体弯曲能量相对于真、假指纹形变特征序列的隶属程度；

分别在采集的真、假指纹形变库上进行训练，得到真、假指纹形变模式的参数空间，其中的全部元素组成了模糊特征集；

采用柯西形式的隶属度函数，并调整输入指纹到真、假特征空间隶属度的权重，将待测手指和真、假手指的相似度映射成归一化的标量；

观察形变指纹特征参数空间内训练样本点的分布，找到合适的阈值，进行活体指纹判别。

本发明的算法基于手指本身的弹性特征进行活体指纹检测。已有的基于其它手指特征（如汗孔和排汗情况）的检测方法很容易受到环境和采集手指状况的影响，对外界条件的适应性不够。根据真实手指的特殊结构很难被仿制的特点，采集待测手指在规定用力下的形变图像，选取



合适的弹性形变特征进行分类，保证了活体指纹检测的准确性。在指纹图像形变过程中，各部分的细节点根据施加压力方向、大小及手指结构出现不同程度的位置偏移。利用针对弹性形变的三角匹配算法可较好地 从形变前后指纹图像上提取相应的细节特征点对，作为计算薄板样条模型参数时的基准点。针对指纹形变的特点改进传统的 TPS 模型。对四个方向上的形变指纹图像，分别根据提取的基准点对的坐标，计算其与正常采集指纹间的旋转平移参数，由此确定 TPS 模型中的刚性形变参数。由于指纹预处理和细节点提取存在误差，采取松弛 TPS 模型以调节变换函数的平滑度。基于模型参数计算指纹在各个方向上的形变能量，构成整体弯曲能量向量并进行真假指纹分类。考虑到不同的指纹图像提取的细节点数目不同以及模型参数选取过程的模糊性，可考虑将模糊理论运用到相似度计算中。

通过对算法性能的评估，我们发现在细节点分布较均匀的情况下，从形变前后的指纹图像中选取的细节点对能够很好反映指纹的整体形变。选取的薄板样条模型有效地描述了指纹图像的形变，计算过程简单，保证了活体指纹的实时检测。整个检测算法基于常用的指纹识别步骤(细节点提取，形变指纹匹配等)进行，而且不需要在现有的自动指纹识别系统上增加额外的硬件，易于实现和推广。

## 附图说明

- 图 1 两幅形变前后的指纹图像及相应的特征点对，  
包括图 1a、图 1b、图 1c;
- 图 2 用 TPS 形变模型模拟指纹图像形变，  
包括图 2a、图 2b、图 2c;
- 图 3 活体指纹检测流程;
- 图 4 实验中的假指纹模具、其相应的假手指及其假指纹图像，  
包括图 4a、图 4b、图 4c;
- 图 5 在指纹库上的实验结果

## 具体实施方式

下面将结合附图对本发明加以详细说明，应指出的是，所描述的实施例仅旨在便于对本发明的理解，而对其不起任何限定作用。

本发明的核心思想是基于薄板样条弹性形变模型进行活体指纹检测。由于人类皮肤的特殊结构，活体指纹通常比假指纹具有更大的形变，本发明采用薄板样条模型—TPS 模型（Thin Plate Splines）对二维指纹图像的形变进行建模和估计。首先采集待检测手指在四个方向上的形变指纹图像，计算它的 TPS 模型的形变能量向量，然后计算这个向量到弯曲能量模糊特征集的相似度。相似度的值位于[0, 1]区间，它表示当前的指纹对于真指纹的相似程度（1 为真指纹，0 为假指纹）。

在指纹采集过程中，手指按在采集仪器的表面，产生手指皮肤由三维到二维的映射，由于施力的原因，指纹产生形变。例如，平行与采集仪器表面的力会引起指纹一定程度的聚拢或分离。旋转按压手指会引起指纹沿接触中心切线方向的形变。对于活体指纹，形变的特殊方式与人类皮肤弹性以及指骨的位置和形状有关。根据先前的研究显示：人类皮肤由表皮，真皮和皮下组织三层由外向里构成。正是由于存在这些特征，要非常逼真的构造与活体指纹一样弹性的假指纹是非常困难的。通常真手指比假手指更有弹性形变较大。即使假指纹由高弹性的材料制作，也很难仿效活体指纹的特殊结构。因此，当按压采集仪器的表面时，真手指和伪手指以各自的方式产生形变。形变是指纹识别中的一个主要问题，但是在这里可以被用来区分真伪手指。描述手指如何形变的理想方法是将指纹恢复成三维模型并与细节点三维坐标进行比对。但是，求二维到三维的逆映射是十分困难的。因此我们对二维指纹图像的形变进行建模和估计，选择适当的模型来描述指纹的形变。

基于上述的思路和目的，将活体指纹的检测过程划分为若干个步骤，简要介绍执行每个步骤时需要注意的关键问题。建立利用指纹弹性特征检测活体指纹的理论框架，并进行性能测试。将研究成果融入现有的自动识别系统后得到的本发明的实现流程如下：

形变指纹图像采集和预处理：要求被采集人员首先放松的将手指放在采集仪器上（正常情况下的指纹），然后分别从四个方向上施加压力，得到最大程度的形变： $0^{\circ}$ ， $90^{\circ}$ ， $180^{\circ}$ ， $270^{\circ}$ 。从而得到这一手指的形变

图像序列{F0, F1, F2, F3, F4}。预处理后得到细化指纹图像。

提取对应细节特征点对：利用针对弹性形变的三角匹配算法可较好地 从形变前后两幅指纹图像中提取相对应的细节特征点对，作为计算薄板样条模型参数时的基准点。在指纹图像序列采集过程中，形变前后指纹图像各部分的细节点根据施加压力方向、大小及手指结构出现不同程度的位置偏移；在细节点均匀分布的前提下，用细节点形变前后的位置偏移量反映指纹的形变情况。

TPS 形变模型和弯曲能量向量：针对指纹形变时无尺度变换的特点改进传统的TPS模型。分别在四个方向上配准形变前后的指纹图像，计算松弛TPS模型参数，模型中的刚性形变参数由已求的配准参数确定。基于模型参数计算指纹在各个方向上的形变能量，构成整体弯曲能量向量。

模糊相似度分类：分别在真假指纹形变库上进行训练，得到相应的弯曲能量向量空间分布。对输入的指纹，计算其TPS模型的弯曲能量向量，然后分别计算这个向量到真假弯曲能量特征集的相似度。相似度是一个介于[0, 1]之间的值（1表示真指纹，0表示假指纹）。选取合适的阈值得到检测结果。

下面对本发明提出的基于薄板样条模型的假指纹检测方法包含的各个步骤，尤其是 TPS 形变模型和弯曲能量向量和模糊相似度分类两部分进行介绍。首先我们引进一些假定，在此基础上进行识别算法的研究和分析：不区分末梢点和分叉点，把它们都看作细节点特征；点特征在指纹中分布较均匀；细节点对的相关性是独立，各个相关是同等重要的；不考虑形变指纹图像匹配性能对检测结果的影响。详细步骤如下：

#### 1) 形变指纹图像采集和预处理

要求被采集人员首先放松的将手指放在采集仪器上（正常情况下的指纹），然后分别从四个方向上施加压力，得到最大程度的形变：0°，90°，180°，270°。从而得到这一手指的形变图像序列{F0, F1, F2, F3, F4}。预处理操作包括：

1. 计算出图像的边界，进行图像的裁剪。
2. 方向场的估计，计算出指纹图像每个像素的方向。

3. 基于各象素的方向采取方向滤波算子进行滤波。

4. 二值化, 根据滤波后的象素灰度值将指纹图像处理为只有黑白二种像素的图像。

5. 细化及后处理, 把二值化指纹图像的脊线宽度细化至只有一个像素, 清除细化图像中的不良脊线结构。

## 2) 提取对应细节特征点对

从预处理后的形变指纹骨架中, 跟踪提取细节特征点并进行去伪处理。位于图像边缘的细节点及分布过于密集的细节点集被判定为伪细节特征点, 不参与后面的匹配过程。采用基于三角局部特征的算法将采集序列中正常采集的指纹图像 F0 和四个方向的形变指纹图像 (F1, F2, F3, F4) 匹配。记录 F0 中的细节点在形变前后的位置, 得到相应的细节点对。实验证明三角匹配算法可以较好地处理形变较大的指纹图像, 保证提取细节点对的数目和准确性。

图 1 显示了两幅形变前后的指纹图像及对应的细节点对。其中图 1a 为正常采集指纹 F0; 图 1b 为 90°方向形变指纹 F2; 图 1c 中用连线标记对应细节点对;

## 3) TPS 形变模型和弯曲能量向量

薄板样条模型(Thin Plate Splines), 作为一种解决插值问题的方法, 被 Bookstein 提出用来模拟弯曲形变, 而 Bazen 和 Ross 采用 TPS 模型来模拟指纹图像中的形变。从前面的分析中我们知道, 活体指纹与假指纹由于材质不同, 弹性也就不同, 若在相同的方向施加相同的压力的条件下, 两者的形变模型是不一样的, 因此它们的 TPS 形变特征也存在一定程度的差异。TPS 模型能够用来实现二维插值, 计算基于任意相关点集的二维到二维的映射。给出对应点的坐标和位置变化, TPS 模型就能对这些点进行拟合, 并且同时能保持最大的平滑度。设原来的坐标点为  $(x, y)$ , 变换后对应的坐标点为  $(x', y')$ , 则 TPS 模型的变换公式为:

$$(x', y') = (f_x(x, y), f_y(x, y))$$

变换函数  $f(x, y)$  的定义如下:

$$f(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + \sum_{i=1}^n w_i U(|P_i - (x, y)|)$$

式中， $U(r)$ 为根函数， $U(r) = -r^2 * \log(r^2)$ ， $a = (a_1, a_2, a_3)$ 为仿射变换向量。 $w$ 表示非线性形变参数。 $P_i$ 表示TPS模型要插值的基准点， $n$ 表示基准点的数目。通过解下列的线性方程组可以求得TPS模型的参数：

$$[K \ P] \begin{bmatrix} W \\ a \end{bmatrix} = Q$$

其中：

$$K = \begin{bmatrix} 0 & U(r_{12}) & \dots & U(r_{1n}) \\ U(r_{21}) & \dots & \dots & U(r_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ U(r_{n1}) & U(r_{n2}) & \dots & U(r_{nn}) \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & p_x(1) & p_y(1) & \vdots \\ p_x(2) & p_y(2) & \vdots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} W_x & W_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_x(1) & w_x(2) & \dots & w_x(n) \\ w_y(1) & w_y(2) & \dots & w_y(n) \end{bmatrix}^T$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q_x & Q_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_x(1) & q_x(2) & \dots & q_x(n) \\ q_y(1) & q_y(2) & \dots & q_y(n) \end{bmatrix}^T$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_x & \alpha_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x(1) & a_x(2) & a_x(3) \\ a_y(1) & a_y(2) & a_y(3) \end{bmatrix}^T$$

$r_{ij} = |P_i - P_j|$ 代表点*i*到点*j*之间的距离（欧氏距离）； $P_i = (p_x(i), p_y(i))$ 表示原图像中的第*i*个基准点； $Q_i = (q_x(i), q_y(i))$ 表示形变图像中对应的点坐标， $n$ 是基准点的个数。

结合二维指纹图像形变时的特点，我们对传统的TPS模型加以约束和改进。

TPS模型中的刚性变换由一个 $2 \times 3$ 的矩阵 $\alpha$ 决定，允许图像平移，旋转及尺寸放缩。然而实验中指纹图像由统一的指纹采集仪获得，不存在尺寸放缩。上一步骤中，从形变前后的指纹图像提取了细节点对，采用基于多参考点的整体配准方法，计算指纹间的旋转平移向量 $\Delta T = [\Delta x, \Delta y, \Delta \theta]$ ，其中 $\Delta \theta$ 表示旋转角度， $\Delta x, \Delta y$ 分别表示x, y轴方向的位移。则模型中的刚性变换参数矩阵 $\alpha$ 为：

$$\alpha = \begin{bmatrix} \Delta x \sin \Delta \theta & \cos \Delta \theta \\ \Delta y \cos \Delta \theta & -\sin \Delta \theta \end{bmatrix}^T$$

由于指纹图像预处理和特征提取中存在误差，细节点坐标可能出现一定的偏移。采取松弛的TPS模型使变换函数更平滑，具有一定的容错性。通过如下公式计算松弛TPS模型参数W：

$$(K + \lambda I) * W + P * \alpha = Q$$

其中，I为n×n的单位矩阵，λ取值和变换的平滑程度成正比。当λ取极大值时，TPS模型退化为刚性变换。

指纹图像的形变程度可以用TPS模型的整体形变能量E来衡量：

$$E = E_x + E_y$$

$E_x$ ， $E_y$ 分别表示TPS模型在x，y方向上的形变能量，由坐标变换函数在整个曲面表面上的二阶偏导的积分给出，通过解一组线性方程组可以求出最小弯曲能量。计算如下：

$$\begin{aligned} E_x &= \iint_{R^2} \left( \left( \frac{\partial^2 f_x}{\partial x^2} \right)^2 + 2 * \left( \frac{\partial^2 f_x}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 f_x}{\partial y^2} \right)^2 \right) dx dy \\ &= O(W_x^T K W_x) = O(L^T (K + \lambda I)^{-1} L) \end{aligned}$$

其中， $L = Q_x - P_x * \alpha_x$ ， $O(x)$ 表示和x值成正比。当W为零矩阵时，弯曲能量为0，TPS模型退化为刚性变换。

图2显示了用TPS形变模型模拟指纹图像形变的过程，包括图2a、图2b、图2c；图2a为正常采集指纹，图2b为180°方向上的形变指纹，图2c为图2a按TPS模型插值所得的形变指纹。比较可见，图2b和图2c具有一定的相似性，按TPS模型插值所得的形变指纹，较好的模拟了指纹形变情况。

利用TPS模型对原图像插值得到的形变指纹及计算出的弯曲能量值。计算指纹在四个方向上的形变能量，构成整体弯曲能量向量  $\vec{e} = \{E_{0^\circ}, E_{90^\circ}, E_{180^\circ}, E_{270^\circ}\}$ ，图3给出了活体指纹检测的整个流程，第一行显示了采集的正常指纹和四个方向的形变指纹序列记为{F0, F1, F2,

F3, F4}; 第二行为预处理得到的细化图像, 并在其上标记了细节点; 分别把正常指纹和其余四幅形变指纹进行匹配, 得到对应细节点对。由此可计算每幅形变图像的形变能量。第三行为按 TPS 模型对正常图像插值得到的形变指纹。指纹上覆盖网格以便于更好的观察其形变模式; 最终由四个方向的形变能量构成了待测手指的整体弯曲能量向量。

#### 4) 模糊相似度分类

分别计算输入指纹弯曲能量  $\vec{e}$  相对于真、假指纹形变特征序列的隶属程度。分别在采集的真、假指纹形变库上进行训练, 得到真、假指纹形变模式的参数空间, 其中的全部元素组成了模糊特征集; 采用柯西形式的隶属度函数, 并调整输入指纹到真、假特征空间隶属度的权重, 将待测手指和真、假手指的相似度映射成归一化的标量; 观察形变指纹特征参数空间内训练样本点的分布, 找到合适的阈值, 进行活体指纹判别, 构造或选择一个合适的隶属函数取决于其应用的领域。最常用的隶属函数的类型有锥型, 指数型和Cauchy型。我们采用了Cauchy函数的改进形式, 它具有很好的表达形式且计算效率较高。

在采集的真指纹形变库上进行训练, 得到真指纹形变模式的参数空间, 其中的全部元素组成了模糊特征集  $\tilde{D}$ 。定义隶属度函数  $C_r: \tilde{D} \rightarrow [0,1]$  如下:

$$C_r(\vec{e}) = \begin{cases} 1 & \text{if } h(\vec{e}, \vec{z}_r) = True \\ \frac{1}{1 + \left(\frac{\|\vec{e} - \vec{z}_r\|}{m}\right)^\alpha} & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中  $\vec{z}_r$  为集合  $\tilde{D}$  中各元素的均值。特征集中的全部元素的平均能增加模糊特征的鲁棒性, 同时, 有用信息的丢失也被隐藏在连续的过程中, 因为一个特征向量集被绘制成单一的特征向量。当  $\vec{e}$  中的每个元素大于  $\vec{z}_r$  中相应的元素时,  $h(\vec{e}, \vec{z}_r) = True$ ;  $m$  和  $\alpha \in \mathbf{R}$ ,  $m > 0$ ,  $\alpha > 0$ ,  $m$  与函数的宽度成正比。 $\alpha$  决定函数的平滑程度。对于确定的  $m$ , 模糊度随  $\alpha$  值的减少而增加。对固定的  $\alpha$ , 模糊度随  $m$  值的增加而增大。很明显, 特

征矢量距离矢量串的中心越远，模糊特征的相关程度就越低。

同理，在采集的假指纹形变库上进行训练，得到假指纹形变模式的参数空间  $\tilde{U}$ 。定义隶属度函数  $C_f: \tilde{U} \rightarrow [0,1]$  如下：

$$C_f(\bar{e}) = \begin{cases} 1 & \text{if } l(\bar{e}, \bar{z}_f) = True \\ \frac{1}{1 + \left(\frac{\|\bar{e} - \bar{z}_f\|}{m_2}\right)^{a_2}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中  $\bar{z}_f$  为集合  $\tilde{U}$  中各元素的均值，当  $\bar{e}$  中的每个元素小于  $\bar{z}_f$  中相应的元素时， $l(\bar{e}, \bar{z}_f) = True$ ；

对于输入的形变指纹序列，计算其弯曲能量向量  $\bar{e}$ ，然后分别测量矢量  $\bar{e}$  相对于模糊特征序列  $\tilde{D}$ 、 $\tilde{U}$  的隶属程度。最后，将输入手指和真手指的相似度映射成一个  $[0,1]$  区间内的标量。

$$Sim(\bar{e}) = (1-p) \cdot C_r(\bar{e}) + p \cdot (1 - C_f(\bar{e}))$$

其中， $p \in [0,1]$ ，调整了输入指纹到真、假特征空间隶属度的比重。观察形变指纹特征参数空间内的样本点，找到合适的阈值，进行判别。

#### 实施例：

为了评价本发明的活体指纹检测方法，制作了120个假指纹，材料为硅树脂AL20；同时，也采集了对应手指的真指纹。建立了包括120个真指纹，120个假指纹的测试库。图4显示了假指纹的制作过程，图4a为假指纹模具（材料为石膏），图4b为相应的假手指，图4c为采集的假指纹图像。

实验中分别选取20个真手指和假手指进行训练，得到相应的形变特征向量空间。测试过程包括：

1000次真指纹测试（100个真手指，每个手指按规则采集10个形变指纹图像序列）；



1000次假指纹测试（100个假手指，每个手指按规则采集10个形变指纹图像序列）。

设 $FAR$  表示活体指纹检测中的误识率（假指纹被识别成真指纹）； $FRR$  表示活体指纹检测中的据识率（真指纹被识别成假指纹）。则我们可以用 $EER$ （曲线上 $FAR = FRR$  时的值）来作为活体指纹检测方法的性能指标。图5给出了我们的活体指纹检测方法的性能图，图5a 显示匹配分数分布,图5b显示  $FMR(t)$ 和 $FNMR(t)$ 曲线图，图5c 显示ROC曲线图，从图中可以看出，算法的 $EER$ 是4.5%。

在采集的形变指纹库上的试验结果显示，本算法有效的处理了活体指纹检测问题。对待检测手指，采集其在四个方向上的形变图像，提取形变特征矢量，利用模糊相似度分类方法进行判别，是简单、快捷和有效的。

以上所述，仅为本发明中的具体实施方式，但本发明的保护范围并不局限于此，任何熟悉该技术的人在本发明所揭露的技术范围内，可理解想到的变换或替换，都应涵盖在本发明的包含范围之内，因此，本发明的保护范围应该以权利要求书的保护范围为准。



图1a



图1b



图1c

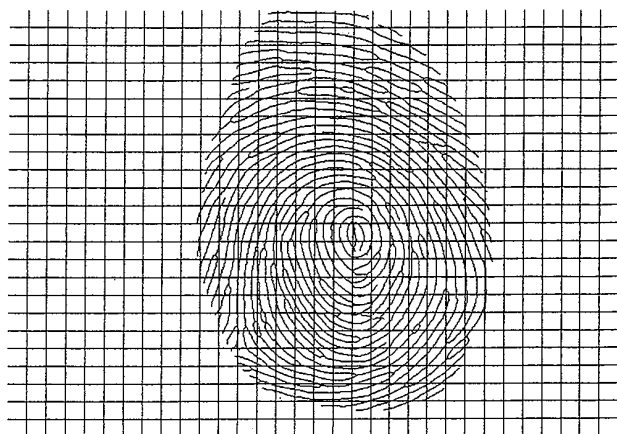


图 2a



图 2b

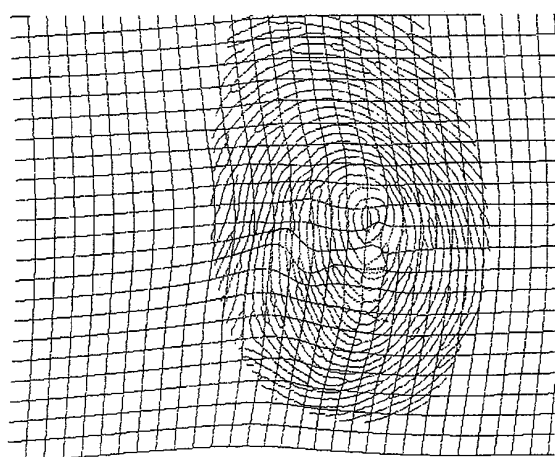


图 2c

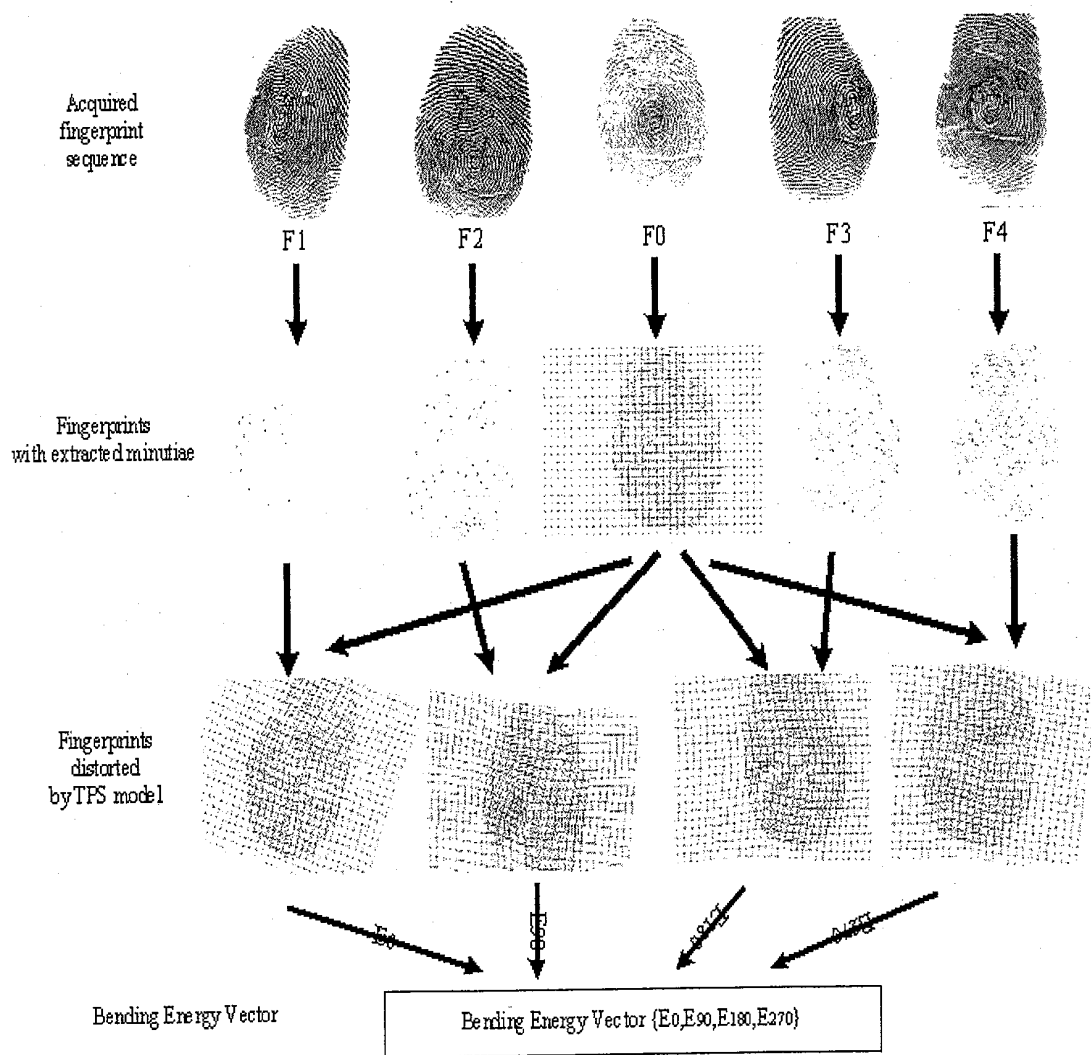


图 3

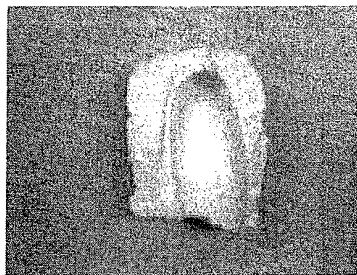


图 4a

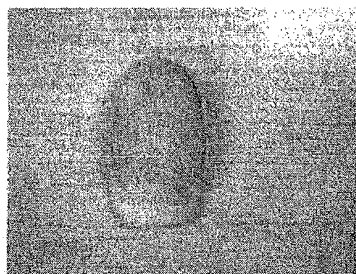


图 4b



图 4c

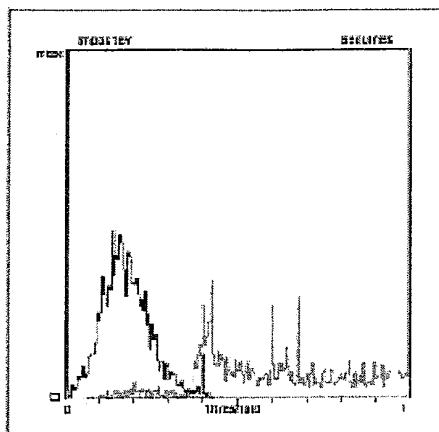


图5a

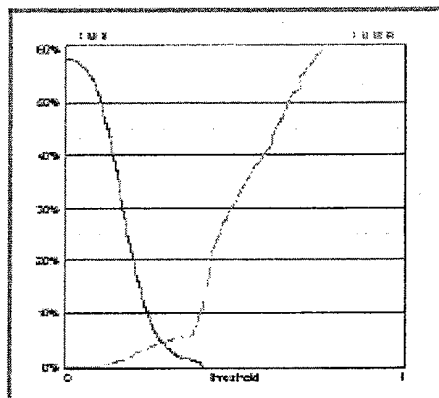


图5b

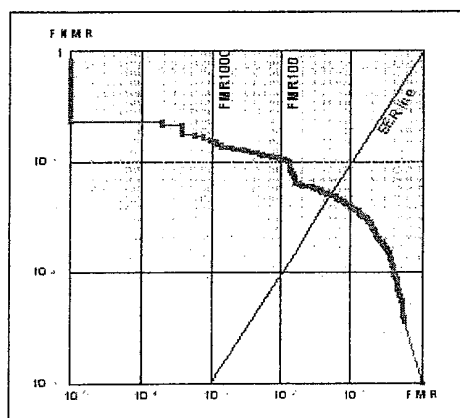


图5c