

基于纹路的三维指纹模型重建算法

梁小龙 殷建平 祝恩 官群健

(国防科技大学计算机学院 长沙 410073)

摘要 三维指纹识别是近几年兴起的一种基于三维指纹模型进行指纹识别的新技术,能够克服传统接触式指纹识别中存在的纹路变形、残留纹路、对手指皮肤状况敏感等缺陷。基于多角度图像的三维指纹模型重建是整个识别过程中的一个关键步骤。提出了一种基于纹路的重建算法,算法重建的指纹模型直接包含纹路与细节点相关特征。相对于已有文献中将指纹表皮作为重建对象,算法重建结果更有助于特征提取等三维指纹识别后续过程。

关键词 三维指纹,三维指纹模型重建,非接触指纹识别

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Ridge Based 3D Fingerprint Reconstruction Method

LIANG Xiao-long YIN Jian-ping ZHU En GUAN Qun-jian

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Three-dimensional (3D) fingerprint recognition based on 3D fingerprint model could technically solve the problems suffered in traditional touch-based fingerprint system, such as filth, skin deformation, and the latent fingerprints from a dirty sensor. The 3D fingerprint model reconstruction using multiple views is the key procedure in the recognition system. This paper presented a new ridge based method to obtain 3D reconstruction of the fingerprint. Different from the existing algorithms which focus on reconstruction of finger surface, the presented method directly reconstructs ridge pattern and minutiae pattern in 3D space as the 3D fingerprint model and it is expected to be more suitable for subsequent process of recognition, such as feature extraction.

Keywords 3D fingerprint, 3D fingerprint reconstruction, Touchless fingerprint recognition

1 引言

三维指纹识别是一种基于三维指纹模型进行指纹识别的新技术。三维指纹识别技术消除了存在于传统接触式指纹识别中的指纹扭曲、残留纹路、对皮肤状况敏感、采集过程容易导致细菌传播等不利因素(这些因素不仅会影响指纹识别效果,还可能导致用户指纹信息泄露甚至危害用户身体健康),还克服了基于单摄像头的非接触指纹识别中存在的对于手指旋转敏感这一缺陷。近年来已有一些基于三维指纹识别的产品研制成功并投入使用,其较好的识别效果体现了三维指纹识别具有的良好前景^[1]。三维指纹识别是目前指纹识别领域的一个研究热点。

当前,绝大多数三维指纹识别系统使用基于多个角度摄像头的指纹采集仪器进行数据采集(图1为本文中采用的基于三个角度摄像头的指纹采集仪器)。采集结果为含有指纹重合区域的多角度的指纹图像,其能够被用来重建三维指纹模型,进而完成指纹匹配识别。因此,三维指纹模型重建是整个指纹识别过程的关键步骤,并影响最终的识别效果。现有的文献中已经提出一些三维指纹模型重建算法^[2-7]。已有的

重建算法均针对手指表皮进行重建,但是对于进一步的指纹识别,还需要进行复杂的三维特征提取(比如纹路提取与细节点提取)。

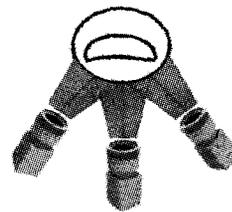


图1 本文采用的三个角度的指纹采集仪器

关于指纹,其最本质的特征是纹路的结构,因此本文提出一种基于纹路的三维指纹模型重建算法。算法通过对采集得到的图像进行纹路提取和匹配,计算获取纹路三维特征,从而完成三维指纹模型重建。与已有算法相比,本文算法仅针对纹路进行重建,重建的结果直接包含纹路与细节点特征,更有利于后续的指纹识别过程。

本文第2节介绍现有的三维指纹重建算法;第3节对本文使用的多角度指纹采集设备进行说明;第4节对提出的算

到稿日期:2012-02-15 返修日期:2012-04-15 本文受国家自然科学基金(60970034,61170287,61105050,61070198),高等学校全国优秀博士学位论文作者资助项目(2007B4)资助。

梁小龙(1988-),男,硕士生,主要研究方向为模式识别、图像处理,E-mail:liangxiaolongnudt@gmail.com;殷建平(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为算法设计与分析、人工智能、模式识别、信息安全;祝恩(1976-),男,博士,副教授,主要研究方向为模式识别、图像处理、信息安全;官群健(1987-),男,硕士生,主要研究方向为模式识别。

法进行描述,并结合一个具体实例展示其处理过程以及三维重建结果;第5节对算法进行对比、总结与展望;最后为结束语。

2 相关工作介绍

目前,相关文献中提到的三维指纹重建算法总体来说有两种,一种是直接基于多摄像头的三维重建算法^[2,4],另一种是运用结构光源(SLI)进行辅助的三维重建算法^[5-7]。

直接基于多摄像头的算法和系统中,在摄像机完成标定的前提下,当同一个指纹不同角度的图像包含指纹重合区域时,这些多角度图像能够被用来计算和重建指纹三维模型。Paar^[4]针对其5个摄像头的指纹采集器设计了一种三维指纹模型重建算法,算法利用5个角度获得指纹图像,首先基于图像中指纹的轮廓信息并结合作者关于指纹的先验模型(一种含有参数的圆柱体模型)计算出初始的手指三维轮廓模型,然后对多角度指纹图像中相重合的部分进行匹配和计算,最后通过纹理粘贴的方式完成三维指纹的模型重建,如图2所示。



图2 Paarl使用的设备以及三维重建结果^[4]

近几年,一些学者提出了基于结构光源(SLI)进行辅助的三维指纹重建算法。结构光源是指在光源中包含一些特别的投影物,能够使采集的图像中包含一些特殊的投影信息。这些信息能辅助用户获得拍摄物体局部的深度信息,从而更容易完成三维指纹模型的重建。Labati^[6]提出的算法中使用双摄像头并结合一个方格形状的结构光源完成了指纹三维重建,如图3所示。实验表明,基于SLI的方法与直接基于多摄像头的方法相比可以更快地完成这一过程。

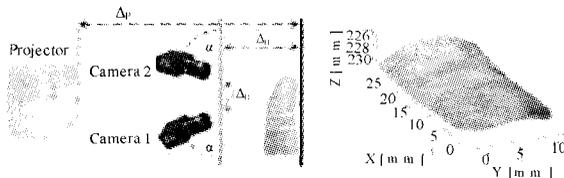


图3 Labati使用的设备以及三维重建结果^[6]

现有的三维指纹重建算法都是把指纹当作一个复杂的三维凹凸表面进行重建,其中包括的大量细节信息使得重建数据量较大,如文献^[4]中重建的指纹模型精确到了25微米~50微米的指纹信息。此外,对手指表面的精确重建也摄像头提出了较高的要求。

3 本文使用的多角度指纹采集器

本文采用的多角度指纹采集器结构如图1所示,该采集器由3个角度的摄像头构成,一次采集可以同时获得目标指纹3个角度的投影图像。在实验前,3个摄像头均已使用张正友摄像机标定算法^[8]完成标定。进行指纹采集时,手指需放置在采集器指定位置。每次采集大约需要2s。指纹采集结果样例如图4所示。可以看到,采集图像之间包含指纹重合区域。

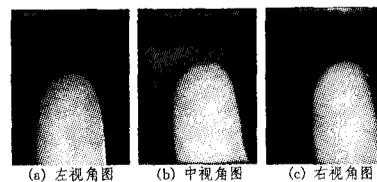


图4 3个角度摄像头指纹采集结果

本文第4节将以图4作为处理样例,给出重建过程以及结果。

4 基于纹路的三维重建算法

关于指纹,我们认为其本质上是由一条条包含共同节点的纹路线条构成。指纹区域就是由多条纹路线条在三维空间里围绕而成,如果将纹路宽度细化为1,整个指纹的三维结构将成为一个网状体。本文提出的三维指纹重建算法以此为思路,首先基于多角度图像进行纹路分析和提取,再将纹路在三维空间中进行重建,达到三维重建的目的。算法具体步骤包括:图像分割、图像增强、指纹纹路提取、指纹细节点提取、指纹细节点匹配、指纹纹路匹配、指纹纹路三维坐标计算等。

算法步骤及说明如下:

- (1)图像分割:完成指纹区域与背景区域的分割。
- (2)图像增强:针对基于摄像头拍摄的指纹图像存在局部纹路对比度低的现象,对其进行图像增强,使图像中的指纹更清晰。
- (3)指纹纹路提取:完成指纹纹路的提取,获得细化的纹路图。
- (4)指纹细节点提取:这一步将根据细化的纹路图提取指纹的细节点信息(细节点包括起止点、分叉点)。
- (5)指纹细节点匹配:在同一采集,不同视角图像中存在共有的指纹区域,这一步将完成这些共有的指纹区域中对应的细节点的匹配。
- (6)指纹纹路匹配:以匹配的细节点作为参考点,完成多视角指纹图像中对应纹路的匹配。

(7)指纹纹路三维坐标计算:根据多视角指纹图像中纹路的匹配结果以及摄像头标定信息,在纹路中选择若干采样点并计算其在三维空间的坐标,从而完成指纹三维重建。

本节将详细阐述提出的三维指纹重建算法,并针对图4中的指纹样例给出重建的过程与结果。其中4.1节介绍图像分割与增强过程;4.2节介绍纹路提取与细节点提取过程;4.3节介绍多视角纹路图中细节点匹配与纹路匹配;4.4节介绍指纹纹路三维坐标计算过程,并展示处理样例的重建结果。

4.1 图像分割和图像增强

关于图像分割,由于本文采集的指纹图像中纹路区域与背景区域有明显的灰度差异,因此算法基于指纹肤色阈值完成指纹区域与背景区域的分割。

关于图像增强,针对基于摄像头拍摄的指纹图像存在纹路对比度低以及局部高亮度的现象,本文在指纹分割的基础上,将图像分成小块,针对局部灰度值分布进行线性灰度值拉伸,使得纹路更清晰。

具体来说,针对图4样例,在这一阶段分别对左视图、中视图、右视图完成图像分割和图像增强。以左视图为例,图像分割和图像增强效果如图5所示。

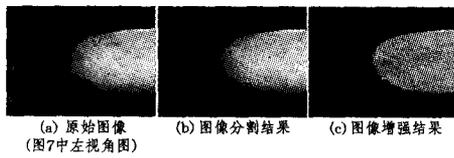


图 5

4.2 指纹纹路和细节节点提取

关于指纹纹路提取,本文采用文献[9]提出的算法。该算法首先计算纹路的的方向场、周期场等信息,然后使用基于神经网络的方法对纹路方向场进行矫正和平滑来消除皱纹等噪声的影响,接着使用 Gabor 滤波器完成纹路的增强、提取,最后完成纹路的细化。

关于细节节点的提取,针对每个经过细化的纹路像素点计算其周围 8 个点的分支数,完成纹路细节节点(包括纹路起止点、分叉点)的提取。

针对图 4 样例,在这一阶段需要完成左视角图、中视角图、右视角图的纹路和细节节点提取。以左视角图为例,图 6 显示得到的纹路图,图 7 显示细节节点提取结果。



图 6 左视图纹路提取结果 图 7 左视图细节节点提取结果

4.3 指纹细节节点匹配与纹线匹配

在多目立体视觉理论中,三维重建的关键问题是寻找多个视角的图像中相互对应的点。本文算法已经将 3 个角度的图像转化为纹路图(可以看作由纹路和细节节点组成的二值图),三维重建的关键问题就转化为寻找多角度纹路图中纹路上的对应点。结合实例,算法首先对左视角图与中视角图、中视角图与右视角图中的细节节点进行匹配,然后基于匹配的细节节点完成对应所在纹路的匹配,最后在 4.4 节中完成纹路中对应点的寻找。

关于多角度纹路图中细节节点的匹配,本文使用文献[10]中的算法完成这一步的操作。其算法原理是针对扭曲的指纹,用基于最小生成树算法进行指纹细节节点之间的对齐和匹配。经过实验验证,该算法可以对多角度纹路图之间对应的细节节点进行有效的匹配。针对图 4 处理样例,图 8 显示左视角图与中视角图的匹配结果。可以看到,使用的算法可以完成图像重合区域中对应细节节点的匹配。对于图像中没有得到匹配的节点存在两种情况:(1)节点在两幅图像的重合区域之外;(2)节点在重合区域之内,但此处重合区域内存在错误提取的节点和纹路(由于图像质量等原因造成)。第二种情况在传统低质量指纹识别中是无法避免的现象,这部分区域纹路的正确性难以检测是造成指纹识别错误的重要原因。一个错误提取的节点同时出现在两个视角指纹图像中的概率微乎其微,因此本文算法可将这部分节点及其对应的纹路找出并剔除,以排除其在后续识别中产生的影响。



图 8 左图与中图细节节点匹配结果

关于纹路的匹配,本文算法中对所有正确匹配的节点进行遍历,通过计算节点周围纹路的走向信息来完成对应纹路的匹配。图 9 显示通过两对对应指纹分叉点完成的纹路匹配。

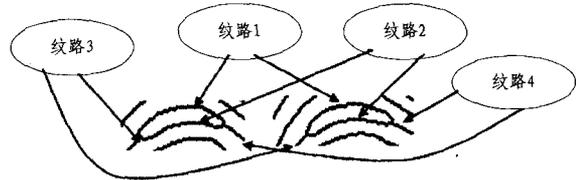


图 9 通过两对对应节点(此处为分叉点)完成的纹路

4.4 指纹纹路三维坐标计算

算法在此步骤对指纹纹路上若干点进行采样,寻找其在多幅图像上的对应点,进而计算出其三维空间坐标,最终通过三维采样点拟合生成指纹三维坐标。根据多目计算机视觉原理,在经过标定的双摄像机系统中,某一空间点的三维坐标可由它在两个角度图像中对应投影点的位置唯一确定。因此在指纹重建过程中,分别对左视角图与中视角图、中视角图与右视角图的纹路进行点采样与匹配。在匹配的过程中使用两个约束条件:纹路约束、极线约束。纹路约束是指对应点必须处在对应的纹路上;极线约束是指对应点必须处在对应的极线上。下文将结合实例对两个约束条件以及算法过程进行描述。

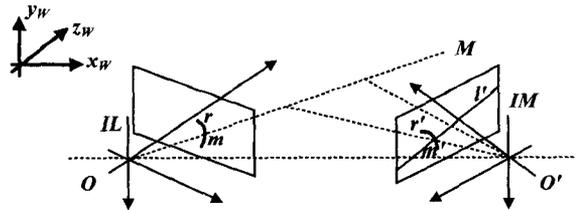


图 10 纹路约束与极线约束

以左视角图与中视角图的计算为例,在完成 4.3 节纹路匹配的基础上(获得了两幅图像纹路的对应信息),对左视角图得到的匹配纹路进行遍历并在其中每条纹路上按一定方向等距离取采样点,同时按照相同的顺序和方向对中视角图所对应的纹路遍历并寻找左图采样点的对应点。单个对应点寻找过程如图 10 所示,假设图中 IL 为左视角图, r 为 IL 中的一条纹路, m 为 r 上一点, IM 为中视角图, r' 为 r 的对应纹路, l' 为 m 对应的极线。目前需要找到 IL 中 m 点在 IM 中的对应点 m' 。根据纹路约束, m' 必须处在纹路 r' 上。根据极线约束, m 在三维空间上的所有候选点在 IM 中的投影处在同一条直线(称为极线)上,所以 m' 必须处在极线 l' 上。极线 l' 可以通过 m 点坐标与双摄像机标定参数计算得出(式(1)[11]),

其中 F 是 3×3 双摄像机基础矩阵), 获取的 r' 与 l' 的交点就是 m 的对应点 m' (式(2)^[11])。

$$l' = Fm \quad (1)$$

$$m'^T l' = 0 \quad (2)$$

在完成左视图图与中视图图相关点的采样和匹配后, 结合对应点和摄像机标定参数, 利用 openCV 库^[12] 可以得出这些点的三维坐标。然后按照同样算法对中视图图与右视图图进行操作。最后将两次计算得出的三维坐标合一, 通过差值拟合完成三维指纹模型的重建, 重建结果如图 11 所示。



图 11 三维重建效果图

5 算法总结、对比与展望

本文提出了一种基于纹路的三维指纹重建算法, 该算法与已有文献[4,6]中算法的对比详见表 1。

表 1 本文算法与已有文献[4,6]算法的对比

算法	指纹采集设备	重建原理	使用的指纹先验信息	重建结果	重建数据量
Paar ^[4] 算法	基于多摄像头的指纹采集器	图像块匹配与纹理粘贴	使用含参数的圆柱体模型拟合手指形状	手指表面三维结构	大
Labati ^[6] 算法	基于 SLI 多摄像头的指纹采集器	使用 SLI 辅助获取图像深度信息	无	手指表面三维结构	大
本文算法	基于多摄像头的指纹采集器	纹路提取与纹路三维重建	基于指纹的本质特征——纹路	手指纹路三维结构	小

相对于已有的文献和算法中将指纹重建等同于皮肤表面的重建, 本文将指纹看作一个三维空间中纹线的集合进行重建。本文算法的优势包括以下几个方面:

(1) 算法仅对纹路而不是手指整体表面进行重建, 重建数据量较少, 便于存储以及压缩。

(2) 本文重建结果直接包含指纹的特征信息(如纹路信息与细节点信息), 更有助于指纹识别。

(3) 算法在指纹图像处理过程中, 充分利用了已有的指纹处理技术, 特别是对于低质量的指纹图像, 充分利用了现有的指纹提取技术。

(4) 算法在指纹重建过程中已经完成了对纹路的分析, 有助于今后本领域更进一步的研究(比如进行有选择性的纹路重建)。

算法也存在一些有待改进的方面: 由于纹路和细节点提取错误导致局部指纹无法匹配的区域, 算法将其简单忽略; 对于两个角度指纹图像细节点的匹配, 仅仅使用一般的匹配算法, 制约着整个重建过程的速度; 算法的优化和加速方面还有待进行更多的研究。

结束语 本文提出了一种基于纹路的三维指纹模型重建算法。算法针对多角度指纹图像, 设计了一系列的步骤用于获取纹路三维结构, 并将其作为三维指纹模型重建结果。与已有算法相对比, 本文算法重建结果直接包含指纹纹路相关特征, 更有利于后续指纹识别。

进一步的研究工作:

(1) 对于纹路提取错误导致的局部纹路不匹配, 引入纠错机制重新进行纹路方向的提取。

(2) 对于多角度指纹图像细节点匹配过程, 更好地使用同源信息(即两幅指纹图像是来自同一手指不同角度的拍摄结果)来引入更多的启发和约束条件, 从而加快这一过程。

(3) 对于最后一步纹路的采样重建, 算法具有潜在的并行性, 可以考虑使用并行程序同时对多条纹路进行操作, 减少算法所需的时间。

(4) 对基于本文重建结果的三维指纹识别过程进行研究。

参考文献

- [1] Vlad M, Anisie A, Vlad M S. New Developments in Automatic Identification [C] // The International Conference on Environment, Economics, Energy, Devices, Systems, Communications, Computers, Mathematics, 2011:163-168
- [2] Parziale G, Diaz-Santana E, Hauke R. The Surround Imager TM: A multi-camera touchless device to acquire 3d rolled-equivalent fingerprints [C] // International Conference on Biometrics, 2006:244-250
- [3] Parziale G. Touchless fingerprinting technology [C] // International Conference on Biometrics, 2007:39-62
- [4] Paar G, Perucha M P C, Bauer A, et al. Photogrammetric fingerprint unwrapping[J]. Journal of Applied Geodesy, 2008, 2(1): 13-20
- [5] Wang Y, Hassebrook L G, Lau D L. Data acquisition and processing of 3-D fingerprints [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(4): 750-760
- [6] Labati R D, Piuri V. Fast 3-D Fingertip Reconstruction Using a Single Two-View Structured Light Acquisition [C] // Biometric Measurements and Systems for Security and Medical Applications (BIOMS), 2011:1-8
- [7] Wang Y, Hassebrook L G, Lau D L. Noncontact, depth-detailed 3D fingerprinting [R]. SPIE Newsroom, 2009
- [8] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334
- [9] 祝恩, 殷建平, 张国敏, 等. 自动指纹识别系统[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2006
- [10] Zhu En, Hancock E, Ren Peng, et al. Associating Minutiae between Distorted Fingerprints Using Minimal Spanning Tree [C] // Image Analysis and Recognition 7th International Conference, 2010:235-245
- [11] 马颂德, 张正友. 计算机视觉 [M]. 北京: 中国科学院科学出版社, 1997:78-80
- [12] Kaehler. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library [M]. Adrian O'Reilly Media, 2008: 446