

基于自适应网格矢量编码的人脸快速匹配算法

谢永华^{1),2)} 杨静宇¹⁾

¹⁾(南京理工大学计算机科学系,南京 210094) ²⁾(南京信息工程大学计算机科学与技术系,南京 210044)

摘 要 在分析传统图像匹配算法优缺点的基础上,提出了一种基于自适应网格矢量编码的人脸快速匹配算法。该算法首先对人脸进行二值化边缘分割和脸部特征轮廓提取,并对图像的细节边缘和特征轮廓进行自适应网格划分,然后对网格内的边缘段和特征轮廓段进行链码描述及矢量编码,最后通过计算编码后的方向矢量矩阵相似度来实现人脸图像的匹配识别。通过对 ORL 标准人脸图像库的实验仿真及对比结果表明,该算法在降低计算复杂度及提高识别精度的同时,有效地解决了由图像旋转、姿态变化引起的微小形变以及不同光照条件所带来的图像识别率低的问题。

关键词 边缘二值化 特征轮廓 自适应网格划分 矢量编码 相似度 边缘形变

中图分类号: TP391.4 TN9191.81 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2006)02-0197-06

An Approach for Fast Face Image Matching Based on Self-adaption Grid Division and Its Vector Coding

XIE Yong-hua^{1),2)}, YANG Jing-yu¹⁾

¹⁾(Department of Computer Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

²⁾(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract Face recognition is a new research topic in today's pattern recognition field. With analyzing the advantages and disadvantages of transient image matching algorithm, a new algorithm for fast human face image matching based on self-adaption grid division and vector coding is presented in this paper. On the premise of the edge extraction and two-value characterization, and face contour extraction, the two images' edges are firstly divided into several grids, and then the segments of the edges and character contour within each grid are described with chain and vector coding. Finally, by computing the similarities and shape alteration between the vector codes, the course of goal matching and recognition is accomplished. The simulative experiment is carried out on the standard ORL face database. Satisfied results have been obtained, which show that the proposed algorithm can not only effectively resolve the problems caused by lower recognition owing to image rotation, minute alteration of edge shape caused by pose transformation and different illumination condition, but also greatly enhance the matching precision and reduce the redundant information and the complexity of computation.

Keywords edge two-value characterization, character contour, self-adaption grid division, vector coding, similarities, shape alteration of edge

1 引言

图像匹配识别方法是图像处理和模式识别领域比较活跃的研究课题之一,和统计模式识别方法相

比,匹配识别算法具有精度高、算法实现简单等优点。经典的图像匹配算法是模板匹配法,但由于模板匹配法主要是通过计算目标图像和待识图像所有像素的相关性来达到识别的目的,计算量非常大,因而并没有实际的应用价值。

基金项目:国家自然科学基金项目(60072034)

收稿日期:2004-11-30;**改回日期:**2005-06-09

第一作者简介:谢永华(1976~),男,讲师。2002年于南京信息工程大学获系统分析与集成专业硕士学位,现为南京理工大学计算机科学系博士研究生。主要研究方向为数字图像处理与模式识别。E-mail:xyh_76@nuist.edu.cn

长期以来,各国学者围绕图像匹配问题,进行了大量的研究,并提出了许多经典的匹配识别算法,具代表性^[1]的有 Chamfer 最小距离匹配算法、Hausdorff 分数法、金字塔最小距离匹配法、同心圆窗口矩匹配算法等。其中最小距离法的基本思想是通过计算图像边缘点之间的最小距离来实现图像之间的匹配; Hausdorff 分数法匹配过程与最小距离法类似,只是匹配时采用的度量不同;同心圆窗口矩法是一种基于图像灰度信息的匹配方法,受光照变化的影响很大。综上可知,这些算法的实质都是通过计算图像之间某种特征向量的相似度来实现目标的匹配识别,因此特征向量的选取对于算法的精度以及时间复杂度具有很大的影响,而且对于待识目标之间角度偏差、微小形变,以及光照不均匀的情况,这些算法并不能很好地适应和解决。

人脸识别是当今模式识别领域中的一个研究热点,而其中采用的一种主要方法就是基于人脸特征的匹配方法,具代表性的方法有基于面部器官几何特征方法^[2];利用可变形模板抽取面部特征的匹配方法^[3]等。实际上,图像的边缘是描述图像结构特征的主要因素之一,因而只要考虑图像边缘之间某种属性的相似度,就可以实现目标的匹配识别。近年来,人们提出了一些基于图像边缘特征的匹配算法,如基于实数值边缘点的图形识别方法^[4];基于图像边缘的立体匹配算法^[5]等。这些方法可以获得比一般匹配算法更好的识别效果,但是这些算法也不能有效解决由于图像旋转以及边缘形变带来的图像匹配问题。基于此,提出了一种基于自适应网格矢量编码的快速匹配算法,该算法在提出自适应八方向链码的基础上,通过对二值化图像边缘和特征轮廓的网格划分,可以对各网格内的边缘和特征段进行链码描述和矢量编码,然后计算该方向矢量矩阵的相关性来实现目标的匹配识别。通过对 ORL 人脸图像库的实验结果表明,这种算法在缩短图像匹配时间,解决角度偏差,光照条件影响以及人脸姿态不同所引起的微小形变的目标识别问题方面,都得到了很好的效果。

2 图像边缘和特征轮廓的网格分割与矢量编码

图像边缘是图像分析与理解的重要信息源,也是图像边缘分割的基础。首先对图像进行尺度规一化处理,然后利用梯度算子结合阈值法进行人脸图像边

缘提取及二值化处理^[6],提取出图像的细节边缘,从而可以减少图像表示的数据量,同时能够抑制由于光照原因所引起的灰度不均匀对图像质量的影响。但是考虑到人脸图像的边缘并不能反映人脸的姿态变化,而人脸的面部主要器官,如眼睛、鼻子和嘴巴的几何拓扑结构不会随着人脸的旋转以及姿态的变化而改变,在边缘二值化的基础上,利用权重模函数方法^[7]对人脸面部的主要器官进行定位,并把它们连通成一个由特征点构成的闭合多边形轮廓区域。由于不同人脸的器官位置不一样,因而所提取出的特征点轮廓区域的长度和方向也各不相同。图 1(b)为图 1(a)原始图像的边缘和特征轮廓提取后的结果。

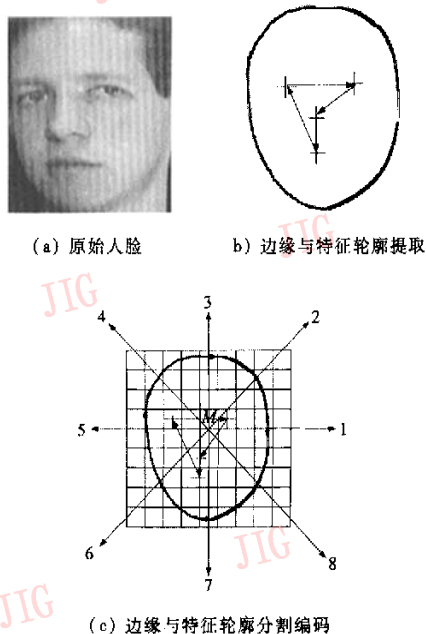


图 1 边缘与特征轮廓提取、分割和编码

Fig. 1 Extraction and division of edge contour and coding

链码表示法^[8]是二值图像的主要描述方法,而且边缘和特征轮廓的分割必须按照链码表示形式进行,因此在对它们进行网格分割之前,必须先规定链码表示的形式。在图像分析领域,常用的链码表示形式是 8 方向链码^[9],但是如果采用传统的 8 方向链码,对同一幅图像在旋转前和旋转后进行分割后进行的链码矢量描述就可能不一样,这样会给旋转后的图像匹配带来很大的困难。因此,提出了一种自适应的 8 方向链码描述方法,该方法的思路是:首先求出图像的重心,然后将穿过图像重心,且惯量分

量为零的坐标轴作为参考坐标轴,接着对该坐标轴进行十进制方向编码,编码号从1到8,即可得到如图1(c)所示的自适应8方向链码。其中1与3编码方向分别对应于横坐标与纵坐标方向, M 点为该图像区域的重心。

在此基础上,对人脸图像边缘和特征轮廓按照纵坐标方向进行 $m \times n$ 正方形网格划分(m, n 表示横向和纵向划分的网格数),从图中箭头所示的方向开始,沿着平行于横轴的方向开始扫描,直至找到第1个含有边缘和含有特征轮廓段的网格,设置图像边缘段的走向为顺时针方向,然后沿着该网格内的边缘段和特征轮廓段开始编码,使得曲线在每个网格中都用最接近的方向链码表示(如图1(c)所示)。例如:图1(c)中第1个找到的网格内的边缘走向与45°的链码方向“2”最为接近,因此将其编码为“2”,依此类推。如果 m, n 较大,则由此产生的网格就会很密,采用此方法所得的数字化点序列将表示一个与源图像边缘和特征轮廓区域非常接近的多边形,该数字化点序列即为图像边缘和特征轮廓的链码。如果在扫描过程中将该链码用矩阵的形式来描述,其中,网格内的边缘与特征轮廓段用对应的方向链码表示,而不存在边缘段和特征轮廓段的网格位置用0来表示,即可得到该人脸的边缘和特征轮廓的 $m \times n$ 维编码矩阵:

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 1 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 0 \\ 0 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 7 & 0 \\ 0 & 3 & 4 & 4 & 6 & 0 & 0 & 7 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 4 & 6 & 0 & 0 & 7 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 5 & 6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

显然,由于图像在旋转的过程中,图像的重心位置与量为零的方向不会发生改变,因而图像的参考坐标轴会随之发生旋转,8方向链码也会自适应地旋转同样的角度,人脸的面部几何特征轮廓也会同样随着图像的重心旋转。这样在对图像边缘和特征轮廓进行分割编码的时候,落在每个网格内的边缘段和轮廓段矢量编码就不会发生改变,由此得到的矢量矩阵也是唯一的。因而在利用该矩阵进行图像匹配的时候,可以很好地解决因为姿态变换、图像旋转或角度偏差带来的无法匹配问题。

3 基于图像边缘和特征轮廓编码矩阵的匹配算法

本文图像匹配算法的主要思想是,首先对目标图像和待识图像利用前文提出的方法进行边缘分割与矢量编码,得出表示边缘和特征轮廓编码的矩阵,然后通过计算矩阵之间的形变率和似然度来实现图像的匹配识别。

3.1 矩阵的似然度及其性质

矩阵可以看成一组数据的2维结构形式,在图像处理领域,也可以看成某类信息或某种特征向量的2维有序排列^[10]。从矩阵间的绝对误差出发,提出矩阵间的最小二乘距离的概念,并由此定义矩阵的似然度,用它来衡量矩阵间的相似程度。

定义1 设 $m \times n$ 维矩阵 $A(m > n)$, $m \times k$ 维矩阵 $B(m > k)$,则存在一个 $n \times k$ 维矩阵 X ,使得 $S(A|B)$ 为最小,称为矩阵 A, B 之间的最小二乘距离 $S^*(A|B)$,即

$$S^*(A|B) = \min_X S(AX|B) \quad (2)$$

其中, $S(A|B) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k (a_{ij} - b_{ij})^2}$ 称为矩阵 A, B 之间的距离, a_{ij}, b_{ij} 分别为矩阵 A, B 的第 i 行第 j 列上的元素。

性质1 由矩阵代数的性质可知,当 $m \times n$ 维矩阵 $A(m > n)$ 的列向量之间线性无关时, A 可进行正交三角分解,即 $A = GH$,其中, G 为 $m \times n$ 维正交矩阵, H 为 $m \times m$ 维的上三角矩阵,且可以写成 $H = [H_1, Q]^T$ 。其中, H_1 为 $m \times n$ 维的上三角矩阵, Q 为 $(m - n) \times n$ 维矩阵。则对于 $m \times k$ 维矩阵 $B(m > k)$,设 $G^T B = [C, D]^T$,其中, G, D 分别为 $n \times k, (m - n) \times k$ 维矩阵,矩阵 D 称为 A, B 之间的差矩阵。由此可得到 A, B 之间的最小距离为

$$S^*(A|B) = S(Q|D) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-n} \sum_{j=1}^k d_{ij}^2} \quad (3)$$

其中, d_{ij} 为差矩阵 D 的第 i 行第 j 列上的元素。

证明:

$$\begin{aligned} AX - B &= GHX - B = G(HX - G^T B) \\ &= G([H_1, Q]^T X - [C, D]^T) \\ &= G[H_1 X - C, Q - D^T] \end{aligned}$$

由于 G 为正交矩阵,当 $H_1 X = C$ 时,才能使 $S^*(A|B)$ 最小,则有:

$$S^*(A|B) = \min S(GHX|B)$$

$$= \min_x S(HX | G^T B)$$

$$= S(Q | D)$$

性质 1 证明结束。

定义 2 设 $m \times n$ 维矩阵 $A (m > n)$ 与 $m \times k$ 维矩阵 $B (m > k)$, 则矩阵 A, B 的归一化的似然度 $L(A|B)$ 定义为

$$L(A|B) = \exp(-S^*(A|B)) \quad (4)$$

同时, 矩阵的似然度满足以下性质:

(1) $0 \leq L(A|B) \leq 1$;

(2) 若 B 的列向量是 A 的列向量的线性组合, 或 A 的列向量是 B 的列向量的线性组合, 则 $L(A|B) = 1$;

(3) $L(A|B)$ 与矩阵 A, B 之间的列向量的相对排列次序无关;

(4) $L(A|B) = L(\lambda A|B), \lambda \in \mathbb{R}$ 。

3.2 人脸图像矢量编码矩阵的似然度匹配算法

现假设有待测人脸图像集所对应的边缘和特征轮廓矢量编码矩阵集合 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_l\}$, 以及目标人脸所对应的矢量编码矩阵 B 。其中, 矩阵 B 为 $m \times k$ 维矩阵, 不失一般性, 假定 $m > k$, 且有 k 个列向量线性无关; 待测矩阵集合 A 中的矩阵 A_i 均为 $m \times n$ 阶矩阵 ($i = 1, 2, \dots, l$), 其中仍假定 $m > n$, 其列向量可以线性相关。

本文算法实现的具体过程如下:

(1) 求出待测图像集和目标图像进行尺度归一化处理, 求出它们各自的特征边缘, 并对其进行二值化处理, 得到各自对应的图像细节边缘;

(2) 对人脸图像面部器官的几何特征的位置进行定位, 并将其连通成闭合的多边形轮廓区域;

(3) 计算图像的重心和惯量为零的方向^[10], 定义参考坐标轴与自适应 8 方向链码;

(4) 对生成的图像边缘和特征轮廓按照前文提出的方法进行分割与矢量编码, 并给出它们所对应的矩阵描述形式;

(5) 计算出矩阵 B 与矩阵集合 A 中每一个矩阵 $A_i (i = 1, 2, \dots, l)$ 之间的似然度 $L(A_i|B)$, 求出似然度的最大值 $\max(L(A_i|B))$, 然后选取使得函数 L 取最大值的 i 所对应的图像作为被匹配的图像。

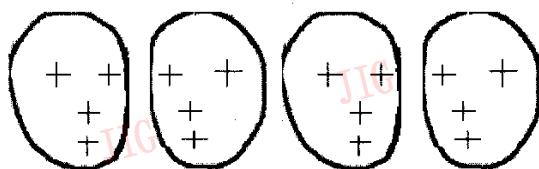
4 实验结果及分析

选取的实验数据是由 40 类人脸组成的 ORL 人

脸图像库, 每一类人脸有 10 幅图像, 分辨率为 92×112 , 都为正面图像, 略有尺度和姿态的变化。为了控制匹配的规模和训练时间, 利用双线性插值将图像归一化成 32×32 的标准图像, 但对图像的灰度不进行任何变化。选取每人的前 2 幅作为目标图像, 后 8 幅作为测试图像, 这样目标样本和测试样本分别达到了 80 幅和 320 幅。图 2(a) 给出了 ORL 人脸库中某人脸归一化后的 4 幅原始测试图像, 图 2(b) 为对应的边缘提取以及眼睛、鼻子和嘴唇的脸部特征定位结果。



(a) 归一化后 4 幅原始测试图像



(b) 边缘提取和脸部特征定位结果

图 2 人脸边缘特征提取及脸部特征定位

Fig. 2 Extraction of face edge and feature orientation

从边缘和特征轮廓提取结果可以看出, 对于同一张人脸不同姿势和旋转角度的图像, 边缘和脸部特征的朝向会有所不同, 但是边缘的形状和特征点的几何拓扑结构几乎没有改变。随着人脸的旋转和姿态变化, 人脸区域的重心以及链码方向会自适应地跟着旋转, 分割后边缘和特征轮廓段的位置就会保持相对不变, 从而保证了同一张人脸图像经过矢量编码后得到的矩阵具有唯一性。

实验中为了既保证提取的图像边缘和特征轮廓矢量更大程度地逼近于原始人脸图像的真实边缘和人脸几何特征分布, 又要控制图像匹配时的计算复杂度, 对图像边缘和特征轮廓进行了 16×16 网格分割。为了测试本文算法在不同旋转角度情况下的匹配效果, 首先对待测人脸图像进行不同角度的旋转, 然后在 PIII 800, 256M 的硬件环境下, 运用 Matlab 软件对本文算法进行仿真, 并将实验结果和相同实验

环境下采用其他边缘匹配算法的识别结果进行了比较,实验对比结果表1所示。

表1 不同旋转角度下的实验结果比较

Tab.1 Experimental results with different rotation angle

匹配方法	旋转角度 (°)	匹配率 (%)	识别时间 (s)
实数值边缘点匹配法	0	100	0.65
	45	9.1	4.5
	90	0	10
图像边缘立体匹配法	0	100	0.6
	45	12.3	3.8
	90	0	9.5
本文算法	0	100	0.24
	45	98.5	0.29
	90	98	0.34

从表1可以看出,本文提出的基于自适应网格矢量编码的图像快速匹配算法,在性能上明显优于其他几种传统分类算法。首先,由于该算法是对图像的边缘和特征轮廓进行匹配,因而人脸图像特征的有效维数可以从1024维减少到不超过60维,这样就不仅可以解决人脸识别小样本集所造成的奇异性问题,而且可以大大降低算法的时间复杂度,使图像的匹配时间较传统的匹配方法平均降低0.4s左右;其次,图像的边缘提取和二值化操作可以抑制由于光照条件原因引起的灰度不一致给图像质量带来的影响,从而提高图像匹配的精度;最后,本文提出的自适应边缘和特征轮廓分割及矢量编码,可以保证图像的边缘矢量和轮廓特征编码不随图像的旋转而改变,从而能够有效解决由于图像旋转带来的无法匹配问题,使旋转任意角度的图像匹配率均保持在98%以上,这也是目前所有图像匹配算法中识别效果最好的算法。

在人脸识别领域,由于具有不同姿态的人脸图像经过边缘提取后,其不一致性恰好可以用边缘的微小形变来描述,因而为了说明本文算法对于姿态变化的不敏感性。选择几幅姿态变化比较明显的人脸图像,并对图像的边缘进行不同程度的变形操作,然后引入矩阵误差 μ 来反映人脸形变的不同程度,即

$$\mu = \frac{\|B^{-1} - (A')^{-1}\|}{\sqrt{\|B^{-1}\|^2 + \|(A')^{-1}\|^2}} \quad (5)$$

其中, B 为一幅原始人脸图像构成的 $m \times n$ 维矩阵,

A' 为另一幅原始人脸图像矩阵 A 经过一定扰动后生成的 $m \times n$ 维矩阵, B 和 A' 称为近似矩阵。

图3给出了在形变率阈值范围内,不同匹配算法在解决微小形变情况下图像匹配问题时的时间复杂度和收敛速度。从图中可以看出,本文算法在解决图像边缘形变时的匹配效果也明显优于其他算法。随着图像形变率的提高,本文算法所用的时间对图像的边缘形变并不敏感,平均匹配时间均保持在4s以内,而且匹配时间的收敛速度大大快于其他方法。

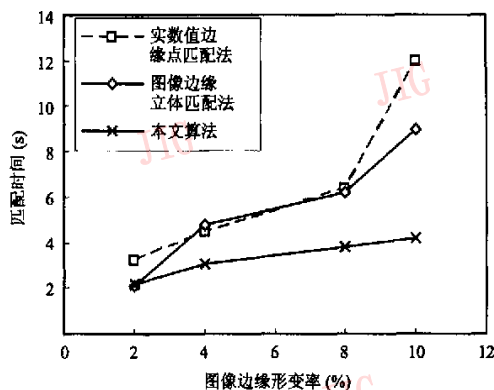


图3 不同边缘形变率下各种算法的平均匹配时间曲线

Fig.3 Average matching time of several algorithms under different alteration rate of edge shape

5 结论

在分析传统图像匹配算法优缺点的基础上,提出了一种基于自适应网格矢量编码的快速匹配算法。实验结果表明,该算法主要具有以下优点:首先,图像匹配是在图像边缘与脸部特征轮廓之间进行,因而可以减少匹配信息量,降低计算复杂度;其次,特征提取能够大大减少噪声影响,对灰度变换、光照不均匀等降质图像之间的匹配具有较强的适应力;最后,本文提出的自适应图像边缘和特征轮廓的矢量编码,可以保证图像边缘和特征轮廓矩阵的一致性,从而解决因图像旋转、微小形变带来的图像匹配问题。鉴于以上优点,基于自适应网格矢量编码的快速匹配算法具有很好的应用前景。

进一步地,本文方法将应用于手写数字识别。

参考文献 (References)

- Olson C F, Huttenlocher D P. Automatic target recognition by

- matching oriented edge pixels [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(1):103 ~ 113.
- 2 XiaoBo L, Nicholas R. Face contour extraction from front-view images[J]. Pattern Recognition, 1995, 28(8): 1167 ~ 1179.
- 3 Yullie A, Hallinan P, Cohen D. Feature extraction from faces using deformable templates[J]. International Journal of Computing Vision, 1992, 8(2):99 ~ 111.
- 4 Feng Y, Kang X. Graph recognition algorithm based on edge points of real number[J]. Journal of North China University of Technology, 2002, 14(1): 17 ~ 20. [冯毅, 康新. 基于实数值边缘点的图形识别算法[J]. 北方工业大学学报, 2002, 14(1):17 ~ 20.]
- 5 Greenfield J S, Schenk A F. Experiments with edge-based stereo matching[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1989, 5(12):1779 ~ 1784.
- 6 Brink A D. Thresholding of digital images using two-dimensional entropies[J]. Pattern Recognition, 1992, 25(8):803 ~ 808.
- 7 Chiunhsium L, Kuo-Chin F. Pose classification of human faces by weighting mask function approach[J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(12):1857 ~ 1869.
- 8 Kenneth R Castleman. Digital Image Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 473 ~ 475.
- 9 Juan R R, Luisa M. Comparison of AESA and LAESA search algorithms using string and tree-edit-distances [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(3): 1417 ~ 1426.
- 10 Wang Y M. Image's Quadrature Function—Principle, Algorithm and Application[M]. Shanghai: Press of East China University of Science and Technology, 2002: 50 ~ 92. [王耀明. 图像的矩函数——原理、算法及应用[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2002: 50 ~ 92.]