

## 眼睛状态检测的组合方法

李英 赖剑煌

阮邦志

(中山大学数计学院计算机视觉研究中心, 广州 510275) (香港浸会大学计算机系, 香港)

**摘要** 眼睛状态的检测具有广泛的应用. 详细介绍了5种检测眼睛状态的方法, 即灰度模板方法、Fisher方法、投影的方法、找眼睛上眼睑的方法、用Hough变换找眼珠的方法. 通过对这5种方法进行组合, 提高了眼睛状态检测的准确率. 通过对396个眼睛进行检测, 准确率达到了95.2%. 实验结果表明了这5种算法组合算法的有效性, 抗光照能力强; 同时适中的复杂性也说明了该组合算法的可行性.

**关键词** 计算机图像处理(520·6040) 眼睛状态 灰度均匀化 水平投影 Hough变换

**中图法分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)10-1140-06

## Combined Method of Eye States Detection

LI Ying, LAI Jian-huang

(Center of Computer Vision, Mathematics Department, SUN YAT-SEN University, Guangzhou 510275)

YUEN Pong-chi

(Computer Science Department, Hong Kong Baptist University, Hong Kong)

**Abstract** There are many applications of the robust eye states detection. In this paper, five methods are applied to detect the eye states in color eye images. They are gray model method, fisher method, projection method, detect-upper-eyelid method and detect-eyeball method. Each of the five methods has its advantage as well as its disadvantage. To increase the accuracy of detection, a combined method is proposed, which combines the above five methods so that it can take good advantage of them all. Experiments are done with 396 different human eyes, 264 of which are closed ones, and 377 of these experiments turned out satisfactory results. The accuracy reaches 95.2%. The inspiring outcome shows that the combined method is effective even if the illumination is nonlinear. At the same time, the combined method is practical because it is moderate in both time and space consuming. This paper introduces in details the idea of the five methods, the design of the combined algorithm, the experiments and their relevant results.

**Keywords** Computer image processing, Eye states, Histogram equalization, Horizontal projection, Hough transform

## 0 引言

眼睛是人脸非常重要的组成部分, 眼睛状态的检测算法具有广泛的应用. 例如, 对驾驶的司机不断进行眼睛状态的检测, 看他是否醒着的还是昏昏欲睡的, 可以防止交通意外的发生; 在人脸识别的过程中可以通过眼睛状态的检测, 判断所取的人脸是否为活体. 眼睛状态也能为表情识别和人机接口提供丰富的信息. 因此眼睛状态检测是非常有意义的.

眼睛的状态是由内外眼角、上下眼睑和虹膜等

特征决定的. 目前已有许多从复杂背景中检测人脸、眼睛的卓有成效的算法<sup>[1~3]</sup>. 眼睛特征点的检测方法可分为两类, 即变形模板的方法和Hough变换的方法. Yuille首先提出用变形模板的方法找眼睛特征<sup>[4]</sup>. Deng等使用改进的变形模板方法找眼睛特征<sup>[5]</sup>. 变形模板的问题在于它的计算复杂度高, 不宜用于视频图象中眼睛的跟踪. Chow等首先使用Hough变换, 然后使用变形模板方法抽取眼睛特征<sup>[6]</sup>. 进一步的问题是如何判断眼睛的睁闭状态. 针对这个问题, Tian等提出了3种方法, 其一, 用几何特征信息和神经网络的方法检测AU5, AU6, AU7

基金项目: 国家自然科学基金(60144001); 香港浸会大学基金; 教育部留学回国人员科研启动基金

收稿日期: 2002-10-31; 改回日期: 2003-04-17

3 种眼睛状态<sup>[7]</sup>;其二,用 Gabor 小波和神经网络的方法检测 AU11, AU42, AU43 3 种眼睛状态<sup>[8]</sup>;其三,用 Canny 边缘和半圆虹膜掩模(Half circle iris mask)的方法检测开、闭两种眼睛状态<sup>[9]</sup>.文献[10]进一步使用饱和度和边缘的方法检测开、闭两种眼睛状态,等等.在光照条件好的情况下,采用边缘<sup>[9]</sup>或饱和度<sup>[10]</sup>的方法可以获得很好的结果.但是,众所周知,在非均匀光照下,边缘信息不稳定,有时可能找不到虹膜边缘.而饱和度受光照的影响也很大,因此单一地用边缘的方法或饱和度的方法来检测眼睛状态,抗光照影响能力必然低.

本文应用 5 种方法来检测开眼和闭眼状态,即灰度模板的方法、Fisher 方法、投影的方法、找眼睛上眼险的方法、用 Hough 变换找眼珠的方法.最后通过对这 5 种方法进行组合来提高抗光照影响能力,提高检测的准确率.

## 1 算 法

假定在眼睛窗口和内外眼角已准确定位的情况下,考虑眼睛状态的检测问题.

### 1.1 灰度模板匹配方法

#### 1.1.1 原理

任给一个未知状态的眼睛,如果有开眼模板和闭眼模板两个模板,那么就可以通过看它和哪个眼睛模板最相似来判断它的状态.如果它和开眼模板最相似,那么就可以认为眼睛是开的,否则就是闭的.

#### 1.1.2 开眼和闭眼灰度模板的制作

##### (1)训练开眼灰度模板

首先,找  $N$  个开眼图象,对于每个眼睛,对齐其内外眼角使之成一水平线.

其次,将所得的眼睛图象转化为灰度图象,然后把它们变成尺度相同的图象,比如说  $m \times n$ .

再次,对它们进行灰度均匀化,也就是说,找一个灰度直方图分布比较均匀的开眼图象,使每幅图的灰度直方图都和此图象灰度直方图几乎一致.

最后,将得到的这  $N$  幅图的灰度进行平均,就得到了开眼的灰度模板.

##### (2)训练闭眼灰度模板

用同样的方法得到闭眼灰度模板.

#### 1.1.3 检测某一个给定的眼睛是开眼还是闭眼

(1)对齐此眼睛的内外眼角使之成一水平线,再转化为灰度图象,然后变成尺度为  $m \times n$  的图象  $I$ .

(2)算出图象  $I$  和开眼灰度模板的相似度  $S_1$  (两个矩阵的相似度),再算出它和闭眼灰度模板的相似度  $S_2$ ,比较这两个相似度的大小,如果相似度  $S_1 < S_2$ ,那么这个眼睛被认为是闭眼,否则认为是开眼.假设

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix}$$

则  $A, B$  的相似度为

$$\left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} b_{ij} \right) / \left[ \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}^2 \right)^{1/2} \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^2 \right)^{1/2} \right]$$

其中,为了减少光线的影响,将  $A$  和  $B$  做了归一化.

### 1.2 Fisher 方法

#### 1.2.1 原理

考虑开眼和闭眼两类对象的鉴别问题,需要通过训练寻找一个有效鉴别方向(即一维子空间).对于任一幅  $m \times n$  维的眼睛图象

$$I = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

可以把它看作是  $mn$  维空间的一个样本  $X = [x_{11}, \dots, x_{1n}, \dots, x_{m1}, \dots, x_{mn}]^T$ ,如果可以把这个  $mn$  维空间投影到一维空间中,便可将  $mn$  维分类问题转为一维分类问题.

#### 1.2.2 训练

(1)找  $K$  幅开眼图象和  $K$  幅闭眼图象.对于每个眼睛,对齐其内外眼角使之成一水平线.

(2)将所得的眼睛图象转化为灰度图象,并把它们变成尺度相同的图象,比如说  $m \times n$ .这些眼睛就成为  $mn$  维空间里面的  $2K$  个样本  $X_1, X_2, \dots, X_{2K}$ .

(3)可以证明<sup>[11]</sup>,基于这  $2K$  个样本  $X_1, X_2, \dots, X_{2K}$  的有效鉴别方向为

$$w = S_w^{-1}(m_1 - m_2)$$

其中,  $m_1 = \frac{1}{K} \sum_{X \text{ 是开眼}} X, m_2 = \frac{1}{K} \sum_{X \text{ 是闭眼}} X$

$$S_w = \sum_{X \text{ 是开眼}} (X - m_1)(X - m_1)^T +$$

$$\sum_{X \text{ 是闭眼}} (X - m_2)(X - m_2)^T$$

利用先验知识可以选定分界阈值  $y_0$

$$y_0 = \frac{(\tilde{m}_1 + \tilde{m}_2)}{2}$$

其中,  $\tilde{m}_1 = \frac{1}{K} \sum_{X \text{ 是开眼}} w^1 X, \tilde{m}_2 = \frac{1}{K} \sum_{X \text{ 是闭眼}} w^2 X$ .

### 1.2.3 检测某一个给定的眼睛是开眼还是闭眼

(1) 对齐此眼睛的内外眼角使之成一水平线, 再转化为灰度图象, 然后变成尺度为  $m \times n$  的图象  $I$ , 从而得到一个  $mn$  维空间上的一个点  $X = [x_1, \dots, x_{1n}, \dots, x_m, \dots, x_{mn}]^T$ .

(2) 用变换向量把它投影到一维, 得到一个值  $y = w^T X$ , 判断这个值, 如果  $y > y_c$ , 那么这个眼睛被

认为是开眼, 否则认为是闭眼.

### 1.3 投影的方法

#### 1.3.1 原理

经观察发现, 闭眼的边缘图常常有两条足够接近的直线(近似)(图 1), 因此可以用投影的方法来观察是否存在这样两条足够接近的直线. 如有, 则认为这个是闭眼; 如没有, 则再用其他方法对这个眼睛作下一步检测.

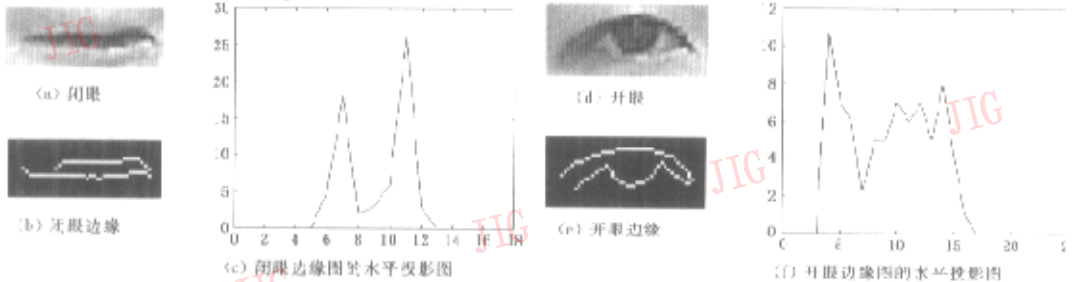


图 1 眼睛的原图、边缘图和边缘图的水平投影图

### 1.3.2 算法

(1) 将眼睛原图象的 R 分量用 Canny 算子<sup>[1]</sup>变换出边缘图, 因用 R 分量变换出来的边缘是最好的. 即边缘图清晰, 噪声相对少<sup>[10]</sup>.

(2) 将边缘图进行水平投影.

(3) 分析投影图, 看看是否有两个足够高的峰(例如, 要求有 10 个像素以上), 且这两个高峰足够接近, 如果有, 则认为这个眼睛是闭眼. 否则, 不能判断这个眼睛是闭眼, 还需用其他方法配合分析.

### 1.4 用 Hough 变换找眼珠的方法

#### 1.4.1 原理

如果一个眼睛是开眼的话, 至少可见部分眼珠, 而眼珠近似圆形, 所以可以用 Hough 变换去检测给定的一个眼睛有没有眼珠, 从而判断这个眼睛是开的还是闭的. 如图 2 所示.

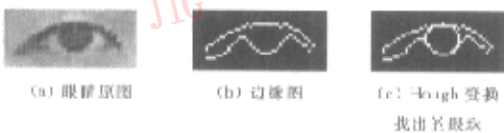


图 2 用 Hough 变换找眼珠示例

#### 1.4.2 算法

- (1) 用眼睛原图象变换出边缘图.
- (2) 用  $(x, y, r)$  来表示圆, 其中  $(x, y)$  为圆心,

$r$  为半径, 对于每一个可能的  $(x, y, r)$  所确定的一个圆, 计算这个圆上是边缘的点的个数  $E(x, y, r)$ .

(3)  $(x_0, y_0, r_0, E_{max}) = \max_{(x, y, r)} (E(x, y, r))$ , 即找出  $E(x, y, r)$  最大的那个圆. 如果  $E_{max}$  大于某个阈值  $T_1$  (这里取  $T_1 = 14$ ), 则可以认为这个眼睛是开的; 如果  $E_{max}$  小于某个阈值  $T_2$  (这里取  $T_2 = 11$ ), 则可以认为这个眼睛可能是闭的; 否则认为不能判断这个眼睛是开的还是闭的.

### 1.5 用 Hough 变换找眼睛上眼睑的方法

#### 1.5.1 原理

如果眼睛是开的, 那么上眼睑就会在边缘图上形成一个较大弧度的弧, 而且, 很多时候上眼睑的信息比下眼睑的信息稳定, 因此选择寻找上眼睑来判断眼睛状态, 如图 3 所示.



图 3 用 Hough 变换找眼睛上眼睑示例

#### 1.5.2 算法

如果边缘图是一个  $m \times n$  的窗口, 用类似寻找眼珠的 Hough 变换去寻找上眼睑, 所不同的是, 寻找眼珠时, 所有可能的圆的集合为

$$\{(x, y, r) \mid 1 \leq x \leq m, 1 \leq y \leq n, 1 \leq r \leq \frac{\min(m, n)}{2}\}$$

寻找上眼睑时,所有可能的圆的集合为  $\{(x, y, r) \mid m \leq x \leq 3m, -n \leq y \leq n, 1 \leq r \leq \sqrt{9m^2 + 4n^2}\}$ .

## 2 眼睛状态检测的组合方法

上述 5 种眼睛状态检测方法各有特点,比如说,灰度模板的方法易受光照条件的影响,鉴别不太精细,不宜用于区分半睁眼和闭眼;Fisher 方法作为抗光照能力强的有效鉴别方法,可以看作是一个与灰度模板方法互补的方法,但它对训练集的依赖性很大;用 Hough 变换找眼珠的方法的有效性依赖于边缘检测的结果,当边缘检测结果较好时,用该方法能有效地确定大多数开眼和闭眼,但是在少数情况下,却无法获得较好的眼睛边缘;找眼睛上眼睑的方法仅是一种确定开眼的方法;投影的方法也只能判断具有某种特征的眼睛是闭的,其他不具有这个特征的眼睛,就无法用该方法判断是开的还是闭的.因此一个关键的问题是,如何将这些方法组合起来,使

得检测准确率得以提高.

充分利用上述 5 种算法的优点,提出了判断开眼和闭眼两种眼睛状态的组合识别算法(如图 4 所示),具体步骤如下:

(1) 输入一个眼睛图象,采用 Hough 变换找眼珠的方法,对能够明确判断的开眼和闭眼图象进行处理.如果  $E_{max}$  大于某个阈值  $T_1$ ,则可以认为这个眼睛肯定是开的,输出开眼结果;如果  $E_{max}$  小于某个阈值  $T_2$ ,则可以认为这个眼睛可能是闭的,转入下一步;否则结果不明确,转入第 4 步;

(2) 对于可能是闭眼的图象,用灰度模板的方法判断,如果结果也是闭眼,则输出闭眼结果;如果结果是开眼,则需用其他方法做进一步的鉴别,转入第 3 步;

(3) 使用 Fisher 方法对眼睛图象做进一步判断,如果结果为闭眼,则输出闭眼结果,否则输出开眼结果;

(4) 剩下的眼睛里面,根据  $E_{max}$  的大小又可以分为可能是开的、可能是闭的、不确定 3 类.如果可能是开的( $E_{max} = T_1$ ),转入下一步;如果可能是闭的

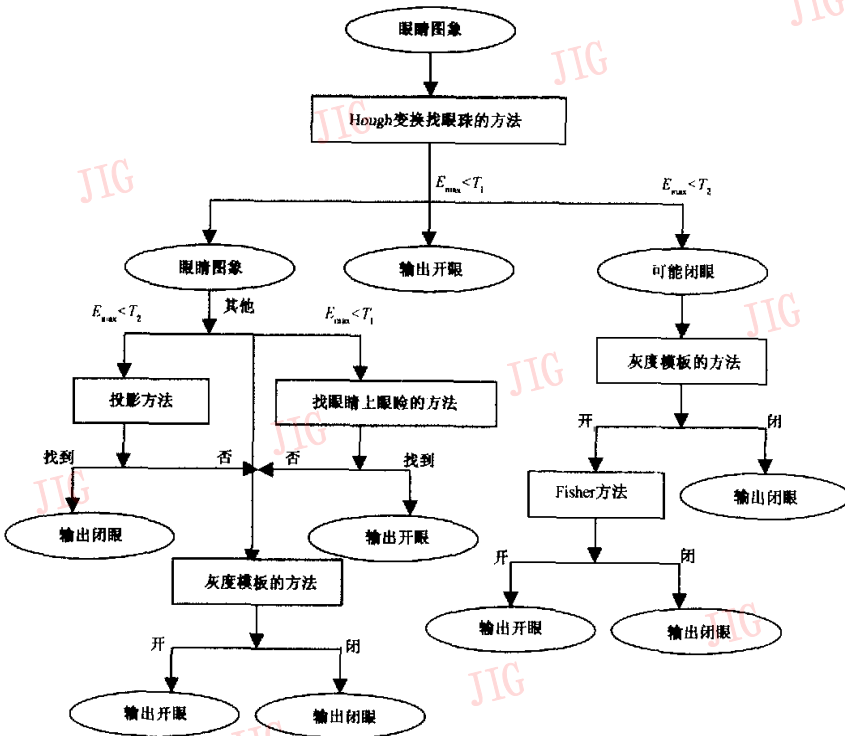


图 4 眼睛状态检测的组合算法流程

( $E_{\max} = T_2$ ), 转入第6步; 其余的转入第7步;

(5) 用寻找眼睛上眼睑的方法判断, 看是否可以真的找得到一个弧度的弧, 如果找得到, 则输出开眼结果, 否则转入第7步;

(6) 用投影的方法判断, 找两个足够高并且足够接近的高峰, 如果找得到, 则输出闭眼结果, 否则转入下一步;

(7) 用灰度模板的方法判断, 如结果为闭眼, 则输出闭眼; 如结果为开眼, 则输出开眼。

对于组合算法而言, 其可能的组合方案是多种多样的, 以上的组合方案相对其他组合方案的优越性在于: (1) 将诸如投影的方法、找眼睛上眼睑的方法和用 Hough 变换找眼珠的方法等直接基于眼睛明显特征的精细方法用在前, 而将灰度模板的方法

和 Fisher 方法等非直接基于眼睛明显特征的不太精细的方法用在后, 保证了中间环节出错率最小、全局准确率最大; (2) 在精细方法的运用中, 对可能是闭眼的直接用针对闭眼设计的投影方法, 可能是开眼的直接用针对开眼设计的找眼睛上眼睑方法, 可以减少运算量。

### 3 实验结果

对 Omron 公司提供的非均匀光照下的人脸正面图象中的 396 个眼睛 (其中 264 个眼睛为闭眼) 进行眼睛状态检测。这些人脸图象大小均为  $320 \times 240$ , 而且是人脸正面图象, 检测到的眼睛的大小为  $10 \times 30$ 。图 5 示例了检测环境与检测结果。



图5 非均匀光照下眼睛状态检测的部分试验结果图  
(对于闭眼, 相应的图中标有闭眼轮廓线; 对于开眼, 相应的图中标有上下眼睑和眼珠圈, 轮廓线位置采用 ASM 算法计算)

对这些眼睛分别用投影方法, 找眼睛上眼睑的方法和 Hough 变换找眼珠的方法做实验, 将眼睛按此方法可检测出其状态和不可检测出其状态分为两类。检测错误定义为在各自可检测出状态的眼睛里, 如果投影方法检测出为闭眼而其实是开眼; 找眼睛上眼睑的方法或 Hough 变换找眼珠的方法检测出为开眼而其实是闭眼。实验结果表明, 投影的方法出错率为 0.25%, 找眼睛上眼睑的方法出错率为 0%, Hough 变换找眼珠的方法出错率为 0.25%。

另外, 也对这些眼睛分别用灰度模板方法、Fisher 方法、饱和度和边缘方法<sup>[10]</sup>、组合法做实验, 部分的试验结果如图 5 所示。实验结果表明, 灰

度模板方法的准确率为 90%, Fisher 方法的准确率为 78% (这是由于训练集中, 有的开眼图是半闭的, 像是闭眼, 而有的闭眼图又像是开眼, 导致了训练结果的不精确, 从而影响了 Fisher 方法的准确率)。饱和度和边缘方法的准确率为 82%, 而组合方法的准确率则为 95.2%。显然, 组合方法的检测结果具有较高的准确性。

### 4 结论

本文对眼睛状态检测的方法做了综述, 实现了 5 种检测眼睛状态的方法, 即灰度模板的方法、

Fisher 方法、投影的方法、找眼睛上眼睑的方法、用 Hough 变换找眼珠的方法,并且充分利用这 5 种方法各自的优点,构造出组合检测算法.实验证明,该方法与现有的方法比较,有下列优点:

(1) 抗光照能力强,即使光照条件影响到边缘特征提取或是一幅图象的饱和度分布不均匀,该算法也是可行的;

(2) 组合方法能有效地利用每个方法的优点,而避开其缺点,检测准确率高,达到了 95.2%;

(3) 算法复杂度适中.虽然找眼珠的时候用的是 Hough 变换,但是由于眼睛的窗口比较小,运算量不大.

### 参 考 文 献

- Lam K M, Yan H. Locating and extracting the eye in human face images[J]. *Pattern Recognition*, 1996, 29(5):771~779.
- Yang M H, Kriegman D, Ahuja N. Detecting face in images: a survey[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(1):34~58.
- Lai J H, Yuen P C, Chen W S *et al.* Robust facial feature point detection under nonlinear illuminations[A]. In: *Proceeding of IEEE ICCV (International Conference on Computer Vision) Workshop on Recognition, Analysis and Tracking of Faces and Gestures in Real-time Systems (RATFG-RTS 2001)* [C], Vancouver, Canada, 2001;168~174.
- Yuille A, Hallinan P, Cohen D S. Feature extraction from faces using deformable templates [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1992, 8(2):99~111.
- Deng J, Lai F. Region-based template deformation and masking for eye feature extraction and description [J]. *Pattern Recognition*, 1997, 30(3):403~419.
- Chow G, Li X. Towards a system for automatic facial feature detection[J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(12):1739~1755.
- Tian Y L, Kanade T, Cohn J F. Recognizing upper face actions for facial expression analysis[A]. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR '00)* [C], Hilton Head Island, South Carolina, USA, 2000, 1: 294~301.
- Tian Y L, Kanade T, Cohn J F. Eye-state action unit detection by Gabor wavelets [C]. *The 3rd International Conference on Multi-modal Interfaces (ICMI'00)* [C], Beijing, China, 2000; 143~150.
- Tian Y L, Kanade T, Cohn J F. Dual-state parametric eye tracking [A]. In: *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition(FG'00)* [C], Grenoble, France, 2000;110~115.
- Liu H, Wu Y W, Zhu H B. Eye state detection from color facial image sequence [A]. In: *Second International Conference on Image and Graphics* [C], Hefei, China, 2002;693~698.
- Canny J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6):679~698.

李 英 1980 年生,2001 年获中山大学应用数学专业学士学位,现为中山大学研究生.主要研究方向为计算机图象处理、人脸模式识别等.



赖剑煌 1964 年生,中山大学数学学院教授,1989 年获中山大学应用数学硕士学位,1999 年获中山大学基础数学博士学位.主要研究方向为图象处理、模式识别、多媒体通信、小波分析等.



阮邦志 1966 年生,香港浸会大学计算机系副教授,1989 年获香港城市大学电子工程专业学士学位,一级荣誉毕业,1993 年获香港大学电子电气工程专业博士学位.主要研究方向为人脸识别、签名识别、医学图象处理等.

