

图像特征检测算法的分析与研究

肖志涛¹⁾ 国澄明¹⁾ 侯正信¹⁾ 于明²⁾

¹⁾(天津大学电子信息工程学院,天津 300072) ²⁾(河北工业大学计算机科学与软件学院,天津 300130)

摘要 从利用图像信息的角度,系统分析了图像特征检测问题的研究文献,将图像特征检测方法分为两大类,即基于梯度信息的方法和基于相位信息的方法。论述了每类方法的特点,并对主要的特征检测方法进行详细而全面的论述。指出了目前研究中存在的主要问题以及今后的研究方向。

关键词 图像特征检测 相位信息 图像处理 相位一致性 对称相位一致性

中图分类号:TP751.1 TP391.41 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-8961(2004)12-1414-07

Analysis on Image Feature Detection Algorithms

XIAO Zhi-tao¹⁾, GUO Cheng-ming¹⁾, HOU Zheng-xin¹⁾, YU Ming²⁾

¹⁾(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

²⁾(School of Computer Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

Abstract Image feature detection is a key technique in image processing, pattern recognition, content-based image retrieval, and so on. The typical image feature detectors are analyzed. From the viewpoint of information used, the literatures on image feature detection are analyzed systematically, and image feature detectors can be categorized in to two kinds, that is, gradient-based ones and phase-based ones. Characteristics of each kind are discussed. The key issues of the important image feature detector are explained extensively and comprehensively. Based on the survey, some concerned issues needed further research are presented, and the future research trends are also given.

Keywords image feature detection, phase information, image processing, phase congruency, symmetry phase congruency

1 引言

图像边缘和其他低层特征的检测长期以来一直被认为是重要的基本运算。图像特征检测是图像处理、模式识别、基于内容的图像检索等领域的关键技术。如何检测以及有效地描述图像本质特征的问题,虽然很早以前就开始了这方面的研究,但是至今也没能得到十分令人满意的一般方法,而且随着多媒体技术和 Internet 网络的迅速发展,图像的使用面不断扩大,使得这一问题的研究更加迫切。近年来出现了大量的技术文献。为了给今后更深入的研究打下基础,本文将对图像特征检测的各类方法进行综

述,对典型的特征检测方法进行详细而全面的论述,并对目前研究中存在的问题进行分析,指出了今后的研究方向。

2 基于梯度信息的特征检测

按照图像特征检测所利用的图像信息,图像特征检测方法可分为两大类:基于梯度信息的图像特征检测和基于相位信息的图像特征检测。

2.1 算法

大多数检测低层图像特征的研究都集中在用基于梯度的算法检测阶跃边缘的不连续性。早期进行基于梯度的边缘检测的有 Roberts^[1]、Prewitt^[2]、

Sobel^[3,4],而后,Marr 和 Hildreth^[5,6]针对人类的视觉计算模型对这些方法做了进一步发展。受到视网膜存在中心和非中心接收点的启发,Marr 和 Hildreth 建立了一个模型:用图像与高斯滤波器拉普拉斯变换卷积后的零交叉来检测边缘。这个方法虽然很吸引人,但存在一些难以解决的问题:零交叉经常形成闭合轮廓,不能真实描述图像特征的连续性;由于对图像进行二次微分,使得结果对噪声特别敏感。

为克服二次微分算法的缺点,研究人员对它做了一系列改进,其中包括 Fleck^[7]、Haralick^[8]、Sarkar 和 Boyer^[9]等人的工作。Fleck 和 Haralick 使用定向二次微分来减小噪声的影响。Sarkar 和 Boyer 采用了 Canny^[10,11]提出的优化标准,并且通过使用零交叉提出了用于边缘检测的无限冲激响应滤波器(IIR filter)。

Canny^[10,11]用 3 个标准对阶跃边缘检测问题进行了统一:全面的检测、精确的定位、对单一特征响应的唯一性。接着,Spacek^[12]和 Deriche^[13]沿用 Canny 的方法得到了类似的算法,Deriche 使得算法有无限冲激响应,Spacek 修正了响应的唯一性标准。但是这些所谓“最优”算法的缺点是它们仅在很有限的范围内最优,即噪声环境下的一维阶跃边缘的情况下是最优的。如果是二维特征,比如角、连接处,这些地方的亮度梯度比较差时,这些检测算法就会遇到困难。

2.2 算法存在的问题

由上可见,基于梯度信息的特征检测算法存在的第一个主要问题是:它们只使用单一的边缘模型,即它们假定边缘是阶跃不连续的。但是,实际情况并非如此。即使是理想的人工图像都会包括线、屋脊、阶跃、以及其他特征,如阴影边界、高亮度,也许还有一些未知的特征类型。在这个理想化的图像中就已经得到一个比阶跃边缘复杂的多的特征,可以想象,在实际的自然图像中情况肯定更复杂。Perona 和 Malik^[14]指出许多图像特征都是由阶跃、冲激、屋脊和斜面的一些组合来表示的。也就是说,这类算法过多地强调了寻找“最优”的阶跃边缘检测算法,而研究的初衷是寻找图像中高信息内容的点。由于这个原因,为了强调表示所有重要特征信息内容而不仅仅是阶跃边缘,在本文中一般使用“特征”(feature)一词而不用“边缘”(edge)。

基于梯度信息的特征检测算法存在的第二个问

题是:主要用亮度梯度值来表征边缘的强度。这样检测到的边缘的强弱就对亮度和空间大小的变化非常敏感。图像的亮度梯度与许多因素有关,包括画面亮度、模糊程度和空间大小。例如,保持亮度不变,将图像大小加倍,则图像的梯度就减半,任何基于梯度信息的边缘检测方法就需要相应地修改阈值。然而,一般来说,事先并不知道图像对比度的等级和图像的大小。代表边缘强度的梯度值一般凭经验决定。

2.3 阈值的设定和噪声的影响

对于如何设定阈值,几乎没有什么方法可循。在自动设定阈值方面只有一些有限的尝试。Canny^[10]用 Weiner 滤波得到的图像噪声的局部估计来设定阈值,然而却没有给出该方法的细节和有效性。Canny 还引入了阈值滞后思想,尽管在决定两个阈值级时又遇到麻烦,但该思想对保持阈值边缘连续性是一个有意义的探索。

Kundu 和 Pal^[15]提出了一个基于人类生理数据的阈值设定方法,其对比度敏感性随整个亮度级变化。然而,对于数字化的灰度级为 0~255 的对比度敏感模型,该方法很难提供直接的引导。

噪声往往是基于梯度信息图像特征检测算法所关心的问题。减小噪声影响的主要方法是空间域的平滑。然而,平滑会降低特征定位的精度,而且会严重破坏二维特征的位置,如角(Perona 和 Malik^[16])。高度平滑将会降低特征定位的强度,埋没特征之间的差别。很不能令人满意的是:检测到的特征定位要依靠平滑的程度来克服噪声的影响。

Bergholm^[17]在研究用于边缘检测的边缘集中法(edge focusing)时采用了尺度空间模型,为此他分析了基于梯度特征检测算法的几个问题。他发现要消除基于梯度的特征检测算子的噪声影响,就需要对图像进行高强度平滑,但是这会降低边缘的定位。要得到好的定位,就不能使用平滑,但噪声就成了问题。Bergholm 的解决方法是从高度平滑得到的边缘图开始,然后计算稍小尺度下的边缘图,但只针对图像中与上一尺度检测到的边缘像素相连的那些像素。忽略老的边缘点,保留稍小尺度下检测到的新边缘点,重复这个过程。用这种方式,由开始较粗糙的定位检测出边缘,并逐渐在更细的尺度下集中到正确的位置。这里重要的一点是克服了噪声:由粗尺度下的边缘开始,逐渐减小尺度时只寻找那些与老边缘相邻的边缘点。另一个优点是只在生成初始边缘图时需要设定阈值。然而,如果这个初始边缘图的

阈值设得太高,则许多特征将永远消失;相反,如果阈值设得太低,将检测到许多噪声特征,并向更细的尺度下传播。

2.4 其他类型的图像特征检测算法

Blake 和 Zisserman^[18]在 Weak membrane 方法中引入整个图像的最小化全局能量函数,这个能量度量是由表示图像表面函数微分的量、函数斜率的平方、以及函数轮廓长度的加权组成。该方法的目的是能量不由加到一起的不同类型量的量纲决定。这使得结果对组成这个能量的相应的加权特别敏感。

Peron 和 Malik^[16]使用各向异性扩散法检测边缘,提出了基于热量扩散方程的尺度空间平滑方法。为了检测边缘,利用图像的梯度函数阻止“热量”流动。这样,图像中的阶跃边缘逐渐明朗,阶跃不连续之间的区域变得更加平滑。最后的边缘提取就非常直观、容易。该方法很重要的一个贡献是特征的位置在不同尺度下保持稳定。随尺度变化的是保持特征所需的对比度的级别。然而,本方法只能检测阶跃边缘,并且高度依赖于图像的对比度。

最近 Smith 和 Brady^[19]提出了 SUSAN 边缘检测算法。这个非线性技术在整个图像中索引圆形模板,并在每一点决定与中心像素亮度值相似的模板面积。用单值块吸收核 (univalue segment assimilating nucleus, USAN) 标识模板,图像中 USAN 局部最小的地方(局部最小的 USAN,就称为 SUSAN)标出了阶跃和线特征的位置。该方法性能很好,且容噪能力很强。但是这个检测算法不是对比度不变的,因为当决定 USAN 的大小时,需要设置阈值决定模板中的元素是否与中心像素值“相似”,这个阈值代表了可以检测到的最小边缘对比度。

前面对现有特征检测方法进行了总体回顾和点评,可见,几乎所有现有的特征检测方法都是基于亮度梯度或亮度空间变化的特征度量。这些量都是有量纲的,因此依赖于图像对比度和空间大小。这里的根本问题是事先不知道哪一级强度的边缘对应于显著特征。所以,要在观察到结果以后设定阈值,并且调节阈值直到结果可以接受。这显然不是自动特征检测。基于相位信息的图像特征检测技术得到的结果是无量纲的,对图像的对比度和亮度具有不变性。

3 基于相位信息的图像特征检测

基于相位信息进行图像特征检测是新兴的图像

特征检测方法。由于相位信息在人类视觉感知中的重要性以及它的稳定性,使得利用相位信息提取的图像特征符合人类视觉感知特性,而这正是特征检测的更高目标。

3.1 相位一致性模型与局部能量模型

特征检测的相位一致性模型(PC: phase congruency)是一个比较新的模型。它不是基于亮度梯度的,而是假定图像中傅里叶相位最大的点为特征点。例如,观察一个由方波组成的傅里叶级数时,所有的傅里叶分量都是正弦波,如图 1 所示,这些正弦波在阶跃点同相,角度为 0° 或 180° (取决于该阶跃点向前或向后传播)。在方波的其他位置,单个相位值都在变化,使得相位一致性变低。与此类似,相位一致的程度在三角波的顶点(0° 或 180°)最大。使用相位一致性标识感兴趣特征,其重要特点是无需对波形进行任何假设,只是在傅里叶变换域里简单地按相位一致的顺序寻找特征点。

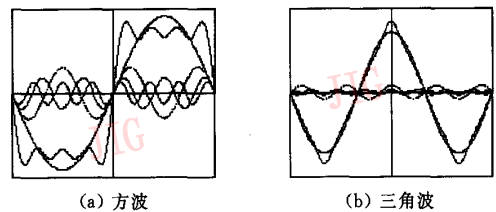


图1 方波和三角波的傅里叶级数展开
(这里只画出了前几项)

各种各样的特征类型都可使得相位一致性高的点出现,包括阶跃、线、屋顶以及马赫带。事实上,正是 Morrone 等人^[20]通过对马赫带现象的研究才导致了相位一致性模型的发展。马赫带是出现在梯形亮度梯度斜坡边缘上的模糊的亮条和暗条,比如在阴影的边缘。Morrone 等人证明了在看到的马赫带的点,信号傅里叶分量的相位一致性最大(虽然并不严格同相)。他们由此得出假设:人类感觉到的图像特征总是位于相位一致性高的点上。Morrone 和 Burr^[21]和 Ross 等人^[22]做了进一步研究,证明这个模型成功地解释了一系列人类在生理方面其他特征感知的有效性。人类视觉系统对相位信息敏感性的其他研究包括 Burr^[23]、Field 和 Nachmias^[24]、Buf^[25] 等人的研究。这些研究表明了相位信息对图像中的噪声、亮度和对比度的变化特别稳健。

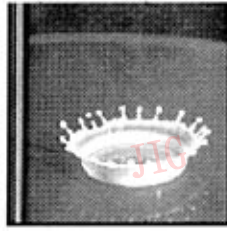
Oppenheim 和 Lim^[26]给出了相位信息重要性的经典证明:将两幅图像分别进行傅里叶变换,用一幅图像的相位信息与另一幅图像的幅度信息合成一

一个新的傅里叶变换,然后将其反变换产生一幅新的图像。尽管这幅新图像有些模糊,但是很明显与获取

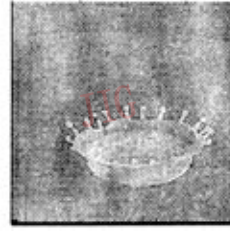
相位信息的那幅图像对应,而几乎找不到另一幅图像的影子。图 2 给出了具体的演示。



(a) 提供幅度信息的图像



(b) 提供相位信息的图像



(c) (a)与(b)的合成图像

图 2 相位信息重要性的演示

既然已经证明相位信息在图像的感知中如此重要,有些人认为自然应该立足于相位信息来研究特征检测。Morrone 和 Owens^[27]立即从关于马赫带的研究成果中认识到相一致性在计算机视觉的特性检测中必有有用之地,并定义了相位一致性模型。

3.1.1 相位一致性模型的定义

考虑一维信号。对于信号 $I(x)$,其傅里叶级数展开为

$$\begin{aligned} I(x) &= \sum_n A_n \cos(n\omega x + \varphi_{n0}) \\ &= \sum_n A_n \cos(\varphi_n(x)) \end{aligned}$$

这里的 A_n 为第 n 次谐波余弦分量的幅值, ω 是常数(一般为 2π), φ_{n0} 是 n 次分量的相位偏移量或初始相位(相位偏移量还可使得该级数用正弦项表示)。函数 $\varphi_n(x)$ 表示 x 点的傅里叶分量的局部相位。

Morrone 和 Owens^[27]定义了相位一致性函数:

$$PC(x) = \max_{\bar{\varphi}(x) \in [0, 2\pi]} \frac{\sum_n A_n \cos(\varphi_n(x) - \bar{\varphi}(x))}{\sum_n A_n}$$

使得上式最大的 $\bar{\varphi}(x)$ 为位于该点的所有傅里叶项的局部相位的加权平均。频率分量的实际相位角与这个加权平均 $\bar{\varphi}(x)$ 差的余弦大致等于 1 减去该差的平方的 $1/2(\cos(x)$ 的泰勒展开在 x 很小时约等于 $1-x^2/2$)。这样,找到相位一致性最大的点就相当于找到了对应于局部相位的加权平均变化最小的点。

3.1.2 局部能量模型的定义

但是相位一致性是一个特别难计算的量。作为相位一致性的等效代换,Venkatesh 和 Owens^[28]指出信号中相位一致性最大的点可以等效为局部能量函数中的峰值。对于一维信号 $I(x)$,局部能量定义

为信号 $I(x)$ 和它的 Hilbert 变换 $H(x)$ 的平方和的平方根:

$$LE = \|E(x)\| = \sqrt{I^2(x) + H^2(x)}$$

并且证明了局部能量等于傅里叶各分量幅度的和与相位一致性的乘积。这样,局部能量就正比于相位一致性,即相位一致性是能量与傅里叶各分量幅度的和的比值。因此,相位一致性就与信号的大小无关,就保证了相位一致性对图像的亮度和对比度的不变性。而局部能量与傅里叶各分量幅度之和成正比,即不具有亮度和对比度的不变性。局部能量模型以牺牲亮度和对比度不变性换取了计算的简单。

以这些早期工作^[20,27,28]为基础,局部能量模型由于计算简单而受到青睐,并得到了进一步发展。Owens 等人^[29]研究了局部能量函数检测算法的幂等性,即当任何一个特征检测算法应用于它自己的结果上时,应该不改变这个结果。因为从特征中检测到的特征应该还是原来的特征。基于梯度的检测方法在这方面的失败在于它们试图在图像中线特征的每一侧标注“边缘”。与此不同,相位一致性模型和局部能量模型在线特征上产生一个单独的响应,因此满足幂等性的要求。

Owens^[30]指出了图像不存在局部能量最大值的条件,也就是用相位一致性模型和局部能量模型检测不到特征的条件。她还研究了保留图像特征的图像变换,指出有些图像运算可以消除或生成图像特征,如图像之间的相加。为使在图像相互作用时不破坏图像的特征结构,她提出两个新的算子,这些算子都是模拟复数乘法和复数除法。利用这些算子,Owens 指出将一个信号分解为它的特征分量与它的无特征分量是可能的。

Freeman^[31]对局部能量模型的研究重点放在了

多方向分析和局部能量在特征连接处的表现上,给出了对特征连接形式进行检测和分类的方法,考虑了用局部能量检测特征的许多问题。

Rosenthaler 等人^[32]综合研究了二维图像特征点的局部能量的情况,提出了基于微分几何的二维特征检测模型,用有方向的局部能量的一次和二次微分来标识他们所谓的“关键点”。Robbins 和 Owens^[33]发展了他们的工作,提出了不使用局部能量微分的较简单的二维特征检测模型。他们对整个图像计算有方向的局部能量,然后计算这个局部能量的局部能量,但在与第一个方向垂直的方向上进行。通过在多个方向上重复这个过程来得到所有的二维特征。

Wang 和 Jenkin^[34]利用复数 Gabor 滤波器检测图像中的边缘和条形物体,并且认识到,阶跃边缘和条形物体具有可以用正交滤波器检测的特殊的局部相位特性,但是没有将局部能量的显著性与相位一致性概念联系在一起。

3.2 局部能量模型存在的问题

局部能量模型没有真正解决的一个问题是如何将多尺度下的数据统一起来。如果信号中某点的局部能量中的峰值是因为它的相位一致性也是最大值,那么同时考虑多个尺度将很重要。毕竟,正是在很宽的频率上的相位一致性才有意义。

虽然利用局部能量函数找出相位一致性的峰值在计算上很方便,但是当它用傅里叶分量幅度和进行加权时,并不能提供表征特征强度的无量纲的量,它的单位是勒克斯(lux)。这样,就如基于梯度信息的特征检测方法类似,局部能量法所不能解决的问题是:事先不知道对应于显著特征的响应级别。尽管如此,局部能量在对各种类型特征的响应方面仍不失为一个有用的度量。

3.3 相位一致性模型存在的问题

通过归一化局部能量函数、除以傅里叶分量幅度之和来得到相位一致性。因此,相位一致性是一个无量纲的量。相位一致性的值从1降到0,表示从显著特征降到无特征。这个特性使得可设定一个通用的特征阈值,就是说,可以在见到图像之前设定阈值——这才是真正的自动特征检测。

但是,关于相位一致性还存在许多问题。Kovesi^[35]对相位一致性的表示问题进行了有益的尝试,得到了较好的结果,遇到的问题有噪声影响问题、在特征连接处的归一化问题等。而且,根据相位

一致性的定义,相位一致性只有在很宽的频率上才有意义,例如对于单一频率的正弦波,相位一致性函数将处处为1,从而失去度量特征的作用。为了解决频率范围较窄时信号的特征检测问题,Kovesi^[36]用频率扩展函数对相位一致性进行加权,但是对于单一频率信号还是无能为力。

3.4 对称相位一致性模型

为了克服相位一致性概念的局限性,文献[37]研究了4个对称相位的特性,并给出了定位4个对称相位的两种方法,提出了对称相位一致性概念。该概念可以克服相位一致性概念固有的局限性。建立了对称局部能量数学模型和对称相位一致性数学模型^[38,39](SPC: symmetry phase congruency)。使用对称相位一致性模型进行图像特征检测,不但可以克服相位一致性模型的固有局限性,而且提高了定位精度和抗噪能力,同时可以检测到马赫带现象,符合人类视觉系统感知特性。对称相位一致性模型(SPC)和相位一致性模型(PC)对二维正弦网格的检测结果如图3所示。

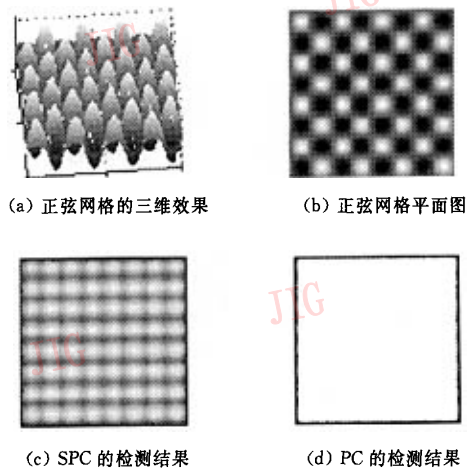


图3 正弦网格及其 SPC 和 PC 检测结果

4 结论

综上所述,目前几乎所有的图像特征检测技术都存在一定的问题。图像特征检测仍是一个开放性的研究课题。在图像特征检测中,应以人类视觉认知科学的研究成果为指导,找出与人类视觉认知一致的相似性度量,基于最新的数学工具获取无量纲的、对绝对亮度和对比度不敏感的、反映图像本质的特征描述。由以上所述可见,利用相位信息进行图像特

征检测等图像处理和分析是新的研究方向,这些技术的理论和算法还有待于进一步完善和提高。

参 考 文 献

- 1 Roberts L G. Machine perception of three-dimensional solids [A]. In: Optical and Electro-optical Information Processing [M], Tippet Ed, Cambridge, Mass: MIT Press, 1965: 159~197.
- 2 Prewitt J M S. Object enhancement and extraction [A]. In: Picture Processing and Psychopictories [M], Lipkin B S, Rosenfeld A Ed, New York: Academic Press, 1970:75~149.
- 3 Pringle K K. Visual perception by a computer [A]. In: Automatic Interpretation and Classification of Images[M], New York: Academic Press, 1969: 277~284.
- 4 Sobel I. Neighborhood coding of binary images for fast contour following and general array binary processing [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1978, 8: 127~135.
- 5 Marr D. Vision [M]. San Francisco: Freeman Publisher, 1982.
- 6 Marr D, Hildreth E C. Theory of edge detection [A]. In: Proceedings of the Royal Society [C], London, 1980, 207: 187~217.
- 7 Fleck M M. Spectre: An improved phantom edge finder [A]. In: Proceedings of 5th Alvey Vision Conference [C], UK, Oxon, 1989: 127~132.
- 8 Haralick R M. Digital step edges from zero crossings of second directional derivatives [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, 6(1): 58~68.
- 9 Sarkar S, Boyer K L. Optimal infinite impulse response zero crossing based edge detectors [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1991, 54(2): 224~243.
- 10 Canny J F. Finding edges and lines in images [D]. USA, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology, AI Lab. TR-720, 1983.
- 11 Canny J F. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 1986, 8(6): 112~131.
- 12 Spacek L A. The Detection of Contours and their Visual Motion [D]. Colchester: University of Essex, 1985.
- 13 Deriche R. Using Canny's criteria to derive an optimal edge detector recursively implemented [J]. International Journal of Computer Vision, 1987, 1(2): 167~187.
- 14 Perona P, Malik J. Detecting and localizing edges composed of steps, peaks and roofs [A]. In: Proceedings of 3rd International Conference on Computer Vision [C], Osaka, 1990: 52~57.
- 15 Kundu M K, Pal S K. Thresholding for edge detecting using human psychovisual phenomena [J]. Pattern Recognition Letters, 1986, 4(6): 433~441.
- 16 Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629~639.
- 17 Bergholm F. Edge focusing [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(6): 726~741.
- 18 Blake A, Zisserman A. Visual Reconstruction [M]. Cambridge: MIT Press, 1987.
- 19 Smith S M, Brady J M. SUSAN—A new approach to low level image processing [R]. Technical Report TR95SMS1b, Defense Research Agency, Hampshire, UK, 1994.
- 20 Morrone M C, Ross J, Burr D C, et al. Mach bands are phase dependent [J]. Nature, 1986, 324(6094): 250~253.
- 21 Morrone M C, Burr D C. Feature detection in human vision: A phase-dependent energy model [A]. In: Proceedings of the Royal Society[C], London B, 1988, 235: 221~245.
- 22 Ross J, Morrone M C, Burr D C. The conditions under which Mach bands are visible [J]. Vision Research, 1989, 29(6): 699~715.
- 23 Burr D C. Sensitivity to spatial phase [J]. Vision Research, 1980, 20(3): 391~396.
- 24 Field D J, Nachmias J. Phase reversal discrimination [J]. Vision Research, 1984, 24(4): 333~340.
- 25 Buf J M H. Ramp edges, Mach bands, and the functional significance of the simple cell assembly [J]. Biological Cybernetics, 1994, 70(5): 449~461.
- 26 Oppenheim A V, Lim J S. The importance of phase in signals [J]. Proceedings of The IEEE, 1981, 69(5): 529~541.
- 27 Morrone M C, Owens R A. Feature detection from local energy [J]. Pattern Recognition Letters, 1987, 6(5): 303~313.
- 28 Venkatesh S, Owens R A. An energy feature detection scheme [A]. In: The International Conference on Image Processing [C], Singapore, 1989: 553-557.
- 29 Owens R A, Venkatesh S, Ross J. Edge detection is a projection [J]. Pattern Recognition Letters, 1989, 9(3): 233~244.
- 30 Owens R A. Feature-free images [J]. Pattern Recognition Letters, 1994, 15(1): 35~44.
- 31 Freeman W T. Steerable Filters and Local Analysis of Image Structure[D]. USA, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology, Media Lab. TR-190, 1992.
- 32 Rosenthaler L, Heitger F, Kubler O, et al. Detection of general edges and key points [A]. In: Proceedings of 2nd European Conference on Computer Vision'92(ECCV92) [C], Italy. Santa Margherita Ligure 1992: 78~86.
- 33 Robbins B, Owens R A. The 2D local energy model [R]. Technical Report 94/5, Department of Computer Science, University of Western Australia, 1994.
- 34 Wang Z, Jenkin M. Using complex Gabor filters to detect and localize edges and bars [J]. Advances in Machine Vision: Strategies and Applications, 1992, 32: 151~170.
- 35 Kovesi P. Image features from phase congruency [R]. Technical Report 95/4, Department of Computer Science, University of Western Australia, 1995.
- 36 Kovesi P. Invariant measures of image features from phase information [D]. Perth: University of Western Australia, 1996.

- 37 肖志涛. 基于相位信息的图像特征检测和基于 DSP 的图像匹配处理机的研究[D]. 天津: 天津大学电子信息工程学院, 2002.
- 38 Xiao Zhitao, Yu Ming, Li Qiang, *et al.* Symmetry Phase Congruency: Feature Detector Consistent with Human Visual System Characteristics[A]. In: Proceedings of 3rd International Conference on Wavelet Analysis and its Application(ICWAA03) [C], China, Chongqing, 2003: 381~386.
- 39 Xiao Zhitao, Hou Zhengxin. Phase based feature detector consistent with human visual system characteristics [J]. Pattern Recognition Letters, 2004, 25(10): 1115~1121.



肖志涛 1971年生。系主任、副教授。2003年于天津大学获信号与信息处理专业博士学位, 目前为天津大学在站博士后。研究方向为图像处理、模式识别等。
E-mail: xiaozhitao@tjpu.edu.cn



国澄明 1943年生。教授、博士生导师。主要研究领域为实时图像处理、数字电视与高清晰度电视、多媒体技术及 DSP 开发与应用等。



侯正信 1945年生。主任、教授、博士生导师。1969年毕业于北京大学无线电电子学系并留校任教, 1981年于天津大学电子工程系获硕士学位。研究方向包括现代数字信号处理、图像及视频信息处理与传输等。



于明 1964年生, 院长、教授、博士生导师。1999年于北京理工大学获通信与信息系统专业博士学位。主要研究方向图像处理与模式识别、智能媒体接口及生物信息识别。