



提供的目录列表 SciVerse ScienceDirect

## 信号处理：图像通信

期刊主页: [www.elsevier.com/locate/image](http://www.elsevier.com/locate/image)

## 感性图像处理方法综述

Q1 A. Beghdadi<sup>a,\*</sup>, M.-C. Larabi<sup>b</sup>, A. Bouzerdoum<sup>c</sup>, K.M. Iftexharuddin<sup>d</sup><sup>a</sup> L2TI, Université Paris 13, France<sup>b</sup> XLIM-SIC, Université de Poitiers, France<sup>c</sup> School of ECTE, University of Wollongong, Australia<sup>d</sup> Vision Lab, Old Dominion University, USA

## 文章信息

## 摘要

## 关键词:

人类视觉系统

画面质量

对比度

感知掩蔽

分割

噪声过滤

强化

编码

量化

Q9 感知方法已广泛应用于视觉信息处理的许多领域。本文概述了基于感知的图像增强、分割和编码方法。本文还简要回顾了图像质量评估 (IQA) 方法, 这些方法用于评估视觉信息处理技术的性能。本文的目的不是回顾文献中出现的所有相关著作, 而是关注在过去几十年中被广泛研究和发展的几个主题。由于视觉研究和信号处理方面的相关进展, 我们的目标是在这个积极发展的领域中呈现尽可能广泛的视角。因此, 对于每个主题, 我们确定了感知方法的主要贡献及其局限性, 并概述了感知视觉如何影响图像增强、分割、编码和视觉信息质量评估中当前最先进的技术。

© 2013 Elsevier 版权所有

## 1. 简介

数字视觉媒体在我们日常生活中的广泛使用及其在我们周围的固有存在需要开发更智能、更有效的方法来建模、分析、处理和传达视觉信息。机器视觉技术进步如此之大, 能够执行几年前人们只能梦想的任务; 得益于更智能的算法, 当今计算机和网络中可用的处理能力、存储能力和通信带宽有了巨大的提高。然而, 与人类视觉系统 (HVS) 处理复杂场景分析、处理和抽象的轻松程度相比, 这些技术没有达到我们的预期。因此, 我们目睹了人们对受HVS启发的数字视觉方法、信息建模、分析、处理和通信越来越感兴趣。HVS的显著特征可用于设计图像处理和机器视觉的新方法。例如, 可以利用感知无关性和视觉掩蔽效应来改进图像压缩和

过滤算法。另一方面, 对HVS处理和编码视觉信息的理解可能有助于开发新的感知方法, 这些方法可以克服现有基于信号处理的方法的局限性。

HVS是一个由视网膜主题组织、并行处理、前馈、反馈和横向连接主导的复杂系统。然而, 本文不涉及HVS的结构或功能组织。重点是人类视觉的感知方面。第2节介绍了在图像处理领域中被大量利用的主要感知特征。它简要描述了对比度、视觉掩蔽、对比敏感度函数和频率选择通道的概念。第3节概述了图像增强方法, 包括去噪技术、对比度增强方法和伪影减少方法。第4节描述了感知图像分割算法, 并将它们分为基于区域、基于边缘和基于感知分组的方法。第5节讨论了基于感知方法的图像编码方法的改进, 重点是感知有损压缩。第6节专门讨论有关视觉信息质量评估的一些重要问题。本文以第7节中提出的一些结论性评论结束。

## 2. 人类视觉系统的感知特性

几十年来, 对人类视觉系统 (HVS) 的了解吸引了许多从事图像处理和机器视觉研究的研究人员的好奇心。然而, 计算机视觉和图像处理中使用的模型通常是从心理物理实验中得出的简化。在以下小节中, 我们将描述基本的人类视觉特征, 这些特征已在不同的图像处理任务中得到广泛利用, 例如对比度增强、视觉掩蔽、对比敏感度函数 (CSF) 以及频率和方向选择性。本文考虑的不同视觉现象背后的机制的生物学解释超出

Q7 Q6 \* Corresponding author. Tel.: +33 149404057; fax: +33 149404061.  
E-mail address: [azeddine.beghdadi@univ-paris13.fr](mailto:azeddine.beghdadi@univ-paris13.fr) (A. Beghdadi).

了本文的范围。读者可以参考[1, 2]对视觉感知的更全面的处理。

## 2.1. 图像对比度

对比度是图像分析和处理需要考虑的最重要因素之一。然而, 对比度的定义仍然存在争议, 对于如何客观地定义和衡量感知对比度尚未达成共识。对于光学图像, 对比度是指人类视觉系统检测两个或多个刺激之间的亮度差异的能力。对比度取决于许多物理和心理视觉因素[2]。为了寻找与HVS的感知灵敏度一致的客观对比度测量, 已经进行了许多实验和研究。Q3Weber (1834) 是第一个研究 HVS 的视觉辨别能力的人。许多年后, Fechner (1861) 更明确地阐述了Weber的经验法则, 并提出了基于Just Noticeable Differences (JNDs) 概念测量HVS辨别能力的方法。然后将对比度的第一个物理量度表示为亮度的相对变化。迈克尔逊于1927年提出了另一种全局对比度量度[3]。引入该措施是为了量化光学条纹的可见性。虽然这种对比定义与HVS没有联系, 但它已广泛用于许多研究, 包括心理视觉实验, 例如对比敏感度函数的测量[4]。1944年, Moon和Spencer考虑了目标在非均匀环绕上的情况, 并提出了一种更现实的对比度测量方法[5]。

所有这些开创性的实验都对我们了解HVS如何感知全局对比度做出了很大贡献。在一些有限的环境中。然而, 对于自然和复杂的图像, 需要定义局部对比度测量以考虑信号的非平稳性和局部结构。自Weber和Fechner的早期开创性工作以来, 已经进行了许多研究, 并提出了几种局部对比度测量方法, 旨在模仿HVS的关键心理物理特征[6-9]。Peli是第一个在复杂和自然图像的对比度测量中引入频率的人。根据Peli的推理, Winkler和Vandergheynst提出了一种基于定向小波分解[8]的各向同性对比度测量, 以说明同相和正交分量的能量响应。已经表明, 这种新的对比度测量克服了Peli定义的一些局限性。在[10]中定义带限局部对比度时考虑了HVS的各向异性选择性。这些研究强调了定义对比的必要性, 其中同时考虑了方向和频率选择性。已经提出了受Peli方法启发的许多其他对比措施[8-11]。然而, 将对比度测量扩展到彩色图像却很少受到关注。困难之一与颜色对比度与颜色恒常性现象有关[12]这一事实有关, 这一点尚不清楚。在[13]中提出了一种基于颜色感知影响模型和图像的局部和全局空间结构之间的相互作用的颜色对比分析。在[14]中, 提出了一种基于Rizzi方法的多级方法来测量彩色图像中的感知对比度。

尽管在局部对比度的计算中已经考虑了色通道和空间信息的贡献, 但据我们所知, 还没有一个综合模型可以从局部对比度测量中预测全局对比度; 但是, 已经进行了一些尝试来推导此类模型[11, 14-16]。这些方法的基本思想是计算不同空间频率下的局部对比度, 然后通过加权过程导出全局对比度。但是, 没有从HVS或底层视觉模型中找到支持此类操作的结果。[16]中进行的研究还揭示了预测自然图像中对比度的全局印象的困难。

## 2.2. 视觉掩蔽

视觉掩蔽是指HVS无法在存在另一个刺激(掩码)的情况

下检测到一个刺激(目标)。这是一种感知现象, 自1960年代次被观察到以来, 已被广泛研究。目标的可见性取决于许多因素, 特别是掩模和目标的频率、方向和对比度。这种现象的建模已经在一些简单的刺激上进行, 例如正弦模式。Legge和Foley在一些简单的视觉场景[17]上进行了广泛的实验。他们研究了在改变掩模的对比度和频率时检测目标所需的阈值对比度。他们建立了一个相关的经验幂律目标阈值对比度与蒙版对比度。还提出了其他更详细的掩蔽模型[18-20]。在[20]中可以找到一些掩蔽模型的比较研究。有关这一重要现象的更广泛讨论, 请读者参考[17-20]。

## 2.3. 对比敏感度函数

HVS的对比敏感度不仅取决于背景和刺激物之间的相对亮度, 还取决于许多其他因素, 例如空间频率、大小、颜色和刺激物的方向。在1960年代初, Robson和Campbell等人研究了HVS的对比频率灵敏度[21, 22]。发现HVS大致充当带通滤波器。还观察到, 虽然时间和空间灵敏度在高频下是独立的, 但它们在低频下是不可分割的。早期的研究主要集中在亮度对比敏感度上。另一方面, 对彩色CSF (CCSF) 的研究更为复杂; 很少有研究致力于它, 这表明CCSF与消色差CSF有很大不同[24]。还提出了一些测量CCSF的实用方法[23]。

## 2.4. 频率和方向选择性

自Hubel和Wiesel[25]的开创性工作以来, 许多研究致力于理解哺乳动物初级视觉皮层的功能结构[26-28]。这些研究和其他发现揭示了对方向、大小和空间频率敏感的存在。现在公认HVS同时具有方向选择性和空间频率选择性。为了模仿 HVS 的这种多通道特性, 已经提出了一些用于图像分析和编码的变换[29-31]。特别是, Watson引入的皮层变换被发现在图像编码、图像质量评估和纹理分析等许多应用中都很有效[32-34]。

## 2.5. 视觉系统中的信息处理

人类视觉器官使用眼睛中的视网膜来收集和处理视觉信息。视网膜中大量相互连接的神经元将视觉刺激转化为代表静态和动态时间图像的神经冲动[108]。视网膜使用一层由视杆和视锥组成的感光器在超过1.26亿个空间位置对视觉图像进行采样[107]。由于光感受器连接的横向抑制特性, 杆状细胞和锥状细胞被双极细胞和水平细胞突触。这导致视觉图像中的对比度增强。视网膜中的下一层由调节双极和水平细胞输出的无长突细胞组成。最后, 神经节细胞将视网膜输出连接到视神经。神经节细胞也负责运动预期[104]。早期的研究表明视网膜接近拉普拉斯边缘检测器和自适应低通滤波导致降噪[105]。

存在三种主要视觉通路, 例如P-、M和K-oniocellular, 它们终止于纹状视觉皮层(V1), 并并行处理信息。初级视觉皮层(Vs)中的这些区域中的每一个区域都维护着一个处理过的、地形学上正确的落在视网膜上的信息图像图。不同皮层水平的通道之间似乎存在一些串扰。根据柱状组织的概念, 视觉皮层中相邻的神经元具有相似的方向调整, 因此形成一

一个方向柱[106]。众所周知，神经元反应的初始阶段编码视觉刺激的位置，而后期阶段编码刺激方向。初级视觉皮层中神经元水平的时间边缘位置及其方向可用于并行顺序图像处理任务，例如在视觉注意控制下的分割。

### 3. 图像增强

图像增强可能是图像处理中研究最广泛的问题之一。有许多因素会影响采集、传输或重建图像的质量。一些因素与图像采集过程直接相关，例如光照，而其他因素则与传感器的物理特性和观察到的场景有关。感知图像质量还受到编码和传输技术的共同限制的影响。在本节中，我们简要描述最广泛意义上的感知图像增强，重点关注三个最广泛研究的问题：图像去噪、对比度增强和编码伪影减少。

#### 3.1. 图像去噪

图像中噪声的可见性是一个已被充分研究的重要问题。然而，很少有人关注HVS如何感知自然图像中的噪声。HVS能够非常快速地区分给定图像中的两个噪声级别。图像去噪是图像处理中研究最广泛的问题之一。主要难点是如何在降低噪声的同时保留一些重要的图像结构，如边缘和精细纹理细节。尽管已经提出了许多有趣的方法来解决这个困难，但问题仍然悬而未决。事实上，在许多情况下，理论模型的预测与人类观察的经验结果之间仍然存在很大差距。主要的困难是由于缺乏一种有效的措施来控制去噪对人类观察者所感知的纹理和精细细节的影响。例如，SNR（信噪比）并不反映人类观察者感知的去噪水平。结合HVS的一些特性似乎是解决这个难题的有希望的解决方案。

在[35]中，提出了一种基于局部对比度熵的感知非线性滤波器。这个想法是基于加性噪声增加局部对比度熵的事实。因此，通过降低每个像素邻域的局部熵，会产生平滑效果。该方法的性能在具有加性高斯白噪声(AWGN)和椒盐噪声的灰度调图像上进行了评估。结果表明，与经典和加权中值滤波器相比，该方法在客观和主观图像质量以及计算速度方面都具有优势。后来在[36]中提出了利用局部对比度进行噪声过滤的想法，但使用了更高级的HVS感知模型。这种感知方法结合了人类视觉系统早期阶段的一些特征。引入了一种基于Holladay原理和Moon和Spencer对比[37]的非线性滤波方法，并在灰度图像[37]上对其进行了评估。使用基于Moon和Spencer模型中定义的光学Just Noticeable Contrast(JNC)的决策规则过滤噪声像素。该模型的性能在一些典型的受AWGN(加性高斯白噪声)污染的图像上进行了评估，并与其他一些非线性滤波方法进行了比较。然而，次要的性能优势并不能证明额外的计算复杂性是合理的。不过，该模型的主要优点之一是可以仅通过调整单个参数来控制去噪级别。后来，基于JNC模型[38]，引入了多分辨率概念以减少感知无关性。然而，作者没有提供任何与噪声能见度相关的措施。此外，该方法的一致性仅在灰度图像上得到证明。

在[39]中，提出了一种用于彩色图像去噪的感知变分框架。该方法基于各向异性扩散并利用HVS的某些特性，尤其是颜色感知中的边缘检测机制。在感知均匀的颜色空间中对图像进行分析和处理，然后将CIE-Lan bnmnt表述为具颜色一

致性约束的优化问题，以避免颜色信息的过度扩散。该方法与经典的Perona - Malik过滤技术相比具有优势；然而，它在计算上很复杂，并且需要在每次迭代时评估尺度空间中的某些参数增强最近，已经提出了一种基于TV变分模型和HVS的一些简单特性的类似方法用于彩色图像去噪[40]；这里，扩散参数是根据噪声可见性自适应选择的。最近，研究表明，将感知显著性纳入变分框架可以提高图像去噪性能[49]。据报道，所提出的方法可以防止一些伪影，例如楼梯效应，而不影响其他显著特征的感知质量。

还有许多其他方法可以隐含地利用HVS的某些属性来进行彩色图像去噪。在[41]中，使用双边滤波在感知颜色均匀空间中分解和处理图像。为避免过滤可能导致的颜色失真，在平均时仅考虑在CIE-Lab空间中测量的感知相似颜色手术。[44]提出了一种基于小波分解和CSF的彩色图像去噪新方法。在这种方法中，CSF应用于CIELAB色彩空间。在存在AWGN的情况下，使用三个主观和客观指标，发现该方法优于其他两种基于小波的滤波技术。尽管该方法看起来很有趣，但它仅与一些基于小波的方法进行了比较。

在[42]中，作者介绍了一种基于感知学习的图像去噪方法。这个想法是将盲噪声参数估计与BM3D(块匹配和3D)去噪算法[43]相结合。然后使用基于自然场景统计和图像质量评估的学习过程来估计BM3D方法中使用的输入噪声参数。所提出的方法在统计上优于BM3D算法。然而，在某些情况下的轻微改进似乎并不能证明BM3D算法的额外计算复杂性是合理的。[45]中介绍了另一种基于非局部均值(NLM)过滤的自适应感知方法。在这种方法中，NLM去噪滤波器的各向异性加权函数适应图像的局部感知内容。这个想法是基于这样的观察，即图像噪声在几乎没有明显感知特征的区域中非常明显，并且在纹理区域中被掩盖。然后在每个像素处计算考虑局部结构的形状和方向的感知度量，并用于调整加权函数的扩展因子。然而，该方法仅与NLM过滤进行了比较。此外，没有明确解释感知测量的相关性和使用。在[46]中，介绍了一种用于CCD/CMOS图像传感器获取的原始CFA(滤色阵列)数据的空间自适应去噪方法。结果表明，通过考虑传感器噪声的统计特性和HVS的一些简单特征，可以实现有效的去噪。此方法中，平滑滤波器适应噪声水平和图像纹理。但这种方法非常复杂，结果取决于许多参数和可调阈值。此外，结果根据PSNR进行评估，而该方法基于某些HVS特性。与基于某些感知测量的其他基于HVS的方法进行比较会更好。

还有其他去噪方法，通过一些感知措施[47, 48]间接利用HVS的特性。在[47]中，结构相似性(SSIM)指数被用来衡量加权函数中使用的补丁之间的相似性。然而，SSIM是一种完整的参考图像质量度量，因此不能直接使用，因为原始图像不可用。为了克服这个困难，首先从嘈杂的观察图像中估计噪声。然后通过从观察到的图像中减去噪声来估计无噪声块；在执行过滤之前，需要进一步调整一些SSIM参数。虽然它优于NLM过滤，但该方法取决于许多参数，并且在SNR非常低的情况下似乎无效。此外，在估计相似补丁的过程中，很难评估过滤后的图像中仍然存在很多噪声。在[48]中，引入了一种类似的方法，其中引入了基于SVD(奇异值分解)和一些局部图像特征的图像内容度量。结果表明，该指标与噪声、对比度和清晰度密切相关。作者声称该指标可用于优化任何图像去噪方法的参数。然而，与前面的方法一样，假



设噪声参数是已知的或者可以从噪声图像中估计出来。这使得该方法依赖于噪声估计方法，因此在乘性噪声或低SNR图像的情况下可能会失败。

### 3. 2. 对比度增强

对比度增强的主要目的是提高给定图像的客观或感知质量，使变换图像的特征比原始图像的特征更明显。对比度增强可以表示为优化问题，其目标是最大化图像的平均局部对比度。然而，不包含视觉感知的某些相关属性的对比度增强的数学公式往往会产生不切实际的结果和不可预测的视觉伪影。从历史上看，人们认为Gabor是第一个提出对比度增强方法的人[50]。在同一时期，Land和McCann独立地引入了Retinex理论[51, 52]，该理论在图像处理界引起了越来越多的兴趣。该理论以人类视觉中对亮度和颜色的感知为模型。兰德建议将亮度分解为三个不同的分量，以获得所观察物体表面的光度不变量。在第一篇关于Retinex的论文发表二十年后，Land在模型中引入了人类感知感受野结构[53]。在过去的二十年中，通过结合HVS、色彩科学和一些新的图像表示（如多尺度模型）的新发现，引入了许多改进[54-57]。值得一提的是，Retinex主要是为了解决颜色恒常性问题而开发的。Retinex模型还产生亮度和颜色的对比度增强和照明补偿。除了Retinex理论之外，还提出了许多基于感知的方法来增强对比度。在这里，我们简要描述和讨论一些具有代表性的受HVS启发的对比度增强方法。

对比度增强(CE)方法可以根据各种标准进行分类。对CE技术进行分类的一种方法是将它们分为两类，这取决于分析和处理图像的领域（空间域或空间频率域）以及转换对比度的方式（直接或间接）[58, 59]。直接法主要包括三个步骤。第一步涉及原始对比度的估计。在第二步中，使用映射函数[59, 60]或[61]中的优化函数来放大对比度。最后，根据这个新的对比度值转换像素强度值。

尽管许多研究工作都致力于开发灰色调图像的对比度增强方法，但对彩色图像的研究却很少。虽然颜色感知的基本概念相对容易理解，但处理彩色图像并不是一件容易的事。这是由于许多影响颜色感知的物理和心理视觉因素之间的复杂相互作用。事实上，处理彩色图像可能会导致不可预知的结果。处理颜色成分时必须特别小心。颜色处理中研究最多的问题之一是颜色恒常性。Retinex模型是解决这一难题的首批有吸引力的解决方案之一。自引入以来，已经开发了许多基于Retinex理论的方法来增强颜色对比度[61-63]。

[64]中介绍了一种有趣的灰度和彩色图像对比度增强的感知方法。对比度增强问题被提出为约束优化问题，使用从控制HVS的超阈值对比敏感度的Weber定律导出的感知标准。要优化的全局函数来自感知的局部对比度；它表示对比度的相对全局增加。该函数在某些约束条件下最大化，例如饱和度和颜色偏移。然而，对于灰度图像，该方法仅与一些经典的基于直方图的方法进行了比较。对于彩色图像，该方法与多尺度 Retinex、基于曲波的增强方法[65]和 Fattal方法[66]进行了比较，尽管比较主要基于对比度增强方法中使用的优化函数。

在[75]中，基于HVS的一些基本特征引入了对比度增强方法。其基本思想是将图像强度分割成三个区域，

即De Vries Rose区域、Weber-Fechner区域和饱和区域。然后将增强适应每个区域，从而避免任何过度增强或噪声放大。该方法被扩展到基于人类视觉系统的多直方图均衡方法，以创建图像增强的通用框架。作者还提出了一种图像增强的定量测量方法，仅限于灰度级图像。然而，拟议的客观措施不包含HVS的任何相关感知特征。在[67]中，引入了一种用于高对比度图像可视化的基于HVS的局部对比度增强方法。这个想法是将图像分割成亮区和暗区，然后根据该分割独立处理亮度和颜色分量。为了克服相机和显示设备动态范围的限制，在[68]中提出了另一种基于HVS的图像增强方法。受人类在临界照明环境下感知处理色调和色彩饱和度的方式的启发，作者开发了一些有趣的解决方案。

值得一提的是，色调映射(TM)技术也可以被认为是另一种间接增强对比度的方法。例如，[69, 70]中提出的TM方法在颜色方面产生了良好的对比度增强。这主要是因为这些方法试图模仿HVS的适应和局部对比度增强机制。

在[71, 72]中研究了压缩域中的感知对比度增强。开发的方法基于Peli的对比度测量和[58]中开发的对比度增强方法。增强压缩域中的对比度提供了许多优势。事实上，许多图像和视频都以压缩形式提供。因此，在执行逆变换时以压缩形式处理数据以节省计算开销会更有效。另一个优点是在增强过程的设计中利用系数的频率分布。但是，所有JPEG压缩域方法都存在编码伪影放大的问题，尤其是在同质区域。在[73]中，开发了一种用于增强灰度级和彩色图像的更详细的方法。在压缩域中处理图像的想法也已扩展到[74]中的Retinex模型。

### 3. 3. 减少编码伪像

尽管大容量和高速存储设备得到快速发展，但多媒体数据尤其是图像的有损压缩技术仍然被越来越多地使用。然而，许多提出的有损图像压缩方法在低比特率下存在一些缺点[76-78]。在下文中，我们将重点关注两个众所周知的恼人神器，即阻塞和振铃效果。基于块的压缩方法会受到块效应的影响，这会导致跨块边界的可见不连续性。这主要是由于块的独立处理。在JPEG中，这是由于块的独立粗量化。尽管基于小波变换的压缩方法（例如 JPEG 2000 [76]和 SPIHT [77]）中的块效应减少了，但轮廓周围出现了另一种称为振铃的恼人效应[78]。这是由于高频小波系数的粗略量化和截断。这种效果通常伴随着轮廓和精细细节的模糊失真[78]。已经提出了一些指标来估计这种失真[79, 80]。然而，阻塞和振铃很难建模和抑制。文献中提出了许多专门的方法来减少这些影响[81]。在本次调查中，我们将讨论限制在一些基于一些相对容易理解的HVS属性的技术上。

在[84]中，作者提出了一种基于HVS属性的去块方法，专用于高度压缩的图像。该方法基于边缘检测、活动掩蔽和亮度掩蔽的组合。根据阈值定义的可见性级别，对块应用处理步骤以减少伪影。在[85]中提出了一种基于模糊边缘敏感性的块伪影减少技术。它依赖于定向和频率选择性，这是HVS的两个基本特征。然后通过集成模糊逻辑技术应用过滤。Wong和Bishop提出了一种去块算法，它依赖于基于局部相位特征的人类感知意义[88]。然后使用局部相位相干来调整解决过程。

在[83]中，Chetouani等人。提出了一种在不了解压缩方法的情况下降低块伪影可见性的策略。通过使用CSF、Cortex变

换和掩蔽分析相邻区域边界的可见性来获得可见性图。最后,根据区域的感知可见性自适应地应用去块过程。[87]中提出了一种类似的方法,其中可见性图被替换为通过对梯度矢量幅度的水平和垂直剖面求和计算得到的图。然后将获得的映射用于提供旨在减少块效应的递归滤波器。所提出的方法在感知质量方面优于最先进的方法,但以增加计算复杂性为代价。

除了致力于减少块伪影的工作外,一些作者还专注于结合减少振铃和块的方法。例如,Do等人。建议使用JNC和亮度自适应作为感知属性,以平衡总变化正则化[86]。后者受到从图像中提取的信息的限制。最近,同一位作者提出了一种由三个步骤组成的方法:(i)块-振铃伪影检测,(ii)感知失真测量和(iii)块-振铃伪影减少。

已经开发了其他几种方法,其中许多专门用于视频,这不是本次调查的重点[82,90]。通过对最近关于编码伪影减少方法的工作的简要调查,似乎在算法设计和伪影测量中使用一些简单的HVS特征可以获得良好的结果。然而,仍然缺少可以说明其他相关HVS功能和其他编码工件的更精细模型。

### 3.4. 高动态范围图像的色调映射和增强

由于90年代的技术能力,视觉数据的8位表示已被用于捕获和显示设备的各种技术。因此,录制或显示的音调范围变得非常有限。然而,自然界为我们的视觉系统提供了广泛的颜色和色调,从而使我们能够适应以获得最佳外观。自然场景的这种视觉外观高度依赖于人类视觉早期阶段发生的感知效果。为了解决上述限制,已经开发了一种称为高动态范围(HDR)的概念(即格式),与低动态范围(LDR)相对,以解决更高范围的色调。该领域吸引了各种应用的兴趣。尽管如此,仍然必须缩小动态范围以便能够直观地探索内容。这种称为色调映射的操作依赖于允许将场景的亮度转换为所需显示图像的观察者模型。

TMO(色调映射运算符)首先用于计算机图形学社区,其中Trumblin和Rushmeier[91]引入了一个开创性的框架,该框架由场景观察者模型与逆向显示观察者模型的组合组成。从理论上讲,当框架构建得当时,此类算子应保证显示图像的真实性。尽管如此,迄今为止,视觉外观仍然是一个非常复杂的问题,只能通过计算模型来解决。从那时起,已经开发了几个TMO,可分为本地或全局运营商[92]。全局运算符对图像的每个像素应用相同的操作,而局部运算符将其比例调整为图像的不同区域。大多数TMO可以概括为一种传递函数,将HDR场景的亮度或颜色通道作为输入并将其处理以输出可在LDR设备上显示的像素强度。

感知模型已广泛用于色调映射。对于全局方法,Larson等人。提出了一种基于Blackwell的心理物理对比敏感度模型[93]的感知对比度保存思想的TMO。在显示端,单调的色调重建避免了场景对比度的变化。基于阈值可见性、颜色外观和视力,Pattanaik等人。提议的色调映射算子,其中在视网膜上测量的刺激用于除了超阈值色彩之外,每个图像像素的适应性[94]。Ferwerda等人处理颜色外观。[100]通过对视杆细胞和视锥细胞使用单独的TVI(阈值与强度)函数以及中间亮度范围的插值来测量这种外观阈值的变化。Reinhard和Devlin[101]基于感光器行为的计算模型进行开发,该模型具

有允许白点灵活性的色变换。

在局部方法中,Reinhard等人使用了类似于Peli的局部带限对比度的对比度近似。[95]和Ashikhmin[96]。在[95]中,应用全局色调映射来减少可显示亮度的范围。为了对图像的不同区域进行不同的曝光,应用了摄影减淡和加深技术。由于不同尺度的中心环绕功能,[98]中提出的自动化版本利用了低对比度区域检测。以前方法中使用的对比度可以很容易地替换为Mantiuk等人定义的对比度。[97]用于HDR图像。正如作者所说,金字塔形对比度表示确保低频的正确重建并且不会反转全局亮度级别。此外,引入换能器函数,给出HVS对全范围对比振幅的响应,这对于HDR图像特别有用。

最近,有两项工作致力于评估TMO。在[102]中,作者进行了一项心理物理实验,以使用对比度、亮度、暗区和亮区的细节再现以及自然度等属性来区分七种TMO方法(3种局部和4种全局)。同样,在[103]中,作者对14个TMO进行了涉及多个标准的心理物理学实验。这项工作的结果是定义专用于色调映射的整体图像质量函数的描述为所用属性的线性组合。

## 4. 感知图像分割

图像分割的目的是从图像、图像序列或一组特征中获得紧凑的表示。稳健的图像分割是自动图像处理中最关键的任务之一。几十年来,图像分割一直是一个活跃的研究领域[109,110]。许多关于图像分割的调查已经出现在文献[110,112]中。正如Fu和Mui[110]所建议的,图像分割方法可以大致分为三类:

(i)基于区域的分割,(ii)基于边缘的分割,以及(iii)特征聚类。在这里,我们只关注图像分割的感知方法。

感知图像分割涉及复杂场景分割的感知相关信息的提取和分组[113]。虽然人类对图像的感知在很大程度上受到像素颜色的影响,但每个像素的感知也取决于相邻像素。与任何分割技术类似,感知图像分割需要提取低级图像特征。然后将这些低级特征与高级图像语义相关联,以进行有效的图像分割。例如,[113]中的作者提出了基于感知模型和颜色和纹理信息处理原理的低级图像特征和分割技术。该方法基于空间自适应颜色和纹理特征,并已被证明对包括低分辨率、退化和压缩图像在内的摄影图像有效。这种感知图像分割模型还可以帮助获得更稳健的感知图像质量度量[114]。[114]中的作者提出了一种基于分割的感知图像质量评估(SPIQA)指标,该指标量化图像质量,同时最小化人类判断与预测图像之间的差异。SPIQA的一个新颖特征是它利用图像中的区域间和区域内属性,该属性与人类视觉系统(HVS)感知失真的方式非常相似。

在[115]中获得了感知图像分割的另一个扩展,其中模糊集是在HSV颜色空间的H、S和V分量上定义的。该模型使用模糊逻辑模型,旨在遵循人类对颜色分类的直觉。实验结果表明,与其他基本颜色分类技术相比,所提出的算法获得了改进的分类,尤其是在更具挑战性的户外自然场景分割中。总之,感知图像分割的主要动机与使用颜色和纹理进行分割有关,因为成像对象通常通过独特的颜色和纹理特征在感知级别进行描述[116]。[116]中的作者对使用颜色和纹理特征进行图像分割的最相关算法进行了全面的评估和审查。此外,SPIQA指标可用于同时进行自动感知图像分割和图像质量预测。

大多数基于感知的图像分割技术主要涉及自下而上的处理。然而,自上而下的信息反馈可以适当地调整特征处理和聚



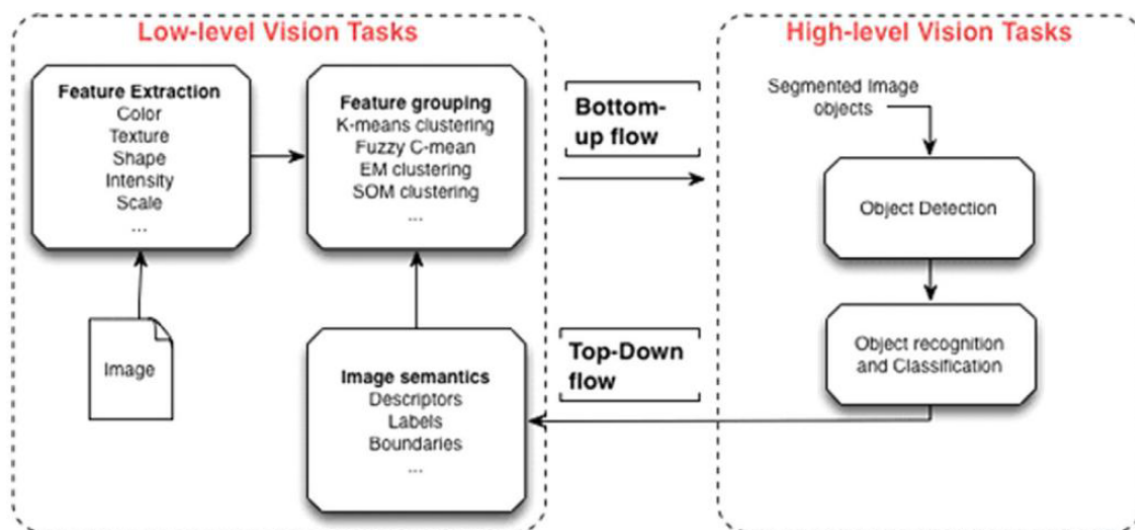


图 1. 视觉信息处理中的图像分割步骤示意图。

类, 以实现更好的图像分割, 如图1所示。

图1显示了一个整体的以机器为中心的视觉信息处理方法。该示意图包括低级和高级视觉处理任务。低级视觉任务涉及提取不同类型的特征, 例如颜色、强度、形状、纹理和比例。然后如上所述, 这些特征在视觉皮层中被进一步处理。在以机器为中心的实现中, 不同的聚类技术, 如k均值、模糊c均值、自组织映射(SOM)和期望最大化(EM)用于将特征聚类成段。图像语义在感知图像分割中的作用非常重要。描述符、标签或边界形式的图像语义有助于改进图像分割。然后处理从低级视觉处理获得的图像片段, 用于对象检测、识别和分类步骤。这些高级视觉任务是在长期和短期记忆和注意力的帮助下在V1区域处理的。这种从视网膜(传感器)到V1以进行对象分割和处理的信息流称为自下而上的信息处理。来自高级视觉处理的反馈也一直反馈到视网膜, 用于感知图像分割过程的迭代多尺度细化。反馈流也称为自上而下的信息流。通常, 视觉信息处理的有效计算建模需要集成自下而上和自上而下的流程。

#### 4. 1. 基于区域的分割

基于区域的分割算法源于这样一个事实, 即图像结构内部的可量化特征看起来是均匀的。基于区域的分割算法旨在搜索具有相似特征值的图像像素。噪声中基于稳健区域的分割具有挑战性。在HVS中, 有两个主要的信息处理、分割和识别阶段[117]。第一阶段是早期视觉, 涉及将注意力集中在视觉系统中以获得必要的信息。视觉系统中的后续处理步骤然后从嘈杂的背景中分割出潜在的候选者以进行高级处理。识别的第二个阶段是识别。在第一阶段对信息进行分割预处理后, 在视觉流中发送的信息量要少得多用于识别。在识别阶段, 反馈来自高级皮层的知识以修正早期视觉中的信息处理。许多对象分割理论涉及将视觉信息与存储在内存中的对象的几个特征视图进行比较。这些理论隐含地假设视觉处理的阶段已经解决了其他任务中的视觉分割。文献中已经提出了不同的受生物学启发的模型来进行图像分割。

人类视觉感知在从嘈杂图像中分割对象时非常有弹性。

Burgi和Pun提出了一种受人类感知启发的噪声静态图像分割方法[118]。在这种方法中, 作者使用异步处理的想法, 使得强亮度在弱亮度之前引起视觉系统的反应。该方法涉及将静态图像转换为数据流, 其中信息流吸引了对象分割和检测的注意力。然而, 这种方法已经在组非常有限的灰度调图像上进行了评估。此外, 结果取决于许多可调参数。所提出方法的另一个弱点是由于异步分析仅依赖于像素强度并且不包含其他相关空间特征。参考[119]讨论了一种人类前注意纹理感知模型, 该模型可以预测灰度图像中纹理边界的显著性。该模型试图模拟视觉皮层V1区域的输出以进行图像分割。

[120]提出了一种联合处理自然图像中颜色和形状信息的新框架。基于HVS中的信息处理, 这项工作提出了一种分层非线性空间色度算子, 它产生空间和色度对立通道。作者扩展了两种流行的对象识别方法, 例如视觉处理的层次模型和SIFT词袋方法将颜色信息与形状信息结合起来。他们在场景分类和分割中使用框架工作。

#### 4. 2. 基于边缘的分割

边缘检测技术涉及描述由世界中的物理过程引起的场景中的突然强度变化。边缘检测的一个重要目标是减少图像信息以供进一步处理。边缘检测的早期工作试图使用不同类型的导数算子和不同的分辨率(尺度)来表征强度变化[121]。在这样的一项工作中, 提出了一种多尺度边缘检测理论[122]。作者使用高斯滤波器的二阶导数分析不同尺度的自然图像强度。然后由称为零交叉段的定向图元表示由于边缘引起的强度变化。给出的证据表明过零表示是完整的。他们还表明, 图像中的边缘是空间局部化的, 这些边缘是由反射率或照明边界变化引起的表面不连续性引起的。因此, 不同颜色分量中的零交叉段不是独立的, 并且推导出将它们组合成图像描述的规则。此描述称为原始原始草图。该理论解释了几个基本的心理物理学发现, 并且从作用于图像的中心环绕滤波器的输出形成定向过零段的操作构成了简单细胞生理模型的基础

础。当基于HVS的阈值[123]理论应用于灰度图像的强度域时,后续工作研究了对边缘提取的影响。还使用“熵”度量对系统的性能进行了定量分析。

后来基于边缘的分割工作受到HVS模型的启发,涉及视觉相关亮度特征的检测[124]。该技术检测边缘(锐利的亮度过渡)和窄条(亮度尖点)并用正确的极性标记它们。这会产生一个保持极性的特征图,该特征图表示在轮廓的相应侧上具有成对的明暗线或曲线的边缘。该算法是使用直接从视觉模型和人类观察者的测量中得出的参数来实现的。参考[125]考虑了HVS的基本特征,例如用亮度屏蔽梯度图像以及屏蔽局部图像中的活动以进行边缘标记。此方法在Canny检测器上的实现被描述为示例。结果表明,得到的边缘图像与感知边缘图像更加一致。在另一种与HVS相关的方法中,作者提出了一种利用人眼的边缘可见性的技术[126]。作者根据传感器的光学特性和对比敏感度函数得到阈值函数。使用二值化技术将信息应用于边缘检测。在另一种补充方法中,作者计算了HVS[127]的边缘可见性。HVS中的两个重要过程被考虑:视觉适应和对比敏感度。主要贡献是一个受生物学启发的统一框架,它模仿人类视觉并计算边缘定位和边缘可见性。

在最近的工作中,基于边缘的方法中使用的信息结合来自HVS的不同图像线索来完成分割。这一类的例子包括分水岭算法[128]。这些算法将图像强度与边缘信息相结合,并使用数学形态学运算来获得分割。在分水岭算法中,灰度图像被视为地貌,边缘幅度被视为高程。分水岭线被定义为具有局部最大边缘幅度的像素。Watershed中的图像区域定义为由同一行包围的像素。分割过程是在灰度值地貌的连续泛滥过程中构建分水岭。分水岭算法往往会出现过度分割问题,尤其是当图像有噪声或所需对象本身具有低信噪比时。在参考文献中,[129]作者介绍了一种基于HVS的算法,该算法集成了图像增强、边缘检测和对数滤波技术,以开发一种有效的边缘检测方法。该算法在跟踪和分割图像中的暗灰度级方面表现良好,并保留了对象的拓扑和形状。

最后,聚类是属于一起的特征的集合。目前,没有广泛的理论可用于基于聚类的分割。广泛的分割方法涉及在局部图像块上集成亮度、颜色或纹理等特征,如图1所示。使用不同类型的神经网络(如SOM)和其他建模技术(如混合拟合)对这些特征进行聚类(例如,EM),模式发现,或图形划分产生分割[130]。基于阈值的算法通常假设图像区域具有独特的可量化特征,例如图像强度、纹理、颜色、反射率、亮度或梯度幅度[131]。分割的过程是搜索其值在阈值定义的范围内的像素。可以手动或自动选择这些算法中使用的阈值。手动和自动选择阈值都可能需要先验知识和一些时间试验。自动阈值选择通常结合图像信息来获得用于边缘提取的自适应阈值。示例有不同的局部和全局边缘提取算法如Canny、Otsu、拉普拉斯算子、霍夫变换和对象背景模型。

由于图像中的噪声和部分体积效应,边缘和片段可能不完整或不连续。然后有必要应用后处理技术,例如形态学操作来连接断裂或消除孔。另一方面,对象背景模型基于直方图阈值。这些模型假设有一个统一的背景,并且对象不规则地放置在这个背景上[132]。因此,在对象和背景之间找到合适的阈值可以获得背景-前景分割。可以修改简单的背景-前景分割技术以考虑产生多分辨率分割的金字塔结构[133]。在很多例子中,图像特征直方图可能在前景和背景之间没有清晰

的分离,因此,简单的阈值方法可能无效。对于图像强度不足以进行前景-背景分割的这些情况,概率方法是很好的候选者。

在[134]中,作者根据HVS的启发提出了一种自动阈值化方法,该方法保留图像中的边缘结构。首先获得基于人类视觉感知的边缘阈值,然后使用这些边缘阈值来寻找多个边缘间隔。从这些边缘间隔中,获得阈值化图像中保留最多边缘信息的阈值。[135]中介绍了另一种使用人类视觉感知的新颖阈值方法。该方法首先利用图像的统计特性,利用人类视觉感知的特性,选择两个灰度级作为候选阈值,然后确定标准差和最小的灰度级作为最优阈值。候选阈值的选择减少了阈值的搜索空间并加速了阈值选择。

#### 4. 3. 基于协作和感知分组的分割

基于人类感知分组后的空间自适应颜色和纹理特征的图像分割一直是一个活跃的研究领域[136,137]。首先独立获得图像特征,然后分组实现整体分割,如图1所示。纹理特征估计需要有限的邻域,这限制了纹理分割的空间分辨率。另一方面,颜色分割提供准确和精确的边缘定位。作者对颜色和纹理特征使用自适应聚类算法来获得集成的图像分割。图像被假定为具有相对较低的分辨率并且可能被降级或压缩。

参考[138]提出了另一种有趣的由HVS属性驱动的图像感知分割算法。从基于区域和基于边界的角度评估分割结果的质量指标被集成到目标函数中。目标函数将HVS属性编码为马尔可夫随机场(MRF)框架,其中在计算图像内容之间的差异时采用JND模型。MRF对图像的纹理和上下文建模很有吸引力[137]。一种改进的MRF模型,也称为多尺度随机场(MSRF)模型[139],使用无监督分割方案。MSRF形成二叉树和金字塔图的混合结构用于尺度表示。EM算法用于求解后验的顺序最大化,其解计算MSRF模型所需的参数。[140]中使用了监督分割方案,其中作者应用受HSV启发的定向Gabor滤波器来提取纹理特征。纹理特征向量表示为高斯分布。后验概率方案被制定为吉布斯分布,用于为像素分配分区标签。使用具有确定性松弛建模的Hopfield神经网络获得后验概率的最大化。

从感知的角度来看,在目标检测和识别任务中涉及更高的感知分组级别。[141]中的作者提出了一种基于视觉注意机制的图像分割模型。该模型模拟了人类自下而上的视觉选择性注意机制,提取图像的早期视觉特征并构建显著图。通过分离显著区域和背景来分割图像。该模型建立在基于Itti-Koch显著性的模型[142]之上。参考[35]讨论了一种根据灵长类动物视觉皮层早期视觉区域进行图像分割的模型,该模型结合了多种特征来构建用于目标识别的图像分割预测。该方法由并行和多个特征融合块组成,在图形-背景分割中表现良好。

运动物体的分割相对更具挑战性。运动可以为感知对象分组和分割提供重要线索。光流是运动物体分割和检测的重要线索。在不知道背景位置的情况下,可能无法有效地计算背景运动。类似地,在不知道背景流的情况下,可能无法确定哪些位置属于背景区域。人类可以仅使用动力学边界毫不费力地感知场景中的物体,并且即使在没有提供其他形状提示的情况下也可以执行感知分组任务。[144]中的作者讨论了一种受生物学启发的模型,该模型源自大脑视觉区域中发现的机制,例如V1和图1中建议的其他机制,可实现沿运动边界的



稳健检测。该模型包括基于视觉皮层中的神经元如何响应空间和时间对比来检测运动不连续性和遮挡区域。特别是，它们表明检测之间的相互作用运动不连续性和时间遮挡允许显著着改进动力学边界检测并因此进行分割。

人类视觉注意力的应用在一个模型中实现，以提高字符识别问题的识别准确性，称为全自动公共图灵测试以区分计算机和人类 (CAPTCHA) [145]。该技术侧重于分割不同的验证码字符，以显示视觉预处理在识别中的重要性。由于背景嘈杂和字符失真，传统字符识别系统对CAPTCHA字符的识别率较低。参考文献中的作者。[65]使用人类视觉注意系统让识别系统知道在存在噪音的情况下应该关注哪里。预处理后的字符随后由光学字符识别 (OCR) 系统识别。

## 5. 感知编码

几十年来，静止图像压缩领域一直是重要研究工作的焦点，定义了几种编码算法，其中一些成为国际标准。这一过程始于1948年Shannon引入的信息论[146]、1952年的Huffman编码[147]、Ahmed1974年的离散余弦变换 (DCT) [148]、Rissanen1979年的算术编码[149]并最终导致1992年[150]广泛使用的JPEG标准 (ISO 10918) 用于有损编码。从那时起，出现了其他三个标准，例如1998年的JPEG-LS (ISO 14495) [151]、2000年的JPEG2000 (ISO 15444) [152]和2009年的JPEGXR (ISO 29199) [153]。与此同时，在定义优化编码方案或在数学、信息和感知领域引入优化过程方面进行了大量工作。

有损编码算法的主要部分的过程分三个主要阶段执行。首先，对输入图像应用正向变换；其次，执行变换域中系数的量化，最后执行熵编码以减少冗余。用于减少信息冗余和比特预算的经典图像编码算法的性能无疑是有吸引力的。然而，它是迄今为止用于基准编码技术的唯一标准。

此外，统计冗余的减少往往不符合感知方面。现在可以清楚地确定，对于给定的比特预算，减少感知冗余信息可以提高性能，同时保持视觉质量。例如，人类的对比敏感度表明 HVS无法感知超出给定截止点的空间频率。因此，为图像保留非常高空间频率的信息可能没有用。人类感知一直是并且仍然是许多图像编码研究的焦点，用于理解和利用某些现象，例如掩蔽和空间/时间敏感性。有几种方法可以将人类感知结合到图像编码方案中。尽管如此，如图2所示，量化是文献中讨论最多的阶段之一[154-176]。

已经提出了几种感知均匀的量化策略。例如，Ibrahim Sezan等人。研究了量化噪声的可见性，并根据他们的发现提出了一个有效的模型[154]。然而，各种研究仅针对低动态范围和特定亮度条件。其他关于感知优化量化的研究已经针对特定的变换。在下文中，将根据其目标方案对各种感知编码方法进行探索。为了清楚和连贯起见，在可能的情况下，根据主要的图像压缩方法对方法进行了分组标准，即JPEG (DCT)

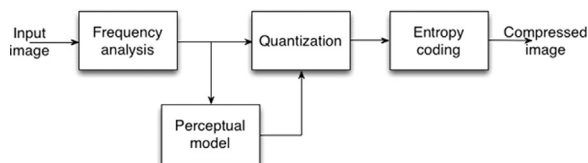


图 2. 通用感知编码器量化优化。

和JPEG 2000 (DWT) 以及JPEG XR。其他方法已单独解决。

### 5.1. 面向DCT的方法

变换编码能够实现最佳的统计压缩比。在结合DCT变换编码和视觉感知方面已经进行了几项工作，从而导致更高的压缩比和原始图像的良好重建。他们中的许多人解决了DCT的量化问题，以便从感知的角度改进相关作品（即JPEG）。动机来自于量化矩阵没有被标准定义的事实。参考[177]专注于在保持良好视觉质量的同时去除了冗余的系数的统计性质。[156]依赖于HVS函数，形状为

$$H(f) = (a + bf)\exp(-cf)$$

由Nil1在[178]中定义，其中f是频率，a、b、c是允许调整模型的系数，以便转置余弦变换系数进入感知域。类似地，Safranek提出了一种符合JPEG标准的编码器，可以去除感知上不相关的系数[160]。Pappas等人探索了超阈值图像压缩。在[179]中用于最小化与HVS匹配的感知图像失真测量。最近，Sreelekha和Sathi devi[180]在JPEG标准编码过程中使用了CSF阈值和掩蔽，允许删除感知上无关紧要的系数。这些方法为类似JPEG的压缩方案提供了一些改进，但通常很难在质量和比特率之间取得平衡。

Watson [157, 158]引入了一种称为DCTune的重要方法，用于基于DCT的压缩的视觉优化。它依靠亮度和对比度掩蔽来生成适合单个图像及其查看条件的量化矩阵。这种依赖于图像的感知方法定义了掩蔽阈值：

$$m_k = \max(t_k, |c_k|^w (t_k)^{1-w})$$

作为亮度阈值 $t_k$ 和DCT系数 $c_k$ 以及亮度和对比度掩蔽的非线性组合之间的最大值，其中指数 $w$ 控制所提出方法的自适应方面。[159]中通过使用YCC颜色空间对彩色图像进行了扩展，从而证明了对彩色通道的更严格压缩，同时具有可接受的视觉效果。一个消极方面在于，量化矩阵和每个DCT块的标量值嵌入到码流中，导致压缩图像的增加。Tran和Safranek [161]基于允许局部适应的图像分割方案考虑了掩蔽的局部变化。这种方法的缺点在于解码端所需的分段信息的成本。

[181]中提出的方法旨在基于Wu和Gersho设计的速率失真算法以及视觉权重的集成来设计JPEG感知量化矩阵。Macq[182]根据变换系数上引入的量化噪声导出感知加权因子。提取的加权因子具有随显示和观看条件变化而独立于图像内容的优点。Tong和Venet sanopoulos提出了一种基于纹理和亮度掩蔽特性的感知模型，用于缩放JPEG量化矩阵[183]。因此，通过将块分类为类似于[161]的平面、边缘和纹理来研究掩蔽。在[168]中，作者利用Daly感知模型和均匀量化器设计了基于DCT的图像编码器的感知量化表。为了应对后者，矢量量化已被用于感知编码，作为Macq和Shi[184]引入的方法，在DCT域中应用LBG (Linde - Buzo - Gray) 程序，使用感知加权信号的优化来-噪声比。这种方法的性能取决于所使用的感知度量的性质。

为了防止对单个图像的高感知错误，Malo等人。建议限制编码器中每个频率和振幅的最大感知误差 (MPE) [167]。他们使用基于对比敏感度函数的非线性感知度量，得出这



样的结论：限制图像每个特定块中的感知失真可能比最小化一组图像的平均感知失真更重要。Höntschi和Karam提出了一种基于DCT、局部自适应、基于感知的图像编码器，方法是根据目标感知失真确定最小化比特率的目标[165, 169]。因此，使用基于图像的局部特征以局部自适应方式导出的掩蔽属性。因此，局部失真灵敏度的阈值被提取并用于自适应地控制编码过程的量化和反量化阶段，以符合初始目标。为了避免发送增加比特预算的端信息，可以在解码器端执行本地可用的掩蔽量的估计。与[157]相比，上述方法在保持相似复杂度的同时实现了压缩比的重要改进。

为了优化JPE 彩色图像编码，Westen等人。提出了一种新的HVS模型，该模型基于一组结合了背景亮度依赖性、亮度和色度频率灵敏度以及亮度和色度掩蔽效应的定向滤波器[185]。为了应对模型域和DCT块变换中滤波器的方向差异，他们提出了一种通过计算每个DCT（颜色）块的局部灵敏度来组合这些域的通用方法。这导致每个块中每个 DCT 系数的感知加权因子。

不同的机器学习技术已成功用于图像编码。例如，支持向量机(SVM)已被Gómez-Pérez等人利用。[186]其中提出了使用自适应  $\epsilon$  insensitivity对[187]中描述的工作进行扩展。感知维度在于常数  $\epsilon$  insensitivity在空间域而不是DCT域中感知有效。

最近，Ma等人基于某些宏块的想法，提出了一种使用DCT的感知编码算法图像的一部分可以在不影响其视觉质量的情况下以较低的分辨率进行编码[188]。在这种方法中，更多位可用于最突出的宏块。通过最小化DCT域中原始块和上采样块之间的误差来获得下采样块。

## 5.2. 面向DWT的方法

DWT压缩通常是一个有损过程，编码伪影的不可见性是一个真正的挑战。许多工作致力于感知优化基于小波的编码。例如，Safranek和Johnston进行的研究可以被视为早期工作之一[155]。它基于从频率和亮度灵敏度以及对比度掩蔽获得的子带分解和量化步长。然而，对于固定显示亮度，图像局部平均亮度的空间变化会产生视觉阈值的局部变化。[189]中提出了这项工作的扩展，通过使用一种算法，该算法根据掩蔽度量的估计在每个像素处局部调整量化步长。与[155]相比，[189]中的方法在不需要额外信息的情况下提供了更好的性能。Lai和Kuo提出了一种非常规的基于小波的压缩方法，其中不使用小波系数的幅度，而是对每个分辨率的对比度进行编码[163]。因此，视觉误差均匀分布在图像上，并随着低比特率下的视觉伪影而减少。

CSF已广泛用于图像编码方案。对于DWT，大多数实现都基于每个子带的单个不变加权因子。由Nadenau和Reichel运行并在[164, 190]中描述的大量实验允许引入四种不同的方式将CSF集成到 JPEG 2000方案中。同样，Stoica等人。提出了一种从CSF中提取的加权方法，该方法在JPEG 2000 编码器中应用感知优化时考虑了观看距离[172]。这两种方法都提高了JPEG 2000压缩图像的视觉质量，同时增加了图像相关优化所产生的复杂性。2006年，Liu等人。使用局部自适应HVS模型[173]提出了一种符合标准的基于失真的JPEG 2000 编码方案。该编码方案结合了不同的掩蔽效应和感知加权MSE，同时

考虑了各个量化误差的空间和频谱总和。这种方法以及其中大多数方法的主要缺点是，在编码器不是按照人类视觉特性构建时，感知考虑用于侧调以获得给定的视觉质量。

在JPEG 2000 [191]的框架中使用自掩蔽和邻域掩蔽来保存详细的边缘。掩蔽函数在量化过程之前应用，目的是调整各个系数的视觉显着性。在Taubman在[192]中描述的具有最佳截断点的嵌入式块编码(EBCOT)编码器中，感知优化在于RD（速率失真）过程中使用的失真函数。这种感知优化允许测量对量化误差的敏感性。然而，EBCOT 中使用的掩蔽模型没有考虑观察条件。2004年，Tan等人。提出了一种遵循EBCOT结构的单色图像感知编码器，并使用利用高级视觉模型的感知失真度量。作者展示了对比度增益控制(CGC)模型的变体，该模型由线性变换、掩蔽响应和检测等三个步骤组成。在[193]中，单色多通道视觉模型已扩展到彩色，并用于近似JPEG 2000框架工作中RD优化中的感知误差。在同一背景下，Liu提出了一种新的颜色JND估计器，并在JPEG2000中使用它来提高压缩图像的感知质量[94, 156]。该方法不需要任何辅助信息，减少了DWT+DPCM压缩中的预测误差。

沃森等人。提出了一种有趣的方法来感知表征小波量化误差的视觉阈值[162]。作者测量了Y、Cb和Cr颜色通道中DWT均匀量化噪声样本的视觉检测阈值。以水平、方向和显示视觉分辨率作为参数，推导出DWT噪声检测阈值的数学模型。获得的模型允许定义感知无损量化矩阵。最近，在Larabi等人进行的一项类似工作中。[196]，涉及不同子带和不同通道噪声的心理物理学实验允许定义数字电影应用的视觉检测阈值。这项工作的一个重要结论是，为JPEG 2000数字电影配置文件定义的250Mbps限制不足以实现视觉无损压缩。Ramos和Hemami对小波系数量化引起的失真可见性进行了一项心理物理调查[166]。从这些实验中，他们提出了一种量化策略，可产生最小的明显失真，从而改善小波编码图像的感知。基于Watson等人的工作。[162]，Albanesi和Guerrini提出了一种基于HSV的量化策略，用于有损和无损编码[170]。Liu和Chou[197]介绍的一项相关工作讨论了使用与颜色通道的每个子带中的每个系数相关联的噪声检测阈值的自适应量化。最近，Sreelekha和Sathidevi提出了一种编码方法，其中在量化步骤中应用对比度阈值。这项工作的新颖之处在于对比度阈值用于亮度和色度通道，并适应图像内容[198, 176]。

对文献中不同方法的回顾表明，感知优化通常与用于在视觉上最小化量化误差影响的度量相关联。因此，Gershikov 和 Porat提出了加权均方误差(MSE)度量，以实现感知上的最佳编码[199]。他们假设已经获得了一组与变换的每个子带的感知影响相对应的加权因子。以同样的方式，Wang等人。考虑了众所周知的SSIM度量，以生成地图来导出局部感知质量指标[174]。提取的地图在迭代过程中使用，在迭代过程中，在每次传递中，剩余的位被分配给视觉上重要的区域。这种重新分配旨在减少图像内空间质量分布的影响。然而，尽管使用SSIM肯定会允许保留结构信息，但该指标并不总是符合人类的感知。Wang和Bovik在[200]中介绍了一种不同的感知优化方法。这种方法利用了HVS在固定点周围的高空间分辨率，也称为中心点，与中央凹相连。然后他们将这个过程集成到图像编码算法中，该算法重新排序比特流以优化独立于比特率的注视点视觉质量。这种重新排序是通过使用利用注视点现象的特定质量度量来实现的。这种受生物启发的方法可以模仿HVS的中央凹视觉。然而

它并没有共同解决小波系数选择和量化参数定义的问题。

在[201]中,一种感知抖动方法被用于图像编码。他们考虑了分层小波变换,其中同一级别的兄弟子带通过应用一系列旋转来解相关。小波系数的改变在量化之前进行。这项工作中使用的感知模型依赖于背景亮度感知和空间掩蔽效应[202]。

### 5.3. 感知无损或接近无损

除了完全有损和无损压缩之外,还出现了第三种方法,称为近无损或感知无损压缩。它依赖于一些损失是人类观察者无法察觉的事实。尽管所有处理图像编码感知优化的作品都强调了这一概念,但仍需要进一步讨论。永久无损方法不是提高编码结果的视觉质量,而是针对原始图像和压缩图像之间没有视觉差异的情况。JPEG-LS标准[151]提出了这样的功能,尽管结果对于近乎无损的部分并不总是令人信服。Chou和Liu[203]引入了JPEG-LS标准的感知优化,使编码错误难以察觉或最低限度地引起注意。因此,JND模型用于每个像素的三个颜色通道,允许在预测编码模式下感知调整量化步长。[204]中提出了类似的方法。在过去十年中,医学成像一直是无损编码工作的重点,尤其是使用类似JPEG 2000的压缩。Wu等人介绍了一种专用于基于小波的编码的方法。[205,206]它使用定义为包含CSF过滤和掩蔽的感知度量的对比度增益控制模型,以便对视觉上无关紧要的信息进行视觉修剪。在这项工作中,已经证明感知无损编码比无损或近乎无损压缩取得更好的结果。然而,医学图像编码可能会受到要提供的诊断的性质以及个人情况的很大影响。

### 5.4. JPEG XR格式

JPEG XR[153,207]是JPEG系列的最新压缩标准,作为扩展范围图像的潜在编码器而开发。它使用分层两级重叠双正交变换(LBT),该变换基于两个运算符的灵活串联,例如像Photo Core Transform(PCT)和Photo Overlap Transform(POT)这样的DCT。由于其新颖性和缺乏市场采用,一些研究致力于JPEG XR的感知优化。与其他JPEG标准一样,Shonberg等人。解决了空间位分配问题,以提高压缩图像的感知质量[175]。这个想法是对视觉质量不太重要的图像特征使用更少的比特。这是通过改变用于量化图像中每个宏块的每个频带和颜色分量的变换系数的步长来实现的。这种方法的优点是无需在解码端进行任何更改。然而,决定一个特征在视觉上是否重要的指标的选择是至关重要的。作者选择了不真正属于感知指标的MS-SSIM。尽管如此,已经使用主观验证来证实客观质量决策。

### 5.5. 其他方法

最近,Masmoudi等人。在[208-210]中提出了一种方法,其灵感来自哺乳动物视觉系统的编码策略,为视觉刺激生成压缩的神经代码。他们依赖于Wohrer和Kornprobst[211]开发的生物合理的虚拟视网膜模型,该模型已针对编码目的进行了调整。所提出的编码器可以概括为三个处理步骤,每个步骤都模仿视网膜的一层。这些是时间相关的边缘检测器(外层),然后是非线性对比度增益控制(内层),最后是将输入刺激转换为尖峰(神经节层)。通过这种架构,作者通过使用视网膜的时间

相关行为展示了可扩展性和比特分配效率。最后,在拟议的仿生编码器中集成了抖动过程,以解决内层发生的视网膜噪声。这种改进允许在解码过程中更快地识别图像的细节。

在[212]中,Niu等人。描述了一种基于边缘的感知编码策略。它侧重于保留自然图像的尺度不变二阶统计量,以保证感知质量。在这项工作中,边缘几何没有明确编码。为了描述最佳边缘几何形状,编码分两个阶段执行,例如首先对图像的背景层进行编码,然后传输以允许在解码器端估计重要边缘的轨迹。第二阶段是使用基于边缘扩张和边缘方向顺序扫描的残差编码技术的细化阶段。在[213]中,对面向感知的视频编码进行了有趣的回顾。尽管本次调查的目的是关注图像,但本文提供了可能适用于基于感知的图像编码的重要开放。

图像编码存在各种挑战,但通常不在核心编码本身。事实上,事实证明,为每个应用程序配备唯一的编码器是一种乌托邦式的方法。因此,出于多种原因,依赖于应用程序的编码方案是首选。首先,因为它意味着要有一个适合应用程序的编码方案,具有适当的域变换、适合的量化和一组嵌入式工具。例如,安全应用程序可能需要具有特定的基于ROI的编码、内部和内部超分辨率阶段和指标来表征检测、识别、识别(DRI)索引。另一方面,出现了新的应用,例如需要具有适当感知模型的适当编码方案的高动态范围成像。大多数心理物理模型都是在8位显示器上构建的,这就提出了模型对此类扩展范围数据的有效性的问题。最后,必须在缺乏实时应用的完全受生物启发的方案与无法捕捉对人类观察者至关重要的感知特征的简单化感知模型之间找到权衡。

## 6. 视觉信息质量评估

在视觉信息的任何处理或传输中,最终的判断者是人类观察者。通常,图像处理工具的性能评估基于一些客观和/或主观标准。尽管已经为图像处理和编码开发了许多客观性能评估方法,但主观评估仍然是最可靠的解决方案。因此,人们投入了大量精力来开发与人类视觉系统(HVS)性能一致的更稳健的客观度量。

事实上,在许多最终结果以图像形式呈现的任务中,观察者被要求判断结果的图形表示的感知质量。然而,图像处理方法的主观评价对于涉及机器参数自动控制和调整的应用是不切实际的。因此,需要开发用于评估图像处理算法的客观方法。然而,尽管为评价图像处理技术的质量开发了大量的客观指标,如噪声过滤、分割、压缩等,但应用最广泛的评价方法仍然是基于主观评价。然而,相信通过利用HVS的一些感知标准和计算模型,可以得出有效的客观图像质量度量。这一研究领域发展迅速,现达到高度成熟的水平。从Mannos和Sakrison[214]的工作以来,已经提出了许多用于图像失真评估的方法:一些方法受到HVS的感知机制的启发,而另一些则基于更传统的信号处理技术[215-217]。选择一个指标而不是另一个指标是一项艰巨的任务。对于如何选择或调整给定的图像质量,没有通用到一个特定的应用程序的标准。根据原始(未失真)图像的可用信息,质量评估技术可分为三类:全参考(FR)、减少参考(RR)和无参考(NR),也称为盲法。FR方法需要原始图像来评估失真图像的质量,而RR方法只需要从原始图像和退化图像中提取的一组特征。当关于失真特



性的先验知识可用时,可以在不参考原始图像的情况下使用NR方法。本文提供了图像质量评估(IQA)方法的简要回顾;有关图像质量指标(IQM)的更全面调查,请读者参考[218–222]。许多FR客观测量已经在文献中提出如PSNR或加权PSNR[217],然而,这些指标反映了图像质量的全局属性,但在预测局部结构退化方面效率低下。由于图像质量是主观的,基于主观实验的评价是最被接受的方法。不幸的是,主观图像质量评估需要使用几个程序,这些程序已由ITU推荐[223]正式化。这些过程复杂、耗时且不确定。还应该注意的,由于自然变化,永远无法实现与HVS的完美关联。主观质量评价。这些缺点导致了其他实用和客观措施的发展[224,225]。基本上,客观图像质量评估有两种方法。第一个也是更实际的是面向失真的测量,例如MSE、PSNR和其他类似的测量。然而,对于此类IQA措施,质量指标与许多类型的退化的主观评估无关。第二类对应于HVS模型导向的措施。不幸的是,没有令人满意的视觉感知模型可以解释HVS上的所有实验结果。所有提出的模型都有取决于许多环境因素的参数,需要精细调整才能与主观评估相关联。尚未满足对可靠且一致的客观图像质量测量的需求。

在下文中,我们为一些图像处理任务的客观图像质量评估提供了一种统一的方法。

#### 6.1. 视觉信息处理方法的性能评估

有许多涉及评估输出图像质量的视觉信息处理方法:图像压缩、图像去噪、对比度增强、量化和分割等方法,其中性能评估基于结果的感知质量。值得注意的是,IQA涉及不易建模的更高层次的感知和认知因素。因此,效率在很大程度上取决于IQA方法设计中使用的图像特征。在一些方法中,一组图像特征用于评估图像处理结果的质量,其中一些包括灰度直方图、灰度直方图熵、边缘粗细、动态范围、灰度局部方差、平均边缘灰度、局部对比度、可见度图。已经提出了大量的客观措施来评估图像处理的质量[226–232]。但最后,所有开发的措施通常必须与主观评价相结合,以便根据图像质量和所得结果的准确性来评估图像处理任务的性能。因此,需要开发在客观测量的设计中纳入一些感知标准的评估方法[228–232]。例如,在图像分割的情况下,例如边缘检测、灰度阈值或基于区域的分割,输出被视为图像视觉内容的简化表示。因此,图像分割评估的目标是通过使用一些感知标准来量化这些表示与原始图像相比的视觉质量。然而,目前还没有用于评估图像分割的通用度量,例如阈值化、边缘检测或区域分割。

最直观和流行的方法是基于分割结果或基本事实的先验知识。不幸的是,在许多应用程序中,基本事实是不可用的。在没有基本事实的情况下开发客观措施仍然是一个活跃的研究领域。在心理视觉图像分割评估领域有一些工作;然而,该过程通常非常复杂、耗时并且取决于许多不可预测的因素[233,234]。[235]中提出了一种新的图像分割评估感知方法。在这种方法中,有人认为图像分割可以被认为是一个感知过程,它倾向于转换图像的视觉内容以提供它的简化表示。然后可以使用IQM对分割后的图像输出进行性能评估。在图像增强的情况下,即对比度增强或去噪,在输出应该表现出更高的感知图像质量的意义上,情况是完全不同。

[236–238]中介绍了一些有趣的基HVS的用于评估图像增强的定量测量。虽然已经为图像失真估计开发了许多图像质量指标,但只有少数专门的客观措施用于图像增强评估如[237–239]。很多时候,我们满足于感性评价。为了评估对比度增强方法,[239]提出了一种基于[240]中引入的光谱能量分析的方法。基本思想是评估不同频带和方向的能量增加变量,同时考虑HVS的方向和频率选择性[241,242,29]。

通过这个简短的概述,图像质量评估似乎仍然是一个悬而未决的问题;不可能为所有已知的失真开发可靠的图像质量指标。图像质量是多维问题,最好的方法是分两步进行。首先,必须为每个失真开发一个IQM,它与主观评估密切相关。然后,可以使用不同IQM的融合策略,以便如[243]中所做的那样,推导出能够对所有考虑过的失真起作用的全局度量。IQA问题也可以视为分类和识别问题。事实上,为了克服IQM的局限性,在[244]中,作者提出了一种策略,其中首先使用分类方案识别图像中包含的退化类型,然后使用最适合该特定的IQM来估计该图像的质量降解。这种方法并不新鲜,已用于许多研究领域。对于图像处理性能评估,我们认为使用受HVS启发的方法可以替代经典评估指标。

## 七、结论

本文考虑了文献中使用的人类视觉的感知方面,以提高一些基本图像处理技术的性能,如增强、分割、编码和质量评估。本文的主要目的是为读者提供依赖于上述研究主题的感知建模的最重要的工作引言部分首先讨论人类视觉系统中的信息处理处理人类视觉系统的最重要特征:图像对比度、视觉掩蔽、对比敏感度函数以及方向和频率选择性。图像增强一直是许多研究的重点,感知增强在三个层面上得到解决,即图像去噪、对比度增强、编码伪影减少和色调映射以及高动态范围图像的增强。感知也用于分割目的,其目的是获得相对较少数量的分割区域,其中每个区域都可以被视为主要对象或对象的有意义的部分。对主要图像分割方法的回顾已分为基于区域、边缘和感知分组的方法。在这些不同的分割技术中,基于感知的图像分割由于与人类视觉处理非常相似而更有前景。然而,在有意义地利用对人类感知的有限理解和有效的高质量图像分割方面仍然存在很大差距。另一个受益于感知模型发展的重要领域是图像编码。后者总是在压缩率和伪影不可见性之间寻求正确的权衡。因此,根据最新技术的变换和标准探索了编码文献,以便全面描述编码方案中感知特征的使用。最后,从广义上讲,图像质量是图像处理中的一个重要问题。因此,专门有一个部分专门讨论这个重要主题,特别关注它在某些图像处理任务和无损压缩方法的性能评估中的用途。我们的审查表明,图像质量评估仍然是一个悬而未决的问题,涉及与视觉信息处理和通信相关的许多问题。

在图像处理中使用感知方法时的一个重要问题是避免应用可用模型时不考虑图像的背景、内容或性质。很多时候,所使用的模型来自于在有限和特定的实验室环境下进行的一些心理视觉实验。例如,尽管实际情况与Weber–Fechner实验的理想配置相差甚远,但Weber–Fechner定律仍用于估计小邻域中像素的可见性,在理想配置中可以在均匀背景上看到目标。另一方面,Moon和Spencer的JNC模



模型不能以其原始形式使用，那里有不均匀的背景。当涉及高动态图像时，情况甚至更加复杂，在8位假设下开发的颜色模型可能不被认为是有效的。颜色问题在图像处理和分析中也非常重要。尽管对色觉的理解和建模进行了数十年的深入研究，但人们仍未完全理解它。然而，使用少数常见的颜色模型进行图像处理和编码是比较令人满意的。使用感知方法时应考虑的另一个重要点是，新的常用图像采集系统具有超出HVS限制的空间分辨率和响应。因此，在原始数据上定义一些感知度量可能是无用的。规避这些限制的一种方法是通过使用例如金字塔分解来导出所获取图像的适当表示，并在此分解的低级别上定义局部度量。因此，需要谨慎地使感知模型与图像处理任务相关且有用。HVS中的感知数据融合和决策制定是另一个尚未得到充分理解的问题。开发可用于设计图像处理感知方法的有效模型需要付出大量努力。最后，我们认为，利用我们在视觉感知机制方面的知识的最佳方式是避免模仿 HVS 的整个属性和认知机制的竞赛。相反，人们可以通过使用适当的信号和图像处理工具组合一些完善的感知视觉计算模型来开发受HVS启发的方法。

## 未引用的参考文献

[89, 99, 111, 143]

## 参考

- [1] R.L. De Valois, K.K. De Valois, *Spatial Vision*, Oxford University Press, New York, 1988.
- [2] T.N. Cornsweet, *Visual Perception*, Academic Press, New York, NY, 1970.
- [3] A. Michelson, *Studies in Optics*, University of Chicago Press, 1927.
- [4] P. Moon, D.E. Spencer, Visual data applied to lighting design, *Journal of the Optical Society of America A* 34 (1944) 230–240.
- [5] F.W. Campbell, J.G. Robson, Application of Fourier analysis to the visibility of gratings, *Journal of Physiology (London)* 197 (1968) 551–566.
- [6] E. Peli, Contrast in complex images, *Journal of the Optical Society of America A* 7 (1990) 2032–2040.
- [7] E. Peli, In search of a contrast metric: matching the perceived contrast of Gabor patches at different phases and bandwidths, *Vision Research* 37 (23) (1997) 3217–3224.
- [8] S. Winkler, P. Vandergheynst, Computing isotropic local contrast from oriented pyramid decompositions, in: *ICIP*, Kyoto, Japan, 1999, pp. 420–424.
- [9] Y. Tadmor, D. Tolhurst, Calculating the contrasts that retinal ganglion cells and LGN neurons encounter in natural scenes, *Vision Research* 40 (2000) 3145–3157.
- [10] G. Dauphin, A. Beghdadi, P. Viaris de Lesegno, A local directional band-limited contrast, in: *ISSPA*, Paris, 2003, pp. 197–200.
- [11] A. Rizzi, T. Algeri, G. Medeghini, D. Marini, A proposal for contrast measure in digital images, in: *CGIV*, Aachen, Germany, 2004, pp. 187–192.
- [12] A. Hurlbert, K. Wolf, Color contrast: a contributory mechanism to color constancy, *Progress in Brain Research* 144 (2004).
- [13] A. Tremau, R. Nicolas, E. Dinet, A measure of colour contrast correlated with human perception, in: *CGIV*, Barcelona, 2008, pp. 120–125.
- [14] A. Rizzi, G. Simone, and R. Cordone, A modified algorithm for perceived contrast in digital images, in: *CGIV*, Barcelona, 2008, pp. 249–252.
- [15] K. Matkovic, L. Neumann, A. Neumann, T. Psik, W. Purgathofer, Global contrast factor—a new approach to image contrast, in: *Computational Aesthetics in Graphics, Visualization and Imaging*, 2005, pp. 159–168.
- [16] G. Simone, M. Pedersen, J.Y. Hardeberg, Measuring perceptual contrast in digital images, *Journal of Visual Communication and Image Representation* 23 (3) (2012) 491–506.
- [17] G.E. Legge, J.M. Foley, Contrast masking in human vision, *Journal of the Optical Society of America* 70 (12) (1980) 1458–1471.
- [18] J.M. Foley, Human luminance pattern-vision mechanisms: masking experiments require a new model, *Journal of the Optical Society of America A* 11 (6) (1994) 1710–1719.
- [19] A.B. Watson, J.A. Solomon, A model of visual contrast gain control and pattern masking, *Journal of the Optical Society of America A* 14 (9) (1997) 2379–2391.
- [20] M.J. Nadenau, J. Reichel, M. Kunt, Performance comparison of masking models based on a new psychovisual test method with natural scenery stimuli, *Signal Processing: Image Communication* 17 (November (10)) (2002) 807–823.
- [21] J.G. Robson, Spatial and temporal contrast sensitivity functions of the visual system, *Journal of the Optical Society of America* 56 (8) (1966) 1141–1142.
- [22] F.L. van Nes, J.J. Koenderink, H. Nas, M.A. Bouman, Spatio-temporal modulation transfer in the human eye, *Journal of the Optical Society of America* 57 (9) (1967) 1082–1087.
- [23] K. Momose, M. Saito, Determination of the chromatic contrast sensitivity using sweep VEP technique, in: *IEEE EMBS/BMES Conference*, 2002, pp. 2145–2146.
- [24] K.L. Gunther, K.R. Dobkins, Individual differences in chromatic (red/green) contrast sensitivity are constrained by the relative number of L-versus M-cones in the eye, *Vision Research* 42 (2002) 1367–1378.
- [25] D.H. Hubel, T.N. Wiesel, Functional architecture of macaque monkey visual cortex, *Proceedings of Royal Society B (London)* 198 (1978) 1–59.
- [26] S. Marcelja, Mathematical description of the responses of simple cortical cells, *Journal of the Optical Society of America* 70 (11) (1980) 1297–1300.
- [27] J.G. Daugman, Six formal properties of anisotropic visual filters: structural principles and frequency/orientation selectivity, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 13 (1983) 882–887.
- [28] D.J. Field, Scale-invariance and self-similar 'Wavelet' transforms: an analysis of natural scenes and mammalian visual systems, in: M. Farge, J. Hunt, S. Vassilios (Eds.), *Wavelets, Fractals and Fourier Transforms: New Developments and New Applications*, Oxford University Press, 1993.
- [29] A. Watson, The cortex transform: rapid computation of simulated neural images, *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 39 (3) (1987) 311–327.
- [30] J.G. Daugman, Complete discrete 2-D gabor transforms by neural networks for image analysis and compression, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 36 (7) (1988) 1169–1179.
- [31] W.T. Freeman, E.H. Adelson, The design and use of steerable filters, *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence* 13 (9) (1991) 891–906.
- [32] C. Goresnic, S.R. Rotman, Texture classification using the cortex transform, *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 54 (4) (1992) 329–339.
- [33] A.B. Watson, Efficiency of a model human image code, *Journal of the Optical Society of America A* 4 (12) (1987) 2401–2417.
- [34] S. Daly, The visible differences predictor: an algorithm for the assessment of image fidelity, in: *Digital Image and Human Vision*, MIT Press, Cambridge, MA, 1993, pp. 179–206.
- [35] A. Beghdadi, A. Khellaf, A noise filtering method using a local information measure, *IEEE Transactions on Image Processing* 6 (6) (1997) 1–4.
- [36] K. Belkacem-Boussaïd, A. Beghdadi, A new image smoothing method based on a simple model of spatial processing in the early stages of human vision, *IEEE Transactions on Image Processing* 9 (2) (2000) 220–226.
- [37] P. Moon, D.E. Spencer, The visual effect of non uniform surrounds, *Journal of the Optical Society of America* 35 (3) (1945) 233–247.
- [38] R. Iordache, A. Beghdadi, P. Viaris de Lesegno, Pyramidal perceptual filtering using Moon and Spencer contrast, in: *ICIP*, Thessaloniki, Greece, 2001.
- [39] J.-H. Kim, T. Sikora, Color image noise reduction using perceptual maximum variation modeling for color diffusion, in: *7th International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services*, Incheon, South Korea, 2006.
- [40] W. Li, H. Zou, C. Liu, Variational adaptive image denoising model based on human visual system, in: *Proceedings of SPIE 8002*, 2011.
- [41] C. Tomasi, R. Manduchi, Bilateral Filtering for Gray and Color Images, in: *IEEE ICCV*, Bombay, India, 1998.

- [42] A. Mittal, A.K. Moorthy, A.C. Bovik, Automatic parameter prediction for image denoising algorithms using perceptual quality features, *Human Vision and Electronic Imaging XVII* (2012) 8291.
- [43] K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, K. Egiazarian, Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering, *IEEE Transactions on Image Processing* 16 (8) (2007) 2080–2095.
- [44] K.-Q. Huang, Z.-Y. Wu, G.S.K. Fung, F.H.Y. Chan, Color image denoising with wavelet thresholding based on human visual system model, *Signal Processing: Image Communication* 20 (2) (2005) 115–127.
- [45] A. Wong, P. Fieguth, D. Clausi, A perceptually adaptive approach to image denoising using anisotropic non-local means, in: *ICIP*, 2008.
- [46] A. Bosco, S. Battiato, A. Bruna, R. Rizzo, Noise reduction for CFA image sensors exploiting HVS behaviour, *Sensors* 9 (2009) 1692–1713.
- [47] A. Rehman, Z. Wang, SSIM-based non-local means image denoising, in: *ICIP*, Brussels, Belgium, September 2011.
- [48] X. Zhu, P. Milanfar, Automatic parameter selection for denoising algorithms using a no-reference measure of image content, *IEEE Transactions on Image Processing* 19 (2010) 3132–3166.
- [49] L. Xiao, L. Huang, F. Zhang, Perceptual saliency driven total variation for image denoising using tensor voting, in: *ICIG*, 2011, pp. 111–116.
- [50] M. Lindenbaum, M. Fischer, A. Bruckstein, On Gabor's contribution to image enhancement, *Pattern Recognition* 27 (1994) 1–8.
- [51] E.H. Land, The retinex, *American Scientist* 52 (1964) 247–264.
- [52] E.H. Land, J.J. McCann, Lightness and retinex theory, *Journal of the Optical Society of America* 61 (1) (1971) 1–11.
- [53] E.H. Land, Recent advances in Retinex theory, *Vision Research* 26 (1) (1986) 7–21.
- [54] D. Jobson, Z. Rahman, G. Woodell, A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes, *IEEE Transactions on Image Processing* 6 (7) (1997) 965–976.
- [55] Z. Rahman, D.J. Jobson, G.A. Woodell, Retinex processing for automatic image enhancement, *Journal of Electronic Imaging* 13 (2004) 100–110.
- [56] E. Provenzi, M. Fierro, A. Rizzi, L. De Carli, D. Gadia, D. Marini, Random spray retinex: a new retinex implementation to investigate the local properties of the model, *IEEE Transactions on Image Processing* 16 (January (1)) (2007) 162–171.
- [57] J.-M. Morel, A.B. Petro, C. Sbert, A PDE formalization of retinex theory, *IEEE Transactions on Image Processing* 19 (11) (2010) 2825–2837.
- [58] A. Beghdadi, A. Le Négrate, Contrast enhancement technique based on local detection of edges, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 46 (1989) 162–274.
- [59] A. Saleem, A. Beghdadi, B. Boashash, Image fusion-based contrast enhancement, *EURASIP Journal on Image and Video Processing* 2012 (1) (2012) 1–17.
- [60] A.P. Dhawan, G. Belloni, R. Gordon, Enhancement of mammographic features by optimal adaptive neighbourhood image processing, *IEEE Transactions on Medical Imaging* 5 (1) (1986) 8–15.
- [61] S. Chen, A. Beghdadi, Natural enhancement of color image, *EURASIP Journal on Image and Video Processing* 2010 (2) (2010).
- [62] A. Choudhury, G. Medioni, Perceptually motivated automatic color contrast enhancement based on color constancy estimation, *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2010.
- [63] I.-S. Jang, T.-H. Lee, W.-J. Kyung, Y.-H. Ha, Local contrast enhancement based on adaptive multi-scale retinex using intensity distribution of input image, *Journal of Imaging Science and Technology* 55 (4) (2011) 1–14.
- [64] A. Majumder, S. Irani, Perception-based contrast enhancement of images, *ACM Transactions on Applied Perception* 4 (3) (2007).
- [65] J.-L. Stark, F. Murtagh, E.L. Candes, D.L. Donoho, Gray and color image contrast enhancement by curvelet transform, *IEEE Transactions on Image Processing* 12 (6) (2003).
- [66] R. Fattal, D. Lischinski, M. Werman, Gradient domain high dynamic range compression, *ACM Transactions on Graphics, Proceedings of ACM Siggraph* 21 (3) (2002) 249–256.
- [67] A. Restrepo, S. Marsi, G. Ramponi, HSV-Domain enhancement of high contrast images, in: *VISAPP'09*, Lisbon, Portugal, 2009.
- [68] S. Marsi, A. Restrepo, G. Guarnieri, Color enhancement in a high dynamic range environment, in: *Proceedings on Image Processing: Algorithms and Systems VIII*, IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging, San Jose, CA, 2009.
- [69] S. Ferradans, E. Provenzi, M. Bertalmio, V. Caselles, TSTM: a two-stage tone mapper combining visual adaptation and local contrast enhancement, *IMA*, (<http://www.ima.umn.edu/preprints/may2009/may2009.html>), May 2009.
- [70] S. Ferradans, M. Bertalmio, E. Provenzi, V. Caselles, A multimodal approach to perceptual tone mapping, in: *6th European Conference on Visual Media Production*, London, 2009.
- [71] J. Tang, E. Peli, S. Acton, Image enhancement using a contrast measure in the compressed domain, *IEEE Signal Processing Letters* 10 (10) (2003) 289–292.
- [72] J. Tang, J. Kim, E. Peli, Image enhancement in the JPEG domain for people with vision impairment, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 51 (11) (2004) 2013–2023.
- [73] J. Mukherjee, S.K. Mitra, Enhancement of color images by scaling the DCT coefficients, *IEEE Transactions on Image Processing* 17 (10) (2008) 1783–1794.
- [74] S. Lee, An efficient content-based image enhancement in the compressed domain using retinex theory, *IEEE Transactions Circuits System for Video Technology* 17 (2) (2007) 199–213.
- [75] Karen A. Panetta, Eric J. Wharton, Sos S. Agaian, Human visual system based image enhancement and logarithmic contrast measure, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics* 38 (1) (2008) 174–188.
- [76] M. Rabbani, R. Joshi, An overview of the JPEG 2000 still image compression standard, *Signal Processing: Image Communication* 17 (2002) 3–48.
- [77] A. Said, W.A. Pearlman, A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 6 (3) (1996) 243–250.
- [78] D. Santa-Cruz, R. Grosbois, T. Ebrahimi, JPEG 2000 performance evaluation and assessment, *Signal Processing: Image Communication* 17 (2002) 113–130.
- [79] P. Marziliano, F. Dufaux, S. Winkler, T. Ebrahimi, Perceptual blur and ringing metrics: application to JPEG2000, *Signal Processing: Image communication* 19 (2004) 163–172.
- [80] R. Barland, A. Saadane, Reference free quality metric for JPEG 2000 compressed images, in: *Proceedings of IEEE ISSPA*, vol. 1, August 2005, pp. 351–354.
- [81] M.-Y. Shen, C.-C.J. Kuo, Review of postprocessing techniques for compression artifact removal, *Journal of Visual Communication and Image Representation* 9 (1) (1998) 2–14.
- [82] S. Wan, M. Mrak, N. Ramzan, E. Izquierdo, Perceptually adaptive joint deringing-deblocking filtering for scalable video transmission over wireless networks, *Journal of Image Communication Archive* 22 (3) (2007) 266–276.
- [83] A. Chetouani, G. Mostefaoui, A. Beghdadi, Deblocking filtering method using a perceptual map, *Signal Processing: Image Communication* 25 (7) (2010) 527–534.
- [84] M. Shi, Q. Yi, J. Gong, Blocking effect reduction based on human visual system for highly compressed images, in: *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Ottawa, 2006, pp. 1948–1951.
- [85] W.-B. Zhao, Z.-H. Zhou, Fuzzy blocking artifacts reduction algorithm based on human visual system, in: *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2007, pp. 1626–1630.
- [86] Q.B. Do, A. Beghdadi, M. Luong, Coding artifacts reduction method based on a perceptually-weighted variational approach, in: *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, 2009.
- [87] A. Saleem, A. Beghdadi, A. Chetouani, B. Boashash, Iterative blocking artifact reduction based on local contrast information, in: *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, 2011, pp. 363–368.
- [88] A. Wong, W. Bishop, Deblocking of block-transform compressed images using phase-adaptive shifted thresholding, in: *Tenth IEEE International Symposium on Multimedia*, 2008, pp. 97–103.
- [89] Q.B. Do, M. Luong, A. Beghdadi, A new perceptually adaptive method for deblocking and deringing, in: *11th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA)*, Montreal, 2012, pp. 533–538.
- [90] C. Brites, J. Ascenso, F. Pereira, Low complexity deblocking filter perceptual optimization for the HEVC codec, in: *18th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Brussels, 2011, pp. 737–740.

- [91] J. Tumblin, H. Rushmeier, Tone reproduction for realistic images, *IEEE Computer Graphics and Applications* 13 (6) (1993) 42–48.
- [92] K. Devlin, A. Chalmers, A. Wilkie, W. Purgathofer, Tone reproduction and physically based spectral rendering. State of the Art Reports, Eurographics, September 2002, pp. 101–123.
- [93] G. Ward Larson, H. Rushmeier, C. Piatko, A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 3 (4) (1997) 291–306.
- [94] S.N. Pattanaik, J.E. Tumblin, H. Yee, D.P. Greenberg, Time-dependent visual adaptation for realistic image display, in: *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000, Annual Conference Series*, pp. 47–54.
- [95] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, J. Ferwerda, Photographic tone reproduction for digital images, in: *SIGGRAPH 2002, August 2002*, pp. 267–276.
- [96] M. Ashikhmin, A tone mapping algorithm for high contrast images, in: *13th Eurographics Workshop on Rendering*, 2002, pp. 145–156.
- [97] R. Mantiuk, K. Myszkowski, H.-P. Seidel, A perceptual framework for contrast processing of high dynamic range images, *ACM Transactions on Applied Perception* 3 (3) (2005) 286–308.
- [98] E. Reinhard, Parameter estimation for photographic tone reproduction, *Journal of Graphics Tools* 7 (1) (2003) 45–51.
- [99] S.N. Pattanaik, J.A. Ferwerda, M.D. Fairchild, D.P. Greenberg, A multiscale model of adaptation and spatial vision for realistic image display, in: *Proceedings of SIGGRAPH 98*, 1998, pp. 287–298.
- [100] J.A. Ferwerda, S.N. Pattanaik, P. Shirley, D.P. Greenberg, A model of visual adaptation for realistic image synthesis, *Computer Graphics* 30 (1996) 249–258.
- [101] E. Reinhard, K. Devlin, Dynamic range reduction inspired by photoreceptor physiology, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 11 (2005) 13–24.
- [102] M. Cadik, M. Wimmer, L. Neumann, A. Artusi, Evaluation of HDR tone mapping methods using essential perceptual attributes, *Computers & Graphics* 32 (3) (2008) 330–349.
- [103] A. Yoshida, V. Blanz, K. Myszkowski, H.-P. Seidel, Perceptual evaluation of tone mapping operators with real-world scenes, in: *Human Vision & Electronic Imaging X, SPIE*, 2005, pp. 192–203.
- [104] M.J. Berry, H. Brivanlou, T.A. Jordan, M. Meister, Anticipation stimuli by the retina, *Nature* 398 (1999) 334–338.
- [105] R.K. Chafin, C.H. Dagli, A biologically inspired connectionist model for image feature extraction in 2D pattern recognition, in: *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks*, 1999, pp. 2704–2709.
- [106] D.H. Hubel, T.N. Wiesel, Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex, *The Journal of Physiology* 148 (1959) 574–591.
- [107] M.W. Matlin, H.J. Foley, *Sensation and Perception*, Allyn and Bacon, 1992.
- [108] D.E. Swanson, *Retinal Modeling: Segmenting Motion from Spatio-temporal Inputs using Neural Networks*, MS Thesis, AFT, 1992.
- [109] R.M. Haralick, L.G. Shapiro, Image segmentation techniques, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 29 (1) (1985) 100–132.
- [110] D.G. Lowe, *Perceptual Organization and Visual Recognition*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 1985.
- [111] K.S. Fu, J.K. Mui, A survey on image segmentation, *Pattern Recognition* 13 (1) (1981) 3–16.
- [112] N.R. Pal, S.K. Pal, A review on image segmentation techniques, *Pattern Recognition* 26 (9) (1993) 1277–1294.
- [113] J. Chen, T.N. Pappas, A. Mojsilovic, B.E. Rogowitz, Adaptive perceptual color-texture image segmentation, *IEEE Transactions on Image Processing* 14 (10) (2005) 1524–1536.
- [114] B. Ghanem, E. Resendiz, N. Ahuja, Segmentation-based perceptual image quality assessment (SPIQA), in: *ICIP*, 2008.
- [115] L. Shamir, Human Perception-based Color Segmentation Using Fuzzy Logic, 2006. (Downloaded from <http://www1.ucmss.com/books/LFS/CSREA2006/IPC4735.pdf>) on 6/1/2012).
- [116] D.E. Ilea, P.F. Whelan, Image segmentation based on the integration of colour-texture descriptors—a review, *Pattern Recognition* 44 (10–11) (2011) 2479–2501.
- [117] K.M. Iftekharuddin, Transformation invariant on-line target recognition, *IEEE Transactions on Neural Networks* 22 (2011) 906–918.
- [118] P.-Y. Burgi, T. Pun, Asynchrony in image analysis: using the luminance-to-response latency relationship to improve segmentation, *Journal of the Optical Society of America A* 11 (1994) 1720–1726.
- [119] J. Malik, P. Perona, Preattentive texture discrimination with early vision mechanisms, *Journal of the Optical Society of America A* 7 (1990) 923–932.
- [120] J. Zhang, Y. Barhom, T. Serre, A new biologically inspired color image descriptor, in: A. Fitzgibbon et al. (Eds.), *ECCV 2012, Part V*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 7576, 2012, pp. 312–324.
- [121] V. Torre, T. Poggio, On edge detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 8 (1986) 147–163.
- [122] D. Marr, E. Hildreth, Theory of edge detection, in: *Proceedings Royal Society London B*, vol. 207, 1980, pp. 187–217.
- [123] M.K. Kundu, S.K. Pal, A note on a grey level-intensity transformation: effect on HVS thresholding, *Pattern Recognition Letters* 8 (1988) 257–269.
- [124] E. Peli, Feature detection algorithm based on a visual system model, *Proceedings of IEEE* 90 (1) (2002) 78–93.
- [125] F. Yang, Y. Chang, S. Wan, Gradient-threshold edge detection based on HVS, *Optical Engineering* 44 (2005).
- [126] N. Hautière, D. Aubert, Visible edges thresholding: HVS based approach, in: *Proceedings of IEEE International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, Hong-Kong, 2006, pp. 155–158.
- [127] N. Hautière, R. Bremond, A unified CSF-based framework for edge detection and edge visibility, in: *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2011, pp. 21–26.
- [128] G. Hamarneh, X. Li, Watershed Segmentation using prior shape and appearance knowledge, *Image and Vision Computing* 27 (1) (2009) 59–68.
- [129] A. Almuntashri, S. Agaian, Human visual system-based edge detection using image contrast enhancement and logarithmic ratio, in: *Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications*, 2010, pp. 1–11.
- [130] P. Arbeláez, M. Maire, C. Fowlkes, J. Malik, Contour detection and hierarchical image segmentation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 33 (5) (2011) 898–916.
- [131] Z. Maa, J.M.R.S. Tavares, R.N. Jorgea, T. Mascarenhas, A review of algorithms for medical image segmentation and their applications to the female pelvic cavity, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 13 (2) (2010) 235–246.
- [132] A. Rosenfeld, L.S. Davis, Image segmentation and image model, *Proceedings of IEEE* 67 (5) (1979) 764–772.
- [133] G. Bongiovanni, L. Cinque, S. Levialdi, A. Rosenfeld, Image segmentation by a multiresolution approach, *Pattern Recognition* 26 (12) (1993) 1845–1854.
- [134] D.C. Tseng, M.Y. Huang, Automatic thresholding based on human visual perception, *Image and Vision Computing* 11 (9) (1993) 539–548.
- [135] Z. Li, C. Lieu, C. Zhao, Y. Cheng, An image thresholding method based on human visual perception, in: *2nd International Congress on Image and Signal Processing*, 2009, pp. 1–4.
- [136] J. Chen, T.N. Pappas, Adaptive image segmentation based on color and texture, in: *ICIP*, Rochester, NY, 2002, pp. 777–780.
- [137] R. Peng, P. Varshney, A Human Visual System-driven image segmentation algorithm, *Electrical Engineering and Computer Science Technical Reports*, 2011.
- [138] F.R. Hansen, H. Elliott, Image segmentation using simple Markov random field models, *Computer Graphics and Image Processing* 20 (2) (1982) 101–132.
- [139] C.A. Bouman, M. Shapiro, A multiscale random field model for Bayesian image segmentation, *IEEE Transactions on Image Processing* 3 (2) (1994) 162–177.
- [140] P.P. Raghu, B. Yegnanarayana, Segmentation of Gabor-filtered textures using deterministic relaxation, *IEEE Transactions on Image Processing* 5 (12) (1996) 1625–1636.
- [141] Q. Zhang, G. Gu, H. Xiao, Image segmentation based on visual attention mechanism, *Journal of Multimedia* 4 (2009).
- [142] L. Itti, C. Koch, Feature combination strategies for saliency-based visual attention systems, *Journal of Electronic Imaging* 10 (2003) 161–169.
- [143] D.-K. Hu, J.-P. Li, S. X. Yang, S. Gregori, A bio-inspired model for color image segmentation, in: *International Conference on Apper-ceiving Computing and Intelligence Analysis*, 2009, pp. 317–320.
- [144] C. Beck, T. Ognibeni, H. Neumann, Object segmentation from motion discontinuities and temporal occlusions—a biologically inspired model, *PLoS One* 3 (11) (2008).
- [145] C.-W. Lin, Y.-H. Chen, L.-G. Chen, Bio-inspired unified model of visual segmentation system for CAPTCHA character recognition, in: *SiPS*, 2008, pp. 158–163.
- [146] C.E. Shannon, A mathematical theory of communication, *Bell System Technical Journal* 27 (1948) 379–423. 623–656.



- [144] C. Beck, T. Ognibeni, H. Neumann, Object segmentation from motion discontinuities and temporal occlusions—a biologically inspired model, *PLoS One* 3 (11) (2008).
- [145] C.-W. Lin, Y.-H. Chen, L.-G. Chen, Bio-inspired unified model of visual segmentation system for CAPTCHA character recognition, in: *SiPS*, 2008, pp. 158–163.
- [146] C.E. Shannon, A mathematical theory of communication, *Bell System Technical Journal* 27 (1948) 379–423. 623–656.
- [147] D. Huffman, A method for the construction of minimum-redundancy codes, in: *Proceedings of the I.R.E.*, 1952, pp. 1098–1102.
- [148] N. Ahmed, T. Natarajan, K.R. Rao, Discrete cosine transform, *IEEE Transactions on Computers* (1974) 90–93.
- [149] J. Rissanen, G.G. Langdon, Arithmetic coding, *IBM Journal of Research and Development* 23 (2).
- [150] G.K. Wallace, The JPEG still picture compression standard, *Communications of the ACM* 34 (1991) 30–44.
- [151] ITU-T, Information technology—lossless and near-lossless compression of continuous-tone still images—Baseline, Technical Report ITU-T Recommendation T.87:1998, ITU, 1998.
- [152] A. Skodras, C. Christopoulos, T. Ebrahimi, The JPEG 2000 still image compression standard, *IEEE Signal Processing Magazine* 18 (2001) 36–58.
- [153] F. Dufaux, G. Sullivan, T. Ebrahimi, The JPEG XR image coding standard, *IEEE Signal Processing Magazine* 26 (6) (2009) 195–199.
- [154] M. Ibrahim Sezan, K. Yip, S. Daly, Uniform perceptual quantization: applications to digital radiography, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 17 (4) (1987) 622–634.
- [155] R. Safranek, J. Johnston, A perceptually tuned sub-band image coder with image dependent quantization and post-quantization data compression, in: *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, IEEE, 1989, pp. 1945–1948.
- [156] K. Ngan, K. Leong, H. Singh, Adaptive cosine transform coding of images in perceptual domain, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing* 37 (11) (1989) 1743–1750.
- [157] A.B. Watson, DCTune: a technique for visual optimization of DCT quantization matrices for individual images, in: *Society for Information Display Digest of Technical Papers XXIV*, 1993, pp. 946–949.
- [158] A. Watson, DCT quantization matrices visually optimized for individual images, in: *Proceedings of SPIE*, vol. 1913, 1993, pp. 202–216.
- [159] A. Watson, Perceptual optimization of DCT color quantization matrices, in: *IEEE International Conference Image Processing*, vol. 1, 1994, pp. 100–104.
- [160] R. Safranek, A JPEG compliant encoder utilizing perceptually based quantization, in: B.E. Rogowitz, J.P. Allebach (Eds.), *Human Vision, Visual Processing, and Digital Display V*, *Proceedings of SPIE*, vol. 2179, 1994, pp. 117–126.
- [161] T. Tran, R. Safranek, A locally adaptive perceptual masking threshold model for image coding, in: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 4, 1996, pp. 1882–1885.
- [162] A.B. Watson, G.Y. Yang, J.A. Solomon, J. Villasenor, Visual thresholds for wavelet quantization error, in: *SPIE Human Vision and Electronic Imaging*, vol. 2657, 1997.
- [163] Y.-K. Lai, C.-C. J. Kuo, Wavelet image compression with optimized perceptual quality, in: *Applications of Digital Image Processing XXI*, *SPIE*, San Diego, CA, 1998.
- [164] M. Nadenau, J. Reichel, Compression of color images with wavelets under consideration of the HVS, in: *SPIE Human Vision and Electronic Imaging*, vol. 3644, San Jose, CA, 1999.
- [165] I. Hontsch, L. Karam, Locally adaptive perceptual image coding, *IEEE Transactions on Image Processing* 9 (9) (2000) 1472–1483.
- [166] M. Ramos, S. Hemami, Perceptual quantization for wavelet-based image coding, in: *International Conference on Image Processing*, vol. 1, IEEE, 2000, pp. 645–648.
- [167] J. Malo, F. Ferri, J. Albert, J. Soret, J. Artigas, The role of perceptual contrast non-linearities in image transform quantization, *Image and Vision Computing* 18 (3) (2000) 233–246.
- [168] C. Wang, S. Lee, L. Chang, Designing JPEG quantization tables based on human visual system, *Signal Processing: Image Communication* 16 (5) (2001) 501–506.
- [169] I. Hontsch, L. Karam, Adaptive image coding with perceptual distortion control, *IEEE Transactions on Image Processing* 11 (3) (2002) 213–222.
- [170] M.G. Albanesi, F. Guerrini, An HVS-based adaptive coder for perceptually lossy image compression, *Pattern Recognition* 36 (4) (2003) 997–1007.
- [171] M.J. Nadenau, J. Reichel, M. Kunt, Wavelet-based color image compression: exploring the contrast sensitivity function, *IEEE Transactions on Image Processing* 12 (1) (2003) 58–70.
- [172] A. Stoica, M.-C. Larabi, C. Fernandez-Maloigne, A method of integration of visual weightings in JPEG2000 compression scheme for image quality enhancement, *International Journal of Robotics and Automation* 20 (2) (2005) 109–122.
- [173] Z. Liu, L. Karam, A. Watson, JPEG2000 encoding with perceptual distortion control, *IEEE Transactions on Image Processing* 15 (7) (2006) 1763–1778.
- [174] Z. Wang, Q. Li, X. Shang, Perceptual image coding based on a maximum of minimal structural similarity criterion, in: *International Conference on Image Processing*, vol. 2, IEEE, 11–121, 2007.
- [175] D. Schonberg, G. Sullivan, S. Sun, Z. Zhou, Perceptual encoding optimization for JPEG XR image coding using spatially adaptive quantization step size control, in: *Proceedings of SPIE*, vol. 7443, 74430M, 2009.
- [176] G. Sreelekha, P. Sathidevi, An HVS based adaptive quantization scheme for the compression of color images, *Digital Signal Processing* 20 (4) (2010) 1129–1149.
- [177] D.L. McLaren, D.T. Nguyen, The Removal Subjective redundancy from DCT Coded Images, *IEE Proceedings – Part I* 138 (1991) 345–350.
- [178] N. Nill, A visual model weighted cosine transform for image compression and quality assessment, *IEEE Transactions on Communications* 33 (6) (1985) 551–557.
- [179] T. Pappas, T. Michel, R. Hinds, Supra-threshold perceptual image coding, in: *International Conference on Image Processing*, vol. 1, IEEE, 1996, pp. 237–240.
- [180] G. Sreelekha, P. Sathidevi, An improved JPEG compression scheme using human visual system model, in: *14th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing*, 2007, pp. 98–101.
- [181] W. Fong, S. Chan, K. Ho, Designing JPEG quantization matrix using rate-distortion approach and human visual system model, in: *International Conference on Communications, 'Towards the Knowledge Millennium'*, 1997, pp. 1659–1663.
- [182] B. Macq, Weighted optimum bit allocations to orthogonal transforms for picture coding, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications* 10 (1992) 875–883.
- [183] H. Tong, A. Venetsanopoulos, A perceptual model for JPEG applications based on block classification, texture masking, and luminance masking, in: *International Conference on Image Processing*, IEEE, 1998, pp. 428–432.
- [184] B. Macq, H. Shi, Perceptually weighted vector quantisation in the DCT domain, *Electronics Letters* 29 (15) (1993) 1382–1384.
- [185] S.J.P. Westen, R.L. Lagendijk, J. Biemond, Optimization of JPEG color image coding using a human visual system model, in: *SPIE Conference on Human Vision and Electronic Imaging*, 1996, pp. 370–381.
- [186] G. Gómez-Pérez, G. Camps-Valls, J. Gutiérrez, J. Malo, Perceptual adaptive insensitivity for support vector machine image coding, *IEEE Transactions on Neural Networks* 16 (6) (2005) 1574–1581.
- [187] J. Robinson, V. Kecman, Combining support vector machine learning with the discrete cosine transform in image compression, *IEEE Transactions on Neural Networks* 14 (4) (2003) 950–958.
- [188] L. Ma, S. Li, K. Ngan, Perceptual image compression via adaptive block-based super-resolution directed down-sampling, in: *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2011, pp. 97–100.
- [189] I. Hontsch, L. Karam, APIC: adaptive perceptual image coding based on subband decomposition with locally adaptive perceptual weighting, in: *International Conference on Image Processing*, vol. 1, IEEE, 1997, pp. 37–40.
- [190] M.J. Nadenau, J. Reichel, M. Kunt, Wavelet-based color image compression: exploiting the contrast sensitivity function, *IEEE Transactions on Image Processing* 12 (1) (2003) 58–70.
- [191] W. Zeng, S. Daly, S. Lei, Point-wise extended visual masking for JPEG2000 image compression, in: *IEEE International Conference on Image Processing*, Vancouver, Canada, 2000, pp. 657–660.
- [192] D. Taubman, High performance scalable image compression with EBCOT, *IEEE Transaction on Image Processing* 7 (9) (2000) 1158–1170.
- [193] D. Tan, C. Tan, H. Wu, Perceptual color image coding with JPEG2000, *IEEE Transactions on Image Processing* 19 (2) (2010) 374–383.
- [194] K.-C. Liu, Perceptual JPEG2000 compliant coding for color images, in: *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, vol. 3, 2011, pp. 442–446.

- [195] K.-C. Liu, Prediction error preprocessing for perceptual color image compression, *EURASIP Journal on Image and Video Processing* 2012 (1) (2012) 3.
- [196] M.-C. Larabi, P. Pellegrin, G. Anciaux, F.-O. Devaux, O. Tulet, B. Macq, C. Fernandez, HVS-based quantization steps for validation of digital cinema extended bitrates, in: *Human Vision and Electronic Imaging XIV*, San Jose, CA, 2009.
- [197] K.-C. Liu, C.-H. Chou, Locally adaptive perceptual compression for color images, *IEICE Transactions on Fundamental Electronics, Communications and Computer Sciences* E91-A (8) (2008) 2213–2222.
- [198] G. Sreelekha, P. Sathidevi, A wavelet-based perceptual image coder incorporating a new model for compression of color images, *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing* 7 (05) (2009) 675–692.
- [199] E. Gershiokov, M. Porat, Towards perceptually optimal coding of color images using subband transforms, Technical Report CCIT report No. 624, Technion, 2007.
- [200] Z. Wang, A. Bovik, Embedded foveation image coding, *IEEE Transactions on Image Processing* 10 (10) (2001) 1397–1410.
- [201] C.-N. Wang, C.-M. Liu, T. Chiang, Perceptual dithering for octave subband image coding, *Journal of Visual Communication and Image Representation* 15 (2) (2004) 163–184.
- [202] C. Chou, Y. Li, A perceptually tuned subband image coder based on the measure of just-noticeable-distortion profile, *IEEE Transactions on Circuits Systems for Video Technology* 5 (6) (1995) 467–476.
- [203] C.-H. Chou, K.-C. Liu, A perceptually optimized JPEG-LS coder for color images, in: *Proceedings of the Fourth Conference on IASTED International Conference: Signal Processing, Pattern Recognition, and Applications*, SP07, 2007, pp. 26–32.
- [204] W.-N. Lie, W.-C. Liu, A perceptually lossless image compression scheme based on JND refinement by neural network, in: *2010 Fourth Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology (PSIVT)*, 2010, pp. 220–225.
- [205] D. Wu, D. Tan, H.R. Wu, An improved visual pruning algorithm for perceptually lossless medical image coding, in: *TENCON 2005 2005 IEEE Region 10, 2005*, pp. 1–6.
- [206] D. Wu, D. Tan, M. Baird, J. DeCampo, C. White, H. Wu, Perceptually lossless medical image coding, *IEEE Transactions on Medical Imaging* 25 (3) (2006) 335–344.
- [207] A. Maalouf, M.-C. Larabi, Low-complexity enhanced lapped transform for image coding in JPEG XR / HD photo., in: *International Conference on Image Processing*, IEEE, 2009, pp. 5–8.
- [208] K. Masmoudi, M. Antonini, P. Kornprobst, L. Perrinet, A novel bio-inspired static image compression scheme for noisy data transmission over low-bandwidth channels, in: *IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Dallas, TX, 2010, pp. 3506–3509.
- [209] K. Masmoudi, M. Antonini, P. Kornprobst, A bio-inspired image coder with temporal scalability, in: *Proceedings of the 13th International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*, 2011, pp. 447–458.
- [210] K. Masmoudi, M. Antonini, P. Kornprobst, Streaming an image through the eye: the retina seen as a dithered scalable image coder, Technical Report RR-7877, INRIA, Sophia Antipolis, France, 2012.
- [211] A. Wohrer, P. Kornprobst, Virtual retina: a biological retina model and simulator with contrast gain control, *Journal of Computational Neuroscience* 26 (2) (2009) 219–249.
- [212] Y. Niu, X. Wu, G. Shi, X. Wang, Edge-based perceptual image coding, *IEEE Transactions on Image Processing* 21 (4) (2012) 1899–1910.
- [213] P. Ndjiki-Nya, D. Doshkov, H. Kaprykowsky, F. Zhang, D. Bull, T. Wiegand, Perception-oriented video coding based on image analysis and completion: a review, *Signal Processing: Image Communication* 27 (July (6)) (2012) 579–594.
- [214] J.L. Mannos, D.L. Sakrison, The effects of a visual fidelity criterion on the encoding of images, *IEEE Transactions on Information Theory* 20 (July (4)) (1974) 525–536.
- [215] Special Issue on Image Quality Assessment, *Signal Processing*, vol. 70, 1998.
- [216] S.K. Mitra, J. Pearson, J. Caviedes, Special issue on objective video quality metrics, in: *Signal Processing: Image Communication*, vol. 19, no. 2, February 2004.
- [217] Andrew B. Watson (Ed.), *Digital Images and Human Vision*, MIT Press, 1993.
- [218] W. Lin, C.C.J. Kuo, Perceptual visual quality metrics: a survey, *Journal of Visual Communication and Image Representation* 22 (4) (2011) 297–312.
- [219] D.M. Chandler, Seven challenges in image quality assessment: past, present, and future research, *ISRN Signal Processing*, vol. 2013, Article ID 905685, 2013, 53 pp. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/905685>.
- [220] A.K. Moorthy, d.A.C. Bovik, Visual quality assessment algorithms: what does the future hold? *International Journal of Multimedia Tools and Applications*, Special Issue on Survey Papers in Multimedia by World Experts 51 (2) (2011) 675–696.
- [221] K. Seshadrinathan, A.C. Bovik, Automatic prediction of perceptual quality of multimedia signals—a survey, *International Journal of Multimedia Tools and Applications*, Special Issue on Survey Papers in Multimedia by World Experts 51 (1) (2011) 163–186.
- [222] M.-C. Larabi, A. Saadane, C. Charrier, Quality assessment approaches, in: *Digital Color*, Wiley Editions, 2013, pp. 265–306.
- [223] ITU-R Recommendation BT.500-7, Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures, ITU, Geneva, Switzerland, 1995.
- [224] Z. Wang, A.C. Bovik, A universal image quality index, *IEEE Signal Processing Letters* 9 (3) (2002) 81–84.
- [225] A. Beghdadi, B. Pesquet-Popescu, A new image distortion measure based wavelet decomposition, in: *Proceedings of ISSPA 2003*, Paris 1–4 July 2003, vol. II, pp. 485–488.
- [226] K.W. Bowyer, P.J. Phillips, *Empirical Evaluation Techniques in Computer Vision*, Wiley-IEEE Computer Society Press, 1998.
- [227] C.E. Erdem, B. Sanker, A.M. Tekalp, Performance measures for video object segmentation and tracking, *IEEE Transactions on Image Processing* 13 (2004) 937–951.
- [228] E.D. Gelasca, T. Ebrahimi, M. Farias, M. Carli, S. Mitra, Towards perceptually driven segmentation evaluation metrics, in: *Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW04)*, vol. 4, 2004.
- [229] P.-S. Hung, S.-S. Guan, A research on the visual assessment methods for evaluating the quality of motion images displayed at LCD, *Journal of Science and Technology, Science and Technology* 16 (2) (2007) 153–164.
- [230] H.-Q. Lu, Quantitative evaluation of image enhancement algorithms, in: *Proceedings of SPIE*, vol. 1453, Human Vision, Visual Processing, and Digital Display II, 223 (June 1, 1991), <http://dx.doi.org/10.1117/12.44358>.
- [231] V. Kumar, A. Kumar, A. Bhardwaj, Performance evaluation of image compression techniques, in: *International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)*, 2012, 15–16 March 2012, pp. 447–450.
- [232] A. Beghdadi, HVS-Inspired image processing performance evaluation, in: *IEEE Workshop on Signal Processing and Applications WOSPA'08*, 18–20 March 2008, Sharjah, UEA.
- [233] M.D. Heath, S. Sarkar, T. Sanocki, K.W. Bowyer, A robust visual method for assessing the relative performance of edge detection algorithms, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 19 (12) (1997) 1338–1359.
- [234] Q. Wang, Z. Wang, A subjective method for image segmentation evaluation, *Computer Vision ACCV 2009*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 5996, 2010, pp. 53–64.
- [235] A. Beghdadi, W. Soudene, An HVS-inspired approach for image segmentation evaluation, in: *Proceedings of IEEE ISSPA 2007*, 12–15 February 2007, Sharjah, United Arab Emirates (U.A.E.).
- [236] S.S. Agaian, K. Panetta, A. Grigoryan, Transform based image enhancement with performance measure, *IEEE Transactions on Image Processing* 10 (3) (2001) 367–381.
- [237] A. Saleem, A. Beghdadi, B. Boashash, Image fusion-based contrast enhancement, *EURASIP Journal on Image and Video Processing* (2012) 10. (16 May 2012), <http://jivp.eurasipjournals.com/content/2012/1/10>.
- [238] L. Tian, S. Kamata, An iterative image enhancement algorithm and a new evaluation framework, in: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2008. ISIE 2008, pp. 992–997.
- [239] D. Cherifi, A. Beghdadi, A.H. Belbachir, Color contrast enhancement method using steerable pyramid transform, *Signal, Image and Video Processing* 4 (2) (2010) 247–262.
- [240] A. Beghdadi, M. Deriche, Features extraction from fingerprints using frequency analysis, in: *WOSPA'2000 (Workshop on Signal Processing and Applications)*, 14–15 December 2000, Brisbane, Australia.

- [241] D.A. Pollen, S.F. Ronner, Visual cortical neurons as localized spatial frequency filters, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 13 (5) (1983) 907–916.
- [242] D. Cherif, A. Beghdadi, A. Belbachir, A multiscale and multi-orientation contrast enhancement method for digital mammography, in: *The 3rd International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP 2008)* Malta, March 12–14, 2008.
- [243] T.-J. Liu, W. Lin, C.-C.J. Kuo, Image quality assessment using multi-method fusion, *IEEE Transactions on Image Processing* 22 (May (5)) (2013) 1793–1807.
- [244] S. Chetouani, A. Beghdadi, M. Deriche, A hybrid system for distortion classification and image quality evaluation, *Signal Processing: Image Communication* 27 (October (9)) (2012) 948–960.

39  
41  
43  
45  
47  
49  
51  
53  
55  
57  
59  
61  
63  
65  
67  
69  
71  
73  
75