

文章编号: 1000-582X(2013)02-141-07

NR-IQA 模型的人类视觉系统补偿方法

陈 勇¹, 程佳绩¹, 谢正祥²

(1. 重庆邮电大学 工业物联网与网络化控制教育部重点实验室, 重庆 400065;

2. 重庆医科大学 生物医学工程研究室, 重庆 400016)

摘 要:在暗视觉环境下, 人类视觉对比度分辨率非常低。针对低照度图像, 提出一种基于无参图像质量评价体系的补偿方法(NR-IQA)。首先, 建立一种用于提取视觉评价参数的数学模型。其次, 建立最好图像质量评价综合函数, 用于评价图像补偿的质量。然后, 计算评价函数和补偿因子 k 的数学关系。这种自动寻优方法用于迅速获取暗视觉下的最佳图像质量, 特别是在视频图像处理中的实时补偿。

关键词:人类视觉特性; 无参图像质量评价; 对比度分辨率; 自适应增强

中图分类号: TP391

文献标志码: A

A compensation method of human visual system based-on NR-IQA

CHEN Yong¹, CHENG Jiaji¹, XIE Zhengxiang²

(1. Key Laboratory of Industrial Internet of things Network control, MOE, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Department of Biomedical Engineering, Chongqing University of Medical Sciences, Chongqing 400016, China)

Abstract: Visual contrast resolution is lower in the low-light level. A compensation method for low-light image based on no-reference image quality assessment(NR-IQA in short) is presented. A mathematical model for extracting vision evaluation parameters is built. The best image quality assessment function is achieved to assess the quality of compensated image. The third step was to get the relationship between the assessment function and the corresponding compensation factors. The method of automatic optimization can be used to quickly acquire the optimal quality from an be taken from scotopic vision, especially image applied to the compensation of video image sequences rapidly.

Abstract: human vision system; no reference image quality assessment; contrast resolution; self-adaptive enhancement

模拟具有夜间视觉的动物实现正常的活动, 一直是人类追求的目标。由于环境照度和成像系统的影响, 低照度图像具有灰度值集中, 对比度小, 信噪比低等特征, 视觉效果黑暗模糊^[1]。目前针对低照度图像的研究主要在图像输入输出端改善, 如通过

硬件像增强和小波变换的方法实现降噪滤波, 提高信噪比^[2]。而软件算法仍采用常规增强方法, 如灰度变换和直方图均衡化, 具有不确定性的问题。Land 等人提出了一种 Retinex 理论, 后来发展了用于改善光源非均匀, 灰度集中的图像对比度和像质

收稿日期: 2012-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60975008)

作者简介: 陈勇(1963-), 男, 重庆邮电大学教授, 主要从事智能仪器仪表及信息处理方向研究, (Tel)13983763634; (E-mail)chenyong@cqupt.edu.cn。

的新技术^[3]。以上方法基于图像整体特征作处理,对于低照度图像的增强效果不明显,也不能有效的实现图像的整体和局部同时增强^[4]。近年来有文献提出利用图像的灰度特征和空间信息的相关性,结合人类视觉特性提出了图像增强的改进方法^[5],但鲜有关于此类图像增强的质量评价模型报道。

由于人类视觉对比度分辨率限制,人眼在低照度环境下难以清晰的看清景物和目标。如能对人类视觉的低对比度分辨率进行补偿,则可显著提高人类在暗视觉条件下的分辨能力。提出一种非线性对比度分辨率补偿方法,弥补人在低照度下的视觉对比度分辨率限制,在降噪处理的基础上使得图像光照均匀,亮度适中,更适合人眼观察。为了实现图像的有效增强,充分发挥人类视觉对图像认知功能,建立了一种基于人类视觉特性的无参客观图像质量评价模型^[6],既有效的量化了图像质量评价的客观标准,又实现了自然图像依赖于人的主观价值。

1 视觉建模

图像质量评价的目标是得到与人类视觉感知相一致的结果。原始图像通常无法获取或者依赖参考图像做出合理的评价,而且主观图像质量评价指标标准不统一,开销大,费时,不适合于实时系统^[7]。因此在嵌入式系统中,无参客观图像质量评价(no reference image quality assessment, NR-IQA)成为主要的研究方向。目前结合人类视觉系统(HVS)特性的客观图像质量评价方法比较多,它依据人的视觉、心理特性,充分发掘视觉认知功能,把主观与客观评价方法有机结合起来。因而基于 HVS 的图像质量评价方法更能揭示人类视觉感知的原理。

在评价图像质量时,一幅图像应具备一些基本特征可测的物理量。通常认为,图像是否存在主观价值取决于图像含信息量多少,量化指标为信息熵;图像能否充分被视觉认识取决于图像的灰度分布,量化指标为图像灰度水平和对比度。基于以上主观认知实验,遴选了这些特征量构成客观图像质量评价参数,其模型计算如下

1.1 信息熵

图像中含灰度级信息越丰富,质量越好。图像的熵反映为图像中各个灰度值的客观信息量大小。理想的自然图像具有灰度级均匀分布的特点。采用信息熵(information entropy, IE)来描述客观图像的

信息量

$$IE = - \sum_{i=0}^{255} p_i \log_2 p_i(bt), \quad (1)$$

式中 $p(i)$ 表示第 i 灰度级上像素数的概率。具有均匀分布直方图的图像具有最大的信息熵 8, 仅具有一个灰度/色度值的图像即单色图像的信息熵最小为 0。

1.2 平均灰度

人眼主观认为灰度值集中在 0 或者 255 附近的图像效果不好。因此图像的好质量与适当的亮度(灰度值)相联系。用平均灰度(average gray, AG)计算图像的亮度水平

$$AG = \frac{1}{M \times N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \text{Gray}(m, n), \quad (2)$$

式中 AG 表示平均灰度。Gray(m, n) 为像素点(m, n)的灰度, M, N 分别为图像行列像素点数。在理想的自然图像中, 灰度谱是连续均匀分布的。均匀分布形成 0 到 255 的自然数序列, 按公差为 1 的等差序列计算得到最佳认知灰度(optimum perception gray, OPG)为

$$OPG = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{255} i \times \frac{M \times N}{256} = 127.5, \quad (3)$$

平均灰度与 OPG 差值越大, 图像质量越差。定义平均灰度与 OPG 的归一化相对灰度距离(normalized gray distance, NGD)为

$$NGD = \begin{cases} \frac{AG}{OPG}, & AG \leq OPG \\ 1 - \frac{AG - OPG}{255 - OPG}, & AG > OPG \end{cases}, \quad (4)$$

式中 NGD 描述 AG 的相对 OPG 的偏离值。NGD 等于 1 取得最佳认知平均灰度值, 偏离 1 越大, 则认为图像质量越差。

1.3 平均对比度

视觉感知的基础是图像。对比度反映了图像的重要信息。对于人类视觉系统来说, 显然一幅单色图像是没有实用研究价值的。在灰度图像中, 通常采用的是 Weber 和 Michelson 的对比度定义, 但是当背景强度为 0 具有不确定性, 而且不适用于暗视觉下的图像对比度。本课题论及的对比度, 是图像中的某点与相邻点的灰度/色度差异, 为区别分时对比度, 特别称为同时对比度(simultaneous contrast), 这里引用文献[8]关于对比度的定义

$$C(x, y) = |g(x_a, y_a) - g(x_b, y_b)|, \quad (5)$$

式中 $C(x, y)$ 表示同时对比度, $g(x_a, y_a)$ 和 $g(x_b, y_b)$

y_b) 分别表示目标和背景灰度,根据现代计算机技术的图像灰度的数字化表示, $g(x_a, y_a)$ 和 $g(x_b, y_b)$ 分别表示图像相邻像素点的灰度值,取值范围为 $[0, 255]$ 。用该对比度定义描述图像的平均对比度 (average contrast, AC)

$$AC = \frac{1}{M \times (N-1)} \sum_{y=0}^{N-2} \sum_{x=0}^{M-1} | \text{Gray}(x, y) - \text{Gray}(x+1, y) |, \quad (6)$$

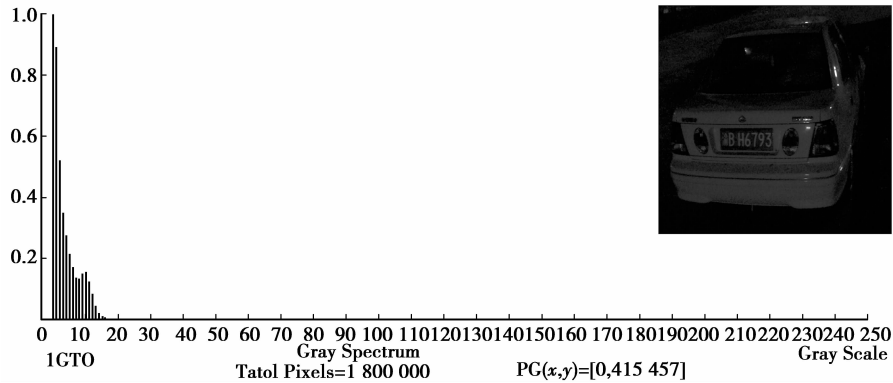


图 1 原始图像灰度直方图分布

以上客观物理量构成了图像质量评价 3 参数。由此建立以信息量,平均灰度,平均对比度 3 个物理量作为无参图像质量评价的量化模型。

2 无参图像质量评价综合函数

2.1 对比度分辨率补偿

由于图像的最终接受者是人,所以在评价图像质量时应考虑人类视觉系统 (HVS) 特性。由于 HVS 非常复杂,目前还无法根据生理和心理特性得到精确的计算模型,这里引用了 JND 的概念,即对比度分辨率,它采用了人类视觉分辨能力的生理和心理物理学基本原理^[9]。JND 表示人类视觉所能分辨的一幅图像的最小灰度差异,它是物理可测的心理物理量,与环境亮度有关。JND 适合于心理对比度测量,也能够反映对比度的物理变化趋势,即在高背景灰度上对比度高,低背景灰度上对比度低。

人眼对跃变信息的感知能力随局部背景亮度和空间复杂度的变化而变化,即人眼视觉感知具有亮度阈值效应和空间频率掩盖效应^[10]。研究表明,人类视觉在不同亮度背景范围 JND 特性不同^[11-12],实验测定对比度分辨率 (contrast resolution, CR) 随背景灰度变化的函数为

式中, $\text{Gray}(x, y)$ 为像素点 (x, y) 的灰度。 M, N 为 x, y 方向的像素数。图像灰度和对比度大小同时影响了图像的可见度和清晰度。在一幅低照度背景图像中,虽然图像熵的信息丰富,但是灰度级整体分布处于暗视觉范围内。如图 1,灰度谱分布表明暗视觉图像具有灰度级低和灰度谱集中的特点。这类图像虽然有用,但不能被充分感知。

$$Y(x) = \begin{cases} 22.98e^{-0.057x}, & 0 \leq x \leq 47; \\ 2.1298 - 0.01376x + 4.851 \times 10^{-5}x^2, & 47 \leq x \leq 255. \end{cases} \quad (7)$$

式中 $Y(x)$ 表示人类视觉对比度分辨率; x 表示背景灰度。对于 $[0, 255]$ 灰度级的图像,定义灰度值在 $0 \leq x \leq 47$ 范围内为暗视觉,灰度值在 $64 \leq x \leq 255$ 范围内为明视觉。公式 (7) 表明人类视觉对比度分辨率对明视觉和暗视觉是不同的,且均为非线性关系。

在暗视觉范围内,如果图像对比度没有达到该背景灰度下的恰可分辨 (just noticeable difference, JND),人类也不能看清图像。通过人为补偿对比度分辨率的阈值缺陷,使得暗视觉图像结构变得清晰可见。理论上,如果将灰度差为 1 的邻级原始灰度差异放大到 JND,就可以对视觉分辨率进行补偿。灰度级放大差异越大,对比度越高,图像越清晰。相邻灰度级放大后级差的极值为黑白二值图像,分别为 0 和 255。图 2 中,对比度分辨率补偿实现了图 1 中原始图像的各相邻灰度级差变大,并超过对比度分辨率阈值;而对于灰度级为 0 的像素点作补偿,灰度值仍保持不变。因此,补偿的方法不仅实现了灰度值的增强,而且扩大了各灰度级差的动态范围,即 $[0, 255]$ 。

基于人类视觉系统的 JND 特性,定义对比度分辨率补偿算法如下

$$TG(i) = \begin{cases} O_g(x, y), O_g(x, y) = 0 \\ k \sum_{i=0}^{O_g-1} JND(i), O_g(x, y) > 0 \end{cases}, \quad (8)$$

式中 $TG(i)$ 为补偿后目标灰度值, $O_g(x, y)$ 为原始灰度值,取值范围为 $[0, 255]$ 。 i 为背景灰度(在一幅图像中仅具有相对意义),取值范围为 $[0, O_g(x, y) - 1]$, k 为补偿因子, $JND(i)$ 为公式(7)中 $Y(x)$,即背景灰度 i 上的恰可分辨距离。

经过对比度分辨率补偿后,如果某点灰度值大于 255,就令其等于 255,如果小于 0,就令其等于 0,否则就会出现补色情况,本来变亮的地方反而会变暗。因此,需给式(10)以如下约束条件

$$TG(x, y) = \begin{cases} 255, TG(x, y) > 255; \\ 0, TG(x, y) < 0. \end{cases} \quad (9)$$

从图 1 和图 2 的灰度谱迁移表明,该算法提高了整个暗视觉图像的灰度和对比度水平,实现了图像灰度的非线性补偿。

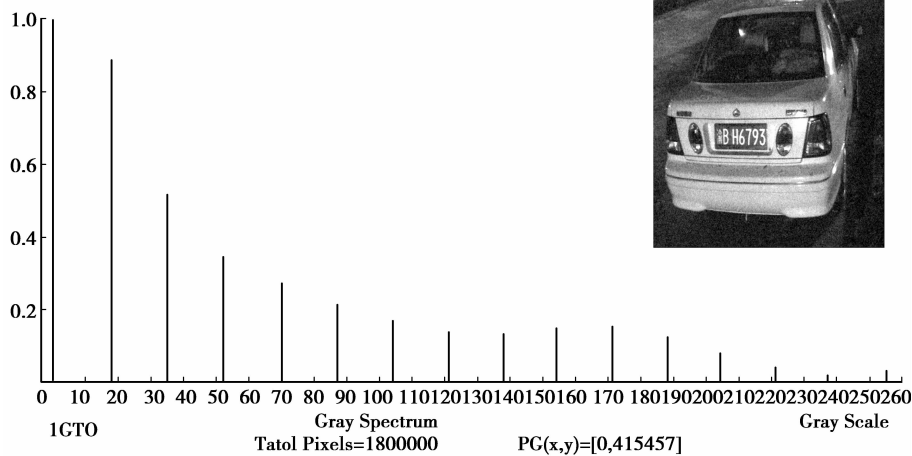


图 2 补偿后图像灰度直方图分布

2.2 补偿评价模型

对比度分辨率补偿需确定最佳补偿条件,产生最佳无参考图像质量的过程就是实现补偿因子 k 的自动寻优。基于 NR-IQA 模型,研究了图像质量评价函数与补偿参数之间的关系。

以补偿参数 k 为自变量建立客观图像质量评价函数 CAF,当该函数取得最大值时,获得最佳补偿条件 k_{op} 。对原始图像补偿的程度不同,增强效果明显不同。图 3 中(a)为原始图像,图(b)-(d)为不同 k 值补偿后图像。当选取不同参数对图像各像素点作灰度补偿时,图像质量评价 3 参数也相应的变化。表 1 中数据反映了不同补偿条件下的评价参数。大量实验测试表明,对暗视觉图像作不同深度的补偿,综合评价函数 CAF 和参数 IE, AC, NGD 随 k 变化的规律为

1) 当 k 取值范围为 $(0, \infty)$, $AC(k)$, $NGD(k)$ 和 $CAF(k)$ 可取得唯一的最大值;除人为加入图像信息, $IE(k)$ 不增只减;

2) $IE(k)$, $AC(k)$, $NGD(k)$ 在不同 k 值处取得最大值,均呈现凸形曲线分布;

3) 随着 k 的增大,视觉感知图像质量先逐渐变

好,然后又逐渐变差。CAF 达到最大值时图像质量 h 最佳。

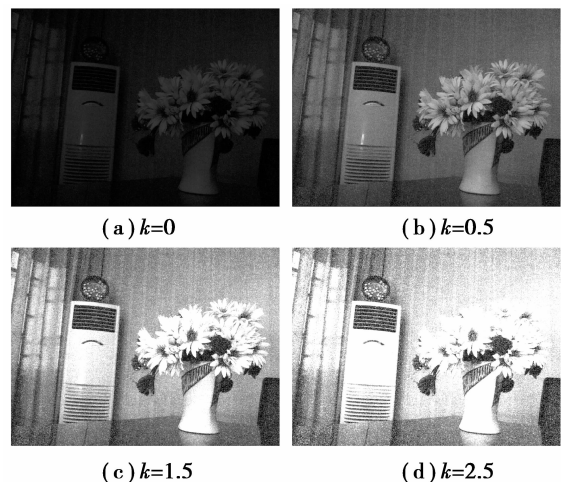


图 3 不同 k 值的图像补偿结果

质量评价 3 参数 $IE(k)$, $AC(k)$ 和 $NGD(k)$ 均是关于 k 的函数,且可用最大值公式表示,3 者之积是一最大值函数。特别的当取最优补偿参数 k_{op} , CAF 关于 k 的一阶导数为 0。

表 1 图像质量 3 参数随 k 值变化规律

k	0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	10.0	12.0
$IE(k)$	3.241	3.241	3.238	2.898	2.516	1.669	1.068	1.068	0.432
$AC(k)$	0.465	4.379	8.767	15.173	17.204	16.199	13.535	10.760	9.976
$AG(k)$	3.397	34.134	68.473	128.187	167.280	189.987	212.149	227.908	232.362
$NGD(k)$	0.027	0.268	0.537	0.995	0.688	0.510	0.336	0.212	0.178
$CAF(k)$	0.437	2.425	4.083	5.705	4.250	2.391	1.187	0.891	0.324

为了描述这 3 个参数随不同 k 值变化的特性,建立无参图像质量综合评价函数

$$CAF(k) = IE^{\alpha}(k) \times AC^{\beta}(k) \times NGD^{\gamma}(k), \quad (10)$$

式中 $CAF(k)$ 是以 IE, AC 和 NGD 为中间量的客观评价函数。该函数的权值 α, β, γ 影响了图像质量 3 参数的综合评价结果,需要由心理物理实验(主观评价)验证。逐渐增大补偿参数 k 值,不同 k 值得到不同补偿效果的补偿后图像。在同一幅原始图像补偿处理后的图像集中,人眼观测主观评价选取视觉感受最佳的图像,提取最佳图像质量评价的 3 个参数 IE, AC, NGD , 得质量评价函数 CAF 的值。通过主观感知比较不同权值,基于统计性实验测定结果为 $\alpha=1, \beta=1/4, \gamma=1/2$ 。由此得到函数

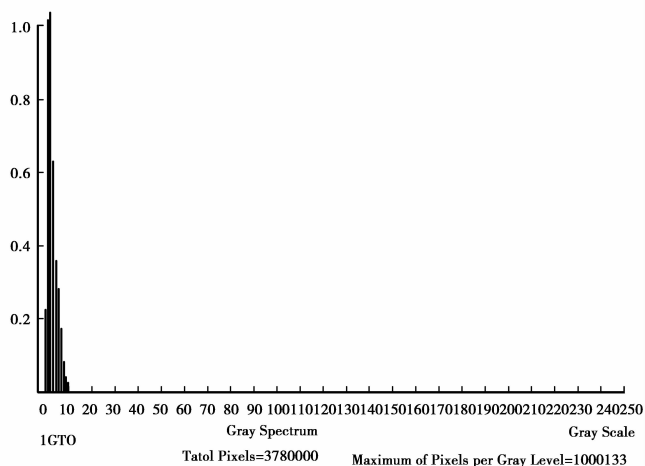
$$CAF(k) = IE(k) \times AC^{\frac{1}{4}}(k) \times NGD^{\frac{1}{2}}(k), \quad (11)$$

式中 $CAF(k)$ 是以 k 为自变量的最大值函数。当 $CAF(k)$ 取得最大值时,得到的 k 值是最佳补偿条件 k_{op} , 对应的补偿后图像视觉感知效果最好。无参考图像质量评价模型通过机器视觉客观评价图像的质量,这是建立在主观评价实验基础上的,也可以通过主观评价反过来来验证模型的有效性。这里特别指出,研究对象为理想情况下的无噪图像,故未引入噪声因素。

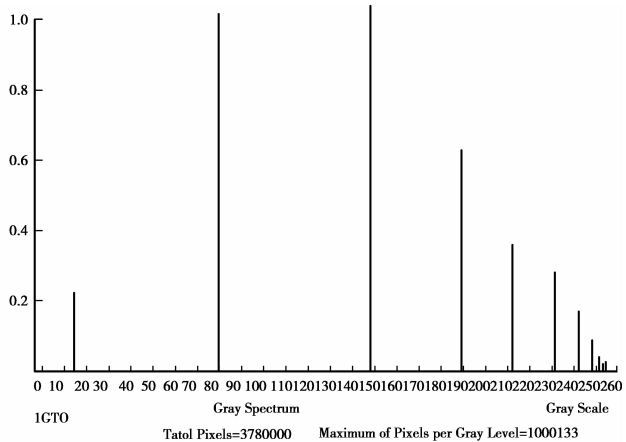
3 实验结果及分析

主观感知是评价图像增强算法有效性的金标准。为了验证方法的有效性,对比分析了图像补偿的视觉效果。图 3 中不同 k 值补偿实现了不同的图像效果,比较图 3 中(b)-(d)图可知,图 3(b)欠补偿使视觉效果差,整体灰度水平偏低,信息熵挖掘未达到最大;图 3(d)过补偿导致花色偏白,信息熵和平均对比度减少。特别的,当补偿参数 k 足够大时,右侧的部分灰度级补偿后达到 255,导致图像的灰度级数减少。为了获得最佳视觉效果,补偿超过一定程度时,对比度和灰度的增强是以图像信息熵的减少为代价的。

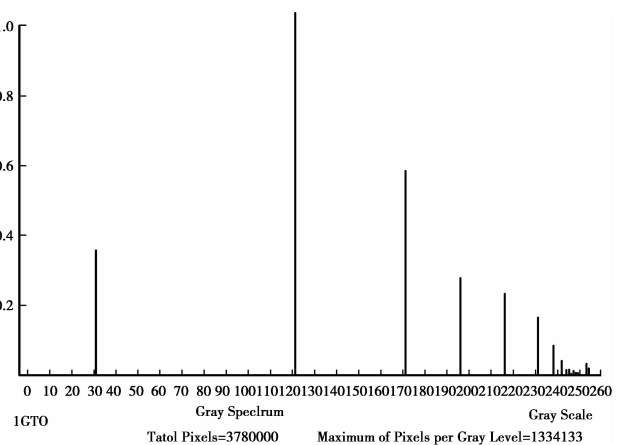
实验选用了大量样本集,对于不同的图像进行客观图像质量评价的参数分析。通过灰度直方图分布和 NR-IQA 评价参数对算法进行比较,实验分析该模型对于图像补偿结果评价的一致性。在图 4 中选用了自然图 4(a)作为原始灰度图,从该图的直方图可知,暗视觉图像含有丰富信息,灰度级集中,对比度小。在保持信息熵不增加的前提下,利用常用的直方图均衡化(global histogram equalization, GHE)方法做简单处理,得到增强后的图像图 4(b),该图像各灰度级具有均匀概率分布的特点,信息熵达到最大,灰度级整体水平提升,且对比度大,图像达到可视化。但直方图均衡化算法存在重要细节丢失,局部过亮现象。



(a) 原始图像



(b) 直方图均衡化



(c) 混合增强

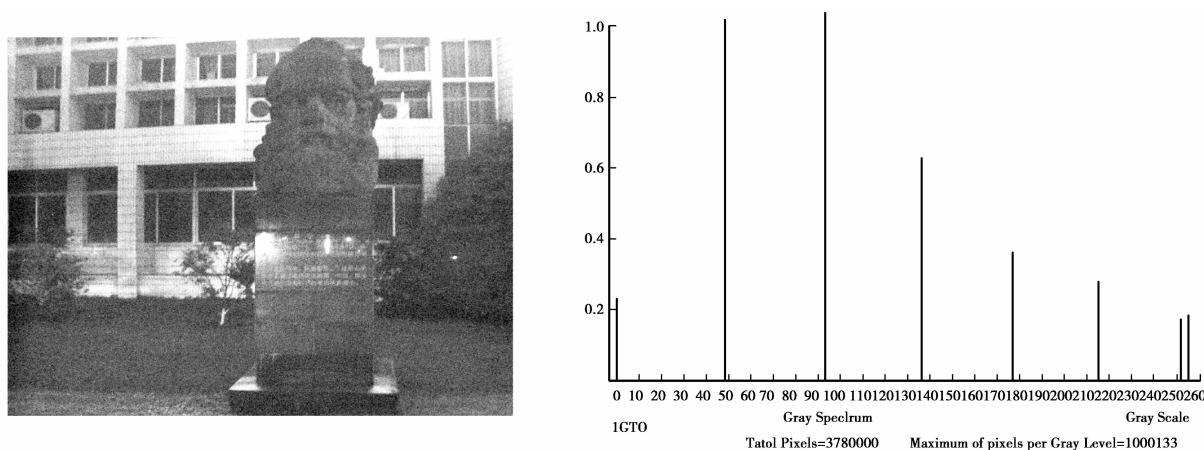
(d) 对比度分辨率补偿($k_{op}=2.4$)

图 4 不同增强算法的对比分析

为了更全面的测试算法的性能,对比分析了一种针对夜视图像改进的自适应算法。文献[13]提出了一种基于全局直方图均衡和局部对比度增强的混合增强(hybrid enhancement, HE)算法,调整灰度范围的同时也有效地突出了图像细节。但比较图 4(a)和图 4(c)中灰度直方图右侧分布,结合表 2 中数据分析发现,混合增强后图像信息熵比原图大,存在人为地引入冗余信息,图像效果为灰白且噪声明显。

由图 4 中可知,增强后图 4(b),图 4(c),图 4(d)相对原图 4(a)整体亮度得到提升,比较灰度直方图发现,图 4(b),图 4(d)各灰度级总像素数不变。特别的,补偿超过一定程度会损失部分高灰度级信息(即信息熵),但是在暗视觉范围内,被动目标通常隐藏在强背景环境中,以信息熵换取整体灰度和对比度是合理的,显然补偿后图像视觉效果明显优于其他两种方法。表 2 中参数分析表明,直方图均衡化的方法获得了最大的有效信息熵,但是局部细节表现不如补偿效果(出现“洗白”现象);混合增强方法改善了局部对比度效果,但是整体亮度和抑制噪声方面表现不如补偿效果。

表 2 算法性能评价参数分析

参量	IE	AG	AC	NGD	CAF
OI	2.78	2.66	0.54	0.02	0.34
GHE	2.76	150.27	23.58	0.82	5.51
HE	2.81	152.53	19.60	0.80	5.31
CR	2.58	127.80	23.50	0.99	5.68

因此,单纯考虑增强图像的整体灰度水平或局部对比度显然难达到满意的视觉效果。如果充分利

用人类视觉特性,并将其融入优化补偿算法中,对于暗视觉图像增强显然更合理,同时也能获得与客观图像质量评价相一致的结果。

4 结 论

针对低照度图像的特征,结合人类视觉特性提出了一种基于 NR-IQA 模型的视觉补偿算法。NR-IQA 模型是依靠视觉感知经验建立图像质量综合评价函数,能够使客观评价的结果与主观视觉感知相一致,并符合人类心理认知趋势。结合图像质量评价技术的补偿寻优方法实现图像的快速补偿,具有自适应性和简单实用等特点。与常用图像处理方法不同,非线性的 JND 补偿方法充分利用了人类视觉特性,提供了一种低照度下人眼感知图像能力增强的途径,可用于图像信息的隐藏和挖掘领域。该算法已经在 TI DM642 开发平台实现了预期效果。

参考文献:

- [1] Cooper H L, Miller M I. Information measures for object recognition accommodating signature variability[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(5): 1896-1907.
- [2] 倪雪,李庆武,陈小刚. 基于第二代 Curvelet 变换的低对比度图像增强[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(17): 188-190.
NI Xue, LI Qingwu, CHEN Xiaogang. Low contrast image enhancement based on second generation curvelet transform[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(17): 188-190.

(下转第 156 页)

- unknown chaotic delayed Yang-Yang-type fuzzy neural networks with noise perturbation based on adaptive control and parameter identification [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2009, 20(7): 1165-1180.
- [15] Zhang T P, Ge S S. Adaptive neural control of MIMO nonlinear state time-varying delay systems with unknown dead-zones and gain signs[J]. Automatica, 2007, 43(6):1021-1033.
- [16] Ge S S, Tee K P. Approximation-based control of nonlinear MIMO time-delay systems[J]. Automatica, 2007, 43(1):31-43.
- [17] Wang M, Chen B, Liu K F, et al. Adaptive fuzzy tracking control of nonlinear time-delay systems with unknown virtual control coefficients [J]. Information Sciences, 2008, 178(22): 4326-4340.
- [18] Wang M, Chen B, Liu X P, et al. Adaptive fuzzy tracking control for a class of perturbed strict-feedback nonlinear time-delay systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2008, 159(8):949-967.
- [19] Yu W S. H_{∞} tracking-based adaptive fuzzy-neural control for MIMO uncertain robotic systems with time delays[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2004, 146(3): 375-401.
- [20] Tseng C S, Chen B S, Uang H J. Fuzzy tracking control design for nonlinear dynamic systems via TS fuzzy model[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2001, 9(3): 381-392.
- (编辑 侯 湘)
-
- (上接第 147 页)
- [3] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1):100-110.
- [4] 彭波, 王一鸣. 低照度图像增强算法的研究与实现[J]. 计算机应用, 2007, 27(8):2001-2003.
PENG Bo, WANG Yiming. Research and implementation of enhancement algorithm for low-illumination image [J]. Journal of Computer Applications, 2007, 27(8): 2001-2003.
- [5] 于天河, 戴景民. 结合人眼视觉特性的红外图像增强新技术[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6):951-954.
YU Tianhe, DAI Jingmin. New technology of infrared image contrast enhancement based on human visual properties[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(6):951-954.
- [6] Sheikh H R, Bovik A C. Image information and visual quality[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(2): 430-444.
- [7] Gao X B, Lu W, Tao D C, et al. Image quality assessment based on multiscale geometric analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(7): 1409-1423.
- [8] Sanchez-Marin F J, Srinivas Y, Jabri K N, et al. Quantitative image quality analysis of a nonlinear spatiotemporal filter [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2): 288-295.
- [9] 丁绪星, 朱日宏, 李建欣. 一种基于人眼视觉特性的图像质量评价[J]. 中国图像图形学报: A 辑, 2004, 9(2): 190-194.
DING Xuxing, ZHU Rihong, LI Jianxin. A criterion of image quality assessment based on property of HVS[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(2): 190-194.
- [10] 王湘晖, 曾明. 基于视觉感知的图像增强质量客观评价算法[J]. 光电子·激光, 2008, 19(2):258-262.
WANG Xianghui, ZENG Ming. A new metric for objectively assessing the quality of enhanced images based on human visual perception [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2008, 19(2):258-262.
- [11] 王志芳, 刘玉红, 王颖, 等. 基于数字图像处理的人类视觉对比度分辨率限制测定[J]. 生物医学工程学杂志, 2008, 25(5): 998-1002.
WANG Zhifang, LIU Yuhong, WANG Ying, et al. Measuring the contrast resolution limits of human vision based on the modern digital image processing [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2008, 25(5): 998-1002.
- [12] 陈勇, 谭超, 谢正祥, 等. 基于对比度分辨率补偿的自适应底层视频挖掘夜视系统[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2011, 23(5):597-601.
CHEN Yong, TAN Chao, XIE Zhengxiang, et al. Self-adaptive lower video mining system based on contrast resolution compensation [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2011, 23(5):597-601.
- [13] 余岱, 鲍旭东. 基于人眼视觉特性的多尺度 DR 图像增强方法[J]. 生物医学工程研究, 2010, 29(1):5-8.
YU Dai, BAO Xudong. A multi-scale image enhancement method based on human visual properties[J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2010, 29(1):5-8.
- (编辑 侯 湘)