

灰度融合图像目标与背景感知对比度客观评价模型

高绍姝^{1,2}, 金伟其², 王延江³, 张晓东¹

(1. 中国石油大学(华东) 计算机与通信工程学院, 山东 青岛 266580;

2. 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

3. 中国石油大学(华东) 信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 目标与背景感知对比度是影响可见光与红外灰度融合图像质量的主要因素之一。现有的对比度评价模型未能充分考虑人眼视觉特性。因此, 基于韦伯对比度模型的形式, 结合人眼亮度掩盖特性, 提出了一种简单有效的融合图像目标与背景感知对比度评价模型。利用模拟图像和现实场景灰度融合图像的主观评价分数来检验客观评价模型。结果表明, 与现有的5种图像对比度评价模型相比, 所提出的目标与背景感知对比度客观评价模型能够给出更接近人眼主观感受的评价结果, 有效地实现灰度融合图像目标与背景感知对比度的客观评价。

关键词: 目标与背景感知对比度; 融合图像; 客观评价; 人眼亮度掩盖特性

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1660-06

Target-background perceptual contrast metric for gray fusion images

Gao Shaoshu^{1,2}, Jin Weiqi², Wang Yanjiang³, Zhang Xiaodong¹

(1. College of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. MoE Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Perceptual contrast between the target and background is one of the main influencing factors of visible and infrared gray fusion image quality. Existing contrast metrics have not put enough consideration for the human visual system. An simple and effective target-background perceptual contrast metric was proposed combined with the human luminance masking effect based on the form of Weber contrast model. The simulated image and the observer evaluation scores of real scene gray fusion images were used to test the proposed model. Experimental results show that the proposed target-background perceptual contrast metric provides better predictions than five other existing contrast metrics. It is more closely matched to human perceptual evaluation and can efficiently implement the objective evaluation of target-background perceptual contrast for gray fusion images.

Key words: perceptual contrast between the target and background; fusion image; objective evaluation; human luminance masking effect

收稿日期: 2014-09-14; 修订日期: 2014-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(61231014, 61271407, 61305008); 高等学校博士学科点专项科研基金(20131101130002); 山东省自然科学基金(ZR2014FP013, ZR2012FL16); 青岛市应用基础研究计划(14-2-4-115-jch); 中央高校基本科研业务费专项资金(14CX02029A)

作者简介: 高绍姝(1983-), 女, 博士, 主要从事光电成像系统性能分析与图像质量评价方面的研究。Email: gaoshaoshu@aliyun.com

0 引言

可见光(微光)与红外图像灰度融合技术可有效综合两个波段提供的信息,在保留场景细节信息的同时,也提高了目标探测能力。在战场侦察、目标探测等方面展现出广泛的应用前景。不断涌现出的融合算法和系统装备,使得科学评价融合图像质量成为技术研究和系统应用迫切需要解决的焦点问题之一^[1]。

融合图像中目标与背景的对比度反映了目标与背景相对亮暗变化的显著程度,直接影响到观察者探测目标的能力,是衡量融合图像质量的重要指标之一^[2]。前人的研究给出了多种图像对比度的计算模型,如针对简单图像的韦伯(Weber)对比度^[3]和迈克尔逊(Michelson)对比度^[4]。韦伯对比度适用于较小的目标位于大的均匀背景中,迈克尔逊对比度适用于计算类似正弦条纹的亮暗周期性分布的图像对比度。此外,局部频带对比度^[5]、各向同性局部对比度^[6]以及局部 RMS(Root Mean Square)对比度^[7]可以用来衡量图像的局部对比度。针对融合图像的灰度对比度,Yuan 等^[8]给出了基于直方图特性的评价模型。

然而现有的对比度模型并未充分考虑人眼视觉特性,特别是对目标与背景感知对比度影响明显的人眼亮度掩盖特性。为了构造更符合人眼主观感受的客观评价模型,同时满足实时图像处理的要求,此文结合人眼视觉特性,提出一种简单有效的灰度融合图像目标与背景感知对比度评价模型。

1 感知对比度模型

现有的几种对比度模型中,经典的韦伯对比度模型可较好地衡量图像中小目标与背景的对比度。

1.1 韦伯对比度

在均匀背景亮度 L_b 中存在亮度为 L_t 的小目标,二者的韦伯对比度^[3]定义为:

$$C_w = \Delta L / L_b \quad (1)$$

其中,目标与背景亮度差 $\Delta L = |L_t - L_b|$ 。

该模型形式简单,并且在通常情况下可以给出较准确的评价结果。然而,当背景亮度较小时,可能出现对比度计算结果的过分增大,同时,该模型没有考虑人眼视觉的亮度掩盖特性,即对于不同亮度的背景,人眼能够识别其中亮度差的能力不同,在某些

情况下,韦伯对比度模型无法给出与人眼视觉感受一致的评价结果。此外,该模型涉及到目标与背景的亮度,这与显示图像所用的显示器有关,因此,在用该模型对图像对比度评价之前,需要对显示器特性进行严格的测量,现实应用中难以操作。为此,此文基于韦伯对比度定义的形式,考虑人眼亮度掩盖特性,引入韦伯定律,给出了一种利用图像灰度计算的感知对比度评价模型。

1.2 基于人眼视觉特性的感知对比度

根据韦伯定律^[9],只有当背景与目标的亮度差 ΔL 大于阈值 ΔL_{th} 时,人眼才能探测到该目标,即人眼视觉存在亮度掩盖特性。在一定背景亮度变化范围中, ΔL_{th} 与 L_b 的比值为常数,

$$\Delta L / L_b = K \quad (2)$$

其中, K 为韦伯比常数,满足此关系的背景亮度区域为 Weber' Law 区域。

对于显示器上的图像灰度和显示亮度存在非线性关系,可近似为指数特性(称为 γ 特性):

$$L_d = L_{max}(I_d / I_{max})^\gamma \quad (3)$$

式中: L_d 为显示图像的亮度,单位 cd/m^2 ; L_{max} 为显示器最大输出亮度; I_d 为图像像素灰度; I_{max} 为最大灰度; γ 为常数,对于 CRT 显示器,一般 γ 为 2.2。

若图像中目标与背景的亮度分别为 L_t 和 L_b ,对应目标与背景灰度为 I_t 和 I_b ,人眼恰可分辨目标时,目标与背景的灰度差为 ΔI_{th} ,由式(2)和式(3)得:

$$\frac{\Delta I_{th}}{I_b} = \frac{I_t - I_b}{I_b} = (K+1)^{1/\gamma} - 1 = K' \quad (4)$$

即在 Weber's Law 区域,人眼视觉刚可辨灰度差(Just Noticeable Difference, JND) ΔI_{th} 与背景灰度 I_b 的比值近似为常数 K' 。但是在过暗或过亮背景中, K' 值增大,也就是人眼辨别亮度差的能力降低。如图 1 所示,不同的灰度背景(I_b 分别为 1, 64, 128, 192, 250)中有灰度差为 5 的亮目标。在较暗($I_b=1$)和较亮($I_b=250$)的背景中,人眼很难发现其中的目标。通过人眼视觉实验可以确定不同灰度图像背景 I_b 中的人眼 JND ΔI_{th} ,图 2 给出二者的关系曲线^[10]。

考虑人眼亮度掩盖特性,借用韦伯对比度的简单形式并结合式(4),给出人眼感知对比度定义:

$$C_p = \begin{cases} \frac{\Delta I}{JND(I_b)} & \Delta I \geq JND(I_b) \\ 0 & \Delta I < JND(I_b) \end{cases} \quad (5)$$

其中,目标与背景灰度差 $\Delta I = |I_t - I_b|$; $JND(I_b)$ 为背景灰度 I_b 对应的可见阈值,使用图 2 中的数据。当图像灰度变化小于人眼 JND 时, C_p 为 0, C_p 越大表示人眼感知图像的对比度越大。

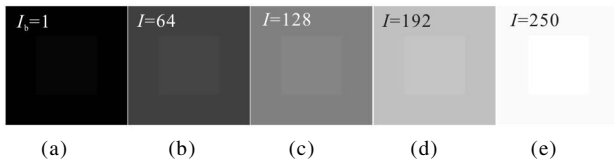


图 1 不同灰度背景中有相同灰度差的亮目标
Fig.1 Bright targets with same intensity difference on different intensity backgrounds

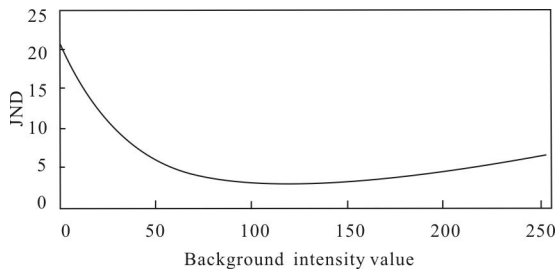


图 2 不同灰度背景下的人眼刚可辨灰度差
Fig.2 JND due to background intensity values

使用感知对比度 C_p 和现有的 5 种对比度评价模型,韦伯对比度^[3]、局部频带对比度 C_B ^[5]、高频带各向同性局部对比度 C'_0 ^[6]、局部 RMS 对比度 C_R ^[7] 以及基于直方图特性的对比度 C_H ^[8],计算图 1 中模拟图像的对比度(对于局部对比度模型,计算图像所有像素的局部对比度平均值来评价图像整体对比度),结果如表 1 所示,每种评价模型对图 1 的 5 幅图像计算结果的最大值(即图像对比度最好)加粗表示。可以看出,在过暗背景区域, C_w 、 C_B 、 C'_0 和 C_R 对于图 1(a)的计算结果均过分增大,以及 C_H 随着图像整

表 1 图 1 中图像 CP 与 5 种对比度模型结果

Tab.1 Results of CP and five contrast metrics for Fig.1

Metrics	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
C_p	0.000 0	1.103 3	1.824 5	1.189 1	0.000 0
C_w	0.469 3	0.131 2	0.075 6	0.053 1	0.041 9
C_B	0.024 0	0.001 0	0.000 5	0.000 3	0.000 3
C'_0	0.031 5	0.001 1	0.000 6	0.000 4	0.000 3
C_R	0.009 9	0.007 0	0.004 4	0.003 2	0.002 6
C_H	0.000 0	0.001 0	0.002 0	0.003 0	0.003 8

体亮度的增大而增大,这些模型的评价结果均与人眼主观感受存在偏差。图 1(a)和(e)中目标与背景灰度差小于人眼 JND,由于 C_p 结合了人眼视觉特性,其计算结果为 0,而图 1(c)背景灰度处于人眼较敏感的中等灰度区域, C_p 结果最大,更符合人眼视觉感受。

2 图像目标与背景感知对比度模型

人眼在观察图像时,对“刺激”的边缘向四周延伸 2° 视角范围的“近场”区域最为敏感^[11]。如果将热目标视为观察视野中的“刺激”,那么相应的“近场”区域则是人眼关注的背景区域,二者构成的图像区域是人眼对于目标与背景的敏感区域。人眼主要依赖于该区域的目标与背景感知对比度来探测融合图像中的目标。

由于所使用融合图像大小的限制(在第 3 节的主观评价实验中,观察者到显示器屏幕距离为 50 cm,待评价的单幅融合图像对于人眼的张角约为 $11.6^\circ \times 8.7^\circ$),这里定义可以包围红外源图像中目标的最小矩形边界(如图 3 中虚线矩形)向四周各延伸 1° 视角大小的扩展矩形区域为目标与背景区域 Ω ,如图 3 中实线矩形区域。其中,红外图像中灰度值大于一定

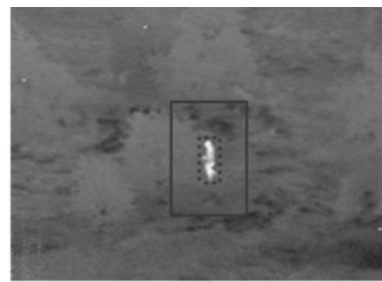


图 3 红外图像中目标与背景区域
Fig.3 Region of the target and background in the infrared image

阈值的区域确定为目标区域 Ω ,其余部分为背景区域 Ω_b 。这里利用 Otsu 给出的自动阈值选取法^[12]计算具体阈值。之后,对应地确定融合图像中目标和背景区域,并在该区域中计算融合图像的目标与背景感知对比度:

$$C_{TB} = \begin{cases} \frac{|\bar{I}_t - \bar{I}_b|}{JND(\bar{I}_b)} & |\bar{I}_t - \bar{I}_b| \geq JND(\bar{I}_b) \\ 0 & |\bar{I}_t - \bar{I}_b| < JND(\bar{I}_b) \end{cases} \quad (6)$$

式中: \bar{I}_t 和 \bar{I}_b 分别为目标区域 Ω_t 和邻近背景区域 Ω_b 像素灰度的平均值。对于一幅图像中包含多个目标背景区域的情况,则每个目标背景区域分别计算 C_{TB} 后取平均作为该图像的目标背景感知对比度。

3 模型验证

选用 8 组现实场景的可见光与红外图像作为源图像,利用 6 种不同的灰度融合算法,产生一共 48 幅灰度融合图像,每组图像包含明确的热目标(人或船只),开展图像目标与背景对比度的主观评价实验,所得实验数据用来验证本文客观评价模型的有效性。

6 种融合算法包括:主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)方法^[13]、拉普拉斯金字塔(Laplacian Pyramid, LP)算法^[14]、梯度金字塔(Gradient Pyramid, GP)算法^[15]以及最简单的取最小值(Minimum Value, Min)方法、取最大值(Maximum Value, Max)方法和取平均值(Average Value, Avg)方法(即融合图像各像素点分别取源图像中对应像素点的最小值、最大值和平均值)。图 4 给出实验所用的一组现实场景图像,包括红外与可见光源图像和 6 幅融合图像。

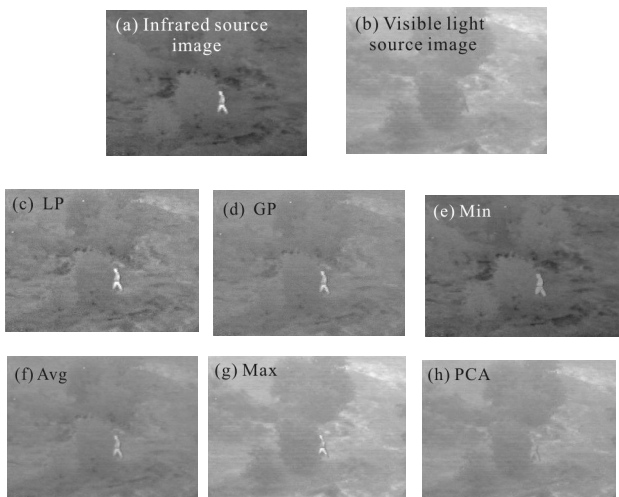


图 4 现实场景源图像以及灰度融合图像

Fig.4 Source images of the real scene and gray fusion images

在暗室中,利用的 17" CRT 显示器开展实验。该显示器使用 GOG(Gain, Offset and Gamma)模型进行特性化^[16],峰值白点亮度为 100 cd/m²。20 名具

有正常或经过校正后正常视力的观察者参与实验,在充分理解目标与背景对比度的定义以及实验目的后,给出每幅融合图像的评价分数。为了使评价者明确图像中的热目标,每组图像显示器先显示红外和可见光源图像,之后再以中等灰度为背景同时显示 6 幅灰度融合图像。观察者将融合图像目标与背景感知对比度从不满意到满意对应 1~10 分制,将该组图像进行相互比较来给出评价分数,对于一幅图像包含多个目标的情况,要求综合衡量给出平均分数。将 20 名观察者给出的评分取平均得到该图像目标与背景感知对比度的平均意见分数(Mean Opinion Score, MOS)。

计算每组融合图像的客观模型计算结果与 MOS 的 Pearson 线性相关系数^[17](Pearson linear correlation coefficient, PLCC)以及 Spearman 顺序相关系数^[17](Spearman rank-order correlation coefficient, SRCC)。PLCC 衡量主客观评价分数的线性一致性,SRCC 衡量主客观评价的排序一致性。PLCC 和 SRCC 越大,说明客观评价模型越符合人眼的主观感受。表 2 给出图 4 中融合图像目标与背景感知对比度的 MOS 和对比度模型计算结果以及相应的两种相关系数(对于局部对比度模型,利用其在目标背景区域所有像素的平均值来评价图像目标与背景对比度)。图 4(c)~4(h)主观评价实验得到的 MOS 分数逐渐降低,几种客观评价模型中,只有 C_{TB} 给出了线性递减的计算结果,与观察者主观评价分数的两种相关系数最高。

图 5 给出 6 种对比度模型对于实验所用的 8 组

表 2 图 4 对应 MOS 与客观模型结果及相关系数
Tab.2 MOS, predicted values and the correlation coefficient between them for Fig.4

Met- rics	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	PLCC	SRCC
MOS	7.1000	6.3000	5.1500	4.5500	3.2500	1.6500	-	-
C_{TB}	28.6367	20.1773	17.1825	14.3826	9.1175	4.0363	0.9790	1.0000
C_w	1.5939	1.0363	1.1181	0.6912	0.4279	0.1630	0.9562	0.9429
C_b	0.0205	0.0150	0.0162	0.0112	0.0128	0.0087	0.8849	0.8857
C'_b	0.0257	0.0209	0.0235	0.0142	0.0169	0.0113	0.8700	0.8857
C_R	0.1711	0.1273	0.1306	0.0917	0.1038	0.0665	0.9098	0.8857
C_H	0.2289	0.1798	0.1022	0.1126	0.1869	0.0883	0.6304	0.6000

融合图像计算结果与 MOS 两种相关系数的累积分布概率,即相关系数小于等于某一实数的概率。图中曲线对应横坐标越接近 1(曲线位置越靠近右端),说明该模型计算结果与主观评价分数存在高度相关的概率越大,越符合人眼主观感受。从图 5 中可以看出,3 种局部对比度模型(C_B 、 C'_0 和 C_R)给出的评价结果相关系数较低,他们侧重于每一点像素的对比度计算,并不适合直接用于目标与背景对比度的评价。而经典的韦伯对比度 C_W 模型适用于均匀背景亮度中存在小目标的对比度计算,表现出较好的评价效果。无论是 Pearson 线性相关系数,还是 Spearman 顺序相关系数,考虑了人眼亮度掩盖特性的 C_{TB} 模型对应的累积概率分布曲线位于其他曲线的最右边,达到了较高的相关性,与人眼主观评价结果最一致。

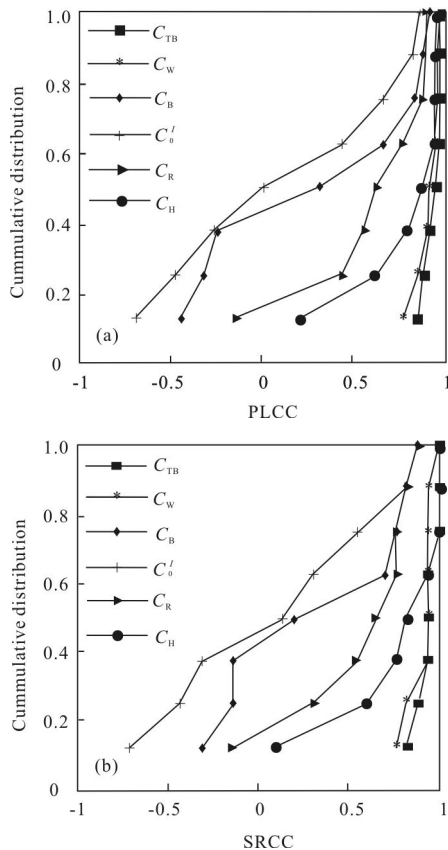


图 5 不同对比度模型对应相关系数的累积分布概率
Fig.5 Cumulative distribution functions of the correlation coefficients for different contrast metrics

4 结论

现有的图像对比度模型并未充分考虑人眼视觉

特性,此文基于韦伯对比度的形式,引入人眼视觉亮度掩盖特性,提出一种灰度融合图像目标与背景感知对比度评价模型。采用模拟图像以及 8 组真实场景 6 种不同灰度融合方法得到的融合图像主观评价分数来验证模型有效性。实验结果表明,与现有的 5 种对比度评价模型相比,此文提出的感知对比度模型给出更符合人眼主观感受的评价结果,可以有效地实现灰度融合图像目标与背景感知对比度的客观评价。

此外,文中使用了简单的基于阈值确定目标背景区域的方法,若能结合更准确的目标识别提取算法,确定人眼感兴趣的目标与其邻近背景区域,有望得到适用性更广的目标与背景感知对比度评价模型。

参考文献:

- [1] Zhnag Yong, Jin Weiqi. Objective assessment method of night vision fusion image quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1360–1365. (in Chinese)
张勇,金伟其.夜视融合图像质量客观评价方法[J].*红外与激光工程*,2013,42(5):1360–1365.
- [2] Gao S, Jin W, Wang L. Quality assessment for visible and infrared color fusion images of typical scenes[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(8): 081101.
- [3] Schreiber W F. Fundamentals of Electronic Imaging Systems: Some Aspects of Image Processing [M]. New York: Springer, 1993: 60–70.
- [4] Michelson A A. Studies in Optics [M]. USA: Courier Dover Publications, 1995.
- [5] Peli E. Contrast in complex images [J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science*, 1990, 7 (10): 2032–2040.
- [6] Winkler S, Vanderghyest P. Computing isotropic local contrast from oriented pyramid decompositions [C]// International Conference on Image Processing, 1999, 4: 420–424.
- [7] Frazor R A, Geisler W S. Local luminance and contrast in natural images[J]. *Vision Research*, 2006, 46(10): 1585–1598.
- [8] Yuan Y, Zhang J, Chang B, et al. Objective quality evaluation of visible and infrared color fusion image [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(3): 033202–033211.
- [9] Netravali A N, Haskell B G. Digital Pictures: Representation and Compression[M]. New York: Perseus Publishing, 1988: 266–269.
- [10] Chou C H, Li Y C. A perceptually tuned subband image coder

- based on the measure of just-noticeable-distortion profile [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1995, 5(6): 467-476.
- [11] Fairchild M D. Color Appearance Models[M]. USA: John Wiley & Sons, 2005: 134-138.
- [12] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [13] Singh A, Harrison A. Standardized principal components [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, 6(6): 883-896.
- [14] Burt P J, Adelson E H. The Laplacian pyramid as a compact image code[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1983, 31(4): 532-540.
- [15] Burt P J. A gradient pyramid basis for pattern-selective image fusion [C]//Proceedings of the Society for Information Display, 1992: 467-470.
- [16] Berns R S. Methods for characterizing CRT displays [J]. *Displays*, 1996, 16(4): 173-182.
- [17] Video Quality Experts Group. Final report from the Video Quality Experts Group on the validation of objective models of video quality assessment, Phase II[R/OL]. [2003-08-25]. <http://www.vqeg.org>.