

基于人眼视觉特性的非下采样轮廓波变换域红外图像增强算法

朱国庆¹ 李庆武^{1,2} 林少飞¹ 周亮基¹

¹河海大学物联网工程学院, 江苏 常州 213022

²常州市传感网与环境感知重点实验室, 江苏 常州 213022

摘要 针对红外图像对比度低、噪声大等特点,提出了一种基于人类视觉系统的亮度掩蔽和对比度掩蔽特性的非下采样轮廓波变换(NSCT)域红外图像增强算法,在NSCT域中定义一种带参数的对比度,对高频系数计算其带参数的对比度,用非线性增益函数对其进行增强,低对比度区域进行高增益,高对比度区域进行低增益,从而突出图像细节与提高图像对比度,同时通过估计噪声水平设置阈值,抑制绝对值小于阈值的系数,用以抑制噪声。对表示图像概貌的低频系数采用非完全贝塔函数进行非线性调整,从而提高图像的整体亮度。实验结果表明,该算法能够有效地对图像局部和整体进行增强,同时能够避免产生过增强现象,具有良好的视觉效果。

关键词 图像处理; 红外图像; 图像增强; 非下采样轮廓波变换; 人眼视觉系统; 非线性增益函数

中图分类号 TN911.73

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.011001

Infrared Image Enhancement Algorithm Based Human Visual System Characteristic Via Non-Subsampled Contourlet Transform Domain

Zhu Guoqing¹ Li Qingwu^{1,2} Lin Shaofei¹ Zhou Liangji¹

¹College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China

²Changzhou Key Laboratory of Sensor Networks and Environmental Sensing, Changzhou, Jiangsu 213022, China

Abstract Considering the low contrast, fuzzy edge of infrared images, an enhancement algorithm based on the luminance and contrast masking characteristics of the human visual system is presented, the parametric contrast is computed, then non-linear gain function is used to process the parametric contrast, which enhances low contrast more than high contrast, to improve image details and image contrast, then to suppress small coefficients by threshold denoising method. The incomplete beta function is applied to improve global brightness of image. Experimental results demonstrate the ability of the proposed algorithm to achieve simultaneous local and global enhancements. The phenomenon of over-enhancement is avoided. The enhanced image is of good visual perception.

Key words image processing; infrared image; image enhancement; non-subsampled contourlet transform; human visual system; nonlinear gain function

OCIS codes 100.2980; 100.3008; 100.2960

1 引言

随着红外技术的发展,红外成像技术在不同领域得到了广泛的应用。但红外图像普遍具有整体偏暗、目标与背景对比度低,噪声大等特点,为了更好地获取红外图像中目标的信息与改善红外图像视觉质量,红外图像的增强一直是对红外图像处理中必不可少的预处理。目前图像增强算法可分为基于空间域和频域

收稿日期: 2014-07-22; 收到修改稿日期: 2014-08-18; 网络出版日期: 2014-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(60972101,41306089)和江苏省科技支撑计划(BE2012096, BE2013372)

作者简介: 朱国庆(1989—),男,硕士研究生,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: 563867910@qq.com

导师简介: 李庆武(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事智能感知与图像处理等方面的研究。

E-mail: li_qingwu@163.com(通信联系人)

两大类。其中,基于频域的图像增强是将图像进行频域变换(如小波、傅里叶),对变换后的系数进行处理。目前基于频域增强算法大都是直接对细节系数进行处理,不能反映人眼视觉对物体观察的特性。人眼视觉系统的主要特点就是对被观察物体的绝对亮度判断力有误差,而对亮度的相对差异判断力较强,即对比灵敏度。人眼视觉系统能够最优地感知与识别出图像信息,能够自然地弥合图像的显示及处理与其心理物理属性的间隙,实现图像的最优表示与处理。一个好的增强算法要能够反映人眼对图像的识别规律,增强后的图像应符合人眼视觉特性。2002年,Do等^[1]提出的具有各向异性的轮廓波变换,克服了小波的缺陷,但是由于下采样过程的存在,基于轮廓波变换的图像增强结果会产生伪Gibbs失真。Cunha等^[2]对其进行改进,提出的非下采样轮廓波变换(NSCT)是一种多分辨、多方向、平移不变的超完备变换,具有更强的细节保护能力。

人眼对图像的光强、灰度等变化具有独特的视觉特性,本文将人眼视觉系统^[3](HVS)的遮蔽特性引入到变换域中,提出了一种基于人眼视觉特性的NSCT域红外图像增强方法,在NSCT变换域中对人类视觉系统特性进行建模,利用人眼的视觉遮蔽机制增强图像。

2 人类视觉系统亮度与对比度掩蔽特性

人眼辨别亮度差的能力与周围环境及其照度大小有关系^[4],即视觉随着图像背景亮度的变化,对亮度偏差的敏感度呈非线性变化,人眼在高亮度背景区对亮度偏差的辨别力相比在低亮度区要强的多。这种特征可以使用心理学中的韦伯-费希纳定律表示,其表达式为

$$\Delta I/I = K, \quad (1)$$

式中 I 表示刺激强度, ΔI 代表刺激的最小可觉差, K 为常数,也叫做韦伯分数,近似值为0.015。显然,因为 K 为常数,随着刺激强度 I 的增大, ΔI 必然增大。但是最小可觉差在刺激强度很低时是极小的,刺激强度和人的知觉间的关系不是线性关系。实验调查结果表明,韦伯定律只作用在中间亮度值,对很高和很低的亮度值都不起作用。视觉反应特性是一个分段函数,可分为4个区域,如图1所示,横坐标表示亮度的对数形式,纵坐标表示最小可觉差的对数形式,最左边区域是低对比度区域,在这个低对比度区域中,人眼几乎感受不到刺激强度的变化;接着是曲线斜率为1/2的区域是低照度区域,叫德弗里斯区域;然后是斜率为1的区域为韦伯区域,是中照度区域;由于韦伯定律只作用于刺激强度不是很大的情形,高照度区域由于受到刺激饱和的影响,故该区域定义为饱和区域^[5-7]。人眼视觉特性主要作用于韦伯区域,因此,人们普遍强调此区域中的亮度遮蔽(LM)现象^[8]。

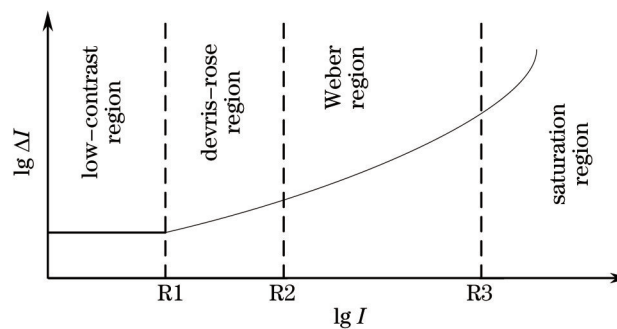


图1 人类视觉4个区域

Fig.1 Four parts of human vision

人类视觉系统不仅对亮度的相对变化敏感,也对对比度的相对变化敏感^[8]。对比度遮蔽(CM)是HVS的另一特性。研究表明,人眼刚能分辨的强度差 ΔL 是亮度 L 的函数,有时采用相对辨别门限(或称为韦伯比) $\Delta L/L$ 来表示辨别情况。 $\Delta L/L$ 在相当宽的强度范围内近似为常数,约等于0.02,但当背景亮度过高或过低时则不成立。由于人眼的韦伯比的作用,加之当人眼适应了某种恒定的背景亮度后,对黑白的感觉范围相应缩小,所以人眼对高亮度背景和低亮度背景中的图像细节的敏感度比较低,而对中亮度背景中的图像细节的敏感度比较高。

3 基于人眼视觉特性的 NSCT 域红外图像增强算法

轮廓波变换滤波器组结构由拉普拉斯塔式滤波器(LP)和方向滤波器(DFB)两部分组成。为了保持轮廓波变换的频带分割特性,并使其具有平移不变性,NSCT去掉了轮廓波两级变换中的下采样过程,构造了相应的非下采样滤波器,首先由非下采样塔式滤波器(NSP)将其分解为高频和低频子带,然后由非下采样方向滤波器(NSDFB)将高频子带分解为若干个方向。NSCT对应的滤波带具有更好的频域选择性和规则性,能够得到更好的子带分解。

红外图像的增强主要在于去除噪声、提高目标和背景的对比度。作为一种多尺度分析方法,NSCT变换能在任意尺度上实现任意方向上的分解,产生低频系数和各带通方向子带系数。基于人眼视觉特性的NSCT红外图像增强算法是在NSCT域内对系数进行符合人眼视觉特性的建模,对建模后的系数进行处理,同时抑制较小系数,经逆变换后实现对原图像整体对比度的增强。使用NSCT变换将图像分解为低频子带和低频子带,对低频和高频子带系数进行HVS变换,得到HVS系数,对HVS系数进行非线性增强,再进行HVS逆变换,得到增强后的低频高频系数,最后进行NSCT逆变换,实现红外图像的增强。算法框图如图2所示。



图2 基于HVS的NSCT增强算法框图

Fig.2 Enhancement algorithm block diagram based on NSCT and HVS

采用NSCT变换给出的近似和细节系数来求解HVS中的对比度,求解得到的两种HVS对比度,分别为亮度遮蔽(LM)和亮度-对比度遮蔽(LCM)。在NSCT变换域中,LM的函数如(2)所示:

$$C_{i,LM}^{(n)} = \frac{y_i^{(n)}}{a_1 + |y_0| \gamma_1}, \quad (2)$$

式中 a_1 为一个很小的正常数,是为防止分母为0而设定的一个阈值, γ_1 为一个控制亮度对比度受周围刺激程度的参数, y_0 表示图像进行NSCT变换后的低频系数。 i 表示方向数, n 表示层数, $y_i^{(n)}$ 表示图像进行NSCT变换后的高频系数。LCM的函数表达式为

$$C_{i,LCM}^{(n)} = \frac{C_{i,LM}^{(n)}}{a_2 + |C_{i,LM}^{(n+1)}| \gamma_2}, \quad (3)$$

式中 a_2 为一个很小的正常数,是为防止分母为0而设定的一个阈值。 γ_2 为一个控制感知对比度受周围刺激程度的参数。

NSCT的变换系数可以通过LCM系数恢复,LM系数可以从LCM系数得到(4)式

$$C_{LM}^{(n)} = C_{LCM}^{(n)} \cdot [a_2 + |C_{LM}^{(n+1)}| \gamma_2]. \quad (4)$$

细节系数可以通过LM系数得到(5)式

$$y_i^{(n)} = C_{LM}^{(n)} \cdot [a_1 + |y_0| \gamma_1]. \quad (5)$$

图像通过NSCT分解后,可重构出原图像;而改进的HVS遮蔽也是一种完全可逆的过程,因此将NSCT与HVS结合,利用NSCT变换的多尺度、多方向的分解能力,有效地提取图像的低频信息和高频信息;根据低频和高频信息求得改进后的HVS中的CM和LCM系数,然后对LCM系数进行非线性增益,对低频系数进行非线性增强;最后再反解NSCT变换中的高频系数,最后经过NSCT逆变换,重构出增强后的图像。

3.1 低频系数非线性增强

NSCT域中,低频子带关系到图像整体的对比度,它包含大量图像的基本信息,噪声较小。对于低对比度的红外图像,其分解后的低频子带系数相差较小。为了达到增强红外图像目的,需要对其低频子带系数进行灰度像素值的拉伸。Tubbs提出利用归一化的非完全Beta函数,能够自动实现灰度变换曲线的拟合^[9]。归一化的非完全Beta函数定义为

$$I_x(x) = B^{-1}(z, w) \int_0^x t^{z-1} (1-t)^{w-1} dt \quad (6)$$

式中 $B(z,w) = \int_0^1 t^{z-1}(1-t)^{w-1} dt$ 为 Beta 函数, $z > 0$, $w \leq 10$, 不同的 z 和 w 可以拟合出不同的灰度变换曲线。图 3 描述了当 $z=5$ 、 $w=10$ 时, 该函数拟合的灰度变换曲线。本算法利用非完全 Beta 函数处理低频子带系数, 以提高整幅图像的对比度。红外图像整体偏暗, 细节不清晰, 调整参数 z 和 w 使灰度过渡平缓, 达到提高图像整体亮度的效果。

3.2 LCM 系数对比度非线性增强

NSCT 域中, 高频方向子带系数代表图像的细节特征信息, 其系数普遍偏小且包含噪声。一般地, 系数绝对值比较小的一部分对应于噪声分量, 需要抑制; 而系数绝对值比较大的一部分对应于边缘细节分量, 需要保留。传统算法一般都是处理系数绝对值介于中间的系数, 以提高图像各方向子带的对比度, 但是对于红外图像, 图像本身高频系数就很小, 所以直接增强高频分量的系数, 达不到增强图像的细节部分。根据人眼对图像的相对变化比绝对变化敏感和前文所述原理, 图像经过 NSCT 变换后, 得到低频系数和高频系数, 然后求解得到的 LCM 参数, 对 LCM 参数进行非线性增益, 得到增益后的 LCM 参数, 然后反求低频系数和高频系数。这里所使用的非线性增益函数必须要满足如下条件: 单调性、反对称性、能抑制较小的系数, 放大绝对值介于中间的系数。采用的增益函数^[10]为

$$f(x) = a\{\text{sigma}[c(x-b)] - \text{sigma}[-c(x-b)]\}, \quad (7)$$

式中 $a = \frac{1}{\text{sigma}[c(x-b)] - \text{sigma}[-c(x-b)]}$, $\text{sigma}(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$, $0 < b < 1$, b 为控制增强范围的参数, c 为控制增强强度的参数。非线性增益函数曲线如图 4 所示。

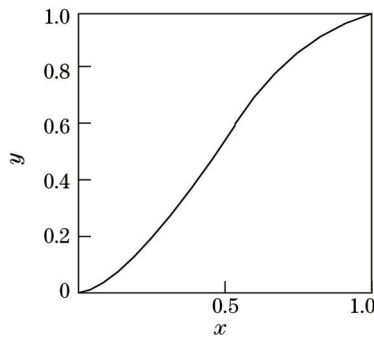


图3 非完全 Beta 函数曲线图

Fig.3 Curve of incomplete beta function

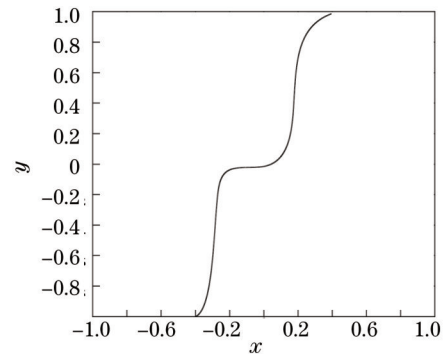


图4 非线性增益函数曲线

Fig.4 Curve of nonlinear enhancement function

为了避免将噪声系数放大, 对各带通方向子带系数进行阈值化处理, 在 NSCT 变换系数中噪声大部分处于最细子带。在最细子带中采用经典中值估计公式 $\delta = \text{median}[\text{abs}(c)]/0.6745$ 对方差 δ 进行估计^[11], 式中 c 为分解后最细子带系数。阈值设定为

$$T = \begin{cases} 3\delta \sqrt{\delta_{j,k}}, & j = 1, 2, \dots, J-1 \\ \rho 3\delta \sqrt{\delta_{j,k}}, & j = J \end{cases} \quad (8)$$

式中 ρ 为高频子带微调系数。

3.3 算法实现步骤

根据上述分析, 基于 HVS 的 NSCT 域红外图像增强方法具体实现步骤如下:

- 1) 对红外图像进行 NSCT 分解, 得到其低频子带系数 C_0 和在各个尺度上的高频方向子带系数 $C_{j,k}$ ($1 \leq j \leq J$, $1 \leq k \leq 2^j$)。其中 j 表示尺度, k 表示子带方向, 2^j 表示各尺度上分解的方向数;
- 2) 由(2)、(3)式和 NSCT 变换后得到的低频子带系数和各个尺度上的高频方向子带系数, 分别求得 HVS 的 CM 系数和 LCM 系数;
- 3) 对 LCM 系数进行(7)式非线性增益, 以提高图像的整体对比度, 同时对原始高频子带系数使用(8)式进行阈值化处理抑制噪声。对低频子带系数 C_0 进行(6)式的非线性增强, 以提高图像的整体亮度;
- 4) 根据增益以后的 LCM 系数和低频系数, 由(4)、(5)式反解求得低频子带中各个尺度上的高频方向子

带系数 $C'_{j,k}$;

5) 对处理后的所有子带系数进行 NSCT 逆变换, 得到清晰化后的红外图像。

4 实验结果分析

增强效果的评价可以从定性与定量两方面进行, 人眼的主观感受是最直接有效的评价标准。但当图像处理前后的变化不是非常明显时, 人类视觉就很难判断了, 所以还需要定量评价, 采用图像的熵^[9]来定量评价增强后图像所含信息量的大小, 熵越大则图像中所含信息越丰富。

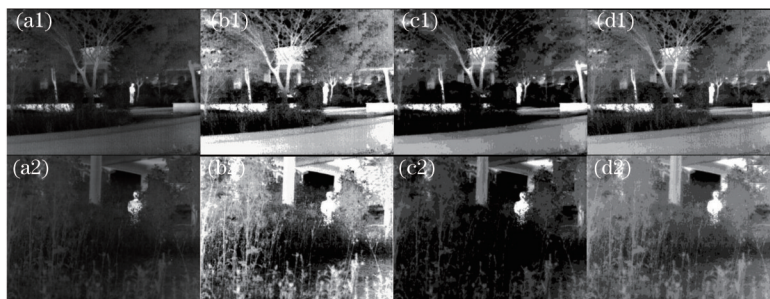


图5 夜间红外图像增强实验。(a) 原始图像; (b) 直方图均衡化; (c) 文献[10]; (d) 本算法

Fig.5 Night infrared image enhancement test. (a) Original image; (b) histogram equalization; (c) Ref.[10]; (d) proposed method

图5(a1)、(a2)为实际获取的夜间红外图像, 夜间图像对比度低, 整幅偏暗且噪声严重, 这就需要在增强图像的同时抑制背景噪声, 突出目标图像。图5(b1)、(b2)为原始图像直方图均衡化后的结果, 处理后的图像动态范围大大的得到了扩展, 提高对比度, 但是会出现局部过增强效应, 而且它的增强效果不便于调控, 处理的结果总是得到全局的均衡化的图像, 而且图像背景噪声也增强了, 目标与背景相融合, 没有突出目标。图5(c1)、(c2)为使用文献[10]增强方法, 对图像进行轮廓波分解后, 对低频系数采用(6)式增益, 对高频系数采用(7)式增益, 从而得到增强后的效果图, 可以看出, 其图像亮度和对比度都得到一定的提升, 但是细节不突出, 对噪声进行了抑制后导致背景信息没有良好的突出。图5(d1)、(d2)为本方法处理后的效果图, 可以看出, 处理后的图像不仅提高了整体和局部的亮度与对比度, 增强了暗区细节, 而且突出了边缘和目标的轮廓信息, 使图像保持良好的整体视觉效果, 背景信息在获得了突出的同时也有效地抑制了噪声。

在定量评价中, 图像的熵反映了图像中所含信息量的大小, 图像细节越丰富所含信息量越大, 则图像的熵越大。从表1可以看出, 直方图均衡化虽然提高了图像整体亮度, 拉伸了动态范围但图像中的信息并没有被增强, 而文献[10]和本算法都对图像细节有了较好的突出, 其中本算法的效果最好。

表1 夜间红外图像增强效果定量评价

Table 1 Evaluations of night infrared image

	Original image	HE	Method from Ref.[10]	Proposed method
a1	6.7545	5.9344	7.2401	7.7627
a2	6.1672	5.6924	6.5637	7.3510

5 结 论

传统直方图均衡化没有考虑噪声的影响, 在增强对比度的同时也增强了噪声, 而且从图像信息量方面来看直方图均衡化并没有提高图像信息量, 细节部分突出的不明显, 传统变换域增强算法对细节的增强不足。从人类视觉系统的掩蔽特性出发, 提出了一种基于人眼视觉特性的 NSCT 域红外图像增强算法。该方法能够有效增强红外图像对比度, 同时抑制噪声, 增强后的图像符合人眼视觉对图像信息的提取, 丰富图像信息量。不仅提高了红外图像的整体和局部亮度、对比度, 增强了暗区细节, 而且突出了边缘和目标的轮廓信息, 在视觉效果和定量指标方面都可以看到显著的效果。

参 考 文 献

- 1 M N Do, M Vetterli. Contourlets: A directional multiresolution image representation[C]. IEEE International Conference on Image Processing, 2002, 1(1): I357-360.

- 2 C A L Da, J Zhou, M N Do. The nonsubsamped contourlet transform: Theory, design, and applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089–3101.
- 3 C N Shahan, A P Karen, S A Sos. Non-linear direct multi-scale image enhancement based on the luminance and contrast masking characteristics of the human visual system[J]. IEEE Transactions on image processing, 2013, 9(22): 3549–3561.
- 4 M K Kundu, S K Pal. Thresholding for edge detection using human psychovisual phenomena[J]. Pattern Recogn Lett, 1986, 4(6): 433–441.
- 5 K A Panetta, E J Wharton, S S Agaian. Human visual system-based image enhancement and logarithmic contrast measure[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2008, 38(1): 174–188.
- 6 G Buchsbaum. An analytical derivation of visual nonlinearity[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1980, (5): 237–242.
- 7 K Panetta, Y Zhou, S Agaian, *et al.* Nonlinear unsharp masking for mammogram enhancement[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2011, 15(6): 918–928.
- 8 F Yang, Y Chang, S Wan. Gradient-threshold edge detection based on the human visual system[J]. Opt Eng, 2005, 44(2): 020505.
- 9 J D Tubbs. A note on parametric image enhancement[J]. Pattern Recogn, 1987, 20(6): 617–621.
- 10 Shi Dan, Li Qingwu, Ni Xue. Infrared image nonlinear enhancement algorithm based on contourlet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 342–346.
石 丹, 李庆武, 倪 雪. 基于 Contourlet 变换的红外图像非线性增强算法[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 342–346.
- 11 D L Donoho, J M Johnstone. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425–455.

栏目编辑: 张浩佳