

# 改进 Retinex 的光照变化人脸图像增强算法

杜 明 赵向军

(江苏师范大学计算机科学与技术学院 徐州 221116)

**摘 要** 为了提高可变光照条件下的人脸图像整体效果,提出一种基于改进单尺度 Retinex 的光照变化人脸增强算法。首先对人脸图像进行对数变换,经过曲波变换得到高频和低频两部分;然后采用双边滤波对高频进行去噪处理,同时采用 Kimmel 变分模型对低频部分进行平滑滤波;最后对人脸图像进行重构,并对图像进行伽马校正处理。在 Yale B 光照人脸库上的实验结果表明,该算法能较好地防止“光晕”现象出现,可以还原出人脸图像的本来面貌,使人脸图像更加适合人眼观察。

**关键词** 人脸识别,可变光照,图像增强,色彩恒常理论

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.2.024

## Face Enhancement Algorithm with Variable Illumination Based on Improved Retinex

DU Ming ZHAO Xiang-jun

(College of Computer Science and Technology, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

**Abstract** In order to improve the overall effect of face images with variable illumination, this paper proposed a novel face enhancement algorithm with variable illumination based on single scale Retinex. Firstly, the face images are logarithmically transformed, and the image is transformed into frequency and low frequency part by curvelet transform. Secondly, the bilateral filtering is used to denoise the high frequency while Kimmel variation model is used to smooth filtering low frequency part. Finally, the image is reconstructed, and Gamma is used to correct the image. The experimental results on Yale B database show that the proposed algorithm can prevent the “halos” phenomenon, and can restore the original face image, so the face image is more suitable for human eye observation.

**Keywords** Face recognition, Variable illumination, Image enhancement, Retinex

## 1 引言

随着信息技术的发展,身份识别与验证显得日益重要,人脸作为一种生物特征,在安全监控、人机交互、身份认证等领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。在近几十年里,人脸识别技术取得了较大的进展,理想条件下的人脸识别精度已经相当高了,然而,人脸识别中仍有许多问题有待解决,如在可变光照条件下的人脸识别<sup>[2]</sup>。在实际应用中,人脸不可避免地会受到各种光照的影响,光照变化使人脸图像产生不同程度的阴影、高光部分,这对后续人脸分类和识别产生不利影响<sup>[3]</sup>。如何提高可变光照条件下的人脸图像质量成为当前计算机图像处理中的重大课题<sup>[4]</sup>。

为了提高光照变化下人脸图像质量,学者们进行了相关研究,提出了许多增强算法对人脸图像进行预处理,以消除光照的不利影响,获得更加理想的人脸识别结果<sup>[5]</sup>。传统图像增强方法包括空域和频域两种方法,其中空域方法有直方图均衡,频域方法有同态滤波,但是由于人脸图像具有丰富的纹理信息,当光照变化较大时,传统方法难以描述纹理信息,导致后续人脸识别精度低,应用价值低<sup>[6,7]</sup>。为了解决传统图

像增强算法存在的不足,有学者提出基于小波域的光照人脸处理技术,但是小波域算法存在着方向数少、稀疏性弱等不足<sup>[8]</sup>。文献<sup>[9]</sup>提出了 Contourlet 变换的图像增强算法,较好地解决了小波域存在的不足,实现了人脸图像的稀疏逼近和多方向表达<sup>[10]</sup>。但是上述图像增强算法易导致颜色、细节信息的失真严重。Retinex 理论模拟人眼成像过程,对光照变化不敏感,可以较好地恢复图像细节信息,因而出现许多基于 Retinex 理论的光照变化人脸图像增强算法,成为当前光照变化人脸图像增强算法的主要研究方向<sup>[11,12]</sup>。然而,传统 Retinex 算法假定照度均匀,即各个方向入射的光分量都是相同的,这与实际情况不相符,易产生“光晕”现象<sup>[13]</sup>。

为了解决当前人脸识别过程中光照变化的难题,提出一种基于改进 Retinex 的光照变化人脸图像增强算法,并在 Matlab 2012 平台采用光照人脸库进行仿真测试,以验证本文算法的有效性。

## 2 Retinex 算法及存在的不足

### 2.1 Retinex 理论

20 世纪 70 年代,美国学者 Edwin Land 提出了 Retinex 理

到稿日期:2015-03-20 返修日期:2015-05-16 本文受国家自然科学基金(61272297),江苏师范大学自然科学基金(13XLB03)资助。

杜 明(1976—),男,硕士,工程师,主要研究方向为计算机网络技术;赵向军(1974—),男,博士,教授,主要研究方向为图形学、智能信息处理, E-mail: xjzhao@jsnu.edu.cn(通信作者)。

论,其通过大量实验证明了人感知到的颜色是光和物质相互作用的结果,真实世界中本是没有色彩的,反射光对物体颜色作用比较小,真正起到决定作用的是物体对各种光线的反射能力。设图像  $S(x,y)$  是入射部分和反射部分组成,入射部分描述图像的低频信息,反射部分描述图像的高频部分,分别用  $R(x,y)$  和  $L(x,y)$  来表示。 $R(x,y)$  对图像起到干扰作用, $L(x,y)$  可以描述图像的本质信息,Retinex 原理模型如图 1 所示。

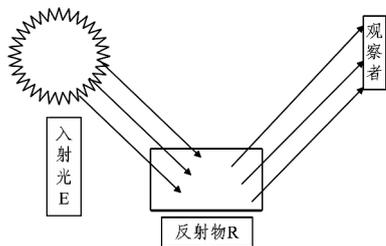


图 1 Retinex 模型

根据 Retinex 理论,图像  $S(x,y)$  可以用式(1)表示:

$$S(x,y) = L(x,y) \cdot R(x,y) \quad (1)$$

如果能够从图像分离出反射和照射分量,并对它们之间的比例进行适当调整,可以达到增强图像的效果。为了简化计算量,将式(1)转化到对数空间:

$$\log_{10}[S(x,y)] = \lg[L(x,y)] + \lg[R(x,y)] \quad (2)$$

对于一幅图像,要直接获取反射分量相当困难,因此通常从  $S(x,y)$  中预估值  $L(x,y)$ ,然后根据式(2)得到  $R(x,y)$ ,工作原理如图 2 所示。

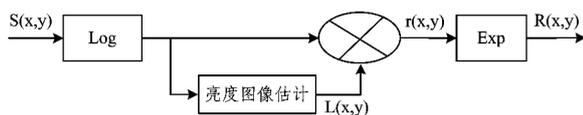


图 2 Retinex 算法的工作原理

## 2.2 单尺度 Retinex 算法

单尺度 Retinex 算法在对数域中可以表示为:

$$r(x,y) = \log_{10}[R(x,y)] = \lg[S(x,y)] - \lg[L(x,y)] \quad (3)$$

入射分量常采用高斯函数估计,高斯函数定义如下:

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中, $\sigma$  为尺度参数,且必须满足如下条件:

$$\iint G(x,y) dx dy = 1 \quad (5)$$

从而得到

$$L(x,y) = S(x,y) \times G(x,y) \quad (6)$$

经过变换后的单尺度 Retinex 算法可以表示为

$$r(x,y) = \lg[S(x,y)] - \lg[S(x,y) * G(x,y)] \quad (7)$$

最后,得到增强后的图像为

$$r(x,y) = \lg[S_i(x,y)] - \lg[S_i(x,y) * F(x,y)] \quad (8)$$

式中, $F(x,y)$  是环绕函数,一般采用高斯函数  $G(x,y)$ ;  $S_i(x,y)$  表示第  $i$  个颜色分量。

## 2.3 传统 Retinex 算法存在的不足

对于一幅光照变化比较强烈的人脸图像,单尺度 Retinex 算法增强后的效果如图 3 所示。

从图 3 可以清楚看出人脸图像的局部细节得到增加,且较暗部分增强比较明显,但是对于光照变化比较强烈的边缘

区域,出现了“光晕”现象,这主要是由于传统单尺度 Retinex 算法假设光照在整个图像内是平滑的,在自然环境中,这种假设很难满足。



(a) 人脸图像



(b) 增强后的人脸图像

图 3 单尺度 Retinex 算法的处理效果

## 3 改进单尺度 Retinex 算法

### 3.1 算法的基本思想

改进单尺度 Retinex 算法的基本思想为:首先采用曲波变换对对数变换后的人脸图像进行分解,得到人脸图像的高频和低频部分;然后对高频部分进行双边滤波去噪处理,采用 Kimmel 变分模型对低频部分进行平滑滤波;最后对重构后的人脸图像进行伽马校正,以提高光照条件下的人脸图像质量,具体如图 4 所示。

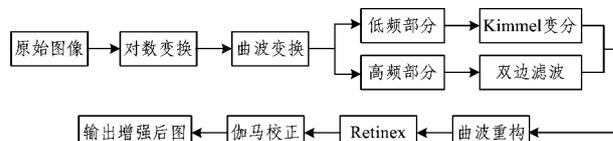


图 4 改进单尺度 Retinex 的人脸图像增强流程

### 3.2 人脸图像的曲波变换

曲波变换具有多尺度性、多方向性等优点,可以对曲线提供近似最优的逼近,首先在二维空间中定义两个窗函数:径向窗函数  $W(r)$  和角度窗函数  $V(t)$ ,它们满足如下条件:

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} W^2(2^j r) = 1, r \in (0.75, 1.5) \quad (9)$$

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} V^2(t-l) = 1, t \in (-0.5, 0.5) \quad (10)$$

然后,对每一个  $j \geq j_0$ ,在频域中定义频率窗  $U_j$ ,其计算公式为:

$$U_j(r,\theta) = 2^{-3j/4} W(2^{-j} r) V\left(\frac{2^{[j/2]}\theta}{2\pi}\right) \quad (11)$$

式中, $[\cdot]$  为取整函数。

另外,定义平移参数  $k$  和均匀旋转角度序列  $\theta_l, k = (k_1, k_2) \in \mathbf{Z}^2, \mathbf{Z}$  表示整数集;  $\theta_l = 2\pi \cdot 2^{[-j/2]} \cdot l, l = 0, 1, \dots, 0 \leq \theta_l \leq 2\pi$ 。

基于以上概念,尺度为  $2^j$ 、方向为  $\theta_l$ 、平移参数为  $k = (k_1, k_2)$  的曲波定义如下:

$$\varphi_{j,l,k}(x) = \varphi_j(R_{\theta_l}(x - x_k^{(j,l)})) \quad (12)$$

其中,  $x_k^{(j,l)} = R_{\theta_l}^T(k_1 \cdot 2^{-j}, k_2 \cdot 2^{-j/2})$ ,  $R_{\theta_l}^T$  为  $R_{\theta_l}$  的转置,  $R_{\theta_l}$  由  $\theta_l$  旋转得到。

$$R_{\theta_l} = \begin{pmatrix} \cos\theta_l & \sin\theta_l \\ -\sin\theta_l & \cos\theta_l \end{pmatrix} \quad (13)$$

于是,曲波变换可表示为:

$$c(j,l,k) = \langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle = \int_{R^2} f(x) \overline{\varphi_{j,l,k}(x)} dx \quad (14)$$

其中,  $\langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle$  为  $f$  和  $\varphi_{j,l,k}$  的内积,  $\overline{\varphi_{j,l,k}(x)}$  为  $\varphi_{j,l,k}(x)$  的共轭复数。

### 3.3 高频部分的双边滤波处理

人脸图像高频部分为  $L(x,y)$ ,则可以表示为:

$$L(x,y) = f(x,y) + n(x,y) \quad (15)$$

式中,  $f(x,y)$  表示有用信息,  $n(x,y)$  表示噪声信息。

双边滤波的目标就是消除  $n(x,y)$ ,对  $f(x,y)$  进行重建获取复原图像  $L(x,y)$  的像素值。

$$L(x,y) = \frac{\sum_{i,j \in s_{x,y}} w(i,j)g(i,j)}{\sum_{i,j \in s_{x,y}} w(i,j)} \quad (16)$$

式中,  $s_{x,y}$  为  $(x,y)$  的邻域,  $w(i,j)$  为其加权系数。

对邻域内每一个像素点  $g(i,j)$ ,  $w(i,j)$  定义为:

$$w(i,j) = w_s(i,j)w_r(i,j) \quad (17)$$

式中,  $w_s(i,j)$  为空间邻近度因子,  $w_r(i,j)$  为亮度相似度因子,可表示为:

$$\begin{cases} w_s(i,j) = e^{-\frac{|i-x|^2 + |j-y|^2}{2\sigma_s^2}} \\ w_r(i,j) = e^{-\frac{|g(i,j) - g(x,y)|^2}{2\sigma_r^2}} \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $\sigma_s$  和  $\sigma_r$  分别表示  $w_s(i,j)$  和  $w_r(i,j)$  的衰减程度。

双边滤波器较好地克服了单尺度 Retinex 算法中高斯滤波器的缺陷,较好地保持了边缘处的梯度,消除了图像中的噪声,保留了图像有用的细节。

### 3.4 低频部分的 Kimmel 变分处理

Kimmel 变分模型可以描述为:

$$\min F[L] = \int_{\Omega} (|\nabla L|^2 + \alpha|L-s|^2 + \beta|\nabla(L-s)|^2) dx dy \quad (19)$$

s. t.  $L \geq s$

式中,  $s$  和  $l$  分别表示原始图像和光照成分图像,  $\alpha, \beta$  是代价因子。

### 3.5 人脸图像的伽马校正

为了进一步增强图像效果,采用伽马校正对预处理后的图像全局增强,伽马变换公式为

$$R'(x,y) = c[R(x,y)]^{1/\gamma} \quad (20)$$

式中,  $c$  和  $\gamma$  为正值。

## 4 仿真实验

### 4.1 人脸数据库

为了验证本文算法在光照变化条件下的人脸图像增强效果,采用 Yale B 人脸库<sup>[14]</sup>进行仿真实验。Yale B 人脸数据库

包含 10 个人的 9 种姿态、64 种光照条件下的 5760 张图片,将其根据光照方向分成 5 个子集,具体如图 5 所示。



(a)子集 1(0°~12°)



(b)子集 2(13°~25°)



(c)子集 3(26°~50°)



(d)子集 4(51°~77°)



(e)子集 5(>77°)

图 5 Yale B 人脸图像

### 4.2 结果与分析

实验中,将本文方法与多种改进的 Retinex 算法进行比较,包括自适应 Retinex 算法<sup>[15]</sup>、基于视网膜模型的 Retinex 算法<sup>[16]</sup>和基于 mean shift 的 Retinex 算法(MFR)<sup>[17]</sup>。

#### 4.2.1 主观评价结果对比

分别从 Yale B 人脸数据库中 5 种光照子集的样本图像中各取出一幅图,组成样本集,如图 6(a)所示。在此样本集上执行以上 3 种改进 Retinex 算法和本文算法,处理后的结果分别如图 6(b)~图 6(e)所示。

可以看出,自适应 Retinex 算法能够很好地消除光照影响,呈现人脸主要轮廓,但存在噪声较大的问题。基于视网膜模型的 Retinex 算法和自适应 Retinex 算法效果类似,对于头发等强阴处的处理结果过于平滑,从而出现了模糊现象。基于 mean shift 的 Retinex 算法能够维持图像的连续性,且很好地消除了光晕现象,但处理后的图像真实感不强。本文算法处理后的图像消除了光晕,给出了清晰的人脸轮廓且图像连续自然,更加符合人眼视觉特性。

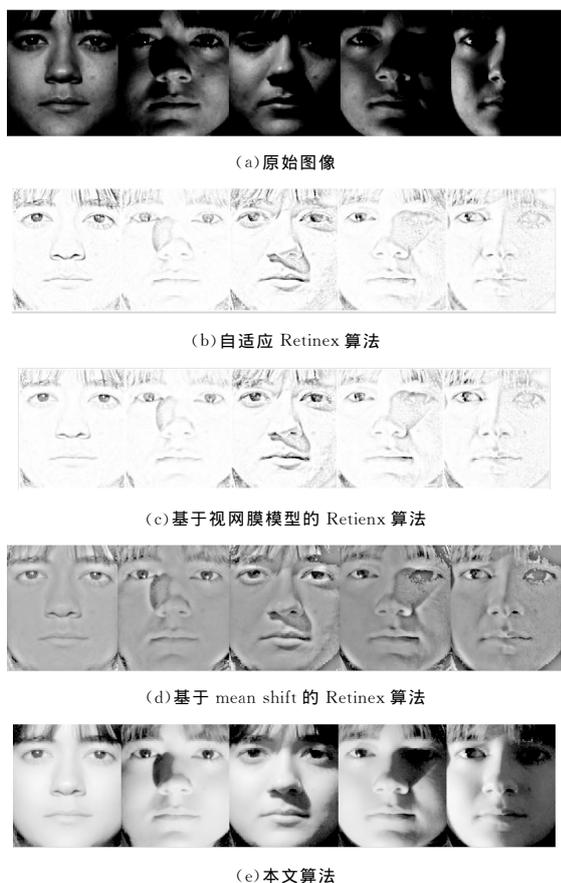


图6 各种算法处理后的对比图像

#### 4.2.2 客观评价对比

为了全面准确评价本文人脸图像增强算法的性能,采用亮度( $L$ )、对比度( $C$ )和色调( $H$ )作为客观评价标准,其定义为

$$L = \frac{\text{mean}(g_{out}(x,y)) - \text{mean}(g_{in}(x,y))}{\text{mean}(g_{in}(x,y))} \quad (21)$$

$$C = \frac{\text{var}(g_{out}(x,y)) - \text{var}(g_{in}(x,y))}{\text{var}(g_{in}(x,y))} \quad (22)$$

$$H = \frac{\text{mean}(H_{out}(x,y)) - \text{mean}(H_{in}(x,y))}{\text{mean}(H_{in}(x,y))} \quad (23)$$

式中, $g_{in}(x,y)$ 和 $g_{out}(x,y)$ 分别代表处理前和处理后的图像<sup>[18]</sup>。

上述3种算法和本文算法的亮度( $L$ )、对比度( $C$ )和色调( $H$ )的变化如图7所示。从图7可知,本文算法得到的图像亮度适中,色调保真度较好,较好地解决了传统Retinex算法存在的难题,获得了比较理想的人脸图像处理效果。

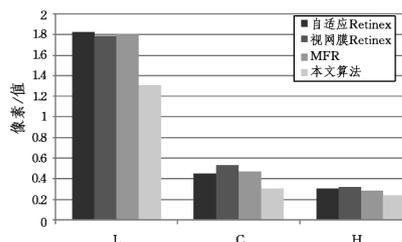


图7 各种算法的客观评价结果对比

#### 4.2.3 运行速度比较

在Yale B数据库中选择不同光照的图像集,其中图像数量分别为100,200,⋯,700幅。执行上述方法与本文方法,在处理所有图像所需时间方面进行比较,结果如图8所示。可

以看出,算法的运行总时间随着图像数量增加而线性增加,本文算法的处理速度最快,所需时间比目前最快的mean shift快速Retinex算法略少,但相比于自适应Retinex算法和基于视网膜模型的Retinex算法,大大缩短了运行时间,可以满足实时处理人脸图像的要求。

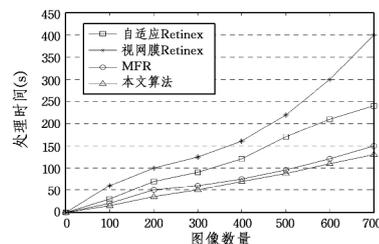


图8 4种算法的图像处理时间对比

**结束语** 在现实生活中,人脸图像在采集过程中经常遇到低光照、高光照的情况,导致人脸图像质量比较差,对后续人脸识别产生不利影响。为此,提出一种基于改进Retinex的光照变化人脸图像增强处理算法。结果表明,采用改进Retinex对人脸图像进行预处理后,人脸图像质量得以提高,有利于提高人脸图像识别率,该方法在人脸识别中具有广泛的应用前景。

#### 参考文献

- [1] Chen T, Yin Wo-tao, Zhou Xiang-sean, et al. Total variation models for variable lighting face recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(9):1519-1524
- [2] Cheng Yong, Zhao Chun-xia, Wang Huan, et al. Illumination Invariant and Face Recognition Based on NSCT and SQI[J]. Journal of Nanjing University of Science And Technology, 2010, 34(4):425-430(in Chinese)
- [3] 程勇,赵春霞,王欢,等.基于NSCT和SQI的光照不变量及人脸识别[J].南京理工大学学报(自然科学版),2010,34(4):425-430
- [4] Provenzi E, Gatta C, Fierro M, et al. A spatially variant white-patch and gray-world method for color image enhancement driven by local contrast[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(10):1757-1770
- [5] Tan X, Triggs B. Enhanced local texture feature sets for face recognition under difficult lighting conditions [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(6):1635-1650
- [6] Young K P, Seokl P, Joong K K. Retinex method based on adaptive smoothing for illumination base on adaptive smoothing for illumination invariant face recognition [J]. Signal Processing, 2008, 88:1929-1945
- [7] Xie Xiao-hua, Lai Jian-huang, Zheng Wei-shi, et al. Illumination Normalization of Human Face Based on the Second-Order Polynomial Model[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8):1791-1797(in Chinese)
- [8] 谢晓华,赖剑煌,郑伟诗,等.基于二次多项式模型的人脸光照归一化[J].电子学报,2010,38(8):1791-1797
- [9] Wang Xiao-ming, Fang Xiao-ying, Liu Jin-gao. Adaptive face image enhancement under complex illumination[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(2):15-18(in Chinese)
- [10] 王小明,方晓颖,刘锦高.可变光照下的自适应人脸增强[J].计算机工程与应用,2011,47(2):15-18

(下转第112页)

- [3] Shang Yi, Ruml W, Zhang Ying, et al. Localization from connectivity in sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2004, 15(11): 961-974
- [4] Vecchioa M, López R, Marcellonib F. A two-objective evolutionary approach based on topological constraints for node localization in wireless sensor networks [J]. Applied Soft Computing, 2012, 15(7): 1891-1901
- [5] Diana M, Javier D S, Sergio G, et al. On the design of a novel two-objective harmony search approach for distance- and connectivity-based localization in wireless sensor networks [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(2): 669-676
- [6] Kannan A A, Mao G, Vucetic B. Simulated annealing based wireless sensor network localization with flip ambiguity mitigation[C]// Proceedings of the 63rd IEEE Vehicular Technology Conference, 2006. Melbourne, Australia: IEEE Press, 2006: 1022-1026
- [7] Zhang Wei, Peng Li, Zhao Long. Aitken Iterative method used in the node positioning for wireless Sensor Network[J]. Mini-micro Systems, 2012, 33(2): 330-333(in Chinese)  
张炜, 彭力, 赵龙. Aitken 迭代法在无线传感器网络节点定位中的应用[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(2): 330-333
- [8] Chaurasiya V K, Jain N, Nandi G C. A novel distance estimation approach for 3D localization in wireless sensor network using multi dimensionalscaling[J]. Information Fusion, 2014, 15(1): 5-18
- [9] Priyadarshini K J, Ganesh A B. Improvisation of localization Algorithm for wireless sensor networks[J]. Procedia Engineering, 2012, 38(6): 1186-1191
- [10] Liu Yun-jie, Jin Ming-lu, Cui Cheng-yi. Modified weighted centroid localization algorithm based on RSSI for WSN [J]. Journal of Transduction Technology, 2010, 23(5): 717-721(in Chinese)  
刘运杰, 金明录, 崔承毅. 基于 RSSI 的无线传感器网络修正加权质心定位算法[J]. 传感技术学报, 2010, 23(5): 717-721
- [11] Zhao Ji-jun, Zhao Qing-wei, Li Zhi-hua, et al. An improved Weighted Centroid Localization algorithm based on difference of estimated distances for wireless sensor networks[J]. Telecommunication Systems, 2013, 53(1): 25-31
- [12] Nabil D, Otman B. Modeling the impact of observation conditions on localization systems[J]. Information Fusion, 2014, 15(1): 19-31
- [13] Han Y-H, Kim Y-H, Kim W-T, et al. An energy-efficient self-deployment with the centroid-directed virtual force in mobile sensor networks[J]. Simulation, 2012, 88(10): 1152-1165
- [14] Xu Qin, Wang Xu, Sun Wen-yuan. Virtual force oriented covering optimization strategy in wireless sensor networks[J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(3): 890-894(in Chinese)  
徐琴, 王旭, 孙文远. 虚拟力导向的无线传感器网络覆盖策略[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(3): 890-894
- [15] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobilerobots [J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98
- [16] Zou Yi, Chakrabarty K, Krishnendu C. Sensor deployment and target localization based on virtual forces[C]// Proceeding of the IEEE INFOCOM 2003. California: IEEE press, 2003: 1293-1303
- [17] Zhu Shou-hong, Ding Zhi-guo. Distributed Cooperative Localization of Wireless Sensor Networks with Convex Hull Constraint [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(7): 2150-2161

(上接第 108 页)

- [8] Jiang Ju-lang, Zhang You-sheng, Xue Feng, et al. Local Histogram Equalization with Brightness Preservation[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(5): 861-866(in Chinese)  
江巨浪, 张佑生, 薛峰, 等. 保持图像亮度的局部直方图均衡算法[J]. 电子学报, 2006, 34(5): 861-866
- [9] Song Shu-Lin, Zhang Yan, Wang Xian, et al. Illumination processing method based on Curvelet transform and Retinex[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(3): 171-173(in Chinese)  
宋书林, 张彦, 王宪, 等. 基于曲波变换和 Retinex 人脸光照处理算法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(3): 171-173
- [10] Li Fu-wen, Jin Wei-qi, Chen Wei-li, et al. Global Color Image Enhancement Algorithm Based on Retinex Mode[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(8): 947-951(in Chinese)  
李福文, 金伟其, 陈伟力, 等. 基于 Retinex 模型的彩色图像全局增强算法[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(8): 947-951
- [11] Yan Jun-xuan, Zhang Ke. HSI space based on luminance information in multi-Scale Retinex image enhancement algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(23): 31-33(in Chinese)  
闫骏宣, 张科. HSI 空间亮度信息的多尺度 Retinex 图像增强研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(23): 31-33
- [12] Wu Zhuang-zhi, Qi Li-na, Luo Pei. A Retinex Image Processing Framework Based on Estimation of Piecewise Smooth Illumination[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(3): 83-88(in Chinese)  
吴壮志, 齐立娜, 骆沛. 基于分片光滑照度估计的 Retinex 图像处理框架[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(3): 83-88
- [13] Cheng Yong, Hou Ying-kun, Zhao Chun-xia, et al. Robust face recognition based on illumination invariant in nonsubsampling Contourlet transform domain [J]. Neurocomputing, 2010, 73(10): 2217-2224
- [14] Sun J G, Li Y, Meng X F, et al. Improved monoscale Retinex and application in face recognition[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(12): 4790-4793(in Chinese)  
孙劲光, 李扬, 孟祥福, 等. 改进的单尺度 Retinex 及其在人脸识别中的应用[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(12): 4790-4793
- [15] Ge Wei, Li Gui-ju, et al. Face image illumination processing based on improved Retinex[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 1011-1020(in Chinese)  
葛微, 李桂菊, 等. 利用改进的 Retinex 进行人脸图像光照处理[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 1011-1020
- [16] Vu N, Caplier A. Illumination-robust face recognition using retina modeling [C]// 16<sup>th</sup> IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2009: 3289-3292
- [17] Elad M. On the bilateral filter and ways to improve it [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 11(10): 1141-1151
- [18] Fan Chun-nian, Zhang Fu-yan. Illumination Invariant Extracting Algorithm Based on Nonsubsampling Contourlet Transform[J]. Signal Processing, 2012, 28(4): 507-513(in Chinese)  
范春年, 张福炎. 基于非下采样 Contourlet 变换的光照不变量提取算法[J]. 信号处理, 2012, 28(4): 507-513