

文章编号 1004-924X(2018)05-1254-13

升余弦变增益微视觉图像自适应增强与应用

张翔^{1,2}, 张宪民^{1,2*}, 李海^{1,2}, 李凯^{1,2}

(1. 华南理工大学制浆造纸工程国家重点实验室, 广东广州 510641;

2. 广东省精密装备与制造技术实验室, 广东广州 510641)

摘要:微视觉系统中同轴光源和光学衍射的存在,使 CCD 相机获取的图像具有灰度值偏低、光照不均匀、动态范围大、对比度差以及微细结构丢失或无法辨识的缺陷。为改善图像质量,本文提出一种升余弦变增益子带分解微视觉图像自适应增强方法。该算法首先基于图像特性利用自适应 Log 增益对原图像进行增强,提高微视觉图像中亮暗区细节特征与背景的对对比度;接着使用自适应升余弦卷积进行快速照度估计;然后对各通道的输出图像采用自适应变增益子带分解算法获取独立光谱子带;最后进行亮度校正、图像融合与色彩恢复。将该算法用于微位移测量系统中可使测量结果的相对误差小于 20%;用于处理光照不均的图像可有效降低同轴光源靠近中心区域的亮度;此外,扩展至普通图像的处理中可提高对比度,改善细节特征。3 组实验结果的平均图像质量相对提高率为 81.46%, 71.18% 和 93.75%;平均耗时为 3.86 s, 0.24 s 和 1.27 s。

关键词:微视觉;图像增强;光照不均;升余弦;变增益

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182605.1254

Micro-vision image adaptive enhancement and application based on raised cosine variable gain

ZHANG Xiang^{1,2}, ZHANG Xian-min^{1,2*}, LI Hai^{1,2}, LI Kai^{1,2}

(1. State Key Lab of Pulp and Paper Engineering, Guangzhou 510641, China;

2. Guangdong Province Key Laboratory of Precision Equipment and Manufacturing Technology,
South China Univ. of Tech., Guangzhou 510641, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangxm@scut.edu.cn

Abstract: The micro-vision images captured by the CCD camera typically show low gray value, non-uniform illumination, large dynamic range, poor contrast and missed or unrecognized fine structure due to the coaxial light source and optical diffraction in micro-vision system. Based on the raised cosine and variable gain sub-band decomposition algorithm, a micro-vision image adaptive enhancement method was developed to improve the image quality in this work. First, on the basis of image characteristic, the original micro-vision image was enhanced by using adaptive Log gain function to improve the contrast between minutiae and background which located in bright or dark regions. Then, the fast illumination estimation was carried out in terms of the adaptive cosine convolution.

收稿日期:2017-10-16;修订日期:2017-11-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. U1501247, No. U1609206);华南理工大学制浆造纸工程国家重点实验室资助项目(No. 2017ZD06)

After that, the independent spectral sub-bands of the image in each channel were obtained through the adaptive variable gain sub-band decomposition algorithm. The ultimately enhanced image was generated after the implement of intensity correction, image fusion and color restoration. The algorithm had been successfully applied to a micro displacement measurement system and the relative error was less than 20%. Moreover, extended the algorithm to ordinary image processing can improve the contrast and minutiae. The relative increasing rates of the average quality of three experiments were 81.46%, 71.18% and 93.75%, respectively; and the average consuming time were 3.86 s, 0.24 s, and 1.27 s, respectively.

Key words: micro-vision; image enhancement; non-uniform illumination; raised cosine; variable gain

1 引言

随着纳米技术和精密工程领域的快速发展,越来越多的行业,如半导体集成电路制造、生物细胞、汽车设计、医疗卫生、航空航天、国防军事等对精密微动系统的使用逐渐增多,相应的测量目标也逐渐从宏观尺度转向微观尺度^[1-2]。在诸多位移测量方法中,由于光学显微成像技术与图像处理技术相融合的方法具有非接触、高精度,测量范围广,适应性强,便于集成以及能同时完成多自由度测量的优点已被广泛采用^[3]。

在亚微米级位移测量的任务中,常采用基于模板匹配原理的位移测量算法,如经典归一化互相关的测量算法^[4-5],圆投影匹配算法(Ring Projection Transform, RPT)^[6]以及一些组合衍生算法:如基于圆投影与方向码(Orientation Codes, OC)匹配算法^[7],圆投影与伪泽尔尼克矩匹配算法(Pseudo-Zernike Moment, PZM)^[8]等。国内的研究人员也提出了一些鲁棒的高精度平面微运动测量算法^[9-10]。以上测量算法的实现均以获取高质量的待测图像为前提。但受光学衍射极限的影响,待测图像中细小边缘或纹理特征经光学显微成像系统放大后,仅有微弱能量汇聚在CCD感光面,绝大部分能量被噪声掩盖,导致拍摄的图像整体模糊不清,细节丢失严重,灰度值偏低,对比度差^[11-12]。此外,在微视觉系统中,光源的选用常为LED同轴光源,使获取的图像以靠近

光源中心处最亮并逐渐向四周发散衰减。若将这些图像直接作为微位移测量的输入,将导致上述测量算法产生较大误差甚至误匹配,严重影响测量精度。

为提高待测图像质量,国内外学者针对普通图像中常出现的噪声干扰,对比度差以及光照不均等问题进行研究并提出了有效的增强方法,这些方法主要应用在人脸识别领域^[13-16];肤色识别领域^[17-18];以及夜间或有雾图像的增强^[19-22]。虽然微视觉图像与普通图像的本质都是数字图像,但由于同轴光源和光学衍射极限造成微视觉图像具有色彩单一,亮度不均,整体灰度值偏低,亮暗区中细节特征与背景间对比度差,信噪比低等缺陷,上述增强方法将不再适用。目前,仅有少数文章讨论了如何改善微视觉图像中的缺陷并提供了解决方法^[9, 11, 23]中分别使用了基本的同态滤波和Retinex算法且仅对光照不均的问题进行处理,虽在一定程度上改善了图像质量,但参数选择困难,结果图像中亮区发散,暗区细节特征模糊,高对比度边缘处产生光晕伪影等问题。

为有效地改善微视觉图像中的缺陷,本文提出了一种升余弦变增益子带分解微视觉图像自适应增强算法,并通过实验验证了所提出算法的正确性。

2 算法框架

Retinex理论最早由Land等提出^[24],之后衍

生出单尺度 Retinex (SSR)^[25], 多尺度 Retinex (MSR) 和带有色彩恢复的多尺度 Retinex (MSRCR) 等经典算法^[26], 以上方法已被广泛应用于光照不均补偿、低对比度等问题的处理中。其中, MSRCR 算法是 SSR 算法和 MSR 算法的扩展, 能有效地压缩图像的动态范围, 增强局部对比度, 保持色感一致性, 其表达式为:

$$\log R_{\text{MSRCR}_i}(x, y) = C_i(x, y) \cdot \log R_{\text{MSR}_i}(x, y), \quad (1)$$

式中: $C_i(x, y) = a \log \left[b \frac{\log R_{\text{MSR}_i}(x, y)}{\sum_{i \in \{R, G, B\}} \log R_{\text{MSR}_i}(x, y)} \right]$ 表

示色彩恢复的权重系数函数, a 和 b 为常数。 $\log R_{\text{MSR}_i}(x, y)$ 为 MSR 算法的输出, 如式 (2) 所示:

$$\log R_{\text{MSR}_i}(x, y) = \sum_{n=1}^N \omega_n \cdot \log R_{n_i}(x, y), \quad (2)$$

式中: N 为尺度数目, ω_n 为第 n 个尺度的权重, $\log R_{n_i}(x, y)$ 为 SSR 算法在第 n 个尺度下的输出, 即为:

$$\log R_i(x, y) =$$

$$\log I_i(x, y) - \log [I_i(x, y) * F(x, y)], \quad (3)$$

式中: $I_i(x, y)$ 为原始图像的亮度, “*” 为二维卷积, $F(x, y)$ 为环绕函数, 一般地采用二维高斯函数, 即:

$$F(x, y) = K e^{-\frac{(x^2 + y^2)}{\sigma_n^2}}. \quad (4)$$

由式 (3) 中的卷积项可知, 该算法中的照度估计仅根据像素点周围空域信息, 即按照像素点位置的远近程度分别赋予不同的权重进行计算, 并没有综合考虑像素点的灰度域信息, 从而导致具有高对比度边缘处的细节信息丢失。为此, 提出了一种高性能微视觉图像增强算法, 具体实现过程为: 首先利用自适应 Log 增益将原图像转至对数域; 接着, 使用自适应升余弦卷积估计原始图像的照度; 然后通过自适应增益子带分解和校正算法得到最后的增强结果, 具体实现过程如图 1 所示。

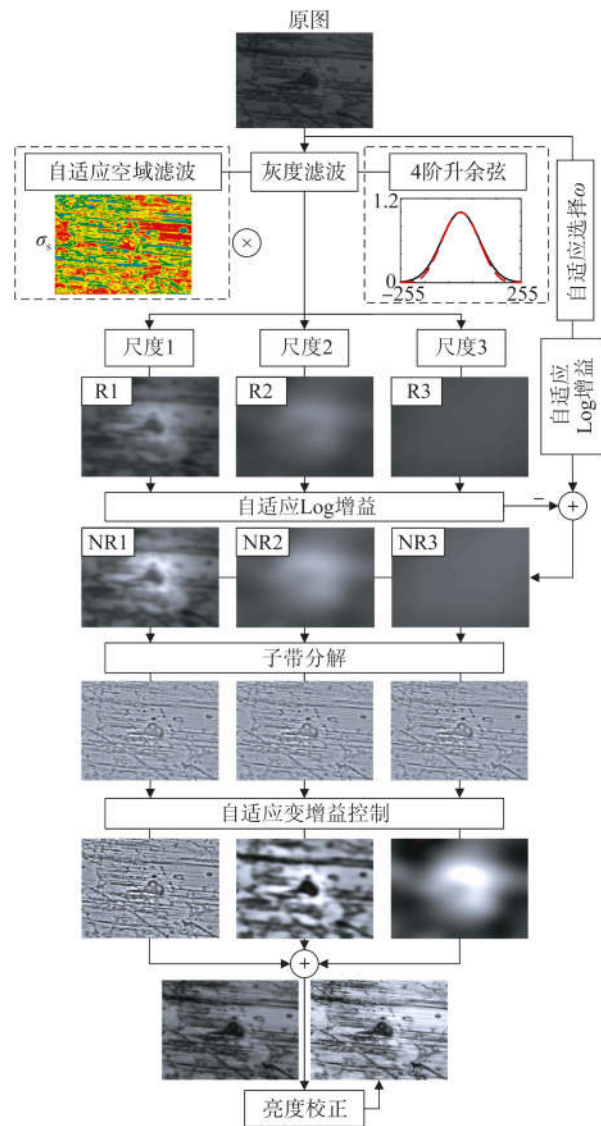


图 1 微视觉图像增强算法的流程图

Fig. 1 Flow chart of micro-vision image enhancement

3 算法实现

在 MSRCR 算法的基本架构上引入自适应变增益子带分解、自适应升余弦卷积以及亮度校正算法来实现微视觉图像的增强, 具体描述如下。

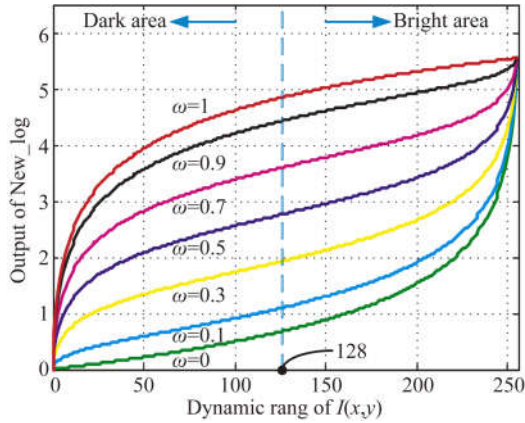
3.1 自适应变增益子带分解

3.1.1 自适应 Log 增益

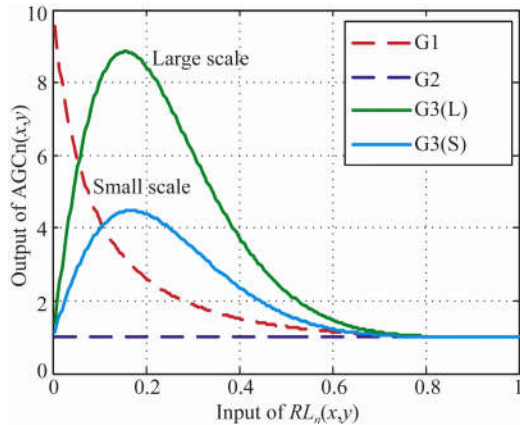
Retinex 理论中常用的 Log 函数仅能部分改善图像暗区中的细节, 而忽略了高亮区中的特征, 导致图像中无用信息丢失, 因此提出一种新的自适应 Log 增益:

$$\begin{cases} \text{New_log}(I) = \omega I_1 + (1 - \omega) I_2 \\ I_1 = \log(I + 1) \\ I_2 = \log D - \log(D - I) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: New_log 为改进后的自适应 Log 增益, ω 为权重系数, I, I_1, I_2 为图像的强度, D 为图像的动态范围, 取值 255。



(a) 自适应 Log 增益
(a) Adaptive Log gain



(b) 子带增益
(b) Sub-band gain

图 2 增益函数

Fig. 2 Gain function

图 2(a) 表示自适应 Log 增益的输出特性曲线, 可以看出: 当 $\omega = 1$ 时, 式(5)即为一般的 Log 函数, 随着该值的降低, 其输出特性表现为暗区增强逐渐削弱, 亮区压缩逐渐增大。在某一图像中, 为了能够根据图像特性选取合适的 ω 值, 提出了自适应的选择方法, 描述如下:

$$\omega = \frac{1}{2} (Lsd + Lsc), \quad (6)$$

式中: Lsd 表示局部标准差评价项, Lsc 为归一化

有用度评价项, 具体表示为:

$$\begin{cases} Lsd = \frac{1}{N_1} \sum_{(x,y) \in \Omega} \left\{ \frac{Lsd_1(x,y)}{Lsd_1(x,y) + Lsd_2(x,y) + \varphi} \right\} \\ Lsc = \frac{1}{N_1} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{(x,y) \in \Omega}^{m \in [1,2]} [S_m(x,y) * C_m(x,y)] \right\} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: N_1 表示图像中像素点总数, (x, y) 为 I_1 和 I_2 的像素点坐标。在局部标准差评价项中, Lsd_1 和 Lsd_2 分别为在 (x, y) 位置处 3×3 邻域内的局部标准差, φ 为大于零的微小量; 在归一化有用度评价项中, S_m, C_m 分别表示 I_1 和 I_2 的饱和度与对比度, 其细节描述如下:

$$\begin{cases} S_m = \text{sqrt}[(R - \mu)^2 + (G - \mu)^2 + (B - \mu)^2] \\ C_m = |I_m * F_{\text{mean}}| \end{cases}, \quad (8)$$

式中 F_{mean} 表示 5×5 的均值滤波器。

3.1.2 子带分解

MSRCR 算法中不同通道图像的输出具有部分相同的光谱范围, 直接进行增强会使重叠区信息冗余导致结果较差, 因此采用子带分解法降低光谱中的相似度^[27]:

$$\begin{cases} R'_1 = R_1, (n=1) \\ R'_{SD(n)} = R'_n - R'_{n-1}, (2 \leq n \leq N) \end{cases}, \quad (9)$$

式中: $R'_{SD(n)}$ 表示第 n 个子带分解后的图像, $R'_n = \text{New_log}(I) - \text{New_log}(I * RC_n)$, RC_n 为自适应升余弦卷积, 具体在 3.2 节介绍。

3.1.3 变增益控制

由 MSRCR 算法中对各通道输出值采用常数增益的思想, 结合图像特征, 对 3.1.2 节中 $R'_{SD(n)}$ 进行变增益控制, 即对图像中具有细节纹理特征区域采用大尺度增益控制, 而对平滑区使用小尺度增益控制。所提出的变增益控制函数的表达式为:

$$G_n = [\beta + \eta_1 \cdot RL_n \cdot \exp(-\eta_2 \cdot RL_n^2)]^{1-s'_n}, \quad (10)$$

式中: G_n 表示变增益控制函数的输出, η_1 与 η_2 分别控制函数沿 y 轴和 x 轴的增强尺度, β 为常数, RL_n 为子带分解后归一化的输出, 即 $RL_n = \frac{|R'_{SD(n)}|}{|\max(R'_{SD(n)})|}$, s'_n 为归一化的尺度常量, 即 $s'_n = \frac{s_n}{s_{\max} + s_\sigma}$, s_σ 为常量。

变增益控制函数的输出特性曲线如图 2(b) 所示, 其中 G1 表示文献[27]中使用的增益函数,

该函数对图像中细节纹理区的特征增强较好,但图像平滑或边缘区易产生过增益;G2 为 MSRCR 中使用的常数增益(这里取值为 1),即对图像不同区域使用相同的增益处理;G3 为本文中所提出的变增益控制函数,根据经验值取 $\eta_2 = 10$,通过改变 η_1 的值得到不同尺度的增益函数曲线。本文中规定, $\eta_1 < 60$ 时使用小尺度增益函数,反之则使用大尺度增益函数。

3.2 自适应升余弦卷积

由 3.1.2 节所述,本文采用基于双边滤波的自适应升余弦卷积进行照度估计,双边滤波器的表示如下^[28]:

$$\tilde{f}(x) = \delta^{-1} \int_{\Omega} \varphi_{\sigma_s}(y) \varphi_{\sigma_r} [f(y) - f(x)] f(y) dy, \quad (11)$$

式中: $\delta = \int_{\Omega} \varphi_{\sigma_s}(y) \varphi_{\sigma_r}(f(y) - f(x)) dy$, Ω 为局部区域, $\varphi_{\sigma_s}(\cdot)$ 和 $\varphi_{\sigma_r}(\cdot)$ 分别表示空域与灰度域高斯核函数, σ_s 和 σ_r 为各自的标准差。在图像平滑区, $[f(y) - f(x)]$ 的局部标准差小, $\varphi_{\sigma_r}(\cdot)$ 的灰度域接近 1, 此时 $\varphi_{\sigma_s}(\cdot)$ 起主导作用;在高对比度边缘处, $[f(y) - f(x)]$ 的局部标准差大, $\varphi_{\sigma_s}(\cdot)$ 主导作用降低,从而实现了保边滤波。该算法的复杂度为 $O(\sigma^2)$, 再加上 MSRCR 算法中需要处理图像的 3 个通道,耗时太大,因此参考文献[29]中,利用升余弦函数代替 $\varphi_{\sigma_r}(\cdot)$ 中的高斯函数并自适应地选择空域标准差,从而实现对经典双边滤波算法的加速。则式(11)中的灰度域高斯核函数可重新写为:

$$\varphi_{\sigma_r}(s) = [\cos(\lambda s)]^N, \quad (12)$$

式中: $\lambda = \pi/2T$, $N = (2, 3, \dots, 7)$, $s \in [-T, T]$, T 为灰度范围,一般取 255。

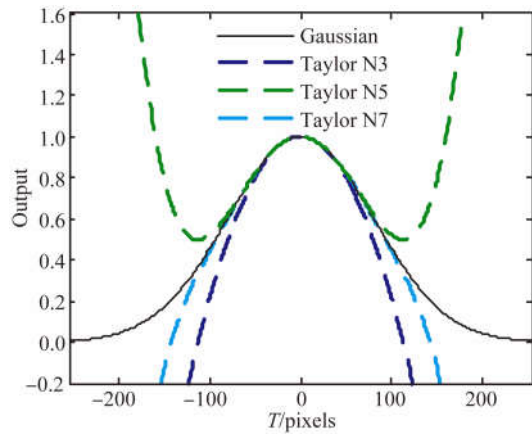
由欧拉公式 $\cos\theta = (e^{j\theta} + e^{-j\theta})/2$ 和二项式展开定理可推导出下式:

$$\varphi_{\sigma_r}(s) = [\cos(\lambda s)]^N = \sum_{n=0}^N 2^{-N} \binom{N}{n} \exp(i(2n - N)\lambda s). \quad (13)$$

当 N 值足够大时,有式(14)成立:

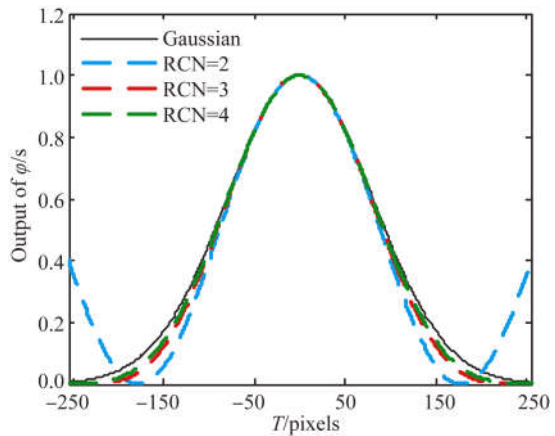
$$\lim_{N \rightarrow \infty} (\cos \theta)^N = \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2 \lambda^{-2}}\right] = \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right], \quad (14)$$

式中: $\theta = \frac{\lambda s}{\rho \sqrt{N}}$, $\rho = \lambda \sigma$, $\cos(\cdot)$ 的定义域为 $[-\pi/2, \pi/2]$, 即为升余弦函数。



(a) 高斯函数的泰勒多项式

(a) Taylor polynomials of Gaussian



(b) 升余弦函数

(b) Raised cosing function

图 3 高斯函数的近似

Fig. 3 Approximation of Gaussian function

不同类型的函数对高斯函数的近似情况如图 3 所示,其中图 3(a)为高斯函数多阶泰勒展开的输出特性曲线,虚线表示第 3 阶、第 5 阶与第 7 阶展开式;图 3(b)为多阶升余弦函数的输出特性曲线,虚线分别表示其第 2 阶、第 3 阶与第 4 阶。高斯函数的多阶泰勒展开与升余弦函数均可在一定程度上逼近高斯函数,但随着阶数的增大,后者表现出更优秀的逼近特性,同时也验证了使用升余弦函数代替高斯函数的正确性。联立式(13)与欧拉公式,式(11)变为:

$$\begin{aligned} \tilde{f}(x) &= \delta^{-1} \int_{\Omega} \varphi_{\sigma_s}(y) \varphi_{\sigma_r} \cdot \\ &([\cos(\lambda(f(y) - f(x)))]^N) f(y) dy = \\ &\delta^{-1} \sum_{n=0}^N 2^{-N} \binom{N}{n} (\cos \alpha + i \sin(-\alpha)) * \\ &\int_{\Omega} \varphi_{\sigma_s}(y) (\cos \alpha + i \sin(-\alpha)) f(y) dy, \quad (15) \end{aligned}$$

式中: $\alpha = -(2n - N) \cdot \theta f(x)$, 综合考虑算法的复杂度, 这里取 $N=4$, 并结合快速 $O(1)$ 算法实现灰度域滤波的加速^[30]。

而对于空域高斯核函数, 其参数 σ_s 的取值直接影响对图像的降噪效果, 纹理细节的保持程度和计算量的大小。因此, 提出一种基于尺度因子, 结合图像中平滑区和纹理边缘区的特征, 对 σ_s 进行自适应地取值方法。

尺度因子随图像特征的不同而变化, 在细节与纹理区域较小, 平滑区域较大, 在二维图像中可定义为以任意像素点为中心, 在规定半径内的所有像素点的集合为同一尺度^[31]。这里定义相似性函数为:

$$L(c) = \frac{\sum_{d \in S_r(c)} F(|f(c) - f(d)|)}{|\Delta S_r(c)|}, \quad (16)$$

式中: F 表示高斯函数, c 和 d 分别为邻域 S 的中心点坐标和非中心点坐标, 分母为邻域边界像素的总个数, 具体表示如下:

$$\begin{cases} \Delta S_r(c) = |S_r(c) - S_{r-1}(c)| \\ S_r(c) = \{(x_c, y_c) \mid |x_c - x_d| \leq r, |y_c - y_d| \leq r\} \end{cases}, \quad (17)$$

式中: (x_c, y_c) 为以图像中任一像素点为中心的坐标, (x_d, y_d) 是邻域半径 r 内的像素坐标, $\Delta S_r(c)$ 为边界像素点的总数, 得到尺度因子的表达式为:

$$R_r(c) = \max\{L_r(c) \geq T\}, \quad (18)$$

式中 $T=0.875$ 为阈值。求出尺度因子后, 由式(19)计算 σ_s :

$$\sigma_s = k \cdot R_r(c), \quad (19)$$

式中 k 为常量, 这里取 0.25。

如图 4 所示为图像中 σ_s 取值的分布情况, 其中图 4(a) 为光刻掩膜版的微视觉图像, 图 4(c) 为标定块中线条纹的微视觉图像, 图 4(b) 和图 4(d) 为各自 σ_s 的取值在 HSV 颜色空间中的分布, 可以看出: 图像平滑区域的 σ_s 取值较小, 此时的式(11)滤波效果增强, 而在纹理边缘区域 σ_s 的取值较大, 使其更好地保留图像中的细节。

3.3 亮度校正

完成上述所有步骤得到的微视觉图像受子带分解的影响使输出图像中平滑区域呈现局部亮度不均, 故需添加亮度校正环节。

如果两图像间色彩恒定且仅存在亮度差异, 则这两幅图像 RGB 三通道中各像素点的值线性

相关。若对每个像素进行相同的线性拉伸, 则很容易使得结果图像呈现整体的过亮或过暗, 大量的细节特征丢失, 所采用的线性拉伸因子如下:

$$\Delta(x, y) = \frac{\rho \sin(\pi \cdot V(x, y)) \cdot R'_n(x, y)}{V(x, y)}, \quad (20)$$

式中: ρ 表示比例因子, $V(x, y)$ 表示 HSV 空间中原图像的归一化亮度, $R'_n(x, y)$ 通过式(9)得到。将该因子与式(10)中 G_n 相乘可得最终增强的图像。

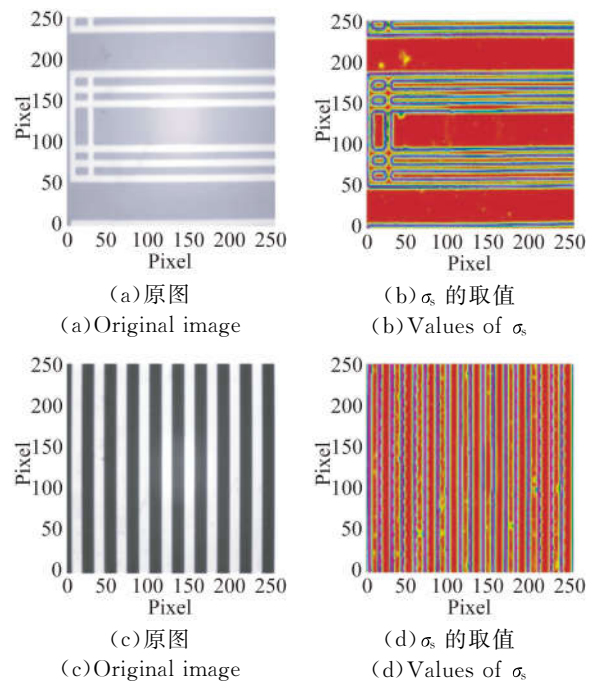


图 4 σ_s 的取值分布

Fig. 4 Distribution of σ_s

4 算法的应用

将本文算法应用于微视觉图像和普通图像增强中, 并进行了 3 组不同场景的实验, 从而验证该算法的良好性能。其中, 4.1.1 节为应用在柔顺定位平台微位移测量的预处理过程中, 4.1.2 节为应用在光照不均标定块中线条纹的增强, 4.2 节为应用在普通低对比度图像的增强。实验所使用的计算机基本信息为: Windows 10, 64 位操作系统, Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ CPU @ 2.60 GHz 8.00 GB (RAM), 软件平台为 MATLAB R2014a, 未使用 GPU 加速。

4.1 微视觉图像增强

4.1.1 微位移测量中的增强

首先驱动压电陶瓷使柔顺定位平台沿水平方向运动,单次步长为 $0.2 \mu\text{m}$,共移动 6 次。其次利用微视觉系统(如图 5 所示)拍摄柔顺定位平台每次进给后的图像,如图 6 所示(图像大小为 $1\ 624 \text{ pixel} \times 1\ 234 \text{ pixel}$)。然后使用本文算法和几种经典算法分别对所获取的图像进行预处理并根据文献[5]中所述的方法完成位移的测量,最后分析这些算法对测量精度的影响。

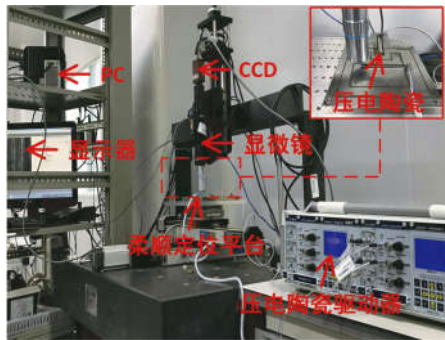


图 5 微视觉测量系统

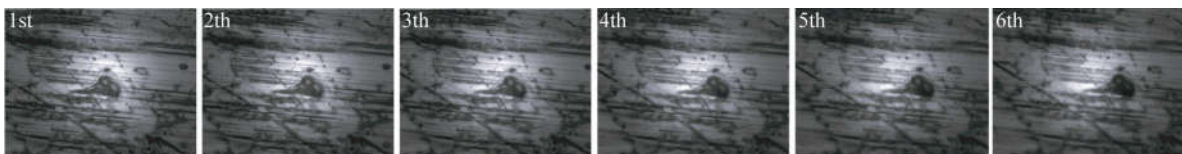
Fig. 5 Measurement system of micro-vision

为了便于说明,仅以图 6(a)中“1st”作为待处理图像,使用所提出的算法与图 6(b)中的 10 种经典算法的增强结果进行对比。所选取的经典算

法可分为三类,第一类为基于灰度变换的算法:直方图均衡(HE),直方图双向均衡(BHE),Gamma 灰度校正(GIC)和对数变换(LT);第二类为基于反射场估计的算法:单尺度 Retinex(SSR),MSR,MSRCR,文献[27]中的算法(SD-MSR)和基于同态滤波的算法(HOMF);第三类为基于梯度或边缘提取的方法:双向梯度法(GD)。

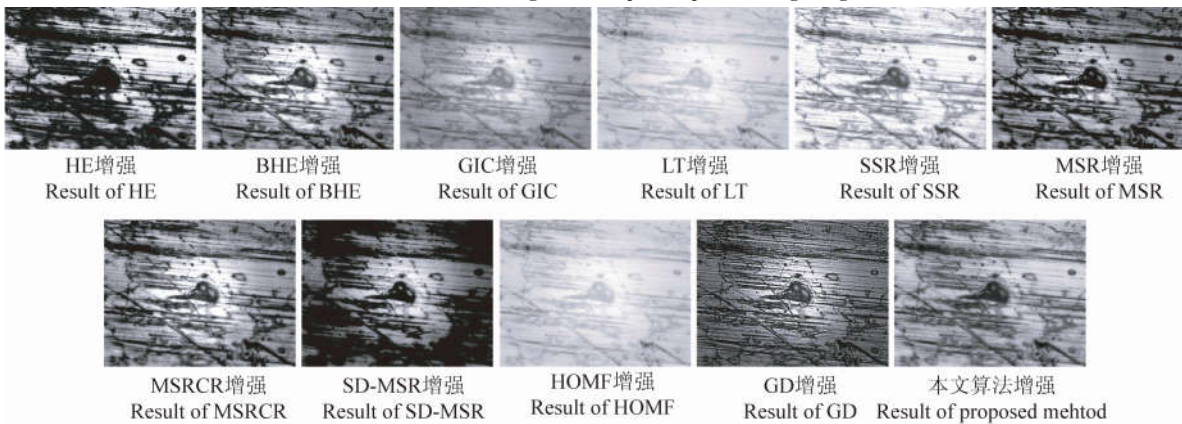
由图 6(b)可以看出:HE 与 SD-MSRCR 算法使得图像中四周区域中出现特征粘连,边缘特征被腐蚀,有效信息减少;BHE、MSR、MSRCR 和 GD 算法无法有效地降低微视觉图像中光照不均的影响,视场中心处的亮度值仍较大,且图像边界处灰度值偏低,对比度差;GIC、LT、SSR 和 HOMF 算法的增强结果使得微视觉图像整体灰度值偏高,微视觉图像被“漂白”,丢失大量的图像特征与边缘信息。本文算法的处理结果基本消除了光照不均的问题,而且结果图像中整体灰度值分布均匀,图像四周边界处的特征也被成功保留,视觉效果良好。

为了客观地说明算法的增强效果,选取性能较好的 NIQE^[32],无参考峰值信噪比(NR-PSNR)^[33]和 SSEQ^[34]作为无参考图像质量评价指标,采用均值、信息熵和标准差作为辅助评价指标。



(a) 柔顺定位平台的显微视觉图像

(a) Micro-vision image of compliant positioning stage



(b) 1st 显微视觉图像的增强

(b) Enhancement of 1st micro-vision image

图 6 实验结果

Fig. 6 Experimental results

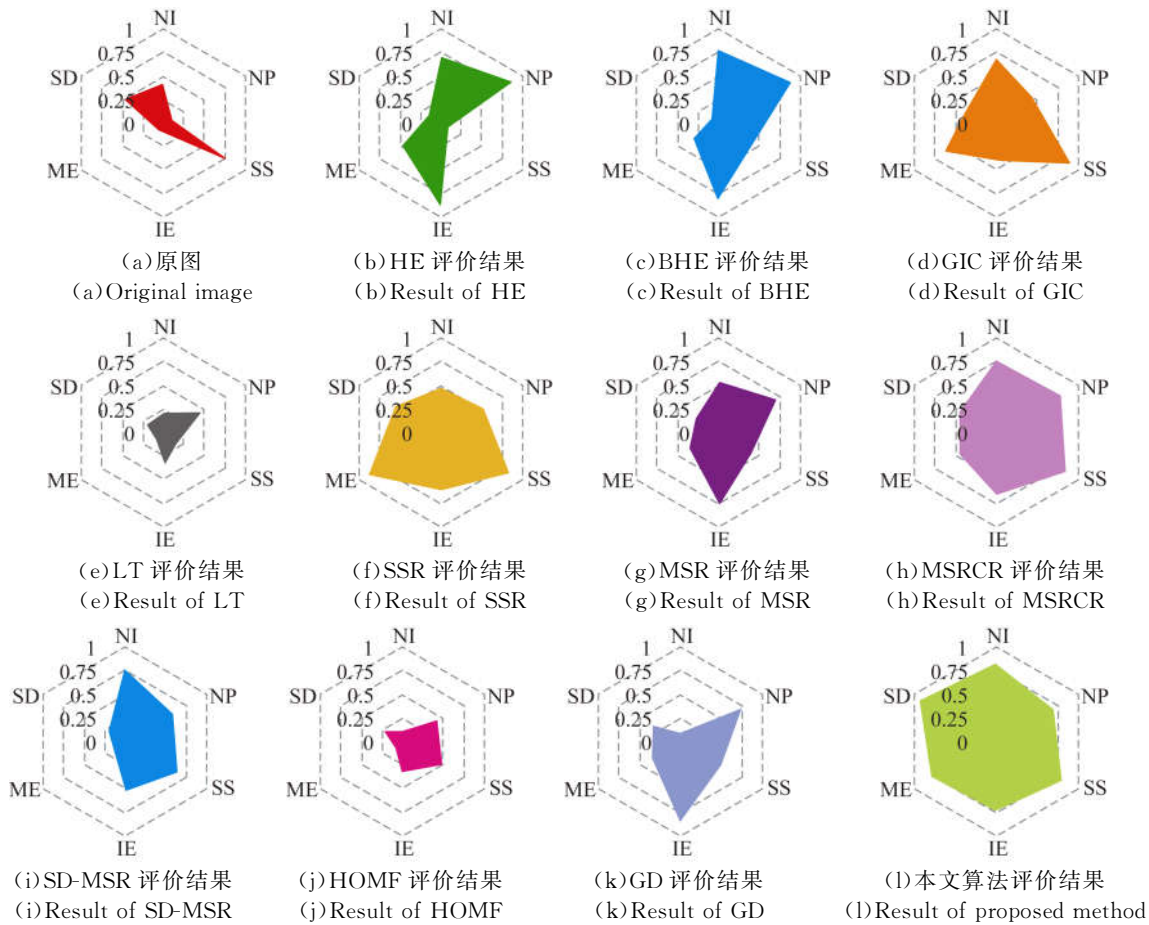


图 7 微视觉图像的质量评价

Fig. 7 Quality evaluation of micro-vision image

分别计算图 6(a)中每幅图像的 6 种质量评价指标并将计算结果归一化后取平均值,结果如图 7 所示,其中 NI 表示 NIQE, NP 为 NR-PSNR, SS 为 SSEQ, ME 为均值, IE 为信息熵, SD 为标准差,对应指标的值越接近 1 则说明图像在该评价指标下的效果越好,反之则越差。由图 7 可知,采用本文算法增强后图像的各项质量评价指标相对于原图都有显著地提高,NI 与 SD 的值分别为 0.83 和 0.90,均近似为 1,其余各项指标也相对均衡,增强效果良好。而其余 10 种经典算法中总有几种指标的数值低于 0.5,增强效果不均衡,例如 SD-MSR 算法中的均值和标准差很小,说明采用此算法增强后微视觉图像存在整体偏暗且对比度差的情况。为定量地说明算法相对于原图像的改善程度,提出图像质量相对提高率作为参考因子,具体定义为:

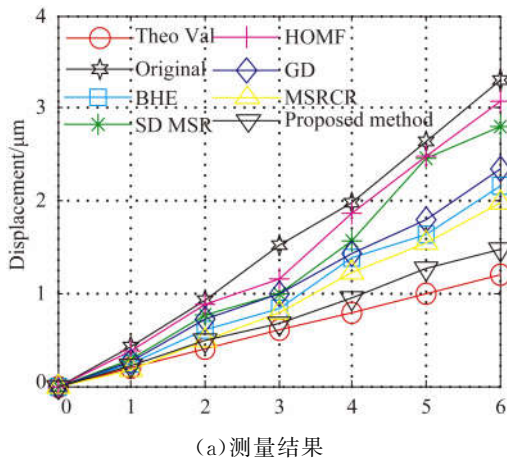
$$rate = \left| \frac{1}{N_2} \sum_{k \in [1,2 \dots 6]}^{j \in [2 \dots N_2]} QI_{j,k} - \Phi \right| / \Phi, \quad (21)$$

式中: $\Phi = \frac{1}{N_2} \sum_{k \in [1,2 \dots 6]}^{j=1} QI_{j,k}$, N_2 表示图像质量评价指标的总数, $QI_{j,k}$ 为第 j 幅图像的第 k 个图像质量评价指标的值。所有算法的运行时间与图像质量相对提高率如表 1 所示,可以看出本文算法的平均图像质量相对提高率居首为 81.46%,且运行时间适中为 3.86 s,相比于 SD-MSR 算法提高了 4.32 s。

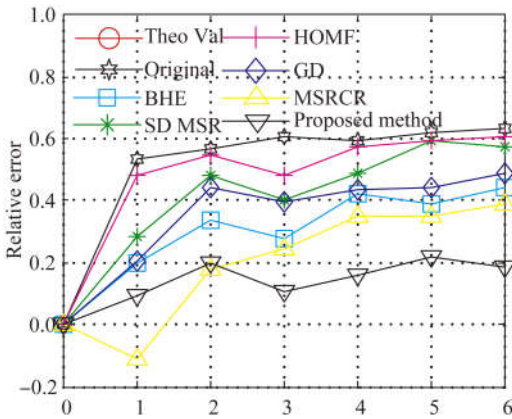
表 1 耗时与图像质量相对提高率对比

Tab. 1 Comparison of time consuming and image quality relative increasing rate

算法	耗时/s	提高率/%	算法	耗时/s	提高率/%
HE	15.7	25.23	MSRCR	8.04	52.47
BHE	0.47	28.73	SD-MSR	8.18	11.49
GIC	0.28	23.64	HOMF	3.90	8.00
LT	0.10	17.70	GD	0.82	34.94
SSR	3.70	43.76	本文方法	3.86	81.46
MSR	4.99	48.65	—	—	—



(a) Measurement result



(b) Relative error

(b) Relative error

图 8 测量结果

Fig. 8 Measurement result

将增强后的图像作为输入并完成后续的位移测量,结果及相对误差如图 8 所示,其中 Theo Val 表示位移的理论输出值,Original 为未经过图像增强算法直接使用微视觉系统所拍摄的图像进行测量的位移值。由图 8 可知,在基于微视觉图像进行高精度位移测量时,采取合理的图像增强算法是必要的,不同的增强算法对测量结果的影响也均不相同,利用所提出的算法进行预处理后使得测量结果更接近理论值,且相对误差控制在 20% 以内。因此,所提出的算法能够显著改善微视觉图像中的缺陷,提升图像的质量。

4.1.2 光照不均条件下的增强

根据微视觉系统中 LED 同轴光源的照明特点,首先建立高斯光照模型,其次调整该模型参数,将不同光照强度与光照范围融入到测试图像中,最后使用所提出的算法进行图像处理并分析

结果。高斯光照模型的形式为:

$$L = \tau + \frac{n}{2\pi r} \exp\left[-\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{r^2}\right], \quad (22)$$

式中: τ 为常量,这里取 1.5, x_c 、 y_c 分别表示 LED 同轴光源的中心坐标, n 和 r 为尺度因子,分别控制高斯光照模型的光强尺度和光照范围尺度。

表 2 结果对比

Tab. 2 Result comparison

算法	耗时/s	提高率/%
$n=1\ 200, r=120$	0.24	92.17
$n=900, r=80$	0.24	75.43
$n=900, r=120$	0.24	66.88
$n=900, r=50$	0.25	50.12
均值	0.24	71.18

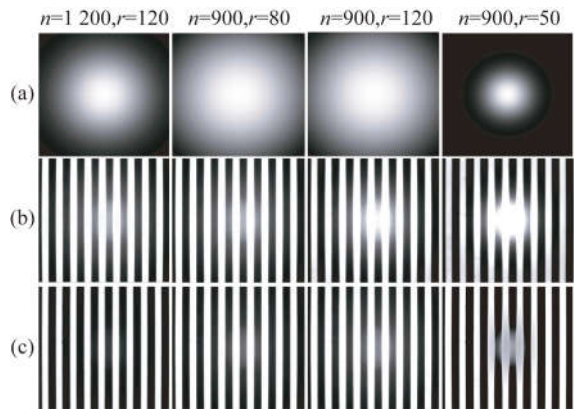


图 9 不同参数下的光照分布

Fig. 9 Illumination distribution with different parameters

不同参数下的光照分布情况如图 9 所示,图像大小均为: $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 其中 (a) 行表示同轴光源的光照模型, (b) 行是将光照模型与图 4(c) 融合后的图像, (c) 行是采用所提出算法的处理结果。同样的采用 4.1.1 节中的 6 参数质量评价指标对图 9 中的图像进行质量评价,结果如表 2 所示,可以看出本文算法能够有效地弱化光照不均的影响,降低同轴光源靠近中心处的高亮度。算法的平均耗时约为 0.24 s, 最大图像质量相对提高率为 92.17%, 发生在 $n=1\ 200, r=120$ 时。但随着尺度因子的改变,如光照范围尺度小而光强尺度较大,即 $n=900, r=50$ 时,该算

法对光照不均的改善效果也会变差。

4.2 普通图像增强

本文所提出的算法主要应用于微视觉图像的增强中,也可以扩展用于普通低对比度图像的增强。本节中选取 3 幅低对比度图像,分别为

“Light House”、“White House”、“Ferrari”为待测对象(图像尺寸均为 259 pixel × 400 pixel × 3 pixel,如图 10(a)所示)进行实验与分析,并与 4.1.1 节中所使用的 10 种经典算法的增强结果进行对比。



图 10 不同算法的增强结果

Fig. 10 Results of different algorithms

由图 10(b)~(l)可知,这些算法均在一定程度上改善了原图像的质量,但增强效果各不相同。以“Light House”为例,其主观分析如下:HE 和 BHE 算法对原图像中的房子和白塔有一些增强效果,由于在均衡化的过程中不可避免地会产生灰度级合并从而导致图像四周边缘部分的低对比度区域细节形貌丢失,天空和草地的颜色偏黄,色彩失真。GIC 和 LT 利用非线性变换函数增强原图像,导致图像的整体灰度值同时拉伸或压缩,而

不能根据图像中不同区域的特性进行自适应变化,如参数选取不当则会使图像产生灰度化,甚至引入大量噪声。SSR、MSR 和 MSRCR 算法在图像暗区细节增强和对比度改善程度较第一类方法好,但由于在估计照明分量时只根据像素点的位置信息来确定权重因子,因此在高对比度区域如白塔的边缘均出现了光晕伪影。SD-MSR 算法虽然也利用了图像的频带特征,但经过大量实验发现该算法对灰度图像的处理效果较好,对于彩

色图像的增强出现严重的色彩丢失,无法达到满意的效果。HOMF 算法将图像转至对数域,有效地增强图像暗区中的细节和对比度,但由于受低通滤波器参数选择的影响,该算法的处理结果很容易使图像模糊不清,很多边缘特征丢失。GD 算法增强了原图像中边缘区域的对比度,但整幅图像亮度较低,暗区中细节仍难以辨识。如图 10(1)所示的为本文算法的增强结果,“Light House”测试图中的房子、天空、白塔、草地以及处在暗区中的汽车等物体均被清晰地呈现出来,对比度显著提升,视觉效果良好,色彩丰富,增强后的图像在高对比度边缘处未产生光晕伪影现象。

表 3 耗时与图像质量相对提高率对比

Tab. 3 Comparison of time consuming and image quality relative increasing rate

算法	耗时/s	提高率/%	算法	耗时/s	提高率/%
HE	0.12	41.67	MSRCR	1.93	65.00
BHE	0.25	55.42	SD-MSR	2.55	13.75
GIC	1.07	3.75	HOMF	0.27	6.67
LT	0.04	19.58	GD	0.07	5.83
SSR	1.26	32.92	本文方法	1.27	93.75
MSR	1.77	36.25	BF	2.69	—

注:BF 为本文算法在照度估计时使用经典双边滤波的总耗时。

使用 6 参数质量评价指标对图 10 中三组图像进行质量评价并取均值,结果如表 3 所示,可以看出所提出算法的平均图像质量相对提高率居首为 93.75%,且运行时间适中为 1.27s,相比于 BF 算法提高了 1.42 s。

参考文献:

- [1] 王先逵. 广义制造论 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 86-94.
WANG X K. Broad manufacturing theory [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(10): 86-94. (in Chinese)
- [2] 王先逵. 现代制造技术及其发展趋向 [J]. 现代制造工程, 2008(1): 1-8.
WANG X K. Modern manufacturing technology and its development [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2008(1): 1-8. (in Chinese)
- [3] GUO T, MA L, BIAN Y. MEMS characterization

5 结 论

本文针对微视觉图像中易出现的光照不均,动态范围大,灰度值偏低,亮区特征丢失,暗区细节难以辨识,对比度差等问题,提出一种升余弦变增益子带分解微视觉图像自适应增强算法。首先介绍了自适应 Log 增益,将图像转至对数域,

接着使用基于双边滤波的自适应升余弦卷积算法进行照度估计,然后对各通道的输出采用自适应变增益子带分解算法获取独立光谱子带;最后进行色彩恢复、图像融合与亮度校正。将本算法分别应用在 3 组不同场景的实验中,其中第 1 组为将该算法作为预处理环节应用在柔顺定位平台微位移的测量任务中可使测量结果的相对误差小于 20%,图像平均质量相对提高率为 81.46%,运行时间适中为 3.86 s,相比于 SD-MSR 算法提高了 4.32 s;第 2 组为使用本算法对受同轴光源影响的标定块线纹图像进行增强,结果表明光照不均现象被弱化,同轴光源靠近中心区域的亮度降低,平均耗时约为 0.24s,平均图像质量相对提高率为 71.18%;第 3 组为本算法的扩展实验,应用于普通低对比度图像的增强,图像平均质量相对提高率为 93.75%,耗时 1.27 s,相比于 BF 算法提高了 1.42 s。

综上,本文算法具有良好的性能,可适用于微视觉图像的增强,又能扩展至普通图像的增强。处理后的图像亮暗区中细节特征明显,对比度强,整体亮度均衡,色彩逼真,效果明显优于很多同类型经典的图像增强算法。

based on optical measuring methods [M]//ISLAM N. *Microelectromechanical Systems and Devices*, Rijeka, Croatia: Nazmul Islam., 2012.

- [4] WU H, ZHANG X M, GAN J Q, *et al.*. Displacement measurement system for inverters using computer micro-vision [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 81: 113-118.
- [5] ZHANG X, ZHANG X M, WU H, *et al.*. A high accuracy algorithm of displacement measurement for a micro-positioning stage [J]. *AIP Advances*, 2017, 7(5): 055301.
- [6] CHOI M S, KIM W Y. A novel two stage template matching method for rotation and illumination invar-

- iance [J]. *Pattern Recognition*, 2002, 35(1): 119-129.
- [7] WEI B H, WANG F, HU X P. Rotation-invariant template matching based on ring projection and orientation codes [C]. *Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Control and Information Processing*, IEEE, 2014: 192-197.
- [8] WU H, ZHANG X M, GAN J Q, et al.. High-precision displacement measurement method for three degrees of freedom-compliant mechanisms based on computer micro-vision [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(10): 2594-2600.
- [9] 黄赞, 张宪民, 陈忠. 基于同态滤波的鲁棒多尺度微运动测量算法 [J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(2): 426-431.
- HUANG Z, ZHANG X M, CHEN ZH. Robust multi-scale micro-motion measurement algorithm based on homomorphic filtering [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(2): 426-431. (in Chinese)
- [10] 卢清华, 张宪民, 范彦斌. 基于计算机微视觉的鲁棒多尺度平面微运动测量 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2): 164-169, 177.
- LU Q H, ZHANG X M, FAN Y B. Robust multiscale method for in-plane micro-motion measurement based on computer micro-vision [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(2): 164-169, 177. (in Chinese)
- [11] 李海, 张宪民, 黄沿江, 等. 光学显微线条纹图像中心线提取 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(5): 1340-1347.
- LI H, ZHANG X M, HUANG Y J, et al.. Centerline extraction of stripe imaged by optical microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5): 1340-1347. (in Chinese)
- [12] 余金栋, 张宪民. 用于线纹显微图像的边缘检测算法 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 271-281.
- YU J D, ZHANG X M. Edge detection algorithm for lines on microscopic image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 271-281. (in Chinese)
- [13] HAN H, SHAN SH G, CHEN X L, et al.. A comparative study on illumination preprocessing in face recognition [J]. *Pattern Recognition*, 2013, 46(6): 1691-1699.
- [14] ADINI Y, MOSES Y, ULLMAN S. Face recognition: the problem of compensating for changes in illumination direction [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 19(7): 721-732.
- [15] ZOU X, KITTLER J, MESSER K. Illumination invariant face recognition: a survey [C]. *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Biometrics: Theory, Applications, and Systems*, IEEE, 2007: 1-8.
- [16] 葛微, 李桂菊, 程宇奇, 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.
- GE W, LI G J, CHENG Y Q, et al.. Face image illumination processing based on improved Retinex [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 1011-1020. (in Chinese)
- [17] RUIZ-DEL-SOLAR J, VERSCHAE R. Skin detection using neighborhood information [C]. *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, IEEE, 2004: 463-468.
- [18] YANG U, KIM B, TOH K A, et al.. Illumination-invariant color space and its application to skin-color detection [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(10): 107004.
- [19] 余顺园, 朱虹. 夜间有雾图像的光照模型构建及去雾 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(3): 729-734.
- YU SH Y, ZHU H. Lighting model construction and haze removal for nighttime image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3): 729-734. (in Chinese)
- [20] WANG J B, HE N, ZHANG L L, et al.. Single image dehazing with a physical model and dark channel prior [J]. *Neurocomputing*, 2015, 149: 718-728.
- [21] PEI S C, LEE T Y. Nighttime haze removal using color transfer pre-processing and dark channel prior [C]. *Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Image Processing*, IEEE, 2012: 957-960.
- [22] 赵宏宇, 肖创柏, 禹晶, 等. 马尔科夫随机场模型下的Retinex夜间彩色图像增强 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 1048-1055.
- ZHAO H Y, XIAO CH B, YU J, et al.. A Retinex algorithm for night color image enhancement by MRF [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 1048-1055. (in Chinese)
- [23] 余金栋, 张宪民, 陈忠. 尺度优化的Retinex增强算法与微视觉图像增强 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(2): 7-11.

- YU J D, ZHANG X M, CHEN ZH. Retinex enhancement algorithm with scale optimization and micro vision image enhancement [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(2): 7-11. (in Chinese)
- [24] LAND E H, MCCANN J J. Lightness and retinex theory [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(1): 1-11.
- [25] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [26] RAHMAN Z, JOBSON D J, WOODDELL G A. Multi-scale retinex for color image enhancement [C]. *Proceedings of 1996 International Conference on Image Processing*, IEEE, 1996: 1003-1006.
- [27] JANG J H, BAE Y, RA J B. Contrast-enhanced fusion of multisensor images using subband-decomposed multiscale retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(8): 3479-3490.
- [28] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images [C]. *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision*, IEEE, 1998: 839-846.
- [29] CHAUDHURY K N, SAGE D, UNSER M. Fast $O(1)$ bilateral filtering using trigonometric range kernels [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(12): 3376-3382.
- [30] VARDHAN D V, REDDY K J. Acceleration of shifttable $O(1)$ algorithm for bilateral filtering and non-local means [J]. *International Journal of Science and Research*, 2014, 3(9): 1073-1077.
- [31] SAHA P K, UDUPA J K, ODHNER D. Scale-based fuzzy connected image segmentation: theory, algorithms, and validation [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2000, 77(2): 145-174.
- [32] MITTAL A, SOUNDARARAJAN R, BOVIK A C. Making a “completely blind” image quality analyzer [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, 20(3): 209-212.
- [33] WANG ZH, SHEIKH H R, BOVIK A C. No-reference perceptual quality assessment of JPEG compressed images [C]. *Proceedings of 2002 International Conference on Image Processing*, IEEE, 2002: I-477-I-480.
- [34] LIU L X, LIU B, HUANG H, *et al.*. No-reference image quality assessment based on spatial and spectral entropies [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2014, 29(8): 856-863.

作者简介:



张翔(1991—),男河南商丘人,博士研究生,2016年7月于石河子大学获得硕士学位,主要从事机器视觉及图像处理方面的研究。E-mail: zhxl991_scut@qq.com

导师简介:



张宪民(1964—),男,河北涿州人,教授,博士生导师,1993年于北京航空航天大学机电系获工学博士学位,主要从事精密柔顺机构、精密定位系统、机器视觉等方面的研究。E-mail: zhangxm@scut.edu.cn