

文章编号:1004-4213(2010)09-1652-6

人脸检测中盲解卷积的点传输函数 和光学传输函数分析*

沈璧川, 吴艳

(重庆邮电大学, 重庆 400065)

摘要:分析了高速实时人脸检测系统中的光学衍射、离焦和采样效应, 通过理论分析, 构造了表征光学成像系统空间和频率特性的近似点扩展函数和光学传输函数. 在假设这些近似点传输函数已知的基础上, 提出了两个盲解卷积滤波器, 并且和拉普拉斯算子以及最优聚焦算子的光学传输函数作了对比研究. 该系统采用一个马达推动光学镜头来获得高清晰度图像, 并在预处理级进行了内插滤波. 演示系统在较高的准确率时检测帧率达到 15.6 fps, 实验结果验证了理论分析.

关键词:人脸检测; 点传输函数; 光学传输函数; 衍射; 离焦; 盲解卷积

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103909.1652

0 引言

近年来, 随着高速数据采集和宽带传输、高效率数据压缩和重建、智能计算和分布并行处理的飞速发展和不断融合, 使得集成高速 CMOS 成像传感器、精密光学和信号处理的系统成为可能, 并在计算机视觉、视频监控和通信、数字医疗成像和外太空探索等领域得到广泛的应用.

在高速 CMOS 传感成像人脸检测系统中, 对于球面对称的透镜, 当光学像差或者其它高阶光学畸变可以忽略时, 光学散射、几何离焦和抽样效应成为导致光学图像采集处理系统性能下降的主要因素. 散射是由于光通过一个尺寸大小与波长相当的物体产生的波动效应, 可近似等效于低通滤波. 因而导致在物体的尖锐边缘产生黑白光圈, 也称为 Airy 图案. 当光学镜头的数值孔径减小或者 F 数增加, 散射随之增加.

离焦产生于当图像平面与聚焦平面不相重合, 而导致投影的一个点扩展成为一个模糊圆斑. 可以将圆斑半径定义为扩展参数, 即为点扩展函数的标准方差. 圆斑半径随着离焦程度的增加而增加. 为此, 文献[1]提出了基于彩色图像的 L1 范数和 L2 范数分别作为粗略调焦和精确调焦的评价函数, 以实现系统在大范围内的精确调焦; 文献[2]给出了结合算子融合和一种基于空域分析的像质评价函数的自动对焦方法; 文献[3]提出了基于最小各向同性小

波滤波的图像清晰度识别方法; 文献[4]研究了人脸识别形态学相关的一般理论问题.

由于半导体技术的快速进步, 为了支持单位面积上更多的像素和降低功率消耗, CMOS 像素大小急剧下降. 但是, 由于当像素较小时散射效应和热噪声变得更为显著, 因此其大小存在一个下限. 当抽样效应在散射效应的范围之内时, 可以将离散采样等价于与采样函数的点扩展函数的卷积.

对于单色光谱, 散射效应的点扩展函数是波长的函数, 并且可用二维高斯函数近似模拟^[5]. 在通常成像情况下, 严格来说点扩展函数和物距变化不是均匀的, 因此严格理论意义上成像系统不是平移不变的. 但是, 只要光学散射、几何离焦和数字采样引起的畸变在一定范围之内, 成像系统可以用和综合的点扩展函数的卷积的线性时不变系统来表征. 因此, 对点扩展函数的深入分析, 可以更好地理解成像系统的光学效应, 以采用有效的数字信号处理. 为了精确描述各类光学数字成像系统, 有必要对这些光学和几何效应进行深入研究和数学描述.

因此, 损坏图像重建可以采用解卷积变换, 然而当系统矩阵含零或很小的数值时, 解卷积通常是不适定问题, 解决办法可以通过引入调整参量来弱化不适定问题. 本文讨论了上述光学和采样效应, 并描述它们的点扩展函数和光学传输函数的表达式. 研究了各种盲解卷积滤波器的频谱, 并给出了实验系统和结果.

* 美国先进技术计划项目(2007-1B-4287)资助

Tel: 023-62487704

Email: sbichuan@hotmail.com

收稿日期: 2008-08-25

修回日期: 2008-12-08

1 光学效应、点扩展函数和光学传输函数

CMOS 成像传感器记录的图像 $g(x, y)$ 可以表示为光学散射、几何离焦和抽样效应与物体图像 $e(x, y)$ 的连续卷积^[6]

$$g(x, y) = \rho(x, y) * \eta(x, y) * \mu(x, y) * e(x, y) \quad (1)$$

这里 $\rho(x, y)$ 、 $\eta(x, y)$ 、 $\mu(x, y)$ 分别是抽样效应、几何离焦和光学散射的点扩展函数。

在傅里叶频域,式(1)可以表示为

$$G = F(\rho) \cdot F(\eta) \cdot F(\mu) \cdot E \quad (2)$$

这里 $F(\rho)$ 、 $F(\eta)$ 和 $F(\mu)$ 分别是对应抽样效应、几何离焦和光学散射的点扩展函数的傅里叶变换,并且 $G = F(g)$ 、 $E = F(e)$ 。

光学散射的点扩展函数是一个单位体积的圆对称函数^[6]

$$\mu(r) = \left[\frac{2J_1(\gamma)}{\gamma} \right] \quad (3)$$

这里 $\gamma = (\pi|r|D)/(\lambda l)$, λ 是光波长, D 是镜头直径, l 是镜头到成像平面的距离, r 是极坐标系下的距离, $J(\cdot)$ 是第一类的一阶贝塞尔函数。

在傅里叶频域,光学散射导致的模糊可以表示为^[6]

$$F(\mu(r)) = \begin{cases} F^2(\gamma - \sin \gamma), & \sqrt{u^2 + v^2} \leq \frac{2}{\lambda F} \\ 0, & \sqrt{u^2 + v^2} > \frac{2}{\lambda F} \end{cases} \quad (4)$$

式中^[7],

$$\gamma = 2 \arccos \frac{\lambda F \sqrt{u^2 + v^2}}{2} \quad (5)$$

这里 u 和 v 表示分别对应于 x 和 y 方向的空间频率,以及 F 为镜头的 F 数。图 1 表示了其点扩展函数和光学传输函数。

当在一个亮度均匀分布的圆环内,离焦可以用一个抛物柱面(Pillbox)函数来表示^[8]

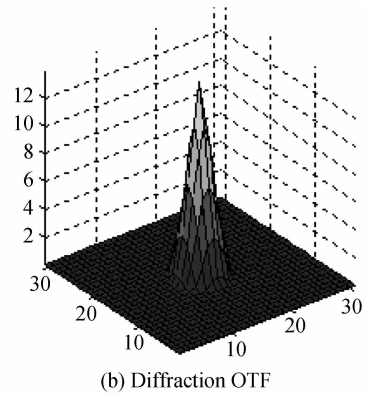
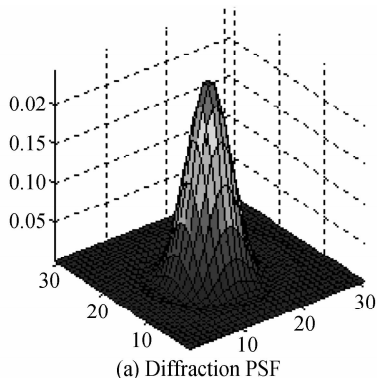


图 1 光学散射的点扩展函数和光学传输函数
Fig. 1 PSF and OTF of optical scattering

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi r^2} & \text{if } x^2 + y^2 \leq r^2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

它的傅里叶变换即是熟知的 Airy 函数

$$H(u, v) = \frac{2J_1(r \sqrt{u^2 + v^2})}{r \sqrt{u^2 + v^2}} \quad (7)$$

图 2 表示了其点扩展函数和光学传输函数。

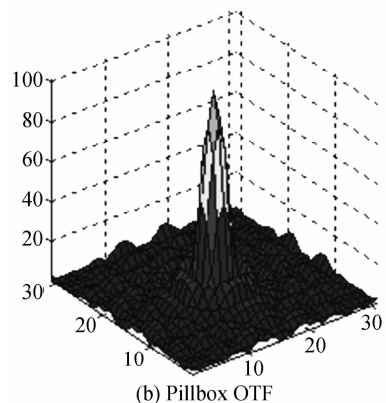
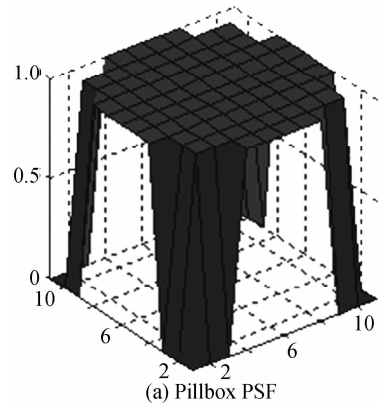


图 2 几何离焦的点扩展函数和光学传输函数
Fig. 2 PSF and OTF of geometry defocus

在像素大小 Δx 平均的采样核可以记为^[6]

$$\rho(x) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta x^2}, & \max \{|x_1|, |x_2|\} \leq \frac{\Delta x^2}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

在频域,其采样模糊可对应表示为^[6]

$$F(\rho(x)) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\Delta x^2} \sin c \frac{u\Delta x}{2} \sin c \frac{v\Delta x}{2} \quad (9)$$

根据对于远物距 Fraunhofer 散射受限的瑞利准则,一个评估精确度和像素大小的常用方法为^[9]

$$R = 1.22\lambda f/D \approx 1.5 \mu\text{m} \quad (10)$$

这里 R 为分辨率, f 是镜头焦距. 由于这个数值通常小于商业上应用的 CMOS 传感器像素尺寸(一般大于 $3 \mu\text{m}$), 所以可以近似忽略数字采样效应.

2 解卷积滤波器和光学传输函数

图 3 显示了当考虑光学散射和几何离焦的情况时合成的点扩展函数和光学传输函数. 值得注意的是图 1~3 的中心已经移位, 表示低频部分, 图 4~6 则没有移位. 显然, 合成的光学传输函数在低频部分存在一个明显的表征模糊效应的尖峰. 虽然近似单色的光学传输函数 PSF $h_\omega(r, \lambda)$ 不一定是高斯函数, 但是对于宽频光谱来说, 总的点扩展函数可以用高斯积分来表示^[10]

$$h(r) = \int_0^\infty [I(\lambda)h_\omega(r, \lambda)]d\lambda \quad (11)$$

这里 $I(\lambda)$ 是照射光谱, r 是极坐标距离. 在一个非均匀亮度分布的圆周内, 白光的点扩展函数可以用二维高斯函数表达^[11], 如图 3.

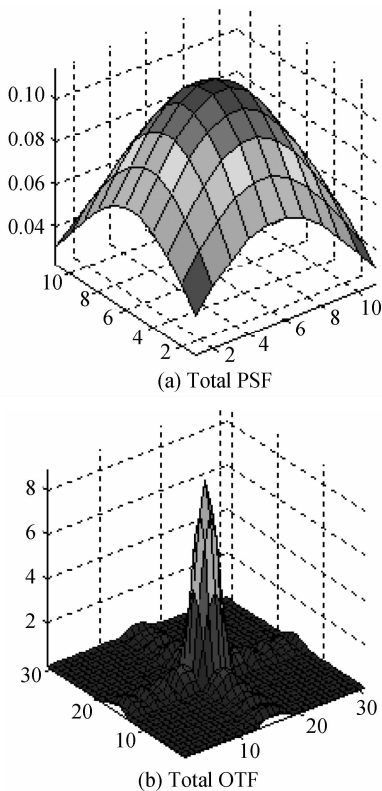


图 3 合成的点扩展函数和光学传输函数
Fig. 3 PSF and OTF of the combined point

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

因此两个离焦图像在空间域和频域的关系可以用式(13)、(14)表示

$$i_1(x, y) = i_0(x, y) \otimes \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_0^2}} \quad (13)$$

$$I_1(u, v) = I_0(u, v) e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma_0^2}} \quad (14)$$

这里 σ_0 是高斯函数的标准方差.

为了消除光学散射和几何离焦带来的图像模糊, 设计的盲解卷积滤波器核尽可能使得去模糊的图像更加尖锐. 考虑到点扩展函数和光学传输函数, 3×3 聚焦运算的傅里叶变换在基础空间域的高频带 $(1/t_x, 1/t_y)$ 内应该只有一个峰值, 并且滤掉低频部分, 如图 1~3. 文献[7-8]提出的其中一个优化 3×3 聚焦运算核可表示为

$$\begin{bmatrix} 0.658 & -1 & 0.658 \\ -1 & 1.368 & -1 \\ 0.658 & -1 & 0.658 \end{bmatrix}$$

图 4 比较了 3×3 拉普拉斯和优化的 3×3 聚焦运算核的频谱. 显然, 优化 3×3 聚焦运算核具有更尖的高频频谱, 而其沿着 X 和 Y 方向的低频能量泄露更小. 这使得该优化 3×3 聚焦运算核能够更有效消除图像的低频部分, 它们通常是图像背景而不是高频的边缘和图案.

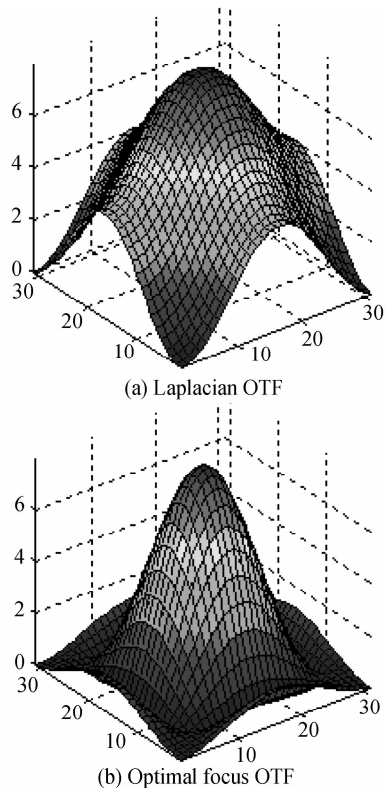


图 4 3×3 拉氏和优化聚焦运算核光学传输函数对比
Fig. 4 Optical transfer function comparison between the Laplacian and the optimal focus operators

如图 4 的光学传输函数清晰所示,有直流泄露存在.这也可以从以下事实得知:沿着 X 和 Y 方向 $0.658-1+0.658 \neq 0$ 均不为零.因此提出如下的两个 3×3 整数核,左边的一个是近似优化 3×3 聚焦运算的整数核,右边的一个是整数移位聚焦运算核.

$$\begin{bmatrix} 2 & -3 & 2 \\ -3 & 4 & -3 \\ 2 & -3 & 2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

图 5 对比了 3×3 优化聚焦运算核和其近似整数核频谱.可以看出,它们的频谱很相似,并且都有直流泄露.

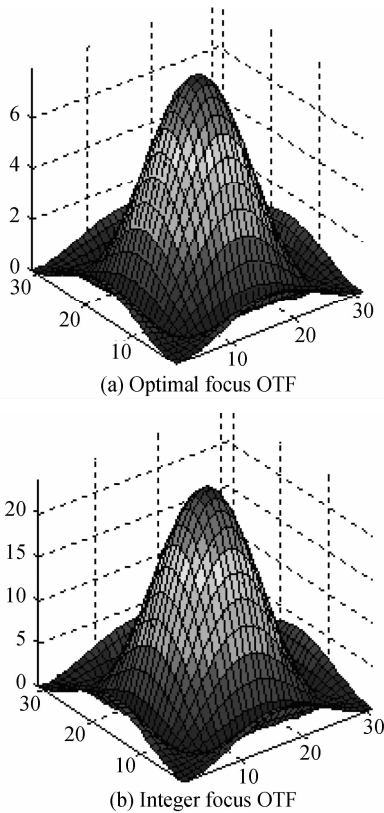


图 5 优化聚焦和其近似整数运算核光学传输函数对比
Fig. 5 Optical transfer function comparison between the optimal focus and the integer focus operators

图 6 则比较了 3×3 优化聚焦运算核和其近似整数移位核的频谱.可以看出,它们的频谱很相似,并且都有直流泄露.图中显示虽然优化聚焦运算核比近似整数移位核具有更好的高频提取性能,但是近似整数移位核沿着 X 和 Y 方向没有直流泄露存在,因为其沿着 X 和 Y 方向的滤波器核系数之和为零.另一方面,其以二的整数幂使之成为一个很好的盲解卷积滤波器核,这是因为可以利用移位运算来代替乘法运算以节省大量的计算时间.

图 7 显示了 3×3 拉普拉斯运算核、优化聚焦运算核、移位运算核的能量半径分布百分比.可以看出优化聚焦运算核比其余两个运算核更加尖锐,对于优化聚焦运算核其能量百分比达到 90% 时的半径为 7,移位运算核为 8,而拉普拉斯运算核为 12.还

可以看出当半径大于 9 时,由于没有直流泄露存在,移位运算核比优化聚焦运算核包括了更多的能量.

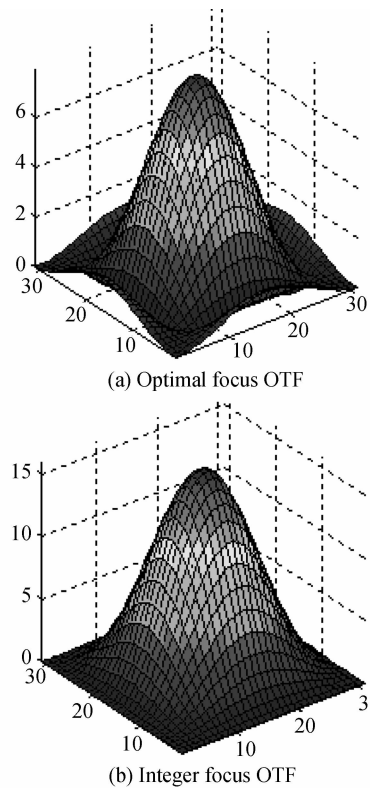


图 6 优化聚焦和其近似整数移位运算核光学传输函数对比
Fig. 6 Optical transfer function comparison between the optimal focus and the integer shift focus operators

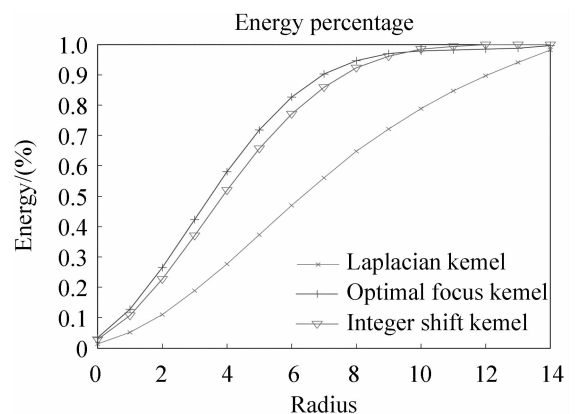


图 7 能量半径分布
Fig. 7 Energy distribution with respect to radius

3 实验

假设本文中模糊低通滤波的光学传输函数为 H ,那么光学卷积过程的矢量式可记为

$$g = Hd + n \tag{15}$$

这里 d, n 和 g 分别为输入图像信号、噪声和记录接收的图像信号.

其伪逆滤波可以表示为^[12]

$$\hat{d} = (H^T H)^{-1} H^T g \tag{16}$$

如果预先知道噪声方差,其最小均方误差

MMSE 估计也可写为

$$\hat{\mathbf{d}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{g} \quad (17)$$

对于加权的最小均方误差估计,还可以表示为

$$\hat{\mathbf{d}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \omega \mathbf{S})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{g} \quad (18)$$

这里 ω 为加权系数,并且 $\mathbf{S} = \sigma^2 \mathbf{I}$.

因此为了重建更清晰的图像,采用了 sinc 函数内插滤波的方法^[12]

$$\hat{D}(\omega) = \frac{\text{sinc}(r\omega)}{\text{sinc}^2(r\omega) + \epsilon} G(\omega) \quad (19)$$

基于前文分析,在实验中构造了一个实时人脸检测系统,如图 8. 该系统由马达推动光学镜头、OmniVision2640 图像传感器、高速 USB 视频数据采集传输、以及 OpenCV 人脸检测模块等组成. 为了提高人脸图像清晰度和检测率,首先对原始图像进行内插处理,其次根据上面提出的盲解卷积滤波器计算图像聚焦,然后控制聚焦马达进行聚焦,使得最后获取的人脸图像达到最佳清晰度. OpenCV 人脸检测模块计算每一帧图像的面积图像,然后采用基于 Haar 特征的级联 AdaBoost 分类器进行人脸检测. 该系统检测帧率达到 15.6 fps,实现了与采集和显示帧率的完全同步.

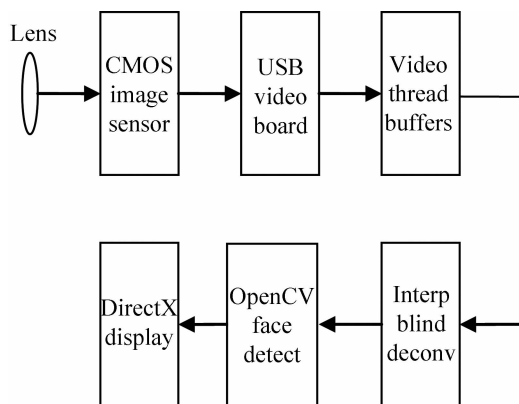


图 8 实时人脸检测系统

Fig. 8 Real-time face detection system

4 结论

在人脸自动识别系统中,由于光学成像普遍存在的光学散射、几何离焦和抽样效应,如何获得较高的图像清晰度和空间分辨率因此成为提高系统性能的一个重要课题.

本文研究探讨了高速实时人脸检测系统中的光学散射、几何离焦和抽样效应,分析了它们的点扩展函数和光学传输函数. 散射点扩展函数是一个二阶的 Airy 函数,而离焦光学传输函数也是一个 Airy 函数. 在实际应用中,当考虑到数字抽样平均时,总效应可以近似为一个二维的高斯函数. 在假设这些先验知识已知的情况下,研究了盲解卷积常用的 $3 \times$

3 拉普拉斯和优化的聚焦运算核的点扩展函数和光学传输函数. 提出了两个 3×3 整数核,并且与上述运算核作了比较. 其光学传输函数的频谱能量半径分布具有和优化的聚焦运算核类似的频谱特性,而且由于其二的整数幂的特点,使其更实用于大规模实时定点并行处理.

在本计算机视觉系统中,构造了一个基于马达推动光学镜头、OmniVision2640 图像传感器、高速 USB 视频数据采集传输、以及 OpenCV 人脸检测模块的实时人脸检测系统. 预处理级先对原始图像进行内插处理,其次根据上面提出的盲解卷积滤波器计算图像聚焦,然后控制聚焦马达进行聚焦,使得最后获取的人脸图像达到最佳清晰度. 系统检测帧率达到 15.6 fps,实现了与采集和显示帧率的完全同步和较高的准确率.

参考文献

- [1] LIU Huai, HUANG Jian-xin. Automatic focusing technique based on color image processing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9):1434-1437.
刘怀, 黄建. 基于彩色数字图像处理的自动调焦技术[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9):1434-1437.
- [2] ZHANG Hong-jian, TIAN Wei-jian, ZHANG Wei, et al. Automatic focusing technique based on color image processing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9):1434-1437.
张宏建, 田维坚, 张薇, 等. 光锥与 CCD 耦合系统中基于算子融合的自动对焦方法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9):1434-1437.
- [3] CHEN Guo-jing, ZHU Miao-fen, Shi Fu-li, et al. Identification of Image Definition Based on Minimum Isotropy Wavelet[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2):395-399.
陈国金, 朱妙芬, 施洪立, 等. 基于最小各向同性小波滤波的图像清晰度识别[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2):395-399.
- [4] YU Yang, ZHANG Xu-ping. General theory research on morphological correlation for gray-scale face recognition [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2):299-303.
余杨, 张旭苹. 灰度人脸识别形态学相关的一般理论研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(2):299-303.
- [5] PENTLAND A P. A new sense for depth of field [J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1987, **9**(4):523-531.
- [6] BLAYYAS I, KIMMEL R, EHUD R. Role of optics in the accuracy of depth-from-defocus systems [J]. *JOSA*, 2007, **24**(4):967-972.
- [7] NAYAR S K, WATANABE M, NOGUICH M. Real-time focus range sensor [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, **18**(12):995-1001.
- [8] SUBBARAO M, SURYA G. Depth from defocus: a spatial domain approach [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, **13**(3):271-294.
- [9] ELTOUKHY H A, KAYUSI S. A computationally efficient algorithm for multi-focus image [C]. *SPIE*, 2003, **5017**:332-341.
- [10] SUBBARAO M, SURYA G. On the depth information in the point spread function of a defocused optical system [EB/OL]. [2008-08-25]. <http://www.ee.sunysb.edu/~cv/Publications/MsubbaraoTR1990.pdf>.
- [11] WATANABE M, NAYAR S K, NOGUICH M. Real time computation of depth from defocus [C]. *SPIE*, 1995, **2599**:14-25.

[12] BANDO Y, NISHITA T. Towards digital refocusing from a single photograph[C]. *15th Pacific Conference on Computer*

Graphics and Applications, 2007; 363-372.

Point Spread Function and Optical Transfer Function of Blind Deconvolution in Face Detection

SHEN Bi-chuan, WU Yan

(Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The optical diffraction, defocus, and sampling effects are investigated in the high speed real-time face detection system. Through the analysis, their point spread function (PSF) and optical transfer function (OTF) are formulated to characterize the optical system in the spatial and frequency domain respectively. With the approximate priority knowledge of their PSF, two integer focus operators are proposed and their OTFs to those of Laplacian and the optimal focus operator are compared. This system utilizes a motorized focusing mechanism to acquire high resolution images and a sinc interpolation at the preprocess stage. The demonstration system reaches 15.6 fps with satisfactory results and validates the theoretical analysis.

Key words: Face detection; Point spread function; Optical transfer function; Diffraction; Defocus; Blind deconvolution



SHEN Bi-chuan was born in 1972. He received the Ph. D. degree from University of Massachusetts in 2000. In 2006, as an associate professor, he joined Chongqing University of Posts and Telecommunications, and his research interests focus on machine vision and intelligence, wireless communications, scalable video coding, pattern recognition and adaptive signal processing.