

doi: 10.3788/gzxb20174607.0715002

基于菲涅尔偏振反射理论的消眩光分析与实验验证

王崎, 雷亮, 谈季, 赖锦祥, 陈健标, 阮杨, 周金运

(广东工业大学 物理与光电工程学院 光电视觉检测工作室, 广州 510006)

摘 要:以菲涅尔偏振反射理论为依据,将入射光进行电矢量分解,推导出影响眩光强度的偏振因子,并分析该因子在眩光消除中所起的主导作用.根据成像检测模型,推导出决定眩光位置和眩光区域大小的位移因子,并分析该因子在眩光消除中起的辅助作用.测量工业上某种工件在相同环境中不同条件下的图像,将所得图像数据进行抽样对比,得到在不同偏振和不同位置情况下的图像灰度变化曲线.分析灰度变化曲线与偏振及位置的关系,并对所提出的理论加以验证.结果表明眩光消除的本质是降低眩光区域与邻域区域之间的光强对比度,对位移因子和偏振因子的联合调动可实现对眩光几乎完全的消除.

关键词:机器视觉;光学工程;光电检测;菲涅尔公式;眩光消除

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)07-0715002-7

Analysis and Verification of Eliminating Glare Based on Fresnel Polarization Reflection Theory

WANG Qi, LEI Liang, TAN Ji, LAI Jing-xiang, CHEN Jian-biao, RUAN Yang, ZHOU Jin-yun
(*Institute of Photoelectric Visual Inspection, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China*)

Abstract: Based on the theory of the Fresnel polarization reflectance, the polarization factor was put forward by decomposing the incident light into electric vector, which could affect the intensity of glare and play a leading role during eliminating glare. According to the imaging detection model, the displacement factor was presented, which could change the glare position and the size of the glare area, and play a supplementary role during eliminating glare. The image gray-scale transformation curves under different polarizations and different positions were gained by sampling and contrasting the image datas of a certain object, and these image data were measured in the equivalent environment while different situations. The proposed theory was verified by analysing the relationship of gray-scale transformation curve with polarization and position. The results show that the essence of glare eliminating is reducing the light intensity and contrast between with the glare area and neighborhood region. Furthermore, the joint mobilization of the displacement factor and polarization factor can almost eliminate the glare completely completely.

Key words: Machine vision; Optical engineering; Photoelectric inspection; Fresnel formula; Glare elimination

OCIS Codes: 150.0155; 080.2720; 150.2950; 260.5430

0 引言

以工业 4.0 为代表的全球化技术革命对光电视觉检测性能提出了更高层次的要求,在产品在线检测、制造全程监控、高精度测量、人工智能识别定位等领域,已基本实现光电视觉智能检测化.然而在此类应用中,

基金项目:国家自然科学基金(No. 61675050)、广东省科技计划项目(No. 2016B090918128)和广州市科技计划项目(No. 2014J4100205)资助

第一作者:王崎(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为光电技术、光电视觉检测. Email: 512500581@qq.com

导师(通讯作者):雷亮(1979—),男,教授,博士,主要研究方向为光电视觉检测、LED 封装等光学工程相关领域. Email: leiliang@gdut.edu.cn

收稿日期:2016-12-12; **录用日期:**2017-03-17

<http://www.photon.ac.cn>

大部分被测对象表面会由于光源的位置、角度、强度的复杂性而发出局部光强饱和的眩光(如抛光金属表面、半光滑的塑料制品、芯片等),致使在图像预处理环节产生被误认为不良品的感兴趣区域(Region Of Interesting, ROI)划分,严重降低了检测的正确率,成为视觉检测系统产生误判的主要原因^[1-2].为减弱或者消除杂散光、眩光的干扰,通常在光源和光阑前分别加入起偏与检偏装置,分别对两者的偏振角度进行调节以达到消除眩光的目的^[3-4].

偏振消眩光模型最早仅在镜头入射即检偏端使用偏振片^[5],在其后的发展中,人们发现在起偏端即光源出射处加入偏振片,能改善图像质量,并显著提高眩光消除的性能^[6].Shen S等^[7]利用眩光点的散射效应测量液体滴落的速度,得到了相对精确的速度值;Tsai M S等^[8]设计了一个高效的LED灯具模型,用来减弱进入人眼的眩光;Salakhutdinov V K等^[9]设计出能够克制眩光进入照相机的光学镜头,可拍摄清晰的眼底组织;Chen P L等^[10]利用色温评估LED模块所产生的眩光,设计出能够改善人们视觉体验的自适应系统;兰明强等^[11]在配光设计中加入非球面反光杯来收集光源发出的大角度光线,改善眩光,并设计了一款高均匀低眩光的护眼台灯.然而鲜有研究对此类眩光消除的形成机理作出完整理论分析.

本文对光电视觉检测领域中的偏振消眩光技术作深入的理论分析,提出使用基于菲涅尔公式的偏振因子与位移因子的概念.根据基本模型推导影响光振幅的偏振因子和位移因子,以解释眩光消除的原因,得出眩光消除的最优状态.

1 偏振因子

图1为某种待检工件(常见的半光滑圆形日化用品泵头)使用偏振片消除眩光的效果.使用偏振片消除眩光后,图像质量明显提升.对于不同的起偏角和检偏角得到的眩光消除图像结果会有所不同,将此方面的影响因素称为偏振因子.

图2(a)为传统二向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)理论^[12-13]与实际视觉成像关系所结合的分析图.为得到物体反射光到达图像传感器上的光强值,以单点成像的标

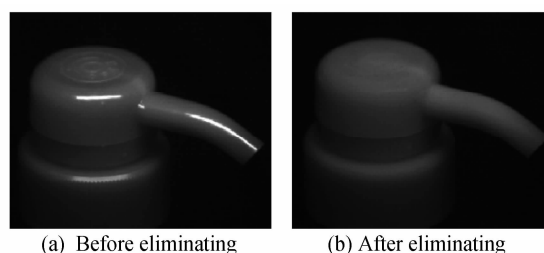


图1 待检测工件消除眩光前后对比
Fig. 1 Contrast of object before and after eliminating glare

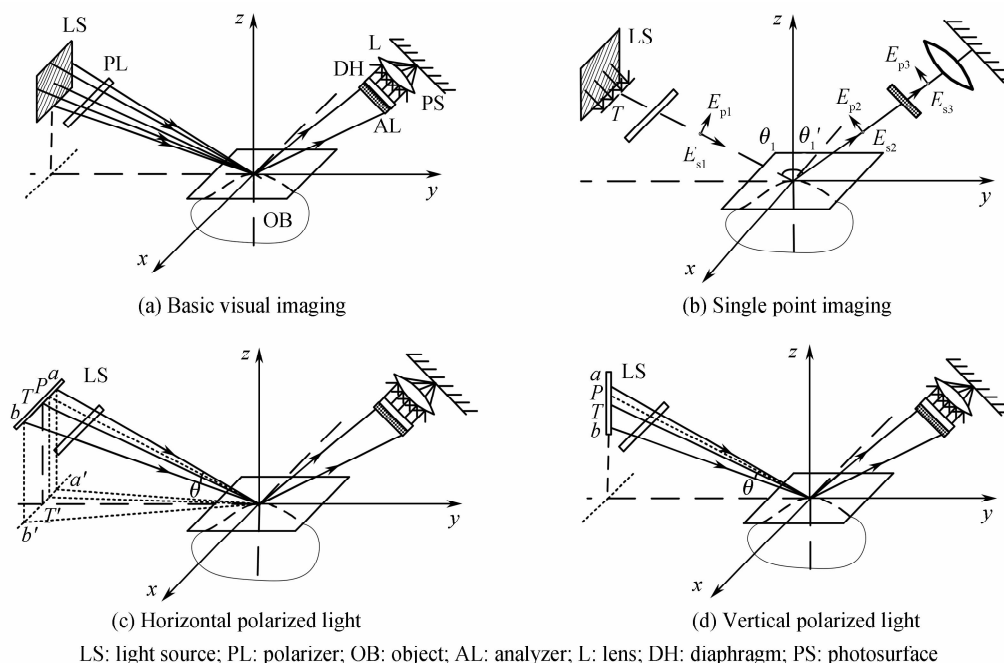


图2 理论分析模型
Fig. 2 Diagram of theoretical analysis model

量方程建立单光线传播模型,如图 2(b),这在视觉检测成像中具有最基本的普适性.由于普通光源偏振方向各异(自然偏振态),将单光线指代的标量平面波作水平和垂直偏振方向的分解独立分析,如图(c)和(d).

光源为理想标量平面波,图 2(b)中 T 点处光振幅设为 E_0 ,当光穿过偏振方向与 x 轴夹角为 α 的起偏器,光波电矢量分解得到垂直和平行于入射面的分量分别为 $E_{p_1} = E_0 \sin \alpha$ 和 $E_{s_1} = E_0 \cos \alpha$. 设光波到达物体表面的入射角为 θ_1 ,折射角为 θ_2 ,物体材质均匀且折射率为 n ,在空气折射率近似为 1 的情形下由反射定律和折射定律有 $\theta_2 = \arcsin\left(\frac{\sin \theta_1}{n}\right)$. 反射光波同样分解为垂直和平行于入射面的分量 E_{p_2} 和分量 E_{s_2} ,则根据菲涅尔反射定律可得

$$E_{p_2} = E_{p_1} \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \quad (1)$$

$$E_{s_2} = E_{s_1} \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2)$$

若检偏器偏振方向与 x 轴夹角为 β ,可检测到的垂直和平行于入射面的分量分别为 $E_{p_3} = E_{p_2} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)$ 和 $E_{s_3} = E_{p_2} \cos \beta$. 于是反射光到达光敏面时的振幅 $E_1 = E_{p_3} + E_{s_3}$ 可计算为

$$E_1 = E_0 \left[\sin \alpha \sin \beta \frac{\tan\left(\theta_1 - \arcsin \frac{\sin \theta_1}{n}\right)}{\tan\left(\theta_1 + \arcsin \frac{\sin \theta_1}{n}\right)} + \cos \alpha \cos \beta \frac{\sin\left(\theta_1 - \arcsin \frac{\sin \theta_1}{n}\right)}{\sin\left(\theta_1 + \arcsin \frac{\sin \theta_1}{n}\right)} \right] \quad (3)$$

令 $E_1 = E_0 \cdot f(\alpha, \beta, \theta_1)$,由式(3)可见,图 2(b)模型的反射光到达光敏面的光强与偏振角、物体折射率、以及入射角有关.

光源从单光线拓展为线光源,即为实际模型图 2(c),能够进入图像传感器并且对成像有贡献的所有光线由检偏器处光阑决定,对式(3)在区间 θ_a 和 θ_b 进行积分得可得水平方向上的光振幅为

$$E_x = \int_{\theta_b}^{\theta_a} f(\alpha, \beta, \theta_x) E(x) d\theta_x \quad (4)$$

式中, θ_a ($\angle aoz$) 和 θ_b ($\angle boz$) 为水平方向上入射方向的边界角,如图 2(c), $E(x)$ 是在不同位置处入射角为 $\theta(x)$ 的反射点的光强函数, x 为光源任意点 P 到 T 的距离, T 到原点距离为 s . 根据空间几何关系,对线光源两端端点 a, b 向 xoy 平面做垂线(垂足 a', b'), $a'b' \parallel ab$ 且 $a'b' \perp oy$ 轴, $aa' = bb' = TT' = s \cdot \cos \theta_1$, 于是有

$$\theta(x) = \arccos \frac{s \cos \theta_1}{\sqrt{x^2 + s^2}} \quad (5)$$

又根据光强和距离的关系,有

$$E(x) = E_0 \cdot \frac{\sqrt{s^2 + x^2}}{S} \quad (6)$$

将式(5)和(6)分别代入式(4)中消去 x ,得

$$E_x = \left| \int_{\theta_b}^{\theta_a} f(\alpha, \beta, \theta_x) \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_x} E_0 d\theta_x \right| \quad (7)$$

式中,积分区间 $\theta_a = \theta_1, \theta_b = \theta\left(s \cdot \tan \frac{\theta}{2}\right) = 2\arccos\left(\cos \theta_1 \cos \frac{\theta}{2}\right)$, θ_1 为光源中心点入射角, θ 为可穿过光阑的发散角.

如图 2(d),作类似的计算分析可得竖直方向上的光振幅为

$$E_y = \left| \int_{\theta'_b}^{\theta'_a} f(\alpha, \beta, \theta_y) \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_y} E_0 d\theta_y \right| \quad (8)$$

式中,积分区间 θ'_a 和 θ'_b 分别是光源反射后可穿过光阑的最小和最大入射角,并且有 $\theta_b - \theta_a = \theta$.

由式(7)和(8)可得入射角 $\theta_1 = \frac{\pi}{3}$ 、发散角 $\theta = \frac{\pi}{3}$ 时的数值模拟光振幅图,如图 3. 实际光强是水平和竖直方向光振幅迭加的模方. 从图中分析可知,对于单个位置不变点来说,成像后所形成的像素点的光强值能够被偏振因子所控制,会随着偏振因子的改变而改变,但一定存在一个最大的峰值点,该峰值点所在处必定

满足 $\alpha - \beta = k\pi (k = -1, 0, 1)$, 该点就是最亮眩光点.

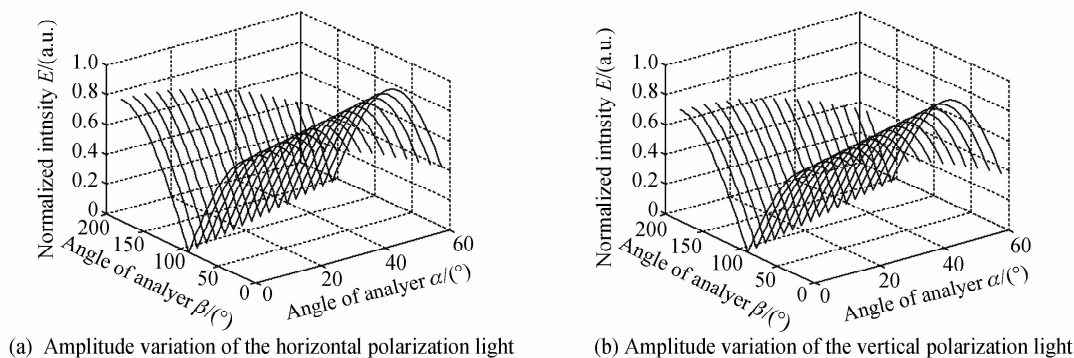


图 3 成像偏振光振幅随起偏角 α 与检偏角 β 的变化曲线
Fig. 3 Amplitude variation with different angle of polarizer α and analyzer β

2 位移因子

一旦待测工件对象反射面为全曲率物体, 则无论光源与工业相机的相对角度如何, 不可避免地总会有满足镜面反射条件的位置存在, 此位置就是在图像传感器中最亮的眩光点^[14-16]. 眩光邻域范围的光强会急剧下降, 即邻域与眩光点的相对位置与通过光阑的光通量有密切关系, 对比偏振因子, 称此方面的影响因素为位移因子.

图 4(a)~(d)是眩光区域以及周围 3 种非眩光邻域的情况, 其他情况类推(增加或减少阴影框实际落在白框间的比例). 它表征了实际光阑在物体成像过程中, 根据物体位置的不同, 进入光阑的反射光也会随之形成显著的灰阶差异.

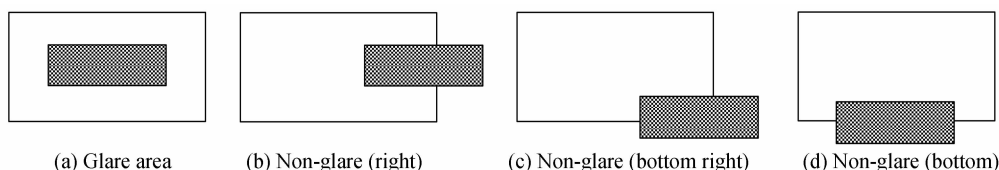


图 4 反射光进入光阑形成眩光区域及其邻域情况
Fig. 4 The case of glare area and its neighborhood while reflect light enter into the aperture

图 5 为眩光区域与非眩光邻域的近似高斯曲面的三维光强分布, 图中 x 和 y 为实际物体距离眩光点的纵向与横向距离. 当反射光全部处于光阑内, 如图 4(a), 反射光随着位置的改变也会发生细微的变化, 但是变化幅度不会太大. 但若反射光超出了光阑孔径, 类似于图 4(b)~(d), 则光强会急剧下降, 以此定性地从空间位置关系的角度解释眩光存在的成因.

3 实验与分析

实验对象为图 1 所示的日化用品泵头, 图像传感器使用 500 万像素图像传感器(型号为 MER-500-7UM), 光源采用 $14.5\text{cm} \times 3.2\text{cm}$ 的条形光源, 光源表面贴附起偏角度为 α 的偏振膜, 镜头前加有光阑且可调节检偏角 β 的偏振片.

实验测量了在相同环境中对同一泵头在不同偏振条件下的所得图像, 光阑大小固定, 起偏角 α 从 0° 到 90° (每次增加 15°) 变化时, 对检偏角 β 从 0° 到 180° (每次增加 12°) 进行调节. 由于偏振角从 0° 到 90° 与从 90° 到 180° 变化为对称关系, 可认为是一个周期完整. 图 6 为 9 幅实验采集图, 分成上中下 3 组, 每组的起偏角 α 一致, 每组的左、中、右三幅图像分别对应检偏角 β 改变导致的眩光灰阶最亮、中等、以及最暗三个状态.

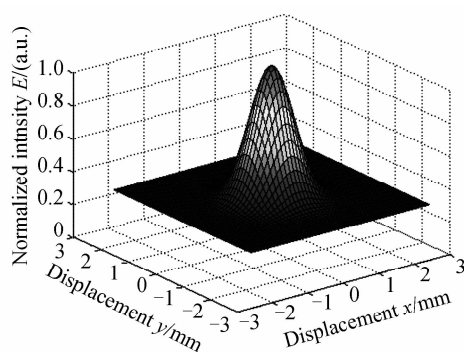


图 5 眩光区域与非眩光邻域的三维光强分布
Fig. 5 Three-dimensional intensity distribution of the glare area and non-glare neighborhood

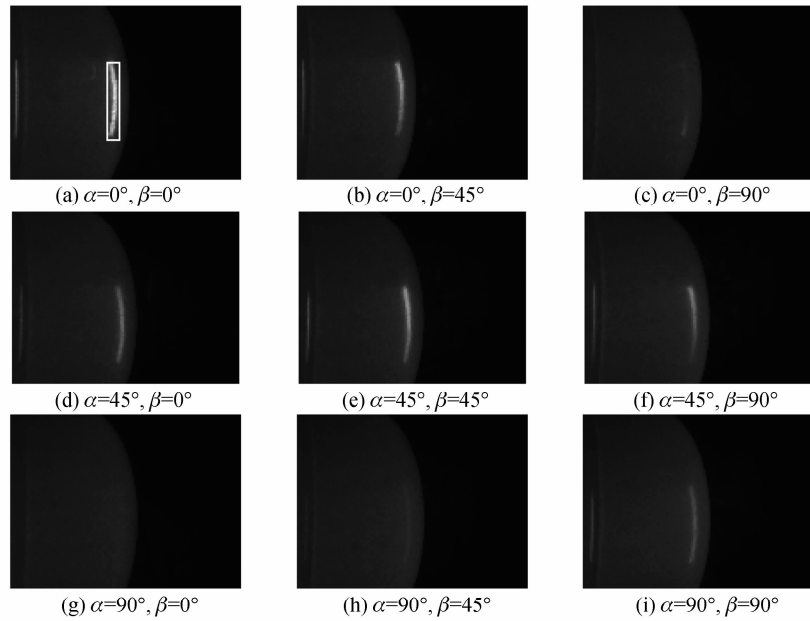


图6 实验所得的原始图像

Fig. 6 Original image of the experiment

由图6可见随起偏角 α 的增大,眩光区域的整体亮度会下降;最大光强出现在起偏角 α 与检偏角 β 近似相等时;眩光区域明显比另外2幅图像效果要强,与偏振因子式(7)、(8)的分析结论相吻合,偏振因子会直接影响光强的大小,从而改变其对应区域的像素灰度值.这是由于 $\alpha=\beta$,使得式(7)、(8)中的光强值接近峰值点,合成所得的光强也接近最大,因此图像眩光区域会相对比较亮.当 α 和 β 相互垂直时,最亮眩光区域会明显变暗,但眩光并不会完全消失,因此不能认为在实际视觉系统中起偏器和检偏器的角度垂直就可以完全消去眩光,而是要求 $\alpha=90^\circ, \beta=0^\circ$ 时才能完全消眩光. $\alpha=90^\circ$ 代表起偏器的偏振角与水平方向(即波前面与反射截面的交线方向)相互平行,这成为除 α 和 β 相互垂直之外的另一个消眩光的必要条件.

对眩光区域进行矩形ROI(如图6(a)中的矩形框)标记,然后以矩形区域中心的横向 x 偏移量提取相同 α 角、不同 β 角时,对应的归一化光强灰度值 E .同理以矩形区域中心的纵向 y 偏移量提取相同 α 角、不同 β

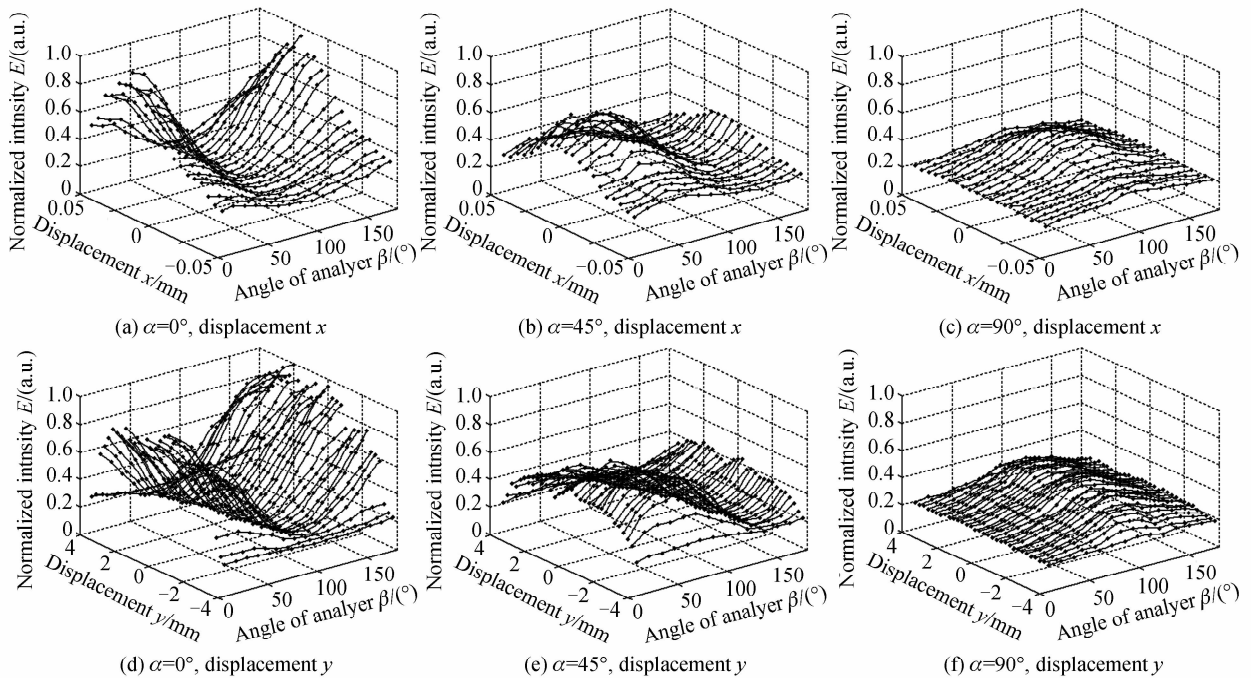


图7 原始图像归一化曲线

Fig. 7 Normalized curve of original image

角时,对应的归一化光强灰度值 E 。

由图 7 的左列子图与中列子图可见当 α 为 0° 和 45° 时,眩光比较明显,而 α 为 90° 时,眩光仅出现在 β 为 90° 附近,并且眩光点较少;当起偏角度 α 由 0° 增加到 90° 时,对应的眩光区域的整体像素平均值变小,并且眩光区域位置呈现周期性变化,这与偏振因子分析一致.图 7 的第一行子图与第二行子图没有本质的区别,只是位移因子作沿横向与纵向移动的分别,两个方向的移动都由于泵头此部位的切面曲率渐降而使光强下降,与位移因子的理论分析吻合.分析图 6 中图像的质量,当 α 为 90° 时,图像消眩光质量最佳,而图 7 中,根据图像的陡峭程度不同,也可反映当 α 为 90° 时,灰度图的像素值整体变化较为平缓,说明此时消除眩光的效果最好.由此得出起偏器的偏振方向与水平方向(即波前面与反射截面的交线方向)相互平行消除眩光效果最佳,即起偏角 α 为 90° 时,图像质量最好。

实际应用中,当原始图像某个区域的灰度平均值大于某个相对值的时候,开始出现眩光,此时先调节起偏角 α 朝向水平,再调检偏角 β 与 α 相垂直,即得到偏振消眩光的最优状态.而当前光电视觉检测应用领域,往往只施行起偏检偏相垂直操作而忽略起偏水平朝向操作,导致眩光消除效果不稳,应用性能大大减弱。

4 结论

本文以菲涅尔反射理论为依据,利用矢量分解结合菲涅尔公式求出影响眩光光强的偏振因子,其在消去眩光的过程中起主要作用,在实际的消眩光模型中可通过改变偏振因子进行消眩光.同时分析了影响眩光光强的位移因子,位移因子在消眩光的过程中起辅助作用,能够减弱眩光,但难以完全消去.而且在实际的视觉检测系统中,位移因子往往由物理硬件条件决定,无法进行灵活调节,例如在待测物体无法移动或在高精度视觉测量需求中,只能通过偏振因子对眩光进行消除.研究表明起偏器的偏振角与水平方向相互平行,可得到眩光消除的最优状态.在实际的偏振消眩光视觉检测系统应用中,首先使用位移因子调节,以减少眩光区域大小,然后再利用偏振因子使眩光区域与周边区域达到近似的光强,可实现几乎完全的眩光消除。

参考文献

- [1] KERESZTES J C, KOSHEL R J, CHIPMAN R, *et al.* A cross-polarized freeform illumination design for glare reduction in fruit quality inspection[C]. SPIE Optical Systems Design. International Society for Optics and Photonics, 2015: 962904.
- [2] JIAO Ying-qi, BEN Guo-quan, LI Dong-wei. Overview of image quality evaluation methods for photoelectric system[J]. *Laser & Infrared*, 2014, **44**(9): 966-971.
矫英祺,任国全,李冬伟. 光电系统图像质量评价方法综述[J]. 激光与红外, 2014, **44**(9): 966-971.
- [3] BRAYFORD D, TURNER M J, HEWITT W T. A physical model for the polarized scattering of light[C]. TPCG. 2008: 17-26.
- [4] JAPUNTICH D A. Polarized task lighting to reduce reflective glare in open-plan office cubicles [J]. *Applied Ergonomics*, 2001, **32**(5): 485-499.
- [5] WOLFF L B, BOULT T E. Constraining object features using a polarization reflectance model[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(7): 635-657.
- [6] SATO Y, WHEELER M D, IKEUCHI K. Object shape and reflectance modeling from observation[C]. Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co, 1997: 379-387.
- [7] SHEN S, JIA M, WANG T, *et al.* Measurement of the droplets sizes of a flash boiling spray using an improved extended glare point velocimetry and sizing[J]. *Experiments in Fluids*, 2016, **57**(4): 1-16.
- [8] TSAI M S, LEE X H, Lo Y C, *et al.* Optical design of low glare luminaire applied for tunnel light[C]. SPIE Optical Engineering+ Applications. International Society for Optics and Photonics, 2014: 91920T.
- [9] SALAKHUTDINOV V K, SMETANIN Y G, DOROSHENKO J, *et al.* Glare-free optical system for fundus visualization[C]. SPIE Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics, 2014: 912911.
- [10] CHEN P L, LIAO C H, LI H C, *et al.* A portable inspection system to estimate direct glare of various LED modules [C]. International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN2015). International Society for Optics and Photonics, 2015: 95241X.
- [11] LAN Ming-qiang, WANG Min, CHEN Xue-mei. High evenness and low glare LED lamp light distribution design and simulation analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 288-292.
兰明强,王敏,陈雪梅. 高均匀低眩光 LED 台灯配光设计及仿真分析[J]. 光子学报, 2013, **42**(3): 288-292.
- [12] LIU Jia, FAN Wen-yi. Review on BRDF Model and the Inversion strategy[J]. *Remote Sensing Technology and*

Application, 2008, **23**(1): 104-110.

刘佳,范文义. BRDF模型及其反演研究的现状及展望[J]. 遥感技术与应用,2008,**23**(1):104-110.

- [13] GENG Li-xiang, CHEN Qian, QIAN Wei-xian, *et al.* A target discrimination method based on the active polarization imaging with the distribution of polarization Fresnel ratio[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(6): 1916-1920.
- 耿利祥,陈钱,钱惟贤,等. 基于偏振菲涅尔反射比分布的主动偏振成像目标辨别方法[J]. 光谱学与光谱分析,2016,**36**(6):1916-1920.
- [14] FERRE-BORRULL J, BOSCH S. Exact calculation of the point spread function of an optical system: effect of the aperture stop in an intermediate space[C]. *Optical Systems Design*. International Society for Optics and Photonics, 2004: 54-61.
- [15] BOYER J, KERESZTES J C, SAEYS W, *et al.* An automated imaging BRDF polarimeter for fruit quality inspection [C]. *SPIE Optical Engineering+Applications*. International Society for Optics and Photonics, 2016: 99481G.
- [16] LIU Jun, CAO Xing, GAO Ming, *et al.* Effects of the aperture on polarization properties of polarized Gaussian Schell-model beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1): 126001.
- 刘钧,曹杏,高明,等. 光阑对偏振高斯-谢尔模型光束偏振特性的影响[J]. 光子学报,2015,**44**(1):126001.