

doi:10.3788/gzxb20134208.0956

基于同步多曲面法的发光二极管机器视觉 照明设计

陈瑞,岑松原,金尚忠

(中国计量学院 光学与电子科学学院,杭州 310018)

摘 要:提出一种无需特殊封装结构光源,采用封装类型为表面贴装型,或板上芯片封装型的普通照明用发光二极管光源的照明子系统.为了使新照明系统在切换具有不同光色普通照明用发光二极管光源时使用同一个匀光系统(可保证被照面照度均匀度),根据非成像理论中的边缘光线原理,使用同步多曲面法设计了通用型匀光光学系统.该系统可以在保持光学系统固定的前提下进行多种照明光源的替换,无需经过匀光设计的特殊结构光源,保证了目标面照度均匀度,并扩展了照明子系统的光色范围.多组蒙特卡罗光线追击仿真对比表明,新系统所使用光源只要满足透镜设计针对光源尺寸的需求,满足尺寸要求的普通照明用光源即可集成入系统使用,不会因为被照面照度不均匀导致的辨别度下降,因而适用于对能量利用率要求不太高,但对目标面照度均匀度有较高要求的机器视觉照明系统.

关键词:机器视觉;照明;发光二极管;同步多曲面

中图分类号:TN312+.8;TN247

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)08-0956-6

A Machine Vision Illumination System Based on Simultaneous Multiple Surfaces Design

CHEN Rui, CEN Song-yuan, JIN Shang-zhong

(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: An improved machine vision illumination system was proposed that used general LED light sources. General LED light source with the package type of surface mounted device, or chip on board was used in the new system. A uniform light system was used to make sure the illumination uniformity when the new system switched different light colors of general lighting LED light source. Based on the edge light principle of the non-imaging theory, a method of simultaneous multiple surfaces was used to design the universally uniform optical system. The system on the premise of maintaining the optical system being fixed can switch multiple light sources without specially designed uniform light source. It ensures the uniformity of target surface illumination and expands the illumination subsystem's light color range. The comparison between several groups of Monte Carlo ray tracing simulation shows that the general illumination light sources meeting the requirements of sizes can be integrated into the system as long as the light source used in the new system meets the design requirements of sizes; the nonuniformity of the illuminated area will not lead to the decrease of distinguishing degree; so the proposed light source is suitable for the machine vision system that requires not too high energy efficiency and high uniformity of illuminance of the target area.

Key words: Machine vision; Illumination; Light-Emitting Diode (LED); Simultaneous Multiple Surfaces (SMS)

基金项目:浙江省 LED 照明新技术科技创新团队项目(No. 2010R50020)资助

第一作者:陈瑞(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为 LED 二次光学设计. Email:15068767400@163.com

导师(通讯作者):岑松原(1974-),男,副研究员,博士,主要研究方向为半导体照明及光学检测. Email:13958196635@163.com

收稿日期:2013-01-04;录用日期:2013-04-08

0 引言

在机器视觉系统中照明设计的好坏直接影响最终图像的提取,在机器视觉应用中得到高对比度图像的一种有效方法是用特殊波长的光照明物体^[1-2]. 目前许多机器视觉照明系统的专业公司可根据实际需求生产经过匀光设计的单波长点光源,如日本 CCS 公司生产的单波长发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)点光源,每种单一光色光源都是独立特殊结构. 但是在实际应用中存在同一个被测物体有多种特征,需要照明系统在保证被照面照度均匀的情况下,分别发出不同波长的光进行照射,从而提取不同特征的情况. 机器视觉系统是一种非接触式光学传感系统,由于其非接触性和高精度的特性,在众多不适合人眼工作的环境及人眼分辨精度达不到的场合,得到广泛应用. 在机器视觉系统中,由光源发出的光线经过待测物体表面反射后进入成像镜头,在电荷耦合元件(Charge-Coupled Device, CCD)上成像后用于待测物体表面的特性提取,系统中对同一待测物体,采用不同照明方式引起的识别差异会很大,所以机器视觉的照明系统是整个系统中至关重要的一部分,它的好坏直接影响着后续特征信息提取与分析. 每种待测的物体都会有其表面特征的独特性,必须根据待测物体选择光源照明,照明应该使待测物体需要被识别的特征最大化,同时必须保证被照面的照明光斑均匀,通常使用照度均与度作为衡量光斑是否均匀的指标,照度均匀度指目标被照面的平均照度与最大照度值的比值. 被测面的照度均匀度低会降低被照面对比度,造成提取图像的识别障碍.

照明光色的控制,可以有效提高机器视觉中待测物体彩色特征的辨别度^[3-5]. 机器视觉照明系统中会使用特殊波长的光照射物体,来获得高辨识度的图像. 如果同一个被测物体中有多个特征,需要照明系统发出不同波长光照射提取各个特征时,需使用对应照明光色需求并经过匀光设计的特殊光源. 传统机器视觉照明系统选择光源分析多种颜色特征时,则根据照明光色需求选择经过匀光设计的特殊结构的 LED 光源. 本文提出使用同步多曲面(Simultaneous Multiple Surfaces, SMS)方法进行照明子系统的光学设计,使照明光学系统对于多种不同配光光型的光源,在目标面上均能形成高均匀度的照度分布^[6]. 新系统可以在保持光学系统固定的前提下进行多种照明光源的替换,无需经过匀光设计的特殊结构光源,并扩展了照明子系统的光色范围. 其所使用光源只要满足透镜设计针对光源尺

寸的需求,即可集成入系统使用.

1 机器视觉照明与光源光色

光源光色的选取直接决定了机器视觉系统中信息的精确提取,如图 1. 用黑白相机拍摄一个印有彩色字体的铝金属表面,该被测面上同时具有两种特征信息待提取,利用相似颜色使需要提取的特征对比度提高,相补颜色使不需要突出的特征对比度下降. 分别对待测物体使用红光 LED(波长范围 600~680 nm)和蓝光 LED(波长范围 420~510 nm)照明来提取两种特征. 图 1(a)采用红光照射,使第一种特征最大化,最小化第二特征;图 1(b)采用蓝光照射,使第二特征最大化,最小化第一特征. 最后获得两幅高辨识度的图像.

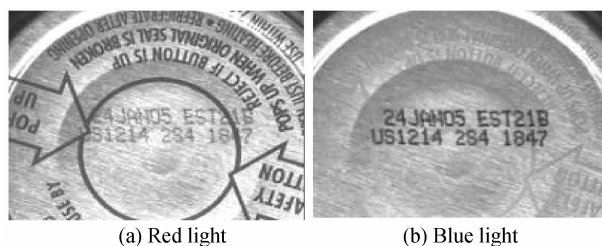


图 1 机器视觉中不同光色提取不同信息

Fig. 1 Using different LED lights to illuminate the target to abstract the different informations in machine vision system

本文将多种光色的普通照明用 LED 扩展光源集成在一个转盘上,需要调整光源光色时,转动转轴即可满足机器视觉系统对照明子系统的光色需求. 但转盘结构只能切换 LED 光源以满足照明光色需求,无法保证被测物体上的照度均匀度达到经过匀光设计的特殊 LED 光源照明的均匀度. 被照面的照度不均匀会使被测物体在机器视觉成像镜头中的像明暗不一,对比度降低,造成识别障碍. 要使用普通 LED 光源,而不使用经过匀光设计的独立结构的 LED 光源,则需要有 LED 二次光学设计的光学结构,该结构需保证更换不同配光的普通照明用光源后,被照面的均匀度数值保持在一定可接受区间范围.

2 机器视觉照明系统中的光学系统设计

在照明系统中,选择板上芯片封装型(Chip on Board, COB)或表面贴装型(Surface Mounted Devices, SMD)的大功率单颗 LED 芯片做光源. 进行二次光学设计时,由于此类芯片的尺寸相对透镜而言,不可视为点光源,因此在设计过程中,需要考虑扩展光源芯片尺寸. 假设需设计一个针对 LED 扩

展光源的透镜,设计要求为:透镜材料选择聚甲基丙烯酸甲酯(PolymethylMethacrylate, PMMA),折射率 $n=1.4935$,光源为直径 4.4 mm 的圆形 LED 芯片,使用配光光型为朗伯型,放置于 1 m 高处,正对照射目标面,在目标面形成一个直径为 1.6 m 的照度均匀圆形光斑,仿真设计时使用 200 万条光线仿

真,目标区域内照度均匀度达 0.8 以上.传统设计方法,首先根据设计要求,针对 LED 点光源进行透镜设计^[7-8],其仿真效果如图 2(a).再使用 LED 扩展光源进行光学仿真,根据仿真结果修改透镜结构,其仿真效果如图 2(b).

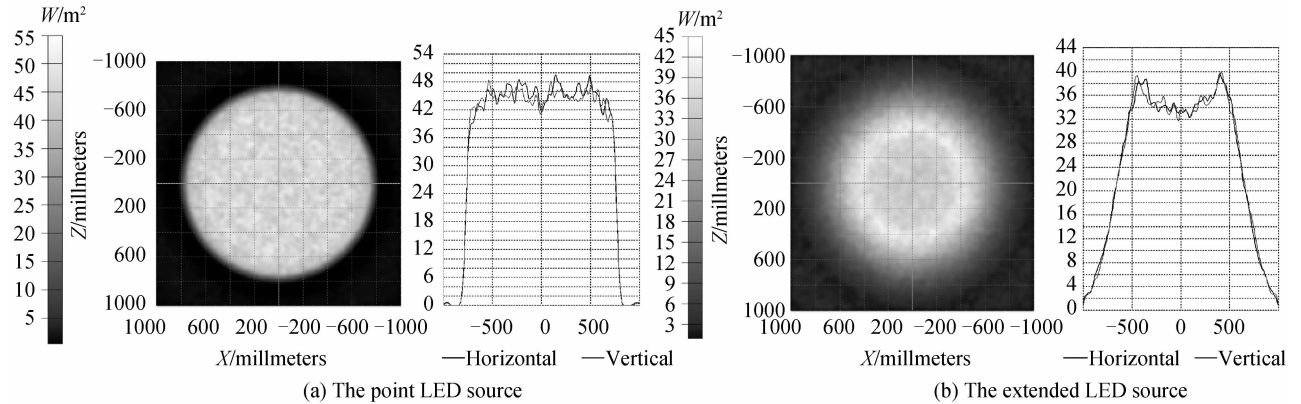


图 2 传统针对扩展光源进行的二次光学设计的方法

Fig. 2 The traditional method of secondary optics design based on extend LED source

图 2(a)中光斑平滑均匀,被照面照度均匀度为 0.9381 ,图 2(b)中光斑有明显亮环,且边界不清晰,被照面照度均匀度 0.8124 .虽照度均匀度达到设计要求,但这样的实际设计效果(图 2(b))和理想设计效果(图 2(a))差别很大,光斑变形,使被照面明暗不一,均匀度低,对比度下降,造成图像识别障碍,并且这种设计不能保证更换扩展光源(导致配光曲线改变)后的效果一致,该设计方法无法满足本文机器视觉照明系统需求.

2.1 系统基于 SMS 的透镜设计

本文采用的 SMS 算法是一种基于非成像光学的边缘光线理论(来自光源边缘的光线,射到接受面的边缘,光源内所有的光线都会在接受面边缘点内^[9-12])进行设计的算法,被照面形成的均匀光斑可理解为扩展光源的像,当采用配光存在差异的 LED 扩展光源芯片,被照面上的光斑均匀度会与芯片表面均匀度相似.在机器视觉照明系统中所选择的光源,只需其尺寸与设计光源尺寸相同,都可在目标待测面形成一个与设计光斑大小相同,照度均匀的圆形光斑,高均匀度,可以提高目标待测面对比度,得到高对比度清晰图像,无图像识别障碍,满足图像提取需求.该方法所设计透镜可保证,更换不同配光光型的 LED 光源的同时,被照面光斑均匀度不会下降.

根据边缘光线原理,按照等光程计算透镜上各点坐标和法向矢量,得出透镜上下表面的坐标点阵^[8,10].

图 3 为确定 SMS 透镜表面起始点原理图, G_1 、 G_2 为光源边缘点, M_1 、 M_2 为目标面边缘点, S_1 、 S_2 、

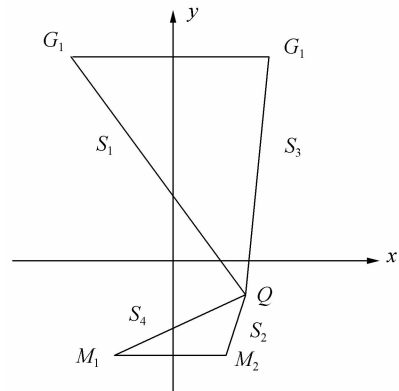


图 3 SMS 透镜起始点 Q 的确定

Fig. 3 Starting point Q of the surface of the SMS lens

S_3 、 S_4 分别为 G_1Q 、 QM_2 、 G_2Q 、 QM_1 对应的光程且满足

$$S_1 + S_2 = S_3 + S_4 \tag{1}$$

由式(1)得透镜初始点 Q 满足

$$S_1 - S_3 = S_2 - S_4 = C/2 \tag{2}$$

式(2)中 C 为常量.因此,透镜上下表面初始点应分别位于以 G_1 、 G_2 为焦点和以 M_1 、 M_2 为焦点的双曲线上,双曲线表达式为^[12]

$$(x, y) = \frac{(C/2)^2 - \text{dis}(X_1, X_2)^2}{C - 2\text{dis}(X_1, X_2)} (\cos \phi, \sin \phi) + X_1 \tag{3}$$

式(3)中 X_1 、 X_2 为双曲线两焦点的坐标, ϕ 为双曲线上坐标 (x, y) 的点到离它相对远的焦点的向量与 x 轴正方向的夹角, $\text{dis}(X_1, X_2)$ 表示 X_1 与 X_2 的几何距离.设计透镜时从透镜边缘开始,上下表面各定一个初始点,设定一个 ϕ 值带入式(3)便可求得,上下透镜表面初始点分别设为 Q_1 和 Q'_1 (见图 4).

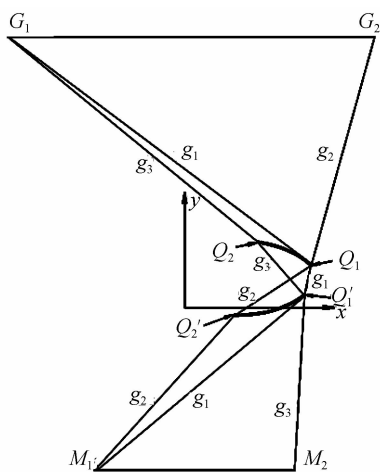


图 4 SMS 透镜设计方法

Fig. 4 The design of SMS lens with surface points Q_1 and Q_2

应用于本文所提出的机器视觉照明系统的具体要求为:使用直径 4.4 mm 的 LED 扩展光源,目标照射区域光斑直径 2.2 mm,目标面为高精度电路板,要求在目标照明区域光斑照度均匀度达到 0.8 以上.采用 SMS 设计一个实现均匀照度的圆形光斑,根据照明需求可设定初始点位置: $G_1 = (-2.2, 4.4)$ 、 $G_2 = (2.2, 4.4)$ 、 $M_1 = (-1.1, -4.4)$ 、 $M_2 = (1.1, -4.4)$,设定 Q_1 在以 G_1, G_2 为焦点的双曲线中张角 ϕ 值为 303° ,设定 Q_1' 在以 M_1, M_2 为焦点的双曲线中张角 ϕ 值为 47° ,设常量 $C=1$,对应式(3)得出 $Q_1 = (1.9915, -1.0848)$ 、 $Q_1' = (1.6125, -1.4708)$.

图 4 为 SMS 算法示意图, g_1 标出的光线表示由 G_1 出发最终到达 M_1 的光线, g_2 标出的光线表示由 G_2 出发最终到达 M_2 的光线, g_3 标出的光线表示由 G_1 出发最终到达 M_2 的光线,首先已知 G_1, Q_1, Q_1' 及透镜折射率 n ,即已知入射矢量,出射矢量,介质折射率,可得到透镜表面 Q_1 点处的法向矢量 NQ_1 ,便可得到光线 g_2 经过 Q_1 点时的出射矢量^[13],将其归一化后得到经过透镜下表面第二点 Q_2 时光线的入射矢量 RQ_2' ,已知 Q_1 点到 M_1 点的光程 $S_{Q_1M_1}$ 为

$$S_{Q_1M_1} = n \text{dis}(Q_1, Q_1') + \text{dis}(Q_1', M_1) \quad (4)$$

已知 $Q_1, RQ_2', n, S_{Q_1M_1}$ 即可得根据式(5)~(7)得透镜点的坐标

$$(x, y) = Q_1 + \frac{c_1 - \sqrt{c_2(1-n^2) + c_1^2}}{n^2 - 1} RQ_2' \quad (5)$$

$$C_1 = n S_{Q_1M_1} + (Q_1 - M_1) QR_2' \quad (6)$$

$$C_2 = S_{Q_1M_1}^2 - (Q_1 - M_1)(Q_1 - M_1) \quad (7)$$

式(5)~(7)中 Q_1, M_1 ,表示坐标原点指向该点的向量(利用同样的方法可以求得透镜上表面点 Q_2 坐标).然后在介于向量 Q_1Q_1' 和向量 Q_1Q_2' 之间取任意条向量(多组仿真结果表明此处条数选的越多

被照面均匀度越高,但是达到一定值后提高不明显)本文设计选择条数为 30 条,根据求解透镜点 Q_2 坐标的方法,可以求得介于向量 Q_1Q_1' 和向量 Q_1Q_2' 之间的向量对应在透镜下表面区域 $Q_1'Q_2'$ 之间透镜上的点阵二维坐标.同时可得其对应点的透镜曲面对应的法向矢量.再由 Q_1 点出发到 G_1 ,经过区域 Q_1Q_2 之间透镜上的点,易得这些点在透镜上表面对应 Q_1Q_2 间二维坐标.光线经过透镜上表面区域 Q_1Q_2 之间点阵到 M_1 ,可以得出对应透镜下表面对应区域 $Q_2'Q_3'$.光线经过透镜下表面区域 $Q_1'Q_2'$ 到 G_1 ,可以得出对应透镜上表面对应区域 Q_2Q_3 .以此类推,多次计算之后可以得到上下表面一系列透镜点阵坐标,选择二维坐标中 $x > 0$ 的点阵坐标,除去 $x < 0$ 的点阵坐标.将这些坐标数据在 3D 建模软件中拟合成二维自由曲线^[14],通过旋转即可得到如图 5 所示透镜结构.

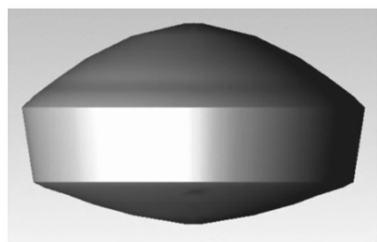


图 5 建立 SMS 透镜模型

Fig. 5 The modeling of SMS design lens

2.2 基于 SMS 设计的机器视觉照明光学系统结构

本文所提出基于 SMS 法的 LED 机器视觉照明系最终结构如图 6.所提出的照明系统可针对不同照明需求切换光源,通过转动转轴 1,旋转光源夹具装置 2,光线通过 SMS 透镜 3,在目标面 4 处形成一个照度均匀圆光斑,得到的像由高精度摄像设备 5 传输至终端处理设备完成最终机器视觉识别.其中光源夹具装置 2 并非如图 6 上视图所示只有四组光源安放位置,可预留多个安放普通照明用 LED 扩展

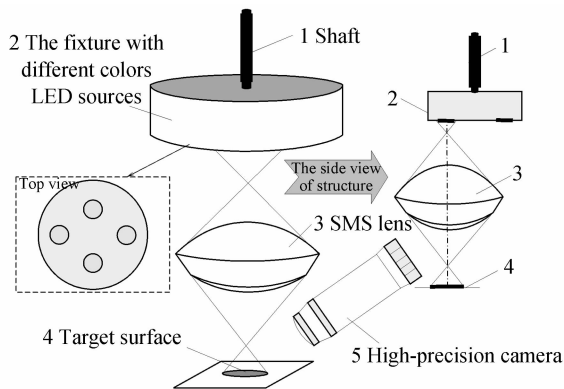


图 6 照明子系统结构

Fig. 6 The structure of new machine vision illumination system

光源的位置,预留位可放入满足其它照明光色需求的 LED 扩展光源,光源尺寸只需满足透镜设计中光源尺寸要求即可.

3 多组光源仿真实例

根据设计所得到 SMS 透镜,分别使用色温 (2 600~3 500)K 的 Cree Xlamp MC-E 暖白光芯片,捷锐 SM-LT5050006s-s 的 5050 冷白光芯片 (色温 6 900 K),PHILIPS LUXEON Rebel 彩色系列芯片:LXML-PM01 绿色光源,LXML-PB01 蓝色光源,LXML-PD01 红色光源,和理想朗伯型配光 LED 芯片该六组进行蒙特-卡洛光线追击仿真.六组光源配光光型如图 7.

仿真中 SMS 法所设计透镜材料选择为 PMMA,由于透镜材料折射率为关于光波长的函数,仿真不同波长的光需对应相应材料折射率.单色光仿真波长选取蓝光波长为 480 nm,绿光波长为

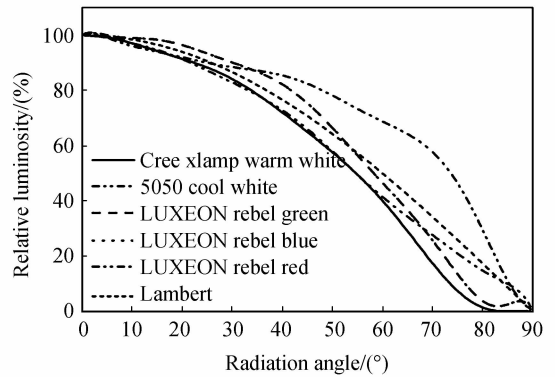


图 7 LED 光源配光曲线对比图
Fig. 7 The contrast of six LED sources distribution curve flux

546 nm,红光波长为 644 nm,对应材料 PMMA 的透镜折射率 n 值分别为:1.498 3、1.493 8、1.489 6.白光对应材料 PMMA 的透镜折射率 n 值为 1.493 5,光学仿真软件中对六组光源均使用 200 万条光线进行蒙特-卡洛光线追击仿真,仿真结果如图 8.

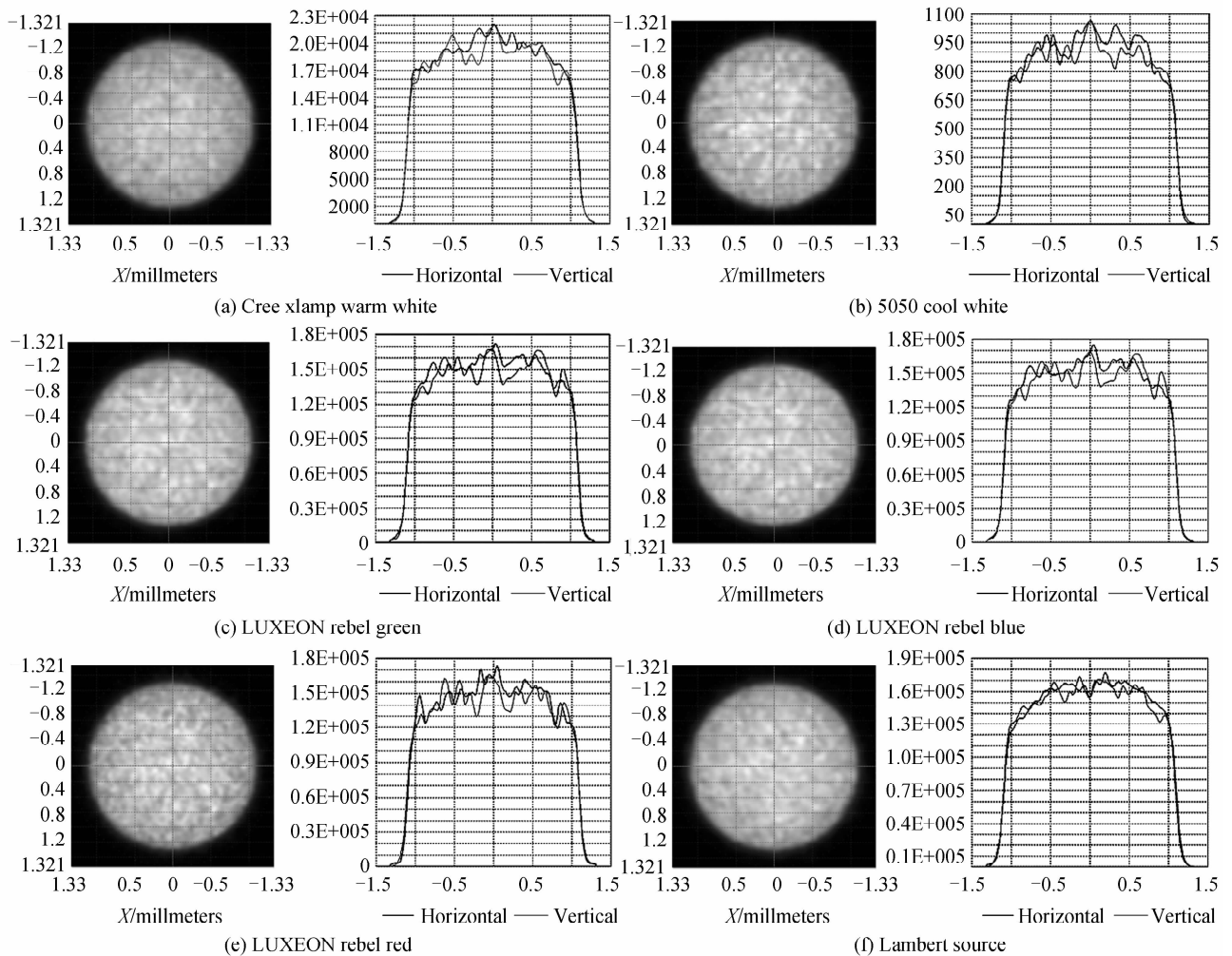


图 8 六组光源仿真效果对比图
Fig. 8 The contrast of six LED sources simulation

六幅仿真效果图中被照面的照度均匀度分别为:0.877 2、0.876 0、0.899 2、0.901 2、0.878 1、

0.890 2.从图 9 中可以看出,六组光源仿真效果均优于同样使用尺寸为圆形直径 4.4 mm 的 LED 扩

展光源图 2(b)的效果,保证了使用 LED 扩展光源时目标面的照度均匀度,并且 SMS 法设计的透镜还可以保证本文提出的结构在不同配光光源时,被照面均具有良好的均匀度指标。

4 结论

针对机器视觉系统中,同一个被测物体有多个特征,需要照明系统发出不同光色的光照射分别提取各个特征的情况,本文提出一种基于 SMS 法的 LED 机器视觉照明系统设计方法,在更换不同光色,并且具有不同配光光型的普通照明用 LED 光源的同时,保证了目标面照度均匀度,不会因为被照面照度不均匀导致的辨别度下降,并且光源光色只需满足照明光色要求,光源尺寸符合设计尺寸要求,无需考虑配光光型即可集成入新结构使用,无需使用经过匀光设计的独立结构的 LED 光源。

光线经过 SMS 设计透镜后在目标面所形成光斑照度均匀度虽有明显提高,但所设计出针对 LED 扩展光源的透镜能量利用率比传统二次光学设计针对 LED 扩展光源的透镜能量利用率低,因而适用于对能量利用率要求不太高,但对目标面照度均匀度有较高要求的机器视觉照明系统。

参考文献

- [1] 贾云得. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 2-13.
- [2] HUANG X, JIANG Z, LU L, *et al.* The study of illumination compensation correction algorithm [C]. Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011: 2967-2970.
- [3] ZHU Z, QU X, JIA G X. Wavelength intervals selection of illumination for separating objects from backgrounds in color vision applications[J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, **58**(9): 777-785.
- [4] DOWLING K J, MUELLER G G, LYS I A. Systems and methods for providing illumination in machine vision systems; US, 7042172[P]. 2006-05-9.
- [5] WINSTON R, MIÑANO J C, BENITEZ P G. Nonimaging optics[M]. San Diego: Academic Press, 2004: 1-15.
- [6] XIA Xun-li, YU Bin-hai, MAI Zhen-qiang. Design on LED encapsulation lens with homogenous light field[J]. *Optical Instruments*, 2010, **32**(2): 45-48.
夏勋力, 余彬海, 麦镇强. 具有均匀光照场的 LED 封装透镜设计[J]. 光学仪器, 2010, **32**(2): 45-48.
- [7] WANG K, WU D, QIN Z, *et al.* New reversing design method for LED uniform illumination[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(104): A830-A840.
- [8] CHEN H C, LIN J Y, CHIU H Y. Rectangular illumination using a secondary optics with cylindrical lens for LED street light[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(3): 3201-3212.
- [9] MUNOZ F, BENI'TEZ P, DROSS O. Simultaneous multiple surface design of compact air-gap collimators for light-emitting diodes[J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(7): 1522-1530.
- [10] RIES H, RABL A. Edge-ray principle of nonimaging optics [J]. *JOSA A*, 1994, **11**(10): 2627-2632.
- [11] LEBENS G A. Machine-vision illumination system and method for delineating a lighted volume from an unlighted volume; US, 5745176[P]. 1998-04-28.
- [12] BENI P, MIN J C, DROSS O, *et al.* Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions[J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(7): 1489-1502.
- [13] CHAVES J. Introduction to nonimaging optics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2008: 271-324, 467-512.
- [14] KOSHEL R J. Illumination Engineering: design with nonimaging optics [M]. USA: Wiley-IEEE Press, 2012: 1-20.