

机器视觉系统前置矩形 LED 阵列的优化布置

郝 飞^{1,2} 史金飞¹ 朱松青² 张志胜¹ 韩亚丽² 陈茹雯²

(¹ 东南大学机械工程学院, 江苏 南京 211189
² 南京工程学院轨道交通车辆现代化装备实验室, 江苏 南京 211167)

摘要 为获得均匀光照,提高视觉测量系统图像的品质,对前置对称安装的矩形发光二极管(LED)光源布置问题进行了研究。考虑到解析法要求光轴与辐照面法线平行,提出采用优化的方法布置光源。根据光源的结构特征,以方差作为主要指标,建立优化目标函数。考虑到目标函数的非凸性,采用模拟退火算法(SA)对问题进行求解。搭建实验平台对照度分布进行了测量,考察均匀度在95%以上的区域,优化方法的结果与实验结果基本一致,误差在4%以内。结果表明,确定的优化目标合理,提出的光源优化布置方法有效。

关键词 机器视觉;光照设计;均匀照明;优化计算;矩形 LED 阵列

中图分类号 TB811. +1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1215001

Optimal Positioning of Forward Installed Square LED Arrays for Machine Vision System

Hao Fei^{1,2} Shi Jinfei¹ Zhu Songqing² Zhang Zhisheng¹ Han Yali² Chen Ruwen²

(¹ School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China
² Laboratory of Modern Equipment for Rail Vehicle, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract Positioning of forward symmetrically installed square light-emitting diode (LED) arrays are studied to achieve uniform illumination with which high quality images can be gathered for machine vision measurement. The optimization method is used to solve this problem because the optical axes of the arrays are not perpendicular to the irradiated plane, which can't be solved by analytic method. The variance is chosen to establish the mathematical model of goal function on the base of the structure characteristics of LEDs. The simulated annealing (SA) algorithm is chosen for solving the non-convex objective function. An experiment system is developed for illumination photometry. The sizes of area with 95% of uniformity of the analytic method are a little larger than those of the optimization based method. The maximum difference is within 4%. The results show that the optimization objective is reasonable and the method is feasible.

Key words machine vision; lighting design; illumination uniformity; optimization; square LED arrays

OCIS codes 150.0155; 150.2945; 150.2950

1 引言

在机器视觉测量中,正确选择与合理布置光源是极其重要的。采集高质量图像可以简化图像处理算法,并能提高算法的可靠性能^[1-4]。目前可采取

的处理办法有:1)研究对光照变化稳健的图像算法;2)通过运用外部光源控制照明条件。在线机器视觉测量中,时间受到限制,因此通过使用外部光源照明视场是首选。

收稿日期: 2014-06-17; 收到修改稿日期: 2014-07-05

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51305194, 51205182)、江苏省六大人才高峰重点项目(2012-ZBZZ-049)、江苏省高校自然科学基金(14KJD46001)

作者简介: 郝 飞(1982—),男,博士研究生,主要从事机器视觉测量方面的研究。E-mail: hf_1982@njit.edu.cn

导师简介: 史金飞(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事机器视觉理论与应用方面的研究。

E-mail: shjif@seu.edu.cn

机器视觉系统早期的光源为白炽灯,通常只有一个光源,通过设计专门的光通路实现照明^[5]。以多面体为目标零件,Yi等^[6]采用优化的方法对光源和相机进行布置,Cowan^[1,7]提出了基于CAD模型的照明设计方法,都不涉及专门光通路的设计。Sieczka等^[8]的研究则没有具体的对象,阐述了机器视觉系统光源设计的一般思路。

发光二极管(LED)光源具有发光效率高、结构紧凑、安全性和稳定性好等优点,被越来越广泛地应用于机器视觉系统中^[9-10]。LED光源均匀光照设计的方法主要有三种:解析法^[11-13]、最优化方法^[14-15]以及基于光学仿真软件的方法^[16-17]。解析法要求LED的光轴与目标面的法线平行,当LED数量比较多时,数学表达式复杂,难以求得其准确解。最优化方法多以方差为均匀度的度量指标^[14],也可以直接从照度均匀度定义出发^[15],但无论是以方差还是以均匀度为优化目标,照度分布曲线都易于呈波浪形。第三种设计方法则需要不断地尝试并改进,当光源的特征参数或结构参数发生变化时,需要对照明系统重新建立三维模型^[16-17]。此外,上述文献报道均是均匀光照设计,而不是针对已有的光源进行合理的布置。然而,在搭建机器视觉测量系统时,通常是从市场上直接采购光源,光源的参数已经确定,光源的结构也无法改变。为获得良好的照明,只能通过调整光源的安装位置来实现,即光源布置问题。因此,以市场上采购而来的矩形LED阵列光源为对象,以方差作为均匀度的度量指标,以方差最小化为主要优化指标,并以照度高低、照度极大值位置、辐照区域面积大小为约束条件,建立完备的优化目标函数,进行前置对称光源的优化布置研究,并进行理论验证和实验验证,与其他的光源优化布置方法进行了对比。

2 数学模型的建立

2.1 问题描述

光源前置的反射照明方式能够凸显被测零件的细节特征,采集高质量图像从而有利于测量。图1所示为两个VS-WL200R条形LED光源前置对称布置,每个条形LED光源由150个非相关的LED按5行30列排列而成。VS-WL200R条形LED光源由市场采购而来,光源的参数已经确定,结构也无法改变。为获得良好的照明,只能通过调整光源的安装参数来实现,包括两光源的相对距离、安装高度、倾角三个参数。

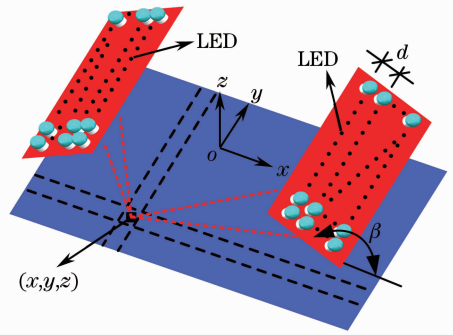


图1 两对称安装的条形LED光源的辐照模型
Fig.1 Model of symmetrically installed square LED arrays

2.2 优化目标函数

进行光源的优化布置以获得均匀一致的光照,1)考虑的是照度分布的均匀性。2)照度过低将降低图像的质量,而不利于测量^[18],因此辐照区域的照度应在合理的范围内。3)从测量的角度考虑,均匀度高的区域应足够大,以确保整个待测零件获得相同的照度。用文献^[14-15]的方法布置光源,照度分布曲线易于呈波浪形,与理论上的最优照度部分曲线不吻合。因此,增加照度极大值出现的位置作为约束条件,约束照度分布曲线。

以方差作为均匀度的度量指标,以方差最小化为主要优化目标,以照度的高低、高均匀度区域面积的大小以及照度极大值出现的位置为约束条件,建立以下优化目标函数:

$$\begin{cases} (\hat{x}, \hat{z}, \hat{\beta}) = \arg \min_{(x, z, \beta)} \sum_i \sum_j (e_{ij} - \bar{e})^2 \\ \text{s. t. } \bar{e} > P_1, d = 0, s > P_2 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 e_{ij} 是区域离散化处理 (i, j) 网格点处的照度, \bar{e} 是区域照度的均值, P_1 是照度均值的阈值, d 是照度极大值所在位置到区域中心的最小距离, s 是辐照区域的面积, P_2 是区域面积的阈值,它们都是关于光源安装参数 x, z, β 的函数。 P_1 和 P_2 应根据具体的情况取不同的值,如待测零件的材质、尺寸等。

(1)式是一个约束优化问题,可采用罚函数法转化为无约束优化问题。分别为外罚函数和内罚函数转化等式约束条件和不等式约束条件,有以下新的优化目标函数:

$$(\hat{x}, \hat{z}, \hat{\beta}) = \arg \min_{(x, z, \beta)} \left\{ \sum_i \sum_j (e_{ij} - \bar{e})^2 + r^{(1)} \phi_e(\bar{e} - P_1) + r^{(2)} \phi_s(s - P_2) + r^{(3)} \varphi(d) \right\}, \quad (2)$$

式中 $r^{(1)}$ 、 $r^{(2)}$ 及 $r^{(3)}$ 是加权因子, ϕ_e 、 ϕ_s 及 φ 是罚函数。

2.3 LED 照度模型

单个 LED 几何尺寸较小可看作具有相同光通量的点光源,其照度分布是一个余弦函数,空间任意一点照度 E 可按(3)式求解:

$$E(d, \theta, \beta) = I_0 \cdot \cos^m \theta \cdot \cos \beta \cdot d^{-2}, \quad (3)$$

式中 I_0 为平均球面发光强度, θ 为光线与光轴的夹角, m 是与 LED 半衰角有关的参数。如果光源为朗伯体 m 可取为 1, 通常 m 大于 1, 并由半衰角 $\theta_{1/2}$ 所确定, 对于给定的 LED 其半衰角 $\theta_{1/2}$ 是确定的常数。 d 为目标面元到点光源的距离, β 为光线与目标面元法线的夹角。

考虑到 LED 光源是一种非相关光源, 空间一点的照度是各个 LED 光源在该处照度的线性叠加:

$$e_{i,j} = \sum_k E[d_k^{(i,j)}, \theta_k^{(i,j)}, \beta_k^{(i,j)}], \quad (4)$$

式中 $e_{i,j}$ 是离散点 (i, j) 的照度, $d_k^{(i,j)}$ 是第 k 个 LED 光源到点 (i, j) 的距离, $\theta_k^{(i,j)}$ 是第 k 个 LED 光源向点 (i, j) 辐射的光线与光轴的夹角, $\beta_k^{(i,j)}$ 是第 k 个 LED 光源向点 (i, j) 辐射的光线与目标面法线的夹角。

3 算法实现及流程

3.1 模拟退火算法

(2)式是一个非凸二次规划问题,它有多多个平稳点和局部极小值点,可以采用全局优化算法进行求解。模拟退火算法(SA)是基于 Monte-Carlo 迭代求解策略的一种随机寻优算法,它具有理论上的概率的全局优化性能。

SA 算法的主要优点可以概括为高效性、稳健性、通用性和灵活性。然而,SA 算法的优越性能是以严密的退火计划为保证的,即足够高的初始温度、缓慢的退火速度、大量的迭代次数及同一温度下足够的扰动次数。SA 算法为了避免落入局部最优,采用玻尔兹曼机制,然而每一步冷却,为使状态达到平衡分布将是一个非常耗时的过程。SA 算法对于已试探的空间区域所知不多,不能利用已试探过的区域引导搜索,且很难判断空间中的哪些区域有更多的机会得到最优解。在这种意义上,SA 算法被称为“随机漫步”。因此,SA 算法的主要不足表现为:返回一个高质量近似解的计算耗时比较长,当问题的规模不可避免地增大时,难以承受的运行时间将使得算法丧失可行性^[19]。

3.2 算法流程

考虑到 SA 算法的上述优点与不足,通过多次尝试计算,确定了表 1 所列出的冷却参数。SA 算

法具有概率的全局最优解,单次计算的结果有可能并非全局最优解,因此对每一个问题都进行多次求解,从中选取较优的结果作为优化计算的最终结果。具体的算法流程如下:

算法:

- 1) 初始化: 包括初始温度 t_0 , 终止温度 t_f , 温度衰减系数 α_k , 迭代次数 k , Mapkob 链长度 L_k 以及初始解 S_0
- 2) $t_k = t_0$
- 3) $S_{old} = S_0$
- 4) while Stop Criterion do
- 5) for $i = 1$ to L_k do
- 6) Generate S_{new}
- 7) if $f(S_{new}) \leq f(S_{old})$ then
- 8) $S_{old} = S_{new}$
- 9) else
- 10) if $\exp(-\Delta f/t_k) > \text{rand}[0, 1]$ then
- 11) $S_{old} = S_{new}$
- 12) end if
- 13) end if
- 14) 根据温度衰减系数 α_k 更新 t_k
- 15) end for
- 16) end while

表 1 冷却进度表

Table 1 Cooling schedule

Initial temperature t_0	End temperature t_f	Attenuation coefficient α_k	Iterations k	Mapkob chain L_k
5	1	0.6	3	40

4 验证与分析

4.1 理论验证

如果每个 LED 的光轴都与辐照平面的法线平行,并且 LED 的数量较少,那么可以用解析的方法求解该 LED 阵列的照度分布。以由 8 个 LED 等间距布置而成的环形 LED 阵列为对象,用解析的方法和优化的方法对其照度分布进行求解。图 2 中实线为解析法得到的照度部分曲线,虚线是优化方法得到的照度部分曲线。两照度分布曲线具有完全相同的曲线类型,考察均匀度^[10]大于 0.95 的区域,优化方法的区域面积比解析法的区域面积略小,其相对差值为 5.33%,但是优化方法的区域照度高,其相对差值为 1%。为考察优化方法的耗时情况,进行

了 50 次优化计算,其平均耗时不超过 0.14 s。结果表明,文中设计的优化目标函数是合理的,所采用的最优化求解方法能够快速得到全局最优解。

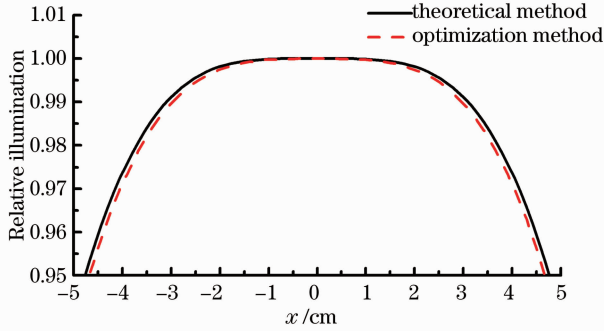


图 2 环形 LED 阵列的理论解与优化解

Fig. 2 Theoretical solution and optimal solution of ring LED arrays

4.2 实验验证

为进一步验证文中提出的光源优化布置方法的有效性,首先用优化的方法求解光源的最优安装参数,然后搭建实验平台进行照度分布的实验验证。对称布置两个 VS-WL200R 矩形 LED 阵列,如图 1 所示,考察 200 mm×200 mm 辐照区域内的照度分布。求解最优安装参数时相关参数的取值如下:1) m 取 4.82;2) 网格尺寸为 2 mm;3) LED 的间隔为 6.7 mm。在实验验证中,如图 3 所示,采用 TES-1330A 照度计进行照度的测量,照度计安装在固高 GXY2020GT4-XLE 型机电一体化二维步进滑台上,二维步进滑台工作范围设定为 200 mm×200 mm,定位精度为 0.05 mm,光源由 MV-BR20 型光源支架支撑,光源安装参数由手动调整。滑台首先沿 x 轴(或 y 轴)运动,找到照度的极大值所在位置(有多个相等极大值时,位置坐标取其均值),然后滑台再沿 y 轴(或 x 轴)运动,同样找到照度的极大值所在

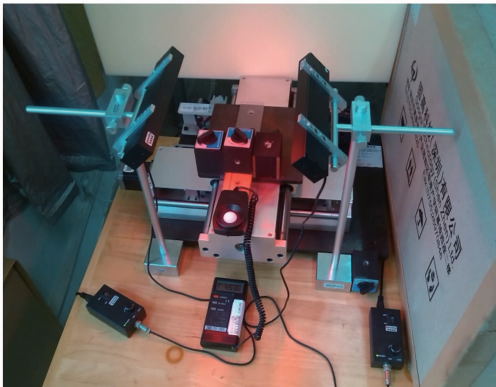


图 3 照度分布实验测定平台

Fig. 3 Experiment platform for illumination photometry

位置,记录该点的位置坐标,从该点出发,滑台分别沿 x 轴和 y 轴运动,每间隔 5 mm 读取照度。为了尽量减小周围环境和 LED 稳定性的影响,实验在暗室中进行,并预热 30 min。

采用优化的方法得到一组光源的最优安装参数如下:1)光源的相对距离应为 384 mm;2)光源的高度应为 190 mm;3)光源安装倾角应为 136° 。此时的照度分布如图 4 所示。考察照度高于 48.1 Lux 的区域,照度分布呈椭圆形,椭圆的长轴约为 154 mm,短轴为 76 mm,椭圆的长轴与短轴比约为 2,区域的均匀度约为 94.31%,照度分布比较均匀。椭圆形的照度分布较适宜于窄长形零件,譬如轴类零件的几何精度检验。

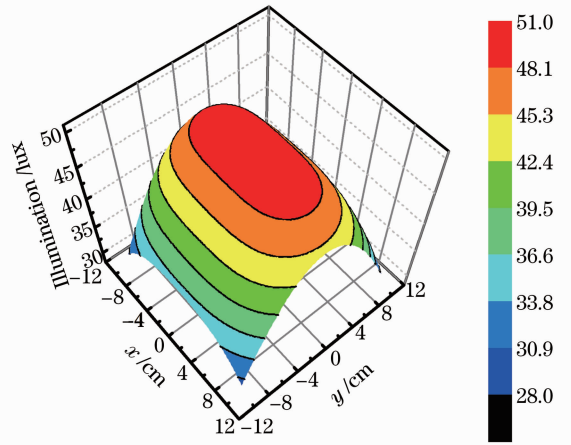


图 4 最优安装参数时的照度分布

Fig. 4 Illuminance distribution with the optimal installation parameters

按照上述最优的光源安装参数调整实验平台,分别沿 x 轴和 y 轴方向测定 0~200 mm 范围内的照度分布,绘制图 5 所示的照度分布曲线。由图 5 可知,沿 x 轴方向,两条照度分布曲线都有一个较宽的平坦区域,考察均匀度 95% 以上的区域,与优化的方法相比,实验曲线平坦区域的尺寸略大些,相对差值为 3.9%;沿 y 轴方向,实验结果与优化结果比较,实验曲线开口稍大些,曲线稍平坦些。结果表明,优化方法的结果与实验测定的结果基本吻合,文中提出的光源优化布置的方法有效。

4.3 与其他最优化方法对比

为进一步说明(1)式给出的目标函数的合理性,验证提出的光源优化布置方法的有效性,将所提方法的结果与文献[14~15]的结果进行对比,绘制了如图 6 所示的相对照度曲线。

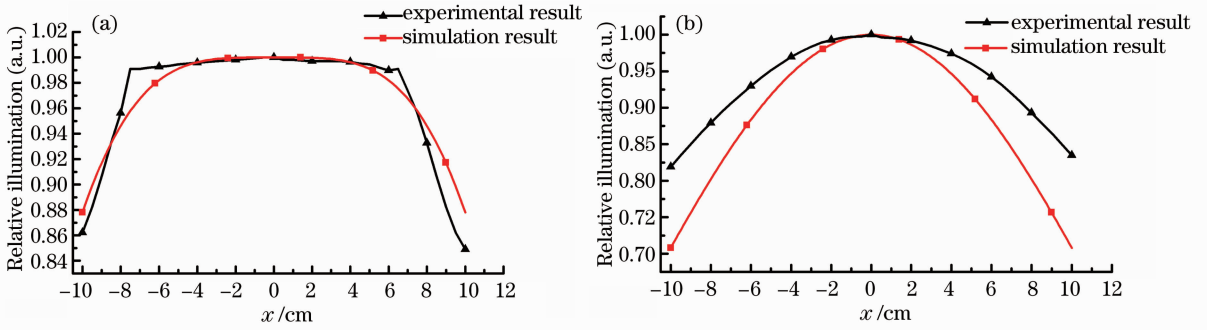


图 5 优化结果与实验结果的对比。(a) 相对照度沿 x 轴方向的分布；(b) 相对照度沿 y 轴方向的分布

Fig. 5 Comparison of optimal result with experimental result. (a) Distribution of relative illumination along the x axis; (b) distribution of relative illumination along the y axis

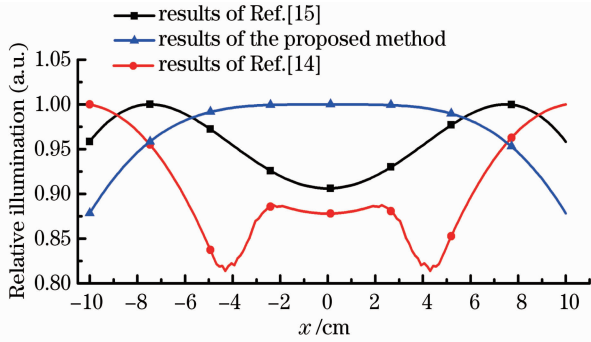


图 6 所提方法与其他最优化方法对比的结果

Fig. 6 Comparison of result of the proposed method with those of other optimization methods

由图 6 可知,按照文献[15]的方法布置光源,照度分布的均匀性最好,相对照度的极差仅为 0.0939,而按照文献[14]的方法布置光源,照度部分的均匀性最差,相对照度的极差为 0.1858。文献[14]和[15]的照度部分曲线都呈波浪形,与理论照度部分曲线有一定的差异(如图 2 所示)。结果表明,单一的以照度的方差为优化指标,或者是直接以均匀度为优化指标,都不能保证优化得到的结果与理论上的结果较好地吻合,进一步需要说明的是,在以方差为主要优化指标的基础上,通过增加必要的约束条件控制照度部分曲线的做法能够确保优化的结果更接近实际。

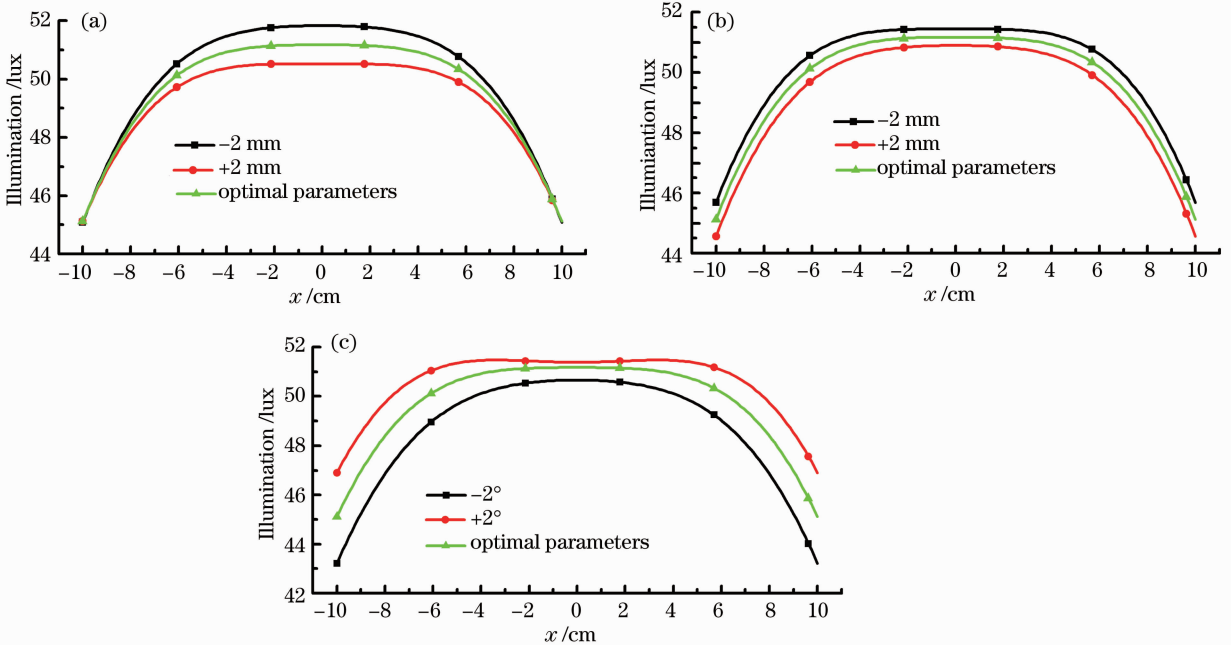


图 7 相对最优参数改变安装参数对照度分布的影响。(a) 改变光源的相对距离；(b) 改变光源的安装高度；(c) 改变光源的安装角度

Fig. 7 Influence of varying the installation parameters of the two LEDs. (a) Vary the relative distance of the two LEDs; (b) vary the height of the two LEDs; (c) vary the angle of the two LEDs

4.4 调整安装参数对照度分布的影响

分三种情况考虑当安装参数偏离最优安装参数时照度分布的改变情况。第一种情况是, x 坐标在最优参数基础上分别有一个+2 mm 和-2 mm 的变化;第二种情况是, z 坐标在最优参数基础上分别有一个+2 mm 和-2 mm 的变化;第三种情况是, β 最优参数基础上分别有一个+2°和-2°的变化。图 7(a)~(c)分别是第一种情况、第二种情况及第三种情况下照度分布曲线。

由图 7(a)可知,当两个光源相对靠近时(x 坐标变化-2 mm),照度分布曲线中平坦区域的尺寸变小;相反情况,照度最大值偏离辐照区域的中心,照度分布曲线则呈“M”。考察均匀度大于 0.95 的区域,按最优参数布置光源,区域的面积为 10120 mm²,照度均值为 49.8 Lux;当两个光源相对靠近时,区域的面积为 9550 mm²,减少了 5.6%,平均照度为 50.3 Lux,增加了 1.15%。由图 7(b)可知,增加安装高度时照度分布改变情况与光源相对靠近时相同。考察均匀度大于 0.95 的区域,当 z 坐标在最优参数基础上有+2 mm 变化时,椭圆的长轴和短轴分别变短和变长,各变化了 1.64%和 3.33%,区域的面积减少了 3.04%,平均照度为 49.4 Lux,减小了 0.75%。由图 7(c)可知, β 变小时照度分布改变情况与光源相对靠近时相同。考察均匀度大于 0.95 的区域,当 β 在最优参数基础上有-2°变化时,椭圆的长轴变短,短轴变长,分别变化了 9.84%和 3.33%,区域的面积减少了 13.17%,平均照度为 49.1 Lux,减小了 1.35%。当 x 坐标改变+2 mm 时, z 坐标有-2 mm 改变时以及 β 变化+2°时,照度分布改变情况相同。

5 结 论

在机器视觉测量中,正确选择与合理布置光源是采集高质量图像的保证,可以简化图像处理算法,并能提高算法的可靠性与实时性。以从市场上直接采购到的矩形 LED 阵列为光源,开展光源优化布置研究。在方差最小化的基础上,通过引入约束条件,形成完备的优化目标,采用模拟退火算法进行问题的求解。对提出的光源优化布置的方法进行理论验证和实验验证,并与其他优化布置光源的方法进行了对比分析。结果表明,确定的优化目标合理,采用的最优化解方法能快速地得到全局最优解,提出的光源优化布置的方法有效。

参 考 文 献

- 1 C K Cowan. Automatic camera and light-source placement using CAD models [C]. Workshop on Directions in Automated CAD-Based Vision, 1991. 22-32.
- 2 Zhang Xuping, Wang Jiaqi, Zhang Yixin, *et al.*. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315002.
张旭苹, 汪家其, 张益昕, 等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315002.
- 3 Lu Qinghua, Xu Chongchuan, Wang Hua, *et al.*. Research on dimension measurement of large size ceramic floor tiles based on machine vision [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0312004.
卢清华, 许重川, 王 华, 等. 基于机器视觉的大幅面陶瓷地砖尺寸测量研究[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0312004.
- 4 Y Ding, X Liu, Z R Zheng, *et al.*. Freeform LED lens for uniform illumination [J]. Opt Express, 2008, 16(17): 12958-12966.
- 5 S Mersch. Overview of machine vision lighting techniques [C]. SPIE, 1987. 36-38.
- 6 S K Yi, R M Haralick, L G Shapiro. Optimal sensor and light-source positioning for machine vision [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1995, 61(1): 122-137.
- 7 C K Cowan, B Modayur. Edge-based placement of camera and light source for object recognition and location [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta, 1993. 586-591.
- 8 E J Sieczka, K G Harding. Light source design for machine vision [C]. SPIE, 1991. 2-10.
- 9 Z M Zhu, X H Qu, G X Jia, *et al.*. Uniform illumination design by configuration of LED array and diffuse reflection surface for color vision application [J]. J Display Technology, 2011, 7(2): 84-89.
- 10 Li Lin, Wang Zhong, Pei Fangying, *et al.*. Improved illumination for vision-based defect inspection of highly reflective metal surface [J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(2): 35-38.
- 11 A J W Whang, Y Y Chen, Y T Teng. Designing uniform illumination systems by surface-tailored lens and configurations of LED arrays [J]. Journal of Display Technology, 2009, 5(3): 94-103.
- 12 I Moreno, A M Avendaño, R I Tzonchev. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance [J]. Appl Opt, 2006, 45(10): 2265-2272.
- 13 I Moreno, J Muñoz, R Ivanov. Uniform illumination of distant targets using a spherical light-emitting diode array [J]. Optical Engineering, 2007, 46(3): 033001.
- 14 S K Kopparapu. Lighting design for machine vision application [J]. Image and Vision Computing, 2006, 24(7): 720-726.
- 15 D Ramane, A Shaligram. Optimization of multi-element LED source for uniform illumination of plane surface [J]. Opt Express, 2011, 19(104): A639-A648.
- 16 Li Lin, Wang Guangzhen, Wang Lili, *et al.*. Lens design for uniform illumination with LED [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222002.
李 林, 王光珍, 王丽莉, 等. 实现均匀照明的 LED 系统设计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0222002.
- 17 Lai Liping, Zhuang Qiren, Liang Dejuan, *et al.*. Investigation of uniform illumination of the near-field on the lateral panels using LED projectors [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0211002.
赖丽萍, 庄其仁, 梁德娟, 等. 基于近场侧面均匀照明的 LED 投射器研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0211002.
- 18 Wu Wencen, Zhao Hui, Liu Weiwen, *et al.*. Effects of illumination on image quality in precision vision measurement [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(6): 931-934.
吴雯岑, 赵 辉, 刘伟文, 等. 精密视觉测量中照明对图像质量的影响[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(6): 931-934.
- 19 C Y Lee, D Lee. Determination of initial temperature in fast simulated annealing [J]. Computational Optimization and Applications, 2014, 58(2): 503-522.