

文章编号: 1000-7032(2018)03-0414-08

## 三通道 PWM 的数控调光调色方法

骆伟岸<sup>1\*</sup>, 王 晗<sup>1</sup>, 陈新度<sup>1</sup>, 曾耀斌<sup>2</sup>, 李志劲<sup>2</sup>, 何锐国<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006; 2. 佛山市质量计量监督检测中心, 广东 佛山 528000)

**摘要:** 针对目前机器视觉光源存在工作时长、需要现场工作人员手动调试、发热严重、适应能力差等问题, 提出了一种基于 PWM 的数字控制光源, 建立了混色光下三通道占空比与光照度的函数关系, 分 8 种情况讨论, 并分析了该模型的局限性。从调光原理、驱动原理和控制原理 3 方面详细说明了该数控光源的实现方法, 并且对本文提出的数学模型进行了 4 种有代表性的实验测试。实验结果表明, 该数学模型能满足大多数比例的混光模型, 实现光源颜色、照度可调, 上述问题均可得到良好的解决, 同时提高光源寿命、节约能源。

**关键词:** 光源; 机器视觉; PWM; 混光; LED

中图分类号: TP273 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20183903.0414

## A Digital Dimming Color and Intensity Method of Three-channel LED

LUO Wei-an<sup>1\*</sup>, WANG Han<sup>1</sup>, CHEN Xin-du<sup>1</sup>, ZENG Yao-bin<sup>2</sup>, LI Zhi-jin<sup>2</sup>, HE Rui-guo<sup>2</sup>

(1. School of Electro-mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Department of Foshan Supervision Testing Center of Quality and Metrology, Foshan 528000, China)

\* Corresponding Author, E-mail: willian\_lok@163.com

**Abstract:** In machine vision, there are many problems exist in light-source, like long running times, manual debugging, heating seriously and poor adaptability. Accordingly, a digital dimming method of light source was proposed based on PWM technology, which was divided into eight situations. The limitation of this model was pointed out and the principals of the digital light-source was declared from three aspects: dimming theory, control theory as well as driving theory. In the meanwhile, four representative experiments were showed out. The results show that this method can satisfy most proportion of the mixed light models, and realize the adjustment of color as well as the change of illumination. With the function of trigger control, the above problems can be solved properly, at the same time, postponing aging of light-source and energy saving can be achieve as well.

**Key words:** light source; machine vision; PWM; mixed light; LED

## 1 引 言

近十几年来,LED 的发展极大地推动了机器

视觉光源的发展。由于其节能、环保、使用寿命长的优点和优势<sup>[1]</sup>,绿色照明理念开始萌芽和发展,到今天已经深入人心,21 世纪将进入以 LED

收稿日期: 2017-06-29; 修订日期: 2017-09-18

基金项目: 广东省科技计划(2015B010102014); “广东特支计划”科技青年拔尖人才项目(YQ2015056); 广东省“质量工程”建设项目(SJJD006); 广东省自然科学基金(2015A030312008); 广东省公益研究项目(2015B010104006)资助  
Supported by Science and Technology Project of Guangdong Province(2015B010102014); Top Talent Project for Young Scientists of “Special Projects of Guangdong Province” (YQ2015056); “Quality Engineering” Project of Guangdong Province(SJJD006), Natural Science Foundation of Guangdong Province (2015A030312008); Commonweal Research of Guangdong Province (2015B010104006)

为代表的新型照明光源时代, 被称为第四代新光源<sup>[2]</sup>。

随着劳动力成本的上升, 工业自动化程度逐年提高, 机器视觉在其中发挥了巨大作用, 其应用从最初的零件识别、尺寸检测, 发展到深度提取, 再到神经网络、深度学习等<sup>[3-6]</sup>, 其影响力还在逐步提升。

光源是影响视觉系统输入的重要因素, 它直接影响输入数据的质量和至少 30% 的应用效果, 它直接影响后续处理过程的复杂程度、整体系统的稳定性<sup>[7]</sup>。但目前针对机器视觉的光源仍存在一些问题, 同一类型的光源针对不同颜色的待测特征需要不同的光照颜色来凸显, 如电路板检测, 检测焊锡和检测色环电阻需要不同颜色的光照来提高对比度, 检测不同颜色的电器元件也需要特定颜色的光照颜色来提高图像对比度<sup>[8]</sup>。在不同的工作时间内也需要不同的照度, 白天和晚上环境光对视觉的影响不同, 也可能导致检测系统的不稳定。

大多数光源在视觉系统工作时一直保持照明, 导致光源工作时间较长、发热严重、浪费能源。在实际应用中, 工业相机拍照只需要在特定时间有恰当的光照即可。因此, 研究一个颜色可调、自适应照度并且能数字控制的光源具有重要的理论意义和应用价值。

## 2 系统设计原理

### 2.1 调光原理

根据色度学原理, 如图 1, 在 CIE 国际照明委员会提出的色品图上, 两种颜色相加产生的第三

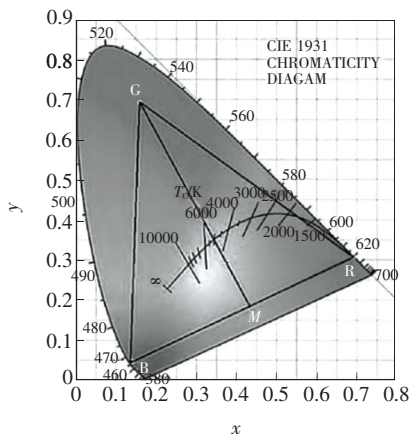


图 1 x-y 色品图

Fig. 1 Chromaticity diagram from CIE, 1931

种颜色总是在这两种颜色相连接的线段上。

其中 R、G、B 分别表示红光、绿光和蓝光, 红光和蓝光混合可以得到第三种颜色 M, 根据格拉斯曼混色原理<sup>[9]</sup>可知, M 在 R、B 连线上的具体位置将由 R 和 B 的混合比例决定。同理可再利用 M 与绿光混合出 RGB 三角形内的目标色, 所以三角形 RGB 内所包含的颜色都可以通过控制 R、G、B 的不同比例混合实现, 利用三通道 PWM 调光实现调色的目的。

### 2.2 照明控制设计

为设计出一种稳定、并且完全数字控制的光源, 本文采用 PC 机输出信号给单片机、最终控制输出电流占空比的方法, 即 PWM 调光。PWM 调光原理主要是通过改变流经 LED 灯的电流信号的占空比(导通时长/总时长), 从而改变 LED 灯的亮度。控制系统原理图如图 2 所示, MFC 软件通过 RS232 串口发送信号给 atmega2560 单片机, 用来改变 PWM 占空比, 接着把输出信号发送给滤波和放大电路, 最终给光源 LED。其中滤波方法采用 RC 低通滤波电路, 低通滤波电路主要滤除高频干扰信号, 只让低频信号输出。此时输出的低频信号未达到 LED 半导体的击穿电流, 所以需要放大电路提高电流才能驱动 LED 发光, 最后输出信号达到 LED 击穿电压, 二极管发光。

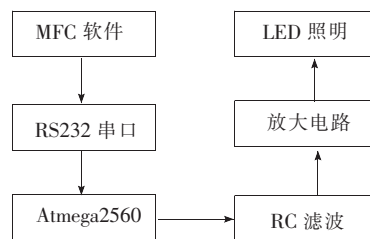


图 2 照明控制原理图

Fig. 2 General lighting control schematic diagram

该方法主要包括 MFC 交互界面以及控制、驱动电路。

#### 2.2.1 MFC 交互界面

以 MFC 数字控制界面为核心, 结合微软的 Visual Studio 编程实现实时颜色、光强控制, 并且可以根据相机拍摄触发光源开关, 或者根据时间条件改变光强, 实现触发式控制以及自适应。其控制界面主要如图 3 所示, 主要包括打开、关闭串口和 4 个滑块。成功实现串口通信后, 通过改变滑块来调整红、绿、蓝 3 种颜色的 PWM, 可调节 0 ~

255 整数输出。通过 PWM 输出,可组合成多种混光模型。

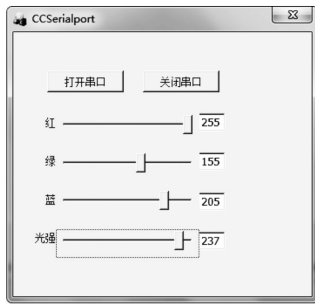


图 3 MFC 控制界面

Fig. 3 MFC control interface

### 2.2.2 控制电路

红、绿、蓝 LED 分别单独接一路电路,改变单路 PWM 即可改变该路 LED 的光强。其中,MFC 通过 RS232 串口与单片机实现通信,单片机获取信号后,通过 PWM 技术输出给放大电路。取一路滤波、放大电路如图 4 所示,单片机输出引脚先接限流电阻  $R_1$ ,输出信号再接入三极管基极,三极管集电极连接 RC 滤波电路,而后接入场效应管栅极,其余两路与该路同理。

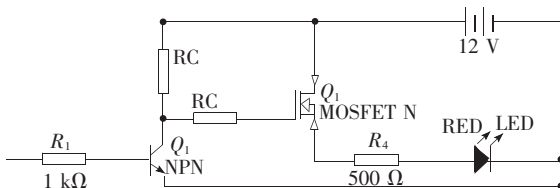


图 4 滤波和放大电路图

Fig. 4 Filter and magnify circuit diagram

具体地, $R_4$ 为选用 LED 光源自带的内置电阻;RC 电路电阻选取  $2\ 000\ \Omega$ ,电容选择  $0.1\ \mu\text{F}$ ,理论限制频率为  $796.2\ \text{Hz}$ ;三极管型号选取 9013-NPN;半导体场效应晶体管选择 N 沟道增强型 MOSFET,型号为 IRFP054。MFC 与单片机串口通信方式是使用开源库上的 CSerialport 类,参数设置为:波特率 9 600、8 个数据位、1 个停止位、无奇偶校验。

## 2.3 调光模型构建

### 2.3.1 混光比例常数

王纪永等<sup>[10]</sup>提出了两通道 PWM 调光调色,主要应用于白光 LED 的色温及其照度调整,实现自然光的模拟;杨宗阳等<sup>[11]</sup>使用橙、绿、蓝三基色 LED 灯作为背光灯,有效地改善了由于温度变化

带来的背光源亮度、色温变化与色坐标漂移;宋鹏程等<sup>[12]</sup>实现了手动 PWM 单色光可调从而达到混光效果。但是在机器视觉应用中,确定了照明颜色后,照度可调在现场调试中是必经的一步,尤其是有些受光照影响明显的机器视觉系统。所以本文提出一种基于红色、绿色、蓝色三通道混色后照度可调的数学模型。基于公式(1):

$$I_{pr} : I_{pg} : I_{pb} = C_r : C_g : C_b, \quad (1)$$

其中  $C_r, C_g, C_b$  为比例常数, $I_{pr}, I_{pg}, I_{pb}$  为图 3 对应的红、绿、蓝滑块输入等级  $0 \sim 255$ ,只要红绿蓝三通道输入等级数值比为常数,光颜色就不会发生改变,所以只要确保其比例一致,再整体数值放大或缩小,即可实现在特定光颜色下照度可调。

### 2.3.2 混色模块

调光模型包括颜色混合模块和照度可调模块,其中颜色混合模块简称混色模块,将红、绿、蓝三色光分别单独控制,以红光为例,红光占空比为  $0 \sim 255$  可调,总共 256 级,255 代表最亮,0 代表最暗,根据  $I_{pr}, I_{pg}, I_{pb}$  3 种颜色占空比来实现颜色混合。

### 2.3.3 照度调整模块

照度可调模块主要用来实现光源照度调整,主要输出 PWM 强度计算流程如图 5 所示。其中  $I_n$  为图 3 的光强值, $I_{pi}$  可以分别表示  $I_{pr}, I_{pg}, I_{pb}$ ,而  $F_r, F_g, F_b$  分别代表红、绿、蓝 3 色,根据式(2)计算获取它们的值后,以其是否大于 0,对所有可能存在的情况进行分类讨论。

$$F_i = I_n - (255 - I_{pi}), \quad (2)$$

式中  $I_{pi}$  分别代表为  $I_{pr}, I_{pg}, I_{pb}$ ,对应计算出  $F_r, F_g, F_b$ 。

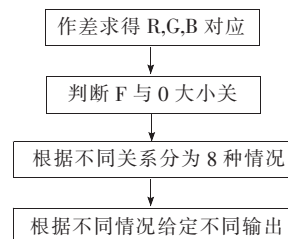


图 5 输出 PWM 强度计算流程图

Fig. 5 Flow chart of output PWM intensity

$O_r, O_g, O_b$  为最终输出给 LED 光源的输出 PWM 信号。从计算机编程的角度出发,式(2)作差得到  $F_i$  后,根据其是否大于 0 来进行分类讨论,R、G、B 每种情况分别有两种,2 的三次方等于 8,所以输出结果有 8 种。

(1) 当  $F_r > 0, F_g > 0$  且  $F_b > 0$  时, 只要保证公式(1)的比例, 光颜色就保持不变, 推导出  $O_r, O_g, O_b$  的计算公式如下:

$$\begin{aligned} O_r &= F_r, \\ O_g &= \frac{O_r \times I_{pg}}{I_{pr}}, \\ O_b &= \frac{O_r \times I_{pb}}{I_{pr}}, \end{aligned} \quad (3)$$

推导思路如下: 随意假定一个输出  $O_i$  等于一个大于 0 的  $F_i$  (小于等于 0 就没有输出了), 公式(3)采用的是假定让  $O_r = F_r$ , 为满足输出等级等比例, 参考式(1), 即  $I_{pr} : I_{pg} = C_r : C_g = O_r : O_g$ , 能推导出下式:

$$O_g = \frac{O_r \times I_{pg}}{I_{pr}}. \quad (4)$$

同理可求出:

$$O_b = \frac{O_r \times I_{pb}}{I_{pr}}. \quad (5)$$

根据该思路即可推导出式(6) ~ (12)。

(2) 当  $F_r > 0, F_g \leq 0$  且  $F_b \leq 0$  时, 同理可得  $O_r, O_g, O_b$  的计算公式:

$$\begin{aligned} O_r &= F_r, \\ O_g &= O_b = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

(3) 当  $F_r > 0, F_g > 0$  且  $F_b \leq 0$  时,  $O_r, O_g, O_b$  的计算公式如下:

$$\begin{aligned} O_r &= F_r, \\ O_g &= \frac{O_r \times I_{pg}}{I_{pr}}, \\ O_b &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

(4) 当  $F_r > 0, F_g \leq 0$  且  $F_b > 0$  时,  $O_r, O_g, O_b$  的计算公式如下:

$$\begin{aligned} O_r &= F_r, \\ O_g &= 0, \\ O_b &= \frac{O_r \times I_{pb}}{I_{pr}}. \end{aligned} \quad (8)$$

(5) 当  $F_r \leq 0, F_g > 0$  且  $F_b > 0$  时,  $O_r, O_g, O_b$  的计算公式如下:

$$\begin{aligned} O_r &= 0, \\ O_g &= F_g, \\ O_b &= \frac{O_g \times I_{pb}}{I_{pg}}. \end{aligned} \quad (9)$$

(6) 当  $F_r \leq 0, F_g \leq 0$  且  $F_b \leq 0$  时,  $O_r, O_g, O_b$  的计算公式如下:

$$O_r = O_g = O_b = 0. \quad (10)$$

(7) 当  $F_r \leq 0, F_g > 0$  且  $F_b \leq 0$  时,  $O_r, O_g, O_b$  的计算公式如下:

$$\begin{aligned} O_r &= O_b = 0, \\ O_g &= F_g. \end{aligned} \quad (11)$$

(8) 当  $F_r \leq 0, F_g \leq 0$  且  $F_b > 0$  时,  $O_r, O_g, O_b$  的计算公式如下:

$$\begin{aligned} O_r &= O_g = 0, \\ O_b &= F_b. \end{aligned} \quad (12)$$

确定照度比例后, 需要计算输出的照度与实际光强的关系。因为本文是通过调节光强大小来实现照度改变的, 所以建立初始光强输入等级  $I_p$  与光强百分比  $N\%$  的关系, 计算原理如式(11)所示:

$$O_r + O_g + O_b = (I_{pr} + I_{pg} + I_{pb}) \times N\%. \quad (13)$$

### 2.3.4 局限性分析

实际应用中光强  $I_n$  有一定的局限性,  $I_n$  取值必须大于式(2)中的  $F_i$  的最小值, 否则混合的颜色会发生改变, 即在调整照度的时候, 颜色由于某个通道发光的消失而发生改变。所以提出一个极限限定公式, 防止该情况的发生。

$$F(\min) = 255 - \min(I_{pr}, I_{pg}, I_{pb}), \quad (14)$$

其中,  $\min(I_{pr}, I_{pg}, I_{pb})$  为  $I_{pr}, I_{pg}, I_{pb}$  非 0 的最小值,  $F(\min)$  为式(2)中  $F_i$  的最小值。

## 3 实验测试与分析

### 3.1 照度与单通道占空比关系

实验光源采用 12 V、5050RGB 滴胶防水 LED 软灯条制作而成的碗型光源, 如图 6 所示, 左侧白色的为碗型漫反射外壳, 右侧红圈为 LED 光源。测量位置选取固定位置、固定距离于碗型光源半球面中心处, 用 FLUKE-941 照度仪测量碗型外壳漫射光的照度。

为验证上述数学模型的可行性, 实验设定为测试单通道占空比与照度的关系, 任意设置 RGB



图 6 碗型光源

Fig. 6 Bowl-shaped light source

占空比为 0:211:0(绿色),实验以测量最高强度百分比(100%)为基准,按百分比来计算后续调整光强级数后的理论照度,代入式(2),求得  $F_r > 0, F_g > 0$  且  $F_b > 0$ ,所以代入式(3)可求得该比例下,  $I_n$  的强度与光强百分比  $N\%$  关系,  $I_n$  为图 3 的光强。

$$I_n = 44 + 211 \times N\%, \quad (15)$$

由于光强最强时,实验测试值受外界环境光干扰最少,测量误差最小,所以实验取所测的最高照度为基准,计算接下来不同百分比  $N\%$  下强度  $I_n$  的值,实验结果如表 1 所示。

表 1 单通道 PWM 测试数据

Tab.1 Test data of single channel PWM

Color	Intensity degree	Intensity $N\%$	Theoretical luminance flux/lx	Measured luminance flux/lx
green	255	100%	—	448
green	234	90%	403.2	405
green	213	80%	358.4	358
green	192	70%	313.6	313.5
green	172	60%	268.8	270
green	150	50%	224	223
green	129	40%	179.2	179.4
green	107	30%	134.4	132.6
green	87	20%	89.6	90.8
green	65	10%	44.8	44.9

### 3.2 照度与双通道占空比的关系

该部分实验设定为测试双通道占空比与照度的关系,任意设置 RGB 占空比为 255:179:0(淡黄色),实验同样以测量最高强度百分比(100%)为基准,按百分比来计算后续调整光强级数后的理论照度,代入公式(2),求得  $F_r > 0, F_g > 0$  且  $F_b > 0$ ,所以代入公式(3)可求得该比例下,  $I_n$  的

强度与光强百分比  $N\%$  的关系:

$$I_n = 255 \times N\%, \quad (16)$$

实验结果如表 2 所示, PY 代表颜色为淡黄色(Pale yellow)。

为了对数学模型局限性进行验证,当强度  $N\% < 30\%$  后,淡黄色的光将变成红光,即混光效果消失,这是由于式(14)的极限限制,所以混光失效。

表 2 双通道 PWM 测试数据

Tab.2 Test data of binary channels PWM

Color	Intensity degree	Intensity $N\%$	Theoretical luminance flux/lx	Measured luminance flux/lx
PY	255	100%	—	492
PY	229	90%	442.9	439
PY	205	80%	393.6	393
PY	179	70%	344.4	346
PY	153	60%	295.2	297
PY	128	50%	246	248
PY	102	40%	196.8	197.7
PY	78	30%	147.6	152.4
red	—	20%	—	—
red	—	10%	—	—

### 3.3 照度与三通道占空比的关系

设置三通道 RGB 占空比为白光 255:255:255,实验以测量最高强度百分比(100%)为基

准,按百分比来计算后续调整光强级数后的理论照度,代入公式(2)、(3)可求得该比例下,  $I_n$  的强度与光强百分比  $N\%$  的关系,如公式(17)所示:

$$I_n = 255 \times N\%, \quad (17)$$

实验结果列于表 3 中。

其中,9 档白光效果图如图 7 所示。

再随机设置三通道 RGB 占空比为 153:153:255(紫蓝光),以测量最高强度百分比(100%)为基准,按百分比来计算后续调整光强级数后的理论照度,代入式(2)、(3)可求得该比例下,  $I_n$  的强度与光强百分比  $N\%$  的关系,如公式(18)所示:

$$I_n = 102 + 153 \times N\%, \quad (18)$$

实验结果如表 4 所示。

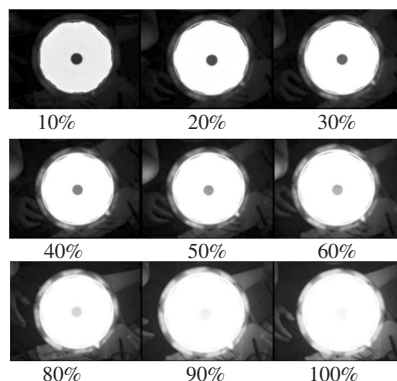


图 7 9 档白光效果图

Fig. 7 Picture of white light in different intensity

表 3 三通道 PWM 测试数据

Tab. 3 Test data of three-channels PWM

Color	Intensity degree	Intensity $N\%$	Theoretical luminance flux/lx	Measured luminance flux/lx
white	255	100%	—	690
white	230	90%	621	625
white	204	80%	552	554
white	179	70%	483	484
white	153	60%	414	415
white	128	50%	345	346
white	102	40%	276	277
white	77	30%	207	212
white	51	20%	138	141.7
white	26	10%	69	72.1

表 4 三通道 PWM 蓝紫光测试数据

Tab. 4 Test data of violet lighting

Color	Intensity degree	Intensity $N\%$	Theoretical luminance flux/lx	Measured luminance flux/lx
violet	255	100%	—	430
violet	224	80%	344	346
violet	194	60%	258	259
violet	163	40%	172	172.2
violet	133	20%	86	88
violet	117	10%	43	46.2

### 3.4 结果分析

从上面的测试结果可以看出,实验结果与理论计算有少许偏差,其中光强  $I_n$  必须取整,所以误差主要来源于  $I_{pi}$  的舍入误差和环境光干扰。从表 2 可以看出,当强度  $N\% < 30\%$  后,由于公式(14)的极限限制,  $I_n$  已经小于  $F(\min)$ ,也是该数学模型的不足之处,但是初始混光光强尽可能选

大一些,即可较大程度地避免上述限制。当选好足够大的 PWM 值时,如表 3 所示,即可实现大范围的照度可调。

## 4 工业应用

在高端定制碗中,产家需要根据顾客的要求生产额外不同表面纹理或胶的碗,目前大多数纹

理都是经过手工画上去再去烧结。手工画对画匠的要求比较高,而且画匠工人成本也很高,所以简单的要求可以用机器视觉加喷印代替,如图 8(a)所示。



图 8 碗底涂胶(a)和表链涂胶(b)应用

Fig. 8 Application in bowl gluing(a) and watch gluing(b) of machine vision

在手表订制中,厂家同样要求在表链表面涂上一层胶,目前工厂也都是手工涂的,手工涂胶存在涂胶不均匀以及成本等问题,所以拟用机器视觉来喷印涂胶,如图 8(b)所示。

光源在上面两个应用中均采用触发式,即在拍照的前一瞬间才打开光源,拍摄完成关闭光源。拍摄后进行图像处理,把提取点发送给数控系统,数控系统动作,到提取点喷头开始点胶。碗底涂胶上使用偏蓝的白光,表链涂胶上使用红光,亮度也不一样,颜色、亮度选取均为调试后的较佳结果。

## 5 结 论

本文通过照明控制系统的设计与实现,调光模型的构建,提出了一种基于 PWM 的数字控制光源,并对该调光模型进行实验测试。实验结果表明,该方法在混光的同时可精确地实现较大范围的照度可调,但还是存在一定的照度调整限制,后续还需要对数学模型进行研究。最后展示了该光源在碗底以及表链涂胶项目上的应用,同时希望能有更广泛的应用。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 吴金辉. LED 光源在功能照明中的优势与应用 [J]. 资源节约与环保, 2013(6):38.  
WU J H. Advantages and applications of LED lighting source [J]. *Resources Econom. Environm. Protect.*, 2013(6):38. (in Chinese)
- [ 2 ] 李向阳. 绿色节能目标下的商业照明灯具应用设计研究 [D]. 齐齐哈尔:齐齐哈尔大学, 2014.  
LI X Y. *Research on Design of Commercial Lighting Lamps Under Energy Saving Target* [D]. Qiqihar: Qiqihar University, 2014. (in Chinese)
- [ 3 ] 颜发根, 刘建群, 陈新, 等. 机器视觉及其在制造业中的应用 [J]. 机械制造, 2004, 42(11):28-30.  
YAN F G, LIU J Q, CHEN X, *et al.*. Machine vision and its application in manufacturing industry [J]. *Machinery*, 2004, 42(11):28-30. (in Chinese)
- [ 4 ] 李可宏, 姜灵敏, 龚永义. 2 维至 3 维图像/视频转换的深度图提取方法综述 [J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(10):1393-1406.  
LI K H, JIANG L M, GONG Y Y. Depth map extraction methods in 2D-3D image/video conversion [J]. *J. Image Graph.*, 2014, 19(10):1393-1406. (in Chinese)
- [ 5 ] TAN K Z, CHAI Y H, SONG W X, *et al.*. Identification of diseases for soybean seeds by computer vision applying BP neural network [J]. *Int. J. Agricult. Biologic. Eng.*, 2014, 7(3):43-50.
- [ 6 ] KIM S D, KIM J H, LEE Y S, *et al.*. Special section on deep learning in medical applications [J]. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 2015, 34(8):1769.
- [ 7 ] 孟然. 基于机器视觉的工件特征识别与分类方法研究 [D]. 天津:天津科技大学, 2006.  
MENG R. *Research on Feature Recognition and Classification Method for Work Piece Based on Machine Vision* [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2006. (in Chinese)
- [ 8 ] 熊光洁, 马树元, 聂学俊, 等. 基于机器视觉的高密度电路板缺陷检测系统 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(8):1824-1826.  
XIONG G J, MA S Y, NIE X J, *et al.*. Defects inspection system of HID PCB based on machine vision [J]. *Comput. Meas. Control*, 2011, 19(8):1824-1826. (in Chinese)
- [ 9 ] 蔡东京. OLED 全彩显示屏白平衡问题的研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2013.

CAI D J. *A Research on White Balance for Full Color AMOLED* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)

[10] 王纪永, 王建平. 基于两通道 PWM 的 LED 调光调色方法 [J]. 光电工程, 2012, 39(7):132-136.

WANG J Y, WANG J P. A dimming method for LED based on two channels' PWM [J]. *Opto-Electron. Eng.*, 2012, 39(7):132-136. (in Chinese)

[11] 杨宗阳, 刘波, 章小兵, 等. 彩色 LED 背光源调频调光与混色方法 [J]. 液晶与显示, 2015, 30(5):872-876.

YANG Z Y, LIU B, ZHANG X B, *et al.*. Colorful LED backlight FM & diming and color mixing method [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2015, 30(5):872-876. (in Chinese)

[12] 宋鹏程, 文尚胜, 尚俊, 等. 基于 PWM 的三基色 LED 的调光调色方法 [J]. 光学学报, 2015, 35(2):285-292.

SONG P C, WEN S S, SHANG J, *et al.*. A dimming method for RGB LED based on three channels' PWM [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2015, 35(2):285-292. (in Chinese)



骆伟岸(1992 -),男,广东汕尾人,硕士研究生,2015年于广东工业大学获得学士学位,主要从事算法、数据研发等方面的研究。

E-mail: willian\_lok@163.com