

# 基于白平衡修正的室外光照估计算法

方靖<sup>1</sup> 张锐<sup>1,2</sup> 崔巍<sup>3</sup> 韩慧健<sup>1,2</sup>

(山东财经大学计算机科学与技术学院 济南 250014)<sup>1</sup>

(山东省信息可视化与计算经济工程技术研究中心 济南 250014)<sup>2</sup> (科学技术部信息中心 北京 100862)<sup>3</sup>

**摘要** 针对不同天气情况下同一太阳位置拍摄的室外场景图像,提出了一种无需用户交互的快速估计室外光照参数的算法。该算法首先通过 K-means 算法检测阴影区域来获取初始天空光参数,同时使用 Grey-World 算法获取初始太阳光参数,进而进行基图像求解,并利用白平衡修正对基图像进行校正,从而迭代优化出更准确的光照参数。实验数据表明,所提算法得到的重构图像比现有算法得到的重构图像误差更小。与现有算法相比,该算法更为快速、方便,且准确性更高,可以很好地应用于增强现实。

**关键词** 光照估计,灰度世界算法,白平衡修正

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

## Outdoor Lighting Estimation Algorithm Based on White Balance Correction

FANG Jing<sup>1</sup> ZHANG Rui<sup>1,2</sup> CUI Wei<sup>3</sup> HAN Hui-jian<sup>1,2</sup>

(School of Computer Science and Technology, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China)<sup>1</sup>

(Shandong Province Research Center of Information Visualization and Computational Economy Engineering Technology, Jinan 250014, China)<sup>2</sup>

(Information Center of Ministry of Science and Technology, Beijing 100862, China)<sup>3</sup>

**Abstract** This paper proposed a fast algorithm for estimating outdoor illumination parameters without user interaction for outdoor scene images taken from the same sun position under different weather conditions. K-means algorithm is used to detect the shadow area to obtain the initial sky light parameters, and Grey-World algorithm is used to obtain the initial sun light parameters. Then the base image is solved, and the white balance correction is used to correct the base image, so as to iteratively optimize the illumination parameters more accurately. Experimental results show that the reconstructed image obtained by the proposed algorithm has less error than the reconstructed image obtained by the existing algorithm. Compared with the existing algorithms, the proposed algorithm is faster, more convenient and more accurate. So it can be well applied to augmented reality.

**Keywords** Illumination estimation, Grey-world, White balance correction

## 1 引言

增强现实技术<sup>[1]</sup>借助于计算机图形学技术、交互技术等多种技术,将通过计算机获取的虚拟景物真实地叠加到现实场景中,达到很好的用户体验。为了实现虚拟物体与真实场景的融合,需要满足虚拟物体与真实场景的光照一致性,即虚拟物体应随着真实场景下的光照变化而改变自身的外观。因此,在场景三维模型未知的情况下,准确获取真实世界的光照条件具有重要的现实意义。在真实的室外场景中,变化的光照条件是一个复杂的问题,光照受气候、空气条件等的影响较大,且光源不易控制;同时,室外场景规模庞大,物体较为多样。因此,很难完美还原环境的真实光照。

在室外光照的研究中,刘万奎等<sup>[2]</sup>概述了近年来国内外学者对光照研究的不同方法,以及当前光照估计所面临的巨大挑战。Liu 等<sup>[3]</sup>首先提出了基图像模型的概念,将室外光

照场景表示为太阳光和天空光基图像的线性模型;但在算法实现过程中需要用户进行大量交互,从而获取输入值。张锐等<sup>[4]</sup>利用不同太阳方位以及不同天气情况下的 4 幅初始图像估计室外光照;但在优化过程中,能量方程表达式较为复杂,算法效率较低。Xing 等<sup>[5]</sup>通过计算基图像比例因子,估算太阳光参数;但算法同样需要进行用户交互。随后 Xing<sup>[6]</sup>等使用最小二乘法,结合天空光和太阳光的颜色约束求解光照参数;同样,算法需要用户交互来获取初值。在基图像分解模型理论上,Zhang<sup>[7]</sup>等又提出了视频序列的光照参数估计算法,用聚类算法代替用户交互获取输入值,并将点的基曲线作为约束条件求解太阳光强度和太阳光基图像;但算法需要一系列视频图像,有一定的局限性。Martin 等<sup>[8]</sup>提出了一种基于图像的主成分分析滤波与支持向量机的组合光照估计算法,该方法首先使用主成分分析法提取图片滤波,进而使用图像滤波得到不同图像的光照参数,而后使用支持向量机将这

本文受国家自然科学基金项目(61303089,61472221,61772309)资助。

**方靖**(1994—),男,硕士生,主要研究方向为增强现实、计算机图形学;**张锐**(1979—),男,博士,副教授,硕士生导师,CCF 会员,主要研究方向为增强现实、计算机辅助几何设计,E-mail:zhchcao@sina.com;**崔巍**(1982—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为网络安全、数字签名、云计算安全;**韩慧健**(1971—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究方向为计算机图形学、计算机辅助几何设计。

些独立光源进行融合,最终得到组合光照估计;虽然该算法的时间复杂度较低,但其最终效果略差。Li等<sup>[9]</sup>提出一种基于树形结构组联合稀疏表示的多线索光照估计算法。该算法使用树结构组联合稀疏表示来构建框架,在框架中综合使用低层级的RGB颜色分布属性、中层级的初始光源估计值、高层级的场景信息来进行光照估计;但该算法对虚拟物体的渲染不太方便。在应用方面,付文晓等<sup>[10]</sup>将雾天大气物理模型引入到光照估计的框架中,提出雾天室外场景图像的光照估计算法;但该算法依然需要用户的交互获取深度初值。

本文算法不需要场景的任何三维几何信息,对场景中物体的材质和纹理没有要求,也不需要场景中存在特殊物体或者特殊表面,适用于一般的室外场景,同时也不需要用户交互。与已有算法相比,本文算法效率较高,初始输入图片仅需要3幅同一太阳位置的不同天气图片以及一幅无太阳光照的固定场景下的图片;同时,本文引入了Grey-World算法求解初值并通过白平衡修正对基图像进行校正,使光照估计算法更为准确、简便。

## 2 相关技术

### 2.1 室外光照明模型

算法采用类似文献<sup>[3]</sup>中的室外光照明模型。假设室外场景的光源只有太阳光和天空光。室外场景中三维点 $x$ 处的光亮度为:

$$I(x, \lambda) = I_{\text{sun}}(x, \lambda) + I_{\text{sky}}(x, \lambda) \\ = L_{\text{sun}} C_{\text{sun}}(x, \lambda) + L_{\text{sky}} C_{\text{sky}}(x, \lambda) \quad (1)$$

其中, $C_{\text{sun}}(x, \lambda)$ 和 $C_{\text{sky}}(x, \lambda)$ 是场景几何、材质和遮挡系数共同作用的结果。如果太阳位置固定,则不管光照强度如何变化,该值都不会改变。因此,任意一幅图像都可以表示成 $C_{\text{sun}}(x, \lambda)$ 和 $C_{\text{sky}}(x, \lambda)$ 的线性组合,它们的系数是场景的光照参数。实际计算中,图像像素值可以通过相机响应函数<sup>[11]</sup>转换成场景点的光亮度,并用R,G,B三通道的像素值代替式(1)中的光波波长 $\lambda$ 。

### 2.2 基于K-means算法的图像划分

K-means算法是一种聚类算法,其首先需要确定每个聚类簇的中心点,这个中心点为各个簇内所有数据的均值;然后通过最小距离准则迭代,将阴影区域和阳光区域归类,从而实现阴影区域和阳光区域的检测。

其中,阳光区域的光源有两种:1)太阳光;2)天空光。而阴影区域的光源只有天空光。因此,像素点 $X$ 的光照强度可以分为两类:1)受太阳光影响的;2)不受太阳光影响的。通过K-means聚类算法可以将像素点分为两类,其中第一类是阴影区域的像素点,另一类是阳光区域的像素点。

### 2.3 Grey-World假设

Retinex的基础理论<sup>[12]</sup>是物体展现出的颜色是由物体对红、绿、蓝光的反射能力所决定的,而不是由反射光强度的绝对值来决定的,物体的颜色不受光照非均匀性的影响,具有一致性。Retinex算法是把反射物体表面的反射光和图像中的入射光单独分开。Grey-World<sup>[13]</sup>假设就是基于Retinex理论和算法产生的。场景内所有物理表面的平均反射是无色差的。光源颜色对一幅图像中R,G,B3个颜色通道分别求取平均值,所得到的颜色值就是场景的光照颜色。

## 2.4 白平衡算法

白平衡算法<sup>[14]</sup>是一种很常用的图像处理算法。在不同的光线下,人眼对相同颜色的感觉基本是相同的。但是拍摄设备并没有人眼的适应性,在不同的光线下,CCD输出的不平衡性会造成相机彩色还原失真。为了解决不同色温下引起的白色漂移现象,通常用白色来作为调整的基色。白平衡算法分为白色点的检测和白色点的调整两大步骤。

## 2.5 岭回归

岭回归是对最小二乘回归的一种补充,它通过损失无偏性来换取高的数值稳定性,从而得到较高的计算精度。在岭回归中,最小化目标函数是:

$$\sum_{i=1}^n (y - (\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i))^2 + \lambda \sum_{i=1}^n \beta_i^2$$

即在最小二乘的基础上添加了惩罚项 $\beta$ 的平方,称为L2正则化。这一惩罚项,可以有效地减少 $\beta$ 过大的情况。

在岭回归中,当 $\lambda$ 很小时系数与普通回归一样,而 $\lambda$ 很大时所有回归系数缩减为0,因此需要在中间某处找到合适的 $\lambda$ 值。实验中对于系数 $\lambda$ 的选取,是通过在岭迹图中寻找而得到的。

## 3 室外参数估计

算法首先获取到同一太阳位置拍摄的室外场景图像的初始太阳光和天空光参数,并根据室外光照明模型求解基图像,最后基于白平衡修正算法迭代优化光照参数。算法流程图如图1所示。

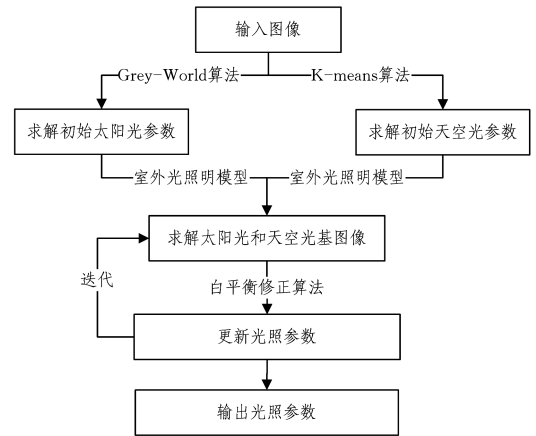


图1 算法流程图

### 3.1 天空光参数估计

算法获取到连续3天固定场景下拍摄的动态变化的图片,选取早晨光照较弱的一张图片作为初始天空光基图像 $R$ ,另外选取3天内同一时刻的3张不同天气下的图像作为原始图像 $R_1, R_2, R_3$ 。通过上文中提到的室外光照明模型进行光照参数的获取:

$$I = L_{\text{sun}} C_{\text{sun}} + L_{\text{sky}} C_{\text{sky}} \quad (2)$$

其中, $I$ 为原始图像, $C_{\text{sky}}$ 为选取的初始天空光基图像 $R$ ,算法分别对 $R_1, R_2, R_3$ 进行相同处理,得出R,G,B三通道的实验参数。

通过K-means算法对图像进行划分。记阴影区域的像素点为 $S$ ,阳光区域的像素点为 $Z$ 。由于阴影区域和阳光区域中的像素点存在部分噪声,因此需要通过摒弃两块区域中

的部分像素值来实现噪声的最小化。通过设定阈值来实现像素点的选取<sup>[15]</sup>,定义阈值为:

$$e = \frac{1}{N_x} \sum_x I_S(x)$$

其中,  $N_x$  为阴影区域  $S$  中像素点的个数。对阴影区域  $S$  进行阈值限定,去除大于阈值  $e$  的阴影区域像素点,得到处理过的阴影区域  $S'$ 。同样对阳光区域  $Z$  进行阈值限定,去除小于阈值  $e$  的阳光区域像素点,得到处理过的阳光区域  $Z'$ 。

此时可以近似认为阴影区域  $S'$  不受太阳光影响,因此可令:

$$L_{sky} = \frac{1}{N_x} \sum_x \frac{I_{S'}(x)}{I_R(x)} \quad (3)$$

其中,  $N_x$  为处理过的阴影区域  $S'$  中的像素点个数,  $I_{S'}(x)$  为  $S'$  中像素点的像素值,  $I_R(x)$  中存放的为与  $S'$  中像素点对应的初始天空光基图像  $R$  的像素点的像素值。然后对区域中各个像素点求出的值取平均,最后得到初始的  $L_{sky}$ 。

### 3.2 太阳光参数估计

记  $R, G, B$  3 个颜色通道阳光区域  $Z'$  像素值的平均值分别为  $avgR, avgG, avgB$ , 取三者的均值并将其记为  $avgGray$ , 然后对  $R, G, B$  3 个颜色通道进行归一化处理。令:

$$\begin{cases} Lr = avgR / avgGray \\ Lg = avgG / avgGray \\ Lb = avgB / avgGray \end{cases}$$

通过 Grey-World 算法得到三通道下  $L_{sun}$  的初始值, 然后对每一幅输入图像进行处理, 最后得到所有初始图像的初始太阳光参数。

## 4 基图像求解

已知  $R_1, R_2, R_3$  3 幅图片的天空光和太阳光系数之后, 可以很容易地求解太阳光和天空光基图像。根据式(2), 对图像的任意像素点  $x$ , 有:

$$\begin{cases} I_1(x) = L_{sun, R_1} C_{sun}(x) + L_{sky, R_1} C_{sky}(x) \\ I_2(x) = L_{sun, R_2} C_{sun}(x) + L_{sky, R_2} C_{sky}(x) \\ I_3(x) = L_{sun, R_3} C_{sun}(x) + L_{sky, R_3} C_{sky}(x) \end{cases}$$

公式左边分别为  $R_1, R_2, R_3$  同一位置的像素值, 右边的光照参数也已知, 只有  $C_{sun}$  和  $C_{sky}$  未知, 通过最小二乘法可以将其求出。然后对图像的所有像素点进行同样的处理, 即可得到太阳光和天空光基图像。

## 5 迭代优化

### 5.1 白平衡修正

基于上述算法描述, 可以得到算法结果, 即天空光基图像和太阳光基图像。但是由于相机具有响应函数, 使得基图像和真实值相差一个系数, 因此我们用白平衡修正对其进行迭代更新。

基于白平衡理论, 对更新后的基图像进行优化, 使基图像更加准确。具体的优化过程为:

- 1) 把更新后的基图像从 RGB 空间转换到 YCrCb 空间。
- 2) 把图像分成块, 对每个块分别计算  $Cr$  和  $Cb$  的平均值, 然后根据平均值计算出  $Cr$  和  $Cb$  的方差。通过方差和平均值判定每个块的近白区域, 选取合适的点作为参考白色点, 并把该点的值赋给  $L(i, j)$ , 其余不符合的  $L(i, j)$  为 0。

3) 选取参考白色点中最大的 10% 亮度值, 找到其中的最小值, 调整  $L$  矩阵, 将小于最小值的  $L(i, j)$  调整为 0, 其余的  $L(i, j)$  调整为 1。

4) 求出增益系数, 将增益系数与原通道  $R, G, B$  相乘, 对基图像进行调整。

### 5.2 参数更新

得到更新后的基图像  $C_{sun}$  和  $C_{sky}$  之后, 用它们来更新太阳光和天空光系数。根据式(2), 有:

$$\begin{cases} I(x_1) = L_{sun} C_{sun}(x_1) + L_{sky} C_{sky}(x_1) \\ I(x_2) = L_{sun} C_{sun}(x_2) + L_{sky} C_{sky}(x_2) \\ \vdots \\ I(x_m) = L_{sun} C_{sun}(x_m) + L_{sky} C_{sky}(x_m) \end{cases}$$

方程组左边是原始图像的所有像素值, 方程组右边的太阳光基图像  $C_{sun}$  和天空光基图像  $C_{sky}$  已经通过白平衡算法进行更新。基于岭回归方法, 在上式中, 我们令最小化目标函数为:

$$\varphi = \sum_{i=1}^m (I(x_i) - L_{sun} C_{sun}(x_i) - L_{sky} C_{sky}(x_i))^2 + \lambda (L_{sun}^2 + L_{sky}^2)$$

对  $\varphi$  求偏导数, 令偏导数等于零。求解方程可以得到  $L_{sun}$  和  $L_{sky}$ , 从而完成对天空光光照强度和太阳光光照强度的更新。用同样的方法对  $G, B$  通道进行处理, 得出太阳光光照强度和天空光光照强度。

## 6 重构图像

通过一系列的实验, 我们得到了原始图像的太阳光基图像  $C_{sun}$  和天空光基图像  $C_{sky}$ , 以及太阳光光照强度  $L_{sun}$  和天空光光照强度  $L_{sky}$ , 此时我们用这些参数重构图像得到  $I'$ :

$$\begin{cases} I'(x_1) = L_{sun} C_{sun}(x_1) + L_{sky} C_{sky}(x_1) \\ I'(x_2) = L_{sun} C_{sun}(x_2) + L_{sky} C_{sky}(x_2) \\ \vdots \\ I'(x_m) = L_{sun} C_{sun}(x_m) + L_{sky} C_{sky}(x_m) \end{cases}$$

定义  $I$  与重构图像  $I'$  的误差函数为:

$$\omega(x_i) = \| I'(x_i) - I(x_i) \|, i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

在实验中, 我们通过式(4)得到误差图像, 从而衡量实验的准确性。

## 7 实验结果分析

本文拍摄的图片分辨率为  $1600 * 1200$ , 经过处理后分辨率为  $400 * 300$ 。其中图 2(a) 为算法输入的原图像, 选取的是 3 张不同天气下在同一太阳位置拍摄的图片。图 2(b) 左边为优化后的天空光基图像, 右边为优化后的太阳光基图像。图 2(c) 为重构出的图像。图 2(d) 为重构图像和原图像相减之后的误差图像, 图 2(e) 为文献[16]的误差图像。文献[16]算法与本文算法  $R, G, B$  各通道的重建误差均值如表 1 所列, 光照参数如表 2 所列。

表 1 两种算法的重建误差

图像序号	文献[16]算法			本文算法		
	R	G	B	R	G	B
1	1.6	0.9	1.2	0.1	0.2	0.5
2	1.8	1.2	2.2	1.2	0.1	2.3
3	2.5	0.8	1.7	1.2	0.3	1.6

表2 两种算法的光照参数比较

光照参数	文献[16]算法			本文算法		
	R	G	B	R	G	B
$Sun^1$	0.985	1.018	0.982	0.8723	0.8494	0.8261
$Sky^1$	0.583	0.496	0.599	0.6186	0.6390	0.6317
$Sun^2$	0.522	0.567	0.611	0.5576	0.4408	0.3599
$Sky^2$	0.927	0.858	0.782	0.7473	0.7208	0.6840
$Sun^3$	0.181	0.226	0.247	0.3310	0.3002	0.2763
$Sky^3$	1.206	1.153	1.099	0.8008	0.7819	0.7464



(a) 算法输入图像



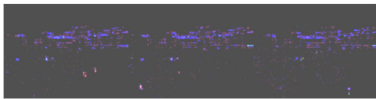
(b) 天空光基图像及太阳光基图像



(c) 重构图像



(d) 误差图像



(e) 文献[16]的误差图像

图2 重构场景一

图3中场景所用图片为从原图像中选择截取的区域,其中图3(a)为输入图像,图3(b)分别为太阳光基图像和天空光基图像,图3(c)为重构图像,图3(d)为误差图像。从误差结果可以看出,实验较为理想。



(a) 算法输入图像



(b) 太阳光基图像及天空光基图像



(c) 重构图像



(d) 误差图像

图3 重构场景二

图4为物理场景较为复杂的情形,根据输入图像和重构图像之间的误差可以看出实验较为理想。其中,图4(a)为输入图像,图4(b)分别为太阳光基图像和天空光基图像,图4(c)为重构图像,图4(d)为误差图像。



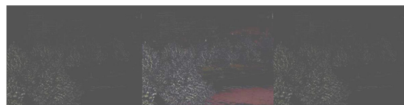
(a) 算法输入图像



(b) 太阳光基图像及天空光基图像



(c) 重构图像



(d) 误差图像

图4 重构场景三

在图5中,使用合成场景测试本文算法得到的光照参数和真实值的误差。图5(a)是不同光照环境的3幅原图像,图5(b)是使用本文算法参数得到的重构图像,图5(c)是误差图像。



(a) 合成原图像



(b) 重构图像



(c) 误差图像

图5 重构场景四

**结束语** 本文给出了一种快速求解室外场景光照估计的算法。算法利用 K-means 算法和 Grey-World 算法估计出初始天空光和太阳光照参数,进而进行基图像求解,然后通过白平衡修正对基图像进行校正,之后再利用光照参数进行迭代更新,最终完成对室外光照参数的估计。算法仅需要几幅场景固定的图像,不需要场景的任何三维信息,并且不要求场景中必须出现何种物体。

算法需要初始输入图片中含有阴影区域,所以提高算法的鲁棒性是需要改进的地方;同时,室外场景图像是由天空光和太阳光两者共同影响的结果,现实中我们无法单独测量天空光和太阳光的真实光强度,因此很难将算法结果与场景真实值进行比较,一般只能计算原图像和重构图像的误差,从而得出算法效果。