

基于色度一致性的室外场景光照参数估计

张 锐^{1,3} 韩慧健^{1,3} 梁秀霞^{1,3} 方 靖¹ 张彩明^{1,2}

(山东财经大学计算机科学与技术学院 济南 250014)¹ (山东大学计算机科学与技术学院 济南 250101)²
(山东省信息可视化与计算经济工程技术研究中心 济南 250014)³

摘 要 针对不同天气情况下在同一太阳方位拍摄的室外场景图像,提出了一种基于色度一致性的光照参数估计算法。该算法基于太阳光与天空光基图像分解理论,利用色度一致性这一约束条件求解太阳光和天空光的光照系数;并利用光照色度校正模型对基图像进行光照色度校正,从而得到更准确的光照参数。实验结果表明,所提算法是有效且正确的,根据基图像和光照系数可以准确重构原图像,从而实现虚拟物体与真实场景的无缝融合。

关键词 光照估计,色度一致性,色度校正模型,基图像

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.03.009

Illumination Parameter Estimation of Outdoor Scene Using Chromaticity Consistency

ZHANG Rui^{1,3} HAN Hui-jian^{1,3} LIANG Xiu-xia^{1,3} FANG Jing¹ ZHANG Cai-ming^{1,2}

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

(School of Computer Science and Technology, Shandong University, Jinan 250101, China)²

(Shandong Province Research Center of Information Visualization and Computational Economy Engineering Technology, Jinan 250014, China)³

Abstract For the outdoor scene images shot in the same solar azimuth under different weather conditions, this paper proposed an algorithm to estimate the illumination parameters using the chromaticity consistency. In this algorithm, based on the basis image decomposition, the chromaticity consistency is used to solve the illumination parameters of outdoor scenes. And then, according to the illumination chromaticity correction model, the illumination parameters are optimized. The experimental results show that the algorithm is effective and correct, and can accurately reconstruct the original image according to the base images and the illumination parameters, so as to realize the seamless integration between the virtual object and the real scene.

Keywords Illumination estimation, Chromaticity consistency, Chromaticity correction model, Basis images

1 引言

在增强现实系统中,需要将虚拟物体绘制到真实场景中。为了实现虚实物体的无缝融合,虚拟物体与真实场景需满足光照一致性,即虚拟物体的外观可反映真实场景光照的变化。为了满足光照一致性,应先估计真实场景的光照参数,再在此基础上实现虚拟物体的阴影、明暗等光照效果。光照估计是计算机视觉中复杂且重要的研究内容之一,人脸识别、阴影检测以及视频跟踪等多种算法都或多或少地受到光照的影响。

近年来,在计算机图形学领域有许多光照估计的研究。刘万奎等^[1]分析阐述了当前光照估计研究所面临的主要挑战,概述了增强现实的光照估计研究的进展。在恢复室内场景光照条件时,一些研究者通过手工测量实验室等光照可调

的室内环境来获取光源的位置和强度^[2]。但是,绝大多数研究还是从拍摄的场景图像出发。在光照估计研究的早期,研究人员借助几何性质和表面材质已知的特殊标志物(如镜面球^[3]、具有漫反射和镜面反射表面的光测球^[4]、三色棱的立方体^[5]等),为场景光照估计提供一些已知条件。这类方法必须使用标志物,相机视角受到限制。根据整体光照明模型,物体的外观取决于几何、材质、纹理及光源等信息。已知场景几何和物体材质时,可根据图像中的特殊信息,如阴影^[6]、明暗^[7]、高光区域^[8]及局部几何信息^[9]等,建立物理表达式,以逆向求解光照参数。基于物理模型的光照估计算法多数情况下需要已知场景的三维模型或局部几何信息,而室外场景不仅规模庞大,而且物体复杂多变,场景建模及几何数据的获取都比较困难,因此这类光照估计算法很难用于室外场景。借助辅助

收稿日期:2017-07-18 返修日期:2017-09-15 本文受国家自然科学基金项目(61303089,61472221,61272431,61303090)资助。

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:zhchao@sina.com(通信作者);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;梁秀霞(1976—),女,博士,教授,硕士生导师,CCF 会员,主要研究方向为计算机图形学、计算机游戏与动画;方 靖(1994—),男,硕士生,主要研究方向为增强现实、计算机图形学;张彩明(1955—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为几何造型、图像处理。

拍摄设备的方法,为光照计算提供了新的解决方案。利用深度相机、鱼眼相机等特殊拍摄设备提供的深度、全视角图像等信息可以更加快捷地计算场景中的光照情况。Boom等^[10]利用 Kinect 摄像头拍摄的图像和深度信息来估计场景中光源的位置。该算法要求光源须是单一点光源,不适合复杂环境。Einabadi等^[11]借助鱼眼镜头拍摄的灯光探测图像离散点光源的位置、衰减和光锥角度。与辅助标志物类似,添加额外的拍摄设备同样制约了光照估计算法的应用。

随着人们对室外场景图像关注度的增加,有关室外场景光照条件的获取工作也引起了研究人员的重视,并取得了一定的研究成果。Blinn等^[12]提出的环境映照技术是较早的基于图像的光照估计方法。为了获取复杂的真实场景光照,Debevec等^[13]使用纯镜面的光测球获取能够反映真实入射光照的多幅图像来制作高动态范围图像(HDR),并以此作为场景光源,从而快速绘制出具有真实感的光照效果。由于室外场景光照动态变化且太阳光强度非常大,同时不可避免地存在运动物体,因此使用 HDRI 获取室外场景的光照条件有一定的局限性。基于图像分解的室外场景光照估计方法是近年来提出的一类新方法,该类方法不需要场景三维几何信息。Li等^[14]利用3个真实场景的数据集对现有的光照估计算法进行了评估,并提出了基于树形结构群联合稀疏表示的多线索光照估计算法^[15],但这种方法不便于渲染虚拟对象。Liu等^[16]给出了基于基图像分解的室外场景光照参数实时估计算法,但该方法需要用户交互划定阴影区域与非阴影区域以获取光照参数的初值。张锐等^[17]利用2个太阳方位、2种天气情况下的4幅图像来估计光照参数,该算法优化太阳光参数的能量方程较为复杂,效率偏低。为了求解天空光光照参数,Xing等^[18]利用一幅早晨图像作为其基图像初始值,并利用法线方向上的表面点计算基图像比例因子,从而估算太阳光参数。该算法可以实时获得场景的光照条件,但需要用户交互选取法线方向上的表面点。之后,Xing等^[19]又利用球面谐波函数得到一个包含6个光照参数的线性模型,并使用最小二乘法结合天空光、太阳光的颜色约束求解光照参数。该算法需要利用用户标注的微小线段标定场景的粗略结构和材质反射属性。在基图像分解的基础上,Zhang等^[20]提出了视频序列的光照估计算法。该算法首先通过k-means算法进行阴影检测得到初始阴影函数,并在此基础上自动估计天空光强度和天空光基图像;然后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。该方法需要借助一系列视频图像来估计光照,有一定的局限性。

太阳光基图像和天空光基图像在阳光区域具有色度一致性,本文将这一约束条件引入基于太阳光与天空光基图像分解理论中,给出了求解并优化太阳光和天空光光照参数的新方法。该算法根据阴影中像素的性质估算天空光,由基图像分解的特点和太阳光及天空光基图像色度一致性计算光照参数;并利用 Von-Kries 对角模型^[21]对基图像进行色度校正,进而迭代优化光照参数。该算法仅要求相机固定、场景静止,不需要已知场景的三维几何及材质信息,允许场景中存在材

质各向异性的表面,也不需要用户交互。

2 算法模型

一般来说,室外场景物体受到太阳光和天空光两种光源的照射。本文采用类似文献^[16]的光照明模型,太阳光是具有微小立体角的无穷远光源,天空光为具有均匀分布的面光源,则场景的太阳光强度和天空光强度是一个常数。根据光照明模型,室外场景中三维点 x 处的光亮度为:

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

其中, $C_{\text{sun}}(x, \lambda)$ 和 $C_{\text{sky}}(x, \lambda)$ 是太阳光和天空光基图像,它们是场景几何、材质和遮挡函数共同作用的结果,与入射光光照强度无关。因此,任意场景图像都可以表示成这两幅基图像的线性组合,组合系数正是场景中太阳光和天空光的入射光强度。实际计算时,用 RGB 通道代替式(1)中的 λ 。

对于给定太阳位置并且视点固定的静止场景,其太阳光基图像和天空光基图像是确定的。本文选用连续3天中同一时刻的图像作为源图像,由于太阳位置差别很小,可以认为其太阳光基图像相同;由于场景静止且视点固定,因此其天空光基图像也相同。文献^[17]对基图像分解的求解进行了分析,证明了连续3天中同一时刻的3幅图像及太阳光和天空光光照系数满足相同的线性关系。因此,基图像分解是一个典型的欠约束问题。本文利用色度一致性作为约束条件进行场景光照估计。根据基图像分解理论,连续3天中同一时刻的图像满足如下关系:

$$I_i(x) = I_{\text{sun}}^i C_{\text{sun}}(x) + L_{\text{sky}}^i C_{\text{sky}}(x), i=1, 2, 3 \quad (2)$$

为了简便,公式中省略 λ 。假设天空光不为0,则 $\frac{I_2(x)}{I_1(x)} =$

$$\frac{l_{\text{sun}}^2 \frac{C_{\text{sun}}(x)}{C_{\text{sky}}(x)} + l_{\text{sky}}^2}{l_{\text{sun}}^1 \frac{C_{\text{sun}}(x)}{C_{\text{sky}}(x)} + l_{\text{sky}}^1}。令 C(x) = \frac{C_{\text{sun}}(x)}{C_{\text{sky}}(x)}, 则式(2)可写成:$$

$$\frac{I_2(x)}{I_1(x)} = \frac{l_{\text{sun}}^2 C(x) + l_{\text{sky}}^2}{l_{\text{sun}}^1 C(x) + l_{\text{sky}}^1} \quad (3)$$

同理, $\frac{I_3(x)}{I_1(x)} = \frac{l_{\text{sun}}^3 C(x) + l_{\text{sky}}^3}{l_{\text{sun}}^1 C(x) + l_{\text{sky}}^1}$ 。记 $\delta_2(x) = \frac{I_2(x)}{I_1(x)}$, $\delta_3(x) =$

$\frac{I_3(x)}{I_1(x)}$, 其中 x 为像素索引, I 为图像亮度。记3幅图像的光照参数为:太阳光 $l_{\text{sun}}^1, l_{\text{sun}}^2, l_{\text{sun}}^3$; 天空光 $l_{\text{sky}}^1, l_{\text{sky}}^2, l_{\text{sky}}^3$ 。其中,上标为图像的索引号。

3 室外场景光照参数估计

首先估计天空光参数,然后利用色度一致性求解太阳光参数,并根据基图像分解的特点求解基图像,最后基于基图像色度校正模型迭代优化光照参数。

3.1 天空光参数估计

场景的阴影区域中, $C_{\text{sun}}(x) = 0$, 即太阳光基图像中该部分为0, 进而 $C(x) = 0$ 。由式(2)可得:

$$\frac{I_2(x)}{I_1(x)} = \frac{l_{\text{sun}}^2 C(x) + l_{\text{sky}}^2}{l_{\text{sun}}^1 C(x) + l_{\text{sky}}^1} \Rightarrow \delta_2(x) = \frac{l_{\text{sky}}^2}{l_{\text{sky}}^1} \\ \Rightarrow l_{\text{sky}}^2 = \delta_2(x) l_{\text{sky}}^1$$

同理, $l_{\text{sky}}^3 = \delta_3(x) l_{\text{sky}}^1$.

本文采用类似文献[17]的方法估计天空光参数,通过选取阴影区域的颜色并求均值得到天空光系数,即

$$\begin{cases} l_{\text{sky}}^2 = \frac{1}{N_x} \sum_x \delta_2(x) l_{\text{sky}}^1 \\ l_{\text{sky}}^3 = \frac{1}{N_x} \sum_x \delta_3(x) l_{\text{sky}}^1 \end{cases}, N_x \text{ 为区域内像素的个数。令 } l_{\text{sky}}^1 = 1,$$

可以求得 l_{sky}^2 和 l_{sky}^3 。一般情况下,阴影区域内像素的亮度低于阳光照射区域,本文选择具有较低亮度值的像素作为阴影区域像素。实验表明,选择 30% 作为阈值,算法在多数情况下能得到稳定的结果。因此,选择第一幅图像 $I_1(x)$ 和 $I_2(x)$ 亮度较低的 30% 像素在阴影中,并找到它们的公共区域作为公共阴影,从而得到第 2 幅图像的天空光强度。同理,可以求出第 3 幅图像的天空光强度。

3.2 利用色度一致性求解太阳光参数

由式(3)和 $l_{\text{sky}}^1 = 1$ 可得:

$$\begin{aligned} \frac{I_2(x)}{I_1(x)} &= \frac{l_{\text{sun}}^2 C(x) + l_{\text{sky}}^2}{l_{\text{sun}}^1 C(x) + l_{\text{sky}}^1} \Rightarrow \delta_2(x) = \frac{l_{\text{sun}}^2 C(x) + l_{\text{sky}}^2}{l_{\text{sun}}^1 C(x) + 1} \\ &\Rightarrow (l_{\text{sun}}^1 \delta_2(x) - l_{\text{sun}}^2) C(x) = l_{\text{sky}}^2 - \delta_2(x) \end{aligned}$$

同理可得: $(l_{\text{sun}}^1 \delta_3(x) - l_{\text{sun}}^3) C(x) = l_{\text{sky}}^3 - \delta_3(x)$ 。因此, $\forall x \in \{\text{阳光照射区域}\}, C(x) \neq 0$, 则有:

$$\frac{l_{\text{sun}}^1 \delta_2(x) - l_{\text{sun}}^2}{l_{\text{sun}}^1 \delta_3(x) - l_{\text{sun}}^3} = \frac{l_{\text{sky}}^2 - \delta_2(x)}{l_{\text{sky}}^3 - \delta_3(x)} \quad (4)$$

虽然太阳光和天空光的照射可能造成物体的色度不同,但光强度系数是与太阳光及天空光有关的因素,而基图像是场景几何、材质和遮挡函数等与光强度无关的成分,因此太阳光基图像和天空光基图像在阳光区域的色调和饱和度应该大致相同,具有色度一致性^[17]。由于波长 λ 对应于 R, G, B 3 个颜色通道,因此:

$$\mu_R \frac{C_{\text{sun}}(x, R)}{C_{\text{sky}}(x, R)} = \mu_G \frac{C_{\text{sun}}(x, G)}{C_{\text{sky}}(x, G)} = \mu_B \frac{C_{\text{sun}}(x, B)}{C_{\text{sky}}(x, B)} \quad (5)$$

其中, μ_R, μ_G 和 μ_B 为基图像 R, G, B 3 个通道与真实值相差的比例因子。由于 $C(x) = \frac{C_{\text{sun}}(x)}{C_{\text{sky}}(x)}$, 由式(5)可得能量方程:

$$\min \sum_{i=1}^n [(\mu_R C(x, R) - \mu_G C(x, G))^2 + (\mu_R C(x, R) - \mu_B C(x, B))^2] \quad (6)$$

其中, n 为阳光区域像素点的个数。由于 3.1 节已经求出 l_{sky}^2 和 l_{sky}^3 , 联立式(4)和式(6), 利用最小二乘法可以求解太阳光参数 $l_{\text{sun}}^1, l_{\text{sun}}^2, l_{\text{sun}}^3$ 以及 μ_R, μ_G, μ_B 。同样, 可以选择具有较高亮度值的像素作为阳光区域。

3.3 基图像求解

有了天空光和太阳光的光强度系数, 就可以很容易地求解太阳光和天空光基图像。根据室外光照明模型, 对于图像的任意像素点 x , 有:

$$\begin{cases} I_1(x) = l_{\text{sun}}^1 C_{\text{sun}}(x) + l_{\text{sky}}^1 C_{\text{sky}}(x) \\ I_2(x) = l_{\text{sun}}^2 C_{\text{sun}}(x) + l_{\text{sky}}^2 C_{\text{sky}}(x) \\ I_3(x) = l_{\text{sun}}^3 C_{\text{sun}}(x) + l_{\text{sky}}^3 C_{\text{sky}}(x) \end{cases} \quad (7)$$

其中, 场景光照参数已经求出, 方程组左侧为图像像素值, 只有 $C_{\text{sun}}(x)$ 和 $C_{\text{sky}}(x)$ 是未知数, 因此用最小二乘法即可求解。

对图像的所有像素做同样的处理, 可得到太阳光和天空光基图像。

3.4 迭代优化

基于上述算法的描述, 可以得到算法的初始结果, 即所有图像的天空光和太阳光的光强系数, 以及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, 且具有前提条件 $l_{\text{sky}}^1 = 1$, 因此基图像和真实值相差一个比例因子, 这样恢复出的基图像可能不够准确。鉴于此, 本文利用基图像色度校正模型对光照参数进行迭代更新。Finlayson 等^[22] 提出的 Shades of Gray 光照色度估计算法的公式为:

$$\left(\frac{\int (I(x))^p dx}{\int dx} \right)^{1/p} = ke$$

其中, e 为光照色度; $I(x)$ 为图像像素颜色; k 是一个取值范围为 $[0, 1]$ 的常数, 0 表示无反射, 1 表示全反射; p 是明科夫斯基范数, 取值范围是 $(0, \infty)$, 通过改变 p 值可以得到不同的光照色度估计。算法中 $p \in [1, \infty)$, 初始值取 1。通过 Von-Kries 对角模型^[21] 对两个基图像进行光照色度校正, 可得

$$f^w = \begin{bmatrix} \frac{1}{e_R} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{e_G} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{e_B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(x, R) \\ I(x, G) \\ I(x, B) \end{bmatrix}$$

像具有色度一致性, 因此校正后的图像的色度相同。由此可得优化方程:

$$\min_{p \in [1, \infty)} \sum_{x \in \{\text{阳光照射区域}\}} (f_{\text{sun}}^w - f_{\text{sky}}^w)^2$$

其中, f_{sun}^w 和 f_{sky}^w 为光照色度校正基图像。因此, 可以利用插值法求出 p , 从而得到光照色度校正后的基图像 $C_{\text{sun}}(x)$ 和 $C_{\text{sky}}(x)$, 用它更新 $l_{\text{sky}}^1, l_{\text{sky}}^2, l_{\text{sky}}^3$ 和 $l_{\text{sun}}^1, l_{\text{sun}}^2, l_{\text{sun}}^3$ 。每次迭代更新都会计算重构误差, 直到最终的均方根误差 (RMS) 小于阈值。

4 实验结果与讨论

本文使用固定视点拍摄的室外场景图像及合成图像对算法进行验证。室外场景图像由佳能 SX110 相机拍摄, 原始分辨率是 1600×1200 , 然后将其处理为 640×480 ; 合成图像由 3Dmax 生成。算法在 CPU 为酷睿 E7500/2.93GHz、内存 8GB 的计算机上运行。

本文算法与文献[16]中的算法的比较结果如图 1 所示。图 1(a) 为 3 幅源图像, 图 1(b) 为文献[16]中的算法的结果, 其中太阳光基图像阳光下部分偏亮, 天空光基图像存在明显的色调异常, 且图 1(c) 中误差图像(指源图像与使用文献[16]中的算法的光照参数重新绘制图像间的误差)的误差明显; 而图 1(d) 中本文算法的结果则不存在这些情况, 色度也更具一致性。在图 1(c) 和图 1(e) 的误差图像中, 亮度越大的地方误差越大。图 1(e) 的误差图像绝大部分误差很小, 结果明显好于图 1(c)。文献[16]中的算法和本文算法 RGB 各通

道的重建误差均值如表 1 所列,光照参数比较如表 2 所列。



(a)3 幅源图像



(b)文献[16]中的算法求得的 2 幅基图像



(c)源图像与用文献[16]中的算法的光照参数重绘图像的误差图像



(d)本方算法求得的 2 幅基图像



(e)源图像与本文算法的光照参数重绘图像的误差图像

图 1 本文算法与文献[16]中的算法的比较结果
Fig.1 Comparison between our method and the algorithm in ref. [16]



(a)同一太阳方位、不同天气的 3 幅图



(c)文献[17]中的算法求得的基图像



(e)源图像与用文献[17]中的算法的光照参数重绘图像(a)的误差图像



(g)源图像与用本文算法的光照参数重绘图像(a)的误差图像



(b)另一太阳方位、不同天气的 3 幅图



(d)本文算法求得的基图像



(f)源图像与用文献[17]中的算法的光照参数重绘图像(b)的误差图像



(h)源图像与用本文算法的光照参数重绘图像(b)的误差图像

图 2 本文算法与文献[17]中的算法的比较结果

Fig.2 Comparison between our method and the algorithm in ref. [17]

表 1 两种算法的重建误差

Table 1 Reconstruction errors of two algorithms

图像 序号	文献[16]中的算法			本文算法		
	R	G	B	R	G	B
1	1.8	2.7	1.5	0.7	1.1	0.4
2	1.7	2.8	1.9	0.6	1.0	0.5
3	2.7	3.5	2.3	1.3	1.4	1.1

表 2 两种算法的光照参数比较

Table 2 Comparison of illumination parameters between two algorithms

光照 参数	文献[16]中的算法			本文算法		
	R	G	B	R	G	B
l_{sun}^1	1.023	0.321	0.796	0.824	0.421	0.579
l_{sky}^1	0.632	1.034	0.926	0.685	0.987	0.886
l_{sun}^2	0.248	0.864	1.210	0.394	0.894	0.756
l_{sky}^2	1.354	0.654	0.487	1.164	0.687	0.960
l_{sun}^3	0.987	0.546	1.024	0.548	0.846	0.879
l_{sky}^3	0.884	1.147	0.543	1.063	0.741	0.635

本文算法与文献[17]中的算法的比较结果如图 2 所示。图 2(a)和图 2(b)分别是 2 个太阳方位、3 种不同天气下的源图像;图 2(c)和图 2(d)是 2 种算法计算得到的基图像,其中前 2 幅为两个太阳方位的太阳光基图像,最后 1 幅为天空光基图像。虽然文献[17]中的算法求得的太阳光基图像和天空光基图像基本满足色度一致性,但由于未进行光照色度校正,太阳光基图像和天空光基图像的亮度很不正常,而本文算法求得的基图像不存在这一问题。图 2(e)和图 2(f)是文献[17]中的算法的误差图像,图 2(g)和图 2(h)是本文算法的误差图像。

图 3 给出了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 3(a)是不同光照环境的 3 幅源图像,图 3(b)是使用本文算法参数得到的重构图像,图 3(c)是误差图像。表 3 列出了本文算法估计的参数值与真实值的灰度误差。

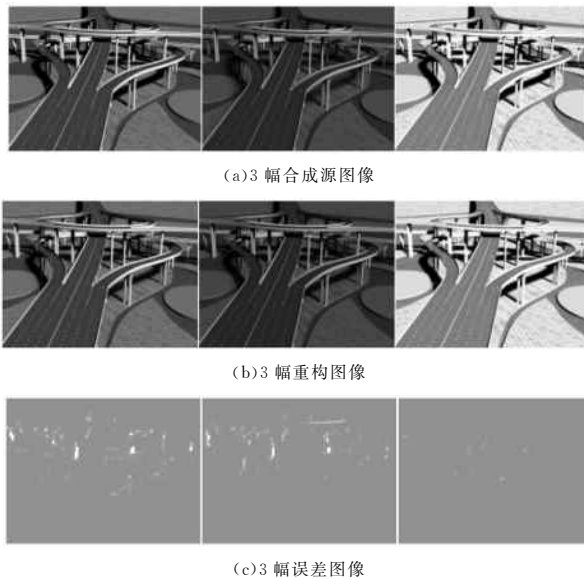


图3 合成图像的重构图与源图像的比较

Fig. 3 Comparison between reconstruction images of synthetic images and source images

表3 所提算法估计的光照参数与真实值的灰度误差
Table 3 Gray errors of illumination parameters of the proposed algorithm and the real values

光照参数	本文算法		
	第1幅图	第2幅图	第3幅图
l_{sun}	1.33	1.02	0.79
l_{sky}	0.89	0.95	0.82

(单位:%)

图4给出本文算法应用到增强现实中的例子,虚拟物体为灰色半球。可以看到,灰色半球的外观随着背景光照的变化而发生变化,且基本上与背景图像的光照保持一致。



图4 3种天气条件下的增强现实效果图

Fig. 4 Augmented reality images under three different weather conditions

结束语 本文提出了一种室外场景光照估计的新算法。该算法利用色度一致性这一约束条件求解光照参数,根据基图像分解的特点得到基图像的初值,最后使用 Von-Kries 对角模型^[21]对基图像进行光照色度校正,以此迭代优化光照参数。相对于文献[17]中的算法,本文算法减少了比例因子个数,增加了色度校正约束,得到的太阳光和天空光基图像更具色度一致性。另,所提算法仅需要几幅固定视点的图像,不需要场景的任何三维几何信息,对场景的材质没有要求。

本文算法在估计天空光参数时需要选择30%的像素在阴影中,在优化时也需要选择阳光区域,这就要求图像要有阴影区域和阳光区域,否则结果会受到影响。该算法要求视点固定,场景静止,但是对于室外场景而言,人的活动以及风等自然条件的改变会使场景发生相应的变化。如何降低这些影

响,提高算法的鲁棒性,需要进行进一步研究。此外,室外场景是太阳光和天空光共同作用的结果,因此无法单独测量天空光和太阳光的光强度系数的真实值,算法结果很难与真实值比较,一般只能计算源图像与重绘图像的误差图像,并与已有算法进行比较。

参考文献

- [1] LIU W K, LIU Y. Review on illumination estimation in augmented reality[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(2): 197-207. (in Chinese)
刘万奎, 刘越. 用于增强现实的光照估计研究综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(2): 197-207.
- [2] LOSCOS C, DRETTAKIS G, ROBERT L. Interactive virtual re-lighting of real scenes[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2000, 6(4): 289-305.
- [3] LEE S, JUNG S K. Estimation of illuminants for plausible lighting in augmented reality[C]// Proceedings of the International Symposium on Ubiquitous Virtual Reality. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 17-20.
- [4] ZHOU W, KAMBHAMETTU C. A unified framework for scene illuminant estimation[J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(3): 415-429.
- [5] ZHOU Y, YAN L, ZHAO H. Study on the lighting model of the real world in augmented reality[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(8): 968-971. (in Chinese)
周雅, 晏磊, 赵虎. 增强现实系统光照模型建立研究[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(8): 968-971.
- [6] SATO I, SATO Y, IKEUCHI K. Illumination from shadows[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(3): 290-300.
- [7] WANG Y, SAMARAS D. Estimation of multiple directional light sources for synthesis of augmented reality images[J]. Graphical Models, 2003, 65(4): 185-205.
- [8] KWON O S, CHO Y H, KIM Y T, et al. Illumination estimation based on valid pixel selection in highlight region[C]// Proceedings of International Conference on Image Processing. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2004, 4: 2419-2422.
- [9] IKEDA T, OYAMADA Y, SUGIMOTO M. Illumination estimation from shadow and incomplete object shape captured by an RGB-D camera[C]// Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2012: 165-169.
- [10] BOOM B, ORTOS-ESCOLANO S, NING X, et al. Point light source estimation based on scenes recorded by a RGB-D camera [C]// Proceedings of the British Machine Vision Conference. Durham: BMVA Press, 2013: 105.
- [11] EINABADI F, GRAU O. Discrete light source estimation from light probes for photorealistic rendering[C]// Proceedings of the British Machine Vision Conference. Durham: BMVA Press, 2015: 43.
- [12] BLINN J F, NEWELL M E. Texture and reflection in computer generated image[J]. Communications of the Association for Computing Machinery, 1976, 19(10): 542-547.

(下转第82页)

短为目标函数探讨了最优控制点的选取。数值实例表明,利用能量优化法得到的二次三角 Hermite 插值样条曲线除了在拼接点处保持 C^1 连续外还具有较好的光顺性;利用弧长近似最短的优化模型使得提出的二次三角 Hermite 插值样条曲线的弧长近似最短。二次三角 Hermite 插值曲线丰富了 Hermite 插值样条的构造方法,当插值数据接近于三角函数类型数据时,其可以提供更高的精度。

参考文献

- [1] LORENTZ R A. Multivariate Hermite interpolation by algebraic polynomials: a survey [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2000, 122(2): 167-201.
- [2] GFRERRER A, ROSCHEL O. Blended Hermite interpolations [J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2001, 18(9): 865-873.
- [3] YONG J H, CHENG F H. Geometric Hermite curves with minimum strain energy [J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2004, 21(3): 281-301.
- [4] HALL C A, MEYER W W. Optimal error bounds for cubic spline interpolation [J]. *Journal of Approximation Theory*, 1976, 16(2): 105-122.
- [5] DUAN Q, DJIDJELI K, PRICE W G, et al. Rational cubic spline based on function values [J]. *Computer and Graphics*, 1998, 22(4): 479-486.
- [6] DUAN Q, DJIDJELI K, PRICE W G, et al. The approximation properties of some rational cubic splines [J]. *International Journal of Computer Mathematics*, 1999, 72(2): 155-166.
- [7] SARFRAZ M. Cubic spline curves with shape control [J]. *Computer and Graphics*, 1994, 18(5): 707-713.
- [8] DUAN Q, LIU A K, CHENG F H. Constrained interpolation using rational cubic spline with linear denominators [J]. *Korean Journal of Computational and Applied Mathematics*, 1999, 6(1): 203-215.
- [9] XIE J, TAN J Q, LI S F. Rational cubic Hermite interpolating spline and its approximation properties [J]. *Chinese Journal of Engineering Mathematics*, 2011, 28(3): 385-392. (in Chinese)
谢进, 檀结庆, 李声锋. 有理三次 Hermite 插值样条及其逼近性质 [J]. *工程数学学报*, 2011, 28(3): 385-392.
- [10] LI J C, LIU C Y, YANG L. Quartic Hermite interpolating splines with parameters [J]. *Journal of Computer Applications*, 2012, 32(7): 1868-1870. (in Chinese)
李军成, 刘纯英, 杨炼. 带参数的四次 Hermite 插值样条 [J]. *计算机应用*, 2012, 32(7): 1868-1870.
- [11] LI J C, ZHONG Y E, XIE C. Cubic trigonometric Hermite interpolating splines curves with shape parameters [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(17): 182-185. (in Chinese)
李军成, 钟月娥, 谢淳. 带形状参数的三次三角 Hermite 插值样条曲线 [J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(17): 182-185.
- [12] HAN X. Piecewise trigonometric Hermite interpolation [J]. *Applied Mathematics & Computation*, 2015, 268(C): 616-627.
- [13] KARCIAUSKAS K, PETERS J. Biquintic G^2 surfaces via functionals [J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2015, 33: 17-29.
- [14] YAN L L, LI S P. Parameter selection of shape-adjustable interpolation curve and surface [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2016, 21(12): 1685-1695. (in Chinese)
严兰兰, 李水平. 形状可调插值曲线曲面的参数选择 [J]. *中国图象图形学报*, 2016, 21(12): 1685-1695.
- (上接第 62 页)
- [13] DEBEVEC P E, MALIK J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs [C] // *Proceedings of the 24th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM Press, 1997: 369-378.
- [14] LI B, XIONG W, HU W, et al. Evaluating combinational illumination estimation methods on real-world images [J]. *IEEE Transactions on image procession*, 2013, 23(3): 1194-1209.
- [15] LI B, XIONG W, HU W, et al. Multi-cue illumination estimation via a tree-structured group joint sparse representation [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2016, 117: 21-47.
- [16] LIU Y, QIN X, XU S, et al. Light source estimation of outdoor scenes for mixed reality [J]. *The Visual Computer*, 2009, 25(5-7): 637-646.
- [17] ZHANG R, ZHONG F, PENG Q S, et al. Basis image decomposition for outdoor lighting estimation [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013, 25(4): 442-449. (in Chinese)
张锐, 钟凡, 彭群生, 等. 室外场景光照估计的基图像分解算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(4): 442-449.
- [18] XING G, LIU Y, QIN X, et al. A practical approach for real-time illumination estimation of outdoor videos [J]. *Computers & Graphics*, 2012, 36(7): 857-865.
- [19] XING G Y, ZHOU X H, PENG Q S, et al. Lighting simulation of augmented outdoor scene based on a legacy photograph [J]. *Computer Graphics Forum*, 2013, 32(7): 101-110.
- [20] ZHANG R, ZHONG F, LIN L, et al. Basis image decomposition of outdoor time-lapse videos [J]. *The Visual Computer*, 2013, 29(11): 1197-1210.
- [21] VON KRIES J. Chromatic adaptation [M] // *Sources of Color Vision*. Cambridge: MIT Press, 1970: 12-13.
- [22] FINLAYSON G D, TREZZI E. Shades of gray and colour constancy [C] // *Proceedings of the 12th Color and Imaging Conference*. Springfield: Society for Imaging Science and Technology, 2004: 37-41.