

文章编号:1001-9081(2016)05-1387-07

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2016.05.1387

## 基于高动态范围图像中光晕分析的光照方向测算算法

李 华, 王旭阳\*, 杨华民, 韩 成

(长春理工大学 计算机科学技术学院, 长春 130022)

(\*通信作者电子邮箱 294880557@qq.com)

**摘要:**针对增强现实(AR)系统中复杂场景的光照一致性问题,运用高动态范围(HDR)图像处理技术对标识物图像进行分析,提出一种基于HDR图像中光晕分析的光照方向测算算法。为了提高虚拟物体的沉浸感和真实性,在研究和分析现有的光照恢复算法的基础上,利用二次曲线对的投影不变性原理进行相机标定;为了获得更加详尽的光照信息,使用HDR技术对标识物图像进行处理,提高了测算精确度;参照Lambert光照模型对图像中的光照信息进行分析,将拍摄角度进行分类,实现了对传统测算光源方向算法的改进,可测算出位于摄影球反射范围外的部分光源的方向,扩大了测算范围。设计了针对单一点光源的视角1和视角2测算验证实验,并进行了分析。实验验证表明,所提方法简单易行,具有较强的鲁棒性,能够实现在标识物部分遮挡的情况下,测算出位于摄影球反射范围外部分光源的方向。

**关键词:**增强现实;沉浸感;光照恢复;相机标定;高动态范围

**中图分类号:**TP193.41    **文献标志码:**A

## Illumination direction measurement based on halo analysis in high-dynamic range images

LI Hua, WANG Xuyang\*, YANG Huamin, HAN Cheng

(College of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin 130022, China)

**Abstract:** Aiming at the illumination consistency of complex scenes in Augmented Reality (AR) system and analyzing the marker images by High-Dynamic Range (HDR) technology, an improved measurement algorithm for illumination direction based on the analysis of halo in HDR images was proposed. In order to improve the immersion and reality of virtual objects, after researching and analyzing the existing illumination recovery algorithms, a camera calibration method was proposed by utilizing the projection invariance of the quadratic curve pair. In order to get detailed light information, HDR was used to process marker image to improve accuracy. Referring to Lambert illumination model, the light information of image was analyzed to classify the shooting angle, and the improvement of traditional light source direction measuring was realized, part of the directions of the light sources outside of the photography ball reflection range was measured. The shooting 1 and shooting 2 of the single point light source were tested and analyzed. The experimental results show that this method is simple, robust, and can measure the direction of partial illumination outside the mirror ball reflection range no matter whether the marker is partially shaded or not.

**Key words:** Augmented Reality (AR); immersion; illumination recovering; camera calibration; High-Dynamic Range (HDR)

### 0 引言

特种电影《阿凡达》《变形金刚》等引起的轰动效应使得基于增强现实的特种影片摄制技术成为国内外学者的研究热点。增强现实(Augmented Reality, AR)是虚拟现实研究领域的重要分支。然而,光照一致性问题<sup>[1]</sup>既是增强现实中实现虚实融合的一个难点也是重点。光照一致性需要根据光学物理的有关定律,结合坐标系的标定、几何特征的提取、阴影遮挡的处理、光源方向和强度的检测及恢复等来模拟自然界中光照的明暗。如何在增强现实系统中高效准确地确保光照一致性已成为近年来备受瞩目的研究热点。

光照一致性是解决虚实物体无缝融合的关键,是增强沉

浸感的主要手段之一<sup>[2]</sup>。最早在1991年由Zheng等<sup>[3]</sup>首次提出光照算法,通过分析包含标识物的图像,并利用图像轮廓线的阴影信息,来推算真实环境中点光源的方位角。当前,关于光照一致性的研究正朝着多样性的方向发展:可以从旋转视频中提取动态的光照信息<sup>[4]</sup>,也可以使用鱼眼镜头拍摄全景图像<sup>[5]</sup>,还可以利用点云数据对复杂场景中物体进行分类和分割<sup>[6]</sup>,此外以立方体标识物<sup>[7]</sup>或者双测光球<sup>[8]</sup>作为光照信息载体的光源恢复也具备较好的效果。从现有的光照一致性的分析和研究中可以看出,需要解决的问题主要集中于光源方向和光源强度的测算<sup>[9]</sup>,其中光源的强度值往往是通过建立光照模型完成的<sup>[10]</sup>,且仅能得到强度的相对值<sup>[11]</sup>,在实际应用的后期处理中还会添加手动调整的过程;而光源

收稿日期:2015-10-19;修回日期:2015-12-12。 基金项目:吉林省重大科技攻关项目(2012ZDGG004)。

**作者简介:**李华(1977—),女,吉林长春人,副教授,硕士,主要研究方向:计算机仿真建模、虚拟现实;王旭阳(1991—),男,吉林长春人,硕士研究生,主要研究方向:虚拟现实、光照一致性;杨华民(1963—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:虚拟现实、数字媒体、图像处理;韩成(1978—),男,吉林长春人,副教授,博士,主要研究方向:虚拟现实、计算机视觉、智能控制。

方向的测算是光照恢复的基础,由于光源的方向变化较频繁,且对渲染效果影响较大,所以光源方向的恢复是光照一致性技术的重点和难点。

在测算光照方向时,利用标定板-测光球模型是完成几何-光照注册的有效方法之一。但在一些遮挡面积大、遮挡物多的复杂场景中,传统的标定方法往往具有很大的局限性,甚至无法估计出结果,而且近光源于摄影球等标识物上所得信息往往不能近似为点,带来较大误差。例如,文献[12]提出的标识物光源测算模型,需要进行人为手动协助才能完成,并且需要进行多次光照矫正;文献[13]提出的三维光照测算模型,虽然能够很好地测算出光照信息,但其受拍摄角度的影响较大,而且在复杂场景中被遮挡时,无法完成测算工作,因此,本文针对复杂场景的光照一致性问题,在分析和研究了传统摄影球模型算法的基础上,运用高动态范围(High-Dynamic Range, HDR)图像处理技术对标识物图像进行分析,提出一种基于HDR图像中光晕分析的光照方向测算算法,对传统的摄影球模型算法进行了明显改进,实现了在标识物部分遮挡的情况下,测算出位于摄影球反射范围外的光源方向。

## 1 随机点云标定

相机标定是2D图像重建3D测度信息的关键步骤。计算机视觉中,随着透视投影角度的变化,所视场景中的面积、长度、角度等元素会随着透视角度的变化而变化,场景中特征点与图像像素点的匹配计算<sup>[14-17]</sup>直接影响到标定算法效率。

对于本文所提测算算法,需要使用一种在标识物被部分遮挡的情况下进行相机姿态的标定方法,如图1所示为传统的棋盘格标定法中标识物被部分遮挡的情况。

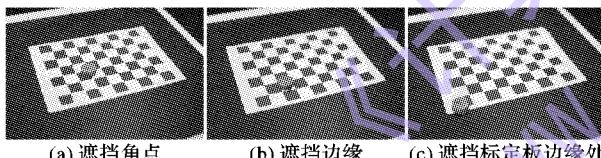


图1 棋盘格标识物遮挡实验

经过实验,传统的棋盘格标定法在以上三种遮挡情况下均无法完成相机标定的功能,无法应用于本文所提测算算法。

### 1.1 二次曲线对透视不变性

目前,对于二维图像已经提出了如不变矩<sup>[18]</sup>、傅里叶描绘子<sup>[19]</sup>、R描绘子<sup>[20]</sup>等方法,但仅限于空间平面与相机光轴垂直时。而本文采取的是二次曲线对的透视不变性原理<sup>[21-22]</sup>,并且在此基础上使用一种基于随机点云标识物的标定方法。

设空间同一平面内某两条不同的二次曲线  $c_1$  和  $c_2$  的标准形式为:

$$Q(x, y) = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (1)$$

令  $\mathbf{P}$  为矩阵  $\begin{bmatrix} A & B/2 & D/2 \\ B/2 & C & E/2 \\ D/2 & E/2 & F \end{bmatrix}$  的归一化矩阵,后文简称“系数矩阵”,则二次曲线对  $c_1$  和  $c_2$  也可以表示为:

$$\lambda X^T \mathbf{P}_i X = 0; \lambda \text{ 是不为零的常数}, i = 1, 2 \quad (2)$$

经透视投影  $\mathbf{T}$  变换后,  $c_1$  和  $c_2$  的系数矩阵可表示为:

$$\mathbf{P}'_i = \lambda_i^3 (\mathbf{T}^{-1})^T \mathbf{P}_i \mathbf{T}^{-1} \quad (3)$$

等号两边取行列式得到:

$$|\mathbf{P}'_i| = \lambda_i |\mathbf{T}^{-1}|^2 |\mathbf{P}_i| \quad (4)$$

由式(3)、(4)可以推导出:

$$IP = \text{Tr}[\mathbf{P}_1^{-1} \mathbf{P}_2] = \text{Tr}[(\mathbf{P}'_1)^{-1} \mathbf{P}'_2] = IP' \quad (5)$$

由于  $IP$  是定义在空间局部平面的量,所以它和二次曲线对相对应于相机的内参和外参无关,又因为  $IP = IP'$ ,所以  $IP$  是空间平面内的透视投影不变量。

### 1.2 随机点云匹配算法

光源方向的测算实质上是对光源三维重建的一部分,三维重建中相机的标定过程是必不可少的,在已知匹配点时,利用张正友算法<sup>[23]</sup>可以直接完成相机标定工作,因此,拍摄图像与标定模板的点匹配成为了相机标定的关键。

在测算光源方向时,本文选定相机坐标系作为全局坐标系。虽然全局坐标系选为世界坐标系时也可以用同样的方法确定光源位置,但是这样设置会引起2个问题:

1) 其他标识的坐标值要经过2次转换才能获得全局坐标,增加了计算的复杂度和误差;

2) 识别标识物时可能产生误差(在现有的基于定位标记的增强现实系统中这是一个无法避免的现象),多次坐标矩阵转换之后这个误差会被放大,影响检测的准确性。

本文基于1.1节中验证的二次曲线对透视不变性原理,使用了一种随机点云标定算法。其中对应点的匹配算法可以简述为如下步骤:

1) 绘制由数个等大圆随机分布构成的标定模板,在将其数字化后记录每个圆的圆心坐标以及1.1节中涉及到的系数矩阵  $\mathbf{P}$ ;

2) 将标定模板中的每个圆与其最近的4个圆分为一组,如图2(a),视圆间的  $IP$  值为边长,计算中心圆与最近4个圆成角的4个余弦值并作为每个中心圆的一组特征值;

3) 分析相机所拍摄的场景图像,提取出球面圆图中可见的每个椭圆的圆心坐标以及系数矩阵;

4) 同理于步骤2),将场景图像中的每个椭圆与其最近的4个椭圆分为一组,如图2(b),视椭圆间的  $IP$  为边长,根据三角形余弦定理,计算中心椭圆与最近4个椭圆成角的4个余弦值并作为每个中心椭圆的一组特征值;

5) 将场景图像与标定模板按照步骤2)和步骤4)中计算得到的特征值进行匹配,从而得到相匹配的圆和椭圆的对应圆心。

得到匹配点的坐标后,即可根据相机的透视投影原理,应用张正友算法<sup>[24-26]</sup>求得单应性矩阵,从而计算出图像坐标与世界坐标之间的转换关系<sup>[27]</sup>。

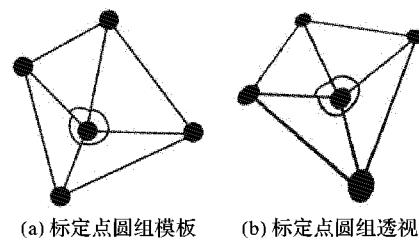


图2 标定点圆分组

## 2 多点光源恢复

所谓光照一致性,是指AR场景中的虚拟物体应具备与真实场景相同的光照效果,这意味着首先要恢复出真实场景

的光照情况,即恢复出真实场景中有“贡献”光源的位置和强度,然后计算真实场景光照对虚拟对象的影响<sup>[28]</sup>。

可根据是否需要借助特殊标定物将光照方向测算方法分为两大类,即借助标定物测算方法和不需要借助标定物测算方法,其中不需要借助标定物测算方法又可分为立体视觉法和人工智能法,本文采取的是借助摄影球的测算方法。

## 2.1 摄影球测光原理

真实光源在AR系统中通常被模拟成三种光源模型:方向光源、锥形光源和点光源,如图3所示。

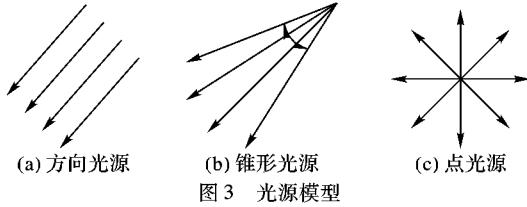


图3 光源模型

点光源模型一般用来模拟近距离内的光源,它可以近似看作一个空间点,具有相对较强的亮度,对恢复场景的光照环境具有突出的“贡献”,这是本文主要研究的光源模型。

根据光的沿直线传播以及光的反射原理,在获得了单应性矩阵后,便可利用相机的位姿和镜面球上与检测到的像素所对应的点的表面法线方向,计算场景中光源的方向,如图4所示,光源方向  $V_l$  可以通过视线向量  $V_{eye}$  和镜面球上某个点的法线向量  $V_n$  来计算<sup>[29]</sup>:

$$V_l = -2(V_n \cdot V_{eye})V_n + V_{eye} \quad (6)$$

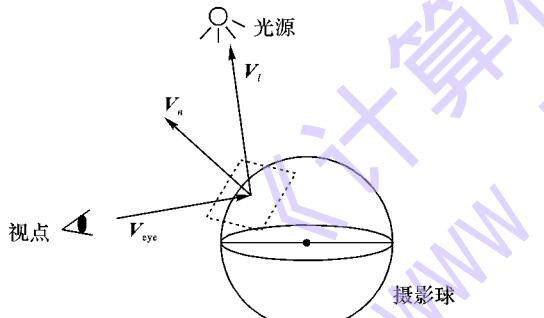


图4 球面反射光路

通过该方法可以获得分布在以摄影球球心为中心的球面上各个光源点的方向,由球面圆区域中与之对应的像素的位置确定。由此所得到的光源数据可用于AR场景的光照重构。

## 2.2 测算光源方向的改进算法

文献[30–32]已提出多种借助摄影球等特殊标定物的光源测算方法。为了获得更加详尽的信息,本文利用HDR技术对场景图像进行处理,并且通过运用Lambert模型对标定物图像进行分析,提出一种改进的摄影球光源测算方法。本节以单点光源为例对改进算法进行叙述。

### 2.2.1 Lambert模型

自然界中的大部分物体表面都是同时具有漫反射性质和镜面反射性质,本文只考虑摄影球的漫反射性质,看作是理想化的Lambert模型。其方程形式为:

$$I = I_a K_a + I_d K_d \cos \theta \quad (7)$$

其中: $I$ 是表面某点的反射光强; $I_a$ 是环境光强; $K_a$ 是表面对环境光的反射系数; $I_d$ 是点光源光照强度; $K_d$ 是表面对点光

的反射系数; $\theta$ 是点光源入射方向与该点处法线方向所成角度。

### 2.2.2 耀点的检测与分析

为叙述方便,先作如下定义:

**定义** 对于摄影球上所有的点,如果点光源的入射方向与某点的法线方向平行,则称该点为“耀点”。

点光源发出的光线,其中一部分会与摄影球相切,光线与摄影球的所有切点会组成一个圆,称该圆面为“圆截面”,如图5(a)所示,其中O球心,Q表示“耀点”。

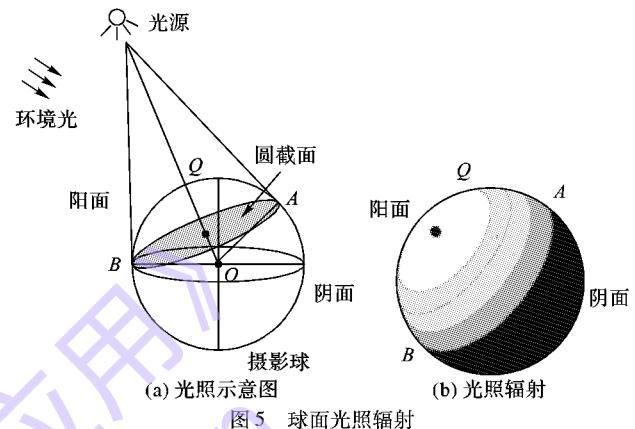


图5 球面光照辐射

对于摄影球,点A,B是其“圆截面”上点光源入射光线与球的切点,则半径OA,OB垂直于过切点的点光源的入射光线。此外,摄影球的整个球面被“圆截面”划分成了两个部分,将耀点Q所在的那一部分记为“阳面”,另一部分记为“阴面”。由式(7)可知,随着摄影球面上的点距离光源越来越远,式中的θ随之增大时,反射光强I将一直减小,当θ增大至90°时,反射光强I将不会减小,即位于“阴面”的点只受环境光影响,如图5(b)所示。

由于拍摄角度的原因,我们只能得到摄影球一部分图像,因此“耀点”有可能不会出现在摄影球的图像上。为了进一步对本算法进行分析和描述,将摄影球图像分为三种视角进行讨论:

1) 视角1,相机拍摄到“耀点”的图像,即“耀点”出现在球面圆的图像中,如图6(a)所示;

2) 视角2,相机没有拍摄到“耀点”的图像,只拍摄到“阳面”和“阴面”的一部分,如图6(b)所示;

3) 视角3,由于“阳面”面积小于摄影球表面积的1/2,所以可能会出现没有拍摄到“阳面”的情况,如图6(c)所示,对于该种情况本文不作研究。

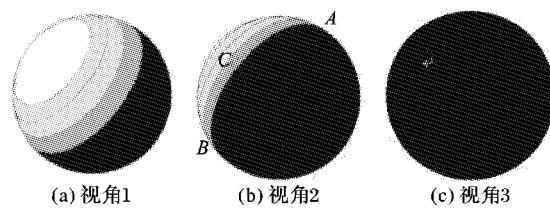


图6 三种不同视角的辐射

为了判断拍摄的图片属于上述3种情况的哪一种,采取如下的方法进行判断:

1) 如果球面圆图像中所有像素点的灰度值全部相等,则可判断属于视角3,即属于图6(c)所描述的情况;

2) 如果球面圆图像中灰度值最大的点位于球面圆的圆

周上,则可判断属于视角 2,即属于图 6(b)所描述的情况;

3)如果球面圆图像中灰度值最大的点个数唯一,且位于球面圆内部,则可判断属于视角 1,即属于图 6(a)所描述的情况。

### 2.2.3 点光源方向的计算

根据 2.2.2 节所述内容可知,拍摄视角可以分为 3 种,本节主要针对各种视角,讨论点光源方向的计算方法。

1)视角 1:耀点出现在球面圆内。

由于欲测点光源可能距离摄影球较近,从而于摄影球表面所成像的最亮部分无法近似为一个点,为此本文要对球面圆图像进行再次处理:先通过设定阈值的方法将球面圆图像进行二值化(具有最高灰度值的一些点设为 1,其余点设为 0),从而将最亮部分提取出来,并对有这些点构成的区域进行椭圆拟合得出圆心点坐标,最终根据式(6)即可计算出光源的方向。

2)视角 2:耀点未出现在球面圆内。

耀点未出现在球面圆内,但图像中同时包含了阴面和阳面,也就是说截圆面圆弧的一部分包含在球面圆内,如图 6(b)所示,从球面圆图像中易得弧 AB 两端点 A、B 的像素坐标  $(x_A, y_A)$ 、 $(x_B, y_B)$ ,由几何关系可知,弧 AB 的中点 C 的坐标  $(x_C, y_C)$  需满足式(8):

$$(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 = (x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2 \quad (8)$$

球面上的点均满足球面方程,在已知球半径的前提下,可以得出 A、B、C 三点的三维坐标。根据空间解析几何定理,给定圆周上的三点可以唯一确定一个圆心。由此,可以求出圆截面的圆心三维坐标,进而求出通过截面圆圆心、球心的直线与摄影球表面的交点,即为未出现在球面圆内的耀点坐标,接下来根据式(6)即可计算出光源的方向。

### 2.2.4 算法步骤

对于借助摄影球测光源方向的方法,往往需要满足前提条件,即于拍摄角度处,光源映射到摄影球表面的光斑必须可见,而本文算法,利用 HDR 图像技术,对摄影球图像进行分析,扩大了光源的测算范围,而且提高了近光源方向的测算精度。从摄影球图像中测算光源方向的大致步骤如图 7 所示。

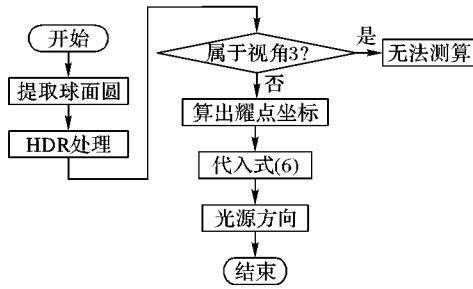


图 7 算法流程

## 3 实验结果与分析

### 3.1 光照信息的采集与虚拟物体的生成

本文主要针对视角 1 和视角 2 进行实验分析,主要针对单一点光源进行验证。如图 8 所示,使用高亮 LED 手电筒作为点光源,室内自然光作为环境光进行光源方向的测算实验。如图 9 所示,为本实验所用的相机标定板。

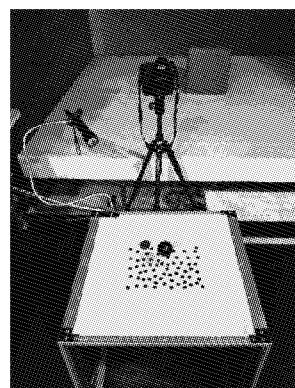


图 8 实验设施

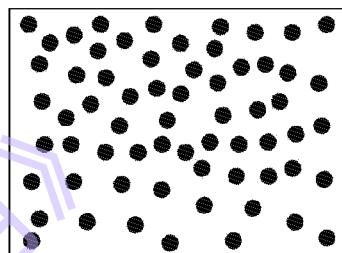


图 9 本文所用标定板

如图 10 为本文所使用的标定方法的 3 组实验。表 1 中仅列举了相机标定单应性矩阵的部分参数,  $R$  为外参中三维的旋转矩阵,  $f$  为内参中的焦距。分析表 1 中的实验数据,由实验 1~2 可知在标定板被遮挡的情况下,相机的外参基本一致,而内参有所差别;由实验 1~4 可知在标定板被遮挡的情况下,相机的外参对应一致,而内参误差随遮挡的面积增大;实验 5~6 为对照实验组,当视角发生改变时,该标定方法仍能够实现功能。

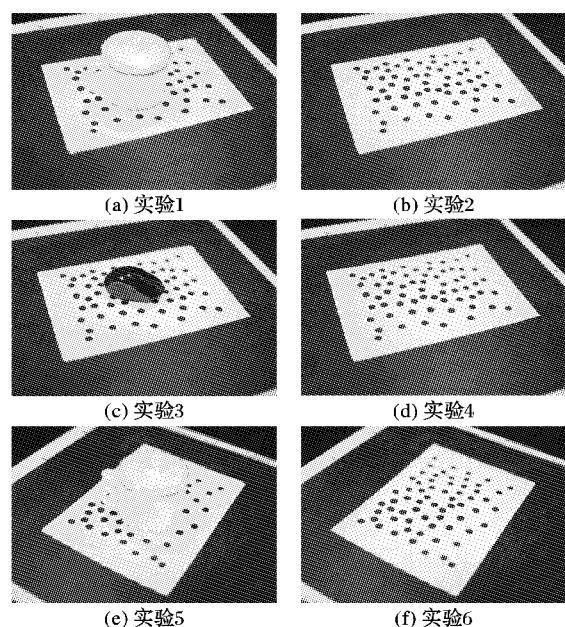


图 10 标定对比

1)视角 1 实验。调整图 9 中的高光 LED 手电筒的位置和角度,使其于摄影球上所呈光斑位置如 2.2.2 节中的视角 1 位置。本文算法中相机的姿态保持不变,其姿态计算过程如图 11 所示。

表1 标定结果(部分)

实验 编号	旋转矩阵 $R$									焦距 $f/\text{mm}$	焦距误差/%
	$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{21}$	$r_{22}$	$r_{23}$	$r_{31}$	$r_{32}$	$r_{33}$		
1	-0.930	-0.363	0.048	0.207	-0.628	-0.750	-0.302	0.688	-0.660	1255.066	9.190
2	-0.930	-0.360	0.053	0.198	-0.632	-0.750	-0.307	0.686	-0.658	1382.164	9.190
3	-0.930	-0.362	0.050	0.195	-0.630	-0.751	-0.305	0.686	-0.656	1266.066	4.236
4	-0.930	-0.363	0.053	0.191	-0.631	-0.751	-0.310	0.686	-0.656	1322.030	4.236
5	-0.515	-0.850	0.113	0.508	-0.409	-0.758	-0.691	0.332	-0.642	1167.116	4.187
6	-0.517	-0.853	0.097	0.523	-0.386	-0.754	-0.671	0.341	-0.650	1218.800	4.187

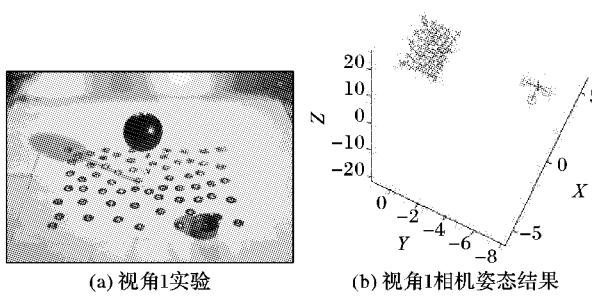


图11 视角1相机姿态

随后,对该场景拍摄5张曝光时间(Exposure Value, EV)不同的图像,并提取出摄影球部分(图12(a)~(e)),采用文献[29]中介绍的方法合成摄影球的高动态范围图像(图12(f))。

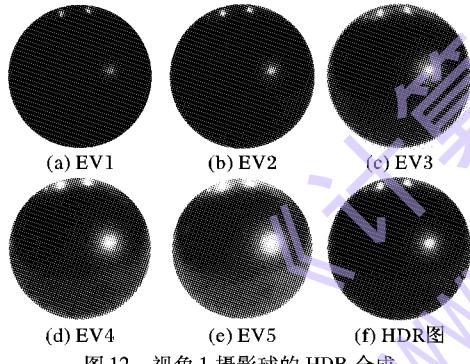


图12 视角1摄影球的HDR合成

由图12可见,图12(f)更加细腻,所含光照信息更加丰富。图13所示为图12(f)的辐射度分析结果。

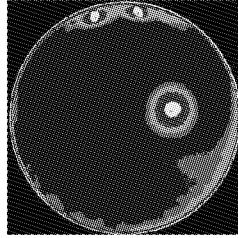


图13 视角1摄影球辐射度

对图13中光斑处进行椭圆拟合,找出椭圆圆心坐标作为“耀点”的近似坐标,代入式(6)中即可算出光源方向。根据实物在MAYA中构建虚拟模型,并利用所测算到的光照信息数据生成虚拟光源,在该虚拟光源的照射下进行渲染,渲染效果如图14所示。

图13中上端的两个高亮点为室内提供环境光照的两盏照明用灯所致。图15中的矿泉水瓶瓶盖为真实物体,作为参照物。对比图14(a)和图14(b)可知,由于本文只对光源方

向做研究未考虑到光源强度,产生的虚拟阴影较深。

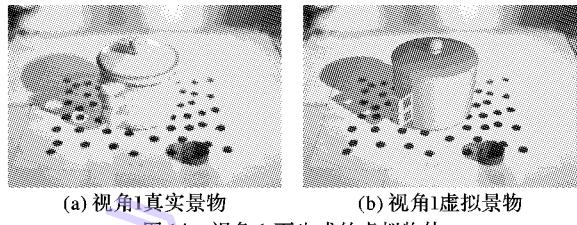


图14 视角1下生成的虚拟物体

2)视角2实验。调整图9中的高光LED手电筒的位置和角度,使其于摄影球上所呈光斑位置如2.2.2节中的视角2位置。其具体实验步骤与实验1类似,如图15合成摄影球的高动态范围图像后,对图15(f)进行辐射度分析,并按照2.2.3节所述算法取A、B两点并计算出弧中点C,算出点光源的方向,如图15所示。如图16所示,为视角2下生成的摄影球辐射度图像。

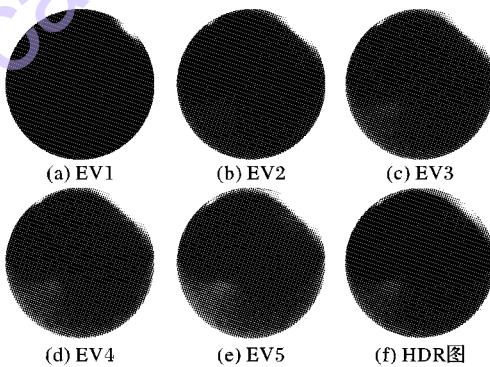


图15 视角2摄影球的HDR合成

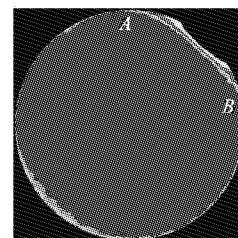


图16 视角2摄影球辐射度

如图17所示,为视角2下生成的虚拟物体。由于实验条件的限制,在该视角下,标识物表面的镜面反射成分无法忽略,标识物中某些点无法准确识别,导致相机标定结果的准确性下降。

### 3.2 实验分析

为了验证光照信息测算的准确性,本文根据实物在MAYA中构建模拟的虚拟模型,并利用所测算到的光照信息数据生成虚拟光源,在该虚拟光源的照射下进行渲染。

在实际操作中,摄影球表面会映射出室内物品或者下方标识物的投影,从而在摄影球的辐射度图中会产生干扰点,如图 14 中的右下方。由于使用了高动态范围成像技术,摄影球图像的更多细节会被保留下来,从而提高了测算的准确性。

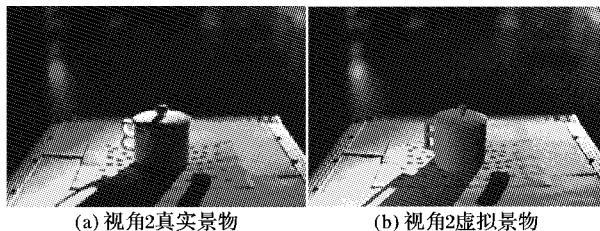


图 17 视角 2 下生成的虚拟物体

无法避免的是,创建的虚拟物体模型无法与实际物体的几何性质完全相同,所以在 MAYA 中生成的实验效果会出现误差,但从光照一致性角度看,本实验结果已经基本达到预期效果,实现了光源方向的一致性。

#### 4 结语

针对增强现实系统中复杂场景的光照一致性问题,本文提出了一种基于 HDR 图像中光晕分析的光照方向测算算法。该算法利用二次曲线对透视不变性原理对相机姿态进行测算,测算方法操作简单、具有较强的鲁棒性,能够克服传统意义上棋盘格标识物的遮挡问题;为了更加精确地获得光照信息,结合高动态范围成像技术,对摄影球图像进行处理,还原出更加准确的测算参数;尤为重要的是,本文在对摄影球的 HDR 图像进行辐射化后,通过分析光斑周围的像素点,可以测算出位于摄影球直接反射范围外的部分位置的点光源方向。由于本文所解决的重点在于测算光源的方向,仅用 SEKONIC L308S 测光表进行光源强度的大致测量。最后,本文通过在 MAYA 中进行模拟实验,利用测算所得光照数据对虚拟物体进行渲染,所得效果较好,达到预期效果。

进一步研究将主要针对复杂场景中多光源的测算和恢复,目的在于更加有效地解决多光源间的相互影响等问题,从而使得虚拟对象更具沉浸感,更加逼真。

#### 参考文献:

- [1] 叶东文,陈国栋.混合场景中光照一致性研究[J].计算机应用研究,2015,32(9):2874-2876.(YE D W, CHEN G D. Research of illumination consistency in hybrid scene[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(9): 2874 - 2876.)
- [2] 李自力,朱光喜,朱耀庭.一种基于会聚双目立体视觉的用户化身模型[J].电子与信息学报,2003,25(6):763-770.(LI Z L, ZHU G X, ZHU Y T. A customization model based on convergent binocular stereo vision [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2003, 25(6): 763 - 770.)
- [3] ZHENG Q, CHELLAPPA R. Estimation of illuminant direction, albedo, and shape from shading[C]// Proceedings of the 1991 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1991: 540 - 545.
- [4] DONG Y, CHEN G, PEERS P, et al. Appearance-from-motion: recovering spatially varying surface reflectance under unknown lighting[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2014, 33(6): 193.
- [5] MADSEN C, LAURSEN R. A scalable GPU-based approach to shading and shadowing for photo-realistic real-time augmented reality [J]. International Conference on Computer Graphics Theory and Applications, 2007, 1(4): 252 - 261.
- [6] NAN L, XIE K, SHARF A. A search-classify approach for cluttered indoor scene understanding [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2012, 31(6): 137.
- [7] 周雅,晏磊,赵虎.增强现实系统光照模型建立研究[J].中国图形图像学报,2004,9(8):968-971.(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.)
- [8] 丰艳.增强现实系统虚实无缝融合相关问题研究[D].上海:上海大学,2007:106-138.(FENG Y. Research on seamless fusion of real and virtual scenes in augmented reality system[D]. Shanghai: Shanghai University, 2007: 106 - 138.)
- [9] 王珂.增强现实中虚实光照一致性研究综述[J].光电技术应用,2013,28(6):6-12.(WANG K. Research on virtual-real illumination consistency in augment reality scene [J]. Electro-Optic Technology Application, 2013, 28(6): 6 - 12.)
- [10] 沈沉,沈向洋,马颂德.基于图像的光照模型研究综述[J].计算机学报,2000,23(12):1261-1269.(SHEN C, SHEN X Y, MA S D. A survey of image-based illumination model[J]. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(12): 1261 - 1269.)
- [11] 李粉莉,童小念.基于增强现实的图像光照一致性模型探讨[J].电脑知识与技术,2011,7(9):6195-6196.(LI F L, TONG X N. Image illumination coherence based on augment reality [J]. Computer Knowledge and Technology, 2011, 7(9): 6195 - 6196.)
- [12] 姚远,朱森良.增强现实场景光源的实时检测方法和真实感渲染框架[J].计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(8):1270-1275.(YAO Y, ZHU M L. A framework for lighting detection and scene rendering in AR environment[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(8): 1270 - 1275.)
- [13] KANBARA M, YOKOYA N. Real-time estimation of light source environment for photorealistic augmented reality[C]// Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 911 - 914.
- [14] 侯志强,黄安奇,余旺盛,等.基于局部部分块和模型更新的视觉跟踪算法[J].电子与信息学报,2015,37(6):1357-1364.(HOU Z Q, HUANG A Q, YU W S, et al. Visual object tracking method based on local patch model and model update[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(6): 1357 - 1364.)
- [15] 彭勃宇,王威,周诚,等.面向增强现实的 SUSAN-SURF 快速匹配算法[J].计算机应用研究,2015,32(8):2538-2542.(PENG B Y, WANG W, ZHOU C, et al. SUSAN-SURF fast matching algorithm for augment reality[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(8): 2538 - 2542.)
- [16] 张勇,王志峰,李丹阳.一种改进的 SIFT 特征点匹配方法[J].广东通信技术,2015,35(5):25-29.(ZHANG Y, WANG Z F, LI D Y. A modified SIFT feature points matching algorithm[J]. Guangdong Communication Technology, 2015, 35(5): 25 - 29.)
- [17] 黄伟国,胡大盟,杨剑宇,等.用于遮挡形状匹配的弦角特征描述[J].光学精密工程,2015,23(6):1758-1767.(HUANG W G, HU D M, YANG J Y, et al. Chord angle representation for shape matching under occlusion[J]. Optics and Precision Eng-

- neering, 2015, 23(6): 1758 – 1767. )
- [18] HU M K. Visual pattern recognition by moment invariants[J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, 8(2): 179 – 187.
- [19] ZAHN C T, ROSKIES R Z. Fourier descriptors for plane closed curves[J]. IEEE Transactions on Computers, 1972, 100(3): 269 – 281.
- [20] MA J, WU C K, LU X R. A fast shape descriptor[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1986, 34(3): 282 – 291.
- [21] 徐正伟, 吴成柯. 二维形状的透视不变性识别[J]. 自动化学报, 1995, 23(4): 431 – 439. (XU Z W, WU C K. Perspective invariance recognition of two-dimensional shape[J]. Acta Automatica Sinica, 1995, 23(4): 431 – 439.)
- [22] 韩笑, 廖粤峰. 基于平面二次曲线的非单视点全景相机标定方法[J]. 计算机与现代化, 2015, 18(7): 59 – 64. (HAN X, LIAO Y F. Calibration method for non-single viewpoint omnidirectional cameras based on planar curve[J]. Computer and Modernization, 2015, 18(7): 59 – 64.)
- [23] ZHANG Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]// Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway, NJ: IEEE, 1999, 1: 666 – 673.
- [24] 李莉. OpenCV 植入改进张正友算法的相机标定算法[J]. 轻工机械, 2015, 33(4): 60 – 63. (LI L. Camera calibration algorithm based on OpenCV and improved Zhang Zhengyou algorithm[J]. Light Industry Machinery, 2015, 33(4): 60 – 63.)
- [25] 刘艳, 李腾飞. 对张正友相机标定法的改进研究[J]. 光学技术, 2014, 19(6): 565 – 570. (LIU Y, LI T F. Research of the improved of Zhang's camera calibration method[J]. Optical Technique, 2014, 19(6): 565 – 570.)
- [26] 王领法, 肖昭然, 张斌. 基于 Matlab 的图像预处理技术在相机标定中的应用研究[J]. 河南科技, 2014(21): 66, 81. (WANG B F, XIAO Z R, ZHANG B. Application research based on image preprocessing technology in Matlab for camera calibration[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2014(21): 66, 81.)
- [27] VOGIATZIS G, HERNÁNDEZ C. WITHDRAWN: Video-based, real-time multi-view stereo[J]. Image & Vision Computing, 2012, 4(7) : 434 – 441.
- [28] 谭茗. 基于视觉的增强现实系统中的光照一致性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009: 19 – 73. (TAN M. The study of consistent illumination in visual-based augmented reality[D]. Changsha: Hunan University, 2009: 19 – 73.)
- [29] DEBEVEC P E, MALIK J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs[C]// Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 2008: 31.
- [30] ZHANG Y, YANG Y H. Multiple illuminant direction detection with application to image synthesis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(8): 915 – 920.
- [31] BOUGANIS C, BROOKES M. Multiple light source detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(4): 509 – 514.
- [32] FENG Y. Estimation of light source environment for illumination consistency of augmented reality[C]// Proceedings of the 2008 Congress on Image and Signal Processing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008, 3: 771 – 775.

### Background

This work is partially supported by the Major Science and Technology Project of Jilin Province (2012ZDGG004).

**LI Hua**, born in 1977, M. S., associate professor. Her research interests include computer simulation modeling, virtual reality technology.

**WANG Xuyang**, born in 1991, M. S. candidate. His research interests include virtual reality technology, illumination coherence.

**YANG Huamin**, born in 1963, Ph. D., professor. His research interests include virtual reality & digital media, image processing.

**HAN Cheng**, born in 1978, Ph. D., associate professor. His research interests include virtual reality, computer vision, intelligent control.

(上接第 1365 页)

- [6] FU C-M, ALSHINA E, ALSHIN A, et al. Sample adaptive offset in the HEVC standard [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(12): 1755 – 1763.
- [7] PIAO Y, LEE S, KIM C, et al. Sample adaptive offset for AVS2 [C]// Proceedings of the 46th AVS Conference. [S. l. ] : Samsung Electronics, 2013: 2 – 3.
- [8] MAANI E, NAKAGAMI O. Flexible band offset mode in SAO: JCTVC-H0406[R]. San Jose, CA: Joint Collaborative Team on Video Coding, 2012: 1 – 10.
- [9] AVS 工作组. GB/T 信息技术高效多媒体编码第 2 部分: 视频 (征求意见稿) [S]. 北京: 全国信息技术标准化技术委员会 (SAC/TC 28), 2015. (Work group of audio video coding standard. Information technology — advanced media coding, part 2: video [S]. Beijing: China National Information Technology Standardization Network (SAC/TC 28), 2015.)
- [10] 唐华敏, 杜建超, 王庆雷. 视频编码标准 HEVC 中的环路滤波技术分析[J]. 电视技术, 2014, 38(11): 1 – 4. (TANG H M, DU J C, WANG Q L. Analysis of in-loop filter technique in video coding standard HEVC [J]. Video Engineering, 2014, 38(11): 1 – 4.)

- [11] MINEZAWA A, SUGIMOTO K, SEKIGUCHI S. Improved edge offset coding for SAO: JCTVC-I0066[R]. Geneva, CH: Joint Collaborative Team on Video Coding, 2012.

- [12] FU C M, CHEN C Y, HUANG Y W. Sample adaptive offset for HEVC[C]// Proceedings of the 2011 IEEE 13th International Workshop on Multimedia Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 1 – 5.

### Background

**CHEN Zhixian**, born in 1992, M. S. candidate. Her research interests include video coding and decoding.

**WANG Guozhong**, born in 1962, Ph. D., professor. His research interests include video coding and decoding, multimedia communication.

**ZHAO Haiwu**, born in 1973, Ph. D., senior engineer. His research interests include video coding and decoding, multiplexing technology.

**LI Guoping**, born in 1974, Ph. D., senior engineer. His research interests include video coding and decoding, multiplexing technology.

**TENG Guowei**, born in 1975, Ph. D., senior engineer. His research interests include video coding and decoding, intelligent video analysis.