

# 基于标志点注册及探测球的光源追踪算法

马晋涛 周雅 刘伟 王红 刘宪鹏

(北京理工大学光电工程系,北京 100081)

**摘要** 增强现实系统中,解决虚拟物体表面光照情况与真实环境匹配问题关键的一步是进行光源追踪。基于标志点注册及具有漫反射特性的探测球提出一种光源追踪算法。该算法仅对一幅被单一光源照射的标志立方体和探测球图像进行分析,利用图中标志点确定探测球相对照相机的位置、姿态关系,利用探测球表面的亮度信息推算光源向量。该探测球图像要进行一系列图像处理程序,其中等亮度线的提取及拟合是关键步骤。实验结果表明,本文算法能够达到预期效果,较好地实现了光源追踪,适用于各种位置的单一光源照射情况及基于标志点注册的增强现实系统。

**关键词** 增强现实 光源追踪 图像处理

中图法分类号:TP39 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)04-0780-06

## Real-time Illuminant Direction Detection Algorithm

MA Jin-tao, ZHOU Ya, LIU Wei, WANG Hong, LIU Xian-peng

(Department of Photo-electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract** In order to integrate a virtual object in a real scene seamlessly in augmented reality (AR) system, we need to simulate the interactions of the virtual object with the illumination of the scene. Acquiring the knowledge of illuminant direction is crucial in this work. We present a novel approach for estimating the direction from a single image of a scene that is illuminated by a light source regardless it is point light source or directional one. We propose to employ a maker cube, which is used to register to determine the rigid transformation relating 2D images to known 3D geometry, and a lambertian probe sphere, which is used to estimate the light source direction by image processing. The key process is to find and extract the intensity occluding curve on the sphere. Experimental results show that our approach is computationally efficient and the light source direction can be accurately obtained by it.

**Keywords** augmented reality, illuminant direction detection, image processing

## 1 引言

在增强现实系统中,为了使叠加在真实场景中的虚拟物体看起来较为真实,且能较好地融入真实场景,就要求虚拟物体表面的光照情况和阴影符合真实场景的现实情况,使人眼认为真实世界中的光源对虚拟物体同样发生了作用。要使虚拟物体的光照效果与真实世界的情况尽量相似,主要需要解决两方面的问题:一方面是光源的追踪问题(需要求

出点光源的位置或是平行光的向量);另一方面是光源的颜色匹配问题。这两个问题中,光源的追踪问题是难点,也是重点。

考虑到光源的追踪问题在增强现实、基于图像的计算机图形学和计算机视觉中的重要作用,已有许多人投入了这方面的研究,各种光源追踪算法也相继被提出<sup>[1-12]</sup>。其中,Hartmann采用了已知几何形状的物体对不同光源位置具有不同形状阴影的原理,通过分析阴影形状追踪光源位置<sup>[1]</sup>;Hara用反复迭代、矫正的方法计算单一点光源的位置、强度及各种参量<sup>[2,3]</sup>;自从Yang和Yuille较早地利用了探

基金项目:国家重点基础研究发展计划973项目(2002CB312104);国家自然科学基金项目(60373058,60475008)

收稿日期:2006-08-24;改回日期:2006-11-24

第一作者简介:马晋涛(1983~),男。目前在北京理工大学攻读博士学位。研究方向主要为增强现实及计算机图形学等。E-mail:libra@bit.edu.cn

测球图像亮度曲线进行计算后<sup>[4]</sup>,探测球就成为一  
 种实用的光源追踪工具;Zhang 和 Yang 用探测球上  
 法线与光源向量垂直的点(称为临界点)估算光源  
 向量<sup>[5,6]</sup>,基于此,Wang 将图像分割成具有不同亮  
 度值的区域,并用递归最小二乘法计算漫反射模型  
 上对应的不同区域以得到光源向量<sup>[7]</sup>;Li 同时将图  
 像中底纹、阴影及镜面反射信息加以分析利用,得  
 出了较为鲁棒的算法<sup>[8]</sup>;Takai 提出差分球的概  
 念,对同一图像中两个探测球合成的差分球进行  
 分析处理,解决点光源和平行光源的追踪问题<sup>[9]</sup>;Debevec  
 和 Agusanto 不求光源位置,而是采用了一个具有  
 镜面反射特性的金属探测球捕捉虚拟物体所在位  
 置的全方位光强信息,得到高动态范围图像<sup>[10,11]</sup>,  
 利用这些信息直接对虚拟物体进行渲染,不仅如  
 此,Nakayama 和 Sato 还将该金属探测球与液晶  
 立方体结合使用,更为快捷、实时<sup>[12]</sup>。

本人提出的光源追踪算法基于标志点注册,能  
 快速将真实世界的物体较为精确地定位,且采用  
 了一个光源追踪探测球进行光源追踪。该算法简  
 单可靠,在基于标志点的增强现实系统中能节省  
 大量运算开销,不仅适用于点光源,而且适用于  
 平行光源,即忽略光源距被照物体的实际距离,  
 而采用等效虚拟光源照射虚拟物体,达到与实  
 际情况尽量相符的目的。

## 2 算法描述

采用一个表面具有均匀漫反射特性的白色球  
 体作为光源追踪探测球(如图 1 所示),用于采  
 集真实世界的光照情况;还采用了一个贴有标志  
 点的立方体用于注册(如图 2 所示),以便找出  
 照相机相对于球心的位置关系。算法核心在对  
 光源追踪探测球的分析上。

如图 3 所示,该球被光源照射后,表面会产  
 生闭合的圆形亮度曲线,该曲线构成的平面将球  
 切



图 1 光源追踪探测球  
Fig. 1 Probe sphere



图 2 标志立方体  
Fig. 2 Marker cube

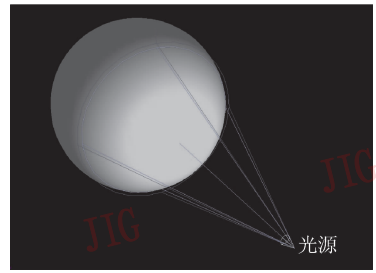


图 3 被照射的探测球  
Fig. 3 The illuminated sphere

割,所切得圆的圆心与球心的连线即光源向量所  
 在的直线。由于圆形亮度曲线投影到平面图上  
 是一个椭圆,因此用这个椭圆得到切圆中点对  
 应的世界坐标,以推算光源向量。图 4 所示为  
 算法的流程图。首先,对真实场景进行注册,算  
 出照相机相对光源追踪探测球的位置关系,即  
 图像坐标对应世界坐标的转化关系;然后,剔  
 除图片中的标志立方体,进行一系列图像处理  
 和分析,得出亮度曲线并将其拟合为椭圆;最  
 后,由该椭圆求出其在世界坐标系下对应圆的  
 圆心坐标,由此推算光源向量并将其单位化。  
 为了验证算法的准确性,把求得的光源向量用  
 于与真实场景相同的虚拟球体的光照渲染,得  
 出效果图与真实图像中的探测球进行比较。

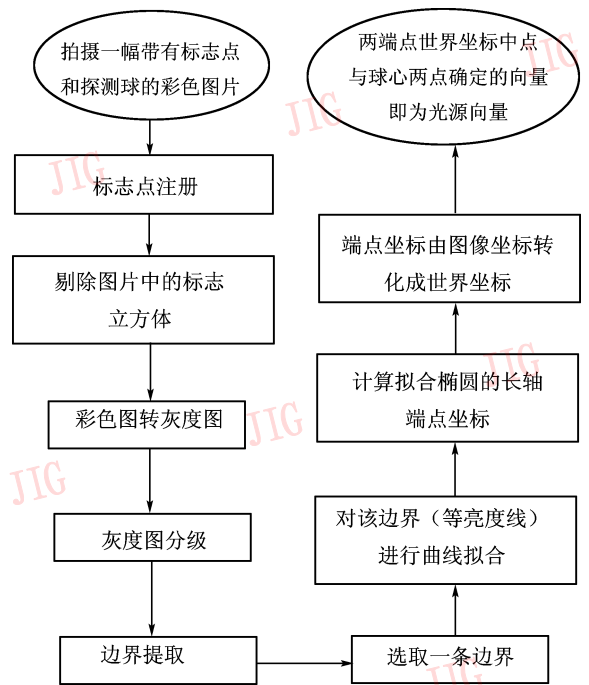


图 4 算法流程  
Fig. 4 Flow chart of the algorithm

## 2.1 注册算法

增强现实系统要排列、融合虚实场景和图像,就要进行姿态计算,也就是确定摄像机与真实场景间的相对关系,即注册。采用 Liu 提出的改进 OI 算法<sup>[13]</sup>,它属于基于数字图像分析处理的 3 维注册算法,该方法速度快,注册精度较高,稳定性好,能准确地将现实世界中的 3 维点对应到图像坐标系下的像素点,便于我们定位光源追踪探测球及其图像坐标。由于该标志点注册算法是以标志立方体的一个顶点为世界坐标系原点的,为了方便光源追踪计算,需要将原点定为光源追踪探测球的球心,而这两个点恰好是一个简单的平移关系如图 5 所示。

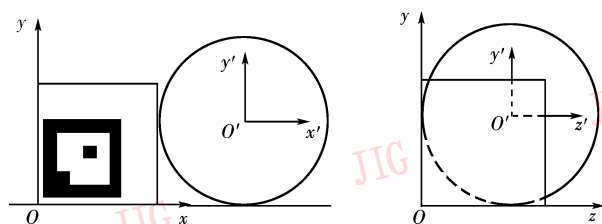


图 5 标志立方体与探测球位置关系

Fig. 5 The ubiety between marker cube and probe sphere

注册完毕,得到两个反映照相机与球心位置、姿态关系的矩阵:旋转矩阵  $R'$  和平移矩阵  $T'$ 。接下来则需要剔除图片中的标志立方体,只对探测球图像进行分析。

## 2.2 图像处理算法

光源追踪探测球能够较好地反映真实世界中的光照信息,利用这些信息寻找光源位置。该算法仅对单一光源进行追踪,不受光源与探测球距离的限制,只要探测球能够反射足够的光量,便可进行下面的光源位置估算。

(1) 彩色图转灰度图 在色度学里,可见光波段不同的辐射引起不同的颜色感觉。任何一种颜色都可以由  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三基色按一定比例混合而得。在表示颜色的方法中,除了  $RGB$  表示法,还有一种  $YUV$  表示方法,这种方法中  $Y$  表示亮度, $U$  和  $V$  表示色差。在光源追踪算法中,我们只需要  $Y$  即亮度信息,而色差  $U$ 、 $V$  则不那么重要。其中, $R$ 、 $G$ 、 $B$  与  $Y$ 、 $U$ 、 $V$  之间存在着下面的对应关系:

$$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.299 & -0.148 & 0.615 \\ 0.587 & -0.289 & -0.515 \\ 0.114 & 0.437 & -0.100 \end{pmatrix} \quad (1)$$

这个关系是彩色图像转化成灰度图的公式。由

这个公式,根据  $R$ 、 $G$ 、 $B$  值求出  $Y$  值,将一幅彩色图转化为灰度图后,可得到图像的亮度信息。

(2) 灰度图分级及边界提取 光源追踪探测球上的亮度显然是渐变的,要从该图像获得所需的几何数据,需要进行灰度图分级、边界提取、等亮度线拟合。

首先,需要将灰度图上的这些渐变灰度值分级,得到球面上离散变化的不同灰度级别。这一过程可以通过简单地设置灰度域值来实现,即将一定灰度域值范围内的点用同一灰度值代替,使得探测球上有明显的灰度级跃变。为了便于后面的分析计算,通过设定亮度级数来让程序自动地设置合适的域值范围,达到分级目的。

如果设定了 6 个亮度级别,则这些亮度级之间有 5 条边界,因此可以对这 5 条边界中的任一条进行分析。为了将其中一条边界提取出来,将处于不同边界上的点赋值为不同灰度值。这样,可以容易地将不同边界上的点提取出来,且便于从中选取任一边界进行分析。

由于每一条边界所能提供的几何信息都是相似的,即每一条边界在探测球上所截得的圆的中心点与球心的连线应该是同一直线。因此,可以任取其中的一条边界进行分析。

(3) 等亮度线拟合 取出一条灰度级边界后,下面的算法就要将其由一批离散的点拟合成一个椭圆曲线。几种椭圆拟合的算法,其中最速下降法拟合精度高,速度较快。

由于灰度级边界大致形状为椭圆,因此拟合方程可设定为椭圆的定义方程:

$$\frac{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}}=2a \quad (2)$$

其中,需要拟合的参数为  $x_0, y_0, x_1, y_1, a$ , 令

$$f_i(x_0, y_0, x_1, y_1, a) = \frac{\sqrt{(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2}}{\sqrt{(x_i-x_1)^2+(y_i-y_1)^2}} - 2a \quad (3)$$

则一条灰度级边界上的所有离散点满足非线性方程组:

$$\begin{cases} f_1(x_0, y_0, x_1, y_1, a) = 0 \\ f_2(x_0, y_0, x_1, y_1, a) = 0 \\ \vdots \\ f_m(x_0, y_0, x_1, y_1, a) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

构造拟合函数

$$\Phi(x_0, y_0, x_1, y_1, a) = \sum_{i=0}^n \left[ \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} + \sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2} - 2a \right]^2 \quad (5)$$

求参数  $x_0, y_0, x_1, y_1, a$  的过程,即是利用最速下降法求解最优化问题  $\min_{x \in \mathbb{R}^n} \Phi(x)$  的过程。

实践证明,在拟合过程中,最速下降法计算简单,收敛性好,虽然仅具有线性收敛速度,但由于初始点较好,因此收敛速度较快。

### 2.3 光源向量计算

由于拟合椭圆上的所有点均在光源追踪探测球球面上。光源向量的一个点为球心,另一个点可通过注册算法和球体方程得到。步骤如下:

- (1) 计算椭圆长轴(或短轴)两端点坐标;
- (2) 利用前面注册算法的投影方程,与探测球球体方程联立,求得该两端点的世界坐标;
- (3) 求两端点世界坐标中点,与球心世界坐标连线,即为光源向量。

其中,第1步,第3步易求,而第2步算法如下: 设一个端点坐标为  $(u, v)$ , 对应世界坐标为  $(x, y, z)$ , 则

$$\mathbf{Q} = \mathbf{K}(\mathbf{R}'\mathbf{P} + \mathbf{T}')/z_c \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{Q} = [u \ v \ 1]^T$ ,  $\mathbf{P} = [x \ y \ z]^T$ ,  $\mathbf{K}_{3 \times 3}$  为照相机内参,  $z_c$  为矩阵  $(\mathbf{R}'\mathbf{P} + \mathbf{T}')$  中第3个元素。球体方程为

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \quad (7)$$

由式(6)及式(7), 求出  $\mathbf{P}$ 。

经过以上3步,可求出光源单位向量。

## 3 实验及结果

采用的主要实验器材为1台经过标定的柯尼卡美能达 A200 型 CCD 数码照相机;一台具有奔腾4 (3.0GHz) 处理器、1GB 内部存储器、NVIDIA GeForce 6800 图形加速卡及 128MB 显示存储器的计算机,一个标志立方体(边长  $l = 157.5\text{mm}$ ), 一个表面具有均匀漫反射性质的白色球体(半径  $r = 123\text{mm}$ )。

软件环境为 Microsoft Visual Studio. NET 2003 及 OpenGL (glut 版本为 3.7.6)。

光源追踪探测球放置于墙角,标志立方体紧靠其放置。固定好照相机及光源,对探测球及标志立方体进行拍摄,得到图6。利用基于标志点的注册

算法对该图进行注册,已知照相机内参为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 535.631 & 0 & 317.017 \\ 0 & -536.938 & 238.57 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

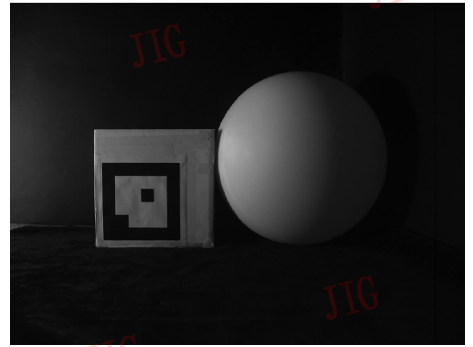


图6 真实场景

Fig. 6 Real scene

得到照相机与标志点位置、姿态关系,其  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$  矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.999\ 971 & 0.005\ 465\ 23 & 0.005\ 23997 \\ -0.005\ 796\ 27 & 0.997\ 843 & 0.065\ 392\ 7 \\ -0.004\ 871\ 28 & -0.065\ 421\ 2 & 0.997\ 846 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} = [-187.633 \quad -99.545\ 4 \quad 514.731]^T$$

由标志点与球心的平移关系,得到

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} 0.999\ 971 & 0.005\ 465\ 23 & 0.005\ 239\ 97 \\ -0.005\ 796\ 27 & 0.997\ 843 & 0.065\ 392\ 7 \\ -0.004\ 871\ 28 & -0.065\ 421\ 2 & 0.997\ 846 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}' = [92.867 \quad 23.454\ 6 \quad 480.231]^T$$

剔除图片中的标志立方体,仅对探测球进行分析。所得图像如图7(a),对该图进行一系列图像处理:彩色图转灰度图(如图7(b)),灰度图分级(如图7(c),本实验分10级),边界提取(如图7(d))。本实验选取第8级边界(如图7(e)),对该边界进行曲线拟合,得到椭圆如图7(f)(用白色像素点表示),其方程如下:

$$\frac{\sqrt{(x - 345.897)^2 + (y - 131.459)^2} + \sqrt{(x - 320.486)^2 + (y - 278.085)^2}}{2 \times 84.830\ 8}$$

由该方程,求出椭圆长轴两端点坐标  $\mathbf{Q}_1(347, 121)$ ,  $\mathbf{Q}_2(318, 288)$ , 利用注册方程式(6)及球体方程式(7)求出这两个点对应的世界坐标  $\mathbf{P}_1(-63.944\ 8, 88.891\ 1, 56.021\ 7)$ , 以及  $\mathbf{P}_2(-91.690\ 3, -74.296\ 4, 34.669)$ , 其中点为  $\mathbf{P}(-77.817\ 55, 7.297\ 35, 45.345\ 35)$ , 则光源向量  $\mathbf{S} = (-77.817\ 55,$

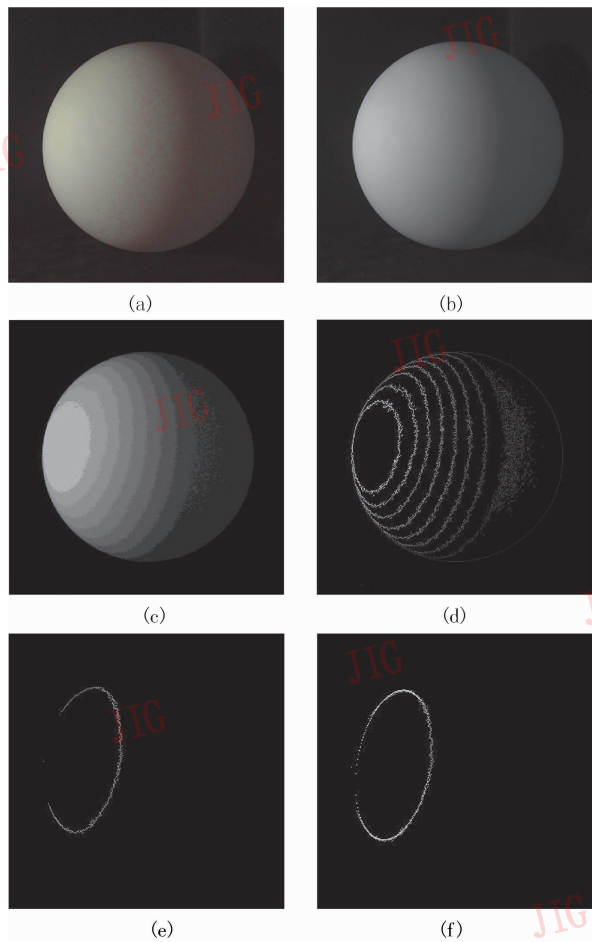
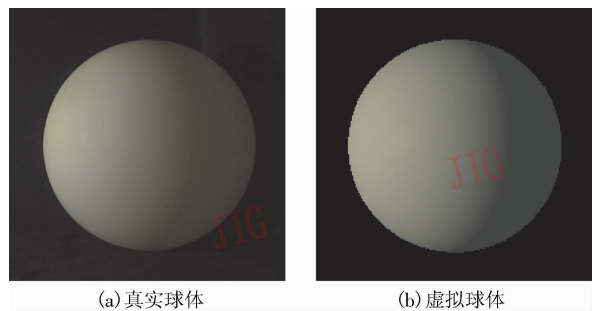


图 7 对探测球进行图像处理

Fig. 7 Image processing to probe sphere

7.297 35, 45.345 35), 单位化  $\hat{S} = (-0.861 19, 0.080 7581, 0.501 827)$ 。

将所得光源向量输入 OpenGL, 对与真实情况相同的虚拟场景中的虚拟球体进行光照渲染, 如图 8(b)。比较图 8(a) 和 (b), 两个球体的光照效果基本相同。图 9(a) 所示为两图的灰度误差情况, 图中越暗的部分表示误差越大 (为了便于观察, 已将



(a) 真实球体 (b) 虚拟球体

图 8 真实球体与虚拟球体

Fig. 8 Real sphere and virtual sphere

所有误差值扩大 30 倍); 图 9(b) 为误差分布直方图, 可见绝大部分误差集中分布在灰度值相差为 2 左右的范围内。该光源追踪算法达到了预期的效果, 可以满足增强现实系统的要求。

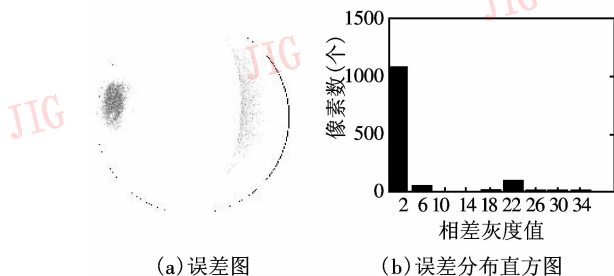


图 9 真实球体与虚拟球体亮度误差分析图

Fig. 9 The image of the errors

下面, 分别对两组不同颜色和位置的光源 A、B 进行追踪, 图 10 所示为真实图像与我们的追踪算法得到的虚拟光照效果对比图。

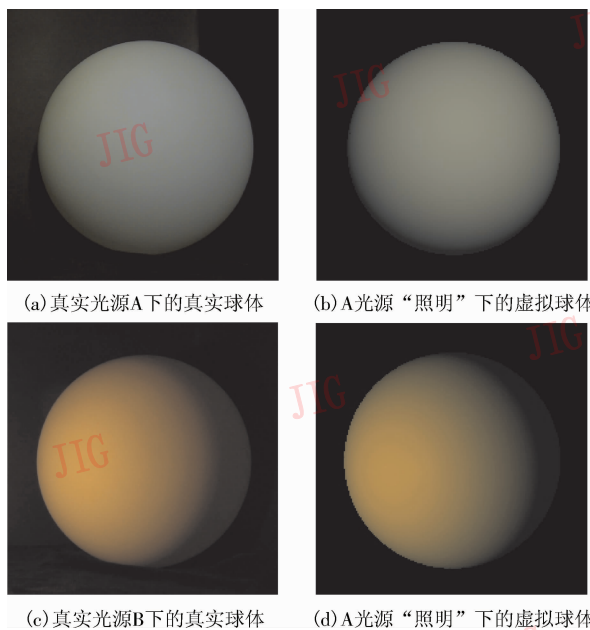


图 10 不同光源 A、B 下真实球体与虚拟球体

Fig. 10 Real sphere and virtual sphere in different illumination; A and B

### 4 结 论

对增强现实中单一光源照明情况下的光源进行了追踪。该追踪算法基于标志点注册, 采用了一个光源追踪探测球, 忽略光源远近的影响, 只需一幅图像即可计算出光源的方向向量, 利用等效光源对虚

拟物体进行渲染。实验结果表明,本文算法能够达到预期的效果,较好地实现了光源追踪,适用于各种位置的单一光源照射情况。由于算法基于标志点注册,精度可以满足增强现实系统的要求,因此便于将该追踪算法应用于基于标志点注册的增强现实系统中;又由于探测球不但能如实反映光照情况,且几何形状简单,所以对其的图像处理过程较为简单、准确性好,速度可以接受。但是,由于该算法在注册及对探测球的分析过程中多次用到了图像处理算法,因此计算精度不高,计算稳定性主要依赖于注册。此外,由于各图像处理算法多次进行了逐个像素的扫描,曲线拟合算法要进行多次迭代运算,这在一定程度上影响了算法的速度(如表1所示)。

表1 算法消耗时间表

Tab. 1 Time-consuming of the algorithm

	注册	图像处理	光源向量计算
消耗时间(ms)	157	781	23

由于本文算法只对光源进行追踪,其颜色等特性均为经验值而非自动算出,因此下面的研究将着力于解决光源颜色自动匹配问题。该问题可利用光照模型方程的约束进行迭代,不断优化来解决,Hara即采用了该方法进行计算,效果显著<sup>[2,3]</sup>。此外,在复杂光照环境下的多光源追踪也是进一步研究的目标。

### 参考文献 (References)

- Hartmann W, Zauner J, Haller M. "Shadow Catcher": a vision based illumination condition sensor using ARToolKit [J]. IEEE International Augmented Reality Toolkit Workshop, 2003, 1(10): 44 ~ 45.
- Hara K, Nishino K, Ikeuchi K. Determining reflectance and light position from a single image without distant illumination assumption [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision [C], Nice, France, 2003: 560 ~ 567.
- Hara K, Nishino K, Ikeuchi K. Light source position and reflectance estimation from a single view without the distant illumination assumption [J]. IEEE Transactions on PAMI, 2005, 27(4): 493 ~ 505.
- Yang Y, Yuille A. Sources from shading [A]. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Hawaii, USA, 1991: 534 ~ 539.
- Zhang Y, Yang Y H. Illuminant direction determination for multiple light sources [J]. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 2000, 1(6): 269 ~ 276.
- Zhang Y, Yang Y. Multiple illuminant direction detection with application to image synthesis [J]. IEEE Transactions on PAMI, 2001, 23(8): 915 ~ 920.
- Wang Y, Samaras D. Estimation of multiple directional light sources for synthesis of mixed reality images [J]. Pacific Graphics, 2002, 1(10): 38 ~ 47.
- Li Y, Lin S, Lu H. Multiple-cue illumination estimation in textured scenes [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision [C], Nice, France 2003: 1366 ~ 1373.
- Takai T, Niinuma K, Maki A. Difference Sphere: an approach to near light source estimation [A]. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Washington USA, 2004: 98 ~ 105.
- Debevec P. Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and Image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH '98 [C], Los Angeles, California, USA, 1998, 1(7): 189 ~ 198.
- Agusanto K, Li L, Zhu C. Photorealistic rendering for augmented reality using environment illumination [A]. In: Proceedings of IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality [C], Tokyo, Japan. 2003: 208 ~ 216.
- Nakayama K, Sato K. A LCD cube transporting high dynamic range light environments [A]. In: Proceedings of IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality [C], Tokyo, Japan. 2003: 323 ~ 324.
- Liu W, Zhou Y, Ni J. An improved orthogonal iterative algorithm for pose estimation in AR [J]. Journal of Computational Information Systems, 2006, 2(1): 173 ~ 178.