

近光源光度立体三维重建误差分析

张珊珊¹, 吕东辉¹, 孙九爱²

(1. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200444;

2. 英国西英格兰大学 布里斯托技术学院, 布里斯托 BS16 1QY)

摘要:一般假设的平行光光源,即远光源模型,受安装空间的约束在现实世界中很难实现。针对这一问题,提出了近光源模型解决近光源大尺寸物体的三维重建。近光源模型是一种新型的光源位置假设,需要标定光源位置,计算目标物体每个点上的光线方向,这样即使当物体尺寸较大或距离光源较近时,近光源模型也是对光源较优的一种假设。通过分析上述两种光源模型对噪声、光源到目标物体距离等因素的敏感度,比较发现当光源距离物体较近或物体尺寸较大的情况下,近光源模型的重建结果优于远光源的重建结果。

关键词:光度立体技术;光源光线向量;近光源;远光源

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)01-0168-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.01.038

3D Reconstruction Error Analysis on Photometric Stereo with Nearby Light Sources

ZHANG Shan-shan¹, LÜ Dong-hui¹, SUN Jiu-ai²

(1. College of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Bristol College of Technology, University of West of England, Bristol BS16 1QY, UK)

Abstract: Distant illumination model, assuming parallel light source, is generally difficult to implement in the real world, where the working space is constrained. To deal with this problem, a nearby light model is proposed to solve the three-dimensional reconstruction of the large-size objects near the light source. A nearby light source model is a new light position assuming, which works with calibrated light source position, calculated light vector across whole target object, even when the object is larger or closer to the light sources, the nearby light source model is also a better assumption. By analyzing the sensitivity of above two model for noise and distance between light source and target object, found that the reconstruction result of nearby source model is better than that from distant source model when the light source is closer to object or the object is larger.

Key words: photometric stereo technique; light source vectors; near light source; distant light source

0 引言

光度立体技术是三维重建技术中的一种重要方法,已广泛应用于计算机视觉和计算机图形学领域,用于估计局部区域的高密度法向量^[1-3]。光度立体技术一般假设照射到物体上的光线是平行且光强均匀的,这样每个光源对目标物体表面区域的作用相当,因此光度立体问题可以简化为解线性方程组问题。然而自然界中,除了太阳光,很少有光源满足上述要求。在光

学行业中,凸透镜和弧形凹面镜能够用来产生平行光束,若将光源放在它们的焦点处能够获得需要的平行光线。但由于物理条件约束,凸透镜和弧形凹面镜也只能产生等同于它们物理尺寸大小的平行光束。另一个方法为将光源放在远离物体的位置,此时可将其近似为点光源,照射在物体上的光线是近似平行和均匀的。但实际上,当光源远离物体时,光强也会呈现与照射距离的平方成反比的衰减。同时当物体尺寸过大

收稿日期:2014-02-27

修回日期:2014-05-29

网络出版时间:2014-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61103181)

作者简介:张珊珊(1987-),女,硕士研究生,研究方向为光度立体三维重建;吕东辉,博士,副教授,研究方向为光度立体三维重建、CT重建;孙九爱,博士,副教授,研究方向为光度立体三维重建。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20141117.2209.043.html>

时,由于实验空间条件限制,不可能将光源置于很远的位置,因此在实际中平行光的产生往往会遇到很多困难。

尽管经常被忽视,光源几乎是视觉系统设计应用中最重要的因素,特别是对于那些直接依赖于照明的几何参数和光照强度变化的重建方法,如光度立体技术等。实验表明,光源强度的误估计对法向向量的计算会产生一定的误差。例如,在典型的三光源光度立体成像系统中,1%的图像灰度估计误差会产生0.5到3.5度的法向量角度偏差^[4]。

为解决该问题,一些学者提出了近光源模型,该模型需要首先获得光源的位置信息,从而计算出物体上每个点的照射光源光线方向向量。Hara等利用松弛迭代法分离物体镜面反射和漫反射成分,通过拟合物体漫反射成分获得光源位置,然后用光条纹测距仪获取物体的三维几何模型^[5]。Weber等提供了一个朗伯体模型来估计光源位置,利用高斯—牛顿迭代法求解光源位置^[6]。谢利民等利用图像亮度和光源照度间的关系表达式,通过解多参数的非线性方程获得物体表面三维信息和光源位置信息^[7]。在有限空间内,不同的光源模型假设将直接影响最终三维重建结果。文中通过分析几种不同的误差,利用光度立体三维重建实验,为实际应用中选择合适的光源模型提供依据。

1 光度立体技术基本原理

文中假设所研究的物体具有朗伯体表面,根据朗伯定律,一个理想漫反射的物体表面反射出来的漫反射光的强度同入射光与物体表面法向量之间的夹角余弦成正比,即

$$I(x,y) = \rho \langle \vec{l}, \vec{N} \rangle \quad (1)$$

其中, $I(x,y)$ 表示目标物体表面 (x,y,z) 处的漫反射光投射到相机上的光亮度; \vec{l} 是光源方向向量; $\vec{N} = (n_x, n_y, n_z)^T$ 是物体表面 (x,y,z) 处的表面单位法向量; $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示向量的内积; ρ 是依赖于物体表面反射

率、光源强度以及光学系统参数的比例常数。

1.1 两种光源模型

为了满足光线平行且光强均匀的条件,经常需要使用远光源模型。即当光源到物体表面的距离与物体尺寸的比值大于5倍时,该光源可以近似为点光源模型,此时光源照射到物体表面的光线平行且光强均匀^[8]。用 m 表示光源到物体表面的距离与物体尺寸的比值,这里物体尺寸指的是物体长、宽、高三者中的最大值。显然,远光源模型中光亮度分布在物体表面会更均匀,然而,由于光源照射到物体表面降低了整个系统的信噪比。上述讲到,许多学者提出了近光源模型,近光源模型由于光源到物体距离较小,光源照射到物体表面的光强度衰减相对较小。但是光源到物体表面各点的距离不同,导致了物体表面光亮度分布不均匀。如图1所示,假设光源直射目标物体的中心位置, S 为光源点, d_1 为光源到物体表面 P_1 的最小距离, d_2 为光源到物体表面 P_2 的最大距离。设光源的光强为 E , 则 P_1 处的光强度与 P_2 处的光强度的相对误差可近似表示为

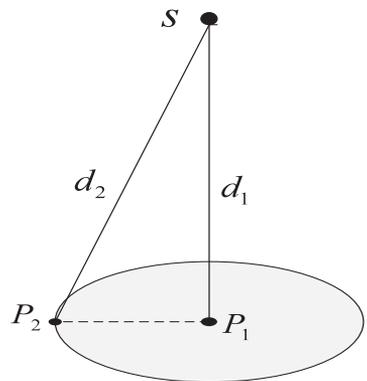


图1 光源到物体表面不同点的距离

$$e = \frac{d_2^2 - d_1^2}{d_2^2} \quad (2)$$

为了判断两种光源模型对物体表面光强度相对误差的影响,计算 m 值在 $[1.5, 8]$, 间隔0.5时的 e 值,如表1所示。

表1 m 取不同值时光强度的相对误差

m	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
e	10	5.88	3.85	2.70	2.00	1.54	1.22	0.99	0.82	0.69	0.59	0.56	0.44	0.39

由表1可知,物体表面上 e 的最大相对误差达到10%。考虑到光源距离物体太近时物体表面不同点光照强度相对误差较大且遮挡阴影问题较严重,以下实验中选择 $m \geq 2$ 的光源模型。

因此,为了提高光度立体三维重建的精度,依据光源到物体表面的距离与物体尺寸的比值 m 将光源模型分为近光源模型和远光源模型。以下详细介绍两种

光源模型。

1.2 远光源模型

一般远光源模型中,如图2所示,假设光源照射到物体上的是平行光线,即物体表面所有点的入射光线方向相同。

不失研究的一般性,假设光度立体成像系统中含有 n 个光源 ($n \geq 3$), n 个光源方向表示为:

$$L = (\vec{l}_1, \vec{l}_2, \dots, \vec{l}_n)^T = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ \dots & \dots & \dots \\ l_{n1} & l_{n2} & l_{n3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

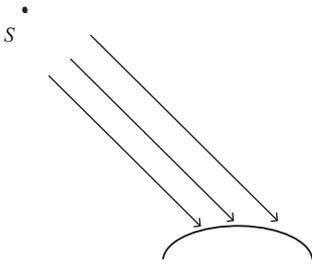


图 2 远光源模型

假设获得的 n 幅图像的亮度值为 $\vec{I} = (I_1, I_2, \dots, I_n)$, 由式(1)可得

$$\begin{cases} I_1 = \rho(l_{11}n_x + l_{12}n_y + l_{13}n_z) \\ I_2 = \rho(l_{21}n_x + l_{22}n_y + l_{23}n_z) \\ \dots \\ I_n = \rho(l_{n1}n_x + l_{n2}n_y + l_{n3}n_z) \end{cases} \quad (4)$$

如果 ρ 已知, 则可求出单位法向量 \vec{N} 。式(4)还可以表示为

$$\vec{I} = \rho L \vec{N} \quad (5)$$

令 $\hat{N} = \rho \vec{N}$, 则有 $\hat{N} = L^{-1} \vec{I}$ 。其中 L^{-1} 为广义逆, 当 $n = 3$ 时, L^{-1} 为方阵。将物体表面法向量归一化, 则有 $\vec{N} = \hat{N} / \|\hat{N}\|$, 另外, 因 \vec{N} 是一个单位向量, 所以可以通过 \hat{N} 求出 ρ , $\rho = \|\hat{N}\|$ 。

综上所述, 从给定的 n 幅光度立体图像可以求解出物体的表面法向量。

1.3 近光源模型

对于近光源模型, 物体上不同点的入射光方向不同。如图 3 所示, 设点 P_1, P_2 是物体表面上任意两点, 光源 S 是某一近光源, 易知, 两点的入射光线方向不同, 且存在较大的角度差异。平行光线的假设不再适用于该情况。为了解决该问题, 需要计算 S 的位置和物体表面任一点 P 的位置, 那么, 物体表面 P 的入射光线表示为 \vec{SP} 。仿真实验中假设光源的位置和物体表面点的位置已知。

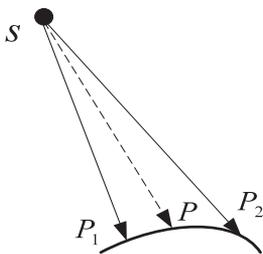


图 3 近光源模型

特别的, 实验中计算光源位置的方法^[9]为: 将高光小球放在视场中至少两个位置, 求出其对应的光源方向, 这些光源方向的交点即为光源在相机坐标系中的位置。相机坐标系下实验模型如图 4 所示, 两个位置的入射光 L_1, L_2 的交点表示光源的坐标位置 S , V_1, V_2 为入射光在高光小球高光点 H_1, H_2 处的反射光, N_1, N_2 是点 H_1, H_2 处的单位法向量, O_1, O_2 为高光小球的球心坐标, π 为相机的相平面。

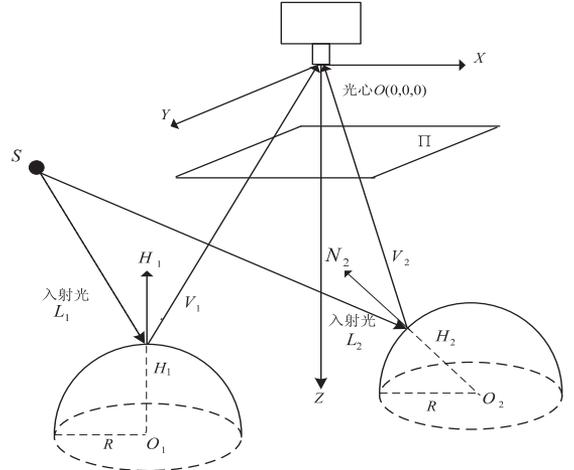


图 4 相机坐标系下实验模型

得到光源在相机坐标系下的坐标后, 用简便快捷的三维扫描工具, 如 Kinect^[10-12] 获得目标物体的三维信息, 然后求出物体在相机坐标系下的坐标 P 。则物体表面任一点的入射光线表示为 \vec{SP} 。

2 仿真实验结果与分析

仿真实验中采用一个半径为 100 mm 的朗伯半球体, 用三个光源做三维重建。光源方向由光源偏角 τ 和光源倾角 σ 决定。取 $\tau = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$, $\sigma = 54.7^\circ$ 。球体综合反照率取 200, 给三个光源获得的亮度图像分别添加均值为 0、均方差为 s 的高斯噪声。由于近光源情形下, 光照阴影存在, 为算法比较的一致性, 取成像区域中心的 100×100 区域。

光度立体三维重建基于准确的曲面法向量的获取^[13], 计算每一点法向量与对应的真实法向量的夹角, 将重建区域中所有点的夹角平均值作为衡量重建精度的指标, 简称平均角度误差。设光源距离朗伯球从 400 mm 变化到 1 000 mm, m 从 2 到 5 时计算两种光源模型的平均角度误差, 如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 光源距离朗伯球越近, 远光源模型的误差越大; 而近光源模型的误差受距离影响较小。可见, 当光源距离目标物体较近时, 近光源模型优于远光源模型。但需要指出的是, 近光源模型需要物体深度信息的先验条件。

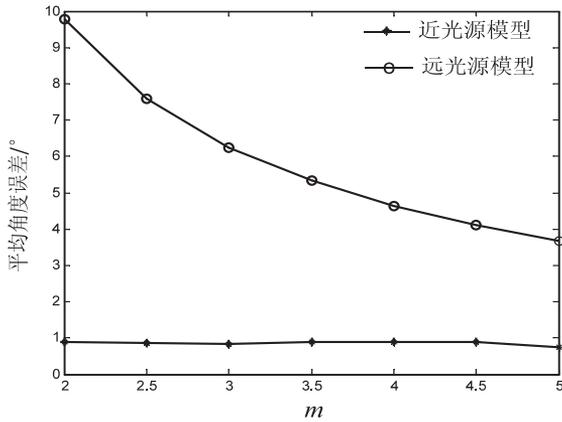


图 5 光源距物体不同距离时两种模型平均角度误差比较

采用文献[14]的算法用于三维表面重建。取过重建半球球心的一条球面的轮廓线,在远光源和近光源情形下的高度重建结果如图 6 所示。

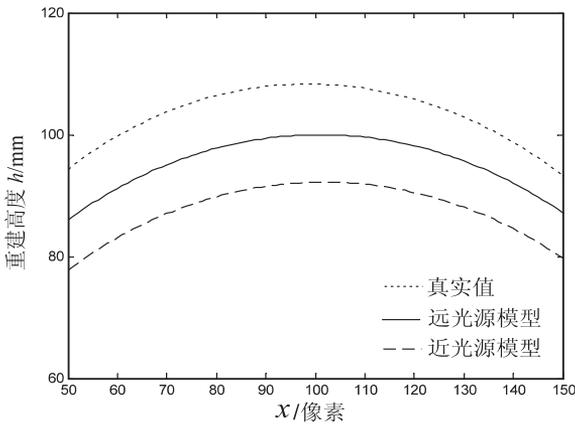


图 6 两种光源过球心剖面的重建高度比较

由图 6 可知,近光源模型重建结果更接近真实值,优于远光源模型重建结果。

两种光源模型的差异在于光源距物体的距离,图 7 为 m 值取 2 到 5 时的平均相对误差,由中心区域的 10 000 个点平均所得。

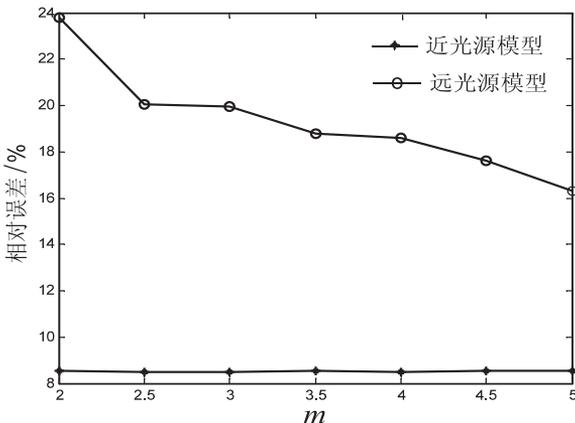


图 7 光源距物体不同距离时重建相对误差的比较

从图 7 可以看出,光源距离朗伯球越近,远光源模型重建结果误差越大,当光源到朗伯球的距离为朗伯

球直径两倍时,相对误差达到 24%。近光源模型重建结果受距离影响较小,光源到朗伯球距离从 400 mm 到 1 000 mm 时,重建误差基本保持在 9% 附近。

特别的,为了比较光源到物体距离对两种光源模型的影响,选取 $m = 3$ 和 $m = 8$ 时上述两种光源模型在不同 s 高斯噪声下的平均角度误差。由图 8 可知,分别取 $m = 3$ 和 $m = 8$ 时近光源模型得到的平均角度误差变化很小,两条线几乎重合在一起,可见光源到物体的距离对近光源模型影响较小。而远光源模型在 $m = 3$ 和 $m = 8$ 时得到的平均角度误差差值达到 4° 左右。因此,由图 8 可知,近光源模型得到平均角度误差小于远光源模型的同时,还对光源到物体距离的影响不敏感。

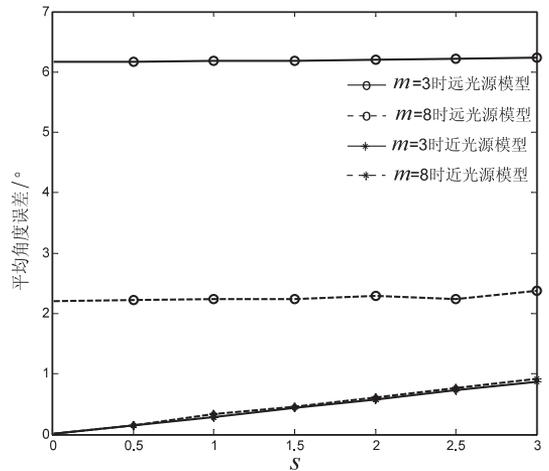


图 8 s 不同时两种光源模型在 $m = 3$ 和 $m = 8$ 时的平均角度误差比较

3 结束语

传统光度立体三维重建中的光源模型不适用于近光源与大物体的研究,一些学者因此提出了近光源模型。文中通过仿真数据研究了远光源模型和近光源模型对近光源大物体光度立体三维重建结果的影响。通过仿真结果可知,近光源模型不仅在平均角度误差、重建高度相对误差小于远光源模型,还对光源到物体距离的影响不敏感。在远光源模型时,对于某个特定光源,整个被重建物体的不同位置具有相同的光源方向,而在近光源模型时,对于某个特定光源,整个被重建物体的不同位置则具有不同的光源方向,这些精细化的物体上的光照方向使得获取的法向量的平均角度误差缩小了 5° ,高度的平均误差缩小了 10%。这说明在光度立体重建中,光源方向因素对于重建结果的影响程度。

在实际重建过程中,表面法向量的获取还与物体表面的光照强度分布的均匀性等有关,这些因素对光度立体重建的精度影响将是下一步研究的方向。

另外,建立光度立体成像系统,使用 LED 光源,结合大尺寸物体进行实验验证与重建结果分析将是下一步的工作之一。

参考文献:

- [1] 陈宇峰,谭文静,王海涛,等. 光度立体三维重建算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(11):2408-2414.
- [2] 张军,戴霞. 基于样例学习的任意光照下的人脸 3D 重建方法[J]. 计算机工程与应用,2008,44(3):81-84.
- [3] 黄勇,汪炳权,任彬. 利用光度立体法生成真实物体的三维模型[J]. 中国图像图形学报,1998,3(10):814-817.
- [4] Sun Jiuai, Smith M, Smith L, et al. Examining the uncertainty of the recovered surface normal in three light photometric stereo[J]. *Image and Vision Computing*, 2007, 25(7): 1073-1079.
- [5] Hara K, Nishino K, Lkeuchi K. Light source position and reflectance estimation from a single view without the distant illumination assumption[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(4): 493-505.
- [6] Weber M, Cipolla R. A practical method for estimation of point light source[C]//Proc of British machine vision conference. New York:IEEE,2001:471-480.
- [7] 谢利民,黄心汉,宋展. 基于不同光照条件的三维重建算

法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2013,41(Sup):403-406.

- [8] Sun Jiuai, Smith M, Smith L, et al. Illumination compensation for nominally planar surface recovery[J]. *IET Computer Vision*, 2012, 6(5): 371-377.
- [9] Ahmad J, Sun Jiuai, Smith L, et al. An improved photometric stereo through distance estimation and light vector optimization from diffused maxima region[J/OL]. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2013.09.005>.
- [10] Zhang Qing, Ye Mao, Yang R, et al. Edge preserving photometric stereo via depth fusion[C]//Proc of IEEE conference on computer vision and pattern recognition. [s. l.]:IEEE,2012:2472-2479.
- [11] Introduce Kinect for Xbox 360[EB/OL]. (2010)[2010-08-10]. <http://www.xbox.com/en-US/Kinect>.
- [12] 陈晓明,蒋乐天,应忍冬. 基于 Kinect 深度信息的实时三维重建和滤波算法研究[J]. 计算机应用研究,2013,30(4):1216-1218.
- [13] 徐庆相. 基于光度立体视觉的表面精细特征三维重建技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [14] 杨敬安. 利用光度立体法确定的表面法线误差灵敏度分析与校正[J]. 应用科学学报,1994,12(3):259-266.

(上接第 167 页)

岛的尺寸逐渐增大并相互连接成更大尺寸的岛;生长方式由分散生长转变为团簇生长,进而连接覆盖整个基底。实验结果与文献[13]相符,因此原子位交错排列方式及 Born-Mayer 函数形式的原子间相互作用势计算公式能比较准确地应用在 Ag 薄膜模拟计算过程中,并能得到理想结果。

参考文献:

- [1] 杨春,李言荣. 薄膜生长模型与计算机模拟[J]. 功能材料,2003,34(3):247-249.
- [2] Witten T A, Sander L M. Diffusion limited aggregation, a kinetic critical phenomenon[J]. *Phy Rev Lett*, 1981, 47(19): 1400-1404.
- [3] 刘祖黎,魏合林,王汉文,等. 薄膜生长的随机模型[J]. 物理学报,1999,48(7):1302-1308.
- [4] Wei H L, Liu Z L, Yao K L. Monte Carlo simulation of thin film growth on a surface with a triangular lattice[J]. *Vacuum*, 1999, 52: 435-440.
- [5] Bruschi P, Cagnoni P, Nannini A. Temperature-dependent Monte Carlo simulations of thin metal film growth and percola-

tion[J]. *Phys Rev B*, 1997, 55(12): 7955-7963.

- [6] Michely T, Hohage M, Bottand M, et al. Inversion of growth speed anisotropy in two dimension[J]. *Phys Rev Lett*, 1993, 70: 3943-3946.
- [7] 刘楠,赵长春,孙瑶,等. Cu 薄膜生长初期的计算机模拟[J]. 吉林大学学报:理学版,2013,51(2):301-304.
- [8] Brune H, Roder H, Boragno C, et al. Microscopic view of nucleation on surfaces[J]. *Phys Rev Lett*, 1994, 73: 1955-1958.
- [9] 陈魁英,李庆春. 液态贵金属 Au, Ag 的局域结构与键取向序[J]. 物理学报,1992,41(11):1813-1819.
- [10] 尚海娇. Fcc(110)面上薄膜三维生长的计算机模拟研究[D]. 沈阳:东北大学,2010.
- [11] 荣海波. 薄膜生长初期的蒙特卡罗模拟研究[D]. 大连:大连理工大学,2010.
- [12] 孙贺明,白照印,宋海洋,等. Cu 表面生长 Ag 薄膜过程的分子动力学模拟[J]. 北京理工大学学报,2005,25(9):831-834.
- [13] 魏合林,刘祖黎,姚凯伦. 超薄膜生长的 Monte-Carlo 研究[J]. 物理学报,2000,49(4):791-796.
- [14] 郑小平,张佩峰,贺德衍,等. 薄膜外延生长及其岛核形成的计算机模拟[J]. 中国科学 G 辑,2004,34(2):131-140.

近光源光度立体三维重建误差分析

作者: [张珊珊](#), [吕东辉](#), [孙九爱](#), [ZHANG Shan-shan](#), [Lv Dong-hui](#), [SUN Jiu-ai](#)
作者单位: [张珊珊, 吕东辉, ZHANG Shan-shan, Lv Dong-hui \(上海大学 通信与信息工程学院, 上海, 200444\)](#), [孙九爱, SUN Jiu-ai \(英国西英格兰大学 布里斯托技术学院, 布里斯托 BS16 1QY\)](#)
刊名: [计算机技术与发展](#) 
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2015(1)

引用本文格式: [张珊珊](#). [吕东辉](#). [孙九爱](#). [ZHANG Shan-shan](#). [Lv Dong-hui](#). [SUN Jiu-ai](#) [近光源光度立体三维重建误差分析](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(1)