

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201204016

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20120907.1706.002.html>

增强现实光照方向估计方法评述与展望

郑毅^{1,2,3}, 郑苹⁴

(1. 南京航空航天大学 民航/飞行学院, 江苏 南京 210016; 2. 山东工商学院 信息与电子工程学院, 山东 烟台 264005; 3. 山东工商学院 智能信息处理山东省高校重点实验室, 山东 烟台 264005; 4. 华中科技大学 图像识别与人工智能研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要:光照一致性是增强现实中实现虚实融合的重要方面,实时地估计出户外场景中的光照方向,对实现户外场景光照一致性和增强真实感具有重要意义.针对光照方向估计问题,首先归纳了户外场景光照方向估计的特点,把现有的光照方向估计方法分为借助光测球等特殊标定物的估算方法、立体视觉法和人工智能法3类方法.然后总结了各类方法的基本原理和有代表性的研究工作,并且比较了各类方法的优缺点和适用范围.最后,根据实际应用中存在的问题和挑战,展望了户外增强现实系统光照方向估计的研究方向.

关键词:增强现实;光照一致性;光照方向估计;立体视觉;人工智能

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2012)05-0389-09

Comments and perspectives on illumination direction estimation methods in augmented reality

ZHENG Yi^{1,2,3}, ZHENG Ping⁴

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. School of Information and Electronic Engineering, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005, China; 3. Key Laboratory of Intelligent Information Processing in Universities of Shandong, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005, China; 4. Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Illumination consistency plays an important role in merging virtual objects into real scenes for augmented reality. Real-time illumination direction estimation for outdoor scenes is important for both illumination consistency and high realism of augmented reality. Aiming at problems of illumination direction estimation, characteristics of illumination direction estimation for outdoor scenes are generalized, and the taxonomy of illumination direction estimation methods is presented. Existing illumination direction estimation methods consist of light probe sphere based method, stereo vision based method and artificial intelligence based method. Relevant fundamental principles and typical algorithms are concluded, and their advantages and disadvantages are compared in detail. Finally, according to existing problems and challenges in actual applications, future research trends of illumination direction estimation for outdoor augmented reality systems are foreseen.

Keywords: augmented reality; illumination consistency; illumination direction estimation; stereo vision; artificial intelligence

增强现实是虚拟现实研究领域的重要分支,是一种能把计算机产生的虚拟物体或系统提示信息叠加到真实场景中,实现对真实场景有效扩充和增强的新

技术,并能支持用户与其进行交互^[1-2]. 国家科技部“863”计划信息技术领域办公室指出,虚实融合是虚拟现实技术的重要发展方向,在复杂产品设计、重大工程论证等诸多领域具有重要的应用价值^[3]. 光照一致性是增强现实中实现虚实融合的一个重要方面^[4-5]. 为了实现虚拟物体与真实场景的光照一致性,首先需要由场景图像估算出光照参数,然后利用计算

收稿日期:2012-04-20. 网络出版日期:2012-09-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60970105,61173173);山东省住房和城乡建设厅科技计划项目(2011YK060);山东省高等学校科研计划项目(J11LG12).

通信作者:郑毅. E-mail: zhengyi@nuaa.edu.cn.

机图形学的光照算法计算真实场景光照对虚拟物体的影响,如明暗、反射、阴影效果等.因此,在增强现实光照一致性研究中,估计真实场景的光照参数是对虚拟物体进行真实感绘制的前提.光照参数包括光源类型、数量、光照方向和光照强度等.

迄今为止,国内外研究者的研究工作主要集中在室内环境下,对户外环境中的光照一致性研究相对较少.户外增强现实系统常用于城市建设^[6]、地理信息系统与导航^[7-8]、航空维修^[9]、遗址重现^[10]、遥操作机器人^[11]和信息化武器装备^[12-13]等领域,为了实现场景光照一致性和增强真实感,需要实时地估计出户外场景中的光照方向.

1 户外光照模型与光照方向估计

1.1 户外光照模型

户外存在太阳光、天空光、环境光等自然光源和多种类型的人工光源,而且户外物体复杂的几何外形、丰富的纹理特征和表面反射特性也会影响光线的传播路径,因此户外环境中的光照情况非常复杂.多种自然光源和人工光源作用于户外环境,共同决定户外环境中物体的光照情况.图1是户外环境中光照模型示意图.

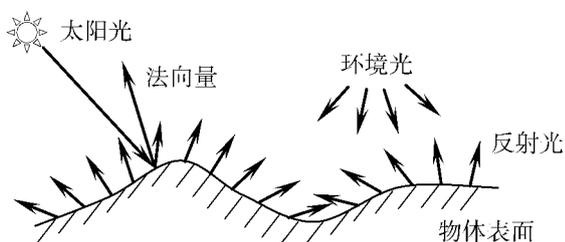


图1 户外光照模型

Fig.1 Outdoor illumination model

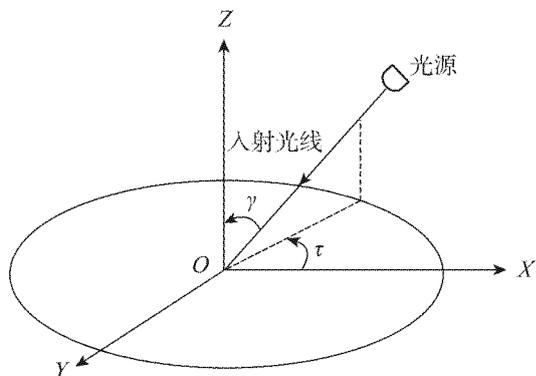


图2 光源的偏角 τ 和倾角 γ

Fig.2 Tilt angle τ and slant angle γ of an illuminant

光源的光照方向包括偏角和倾角,定义如图2所示.光源的偏角 τ 是光源的入射光线与 XOZ 平面

的夹角,光源的倾角 γ 是光源的入射光线与 Z 轴正方向的夹角.其中, XOZ 平面是成像平面, Y 轴正方向指向用户.

1.2 户外光照方向估计的特点

光照方向估计是计算机视觉的研究重点,除了增强现实外,还涉及到人脸识别^[14-17]、图像篡改鉴别^[18-22]等领域,是一个具有共性的研究课题.但在户外增强现实领域中,光照方向估计具有自己的特点,即户外光源的复杂性、户外场景的随机性、光照方向的三维性和算法的实时性.

1) 户外光源的复杂性是指户外存在太阳光、天空光、环境光等自然光源和多种类型的人工光源,并且户外场景中物体的几何复杂性、丰富的材质表面反射特性会影响光线的传播路径,因此户外光照情况比实验室中可以控制光源强度和方向的人工光源情况更复杂.

2) 户外场景的随机性是指随着用户视点的移动,用户观察到的场景图像会发生变化,场景中目标的几何信息和表面反射特性是未知的,这与室内目标的几何信息和表面反射特性是已知的、可作为系统工作的先验知识是截然不同的.

3) 光照方向的三维性是指在增强现实系统呈现给用户的三维场景中,光照方向包括光源的偏角和倾角,如图2所示.在人脸识别和图像篡改鉴别领域中,光照方向通常只有二维性,仅指光源的倾角,不包括光源的偏角.

4) 算法的实时性是指能够实时检测出真实场景的光照变化,保证虚拟物体的光照随着真实场景光照变化实时改变,否则虚拟物体光照变化的延迟会使用户立刻察觉到虚拟物体外观与周围环境不协调,影响虚拟物体与真实场景的无缝融合.

2 光照方向估计方法

在室内环境中,可以事先获得场景中物体的几何、材质和纹理等信息,并且能够方便地控制光源类型、数量、光照方向和光照强度等参数,便于测试和仿真.因此,国内外研究者们对光照方向估计的研究主要针对室内情况,并且大多数研究是在假设场景中只存在类型已知的单一光源的前提下展开的,对户外光照方向估计的研究相对较少.

在一些户外增强现实系统中,用户利用全球定

位系统确定自己的位置,结合系统工作时间,计算太阳光的光照方向.这种方法虽然简单、直接,但是只能估算出用户所在位置的太阳光的光照方向;如果场景中还存在其他类型的照明光源,那么这种方法就不再适用.本文后续章节没有对这种方法进一步归纳总结.

2.1 光照方向估计方法分类

根据是否需要借助光测球等特殊标定物,可以把光照方向估计方法分为两大类,即借助光测球等特殊标定物的估算方法与不需要特殊标定物的估算方法.其中,不需要特殊标定物的估算方法又可以细分为立体视觉法和人工智能法.图3是光照方向估计方法分类图.

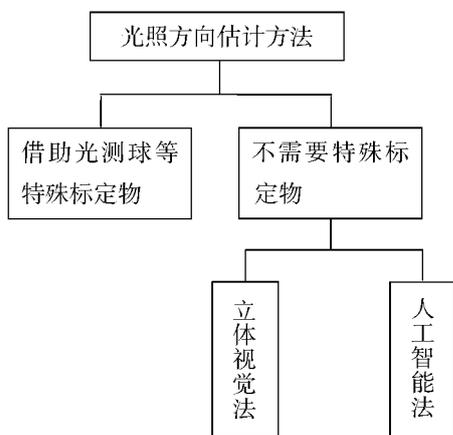


图3 光照方向估计方法分类

Fig. 3 Taxonomy of illumination direction estimation methods

2.1.1 借助光测球等特殊标定物的估算方法

早期大多数研究者们借助几何尺寸和表面反射特性已知的光测球来估算场景中的光照参数. Zhang等利用最小二乘法和迭代方法确定光测球上关键点的三维几何信息,然后估算出场景中多个光源的光照方向和光照强度等参数^[23]. 这种方法需要已知光测球的半径. C. S. Bouganis等把光测球图像分割成若干子区域,每个子区域对应一个虚拟光源,利用相邻子区域虚拟光源的差别来估计光照参数^[24]. 这种方法鲁棒性好,精度高,但是必须使用具有朗伯表面反射特性的光测球作为标定物. Feng使用2个具有朗伯表面反射特性的光测球作为标定物,通过图像分析和空间解析几何,能够估算出场景中的光照参数^[25]. 但是Feng的方法属于后处理,不能实时得到满足光照一致性的虚实融合图像.

Zhou等提出了一种能够同时确定多个光源的

光照方向和光照强度的估算方法^[26]. 这种方法使用表面同时具有漫反射特性和镜面反射特性的光测球,不需要光测球半径和位置作为先验知识,而是通过光测球的立体图像对求出光测球半径和中心位置,然后分离光测球图像中的漫反射分量和镜面反射分量,前者用于估计场景中光源的光照强度,后者用于估计光源的光照方向. 之后,他们又换用具有明亮表面的光测球,通过光测球立体图像对的镜面反射面片匹配误差最小化方法,能够估算出场景中多个面光源的尺寸和位置信息^[27]. 在文献[26-27]的研究基础上,Zhou等构建了一个估计场景光照参数的通用框架,能够同时估算场景中多个不同类型光源的光照参数^[28]. Ma等采集具有镜面反射特性的已知尺寸的光测球的图像,通过最大-最小距离法估计光源数量和高光区域的形心位置,并利用 c 均值聚类法优化形心位置,然后通过高光区域形心位置和用户视点位置计算出场景中多个光源的光照方向^[29].

在这类方法中,光测球的几何尺寸和表面反射特性可以作为估算场景光照参数的先验知识. 但是,光测球携带不便,而且场景图像中会出现光测球;当用户视点移动时,场景会发生变化,需要采集光测球图像来重新估算场景的光照参数,因此这类方法在使用中存在较大的局限性.

2.1.2 立体视觉法

使用几何尺寸和表面反射特性已知的光测球作为标定物,可以为估算场景光照参数提供一些已知条件;但是,在实际应用中光测球携带不方便,而且有时不希望场景图像中出现光测球. 利用场景中的明暗、阴影或局部几何信息,通过立体视觉方法,也可以为估算场景中的光照参数提供条件.

Zheng等假设场景中的物体具有朗伯表面反射特性,使用沿图像轮廓的明暗信息,可以估算出光源的偏角和倾角,并能够重建物体的三维形状^[30]. K. Hara等提出了2种根据单一视图估计光源位置的方法,这2种方法不需要假设光源位于无限远处,因此适用于室内光源的光照方向估计^[31]. 第1种方法要求场景中物体表面具有均匀漫反射特性,使用迭代松弛法分离镜面反射分量和漫反射分量,通过拟合漫反射分量估算光源位置. 第2种方法以镜面反射分量图像作为输入,通过线性化 Torrance-Sparrow

镜面反射模型和最优化采样相关系数,能够同时估算出镜面反射参数和光源位置,但是由于缺少漫反射分量信息,因此鲁棒性较差.这2种方法都要求已知场景三维几何信息,并且场景中只存在单一点光源.Xie等分2步来估计自然照明条件下单一点光源的光照方向和光照强度,首先把采集到的场景图像投影到一个基于球面谐波基函数的正交线性子空间,然后在这个低维子空间中计算光照参数^[32].但是,这种方法需要已知场景的三维几何信息,并且只适用于光照方向与摄像机轴的夹角小于 55° 的情况.M. Bingham等利用场景中阴影和特征点之间的对应关系来检测场景中的光照信息,进而确定光源的三维空间坐标^[33].但是该方法假设场景中只存在1个光源,并且要求物体的阴影投射到平坦表面上.在实际应用中,户外可能存在多个不同类型的光源,并且物体阴影可能会投射在上下交叠的其他物体上,因此这种方法仅适用于实验室理论研究,不适用于户外情况.

立体视觉法也可以用于场景中存在多个光源的情况.I. Sato等利用入射光产生的阴影信息,能够估算出复杂场景的光照分布^[34].但是,这种方法要求产生遮挡阴影的2个物体的形状已知,并且接受阴影投射的物体的表面反射率也是已知量.Wang等不需要在场景中放置光测球,只需已知场景的局部几何信息,再结合场景中的明暗和阴影信息,就可以从单一场景图像中估算出多个方向光源的光照方向^[35].之后,Wang等对算法进行了改进,将明暗和阴影信息同时处理,减少了运算时间^[36].Li等综合利用场景中的明暗、阴影和高光区域等信息,提出了一种新的方向光源参数估计算法^[37].与文献[35]的方法相比,该方法不需要假设物体表面具有朗伯表面反射特性,因此可用于纹理场景的光照恢复.姚远等提出了一种使用普通定位标记的场景光源实时检测方法^[38].该方法能够确定光源位置,估算光源的光照强度和颜色,并且能够在运行过程中创建一个或多个虚拟光源来模拟与真实场景一致的光照效果.但该方法依赖场景中的定位标记,因此只适合在室内建模虚拟光源,不适用于户外场合.

对于户外增强现实系统来说,场景会随着用户视点移动而发生变化,户外场景中的明暗、阴影或局部几何信息有时难以准确获取,因此这类方法较少

用于户外场合.

2.1.3 人工智能法

准确估计出场景中的光照方向,需要已知场景图像、场景深度信息和场景中物体的表面反射率.缺少其中任意一个信息,光照方向恢复就会成为不定问题.对于工作于户外环境的增强现实系统来说,视点会随着用户走动而发生改变,场景也会随之变化,因此场景是动态变化的.对于动态场景而言,场景中物体的几何尺寸、表面反射率在绝大多数情况下是未知的.在这种情况下,估算场景光照方向属于不定问题.在没有先验知识作为约束条件使不定问题适定化的情况下,神经网络和支持向量机等人工智能方法是较好的解决工具.

田英利等提出了一种使用神经网络估计光照参数的方法,该方法适用于场景中存在多个光源的情况^[39].但是,该方法需要事先使用标定物图像对神经网络进行训练.当视点发生移动时,原先训练得到的网络权值不再适用,需要重新采集标定物图像进行训练,运算量较大,难以满足户外光照估计的实时性要求.S. Y. Cho等在研究从明暗恢复形状问题时,提出了一种估计场景光照参数的混合反射模型,适用于场景中物体表面反射率未知、图像中含有较多噪声并且存在较强镜面反射的情况^[40].该模型使用前馈神经网络归一化漫反射项,使用径向基函数神经网络归一化镜面反射项,但这2种神经网络在使用前都需要训练,难以满足户外动态场景光照参数估计的实时性要求.S. Karungaru等提出了一种遗传算法和神经网络相结合的场景光照参数估计方法^[41-42],该方法使用遗传算法筛选神经网络的输入数据,可以加速神经网络的训练和运行速度.但是该方法也仅适用于视点固定的情况,当视点变化时,需要重新训练神经网络,才能得到适用于新场景的网络权值.C. K. Chow等提出了一种表层输入实值输出回归网络,结合场景深度信息,能够以较高精度估计出场景中的光照方向^[43].但是,该方法所用的场景深度信息是由三维扫描仪获得的,这增加了系统的成本和复杂度;并且这种表层输入实值输出回归网络实质上是径向基函数神经网络,使用前需要进行训练.当视点变化时,场景也会发生变化,同样需要重新训练神经网络,以得到适用于新场景的网络权值.因此,这种神经网络也不能满足户外动态场景

光照方向估计的实时性要求.

除了神经网络外,人工智能范畴内的其他方法也被用于估计场景中的光照方向. P. Nillius 等提出了一种根据单一图像估计光照方向的方法^[44]. 该方法使用颜色和边缘信息,提取多个具有朗伯表面反射特性物体的封闭轮廓,利用轮廓的亮度值,估计出对应于每一个封闭轮廓的光照方向,然后使用贝叶斯网络推理确定概率最大的光照方向为场景光源的光照方向. 这种方法要求提取的物体轮廓是封闭的,因此适用范围受到限制. M. Chantler 等提出了一种能够同时进行表面纹理特征分类和光照方向估计的分类器^[45]. 这种分类器是利用与光照方向相关的纹理特征构建的,能够估计出光源的偏角和倾角,分类准确率可以达到 98%. 但是它在使用前必须训练,在场景动态变化时不能实时估计光照方向. 文献[46]研究表明,在一定假设条件下朗伯凸表面图像可表示为该凸表面 9 个球面谐波基图像的线性组合,这 9 个线性组合系数反映了图像光照情况. 卿来云等利用文献[46]的方法估计图像的光照系数,并将该系数用于光照方向估计与光照补偿,其中光照方向估计也是利用分类器完成的,分类器在使用前也必须训练^[14]. 孙雪梅等提出采用支持向量机解决

人脸识别中复杂的、非线性光照方向的分类问题,分类准确率达到 89.16%^[15]. 但是,支持向量机在使用前也需要训练,也不能满足户外动态场景光照方向估计的实时性要求.

2.2 研究现状评价

将上述 3 类光照方向估计方法的特点、局限性和适用范围进行比较,如表 1 所示. 由表 1 可以看出,最初研究者们大多借助几何尺寸和表面反射率已知的光测球来估算场景的光照参数,此时光照方向估计问题已知信息充足,属于适定问题. 为了提高光照方向估计算法的实用性,摆脱对类似光测球等标定物的依赖,Zheng 和 I. Sato 等众多研究者们对不需场景物体的几何、材质、纹理等先验知识的光照方向估计方法展开研究,取得了一系列研究成果;但此时光照方向估计问题缺少足够的求解信息,属于不适定问题,可能会估算出错误的光照参数. 为了能够在缺少相关信息情况下提高不适定问题的求解准确度,研究者们提出使用人工智能方法来估算场景光照参数,使用的数学工具有反向传播神经网络、径向基函数神经网络和支持向量机等;但是它们在使用前都需要训练,不能满足户外动态场景光照方向估计的实时性要求.

表 1 光照方向估计方法比较

Table 1 Comparison of illumination direction estimation methods

方 法	特 点	局 限 性	适 用 范 围
借助光测球等特殊标定物的估算方法	利用光测球图像获取光照参数	需要携带光测球;场景图像中出现光测球;视点移动时,需要重新采集光测球图像来估算光照参数	室内和户外环境
立体视觉法	利用明暗、阴影或局部几何信息获取光照参数	要求场景中的明暗、阴影或局部几何信息已知,或易于获取	室内环境
人工智能法	使用神经网络或支持向量机等方法获取光照参数	视点移动时,需要重新训练,才能得到适用于新场景的网络权值,实时性差	室内和户外静态场景

3 总结与展望

增强现实中的光照方向估计问题的提出,已有近 20 年的时间,这期间有大量的研究者针对不同的应用环境提出了各自的解决方法,但是光照方向估计问题并没有得到全面解决,它仍然是一项颇具挑战性的研究课题.

根据当前的研究现状和应用需求,光照方向估计存在的主要问题和挑战有:

1) 实时性问题. 立体视觉法和人工智能法都存在运算量大的问题,导致算法实时性较差. 对于立体视觉法而言,由于需要从场景图像中获取明暗、阴影或局部几何信息,因此算法耗时较长. 对于人工智能法而言,当场景随着用户视点移动而发生变化时,所

用的神经网络和支持向量机等都需要重新训练,难以满足系统实时性和实用性的要求。

2) 不适用于户外动态场景. 由于户外光源的复杂性和户外场景的随机性,一些室内情况下可以使用的光照参数估计方法不能直接推广到户外使用. 目前绝大多数光照方向估计方法仅适用于室内静态场景或者户外缓慢变化的场景,不适用于户外动态场景,适用范围受到限制。

针对上述问题,在未来一段时间内,光照方向估计问题的研究可以从以下几个方面展开。

1) 采用 CPU + GPU 模式. 图形处理器(graphics processing unit, GPU) 的运算性能近 10 年来大大提高,其应用已经从矩阵计算、实时渲染和并行图像处理等传统领域过渡到通用计算领域^[47-49]. 利用 GPU 的并行计算能力,将光照方向估计方法中可以并行运算的模块移植到 GPU 上,分担 CPU 的负荷,可以提高系统运行效率^[50]. 通用 GPU 具有多核流水线处理架构和全局、本地内存层次体系,如何进行光照方向估计算法的任务分解、并行编程、映射到通用 GPU 的渲染单元、子任务调度以及减少内存层次之间的数据传输等,都需要深入研究。

2) 适用于户外动态场景的实时光照方向估计方法. 对于工作于户外环境的增强现实系统来说,视点会随着用户走动而发生改变,场景也会随之变化,因此场景是动态变化的. 对于动态场景而言,场景中物体的几何尺寸、表面反射率在绝大多数情况下是未知的,一些室内情况下可以使用的光照参数估计方法不能直接推广到户外使用. 在这种解算模型复杂、缺少必要信息的情况下,使用神经网络等人工智能方法是较好的解决思路. 例如,不同于传统的人工神经网络,脉冲耦合神经网络是第 3 代神经网络的一个重要分支,是以模仿猫、猴等小型哺乳动物的大脑视觉皮层神经元同步脉冲发放现象作为工作机制,具有类似人类的视觉神经功能^[51]. 而且,脉冲耦合神经网络是单层模型神经网络,不需要训练过程即可实现模式识别、图像分割和目标分类等,因此非常适合实时图像处理环境^[52-54]. 对于户外增强现实系统而言,如果网络参数设置合理,就可以通过脉冲耦合神经网络实时地估算出户外动态场景中的光照方向。

3) 任意物体表面光学反射特性建模. 物体表面

法向量图是确定场景光照方向不可或缺的条件,在图像中的最亮点处,表面法向量方向与光源的光照方向相同. 物体表面法向量图是由物体表面光学反射特性决定的. 场景中物体的表面可能同时具有漫反射和镜面反射的特性,不能简单地假设物体表面只具有单一的光学反射特性. 准确重建出场景中物体表面的光学反射特性,再结合视点位置和物体的三维几何信息,就可以估算出场景中的光照方向. 因此对场景中任意物体表面光学反射特性的建模,是一项具有挑战性和重要意义的研究工作。

在增强现实系统中实现良好的虚实融合效果,需要根据场景图像估算出光照参数. 户外光照方向估计方法的研究,是当今增强现实技术领域研究热点和难点,现有的各种方法离实际应用还有一段距离. 因此,在未来一段时间内,还需要在这一领域进行更加深入细致的研究。

参考文献:

- [1] 朱森良,姚远,蒋云良. 增强现实综述[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(7): 767-774.
ZHU Miaoliang, YAO Yuan, JIANG Yunliang. A survey on augmented reality [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(7): 767-774.
- [2] 赵沁平. 虚拟现实综述[J]. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2009, 39(1): 2-46.
ZHAO Qiping. Overview of virtual reality [J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2009, 39(1): 2-46.
- [3] 科技部 863 计划信息技术领域办公室. 国家高技术研究发展计划(863 计划) 信息技术领域“虚实融合的协同工作环境技术与系统” 重点项目申请指南 [EB/OL]. (2008-11-19) [2012-04-20]. <http://www.most.gov.cn/tztg/200811/P020081217461996567919.pdf>.
- [4] 全红艳,王长波,林俊隽. 基于视觉的增强现实技术研究综述[J]. 机器人, 2008, 30(4): 379-384.
QUAN Hongyan, WANG Changbo, LIN Junjuan. Survey of vision-based augmented reality technologies [J]. Robot, 2008, 30(4): 379-384.
- [5] 刘艳丽. 室外场景的光照分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009: 1-2.
LIU Yanli. Illumination estimation of outdoor scenes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009: 1-2.
- [6] 常勇,何宗宜. 户外增强现实技术及其在地下管网 3 维可视化中的应用[J]. 测绘通报, 2005, 51(11): 54-57.

- CHANG Yong, HE Zongyi. Technology of augmented reality and its application in 3D visualization of underground pipeline [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2005, 51(11): 54-57.
- [7] 杜清运, 刘涛. 户外增强现实地理信息系统原型设计与实现[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2007, 32(11): 1046-1049.
- DU Qingyun, LIU Tao. Design and implementation of a prototype outdoor augmented reality GIS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(11): 1046-1049.
- [8] 石刚, 田洪波, 马小虎. 基于增强现实的户外导航系统的设计与实现[J]. *苏州大学学报: 自然科学版*, 2010, 26(3): 44-47.
- SHI Gang, TIAN Hongbo, MA Xiaohu. Design and implementation of outdoor navigation system based on augmented reality [J]. *Journal of Suzhou University: Natural Science Edition*, 2010, 26(3): 44-47.
- [9] 赵新灿, 左洪福. 增强现实技术在航空领域中的应用及展望[J]. *航空维修与工程*, 2008(6): 23-25.
- ZHAO Xincan, ZUO Hongfu. Aviation applications and prospect of augmented reality [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2008(6): 23-25.
- [10] 陈靖, 王涌天, 林精敦, 等. 基于增强现实技术的圆明园景观数字重现[J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(2): 424-428.
- CHEN Jing, WANG Yongtian, LIN Jingdun, et al. Digital reconstruction of Yuan Ming Yuan based on augmented reality technology [J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(2): 424-428.
- [11] 贾庆轩, 高欣, 孙汉旭, 等. 面向机器人遥操作的预测图形仿真技术[J]. *航空制造技术*, 2011(7): 60-63.
- JIA Qingxuan, GAO Xin, SUN Hanxu, et al. Predictive graphical simulation technology for robot teleoperation [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011(7): 60-63.
- [12] HICKS J D, FLANAGAN R A, PETROV P V, et al. Eye-kan; augmented reality for battlefield soldiers [C]// *Proceedings of the 27th Annual NASA Goddard/IEEE Software Engineering Workshop*. Greenbelt, USA, 2002: 156-163.
- [13] 黄天智, 刘越, 王涌天, 等. 增强现实技术的军事应用与前景展望[J]. *兵工学报*, 2006, 27(6): 1043-1046.
- HUANG Tianzhi, LIU Yue, WANG Yongtian, et al. Military applications and prospect of augmented reality [J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(6): 1043-1046.
- [14] 卿来云, 山世光, 陈熙霖, 等. 基于球面谐波基图像的任意光照下的人脸识别[J]. *计算机学报*, 2006, 29(5): 760-768.
- QING Laiyun, SHAN Shiguang, CHEN Xilin, et al. Face recognition under varying lighting based on the harmonic images [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(5): 760-768.
- [15] 孙雪梅, 苏菲, 蔡安妮. 基于分叉树和SVM的人脸图像光照方向估计[J]. *中国图象图形学报*, 2007, 12(10): 1885-1888.
- SUN Xuemei, SU Fei, CAI Anni. Illumination direction estimation in face recognition based on bifurcate tree and SVM [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(10): 1885-1888.
- [16] 陈晓钢, 陆玲, 刘向阳. 经典光照模型实现人脸图像光照方向准确估计[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(11): 203-205.
- CHEN Xiaogang, LU Ling, LIU Xiangyang. Accurate estimation of face image illuminating direction based on classical lighting model [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(11): 203-205.
- [17] 张雯, 梁艳梅, 常胜江. 基于方向扫描的图像光照补偿算法[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(3): 435-439.
- ZHANG Wen, LIANG Yanmei, CHANG Shengjiang. Line scanning for illumination compensation of image [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(3): 435-439.
- [18] 吴琼, 李国辉, 涂丹, 等. 面向真实性鉴别的数字图像盲取证技术综述[J]. *自动化学报*, 2008, 34(12): 1458-1466.
- WU Qiong, LI Guohui, TU Dan, et al. A survey of blind digital image forensics technology for authenticity detection [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(12): 1458-1466.
- [19] FARID H. Image forgery detection [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, 26(2): 16-25.
- [20] 吕颖达, 申铨京, 苗健, 等. 基于光源方向不一致性的局部光源图像盲鉴别方法[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2010, 40(6): 1673-1677.
- LÜ Yingda, SHEN Xuanjing, MIAO Jian, et al. Blind identification for light source images based on inconsistency in light source direction [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2010, 40(6): 1673-1677.
- [21] 李叶舟, 胡静, 牛少彰, 等. 基于光照方向不一致的图像盲取证技术[J]. *北京邮电大学学报*, 2011, 34(3): 26-30.
- LI Yezhou, HU Jing, NIU Shaozhang, et al. Exposing digital image forgeries by detecting inconsistency in light source direction [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2011, 34(3): 26-30.

- [22] 张闯, 吕东辉. 单幅图像估计光照方向算法研究及其应用[J]. 电视技术, 2011, 35(15): 41-45.
ZHANG Chuang, LÜ Donghui. Research and application of single image light direction estimation algorithm [J]. Video Engineering, 2011, 35(15): 41-45.
- [23] ZHANG Yufei, 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.
- [24] BOUGANIS C S, BROOKES M. Multiple light source detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(4): 509-514.
- [25] FENG Yan. Estimation of light source environment for illumination consistency of augmented reality [C]//Proceedings of the 1st International Congress on Image and Signal Processing. Sanya, China, 2008, 3: 771-775.
- [26] ZHOU Wei, KAMBHAMETTU C. Estimation of illuminant direction and intensity of multiple light sources [C]//Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision. Copenhagen, Denmark, 2002: 206-220.
- [27] ZHOU Wei, KAMBHAMETTU C. Estimation of the size and location of multiple area light sources [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Cambridge, UK, 2004, 3: 214-217.
- [28] ZHOU Wei, KAMBHAMETTU C. A unified framework for scene illuminant estimation [J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(3): 415-429.
- [29] MA Jintao, ZHOU Ya, HAO Qun, et al. Efficient estimation of multiple illuminant directions using c-means clustering and self-correction for augmented reality [C]//Proceedings of the 2009 8th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science. Shanghai, China, 2009: 1106-1110.
- [30] ZHENG Qinfen, CHELLAPPA R. Estimation of illuminant direction, albedo, and shape from shading [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(7): 680-702.
- [31] 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 Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(4): 493-505.
- [32] XIE Feng, TAO Linmi, XU Guangyou. Estimating illumination parameters using spherical harmonics coefficients in frequency space [J]. Tsinghua Science and Technology, 2007, 12(1): 44-50.
- [33] BINGHAM M, TAYLOR D, GLEDHILL D, et al. Illuminant condition matching in augmented reality: a multi-vision, interest point based approach [C]//Proceedings of the 2009 6th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization: New Advances and Trends. Tianjin, China, 2009: 57-61.
- [34] SATO I, SATO Y, IKEUCHI K. Illumination distribution from shadows [C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Fort Collins, USA, 1999, 1: 306-312.
- [35] WANG Yang, SAMARAS D. Estimation of multiple directional light sources for synthesis of augmented reality images [J]. Graphical Models, 2003, 65(4): 185-205.
- [36] WANG Yang, SAMARAS D. Estimation of multiple directional illuminants from a single image [J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(9): 1179-1195.
- [37] LI Yuanzhen, LIN S, LU Hanqing, et al. Multiple-cue illumination estimation in textured scenes [C]//Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision. Nice, France, 2003, 2: 1366-1373.
- [38] 姚远, 朱森良, 卢广. 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 Yuan, ZHU Miaoliang, LU Guang. A framework for lighting detection and scene rendering in AR environment [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(8): 1270-1275.
- [39] 田英利, 马颂德, 徐孔达. 未知光源位置环境中物体形状恢复的神经网络方法研究 [J]. 自动化学报, 1999, 25(2): 210-214.
TIAN Yingli, MA Songde, TSUI H T. Shape recovery in unknown environment by neural networks [J]. Acta Automatica Sinica, 1999, 25(2): 210-214.
- [40] CHO S Y, CHOW T W S. Neural computation approach for developing a 3-D shape reconstruction model [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2001, 12(5): 1204-1214.
- [41] KARUNGARU S, FUKUMI M, AKAMATSU N. Identifying scene illumination using genetic algorithms and neural networks [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing. Singapore, 2002, 2: 881-885.
- [42] KARUNGARU S, FUKUMI M, AKAMATSU N. Neural networks and genetic algorithms for learning the scene illumination in color images [C]//Proceedings of the 2003 IEEE In-

- ternational Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Kobe, Japan, 2003, 3: 1085-1089.
- [43] CHOW C K, YUEN S Y. Illumination direction estimation for augmented reality using a surface input real valued output regression network[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(4): 1700-1716.
- [44] NILLIUS P, EKLUNDH J O. Automatic estimation of the projected light source direction[C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Kauai, USA, 2001: I1076-I1083.
- [45] CHANTLER M, PETROU M, PENIRSCHE A, et al. Classifying surface texture while simultaneously estimating illumination direction[J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 62(1/2): 83-96.
- [46] BASRI R, JACOBS D W. Lambertian reflectance and linear subspaces[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(2): 218-233.
- [47] 吴恩华. 图形处理器用于通用计算的技术、现状及其挑战[J]. 软件学报, 2004, 15(10): 1493-1504.
WU Enhua. State of the art and future challenge on general purpose computation by graphics processing unit[J]. Journal of Software, 2004, 15(10): 1493-1504.
- [48] PHARR M. GPU 精粹 2——高性能图形芯片和通用计算编程技巧[M]. 龚敏敏,译. 北京:清华大学出版社, 2007: 327-422.
- [49] NGUYEN H. GPU 精粹 3[M]. 杨柏林,陈根浪,王聪,译. 北京:清华大学出版社, 2010: 582-692.
- [50] 卢风顺,宋君强,银福康,等. CPU/GPU 协同并行计算研究综述[J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 5-9, 46.
- LU Fengshun, SONG Junqiang, YIN Fukang, et al. Survey of CPU/GPU synergetic parallel computing[J]. Computer Science, 2011, 38(3): 5-9, 46.
- [51] ECKHORN R, REITBOECK H J, ARNDT M, et al. Feature linking via synchronization among distributed assemblies: simulation of results from cat cortex[J]. Neural Computation, 1990, 2(3): 293-307.
- [52] JOHNSON J L, PADGETT M L. PCNN models and applications [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3): 480-498.
- [53] LINDBLAD T, KINSER J M. Image processing using pulse-coupled neural networks[M]. 2nd ed. [S. l.], The Netherlands: Springer, 2005: 35-67.
- [54] 马义德,李廉,琬琨,等. 脉冲耦合神经网络与数字图像处理[M]. 北京:科学出版社, 2008: 30-271.

作者简介:



郑毅,男,1975年生,讲师,博士后,主要研究方向为增强现实、图像测量、三维重建和图像融合.主持或参与国家自然科学基金、总装备部技术改造项目、省住建厅和省教育厅项目多项,发表学术论文10余篇,其中被EI检索9篇.



郑苹,女,1973年生,博士研究生,主要研究方向为模式识别与计算机视觉.参与国家自然科学基金和总装备部预研项目多项,发表学术论文10篇,其中被EI检索8篇、SCI检索1篇.