



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Lunar Terrain Recovery Based on Shape from Shading

徐辛超 著

基于明暗恢复形状的 月面地形恢复



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资

基于明暗恢复形状的月面地形恢复

Lunar Terrain Recovery Based on Shape from Shading

徐辛超 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 徐辛超 2014

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 提 要

探月工程是中华民族历史上重大的科技工程之一。为了实现探月二期的科学与工程目标,保障月面巡视探测器安全的路径规划和实施高效的科学探测,着陆区和巡视探测区高精度的地形信息将发挥至关重要的作用。本书结合下降序列影像匹配与基于明暗恢复形状(SFS)技术完成三维地形恢复算法,该算法提出了 SFS 反射方程的特征边缘约束条件,再以下降序列影像得到的匹配点作为控制点,对 SFS 的恢复结果进行坐标约束,使得最终恢复地形,得以在着陆器独立坐标系下,方便工程应用。

本书可供影像匹配、影像特征提取等方向的师生和研究人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

基于明暗恢复形状的月面地形恢复/徐辛超著. —北京:测绘出版社,2014.6

ISBN 978-7-5030-3404-6

I. ①基… II. ①徐… III. ①月球—遥感图像—图像处理—研究 IV. ①P184②TP751

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 070857 号

责任编辑 吴 芸 封面设计 李 伟 责任校对 董玉珍 责任印制 喻 迅

出版发行	测绘出版社	电 话	010-83543956(发行部)
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010-68531609(门市部)
邮政编码	100045		010-68531363(编辑部)
电子信箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com
印 刷	北京柏力行彩印有限公司	经 销	新华书店
成品规格	169mm×239mm		
印 张	7.25	字 数	140 千字
版 次	2014 年 6 月第 1 版	印 次	2014 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001-1000	定 价	30.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-3404-6 / P · 716

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

根据《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》、《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》,中国月球探测工程被列为我国的 16 个重大专项之一。目前探月一期工程已经圆满完成,为了实现探月二期的科学与工程目标、保障月面巡视探测器安全的路径规划和实施高效的科学探测,高精度的地形信息将发挥至关重要的作用。

由于纹理、光照等方面的原因,传统双目立体匹配方法在月面地形重建过程中存在一定的局限性。针对这些局限性,本书提出了结合摄影测量领域中的影像匹配和计算机视觉领域中的明暗恢复形状技术的优化地形重建方法,弥补了影像匹配技术在纹理匮乏、重复、遮挡等区域效果不佳的弱点,同时也克服了明暗恢复形状技术只能得到相对形状,不能直接应用于巡视探测器的路径规划的不足。

本书通过特征匹配得到影像中高精度的匹配点对,通过特征边缘梯度约束将明暗恢复形状问题的求解过程正则化,然后通过具有绝对坐标值的匹配点坐标对明暗恢复形状结果进行约束控制,最终得到了可供巡视探测器的路径规划直接使用的优化地形信息。该地形的重建精度优于仅依靠影像匹配的恢复结果和仅依靠现有的明暗恢复形状技术的恢复结果。

本书在编写过程中得到了中科院遥感所刘少创研究员、辽宁工程技术大学徐爱功教授以及航天五院的多位专家学者的指点,在此对他们表示衷心的感谢。此外,也感谢相关实验实施过程中给予帮助的同志。由于作者水平有限,内容如有不当、不妥之处,还请指正。

2014 年 3 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 月面地形恢复的意义	1
§ 1.2 国内外技术现状	2
§ 1.3 主要内容和方法	4
第 2 章 经典 SFS 和边缘提取算法	7
§ 2.1 梯度空间和影像光照方向	7
§ 2.2 传统光照模型	8
§ 2.3 传统光照方向估计算法	10
§ 2.4 经典 SFS 算法	13
第 3 章 经典边缘提取算法	19
§ 3.1 典型微分方法	19
§ 3.2 Canny 算法	20
§ 3.3 Snake 边缘提取	21
第 4 章 下降序列影像控制点及地形特征边缘提取	22
§ 4.1 下降序列影像控制点提取	22
§ 4.2 月面地貌边缘特征线提取	33
第 5 章 基于特征线约束的 SFS 恢复算法	42
§ 5.1 光照方向计算	42
§ 5.2 特征线与梯度约束	50
§ 5.3 特征边缘线梯度约束方向确定原则	59
第 6 章 基于特征线梯度约束的 SFS 算法实现	61
§ 6.1 特征线选取	63
§ 6.2 梯度比例约束	69
§ 6.3 光照方向求解	72
§ 6.4 月表光照反射系数确定	77
§ 6.5 辐照度方程求解	77

第 7 章 SFS 三维恢复	83
§ 7.1 各种算法恢复结果	83
§ 7.2 误差分析	94
§ 7.3 总结	97
参考文献	100
附录 变量及英文缩写	107

Contents

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Significance of Lunar Topography Reconstruction	1
§ 1.2	Research Situation	2
§ 1.3	Main Content and Organization	4
Chapter 2	Classic SFS and Edge Detection Algorithm	7
§ 2.1	Gradient Space and Image Illumination Direction	7
§ 2.2	Traditional Light Model	8
§ 2.3	Traditional Algorithm of Illumination Direction Estimation	10
§ 2.4	Classic SFS Algorithm	13
Chapter 3	Classic Edge Detection Algorithm	19
§ 3.1	Typical Differential Approache	19
§ 3.2	Canny Approache	20
§ 3.3	Snake Approache	21
Chapter 4	Extraction of Control Points and Topography Edge with Decent Images	22
§ 4.1	Extraction of Control Points with Decent Images	22
§ 4.2	Lunar Topography Edge Extraction	33
Chapter 5	SFS Reconstruction Algorithm Based on Constraint of Edge Constraint	42
§ 5.1	Illumination Direction Calculation	42
§ 5.2	Edges and Gradient Constraint	50
§ 5.3	Direction Determine Principle for Edge Gradient Constraint	59
Chapter 6	SFS Algorithm Based on Edge Gradient Constraint	61
§ 6.1	Edge Selection	63
§ 6.2	Gradient Constraint	69

§ 6.3	Light Direction's Solving	72
§ 6.4	Lunar Reflection Coefficient Determined	77
§ 6.5	Irradiance Equations's Solving	77
Chapter 7	SFS Reconstruction	83
§ 7.1	Reconstruction Results of Different Algorithms	83
§ 7.2	Error Analysis	94
§ 7.3	Conclusion	97
References		100
Appendix	Variables and Abbreviation	107

第1章 绪论

中国的探月工程是《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中的16个重大专项之一,也是中华民族历史上的重大科技工程之一。中国的探月工程分“绕、落、回”三个步骤完成(叶培建等,2005;欧阳自远等,2004)。探月一期工程为绕月探测,即发射绕月探测卫星,其上搭载的CCD立体相机、成像光谱仪、激光高度计等设备,能够获取月球表面的影像数据、高程数据,并探测月球表面的有用元素及月壤特性。探月二期工程为落月工程,即发射月球软着陆器并携带月面巡视探测器,完成对月面的巡视勘查,获取着陆区地形地貌、地质构造,并对岩石与矿物成分进行现场采样与分析。探月三期工程为采样返回工程,发射的月球软着陆器能够进行月球样品的自动取样并返回地球。已正式立项的中国火星探测计划,也将沿用月球探测时采用的“绕、落、回”三步走的战略。

2007年10月24日,中国成功发射的第一个月球探测器——嫦娥一号,实现了“精确变轨,成功绕月”的预定目标,获取了大量科学数据和全月球影像图,并成功实施“受控撞月”任务(欧阳自远等,2005;贾阳等,2006)。2010年10月1日,中国成功发射嫦娥二号月球探测器,获取了更高分辨率的全月球影像图和虹湾区域高清晰影像,并成功开展环绕拉格朗日L2点等多项拓展性试验,为后续任务的实施奠定了基础。2012年2月16日,国家国防科工业局发布了嫦娥二号月球探测器获得的分辨率为7m的全月球影像图(石德乐等,2005;刘少创等,2007)。

按计划,嫦娥三号于2013年发射,嫦娥四号也将在2015年发射。嫦娥三号和嫦娥四号月面巡视探测器将由着陆器携带通过软着陆的方式在月球表面降落。在向月球表面降落过程中,着陆器携带的降落相机将获取下降序列影像。当着陆器通过软着陆的方式在月球表面着陆后,月面巡视探测器将离开着陆器,开始执行巡视探测任务。

§ 1.1 月面地形恢复的意义

执行科学探测任务的过程中,在保障月面巡视探测器安全的前提下,提高巡视探测器科学探测的效率,是中国月球探测计划中需要解决的关键问题之一。这就需要对巡视探测器进行安全高效率的任务规划,其中包括:选择探测目标、确定探测目标与巡视探测器的相对位置、巡视探测器安全、可靠的路径规划及生成有效的机械臂投放策略等。为了使巡视探测器能够对其构成威胁的目标(如陨石撞击坑、

陡坡等)进行有效规避;以高精度的地形信息为基础,实现安全、高效的任務规划;并保证巡视探测器能够在其生存周期內完成预定的科学探测任务,着陆区高精度的地形信息和高分辨率的影像信息是至关重要的。

在着陆器向月球着陆的过程中,着陆器携带的降落相机将从距着陆区数千米的高度至着陆点几米的高度,连续获取一个完整的下降序列影像。下降序列影像的特点是影像的覆盖范围随着高度的降低而逐渐缩小,而影像的分辨率逐渐增加。与轨道器获取的影像相比,下降序列影像具有较高的分辨率;与月面巡视探测器立体视觉系统获取的影像相比,下降序列影像具有较大的视场,因而覆盖范围更大。这一特点使下降序列影像成为连接轨道器获取影像和月面巡视探测器立体视觉系统获取影像的桥梁和纽带。通过对下降序列影像进行处理,可以实现着陆区精细地形恢复。本书利用着陆器降落相机获取的下降序列影像,通过影像匹配得到的特征点作为控制点,进而采用明暗恢复形状(shape from shading,SFS)技术提取着陆区和巡视探测区高精度的地形信息,从而为安全、高效的任務规划提供保障。

§ 1.2 国内外技术现状

由于应用领域的特殊性,利用下降序列影像提取地形信息的研究在国内基本属于空白。在国际上,已经开展下降序列影像处理技术的研究并成功地应用于深空探测领域的只有美国的喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory,JPL)(Williams et al,2006;Greeley et al,1990)。在美国2004年实施的火星探测中,JPL成功地利用降落相机获取下降序列影像(descent images),取得了着陆点附近的高分辨率影像信息,这些信息在火星车的定位、路径规划和实施科学探测任务的过程中发挥了重要作用(Vogel et al,2009;Xu,2004;Zuber et al,2005;宁晓刚等,2009)。

1.2.1 着陆区下降序列影像地形恢复现状

尽管目前实现着陆器(非载人)在地外天体成功着陆的只有美国和苏联,但只有美国在发射火星车“勇气号”和“机遇号”时,成功应用下降序列影像进行了着陆区地形恢复。在进行着陆区地形恢复中主要有以下几种途径:①通过立体视觉进行三维恢复;②应用下降序列影像匹配插值进行地形三维重建(张祖勋等,1996;Xiong et al,2005);③综合运用地表影像、下降序列影像和轨道影像等多种影像数据进行地形恢复的方法。

立体视觉方法的基本思想就是靠着陆器安装的多台相机同时获取着陆区影像,以获取在不同视角下的着陆区影像,通过影像匹配获得立体影像像素间的位置偏差(即视差)来获取景物的三维信息(Li et al,2002;Ansar et al,2005)。

下降序列影像是深空探测时,着陆器或者其他设备在垂直着陆过程中获取的一系列影像。这些影像的特点是随着高度的降低,影像的分辨率提高,同时影像覆盖范围也越来越小。Yalin Xiong、Clark F. Olson 和 Larry H. Matthies 成功利用下降序列影像进行地形三维恢复(Olson et al, 2001),其主要思路是通过匹配得到一定的特征点,对这些特征点进行插值,从而获得地形信息。首先通过序贯相似性检测法(sequence similarity detection algorithm, SSDA)得到相邻影像中的匹配点,然后根据影像的位置姿态数据加密出地面点。下降序列影像不仅可以用于着陆区高精度地形恢复,还可以用于着陆器的高精度定位等。

中国嫦娥三号月面着陆器将安装一台降落相机,可以通过下降序列影像匹配结合其他技术进行着陆区的高精度地形恢复。由于月面没有大气层,而且月壤成分比较均匀、反射率很低,因此很难找到足够的匹配点进行地形恢复,需要考虑通过结合其他算法进行着陆区三维地形恢复。

1.2.2 SFS 技术研究现状

传统的三维恢复算法是通过双目或多目立体视觉进行恢复。20 世纪 70 年代, Horn 首先提出了通过单目单幅影像进行三维形状的恢复,从而拉开 SFS (shape from shading) 算法的研究序幕(Horn et al, 1989)。然而由于算法需要恢复物体表面具有相同的光照反射率,因此 SFS 只能应用于较少的领域,如对焊接点或者医学上的骨骼三维重建(廖熠等, 2001)等。SFS 算法主要过程包括反射模型的确定、光照方向估计,以及由反射模型得到的辐照度方程的近似求解问题。算法实现过程中需要首先确定反射模型以及影像的光照方向,然后通过近似求解辐照度方程从而得到影像的三维信息(Michael et al, 2009)。

现有的研究中,多数观点认为月球表面具有近似 Lambert 模型的反射特性,模型完全不吸收入射光线的能量,并且从所有观察方向看它都具有相同的亮度(Hapke, 1981)。Hapke 提出了更符合月球实际情况的 Lommel-Seeliger 反射模型,只考虑物体表面的一次散射情况,暂不考虑多次散射和相位角(McEwen et al, 1994)。McEwen 考虑到相位角的影响,提出了 Lunar-Lambert 模型(Oren et al, 1995)。Oren 提出了 Oren-Nayar 反射模型,认为每个反射元都符合 Lambert 反射规则,但是增加考虑了物体的反射系数及表面粗糙度(Chow et al, 2009)。20 世纪 80 年代, Hapke 等人提出的异性多项散射模型,开始研究行星表面辐射传输性质,并考虑相位角和多次散射的影响,提出了多项散射模型。但由于模型过于复杂,应用范围不是很广。

SFS 光照估计方法一般假设光源方向是已知的。当假定光源为无限远处点光源,投影为正交投影时,无论是 Lambert 反射模型还是 Lommel-Seeliger 反射模型或者是其他模型,物体表面亮度都与入射光的入射角有关(Shimodaira, 2006)。所

以,光源方向是地形重建过程中的非常重要的起算数据。然而,在大多数情况下,并不知道光源方向。因此,为保证 SFS 算法的正确执行,必须提供对影像拍摄时的光照方向进行估计的算法。

传统的光照估计方法都是根据影像的灰度来进行光照估计。Pentland 假设曲面是朗伯体反射曲面并且影像亮度的微分符合某一规律,采用最大似然分析法实现光照方向的估计(郑小强等,2007)。Lee 依据影像灰度在 x, y 方向的一阶偏导,以及它们在整个影像上的灰度值的期望得到光源的倾角,进而求解光源的偏角(陈玮,2006)。Zheng 也是运用影像灰度在不同方向的一阶偏导,以及影像在相应不同方向上的灰度期望值,通过最小二乘方法最终求解得到光源倾角,进一步求得光源偏角(寇镇淳,2005)。但基于灰度进行光照估计有其不可避免的弱点,即对噪音非常敏感。通常估计误差都非常大。

根据光照反射模型及光照方向可以列出辐照度方程,进而求解影像的三维信息。传统的 SFS 方法按照求解方式大致可以分为最小化方法、演化方法、局部方法以及线性化近似求解方法(Wang et al, 2009)等。除此之外,傅晋堂通过小波方法来求解辐照度方程(傅晋堂,2002)。最近 Hara 和 Barnes 又提出用 HRSC(high resolution stereo camera)的影像辅助 SFS 进行地形恢复。

SFS 问题最小化方法就是将辐照度方程和约束表面模型都表示为能量函数的形式,然后再将它们表示为一个泛函极值问题或最优化控制问题,并得到相应最小值的解,即为原 SFS 问题的解。

演化方法是从动力学的角度出发,将 SFS 基本问题看作是一个 Hamilton 系统问题。演化算法的关键步骤是找到影像中可唯一确定形状的某一点或某些点,并从这些点出发,逐步推算出整个表面的解。

局部分析方法是将反射模型与假设的物体表面局部形状相结合来构成关于物体局部形状参数的线性偏微方程组,再利用已知边界条件来求得该方程组的唯一解,这样即可直接确定物体的局部三维表面形状。

线性化方法是指通过对反射函数的线性化近似,以便将原 SFS 非线性问题,转化为一个线性问题进行求解的方法。该方法的基本思想是将反射函数作泰勒级数展开,取线性项近似求解结果。

现有的 SFS 算法大多只是对辐照度方程求解方式不同,求解结果差别很大,应用范围也非常有限,多用于模拟影像或理想实验条件下的影像。用于实际地形后,由于辐照度方程本身的局限性,所以最终的地形恢复效果也不理想。

§ 1.3 主要内容和方法

通过下降序列影像进行地形恢复的主要思路是通过影像匹配得到的控制点作

为起算和约束点,结合 SFS 技术综合进行着陆区的三维地形恢复。主要内容包括下降序列影像控制点提取、SFS 三维恢复和控制点综合约束。

传统的 SFS 技术首先需要进行一些假设,如光源无限远、物体表面各点处的反射率近似一致、合适的光照反射模型。在这些假设的前提下才可以进行 SFS 恢复。月面影像相对于地面影像来说,基本符合这些假设,这就为运用 SFS 进行月面地形恢复提供了基础。本书重点研究了在影像匹配信息缺乏的条件下,通过结合这些少量的控制点与 SFS 技术完成地形的三维重建。

1.3.1 研究内容

由于 SFS 三维恢复结果是相对的,即高度等信息都只是相对关系,因此,需要通过匹配得到的匹配点作为 SFS 恢复结果的控制点,将 SFS 恢复的相对地形信息,转换成具有绝对位置坐标的地形信息。本书在传统 SFS 算法基础上提出了基于特征边缘线梯度约束的 SFS 三维地形恢复算法,主要包括以下研究内容:

(1)基于改进“尺度不变特征转换”(scale-invariant feature transform, SIFT)算子的匹配方法,提高算法对下降序列影像的控制点提取效率。SIFT 算子具有旋转、平移、尺度不变性,并且能够克服影像噪声和一定程度的视角变化。尺度变化根据下降序列影像的特点,本书对 SIFT 算子进行了改进,增加其对下降序列影像的适应性,并通过基于改进 SIFT 算子提取的控制点将为 SFS 算法提供起算和约束条件。

(2)光照估计。传统光照估计是通过影像中像素灰度梯度的数学统计进行。本书采用喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)给出的行星精密历表来计算日、地、月三者的相对位置,通过坐标转换得到下降序列影像拍摄时刻的光照方向。

(3)确定反射模型,建立辐照度方程。辐照度方程的建立是 SFS 的核心。辐照度方程是通过反射模型建立的,因此,必须首先确定物体表面的反射模型,本书采用了 Lommel-Seeliger 月面反射模型。

(4)运用地形特征边缘线对辐照度方程进行约束,并进行线性化近似求解。由反射模型建立的辐照度方程是一个病态的方程,需要通过增加约束条件或者其他限制,将其变得正则化以后才能够正确求解。本书提出了以地形特征边缘线的梯度比例作为地形表面点的三维约束,使得辐照度方程未知数降为一维。为提高算法效率,采用线性化近似迭代求解。

(5)运用改进的边缘提取卷积模板,优化地形特征边缘提取结果。传统特征边缘提取结果容易忽略边缘响应较弱的部分,需要对其进行改进,增加提取精度。

(6)建立透视投影下的辐照度方程。传统 SFS 往往将问题假设为正射投影,但在下降序列影像获取过程中,本书只考虑拍摄高度为 4~100 m 的影像,因此,不

能将该过程直接视为正射投影,需要考虑透视投影下的辐照度方程建立问题。

(7)运用改进 SIFT 得到的控制点对 SFS 恢复结果进行约束。SFS 恢复结果中高差等信息只是相对关系,因此,需要利用匹配得到的控制点将 SFS 得到的相对地形信息转换为具有绝对位置坐标的地形信息。

1.3.2 主要方法

传统 SFS 算法主要研究了关于辐照度方程的求解问题,而忽略了 SFS 问题病态的根源,从而导致实际地形恢复的误差较大。本书根据传统的 SFS 假设,通过天体运动来求取影像的光照方向,结合立体匹配手段提取控制点,作为 SFS 的起算点,并通过地貌边缘特征约束,提出了求解像元面法向量的求解方式,最终通过迭代求解辐照度方程得到着陆器本体坐标系下的三维地形。采用的主要方法如下:

(1)分析下降序列影像特点,优化 SIFT 控制点提取算法。缩小匹配过程中同名控制点的搜索范围,在保证算法稳定性的基础上,提高算法效率。

(2)运用改进的边缘提取卷积模板,优化倾斜方向计算模板,使边缘提取结果更加准确,最终获得更为精确的特征边缘,作为辐照度方程求解时的约束条件。

(3)通过 JPL 405 精密星历求取日、地、月的相对位置,并通过坐标转换关系,最终得到下降序列影像拍摄时刻的光照方向。

(4)通过运用最小二乘对已经得到的特征边缘线进行拟合,求取梯度比例约束因子,并将其代入辐照度方程,使得 SFS 问题正则化。

(5)通过对下降序列影像和透视投影分析,建立透视投影下的辐照度方程。改变传统模型认为拍摄过程是正射投影的假设,采用透视投影建模。为简化求解过程,运用泰勒级数展开进行辐照度方程的线性化近似,并通过雅克比迭代进行求解。

(6)采用最小二乘求解坐标转换参数,运用匹配得到的控制点对 SFS 恢复结果进行控制约束,保证了恢复结果误差最小。同时,通过坐标转换使得恢复结果可以直接应用于月面巡视探测器的导航定位和任务规划。

第 2 章 经典 SFS 和边缘提取算法

SFS 是通过光照方向及反射模型最终确定影像三维信息的一种方法(Ecker et al,2010;Robleskelly et al,2007)。一般地形影像中光照方向都是未知的,这就需要首先解决影像中光照方向估计的问题。其次,传统的 SFS 最重要的部分就是辐照度方程的求解(Adm et al,2011),由于辐照度方程是一个病态方程,因此,需要加入约束条件,或者将它看作动力学系统问题进行求解。本书将特征边缘点的梯度作为整个地形表面点的梯度约束,将辐照度方程正则化。下面将对 SFS 和边缘提取中比较典型的算法进行详细叙述。

§ 2.1 梯度空间和影像光照方向

SFS 问题中光照方向往往以倾角和偏角的形式给出,因此,首先对光照方向的定义进行描述。辐照度方程建立后,运用梯度进行三维法向量表达,可以实现方程中未知数的降维,在此对梯度空间进行一定说明。

2.1.1 影像光照方向

光照方向是 SFS 问题在建立辐照度方程时必须首先确定的因素,往往以倾角和偏角的形式给出。图 2.1 为光照方向描述示意图。笛卡儿坐标系下,以原点 O 为球心,半径为 1 的球体,称之为高斯球。在高斯球中,假设光源点为 P ,则 P 在 X 、 Y 轴所在平面内的投影与 X 轴的夹角为光照偏角 τ 。 P 点所在经线与 X 、 Y 轴所在平面的交点为 Q ,则 OP 与 OQ 对应夹角为光照倾角 σ 。

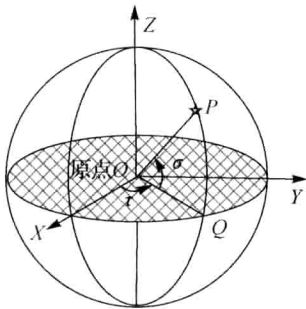


图 2.1 光源方向表示

对于球面上的任意点 $P(x, y, z)$ 为光源所在方向, 假设该点处的法向量为 $\mathbf{N}(n_x, n_y, n_z)$ 。球面坐标系下 P 点位置可表示为 (τ, σ) , 其中 τ 为该点偏角, σ 为该点倾角。可得到法向量与光照角度的对应关系如下

$$(n_x, n_y, n_z) = (\sin\sigma\cos\tau, \sin\sigma\sin\tau, \cos\sigma) \quad (2.1)$$

2.1.2 梯度空间

在二维空间中, 梯度空间用来表示物体表面的朝向的基本特征。假设地形曲面为 $z = f(x, y)$, 若梯度空间中的一点表示为 (p, q) , 该点处的表面法向量为 $\mathbf{N}(n_x, n_y, n_z)$, 则可求得 p, q 分别为

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \\ q &= \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

同时表面法向量与梯度关系如下

$$\left. \begin{aligned} p &= -\frac{n_x}{n_z} \\ q &= -\frac{n_y}{n_z} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

由 p, q 的求解公式可得出, 曲面 $z = f(x, y)$ 上所有表面朝向相同的像素点在二维梯度空间中都对应同一点 (p, q) 。同时像素面片法向量可表示为 $\mathbf{N}(p, q, -1)$ 。可见三维空间中的表面法向量 $\mathbf{N}(n_x, n_y, n_z)$ 对应梯度空间中的 (p, q) , 应用这种方法可以在三维表面研究过程中起到降维的作用。因此, 在 SFS 研究过程中, 常用梯度来代替表面法向量, 减少辐照度方程中的未知数个数。

§ 2.2 传统光照模型

光照模型是反映物体表面某个方向的反射亮度和入射照度的比值。通过确定光照模型可以列出对应的辐照度方程, 进而进行影像三维信息的求解。比较常见的反射模型有 Lambert 光照反射模型、Lunar-Lambert 光照反射模型和 Lommel-Seeliger 光照反射模型等 (Grumpe et al, 2011; Forsyth et al, 2006)。

2.2.1 Lambert 反射模型

Lambert 余弦定理总结了一个理想漫反射物体在点光源照射条件下光的反射定律。漫反射光的强度近似地服从于 Lambert 定律, 即漫反射光的光强与光源强度、入射光的方向和反射点处表面法向夹角的余弦成正比 (章毓晋, 2011)。由此可

以构造出 Lambert 漫反射模型

$$E = E_0 \omega \cos \theta_i \quad (2.4)$$

式中, E 表示物体表面某点的漫反射光强; E_0 为点光源强度; ω ($0 < \omega < 1$) 表示物体表面的反射系数; θ_i 是入射光线与物体表面该点处法向量的夹角, 或称为入射角 ($0^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$)。当入射角为 0° 时, 光线垂直于物体表面入射, 漫反射光强最大; 90° 时光线与物体表面平行, 物体接收不到任何光线。图 2.2 为 Lambert 反射模型示意图。其中, $\mathbf{L}$ 为光源方向, $\mathbf{N}$ 为物体表面法向量, θ_i 为光照入射角。

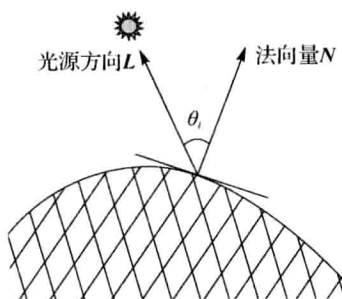


图 2.2 Lambert 反射模型

假设物体表面在被照射点 P 处的梯度形式下的法向量为 $\mathbf{N}(p, q, -1)$, P 到点光源的梯度形式法向量为 $\mathbf{L}(p_0, q_0, -1)$, 则式 (2.4) 可表示为如下的向量形式

$$E = E_0 \omega \left(\frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}}{|\mathbf{N}| |\mathbf{L}|} \right) \quad (2.5)$$

式中, $\mathbf{N} \cdot \mathbf{L} = \sqrt{p_0^2 + q_0^2 + 1} \sqrt{p^2 + q^2 + 1} \cdot \cos \theta_i$, $\cos \theta_i = \frac{(1 + p p_0 + q q_0)}{\sqrt{p_0^2 + q_0^2 + 1} \sqrt{p^2 + q^2 + 1}}$ 。

大多数情况下, 将辐照度方程写成如下形式

$$I(x, y) = \omega \frac{(1 + p p_0 + q q_0)}{\sqrt{p_0^2 + q_0^2 + 1} \sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \quad (2.6)$$

式中, $I(x, y)$ 为归一化的像素灰度值。

2.2.2 Lommel-Seeliger 光照反射模型

随着月球表面散射现象研究的深入, 月球光照反射模型也得到了发展, Lommel-Seeliger 反射模型在这个时候被提出 (Kreslavsky et al, 2000)。Lommel-Seeliger 模型考虑了各向同性的一次散射, 而暂不考虑多次散射效应。图 2.3 为 Lommel-Seeliger 反射模型示意图。其中, θ_r 为观测者所在方向与物体表面法向量的夹角, θ_i 为光照入射角, $\mathbf{L}$ 为光源方向, $\mathbf{S}$ 为观察方向, $\mathbf{N}$ 为物体表面法向量。