

光电器件与材料

基于BRDF模型的金属表面反射特性及相变特性研究

张颖 李金龙 黄趾维 冯尧 杨露露 唐欣盈

(西南交通大学 物理科学与技术学院 成都 611756)

摘要:针对强反射金属表面物体的三维形貌测量问题,在传统光照度BRDF模型的基础上,详细研究了适合金属表面的Cook-Torrance反射模型,并结合菲涅尔公式对金属表面相变特性进行了分析。以常见几种金属可见光范围内的复折射率为例,对模型进行数值仿真,得出常见金属在不同波长下的镜面反射率和相移特性曲线,为金属表面物体的三维形貌测量等应用提供理论基础和方法指导。

关键词: BRDF;复折射率;可见光;镜面反射率;相位变化

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-03-0032-04

Research on Reflection and Phase Shift Characters of Metal Surface Based on BRDF Model

ZHANG Ying, LI Jin-long, HUANG Zhi-wei, FENG Yao, YANG Lu-lu, TANG Xin-ying

(School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: According to the problem of three dimensional shape reconstruction of strongly reflected metal surface, based on the traditional light illuminance bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model, the Cook-Torrance reflection model is researched in detail. And the phase shift characteristics of the metal surface are analyzed with Fresnel formula. Taking the complex refractive index of some common metal in visible light region as an example, the specular reflectivity and phase shift characteristic curves of common metal at different wavelength are obtained through model simulation, which provides theoretical basis and methodological guidance for 3D shape reconstruction measurement application of the metal surface object.

Key words: bidirectional reflectance distribution function (BRDF); complex refractive index; visible light; specular reflectivity; phase shift

基于结构照明的三维形貌光学测量方法已广泛应用于机器视觉、工业检测、生物医学、影视特技等领域中,然而对于金属表面的物体,尤其是具有强反射金属表面的物体,当收到结构照明时,反射光的光学性质和相位变化性质将对三维形貌的重建产生重要影响。从物体表面的双向反射分布函数BRDF(bidirectional reflectance distribution function)出发,研究适于金属表面的反射特性及相

变特性。目前,用于描述材质表面的反射属性的BRDF模型有很多种,如Phong模型、Torrance-Sparrow模型、Cook-Torrance模型和Banks模型等。据报道, Li Mingzhe等人以铝合金材料为例,利用C-T模型对铝表面的反射特性进行测量,通过实验数据对模型进行了修订^[1];李江波等人基于照度-反射模型对植物缺陷进行检测^[2-6];吴凤和等人基于锥角计算Phong混合反射模型反射参数估算^[7-9];Cho S Y等人

收稿日期: 2017-04-25

作者简介:张颖(1995-),女,山西运城人,学士,从事三维传感和测量研究;李金龙(1978-),男,江苏邳州人,博士,西南交通大学物理科学与技术学院副教授,从事三维传感与测量研究。

采用神经网络法可以确定特定图像的镜面反射系数^[10]。然而对于具有强反射金属表面的物体,在进行基于相位的三维形貌测量时,变形条纹的部分区域呈现高亮状态而使得CCD出现过饱和状态,无法识别完整的变形条纹。因此,文中基于适用性较广泛的Cook-Torrance模型,并对其中的参数予以修正,建立起适合于金属表面的反射特性和相变特性模型,并结合几种常见金属进行了数值分析,得出有用结论,为金属表面物体的三维形貌测量提供理论基础和方法指导。

1 模型建立

描述光线在物体表面的反射性征最常用的是双向反射分布函数(BRDF),它表征入射光的能量在经过物体表面反射作用后,在空间中的分布情况。换言之,它给出了从一个指定方向入射的光线,从另外一个方向反射出去的概率。

BRDF描述的理想漫反射(光线向各个方向均匀地反射)和镜面反射(光线仅仅沿着与入射方向关于法向对称的出射方向进行反射),用C-T模型可表示为

$$R = dR_d + sR_s \tag{1}$$

其中, R_s 代表镜面反射分量; R_d 代表漫反射分量; s, d 分别为镜面反射和漫反射所占的比例。

为了研究强反射金属表面的反射特性,文中主要讨论镜面反射分量,可定义为

$$R_s = \frac{FDG}{\pi \cos \theta_i \cos \theta_r} \tag{2}$$

其中, F 为菲涅耳项; D 表示微平面朝向的分布函数; G 表示几何衰减因子。

Li Ming-zhe 等人以铝合金材料为例,对C-T模型的镜面反射率进行仿真分析和实验测量,并将其数据进行对比,发现C-T模型不适于光滑材料表面的反射。于是,他们通过实验对C-T模型进行了修改^[1]。修改后的模型如下

$$R_s = \frac{c \cdot FDG \cdot (\sin(\theta_i + \theta_r) + a)}{\pi \cos \theta_i \cos \theta_r + b} \tag{3}$$

其中, a, b 和 c 与材料自身特性有关; $F = \frac{\cos \theta_i - n \cos \theta_r}{\cos \theta_i + n \cos \theta_r}$ 表示菲涅耳函数; $D = \exp[-\beta^2 \sigma^2]$, 表示微平面朝向的分布函数; G 表示几何衰减因子,由于微平面相互遮挡(包括挡住入射光线和反射光线两种情况),导致反

射出去的光线衰减,其表达式为 $G = \min\left\{1, \frac{2(n \cdot h)(n \cdot v)}{(h \cdot v)}, \frac{2(n \cdot h)(n \cdot l)}{(h \cdot v)}\right\}$, 各方向量如图1所示。

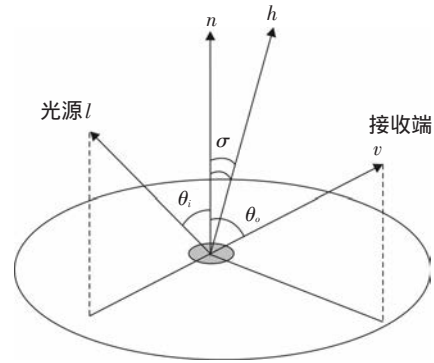


图1 各项同性模型中的几何参数示意图

光在金属表面反射时的位相跃变值与入射光波长和金属本身的光学特性有关,根据菲涅尔公式可得

$$\varphi = \arctan[2k/(n^2 + k^2 - 1)] \tag{4}$$

式中, n 为金属的复数绝对折射率; k 为衰减系数

2 数值计算及分析

基于上述的模型,分别固定入射角度 $\varphi = 6.88^\circ$, $m = 1$, $G = 0$,复折射率取铁在波长 $\lambda = 540 \text{ nm}$ 下的折射率 $2.697 + 3.483i$,分别做了如下数值仿真:入射角度对镜面反射率的影响(如图2所示)、镜面反射率与表面粗糙度的关系(如图3所示)、几何衰减对镜面反射率的影响(如图4所示),以及不同入射角下表面相位变化(如图5所示)。

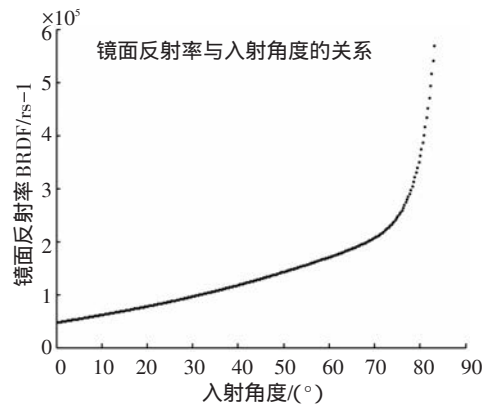


图2 镜面反射率与入射角度的关系

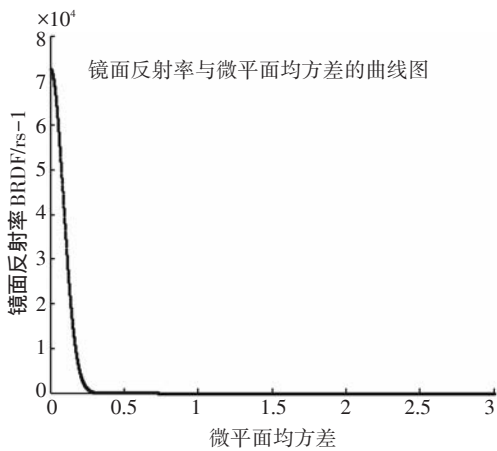


图3 镜面反射率与微平面均方差的关系

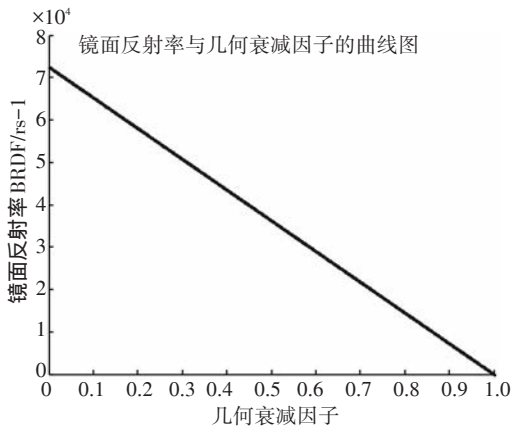


图4 镜面反射率与几何衰减因子的关系

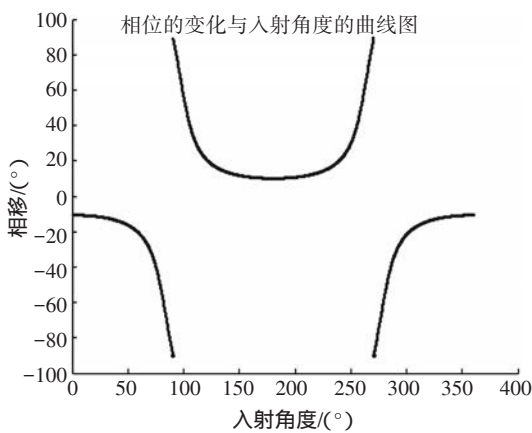


图5 相位的变化与入射角度的关系

从图2可以看出,入射角越小,镜面反射率越低,入射角达到75°时,镜面反射率急剧增大,因此在投影光栅进行金属表面外形轮廓测量时,应尽量设置较小的人射角度,以减少镜面反射对采集图像的影响,当入射角度高于75°时将出现严重的高光现象。

从图3可以看出,微小平面的均方差,即反射面粗糙程度,决定着高光的衰减程度,物体表面越粗糙,物体的漫反射程度越高,当微平面均方差大于0.25时,基本消除了镜面反射,避免高光效应。

从图4可以看出,几何衰减因子与镜面反射成负相关,且成线性关系。

从图5可以看出,入射角度在小于75°时,相移接近于零,因此在实际进行三维测量时,应使入射角度尽量小,最大不超过75°,这与图2的结论一致。

通过查阅光学手册,得到Zn、Fe、Al、Cu、Ni、Ti等6种常见金属在可见光范围内的复折射率,在镜面反射率为最优值(入射角度为0°、微平面均方差为0.5、几何衰减因子为1)的情况下,对不同波长下的镜面反射率和相变特性进行了数值仿真,归一化处理后的结果分别如图6、图7和图8所示。

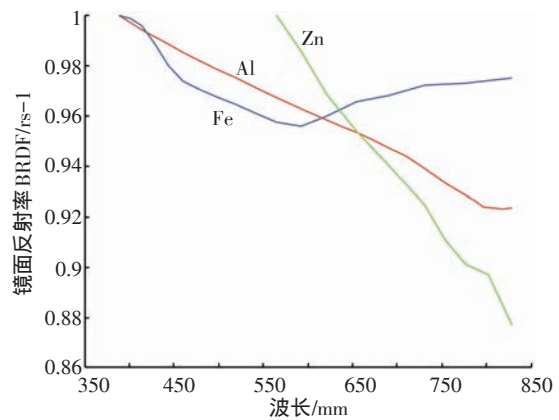


图6 常见金属的镜面反射率与波长的关系(一)

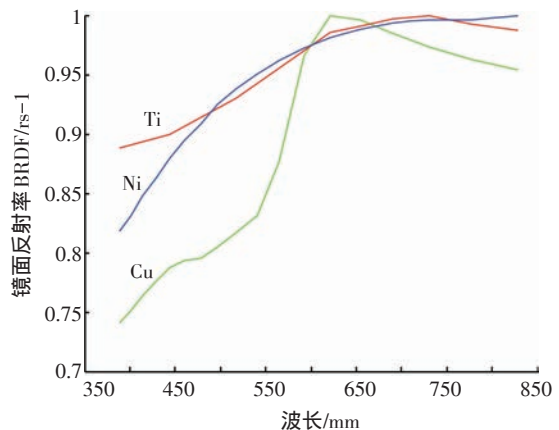


图7 常见金属的镜面反射率与波长的关系(二)

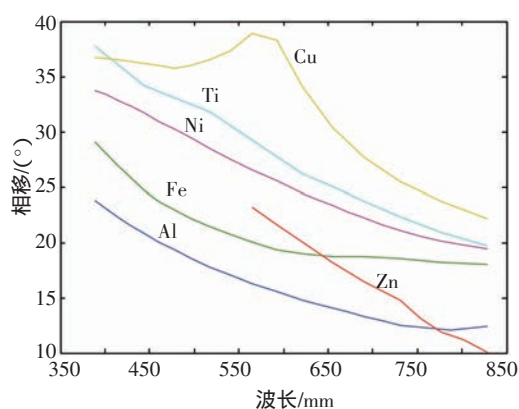


图8 常见金属的相位改变与波长的关系

从图6可以看出,在可见光波段,金属锌和铝的镜面反射率均随入射光的增大而下降。但是对于不同的入射光波长,锌和铝的镜面反射率下降幅度不大,均在 $[0.85, 1]$ 区间内。金属铁的镜面反射率在可见光波段随波长增大先下降后上升,在约590 nm(黄橙光)处达到最小值,因此在利用投影光栅进行铁质物体表面三维形貌测量时,选择黄橙光投影光栅有利于减小镜面反射。

从图7可以看出,在可见光波段,镍的镜面反射率随入射光波长的增大而单调增大,故入射波长越小镜面反射率越小;铜和钛的镜面反射率在可见光波段随着入射光波长的增加在上升之后都有一个回落,两者分别在约620 nm和720 nm入射光照射下有最高的镜面反射率,所以为避免高光对拍摄的影响,对这两种金属物体进行拍摄时,应远离该波段入射光,可选取较低波段可见光照射。

从图8可见,金属锌、钛、镍、铁、铝在不同波长的可见光照射下,其相移都会随波长的增加而下降,且相移量均小于 30° ,实际三维测量中,尽量选择长波段光投影光栅铜的相位在不同光照射下有些许波动,在450 nm和560 nm附近有极小值和极大值,随后随波长的增大而快速下降。

3 结论

基于BRDF光照模型,建立了金属表面反射特

性模型,定量分析了常见金属的镜面反射特性和相位变化特性,绘制了两个参数在不同波长下的变化曲线,对于铁、铝、锌等金属选择长波长能够同时达到镜面反射率和相位均最佳的状态,而对于铜、钛、镍等金属则要根据实际情况选择最佳波长。数值计算及结果分析表明,在镜面反射率达到最小时可获得更优良的光栅条纹,能够削弱或消除高光效应,为具有强反射金属表面物体的三维形貌重建提供理论根据,也为解决此类问题提供方法上的指导。

参考文献

- [1] 李明哲,赵继光,周云婷. Cook-Torrance模型修改方法分析[J]. 应用力学与材料, 2014, 556-562: 4240-4243.
- [2] 顾春明,刘振波,葛云健. 利用MODIS BRDF估算中国东北森林背景反射率——以大兴安岭加格达奇地区为例[J]. 遥感学报, 2014(3):696-714.
- [3] 董亚冬,焦子锦,张虎,等. 改善MODIS BRDF产品热点效应的方法研究[J]. 遥感学报, 2014(4):804-825.
- [4] 王强,过志峰,孙国清,等. 离散植被冠层的解析混合BRDF模型——MGeoSAIL[J]. 测绘学报, 2010(2):195-201.
- [5] 黄健熙,吴炳方,曾源,等. 基于蒙特卡罗方法的森林冠层BRDF模拟[J]. 系统仿真学报, 2006(6):1671-1676.
- [6] 吴凤和,王金芬,尹清静,等. 基于锥角计算的Phong混合反射模型反射参数估算[J]. 燕山大学学报, 2014(2): 144-151.
- [7] 李明哲,赵继广,杨帆. 基于统计与遗传算法的Cook-Torrance模型研究[J]. 装备学院学报, 2016(1):116-121.
- [8] 李俊麟,张黎明,陈洪耀,等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. 光学学报, 2014(5):269-276.
- [9] Cho S Y, Chow T W S. 一种基于神经色彩反射率模型和迭代递推方法的新型3D SFS方法[J]. Neural Computation, 1989, 14(11):2751-2789.