

基于微观图像的加工表面 3 维形貌重建算法研究

孙林丽 李言 郑建明

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘要 切削加工表面由于微观不平度及镜面效应的存在,使得照射其上的光线具有多次散射及后向散射的特性,从而影响了以工件表面图像3维重建形貌的精度。提出了一种基于二向反射分布函数的表面重建算法,构造了以Hapke模型表达的金属切削表面重建方程。该算法以重建方程离散化为手段,计算出光源和物体的倾角和偏角,得到光源和物体的梯度值,最后采用全微分方程对物体表面高度进行恢复。通过对实际切削加工表面图像3维形貌重建结果与触针式测量结果的对比表明,重建形貌粗糙度轮廓贴近实测粗糙度轮廓,证明了本文算法的准确、有效性,为加工表面3维形貌的重建提供了新的思路和方法。

关键词 计算机视觉 表面微观形貌 光照估计 Hapke模型 二向反射分布函数

中图分类号: TP391.41 **文献标志码**: A **文章编号**: 1006-8961(2010)06-887-06

Research on the Reconstruction Arithmetic for Three Dimensions Topographic of Metal Cutting Surface

SUN Linli, LI Yan, ZHENG Jianming

(School of Mechanical Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract Multiple scattering and backward scattering on rough surface is caused by surface roughness and mirror effect, and this affects the precision of shape from shading arithmetic accordingly. This paper reconstructs the reflection map equation by using a bidirectional reflectance distribution function and the Hapke model. After the equation discretization, we calculated tilt and slant of the lighting and the surface, then get the height gradient of the lighting and the surface, recover the height data with a total differentiation method. The comparison of reconstruction of real cutting surface and the measured stylus profile result shows this algorithm is accurate and effective, and it inspires new thinking ways for the shape from shading of metal cutting surface for cutting surfaces.

Keywords computer vision, surface micro-topography, lighting estimation, Hapke model, bidirectional reflectance distribution function

0 引言

在机械加工中,通过视觉图像重建提供的加工

表面3维几何信息来判别表面加工质量及刀具状态,实现加工过程在线检测,对提高企业生产自动化水平具有重要意义。以明暗恢复形状(SFS)技术获取物体表面3维几何形状信息,具有非接触测量和

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB724406);陕西省教育厅研究计划项目(07JK335);陕西省重点学科建设专项资助项目(2008-171)

收稿日期:2009-11-25;**改回日期**:2010-02-25

第一作者简介:孙林丽(1980—),女。西安理工大学机械电子工程专业在读博士生。主要研究方向是模式识别及计算机视觉的研究。

E-mail: rourouxiang@126.com

对环境要求低的显著特点,已成为物体表面 3 维形貌检测及重建的研究热点。

经典 SFS 算法是应用光度学理论对 Lambert 表面所建立的反射图方程进行解算以获取物体表面深度信息。目前大多数重建算法都是基于 Lambert 漫反射模型的。但金属切削加工表面形貌特征比较特殊,不完全满足 Lambert 反射,而是一种在不同尺度内具有分形特性的粗糙金属表面,且具有较强的镜面反射特性,因此经典 SFS 算法难以适应金属切削表面的 3 维重建工作。

对于粗糙表面光散射问题的描述,已提出多种几何光学反射模型,比如 Lambert 反射模型、Torrance-Sparrow 反射模型及 Oren-Nayar 反射模型等^[1-2]。但这些模型是在考虑同一尺度几何特性条件下得出的,是表面粗糙形状的简化模型,当在两个不同尺度上考察时,结果可能有着显著的差别,这就是几何光学反射模型在尺度上的局限性。Beckmann 等人建立的 Beckmann-Kirchhoff 反射模型是应用最广的物理光学反射模型^[3], Ragheb 等学者应用此改进的模型,分析了粗糙表面光散射现象,并且与哥伦比亚大学的 CUReT 库中实测的粗糙表面二向反射分布函数测量结果对比,其准确度明显优于 Oren-Nayar 等几何光学反射模型^[4]。尽管如此,还是存在较大的误差,这个误差是由于粗糙金属表面上的多次散射而造成的后向增强散射现象引起的^[5-7], Beckmann-Kirchhoff 物理光学反射模型是无法解释该现象的^[8]。因此,应寻求更适合于具有强烈后向增强散射现象的粗糙金属表面光反射模型。

Hapke 辐射传输模型是应用最广泛的二向反射模型,能够定量描述粗糙表面的单次及多次散射^[9-11]。Chappell 和程衍亮应用此改进模型模拟了土壤的二向反射率并进行了土壤表面的物理参数反演,结果令人满意^[12-14]。模型中体现土壤与金属表面不同性状的参数为单粒子反照率,而且土壤表面和切削金属表面都是来自下界辐射为零的半无界介质,都是由于表面层的粗糙度而造成具有强烈后向散射现象的。基于此,经过对 Hapke 辐射传输模型进行物理参数的修正与标定,采用 Hapke 辐射传输模型作为重建的光反射模型。首先采用二向反射分布函数构建基于灰度图像的 3 维重建表达式,其次使用 Hapke 辐射传输模型得到粗糙切削金属表面的反射图方程,最后对此方

程求解,获得高精度的 3 维数据。标准粗糙度样块重建实验结果证明,该算法对加工表面微观形貌 3 维重建是准确有效的。

1 反射图方程的建立

1.1 朗伯体反射

在一个辐射场景中,Lambert 表面是指在所有视场方向上观测都具有相同亮度的表面。Lambert 表面不吸收任何入射光,它把入射的全部辐射功率按照 Lambert 余弦定律反射出去。令 Lambert 表面辐射亮度为 L ,辐射照度为 E ,则有

$$L = \frac{E}{\pi} \quad (1)$$

可见,Lambert 漫反射特性是不符合切削加工表面的。切削加工表面由于加工受切削参数、刀具几何形状以及材料特性等多方面因素的影响,加工表面上存在着宏观的波度和微观的粗糙度,加之金属表面的镜面反射效应,因此必须构造能够反映粗糙表面特性的反射图方程。

1.2 基于 BRDF 的反射图方程建立

采用描述物体表面空间光反射特性的二向反射分布函数(BRDF)来建立反射图方程。物体的二向反射特性是人们对于物体光反射机理研究从定性到定量的必然。BRDF 是物体表面的辐射亮度 L_r 与辐射照度 E_i 的比值,是关于入射角、反射角和波长的函数。

BRDF 定义为反射方向的反射辐射亮度微增量 $dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 与来自入射方向的物体表面上辐射照度的微增量 $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ 的比值,表示为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (2)$$

式中, θ 和 φ 分别表示倾角和偏角,下标 i 和 r 分别表示入射和反射。BRDF 描述了不同入射条件下物体表面在任意观测角的反射特性。如图 1 所示。

将式(2)变形为

$$L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) E_i(\theta_i, \varphi_i) \quad (3)$$

Horn 证明了图像的辐照亮度 $I(x, y)$ 正比于物体的反射辐射亮度 L_r ,令比例因子为 k ,有 $I(x, y) = kL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$,带入式(3),可得基于 BRDF 的反射图方程

$$I(x, y) = kf_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) E_i(\theta_i, \varphi_i) \quad (4)$$

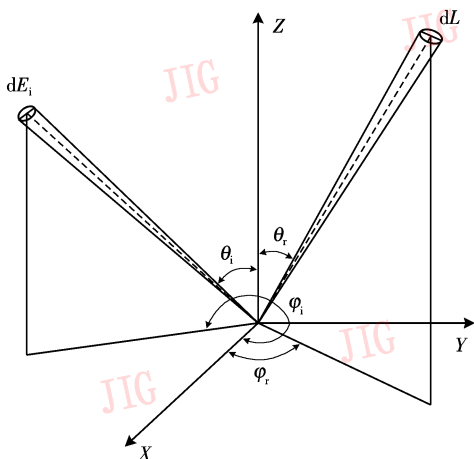


图 1 BRDF 示意图
Fig.1 Schematic of BRDF

1.3 基于 Hapke 二向反射模型的反射图方程

Hapke 二向反射模型描述了地物与入射辐射之间的相互作用的过程。假设物体表面是不规则的,表面颗粒比入射波长大,在表面任意点上建立坐标系,设该点处单位法矢为 N ,其倾角为 θ ,偏角为 φ ;光源的倾角为 θ_i ,偏角为 φ_i ,光源与法矢的夹角为 α 。令观测方向为 P ,观测方向与法矢的夹角为 β ,Hapke 二向反射模型参数如图 2 所示。则 BRDF 表达式为

$$f_r = \frac{\omega}{4\pi} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha + \cos \beta} [p(g) + H(\cos \alpha)H(\cos \beta) - 1] \quad (5)$$

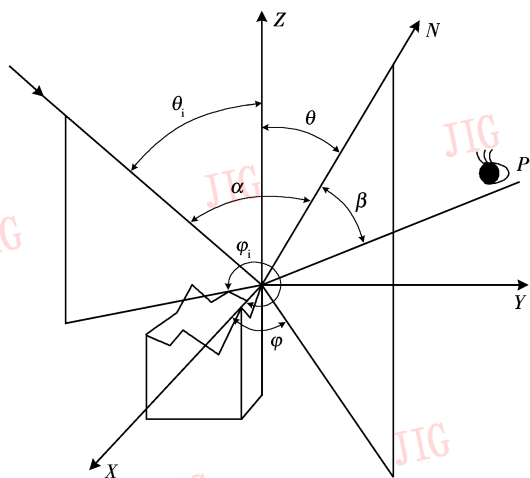


图 2 Hapke 二向反射模型示意图
Fig.2 BRDF schematic of Hapke model

带入式(3)得到基于 Hapke 二向模型的反射图方程:

$$I(x, y) = \frac{k\omega \cos \alpha}{4\pi(\cos \alpha + \cos \beta)} [p(g) + H(\cos \alpha)H(\cos \beta) - 1] E_i(\theta_i, \varphi_i) \quad (6)$$

式中, ω 为表面微粒的单个散射反照率; $p(g)$ 是相函数,其中 g 为相角; $H(x)$ 是 Ambartsumian-Chandrasekhar 项,表达了多次散射的贡献量。

2 Hapke 二向反射模型反射图方程解算

实验中,观测方向都垂直于微观切削加工金属表面,且观测距离远大于拍摄的微观表面尺寸,故观测角可视为零,即 $\beta = 0$ 。金属微粒表面的散射能量与吸收能量之比为 1,则单次散射反照率 $\omega = 1$ 。假设切削金属表面上的多重散射是各向同性的,则 $p(g) = 1$ 。于是式(6)可化简为

$$I(x, y) = k' \frac{\cos \alpha(1 + 2\cos \alpha)}{\cos \alpha + 1} \quad (7)$$

式中, $k' = \frac{3kE_i(\theta_i, \varphi_i)}{4\pi}$ 为修正系数。当物体法矢平行于 Z 轴且入射光与物体法矢夹角为零时, $k' = \frac{510}{3}$ 。

算法思路:首先将图像灰度矩阵 $I(x, y)$ 离散化后,求出光源的偏角 φ_i ,对式(7)解出入射角函数 $\cos \alpha$,对 $\cos \alpha$ 求矩且积分的手段得到光源的倾角 θ_i 。其次通过解球面几何关系得到物体法矢的倾角 θ 和偏角 φ 。最后将以角度参数变换为高度梯度值,用全微分恢复出物体表面 3 维形貌。

算法步骤:

1) 将式(7)辐照度归一并离散化,在每一个离散点上,用 Pentland 法求出光源偏角 φ_i 。

2) 从式(6)中得到

$$\cos \alpha = \frac{I(x, y) - k' - \sqrt{I(x, y)^2 + 6k'I(x, y) + k'^2}}{4k'}$$

等式右边是图像灰度值的函数,令 $\cos \alpha = \bar{I}$ 。有

$$\frac{\left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \cos \alpha d\varphi d\theta \right)^2}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha d\varphi d\theta} = \frac{(\mu(\bar{I}))^2}{D(\bar{I})}$$

3) 根据球面几何学,得到关系式 $\cos \theta = \frac{\cos \theta_i \cos \alpha}{\sin \theta_i \sin \alpha - 1}$,从中求出物体法矢倾角 θ 。

4) 根据球面几何学可得 $\cos(2\pi + \varphi - \varphi_i) = \frac{\sin^2 \theta_i + \sin^2 \theta + (\cos \theta - \cos \theta_i)^2 - 2(1 - \cos \alpha)^2}{2\sin \theta_i \sin \theta}$, 从中求出物体法矢偏角 φ 。

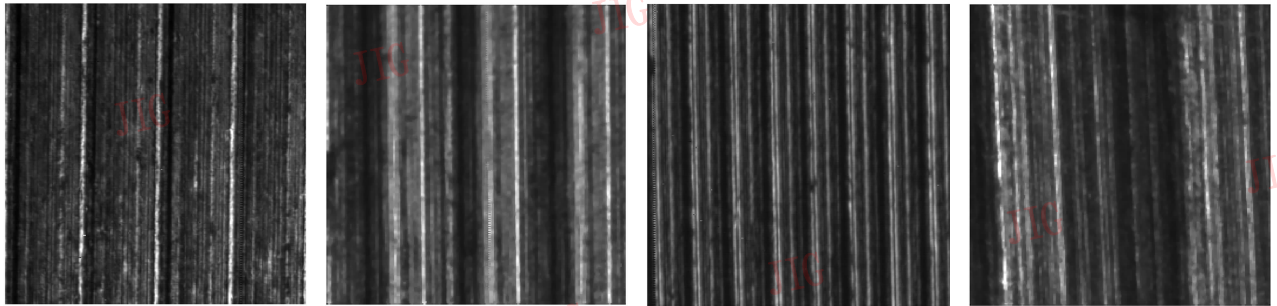
5) 将物体法矢角度参数 (θ, φ) , 变换为梯度值 $p = \tan \theta \cos \varphi$, $q = \tan \theta \sin \varphi$, 用全微分方程 $z(x, y) = z_0(x_0, y_0) + \int_{A(x_0, y_0)}^{B(x, y)} p dx + q dy$ 得到物体表面高度值 $z(x, y)$ 。

3 实验结果及其分析

实验设备由哈量表面粗糙度比较样块、冷光源、

20~80 倍显微镜、永亨 XTZ 系列 CCD 显微摄像头、图像采集卡、时代 TR300 便携式粗糙度形状测量仪和计算机等组成。采集的车削 Ra1.6 μm , Ra3.2 μm , 端铣 Ra1.6 μm , Ra3.2 μm 工件图像如图 3 所示。采集图像大小均为 256 \times 256 像素。

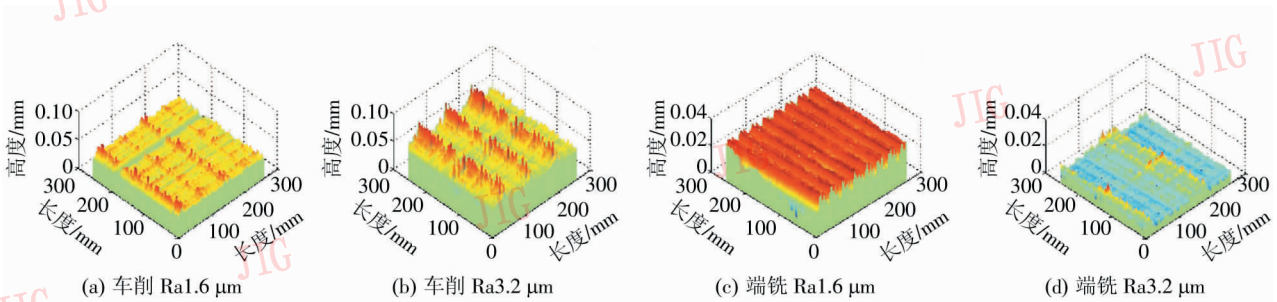
采用 Lambert 模型重建形貌如图 4 所示, 采用 Hapke 二向反射模型重建算法恢复形貌如图 5 所示, 重建大小均为 1.9125 \times 1.9125 mm。Lambert 模型中恢复出来的形貌, 高度误差过大, 且纹理中有散乱的尖峰, 不能清晰表示表面的纹理和起伏, 不符合实际加工表面具体形貌情况。而采用本文算法恢复的 3 维形貌整体起伏与原图像基本一致, 恢复出的表面细节信息非常丰富, 效果远好于 Lambert 模型重建结果。



(a) 车削 Ra1.6 μm (b) 车削 Ra3.2 μm (c) 端铣 Ra1.6 μm (d) 端铣 Ra3.2 μm

图 3 切削金属表面图像

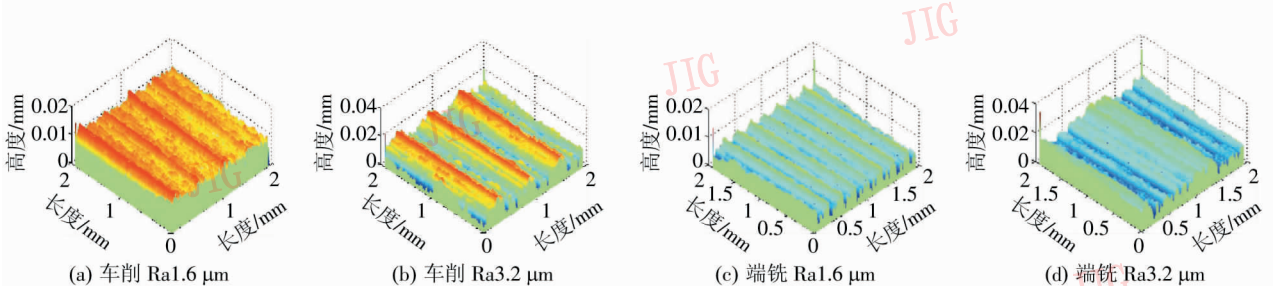
Fig. 3 Images of cutting surface



(a) 车削 Ra1.6 μm (b) 车削 Ra3.2 μm (c) 端铣 Ra1.6 μm (d) 端铣 Ra3.2 μm

图 4 Lambert 模型重建算法恢复形貌

Fig.4 Reconstructed topographic result based on Lambert model



(a) 车削 Ra1.6 μm (b) 车削 Ra3.2 μm (c) 端铣 Ra1.6 μm (d) 端铣 Ra3.2 μm

图 5 Hapke 二向反向模型重建算法恢复形貌

Fig.5 Reconstructed topographic result based on Hapke model

图 6、图 7 为使用 TR300 粗糙度形状测量仪得到的实测粗糙度轮廓与重建数据的对比图。

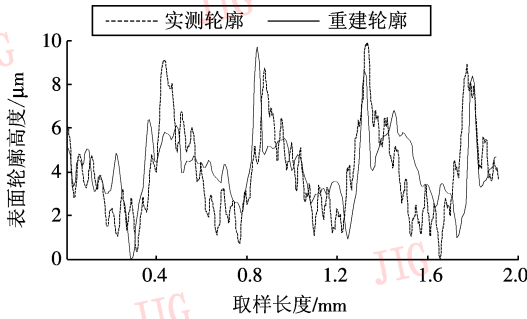


图 6 车削 Ra1.6 μm 量块实测与图像重建轮廓比较
Fig. 6 Comparison of measured and reconstructed profile of turning Ra1.6 μm

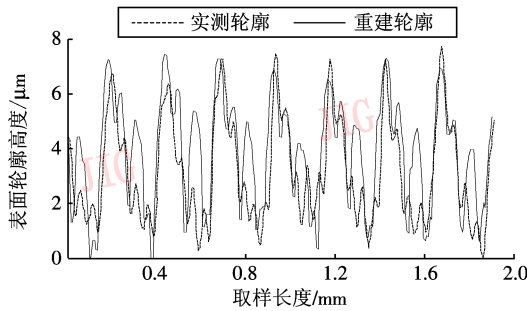


图 7 铣削 Ra1.6 μm 量块实测与图像重建轮廓比较
Fig. 7 Comparison of measured and reconstructed profile of face milling Ra1.6 μm

总体上两者曲线很相似,由于存在互反射、二次反射、噪声或者杂散的辐射等干扰,造成了细节上有

所不一致。最明显的是图 7 中间距比较大的峰与谷,重建得到的数据点在谷的位置有着较大的波动,因为在此处,反射性能极佳的金属表面斜面处接收到最多的二次反射,并且存在着面与面之间的互反射,这样就造成了如图 6 中部分重建曲线与实测曲线有较大的偏离。

从图 7 中可以发现每个主峰右下侧恢复出来的形貌有小的尖峰,与触针式测量获得的表面轮廓偏离较大,究其原因采用接触式探针获取表面轮廓数据的时候,本文所采用的轮廓仪圆锥形的金刚石探针针尖半径为 1~2.5 μm,针尖无法读出比它细而窄的深度轮廓信息,然而重建所获得的 3 维形貌是根据表面图像的灰度值对表面的深度信息进行恢复的,因此可以将这些细而窄的峡谷恢复出来。这是本文提出的利用灰度信息进行深度恢复的优势所在。

采用重建算法,对重建表面进行取样,经过高斯滤波得到的粗糙度轮廓表面上提取的轮廓算术平均差 Ra、轮廓最大高度 Rz、轮廓的均方根偏差 Rq,并且与仪器实测粗糙度数值进行比较,如表 1,表 2 所示。总体而言,车削图像得到的轮廓算术平均差 Ra 参数偏差大于铣削图像所得结果,但相对误差都在 20%之内;车削和铣削的轮廓最大高度 Rz 偏差都比较小,基本在 10%之内;轮廓的均方根偏差 Rq 这一项,铣削的结果要好于车削。总体而言,本文算法具有较高精度。

表 1 车削粗糙度参数对比

Tab. 1 Comparison of roughness parameters by turning

项 目	车削 0.8 μm 量块			车削 1.6 μm 量块			车削 3.2 μm 量块			车削 6.3 μm 量块		
	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq
实测值	1.013	5.453	1.207	1.719	8.842	2.100	3.322	16.325	9.417	7.447	29.921	8.760
重建值	1.170	5.304	1.386	1.223	9.670	1.597	3.284	17.567	8.991	6.305	29.649	7.502
相对误差/%	15.4	2.7	14.8	28.9	9.36	23.9	1.14	7.6	4.5	14.9	0.9	14.3

表 2 端铣粗糙度参数对比

Tab. 2 Comparison of roughness parameters by face milling

项 目	端铣 0.8 μm 量块			端铣 1.6 μm 量块			端铣 3.2 μm 量块			端铣 6.3 μm 量块		
	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq
实测值	1.046	6.126	1.312	1.714	8.250	1.991	3.272	14.303	3.949	5.642	20.101	6.737
重建值	0.982	7.780	1.422	1.650	7.432	1.983	3.293	15.992	4.194	5.961	20.473	7.374
相对误差/%	6.1	27.0	8.3	3.7	9.9	0.4	0.6	11.8	6.2	5.7	1.9	9.5

4 结 论

对于粗糙切削金属表面采用了 Hapke 二向反射模型来进行基于灰度图像的 3 维形貌重建工作。在较平坦和没有阴影的区域,恢复的效果较好,在有较大起伏和有阴影的区域,恢复的效果不是很理想。这是由于随着表面粗糙程度的加大引起的表面散射、互反射现象的加剧,反射模型与实际粗糙金属表面的反射特性不完全一致,造成了重建精度的降低。此外,光源估计的误差、求解过程中引入的误差,以及没有考虑到遮蔽效应,在阴影区域用光照能力进行恢复计算等引入的误差也是应该注意的方面。总体而言,本文方法可以有效地恢复切削金属表面 3 维形状。对于更加复杂的表面状况,应该对二向反射模型加以修正,以适合具体情况的应用。该方法对于解决加工表面的 3 维形貌和粗糙度监测提供了新的途径。

参考文献 (References)

- [1] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces [J]. Journal of the Optical Society of America, 1967, 57(9): 1105-1114.
- [2] Oren M, Nayar S K. Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision [J]. International Journal of Computer Vision, 1995, 14(3): 227-251.
- [3] Beckmann P, Spizzichino A. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces [M]. London: Pergamon Press, 1963: 22-32.
- [4] Ragheb H, Hancock E R. The modified Beckmann-Kirchhoff scattering theory for rough surface analysis [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(7): 2004-2020.
- [5] Tamara A L, Alexei A M, Andrei V S. Enhanced backscattering of light from a randomly rough interface between a dipole-active medium and a dielectric [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3141: 139-151.
- [6] Luna R E. Scattering by one-dimensional random rough metallic surfaces in a conical configuration [J]. Optics Letters, 1995, 20(7): 657-659.
- [7] O' Donnell K A, Mendez E R. Experimental study of scattering from characterized random surfaces [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(7): 1194-1205.
- [8] Bruce N C, Dainty J C. Multiple scattering from random rough surfaces using the kirchhoff approximation [J]. Journal of Modern Optics, 1991, 38(3): 579-590.
- [9] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 6. effects of porosity [J]. Icarus, 2008, 195(2): 918-926.
- [10] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 5. the coherent backscatter opposition effect and anisotropic scattering [J]. Icarus, 2002, 157(2): 523-534.
- [11] Hapke B, Michael K S. A quantitative test of the ability of models based on the equation of radiative transfer to predict the bidirectional reflectance of a well-characterized medium [J]. Icarus, 2009, 199(1): 210-218.
- [12] Chappell A, Zobeck T M, Brunner G. Using bi-directional soil spectral reflectance to model soil surface changes induced by rainfall and wind-tunnel abrasion [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(3/4): 328-343.
- [13] Chappell A., Strong C, McTainsh G, et al. Detecting induced in situ erodibility of a dust-producing playa in Australia using a bi-directional soil spectral reflectance model [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(4): 508-524.
- [14] Cheng Xianliang. Observation and simulation of bi-directional spectral reflectance on different type of soils [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(5): 1007-1011. [程衍亮. 不同类型土壤的二向反射光谱特性及模拟 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(5): 1007-1011.]