

基于三维重建理论的目标光谱散射特性研究

杨玉峰 吴振森 曹运华

(西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 根据三维重建理论, 基于目标的多角度视图, 重建了目标表面的三维点云。利用德洛奈三角剖分法结合可见性原理, 得到了目标的曲面和曲面面元的法线方向。根据粗糙面散射理论和目标表面的双向反射分布函数(BRDF), 结合大气传输软件 Modtran 计算的某时间、地点的背景光谱辐射亮度, 数值分析了目标光谱散射亮度分布特性。以覆盖车衣的汽车为例, 重建的三维几何模型误差为 4.11%, 数值计算了目标在三个波段的光谱散射亮度分布。上述方法可以进一步用于卫星和其他空间目标的光谱辐射、散射特性研究。

关键词 散射; 双向反射分布函数; 三维重建; 三维模型; 德洛奈三角剖分

中图分类号 O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0929001

Research on the Spectral Scattering of Target Based on Three-Dimensional Reconstruction Theory

Yang Yufeng Wu Zhensen Cao Yunhua

(School of Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract According to three-dimensional (3D) reconstruction theory, based on multi-angle images of the target, 3D points cloud of the target surface is reconstructed. With the method of Delaunay triangulation and the principle of "visibility", the target surface and the normal vector of surface elements are gained. By the rough surface scattering theory and the target sample bidirectional reflectance distribution function (BRDF), associated with the spectral radiance of the background at some time and place calculated by Modtran, the spectral scattering radiance distribution of the target is obtained by numerical analysis method. Taking a car covered with car sewing as an example, the error of the reconstructed geometric 3D model is 4.11%, and the spectral scattering radiance distributions of the target in three bands are obtained by numerical calculation. The method above can be applied to the research on spectral radiation and scattering of satellites and other spatial targets.

Key words scattering; bidirectional reflectance distribution function; three-dimensional reconstruction; three-dimensional model; Delaunay triangulation

OCIS codes 290.1483; 240.3695; 290.5825

1 引言

高科技武器的日新月异和战场目标的复杂化使得目标探测和识别在现代化战争中越来越受重视。目标散射特性研究是目标探测和识别的前提和基础, 这涉及到目标的三维(3D)几何建模。传统的 3D 模型采用 3D MAX、Maya 等 3D 造型软件制作, 但对于不规则表面目标, 例如卫星主体的隔热包覆表面、伪装网覆盖、褶皱帐篷、高低起伏的地面以及随机波动的海面等, 由于其形状起伏随机、面积较

大、不可接触或快速随机变化等特点, 常规方法很难对其进行 3D 几何建模, 所以需要借助 3D 重建技术对其进行建模。

3D 重建技术是一种非接触式的测量技术, 总体上分为两类: 1) 利用精密仪器, 如激光扫描仪、结构光、深度扫描仪等, 直接获取物体表面点的 3D 坐标, 但是这类方法需要较为复杂的硬件设备, 所以极大地限制了使用场合; 2) 从单幅或多幅图像来恢复物体的 3D 信息, 这一类重建方法因为不用直接接

收稿日期: 2012-03-23; **收到修改稿日期**: 2012-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(60771038, 60971065)资助课题。

作者简介: 杨玉峰(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事目标光散射特性和图像处理等方面的研究。

E-mail: yyf317936@126.com

导师简介: 吴振森(1946—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事目标与环境的光电特性与计算机仿真等方面的研究。

E-mail: wuzhs@mail.xidian.edu.cn(通信联系人)

触目标并且成本较低,所以应用很广泛。在军事上,通过相机拍摄来重建战场景观,可以更逼真地模拟战争场面;在医学上,重建人体内脏器官可以帮助医生更好地了解患者病情;在考古方面,由于文物的脆弱性,采用非接触的方式重建其模型,能更好地保护和修复文物。除此之外,2001年,Rajabi等^[1]把该方法应用到遥感领域对高分辨率卫星图像进行了重建。2001年,杨晓波^[2]将3D重建技术用于织物表面的重建,以客观评估织物的表面形态。2007年,Wu等^[3]重建了人的头型,识别率超过90%。2008年,Kong^[4]把3D重建技术应用到焊接领域,3D重建了焊接结合处并改善了焊接技术。2009年,Wei等^[5]利用X射线图像重建了股骨头的3D模型。2010年,Yang等^[6]提出了一种基于运动图像的3D重建方法。2010年,Beall等^[7]对海底地形结构进行了3D重建,为海洋科学家的水下探测提供了依据。2011年,王传宇等^[8]对农田景观进行了3D重建,方便快速地分析了作物的生长状态以及农田的环境变化。

在得到目标的3D模型后就可以对空间或地面目标的光谱散射特性进行研究^[9~15]。在这方面,国内外学者进行了大量的研究。2001年,Steinvall等^[12]利用双向反射分布函数(BRDF)对目标表面的光学特性进行了描述,建立了一个计算机模型来模拟3D激光雷达。2003年,吴振森等^[13]研究了空间目标的可见光散射和红外辐射。2005年,Forsell^[14]利用蒙特-卡罗方法和射线跟踪方法仿真了3D物体的红外散射图像。2011年,杨玉峰等^[15]计算了空间目标对复杂背景红外辐射的散射亮度空间分布。

本文将3D重建理论引入到目标环境散射特性研究中,基于目标的多角度视图对不规则外形的粗糙面目标进行了3D几何建模。利用德洛奈三角剖分法结合可见性原理,得到了目标的曲面和曲面面元的法线方向。根据粗糙面散射理论,结合大气传输软件Modtran计算的背景光谱辐射亮度,数值分析了目标光谱散射亮度分布特性。针对覆盖车衣的汽车,分析了目标的光谱辐射亮度分布以及最佳探测波段和角度。

2 3D重建原理及流程

视觉过程的原理是根据在两幅相应数字图像上互相匹配的像素点和标定好的摄像机参数,计算空间点在世界坐标系下的坐标。通常所采用的摄像机模型为针孔模型,空间点和图像点的齐次线性变换

表示为

$$sm = \mathbf{K}(\mathbf{R}, \mathbf{t})\mathbf{M} = \mathbf{P}\mathbf{M}. \quad (1)$$

式中 s 为任意尺度因子,表示在相差一个非零常数因子的意义下相等。设空间坐标系中一点 M 经坐标变换和摄像机投影成为摄像机主平面上的一点 m ,即图像点 (u, v) ,该过程的逆过程就是通过二维图像上的点来反求出这些点在世界坐标系中的3D坐标,称为重建过程。3D重建的关键是确定摄像机内部参数矩阵 \mathbf{K} 和旋转矩阵 \mathbf{R} 以及平移矢量 \mathbf{t} ,其中 \mathbf{K} 是一个 3×3 矩阵,它反映了摄像机的内部特性; \mathbf{R} 为 3×3 的正交矩阵,表达坐标系之间的旋转关系; \mathbf{t} 为 3×1 平移向量,代表坐标系之间在三个坐标分量上的平移。 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 被统称为摄像机的外部参数。 \mathbf{P} 是摄像机矩阵,它包含着摄像机内部和外部参数信息。三维重建流程如图1所示。

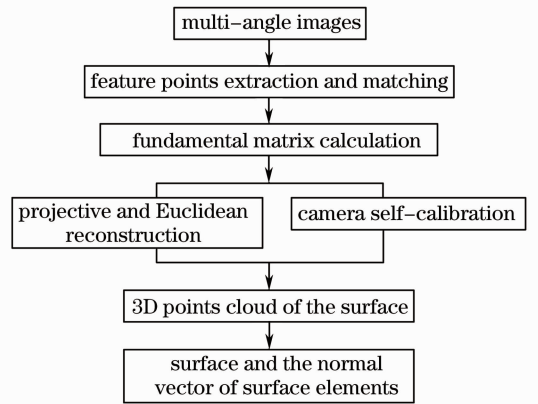


图1 3D重建流程图

Fig. 1 Flowchart of 3D reconstruction

2.1 特征点提取和匹配

特征点是图像中与周围邻近点有着明显差异的亮度变化剧烈的点或图像边缘曲线上曲率的极大值点,特征点提取算法包括 Moravec 算法、Harris 算法、角点检测方法和尺度不变特征变换(SIFT)算法等^[16],其中 SIFT 特征点提取算法是国内外匹配研究领域的研究热点,这是因为 SIFT 特征向量具有对旋转、缩放、光照等保持不变的特性,其在计算机视觉领域应用广泛。

在图像的 SIFT 特征点被检测出来后,需要对图像特征点进行匹配。设欧氏距离 $d_{i,j}$,即第 i 个点与第 j 个点的距离为

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{l=1}^{128} (x_{i,l} - x_{j,l})^2}, \quad (2)$$

用该距离表示两幅图像中关键点的相似性判定度量,例如一幅图像中第 i 个特征点与另一幅图像中

第 j 个特征点的距离为 $d_{i,j}$, 假设 $d_{i,a} < d_{i,b} < d_{i,c} < \dots$, 如果 $d_{i,a} < td_{i,b}$, 那么就将第 i 个点和第 a 个点作为匹配点, 从而实现两幅图的特征点匹配, 其中 t 为阈值, 通常取 $t = 0.6$ 。为了保证匹配的准确性, 用极限约束条件剔除其中的误匹配点。

2.2 计算多视图的射影矩阵

根据 8 点算法^[17] 估计出两视图的基本矩阵 F , 利用基本矩阵所有的摄像机矩阵可表示为关于参数 v 和 v_4 的形式, 所以只要确定了 v 和 v_4 就可以得到摄像机矩阵。对于两个以上视图的射影重建, 可利用多视图算法。假设

$$\lambda_i^j m_i^j = \Pi_i M^j, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中矩阵 $\Pi_i = K_i \Pi_0 g_i$ 是一个 3×4 的摄像机矩阵, 它表示第 i 幅图第 j 个点与 3D 坐标 M^j 的关系。内部参数 K_i 是上三角矩阵, $\Pi_0 = [I, 0] \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$ 是一个标准的摄像机矩阵, g_i 属于 3D 特殊欧几里德空间, 是相关于世界坐标系的刚体移位。多视图算法表示为^[18]

$$P_i \begin{bmatrix} R_i \\ T_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_1^i)^T \otimes \hat{x}_i^1 & \alpha^1 \hat{x}_i^1 \\ (x_1^i)^T \otimes \hat{x}_i^2 & \alpha^2 \hat{x}_i^2 \\ \vdots & \vdots \\ (x_1^i)^T \otimes \hat{x}_i^n & \alpha^n \hat{x}_i^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_i \\ T_i \end{bmatrix} = 0, \quad \in \mathbb{R}^{3n} \quad (4)$$

式中 \otimes 表示 Kronecker 叉乘。利用该算法可以得到相机移动 $[R_i, T_i]$, $i = 2, 3, \dots, m$ 和点的深度 (以第一个相机为标准) $\lambda_i^j = 1/\alpha^j$, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

重建过程是从一对基准图像对开始的, 用一对基准图像对对射影重建进行初始化。通常选取一对距离较远的图像对作为基准图像对, 当完成基准图像对初始化射影结构之后, 再按照图像的拍摄顺序添加后续图像, 并求解它们的摄像机矩阵, 最终完成所有图像的射影重建。

2.3 自标定和欧氏重建

重建曲面经过射影重建后还是扭曲的, 从这些离散点还无法辨认重建曲面的形状, 因此要进行欧氏变换。在欧氏变换之前要进行摄像机自标定, 自标定的目的是通过多幅未标定图像来获取各幅图像的摄像机参数^[18]。

通过两两图像上点的匹配得到图像间的基本矩阵, 利用摄像机自标定关于 ω 的约束方程:

$$\omega_1^* = H_{i\infty} \omega_i^* H_{i\infty}^T \text{ or } \omega_1 = (H_{i\infty})^{-T} \omega_i (H_{i\infty})^{-1}, \quad (5)$$

便可以确定 ω 或 ω^* , 再对它们进行 Cholesky 分解就可以得到内部参数 K 。以第一个摄像机坐标系为标准, 在欧氏空间下 $\Pi_{1e} = K_1 [I | 0]$ 。在射影重建下的第一个摄像机矩阵为 $\Pi_1 = [I | 0]$, 且存在 $\Pi_{1e} = \Pi_1 H$ 。因此, 可得单位尺度 H 的形式为

$$H = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ v^T & I \end{bmatrix}. \quad (6)$$

因此, 只要知道第一个摄像机的内部参数矩阵 K_1 , 便可以确定变换矩阵 H , 也就将一个射影重建变换到了欧氏重建, 从而得到每一个曲面点的 3D 坐标 M_e :

$$\Pi_{ip} \sim \Pi_{ie} H^{-1}, M_p \sim H M_e, i = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

3 重建结果与误差分析

以长 4.544 m、宽 1.760 m、高 1.461 m 的汽车为例, 该汽车上覆盖了灰色车衣, 对该车进行了多角度拍摄, 如图 2 所示。拍摄按照从车尾到车头的顺序, 拍摄过程中有诸如电线或阳台的遮挡, 最后选择了其中无遮挡的六幅图像作为 3D 重建的图像序列, 对其图像背景进行了处理, 如图 3 所示。



图 2 汽车车衣的图像序列

Fig. 2 Images of car covered with car sewing



图 3 3D 重建所用的图像序列

Fig. 3 Images used for 3D reconstruction

利用图像序列对汽车进行 3D 重建,得到汽车点云效果图,如图 4(b)所示,利用德洛奈三角剖分法得

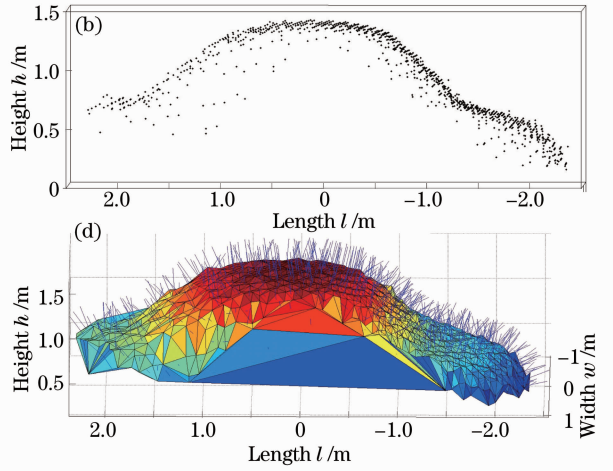
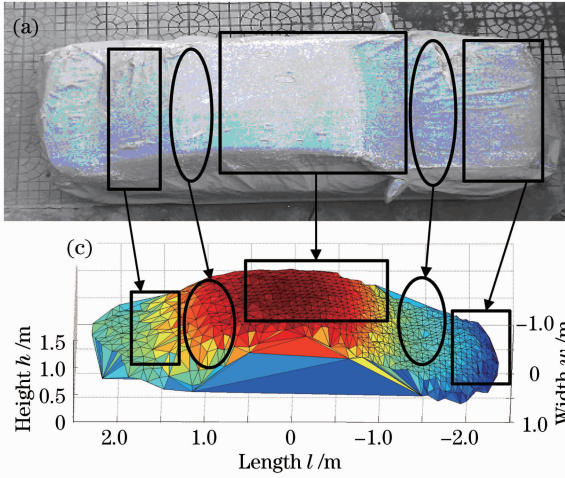


图 4 重建得到的汽车模型。(a)汽车图;(b) 3D 点云;(c) 3D 曲面;(d)法线方向

Fig. 4 Car model reconstructed. (a) Image of the car; (b) 3D points cloud; (c) 3D surface; (d) normal direction of the surface

此时 3D 模型面元法线方向是不确定的。众所周知,面元有两个取向正好相反的法线方向。在目标的散射特性计算中,只有确定了面元的法向矢量,才能确定入射天顶角、散射天顶角、入射方位角、散射方位角以及 BRDF 模型。如果法线方向取反了就意味着散射亮度为负值,所以需要确定面元的法线方向。由于 3D 重建是基于图像序列来进行的,而图像序列又针对目标的不同角度,所以只要摄像机在某一角度能拍摄到目标,那么该角度下目标成像部分就是“可见”的,换句话说就是目标成像部分的曲面面元法线方向与面元中心朝向相机光心方向的夹角小于 90° ,根据这个“可见性”原理就可以确定整个目标曲面三角面元的法线方向,如图 4(d)所示。

4 目标对复杂背景辐射的散射亮度

BRDF^[19,20]表示为

$$f_r(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) = \frac{dL_r(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, E_i)}{dE_i(\lambda, \theta_i, \varphi_i)} \quad (8)$$

到了剖分后的曲面,如图 4(c)所示。重建效果图非常直观,从中可以非常清楚地区分汽车的各个部位。为了定量分析重建效果,分别对射影重建误差和欧氏重建误差进行了计算,其中射影重建误差为 3.12%。欧氏重建后汽车的重建结果为长 (4.54 ± 0.01) m、宽 (1.77 ± 0.01) m、高 (1.20 ± 0.01) m,比例系数 $k = 10.24$ 。经测量汽车头部车衣底边到地面的距离为 0.2 m,加上车衣的高度得到总高度为 (1.40 ± 0.01) m,重建高度的绝对误差为 0.06 m,相对误差为 4.11%,误差在工程计算允许范围之内。

它表示沿 (θ_s, φ_s) 方向的散射亮度 dL_r 与沿 (θ_i, φ_i) 方向入射到表面的辐照度 dE_i 之比,由材料的粗糙度、介电常数和波长等因素决定。假设面元受波长为 λ 、立体角为 $d\omega_i$ 的天地背景辐射,各方向上的散射亮度为

$$L_r(\lambda) = f_r(\lambda, \theta_i, \theta_s, \varphi) L(\lambda) d\omega_i \cos \theta_i \quad (9)$$

式中 $L(\lambda)$ 表示波长为 λ 时入射到面元上的背景辐射亮度, $f_r(\lambda, \theta_i, \theta_s, \varphi)$ 表示波长为 λ 时面元的 BRDF, θ_i, θ_s 和 φ 为入射天顶角、散射天顶角和相对方位角, $d\omega_i \cos \theta_i$ 为投影立体角。面元受天地背景辐射的散射亮度为

$$L_r(\lambda) = \int_{\Omega_{sky}} f_r(\lambda) L_{sky}(\lambda) \cos \theta_i d\omega_i + \int_{\Omega_{land}} f_r(\lambda) L_{land}(\lambda) \cos \theta_i d\omega_i \quad (10)$$

式中 $L_{land}(\lambda)$ 和 $L_{sky}(\lambda)$ 为波长 λ 时天背景和地背景辐射亮度, Ω_{sky} 和 Ω_{land} 表示天背景和地背景的积分域。

把目标坐标系中的散射方向转换到各个面元本地坐标系,并判断面元是否可见,然后对可见面元的散射强度叠加求和,再除以目标在散射方向上的投

影面积,就得到了目标在散射方向上的光谱散射亮度。最后,在任一谱段用波长进行积分,就得到了目标的积分散射亮度:

$$L_r = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\sum_{k=1}^n \left(\int_{\Omega_{sky}} f_r L_{sky} \cos \theta_i d\omega_i + \int_{\Omega_{land}} f_r L_{land} \cos \theta_i d\omega_i \right) \cdot (S_k \cos \theta_s)}{\sum_{k=1}^n (S_k \cos \theta_s)} d\lambda. \quad (11)$$

对于太阳辐射来说,阳光照射方向是单一的,利用 Modtran 软件可以直接获得太阳辐射的光谱照度。利用(9)式可得到目标对太阳辐射的散射亮度:

$$L_r = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\sum_{k=1}^n (f_r E_{sun} \cos \theta_i) (S_k \cos \theta_s)}{\sum_{k=1}^n (S_k \cos \theta_s)} d\lambda, \quad (12)$$

式中 E_{sun} 为太阳的辐照度, $S_k \cos \theta_s$ 为第 k 个面元在散射方向上投影的面积, $\sum_{k=1}^n (S_k \cos \theta_s)$ 表示目标在散射方向上的投影面积。

位角 $\varphi = 0^\circ$)。太阳天顶角(阳光与 y 轴正向夹角)为 3.3° ,方位角(阳光与 x 轴正向夹角)为 124.7° 。

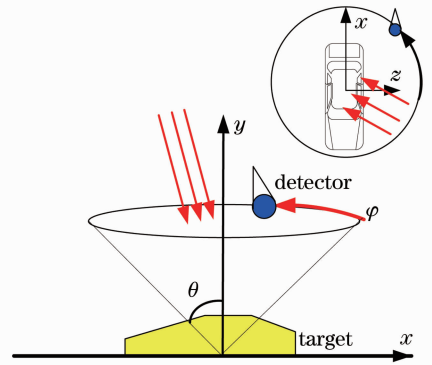


图5 目标姿态示意图

Fig. 5 Diagram of target attitude

5 目标散射特性仿真计算

利用 Modtran 软件计算了美国标准大气下可见光波段 $0.4 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 及两个大气窗口 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段太阳的辐射照度和天地背景的辐射亮度。对计算条件进行设定,时间:2009年7月1日,当地时间 12:00;位置:北纬 25° 、东经 118° ;目标高度:0 km(地面);太阳天顶角为 3.3° ,方位角为 124.7° 。利用背景光谱辐射亮度对目标的光谱散射亮度分布进行仿真计算。

汽车停放姿态如图5所示,对天顶角(探测器接收方向与 y 轴正向夹角)为 θ 时,绕 y 轴正向旋转一周各方向上的散射亮度进行仿真计算(z 轴正向方

图6和图7给出了在 $0.4 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 、 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段,天顶角 θ 分别为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 时汽车车衣对太阳和天背景辐射的散射亮度分布。由图可知,当天顶角 $\theta = 0^\circ$ 时,探测方向位于目标的正上方,此时目标对太阳辐射和天背景辐射的散射亮度值为常数。随着天顶角的增大,除了 90° 附近外其他方向的散射亮度值都在减小。当天顶角增大到 50° 时,曲线出现两个明显的峰值,它们分别在方位角 90° 和 270° 附近,对应于轿车的后部和前部。两个峰值大小不同是由汽车后窗和前窗倾

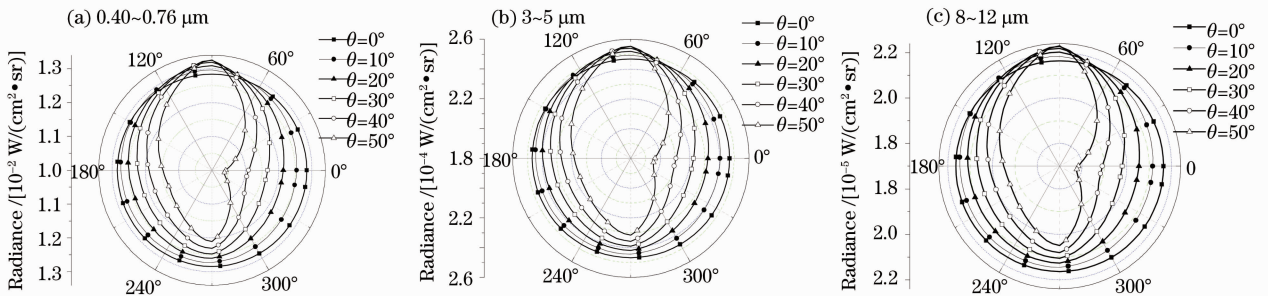


图6 不同天顶角时朗伯面目标对太阳辐射的散射亮度分布

Fig. 6 Distribution of scattering radiance from the sun for the Lambertian surface target from different zenith angles

角不同造成的。方位角 0° 附近(汽车左侧)的亮度值略小于 180° 附近的亮度值,这是因为摄像机在拍照过程中始终位于汽车的右侧,因此重建得到的汽

车曲面 3D 点云右侧比左侧密,重建曲面面积更大(如图 4 所示),散射亮度值也就更大。

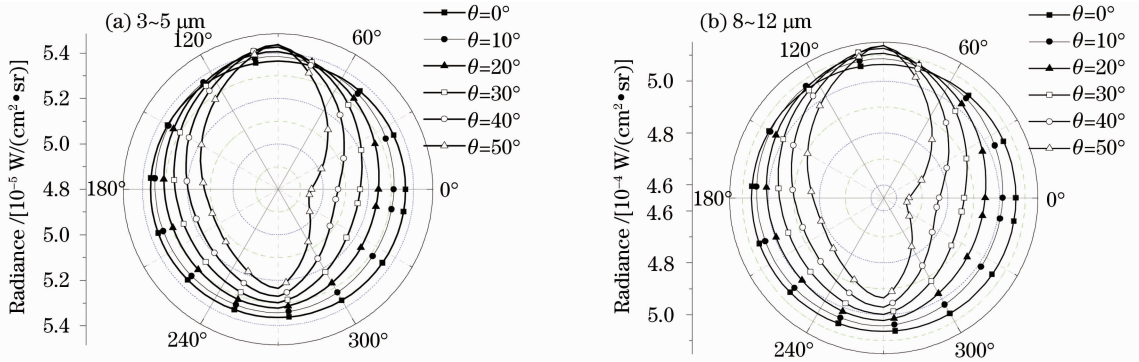


图 7 不同天顶角时朗伯面目标对天背景辐射的散射亮度分布

Fig. 7 Distribution of scattering radiance from the sky for the Lambertian surface target from different zenith angles

比较图 6(a)~(c)可知,目标对太阳辐射的散射亮度在可见光波段最大。以 50° 天顶角为例,在三个波段的亮度最大值分别为 0.01326 、 2.55404×10^{-5} 、 2.22895×10^{-5} W/(cm²·sr)。在两个大气窗口波段,目标的散射亮度来自太阳辐射和天背景辐射。比较图 7(a)和(b)可知,在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段目标对天背景辐射的散射亮度最小值为 4.9×10^{-5} W/(cm²·sr),在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段散射亮度最小值为 4.6×10^{-4} W/(cm²·sr)。比较图 6(b)和(c)可知,目标对太阳辐射的散射亮度在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 最小值为 1.9×10^{-4} W/(cm²·sr),在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 最小值为 1.7×10^{-5} W/(cm²·sr)。这说明在两个大气窗口波段, $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段天背景辐射对目标的散射亮度起到了主要作用。

综上所述,目标对太阳辐射的散射亮度值在可见光波段最大,且远大于另两个波段的值。在两个大气窗口波段, $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段目标对天背景辐射的散射亮度值是最大的,说明 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段天背景辐射对目标的散射亮度起到了主要作用。另外,天顶角的变化对目标的散射亮度分布也起着重要作用,随着天顶角的增大目标散射亮度曲线的方向性逐渐变强,对目标探测不利。因此,目标探测应尽量保持在小天顶角位置。

6 结 论

对于常规方法很难进行 3D 几何建模的粗糙面目标,借助于 3D 重建理论重建了它的 3D 几何模型。利用德洛奈三角剖分法结合可见性原理,得到了目标的曲面和曲面面元的法线方向。以覆盖车衣

的汽车为例,重建了其 3D 几何模型,重建高度的绝对误差为 0.06 m,相对误差为 4.11%。根据粗糙面散射理论,结合大气传输 Modtran 软件计算的背景光谱辐射亮度,数值分析了该目标在可见光波段 $0.4 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 以及两个大气窗口 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段的光谱散射亮度分布特性。结果说明对于该目标来说,在可见光波段最适于探测。在大气窗口波段, $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段天背景辐射对目标的散射亮度起到了主要作用。天顶角的大小也影响着目标探测,在小天顶角时目标散射亮度方向性不强,适于探测。下一步的工作是对空间目标的光谱散射特性进行研究,由于空间目标的表面结构复杂,常规方法很难对其建模,目前的方法大都是简化表面结构,但这样严重影响了目标散射特性的计算。借助于 3D 重建方法减少计算中的误差,可以大大提高识别和探测目标的能力。

参 考 文 献

- 1 M. A. Rajabi, J. A. R. Blais. Densification of digital terrain elevations using shape from shading with single satellite imagery [C]. International Conference on Computational Science-Part II, 2001, 3~12
- 2 Yang Xiaobo. A new research of fabric appearance using shape from shading[J]. *J. Northwest Institute of Textile Science and Technology*, 2001, 15(4): 33~38
杨晓波. 基于阴影恢复形状的织物表面形态研究[J]. *西北纺织工学院学报*, 2001, 15(4): 33~38
- 3 Q. Wu, J. Ben-Arie. View invariant head recognition by hybrid PCA based reconstruction [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2007, 4778: 46~57
- 4 F.-H. Kong. Reconstruction of solder joint surface based on hybrid shape from shading[C]. Fourth International Conference on Natural Computation, 2008: 593~595
- 5 W. Wei, W. Guorong, C. Hua. 3D reconstruction of a femur shaft using a model and two 2D X-ray images [C]. 4th

- International Conference on Computer Science & Education, 2009, 720~722
- 6 G. Yang, L. Yan, H. Zhang *et al.*. 3D object reconstruction based on motion vision[C]. First International Conference on Pervasive Computing: Signal Processing and Applications, 2010, 263~268
- 7 C. Beall, B. J. Lawrence, V. Ila *et al.*. 3D reconstruction of underwater structures[C]. The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010, 4418~4423
- 8 Wang Chuanyu, Zhao Chunjiang, Guo Xinyu *et al.*. 3D reconstruction of virtual agricultural field scene based on digital camera [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, **27**(33): 266~272
王传宇, 赵春江, 郭新宇等. 基于数码相机的农田景物三维重建[J]. *中国农学通报*, 2011, **27**(33): 266~272
- 9 Bai Lu, Tang Shuangqing, Wu Zhensen. Transmission characteristic of external mixture of aerosol from ultraviolet to visible light band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2175~2179
白璐, 汤双庆, 吴振森. 紫外到可见波段外混合气溶胶的传输特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2175~2179
- 10 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu *et al.*. Wavelength dependence of the spectral irradiance of standard lamp and bi-reflection distribution function of diffuser based on standard detectors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0612008
杨小虎, 王淑荣, 黄煜等. 基于标准探测器研究标准灯光谱辐照度和漫反射板双向反射分布函数随波长的变化[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0612008
- 11 Gong Lei, Wu Zhensen. Analysis of light scattering about slightly non-spherical nanoparticles on wafers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0110001
巩蕾, 吴振森. 基片表面微球体纳米级缺陷的光散射分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0110001
- 12 O. Steinvall, T. Carlsson. Three-dimensional laser radar modeling[C]. *SPIE*, 2001, **4377**: 23~34
- 13 Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1250~1254
吴振森, 窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1250~1254
- 14 G. Forssell. Model calculations of polarization scattering from 3-dimensional objects with rough surfaces in the IR wavelength region[C]. *SPIE*, 2005, **5888**: 588818
- 15 Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Scattering characteristics of complex background infrared radiation from a non-Lambertian target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(5): 800~804
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 非朗伯面目标对复杂背景红外辐射的散射特性[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(5): 800~804
- 16 D. G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International J. Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91~110
- 17 R. I. Hartley. In defense of the eight-point algorithm [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, **19**(6): 580~593
- 18 Y. Ma, S. Soatto, J. Kosecka *et al.*. An Invitation to 3-D Vision from Images to Geometric Models[M]. Berlin: Springer, 2004
- 19 Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Optical constants deduction and scattering BRDF computation of alloy aluminum surface in near infrared waveband[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0229001
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 合金铝表面近红外波段光学常数的反演与BRDF的计算[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0229001
- 20 Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. A practical six-parameter bidirectional reflectance distribution function model for rough surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0229001
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 一个实用的粗糙面六参数双向反射分布函数模型[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0229001

栏目编辑: 李文喆