

地面激光雷达扫描垂直立面的强度数据模拟

汪沛

(北京林业大学电子信息科学与技术系, 北京 100083)

摘要 地面激光雷达获取的激光强度数据包含目标的物理和化学信息,因此研究激光强度数据的生成机制就成为对其分析和应用的关键。分析了地面激光雷达的工作特点,提出假设简化了激光强度数据的计算方程,得出影响激光强度数据的3个主要参量:目标反射率、入射角度和扫描距离。以垂直立面为目标分析地面激光雷达扫描的空间点阵间距的非均匀分布特性,并提出衡量扫描点间距非均匀分布程度的计算方程,分析扫描角度的步进值对扫描点间距非均匀分布的影响。根据实际参数模拟垂直立面的激光强度数据,验证了强度数据计算方程并分析了各参量的影响。

关键词 遥感;地面激光雷达;激光强度;模拟

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.080102

Intensity Simulation of Vertical Surface by Terrestrial Laser Scanning

Wang Pei

(Department of Electronic Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract Intensity data acquired by terrestrial laser scanner contains physical and chemical information of objects. The mechanism by which the intensity data are produced is the key point to the analysis and application of intensity data. The working characteristics of terrestrial laser scanners are analyzed, hypotheses are proposed, and the calculating formulation of intensity data is simplified. The conclusion is drawn that reflectivity, incidence angle and range are the three main variables affecting the intensity data mostly. Based on a vertical surface, the distances between adjoined scanning points and influence of angular step width are analyzed and a formulation is proposed to measure a nonuniform distribution of scanning point. By simulating the intensity data of the vertical surfaces, the proposed formulation about intensity data is verified and the influence of the three variables is analyzed.

Key words remote sensing; terrestrial laser scanner; laser intensity; simulation

OCIS codes 010.3640; 280.3640; 070.4560

1 引言

近年来,地面激光雷达技术发展迅速,在许多研究领域得到应用,如地质学与地质分析^[1,2]、城市规划^[3]、林业与植被分析^[4,5]等。国内研究者也对三维激光的噪声^[6]和姿态角度误差对机载三维扫描成像的影响^[7]进行了分析。地面激光雷达具有获取数据速度快、数据精度高和数据量大等特点。地面激光雷达获取的信息中包含精确细致的目标结构信息,常被用来分析目标的结构特点及变化^[1,2],或者重建目标结构进行规划设计^[3]。地面激光雷达数据也可以和目标的其他光谱数据源一起融合进行模式识别等分析^[5]。

地面激光雷达在获取目标结构信息的同时,还提供激光波束从目标反射回来的激光回波强度数据。由于不同品牌的地面激光雷达设备的工作原理和技术特点都有所区别,加上激光强度数据受目标特性和环境因素影响较大,导致激光强度数据生成机制复杂,相关应用也难于开展。但是近年来,激光强度数据被发现

收稿日期: 2012-02-17; **收到修改稿日期**: 2012-04-23; **网络出版日期**: 2012-05-22

基金项目: 北京林业大学青年科技启动基金(BLX2009009)和优秀青年教师科技支撑专项计划(YX2010-14)资助课题。

作者简介: 汪沛(1981—),男,博士,讲师,主要从事雷达数据及图像处理、嵌入式系统开发等方面的研究。

E-mail: wangpei.cas@gmail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

蕴藏着与目标相关的物理和化学信息,其分析及应用也成为研究的热点。然而由于强度数据自身的复杂性,其分析和应用仍存在许多难点。

本文对采用时间脉冲法测距的地面激光雷达的强度数据进行分析,通过假设条件简化了强度数据的计算方程。假设目标为垂直立面,分析地面激光雷达扫描的空间几何关系和垂直向与水平向扫描角度的步进值的影响。通过模拟实验获得的垂直立面强度数据验证了所简化计算方程中各参量的影响,为激光强度数据的进一步分析和应用奠定基础。

2 地面激光雷达原理

2.1 工作原理简介

地面激光雷达实现距离测量的方法分为两种:时间脉冲法和相位比较法。由于本文是基于采用时间脉冲测距法的地面激光雷达设备进行强度数据模拟和选用测量参数,因此仅在此简要介绍采用时间脉冲测距的地面激光雷达的工作原理(下文中的地面激光雷达均为时间脉冲测距型)。

地面激光雷达在扫描过程中发射激光波束,并接收从目标点反射的回波信号。通过测量发射信号和回波信号的时间差,地面激光雷达可以计算出从激光发生器到目标单个反射点的距离:

$$R = ct/2, \quad (1)$$

式中 c 为光速, t 为从地面激光雷达发射激光波束至接收到回波信号的时间差, R 为激光发射器到目标反射点的距离。

根据测量得到的目标点距离值以及和该目标点相对于激光发生器的水平角度和垂直角度,可以进一步解算出该目标点相对于激光发生器的空间位置信息,即目标点的三维坐标数据。地面激光雷达测量得到的目标每个反射点的相对坐标数据称为点云数据。如果在实验中采用全球定位系统(GPS)进行定标,则可以进一步获得目标各个扫描点的绝对坐标。若采用一组激光波束组成垂直扫描线,则可以获得目标在该垂直扫描线截面上的轮廓采样。如果该垂直扫描线在水平向上移动,则可以通过扫描点描绘出目标在扫描视角范围内的整体轮廓。水平向和垂直向上角度的偏转都可以通过马达控制。

地面激光雷达一般还配备高分辨率数码相机用于获取目标的影像数据,从而为后期的目标模型提供丰富的影像信息。地面激光雷达还可以提供从目标反射回来的激光强度数据。强度数据因其包含目标的物理和化学特性而广受关注,但它同时也受到目标结构、扫描角度步进值等因素的影响。

2.2 地面激光雷达激光强度数据

现在研究一般认为,激光强度数据和地面激光雷达接收回波的能量相关,强度数据值与回波功率幅度的峰值成正比关系^[8]。根据雷达方程,可推导回波信号的功率为^[8]

$$P_r = \frac{P_t D_r^2}{4R^2} \cdot \rho \cos \alpha, \quad (2)$$

式中 P_r 为地面激光雷达接收到的回波信号的功率, P_t 为地面激光雷达发射信号的功率, D_r 为地面激光雷达的孔径, R 为目标与地面激光雷达之间的距离, ρ 为目标反射率, α 为激光入射角。

对于不同的地面激光雷达,其发射功率、雷达孔径和系统损耗等参数都可能不同,因此很难用简单的公式或者方法来准确表达回波功率与这些因素的关系。而且,在实际扫描工作中,扫描环境中的尘土等细小颗粒、空气湿度以及扫描距离等所导致的损耗也会对激光强度数据造成影响。

3 垂直立面强度数据模拟

3.1 假设分析

由上述分析可知,激光强度数据受到诸多因素的影响。对于小区域的中短测距任务,使用同一台地面激光雷达的单次扫描,实验环境可以视为基本保持不变,即诸如空气中细小颗粒、空气湿度及空气传播损耗等可视为恒定。而对于同一台设备的单次扫描来说,其发射功率、孔径和系统误差等因素也可以视为恒定。因此,为了简化问题,假设这些因素所引起的噪声均为乘性噪声,且假设激光强度数据 I 与激光回波信号功率 P_r 的幅度峰值之间只是简单的过零点线性关系:

$$I = c'P_r = c' \cdot \frac{P_t D_r^2}{4} \cdot \frac{\rho \cos \alpha}{R^2} = c \cdot \frac{\rho \cos \alpha}{R^2} \quad \left(c = c' \frac{P_t D_r^2}{4} \right), \quad (3)$$

式中 c' 表示回波功率方程未包括的因素引起的乘性噪声因子。由于在单次扫描中,发射功率和雷达孔径也被视为恒定值,所以用 c 表示所有固定的乘性噪声因子。显然,从(3)式简化后的结果可以直观地发现:在上述假设条件下,归一化后的强度数据值取决于目标的反射率、激光波束的入射角以及地面激光雷达与目标的距离。

3.2 模拟方法

为了清晰、直观地反映目标反射率、入射角以及扫描距离这 3 个因素对强度数据的影响,同时降低模拟的复杂度,选择垂直的立面作为地面激光雷达的扫描目标。据此可以构造模拟扫描的空间几何关系,如图 1 所示。

图 1 中点 O 代表激光发生器的位置, O' 为地面激光雷达在垂直立面上的垂直扫描点,而 AB 是过 O' 点的垂直轮廓扫描线, CD 是过 O' 点的水平扫描线。 P 点为 O 在地面上的投影点。

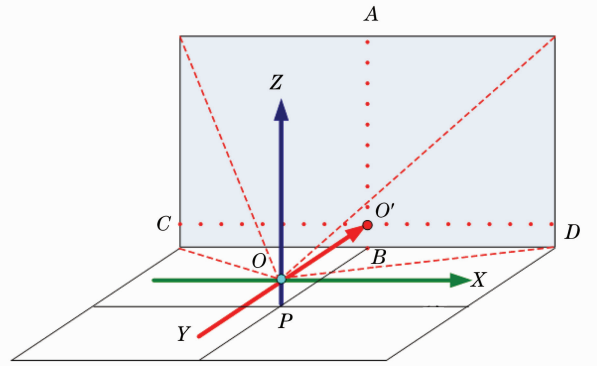


图 1 地面激光雷达扫描垂直立面的几何关系
Fig.1 Geometry of terrestrial laser scanner scanning vertical surface

设垂直立面的高度为 H ,宽度为 W ,地面激光雷达距离垂直立面 R_s ,地面激光雷达的激光发生器距离地面高度为 h ,则可以分别绘出过点 O 的 XY 平面和 YZ 平面两个截面,如图 2 所示。

根据图 1 和图 2 可知,当垂直向旋转马达以固定的扫描角度步进值控制扫描角度时,地面激光雷达扫描垂直立面所获取的点云分布并不均匀,如图 3 所示。

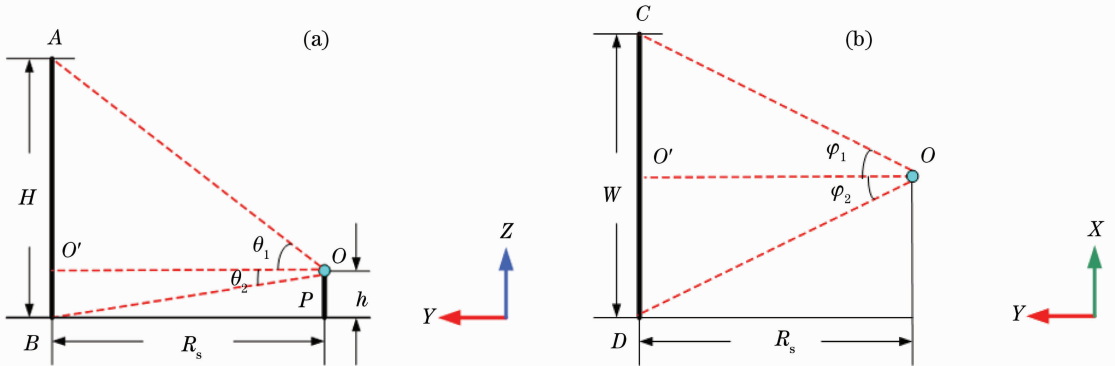


图 2 几何关系。(a)垂直截面;(b)水平截面
Fig.2 Geometry of (a) vertical section and (b) horizontal section

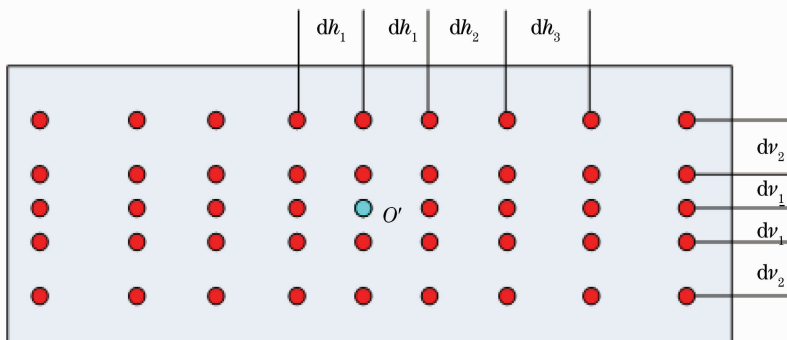


图 3 扫描点的非均匀分布
Fig.3 Nonuniform distribution of scanning points

在图 3 中, $dv_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 代表以 O' 点为中心垂直方向上相邻点的间距, $dh_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 代表以 O' 点为中心水平方向上相邻点的间距。令 $\Delta\theta$ 代表垂直向的角度步进值, $\Delta\varphi$ 代表水平向的角度步进值, 则根据空间几何关系可推导出如下公式:

$$\begin{cases} dv_1 = R_s \tan(1 \times \Delta\theta) \\ dv_2 = R_s \tan(2 \times \Delta\theta) - dv_1 = R_s [\tan(2 \times \Delta\theta) - \tan(1 \times \Delta\theta)] \\ \vdots \\ dv_n = R_s \{ \tan(n \times \Delta\theta) - \tan[(n-1)\Delta\theta] \} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} dh_1 = R_s \tan(1 \times \Delta\varphi) \\ dh_2 = R_s \tan(2 \times \Delta\varphi) - dh_1 = R_s [\tan(2 \times \Delta\varphi) - \tan(1 \times \Delta\varphi)] \\ \vdots \\ dh_m = R_s [\tan(m\Delta\varphi) - \tan[(m-1)\Delta\varphi]] \end{cases}. \quad (5)$$

以垂直向的点间距为例对扫描点阵的非等间隔分布做如下讨论与分析。根据(4)式, 第 $n+1$ 个点间距 dv_{n+1} 与第 n 个点间距 dv_n 之间的差值 ΔD_{V_n} 经过麦克劳林展开并化简后表示为

$$\Delta D_{V_n} = dv_{n+1} - dv_n = R_s \{ \tan[(n+1)\Delta\theta] - \tan[(n-1)\Delta\theta] \} \approx 2n \times R_s \Delta\theta^3. \quad (6)$$

根据(6)式, 可以计算得到垂直向上第 n 个点间距 dv_n 与第 1 个点间距 dv_1 的差值为

$$dv_n - dv_1 \approx R_s \Delta\theta^3 (n-1)(n-2). \quad (7)$$

由(7)式可知, 对于不同的扫描距离和不同的垂直角度步进值, dv_n 与 dv_1 的差值不同。但仅靠差值并不能了解扫描点在垂直方向上的非均匀分布程度。为了更清晰地描述扫描点阵非均匀分布的程度, 提出采用(7)式计算得到的差值和垂直向起始点间距 dv_1 的比值 R_v 来表示扫描点阵在垂直方向上的非均匀分布程度:

$$R_v = \frac{dv_n - dv_1}{dv_1} \approx n^2 \Delta\theta^2. \quad (8)$$

显然, R_v 表示第 n 个点间距相对于起始点间距的变化比例。这个比值越大, 说明固定扫描点阵在垂直方向上的非均匀分布程度越大。

同理可得描述扫描点阵在水平方向上非均匀分布程度的比值:

$$R_h = \frac{dh_m - dh_1}{dh_1} \approx m^2 \Delta\varphi^2. \quad (9)$$

显然, 从(8)、(9)式可以知道, 描述扫描点非均匀分布程度的比值只与该方向上的角度步进值和扫描点数相关。在相同扫描点数目的情况下, 角度步进值 $\Delta\theta$ 越大, 点间距的非均匀变化越大。由于扫描点在垂直向和水平向关于角度步进值的分析和公式表示形式相同, 下文中仅以垂直向角度的步进值为例展开讨论。

根据上述分析, 在图 4 中画出垂直角度的步进值 $\Delta\theta$ 分别为 0.0024° 、 0.01° 、 0.02° 和 0.2° 时垂直向点间距非均匀分布的情况。同时在图 4 中画出比值 $R_v = 0.1$ 的直线, 不同角度步进值曲线与此直线相交点的横坐标即为在点间距非均匀性变化小于起始点间距 10% 的情况下的极限点数。 $\Delta\theta = 0.0024^\circ$ 时, 相交于 7549 点处; 而 $\Delta\theta = 0.01^\circ$ 时, 相交于 1811 点处。不管 $\Delta\theta$ 如何取值, 相交于那个位置, 交点对应的角度值都近似为 18.11° 。也就是说, 当地面激光雷达从正射扫描点 O' 沿水平向或者垂直向扫描的偏移角度小于 18.11° , 扫描点间距的变化小于起始点间距的 10%。反之, 当偏转角度无法限制于此范围时, 点阵的非均匀分布特点需要考虑。

3.3 模拟结果

根据实际应用中的条件, 实验假设扫描参数如表 1 所示, 垂直立面的高度为 10 m, 宽度为 20 m, 地面激光雷达与垂直立面的距离为 10 m, 地面激光雷达距离地面高度为 1.5 m。垂直向和水平向上的角度的步进

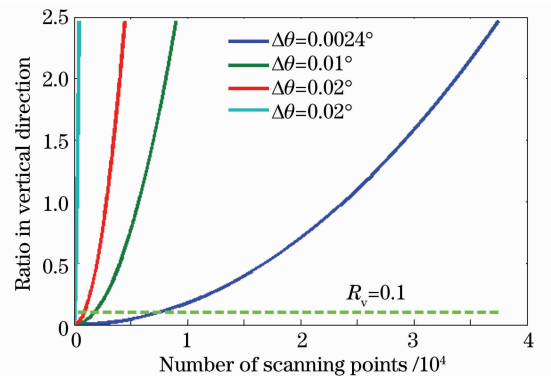


图 4 扫描点数与垂直向角度步进值对比值的影响
Fig. 4 Influence of the number of scanning points and angular step width $\Delta\theta$ on the ratio R_v in vertical direction

值均假设为 0.05° 。根据(8)式和(9)式计算得到 R_v 和 R_h 分别为 52.63% 和 61.75%，因此必须在模拟时考虑点阵的非均匀分布特性。除上述参数外，模拟强度数据还需要目标的反射率信息。此处暂时设置整个垂直立面的反射率相同(假设为 1)，这样模拟所获得的强度数据只受扫描空间几何参数和影响。基于上述参数设置并根据(3)式进行模拟，得到垂直立面的强度数据如图 5 所示。

表 1 模拟参数

Table 1 Simulation parameters

H/m	W/m	R_s/m	h/m	$\Delta\theta/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$
10	20	10	1.5	0.05	0.05

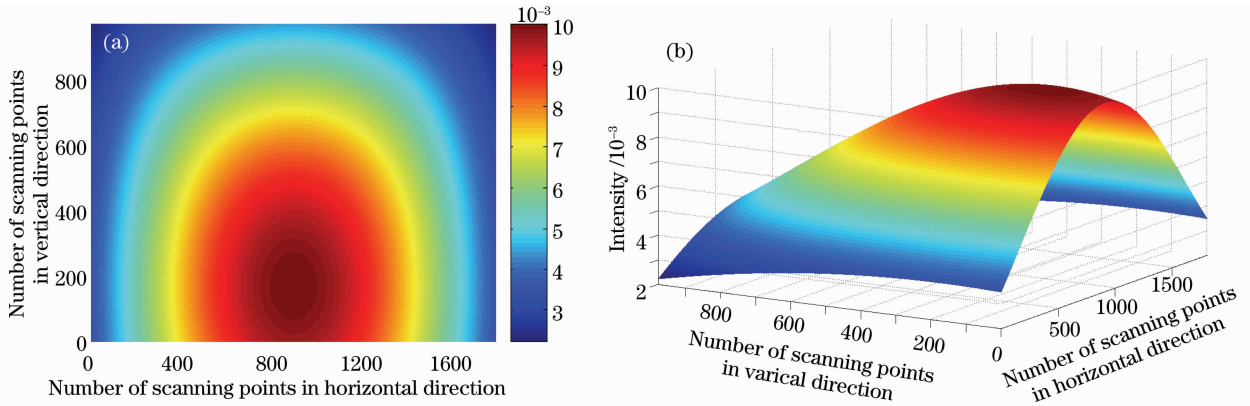


图 5 垂直立面的强度数据模拟结果。(a)二维展示；(b)三维展示

Fig. 5 Simulated result of intensity in the vertical surface. (a) Two-dimensional display; (b) three-dimensional display

图 5 中每条垂直向扫描线上有 978 个点，每条水平向扫描线上有 1801 个点，也即整个立面的模拟强度数据点阵共有超过 1.7×10^6 个扫描点。本次实验模拟中所采用的垂直和水平两个方向上角度步进值为 0.05° ，而一些地面激光雷达设备的角度步进值标称值可以达到 0.0024° ，这会导致更大的采集数据量。

若其余参数不变，只将扫描距离由 10 m 改为 30 m，根据上述方法可以模拟得到如图 6 所示的垂直立面强度数据。不难发现，图 6 中强度数据的变化形态基本与图 5(a)类似。但是，根据(3)式可知强度数据的大小与扫描距离的平方成反比，因此强度数据由图 5 中的 10^{-3} 量级减少至图 6 中的 10^{-4} 量级。而且，随着扫描距离的增加，扫描点阵中点数也降至约 2.7×10^5 个。

在图 5 与图 6 的模拟中均设置目标反射率相同，为反映目标反射率对强度数据的影响，基于表 1 中的参数设置不变，在立面中部加入一个反射率为 0.8 的水平向条带。实验模拟结果如图 7 所示，条带状特征清晰可见。显然不同的反射率会造成不同的地面激光雷达强度值，而这也会给利用激光强度值数据分析带来一

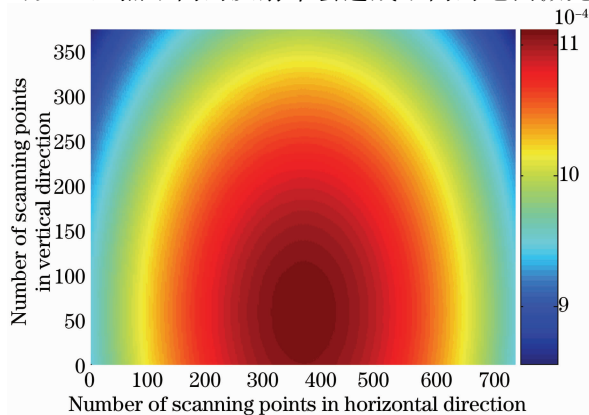


图 6 测距修改为 30 m 的垂直立面强度数据模拟

Fig. 6 Intensity simulation of the vertical surface with range modified to 30 m

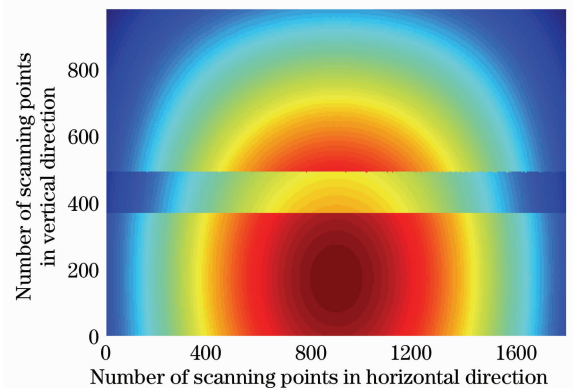


图 7 带有 0.8 反射率条带的垂直立面强度数据模拟

Fig. 7 Intensity simulation of the vertical surface with a strip of 0.8 reflectivity

定的困难。

4 结 论

分析了地面激光雷达扫描的工作原理,提出假设条件简化了强度数据的计算方程,从而总结出影响强度数据的三个主要参量:目标反射率、入射角度和扫描距离。基于垂直立面目标分析地面激光雷达扫描工作的空间几何关系,分析垂直向和水平向的角度步进值对扫描点阵间距的非均匀分布程度的影响。基于所提出的强度数据计算方程和扫描点阵的非均匀分布特性,模拟地面激光雷达扫描垂直立面获得的强度数据。模拟结果验证了本文强度数据计算方程的正确性,并能够直观分析三种主要参量对强度数据所产生的影响,为进一步开展强度数据分析奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 Simon J. Beukley, J. A. Howell, H. D. Enge *et al.*. Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations [J]. *J. Geol. Soc.*, 2008, **165**(3): 625~638
- 2 A. Abellán, J. M. Vilaplana, J. Martínez. Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain) [J]. *Engng. Geol.*, 2006, **88**(3-4): 136~148
- 3 C. Dold, C. Brenner. Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data [J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2006, **36**(5): 78~83
- 4 J. L. Lovell, D. L. B. Jupp, G. J. Newnham *et al.*. Measuring tree stem diameters using intensity profiles from ground-based scanning lidar from a fixed viewpoint [J]. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, **66**(1): 46~55
- 5 E. W. Bork, J. G. Su. Integrating LIDAR data and multispectral imagery for enhanced classification of rangeland vegetation: a meta analysis [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2007, **111**(1): 11~24
- 6 Zhou Qin, Zhang Xiuda, Hu Jian *et al.*. Noise analysis of staring three-dimensional active imaging laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0908005
周 琴, 张秀达, 胡 剑 等. 凝视成像三维激光雷达噪声分析[J]. 中国激光, 2011, **38**(9): 0908005
- 7 Wang Jianjun, Xu Lijun, Li Xiaolu. Impacts of random attitude measurement errors on airborne laser scanning image [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0314001
王建军, 徐立军, 李小路. 姿态角随机测量误差对机载激光扫描成像的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(3): 0314001
- 8 S. Kaasalainen, H. Hyypä, A. Kukko *et al.*. Radiometric calibration of LIDAR intensity with commercially available reference targets [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2009, **47**(22): 588~598