

点云角度分辨率精度评定

陈西江^{1,2} 花向红^{1,2} 邱卫宁^{1,2} 蒋健君^{1,2}

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 武汉大学灾害监测与防治研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:角度分辨率是决定点云目标细节提取能力的主导因素,角度分辨率模型是由平均调制传递函数 AMTF 模型推导而来,AMTF 模型受采样间隔 AMTF_s模型、光斑大小 AMTF_b模型和量化精度 AMTF_q模型共同影响,通过分析采样间隔和光斑大小的误差因子,推导采样间隔和光斑大小精度评定公式。根据 AMTF 模型与采样间隔和光斑大小的关系式,对 AMTF 模型进行线性化;依据误差传播规律详细推导了截止频率的中误差,并利用截止频率与角度分辨率的关系,实现了角度分辨率的精度评定。

关键词:角度分辨率;采样间隔;光斑大小;EIFOV;AMTF

中图分类号:P207.1

在三维激光扫描中,用点云的空间分辨率来评定点云所构建模型的失真情况,空间分辨率受系统误差和随机误差的影响^[1],文献[2]认为空间分辨率主要与角度增量和光斑尺寸大小有关;空间分辨率分为距离分辨率和角度分辨率^[3],角度分辨率是决定点云目标细节提取能力的主导因素^[3-6]。目前,对于角度分辨率模型的研究,主要由 Lichti 根据平均调制传递函数(AMTF)推导出的有效瞬时视场角 EIFOV 模型^[3]。文献[7]对平均点扩散函数(PSF)进行傅里叶变换得到 AMTF,假设采样间隔是随机分布的独立变量,则 PSF 是任意点集的综合平均函数^[8],因此,利用 PSF 的傅里叶变换可以得到 AMTF,进而推导出角度分辨率模型。

文献[9-11]提出了两种估计分辨率的方法;文献[3]介绍了角度分辨率模型的由来,并给出了推导结果,但是对于推导而来的角度分辨率却没有进行精度评定。基于此,本文以测角精度和测距精度为依据,对角度分辨率中的采样间隔和光斑大小的精度进行分析,推导了角度分辨率的精度评定公式,并给出了角度分辨率精度评定模型。根据厂商提供的三维激光扫描参数,计算了不同采样间隔、不同测角精度下的角度分辨率精度。

1 采样间隔精度评定

假设扫描间隔相邻两个测角分别为 θ_1 和 θ_2 , 采样间隔角度 $\tilde{\Delta}_\theta$ 可以表示为:

$$\tilde{\Delta}_\theta = \theta_2 - \theta_1 \quad (1)$$

假设扫描距离为 S ,则水平方向的采样间隔可以表示为:

$$\tilde{\Delta}_\theta = \frac{\tilde{\Delta}_\theta}{360} 2\pi S = \frac{\pi S}{180} (\theta_2 - \theta_1) \quad (2)$$

式中, θ 的单位为度; S 的单位为 mm。

由于测角 θ_1, θ_2 存在误差,测距 S 存在误差,则式(2)写成函数形式:

$$f(S, \theta_1, \theta_2) = \frac{\pi S}{180} (\theta_2 - \theta_1) \quad (3)$$

利用泰勒级数对式(3)展开:

$$\left\{ \begin{aligned} f(S, \theta_1, \theta_2) &= f(S_0, \theta_1^0, \theta_2^0) + \frac{df(S_0, \theta_1^0, \theta_2^0)}{dS} \cdot \\ &\quad (S - S_0) + \frac{df(S_0, \theta_1^0, \theta_2^0)}{d\theta_1} (\theta_1 - \theta_1^0) + \\ &\quad \frac{df(S_0, \theta_1^0, \theta_2^0)}{d\theta_2} (\theta_2 - \theta_2^0) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中, $S_0, \theta_1^0, \theta_2^0$ 为 S, θ_1, θ_2 的近似值。根据误差

收稿日期:2013-04-29。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41174010,41074025);武汉大学精密工程与工业测量国家测绘局重点实验室开放研究基金资助项目(PF2011-17)。

传播规律,可以得到采样间隔 Δ_θ 的中误差 ∂_{Δ_θ} :

$$\begin{aligned} \partial_{\Delta_\theta}^2 &= \left(\frac{df(S_0, \theta_1^0, \theta_2^0)}{dS}\right)^2 \partial_S^2 + \left(\frac{df(S_0, \theta_1^0, \theta_2^0)}{d\theta_1}\right)^2 \partial_{\theta_1}^2 + \\ &\left(\frac{df(S_0, \theta_1^0, \theta_2^0)}{d\theta_2}\right)^2 \partial_{\theta_2}^2 = \left(\frac{\pi}{180}(\theta_2^0 - \theta_1^0)\right)^2 \partial_S^2 + \\ &\left(\frac{\pi S_0}{180}\right)^2 \partial_{\theta_1}^2 + \left(\frac{\pi S_0}{180}\right)^2 \partial_{\theta_2}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, ∂_S 为测距精度; ∂_{θ_1} 、 ∂_{θ_2} 为测角精度。

2 光斑直径大小精度评定

文献[2-3]给出了第一类光斑直径计算公式:

$$w = \sqrt{\left(\frac{f_2}{f_1} \omega_0\right)^2 + \left(\frac{f_2 \lambda}{f_1 \pi}\right)^2 (S - R_0)^2} = \sqrt{\omega_0^2 + c^2 (S - R_0)^2} \quad (6)$$

有些学者给出了第二类光斑直径计算公式^[12-13]:

$$w = 2 \text{Stan}\left(\frac{\gamma}{2}\right) + D_0 \quad (7)$$

式中, f_1 为扩束镜; f_2 为收敛镜的焦距; λ 为激光波长; R_0 为激光束的束腰半径; γ 为光束发散角; D_0 为发射孔直径。

计算第一类光斑直径中误差 ∂_w :

$$\partial_w^2 = \left(\frac{c^2 (S_0 - R_0)}{\sqrt{\omega_0^2 + c^2 (S_0 - R_0)^2}}\right)^2 \partial_S^2 \quad (8)$$

第二类光斑直径的中误差为:

$$\partial_w^2 = \gamma^2 \partial_S^2 \quad (9)$$

3 角度分辨率精度评定

Slater^[15]和 Park 等^[9]给出 $A=0.5$, Lichti^[1]给出 $A = \frac{2}{\pi}$, 本文选用 $A = \frac{2}{\pi}$ 。由文献[3]可知, $v=0$ 时, AMTF_{Sq} 模型为:

$$\text{AMTF}_{Sq}(u) = \left| \frac{\sin(\pi \Delta_\theta u)}{\pi \Delta_\theta u} \right| \left| \frac{2J_1(\pi \delta_\theta u)}{\pi \delta_\theta u} \right| \left| \frac{\sin(\pi Q_\theta u)}{\pi Q_\theta u} \right| \quad (10)$$

式中, Δ_θ 为水平方向采样间隔; δ_θ 为水平方向光斑直径; Q_θ 为水平方向量化精度。

AMTF_{Sq} 模型是个非线性函数模型,无法直

接对 u 值进行求解,需首先对式(11)进行线性化:

$$F(u, \Delta_\theta, \delta_\theta) = \left| \frac{\sin(\pi \Delta_\theta u)}{\pi \Delta_\theta u} \right| \left| \frac{2J_1(\pi \delta_\theta u)}{\pi \delta_\theta u} \right| \left| \frac{\sin(\pi Q_\theta u)}{\pi Q_\theta u} \right| - \frac{2}{\pi} \quad (11)$$

$$F(u, \Delta_\theta, \delta_\theta) = F(u_0, \Delta_\theta^0, \delta_\theta^0) + \frac{dF}{du}(u - u_0) + \frac{dF}{d\Delta_\theta}(\Delta_\theta - \Delta_\theta^0) + \frac{dF}{d\delta_\theta}(\delta_\theta - \delta_\theta^0) \quad (12)$$

式中, u_0 、 Δ_θ^0 、 δ_θ^0 为 u 、 Δ_θ 、 δ_θ 的近视值。令 $F(u, \Delta_\theta, \delta_\theta) = 0$, 根据式(12)可解得 u 值, 根据误差传播规律得到截止频率中误差 ∂_u :

$$\partial_u^2 = \left(\frac{dF}{d\Delta_\theta}\right)^2 \partial_{\Delta_\theta}^2 + \left(\frac{dF}{d\delta_\theta}\right)^2 \partial_{\delta_\theta}^2 + \left(\frac{dF}{du}\right)^2 \quad (13)$$

式中, ∂_{Δ_θ} 、 ∂_{δ_θ} 分别为水平方向采样间隔中误差和光斑大小中误差。

利用泰勒级数得到 EIFOV 模型线性化的形式,从而得到角度分辨率的中误差 ∂_{EIFOV} :

$$\begin{aligned} \partial_{\text{EIFOV}}^2 &= \left(\frac{1}{2u_0^2}\right)^2 \partial_u^2 = \left(\frac{1}{2u_0^2}\right)^2 \left(\frac{dF}{d\Delta_\theta}\right)^2 \partial_{\Delta_\theta}^2 + \\ &\left(\frac{dF}{d\delta_\theta}\right)^2 \partial_{\delta_\theta}^2 + \left(\frac{dF}{du}\right)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

则角度分辨率精度为:

$$\tilde{\partial}_{\text{EIFOV}} = \frac{\partial_{\text{EIFOV}}}{\text{EIFOV}} \quad (15)$$

4 实例计算

根据各种型号 TLS 参数,利用本文方法对角度分辨率精度进行解算结果如表 1 所示。由表 1 可知,对所计算的角度分辨率精度最高的是 RIEGL VZ-1000,精度最低的是 I-Site 8800。

由于 Basis Software. (Surphaser25HSX) 和 RIEGL VZ-400 仪器商所提供的水平方向采样间隔为 $[0.005^\circ \ 0.3^\circ]$ 和 $[0.0024^\circ \ 0.5^\circ]$, 则利用本文方法,计算这两种仪器不同采样间隔所对应的角度分辨率精度,结果如表 2 所示。

根据表 2 绘制这两种仪器不同采样间隔所对应的角度分辨率精度评定的相对中误差,结果如图 1、图 2 所示。

表 1 角度分辨率精度评定结果

Tab. 1 Assessment Results of Angular Resolution Accuracy

TLS 型号	S/m	$\Delta_\theta/(\circ)$	∂_{Δ_θ}	∂_w	EIFOV	∂_{EIFOV}	$\tilde{\partial}_{\text{EIFOV}}$
DeltaSphere-3000IR	10	0.067	3.702 4	0.005 6	13.227 5	4.059 2	30.69%
Surphaser25HSX	50	0.016	3.702 4	0.001 6	19.328 3	5.768 1	29.84%
Trimble FX	50	0.005	2.961 9	0.000 3	16.891 9	0.684 8	4.05%

表2 不同采样间隔的角度分辨率精度评定

Tab. 2 Angular Resolution Accuracy Assessment of Different Sampling Interval

Basis Software. (Surphaser25HSX)				RIEGL VZ-400			
$\Delta\theta$	EIFOV	∂_{EIFOV}	$\tilde{\partial}_{\text{EIFOV}}$	$\Delta\theta$	EIFOV	∂_{EIFOV}	$\tilde{\partial}_{\text{EIFOV}}$
0.005	14.326 65	0.650 133	0.045 379	0.002 4	15.587 11	0.035 523	0.002 279
0.008	15.209 13	1.304 371	0.085 762	0.005 4	16.065 69	0.084 978	0.005 289
\vdots			\vdots	\vdots			\vdots
0.299	261.437 9	7.621 684	0.029 153	0.497 4	434.782 6	9.102 692	0.020 936

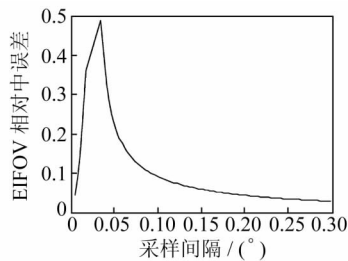


图1 Surphaser25HSX EIFOV 精度评定

Fig. 1 EIFOV Precision Evaluation of Surphaser25HSX

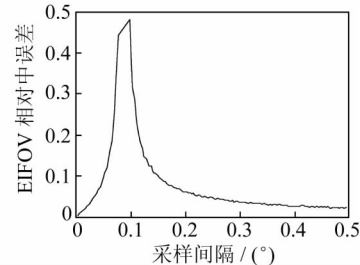


图2 RIEGL VZ-400 EIFOV 精度评定

Fig. 2 EIFOV Precision Evaluation of RIEGL VZ-400

由图1、图2可知,角度分辨率的精度,随着采样间隔的增加呈现先降低后升高的趋势,根据表2可知,对于 Surphaser25HSX,最能真实反映角度分辨率的是采样间隔为 0.299° ;对于 RIEGL VZ-400,最能真实反映角度分辨率的是采样间隔为 0.0024° 。

Surphaser25HSX 及 RIEGL VZ-400 进行不同测角精度下的角度分辨率精度解算。在采样间隔为 0.3° 时,绘制这两种仪器不同测角精度所对应的角度分辨率相对中误差,其结果如图3(a)、3(b)所示。由图3(a)、3(b)可知,当采样间隔为

0.3° 时,随着测角精度的降低,角度分辨率精度提高,但其变化量很小,即当采样间隔较大时,角度分辨率精度受测角精度的影响较小。

在采样间隔为 0.0024° 时,绘制角精度所对应的角度分辨率相对中误差,结果如图3(c)、3(d)所示。

由图3(c)、3(d)可知,采样间隔为 0.0024° 时,随着测角精度的降低,角度分辨率相对中误差呈现先上升后降低的趋势,同时其变化量较大,即当采样间隔较小时,角度分辨率精度受测角精度的影响较大。

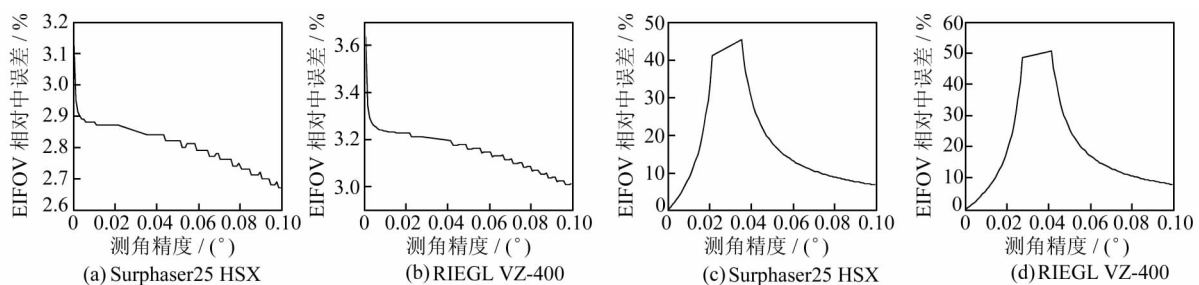


图3 EIFOV 精度评定

Fig. 3 EIFOV Precision Evaluation

5 结 语

本文根据光斑直径大小计算公式,推导了第一类和第二类光斑直径精度评定公式,在测角精度已知的前提下得出了光斑直径大小精度评定公式,在 AMTF 模型的基础上,利用泰勒级数对其进行线性化,推导出了截止频率的线性化函数模

型,根据误差传播规律,求出了截止频率的精度评定公式,并由此得到了角度分辨率精度评定函数模型。依据不同厂商所提供的 TLS 参数,计算了不同型号角度分辨率的相对中误差。通过实例验证了采样间隔和测角精度对角度分辨率精度的影响情况,得出了最能真实反映角度分辨率计算结果的采样间隔,同时说明了采样间隔、测角精度和角度分辨率精度相互影响的关系。

参 考 文 献

- [1] den Dekker A J, van den Bos A. Resolution: A Survey[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1997, 14(3): 547-557
- [2] Boehler W, Marbs A. Investigating Laser Scanner Accuracy[OL]. <http://scanning.fh-mainz.de/scannertest/results/300303.pdf>, 2005
- [3] Lichti D D. Angular Resolution of Terrestrial Laser Scanners[J]. The Photogrammetric Record, 2006, 21(14): 141-160
- [4] McIntosh J R. Comparison of the Spatial Accuracy of Disparate 3D Laser Point Clouds in Large Scale 3D Modeling and Physical Reproduction Projects for Large Cultural[D]. Australia: Curt in University of Technology, 2009
- [5] Lichti D D. A Resolution Measure for Terrestrial Laser Scanners[J]. International Archives of Photogrammetric and Remote Sensing, 2004, 34(30): 222-227
- [6] 朱凌, 石若明. 地面三维激光扫描点云分辨率研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(3): 405-410
- [7] Boreman G D. Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems[M]. Bellingham: SPIE Press, 2001
- [8] Park S K, Schowengerdt R, Kaczynski M A. Modulation-transfer-function Analysis for Sampled Image Systems[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 2 572-2 582
- [9] Bohler W, Bordas V M, Marbs A. Investigating Laser Scanner Accuracy International Archives of Photogrammetry[J]. Remote Sensing and the Spatial Information Sciences, 2003, 34(5/C15): 696-701
- [10] Hebert M, Krotkov E. 3D Measurements from Imaging Laser Radars: How Good are They[J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(3): 170-178
- [11] Weichel H. Laser Beam Propagation in the Atmosphere[J]. Bellingham: SPIE Press, 1990
- [12] 张毅. 地面三维激光扫描点云数据处理方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2008
- [13] Rees W. Physical Principles of Remote Sensing[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990
- [14] GIM International. Terrestrial Laser Scanners[EB/OL]. http://www.gim-international.com/product-survey/id41-Terrestrial_Laser_Scanners,_August.html, 2010

第一作者简介: 陈西江, 博士生, 研究方向为三维激光点云数据处理。

E-mail: cxj_0421@163.com

Accuracy Evaluation of Point Cloud Angular Resolution

CHEN Xijiang^{1,2} HUA Xianghong^{1,2} QIU Weining^{1,2} JIANG Jianjun^{1,2}

(1 School of Geodesy & Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Hazard monitoring & prevention Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Angular resolution is the dominant factor for determining the extraction ability of a point cloud target. An angular resolution model is derived from average modulation transfer function (AMTF). The AMTF model is affected by sampling interval $AMTF_s$, spot size $AMTF_b$ and quantization $AMTF_q$. An accuracy assessment formula for sampling intervals and spot size was derived through an analysis of the error factor of sampling interval and spot size. The Linearization of AMTF model was based on the relationship among AMTF model, the sampling interval and spot size; The standard deviation of the cut-off frequency is derived according to the error propagation law; and an accuracy evaluation for angular resolution is achieved according to the relationship between cut-off frequency and angular resolution.

Key words: angular resolution; sampling interval; spot size; EIFOV; AMTF

About the first author: CHEN Xijiang. Ph.D candidate. His major research is the point cloud data processing of 3D laser.

E-mail: cxj_0421@163.com