

航行船舶交会测量精度分析

黄士亮¹ 胡亚斌^{2,3} 周 钧¹

¹中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125000

²中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于交会测量原理,建立了测量航行船舶位置、尺寸的数学模型,推导了测量误差公式。利用 Matlab 软件进行测量误差分布模拟仿真,对系统测量精度的主要因素进行了分析;结合实验,对测量模型进行了验证。结果表明,利用交会测量原理进行航行船舶位置、尺寸测量的方法是可行的,为进一步的工程应用奠定了基础。

关键词 测量; 交会测量; 航行船舶; 精度分析

中图分类号 TJ206 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.081203

Accuracy Analysis of Intersection Measurement on Sailing Ships

Huang Shiliang¹ Hu Yabin^{2,3} Zhou Jun¹

¹ People's Liberation Army of China Troops 92941, Huludao, Liaoning 125000, China

² Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the principle of intersection measurement, a mathematical model is established to gauge the location and the size of the sailing ships, and the formula of measurement error is deduced. The distribution of the measurement error is simulated using Matlab software, and the main factors affecting the system measurement accuracy are analyzed. The measurement model is validated through the tests. The results show that it is feasible to use the intersection measuring principle to measure the location and the size of sailing ships. It also lays the foundation for further project application.

Key words measurement; intersection measurement; sailing ships; accuracy analysis

OCIS codes 120.3940; 120.1880

1 引言

跨越通航河流的各种桥梁极大地便利了陆上交通,促进了当地的经济的发展。但桥梁作为跨越航道的固定建筑物,客观上也对船舶通航形成了障碍,给船舶航行增加了难度,稍有不慎就可能造成船桥碰撞事故的发生。同时,内河船型的大型化和高速化趋势以及危险品运输不断增长的态势,都使得船撞桥事故的影响和由此产生的风险显得更加突出^[1]。为了防止与减少船撞桥事故,既保证桥梁不受撞击,又保护船舶通航安全,需要对碰撞事故进行提前预警,变被动防护为主动预警,提出航行船舶预警测量的技术方法,从源头减少事故发生率。

基于交会测量原理和图像处理技术的船舶航速、航向、位置、尺度测量技术,能够为船桥碰撞事故的预警提供实时信息,从而为船舶导航、桥梁管理等提供技术支撑。本文重点对航行船舶交会测量技术进行了研究,建立了相关的测量模型,对测量精度进行分析,并进行了相关实验验证,为工程应用奠定了一定的基础。

收稿日期: 2016-03-08; 收到修改稿日期: 2016-03-30; 网络出版日期: 2016-07-20

作者简介: 黄士亮(1968—),男,高级工程师,主要从事装备实验与鉴定技术方面的研究。E-mail: 376030776@qq.com

2 测量模型

测量系统对航行船舶的测量是基于交会测量工作原理来实现的^[2]。测量系统由在同一基线上布设的2台安装有相机的测量仪器 A、B 组成,如图 1 所示。通过布局设计,将仪器 A、B 分别转动和俯仰一定的角度来实现测量工作。根据系统测量原理,对测量坐标系进行转换,建立如图 2 所示的测量模型^[3-4]。A、B 为相应的测量仪器点位, L 为基线长度, M 为目标点, M' 为 M 在水平面的投影点。

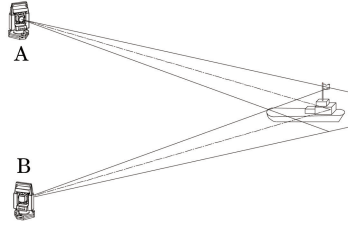


图 1 交会测量系统

Fig. 1 System of intersection measurement

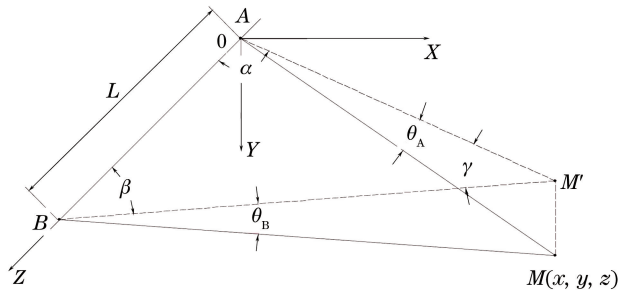


图 2 测量模型

Fig. 2 Measurement model

α 、 β 为仪器水平指向与基线的夹角, θ_A 为仪器俯仰角,均由测量仪器的测角系统获得; $\gamma = \pi - \alpha - \beta$;那么,点 M 的坐标为:

$$x = L \frac{\sin \alpha \sin \beta}{\sin(\pi - \alpha - \beta)}, \quad (1)$$

$$y = L \frac{\sin \beta \tan \theta_A}{\sin(\pi - \alpha - \beta)}, \quad (2)$$

$$z = L \frac{\cos \alpha \sin \beta}{\sin(\pi - \alpha - \beta)}, \quad (3)$$

根据相关误差理论,影响系统的交会测量精度的主要因素有 α 、 β 、 θ_A 及设备测角误差和基线 L 测量误差等。对(1)~(3)式中的各变量求偏导,可以得到:

$$\Delta x = \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \Delta L + L \cdot \left[\frac{\cos \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} - \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \right] \cdot \Delta \alpha + L \cdot \left[\frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} - \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \right] \cdot \Delta \beta, \quad (4)$$

$$\Delta y = \frac{\sin \beta \cdot \tan \theta_A}{\sin(\alpha + \beta)} \Delta L + L \cdot \left[\frac{\cos \beta \cdot \tan \theta_A}{\sin(\alpha + \beta)} - \frac{\sin \beta \cdot \tan \theta_A \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \right] \cdot \Delta \beta + L \frac{\sin \beta \cdot (1 + \tan^2 \theta_A)}{\sin(\alpha + \beta)} \Delta \theta_A - L \frac{\sin \beta \cdot \tan \theta_A \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \Delta \alpha, \quad (5)$$

$$\Delta z = \frac{\cos \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \Delta L - L \cdot \left[\frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} + \frac{\cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \right] \cdot \Delta \alpha + L \cdot \left[\frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} - \frac{\cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \right] \Delta \beta, \quad (6)$$

根据误差独立原则, M 点坐标测量误差为:

$$\sigma_x = \left\{ \left[\frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \Delta L \right]^2 + \left[L \cdot \sin \beta \frac{\cos \alpha \cdot \sin(\alpha + \beta) - \sin \alpha \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \Delta \alpha \right]^2 + \left[L \cdot \sin \alpha \frac{\cos \beta \cdot \sin(\alpha + \beta) - \sin \beta \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \Delta \beta \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

$$\sigma_y = \left\{ \left[\frac{\sin \beta \cdot \tan \theta_A}{\sin(\alpha + \beta)} \Delta L \right]^2 + \left[L \cdot \tan \theta_A \frac{\cos \beta \cdot \sin(\alpha + \beta) - \sin \beta \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \Delta \beta \right]^2 + \left[L \frac{\sin \beta \cdot (1 + \tan^2 \theta_A)}{\sin(\alpha + \beta)} \Delta \theta_A \right]^2 + \left[L \frac{\sin \beta \cdot \tan \theta_A \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \Delta \alpha \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

$$\sigma_z = \left\{ \left[\frac{\cos \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \Delta L \right]^2 + \left[L \cdot \sin \beta \frac{\sin \alpha \cdot \sin(\alpha + \beta) + \cos \alpha \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \Delta \alpha \right]^2 + \left[L \cdot \cos \alpha \frac{\cos \beta \cdot \sin(\alpha + \beta) - \sin \beta \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \Delta \beta \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

3 测角误差分析

测量系统中影响测量精度的主要因素是测角误差。测角误差一般由仪器指向误差、大气抖动误差^[5]和目标判读误差等组成。

1) 仪器指向误差主要由仪器的俯仰、方位轴系精度和仪器的安装精度来决定。在经费允许的情况下, 结合目前的加工水平及工程经验, 取仪器指向误差: $\Delta_{Yi} = 30''$;

2) 大气抖动误差: $\Delta_{Da} = 2''$ ^[6];

3) 判读误差与探测器的像元数、像元尺寸、目标距离及测量范围等有关^[7]。

按照探测器像元数 $320 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$, 像元尺寸 $23.5 \mu\text{m} \times 23.5 \mu\text{m}$, 目标距桥梁 500 m , 观测范围 62.7 m , 则光学系统焦距为 $f = 50 \text{ mm}$, 视场角:

$$2(\omega_1 \times \omega_2) = 8.553^\circ \times 6.436^\circ, \quad (10)$$

则每像元对应的量化角值为: $\tau_0 = 96.54''$, 那么探测器测量的量化误差 Δ_1 为:

$$\Delta_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 96.54 = 55.735'', \quad (11)$$

视频噪声误差 Δ_2 为: $\Delta_2 = \Delta_1 = 55.735''$ 。

光学系统全视场畸变校正后可达到 0.1% , 那么畸变引起的测量误差 Δ_3 即为: $\Delta_3 = 30.8''$ 。则目标判读误差为:

$$\Delta_{Mu} = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2} = 79'', \quad (12)$$

4) 测角误差为:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{Da}^2 + \Delta_{Yi}^2 + \Delta_{Mu}^2} = 84.53'' = 0.00041 \text{ rad}. \quad (13)$$

4 系统测量误差

根据测量系统的布局, 基线长度为 100 m , 基线长度测量误差 $\pm 2 \text{ mm}$ 。通过 Matlab 软件的模拟仿真, 得到测量区域值的测量误差分布如图 3 所示。图 3(b)、(c) 的俯仰分别是 -2.3° 、 -0.57° 。

根据仿真结果, 交会点距离基线小于等于 715 m , α, β 不大于 $1.5 \text{ rad}(86^\circ)$ 时, $\sigma_x \leq 2 \text{ m}$, $\sigma_y \leq 0.2 \text{ m}$, $\sigma_z \leq 0.13 \text{ m}$ 。也就是说, 根据上述布局方式、设备配置及系统相关要求进行仿真, 系统对于航行船舶的测距误差不大于 2 m , 船舶高度测量误差不大于 0.2 m , 航向误差不大于 0.13 m 。

从分析过程可以看出, 探测器的像元数、设备指向精度、工作时的交会角、俯仰角、设备布局方式等均会对系统测量的精度造成影响。如果需要进一步提高系统的测量精度可以通过增加探测器像元数、提高设备指向精度及优化系统布局等几方面来完成。

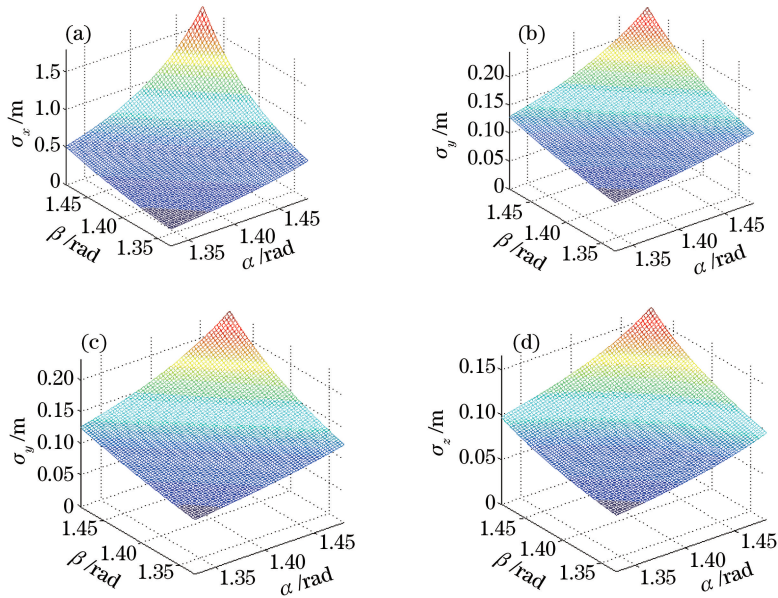


图3 测量误差分布图。(a) x 轴测量误差分布;(b) y 轴测量误差分布($\theta_A = -2.3^\circ$);
(c) y 轴测量误差分布($\theta_A = -0.57^\circ$);(d) z 轴测量误差分布

Fig. 3 Measurement error distribution. (a) Measurement error distribution on x axis; (b) measurement error distribution on y axis ($\theta_A = -2.3^\circ$); (c) measurement error distribution on y axis ($\theta_A = -0.57^\circ$); (d) measurement error distribution on z axis

5 实验与数据

按照系统的布局方案,对一个 $357 \text{ mm} \times 287 \text{ mm}$ 立方体的宽、高和距离进行测量。实验采用相机焦距 50 mm ,像元大小为 $8.6 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$,基线长度为 4.5 m 。根据搭建的实验系统的指向精度及基线测量精度,在实验系统的实际观测范围内,首先对实验系统按照前述误差分析方法进行仿真分析,得到测量误差分布如图4所示,图4(b)中俯仰为 -1.8991° 。

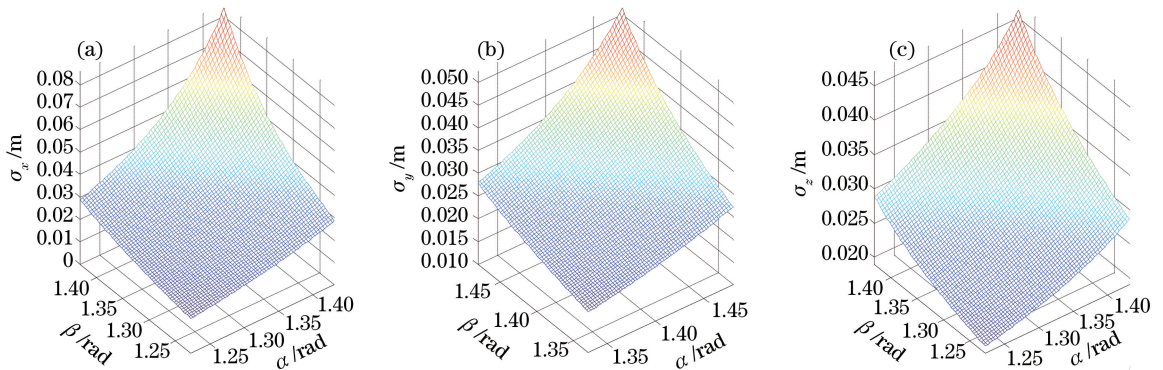


图4 实验系统测量误差仿真。(a) x 轴测量误差分布;(b) y 轴测量误差分布;(c) z 轴测量误差分布

Fig. 4 Simulation of measurement error of experimental system. (a) Measurement error distribution on x axis; (b) measurement error distribution on y axis; (c) measurement error distribution on z axis

实验时,将目标分别按 12.5 m 和 9.2 m 距离摆置进行测量。仪器的交会数据见表1,分析处理结果见表2、表3及表4。从实验结果来看,实验测量数据与仿真分析结果较为吻合。

表1 仪器的交会数据

Table 1 Intersection data of the instruments

Distance	12.5 m	9.2 m
α	78.7263°	78.7263°
β	81.0045°	74.9797°
θ_A	-1.8991°	-1.8991°
θ_B	-2.0489°	-2.1426°

表2 特征点二维位置

Table 2 Two-dimensional position of feature points

Distance	Left camera			Right camera		
	Top left /pixel	Top right /pixel	Bottom left /pixel	Top left /pixel	Top right /pixel	Bottom left /pixel
12.5 m	531.0,232.0	804.0,234.0	533.0,438.0	524.0,199.0	791.0,198.0	524.0,406.0
	690.0,322.0	1057.0,328.0	691.0,601.0	498.0,292.0	859.0,295.0	496.0,563.0

表3 特征点三维坐标

Table 3 Three-dimensional coordinate of feature points

Distance	Top left	Top right	Bottom
12.5	2.2623, -0.4455, -12.5601	2.7165, -0.4439, -12.5236	2.3637, -0.1611, -12.553
9.2	1.887, -0.2364, -9.2127	2.2475, -0.2323, -9.2151	1.8868, 0.0468, -9.2069

表4 目标宽度、高度和与基线的距离

Table 4 Width, height and distance to baseline of target

	Length	Height	Distance
Far	0.356	0.2845	-12.5383
Near	0.3605	0.2833	-9.2110
True value	0.357	0.287	12.5/9.2
Maximum deviation	0.035	0.037	0.0383/0.011

6 结 论

在测量系统的研制过程中,通过仿真分析和实验的方法,对系统的测量精度进行了分析;航行船舶的严重偏航及船舶超高是船桥碰撞事故的主要原因,对船舶航向及高度的精确测量尤为重要。根据仿真分析及实验结果可以看出,测量系统能够达到航向测量误差不大于0.13 m,高度测量误差不大于0.2 m的测量精度,可以满足航行船舶安全通过桥梁的需求。系统采用的方法及推导出的计算公式,可以很方便地应用到更多的实际工程中。

参 考 文 献

- Jiang Jinhui, Jin Yunlong, Pan Liuliu, *et al.* Techniques and methods in ship-bridge collision avoidance research[J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2008, 31(1): 23-30.
姜金辉, 金允龙, 潘溜溜, 等. 桥梁防撞研究技术与方法[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2008, 31(1): 23-30.
- 于来法, 段定乾. 实时经纬仪工业测量系统[M]. 北京: 测绘出版社, 1996.
- Wang Miao, Li Hua. Researching about capturing of CCD vertical target measurement system[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(6): 1539-1542.
王 苗, 李 华. CCD立靶测量系统捕获性能研究[J]. 光子学报, 2009, 38(6): 1539-1542.
- Wang Miao, Xu Wei. Projectile's attack angle measurement with CCD vertical target[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(9): 30-34.
王 苗, 徐 玮. CCD立靶弹丸攻角测量[J]. 光电工程, 2011, 38(9): 30-34.
- Chen Lixue. Transfer performance analysis for sampled image systems[J]. Acta Optica Sinica, 1995, 15(11): 1547-1551.

- 陈立学. 采样成像系统的传递性能分析[J]. 光学学报, 1995, 15(11): 1547-1551.
- 6 Wang Hongxing, Wu Xiaojun, Song Bo. Experimental study on beam wander of collimated beam in atmospheric turbulence under sea surface environment[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1101005.
王红星, 吴晓军, 宋 博. 近海面大气湍流中准直光束漂移特征的实验研究[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1101005.
- 7 Lu Shuhua, Huang Hongzhi, Zhang Hongzhou, *et al.* Comprehensive performance evaluation for video surveillance cameras[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091102.
卢树华, 黄鸿志, 张鸿洲, 等. 视频监控摄像机性能参数综合评价研究[J]. 激光与光电子学进展 2015, 52(9): 091102.