

IMU/DGPS 机载激光定位测量误差分析与估计

王克平^{1,2}, 边少锋², 翟国君¹, 叶修松¹

(1. 海军海洋测绘研究所, 天津 300061; 2. 海军工程大学 导航工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要:详细分析了 IMU/DGPS 机载激光定位测量的各种误差,着重讨论了 IMU 姿态测量误差对机载激光定位的影响。根据实际可能的误差数据,并联合扫描角误差、测距误差和平台坐标系原点误差进行计算分析,得出了不同的量测误差对目标三维定位误差的综合影响。

关键词:机载激光; 姿态角; 定位误差
中图分类号:P228 **文献标识码:**A

文章编号:1000-3096(2009)04-0057-04

IMU/DGPS 机载激光测量的误差来源有很多,如 GPS 定位的误差、IMU 姿态测量的误差、系统集成的误差、基准站(及控制点)测量的误差、坐标转换的误差等。后两项误差的大小取决于采用的作业方式和起算数据精度(如选用的大地水准面模型等),由于篇幅关系,本文作者在此不作赘述。

根据实际可能的误差数据,并联合扫描角误差、测距误差和平台坐标系原点误差进行计算分析,便可得出不同的量测误差对目标三维定位误差的综合影响。

1 DGPS 定位误差与系统集成误差的影响

1.1 DGPS 定位误差的影响

差分 GPS(DGPS)定位受多方面的影响,除受接受机接收数据因素的影响外(如信号失锁、大气折射、多路径、卫星数及分布等),还与 DGPS 处理技术相关。虽然 GPS 的量测误差随时间变化,但这个变化是有界的。除非接受不到 GPS 信号。通过 GPS 与 IMU 的集成,随时间变化的量测误差被平滑。一般而言,采用伪距差分定位系统精度可达到米级,而采用载波相位后差分处理技术后可达到 5~15 cm 的定位精度。

1.2 系统集成误差的影响

带有 IMU/DGPS 的机载激光探测系统是由机载 GPS/IMU、激光扫描仪、数码相机等设备集成而成,因此不可避免地带来误差。机载激光探测时飞机会有不同角度的倾斜或旋转,与在飞机探测前测定 GPS 天线与激光扫描仪投影中心的偏移向量时的状态不一致等,上述角度的变化将直接对激光扫描仪带来偏移向量误差。

由于飞机改装的限制条件,一般 GPS 天线无法安装在激光扫描仪投影中心的正上方,有时在飞行方向上的偏移向量会达到 14 m(某运八飞机上的偏移向量的 3 个分量分别为:16.93、-0.33、3.78 m)。表 1 给出了在不同的倾斜或旋转角情况下产生的偏移向量误差^[1]。

表 1 飞行方向上不同偏心分量在不同偏航角下产生的误差
Tab. 1 Errors of different eccentric constituents at different angles of yaw along flight heading

偏心分量(m)	偏航角度(°)					
	2	4	6	8	10	12
2	0.07	0.14	0.21	0.28	0.35	0.42
6	0.21	0.42	0.63	0.84	1.05	1.25
10	0.35	0.70	1.05	1.40	1.74	2.09
14	0.49	0.98	1.47	1.95	2.44	2.93

2 IMU 姿态测量精度的影响

IMU/DGPS 辅助航空摄影测量中,姿态测量是通过与航摄仪刚性连接的 IMU 来进行的,由于存在陀螺各种系统漂移、随机漂移、加速度的动态误差等,姿态测量的精度受到限制。国内中档的 INS 一般只能达到偏航 0.1°(或 6′)、侧滚和俯仰 0.05°(或 3′)的精度水平,采用 GPS/INS 组合也仅达到 0.03°

收稿日期:2008-08-10;修回日期:2008-10-20
基金项目:国家自然科学基金项目(40774031);国家 863 计划项目(2006AA06A202)
作者简介:王克平(1968-),男,辽宁东港人,工程师,硕士研究生,主要从事海洋测量与卫星导航应用技术研究,电话:022-84685080, E-mail:wkpxy007@sina.com

(或 $2'$) 的精度水平。国外先进的 IMU/DGPS 系统姿态测量精度一般可达到偏航 0.01° (或 $36''$)、侧滚和俯仰 0.005° (或 $18''$) 的水平。显然,姿态测量精度的好坏必然影响直接定向的结果。由于 IMU 是固联在传感器上的,故在这里的精度分析是基于机载激光探测传感器姿态的定义。

2.1 俯仰角 (pitch) 误差影响

俯仰角误差 $d\varphi$ 主要影响飞行方向和高程 H , 见图 1。

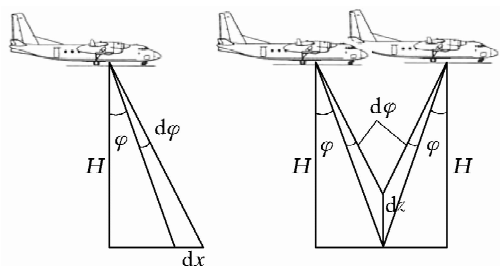


图 1 俯仰角对定位精度影响示意图

Fig. 1 Map showing the positioning accuracy influence due to pitch angular

俯仰角误差 $d\varphi$ 对飞行方向的定位影响 dx 可由 (1) 式求出:

$$dx = \frac{H \sin d\varphi}{\cos \varphi \cos (\varphi + d\varphi)} \quad (1)$$

俯仰角误差 $d\varphi$ 对高程定位影响 dz 可由 (2) 式求出:

$$dz = \frac{H \sin d\varphi}{\cos \varphi \cos (\varphi + d\varphi) \tan (\varphi + d\varphi)} = \frac{H \sin d\varphi}{\cos \varphi \sin (\varphi + d\varphi)} \quad (2)$$

2.2 滚动角 (roll) 误差影响

滚动角误差 $d\omega$ 主要影响飞行旁向和高程, 见图 2。

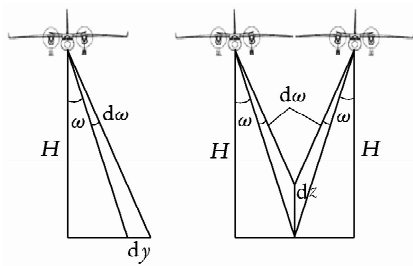


图 2 滚动角对定位精度影响示意图

Fig. 2 Map showing the positioning accuracy influence due to roll angular

滚动角误差 $d\omega$ 对飞行旁向的定位影响 dy 可由 (3) 式求出:

$$dy = \frac{H \sin d\omega}{\cos \omega \cos (\omega + d\omega)} \quad (3)$$

滚动角误差 $d\omega$ 对高程定位影响 dz 可由 (4)

式求出:

$$dz = \frac{H \sin d\omega}{\cos \omega \cos (\omega + d\omega) \tan (\omega + d\omega)} = \frac{H \sin d\omega}{\cos \omega \sin (\omega + d\omega)} \quad (4)$$

2.3 偏航角 (Yaw) 误差影响

偏航角误差 $d\kappa$ 主要影响飞行方向和飞行旁向, 见图 3。

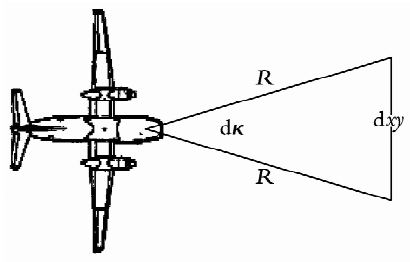


图 3 偏航角对定位精度影响示意图

Fig. 3 Map showing the positioning accuracy influence due to yaw angle

偏航角误差 $d\kappa$ 对飞行旁向和飞行方向的总影响 dxy 可由 (5) 式求出:

$$dxy = 2R \sin \left(\frac{d\kappa}{2} \right) \quad (5)$$

3 定位误差影响估计

假设飞机飞行方向为 x 方向, 飞机飞行高度为 H , 激光扫描方向为 y 方向, 扫描角为 β 。这里以扫描镜中心为原点定义一个右手系平台坐标系, 其天底点为右手系物方坐标系原点, 物方坐标为 X, Y, Z 。 $\beta \in [\theta/2, \theta/2]$, 定义飞行方向左侧扫描角为正。

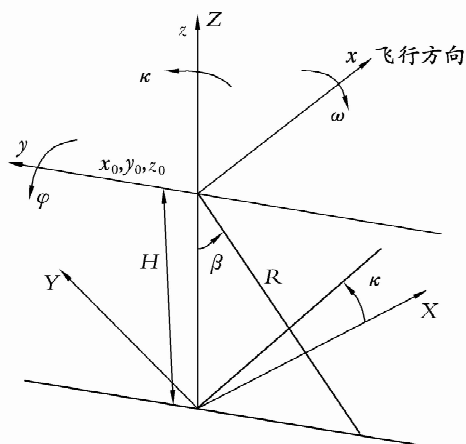


图 4 旋转角度和使用的坐标系

Fig. 4 Rotational angular and using coordinate system

这里分别联合扫描角误差、测距误差、平台坐标原点测量误差和姿态角误差等对定位误差的影响进行分析。

3.1 姿态角误差的影响

滚动角误差所造成的影响分析。此时, $dx=0$ 。

$$dy = H[\sin(\beta + d\omega) - \sin\beta] / \cos\beta \approx H \sin d\omega \approx Hd\omega \quad (6)$$

于是, 可以进一步估计因滚动角误差量测 $d\omega$ 所造成的地面目标计算的坐标误差:

$$\begin{aligned} dX_\omega &= -dy \sin\kappa \approx -Hd\omega \sin\kappa \\ dY_\omega &= dy \cos\kappa \approx -Hd\omega \cos\kappa \end{aligned} \quad (7)$$

$$dZ_\omega = H[1 - \cos(\beta + d\omega) / \cos\beta] \approx Hd\omega \tan\beta$$

同理, 俯仰角误差 $d\varphi$ 和偏航角误差 $d\kappa$ 所造成的影响分别为(8)和(9)式:

$$\begin{aligned} dX_\varphi &= dx \cos\kappa \approx -H \sin d\varphi \cos\kappa \\ dY_\varphi &= dx \sin\kappa \approx -H \sin d\varphi \sin\kappa \\ dZ_\varphi &= H(1 - \cos d\varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} dX_\kappa &= -H \tan\beta [\sin(\kappa + d\kappa) - \sin\kappa] \\ dY_\kappa &= -H \tan\beta [\cos(\kappa + d\kappa) - \cos\kappa] \\ dZ_\kappa &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

3.2 扫描角误差的影响

由扫描角误差量测 $d\beta$ 所造成的影响分析类似与滚动角误差 $d\omega$, 有 $dx=0$, 而

$$\begin{aligned} dy &= H[\sin(\beta + d\beta) - \sin\beta] / \cos\beta \\ &= H \sin d\beta \approx Hd\beta \end{aligned} \quad (10)$$

则有:

$$\begin{aligned} dX_\beta &= -dy \sin\kappa \approx -Hd\beta \sin\kappa \\ dY_\beta &= dy \cos\kappa \approx -Hd\beta \cos\kappa \end{aligned} \quad (11)$$

$$dZ_\beta = H[1 - \cos(\beta + d\beta) / \cos\beta] \approx Hd\beta \tan\beta$$

3.3 测距误差的影响

测距误差 dR 所造成的影响按以下方式进行分析, 则有 $dx=0$, $dy=dR \sin\beta$, 于是:

$$dX_R = -dy \sin\kappa = -dR \sin\beta \sin\kappa$$

$$dY_R = dy \cos\kappa = dR \sin\beta \cos\kappa \quad (12)$$

当扫描角较小或中等数值情况下, 对坐标 Z 的量测所造成的误差可表示成^[4]:

$$dZ_R = -R \cos|\beta| \quad (13)$$

3.4 平台坐标系原点量测误差的影响

平台坐标系原点也就是激光束发出的原点, 它的量测误差带来的定位误差可表示为:

$$\begin{aligned} dX_0 &= dx_0 \cos\kappa - dy_0 \sin\kappa \\ dY_0 &= dx_0 \sin\kappa + dy_0 \cos\kappa \\ dZ_0 &= dz_0 \end{aligned} \quad (14)$$

4 计算分析和结论

假设上述各量测误差对造成的定位误差是相互独立的, 则整体误差可按误差传播定律求得。根据实际可能的误差数据, 令 $d\omega = d\varphi = 0.02^\circ$, $d\kappa = 0.01^\circ$, $d\beta = 0.03^\circ$, $dR = -5$ cm, $dx_0 = dy_0 = dz_0 = 4$ cm。则可得出飞行高度分别为 300 m 和 800 m 时, 扫描角和目标定位误差的关系, 见图 5。计算分析表明:

(1) 扫描角越大、飞行高度越高, 则目标定位的误差就越大;

(2) 根据公式(9)和(14)以及计算分析可知, $d\kappa$ 、 dx_0 、 dy_0 对高程误差的分析无影响;

(3) 通过图 5 和计算分析可知, 当偏航角 $\kappa=0^\circ$ 时, 扫描角对目标定位误差 dX 的影响较大, 但对目标定位误差 dY 无影响。这是因为随扫描角度的增加, 由姿态角误差和扫描角误差引起的平面位置误差无多少变化。当偏航角 $\kappa=30^\circ$ 时, 扫描角度的增加对目标定位误差 dX 和 dY 的影响是较小的;

(4) 从图 5 可以看出, 目标定位误差 dZ 并非随飞行高度和扫描角的增加而线性增加。

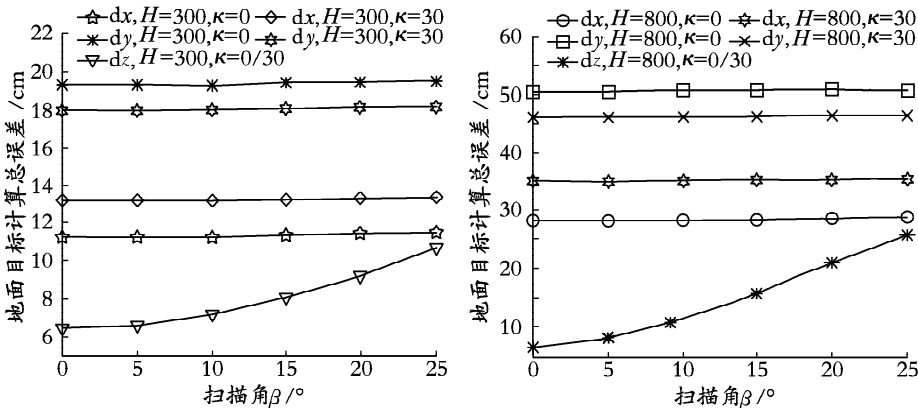


图 5 飞行高度为 300 m 和 800 m 时扫描角和目标定位误差的关系

Fig. 5 Relation between scan angle and positioning error of target at 300 and 800 m of flight height

参考文献:

- [1] 李学友. IMU/DGPS 辅助航空摄影测量原理、方法及应用 [D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2005. 74-80.
- [2] 舒宁. 激光成像 [M]. 武汉:武汉大学出版社, 2005. 61-74.
- [3] 刘少创, 尤红建, 刘彤, 等. 机载激光测距——扫描成像系统的定位原理与误差分析 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(2): 124-128.
- [4] Baltsavias E P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas [J]. *ISPRS Photogramm Remote Sensing*,

- 1999, **54**(2/3): 199-214.
- [5] Hutton J J, Lithopoulos E. Airborne photogrammetry using direct camera orientation measurements [J]. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 1998, 3: 363-370.
- [6] Baltsavias E P. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources [J]. *ISPRS Photogram Remote Sensing*, 1999, **54**(2/3): 164-198.

Analysis and estimation on the IMU/DGPS airborne laser scanning errors

WANG Ke-ping^{1,2}, BIAN Shao-feng², ZHAI Guo-jun¹, YE Xiu-song¹

(1. Naval Institute of Hydrographic Survey and Charting, Tianjin 300061, China; 2. Department of Navigation, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Received: Aug. , 10, 2008

Key words: airborne laser; attitude degree; position errors

Abstract: In this paper the various errors of IMU/DGPS airborne laser scanning were analyzed in detail, the survey error of IMU effect on the airborne laser scanning by was discussed in stress. The errors of IMU/DGPS airborne laser scanning were computed and analyzed by associating with scan error, telemeter error and origin error of coordinate system. According to the possible error datum, it was concluded that the different survey errors have synthetic effects on 3D targets position errors.

(本文编辑:梁德海)

(上接第 56 页)

The preliminary research on limits to cadmium in prawn formula feed

NING Jin-song^{1,2}, ZHAI Yu-xiu^{1,2}, SHANG De-rong^{1,2}, ZHANG Cui^{1,3}

(1. Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resources, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fishery Research Institute Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 2. The National Center for Quality Supervision and Test of Aquatic Products, Qingdao 266071, China; 3. College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Received: Feb. , 27, 2007

Key words: white legged shrimp(*Penaeus vannamei*); formula feed; inorganic cadmium; organic cadmium; limits

Abstract: The current situation is that there is a high concentration of cadmium in prawn formula feed but the standard of cadmium in feed is too strict and the relevant research results are not proposed. In this study, white-legged shrimps were used as an experiment object. Cadmium chloride and Cuttlefish viscus powder were added to the feed as the inorganic cadmium and organic cadmium respectively. After analyzing the cadmium concentration in the prawns, the results suggested that the cadmium from the feed mostly accumulates in prawn's viscus. With the same concentration of organic cadmium feed and inorganic cadmium feed, the cadmium accumulated from the former is less than from the latter. Meanwhile, according to the data from our research, the cadmium critical limit in prawn formula feed in China is calculated to be not more than 3.0 mg/kg, which is considered to be proper for the domestic fishery.

(本文编辑:张培新)