



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117745839 A

(43) 申请公布日 2024. 03. 22

(21) 申请号 202311709111.5

G06F 17/16 (2006.01)

(22) 申请日 2023.12.13

G06V 10/764 (2022.01)

(71) 申请人 安徽建筑大学

G01S 17/88 (2006.01)

地址 230000 安徽省合肥市经济技术开发区
紫云路292号

G01C 13/00 (2006.01)

(72) 发明人 俞家勇 许杰 李姬喆 贺岩
陶邦一 吕德亮 胡善江 罗远
侯春鹤

(74) 专利代理机构 上海笃学志远专利代理事务
所(普通合伙) 31541

专利代理师 陈飞

(51) Int. Cl.

G06T 7/80 (2017.01)

G06F 17/11 (2006.01)

G06T 7/13 (2017.01)

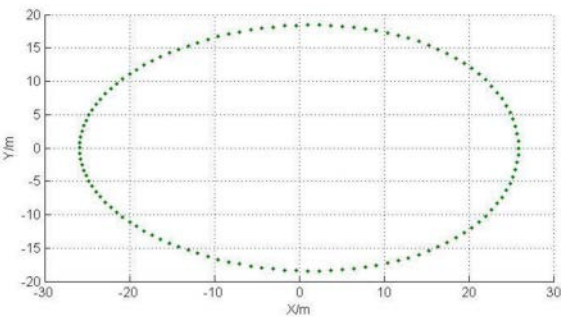
权利要求书3页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种机载测深激光雷达扫描轨迹拟合模型

(57) 摘要

本发明公开一种机载测深激光雷达扫描轨迹拟合模型,涉及光学技术领域,包含以下步骤:步骤1. 布设场地,架设经过标定后的相机和测深激光雷达,设置机载测深激光雷达电机转速D进行开光扫描,同时利用相机完整拍摄下对应转速激光点的扫描轨迹;步骤2. 利用自动化图像识别算法检测出照片上对应激光点的扫描轨迹;步骤3. 自适应蛋形曲线拟合方程:构建一种自适应蛋形曲线拟合实际扫描点运动轨迹,本发明通过立体相机拍摄测深雷达蓝绿激光扫描完整轨迹并利用自动化图像提取算法进行扫描轨迹提取与拟合,能够精确获得扫描轨迹蛋型曲线方程。



1. 一种机载测深激光雷达扫描轨迹拟合模型,其特征在于,包含以下步骤:

步骤1. 布设场地,架设经过标定后的相机和测深激光雷达,设置机载测深激光雷达电机转速D进行开光扫描,同时利用相机完整拍摄下对应转速激光点的扫描轨迹;

步骤2. 利用自动化图像识别算法检测出照片上对应激光点的扫描轨迹;

步骤3. 自适应蛋形曲线拟合方程:构建一种自适应蛋形曲线拟合实际扫描点运动轨迹。

2. 根据权利要求1所述的一种机载测深激光雷达扫描轨迹拟合模型,其特征在于,步骤1采用双相机立体量测原理进行模型构建,在机载激光测深雷达转速 $D < 50\text{rpm}$ 模式下对墙面进行扫描,通过立体量测相机获得两张包含扫描蛋型曲线扫描轨迹的照片以及对应时段扫描的波形数据后,以两张照片中的两个蛋形曲线建立立体像对约束。

3. 根据权利要求1所述的一种机载测深激光雷达扫描轨迹拟合模型,其特征在于,步骤3具体包括以下子步骤:

a) 设定扫描镜法线方向与扫描转轴夹角 α ,激光发射方向与扫描转轴夹角 β ,通过转镜转动,扫描出一个近似卵型的扫描轨迹利用光线反射定律推导出激光出射方向向量,建立扫描点与光路系统每个角度之间的耦合关系式,对数据进行模拟,构建出一种蛋形曲线函数为:

$$\frac{(a_e x^2 + b_e x + c_e)^2}{(d_e x + e_e)^2} + \left(\frac{y}{f_e}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

式中 a_e 、 b_e 、 c_e 、 d_e 、 e_e 、 f_e 为蛋形曲线参数,当 $a_e = 0$, $b_e = 1$, $c_e = 0$, $d_e = 0$, $e_e \neq f_e \neq 0$ 时该方程为椭圆方程;

当 $a_e = 0$, $b_e = 1$, $c_e = 0$, $d_e = 0$, $e_e = f_e \neq 0$ 时该方程为圆方程;

b) 通过基于Hough变换的椭圆检测方法从影像中提取出扫描点轨迹;

首先对图像进行边缘检测,得到二值化的边缘轮廓图,将边缘图上的点坐标存入数组A,其次对图像上的每一点,计算与上一步所得数组A中点的距离,得到每一点距数组A中点的最大距离,所有点中最大距离对应最小的点,即是椭圆中心(P、Q),该最大距离即是椭圆长轴长度a,然后将数组A中每一点的数值和刚才得到的三个椭圆参数P、Q、a代入椭圆方程(2)中;

$$\frac{[(x-P)\cos(\theta_e) + (y-Q)\sin(\theta_e)]^2}{a^2} + \frac{[-(x-P)\sin(\theta_e) + (y-Q)\cos(\theta_e)]^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

其中: a 、 b 为椭圆的长轴和短轴,P、Q为椭圆中心坐标, θ_e 为椭圆的旋转角度;

最后,再对参数 b 、 θ_e 进行统计,得到峰值超过一定阈值的一组参数即为椭圆,从而实现扫描轨迹自动化检测;

C) 依据图像上检测出的扫描轨迹对应的像素点,利用最小二乘方法和蛋形曲线公式,拟合拍摄的扫描轨迹点形成的轨迹方程 $F(x)$,用于准确描机载测深激光雷达扫描轨迹图形,公式如下:

$$F(x) = \frac{(a_e x^2 + b_e x + c_e)^2}{(d_e x + e_e)^2} + \left(\frac{y}{f_e}\right)^2 - 1 \quad (3)$$

式中 a_e 、 b_e 、 c_e 、 d_e 、 e_e 、 f_e 为蛋形曲线参数;

首先将轨迹方程 $F(x)$ 线性化,取至一次项,考虑到观测值是有误差的,利用附有参数的条件平差的函数模型进行参数解算,则改正数平差模型为:

$$AV + B\hat{x} + W = 0 \quad (4)$$

L 为 p 点对应的像点坐标 (x_p, y_p) 构成的观测向量, V 为观测值向量 L 的改正数, X^0 参数向量, $\hat{x}$ 为参数向量 X^0 的改正数;

参数 $X^0(a_e, b_e, c_e, d_e, e_e, f_e)$ 初始值构成的参数向量;

观测值系数对角矩阵 A 为:

$$A = \text{diag}(a_1 \ a_2 \cdots a_{n-1} \ a_n) \quad (5)$$

对于每个 a_n 有:

$$a_n = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial x_p} & \frac{\partial F}{\partial y_p} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

n 表示有 n 组检测点,每个检测点可列1个方程, x_p, y_p 表示检测点对应的像点坐标;

待求参数系数矩阵 $B: [b_1 \ b_2 \cdots b_{n-1} \ b_n]^T$,

$$b_n = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial a_e} & \frac{\partial F}{\partial b_e} & \frac{\partial F}{\partial c_e} & \frac{\partial F}{\partial d_e} & \frac{\partial F}{\partial e_e} & \frac{\partial F}{\partial f_e} \end{bmatrix} \quad (6)$$

B 为 $2n \times 6$ 的矩阵; $a_e, b_e, c_e, d_e, e_e, f_e$ 表示蛋形曲线参数;

W 为闭合差向量 $W = [w_1 \ w_2 \cdots w_{n-1} \ w_n]^T$

$$w_n = \left[\frac{(a_e x^2 + b_e x + c_e)^2}{(d_e x + e_e)^2} + \left(\frac{y}{f_e}\right)^2 - 1 \right] \quad (7)$$

最后根据最小二乘准则进行参数解算;

$$\varphi = V^T P V - 2K^T (AV + B\hat{x} - W) \quad (8)$$

K 为对应条件方程(4)的系数向量, φ 为极值函数, P 为观测值的权阵;

将 φ 对 V 和 $\hat{x}$ 求一阶导数,并令其等于0得:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial V} = 2V^T P - 2K^T A = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \hat{x}} = -2K^T B = 0 \quad (10)$$

基础方程如下:

$$\begin{cases} PV - A^T K = 0 \\ B^T K = 0 \\ AV + B\hat{x} - W = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$V = P^{-1} A^T K \quad (12)$$

$$K = (AP^{-1}A^T)^{-1} (W - B\hat{x}) \quad (13)$$

令

$$N_{aa} = AP^{-1}A^T, B^T N_{aa}^{-1} B\hat{x} - B^T N_{aa}^{-1} W = 0 \quad (14)$$

令

$$N_{bb} = B^T N_{aa}^{-1} B, \quad l = B^T N_{aa}^{-1} W \quad (15)$$

得:

$$N_{bb} \hat{x} - l = 0, \quad \hat{x} = N_{bb}^{-1} l \quad (16)$$

$$V = P^{-1} A^T K = P^{-1} A^T N_{aa}^{-1} (W - B \hat{x}) \quad (17)$$

将改正数带入,计算出观测值的平差值和参数的平差值;

$$\hat{L} = L + V, \quad \hat{X} = X^0 + \hat{x} \quad (18)$$

L为xp,yp构成的观测向量,V为观测值向量L的改正数, X^0 参数向量, $\hat{x}$ 为参数向量 X^0 的改正数, $\hat{L}$ 为观测值的平差值, $\hat{X}$ 为参数的平差值;

这里是一个迭代过程,在每次计算完成后,需要判断解算精度是否满足迭代阈值要求,直到满足迭代阈值条件结束参数计算。

一种机载测深激光雷达扫描轨迹拟合模型

技术领域

[0001] 本发明涉及光学技术领域,具体是一种机载测深激光雷达扫描轨迹拟合模型。

背景技术

[0002] 随着我国海洋活动急剧增加、海洋强国建设发展需求,海岸带、海岛礁、近岸水上水下地形、地形多变复杂潮间带等区域陆海过渡带一体化测量一直是国内外海洋测绘领域的一个难点问题。

[0003] 机载激光测深系统是海洋测绘先进技术的集中体现,具有高效、快速、陆海数据无缝获取等优势,是海岸带、海岛礁一体化测绘的首选方式。当前国外大公司均推出自己的机载激光测深系统,如Optech公司的CZMI L Nova系统、徕卡公司的鹰眼和蝙蝠系列测深系统、Fugro公司的LADS HD系统、RI EGL公司的VQ880-G等,但因商业技术保密、数据格式不公开、系统价格昂贵以及对华武器禁运令的制约存在,严重影响了我国海洋测绘技术发展和信息安全。

[0004] 我国自主研发的机载激光测深系统已经具备工程应用能力,但存在关键技术性能如激光重频、扫描点密度等指标落后欧美强国,在中国科学院上海光学精密机械研究所机载激光测深系统研发团队共同推进机载激光测深雷达产业化进程中,发现以下问题:

[0005] (1) 光路系统的角度静态修正,光路系统中转轴与发射激光光轴夹角 α 、转轴与转镜法线夹角 β 、转镜零位角 θ 在扫描系统集成过程中利用自准直仪结合光学装校方案实现各个角度逐步校准,但是各个角度修正量会受上一步装调残留误差影响,这样会导致某些角度修正量与偏离真实修正值,而且系统集成后现有光学装校方法很难对光路系统的角度进行解耦精修正,无法对修正值进行检核。

[0006] (2) 光路系统的角度动态修正,扫描系统集成后,因为国产机载激光测深雷达采用圆轴偏镜卵型扫描结构,尽管进行了配重质量分配与动平衡测试,但由于加工、转配过程中产生的误差,在转镜高速转动时,转镜质心仍然会偏离旋转轴导致偏轴力矩存在进而产生动不平衡。动不平衡的存在会对转镜产生离心作用导致扫描过程中转轴与镜面夹角会发生动态变化,变化量并会随着转速提高而增大,这种动态变化对扫描点精度影响较大且无法通过常规光学手段实现快速、精确修正。

[0007] 基于上述问题,需要精确、快速、自动化获取机载蓝绿激光测深雷达扫描轨迹曲线方程,为扫描角修正与精度评估模型提供理论支撑,为整个修正与评估工作奠定自动化和标准化基础。

发明内容

[0008] 本发明的目的在于提供一种机载测深激光雷达扫描轨迹拟合模型,以解决上述背景技术中提出的技术问题。

[0009] 为实现上述目的,本发明提供如下技术方案:

[0010] 一种机载测深激光雷达扫描轨迹拟合模型,包含以下步骤:

[0011] 步骤1. 布设场地, 架设经过标定后的相机和测深激光雷达, 设置机载测深激光雷达电机转速D进行开光扫描, 同时利用相机完整拍摄下对应转速激光点的扫描轨迹;

[0012] 步骤2. 利用自动化图像识别算法检测出照片上对应激光点的扫描轨迹;

[0013] 步骤3. 自适应蛋形曲线拟合方程: 构建一种自适应蛋形曲线拟合实际扫描点运动轨迹。

[0014] 作为本发明的进一步技术方案: 步骤1布设场地, 架设经过标定后的相机和测深激光雷达, 在机载激光测深雷达转速 $D < 50\text{rpm}$ 模式下对墙面进行扫描, 通过立体量测相机获得两张包含扫描蛋型曲线扫描轨迹的照片。

[0015] 作为本发明的进一步技术方案: 步骤2具体包括以下子步骤:

[0016] b) 通过基于Hough变换的椭圆检测方法从影像中提取出扫描点轨迹;

[0017] 首先对图像进行边缘检测, 得到二值化的边缘轮廓图, 将边缘图上的点坐标存入数组A, 其次对图像上的每一点, 计算与上一步所得数组A中点的距离, 得到每一点距数组A中点的最大距离, 所有点中最大距离对应最小的点, 即是椭圆中心(P、Q), 该最大距离即是椭圆长轴长度a, 然后将数组A中每一点的数值和刚才得到的三个椭圆参数P、Q、a代入椭圆方程(1)中;

$$[0018] \quad \frac{[(x-P)\cos(\theta_e) + (y-Q)\sin(\theta_e)]^2}{a^2} + \frac{[-(x-P)\sin(\theta_e) + (y-Q)\cos(\theta_e)]^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

[0019] 其中:a、b为椭圆的长轴和短轴,P、Q为椭圆中心坐标, θ_e 为椭圆的旋转角度。

[0020] 最后, 再对参数b、 θ_e 进行统计, 得到峰值超过一定阈值的一组参数即为椭圆, 从而实现扫描轨迹自动化检测;

[0021] C) 依据图像上检测出的扫描轨迹对应的像素点, 利用最小二乘方法和蛋形曲线公式, 拟合拍摄的扫描轨迹点形成的轨迹方程F(x), 用于准确描机载测深激光雷达扫描轨迹图形, 公式如下:

$$[0022] \quad F(x) = \frac{(a_e x^2 + b_e x + c_e)^2}{(d_e x + e_e)^2} + \left(\frac{y}{f_e}\right)^2 - 1 \quad (2)$$

[0023] 式中 a_e 、 b_e 、 c_e 、 d_e 、 e_e 、 f_e 为蛋形曲线参数;

[0024] 首先将轨迹方程F(x)线性化, 取至一次项, 考虑到观测值是有误差的, 利用附有参数的条件平差的函数模型进行参数解算, 则改正数平差模型为:

$$[0025] \quad AV + B\hat{x} + W = 0 \quad (3)$$

[0026] L为 x_p, y_p 构成的观测向量,V为观测值向量L的改正数, X^0 参数向量, $\hat{x}$ 为参数向量 X^0 的改正数;

[0027] 参数 X^0 ($a_e, b_e, c_e, d_e, e_e, f_e$) 初始值构成的参数向量。

[0028] 观测值系数矩阵A为:

$$[0029] \quad A = \text{diag}(a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_{n-1} \ a_n) \quad (4)$$

[0030] 对于每个 a_n 有:

$$[0031] \quad a_n = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial x_p} & \frac{\partial F}{\partial y_p} \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0032] n表示有n组检测点, 每个检测点可列1个方程, x_p, y_p 表示检测点对应的像点坐标。

[0033] 待求参数系数矩阵: $B = [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_{n-1} \ b_n]^T$,

$$[0034] \quad b_n = \left[\frac{\partial F}{\partial a_e} \quad \frac{\partial F}{\partial b_e} \quad \frac{\partial F}{\partial c_e} \quad \frac{\partial F}{\partial d_e} \quad \frac{\partial F}{\partial e_e} \quad \frac{\partial F}{\partial f_e} \right] \quad (6)$$

[0035] B 为 $2n \times 6$ 的矩阵; $a_e, b_e, c_e, d_e, e_e, f_e$ 表示蛋形曲线参数;

[0036] W 为闭合差向量 $W = [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_{n-1} \ w_n]^T$

$$[0037] \quad w_n = \left[\frac{(a_e x^2 + b_e x + c_e)^2}{(d_e x + e_e)^2} + \left(\frac{y}{f_e} \right)^2 - 1 \right] \quad (7)$$

[0038] 最后根据最小二乘准则进行参数解算。

$$[0039] \quad \varphi = V^T P V - 2K^T (AV + B\hat{x} - W) \quad (8)$$

[0040] K 为对应条件方程(3)的联系数, φ 为极值函数, P 为观测值的权阵;

[0041] 将 φ 对 V 和 $\hat{x}$ 求一阶导数,并令其等于0得:

$$[0042] \quad \frac{\partial \varphi}{\partial V} = 2V^T P - 2K^T A = 0 \quad (9)$$

$$[0043] \quad \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{x}} = -2K^T B = 0 \quad (10)$$

[0044] 基础方程如下:

$$[0045] \quad \begin{cases} PV - A^T K = 0 \\ B^T K = 0 \\ AV + B\hat{x} - W = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$[0046] \quad V = P^{-1} A^T K \quad (12)$$

$$[0047] \quad K = (AP^{-1}A^T)^{-1} (W - B\hat{x}) \quad (13)$$

[0048] 令

$$[0049] \quad N_{aa} = AP^{-1}A^T, \quad B^T N_{aa}^{-1} B\hat{x} - B^T N_{aa}^{-1} W = 0 \quad (14)$$

[0050] 令

$$[0051] \quad N_{bb} = B^T N_{aa}^{-1} B, \quad l = B^T N_{aa}^{-1} W \quad (15)$$

[0052] 得:

$$[0053] \quad N_{bb} \hat{x} - l = 0, \quad \hat{x} = N_{bb}^{-1} l \quad (16)$$

$$[0054] \quad V = P^{-1} A^T K = P^{-1} A^T N_{aa}^{-1} (W - B\hat{x}) \quad (17)$$

[0055] 将改正数带入,计算出观测值的平差值和参数的平差值

$$[0056] \quad \hat{L} = L + V, \quad \hat{X} = X^0 + \hat{x} \quad (18)$$

[0057] L 为 x_p, y_p 构成的观测向量, V 为观测值向量 L 的改正数, X^0 参数向量, $\hat{x}$ 为参数向量 X^0 的改正数, $\hat{L}$ 为观测值的平差值, $\hat{X}$ 为参数的平差值。

[0058] 这里是一个迭代过程,在每次计算完成后,需要判断解算精度是否满足迭代阈值要求,直到满足迭代阈值条件结束参数计算。

[0059] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0060] 本发明通过立体相机拍摄测深雷达蓝绿激光扫描完整轨迹并利用自动化图像提取算法进行扫描轨迹提取与拟合,能够精确获得扫描轨迹蛋型曲线方程。

附图说明

[0061] 图1为国产机载激光测深系统扫描轨迹图。

[0062] 图2为转镜角度关系图。

[0063] 图3为转镜结构图。

[0064] 图4为激光测深雷达实际扫描轨迹图。

具体实施方式

[0065] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整的描述,显然,所描述的实施例仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0066] 本发明针对国产机载激光测深雷达扫描轨迹构建一种自适应蛋型曲线拟合模型:

[0067] (1) 首要需要获得扫描轨迹蛋型曲线方程。通过立体相机拍摄测深雷达蓝绿激光扫描完整轨迹并利用自动化图像提取算法进行扫描轨迹提取与拟合,为此,具体开展如下:

[0068] 布设场地等,参考前面,

[0069] ②扫描轨迹自动化提取,通过相机捕获蓝绿激光测深雷达扫描轨迹,利用自动化图像识别算法将扫描点转动轨迹从图像中提取出来,为轨迹精确拟合自动化处理提供技术保障。

[0070] ③自适应蛋形曲线拟合方程,国产机载蓝绿激光扫描图案是一个近似蛋型的曲线,受系统装校精度影响,最终观测到的扫描曲线并不是一个严格的蛋形曲线,需要构建一种自适应蛋形曲线尽可能逼近实际扫描点运动轨迹,为高精度扫描角度解耦精修正提供可行性。

[0071] 工作原理如下:

[0072] 请参阅图1-4,首先,需要布设场地:

[0073] ①选择平整墙面作为扫描轨迹呈像参考平面。该墙面应尽量平整,扫描范围内平整度变化小于1mm;

[0074] ②在离平整墙面一定垂直距离且离地一定高度地方放置机载测深雷达,确保设备放置后扫描轨迹能够完整显现在墙面上;

[0075] ③布设立体相机,立体量测相机布设位置应保证立体量测相机坐标系与激光测深雷达自身轴系近似平行。

[0076] 其中,进行数据获取:

[0077] ②调整立体量测相机曝光参数和快门,在机载激光测深雷达转速D模式下利用相机捕获完整扫描轨迹。

[0078] (1) Hough变换检测扫描轨迹:从扫描轨迹可知,国产机载测深雷达扫描图案是一个蛋形曲线,但同时也接近椭圆。实际扫描轨迹如图4所示,从图中可以看出,通过控制相机

曝光与快门参数,扫描轨迹在相片中清晰可见,能够与背景非常好地区分出来,由此可以通过基于Hough变换的椭圆检测方法从影像中提取出扫描点轨迹。

[0079] 随机Hough变换采用的是多对一的映射,这种随机采样会带来大量无效的计算,当点数很大时,算法的性能急剧下降,可以利用椭圆的几何特征降低参数的维度提高算法效率与准确度。在此基础上,针对Hough需进行改进,改进依赖定理如下:

[0080] 设平面上有一个椭圆,点c为椭圆中心,任取平面上一点p(不同于点c),点p点对应的像点坐标 (x_p, y_p) ,距椭圆上点的最大距离一定大于点c距椭圆上点的最大距离。

[0081] 基于上述定理,首先对图像进行边缘检测,得到二值化的边缘轮廓图,将边缘图上的点坐标存入数组A。其次对图像上的每一点,计算与上一步所得数组A中点的距离,得到每一点距数组A中点的最大距离,所有点中最大距离对应最小的点,即是椭圆中心(P、Q),该最大距离即是椭圆长轴长度a,然后将数组A中每一点的数值和刚才得到的三个椭圆参数P、Q、a代入椭圆方程(1)中。

$$[0082] \quad \frac{[(x-P)\cos(\theta_e)+(y-Q)\sin(\theta_e)]^2}{a^2} + \frac{[-(x-P)\sin(\theta_e)+(y-Q)\cos(\theta_e)]^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

[0083] 其中:a、b为椭圆的长轴和短轴,P、Q为椭圆中心坐标, θ_e 为椭圆的旋转角度。

[0084] 最后,在对参数b、 θ_e 进行统计,得到峰值超过一定阈值的一组参数即为椭圆,从而实现扫描轨迹自动化检测。

[0085] (2) 扫描轨迹确定与蛋形曲线拟合:由上图可以看出,扫描的轨迹在图像上呈现一个蛋型曲线结构,呈现“一头大”、“一头小”的蛋型曲线。初步构建出一种蛋形曲线函数为:

$$[0086] \quad \frac{(a_e x^2 + b_e x + c_e)^2}{(d_e x + e_e)^2} + \left(\frac{y}{f_e}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

[0087] 式中 a_e 、 b_e 、 c_e 、 d_e 、 e_e 、 f_e 为蛋形曲线参数;

[0088] 依据图像上检测出的扫描轨迹对应的像素点,利用最小二乘方法和蛋形曲线公式,拟合拍摄的扫描轨迹点形成的轨迹方程 $F(x)$,用于准确描机载测深激光雷达扫描轨迹图形,公式如下:

$$[0089] \quad F(x) = \frac{(a_e x^2 + b_e x + c_e)^2}{(d_e x + e_e)^2} + \left(\frac{y}{f_e}\right)^2 - 1 \quad (3)$$

[0090] 式中 a_e 、 b_e 、 c_e 、 d_e 、 e_e 、 f_e 为蛋形曲线参数;

[0091] 首先将轨迹方程 $F(x)$ 线性化,取至一次项,考虑到观测值是有误差的,利用附有参数的条件平差的函数模型进行参数解算,则改正数平差模型为:

$$[0092] \quad AV + B\hat{x} + W = 0 \quad (4)$$

[0093] V为观测值向量L的改正数,L为 x_p, y_p 构成的观测向量;

[0094] $\hat{x}$ 为参数向量 X^0 的改正数;

[0095] 参数 X^0 ($a_e, b_e, c_e, d_e, e_e, f_e$)初始值构成的参数向量。

[0096] 观测值系数矩阵A为:

$$[0097] \quad A = \text{diag}(a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_{n-1} \ a_n) \quad (5)$$

[0098] 对于每个 a_n 有:

$$[0099] \quad a_n = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial xp} & \frac{\partial F}{\partial yp} \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0100] n表示有n组检测点,每个检测点可列1个方程,xp,yp表示检测点对应的像点坐标;

[0101] 待求参数系数矩阵B: $[b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_{n-1} \ b_n]^T$,

$$[0102] \quad b_n = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial a_e} & \frac{\partial F}{\partial b_e} & \frac{\partial F}{\partial c_e} & \frac{\partial F}{\partial d_e} & \frac{\partial F}{\partial e_e} & \frac{\partial F}{\partial f_e} \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0103] B为 $2n \times 6$ 的矩阵; a_e 、 b_e 、 c_e 、 d_e 、 e_e 、 f_e 表示蛋形曲线参数;

[0104] W为闭合差向量 $W = [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_{n-1} \ w_n]^T$

$$[0105] \quad w_n = \left[\frac{(a_e x^2 + b_e x + c_e)^2}{(d_e x + e_e)^2} + \left(\frac{y}{f_e}\right)^2 - 1 \right] \quad (8)$$

[0106] 最后根据最小二乘准则进行参数解算。

$$[0107] \quad \varphi = V^T P V - 2K^T (AV + B\hat{x} - W) \quad (9)$$

[0108] K为对应条件方程(4)的联系数, φ 为极值函数,P为观测值的权阵;

[0109] 将 φ 对V和 $\hat{x}$ 求一阶导数,并令其等于0得:

$$[0110] \quad \frac{\partial \varphi}{\partial V} = 2V^T P - 2K^T A = 0 \quad (10)$$

$$[0111] \quad \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{x}} = -2K^T B = 0 \quad (11)$$

[0112] 基础方程如下:

$$[0113] \quad \begin{cases} PV - A^T K = 0 \\ B^T K = 0 \\ AV + B\hat{x} - W = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$[0114] \quad V = P^{-1} A^T K \quad (13)$$

$$[0115] \quad K = (AP^{-1}A^T)^{-1} (W - B\hat{x}) \quad (14)$$

[0116] 令

$$[0117] \quad N_{aa} = AP^{-1}A^T, \quad B^T N_{aa}^{-1} B\hat{x} - B^T N_{aa}^{-1} W = 0 \quad (15)$$

[0118] 令

$$[0119] \quad N_{bb} = B^T N_{aa}^{-1} B, \quad l = B^T N_{aa}^{-1} W \quad (16)$$

[0120] 得:

$$[0121] \quad N_{bb} \hat{x} - l = 0, \quad \hat{x} = N_{bb}^{-1} l \quad (17)$$

$$[0122] \quad V = P^{-1} A^T K = P^{-1} A^T N_{aa}^{-1} (W - B\hat{x}) \quad (18)$$

[0123] 将改正数带入,计算出观测值的平差值和参数的平差值

$$[0124] \quad \hat{L} = L + V, \quad \hat{X} = X^0 + \hat{x} \quad (19)$$

[0125] $\hat{L}$ 为观测值的平差值, $\hat{X}$ 为参数的平差值,V为观测值向量L的改正数,L为xp,yp

构成的观测向量； $\hat{x}$ 为参数向量 x^0 的改正数；

[0126] 这里是一个迭代过程，在每次计算完成后，需要判断解算精度是否满足迭代阈值要求，直到满足迭代阈值条件结束参数计算。

[0127] 对于本领域技术人员而言，显然本发明不限于上述示范性实施例的细节，而且在不背离本发明的精神或基本特征的情况下，能够以其他的具体形式实现本发明。因此，无论从哪一点来看，均应将实施例看作是示范性的，而且是非限制性的，本发明的范围由所附权利要求而不是上述说明限定，因此旨在将落在权利要求的等同要件的含义和范围内的所有变化囊括在本发明内。不应将权利要求中的任何附图标记视为限制所涉及的权利要求。

[0128] 此外，应当理解，虽然本说明书按照实施方式加以描述，但并非每个实施方式仅包含一个独立的技术方案，说明书的这种叙述方式仅仅是为清楚起见，本领域技术人员应当将说明书作为一个整体，各实施例中的技术方案也可以经适当组合，形成本领域技术人员可以理解的其他实施方式。

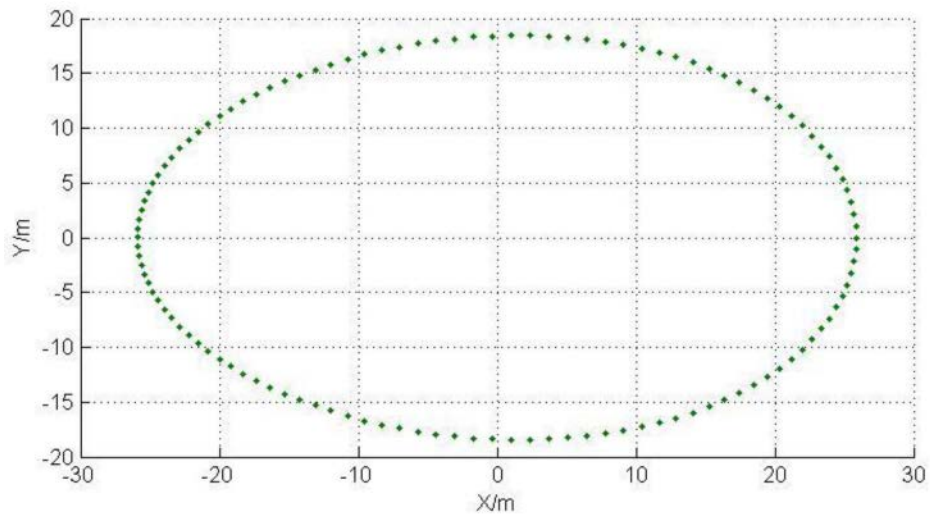


图1

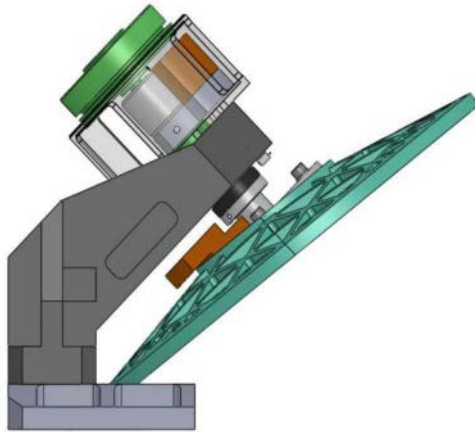


图2

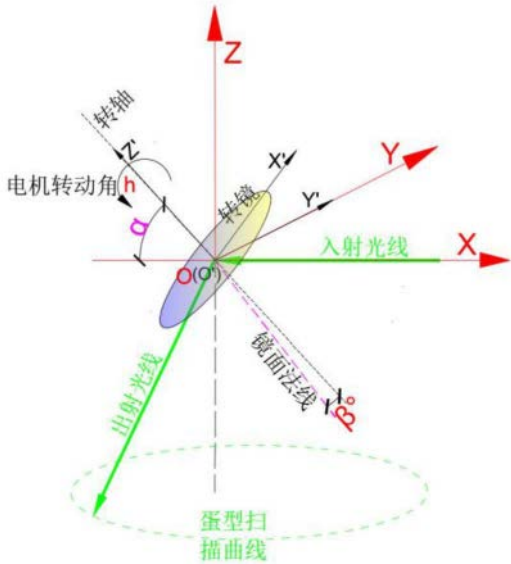


图3

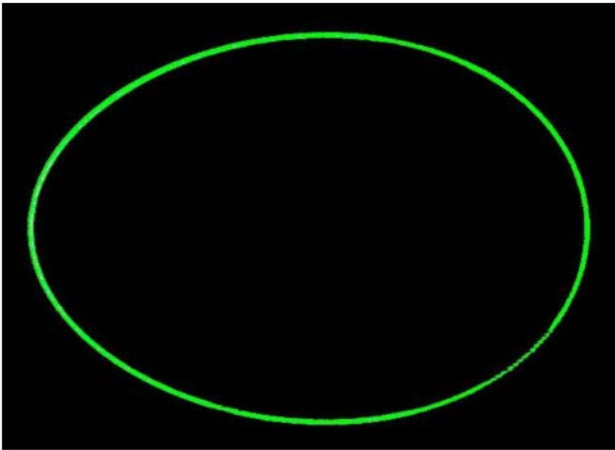


图4