

证书号第2781632号



# 发明专利证书

发明名称：一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法

发明人：卢秀山；冯成凯；石波；阳凡林；景冬；马跃；刘振；李耀宗

专利号：ZL 2015 1 0822825.6

专利申请日：2015年11月24日

专利权人：山东科技大学

授权公告日：2018年01月16日

本发明经过本局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发本证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。

本专利的专利权期限为二十年，自申请日起算。专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年11月24日前缴纳。未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

专利书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨



2018年01月16日



## (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105444779 B

(45)授权公告日 2018.01.16

(21)申请号 201510822825.6

(22)申请日 2015.11.24

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105444779 A

(43)申请公布日 2016.03.30

(73)专利权人 山东科技大学

地址 266590 山东省青岛市经济技术开发区前湾港路579号

(72)发明人 卢秀山 冯成凯 石波 阳凡林  
景冬 马跃 刘振 李耀宗

(74)专利代理机构 济南舜源专利事务有限公司  
37205

代理人 陈海滨

(51)Int.Cl.

G01C 25/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 102927974 A, 2013.02.13,

CN 101852854 A, 2010.10.06,

CN 101000242 A, 2007.07.18,

EP 2866052 A1, 2015.04.29,

张则飞等.水上水下一体化测量设备应用分析.《山西建筑》.2015,第41卷(第25期),

余建伟等.中海达船载水上水下一体化三维移动测量系统.《测绘通报》.2013,(第7期),

申家双等.海岸带地形快速移动测量技术.《海洋测绘》.2015,第35卷(第2期),

审查员 房倩

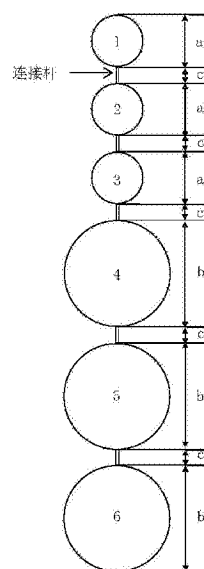
权利要求书2页 说明书10页 附图3页

(54)发明名称

一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法

(57)摘要

本发明公开了一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法,属于海洋测绘技术领域,本发明在获取船载水上水下一体化测量系统整体粗标定参数以及激光扫描仪的精检校参数基础上进行,本发明根据精检校后的激光扫描仪测量数据可作为海上检校目标物的准确空间点云数据,以此为基础比较多波束测量数据与激光扫描仪测量数据,以粗标定获得的多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏移量和旋转角作初值,获得多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏移量和旋转角度的精确修正值,实现测量系统整体校准。本发明集成了激光扫描仪和多波束测深仪,可同时获取海底地形和近岸水上地形数据,实现了船载多传感器测量系统在野外实时校准。



1. 一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法, 采用船载水上水下一体化测量系统, 其近岸水上部分包括激光扫描仪和惯性导航系统, 水下部分包括多波束测深仪, 水上部分与水下部分通过一个平台支架固连; 其中的激光扫描仪用于测量近岸水上地形数据, 多波束测深仪用于测量水下地形数据, 惯性导航系统用于为激光扫描仪和多波束测深仪提供定位信息、时间信息、姿态信息和航向信息;

其特征在于: 所述的船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法, 按照如下步骤进行:

步骤1: 将六个圆球作为一组按一定顺序串联起来并放置在水中作为检校目标物, 确保串联圆球中上方三个圆球处在水面以上并呈上、中、下按一定间距分布状态, 下方三个圆球处在水面以下并呈上、中、下分布状态;

步骤2: 选取两组或两组以上六个串联的圆球竖直放置在水中不同位置, 选取第一组六个圆球的最上方的圆球中心建立ENU坐标系, 并使选取的检校目标物的圆球中心连线与ENU坐标系的Z轴保持平行;

其中, ENU坐标系定义: 以站心为坐标系原点O, Z轴与椭球法线重合, 向上为正, y轴与原点所在经线相切, 向北为正, x轴与原点所在纬线相切, 向东为正所构成的右手空间直角坐标系;

步骤3: 行驶测量船位于检校目标物的一侧, 使船行进时惯性导航系统坐标系与建立的ENU坐标系轴向保持一致, 通过激光扫描仪和多波束测深仪同时进行信息采集, 针对检校目标物获取水上、水下测量点数据, 分别提取放置在水中的几组串联圆球的测量点信息;

步骤4: 计算多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在横摇、纵摇和艏摇方向的角度偏转量的修正值;

步骤5: 在完成以上步骤基础上, 根据通过多波束测深仪测量数据拟合获得的球心坐标与通过激光扫描仪测量数据推算获得的球心坐标, 求取多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系三个坐标轴距离偏移量的修正值。

2. 根据权利要求1所述的船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法, 其特征在于: 在步骤4中, 具体包括

步骤4.1: 对船载一体化测量系统进行整体粗标定, 获取激光扫描仪坐标系以及多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏移量和旋转角;

步骤4.2: 对激光扫描仪进行精检校, 获得激光扫描仪的精检校参数;

步骤4.3: 在XOZ平面内对横摇方向偏转夹角 $\delta_\gamma$ 大小与方向确定;

步骤4.4: 在YOZ平面内对纵摇方向偏转夹角 $\delta_\theta$ 大小与方向确定;

步骤4.5: 在XOY平面内对艏摇方向偏转夹角 $\delta_\phi$ 大小与方向确定;

步骤4.6: 获取的三个方向角度偏转修正量 $(\delta_\gamma, \delta_\theta, \delta_\phi)$ 分别为多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系下的横摇、纵摇和艏摇的角度偏转修正量, 单位为弧度。

3. 根据权利要求1所述的船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法, 其特征在于: 在步骤5中, 具体包括

步骤5.1: 将通过多波束测深仪测量数据拟合获得的水面以下三个圆球的球心坐标与通过激光扫描仪测量数据推算获得的水面以下三个圆球的球心坐标分别做差获得三组差

值,三组差值即为多波束测深仪测量数据相对于激光扫描仪测量数据在ENU坐标系的X轴、Y轴、Z轴三个方向的平移值;

步骤5.2:对步骤5.1中的三组平移值求平均值,作为多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系三个坐标轴距离偏移的修正值。

## 一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及海洋测绘技术领域,具体涉及一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法。

### 背景技术

[0002] 三维激光扫描系统可快速获取水面以上大量地形点云数据,多波束测深仪能够快速获取海底大面积地形点云数据,集成三维激光扫描仪和多波束测深仪的“船载水上水下一体化测量系统”可以同时获取海底地形和近岸水上地形数据,解决近岸海岸带和滩涂地形测量问题。“船载水上水下一体化测量系统”的整体检校是保障测量精度的重要方面。此外,船载多传感器系统用于海上作业时,有时作业条件不满足对水上水下测量数据整体检校要求,因此对于“船载水上水下一体化测量系统”整体检校方法有必要进行研究和实施,以保障一体化测量精度。

### 发明内容

[0003] 针对现有技术中存在的上述技术问题,本发明提出了一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法,设计合理,提高了测量数据的准确性,具有良好的效果。

[0004] 为了实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0005] 一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法,采用船载水上水下一体化测量系统,其近岸水上部分包括激光扫描仪和惯性导航系统,水下部分包括多波束测深仪,水上部分与水下部分通过一个平台支架固连;其中的激光扫描仪用于测量近岸水上地形数据,多波束测深仪用于测量水下地形数据,惯性导航系统用于为激光扫描仪和多波束测深仪提供定位信息、时间信息、姿态信息和航向信息;

[0006] 所述的船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法,按照如下步骤进行:

[0007] 步骤1:将六个圆球作为一组按一定顺序串联起来;选用合适材料调整串联圆球的浮力,使得串联圆球中上方三个圆球处在水面以上,下方三个圆球处在水面以下,圆球自上而下依次编号为1,2,3,4,5,6,圆球大小设计尺寸适中,水面以上圆球可被激光扫描仪充分扫描,水面以下圆球可被多波束测深仪充分扫描,同时测量数据能够表示圆球的实际外形;

[0008] 步骤2:选取2组或2组以上六个串联的圆球竖直放置在水中不同位置,2组串联圆球间距根据实际情况适当选取并选取固定位置进行稳定;选择第一组圆球检校目标物最上方1号圆球中心建立ENU坐标系,并使选取的检校目标物圆球中心连线与ENU坐标系的Z轴保持平行,即圆球中心连线保持竖直;

[0009] 其中,ENU坐标系定义:以站心为坐标系原点0,Z轴与椭球法线重合,向上为正,y轴与原点所在经线相切,向北为正,x轴与原点所在纬线相切,向东为正所构成的右手空间直角坐标系;

[0010] 步骤3:行驶测量船于目标物一侧,使船行进时惯性导航系统坐标系与建立的ENU坐标系轴向保持一致,通过激光扫描仪和多波束测深仪同时进行信息采集,针对串联圆球

目标物获取水上水下测量点数据,分别提取放置在水中的几组串联圆球的测量点信息;

[0011] 步骤4:在获取船载多传感器测量系统整体粗标定参数以及激光扫描仪的精检校参数基础上根据精检校后的激光扫描仪测量数据可作为海上检校目标物的准确空间点云数据,以粗标定获得的多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏移量和旋转角作初值,求多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏转角修正值。

[0012] 以激光扫描仪测量的数据为准,针对一组串联圆球,根据串联圆球球心在同一直线上,通过激光扫描仪测量数据拟合水面以上三个圆球球心坐标并推算出水面以下三个圆球球心坐标,利用多波束测量数据拟合水面以下三个圆球球心坐标;由水上圆球球心和水下圆球球心坐标在ENU坐标系下拟合分别在XOY平面,YOZ平面,XOZ平面的投影直线;分别在三个平面中利用激光扫描仪和多波束测量数据拟合的直线求解多波束测量数据相对于激光扫描仪数据在三个平面内的夹角,从而获得船载水上水下一体化测量系统整体检校中多波束坐标系相对惯性导航系统坐标系的角度偏转量修正值。

[0013] 步骤5:在完成以上偏转角度修正量的确定工作后,此时激光扫描仪测量数据与多波束测量数据只存在X,Y,Z三个方向的平移,对第一组检校目标物4号球,利用多波束数据拟合获得的4号圆球球心坐标与激光扫描仪数据推算4号圆球球心坐标做差获得一组差值;同理,对5号球和6号球分别进行此操作,最终获得三组多波束数据相对于激光扫描仪数据在X,Y,Z三个方向的平移值,对这三组值取平均作为多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系三个坐标轴距离偏移的修正值。

[0014] 优选地,在步骤4中,具体包括

[0015] 步骤4.1:对船载水上水下一体化测量系统进行整体粗标定,获取激光扫描仪坐标系以及多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏移量和旋转角;

[0016] 步骤4.2:对激光扫描仪进行精检校,获得激光扫描仪的精检校参数;

[0017] 步骤4.3:在XOZ平面内对横摇方向偏转夹角 $\delta_y$ 大小与方向确定

[0018] 选取第一组串联圆球检校目标物,分别利用水上和水下各三个圆球中心拟合在ENU坐标系下XOZ平面内的两条投影直线,该两条直线为:

$$[0019] \quad L_1: z = k_1x + b_1$$

$$[0020] \quad L_m: z = k_2x + b_2$$

[0021] 其中: $L_1$ 对应激光扫描仪数据拟合直线, $L_m$ 对应多波束数据拟合直线。

[0022] 取两条直线与ENU坐标系Z轴正向夹角在0到 $\pi/2$ 内的向量,则对应激光扫描仪数据的直线向量为 $(1, k_1)$ ,对应多波束数据所得直线向量为 $(1, k_2)$ 。则多波束数据相对于激光扫描仪数据在横摇方向的角度偏转为向量 $(1, k_1)$ 与向量 $(1, k_2)$ 之间的夹角。计算两向量与X轴正向的夹角余弦值,用向量 $(1, 0)$ 代表X轴正向的,若多波束对应向量与X轴正向的夹角余弦值大于激光扫描仪对应向量与X轴正向的夹角余弦值,则定义横摇偏转角为正值;若多波束对应向量与X轴正向的夹角余弦值小于激光扫描仪对应向量与X轴正向的夹角余弦值,则定义横摇偏转角 $\delta_y$ 为负值

[0023] 步骤4.4:在YOZ平面内对纵摇方向偏转夹角 $\delta_\theta$ 大小与方向确定

[0024] 选取第一组串联圆球检校目标物,分别利用水上和水下各三个圆球中心拟合在ENU坐标系下YOZ平面内的两条投影直线,这两条直线为:

$$[0025] \quad L_1: z = k_1y + b_1$$

[0026]  $L_m: z = k_2 y + b_2$

[0027] 其中:  $L_1$  对应激光扫描仪数据拟合直线,  $L_m$  对应多波束数据拟合直线。

[0028] 取两条直线与ENU坐标系Z轴正向夹角在0到 $\pi/2$ 内的向量, 则对应激光扫描仪数据的直线向量为  $(1, k_1)$ , 对应多波束数据所得直线向量为  $(1, k_2)$ 。则多波束数据相对于激光扫描仪数据在纵摇方向的角度偏转为向量  $(1, k_1)$  与向量  $(1, k_2)$  之间的夹角。计算两向量与Y轴正向的夹角余弦值, 用向量  $(1, 0)$  代表Y轴正向, 若多波束对应向量与Y轴正向的夹角余弦值大于激光扫描仪对应向量与Y轴正向的夹角余弦值, 则定义纵摇偏转角为负值; 若多波束对应向量与Y轴正向的夹角余弦值小于激光扫描仪对应向量与Y轴正向的夹角余弦值, 则定义纵摇偏转角 $\delta_\theta$ 为正值

[0029] 步骤4.5: 在XOY平面内对艏摇方向偏转夹角 $\delta_\varphi$ 大小与方向确定

[0030] 求艏摇方向偏转角度需要用到两组串联圆球检校目标物。首先对两组串联圆球检校目标物分别对其水面以上三个圆球球心进行拟合直线。利用该拟合的直线以及串联圆球的设计尺寸推算水面以下三个圆球的球心位置, 获得两组检校目标物水面以下由激光扫描仪数据推算的圆球球心坐标。同时对水面以下的两组各三个圆球利用多波束测量数据进行球面拟合获取球心坐标。

[0031] 两组检校目标物在水面以下对应4号球可在XOY平面分别利用激光扫描仪数据推算的球心坐标获得投影直线 $y = k_1 x + b_1$ , 利用多波束数据拟合获得的球心坐标获得投影直线 $y = k_2 x + b_2$ 。取两条直线与ENU坐标系Y轴正向夹角在0到 $\pi/2$ 内的向量, 则对应激光扫描仪数据的直线向量为  $(1, k_1)$ , 对应多波束数据所得直线向量为  $(1, k_2)$ 。则多波束数据相对于激光扫描仪数据在艏摇方向的角度偏转为向量  $(1, k_1)$  与向量  $(1, k_2)$  之间的夹角。计算两向量与X轴正向的夹角余弦值, 用向量  $(1, 0)$  代表X轴正向, 若多波束对应向量与X轴正向的夹角余弦值大于激光扫描仪对应向量与X轴正向的夹角余弦值, 则定义纵摇偏转角为正值; 若多波束对应向量与X轴正向的夹角余弦值小于激光扫描仪对应向量与X轴正向的夹角余弦值, 则定义纵摇偏转角为负值。同理, 再取两组检校目标物在水面以下对应5号球可在XOY平面分别利用激光扫描仪数据推算的球心坐标和利用多波束数据拟合获得的球心坐标获得两条直线, 利用上述方法求多波束数据对应直线相对于激光扫描仪数据对应直线的夹角并确定正负。最后对两组检校目标物在水面以下对应6号球利用上述方法求解多波束数据对应直线相对于激光扫描仪数据对应直线的夹角并确定正负。

[0032] 最后利用两组检校目标物获得4, 5, 6号球三组多波束数据对应直线相对于激光扫描仪数据对应直线确定正负的夹角, 对这三组夹角求平均值作为艏摇方向偏转夹角 $\delta_\varphi$ 。

[0033] 步骤4.6: 获取的三个方向角度偏转修正量 $(\delta_\gamma, \delta_\theta, \delta_\varphi)$ 分别为多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系下的横摇、纵摇和艏摇的角度偏转修正量, 单位为弧度。

[0034] 考虑到小角的情况下, 对于角度修正量的近似旋转矩阵为

$$[0035] \quad \Omega_{b^*}^b = \begin{pmatrix} 0 & -\delta_\varphi & \delta_\gamma \\ \delta_\varphi & 0 & -\delta_\theta \\ -\delta_\gamma & \delta_\theta & 0 \end{pmatrix}$$

[0036] 利用以上旋转矩阵对多波束原始数据进行修正, 将测量数据重新归算到地心地固坐标系下, 归算公式为:

$$[0037] \quad \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{oe} + R_l^e \cdot R_b^l \cdot \left[ (I + \Omega_b^{b*}) \cdot R_m^{b*} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix}_b + \begin{bmatrix} \Delta l_x \\ \Delta l_y \\ \Delta l_z \end{bmatrix}_b \right]$$

[0038] 其中:  $[X_e \ Y_e \ Z_e]$  为地心地固坐标系下坐标;  $[X \ Y \ Z]_{oe}$  为惯性导航系统中心在地心地固坐标系下坐标;  $R_l^e$  为当地水平坐标系向地心地固坐标系的旋转矩阵, 此处当地水平坐标系为测量时惯性导航系统中心所在位置为原点建立的当地水平坐标系;  $R_b^l$  为惯性导航系统坐标系向当地水平坐标系的旋转矩阵, 此处当地水平坐标系为测量时惯性导航系统中心所在位置为原点建立的当地水平坐标系;  $R_m^{b*}$  为粗标定后多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系的初始旋转矩阵;  $(I + \Omega_b^{b*})$  为校准获得的对粗标定后多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系角度偏转的修正矩阵,  $I$  为单位阵;  $[X \ Y \ Z]_m$  为多波束坐标系下的测量点坐标;  $[l_x \ l_y \ l_z]_b$  为粗标定后多波束坐标系中心相对惯性导航系统中心的初始偏移量;  $[\Delta l_x \ \Delta l_y \ \Delta l_z]_b$  为多波束坐标系中心相对于惯性导航系统坐标系中心偏移量的修正量, 当前未进行偏移量的修正量计算, 因此当前步骤可设置为零。

[0039] 重新转换测量点坐标到建立的ENU坐标系下坐标, 求解多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系的横摇、纵摇以及艏摇三个方向角度偏转的修正量, 改正到前一次的角度偏转修正量中, 迭代该过程直到多波束测量平面的法向量与激光扫描仪测量平面的法向量夹角小于一定阈值时结束迭代, 该阈值由实际情况确定。整个迭代过程获得的多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系的横摇、纵摇以及艏摇三个方向旋转量的修正量为最终角度检校结果。

[0040] 本发明所带来的有益技术效果:

[0041] 本发明提出了一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法, 与现有技术相比, 一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法, 集成了激光扫描仪和多波束测深仪, 可以同时获取海底地形和近岸水上地形数据, 解决近岸海岸带和滩涂地形测量问题; 激光扫描仪精检校获取的偏移量和旋转角度具有较高精度, 以精检校后激光扫描仪测量的数据为准, 求取多波束测量目标结果相对于激光扫描仪测量并推算至同一目标结果的距离偏差以及多波束测量数据相对于激光扫描仪测量数据的横摇、纵摇和艏摇角度偏转量, 实现了船载水上水下一体化测量系统野外实时校准, 对漂浮于水中的目标物进行一体化测量。

[0042] 本发明可用于实验水池系统的整体检校或海上没有合适固定检校目标时船载水上水下一体化测量系统的整体检校。

## 附图说明

[0043] 图1为本发明一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法中检校目标物的示意图。

[0044] 图2为在本发明一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法中检校目标物上建立ENU坐标系的示意图。

[0045] 图3为本发明一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法的流程框图。



## 具体实施方式

[0046] 下面结合附图以及具体实施方式对本发明作进一步详细说明：

[0047] 如图1所示,设计的刚性连接检校目标物,其中:上方三圆球直径都为a,下方三圆球直径都为b,圆球之间间隔为c(以上设计尺寸根据实际需要适当调整,并且圆球数目也可根据情况适当添加,圆球之间的连接杆设计有螺纹,使用时旋进圆球,使用结束可拆卸。一旦使用连接杆连接好圆球后,整体检校目标物作为刚性连接物体)。

[0048] 首先介绍一下本发明所需要的理论基础:

[0049] 1. 球面拟合理论

[0050] 根据球面公式

$$[0051] \quad (x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 = R^2 \quad (1)$$

[0052] 对于测量点 $(x_i, y_i, z_i)$ 可根据圆球半径得到以下表达式:

$$[0053] \quad V_i = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 + (z_i - c)^2} - R \quad (2)$$

[0054] 令

$$[0055] \quad L_i = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 + (z_i - c)^2}$$

[0056] 对圆心坐标求偏导可得:

$$[0057] \quad \frac{\partial L_i}{\partial a} = \frac{-(x_i - a)}{\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 + (z_i - c)^2}}$$

$$[0058] \quad \frac{\partial L_i}{\partial b} = \frac{-(y_i - b)}{\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 + (z_i - c)^2}}$$

$$[0059] \quad \frac{\partial L_i}{\partial c} = \frac{-(z_i - c)}{\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 + (z_i - c)^2}}$$

[0060] 取球心近似值 $(a_0, b_0, c_0)$ ,利用泰勒公式展开得:

$$V_i = B\hat{x} - 1$$

$$[0061] \quad = \frac{\partial L_i}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial L_i}{\partial b} \Delta b + \frac{\partial L_i}{\partial c} \Delta c - (R - L_i^0) \quad (3)$$

[0062] 其中: $V_i$ 为圆球半径误差, $L_i^0$ 圆球半径近似值, $\hat{x}$ 为对应近似值的微小改正量,B为泰勒公式展开时微小量系数,1为已知圆球半径与圆球半径近似值之差。对于n个点有:

$$[0063] \quad L_i^0 = \sqrt{(x_i - a_0)^2 + (y_i - b_0)^2 + (z_i - c_0)^2}$$

$$[0064] \quad B = \begin{bmatrix} \frac{-(x_1 - a_0)}{L_1^0} & \frac{-(y_1 - b_0)}{L_1^0} & \frac{-(z_1 - c_0)}{L_1^0} \\ \frac{-(x_2 - a_0)}{L_2^0} & \frac{-(y_2 - b_0)}{L_2^0} & \frac{-(z_2 - c_0)}{L_2^0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{-(x_n - a_0)}{L_n^0} & \frac{-(y_n - b_0)}{L_n^0} & \frac{-(z_n - c_0)}{L_n^0} \end{bmatrix}$$

$$[0065] \quad \hat{X} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, X^0 = \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \\ c_0 \end{bmatrix}, \hat{x} = \begin{bmatrix} \Delta a \\ \Delta b \\ \Delta c \end{bmatrix}$$

$$[0066] \quad l = R - L_i^0$$

[0067] 利用最小二乘平差:

$$[0068] \quad \sum v^2 = \min \quad (4)$$

[0069] 经过解算得到微小量 ( $\Delta a, \Delta b, \Delta c$ ), 进而得到球心坐标 ( $a, b, c$ )。进行迭代计算, 当近似值对应微小量足够小并满足要求时停止, 此时获得最终圆球球心坐标。

[0070] 2. 平面内直线拟合理论

[0071] 该专利中主要使用三个点进行平面内直线拟合

[0072] 以在XOY平面为例, 设三个点分别为 $P_1(X_1, Y_1)$ ,  $P_2(X_2, Y_2)$ ,  $P_3(X_3, Y_3)$ 。

[0073] 设待拟合的直线为:

$$[0074] \quad y = kx + b。$$

[0075] 三个点到待拟合的直线距离为:

$$[0076] \quad d_i = \frac{|kX_i - Y_i + b|}{\sqrt{k^2 + 1}}$$

[0077] 其中 $i=1, 2, 3$ 。

[0078] 拟合的直线应满足使以上三个点到该直线的距离平方和最小。因此

$$[0079] \quad d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 = \min$$

[0080] 将上式带入得:

$$[0081] \quad \frac{|kX_1 - Y_1 + b|^2}{k^2 + 1} + \frac{|kX_2 - Y_2 + b|^2}{k^2 + 1} + \frac{|kX_3 - Y_3 + b|^2}{k^2 + 1} = \min$$

[0082] 上式等价于

$$[0083] \quad (kX_1 - Y_1 + b)^2 + (kX_2 - Y_2 + b)^2 + (kX_3 - Y_3 + b)^2 = \min$$

[0084] 令

$$[0085] \quad f = (kX_1 - Y_1 + b)^2 + (kX_2 - Y_2 + b)^2 + (kX_3 - Y_3 + b)^2$$

[0086] 求f的最小值则首先对k和b求偏导并使其为零:

$$[0087] \quad \frac{\partial f}{\partial k} = 2X_1(kX_1 - Y_1 + b) + 2X_2(kX_2 - Y_2 + b) + 2X_3(kX_3 - Y_3 + b) = 0$$

$$[0088] \quad \frac{\partial f}{\partial b} = 2(kX_1 - Y_1 + b) + 2(kX_2 - Y_2 + b) + 2(kX_3 - Y_3 + b) = 0$$

[0089] 联立以上两个方程可求的k和b。进而得到拟合直线 $y = kx + b$ 。

[0090] 一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法(如图3所示), 该方法采用R2sonic 2024多波束测深仪, RIEGL VZ1000激光扫描仪, SPAN-LCI惯性导航系统系统, 按照如下步骤进行:

[0091] 步骤1: 将六个圆球作为一组按一定顺序串联起来; 选用合适材料调整串联圆球的浮力, 使得串联圆球中上方三个圆球处在水面以上, 下方三个圆球处在水面以下。圆球自上而下依次编号为1, 2, 3, 4, 5, 6。圆球大小设计尺寸适中, 水面以上圆球可被激光扫描仪充分扫描, 水面以下圆球可被多波束测深仪充分扫描, 同时测量数据能够表示圆球的实际外形;

[0092] 步骤2:选取2组或2组以上串联的圆球竖直放置在水中不同位置,2组串联圆球间距根据实际情况适当选取并选取固定位置进行稳定;选择第一组圆球检校目标物最上方1号圆球中心建立ENU坐标系,并使选取的检校目标物圆球中心连线与ENU坐标系的Z轴保持平行,即圆球中心连线保持竖直。

[0093] ENU坐标系(站心坐标系或者当地水平坐标系)定义:以站心为坐标系原点0,Z轴与椭球法线重合,向上为正(天向),y轴与原点所在经线相切,向北为正(北向),x轴与原点所在纬线相切,向东为正(东向)所构成的右手空间直角坐标系。

[0094] 步骤3:行驶测量船于目标物一侧,使船行进时惯性导航系统坐标系与建立的ENU坐标系轴向保持一致,通过激光扫描仪和多波束测深仪同时进行信息采集,针对串联圆球目标物获取水上水下测量点数据,分别提取放置在水中的几组串联圆球的测量点信息,进行球面拟合,获取水上水下圆球球心点坐标并归算到步骤2中建立的ENU坐标系下坐标;

[0095] 步骤4:在获取船载多传感器测量系统整体粗标定参数以及激光扫描仪的精检校参数基础上根据精检校后的激光扫描仪测量数据可作为海上检校目标物的准确空间点云数据,以粗标定获得的多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏移量和旋转角作初值,求多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏转角修正值。

[0096] 以激光扫描仪测量的数据为准,针对一组串联圆球,根据串联圆球球心在同一直线上,通过激光扫描仪测量数据拟合水面以上三个圆球球心坐标并推算出水面以下三个圆球球心坐标,利用多波束测量数据拟合水面以下三个圆球球心坐标;由水上圆球球心和水下圆球球心坐标在ENU坐标系下拟合分别在XOY平面,YOZ平面,XOZ平面的投影直线;分别在三个平面中利用激光扫描仪和多波束测量数据拟合的直线求解多波束测量数据相对于激光扫描仪数据在三个平面内的夹角,从而获得船载水上水下一体化测量系统整体检校中多波束坐标系相对惯性导航系统坐标系的偏转量修正值。

[0097] 在步骤4中,具体包括

[0098] 步骤4.1:对船载一体化测量系统进行整体粗标定,获取激光扫描仪坐标系以及多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏移量和旋转角;

[0099] 步骤4.2:对激光扫描仪进行精检校,获得激光扫描仪的精检校参数;

[0100] 步骤4.3:在XOZ平面内横摇方向偏转夹角 $\delta_y$ 大小与方向确定

[0101] 选取第一组串联圆球检校目标物,分别利用水上和水下各三个圆球中心拟合在ENU坐标系下XOZ平面内的两条投影直线,该两条直线为:

$$[0102] \quad L_1: z = k_1x + b_1$$

$$[0103] \quad L_m: z = k_2x + b_2$$

[0104] 其中: $L_1$ 对应激光扫描仪数据拟合直线, $L_m$ 对应多波束数据拟合直线。

[0105] 取两条直线与ENU坐标系Z轴正向夹角在0到 $\pi/2$ 内的向量,则对应激光扫描仪数据的直线向量为 $(1, k_1)$ ,对应多波束数据所得直线向量为 $(1, k_2)$ 。则多波束数据相对于激光扫描仪数据在横摇方向的角度偏转为向量 $(1, k_1)$ 与向量 $(1, k_2)$ 之间的夹角。计算两向量与X轴正向的夹角余弦值,用向量 $(1, 0)$ 代表X轴正向的,若多波束对应向量与X轴正向的夹角余弦值大于激光扫描仪对应向量与X轴正向的夹角余弦值,则定义横摇偏转角为正值;若多波束对应向量与X轴正向的夹角余弦值小于激光扫描仪对应向量与X轴正向的夹角余弦值,则定义横摇偏转角 $\delta_y$ 为负值

[0106] 步骤4.4:在YOZ平面内对纵摇方向偏转夹角 $\delta_\theta$ 大小与方向确定

[0107] 选取第一组串联圆球检校目标物,分别利用水上和水下各三个圆球中心拟合在ENU坐标系下YOZ平面内的两条投影直线,这两条直线为:

[0108]  $L_1: z = k_1 y + b_1$

[0109]  $L_m: z = k_2 y + b_2$

[0110] 其中: $L_1$ 对应激光扫描仪数据拟合直线, $L_m$ 对应多波束数据拟合直线。

[0111] 取两条直线与ENU坐标系Z轴正向夹角在0到 $\pi/2$ 内的向量,则对应激光扫描仪数据的直线向量为 $(1, k_1)$ ,对应多波束数据所得直线向量为 $(1, k_2)$ 。则多波束数据相对于激光扫描仪数据在纵摇方向的角度偏转为向量 $(1, k_1)$ 与向量 $(1, k_2)$ 之间的夹角。计算两向量与Y轴正向的夹角余弦值,用向量 $(1, 0)$ 代表Y轴正向,若多波束对应向量与Y轴正向的夹角余弦值大于激光扫描仪对应向量与Y轴正向的夹角余弦值,则定义纵摇偏转角为负值;若多波束对应向量与Y轴正向的夹角余弦值小于激光扫描仪对应向量与Y轴正向的夹角余弦值,则定义纵摇偏转角 $\delta_\theta$ 为正值

[0112] 步骤4.5:在XOY平面内对艏摇方向偏转夹角 $\delta_\varphi$ 大小与方向确定

[0113] 求艏摇方向偏转角度需要用到两组串联圆球检校目标物。首先对两组串联圆球检校目标物分别对其水面以上三个圆球球心进行拟合直线。利用该拟合的直线以及串联圆球的设计尺寸已知推算水面以下三个圆球的球心位置。这样获得两组检校目标物水面以下由激光扫描仪数据推算的圆球球心坐标。同时,对水面以下的两组个三个圆球利用多波束测量数据进行球面拟合获取球心坐标。

[0114] 两组检校目标物在水面以下对应4号球可在XOY平面分别利用激光扫描仪数据推算的球心坐标获得投影直线 $y = k_1 x + b_1$ ,利用多波束数据拟合获得的球心坐标获得投影直线 $y = k_2 x + b_2$ 。取两条直线与ENU坐标系Y轴正向夹角在0到 $\pi/2$ 内的向量,则对应激光扫描仪数据的直线向量为 $(1, k_1)$ ,对应多波束数据所得直线向量为 $(1, k_2)$ 。则多波束数据相对于激光扫描仪数据在艏摇方向的角度偏转为向量 $(1, k_1)$ 与向量 $(1, k_2)$ 之间的夹角。计算两向量与X轴正向的夹角余弦值,用向量 $(1, 0)$ 代表X轴正向,若多波束对应向量与X轴正向的夹角余弦值大于激光扫描仪对应向量与X轴正向的夹角余弦值,则定义纵摇偏转角为正值;若多波束对应向量与X轴正向的夹角余弦值小于激光扫描仪对应向量与X轴正向的夹角余弦值,则定义纵摇偏转角为负值。同理,再取两组检校目标物在水面以下对应5号球可在XOY平面分别利用激光扫描仪数据推算的球心坐标和利用多波束数据拟合获得的球心坐标获得两条直线,利用上述方法求多波束数据对应直线相对于激光扫描仪数据对应直线的夹角并确定正负。最后对两组检校目标物在水面以下对应6号球利用上述方法求解多波束数据对应直线相对于激光扫描仪数据对应直线的夹角并确定正负。

[0115] 最后利用两组检校目标物获得4,5,6号球三组多波束数据对应直线相对于激光扫描仪数据对应直线确定正负的夹角。对这三组夹角求平均值作为艏摇方向偏转夹角 $\delta_\varphi$ 。

[0116] 步骤4.6:获取的三个方向角度偏转修正量 $(\delta_\gamma, \delta_\theta, \delta_\varphi)$ 分别为多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系下的横摇,纵摇和艏摇的角度偏转修正量,单位为弧度。考虑到小角的情况下,对于角度修正量的近似旋转矩阵为

$$[0117] \quad \Omega_{b*}^b = \begin{pmatrix} 0 & -\delta_\varphi & \delta_\gamma \\ \delta_\varphi & 0 & -\delta_\theta \\ -\delta_\gamma & \delta_\theta & 0 \end{pmatrix}$$

[0118] 利用以上旋转矩阵对多波束原始数据进行修正,将测量数据重新归算到地心地固坐标系下,归算公式为:

$$[0119] \quad \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{oe} + R_l^e \cdot R_b^l \cdot \left[ (I + \Omega_{b*}^b) \cdot R_m^{b*} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix}_b + \begin{bmatrix} \Delta l_x \\ \Delta l_y \\ \Delta l_z \end{bmatrix}_b \right]$$

[0120] 其中:  $[X_e \ Y_e \ Z_e]$  为地心地固坐标系下坐标;  $[X \ Y \ Z]_{oe}$  为惯性导航系统中心在地心地固坐标系下坐标;  $R_l^e$  为当地水平坐标系向地心地固坐标系的旋转矩阵,此处当地水平坐标系为测量时惯性导航系统中心所在位置为原点建立的当地水平坐标系;  $R_b^l$  为惯性导航系统坐标系向当地水平坐标系的旋转矩阵,此处当地水平坐标系为测量时惯性导航系统中心所在位置为原点建立的当地水平坐标系;  $R_m^{b*}$  为粗标定后多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系的初始旋转矩阵;  $(I + \Omega_{b*}^b)$  为校准获得的对粗标定后多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系角度偏转的修正矩阵,  $I$  为单位阵;  $[X \ Y \ Z]_m$  为多波束坐标系下的测量点坐标;  $[l_x \ l_y \ l_z]_b$  为粗标定后多波束坐标系中心相对惯性导航系统中心的初始偏移量;  $[\Delta l_x \ \Delta l_y \ \Delta l_z]_b$  为多波束坐标系中心相对于惯性导航系统坐标系中心偏移量的修正量,当前未进行偏移量的修正量计算,因此当前步骤可设置为零。

[0121] 重新转换测量点坐标到建立的ENU坐标系下坐标,求解多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系的横摇、纵摇以及艏摇三个方向角度偏转的修正量,改正到前一次的角度偏转修正量中,迭代该过程直到多波束测量平面的法向量与激光扫描仪测量平面的法向量夹角小于一定阈值时结束迭代,该阈值由实际情况确定。整个迭代过程获得的多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系的横摇、纵摇以及艏摇三个方向旋转量的修正量为最终角度检校结果。

[0122] 步骤5:在完成以上偏转角度修正量的确定工作后,此时激光扫描仪测量数据与多波束测量数据只存在X,Y,Z三个方向的平移。对第一组检校目标物4号球,利用多波束数据拟合获得的4号圆球球心坐标与激光扫描仪数据推算4号圆球球心坐标做差获得一组差值。同理,对5号球和6号球分别进行此操作,最终获得三组多波束数据相对于激光扫描仪数据在X,Y,Z三个方向的平移值,对这三组值取平均作为多波束坐标系相对于惯性导航系统坐标系三个坐标轴距离偏移的修正值。

[0123] 一种船载水上水下一体化测量系统野外实时校准方法,集成了激光扫描仪和多波束测深仪,可以同时获取海底地形和近岸水上地形数据,解决近岸海岸带和滩涂地形测量问题;激光扫描仪精检校获取的偏移量和旋转角度具有较高精度,以精检校后激光扫描仪测量的数据为准,求取多波束测量目标结果相对于激光扫描仪测量并推算至同一目标结果的距离偏差以及多波束测量数据相对于激光扫描仪测量数据的横摇、纵摇和艏摇角度偏转量,实现了船载水上水下一体化测量系统野外实时校准,对漂浮于水中的目标物进行一体化测量。

[0124] 本发明可用于实验水池系统的整体检校或海上没有合适固定检校目标时船载水

上水下一体化测量系统的整体检校。

[0125] 当然,上述说明并非是对本发明的限制,本发明也并不仅限于上述举例,本技术领域的技术人员在本发明的实质范围内所做出的变化、改型、添加或替换,也应属于本发明的保护范围。

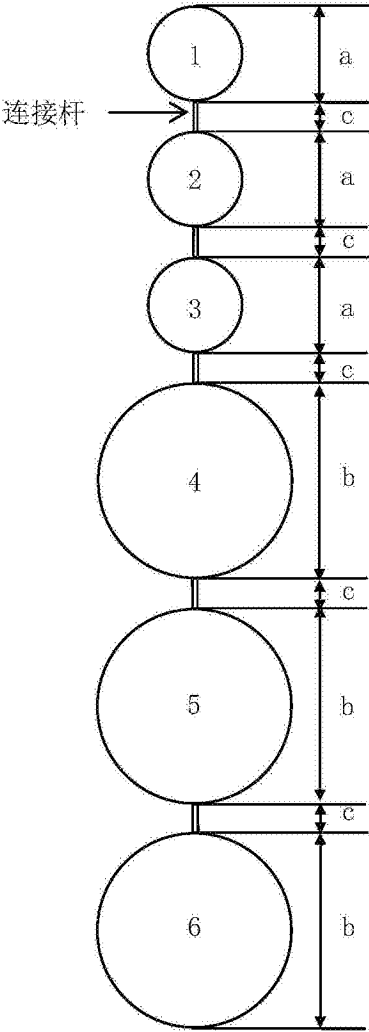


图1

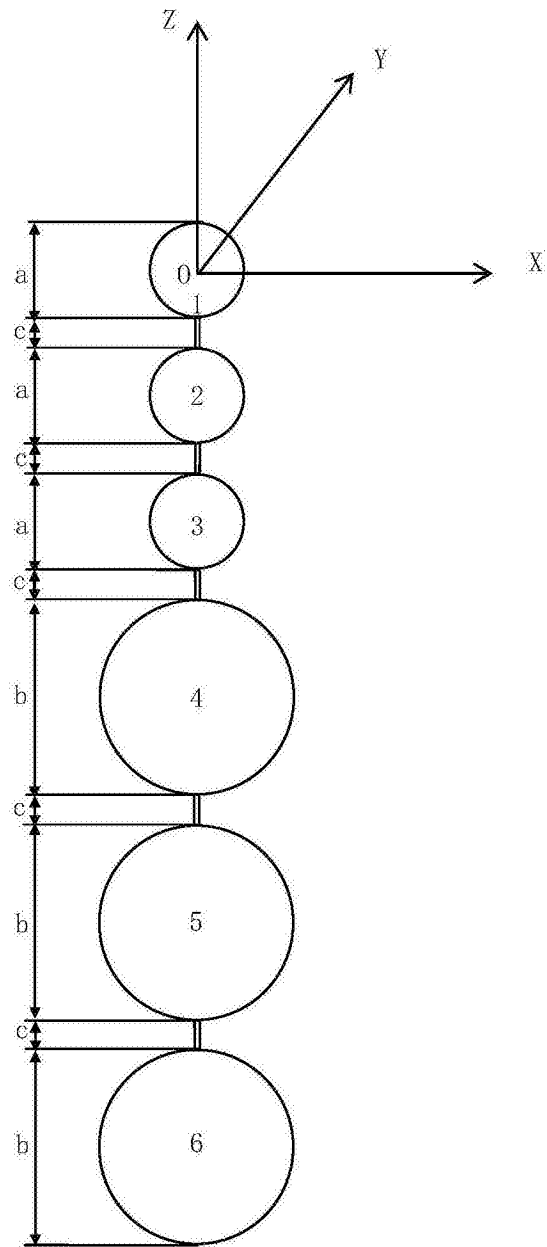


图2



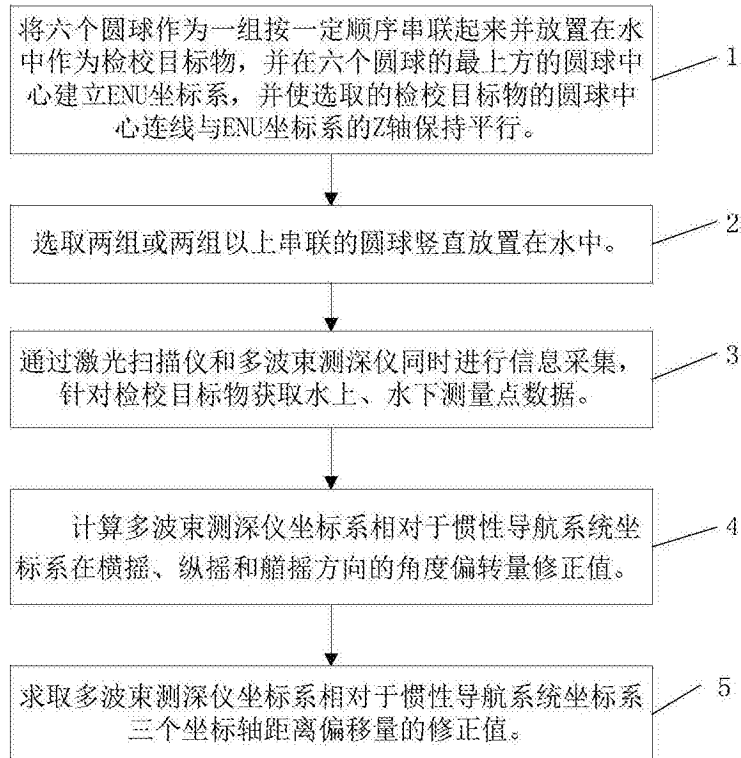


图3