

水下目标卫星导航定位修正技术研究

李德仁¹ 闫 军¹

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:提出了一种基于小型拖曳浮体进行水下目标卫星导航的原理模型,给出了模型的基本体系架构。为了从水面导航定位结果推算水下目标高精度位置信息,推导了两种定位修正算法,并基于数据融合技术提高了水下目标卫星定位修正的精度。试验结果表明,采用该技术可以较好地满足水下导航的精度要求。

关键词:水下目标;卫星定位;修正

中图法分类号:P228.42

高精度的水下导航定位技术对于水下机器人的精密定位作业具有重要意义。水下环境复杂多变,如何使水下机器人在潜航时获得较高精度的定位参数,一直是水下机器人导航定位的难题和关键技术。在不断完善自主导航系统的同时,被动导航技术也在飞速发展,研究方法主要有海洋 GPS 的三浮标法、四浮标法和单个装载超短基线的智能型浮标定位法^[1]。这些方法均依赖于声学传递浮标与水下运载体相对位置的信息,需要事先布设水声基阵,作业区域有限,受海洋和气象条件影响较大,水面船舶保障任务重,且作业效率较低,测量工序繁琐,通常需要几小时甚至一两天的时间^[1],难以满足水下运行器大范围快速作业的要求。针对以上问题,本文提出了以小型拖曳浮体为核心的水下 GPS 定位原理模型^[2],主要讨论了水下卫星定位的修正算法。

1 水下卫星定位修正技术

采用内置卫星导航接收设备的小型拖曳浮体,为水下机器人引入卫星导航信息。小型拖曳浮体内的捷联式惯性测量单元主要解决以下两个问题:① 测量从水下机器人释放起至浮体卫星定位时刻,浮体与水下机器人之间的相对位移;② 与卫星导航接收机构成浮体内的组合导航系统,保证水面定位数据的可靠性;基于广义卡尔曼滤波技术^[3]与水下主导航系统构成多传感器信息

融合系统,提供水下高精度定位服务。

该系统架构定位主要误差来源于两个方面:① 水面浮体的定位误差;② 水下机器人与水面浮体之间相对位置的测量误差。保证水下机器人的定位精度,就要控制这两个主要的误差源。

由于水面拖曳浮体与水下机器人之间存在较大的间距,需要通过修正才能获得水下机器人的真实位置,而修正算法的优劣直接关系到水下机器人的定位精度。

水下卫星定位修正就是求出拖曳浮体与水下机器人之间的相对位置差,并将水面定位成果推算至水下机器人导航坐标系^[1]。本模型采用两种方法获得两者之间的相对位置关系:① 通过拖缆方程计算拖缆长度在导航坐标系下的投影;② 通过内置于拖曳浮体内的捷联式惯性测量单元,在拖曳浮体从水下机器人释放至水面的过程中进行积分计算,获得两者之间的相对位移关系。为了提高精度,采用信息融合技术,将两者的测量值进行融合^[4]来获得修正结果。

1.1 拖缆方程

拖缆连接水下机器人与水面拖曳浮体,一方面拖曳水面浮体运行,另一方面用作供电和信息传递通路。

对拖缆的三维空间模型进行受力分析,需要建立两个坐标系,如图 1 所示。其一以浮体的微带天线相位中心为原点,以水下机器人的航向为 x 轴,竖直向上为 z 轴, x 、 y 、 z 轴构成右手系,而 i 、 j 和 k

为浮体坐标系的直角坐标单位向量。其二是拖缆微元坐标系， $\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}$ 为缆绳上任一点 P 处的一组直角坐标单位向量， \boldsymbol{u} 为 P 点处的拖缆方向，其中，水平面与向量 \boldsymbol{u} 之间的夹角为 φ ， \boldsymbol{u} 在水平面上的投影与矢量 \boldsymbol{i} 的夹角为 ϕ 。 $\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}$ 方向满足：

$$\boldsymbol{u} = \cos\varphi\cos\phi\times\boldsymbol{i} + \cos\varphi\sin\phi\times\boldsymbol{j} + V_z\sin\varphi\times\boldsymbol{k} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{v} = -V_x\sin\phi\times\boldsymbol{i} + \cos\phi\times\boldsymbol{j} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{w} = -V_x\sin\varphi\cos\phi\times\boldsymbol{i} - \sin\varphi\sin\phi\times\boldsymbol{j} + V_z\cos\varphi\times\boldsymbol{k} \tag{3}$$

设 ds_u 是位于某点处的长为无穷小的缆绳元，缆绳元的长度在 x, y 和 z 轴方向上的投影为：

$$dx = ds_u \times \boldsymbol{i} = ds\cos\phi\cos\varphi \tag{4}$$

$$dy = ds_u \times \boldsymbol{j} = ds\cos\phi\sin\varphi \tag{5}$$

$$dz = ds_u \times \boldsymbol{k} = ds\sin\varphi \tag{6}$$

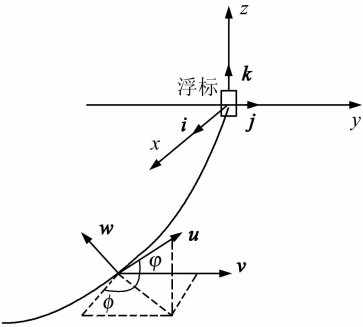


图 1 拖缆微元参考坐标系

Fig. 1 Tug Unit Reference Coordinate System

作用在拖缆绳元上的力有拖缆绳元浸没在水中的合成重力 p 、拖缆绳元上的水动力阻力和拖缆绳元两端的拉力 T 。当水下机器人与拖曳浮体处于动力学平衡状态时，导线缆绳元上的作用力之和为零，则导出导线缆绳元上与空间相关的各标量之间的微分方程为：

$$dT/ds = p\sin\varphi - F \tag{7}$$

$$d\phi/ds = -G/(T\cos\varphi) \tag{8}$$

$$d\varphi/ds = (p\cos\varphi - H)/T \tag{9}$$

式中，合成重力 p 为单位长度导线缆的重力与浮力差。设在导线缆绳元相对水的三维速度场 $\boldsymbol{V} = V_x\boldsymbol{i} + V_y\boldsymbol{j} + V_z\boldsymbol{k}$ 中，水动力阻力的切向阻力 F 、法向阻力 G, H 大小分别为：

$$F = Fds_u = \rho C_{D_T} \pi d (V_x \cos\phi \cos\varphi + V_y \cos\varphi \sin\phi + V_z \sin\varphi)^2 ds/2 \tag{10}$$

$$G = Gds_v = \rho C_{D_N} d (-V_x \sin\phi + V_y \cos\phi)^2 ds/2 \tag{11}$$

$$H = Hds_w = \rho C_{D_N} d (-V_x \sin\varphi \cos\phi - V_y \sin\varphi \sin\phi + V_z \cos\varphi)^2 ds/2 \tag{12}$$

式中， ρ 为海水密度； d 为缆绳直径； C_{D_T} 为缆绳的切向阻力系数； C_{D_N} 为法向阻力系数。式(4)~式(9)表示了缆绳径迹上任意点处的 6 个变量 T, ϕ, φ, x, y 和 z 之间的关系。根据边界条件对方程进行积分，采用龙格-库塔法，就可得到缆绳的空间形态和拉力沿缆绳径迹的稳态分布^[5]。

流体力学计算和试验可以证明，采用一定的拖曳方式和水动力特性良好的拖曳浮体线型能够保证：当水下机器人保持在一定的航速范围内，在恒流场中，拖缆及浮体与水下机器人航向保持一致^[6]，通过计算和船池试验修正，得到了拖缆方程：

$$\theta = f(\rho_c, \rho_s, A_c, \boldsymbol{c}_R, \boldsymbol{V}, d, g) \tag{13}$$

式中， ρ_c 为电缆密度； ρ_s 为海水密度； A_c 为电缆横截面积； \boldsymbol{c}_R 为阻力系数； \boldsymbol{V} 为速度； d 为电缆直径； g 为重力加速度。其中，阻力系数与速度为矢量，其余为标量。

由此可以计算拖缆在浮体坐标系下的投影关系，通过坐标变换获得在水下机器人导航坐标系下浮体坐标原点与水下机器人之间的相对位置关系。基于恒流场假定，可以计算在不同深度、不同航速下的斜距改正值。此时，假设流场方向与运动方向相同，问题简化为一维流场，其计算结果如表 1 所示。

表 1 通过拖缆方程计算在恒流场中的斜距改正量

Tab. 1 Correct Length at Different Depths and Speeds Calculated by Tug Formula

航速	深度			
	10 m	20 m	30 m	40 m
4 节	95.667	191.335	287.003	382.671
5 节	114.737	229.474	344.211	458.948
6 节	143.355	286.712	430.067	573.423

由于受紊流层、温度、盐度的影响，不同深度上的水速不一定相同，因此，模型计算得到的数据与实际情况存在差异，但对于水下导航而言，任何有用的数据都应该纳入到综合导航的信息融合系统中，以提高系统精度。

拖缆收放装置采用霍尔元件作为计数传感器，可以测量放出的电缆长度，缆长计数最大误差不大于 10 m，因此，可以作为一个可信度高的控制性参数用来约束整个信息融合计算，剔除野值。

1.2 捷联式惯导计算

在拖曳浮体中安装捷联式惯性测量单元 IMU^[7-9]，取与水面浮体坐标系相同的右手系，并保持 X 轴与浮体轴向一致，指向拖缆的连接端。IMU 由 3 个正交布置的加速度计和 3 个正交布

置的角速度计构成。

浮体从水下机器人释放前,浮体导航子系统的航向初值与水下机器人主导航系统对正(通过接收主导航系统通播信号获得)。从浮体释放时起,到浮体漂浮至水面且释放机构发出停车命令时止,在此期间进行惯性导航计算,其后停止自主导航计算转入组合导航状态。将惯性计算结果作为水面浮体与水下运行器之间相对位置关系的测量值。

浮体的位置矢量 \mathbf{R} 在惯性坐标系中表示为 \mathbf{R}^i ,在地球坐标系中表示为 \mathbf{R}^e , \mathbf{R}^i 和 \mathbf{R}^e 的变换关系为 $\mathbf{R}^e = \mathbf{C}_i^e \mathbf{R}^i$ 。求导可得:

$$\dot{\mathbf{R}}^e = \mathbf{C}_i^e \dot{\mathbf{R}}^i + \dot{\mathbf{C}}_i^e \mathbf{R}^i = \mathbf{C}_i^e (\dot{\mathbf{R}}^i + \dot{\mathbf{C}}_i^e \mathbf{R}^i) \quad (14)$$

由于 $\dot{\mathbf{C}}_i^e = -\mathbf{C}_i^e \boldsymbol{\omega}_{ie}^{ik}$, $\boldsymbol{\omega}_{ie}^{ik}$ 是由 $\boldsymbol{\omega}_{ie}^i$ 的 3 个分量组成的反对称阵,则可得:

$$\dot{\mathbf{R}}^e = \mathbf{C}_i^e (\dot{\mathbf{R}}^i - \boldsymbol{\omega}_{ie}^{ik} \mathbf{R}^i) \quad (15)$$

式中, $\dot{\mathbf{R}}^e$ 为浮体相对于地球运动速度的列向量。将 $\dot{\mathbf{R}}^e$ 投影到地理坐标系(北-东-上坐标系),定义 $\mathbf{v}^n = \mathbf{C}_e^n \dot{\mathbf{R}}^e$,将式(15)代入计算,可得:

$$\mathbf{v}^n = \mathbf{C}_e^n \mathbf{C}_i^e (\dot{\mathbf{R}}^i - \boldsymbol{\omega}_{ie}^{ik} \mathbf{R}^i) = \mathbf{C}_i^n (\dot{\mathbf{R}}^i - \boldsymbol{\omega}_{ie}^{ik} \mathbf{R}^i)$$

两边求导可得:

$$\dot{\mathbf{v}}^n = \mathbf{C}_i^n (\dot{\mathbf{R}}^i - \boldsymbol{\omega}_{ie}^{ik} \dot{\mathbf{R}}^i) + \dot{\mathbf{C}}_i^n (\dot{\mathbf{R}}^i - \boldsymbol{\omega}_{ie}^{ik} \mathbf{R}^i)$$

结合式(15),上式可以变换为:

$$\dot{\mathbf{v}}^n = \mathbf{C}_i^n [\dot{\mathbf{R}}^i - (\boldsymbol{\omega}_{en}^n + 2\boldsymbol{\omega}_{ie}^{ik}) \mathbf{C}_i^n \mathbf{v}^n - \boldsymbol{\omega}_{ie}^{ik} \boldsymbol{\omega}_{ie}^{ik} \mathbf{R}^i] \quad (16)$$

$$\begin{cases} \dot{v}_x = f_x + \left(2\omega_{ie} \sin L + \frac{v_x}{R+h} \tan L\right) \cdot v_y - \left(2\omega_{ie} \cos L + \frac{v_x}{R+h}\right) v_z \\ \dot{v}_y = f_y - \left(2\omega_{ie} \sin L + \frac{v_x}{R+h} \tan L\right) \cdot v_x - \frac{v_x}{R+h} \cdot v_z \\ \dot{v}_z = f_z + \left(2\omega_{ie} \cos L + \frac{v_x}{R+h}\right) \cdot v_x + \frac{v_y^2}{R+h} - g \end{cases} \quad (18)$$

采用龙格-库塔法,求解上述方程组可以得到 v_x 、 v_y 、 v_z 。浮体所经过的路程可以通过直接积分计算地速的 3 个分量得到:

$$L = \int \frac{v_y}{R+h} dt, \lambda = \int \frac{v_x}{(R+h) \cos L} dt, h = \int v_z dt \quad (19)$$

至此,就获得了浮体相对于水下机器人的位移。对于水下卫星导航作业而言,这就是两者之间的相对位置差。

在本模型设计的捷联惯导系统中,惯性器件直接安装在浮体上。实际环境中,浮体存在角振动和线振动,当浮体沿着各正交的坐标轴存在同频角振动和线振动时,数学平台隔离作用不完善会诱发整流分量,角振动引起的整流效应将在姿态更新的计算中产生圆锥误差,角振动和线振动引起的整流效应会在速度计算中产生划船误差,

在地理坐标系中,比力可以表示为 $\mathbf{f}^n = \mathbf{C}_i^n \ddot{\mathbf{R}}^i \mathbf{G}^n$,而地球重力约为 $\mathbf{g} \approx \boldsymbol{\omega}_{ie} \times (\boldsymbol{\omega}_{ie} \times \mathbf{R})$,则地理坐标系中比力表示为 $\mathbf{f}^n = \mathbf{v}^n + (\boldsymbol{\omega}_{en}^n + \boldsymbol{\omega}_{ie}^{nk}) \mathbf{v}^n - \mathbf{g}^n$ 。写成叉乘形式为 $\mathbf{f}^n = \mathbf{v}^n + (\boldsymbol{\omega}_{en}^n + 2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n) \times \mathbf{v}^n$ 。

捷联惯导系统中加速度计测量的是沿浮体坐标系的比力 \mathbf{f}^b ,经姿态矩阵变换可得 $\mathbf{f}^n = \mathbf{C}_n^b \mathbf{f}^b$,代入惯导基本方程并移项,得:

$$\dot{\mathbf{v}}^n = \mathbf{C}_n^b \mathbf{f}^b - (\boldsymbol{\omega}_{en}^n + 2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n) \times \mathbf{v}^n + \mathbf{g}^n \quad (17)$$

其中,

$$\mathbf{v}^n = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}, \mathbf{f}^n = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}, \boldsymbol{\omega}_{ie}^n = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ie} \cos L \\ \omega_{ie} \sin L \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\omega}_{en}^n = \begin{bmatrix} -\frac{v_x}{R+h} \\ \frac{v_y}{R+h} \\ \frac{v_x}{R+h} \tan L \end{bmatrix}, \mathbf{g}^n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}$$

v_x 、 v_y 、 v_z 分别为东、北、上方向的速度; f_x 、 f_y 、 f_z 分别为东、北、上方向的比力^[10]; ω_{ie} 为地球自转角速率; L 为浮体所处位置的地理纬度; g 为重力加速度。

$$g = 9.078\ 03 + 0.051\ 799 \sin L - 0.941\ 14 \times 10^{-6} h$$

将式(17)展开可得:

在位置计算中产生涡卷误差。对于中等精度的导航计算可以不予考虑,但对于高精度的计算,需要进行适当的补偿。

本模型在实际应用中,由于惯性测量单元用于积分计算的时间较短,从误差传播的角度考虑,影响不大,计算精度对于测量浮体与水下机器人之间的相对位置关系已经足够。因此,没有进一步处理这些误差。

1.3 修正数据融合

水下环境复杂,可以获得的与导航有关的数据来源较少,所以,对于所有可以获得的有效数据都应该加以利用。同时,考虑到由于不可预知的故障造成某种传感器不能正常工作时,需要依靠其他传感器得到的数据进行补偿。为此,采用数据融合的方法以提高修正数据的可用性,从而保证水下卫星导航的精度。

数据融合的本质是数据处理,因此,所使用的方法可以在数据处理的方法中选取。本模型采用两种相互独立的方法获得水面浮体与水下机器人之间的相对位置关系,在两套量测数据均为有效的情况下,采用如下方式进行融合:被测向量为三维向量,同一时刻 k 使用两套独立的量测方法获得两组量测值 $Z_{\text{拖缆}}(k)$ 、 $Z_{\text{IMU}}(k)$,其方差矩阵为 $P_{\text{拖缆}}(k)$ 、 $P_{\text{IMU}}(k)$,则采用下式进行数据融合:

$$Z(k) = P(k)[P_{\text{拖缆}}^{-1}(k)Z_{\text{拖缆}}(k) + P_{\text{IMU}}^{-1}(k)Z_{\text{IMU}}(k)] \tag{20}$$

式中,

$$P^{-1}(k) = P_{\text{拖缆}}^{-1}(k) + P_{\text{IMU}}^{-1}(k) \tag{21}$$

$P(k)$ 为融合后 $Z(k)$ 的方差矩阵。因为两种量测方法不相关,则各方差矩阵只有主对角线上的元素不为零,可以简化计算,不需要进行矩阵求逆。

通过以上处理方法,当两种方法获得的数据均为有效数据的前提下,可以获得更加准确的水面浮体与水下机器人之间的相对位置关系。当其中任意一种量测方法失效时,需要剔除,而仅仅采用正常状态的量测数据作为修正值,但精度略有下降。

2 试验结果

2.1 试验系统构成

试验系统由水面与水下两部分组成,水面浮体采用具有良好透波能力的玻璃钢整体绕制而成,其中主要搭载设备有 Hemisphere 一体化 GPS 接收机(考虑到主要验证修正技术,所以采用的是单系统/单频接收机)、MEMS IMU、基于 SOC 的浮体组合导航/信号处理板、电源与通信接口电路等。水下机器人采用水下拖车替代,拖缆收放机构安装在拖车上,为便于评测,水下拖车上固定连接同型号 GPS 接收机,并通过撑杆使天

线出水,作为水下机器人的真实位置输出。水下主导航系统由计算机模拟,水下主控制器位于水面行车上(外场试验时,位于拖船上),控制信号和通信数据信号通过多芯电缆连接到拖曳电缆转轴,滑环传输至拖曳电缆,并由该电缆向水面浮体供电。

2.2 试验方法

试验分别在船池和外场进行,水面行车或者拖船按照规定的航速(航向)运行,水下机器人定深,由位于水面的主控制器控制水下收放拖曳电缆,水面浮体浮出至水面完成定位,并将定位数据以及 IMU 量测数据编帧通过拖曳电缆传回至主控制器,主控制器完成融合计算后,将水下机器人的位置信息发送至计算机(模拟水下主导航系统),通过与固连在水下机器人上的 GPS 接收机获得的定位数据比较,确定误差。

考虑到试验用水面浮体载荷有限,不可能加装 GPS RTK 移动站,所以采用同型号 GPS 接收机进行水下机器人位置测量,这是因为同型号接收机噪声水平接近,两者之间间隔不太大,且在同一时刻视野中卫星情况相同,有理由认为,两者间的相对误差仅仅由接收机噪声和位置修正误差造成,而接收机噪声误差相对于位置修正误差较小,不影响结果数据分析。

在船池试验中,由船池负责造波。在外场拖曳试验时,通过跟随的摩托艇造波。由于固连在水下机器人上的杆件强度有限,拖曳试验航速不超过 6 节。

2.3 试验数据分析

以某次海洋试验实测数据为例进行分析,从水下 40 m 定深释放浮标,浮标上浮至水面定位。试验结果记录于水下机器人内置数据记录仪上,上浮后读出供分析使用。测量结果如图 2 所示。

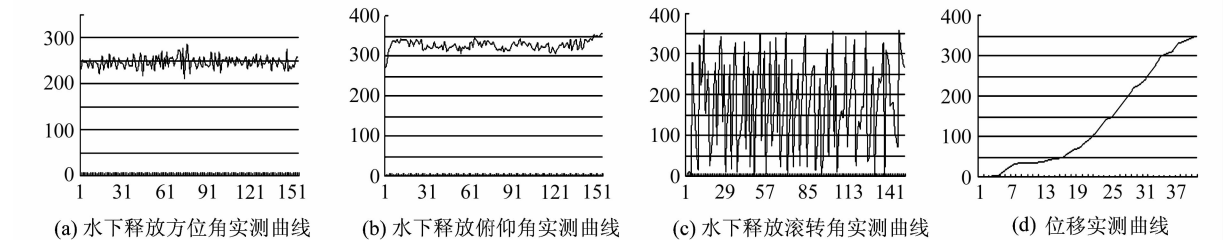


图 2 测量结果
Fig. 2 Surveying Results

从实测数据可以看出,浮标在释放过程中作三维运动,且运动状态变化剧烈,捷联惯导设备工作正常,完整地记录了浮标的运行轨迹,距离积分

计算精度与拖缆计数器计数值完全吻合,说明该方法能够完成对浮标相对位移的测量。同时说明由于不同深度流场的变化,单纯采用拖缆方程计

算,修正精度会有一定程度的下降。

3 结 语

通过在船池、高速船池、淡水湖泊、水库以及沿海等地历时 3 a 的试验,并经由武汉大学 GPS 国家工程中心进行精度评测^[11],结果表明,最大修正误差不大于释放长度的 1.12%,修正后水下定位精度满足实际要求。

研究表明,通过采用修正技术,可以使水下机器人在潜航状态下获得自身高精度的位置信息,相对于水声 GPS 浮标技术而言,大大简化了作业流程,能够满足水下机器人大范围活动时的导航定位需求。需要指出的是,修正算法与水下机器人拖曳航速有关,低于一定航速,由于海流的影响导致拖缆失稳,从而修正精度下降。这是今后需要进一步努力的方向。

参 考 文 献

[1] 蒋新松,封锡盛,王棣棠. 水下机器人[M]. 沈阳:辽宁科技出版社,2000:292-304

[2] 闫军. 小型拖曳浮标若干关键技术研究[R]. 武汉大学博士后出站报告,武汉大学,武汉,2006

[3] 何秀凤,杨光. 扩展区间 Kalman 滤波器及其在

GPS/INS 组合导航中的应用[J]. 测绘学报,33(1):4-5

[4] 朱海,莫军. 水下导航信息融合技术[M]. 北京:国防工业出版社,2002:19-112

[5] 李志印,吴家鸣. 水下拖曳系统水动力特性的计算流体力学分析[J]. 中国造船,2007,48(2):3-5

[6] 陈加菁,张年方,袁毅之. 均流中悬索的性状及计算[J]. 中国造船,1980,68(1):7-9

[7] 陈哲. 捷联惯性系统原理[M]. 北京:宇航出版社,1986:124-235

[8] 张树侠. 捷联式惯性导航系统原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1992:78-128

[9] 张天光. 捷联式惯性导航技术[M]. 北京:国防工业出版社,2001:230-268

[10] 谢荣生,孙枫. 船用捷联惯导系统比力转换方法研究[J]. 中国惯性技术学报,2000(3):67-70

[11] 王新洲. XXX 天线精度评测报告[R]. 武汉大学 GPS 国家工程中心,武汉,2005

第一作者简介:李德仁,教授,博士生导师,中国科学院院士,中国工程院院士,国际欧亚科学院院士。主要从事以 RS、GPS 和 GIS 为代表的空间信息科学的科研和教学工作。近年提出空间信息多级网格和空间数据挖掘与知识发现理论,广义空间信息网格和狭义空间信息网格,并致力于空间信息网格方面的研究与应用工作。
E-mail:dli@wtusm.edu.cn

Correction Technology for Underwater Object Navigation Using GNSS Buoy

LI Deren¹ YAN Jun¹

(1 State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: A method to improve the underwater object navigation accuracy for ROV is put forward. Unlike traditional ocean GPS position technologies, tug buoy is used. With the benefit of it, researchers needn't prepare the buoy array before ROV is to work, also the ROV can move faster and even much more far away. In this case, it is important to correct the distance between the buoy and the underwater ROV. Two routes are used to get it. And how to use IMU to get the distance is discussed in detail, the data fusing method which is used to improve the accuracy. An experiment system is given to examine this correction technology.

Key words: underwater object; GNSS; correction

About the first author: LI Deren, professor, Ph. D supervisor, Academician of the Chinese Academy of Sciences, Academician of the Chinese Academy of Engineering, Academician of the Euro-Asia International Academy of Sciences. He is concentrated on the research and education in spatial information science and technology represented by RS, GPS and GIS. His recent majors are the theories and methods for spatial information multi-grid, data mining and knowledge discovery, theories and application of generalized spatial information grid.
E-mail: dli@wtusm.edu.cn