

【引用格式】吕志刚. 基于 INS/DVL/GPS 的 UUV 组合导航技术分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(6): 546-552.

基于 INS/DVL/GPS 的 UUV 组合导航技术分析

吕志刚^{1, 2}

(1. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;
2. 清江创新中心, 湖北 武汉 430076)

摘要 水下组合导航是 UUV 完成长航时水下自主航行和任务的技术保障和基础, 而基于 INS/DVL/GPS 的组合导航是当前 UUV 的主流组合导航方式, 可解决导航误差随时间积累的难题, 满足 UUV 长航时水下航行的要求。介绍了水下组合导航系统的结构和组成以及关键技术, 并详细论述了初始对准算法、纯惯性解算算法、组合导航算法、DVL 标定算法和校准算法。

关键词 UUV; 组合导航; 纯惯性; DVL 标定; 初始对准; 校准

中图分类号 U666.11 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2022)06-0546-07
DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.06.009

Technology Analysis of UUV Integrated Navigation Based on INS/DVL/GPS

LYU Zhigang^{1, 2}

(1. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China;
2. Qingjiang Innovation Center, Wuhan 430076, China)

Abstract Underwater integrated navigation is the technical guarantee and foundation for the UUV to complete long endurance underwater autonomous navigation and tasks. The integrated navigation based on INS/DVL/GPS is the current mainstream integrated navigation method for the UUV, which can solve the problem of navigation error accumulation over time and meet the requirements of UUV long endurance underwater navigation. This paper introduces the structure and composition of underwater integrated navigation system, as well as the key technologies. Besides, the initial alignment algorithm, pure inertia solution algorithm, integrated navigation algorithm, DVL calibration algorithm and calibration algorithm have been discussed in detail.

Key words UUV; integrated navigation; pure inertia; DVL calibration; initial alignment; calibration

0 引言

组合导航系统可为 UUV 长航时水下航行提供精确的姿态、航向、速度和位置信息, 精确的导航能力是 UUV 任务完成和安全回收的一项关键技术。但由于受总体尺寸、重量、功耗等条件限制, 水下环境的特殊性及其隐蔽性等诸多因素的影响, 实

现 UUV 水下高精度导航仍然很困难, 水下组合导航仍然是 UUV 所面临的主要技术挑战之一。

目前, 单一的导航方式由于自身的不足, 如单一的惯性导航系统和 GPS 导航, 已无法满足水下高精度的导航要求, 而目前基于 INS/DVL/GPS 的水下组合导航方式为 UUV 通常采用的一种导航方式, 可解决导航误差随时间积累的难题^[1], 满足

收稿日期: 2022-05-23

作者简介: 吕志刚 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事导航与控制技术研究。

基金项目: 科技部国家重点研发计划“深海关键技术与装备”(2018YFC0309005)。

UUV 长航时水下航行的要求。

1 水下组合导航系统的结构和组成

水下组合导航系统一般由 INS、DVL、GPS 和深度计构成。深度计为可选择的配置, 下潜深度在

300 m 以内的 UUV 可以不配置深度计。配置了深度计的 UUV 导航精度可以进一步提升, 特别是天向速度和高程信息精度可以大大提升。下潜深度远大于 300 m 的 UUV, 一般要求配置深度计, 以提高导航的精度^[2-3]。水下组合导航原理简图见图 1。

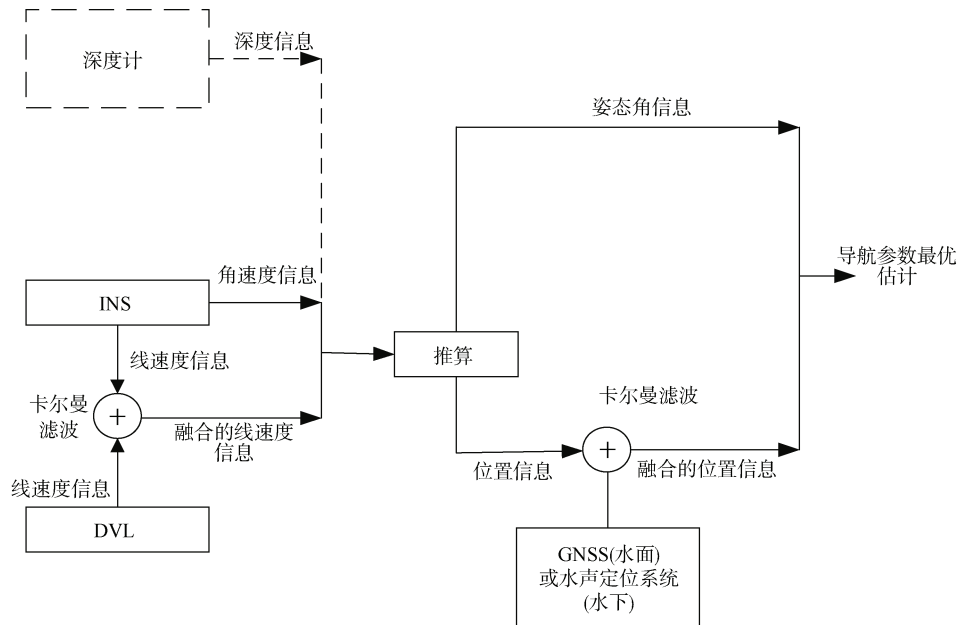


图 1 水下组合导航原理图

Fig. 1 Schematic diagram of underwater integrated navigation

2 组合导航系统的关键技术

制约 INS 与 DVL 组合导航的因素有很多, DVL 的测速精度和 INS 的姿态精度是影响组合导航精度的 2 个重要因素。通过 DVL 标定可降低 INS 与 DVL 之间的安装偏差对 DVL 测速精度的影响, 从而提高系统的导航精度。对准精度和对准速度是惯性导航系统进行初始对准时的 2 项重要技术指标, 初始对准精度影响惯性导航系统的性能, 为了提高惯性导航系统的性能, 需要通过高精度的初始对准技术来保证系统的初始信息精度, 尤其是初始姿态精度。

2.1 DVL 标定

DVL 测量得到的是 DVL 在 UUV 坐标系下的速度, 它通过 INS 的姿态转换到导航坐标系下。在生产制造和安装过程中, 很难保证 INS 的 UUV 坐标系与 DVL 的 UUV 坐标系完全重合。因此, 若不进行 INS 与 DVL 的安装偏差进行标定, 将产生

一定的测速误差, 从而影响导航的定位精度。由于 INS 的精度在很大程度上由器件决定, 因此, 提高 INS 与 DVL 组合导航精度的主要途径在于提高 DVL 的测速精度。通过对 DVL 标度因数和 INS 与 DVL 之间安装误差的标定可提高 INS、DVL 组合导航精度, 为了提高 INS/DVL 组合导航系统精度, 国内外学者广泛关注了 INS 与 DVL 安装偏差的标定问题。最早的标定方法只考虑了 1 个自由度, 1989 年, JOYCE 提出了一种基于最小二乘的估计船载 DVL 航向安装误差的方法, 该方法以 GPS 的速度作为参考来估计安装偏差^[4]。对于 DVL 标定, 国内通常采用 GPS 辅助下的标定方式, 国内学者对 DVL 安装偏差的在线估计也作了一定的研究, 但是, 由于水下航行器的机动性较小, 也难以取得比较好的估计效果。

综上所述, DVL 测速误差标定的难点在于水下航行器难以得到额外的速度、位置观测, 且水

下航行器机动性较小,为实现目标定位带来极大的难度。

2.2 INS 初始对准

INS 初始对准的目的是为了确定初始时刻的姿态矩阵。初始对准的精度对惯性导航系统的导航精度有着重要的影响,初始对准的时间在很大程度上决定了 UUV 的快速反应能力,因此,对准精度和对准的快速性是初始对准最重要的 2 个指标。按不同的划分标准可以把 INS 的初始对准分为静基座对准和动基座对准。对于静基座对准技术,研究成果已经比较成熟,而动基座一直都是惯性导航学术界关注的热点。动基座对准包含 2 种情况:1) UUV 受到机械振动、外界风力、浪涌等影响而引起的基座扰动;2) UUV 在水面航行中进行初始对准。

一般来说,初始对准包括粗对准和精对准 2 大部分,粗对准过程是一个提供 UUV 坐标系和导航坐标系之间姿态矩阵初始值的过程。目前初始对准最常用的方法是惯性系粗对准法,该算法有一定的抗基座摇晃能力,适合于系泊状态下的航行器或舰船的粗对准。精对准则是利用外部观测量的信息,进一步得到 UUV 坐标系和导航坐标系之间姿态矩阵的精确值。典型的精对准方法有罗经法、DVL 辅助下的 UUV 行进间罗经法、基于最优估计(常用卡尔曼滤波估计)的对准方法等。

3 导航系统算法

导航系统算法主要包括初始对准、DVL 标定、纯惯性导航算法、组合导航算法和校准算法。

3.1 初始对准算法

初始对准算法有很多种,除了少数先进的对准算法,大部分初始对准都包含粗对准和精对准 2 个过程,最合适 AUV 的是惯性系粗对准和卡尔曼精对准算法。

3.1.1 惯性系粗对准^[5-7]

惯性系粗对准过程采用晃动基座对准方式解算 INS 的初始姿态,姿态矩阵 C_b^n 方程为

$$C_b^n = C_e^n C_i^e C_{i_{b0}}^i C_b^{i_{b0}} \quad (1)$$

其中

$$C_e^n = \begin{bmatrix} \cos L_0 & -\sin L_0 & 0 \\ \sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

e 系和 n 系的坐标转换仅与大地维度信息有关,从 e 系到 n 系的变换矩阵为公式(2),其中 L_0 为大地维度。

$$C_i^e = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega_{ie}t) & \sin(\omega_{ie}t) \\ 0 & -\sin(\omega_{ie}t) & \cos(\omega_{ie}t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

公式(3)为从 i 系和 e 系的转换矩阵,即 e 系相对于 i 系的转动,其中 ω_{ie} 为地球自转角速度。

$$C_{i_{b0}}^i = \begin{bmatrix} \Delta V^i(t_{k1})^T \\ (\Delta V^i(t_{k1}) \times \Delta V^i(t_{k2}))^T \\ (\Delta V^i(t_{k1}) \times \Delta V^i(t_{k2}) \times \Delta V^i(t_{k1}))^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta V^{i_{b0}}(t_{k1})^T \\ (\Delta V^{i_{b0}}(t_{k1}) \times \Delta V^{i_{b0}}(t_{k2}))^T \\ (\Delta V^{i_{b0}}(t_{k1}) \times \Delta V^{i_{b0}}(t_{k2}) \times \Delta V^{i_{b0}}(t_{k1}))^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

$C_b^{i_{b0}}$ 可利用陀螺的输出通过旋转矢量法或四元数法计算求出。

由以上公式求出 C_b^n ,从而得到 INS 粗对准结束时刻的初始姿态,在这一个 C_b^n 的基础上进行精对准的计算。

3.1.2 卡尔曼精对准

选用常用的卡尔曼模型,状态变量选择为如下的 15 维列向量:

$$x = [\delta V_E \ \delta V_N \ \delta L \ \delta \lambda \ \phi_E \ \phi_N \ \phi_U \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \nabla_x \ \nabla_y \ \nabla_z]^T$$

式中: δV_E 、 δV_N 为速度误差; δL 、 $\delta \lambda$ 为纬度、经度误差; ϕ_E 、 ϕ_N 、 ϕ_U 为姿态误差; ε_x 、 ε_y 、 ε_z 为陀螺漂移; ∇_x 、 ∇_y 、 ∇_z 为加速度计零偏。状态变量对应的高斯白噪声选为

$$W = [a_x \ a_y \ 0 \ 0 \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

卡尔曼模型中的状态转移矩阵 F 如下:

$$F = \begin{bmatrix} F_{13 \times 13}^{\text{SINS}} \\ 0_{3 \times 13} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$F_{13 \times 13}^{\text{SINS}} = \begin{bmatrix} F_{4 \times 4}^1 & F_{4 \times 3}^2 & 0_{4 \times 3} & F_{4 \times 3}^3 \\ F_{3 \times 4}^4 & F_{3 \times 3}^5 & F_{3 \times 3}^6 & 0_{3 \times 3} \\ & & & 0_{6 \times 12} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$F_{4 \times 4}^1 = \begin{bmatrix} \frac{v_N}{R} \tan \varphi & 2\Omega \sin \varphi + \frac{v_E}{R} \tan \varphi & 2\Omega \cos \varphi v_N + \frac{v_E v_N}{R} \sec^2 \varphi & 0 \\ -(2\Omega \sin \varphi + \frac{v_E}{R} \tan \varphi) & 0 & -(2\Omega \cos \varphi v_E + \frac{v_E^2}{R} \sec^2 \varphi) & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} & 0 & 0 \\ \frac{1}{R} \sec \varphi & 0 & \frac{v_E}{R} \tan \varphi \sec \varphi & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$F_{4 \times 3}^2 = \begin{bmatrix} 0 & -g & f_N^n \\ g & 0 & -f_E^n \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$F_{4 \times 3}^3 = \begin{bmatrix} C_{b11}^n & C_{b12}^n & C_{b13}^n \\ C_{b21}^n & C_{b22}^n & C_{b23}^n \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$F_{3 \times 4}^4 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R} & 0 & 0 \\ \frac{1}{R} & 0 & -\Omega \cos \varphi & 0 \\ \frac{\tan \varphi}{R} & 0 & \Omega \cos \varphi + \frac{v_E}{R} \sec^2 \varphi & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$F_{3 \times 3}^5 = \Omega_{in}^n \quad (11)$$

其中， Ω_{in}^n 是 ω_{in}^n 的反对称矩阵。

$$F_{3 \times 3}^6 = C_b^n \quad (12)$$

卡尔曼模型中的 X 的噪声 W 前面的矩阵

$$G = I \quad (13)$$

量测矩阵

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

模型中量测量 Z 对应的噪声记为 V ，它是高斯白噪声。

模型中量测方程

$$Z(k) = \begin{bmatrix} \delta v_E \\ \delta v_N \\ \delta L \\ \delta \lambda \end{bmatrix} + u = \begin{bmatrix} v_E^{INS} - v_E^{GPS} \\ v_N^{INS} - v_N^{GPS} \\ L^{INS} - L^{GPS} \\ \lambda^{INS} - \lambda^{GPS} \end{bmatrix} + u \quad (15)$$

以上就是卡尔曼精对准的全部计算公式，但精对准结束时刻，应该用卡尔曼滤波估计的误差修正纯惯性的计算结果，而不是直接用卫星定位装置或 DVL 的量测信息进行修正。因为前者不含噪声，精度较高，后者包含了一定的噪声，修正的效果不好。

3.2 纯惯性解算算法

纯惯性解算算法是利用惯性测量单元 (IMU) 的测量数据不断地推算 UUV 当前的姿态、速度和位置信息，包括姿态更新算法和速度位置更新算法 2 部分。

纯惯性解算算法的流程图见图 2。

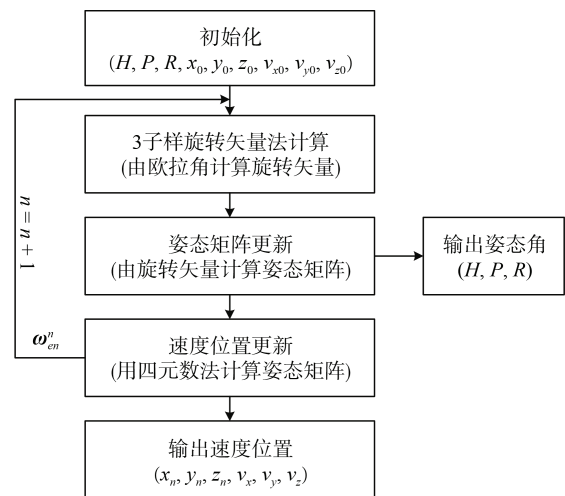


图 2 纯惯性算法流程图

Fig. 2 Flow chart of pure inertial algorithm

3.3 组合导航算法

组合导航算法是利用 DVL 的速度信息进行组合导航，主要有线性卡尔曼滤波、非线性卡尔曼滤波与粒子滤波等，最常用的就是线性卡尔曼滤波法。

组合导航过程采用 Kalman 滤波计算滤波模型。估算出误差以后，用纯惯性结果减去误差得到

组合导航的结果。

在每个导航周期进行状态转移矩阵 F 的离散化计算, 转移矩阵 $\Phi_{k,k-1}$ 计算如下^[8-10]:

$$\Phi_{k,k-1} \approx I + T F_k \quad (16)$$

式中, T 为导航周期。

当接收到有效的接收机信息时, 进行 Kalman 滤波计算, 计算过程分为 5 步:

$$\hat{X}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (17)$$

$$P_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + Q_k \quad (18)$$

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (19)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1}) \quad (20)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k/k-1} (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \quad (21)$$

式中: \hat{X}_k 为当前滤波周期的实时状态估计值; $\hat{X}_{k/k-1}$ 为上一滤波周期对当前滤波周期的状态预测值; K_k 为当前滤波周期的滤波增益阵; $P_{k/k-1}$ 为上一滤波周期对当前滤波周期的预测误差估计的协方差阵; P_k 为当前滤波周期的实时误差估计协方差阵; Q_k 为系统噪声方差阵; R_k 为量测噪声方差阵。

量测方程为

$$Z(k) = \begin{bmatrix} \delta v_E \\ \delta v_N \end{bmatrix} + u = V_{\text{INS}} - V_{\text{DVL}}^{\text{corr}} + u = V_{\text{INS}} - (C_d^n C_d^b (1 + K_g) V_{\text{DVL}}) + u \quad (22)$$

式中, C_d^b 和 K_g 是在用户输入的初始值基础上叠加了利用标定结果修正以后的 C_d^b 和 K_g 。

卡尔曼滤波算法流程如图 3 所示。

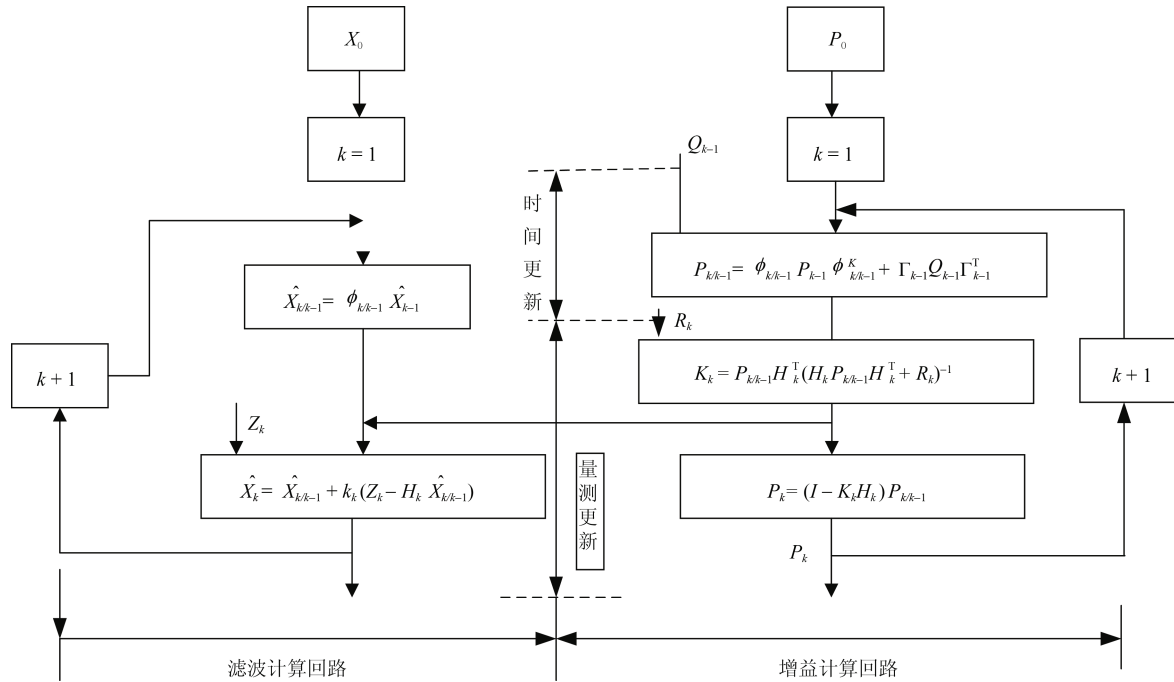


图 3 卡尔曼滤波算法流程图

Fig. 3 Flow chart of Kalman filtering algorithm

3.4 DVL 标定算法

由于 DVL 与 INS 之间有安装误差, 导致 DVL 测量的速度与 INS 需要的速度值不一致, 需要标定出安装误差进行补偿才能够提高组合导航的精度。最常用的标定算法是两点法, 利用起点和终点处的 GPS 信息进行航向角安装误差与标度因子这 2 个变量的标定。

3.4.1 基于卡尔曼滤波的标定方法

DVL 输出的测量速度 V_{DVL} 与 INS 组合导航所需要的速度 v^b 之间的关系为^[11]

$$v^d = (1 + K_g) V_{\text{DVL}} \quad (23)$$

$$v^b = C_d^b v^d = C_d^b C_d^a v^d \quad (24)$$

式中: V_{DVL} 是 DVL 输出的自身坐标系下的原始速

度数据； K_g 是标度因数。

$$C_d^b = \begin{bmatrix} \cos(\beta_0)\cos(\gamma_0) - \sin(\alpha_0)\sin(\beta_0)\sin(\gamma_0) & \cos(\beta_0)\sin(\gamma_0) - \sin(\alpha_0)\sin(\beta_0)\cos(\gamma_0) & -\cos(\alpha_0)\sin(\beta_0) \\ -\cos(\alpha_0)\sin(\gamma_0) & \cos(\alpha_0)\sin(\gamma_0) & \sin(\alpha_0) \\ \sin(\beta_0)\cos(\gamma_0) + \sin(\alpha_0)\cos(\beta_0)\sin(\gamma_0) & \sin(\beta_0)\sin(\gamma_0) - \sin(\alpha_0)\cos(\beta_0)\cos(\gamma_0) & \cos(\alpha_0)\cos(\beta_0) \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中， α 、 β 、 γ 分别为俯仰、横滚、航向安装误差角。

标定算法数据传递关系图和标定算法流程图分别如图 4 和图 5 所示。图 5 中加入了反馈，这样即使设定的初始值偏离真实值很远，几步迭代以后也可以保证算法收敛。

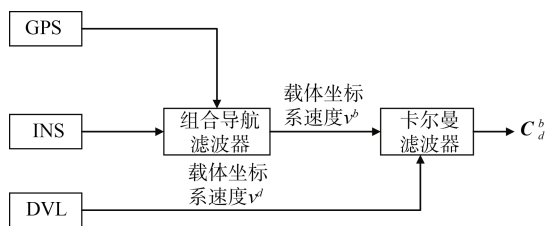


图 4 标定算法数据传递关系图

Fig. 4 Data transmission relation diagram of calibration algorithm

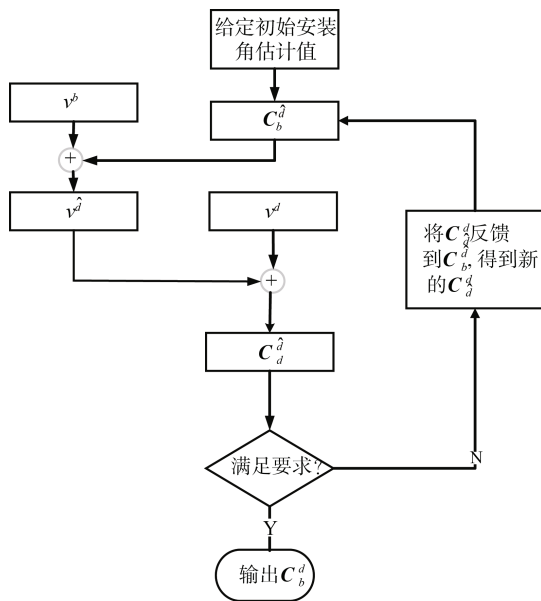


图 5 标定算法流程图

Fig. 5 Flow chart of calibration algorithm

标定完成得到标定参数以后便可以将 V_{DVL} 转换为 v^n 进行组合导航：

$$v^n = C_d^n v^d = C_b^n C_d^b C_d^d v^d = C_b^n C_d^b C_d^d (1 + K_g) V_{DVL} \quad (26)$$

还可以改进卡尔曼模型，把速度标度因数 K_g

姿态矩阵为

也包含进去，一起进行卡尔曼滤波估算。可以自行采用类似的方法进行推导。

3.4.2 基于航程起点终点位置信息的标定方法

利用一段直线航程(一般选为 6 km 或 7 km 为 1 个标准航程)的起点与终点 GPS 信息可以进行 DVL 的标定，这种方式常称为两点标定法。此方法只需要 UUV 在航程起点和终点处位于水面即可，其余时间 UUV 都可以在水下航行，标定方式更利于 UUV 的隐蔽。

这种标定方法的原理和计算公式十分简单，就是计算组合导航推算的直线航路、GPS 起点与终点构成的实际直线航路之间的夹角和长度比值。

3.5 校准算法

校准是指当 UUV 下潜前或上浮后接收 GPS (常用 GPS 和北斗等)的位置信息进行 INS 误差的估算与补偿。其本质就是基于 GPS 位置信息的组合导航算法，只要对组合导航算法稍加修改就可以实现校准算法。

1) 纯惯性导航时的校准。

卫星定位装置仅位置信息有效时，就用位置误差信息作为观测进行校准；卫星定位装置仅速度信息有效时，就用速度误差作为观测量进行校准；卫星定位装置的位置信息和速度信息同时有效时，就用位置误差信息和速度误差同时作为观测量进行校准。

2) 组合导航时的校准。

不管 GPS 的速度信息是否有效，都不用其速度信息，只用 GPS 的位置信息得到的位置误差作为观测量进行校准。为了解决 DVL 组合模式切换到 GPS 组合模式时卡尔曼滤波器的振荡甚至发散的问题，也可以采用校准时重启卡尔曼滤波器或替换法等技巧。当然，这种方法也会带来一些弊端，重启卡尔曼滤波器的缺点是卡尔曼重新收敛一般需要几分钟的时间；替换法的缺点是只对位置进行了校准，速度和姿态没有得到校准，组合导航精度

不够高。

校准方式不限于如上 2 种, 对于大深度 UUV, 位置信息还可能来自水声定位系统, 考虑延时补偿后对大深度 AUV 进行校准。同时, 还应该建立重力加速度模型考虑不同深度下重力加速度值的变化。校准算法的本质就是卡尔曼组合导航, 所以校准算法的公式参考组合导航算法即可。

4 结束语

水下组合导航是 UUV 完成长航时水下自主航行和任务的技术保障和基础, 而组合导航技术是提高 UUV 导航精度的主要手段。本文章针对基于 SINS/DVL/GPS 的水下组合导航技术进行了分析, 阐述了水下组合导航系统的关键技术, 随后对初始对准算法、纯惯性解算算法、DVL 标定算法和校准算法进行了详细论述, 对水下组合导航具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 吕志刚, 吴爽, 白龙, 等. 光纤惯导国内外发展现状及其关键技术分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2020, 3(5): 420-424.

- [2] 李亮. SINS/DVL 组合导航技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [3] 朱忠军. 未知海底环境下 UUV 组合导航技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [4] 朱春云, 庄广琛, 宋雅兰, 等. DVL 安装角估计方法在水下组合导航系统中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1): 75-78.
- [5] 王巍. 光纤陀螺惯性系统[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.
- [6] 王新龙. 捷联式惯导系统董、静基座初始对准[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.
- [7] 邹海军. 光纤陀螺捷联惯导系统初始对准技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [8] 王小峰. 水下航行器 INS/GPS/DVL 组合导航方法[J]. 鱼雷技术, 2010, 18(8): 287-290.
- [9] 徐晓苏, 潘永飞, 邹海军. 基于自适应滤波的 SINS/DVL 组合导航系统[J]. 华中科技大学: 自然科学版, 2015, 43(3): 95-99.
- [10] 王宏健, 李村, 么洪飞, 等. 基于高斯混合容积卡尔曼滤波的 UUV 自主导航定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 254-261.
- [11] 于玖成, 何昆鹏, 王晓雪. SINS/DVL 组合导航系统的标定[J]. 智能系统学报, 2015, 10(1): 143-148.

(责任编辑: 曹晓霖)