

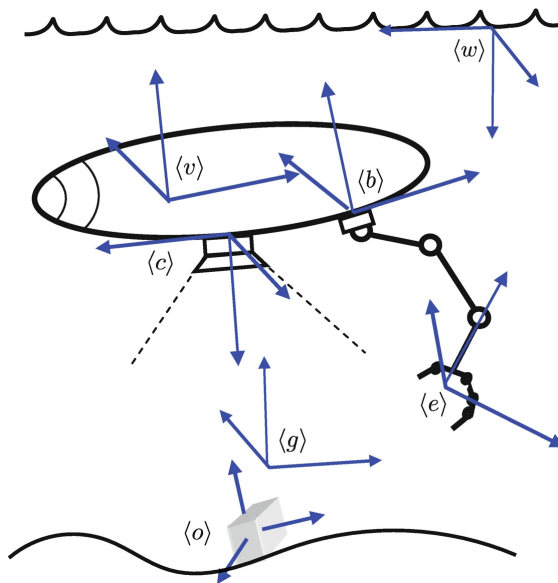
大纲

1. AUV 的应用领域
2. 纵向面建模，控制分配
3. 针对轨迹跟踪设计
4. 针对执行器故障的容错控制设计，如何进行故障检测

应用领域

1. 水下干预

关于Sauvim: 概述 (gmarani.org)



2. 目标跟踪
3. 海洋调查 (海底测绘等)

纵向面建模

Optimal robust trajectory tracking control of a X-rudder AUV with velocity sensor failures and uncertainties

对于海底水下测绘或者零纵倾控制，需要对 X-AUV 的纵向面进行建模。

运动学方程：

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \theta + w \sin \theta \\ \dot{z} = -u \sin \theta + w \cos \theta \\ \dot{\theta} = q \end{cases} \quad (1)$$

x, z, θ 代表水平位置，竖直位置和方向。 u, w, q 代表推进速度，倾斜速度和俯仰角加速度。

纵向面动力学模型：

$$\begin{cases} (m - X_{\dot{u}})\dot{u} = -(W - B)\sin\theta - mwq + mx_g q^2 + X_{u|u}|u| + X_{wq}wq + X_{qq}q^2 + X_T + D_u \\ (m - Z_{\dot{w}})\dot{w} = (W - B)\cos\theta + muq + mz_g q^2 + Z_{w|w}|w| + Z_{q|q}|q| + Z_{uq}uq + Z_{uw}uw + \tau_w + D_w \\ (I_{yy} - M_{\dot{q}})\dot{q} = -(z_g W - z_b B)\sin\theta - (x_g W - x_b B)\cos\theta - mz_g wq - mx_g uq + M_{w|w}|w| + M_{q|q}|q| \\ \quad + M_{uq}uq + M_{uw}uw + \tau_q + D_q \end{cases}$$

m, W, B 代表设备的质量, 重力和浮力。 $(x_g, z_g), (x_b, z_b)$ 分别代表设备的重心和浮心。 I_{yy} 是设备绕 y 轴的惯性矩。 X_*, Z_*, M_* 是设备的流体力学系数。 X_T 是沿航行器 **surge** 方向的螺旋桨推力, τ_w 和 τ_q 分别是沿航行器倾斜运动和俯仰运动的舵力和扭矩。 D_u, D_w, D_q 表示上界未知的复合环境干扰。

将以上动力学方程重写为:

$$\begin{cases} \dot{u} = f_u(u, w, q) + g_u X_T + d_u \\ \dot{w} = f_w(u, w, q) + g_w \tau_w + d_w \\ \dot{q} = f_q(u, w, q) + g_q \tau_q + d_q \end{cases}$$

τ_w 和 τ_q 到四个执行器的映射为:

$$\begin{cases} \tau_w = Z_{uu\delta_1} u^2 \delta_1 + Z_{uu\delta_2} u^2 \delta_2 + Z_{uu\delta_3} u^2 \delta_3 + Z_{uu\delta_4} u^2 \delta_4 \\ \tau_q = M_{uu\delta_1} u^2 \delta_1 + M_{uu\delta_2} u^2 \delta_2 + M_{uu\delta_3} u^2 \delta_3 + M_{uu\delta_4} u^2 \delta_4 \end{cases}$$

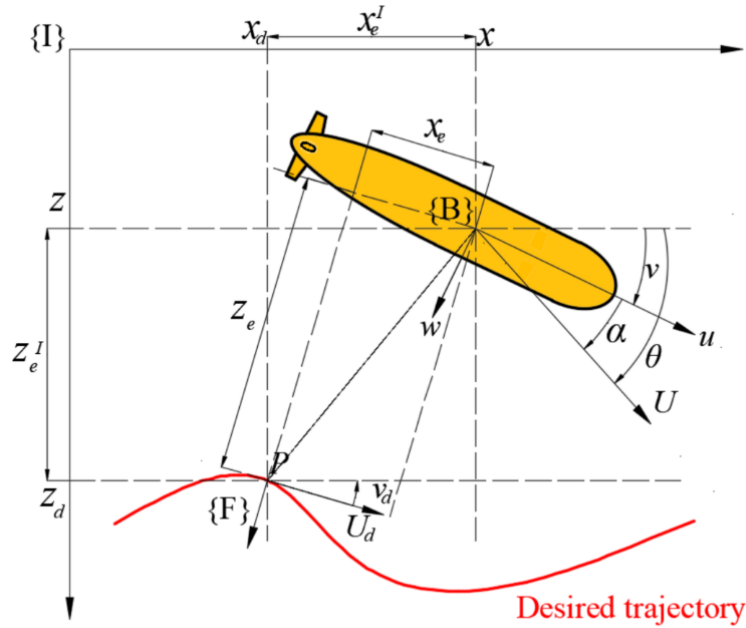


Fig. 2. Trajectory tracking mission in vertical plane.

如图 2 所示, AUV 需要在垂直面上跟踪一条所需的轨迹, 其中 $\{I\}$ 、 $\{B\}$ 和 $\{F\}$ 分别表示惯性参考系、AUV 固定参考系和 Frenet-Serret 参考系。P 是要跟踪轨迹上的一个移动点。在所需轨迹上与 P 相关联的是 $\{F\}$, 其坐标轴与轨迹相切且为法线。

对于轨迹跟踪任务, 惯性参考系中的跟踪误差可以表示为:

$$\begin{cases} x_e^I = x - x_d \\ z_e^I = z - z_d \\ v_e^I = v - v_d \end{cases}$$

where $v = \theta - \alpha$, $\alpha = \arctan(w/u)$, $v_d = \arctan(-\dot{z}_d/\dot{x}_d)$.

随后, 在 $\{F\}$ 中建立的轨迹跟踪误差矢量为

$$\begin{bmatrix} x_e \\ z_e \\ v_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos v_d & -\sin v_d & 0 \\ \sin v_d & \cos v_d & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e^I \\ z_e^I \\ v_e^I \end{bmatrix}$$

根据此公式和系统运动学方程, 得到:

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= \dot{x}_e^I \cos v_d - x_e^I \sin v_d \dot{v}_d - \dot{z}_e^I \sin v_d - z_e^I \cos v_d \dot{v}_d \\ &= (\dot{x} - \dot{x}_d) \cos v_d - \dot{v}_d (x - x_d) \sin v_d - (\dot{z} - \dot{z}_d) \sin v_d - \dot{v}_d (z - z_d) \cos v_d \\ &= (u \cos \theta + w \sin \theta - \dot{x}_d) \cos v_d - \dot{v}_d (x - x_d) \sin v_d - (-u \sin \theta + w \cos \theta - \dot{z}_d) \sin v_d - \dot{v}_d (z - z_d) \cos v_d \\ &= u \cos(\theta - v_d) + w \sin(\theta - v_d) - U_d(1 + \kappa z_e) \end{aligned}$$

同理:

$$\begin{aligned} \dot{z}_e &= (\dot{z} - \dot{z}_d) \sin v_d + (x - x_d) \dot{v}_d \cos v_d + (\dot{z} - \dot{z}_d) \cos v_d - (z - z_d) \dot{v}_d \sin v_d \\ &= (u \cos \theta + w \sin \theta - \dot{x}_d) \sin v_d + \dot{v}_d (x - x_d) \cos v_d \\ &\quad + (-u \sin \theta + w \cos \theta - \dot{z}_d) \cos v_d - \dot{v}_d (z - z_d) \sin v_d \\ &= -u \sin(\theta - v_d) + w \cos(\theta - v_d) + \kappa U_d x_e \end{aligned} \tag{8}$$

where $U_d = \sqrt{\dot{x}_d^2 + \dot{z}_d^2}$ is the velocity of the point P on the desired trajectory, κ is the curvature of the point P on the desired trajectory, and $\kappa = \dot{v}_d/U_d$.

因此, 轨迹跟踪的动力学方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{z}_e \\ \dot{v}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos(\theta - v_d) + w \sin(\theta - v_d) - U_d(1 + \kappa z_e) \\ -u \sin(\theta - v_d) + w \cos(\theta - v_d) + \kappa U_d x_e \\ q - \dot{\alpha} - \dot{v}_d \end{bmatrix}$$

根据运动学方程和动力学方程开发一种控制器, 以调节自动潜航器在垂直面上跟踪所需的轨迹。在垂直面上跟踪所需的轨迹, 而不受速度传感器故障、未知外部干扰和复杂执行器动态的影响。该目标可分为两个控制问题。

(1) 运动学控制: 给定一个期望轨迹和轨迹跟踪误差模型 (7-8), 推导出一个有效的运动学控制法则, 以产生所需的推进速度 u_d 和俯仰角速度 q_d , 从而使轨迹跟踪误差矢量在 ∞ 时收敛为零。

(2) 动力学控制：给定所需的浪涌速度 u_d 和俯仰角速度 q_d 以及动力学模型 (3-4)，推导出有效的动力学控制法则，以产生控制输入，从而使跟踪误差 $u - u_d$ 和 $q - q_d$ 在 ∞ 时趋于零。

滑膜控制

【控制理论】滑模控制解析

MPC AUV

Trajectory Tracking Control of an Autonomous Underwater Vehicle Using Lyapunov-Based Model Predictive Control

这篇文章所面向的AUV用于水平面的轨迹跟踪，与 纵向面建模 类似，首先建立水平面运动学方程：

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\psi)\mathbf{v} \quad (1)$$

where $\boldsymbol{\eta} = [x, y, \psi]^T$ denotes the position and heading of the AUV, represented in the i-frame; $\mathbf{v} = [u, v, r]^T$ denotes the velocity of the vehicle, represented in the b-frame; $\mathbf{R}(\psi)$ is the rotation matrix depending on the heading ψ

$$\mathbf{R}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

这是一个类似绕着 z 轴旋转的旋转方程，作用是表达了 AUV 在水平面的速度和朝向。

动力学方程：

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

where $\boldsymbol{\tau} = [F_u, F_v, F_r]^T$ denotes the generalized thrust force. $\mathbf{M} = \text{diag}(M_{\dot{u}}, M_{\dot{v}}, M_{\dot{r}})$ represents the inertia matrix including the added mass; $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ denotes the Coriolis and centripetal matrix having the following form:

$$\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -M_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & M_{\dot{u}}u \\ M_{\dot{v}}v & -M_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

and $\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \text{diag}(X_u, Y_v, N_r) + \text{diag}(D_u|u|, D_v|v|, D_r|r|)$ is the damping matrix; and $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ represents the restoring force.

The generalized thrust force $\boldsymbol{\tau}$ is actually generated by four thrusters $\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T$ which follows $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{B}(\boldsymbol{\alpha})\mathbf{u}$. Here, $\boldsymbol{\alpha}$ represents the azimuth vector of the thrusters represented in b-frame. For the Falcon, the azimuth angles are fixed. Therefore, we have the thrust distribution

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (5)$$

where \mathbf{B} is a constant input matrix.

这里的 $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{B}\mathbf{u}$ 代表“控制分配”。

根据这两个方程，可以建立轨迹跟踪动态方程：

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\psi)\mathbf{v} \\ \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{C}\mathbf{v} - \mathbf{D}\mathbf{v} - \mathbf{g}) \end{bmatrix} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (6)$$

where the state is defined as $\mathbf{x} = [x, y, \psi, u, v, r]^T$ and the control as $\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T$.

根据该状态空间方程，控制 AUV 水平面的运动。

容错控制

X舵AUV控制分配优化与容错控制方法研究

故障诊断和定位

使用 SVM 进行训练，得到正常情况和故障情况下的分类，用于故障诊断。诊断出故障后，通过让所有舵面归零的方式定位卡死舵。

表 4.3 处理后的样本数据

Av	u_error	v_error	w_error	fai_error	sita_error	puxi_error	Label
0.001889	0.001889	4.90E-7	5.40E-7	3.10E-9	8.80E-6	4.41E-6	1
0.002056	0.002056	7.00E-7	8.20E-7	5.30E-9	1.20E-5	5.82E-6	1
0.002219	0.002219	9.70E-7	1.20E-6	8.60E-9	1.50E-5	7.50E-6	1
0.002379	0.002379	1.30E-6	1.60E-6	1.30E-8	1.90E-5	9.47E-6	1
0.002389	0.00178	0.00156	0.000321	0.000142	0.000519	0.001136	-1
0.002409	0.00179	0.001565	0.000386	0.000135	0.000526	0.001151	-1
0.002287	0.00184	0.001272	0.000478	0.000129	0.000534	0.001166	-1

取数据样本的 u_error、v_error、w_error 三个特征进行三维作图，结果如下：

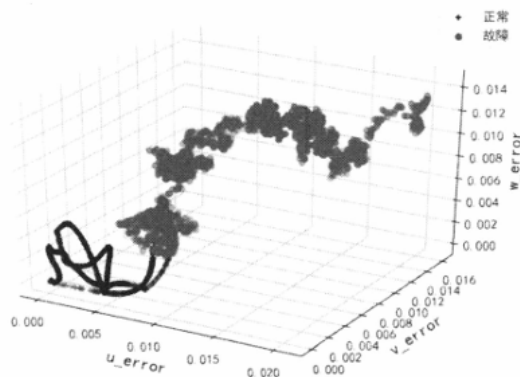


图 4.18 部分样本数据特征图示

上图中，蓝色加号标注的数据点为正常的 AUV 工作数据，绿色圆点标注为故障下的工作数据，两种数据存在交叉，对于这种数据交叉，阈值法很难选择一个阈值对其进行区分，基于 SVM 的机器学习算法却可以客观的确定两类数据的边界。

容错控制

通过重新进行舵角分配来补偿卡舵。

正常情况下：

参考文献 [8], X 舵角与十字舵角的转换关系为:

$$\begin{cases} \delta_r = \frac{1}{4}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4), \\ \delta_s = \frac{1}{4}(\delta_1 - \delta_2 + \delta_3 - \delta_4). \end{cases} \quad (18)$$

将式 (18) 转化为如下形式:

$$\tau_s = B\tau_x. \quad (19)$$

式中: $\tau_s = [\delta_s, \delta_b]^T$, $\tau_x = [\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4]^T$, 控制效率矩阵 B 为:

$$B = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & -0.25 & 0.25 & -0.25 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

使用伪逆法设计 X 舵角分配算法, 其表达式如下:

$$\tau_x = B^T(BB^T)^{-1}\tau_s. \quad (21)$$

卡舵情况下:

4.7.2 尾舵卡舵情况下的控制再分配

(1) 单舵卡舵

卡舵与舵叶缺失的情况不同, 卡舵时, 舵叶仍然产生力矩, 只不过其力矩是固定大小, 无论舵机输入指令为多少, 都只输出固定的力矩大小, 方向也一定。假设 4 号舵发生卡舵, 卡舵舵角为 u_{t4} , 4 号舵的固定力矩 τ_f 输出为:

$$\tau_f = \begin{bmatrix} -0.0221v^2 \cdot u_{t4} \\ 0.0729v^2 \cdot u_{t4} \\ 0.0729v^2 \cdot u_{t4} \end{bmatrix} \quad (4-28)$$

单舵卡舵情况下的控制分配效率矩阵为:

$$\mathbf{B}_f = \begin{bmatrix} -0.0221v^2 & -0.0221v^2 & -0.0221v^2 \\ 0.0729v^2 & -0.0729v^2 & -0.0729v^2 \\ -0.0729v^2 & -0.0729v^2 & 0.0729v^2 \end{bmatrix} \quad (4-29)$$

此时, 期望力矩 τ 与剩余执行机构输入指令向量 u_f 的关系为:

$$\tau - \tau_f = \mathbf{B}_f u_f \quad (4-30)$$

上式求解过程与式 (4-25) 相同。