

自动化技术、计算机技术

# 面向无缆水下机器人水下对接的轨迹跟踪控制

赵熊<sup>1,2</sup> 李一平<sup>1</sup> 阎述学<sup>1,2</sup>

(中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室<sup>1</sup>, 沈阳 110016; 中国科学院大学<sup>2</sup>, 北京 100049)

**摘要** 针对欠驱动无缆水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)的特点,面向水下对接的应用需要,在考虑其非完整约束的条件下,对水下机器人的非线性系统的可控性进行深入分析,并推导如何将非线性系统通过反馈变换转换成链式模型,在此基础上提出一种使用近似线性化的全状态反馈进行三维链式控制器设计的方法。最后,为了验证轨迹跟踪控制器的控制性能,在 Matlab 仿真环境下进行了实验,结果表明该方法可以实现路径跟踪误差的全局渐近稳定,验证了其有效性和合理性。

**关键词** 无缆水下机器人(AUV) 水下对接 轨迹跟踪 链式模型  
中图分类号 TP242; 文献标志码 A

为了能增加无缆水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)的连续水下作业时长,提高其工作效率并降低回收的成本及风险,各国科学家研究出了不同结构、形状各异的水下对接系统,以使 AUV 能稳定地停靠在海底对接平台,进而在水下完成能源补给、信息备份或者接收新的指令。

解决水下自主对接难题的关键包括载体的定位与导航、抗外界干扰性能、操纵能力和控制方面<sup>[1]</sup>。当前已通过实验得到验证,典型的对接方式包括以下几种:伍兹霍尔海洋研究所研制的将锥形导向罩作为对接目标的 REMUS<sup>[2]</sup>水下对接系统,MIT 的以杆为目标、可实现全方位对接的 Odyssey IIB<sup>[3]</sup>,川崎重工的以类似于飞机着陆的形式完成对接的 Marine-bird<sup>[4]</sup>。

参照文献[5]的做法,依据 AUV 和对接平台的相对距离,将其从开始执行对接的位置到最终对接的过程分为远程、中程和近程三个阶段。本文的研究重心是远程阶段,这可以归结为一个从对接起始点到预定目标点之间的三维路径规划和轨迹跟踪问题。文献[6]结合 B 样条的曲率连续特性和遗传算法,提出了一种适合欠驱动 AUV 的归航与制导方法。文献[7]综合运用 Lyapunov 方法和 Backstepping 技术设计出 AUV 路径跟踪的运动学控制律,可实现轨迹跟踪误差达到全局渐近稳定性。文献[8]基于 Lyapunov 稳

定性理论和反步法设计出水平面轨迹跟踪控制律,而基于精确模型和反步法思想设计的控制器由于结构复杂导致工程实现上较困难。文献[9]提出了一种基于非奇异终端滑模控制的鲁棒轨迹跟踪控制方法。

以上论文中的方法仅仅是在水平面或者是垂直面上单独进行轨迹跟踪控制器的实现,或者没有考虑水下机器人的非完整约束特性,本文在充分考虑了 AUV 物理约束的前提下,提出了一种可直接适用于三维空间轨迹跟踪的控制律。

## 1 运动学模型建立与非完整约束分析

研究对象是我所自主研发的 50 kg 级便携式欠驱动型 AUV。需要用到的 AUV 数学模型——运动学方程,为链式模型的建立做好铺垫。然后探讨 AUV 的非完整约束问题,它是一个有着运动学约束的物理系统,比如说其所能提供的最大动力、舵板的最大偏角都是有限的,这些都是在实际控制中需要考虑的因素。

### 1.1 运动学模型

以下用到的符号、坐标系均采用文献[10]中的表示方法,大地坐标系(定系)的原点  $O$  选在对接平台的中心,体坐标系(动系)原点  $G$  选在 AUV 的重心位置。这样规定坐标系的好处是,利用 AUV 携带的声学传感器 USBL 测量出的相对于对接平台的相对位置也是大地坐标系下的绝对位置。描述载体的运动需要六个广义坐标,其坐标向量用  $q = [p \ \eta]^T$  表示,它们分别是动系原点在定系下的笛卡尔位置向量  $p = [x \ y \ z]^T$  和方向向量  $\eta = [\varphi \ \theta \ \psi]^T$ 。从动系到定系是通过正交矩阵  $R$  转换得到的,用列向量表示为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2017 年 1 月 4 日收到 国家“863”计划(2011AA09A105)资助  
第一作者简介:赵熊(1990—),硕士研究生。研究方向:水下机器人控制技术。E-mail: zhaoxiong@sina.cn。

引用格式:赵熊,李一平,阎述学.面向无缆水下机器人水下对接的轨迹跟踪控制[J].科学技术与工程,2017,17(22):88—93

Zhao Xiong, Li Yiping, Yan Shuxue. Path following control for autonomous underwater vehicle underwater docking [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(22): 88—93

令  $v = [v_x \ 0 \ 0]^T$  表示载体的线速度,  $w = [w_x \ w_y \ w_z]^T$  为沿  $x, y, z$  方向的角速度。系统中两个非完整约束条件分别是沿着  $y$  轴和  $z$  轴的线速度, 用方程表示为

$$\begin{cases} r_{12}\dot{x} + r_{22}\dot{y} + r_{32}\dot{z} = 0 \\ r_{13}\dot{x} + r_{23}\dot{y} + r_{33}\dot{z} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)可用  $A(q)\dot{q} = 0$  表示, 其中:

$$A(q) = \begin{bmatrix} r_{12} & r_{22} & r_{32} & 0 & 0 & 0 \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

将速度描述为用向量场  $g_1(q), g_2(q), g_3(q)$  和  $g_4(q)$  的线性组合张成矩阵  $A(q)$  的零空间, 建立运动学模型:

$$\dot{q}(t) = g_1(q)v_1 + g_2(q)v_2 + g_3(q)v_3 + g_4(q)v_4 \quad (4)$$

式(4)中  $v_1 = v_x, v_2 = w_x, v_3 = w_y, v_4 = w_z$  且:

$$\begin{cases} g_1(q) = [\cos\psi\cos\theta \ \sin\psi\cos\theta \ -\sin\theta \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ g_2(q) = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T \\ g_3(q) = [0 \ 0 \ 0 \ \sin\varphi\tan\theta \ \cos\varphi \ \sin\varphi\sec\theta]^T \\ g_4(q) = [0 \ 0 \ 0 \ \cos\varphi\tan\theta \ -\sin\varphi \ \cos\varphi\sec\theta]^T \end{cases} \quad (5)$$

### 1.2 非完整约束

机械系统中涉及到广义坐标与速度的约束被称为系统的运动学约束<sup>[11]</sup>, 也被称为非完整约束, 形式如下:

$$a_i(q, \dot{q}) = 0; \quad i = 1, 2, \dots, k < n \quad (6)$$

式(6)中,  $q$  是广义坐标向量  $(x, y, z, \phi, \theta, \varphi)$ ,  $q \in M \subset \mathbb{R}^n$ ,  $n$  是向量  $q$  所属的配置空间  $M$  的维数。通常这样的约束在力学中的普法夫形式为  $M a_i^T(q)(\dot{q} = 0; \quad i = 1, 2, \dots, k < n)$  或  $C(q)\dot{q} = 0$ 。

$a_i(q) \in M \subset \mathbb{R}^n, i = 1, 2, \dots, k$  是行向量, 假设向量  $a_i: M \rightarrow \mathbb{R}^n$  是光滑和线性独立的, 矩阵  $C(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  是约束矩阵。运动学约束通过限制广义速度来约束载体的运动, 非完整约束是不能积分<sup>[12]</sup>。在拥有  $n$  个坐标轴和  $k$  个非完整约束的系统中, 虽然速度被限制到  $n - k$  维的空间中, 但依然可以获得在配置空间中的全局可控性。

## 2 链式模型和控制器设计

通过反馈变换将系统变成链式模型, 然后使用近似线性化的全状态反馈进行链式控制器的设计。

### 2.1 链式模型的推导

链式系统模型是由 Murry 在文献[13]首次提出, 所介绍的仅仅是两输入、一个链的链式模型, 文献[14, 15]阐述了将多输入非完整系统转换为多个链的链式模型的方法。第1节推导的运动系统为  $\dot{q}(t) = g_1(q)v_1 + g_2(q)v_2 + g_3(q)v_3 + g_4(q)v_4$  (7)

可以通过反馈变换转换成链式模型, 其中  $g_i$  是线性无关的光滑向量场, 存在反馈变换  $(\xi, \alpha, \eta, \gamma) = \varphi(q)$  和  $v = \beta(q)u$ , 可将系统转换为下面的链式形式<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_0 = u_1 \\ \dot{\alpha}_0 = u_2 \\ \dot{\beta}_0 = u_3 \\ \dot{\gamma}_0 = u_4 \\ \dot{\alpha}_1 = \alpha_0 u_1 \\ \dot{\eta}_1 = \eta_0 u_1 \end{cases} \quad (8)$$

分布  $\Delta_0 = \text{span}(g_1, g_2, g_3, g_4)$  存在四个基函数  $f_1, f_2, f_3, f_4$ , 基函数的选择要使得如下分布:

$$\begin{cases} G_0 = \text{span}(f_2, f_3, f_4) \\ G_1 = \text{span}(f_2, f_3, f_4, [f_1, f_2], [f_1, f_3], [f_1, f_4]) \\ \vdots \\ G_5 = \text{span}(ad_{f_1}^i f_2, ad_{f_1}^i f_3, ad_{f_1}^i f_4) \end{cases} \quad 0 \leq i \leq 5 \quad (9)$$

在开集  $U \in \mathbb{R}^n$  中有恒定维数, 并且  $G_5$  的维数为 5。  $f_1, f_2, f_3$  和  $f_4$  满足下述条件:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{g_1}{\cos\psi\cos\theta} = [1 \ \tan\psi \ -\tan\theta\sec\psi \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ f_2 = g_1 \\ f_3 = g_3 \\ f_4 = g_4 \end{cases} \quad (10)$$

因此系统的坐标转换为

$$\xi_0 = h_1, \alpha_0 = L_{f_1}^1 h_2, \eta_0 = L_{f_1}^0 h_3, \gamma_0 = h_4, \alpha_1 = L_{f_1}^0 h_2, \eta_1 = h_3 \quad (11)$$

式(11)中  $h_1, h_2, h_3, h_4$  是光滑函数, 且满足以下条件:

$$dh_1 \perp G_j; \quad 0 \leq j \leq 5 \quad (12)$$

$dh_1, dh_2, dL_{f_1}^0 h_2, dL_{f_1}^1 h_2, dh_3, dL_{f_1}^0 h_3, dL_{f_1}^1 h_3$  和  $dh_4$  为分布  $G_0$  的奇点, 其中  $L_{f_1}^1 h_3$  是  $h_3$  相对于  $f_1$  的李导数。由于  $h$  函数的选择不是唯一的, 为方便计算, 选择如下:

$$\begin{cases} h_1 = x \\ h_2 = y \\ h_3 = z \\ h_4 = \frac{1}{1 + \text{trace}R}(r_{32} - r_{23}) \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中,  $R$  是旋转矩阵,  $\text{trace}R = r_{11} + r_{22} + r_{33}$ , 因此系统的坐标变换为

$$\begin{cases} x_2 = \alpha_0 = \tan\psi \\ x_3 = \alpha_1 = y \\ x_4 = \eta_0 = -\tan\theta\sec\psi \\ x_5 = z \\ x_6 = \frac{1}{1 + \text{tr}R}(r_{32} - r_{23}) \end{cases} \quad (14)$$

可得如下链式系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = u_1 \\ \dot{x}_2 = u_2 \\ \dot{x}_3 = x_2 u_1 \\ \dot{x}_4 = u_3 \\ \dot{x}_5 = x_4 u_1 \\ \dot{x}_6 = u_4 \end{cases} \quad (15)$$

联合式(14)和式(15),则输入可以转换为

$$\begin{cases} u_1 = \cos\psi \cos\theta v_1 \\ u_2 = \sec^2\psi \sin\varphi \sec\theta v_3 + \sec^2\psi \cos\varphi \sec\theta v_4 \\ u_3 = \frac{(-\sin\psi \sin\varphi \sin\theta - \cos\psi \cos\varphi) v_3}{\cos^2\psi \cos^2\theta} + \\ \frac{(\sin\psi \cos\varphi \sin\theta + \cos\psi \sin\varphi) v_4}{\cos^2\psi \cos^2\theta} \\ u_4 = [(1 + \cos\psi \cos\theta) v_2 + (\cos\psi \sin\theta \sin\varphi - \\ \sin\psi \cos\varphi) v_3 + (\sin\psi \sin\theta \cos\varphi + \sin\psi \sin\varphi) v_4] \times \\ (1 + \cos\psi \cos\theta + \sin\psi \sin\theta \sin\varphi + \cos\psi \cos\varphi + \\ \cos\varphi \cos\theta)^{-1} \end{cases} \quad (16)$$

如果  $\cos\psi \cos\theta \neq 0$ , 则输入  $v_1, v_2, v_3, v_4$  可由式(16)计算得到。因为系统的可控性不受状态反馈和坐标转换的影响,因此链式系统是完全可以控的。

### 2.2 控制器设计

运用系统的运动学模型进行轨迹跟踪控制器设计,先将期望轨迹进行近似线性化处理,即链式方程的形式,然后使用近似线性化的全状态反馈。期望的状态和输入可从相应的参考笛卡尔轨迹中计算得出,设期望状态:

$$\mathbf{x}_d(t) = [x_{d1}(t) \quad x_{d2}(t) \quad x_{d3}(t) \quad x_{d4}(t) \quad x_{d5}(t) \quad x_{d6}(t)]^T \quad (17)$$

期望输入轨迹为

$$\mathbf{u}_d(t) = [u_{d1}(t) \quad u_{d2}(t) \quad u_{d3}(t) \quad u_{d4}(t)]^T \quad (18)$$

在路径跟踪时,控制系统需要调节 AUV 相对于参考系统的方向和位置,以跟踪规划好的轨迹,这个轨迹是随时间变化的函数,设实际配置和期望配置在零点附近的差值为跟踪误差。因为载体开始对接时的实际初始位置和姿态与期望系统不一定相同,因此应该设计跟踪控制器使误差趋于 0。记输入和系统状态的误差变量为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_e = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d \\ \mathbf{u}_e = \mathbf{u} - \mathbf{u}_d \end{cases} \quad (19)$$

误差微分方程可由系统的实际方程减去期望方程得到,表示成如下非线性方程组:

$$\begin{cases} \dot{x}_{e1}(t) = u_{e1}(t) \\ \dot{x}_{e2}(t) = u_{e2}(t) \\ \dot{x}_{e3}(t) = x_2(t) u_1 - x_{d2}(t) u_{d1}(t) \\ \dot{x}_{e4}(t) = u_{e3}(t) \\ \dot{x}_{e5}(t) = x_4(t) u_1(t) - x_{d4}(t) u_{d1}(t) \\ \dot{x}_{e6}(t) = u_{e4}(t) \end{cases} \quad (20)$$

对期望轨迹进行线性化处理后可得到线性系统:

$$\dot{\mathbf{x}}_e(t) = \mathbf{A}(t) \mathbf{x}_e(t) + \mathbf{B}(t) \mathbf{u}_e(t) \quad (21)$$

$$\text{式(21)中 } \mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & u_{d1}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u_{d1}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ x_{d2}(t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_{d4}(t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

对于具有常值输入  $u_{d1}(t) = u_{d1}$  的线性轨迹,其可控性条件为

$$\text{rank}[\mathbf{B} \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \mathbf{A}^2\mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^5\mathbf{B}] = 6 \quad (22)$$

式(22)中的矩阵是一个非奇异矩阵,并至少有一个六阶的非零子式,当且仅当系统输入  $u_{d1}$  非零,可控性矩阵才是非奇异的,即  $u_{d1} = 0$  相当于系统运动学模型的奇点,因此,只要  $u_{d1} \neq 0$ ,则该系统就是可控的,选择系统的线性时变反馈控制器为

$$\mathbf{u}_e = -\mathbf{K} \mathbf{x}_e \quad (23)$$

对于链式系统,其反馈控制应该满足:对于每条链来说,反馈中所包含项的数目与链中包含状态的数目是相同的<sup>[17]</sup>,因此:

$$\begin{cases} u_{e1} = -k_1 x_{e1} \\ u_{e2} = -k_2 x_{e2} - \frac{k_3}{u_{d1}} x_{e3} \\ u_{e3} = -k_4 x_{e4} - \frac{k_5}{u_{d1}} x_{e5} \\ u_{e4} = -k_6 x_{e6} \end{cases} \quad (24)$$

反馈系数  $k_3$  和  $k_5$  分别除以  $u_{d1}$ ,这样闭环系统矩阵的特征方程将不包含  $u_{d1}$ ,从而使设计全局化,故矩阵  $\mathbf{K}$  为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & k_3/u_{d1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_4 & k_5/u_{d1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_6 \end{bmatrix} \quad (25)$$

式(25)中,  $k_1$  和  $k_6$  为正值, 且  $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$  和  $k_5$  可使  $\lambda^2 + k_2\lambda + k_3$  和  $\lambda^2 + k_4\lambda + k_5$  满足赫尔维茨定理, 将式(23)代入式(21)得闭环系统矩阵为

$$A_{cl} = A - BK = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & -k_3/u_{d1} & 0 & 0 & 0 \\ x_{d2}k_1 & u_{d1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_4 & -k_5/u_{d1} & 0 \\ x_{d4}k_1 & 0 & 0 & u_{d1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_6 \end{bmatrix} \quad (26)$$

闭环系统矩阵的特征值是恒定的且具有负实部, 但这并不能保证闭环时变系统渐进稳定。然而, 如果取  $u_{d1}(t)$  远离零点, 并令  $u_{d2}(t)$ 、 $u_{d3}(t)$  和  $u_{d4}(t)$  都等于 1, 就可以用缓慢时变线性系统的理论证明其渐进性。反馈矩阵可通过极点配置的方法得到, 如果系统稳定, 则闭环矩阵的特征值应该具有负实部, 系统的特征方程应满足下列条件:

$$\det(sI - A_{cl}) = (s - p_1)(s - p_2)(s - p_3)(s - p_4) \times (s - p_5)(s - p_6) \quad (27)$$

式(27)中  $p_i (i = 1, 2, \dots, 6)$  是系统的特征值, 这样可以保证在式(24)的反馈条件下, 闭环系统是可控的。

### 3 仿真实验

给定空间里的一条正弦曲线的参数方程, 以观察进行近似线性化处理后链式状态变量和期望状态变量以及链式输入和期望输入的跟踪效果, 选择正弦轨迹:

$$\begin{cases} x_d(t) = t \\ y_d(t) = \sin(\pi t) \\ z_d(t) = 1 \end{cases} \quad (28)$$

作为期望的链式输出轨迹, 由前面的分析、推导过程可以得出链式系统中状态和输入的期望值以及初始条件为

$$\begin{cases} x_{d1}(t) = t \\ x_{d2}(t) = \pi \cos(\pi t) \\ x_{d3}(t) = \sin(\pi t) \\ x_{d4}(t) = 0 \\ x_{d5}(t) = 1 \\ x_{d6}(t) = 0 \end{cases}, \begin{cases} u_{d1}(t) = t \\ u_{d2}(t) = -\pi^2 \sin(\pi t) \\ u_{d3}(t) = 0 \\ u_{d4}(t) = 0 \end{cases}, \begin{cases} x_{d1}(0) = 1 \\ x_{d2}(0) = \pi \\ x_{d3}(0) = 2 \\ x_{d4}(0) = 0 \\ x_{d5}(0) = 3 \\ x_{d6}(0) = 0 \end{cases} \quad (29)$$

设置系统的 6 个闭环极点为  $-2$ , 即:

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = p_6 = -2 \quad (30)$$

则可以得到反馈矩阵  $K$  的系数为

$$k_1 = k_6 = 2, k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = 4 \quad (31)$$

设定仿真时间为 10 s, 步长为 0.001, 采用 ode45 进行微分方程的求解, 仿真结果如下面的各图所示, 图 1 显示了实际的跟踪轨迹和期望轨迹的对比图, 从中可以看出, 链式跟踪控制器可以较好地跟踪期望轨迹。图 2 和图 3 显示了链式系统期望的状态变量、输入与实际系统的状态变量、输入间的跟踪误差, 一旦跟踪误差为 0, 那么从链式变量和输入中获取的实际控制输入就可以保证全局渐进稳定,

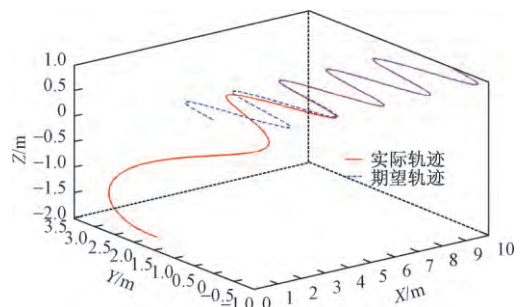


图 1 实际轨迹和期望轨迹对比

Fig. 1 The comparison between real and desired trajectory

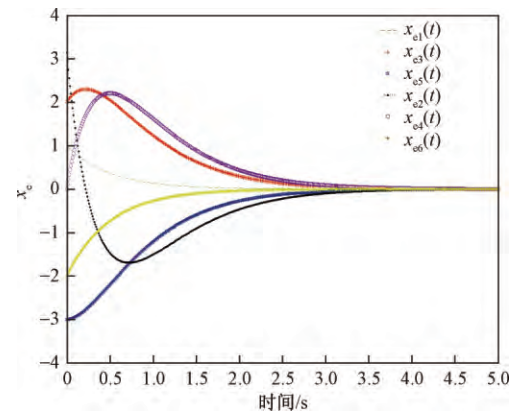


图 2 链式变量  $x_e(t)$  随时间的跟踪误差曲线

Fig. 2 The track error curve of chained variable  $x_e(t)$  along with time

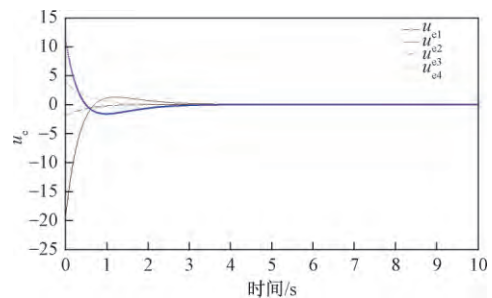


图 3 链式输入随时间的跟踪误差曲线

Fig. 3 Track error of chained inputs along with time

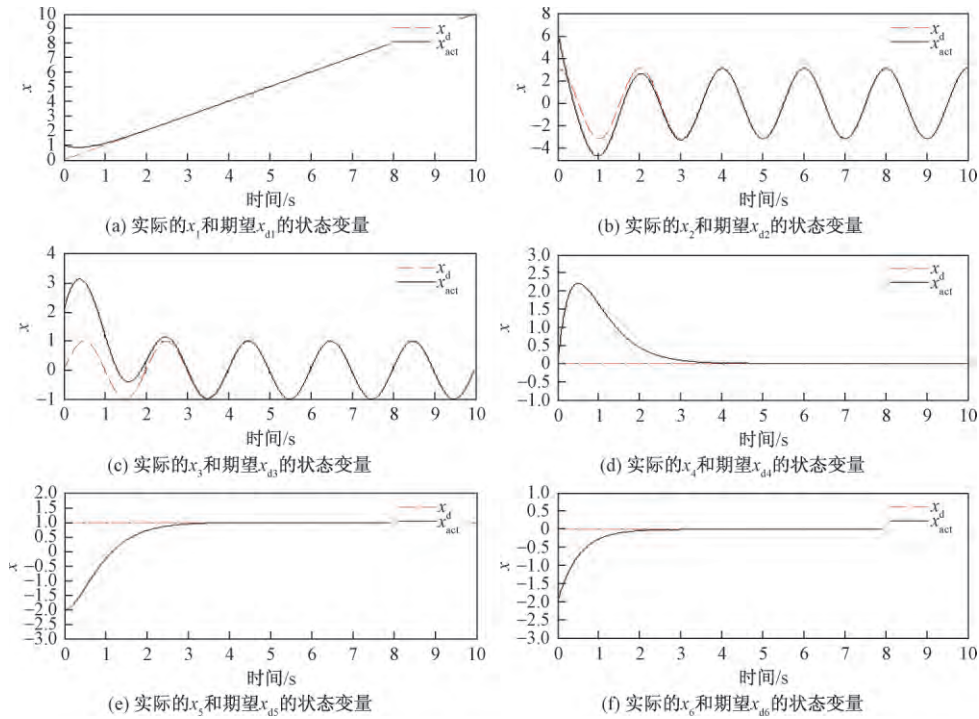


图4 实际的和期望的链式状态变量随时间变化曲线

Fig. 4 The changed curve of real and desired chained state variables along with time

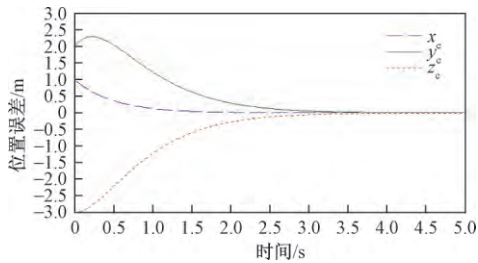


图5 位置坐标随时间的跟踪误差曲线

Fig. 5 Track error of position coordinates along with time

这样载体就可以按照所期望的三维轨迹进行跟踪。图4显示了实际的和期望的链式状态变量随时间的变化曲线,刚开始的时候,两者差距比较大,随着时间的推进,实际的状态和输入能很好地跟踪期望的状态和输入。图5显示出载体的位置坐标随时间的跟踪误差曲线,当 $t = 3.5\text{ s}$ 时,位置跟踪误差已经趋于0。以上仿真结果间接地证明了所设计的控制器能很好地跟踪期望三维路径,验证了其有效性。

### 4 结论

面向水下自主对接的应用需要,在考虑AUV非完整约束的条件下,对非线性系统的可控性进行了深入分析,并推导如何将非线性系统通过反馈变换转换成链式模型,进而基于近似线性化的全状态反馈进行链式跟踪控制器的设计,从而实现了欠驱动AUV的空间三维轨迹跟踪控制,且仿真结果验证了

控制律的有效性和合理性。

### 参 考 文 献

- 1 燕奎臣,吴利红. AUV水下对接关键技术研究. 机器人, 2007; 29(3): 267—273  
Yan K C, Wu L H. A survey on the key technologies for underwater AUV docking. Robot, 2007; 29(3): 267—273
- 2 Allen B, Auttin T, Forrester N, et al. Autonomous docking demonstrations with enhanced REMUS technology. Oceans, 2006; 18(21): 1—6
- 3 Singh H, Bellingham J G, Hover F, et al. Docking for an autonomous ocean sampling network. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001; 26(4): 10—14
- 4 Fukasawa T. On the development of underwater docking and recharging system for AUV "Marine Bird". Tokyo: Techno-Ocean, 2002
- 5 赵 慎,乔纯捷,王跃科. AUV水下对接导航定位技术研究. 第三十一届中国控制会议. 合肥: 中国自动化学会, 2012: 74—79  
Zhao S, Qiao C J, Wang Y K. On the navigation positioning technologies in AUV underwater docking. Proceedings of the 31st Chinese Control Conference. Hefei: Chinese Association of Automation, 2012: 74—79
- 6 李 晔,姜言清,张国成,等. 考虑几何约束的AUV回收路径规划. 机器人, 2015; 37(4): 478—485  
Li Y, Jiang Y Q, Zhang G C, et al. AUV recovery path planning method considering geometrical constraints. Robot, 2015; 37(4): 478—485
- 7 施淑伟,严卫生,高 剑,等. 常值海流作用下的AUV水平面路径跟踪控制. 兵工学报, 2010; 31(3): 375—379  
Shi S W, Yan W S, Gao J, et al. Path-following control of an AUV in the horizontal plane with constant ocean currents. Acta Armamen-

- tarii, 2010; 31(3): 375—379
- 8 Repoulias F. Trajectory planning and tracking control design of underactuated AUVs. Proc of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Barcelona: IEEE Press, 2005: 1622—1627
- 9 马 岭, 崔维成. NTSM 控制的 AUV 路径跟踪控制研究. 中国造船, 2006; 47(4): 76—82  
Ma L, Cui W C. Research on AUV path following control based on NTSM. Shipbuilding of China, 2006; 47(4): 76—82
- 10 施生达. 潜艇操纵性. 北京: 国防工业出版社, 1995  
Shi S D. Submarine maneuverability. Beijing: National Defence Industry Press, 1995
- 11 Murry R M. Nonholonomic motion planning: steering using sinusoids. IEEE Transaction on Automatic Control, 1993; 38(5): 700—716
- 12 Wichlund K Y, Sordalen O J, Egeland O. Control properties of underactuated vehicles. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Nagoya: IEEE Press, 1995: 2009—2014
- 13 Murry R M. Steering nonholonomic systems using sinusoids. Systems and Control Letters, 1990; 20(5): 281—288
- 14 Bushnell L G, Tilbury D M, Sastry S S. Steering three input nonholonomic systems. European Controls Conference, 1993: 1432—1437
- 15 Tilbury D, Sordalen O J, Bushnell L, *et al.* A multi-steering trailer system: conversion into chained form using dynamic feedback. IEEE Transactions on Robotics and Automation. New York: IEEE Press, 1995: 1223—1228
- 16 Kailath T. Linear systems. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1980
- 17 Wadoo S, Kachroo P. Autonomous underwater vehicles modeling, control design, and simulation. Boca Raton: CRC Press, 2013

## Path Following Control for Autonomous Underwater Vehicle Underwater Docking

ZHAO Xiong<sup>1,2</sup>, LI Yi-ping<sup>1</sup>, YAN Shu-xue<sup>1,2</sup>

(State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences<sup>1</sup>, Shenyang 110016, P. R. China; University of Chinese Academy of Sciences<sup>2</sup>, Beijing 100049, P. R. China)

**[Abstract]** Under the consideration of autonomous underwater vehicle nonholonomic constraints, deep analysis is carried out on controllability of nonlinear system combining with the characteristics of underactuated AUV in order to meet the application requirements of underwater docking. Then demonstration on how to transform the nonlinear system into chained model through state feedback is made. Basing on previous derivation, a method of chained controller design using approximate-linear full state feedback is proposed. At last, relative experiments are done in Matlab simulation environment for the purpose of validating the performance of trajectory tracking controller. The results show that proposed method can make the global asymptotic stabilization path following error, thus its validity and rationality.

**[Key words]** AUV underwater docking path following chained model