

控制与决策

Control and Decision

基于准最大最小模型预测控制的AUV视觉对接

岳伟, 季嘉诚, 刘中常, 李莉莉, 王丽媛, 邹存名

引用本文:

岳伟, 季嘉诚, 刘中常, 李莉莉, 王丽媛, 邹存名. 基于准最大最小模型预测控制的AUV视觉对接[J]. *控制与决策*, 2023, 38(7): 1887–1894.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.2069>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

通信随机时滞条件下基于分布式模型预测的AUV编队控制

AUV formation control with communication stochastic delay based on distributed model prediction

控制与决策. 2023, 38(5): 1363–1372 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0451>

基于神经网络的机电伺服系统非线性控制

Nonlinear control of mechatronic servo system based on neural network

控制与决策. 2023, 38(4): 1008–1014 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1630>

含未校准摄像机参数的非完整移动机器人自适应动态反馈跟踪控制

Adaptive dynamic feedback tracking control for nonholonomic mobile robots with uncalibrated camera parameters

控制与决策. 2022, 37(1): 247–256 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0730>

基于变速趋近律的机电伺服系统自适应滑模控制

Adaptive sliding mode control of electromechanical servo system based on variable rate reaching law

控制与决策. 2022, 37(4): 1067–1073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1166>

基于动态蚁群劳动分工模型的多AUV任务分配方法

A multi-AUV dynamic task allocation method based on antcolony labor division model

控制与决策. 2021, 36(8): 1911–1919 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1312>

基于准最大最小模型预测控制的 AUV 视觉对接

岳伟^{1†}, 季嘉诚¹, 刘中常¹, 李莉莉¹, 王丽媛², 邹存名³

(1. 大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116000; 2. 大连民族大学 机电工程学院, 辽宁 大连 116600;
3. 辽宁警察学院 治安管理系, 辽宁 大连 116036)

摘要: 针对六自由度自主式水下机器人 (autonomous underwater vehicle, AUV) 视觉对接这一重要课题, 提出一种基于融合深度信息的改进准最大最小模型预测控制 (quasi-min-max model predictive control, QMM-MPC) 方法, 有效提高复杂水下视觉伺服对接系统性能. 首先, 针对水下 AUV 视觉由于能见度低导致深度信息存在不确定性的影响, 建立新的六自由度 AUV 视觉伺服模型; 然后, 结合 AUV 运动和图像特征运动的测量数据, 设计在线深度估计器, 同时提出结合多李雅普诺夫函数的 QMM-MPC 算法, 通过求取凸多面体中各顶点不同上界值, 降低传统 QMM-MPC 算法中单李雅普诺夫函数上界所带来的强保守性; 最后, 通过仿真验证所提出方法的有效性和优越性.

关键词: AUV; 视觉伺服; 凸多面体; 深度不确定性; 准最大最小模型预测

中图分类号: TP29 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.2069

引用格式: 岳伟, 季嘉诚, 刘中常, 等. 基于准最大最小模型预测控制的 AUV 视觉对接 [J]. 控制与决策, 2023, 38(7): 1887-1894.

Quasi-min-max MPC algorithm for visual docking of an autonomous underwater vehicle

YUE Wei^{1†}, JI Jia-cheng¹, LIU Zhong-chang¹, LI Li-li¹, WANG Li-yuan², ZOU Cun-ming³

(1. College of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116000, China; 2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China; 3. Department of Public Security Management, Liaoning Police College, Dalian 116036, China)

Abstract: In this paper, a quasi-max-min predictive control (QMM-MPC) algorithm based on depth information is proposed for visual docking of the 6-DOF autonomous underwater vehicle (AUV), which can effectively improve the performance of the complex underwater visual servo docking system. Firstly, a new 6-DOF visual servo model for the underwater AUV is established to solve the problem of the uncertainty of depth information caused by the low visual visibility of the underwater AUV. Then, an online depth estimator is designed by combining the measurement data of AUV motion and image feature motion. Meanwhile, a QMM-MPC algorithm combining multi-Lyapunov functions is proposed, which can reduce the strong conservatism caused by one upper bound of the Lyapunov function in the traditional QMM-MPC algorithm by solving the different upper bound of each vertex in the convex polyhedron. Finally, the simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: AUV; visual servoing; convex polyhedron; depth parameter uncertainty; model predictive control

0 引言

过去几十年中, 自主水下机器人 (autonomous underwater vehicle, AUV) 在测深测绘、检查、维修、探雷、环境监测、监视和干预等方面的应用取得了突飞猛进的发展^[1-4]. AUV 的主要特点是在执行任务过程中自主应对变化, 保持其稳定控制性能, 而不需要人的操作. 考虑 AUV 自身的复杂动力学特点、任务复杂

性和环境的危险性^[5-6], 目前复杂环境下 AUV 的控制问题成为热点研究领域之一. AUV 的传感器需要经常维护, 且载荷电源十分有限, 当执行复杂任务时, 必须通过平台及时对其进行回收, 以完成补充电量和传感器的维护. 传统利用水面舰艇对 AUV 进行部署回收不能保证回收平台的稳定性和隐蔽性, 截止目前, 国内外针对 AUV 的特点和回收平台的类型已设计了

收稿日期: 2021-11-26; 录用日期: 2022-03-15.

基金项目: 大连市科技创新基金项目 (2019J12GX040); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (3132019355); 大连高层次人才创新支撑计划项目 (2020RQ060); 辽宁省教育厅基本科研重点项目 (LJKZ1078).

责任编辑: 高会军.

[†]通讯作者. E-mail: weiy@dlnu.edu.cn.

多种水下回收对接系统,如以绳索和杆作为对接目标的对接方式^[7],基于导向罩或导向笼为对接目标的对接方式^[8]以及电磁引导AUV的对接方式^[9]等.无论何种对接方式,在最后进行近距离对接操作时的高精度要求始终是一个研究难点.针对该问题目前已有研究包括:文献[10]设计了Tri-Ton型悬停式AUV,利用带光源的摄像头来检测目标,并完成对接工作.文献[11]提出了一种基于单摄像机的针孔模型的视觉制导控制器,相比文献[10]可实现实时运动的巡航对接任务;文献[12]将5个光源生成的单个目标放置在漏斗形水下回收平台的入口处,设计基于图像平面的比例积分(PI)控制器,以实现图像特征点与获取的特征点之间误差趋近于零;在此基础上文献[13]针对气泡扰动等实际干扰提出了一种鲁棒视觉对接技术,可应用于巡航型和悬停型AUV,该技术提出的图像处理算法在检测兴趣特征点的同时可以估计出AUV实时期望的位姿;针对单摄像头工作一旦丢失目标便会导致任务失败的情况,文献[14]提出了一种基于位置的视觉伺服,通过估计水下平台的姿态进行水下对接;考虑当前的研究工作大都依赖于视觉伺服对AUV的位姿进行估计来完成对接任务,但是水下环境复杂能见度低、光线折射、吸收和散射严重影响视觉摄像头的深度信息,文献[15]设计了一种基于图像的视觉伺服,但是文中只是将深度信息设为恒定值,并未彻底解决深度不确定问题.目前已有研究表明假设深度信息为恒定值,导致对接任务失败率较高^[16].为解决深度信息存在不确定问题,Cheah等^[17]提出了一种基于自适应算法的混合力位控制器,实现对位置深度参数的在线估计,但这些方法在线计算量较大,不适用于实时快速的AUV对接任务.

鉴于此,本文针对水下AUV视觉对接系统,提出一种改进的QMM-MPC算法,主要创新点如下:1)针对深度不确定性问题,结合深度估计值建立六自由度AUV视觉伺服误差模型,该模型相比文献[18]更加符合AUV对接系统应用需求;2)提出一种融合估计深度信息的改进QMM-MPC控制器,保证视觉伺服模型的跟踪误差趋近于零,并设计多李雅普诺夫函数上界以降低quasi-min-max算法^[19]在该领域下的强保守性.数字仿真结果表明了所提出算法的优越性.

1 问题描述

本文考虑的AUV对接系统在图像平面上的投影如图1所示.假设拥有*i*个特征点的对接站,且AUV局部坐标系与摄像机坐标系重合,则可利用成像几何中的三大坐标系(图像坐标系、摄像机坐标系、世界

坐标系),描述三维空间点投影到二维相平面的坐标转化关系.

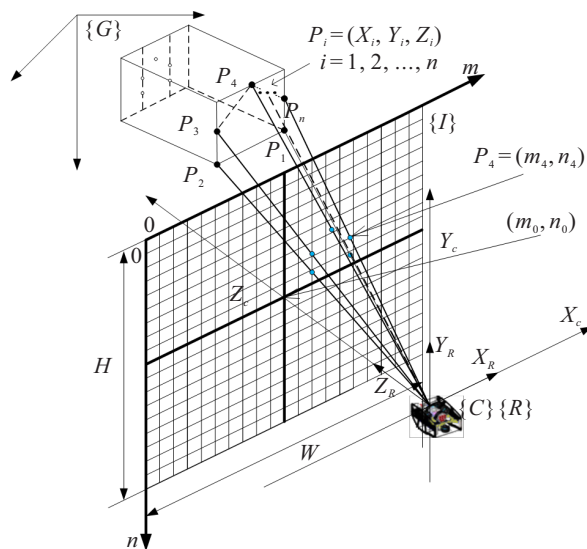


图1 对接系统在图像平面上的投影

2 模型建立

2.1 相机投影建模

已知世界坐标系 $\{G\}$ 下的 $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ 与AUV在图像坐标系下的投影点 $p_i = (m_i, n_i)$ 的坐标映射关系如下:

$$Z_i \begin{bmatrix} p_i \\ 1 \end{bmatrix} = M_I M_E \begin{bmatrix} P_i \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中: Z_i 为第*i*个特征点的深度; M_I 、 M_E 分别为相机的内参矩阵和外参矩阵,定义为

$$M_I = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & m_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & n_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$M_E = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

这里: f 为摄像机焦距, (m_0, n_0) 为图像平面中心像素坐标, dx 和 dy 为每个像素点在图像物理坐标系*x*轴和*y*轴的尺寸, R 、 T 分别为摄像机坐标系 $\{C\}$ 到世界坐标系 $\{G\}$ 的旋转矩阵和平移向量.旋转矩阵 R 由ZYX欧拉角生成,可由下式描述:

$$R_Z(\psi)R_Y(\theta)R_X(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & & & \\ \cos \theta \cos \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & & \\ -\sin \theta & & \sin \phi \cos \theta & \\ & & \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi & \\ \leftarrow & -\sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi & & \\ & & \cos \phi \cos \theta & \end{bmatrix}. \quad (4)$$

2.2 深度信息不确定影响下的视觉伺服建模

设特征点在世界坐标系下的坐标为 $p_i = [X_i, Y_i, Z_i]^T \in \mathbf{R}^3$, 对 p_i 求导可得

$$\dot{p}_i = -v_1 - v_2 \times p_i, \quad (5)$$

其中 $v_1 = [u, v, w]^T$ 、 $v_2 = [p, q, r]^T$ 分别为AUV在三坐标轴的线速度和角速度. 根据相机的透视投影, 有

$$s_i = \begin{bmatrix} m_i \\ n_i \end{bmatrix} = \frac{f}{Z_i} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix}, \quad s_i^* = \begin{bmatrix} m_i^* \\ n_i^* \end{bmatrix} = \frac{f}{Z_i^*} \begin{bmatrix} X_i^* \\ Y_i^* \end{bmatrix}. \quad (6)$$

其中: $s_i = [m_i, n_i]$ 为第 i 个特征点在图像平面上当前图像坐标, $s_i^* = [m_i^*, n_i^*]$ 为图像平面上的期望图像坐标. 对式(6)求导, 并结合式(5)可得视觉伺服模型为

$$\dot{s}_i = L_i(s_i, Z_i)v. \quad (7)$$

其中

$$L_i(s_i, Z_i) = \begin{bmatrix} -\frac{f}{Z_i} & 0 & \frac{m_i}{Z_i} & \frac{m_i n_i}{f} & -\frac{f^2 + m_i^2}{f} & n_i \\ 0 & -\frac{f}{Z_i} & \frac{n_i}{Z_i} & \frac{f^2 + n_i^2}{f} & -\frac{m_i n_i}{f} & -m_i \end{bmatrix}$$

为相机速度与成像率之间的图像雅可比矩阵; $v = [v_1, v_2]^T$ 为AUV的速度向量, Z_i 为第 i 个特征点的深度信息. 考虑视觉跟踪需要 N 个视觉特征点, 当前图像坐标和期望图像坐标可定义为

$$s \triangleq [s_1^T, \dots, s_i^T, \dots, s_N^T]^T \in \mathbf{R}^{2N},$$

$$s^* \triangleq [(s_1^*)^T, \dots, (s_i^*)^T, \dots, (s_N^*)^T]^T \in \mathbf{R}^{2N}. \quad (8)$$

由式(7)可得AUV视觉伺服模型为

$$\dot{s} = L(s, z)v. \quad (9)$$

其中: $z = [Z_1, \dots, Z_i, \dots, Z_N]^T \in \mathbf{R}^{2N}$ 为每个特征点对应的深度向量, $L(s, z)$ 为堆叠的雅可比矩阵, 有

$$L(s, z) = [L_1(s_1, Z_1) \quad \dots \quad L_i(s_i, Z_i) \quad \dots \quad L_N(s_N, Z_N)]^T. \quad (10)$$

进一步, 定义视觉跟踪误差

$$e_i = s_i - s_i^* \in \mathbf{R}^{2N}. \quad (11)$$

对式(11)求导可得

$$\dot{e} = L(s, z)v. \quad (12)$$

注1 由于水下环境复杂, 能见度低, 严重影响视觉摄像头的深度信息. 针对该问题文献[15]虽设计了一种基于图像的视觉伺服, 使其完全依赖于特征在图像平面上的运动, 但只是将深度信息设为恒定值, 并未解决深度不确定问题, 无法适用于水下视觉对接

等高精度的任务.

3 对接控制器设计

本文的目标是考虑水下弱光情况及水下的弱通信特性, 设计一个视觉伺服控制器, 保证在视觉信息不确定的情况下实现视觉跟踪误差(11)趋近于零, 使AUV能自主完成对接任务. 由此, 设计一种在线深度估计器, 并将该估计器估计的深度信息引入QMM-MPC控制算法.

3.1 在线深度估计器设计

首先, 基于AUV和图像的运动数据, 设计在线深度值估计器. 考虑第 i 个特征点的视觉伺服模型(7), 可知雅可比矩阵中前3列与深度相关. 将式(7)重新整理可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{m}_i \\ \dot{n}_i \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{Z_i} J_t | J_\omega \right) \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_i} J_t v_1 + J_\omega v_2. \quad (13)$$

其中 J_t 和 J_ω 分别为相机的平移运动和旋转运动对图像特征矢量的影响, 有

$$J_t = \begin{bmatrix} -\frac{f}{Z_i} & 0 & \frac{m_i}{Z_i} \\ 0 & -\frac{f}{Z_i} & \frac{n_i}{Z_i} \end{bmatrix},$$

$$J_\omega = \begin{bmatrix} \frac{m_i n_i}{f} & -\frac{f^2 + m_i^2}{f} & n_i \\ \frac{f^2 + n_i^2}{f} & -\frac{m_i n_i}{f} & -m_i \end{bmatrix}.$$

进一步得到紧凑的视觉伺服系统线性方程如下:

$$A\theta = b. \quad (14)$$

其中: $A = J_t v_1$, $\theta = \frac{1}{Z_i}$, $b = \begin{bmatrix} \dot{m}_i \\ \dot{n}_i \end{bmatrix} - J_\omega v_2$, b 为剩余光流, 即观察到的光流与相机旋转即将产生的光流差. 对式(14)求解可得

$$\frac{1}{Z_i} = [A^T A]^{-1} A^T b = [[J_t v_1]^T [J_t v_1]]^{-1} [J_t v_1]^T \left[\begin{bmatrix} \dot{m}_i \\ \dot{n}_i \end{bmatrix} - J_\omega v_2 \right], \quad (15)$$

其中 \hat{Z}_i 为深度估计值, 为下文模型预测控制器的设计提供近似的深度信息值.

注2 所设计的在线深度估计器只与特征提取精度相关, 不受摄像机安装位置与AUV运动的影响.

3.2 QMM-MPC设计

考虑AUV视觉伺服误差系统(12), 选取 T 为采样时间, 利用欧拉近似离散系统可得离散时间视觉伺服误差系统

$$e(k+1) = e(k) + TL(e(k), \hat{z})v. \quad (16)$$

其中: $e(k) = [e_1(k), \dots, e_i(k), \dots, e_N(k)]^T$ 为视觉误差向量, $e_i(k) = [m_{ie}(k), n_{ie}(k)]$ 为第 i 个特征点的视觉误差向量, $m_{ie}(k)$ 为横向误差, $n_{ie}(k)$ 为纵向误差. 有

$$L(e(k), \hat{z}) = [L(e_1, \hat{Z}_1), \dots, L(e_i, \hat{Z}_i), \dots, L(e_N, \hat{Z}_N)], \quad (17)$$

其中 $\hat{z} = [\hat{Z}_1, \dots, \hat{Z}_i, \dots, \hat{Z}_N]$ 为所有特征点在线估计的深度值向量. 给出第 i 个特征点在视觉伺服误差系统中的雅可比矩阵为

$$L(e_i(k), \hat{Z}_i) = \begin{bmatrix} -\frac{f}{\hat{Z}_i} & 0 & \frac{m_{ie} + m_i^*}{\hat{Z}_i} & \frac{(m_{ie} + m_i^*)(n_{ie} + n_i^*)}{f} \\ 0 & -\frac{f}{\hat{Z}_i} & \frac{n_{ie} + n_i^*}{\hat{Z}_i} & -\frac{f^2 + (n_{ie} + n_i^*)^2}{f} \\ \frac{f^2 + (m_{ie}(k) + m_i^*)^2}{f} & & & (n_{ie}(k) + n_i^*) \\ -\frac{(m_{ie}(k) + m_i^*)(n_{ie}(k) + n_i^*)}{f} & & & -(m_{ie}(k) + m_i^*) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

由式(18)可知, 雅可比矩阵 $L(e_i(k), \hat{Z}_i)$ 是关于变量 $m_{ie}(k)$ 和 $n_{ie}(k)$ 的函数. 即 $L(e_i(k), \hat{Z}_i) = L(p(k))$ 随着参变向量 $p(k) = [m_{ie}(k), n_{ie}(k)]$ 的变化而变化. 根据摄像机的分辨率, 可以确定图像坐标 $m_{ie}(k)$ 和 $n_{ie}(k)$ 的变化范围分别为 $m_{\min} \leq m_{ie}(k) + m_i^* \leq m_{\max}$, $n_{\min} \leq n_{ie}(k) + n_i^* \leq n_{\max}$.

进一步, $L(p(k))$ 可以分解为已知顶点矩阵的凸组合形式, 使得任意采样时刻 k , $L(p(k))$ 在顶点矩阵 $L_r (r = 1, 2, \dots, R)$ 组成的凸多面体 Ω 中变化, 即

$$L(p(k)) \in \Omega = C_o\{L_1, L_2, \dots, L_R\}. \quad (19)$$

考虑误差系统(17), 满足如下约束:

$$|v_1(k)| \leq v_{1\max}, |v_2(k)| \leq v_{2\max}, k \geq 0; \quad (20)$$

$$s_{i\min} \leq e_i(k) + s_i^* \leq s_{i\max}, k \geq 0. \quad (21)$$

进一步, 针对受限 AUV 视觉伺服系统(18)~(21), 雅可比矩阵 $L(p(k))$ 中的视觉特征参数向量 $p(k)$ 在当前 k 时刻可测量得知. 而对于未来时刻的数值不能提前预估得到, 仅能保证其动能范围在凸多面体 Ω 中. 因此, 本文分别对当前时刻以及未来时刻设计预测控制器. 定义目标函数如下:

$$J_0^\infty(k) = e(0|k)^T Q_e e(0|k) + u(0|k)^T Q_u u(0|k) + J_1^\infty(k). \quad (22)$$

其中: $u(0|k) = u(k) = [v_1, v_2]$, $e(0|k) = e(k)$, $J_1^\infty(k)$ 为 $k + 1$ 时刻到无穷时刻的目标函数值, Q_e 和 Q_u

分别为状态和控制输入加权矩阵. 由于未来时刻目标函数具有参数不确定性, 需利用 min-max 控制策略对其进行优化, 等价于对 $J_0^\infty(k)$ 进行优化. 设定由于未来时刻不确定性, 所造成最差情况下的性能为 $\max_{L(p(k+i)) \in \Omega} J_0^\infty(k)$, 对其极小化可得到最优性能指标, 从而得到优化问题如下:

$$\min_{U_0^\infty} \max_{L(p(k+i)) \in \Omega} J_0^\infty(k). \quad (23)$$

其中: $U_0^\infty = \{u(0|k), U_1^\infty\}$, $U_1^\infty = [u(1|k), \dots, u(\infty|k)]$ 为 $k + 1$ 时刻到无穷时刻的控制输入. 定义 U_1^∞ 状态反馈控制器为

$$u(i|k) = F(k)e(i|k), i = 1, 2, \dots, \infty, \quad (24)$$

其中 $F(k)$ 为反馈控制增益. 为了获取最优性能指标, 需求取最坏情况下的控制性能, 即确定 $J_1^\infty(k)$ 的上界. 在传统 QMM-MPC 中, 仅有一个李雅普诺夫函数上界, 而针对 AUV 视觉对接系统, 则具有太强的保守性. 本文借鉴文献[20]多李雅普诺夫 min-max 预测控制的思想, 采用凸多面体中不同顶点构成的视觉系统模态, 为每个顶点设计李雅普诺夫函数如下:

$$V_r(e(i|k)) = e(i|k)^T P_r(k)e(i|k), \quad r = 1, 2, \dots, R, \quad (25)$$

其中 $P_r(k)$ 为待求的对称正定矩阵. 若使闭环系统渐近稳定, 则 $V_r(e(i|k))$ 需满足

$$V_r(e(i+1|k)) - V_r(e(i|k)) \leq -[e(i|k)^T Q_e e(i|k) + u(i|k)^T Q_u u(i|k)]. \quad (26)$$

将式(26)左端从 $i = 1$ 累加到 ∞ , 可得

$$V_r(e(1|k)) - V_r(e(\infty|k)) \geq \sum_{i=1}^{\infty} [e(i|k)^T Q_e e(i|k) + u(i|k)^T Q_u u(i|k)]. \quad (27)$$

考虑闭环系统的渐近稳定性 $V_r(e(\infty|k)) = 0$, 上式化简可得到 $J_1^\infty(k)$ 的上界为

$$J_1^\infty(k) \leq e(1|k)^T P_r(k)e(1|k), r = 1, 2, \dots, R. \quad (28)$$

进一步, 将状态反馈控制器(24)代入递减性约束(27), 可得

$$e(i|k)^T \{(I + L(i|k)F(k))^T P(k)(I + L(i|k)F(k)) - P(k) + Q_e + F(k)^T Q_u F(k)\} e(k + i|k) < 0. \quad (29)$$

根据线性系统的性质, 当各个多面体顶点满足约束(29)时未来时刻的系统模型必定满足约束(29), 可以将式(29)重写为

$$(I + L_r F_r(k))^T P_r(k)(I + L_r F_r(k)) - P_r(k) + Q_e + F_r(k)^T Q_u F_r(k) < 0. \quad (30)$$

并附加如下性能要求:

$$V(0, k) = e(k|k)^T P(0|k)e(k|k) < \gamma. \quad (31)$$

根据式(30)和(31)建立优化问题,并设计如下线性矩阵不等式:

$$\min_{Y, G, Q_r} \gamma; \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} Q_r & * & * & * \\ [I + L_r F_r] Q_r & Q_r & * & * \\ Q_e^{1/2} Q_r & 0 & \gamma I & * \\ Q_u^{1/2} F_r Q_r & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} > 0, \quad (33)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & e(k|k)^T \\ e(k|k) & Q_r \end{bmatrix} > 0. \quad (34)$$

其中: $Q_r = \gamma P_r^{-1}, \forall r = 1, 2, \dots, R$. 根据舒尔补引理,由式(34)可得 $Q_r > 0, G + G^T > Q_r$,进一步,矩阵 $(G^T - Q_r)Q_r^{-1}(G^T - Q_r)$ 满足非负定,因此可得

$$0 < G + G^T - Q_r \leq G^T Q_r^{-1} G. \quad (35)$$

根据式(35),可将式(34)转化为

$$\begin{bmatrix} G^T Q_r^{-1} G & * & * & * \\ [I + L_r F_r] G & Q_r & * & * \\ G_e^{1/2} G & 0 & \gamma I & * \\ G_u^{1/2} F(k) G & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} > 0. \quad (36)$$

将式(36)左乘 $\text{diag}\{Q_r, G^{-T}, I, I, I\}$, 右乘 $\text{diag}\{G^{-1} Q_j, I, I, I\}$, 则式(33)等价于如下LMI:

$$\begin{bmatrix} G + G^T - Q_r & * & * & * \\ [I + L_r Y] G & Q_r & * & * \\ Q_e^{1/2} G & 0 & \gamma I & * \\ Q_u^{1/2} Y & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} > 0. \quad (37)$$

其中: $G = F^{-1} Y, \forall r = 1, 2, \dots, R$.

若优化问题(32)存在解 $Q_r (r = 1, 2, \dots, R)$ 和一对矩阵 Y, G , 则为了求取 J_1^∞ 的最终上界, 定义 $Q_m = \min\{Q_r\}$, 得到 J_1^∞ 的上界为 $e(1|k)^T P_m(k)e(1|k)$, 其中 $P_m = Q_m/\gamma$.

考虑当前时刻 $k, e(0|k) = e(k), u(0|k) = u(k)$, 整理式(22)可得

$$\max_{L(p(k+i)) \in \Omega} J_0^\infty \leq e(k)^T Q_e e(k) + u(k)^T Q_u u(k) + e(1|k)^T P_m(k)e(1|k). \quad (38)$$

由式(20)、(21)、(30)和(38), AUV视觉伺服准最大最小模型预测控制问题表示为

$$\begin{aligned} & \min_{u, F, P} \{e(k)^T Q_e e(k) + u(k)^T Q_u u(k) \\ & \quad u(k) + e(1|k)^T P_m(k)e(1|k)\}. \quad (39a) \\ & \text{s.t. } e(1|k) = e(k) + L(p(k))u(k), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (I + L_r F_r(k))^T P_r(k)(I + L_r F_r(k)) - \\ & P_r(k) + Q_e + F_r(k)^T Q_u F_r(k) < 0, \\ & \forall r = 1, 2, \dots, R, \end{aligned}$$

$$v_{1\min} \leq v_1 \leq v_{1\max}, v_{2\min} \leq v_2 \leq v_{2\max},$$

$$e_{\min} - e(k) \leq B(p(k))u(k) \leq e_{\max} - e(k). \quad (39b)$$

进而可得如下LMIs:

$$H(k) = \begin{bmatrix} 1 & * & * & * \\ e(k) + L(p(k))u(k) & Q_m(k) & * & * \\ Q_e^{0.5} e(k) & 0 & \gamma I & * \\ Q_u^{0.5} e(k) & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix}, \quad (40)$$

$$C_r(k) = \begin{bmatrix} G + G^T - Q_r & * & * & * \\ [I + L_r Y] G & Q_r & * & * \\ Q_e^{1/2} G & 0 & \gamma I & * \\ Q_u^{1/2} Y & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix}, \quad (41)$$

$$D_r(k) = \begin{bmatrix} u_{\max}^2 I & * \\ Y^T & G + G^T - Q_r \end{bmatrix}. \quad (42)$$

为了使目标函数更易求解, 令优化问题(39)的目标函数满足

$$\begin{aligned} & e(k)^T Q_e e(k) + u(k)^T Q_u u(k) + \\ & e(1|k)^T P_m(k)e(1|k) \leq \gamma. \quad (43) \end{aligned}$$

将 $e(1|k) = e(k) + L(p(k))u(k)$ 代入式(43), 由舒尔补引理可得等价条件 $H(k) \geq 0$, 对式(39b)中的递减性约束和控制输入约束应用舒尔补定理可得等价条件 $C_r(k) \geq 0, D_r(k) \geq 0$.

结合式(43)~(45), 优化问题(39)可改写为

$$\begin{aligned} & \min_{\gamma, u(k), Q_r(k), Y(k), Q_m} \gamma. \quad (44a) \\ & H(k) \geq 0, C_r(k) \geq 0, D_r(k) \geq 0; \end{aligned}$$

$$v_{1\min} \leq v_1 \leq v_{1\max}, v_{2\min} \leq v_2 \leq v_{2\max};$$

$$e_{\min} - e(k) \leq B(p(k))u(k) \leq e_{\max} - e(k). \quad (44b)$$

其中式(44b)最后一个约束为视觉可见性约束.

将优化问题(39)转换为在线求解较为便捷的线性矩阵不等式描述. 假定对该问题求得最优解 $\gamma^*, u(k)^*, Q_m(k)^*$ 和 $Y(k)^*$, 将AUV视觉伺服控制器定义为 $u_{\text{mpc}}(k) = u(k)^*$, 终端权值 $P(k) = \gamma Q_m(k)^{*^{-1}}$, $F(k) = Y(k)^* G(k)^*$, 相应的AUV闭环视觉伺服控制系统为

$$e(k+1) = e(k) + L(p(k))u_{\text{mpc}}(k). \quad (45)$$

4 仿真结果与分析

以六自由度AUV为研究对象,通过与文献[15, 19]的对比实验,分别验证所提出算法在对接控制方面的有效性. 设定摄像机位于AUV的重心,相机的焦距为0.008,像素宽和高均为0.000 01,图像原点为(512, 512),相机平面尺寸为(1 024, 1 024).

4.1 深度不确定下的视觉轨迹

设置相对位姿向量为 $(X, Y, Z, \mathcal{R}, \mathcal{P}, \mathcal{Y})$,其中 X 、 Y 、 Z 表示位移(单位:m), \mathcal{R} 、 \mathcal{P} 和 \mathcal{Y} 表示Roll-Pitch-Yaw角(单位:rad). 本例仿真中对接目标与摄像机初始相对位姿为(2.0, 2.0, 5.0, 0, 0, 1.5),期望位姿为(0, 0, 1.0, 0, 0, 0),选取水下平台外围5个顶点作为特征点,期望视觉特征定义为 $s_i^* = (300, 300, 700, 700, 500; 400, 800, 800, 400, 200)$.

文献[15]将深度默认为已知常量,仿真结果如图2所示. 可以看到,在同一采样时间下,虽然其最终能到达期望位姿,但摄像机轨迹很不理想,相比本文算法的轨迹产生了很多额外运动,运动轨迹变长,增加了AUV的能耗.

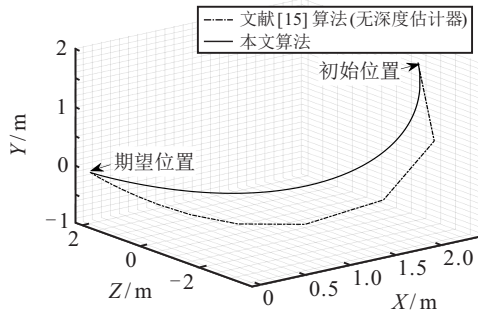
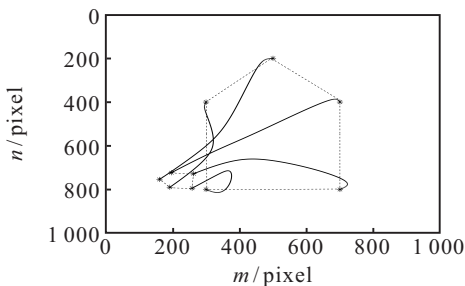
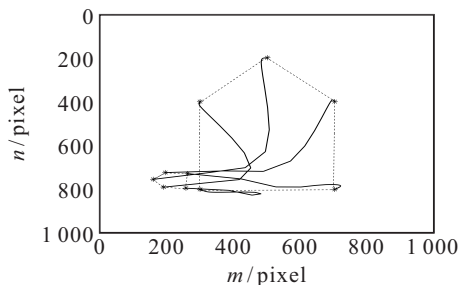


图2 摄像机轨迹



(a) 本文算法



(b) 文献[15]算法

图3 场景1下的图像平面

场景1下的图像平面如图3所示. 由图3可见,图像轨迹呈现锯齿状,这是因为在给定恒定深度下图像雅可比矩阵不能很好地描述相机和特征点的关系,在相机指引下,AUV每次运动误差均较大,导致路径呈锯齿状.

本文所提出算法的深度估计值与真实深度值的对比如图4所示. 由于深度估计值初始为零,与真实深度值相差较大,图像雅可比矩阵无法很好地近似相机的运动,这也是造成图3(a)中初始时刻特征点运动方向偏差的原因.

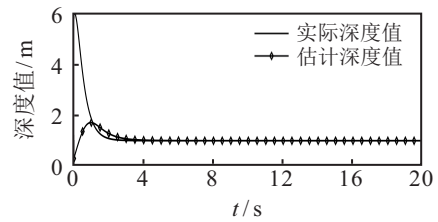


图4 深度估计值与真实值对比

4.2 控制性能对比

本例仿真对比文献[19]QMM-MPC算法和本文改进算法. 设置场景2中,目标在摄像机坐标系期望相对位姿不变,初始相对位姿为(0.5, 0.5, 2.0, random, random, -1)不同于场景1初始角值设为零,场景2中初始的Roll角和Pitch角设置为随机数,其取值范围分别为 $-0.5 \text{ rad} \leq \mathcal{R} \leq 0.5 \text{ rad}$, $-0.5 \text{ rad} \leq \mathcal{P} \leq 0.5 \text{ rad}$. 同时设置物理约束条件为 $-2.5 \text{ m/s} \leq v_1 \leq 2.5 \text{ m/s}$, $-1.5 \text{ rad/s} \leq v_2 \leq 1.5 \text{ rad/s}$. 设置图像特征点5(最上方顶点)的期望图像坐标为 $s_5^* = [500, 200]$,则由图像特征约束 $s_{i_{\min}} \leq e_i(k) + s_i^* \leq s_{i_{\max}}$ 可得 $[-500 \quad -200]^T \leq e_5(k) \leq [500 \quad 800]^T$,然后通过解得所有特征点的特征约束最终得到凸多面体 Ω .

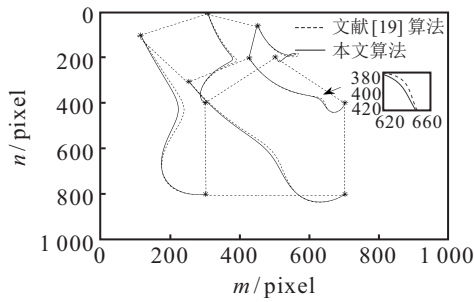
为了对仿真结果进行分析,表1中给出5种不同初始角度信息下对应的摄像机轨迹长度,图像平面以及三维中摄像机运动的仿真结果如图5所示. 可以看到,本文算法和文献[19]算法均能实现对接任务,但本文算法控制下相机运动轨迹相对更短.

表1 不同Roll、Pitch角下对应的摄像机轨迹长度

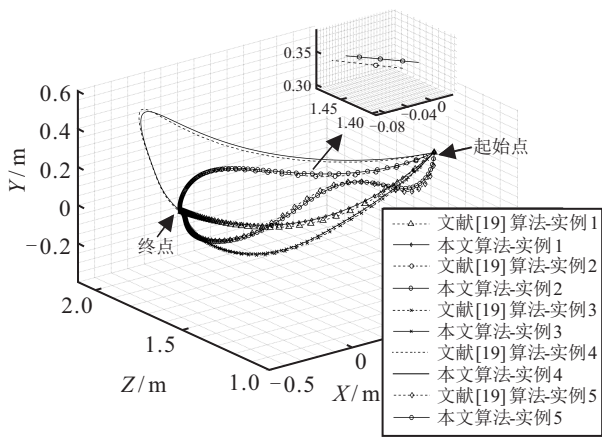
编号	例1	例2	例3	例4	例5
\mathcal{R} /rad	0.0	0.25	-0.25	0.5	-0.5
\mathcal{P} /rad	0.0	0.25	-0.25	0.5	-0.5
文献[19]算法轨迹长度	1.428	1.581	1.549	2.268	2.127
本文算法轨迹长度	1.395	1.540	1.526	2.075	2.042

图6给出实例2($\mathcal{R} = 0.25 \text{ rad}$, $\mathcal{P} = 0.25 \text{ rad}$)中同一采样时间、不同算法下5个特征点的视觉误差曲线. 由图6(b)可知,文献[19]算法存在静态误差,无法适用于高精度视觉对接任务. 由图6(a)可知,本文

算法下所有特征点的误差在4.57s衰减到零点,而图6(b)文献[19]算法在10s时衰减到零点附近. 本文算法相比文献[19],无论是收敛性还是响应时间均具有更好的控制性能.

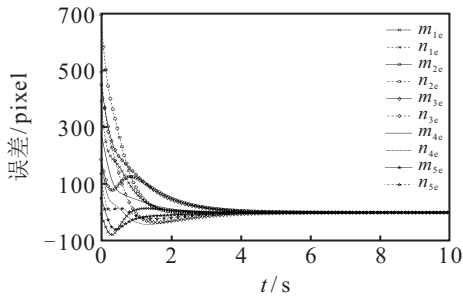


(a) 图像平面-实例2

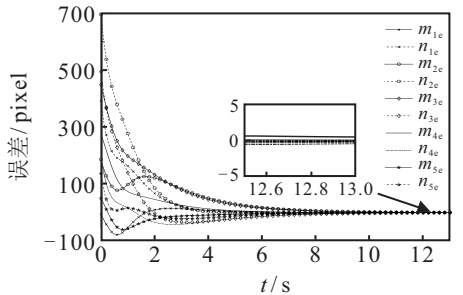


(b) 摄像机轨迹(三维空间)

图5 场景2的图像及摄像机运动



(a) 本文算法误差变化

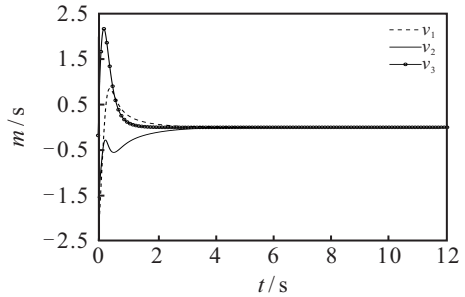


(b) 文献[19]算法误差变化

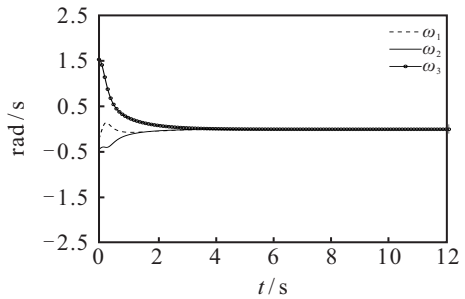
图6 误差变化

由图7可见,本文算法大大降低了文献[19]中QMM-MPC控制算法的强保守性,图7(a)、(c)分别表

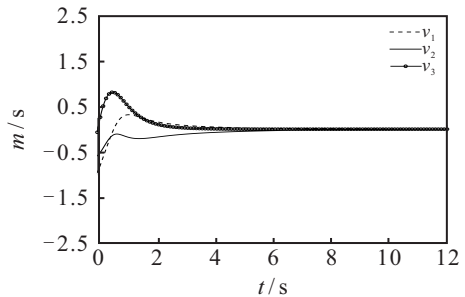
示本文算法和文献[19]算法在满足约束条件下所规划的线速度,图7(b)、(d)分别表示所规划的角速度. 通过对比可得,本文算法相较于文献[19]算法所规划的线速度角速度更大,能使AUV更快地达到期望位姿,即本文算法能更快、更准确地完成对接任务.



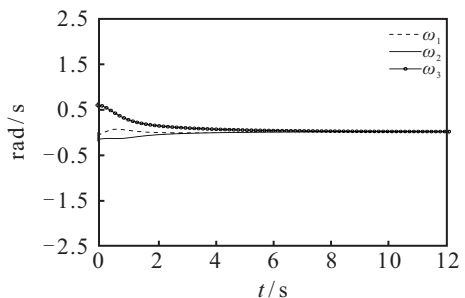
(a) 本文算法机器人线速度规划



(b) 本文算法机器人角速度规划



(c) 文献[19]算法机器人线速度规划



(d) 文献[19]算法机器人角速度规划

图7 场景2下的图像平面

5 结论

本文设计了一种深度估计器,将实时估计的深度信息引入视觉伺服模型,利用改进的准最大最小模型预测控制方法实现了基于图像平面的AUV视觉对接任务. 所提出的模型和方法更适用于水下实际情况,在保证系统的闭环稳定性的同时,能保证AUV更快

速、更准确地完成对接任务。

本文算法增加了深度估计和优化凸多面体环节,使得在线求解的计算量增加,对本文选取5个视觉特征点的水下机器人视觉对接任务并没有影响,但在一些具有大量特征点或参变量的复杂系统中,可能会影响系统的实时性问题,下一步将针对此问题开展研究以提高算法的效率。

参考文献(References)

- [1] Zhang W, Teng Y B, Wei S L, et al. The robust H-infinity control of UUV with Riccati equation solution interpolation[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 156: 252-262.
- [2] Wynn R B, Huvenne V A I, le Bas T P, et al. Autonomous underwater vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 451-468.
- [3] Gwyn G. Technology and applications of autonomous underwater vehicles[J]. *Mechanical Engineering*, 2003: 1087-1097.
- [4] Allotta B, Costanzi R, Ridolfi A, et al. The ARROWS project: Robotic technologies for underwater archaeology[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 364: 012088.
- [5] Lin Y H, Wang S M, Huang L C, et al. Applying the stereo-vision detection technique to the development of underwater inspection task with PSO-based dynamic routing algorithm for autonomous underwater vehicles[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 139: 127-139.
- [6] Petillot Y R, Reed S R, Bell J M. Real time AUV pipeline detection and tracking using side scan sonar and multi-beam echo-sounder[J]. *Oceans'02 Mts/Ieee*, 2002, 1: 217-222.
- [7] Li D J, Chen Y H, Shi J G, et al. Autonomous underwater vehicle docking system for cabled ocean observatory network[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 109: 127-134.
- [8] Maki T, Shiroku R, Sato Y, et al. Docking method for hovering type AUVs by acoustic and visual positioning[C]. *IEEE International Underwater Technology Symposium*. Tokyo, 2013: 1-6.
- [9] Trslic P, Rossi M, Robinson L, et al. Vision based autonomous docking for work class ROVs[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 196: 106840.
- [10] Yan Z, Gong P, Zhang W, et al. Autonomous underwater vehicle vision guided docking experiments based on L-shaped light array[J]. *IEEE Access*, 2019, 35(7): 72567-72576.
- [11] Lee P M, Jeon B H, Kim S M. Visual servoing for underwater docking of an autonomous underwater vehicle with one camera[J]. *Oceans Celebrating the Past Teaming Toward the Future*, 2003, 1(2): 677-682.
- [12] Park J Y, Jun B H, Lee P M, et al. Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera[J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(1): 48-61.
- [13] Wirtz M, Hildebrandt M, Gadugi C. Design and test of a robust docking system for hovering AUVs[J]. *Oceans*, 2012, 1(6): 1-8.
- [14] Sotiropoulos P, Tosi N, Andritsos F, et al. Optimal docking pose and tactile hook-localisation strategy for AUV intervention: The DIFIS deployment case[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 46: 33-45.
- [15] Yahya M F, Arshad M R. Image-based visual servoing for docking of an autonomous underwater vehicle[C]. *IEEE 7th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications*. Kuala Lumpur, 2017: 1-6.
- [16] 贾庆轩, 段嘉琪, 陈钢. 机器人在轨装配无标定视觉伺服对准方法[J]. *航空学报*, 2021, 42(6): 424063. (Jia Q X, Duan J Q, Chen G. Uncalibrated visual servo of space robots performing on-orbit assembly alignment task[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(6): 424063.)
- [17] Cheah C C, Liu C, Slotine J J E. Adaptive Jacobian vision based control for robots with uncertain depth information[J]. *Automatica*, 2010, 46(7): 1228-1233.
- [18] 王婷婷, 刘国栋. 结合深度信息的视觉伺服准最小最大MPC方法[J]. *控制与决策*, 2013, 28(7): 1018-1022. (Wang T T, Liu G D. Quasi-Min-max MPC algorithm for visual servoing system with depth information[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(7): 1018-1022.)
- [19] Lu Y H, Arkun Y. Quasi-min-max MPC algorithms for LPV systems[J]. *Automatica*, 2000, 36(4): 527-540.
- [20] Cuzzola A F, Geromel C J, Morari M. An improved approach for constrained robust model predictive control[J]. *Automatica*, 2002, 38(7): 1183-1189.

作者简介

岳伟(1981—),男,副教授,博士生导师,从事智能交通系统中车辆协同控制、多无人机协同搜索中的路径规划和任务分配等研究, E-mail: weiy@dlmu.edu.cn;

季嘉诚(1998—),男,硕士生,从事机器视觉、模型预测控制的研究, E-mail: wo1067642848@qq.com;

刘中常(1987—),男,副教授,博士,从事网络控制、多智能体一致性等研究, E-mail: zcliu@foxmail.com;

李莉莉(1982—),女,副教授,博士,从事网络切换控制等研究, E-mail: tolilili@gmail.com;

王丽媛(1987—),女,副教授,博士,从事网络控制、无人船编队等研究, E-mail: wangliyuan@163.com;

邹存名(1982—),男,副教授,博士,从事智能交通系统车辆协同控制等研究, E-mail: zoucm_lnpc@163.com.