

控制与决策

Control and Decision

基于视觉传感器的小型多AUV系统队形排列

解则晓, 王晓敏

引用本文:

解则晓, 王晓敏. 基于视觉传感器的小型多AUV系统队形排列[J]. 控制与决策, 2020, 35(3): 569–577.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0962>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于复杂网络的多电机同步控制系统故障诊断与切换容错研究

Fault diagnosis and switching tolerance for multi-motor synchronous control based on complex dynamical network
控制与决策. 2020, 35(4): 843–851 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0733>

基于镜像映射原理的LNG液舱压力维持系统 H_∞ 优化控制

H_∞ optimized control for pressure maintenance system of LNG tank via the mirror-mapping technique
控制与决策. 2020, 35(2): 501–506 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0662>

基于镜像映射原理的LNG液舱压力维持系统 H_∞ 优化控制

H_∞ optimized control for pressure maintenance system of LNG tank via the mirror-mapping technique
控制与决策. 2020, 35(2): 501–506 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0662>

基于递推近似最小一乘的多传感器系统偏差稳健估计算法

Multi-sensor bias robust estimation based on recursive approximate least absolute deviation
控制与决策. 2019, 34(3): 495–502 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1204>

基于二阶一致性算法的多仿生机器鱼分布式编队控制

Distributed formation control of multiple biomimetic robotic fish based on second-order consensus algorithm
控制与决策. 2019, 34(1): 31–42 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0981>

基于速度空间的移动机器人同时避障和轨迹跟踪方法

Velocity space based concurrent obstacle avoidance and trajectory tracking for mobile robots
控制与决策. 2017, 32(2): 358–362 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1376>

二阶多智能体系统量化蜂拥控制

Quantized flocking control of multiple agents with second-order dynamics
控制与决策. 2015(3): 541–545 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0008>

一种基于条件证据网络的多源异类知识融合识别方法

A recognition fusion method of multi heterogeneous knowledge based on condition evidential network
控制与决策. 2015, 30(12): 2153–2160 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1495>

基于视觉传感器的小型多 AUV 系统队形排列

解则晓¹, 王晓敏^{1,2†}

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 法国布列塔尼国立高等先进技术学校
海洋感知与测绘系, 菲尼斯泰尔 布雷斯特 29806)

摘要: 针对海底体积较小(或彩色)目标物体的搜索, 基于视觉传感器的多 AUV 系统成为一个研究热点. 为构建一个给定队形(平面金字塔队形), 将系统中的同构小型 AUV 单元有序地集合在一起, 基于视觉传感器得到的相对位置及罗盘得到的全局方位, 提出一种基于局部位置的队形控制方法. 该控制算法包含两部分: 1) 采取邻居互查机制以区分 AUV 身份 ID; 2) 提出复杂度为 $\mathcal{O}(n \log n)$ 的避碰策略, 优化平面金字塔队形的位置与姿态, 并为每个 AUV 规划无交叉直线轨迹. 在 Blender 搭建的无障碍深海仿真环境中, 通过 4~7 个具有 ROV 结构的同构 AUV (CISCREA) 重复构建平面金字塔队形, 对所提出方法的性能进行测试. 仿真结果表明, 所提算法具有较好的可行性与稳定性.

关键词: 同构小型多 AUV 系统; 水下视觉伺服系统; 局部信息; 队形控制; 避碰策略; 平面金字塔队形
中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Pattern formation of small multi-AUV system based on optical sensors

XIE Ze-xiao¹, WANG Xiao-min^{1,2†}

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Ocean Sensing and Mapping, ENSTA Bretagne, Brest 29806, France)

Abstract: Due to the searching tasks of the small and/or color objects on the seabed, the multi-AUV systems with the optical sensors have become a research hotspot. To build a given pattern formation (a planar pyramid pattern) and put all the small homogeneous AUV units together, based on the relative positions got from the optical sensors and the absolute orientation evaluated by the compass, a local position-based control method is proposed. This method includes two parts: 1) a neighbor-check mechanism is given to distinguish the AUVs' IDs; 2) a collision avoidance strategy with complexity $\mathcal{O}(n \log n)$ is proposed to optimize the position and gesture of a planar pyramid pattern, and the non-intercrossing linear trajectories for each AUV is planned. The proposed control method is tested in a realistic obstacle-free deep-sea simulation environment established in Blender. 4~7 AUVs (CISCREA) are used to build the planar pyramid pattern repeatedly. The results verify the feasibility and stability of the proposed control method.

Keywords: multi-AUV system with homogeneous structure; underwater vision servoing; local information; formation control; collision avoidance strategy; planar pyramid pattern

0 引言

随着对海洋研究的深入, AUV 承担的任务也日趋复杂. 其中, 部分任务需要大范围探测信息, 例如海洋检测、海洋采样、海底管道监管、反水雷探测等. 完成此类任务一般有两种方式: 一种是传统方式, 采用单个大型 AUV 系统(或者与水面母船相结合); 另一种是采用多个小型 AUV 组成的舰队(多 AUV 系统). 与单 AUV 系统相比, 多 AUV 系统中的每个 AUV 对低精度、低成本传感器的接受度更高. 例如, 光学传感器或者低分辨率声呐代替高分辨率的合成孔径声

呐. 另外, 光学传感器较短的工作范围可借助多 AUV 系统得到扩展. 光学传感器不仅可以获得海底的相关信息, 同时还可与 AUV 进行通讯. 装配光学传感器的小型多 AUV 系统的常规任务是搜索海底体积较小的目标物体或采集颜色丰富的水下生物样本.

为完成任务, 多 AUV 系统必须通过队形设定和队形控制来实现整个系统的协调控制. 队形设定是多 AUV 系统执行任务的第一环节, 其对队形的抗扰动能力及实现队形控制有重要影响. 队形控制包含队形构建、队形维持和队形重构(如遇到障碍等). 水

收稿日期: 2018-07-12; 修回日期: 2018-10-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61571478, 61601428, 51709245, 51509229).

责任编辑: 林崇.

†通讯作者. E-mail: wangxiaomin88@126.com.

下环境中的队形协调控制已经开始得到关注,但大部分研究是针对由2或3个装备精良的大型AUV组成的队列,而且这些AUV的感知传感器主要为声纳^[1-4],其队形主要是三角形^[2,5]和少量的圆形或椭圆形^[1]。但是这些多AUV系统大多用于探测海底地形与环境监管,且成本较高。

本文研究的是低成本、低功耗的小型同构多AUV系统,AUV单元装备的传感器性能相对较低,感知传感器主要为水下摄像机和罗盘。为获得较大的覆盖范围,该类多AUV系统可包含较多数量的小型AUV单元。借鉴于陆上及空中的“V”型队形^[6-8],引入平面金字塔队形^[9]。平面金字塔队形是一种不受机器人数量限制的主从式队形,覆盖范围相对较大,且内部冗余机器人弥补了水下摄像机较短的工作范围,降低了AUV之间的通讯距离,增强了AUV之间的约束,提高了队形的抗干扰能力,满足本文要求。

队形的建立需要队形控制算法的支撑。根据传感器的感知能力及系统的拓扑结构,队形控制算法主要包含基于位置、分布、距离3种控制方法^[10]。基于位置的控制方法通过实时感知全局坐标实现轨迹的规划与更新^[1-2,8,11-13],对传感器的感知能力要求较高,在室外环境应用比较广泛。基于距离的控制方法仅依据机器人之间的相对距离完成队形的控制^[10,14],其对拓扑结构稳定性要求较高。而基于分布的控制方法,机器人通过感知邻近机器人的相对位置和全局方位实现队形控制^[15-16],对传感器和拓扑结构的要求均一般。考虑到水下环境中传感器的感知能力受限,AUV单元均装备罗盘,基于分布的控制方法更切实际。目前,基于分布的控制算法主要有人工势场算法^[17]、分布式一致算法^[18]以及生物启发式算法^[19]等。基于分布的控制算法一般对通讯要求比较高,需要机器人单元之间不断进行信息交换。不同于陆上或空中系统中RF发展较为成熟,可实时进行通讯,水下环境中RF不可用,水声通讯稳定性又有待提高,因此水下环境中的信息交换是完成队形排列的一个关键问题。

考虑到视觉通讯已经在鱼群的形成中得到了验证^[20],也已经开始被应用于陆上多机器人系统^[15-16]和水中系统^[2,5,9],因此基于视觉感知的相对位置和罗盘估计的全局方位,提出一种新的基于分布的队形控制方法实现无障碍水下环境中队形的排列。该方法仅进行一次水声通讯用于完成AUV单元信息交换,降低了水声通讯频率。为识别同构AUV单元的软件ID,该算法给出了一种邻居互查机制;为避免AUV单

元之间的碰撞又不需要实时通讯,提供一种时间复杂度为 $O(n \log n)$ 的避碰策略优化给定队形的位姿,并为每个AUV单元规划避碰路径,最终实现无障碍环境中小型同构多AUV系统队形的建立。

1 问题描述

为完成水下任务,多AUV系统需要一个鲁棒性较好、抗扰动能力较强的有序队形,且为构建此队形,需要提出相应的队形控制算法。本文系统的特点是:1)无全局位置传感器;2)AUV单元之间的相对位置依靠机载单摄像机系统和罗盘获取;3)水声通讯采用最小频次;4)同构AUV单元,其ID为软件ID。

针对该系统,为增强可操作性,基于具有ROV形状与4个自由度(3个平移自由度和1个绕垂直轴旋转的自由度)的CISCREA(长0.525 m,宽0.406 m,高0.395 m)水动力模型^[21]构建1:1比例的仿真CISCREA,如图1所示。为简化队形建立过程,假设:

- 1)队形构建在无障碍水下环境中进行。
- 2)系统中CISCREA的初始位置分布为同一深度有界范围内(2D平面),记为初始分布, $V_I = \{p_0, p_1, \dots, p_{n-1}\}$, p_i 表示CISCREA- i 在初始分布中的位置。每个CISCREA- i 在其周边邻域内搜索到的CISCREA- j (记为邻居),构成子集 $V_{I_i} = \{r_j, \dots\}$, $V_{I_i} \subseteq V_I$,而且 $V_{I_i} \neq \emptyset$, $V_I = \bigcup_{i=1}^N V_{I_i}$ 。
- 3)不考虑罗盘的测量误差,假设其估计得到的全局方位精确。
- 4)CISCREA之间可通过水声通讯进行信息交换,无信息丢失。
- 5)忽略CISCREA自身的运动误差,即线速度误差与角速度误差。

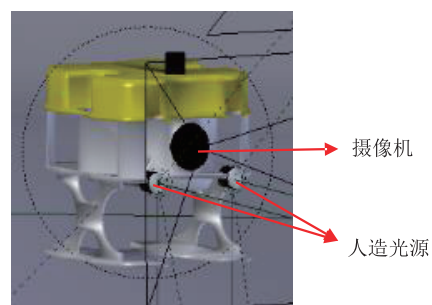


图1 CISCREA

由于本文CISCREA获取信息的主要传感器是装配在CISCREA正前方的单摄像机系统(见图1),而摄像机在水下可视范围较小,CISCREA在前进时仅可以探测到位于正前方邻域内的邻居,因此引入主从式队形结构。典型的主从式结构为“V”型结构,为获得较大的覆盖范围,“V”型结构的角为摄像机水平

视场的最大范围. 根据文献[22], 队形结构对应的拉普拉斯矩阵, 其第二小特征值越大, 系统结构越稳定, 而第二小特征值随AUV单元之间关联强度的增强而增大. 因此, 为缩小CISCREA之间的通讯距离并增强CISCREA之间的联系, 在“V”型结构的内部增加冗余CISCREA, 平面金字塔队形^[9]被引入到本文中. 为方便描述, 平面金字塔队形中被跟随者与跟随者被定义为父子关系^[9], 如图2所示.

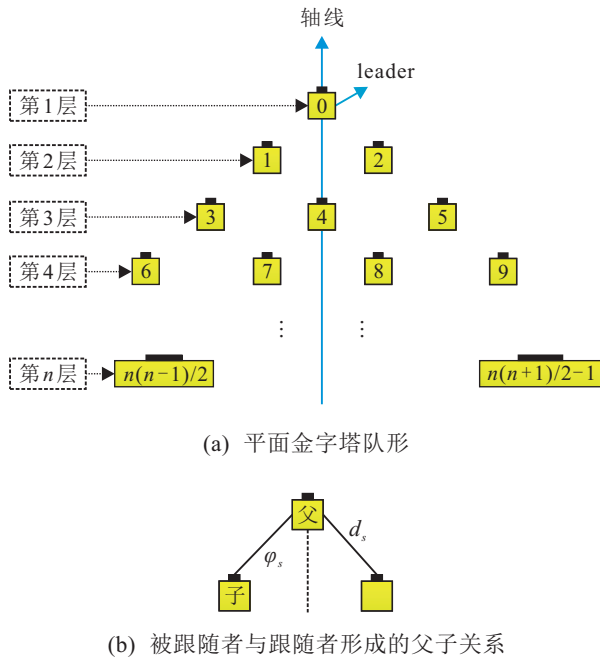


图2 平面金字塔队形

在无阻碍水下环境中, 基于机载单摄像机系统与罗盘完成同构多AUV系统的平面金字塔队形排列, 4个问题需要解决: 1) 从单幅图像中提取CISCREA邻居的相对位置信息, 即相对距离和相对角度; 2) 完成CISCREA身份(ID)的确定; 3) 构建参考坐标系, 确定多AUV系统中CISCREA的初始分布; 4) 提出避碰策略, 优化平面金字塔队形的分布、规划无碰撞轨迹.

2 基于局部位置的队形排列算法

2.1 CISCREA相对位置 (x_{aij}, y_{aij}) 的确定

确定CISCREA之间的相对位置, 需要为每个CISCREA构建摄像机坐标系及局部坐标系. 仅考虑系统位于同一水深环境(2D环境), 摄像机坐标系(记为 $o_{ci}x_{ci}y_{ci}$)与CISCREA局部坐标系(记为 $o_{ai}x_{ai}y_{ai}$)均搭建为平面坐标系, 如图3和图4所示. 在 $o_{ci}x_{ci}y_{ci}$ 中, 摄像机光心作为原点 o_{ci} , 光轴作为 $o_{ci}y_{ci}$ 轴, $o_{ci}x_{ci}$ 轴沿像素 u 增大的方向. $o_{ci}x_{ci}y_{ci}$ 相对CISCREA- i 静止不动, 随CISCREA- i 的运动而变化. 为将不同方位获得的邻居信息统一在同一坐标系下, 需要为每个CISCREA搭建固定局部坐标系 $o_{ai}x_{ai}y_{ai}$. o_{ai} 与 o_{ci}

重合, $o_{ai}y_{ai}$ 轴沿罗盘估计的正北方向, $o_{ai}x_{ai}$ 轴在水平面垂直于 $o_{ai}y_{ai}$ 轴. 当CISCREA面向正北方向时, $o_{ci}x_{ci}y_{ci}$ 与 $o_{ai}x_{ai}y_{ai}$ 重合, 两个坐标系的转换关系如图4和式(1)所示. 所有的CISCREA局部坐标系 $o_{ai}x_{ai}y_{ai}$ 相互平行.

$$\begin{bmatrix} x_{aij} \\ y_{aij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_{ij} & \cos \theta_{ij} \\ -\cos \theta_{ij} & \sin \theta_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cij} = d_{ij} \sin \varphi_{ij} \\ y_{cij} = d_{ij} \cos \varphi_{ij} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中: (x_{cij}, y_{cij}) 和 (x_{aij}, y_{aij}) 分别为邻居CISCREA- j 在 $o_{ci}x_{ci}y_{ci}$ 和 $o_{ai}x_{ai}y_{ai}$ 坐标系下的坐标值; d_{ij} 和 φ_{ij} 分别为CISCREA- i 的单摄像机系统得到的与CISCREA- j 之间的相对距离和相对角度; θ_{ij} 为搜索到CISCREA- j 时, CISCREA- i 的罗盘估计得到的自身方位.

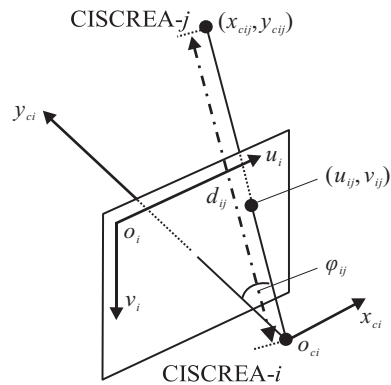


图3 摄像机坐标系 $o_{ci}x_{ci}y_{ci}$

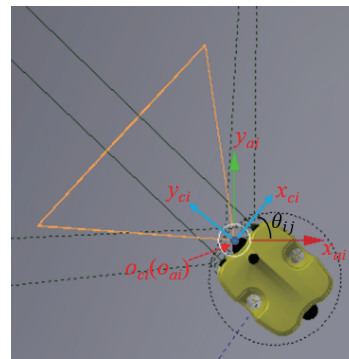


图4 $o_{ci}x_{ci}y_{ci}$ 与 $o_{ai}x_{ai}y_{ai}$ 的坐标关系

为从单幅图像中得到 d_{ij} 和 φ_{ij} , 需要从图像中识别得到CISCERA. 为此, 引入文献[5]中的方法: 黄色区域作为CISCREA的特征, 其中心位置 (u_{ij}, v_{ij}) 、高度 h_{ij} 分别作为CISCREA在图像中的位置和高度, 如图5所示.

随后, d_{ij} 与 φ_{ij} 可由距离模型与角度模型^[9]求解, 如下所示:

$$d_{ij} = 132.4e^{-0.1324h_{ij}} + 4.558e^{-0.01497h_{ij}}, \quad (2)$$

$$\varphi_{ij} = 0.1087u_{ij} - 36.77. \quad (3)$$

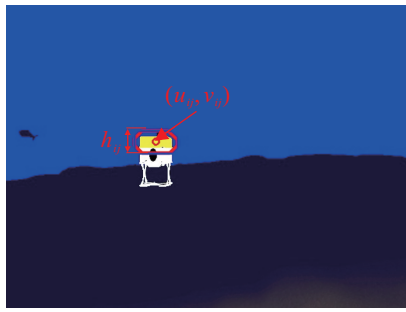


图5 图像中CISCREA的识别

结合式(1),每个CISCREA与其邻居在 $o_{ai}x_{ai}y_{ai}$ 下的相对位置信息可以得到。

2.2 CISCREA身份ID的确定

在完成邻居搜索后,CISCREA之间通过唯一一次水声通讯完成邻居信息的共享,信息格式如下:

- {CISCREA- i 自身ID: i ;
- 经过图像处理探测到的邻居数量: N_i ;
- 已探测邻居的相对位置:
 $(x_{aij}, y_{aij}), j \in [1, 2, \dots, N_i]$

为确定每个CISCREA的ID,提出一种邻居互查机制.因 $o_{ai}x_{ai}y_{ai}$ 相互平行,如图6所示,若CISCREA- i 与CISCREA- j 互为邻居,则其原点在对方局部坐标系中的坐标 $o_i(x_{aji}, y_{aji})$ 与 $o_j(x_{aij}, y_{aij})$ 互为相反数.然而,由于图像处理误差的存在,其相对位置之和应该满足给定误差,如下式所示:

$$\begin{cases} e_{xij} = x_{aij} + x_{aji} < \varepsilon_x, \\ e_{yij} = y_{aij} + y_{aji} < \varepsilon_y, \\ e_{dij} = \sqrt{e_{xij}^2 + e_{yij}^2} < \varepsilon_d. \end{cases} \quad (4)$$

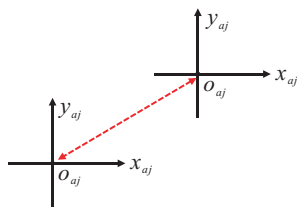


图6 CISCREA- i 与CISCREA- j 的相对位置关系

根据给定的 ε_x 、 ε_y 、 ε_d ,在遍历所有CISCREA已探测的邻居后,真正的邻居及其ID可以确定.若同时存在 $M(M > 1)$ 个邻居信息满足式(4),则最小距离误差 $e_{d_{min}} = \min\{e_{d_{ij}}\}, j \in 0, 1, \dots, M$,对应的CISCREA- j 是CISCREA- i 真正的邻居,且该邻居的ID为 j ,而CISCREA- j 相应邻居的ID为 i .具体的身份确认规则在如下算法(Python格式)中呈现。

算法1

```
for i in CISCREAs
    for k in CISCREA-i的邻居
```

for j in CISCREAs

if $j \neq i$

for t in CISCREA- j 的邻居

if $e_{x_{kt}}, e_{y_{kt}}, e_{d_{kt}}$ 满足式(4),且 $e_{d_{kt}}$

$= e_{d_{min}}$

CISCREA- i 邻居- k 的ID是 j ,

CISCREA- j 邻居- t 的ID是 i .

2.3 初始分布的确定

CISCREA的ID确认后,已探测邻居数量最多的CISCREA- n 的坐标系 $o_{an}x_{an}y_{an}$ 作为参考坐标系 $o_r x_r y_r$.因 $o_{ai}x_{ai}y_{ai}$ 相互平行,按照式(5),系统中CISCREA在参考坐标系 $o_r x_r y_r$ 中的初始分布可由广度遍历的方式逐步确定.例如:CISCREA- i 作为CISCREA- n 的邻居,其坐标值为 $(x_{ri}, y_{ri}) = (x_{ani}, y_{ani})$.CISCREA- j 作为CISCREA- i 的一个邻居,其在 $o_r x_r y_r$ 中的坐标系可以由下式得到:

$$\begin{bmatrix} x_{rj} \\ y_{rj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ri} \\ y_{ri} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{aij} \\ y_{aij} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由第1节的假设条件2)中的 $V_I = \bigcup_{i=1}^N V_{I_i}$ 可知,每个CISCREA的坐标均可转换到 $o_r x_r y_r$ 中,即系统在 $o_r x_r y_r$ 中的初始分布可以得到。

2.4 避碰策略

在 $o_r x_r y_r$ 中得到CISCREA的初始分布后,提出一种避碰策略确定、优化金字塔分布,并为每个CISCREA规划避碰路径,实现队形的排列。

设由CISCREA构成的位置网络为一个图结构 G ,点 p 、 p' 和 f 、 f' 分别是CISCREA- i 和CISCREA- j 在初始分布及平面金字塔分布中的位置.在给出避碰策略之前,首先引入一个引理。

引理1 设 $e_1 = (p, f)$ 与 $e'_1 = (p', f')$ 是图 G 中的两条边, $e_2 = (p, f')$ 与 $e'_2 = (p', f)$ 是图 G 中的另外两条边.假设 p 、 p' 、 f 、 f' 是明确不重合的点,如图7所示.如果 $d_{e_1} + d_{e'_1} < d_{e_2} + d_{e'_2}$,且 $\max(d_{e_1}, d_{e'_1}) < \max(d_{e_2}, d_{e'_2})$,则即使 e_1 与 e'_1 共线且部分重合 ($e_1 \cap e'_1 \neq \emptyset$,如图7(b)所示), e_1 与 e'_1 永不相交^[23].

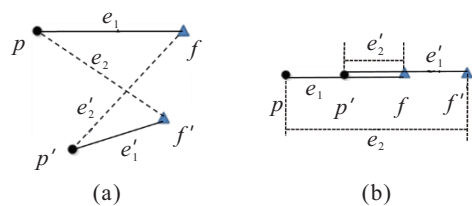


图7 位置匹配原理

在确定优化的平面金字塔分布后,按照引理1匹配初始分布与平面金字塔分布中的位置,CISCREA

的运动轨迹不会相遇,如下式所示:

$$w(G) = \arg \min \left(\sum_{p,f \in G} \text{dis}(p, f) \right), \quad (6)$$

其中 $\text{dis}(p, f)$ 是连接初始位置 p 与目标位置 f 边线的长度, p 与 f 仅且只能参与一次边线的构成。

考虑到由代数方式获得 $w(G)$ 过程的复杂性, 提出一个复杂度为 $\mathcal{O}(n \log n)$ 的避碰策略, 用以确定优化的平面金字塔分布, 并参照引理 1 完成轨迹规划。

2.4.1 确定优化的平面金字塔分布

因平面金字塔队形是一种对称结构, 主轴两侧可视为两个集合 L_P 和 R_P (见图 8(a)). 为使平面金字塔分布趋近于初始分布, 初始分布同样需要被金字塔队形的主轴分成两个集合 L_I 和 R_I , 且两个集合元素的数量 N_{L_I} 与 N_{R_I} 满足条件 $|N_{L_I} - N_{R_I}| \leq 1$, 如图 8(b) 所示. 为此, 引入基于主分量分析 (PCA) 的方法确认主轴方向, 位置协方差矩阵 (如下式所示) 较大的特征值对应的特征向量视为主轴方向^[9].

Cov =

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_{ri}^2 / N - x_{op}^2 & \sum_{i=1}^N x_{ri} y_{ri} / N - x_{op} y_{op} \\ \sum_{i=1}^N x_{ri} y_{ri} / N - x_{op} y_{op} & \sum_{i=1}^N y_{ri}^2 / N - y_{op}^2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 N 为系统中 CISCREA 的数量。

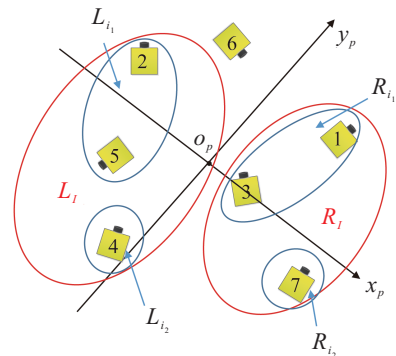
随后, 平面金字塔坐标系 $o_p x_p y_p$ 得以构建, 如图 9 所示: 重心位置作为原点 o_p , 主轴方向作为 y 轴 ($o_p y_p$), x 轴 ($o_p x_p$) 在水平面内垂直 y 轴, β 为 $o_p y_p$ 与 $o_r x_r$ 的夹角. 图 9 中, $o_r x_r y_r$ 仅代表参考坐标系方向, 位置在 CISCREA- n 处. 进而, 平面金字塔队形的分布 V_P 在 $o_p x_p y_p$ 中可以根据其定义^[9] 确定, leader 的位置位于 $o_p y_p$ 上. 由于 $o_p x_p y_p$ 建立在 $o_r x_r y_r$ 下, 两个坐标系的转换关系可以推导, 如下式所示:

$$\begin{bmatrix} x_{ri} \\ y_{ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \beta & \cos \beta \\ -\cos \beta & \sin \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{pi} \\ y_{pi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{op} \\ y_{op} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

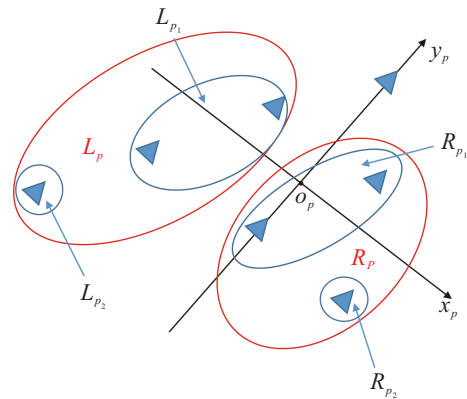
2.4.2 规划无交叉直线轨迹

无交叉直线轨迹的规划在平面金字塔坐标系 $o_p x_p y_p$ 中完成. 初始分布 V_I 与金字塔分布 V_P 均可通过式 (8) 转移到 $o_p x_p y_p$ 下. 要实现无交叉直线轨迹规划, 关键问题是将两种分布中的位置分割成满足引理 1 的混合分组 (见图 8(c)), 而且混合分组之间尽量避免重叠. 为此, 轨迹规划策略如下所示 (见图 8, 证明过程见文献 [9]):

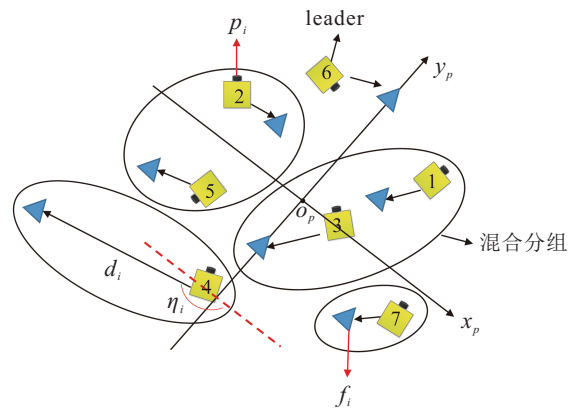
1) 初始分布及平面金字塔分布中的位置, 除 leader 外, V_I 与 V_P 中的其他位置分别被轴线 $o_p y_p$ 分



(a) 初始分布中位置分组



(b) 平面金字塔队形分布中位置分组



(c) 混合分组

图 8 避障策略示意图

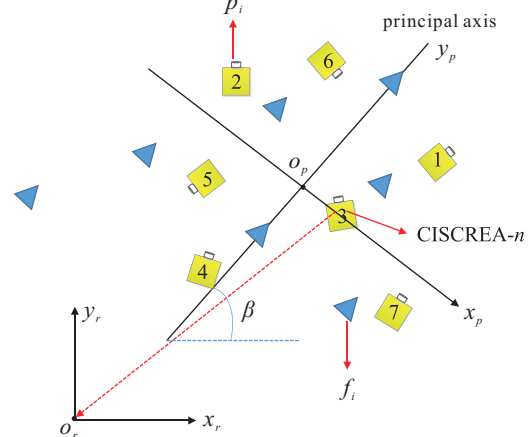


图 9 平面金字塔队形的构建

成左右两个集合 (L_I, R_I) 和 (L_P, R_P) , 按照 $|N_{L_I} - N_{R_I}| \leq 1$ 与 $|N_{L_P} - N_{R_P}| \leq 1$ 的原则分别对左右两个集合中的元素进行微调。

2) 在每个集合内, 位置 p_i 与 f_i 分别按照 y 值排序 (当 y 值相同或相近 (给定阈值 ε_e) 时, 该部分位置按照 x 值重新排序)。

3) 随后, 在每个集合 (L_I, R_I, L_P, R_P) 内按顺序每两个或一个位置构成一个分组, $(L_{I_1}, L_{I_2}, \dots)$, $(R_{I_1}, R_{I_2}, \dots)$, $(L_{P_1}, L_{P_2}, \dots)$, $(R_{P_1}, R_{P_2}, \dots)$, 如图 8(a) 和图 8(b) 所示. 分布在同一区域且具有相同序号的分组结合在一起构成混合分组, 如图 8(c) 所示。

4) 在混合分组内, 根据引理 1, 按照距离总和最短的原则对 p_i 与 f_i 进行匹配. 匹配结果对应的无交叉直线段就是各个 CISCREA 的运动路径, 记为 (d_i, η_i) 。

注 1 每个 CISCREA 共享相同的算法, 除去信息交换外, 算法由每个 CISCREA 独立实现。

避障策略时间复杂度证明。

1) 由协方差矩阵 (式 (7)) 求解特征向量确定平面金字塔队形的主轴方位, 其时间复杂度为 $\mathcal{O}(f_{11}) = \mathcal{O}(1)$; 位置微调需要统计左右两个集合中位置的数量, 最坏情况的时间复杂度 $\mathcal{O}(f_{12}) \leq \mathcal{O}(n)$, 因此轨迹规划策略步骤 1) 的时间复杂度为 $\mathcal{O}(f_1) = \mathcal{O}(n)$ 。

2) 两个集合分别采用 Python 中的 `sort()` 函数按 y 值进行排序, 其为 `Timsort`^[24], 最坏情况的时间复杂度为 $\mathcal{O}(n \log n)$, 此步骤的最坏时间复杂度为 $\mathcal{O}(f_2) = \mathcal{O}\left(\frac{n}{2} \log \frac{n}{2}\right)$ 。

3) 两个集合的位置按照顺序每两个位置构成一个子组, 其时间复杂度为 $\mathcal{O}(f_3) = \mathcal{O}(n)$ 。

4) 按照引理 1 完成位置匹配, 每个联合子组内 4 个位置计算 4 条距离及 2 次逻辑运算, 其时间复杂度为 $\mathcal{O}(f_3) = \mathcal{O}(n)$ 。

避障策略步骤顺序执行, 因此其时间复杂度为 $\mathcal{O}(f) = \mathcal{O}(n \log n)$ 。

3 仿真实验

在进行真实的水下实验之前, 仿真环境下的算法测试必不可少. 采用的 Blender 软件 (图 10) 利用游戏引擎 (BGE) 通过建模、材质、雕刻、渲染等处理, 可构建接近真实环境的 3D 仿真环境. 而且, Blender 支持 Python 脚本, 能够扩展本文特有的需求. 仿真在一台 4 核 PC 机 (Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1220V3@3.1 GHz) 上进行, 采用 Blender 2.6.9 版本. CISCREA 模型是基于真实的 CISCREA 动态模型^[21] (图 1) 建立的, 每个 CISCREA 模型完全一致。

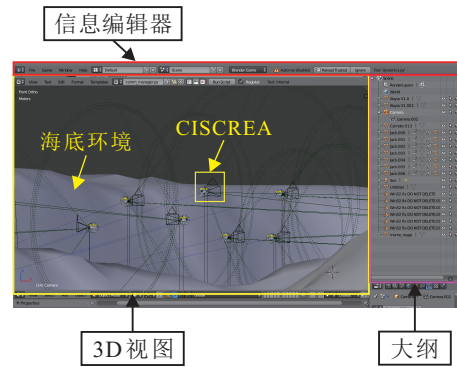


图 10 Blender 仿真环境

3.1 平面金字塔队形的排列

同构多 AUV 系统排列队形的过程如下所示。

step 1: 每个 CISCREA 以 20° 的步幅绕自身旋转, 通过单摄像机系统搜索周边环境, 识别邻近 CISCREA, 结合罗盘得到的全局方位, 由式 (1)~(3) 计算它们之间的相对位置 (x_{aij}, y_{aij}) 。

step 2: 若某个 CISCREA 在 step 1 完成后 $V_{I_i} = \emptyset$, 则该 CISCREA 微调一下自身位姿, 重新执行 step 1, 直到 $V_{I_i} \neq \emptyset$, 搜索结束。

step 3: 当每个 CISCREA 均搜索结束后, 通过通讯与其他 CISCREA 共享其邻居信息。

step 4: 通过 2.2 节的邻居互查机制确定每个 CISCREA 真正的邻居及其 ID。

step 5: 根据 2.3 节, 邻居数量最多的 CISCREA- n , 其局部坐标系作为参考坐标系 $o_r x_r y_r$, 计算得到多 AUV 系统的初始分布 V_I 。

step 6: 根据 2.4 节的避障策略确定平面金字塔分布, 并为每个 CISCREA 规划无交叉直线路线 (d_i, η_i) 。

step 7: 每个 CISCREA 沿自身路线运动到其在平面金字塔队形中的位置. 当每个 CISCREA 均到达收敛状态时, 平面金字塔队形构建完成。

本文仿真实验的条件设置如下所示。

1) 多 AUV 系统的初始分布均在有限的视场区域内。

2) 一般地, 摄像机的水平视场角 $\varphi \geq 40^\circ$, 水下的视场景深 $d \leq 5$ m. 在仿真实验中, 设置 $\varphi_s = 20^\circ$, $d_s = 2.5$ m.

3) 仿真的环境为深海环境, 受波浪、潮汐等因素的影响微小, 为此, 假设深海环境水流恒速流动, 可通过速度矢量对其进行完全补偿。

4) 仿真实验中, 视觉感知接近于真实实验, 不额外为图像处理增加噪声. 但是考虑到在真实环境中, CISCREA 存在运动误差, 为每个 CISCREA 的轨迹 (d_i, η_i) 均随机增加 $\pm 10\%$ 以内的噪声。

基于此条件, 4~7个CISCREA被用来构建平面金字塔队形, 以验证所提出的算法. 同时, 为对比此算法的性能, 引入拓扑结构为时不变有向图的分布式一致性控制算法, 构建平面金字塔队形. 因为分布式一致性控制算法需要不断感知邻居信息, 为简化过程, 在此方法中每个CISCREA采用外置硬件ID标识. 图11和图12分别为利用所提出的算法及分布式一致性控制算法由7个CISCREA构建的平面金字塔队形以及对应的运动轨迹.

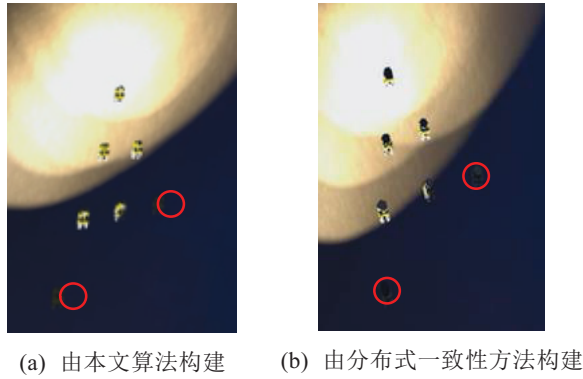


图11 由7个CISCREA构建的平面金字塔队形

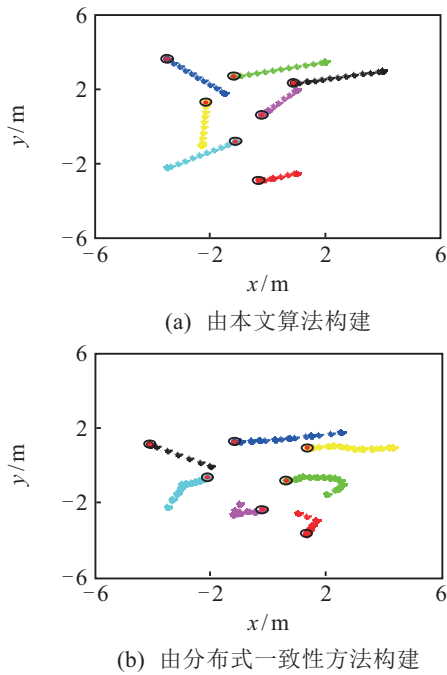


图12 由7个CISCREA构建平面金字塔队形的运动轨迹

由于深海环境缺乏自然光, 且CISCREA配备的人造光源仅照射前方, 导致队形最后一行的CISCREA处于黑暗之中, 如图11所示, 红色圆圈所在位置为最后一行CISCREA的所在.

为评价算法性能, 引入与CISCREA位置相关的4个误差参数: 相对位置误差 x_{re} 、 y_{re} , 相对距离误差 d_{re} 和相对角度误差 φ_{re} . 它们均由下式计算得到:

$$\begin{cases} x_s = d_s \sin \varphi_s, & y_s = d_s \cos \varphi_s, \\ x_a = d_a \sin \varphi_a, & y_a = d_a \cos \varphi_a, \\ x_{re} = x_a - x_s, & y_{re} = y_a - y_s, \\ d_{re} = d_a - d_s, & \varphi_{re} = \varphi_a - \varphi_s, \end{cases} \quad (9)$$

其中 d_a 、 φ_a 为CISCREA与其父CISCREA之间相对距离与相对角度的测量值.

为验证及对比本文队形控制算法的稳定性, 分别采用此算法及分布式一致性控制算法, 由6个CISCREA在有限可视区域内从不同的初始位置连续仿真100次. 其在收敛状态的 d_{re} 与 φ_{re} 如图13和图14所示, 完成一次收敛花费的时间如表1所示.

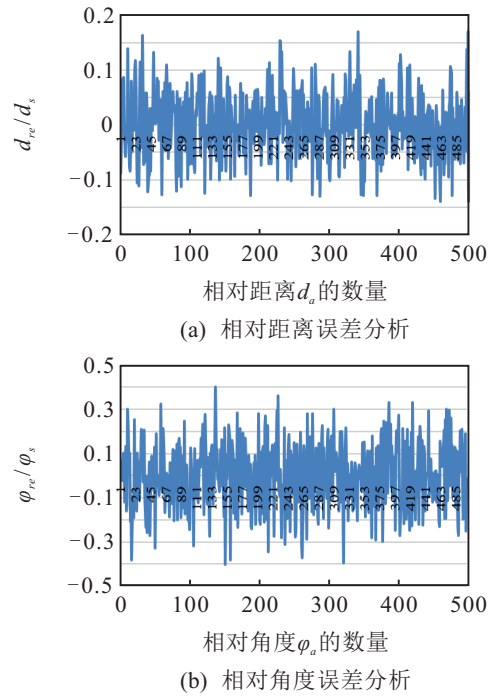


图13 基于本文算法构建队形, 收敛状态时的误差分析

表1 本文算法与分布式一致性控制方法构建平面金字塔队形时间成本对比

	本文算法/s	分布式一致性控制方法/min
时间成本	165 ± 15	20 ~ 40

图13说明本文算法的 d_{re} 与 φ_{re} 误差分别主要分布在期望值的15%与30%以内. 考虑到在执行任务过程中还会不断进行队形控制协调AUV单元之间的相对位置, 所以容许误差设置较大. 通过图13与图14的对比发现, 采用分布式一致性控制方法可以使得误差主要分布在期望值的30%以内, 精度甚至可以更高. 但是从表1可以看出, 分布式一致性控制方法花费的时间为本文算法的10~15倍, 如果精度要求更高, 时间相应地也会更长. 主要原因是: 不同于陆上或空中采用RF进行广播式实时通讯, 本文多AUV系统

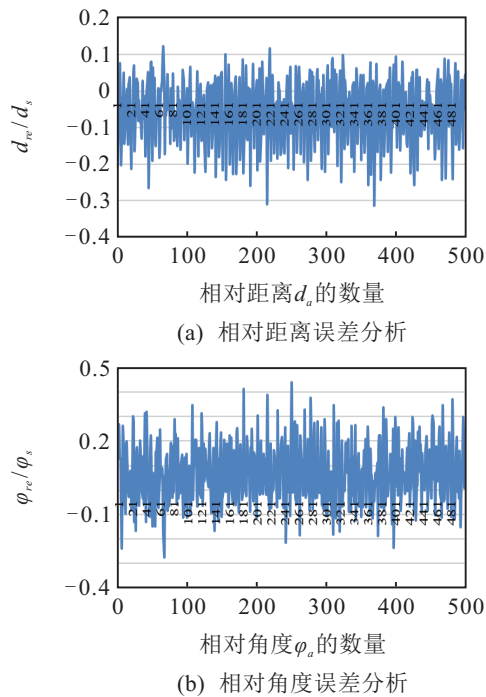


图14 基于分布式一致性控制方法构建队形,收敛状态时的误差分析

获取局部信息的主要传感器是摄像机;而基于分布式一致性算法中,每个CISCREA需要不断更新其轨迹.为此,在每次更新轨迹时,CISCREA需要由摄像机绕自身旋转搜索邻居,获取邻居信息,而此步骤花费时间较长.为达到本文算法的精度,每个CISCREA需要循环的次数较多,一般需要循环10~20次才能收敛(与初始分布有关),否则相对误差就会比较大,甚至不能收敛到给定队形.

本文算法中CISCREA仅需要完成一次邻居搜索即可,时间成本远低于分布式一致性控制算法.另外,为系统中的每个CISCREA增加硬件ID识别标识,并采用本文算法构建平面金字塔队形,其排列队形需要的时间为 100 ± 15 s.采用本文软件ID标识与硬件ID构建的队形^[9],在收敛状态的相对误差分别如表2和表3所示.

表2 同构多CISCREA系统基于本文算法排列平面金字塔队形的性能分析

	d_{re}/d_s	φ_{re}/φ_s
max	0.168 6	0.398 9
min	-0.138 8	-0.400 7
stdev	0.059 4	0.148 8

表3 具有硬件ID标识的多CISCREA系统基于本文算法排列平面金字塔队形的性能分析

	d_{re}/d_s	φ_{re}/φ_s
max	0.146 9	0.415 8
min	-0.167 9	-0.408 5
stdev	0.060 3	0.162 2

3.2 结果分析

实验结果表明,对于基于视觉传感器的同构小型多AUV系统,在无障碍水下环境且无全局位置传感器协助的情况下,提出的考虑避碰策略的基于局部位置的队形控制方法可以100%成功完成队形的排列.图13和表2呈现的误差显示,相对距离误差 d_{re} 主要在期望距离的15%以内,相对角度误差 φ_{re} 主要在期望角度的30%以内,误差主要来源于图像处理与CISCREA的运动控制.时间成本约 165 ± 15 s.

为衡量本文算法的性能而引入的分布式一致性控制方法,其构建给定队形同样可以达到与本文算法同样精度,甚至更高,只是花费的时间成本远高于本文的时间成本,约20~40 min,降低了其在水下环境中的实用性.

另外,同构多AUV系统构建平面金字塔与采用硬件ID标识的多AUV系统相比,精度一致.虽然同构AUV需要花费较多的时间完成CISCREA身份的识别,但是当系统中的AUV单元数量增加时,没有设计ID标识的困扰,也不需要改变AUV单元的动力学模型.

4 结论

针对同构小型多AUV系统,基于视觉传感器获得的局部位置信息及罗盘获得的全局方位信息,在无障碍环境中实现了金字塔队形的排列.

为完成队形排列,提出了基于局部位置的队形控制方法:1)给出了邻居互查机制完成同构CISCREA身份ID的区分;2)提出了复杂度为 $O(n \log n)$ 的避碰策略,根据在参考坐标系中的初始分布,确定并优化平面金字塔队形的位置与姿态,进而根据图论完成初始分布与平面金字塔分布中位置的匹配,规划无交叉直线轨迹.最后每个AUV沿自身轨迹到达目标位置,完成队形的排列.提出的算法在Blender中搭建的深海环境中通过4~7个CISCREA进行了验证.重复实验,从统计学角度得到了平面金字塔队形的收敛成功率为100%,验证了本文算法的可行性与稳定性(收敛性).

在下一步工作中,将进一步改进算法,使得多CISCREA系统能够在障碍物环境中仍然可以基于局部信息构建平面金字塔队形.

参考文献(References)

- [1] Fiorelli E, Leonard N E, Bhatta P, et al. Multi-auv control and adaptive sampling in monterey bay[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(4): 935-948.
- [2] Leonard N E, Paley D A, Lekien F, et al. Collective

- motion, sensor networks, and ocean sampling[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 48-74.
- [3] Isokeit C, Meyer B, Maehle E. Cooperative swarm behaviour for in situ underwater environmental measurements[C]. Oceans. Aberdeen: IEEE, 2017: 1-6.
- [4] Paull L, Huang G, Seto M, et al. Communication-constrained multi-AUV cooperative SLAM[C]. International Conference on Robotics and Automation. Washington: IEEE, 2015: 509-516.
- [5] Saad S B, Zerr B, Probst I, et al. Hybrid coordination strategy of a group of cooperating autonomous underwater vehicles[J]. IFAC Papersonline, 2015, 48(5): 47-52.
- [6] Lewis M A, Tan K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures[J]. Autonomous Robots, 1997, 4(4): 387-403.
- [7] Gu Y, Seanor B, Campa G, et al. Design and flight testing evaluation of formation control laws[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(6): 1105-1112.
- [8] Yu S, Barca J C. Autonomous formation selection for ground moving multi-robot systems[C]. International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: Busan: IEEE, 2015: 54-59.
- [9] Wang X, Zerr B, Thomas H, et al. Pattern formation for a fleet of AUVs based on optical sensor[C]. Oceans. Aberdeen: IEEE, 2017: 1-9.
- [10] Oh K K, Park M C, Ahn H S. A survey of multi-agent formation control[J]. Automatica, 2015, 53(C): 424-440.
- [11] Jin Y, Guo H, Meng Y. A hierarchical gene regulatory network for adaptive multirobot pattern formation[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2012, 42(3): 805-816.
- [12] Huth A, Wissel C. The simulation of the movement of fish schools[J]. Journal of Theoretical Biology, 1992, 156(3): 365-385.
- [13] Xin Li, Daqi Zhu, Yuang Qian. A survey on formation control algorithms for multi-AUV system[J]. Unmanned Systems, 2014, 2(4): 351-359.
- [14] Nikou A, Verginis C K, Dimarogonas D V. Robust distance-based formation control of multiple rigid bodies with orientation alignment[J]. IFAC-Papers OnLine, 2017, 50(1): 458-463.
- [15] Fredslund J, Mataric M J. A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication[J]. Journal of Plastic Reconstructive and Aesthetic Surgery, 2012, 65(5): 650-656.
- [16] Chiem S Y, Cervera E. Vision-based robot formations with bézier trajectories[C]. Intelligent Autonomous Systems. Amsterdam: Springer, 2004: 191-198.
- [17] 李东方, 李科伟, 邓宏彬, 等. 基于人工势场与IB-LBM的机器蛇水中2D避障控制算法[J]. 机器人, 2018, 40(3): 346-359.
(Li D F, Li K W, Deng H B, et al. The 2D aquatic obstacle avoidance control algorithm of the snake-like robot based on artificial potential field and IB-LBM[J]. Robot, 2018, 40(3): 346-359.)
- [18] 熊永阳. 分布式一致性问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学航天学院, 2014.
(Xiong Y Y. Investigation on distributed consensus algorithm[D]. Harbin: School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, 2014.)
- [19] 仇新, 张禹, 苏晓明. 基于启发式算法的移动机器人SLAM[J]. 中国惯性技术学报, 2018(1): 45-50.
(Zhang X, Zhang Y, Su X M. Simultaneous localization and mapping of mobile robot based on heuristic algorithm[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018(1): 45-50.)
- [20] Verheijen F J. Transmission of a flight reaction amongst a school of fish and the underlying sensory mechanisms[J]. Experientia, 1956, 12(5): 202-204.
- [21] Yang R, Clement B, Mansour A, et al. Modeling of a complex-shaped underwater vehicle for robust control scheme[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2015, 80(3/4): 491-506.
- [22] Kim Y, Mesbahi M. On maximizing the second smallest eigenvalue of a statedependent graph laplacian[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(1): 116-120.
- [23] Fujinaga N, Yamauchi Y, Kijima S, et al. Pattern formation by oblivious asynchronous mobile robots[C]. International Conference on Distributed Computing. Salvador: Springer, 2012: 312-325.
- [24] Chandramouli B, Goldstein J. Patience is a virtue: Revisiting merge and sort on modern processors[C]. International Conference on Management of Data. Salt Lake: ACM SIGMOD, 2014: 755-766.

作者简介

解则晓(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 从事机器视觉和机器人控制等研究, E-mail: xiezexiao@ouc.edu.cn;

王晓敏(1989—), 女, 博士生, 从事机器视觉、多机器人协调控制的研究, E-mail: wangxiaomin88@126.com.

(责任编辑: 齐 霖)