

doi: 10.7690/bgzdh.2022.10.016

水下球形机器人视觉防碰撞编队策略

石立伟, 鲍鹏筱, 陈 占, 郭书祥
(北京理工大学生命学院, 北京 100081)

摘要: 为解决小型水下机器人编队系统协调周期长、碰撞事故率高等问题, 提出一种基于双目视觉的领航者-跟随编队形成方法。利用水下球形机器人平台的双目视觉系统通过点匹配算法实现机器人的 3 维相对定位, 将视觉系统解算的控制量作为机器人运动控制的输入量, 根据机器人的运动性能设置安全阈值以实现机器人的水下防碰撞编队, 开展 2 个球形机器人的编队实物实验。结果表明, 该方法具备有效性。

关键词: 水下机器人; 双目视觉; 防碰撞策略; 领航者-跟随编队控制

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A

Visual Anti-collision Formation Strategy of Underwater Spherical Robot

Shi Liwei, Bao Pengxiao, Chen Zhan, Guo Shuxiang
(School of Life Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to solve the problems of long coordination period and high collision accident rate of small underwater robot formation system, a leader-follower formation method based on binocular vision is proposed. The 3D relative positioning of the robot is realized by using the binocular vision system of the underwater spherical robot platform through the point matching algorithm. The control quantity calculated by the vision system is used as the input quantity of the robot motion control, and the safety threshold is set according to the motion performance of the robot to realize the underwater anti-collision formation of the robot. The formation experiment of 2 spherical robots is carried out. The results show that the method is effective.

Keywords: underwater robot; binocular vision; anti-collision strategy; leader-follower formation control

0 引言

海洋是人类资源的宝库, 探索海洋之深之远, 人力所不能及; 因此, 水下机器人技术应运而生。针对浅海地形的探测需求, 小型水下机器人技术成了各国研究的焦点。

小型机器人的体型限制明显, 功能受到限制。越来越多的研究人员将目光聚焦于小型水下机器人系统的设计, 希望通过多机器人任务分配, 协同作业来完成复杂的任务, 以提高机器人系统的工作效率、扩大工作范围、提高带载能力以及更好地应对水下的复杂环境。由于水介质对电磁波的天然屏蔽作用, 使得水下机器人系统的通信充满挑战。目前, 成熟的水下系统通信应对方案是利用水声通信传递信息, 但存在无法大规模地进行高效的实时通信等问题, 且对于小型机器人, 水下通信只能依靠少数的小型水听器设备, 不仅价格昂贵, 而且通信效率更低。这直接导致了利用水听设备的小型水下机器人编队可能会带来的协调周期长、机器人碰撞、编队成功率低等问题。

笔者针对小型的水下机器人编队协调中存在的通信困难、定位困难和控制方法复杂等问题, 提出利用双目视觉为传感手段去实现小型机器人水下编队的方案。利用水下球形机器人平台^[1-8]的双目视觉系统实现点匹配算法实现机器人的 3 维相对定位, 并利用视觉系统解算控制量作为机器人运动控制的输入量。同时, 根据机器人的运动特性设置安全阈值, 采用领航跟随的编队策略, 从而实现机器人的水下防碰撞编队。

1 水下双目系统定位原理

1.1 相机成像模型

水下系统的测距依靠水下相机的成像过程。可见光相机大都采用中心透射投影成像模型。为分析方便, 将其简化为线性模型。可见光相机的成像模型如图 1 所示。

设 $O_w-X_wY_wZ_w$ 为世界坐标系, $O_c-X_cY_cZ_c$ 为相机坐标系, O_1-xy 为图像坐标系, O_0-uv 为像素坐标系。其中: O_c 为相机光心; O_cZ_c 为光轴; O_1 为图

收稿日期: 2022-06-01; 修回日期: 2022-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61773064, 61503028)

作者简介: 石立伟(1983—), 男, 河北人, 博士, 副教授, 从事仿生机器人、医用机器人研究。E-mail: shiliwei@bit.edu.cn。

像中心； O_cO_1 为相机焦距 f 。设某一点 P 在世界坐标系下的坐标为 (X_w, Y_w, Z_w) ，在相机坐标系的坐标为 (X_c, Y_c, Z_c) ， p_0 为点 p 图像坐标系上的投影，坐标为 (x, y) ，在像素坐标系下的坐标为 (u, v) ， O_1 在 O_0-uv 坐标系下的坐标为 (u_0, v_0) 。则 p_0 在 O_0-uv 和 O_1-xy 的关系为：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， d_x, d_y 分别为相邻 2 个像素在 X 轴， Y 轴的单位距离。坐标系 O_0-uv 中的 p_0 与 $O_c-X_cY_cZ_c$ 中的 P 的关系为：

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

点 P 在坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 与 $O_w-X_wY_wZ_w$ 中的关系为：

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中， $\alpha_x, \alpha_y, u_0, v_0$ 为相机内参； R, t 为相机外参。利用相机进行计算处理时必须知道相机的内外参数。

1.2 水下双目相机相对定位原理

如图 2 所示，双目相机的左侧相机和右侧相机共同组成一个双目相机。设某一点 P 在世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 下的坐标为 (X_w, Y_w, Z_w) ，在左侧相机坐标系 $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 的坐标为 (X_{c1}, Y_{c1}, Z_{c1}) ，在右侧相机坐标系 $O_{c2}-X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$ 的坐标为 (X_{c2}, Y_{c2}, Z_{c2}) ， p_0 为点 P 在像素坐标系下的投影，在左像素坐标系 $O_1-u_1v_1$ 下坐标为 (u_1, v_1) ，在右像素坐标系 $O_2-u_2v_2$ 下坐标为 (u_2, v_2) 。

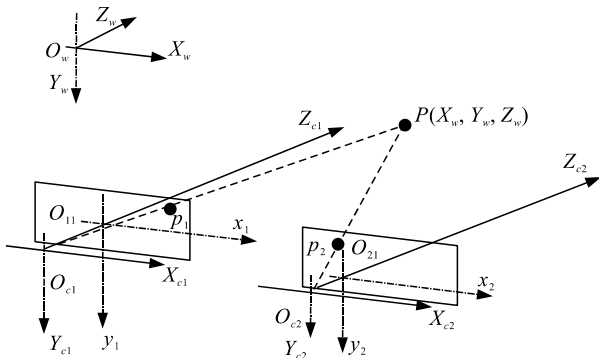


图 2 双目相对定位原理

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中，旋转矩阵 R 、平移向量 t 表示坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 与坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 的关系； R 为三阶单位正交矩阵； M_1 为 4 阶正矩阵。

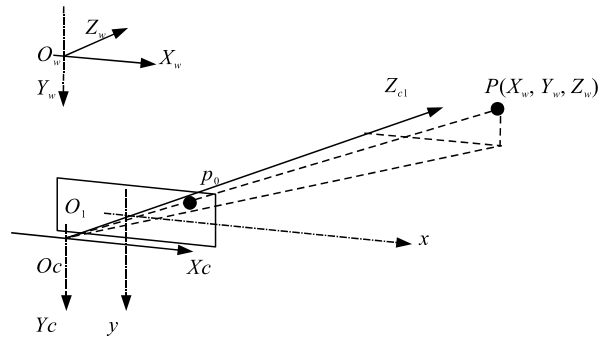


图 1 可见光相机成像模型

世界坐标系向像素坐标系的投影过程可用如下方程表示：

根据式(4)可得到左相机和右相机的成像分别如式(5)、(6)所示。

$$Z_{c1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 & m_{13}^1 & m_{14}^1 \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 & m_{23}^1 & m_{24}^1 \\ m_{31}^1 & m_{32}^1 & m_{33}^1 & m_{34}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Z_{c2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^2 & m_{12}^2 & m_{13}^2 & m_{14}^2 \\ m_{21}^2 & m_{22}^2 & m_{23}^2 & m_{24}^2 \\ m_{31}^2 & m_{32}^2 & m_{33}^2 & m_{34}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(5)、(6)联立可得：

$$\begin{bmatrix} u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1 & u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1 & u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1 \\ v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1 & v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1 & v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1 \\ u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2 & u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2 & u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2 \\ v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2 & v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2 & v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将参数矩阵用 K 代替，系数矩阵用 U 代替简化

后可得：

$$\mathbf{K} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \mathbf{U}。 \quad (8)$$

式(8)的最小二乘解为：

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{U}。 \quad (9)$$

从而可通过求出目标点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 的 3 维坐标而进行相对定位。

2 防碰撞系统编队设计

2.1 多机器人视觉系统解算

对于利用机器人双目视觉系统解算目标物位置的问题，关键是对目标物进行识别、检测和跟踪。图 3 为跟随机器人视觉坐标系下领航机器人位置信息解算。

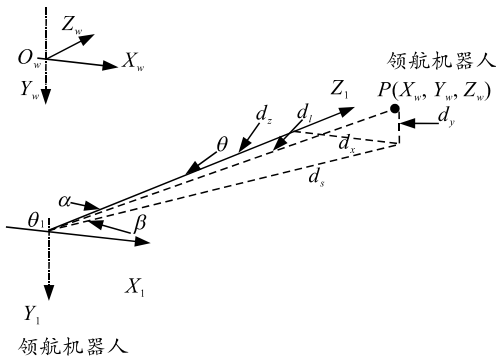


图 3 领航机器人位置信息解算

根据水下双目相机的相对定位原理，解算视觉系统的控制量。跟随机器人与领航机器人的距离 $d_l = \sqrt{d_s^2 + d_y^2} = \sqrt{X_w^2 + Y_w^2 + Z_w^2}$ ，其中： $d_x = |X_w|$ ， $d_y = |Y_w|$ ， $d_z = |Z_w|$ ， $d_s = \sqrt{d_x^2 + d_z^2} = \sqrt{X_w^2 + Z_w^2}$ ，跟随机器人与领航机器人间的夹角关系为 $\tan \alpha = X_w / Z_w$ ， $\tan \beta = Y_w / \sqrt{X_w^2 + Z_w^2}$ ， $\tan \theta = \sqrt{X_w^2 + Y_w^2} / Z_w$ 。

2.2 多机器人编队控制建模

对于经典的领航跟随编队控制^[9]，主要应用在 2 维平面，通常利用 2 种方法实现编队的控制：1) 是基于角度-距离的控制方法；2) 是基于距离-距离控制方法。第 1 种控制方法是利用领航机器人和跟随机器人间的偏角和偏距来控制跟随机器人的运动，从而保持队列；第 2 种控制方法利用跟随机器人与

2 个领航机器人之间距离上的偏差来控制跟随机器人的运动，从而保持队列。

笔者利用级联的方式实现机器人的领航跟随编队，每个跟随者均有一个领航者，但整个多机器人编队系统，只有一个“真正的”领航者。在整个编队系统中，2 个机器人可以被视为一个子系统。子系统中每个跟随者都会观察自己的领航者的运动情况并完成跟随。同时，一个子系统的领航者可能同时是另一个子系统的跟随者。在这种控制结构下，只需研究一对领航跟随机器人的控制模型就可实现对编队控制模型的研究。

对于解算出的信息，利用偏角 α 和偏距 dx 作为输入量完成航向控制，利用偏角 β 和偏距 dy 完成深度控制，利用偏距 dz 和 dl 实现速度控制。通过深度方向、航向和速度的控制，使领航机器人保持在跟随机器人视觉图像上的固定位置。领航机器人与跟随机器人在左相机坐标系的 Z 轴方向的夹角，取决于机器人的队形。由于跟随机器人主航向时的受力方向与领航机器人主航向时的受力方向相同，跟随机器人在跟随领航机器人时，通过调整最终可以实现各个跟随机器人对主机器人的跟随与队形保持，从而可以实现多机器人系统的编队。

因此，对于一个跟随机器人而言，其运动的全过程如下：1) 跟随机器人的双目系统工作，对领航机器人进行定位得到跟随机器人坐标系下的 3 维定位；2) 通过领航机器人的 3 维坐标，计算出跟随机器人与领航机器人的偏角和偏距；3) 利用各个方向偏角和偏距的信息作为运动控制的输入，跟随机器人运动，实现 3 维平面中的跟随机器人对领航机器人的跟随。

2.3 防碰撞编队策略

理想情况下，视觉解算和推进器喷水推进的时间是可以忽略的。实际上，在跟随机器人控制系统与视觉系统的融合中，由于控制程序运行时 PID 调节的速度较快，同时又要读取视觉系统解算出的领航机器人的各种位置信息，编队的协调周期由视觉系统的帧速和机器人控制的频率来决定。

笔者采用多线程的策略来协同机器人的控制程序与视觉程序。为避免 2 个线程在同一时刻对表示领航机器人位置信息的变量进行操作时发生错乱，保证多线程的正常运行，每个线程上采用互斥锁对每个线程表示位置信息的变量进行保护。图 4 为跟随机器人的控制系统与视觉系统运行流程。

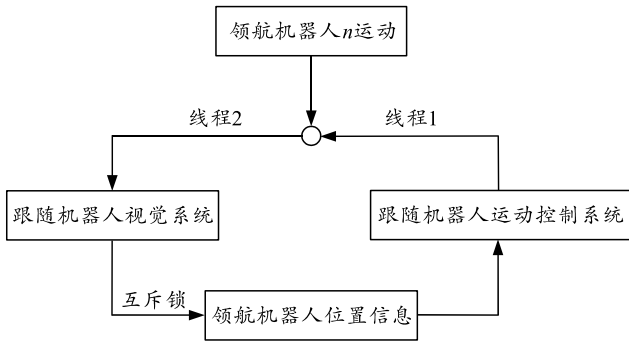


图 4 跟随机器人控制系统与视觉系统防碰撞运行流程

由于机器人在水中阻力较小,具有一定的惯性,以及编队本身具有协调周期的特性,反映在防碰撞问题中表现为当判断两者过于接近时,进行减速的控制运动具有一定的滞后性。

笔者预先测试了水下机器人的制动性能,设定安全阈值 δ 。根据视觉信息解算出的 d_t 与设定的安全距离 δ 进行比对。当 $d_t \geq \delta$ 时,控制器正常动作,按照视觉解算量作为输入,完成运动控制。当 $d_t \leq \delta$ 时,跟随机器人前置的 2 个喷水电机开始喷水,后面的喷水电机停止运行。机器人在水中减速,防止碰撞发生。根据预先测试的水下机器人的制动性能,设定阈值为 600 mm。

3 实验验证

3.1 水下实时测距实验

实时的水下测距是完成笔者提出的避障设计思路的前提;因此,设计了基于水下双目相机的实时测距实验。测距实验的示意图如图 5 所示,目标物为潜艇模型,每相隔 10 cm 进行一次刻度尺测距的记录。

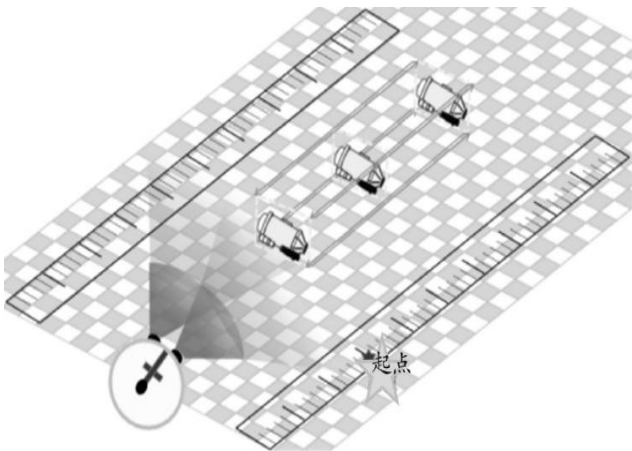


图 5 水下实时测距实验

视觉测距的结果和刻度尺直接测距的结果如图 6 所示。

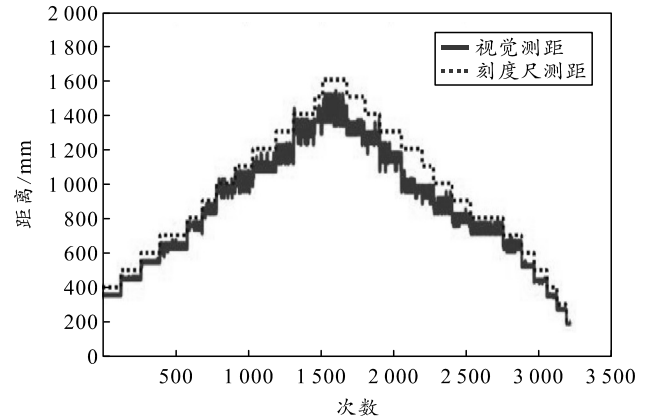


图 6 水下视觉测距与刻度尺测距实验结果对比

笔者利用均方根误差来衡量双目相机视觉所测的距离与标尺所测距离的关系。均方根误差计算公式为:

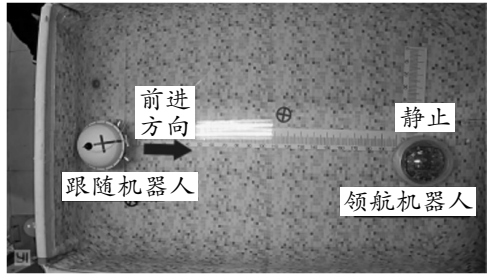
$$RMSE(d_z) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \hat{d}_i)^2} \quad (10)$$

式中, d_i , \hat{d}_i 分别为每次视觉系统和标尺所测目标物的距离。经计算,本实验中的均方根误差为 112.894 7 mm。

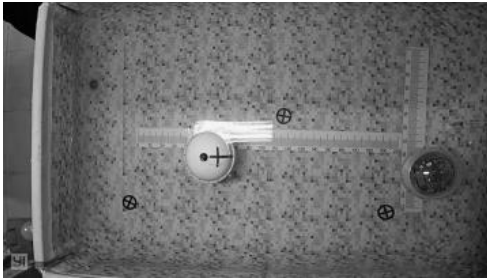
3.2 水下防碰撞编队实验

笔者设计的实验是在水池中完成,水池置于实验室内,水池尺寸为 2.87 m×2.01 m×1 m,水池中水深大约是 0.5 m。由于级联结构的推广性,2 个机器人可被视为一个编队的子系统,受制于实验条件的限制,为验证笔者所提方法的有效性,通过 2 台机器人组成领航跟随编队。设定领航机器人静止,跟随机器人从初始位置不断向领航机器人靠近,当达到设定的安全距离后,跟随机器人前置的 2 个喷水电机开始喷水,后面的喷水电机停止运行,由于机器人在水中阻力较小,具有一定的惯性,所以跟随机器人需要一定的时间做减速运动后才能停止。

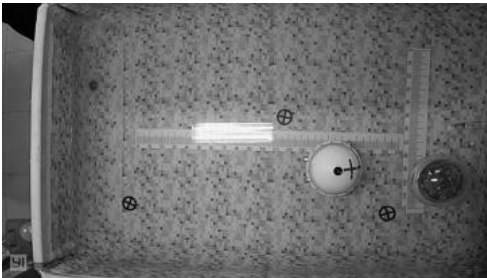
图 7 为水池上方的全局相机拍摄的领航机器人与跟随机器人第 0 s、第 10 s、第 19 s 和第 21 s 的状态,图 8 为跟随机器人上的双目相机在第 0 s、第 10 s、第 19 s 和第 21 s 时跟踪到的领航机器人状态,图 9 为跟随机器人视觉所测领航机器人的距离。由图 9 中各个坐标轴的距离和 3 维坐标可知,当跟随机器人在不断靠近领航机器人的过程中,跟随机器人双目视觉所测领航机器人的距离大约为 600 mm 时,跟随机器人距离的变化趋势变缓,至 550 mm 时停止。实验证明,该方法可以达到防止碰撞的效果,有效地保护了水下机器人的结构。



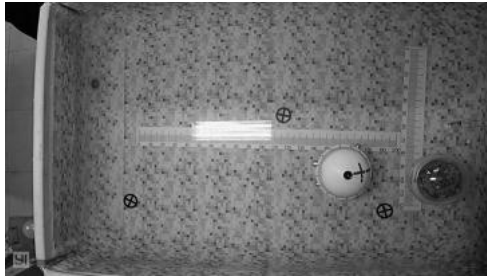
(a) 0 s



(b) 10 s

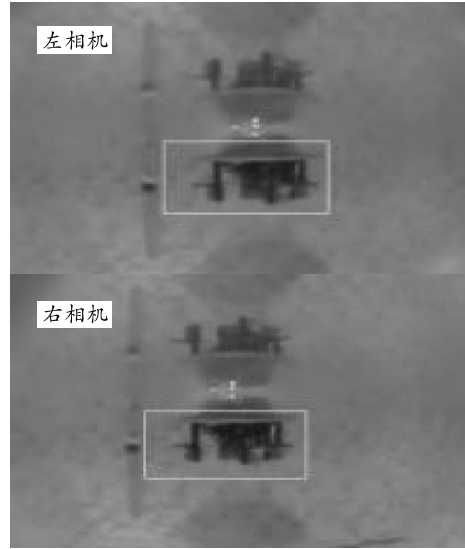


(c) 19 s

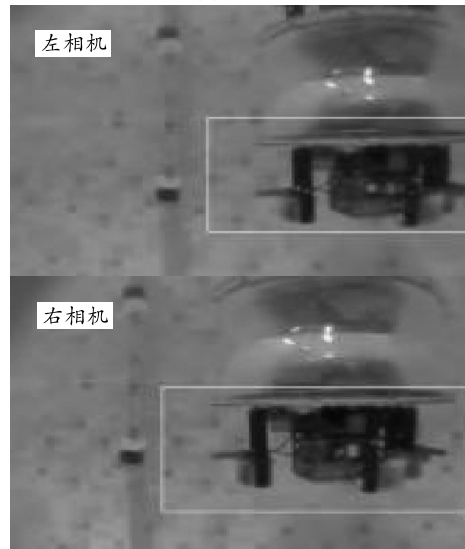


(d) 21 s

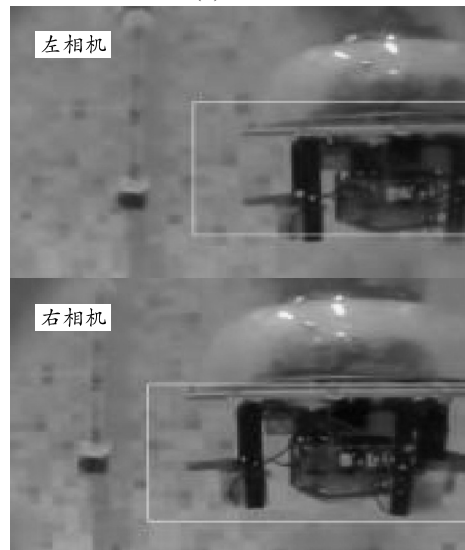
图 7 全局相机视角下领航机器人与跟随机器人的状态



(b) 10 s

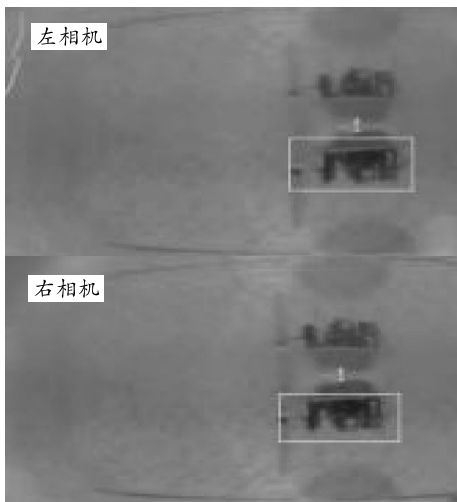


(c) 19 s



(d) 21 s

图 8 跟随机器人视角下领航机器人状态



(a) 0 s

(下转第 87 页)