

一、引言

近年来,群体机器人(swarm robotics, SR)研究开始广泛应用于仿生学、人工智能、军事打击等领域。群体智能机器人作为一种特殊的机器人系统,相较于单一机器人而言,更适用于复杂的任务场景中。传统的单一机器人系统会存在大量的硬件冗余,系统动态调节能力有限,当出现传感器故障时可能会导致整个系统功能失效等问题。受自然生物界集群现象的启发,群体智能机器人旨在通过集群控制的方法以保证复杂场景中机器人系统具备硬件低冗余性、系统高动态调节性、以及集群机器人传感器之间存在互补性等特点。

根据群体集群行为的特点,我们将群体任务分解为三类: **集群搜索、集群跟踪和集群围捕**, 其中在如何设计合适的集群围捕模型方面一直备受关注。目前针对集群围捕模型的研究大致分为两大类: 1) **集中式控制**, 这种模型普遍存在明显的上下级属性, 任务的协调和规划都由上级负责, 并进行集中调度以实现目标的刚性群体围捕。2) **分布式控制**, 即该模型中机器人不存在明显的上下级关系, 机器人通过交互行为来共同决定任务的分配, 协同实现对目标的柔性群体围捕。

经调查发现, 基于**生物启发式**群体控制模型成为了近年来群体机器人控制领域的研究热点之一, 其中很多研究者在基于基因调控网络的群体模式生成方面做了大量的研究。

本文提出了一种基于三维环境的**基因调控网络模型及控制方法**, 以实现群体智能机器人在三维场景中**避障**的同时对目标完成**自适应围捕**。

二、问题陈述和假设

本文主要研究在含有障碍物的三维场景下, 利用基因调控网络模型实现群体智能机器人对目标的围捕任务。本文的目标围捕任务主要包含以下两个步骤: 1) 根据当前时刻的信息素浓度值生成包围目标的**最优形态**, 并得到每个机器人在三维空间中的**运动分量**; 2) 根据运动分量来控制群体机器人分布到**当前时刻最优的形态**上。在此基础上, 本研究针对性的作了如下假设:

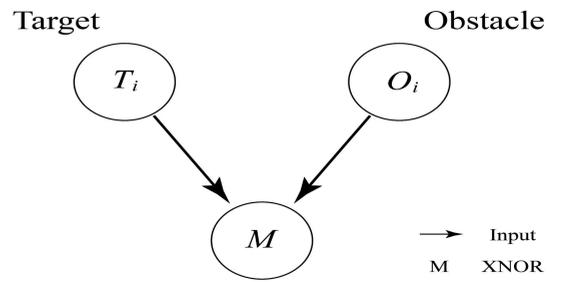
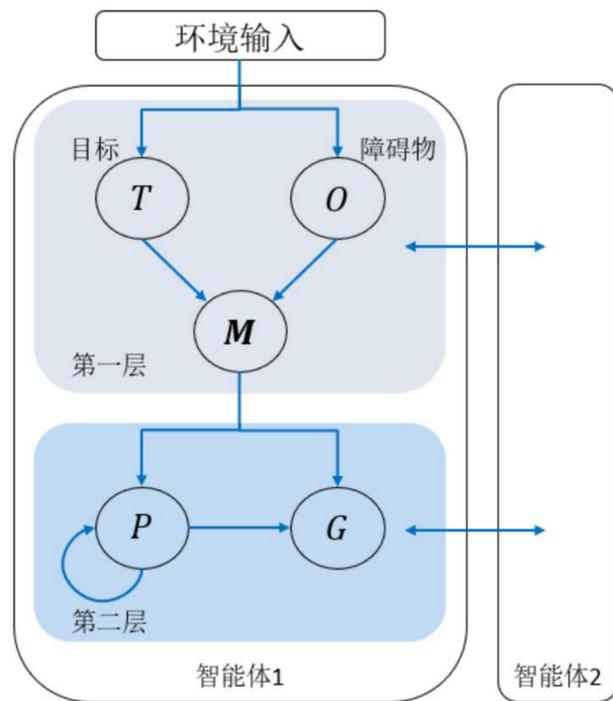
- 在三维空间中, 机器人保持**匀速运行**的, 同时机器人可以在全局坐标系下进行简单的位姿信息交互;
- 对于障碍物与目标, 机器人可以**通过视觉等方法实现目标捕获**, 并能将目标位置映射到全局坐标系下;
- 群体围捕机器人的**速度大于目标的速度**, 以保证围捕机器人能够追上目标并对目标进行围捕;
- 所有围捕机器人都是**同质且去中心化的**, 每个机器人可以分布式布置。

此外, 为了衡量所提方法的性能, 本文定义了以下指标:

- 围捕机器人与目标的**平均距离** D_a , 表示了群体机器人相对于目标的平均距离;
- 围捕机器人**收敛误差** ϕ_s , 用于判断在三维空间中机器人通过基因调控网络自适应运动到指定包围球面上的能力;
- 围捕机器人包围球面的**包围强度** D_s , 表示了机器人在包围球面上的均匀性。

三、基于三维基因调控网络的群体模式生成方法

在实际应用中, 群体机器人一般处于三维环境, 但目前的群体聚合形态算法一般是在二维平面上进行设计及验证的, 并不适用于三维空间下群体机器人的目标围捕。我们提出一种基于三维基因调控网络的智能机器人围捕与群体聚合方法。该方法主要分为两个部分: 1) **基于全局信息自适应生成三维聚合形态的上层**, 以及2) **控制群体机器人形成该群体三维聚合形态的下层**。



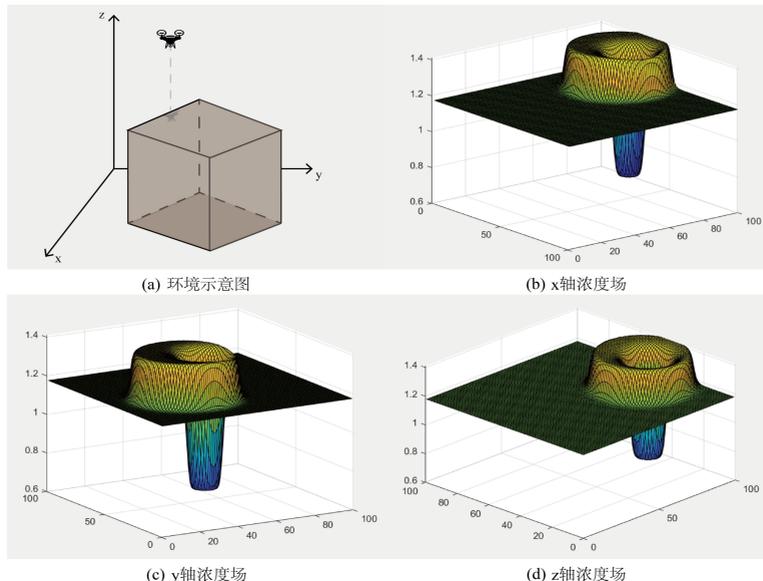
$$T = \sum_{i=1}^{N_t} \nabla^2 T_i + \gamma_i - T_i,$$

$$O = \sum_{j=1}^{N_o} \nabla^2 O_j + \beta_j - j,$$

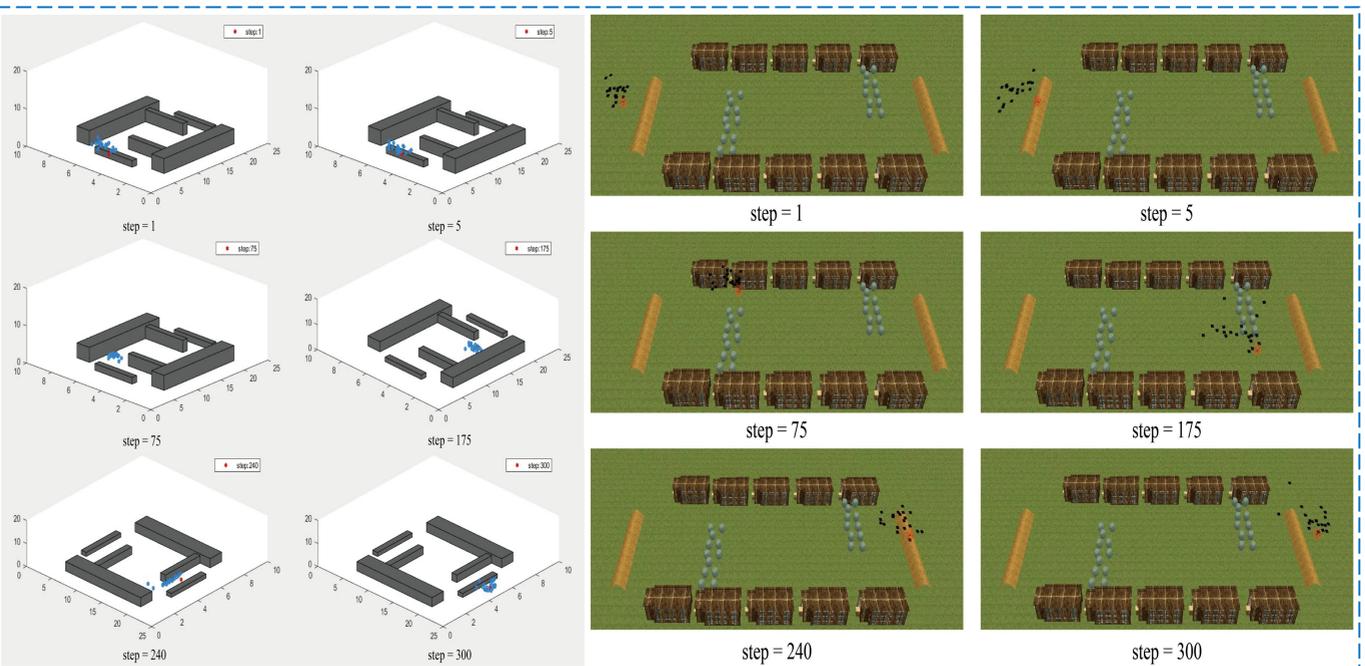
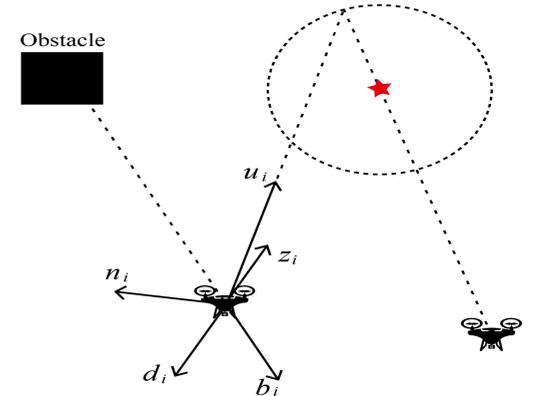
$$\frac{dM}{dt} = -M + \text{sig}(1 - T * T, \theta, k) + \text{sig}(O * O, \theta, k),$$

$$\text{sig}(x, \theta, k) = \frac{1}{1 + e^{-k(x - \theta)}}$$

假设环境中只有一个目标, 且目标周围只有一个障碍物, 障碍物在目标的下方, 将浓度场分别沿着目标的三个维度(X,Y,Z)进行切分, 得到浓度场在**三个维度下的浓度图**, 如图所示。



$$\begin{cases} \frac{dP_i}{dt} = d_i + n_i + z_i + u_i & s_f \geq a \\ \frac{dP_i}{dt} = b_i & s_f < a \end{cases}$$



四、结论

本文研究了在含有障碍物的三维环境下, 群体智能机器人对目标围捕的问题。为此, 本文提出了一种基于三维基因调控网络的智能机器人围捕与群体聚合方法。文中提出的模型在考虑三维环境下机器人围捕情况的同时, 能够根据**目标与障碍物不同的位置自适应生成适合的目标围捕形态**。实验结果表明, 该方法能够解决在**复杂的三维环境中机器人对目标的围捕问题**, 并为未来真实场景中的群体机器人目标围捕打下了良好的基础。本文后续会在现实中搭建场景来验证该方法在真实环境下的可行性, 并设计出更加灵活的GRN结构。