DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2016.0265

人工智能集群控制演示验证系统

安梅岩^{1,2}, 王兆魁¹, 张育林¹

(1.清华大学航天航空学院,北京 100084; 2.中国航天员科研训练中心,北京 100193)

摘 要:为了对人工智能集群的自组织控制方法进行验证,提出了一种在实验室环境下低成本建立人工智能 集群控制演示验证系统的方法.系统由演示场、多个移动个体、合作标识及识别单元、控制及信息分配单元共同 组成.合作标识及识别单元能准确获取多个个体的身份信息和高精度的位姿信息.控制及信息分配单元对智能集 群中个体间的信息交换和个体控制策略进行模拟.最后,以机动自组织探测集群为验证对象,在人工智能集群控 制演示验证系统中对基于人工势场法的自组织控制策略进行演示验证.验证结果表明,该智能集群控制演示验证 系统能够在实验室环境下对智能集群的运行过程进行演示和验证,可以更真实地体现智能集群的实际表现.

关键词:人工智能集群;演示验证系统;自组织;视觉标识识别 中图分类号:TP23 文献标识码:A 文章编号:1002-0446(2016)-03-0265-11

Demonstration and Verification System for Artificial Intelligent Swarm Control

AN Meiyan^{1,2}, WANG Zhaokui¹, ZHANG Yulin¹

School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
 Astronaut Center of China, Beijing 100193, China)

Abstract: A low-cost demonstration and verification system is developed and established in laboratory condition to demonstrate and verify the self-organizing control strategy of an intelligent swarm. The system consists of an arena, multiple mobile individuals, the cooperative identification logo and the identification unit, and the control and information allocating unit. The cooperative identification and the identification unit provides the accurate identification and the high-precision position and direction data of the multiple mobile individuals. The control and information allocating unit simulates the rules of the information exchanging and control among the individuals of an intelligent swarm. Finally, the mobile self-organized detecting swarm is taken as a demonstration case, and the self-organizing control strategy based on artificial potential field is demonstrated and verified in the system. The demonstration results show that the proposed system can demonstrate and verify the operation process of an intelligent swarm in laboratory condition, and the demonstration can provide the actual performance of an intelligent swarm.

Keywords: artificial intelligent swarm; demonstration and verification system; self-organizing; visual fiducial identification

1 引言(Introduction)

Bonabeau 等人将集群智能描述为"简单个体集 群涌现出的整体智能"^[1],这启发我们可以利用大 量相对简单的个体共同构成智能集群,并通过自组 织技术实现这些简单个体行为间的协作,在集群的 整体层面上涌现出集群智能从而完成复杂任务.智 能集群的灵感来源于生物集群^[2].自然界中的生物 集群,如蚁群、鱼群、蜂群、鸟群、兽群等,通过 简单的相互协作,不仅能够实现能力累加效果,更 能够实现能力上的升级,完成单个个体不可能完成 的复杂任务^[1,3]. 对智能集群的研究,不仅能解释生物集群的组 织规律,如著名的蚁群觅食单桥、双桥实验^[4],而 且能利用这些规律提炼出对其他学科领域有意义的 解决方案,如蚁群算法^[5-7]、劳动力分配方案^[1,8-9] 等.更重要的是,随着智能个体技术的发展,可以 利用多个人工个体共同组成人工智能集群,通过分 布的、自主的、简单的人工个体之间的自组织控制 实现个体间的协同,完成复杂的系统任务^[10-16].

研究智能集群时通常先开展理论设计,然后再 进行数字仿真.由于在理论设计时,通常会简化许 多工程实际条件,例如,不考虑个体间通信时的时

基金项目: 国家自然科学基金 (11002076); 国家863计划 (2014AA7041002).

通信作者:安梅岩, amy10@mails.tsinghua.edu.cn 收稿/录用/修回: 2015-11-26/2016-02-03/2016-02-19





延、实际个体的能力局限或执行性能,等等,这会存在很大的弊端.在设计的智能集群进入实际应用前,在实验室环境下对人工智能集群的实际运行规律进行半实物仿真,可以更真实地体现实际环境下人工智能集群的性能,探索智能集群的实际能力,为智能集群的应用扫清障碍.文[17-18]在实验室环境下建立了智能集群半实物仿真系统.在这些系统中,运动个体都采用了真正的物理传感器来采集运动个体的环境参数,运动个体依据这些参数并根据设定的控制规则做出控制.这些智能集群半实物仿真系统能够模拟智能集群的运行情况.

本文在实验室环境下构建了一套人工智能集群 控制演示验证系统,利用多个双轮移动机器人作为 可控移动个体,结合机器视觉合作标识,可识别出 智能集群中各个体所需获得的环境参数,并可通过 数字处理模拟出多种传感器参数,避免了物理传感 器带来的应用限制,使得实验系统可以更专一地验 证智能集群的自组织控制规则.人工智能集群控制 演示验证系统成本低廉,并且可完成多种信息交换 条件、多种自组织控制策略下的人工智能集群自组 织仿真模拟.本文以机动自组织探测集群为例,在 人工智能集群控制演示验证系统中对基于人工势场 法的自组织控制策略进行演示验证.

人工智能集群控制演示验证系统结构与 运作(Configuration and operation of the demonstration and verification system for artificial intelligent swarm control)

人工智能集群控制演示验证系统用于在实验室 条件下演示人工智能集群的自组织过程,验证智能 集群的个体控制规则的有效性.人工智能集群控制 演示验证系统可实现多个移动个体在预设规则的控 制下在实验室搭建的演示场中运动,获得集群的整 体运行结果.

2.1 结构组成

人工智能集群控制演示验证系统由演示场、多 个移动个体、合作标识及识别单元、控制及信息分 配单元共同组成,其结构如图1所示. 演示场为移 动个体提供了运动区域.为了与移动个体形成鲜明 的色差,便于对移动个体进行图像识别,演示场的 颜色被设置为黑色. 移动个体选用两轮小机器人, 两个转动轮分别采用可数控的步进电机控制,可实 现精确的前进、倒退、左转和右转运动. 每个移动 个体的顶部安装有合作标识,每个移动个体的合作 标识唯一,并且可指示出移动个体的编号、位置、 指向等信息. 图像采集设备设置于演示场的正上 方,可以获得整个演示场的图像.为了降低图像采 集数据量,提高图像处理速度,图像采集设备采用 了灰度采集模式. 合作标识识别单元对图像采集设 备获得的图像进行处理,获取所有移动个体的合作 标识,解算各个移动个体的位置和方位数据信息. 控制及信息分配单元根据所要演示验证的智能集群 控制规则,将识别结果数据分配给各个个体.各个 个体根据收到的数据信息,依据所要演示验证的智 能集群控制规则生成各个移动个体的控制指令并进 行相应的移动.

2.2 运作流程

智能集群控制演示验证系统的一般运作流程描述如下:

1) 合作标识及识别单元通过图像采集设备对演

示场进行图像采集,获得各个移动个体在演示场上 的分布图像,并实时解算出所有移动个体的位置和 方位数据信息.

2) 针对具体的演示验证实验,确定移动个体的 信息获取规则和自组织控制规则.根据信息获取规 则分发移动个体的信息,例如,在全局信息获取规 则下,将会把所有个体的信息分发给每一个个体代 理;而在局部信息获取规则下,将会根据个体间的 距离确定其相邻个体集合,将该个体和其相邻个体 集合中的个体的信息分发给此个体代理.

3) 各个个体代理将根据具体的自组织控制规则 和获得的个体信息,计算出每个个体的下一控制目 标位置.

4) 各个移动个体收到控制指令,并按照控制指 令进行动作,向当前控制目标位置运动.

5) 检测各个个体是否到达当前控制目标位置, 如未到达则重复检测.

6) 检查是否满足设定的演示验证结束规则,如 不符合结束条件,则重复以上步骤.

演示验证过程将重复以上步骤,直到满足设定 的实验结束条件.

2.3 智能集群控制演示验证系统实物组成

在实验室内搭建了智能集群控制演示验证系统,实物照片见图 2. 其中,演示场为在地面直接 铺设的一块黑色方形区域.移动个体采用了实验室 现有的 Epuck 两轮小车(图 3),图像采集设备选 用RS-A1300-GM60 灰度相机.个体信息分配与智 能集群控制系统运行于普通的台式计算机(CPU: core i3,内存:4G),配置有两块网卡,一块连接图 像采集设备,一块连接指令无线分发设备.系统中 Epuck 两轮小车可选用其它型号的两轮小车,只要 能够实现无线可控移动即可.所选用的其它设备均 为普通商业货架产品,整个系统成本低廉.



图 2 人工智能集群控制演示验证系统实物照片 Fig.2 Photo of the demonstration and verification system for artificial intelligent swarm control



图 3 Epuck 两轮机器人 Fig.3 Epuck double-wheel robot

3 合作标识的设计与识别(Design and identification of the cooperative identification logo)

在智能集群控制演示验证系统中,为了快速高效地识别演示场上的所有个体的身份编码和位姿状态,专门设计了合作标识.利用这种合作标识,通过简单的图像处理算法,以较少的图像处理耗时快速识别出每个个体的身份编码和位姿状态,识别精度高,个体的位置信息能够达到亚像素级,姿态指向角度优于 0.5°.

3.1 合作标识设计

合作标识为图像标识,通过在背景图像上合理 布置简单图形,利用这些简单的图形来表示合作标 识代表的身份编码和位姿状态.合作标识的结构示 意图见图 4.背景图像为黑色,其上布置有定位图 形、定向起点图形、定向终点图形和编码图形,这 些图形可以采用规则几何图形,如圆形、正方形、 正六边形等.定向起点图形、定向终点图形和编码 图形可以是不同类型的图形,但其面积要相等.定 位图形的面积要明显大于其它 3 种图形,一般要超 过 2 倍.

定位图形的几何中心为标识的中心,用于确定 个体的空间位置.从定向起点图形的几何中心到定 向终点图形的几何中心的连线称为定向直线,定向 直线表示被标识物的指向信息.定向起点图形、编 码图形和定向终点图形的中心沿顺时针方向均匀分 布在以定位图形几何中心为中心、半径为*R*的半圆 上,定向直线通过定位图形中心点.编码图形均匀 分布,所代表的编码位从高位到低位沿顺时针方向 排列. 编码位的编码分别为"1"或"0"表示此编码位位置上存在或不存在编码图形. 编码图形数量表示编码位数 n,可以根据需要标识的个体数量来确定. 编码为"00…0"的合作标识无法确定定向直线的前后指向,因此不可用,所以编码位数为 n的合作标识最多可表示的编码数量为 2ⁿ – 1 个.

在图 4 中,合作标识的简单图形为圆形,其中 中心的大圆 1 为定位图形,小圆 2 和小圆 6 分别为 定向起点图形和定向终点图形,小圆 3、4、5 为编 码图形,图 4 所示的合作标识的编码位共 3 位,小 圆 3 为编码最高位,小圆 5 为编码最低位,所能表 示的合作标识共 7 个,见图 5.

 2
 1
 6

 图 4
 合作标识的结构示意图

Fig.4 The configuration of the cooperative fiducial identification logo



Fig.5 The cooperative fiducial identification logo for 3-bit coding

3.2 合作标识识别

图像采集设备获取演示场的图像,通过合作标 识识别算法对图像进行处理以识别演示场上所有移 动个体上的合作标识.在实际实验中,演示场颜色 的不均匀性以及灰尘等会影响成像质量,为解决此 问题,可以在验证实验前首先获得一幅空演示场的 图像,实验过程中获取的每幅图像与此图像进行灰 度减法操作,可获得质量很好的灰度图像,降低对 演示场颜色一致性、洁净性等方面的要求.

合作标识的识别方法和过程如下:

1) 提取合作标识图形,计算合作标识图形的像

素面积和中心位置.对整幅图像进行预处理,获得 图像的平均灰度值.像素灰度值超过平均灰度值的 像素为合作标识图形像素,对这些像素进行连通区 域判断,记录构成一个连通区域的所有像素点位置 的平均值和像素总数.每一个连通区域代表了一个 合作标识图形,例如在图5中,7个合作标识同时 使用时,将提取出33个合作标识图形.由于合作 标识图形都为规则几何图形,所以所有像素点位置 的平均值即为合作标识图形的中心位置.对所有提 取出的合作标识图形根据面积大小进行分类,大小 超过平均值的为定位图形,在图5中将得到7个定 位图形.

2) 合作标识图形归属判断. 计算定位图形外的 其它所有合作标识图形的中心位置与定位图形中心 位置的距离,将距离一个定位图形为 *R*±δ*r* 的所有 合作标识图形归属于此定位图形,它们共同构成同 一个合作标识,其中 *R* 为定向起点图形、编码图形 和定向终点图形的分布半径,δ*r* 为图像识别误差, 一般可取 2 个像素距离.

3)确定定向图形.从定位图形中心点向同一个 合作标识的所有非定位图形中心点连线构成矢量线 段,矢量线段的数量最少为3条,最多为n+2条, n为编码位数.如图6所示,编码位数为3,矢量线 段共有5条,分别标记为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 ,计算 各个矢量线段与水平方向的夹角,标记为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 .查找角度差为180°的两个夹角,图6 中为 θ_1 和 θ_5 .这两个夹角对应的矢量线段的合作 标识图形为定向图形,但此时仍不能区分定向起点 图形和定向终点图形.为描述方便,称 θ_1 和 θ_5 为 定向夹角,其它夹角称为编码夹角.

4) 确定合作标识指向.从定向夹角中任选其 中一个作为假定定向起点夹角 θ_0 ,然后沿顺时针 方向检测各个编码夹角,即从编码高位到编码低 位依次检查编码夹角集.如果某编码位*i*上检测到 编码夹角存在,即存在某个编码夹角满足 $\theta_i = \theta_0 +$ $180/(n+1) \times i + \delta\theta$,则相应的编码 $a_i = 1$,否则 $a_i = 0$,其中 $\delta\theta$ 为夹角识别误差,一般可取 0.5° . 如果直到i = n时,仍没有检测到编码夹角存在,则 假定定向起点夹角实际为定向终点夹角.由此可确 定合作标识的指向.

在图 6 中,如果假设 θ_1 为假定定向起点夹角, 然后依次检测编码夹角集 { θ_2 , θ_3 , θ_4 } 是否存在编码 夹角等于 $\theta_1 + 180^{\circ}/4 \times 1 \pm 0.5^{\circ}$ 、 $\theta_1 + 180^{\circ}/4 \times 2 \pm$ 0.5°、 $\theta_1 + 180^{\circ}/4 \times 3 \pm 0.5^{\circ}$ 的情况,检测结果为 $a_1 = 1$ 、 $a_2 = 1$ 、 $a_3 = 1$.可知 θ_1 为定向起点夹角, $θ_5$ 为合作标识的指向.如果初始时假设 $θ_5$ 为定向 起点夹角,则检测结果为 $a_1 = 0$ 、 $a_2 = 0$ 、 $a_3 = 0$. 同样可知 $θ_1$ 为定向起点夹角.

5) 确定合作标识编号.如果上一步中的假设定 向起点夹角是正确的,则各个编码位的编码就已经 确定.否则,以当前确定的定向起点夹角为起点, 确定各个编码位的编码.最后合作标识编号等于 $\sum_{i=1}^{n} a_i 2^{n-i}$.图 6 中,可确定合作标识编号为 7.





3.3 合作标识识别实例及识别精度和识别效率

图 7 为智能集群控制演示验证系统实际运行过 程中合作标识的识别结果.演示场上共有 4 个移动 个体,编号分别为 1、2、3、4.每个移动个体旁边 的数字标注为其合作标识的识别结果,格式为 (编 号, *x* 坐标, *y* 坐标,指向角度).图 7 中用椭圆标注 出来的合作标识的识别结果为 (2:365.2, 804.1:46.8), 即 2 号移动个体的亚像素坐标为 (365.2, 804.1),指 向角度为 46.8°.



图 7 百千种以因为结米 Fig.7 An identification result of the cooperative identification logos

为了测试智能集群控制演示验证系统对合作标 识的身份编号、位置坐标和指向角度的识别准确度 和精度,分别将编号为1~4的合作标识布置在演 示场的不同位置,进行100次测量并对测量结果进 行分析,分析结果见表1.

从表 1 可以看出:在 100 次测量中,合作标识的身份编号识别准确,没有出现误识别或未识别的情况;位置坐标的最大偏差为 0.14 像素,演示场的大小为 1.5 m×1.5 m,相机分辨率为 1280×1024,因此 x 坐标和 y 坐标的最大偏差分别为 0.16 mm、0.21 mm;指向角度的最大偏差为 0.37°.从最大偏差的分布情况来看,在靠近演示场中心位置处,位置坐标和指向角度的最大偏差较小,而在演示场的边缘位置处,位置坐标和指向角度的最大偏差相对较大.

为了测试合作标识识别算法的耗时,令图 5 所示的所有合作标识下的 7 个小车在演示场内随机移动,对合作标识识别所需的时间进行了 3 000 次测试. 其中合作标识识别平均用时 0.093 5 s,最大用时为 0.142 6 s,最小用时为 0.065 8 s,具体测试结果见图 8.



4 小车运动路径优化(Path optimization for the robot)

智能集群控制演示验证系统的运作流程中的第 4)步是要控制运动个体到达设定的目的位置.运动 个体从当前所在位置运动到目的位置的过程中,由 于运动个体的运动方向与目的位置方向间可能会存 在误差,因此运动个体可能偏离设定的运动方向, 难以精确到达目的位置.所以,在运动个体向目的 位置运动的过程中,需要适时地修正运动个体的运 表1 人工智能集群控制演示验证系统测量性能实验结果

2016年5月

Tab.1	Measurement performance of the demonstration and verification system for artificial intelligent swarm control						
编号	编号识别 错误次数	<i>x</i> 坐标 平均值 /像素	x 坐标 最大偏差	y 坐标 平均值 /像素	y 坐标 最大偏差	指向角度 平均值 /(°)	指向角度 最大偏差 /(°)
1	0	46.9747	0.09	479.2869	0.04	186.3629	0.30
2	0	880.3899	0.09	483.6703	0.06	354.5895	0.24
3	0	1233.94	0.14	984.0346	0.14	226.0966	0.37
4	0	633.3683	0.04	487.1696	0.1	168.9457	0.16

动方向,使运动方向指向目的位置方向,从而能够 精确地到达目的位置.

4.1 小车运动路径策略

在智能集群控制演示验证系统中,运动个体选 用了 Epuck 两轮小车. 简化其运动控制为以下 2 种: 一种是以设定的速度 v 向前沿直线运动, 另一种是 以设定的角速度 ω 在原地转动. 通过这两种运动方 式的组合,控制小车从当前位置运动到设定的目的 位置. 如图9所示, 小车从初始位置 S 出发向目的 位置D运动,目的位置D与初始位置S的距离为 D1. 考虑到控制误差和识别误差的存在,当小车当 前位置与位置 D 的距离小于等于一个设定的小量 D_{req}时,认为小车到达了目的位置 D. 同样,由于 控制误差和识别误差的存在,小车从位置 S 出发以 速度 v 向前运动时,其运动方向可能不严格沿 SD 方向,而是存在运动指向误差 η_1 ,也就是说小车沿 与 SD 夹角为 η 的直线运动. 这样,小车距离位置 D的最近距离为 $D_1 \sin \eta_1$.如果 $D_1 \sin \eta_1 > D_{reg}$,则 小车将不能到达位置 D. 因此,在小车向位置 D 运 动的过程中需要适当地修正小车的运动指向,才能 够到达位置 D.



Fig.9 Path strategy for the robot

采用下述方案来控制小车的运动,使其能够到 达位置 D:小车从 S 点沿与 \overrightarrow{SD} 夹角为 η_1 的方向以 速度 v 运动,当小车的运动方向与小车与位置 D 的 连线夹角大于等于 η_2 时,小车距离位置 D 的距离 为 D_2 ,以角速度 ω 将速度方向从 η_2 旋转至指向位 置 D,然后再次以速度 v 运动,此时的速度方向与 实际的位置 D 的指向仍旧存在误差 η_1 .如此反复, 经过 n 次后,小车与位置 D 的距离小于等于 D_{req} . 由三角形正弦定理可知:

$$D_2 = D_1 \frac{\sin \eta_1}{\sin \eta_2} \tag{1}$$

同样,有:

$$D_{3} = D_{2} \frac{\sin \eta_{1}}{\sin \eta_{2}}, \cdots, D_{n+1} = D_{n} \frac{\sin \eta_{1}}{\sin \eta_{2}}$$
(2)

为简化问题,这里假设 η_1 、 η_2 为常量.考虑到 0° < $\eta_1 < \eta_2 < 90$ °, $D_1, D_2, \dots, D_n, D_{n+1}$ 构成等比递 减数列,因此有

$$D_{n+1} = D_1 \left(\frac{\sin \eta_1}{\sin \eta_2}\right)^n \tag{3}$$

因此,当

$$n = \left\lceil \frac{\ln \left(D_{\rm req} / D_1 \right)}{\ln \left(\sin \eta_1 / \sin \eta_2 \right)} \right\rceil \tag{4}$$

时, *D*_{*n*+1} < *D*_{req}, 小车到达目的位置 *D*. 即此小车运动路径控制策略能够保证小车到达目的位置.

4.2 小车偏转角阈值设计

在上述小车运动路径方案中,小车偏转角阈值 η₂ 只需要满足 0° < η₁ < η₂ < 90°(-90° ~ 0° 时的 分析类似),就可以确保小车一定能够到达位置 D. 不过,η₂ 的取值将决定小车的运动路径优劣,因此 需要仔细设计 η₂ 的取值以优化小车运动路径.在 智能集群控制演示验证系统的运行过程中,小车要 按照个体的控制规则不断更新其目的位置.因此, 小车如果能够在最短的时间内到达目的位置,将大 大缩短整个智能集群控制规则的演化时间,提高智 能集群演示验证系统的效率.

在图 9 中,小车经过 *n* 次直线运动和 *n*-1 次 转向后到达位置 *D*,每次直线运动的距离分别为 $\Delta D_1, \Delta D_2, \dots, \Delta D_n$,则小车从起始位置 *S* 运动到目 的位置 *D* 所需的总时间为 $T_{\text{total}} = \sum_{k=1}^{n} \Delta D_k / v +$ $(n-1)((\eta_2 - \eta_1)/\omega)$.其中,前一项为各段直线运 动的总时间 T_v ,后一项为转动总时间 T_ω .问题可转 化为无约束极值问题,即

$$\begin{array}{l} \min \ T_{\mathrm{total}}\left(\eta_{2}\right)\\ \mathrm{s.t.} \ 0^{\circ} < \eta_{1} < \eta_{2} < 90^{\circ} \end{array}$$

车的总运动距离为

$$\sum_{i=1}^{n} \Delta D_{i} = D_{1} \frac{\sin(\eta_{2} - \eta_{1})}{\sin\eta_{2}} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\sin\eta_{1}}{\sin\eta_{2}}\right)^{i-1}$$
$$= D_{1} \frac{\sin(\eta_{2} - \eta_{1}) \left(1 - \left(\frac{\sin\eta_{1}}{\sin\eta_{2}}\right)^{n}\right)}{\sin\eta_{2} - \sin\eta_{1}} \qquad (5)$$

根据式 (4) 可知, 当 n = N 和 n = N+1 时, 对 应的 η_2 的最小值分别满足:

$$N+1 = \frac{\ln(D_{\rm req}/D_1)}{\ln(\sin\eta_1/\sin\eta_{2.N+1.{\rm min}})}$$
(6)

$$N = \frac{\ln(D_{\rm req}/D_1)}{\ln(\sin\eta_1/\sin\eta_{2_{-N}\rm{-min}})}$$
(7)

当 $\eta_2 \in [\eta_{2.N+1.min}, \eta_{2.N.min})$ 时,有 $n \equiv N$,即n不变.此时,式(5)是关于 η_2 的递增函数,所以 η_2 越小,小车的直线运动总时间 T_v 也越短.同时,在 n不变的情况下,小车的总转动时间 T_ω 也为关于 η_2 的递增函数.因此,在n不变的情况下,小车的 整个运行时间 T_{total} 为关于 η_2 的递增函数.要使运 行时间最短, η_2 应取为每一个n对应的最小值.

当 n 发生变化,由式 (6) 和 (7) 可知

$$N\ln\frac{\sin\eta_1}{\sin\eta_{2_{-N}\min}} = (N+1)\ln\frac{\sin\eta_1}{\sin\eta_{2_{-N+1}\min}}$$
(8)

并且有

$$0^{\circ} < \eta_1 < \eta_{2_{N+1}\min} < \eta_{2_{N}\min} < 90^{\circ}$$
 (9)

下面分别证明在满足式 (8) 和式 (9) 的条件下, 小车总的直线运动时间和总的转动时间都在 $\eta_2 = \eta_{2-N+1-\min}$ 时更小,也就是需要证明式 (10) 和 (11) 成立.

$$\frac{\sin(\eta_{2.N+1},\min}{\eta_{2.N+1},\min}-\eta_{1})\left(1-\left(\frac{\sin\eta_{1}}{\sin\eta_{2.N+1},\min}\right)^{N+1}\right)}{\sin\eta_{2.N+1},\min}-\sin\eta_{1}} < \frac{\sin(\eta_{2.N},\min}{\eta_{1}}-\eta_{1})\left(1-\left(\frac{\sin\eta_{1}}{\sin\eta_{2.N},\min}\right)^{N}\right)}{\sin\eta_{2.N},\min}-\sin\eta_{1}}$$
(10)

$$(N+1)(\eta_{2_{-N+1}\min}-\eta_1) < N(\eta_{2_{-N}\min}-\eta_1)$$
 (11)

要证明式(10),只需证明

$$y(x) = \frac{\sin(x-A)}{\sin x - \sin A}$$
(12)

是关于 x 的递增函数, 其中 A 为常数. 求导数可知

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\sin A \left[1 - \cos \left(x - A\right)\right]}{\left(\sin x - \sin A\right)^2} > 0$$
(13)

因此, y(x) 为递增函数, 所以式 (10) 是成立的.

要证明式(11),只需证明下述问题:

已知:函数 $y = \arcsin e^x$,存在 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) ,并且满足 $0 < x_1 < x_2 < x_3 < 90$, $(N+1)x_2 < x_1 + Nx_3$.

证明: $(N+1)y_2 < y_1 + Ny_3$.

函数 $y = \arcsin e^x$ 的 2 阶导数为

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{e^x}{\sqrt{1 - e^{2x}}} + \frac{e^{3x}}{\left(\sqrt{1 - e^{2x}}\right)^3} > 0$$
(14)

因此函数 $y = \arcsin e^x$ 为严格下凸函数,所以

$$y(x_{2}) = y\left(\frac{1}{N+1}x_{1} + \frac{N}{N+1}x_{3}\right)$$

$$< \frac{1}{N+1}y(x_{1}) + \frac{N}{N+1}y(x_{3})$$

$$= \frac{1}{N+1}y_{1} + \frac{N}{N+1}y_{3}$$
 (15)

 $□ (N+1) y_2 < y_1 + N y_3.$

综合以上证明,可知 η_2 越小,小车到达目的 位置所需的时间越短.在智能集群控制演示验证系 统中,考虑到实际工程约束, η_2 取为一个控制时间 间隔所对应的转角,即 $\eta_2 = \omega \Delta t$.

4.3 小车运动路径实验

为了检验小车运动路径转角阈值优化设计的理 论分析结果,在智能集群控制演示验证系统中进行 了小车运动路径测试实验.小车从同一个地点出发 到达目的地点,分别设定不同的转角阈值,测试小 车的运动情况.

图 10 给出了小车运动路径实验结果. 小车从 (200,800)运动至(800,200),图10中的两列曲线 分别为小车的位置变化曲线和指向角度变化曲线, 第1行到第6行分别对应转角阈值设定为5°、10°、 20°、30°、40°和50°时的实验结果. 从图 10 可以 看出: 1) 对于所有的转角阈值, 小车都正确完成 了路径运动,从(200,800)运动到了(800,200).2) 转角阈值为 5° 和 10° 时,小车的运动路径与 (200, 800) 到 (800, 200) 间的直线偏离较小,而且随着转 角阈值的增大,偏离也越明显.3)转角阈值在30°、 40°和50°时,小车的运动路径在越过目的点后有 绕回现象, 尤其对于 50° 的转角阈值, 小车运动路 径呈螺旋收缩形. 4)转角阈值为 5°时,小车的指向 角度出现往复摆动现象,其原因是一个控制周期内 小车的转角为10°左右,转角阈值为5°时,在一个 控制周期内会导致小车的指向角度超出 [-5°, +5°] 范围. 5) 小车运动所需要的时间分别为 80.358 5 s、



Fig.10 Experiment results of the robot path

61.254 87 s、 68.0106 s、 78.446 3 s、 82.991 2 s 和 99.617 3 s. 可以看出,除转角阈值为 5°之外,小车 运动时间随转角阈值的减小而缩短.小车在转角阈 值为 5°时指向角度出现往复摆动,导致所需时间 大于转角阈值为 10°时.

5 基于人工势场的机动自组织探测集群控制验证实验(Control strategy verification experiment for the mobile self-organized detecting swarm based on artificial potential field)

本节利用智能集群控制演示验证系统对基于人 工势场的机动自组织探测集群控制进行实验验证. 基于人工势场的机动自组织探测集群是由多个自主 机动探测个体共同构成的探测集群,每个个体的控 制规则采用人工势场法生成,由其他个体的当前位 置和探测目标位置决定,个体间相互影响并且能够 形成整体上均匀分布的探测构型,实现对目标的多 角度探测.基于人工势场的机动自组织探测集群是 典型的智能集群,利用人工智能集群控制演示验证 系统对其人工势场控制规则进行验证,能够有效地 检验控制规则的有效性.

5.1 机动自组织探测集群系统组成

机动自组织探测集群用于对再入飞行器的落点 进行探测.再入飞行器的落点探测与着陆过程监 测对于再入飞行器技术性能分析和效能评估有着 重要意义,同时也对探测系统提出了诸多要求.再 入飞行器的落点会在一定范围内分布,无法预知准 确落点,因此在大范围内布置大量固定探测设备的 方案不仅建造成本高昂,更存在被击中而损毁的可 能.而且,采用长焦距固定监测设备远距离进行监 测时,获得的图像的分辨率较低,难以提取详细的 落点数据;并且,在气象条件不好的情况下,如雾 霾、沙尘等恶劣天气下,监测结果会受严重影响, 甚至根本无法获取到所需数据.因此,需要建立机 动自组织探测系统.

机动自组织探测集群由多个自主移动平台共同 组成,移动平台为地面移动小车和旋翼式空中飞 行器,自主移动平台携带光学监测设备.旋翼式空 中飞行器机动能力强,可快速抵达并及时探测着陆



图 11 机动自组织探测集群构成图 Fig.11 Configuration of the mobile self-organized detecting swarm

过程,地面移动小车负重能力强,可携带功能更强 的探测设备,详细探测着陆情况.两者结合可以高 效、详细地获取探测数据.此外,探测集群可以近 距离地对落点进行观测,降低气象条件对探测效果 的影响.系统如图 11 所示,详细描述可见文 [19].

5.2 基于人工势场方法的个体自组织控制规则

机动自组织探测集群中的两种自主移动平台分 别组成独立的探测集群,地面移动小车集群和旋翼 式空中飞行器集群.这两个集群的个体自组织控制 规则都采用下述人工势场法设计个体的控制规则.

5.2.1 机动自组织集群控制模型

将机动自组织集群中的自主移动平台视为构成 集群的个体. 假设第 *i* 个个体的位置在第 *k* 个时刻 为 *x_i(k)*. 在自组织控制规则下,个体 *i* 的运动可表 示为

$$\boldsymbol{x}_{i}(k+1) = \boldsymbol{x}_{i}(k) + \boldsymbol{u}_{i}(k)$$
(16)

其中 *u_i* 为第 *k* 个时刻的控制量,由个体间人工势场和落点的环境势场两部分控制量组成.

5.2.2 个体间人工势场

个体间人工势场函数如下:

$$\boldsymbol{f}_{i}(\boldsymbol{x}_{1},\boldsymbol{x}_{2},\cdots,\boldsymbol{x}_{N}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1, j\neq i}^{N} \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_{i}-\boldsymbol{x}_{j})$$
$$i = 1, 2, \cdots, N \qquad (17)$$

其中, $g(\cdot)$ 表示个体 \mathbf{x}_i 和个体 \mathbf{x}_j 之间的作用函数, 其形式如下:

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{y}) = -\boldsymbol{y}\left(a - b \exp\left(-\frac{\|\boldsymbol{y}\|^2}{c}\right)\right) \qquad (18)$$

其中, *a*,*b*,*c* 为常数,并且满足 *b* > *a* > 0, *c* > 0. ||**y**|| 为**y**的欧氏范数, ||**y**|| = $\sqrt{\mathbf{y}^{\mathsf{T}}\mathbf{y}}$. *g*(**y**)包括吸引 和排斥两部分, *a***y**为线性吸引函数,使得两个个 体有靠近的趋势,*b***y**exp(-||**y**||²/*c*)为排斥函数,使 得两个个体有远离的趋势.当两个个体的距离满足 ||**y**|| = $\delta = \sqrt{c \ln (b/a)}$ 时,两者之间的吸引作用和 排斥作用相抵,整体作用为 0.

5.2.3 落点的环境人工势场

在上述离散集群模型和人工势能函数控制下, 集群的中心位置 $\bar{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^{N} \mathbf{x}_i / N$ 满足:

$$\overline{\boldsymbol{x}(k+1)} = \overline{\boldsymbol{x}(k)} \tag{19}$$

由此可知,在集群的运行过程中,集群的中心 位置始终保持不动.由文 [20]的分析可知,集群最 终将形成围绕集群中心点的紧密集群构型.由于集 群的中心点位置始终保持不动,因此,最终的紧密 集群构型的中心位置是确定的,这不满足机动自组 织探测系统的动目标点要求,需要增加落点的人工 势场,才能实现紧密集群构型以落点为中心位置.

利用环境势场函数,能够实现所有个体向同一 个地点的聚集.仿照这种方法,可以利用环境势场 函数来控制集群构型在空间中的位置.环境势场函 数可采用二次型的形式,如下所示:

$$V(\mathbf{y}) = \frac{d}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{y}_{c}\|^{2}$$
(20)

其中, d 为常数, 且 d > 0. 不难看出, 环境势场函数 $V(\mathbf{y})$ 在 $\mathbf{y} = \mathbf{y}_{c}$ 处取得最小值. 因此, 在二次型 环境势场函数作用下, 各个个体都有向 $\mathbf{y} = \mathbf{y}_{c}$ 处靠 近的趋势.

二次型环境势场函数对第 i 个体的作用可以表示为

$$\boldsymbol{e}_{i}\left(\boldsymbol{x}_{i}\right) = -d\left(\boldsymbol{x}_{i} - \boldsymbol{x}_{c}\right) \tag{21}$$

其中, **x**c 为集群构型要到达的中心位置. 综上所述,个体控制函数可表示为

 $\boldsymbol{u}_{i} = -d\left(\boldsymbol{x}_{i} - \boldsymbol{x}_{c}\right) + \frac{1}{N} \cdot \sum_{\substack{j=1, j \neq i \\ i = 1, 2, \cdots, N}}^{N} \left(-\left(\boldsymbol{x}_{i} - \boldsymbol{x}_{j}\right) \left(a - b \exp\left(-\frac{\|\boldsymbol{x}_{i} - \boldsymbol{x}_{j}\|^{2}}{c}\right)\right) \right)$ $i = 1, 2, \cdots, N$ (22)

针对地面移动小车和旋翼式空中飞行器不同的 机动能力,地面移动小车集群和旋翼式空中飞行器 集群控制模型中的参数可分别设计,实现空中集群 快速移动,地面集群平稳移动,从而充分发挥各自 的优势,实现及时、详细探测的有机结合.

5.3 机动自组织探测集群控制规则演示验证实验

在建立的智能集群控制演示验证系统上,对机动自组织探测集群的人工势场控制规则进行验证. 以4个探测移动平台组成的机动自组织探测集群为 例,在智能集群控制演示验证系统中,采用4个移动个体分别代表这4个探测移动平台.初始时将这 4个移动个体分别布置在其对应的初始位置上.然 后,中央控制处理单元发出落点的对应位置,机动 自组织控制演示过程开始,各个移动个体根据设定 的控制规则向落点机动,并最终形成对落点的多角 度观测构型.

这里给出了2个实验结果. 第1个实验中4个 移动个体的初始位置分别为(200,200)、(200,800)、 (1000, 800)、(1000, 200), 落点的对应位置为(600, 500),进行自主机动实验,实验结果见图 12. 图中 中心位置的"*"点为落点对应位置,4条曲线分别 对应4个移动个体的移动过程,曲线上的"o"点为 各个时刻每个移动个体的目标运动位置. 小车从初 始位置运动至第一个目标运动位置,然后根据控制 规则生成下一目标运动位置,并向此位置运动.从 图中可以看出,移动个体的运动过程为向探测落点 位置聚拢的过程,所有小车最终的探测构型相对于 探测落点均匀分布,并且保持在一定距离.每个移 动个体的目标位置序列在初始时刻变化较大,而随 着移动个体向落点位置的聚拢,目标位置序列的变 化减小.也就是说,在人工势场规则下,移动个体 在距离落点位置较远时位置变化也较大,而在逐渐 形成稳定观测构型时个体的位置变化表现为微调.



第2个实验在第1个实验的基础上进行,4个 移动个体对落点位置(600,500)形成稳定的探测构 型后,假设落点位置由(600,500)改变为(400,500), 观察移动个体的运动情况,实验结果见图13.从 图中可以看出,4个移动个体由初始的探测位置向 更新的落点位置方向移动,并最终相对新落点位置 构成稳定探测构型.人工势场规则下生成的个体目 标位置分布密集,在图13中用于标示每个阶段生 成的目标位置的"o"点相互重叠形成了一条粗线, 已经覆盖了标示个体运动过程的细线.



从两个实验的结果来看,机动自组织探测集群 能够实现对落点位置形成均布的稳定探测构型,并 且在落点位置发生变化后,再次形成均布稳定探测 构型.本文所构建的人工智能集群控制演示验证系 统实现了对基于人工势场的自组织控制规则下机动 自组织探测集群运行过程的演示验证,为机动自组 织探测集群的实际应用提供了技术支持.

6 结论与展望(Conclusion and prospect)

本文提出了一种智能集群控制演示验证系统, 用于在实验室环境下对智能集群从个体简单行为到 整体涌现行为的演示和对个体控制规则的有效性进 行验证.系统由演示场、多个移动个体、合作标识 及识别单元、控制及信息分配单元共同组成.所提 出的合作标识和识别方法能够通过机器视觉提供个 体的身份编码和精确的位姿信息.通过对机动自组 织探测集群的演示验证,证明了智能集群控制演示 验证系统能够在实验室环境下对智能集群的运行进 行演示和验证,可以更真实地体现智能集群的实际 表现,为智能集群的现实应用创造条件.

人工智能集群控制技术发展迅速,人工势函数、人工物理、leader-follower、有限状态机等方法 得到了深入的研究.此外,个体的运动环境中还可 能存在障碍物,从而限制个体的运动路径.这些都 对演示验证系统提出了新的要求.实现在各种环境 约束下对各种控制技术的验证实验,将大大提高人 工智能集群控制演示验证系统的应用广泛性.

参考文献(References)

- Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. Swarm intelligence: From natural to artificial systems[M]. New York, USA: Oxford University Press, 1999.
- [2] Şahin E. Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application[M]//Swarm Robotics. Berlin, Germany: Springer, 2005. 10-20.
- [3] Blum C, Merkle D. Swarm intelligence: Introduction and applications[M]. Berlin, Germany: Springer, 2008.
- [4] Deneubourg J L, Aron S, Goss S, et al. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant[J]. Journal of Insect Behavior, 1990, 3(2): 159-168.
- [5] Dorigo M, Birattari M, Stutzle T. Ant colony optimization[J]. Computational Intelligence Magazine, 2006, 1(4): 28-39.
- [6] Merkle D, Middendorf M, Schmeck H. Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(4): 333-346.
- [7] Dorigo M, Blum C. Ant colony optimization theory: A survey[J]. Theoretical Computer Science, 2005, 344(2-3): 243-278.
- [8] Castello E, Yamamoto T, Nakamura Y, et al. Task allocation for a robotic swarm based on an adaptive response threshold model[C]//13th International Conference on Control, Automation and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 259-266.
- [9] Pini G, Brutschy A, Pinciroli C, et al. Autonomous task partitioning in robot foraging: An approach based on cost estimation[J]. Adaptive Behavior, 2013, 21(2): 118-136.

- [10] Matarić M J. Behavior-based robotics as a tool for synthesis of artificial behavior and analysis of natural behavior[J]. Trends in Cognitive Sciences, 1998, 2(3): 82-87.
- [11] Verhoeven C J M, Bentum M J, Monna G L E, et al. On the origin of satellite swarms[J]. Acta Astronautica, 2011, 68(7-8): 1392-1395.
- [12] D'Arrigo P, Santandrea S. The APIES mission to explore the asteroid belt[J]. Advances in Space Research, 2006, 38(9): 2060-2067.
- [13] Curtis S A, Truszkowski W, Rilee M L, et al. ANTS for human exploration and development of space[C]//IEEE Aerospace Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2003: 1-261.
- [14] Truszkowski W, Hallock H, Rouff C, et al. Autonomous and autonomic systems: With applications to NASA intelligent spacecraft operations and exploration systems[M]. Berlin, Germany: Springer, 2010.
- [15] 王浩, 丁磊, 方宝富, 等. 多机器人追逃问题中的追捕联 盟生成算法[J]. 机器人, 2013, 35(2): 142-150.
 Wang H, Ding L, Fang B F, et al. Pursuers-coalition construction algorithm in multi-robot pursuit-evasion game[J]. Robot, 2013, 35(2): 142-150.
- [16] 黄天云,陈雪波,徐望宝,等.基于松散偏好规则的群体 机器人系统自组织协作围捕[J].自动化学报,2013,39(1): 57-68.
 Huang T Y, Chen X B, Xu W B, et al. A self-organizing cooperative hunting by swarm robotic systems based on loose-
- preference rule[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(1): 57-68. [17] Ducatelle F, Di Caro G A, Förster A, et al. Cooperative naviga-
- tion in robotic swarms[J]. Swarm Intelligence, 2014, 8(1): 1-33.
- [18] Fujisawa R, Dobata S, Sugawara K, et al. Designing pheromone communication in swarm robotics: Group foraging behavior mediated by chemical substance[J]. Swarm Intelligence, 2014, 8(3): 227-246.
- [19] An M Y, Fan L, Wang Z K, et al. Design for autonomous selforganizing target detection system based on artificial swarms [C]//2014 International Conference on Multisensor Fusion and Information Integration for Intelligent Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2014.
- [20] Gazi V, Passino K M. Stability analysis of swarms[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(4): 692-697.
- 作者简介:
 - 安梅岩(1978-),男,博士生,工程师.研究领域:智能 集群自组织控制及空间应用.
 - 王兆魁(1978-),男,博士,副教授.研究领域:分布式 航天器系统,天基重力场测量.
 - 张育林(1958-),男,博士,教授.研究领域:空间系统 动力学与控制,分布式航天器与快速响应空间系 统,地月空间体系结构与自主智能系统.