

控制与决策

Control and Decision

晶格式集群机器人矩阵成型方法及实验

杨宏安, 段鑫, 张昭琪, 曹帅, 咎文佩

引用本文:

杨宏安, 段鑫, 张昭琪, 等. 晶格式集群机器人矩阵成型方法及实验[J]. 控制与决策, 2020, 35(10): 2391–2398.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0104>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

移动机器人视觉伺服镇定quasi-min-max预测控制

Quasi-min-max predictive control for visual servoing stabilization of mobile robots

控制与决策. 2020, 35(6): 1391–1396 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0743>

基于内发动机机制的移动机器人自主路径规划方法

Mobile robot autonomous path planning method based on intrinsic motivation mechanism

控制与决策. 2018, 33(9): 1605–1611 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0620>

UHF-RFID环境下的移动机器人定位方法

Mobile robot localization method in UHF-RFID

控制与决策. 2018, 33(10): 1807–1812 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0741>

基于动态精简式混合地图的移动机器人自主探索

Mobile robot autonomous exploration based on dynamically simplified hybrid map

控制与决策. 2017, 32(5): 817–822 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0127>

基于轨迹跟踪车式移动机器人编队控制

Formation control for car-like mobile robots based on trajectory tracking

控制与决策. 2015(1): 176–180 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1277>

晶格式集群机器人矩阵成型方法及实验

杨宏安[†], 段鑫, 张昭琪, 曹帅, 咎文佩

(西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

摘要: 针对复杂非结构环境下作业任务对机器人的多功能性、柔性化等特殊需求, 提出一种以映射矩为目标构型识别依据、矩阵元素为成型运动核心的晶格式集群机器人矩阵成型方法. 基于离散化处理后的晶格式群体系统与元素离散排列、对称分布的矩阵的相似性, 在预处理阶段, 将用户给定的二维目标几何构型任务进行矩阵二值化处理, 与初始构型矩阵嵌套和匹配, 并依次通过矩阵映射运算、初始构型体的相对定位实现集群机器人对目标几何构型的有效识别. 在成型阶段, 晶格式机器人个体以矩阵元素为运动依据、晶格单元为成型载体, 设计晶格式集群机器人的个体自主成型规则, 有效解决群体系统中“去哪里”和“怎么走”的问题. 最后, 通过仿真实验表明群体矩阵成型方法的可行性和有效性.

关键词: 集群机器人; 矩阵成型; 晶格式移动机器人; 个体成型规则; 实验验证

中图分类号: TP242

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0104

引用格式: 杨宏安, 段鑫, 张昭琪, 等. 晶格式集群机器人矩阵成型方法及实验[J]. 控制与决策, 2020, 35(10): 2391-2398.

A matrix shape formation approach and experiment for latticed swarm robots

YANG Hong-an[†], DUAN Xin, ZHANG Zhao-qi, CAO Shuai, ZAN Wen-pei

(Electromechanical College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming at the special requirements in non-structural environment, a matrices shape formation approach for swarm robots is presented, which includes goal shape recognized based on mapping matrices and formation movement based on matrix elements, to adapt the versatility and flexibility of robots in complex tasks. Based on the similarity between the discretized crystal format group system and the matrix with discrete arrangement and symmetrical distribution of elements, during the process of pretreatment, the 2-D user-specific shape is binarized as a goal matrix, which is matched with the matrix of the initial shape. Through matrix mapping operations and the relative localization approach of the initial shape, the goal shape is recognized by swarm robots. During the process of formation movement, a movement rule to solve the problem of “where to go” and “how to go” is proposed according to the movement feature based on the matrix element and the formation carrier based on the lattice unit. Finally, the feasibility and validity of the matrix shape formation approach are verified by simulation experiments, and following the shape formation algorithm, after a novel modular robot is designed and a latticed formation platform for swarm robots is built, the nine latticed robots by two kinds of experiments are completed.

Keywords: swarm robots; matrix shape formation; latticed robot; individual movement rules; experiment verification

0 引言

相对于传统任务单一、功能复杂、成本高昂、中心控制的单体机器人, 集群机器人 (swarm robotics) 由于其分布式、无中心控制等固有特性, 在柔性、鲁棒性、可拓展性和适应性等方面具有独特优势. 为此, 集群机器人被 2018 年度机器人领域顶级期刊《Science Robotics》列为未来 10 年机器人技术面临的十大挑

战之一^[1].

集群机器人自主成型是指: 对于大量具有一定感知、计算和运动能力的机器人个体, 通过个体之间的局部感知和交互协作, 使整个群体自主、有序地涌现出预期的复杂几何构型^[2]. 这种分布式成型方法采用自下而上的设计方式, 因其在柔性、多功能性等方面的显著优势, 它在深空探索、健康医疗等领域具有

收稿日期: 2019-01-21; 修回日期: 2019-07-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51775435); 西北工业大学种子基金项目 (ZZ2019091).

责任编辑: 方勇纯.

[†]通讯作者. E-mail: yhongan@nwpu.edu.cn.

潜在的应用价值^[3]. 例如:在复杂非结构化的深空探索环境中,轻量化是永恒的主题,航天员在执行在轨维修任务时,只需携带一套类似于“万能工具”的晶格式集群机器人,通过“软编程”便可构造出不同形状、不同功能的维修工具,并在完成维修任务后又可重复利用.

晶格式集群机器人是由功能简单、同构(homolinebreak geneous)的晶格式机器人个体按照晶格排列方式组成的群体系统. 该群体系统在自主成型领域具有以下特点: 1)晶格式个体排列规则,便于群体系统个体之间的相对定位; 2)晶格式个体呈立方体结构,在空间上对称分布,可以减小个体之间的累计误差,提高成型精度. 在给定某一目标几何构型的条件下,晶格式集群机器人若要自主有序地完成目标构型任务,则必然涉及成型方法和成型载体两类问题.

近年来,研究者从多近邻协同与单近邻协同^[4]、个体间吸引与排斥^[5]、记忆及其对集群运动影响^[6]等方面对个体局部交互规则进行了实证化研究和分析. 文献[7]提出通过多细胞重组来形成特定几何结构的构型思路,并在国际上首次研发出基于CEBOT机器人的成型验证系统. MIT的Gilpin等^[8-9]研制出可与相邻机器人连接和通信的两款机器人系统: Miche和Pebble,初始给定一个由机器人模块以规则晶体结构拼装在一起的构型体,然后系统通过自拆卸的方式分离不必要的模块,以完成2D或3D的成型任务. 后期, Gilpin等^[10-11]利用Pebble机器人还实现了群体机器人自复制的功能. 魏洪兴等^[12]设计了一种基于晶核成型的分布式构型控制算法,并完成了基于Sambot成型载体的实验验证. Zhu等^[13]提出了一种用于机器人自重构的分布式和并行的机制,随后, Bie等^[14]提出了一种基于元胞自动机的簇流运动与基于膜计算思想的空间几何去中心化的局部表示相结合的新方法. 哈佛大学Rubenstein等^[2]设计了一种基于简单个体行为规则的群体自组装算法,并实现了规模达1 024个Kilobot机器人的二维几何图案成型任务. 该项研究成果同时荣获《Science》2014年度

十大科技突破称号.

针对大规模机器人群体自主成型问题,国内外学者在群体成型方法、机器人硬件设计等方面开展了一定的研究工作,其核心是通过大规模简单个体的局部交互和群体协作,使整个群体涌现出有序、协调的宏观集体行为. 但是,由于成型方法的设计是自下而上完全分布式、个体成型行为复杂多样、个体行为规则需要进行细微具体的逻辑设计等原因,研究者主要以试错法和直觉法进行群体系统的设计^[15],目前仍缺乏有据可循的理论来指导个体成型行为规则设计. 另外,该领域大部分研究侧重于仿真验证环节,而仿真实验存在实验条件理想化、模型简单、忽略实际复杂工况等弊端.

本文研究的目的在于:针对晶格式集群机器人系统设计一套自下而上的分布式矩阵成型方法,并通过仿真和实物实验验证该方法的可行性. 在假设成型前所有机器人个体业已聚集、对齐排列成 N 阶方形初始构型体的条件下,依据外部用户给定的二维目标几何构型,经过离散化处理后的晶格式群体系统与元素离散排列、对称分布的矩阵具有相似性,本文提出一种以映射矩为目标构型识别依据、矩阵元素为成型运动核心的晶格式集群机器人矩阵成型方法. 最后,通过仿真实验对该群体矩阵成型方法进行验证,并研制了晶格式移动机器人硬件个体,将该方法嵌入群体中的每台机器人控制器中,完成了9台机器人的2类构型实验.

1 目标构型任务驱动下的矩阵成型方法

在用户给定二维目标几何构型任务后,群体的成型将面临两个问题: 1)群体机器人如何识别目标几何构型任务; 2)机器人识别任务后,个体如何实现自主、有序地涌现出目标几何构型任务. 基于离散化处理后的晶格式群体系统与元素离散排列、对称分布矩阵的相似性,设计一种晶格式集群机器人矩阵成型的方法. 该方法分为两个阶段:成型前预处理阶段与矩阵成型阶段(见图1).

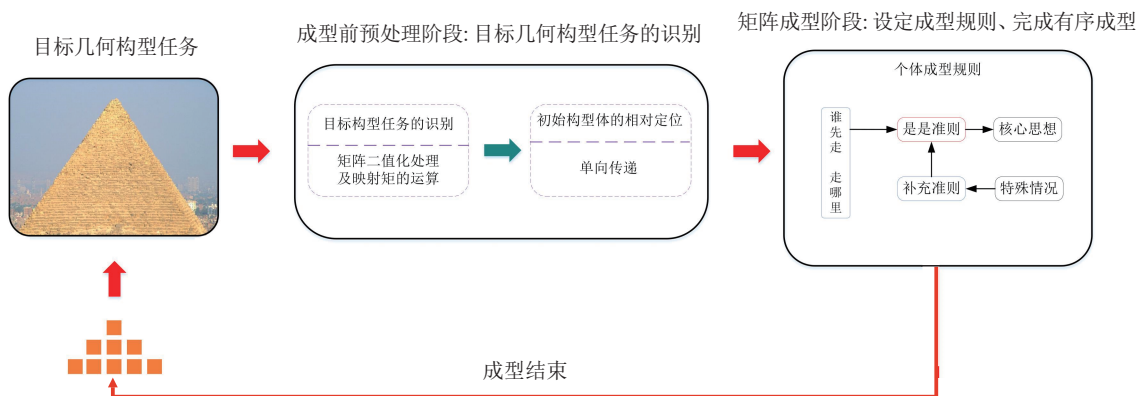


图1 晶格式集群机器人矩阵成型方法

1) 成型前预处理阶段.

在外部用户给定目标几何构型(目标构型体)之后,群体面临的主要问题是机器人如何识别目标构型任务.为了解决群体机器人“我是谁”、“我在哪”的问题,通过初始构型体与目标构型体的矩阵嵌套重合、坐标匹配、映射运算,建立晶格式集群机器人特有的“三型一位映射矩”,完成群体机器人对目标构型任务的识别;针对群体中机器人个体“谁先走”、“走哪里”的问题,将识别后的“三型一位映射矩”嵌入机器人个体中,通过对初始构型体进行相对定位,实现对该映射矩直接的寻址访问,为确定其下一步运动位置和方向提供依“矩”.

三型:目标构型体和初始构型体嵌套重合后的晶格类型,即目标构型体内晶格、目标构型体外晶格和待填补晶格(“我是谁”、“我在哪”的判别).

一位:初始构型体和目标构型体坐标匹配后,待填补晶格的位置信息(“谁先走”、“走哪里”的依据).

映射矩:含有三型一位信息的矩阵对应关系.

2) 矩阵成型阶段.

成型阶段的主要任务是设定完整的晶格式集群机器人个体的成型规则.在预处理的基础上,机器人个体通过访问三型一位映射矩信息,确立个体向目标构型体运动的优先级、运动位置和方向,以“有补填补、无补不补”(有待填补晶格填补,无待填补晶格不填补)为运动指导思想,以矩阵元素为运动依托、晶格单元为成型载体,寻找目标构型体待填补晶格位置,判断领域晶格类型,自主决策其下一步运动,从而实现群体的有序成型.

当个体运动完成后,群体将面临成型结束判定的问题,由于机器人个体感知有限,自身无法获得全局信息,而成型的结束标志着目标构型任务的完成,需要晶格式集群机器人所有个体通过自身的、领域间的底层行为表征出结束的状态.

2 成型前预处理阶段

机器人个体如何识别目标构型任务并转化为自身所需的运动信息是成型的关键.因此在成型开始前,需要对目标构型任务进行识别和转化——三型一位映射矩,实现机器人个体对自身位姿的获取,为解决群体系统中机器人个体“我是谁”、“我在哪”的问题提供依据;并通过对初始构型的相对定位,将三型一位映射矩嵌入机器人个体中,为下一步群体系统中机器人“谁先走”、“走哪里”的个体行为创造有“矩”可依、有“址”可寻的条件.

2.1 目标构型任务的识别和转化

晶格式集群机器人个体功能简单、感知有限,无法识别用户给定的目标构型任务,因此,必须将其转化为“机器语言”以被机器人个体识别,从而为矩阵成型运动提供依据.

2.1.1 目标构型任务的矩阵二值化处理

为了实现目标任务转化为能够被机器人识别的信息,即个体自身所处晶格类型和位置,通过用矩阵二值化处理目标构型体、以矩阵表示目标构型体的方式,为三型一位映射矩的建立提供依“矩”.

在假设条件下,将无序、复杂的目标构型体统一扩充为 m 行 n 列、能够被识别的矩形聚集体.矩阵中,0 表示目标构型体外晶格,1 表示目标构型体内晶格.目标矩阵——目标构型体的扩充矩阵,矩阵的行取目标构型体的行数;矩阵的列取目标构型体的列数.

以“金字塔”目标构型任务为例,对目标构型体进行矩阵二值化处理,并用目标矩阵表示其二值化结果,见图 2.其中:图 2(a)表示“金字塔”目标构型任务;图 2(b)表示用晶格表示任务——建立目标构型体;图 2(c)表示目标构型体的矩阵二值化处理;图 2(d)表示目标构型体的目标矩阵.

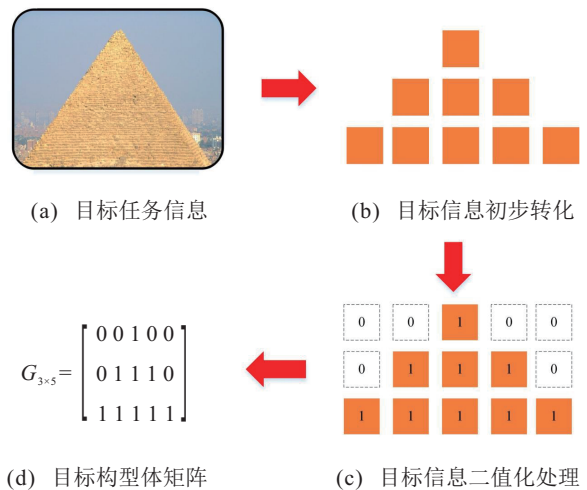


图 2 “金字塔”目标构型体的矩阵化二值化处理

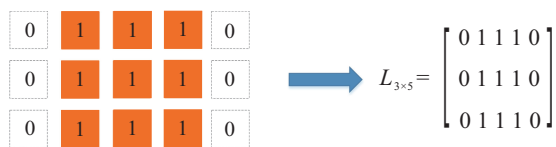
目标矩阵实现了目标任务信息向机器人个体可识别信息的初步转化,而机器人个体成型运动所需的三型一位信息却无法由目标矩阵得到.因此,首先通过初始构型体与目标构型体矩阵的嵌套重合,分离出“三型”;然后通过初始构型体与目标构型体矩阵的坐标匹配获取“一位”;最后确定“三型”与“一位”的映射关系,建立可被晶格式集群机器人识别的三型一位映射矩.

2.1.2 目标构型体与初始构型体矩阵的嵌套重合

目标矩阵无法直接得到初始构型体所需要的“三型”信息,为了便于机器人个体识别初始构型体内晶格类型,分离“三型”信息,需将初始构型体与目标构型体矩阵进行嵌套重合.

1) 初始矩阵的确定.

为了实现初始构型体与目标构型体的完全重合,依据目标矩阵,以相同的方式将初始构型体扩充为 m 行 n 列初始矩阵,初始矩阵——初始构型体的扩充矩阵,其中 N 阶初始构型体的第 1 列为目标矩阵的第 2 列,第 N 行为目标矩阵的第 m 行,见图 3(a);图 3(b) 为其对应的初始矩阵.



(a) 初始构型体二值化处理 (b) 初始构型体矩阵

图 3 初始构型体的矩阵化二值化处理

2) 初始矩阵与目标矩阵的嵌套重合.

目标矩阵和初始矩阵无法单独地分离出“三型”,对于同形的矩阵 G 和 L ,通过简单地嵌套重合,矩阵元素信息即可转化为机器人个体所需的“三型”信息.重合矩阵 J 为

$$J = 2G + L.$$

由图 2(d) 和图 3(b) 可得“金字塔”目标构型体的重合矩阵为

$$J = 2G + L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 3 & 1 & 0 \\ 0 & 3 & 3 & 3 & 0 \\ 2 & 3 & 3 & 3 & 2 \end{bmatrix}.$$

对重合矩阵 J 的元素分析,如表 1 所示.

表 1 “三型”的判断依据

序号	类型	判断依据
1	目标构型体外晶格	重合矩阵元素为 1
2	目标构型体内晶格	重合矩阵元素为 3
3	待填补晶格	重合矩阵元素为 2

重合矩阵元素为 0 的晶格为扩充晶格,仅用作机器人运动时邻域内的无效晶格的判断.

2.1.3 初始构型体与目标构型体矩阵的坐标匹配

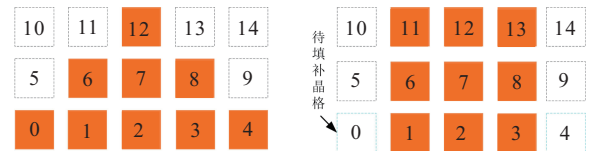
“三型”解决了机器人个体自身所处群体中的位置(“我是谁”),但不能解决晶格式集群成型中个体成型运动的方向和位置(“走哪里”).为了得到待填补晶格的位置,需要对初始矩阵和目标矩阵进行坐标匹配、映射处理,机器人个体通过匹配矩阵获取“一位”

信息,从而确定个体的运动方向和运动位置.

匹配矩阵 K : 与目标矩阵同形,元素表示晶格坐标的矩阵.

针对“金字塔”目标构型任务,以左下角晶格为 0,依次对初始构型体和目标构型体的矩阵进行坐标匹配,见图 4,由此得到匹配矩阵

$$K_{3 \times 5} = \begin{bmatrix} 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix}.$$



(a) 目标矩阵的坐标匹配 (b) 初始矩阵的坐标匹配

图 4 初始构型体与目标构型的坐标匹配

“三型一位”源于目标构型体,个体完全相同的晶格式机器人无法直接从重合矩阵 J 和匹配矩阵 K 获取信息.因此,为了实现“三型一位”信息能够被初始构型体的机器人个体同时访问,必须寻求“三型”与“一位”之间的联系,建立匹配矩阵 K 与重合矩阵 J 的对应关系:存在映射 f ,使得 K 中的每个元素 K_{ij} 对应于 J 中的每个元素 J_{ij} ,其中 $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$.

匹配矩阵 K 与重合矩阵 J 映射关系的建立,将包含晶格式机器人个体矩阵成型所需的矩阵联系在一起,形成了可被机器人个体访问的矩阵集.

2.2 初始构型体的相对定位

三型一位映射矩将目标构型任务信息转化为机器人个体可识别的“机器语言”,而不具有寻址功能的初始构型体机器却无法直接访问该附带“地址”的“机器语言”.因此,若要将“机器语言”(三型一位映射矩)嵌入机器人个体,则必须通过初始构型体的相对定位并赋予每个机器人个体“地址”,才能够实现对目标构型任务信息“机器语言”的直接获取.

上面给出了匹配矩阵与重合矩阵的映射关系,因此,只需依据匹配矩阵赋予初始构型体中每个机器人个体地址即可获取“机器语言”.匹配矩阵中的扩充晶格元素对于初始构型体是无效信息,除去扩充晶格元素,即

$$K_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 11 & 12 & 13 \\ 6 & 7 & 8 \\ 1 & 2 & 3 \end{bmatrix},$$

并以此为依据,通过坐标传递的方式对初始构型体进行相对定位.

为了适应由目标构型任务的无序性和复杂性而导致初始构型体相对定位的多样性,本文提出一种基于递推公式(1)、(2)的“单向传递”定位方法(见图5),即横向传递

$$D_i = D_{i-1} + 1, 2 \leq i \leq N; \quad (1)$$

纵向传递

$$P_j = P_{j-1} + n, 2 \leq j \leq N. \quad (2)$$

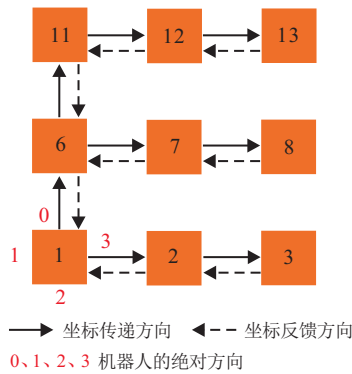


图 5 “金字塔”初始构型体的相对定位

对该方法的描述如下:

- 1) 初始构型体中,左下方机器人所在晶格坐标为 1.
- 2) 向 3 方向传递坐标依次加 1;向 0 方向传递坐标依次加 n .
- 3) 机器人所处晶格按照逆时针传递一周,若某方向不存在机器人,则跳过该方向.
- 4) 整个初始构型体中,只允许第 1 列进行纵向坐标传递.

为了保证坐标信息传递的准确性,在每个方向坐标传递的过程中增加了反馈环节:接收到对应方向反馈信息后才进行下一个方向的坐标传递.“单向传递”通过对初始构型体的相对定位,实现了机器人个体对信息源的获取,为下一步个体的运动成型提供了可靠的依“矩”.

3 晶格式集群机器人的个体成型规则

在预处理阶段,通过三型一位映射矩的建立和初始构型体的相对定位,确定了机器人个体在群体中的位姿.在成型阶段,个体的运动将面临以下 3 个问题:

- 1) 谁先走:个体无法获取非相邻晶格的信息,机器人个体自身不能确定谁先运动.
- 2) 走哪里:目标任务构型具有复杂性,导致机器人个体运动方向的不确定性.
- 3) 到哪停:成型任务完成时,个体运动无法获知成型结束的信息.

针对个体运动成型中存在的问题,需要设定一套

完整的机器人个体成型规则,以期解决成型过程中个体之间的运动优先、运动方向和位置以及个体的运动停止(成型结束)的问题.

3.1 个体间的运动填补准则

在运动成型时,待填补晶格相邻机器人个体之间无法进行感知,在向该晶格填补时会出现碰撞问题,导致整个群体运动的紊乱.为了解决群体成型过程中个体之间的避碰问题,实现群体自主、有序的成型,需要对个体的运动填补准则进行严格的设定.以“有补填补,无补不补”的运动思想为指导,以矩阵元素为运动核心,个体之间的运动准则如下.

是是准则:当个体周围存在一个待填补晶格时,向待填补晶格移动;存在多个待填补晶格时,以 $0 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 2$ 方向的顺序进行填补,非待填补晶格跳过;个体不能向之前的晶格内移动.

机器人个体先访问三型一位映射矩,获取自身晶格的位置;然后对邻域晶格进行信息识别.当识别邻域存在待填补晶格(“是”待填补晶格)时,便向该晶格移动填补(运动与否——“是”).是是准则是整个群体成型的核心,该准则解决了群体成型过程中机器人个体“谁先走”、“走哪里”的问题.其运动的伪代码如下.

运动算法.

step1: 访问三型一位映射矩,获取自身晶格位置(我是谁、我在哪)

- 1) if now_coordinate then
- 2) if $C_coordinate$ then
- 3) $P_coordinate$
- 4) end if
- 5) end if

step2: 检测邻域晶格类型,判断移动方向(走哪里),记录空白晶格(谁先走)

- 6) if $C_coordinate = 3$ //判断为目标构型体内晶格(矩阵元素判断)
- 7) for i 1 to 4 do //监测空白晶格
- 8) distance (i)
- 9) end if
- 10) direction(i) //记录空白晶格的方向
- 11) case 0: $k = m$; case 1: $k = -1$; case 2: $k = 1$;
- case 3: $k = -m$;
- 12) return k
- 13) $P_coordinate = P_coordinate + k$
- step3: 向下一个晶格内机器人传递信息
- 14) if $C_coordinate$ then

```

15) if C_coordinate = 2 then //判断是待填补晶格,进行移动(矩阵元素判断)
16)   send_message(now_coordinate)
17)   move(i)
18) end if
19) end if

```

在晶格式集群机器人的成型运动中,机器人个体只能进行横向和纵向的移动,但由于机器人个体在不同的晶格内具有相同的运动状态,从而导致机器人个体在晶格之间往复运动.为了适应目标构型任务的多样性,对是非准则进行以下两点补充,以保证群体成型的连续性和唯一性. 1)是非准则:理论上不允许目标构型内晶格机器人向目标构型体外晶格移动;2)非非准则:理论上不允许目标构型体外晶格之间进行移动.

准则1)中,理论上不允许目标构型内晶格机器人向目标构型体外晶格移动(见图6(a)).当晶格前方的晶格为目标构型体外晶格时,该晶格有机器人移动,且当前晶格相邻反方向晶格内存在机器人处于目标构型体外晶格,此时允许目标构型内晶格机器人向目标构型体外晶格移动,并遵循 $0 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 2$ 方向的顺序,按1、2、3、4级优先级进行填补(见图6(b)).

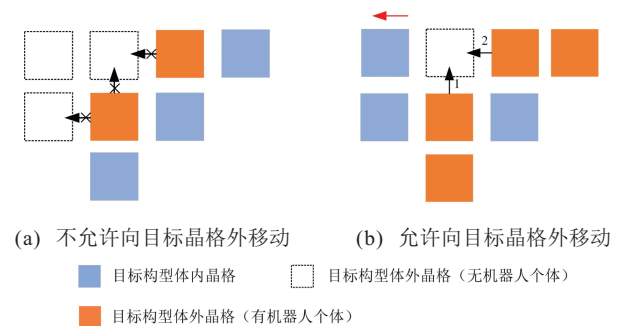


图6 是非准则

准则2)中,理论上不允许目标构型体外晶格之间进行移动(见图7(a)).当两相邻晶格均为非待填补晶格时,其中一个晶格有机器人移动,且另一晶格相邻反方向晶格内存在机器人处于目标构型体外晶格,

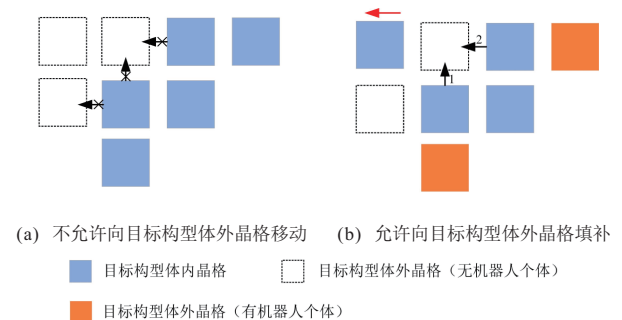


图7 非非准则

则另一晶格内的机器人移动至状态信息改变的晶格内,并遵循 $0 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 2$ 方向的顺序,按1、2、3、4级优先级进行填补(见图7(b)).

准则1)和准则2)的引进是为了避免在填充过程中,目标构型体外的晶格被机器人个体阻挡,无法进入目标构型体内.

3.2 群体成型结束的判定

晶格式机器人因其分布式、感知有限的特点,导致个体在成型过程中无法获取目标构型任务完成时的全局信息,因此,必须在机器人个体成型规则的基础上加以限定,以所有机器人个体局部的停止来判定群体成型的结束.

个体运动停止的判定:1)当前机器人所处晶格为目标构型体内晶格;2)除去移动至此晶格的方向,其余相邻晶格无待填补晶格或相邻待填补晶格内存在机器人个体.

运动停止的机器人个体在原地等待,表征出休眠状态,直至接收激活信息,解除休眠状态,开启运动模式.激活信息包括:相邻待填补晶格中的机器人移动,且此时自身满足优先运动条件.

群体成型结束判定:当所有的机器人个体停止运动时,表征为休眠状态,且群体不存在运动的机器人个体,则判定群体成型的结束.

4 晶格式集群机器人矩阵成型的实验验证

4.1 矩阵成型方法的仿真实验验证

为了验证本文算法的通用性与可扩展性,利用机器人仿真平台 Webots,依据自主成型方法对个体功能的需求,设计可通讯、测距、计算并全向移动的机器人个体(见图8(a)),并在大规模集群中嵌入该算法控制器进行仿真,以验证算法针对不同形状目标构型的通用性,以及在不同规模集群的可扩展性.

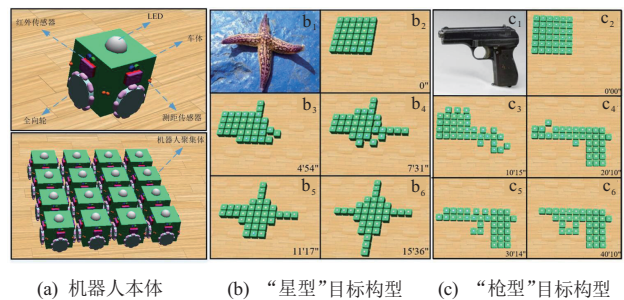


图8 机器人个体设计与仿真实验

综合图8所示的仿真结果可知,矩阵成型方法能够完成多种几何构型的仿真实验,且随着晶格式群体系统个体数量的增加,成型任务仍能够顺利执行,从而表明该方法具有较好的通用性和可扩展性.

4.2 群体矩阵成型方法的实物验证

4.2.1 Qbot 机器人的搭建

晶格式集群机器人系统要求个体具有局部感知通讯能力、定向运动能力和中心决策能力. 为了实现大规模晶格式集群机器人的成型, 晶格式机器人各传感器模块的选型应以低成本、低功耗、小型化为原则, 同时还应具备中心处理、感知通讯、定向转动等功能. 晶格式 Qbot 机器人的主要硬件组成及性能参数如图 9 和表 2 所示.

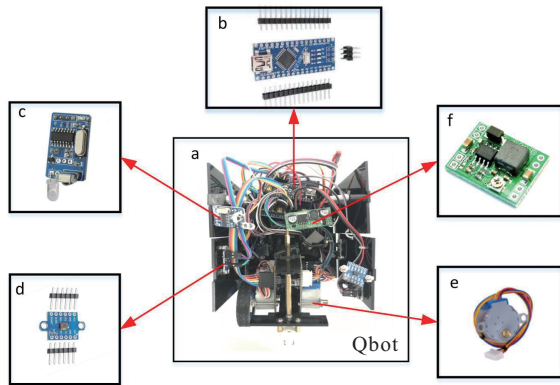


图 9 Qbot 机器人个体硬件组成

表 2 Qbot 机器人个体硬件性能参数

序号	模块	型号	数量
b	中心处理器	Arduino Nano	1
c	红外收发模块	YS-NEC(IRTM)	4
d	红外测距	VL53LOX	8
e	步进电机	28byj-48	2
f	降压模块	MP15845EN	1

限于晶格式机器人的体积, 采用低功耗、高性能的微型处理器; 基于晶格式机器人特殊的正方体结构设计, 采用 4 个面的局部通讯和测距; 要求个体只能进行横向和纵向的移动, 而现有全向轮式驱动方式底盘尺寸太大, 采用 PID 闭环控制步进电机差速驱动的方式进行运动控制, 移动一次为一个晶格距离.

4.2.2 矩阵成型方法的实物实验

在假设 9 个 Qbot 机器人已经聚集且对齐排列成 3 阶方形初始构型体的条件下, 在 Qbot 机器人中嵌入成型方法, 选择晶格式机器人两种典型构型进行实验: 对称构型“金字塔”和非对称构型“h”. 其中: 对称构型“金字塔”的成型完整过程参见 <https://url.cn/59udxnj>; 非对称构型“h”的成型完整过程参见 <https://url.cn/59udxnj>.

1) “金字塔”目标构型的矩阵成型实验.

当 $t = 0s$ 时, 在上述假设条件下, 9 个 Qbot 机器人聚集且对齐排列; 当 $0s < t \leq 7s$ 时, 建立“三型

一位”映射矩, 通过初始构型体的相对定位完成预处理; 当 $7s < t \leq 30s$ 时, 依据准则 1), 机器人个体优先向待填补晶格移动填充; 当 $30s < t < 58s$ 时, 依据准则 2), 接收信息的机器人个体进行运动填充; 当 $t = 58s$ 时, 所有个体均处于休眠状态, 标志着成型的结束. Qbot 机器人个体的绿灯表示当前个体任务完成, 处于休眠状态 (见图 10).

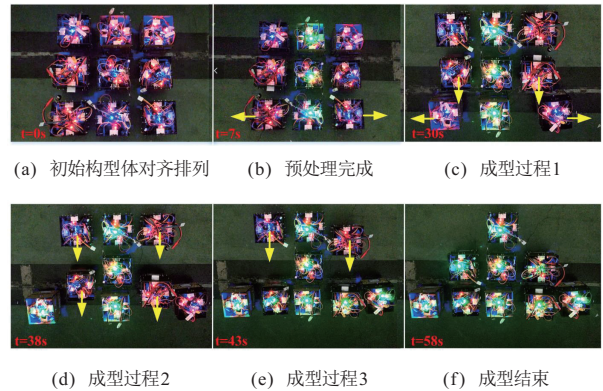


图 10 “金字塔”目标构型的矩阵成型过程

2) “h”目标构型的矩阵成型实验.

当 $t = 27s$ 时, 预处理已经完成, 而左上方机器人“提前”开始运动和预处理时间较长, 其原因是: 为了保证信息传递的正确性, 过程中增加了反馈环节, 而反馈环节的出现导致实验预处理完成时间的不同; 当 $t = 79s$ 时, 所有个体均处于休眠状态, 标志着成型的结束 (见图 11).

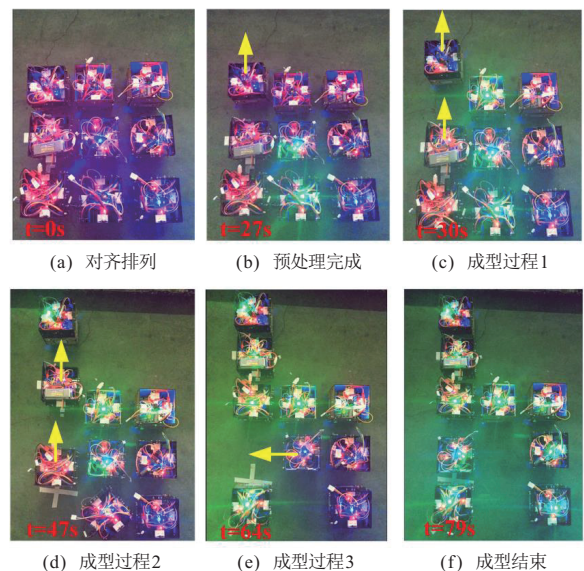


图 11 “h”目标构型的矩阵成型过程

5 结论

针对用户给定的目标几何构型任务, 在假设所有个体已经聚集且对齐排列成 N 阶方形初始构型体的条件下, 提出一种以映射矩为目标构型识别依据、矩阵元素为成型运动核心的晶格式集群机器人矩阵成

型方法,并对晶格式集群机器人系统中两类典型构型的成型实验进行了仿真和实物测试,验证了该方法的可行性和有效性. 本文的主要贡献如下:

1) 针对群体系统对目标构型任务的识别问题,提出了一种晶格式集群机器人特有的区分晶格类别、获取晶格位置的任务识别预处理方法. 依据目标构型任务,建立三型一位映射矩,实现了机器人对目标任务的识别,解决了群体机器人个体中“我是谁”、“我在哪”的问题,从而为后续自主有序地成型创造了有“矩”可依、有“址”可寻的条件.

2) 针对群体系统中的避碰、运动优先的问题,设计了一套晶格式集群机器人特有的以矩阵元素为运动依据、晶格单元为成型载体的个体成型规则. 机器人个体通过访问矩阵元素,获取自身的运动优先级、运动位置和方向,解决“谁先走”、“怎么走”、“去哪里”的问题,实现了集群机器人自主有序地成型.

3) 依据晶格式集群机器人矩阵成型方法,通过仿真实验验证了群体矩阵成型方法的可行性和有效性,并研制了晶格式移动机器人硬件个体,完成了9台机器人的2类构型实验.

本文提出的矩阵成型方法对于晶格式集群机器人系统中目标任务识别、个体成型规则的研究具有一定的价值. 考虑到集群机器人系统的大规模特性,以及群体中机器人个体的功能相对较弱,大规模数量条件下的集群机器人自主成型实验验证,以及部分个体失效条件下的群体鲁棒成型将是亟待深入研究的两个重点内容.

参考文献(References)

- [1] Yang G Z, Bellingham J, Dupont P E, et al. The grand challenges of science robotics[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(14): eaar7650.
- [2] Rubenstein M, Cornejo A, Nagpal R. Robotics programmable self-assembly in a thousand-robot swarm[J]. *Science*, 2014, 345(6198): 795-799.
- [3] 刘永进, 余旻婧, 叶子鹏, 等. 自重构模块化机器人路径规划方法综述[J]. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48(2): 143-176.
(Liu Y J, Yu M J, Ye Z P, et al. Path planning for self-reconfigurable modular robots: A survey[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2018, 48(2): 143-176.)
- [4] Bode N W, Franks D W, Wood A J. Limited interactions in flocks: Relating model simulations to empirical data[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2011, 55(8): 301-304.
- [5] Lukeman R, Li Y X, Edelman-Keshet L. Inferring individual rules from collective behavior[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(28): 12576-12580.
- [6] Mann R P, Perna A, Strömbom D, et al. Multi-scale inference of interaction rules in animal groups using bayesian model selection[J]. *Plos Computational Biology*, 2013, 9(3): e1002961.
- [7] Whitesides G M, Grzybowski B. Self-assembly at all scales[J]. *Science*, 2002, 295(5564): 2418-2421.
- [8] Gilpin K, Kotay K, Rus D, et al. Mische: Modular shape formation by self-disassembly[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2008, 27(3/4): 345-372.
- [9] Gilpin K, Knaian A, Rus D. Robot pebbles: One centimeter modules for programmable matter through self-disassembly[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Anchorage: IEEE, 2012: 2485-2492.
- [10] Gilpin K, Rus D. A distributed algorithm for 2D shape duplication with smart pebble robots[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Saint Paul: IEEE, 2012: 3285-3292.
- [11] Gilpin K, Rus D. What's in the bag: A distributed approach to 3D shape duplication with modular robots[C]. *Robotics: Science and Systems VIII*. Boston: MIT Press, 2012: 89-96.
- [12] 魏洪兴, 王田苗. 模块化群体机器人构型分析与自组装控制[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(13): 100-108.
(Wei H X, Wang T M. Configuration analysis and self-assembly control for modular swarm robots[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(13): 100-108.)
- [13] Zhu Y, Bie D, Wang X, et al. A distributed and parallel control mechanism for self-reconfiguration of modular robots using *L*-systems and cellular automata[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2017, 102(C): 80-90.
- [14] Bie D, Gutiérrez-Naranjo M A, Zhao J, et al. A membrane computing framework for self-reconfigurable robots[J]. *Natural Computing*, 2019, 18(1): 635-646.
- [15] Brambilla M, Ferrante E, Birattari M, et al. Swarm robotics: A review from the swarm engineering perspective[J]. *Swarm Intelligence*, 2013, 7(1): 1-41.

作者简介

杨宏安(1972—), 男, 教授, 博士, 从事集群机器人、多机器人协作、群智能优化方法等研究, E-mail: yhongan@nwpu.edu.cn;

段鑫(1996—), 男, 硕士生, 从事集群机器人、群智能优化方法的研究, E-mail: noahsarkdx2012@163.com;

张昭琪(1993—), 男, 硕士生, 从事集群机器人、多机器人控制的研究, E-mail: 986060821@qq.com;

曹帅(1993—), 男, 硕士生, 从事集群机器人自主成型的研究, E-mail: 695810907@163.com;

咎文佩(1994—), 男, 硕士, 从事集群机器人容错控制的研究, E-mail: shendi531@gmail.com.

(责任编辑: 李君玲)