



基于协商的队形动态生成方法

任德华, 柳映辉

(天津科技大学计算机科学与信息工程学院, 天津 300222)

摘要: 基于层次可扩展队形描述框架 HEFF, 提出了基于协商的队形动态生成方法, 可以在保持原队形形状不变的情况下动态扩展队形, 以容纳新加入队形的机器人, 并集成最大优先指派算法, 实现了机器人到队形目标点的优化分派. 该方法简单、灵活, 能充分利用机器人之间的并行操作, 快速有效地生成指定队形.

关键词: 多机器人系统; 队形控制; 队形生成; 队形切换

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1672-6510 (2008) 02-0077-06

Dynamically Build Formation Based on the Negotiation

REN De-hua, LIU Ying-hui

(College of Computer Science and Information Engineering, Tianjin University of Science & Technology,
Tianjin 300222, China)

Abstract: A solution to dynamically build formation based on the negotiation using the HEFF (Hierarchical Extend Formation description Frame) was proposed. The formation can be dynamically extended while keeping the same formation shape. At the same time, the MSFA (Max Sum First Assignment) method was integrated into the solution to optimize assignments between robots and objective locations. The solution is simple, flexible, which utilize robots' parallel operations and can be used to build the formation effectively and quickly.

Keywords: multi-robot system; formation control; formation build; formation reconfigure

多机器人队形控制是一个典型的机器人协调与合作问题, 它的研究可应用于卫星、空中无人飞行器 UAV、陆上无人驾驶车辆 UGV、水下机器人等, 有广泛的应用领域. 国内外的研究者提出了许多方法进行队形控制^[1], 如基于行为的方法、虚拟结构的方法、领导者-跟随者方法、基于图论的方法等. 各种方法都有各自的优缺点, 常常也可结合使用. 在队形控制中如何有效快速地形成指定的队形是最基本的问题.

机器人队形生成问题是如何使得机器人聚集在一起并保持一定的相对位置关系的问题. 总的来讲有两类方法: 队形自动生成和队形位置分派.

队形自动生成是利用局部交互规则, 按照自下而上的方法让机器人通过交互, 隐式地生成队形. Yamaguchi H 等^[2]利用各机器人之间的相对位置构造

控制向量, 每个机器人利用平滑时变反馈控制法则跟踪它附近的机器人, 并保持指定相对位置, 由此构成一个开环链式的队形; 文献[3]中采用基于领导者-跟随者的方法, 通过协商逐步建立起指定的机器人队形. 队形自动生成方法不能保证生成所需的队形, 并且在队形生成时间上也无法提供保证.

队形位置分派是通过显式定义队形中各个目标位置, 并按一定的约束条件或优化条件将机器人分派到各个目标位置, 从而形成队形. Kowalczyk W^[4]根据各机器人和队形中目标位置的远近, 提出了两种不同的分派策略. 董胜龙等^[5]采用最速排除法得到各机器人的目标点分派. 沈捷等^[6]采用各机器人首先选择离自己最近的目标点; 当目标点有冲突时, 使用距离目标点最远的机器人优先选择该目标点的方法来解

收稿日期: 2008-01-18; 修回日期: 2008-03-17

基金项目: 天津科技大学引进人才科研启动基金资助项目 (20060417)

作者简介: 任德华 (1976—), 男, 四川眉山人, 讲师, 博士.

决分派冲突;并根据各机器人到达目标点的远近,设定各机器人的优先级,实现多个机器人的协调运动. 队形位置分派的方法可以生成任意队形,能对队形生成过程进行优化,并且能直接实现控制者的意图,所以常用在现实应用系统中.

队形自动生成方法一般采用分散式控制体系框架,各机器人仅凭有限的局部信息确定自身的队形位置,这种方法只适用于机器人数量较少、目标队形较简单的情况. 特别是当目标队形较复杂时,各机器的交互协调机制的设计就变得复杂,而且形成队形操作的性能等都不能得到保证. 因此对于复杂队形,统一的协调模块必不可少,解决队形生成问题采用队形位置分派方法就成为首选.

本文采用队形位置分派的方法,并结合层次可扩展队形描述框架 HEFF (Hierarchical Extend Formation description Frame),来研究队形生成问题,提出了基于协商的队形动态生成方法. 该方法可以动态扩展队形以容纳新加入队形的机器人,并保持原队形状不变.

1 HEFF 队形描述框架

层次可扩展队形描述框架 HEFF 主要的结构是图、图上附加的队形框架坐标系、图中各节点之间的角色关系,如图 1 所示.

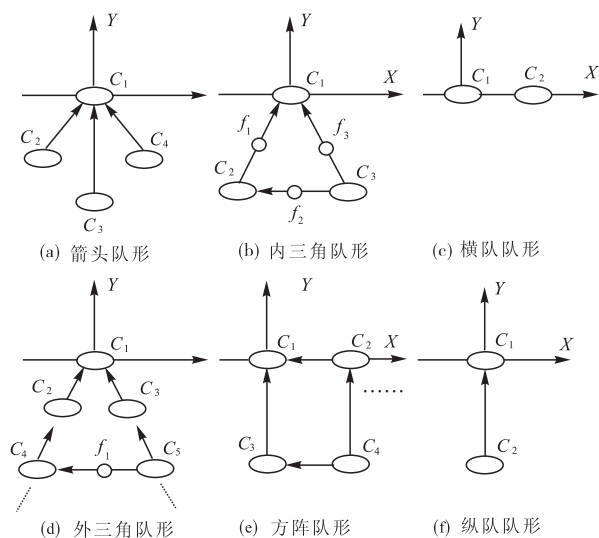


图 1 队形描述框架

Fig. 1 Formation description frame

图 1 中的节点用椭圆、或小圆表示,分为三类:关键节点,即直线段的首末节点,用 C_x 表示;跟随节点,即针对某一直线段上除去首末节点外的节点;非

关键节点,即不作为任一直线的首末节点的节点.

图中连接两个关键节点的有向边称为关键边,关键边的方向总是从编号较大的关键节点(末节点)指向编号较小的节点(首节点). 关键边可以进行扩展,以增加新的节点. 有两种扩展方式:内扩展、外扩展. 内扩展是指在两个关键点中间加入新的节点,外扩展是指在两关键点所在的边的反方向延长线上增加节点,如图 2 所示.

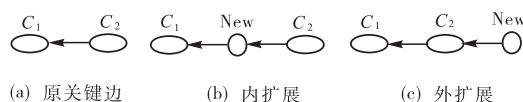


图 2 边的扩展

Fig. 2 Edge's extension

图中的每一个节点均有一个或多个角色,角色分 4 种: Leader, 队形中的领导者; Conductor, 某关键边上的领导者, 即该边上的首节点; Assistant, 某关键边上的辅助管理者, 即该边上的末节点; Follower, 关键边上的跟随节点. 后三种角色是相对于特定关键边而言的, 各个节点由于可能同时处于不同的边中, 因此可能同时有多个角色.

由关键点和关键边组成的图称为关键图.

HEFF 队形描述框架 F 可表示为: $F = \{G, P, ListNode, ListEdge\}$. G 表示是关键图, 可由邻接表表示. P 是队形参数的集合, 包括队形框架坐标 O_{xy} 、基本队形的节点数 N_{basic} 、队形中机器人间距 L_{node} 、当前队形的长度 F_{Length} 及宽度 F_{Width} . $ListNode$ 是图中的所有节点信息列表, 存储该节点的属性信息. 主要属性信息有: 关键点的坐标、节点占用情况、角色情况等. $ListEdge$ 是图中的边信息列表, 并存放边的一些属性信息. 主要属性信息有: 边中非关键点的比例或绝对个数; 在队形框架坐标中非关键点的位置信息、占用情况; 边的两个端点的位置和边的斜率; 扩展信息, 即能否扩展, 是内扩展还是外扩展, 如果是外扩展需要与哪条边同步扩展.

HEFF 框架用直线段为基本单位构建的队形, 给出了对队形的一个统一描述形式. HEFF 中定义的 4 种角色关系确定了机器人之间控制信息流的层次性, 使得队形的表示呈现出层次性. 由于将队形表示为图, 图中节点可容纳机器人, 关键边可以扩展以增加图中的节点, 使得能够动态扩展队形以容纳更多的机器人, 同时可以根据实际需要灵活设计队形. 因此, 基于 HEFF 分布能并行控制队形中各机器人, 统一实现各种形状的队形的控制.

2 队形动态生成方法

基于 HEFF, 提出了基于协商的队形动态生成方法. 队形在生成过程中始终保持原队形形状, 而且能根据加入队形的机器人的增加对队形进行自动扩展. 该方法可以应用于许多场合, 特别是要求保持队形形状, 并增量调整以适应未知的机器人数目的场合, 如军事中的集结. 该方法的基本步骤是:

(1) 离队形目标点最近的机器人自动成为 Leader, 并初始化指定的基本队形的 HEFF;

(2) 当有机器人要求加入队形时, 与队形中的 Leader 协商, Leader 根据机器人位置和队形中未占用节点的位置以及节点角色的优先顺序, 为申请加入的机器人分派一个目标位置;

(3) 已取得分派的目标位置的机器人各自向自己的目标位置运动;

(4) Leader 监控整个过程, 并按需调整 HEFF 中的节点和边 (即进行扩展) 及其状态.

下面就此方法的几个关键问题进行讨论.

2.1 队形的扩展

当机器人已形成基本队形, 而还有机器人加入队形时, 就需要对队形框架进行扩展, 以容纳这些机器人, 并对原队形中的机器人的位置进行调整, 并保证扩展结束后的形状不发生变化.

队形的扩展是以关键边的扩展为基础, 以 HEFF 的坐标原点为基点, 沿着各关键边依次进行的, 扩展的方向是沿关键边箭头的相反方向. 由于机器人在队形框架中有不同的角色: Leader, Conductor, Assistant, Follower, 且分别处于队形框架中不同的节点上, 根据队形扩展时边的扩展顺序, 以及各机器人所在的节点位置, 可以依次确定扩展过程中各机器人的动作, 实现队形的合作扩展.

队形的扩展分为两种, 内扩展和外扩展.

2.1.1 内扩展

内扩展方法用于扩展非关键点位置的数目, 不改变原边上的 Conductor 和 Assistant 内扩展步骤:

(1) 首先扩展以坐标原点处节点为 Conductor 的关键边. 将已扩展的关键边的 Assistant 节点纳入当前已扩展节点集 A . B 为全部已扩展节点集合, 此时 $B=A$;

(2) 对以当前已扩展集合 A 中的节点为 Conductor 的每一条关键边进行扩展, 分两种情况: 如果边的 Assistant 也在 B 中, 则直接计算扩展节点

的位置; 如果边的 Assistant 不在 B 中, 则根据边的内扩展进行扩展, 并将此 Assistant 加入 A 和集合 B 中;

(3) 重复步骤 (2) 直到所有边扩展完毕.

如图 3 所示, 初始时 $A=B=\{C_1\}$. 首先, 以 C_1 为关键点的边, 即扩展 e_1, e_2 边, 根据边的内扩展得到扩展节点 f_1, f_2 , 以及 C_2, C_3 新的位置, 并将 C_2, C_3 加入集合 A, B 中. 加入后 $A=\{C_2, C_3\}$, $B=\{C_1, C_2, C_3\}$. 接着扩展关键点属于 A 的边, 即 e_3, e_4, e_5 . 对于 e_3 , 由于其 Assistant 在 B 中, 所以只需直接计算节点 f_3 的位置, 而对于 e_4, e_5 则按照边的内扩展方法得到新的扩展节点 f_4, f_5 , 以及 C_4, C_5 的新位置. 节点上的机器人得到自己的新位置点后, 向此目标运动. 当所有都到达目标点后, 扩展结束.

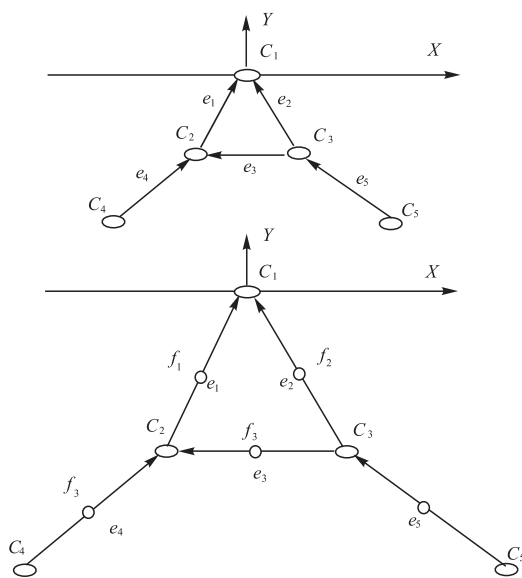


图 3 内三角形队形扩展

Fig. 3 Inner triangle formation extension

2.1.2 外扩展

队形外扩展方法在扩展关键点的同时扩展关键边, 原队形中的角色会发生变化, 同时由于扩展的关键边上可容纳非关键点, 也扩展了非关键点.

外扩展通常是两条外扩展边同步扩展, 如图 4 所示. 首先按广度优先搜索方法查找可扩展的关键边及其同步边; 然后根据同步外扩展边的 Assistant 角色位置分别计算扩展的关键点的位置, 并且按照逆时针方向递增编号, 记为 C_{new1}, C_{new2} , 纳入关键点集合中. 接着增加关键边 e_{new} , 以 C_{new1} 为 Conductor, 以 C_{new2} 为 Assistant. 最后由 Leader 计算在 e_{new} 中可加入多少非关键位置点.

内扩展用于扩展非关键点位置, 扩展时原队形框架中的关键点以及关键边的数目不发生变化. 主要用

于开环形式的队形,如箭头形、楔形形状的队形等,以及四周形的队形,如内三角、四边形、菱形形状的队形.外扩展用于扩展关键点和关键边,主要可用于扩展类似于外三角形、方阵等“实心”形状的队形.

内扩展和外扩展可以相互结合使用,提高队形扩展的灵活性.如图1中方阵队形,与 X 轴平行的两条关键边属于外扩展类型,且同步扩展;与 Y 平行的关键边属于内扩展类型;因此可以通过外扩展在 X 轴方向增加关键点和关键边,通过内扩展增加与 Y 轴平行的关键边上的非关键点位置.内扩展和外扩展交错进行,使得原方阵队形按需要能在 X, Y 方向分别扩展队形,提高了灵活性.

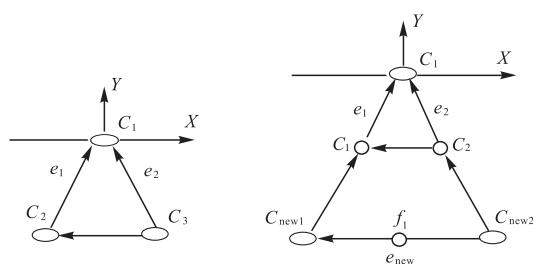


图4 外三角形队形扩展

Fig. 4 Outer triangle formation extension

2.2 队形协商生成的实现

Leader 中维护着一张当前队形节点及其对应的角色和占用情况表.每一节点的占用情况有三种状态:未占用未分配、未占用已分配、已占用.初始时各节点设置为未占用状态.一个节点可对应多个角色,在同一节点同种角色只有一个.每个角色都有自己的直接负责人:Conductor 角色直接向 Leader 负责;某一关键边的 Assistant 角色向该边的 Conductor 角色负责,同时能接收 Leader 发送的命令信息.Follower 角色向所在边的 Conductor 负责.同时 Leader 根据当前队形位置及队形框架方向将通过坐标变换将队形位置的局部坐标变为全局坐标. Leader 按照先分配 Conductor 角色节点,接着分配 Assistant 角色节点,最后分派 Follower 角色位置的优先顺序分派节点给新申请加入的机器人.例如 Conductor 角色节点是指节点的最高的角色为 Conductor.机器人申请者加入队形是通过申请者和 Leader 之间的通信实现的.

机器人协商加入队形的过程如下:

(1) 机器人向 Leader 发出加入请求信息.当队形外的机器人发出携带自己的全局位置信息和自身能力信息(如最大速度等)的“Is there a leader”的消息时,就表明它是申请加入队形者.

(2) Leader 收到申请者发出的请求消息后,将

自己的信息发送给申请者,并启动认证过程确认申请者身份.如果申请者不是合法身份,则 Leader 发送消息拒绝其加入队形,结束此次协商过程;如果是合法身份则同意其加入队形,Leader 根据优先分配顺序,并根据一定的优化分配原则(如距离最近)分配一个节点,并将分派的节点位置信息以及加入时间要求 T_{join} 一并传送给申请加入者,同时将此位置设置为未占用已分配状态.

节点位置信息包括:节点的全局坐标、角色信息以及每种角色对应的负责人.发送节点位置信息的同时对此节点启动定时机制,如果在指定时间 T_{join} 内未收到申请者就位信息则取消此次分配,并将此节点设置为未占用未分配状态. T_{join} 的确定是根据申请者与分配位置点的距离以及申请者的能力,经保守计算得到的.

特殊情况处理:如果在发送节点位置信息时,对应的负责人的位置状态为未占用已分配,而不是已占用,则以 Leader 作为负责人,且 Leader 对此分配机器人作“未分派直接负责人”标记,并记录其直接负责人的节点位置,一旦其直接负责人到达,而此机器人还未到达指定位置,则向该机器人发出“负责人更新消息”,该机器人收到消息后,更改负责人并向 Leader 回复“负责人更新确认消息”,Leader 收到后,清除其“未分派直接负责人”标记.

(3) 当申请者被允许加入且收到位置点信息后,向目标点运动,如果在指定时间 T_{join} 内未能到达位置点,但仍想加入队形,则需重新开始申请,转(1).如果在 T_{join} 内到达位置点,则向其角色的负责人报告自己到位.需要注意的是,由于一个位置点(除 Leader 外)有可能有两种或三种角色(Conductor、Assistant、Follower),因此申请者需要向每一角色的负责人报告有关信息,并从负责人处获得相关信息.

(4) 机器人的每一角色的负责人收到机器人到位信息后,进行后续处理.

Leader 收到机器人到位信息,首先判断此机器人是否“未分派直接负责人”,如果是,则在以后收到其直接负责人到达的消息后,负责将机器人所在边的节点占用信息传送给其直接负责人,直接负责人收到该信息后,向所在关键边上的所有成员发出状态更新信息(本关键边的斜率、各非关键点在关键边上位置,Assistant 是谁等).如果该机器人所分配的节点的角色中有 Conductor 角色,Leader 收到机器人到位信息后,将原分配节点使用状态设置为已占用状

态. 并将 Conductor 角色所对应的关键边的斜率等信息传送给此机器人.

如果机器人所分配的节点的角色中有 Assistant 角色或 Follower 角色, 则向角色所对应边的 Conductor 报告, Conductor 收到其到位信息后, 向所在关键边上的所有成员发出状态更新信息 (本关键边的斜率、各非关键点在关键边上位置, Assistant 是谁等). 同时所在边的 Conductor 将申请者到位信息向 Leader 报告, Leader 接收到后, 将原分配节点使用状态设置为已占用状态.

以上过程就完成了了一次申请加入的协商过程.

此外在协商过程中当申请者已通过身份确认, 但 Leader 发现已经没有未占用未分配状态的节点时, Leader 向申请者发出 “wait” 消息, 并等待所有的已分配节点的机器人到位后或者定时结束后, 命令队形执行扩展行为. 在执行扩展行为的过程中, 所有要求加入队形的机器人均停止运动, 处于等待分派状态. 当队形扩展完成后, 对当前所有要求加入队形的机器人进行分派指定节点, 并执行上述协商加入队形的过程.

2.3 队形切换

队形的切换操作是队形的变换操作, 即从一个队形变换到另一个队形. 队形的切换可以看作是多个机器人同时协商加入新队形的过程.

由于原队形中的 Leader 根据队形结构信息及当前队形的框架坐标信息, 可以方便地计算出原队形中机器人数目以及各机器人在全局坐标中的位置. 根据原队形中的数目以及新队形结构框架, 原队形中的 Leader 自动成为新队形的 Leader, 并实例化新的队形, 计算出新队形中各节点的全局坐标. 整个切换过程可以看作是以旧 Leader 领导的队形协商加入一个新 Leader 领导的新队形: 旧 Leader 根据队形结构信息及当前队形位置和方向计算出原队形中机器人的数目以及各机器人在全局坐标中的实际位置, 再向新 Leader 提出加入请求, 并将这些信息一并提交给新 Leader, 新 Leader 根据需加入的机器人的数目扩展队形, 并计算出各个未占用未分配节点位置的全局坐标, 接着分配机器人到目标位置. 一旦各机器人得到自己分派的节点, 则向节点所在的位置运动, 后面的过程同队形的协商加入过程. 当机器人均到达各自指定的节点位置后, 队形切换结束.

2.4 优化分派问题

在进行队形扩展操作时, Leader 记录已通过身份确认的申请者, 并向其发出 “wait” 消息. 当扩展结

束后, Leader 重新计算处于未占用未分配状态的位置点的全局坐标, 需要对处于等待状态的多个机器人进行分派. 在队形切换过程中, 由于是旧队形中的所有机器人同时加入到新的队形中, 也存在对多个机器人进行分派的问题.

通过求解优化分派问题就可得到各个申请者分配的目标位置点, 从而优化的实现队形生成和队形切换操作.

分派问题的优化目标就是使得所有机器人最快时间生成队形, 同时机器人之间的相互干扰最少. 为达到此优化目标, 提出了最大优先指派算法 MSFA (Max Sum First Assignment) 算法, 基本思想是对每一个机器人, 求出机器人到所有目标点所需时间的总和. 在所有时间总和值中选出其中的最大值, 在最大值对应行或列的各个元素中选一个最小元素, 从而确定一个机器人到一个目标点的分派, 循环反复, 直到所有的机器人或目标点都得到指派值.

根据实际情况, 在分派时可能出现机器人与目标点数目不一致的情况, 对 MFSA 算法进行了改进, 进一步扩展到用于 N 人 M 事中求取 K 人 K 事问题的优化求解中^[7]. 实验证明, MSFA 算法是行之有效的.

3 仿真研究

在美国南加州大学组织开发的开放源代码多机器人仿真研究平台 Player/stage^[8]上, 采用 6 个机器人, 对基于协商的动态队形生成方法进行了验证, 实验表明该方法能在保证队形形状不变的情况下, 快速有效地生成指定队形.

3.1 队形协商生成

图 5 为机器人队形生成过程. 首先, 各机器人向队形的目标位置点运动如图 5 (a) 所示; 离队形目标点最近的机器人成为 Leader 如图 5 (b) 所示; Leader 初始化要形成的队形, 获得队形中的状态为未分配的节点, 并分派给要加入队形的机器人, 形成队形如图 5 (c) 图所示; Leader 检测到仍有机器人加入队形, 而队形中已没有未分配的节点, 则控制队形进行扩展, 扩展后的队形如图 5 (d) 图所示; 扩展后的未分配节点如图 5 (e) 图所示; Leader 接着将各未分配的节点按 MFSA 方法分派给新加入的机器人, 各机器人向自己的目标点运动, 如图 5 (e) 所示. 最终各机器人到达目标点, 形成最后扩展的队形如图 5 (f) 所示.

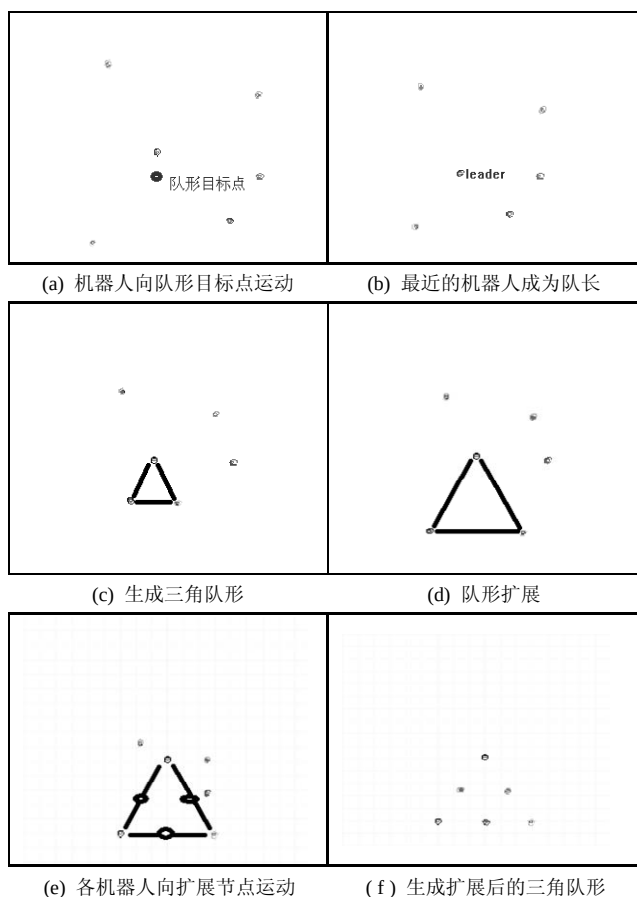


图5 内三角形队形生成与扩展

Fig. 5 Inner triangle formation building and extension

3.2 队形切换

图6展示了机器人队形从内三角形切换成纵队的过程。

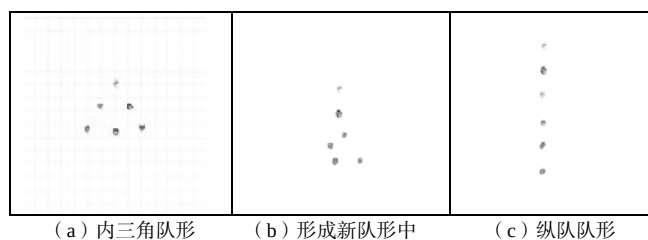


图6 内三角形队形向纵队队形切换

Fig. 6 Formation transition from inner triangle shape to column shape

切换时, Leader 首先初始化新队形, 并根据当前队形中的机器人数量确定新的队形是否需要扩展, 以及扩展命令的参数。在图6中因为纵队形最小节点数为2, 所以需要对纵队形进行扩展, 扩展参数为4

(只有1条边, 需扩展4个节点)。Leader 对队形进行扩展后, 得到能容纳所有机器人的队形节点, 并按MSFA算法将各机器人分派到各节点。

4 结 语

本文在采用HEFF框架表示队形的基础上提出了基于协商的队形动态生成方法, 提出了基于协商的队形动态生成方法, 可以动态扩展队形以容纳新加入队形的机器人, 并保持原队形形状不变, 并采用MSFA算法优化机器人到目标点的分派, 提高了队形生成的效率。

参 考 文 献:

- [1] 任德华, 卢桂章. 对队形控制的思考[J]. 控制与决策, 2005, 20(6): 601—606.
- [2] Yamaguchi H, Burdick J W. Asymptotic stabilization of multiple nonholonomic mobile robots forming group formations [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York, NY, USA: IEEE, 1998: 3573—3580.
- [3] Naffin D J, Sukhatme G S. Negotiated formations [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 181—191.
- [4] Kowalczyk W. Target assignment strategy for scattered robots building formation [C]// Proceedings of the Third International Workshop on Robot Motion and Control. Romoco '02. Poznan, Poland: Poznan Univ Technol, 2002: 181—185.
- [5] 董胜龙, 陈卫东, 席裕庚. 移动机器人的时间最优编队[J]. 控制与决策, 2001, 16(5): 573—576.
- [6] 沈捷, 费树岷, 刘怀. 多移动机器人组成任意队形的控制研究[J]. 机器人, 2004, 26(4): 295—300.
- [7] 任德华, 卢桂章. 最短时限最少耗费指派问题的一种解法[J]. 自动化与仪表, 2005, 20(3): 1—4.
- [8] Gerkey B P, Vaughan R T, Stoy K, et al. Most valuable player: A robot device server for distributed control [C]// Proceedings of RSJ/IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 1226—1231.