

# 一种保持 Agent 团队队形的路径规划方法

郑延斌, 李新源, 段德全

(河南师范大学 计算机与信息技术学院, 河南 新乡 453002)

**摘 要:** Agent 团队能够在动态环境中完成复杂的任务, 路径规划问题是 Agent 团队研究的主要问题之一。对 Agent 团队的路径规划问题进行了分析, 提出了一种保持 Agent 团队队形的规划算法(ATPP)。该算法是一种集中式的全局规划方法, 使用改进的 A\* 算法得到 Leader 的路径, 通过对 Leader 路径的优化得到关键点表和队形转换表, 利用关键点表和队形转换表得到团队中非 Leader 成员的路径。队形转换表可以使行进中的队形变换更合理, 并且减少了队形维护时需要的通信量。通过调整算法中的两个影响因子, 可以分别得到侧重于队形和侧重于距离的路径, 改进了 Hao 的方法。

**关键词:** Agent 团队; 路径规划; 队形; A\* 算法; 队形转换

**中图分类号:** TP18

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2009)07-0159-04

## A Path Planning Algorithm with Agent Team Formation Maintained

ZHENG Yan-bin, LI Xin-yuan, DUAN De-quan

(College of Computer and Information, Henan Normal University, Xinxiang 453002, China)

**Abstract:** Agent team can do complex works in dynamic environments, path planning is one of key problems in agent team researching. Through analyzing of agent team path planning problem, proposed a path planning algorithm ATPP with agent team formation maintained. It is a centralized global planning method. Using mended A\* algorithm can get path for team leader, and through optimizing, the table of key points and the table of formation changing were achieved, so path for all non-leader members could be found. Formation changing table made the formation change more reasonable, and decreased the required communication numbers in formation maintaining. Through adjusting the two parameters in the algorithm, can get different paths emphasized on formation and emphasized on distance. Mend the method of Hao's.

**Key words:** agent team; path planning; formation; A\* algorithm; formation changes

## 0 引言

与单 Agent 相比, Agent 团队具有功能强、效率高、鲁棒性等优点。但是由于团队中 Agent 任务之间的关联性和资源的有限性, Agent 团队与单 Agent 相比要复杂得多。Agent 团队主要研究的问题有: 团队的组织形式, 团队规划(任务规划, 路径规划)、Agent 之间的协调与协作等, 其中路径规划问题是 Agent 团队研究的主要问题之一, 有着广泛的应用<sup>[1-6]</sup>。

Agent 团队在执行任务的过程中, 根据任务的要求, 成员之间要保持一定的几何形状, 即队形, 并在运动的过程中保持这种队形不变。团队成员所形成的队形具有如下优点<sup>[7]</sup>:

(1) 充分获取工作环境中的信息, 有利于执行侦察、搜索、排雷、安全巡逻等任务;

(2) 增强团队的工作能力、抵抗外来侵扰的能力, 如生物群体形成的队形可以有效地防御捕食者, 军事上的团队队形能够有效地发现敌情, 从而减少伤亡;

(3) 提高团队的工作效率, 简化任务的执行, 如多个动物按照一定的队形围猎, 能够快速地俘获猎物, 多个机器人按照一定的队形搬运货物, 可以把货物快速地搬运到目的地;

(4) 增加系统的鲁棒性。

保持 Agent 团队队形路径规划的目标是为团队中每个 Agent 指定一条从起始地点到目标地点的路径, 满足:

- a. 与环境中的静态障碍物不碰撞;
- b. 相互之间不发生碰撞;
- c. 成员位置满足队形要求;
- d. 每个成员按照给定的路径可以达到目的地。

目前研究者提出的保持 Agent 团队队形路径规划

收稿日期: 2008-10-10; 修回日期: 2009-02-16

基金项目: 河南省自然科学基金(0611056300, 072300410200); 河南省科技攻关资助项目(082102210108)

作者简介: 郑延斌(1964-), 男, 河南内乡人, 博士, 副教授, 研究方向为虚拟现实、人工智能。

方法可以分为两类:

1) 基于单 Agent 的规划方法。把多 Agent 规划问题转换为单 Agent 规划,通过某种协调机制来修改各 Agent 的路径、速度、方向等,该类方法由于规划的顺序对 Agent 的路径影响非常大,因此不同的顺序可能得到不同的规划结果,不能得到最优解,同时简单地把其它 Agent 看作动态障碍物可能导致 Agent 的行为不一致。

2) 基于队形的规划方法。如基于 Leader-Follower 方法、基于行为的方法、基于虚拟结构的方法等。该类方法在复杂的环境中队形的维持效率和路径最优都不能保证,并且不能事先对可能的队形变化进行预测,导致过多的等待和通讯。

为了解决这些问题, Kamphuis 等<sup>[1]</sup>首先建立了一条道路走廊,把多 Agent 运动限制在该走廊中,虽然能够保证 Agent 的运动一致性,但是没有考虑队形问题。Tabuada 等<sup>[8]</sup>提出了一种规划方法,能够很好地维持队形,但是没有考虑静态障碍物、Agent 的目标等问题。Hao 等<sup>[2]</sup>把整个团队看作一个特殊的 Agent,宽度为队形的宽度。该算法在规划中要队形宽度不变,因此最终得到的很可能是队形的宽度为  $L$  (单个 Agent 的宽度)的路径。

笔者提出一种保持 Agent 团队队形的路径规划算法 ATPP (Agent Team Path Planning), ATPP 是一种全局规划算法,首先使用改进的 A\* 算法得到团队中 Leader 成员的路径,通过两个影响因子来控制评价函数中的距离因素和队形因素;其次,根据环境特性生成队形转换表,可以使队形转换更合理,队形维持效果更好。

## 1 ATPP 算法

根据不同的任务要求、成员的地位等,在团队中选择一个成员作为 Leader, Leader 成员一经选定,在运行的过程中不会发生变换。ATPP 算法通过下面两步来实现:

第一步: Leader 成员的路径规划。使用改进的 A\* 算法为团队中的 Leader 成员规划出一条从起始点到目标点的最优路径。

第二步: 非 Leader 成员的路径规划。根据第一步得到的 Leader 的路径,为团队中每个非 Leader 成员生成一条满足要求的路径。

### 1.1 改进的 A\* 算法

A\* 算法是一种有序搜索算法,其特点在于对评价函数的定义上。Leader 作为团队中的一个成员,其路径的选择不能只考虑自身的因素,还要考虑团队的

队形。因此需要对 A\* 算法的评价函数进行修改,加入队形因素。具体定义如下:

$$f'(n) = k_1 \times (g(n) + h(n)) + k_2 \times f_p(n, H, m)$$

该评价函数包括两部分:第一部分为距离评价函数,第二部分为队形评价函数。其中:可  $k_1 > 0, k_2 \geq 0$  且  $k_1 + k_2 = 1$ , 称  $k_1$  为距离影响因子,  $k_2$  为队形影响因子,当  $k_2 = 0$  时,  $k_1 = 1$ , 即评价函数只考虑距离,就变成标准的 A\* 算法的评价函数。 $g(n)$  和  $h(n)$  的含义与标准的 A\* 算法的定义相同,  $f_p$  是队形效果评价函数,定义如下:

$$f_p(n, H, m) = 1 / \sum_{i=1}^m a_i$$

其中:  $n$  为当前栅格点,  $H$  为要维持的队形函数,  $m$  为团队中自治实体的个数。  $a = (a_1, a_2, \dots, a_m)$  表示当 Leader 位置为  $n$  时的队形向量,如果成员  $i$  的期望位置(符合队形要求的位置)上无障碍物,则  $a_i = 1$ , 否则  $a_i = 0$ 。选择某个节点后,除保存该节点的位置坐标外,还需要保存该节点的队形向量。

### 1.2 Leader 路径的优化

设使用改进的 A\* 算法求得的 Leader 路径为:  $(x_i, y_i, a^i), i = 1, 2, \dots, p$ , 其中  $(x_1, y_1, a^1)$  为起始点,  $(x_p, y_p, a^p)$  为目标点。  $x_i, y_i$  为位置坐标,  $a^i$  为队形向量。由于改进的 A\* 算法输出的是离散栅格节点,不能作为路径使用,故需要对这些离散的节点做连续化的处理,即路径的优化,下面的算法可以实现 Leader 路径的优化。

Leader 路径优化算法:

1. 把开始节点作为关键点,  $i = 1$ 。
2. 从第  $i + 1$  个节点开始,往后找出第一个满足  $a^k = a^i$  点节点,第  $k$  个节点作为关键点,插入到关键点表中。若  $\|a^k > a^i\|$ , 则  $(x_{k-d}, y_{k-d}, a^{k-d})$  为队形开始变换位置,  $(x_k, y_k, a^k)$  为结束变换位置;若  $\|a^k < a^i\|$ , 则:  $(x_k, y_k, a^k)$  为队形开始变换位置,  $(x_{k+d}, y_{k+d}, a^{k+d})$  为结束变换位置,将队形变换开始位置和结束位置插入到队形变换表中。
3. 在节点  $i$  和节点  $k$  之间做一条直线。
4. 用 LOS 算法检查该直线上是否有障碍。
5. 如果没有障碍物,并且直线上所有栅格点上队形向量相同,则把该节点作为新的关键点, GOTO 7。
6.  $k = [(k + i) / 2]$ , GOTO 3。
7. 如果  $k = p$ , GOTO 9。
8.  $i = k$ , GOTO 2。
9. end。

### 1.3 队形变换

由于环境的复杂性,行进过程中的队形变换是不

可避免的,关键的问题是如何根据地形和队形得到合理的队形变换结果,该问题是队形维持中必须解决的复杂问题之一,费时且对队形维持的效果影响较大,故大部分研究者都对该问题进行了简化<sup>[2]</sup>。ATPP 算法通过队形转换表合理地解决了队形转换的问题。

在为 Leader 路径优化过程中得到了两个表:关键点表和变换表。关键点表是经优化后的连续路径节点集合,变换表中记录了队形变化的位置。由于变换表中记录了队形变换开始位置和队形变换结束位置的队形向量,因此可以使用某种转换机制或者方法把一种队形转换为另外一种队形。当相应位置上的队形向量替换为队形函数后,变换表就变成队形转换表,队形转换表的结构如表 1 所示。

表 1 队形转换表

$X_0, y_0,$	$x_1, y_1,$	$x_2, y_2,$	...	$x_{s-1}, y_{s-1},$	$x_n, y_n,$
$H_0$	$H_0$	$H_1$		$H_g$	$H_g$

其中: $(x_i, y_i)$  表示位置坐标,  $H_i$  为队形函数,  $i = 0, 1, \dots, n$ ,  $(x_0, y_0)$  是 Leader 的起始位置,  $(x_n, y_n)$  是 Leader 的目标位置,  $H_0$  为初始队形,  $H_g$  为目标队形。队形变化表的含义是从  $(x_0, y_0)$  到  $(x_1, y_1)$  队形一直是  $H_0$ , 队形从  $(x_1, y_1)$  开始变化, 到  $(x_2, y_2)$  后变化结束, 队形变为  $H_1, \dots$ 。

使用改进的 A\* 算法在为 Leader 规划路径的过程中得到相应的队形向量, 队形向量是在当前地形下对当前队形的评价向量, 根据相邻节点的队形相邻可以得到一个符合当前地形要求的队形转换方法, 具体的转换方法将在以后的论文中给出。

1.4 非 Leader 成员的路径

根据前面得到的 Leader 路径、队形转换表就可以生成团队中非 Leader 成员的路径。当然要得到非 Leader 成员的路径首先要计算队形变换时这些成员的路径, 根据队形转换表, 利用文献[9]中给出的各个成员在队形转换中的位置变换方法就可以得到每个成员的转换路径。

非 Leader 成员的路径算法:

1.  $k = 1$ ;
2. IF  $k = n$  THEN end;
3. 根据 Leader 的位置  $(x_k, y_k)$ 、队形函数  $H_k$  计算每个成员的位置  $(x_i, y_i)$ ;
4. 把  $(x_i, y_i)$  插入到该成员的路径列表中;
5. 如果  $(x_k, y_k)$  在转换表中, 则把该成员的转换路径插入到该成员的路径列表中;
6.  $k = k + 1$ ; GOTO 2.

2 算法分析与试验

ATPP 算法把团队中的 Leader 成员看作一个普通的团队成员, 利用改进的 A\* 算法为团队中的 Leader 成员规划一条无障碍的路径, 利用距离影响因子  $k_1$  和队形影响因子  $k_2$  来控制最终的规划结果,  $k_1$  和  $k_2$  的选择与具体的任务有关。Hao<sup>[2]</sup>的方法是将 Leader 作为一个特殊的成员(成员的宽度为团队队形的宽度)。影响因子的引入使得用户可以根据任务和地形的需要来调整规划的结果, 图 1 给出了 5 个 Agent 组成的团队在经过复杂障碍物时, 不同的影响因子对规划结果的影响。当  $k_2 = 0$  时, 得到距离最短的路径, 队形不能保持。当  $k_2 > 0$  时, 队形就能够在一定程度上得到保持。

如何根据实际地形得到最优的变换结果是一个非常复杂的问题。Hao<sup>[2]</sup>对该问题进行简化, 采用固定的变换格式。ATPP 算法通过队形转换表来控制队形的变换, 而队形变换表是依据描述当前地形情况的队形向量得到的, 因此与 Hao 的方法相比, 可以通过设计合理的变换方法和规则<sup>[9]</sup>, 使得队形变换的结果更合理。图 2 给出了不同环境下应用两种方法的得到队形转换结果, 结果表明 ATPP 算法在队形变换的处理上优于 Hao 的方法。

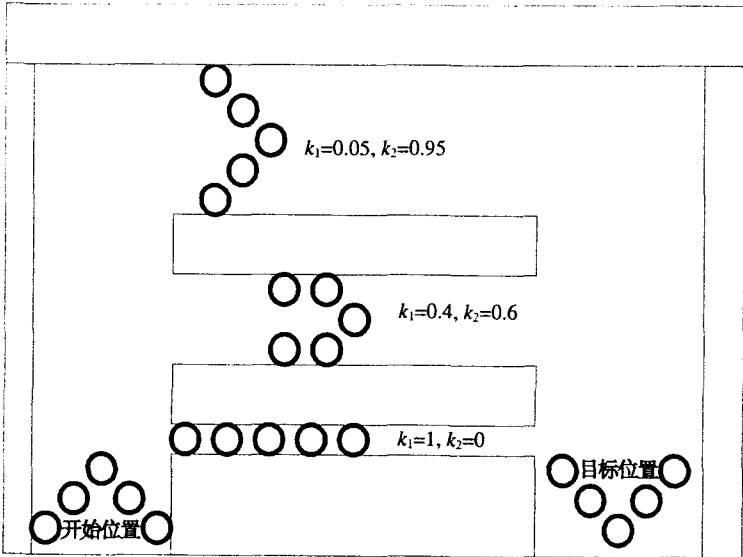


图 1 影响因子对规划结果的影响

从队形维持的角度, TAPP 算法属于 Leader - Follower 方法, 与 Hogg<sup>[6]</sup>的方法相比, TAPP 算法具有:

- ①减少队形维护过程中需要的通信量, 因为当生成 Leader 路径后, 同时得到队形转换表, Leader 只需要将队形转换表发送给团队中非 Leader 成员, 非 Leader 成员根据队形转换表就能够计算自己的路径, 只需要一次通信即可。Hogg 的方法要求 Leader 在队形转换开始和结束时把自己的位置告诉团队中每个非

Leader 成员,需要的通信次数为:  $\text{Number}(\text{队形转换表中元素的个数})$ ;

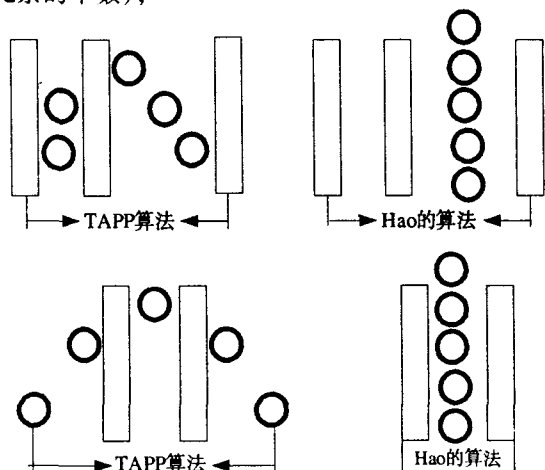


图 2 两种方法的结果比较

②队形转换表使团队中的非 Leader 成员清楚队形转换的结果,从而确保团队成员的行为一致,而 Hao<sup>[2]</sup>的方法中每个成员都根据自己的局部信息来调整自己的位置,不知道队形的转换结果,容易导致成员的行为不一致,导致转换过程的混乱和相互等待。

图 3 给出的是三个 Agent 构成的团队在经过障碍物时的运动轨迹。编号 3 的成员为团队中的 Leader 成员,团队成员在经过复杂障碍物时,队形由三角形队形变换为列队形,行进的过程中当环境满足三角形队形的要求时,又变为三角形队形。

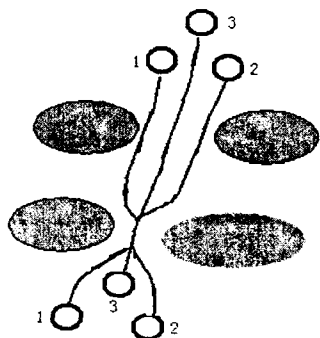


图 3 Agent 团队在经过障碍物时的运动轨迹

### 3 结束语

给出了一个保持 Agent 团队队形的路径规划算法

ATPP。ATPP 算法是一种集中式的全局规划方法,通过两步得到团队中所有自治实体的路径规划,分析与试验结果表明该算法是合理和有效的。用户可以根据任务的要求及自身需要,通过调整影响因子  $k_1, k_2$  的值,分别得到侧重距离和侧重队形的路径规划。队形转换表是根据环境特性得到的,用它来指导团队行进中的队形变换更合理,ATPP 算法改进了 Hao 的方法。与 Hogg<sup>[6]</sup>方法相比,ATPP 方法减少了队形维持过程中需要的通信量,并且能够确保团队中每个非 Leader 成员在队形变换的过程中知道队形变换的结果,确保其行为一致,避免队形转换过程中的等待和混乱。

#### 参考文献:

- [1] Kamphuis A, Overmars M H. Finding paths for Coherent Groups using Clearance[C]//Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, Copyright ACM SIGGRAPH / Eurographics. [s. l.]:[s. n.], 2004.
- [2] Hao Yongxing, Agrawal S K. Planning and control of UGV formations in a dynamic environment: A practical framework with experiments[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 51: 101-110.
- [3] 范莉丽,王奇志. 改进的生物激励神经网络的机器人路径规划[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(4): 19-21.
- [4] 易荣贵,罗大庸. 基于遗传算法的物流配送路径优化问题研究[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(6): 13-15.
- [5] 郑延斌. 团队 CGA 行进中的动态避障方法[J]. 计算机工程, 2005, 31(19): 23-25.
- [6] Hogg R W, Rankin A L, Romelitis S I, et al. Algorithms and sensors for small robot path following[C]//Proc 2002 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Washington D C: [s. n.], 2002: 3850-3857.
- [7] 谭民,王硕,曹志强. 多机器人系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [8] Tabuada P, Pappas G J, Lima P. Motion Feasibility of Multi-Agent Formations[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(3): 387-391.
- [9] 王凤林. 坦克兵营连战胜教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.

(上接第 158 页)

- [6] 陈三堰,沈阳. 网络攻防技术与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 362-367.
- [7] 汤丹,匡晓红,蒋光和,等. 运营商抵御 DDOS 的安全解决方案[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27: 4028-4032.
- [8] 忽海娜,冯浩,王中立. DDOS 攻击下高带宽聚类的控制[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(4): 155-157.
- [9] 尚占锋;章登义. DDOS 防御机制研究[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(1): 116-118.