第16卷 第5期 控 制 与 决 策 2001年9月
Vol 16 No. 5 CONTROL AND DECISION Sept. 2001

文章编号: 1001-0920(2001)05-0573-04

移动机器人的时间最优编队

董胜龙, 陈卫东, 席裕庚
(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

摘 要: 针对移动机器人的最速编队问题, 结合路径规划和任务分解, 提出一种分派问题的新解法和时间最优的编队策略。该策略充分考虑了障碍物环境约束和各机器人运动时的相互影响, 通过将系统整体路径规划的复杂问题分解为独立路径规划问题和冲突协调问题来分别求解, 降低了计算的复杂性, 并能实现最快编队。

关键词: 多移动机器人; 编队控制; 路径规划; 时间最优
中图分类号: TP 24 **文献标识码**: A

Time-optimal Formation for Mobile Robots

DONG Sheng-long, CHEN Wei-dong, XI Yu-geng
(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The rapid formation problem of the mobile robots is studied. A kind of time optimal formation strategy is proposed, which is based on path planning and task decomposition as well as an effective algorithm for assignment problem. The strategy decomposes the entire systematic path-planning mission into two problems: Path planning of individual robot and conflict coordination among the multiple robots. This strategy decreases the compute complexity and makes the formation rapidly. Simulation results show the effectiveness of the strategy. The proposed strategy is applicable to other general multi-robots cooperative missions.

Key words: multiple robots; formation control; path planning; time-optimal

1 引 言

近年来, 多移动机器人系统的协调问题已成为新兴的研究热点之一。而编队控制是具有典型性和通用性的多机器人协调问题, 是许多多机协调问题的基础。通过研究开发及实用化, 编队技术在工农业生产、柔性制造、无人探险(海洋、太空、核环境), 特别是在国防工业中的巨大应用前景已逐渐显现出来, 使得美、欧、日等发达国家对多移动机器人编队控制问题投入了相当大的研究热情[1~3]。

对于编队问题, 文献[2]提出基于局部信息的分布式算法, 并证明了该算法的收敛性和鲁棒性。但是这种算法完全依赖于给定的编队形状, 对于不同的协作任务(甚至不同的编队形状)则完全失效, 不具有一般意义。反应式控制(反应式学习、反应式行为)是研究机器人智能的一种常用方法。该方法已

收稿日期: 2000-05-19; **修回日期**: 2000-10-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(69889501); 国家863计划项目(863-512-9935-02); 中国科学院机器人学开放研究实验室基金项目(RL 199909)
作者简介: 董胜龙(1975—), 男, 陕西礼泉人, 博士生, 从事智能机器、多机器人协作系统研究; 席裕庚(1946—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事预测控制、智能机器人和复杂对象控制系统等研究。

成功地应用于机器人足球、仿生进化等问题,但这种方法只能表现出完成某种任务的能力,而没有象人们希望的那样体现出性能指标的最优(如时间最短、能量最省)。基于行为的控制方法思路清晰、简单易行,在编队问题中非常有效[3],但同样存在不能保证性能指标最优的问题,只能处理一些简单的协作任务(如编队、搜索等),对于更一般的问题,很难清晰地分解成几个平行的子行为,从而影响了该方法在多机器人协作任务中的进一步推广。

本文针对以上不足,重点研究了多个机器人初始位置任意给定时如何以最快的速度在预定的目标点形成编队的问题。在系统设计过程中,避开多起点多终点路径同时规划的高度复杂性,对每个机器人的路径分别规划,运用均衡原则处理路径之间的冲突,提出一种新的分派问题解法,以保证完成编队任务的时间性能最优。本文提出的策略思想,经过很小改动便可方便地用于其它协作任务,具有更一般的意义。

2 问题描述与系统结构

在现实生活中,往往需要多个协作单元从散乱无序的状态开始,快速集结到某个需要协作的位置,以便完成某些复杂的协作任务。本文要解决的问题可描述为:

1) 环境中存在多个位置和形状已知的障碍物,多机器人初始位置随机分布;

2) 编队的形状和目标点位置任意给定,但在一次任务的执行过程中是不变的;

3) 各台机器人在平面内可以自由运动,机器人运动的最大速度为V_0,制动(速度从V_0到0)和起动(速度从0到V_0)的最短时间分别为t_1和t_2,且速度线性变化;

4) 目标为保证系统总体代价最小。

图1给出了控制系统的结构图。任务解释器对编队任务和环境信息进行解释,并计算出需要规划的路径数目及其起点和终点;路径规划器结合障碍物约束,对每一条可能路径进行规划,并经过代价评估得到机器人沿该路径运动所需的代价(时间);编队任务协调器根据总体代价最小的原则,对所有的可行路径进行选择,并解决路径之间的冲突,进而为每个机器人分配一条最优路径;每台机器人的局部传感器探知周围环境的局部信息,这些信息经过局部信息过滤器后到达机器人的运动控制模块,并结合最优路径得到每一时刻的控制变量;控制器在控制变量的作用下实现机器人的运动。

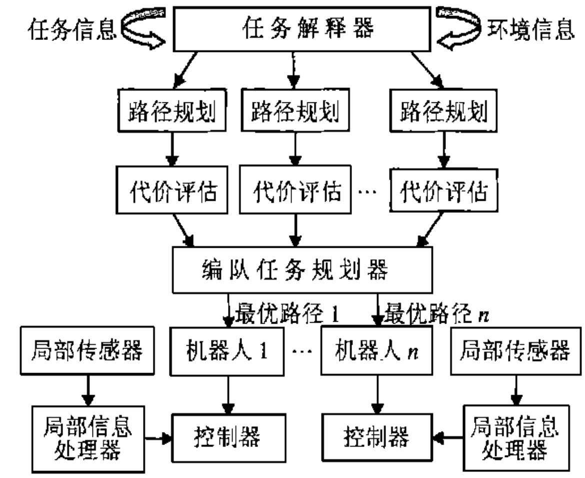

图1 系统结构

3 任务解释器和路径规划

3.1 任务解释器

任务解释器具有如下功能:

1) 根据环境信息的描述,确定运动环境的大小、障碍物的位置和形状,作为路径规划的模型信息。假设机器人运动环境为$L\times L$的二维空间,环境中共有M个障碍物$O_1, O_2, \cdots, O_M$。

2) 根据机器人初始位置、编队形状和目标点位置确定n^2条路径的起点和终点。假设参与编队任务的机器人分别为$R^1, R^2, \cdots, R^n$,它们的初始位置分别为$P_0^1, P_0^2, \cdots, P_0^n$,$n$个中止位置分别为$P_G^1, P_G^2, \cdots, P_G^n$,这些中止位置对每台机器人而言都是可能选取的。由$n$个起点和$n$个终点,可得到$n\times n$的路径矩阵$(L_{ij})_{n\times n}$,其中矩阵元素$L_{ij}$表示从$P_0^i$到$P_G^j$的一条路径。

3.2 路径规划与代价评估

本文利用势场模型进行路径规划。假设目标的势为P_G,M个障碍物的势分别为P_{O_i},$i=1,2,\cdots,M$,则机器人在移动过程中所受的势为

$$P = P_G + \sum_{i=1}^{M} P_{O_i} \tag{1}$$

机器人从起点出发,受到综合势场的作用而运动,最终停在目标点,形成一条最短路径。

在$n\times n$条安全路径规划出来后,计算机器人沿各条路径运动所需的时间。假设各条路径之间没有冲突(对于路径之间存在冲突的情况将在4.3节讨论),所以每条路径的完成时间与该路径的长度成

正比, 得到路径基本代价矩阵为

$$T = (t_{ij})_{n\times n} = \left[\frac{C_{ij}}{V_0} + \frac{t_1 + t_2}{2}\right]_{n\times n} \quad (2)$$

其中, C_{ij} 为路径 L_{ij} 的长度, V_0 为机器人的最大运动速度。

4　编队任务规划器

编队任务规划器是系统中最重要的环节之一, 它完成编队任务的整体规划, 保证总体代价最小, 同时解决机器人之间的冲突问题。

4.1　路径分配

为了实现最优编队, 根据不同的任务要求定义相应的目标函数如下

$$\min \sum_{i=1}^{n} T_i \quad (3)$$

$$\min \max_i T_i \quad (4)$$

$$\min \min_i T_i \quad (5)$$

其中 T_i 表示机器人 i 在任务执行过程中所需时间代价。目标函数(3) 考虑完成编队任务总体消耗的时间代价; 式(4) 则着重考虑在多长时间内队形完全形成; 式(5) 因为突出个别机器人的代价最小而不关注整体代价。第 3 节对 n^2 条可能路径进行了最优规划和代价评估, 下一个任务是给 n 个机器人分配不同的路径, 以保证总体的目标函数最小。随着机器人数目的增大, 常规遍历搜索方法的运算量将以阶乘迅速膨胀而使分配方案无法实施。下面针对目标函数(3) 和(4), 使用不同的实用算法。

4.1.1　匈牙利算法

定义变量 x_{ij} 为

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{路径 } L_{ij} \text{ 被选中} \\ 0, & \text{路径 } L_{ij} \text{ 未被选中} \end{cases} \quad (6)$$

目标函数(3) 的路径分配可描述为

$$\begin{cases} \min \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} x_{ij} t_{ij} \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1, \quad \sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中 t_{ij} 为基本代价矩阵 T 的元素。最优分配矩阵重复搜索的匈牙利解法参见文献[5]。

4.1.2　最速排除法

目标函数(4) 的路径分配问题可描述为

$$\begin{cases} \min \max_{i,j} x_{ij} t_{ij} \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1, \quad \sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

该问题在于如何寻求最大代价最小路径分配方案, 即从基本代价矩阵 T 出发, 求出分配矩阵 X, 最小化与 X 中 1 元素对应的代价最大值。

该问题的难点在于找出每个分配方案中的最大代价值, 然后选取这些最大值中的最小作为最优方案, 所以不能象 4.1.1 那样通过重复搜索最小值来实现。但是, 考虑到所有方案最大代价的最大值是可以直接搜索得到的, 并且该元素肯定不会是最优方案中的元素, 所以可直接排除。最后剩下 n 个不同行不同列的元素, 它们的组合便得到了最优解。

Step 1: 比较矩阵中的元素, 找到最大元素, 并将该元素置为零;

Step 2: 如果矩阵中某行或某列只有一个非零元素, 则将该元素所在行、列的所有其它元素都置零;

Step 3: 重复 Step 1 和 Step 2, 直到基本代价矩阵中每行、每列只有一个非零元素;

Step 4: 在非零元素的位置上令 $x_{ij} = 1$, 而在其它位置令 $x_{ij} = 0$, 得到最优分配矩阵 X。

这种算法把在 $n!$ 种方案中的搜索问题变为在 n^2 个元素中的排除问题。最大可能的运算量为 $n(n-1)$ 步, 显然减小了工作量, 并且算法简单, 特别适合于计算机迭代计算。

4.2　冲突解决方法

上节为每个机器人找到了一条安全路径, 而且总体代价函数最小。但当环境中有多个机器人同时运动时, 它们之间可能发生碰撞。我们用一种简单的“偏袒”方法来处理, 以保证发生冲突一方(称为保

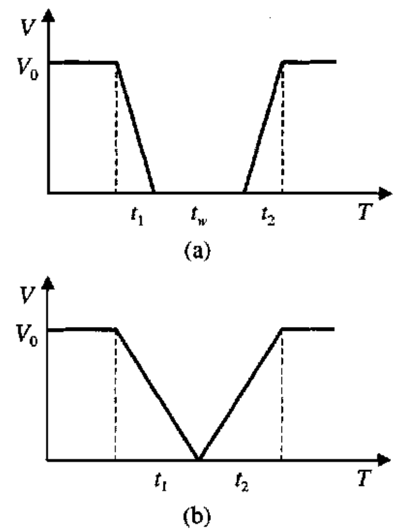

图 2　受阻方解决冲突的速度曲线

(a)　$T_p > (t_1 + t_2)/2$

(b)　$T_p \leq (t_1 + t_2)/2$

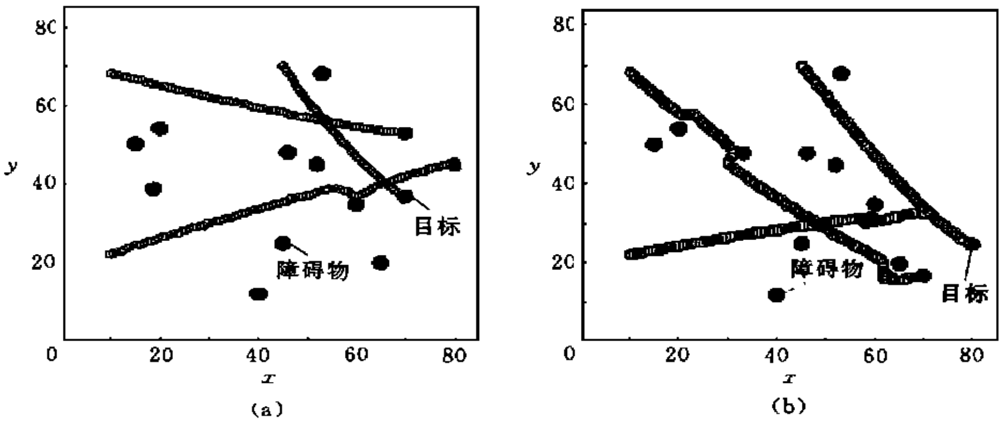

图 3 仿 真 结 果

(a) 中心位置为(73 3, 45) (b) 中心位置为(73 3, 25)

护方) 的运动性能不受影响, 安全通过可能碰撞点; 而牺牲另一方(称为受阻方) 的时间性能, 避免发生碰撞。假设保护方通过冲突点所需时间为 T_p, 如果 $T_p > (t_1 + t_2)/2$, 则受阻方经历减速、等待、起动 3 个过程, 速度按图 2(a) 变化; 如果 $T_p \leq (t_1 + t_2)/2$, 则受阻方只经历减速和起动两个过程, 速度按图 2(b) 变化。这两种模式造成受阻方的额外时间代价分别为

$$t_{s1} = \frac{t_1 + t_2}{2} + t_w, \quad t_{s2} = \frac{t_1 + t_2}{2} \qquad (9)$$

4 3 冲突的均衡分配原则

由于使用的是"偏袒"的冲突解决方法, 所以需要在每个具体冲突点上确定保护方和受阻方。使用基于保护"弱者"的均衡原则分配冲突角色, 具体方法为:

1) 找到第一个冲突点, 确定时间代价最大的机器人作为保护方, 其它为受阻方;

2) 采用第 4 2 节方法延迟受阻方到达冲突点的时间, 并刷新受阻方的时间代价 $T = T + t_{si}$, $i = 1, 2$;

3) 重复实施直到最后一个冲突点被解决。

对于目标函数(3), 如果路径中存在 M 个冲突点, 那么不管如何分配冲突角色, 都会给最终的目标函数增加 $M\ t_{si}(i = 1, 2)$, 所以上述方法是适合的; 对于目标函数(4), 上述方法在冲突中保证时间代价较大的机器人运动不受影响, 确保总的目标函数最小; 如果采用目标函数(5), 则将保护方和受阻方的确定准则互换即可。

5 仿真结果

对本文提出的最速编队系统进行计算机仿真。仿真环境为 80 × 80 的正方形区域, 3 个机器人的起始点坐标分别为(10, 22), (45, 70), (10, 68), 障碍物数目为 10 且随机分布。要求机器人最终形成前后长度为 10, 左右长度为 16 的三角编队。采用势场法进行路径规划, 势场参数为 $D = 20, r = 1, m = 6, s = 3$。图 3 分别给出了障碍物位置不同(编队中心位置分别为(73 3, 45) 和(73 3, 25)) 时机器人的运动轨迹, 所得的单个机器人最大代价分别为 91 和 100。仿真结果证实了所提出的编队策略的有效性。

参考文献:

[1] Kazuo Sugihara, Ichiro Suzuki Distributed algorithms for formation of geometric patterns with many mobile robots[J]. J of Robotic Systems, 1996, 13(3): 127-139.

[2] Xiaoping Yun, Gokhan Alptekin. Line and circle formation of distributed physical mobile robots[J]. J of Robotic Systems, 1997, 14(2): 63-76.

[3] Rodney A Brooks A robust layered control system for a mobile robot[J]. IEEE J of Robotics & Automation, 1985, 2: 14-23.

[4] J J 摩特, S E 爱尔玛拉巴 运筹学手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987.