

文章编号: 1002-0446(2000)06-0433-06

多移动机器人编队的分布式控制系统*

董胜龙 陈卫东 席裕庚

(上海交通大学自动化系 上海 200030)

(中国科学院机器人学开放研究实验室 沈阳 110015)

摘要: 分布式控制是用于多智能体协调的系统设计方法. 编队控制是一种最常见的协调问题. 本文以机器人的运动模型和基于行为的算法为基础, 对一种用于编队控制的分布式控制系统进行了阐述和设计, 并通过实验对系统进行了验证.

关键词: 多移动机器人; 编队控制; 分布式系统; 基于行为

中图分类号: TP24 文献标识码: B

1 引言

近年来, 多移动机器人系统的协调问题已成为一个新兴的研究热点. 对于多个机器人的运动控制, 集中式和分布式是两种不同的系统设计思路. 与集中式控制相比较, 分布式控制系统具有的更多的灵活性和更强的鲁棒性, 完成任务的高效性和更高的容错能力等优点. 所谓编队控制, 是指多个机器人在到达目的地的过程中, 保持某种队形, 同时又要适应环境约束(例如存在障碍物或者空间的物理限制)的控制技术. 编队控制是一个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, 该技术在工农业生产、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逐步表现出来, 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^[1-5].

在不同的任务要求中, 编队的形状和维持队形的严格程度是不同的, 所以对环境的要求也有所不同. 为了完成编队运动到某指定点的任务, 运动控制应考虑到目标点的位置、队形的要求、避开障碍物等因素. 国际上对于此问题的处理是从基于行为的角度出发, 根据有限状态机(FSM)的原理, 将编队行为分解为以下三个子行为: 向目标点运动, 保持队形和避障. 而对于各子行为的处理方式有两种: 一种是 Brooks 的行为抑制法, 即在每一时刻, 编队任务被具体化为某一个子行为; 而另一种是 Ark in 控制变量的矢量累加方法, 即在每个时刻, 对三个子行为分别求出控制变量, 然后进行矢量累加而得到综合的控制变量. 这两种方法各有利弊, Brooks 的方法, 在每一时刻控制变量都有明确意义(实现某子行为), 但由于不停在各子行为之间切换, 控制结果不平滑, 而且完成任务所需的时间较长; Ark in 的方法完成任务速度较快, 但是控制意义不明确, 而且由于把每个子行为平等看待, 所以各子行为之间相互干扰, 从而影响了整体的控制效果.

本文结合上述两种方法的优点, 提出了各子行为加权综合的控制实现方法. 即在不同时刻, 为每个子行为赋予一定的重要性(权值), 并对各子行为分别求出一组控制变量, 然后对这

* 基金项目: 本课题为国家 863 资助项目(863- 512- 9805- 18).

收稿日期: 1999- 11- 19

些控制变量进行加权平均,从而得到综合的控制变量.这样做有着很好的灵活性:如果每个子行为的权值始终维持相等,就相当于 A r k i n 的矢量累加方法;如果在每一时刻,为某一个子行为赋予的权值,而其他子行为的权值赋为 0,则相当是 B r o o k s 的行为抑制方法.可以通过实验或理论探索调整权值,从而适应不同的任务要求,实现编队控制的优化.

纵观当前该技术在世界范围的研究现状,可以发现绝大多数的编队控制,还停留在计算机仿真阶段,缺乏实验结果;而[1]中曾完成了两台机器人的编队实验,但编队类型过于简单,而且由于没有考虑机器人的运动模型以及旋转角速度和机器人的物理尺寸对编队的影响,所以控制结果很不平滑,且容易陷入控制死区.

本文针对以上不足,基于机器人的运动模型和行为分解,使用子行为加权综合的方法,以轮式机器人为例进行了系统的设计和实验研究.

2 机器人的运动模型与行为分解

2.1 运动模型

在分布式系统中,全局的定位条件并不存在.每台机器人都通过左右两轮的滚动距离确定自身的位置.为了便于被别的机器人识别和发现,在每台机器人上设置一个高度固定的标记(可用发光二极管实现),作为坐标原点.各台机器人通过一个带有云台的摄像头发现和其他机器人的距离和方位.运动学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos \theta \\ \dot{y} = V \sin \theta \\ V = V_i \\ \dot{\theta} = \omega_i \end{cases} \quad (1)$$

其中, d 为坐标原点到两轮中心的距离,控制变量为 (V_i, ω_i) . V_i 和 ω_i 的最大值由地面摩擦系数、机器人重心高度、机器人的宽度共同决定.在这里不作详细讨论,设控制变量的最大值为: $(V_{\max}, \omega_{\max})$.

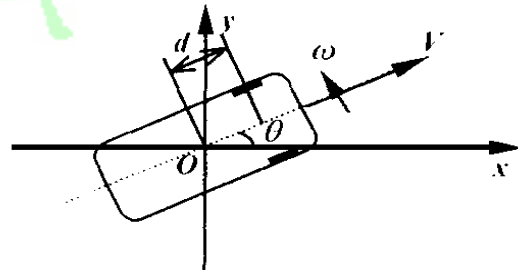


图 1 机器人的运动模型

2.2 编队行为分解

在现实中,往往需要多个移动单元在存在障碍约束的环境下,从初始位置运动到某个指定的目标位置,或者是在指定的区域内进行漫游(搜索);同时在运动的过程要保持一定的编队形状.本文编队控制的目的是使得多个机器人以一定的编队队形运动到指定的目标点,并实现避障.

根据有限状态机(FSM)的原理,考虑对异常问题的处理,将编队行为分解为以下 4 个子行为:

- (1) 异常情况处理;
- (2) 向目标点运动;
- (3) 保持队形;
- (4) 避障.

在编队过程中,必须要有一个参考点.不同机器人位于参考点不同的相对位置,从而形成一定的队形.参考点的选取方法通常有两种:一种是以机器人团队中的其中一台机器人作为参考,其他机器人以此为编队的依据;第二种是以编队的平均坐标为编队的参考点,每台机器人以此作为编队的依据. A r k i n 曾对这两种方法进行了比较:前者在运动过程中队形被打乱的时间较短,而后者队形被改变的幅度较小.本文以第二种方法来选取参考点,而以各个机器人的

速度和转向角速度(V_i, ω_i)作为控制变量.

3 系统描述

3.1 系统结构

整个系统结构分为三部分: 行为分解, 控制变量求解和控制实现. 在行为分解环节中, 机器人根据当前的环境信息和任务性质, 将任务行为分解为若干个互相平行的子行为, 同时为每个子行为赋予相应的重要性(权值) w_i ; 这里的环境信息包括声纳信息、视觉信息、友机的通讯信息等. 控制变量求解环节根据机器人的运动模型和当前运动状态, 算出实现各子行为的控制变量 U_i , 并对求得的各组控制变量进行加权平均, 进而得到综合控制变量 U_{int} ; 控制实现环节把综合控制变量输给执行机构, 从而实现对机器人的运动控制. 见图 2.

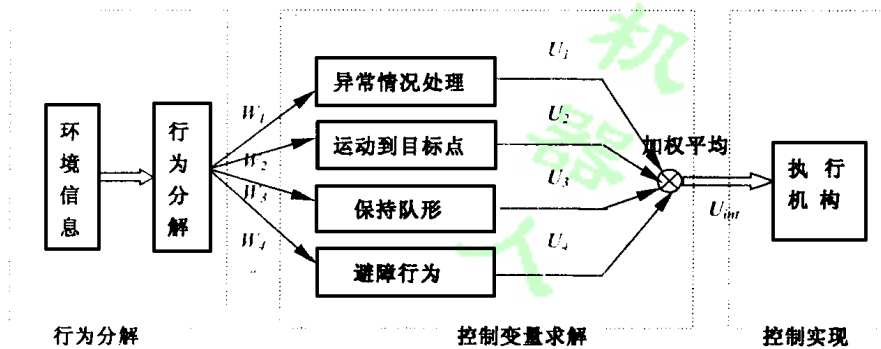


图 2 控制系统结构

3.2 各子行为的控制实现

3.2.1 异常情况处理

- 陷入障碍死区

判断条件: 前、左、右三个方向的声纳测得障碍距离都小于最小安全距离 d_s , 而且此状态持续时间到达规定的门限时间; 如果出现某方向的探测障碍距离大于安全距离, 则退出此状态而且状态时间清零;

处理方法: 向团队发送脱离编队信号, 为了解决从一个方向不能摆脱障碍死区的问题, 相邻两次的转向速度应该避免相同. 控制变量为:

$$V_t = V_k, \omega_t = \begin{cases} \omega_k, & n = \text{奇数} \\ -\omega_k, & n = \text{偶数} \end{cases} \quad (2)$$

其中, (V_k, ω_k) 为给定的安全运动速度和转向速度, n 为陷入障碍死区的次数. 然后返回.

- 障碍环境不允许编队通过

判断条件: 左右声纳测的距离之和+ 机器人宽度 < 队形宽度+ 安全距离

处理方法: 向其他机器人发送更改编队信息见图 3. 首先缩小队形规模, 然后更改队形种类, 队形更改的顺序依次为:

3.2.2 向预定目标点运动

根据机器人的运动模型见图 4, 并考虑 O 点和两轮中心的距离 d 的影响, 可以得到以下等式:

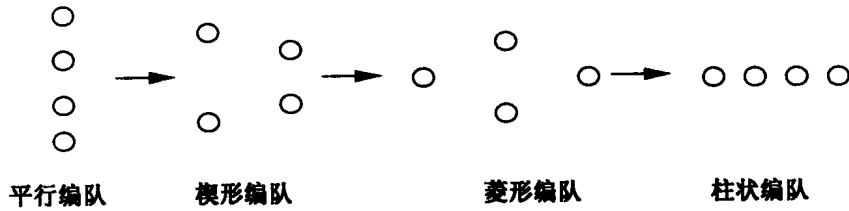


图3 编队队形更改顺序

$$\begin{aligned} \dot{r} &= d\omega_0 \sin\varphi - V_t \cos\varphi \\ \dot{\varphi} &= \frac{V_t \sin\varphi}{r} - \omega_0 + \frac{d\omega_0 \cos\varphi}{r} \end{aligned} \quad (3)$$

控制的最终目标为: $r = 0, \varphi = 0$.

可以将控制策略定为:

$$\begin{aligned} \dot{r} &= -\alpha_1 r \\ \dot{\varphi} &= -\alpha_2 \varphi \end{aligned} \quad (4)$$

其中, α_1, α_2 是给定的比例系数. (3)、(4) 联立可以解得控制变量为

$$\omega_0 = \frac{\alpha_1 r \sin\varphi + \alpha_2 r \cos\varphi}{r \cos\varphi - d}$$

$$V_t = \frac{\alpha_1 (r - d \cos\varphi) + d \alpha_2 \sin\varphi}{r \cos\varphi - d} \quad (5)$$

考虑到 (V_{max}, ω_{max}) 的限制, 控制变量应为

$$\omega_0 = \begin{cases} \omega_{max} & \omega_0 > \omega_{max} \\ \omega_0 & -\omega_{max} \leq \omega_0 \leq \omega_{max} \\ -\omega_{max} & \omega_0 < -\omega_{max} \end{cases} \quad V_t = \begin{cases} V_{max} & V_t > V_{max} \\ V_t & -V_{max} \leq V_t \leq V_{max} \\ -V_{max} & V_t < -V_{max} \end{cases} \quad (6)$$

3.2.3 保持队形

我们以编队中各机器人运动状态的平均 (一个假想的机器人) 作为参考, 来确定每个机器人在编队中的位置和指向, 见图 5.

设参考机器人的状态为 $R_0(x_0, y_0, V_0, \omega_0)$. 根据队形要求, 机器人 $R_i(x_i, y_i, V_i, \omega_i)$ 相对于参考机器人的相对参数为 (l, φ) . 则

$$\begin{aligned} \dot{l} &= V_i \cos\gamma - d\omega_0 \sin\gamma - V_0 \cos\varphi + d\omega_0 \sin\varphi \\ \dot{\varphi} &= \frac{1}{l} (V_0 \sin\varphi - V_i \sin\gamma - d\omega_0 \cos\gamma + d\omega_0 \cos\varphi - l\omega_0) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 θ_0 为参考机器人的指向, θ_i 为机器人 R_i 的指向, $\gamma = \varphi + \theta_0 - \theta_i$, (l, φ) 分别为队形要求中, R_i 相对于参考机器人 R_0 的理想距离和方位

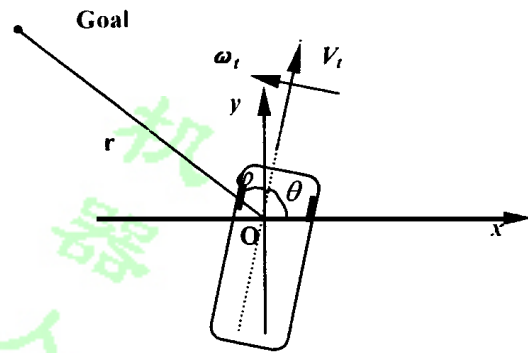


图4 运动向目标点

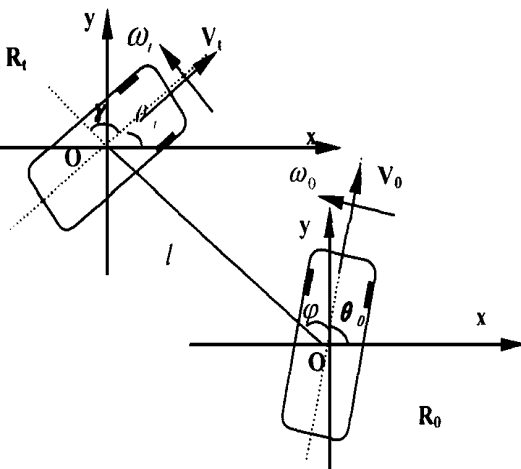


图5 保持队形

角.

控制的最终目标为: $(l - l_d) \rightarrow 0, (\varphi - \varphi_d) \rightarrow 0$. 将控制策略定为

$$\begin{aligned} \dot{l} &= \beta_1 (l_d - l) \\ \dot{\varphi} &= \beta_2 (\varphi_d - \varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

(7), (8) 联立可解得控制变量为

$$\begin{aligned} \omega_i &= -\frac{\cos \gamma}{d} [\beta_2 l (\varphi_d - \varphi) - V_0 \sin \varphi - d \omega_0 \cos \varphi + l \omega_0 + \rho \sin \gamma] \\ V_i &= \rho + d \omega_i \tan \gamma \end{aligned} \quad (9)$$

同样, 考虑到 $(V_{fm \max}, \omega_{m \max})$ 的限制, 控制变量应为

$$\omega_i = \begin{cases} \omega_{m \max} & \omega > \omega_{m \max} \\ \omega & -\omega_{m \max} \leq \omega \leq \omega_{m \max} \\ -\omega_{m \max} & \omega < -\omega_{m \max} \end{cases} \quad V_i = \begin{cases} V_{fm \max} & V_i > V_{fm \max} \\ V_i & -V_{fm \max} \leq V_i \leq V_{fm \max} \\ -V_{fm \max} & V_i < -V_{fm \max} \end{cases} \quad (10)$$

3.2.4 避障行为

为了保证整个编队能够顺利地避障, 应考虑编队的大小及该机器人在编队中的位置. 首先假设一台机器人可以通过的安全距离为 d_s , 并定义各机器人基于编队任务的全局安全距离

$$d_{st} = d_s + \left(\frac{1}{2}D - l_d \cos \varphi_d\right), \text{ 其中 } D \text{ 为编队宽度;}$$

避障的策略为:

如果前、左前、右前测得障碍距离的最小值大于 d_{st} , 那么保持现在的速度和指向, 控制变量为 $V_i = V, \omega = 0$,

否则, 随着前方测的障碍距离的缩小而降低运动速度, 并且通过比较左前方和右前方测得的障碍距离的大小决定转向速度. 控制变量为 $V_i = k S_F, \omega = \min\{k_s(S_{LF} - S_{RF}), \omega_{m \max}\}$, 其中, k 和 k_s 为给定的常数, S_F, S_{LF} 和 S_{RF} 分别为前方、左前方、右前方测得的障碍距离.

3.3 综合控制变量求解

在各个子行为的控制变量求出以后, 可以用下式得到综合的控制变量

$$U_{inte} = \frac{\sum W_i U_i}{\sum W_i} \quad (11)$$

其中控制向量 $U = (V_i, \omega)^T$, 在本系统中, 各个子行为重要性的定义如下:

- 异常情况处理的重要性;
- 如果符合异常情况的判断条件 $W_1 = 1.0, W_i = 0, i = 2, 3, 4$; 否则 $W_1 = 0$;
- 向目标点运动的重要性 $W_2 = k_2$;

• 保持队形的重要性: $W_3 = k_3 \frac{R_d}{d_r}$; 其中 $R_d = \sqrt{l^2 + l_d^2 - 2l l_d \cos(\varphi - \varphi_d)}$, 为机器人偏离理想位置的距离, R_d 为常数, 表示队形的允许偏差距离;

- 避障行为的重要性为: $W_4 = k_4 \frac{d_{st}}{\min(S_F, S_{RF} \dots)}$.

其中, k_2, k_3 和 k_4 为归一化系数, 可以通过实验探索或启发式算法来灵活调整, 以适应不同的具体编队任务和作业环境, 并且 $\sum_{i=1}^4 W_i = 1.0$.

4 实验与结论

作者以三台美国 ActiveMedia 公司的 Pioneer2 型智能机器人为硬件平台, 以基于行为的多智能体控制语言 Ayllu 为软件平台, 对上述系统作了实验验证. 分别在自由环境和有障碍物约束的室内环境下, 实现了三种编队(平行编队, 三角编队和柱状编队)向预定目标点的运动见图 6. 实验证明在该系统控制下, 机器人运动状态变化平滑; 在无障碍物情况下保持队形并快速到达目标点; 在有障碍物情况下各台机器人自动避障, 并在远离障碍物时自动恢复队形, 达到了良好的编队控制效果. 和文献[1]提供的控制方法相比较, 本系统在机器人运动的稳定性, 避免陷入障碍物死区以及走出障碍物死区等方面具有明显的优势.



图 6 实验结果

参 考 文 献

- 1 Ark in R C. Motor Schema Based Mobile Robot Navigation. International Journal of Robotics Research, 8(4): 92
- 2 Parker L. Adaptive Action Selection for Cooperative Agent Teams. From Animals to Animals: Proc. 2nd International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior, MIT Press/Bradford Books. Honolulu, HI, 1993: 442- 450
- 3 Eiji Nakano, Zhidong Wang. Cooperating Multiple Behavior-Based Robots for Object Manipulation. International Conference on Intelligent Robots and System. 1994, 3: 1524
- 4 Rodney A Brooks. A Robust Layered Control System for A Mobile Robot. IEEE Journal of Robotics & Automation, RA-2, April, 14- 23
- 5 Rodney A Brooks. A Robot That Walks Emergent Behavior from A Carefully Evolved Network. Neural Computation 1: 2. Summer

AN DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM FOR MULTI-MOBILE ROBOTS FORMATION

DONG Sheng-long CHEN Weidong XI Yu-geng

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University Shanghai 200030;
Robotics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110015)

Abstract: Distributed control is a system designing method for multiple intelligent agents cooperation. Formation is a kind of normal cooperation problem. This paper introduces and designs a distributed system for formation control based on robot kinematics model and behavior based algorithms and proves the system with some experiments.

Keywords: multiple robots, formation control, distributed system, behavior based

作者简介:

董胜龙 (1975-), 男, 博士生. 研究领域: 智能机器人, 多机器人协调控制.

陈卫东 (1968-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 机器人, 多智能系统.