

基于鱼群效应的多车协同行驶控制方法

来 磊, 曲仕茹

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 针对提高道路中多车行驶协同性问题, 将鱼群群体行为效应引入到车辆的行驶控制中。通过对鱼群群体集群、游动行为一致性的研究, 采用邻域平均法和改进的人工势场函数构造鱼群群体移动数学模型, 将该移动数学模型应用到多车协同控制中, 根据车辆行驶的常见运动行为, 建立基于群体行为的车辆群体行驶、避障、队形变换控制方法, 使行驶车辆间具有群体协同性、一致性, 以提高车辆对环境的感知适应力。通过仿真实验得到的车辆行驶路径轨迹验证了该协同控制方法的有效性。

关 键 词: 智能交通, 鱼群效应, 车辆协同控制, 主动安全, 智能车辆, 交通控制

中图分类号: U491.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-2758(2012)03-0373-05

交通拥挤和堵塞现象成为许多国家大中城市所面临的一个日趋严重、较难解决的问题, 交通拥挤造成一系列问题, 如能源的过多消耗、环境的污染, 以及给人们的生活带来不便等。20世纪70年代, 美国、日本等发达国家开始研究解决交通拥挤问题的方法, 从而提出了智能交通系统(Intelligent Transport System)^[1]。智能交通系统是指在具备较完善的基础设施之上, 将先进的信息技术、通信技术、控制技术、传感技术和系统综合技术有效地集成, 并应用于交通运输系统, 从而建立起大范围内发挥作用的实时、准确、高效的运输系统。ITS的研究和应用主要有五个方面: 交通管理系统、交通信息系统、车辆智能控制系统、电子自动收费系统、车辆信息服务系统^[2]。ITS研究目的是更有效地使用有限的道路资源, 提高道路的通行能力。由于人为操控能力的局限性, 用智能控制装置作为辅助或取代人为操作, 可以提高车辆行驶安全性及行驶速度、提高道路资源的利用率。车流中车辆人为的操控具有自主性和随机性, 多车行驶中不协调的行为都会影响行驶安全、车流的速度和通行能力。使车辆扩大环境感知范围, 将道路中的整个车流或车队看成一个具有自主协调能力的整体, 会有效提高道路中车辆的主动安全性、车流行驶速度和通行能力。

随着无线通信技术的发展, 多车协同得到越来越

越多的关注, 协同控制问题成为多车辆协作技术中的一个重要研究课题。所谓协同控制是指多个个体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的控制技术^[3,4]。协同控制技术已经应用到工业生产、军事、娱乐等领域, 例如航天器编队飞行、无人机的编队飞行、自主水下航行器的编队航行等。

本文将鱼群效应理论应用到道路车流或车队的行驶控制当中, 应用邻域平均法和势场理论建立鱼群群体行为模型, 提出了基于鱼群效应的车辆行驶协同控制方法。车流自组成仿生物群体的车群体, 使车流中行驶车辆具有群体效应, 发挥其统一性、协作性, 扩大车辆的感知范围, 从而有效提高道路中车辆的主动安全性、提高道路资源的利用率, 以缓解日趋严重的城市交通拥挤和堵塞问题。

1 人工势场与鱼群效应

1.1 人工势场理论

人工势场是 Khatib 为解决机械手避障问题提出的^[5], 其基本思想是构造目标位置引力场和障碍物斥力场共同作用的人工势场, 引力场发出的引力吸引运动体向目标位置运动, 斥力场的斥力阻止运

动体向障碍物方向运动。

人工势场主要通过设计人工势场和势场函数来表示队形中运动体之间的约束关系,并以此进行分析和控制。传统势场法的表达式如下所示

引力势函数

$$U_a(q) = \frac{1}{2}K_a |q - q_g|^2 \quad (1)$$

引力

$$F_a = -grad | U_a(q) | = -K_a |q - q_g| \quad (2)$$

式中 K_a 为位置增益系数, q 为个体的当前位置, q_g 为目标点的位置。

斥力势函数

$$U_r(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}K_r \left[\frac{1}{\rho(q, q_g)} - \frac{1}{\rho_0} \right]^2 & \rho \leq \rho_0 \\ 0 & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (3)$$

斥力

$$F_r = -grad | U_r(q) | = \begin{cases} K_r \left[\frac{1}{\rho(q, q_g)} - \frac{1}{\rho} \right] \cdot \frac{\partial \rho(q, q_g)}{\rho(q, q_g)} & \rho \leq \rho_0 \\ 0 & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 K_r 为斥力势场常量, $\rho(q, q_g)$ 为个体与障碍物的距离, ρ_0 为斥力势场的影响距离。

以上传统的人工势场函数对于静态环境下运动效果较好,但是当运动个体处于动态环境下,传统的势场函数效果较差,因为传统人工势场函数只考虑了目标位置量。研究人员将传统的人工势场函数进行了改进,速度量被考虑其中^[6]。改进的人工势场函数如下所示

$$U_a(q) = \frac{1}{2}K_a |q - q_g|^2 + \frac{1}{2}K_{av} |v - v_g|^2 \quad (5)$$

$$F_a = -grad | U_a(q) | = -K_a |q - q_g| - K_{av} |v - v_g| \quad (6)$$

$$U_r(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}K_r \left[\frac{1}{\rho(q, q_g)} - \frac{1}{\rho_0} \right]^2 + K_{rv} |v - v_g| & \rho \leq \rho_0 \\ 0 & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$F_r = -grad | U_r(q) | = \begin{cases} K_r \left[\frac{1}{\rho(q, q_g)} - \frac{1}{\rho} \right] \cdot \frac{\partial \rho(q, q_g)}{\rho(q, q_g)} - K_{rv} |v - v_g| & \rho \leq \rho_0 \\ 0 & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中 K_{av}, K_{rv} 为增益常数, v 和 v_g 分别为个体的运动速度、目标体的运动速度。

1.2 鱼群效应

群体智能理论的研究从20世纪80年代以来得到各国研究人员的普遍关注,群体智能主要是对蚁群、鸟群、鱼群等生物群体行为的研究,是对简单生物群体的智能涌现想象的具体模式研究。自然界中,动物个体的行为较为简单,集群后却能表现出异常复杂的群体行为,如鱼群在运动中连贯一致的整体自组织结构,使得鱼群能更好地躲避危险等活动。鱼群游动的方向不是由领导者决定,而是由鱼群中个体的相互联系决定。鱼群运动中的主要行为有:鱼群集群行为、鱼群移动行为、鱼群逃逸避障行为等。文献[7]中对鱼群自组织行为构造了模型,以下结合人工势场理论对鱼群游动行为建模。

鱼群集群行为:

游动中鱼将寻找最近同类鱼群向其游去,当 $fish_i$ 与 $fish_j$ 的距离大于设定值时,受引力作用 $fish_i$ 将加速向 $fish_j$ 游去;当 $fish_i$ 与 $fish_j$ 的距离小于某一设定区间时,为防止碰撞冲突,受斥力作用 $fish_i$ 和 $fish_j$ 将向相互分离的方向运动。当 $fish_i$ 与 $fish_j$ 的距离保持在一定的中值区间内,这时将处于相对平衡的状态, $fish_i$ 与 $fish_j$ 进行速度匹配,保持这种平衡。

鱼群移动行为:

鱼群在移动过程中,个体间要不断调整位置,使个体间始终处于平衡状态,同时为保持群体运动一致性,群体中个体的运动规则为:与自己邻居个体运动状态保持一致,即有限个数的稳定鱼群中,每个个体以稳定的速率运动,固定的时刻中,个体运动方向为上一时刻个体邻居运动方向的平均, $fish_i$ 在 t 时刻的运动方向为它全体邻居在 $t - 1$ 时刻运动速度矢量平均。

t 时刻 $fish_i$ 的邻居定义为

$$N_i(t) = \left\{ j \left[\begin{aligned} & [x_i(t) - x_j(t)]^2 + [y_i(t) - y_j(t)]^2 \\ & + [z_i(t) - z_j(t)]^2 \leq r_n^2 \end{aligned} \right] \right\} \quad (9)$$

式中 $x_i(t), y_i(t), z_i(t)$ 为个体在空间中的三坐标, $r_n \geq 0$ 为区域半径。

个体 k 的运动方向表达式为

$$\alpha(t) = \frac{1}{n_k(t-1)} \sum_{j \in N(t-1)} \alpha_j(t-1) \quad (10)$$

$$\beta(t) = \frac{1}{n_k(t-1)} \sum_{j \in N(t-1)} \beta_j(t-1) \quad (11)$$

$$\gamma(t) = \frac{1}{n_k(t-1)} \sum_{j \in N(t-1)} \gamma_j(t-1) \quad (12)$$

$\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$ 、 $\gamma(t)$ 为 t 时刻个体 k 周围邻居在 $t-1$ 时刻运动方向的平均值。则个体 k 的位置公式为

$$\begin{cases} x_k(t) = x_k(t-1) + v_n \cos \alpha_k(t-1) \\ y_k(t) = y_k(t-1) + v_n \cos \beta_k(t-1) \\ z_k(t) = z_k(t-1) + v_n \cos \gamma_m(t-1) \end{cases} \quad (13)$$

2 基于鱼群效应的多车协同控制

2.1 系统结构

基于鱼群效应的车辆行驶协同控制系统中, 车辆个体的自组织行为由四大模块组成。信息采集与处理模块采集内部信息和外部信息, 内部信息主要是指车辆个体自身的状态, 如车辆的速度、运动方向、车辆机械设备的良好状态等。外部信息指邻居车辆的运动状态等参数, 及道路环境中影响车辆运行的条件参数, 例如路面状况、天气情况等。信息采集模块采集到信息, 经相应处理后传输到协同与控制模块, 协同与控制模块根据不同车辆行驶意图, 协调车辆组成目的地相同的车辆群体, 统一规划车辆群体运动, 在遇到障碍物时控制车辆群体统一完成避障功能, 需要队形变换时控制车辆群体进行队形变换控制。路径规划模块统一规划车队、车辆的运动路径。运动控制模块根据协同与控制模块发出的协同命令对车辆个体运动行为参数进行控制。

2.2 车辆协同控制

车辆在运动过程中, 本文定义了以下三种车辆的运动协同控制方法:

① 车辆队形控制

多车协同运动过程中, 车辆整体运动必须保持一致性, 因此单个车辆应用公式 (10 ~ 13) 所建立的运动模型调整自己的运动方向。同时车辆 $Car_{follower(i)}$ 间必须始终保持平衡状态, 以避免碰撞事故。模仿鱼群模型建立车辆感应区域, 车辆外围根据 L 的变化分为三个感应区域。

L 表示 $Car_{follower(i)}$ 与 $Car_{follower(j)}$ 之间的距离, 当 $p \leq L \leq a$ 时, 两车之间将受到引力 $F_a = -\text{grad} | U_a(q) | = -K_a | q - q_g | - K_{ar} | v - v_g |$ 的作用, $Car_{follower(j)}$ 将迅速向 $Car_{follower(i)}$ 运动, 速度与引力大小成正比。

当 $r \leq L \leq p$ 时, 两车处于平衡状态, 车距最优。

当 $L \leq r$ 时, 两车受到斥力 $F_r = -\text{grad} | U_r(q)$

的作用, 为防止发生碰撞, $Car_{follower(j)}$ 将迅速向远离 $Car_{follower(i)}$ 的方向运动, 直到达到平衡距离。

② 车队避障控制

当车辆 $Car_{follower(j)}$ 在运动过程中遇到障碍物时, $Car_{follower(j)}$ 与障碍物之间的距离小于障碍物斥力的作用范围时, $Car_{follower(j)}$ 将在斥力 F_r 的作用下向远离障碍物的方向运动, 但约束条件为 $Car_{follower(i)}$ 与 $Car_{follower(j)}$ 之间的距离 L 保持不变, L 为两车之间的平衡距离。在此条件下, 两车中点的连线与 $Car_{follower(i)}$ 中垂线之间的夹角由 φ_1 变为 φ_2 , 在此夹角的变化中 $Car_{follower(j)}$ 达到避障的目的, 如图 1 所示。

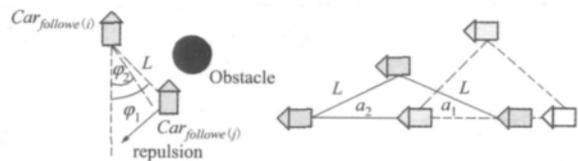


图1 车辆避障与队形变换示意图

③ 队形变换控制

当车队在遇到障碍物、路面变窄等情况时, 原先车辆队形无法通过路面, 需要变换车辆队形, 使车辆能够顺利通过。本节中设计了一种简单的几何变形法进行队形的变换控制, 该方法具有算法简单、响应速度快的特点。该几何变型由三角形压缩变换为直线, 直线拉伸为三角形原理得出, 如图 1 所示。当矩形队形变线型队形时, 由 Car_{leader} 规划各个车辆在线型队形中位置, 其规划原则为到达时间最短原理。车辆位置确定后, 车辆间的距离 L 将保持不变, 两车之间的角度将逐渐变小, 由 α_1 变为 α_2 , 直到多车之间的角度相同时, 变换完毕, 线型变矩形时则相反。

基于鱼群效应的多车协同控制算法流程为:

Step1 初始化车群系统, 以车辆 Car_{leader} 为中心, 根据相同目的地条件发出车辆组群指令。

Step2 如果个体车辆 $Car_{follower(i)}$ 符合组群条件, 以 Car_{leader} 为动态目标点向其靠近, Car_{leader} 对其感知半径内的车辆进行检测, 根据检测到的车辆数目及道路环境情况决定车辆运动队形。

Step3 如果编队车辆到达目的地, 编队控制结束, 否则转 Step4。

Step4 车队车辆向目的地前进, 如果遇到障碍物, 则车队进入避障状态, 采用避障控制方法。

Step5 如果 Car_{leader} 遇到障碍物,进入车辆整体避障,车辆为线型队形时, $Car_{follower(i)}$ 将保持队形不变,跟随 Car_{leader} 运动; 车辆为矩形队形时,队形将变为线型队形,跟随 Car_{leader} 运动。

如果仅 $Car_{follower(i)}$ 遇到障碍物,则 $Car_{follower(i)}$ 避障脱离车队,进入个体避障状态。

避障车辆避障结束,车队结束避障状态,如果队形保持未变,进入 Step3, 否则,恢复原有队形进入 Step3。

3 仿真实验

本文应用 MATLAB 对车辆协同控制方法进行验证,如图 2 ~ 图 4 所示,分别对车辆在道路中协同编队形成、车辆避障、车队在遇障时的队形变换算法进行仿真。

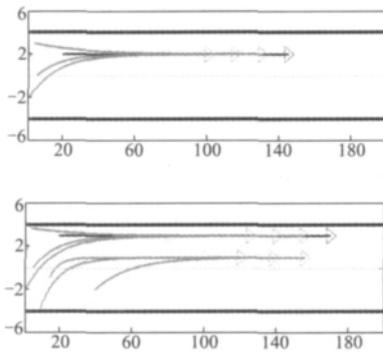


图2 车辆集群示意图

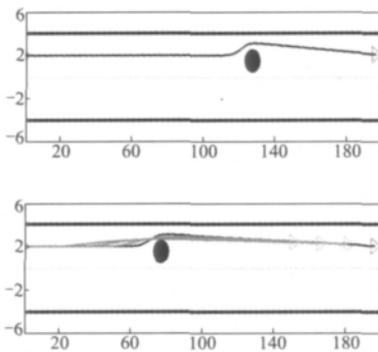


图3 车辆避障示意图

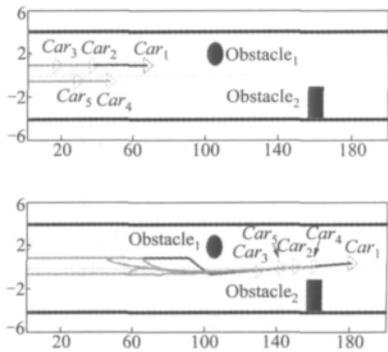


图4 车辆遇障队形变换示意图

图中粗实线表示道路边界,虚线为道路中线。最右边三角为领航车辆,其后虚线为领航车辆的路径轨迹。其它三角表示车辆编队中的跟随车辆,实线为其路径轨迹,黑色圆和矩形表示障碍物。车辆在道路行驶过程中,具有相同目的地的车辆达成协议形成车辆协同车队,车辆将根据实际道路情况形成图 2 线性编队和矩形编队。当车辆在行驶过程中遇到障碍物时,车辆编队将比单个车辆具有更强的感知能力,图 3 中领航车辆首先检测到前方障碍物,车辆根据邻居车辆的运动状态调整自身状态,提前对障碍物进行响应,规划自己的路径轨迹。行驶中当遇到路面变窄等情况时,车辆需要由双车道行驶变为单车道行驶,实际中由于车辆缺乏统一协调性,车辆的通行速度较慢,采用本文协同控制算法,如图 4 所示,前方车辆感知路面情况后,运动状态改变影响后车的状态,车辆编队将根据最短时间变换原理,

由矩形车队变为线性车队,快速通过狭窄路面。

4 结 论

提高行驶车辆间的协同性是智能交通中一项重要研究课题。生物界个体集群后能够完成更为复杂的任务,表现出对环境更强的适应能力,本文对鱼群的自组织行为进行研究,应用物理学中势场理论构造鱼群行为模型,并将此群体效应应用到道路车辆行驶中,提出智能车辆协同行驶控制方法。通过仿真实验验证,本文提出的方法具有有效性和可行性。通过多车协同控制,车辆对外部环境具有更强的感知能力,可以提前对道路情况进行响应,为提高车辆在行驶过程中的主动安全性、最大化利用有限的道路资源提供了解决方案。

参考文献:

- [1] Iehiro Masaki. A Brief History of ITS. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1999
- [2] 秦贵和, 葛安林等. 智能交通系统及其车辆自动控制技术. 汽车工程, 2001, 23(2): 92-96
Qin Guihe, Ge Anlin. The Advanced Automotive Automatic Control Technologies in Intelligent Transport System. Automotive Engineering, 2001, 23(2): 92-96 (in Chinese)
- [3] 陈杨杨, 田玉平. 多智能体沿多条给定路径编队运动的有向协同控制. 自动化学报. 2009, 35(12): 1541-1549
Chen Yangyang, Tian Yuping. Directed Coordinated Control for Multi-Agent Formation Motion on a Set of Given Curves. Acta Automatica Sinica. 2009, 35(12): 1541-1549 (in Chinese)
- [4] 杨甜甜, 刘志远. 移动机器人编队控制的现状与问题. 智能系统学报, 2007, 2(4): 21-27
Yang Tiantian, Liu Zhiyuan. Formation Control of Mobile Robots: State and Open Problems. Transaction on Intelligent Systems, 2007, 2(4): 21-27 (in Chinese)
- [5] Khatib O. Real Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. International Journal of Robotic Research, 1986, 5(1): 90-98
- [6] 韩永, 刘国栋. 动态环境下基于人工势场的移动机器人运动规划. 机器人, 2006, 28(1): 45-49
Han Yong, Liu Guodong. Mobile Robot Motion Planning Based on Potential Field in Dynamic Environment. Robot, 2006, 28(1): 45-49 (in Chinese)
- [7] 班晓娟, 宁淑荣等. 人工鱼群高级自组织行为研究. 自动化学报, 2008, 34(10): 1328-1331
Ban Xiaojuan, Ning Shurong. Research on Advanced Self-Organization Behavior for Artificial Fish School. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(10): 1328-1331 (in Chinese)

An Effective Swarm Vehicle Coordinative Traffic Control Design Based on Fish Swarm Grouping Behavior

Lai Lei, Qu Shiru

(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The fish swarm performs a collective movement, which is considered as a typical advanced self-organized behavior. We believe this property will increase the inter-coordination and improve the active safety for vehicles on road. Sections 1 and 2 of the full paper explain the traffic control design mentioned in the title, which we believe is effective and whose core consists of “After analyzing the fish swarm grouping behavior, we first construct the model of fish swarm behavior by an improved artificial potential function, a physical term introduced here for the purpose of collision avoidance. The artificial potential function keeps individuals suitably distant from each other; simultaneously each individual fish’s moving direction is the average of those of its neighbors, which keeps the swarm movement inter-coordinated. Then our swarm vehicle coordinative traffic control design is done with three control laws: movement, collision avoidance, and formation transformation.” The simulation results, given in Figs. 2 and 4, and the vehicle trajectory analysis show preliminarily that our swarm vehicle coordinative traffic control design is indeed effective.

Key words: artificial intelligence, collision avoidance, control, design, dynamic positioning, equations of motion, mathematical models, schematic diagrams, synchronization, traffic control, trajectories; active safety, fish swarm, intelligent transport system, simulation, vehicle coordinative control