

基于改进蚁群算法的路径规划方法

唐良^{1,2,3}, 方廷健^{1,3}

(1. 中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽合肥 230031; 2. 中国科学技术大学自动化系, 安徽合肥 230026;
3. 安徽省智能交通工程研究中心, 安徽合肥 230088)

摘要: 针对城市道路交通中路径规划的特点, 提出了一种基于改进蚁群算法的路径规划方法. 该方法通过对交通约束的分析与转换, 加强了对实际道路交通网络的描述, 提高了路径规划的有效性; 在引入方向启发的同时, 保留了足够的初始搜索空间, 提高了算法的路径规划效率. 实验结果表明, 该方法在规划效率与有效性上均有明显提高.

关键词: 路径规划; 蚁群算法; 城市道路交通; 最优路径

中图分类号: TP 301

文献标识码: A

Path planning method based on improved ant colony algorithm

TANG Liang^{1,2,3}, FANG Tingjian^{1,3}

(1. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China;
2. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Research Center for ITS Engineering Technology of Anhui Province, Hefei 230088, China)

Abstract: A path planning method based on improved ant colony algorithm was proposed according to the path planning features in urban road traffic. This method enhances the descriptive ability of the real road traffic network to improve the effectiveness of path planning by analyzing and converting the traffic constraints. When the direction heuristic information is introduced into the ant colony algorithm, there is enough initial search space to be held in order to improve the efficiency of path planning. Experimental results showed that the planning efficiency and effectiveness both increased evidently with application of the proposed method.

Key words: path planning; ant colony algorithm; urban road traffic; optimal path

0 引言

路径规划是指在数据或物理网络中进行路径选择的过程. 在城市道路交通中, 路径规划是指由出行起始地到目的地之间搜索总代价最小的目标路径的过程. 这里的代价可以是距离最短、时耗最少、费用最低或安全性最高等. 由于路径规划有着强大的应用驱动, 因而国内外学者对其进行了广泛深入的研

究, 提出了许多解决方案和算法, 主要有 Dijkstra 算法^[1]、Floyd 算法^[2]、启发式搜索算法^[3]、遗传算法^[4]、神经网络算法^[5]、蚁群算法^[6]等. 这些方法都可以在一定程度上实现相应代价要求的路径规划.

然而, 在实际交通行为中, 由于道路交通状况、禁限行规制等交通约束的存在, 使得路径规划的难度增大. 于是, 在上述方法的基础上进行改进就显得尤为必要. 文献[7]中采用网络转化法把含有禁行路

收稿日期: 2008-08-08; 修回日期: 2008-11-08

作者简介: 唐良, 男, 1977 年生, 博士生. 研究方向: 智能交通, 智能信息处理. E-mail: liatn@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 方廷健, 研究员. E-mail: tjfang@im.ac.cn

线的交通网转化为不含禁行路线的交通网,利用邻接结点矩阵和邻接结点权矩阵实现了道路结点关系的表达,进而改善了传统的Dijkstra算法.文献[8]通过建立包含交通连通性约束信息的受限道路网络模型来表达道路网中的交通禁行约束,然后在标记设定算法基础上实现了最优路径算法.文献[9]对具有动态交通拥塞限制和静态禁行限制的道路网的路径规划进行了研究,分别用增加加权系数描述路段的交通拥塞状况和结点禁行标志表来达交通限制,并提出了兼顾静态和动态交通限制的最优路径规划方法.这些改进在一定程度上解决了交通约束的影响,但没有对路径规划的时耗进行足够的考虑.于是文献[10]将路径时间与路径距离的加权和作为目标函数,提出了一种基于蚁群算法的路径规划方法.但是这一方法对于交通约束的考虑不够充分,且路网规模较大时算法时间比较长.为此,本文考虑在文献[10]的研究基础上,通过加强对道路交通约束的描述和缩减算法的搜索空间,来改进基本蚁群算法,进而提高路径规划的效率和有效性.

1 基本蚁群算法原理

蚁群算法是20世纪90年代由意大利学者Dorigo等^[1]通过模拟自然界蚂蚁觅食行为提出的一种仿生进化算法.由于蚂蚁觅食过程中会在所经过路径上释放一种被称为信息素的物质,因而其他经过该路径的蚂蚁可以通过感知这种物质,并根据其残留量确定行进的方向.这样,蚂蚁选择越多的路径上所留下的信息素浓度会越大,而浓度大的路径会吸引更多的蚂蚁,这样就形成一种正反馈.在这种正反馈机制作用下,蚁群最终可以找到一条巢穴到食物源之间的最短路径.

设 m 是蚁群中蚂蚁的数量, $\tau_i(t)$ 为 t 时刻路径 (i,j) 上的信息素浓度.初始时刻,各路径上信息素浓度相同,设 $\tau_i(0)=C$ (C 为常数),蚂蚁均由路径规划的起点出发.然后每只蚂蚁根据所在结点 i 邻接各路径上的信息素浓度选择其行进路径.在 t 时刻蚂蚁 $k(k=1,2,\dots,n)$ 由结点 i 转移到 j 的状态转移概率

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_i(t)]^\alpha \cdot [\eta_k(t)]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} [\tau_s(t)]^\alpha \cdot [\eta_s(t)]^\beta}, & \text{若 } j \in \text{allowed}_k; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\text{allowed}_k = \{N \setminus \text{tabu}_k\}$ 表示蚂蚁 k 下一步允许选择的结点(N 为蚂蚁所在道路网络, tabu_k 为禁忌表,表示蚂蚁已经走过的结点); α, β 分别表示蚂蚁在运动过程中所积累的信息素和启发信息在路径选择中所起的不同作用; $\eta_i(t)$ 为启发函数,表示蚂蚁从结点 i 转移到 j 的期望程度,其表达式一般为

$$\eta_i(t) = \frac{1}{d_{ij}}. \quad (2)$$

式中, d_{ij} 表示结点 i 和结点 j 之间的距离.

当蚂蚁完成一次循环后,需要对路径上的信息素进行更新:

$$\tau_i(t+n) = (1-\rho) \cdot \tau_i(t) + \Delta\tau_i(t), \quad (3)$$

$$\Delta\tau_i(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_i^k(t). \quad (4)$$

式中, $\rho \in (0,1)$ 表示信息素挥发系数,则 $1-\rho$ 表示信息素残留因子. $\Delta\tau_i(t)$ 表示本次循环中路径 (i,j) 上的信息素增量, $\Delta\tau_i^k(t)$ 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中留在路径 (i,j) 上的信息素,其取值通常采用Dorigo提出的ant cycle system模型求得,即

$$\Delta\tau_i^k(t) = \begin{cases} Q/L_k, & i,j \in L_k; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (5)$$

式中, Q 为一常数,表示信息素强度, L_k 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中所走的路径长度.

2 改进蚁群算法的路径规划

2.1 构建路径规划目标函数

在实际的路径规划中,不仅要考虑出行距离的长短,而且也要考虑行程时耗和能耗等因素.由于出行距离和行程时耗在一定程度上可以反映能耗等因素的影响,为此,本文路径规划的目标是寻求路径长度和行程时耗综合测度的最佳.于是,从起点 O 到终点 D 的规划路径综合测度函数^[10,12]

$$F_k = \gamma D_k + \lambda \delta T_k. \quad (6)$$

式中, D_k 为规划路径的总长度, T_k 为规划路径上的时耗, γ, λ 分别为 D_k 和 T_k 的相对重要性, δ 为常数,用以保证 T_k 与 D_k 具有相同的数量等级.

由于道路交通约束的存在, T_k 并不是一个确定的参数,它与道路状况(如路宽)、交通环境(如交通拥塞、道路功能)、车辆状况(如车辆类型、载重)和交通参与者素质(如驾驶技术、视力)等因素有关.这些因素的影响可以通过道路权值来进行描述,道路权值的求取可采用基于模糊数学的权值确定算法来确定^[13],公式如下:

$w(i, j) = d_{ij} \cdot (\lambda + \text{fuzz}(x_1, x_2, \dots, x_l)) \cdot (7)$
 式中, d_{ij} 为道路长度, x_1, x_2, \dots, x_l 为除道路长度以外的其他影响因素, $\text{fuzz}(x_1, x_2, \dots, x_l)$ 为这些影响因素的模糊综合评价函数, 其可通过模糊数学的方式求得. 系数 λ, μ 反映了道路长度与模糊综合评价函数对权值的影响程度.

于是路段 (i, j) 上的时耗 t_{ij} 可以描述如下:

$$t_{ij} = \frac{w(i, j)}{v_{ij}}. \quad (8)$$

式中, v_{ij} 为交通参与者在路段 (i, j) 上的行进速度.

至此, 可以定义路径规划的目标函数为

$$F = \min(F_k) = \min\left[\gamma \sum_{o \rightarrow} d_k(i, j) + \chi \delta \sum_{o \rightarrow} t_k(i, j)\right]. \quad (9)$$

需要注意的是, 式 (7) 中没有包括禁行和部分限行规制因素, 因为这些规制对道路所起的作用是禁止或限制通行, 结果相当于相应路段方向不能通行, 在具有连续意义的权值上不易描述. 因此, 对于这样的规制因素我们通过设定相应方向路段权值为空或特定量值来使人工蚂蚁忽略此路段的存在.

2.2 信息素更新策略

由于本文路径规划的目标是寻求路径长度和行程时耗综合测度的最佳, 因而在算法过程中, 蚂蚁 k 循环结束后留在路径 (i, j) 上的信息量 $\Delta \tau_{ij}^k(t)$ 由下式求取:

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{F_k}, & \text{若蚂蚁 } k \text{ 经过 } (i, j); \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (10)$$

2.3 启发信息更新策略

在进行路径规划时, 人工蚂蚁根据式 (1) 来进行路径选择. 但是, 式 (1) 中只反映了当前结点与邻接结点的关系, 没有反映出邻接结点与终点的关系, 其搜索空间为以起点为中心的圆形区域, 这样没有方向的搜索容易出现搜索失败或收敛速度慢等问题. 为此, 文献 [14] 将当前结点 i 的下一可选结点 j 与终点 D 的直线距离 d_{jd} 引入启发函数, 得到

$$\eta_j(t) = \frac{1}{d_{ij} + d_{jd}}. \quad (11)$$

这样, 通过将 d_{jd} 引入启发函数, 加强了搜索的方向性, 搜索空间缩减为从起点到终点的一个椭圆形区域, 增强了搜索的成功率, 加快了搜索效率. 然而, 在实际道路交通中, 由于交通环境 (如高速路、快速路的存在) 等的影响, 这种具有方向启发的方法得到的并不一定是最优路径. 这是由于方向启发的过

早加入, 使得初始搜索空间过小. 为此, 这里引入起点 O 与当前结点 i 的直线距离 d_{oi} 作为初始搜索空间大小的度量, 来放宽初始搜索空间, 待搜索到一定程度后再引入方向启发来缩减搜索空间.

于是, 在利用蚁群算法进行路径规划时, 人工蚂蚁首先按基本蚁群算法进行路径搜索, 当 d_{oi} 大于给定阈值 ϵ 后, 采用式 (10) 来实现具有方向启发的路径搜索. 这样不仅增大了搜索到最优路径的可能性, 而且也充分缩减了搜索空间, 提高了算法效率. 对于起点与当前结点的直线距离阈值 ϵ 需根据城市规模来确定, 通常参照起点与终点直线距离 d_{od} 来确定具体的取值.

2.4 算法过程

由于路径选择的随机性, 因此在蚂蚁数量巨大时, 不可能所有蚂蚁都会聚合到一条路径上. 于是规定: 当 90% 的蚂蚁聚合到同一条路径时, 认为结果是收敛, 该路径为最优路径.

于是路径规划方法的流程图如图 1 所示, 其主要步骤如下:

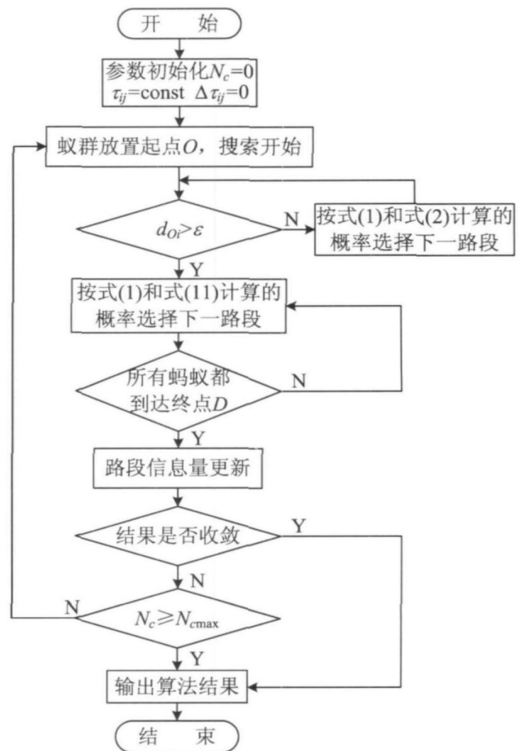


图 1 算法流程图

Fig. 1 The flow chart of the algorithm

Step 1 参数初始化.

令时间 $t=0$ 和循环次数 $N_c=0$, 设置最大循环

次数 $N_{c_{max}}$ 。令每条道路路段 (i, j) 的初始化信息量 $\tau_{ij}(0) = \text{const}$, $\Delta\tau_{ij} = 0$ 。

Step 2 将 m 只蚂蚁置于起点 O , 每只蚂蚁均由此开始搜索。

Step 3 若 $d_{\alpha} > \epsilon$ 不成立, 则根据式 (1) 和式 (2) 选择下一路段, 重复此步, 直到 $d_{\alpha} > \epsilon$ 成立。

Step 4 根据式 (1) 和式 (11) 选择下一路段, 并前进到下一路段, 继续搜索直到终点 D 。

Step 5 重复 Step 3, 直到所有蚂蚁都到达终点 D 。

Step 6 根据式 (4) 和式 (10) 计算本次循环产生的信息量 $\Delta\tau_{ij}(t)$, 按式 (3) 更新每条路段上的信息量。

Step 7 若每个蚂蚁的结果收敛于同一路径则算法结束。

Step 8 若循环次数 $N_c \geq N_{c_{max}}$, 则算法结束; 否则转到 Step 2。

3 实验结果与分析

为验证算法的性能, 我们进行了对比实验。实验在义乌市城区道路网(如图 2 所示)和交通网实际数据上进行。该路网共有 306 个道路交叉口, 452 个路段, 每一路段的道路交通属性信息都按式 (7) 转换为道路权值。实验选取的起点为图中红色小旗 O 点所在的路口, 终点为蓝色小旗 D 所在的路口。算法参数设置见表 1 所示, 实验要求是实现综合路径最短和时耗最少的路径规划。



图 2 实验路网示意图

Fig. 2 Road network for experiments

我们分别将本文算法、文献 [10] 中的蚁群算法(表示为 T-ACA)和文献 [7] 中的改进 Dijkstra 算法

表 1 改进蚁群算法参数取值表

Tab. 1 Parameters of the improved ant colony algorithm												
α	β	ρ	γ	χ	δ	λ	μ	Q	$N_{c_{max}}$	m	ϵ	
1	1	0.8	1	1	13	1	1	1 000	100	50	0.2 d_{OD}	

在上述环境中运行, 得到表 2 所示的结果。从表 2 中可以看出, 本文所得算法所得规划路径长度最长, 但时耗最少, 这主要是因为本文算法更多的考虑了交通约束对路径规划的影响。对于算法时间, 由于本文算法引入了方向启发信息, 缩减了搜索空间, 节约了算法时间, 因而比 T-ACA 有更高的规划效率。改进 Dijkstra 算法采用遍历整个网络的原理来实现路径规划, 在路网规模较小时效率较高, 但在本文的较大规模路网中, 算法效率明显不如本文算法。

表 2 实验结果列表

Tab. 2 Experimental results				
算法类型	所得最优路径长度/km	路径时耗 /m	算法时间 /s	目标函数值
本文算法	9.86	10.51	0.67	1 8057.8
T-ACA	9.63	10.94	0.82	1 8163.2
改进 Dijkstra 算法	9.22	11.98	1.04	1 8564.4

4 结论

本文对实际道路交通中, 考虑交通约束情况下的路径规划方法进行了分析, 并在基础上提出了一种基于改进蚁群算法的路径规划方法。该方法通过构建目标函数, 增强对实际道路交通网络的描述能力, 提高路径规划的有效性; 在引入方向启发信息的同时, 保留了足够的初始搜索空间, 提高了算法的路径规划效率。最后利用实际的道路交通数据对算法进行了对比实验, 从实验结果可以看出本文算法在规划效率和有效性上均有明显提高。并且可以推知, 在更大规模的道路交通网络中, 本文算法的优越性将更为明显。

参考文献 References)

[1] 张其善, 吴今培, 杨东凯. 智能车辆定位导航系统及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[2] Floyd R W. Algorithm 97: Shortest path [J]. Communications of the ACM, 1962, 5(6): 3-5.

[3] Ikeda T, Hsu M Y, Inai H. A fast algorithm for finding better routes by AI search techniques [C] // IEEE Vehicle Navigation and Information Systems Conference Proceedings. IEEE Press, 1994: 291-296.

(下转第 995 页)

- nonholonomic control problems [J]. Control Systems Magazine, IEEE, 1995, 15(6): 20-36.
- [3] Astolfi A. Exponential stabilization of a wheeled mobile robot via discontinuous control [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1999, 121(1): 121-126.
- [4] Lee T C. Exponential stabilization for nonlinear systems with applications to nonholonomic systems[J]. Automatica, 2003, 39(6): 1045-1051.
- [5] Marchand N, Alamir M. Discontinuous exponential stabilization of chained form systems[J]. Automatica, 2003, 39(2): 343-348.
- [6] Zairong X, Gang F, Jiang Z P, et al. A switching algorithm for global exponential stabilization of uncertain chained systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(10): 1793-1798.
- [7] Hong Y, Wang J, Xi Z. Stabilization of uncertain chained form systems within finite settling time[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(9): 1379-1384.
- [8] Li Sheng, Ma Guoliang, Cheng Qingwei, et al. Discontinuous adaptive stabilization of uncertain nonholonomic mobile robot [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(1): 161-164.
- 李胜, 马国梁, 陈庆伟, 等. 一类不确定非完整机器人的不连续自适应镇定[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(1): 161-164.
- [9] Li Chuanfeng, Wang Chaoli. Robust stabilization of uncertain nonholonomic kinematic systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(4): 427-430.
- 李传峰, 王朝立. 一类不确定非完整运动学系统的鲁棒镇定[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(4): 427-430.
- [10] Sun Duoqing, Huo Wei, Yang Xiao. Path following control of mobile robots with model uncertainty based on hierarchical fuzzy systems[J]. Control Theory and Applications, 2004, 21(4): 489-494.
- 孙多青, 霍伟, 杨杲. 含模型不确定性移动机器人路径跟踪的分层模糊控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(4): 489-494.
- [11] Slotine J J E, Li W P. Applied Nonlinear Control[M]. New Jersey, Englewood Cliffs; Prentice Hall, 1991.

(上接第983页)

- [4] Gen M, Cheng R W, Wang D W. Genetic Algorithms for Solving Shortest Path Problems [C]. //IEEE International Conference on Evolutionary Computation. IEEE Press, 1997, 401-406.
- [5] Araújo F, Ribeiro B, Rodrigues L. A neural network for shortest path computation[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2001, 12(5): 1067-1073.
- [6] Hsiao Y T, Chuang C L, Chien C C. Ant colony optimization for best path planning[C]. //ASCT 2004. Sapporo, 2004, 109-113.
- [7] 李挺, 杨殿阁, 罗禹贡, 等. 受限路网中汽车行驶最优路径算法及优化实现[J]. 汽车工程, 2005, 27(6): 706-709.
- [8] 王丰元, 潘福全, 张丽霞, 等. 基于交通限制的路网最优路径算法[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(1): 92-95.
- [9] 邹旭东, 郑四发, 班学钢, 等. 具有交通限制约束的道路网络最优路径算法[J]. 公路交通科技, 2002, 19(4): 82-84.
- [10] Liu J Y, Fang Y J, Liu Y J. Ant colony system algorithm for path routing of urban traffic vehicles [C]. //Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. IEEE Press, 2007, 1902-1907.
- [11] Dorigo M, Stützle T. Ant Colony Optimization[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 2004.
- [12] 吴启迪, 汪镭. 智能蚁群算法及应用[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2004.
- [13] 陈玉敏, 龚健雅. 基于模糊数学的多因素道路网权值确定算法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(10): 928-931.
- [14] 黄贵玲, 高西全, 靳松杰, 等. 基于蚁群算法的最短路径问题的研究与应用[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(13): 233-235.