

一种人工势场导向的蚁群路径规划算法

王芳¹ 李昆鹏² 袁明新³

(西安航空学院航空工程系 西安 710077)¹ (长安大学机械学院 西安 710064)²

(江苏科技大学机电与汽车工程学院 张家港 215600)³

摘要 针对复杂环境下的机器人路径规划问题,提出一种势场法优化的蚁群路径规划算法。为提高算法收敛速度,将人工势场法的规划结果作为先验知识,对蚁群初始到达的栅格进行邻域信息素的初始化,并通过构建势场导向权重改变蚂蚁概率转移函数,使其作用于蚂蚁路径搜索的始终,从而改善蚁群路径搜索的盲目性。仿真结果表明,新算法具有收敛速度快、规划路径短以及环境自适应的优点。

关键词 路径规划,蚁群算法,人工势场,转移概率,导向权

中图分类号 TP242.6 **文献标识码** A

AntColony Algorithm Based on Optimization of Potential Field Method for Path Planning

WANG Fang¹ LI Kun-peng² YUAN Ming-xin³

(Department of aerial Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)¹

(School of Mechanical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)²

(School of Mechanical-Electronic and Automotive Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China)³

Abstract To realize path planning in complicated environments, a new potential field optimal ant colony algorithm for path planning was presented. To further quicken the convergence speed of AC, the path planning results of potential field method were taken as the prior knowledge, and the original reached grids were initialized by neighborhood pheromone. The potential field guided weight was constructed to change transition probability as well, thus it can be active over the entire period of path searching, and can get rid of blindness. Simulation results indicate that the proposed algorithm (APF-AC) is characterized by high convergence speed, short planning path and self-adaptive.

Keywords Path planning, Ant colony algorithm, Artificial potential field, Transition probability, Guided weight computer

1 引言

目前,对于不确定环境中的实时路径规划问题,仍然是自主移动机器人领域的重点和难点,还缺少行之有效的解决方法。近年来,国内外不少学者将仿生智能算法应用到路径规划中:肖本贤等^[1]将模糊神经网络应用于路径规划,虽然通过机器人上的传感器能完成未知环境下的路径规划,但在模糊控制规则及算法复杂度等方面有待进一步改进;王孙安团队^[2-4]将人工免疫网络应用于机器人控制及路径规划技术中,取得了比较好的效果。基于仿生算法在机器人路径规划中虽然可以获得较高精度的可行路径,但是通常算法复杂度较高,难以满足机器人实时运动规划的需要;Khatib O^[5]提出的人工势场法由于在数学描述上的简洁且便于实时控制,因此可以很好地改善路径规划的实时性问题。

为了更好地解决复杂环境中自主移动机器人的路径规划问题,本文融合改进人工势场法的实时性以及蚁群算法正反馈和全局寻优点,提出两种有效的基于势场法优化的蚁群路径规划策略,其不仅可以满足机器人的实时避障,同时在复杂环境中也可以很好地改善传统实时规划策略中存在的局部极

小、徘徊等问题。

2 蚁群路径规划算法

尽管蚂蚁个体行为比较简单,但是由这些简单个体所组成的群体却表现出极其复杂的行为特征。Dorigo M等^[6]于1991年首次提出蚁群算法,其基本规则如下。

2.1 路径选择规则

在路径选择阶段,蚂蚁会根据路径上的信息素来选择运动方向, t 时刻蚂蚁 k 从节点 i 转移到节点 j 的概率按下式计算^[7]:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{j \in allowed_k} \tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}, & j \in allowed_k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻节点 i 和 j 之间残留的信息素; α 为信息素启发因子; $\eta_{ij}(t)$ 为 t 时刻节点 i 和 j 之间的期望启发函数; β 为期望启发因子; $allowed_k = (Tabu_k)$ 为蚂蚁下一步允许选择的节点, $Tabu_k$ 为禁忌表,记录蚂蚁 k 所走过的节点。

期望启发函数定义为节点 i 和 j 之间的距离 d_{ij} 的倒数,即,

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

2.2 信息素更新规则

蚂蚁走过的路径上会留下信息素,同时为了避免路径上因残留信息素过多而造成启发信息被淹没,信息素会随着时间的流逝而挥发,设 ρ 为信息素挥发系数且 $(0 \leq \rho < 1)$, $t + \Delta t$ 时刻节点 i 和 j 上的信息素更新规则为^[8]:

$$\tau_{ij}(t + \Delta t) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (3)$$

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

式中, $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 为第 k 只蚂蚁在本次循环中留在节点 i 和 j 之间的信息素,这里采用 Dorigo M 提出的 Ant-Cycle 模型,即,

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & (i, j) \in p_k(\text{begin}, \text{end}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

式中, Q 为信息素强度; L_k 为蚂蚁 k 在本次循环中所走过路径的总长度; $p_k(\text{begin}, \text{end})$ 为蚂蚁 k 在本次循环中从起点到终点所走过的路径。

在蚁群路径规划算法中,初始解的产生带有随机性,不利于路径搜索效率;同时,由于蚁群算法的正反馈机制,使得质量不高的初始解可能使算法收敛于次优解。因此,高效地获得较高质量的初始解,同时改善蚁群路径搜索中的盲目性对提高算法性能具有重要意义。

3 势场法导向的蚁群路径规划算法

3.1 基于势场优化的蚁群算法(APFOA)

将人工势场法得到的规划结果作为蚁群算法较高质量的初始解,对初始到达的栅格进行邻域栅格信息素的初始化,可以大大提高路径搜索的效率,算法具体计算过程如下:

步骤 1 确定初次到达的栅格。

步骤 2 利用势场法,计算蚂蚁在该栅格时受到的引力和斥力,并计算基于势场法的转移角度。

步骤 3 计算势场法转移角度与蚂蚁相邻 8 个栅格转移角度的差。如图 1 所示,图中中心黑点为蚂蚁当前位置,周围被分割的 8 个栅格区表示蚂蚁下一步可能的移动方向,分别用细实线表示,并用数字标明;而在势场法下,蚂蚁受到的引力、斥力及合力分别用粗实线和虚线表示;逐一计算合力与 8 个栅格方向的角度差。

步骤 4 对上述角度差进行排序,角度差小说明越接近势场法转移方向,此时对相应的转移方向赋予较大的信息素,而其余 7 个方向,按照由小到大,分别赋予较小的初始信息素。

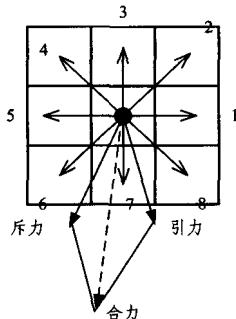


图 1 最佳栅格方向计算

图 1 中,合力与方向 7 的角度差最小,则方向 7 即为蚂蚁

转移的最佳栅格方向,因此将该栅格信息素赋予最大权值,势必提高蚂蚁的转移概率,其余按照夹角由小到大分别赋予较小的权值,由于采用轮盘赌的选择方法,因此大的权值,即信息素强度高的栅格被选中的机会较大,同时,信息素强度低的栅格也存在被选择的可能性。

步骤 5 经过路径信息素强度初始化之后,采用蚁群算法进行路径搜索,蚂蚁在相邻位置间的转移按照式(1)定义的转移概率进行,而当蚂蚁到达目标,完成一次搜索后,按照式(3)进行信息素的更新,完成一次群体优化,不断重复此过程,最终完成最佳路径的搜索。

3.2 基于势场法导向的蚁群路径规划算法(APFGA)

将人工势场法得到的规划结果作为蚁群算法状态转移概率的依据,使其作用于路径搜索的全过程,可以大大提高路径搜索的效率,算法具体计算过程如下:

步骤 1 初始化算法参数:包括蚂蚁数 m ,最大循环次数 T_{\max} , α 、 β 、 γ 、 λ 及人工势场法中的相关参数。

步骤 2 初始化规划任务。

步骤 3 提取环境信息,计算当前蚂蚁的可达栅格表。

步骤 4 计算机器人在虚拟势场中受到的引力、斥力,并计算势场导向权。

在图 1 中,同样计算出势场法合力与邻域栅格方向的夹角,用夹角构建导向权。设 F_{at} 、 F_{rep} 分别为人工势场法的引力和斥力,则蚂蚁在人工势场中的避障角度为:

$$\theta = \angle(F_{at} + \sum F_{rep}) \quad (6)$$

假设当前蚂蚁在某栅格中,其向邻域栅格转移的方向角为 φ ,则定义该栅格方向的人工势场导向权为:

$$q(t) = \lambda \cdot \exp(\cos(\theta - \varphi)) \quad (7)$$

式中, λ 为调整系数。由上式可以看出,蚂蚁邻域某栅格方向与势场法避障方向越接近,其导向权值越大。

步骤 5 计算蚂蚁转移概率,按概率随机得到蚂蚁下一步的移动位置,并更新禁忌表。

为了提高路径搜索效率,结合蚁群算法的相关机理,构建如下的蚂蚁概率转移函数:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^k(t) \eta_{ij}^k(t) q_{ij}^k(t)}{\sum_{s \in allowed_k} \tau_{is}^k(t) \eta_{is}^k(t) q_{is}^k(t)}, & j \in allowed_k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $q_{ij}(t)$ 为导向权; γ 为导向权启发因子。 $\eta_{ij}(t)$ 的表达式定义如下:

$$\eta_{ij}(t) = \frac{1}{\Delta d(i) - \min(\Delta d) + l} \quad (9)$$

式中, Δd 为距离变化集; l 为调整系数,且 $l > 0$ 。其他参数定义同上节。

步骤 6 判断一只蚂蚁是否完成路径搜索,若没有则转步骤 3,否则依据式(3)进行信息素的局部更新。

步骤 7 判断所有蚂蚁是否完成一次循环,如没有完成则转步骤 3。

步骤 8 判断是否满足终止条件(达到设定的循环次数或者最优解连续若干代未发生变化),如果没有则转步骤 3,否则输出最优路径。

4 仿真测试与讨论

为了验证文中算法的有效性,针对不同环境给出了算法

的仿真实验测试。本文提供了如图2所示的两种环境,环境1相对比较简单,障碍物较少。环境2比较复杂,且存在明显的局部极小。针对两种环境,分别对基本蚁群算法、基于势场法优化的蚁群算法及势场法导向的蚁群算法进行规划对比测试,结果如图3所示。考虑到算法的随机性,仿真中,每种环境进行了50次独立随机测试。算法中的具体参数设置分别为:最大循环次数为 $T_{\max}=50$,每次出动的蚂蚁数为 $m=15$, $\alpha=1$, $\beta=2$, $\gamma=2$, $\rho=0.2$ 。

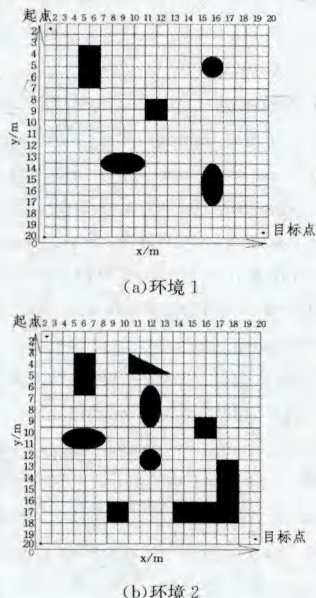


图2 仿真测试环境

图3(a)(b)(c)分别为环境1中3种规划算法的蚂蚁信息素演化曲线。图3(d)为3种算法最优规划结果。从结果可见,在环境简单时,3种方法基本上都能得到最优路径。从信息素演化图可见ACA算法(图3(a))在路径搜索过程中带有一定随机性,而另两种方法则减少了盲目搜索,特别是对于势场导向的蚁群算法,人工势场作用于路径搜索的始终,因而最优路径的规划效率也最高。

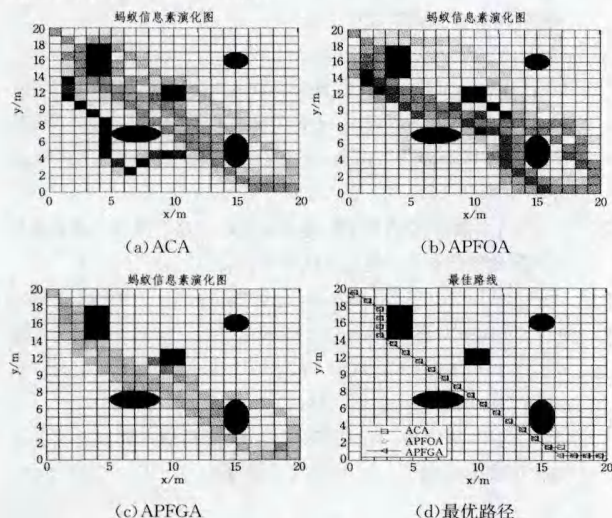


图3 环境1信息素演化曲线及最优路线

图4(a)(b)(c)为环境2中3种规划算法的蚂蚁信息素演化曲线。图4(d)为3种算法最优规划结果。和环境1相比,

环境2更为复杂,且存在明显局部极小,虽然3种方法最终都能收敛到各自的最优路径,但从蚁群信息素演化图可见,在人工势场作用下,蚂蚁的路径搜索更趋理性,减少了对明显非最优路径的尝试,体现了较强的规划能力。

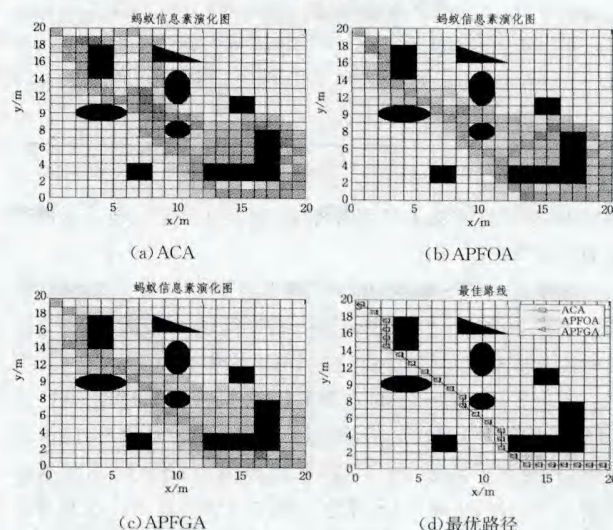


图4 环境2信息素演化曲线及最优路线

图5为3种规划算法在环境1和环境2中的平均收敛曲线,图中上边3条曲线为3种算法的所有蚂蚁路径的平均进化曲线,下边3条曲线为所有最优路径的平均进化曲线。从图中的对比结果可见ACA规划能力相对较弱,而改进后的两种算法(APFOA和APFGA)则明显提高了最优路径搜索能力,特别是APFGA,人工势场法的引导贯穿于路径搜索的始终,规划效果明显是最优的。

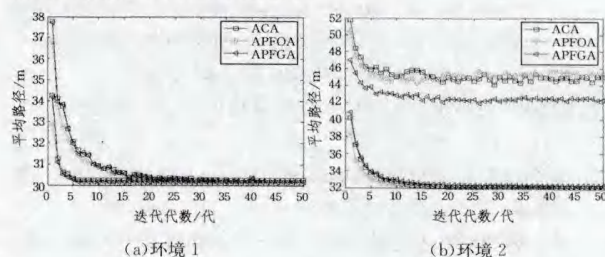


图5 两种环境下平均收敛曲线

结束语 本文针对复杂环境中机器人路径规划问题,融合蚁群算法和人工势场法各自优点,提出一种势场法导向的蚁群算法,算法中将人工势场规划结果作为蚁群路径搜索的初始解,以及通过构建势场导向权,使势场法的引导作用于蚁群路径搜索的始终,可以改善蚂蚁路径搜索的盲目性,从而显著提高收敛速度。仿真实验测试表明,在收敛速度及最优规划方面,经过势场法优化的蚁群算法整体上要优于蚁群算法和人工势场法,而势场导向的蚁群算法效果更好。

参考文献

- [1] 肖本贤,齐东流,刘海霞. 动态环境中基于模糊神经网络的AGV路径规划[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(9): 2401-2404
- [2] Li J H, Wang S A. Model of immune agent and application in path finding of autonomous robots [C]// Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Pis-

- [3] 庄健,王孙安. 基于人工免疫网络机器人路径规划算法的进一步研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 1017-1019
- [4] 袁明新,王孙安,吴灿阳,等. Baldwin效应的自适应免疫网络规划算法[J]. 西安交通大学学报, 2009, 23(5): 85-90, 113
- [5] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98

(上接第 46 页)

术标准、模式标准和人机服务标准,以保证未来从技术上进行集成的可行性。

结束语 CTS 的形成与发展本身即是交通运输面临的前所未有的挑战。CTS 带来的一系列问题,决定了其研究伊始就困难重重。本文针对这些问题,分析了 CPS 相应的特性。通过分析可知,CTS 适于解决这些问题。根据 CPS 在 CTS 中应用的可行性分析,提出了 CTCPS 的概念,构建了其框架,并制定了其标准。CTCPS 的提出是 CPS 研究领域拓展的又一例证,也是 CTS 理论研究的一个新方向。本文对未来 CTCPS 研究将面临的 4 大技术难题进行探讨,期望未来 CTCPS 研究在这些方面有所突破。作为一个新课题,CTCPS 需要更深入的研究来实现其实际应用。

参 考 文 献

- [1] 董治,吴兵,王艳丽,等. 中国城市群交通系统发展特征研究[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 83-88
- [2] Cartwright R, Cheng A, Hudak P, et al. Cyber-physical challenges in transportation system design [C]// Poovendran R. National workshop for research on high-confidence transportation cyber-physical system; automotive, aviation and rail. Washington D. C. : National science foundation, 2008: 220-224
- [3] 陈丽娜,王小乐,邓苏. CPS 体系结构设计[J]. 计算机科学, 2011, 38(5): 295-300
- [4] 林峰,舒少龙. 赛博物理系统发展综述[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(8): 1243-1248
- [5] 王中杰,谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述[J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1157-1166
- [6] 孙棣华,李永福,刘卫宁,等. 交通信息物理系统及其关键技术研究综述[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 144-155
- [7] 龚葵,李苏剑. 基于 CPS 理论的城市交通控制与诱导融合框架[J]. 公路交通科技, 2012, 29(05): 114-120
- [8] 何积丰. Cyber-physical systems[J]. 中国计算机学会通讯, 2010, 6(1): 25-29
- [9] Tan Ying, Goddard S, Perez L C. A prototype architecture for Cyber-physical systems[J]. ACM SIGBED Review, 2008, 5(1): 26
- [10] Sengupta R, Fallah Y P. The rise of the mobile internet: what does it mean for transportation[C]// Poovendran R. National workshop for research on high-confidence transportation cyber-physical system; automotive, aviation and rail. Washington D. C. : National science foundation, 2008: 190-194
- [11] Kang W, Son S H. The design of an open data service architec-

- [6] Colomni A, Dorigo M, Maniezzo V, et al. Distributed optimization by ant colonies[C]// Proceedings of the 1st European Conference on Artificial Life. Elsevier Publishing, Amsterdam, 1991: 134-142
- [7] 袁明新,王孙安,李昆鹏,等. 基于势场法优化的蚁群免疫网络路径规划研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4686-4690
- [8] 段俊花,李孝安,刘立云. 人工势场法在足球机器人路径规划中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(1): 138-140
- [9] 袁明新,王孙安,李昆鹏,等. 基于势场法优化的蚁群免疫网络路径规划研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4686-4690
- [10] 段俊花,李孝安,刘立云. 人工势场法在足球机器人路径规划中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(1): 138-140
- [11] 袁明新,王孙安,李昆鹏,等. 基于势场法优化的蚁群免疫网络路径规划研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4686-4690
- [12] Bestavros A, Kfoury A, Lapets A, et al. Safe compositional network sketches: formal framework[C]// Proceedings of the 13th ACM International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control. New York, USA: ACM, 2010: 231-241
- [13] LI Xu, YU Xue-gang, WAGH A, et al. Human Factors aware Service Scheduling in Vehicular Cyber-Physical Systems[C]// IEEE INFOCOM 2011-IEEE Conference on Computer Communications. New Jersey: IEEE, 2011: 2174-2182
- [14] 赵俊华,文福拴,薛禹胜. 电力 CPS 的架构及其实现技术与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 1-7
- [15] National Science Foundation of the United States. Cyber Physical System(CPS) program solicitation [EB/OL]. [2009-08-16]. <http://www.nsf.gov/pubs/2010/nsf1015/nsf1015.htm>
- [16] Rajkumar R, Lee I, Sha L, et al. Cyber physical systems: The next computing revolution on[C]// Proc of DAC. New York: ACM, 2010: 731-736
- [17] Pham N, Abdelzaher T, Nath S. On bounding data stream privacy in distributed cyber-physical systems[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing. Newport Beach, USA: IEEE, 2010: 211-218
- [18] Chong S, Skalka C, Vaughan J A. Self-identifying sensor data [C]// Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Stockholm, Sweden: ACM, 2010: 82-93
- [19] Madden J, Mcmillin B, Sinha A. Environmental Obfuscation of a Cyber Physical System: Vehicle Example[C]// IEEE 34th Annual Computer Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW 2010). New Jersey: IEEE Computer Society, 2010: 176-181
- [20] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 1-8
- [21] Wang A, Li Xu, Wan Jing-yan, et al. Human Centric Data Fusion in Vehicular Cyber-physical Systems[C]// 2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops. New Jersey: IEEE Computer Society, 2011: 684-689
- [22] 王鹏,向阳,宗宇伟,等. 基于时空 π 演算的信息物理融合系统组件可替换性判定[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(10): 2494-2500
- [23] 王小乐,陈丽娜,黄宏斌,等. 一种面向服务的 CPS 体系框架[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(增刊): 299-303