

# 基于多点协作的团队出行路径优化算法

邱吉刚<sup>1,2\*</sup>, 李汶隆<sup>1</sup>, 杨佳<sup>1</sup>

(1. 四川九洲电器集团有限责任公司 通信技术所, 成都 610041; 2. 清华大学 电子工程系, 北京 100083)

(\* 通信作者电子邮箱 380431810@qq.com)

**摘要:** 针对团队出行过程中因信息孤岛导致出行路径非优化和延时等待等问题, 提出了一种以团队成员信息共享为基础, 以集中式计算为手段的协作式路径优化算法。该算法统筹考虑成员间会合的便捷性、路径/时间最短化等多种因素基础上, 通过引入团队会合优先度因子对路径计算进行加权处理, 从而实现整个团队出行路径的最优化。理论分析表明, 协作式路径优化算法的计算复杂度随团队成员的数量线性增长, 与传统的 shortest path 算法计算复杂度基本相当。仿真结果表明, 会合优先度因子值的高低, 将会影响会合点及出行路径的选择, 因此, 可根据实际需求设置会合优先度因子, 实现团队会合和路径最短化的动态均衡。最后, 以协作式路径优化算法的一个具体的工程应用, 阐述团队成员间如何提供支持和帮助, 从而安全、高效和有序地到达目的地。

**关键词:** 最短路径; 协作式导航; 团体出行; 动态导航; 路径优化; 信息共享

**中图分类号:** TP393.03 **文献标志码:** A

## Path optimization algorithm for team navigation based on multiple point collaboration

QIU Jigang<sup>1,2\*</sup>, LI Wenlong<sup>1</sup>, YANG Jia<sup>1</sup>

(1. Telecommunication Technology Institute, Sichuan Jiuzhou Electric Group Company Limited, Chengdu Sichuan 610041, China;

2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Concerning the path non-optimization and the delay due to mutual-waiting caused by information island in the team travel, a collaborative path optimization algorithm was proposed which employed centralized computing based on information sharing among team members. The algorithm calculated the optimum navigation path weighted by the factor of meeting priority, taking meeting convenience and path time shortening into overall consideration. Theoretical analysis shows that the computation complexity increases linearly with the number of team members, and is approximately equal to that of the traditional path optimization algorithm. The simulation results show that the factor of meeting priority has a great influence on optimization path and meeting place. So, the factor of meeting priority needs to be set according to the actual requirement to ensure the dynamic balance between team cooperation and shortening path. A typical application solution of collaborative path optimization algorithm was given to illustrate how to support and to help each other among team members, and to travel together to the destination in order, safely and quickly.

**Key words:** shortest path; collaborative navigation; team travel; dynamic navigation; path optimization; information sharing

## 0 引言

随着社会经济迅猛发展及人民物质文化水平的提高, 结伴出行和团体性的商务活动日益频繁。在团队出行过程中, 为安全、有序、快捷到达目的地, 迫切需要解决一些个体出行过程中未曾出现的问题。例如, 团队成员如何实时获知其他成员的地理位置, 如何快捷地实现成员间会合, 如何避免团队成员在出行过程中的掉队问题, 如何综合考虑所耗时间、道路拥挤程度等多个因素确定最佳出行路径等。

## 1 相关研究

路径优化问题是智能交通领域的重要分支, 出行路径的最优化不仅可以减少出行者的时间和成本, 而且可以有效缓解交通拥堵、废气污染等系列问题, 因此, 路径优化问题一直

是众多业者和学者研究和关注的重点之一。

李军等<sup>[1]</sup>对车辆优化调度的相关理论和方法进行了深入分析, 并给出了具体的车辆优化调度算法的计算机实现。文献[2–6]对多目标条件下的路径优化问题进行了研究, 提出了系列策略将多目标问题转化为单目标问题, 从而应用单目标路径优化算法进行处理。其中: 文献[2]和文献[3]侧重于目标加权, 所提算法存在的问题在于如何确定合理科学的权重值, 而且难以实现均匀曲面上解的最优化; 文献[4]和文献[5]的主要思路在于, 确定一个主要目标的同时将其他目标转化为约束条件, 但是可能导致算法无解的问题; Reinhardt 等<sup>[6]</sup>针对条件和目标不可累加的多目标最短路径问题, 给出了一个通用的公式来处理一系列不可累加的条件, 最后用动态规划算法进行求解。基于遗传算法在解决多目标优化问题的潜在优势, 不少学者对遗传算法在多目标路径优化的相关应

收稿日期: 2015-02-11; 修回日期: 2015-03-21。 基金项目: 国家发改委应用示范项目(2013GZX0037)。

作者简介: 邱吉刚(1976–), 男, 四川南溪人, 博士, 主要研究方向: 无线通信、物联网; 李汶隆(1981–), 男, 四川南充人, 主要研究方向: 无线通信、移动互联网; 杨佳(1987–), 女, 四川广安人, 硕士, 主要研究方向: 物联网、计算机网络。

用进行了深入研究,比较典型的包括基于优先权的路径编码方法<sup>[7]</sup>和基因值顺序表示该基因连接的后续基因位置<sup>[8]</sup>的编码方法。

但是,现有的路径优化算法往往致力于解决个体出行过程中的系列问题,如何统筹考虑当前团队成员所处位置,结合其他一些目标或者约束条件,为团队成员选择一条合适的出行途径,迄今为止尚无相关机制提出。从工程应用而言,当前,小米<sup>[9-10]</sup>、中国联通<sup>[11-12]</sup>等厂商针对基于位置服务的相关应用,提出了一系列技术方案,用于实现用户之间地理位置等信息的共享。但是,上述方案主要着眼于位置信息的采集、传输及信息请求许可等操作,并未涉及如何基于共享的地理位置信息实现用户间的出行协作,尤其是如何实现面向团队出行的路径优化。

## 2 协作式路径优化算法

### 2.1 基本思想

为解决团队出行路径优化的难题,本文提出了一种以团队成员信息共享为基础,以集中式计算为手段的协作式路径优化算法,其基本思想:团队成员与中心控制器实时共享地理位置等相关信息,并实现导航策略和团队会合优先度因子参数的远程配置;中心控制器基于现有的路径优化算法和导航策略,结合团队会合优先度因子进行权重均衡,从而选择合适的出行路径和会合地点,引导团队成员的出行。

### 2.2 理论建模

以  $P_k = (v_{k,k_0}, v_{k,k_1}, \dots, v_{k,k_m})$  表示团队成员  $k$  从源点经过节点  $v_{k,k_0}, v_{k,k_1}, \dots, v_{k,k_m}$  到达会合节点  $v_{meeting}$  形成的路径;以  $P'_k = (v_{k,k_0}', v_{k,k_1}', \dots, v_{k,k_n}')$  表示团队成员  $k$  从会合点经过节点  $v_{k,k_0}', v_{k,k_1}', \dots, v_{k,k_n}'$  到达终点形成的路径。以路阻函数  $w: E \rightarrow R$  表示边的实际成本开销,这里的开销可根据实际情况映射为距离、油耗费用、时间、损失或任何其他沿一条路径线性积累的试图将其最小化的某个量。采用路网模型  $G = (V, E)$ , 团队成员出行成本可表述为:

$$T(u, v) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{k_m} w(P_k) + \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{k_n} w(P'_k) \quad (1)$$

以团队会合优先度因子  $r$  表示路径选择过程中对团队会合选择的倾向性,  $r$  越大则越倾向于尽快实现团队成员的会合,取值范围为  $[0, 1]$ 。引入团队会合优先度因子  $r$  进行加权处理,则团队成员出行成本开销可表示为:

$$F(u, v) = (1-r)T(u, v) + r \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{k_m} w(P_k) = (1-r) \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{k_n} w(P'_k) + (1+r) \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{k_m} w(P_k) \quad (2)$$

相应地,路径优化问题可转换为,求解  $P_k$  和  $P'_k$  使得  $F(u, v)$  最小化。

### 2.3 算法描述

虽然 2.2 节建模通过一定的策略将多目标优化(会合优先及总体出行成本最小化)转化为单目标优化,不过直接求取式(2)的数学解是非常困难的。为此,本文致力于寻求一种工程上可实现的协作式路径优化算法,由计算机启发式搜索出满足上述需求的路径。以  $K$  代表团队成员的集合,以  $\Psi$  代表无向图内节点集合协作式路径优化算法可表述如下:

- 1) Initialization of global variables
- 2) For  $k \in K$
- 3) Using Dijkstra to calculate distance  $A(k, m), m \in \Psi$
- 4) End
- 5) Get  $A(m) = \sum_{k=1}^K A(k, m)$
- 6) Sort  $A(m)$ , then  $A(S_m = 1) < A(S_m = 2) < \dots < A(S_m = M)$
- 7) For  $m \in S_m$
- 8) Using Dijkstra to calculate the distance from  $m$  to destination  $B(m)$
- 9)  $C(m) = K * B(m) + A(m)$
- 10)  $D(m) = (1-r) * C(m) + r * A(m)$
- 11) End
- 12)  $\min(D(m)) \rightarrow$  Best conjunction node and path

其中:步骤 2)~4) 采用 Dijkstra 算法计算团队成员当前位置到无线图内各节点的路径长度;步骤 5)~9) 用于计算当无向图内各节点作为会合点时,相应的路径长度;步骤 10) 采用团队会合优先因子  $r$  进行加权处理得到最终的出行成本;步骤 12) 由上述计算得到结果的最小值从而得到最佳会合节点和最佳出行途径。

值得一提的是,这里的路径长度可衍生为 2.2 节提及的路阻,实例化为距离、油耗等具体量。

### 2.4 算法复杂度分析

从 2.3 节可以看出,最佳路径的计算主要由 3 个步骤组成,其中步骤 1 采用 Dijkstra 算法搜索每个成员从当前位置到目的地的路径,计算量为  $O(K)O(V^2) + O(V)$ ,其中  $O(V^2)$  为搜索路径为  $V$  节点 Dijkstra 算法计算量;步骤 2 针对每个搜索路径上的每个节点进行路径累加、排序等操作,计算量为  $O(V)$ ;步骤 3 中候选的会合节点到目的节点的最短距离可直接利用步骤 1 的中间结果得到,此步骤的工作量主要计算  $C(m)$ 、 $D(m)$  及求最小值的计算量,可表示为  $O(V)$ ,因此,算法总的计算量为  $O(K)O(V^2) + O(V) = O(K)O(V^2)$ ,与每个节点独立采用 Dijkstra 算法搜索最佳路径导致的总工作量相近。

### 2.5 实验分析

下面以一个简单的三人结伴出行场景为例对协作式团队出行路径算法进行分析和讨论,如图 1 所示。

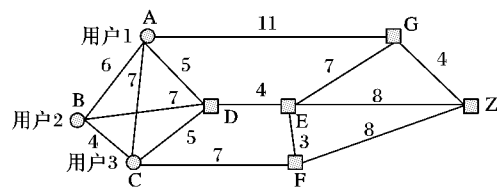


图1 团队出行示例

用户1、用户2、用户3当前分别处于地理位置A、地理位置B、地理位置C,准备结伴出行至地理位置Z。每条边上的数字代表对应子路径的长度。设置会合优先度因子  $r$  为 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 利用协作式团队出行路径算法搜索得到的路径如表 1 所示。

从表 1 可以看出,当会合优先度因子为 0 时,用户1、用户2、用户3分别选择路径 AGZ、BDEZ、CFZ 到达目的地。团队成员出行相互独立,不进行会合也不能在及时提供支持、帮助。从本质上讲,此时的协作式团队出行路径算法将退化为传统的个体出行路径优化算法。

表1 不同会合优先度因子情况下的会合节点和出行路径

会合 优先度因子	会合 节点	出行路径		
		用户1	用户2	用户3
0	Z	ACZ	BDEZ	CFZ
0.2	D	ADEZ	BDEZ	CDEZ
0.4	D	ADEZ	BDEZ	CDEZ
0.6	D	ADEZ	BDEZ	CDEZ
0.8	A	ACZ	BACZ	CAGZ
1.0	B	ABDEZ	BDEZ	CBDEZ

当会合优先度因子为0.8和1时,团队将会选择地理位置A和B为汇合点,随后一起前往目的地。在此情况下,团队成员能够实现尽快会合,在出行过程中彼此提供帮助。

当会合优先度因子为0.2,0.4和0.6时,团队将会选择地理位置D为汇合点,然后沿路径DEZ前往目的地。

总出行路径长度和会合前出行路径长度将随着会合优先度因子相应地变化,如表2所示。可以看出,随着会合优先度因子不断增大,总出行路径长度会逐渐上升,但是会合前出行路径长度逐渐下降。

表2 不同会合优先度因子下的总出行路径长度和会合前出行路径长度

会合优先 度因子	总出行 路径长度	会合前出 行路径长度	会合优先 度因子	总出行 路径长度	会合前出 行路径长度
0	39	39	0.6	53	17
0.2	53	17	0.8	58	13
0.4	53	17	1.0	67	10

综上所述,会合优先度因子值的高低,将会影响会合点及出行路径的选择。会合优先度因子较高时,可确保团队成员能够尽快会合,但是可能导致的缺陷在于,某些用户需要在当前位置等待其他成员到达后方才能出行,使得整体出行时间相对延长;并且某些成员为达到尽快会合的目的,不得不兜圈绕行。会合优先度因子较低时,从单个团队成员而言出行路径能够实现最短化,但是出行路径较为分散甚至到达目的地才实现会合,不能在出行过程中相互支持,因此,用户可根据自己的实际需求,设置不同的会合优先度因子值,实现团队会合和路径最短化的均衡。

### 3 协作式路径优化算法的工程应用

为解决当前团队出行过程中出现的相互等待、兜圈等现象,下面给出了协作式团队出行路径规划算法的工程应用方案。该方案以团队成员实时信息共享为基础,后端服务平台综合处理为核心,统筹考虑客户的不同需求,能够确保整个团队出行过程的安全、高效、有序。

首先,团队成员在出行前向后端服务平台进行注册,注册内容包括不限于自己的ID、团队ID、目的地,并确定会合优先度因子。

在此基础上,后端服务器采用协作式路径优化算法,在综合考虑成员会合便捷性、路径/时间最短等多种因素计算出最佳导航路径,并将导航路径和团队成员的会合地点通告给所有的团队成员。

团队成员在收到系统下发的导航路径后,按照指示与团队成员在指定地点会合,并结伴前进;在出行过程中,团队成员实时地将位置等信息传输至后端服务平台,并通过系统实

现成员之间信息共享。

系统收集各成员上报的信息,判定是否有影响出行的事件如掉队等发生。如果有,则需要重新计算导航路径,减轻上述事件的影响。

团队成员通过后端服务器实时获知其他团队成员的当前位置等信息,相互配合、支持和帮助,安全、有序地到达目的地。

### 4 结语

为解决团队出行过程中呈现的导航难题,本文提出一种基于多点协作的团队出行路径优化算法,并给出了一个具体的工程方案阐述算法的实际应用。该算法的基本思想在于,通过团队成员相互协作和信息共享,由中心控制器根据团队会合优先度因子进行出行路径计算的加权处理,统筹考虑会合便捷性、路径/时间最短等多种因素进行路径计算。虽然文中的协作式算法主要基于Dijkstra进行改进,但是其基本思想经适当修改后可应用于其他算法,例如Bellman-Ford和Floyd算法。值得一提的是,多目标条件下的路径优化问题经一定策略处理转化为单目标优化问题(参见文献[3-6])后,可进一步采用协作式路径优化思想进行团队出行路径计算。

#### 参考文献:

- [1] LI J, GUO Y. Vehicle routing problem: theory and method [M]. Beijing: China Logistics Publishing House, 2001: 48-87. (李军, 郭耀煌. 车辆优化调度理论与方法[M]. 北京: 中国物资出版社, 2001: 48-87.)
- [2] MOONEY P A. An evolutionary algorithm for multiple criteria path optimization problems [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2006, 20(4): 401-423.
- [3] PEREIRA C M N A. Evolutionary multi-criteria optimization in core designs: basic investigations and case study [J]. Annals of Nuclear Energy, 2004, 31(1): 1251-1264.
- [4] LI R, LEUNG Y. Multiple-objective route planning for dangerous goods using compromise programming [J]. Journal of Geographical Systems, 2011, 13(3): 249-271.
- [5] CHAKRABORTY B. GA-based multiple router selection for car navigation [C]// AACC 2004: Proceedings of the Second Asian Applied Computing Conference, LNCS 3285. Berlin: Springer, 2004: 76-83.
- [6] REINHARDT L B, PISINGER D. Multi-objective and multi-constrained nod-additive shortest path problems [J]. Computers & Operations Research, 2011, 38(3): 605-616.
- [7] GEN M, CHENG R, WANG D. Genetic algorithms for solving shortest path problems [C]// Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE, 1997: 401-406.
- [8] INAGAKI J, HASEYAMA M, KITAJIMA H. A genetic algorithm for determining multiple routes and its applications [C]// Proceeding of the 1999 IEEE International Symposiums on Circuits and Systems. Piscataway: IEEE, 1999: 137-140.
- [9] Millet Technology Co., Ltd. Method and device of positioning and navigation: China, 103968846A [P]. 2014-08-06. (小米科技有限责任公司. 定位导航方法和装置: 中国, 103968846A [P]. 2014-08-06.)



由上分析也可以看出,该算例属于供需不平衡情况,即在要求的保障时间窗内,可供应量不能完全满足需求点的油料需求量。战时很有可能出现这种情况,但本文模型只考虑保障量最大化和保障时间尽可能早,并没有对油料保障需求划分重要等级,因此,无法保证优先满足重要任务的保障需求。针对上述运力有限的情况,可通过设定任务优先级的方式,保障重要任务的油料需求得到满足;或者在条件允许的情况下,增加野战油库及各单位的运油车数量,提高运输能力。

#### 4 结语

本文研究了基于多时间窗的油料保障优化模型。首先对模型中所涉及到的基本要素,如油料保障点、油料需求点、油料保障需求、油料保障任务等进行了形式化描述;在此基础上,通过综合考虑油料保障的时间约束和运力约束,建立了油料调拨运输 CSP 模型;并利用 PSO 算法对模型进行求解。算例表明,该模型能够较好地解决多时间窗的油料调拨运输问题。

#### 参考文献:

- [1] HUANG Y, HU L, SU M. The optimization model of military POL allocation [J]. Journal of Xuzhou Air Force Academy, 1997, 4: 22-24. (黄永平, 胡利明, 苏梦. 军队油料调拨优化模型[J]. 徐州空军学院学报, 1997, 4: 22-24.)
- [2] WANG J, NING X. Optimal allocation of aviation fuel during wartime [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1999, 31(1): 112-115. (汪军, 宁宣熙. 战时航空油料的优化调拨[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(1): 112-115.)
- [3] LIU Q, HE Q, MU X. Pattern analysis and model implementation of fuel supply resource allocation and transportation optimization model [J]. China Storage & Transport, 2013(4): 127-130. (刘奇韬, 何奇, 穆鑫. 油料保障资源调拨运输优化模式分析和模型实现[J]. 中国储运, 2013(4): 127-130.)
- [4] ZHANG L, WANG Y, YAO D, et al. Aviation fuel transportation optimization based on multi-restriction model [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2011, 12(3): 6-10. (张来顺, 王瑛, 姚颀, 等. 基于多重约束整合模型的航空油料调运优化[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2011, 12(3): 6-10.)
- [5] FISHER M L. Vehicle routing problem [J]. Operations Research and Management Science, 1995, 8: 1-33.
- [6] SONG J, RONG G. Time window confirmation and transportation arrangement of oil distribution [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2003, 23(4): 63-69. (宋洁蔚, 荣冈. 成品油配送中时间窗的确定及运输的安排[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(4): 63-69.)
- [7] LAPORTE G. Fifty years of vehicle routing [J]. Transportation Science, 2009, 43(4): 408-416.
- [8] MIAO C, XU W, WU Q. A transportation modal and solution of large-scale emergency relief commodities [J]. Systems Engineering, 2006, 24(11): 6-12. (缪成, 许维胜, 吴启迪. 大规模应急救援物资运输模型的构建与求解[J]. 系统工程, 2006, 24(11): 6-12.)
- [9] SARIKLIS D, POWELL S. A heuristic method for the open vehicle routing problem [J]. Journal of the Operational Research Society, 2000, 51(5): 564-573.
- [10] BRAMEL J, SIMCHI LEVI D. A location based heuristic for general routing problems [J]. Operations Research, 1995, 43(4): 649-660.
- [11] DENG C. Based on oil allocation route optimization of improving genetic algorithm [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2009, 25(3): 39-43. (邓超. 基于改进遗传算法的油料调拨优化[J]. 后勤工程学院学报, 2009, 25(3): 39-43.)
- [12] LIN S, ZHOU Q, SHI X, et al. Application of ant colony algorithm in military POL transportation [J]. Logistics Technology, 2010, 29(10): 147-149. (林世岗, 周庆忠, 石祥辉, 等. 军事油料输送蚁群算法[J]. 物流技术, 2010, 29(10): 147-149.)
- [13] LAPORTE G, LOUVEAUX F, MERCURE H. The vehicle routing problem with stochastic time [J]. Transportation Science, 1992, 26(3): 161-170.
- [14] BALDACCINI R, MINGOZZI A, ROBERTI R. Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints [J]. European Journal of Operational Research, 2012, 218(1): 1-6.
- [15] LEE C Y, LEE Z J, LIN S W. An Enhanced Ant Colony Optimization (EACO) applied to capacitated vehicle routing problem [J]. Applied Intelligence, 2010, 32(1): 88-95.
- [16] CHANG F. Research on ground station data transmission resources allocation optimization model and algorithm [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (常飞. 卫星地面站数据传输资源配置优化模型与算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.)
- [17] WANG T, WU L. Research on emergency resources scheduling based on particle swarm optimization [J]. Journal of Academy of Military Transportation, 2011, 13(5): 70-74. (汪涛, 吴琳丽. 基于粒子群算法的应急物资调度研究[J]. 军事交通学院学报, 2011, 13(5): 70-74.)
- [18] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]// Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [19] LI Z, MA Y, LIU L. Particle swarm optimization based on the average optimal information for vehicle routing problem [J]. Logistics Sci-tech, 2013, 36(7): 50-54. (李壮阔, 马艳楠, 刘亮. 平均最优信息粒子群算法在车辆调度中的应用[J]. 物流科技, 2013, 36(7): 50-54.)

(上接第 2095 页)

- [10] Millet Technology Co., Ltd. Method, device and system for location information sharing: China, 102740228A [P]. 2012-10-17. (小米科技有限责任公司. 一种位置信息共享方法、装置及系统: 中国, 102740228A [P]. 2012-10-17.)
- [11] China United Network Communications Group Co., Ltd. Method of positioning service in mobile communication system: China, 1874589 [P]. 2006-12-06. (中国联合网络通信集团有限公司.

在移动通信系统中提供定位服务的方法: 中国, 1874589 [P]. 2006-12-06.)

- [12] China United Network Communications Group Co., Ltd. Method and device of mobile terminal positioning: China, 1719941 [P]. 2006-01-11. (中国联合网络通信集团有限公司. 一种通信网络的移动终端定位方法及装置: 中国, 1719941 [P]. 2006-01-11.)