

BGrR: 基于粒计算的大规模网络路径的加速方法

何富贵¹ 刘仁金¹ 张燕平² 张 铃²

(皖西学院信息工程学院 六安 237012)¹ (安徽大学计算机科学与技术学院 合肥 230039)²

摘 要 大规模网络路径问题是社会网络信息处理的基本问题。将粒计算方法引入到大规模网络研究中,结合社会网络分层和社团结构性建立网络的多粒度层次模型,实现网络的多粒度存储,将大规模网络复杂结构映射到不同粒度空间中。为了降低问题求解的复杂度,将最短路径问题映射到不同粒度空间中,将搜索过程从粗粒度空间向细粒度空间跳转以搜索路径信息,提出基于多粒度空间的最短路径搜索算法(BGrR)来加速大规模网络路径搜索。在实验中,以城市道路交通网络为数据源,通过与 A* 和 ALT 方法比较,验证了所提算法的有效性。

关键词 粒计算,网络结构分析,最短路径

中图分类号 TP18 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.11.051

BGrR: Large-scale Network Routing Speedup Techniques Based on Granular Computing

HE Fu-gui¹ LIU Ren-jin¹ ZHANG Yan-ping² ZHANG Ling²

(Department of Information Engineering, West Anhui University, Lu'an 237012, China)¹

(School of Computer Science and Technology, Anhui University, Hefei 230039, China)²

Abstract Large-scale network routing is one of the fundamental problems in social network information processing. A granular analysis method of network based on granular computing was put forward. From basic problems of granular computing, using hierarchy topology and community structure of social network, this paper studied how to select grain of network and how to deal with problems among different granular spaces. By hierarchical granular chain, complex and large-scale network was mapped into different granular spaces. To reduce complexity of problem solving, network routing problem was mapped into different granular spaces. Through the change of searching process from coarse granular space to fine granular space, network routing problem was solved. In order to speedup large-scale network routing finding, a Between-Granular Routing Algorithm(BGrR) was put forward. In experiment, using urban road network as data source, the proposed method was compared with other heuristic searching path methods (A* and ALT). The result of experiments shows that the proposed method is effective.

Keywords Granular computing, Network structure analysis, Shortest path

1 引言

最短路径问题是计算机、运筹学、地理信息和运输控制等领域研究的经典问题。随着信息技术的发展,信息数据量在不断膨胀,如何从海量、复杂的数据中获取有价值的知识成为了信息学科面临的一个重要课题。对于无法用主流软件工具处理的巨量资料——大数据^[1],如何从容面对。在社会网络中,如生物系统中基因网络、脑科学中神经网络、车辆交通系统中交通网络、物联网系统中传感器网络,面临的是在大规模网络中快速挖掘出有价值的信息和计算复杂度问题,涉及到的主要问题是大规模网络的信息描述和网络信息处理。

对于粒计算研究,Zadeh 早在 20 世纪 60 年代就提出了模糊集合论,并于 1979 年首次提出了模糊信息粒化问题,他

认为人类认知能力可概括为粒化、组织和因果 3 个主要特征^[2-5]。1985 年,Hobbs 提出了粒度(Granularity)的概念^[6]。Yager 和 Filev 指出“人们已形成了一个关于世界的粒度观点,……,在此观点下,人类的观察、度量、概念化和推理都是在粒度意义下进行的”^[7]。在 20 世纪 90 年代初,我国张铤院士、张铃教授在其专著《问题求解理论及应用》中指出快速自如地在不同粒度世界进行问题求解正是人类问题求解的强有力的表现,并给出粒计算分析的数学模型^[8]。这些观点都认为,粒化可作为人类认知复杂问题的重要特征之一。

在此,我们用粒计算方法对数据网络进行建模,为大规模网络信息处理提供一种新的方法,即通过粒化处理来降低问题求解的计算复杂性,用多粒度表示大规模网络,并通过粒度合成和分解技术,进行各粒度空间构建、转换,建立目标问题

到稿日期:2013-06-25 返修日期:2013-08-16 本文受国家自然科学基金(61073117,61175046),973 计划项目(2007CB311003),安徽省自然科学基金(11040606M145),安徽高校省级自然科学基金项目(KJ2012B212,KJ2013A255)资助。

何富贵(1982-),男,博士,讲师,CCF 会员,主要研究方向为粒计算、商空间理论、网络分析,E-mail: fuguie@163.com;刘仁金(1969-),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为粒计算、商空间理论;张燕平(1962-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为粒计算、商空间理论;张铃(1937-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为粒计算、商空间理论。

在不同粒度空间解的联系。

2 问题描述与相关技术

对于给定网络 $G(V, E, W)$, V 为网络节点集, $E \subseteq V \times V$ 为边集, W 为边上权重。

定义 1 网络 $G(V, E, W)$ 中, 给定节点 s 和 t , 定义路径 $P(s, t): (s, s_i, \dots, s_j, \dots, t_j, \dots, t_i, t)$ 是由一组首尾相互连接的边组成。

定义 2 网络最短路径 $P^*(s, t)$ 是从源节点 s 到汇节点 t 路径中边上权重累加和最小的路径。即满足:

$$W(P(s, t)) = \sum_{e(i, j) \in P(s, t)} w_{ij}$$

$$P^*(s, t) = \arg \min W(P(s, t))$$

图论中路径算法研究为经典问题。20 世纪中下叶, 继 Dijkstra 提出单源最短路径算法后, 涌现出大量针对最短路径问题的经典之作, 它们为网络路径搜索算法奠定了坚实的基础。对于小规模网络路径选择来说, 最经典的则为 Dijkstra 算法及其改进算法^[9-12]、Floyd 算法和 A* 算法。

为了适应大规模网络路径搜索, 不少研究者提出加速技术^[13]。ALT 算法^[11, 14]结合 A* 算法引入地标, 并预先计算、存储各节点与地标之间的最短距离, 应用三角不等式原理计算启发式函数。PCD^[15]应用预处理和双向搜索加速技术, 将网络划分为聚类子网并预算出各子网间的最短路径, 给出最短路径距离的上下限以对搜索过程进行限制; Reach^[16]采用预处理找到最短路径的重要节点来剪搜搜索路径分支; Nir Pochter^[17]等应用剪枝技术, 在预处理中将网络中无关的区域进行修剪, 以简化初始网络; 文献[18, 19]提出 Highway Hierarchies 算法, 采用压缩的方式来构造不同层次的 Highway 网络, 实现基于层次搜索; 文献[20]以社团为基本单元层次化网络; Dorothea Wagner^[21]等提出几何容器法, 将网络分成若干小几何容器, 压缩网络为几何容器块; Edge-flags^[22]给出边标记法, 对网络中的边进行标记以判断其是否在网络块的最短路径线路中。还有一些研究成果是利用已有的算法进行组合研究, 如 REAL^[16, 23]算法采用 Reach 和 ALT 算法组合, SHARC 算法^[24]组合了 Highway Hierarchies 和 Edge-flags 技术, 文献[25, 26]结合分层技术与 A* 算法来实现大规模网络路径搜索。在地理信息系统领域的网络路径研究中, 文献[27]提出了层次空间推理过程, 文献[28-31]将层次空间推理机制应用到地理信息的路径搜索中, 分析空间系统分层的优越点。

对于粒计算在网络路径中的应用研究, 文献[32, 33]用分层递阶商空间链描述网络的粒度层次, 并应用分解和合成理论在多粒度空间中求解网络路径问题, 给出了商空间理论对基本网络图的粒度描述和路径搜索的模型, 实现了商空间理论在带结构特征数据中的应用。对于较大规模网络的特定目标问题求解, 应用商空间理论的粒度分解方法依据网络结构特点将网络进行粒化, 应用启发式方法实现多粒度空间问题求解^[34, 35]。本文在此基础上, 组合网络路径中的加速技术, 引入粒计算方法实现大规模网络分层粒化的预处理, 采用双向搜索、剪枝技术加速路径搜索过程。

3 网络的粒度分层描述

为了实现大规模网络分层粒化, 需要在不破坏网络的结

构特征的基础上, 对网络的整体结构特征进行分析。在系统科学^[36]研究领域, 对社会网络的结构特征进行了深刻研究, 网络呈现小世界^[37]现象、无标度^[38]特性, 而且整体特征形成层次和社团结构^[39-42]。Girvan 在文献[39]中就社团与最短路径问题提到, 位于不同社团内部的节点对间的最短路径必定要经过社团之间稀疏连接的边, 社团间的边视为各社团之间联系的桥梁。我们将社团作为粒化的基本粒度单元来进行网络粒度分层。

对于大规模网络 $G(V, E, W)$, 应用社团划分方法进行社团划分, 以社团作为等价类构建粒度空间 $G_1(V_1, E_1, W_1)$, 如图 1 所示。将 $G(V, E, W)$ 以社团划分方法划分为若干子图 C_i , 社团个数为 $G_1(V_1, E_1, W_1)$, 规模为 $|G_1|$, 网络中的任一节点 v 只属于一社团 C_i , $\forall v \in V, v \in C_i, v \notin C_j, \forall j \neq i, 1 \leq j \leq |G_1|, C_i \cap C_j = \emptyset, \bigcup_{1 \leq i \leq |G_1|} C_i = V$ 。网络中边有两种, 一种是社团内部边 $\forall e(v_p, v_q) \in E, e(v_p, v_q) \in C_i, v_p \in C_i, v_q \in C_i, 1 \leq p, q \leq |G_1|$; 一种是社团间边 $\forall e(v_p, v_q) \in E, e(v_p, v_q) \notin C_k, v_p \in C_i, v_q \in C_j, C_i \neq C_j, 1 \leq k \leq |G_1|, 1 \leq p, q \leq |G_1|$, 社团间边上的节点成为社团边界点。对于 $G_1(V_1, E_1, W_1)$, 记录社团边界点以及边界点边的信息。边界点边的信息有两种: 一种是两边界点属于两个社团, 其边为社团间的边, 从 $G(V, E, W)$ 直接获取; 一种是两边界点属于同一社团, 其边的信息要重新构造, 用两节点在社团内最短路径距离来表示。

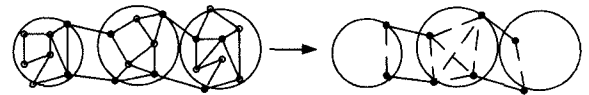


图 1 网络进行社团粒度划分过程示意图

性质 1 粒度空间 $G_1(V_1, E_1, W_1)$ 中记录着网络 $G(V, E, W)$ 中粒间的最短路径信息。

证明: 对于网络 $G(V, E, W)$ 任意源节点 s 到汇节点 t , 要求其最短路径 $P^*(s, t)$ 。

(a) 节点 s, t 属于同一社团 C_i , 其最短路径在社团 C_i 内部节点中。

(b) 节点 s, t 不属于同一社团。若 s, t 是边界点, 设其最短路径为 $(s, s_i, \dots, s_j, \dots, t_j, \dots, t_i, t)$, 则 $e(s, s_i)$ 与 $e(t_i, t)$ 为社团间边, 在 $G_1(V_1, E_1, W_1)$ 有记录。不失一般性, 假设 s_j, t_j 属于同一社团的边界点, 根据 (a), 在社团内获取最短路径。若 s_i, s_j 与 t_j, t_i 都是边界点, 则 s_i, s_j 和 t_j, t_i 之间的最短路径问题还属于 (b) 情形。

(c) 节点 s, t 不属于同一社团, 且 s, t 中其一或两个都是社团内节点。不失一般性, 假设 s 是社团内节点, 在社团内, 获取 s 到社团的边界点的最短路径。由 Bellman 原理^[43]可知, 如果 $(s, \dots, s_i, \dots, t_i, \dots, t)$ 是节点 s, t 间的最短路径, 那么其任意子路径 (s, \dots, t_i) 也一定是 s, t_i 之间的最短路径。对于边界点到 t 的最短路径属于 (b) 情形。同理, t 是社团内节点以及两节点都是社团内节点的结论成立。证毕。

从性质 1 的证明得知, 为了保证最短路径信息不丢失, 进行网络粒化, 其社团内部节点间的最短路径只经过社团内部节点, 不跨越社团。而且, 对于社团内来说, 可以用最短路径树来记录社团内节点的最短路径信息。

对于大规模网络来说, 进行一次分层, 形成粒度空间 $G_1(V_1, E_1, W_1)$, 其社团规模和 $|G_1|$ 之间要进行权衡, 并要保

证计算复杂度,其社团规模不能太大(K 数量级),而 $|G_1|$ 仍然很大。接下来,对网络 $G_1(V_1, E_1, W_1)$ 进行粒化分层,形成粒度空间 $G_2(V_2, E_2, W_2)$ 。逐步进行,形成多粒度表示的分层递阶粒度空间链 $G(V, E, W) > G_1(V_1, E_1, W_1) > G_2(V_2, E_2, W_2) > \dots > G_n(V_n, E_n, W_n)$ ($|G_n|$ 为 K 数量级,其中 $>$ 表示粒度大小关系)。

性质 2 在分层递阶粒度空间链 $G(V, E, W) > G_1(V_1, E_1, W_1) > G_2(V_2, E_2, W_2) > \dots > G_n(V_n, E_n, W_n)$ 上记录着网络 $G(V, E, W)$ 中粒间的最短路径信息。

证明:由性质 1 可知, $G_1(V_1, E_1, W_1)$ 中没有丢失最短路径信息。任一粒度空间 $G_i(V_i, E_i, W_i)$ 的构造构成遵循着记录最短路径信息的原则。则分层递阶粒度空间链记录着原网络中粒间的最短路径信息。证毕。

根据分层递阶粒度空间链 $G(V, E, W) > G_1(V_1, E_1, W_1) > G_2(V_2, E_2, W_2) > \dots > G_n(V_n, E_n, W_n)$,将 $G(V, E, W)$ 中每个节点 v 映射到不同粒度空间上,节点在不同粒度空间上的分层坐标为 $(v, v^1, v^2, \dots, v^n)$ (v^j 表示节点 v 在粒度空间 $G_i(V_i, E_i, W_i)$ 中的位置)。则网络 $G(V, E, W)$ 中源节点 s 到汇节点 t 的最短路径 $P^s(s, t)$ 问题,将映射到不同粒度空间。根据节点粒度空间坐标,确定源节点 s 、汇节点 t 在某个粒度空间中属于同一粒度空间的社团,这为求解最短路径指明了搜索方向。

4 多粒度空间的最短路径搜索算法

上节给出了大规模网络的粒度分层描述:分层递阶粒度空间链,每个节点对应不同粒度空间形成粒度空间分层坐标。对于网络 $G(V, E, W)$ 中源节点 s 与汇节点 t ,其粒度分层坐标为 $(s, s^1, s^2, \dots, s^n)$ 和 $(t, t^1, t^2, \dots, t^n)$ 。对两节点的分层坐标进行比较。若 $s^n = t^n$,表示在粒度空间 $G_n(V_n, E_n, W_n)$ 属于一个节点。必定存在 $k, s^i = t^i (k+1 \leq i \leq n), s^k = t^k, s^{k-1} \neq t^{k-1}$,在 $G_k(V_k, E_k, W_k)$ 中属于同一个节点,在 $G_{k-1}(V_{k-1}, E_{k-1}, W_{k-1})$ 中划分在同一个社团中。在 $G_{k-2}(V_{k-2}, E_{k-2}, W_{k-2})$ 中记录了粒间的路径信息,可搜索源节点 s 与汇节点 t 在 $G_{k-2}(V_{k-2}, E_{k-2}, W_{k-2})$ 粒空间上粒间最短路径,其最短路径由社团间边组成,其构成边的起点和终点即为从源节点 s 到汇节点 t 最短路径中必定经过的一些节点(如 s_1, s_2, t_2, t_1)。粒内最短路径搜索将在细粒度空间中进行,比较 s 与 s_1, s_2 与 t_2 以及 t_1 与 t 的分层坐标,计算源节点 s 到 s_1, s_2 到 t_2 以及 t_1 到汇节点 t 的最短路径。图 2 所示为在粒度空间中搜索粒间最短路径示意图。

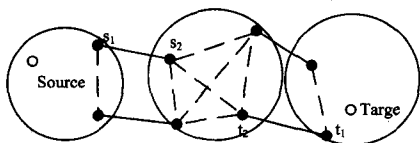


图 2 在粒度空间中搜索粒间最短路径示意图

算法 1 多粒度空间的最短路径搜索算法 (Between-Granular Routing Algorithm(BGrR))。

给定粒度分层坐标为 $(s^0, s^1, s^2, \dots, s^n)$ 和 $(t^0, t^1, t^2, \dots, t^n)$,其中 $s^0 = s, t^0 = t$ 。

BGrR(s^0, t^0);

Step 1 if (s^0, t^0 在一个最短路径树上) return ($P^s(s^0, t^0)$);

Step 2 搜索 k , 使得 $s^i = t^i (k+1 \leq i \leq n), s^k = t^k, s^{k-1} \neq t^{k-1}$;

Step 3 获取粒间最短路径,在粒度空间 $G_{k-1}(V_{k-1}, E_{k-1}, W_{k-1})$ 中获取 s 到 t 最短路径中经过的节点 $v_1, v_2, \dots, v_{r-1}, v_r$ 。

Step 4 $v_0 = s, v_{r+1} = t$

Step 5 For($i=0; i < r+1; i++$)

BGrR(v_i, v_{i+1});

End For

5 实验及其分析

为了验证基于粒计算的最短路径分层加速算法的有效性,以 DIMACS Challenge^[18,19]提供的美国不同等级规模州、区的城市道路交通网络为实验数据,如表 1 所列,包括 Columbia, Hawaii, Alabama, California 和 Texas 等城市的具体数据信息:缩写、城市名称、节点个数和边数目,其城市道路交通网络是无向加权网络,基本信息包括:地名、经纬度、无向路线的时间费用。

表 1 美国不同等级规模州、区的城市道路交通网络

缩写	城市名称	节点个数	边数目
DC	District of Columbia	9559	14909
HI	Hawaii	64892	76809
AL	Alabama	566843	661487
CA	California	1613325	1989149
TX	Texas	2073870	2584159

实验中,为了说明算法的性能效果,引入 A^* 算法和 ALT^[14]算法进行比较。在 ALT 算法中,采用 avoid 方法选择 32 个地标进行实验。在 5 组交通网络数据中,随机选择不同区域的 100 对节点进行最短路径搜索。实验中的算法是在 VC++ 环境下实现的,处理器为 Inter(R) Core2 T5470,主频 1.6GHz,内存为 2GB。

在网络的粒度分层描述过程中,社团划分方法有多种,在实验中分别采用了模块度^[40]和适应度来作为划分社团的准则。为了保证在构造粒度空间中最短路径信息不丢失,再根据最短路径树构造来进行社团结构的逐步调整,以确保社团内节点间的最短路径在社团的最短路径树上。社团是粒化的基本单元,其社团划分的好坏决定着分层递阶粒度空间链 $G(V, E, W) > G_1(V_1, E_1, W_1) > G_2(V_2, E_2, W_2) > \dots > G_n(V_n, E_n, W_n)$,影响到最短路径搜索效率。在实验中,分别对两种社团划分方法进行对比实验:方法一(TCM),首先利用拓扑中心性^[44]分析网络的节点特征属性,将拓扑中心度高的节点作为社团中心节点,邻接节点根据节点依附程度划分社团,以模块度作为社团划分整体衡量标准。方法二(TPM),首先利用拓扑势^[45]来分析网络的节点特征属性,将拓扑势高的节点作为社团中心节点,邻接节点根据节点的适应度来归属社团进行划分,并以模块度作为社团划分整体衡量标准。将多粒度空间中路径搜索方法与文献[34]的基于多粒度空间启发式路径算法(HGrR)进行了对比。表 2 为大规模网络多粒度信息处理过程中所花费的时间、空间费用。实验中将社团划分方法和路径搜索方法进行组合,比较实验结果,图 3、图 4 为各种方法路径搜索查询过程中所搜索的空间比(路径搜索的节点数/路径上的节点数)以及时间费用,其实验结果为选择的 100 对节点最短路径搜索的平均值。TCM+HGrR 表示社团划分方法一和 HGrR 进行组合时的路径搜索效果,TPM+HGrR 表示社团划分方法二和 HGrR 进行组合时的路径搜索效果,TCM+BGrR 表示社团划分方法一和本文算

法进行组合时的路径搜索效果。TPM+BGrr 表示社团划分方法二和本文算法进行组合时的路径搜索效果。A* 算法只列出了前 3 组交通网络的实验结果。

表 2 5 组交通道路网络粒度分层费用(时间费用和空间费用)

数据源	Time[s]		Space[MB]	
	TCM	TPM	TCM	TPM
DC	3.819	2.95	0.18	0.10
HI	43.56	30.57	1.32	0.8
AL	766.04	476	5.21	3.21
CA	1696.4	884	20.06	12.6
TX	2310.7	1406	28.69	19.56

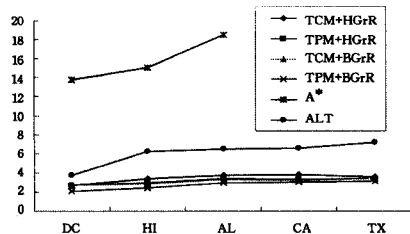


图 3 最短路径搜索过程中所搜索的空间比

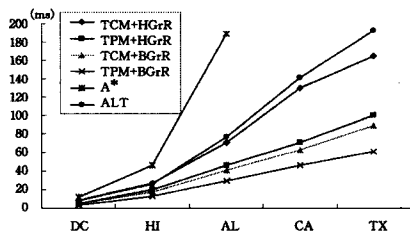


图 4 最短路径搜索过程中时间费用比较

综合实验结果可得,对大规模网络进行粒度分层处理可以很大程度地降低问题复杂度,其最短路径搜索方法的时间、空间复杂度相对于 A*,ALT 有一定的优势。与多粒度空间启发式路径算法相比,其在搜索空间和时间内都有所改进。对搜索空间进行对比发现,HGrr 算法只使得估计函数值很接近最短路径,在搜索方向上偏于盲目,BGrr 算法搜索过程是从粗粒度向细粒度空间跳转,将搜索问题映射到不同粒度空间中,为路径搜索指明了方向。

对于社团的质量来说,合理地划分社团将提高最短路径搜索效率。在实验中发现,若最短路径经过社团中心,搜索时空费用低,若搜索的路径远离社团中心,搜索费用较高。

结束语 为了降低问题求解的复杂度,本文引入粒计算方法,提出了基于多粒度空间的最短路径搜索算法(BGrr),它适合于大规模网络的路径寻优。此外,本文将复杂网络的分层和社团的结构性质与粒计算方法结合,给出大规模网络的分层多粒度表示,用分层递阶粒度空间链记录了网络中最短路径信息,使得最短路径信息不丢失,这充分利用了粒计算方法的问题求解思路。在最短路径搜索过程中,在分层递阶粒度空间链上,为了降低问题求解的复杂度,从粗粒度空间向细粒度空间跳转进行路径信息搜索,实现了粒计算“快速自如地在不同粒度世界进行问题求解”。实验中,本文将算法应用到城市交通道路上,实验结果证实了 BGrr 算法的有效性以及网络的多粒度分层表示是一种行之有效的存储方法。

参考文献

[1] 李国杰. 大数据研究的科学价值[J]. 中国计算机学会通讯,

2012,8(9):8-15

- [2] Zadeh L. Fuzzy logic equals computing with words [J]. IEEE transactions on Fuzzy Systems,1996,4(2):103-111
- [3] Zadeh L. Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic[J]. Fuzzy Sets and System,1997,90(2):111-127
- [4] Zadeh L. Some reflections on soft computing, granular computing and their roles in the conception, design and utilization of information/intelligent systems[J]. Soft computing,1998,2(1):23-25
- [5] Zadeh L. A new direction in AI-Toward a computational theory of perceptions[J]. Artificial Intelligence Magazine,2001,22(1):73-84
- [6] Granularity H J R. Proceedings of IJCAI[C]// Los Angeles, 1985:432-435
- [7] Yager R R,Filev D. Operations for granularity computing: mixing words with numbers[C]//Proceedings of 1998 IEEE International conference on Fuzzy Systems, 1998:123-128
- [8] Zhang B,Zhang L. Theory and applications of problem solving [M]. North-Holland,Elsevier science publishers,1992
- [9] 鲍培明. 距离寻优中 Dijkstra 算法的优化[J]. 计算机研究与发展,2001,38(3):307-311
- [10] 周培德. 交通道路网中任意两点之间最短路径的快速算法[J]. 计算机研究与发展,2004,24(2):35-37
- [11] Goldberg A V,Harrelson C. Computing the Shortest Path : A* Search Meets Graph Theory[R]. Vancouver,2004
- [12] Subramani K,Madduri K. Two-level heaps;a new priority queue structure with applications to the single source shortest path problem[C]//Third International Conference of COCOA 2009, 2009:186-196
- [13] 宋青,汪小帆. 最短路径算法加速技术研究综述[J]. 电子科技大学学报,2012,41(2):176-184
- [14] Goldberg A V. Point-to-Point Shortest Path Algorithms with Preprocessing[C]// Theory and Practice of Computer Science Lecture Notes in Computer Science, volume 4362,2007:88-102
- [15] Maue J, Sanders P, Matijevic D. Goal-Directed Shortest-Path Queries Using Precomputed Cluster Distances[J]. ACM Journal of Experimental Algorithmics,2009,14(3):1-27
- [16] Goldberg A V. Reach for A* ;Efficient Point-to-Point Shortest Path Algorithms[C]// SIAM Workshop on Algorithms Engineering and Experimentation (ALENEX 06). 2006:129-143
- [17] Pochter N,Zohar A,Rosenschein J S, et al. Search Space Reduction Using Swamp Hierarchies [C]// Twenty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2010:155-160
- [18] Sanders P,Schultes D. Highway hierarchies hasten exact shortest path queries[C]// European Symposium on Algorithms, 2005:568-579
- [19] Sanders P,Schultes D. Engineering Highway Hierarchies[C]// the 14th European Symposium on Algorithms (ESA 2006). 2006:804-816
- [20] Song Qing,Wang Xiao-fan. Efficient routing on large road networks using hierarchical communities[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2011,12(1):132-140
- [21] Wagner D,Willhalm T,Zaroliagis C D. Geometric containers for efficient shortest-path computation[J]. ACM Journal of Experimental Algorithmics,2005,10:1-3

(下转第 281 页)

能力。二阶、高阶以及二阶惯性加纯滞后等3种典型控制系统的PID控制器参数整定仿真实验结果表明,本文所提方法的优化性能明显优于粒子群算法与遗传算法,可以得到更优的PID控制参数。需要指出的是,理论与实验研究表明,本方法参数优化的时间稍长,如何缩短最佳参数的搜索时间将是下一步分析与研究的问题。

参考文献

[1] 郭大庆,李晓,赵永进. 基于改进 PSO 算法的 PID 参数自整定[J]. 计算机工程, 2007, 38(18): 202-204
 [2] 林军,倪宏,孙鹏,等. 一种采用神经网络 PID 控制的自适应资源分配方法[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(4): 112-117
 [3] 姜杉,冯文浩,杨志永,等. 基于模糊 PID 调节的核磁共振机器人气动控制技术[J]. 机器人, 2012, 34(5): 532-538
 [4] 傅晓云,方旭,杨钢,等. 基于遗传算法的 PID 控制器设计及仿真[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2012, 40(5): 1-5
 [5] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Neural Network, Piscataway; IEEE Press, 1995: 1942-1948

(上接第 268 页)

[22] Mohring R H, Schilling H, Schutz B, et al. Partitioning graphs to speedup dijkstra's algorithm[J]. Experimental and Efficient Algorithmics, 2005, 3503: 189-202
 [23] Bast H, Funke S, Matijevic D. TRANSIT: Ultrafast Shortest-Path Queries with Linear-Time Preprocessing [C]// Proc. of Proc. 9th DIMACS Implementation Challenge. 2006: 1-13
 [24] Bauer R, Delling D. SharC: Fast and robust unidirectional routing [J]. ACM Journal of Experimental Algorithmics, 2009, 14(4)
 [25] Botea A. Improving AI Planning and Search with Automatic Abstraction[D]. Canada; University of Alberta, Edmonton, 2006
 [26] Kishimoto A, Fukunaga A, Botea A. On the scaling behavior of hda* [C]// Proceedings of the Third Annual Symposium on Combinatorial Search SoCS-2010. Stone Mountain, Atlanta, GA, USA, 2010
 [27] Car A. Hierarchical Spatial Reasoning: Theoretical Consideration and Its Application to Modeling Way Finding[D]. Vienna: Department of Geo-information, Technical University of Vienna, 1997
 [28] 李楷,钟耳顺,曾志明,等. 基于分层网络拓扑结构的最优路径算法[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(7): 1004-1009
 [29] 陆锋,周成虎,万庆. 基于层次空间推理的交通网络行车最优路径算法[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(3): 226-232
 [30] 翁敏,毋河海,李林燕. 层次空间推理的机制及其在路径寻找方面的应用[J]. 测绘科学, 2006, 31(5): 119-121
 [31] Weng S J M, Qu R. Hierarchical spatial reasoning and case of way-finding[J]. Geo-spatial Information Science, 2008, 11(4): 269-272
 [32] Zhang Ling, He Fu-gui, Zhang Yan-ping, et al. A New Algorithm for Optimal Path Finding in Complex Networks Based on the Quotient Space[J]. Fundamenta Informaticae, 2009, 93(4): 459-469
 [33] 张燕平,罗斌,姚一豫,等. 商空间与粒计算:结构化问题求解理

[6] Jaafar H I, Mohamed Z, Abidin A F Z, et al. PSO-tuned PID controller for a nonlinear gantry crane system[C]// Proceedings-2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE 2012). Penang, Malaysia, IEEE, 2013: 515-519
 [7] 胡海兵,胡庆波,吕征宇. 基于粒子群优化的 PID 伺服控制器设计[J]. 浙江大学学报:工学版, 2006, 40(12): 2144-2148
 [8] Bergh F V D. An Analysis of Particle Swarm Optimizers [D]. Pretoria; University of Pretoria, 2001
 [9] 李兵,蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613-615
 [10] 张国平,王正欧,袁国林. 求解一类组合优化问题的混沌搜索法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 45(7): 49-51
 [11] 叶吉祥,徐玉良. 基于混沌 PSO 算法的求解电力公司最优报价策略研究[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(2): 149-153
 [12] 高尚,杨静宇. 混沌粒子群优化算法研究[J]. 模式识别与人工智能, 2006, 19(2): 266-269
 [13] 朱红求,阳春华,桂卫华,等. 一种带混沌变异的粒子群优化算法[J]. 计算机科学, 2010, 37(3): 215-217

论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2010

[34] He Fu-gui, Zhang Yan-ping, Zhao Shu, et al. Computing the Point-to-Point Shortest Path: Quotient Space Theory's Application in Complex Network [C]// Yu J, et al., eds. RSKT 2010, LNAI 6401. Springer, Heidelberg, 2010: 751-758
 [35] He Fu-gui, Zhang Yan-ping, Chen Jie, et al. Path Queries on Massive Graphs Based on Multi-granular Graph Partitioning [C]// Yao J T, et al., eds. RSKT 2011, LNCS 6954. Springer, Heidelberg, 2011: 569-578
 [36] 汪小帆,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006
 [37] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small world networks[J]. Nature, 1998, 393(4): 440-442
 [38] Barabási AL, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512
 [39] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks[J]. Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(12): 7821-7826
 [40] Newman M E J, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks [J]. Physical Review E, 2004, 69(2): 026113
 [41] Newman M E J. Modularity and community structure in networks [J] Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(23): 8577-8582
 [42] Wang L, Dai G Z. Community finding in complex networks: theory and applications [J]. Science & Technology Review, 2005, 23(8): 62-66
 [43] Bellman R. On a routing problem [J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1958, 16(1): 87-90
 [44] Hai Zhu-ge, Zhang Jun-sheng. Topological centrality and its e-Science applications [J]. JASIST, 2010, 61(9): 1824-1841
 [45] 涂文燕,赫南,李德毅,等. 一种基于拓扑势的网络社区发现方法[J]. 软件学报, 2009, 20(8): 2241-2254