

面向移动群智感知的位置相关在线多任务分配算法

李 卓^{1,2} 徐 哲² 陈 昕² 李淑琴^{2,3}

(北京信息科技大学网络文化与数字传播北京市重点实验室 北京 100101)¹

(北京信息科技大学计算机学院 北京 100101)²

(北京信息科技大学感知与计算智能联合实验室 北京 100101)³

摘 要 越高的数据质量要求对应越高的感知成本,如何权衡质量与成本是当前移动群智感知任务分配问题的研究热点之一。研究了保证最低数据质量要求的位置相关在线多任务分配问题,以最小化总体感知成本为优化目标,将数据质量要求量化为不同执行节点的个数;提出了一种基于划分的贪心算法,其主要思想是以执行节点的初始位置为圆心、以节点最远移动意愿为半径生成圆盘,然后从圆盘覆盖到的任务集合中选出合适的任务子集作为相应执行节点的待执行任务集。根据实验仿真,与 GGA-I 算法相比,所提算法在相同运行时间下,总体感知成本降低 12.7%;在相近计算性能下,所需的计算时间平均缩短 51.6%。

关键词 移动群智感知,数据质量,在线多任务分配,位置相关,贪心算法

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.06.014

Location-related Online Multi-task Assignment Algorithm for Mobile Crowd Sensing

LI Zhuo^{1,2} XU Zhe² CHEN Xin² LI Shu-qin^{2,3}

(Beijing Key Laboratory of Internet Culture and Digital Dissemination Research, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China)¹

(School of Computer Science, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China)²

(Joint Lab of Sensing and Computational Intelligence, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China)³

Abstract The higher data quality is required, the more sensing cost is needed. How to achieve the trade-off between the quality and cost is one of the hot topics in the current research on the problem of task assignment in mobile crowd sensing. In this paper, the location-related online multi-task assignment problem where the lower bound of the data quality is required to ensure was investigated. The optimization goal is to minimize the total sensing cost, and the data quality requirement is quantified as the number of different execution nodes. This paper proposed a greedy algorithm based on partition. Its main idea is as follows. Firstly, a disk is generated, whose center is the initial position of the execution node and whose radius is the farthest expected move of the node. After that, a subset of proper tasks whose locations are in the disk are selected, and they are regarded as the tasks to be taken by the corresponding execution node. According to the experimental simulation, compared with the GGA-I algorithm, the proposed algorithm reduces the total sensing cost on the average of 12.7% in the same running time, and reduces the running time on an average of 51% in the similar sensing performance.

Keywords Mobile crowd sensing, Data quality, Online multi-task assignment, Location-related, Greedy algorithm

1 引言

随着人们对周围环境及自身感知需求的增大以及移动设备的普及,移动群智感知技术得到了越来越多的关注和研究^[1-2]。移动群智感知技术具有感知成本低、规模大、范围广

等特点;同时,因为感知节点的主体是人,即感知节点具有移动性,移动群智感知技术能够完成传统静态感知技术无法实现的任务类型。

目前,移动群智感知在智能交通(Intelligent Transportation)、环境监测(Environment Monitoring)以及健康监测

到稿日期:2018-04-30 返修日期:2018-07-08 本文受国家自然科学基金资助项目(61502040),北京市属高校高水平教师队伍支持计划青年拔尖人才培养计划资助项目(CIT&TCD201804055),网络文化与数字传播北京市重点实验室资助项目(ICDDXN001),北京信息科技大学“勤信英才”培养计划资助项目资助。

李 卓(1983-),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为移动无线网络、分布式计算,E-mail:lizhuo@bistu.edu.cn(通信作者);徐 哲(1993-),男,硕士生,主要研究方向为移动群智感知;陈 昕(1965-),男,博士,教授,CCF 会员,主要研究方向为网络性能评价、网络安全;李淑琴(1963-),女,博士,教授,CCF 会员,主要研究方向为人工智能。

(Healthcare)等领域均已得到应用。Yao 等^[3]设计了一种对象跟踪系统 CrowdTracker,其基于移动群智感知平台中的参与者协助拍摄对象的照片,以实现对象移动的预测和跟踪。CrowdTracker 能以较低的成本,实时、有效地跟踪移动对象。Zheng 等^[4]设计了一种空气质量相关性分析模型,其利用群智感知技术收集数据,并利用机器学习方法进行处理。

无论是参与式感知还是机会式感知,用户在参与完成感知任务时都需要消耗智能设备的电量,同时还有可能泄露自己的隐私,因此用户不愿意接受并完成没有报酬的感知任务,这也是移动群智感知系统运行成本的重要支出之一。研究人员已经开展了对用户激励机制的研究工作,希望通过合理的激励机制实现感知系统运行成本与招募用户参与之间的最佳平衡。Yang 等^[5]设计了两种激励机制的系统模型:以平台为中心的模型和以用户为中心的模型。以平台为中心的模型基于斯塔克尔伯格博弈(Stackelberg Game),平台是领导者,其他参与者是跟随者。以用户为中心的模型使用基于拍卖的激励机制,使其满足计算高效性、个人理性、盈利以及真实性。确保高数据质量是保证移动群智感知成功的基本要求,在激励用户提交高质量的感知数据方面也已有研究。Han 等^[6]考虑已知成本和质量分布,使用贝叶斯定理定价招募具有相应质量且支付最少的用户。

与地理位置相关的感知应用更加普遍和贴近生活,如绘制城市噪声热点分布图、城市空气质量实时监测、交通状态实时监测等。在位置相关的感知任务场景中,还应该考虑感知质量的要求,本文中通过设置重复感知次数来保证感知质量。对于感知系统,在执行结果能够满足任务质量要求的前提下,越少的代价意味着任务执行越容易得到请求者的认可。如绘制某个城市全部区域的噪声图时,只需要保证数据的真实性,并收集得到所有区域的噪声数据即可。图 1 为一个位置相关感知任务的感知场景示意图。其中,有 1 个感知参与者和若干个任务,它们都有对应的位置属性,参与者具有起始位置,任务具有感知区域的位置要求。从图中可以看出参与者被分配了多个任务,它们按照标有序号的 3 条轨迹依序移动并完成任务。

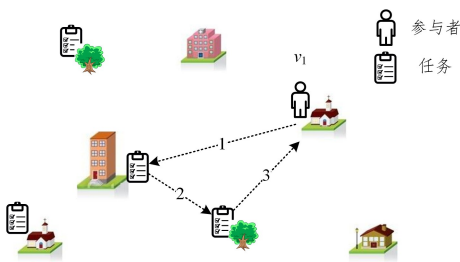


图 1 移动群智感知中位置相关任务的执行场景

Fig. 1 Location-related task execution scenario in mobile crowd sensing

现有的研究在分配有地理位置属性要求的感知任务时,以最小化整体感知成本为优化目标,并未考虑感知数据的质量,但数据质量是保证移动群智感知成功应用的必然条件。为了解决上述问题,本文将以最小化整体感知成本为优化目标,在满足数据质量的要求下,设计与位置相关的在线多任务

分配算法。通过分析,该分配问题具有 NP 难解性,因此本文设计了基于划分的贪心算法。在所提出的近似任务分配算法中,首先将任务重复放置多个,用于表示感知任务将被不同的感知节点执行;然后采用圆盘覆盖的方法,以执行者为圆心找出圆盘的最小半径,并将感知任务对应的点覆盖住;最后根据圆盘覆盖的任务来确定任务分配方案。通过实验仿真,证明了所设计算法优于对照算法。

2 相关工作

在移动群智感知任务分配方面,相关研究可分为两种类型:单任务中的参与者选择和多任务分配。

在单任务参与者选择的相关研究中,Zhang 等^[1]设计一个参与者选择框架,以帮助任务请求者选择用户,并最小化支付的成本。

随着 MCS 任务数量的增加,任务不再独立,多个任务之间存在相互依存的关系。单个感知任务的分配优化不能解决多个并发任务之间在共享资源时的竞争,最近的工作已经开始研究多任务分配。

文献^[7]考虑到位置相关的任务和用户的时间预算;但是忽略了任务具有时间属性,特别是任务处理时间。Wang 等^[8]研究了在考虑用户感知能力的限制时多项任务的总体效用最大化。此外,还有一些研究集中在最大化感知质量方面。Estrada 等^[9]研究了任务具有时间约束及位置要求时的任务分配问题,提出了一种服务计算平台,为每个感知任务分配最合适的工作节点集,以便在要求的响应时间内得到高质量的结果。Hu 等^[10]研究了服务质量敏感的任务分配问题,优化目标为最小化总体感知成本;但其任务建模中将感知场景划分为若干个正方形格子,且节点同样沿格子移动,实际场景中由于路线规划的问题,所计算的节点移动距离过于理想。

虽然多数感知任务均对数据质量有要求,但越高的数据质量意味着越大的开销,因此感知任务并不一定追求质量的最大化。基于此,不同于文献^[9],本文考虑在满足最低感知质量要求的情况下,最小化总体感知成本的位置相关任务分配问题。本文将任务对感知质量的要求转化为不同执行者参与该任务的人数,并使感知代价与用户的移动距离成正比,这也更符合实际。因此,本文研究带感知质量保证的距离相关的最小化感知代价在线多任务分配问题(Minimizing Cost Task Assignment, MinCTA),并针对该问题设计了基于划分的方法,其目标是求出参与者与任务之间的分配关系,使总感知成本最小,并且满足每个任务对感知质量的要求。

3 位置相关的最小化感知成本任务分配问题

3.1 位置相关的任务模型

一个移动群智感知系统由两部分组成:一个任务调度平台和一组感知参与者。调度平台负责管理一组任务 $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\}$ 的分配和收集。其中,每个 t_j 都至少有两个属性 P_{t_j} 和 k_j , P_{t_j} 是任务的位置, k_j 是最少参与人数。调度平台会根据当前活跃的感知参与者集合 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$, 为每一个任务确定一个感知参与者子集,使得执行每个感知任务 t_j 的参与者人数不少于 k_j 。此外,因为感知参与者的感知能

力是有限的,所以每个感知参与者 v_i 的任务队列长度存在最大值,设为 d_i 。每个任务 t_j 的参与者集合用 Π_j 表示,每个参与者需要执行的任务集合用 A_i 表示。每个感知参与者在执行完一个任务后,平台需要支付一定的报酬。因为不同的感知执行者为了完成任务需要移动的距离不同,所以平台应支付的报酬也应不同,且报酬应与感知执行者的移动距离成正比。报酬包括:基础奖励 b_j 和额外奖励 e_j ,其中, $e_j = a_j * D(i, j)$, $D(i, j)$ 表示感知参与者 v_i 从起始位置或上一个任务所在位置出发移动到任务 t_j 的距离, a_j 表示任务 p_j 的奖励系数。因此,每个感知任务 t_j 的总成本应为:

$$p_j = k_j * b_j + a_j * \sum_{t_i \in \Pi_j} D(i, j) \quad (1)$$

每个参与者 v_i 应得到的总报酬为:

$$q_i = \sum_{t_j \in \Pi_i} (b_j + a_j * D(i, j)) \quad (2)$$

由于用户的移动距离与平台支付的报酬成正比,因此平台会按照用户到达所有待执行任务的执行地点的最短路线计算报酬。从原点出发,遍历所有地点,然后回到原点,最短路线的计算问题正是经典的旅行商问题。

3.2 MinCTA 问题定义

针对以上场景,本节提出了一种最小化感知成本的任务分配问题,其形式化定义如下。

问题 1 (MinCTA 问题) 假设 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 是对待分配任务感兴趣的智能手机用户的集合, P_{v_i} 是 v_i 的起始位置。对于待分配任务集 $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\}$, 与每个任务 t_j 相关联的位置为 P_{t_j} 。为保证感知任务的质量,要求任务 P_{t_j} 至少要被 k_j 个不同的用户执行;同时,为保证任务能够尽快完成,每个节点 v_i 最多被分配 d_i 个任务。设 Π_i 为分配给 v_i 的任务集。任务 t_j 的总感知代价与用户移动距离和任务的基础奖励 b_j 相关:

$$p_j = k_j * b_j + a_j * \sum_{v_i \in \Pi_j} D(i, j) \quad (3)$$

因此,最小化总感知代价的位置相关移动群智感知任务分配问题可被定义为:

$$\min: P(\Pi) = \sum_{t_i \in T} p_i \quad (4)$$

$$\text{s. t. } p_i = k_i * b_i + \sum_{t \in \Pi_i} D(i, j) \quad (5)$$

$$k_i \leq \omega(p_i) \quad (6)$$

$$d_j \leq o(\Pi_j) \quad (7)$$

其中, $\omega(p_i)$ 表示需要执行任务 p_i 的用户数量, $o(\Pi_j)$ 表示分配给用户 v_j 的任务数量。

3.3 问题难解性证明

首先给出 MinCTA 问题的判定形式。

问题 2 (MinCTA 判定问题) 任给 $3m + 2n + 2$ 个整数, 即 $S, P, P_{v_1}, \dots, P_{v_n}, P_{t_1}, P_{t_2}, \dots, P_{t_m}, k_1, k_2, \dots, k_m, d_1, d_2, \dots, d_n, b_1, b_2, \dots, b_m$, 判定是否存在 $(x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{n,m}) \in \{0, 1\}^{n \times m}$ 使得 $k_i \leq \omega(p_i)$ 且 $d_i \leq o(\Pi_i)$ 且 $\sum_{t_i \in T} p_i \leq P$ 。

问题 2 属于非确定性判定问题,下面尝试证明 MinCTA 是 NP-难解的。

定理 1 MinCTA 问题属于 NP-难问题。

证明:首先引入最小权集合覆盖问题。

对于一个集合 $U = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, 其幂集用 $G = \{S_1,$

$S_2, \dots, S_n\}$ 表示, $S_i \in U$ 。相应地, S_i 有对应的权重 c_i 。一个集合覆盖 $Y \subseteq G$, 其满足式(8)条件:

$$\forall e_i \in U, \exists ((e_i \in S_k) \wedge (S_k \in Y)) \quad (8)$$

其中, Y 的权重为 $c_Y, c_Y = \sum_{S_j \in Y} c_j$ 。则最小权集合覆盖问题为: 求出具有最小权重 c_Y 的 Y 。

下面归约最小权集合覆盖问题为 MinCTA 问题。

在 MinCTA 问题中,当 $k_i = 1$ 时,假设有一个任务集合 S 。 S 中的任务用 t 表示, $\forall t \in S, t$ 的权重用 r_i 表示。用 S_i 表示用户 i 可以执行的任务集合, S_i 的幂集用 $P(S_i)$ 表示。 $P(S_i)$ 的权重为 $\sum_{t_i \in P(S_i)} r_j$ 。从 $\cup P(S_i) (i=0, \dots, n)$ 中找到一个子集合,使得权重之和最小。该问题为最小权集合覆盖问题。

由于最小权集合覆盖问题为 $k_i = 1$ 时的 MinCTA 问题的特例,且最小权集合覆盖问题已经被证明为 NP-难问题^[11], 因此 MinCTA 问题属于 NP-难问题。证毕。

4 基于划分的在线多任务分配算法

MinCTA 问题中考虑了任务完成质量、任务的位置属性以及用户的感知能力等多个限制,又因该问题属于 NP-难问题,传统算法很难有效解决,因此本文提出了一种基于划分的任务分配算法。

算法的主要内容如图 2 所示。图中的实心点代表参与者;有数字的空心点代表任务,其中的数字表示至少需要几个人完成该任务。通过以参与者为圆心画圆盘来覆盖一定数量的空心点,进而完成任务分配。

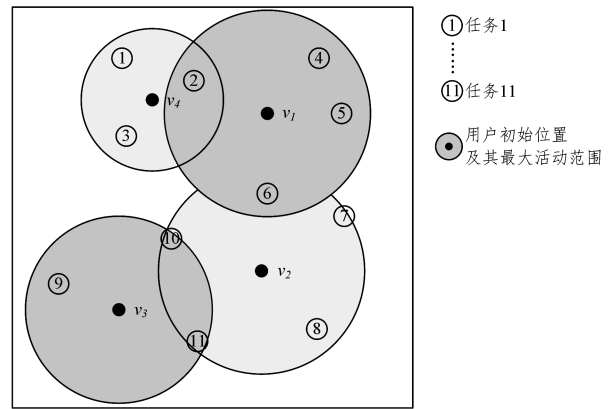


图 2 基于划分的任务分配算法的主要思想

Fig. 2 Main idea of partition based task assignment algorithm

算法的具体步骤(见算法 1)为:首先将每个任务 t 与地图中的一个点对应,在地图中重复放置 k_i 个相同的点来代表任务 t 需要 k_i 个不同的执行者完成;然后重复执行以下步骤,直到任务全部分配完或所有人都分配满了任务,首先分别以每个执行者的位置为圆心创建一个圆盘,圆盘半径是使得该圆盘能够同时覆盖至少 d_j 个图中不同位置的点的最小值,然后计算每个圆盘覆盖住的点的权值之和,找出圆盘权值最小的一个,并为其覆盖的点所代表的任务分配圆盘对应的执行者。

算法 1 PTA (Partition based Task Assignment) 算法

输入:节点集 V , 任务集 T

输出:任务分配结果 π

1. 对于每个任务 p_i , 根据位置 P_i 在平面上重复放置 k_i 个点。
2. while ($k_s \neq 0, \exists t_s \in T$) & & ($V \neq \emptyset$) 执行:
3. for v_j in V :
4. $c_j = P_{v_j}$
5. $dis = []$
6. for t_s in T :
7. if $k_s \neq 0$: // 判断 t_s 是否已经分配完成
8. $dis.append([D(c_j, t_s), t_s])$
9. end if
10. end for
11. $sort(dis, key=1)$ // 按每个元素的第一个子元素从小到大排序
12. $\Pi_j = dis[1:d_j]$ // 选择前 d_j 个元素作为任务集合
13. 设每个圆盘 C_j 中包含的任务集为 T_{C_j} , 令 $Sum_j = \sum_{t \in C_j} \omega(t)$ 。
14. end for
15. 求 Sum 最小的节点 v_{min}
16. 只保留 Π_j 中与 v_{min} 的距离最小的 d_{min} 个任务
17. for t_s in Π_j :
18. $k_s = k_s - 1$
19. end for
20. $V = V - v_{min}$
21. $\Pi = \Pi + \Pi_j$
22. end while
23. 输出 Π

在确定了用户需要执行的任务集合后,需要规划任务执行的顺序。通过对用户总支付报酬计算公式进行分析可以得出,报酬与用户的移动距离成正比。因此,应使用用户的移动距离最短,这是典型的旅行商问题。然而旅行商问题已被证明为 NPC 问题,且无有效的最优解算法;该问题已得到广泛研究^[12]。在求解任务执行顺序时,可借鉴已有求解旅行商问题的近似算法。

求解任务执行顺序的具体步骤如算法 2 所示。

算法 2 任务调度算法

输入: 执行者原始位置 s , 任务集 T

输出: 任务执行顺序 Φ

1. 计算包括 s 及 T 中每一个点在内的所有点之间的距离;
2. 生成一个包括 s 及 T 中每一个点在内的完全图 G , 图中边的权值为两端点的距离;
3. 利用 TSP 问题的近似算法计算完全图 G 的哈密顿圈 C ;
4. 以 s 为起点, 将 C 转换为节点序列 Φ ;
5. 输出 Φ 。

定理 2 PTA 算法的时间复杂度为 $O(m(n^2 + \log_2 m))$, 其中 m 为任务个数, n 为节点个数。

证明: 每确定一个节点的分配策略, 需要计算一次圆盘半径, 时间复杂度为 $O(mn)$; 然后需要对圆盘中的点进行一次排序, 时间复杂度为 $O(m \log_2 m)$ 。由于共有 n 个节点, 即需要执行 n 次分配策略, 因此总的复杂度为 $O(m(n^2 + \log_2 m))$ 。证毕。

5 实验仿真与结果分析

本文以 Foursquare User Dataset^[13] 作为实验数据集。该

数据集包括了纽约市所有餐馆顾客的签到记录, 其中包括位置信息。本文主要使用其中的签到地址作为任务和执行者的地址。实验数据集的位置分布如图 3 所示。

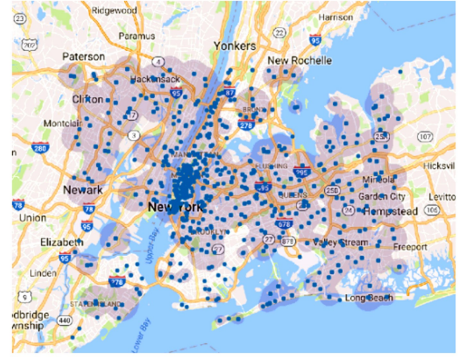


图 3 Foursquare User Dataset 数据集集中的位置分布
Fig. 3 Location distribution in Foursquare User dataset

在求解任务的执行顺序, 即计算参与者感知总报酬时, 所用的旅行商问题的求解算法是证明了近似比为 $3/2$ 的 Christofides 算法^[14]。

对照算法选用文献[2]中的 GGA-I 算法。GGA-I 算法基于遗传算法设计, 其特点为通过一个初始化算法生成初始种群, 并通过不断迭代进行基因进化, 达到提升种群质量的效果, 使求解结果不断逼近最优解。因此, 算法的求解质量与运行时间存在一定的正相关性。本文在与 GGA-I 算法进行实验对比时, 同时考虑了运行时间的因素。

对于小规模任务(任务数量少于 10), 通过穷举所有可能的解决方案, 可以确定最优解。对于较大规模的任务, 由于耗费时间较长, 无法在短时间内确定最优解, 因此未将其加入对比结果中。

在实验中, 首先对比了在相同运行时间情况下 PTA 与 GGA-I 的求解结果性能, 如图 4 所示。在本配置的对比中, GGA-I 算法迭代了 285 次。从图 4 中可以看出, PTA 算法计算得出的任务分配结果的感知代价均小于 GGA-I 算法的感知代价; 同时, 随着执行者个数的增加, 平均的任务成本逐渐降低。经统计, 相同运行时间下, 总体感知成本减少 12.7%。GGA-I 算法为遗传算法, 其求解过程中存在收敛现象, 收敛的快慢与交叉、变异、适应度计算等过程相关, 且很难对其最优性进行理论分析。而本文所提算法通过以感知节点为圆心生成圆盘, 大大缩短了可行解的搜索范围, 实现了快速求解, 并结合旅行商问题的近似求解算法保证了求解结果的性能。

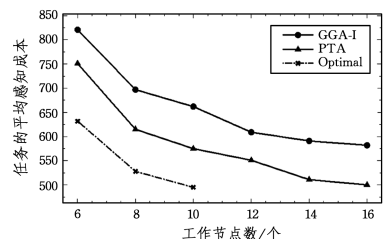


图 4 相同运行时间下, PTA 与 GGA-I 的求解结果性能对比
(以 PTA 运行时间为基准)

Fig. 4 Performance comparison between PTA and GGA-I in same running time (based on PTA running time)

除了对比了 PTA 算法与 GGA-I 算法的计算结果性能外,还对它们的时间性能做了对比,结果如图 5 所示。可以看出,在达到相同计算性能所需的计算时间方面,PTA 算法明显优于 GGA-I 算法,且随着执行节点个数的增加,PTA 算法的时间优势越来越明显。经统计,在达到相近的计算性能时,所需的计算时间平均缩短 51.6%。

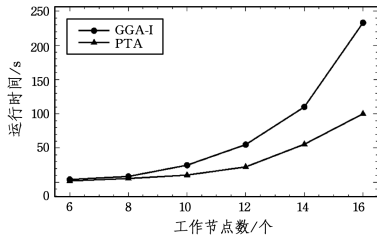


图 5 相同性能下,PTA 算法与 GGA-I 算法的运行时间对比
(以 PTA 算法的性能为基准)

Fig. 5 Running time comparison between PTA and GGA-I under same performance (based on the performance of PTA)

通过增大问题规模,可验证算法对大规模数据集的解决能力及性能表现。本次实验还验证了任务数量较大时的性能,任务数量范围为 10~210,并将任务个数与执行者数量的比例设置为 2:1。实验结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,PTA 算法一直优于 GGA-I 算法。

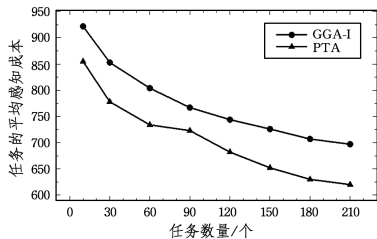


图 6 相同运行时间下,PTA 算法与 GGA-I 算法的性能对比
(以 PTA 运行时间为基准)

Fig. 6 Performance comparison between PTA and GGA-I algorithm under same running time (based on the running time of PTA)

结束语 本文研究了在移动群智感知网络中位置相关的任务分配问题。以最小化总任务感知代价为优化目标,提出了一种多项式时间近似最优的求解算法。最后,通过实验仿真与同类算法进行比较,验证了所提算法的可行性:在相同运行时间下,总体感知成本减少 12.7%;在计算出相近感知成本时,所需的计算时间平均缩短 51.6%。

参考文献

[1] ZHANG D Q, XIONG H Y, WANG L Y, et al. CrowdRecruiter: Selecting participants for piggyback crowdsensing under probabilistic coverage constraint[C]//Proceedings of the 2014 ACM International joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp'14). ACM, 2014:703-714.

[2] WANG J, TAN N, LUO J, et al. WOLoc: WiFi-only outdoor localization using crowdsensed hotspot labels[C]//INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications. IEEE, 2017:1-9.

[3] JING Y, GUO B, LIU Y, et al. CrowdTracker: object tracking using mobile crowd sensing[C]//Proceedings of the 2017 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers. ACM, 2017:85-88.

[4] ZHENG Y, LIU F, HSIEH H P. U-air: When urban air quality inference meets big data[C]//Proceedings of the 19th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. ACM, 2013:1436-1444.

[5] YANG D, XUE G, FANG X, et al. Crowdsourcing to smartphones: Incentive mechanism design for mobile phone sensing[C]//Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2012:173-184.

[6] HAN K, HUANG H, LUO J. Posted pricing for robust crowdsensing[C]//Proceedings of the 17th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. ACM, 2016:261-270.

[7] HE S, SHIN D H, ZHANG J, et al. Toward optimal allocation of location dependent tasks in crowdsensing[C]//2014 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). 2014:745-753.

[8] WANG J, WANG Y, ZHANG D, et al. PSAllocator: multi-task allocation for participatory sensing with sensing capability constraints[C]//Proceedings of the 2017 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work and Social Computing. 2017:1139-1151.

[9] ESTRADA R, MIZOUNI R, OTROK H, et al. A crowd-sensing framework for allocation of time-constrained and location-based tasks[J/OL]. IEEE Transactions on Services Computing, <https://www.computer.org/csdl/trans/sc/preprint/07974784-abs.html>.

[10] HU T, XIAO M, HU C, et al. A QoS-sensitive task assignment algorithm for mobile crowdsensing[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2017, 41:333-342.

[11] GAMBOSI G, PROTASI M, TALAMO M. Preserving approximation in the Min-Weighted Set Cover Problem[J]. Discrete Applied Mathematics, 1997, 73(1):13-22.

[12] 堵丁柱, 葛可一, 胡晓东, 等. 近似算法的设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.

[13] BOWDEN J A. Foursquare-user-dataset [EB/OL]. <https://github.com/jalbertbowden/foursquare-user-dataset>.

[14] CHRISTOFIDES N. Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem [R]. Carnegie-Mellon Univ Pittsburgh Pa Management Sciences Research Group, 1976.