

文章编号: 1001-0920(2008)05-0481-06

多机器人覆盖技术研究进展

蔡自兴^a, 崔益安^{a,b}

(中南大学 a. 信息科学与工程学院, b. 信息物理工程学院, 长沙 410083)

摘要: 系统地总结了当前覆盖问题的定义、分类和应用前景. 对多机器人覆盖中关于通信、环境地图、路径规划算法及效果评价等方面的研究进展情况进行了阐述. 分析并指出若干多机器人覆盖研究中的重点和难点问题: 体系结构、通信技术、协商协作、地图表示、路径规划及效果评价, 并对未来的研究发展方向进行了探讨.

关键词: 多机器人; 覆盖; 路径规划算法; 效果评价; 研究进展

中图分类号: TP24 文献标识码: A

Survey of multi-robot coverage

CAI Zi-xing^a, CUI Yi-an^{a,b}

(a. School of Information Science and Engineering, b. School of Info-Physics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Correspondent: CUI Yi-an, E-mail: csuriag@mail.csu.edu.cn)

Abstract: The definition, classification and application of coverage are summarized roundly. And the recent research results about multi-robots communication, robotic mapping, coverage path planning, algorithm performance evaluating in multi-robot coverage are also discussed. The main challenges and difficulties in this aspect are analyzed, such as multi-robots architecture, multi-robots communication, robotic mapping, path planning, task allocation, coverage path planning and algorithm performance evaluating. Finally, some future trends of this field are presented.

Key words: Multi-robots; Coverage; Path planning algorithm; Performance evaluating; Research development

1 引言

相对多机器人其他方面的研究,多机器人覆盖的研究成果很少,且主要集中在国外.多机器人覆盖在许多领域具有重要的现实应用价值,如清扫、搜救、耕种等.此外,它还可看作是多机器人系统研究热点问题的集中平台,相关问题的解决具有普遍的意义.

2 覆盖的定义

Gage^[1]率先提出多机器人覆盖的概念,但未对覆盖问题进行严格的定义.之后许多研究者在研究覆盖问题时,从不同的角度对覆盖进行过若干定义.如 Zack^[2]认为,覆盖的最基本问题是:为传感器、执行器或机器人进行路径规划,使之可到达一环境中的每一点. Sylvania 等^[3]认为,覆盖是机器人或工具必须遍访工作环境中所有可到达的表面.而 Maxim 等^[4,5]认为,覆盖是为了侦测目标而在环境中布置传感器的问题,并将多机器人覆盖的问题定义为使机器人团队的传感器所覆盖的区域最大化问题.

Zheng 等^[6]定义已知环境覆盖问题为:在已知环境中遍访所有位置,并实施某项任务. Ercan 等^[7]定义了基于传感器的覆盖:利用传感器信息在未知环境中让检测器或执行器遍历所有点的路径规划问题. Enrique Gonzalez 等^[8]认为,覆盖必须满足覆盖路径尽可能短,重复路径应尽可能避免;并将覆盖问题简化成两个子问题:寻找能填充简单区域的运动方式和寻找一条连接各填充简单区域过程的可靠途径,以保证全区域覆盖.

这些定义虽然基本描述了机器人覆盖的含义,但都是出于研究者自己感兴趣或便于问题描述的角度,不够全面、缺乏普遍性.综合来看,覆盖可定义为:利用移动机器人或固定传感器,在物理接触或传感器感知范围内遍历目标环境区域,并尽可能地满足时间短、重复路径少和未遍历区域小的优化目标.

这里明确了覆盖主体为移动机器人或固定传感器,客体为目标区域内的每个可到达点,方式为物理接触或传感器感知,优化目标为同时满足时间最短、

收稿日期: 2007-01-09; 修回日期: 2007-05-16.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60234030); 国家基础研究项目(A1420060159).

作者简介: 蔡自兴(1938—),男,福建莆田人,教授,博士生导师,从事人工智能、机器人学等研究; 崔益安(1978—),男,湖南益阳人,博士生,从事人工智能、机器人等研究.

重复路径最少、未遍历区域最小中的一个或多个。

3 覆盖的分类

早期的覆盖研究主要考虑单个机器人的情况,如 Yoav 等^[9]研究基于生成树的单机器人覆盖算法。Maxim 等^[4]和 Keith 等^[10]则采用固定通讯节点作为路标来引导多机器人实现覆盖。当然也有纯粹多个机器人覆盖的研究,如文献[11,12]等。Gage^[11]将覆盖分成地毯式覆盖、栅栏式覆盖和扫掠式覆盖。地毯式覆盖让机器人静态地布满整个目标区域;栅栏式覆盖利用多机器人排列成一道“栅栏”,移动目标体在试图通过“栅栏”时就被检测发现;扫掠式覆盖由机器人利用合适的路径规划算法,遍扫整个目标区域。Maxim 等^[4]把覆盖分为动态覆盖和静态覆盖。动态覆盖通过机器人的运动,实现动态地“覆盖”目标区域;而静态覆盖,类似地毯式覆盖,指机器人团队静态地散布在目标区域内,并使区域内每处地方都在机器人感知范围内。可将静态覆盖看作是特殊的动态覆盖。许多针对覆盖问题的研究大多假设环境已知或部分已知,而 Ercan 等^[7]提出了基于传感器的覆盖,讨论未知环境下的覆盖问题,类似的研究还有文献[13]等。因此,从环境信息是否已知的角度,可将覆盖分为已知环境覆盖和未知环境覆盖。除 Ercan 等在文献[14]中提到简单三维物件表面的覆盖问题外,目前绝大多数覆盖问题的研究只考虑二维(平面)地形,尚未涉及三维地形的覆盖。此外,还有个别文献^[15,16]考虑覆盖时间最短、覆盖面积最大或重复路径最小的覆盖算法。

综合各种分类方式的覆盖分类如表1所示。

表1 覆盖详细分类

分类方式	覆盖类别
覆盖主体	单机器人覆盖: 单机器人、固定节点联合覆盖; 多机器人、固定节点联合覆盖; 多机器人覆盖
覆盖方式	地毯式覆盖; 栅栏式覆盖; 扫掠式覆盖
覆盖形态	动态覆盖; 静态覆盖
环境信息	已知环境覆盖; 未知环境覆盖; 部分已知环境覆盖
覆盖地形	二维地形覆盖; 三维地形覆盖
优化目标	最短时间覆盖; 最大面积覆盖; 最小重复路径覆盖

4 覆盖的潜在实际应用

覆盖研究的实际应用非常广泛,从陆地到海洋、从农业到工业、从家政服务到医疗诊治、从资源勘察到星球探索、从军事侦察到搜寻救助等都有应用前景。具体包括:

1) 服务保障方面,包括室内外清扫、铲除积雪、修剪草坪、清理油污等。如文献[17]讨论了机器人在

超级市场清扫垃圾的问题。

2) 工业方面,如汽车、船体的喷漆作业。David 等^[18]构造了汽车车身自动喷漆覆盖的模型。

3) 军事方面,如布雷扫雷、对战区情况侦察等。Nicoud 等^[19]研究了机器人覆盖式扫雷的感知和导航策略;Wagner 等^[20]研究了多机器人基于通信的联合侦察。

4) 安全保卫方面,如对敏感设施或区域的安全监控,自然或人为灾难后的人道主义搜救等。Kantor 等^[21]采用机器人与传感器实现分布式搜索;文献[22]提出了一种新颖的多机器人搜救策略。

5) 医疗方面。文献[23]对利用微型机器人为病灶区涂抹药物的算法进行了初步研究;文献[24]则考虑覆盖算法在外科手术中处理骨骼关节的表面覆盖问题。

6) 矿产资源方面,包括陆地、海底的地形测绘、地球物理勘探数据采集等。如文献[25]采用水下机器人覆盖海底来进行海底的地形测绘。

此外,还有许多文献提到覆盖在农业、林业方面的应用,如可实施农林业的播种、耕作与收割等。

5 多机器人覆盖问题的研究现状

目前对多机器人覆盖的研究已取得了一定的成果,主要体现在多机器人覆盖路径规划算法上。不同的覆盖算法对通信和环境地图表示通常有不同的要求,下面就多机器人覆盖中的通信、地图表示、覆盖算法和覆盖效果评价4个方面的研究现状进行讨论。

5.1 多机器人通信

与大多数多机器人系统一样,目前多机器人覆盖任务中机器人间的通信方式基本有3种类型:通过环境相互作用、通过感知相互作用、通过显式的通讯相互作用。

通过环境相互作用。该类型被称为“没有通信的系统”。利用自然环境作为媒介,一个最简单的例子就是多个机器人在同一区域执行割草任务时,彼此并不一定需要直接的交流或感知,而是通过直接观察便可知哪些区域已被其他机器人割过了。Keith 等^[10]在环境中设置大量固定的传感器节点来指导机器人协作。Maxim 等^[4]则让机器人自行在环境中布置通信节点,然后利用这些节点来完成覆盖任务。Koenig 等^[26]采用类似蚂蚁在走过的路径上留下信息素的办法让机器人在经过的地方留下标记,其他机器人通过感知这些标记来避免重复覆盖。

通过感知相互作用。该类型要求每个机器人能将其他机器人与环境区分开来,通过传感器互相感知来交流信息。机器人的感知可通过红外线、超声

波、机器视觉等实现。由于每个机器人都可能具有自己的传感器系统,整个系统的传感器信息融合和有效利用是一个重要问题。如 Kuniyoshi 等^[27]利用视觉传感器研究多机器人协作的问题。Maxim 等^[11]利用机器人之间的相互感知、互相排斥来达到覆盖区域的目的。

通过显式的通讯相互作用,该方式类似于网络通信,每个机器人之间可通过建立临时的通信链路相互传递信息。这类通信方式在多机器人研究中应用较多,有直接点对点、点对多点和间接通信(Ad hoc 网络)等形式,如图 1 所示。图 1(a)为两个机器人在通信范围内直接通信;图 1(b)为一个通信范围较大的机器人类似广播地同时与几个机器人通信;图 1(c)为类似 Ad hoc 网络的通信方式,中间的机器人充当通信网络的路由节点,使得相互不在通信范围内的两个机器人借助这些路由节点实现通信。Ioannis 等^[28]研究了通过机器人在视觉范围内的通信,交换各自信息的多机器人协作覆盖方法。

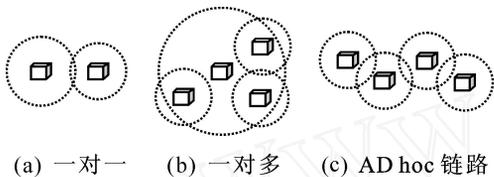


图 1 多机器人显式通信

5.2 环境地图表示方法

机器人的环境地图表示方法较多,可用于多机器人覆盖的主要是基于环境拆分的表示方法,如:栅格法和单元分解法以及拓扑逻辑图和 Voronoi 图。

栅格法是目前研究最广泛的路径规划方法之一。理想的覆盖过程就是在图上搜索一条无重复的遍历所有栅格的路径,通常路径只需用栅格的序号表示。文献[29,30]均对多机器人创建占据栅格地图实现覆盖的方式进行了研究。栅格地图易于创建和维护,对某个网格的感知信息可直接与环境某个区域对应,机器人对所测得的障碍物具体形状不太敏感,特别适于处理超声测量数据。但当在大型环境中或网格单元划分比较细时,网格法计算量迅速增长,需大量内存单元,使计算机的实时处理变得很困难。

单元分解法以障碍物为边界将环境分解成不含障碍物的单元,单元数目通常比栅格法中的网格单元少。Latombe^[31]提出的四边形分解法利用一条“Slice”扫过障碍物的顶点将机器人自由空间(无障碍空间)分成一系列简单的四边形单元。Howei^[32]在此基础上进一步提出了 Boustrophedon decomposition。后者的方法减少了分割后的单元数

量,对于覆盖算法非常有用。Ercan^[14]等利用 Morse 方程寻找环境拆分的关键点,通过构造不同的 Morse 方程为不同的环境寻求最合理的拆分方式,使其最适合机器人进行覆盖。

拓扑图将环境建模用一张线图表示,忽略了具体的几何特征信息,不必精确表示不同节点间的地理位置关系,图形抽象,表示方便。Sylvia 等^[3]对利用环境中的自然路标构造拓扑图进行覆盖的方式进行了初步研究。此外,由于 Voronoi 图构造的时间复杂度是 $O(n \lg n)$,实时性较好,生成的路径相对比较安全,远离障碍,并且路径比较平滑。Choset 等^[33]对广义 Voronoi 图(GVG)在基于传感器的路径规划方面进行了深入研究。因此,拓扑图和 Voronoi 图在基于传感器的未知环境覆盖中有较好的应用价值。

5.3 覆盖路径规划算法

对于单机器人的覆盖路径规划算法,Howie^[34]作了较详细的总结。多机器人的覆盖路径规划与单机器人相比,除了考虑遍历和路径的无重复外,还要考虑覆盖区域分配、机器人之间的协商和冲突等因素,因而要复杂得多。总体上可将目前出现的这些多机器人覆盖路径规划算法分为 3 类:无规划、集中规划和离散规划。

无规划算法无需地图信息,机器人采用反应式运动规划,取得理想的覆盖效果要以牺牲时间或投入大量的机器人为代价。如 Gage^[35]让机器人采用随机行走的策略来覆盖所有区域;Maxim 等^[11]利用机器人之间相互排斥的策略使其均匀散布在区域中,从而达到覆盖的目的,最好的实验结果达到了 97% 的覆盖率。

集中规划算法,在获得全局环境信息的条件下进行区域分配,机器人各自完成分配区域内的覆盖任务。如图 2 所示的一个简单栅格环境,单个机器人可以来回往复覆盖整个区域。多个机器人在集中规划下可分别覆盖分配到的某一子区域,提高覆盖效率,如图 3 所示。Kurabayashi 等^[12]研究了在已知环境下的多机器人覆盖算法。由于环境已知,可先计算出一条完整的覆盖路径,然后分段分配给单个机器人完成,并在实际机器人上进行实验。Kjerstin 等^[36]将 k 个机器人检测 2D 环境中的所有边界问题转化成 k RPP 问题,通过求解 RPP 的算法加以解决。Hazon 等^[37]改造单机器人覆盖算法 STC,使其成为能应用于多机器人覆盖的算法 MSTC,其允许原路返回的算法在最坏情况下, $K(K > 2)$ 台机器人完全覆盖区域的时间仅是单机器人 STC 算法的 50%。Zheng 等^[6]进一步提出了 MFC(Multi-robot-forest Coverage),实验结果表明所需覆盖时间比 MSTC

更短.文献[38]则在环境未知,但机器人从目标覆盖区外利用传感器将覆盖区分区的条件下,提出相应的覆盖算法.集中规划算法能从时间和面积两方面保证有效的覆盖,但需全部或部分的环境信息.

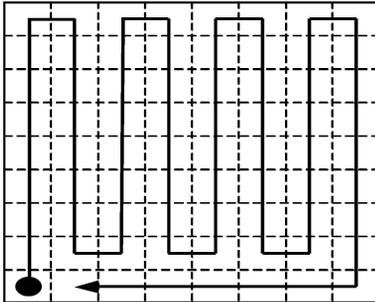


图2 单个机器人对栅格环境覆盖

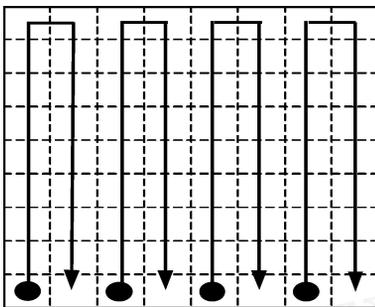


图3 多机器人对栅格环境覆盖

离散规划算法没有集中的任务分配机制,各机器人通过显式或隐式通信交换信息来协作完成覆盖. Singh 等^[29]假设机器人初始位置是聚集在一起,并能保持连续的数据共享,研究没有中央控制的异构多机器人协作创建占据栅格地图的算法. Yamauchi 等^[30]也进行了类似的研究,多机器人各自创建占据栅格地图,通过共享获取全局地图. Wagner^[39]提出了 MAC (Mark and Cover) 和 PC (Probabilistic Coverage), 分别是确定性的和概率的地形覆盖算法,两者结合的模拟实验表明,完全覆盖可在 $O(n)$ 时间内完成. 在 MAC 和 PC 算法中,机器人没有中央控制,也没有共同初始位置,是通过各机器人对走过的路径留下标记进行信息交流. 文献[26, 40]受蚂蚁等群体性昆虫的启发,提出的算法也属于这类覆盖算法. 离散规划算法是一种在线的、实时的规划算法,可以适应未知环境下的覆盖,但其效果与算法本身关系密切.

5.4 覆盖效果评价方法

由于目前的多机器人覆盖大多还是理论层面的探讨,采用适当的方法对应用于机器人的各种算法的实际效果进行评价非常重要. Nehmzow 等^[41, 42]对机器人与环境交互、机器人定位的效果作了较多定性的研究,但定量的覆盖算法效果评价研究还比

较少见. 文献[43, 44]采用计算机器人重复覆盖的栅格数目与总栅格数目之比来评价覆盖的效率. Zack^[2]则采用一个与路径相关的评估因子来评价覆盖的效率. Ercan 等^[45]用覆盖路径的照片来估计已覆盖区域,利用其与总区域面积之比来评价覆盖的完整率. 而 Iwan 等^[46]用机器人清扫平面上的锯末屑,统计残留锯末屑量来评价覆盖的完整率. Sylvia 等^[15, 16]在此基础上对覆盖的完整率和效率评价进行了更深入的研究,分别采用了合成照片面积 (C) 计算和路径长度 (L) 计算的方法,即

$$C = \frac{\text{Area covered}}{\text{Area of reachable surface}}, \quad (1)$$

$$L = \frac{P_n}{P_m}. \quad (2)$$

整体来看,目前对覆盖效果评价的依据主要集中在以下3个方面:

- 1) 重复率,包括区域重复和路径重复,理想的覆盖算法重复率应尽可能小;
- 2) 完整率,理想的覆盖算法目标是 100% 覆盖;
- 3) 消耗,指完成覆盖所需的时间和能量消耗.

6 多机器人覆盖研究的重点问题

多机器人覆盖是个比较系统的研究领域,涉及到多机器人的许多问题. 单机器人覆盖的主要问题是路径规划算法;而多机器人覆盖则需考虑多个机器人如何组织,彼此之间如何进行通信交流,如何进行任务分配协调合作等. 多机器人覆盖的重点问题包括:

1) 多机器人体系结构. 特别是具有对不同环境重构(自适应)性能的异构多机器人体系结构模型. 采用合理的体系结构,对于执行覆盖任务的多机器人而言,是决定覆盖效果的基础.

2) 多机器人通信技术. Ad hoc 网络的移动性和自主性能满足多机器人覆盖的要求,但问题在于:如果机器人过分依赖通信来获取信息,那么当系统中机器人的数量增加时,系统通信的负担将使系统的运行效率下降. 因此,有必要设计专门的多机器人系统使用的通讯机制、规范和协议.

3) 任务分配、协商协作机制. 合理的任务分配和协商协作是充分发挥多机器人优势、获得理想覆盖效果的关键. 任务分配方法是多机器人协作的难点问题. 可采用运筹学、市场法、调度法、组合优化等方法进行多机器人任务分配^[47].

4) 环境地图和机器人位姿知识表示方法. 在一般的机器人导航中,对环境地图和机器人位姿知识表示已有较多的研究. 合适的环境地图和机器人位姿知识表示方法一方面可降低通信信息量,增加系

统的稳定性和可靠性;另一方面,表达简洁而内容丰富的知识表示方法可方便任务分配,提高系统的效率。

5) 路径规划算法及效果评价。路径规划算法是多机器人覆盖研究的核心内容。体系结构、通信方式、任务分配机制以及环境地图和机器人位姿知识表示方法的研究均是为了方便路径规划,达到较好的覆盖效果。算法效果评价也是个难点问题,目前尚未形成统一的评价标准。由于移动机器人计算以及通信能力的限制和差异,算法的优劣除了依据覆盖的效果外,本身的时间和空间复杂度也有必要考虑。

7 结 论

多机器人覆盖研究才刚刚起步,有待研究的问题还有很多,一些具有重要意义的发展方向如下:

1) 多机器人覆盖研究的仿真平台。在离实用还存在较大距离的多机器人覆盖研究领域,仿真平台是开展相关研究的重要工具。

2) 未知环境下的覆盖。多机器人覆盖在实际应用中,环境信息大多是未知的,如军事、勘探等领域。开展基于传感器信息的多机器人覆盖研究具有非常现实的意义。

3) 三维地形的覆盖。目前的覆盖研究多数假设环境是二维平面,障碍物情况也较为简单。而实际环境不可能都是这种理想的情况,比如在起伏不定的地形、存在悬崖峭壁等危险障碍的环境中开展搜救行动。

4) 多目标优化覆盖。覆盖优化目标参数有多个,如消耗时间、重复路径、覆盖面积、能量消耗等。如何同时考虑多个优化目标,是多机器人覆盖一个重要的研究方向。

随着研究的不断深入,多机器人覆盖的研究将逐步由理论性探讨和仿真实验走向真实机器人的实际实验,并进一步实现多机器人在农业、林业、工业、资源以及军事等方面的实际应用。

参考文献(References)

[1] Douglas W Gage. Command control for many-robot systems[J]. *Unmanned Systems*, 1992, 10(4): 28-34.

[2] Zack J Butler. Distributed coverage of rectilinear environments [D]. Pennsylvania: Carnegie Mellon University, 2000.

[3] Sylvia C Wong, Bruce A MacDonald. A topological coverage algorithm for mobile robots[C]. *Proc of the 2003 IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems*. Las Vegas, 2003: 1685-1690.

[4] Maxim A Batalin, Gaurav S Sukhatme. Sensor coverage using mobile robots and stationary nodes[C]. *Proc of*

the SPIE. Boston, 2002: 269-276.

[5] Maxim A Batalin, Gaurav S Sukhatme. The analysis of an efficient algorithm for robot coverage and exploration based on sensor network deployment[C]. *Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. Barcelona, 2005: 3478-3485.

[6] Zheng Xiao-ming, Sonal Jain, Sven Koenig, et al. Multi-robot forest coverage[C]. *Proc of the IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems*. Edmonton, 2005: 343-350.

[7] Ercan U Acar, Howie Choset. Robust sensor-based coverage of unstructured environments[C]. *Proc of the 2001 IEEE/RSJ Int Conf on Intelligence Robots and Systems*. Hawaii, 2001: 61-68.

[8] Enrique Gonzilez, Mauricio Alarcon, Paula Aristizibal, et al. BSA: A coverage algorithm[C]. *Proc of the 2003 IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems*. Las Vegas, 2003: 1679-1684.

[9] Yoav Gabriely, Elon Rimon. Spanning-tree based coverage of continuous areas by a mobile robot[C]. *Proc of the IEEE Conf on Robotics and Automation*. Seoul, 2001: 1927-1933.

[10] Keith J O'Hara, Tucker R Balch. Pervasive sensorless networks for cooperative multi-robot tasks[C]. *The 7th Int Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems*. Toulouse, 2004: 279-286.

[11] Maxim A Batalin, Gaurav S Sukhatme. Spreading out: A local approach to multi-robot coverage[C]. *Proc of the 6th Int Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems*. Fukuoka, 2002: 373-382.

[12] Kurabayashi D, Ota J, Arai T, et al. Cooperative sweeping by multiple mobile robots[C]. *Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. Minneapolis, 1996: 1744-1749.

[13] Ercan U Acar, Howie Choset, Prasad N Atkar. Complete sensor-based coverage with extended-range detectors: A hierarchical decomposition in terms of critical points and voronoi diagrams[C]. *Proc of the 2001 IEEE/RSJ Int Conf on Intelligence Robots and Systems*. Hawaii, 2001: 1305-1311.

[14] Ercan U Acar, Howie Choset, Alfred A Rizzi, et al. Morse decompositions for coverage tasks[J]. *The Int J of Robotics Research*, 2002, 21(4): 331-344.

[15] Sylvia C Wong, Lee Middleton, Bruce A MacDonald. Performance metrics for robot coverage tasks[C]. *Proc Australasian Conf on Robotics and Automation*. Auckland, 2002: 7-12.

[16] Sylvia C Wong, Lee Middleton, Bruce A MacDonald. Creating composite images for estimating the effectiveness of mobile robot coverage algorithms[C]. *Proc of Australasian Conf on Robotics and*

- Automation. Brisbane, 2003: 243-248.
- [17] Enders H, Feiten W, Lawitzky G. Field test of autonomous cleaning in supermarkets [C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Leuven, 1998: 1779-1781.
- [18] David C Conner, Aaron Greenfield. Paint deposition modeling for trajectory planning on automotive surfaces [J]. IEEE Trans on Automation Science and Engineering, 2005, 2(4): 381-392.
- [19] Nicoud J, Habib M. The pemex autonomous demining robot: Perception and navigation strategies [C]. Proc of IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robot Systems. Pittsburg, 1995: 419-424.
- [20] Wagner A, Arkin R C. Multi-robot communication-sensitive reconnaissance [C]. Proc of the IEEE Int Conf on Intelligent Robotics and Systems. New Orleans, 2004: 4674-4681.
- [21] Kantor G A, Singh S, Peterson R, et al. Distributed search and rescue with robot and sensor teams [C]. The 4th Int Conf on Field and Service Robotics. Japan, 2003: 1808-1813.
- [22] Sanem Sariel, Levent Akin H. A novel search strategy for autonomous search and rescue robots [C]. RoboCup 2004, Lecture Notes in Artificial Intelligence. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 459-466.
- [23] Tao Wei-min, Mingiuu Zhang, Tzyh-Jong Tarn. A genetic algorithm based area coverage approach for controlled drug delivery using micro-robots [J]. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine, 2005: 1(1), 91-100.
- [24] Abraham N J, Wolf A, Choset H. A potential function approach to surface coverage for a surgical robot [J]. J of Computer Aided Surgery, 2006, 11(1): 1-9.
- [25] Dana R Yoerger, Albert M Bradley, Barrie B Walden, et al. Fine-scale seafloor survey in rugged deep-ocean terrain with an autonomous robot [C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. San Francisco, 2000: 1787-1792.
- [26] Koenig S, Szymanski B, Liu Y. Efficient and inefficient ant coverage methods [J]. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 2001, 3(1-4): 41-76.
- [27] Kuniyoshi Y, Yasuo Kita, Nobuyuki Rougeaux, et al. Vision based behaviors for multi-robot cooperation [C]. IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Neubiberg, 1994: 925-932.
- [28] Ioannis Rekleitis, Vincen Lee-shue, Ai Peng New, et al. Limited communication, multi-robot team based coverage [C]. Proc of the 2004 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. New Orleans, 2004: 3462-3468.
- [29] Singh K, Fujimura K. A navigation strategy for cooperative multiple mobile robots [C]. Proc of IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Yokohama, 1993: 283-288.
- [30] Yamauchi B. Decentralized coordination for multi-robot exploration [J]. Robotics and Autonomous Systems, 1999, 29(2): 111-118.
- [31] Latombe J C. Robot motion planning [M]. Boston: MA KLower, 1991.
- [32] Choset H, Pignon P. Coverage path planning: The boustrophedon decomposition [C]. Proc of the Int Conf on Field and Service Robotics. Canberra, 1997: 667-682.
- [33] Choset H, Burdick J. Sensor based planning I: The generalized voronoi graph [C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Leuven, 1995: 1649-1655.
- [34] Howie Choset. Coverage for robotics — A survey of recent results [J]. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 2001, 31(1-4): 113-126.
- [35] Gage D W. Randomized search strategies with imperfect sensors [J]. Mobile Robots, 1993, 5(3): 270-279.
- [36] Kjerstin Easton, Joel Burdick. A coverage algorithm for multi-robot boundary inspection [C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Barcelona, 2005: 727-734.
- [37] Hazon N, Kaminka G. Redundancy, efficiency, and robustness in multi-robot coverage [C]. Proc of the Int Conf on Robotics and Automation. Hong Kong and Macau, 2005: 735-741.
- [38] Min T W, Yin H K. A decentralized approach for cooperative sweeping by multiple mobile robots [C]. Proc of IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Victoria, 1998: 380-385.
- [39] Wagner I A, Lindenbaum M, Bruckstein A M. MAC vs PC: Determinism and randomness as complementary approaches to robotic exploration of continuous unknown domains [J]. Int J of Robotics Research, 2000, 19(1): 12-31.
- [40] Payton D, Daily M, Estkowski R, et al. Pheromone robotics [J]. Autonomous Robots, 2001, 11(3): 319-324.
- [41] Duckett T, Nehmzow U. Mobile robot self-localization and measurement of performance in middle-scale environments [J]. Robotics and Autonomous Systems, 1998, 24(1): 57-69.
- [42] Nehmzow U. Quantitative analysis of robot-environment interaction on the difference between simulations and the real thing [C]. Proc of Eurobot. Lund, 2001: 171-178. (下转第 491 页)

$$F = (\tilde{f}^{sc*} - \tilde{f}^{sc}) * 100 \% / \tilde{f}^{sc},$$

$$S = (\tilde{f}^s* - \tilde{f}^s) * 100 \% / \tilde{f}^s,$$

$$R = (\tilde{f}^r* - \tilde{f}^r) * 100 \% / \tilde{f}^r.$$

可见,当市场规模和价格敏感系数同时发生变化时,整个供应链的收益变化率均大于零,说明了采用应急策略的必要性.同时还表明当最优订货量减少时,随着 a 的增加,供应链的收益变化率呈递减趋势,而随着 k 的增大而增大;当最优订货量增加时,则正好相反.

对于零售商而言,随着 a 的增加,收益变化率呈递减趋势.当最优订货量减少时,零售商的收益变化率大于零;当最优订货量增加时,其变化率小于零.而随着 k 的减小,其收益变化率呈递增趋势.对于供应商而言,则正好相反.

总之,在需求预测偏差下,对于零售商而言,当需求量增加时,如不采用新的策略,其收益增加;而采用新策略,其收益减少.所以在需求预测偏差下,零售商不会主动为了协调整个供应链的收益而降低自己的收益.而当需求量减少时,零售商会要求供应商采用新的数量折扣机制,否则将退出供应链.因此,在需求预测偏差下,不管是需求量增加还是减少,供应商都应积极地做出应对策略.

7 结 论

本文研究了由单供应商和单零售商在需求预测偏差下的供应链协调问题.当供应商为 Stackelberg 博弈主导者时,对市场规模和敏感系数同时发生变化的情形进行了分析,给出了对供应商而言的最优应对策略.本文的结论也解释了随着市场规模和价格敏感系数的变化,价格会及时作出调整,而生产计划不经常改变的经济现象.并通过数值例子进行了分析比较,为供应链的决策者进行科学决策提供了有效依据.

参考文献(References)

[1] Jeuland A L, Shugan S M. Managing channel profits

[J]. Marketing Science, 1983, 2(3): 239-272.

[2] Ingene C, Parry M. Coordination and manufacturer profit maximization: The multiple retailer channel[J]. J of Retailing, 1995, 71(2): 129-151.

[3] Chen F, Federgruen A, Zheng Y S. Coordination mechanisms for a distribution system with one supplier and multiple retailers [J]. Management Science, 2001, 47(5): 693-708.

[4] 常良峰, 卢震, 黄小原. 供应链渠道协调中的 Stackelberg 主从对策[J]. 控制与决策, 2003, 18(6): 651-655.

(Chang Liang-feng, Lu Zhen, Huang Xiao-yuan. Stackelberg game in supply chain channel coordination [J]. Control and Decision, 2003, 18(6): 651-655.)

[5] 索寒生, 储洪胜, 金以慧. 带有风险规避型销售商的供应链协调[J]. 控制与决策, 2004, 19(9): 1042-1049.

(Suo Han-sheng, Chu Hong-sheng, Jin Yi-hui. Supply chain coordination with risk aversion retailers [J]. Control and Decision, 2004, 19(9): 1042-1049.)

[6] Qi X T, Bard J, Yu G. Supply chain coordination with demand disruption[J]. Omega, 2004, 32(4): 301-312.

[7] Xu M H, Qi X T. The demand disruption management problem for a supply chain system with nonlinear demand functions [J]. J of Systems Science and Systems, 2003, 12(1): 82-97.

[8] Xu M, Gao X. Supply chain coordination with demand disruptions under convex production cost function [J]. Wuhan University J of Natural Science, 2005, 10(3): 493-498.

[9] Huang C C, Yu G, Wang S. Disruption management for supply chain coordination with exponential demand function[J]. Acta Mathematica Scientia, 2006, 26B(4): 655-669.

[10] 于辉, 陈剑, 于刚. 协调供应链如何应对突发事件[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(7): 9-16.

(Yu Hui, Chen Jian, Yu Gang. How to coordinate supply chain under disruption[J]. System Engineering Theory and Practice, 2005, 25(7): 9-16.)

(上接第 486 页)

[43] Yoav Gabriely, Elon Rimon. Spiral-STC: An on-line coverage algorithm of grid environments by a mobile robot[C]. Proc of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Washington, 2002: 954-960.

[44] Zelinsky A, Jarvis R A, Byrne J C, et al. Planning paths of complete coverage of an unstructured environment by a mobile robots [C]. Int Conf on Advanced Robotics. Tokyo, 1993: 533-538.

[45] Ercan Umut Acar. Complete sensorbased coverage of

unknown spaces: Incremental construction of cellular decompositions [D]. Pennsylvania: Carnegie Mellon University, 2002.

[46] Iwan R Ulrich, Francesco Mondada, Nicoud J D. Autonomous vacuum cleaner [J]. Robotics and Autonomous Systems, 1997, 19(3/4): 233-245.

[47] Gerkey B P, Mataric M J. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems[J]. Int J of Robotics Research, 2004, 23(9): 939-954.