

文章编号: 1001-0920(2007)11-1289-04

无线传感器网络中基于遗传算法的优化覆盖机制

贾杰^a, 陈剑^a, 常桂然^b, 赵林亮^a, 王光兴^a

(东北大学 a. 信息科学与工程学院, b. 计算中心, 沈阳 110004)

摘要: 覆盖作为无线传感器网络应用的一个基本问题,反映了网络监测和实现目标跟踪的质量效果. 针对传感器节点的高密度部署情况,研究了工作节点集选取问题. 提出两种基于加权遗传算法和基于约束遗传算法的优化覆盖机制. 根据生成的适值函数进行遗传算法操作,并计算传感器网络充分覆盖区域所需的近似最优工作节点集. 仿真结果表明该算法能快速收敛于最优解,完成工作节点集的优化选取,从而降低网络冗余,延长网络生存时间.

关键词: 无线传感器网络; 覆盖; 遗传算法; 网络生存时间

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

Optimal coverage scheme based on genetic algorithm in wireless sensor networks

JIA Jie^a, CHEN Jian^a, CHANG Gui-ran^b, ZHAO Lin-liang^a, WANG Guang-xing^a

(a. College of Information Science and Engineering, b. Computing Center, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: JIA Jie, E-mail: jiajieneu@163.com)

Abstract: As one of the basic problems in wireless sensor networks, coverage reflects the effect of monitoring and tracking. Due to the high density of distributing nodes in wireless sensor networks, the searching algorithm for the optimal working sensor set is studied. Two optimal coverage control schemes based on weighted genetic algorithm and constrained genetic algorithm are proposed respectively, to compute the sub-optimal working sensor set maintaining the full coverage of the network. The number of working nodes and the network redundancy are reduced to extend network lifetime. Finally, simulation results validate the claims.

Key words: Wireless sensor network; Coverage; Genetic algorithm; Network lifetime

1 引言

无线传感器网络由大量具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器以自组织方式构成,网内节点协作完成数据的采集与传送,可广泛应用于战场监测、环境保护和智能家居等诸多领域^[1,2].

构建无线传感器网络时,在保证一定服务质量(QoS)的条件下,网络覆盖是无线传感器网络的基本问题之一,即如何部署传感器网络节点,达到网络覆盖范围最大化. 对网络覆盖的测量能使人们了解是否存在监测和通信盲区,以及被监测区域的无线传感器网络的覆盖情况,从而重新调整传感器节点分布或在添加传感器节点时采取改进措施. 另外,还可通过调整网络覆盖的密度,对被监测区域中重要区域部署更多的传感器节点,以保证测量数据的可靠性. 因此,网络覆盖已不单纯是为了通信覆盖和监

测区域覆盖,而是为了满足一定的应用需求. 一般而言,服务质量是衡量无线传感器网络覆盖的度量值^[3].

2 相关工作

目前,对无线传感器网络覆盖问题的研究主要分为确定性覆盖和随机覆盖. 确定性覆盖指覆盖的区域大小是确定的,保证使用最少数目的传感器覆盖该区域. 确定性覆盖通常采用最大平均覆盖法或最大最小覆盖法^[4]. 前者的目的是保证对格栅网络环境中的节点平均覆盖最大化,后者是保证对覆盖能力最差的格栅节点的覆盖最大化. 随机覆盖方式通常用于战场等危险或恶劣的环境,只能通过火箭弹射或飞机投放等方式,将足够的传感器洒落到需要监视的区域.

文献[5]设计了一种判断传感器节点周边覆盖

收稿日期: 2006-11-14; 修回日期: 2007-01-29.

基金项目: 教育部高等学校博士点专项基金项目(20030145017); 国家 863 计划项目(2003AA712032).

作者简介: 贾杰(1980—),女,辽宁鞍山人,博士生,从事传感器网络、无线通信的研究;常桂然(1946—),男,河北邯郸人,教授,博士生导师,从事计算机网络、无线通信的研究.

的算法,用于计算确定的区域是否能被 K 个传感器节点覆盖.文献[6]利用节点间的相互交叉,分别对节点集和监测区域集进行划分,将问题转换为从对应的一组节点集中寻找范数最小的节点集,充分覆盖监测区域.文献[7]通过把 Voronoi 图以及 Delaunay 三角应用于传感器网络,从而利用它们的相关性质对传感器网络进行研究.文献[8]将基于网格的传感器优化覆盖问题转化为最小化距离错误问题,提出一种在有限代价条件下最小化最大错误距离的组合优化配置方法.在文献[9-11]中,采用轮换“活跃节点”和“休眠节点”的节能覆盖方案,保证大规模网络环境下传感器节点能量的有效使用,从而提高网络的生存时间.文献[12,13]研究了在保证网络最优化的同时,使得所需的节点数目最少.在维持网络覆盖率的同时,保证网络的连通性同样引起了人们的广泛关注.文献[14]证明了当保持节点间通信半径 2 倍于感知半径时,在充分覆盖的前提下,总能保证网络的连通性.

3 无线传感器网络覆盖模型

从大量的传感器节点中选取一组优秀节点,以便在保持网络连通的前提下,获得尽可能大的覆盖率.在保证充分覆盖的前提下,令一部分冗余节点进入低功耗休眠状态,以形成最优覆盖节点集.所谓最优覆盖节点集,是指保证不影响整个网络覆盖率的最小节点集合.它们覆盖了整个区域,该子集外的任何节点都可处于低功耗休眠状态.这样不仅节约能源,而且减少无线信道中潜在的冲突,降低争用访问介质的可能性,从而延长网络的生命期.

假定监测区域 A 为二维平面,在该区域上投放 N 个参数相同的传感器节点,每个节点的坐标均已知,且有效感知半径均为 r ,则每个传感器节点的覆盖模型可表示为以节点坐标为圆心, r 为半径的圆.传感器节点集 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$, 其中 $c_i = \{x_i, y_i, r\}$ 即为节点 c_i 的覆盖模型, (x_i, y_i) 为节点 c_i 的坐标, r 为节点 c_i 的有效感知半径.

监测区域 A 被数字离散化为 $m \times n$ 个像素,每个像素的面积为 1.将像素点 (x, y) 被传感器节点 c_i 覆盖的事件定义为 $r_i, i \in [1, N]$, 则该事件发生的概率 $P\{r_i\}$ 即为像素点 (x, y) 被传感器节点 c_i 所覆盖的概率 $P_{\text{cov}}(x, y, c_i)$. 该概率为一个二值函数,即

$$P\{r_i\} = P_{\text{cov}}(x, y, c_i) = \begin{cases} 1, & (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \leq r^2; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (1)$$

这表明,如果一个像素点 (x, y) 到传感器节点 c_i 的距离不大于节点的感知半径 r ,则认为该像素点 (x, y) 被传感器节点 c_i 覆盖,且

$$P\{\bar{r}_i\} = 1 - P\{r_i\} = 1 - P_{\text{cov}}(x, y, c_i). \quad (2)$$

其中 \bar{r}_i 为 r_i 的补,表示像素点 (x, y) 未被传感器节点 c_i 所覆盖这一事件.

假设所有的随机事件 r_i 是相互独立的,即 r_i 和 r_j 无关, $i, j \in [1, N]$ 且 $i \neq j$, 则

$$P\{r_i, r_j\} = 1 - P\{\bar{r}_i, \bar{r}_j\} = 1 - P\{\bar{r}_i\} P\{\bar{r}_j\}. \quad (3)$$

节点集中只要有一个节点覆盖了像素点 (x, y) , 就认为该像素点 (x, y) 被节点集覆盖; 否则, 便认为该像素点 (x, y) 未被节点集覆盖. 因此, 像素点 (x, y) 被节点集覆盖的概率为 r_i 的并集, 即

$$P_{\text{cov}}(x, y, C) = P\left\{\bigcup_{i=1}^N r_i\right\} = 1 - P\left\{\bigcap_{i=1}^N \bar{r}_i\right\}. \quad (4)$$

传感器节点集 C 所覆盖的像素面积之和即为该节点集的区域覆盖面积 $A_{\text{area}}(C)$, 有

$$A_{\text{area}}(C) = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n P_{\text{cov}}(x, y, C) \quad (5)$$

4 基于遗传算法的优化覆盖机制

遗传算法(GA)是近年来提出的一种新型优化方法,它具有并行搜索、群体寻优的特点,已广泛用于解决各种具有 NP 难度的问题.算法主要包含以下 5 个步骤(其中 F 和 S 表示其父代和子代):

输入: T 为给定运行代数, K 为群体大小, F_r 为重组概率, F_m 为变异概率;

输出: F 中最好的解.

Step1: 初始化. 设 $t = 0, F = \emptyset$, 对 $i = 1, 2, \dots, K$ 执行:

- 1) 随机创建一个个体 \bar{a}_i ;
- 2) $F = F \cup \{\bar{a}_i\}$.

Step2: 评价. 对每个个体 $\bar{a}_i \in F$ 执行:

- 1) 计算目标函数 $f(\bar{a}_i)$;
- 2) 为 \bar{a}_i 分配适应值 $f(\bar{a}_i)$.

Step3: 再生. 设 $S = \emptyset$, 对 $i = 1, 2, \dots, K$ 执行:

- 1) 根据给定方案挑选两个个体 $\bar{a}, \bar{b} \in F$;
- 2) 以概率 F_r 重组 \bar{a} 和 \bar{b} , 产生一个子代个体 \bar{c}_i ;
- 3) \bar{c}_i 以概率 F_m 变异;
- 4) $S = S \cup \{\bar{c}_i\}$.

Step4: 取代. 用子代 S 中的优秀个体取代群 F 中的小适应个体.

Step5: 结束. $t = t + 1$, 如果 $t = T$ 则结束; 否则返回 Step2.

无线传感器网络优化覆盖问题是一个典型的多目标组合优化问题,既要尽量减少工作节点的数量,又要保证网络充分覆盖.本文探索的问题为:存在传感器节点集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$, 求一个工作节点

集 C , 使得网络覆盖率 $R_{cov}(C)$ 最大, 并且工作节点数目 $|C|$ 最少.

4.1 基于加权的遗传算法覆盖机制

加权法是通过形成目标函数的线性组合, 将原始的多目标函数转化为单目标函数.

对于无线传感器网络的优化覆盖控制问题, 其解采用位串 $\bar{a} = (a_1, a_2, \dots, a_N)$ 通过二进制编码的形式表示, 将实际的问题空间对应地转换到编码空间. 其中

$$a_i = \begin{cases} 1, & c_i \text{ 被选取;} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (6)$$

覆盖区域的总面积为 A_s , 则工作节点集 C 的网络覆盖率子目标函数为

$$f_1(x) = R_{cov}(C) = A_{area}(C) / A_s. \quad (7)$$

设 $|C|$ 为工作节点总数, $|C|$ 为投放节点总数, 则节点利用率子目标函数为

$$f_2(x) = |C| / |C|. \quad (8)$$

本文将覆盖率函数 $f_1(x)$ 与节点利用率函数 $f_2(x)$ 称为子目标函数, 总体目标函数是这些子目标函数的变换加权和. 通过加权将这些子目标函数转化为总体目标函数, 并将其作为遗传算法求解问题中的适值函数. 总体目标函数可定义为

$$f_{obj}(x) = w_1 f_1(x) + w_2 (1 - f_2(x)). \quad (9)$$

其中 w_1 和 w_2 为子目标函数对应的权值, 其值取决于设计者对该网络指标的综合要求. 各个权值的总和为 1, 总体目标函数值介于 0 ~ 1 之间, 该值越大表明方案越优. 通过式 (9), 可综合评估每种节点部署方案的优劣.

为使父代双亲的基因在子代中尽可能得到保留, 从而避免已获得的最优解丢失, 交叉操作采取一种循环交叉的方法. 设父代中选取 K 个个体进行繁殖 ($ind_1, ind_2, \dots, ind_K$), 则第 1 次选取 (ind_1, ind_2) 作为双亲, 第 2 次选取 (ind_2, ind_3) 作为双亲, 第 i 次选取 (ind_i, ind_{i+1}), 以此类推, 共产生 $2 * (K - 1)$ 个后代. 这样, 每个父代个体的基因将在两个子代个体中有所保留.

变异操作只应用于由双亲繁殖所得的后代个体. 在所有后代个体构成的基因组集合中, 按概率 P_m 选取基因组进行取反操作, P_m 为变异概率.

取代采用竞争选择的方法, 当后代的适值大于取代的个体时, 便发生取代操作.

4.2 基于约束条件的遗传算法覆盖机制

约束项求解是处理多目标优化问题的另一种常见方法, 这里将其用于传感器网络的优化覆盖问题. 将处理的多目标函数转化为优化的单一目标, 选择决策者最终需要的一个目标, 而将其他 ($m - 1$) 个目

标视为约束项, 即将多目标函数转化为单目标函数.

$$\max \bar{y} = f(\bar{x}) = (f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_m(\bar{x})). \quad (10)$$

其中: $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X, X$ 是决策空间; $\bar{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in Y, Y$ 是目标空间. 服从 $f_i(\bar{x}), i, i = 1, 2, \dots, m.$ 的上下边界由网络设计者根据不同的目标来挑选, 最优解可通过求解不同的 i 约束项得到.

需注意 i 上下边界的选取原则: 如果 i 挑选不合适 (比如网络覆盖率边界设置为 $i > 1$), 则对应的 SOP 没有可行解. 为避免这种情况, 必须预设 i 在一个合适的范围内.

本文需优化的目标有两个: 网络覆盖率函数 $f_1(x)$ 和节点利用率函数 $f_2(x)$. 设计目标要求最大化网络覆盖率, 同时最小化节点利用率 (即最少的工作节点数目). 当选择优化目标为最大化网络覆盖率时, 由文献 [14] 可知, 网络节点以六边形分布时, 所需工作节点数目最少. 假设此时投放节点数目为 m 个, 网络最优分布所需节点为 k 个, 则节点利用率目标函数约束边界为

$$\max(0, (k - 10) / m) / m < i < \min(1, (k + 10) / m), \quad (11)$$

即可保证算法搜索的范围中包含最优解. 当选择优化目标为最小化节点利用率时, 因网络覆盖率低于 90% 时, 网络便不能完成正常的监测工作, 故设置网络覆盖率约束边界为 $0.9 < i < 1$.

在基于约束遗传算法的优化覆盖机制中, 解的编码表示以及交叉和变异算子均与加权法相同, 但在取代方案设计上, 若两个解都是可行解, 则选适值大的; 若一个解可行而另一个不可行, 则选可行的; 若两个解都不可行, 则把解违反约束函数的程度加起来比较, 选违反约束程度小的. 这样就能避免使用惩罚函数带来的复杂性, 取得更好的求解效果^[15].

5 仿真实验

实验 1 设监测区域为 100 m * 100 m, 节点感知半径为 11 m. 首先确定性部署 39 个节点以六边形结构最优化分布于监测区域, 如图 1 (a) 所示. 其他 61 个节点随机部署于监测区域, 采用基于加权的遗传算法进行求解. GA 中交叉概率设为 0.9, 变异概率设为 0.1, 算法运行 120 代, 观察不同代数下区域的覆盖情况.

不同代数下的节点分布如图 1 所示. 图中, (b) 表示在 (a) 的最优节点分布方案上随机部署 61 个节点后的初始节点分布情况; (c), (d), (e) 和 (f) 分别表示 60 代、80 代、100 代和 120 代时的节点分布. 观察 0 ~ 120 代的整个过程可清晰地看到, 搜索向着全

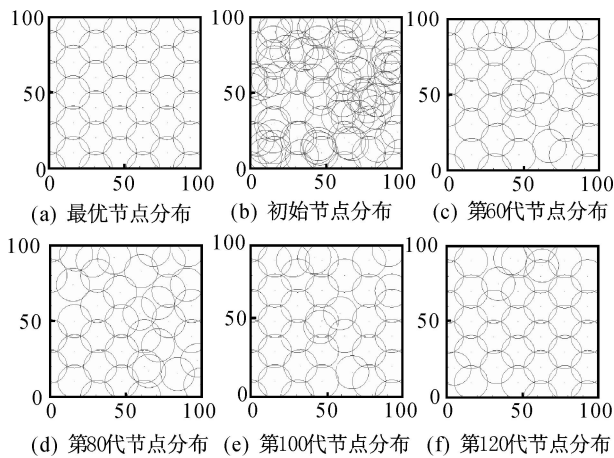


图1 基于加权遗传算法的节点分布

局的最优解方向进行,120代以后的解非常接近(a)中的最优分布.最终使用37个节点,获得96.8%的覆盖率.

实验2 节点感知参数以及监测区域大小同实验1,随机部署200个节点,采用基于约束的遗传算法进行求解.首先假设约束条件为网络覆盖率($0.9 < i < 1$),优化目标为最小化工作节点数目;然后假设约束条件为节点利用率($0.1 < i < 0.4$),优化目标为最大化覆盖率,其中GA种群大小设为200,交叉概率设为0.9,变异概率设为0.005,算法运行100代.

不同约束条件下,GA求解性能对比曲线如图2所示.从图中可以看出,在获得相同覆盖率的前提下,以覆盖率为优化目标的约束算法所需的节点数更少,故该算法优于以节点个数为优化目标的约束算法.同时还可看到,约束法获得了更多的优化解,而加权法需在算法的初始阶段对整体目标进行取舍,故最后得到的优化解是唯一的.

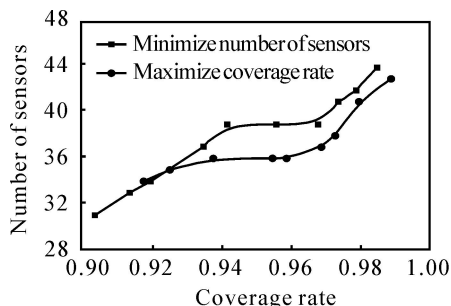


图2 不同约束条件下求解性能对比曲线

6 结 语

本文研究了无线传感器网络的优化覆盖问题,提出了基于遗传算法的两种优化覆盖机制,分别给出了两种机制的性能分析.仿真结果表明,本文提出的两种优化机制均能有效收敛于最优解,降低了网络能耗.

今后的工作将集中于利用传感器网络的分簇结构,对骨干网络进行最优拓扑,进而调整簇内节点,形成分级的优化方案;同时考虑节点差异性及其位置无关特性,进一步降低成本,提高网络的生存时间.

参考文献(References)

- [1] Akyildiz F, Su W, Sanakamian Y. Wireless sensor networks: A survey [J]. IEEE Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] Hill J, Szewczyk R, Woo A, et al. System architecture directions for networked sensors [C]. Int Conf on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. New York: ACM Press, 2000: 93-104.
- [3] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, et al. Coverage problem in wireless ad-hoc sensor networks [C]. IEEE INFOCOM. Anchorage: IEEE Press, 2001: 1380-1387.
- [4] Dhillon S, Chakrabarty K. Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks [C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conf. New Orleans: IEEE Press, 2003: 1609-1614.
- [5] Huang Chi-fu, Tseng Yu-chee. The coverage problem in a wireless sensor network [C]. ACM WSNA '03. New York: ACM Press, 2003: 115-121.
- [6] Slijepcevic S, Potkonjak M. Power efficient organization of communication [C]. IEEE Communication Society. Helsinki: IEEE Press, 2001: 472-476.
- [7] Wen Ying-you, Feng Yong-xin, Wang Guang-xing. Sensor distribution optimization based on extending-tree in sensor network [J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(5): 737-742.
- [8] Lin F Y S, Chiu P L. A near-optimal sensor placement algorithm to achieve complete coverage in sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(1): 43-45.
- [9] Yan I, He T, Stankovic J A. Differentiated surveillance for sensor networks [C]. Int Conf on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2003: 51-62.
- [10] Tian D, Georganas N D. A node scheduling scheme for energy conservation in large wireless sensor networks [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2003, 3(2): 271-290.
- [11] Cardei M, Du D Z. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization [J]. Wireless Networks, 2005, 11(3): 333-340.

(下转第1301页)

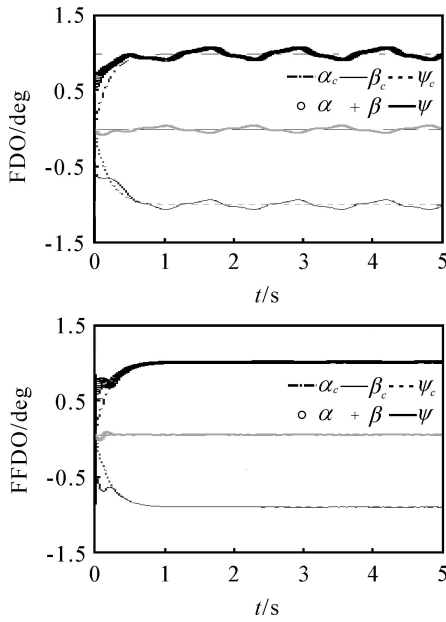


图 3 扰动情况下 TSMC 和自适应 TSMC 的跟踪曲线
快速消除全部干扰的影响,因此闭环系统具有强鲁棒性.

6 结 语

首先针对传统 FDO 在逼近误差较小时学习缓慢的缺点,设计了 FFDO,严格证明了其逼近误差在有限时间内收敛到非常小的区域,然后基于 FFDO

设计了自适应 TSMC 控制方案;最后,通过仿真进一步验证了 FFDO 的快速性和闭环控制方案的鲁棒性.

参考文献(References)

[1] Kim E. A fuzzy disturbance observer and its application to control[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2002, 10 (1): 77-84.

[2] Yu Shuang-he, Yu Xing-huo, Man Zhi-hong. A fuzzy neural network approximator with fast terminal sliding mode and its applications[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2004, 148(3): 469-486.

[3] Wu Y Q, Man Z H. Terminal sliding mode control design for uncertain dynamic systems[J]. Systems and Control Letters, 1998, 34(5): 281-287.

[4] Park K B, Tsuji T. Terminal sliding mode control of second-order nonlinear uncertain systems[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 1999, 9(11): 769-780.

[5] Yuri B Shtessel, McDuffie J. Sliding mode control of the X-33 vehicle in launch and re-entry mode [R]. Boston: Marshall Space Flight Center, 1998.

[6] Wu S F, Engelen C J H, Chu Q P, et al. Fuzzy logic based attitude control of the spacecraft X-38 along a nominal re-entry trajectory [J]. Control Engineering Practice, 2001, 9(7): 699-707.

(上接第 1292 页)

[12] Molina A, Athanasiadou G E, Nix A R. The automatic location of base-stations for optimized cellular coverage: A new combinatorial approach[C]. IEEE 49th Vehicular Technology Conf. Amsterdam: IEEE Press, 1999: 606-610.

[13] Lieska K, Laitinen E, Lahteenmaki J. Radio coverage optimization with genetic algorithms [C]. IEEE Int Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio

Communications. Boston: IEEE Press, 1998: 318-322.

[14] Zhang Hong-hai, Jennifer C Hou. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. Ad-hoc and Sensor Wireless Networks, 2005, 1(1): 89-124..

[15] Deb K. An introduction to genetic algorithms [J]. Sadhana J, 1999, 24(4): 293-315.

(上接第 1296 页)

[4] Body S, El Ghaoui L, Eron E, et al. Linear matrix inequalities in system and control theory [M]. Philadelphia: SIAM, 1994.

[5] Li X, de Souza C E. Delay-dependent robust stability and stabilization of uncertain linear delay systems: A linear matrix inequality approach[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1997, 42(8): 1144-1148.

[6] Li X, de Souza C E. Criteria for robust stability and stabilization of uncertain linear systems with state delays [J]. Automatica, 1997, 33(1): 1657-1662.

[7] Su T J, Lu C Y, Tsai J S H. LMI delay-dependent robust stability criteria for uncertain systems with multiple-state delays [J]. IEEE Trans on Circuits and

Systems, 2002, 49(2): 253-256.

[8] Su N J, Su H Y, Chu J. Delay-dependent robust H control for uncertain time-delay systems[C]. IEE Proc Control Theory Application. London, 2003: 489-492.

[9] Moon Y S, Park P, Kwon W H, et al. Delay-dependent robust stabilization of uncertain state-delayed systems [J]. Int J of Control, 2001, 74 (14): 1447-1455.

[10] Kwon O M, Park Ju H. On improved delay-dependent robust control for uncertain time-delay systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49 (11): 1991-1995.

[11] Lee J H, Kim S W, Kwon W H. Memoryless H controllers for state delayed systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(1): 159-162.