

基于移动传感网络的随机分布参数系统的镇定控制

穆文英, 崔宝同, 李 纹

(江南大学 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 针对移动传感网络带有执行器的情况, 研究了基于移动传感网络的随机分布参数系统的镇定控制问题. 通过 Lyapunov 稳定性理论和 Itô 公式, 设计相应的反馈镇定控制器, 得到每个传感器/执行器节点的移动轨迹, 最终保证基于移动传感网络的分布参数系统是渐近稳定的. 仿真结果表明: 移动传感网络在增强系统性能方面具有明显的优越性.

关键词: 移动传感网络; 随机分布参数系统; 空间分布

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2014)07 - 1023 - 05

Stabilization Control of Stochastic Distributed Parameter Systems Based on Mobile Sensor Networks

MU Wen-ying, CUI Bao-tong, LI Wen

(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry of the Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: According to mobile sensor networks with actuators, the authors proposed a scheme for stabilization control of stochastic distributed parameter systems based on mobile sensor network. By the Lyapunov stability theorem and the Itô formula, a feedback stabilization controller was designed, and each sensor/actuator agent trajectory was obtained. Finally, the whole distributed parameter systems based on mobile sensor network was proved to be asymptotically stable. Numerical simulation demonstrated the superiority of such a moving sensor network in enhancing system performance.

Key words: mobile sensor networks; stochastic distributed parameter systems; spatial distribution

0 引言

近年来,移动传感网络技术的发展与研究,成为国际上备受关注的前沿热点研究领域,传感器节点以其低成本、低功耗,具有感知、计算、无线通信的能力,受到各个领域研究者的极大关注^[1-2]. 但是,由于传感器节点体积小、能量供给受限的原因,在实际工程应用中,带执行器的移动传感网络相对于传统传感网络具有更大优势,网络中的执行节点具有较

强的计算与数据处理能力、能量不受限且能够根据传感节点感知信息,并根据外部环境实施相应的行动. 这种网络可自成一个功能强大和完善的自治系统^[3],在战场侦查、机器人作战等军事环境以及农林监控、环境监测和医疗救护等很多民用项目中都有潜在应用^[1-3]. 而随机分布参数系统在一系列实际问题中,尤其是在原子能、航空航天,甚至环境监测、智能控制等领域都有特别的应用背景.

利用移动传感网络对分布参数系统进行有效的

收稿日期: 2013-10-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174021);中央高校基本科研业务费专项资金资助(JUDCF13037);江苏省研究生培养创新工程项目资助(CXZZ13-0740)

作者简介: 穆文英(1985—),女,博士研究生,主要从事移动传感网络的协同控制方面的研究,E-mail: weny815@126.com

控制,可以改善系统的性能以及降低能耗.然而,目前国内鲜有讨论这方面的方法与研究. Li等^[4]提出了移动传感网络中移动传感器节点的定位和运动分析; Resa等^[5]针对移动传感网络的目标跟踪问题,分析其耦合分布估计与群集控制问题; Burns等^[6]基于移动传感网络,研究了分布参数系统的最优滤波问题.然而,以上研究都没有考虑移动执行器的作用. Demetriou^[7]考虑了基于带执行器的移动传感网络的分布参数系统的镇定控制与状态估计问题.

在实际工程中,信号传递间不可避免地会出现噪声,同时,执行器与传感器在网络中的空间分布也往往不同.为了克服这一问题,与文献[7]在理想状态下,执行器与传感器在网络中并列且同构不同,本文在存在随机扰动的前提下,进一步分析了传感器与执行器异构且在空间分布不同时,其节点的移动速度.本文的主要工作在于:以Lyapunov稳定性理论为分析手段,引入Itô公式,基于移动传感器与执行器在网络中的空间分布不同,研究带噪声扰动的随机分布参数系统的镇定控制问题,并给出传感器与执行器节点的移动轨迹,在整个空间领域内定位,保证随机分布参数系统的稳定性.

1 问题描述

考虑随机分布参数系统

$$dX(t, x) = \left[v \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}(t, x) + \sum_{i=1}^m b(x, x_i^a(t)) u_i(t) \right] dt + \sigma(X(t, x)) d\omega(t) \quad (1)$$

初始条件为

$$X(0, x) = x_0(x)$$

边界条件为

$$X(t, 0) = X(t, h) = 0$$

输出方程为

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ \vdots \\ y_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_0^h c(x, x_1^s(t)) X(t, x) dx \\ \vdots \\ \int_0^h c(x, x_m^s(t)) X(t, x) dx \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $x \in \Omega = [0, h]$; $t \in \mathbb{R}^+$; v 为扩散系数, $v > 0$; $X(\cdot, x)$ 表示过程状态; 函数 $b(x, x_i^a(t)) (i=1, \dots, m)$ 表示第 i 个移动执行设备的空间分布; 空间点 $x_i^a(t) \in \Omega = [0, h]$ 表示第 i 个移动执行设备的时变中心点; $u_i(t)$ 是相关控制信号; 类似地, 利用 m 个移动传感

设备提供空间平均观测值, 函数 $c(x, x_i^s(t)) (i=1, \dots, m)$ 表示第 i 个移动传感设备的空间分布, 空间点 $x_i^s(t) \in \Omega = [0, h]$ 表示第 i 个移动传感设备的时变中心点; $\omega(t) = (\omega_1(t), \dots, \omega_m(t))^T$ 是定义在完备的概率空间 $(\Omega, \mathcal{F}, (\mathcal{F}_t)_{t \in I}, \mathcal{P})$ 上具自然流 $\{\mathcal{F}_t\}_{t \geq 0}$ 的 m 维 Brown 运动; $\sigma: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^{m \times m}$, $\sigma(0) = 0$.

令 \mathcal{X} 是 Hilbert 空间, 在 \mathcal{X} 上存在内积 $\langle \cdot, \cdot \rangle$, 且由该内积可诱导出范数 $|\cdot|$. 令 \mathcal{Y} 是自反 Banach 空间, 由 $\|\cdot\|$ 表示. 且 \mathcal{Y} 在 \mathcal{X} 中稠密. 同时令 \mathcal{Y}^* 为 \mathcal{Y} 的共轭对偶空间, $\|\cdot\|^*$ 是 \mathcal{Y}^* 的范数, 则有^[7]

$$\mathcal{Y} \hookrightarrow \mathcal{X} \hookrightarrow \mathcal{Y}^* \quad (3)$$

由于上述嵌入是紧嵌入且是连续的, 则 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 同样表示在 \mathcal{Y} 和 \mathcal{Y}^* 间的对偶积, 即对于 $\phi \in \mathcal{Y}, \varphi \in \mathcal{Y}^*$, $\langle \phi, \varphi \rangle$ 表示有界线性泛函 ϕ 作用于 φ , 即 ϕ, φ 是 \mathcal{X} 的内积. 根据以上性质, 可得^[7]

$$|\phi| \leq \tau \|\phi\| \quad (4)$$

式中: $\phi \in \mathcal{Y}; \tau$ 是正常数.

为使分析方便, 将系统(1)抽象表达为

$$\begin{aligned} dX(t) &= [\mathcal{A}X(t) + \mathcal{B}u(t)] dt + \mathcal{D}d\omega(t) \\ X(0) &= X_0 \end{aligned} \quad (5)$$

其中二阶椭圆算子 \mathcal{A} 是 \mathcal{X} 上的 \mathcal{E}_0 半群的生成元, 表示为

$$\mathcal{A}\phi = v \frac{\partial^2 \phi(x)}{\partial x^2}, \phi \in D(\mathcal{A})$$

其定义域为 $D(\mathcal{A}) = H_0^1(0, l) \cap H^2(0, l)$.

算子 $\mathcal{B}: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathcal{Y}^*$ 表示控制输入算子, 则

$$\mathcal{B}_i(x_i^a(t)) u_i(t) = b(x, x_i^a(t)) u_i(t)$$

或

$$\langle \mathcal{B}_i(x_i^a(t)) u_i(t), \phi \rangle = \int_0^h b(x, x_i^a(t)) \phi(x) u_i(t) dx$$

其中 $i=1, \dots, m$. 执行器节点的位置为

$$x_i^a(t) = [x_1^a(t), x_2^a(t), \dots, x_m^a(t)]$$

算子 $\mathcal{D}: \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{Y}^*$ 表示过程扰动算子, 则

$$\mathcal{D}d\omega(t) = \sigma(X(t, x)) d\omega(t), \mathcal{D} \in L(\mathbb{R}, \mathcal{Y}^*)$$

$u \in \mathbb{R}^m$ 和 $\omega \in \mathbb{R}$ 分别表示过程控制信号和过程扰动信号, 若 u, ω 平方可积, 即有

$$\mathcal{B}u + \mathcal{D}\omega \in L_2([0, t]; \mathcal{Y}^*)$$

且由于 \mathcal{A} 是 \mathcal{X} 上 \mathcal{E}_0 半群的生成元, $X_0 \in \mathcal{X}$, 则系统(5)是适定的, 且存在唯一弱解.

类似的, 输出系统(2)可以写为

$$y(t, x^s) = \mathcal{C}(x^s(t)) X(t) \quad (6)$$

其中算子 $\mathcal{C}: \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}^m$ 是与传感网络相关的输出算子. 通过传感器的位置 $x^s = \{x_1^s, x_2^s, \dots, x_m^s\} \in \Omega^m$ 进行参数化

$$\langle \mathcal{E}(x^s(t))\phi, \varphi \rangle = \begin{bmatrix} \langle \mathcal{E}(x_1^s(t))\phi, \varphi \rangle \\ \vdots \\ \langle \mathcal{E}(x_m^s(t))\phi, \varphi \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_0^h c(x, x_1^s(t))\phi(x)\varphi(x) dx \\ \vdots \\ \int_0^h c(x, x_m^s(t))\phi(x)\varphi(x) dx \end{bmatrix}$$

若执行设备的测度在空间间隔 $[x_i^a - 2\varepsilon, x_i^a + 2\varepsilon]$ 内, 其多项式函数为

$$b(x, x_i^a) = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon} & x \in [x_i^a - 2\varepsilon, x_i^a + 2\varepsilon] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\varepsilon > 0$, 同时, 传感设备的测度在空间间隔 $[x_i^s - \varepsilon, x_i^s + \varepsilon]$ 内. 其函数为脉冲函数, 即

$$c(x, x_i^s) = \begin{cases} 1 & x \in [x_i^s - \varepsilon, x_i^s + \varepsilon] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

为方便定理证明, 同时给出如下假设:

假设 1^[7] 对于算子 \mathcal{A} , 存在 $\alpha > 0$, 使得

$$|\langle \mathcal{A}\phi, \varphi \rangle| \leq \alpha \|\phi\| \|\varphi\|$$

其中 $\phi \in \mathcal{D}, \varphi \in \mathcal{D}^*$.

假设 2^[7] 算子 $-\mathcal{A}$ 是强制算子, 即满足

$$\operatorname{Re}\langle -\mathcal{A}\phi, \phi \rangle > \beta \|\phi\|^2$$

其中 β 是正常数, $\phi \in \mathcal{D}$.

假设 3 若 $-\Theta(t)$ 是强制算子, 则存在常数 $0 \leq \mu_1 \leq 1, 0 \leq \mu_2 \leq 1$, 使得

$$\operatorname{Tr}(\sigma(X(t, x)))^T (-\Theta(t))\sigma(X(t, x)) \leq \mu_1 \|X(t)\Theta(t)\|^2 + \mu_2 \|X(t)\Theta(t)\|^2 \quad (9)$$

2 镇定性分析

针对前述随机分布参数系统(5)满足假设 1 ~ 3, 且移动执行器与移动传感器在网络中的空间分布不同, 分别由式(7)和式(8)给出. 本节将分析和研究在控制器作用下系统能进行镇定的充分条件.

定理 1 当每个执行器与传感器的移动速度分别为

$$\dot{x}_i^a = -k_i [X(t, x_i^a - 2\varepsilon) - X(t, x_i^a + 2\varepsilon)] y_i(t) \quad (10)$$

$$\dot{x}_i^s = -k_i [X^2(t, x_i^s - \varepsilon) - X^2(t, x_i^s + \varepsilon)] \quad (11)$$

且系统的反馈控制器设计为

$$u_i(t) = -k_i y_i(t) = -k_i \int_0^h c(x, x_i^s(t)) X(t, x) dx \quad (12)$$

其中反馈增益 $k_i > 0, i = 1, \dots, m$, 则基于移动传感网

络的随机分布参数系统(5)是渐近稳定的.

证明 考虑带输出反馈控制器和噪声干扰项的随机分布参数系统

$$\begin{aligned} dX(t) &= [\mathcal{A}X(t) + \mathcal{B}u(t)]dt + \mathcal{D}d\omega(t) = \\ &= \left[\mathcal{A}X(t) + \sum_{i=1}^m \mathcal{B}_i(x_i^a(t))u_i(t) \right] dt + \sigma(X)d\omega(t) = \\ &= [(\mathcal{A} - \mathcal{B}(x^a(t))\mathbf{K}\mathcal{E}(x^s(t)))X(t)] dt + \\ &= \sigma(X)d\omega(t) = (\Lambda(t)X(t))dt + \sigma(X)d\omega(t) \quad (13) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= \operatorname{diag}\{k_i\}, i = 1, 2, \dots, m \\ \Lambda(t) &= \mathcal{A} - \mathcal{B}(x^a(t))\mathbf{K}\mathcal{E}(x^s(t)) \end{aligned}$$

构造 Lyapunov 函数如下

$$V(t, X) = -\langle X(t), \Lambda(t)X(t) \rangle \quad (14)$$

其中

$$\Lambda(t) = \mathcal{A} - \mathcal{B}(x^a(t))\mathbf{K}\mathcal{E}(x^s(t))$$

由假设 2 知 $-\mathcal{A}$ 是强制算子, 容易得到函数 $V(t, X)$ 是正定的. 运用 Itô 微分公式^[8]沿式(13)的轨迹可得 $V(t, X)$ 的导数为

$$dV(t, X) = \mathcal{L}V(t, X)dt + V_x(t, X)\sigma(X)d\omega(t) \quad (15)$$

其中, 算子 \mathcal{L} 表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}V(t, X) &= V_t(t, X) + V_x(t, X)[\Lambda(t)x(t)] + \\ &= \frac{1}{2}\operatorname{tr}(\sigma^T(X)V_{xx}(t, X)\sigma(X)) \quad (16) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} V_t(t, X) &= \frac{\partial V(t, X)}{\partial t} \\ V_x(t, X) &= \left(\frac{\partial V(t, X)}{\partial X_1}, \dots, \frac{\partial V(t, X)}{\partial X_m} \right) \\ V_{xx}(t, X) &= \left(\frac{\partial^2 V(t, X)}{\partial X_i \partial X_j} \right)_{m \times m} \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} \mathcal{L}V(t, X) &= \\ &= -2 \left\langle \frac{dX}{dt}, \Lambda(t)X(t) \right\rangle - \left\langle X(t), \frac{d\Lambda(t)}{dt}X(t) \right\rangle + \\ &= \operatorname{tr}[\sigma^T(X)(-\Lambda(t))\sigma(X)] \leq \\ &= -2 \|\Lambda(t)X(t)\|^2 - \left\langle X(t), \frac{d\Lambda(t)}{dt}X(t) \right\rangle + \\ &= \mu_1 \|X(t)\Lambda(t)\|^2 + \mu_2 \|X(t)\Lambda(t)\|^2 \leq \\ &= - \left\langle X(t), \frac{d\Lambda(t)}{dt}X(t) \right\rangle = \\ &= - \left\langle X(t), \frac{d}{dt}(\mathcal{A} - \mathcal{B}(x^a(t))\mathbf{K}\mathcal{E}(x^s(t)))X(t) \right\rangle = \\ &= \int_0^h X(t, x) \frac{\partial}{\partial t} \{ \mathcal{B}(x^a(t)) \} \mathbf{K}\mathcal{E}(x^s(t)) X(t, x) dx + \end{aligned}$$

$$\int_0^h X(t,x) \mathcal{B}(x^a(t)) \mathbf{K} \frac{\partial}{\partial t} \{ \mathcal{E}(x^s(t)) \} X(t,x) dx \tag{17}$$

注意到

$$\begin{aligned} & \int_0^h X(t,x) \frac{\partial}{\partial t} \{ \mathcal{B}(x^a(t)) \} \mathbf{K} \mathcal{E}(x^s(t)) X(t,x) dx = \\ & \dot{x}^a \int_0^h X(t,x) \frac{\partial}{\partial x^a} \{ b(x,x^a) \} \mathbf{K} y_i(t) dx = \\ & \sum_{i=1}^m \dot{x}_i^a \int_0^h X(t,x) \frac{\delta(x_i^a - 2\varepsilon) - \delta(x_i^a + 2\varepsilon)}{\varepsilon} dx k_i y_i(t) = \\ & \sum_{i=1}^m \dot{x}_i^a \frac{1}{\varepsilon} [X(t,x_i^a - 2\varepsilon) - X(t,x_i^a + 2\varepsilon)] k_i y_i(t) \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned} & \int_0^h X(t,x) \mathcal{B}(x^a(t)) \mathbf{K} \frac{\partial}{\partial t} \{ \mathcal{E}(x^s(t)) \} X(t,x) dx = \\ & \dot{x}^s \int_0^h X^2(t,x) \mathbf{K} \frac{\partial}{\partial x^s} \{ c(x,x^s) \} b(x,x^a) dx = \\ & \sum_{i=1}^m \dot{x}_i^s \int_0^h X^2(t,x) k_i [\delta(x_i^s - \varepsilon) - \delta(x_i^s + \varepsilon)] b(x,x^a) dx = \\ & \sum_{i=1}^m \dot{x}_i^s [X^2(t,x_i^s - \varepsilon) - X^2(t,x_i^s + \varepsilon)] k_i b(x,x^a) \end{aligned} \tag{19}$$

由于

$$\varepsilon > 0, b(x,x^a) \geq 0$$

则有

$$\begin{aligned} & \mathcal{L}V(t,X) \leq \\ & - \sum_{i=1}^m \frac{1}{\varepsilon} \{ [X(t,x_i^a - 2\varepsilon) - X(t,x_i^a + 2\varepsilon)] k_i y_i(t) \}^2 - \\ & \{ [X^2(t,x_i^s - \varepsilon) - X^2(t,x_i^s + \varepsilon)] k_i \}^2 b(x,x^a) \leq 0 \end{aligned} \tag{20}$$

即对于任意非零的初始状态的解, $dV(t,X(t)) \leq 0$. 根据 LaSalle 不变性原理^[9], 容易得到基于移动传感网络的随机分布参数系统(5)是渐近稳定的.

3 数值仿真

为验证所提方法的有效性, 考虑系统(1)描述的随机分布参数系统. 选取系统在 $\Omega = [0, 1]$ 的初始条件为 $X(0, x) = \sin(\pi x) e^{-10x^2}$, 扩散系数 $v = 0.005$, 空间变量满足 $0 \leq x \leq h = 1$. $\varepsilon = h/20$, 控制器增益 $k_i = 30, i = 1, \dots, m$. 选取噪声强度 $\sigma(X(t, x)) = [a_1 \cos(X(t, x)), a_2 \cos(X(t, x))]$, 其中 $a_1 = 0.1, a_2 = 0.2$. $\omega(t)$ 是满足 $E[d\omega(t)] = 0, E[d\omega(t)]^2 = dt$ 的 Brown 运动.

对 $m = 2$ 的基于移动传感网络的随机分布参数系统在时间 $0 \sim 20$ s 内与开环系统(即控制器 $u(t) = 0$)及静态网络(即传感器与执行器的空间分布是固

定的, x_i^s 与 x_i^a 为常数)进行仿真对比研究. 移动传感器与移动执行器的初始条件分别为 $x_1^s(0) = 0.15, x_2^s(0) = 0.55, x_1^a(0) = 0.35, x_2^a(0) = 0.75$.

图1表示对开环系统、静态网络及闭环系统的 $L_2(0, h)$ 范数进行比较. 由图可见, 基于移动传感网络的分布参数系统对比其他2种具有更好的性能, 能够更快地收敛到零点, 而开环系统则表现出最差的性能. 图2表示当传感器与执行器节点分别在移

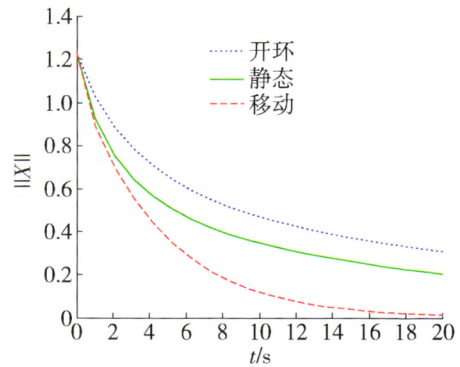
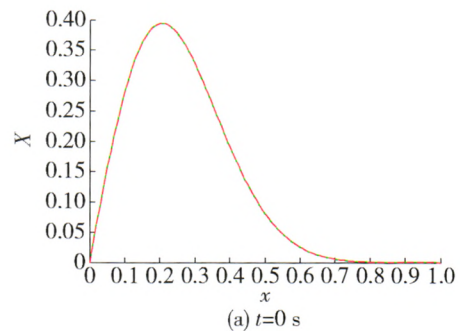
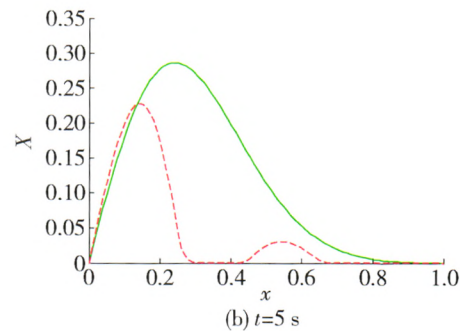


图1 L_2 范数的状态演变

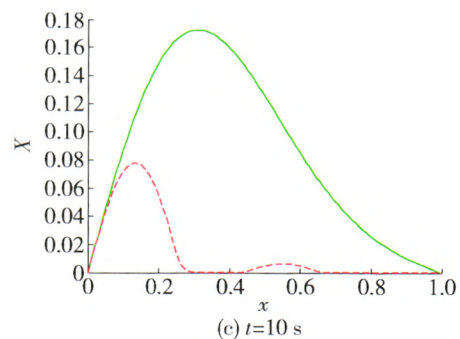
Fig. 1 Evolution of state L_2 norms



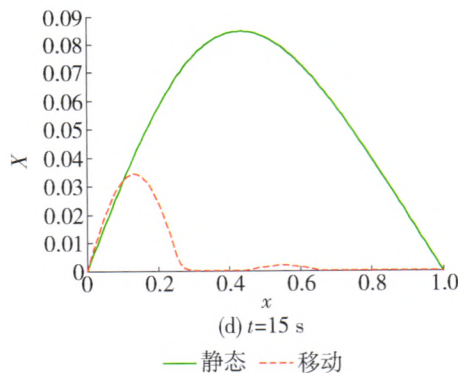
(a) $t=0$ s



(b) $t=5$ s



(c) $t=10$ s

图 2 $X(t, x)$ 在不同时刻的空间分布Fig. 2 Spatial distribution of $X(t, x)$ at different time

动与静止的条件下, 系统空间分布在不同时刻的收敛状态, 可以再次看到, 在移动的情况下收敛性更好. 移动执行器与传感器的运动轨迹如图 3 所示.

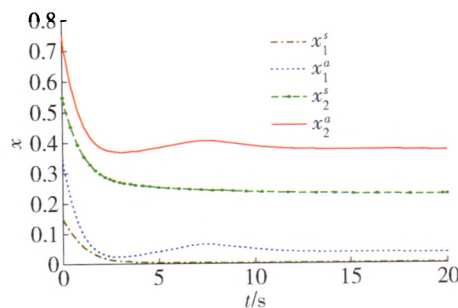


图 3 执行器/传感器移动轨迹

Fig. 3 Moving actuators and sensors trajectory

4 结论

考虑了基于带执行器的移动传感网络的随机分布参数系统的镇定控制问题. 通过构造一个 Lyapunov 函数, 运用 Itô 公式, 获得了每个智能体的移动速度, 并达到在控制器的作用下保证分布参数系统镇定的目的. 仿真实例表明: 节点在移动情况下, 闭环系统与开环系统和静态网络对比在提高系统性能方面具有明显的优越性, 并给出了传感器与执行器节点的移动轨迹.

参考文献:

[1] CAMA A, MONTOYA F G, GÓMEZ J, et al. Integration

of communication technologies in sensor networks to monitor the Amazon environment [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 59(15): 32-42.

- [2] LI Wen-fang, SHEN Wei-ming. Swarm behavior control of mobile multi-robots with wireless sensor networks [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011, 34: 1398-1407.
- [3] CHRISTOPHE T, CHEN Y Q. Optimal mobile actuator/sensor network motion strategy for parameter estimation in a class cyberphysical systems [C] // Proceedings of American Control Conference. Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 2009: 367-372.
- [4] LI Shan-cang, ZHANG De-yun, YANG Zhen-yu. A novel algorithm for node localization and motion analysis in wireless sensor networks [C] // Proceedings of International Conference on Automation Science and Engineering. Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 2006: 574-579.
- [5] REZA O S, PARISA J. Coupled distributed estimation and control for mobile sensor networks [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 59(10): 2609-2614.
- [6] BURNS J A, CLIFF E M, RAUTENBERG C. A distributed parameter control approach to optimal filtering and smoothing with mobile sensor networks [C] // Proceedings of 17th Mediterranean Conference on Control and Automation. Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 2009: 181-186.
- [7] DEMETRIOU M A. Guidance of mobile actuator-plus-sensor networks for improved control and estimation of distributed parameter systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(7): 1570-1584.
- [8] 罗琦, 邓飞其, 包俊东. 一类随机分布参数系统反馈控制的镇定 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(3): 477-480.
- LUO Qi, DENG Fei-qi, BAO Jun-dong. Stabilization of a class of stochastic distributive parameter systems with feedback control [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2005, 22(3): 477-480. (in Chinese)
- [9] MAO Xue-rong. LaSalle-type theorems for stochastic differential delay equations [J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2002, 236: 350-369.

(责任编辑 郑筱梅)