

基于防碰撞的移动SAN对分布参数系统的控制

江正仙^{a,b}, 崔宝同^a, 楼旭阳^a, 张晓娇^a

(江南大学 a. 物联网工程学院, b. 理学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 在考虑移动执行器动力学行为和防碰撞的条件下, 研究在控制分布参数系统过程中执行器的移动策略. 移动传感-执行器网络中的传感器对分布参数系统进行测量, 由执行器对空间分布过程执行相应的控制信号以控制分布参数系统. 基于Lyapunov稳定性理论, 对每个执行器设计一种新的移动策略, 实现每个移动执行器对分布参数系统的协同控制, 并保证各移动执行器之间不会发生碰撞. 仿真实例表明了所提出方法的有效性.

关键词: 移动传感-执行器网络; 分布参数系统; 防碰撞

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Controlling distributed parameter systems utilizing mobile sensor-actuator networks with guaranteed collision avoidance

JIANG Zheng-xian^{a,b}, CUI Bao-tong^a, LOU Xu-yang^a, ZHANG Xiao-jiao^a

(a. School of IoT Engineering, b. School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China. Correspondent: JIANG Zheng-xian, E-mail: zhengxian@jiangnan.edu.cn)

Abstract: A guidance scheme for mobile sensor-actuator networks is studied under the condition of augmented vehicle dynamics and guaranteed collision avoidance. The mobile sensor-actuator networks are used to obtain measurements from distributed parameter systems by sensors and dispense control signals to spatially distributed process by actuators. A new guidance scheme is provided for each of mobile actuators which cooperatively control the distributed parameter systems and are guaranteed collision avoidance based on the Lyapunov stability theory. Simulation study shows the effectiveness of the proposed method.

Key words: mobile sensor-actuator networks; distributed parameter systems; collision avoidance

0 引言

近年来, 无线传感器网络由于其应用广泛而受到了国内外学者的极大关注^[1]. 尽管无线传感器网络取得了很多研究成果, 但有其固有的缺点, 它只能感知环境而不能改变环境. 随着大量应用场景的需要, 传感器网络在具有事件监测能力的同时, 还需要具有执行任务、控制事件的能力. 因此, 将无线传感网与移动执行器相结合的移动传感-执行器网络(SAN)受到学术界和工业界的广泛关注, 它具有节能、实时性强、有效监控和控制环境等优点^[2-4].

实际应用系统大多属于由偏微分方程描述的分布参数系统, 如化工过程、大气与海洋运动、环境系统、生态系统、金融系统等. 因此, 研究移动传感-执行器网络对分布参数系统的控制问题更具有实际意

义^[5-12], 但这方面的研究还刚刚起步, 国内外的研究都较少. Khapalov^[5-6]对由抛物型和双曲型偏微分方程描述的分布参数系统的移动测量和控制方面做了很多早期工作. 近年来, Chen等^[7-9]研究了移动传感-执行器网络对分布参数系统的估计和控制问题. 文献[8]考虑了静态传感器与移动执行器组成的网络对扩散过程的分布反馈控制, 给出了基于中心泰森多边形法的移动执行器的位置. 文献[9]讨论了移动SAN对信息物理系统中的参数估计问题, 通过最小化D-最优性准则给出了移动传感器和执行器的运动位置. 然而, 以上文献的传感器或执行器只可以在若干个选好的固定位置移动, 虽然节约能量, 但会影响估计或控制分布参数系统的效果. Demetriou^[10-12]考虑了移动SAN在估计和控制分布参数系统时传感器或执行

收稿日期: 2013-07-13; 修回日期: 2014-01-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61174021, 61104155); 高等学校学科创新引智计划项目(B12018).

作者简介: 江正仙(1978-), 女, 博士生, 从事移动传感器网络协同控制的研究; 崔宝同(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统控制理论与应用等研究.

器可以任意移动的情况, 将传感器或执行器的移动与分布参数系统相结合, 基于 Lyapunov 稳定性理论, 给出了每个移动传感器-执行器智能体的移动策略. 文献 [10] 中每个移动智能体都假设是无质量、无惯性的, 在估计分布参数系统过程中由误差数据给出移动传感器的移动策略, 在控制分布参数系统中由传感器的测量数据给出执行器的移动策略. 文献 [11] 在考虑增加执行器的动力学行为的基础上给出了一个执行器的移动策略. 文献 [12] 在考虑多个传感器智能体在防碰撞的前提下, 研究了移动传感器网络对扩散过程的状态估计. 但多个执行器组成的网络在考虑其动力学行为和防碰撞的前提下对分布参数系统的控制研究还较少见到报道.

本文主要考虑在对分布参数系统执行相应的控制命令时, 使得该分布参数系统尽快得到控制下多个执行器的移动策略. 基于 Lyapunov 稳定性理论, 在考虑多个移动执行器的动力学行为和防碰撞前提下, 对每个执行器给出稳定的移动策略.

1 问题描述

考虑多输入多输出分布参数系统

$$\begin{cases} \frac{\partial w(t, x)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 w(t, x)}{\partial x^2} + \sum_{i=1}^n b(x; x_i^a) u_i(t), \\ w(0, x) = w_0(x), \\ y(t) = \begin{bmatrix} \int_0^l c(x; x_1^s) w(t, x) dx \\ \int_0^l c(x; x_2^s) w(t, x) dx \\ \vdots \\ \int_0^l c(x; x_n^s) w(t, x) dx \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $a > 0$ 为扩散系数, $x \in \Omega = [0, l]$, Dirichlet 边界条件为 $w(t, 0) = w(t, l) = 0$, $w(t, x)$ 为扩散过程的状态, $b(x; x_i^a)$ 为第 i 个移动执行器的空间分布, $u_i(t)$ 为相关的控制信号, $c(x; x_i^s)$ 为第 i 个移动传感器的空间分布, $x_i^a(t)$ 和 $x_i^s(t)$ 分别为第 i 个移动传感器和执行器的时变中心位置.

为了简化控制器的设计和稳定性分析, 设每个移动智能体上安装了一个传感器和一个执行器, 并设此移动 SAN 由 n 个相同的传感器和执行器装置组成, 即

$$x_i^a = x_i^s, \quad b(x; x_i^a) = c(x; x_i^s).$$

传感器与执行器的空间分布为

$$b(x; x_i^a) = c(x; x_i^a) = \begin{cases} 1, & x \in [x_i^a - \varepsilon, x_i^a + \varepsilon]; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$b(x; x_i^a)$ 也可写为

$$b(x; x_i^a) = H(x_i^a - \varepsilon) - H(x_i^a + \varepsilon),$$

其中 $H(x_i^a - \varepsilon)$ 和 $H(x_i^a + \varepsilon)$ 为两个 Heaviside 阶跃函

数.

在如何更好地控制扩散过程使分布参数系统的状态 $w(t, x)$ 尽快收敛于 0 的控制问题上, 有两个问题需要解决: 1) 如何选择控制器; 2) 在考虑执行器的动力学行为和防碰撞的前提下, 如何选择执行器的运动路径.

本文选择静态输出反馈控制器. 设每个移动智能体可以接受其他所有智能体传输的信息, 也可以将自己的信息传输给其他各个智能体. 设计第 i 个执行器的控制率为

$$u_i(t) = - \sum_{j=1}^n r_{ij} y_j(t). \quad (2)$$

其中: $r_{ij} > 0$ 为反馈增益; $y_j(t)$ 为第 j 个传感器测得的数据的平均值, 即

$$y_j(t) = \int_0^l c(x; x_j^a) w(t, x) dx \approx \frac{w(t, x_j^a - \varepsilon) + w(t, x_j^a + \varepsilon)}{2}. \quad (3)$$

第 2 个问题是如何选择执行器的运动路径, 使得扩散过程尽快得到控制. 文献 [10] 假设带传感器和执行器的智能体是无质量和无惯性的. 文献 [11] 在考虑控制分布参数系统时, 将执行器的动力学行为考虑在内, 但是只考虑了单个执行器的情况. 事实上, 为了更好地控制分布参数系统, 不仅要考虑多个移动执行器, 还要考虑实际问题中多个执行器之间的防碰撞问题和自身的动力学行为.

设移动执行器的运动方程为

$$\begin{cases} m_i \ddot{x}_i^a = f_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n, \\ \dot{x}_i^a(0) = x_{i0}^a, \quad \dot{x}_i^a(0) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $x_i^a(t)$ 为第 i 个执行器的位置, $f_i(t)$ 为相应的运动控制力. 本文的主要目标是如何设计执行器的运动控制力, 在保证执行器不碰撞的前提下使分布参数系统得到更快的控制.

2 移动执行器的运动策略

为了考虑执行器运动过程中的动力学行为和多个执行器间的防碰撞, 应用 Lyapunov 稳定性理论导出执行器的运动策略, 将分布参数系统 (1) 看作 Hilbert 空间中的发展方程^[13].

令 \mathcal{H} 为 Hilbert 空间, 且 \mathcal{H} 上的内积和范数分别为 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 和 $\|\cdot\|$. \mathcal{V} 为自反的 Banach 空间, 其范数为 $\|\cdot\|$, 设 \mathcal{V} 连续稠密地嵌入 \mathcal{H} . \mathcal{V}^* 为 \mathcal{V} 的共轭空间, 其范数为 $\|\cdot\|_*$, 有 $\mathcal{V} \hookrightarrow \mathcal{H} \hookrightarrow \mathcal{V}^*$, 且两个嵌入都是连续的、稠密的. 对于任何正常数 $c, \phi \in \mathcal{V}$, 有 $|\phi| \leq c \|\phi\|^{[14]}$.

本文中, $\mathcal{H} = L_2(\Omega)$ 为状态空间, $w(t, \cdot) = \{w(t, x), 0 \leq x \leq l\}$ 为扩散过程状态, $\mathcal{V} = H_0^1 = \{\psi \in$

$H^1(\Omega)|\psi(0) = \psi(l) = 0\}$, $\mathcal{V}^* = H^{-1}(\Omega)$. 二阶强椭圆形算子 \mathcal{A} 及其定义域为

$$\mathcal{A}\phi = \frac{d}{dx} \left(a \frac{d\phi}{dx} \right), \quad a > 0, \quad \phi \in \text{Dom}(\mathcal{A}),$$

其中

$$\begin{aligned} \text{Dom}(\mathcal{A}) = \\ \{ \psi \in L_2(\Omega) \mid \psi, \psi' \text{ 绝对连续}, \\ \psi'' \in L_2(\Omega) \psi(0) = \psi(l) = 0 \}. \end{aligned}$$

由于 $a > 0$, 算子 \mathcal{A} 有界、对称, 且 $-\mathcal{A}$ 强制^[10]. n 个输入算子为

$$\mathcal{B}_i(x_i^a)u_i(t) = b(x; x_i^a)u_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

其向量形式为

$$\mathcal{B}(x^a)u(t) = \begin{bmatrix} \mathcal{B}_1(x_1^a) & \cdots & \mathcal{B}_n(x_n^a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_n(t) \end{bmatrix}.$$

由于假设每个智能体上都有一个传感器和执行器, 有 $C_i = \mathcal{B}_i^*$, 且

$$y_i(t) = C_i w(t) = \mathcal{B}_i^* w(t), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

于是, 静态输出反馈控制率

$$u_i(t) = - \sum_{j=1}^n r_{ij} y_j(t)$$

可以表示为

$$u(t) = -\Gamma y(t).$$

其中

$$u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)]^T,$$

$$\Gamma = \Gamma^T = [r_{ij}]_{n \times n} > 0,$$

$$y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)]^T.$$

故闭环系统可以表示为

$$\dot{w}(t) = \mathcal{A}_{cl}(x^a)w(t), \quad (5)$$

其中 $\mathcal{A}_{cl} = \mathcal{A} - \mathcal{B}(x^a)\Gamma\mathcal{B}^*(x^a)$. 根据半线性发展方程的隐函数定理或解析半群理论可知, 闭环系统(5)的定解问题是适定的^[10]. 鉴于文献[12]的思想, 得到如下定理.

定理 1 考虑分布参数系统(1)和 n 个带有传感器、执行器的移动智能体, 每个智能体的状态为 (x_i^a, \dot{x}_i^a) , 其运动方程为式(4), 智能体之间可以互相传输信息. 设计第 i 个执行器的反馈控制率为

$$u_i(t) = - \sum_{j=1}^n r_{ij} y_j(t),$$

则分布参数系统(1)的系统状态 $w(t, x)$ 在移动执行器的控制作用下比在固定执行器的控制作用下趋于零的速度更快, 且在多个移动执行器间防碰撞的前提下, 执行器的运动控制力为

$$\begin{aligned} f_i = \\ - (w(t, x_i^a - \varepsilon) - w(t, x_i^a + \varepsilon)) \sum_{j=1}^n r_{ij} y_j - \\ \sum_{j=1, j \neq i}^n \omega \frac{\partial P_{ij}}{\partial x_i^a} - x_i^a - \dot{x}_i^a. \end{aligned} \quad (6)$$

证明 构造一个新的 Lyapunov 函数

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t). \quad (7)$$

其中

$$V_1(t) = -\frac{1}{2} \langle w(t), \mathcal{A}_{cl}(x^a)w(t) \rangle,$$

$$V_2(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \omega P_{ij}(x_i^a, x_j^a),$$

$$V_3(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (m_i (\dot{x}_i^a)^2 + (x_i^a)^2).$$

$V_1(t)$ 表示闭环系统(5)的能量; 为了考虑智能体之间的聚集和防碰撞^[12,15], 在 Lyapunov 函数中引入 $V_2(t)$, 其中

$$P_{ij}(x_i^a, x_j^a) = \left\{ \max \left(0, \frac{1}{(x_i^a - x_j^a)^2 - r^2} \right) \right\}^2, \quad (8)$$

r 为两个智能体之间的最小安全距离; $V_3(t)$ 为智能体动能和势能的总和.

下面首先计算 $V_1(t)$ 的时间导数

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) = & -\frac{1}{2} \langle \mathcal{A}_{cl}(x^a)w(t), \mathcal{A}_{cl}(x^a)w(t) \rangle - \\ & \frac{1}{2} \langle w(t), \mathcal{A}_{cl}(x^a)\mathcal{A}_{cl}(x^a)w(t) \rangle - \\ & \frac{1}{2} \langle w(t), \dot{\mathcal{A}}_{cl}(x^a)w(t) \rangle. \end{aligned}$$

由于 \mathcal{A} 和 $\mathcal{B}(x^a)\Gamma\mathcal{B}^*(x^a)$ 都为自共轭算子, $\mathcal{A}_{cl}(x^a) = \mathcal{A} - \mathcal{B}(x^a)\Gamma\mathcal{B}^*(x^a)$ 也为自共轭算子, 从而有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) = \\ - |\mathcal{A}_{cl}(x^a)w(t)|^2 - \frac{1}{2} \langle w(t), \dot{\mathcal{A}}_{cl}(x^a)w(t) \rangle. \end{aligned} \quad (9)$$

因为 $y(t) = \mathcal{B}^*(x^a)w(t)$, 有

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2} \langle w(t), \dot{\mathcal{A}}_{cl}(x^a)w(t) \rangle = \\ \left\langle w(t), \dot{x}_i^a \frac{\partial \mathcal{B}(x^a)}{\partial x^a} \Gamma \mathcal{B}^*(x^a)w(t) \right\rangle = \\ \sum_{i=1}^n \left[\dot{x}_i^a (w(t, x_i^a - \varepsilon) - w(t, x_i^a + \varepsilon)) \left(\sum_{j=1}^n r_{ij} y_j \right) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

将式(10)代入(9), 有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) = \\ - |\mathcal{A}_{cl}(x^a)w(t)|^2 + \\ \sum_{i=1}^n \left[\dot{x}_i^a (w(t, x_i^a - \varepsilon) - w(t, x_i^a + \varepsilon)) \left(\sum_{j=1}^n r_{ij} y_j \right) \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

文献[12]给出了 $V_2(t)$ 中的 $P_{ij}(x_i^a, x_j^a)$ 导数为

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial x_i^a} = \begin{cases} \frac{-4(x_i^a - x_j^a)}{((x_i^a - x_j^a)^2 - r^2)^3}, & |x_i^a - x_j^a| > r; \\ \text{无定义}, & |x_i^a - x_j^a| = r; \\ 0, & |x_i^a - x_j^a| < r. \end{cases}$$

且证明了

$$\dot{V}_2(t) = \omega \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial x_i^a} \dot{x}_i^a. \quad (12)$$

由式 (4) 得到 $V_3(t)$ 的时间导数为

$$\dot{V}_3(t) = \sum_{i=1}^n \dot{x}_i^a (f_i + x_i^a). \quad (13)$$

结合式 (11)~(13), 有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & -|\mathcal{A}_{cl}(x^a)w(t)|^2 + \\ & \sum_{i=1}^n \dot{x}_i^a \left\{ (w(t, x_i^a - \varepsilon) - w(t, x_i^a + \varepsilon)) \left(\sum_{j=1}^n r_{ij}y_j \right) + \right. \\ & \left. \sum_{j=1, j \neq i}^n \omega \frac{\partial P_{ij}}{\partial x_i^a} + (f_i + x_i^a) \right\}. \end{aligned}$$

当第 i 个执行器的运动控制力 f_i 为式 (6) 时, 有

$$\dot{V}(t) = -|\mathcal{A}_{cl}(x^a)w(t)|^2 - \sum_{i=1}^n (\dot{x}_i^a)^2 \leq 0. \quad \square$$

注 1 如果在控制扩散过程中只考虑一个执行器, 则不存在碰撞问题, 该执行器的运动控制力为

$$f_1 = -(w(t, x_1^a - \varepsilon) - w(t, x_1^a + \varepsilon))r_1y_1 - x_1^a - \dot{x}_1^a.$$

针对这种情况, 文献 [11] 进行了研究, 本文所设计的控制力 f_1 与文献 [11] 相似但不同. 本文考虑的是多个执行器在防碰撞前提下控制扩散过程, 因此是对文献 [11] 的推广.

注 2 定理 1 中, 假设每个智能体都可以与其他智能体交换信息, 即各个智能体之间是全连通的. 这一假设可以放宽到局部连通的情况: 每个智能体只能与其邻居交换信息. 此时第 i 个执行器的控制率可以设计为

$$u_i(t) = - \sum_{j \in N(i)} r_{ij}y_j(t),$$

其中 $N(i) = \{j | |x_j^a - x_i^a| < R, R > r\}$. 类似于定理 1 的证明, 可以得到以下结论.

定理 2 考虑分布参数系统 (1) 和 n 个带有传感器、执行器的移动智能体, 每个智能体的状态为 (x_i^a, \dot{x}_i^a) , 其运动方程为式 (4). 设每个智能体只能与其邻居交换信息, 设计第 i 个执行器的控制率为

$$u_i(t) = - \sum_{j \in N(i)} r_{ij}y_j(t),$$

则分布参数系统 (1) 的系统状态 $w(t, x)$ 在移动执行器的控制作用下比在固定执行器的控制作用下趋于零

的速度更快, 且在多个移动执行器间防碰撞的前提下, 执行器的运动控制力为

$$\begin{aligned} f_i = & - (w(t, x_i^a - \varepsilon) - w(t, x_i^a + \varepsilon)) \sum_{j \in N(i)} r_{ij}y_j - \\ & - \sum_{j \in N(i), j \neq i} \omega \frac{\partial P_{ij}}{\partial x_i^a} - x_i^a - \dot{x}_i^a. \end{aligned}$$

3 数值仿真

考虑带有输入控制的分布参数系统

$$\frac{\partial w(t, x)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 w(t, x)}{\partial x^2} + \sum_{i=1}^n b(x; x_i^a)u_i(t).$$

其中: $w(t, 0) = w(t, l) = 0, w(0, x) = w_0(x), t \in [0, 20], l = 1$, 扩散系数 $a = 0.005$, 初始条件 $w_0(x) = \sin(\pi x)e^{-7x^2}$.

为简单起见, 考虑 2 个移动传感器-执行器智能体, 即 $n = 2$. 设式 (4) 中的 $m_i = 1 (i = 1, 2)$, 其初始位置分别为 $x_1^a(0) = 0.2, x_2^a(0) = 0.8$. 防碰撞半径 $r = 0.01, \omega = 0.0001$. 两个固定执行器的位置分别为 0.2 和 0.8, 增益矩阵 Γ 为 $\begin{bmatrix} 40 & 10 \\ 10 & 40 \end{bmatrix}$.

图 1 和图 2 分别给出了分布参数系统 (1) 在没有控制输入和在移动传感-执行器网络控制下的系统状态. 可以看出, 分布参数系统在移动传感-执行器网络控制下快速趋于零. 图 3 比较了系统状态在静态执行器和移动执行器控制下的不同时刻空间分布, 显示了状态 $w(t, x)$ 在移动传感-执行器网络控制下比静态的传感-执行器网络控制下趋于零的速度更快, 因此移动传感-执行器网络对分布参数系统的影响更大. 图 4 为 2 个移动执行器的运动轨迹, 可以看出两个执行器是不会发生碰撞的.

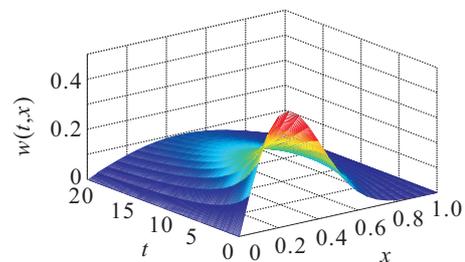


图 1 开环系统状态 $w(t, x)$

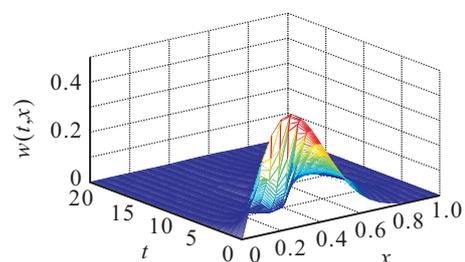


图 2 移动执行器控制下的系统状态 $w(t, x)$

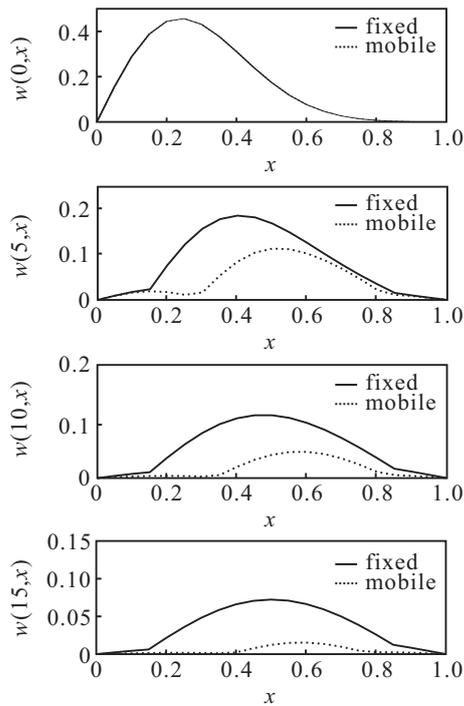


图3 系统状态 $w(t, x)$ 在 $t = 0, 5, 10, 15$ 时刻的空间分布

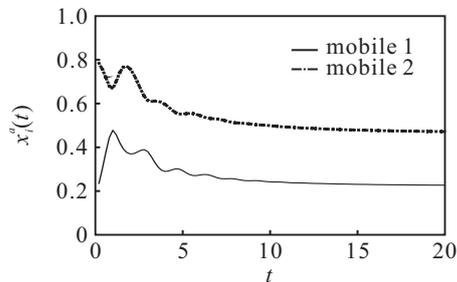


图4 两个移动执行器的轨迹

4 结论

为了提高分布参数系统的控制性能, 本文给出了移动传感-执行器网络的稳定的运动策略. 在考虑执行器的动力学行为和防碰撞的前提下, 基于 Lyapunov 稳定性理论, 对每个移动执行器的控制力给出了一个解析表达式. 仿真研究表明, 所提出的移动传感-执行器网络在控制扩散过程中具有更好的性能.

参考文献(References)

- [1] Cassandras C G, Li W. Sensor networks and cooperative control[J]. *European J of Control*, 2005, 11(4): 436-463.
- [2] Akyildiz I F, Kasimoglu I H. Wireless sensor and actor networks: Research challenges[J]. *Ad Hoc Networks*, 2004, 2(4): 351-367.
- [3] Akkaya K, Senel F. Detecting and connecting disjoint sub-networks in wireless sensor and actor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(7): 1330-1346.
- [4] Akkaya K, Senel F, Thimmapuram A, et al. Distributed recovery from network partitioning in movable sensor/actor networks via controlled mobility[J]. *IEEE Trans on Computers*, 2010, 59(2): 258-271.
- [5] Khapalov A Y. Continuous observability for parabolic system under observations of discrete type[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1993, 38(9): 1388-1391.
- [6] Khapalov A Y. Controllability of the wave equation with moving point control[J]. *Applied Mathematics and Optimization*, 1995, 31(2): 155-175.
- [7] Chen Y Q, Wang Z M, Moore K L. Optimal spraying control of a diffusion process using mobile actuator networks with fractional potential field based dynamic obstacle avoidance[C]. *Proc of IEEE Int Conf Networking, Sensing Control*. Lauderdale, 2006: 107-112.
- [8] Chao H Y, Chen Y Q, Ren W. A study of grouping effect on mobile actuator sensor networks for distributed feedback control of diffusion process using central voronoi tessellations[C]. *Proc of IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation*. Luoyang, 2006: 769-774.
- [9] Tricaud C, Chen Y Q. Optimal mobile actuator/sensor network motion strategy for parameter estimation in a class of cyber physical systems[C]. *Proc of the American Control Conf*. Louis, 2009: 367-372.
- [10] Demetriou M A. Guidance of mobile actuator-plus-sensor networks for improved control and estimation of distributed parameter systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2010, 55(7): 1570-1584.
- [11] Demetriou M A. Simplified controller design for distributed parameter systems using mobile actuator with augmented vehicle dynamics dynamics[C]. *Proc of the American Control Conf*. San Francisco, 2011: 3140-3145.
- [12] Demetriou M A. State estimation of spatially distributed processes using mobile sensing agents[C]. *Proc of the American Control Conference*. San Francisco, 2011: 1770-1776.
- [13] Curtain R F, Zwart H J. An introduction to infinite dimensional linear systems theory, ser. texts in applied mathematics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995: 13-14.
- [14] Dautray R, Lions J L. Mathematical analysis and numerical methods for science and technology in Functional and Variational Methods[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000: 100-102.
- [15] Hussein I I, Stipanovic D M. Effective coverage control for mobile sensor networks with guaranteed collision avoidance[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2007, 15(4): 642-657.