

基于观测器的轮式移动机器人路径跟踪控制

马保离

(北京航空航天大学七研, 北京 100083)

摘要: 研究基于状态观测器的轮式移动机器人的路径跟踪控制问题. 首先简要回顾了基于状态反馈的移动机器人的路径跟踪控制问题; 进而通过适当的状态变换将移动机器人模型转换为合适的形式, 并在移动机器人的位置可以测量的情况下设计了一种可保证状态观测误差指数收敛的状态观测器; 最后结合状态反馈路径跟踪控制器和所设计的观测器得到了一种基于观测器的路径跟踪控制器, 该控制器可以保证移动机器人的运动轨迹指数收敛到期望路径上. 仿真结果证实了所提出的基于观测器的路径跟踪控制器的有效性.

关键词: 轮式移动机器人; 状态观测器; 路径跟踪

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Observer-based path following control of wheeled mobile robots

MA Bao-li

(The Seventh Research Division, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The observer-based path following control problems are investigated in this work. Firstly, the state feedback path following control is reviewed briefly. Secondly, by converting the model of mobile robots to an advantageous form, an exponential convergence state observer is constructed based on position measurements. Furthermore, an observer-based path following control law is obtained by combining the state feedback control law and the proposed state observer, guaranteeing exponential convergence of the state trajectory to the desired path. Finally, simulation results show the effectiveness of the proposed observer-based path following control law.

Key words: wheeled mobile robots; state observer; path following

1 引言(Introduction)

近年来, 轮式移动机器人的控制问题得到了广泛深入的研究, 但这些研究大都假定机器人的状态是可以直接测量的. 当机器人的状态不可直接测量时, 需要设计基于测量输出的输出动态反馈控制器, 其中基于状态观测器的控制器是输出动态反馈控制器的一种常见形式. 已有一些文献研究轮式移动机器人的状态观测器设计问题和输出反馈控制问题. 文[1]给出了根据移动机器人相对已知直线的距离估计自身位姿的状态观测器; 文[2]给出了根据移动机器人的运动方向和其相对两个固定参考点的位置向量的夹角来估计机器人位姿的局部渐近状态观测器; 文[3]给出了一种估计机器人前轮转角的滑动模态估计器. 针对非完整链式系统, 文[4, 5]给出了基于输出动态反馈的非连续指数镇定算法. 文[6]给出了一种基于观测器的移动机器人轨迹跟踪控制器.

本文研究基于观测器的轮式移动机器人的路径跟踪控制器设计问题. 首先简要回顾了基于状态反馈的轮式移动机器人的路径跟踪控制问题, 然后给出了一种根据机器人的位置测量估计机器人姿态和线速度的全局指数收敛状态观测器, 最后结合该观测器和基于状态反馈的移动机器人路径跟踪控制律得到了一种基于观测器的路径跟踪控制律, 该控制律可以保证路径跟踪误差的局部指数收敛.

2 基于状态反馈的路径跟踪控制(Path following control based on state feedback)

考虑图1所示轮式移动机器人系统, 其中机器人车身两侧的左右轮可以独立驱动, XOY 为惯性坐标系, P 为两驱动轮连线的中点, 其在 XOY 坐标系中的坐标为 (x, y) , θ 为机器人车身方向相对正 X 轴的转角. 假定车轮无侧滑、变形等影响因素, 则轮式移

动机器人的运动学方程可以表示为

$$\dot{x} = u_1 \cos \theta, \dot{y} = u_1 \sin \theta, \dot{\theta} = u_2, \quad (1)$$

其中 u_1, u_2 分别表示机器人的运动线速度和角速度, 可以由两驱动轮的运动角速度唯一确定。

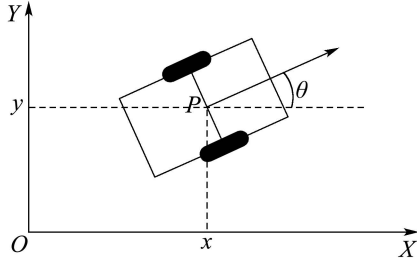


图1 轮式移动机器人

Fig. 1 Wheeled mobile robot

设机器人所要跟踪的期望几何路径为 $h(x, y) = 0$, 并假定 u_1 为非零常数, u_2 为控制变量, 则轮式机器人的几何路径跟踪控制问题为: 设计反馈控制律 $u_2 = u_2(x, y, \theta, u_1)$ 使得系统(1)的闭环轨迹 $(x(t), y(t), \theta(t))$ 满足

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} h(x, y) = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{h}(x, y) = h_x u_1 \cos \theta + h_y u_1 \sin \theta = 0, \end{cases} \quad (2)$$

其中: $h_x = \frac{\partial h(x, y)}{\partial x}, h_y = \frac{\partial h(x, y)}{\partial y}$.

注1 式(2)中的第1个条件 $\lim_{t \rightarrow \infty} h = 0$ 保证机器人的位置收敛到期望的路径上, 第2个条件 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{h} = h_x u_1 \cos \theta + h_y u_1 \sin \theta = 0$ 保证机器人的运动方向收敛到期望几何路径的切线方向^[7].

定义 $h(x, y)$ 为输出, 则路径跟踪问题就转化为输出调节问题, 并可以由输入-输出反馈线性化方法来解决。

首先对 $h(x, y)$ 求导两次可以得到

$$\ddot{h} = f(x, y, \theta, u_1) + g(x, y, \theta, u_1)u_2, \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} f(x, y, \theta, u_1) = (h_{xx} \cos^2 \theta + h_{yy} \sin^2 \theta + 2h_{xy} \sin \theta \cos \theta)u_1^2, \\ g(x, y, \theta, u_1) = (-h_x \sin \theta + h_y \cos \theta)u_1, \\ h_{xx} = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}, h_{yy} = \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}, h_{xy} = \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y}. \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)可得到基于输入-输出反馈线性化的路径跟踪控制律为

$$u_2 = \frac{1}{g(x, y, \theta, u_1)}(-f(x, y, \theta, u_1) - k_2 \dot{h} - k_1 h), \quad (5)$$

其中 $k_1 > 0, k_2 > 0$.

将式(5)代入式(3)得到闭环系统方程为

$$\ddot{h} + k_2 \dot{h} + k_1 h = 0, \quad (6)$$

因此 $h(x, y), \dot{h}(x, y)$ 均指数趋于零, 即上述控制律不仅可以保证机器人的位置收敛到期望的路径上, 而且可以保证机器人的运动方向收敛到期望路径的切线方向。

注2 状态反馈跟踪控制器(5)有效的条件是 $g(x, y, \theta, u_1) \neq 0$. 可以证明^[7]: 当移动机器人的初始状态在期望路径附近时, 即 $h(x, y), \dot{h}(x, y)$ 足够小时, 条件 $g(x, y, \theta, u_1) \neq 0$ 可以得到保证. 因此控制律(5)是一种局部指数收敛路径跟踪控制器。

注意控制律(5)不仅用到了系统的所有状态变量 (x, y, θ) , 而且还用到了定常线速度量 u_1 . 当这些量不能直接测量时, 无法直接应用控制律(5), 需要根据测量输出设计输出动态反馈控制器. 输出动态反馈控制器的一种主要形式为基于状态观测器的输出动态反馈, 即首先根据测量输出设计状态观测器估计系统的状态, 然后用估计的状态代替真实状态得到输出动态反馈控制器。

3 观测器设计(Observer design)

3.1 观测器设计问题的描述(Formulation of observer design problem)

现有的轮式机器人的位姿一般由机器人两驱动轮的转动速度积分得到, 但这种方法会产生积累误差. 消除积累误差的方法很多, 其中一种是直接测量机器人的位置 (x, y) , 并由位置测量值估计机器人的姿态 θ . 测量机器人位置的方法有很多, 例如可以利用两个固定在已知位置的声纳或激光测距仪测量机器人相对测距仪的距离来确定机器人的位置。

给定 (x, y) 的测量值, 并假定 u_1 为非零常数, 即 $\dot{u}_1 = 0, u_1(0) \neq 0$, 则如果动态系统

$$\begin{cases} \dot{z} = \alpha(z, x, y), \\ \dot{\hat{\theta}} = \beta(z, x, y), \\ \dot{\hat{u}}_1 = \gamma(z, x, y), \end{cases} \quad (7)$$

使得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\theta - \hat{\theta}) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} (u_1 - \hat{u}_1) = 0.$$

则称动态系统(7)为轮式机器人系统(1)的一个渐近状态观测器; 进一步, 如果动态系统(7)使得

$$\left\| \begin{pmatrix} \theta(t) - \hat{\theta}(t) \\ u_1(t) - \hat{u}_1(t) \end{pmatrix} \right\| \leq \beta_1 \left\| \begin{pmatrix} \theta(0) - \hat{\theta}(0) \\ u_1(0) - \hat{u}_1(0) \end{pmatrix} \right\| e^{-\beta_2 t},$$

其中 β_1, β_2 为正常数, 则称动态系统(7)为系统(1)的一个渐近指数状态观测器。

3.2 能观测性(Observability)

轮式机器人系统(1)是一个非线性系统, 非线性系统的能观测性有很多定义, 本文不讨论这些严格定义, 只给出一种全局能观测的直观定义.

定义 1 对于一个非线性系统, 若可以根据输入、输出及其导数的信息全局唯一地确定系统的所有状态, 则称该非线性系统是全局能观测的.

为了应用上述定义判断系统(1)的能观测性, 考虑到 u_1 为非零常数, 可以将系统(1)等价地表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = u_1 \cos \theta, \dot{y} = u_1 \sin \theta, \dot{\theta} = u_2, \\ \dot{u}_1 = 0 (u_1(0) \neq 0). \end{cases} \quad (8)$$

系统(8)的量测输出为 (x, y) , 由 $\dot{x} = u_1 \cos \theta$, $\dot{y} = u_1 \sin \theta$ 可知, (θ, u_1) 可以由 $(\dot{x}, \dot{y})$ 唯一地表示为

$$\begin{aligned} \theta &= \arctan 2(\dot{y}, \dot{x}), \\ u_1 &= \dot{x} \cos(\theta) + \dot{y} \sin \theta, \end{aligned}$$

因此系统(8)为全局能观测的.

3.3 状态观测器的设计(State observer design)

虽然当 (x, y) 可量测时系统(1)是全局能观测的, 但是其观测器的设计问题并没有解决. 本小节给出一种渐近指数观测器.

由于 (θ, u_1) 可以由 $(\dot{x}, \dot{y})$ 唯一确定. 因此关于 (θ, u_1) 的观测器设计问题可以等价为关于 $(\dot{x} = u_1 \cos \theta, \dot{y} = u_1 \sin \theta)$ 的观测器设计问题.

为了得到 $(\dot{x}, \dot{y})$ 的估计, 对方程 $\dot{x} = u_1 \cos \theta$, $\dot{y} = u_1 \sin \theta$ 两边求导并利用 $\dot{\theta} = u_2, \dot{u}_1 = 0$ 得到

$$\begin{cases} \ddot{x} = -u_1 u_2 \sin \theta = -\dot{y} u_2, \\ \ddot{y} = u_1 u_2 \cos \theta = \dot{x} u_2. \end{cases} \quad (9)$$

令 $z_1 = x, z_2 = \dot{x} = u_1 \cos \theta, z_3 = y, z_4 = \dot{y} = u_1 \sin \theta$, 则可得到关于新状态 (z_1, z_2, z_3, z_4) 的方程为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2, \\ \dot{z}_2 = -z_4 u_2, \\ \dot{z}_3 = z_4, \\ \dot{z}_4 = z_2 u_2. \end{cases} \quad (10)$$

定理 1 设 (z_1, z_2) 可量测, 则系统(10)的一个关于 (z_2, z_4) 的一个渐近指数状态观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_2 = -(\bar{z}_4 + L_4 z_3) u_2 - L_2(\bar{z}_2 + L_2 z_1), \\ \dot{\hat{z}}_4 = -(\bar{z}_2 + L_2 z_1) u_2 - L_4(\bar{z}_4 + L_4 z_3), \\ \hat{z}_2 = \bar{z}_2 + L_2 z_1, \\ \hat{z}_4 = \bar{z}_4 + L_4 z_3, \end{cases} \quad (11)$$

其中 $\hat{z}_2, \hat{z}_4$ 分别为 z_2, z_4 的估计值, L_2, L_4 为正常数.

证 方程(11)可以等价地表示为

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_2 = -\hat{z}_4 u_2 + L_2(\dot{z}_1 - \hat{z}_2) = -\hat{z}_4 u_2 + L_2(z_2 - \hat{z}_2), \\ \dot{\hat{z}}_4 = \hat{z}_2 u_2 + L_4(\dot{z}_3 - \hat{z}_4) = \hat{z}_2 u_2 + L_4(z_4 - \hat{z}_4). \end{cases} \quad (12)$$

令 $e_2 = z_2 - \hat{z}_2, e_4 = z_4 - \hat{z}_4$, 则由式(10)(12)可得到观测器误差方程为

$$\dot{e}_2 = -e_4 u_2 - L_2 e_2, \dot{e}_4 = e_2 u_2 - L_4 e_4. \quad (13)$$

令 $V = 0.5(e_2^2 + e_4^2)$, 则 $\dot{V} = -L_2 e_2^2 - L_4 e_4^2 \leq -2c_1 V$, 其中 $c_1 = \min\{L_2, L_4\}$. 因此 $V \leq V(0)e^{-2c_1 t}$, 即

$$\left\| \begin{pmatrix} e_2 \\ e_4 \end{pmatrix} \right\| \leq \left\| \begin{pmatrix} e_2(0) \\ e_4(0) \end{pmatrix} \right\| e^{-c_1 t},$$

所以观测器(11)是系统(10)的一个渐近指数状态观测器.

证毕.

由 $(\hat{z}_2, \hat{z}_4)$ 可以得到 (θ, u_1) 的估计为

$$\hat{\theta} = \arctan 2(\hat{z}_4, \hat{z}_2), \hat{u}_1 = \hat{z}_2 \cos \hat{\theta} + \hat{z}_4 \sin \hat{\theta}. \quad (14)$$

由于 $(\hat{z}_2, \hat{z}_4)$ 指数收敛到 (z_2, z_4) , 因此 $(\hat{\theta}, \hat{u}_1)$ 也指数收敛到 (θ, u_1) .

4 基于观测器的路径跟踪控制器(Observer-based path following controller)

将基于状态反馈的路径跟踪控制器(5)中的真实状态用估计状态代替可得到基于观测器的路径跟踪控制器为

$$u_2 = \frac{1}{\hat{g}}(-\hat{f} - k_2 \hat{h} - k_1 h), \quad (15)$$

其中 k_1, k_2 为正常数,

$$\begin{cases} \hat{f} = f(x, y, \hat{\theta}, \hat{u}_1) = \\ (h_{xx} \cos^2 \hat{\theta} + h_{yy} \sin^2 \hat{\theta} + 2h_{xy} \sin \hat{\theta} \cos \hat{\theta}) \hat{u}_1^2 = \\ h_{xx} \hat{z}_2^2 + h_{yy} \hat{z}_4^2 + 2h_{xy} \hat{z}_2 \hat{z}_4, \\ \hat{g} = g(x, y, \hat{\theta}, \hat{u}_1) = \\ (-h_x \sin \hat{\theta} + h_y \cos \hat{\theta}) \hat{u}_1 = \\ -h_x \hat{z}_4 + h_y \hat{z}_2, \\ \hat{h} = h_x \hat{u}_1 \cos \hat{\theta} + h_y \hat{u}_1 \sin \hat{\theta} = \\ h_x \hat{z}_2 + h_y \hat{z}_4. \end{cases} \quad (16)$$

式(11)和(15)共同组成基于观测器的输出动态反馈路径跟踪控制器. 由式(11)(15)和(10)可导出闭环路径跟踪误差方程为

$$\begin{aligned} \ddot{h} &= g/\hat{g}(-\hat{f} - k_1 h - k_2 \dot{h}) + \dot{f} = \\ &-k_1 (1 + \bar{g}/\hat{g}) h - k_2 (1 + \bar{g}/\hat{g}) \dot{h} + r, \end{aligned} \quad (17)$$

其中

$$\begin{cases} \bar{g} = g - \hat{g} = h_y e_2 - h_x e_4, \\ \bar{f} = f - \hat{f} = \\ h_{xx}(z_2^2 - \hat{z}_2^2) + h_{yy}(z_4^2 - \hat{z}_4^2) + 2h_{xy}(z_2 z_4 - \hat{z}_2 \hat{z}_4), \\ \dot{h} - \hat{\dot{h}} = h_x e_2 + h_y e_4, \\ r = \bar{f} + k_2(\dot{h} - \hat{\dot{h}}) + \bar{g}/\hat{g}(-\hat{f} - k_2(\dot{h} - \hat{\dot{h}})). \end{cases} \quad (18)$$

结合状态观测器误差方程(13)可以得到整个闭环系统方程为

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = \phi_2, \\ \dot{\phi}_2 = -k_1(1 + \bar{g}/\hat{g})\phi_1 - k_2(1 + \bar{g}/\hat{g})\phi_2 + r, \\ \dot{e}_2 = -e_4 u_2 - L_2 e_2, \\ \dot{e}_4 = e_2 u_2 - L_4 e_4, \end{cases} \quad (19)$$

其中: $\phi_1 = h, \phi_2 = \dot{h}$.

为了证明上述系统的轨线收敛到期望的几何路径上, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \phi_1 = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \phi_2 = 0$, 需要用到以下引理.

引理 1 假定集合 $\Omega_1 = \{x, y, \theta, e_2, e_4 : \phi = 0, e = 0\}$ 内的所有点均满足 $h_x^2 + h_y^2 > 0$, 则存在 $\epsilon > 0$ 使得集合 $\Omega_2 = \{x, y, \theta, e_2, e_4 : \|\phi\|_2 \leq \epsilon, \|e\|_2 \leq \epsilon\}$ 内的所有点均满足 $\hat{g} = g(x, y, \hat{z}_2, \hat{z}_4) \neq 0$. 其中 $\phi = \text{col}(\phi_1, \phi_2), e = \text{col}(e_2, e_4)$.

证 对于集合 Ω_1 内任意一点 $(x, y, \theta, 0, 0)$ 有

$$\begin{aligned} \hat{g} &= g = h_y z_2 - h_x z_4, \\ \phi_2 &= \dot{h}(x, y, z_2, z_4) = h_x z_2 + h_y z_4 = 0, \end{aligned}$$

因此

$$\hat{g}^2 = \hat{g}^2 + \phi_2^2 = (h_x^2 + h_y^2)(z_2^2 + z_4^2) = (h_x^2 + h_y^2)u_1^2 > 0.$$

由函数 $\hat{g}$ 对其自变量的连续性可知, 存在关于集合 Ω_1 内的点 $(x, y, \theta, 0, 0)$ 的一个邻域使得在该邻域内有 $\hat{g}^2 > 0$. 由于 $(x, y, \theta, 0, 0)$ 是集合 Ω_1 内的任意一点, 因此存在关于集合 Ω_1 的一个邻域使得在该邻域内有 $\hat{g}^2 > 0$. 选择充分小的 $\epsilon > 0$ 使得集合 Ω_2 属于该邻域, 即可保证在 Ω_2 内有 $\hat{g}^2 > 0$, 即 $\hat{g} \neq 0$.

证毕.

应用引理1即可证明以下定理.

定理 2 假定函数 $h(x, y)$ 满足:

1) $h_x^2 + h_y^2 > 0, \forall (x, y) \in \{x, y : h(x, y) = 0\}$;

2) $h_x, h_y, h_{xx}, h_{yy}, h_{xy}$ 的模均以 (x, y) 的多项式

函数为上界. 则当 $\left\| \begin{smallmatrix} \phi(0) \\ e(0) \end{smallmatrix} \right\|$ 充分小时, $\phi(t)$ 指数收敛到零.

证 由系统方程 $\dot{x} = u_1 \cos \theta, \dot{y} = u_1 \sin \theta$ 知, $|x(t)| \leq |x(0)| + |u_1|t, |y(t)| \leq |y(0)| + |u_1|t,$

结合定理条件(2)知, $h_x, h_y, h_{xx}, h_{yy}, h_{xy}$ 的模均以 t 的多项式函数为上界. 由条件(1)和引理1知 $\hat{g} \neq 0, \forall (x, y, \theta, \phi_1, \phi_2) \in \Omega_2$. 由于 $\|e(t)\| \leq \|e(0)\|e^{-c_1 t}$, 因此存在常数 $c_2 > 0, 0 < c_3 < c_1, c_4 > 0$ 使得 $|\bar{g}/\hat{g}| \leq c_2 \|e(0)\|_2 e^{-c_3 t}, |r| \leq c_4 \|e(0)\|_2 e^{-c_3 t}$.

闭环系统(19)的前两个方程可以写成以下线性稳定系统加扰动的形式:

$$\dot{\phi} = (A_1 + A_2(t))\phi + R(t), \quad (20)$$

其中:

$$\begin{cases} A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_1 - k_2 & 0 \end{bmatrix}, \\ A_2(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -k_1 \frac{\bar{g}}{\hat{g}} & -k_2 \frac{\bar{g}}{\hat{g}} \end{bmatrix}, \\ R(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ r(t) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (21)$$

由于 A_1 为 Hurwitz 阵, $A_2(t), R(t)$ 均指数收敛到零, 因此根据扰动系统的稳定性理论(参见文献[8] 9.3节)可知, $\phi(t)$ 也指数收敛到零且满足 $\|\phi(t)\|_2 \leq \rho(\|e(0)\|_2) \gamma(\|X(0)\|_2) e^{-c_4 t}$, 其中 $c_4 > 0, X(0) = (\phi^T(0), e^T(0))^T, \gamma(\cdot)$ 为其自变量的 K 类函数, $\rho = e^{k_5 \|e(0)\|_2}, k_5 > 0$. 为了保证系统轨线保持在 Ω_2 内, $X(0), e(0)$ 应满足(注意 $\|e\|_2 \leq \|e(0)\|_2 e^{-c_1 t}$): $\rho(\|e(0)\|_2) \gamma(\|X(0)\|_2) \leq \epsilon, \|e(0)\|_2 \leq \epsilon$, 即 $\|X(0)\|_2 \leq \gamma^{-1}(\epsilon/\rho(\epsilon)), \|e(0)\|_2 \leq \epsilon$. 因此当 $\|X(0)\|_2 \leq \min\{\gamma^{-1}(\epsilon/\rho(\epsilon)), \epsilon\}$ 时可以保证 $\forall t \geq 0$ 有 $\|\phi(t)\|_2 \leq \epsilon, \|e(t)\|_2 \leq \epsilon$, 即当机器人的初始跟踪误差和观测器的初始估计误差均充分小时可以保证机器人的状态轨线保持在集合 Ω_2 内(从而保证 $\hat{g} \neq 0, \forall t \geq 0$)且指数收敛到零.

证毕.

注 3 定理2的条件(1)是非限制性的, 当 $h(x, y) = 0$ 为非退化曲线(不是一个点)时, 条件(1)总能满足.

注 4 当 $h(x, y)$ 为多项式函数时, 定理2的条件(2)自动满足. 考虑到任意光滑函数 $h(x, y)$ 都可以由多项式函数来任意逼近, 因此当 $h(x, y)$ 不满足条件(2)时, 可以用一个多项式函数 $h_p(x, y)$ 逼近 $h(x, y)$, 然后通过跟踪路径 $h_p(x, y) = 0$ 就可以实现对期望路径 $h(x, y) = 0$ 的近似跟踪.

5 仿真(Simulation)

设 $u_1 = 1$, 期望几何路径为圆心在 $(0, 0)$ 、半径为1的圆, 即 $f(x, y) = x^2 + y^2 - 1$, 该函数显然满足定理2的两个条件. 控制器和观测器的增益系数取为: $k_1 = 1, k_2 = 2, L_2 = 2, L_4 = 2$. 仿真结果如图2、图3所示. 可以看出机器人的状态估计误

差 $e_2(t)$, $e_4(t)$ 指数收敛到零, 机器人的几何运动轨迹指数收敛到期望的几何路径上.

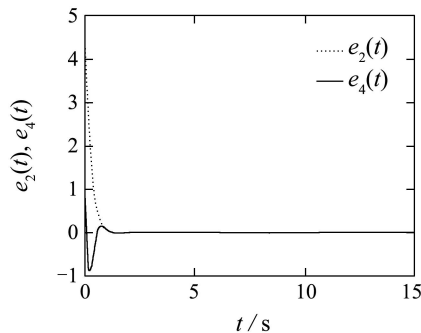


图2 状态估计误差

Fig. 2 State Estimation Error

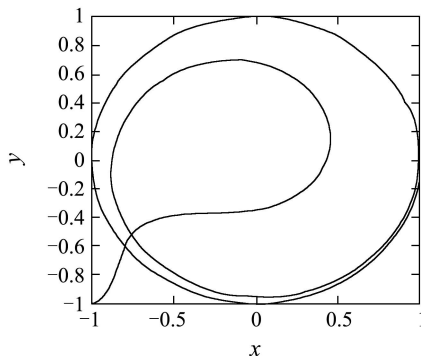


图3 几何轨迹

Fig. 2 Geometric trajectory

6 结论(Conclusion)

本文研究了基于状态观测器的轮式移动机器人的路径跟踪控制问题, 得到以下结果:

1) 构造了一种基于轮式移动机器人位置测量的渐近指数状态观测器.

2) 将所构造的状态观测器应用于轮式机器人的路径跟踪控制, 得到了一种基于观测器的输出动态反馈路径跟踪控制律, 该控制律在适当的假设下可

以保证路径跟踪误差的局部指数收敛.

本文所构造的渐近指数观测器需要假定机器人的运动线速度为未知常数, 不能直接用于移动机器人的轨迹跟踪和镇定, 还需要研究运动线速度为时变时移动机器人的观测器设计问题.

参考文献(References):

- [1] MEDROMI H, TIGLI J Y, THOMAS M C. Posture estimation of mobile robots: observers-sensors[C] // *Proc of IEEE Int Conf on Multisensor Fusion and Intelligent Systems(MFI'94)*. New York: IEEE Press, 1994: 661 – 666.
- [2] ISHIKAWA M, SAMPEI M. State estimation of non-holonomic mobile robots using nonlinear observers[C] // *IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. New York: IEEE Press, 1995: 1379 – 1384.
- [3] STOTSKY A, HU X. Control of car-like robots using sliding observers for steering angle estimation[C] // *Proc of the 36th Conf on Decision and Control*. New York: IEEE Press, 1997: 3648 – 3653.
- [4] ASTROFI A, SCHAUFELBERGER W. State and output feedback stabilization of multiple chained systems with discontinuous control[C] // *Proc of the 35th Conf on Decision and Control*. New York: IEEE Press, 1996: 1443 – 1448.
- [5] TAYEBI A, TADJINE M, RACHID A. Stabilization of nonholonomic systems in chained form: application to a car-like mobile robot[C] // *Proc of the 1997 IEEE Int Conf on Control Application*. New York: IEEE Press, 1997: 195 – 200.
- [6] LEFEBER E, JAKUBIAK J, TCHON K, NILMEIJER H. Observer based kinematic tracking controllers for a unicycle-type mobile robot[C] // *Proc of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. New York: IEEE Press, 2001: 2084 – 2089.
- [7] 马保离, 霍伟. 移动机器人的路径跟踪与镇定. 机器人[J]. 1995, 17(6): 358 – 362.
(MA Baoli, HUO Wei. Path following and stabilization of mobile robots[J]. *Robots*, 1995, 17(6): 358 – 362.)
- [8] KHALIL H K. 非线性系统[M]. 朱义胜, 董辉, 李作洲, 译. 第3版. 北京: 电子工业出版社, 2005.

作者简介:

马保离 (1963—), 男, 北京航空航天大学理学院七研教授, 目前研究方向为非线性系统控制、机器人控制, E-mail: ma_baoli@yahoo.com.