

未知视觉参数下的移动机器人动力学鲁棒镇定

王 刚^{1,2}, 王朝立², 杜庆辉¹, 季云峰²

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对具有未知参数的视觉伺服下带有非完整约束的一类移动机器人不确定扰动的动力学模型, 提出新的反馈控制算法, 实现了移动机器人的位姿镇定. 首先, 对于单目摄像机模型下的移动机器人运动学模型, 将原始系统进行状态缩放变换, 基于线性时变系统的稳定性理论, 设计了非完整移动机器人运动的期望速度, 实现了机器人的指数镇定; 其次, 对于带有不确定扰动的非完整移动机器人的动力学模型, 利用计算力矩法设计力矩控制器, 使得机器人的实际速度在有限时间内收敛至期望速度, 并且通过了严格的数学证明. 最后, 仿真结果验证了所提控制器的有效性.

关键词: 非完整移动机器人; 视觉伺服; 镇定; 动力学

中图分类号: TP 273 **文献标志码:** A

Dynamic Robust Regulation of Mobile Robots with Unknown Camera Parameters

WANG Gang^{1,2}, WANG Chaoli¹, DU Qinghui², JI Yunfeng¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: For a class of dynamic models of nonholonomic mobile robots in the presence of uncertain disturbances under visual servo with unknown parameters, a novel feedback controller was proposed to stabilize the mobile robot. For the kinematic model of the robot with a monocular camera, a state scaling transformation was applied to its original system, and the stability theory for time-varying linear system was exploited to deduce a desired velocity to stabilize the mobile robot exponentially. The method of computed-torque was introduced for the dynamic model associated with uncertain disturbances to design a torque controller which can let the actual velocity track the desired one in finite time. The method was also proved rigorously in mathematical way. The simulation results confirm the effectiveness of the proposed methods.

Key words: nonholonomic mobile robot; visual servo; regulation; dynamic

收稿日期: 2014-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61374040); 上海市教委科技创新项目(13ZZ115); 上海市研究生创新项目(5413302102); 沪江基金资助项目(C14002)

第一作者: 王 刚(1990-), 男, 博士研究生. 研究方向: 机器人视觉控制. E-mail: 2010wanggang@gmail.com

通信作者: 王朝立(1965-), 男, 教授. 研究方向: 视觉伺服反馈控制、机器人动力学控制. E-mail: clclwang@126.com

轮式移动机器人是典型的具有非完整约束的系统,近三十年来已经引起越来越广泛的关注^[1-2].由于非完整系统不满足 Brockett 定理^[3]的3个必要条件,因此不存在光滑时不变纯状态反馈律使其镇定,故许多经典的线性系统方法无法直接应用于移动机器人的镇定问题上.为了解决这个问题,大量的学者在这方面作了相关的研究,如使用滑模控制^[4-5]、转换为链式系统^[6-7]、使用不连续的反馈^[8]以及光滑时变反馈^[9]等.为了控制移动机器人,通常假设机器人的各个状态是精确知道的,但在实际中,由于测量的精度和一些不确定的干扰,这个假设是很难成立的.利用视觉反馈获得控制器所需要的位置信息是克服这些问题的一种有效办法.

近年来,视觉反馈已经被广泛地应用在机器人的控制上^[10-11].回顾以往文献,缺乏深度信息是单目视觉伺服固有的缺点. Dixon 等^[12]利用放置在天花板上不校调的单目摄像机设计了自适应跟踪控制器,实现了机器人的跟踪控制.最近, Fang 等^[13]和 Chen 等^[14]通过分解单应矩阵分别设计了自适应镇定控制器和跟踪控制器,用以补偿未知的深度信息,实现了移动机器人的渐进镇定和跟踪.但是由于对目标机器人线速度和角速度等的限制,文献^[12]和^[14]无法解决移动机器人的镇定问题.同时,对于单应矩阵的分解也是非常复杂的,常常需要人为干预. Mariottini 等^[15]提出了基于图像的控制策略,通过控制极线几何中的极点,实现了移动机器人的镇定.但利用极线几何的缺点是短基线时候的准确性降级以及对于平面场景呈现病态.文献^[16]研究了移动机器人在运动过程中保证特征点不出视野的问题,同时不需要分解单应矩阵.而 Fang 等^[17]把云台摄像机放置在移动机器人上,提出了新的主动视觉控制算法.该算法包含两个控制器:一个控制云台摄像机旋转使得特征点始终保持在图像中央;一个控制机器人使其镇定.彭飞等^[18]探讨了针对车载单目摄像机的轮式移动机器人的目标跟踪问题.

本文主要探讨未知视觉参数下的移动机器人的镇定问题.主要贡献有两点:一是对于单目摄像机模型下的移动机器人运动学模型,设计了期望的运动速度,实现了机器人的指数镇定;二是对于带有不确定扰动的非完整移动机器人的动力学,利用计算力矩法设计力矩控制器,实现了机器人的实际速度在有限时间内收敛至期望速度.

1 问题的描述

1.1 系统配置

本文研究的视觉反馈下的非完整移动机器人模型如图1所示.假设单目摄像机固定在天花板上,且摄像机图像平面与机器人运动平面平行.构造3个坐标系,分别是世界坐标系 $X-Y-Z$ 、摄像机固连坐标系 $X_1-Y_1-Z_1$ 以及图像坐标系 $u-o-v$.假设图像坐标平面 $u-v$ 和摄像机坐标系 X_1-Y_1 平面平行.点 C 是摄像机光轴与 $X-Y$ 平面的交点,在 $X-Y$ 平面上的投影是 (p_x, p_y) ,摄像机坐标系坐标原点在图像平面的坐标为 (O_{c1}, O_{c2}) .同时,坐标 (x, y) 是机器人质心 P 在 $X-Y$ 平面的坐标, (x_m, y_m) 为 (x, y) 在图像坐标系下的投影. θ 表示机器人前向与 X 轴的夹角.则摄像机投影模型为^[12]

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & \alpha_2 \end{bmatrix} \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_{c1} \\ O_{c2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, α_1, α_2 为与深度信息、光轴长度以及沿 x 轴和 y 轴缩放因子有关的未知的正常数. $\mathbf{R}$ 定义如下:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, θ_0 表示摄像机坐标系与世界坐标系沿逆时针方向的夹角.

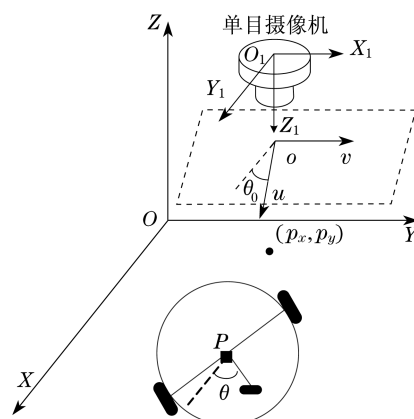


图1 单目摄像机-机器人系统

Fig.1 Camera-robot system configuration

1.2 移动机器人的动力学以及运动学

利用 Euler-Lagrangian 公式可以将带有非完整约束的机械系统描述成^[4,19]

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{B}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} + \mathbf{A}^T(\mathbf{q})\boldsymbol{\kappa} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$ 是广义坐标; $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^r$ 表示控制输入; $\boldsymbol{\kappa} \in \mathbb{R}^m$ 表示约束力向量; $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 表示正定对

称惯性矩阵; $\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 表示向心力和哥氏力; $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$ 是重力向量; $\mathbf{B}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times r}$ 是输入变换矩阵; $\mathbf{A}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 是和约束条件有关的矩阵. 为了简化接下来的分析, 假设 $r = n - m$. 同时由于机器人作平面运动, 因此 $\mathbf{G}(\mathbf{q}) = 0$.

移动机器人的非完整约束可以表述成

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (4)$$

同时取

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{S}(\mathbf{q})\mathbf{z} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{S}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times (n-m)} = \mathbb{R}^{n \times r}$ 是由 $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ 解空间中一组基组成, $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_{n-m}]^T$ 与内部的状态变量相对应. 对式(5)两边微分并利用式(3), 移动机器人的动力学可以被重写成

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\mathbf{S}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{z}} + [\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{S}}(\mathbf{q}) + \mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{S}(\mathbf{q})]\mathbf{z} - \mathbf{A}^T(\mathbf{q})\lambda = \mathbf{B}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} \quad (6)$$

式(6)两边左乘 $\mathbf{S}^T(\mathbf{q})$, 利用 $\mathbf{S}^T(\mathbf{q})\mathbf{A}^T(\mathbf{q}) = 0$, 可以得到

$$\mathbf{S}^T(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})\mathbf{S}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{z}} + \mathbf{S}^T(\mathbf{q})\{\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{S}}(\mathbf{q}) + \mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{S}(\mathbf{q})\}\mathbf{z} = \mathbf{S}^T(\mathbf{q})\mathbf{B}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} \quad (7)$$

左乘 $[\mathbf{S}^T(\mathbf{q})\mathbf{B}(\mathbf{q})]^{-1}$, 式(7)可以简化为

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{z}} + \mathbf{F}(\mathbf{q}, \mathbf{z}) = \boldsymbol{\tau} \quad (8)$$

式中,

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) = (\mathbf{S}^T\mathbf{B})^{-1}\mathbf{S}^T\mathbf{M}\mathbf{S}$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{q}, \mathbf{z}) = (\mathbf{S}^T\mathbf{B})^{-1}\mathbf{S}^T\{\mathbf{M}\dot{\mathbf{S}} + \mathbf{V}\mathbf{S}\}\mathbf{z}$$

对于(2,0)型移动机器人来说, 式(5)中 $\mathbf{q}$ 和 $\mathbf{z}$ 分别为 $\mathbf{q} = [x, y, \theta]^T$, $\mathbf{z} = [\nu, \omega]^T$. 其中 x, y, θ 前面已经指出其物理意义, 而 ν, ω 分别表示移动机器人的线速度和角速度. 接下来对带有不确定扰动的机器人动力学作如下假设^[4].

假设 1 带有不确定扰动的移动机器人的动力学可以表述成

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{z}} + \mathbf{F}(\mathbf{q}, \mathbf{z}) + \boldsymbol{\tau}_d = \boldsymbol{\tau} \quad (9)$$

式中, $\boldsymbol{\tau}_d = \mathbf{H}(\mathbf{q})\mathbf{f}$ 为机器人所受的不确定扰动; $\mathbf{f} = [f_1, f_2]^T$, $|f_i| \leq f_{mi}$, $i = 1, 2$; $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2]^T$ 是机器人左右轮的输入力矩.

对于图 1 所示的(2,0)型移动机器人, 假设其质心和几何中心重合, 并且其固定轮在平面上做纯滚动无侧滑运动. 具有这样约束条件的移动机器人的运动学模型在世界坐标系下可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = \nu \cos \theta \\ \dot{y} = \nu \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (10)$$

通过式(1)和式(10), 可以得到机器人在图像坐标系下运动学模型

$$\begin{cases} \dot{x}_m = \alpha_1 \nu \cos(\theta - \theta_0) \\ \dot{y}_m = \alpha_2 \nu \sin(\theta - \theta_0) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (11)$$

2 控制器设计

为了简化接下来的分析, 做如下假设.

假设 2 θ_0 是已知的, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ 是未知的, 且存在一个已知的正常数 $\bar{\alpha}$, 使得

$$\bar{\alpha} \leq \alpha$$

把 $(\theta - \theta_0)$ 用 θ 替换, 式(11)可以被重写成

$$\begin{cases} \dot{x}_m = \alpha \nu \cos \theta \\ \dot{y}_m = \alpha \nu \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (12)$$

对式(12)作如下全局可逆变换可得

$$\begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据式(12)和式(13), 得到

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = -\omega \eta_2 + \alpha \nu \\ \dot{\eta}_2 = \omega \eta_1 \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (14)$$

通过观察, 利用线性系统理论易证 θ 可以通过 ω 全局指数收敛到零, 但是这样会造成状态量 η_1, η_2 不可控. 为了避免这个问题, 引入状态缩放

$$\bar{\eta}_1 = \eta_1, \bar{\eta}_2 = \frac{\eta_2}{\rho} \quad (15)$$

式中, $\rho(t) = \rho_0 e^{-\lambda_0 t}$ ($\rho_0 \neq 0$), $\lambda_0 > 0$. 对式(15)两边微分

$$\begin{cases} \dot{\bar{\eta}}_1 = -\rho \omega \bar{\eta}_2 + \alpha \nu \\ \dot{\bar{\eta}}_2 = \frac{\omega}{\rho} \bar{\eta}_1 + \lambda_0 \bar{\eta}_2 \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (16)$$

根据非完整链式系统设计方法^[9,20]和前面的分析, 设计期望的运动速度如下:

$$\nu_d = k_1 \bar{\eta}_1 + k_2 \bar{\eta}_2, \omega_d = -k_0 \theta + \rho \quad (17)$$

式中, k_i ($i = 0, 1, 2$) 是待设计的参数.

定义如下速度误差信号

$$\nu_e \triangleq \nu - \nu_d, \omega_e \triangleq \omega - \omega_d \quad (18)$$

由于式(9)中 $\mathbf{H}(\mathbf{q}), \mathbf{F}(\mathbf{q}, \mathbf{z})$ 中的系数只与 θ 有关而与 x, y 无关^[21-22]. 这样只要 θ 从摄像机中获得, 那

么 $\mathbf{H}(\mathbf{q}), \mathbf{F}(\mathbf{q}, \mathbf{z})$ 就是已知的. 利用计算力矩法^[23], 力矩控制器可以选择为

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{H}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{z}}_d + \mathbf{F}(\mathbf{q}, \mathbf{z}) + \mathbf{H}(\mathbf{q})\mathbf{u} \quad (19)$$

式中, $\mathbf{z}_d = [\nu_d, \omega_d]^T, \mathbf{u}(t) = [u_1, u_2]^T$ 是相应的控制输入. 基于接下来稳定性分析, 定义控制输入 $\mathbf{u}(t)$ 如下:

$$\begin{cases} u_1 = -\operatorname{sgn}(v_e)(f_{m1} + |v_e|^{p_1}) \\ u_2 = -\operatorname{sgn}(\omega_e)(f_{m2} + |\omega_e|^{p_2}) \end{cases} \quad (20)$$

式中, $0 < p_1, p_2 < 1$, 且

$$\operatorname{sgn}(\delta) = \begin{cases} \frac{|\delta|}{\delta} & \delta \neq 0 \\ 0 & \delta = 0 \end{cases} \quad (21)$$

下面来证明要用到的几个引理.

引理 1^[24] 假设存在连续函数 $V(t)$, 满足以下条件:

- V 是正定的;
- 存在正常数 c 和 $\beta \in (0, 1)$, 使得

$$\dot{V} + cV^\beta \leq 0 \quad (22)$$

那么存在一个时间点 T_0 , 使得当 $t \geq T_0$ 时, $V(t) \equiv 0$, 其中

$$T_0 \leq \frac{1}{c(1-\beta)} V(0)^{1-\beta}$$

引理 2^[25] 矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, 矩阵 $\mathbf{A}$ 的特征多项式为 $|\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}| = \lambda^2 + a_1\lambda + a_2$. 那么矩阵 $\mathbf{A}$ 是 Hurwitz 矩阵的充要条件是 $a_1, a_2 > 0$.

引理 3^[26] 考虑线性时变系统

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2(t))\mathbf{x} \quad (23)$$

如果矩阵 $\mathbf{A}_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是 Hurwitz 矩阵, 且 $\mathbf{A}_2(t)$ 满足以下条件:

- $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{A}_2(t) = 0$;
- $\int_0^\infty \|\mathbf{A}_2(t)\| dt < \infty$.

那么系统(23)是指数稳定的.

定理 1 对于系统(12), 选择控制器(19)并且当参数 $k_i (i=0, 1, 2)$ 满足以下条件时:

$$\begin{cases} k_0 > \lambda_0 \\ k_1 < -\frac{\lambda_0}{\alpha} \\ k_2 > -k_1(k_0 - \lambda_0) \end{cases} \quad (24)$$

那么系统(12)的各个状态量会被指数镇定到零, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t), y(t), \theta(t) = 0$.

证明 式(19)减去式(9), 得到

$$\dot{\mathbf{z}} + \mathbf{f} = \dot{\mathbf{z}}_d + \mathbf{u} \quad (25)$$

把式(18)代入式(25), 利用式(20)

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_e \\ \dot{\omega}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\operatorname{sgn}(v_e)(f_{m1} + |v_e|^{p_1}) \\ -\operatorname{sgn}(\omega_e)(f_{m2} + |\omega_e|^{p_2}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

构造非负标量函数 V_v

$$V_v = \frac{1}{2} v_e^2 \quad (27)$$

利用式(26), 对式(27)求微分

$$\begin{aligned} \dot{V}_v &= v_e \{-\operatorname{sgn}(v_e)(f_{m1} + |v_e|^{p_1}) - f_1\} = \\ &= -|v_e|(f_{m1} + |v_e|^{p_1} + \operatorname{sgn}(v_e)f_1) \leq \\ &= -|v_e|^{p_1+1} \end{aligned} \quad (28)$$

显然 $\dot{V}_v \leq -2^{\frac{p_1+1}{2}} V_v^{\frac{p_1+1}{2}}$, 那么由引理 1 可知, 当 $t \geq T_1$ 时, $v_e \equiv 0$. 同理, 当 $t \geq T_2$ 时, $\omega_e \equiv 0$. 其中, T_1, T_2 定义为

$$T_1 = \frac{V_v(0)^{1-\frac{p_1+1}{2}}}{2^{\frac{p_1+1}{2}} \left(1 - \frac{p_1+1}{2}\right)}, T_2 = \frac{V_\omega(0)^{1-\frac{p_2+1}{2}}}{2^{\frac{p_2+1}{2}} \left(1 - \frac{p_2+1}{2}\right)} \quad (29)$$

显然 $V_v(0)$ 和 $V_\omega(0)$ 有界, 则当 $t \geq \max\{T_1, T_2\}$ 时, 由于 $v_e \equiv 0, \omega_e \equiv 0$. 利用式(17)和式(18)

$$\nu = k_1 \bar{\eta}_1 + k_2 \bar{\eta}_2, \omega = -k_0 \theta + \rho \quad (30)$$

式(30)代入到式(16)的第三个方程, 有

$$\dot{\theta} = -k_0 \theta + \rho \quad (31)$$

对式(31)解微分方程

$$\theta(t) = \frac{\rho_0}{k_0 - \lambda_0} e^{-\lambda_0 t} + \left(\theta(0) - \frac{\rho_0}{k_0 - \lambda_0} \right) e^{-k_0 t} \quad (32)$$

式中, $\theta(0)$ 是 θ 的初始值. 式(30)和式(32)表明 θ, ω 将会指数收敛至零.

将式(30)和式(32)代入到式(16)的第一和第二个方程中, 可以得到

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = -\rho \omega \bar{\eta}_2 + \alpha(k_1 \bar{\eta}_1 + k_2 \bar{\eta}_2) \\ \dot{\eta}_2 = \frac{-\lambda_0}{k_0 - \lambda_0} \bar{\eta}_1 - \frac{k_0}{\rho_0} \left(\theta(0) - \frac{\rho_0}{k_0 - \lambda_0} \right) \cdot \\ e^{-(k_0 - \lambda_0)t} \bar{\eta}_1 + \lambda_0 \bar{\eta}_2 \end{cases} \quad (33)$$

基于接下来的分析, 把式(33)写成如下矩阵形式

$$\dot{\mathbf{Y}} = (\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2(t))\mathbf{Y} \quad (34)$$

式中, $\mathbf{Y} = [\bar{\eta}_1, \bar{\eta}_2]^T, \mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2(t)$ 分别定义为

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} k_1 \alpha & k_2 \alpha \\ -\frac{\lambda_0}{k_0 - \lambda_0} & \lambda_0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_2(t) = \begin{bmatrix} 0 & -\rho \omega \\ -\frac{k_0}{\rho_0} \left(\theta(0) - \frac{\rho_0}{k_0 - \lambda_0} \right) e^{-(k_0 - \lambda_0)t} & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (35)$$

矩阵 $\mathbf{A}_1$ 的特征多项式

$$|\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}_1| = \lambda^2 + a_1 \lambda + a_2 \quad (36)$$

式中, $a_1 = -(k_1 \alpha + \lambda_0), a_2 = k_1 \alpha \lambda_0 + \frac{k_2 \alpha \lambda_0}{k_0 - \lambda_0}$.

由于 k_1, k_2 满足式(24), 这样 $a_1 > 0, a_2 > 0$. 因此, 由引理 2 可知 A_1 是 Hurwitz 矩阵. 由于 ρ, ω 都将指数收敛到零, 同时, 由式(24)的第一个不等式条件可以看出矩阵 $A_2(t)$ 的每个元素 $\gamma_{ij} (i, j = 1, 2)$ 都将指数收敛到零. 当 $t \geq \max\{T_1, T_2\}$ 时, 由引理 3 可知, 系统(16)是指数稳定的. 此外, 由于 $\rho(t)$ 是指数收敛的, 所以 η_1, η_2 也会指数收敛到零. 综上所述, 利用力矩控制器(19), 当 $t \geq \max\{T_1, T_2\}$ 时, 系统(12)将会指数收敛至其期望位姿. 至此, 完成了定理 1 的证明.

3 仿 真

对于系统(12)选择初始值

$$[x_m(0), y_m(0), \theta(0), v(0), \omega(0)] = [1, -1, \frac{\pi}{3}, 0, 0]$$

设置参数 $\lambda_0 = 1, \rho_0 = 1, \bar{\alpha} = 1, \alpha = 1.5, f_{m1} = 1, f_{m2} = 1$, 不确定扰动是 $[-1, 1]$ 范围内的随机数. 根据控制条件(20)和(24), 选择 $p_1 = 0.5, p_2 = 0.5, k_0 = 1.5, k_1 = -2, k_2 = 2$. 那么机器人的状态量如图 2—5 所示. 仿真结果验证所提控制器的有效性. 此外, 如果选择 k_1, k_2, k_3 是矩阵 A_1 的特征值在复平面中左半平面远离虚轴, 选择 p_1, p_2 使得 T_1, T_2 尽可能的短, 则系统(12)收敛的速度更快.

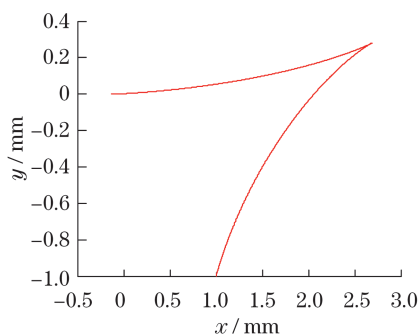


图 2 机器人在图像坐标系下的运动轨迹

Fig.2 Trajectory of the robot in the image frame

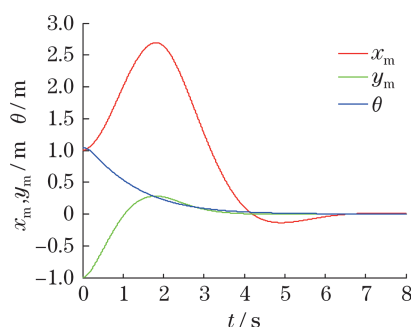


图 3 机器人状态变化曲线

Fig.3 States of the robot with respect to time

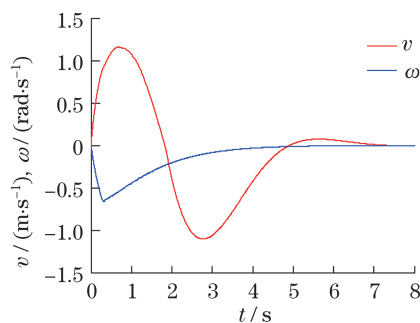


图 4 机器人实际的速度变化轨迹

Fig.4 Actual velocity with respect to time

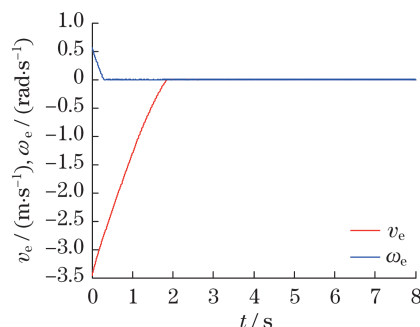


图 5 速度误差变化曲线

Fig.5 Velocity errors with respect to time

4 结论与展望

针对单目摄像机下的移动机器人, 在摄像机参数未知以及带有不确定扰动的动力学情况下, 研究了其镇定问题. 主要分为两步设计力矩控制器完成机器人的镇定. 仿真结果有效地证实了理论的正确性. 本文仅对 θ_0 已知, 而 $\alpha_1 = \alpha_2$ 未知的情况进行研究, 未来将会放松这一假设条件. 同时, 滑模变结构控制的明显缺点就是抖振现象, 如何有效地消除抖振也是未来努力的方向.

参考文献:

- [1] Kolmanovsky I, McClamroch N H. Developments in nonholonomic control problems [J]. IEEE Control Systems, 1995, 15(6): 20-36.
- [2] Wang G, Wang C L, Song X M, et al. Trajectory tracking of nonholonomic mobile robots via discrete-time sliding mode controller based on uncalibrated visual servoing[M] // Fei M R, Peng C, Su Z, et al. Computational Intelligence, Networked Systems and Their Applications. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014: 342-350.
- [3] Brockett R W. Asymptotic stability and feedback

- stabilization [J]. Differential Geometric Control Theory, 1983, 8: 181 – 191.
- [4] Yang J M, Kim J H. Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(3): 578 – 587.
- [5] Becerra H M, López-Nicolás G, Sagüés C. A sliding-mode-control law for mobile robots based on epipolar visual servoing from three views [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2011, 27(1): 175 – 183.
- [6] Murray R M, Sastry S S. Nonholonomic motion planning: Steering using sinusoids [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, 38(5): 700 – 716.
- [7] Jiang Z P, Nijmeijer H. A recursive technique for tracking control of nonholonomic systems in chained form[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(2): 265 – 279.
- [8] Astolfi A. Discontinuous control of nonholonomic systems[J]. Systems & Control Letters, 1996, 27(1): 37 – 45.
- [9] Tian Y P, Li S H. Exponential stabilization of nonholonomic dynamic systems by smooth time-varying control[J]. Automatica, 2002, 38(7): 1139 – 1146.
- [10] Chaumette F, Hutchinson S. Visual servo control, Part I: Basic approaches[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2006, 13(4): 82 – 90.
- [11] Chaumette F, Hutchinson S. Visual servo control, Part II: Advanced approaches [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2007, 14(1): 109 – 118.
- [12] Dixon W E, Dawson D M, Zergeroglu E, et al. Adaptive tracking control of a wheeled mobile robot via an uncalibrated camera system[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics, 2001, 31(3): 341 – 352.
- [13] Fang Y, Dixon W E, Dawson D M, et al. Homography-based visual servo regulation of mobile robots[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics, 2005, 35(5): 1041 – 1050.
- [14] Chen J, Dixon W E, Dawson M, et al. Homography-based visual servo tracking control of a wheeled mobile robot [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(2): 406 – 415.
- [15] Mariottini G L, Oriolo G, Prattichizzo D. Image-based visual servoing for nonholonomic mobile robots using epipolar geometry[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(1): 87 – 100.
- [16] Lopez-Nicolas G, Gans N R, Bhattacharya S, et al. Homography-based control scheme for mobile robots with nonholonomic and field-of-view constraints[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics, 2010, 40(4): 1115 – 1127.
- [17] Fang Y C, Liu X, Zhang X B. Adaptive active visual servoing of nonholonomic mobile robots [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 486 – 497.
- [18] 彭飞, 王朝立. 基于车载摄像机移动机器人的模糊神经网络跟踪[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(4): 385 – 390.
- [19] Fukao T, Nakagawa H, Adachi N. Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(5): 609 – 615.
- [20] 马保离, 霍伟. 非完整链式系统的时变光滑指数镇定[J]. 自动化学报, 2003, 29(2): 301 – 305.
- [21] Fierro R, Lewis F L. Control of a nonholonomic mobile robot: backstepping kinematics into dynamics [C] // Proceedings of the 34th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA: IEEE, 1995: 3805 – 3810.
- [22] Campion G, Bastin G, Dandrea-Novet B. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(1): 47 – 62.
- [23] Lewis F L, Abdallah C T, Dawson D M. Control of robot manipulators [M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1993.
- [24] Bhat S P, Bernstein D S. Finite-time stability of continuous autonomous systems[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2000, 38(3): 751 – 766.
- [25] Dorf R C, Bishop R H. Modern control systems[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2011.
- [26] Slotine J J E, Li W P. Applied nonlinear control[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1991.

(编辑:董 伟)