

移动机器人自适应视觉伺服镇定控制

张雪波, 方勇纯, 刘 玺

(南开大学 机器人与信息自动化研究所, 天津 300071)

摘要: 对有单目视觉的移动机器人系统, 提出了一种自适应视觉伺服镇定控制算法; 在缺乏深度信息传感器并且摄像机外参数未知的情况下, 该算法利用视觉反馈实现了移动机器人位置和姿态的渐近稳定. 由于机器人坐标系与摄像机坐标系之间的平移外参数(手眼参数)是未知的, 本文利用静态特征点的位姿变化特性, 建立移动机器人在摄像机坐标系下的运动学模型. 然后, 利用单应矩阵分解的方法得到了可测的角度误差信号, 并结合2维图像误差信号, 通过一组坐标变换, 得到了系统的开环误差方程. 在此基础上, 基于Lyapunov稳定性理论设计了一种自适应镇定控制算法. 理论分析、仿真与实验结果均证明了本文所设计的单目视觉控制器在摄像机外参数未知的情况下, 可以使移动机器人渐近稳定到期望的位姿.

关键词: 单目视觉; 移动机器人; 自适应镇定控制; 未知外参数

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Adaptive visual servo regulation of mobile robots

ZHANG Xue-bo, FANG Yong-chun, LIU Xi

(Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: For a monocular camera-based mobile robot system, we propose an adaptive visual servo regulation controller. This controller asymptotically drives the robot to its desired position/orientation, even when the range sensors are not available and the camera extrinsic parameters are unknown. Because the translational parameters between the robot frame and the camera frame are unknown, the kinematical model of a monocular camera-based mobile robot system is developed based on a static point in the camera coordinate system. The orientation error is extracted from the image by decomposing the homography matrix, which is then incorporated with the image error signals to form the open-loop error system by a coordinate transformation. On this basis, an adaptive regulation controller is proposed by using Lyapunov techniques. The performance of the controller is validated by both the theoretical stability analysis and the experiment results, showing that the controller can perform a rapid asymptotic regulation even when the extrinsic camera parameters are unknown.

Key words: monocular vision; mobile robot; adaptive regulation control; unknown extrinsic parameters

1 引言(Introduction)

移动机器人是典型的具有非完整性约束的系统, 近年来得到了自动控制与机器人领域众多研究人员的关注. 由于存在非完整性约束, 与跟踪控制相比较, 其镇定问题具有更大的难度. 根据Brockett条件^[1]可知, 任何光滑非时变的状态反馈控制律都无法解决移动机器人的镇定问题. 由于这个原因, 移动机器人镇定算法的设计非常困难. 一些学者借助微分几何工具与Lyapunov等方法, 提出了数种具有非连续形式的控制器^[2~4]; 另外一些研究者则致力于光滑时变控制律的设计^[5~7], 两者均可以达到渐近稳定或者指数收敛的性能. 在该研究领域中, 较具代

表性的综述与专著可以参考文献[8, 9]. 遗憾的是, 在进行控制器设计时, 这些方法都假定移动机器人在3维欧氏空间中的位姿精确可测, 从而难以应用于基于单目视觉的移动机器人控制系统之中.

视觉传感器由于具有成本低、信息丰富、可靠性高等优点而被广泛应用于机器人控制系统, 极大地提升了机器人的工作能力和智能水平, 也因此使得视觉伺服逐渐发展成为机器人领域当前最活跃的研究方向之一. 文献[10~12]先后对近年来出现的视觉伺服算法进行了比较全面的总结, 这些伺服策略借助于计算机视觉等相关算法, 主要解决了六自由度机械操作臂的视觉镇定与跟踪控制问题. 视觉

伺服的主要难点之一在于,由于2维图像空间缺乏场景深度信息,从而无法得到特征点完整的3维位姿信息.为了解决这一问题,D. Jung等人使用扩展卡尔曼滤波技术(EKF)来在线估计深度信号^[13],但是此方法需要利用泰勒展开式来对系统进行线性化.此外,文献[14~16]分别采用不同的方法对视觉跟踪控制进行了深入的研究,但是均需要对移动机器人的速度与轨迹进行一定的约束,从而使得这些方法难以推广到移动机器人的视觉镇定问题之中.

综上所述,解决单目移动机器人的视觉镇定问题,需要将非完整约束系统的镇定控制器设计与视觉伺服技术相结合,并对系统中的不确定参数进行在线补偿.在文献[17]中,方勇纯等人使用单应矩阵分解的方法得到了当前位姿与期望位姿的角度误差与深度比等信号,然后基于Lyapunov稳定性理论设计了一种时变光滑的自适应控制律,它可以对期望位姿处的未知深度信息进行在线补偿,并且使闭环系统达到渐近稳定的性能.但是,这种方法需要摄像机坐标系与机器人坐标系之间完全重合.在实际的移动机器人视觉伺服系统中,为了获取尽可能开阔的视野,一般在摄像机光轴方向与移动机器人正前方一致的前提下,将摄像机放置于合适的位置,因此摄像机坐标系与机器人坐标系之间通常存在着平移外参数.此外,该方法需要使用当前位姿与期望位姿处的深度比信息(在估计单应矩阵时同时得到),因此算法的性能将不可避免地受此参数估计误差的影响.针对摄像机参数的未知不确定性,苏剑波等人利用扩展状态观测器对图像雅可比矩阵进行在线估计,并在此基础上设计出了一种无标定视觉伺服控制器^[18].文献[19]则基于单位四元数与单应矩阵的方法,在摄像机内参数不准确的情况下,设计出了一种鲁棒视觉伺服控制器.需要注意的是,以上无标定视觉伺服的方法均针对工业机械臂的视觉伺服问题开展了研究,而没有考虑到非完整性约束条件,因此难以应用于移动机器人的无标定视觉伺服之中.

本文针对移动机器人这一具有非完整约束的欠驱动系统,在平移外参数未知的情况下,设计了一种基于单目视觉的控制算法,解决了移动机器人的镇定问题.具体而言,首先,对于环境中特定静态特征点,通过分析机器人运动时此点在摄像机坐标系下3维坐标的变化,建立了移动机器人在摄像机坐标系下的运动学模型;然后,借助于计算机视觉算法,对当前位姿与期望位姿处摄像机坐标系之间存在的单应矩阵进行分解,提取出包含2维图像误差信息与部分3维位姿误差信息的可测信号;最后基于上述移动机器人运动学模型,利用该可测信号进行反馈,设计了一种可以对未知平移外参数与期望深度信息同时进行在线补偿的自适应控制律,并基

于Lyapunov理论证明了闭环系统的渐近稳定性.与现有的方法相比较,本文的主要贡献在于设计了一种自适应视觉伺服控制器,从而考虑了未知摄像机外参数对视觉伺服任务的影响.此外,构造了新颖的误差信号,从而提出了一种不依赖于深度比信息的混合视觉伺服策略.

本文其它部分组织如下.第2节对存在未知外参数的单目视觉移动机器人进行了运动学建模.第3节完成了自适应镇定控制器的设计,并对闭环系统的稳定性进行了证明.第4节提供了仿真与实验结果以验证视觉控制算法的性能,最后一节给出了本文的结论.

2 运动学模型(Kinematics model)

基于单目视觉的移动机器人是指将单目摄像机固定于机器人之上,以其作为传感器来感知周围环境并完成指定任务的智能机器人系统.一般而言,镇定问题是指控制机器人从当前位姿运动到期望位姿.在本文中,本文借助于单目视觉传感器来解决移动机器人的镇定问题.为此,将期望位姿处所拍摄的图片作为控制目标,并假设移动机器人在运动过程中,可以提取出周围环境中至少4个特征点的图像,并且这些特征点在期望位姿处的图像是已知的,则视觉镇定是指控制机器人运动,直到当前所拍摄的图片与期望图片中特征点的位置相互重合,在这种情况下,容易证明机器人已经达到期望的位姿.因此,如果系统模型中描述了特征点在当前摄像机坐标系下的运动特性,则会为控制器的设计带来方便.基于这种考虑,本节首先分析了特征点在摄像机坐标系下的动态特性,然后在此基础上建立了机器人运动学模型.

如图1所示,分别用 F_r 与 F_c 来表示移动机器人坐标系与摄像机坐标系, $a \in \mathbb{R}$ 与 $b \in \mathbb{R}$ 为两者之间沿 x_r 与 y_r 轴的平移外参数,而两个坐标系的 z_r , z_c 轴(图1中没有画出)则满足右手惯例,它们与移动机器人运动平面相垂直并指向正上方.

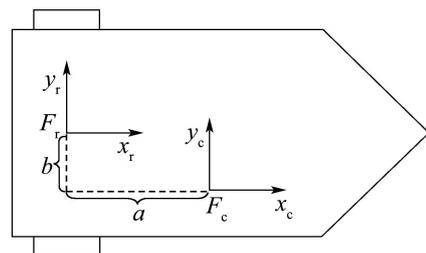


图1 机器人与摄像机坐标系

Fig. 1 The mobile robot frame and the camera frame

如图2所示,令 F_w 代表世界坐标系, $(x_{rw}, y_{rw}, \theta_{rw})$ 表示移动机器人在世界坐标系中 F_w 的位姿,则

移动机器人运动学模型可以描述为:

$$\begin{cases} \dot{x}_{rw} = v \cos \theta_{rw}, \\ \dot{y}_{rw} = v \sin \theta_{rw}, \\ \dot{\theta}_{rw} = w. \end{cases} \quad (1)$$

其中 $v \in \mathbb{R}$ 与 $w \in \mathbb{R}$ 分别表示移动机器人的线速度与角速度. 在后文中, 对于任意参考点, 本文用 $x_s, y_s, z_s (s = w, r, c)$ 表示此点在相应坐标系下的3维坐标.

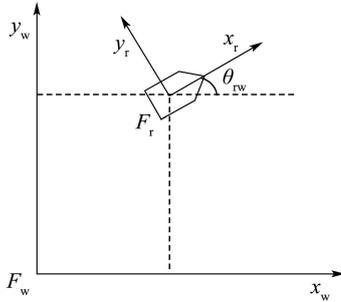


图2 移动机器人模型

Fig. 2 Kinematics model of the mobile robot

根据图1和图2所示几何关系, 可以得到如下表示坐标变换的两个方程:

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{rw} & -\sin \theta_{rw} & 0 \\ \sin \theta_{rw} & \cos \theta_{rw} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{rw} \\ y_{rw} \\ \sigma_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a \\ b \\ \sigma_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中 $\sigma_1 \in \mathbb{R}$ 与 $\sigma_2 \in \mathbb{R}$ 为未知常数, 分别表示世界坐标系与机器人坐标系之间, 以及机器人坐标系与摄像机坐标系之间沿 z 轴的平移参数. 将式(3)代入式(2)进行整理, 然后将方程两边分别对时间求导并利用方程(1), 可以得到基于单目视觉的移动机器人运动学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_c = wy_c + wb - v, \\ \dot{y}_c = -wx_c - wa. \end{cases} \quad (4)$$

以上模型中用到了空间中参考特征点在当前运动的摄像机坐标系下的3维坐标. 在后文的视觉镇定控制中, 所使用的可测反馈信号, 也正是借助于摄像机视野之内的4个参考特征点, 利用视觉算法进行计算而得到的.

3 控制器设计(Controller design)

移动机器人视觉镇定控制的主要任务是: 寻找合适的反馈控制律对移动机器人进行控制, 使其从当前位姿运动到期望位姿, 换言之, 即使得当前摄像机坐标系与期望摄像机坐标系相重合. 因此, 控制目标也可以概括为: 在移动机器人运动过程中, 使用单目视觉传感器实现实时位姿反馈, 即通过将当前所拍摄图片与期望图片进行对比, 提取出部分位姿信息, 然后进行自适应反馈控制, 使得当前图片中参考特征点与期望图片中参考特征点的2维图像坐标相重合. 单目移动机器人视觉伺服框图如图3所示, 它主要包括图像分析与比较, 误差信号构造, 控制器设计等环节.

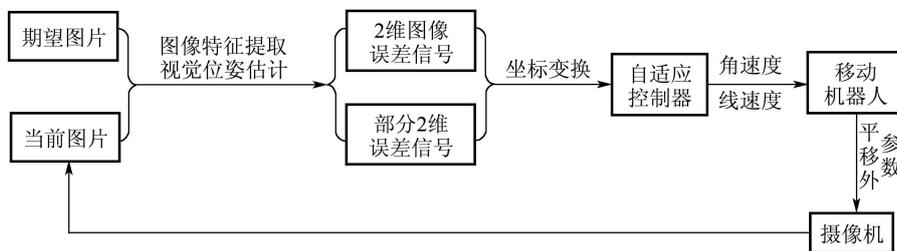


图3 单目移动机器人视觉伺服框图

Fig. 3 Visual servoing of the mobile robot with a monocular camera

3.1 可测信号提取(Derivation of measurable signals)

对于单目摄像机而言, 由于2维图像空间缺乏场景深度信息, 因而仅仅通过当前位姿与期望位姿之间两幅图像的对比, 并借助于视觉算法并不能计算出所有的相对位姿信号. 以 $\mathbf{m}_c, \mathbf{m}_c^* \in \mathbb{R}^3$ 分别表示特征点 P 在当前摄像机坐标系 F_c 与期望摄像机坐标系 F_c^* 下的3维坐标, 即

$$\mathbf{m}_c = [x_c \ y_c \ z_c]^T, \quad \mathbf{m}_c^* = [x_c^* \ y_c^* \ z_c^*]^T. \quad (5)$$

由第2节对坐标系的定义可知, 坐标 x_c 与 x_c^* 分别为点 P 在 F_c 与 F_c^* 下的深度信息(即特征点在摄像机坐标系下沿光轴方向的坐标值). 利用摄像机模型, 可以通过像素坐标计算出归一化后的欧氏3维坐标 $\mathbf{m}, \mathbf{m}^* \in \mathbb{R}^3$:

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{y_c}{x_c} & \frac{z_c}{x_c} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{m}_c^* = \begin{bmatrix} 1 & \frac{y_c^*}{x_c^*} & \frac{z_c^*}{x_c^*} \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

对于基于单目视觉的移动机器人系统而言, 利用当前图像与期望图像中4对特征点像素坐标的对应

(特征点位于同一个平面上, 并且任意三点不共线), 可以通过摄像机模型计算出包含位姿信息的单应矩阵. 在此基础上, 通过Faugeras数值算法^[20]或其他解析方法^[21]等对单应矩阵进行分解, 可以得到 F_c 与 F_c^* 之间的旋转矩阵 $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

上式中 $\theta \in \mathbb{R}$ 为机器人当前位姿与期望位姿之间的夹角, 其中逆时针为正方向. 假设 $\theta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$, 则 θ 可以通过下式求得:

$$\theta = \text{asin}\left(\frac{r_{12} - r_{21}}{2}\right), \quad (8)$$

其中 $r_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$ 代表旋转矩阵 R 的对应元素.

综上所述, 在机器人运动过程中, 可以用于反馈的信号包括归一化坐标 \mathbf{m} , \mathbf{m}^* , 角度误差 θ , 以下将利用这些信号来设计视觉反馈控制器, 以解决移动机器人的镇定问题.

3.2 自适应控制律设计(Adaptive controller design)

定义如下坐标变换:

$$\zeta_1 = \frac{y_c}{z_c} = \left(\frac{y_c}{x_c}\right) / \left(\frac{z_c}{x_c}\right), \quad (9)$$

$$\zeta_2 = \frac{x_c}{z_c} = 1 / \left(\frac{z_c}{x_c}\right). \quad (10)$$

结合式(6)可知, $\zeta_1 \in \mathbb{R}$ 与 $\zeta_2 \in \mathbb{R}$ 均为可测反馈信号. 相应地, 在期望位姿处, 定义 $\zeta_1^* \in \mathbb{R}$ 与 $\zeta_2^* \in \mathbb{R}$ 为

$$\zeta_1^* = \frac{y_c^*}{z_c^*}, \quad \zeta_2^* = \frac{x_c^*}{z_c^*}, \quad (11)$$

为了完成视觉伺服任务, 定义如下误差信号:

$$e_0 = \theta, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_1^* \\ \zeta_2^* \end{bmatrix}, \quad (13)$$

根据简单的几何关系可知, 当 e_0, e_1, e_2 为零时, 当前摄像机坐标系 F_c 将与期望摄像机坐标系 F_c^* 相重合, 即机器人成功地到达了指定位姿处. 为此, 下文将致力于在深度信息以及外参数未知的情况下, 设计自适应控制器使得

$$e_0(t) \rightarrow 0, e_1(t) \rightarrow 0, e_2(t) \rightarrow 0, \quad (14)$$

注 1 文献[17]提出的反馈误差信号中含有特征点的深度比信息(即特征点在当前摄像机坐标系与期望摄像

机坐标系下的深度信息之比值), 而摄像机内参数的标定误差会降低深度比信息的计算准确度, 因此会影响视觉伺服系统的性能, 甚至导致视觉伺服的失败. 与文献[17]不同, 本文选择的误差信号与深度比信息无关, 因此可以避免由于深度比的计算误差带来的负面影响, 从而使所设计的视觉控制算法对于摄像机标定误差等因素具有更强的鲁棒性.

根据方程(4), 对式(12)(13)进行求导并整理, 可以得到如下开环误差方程:

$$\begin{cases} \dot{e}_0 = w, \\ \alpha \dot{e}_1 = -\alpha w e_2 - w a, \\ \alpha \dot{e}_2 = \alpha w e_1 + w b - v. \end{cases} \quad (15)$$

其中 $\alpha \in \mathbb{R}$ 为常数, 表示期望位姿处点 P 在摄像机坐标系下的高度信息(恒值保持不变), 即:

$$\alpha \triangleq z_c^*, \quad (16)$$

这里假设 $\alpha \neq 0$. 对于方程(15)所描述的开环系统, 根据非完整约束系统控制器设计方法^[5]与Lyapunov稳定性理论, 可以设计如下自适应速度控制器:

$$\begin{cases} w = -k_1 (e_0 - \chi), \\ v = \mathbf{Y}^T(\cdot) \hat{\boldsymbol{\xi}} + k_2 \text{sgn}(\alpha) (e_2 + e_1 \cos t), \end{cases} \quad (17)$$

以及如下参数更新律:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\rho}} = -\Gamma_2 w e_1, \\ \dot{\hat{\boldsymbol{\xi}}} = \text{sgn}(\alpha) \Gamma_1 \mathbf{Y}(\cdot) (e_2 + e_1 \cos t). \end{cases} \quad (18)$$

其中 $\mathbf{Y}^T(\cdot) \in \mathbb{R}^3$ 与 $\chi \in \mathbb{R}$ 的具体表达式为:

$$\begin{cases} \chi = e_1 e_2 + e_2 \cos t (e_2 + e_1 \cos t) + \hat{\rho} e_1, \\ \mathbf{Y}^T(\cdot) = [e_1 (w - \sin t) \quad -w \cos t \quad w]. \end{cases} \quad (19)$$

而 $\hat{\boldsymbol{\xi}} \in \mathbb{R}^3$, $\hat{\rho} \in \mathbb{R}$ 则分别表示对如下未知常数向量 $\boldsymbol{\xi} \in \mathbb{R}^3$ 与 $\rho \in \mathbb{R}$ 的估计:

$$\boldsymbol{\xi} \triangleq [\alpha \quad a \quad b]^T, \quad (20)$$

$$\rho \triangleq \frac{a}{\alpha}, \quad (21)$$

$$\text{sgn}(\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{当} \alpha > 0 \text{时,} \\ -1, & \text{当} \alpha < 0 \text{时.} \end{cases} \quad (22)$$

在控制器(17)与参数更新律(18)中, $k_1, k_2, \Gamma_2 \in \mathbb{R}^+$ 为正的常数增益, $\Gamma_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为对角正定增益矩阵. 将式(17)代入式(15), 进行整理后可以得到闭环误差方程如下:

$$\begin{cases} \dot{e}_0 = -k_1 (e_0 - \chi), \\ \alpha \dot{e}_1 = \alpha k_1 (e_0 - \chi) e_2 - w a, \\ \alpha \dot{e}_2 = -k_2 (e_2 + e_1 \cos t) - \mathbf{Y}^T(\cdot) \hat{\boldsymbol{\xi}} + w b + \alpha w e_1. \end{cases} \quad (23)$$

3.3 稳定性分析(Stability analysis)

定理 1 自适应镇定控制器(17)以及对应的参数更新律(18), 可以使系统(15)中的误差信号渐近趋于零, 即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_0 = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_1 = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_2 = 0. \quad (24)$$

证 构造Lyapunov函数如下:

$$V = \frac{1}{2}|\alpha|(e_0^2 + e_1^2) + \frac{1}{2}|\alpha|(e_2 + e_1 \cos t)^2 + \frac{1}{2}\tilde{\xi}^T \Gamma_1^{-1}\tilde{\xi} + \frac{1}{2}\Gamma_2^{-1}|\alpha|\tilde{\rho}^2 \geq 0, \quad (25)$$

其中 $\tilde{\xi} \in \mathbb{R}^3$, $\tilde{\rho} \in \mathbb{R}$ 分别表示如下参数估计误差:

$$\tilde{\rho} = \rho - \hat{\rho}, \quad \tilde{\xi} = \xi - \hat{\xi}, \quad (26)$$

将式(25)对时间求导, 并将式(17)~(19)与式(23)代入其中, 经过整理后可得:

$$\dot{V} = -|\alpha|k_1(e_0 - \chi)^2 - k_2(e_2 + e_1 \cos t)^2 \leq 0, \quad (27)$$

根据式(25) (27)可知, $e_0, e_1, e_2 \in \mathcal{L}_\infty$, $\tilde{\rho}, \tilde{\xi} \in \mathcal{L}_\infty$. 然后再利用式(17) (19) (26)可知, $\hat{\rho}, \hat{\xi} \in \mathcal{L}_\infty$, $w, v, \chi, \mathbf{Y}(\cdot) \in \mathcal{L}_\infty$, 进而由式(15) (18) (19)可以推出 $\dot{e}_0, \dot{e}_1, \dot{e}_2, \dot{\hat{\rho}}, \dot{\hat{\xi}}, \dot{\chi} \in \mathcal{L}_\infty$.

定义函数 $f(t)$ 如下:

$$f = |\alpha|k_1(e_0 - \chi)^2 + k_2(e_2 + e_1 \cos t)^2 \geq 0,$$

则容易得到:

$$\dot{f} = 2k_2(e_2 + e_1 \cos t)(\dot{e}_2 + \dot{e}_1 \cos t - e_1 \sin t) + 2|\alpha|k_1(e_0 - \chi)(\dot{e}_0 - \dot{\chi}) \in \mathcal{L}_\infty.$$

所以由芭芭拉定理的推论^[22]可以证明:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f = 0, \quad (28)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (e_0 - \chi) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} (e_2 + e_1 \cos t) = 0. \quad (29)$$

根据上式, 利用式(23) (17) (18)可知:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_0 = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\hat{\rho}} = 0, \quad (30)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\hat{\xi}} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} w = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_1 = 0. \quad (31)$$

利用式(19) (23)可以得到下式:

$$\frac{d\alpha(e_2 + e_1 \cos t)}{dt} = g(\cdot) - e_1\tilde{\alpha} \sin t, \quad (32)$$

其中

$$g(\cdot) = -k_2 \text{sgn}(\alpha)(e_2 + e_1 \cos t) - \alpha e_2 w \cos t + w\tilde{b} - w\tilde{a} \cos t + e_1 w\tilde{a}, \quad (33)$$

根据式(29)与式(31), 容易证明:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(\cdot) = 0. \quad (34)$$

因为

$$\frac{d(-e_1\tilde{\alpha} \sin t)}{dt} = -(\dot{e}_1\tilde{\alpha} + e_1\dot{\tilde{\alpha}}) \sin t - e_1\tilde{\alpha} \cos t \in \mathcal{L}_\infty, \quad (35)$$

由上式可知 $(-e_1\tilde{\alpha} \sin t)$ 一致连续, 根据式(28) (32) (34), 利用扩展芭芭拉定理(extended barbalat's lemma)^[22]可以得知:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d(e_2 + e_1 \cos t)}{dt} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_1\tilde{\alpha} = 0. \quad (36)$$

利用式(18) (19) (23), 可以得到下式:

$$\frac{d(e_0 - \chi)}{dt} = \vartheta(t) - e_1^2 \sin t, \quad (37)$$

其中:

$$\begin{aligned} \vartheta(t) = & (e_2 \sin t - \dot{e}_2 \cos t + \frac{k_2 e_1}{|\alpha|})(e_2 + e_1 \cos t) + \\ & w - \dot{e}_1(e_2 + \hat{\rho}) - \dot{\hat{\rho}}e_1 + \frac{1}{\alpha}e_1^2\tilde{\alpha} \sin t - \\ & e_2 \cos t \cdot \frac{d(e_2 + e_1 \cos t)}{dt} - \\ & \frac{1}{\alpha}e_1 w(e_1\tilde{\alpha} + \tilde{b} + \hat{a} \cos t). \end{aligned} \quad (38)$$

将式(29)~(31)与(36)代入到式(38)中, 可以推导出:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \vartheta(t) = 0. \quad (39)$$

另一方面, 容易证明:

$$\frac{d(e_1^2 \sin t)}{dt} = 2e_1\dot{e}_1 \sin t + e_1^2 \cos t \in \mathcal{L}_\infty, \quad (40)$$

即 $(e_1^2 \sin t)$ 一致连续, 则根据式(28) (36) (39), 再次利用扩展芭芭拉定理可以证明:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d(e_0 - \chi)}{dt} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_1^2 \sin t = 0, \quad (41)$$

从而推出:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_1 = 0, \quad (42)$$

根据式(28) (19) (42)可以证明:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_2 = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \chi = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_0 = 0. \quad (43)$$

根据式(42)(43)可知, 定理1得证. 即移动机器人将会渐近稳定到期望位姿.

4 仿真与实验(Simulation and experiment)

为了验证本文算法的性能, 本节在MATLAB环境下对含有平移外参数的机器人系统进行了仿真. 在此基础上, 在Pioneer 3 - Dx机器人平台上进行了实验测试. 从仿真与实验结果中可以看出, 本文算法可以使得移动机器人渐近收敛于目标位置, 具有良好的性能.

4.1 仿真(Simulation)

对于本文所提出的视觉控制算法(17)与(18), 本节给出了仿真测试结果. 在仿真实验中, 平移外参数与摄像机坐标系下高度信息的真实值选取如下:

$$\begin{cases} a = 0.2 \text{ m}, \\ b = 0.1 \text{ m}, \\ z_c^* = 0.5 \text{ m}, \end{cases} \quad (44)$$

系统误差的初始值分别为:

$$\begin{cases} e_0(0) = \frac{\pi}{6} \text{ rad}, \\ e_1(0) = -0.866, \\ e_2(0) = 3.5, \end{cases} \quad (45)$$

控制器以及参数更新律的各个增益选择为:

$$k_1 = 0.2, k_2 = 1.13, \quad (46)$$

$$\Gamma_1 = \text{diag}\{0.1 \ 0.05 \ 0.3\}, \quad (47)$$

$$\Gamma_2 = 0.04. \quad (48)$$

其中diag{·}表示对角矩阵.

对闭环动态系统(23)进行仿真测试后, 可以得到如图4~图6的仿真结果. 其中图4表示系统误差的变化曲线, 图5表示移动机器人的速度控制量变化曲线. 图6则显示了各未知参数的动态估计过程. 由仿真结果可以看出, 本文所设计的自适应视觉镇定算法, 在摄像机外参数未知的情况下, 可以控制移动机器人渐近稳定到期望位姿处.

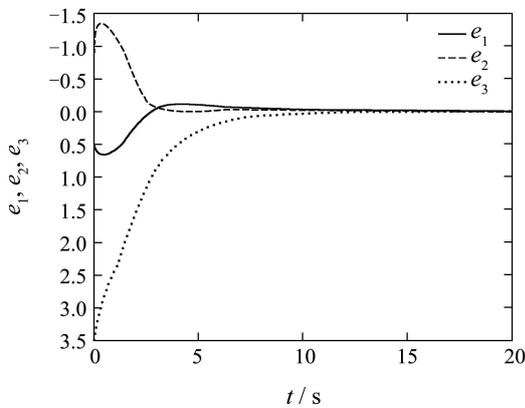


图4 系统误差
Fig. 4 System error

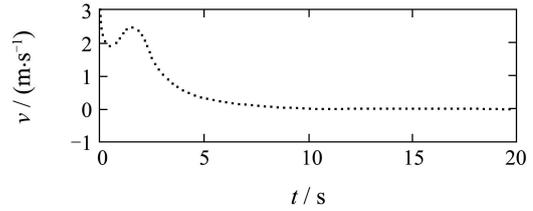
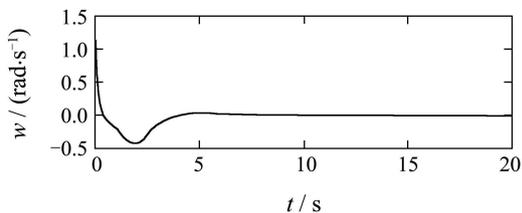


图5 控制输入

Fig. 5 Control inputs

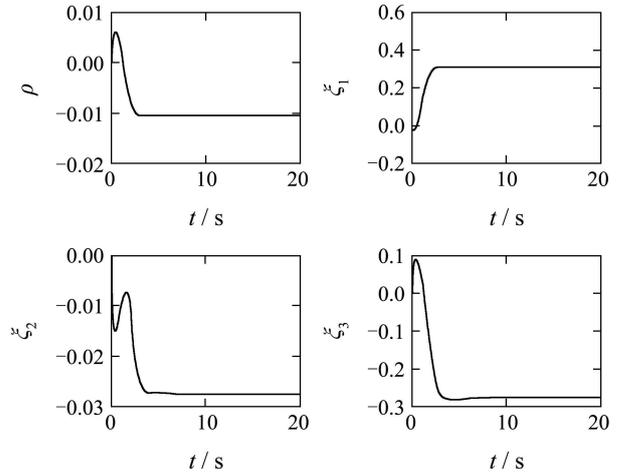


图6 参数估计

Fig. 6 Parameter estimation

4.2 实验(Experiment)

在仿真测试的基础之上, 本节对本文的算法进行了实验验证. 在实验中, 以MobileRobots公司的Pioneer 3 - Dx室内移动机器人平台, 视觉传感器采用大恒SV400®IEEE1394接口数字摄像机, 其拍摄速度可达50帧/秒, 分辨率为780×582. 在Visual Studio 2005®环境下, 基于Intel提供的开源计算机视觉库OpenCV®, 本文对特征点提取与跟踪, 以及本文的视觉控制算法进行了编程实现, 从而完成了移动机器人视觉伺服软件系统的搭建. 其中, 系统误差的初始值为:

$$e_0(0) = -17^\circ, e_1(0) = 5.50, e_2(0) = -0.43, \quad (49)$$

控制器的相关参数选择如下:

$$k_1 = 0.18, k_2 = 0.6, \quad (50)$$

$$\Gamma_1 = \text{diag}\{0.05 \ 0.1 \ 0.4\}, \Gamma_2 = 0.03. \quad (51)$$

图7为视觉伺服过程中4个图像特征点的2维轨迹, 圆点代表图像特征在目标图像中的位置, 方块点代表图像特征在起始图像时的位置. 可以看出, 本文所提控制器使得当前图像特征与目标图像特征逐渐趋于重合, 即移动机器人逐渐收敛到期望位姿处. 系统误差量的变化曲线如图8所示, 其最终渐近收敛于零点. 图9为伺服过程中移动机器人的速度控制量曲线. 图10为自适应控制律中各未知参数的动态估计

曲线, 可以看出, 这些参数均较快地收敛到稳态.

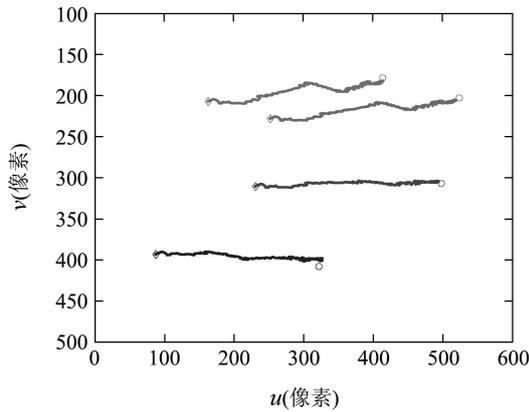


图 7 2维图像特征轨迹

Fig. 7 Trajectories of 2D image features

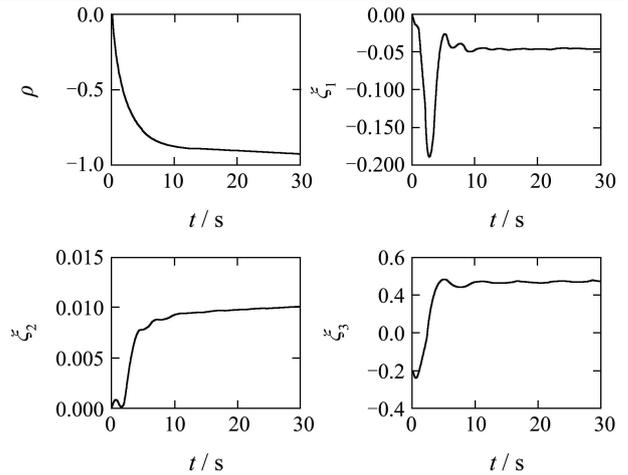


图 10 参数估计

Fig. 10 Parameter estimation

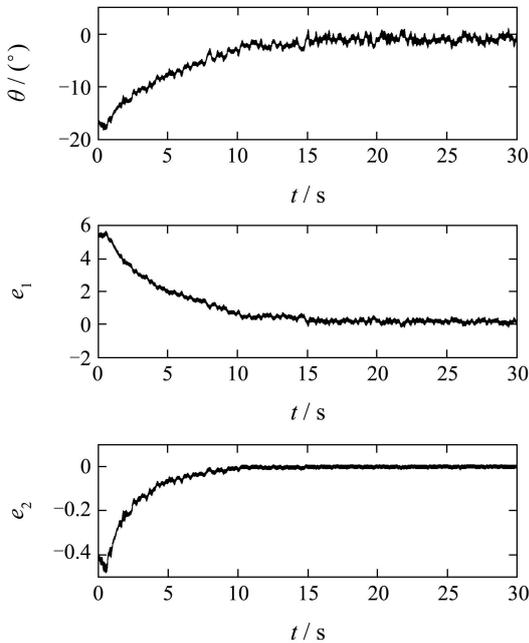


图 8 系统误差

Fig. 8 System error

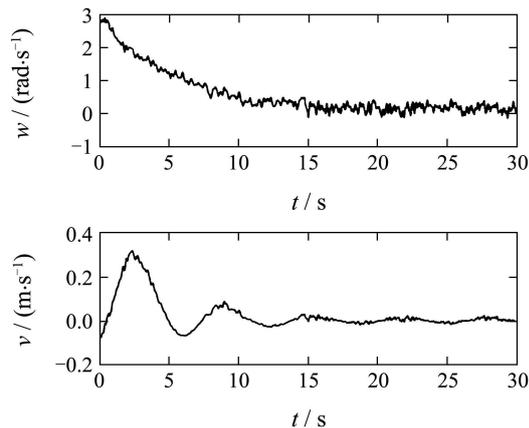


图 9 控制输入

Fig. 9 Control inputs

5 结论(Conclusion)

针对基于单目视觉的移动机器人系统, 本文在存在未知摄像机外参数的情况下, 着重研究了其镇定控制问题. 本文将视觉算法与Lyapunov非线性控制器设计方法相结合, 构造了一种自适应视觉控制器, 它可以对未知平移外参数与期望位姿处特征点的高度信息同时进行在线补偿, 从而使移动机器人从初始位姿渐近稳定到期望位姿. 理论分析、仿真与实验结果均证实了这种视觉控制方法的良好性能. 在后续的研究中, 本文拟将非完整系统控制理论与鲁棒/自适应控制方法相结合, 使之除参数外, 可以同时补偿摄像机内参数的标定误差等不确定性因素, 并使其能更好地应用于实际场合.

参考文献(References):

- [1] BROCKETT R W. Asymptotic stability and feedback stabilization[M] // *Differential Geometry Control Theory*. Boston, MA, American: Birkhauser, 1983.
- [2] MARCHAND N, ALAMIR M. Discontinuous exponential stabilization of chained form systems[J]. *Automatica*, 2003, 39(2): 343 – 348.
- [3] POURBOGHRAT F. Exponential stabilization of nonholonomic mobile robots[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2002, 28(5): 349 – 359.
- [4] CANUDAS-DE-WIT C, SORDALEN O J. Exponential stabilization of mobile robots with nonholonomic constraints[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992, 13(11): 1791 – 1797.
- [5] TEEL A R, MURRAY R M, WALSH G C. Non-holonomic control systems: from steering to stabilization with sinusoids[J]. *International Journal of Control*, 1995, 60(4): 849 – 870.
- [6] TIAN Y P, LI S. Exponential stabilization of nonholonomic dynamic systems by smooth time-varying control[J]. *Automatica*, 2002, 38(7): 1139 – 1146.
- [7] YUAN H, QU Z. Continuous time-varying pure feedback control for chained nonholonomic systems with exponential convergent rate[C] // *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*. Oxford: Elsevier Science Press, 2008: 15203 – 15208.

- [8] KOLMANOVSKY I, MCCLAMROCH N H. Developments in non-holonomic control problems[J]. *IEEE Control System Magazine*, 1995, 15(6): 20 – 36.
- [9] BLOCH A M, BAILLIEUL J, CROUCH P E, et al. *Nonholonomic Mechanics and Control*[M]. New York: Springer-Verlag, 2003.
- [10] HUTCHINSON S, HAGER G D, Corke P I. A tutorial on visual servo control[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, 12(5): 651 – 670.
- [11] CHAUMETTE F, HUTCHINSON S. Visual servo control, part I: basic approaches[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006, 13(4): 82 – 90.
- [12] CHAUMETTE F, HUTCHINSON S. Visual servo control, Part II: Advanced approaches[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2007, 14(1): 109 – 118.
- [13] JUNG D, HEINZMANN J, ZELINSKY A. Range and pose estimation for visual servoing of a mobile robot[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Leuven: IEEE, 1998: 1226 – 1231.
- [14] DIXON W E, DAWSON D M, ZERGEROGLU E, et al. Adaptive tracking control of a wheeled mobile robot via an uncalibrated camera system[C] // *Proceedings of American Control Conference*. Piscataway: IEEE, 2000: 1493 – 1497.
- [15] CHEN J, DIXON W E, DAWSON D M, et al. Homography-based visual servo tracking control of a wheeled mobile robot[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(2): 406 – 415.
- [16] CHEN J, DAWSON D M, DIXON W E, et al. Adaptive homography-based visual servo tracking for a fixed camera configuration with a camera-in-hand extension[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, 13(5): 814 – 825.
- [17] FANG Y, DIXON W E, DAWSON D M. Homography-based visual servo regulation of mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 2005, 35(5): 1041 – 1050.
- [18] SU J, MA H, QIU W, et al. Task-independent robotic uncalibrated hand-eye coordination based on the extended state observer[J]. *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 2004, 34(4): 1917 – 1922.
- [19] HU G, MACKUNIS W, GANS N, et al. Homography-based visual servo control with imperfect camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(6): 1318 – 1324.
- [20] FAUGERAS O, LUSTMAN F. Motion and structure from motion in a piecewise planar environment[J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1988, 2(3): 485 – 508.
- [21] ZHANG X, FANG Y, MA B, et al. A fast homography decomposition technique for visual servo of mobile robots[C] // *Proceedings of 27th Chinese Control Conference*. Beijing: Beihang University Press, 2008: 404 – 409.
- [22] SLOTINE J E, LI W. *Applied Nonlinear Control*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.

作者简介:

张雪波 (1984—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为视觉控制、移动机器人、计算机视觉, E-mail: zhangxb@robot.nankai.edu.cn;

方勇纯 (1973—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE高级会员, 主要研究方向为复杂系统非线性控制、机器人视觉控制, E-mail: yfang@robot.nankai.edu.cn;

刘玺 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为移动机器人、视觉伺服控制, E-mail: liux@robot.nankai.edu.cn.