

基于 2D 三焦点张量的移动机器人视觉伺服镇定控制

李宝全^{1,2} 方勇纯^{1,2} 张雪波^{1,2}

摘要 针对单目视觉移动机器人系统, 本文提出了一种基于二维三焦点张量 (2D trifocal tensor, 2DTT) 的视觉伺服镇定控制方法. 具体而言, 首先描述了 2D 三焦点张量的导出过程, 并给出了基于图像特征点的估计方法. 在此基础上根据 2D 三焦点张量的元素, 设计了一种反馈线性化控制器以实现机器人的位置镇定, 以及一种比例控制器来实现姿态镇定, 因而在场景信息与平移信息均未知情况下完成了移动机器人的视觉镇定控制. 通过理论分析证明了本文设计的镇定控制算法具有指数收敛性能. 相比现有方法, 这种基于 2D 三焦点张量的方法在图像特征识别方面具有更强的鲁棒性, 并且在平面场景与立体场景情况下均适用. 最后利用仿真与实验结果验证了本文提出的视觉伺服方法的优良性能.

关键词 非完整移动机器人, 镇定控制, 视觉伺服, 2D 三焦点张量

引用格式 李宝全, 方勇纯, 张雪波. 基于 2D 三焦点张量的移动机器人视觉伺服镇定控制. 自动化学报, 2014, 40(12): 2706–2715

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.02706

2D Trifocal Tensor Based Visual Servo Regulation of Nonholonomic Mobile Robots

LI Bao-Quan^{1,2} FANG Yong-Chun^{1,2} ZHANG Xue-Bo^{1,2}

Abstract For a nonholonomic mobile robot system equipped with a fixed camera, we propose a two-dimensional trifocal tensor (2DTT) based visual servo regulation strategy. Firstly, the derivation of the 2DTT is described and then estimated by an image feature based algorithm. Subsequently, by utilizing the entities of the 2DTT, a feedback linearizing position controller is designed to regulate the position errors of the robot, and then a proportion controller is designed to regulate the rotation error. The regulation task is successfully implemented even in the situation that the scene information and the translation parameter are unknown. The exponentially convergent rate of closed-loop systems is proven mathematically. Compared with the existing methods, the 2DTT based strategy is more robust in image feature recognition, and it can be applied to both planar and nonplanar scenes. Simulation and experimental results show the feasibility of the proposed approach.

Key words Nonholonomic mobile robots, regulation control, visual servoing, 2D trifocal tensor (2DTT)

Citation Li Bao-Quan, Fang Yong-Chun, Zhang Xue-Bo. 2D trifocal tensor based visual servo regulation of nonholonomic mobile robots. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(12): 2706–2715

视觉传感器具有获取信息丰富、非接触测量与成本低廉等优势, 随着图像处理与计算机视觉等技术的发展, 它被广泛应用于机器人领域^[1–6]. 移动机器人具有工作空间大与灵活性强等特点, 将视觉

传感器安装在移动机器人上形成车载视觉系统, 则可以在很大程度上提高系统的智能化程度与控制性能^[7–10]. 具体而言, 移动机器人视觉伺服镇定控制是指: 以视觉传感器所获取的图像信息作为反馈信号, 控制移动机器人从任意初始位姿运动到期望位姿处. 视觉伺服技术在生产制造、家庭服务等领域具有广泛的应用价值. 由于移动机器人的运动受限于非完整约束, 而视觉系统存在深度信息缺失这一固有缺陷, 因此移动机器人的视觉镇定问题已成为控制与机器人领域的研究难点之一^[11–14].

为了实现移动机器人的视觉镇定控制, 一些方法直接使用特征点的图像坐标来定义系统误差^[15–17]. 基于多个图像特征点的像素坐标, Luca 等采用经典的基于图像视觉伺服策略实现了视觉镇定控制, 其中特征点的深度信息由非线性观测器在线辨识得到^[15]. Fang 等利用一个特征点的归一化

收稿日期 2013-05-08 录用日期 2014-06-10
Manuscript received May 8, 2013; accepted June 10, 2014
国家自然科学基金 (61203333), 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20120031120040), 天津市应用基础与前沿技术研究计划 (13JCQNJC03200) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61203333), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20120031120040), and Tianjin Research Program of Application Foundation and Advanced Technology (13JCQNJC03200)
本文责任编辑 于海斌
Recommended by Associate Editor YU Hai-Bin
1. 南开大学机器人与信息自动化研究所 天津 300071 2. 南开大学天津市智能机器人技术重点实验室 天津 300071
1. Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University, Tianjin 300071 2. Tianjin Key Laboratory of Intelligent Robotics, Nankai University, Tianjin 300071

图像坐标构造部分控制误差, 实现了深度信息未知情况下的自适应视觉镇定控制^[16]. 而在文献 [17] 中, Zhang 等基于归一化图像坐标来构造误差信号, 他们设计了一种不受限于场景约束的位姿估计算法来获得机器人的角度信号, 实现了 2.5 维视觉伺服策略下的镇定控制. 遗憾的是, 由于上述方法直接使用特征点坐标来定义误差, 系统对图像噪声较为敏感; 特别是当出现误匹配时, 通常会导致视觉镇定任务的失败.

为了提高视觉镇定控制系统对图像噪声、特征误匹配等因素的鲁棒性, 众多研究者研究了基于单应矩阵 (Homography) 或本质矩阵 (Essential matrix) 的机器人视觉控制方法^[18-23]. 其中, Lopez 等根据单应矩阵中的元素来设计控制器, 在完成镇定控制的同时保证了特征点位于摄像机视野 (Field of view, FOV) 之内^[18]. 基于单应矩阵方法, Fang 等设计的视觉控制系统可以使机器人以直线路径运动至期望位姿处, 并同时通过主动视觉方法确保了特征点的 FOV 约束^[19]. 文献 [20] 利用单应矩阵分解方法得到了机器人的位姿估计, 进而设计了一种视觉镇定控制器, 并辅之以选择策略实现了移动机器人的高效镇定. Mariottini 等利用从基本矩阵计算得到的极点, 首先控制机器人使之与期望位姿对齐, 之后以直线方式使其运动至期望位姿处^[21]. Becerra 等采用滑模控制方法来增强机器人视觉系统的鲁棒性, 他们根据极点设计的滑模控制器可以将机器人镇定至期望位姿^[22]. 值得指出的是, 由于单应矩阵仅仅适用于平面场景, 而本质矩阵则存在短基线退化问题, 因此这些方法的应用受到了不同程度的限制.

三焦点张量 (Trifocal tensor, TT) 是计算机视觉中的重要内容之一, 它包含了三幅视图之间的相对位姿关系^[24]. 三焦点张量包括一维三焦点张量 (1-Dimensional trifocal tensor, 1DTT) 与二维三焦点张量 (2-Dimensional trifocal tensor, 2DTT). 其中, 1DTT 可以根据一维图像 (对应于线阵 CCD 摄像机) 或者二维图像 (对应于面阵 CCD 摄像机) 的部分信息来获得. Guerrero 等将 1DTT 引入机器人领域, 实现了机器人的位姿估计^[25], 继而 Becerra 等根据 1DTT 完成了机器人的视觉镇定控制^[26-27]. 由于难以得到 1DTT 的估计值与真实值之间的固定比例关系, 因此其应用受到了一定的制约. 与 1DTT 相比, 2DTT 能够充分利用二维图像中的信息, 并且能够得到其估计值与真实值之间的固定比例关系. 与单应矩阵相比较, 2DTT 不包含空间中的景物信息, 因而便于求取图像之间的相对位姿关系, 并且该

相对位姿的解是唯一的; 与本质矩阵相比, 2DTT 不存在短基线退化的问题. 由于利用了三幅图像, 与以上基于二视图几何的方法相比, 2DTT 对图像噪声与误匹配点等不确定因素具有更强的鲁棒性, 并且它对平面场景与立体场景均适用. 特别地, 由于车载视觉系统具有平面运动的特点, 因此根据至少 3 个特征点即可得到相差一个比例因子的 2DTT 的估计. Lopez 等在文献 [28] 中利用 2DTT 实现了机器人的光滑形式的镇定控制, 遗憾的是该方法存在局部极小问题, 因而仅能得到局部稳定的结果.

由文献 [27-28] 的工作得到启示, 提出了一种基于 2DTT 的移动机器人视觉伺服镇定控制方法. 与文献 [27] 相比, 本文由于采用了 2DTT, 因而得到了固定比例因子下三焦点张量的估计, 因此便于进行控制器设计与稳定性分析; 与文献 [28] 相比, 本文设计的视觉镇定算法在理论上得到了全局稳定的结果, 解决了局部极小的问题. 具体而言, 本文首先描述了 2DTT 的导出过程, 给出了基于图像特征点的估计方法; 然后根据 2DTT 中的元素, 设计了一种反馈线性化控制器来实现机器人的位置镇定, 之后通过比例控制器来完成机器人的姿态镇定. 理论分析与仿真及实验结果充分验证了本文所提出的移动机器人视觉镇定控制方法的有效性. 相比现有方法, 本文方法的优势在于: 1) 由于采用了 2DTT, 该方法可对平面场景与立体场景均适用. 由于加入了第 3 幅视图的信息, 这种利用 3 幅图像的方法能有效抑制图像噪声, 并且能易于识别误匹配点, 因此在图像特征识别方面更具有鲁棒性. 2) 在理论上, 本文在移动机器人具有非完整约束限制, 以及场景信息与平移信息均未知的情况下, 设计出了具有指数收敛性能的位姿镇定控制器; 3) 本文根据 2DTT 中的元素直接构造误差信号以设计控制器, 因而无需任何位姿估计算法. 避免了在位姿估计环节产生的误差以及不确定性, 而且提高了算法的效率.

本文其他部分组织如下: 第 1 节对视觉镇定问题进行了描述; 第 2 节给出了 2DTT 的导出与估计方法; 第 3 节与第 4 节依次设计了移动机器人的位置控制器与姿态控制器; 第 5 节给出了算法的仿真与实验结果; 最后一节为本文工作的总结.

1 问题描述

本节首先对机器人的视觉镇定任务进行了描述, 之后对相应坐标系的变换、运动学模型以及可测信号提取进行了分析.

1.1 系统的描述

对于单目视觉移动机器人系统, 图 1 给出了其

视觉镇定过程中的坐标系的关系, 其中机器人坐标系与摄像机坐标系重合. 以 $\mathcal{F}^*$, $\mathcal{F}^c$ 与 $\mathcal{F}^0$ 分别表示摄像机在期望位姿、当前位姿以及初始位姿处的坐标系. 以 $\mathcal{F}^*$ 为例, 其 z_c^* 坐标轴与摄像机光轴方向一致, 并指向机器人的正前方; $\mathcal{F}^*$ 的 x_c^* 坐标轴与机器人的轮轴方向一致; $\mathcal{F}^*$ 的 y_c^* 坐标轴为竖直向下方向, 并且三轴符合右手定则. α 表示 $\mathcal{F}^0$ 与 $\mathcal{F}^*$ 之间绕 y_c^* 轴的旋转角度, $\theta(t)$ 表示 $\mathcal{F}^c$ 与 $\mathcal{F}^*$ 之间绕 y_c^* 轴的旋转角度, 且 α 与 $\theta(t)$ 以逆时针方向为正. P_i 表示外界环境中第 i 个特征点.

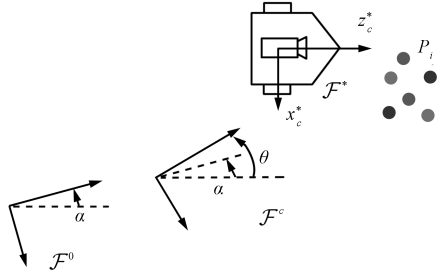


图1 视觉镇定过程中的坐标系关系

Fig.1 Coordinate systems relationship of the visual servoing task

因此本文的目标即概括为: 通过视觉反馈, 控制机器人从初始位姿处运动到期望位姿处, 即令 $\mathcal{F}^c$ 与 $\mathcal{F}^*$ 相重合.

1.2 坐标系变换

不失一般性, 本文以 $\mathcal{F}^*$ 作为参考坐标系. 定义 $\mathcal{F}^c$ 相对于 $\mathcal{F}^*$ 的平移向量为 ${}^*\mathbf{t}_c$, 根据机器人的平面运动约束, ${}^*\mathbf{t}_c$ 的形式可表示为

$${}^*\mathbf{t}_c = \begin{bmatrix} {}^*t_{cx} & 0 & {}^*t_{cz} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

其中, ${}^*t_{cx}$ 与 ${}^*t_{cz}$ 分别表示 $\mathcal{F}^c$ 的原点在 $\mathcal{F}^*$ 下的 x 与 z 坐标分量. 因而机器人 (或摄像机) 在 $\mathcal{F}^*$ 下的位姿即可表示为 $({}^*t_{cz}, {}^*t_{cx}, \theta)$. 因此当 $({}^*t_{cz}, {}^*t_{cx}, \theta) = (0, 0, 0)$ 时, 可知完成了移动机器人的镇定控制任务.

定义 $\mathcal{F}^*$ 在 $\mathcal{F}^c$ 下的旋转矩阵与平移向量分别为 cR 与 ${}^c\mathbf{t}_*$, 根据机器人的平面运动约束, 其具体形式为

$${}^cR = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix}, \quad {}^c\mathbf{t}_* = \begin{bmatrix} {}^ct_{*x} \\ 0 \\ {}^ct_{*z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, ${}^ct_{*x}$ 与 ${}^ct_{*z}$ 分别表示 ${}^c\mathbf{t}_*$ 的 x 与 z 分量, $s\theta$ 与 $c\theta$ 分别为 $\sin\theta$ 与 $\cos\theta$ 的简写形式. 同样地, 定

义 $\mathcal{F}^*$ 在 $\mathcal{F}^0$ 下的旋转矩阵与平移向量分别为 0R 与 ${}^0\mathbf{t}_*$:

$${}^0R = \begin{bmatrix} c\alpha & 0 & s\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\alpha & 0 & c\alpha \end{bmatrix}, \quad {}^0\mathbf{t}_* = \begin{bmatrix} {}^0t_{*x} \\ 0 \\ {}^0t_{*z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, ${}^0t_{*x}$ 与 ${}^0t_{*z}$ 分别表示 ${}^0\mathbf{t}_*$ 的 x 与 z 分量, $s\alpha$ 与 $c\alpha$ 分别为 $\sin\alpha$ 与 $\cos\alpha$ 的简写形式.

定义 P_i 在 $\mathcal{F}^*$, $\mathcal{F}^c$ 与 $\mathcal{F}^0$ 下的坐标分别为 P_i^* , P_i^c 与 P_i^0 , 其具体形式是:

$$P_i^* = \begin{bmatrix} X_i^* \\ Y_i^* \\ Z_i^* \end{bmatrix}, \quad P_i^c = \begin{bmatrix} X_i^c \\ Y_i^c \\ Z_i^c \end{bmatrix}, \quad P_i^0 = \begin{bmatrix} X_i^0 \\ Y_i^0 \\ Z_i^0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据坐标系的变换规则^[22], 有:

$$P_i^c = {}^cR P_i^* + {}^c\mathbf{t}_*, \quad P_i^0 = {}^0R P_i^* + {}^0\mathbf{t}_* \quad (5)$$

1.3 运动学模型

由于摄像机坐标系与机器人坐标系重合, 根据机器人的运动学方程^[29], 可得摄像机的运动学方程为

$$\begin{cases} {}^*\dot{t}_{cz} = v_c c\theta \\ {}^*\dot{t}_{cx} = -v_c s\theta \\ \dot{\theta} = w_c \end{cases} \quad (6)$$

其中, v_c 表示摄像机沿 $\mathcal{F}_c$ 的 z_c 坐标轴方向的线速度, 它与机器人的线速度一致; w_c 表示摄像机绕 $\mathcal{F}_c$ 的 y_c 坐标轴负方向的旋转速度, 它与机器人的角速度一致.

根据坐标系变换规则有^[30]:

$${}^c\mathbf{t}_* = -{}^cR {}^*\mathbf{t}_c \quad (7)$$

将上式扩展, 有:

$$\begin{cases} {}^ct_{*x} = -{}^*t_{cx} c\theta - {}^*t_{cz} s\theta \\ {}^ct_{*z} = +{}^*t_{cx} s\theta - {}^*t_{cz} c\theta \end{cases} \quad (8)$$

对式 (8) 关于时间求导, 将式 (6) 代入并整理, 可得 ${}^ct_{*x}$, ${}^ct_{*z}$ 的运动学方程:

$$\begin{cases} {}^c\dot{t}_{*x} = {}^ct_{*z} w_c \\ {}^c\dot{t}_{*z} = -v_c - {}^ct_{*x} w_c \\ \dot{\theta} = w_c \end{cases} \quad (9)$$

1.4 可测信号提取

对于特征点 $\mathbf{P}_i$, 它在期望图像、当前图像与初始图像上的坐标分别定义为 $\mathbf{p}_i^*$, $\mathbf{p}_i^c$ 与 $\mathbf{p}_i^0$:

$$\mathbf{p}_i^* = \begin{bmatrix} u_i^* \\ v_i^* \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{p}_i^c = \begin{bmatrix} u_i^c \\ v_i^c \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{p}_i^0 = \begin{bmatrix} u_i^0 \\ v_i^0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, u_i^*, u_i^c 与 u_i^0 对应于图像平面的 $\mathbf{u}$ 轴坐标, v_i^*, v_i^c 与 v_i^0 对应于图像平面的 $\mathbf{v}$ 轴坐标. 以 $\mathbf{p}_i^c$ 为例, 根据摄像机的针孔成像模型, 可得 $\mathbf{P}_i^c$ 与 $\mathbf{p}_i^c$ 的关系为

$$\mathbf{p}_i^c = \frac{1}{Z_i^c} K \mathbf{P}_i^c \quad (11)$$

其中, K 表示摄像机的内参数矩阵.

$\mathbf{p}_i^*$, $\mathbf{p}_i^c$ 与 $\mathbf{p}_i^0$ 的归一化图像坐标分别定义为 $\bar{\mathbf{p}}_i^*$, $\bar{\mathbf{p}}_i^c$ 与 $\bar{\mathbf{p}}_i^0$. 对于已标定的摄像机, 可知 $\bar{\mathbf{p}}_i^c$ 为可测:

$$\bar{\mathbf{p}}_i^c = K^{-1} \mathbf{p}_i^c \quad (12)$$

$\bar{\mathbf{p}}_i^*$, $\bar{\mathbf{p}}_i^0$ 也可用同样方式获得. 在下文中, $\bar{\mathbf{p}}_i^*$, $\bar{\mathbf{p}}_i^c$ 与 $\bar{\mathbf{p}}_i^0$ 用于估计 2DTT.

2 2DTT 的导出与估计

本节首先描述了 2DTT 的导出过程, 之后在第 2.2 节中给出了差一个固定比例因子意义下的 2DTT 的估计方法.

2.1 2DTT 的导出

根据 $\mathcal{F}^*$, $\mathcal{F}^c$ 与 $\mathcal{F}^0$ 之间的相对位姿关系 (2) 和 (3), 可以得到 $\mathcal{F}^*$, $\mathcal{F}^c$ 与 $\mathcal{F}^0$ 分别对应的摄像机投影矩阵 $\mathcal{P}^*$, $\mathcal{P}^c$ 与 $\mathcal{P}^0$, 其具体形式为^[24]

$$\mathcal{P}^* = [I_{3 \times 3} | \mathbf{0}_{3 \times 1}], \quad \mathcal{P}^c = [{}^cR | {}^c\mathbf{t}_*], \quad \mathcal{P}^0 = [{}^0R | {}^0\mathbf{t}_*] \quad (13)$$

其中, $I_{3 \times 3}$ 表示 3 阶单位矩阵, $\mathbf{0}_{3 \times 1}$ 表示 3 行 1 列的零矩阵, 并且以上投影矩阵均以 $\mathcal{F}^*$ 为参考. 将 2DTT 表示为 $\{T_1, T_2, T_3\}$, 它与摄像机投影矩阵 (13) 有如下关系^[24]:

$$T_j = \mathcal{P}_j^0 (\mathcal{P}_4^c)^T - \mathcal{P}_4^0 (\mathcal{P}_j^c)^T \quad (14)$$

其中, $j = 1, 2, 3$, $\mathcal{P}_j^0$ 与 $\mathcal{P}_j^c$ 分别表示 $\mathcal{P}^0$ 与 $\mathcal{P}^c$ 的第 j 列. $\mathcal{P}_4^0$ 与 $\mathcal{P}_4^c$ 分别表示 $\mathcal{P}^0$ 与 $\mathcal{P}^c$ 的第 4 列. 将式

(14) 展开可得 2DTT 的具体形式:

$$\begin{aligned} T_1 &= \begin{bmatrix} T_{111} & 0 & T_{113} \\ 0 & 0 & 0 \\ T_{131} & 0 & T_{133} \end{bmatrix} \\ T_3 &= \begin{bmatrix} T_{311} & 0 & T_{313} \\ 0 & 0 & 0 \\ T_{331} & 0 & T_{333} \end{bmatrix} \\ T_2 &= \begin{bmatrix} 0 & T_{212} & 0 \\ T_{221} & 0 & T_{223} \\ 0 & T_{232} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

根据式 (15) 可知, 2DTT 仅有 12 个非零项, 易知这是由于摄像机存在平面运动特性造成的. 为便于描述, 以 T_{lmn} 表示 2DTT 中下标为 lmn 的项, 其中 l, m, n 的取值范围均为 $\{1, 2, 3\}$. T_{lmn} 的具体形式为

$$\begin{aligned} T_{111} &= {}^c t_{*x} c\alpha - {}^0 t_{*x} c\theta \\ T_{113} &= {}^c t_{*z} c\alpha + {}^0 t_{*x} s\theta \\ T_{131} &= -{}^c t_{*x} s\alpha - {}^0 t_{*z} c\theta \\ T_{133} &= -{}^c t_{*z} s\alpha + {}^0 t_{*x} s\theta \\ T_{212} &= -{}^0 t_{*x} \\ T_{221} &= {}^c t_{*x} \\ T_{223} &= {}^c t_{*z} \\ T_{232} &= -{}^0 t_{*z} \\ T_{311} &= {}^c t_{*x} s\alpha - {}^0 t_{*x} s\theta \\ T_{313} &= {}^c t_{*z} s\alpha - {}^0 t_{*x} c\theta \\ T_{331} &= {}^c t_{*x} c\alpha - {}^0 t_{*z} s\theta \\ T_{333} &= {}^c t_{*z} c\alpha - {}^0 t_{*z} c\theta \end{aligned} \quad (16)$$

由式 (16) 可以看出, 2DTT 仅与相对位姿参数有关, 与外界景物信息无关.

2.2 2DTT 的估计

2DTT 与归一化图像坐标 $\bar{\mathbf{p}}_i^*$, $\bar{\mathbf{p}}_i^c$, $\bar{\mathbf{p}}_i^0$ 具有如下关系^[24]:

$$[\bar{\mathbf{p}}_i^0]_{\times} \left(\sum_j \bar{\mathbf{p}}_{ij}^* T_j \right) [\bar{\mathbf{p}}_i^c]_{\times} = \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad (17)$$

其中, $[\bar{\mathbf{p}}_i^0]_{\times}$ 表示 $\bar{\mathbf{p}}_i^0$ 的反对称矩阵, $\bar{\mathbf{p}}_{ij}^*$ 表示 $\bar{\mathbf{p}}_i^*$ 的第 j 个元素. 2DTT 为式 (17) 中的未知量, 因此根据该式可以求解出差一个比例因子下的 2DTT 的解 T_{lmn}^{sol} . 根据上式可知, 每一个特征点可以提供 4 个独立的约束方程, 因而利用 3 个以上的特征点即可得到 2DTT 的解.

为了得到 2DDT 的估计值 T_{lmn}^{est} , 对 T_{lmn}^{sol} 进行如下形式的归一化变换:

$$T_{lmn}^{est} = \pm \frac{T_{lmn}^{sol}}{\sqrt{(T_{212}^{sol})^2 + (T_{232}^{sol})^2}} \quad (18)$$

其中, T_{lmn}^{est} 的正负性可通过特征点的关联或者运动连续性来确定.

为了便于描述, 本文将 $\mathcal{F}^0$ 与 $\mathcal{F}^*$ 之间平移向量的模长 $\|{}^0\mathbf{t}_*\|$ 表示为 d . 对应于式 (16) 有:

$$\sqrt{(T_{212})^2 + (T_{232})^2} := d \quad (19)$$

另一方面, 根据式 (18) 可知:

$$(T_{212}^{est})^2 + (T_{232}^{est})^2 = 1 \quad (20)$$

因而根据式 (19) 和 (20), 以及 T_{lmn}^{est} 与 T_{lmn} 之间仅差一比例因子的性质可知:

$$T_{lmn}^{est} = \frac{1}{d} T_{lmn} \quad (21)$$

定义未知常量 ξ 为

$$\xi := \frac{1}{d} \quad (22)$$

将其代入式 (21), 有:

$$T_{lmn}^{est} = \xi T_{lmn} \quad (23)$$

因而得到了相差一未知常比例因子下的 2DDT 的估计, 并且该比例因子是 $\|{}^0\mathbf{t}_*\|$ 的倒数.

3 位置镇定

为了处理移动机器人的非完整约束限制, 本文首先设计了位置镇定控制器, 以使移动机器人运动至期望位置处; 之后设计姿态镇定控制器, 使其旋转至期望朝向, 进而完成镇定控制任务. 在本节中, 直接利用 2DDT 中的元素来构造位置误差信号, 然后求取位置误差的运动学方程, 进而设计一种反馈线性化控制器以实现机器人的位置镇定.

3.1 位置误差及其运动学方程求取

根据 2DDT 估计值的形式 (21) 与 (16), 定义系统的位置误差为

$$e_1 \triangleq T_{111}^{est} - T_{313}^{est}, \quad e_2 \triangleq T_{131}^{est} - T_{333}^{est} \quad (24)$$

将式 (21) 与 (16) 代入式 (24), 经整理可得:

$$\begin{cases} e_1 = \xi(c_{t_{*x}}c\alpha - c_{t_{*z}}s\alpha) \\ e_2 = \xi(-c_{t_{*x}}s\alpha - c_{t_{*z}}c\alpha) \end{cases} \quad (25)$$

将式 (25) 写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \xi \begin{bmatrix} -s\alpha & c\alpha \\ -c\alpha & -s\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{t_{*z}} \\ c_{t_{*x}} \end{bmatrix} \quad (26)$$

对等号右侧矩阵求取行列式可得:

$$\det(*) = \xi(s^2\alpha + c^2\alpha) = \xi \neq 0 \quad (27)$$

因而可知当 $e_1(t), e_2(t) = 0$ 时, 有 $c_{t_{*z}}(t), c_{t_{*x}}(t) = 0$, 即机器人运动到期望位置.

对式 (25) 关于时间求导有:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \xi(c_{t_{*x}}c\dot{\alpha} - c_{t_{*z}}s\dot{\alpha}) \\ \dot{e}_2 = \xi(-c_{t_{*x}}s\dot{\alpha} - c_{t_{*z}}c\dot{\alpha}) \end{cases} \quad (28)$$

将运动学模型 (9) 代入式 (28), 经过整理可得如下的开环误差方程:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \xi s\alpha v_c - e_2 w_c \\ \dot{e}_2 = \xi c\alpha v_c + e_1 w_c \end{cases} \quad (29)$$

其中, $s\alpha, c\alpha$ 可由 T_{lmn}^{est} 计算得到:

$$\begin{cases} s\alpha = \frac{T_{232}^{est}T_{313}^{est} - T_{212}^{est}T_{131}^{est}}{T_{232}^{est}T_{223}^{est} + T_{212}^{est}T_{221}^{est}} \\ c\alpha = \frac{T_{232}^{est}T_{113}^{est} + T_{212}^{est}T_{331}^{est}}{T_{232}^{est}T_{223}^{est} + T_{212}^{est}T_{221}^{est}} \end{cases} \quad (30)$$

3.2 位置控制器的设计与分析

将开环误差方程 (29) 写成如下的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi s\alpha & -e_2 \\ \xi c\alpha & e_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ w_c \end{bmatrix} \quad (31)$$

为便于描述, 将式 (31) 等号右边的矩阵标记为

$$M := \begin{bmatrix} \xi s\alpha & -e_2 \\ \xi c\alpha & e_1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

以 $\hat{M}^{-1}$ 表示对 M 的逆矩阵 M^{-1} 的估计, 可知其具体形式为

$$\hat{M}^{-1} = \frac{1}{\hat{\xi} s\alpha e_1 + c\alpha e_2} \begin{bmatrix} e_1 & e_2 \\ -\hat{\xi} c\alpha & \hat{\xi} s\alpha \end{bmatrix} \quad (33)$$

其中, $\hat{\xi}$ 表示对 ξ 的估计. 根据下文控制器稳定性的证明过程, 设定 $\hat{\xi}$ 的选取规则为

$$\hat{\xi} > 0 \quad (34)$$

本文将位置控制器设计为如下的反馈线性化形式:

$$\begin{bmatrix} v_c \\ w_c \end{bmatrix} = \hat{M}^{-1} \begin{bmatrix} -k_1 e_1 \\ -k_2 e_2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

其中, $k_1, k_2 \in \mathbf{R}^+$ 为控制增益. 将式 (33) 代入式 (35) 并整理, 可得控制器的展开形式为

$$\begin{cases} v_c = \frac{1 - k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2}{\hat{\xi} s \alpha e_1 + c \alpha e_2}, \\ w_c = \frac{k_1 e_1 c \alpha - k_2 e_2 s \alpha}{s \alpha e_1 + c \alpha e_2} \end{cases} \quad (36)$$

另外, 将式 (25) 代入控制律的分母部分, 可得

$$(s \alpha e_1 + c \alpha e_2) = -\xi^c t_{*z} \quad (37)$$

定理 1. 控制器 (35) 以及未知参数的选取规则式 (35), 可以保证式 (31) 中的误差信号以指数速度收敛至零.

证明. 首先将式 (35) 代入式 (31), 可得系统的闭环误差方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = M \hat{M}^{-1} \begin{bmatrix} -k_1 e_1 \\ -k_2 e_2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

根据式 (32) 和 (33), 可得 $M \hat{M}^{-1}$ 的具体形式为

$$M \hat{M}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\hat{\xi}} \frac{\xi s \alpha e_1 + e_2 \hat{\xi} c \alpha}{s \alpha e_1 + c \alpha e_2} & \frac{1}{\hat{\xi}} \frac{(\xi - \hat{\xi}) e_2 s \alpha}{s \alpha e_1 + c \alpha e_2} \\ \frac{1}{\hat{\xi}} \frac{(\xi - \hat{\xi}) c \alpha e_1}{s \alpha e_1 + c \alpha e_2} & \frac{1}{\hat{\xi}} \frac{\xi c \alpha e_2 + e_1 \hat{\xi} s \alpha}{s \alpha e_1 + c \alpha e_2} \end{bmatrix} \quad (39)$$

当 $-M \hat{M}^{-1}$ 为 Hurwitz 矩阵时, 式 (38) 中的误差信号以指数形式收敛至零^[31]. 为了求取 $(-M \hat{M}^{-1})$ 的特征根 λ , 首先计算与之相对应的特征方程:

$$|\lambda I_{2 \times 2} - (-M \hat{M}^{-1})| = 0 \quad (40)$$

将式 (39) 代入式 (40), 经过整理并化简可得:

$$\lambda^2 + \frac{1}{\hat{\xi}}(\xi + \hat{\xi})\lambda + \frac{\xi}{\hat{\xi}} = 0 \quad (41)$$

根据方程 (41), 可解得 λ 的两个常实特征根为

$$\lambda_1 = -1, \quad \lambda_2 = -\frac{\xi}{\hat{\xi}} \quad (42)$$

可知 $\hat{\xi}$ 的选取规则 (34) 能够保证 λ 的两个解为负实数. 因此定理 1 成立. $\square$

注 1. 根据式 (36) 和 (37), 并考虑到该阶段控制器的镇定轨迹, 可知当移动机器人运动至期望位置时才有可能出现奇异现象. 为了处理该问题, 需对 $e_1(t), e_2(t)$ 设定可接受的误差阈值, 当镇定过程中 $e_1(t), e_2(t)$ 小于该阈值时, 便认为机器人已经到达期望位置处. 之后把算法切换至下一步骤的姿态镇定环节.

注 2. 根据镇定控制器的具体形式 (36), 可知其分子分母均包含系统误差, 且分子误差的阶次不小于分母误差的阶次. 因此很大程度上降低了当 $e_1(t), e_2(t)$ 接近或等于零时, 系统出现奇异的可能性. 通过大量的仿真与实验测试, 发现控制量未出现奇异现象. 对于系统误差为零时, 控制器是否出现奇异问题, 课题组将在今后的工作中进行理论上的分析.

4 姿态镇定

当移动机器人运动至期望位置后, 利用本节的姿态镇定控制器使其旋转至期望朝向. 为了设计该控制器, 本节选取 T_{133}^{est} 作为旋转误差:

$$e_3 := T_{331}^{est} \quad (43)$$

根据 T_{331}^{est} 的形式 (21), 以及当机器人运动至期望位置时 ${}^c t_{*x} = 0$, 可知当 $e_3(t) = 0$ 时, $s\theta = 0$. 根据机器人在位置镇定过程中的运动轨迹以及系统满足 FOV 约束的假设, 可知 $\theta(t)$ 的范围处于 $\pm\pi/2$ 之间. 因此当 $s\theta = 0$ 时, 可以得到 $\theta(t) = 0$ 的结果.

对式 (43) 关于时间求导有:

$$\dot{e}_3 = \frac{1}{d}({}^c \dot{t}_{*x} c \alpha - {}^0 t_{*z} c \theta \dot{\theta}) \quad (44)$$

将摄像机的运动学模型式 (9) 代入式 (44), 可得系统开环误差方程为

$$\dot{e}_3 = \frac{1}{d}({}^c t_{*z} c \alpha - {}^0 t_{*z} c \theta) w_c \quad (45)$$

考虑到 2DTT 的定义 (21) 和 (16), 式 (45) 可变换为

$$\dot{e}_3 = T_{333}^{est} w_c \quad (46)$$

因而将姿态镇定控制器设计为

$$v_c = 0, \quad w_c = -k_3 \frac{e_3}{T_{333}^{est}} \quad (47)$$

其中, $k_3 \in \mathbf{R}^+$ 为控制增益. 根据 T_{333}^{est} 的形式 (21), 可知 T_{333}^{est} 在机器人的姿态镇定环节中不会出现奇异现象. 将式 (47) 带入式 (46) 可得闭环误差方程为

$$\dot{e}_3 = -k_3 e_3 \quad (48)$$

因此可知比例姿态控制器 (47) 能使旋转误差以指数速度收敛至零.

5 仿真与实验结果

对于本文提出的基于 2DTT 的视觉镇定控制策略, 本节分别进行了仿真与实验验证. 首先在含有图像噪声的情况下进行了仿真测试, 以检验本文方法对图像噪声的鲁棒性. 之后进行了实验测试, 仿真与实验结果表明, 该方法使机器人呈现出高效的镇定运动轨迹, 具有良好的控制性能.

5.1 仿真结果

设定机器人的初始位姿为 $(-6\text{ m}, 3.5\text{ m}, 8^\circ)$, 期望位姿为 $(0\text{ m}, 0\text{ m}, 0^\circ)$. 利用 3 个特征点对三焦点张量进行估计. e_1, e_2 的阈值设定为 $\sqrt{e_1^2 + e_2^2} \leq 0.02$, 控制增益及 $\hat{\xi}$ 分别设置为

$$k_1 = 3.2, \quad k_2 = 0.3, \quad k_3 = 1.2, \quad \hat{\xi} = 1.3\xi \quad (49)$$

为了更接近系统的真实情况, 本文在仿真中对图像特征点加入了 $\sigma = 0.15$ 的高斯白噪声.

图 2 给出了仿真测试中机器人的运动路径, 可见本文方法在第一阶段将机器人镇定至期望位置处, 在第二阶段使机器人纯旋转至期望姿态, 呈现出了高效的镇定路径. 此外, 根据仿真结果可知该方法对图像噪声具有较好的鲁棒性.

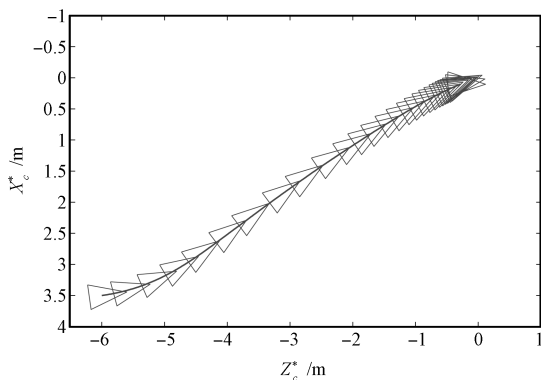


图 2 仿真结果: 机器人的运动路径

Fig. 2 Simulation results: the path of the robot

5.2 实验结果

在仿真测试的基础上, 本文以实验结果来进一步说明所设计的视觉镇定控制方法的良好性能. 如图 3 所示, 实验中采用的移动机器人平台为 P3-DX, 其上安装有 SV400 型摄像机. 场景中存在 3 个特征点用来估计 2DTT (两正方形对顶处的角点). 本文在 Visual Studio 2005 以及 OpenCV 环境下进行

了编程实现. 系统的采样速率为 46 帧/秒, 满足视觉伺服实时性的要求.

为了更好地说明本文方法的性能, 在实验中选择了如下 4 个不同的初始位姿 (m, m, deg):

$$\begin{aligned} &(-1.2, -0.4, 0), (-1.2, -0.4, 30) \\ &(-1.2, 0.1, -10), (-1.1, 0.3, 1) \end{aligned} \quad (50)$$



图 3 实验场景

Fig. 3 Experimental scene

移动机器人的期望位姿为 $(0\text{ m}, 0\text{ m}, 0^\circ)$. e_1, e_2 的阈值设定为 $\sqrt{e_1^2 + e_2^2} \leq 0.02$, 控制增益与系统相关参数设置为

$$k_1 = 1.6, \quad k_2 = 0.8, \quad k_3 = 0.5, \quad \hat{\xi} = 2 \quad (51)$$

移动机器人的运动路径如图 4 所示, 其中三角形表示相应路径上的移动机器人的姿态. 为了表述简洁, 本文把初始位姿为 $(-1.1, 0.3, 1)$ 的路径上的姿态全部给出, 对于其他三条路径仅给出了部分姿态. 由图 4 可知, 在相同控制增益与系统参数 (51) 条件下, 移动机器人均可高效运动至期望位姿处, 展现出较好的镇定控制效果. 由于存在阈值设置与图像噪声等因素, 会存在可接受的稳态误差. 镇定过程中的稳态误差在表 1 中给出, 其中距离误差由最终位姿的前两维取模长并四舍五入得到. 可知最大距离误差为 5.1 cm, 平均距离误差为 3.7 cm; 最大角度误差为 0.9° , 平均角度误差为 0.6° . 从表 1 可知, 移动机器人的最终位姿均与期望位姿非常接近, 表现出了较高的镇定精度.

对于初始位姿为 $(-1.1, 0.3, 1)$ 的情况, 图 5~7 给出了相应的实验数据. 图 5 给出了移动机器人的位姿变化曲线, 其中 Stage I 与 Stage II 分别表示位置镇定阶段与姿态镇定阶段, 可见机器人在第一阶段中运动至期望位置处, 在第二阶段中旋转至期望朝向. 图 6 给出了机器人的线速度与角速度的变化曲线. 图 4 与图 5 中的位姿信息是由机器人底层码盘获得; 图 6 中的速度信息由机器人底层速度计算

模块获得. 图 7 给出了图像特征点的轨迹, 其中星形点与圆形点分别表示机器人在期望位姿处与初始位姿处对应的图像特征点. 可以看出, 随着移动机器人的运动, 当前图像逐渐与期望图像相重合, 这也说明了移动机器人成功地到达期望位姿处.

表 1 稳态误差

Table 1 Steady states errors

初始位姿 (m, m, °)	最终位姿 (m, m, °)	距离误差 (cm)
(-1.2, -0.4, 0)	(-0.02, -0.01, -0.9)	2.2
(-1.2, -0.4, 30)	(-0.04, -0.01, -0.6)	4.1
(-1.2, 0.1, -10)	(-0.03, 0.01, 0.5)	3.2
(-1.1, 0.3, 1)	(-0.05, 0.01, 0.3)	5.1

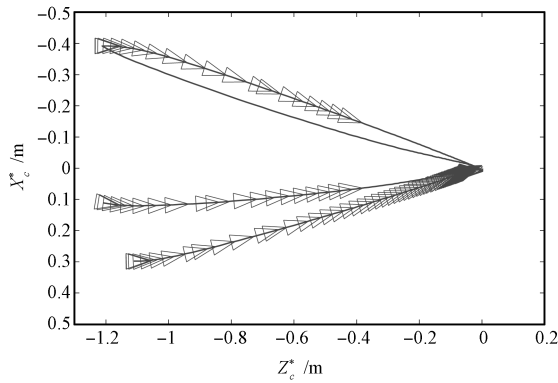


图 4 实验结果: 移动机器人的运动路径

Fig. 4 Experimental results: the paths of the robot

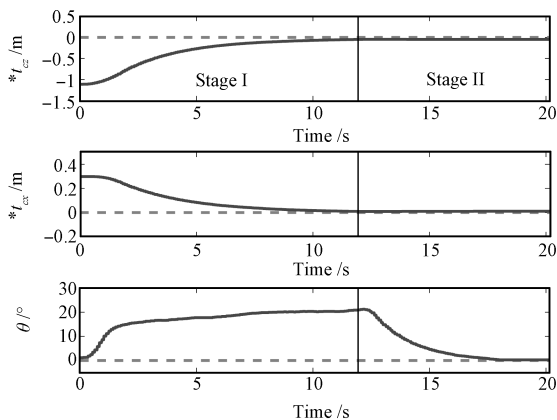
图 5 实验结果: 移动机器人位姿的变化
(初始位姿为 (-1.1, 0.3, 1))

Fig. 5 Experimental results: evolution of the robot pose with respect to the initial pose (-1.1, 0.3, 1)

当摄像机与特征点相距较远时, 易知特征点的周围区域在图像上会变得很小, 因此不利于图像特

征点的检测与跟踪. 考虑到这一问题, 本文在实验中未使初始位姿与期望位姿的偏差较大.

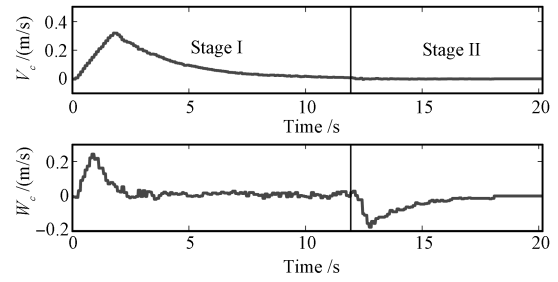
图 6 实验结果: 机器人速度量的变化
(初始位姿为 (-1.1, 0.3, 1))

Fig. 6 Experimental results: velocities of the robot with respect to the initial pose (-1.1, 0.3, 1)

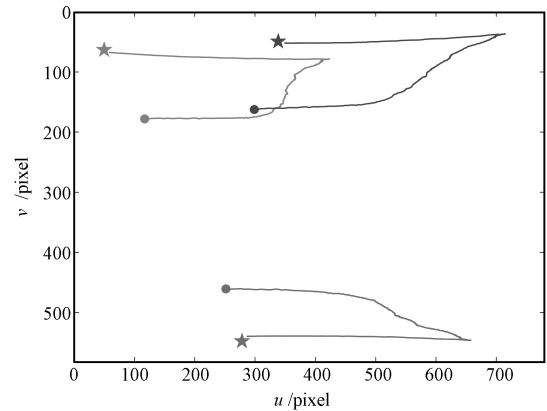
图 7 实验结果: 图像特征点的轨迹变化
(初始位姿为 (-1.1, 0.3, 1))

Fig. 7 Experimental results: image trajectory of the features with respect to the initial pose (-1.1, 0.3, 1)

6 结论

本文针对单目视觉移动机器人系统, 提出了一种基于 2DTT 的视觉伺服镇定控制算法. 具体而言, 首先描述了 2DTT 的导出与估计方法; 然后根据 2DTT 中的元素, 依次设计了反馈线性化位置控制器与比例姿态控制器, 实现了在平移信息与场景信息均未知情况下的机器人视觉镇定控制. 通过理论分析证明了本文的镇定控制算法具有指数收敛的性能. 相比已有方法, 本文提出的视觉镇定控制策略更为充分地利用了伺服过程中的图像, 因而对图像噪声等不确定因素具有更强的鲁棒性; 并且它同时适用于平面场景与立体场景. 仿真与实验结果验证了本文方法的有效性. 后续工作将致力于在理论上分析控制增益与机器人运动轨迹之间的关系, 最终在保证 FOV 的前提下获得最优镇定轨迹.

References

- 1 Chaumette F, Hutchinson S. Visual servo control Part I: basic approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006, **13**(4): 82–90
- 2 Hu G, MacKunis W, Gans N, Dixon W, Chen J, Behal A, Dawson D. Homography-based visual servo control with imperfect camera calibration. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, **54**(6): 1318–1324
- 3 Liu Y H, Wang H, Chen W, Zhou D. Adaptive visual servoing using common image features with unknown geometric parameters. *Automatica*, 2013, **49**(8): 2453–2460.
- 4 Chesi G, Shen T T. Conferring robustness to path-planning for image-based control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, **20**(4): 950–959
- 5 Gans N R, Hu G, Shen J, Zhang Y, Dixon W. Adaptive visual servo control to simultaneously stabilize image and pose error. *Mechatronics*, 2012, **22**(4): 410–422
- 6 Ma Hong-Yu, Su Jian-Bo. Uncalibrated robotic 3D hand-eye coordination based on auto disturbance rejection controller. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(3): 400–406
(马红雨, 苏剑波. 基于自抗扰控制器的机器人无标定三维手眼协调. 自动化学报, 2004, **30**(3): 400–406)
- 7 Jean J H, Lian F L. Robust visual servo control of a mobile robot for object tracking using shape parameters. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, **20**(6): 1461–1472
- 8 Wang Y, Lang H X, Silva C W. A hybrid visual servo controller for robust grasping by wheeled mobile robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, **15**(5): 757–769
- 9 Cherubini A, Chaumette F. Visual navigation of a mobile robot with laser-based collision avoidance. *The International Journal of Robotic Research*, 2013, **32**(2): 189–205
- 10 Yang F, Wang C L. Adaptive stabilization for uncertain nonholonomic dynamic mobile robots based on visual servoing feedback. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(7): 857–864
- 11 Oriolo G, Luca D A, Vendittelli M. WMR via dynamic feedback linearization: design, implementation, and experimental validation. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2002, **10**(6): 835–852
- 12 Dixon W E, Queiroz de M S, Dawson D M, Flynn T J. Adaptive tracking and regulation of a wheeled mobile robot with controller/update law modularity. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, **12**(1): 138–147
- 13 Cao Zheng-Cai, Yin Long-Jie, Fu Yi-Li, Liu Tian-Long. Predictive control for visual servo stabilization of nonholonomic mobile robots. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(8): 1238–1245
(曹政才, 殷龙杰, 付宜利, 刘天龙. 基于预测控制的非完整移动机器人视觉伺服镇定. 自动化学报, 2013, **39**(8): 1238–1245)
- 14 Janabi-Sharifi F, Deng L, Wilson W J. Comparison of basic visual servoing methods. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, **16**(5): 967–983
- 15 Luca A D, Oriolo G, Giordano P R. Feature depth observation for image-based visual servoing: theory and experiments. *International Journal of Robotic Research*, 2008, **27**(10): 1093–1116
- 16 Fang Y, Dixon W E, Dawson D M, Chawda P. Homography-based visual servo regulation of mobile robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B — Cybernetics*, 2005, **35**(5): 1041–1050
- 17 Zhang X B, Fang Y C, Liu X. Motion-estimation-based visual servoing of nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, **27**(6): 1167–1175
- 18 Lopez-Nicolas G, Gans N R, Bhattacharya S, Sagues C, Guerrero J J, Hutchinson S. Homography-based control scheme for mobile robots with nonholonomic and field-of-view constraints. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B — Cybernetics*, 2010, **40**(4): 1115–1127
- 19 Fang Y C, Liu X, Zhang X B. Adaptive active visual servoing of nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, **59**(1): 486–497
- 20 Li Bao-Quan, Fang Yong-Chun, Zhang Xue-Bo, He Wan-Feng. Selection-strategy-based visual servo regulation of wheeled mobile robots. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2012, **32**(6): 750–767
(李宝全, 方勇纯, 张雪波, 何万峰. 基于选择策略的移动机器人视觉伺服镇定方法. 系统科学与数学, 2012, **32**(6): 750–767)
- 21 Mariottini G L, Oriolo G, Prattichizzo D. Image-based visual servoing for nonholonomic mobile robots using epipolar geometry. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, **23**(1): 87–100
- 22 Becerra H M, Lopez-Nicolas G, Sagues C. A sliding-mode-control law for mobile robots based on epipolar visual servoing from three views. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, **27**(1): 175–183
- 23 Li B Q, Fang Y C, Zhang X B. Uncalibrated visual servoing of nonholonomic mobile robots. In: *Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Tokyo, Japan: IEEE, 2013. 584–589
- 24 Hartley R, Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision (2nd Edition)*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003
- 25 Guerrero J J, Murillo A C, Sagues C. Localization and matching using the planar trifocal tensor with bearing only data. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, **24**(2): 494–501
- 26 Becerra H M, Sagues C. Exploiting the trifocal tensor in dynamic pose estimation for visual control. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2013, **21**(5): 1931–1939

- 27 Becerra H M, Lopez-Nicolas G, Sagues C. Omnidirectional visual control of mobile robots based on the 1D trifocal tensor. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, **58**(6): 796–808
- 28 Lopez-Nicolas G, Guerrero J J, Sagues C. Visual control through the trifocal tensor for nonholonomic robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, **58**(2): 216–226
- 29 Dixon W E, Dawson D M, Zergeroglu E, Behal A. *Nonlinear Control of Wheeled Mobile Robots*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001
- 30 Craig J J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control* (3rd Edition). NJ: Prentice-Hall, 2005
- 31 Slotine J J, Li W. *Applied Nonlinear Control*. Englewood Cliff, NJ: Prentice Hall, Inc., 1991



李宝全 南开大学机器人与信息自动化研究所博士研究生. 2010 年于南开大学获得工学学士学位. 2013 年至 2014 年于新加坡南洋理工大学公派联合培养. 主要研究方向为计算机视觉, 视觉伺服和移动机器人.

E-mail: libq@robot.nankai.edu.cn

(**LI Bao-Quan** Ph.D. candidate at the Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University. He received his bachelor degree from Nankai University in 2010. From 2013 to 2014, he was a joint Ph.D. student at Nanyang Technological University in Singapore awarded by China Scholarship Council. His research interest covers computer vision, visual servoing, and mobile robots.)



方勇纯 南开大学机器人与信息自动化研究所教授. 2002 年于美国克莱姆森大学获得博士学位. 主要研究方向为视觉伺服, 微纳米控制系统, 非线性控制以及欠驱动系统控制. 本文通信作者.

E-mail: yfang@robot.nankai.edu.cn

(**FANG Yong-Chun** Professor at the Institute of Robotics and Automatic Information System (IRAIS), Nankai University. He received his Ph.D. degree from Clemson University, USA in 2002. His research interest covers visual servoing, micro/nano control systems, nonlinear control, and underactuated systems control. Corresponding author of this paper.)



张雪波 南开大学机器人与信息自动化研究所副教授. 2006 年于天津大学自动化专业获得工学学士学位, 2011 年于南开大学控制理论与控制工程专业获博士学位. 主要研究方向为移动机器人, 运动规划, 视觉伺服以及多摄像机传感网络.

E-mail: zhangxb@robot.nankai.edu.cn

(**ZHANG Xue-Bo** Associate professor at the Institute of Robotics and Automatic Information System (IRAIS), Nankai University. He received his bachelor degree in automation from Tianjin University in 2006, and the Ph.D. degree in control theory and control engineering from Nankai University in 2011. His research interest covers mobile robots, motion planning, visual servoing, and visual sensor network.)