

基于图像的双臂模糊自适应轨迹跟踪控制

王 勇^{1,2}, 刘 治^{1†}

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广州 510006; 2. 广东外语外贸大学 教育技术中心, 广州 510420)

摘 要: 在固定相机的监视下, 随机位姿的目标物体在双臂系统的控制下执行轨迹跟踪控制任务时, 既要考虑目标随机位姿引起的运动学和动力学不确定性问题, 还要考虑运动学和动力学的协同问题. 针对上述问题, 分别采用自适应方法估计目标质心和特征点的位置信息, 利用模糊逻辑系统逼近系统的动力学模型, 使用分散控制策略处理双臂的协同问题, 最后基于位置/力混合控制方法设计基于图像的双臂模糊自适应轨迹跟踪控制器, 并采用李亚普诺夫方法证明系统的稳定性. 仿真实验验证了所设计控制器的有效性.

关键词: 视觉伺服; 双臂系统; 协同控制; 轨迹跟踪控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Image based fuzzy adaptive trajectory tracking control for dual-arm system

WANG Yong^{1,2}, LIU Zhi^{1†}

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Center of Education Technology, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou 510420, China)

Abstract: When a target object with random orientation grasped by a dual-arm system carries out a trajectory tracking task under the sight of a fixed camera, not only the uncertainties in kinematics and dynamics generated from random orientation of the target object should be taken into consideration, but also the cooperation in kinematics and dynamics does. To address such problems, the adaptive method is adopted to estimate the position information of the mass center and feature points, the fuzzy logic system is used to approximate the unknown dynamics model, and the decentralized method is utilized to cope with the cooperation problem for dual-arm. The image based fuzzy adaptive trajectory tracking controller for the dual-arm system is designed on the basis of the position/force hybrid control method, and the system stability is rigorously proved by using Lyapunov method. Finally, the effectiveness of the proposed controller is demonstrated in the simulation of trajectory tracking.

Keywords: visual servoing; dual-arm system; cooperative control; trajectory tracking control

0 引 言

最近的谷歌人工智能 AlphaGo 机器人战胜李世石事件再次引爆关于机器人战胜人类的大讨论. 机器人技术是多种学科技术的融合, 其中包括人工智能技术、自动控制技术、传感器技术、机器视觉技术和计算机技术等. 相机作为传感器的一种, 因获取信息量大、适用范围广、非接触性等优点成为机器人身上最重要的传感器之一. 它可以帮助机器人获得周围的环境信息和任务信息, 然后利用这些获得的信息进行导航避障和控制任务等. 视觉伺服技术是一种利用相机获得目标的状态信息并且根据获得的信息进行机器人运动控制的方法. 根据任务控制误

差定义的不同, 视觉伺服方法可以分为两类, 一类是基于图像的视觉伺服^[1-8], 另一类是基于位置的视觉伺服^[9-11]. 基于图像的视觉伺服方法直接使用相机反馈的目标图像信息, 在图像空间上定义控制误差, 然后通过图像雅可比矩阵将控制误差映射到关节空间来驱动机械臂的运动. 而在基于位置的视觉伺服方法中, 相机则只是作为一种获得目标位置信息的传感器, 将相机反馈的目标图像信息计算转换成笛卡尔空间的位置信息, 然后根据控制任务控制机械臂的运动. 在视觉伺服方法中, 相机参数会影响系统的控制精度, 尤其对于基于位置的视觉伺服方法. 为了克服应用过程中复杂的相机标定问题, 文献[6, 12-14]提

收稿日期: 2016-05-04; 修回日期: 2016-11-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573108).

作者简介: 王勇(1977—), 男, 博士生, 从事视觉伺服、自适应控制、模糊控制的研究; 刘治(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事机器人控制、模糊控制等研究.

†通讯作者. E-mail: lz@gdut.edu.cn

出了相机参数自适应估计方法,此方法要求系统的运动学参数和特征点的位置已知.当系统的运动学参数和特征点位置未知时,即运动学方程存在不确定性时,这种基于未标定的视觉控制方法没办法应用.另外,文献[6,12-14]中的机械臂都是空载状态,特征点选取在机械臂末端上.当机械臂以随机的姿态夹持一个体积和重量都未知的普通物体时,系统的运动学方程和动力学方程会存在不确定性.另外,由于视觉反馈是一种三维信息到二维信息的映射,在映射过程中丢失了深度信息.针对上述问题,文献[2,7]采用运动学和动力学参数自适应方法和特征点深度估计方法设计了轨迹跟踪控制器.由于图像易受到成像过程中各种噪声的干扰,且视觉速度是通过差分计算得到,视觉速度的精确度不高.文献[15]利用特征点速度的投影映射替代视觉速度,即通过图像雅可比矩阵的估计计算视觉速度的估计.针对文献[15]中的过参数化问题,文献[2]设计了视觉速度观测器,在控制器设计上使用观测的视觉速度替代差分计算得到的视觉速度.

上述这些视觉伺服方法都是针对单机械臂的,而且很多是针对空载状态下的单机械臂.当目标物体的体积和重量都较大时,单机械臂难以完成各种各样的复杂操控任务,这时就需要双臂或者多机械臂机器人来完成操控任务.与单臂机器人相比,多机械臂机器人在灵活性、适应性和工作效率方面具有巨大优势.例如,搬运重物、组装大型工件,又如做家务劳动、打扫卫生等.因此,多机械臂机器人一直是机器人研究领域中的热点.与单机械臂的视觉伺服控制相比,多机械臂协同下的视觉伺服控制要复杂得多.首先,当多个末端执行器牢固地抓紧目标对象时,多机械臂将构成一个运动学“闭链”系统.为实现预定的工作任务,多机械臂之间必须能够实现运动学和动力学的协同.因此,在运动过程中要保证机械臂的末端、末端执行器和操作对象之间的相对位置关系始终保持不变,即运动学上的协同.在保证运动学协同的基础上,还要做到控制过程的平稳连续,因此还要保证动力学上的协同.另外,还要考虑因位置控制误差在目标物体上形成的夹持力,较大的位置控制误差会在目标物体上形成较大的夹持力,较大的夹持力可能会损坏目标物体,因此有必要控制目标物体上的夹持力大小.综上所述,多机械臂下的视觉伺服控制比单机械臂下的视觉伺服控制要复杂很多.针对“闭链”系统中的动力学不确定性问题,在文献[16-18]和文献[19-20]中分别采用模糊逻辑系统和神经网络逼近解决.由于控制任务中的位置控制和力控制的正交性,在文献[16-20]中采用了基于位置/力混合的控制方

法.另外,为了获得良好的柔顺控制效果,在文献[21-23]中采用了阻抗控制方法.本文考虑最一般的场景,在“手眼”相机监视的非结构环境下,体积和重量未知的目标对象以随机的姿态在双臂系统的控制下进行运动.由于目标对象的体积和重量未知,且目标以随机的姿态被夹持,造成双臂系统存在运动学和动力学上的不确定性.为了解决运动学方面的不确定性,采用自适应方法估计未知的运动学参数^[2,8,24].针对动力学方面的不确定性,采用模糊逻辑系统逼近的方法解决^[16-18].针对运动学和动力学方面的协同问题,采用分散控制方法解决.最后,采用位置/力混合控制方式,设计了基于图像的双臂模糊自适应轨迹跟踪控制器.

所提方法与前文提到的视觉伺服控制方法相比,除了能够处理普遍存在的运动学和动力学不确定性问题以外,还能处理双臂控制中存在的运动学和动力学协同问题,由此解决了随机位姿目标在双臂系统下的视觉轨迹跟踪控制问题.同时,此方法还可直接扩展到面向多机械臂的视觉轨迹跟踪控制研究中.

1 双臂系统

1.1 运动学

如图1所示,采用“手眼”配置的相机固定在双机械臂系统的操作空间内,用于实时监视双机械臂系统的操作情况.目标对象的质心 o 点如图2所示.

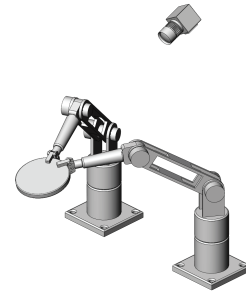


图1 视觉系统

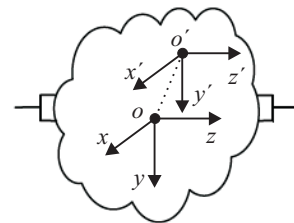


图2 目标坐标系及估计

作为目标坐标系的原点,其在水坐标系的位置 $x \in \mathbf{R}^{n_p+o}$ 可以表示为

$$x = \phi_1(q_1) = \phi_2(q_2). \quad (1)$$

其中: $n_p+o = n_p + n_o$, n_p 和 n_o 分别表示位置和位姿的自由度; $q_i \in \mathbf{R}^{n_i}$ 表示机械臂 i 的关节向量; n_i 表示

机械臂 i 的自由度, $i = 1, 2$. 将式(1)两端对时间求导, 可得质心速度与关节速度的关系式为

$$\dot{x} = J_i(q_i)\dot{q}_i. \quad (2)$$

其中: \dot{x} 表示质心速度, \dot{q}_i 表示关节速度, $J_i(q_i)$ 表示从目标质心到关节向量 q_i 的雅可比矩阵. 将式(2)两端继续对时间求导, 可得目标质心的加速度为

$$\ddot{x} = J_i(q_i)\ddot{q}_i + \dot{J}_i(q_i)\dot{q}_i. \quad (3)$$

其中: \ddot{x} 表示质心加速度, \ddot{q}_i 表示机械臂 i 的关节加速度, $\dot{J}_i(q_i)$ 表示 $J_i(q_i)$ 的导数.

1.2 相机模型

特征点 p_k 在世界坐标系下的坐标是 $x_k \in \mathbf{R}^3$, $k = 1, 2, \dots, m$, 经过相机的投影作用, 在图像上的像点 $y_k \in \mathbf{R}^2$ 可以表示为

$$\begin{bmatrix} y_k(t) \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{\Psi\Omega}{z_k(t)} \begin{bmatrix} x_k(t) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

其中: $\Omega \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ 表示从世界坐标系到相机坐标系的变换矩阵, 又称为相机的外参数; $\Psi \in \mathbf{R}^{3 \times 4}$ 表示相机的内参数; $z_k(t)$ 表示特征点 $x_k(t)$ 在相机坐标系下到零点的距离, 且有

$$z_k(t) = P_3^T \times \begin{bmatrix} x_k(t) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

P_3 表示由 P 矩阵中的第3行元素组成的向量, $P = \Psi\Omega$. 对式(4)求导可得

$$\dot{y}_k(t) = \frac{A_k(t)}{z_k(t)} \dot{x}_k(t). \quad (6)$$

其中

$$A_k(t) = \begin{bmatrix} P_{(1 \times 3)}^T \\ P_{(2 \times 3)}^T \end{bmatrix} - y_k(t)P_{(3 \times 3)}^T,$$

$P_{m \times n}$ 表示由矩阵 P 的第 m 行的 $1 - n$ 列构成的向量; $\dot{y}_k(t)$ 表示特征点 p_k 的视觉速度. 综合式(2)和(6), 有

$$\dot{y}_k(t) = \frac{A_k(t)}{z_k(t)} J_{ik}(q_i)\dot{q}_i, \quad (7)$$

其中 $J_{ik}(q_i)$ 表示关于特征点 p_k 的雅可比矩阵. 考虑 m 个特征点, 当 $n_p = 3$ 且 $n_o = 3$ 时, 由式(7)可得

$$\dot{Y}(t) = Z^{-1}(t) \underbrace{\mathbf{A}(t)J_B J_i(q_i)}_{J_{Y_i}} \dot{q}_i. \quad (8)$$

其中

$$\dot{Y}(t) = [\dot{y}_1^T, \dot{y}_2^T, \dots, \dot{y}_m^T]^T,$$

$$Z(t) = \text{diag}(z_1 I_2, z_2 I_2, \dots, z_m I_2),$$

$$\mathbf{A}(t) = \text{diag}(A_1, A_2, \dots, A_m),$$

$$J_B = \begin{bmatrix} I_3 & B_1 \\ \vdots & \vdots \\ I_3 & B_m \end{bmatrix}, \quad B_k = \begin{bmatrix} 0 & -b_{k3} & b_{k2} \\ b_{k3} & 0 & -b_{k1} \\ -b_{k2} & b_{k1} & 0 \end{bmatrix},$$

向量 $[b_{k1}, b_{k2}, b_{k3}]^T$ 表示在世界坐标系下特征点 p_k 与质心位置的相对位置关系.

当 $n_p = 2$ 且 $n_o = 1$ 时, 式(8)中的 J_B 则对应

新的形式 $\begin{bmatrix} I_2 & B_1 \\ \vdots & \vdots \\ I_2 & B_m \end{bmatrix}$. 另外, 由于随机的目标姿态或

者目标质地不均, 造成目标坐标系 $o-xyz$ 与其估计 $o'-x'y'z'$ 的差异, 如图2所示, 因此造成了目标质心位置到执行器的距离不确定和从特征点到质心估计位置的不确定. 由式(2)可得目标质心速度的估计

$$\hat{\dot{x}} = \hat{J}_i(q_i)\dot{q}_i. \quad (9)$$

其中: $\hat{\dot{x}}$ 表示质心速度的估计, $\hat{J}_i(q_i)$ 表示雅可比矩阵的估计. 另外, 由于运动学参数的不确定性, 由式(8)可得特征点视觉速度的估计

$$\hat{Y}(t) = \hat{Z}^{-1}(t) \underbrace{\mathbf{A}(t)\hat{J}_B \hat{J}_i(q_i)}_{\hat{J}_{Y_i}} \dot{q}_i. \quad (10)$$

其中

$$\hat{Y}(t) = [\hat{y}_1^T, \hat{y}_2^T, \dots, \hat{y}_m^T],$$

$$\hat{Z}(t) = \text{diag}(\hat{z}_1 I_2, \hat{z}_2 I_2, \dots, \hat{z}_m I_2),$$

$$\hat{J}_B = \begin{bmatrix} I_3 & \hat{B}_1 \\ \vdots & \vdots \\ I_3 & \hat{B}_m \end{bmatrix}.$$

另外, 根据文献[2, 7], 式(2)、(8)、(9)可以写成回归矩阵的形式

$$\dot{x} = \Gamma_x(q_i, \dot{q}_i)\Theta_i, \quad (11)$$

$$\hat{\dot{x}} = \Gamma_x(q_i, \dot{q}_i)\hat{\Theta}_i, \quad (12)$$

$$J_{Y_i}\dot{q}_i = \Gamma_Y(q_i, \dot{q}_i)\Theta_i, \quad (13)$$

$$\hat{J}_{Y_i}\dot{q}_i = \Gamma_Y(q_i, \dot{q}_i)\hat{\Theta}_i, \quad (14)$$

$$Z\dot{Y} = \Gamma_Z(q_i, \dot{Y})\Theta_i, \quad (15)$$

$$\hat{Z}\hat{Y} = \Gamma_Z(q_i, \dot{Y})\hat{\Theta}_i. \quad (16)$$

其中: $\Gamma_x(q_i, \dot{q}_i)$ 、 $\Gamma_Y(q_i, \dot{q}_i)$ 和 $\Gamma_Z(q_i, \dot{Y})$ 分别表示导出的回归矩阵; $\Theta_i = [\theta_{io}^T, \theta_{i1}^T, \dots, \theta_{im}^T]^T$, θ_{io} 表示关于机械臂杆长和质心位置的向量, θ_{ik} 表示特征点 p_k 到目标质心距离的向量, 符号 $\hat{\Theta}_i$ 表示 Θ_i 的估计.

1.3 动力学

使用拉格朗日方法, 机械臂 i 的动力学方程可以写成如下形式:

$$\mathbf{M}_i(q_i)\ddot{q}_i + \mathbf{C}_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + \mathbf{G}_i(q_i) - J_{e_i}^T(q_i)F_{e_i} = \tau_i. \quad (17)$$

其中: $\mathbf{M}_i(q_i)$ 表示机械臂 i 的正定惯性矩阵, $\mathbf{C}_i(q_i, \dot{q}_i)$ 表示哥式力和向心力矩阵, $\mathbf{G}_i(q_i)$ 表示重力向量, F_{e_i} 表示目标对末端执行器 i 的作用力, J_{e_i} 表示从末端执行器到机械臂 i 关节的雅可比矩阵, τ_i 表示机械臂 i 上的驱动力. 另外, 目标对象的动力学方程可以写成

$$\mathbf{M}_o(x)\ddot{x} + \mathbf{C}_o(x, \dot{x})\dot{x} + \mathbf{G}_o(x) = F_o. \quad (18)$$

其中: $x(t)$ 表示目标质心在世界坐标系的位置, $\mathbf{M}_o(x)$ 表示目标对象的正定惯性矩阵, $\mathbf{C}_o(x, \dot{x})$ 表

示目标的哥式力和向心力矩阵, $\mathbf{G}_o(x)$ 表示重力向量, F_o 表示双臂系统对目标的合作用力. 根据机械臂 i 的受力分析可以得到

$$F_{ce_i} = J_{ce_i}^T(x) F_{e_i}. \quad (19)$$

其中: $J_{ce_i}^T(x)$ 表示从目标质心到机械臂 i 末端的雅可比矩阵, F_{ce_i} 表示目标对机械臂 i 的作用力. 根据力的合成与分解, 目标受到的合力可以写成

$$F_o = -(F_{ce_1} + F_{ce_2}). \quad (20)$$

另外, 根据作用力对目标运动的贡献, 可将 F_{ce_i} 分解为

$$F_{ce_i} = f_i + f_{o_i}. \quad (21)$$

其中: f_{o_i} 表示作用于目标运动的力, f_i 表示作用在目标上的内力, 且有

$$f_1 + f_2 = 0. \quad (22)$$

结合式(18)和(21), 可得

$$\mathbf{M}_o(x)\ddot{x}(t) + \mathbf{C}_o(x, \dot{x})\dot{x}(t) + \mathbf{G}_o(x) = -(f_{o_1} + f_{o_2}). \quad (23)$$

假设机械臂 i 对目标运动的贡献率为 $c_i(t) = f_{o_i}/(f_{o_1} + f_{o_2})$, 即其所承担的目标负载的占比, 那么 f_{o_i} 可以写成

$$-c_i(t)(\mathbf{M}_o(x)\ddot{x}(t) + \mathbf{C}_o(x, \dot{x})\dot{x}(t) + \mathbf{G}_o(x)) = f_{o_i}. \quad (24)$$

因此, 耦合目标对象的机械臂 i 的动力学方程可以写成如下形式:

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i(t) + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i(t) + G_i(q_i) - J_i^T(q_i)f_i = \tau_i. \quad (25)$$

其中

$$\begin{aligned} M_i(q_i) &= \mathbf{M}_i(q_i) + c_i(t)\mathbf{M}_o(q_i), \\ C_i(q_i, \dot{q}_i) &= \mathbf{C}_i(q_i, \dot{q}_i) + c_i(t)(\dot{\mathbf{M}}_o(q_i) + \mathbf{C}_o(q_i, \dot{q}_i)), \\ G_i(q_i) &= \mathbf{G}_i(q_i) + c_i(t)\mathbf{G}_o(q_i), \\ \mathbf{M}_o(q_i) &= J_i^T(q_i)\mathbf{M}_o(x)J_i(q_i), \\ \mathbf{C}_o(q_i, \dot{q}_i) &= J_i^T(q_i)\mathbf{C}_o(x, \dot{x})J_i(q_i), \\ \mathbf{G}_o(q_i) &= J_i^T(q_i)\mathbf{G}_o(x). \end{aligned}$$

另外, 由于矩阵 $2C_i(q_i, \dot{q}_i) - \dot{M}_i(q_i) + \dot{c}_i(t)\mathbf{C}_o(q_i, \dot{q}_i)$ 是斜对称矩阵, 对于任意向量 $\xi \in \mathbf{R}^{n_i}$, 满足

$$\xi^T(\dot{M}_i(q_i) - 2C_i(q_i, \dot{q}_i) - \dot{c}_i(t)\mathbf{C}_o(q_i, \dot{q}_i))\xi = 0. \quad (26)$$

2 控制器设计

2.1 模糊系统

在目标物体的质量未知, 且目标姿态任意的情况下, 会出现系统动力学方程的不确定问题. 为了解决此问题, 采用文献[16-18]中的方法, 引入模糊系统来自适应地逼近系统的真实动力学方程. 设 \mathbf{F}_{i1} 和 \mathbf{F}_{i2} 为 T-S 型模糊系统, $\mathbf{F}_{i1} = M_i(q_i)\ddot{q}_{r_i}(t)$, $\mathbf{F}_{i2} = C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_{r_i}(t) + G_i(q_i)$. \mathbf{F}_{i1} 模糊系统的输入为 (q_i, \dot{q}_{r_i}) , \mathbf{F}_{i2} 模糊系统的输入为 $(q_i, \dot{q}_i, \dot{q}_{r_i})$, \mathbf{F}_{i1} 和 \mathbf{F}_{i2} 可

以写成如下形式:

$$\mathbf{F}_{i1} = \Xi_{i1}^T U_{i1}, \quad (27)$$

$$\mathbf{F}_{i2} = \Xi_{i2}^T U_{i2}. \quad (28)$$

其中: U_{ij} 表示由模糊规则输出构成的向量, Ξ_{ij} 表示最优权重矩阵, $j = 1, 2$. 用最优权重矩阵的估计 $\hat{\Xi}_{ij}$ 代替 Ξ_{ij} , 代入式(27)和(28)可得

$$\hat{\mathbf{F}}_{i1} = \hat{\Xi}_{i1}^T U_{i1}, \quad (29)$$

$$\hat{\mathbf{F}}_{i2} = \hat{\Xi}_{i2}^T U_{i2}. \quad (30)$$

式(27)和(28)与其估计(29)和(30)之间的误差为 $|\hat{\mathbf{F}}_{i1} - \mathbf{F}_{i1}| = \varepsilon_{i1}$, $|\hat{\mathbf{F}}_{i2} - \mathbf{F}_{i2}| = \varepsilon_{i2}$. 当模糊逻辑系统使用的逻辑变量足够充分时, 系统误差 ε_{i1} 和 ε_{i2} 可以趋于无穷小.

2.2 滑模向量

分别用 y_{d_k} 、 \dot{y}_{d_k} 和 \ddot{y}_{d_k} 表示图像上特征点 p_k 的理想位置、速度和加速度. 定义图像空间上特征点 p_k 的速度参考变量如下:

$$\dot{y}_{r_k}(t) = \dot{y}_{d_k} - \lambda(y_k - y_{d_k}), \quad (31)$$

其中 $\lambda \in \mathbf{R}$. 利用伪逆定义关节空间参考速度

$$\dot{q}_{r_i} = \hat{J}_{Y_i}^+ \dot{Y}_r. \quad (32)$$

其中: $\dot{Y}_r = [\dot{y}_{r_1}^T, \dot{y}_{r_2}^T, \dots, \dot{y}_{r_m}^T]^T$, $\hat{J}_{Y_i}^+$ 表示 \hat{J}_{Y_i} 的伪逆. 定义图像空间和关节空间的滑模变量

$$S_y = \dot{Y}(t) - \dot{Y}_r(t), \quad (33)$$

$$s_i = \dot{q}_i - \dot{q}_{r_i}. \quad (34)$$

综上所述, 采用位置/力混合控制方法, 基于图像的双臂模糊轨迹跟踪控制器设计如下:

$$\tau_i = \hat{\mathbf{F}}_i - K_{s_i} s_i - \hat{J}_{Y_i}^T K_{S_Y} S_Y - \hat{J}_i^T f_{d_i}, \quad (35)$$

其中 $\hat{\mathbf{F}}_i = \hat{\mathbf{F}}_{i1} + \hat{\mathbf{F}}_{i2}$. 另外, 相关的参数估计自适应律设计如下:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\Theta}}_i &= \Lambda_{i3}^{-1}(\Gamma_x^T(s_i, q_i)f_{d_i} - \\ &\Gamma_Z^T(q_i, \dot{Y}_r)K_{S_Y}S_Y + \Gamma_Y^T(q_i, \dot{q}_i)K_{S_Y}S_Y), \end{aligned} \quad (36)$$

$$\dot{\hat{\Xi}}_{il} = -\Lambda_{il}^{-1}U_{il}s_i^T. \quad (37)$$

其中 K_{s_i} 、 K_{S_Y} 、 Λ_{il} 和 Λ_{i3} ($l = 1, 2$) 是控制增益. 为了证明系统的稳定性, 引入非负李亚普诺夫函数如下:

$$\begin{aligned} V_i(t) &= \\ &\frac{1}{2}s_i^T M_i s_i + \frac{1}{2}\tilde{\Theta}_i^T \Lambda_{i3} \tilde{\Theta}_i + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{l=1}^2 (\tilde{\Xi}_{il})_j^T \Lambda_{il} (\tilde{\Xi}_{il})_j. \end{aligned} \quad (38)$$

其中: $\tilde{\Theta}_i = \hat{\Theta}_i - \Theta_i$, $\tilde{\Xi}_{il} = \hat{\Xi}_{il} - \Xi_{il}$, n_i 表示模糊规则的数量. 结合式(25)和(35)可得闭环动力学方程如下:

$$\begin{aligned} M_i(q_i)\dot{s}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)s_i - J_i^T(q_i)f_i + \hat{J}_i^T f_{d_i} = \\ \hat{\mathbf{F}}_i - K_{s_i} s_i - \hat{J}_{Y_i}^T K_{S_Y} S_Y, \end{aligned} \quad (39)$$

其中 $\hat{\mathbf{F}}_i = \hat{\mathbf{F}}_i - \mathbf{F}_i$. 对式(39)求导可得

$$\dot{V}_i(t) = \dot{s}_i^T M_i(q_i) s_i + \frac{1}{2} \dot{s}_i^T \dot{M}_i(q_i) s_i + \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{l=1}^2 (\tilde{\Xi}_{il})_j^T A_{il} (\dot{\tilde{\Xi}}_{il})_j + \tilde{\Theta}_i^T A_{i3} \dot{\tilde{\Theta}}_i. \quad (40)$$

用 s_i^T 左乘式(39)并代入式(40), 同时将自适应律(37)代入可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(t) = & \sum_{l=1}^2 s_i^T \tilde{\Xi}_{il}^T U_{il} - s_i^T K_{s_i} s_i - s_i^T \hat{J}_{Y_i}^T K_{S_Y} S_Y - \\ & s_i^T C_i s_i + s_i^T (J_i^T f_i - \hat{J}_i^T f_{d_i}) + \frac{1}{2} \dot{s}_i^T \dot{M}_i s_i + \\ & \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{l=1}^2 (\tilde{\Xi}_{il})_j^T A_{il} (\dot{\tilde{\Xi}}_{il})_j + \tilde{\Theta}_i^T A_{i3} \dot{\tilde{\Theta}}_i = \\ & - s_i^T \left(K_{s_i} - \frac{1}{2} \dot{c}_i(t) \dot{C}_o(q_i, \dot{q}_i) \right) s_i + \\ & \tilde{\Theta}_i^T A_{i3} \dot{\tilde{\Theta}}_i + s_i^T (J_i^T f_i - \hat{J}_i^T f_{d_i}) - \\ & s_i^T \hat{J}_{Y_i}^T K_{S_Y} S_Y. \end{aligned} \quad (41)$$

结合式(11)计算 $s_i^T (J_i^T f_i - \hat{J}_i^T f_{d_i})$, 可得

$$\begin{aligned} s_i^T (J_i^T f_i - \hat{J}_i^T f_{d_i}) = & s_i^T (J_i^T f_i - J_i^T f_{d_i} + J_i^T f_{d_i} - \hat{J}_i^T f_{d_i}) = \\ s_i^T J_i^T \tilde{f}_i - s_i^T \tilde{J}_i^T f_{d_i} = & s_i^T J_i^T \tilde{f}_i - \tilde{\Theta}_i^T \Gamma_x^T(q_i, s_i) f_{d_i}. \end{aligned} \quad (42)$$

结合式(10)和(16)计算 $s_i^T \hat{J}_{Y_i}^T K_{S_Y} S_Y$, 可得

$$\begin{aligned} s_i^T \hat{J}_{Y_i}^T K_{S_Y} S_Y = & (\dot{q}_i^T J_{Y_i}^T - \dot{q}_{r_i}^T \hat{J}_{Y_i}^T + \dot{q}_i^T \hat{J}_{Y_i}^T - \dot{q}_i^T J_{Y_i}^T) K_{S_Y} S_Y = \\ (Z\dot{Y} - Z\dot{Y}_r - \dot{Z}\dot{Y}_r + Z\dot{Y}_r)^T K_{S_Y} S_Y + & (\tilde{J}_{Y_i} \dot{q}_i)^T K_{S_Y} S_Y = \\ S_Y^T Z^T K_{S_Y} S_Y - \tilde{\Theta}_i^T \Gamma_Z^T(q_i, \dot{Y}_r) K_{S_Y} S_Y + & \tilde{\Theta}_i^T \Gamma_Y^T(q_i, \dot{q}_i) K_{S_Y} S_Y. \end{aligned} \quad (43)$$

将式(36)、(42)和(43)代入(41), 另外由于 $c_i(t)$ 设计为常数, 且 $\dot{c}_i(t) = 0$, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \dot{V}_1(t) + \dot{V}_2(t) = \\ - \sum_{i=1}^2 s_i^T K_{s_i} s_i - 2S_Y^T Z^T K_{S_Y} S_Y \leq & 0. \end{aligned} \quad (44)$$

定理1 双臂系统在控制律的作用下能够保证特征点在图像上的跟踪误差渐近收敛到零。

证明 由式(44)可知(38)有界, 且式(38)中的变量 s_i 、 $\tilde{\Theta}_i$ 和 $\tilde{\Xi}_{il}$ 亦有界, 因此可得变量 \dot{q}_i 、 \dot{q}_{r_i} 、 $\hat{\theta}_{ik}$ 和 $\dot{\tilde{\Xi}}_{il}$ 有界, $i = 1, 2, k = 1, 2, \dots, m, l = 1, 2$. 假设 y_{d_k} 一致连续, 可推出 \dot{Y}_r 一致连续, 且 \dot{q}_{r_i} 一致连续. 因此可得变量 s_i 和 S_Y 一致连续. 根据 Barbalat 引理可得 $\dot{V} = 0$, 由式(44)可推出

$$\lim_{t \rightarrow \infty} S_Y(t) = 0. \quad (45)$$

由 S_Y 的结构可知, 在 $t \rightarrow \infty$ 时, 每个特征点的位移跟踪误差为零. \square

定理2 双臂系统在控制律和自适应律的控制

下, 能够保证目标物体受到的夹持力控制误差最后收敛到零的有界邻域内。

证明 根据定理1的结论, 在 $t \rightarrow \infty$ 时, s_i 和 S_Y 趋近于零, 因此由式(39)可得

$$J_i^T(q_i) \tilde{f}_i = -\tilde{F}_i - \tilde{J}_i^T f_{d_i}. \quad (46)$$

假设在控制过程中, 双臂系统没有出现奇异现象, 因此 J_i 满秩, 式(46)两端左乘 J_i . 令 $\mathbf{J}_i = J_i J_i^T$, 且其可逆, 因此可得

$$\begin{aligned} \tilde{f}_i = & -\mathbf{J}_i^{-1} J_i (\tilde{F}_i + \tilde{J}_i^T f_{d_i}) = \\ - \mathbf{J}_i^{-1} J_i \left(\sum_{l=1}^2 \tilde{\Xi}_{il} U_{il} + \tilde{\Theta}_i^T \Gamma_x^T(q_i, 1) f_{d_i} \right). \end{aligned} \quad (47)$$

由定理1的结论可知误差量 $\tilde{\Theta}_i$ 和 $\tilde{\Xi}_{il}$ 有界, 因此目标受到的夹持力控制误差收敛到零的有界邻域的结论得证. \square

注1 同文献[17-18]中的夹持力控制误差相比, 本文考虑了目标引起的运动学不确定性, 因此夹持力控制误差只能收敛到零的有界邻域范围而不能收敛到零。

3 仿 真

3.1 直线轨迹跟踪

为了验证控制方法的正确性, 使用 Matlab 软件进行轨迹跟踪仿真, 在仿真中时间间隔设置为 0.02 s. 仿真中的双臂系统由相同的 2 连杆 3 关节机械臂构成. 机械臂连杆的长度分别是 $l_{11} = l_{21} = 0.425$ m 和 $l_{12} = l_{22} = 0.375$ m, 末端执行器直接连接在关节 3 上. 杆 1 的质量是 30 kg, 杆 2 的质量是 15 kg, 执行器的质量 5 kg, 杆 1 的转动惯量是 1.1 kg·m², 杆 2 的转动惯量是 0.3 kg·m², 执行器的转动惯量是 0.01 kg·m². 操控对象的质量是 20 kg, 长宽高是 0.24×0.4×0.05 m. 质心位于目标的中心位置, 质心到关节 3 的距离是 $l_{31} = l_{32} = 0.12$ m, 目标坐标系的零点位于目标的质心上, z 轴与关节 3 的方向重合, 特征点 1、2、3 在目标坐标系中的坐标分别为 $p_1 = (-0.03, 0, 0)$, $p_2 = (-0.03, 0, -0.12)$, $p_3 = (-0.03, 0.02, 0.12)$. 世界坐标系的零点位于机械臂 1 的基座的中心, 机械臂 2 的基座位于 (1, 0, 0) 点. 视觉系统中使用相机参数如下:

$$\begin{bmatrix} 1806 & 0 & 283 & 1015.2 \\ 0 & -1812 & 249 & 2614.4 \\ 0 & 0 & -1 & 3.6 \end{bmatrix}.$$

特征点 p_1 的理想轨迹定义如下:

$$\begin{bmatrix} u_{d1} \\ v_{d1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 560 + 150 \times e^{-\frac{t}{5.6}} - 300 \times e^{-\frac{t}{5.8}} \\ 940 + 100 \times e^{-\frac{t}{5.6}} - 200 \times e^{-\frac{t}{5.8}} \end{bmatrix}.$$

由于视觉投影的影响, 特征点 p_2 和 p_3 对应的理想轨迹都不是严格的直线, 不能直接用公式定义. 因此, 在仿真中这两点的理想轨迹通过特征点之间

的位置关系和投影模型计算得到. 仿真中, 目标受到的理想夹持力为 $f_{d1} = f_{d2} = [0, 0, 0]^T$, 目标质心的位置估计为 $\hat{l}_{31} = 0.1 \text{ m}$, $\hat{l}_{32} = 0.14 \text{ m}$, 3个特征点在目标坐标系下的位置估计为 $\hat{p}_1 = (-0.05, -0.02, -0.02)$, $\hat{p}_2 = (-0.05, -0.02, -0.14)$, $\hat{p}_3 = (-0.05, 0, 0.1)$. 另外, 仿真中用到的控制参数和控制增益设置如下: $\lambda = 2$, $c_i = \text{diag}(0.5, 0.5, 0.5)$, $K_{s_i} = \text{diag}(10, 10, 10)$, $K_{S_V} = \text{diag}(4 \times 10^{-7}, 4 \times 10^{-7}, 4 \times 10^{-7}, 4 \times 10^{-7}, 4 \times 10^{-7}, 4 \times 10^{-7}, 4 \times 10^{-7}, 4 \times 10^{-7}, 4 \times 10^{-7})$, $A_{i1} = A_{i2} = I_{5 \times 5}$, $A_{i3} = \text{diag}(0, 0, 10, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$. 另外, 用于逼近系统动力学模型的模糊逻辑系统由5个使用高斯函数的模糊规则组成. 仿真中3个特征点在图像上的初始位置和初始速度分别为 (411, 870), (352, 886), (467, 844), $[0, 0]^T$, $[0, 0]^T$ 和 $[0, 0]^T$. 直线轨迹跟踪的仿真结果如图3所示.

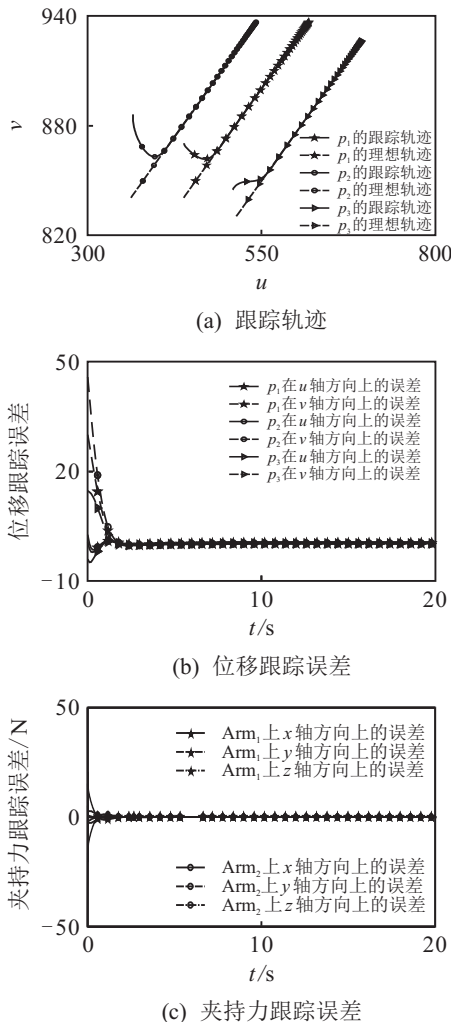


图3 直线轨迹跟踪

图3(a)显示的是3个特征点进行直线轨迹跟踪的情况, 可以看到3个特征点能够快速地跟踪上理想轨迹. 图3(b)显示的是3个特征点的位移跟踪误差变化情况, 从图中可以看出视觉位移跟踪误差快速地减小并收敛到零. 图3(c)显示的是机械臂1和机械臂2

上的夹持力跟踪误差变化情况, 可以看到夹持力能够很好地跟踪上理想的夹持力, 且夹持力跟踪误差快速减小并收敛到零值附近.

3.2 曲线轨迹跟踪

曲线轨迹跟踪仿真中特征点 p_1 的理想轨迹定义为

$$\begin{bmatrix} u_{d1} \\ v_{d1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 560 + 150 \times e^{-\frac{t}{5.6}} - 300 \times e^{-\frac{t}{5.8}} \\ 840 + 100 \times e^{-\frac{t}{5.6}} \times \cos(t) \end{bmatrix}$$

与直线轨迹跟踪一样, 其他两个特征点 p_2 和 p_3 的理想轨迹通过与特征点 p_1 的位置关系计算得到. 在曲线轨迹跟踪仿真中, 调整参数 $\lambda = 4$, 其他的参数和控制增益设置情况和直线轨迹跟踪中的一样. 曲线轨迹跟踪仿真的结果如图4所示.

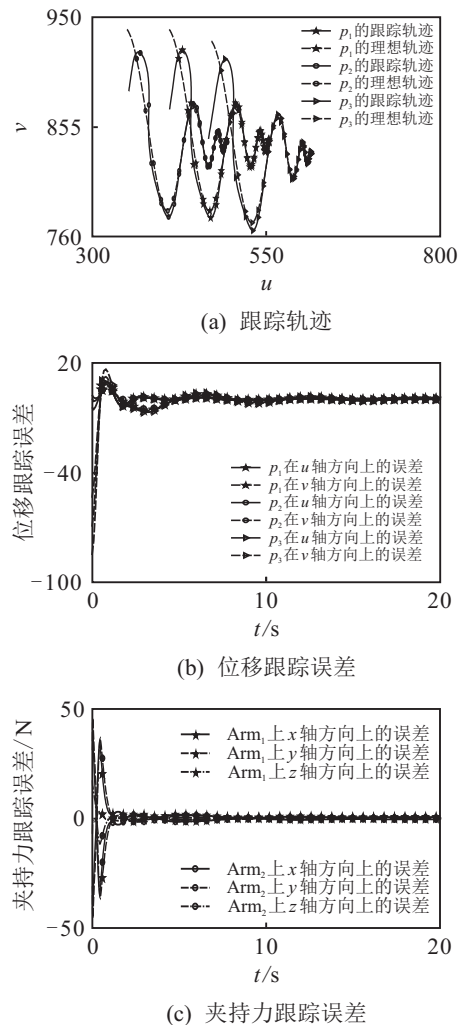


图4 曲线轨迹跟踪

图4(a)显示的是特征点进行曲线轨迹跟踪的情况, 可以看出3个特征点能够很好地跟踪上理想的曲线轨迹; 图4(b)显示的是位移跟踪误差的收敛情况, 可以看出位移跟踪误差越来越小, 最后收敛到零; 图4(c)显示的是夹持力的跟踪误差变化情况, 可以看出夹持力跟踪误差越来越小, 最后收敛到零值附近.

从直线和曲线轨迹跟踪仿真的结果上看, 本文提

出的基于图像的双臂模糊轨迹跟踪控制方法是有效的,能够保证视觉位移误差收敛到零,同时能够保证夹持力跟踪误差最后收敛到零的邻域内。

4 结 论

当目标物体以随机的位姿在双臂系统控制下进行视觉轨迹跟踪任务时,目标的随机位姿造成了运动学和动力学上的不确定性,同时也影响了运动学和动力学上的协同控制.针对这些问题,本文首先采用运行学参数自适应方法估计目标质心位置和特征点的位置,其次采用模糊逻辑系统逼近系统的动力学模型,接下来采用分散控制方法解决运动学和动力学上的协同控制.最后采用位置/力混合控制方法设计了基于图像的双臂模糊自适应轨迹跟踪控制器,并且用李亚普诺夫方法证明了控制方法的稳定性.在直线轨迹和曲线轨迹跟踪控制仿真中验证了所提方法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Nadi F, Derhami V, Rezaeian M. Visual servoing control of robot manipulator with jacobian matrix estimation[C]. Robotics and Mechatronics. RSI/ISM Int Conf. New York: IEEE, 2014: 405-409.
- [2] Wang H. Adaptive visual tracking for robotic systems without image space velocity measurement[J]. Automatica, 2015, 55: 294-301.
- [3] Lizarralde F, Leite A C, Hsu L, et al. Adaptive visual servoing scheme free of image velocity measurement for uncertain robot manipulators[J]. Automatica, 2013, 49(5): 1304-1309.
- [4] Dong J, Hu Y, Peng K. Robot visual servo control based on fuzzy adaptive pid[C]. 2012 Int Conf on Systems and Informatics (ICSAI). New York: IEEE, 2012: 1337-1341.
- [5] Morales B, Roberti F, Toibero J M, et al. Passivity based visual servoing of mobile robots with dynamics compensation[J]. Mechatronics, 2012, 22(4): 481-490.
- [6] Wang H, Jiang M, Chen W, et al. Visual servoing of robots with uncalibrated robot and camera parameters[J]. Mechatronics, 2012, 22(6): 661-668.
- [7] Cheah C C, Hou S P, Zhao Y, et al. Adaptive vision and force tracking control for robots with constraint uncertainty[J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2010, 15(3): 389-399.
- [8] Cheah C, Liu C, Slotine J. Adaptive vision based tracking control of robots with uncertainty in depth information[C]. 2007 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2007: 2817-2822.
- [9] Baba L, Kawamura A, Motoi N, et al. A prediction method considering object motion for humanoid robot with visual sensor[C]. The 13th Int Workshop on Advanced Motion Control(AMC). New York: IEEE, 2014: 320-325.
- [10] Qu J, Zhang F, Fu Y L, et al. Approach movement of redundant manipulator using stereo vision[C]. 2014 IEEE Int Conf on Robotics and Biomimetics(ROBIO). New York: IEEE, 2014: 2489-2494.
- [11] Lippiello V, Siciliano B, Villani L. Position-based visual servoing in industrial multirobot cells using a hybrid camera configuration[J]. IEEE Trans on Robotics, 2007, 23(1): 73-86.
- [12] Liu Y, Wang H, Wang C, et al. Uncalibrated visual servoing of robots using a depth-independent interaction matrix[J]. IEEE Trans on Robotics, 2006, 22(4): 804-817.
- [13] Liu Y, Wang H, Zhou D. Dynamic tracking of manipulators using visual feedback from an uncalibrated fixed camera[C]. Proc of 2006 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2006: 4124-4129.
- [14] Wang J, Liu Y H, Zhou D. Dynamic visual tracking for manipulators using an uncalibrated fixed camera[J]. IEEE Trans on Robotics, 2007, 23(3): 610-617.
- [15] Wang H, Liu Y H, Chen W. Uncalibrated visual tracking control without visual velocity[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2010, 18(6): 1359-1370.
- [16] Liu Z, Chen C, Zhang Y. Decentralized robust fuzzy adaptive control of humanoid robot manipulation with unknown input backlash: An experimental study[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2015, 23(3): 605-616.
- [17] Gueaieb W, Karray F, Sharhan S A. A robust hybrid intelligent position/force control scheme for cooperative manipulators[J]. IEEE-ASME Trans on Mechatronics, 2007, 12(2): 109-125.
- [18] Gueaieb W, Karray F, Al-Sharhan S. A robust adaptive fuzzy position/force control scheme for cooperative manipulators[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2003, 11(4): 516-528.
- [19] Liu Z, Chen C, Zhang Y, et al. Adaptive neural control for dual-arm coordination of humanoid robot with unknown nonlinearities in output mechanism[J]. IEEE Trans on Cybernetics, 2015, 45(3): 521-532.
- [20] Kumar M, Panwar V, Sukavanam N. Neural network control of coordinated multiple manipulator systems[C]. 2007 Int Conf on Computing: Theory and Applications. New York: IEEE, 2007: 250-256.
- [21] Caccavale F, Chiacchio P, Marino A, et al. Six-dof impedance control of dual-arm cooperative manipulators[J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2008, 13(5): 576-586.
- [22] Kosuge K, Ishikawa K, Furuta L, et al. Control of single-master multi-slave manipulator system using VIM[C]. Int Conf on Robotics and Automation. New York: IEEE, 1990: 1172-1177.
- [23] Lee K, Chang H P, Jamisola R S. Relative impedance control for dual-arm robots performing asymmetric bimanual tasks[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3786-3796.
- [24] Cheah C, Liu C, Slotine J. Adaptive jacobian tracking control of robots with uncertainties in kinematic, dynamic and actuator models[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(6): 1024-1029.