

文章编号: 1001-0920(2013)07-1060-05

基于任务空间的无标定视觉机械臂自适应跟踪控制

薛广月, 任雪梅

(北京理工大学 自动化学院, 北京 100081)

摘要: 针对动力学参数不确定的无标定视觉机械臂系统, 研究基于任务空间的自适应控制问题. 对于控制器的设计, 首先研究机械臂动力学参数不确定情况下基于任务空间的控制问题, 然后设计自适应摄像机标定控制器, 最后根据任务空间信息和图像空间信息的一致收敛关系统一两部分控制器, 设计整个闭环系统控制信号和自适应控制律. 实验结果表明了所提出的控制方法的有效性.

关键词: 自适应控制; 任务空间; 视觉伺服; 机械臂

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Adaptive task-space tracking control for uncalibrated eye-to-hand systems with dynamic uncertainties

XUE Guang-yue, REN Xue-mei

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China. Correspondent: REN Xue-mei, E-mail: xmren@bit.edu.cn)

Abstract: In this paper, an adaptive task-space tracking control approach is designed by using the error caused by manipulator's dynamic uncertainties and unknown camera calibration parameters. Due to the different uncertainties, the input signal of controller is designed in two steps. Firstly, an adaptive task-space tracking controller is designed to compensate the robotic dynamic uncertainty. Then, an adaptive camera calibration controller is established to ensure bounded image-space tracking error. Finally, a uniform controller is combined by using the errors in both image-space and task-space. Results of experiments show the effectiveness of the proposed method.

Key words: adaptive control; task space; visual servoing; robotic manipulators

0 引言

视觉传感器作为最基本的外部传感器, 已被应用于工业机器人系统, 并得到了广泛研究. 根据摄像机与机械臂的位置关系, 可分为两种情况, 即 Eye-in-hand (视觉传感器配置在机械臂末端) 和 Eye-to-hand (视觉传感器安装在机械臂工作空间某固定位置). 为实现精确跟踪控制, 控制器设计应考虑机械臂本身动力学的不确定性以及未知视觉系统参数对整个系统的影响. 动力学不确定性机械臂控制是实际机器人控制中必须克服的主要问题, Cheah 等^[1]和 Dixon^[2]提出的近似 Jacobian 控制器解决了机械臂定点控制问题; Cheah 等^[3]设计了自适应 Jacobian 跟踪控制器, 以实现机械臂末端的轨迹跟踪控制; Wang 等^[4]研究了基于任务空间的不确定机械臂的逆动力学问题, 应用自

适应控制的方法解决了机器人关节参数变化情况下的逆动力学控制. 其中文献 [1-2] 的方法只限于定点控制问题而不适用于复杂的跟踪控制情形; 文献 [3-4] 针对的是机械臂的轨迹跟踪控制, 其研究对象并没有针对配置视觉的机械臂系统. 针对视觉机械臂系统, 无标定手眼系统的研究是其重要分支. Wang 等^[5]讨论了无标定条件下, Eye-to-hand 系统自适应跟踪控制问题, 但没有同时考虑机械臂动力学不确定性对系统的影响; Akella^[6]设计了基于视觉的不确定性机械臂自适应关节空间控制器; Cheah 等^[7]对图像深度信息未知的视觉机械臂点到点控制提出了基于视觉的自适应 Jacobian 控制器. 但是文献 [6-7] 都对机器人模型进行了一定的简化或者仅讨论了平面机器人的情况. Zergeroglu 等^[8]设计了机器人和摄像机参数未

收稿日期: 2012-02-14; 修回日期: 2012-05-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60974046, 61273150); 教育部博士点基金项目(20121101110029).

作者简介: 薛广月(1982-), 男, 博士生, 从事多传感器数据融合、机器人、自适应控制的研究; 任雪梅(1967-), 女, 教授, 博士生导师, 从事智能信息处理、智能控制、非线性系统建模与控制等研究.

知、基于视觉的非线性跟踪控制器,但文献[8]中基于Backstepping方法设计的控制信号较复杂。

为了克服上述方法在动力学参数不确定、无标定Eye-to-hand系统跟踪控制中的局限性,本文研究基于任务空间的自适应跟踪控制器设计.利用任务空间被关节空间控制,并且由图像空间观测的特点,设计了自适应逆动力学控制与自适应摄像机标定控制相结合的基于任务空间的自适应跟踪控制方法.自适应逆动力学控制能够有效解决机械臂动力学参数不确定性对系统的影响;自适应摄像机标定控制器则能够解决无标定视觉系统的未知参数对系统的影响.根据任务空间与图像空间之间的一致映射关系,将两部分控制信号统一到任务空间并设计了结构简单的整体控制器。

1 预备知识

作为多刚体结构,机械臂可视为一系列由关节连接起来的连杆.将每个关节建立一个坐标系,机械臂的运动学方程可表示成关节空间的齐次变换形式.据此,任务空间与关节空间的映射关系^[9-10]为

$$\begin{cases} x = h(q), \\ \dot{x} = J(q)\dot{q}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $h(\cdot) \in R^n \rightarrow R^n$ 描述机械臂任务空间与关节空间映射关系, q 为关节角度向量, x 为末端位置, \dot{x} 为末端的速度, \dot{q} 为关节向量速度, $J(q) \in R^n \times R^n$ 为由关节空间映射到任务空间的Jacobian矩阵。

视觉传感器用来测量机器人任务空间信息,能直观地反映机器人末端与待跟踪目标的关系.图像空间与任务空间之间存在如下映射关系^[10]:

$$\begin{cases} y = I_m(x), \\ \dot{y} = J_I(x)\dot{x}. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $I_m(\cdot)$ 为摄像机投影函数, $J_I(\cdot)$ 为图像雅克比矩阵, y 为图像空间内的向量, \dot{y} 为图像中的向量速度。

根据相机成像原理, $I_m(\cdot)$ 详细形式如下:

$$I_m = \frac{\lambda}{z} \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 \\ 0 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega \\ \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中: λ 为摄像机的焦距, z 为摄像机光轴中心与机器人工作空间的距离, ω 表示摄像机坐标系与任务空间坐标系之间在顺时针方向的夹角.特别在Eye-to-hand系统中, I_m 中的组成元素均为常数,因此式(2)中的映射关系都是线性映射并能写成以下形式:

$$\begin{cases} y(t) = I_m x(t), \\ \dot{y}(t) = J_I \dot{x}(t). \end{cases} \quad (4)$$

这里: $I_m = J_I$, 为表达习惯依然沿用 J_I .

机械臂动力学方程^[11]如下:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau. \quad (5)$$

其中: $M(q)$ 为惯性矩阵, $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 表示向心力与哥氏力, $g(q)$ 为重力, τ 为关节输入扭矩.机械臂动力学方程具有下列性质。

性质 1 $M(q)$ 是满足 $\alpha_1 I \leq M(q) \leq \alpha_2 I$ 的正定矩阵;

性质 2 式(5)右边可以写成由动力学回归矩阵 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 与动力学参数 a_d 的乘积形式,即

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})a_d. \quad (6)$$

Eye-to-hand视觉机械臂控制系统中的控制效果可以直观地反映在末端执行器的状态上,较之基于关节空间的机械臂控制,基于任务空间的控制方法在机械臂跟踪控制方面更具实际意义。

2 控制器设计

2.1 基于任务空间自适应逆动力学控制

为实现在任务空间对期望轨迹跟踪,控制器可设计成如下形式:

$$\begin{aligned} \tau = & M(q)[J^{-1}(q)(\ddot{x}_d - K_v\Delta\dot{x} - K_p\Delta x - \dot{J}(q)\dot{q})] + \\ & C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q). \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $\Delta x = x - x_d$ 为末端执行器跟踪位置误差, $\Delta\dot{x} = \dot{x} - \dot{x}_d$ 为末端执行器跟踪速度误差, K_v 和 K_p 为非奇异正定系数矩阵, $\dot{J}(q)$ 为 $J(q)$ 的导数。

控制律(7)不适用于机械臂动力学以及运动学存在不确定性的系统,而实际系统中机械臂自身机械结构模型往往不够精确,针对机械臂参数不确定性可以设计如下基于参数估计的控制器^[4]:

$$\begin{aligned} \tau_d = & \hat{M}(q)[\hat{J}^{-1}(q)(\ddot{x}_d - K_v\Delta\hat{x} - K_p\Delta\hat{x} - \hat{J}(q)\dot{q})] + \\ & \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{g}(q). \end{aligned} \quad (8)$$

其中: \ddot{x}_d 为对跟踪目标期望加速度, $\Delta\hat{x} = \hat{x} - x_d$ 为末端执行器速度估计与跟踪目标的速度误差, $\hat{x} = \hat{J}(q)\dot{q}$, $\Delta\hat{x} = \hat{x} - x_d$ 表示末端执行器与跟踪目标的位置误差。

将控制律(8)代入式(5)表述的系统,得

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = & \\ \hat{M}(q)[\hat{J}^{-1}(q)(\ddot{x}_d - K_v\Delta\hat{x} - K_p\Delta\hat{x} - \hat{J}(q)\dot{q})] + & \\ \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{g}(q). & \end{aligned} \quad (9)$$

与式(6)联立,可得

$$\begin{aligned} \hat{M}(q)\ddot{q} - \hat{M}(q)[\hat{J}^{-1}(q)(\ddot{x}_d - & \\ K_v\Delta\hat{x} - K_p\Delta\hat{x} - \hat{J}(q)\dot{q})] = & \\ Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\Delta a_d, & \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $\Delta a_d = \hat{a}_d - a_d$ 表示机械臂动力学参数估计误差。

对机械臂末端的速度估计 $\hat{x} = \hat{J}(q)\dot{q}$ 求导,得

$$\dot{\hat{x}} = \hat{J}(q)\ddot{q} + \dot{\hat{J}}(q)\dot{q}. \quad (11)$$

式(11)移项得 \ddot{q} 的表达式并将其代入式(10),得

$$\Delta\hat{\dot{x}} + K_v\Delta\hat{x} + K_p\Delta x = \psi\Delta a_d. \quad (12)$$

其中: $\psi = \hat{J}\hat{M}^{-1}Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$, K_v 和 K_p 为增益矩阵.

以上只考虑了机械臂参数不确定性条件下的控制律设计形式. 对于整个系统的闭环误差, 应该分析视觉系统未知参数的影响, 下面便针对视觉系统未知参数进行控制器设计.

2.2 自适应摄像机标定控制器

视觉机械臂系统闭环包含了视觉系统信号. 下面针对未知的视觉系统参数设计自适应摄像机标定的控制器. 对式(1)和(3)求导, 可以得到如下关系:

$$\ddot{x} = J_I^{-1}\ddot{y} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q}. \quad (13)$$

联立式(5)和(13), 得

$$J_I^{-1}\ddot{y} = J(q)M(q)^{-1}(\tau_c - C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)) + \dot{J}(q)\dot{q}. \quad (14)$$

针对系统(14)设计控制输入为

$$\tau_c = M(q)J(q)^{-1}(u - \dot{J}(q)\dot{q}) + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q), \quad (15)$$

这里的 u 为辅助输入信号. 将式(15)代入(14), 得

$$J_I^{-1}\ddot{y} = u. \quad (16)$$

图像空间内跟踪误差可表示为

$$\Delta y = y - y_d = I_m(x - x_d). \quad (17)$$

定义跟踪误差信号 r , 表示为

$$r = \Delta\dot{y} + \alpha\Delta y, \quad (18)$$

其中 α 为正定增益矩阵.

对式(18)求导, 联立式(16)得

$$J_I^{-1}\dot{r} = J_I^{-1}(\ddot{y}_d + \alpha\Delta\dot{y}) - u. \quad (19)$$

引入视觉系统回归矩阵 W_c 和未知的摄像机参数 ϕ , 可将上式改写为

$$J_I^{-1}\dot{r} = W_c\phi - u. \quad (20)$$

基于式(20)设计辅助输入信号和参数调节规律

$$\begin{cases} u = W_c\hat{\phi} + K_c r, \\ \dot{\hat{\phi}} = -\Gamma_c W_c^T r. \end{cases} \quad (21)$$

其中: Γ_c 为正定增益矩阵, K_c 为增益系数. 将式(21)代入(20), 得

$$J_I^{-1}\dot{r} = W_c\tilde{\phi} - K_c r. \quad (22)$$

单独考虑视觉系统不确定性的影响, 由式(15)和(21)设计的控制律能保证误差渐近收敛, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta y = 0. \quad (23)$$

根据视觉误差 r 和未知摄像机标定参数 ϕ 定义如下 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2}r^T J_I^{-1}r + \frac{1}{2}\tilde{\phi}^T \Gamma_c \tilde{\phi}. \quad (24)$$

对式(24)求导, 并联立式(21)和(22), 得

$$\dot{V} = -r^T K_c r \leq 0. \quad (25)$$

Eye-to-hand 系统中摄像机固定, 保证了摄像机参数 $\tilde{\phi}$ 有界, 因此控制信号 τ_c 能够保证跟踪误差收敛^[8].

2.3 整体控制器设计和稳定性分析

综合 2.1 和 2.2 节的分析, 设计动力学不确定的无标定 Eye-to-hand 系统的整体控制器. 为讨论方便, 引入变量 η 和 ν , 并满足 $\dot{x} = \eta + \nu$ ^[6,8]. 其中: η 为针对机械臂动力学不确定性对系统的影响, ν 为针对视觉系统未知参数对系统的影响. 由 $\dot{x} = \eta + \nu$ 求得

$$\ddot{x} = \dot{\eta} + \dot{\nu}. \quad (26)$$

同时考虑动力学不确定性, 式(26)两边分别乘以 $M(q)J^{-1}(q)$, 可得到如下动力学方程:

$$M(q)J^{-1}(q)\ddot{x} = M(q)J^{-1}(q)\dot{\eta} + M(q)J^{-1}(q)\dot{\nu}. \quad (27)$$

针对 $\dot{\eta}$ 的控制输入设计可按式(8)进行. 对于 $\dot{\nu}$, 由 2.2 节的控制器设计知 $\dot{\nu}$ 对应的是无标定视觉系统中的状态 \dot{y} , 联立式(16)和(21)可求得

$$MJ^{-1}\ddot{x} = MJ^{-1}\dot{\eta} + MJ^{-1}J_I(W_c\hat{\phi} + K_c r). \quad (28)$$

联立式(8)和(10)可得

$$MJ^{-1}\ddot{x} = MJ^{-1}J_I(W_c\hat{\phi} + K_c r) + \tau_d + Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\Delta a_d - \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} - \hat{g}(q). \quad (29)$$

移项可得整个系统的控制器输入

$$\tau = \tau_d + Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\Delta a_d + MJ^{-1}J_I(W_c\hat{\phi} + K_c r). \quad (30)$$

由于图像空间的误差信息与任务空间中的误差信息通过映射矩阵存在一致变化关系, 两种控制信号综合并统一表示为任务空间的误差方程为

$$\begin{cases} \Delta\hat{x} + K_v^*\Delta\hat{x} + K_p^*\Delta x = \Phi\Delta a_d + \Psi\tilde{\phi}, \\ \tilde{\phi} = W_c^{-1}(J_I^{-1}\dot{r} + K_c r). \end{cases} \quad (31)$$

其中: $\Phi = (\hat{J}\hat{M}^{-1} + I)Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$, $\Psi = MJ^{-1}J_I$. 考虑式(31)的误差方程, 可以设计整个系统的控制信号

$$\tau = \hat{M}(q)[\hat{J}^{-1}(q)(\ddot{x}_d - K_v^*\Delta\hat{x} - K_p^*\Delta x - \dot{J}(q)\dot{q}) + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{g}(q)]. \quad (32)$$

其中

$$\begin{cases} K_v^* = K_v + K_c J_I, \\ K_p^* = K_p + K_p K_c \alpha I_m. \end{cases} \quad (33)$$

通过对系统的整体分析, 分别针对视觉系统参数未知以及机械臂自身动力学不确定性的控制进行设计, 并通过图像空间与任务空间的映射关系将两种控制信号统一成基于任务空间的控制器形式.

定理 1 针对动力学参数不确定性的无标定 Eye-to-hand 系统, 设计基于任务空间的自适应控制器(32), 其中参数自适应律满足

$$\begin{cases} \dot{\hat{a}}_d = -\Gamma_d \Phi^T (\Delta x + \Delta \hat{x}), \\ \dot{\hat{\phi}} = -\Gamma_c (\Psi^T - J_I^{-1} K_c)^T (\Delta x + \Delta \hat{x}). \end{cases} \quad (34)$$

证明 考虑大闭环中机械臂动力学参数不确定、视觉系统参数未知条件下, 将系统跟踪误差表示为任务空间误差方程(31)的形式. 定义如下 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} (\Delta \hat{x} + \Delta x)^T (\Delta \hat{x} + \Delta x) + \frac{1}{2} \Delta a_d \Gamma_d^{-1} \Delta a_d + \frac{1}{2} \Delta x^T (K_p^* + K_v^*) \Delta x + \frac{1}{2} \tilde{\phi} \Gamma_c^{-1} \tilde{\phi}. \quad (35)$$

其中: $\Delta a_d = \hat{a}_d - a_d$ 为动力学参数估计误差, $\tilde{\phi}$ 为视觉未知参数估计误差. 求导得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & (\Delta \hat{x} + \Delta x)^T (-K_v^* \Delta \hat{x} - K_p^* \Delta x + \Phi \Delta a_d + \\ & \Psi \tilde{\phi} + \Delta \dot{x}) + \Delta \dot{x}^T (K_p^* + K_v^*) \Delta x + \\ & \Delta a_d \Gamma_d^{-1} \dot{\hat{a}}_d + \tilde{\phi} \Gamma_c^{-1} \dot{\hat{\phi}}, \end{aligned}$$

代入式(12)和(21)得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & (\Delta \hat{x} + \Delta x)^T (-K_v^* \Delta \hat{x} - K_p^* \Delta x + \Phi \Delta a_d + \\ & \Psi \tilde{\phi} + J_I^{-1} K_c \tilde{\phi}) + \Delta \dot{x}^T (K_p^* + K_v^*) \Delta x + \\ & \Delta a_d \Gamma_d^{-1} \dot{\hat{a}}_d + \tilde{\phi} \Gamma_c^{-1} \dot{\hat{\phi}}, \end{aligned}$$

进一步, 有

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\Delta \hat{x}^T K_v^* \Delta \hat{x} - \Delta x^T K_p^* \Delta x + \\ & (\Delta \hat{x} + \Delta x)^T \Phi \Delta a_d + \Delta a_d \Gamma_d^{-1} \dot{\hat{a}}_d + \\ & (\Delta \hat{x} + \Delta x)^T (J_I^{-1} K_c + \Psi) \tilde{\phi} + \tilde{\phi} \Gamma_c^{-1} \dot{\hat{\phi}}, \end{aligned} \quad (36)$$

将式(34)自适应律代入(36), 得

$$\dot{V} = -\Delta \hat{x}^T K_v^* \Delta \hat{x} - \Delta x^T K_p^* \Delta x \leq 0. \quad (37)$$

由式(35)和(37)的构成可知 $V \in L_\infty$, 因此 $\Delta \hat{x} + \Delta x, \tilde{\phi} \in L_\infty$. 因为2.2节已经证明 \dot{r} 有界, 由图像空间与任务空间的一致对应关系可知 $\Delta \hat{x} + \Delta x$ 是一致有界的. 再根据式(37), 可说明 $\Delta \hat{x} + \Delta x \in L_2$, 由 Barbalat 定理易知 $\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta \hat{x} + \Delta x = 0$. 设计中选择参数 K_v^* 和 K_p^* 为正定增益矩阵可保证稳定, 其中参数 $\Delta a_d, \Delta \phi$ 有界^[4,8].

3 实验结果

为了验证所提出方法的有效性, 针对动力学不确定性的无标定 Eye-to-hand 系统进行实验研究. 实验平台主要构成如下: 3-DOF 机械臂 (D-H 参数^[12]见表1), 标准工业摄像头和上位机. 机械臂关节由 YASKAMA 交流伺服电机驱动, 摄像机通过 IEEE1394 接口与上位机通信. 机械臂动力学方程中的参数为

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & M_{23} \\ 0 & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix},$$

$$g(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix}.$$

其中

$$\begin{aligned} M_{11} &= m_2 l_2^2 + m_3 (l_2 S_2 + l_3 S_{23}), \\ M_{22} &= m_2 l_2^2 + m_3 (l_2^2 + 2l_2 l_3 C_3 + l_3^2), \\ M_{23} &= M_{32} = m_3 l_3 (l_2 C_3 + l_3), \\ M_{33} &= m_3 l_3^2, \\ g_2 &= -m_2 g l_2 S_2 - m_3 g (l_2 S_2 + l_3 S_{23}), \\ g_3 &= m_3 g l_3 S_{23}, \\ C_1 &= 2[m_2 l_2^2 S_2 C_2 + m_3 (l_2 S_2 + l_3 S_{23}) (l_2 S_2 + \\ & l_3 S_{23}) \dot{q}_1 \dot{q}_2] + 2m_3 l_3 C_{23} (l_2 S_2 + l_3 S_{23}) \dot{q}_1 \dot{q}_3, \\ C_2 &= -2m_3 l_2 l_3 S_3 \dot{q}_2 \dot{q}_3 - m_3 l_2 l_3 S_3 \dot{q}_3^2 - [m_2 l_2 S_2 C_2 + \\ & m_2 (l_2 S_2 + l_3 S_{23}) (l_2 C_2 + l_3 C_{23})] \dot{q}_1^2, \\ C_3 &= -m_3 (l_2 S_2 + l_3 S_{23}) l_3 C_{23} \dot{q}_1^2 + \\ & m_2 l_2 l_3 S_3 \dot{q}_2^2 + m_3 l_3 \dot{q}_2 \dot{q}_3. \end{aligned}$$

这里: m_i 表示关节质量; l_i 为关节长度; $S_i = \sin q_i$ 和 $C_i = \cos q_i$ 分别为关节角的正、余弦函数; $S_{ij} = \sin(q_i + q_j)$ 和 $C_{ij} = \cos(q_i + q_j)$ 分别表示相邻关节角和的正余弦函数, $i, j = 1, 2, 3$.

由动力学方程参数表达式可知, 系统系数惯性矩阵 $M(q)$ 、向心力与哥氏力系数 $C(q, \dot{q})$ 、重力 $g(q)$ 均为关节质量、连杆长度以及转角的三角函数乘积形式. 因为刚体结构的长度不变, 转角可测, 所以实验中动力学参数的不确定性是由机械臂关节组成部件导致关节质量不能精确测量而引起的. 动力学不确定参数近似为 $a_d = (a_{d1}, a_{d2}, a_{d3})^T \approx (m_1, m_2, m_3)^T$, 视觉系统未知参数主要为式(3)中的 $(\lambda/z)\beta_1, (\lambda/z)\beta_2$, 记为 $\phi = (\phi_1, \phi_2)^T$. 跟踪圆心为 (385 mm, -20 mm), 半径为 60 mm 的圆形轨迹. 控制器参数选择如下: $K_p^* = 50I, K_v^* = 23I, \alpha = \text{diag}(3, 2)^T, \Gamma_d = \text{diag}(0.9, 3, 1)^T, \Gamma_c = (0.5, 0.1, 0.3)^T$.

表1 机械臂 D-H 参数

Link i	α_i/mm	a_i	d_i/mm	q_i
1	0	-90°	200	$q_1 (-160^\circ \sim 160^\circ)$
2	350	0	0	$-90^\circ + q_2 (-101^\circ \sim 101^\circ)$
3	225	90°	0	$90^\circ + q_3 (-105^\circ \sim 105^\circ)$

本实验讨论以下3种情况: 在实验平台上应用2.2节的自适应摄像机标定控制器; 期望轨迹已知情况下, 应用文献[4]控制方法; 在无标定 Eye-to-hand 实验平台应用本文方法. 为方便阐述, 将上述3种情况分别简称为 case 1、case 2、case 3. 机械臂各个关节位置及误差曲线如图1和图2所示, 机械臂动力学参数的估计误差曲线和摄像机参数的估计曲线如图3和图4所示.

综上实验数据, 本文方法对一类无标定动力学不确定性 Eye-to-hand 系统的轨迹跟踪控制是一种有效的控制方案.

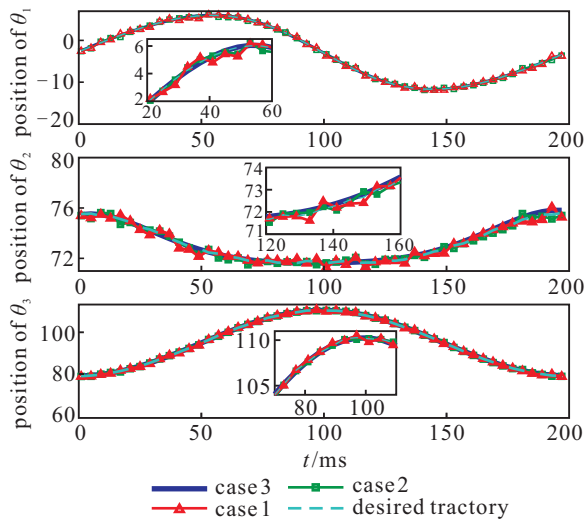


图 1 机械臂各个关节位置跟踪曲线

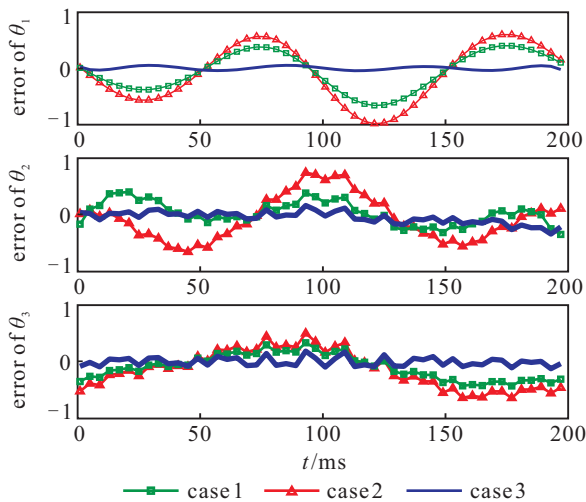


图 2 各个关节位置跟踪误差

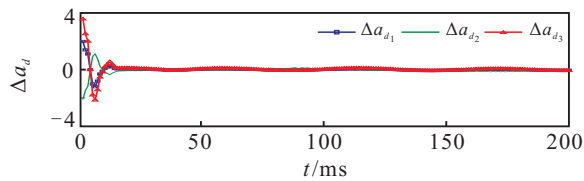


图 3 机械臂动力学参数估计误差

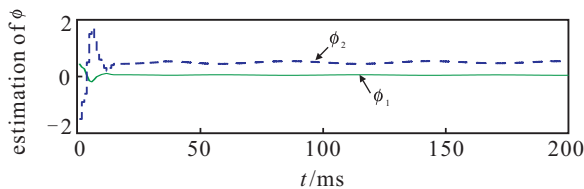


图 4 无标定视觉系统参数估计

4 结 论

本文针对无标定Eye-to-hand视觉机械臂系统,研究了一种自适应控制策略,统一考虑了机械臂自身

动力学不确定性和视觉系统未知参数,分别设计了自适应逆动力学控制器和自适应摄像机标定控制器,并综合两部分控制信号设计了整个系统的自适应控制器.实验结果验证了所提出方法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Cheah C, Arimoto S, Kawamura S. Feedback control for robotic manipulator with an uncertain jacobian matrix[J]. J of Robotic Systems, 1999, 12(2): 119-134.
- [2] Dixon W. Adaptive regulation of amplitude limited robot manipulators with uncertain kinematics and dynamics[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(3): 488-493.
- [3] Cheah C, Liu C, Slotine J. Adaptive tracking control for robots with unknown kinematic and dynamic properties[J]. Int J of Robotics Research, 2006, 25(3): 283-296.
- [4] Wang H L, Xie Y C. Adaptive inverse dynamics control of robots with uncertain kinematics and dynamics[J]. Automatica, 2009, 45(9): 2114-2119.
- [5] Wang H, Liu Y, Zhou D. Dynamic visual tracking for manipulators using an uncalibrated fixed camera[J]. IEEE Trans on Robotics, 2007, 23(3): 610-617.
- [6] Akella M. Vision-based adaptive tracking control of uncertain robot manipulators[J]. IEEE Trans on Robotics, 2005, 21(4): 747-753.
- [7] Cheah C, Liu C, Slotine J. Adaptive Jacobian vision based control for robots with uncertain depth information[J]. Automatica, 2010, 46(7): 1228-1233.
- [8] Zergroglu E, Dawson D, Querioz M, et al. Vision-based nonlinear tracking controllers with uncertain robot camera parameters[J]. IEEE Trans on Mechatronics, 2001, 6(3): 322-337.
- [9] Hutchinson S, Hager G, Corke P. A tutorial on visual servo control[J]. IEEE Trans on Robotics Automation, 1996, 12(5): 651-679.
- [10] Corke P, Good M. Dynamic effects in visual closed-loop systems[J]. IEEE Trans on Robotics Automation, 1996, 12(5): 671-683.
- [11] Lewis F, Abdalanh C, Dawson D. Control of robot end-effectors[M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1993: 380-386.
- [12] Craig J. Introduction to robotics: Mechanics and control[M]. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2004: 62-92.