

# 带时延补偿的视觉跟踪控制<sup>①</sup>

吴越, 匡森

(中国科学技术大学 自动化系, 合肥 230036)

**摘要:** 在实际的视觉伺服系统中, 由于摄像机到图像处理设备的传输延迟和图像处理本身占用的时间, 视觉信息的获取会产生时延。对此, 给出了一个带有时延补偿的视觉跟踪控制方法。通过实时拟合图像雅可比矩阵, 实现了对机械手末端执行器图像特征信息的实时预测, 从而减小了估计误差。在此基础上, 设计了一个带有时延补偿的控制方案。通过对运动目标进行跟踪的仿真实验, 验证了本文时延补偿方法的有效性。

**关键词:** 视觉伺服; 时延补偿; 图像雅可比矩阵; 多项式拟合

## Visual Tracking Control with Time-delay Compensation

WU Yue, KUANG Sen

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** In actual visual servoing systems, image processing itself and image information transmission from a camera to an image processing device can cause time delay in the acquirement of visual information. This paper proposes a visual tracking control method with time-delay compensation. Real-time prediction of image feature information of an end-effector is achieved by on-line polynomial fitting of each element of the image Jacobian matrix, which reduces estimation error on image features. Also, a control scheme with time-delay compensation is designed. Simulation experiments of tracking a moving object verify effectiveness of the proposed method.

**Key words:** visual servoing; time-delay compensation; image Jacobian matrix; polynomial fitting

## 1 引言

目前, 视觉伺服控制受到了人们广泛的关注与研究<sup>[1,2]</sup>。实际的视觉伺服系统中, 由于多数摄像机的采样率较低, 摄像机到图像处理设备的图像传输存在延迟, 以及像处理本身会占用较多的时间, 我们无法及时获得摄像机所拍摄到的图像信息(通常是图像中的目标特征信息), 也就是说视觉信息的获取会产生时延, 这对视觉伺服控制任务会造成较大的影响, 例如降低控制的精度, 甚至造成控制任务的失败。

解决时延问题最直接的办法就是提高硬件成本, 例如采用高速的图像处理设备<sup>[3,4]</sup>或者采用高采样频率的摄像机<sup>[5,6]</sup>。但这些办法的代价都很昂贵, 所以人们常常选择通过软件设计的办法来解决。

Nakadokoro 等人<sup>[7]</sup>利用前后两个时刻关节位置的

平均值来估计图像特征, 进而补偿时延。Nashio 等人<sup>[8]</sup>则在这个方法基础上采用对所估计图像特征的估计误差进行补偿。这两种方法需要假定运动物体的速度和加速度是固定不变的。Kinbara 等人<sup>[9,10]</sup>采用在线标定雅可比矩阵的方法来估计图像特征, 进一步减少估计误差。Inoue 等人<sup>[11]</sup>设计了一种不含雅可比矩阵的双层控制器, 并引入关节角的“虚拟轨迹”(即并不需要关节角收敛到虚拟生成的关节角)这个概念来补偿时延。上述方法都是基于已标定的视觉伺服系统, 并不直接适用于无标定视觉系统。对于无标定视觉伺服系统, Chaumette 等人<sup>[12]</sup>借助卡尔曼滤波法来估计图像特征的位置, 从而补偿时延。Kim 等人<sup>[13]</sup>采用 ARM 模型预测目标物体在图像空间的位置减小了因时延而产生的误差。这两种方法同样要求运动物体的速度和加速度

<sup>①</sup> 收稿时间:2015-01-09;收到修改稿时间:2015-02-09

是恒定的. 李飞等人<sup>[14]</sup>基于 BP 神经网络理论设计了一个预测估计器来预测图像特征位置, 进而补偿时延, 但其要求系统有高性能的动态特性. 刘海芳等人<sup>[15]</sup>对卡尔曼滤波时延补偿法做了改进, 他们将目标物体的加速度当作一种随机噪声处理, 使得补偿效果更加明显. 但它要求系统是线性的, 而实际系统大多是非线性的, 所以这种方法存在一定的局限性. 高振东等人<sup>[16]</sup>基于局部拟合原理利用机械手末端执行器在任务空间的位置坐整体性估计雅可比矩阵, 从而得到机器人末端执行器在图像空间的预测位置值, 取得了较好的补偿效果. 针对无标定视觉伺服系统, 本文对文献[16]中的图像雅可比矩阵拟合估计法做了进一步的改进和发展. 具体地, 基于多项式拟合原理, 利用测到的机械手末端执行器在任务空间中的位置向量历史值, 估计出图像雅可比矩阵中每个元素对应的多项式的拟合系数, 并进一步实时预测出图像雅可比矩阵中的相应元素, 最终得到当前时刻的图像雅可比矩阵. 应该指出, 随着控制的进行, 机械手末端执行器在任务空间中的位置向量历史值也是不断更新的. 由于实际系统中可能存在各种扰动的影响, 本文的方法对于图像雅可比矩阵的估计更为准确, 预测得到的实时图像特征信息的偏差也 smaller, 时延补偿效果更加明显.

文章余下部分组织结构如下, 第 2 节介绍了图像雅可比矩阵及如何利用拟合估计的图像雅可比矩阵来进行时延补偿. 第 3 节给出了一个带时延补偿的视觉跟踪控制方案. 最后, 对运动目标进行了实时跟踪仿真实验, 仿真结果验证了该方法的优越性和可行性.

## 2 时延补偿方案

我们考虑的视觉跟踪系统包含一个机械手、一个固定安装在机械手本体外(比如安装在天花板上)的摄像机和一个运动的物体. 本节, 我们首先介绍存在时延时视觉伺服系统中的图像雅可比矩阵, 然后给出考虑时延补偿的图像雅可比矩阵估计方法.

### 2.1 存在时延的图像雅可比矩阵

图像雅可比矩阵的估计是无标定视觉伺服系统中的重要研究内容<sup>[1,17,18]</sup>.

任务空间中的位姿, 则  $\dot{p}$  表示相应的末端速度, 其中  $n$  表示机械手运动空间的维数; 进一步, 用  $f = [f_1, f_2, \dots, f_m]$  表示在机械手末端执行器上选择的特征点在图像空间中的位置坐标, 则  $\dot{f}$  表示相应的特征

点在图像空间的运动速度, 其中  $m$  表示图像特征空间的维数. 图像雅可比矩阵描述了任务空间中机械手末端执行器的运动速度  $\dot{p}$  与末端特征点在图像空间上的速度  $\dot{f}$  之间的关系, 即

$$\dot{f} = J\dot{p} \quad (1)$$

其中,  $J \in R^{m \times n}$  表示图像雅可比矩阵, 还可进一步表示为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial p_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial p_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

记初始时刻为 0 时刻, 则机械手末端执行器在任务空间汇总的初始位姿即为  $p^0$ , 特征点在图像空间中的坐标为  $f^0$ . 在第 1 个采样时刻, 机械手末端执行器在任务空间中的位姿为  $p^1$ , 末端在图像空间中的坐标为  $f^1$ , 因此有

$$\dot{f}^1 = J\dot{p}^1 \quad (3)$$

其中  $\dot{p}_1 = \frac{\Delta p^1}{\Delta t} = \frac{p^1 - p^0}{\Delta t}$ ,  $\dot{f}^1 = \frac{\Delta f^1}{\Delta t} = \frac{f^1 - f^0}{\Delta t}$ ,  $\Delta t$  为采样周期.

对于任意采样时刻  $i$ , 机械手末端在任务空间中的运动与末端特征点在图像空间中的运动关系为

$$\dot{f}^i = J\dot{p}^i \quad (4)$$

特别地, 对当前时刻  $k$ , 由于实际系统存在时延(假设时延是  $h$  个采样周期), 我们只能得到从初始时刻 0 到时刻  $k-h$  的机械手末端在图像空间的位置  $f^i (i=0, 1, \dots, k-h)$ . 在时延存在的情况下, 式(4)实际上表示了当前末端运动与延迟的图像空间特征之间的映射关系. 因此, 不考虑时延的传统图像雅可比矩阵估计方法无法准确地估计出当前时刻的真实图像雅可比矩阵. 基于此, 下一小节我们将给出一种能够更好地估计出图像雅可比矩阵的多项式拟合法.

### 2.2 图像雅可比矩阵的多项式拟合估计

由于机械手末端的位姿变化会引起图像雅可比矩阵的变化, 进而引起机械手末端特征点在图像空间中的位置变化. 因此,  $f$  和  $J$  都是  $p$  的函数. 假定机械手末端在第  $i$  个采样时刻的位姿变化率为  $\dot{p}^i$ , 则我们可以将图像雅可比矩阵  $J^i(p^i)$  记为

$$J^i(p^i) = \begin{bmatrix} J_{11}^i(p^i) & \dots & J_{1n}^i(p^i) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ J_{m1}^i(p^i) & \dots & J_{mn}^i(p^i) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $p_l^i, (l=1, \dots, n)$  表示  $i$  时刻机械手末端执行器在任务空间的位姿列向量  $p^i$  中的第  $l$  个元素.

通过逐个拟合图像雅可比矩阵中的元素, 即可得到整个图像雅可比矩阵. 我们采用多项式拟合方法, 并将第  $i$  个时刻图像雅可比矩阵中的任意元素表示为

$$\hat{J}_{j,l}^i(p_l^i) = a_0 + a_1 p_l^i + \dots + a_\nu (p_l^i)^\nu \quad (6)$$

其中,  $a_0, a_1, \dots, a_\nu$  是对应于式(5)中雅可比矩阵的第  $(j, l)$  个元素的多项式拟合函数的系数变量,  $\nu$  表示拟合多项式的最高项次数. 注意, 同一时刻雅可比矩阵中的不同元素对应的系数取值并不相同.

为了拟合出图像雅可比矩阵中的每个元素值, 我们需要实时计算出式(6)中  $a_0, a_1, \dots, a_\nu$  的取值. 假定当前时刻为  $k$ , 时延为  $h$  个采样周期, 则我们可以利用  $L$  组(即  $k-h-L+1$  时刻到  $k-h$  时刻)已知的  $p$  和  $J$  的数据用于拟合. 这里, 我们可以采用传统的 *Broyden* 一阶更新算法来估计雅可比矩阵的历史值<sup>[19]</sup>:

$$\hat{J}^{k-h} = \hat{J}^{k-h-1} + \frac{(f^{k-h} - f^{k-h-1})(p^{k-h} - p^{k-h-1})^T}{(p^{k-h} - p^{k-h-1})^T (p^{k-h} - p^{k-h-1})} - \frac{\hat{J}^{k-h-1} (p^{k-h} - p^{k-h-1})(p^{k-h} - p^{k-h-1})^T}{(p^{k-h} - p^{k-h-1})^T (p^{k-h} - p^{k-h-1})} \quad (7)$$

建立目标函数

$$Y = \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (\hat{J}_{j,l}^i - J_{j,l}^i)^2, \quad (8)$$

其中,  $\hat{J}_{j,l}^i$  表示  $i$  时刻由拟合多项式(6)表示的图像雅可比矩阵的元素,  $J_{j,l}^i$  表示  $i$  时刻已知的图像雅可比矩阵中的相应元素. 我们通过对式(8)进行最小化来确定其中的未知参数  $a_0, a_1, \dots, a_\nu$ .

由多元函数的极值原理, 可得

$$\frac{\partial Y}{\partial a_u} = \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^u = [a_0 + a_1 p_l^i + \dots + a_\nu (p_l^i)^\nu - J_{j,l}^i] = 0 \quad (9)$$

其中,  $u = 0, 1, \dots, \nu$ .

式(9)等价于

$$\sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^u = [a_0 + a_1 p_l^i + \dots + a_\nu (p_l^i)^\nu] = \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^u J_{j,l}^i \quad (10)$$

对于  $u = 0, 1, \dots, \nu$ , 式(10)可进一步写为如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} 1 & \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} p_l^i & \dots & \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^\nu \\ \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} p_l^i & \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^2 & \dots & \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^{\nu+1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^\nu & \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^{\nu+1} & \dots & \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^{\nu+\nu} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} J_{j,l}^i \\ \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} p_l^i J_{j,l}^i \\ \vdots \\ \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^\nu J_{j,l}^i \end{bmatrix} \quad (11)$$

定理. 对于图像雅可比矩阵(5), 采用式(6)的多项式逐个拟合图像雅可比矩阵中的元素. 如果对应于每个元素的多项式(6)的最高次数小于用来拟合的数据组数, 即  $\nu < L$ , 则性能指标(8)的最小化能够唯一确定出对应于该元素的一组多项式拟合系数.

证明: 我们通过证明方程(11)的系数矩阵非奇异, 说明方程(11)能够唯一确定出  $a_0, a_1, \dots, a_\nu$  的值. 采用反证法.

假设方程组(11)的系数矩阵奇异, 则(11)对应的齐次方程组为

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} 1 & \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} p_l^i & \dots & \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^\nu \\ \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} p_l^i & \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^2 & \dots & \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^{\nu+1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^\nu & \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^{\nu+1} & \dots & \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^{\nu+\nu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

方程组(12)包含  $\nu+1$  个方程, 即

$$\sum_{\alpha=0}^{\nu} \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^{\alpha+\beta} a_\alpha = 0, \quad (13)$$

其中,  $\beta = 0, 1, \dots, \nu$ .

将式(13)中第  $\beta$  个方程两边乘以  $a_\beta (\beta = 0, 1, \dots, \nu)$ , 然后将新得到的  $\nu+1$  个方程左右两端相加得到

$$\sum_{\beta=0}^{\nu} a_\beta \sum_{\alpha=0}^{\nu} \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^{\alpha+\beta} a_\alpha = 0. \quad (14)$$

式(14)的左边能进一步写为

$$\begin{aligned} & \sum_{\beta=0}^{\nu} a_\beta \sum_{\alpha=0}^{\nu} \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} (p_l^i)^{\alpha+\beta} a_\alpha \\ &= \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} \sum_{\beta=0}^{\nu} \sum_{\alpha=0}^{\nu} a_\alpha a_\beta (p_l^i)^{\alpha+\beta} \\ &= \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} \sum_{\alpha=0}^{\nu} a_\alpha (p_l^i)^\alpha \sum_{\beta=0}^{\nu} a_\beta (p_l^i)^\beta \\ &= \sum_{i=k-h-L+1}^{k-h} [R(p_l^i)] \end{aligned} \quad (15)$$

其中,  $R(p_i^j) = \sum_{\beta=0}^v a_{\beta} (p_i^j)^{\beta}$ .

这样, 我们有

$$R(p_i^j) = 0, \quad (16)$$

其中,  $i = k-h-L+1, \dots, k-h$ .

由式(16)可知方程  $R(x) = \sum_{\beta=0}^v a_{\beta} x^{\beta} = 0$  有  $L$  个相异解  $p_i^{k-h-L+1}, p_i^{k-h-L+2}, \dots, p_i^{k-h}$  ( $L > v$ ). 下面进一步用反证法证明  $a_0, a_1, \dots, a_v$  必然为 0. 假设  $a_v$  不为 0,

$$R(x) = a^v \sum_{\beta=0}^v \frac{a_{\beta}}{a^v} x^{\beta}. \quad (17)$$

因方程  $R(x) = 0$  有  $L$  个相异解, 故式(17)能被因式分解为

$$R(x) = a^v (x-x_1)(x-x_2)\cdots(x-x_{v-1})(x-x_v), \quad (18)$$

$$R(x) = a^v (x-x_1)(x-x_2)\cdots(x-x_{v-1})(x-x_{v+1}). \quad (19)$$

由式(18)可知,  $x^{v-1}$  的系数为  $-a^v \sum_{\beta=1}^v x_{\beta}$ . 由式(19)

可知,  $x^{v-1}$  的系数为  $-a^v (\sum_{\beta=1}^{v-1} x_{\beta} + x_{v+1})$ . 因为零点都是相异的,  $x^{v-1} \neq x^v$ , 所以  $\sum_{\beta=1}^v x_{\beta} \neq \sum_{\beta=1}^{v-1} x_{\beta} + x_{v+1}$ , 故假设不成立,  $a_v = 0$ . 同理可证  $a_{v-1} = \dots = a_1 = a_0 = 0$ .

这样, 方程组(12)有且只有一个零解  $a_{v-1} = \dots = a_1 = a_0 = 0$  就与齐次方程组(12)奇异时有非零解产生了矛盾. 这就是说, 方程组(11)的系数矩阵只可能是非奇异矩阵, 因此方程组(11)能够唯一确定出  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_v$  的值. 证毕.

由上述定理知, 式(11)可唯一确定出  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_v$  的值. 这意味着, 我们借助  $k-h-L+1$  到  $k-h$  时刻的机械手末端执行器位姿值和图像雅可比矩阵值确定出了表征图像雅可比矩阵的第  $(j, l)$  个元素的多项式函数(6). 进一步, 我们可以借助确定出来的这个函数, 并利用  $k-h+1$  时刻到  $k$  时刻测得的末端执行器位姿  $p$  来预测出  $k-h+1$  时刻到  $k$  时刻的图像雅可比矩阵的第  $(j, l)$  个元素值. 同理, 可以得到  $k-h+1$  时刻到  $k$  时刻图像雅可比矩阵中其他元素的预测值. 这样我们就得到了  $k$  时刻的图像雅可比矩阵  $J^k$ .

进一步, 由式(1)的映射关系, 我们能够递推估计出  $k-h+1$  时刻到  $k$  时刻末端特征点在图像空间中的位置值. 特别地, 机械手末端执行器在图像空间中的当前位置值  $\hat{f}$  (即时刻  $k$  的位置值)将被用于与期望值比较并产生误差, 以便设计反馈控制器.

我们指出, 实际的视觉伺服系统常常会受到噪声的影响, 因此采用固定不变的参数值将会大大影响后续雅可比矩阵估计的准确性. 本文中, 我们考虑了对每个时刻  $k$  的图像雅可比矩阵进行拟合估计, 也就是说图像雅可比矩阵中任意元素对应的  $a_0, a_1, \dots, a_v$  的值会不断地变化, 具体的来说, 我们可以不断地取每个时刻  $k$  前  $L$  组  $p$  和  $J$  来拟合估计当前时刻的  $J^k$ . 这样提高了雅可比矩阵估计的准确性.

### 3 控制设计

这里, 我们利用前一节估计的图像雅可比矩阵设计机械手的视觉跟踪控制方案. 控制任务是, 使得机械手跟踪上给定的目标运动轨迹.

在图像空间中, 定义如下误差函数

$$e(t) = \hat{f}(t) - f^*(t), \quad (20)$$

其中,  $\hat{f}$  是机械手末端执行器在图像上的预测位置坐标,  $f^*$  是目标轨迹的期望位置坐标.

我们设计控制器, 以确保  $t \rightarrow \infty$  时,  $e(t) \rightarrow 0$  成立. 为此, 我们令式(20)中的误差函数  $e$  满足

$$\dot{e} = -ke, (k > 0) \quad (21)$$

显然, 式(21)所示的误差变化规律保证了无论初始误差的正负和大小, 都有  $t \rightarrow \infty$  时,  $e(t) \rightarrow 0$  成立.

对式(20)两端求导, 并考虑式(21), 有

$$\dot{\hat{f}} - \dot{f}^* = -ke. \quad (22)$$

进一步, 将式(1)所示的估计关系代入式(22)有

$$\hat{J}\dot{p} - \dot{f}^* = -ke. \quad (23)$$

由文献[20]中的定理, 式(23)的最小二乘解为

$$\dot{p} = -k\hat{J}^+ e + (I_n - \hat{J}^+ \hat{J})b + \hat{J}^+ \dot{f}^*, \quad (24)$$

其中,  $b \in \mathbb{R}^n$  为一任意  $n$  维矢量,  $\hat{J}^+$  表示图像雅可比矩阵估计值  $\hat{J}$  的伪逆. 等式右边的第三项对应了目标物体的运动情况, 对于静止目标该项将自动消失.

文献[1-2]指出, 为了唯一确定出机器人运动、实现良好的机械手跟踪控制, 图像特征空间的维数应不小于机械手运动空间的维数(即:  $m \geq n$ ), 且雅可比矩阵列满秩. 此时,  $\hat{J}$  的广义逆为

$$\hat{J}^+ = (\hat{J}^T \hat{J})^{-1} \hat{J}^T. \quad (25)$$

这样, 我们有  $\hat{J}^+ \hat{J} = I_n$ . 因此, 式(24)有唯一的最小二乘解

$$\dot{p} = -k\hat{J}^+ e + \hat{J}^+ \dot{f}^*. \quad (26)$$

式(26)就是本文所设计的视觉跟踪末端速度控制律.

### 4 仿真实验

本节, 我们通过仿真实验验证所提时延补偿方法的有效性, 同时考查不同时延对跟踪效果的影响.

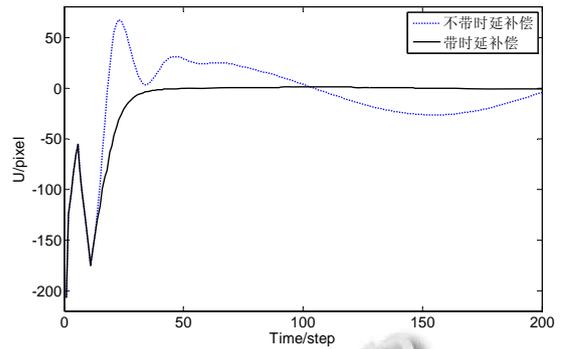
本节, 我们通过仿真实验验证所提时延补偿方法的有效性, 同时考查不同时延对跟踪效果的影响.

基于式(26)的控制律, 我们分别采用不带时延补偿的传统图像雅克比矩阵估计方法和本文提出的含时延补偿的图像雅克比矩阵估计方法来执行视觉跟踪控制任务. 仿真中, 选用 Nikon D700 相机, 其内参数矩阵为  $M = \begin{bmatrix} 4137.8 & 0 & 2128 \\ 0 & 4147.3 & 1416 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ . 进一步, 假定机械手

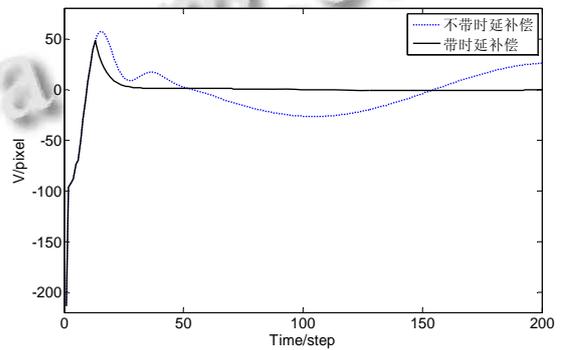
$$M = \begin{bmatrix} 4137.8 & 0 & 2128 \\ 0 & 4147.3 & 1416 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

和目标物体都在水平平面内运动(对应前文中的  $n=2$ ), 且机械手和运动目标在整个视觉控制过程中都位于摄像机的视野内. 目标的运动轨迹给定为:  $f^*(t)=[400+100 \times \cos(\pi-t), 300+100 \times \sin t]$ . 设定系统的采样周期  $T=\pi/100$ 、多项式拟合函数的次数是 2、初始点  $p^0=[200,200]$ 、D700 相机的初始图像雅可比矩阵为  $J = \begin{bmatrix} -1 & 0.5 \\ -1 & 0.8 \end{bmatrix}$ 、常量控制增益  $k=6$ . 分别选取时延

为  $4T$  和  $5T$  进行仿真实验. 仿真结果如图 1-4 所示.

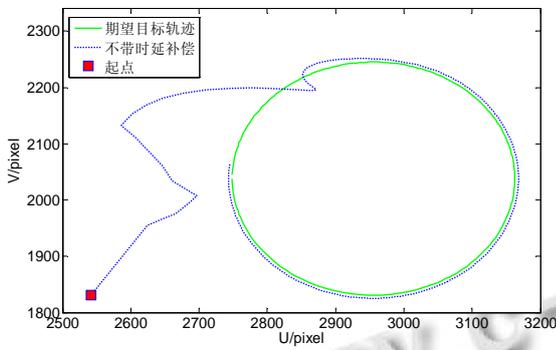


(a)

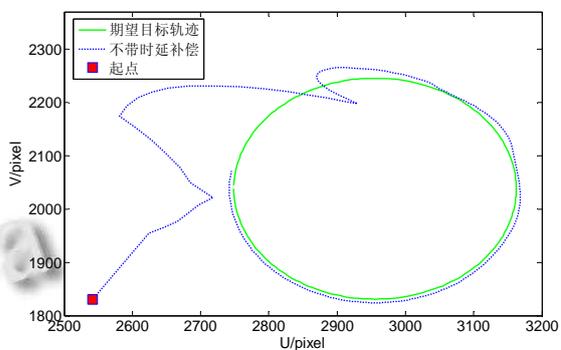


(b)

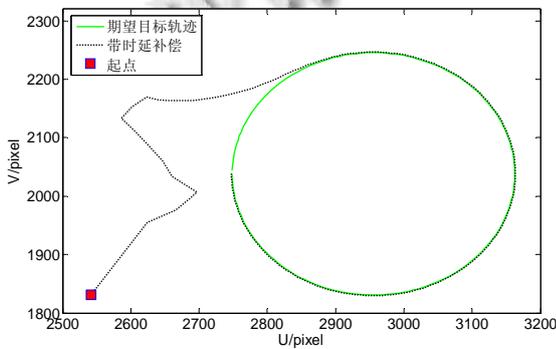
图 2 h=4T 时水平方向和垂直方向上位置跟踪误差



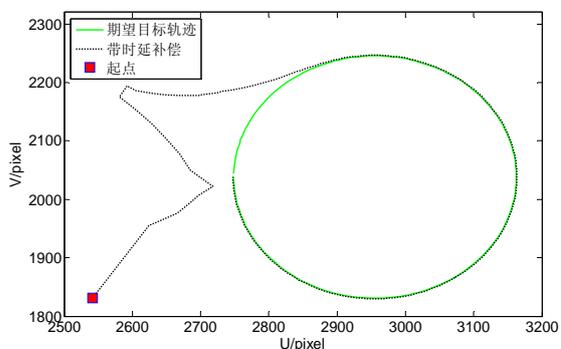
(a)



(a)



(b)



(b)

图 1 h=4T 时图像空间视觉跟踪轨迹

图 3 h=5T 时图像空间视觉跟踪轨迹

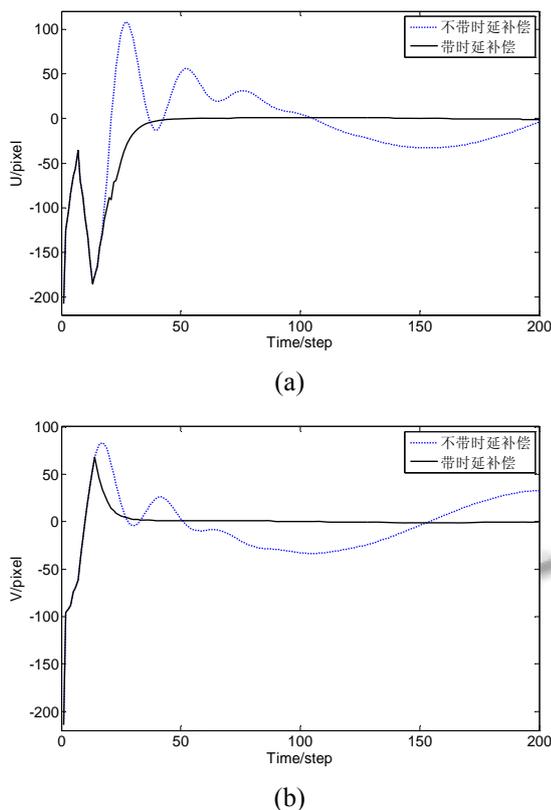


图 4  $h=5T$  时水平方向和垂直方向上位置跟踪误差

图 1(a)和图 1(b)中分别表示时延为  $4T$  时的图像空间中不带时延补偿的传统图像雅可比矩阵估计方法和带时延补偿的雅可比矩阵估计方法下的跟踪轨迹。图 1 中的绿色实线代表目标轨迹,蓝色虚线代表传统估计方法下机械手末端执行器的跟踪轨迹,黑色虚线代表带时延补偿的估计方法下机械手末端执行器的跟踪轨迹。从图 1 可以看出,带时延补偿的估计方法下机械手能更圆滑地跟踪上目标物体。图 2(a)和图 2(b)分别为水平方向和垂直方向上的位置跟踪误差。从图 2 可以看出,传统估计方法下的误差超调量大,且稳态误差明显大于带时延补偿的估计方法。带时延补偿的估计方法几乎看不到稳态误差的存在。

图 3 和图 4 分别是时延为  $5T$  时的跟踪轨迹和跟踪误差。由图 3 和图 4 可以得出,与时延为  $4T$  相比,带时延补偿的估计方法相对于传统方法的跟踪轨迹更加圆滑,而且传统方法下误差超调量和稳态误差也更大。通过一系列的仿真实验,我们得出了不同时延的如下影响规律:系统时延越大,传统控制方法的跟踪控制效果就越差,而带时延补偿方法就越具有优越性。

仿真实验表明,带时延补偿的视觉跟踪方法明显优于传统的不带时延补偿的跟踪方法。

## 5 结论

本文通过分析时延存在情况下的图像雅可比矩阵的特点,借助多项式拟合方法得到了带时延补偿的图像雅可比矩阵估计值,并针对运动目标设计了相应的跟踪控制律。我们也对所提出的时延补偿方法进行了仿真实验,结果表明本文的时延补偿方法具有良好的跟踪效果,通过仿真实验我们也得到了不同时延周期对跟踪效果的影响规律。然而,本文并没有专门考虑对快速运动目标的时延补偿跟踪控制问题,这将是进一步的研究需要考虑的问题。

## 参考文献

- 1 Hutchinson S, Hager GD, Corke PI. A tutorial on visual servo control. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 1996, 12(5): 651–670.
- 2 苏剑波. 机器人无标定手眼协调. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- 3 Nakabo Y, Ishikawa M. Visual impedance using 1ms visual feedback system. *Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1998. 2333–2338.
- 4 Imai Y, Namiki A, Hashimoto K, et al. Dynamic active catching using a high-speed multifingered hand and a high-speed vision system. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2004. 1849–1854.
- 5 Gangloff J, Mathelin M. High speed visual servoing of a 6 DOF manipulator using MIMO predictive control. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2000. 3751–3756.
- 6 Oaki J. Application of 1,000 fps high speed image processing to active camera system-tracking of unspecified moving object under ordinary illumination and cluttered background. *Journal of ordinary society of Japan*, 2005, 23(3): 282–285.
- 7 Nakadokoro M, Komada S, Hori T. Stereo visual servo of robot manipulators by estimated image features without 3D reconstruction. *IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. 1999. 571–576.
- 8 Nishio D, Nkamura M, Komada S, et al. Tracking of moving object by manipulator using estimate image feature and its

- error correction on image planes. *Advanced Motion Control*, 2004: 653–657.
- 9 Kinbara I, Komada S, Hirai J. Visual servo of active cameras and manipulators by time delay compensation of image features with simple on-line calibration. *SICE-ICASE International Joint Conference*, 2006, 23(3): 5317–5322.
- 10 Kinbara I, Komada S, Hirai J. Visual servo of active cameras and manipulators with simple on-line Calibration for estimated Image Features. *Advanced Motion Control*, 2006: 653–657.
- 11 Inoue T, Hirai S. Robotic manipulation with large time delay on visual feedback systems. *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 2010: 1111–1115.
- 12 Chaumette F, Santos A. Tracking a moving object by visual servoing. *12th World Congress, IFAC, Sydney, Australia*, 1993, 9: 409–414.
- 13 Kim GW, Lee BH, et al. Uncalibrated visual servoing Technique using large residual. *Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei. IEEE*. 2004. 3315–3320.
- 14 Li F, Xie HL, Xu XH, et al. Uncalibrated direct visual servoing based on state estimation. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2006. 521–525.
- 15 刘文芳, 郝志刚, 卢胜利, 等. 带时延补偿的图像雅可比矩阵在线估计方法. *计算机工程与应用*, 2010, 46(21): 181–184.
- 16 高振东, 苏剑波. 带有时延补偿的图像雅可比矩阵估计方法. *控制理论与应用*, 2009, 26(1): 23–27.
- 17 Liu YH, Wang HS. Uncalibrated visual servoing of robots using a depth-independent image interaction matrix. *IEEE Trans. on Robotics*, 2006, 22(4): 804–817.
- 18 Weiss LE, Sanderson AC, Neuman CP. Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(5): 404–417.
- 19 Jagersand M, Fuentes O, Nelson R. Experimental evaluation of uncalibrated visual servoing for precision manipulation. *Proc. of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1997, 4. 2874–2880.
- 20 季海波. 控制理论中的代数基础. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.