

文章编号: 1000-8152(2009)01-0023-05

## 带有时延补偿的图像雅可比矩阵估计方法

高振东, 苏剑波

(上海交通大学 自动化系, 上海 200240)

**摘要:** 提出一种新的带有时延补偿的图像雅可比矩阵在线估计方法, 用于存在时延的无标定视觉伺服系统. 传统的图像雅可比矩阵估计方法没有考虑时延影响, 从而产生较大的估计误差. 为了补偿时延, 本文采用局部拟合方法估计图像雅可比矩阵, 以获得当前时刻更准确的图像雅可比矩阵估值, 并可对图像预补偿. 本文以无标定的移动机器人和视觉传感器为实验对象, 仿真和实验表明该方法改善了系统的动态性能, 减小了稳态误差, 从而验证带有时延补偿的图像雅可比矩阵估计方法的可行性和有效性.

**关键词:** 无标定视觉伺服; 时延补偿; 图像雅可比矩阵估计

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** A

## The estimation of image Jacobian matrix with time-delay compensation for uncalibrated visual servoing

GAO Zhen-dong, SU Jian-bo

(Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** A novel online estimation of image Jacobian matrix with time-delay compensation for uncalibrated visual servoing is proposed. The traditional methods didn't consider the time-delay which causes larger estimation error. In order to compensate the time-delay, local fitting Jacobian matrix with time-delay compensation based on polynomial fitting is employed to obtain more accurate Jacobian estimation and image precompensation. Simulations and experiments of uncalibrated mobile robot and uncalibrated visual sensors show that this method improves the system dynamic performance and reduces the steady-state error, demonstrating the feasibility and validity of the time-delay compensation.

**Key words:** uncalibrated visual servoing; time-delay compensation; image Jacobian matrix estimation

### 1 引言(Introduction)

图像雅可比矩阵估计是无标定视觉伺服领域最重要的研究之一. 图像雅可比矩阵描述了机器人系统中图像空间的微分变化和机器人工作空间的微分变化之间的非线性映射关系. Herve论述了传感信息从图像空间直接映射到机器人运动空间的可能性和可行性<sup>[1]</sup>. 在机器人运动过程中图像雅可比矩阵是不断变化的, 因此需要在线或离线辨识图像雅可比矩阵<sup>[2]</sup>. 精确辨识图像雅可比矩阵是有效控制的关键. Hashimoto等采用人工神经网络逼近图像雅可比矩阵, 规划机器人末端执行器的位置和方向, 应用于眼在手上构型的视觉定位问题<sup>[3]</sup>. Piepmeier等采用递推最小二乘法在线估计图像雅可比矩阵, 并进行了收敛性分析, 实验验证了其方法的可行性<sup>[4]</sup>. 苏剑波等提出非线性视觉映射模型, 并应用于无标定手

眼协调系统进行3-D视觉跟踪<sup>[5]</sup>. 这些研究是以假设系统没有时间延迟为基础, 进行的图像雅可比矩阵估计.

但在大多数的实际系统中, 特别是遥操作系统, 都存在的一些时间延迟环节, 如数据(图像)采集和传输、特征提取等. 在上述研究中并没有人提及存在时延情况下这些图像雅可比矩阵估计方法的局限性. 对于一个时延系统, 如果采用传统的图像雅可比矩阵估计方法, 忽略系统时延, 则建立的是机器人工作空间中当前的运动和图像空间中延迟的机器人运动之间的非线性映射关系, 这显然是不准确的. 将这个图像雅可比矩阵估值应用于机器人视觉伺服控制, 必然引起控制的不精确, 甚至控制失败.

为了解决视觉系统的延时问题, 人们提出了一些解决办法<sup>[6]</sup>, 取得了一定的成果. 已有的方法大多是

从控制角度提出的,通过控制器改善系统性能,以在一定程度上改善系统的稳定性,减小稳态误差,但由于图像特征的不准确和延迟,这类方法的效果十分有限,无法实现快速的动态控制.而在图像特征空间来克服延时的影响可以直接地很大程度上减小上述误差,从而提高系统的稳定性,使稳态误差更小,改善控制效果. Nishio 等<sup>[7]</sup>和Nakadokoro等<sup>[8]</sup>通过预测图像的变化来补偿这部分时延,并取得了一定的效果.它建立的是机器人工作空间中当前的运动和通过预测获得的图像空间中机器人运动之间的非线性映射关系.但其假定在时延期间机器人运动图像特征的加速度不变,且对图像特征运动的预测本身就存在着较大的误差,所以这种方法存在很大的局限性,不适合实际动态控制系统.

本文通过局部拟合估计图像雅可比矩阵补偿时延,实现了更为精确的图像雅可比矩阵估计算法.

## 2 传统图像雅可比矩阵估计方法(Traditional estimation of image Jacobian matrix)

为了实现对机器人的视觉伺服控制,必须确定机器人在运动空间中和图像平面上的对应关系.图像雅可比矩阵描述了这种对应关系.机器人在图像中的位置 $f(t_1)$ 和在机器人工作空间中的位置 $p(t_2)$ 可表示为:

$$f(t_1) = [f_1(t_1), f_2(t_1), \dots, f_m(t_1)]^T, \quad (1)$$

$$p(t_2) = [p_1(t_2), p_2(t_2), \dots, p_n(t_2)]^T. \quad (2)$$

以往的方法假定图像空间的变化和机器人运动空间变化同步,即 $t_1 = t_2$ .因此它们的关系可以表示为:

$$\dot{f}(t_1) = J(p) \cdot \dot{p}(t_2) = J(p) \cdot \dot{p}(t_1). \quad (3)$$

其中: $\dot{f}$ 是图像特征随时间的变化率, $\dot{p}$ 是机器人整体或局部特征的位置或姿态的变化率, $J(p)$ 是一个 $m \times n$ 的矩阵,即图像雅可比矩阵. $J(p)$ 可以进一步表示为:

$$J(p) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial p_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial p_n} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

这样在系统存在时延的情况下,式(3)应表示为:

$$\dot{f}(t_1) = J_{t_2-\tau}(p) \cdot \dot{p}(t_2 - \tau). \quad (5)$$

其中 $\tau$ 表示延迟环节.

下面分析不考虑时延情况,传统估计方法带来的问题.首先分析没有时延的情况下采用传统方法估计图像雅可比矩阵的过程.假设系统当前时刻是 $k$ ,系统采样周期为 $T$ .系统对机器人施加控制量后,可以通过机器人动力学模型或机器人的里程计获得机器人位置的变化量 $\Delta p$ ,由于这个过程计算量很小,通常耗时可以忽略不计.同一时刻系统通过摄像机获得机器人在图像空间中的变化量 $\Delta f$ ,如果假设这个过程也不存在时延,则可以通过传统方法逼近或估计此时的图像雅可比矩阵.

由于时延的存在,上述估计方法就会产生错误的映射关系,如图1所示.假定系统时延是 $hT$ .系统可以实时或在很小时延的情况下获得机器人位置的变化量 $\Delta p$ .而系统通过摄像机获得机器人在图像空间中的变化量 $\Delta f$ 总是 $h$ 个采样周期之前的.另外由于图像的延迟,系统的控制误差就会变得更大.

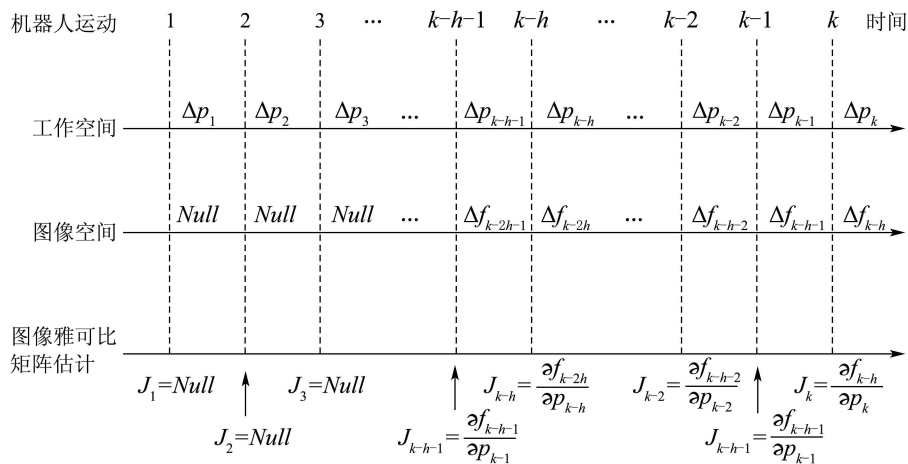


图1 存在时延传统图像雅可比矩阵估计方法

Fig. 1 Traditional estimation of IJM with time-delay

### 3 基于时延补偿的图像雅可比矩阵估计方法 (Estimation of image Jacobian matrix with time-delay compensation)

为了获得准确的映射关系, 首先将通过图像获

得的机器人运动序列补偿 $h$ 个采样周期, 如图2所示。

这时可以通过传统估计方法获得 $k-h$ 时刻前的准确图像雅可比矩阵估值。

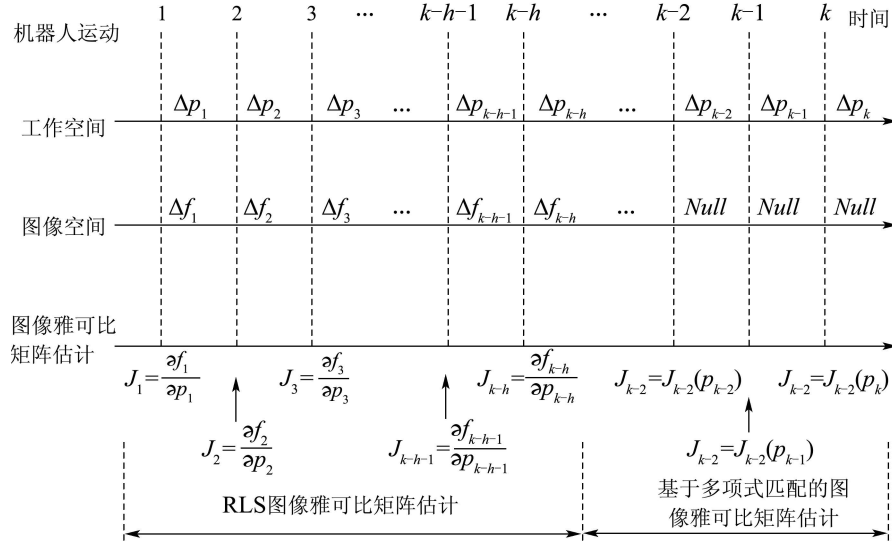


图2 存在时延基于时延补偿图像雅可比矩阵估计方法

Fig. 2 Estimation of IJM with time-delay compensation

文献[4]给出了采用递推最小二乘算法来估计 $k-h$ 时刻的图像雅可比矩阵估值 $\hat{J}_{k-h}$ :

$$\hat{J}_{k-h} = \hat{J}_{k-h-1} + \frac{(f_{k-h} - f_{k-h-1})\dot{p}_{k-h}^T P_{k-h-1}}{\lambda + \dot{p}_{k-h}^T P_{k-h-1} \dot{p}_{k-h}} - \frac{(\hat{J}_{k-h-1} \dot{p}_{k-h} - \frac{\partial f_{k-h}}{\partial t} T) \dot{p}_{k-h}^T P_{k-h-1}}{\lambda + \dot{p}_{k-h}^T P_{k-h-1} \dot{p}_{k-h}}, \quad (6)$$

$$P_{k-h} = \frac{1}{\lambda} (P_{k-h-1} - \frac{P_{k-h-1} \dot{p}_{k-h} \dot{p}_{k-h}^T P_{k-h-1}}{\lambda + \dot{p}_{k-h}^T P_{k-h-1} \dot{p}_{k-h}}). \quad (7)$$

其中:  $\hat{J}_{k-h}$ 是 $k-h$ 时刻的图像雅可比矩阵的最小二乘估值,  $f_{k-h}$ 是 $k-h$ 时刻的目标值,  $\dot{p}_{k-h}$ 是机器人末端执行器运动变化量,  $T$ 是系统采样周期,  $\lambda$ 是遗忘因子,  $0 < \lambda \leq 1$ ,  $\frac{\partial f}{\partial t} T$ 为误差补偿项, 若该方法应用于静态目标, 则 $\frac{\partial f}{\partial t} T = 0$ 。

至此已通过递推可以获得 $J_i (i = 1, \dots, k-h)$ 和机器人位置变化量 $\dot{p}_i (i = 1, \dots, k)$ 。下面采用多项式拟合方法拟合出图像雅可比矩阵的变化, 并通过 $\dot{p}_i (i = k-h+1, \dots, k)$ 估计 $J_i (i = k-h+1, \dots, k)$ , 进而获得 $k$ 时刻机器人在图像中的位置并应用于控制。

由于机器人位置的变化引起了机器人图像空间和图像雅可比矩阵的变化, 也就是说 $f$ 和 $J$ 都

是位置 $p$ 的函数, 因此可以通过 $J_i (i = 1, \dots, k-h)$ 和 $\dot{p}_i (i = 1, \dots, k)$ 在线局部拟合 $J$ , 进而估计 $J_k(p_k)$ 。 $J$ 表示为 $p$ 的函数:

$$J_i(p_i) = \begin{bmatrix} j_{11}(p_{i,1}) & \cdots & j_{1n}(p_{i,n}) \\ \vdots & & \vdots \\ j_{m1}(p_{i,1}) & \cdots & j_{mn}(p_{i,n}) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

其中 $p \in n$ ,  $j_{11}, \dots, j_{mn}$ 表示 $J(p)$ 的子项。

下面采用最小二乘法拟合 $J(p)$ 曲线。为了简化拟合模型, 取拟合函数为线性多项式形式:

$$j(p) = a_0 + a_1 p + \cdots + a_v p^v. \quad (9)$$

其中:  $a_0, a_1, \dots, a_v$ 是多项式拟合函数的系数,  $v$ 表示最高项次数。

下面通过最小二乘法计算 $a_0, a_1, \dots, a_v$ 。为了减小系统的累积误差, 采用从时刻 $k-h-r+1$ 到 $k-h$ 的这一部分数据进行拟合,  $r$ 表示用于拟合的数据的个数。假定 $J_i(p_i), (i = k-h-r+1, \dots, k-h)$ 的权值分别是 $0 < \beta_i \leq 1$ 。目标函数是得到1个阶次为 $v$ 的多项式使拟合残差最小:

$$\min(\varphi(a_0, a_1, \dots, a_v)) = \min(\sum_{i=0}^r e_i^2) = \min(\sum_{i=0}^r \beta_i (a_0 + a_1 p + \cdots + a_v p^v - j_i)^2). \quad (10)$$

其中 $e_i$ 是 $j_i(p)$ 和多项式函数之间的差值.

则:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial a_q} = \sum_{i=0}^r \beta_i p_i^q (a_0 + a_1 p + \dots + a_v p^v - j_i) = 0, \quad q = 0, 1, \dots, v. \quad (11)$$

取 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_r = 1$ , 易得方程组:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=0}^r 1 & \sum_{i=0}^r p_i & \dots & \sum_{i=0}^r p_i^v \\ \sum_{i=0}^r p_i & \sum_{i=0}^r p_i^2 & \dots & \sum_{i=0}^r p_i^{v+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^r p_i^v & \sum_{i=0}^r p_i^{v+1} & \dots & \sum_{i=0}^r p_i^{v+v} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^r j_i \\ \sum_{i=0}^r p_i j_i \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^r p_i^v j_i \end{bmatrix}. \quad (12)$$

可解出 $a_0, a_1, \dots, a_v$ 即可得 $j_i(p)$ . 由式(8)进而可得 $\hat{j}_{k-h+1}, \dots, \hat{j}_k$ . 同样可得到机器人末端执行器的预测位置值 $\hat{f}_i(p)$ .

### 4 仿真(Simulation)

本节通过仿真检验前面提出的带有时延补偿的图像雅可比矩阵估计方法. 仿真系统中的实验对象由一个移动机器人和一个摄像机组成. 任务是通过未标定的摄像机控制机器人沿环形轨迹运动, 系统中机器人和摄像机相互关系未知.

移动机器人和目标运动在同一平面. 假定系统时延 $\tau$ 是两个采样周期. 目标轨迹总长1500 mm, 每步15 mm. 目标轨迹起始位置是[0 mm, 480 mm], 机器人起始位置是[0 mm, 0 mm]. 设置多项式拟合函数的最高阶次为2. 拟合数据从第 $k - m - 5$ 步到 $k - m$ 步, 其中 $m = 2$ . 实验如图3所示, 系统时延 $\tau$ 是两个采样周期.

图中包含了环形目标轨迹以及两条机器人运动轨迹, 一条采用传统图像雅可比矩阵估计方法, 另一条采用的是本文提出带有时延补偿的图像雅可比矩阵估计方法. 从图4中可以看到, 两种方法都在8步左右迅速接近目标轨迹, 并在20步左右达到稳态. 但前者有一些超调, 并且稳态误差明显大于后者. 而采用新方法的轨迹在20步后几乎没有

误差, 体现了较好的跟踪性能. 带有时延补偿的图像雅可比矩阵估计方法优于传统的方法. 通过多组仿真, 得到这样一个结论, 时延越大, 带有时延补偿的估计方法跟踪效果越优于传统方法. 当然时延的增大会显著影响系统的稳定性, 同样也会影响拟合的准确性.

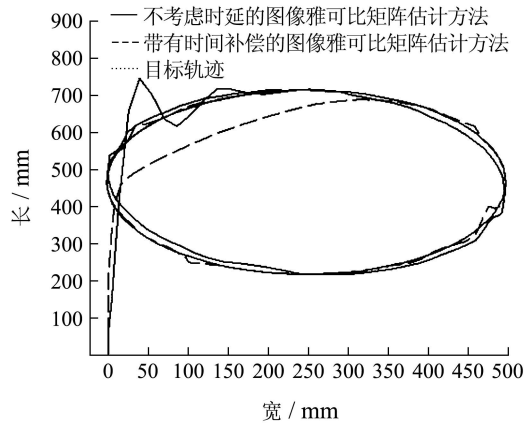


图3  $\tau = 2T$ 时机器人的运动轨迹

Fig. 3 Robot tracking ring trajectories at  $\tau = 2T$

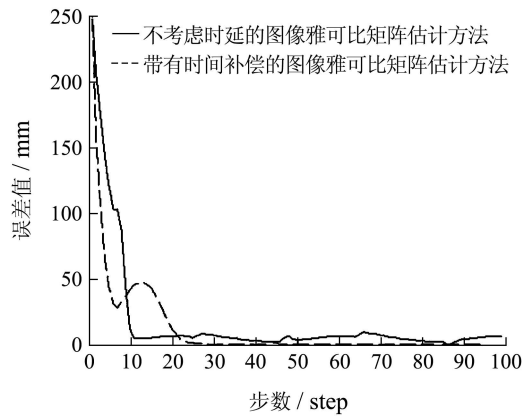


图4  $\tau = 2T$ 时机器人的跟踪误差

Fig. 4 Robot tracking errors at  $\tau = 2T$

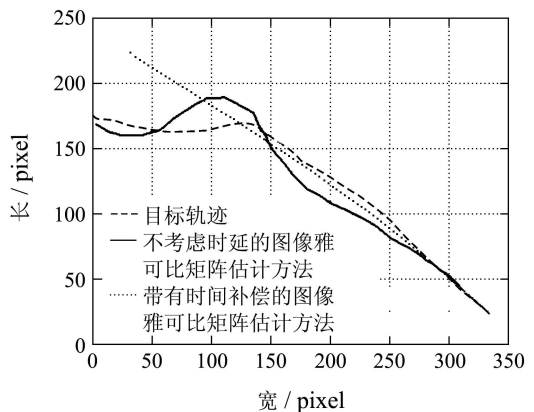


图5 机器人跟踪轨迹

Fig. 5 Robot tracking trajectories

仿真说明了带有时延补偿的图像雅可比矩阵估计改善了系统的动态性能并减小了稳态误差, 当系统存在一定的时延时, 该方法明显优于传统方法.

## 5 实验(Experimentation)

实验中采用ActiveMedia Pioneer2DX 移动机器人作为实验对象. 实验系统另外包括一套100 M局域网和一个网络摄像机. 实验系统中机器人和摄像机之间是未标定的, 需要在线估计图像雅可比矩阵, 机器人模型已知. 系统时延等于两个采样周期.

实验任务是机器人通过未标定摄像机的导航沿跟踪运动目标. 目标轨迹长350个像素点, 跟踪过程共30步, 平均每个循环12个像素点. 图5是对跟踪轨迹的比较, 从图中可以看出, 采用不考虑时延的图像雅可比矩阵估计方法, 机器人的跟踪轨迹存在较大的超调. 而采用带有时延补偿的图像雅可比矩阵估计方法, 其跟踪轨迹较为平滑.

实验结果表明带有时延补偿的图像雅可比矩阵估计方法减小了时延的影响, 同时使系统具有更好的稳态性能.

## 6 结论(Conclusion)

本文提出了一种基于多项式拟合的带有时延补偿的图像雅可比矩阵估计方法, 这种方法可以更有效地估计存在时延系统中的图像雅可比矩阵, 并应用于无标定视觉伺服控制. 通过一系列无标定视觉伺服仿真和实验, 可以说明这种方法的有效性和跟踪的稳定性.

## 参考文献(References):

- [1] HERVE J, SHARMA R, CUCKA P. Toward robust vision-based control: Hand-Eye coordination without calibration[C] // *Proceedings of IEEE Internet Symposium on Intelligent Control*. Singapore: IEEE Computer Society Press, 1991: 457 – 462.
- [2] SUTANTO H, SHARMA R, VARMA V. Image based autodocking without calibration[C] // *Proceedings of IEEE Internet Conference Robotics and Automation*. Albuquerque: IEEE Computer Society Press, 1997: 974 – 979.
- [3] HASHIMOTO H, KUBOTA T, SATO M, et al. Visual control of robotic manipulator based on neural networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1992, 39(6): 490 – 496.
- [4] PIEPMEIER A J, MCMURRAY V G, LIPKIN H. Uncalibrated dynamic visual servoing[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automations*, 2004, 20(1): 143 – 147.
- [5] SU J, QIU W, MA H, et al. Calibration-free robotic eye-hand coordination based on an auto disturbance-rejection controller[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2004, 20(5): 899 – 907.
- [6] HIGASHI S, KOMADA S. Obstacle avoidance of redundant manipulators on visual servo system using estimated image features[C] // *Proceedings of International Workshop on Advanced Motion Control*. Singapore: World Scientific, 1998: 165 – 170.
- [7] NISHIO D, NAKAMURA M, KOMADA S, et al. Tracking of moving object by manipulator using estimated image feature and its error correction on image planes[C] // *Advanced Motion Control*. Kawasaki, Japan: IEEE Computer Society Press, 2004: 653 – 657.
- [8] NAKADOKORO M, KOMADA S, HORI T. Stereo visual servo of robot manipulators by estimated image features without 3D reconstruction[C] // *IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Michigan: IEEE Computer Society Press, 1999, 1: 571 – 576.

## 作者简介:

高振东 (1977—), 男, 博士, 研究方向为网络机器人、嵌入式系统, E-mail: imgordon@163.com;

苏剑波 (1969—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为机器人视觉、多机器人协调, E-mail: jbsu@sjtu.edu.cn.