

文章编号: 1001-0920(2003)01-0077-04

图象雅可比矩阵的在线 Kalman 滤波估计

钱江, 苏剑波

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

摘要: 通过分析现有图象雅可比矩阵的在线辨识方法, 提出一种新的辨识思路。将雅可比矩阵的在线估计转化为系统的状态观测, 并设计了相应的 Kalman-Bucy 滤波估计算法。以双目立体视觉反馈下的运动目标跟踪任务为例, 通过仿真和实验说明了所提出方法的有效性。

关键词: 手眼协调; 图象雅可比矩阵; Kalman-Bucy 滤波; 视觉反馈

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

On-line estimation of image Jacobian matrix based on Kalman filter

Q I A N J i a n g , S U J i a n - b o

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Some existing methods of image Jacobian s on-line estimation are discussed. A new on-line identification method is provided based on Kalman-Bucy filter algorithm. For the specific task of stereo vision guided motion tracking, simulations and experiments demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: Hand-eye coordination; Image Jacobian matrix; Kalman-Bucy filter; Visual feedback

1 引言

机器人手眼协调控制包括两种基本方法, 即基于位置的控制和基于图象的控制。前者的控制性能很大程度上依赖于手眼系统参数标定的精度, 在实际应用中效果并不理想。因此人们更倾向于使用基于图象的控制方法, 即由图象特征误差直接建立反馈控制律。而要实现这种控制方式, 首先必须建立从图象特征空间到机器人运动空间的模型映射。目前使用最多的是如下图象雅可比矩阵模型

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

图象雅可比矩阵 $J(p)$ 描述了机器人执行器运动速度 \dot{p} 与相应图象特征运动 \dot{f} 之间的比例关系, 可用于建立图象反馈控制律。这种使用图象雅可比矩阵

的直接图象反馈控制已在很多手眼系统中得到应用。例如 Allen 等用它完成在二维平面上插轴入孔的任务^[1]; Horaud 等基于雅可比矩阵的视觉反馈控制, 完成对 3D 形状目标的抓取操作^[2]。

对于无标定手眼协调的控制任务而言, 图象雅可比矩阵是未知的时变模型, 因此必须考虑图象雅可比矩阵模型的辨识问题。Kawabata 等^[3] 和 Hashimoto 等^[4] 对雅可比矩阵变化较小的情况进行离线辨识, 在实际控制过程中使用固定的图象雅可比矩阵。但在更多情况下, 图象雅可比矩阵在机器人运动过程中变化十分明显, 这种方法并不能取得良好的性能, 因此必须探索图象雅可比矩阵的在线估计方法。

现有在线辨识图象雅可比矩阵的方法大致可

收稿日期: 2001-09-11; 修回日期: 2001-11-02。

作者简介: 钱江(1976—), 男, 浙江海盐人, 硕士生, 从事机器人控制等研究; 苏剑波(1969—), 男, 江苏靖江人, 教授, 从事机器人学、计算机视觉等研究。

分为以下两类：一类是基于在线自标定的间接估计方法。其基本思想是进行在线参数自标定，然后由解析表达式计算当前的图象雅可比矩阵。如 Horation^[2] 针对一个固定单眼空间 3D 形状目标抓取的任务，通过观察手爪上的多个特征点，估计出当前的手爪位姿参数，并由此计算图象雅可比矩阵。这类方法的一个缺点是雅可比矩阵的获得必须经过两次运算，观测误差将被累积，严重影响估计精度。此外，这类方法要求知道雅可比矩阵的解析表达式，这意味着上述方法只能针对特定的手眼协调系统，不具有通用性。

另一类方法是从雅可比矩阵的物理含义出发，通过观察已知机器人运动所引起的图象特征变化来估计相应的图象雅可比矩阵。根据具体实现方式的不同，这类方法又可分为两种：第 1 种是直接估计每个控制时刻的图象雅可比矩阵本身。如 Allen^[1] 通过在当前位置附加两步试探运动，用最小二乘法估计当前的图象雅可比矩阵。Sutanto^[5] 提出用机器人已完成的运动来实现这一估计过程，但这种方法在估计过程中存在运动奇异问题。第 2 种是用估计雅可比矩阵的增量来代替对雅可比矩阵本身的估计。通过每一步观察到的机器人运动和相应的图象特征运动，逐步修正对图象雅可比矩阵的估计。Hosada 等^[6] 和 Jagersand 等^[7] 相继提出了一些较为有效的在线更新估计算法。

本文介绍一种新的图象雅可比矩阵的在线辨识策略，将对雅可比矩阵的辨识问题转化为相应系统的状态观测问题，并采用 Kalman-Bucy 滤波算法来具体实现。与以往方法相比，这种方法对状态噪声有较强的鲁棒性。仿真和实验说明了所提出方法的有效性。

2 基于 Kalman-Bucy 滤波的雅可比矩阵在线递推估计

为实现图象雅可比矩阵的在线辨识，可以构造一个系统，以待估计的矩阵元素作为系统的状态，从而将对雅可比矩阵的估计问题转变为对系统状态的观测问题。同时使用 Kalman 滤波算法来实现这一状态观测，以便减弱观测噪声的影响，使雅可比矩阵的估计有足够的鲁棒性。

为实现对 $J(p)$ 矩阵各个元素的估计，本文定义如下 $mn \times 1$ 维观测向量

$$x = \begin{bmatrix} \hat{q}_1 \\ \hat{q}_2 \\ \dots \\ \hat{q}_m \end{bmatrix}^T$$

其中

$$\hat{q}_i = \begin{bmatrix} \hat{q}_{i1} & \dots & \hat{q}_{in} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

为雅可比矩阵 $J(p)$ 的第 i 行向量。根据式 (1) 的雅可比矩阵的定义，有

$$f(k+1) = f(k) + J(k)\Delta p(k) \quad (2)$$

定义雅可比矩阵的观测向量 $x(k)$ 为系统状态，而手爪运动所引起的图象特征变化为系统输出，即 $y(k) = f(k+1) - f(k)$ 。于是可得到如下状态方程

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + \eta(k) \\ y(k) = C(k)x(k) + v(k) \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$C(k) = \begin{bmatrix} \Delta p(k)^T & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \Delta p(k)^T \end{bmatrix}_{m \times mn} \quad (4)$$

$\eta(k)$ 和 $v(k)$ 分别为状态噪声和图象观测噪声，假定为高斯白噪声。

按照 Kalman-Bucy 滤波算法^[8,9]，建立如下递推估计

$$\begin{cases} Q(k+1) = P(k) + R\eta \\ K(k+1) = \\ Q(k+1)C^T(k)[C(k)Q(k+1)C^T(k) + R_v]^{-1} \\ P(k+1) = \\ [I - K(k+1)C(k)]Q(k+1) \\ x(k+1) = \\ x(k) + K(k+1)[y(k+1) - C(k)x(k)] \end{cases} \quad (5)$$

其中： R_η 和 R_v 为噪声方差阵，根据实际的噪声情况设定； $P(k)$ 为状态估计误差方差阵，其初始值可取 $P(0) = 10^5 I_{mn}$ ；状态估计的初值 $x(0)$ (即 $J(0)$) 可采用如下最小二乘方法获得：

在手爪的初始位置任意给定 n 步线性无关的试探运动 $\Delta p_1, \dots, \Delta p_n$ ，观察相应的图象特征变化 $\Delta f_1, \dots, \Delta f_n$ ，从而获得初始的雅可比矩阵估计值

$$J(0) = [\Delta f_1 \ \dots \ \Delta f_n][\Delta p_1 \ \dots \ \Delta p_n]^{-1} \quad (6)$$

然后用 $J(0)$ 构成 $x(0)$ 。这样只需在系统初始时给出 n 步试探运动，而在雅可比矩阵的递推估计中使用机器人已完成的跟踪运动，因此不会影响系统的跟踪性能。

3 仿真研究

对一个具有固定双目视觉反馈的无标定手眼系统进行仿真，以完成跟踪空间三维运动目标的任务。机器人末端执行器具有三维平动能力，执行器在机器人基坐标系中的坐标为 $p^s = [p_x^s, p_y^s, p_z^s]^T$ ，在

两个固定摄像机坐标系内的坐标分别为 $p^{c1} = [p_x^{c1}, p_y^{c1}, p_z^{c1}]^T$ 和 $p^{c2} = [p_x^{c2}, p_y^{c2}, p_z^{c2}]^T$ 。定义图象特征空间为末端执行器在双目摄像机中的图象坐标, 即 $f^g = [f_1^g, f_2^g, f_3^g, f_4^g]^T = [u_1^g, v_1^g, u_2^g, v_2^g]^T$ 。按照式(1)的雅可比矩阵的定义, 有

$$\dot{f}^g = J(p^g) \dot{p}^g \quad (7)$$

对此雅可比矩阵, 利用上述 Kalman-Bucy 估计算法进行估计, 而机器人跟踪目标的控制律设计为

$$u(k) = \Delta p^g(k) = \lambda J(k)^+ e_f(k) \quad (8)$$

其中

$$\lambda = \min\left(\frac{\Delta p_{\max}}{J(k)^+ e_f(k)}, 1\right) \quad (9)$$

$e_f(k)$ 为图象误差, Δp_{\max} 为机器人终端执行器运动速度上限, 以保证给出的控制量不超过机器人的运动能力。

仿真在 MATLAB 平台上完成。在系统配置和目标运动规律都完全相同的情况下, 分别使用固定的图象雅可比矩阵、Kalman-Bucy 滤波算法估计的雅可比矩阵及通过系统参数计算得到的真实雅可比矩阵来跟踪目标。跟踪误差定义为机器人执行器与目标点之间的空间距离, 系统跟踪误差如图 1 所示。

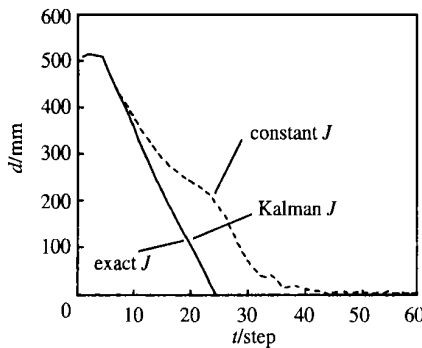
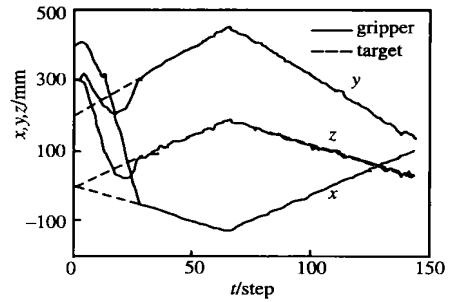


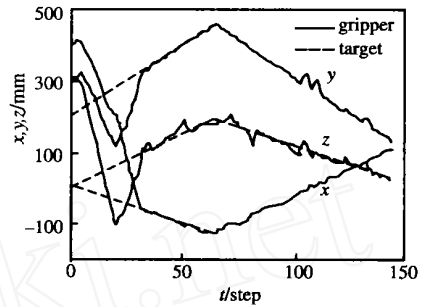
图 1 跟踪误差变化曲线

从图 1 可以看出, 利用 Kalman-Bucy 算法估计得到的雅可比矩阵, 其动态跟踪误差明显小于使用固定雅可比矩阵的跟踪误差, 而与使用真实图象雅可比矩阵的跟踪误差轨迹基本吻合。这说明 Kalman-Bucy 滤波估计算法能有效地逼近不断变化的图象雅可比矩阵。

为进一步分析本文方法的鲁棒性, 在图象特征提取环节施加最大幅值为正负 3 个象素点、均值为 0 的随机噪声, 并与 Sutanto^[5]使用的 n 步跟踪运动在线最小二乘估计方法进行比较。跟踪过程中执行器和目标在机器人基坐标系中三维坐标的变化如图 2 所示。



(a) Kalman-Bucy 滤波估计



(b) Sutanto 方法估计

图 2 直线运动跟踪过程

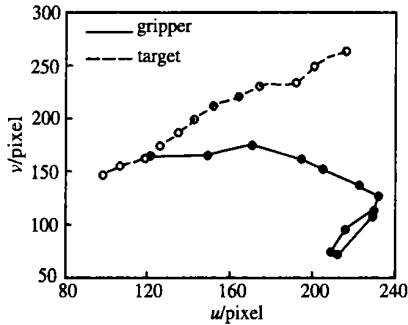
从图 2 可以看出, 虽然两种方法都能实现对空间运动的跟踪, 但本文所使用的 Kalman-Bucy 滤波估计算法是一种递推修正估计, 对图象观测噪声具有更好的鲁棒性。不仅跟踪速度快, 而且跟踪过程相当平稳。此外, 图中显示在 x 和 y 方向的跟踪误差相对较小, 而 z 方向的误差则较大。这主要是由于两个摄像机的安装位置造成的, 它们观察 z 轴运动的灵敏度低于观察 x 和 y 轴运动的灵敏度, 故对 z 轴运动的观察受图象观测噪声的影响较大。

4 实验研究

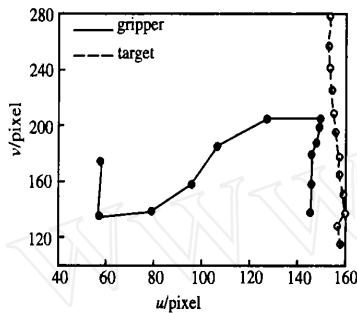
实验系统选用一台四自由度的 SCARA 型装配机器人, 锁住机器人的第 4 个转动关节, 使末端执行器只进行三维平动。视觉部分使用两个彩色 CCD 摄像头, 以观察机器人在 3 个坐标轴方向的运动, 摄像头的内外参数不作任何标定。为简化图象处理和目标识别, 手爪与目标都用一个相应色块来标识。在图象处理中, 以色块的中心坐标作为目标和手爪的图象位置。跟踪任务是使代表手爪的色块跟上并接触运动的目标色块。目标物作近似直线运动, 速度约为 0.1 m/s 。

使用本文提出的 Kalman-Bucy 滤波估计方法来估计雅可比矩阵。结合式(8)的控制律, 目标跟踪结果如图 3 所示。由于实验中以图象色块的几何中心来标识手爪和目标, 在观察到的图象中, 色块本身

的半径就有约 10 pixel, 因此在手爪色块接触目标, 即跟踪任务完成时, 二者图象中心仍相距约 20 pixel.



(a) 摄像机 1 图象跟踪



(b) 摄像机 2 图象跟踪

图 3 空间目标跟踪过程

5 结 论

基于图象雅可比矩阵方法的无标定手眼协调系统, 其性能很大程度上取决于是否对雅可比矩阵进行在线辨识以及所选在线辨识算法的好坏。本文提出一种雅可比矩阵的在线 Kalman-Bucy 滤波估计算法, 不需引入任何冗余运动, 直接利用机器人已完成的跟踪运动在线递推辨识当前的图象雅可比矩

阵。仿真和实验表明, 使用该算法的无标定双目手眼系统, 能有效地实现对空间三维运动的跟踪, 并对噪声有很强的鲁棒性。通过与已有典型方法的比较, 证明了本文方法的优越性。

参考文献 (References):

- [1] Yoshimi B H, Allen P K. Alignment using an uncalibrated camera system [J]. *IEEE Trans Robot Automat*, 1995, 11(4): 516-521.
- [2] Radu Horaud, Fadi Dornaika. Visually guided object grasping [J]. *IEEE Trans Robot Automat*, 1998, 14(4): 525-532.
- [3] Kawabata A, Fujita M. Design of an H^∞ filter-based robust visual servoing system [J]. *Contr Eng Prac*, 1998, (6): 219-225.
- [4] Hashimoto K, Ebine T, Kimura H. Visual servoing with hand-eye manipulator: Optimal control approach [J]. *IEEE Trans Robot Automat*, 1996, 12(5): 766-774.
- [5] Sutanto H, Shama R, Vama V. Image based autodocking without calibration [A]. *Proc IEEE Int Conf Robot Automat [C]*. New Mexico: Albuquerque, 1997. 974-979.
- [6] Hosada K, Asada M. Versatile visual servoing without knowledge of true Jacobian [A]. *Proc IEEE/RSJ Int Conf Intell Robot Syst [C]*. Melbourne, 1994. 186-191.
- [7] Jagersand M, Fuentes O, Nelson R. Experimental evaluation of uncalibrated visual servoing for precision manipulation [A]. *Proc IEEE Trans Robot Automat [C]*. New Mexico: Albuquerque, 1997. 2874-2880.
- [8] 徐南荣, 宋文忠, 夏安邦. 系统辨识 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1991.
- [9] L. 雍, T. 索德斯图姆. 递推辨识的理论与实践 [M]. 田立生译. 北京: 科学出版社, 1989.