

文章编号:1671-6833(2013)01-0095-04

基于 Kalman 滤波的图像雅克比矩阵在线估计

刘广瑞¹, 黄 真¹, 韩莉莉², 毕竞锴¹

(1. 郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南工业大学 机电学院, 河南 郑州 450007)

摘 要: 视觉伺服机器人主要是通过系统的图像雅克比矩阵表述机器人系统的特征空间进行反馈控制. 首先建立了 SCARA 型机器人系统, 针对系统图像雅克比矩阵的物理意义, 利用雅克比矩阵增量 ΔJ 建立系统状态方程, 以 Kalman 滤波的方法对系统雅克比矩阵进行在线估计. 在 Matlab 仿真的基础上对此方法进行分析, 并将其运用于二维目标的跟踪, 实验表明此方法的有效性.

关键词: 卡尔曼滤波; 雅克比矩阵; 在线估计

中图分类号: TP249 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2013.01.023

0 引言

随着机器人行业的发展, 视觉伺服技术在机器人控制方面的应用也越来越多. 传统系统标定技术由于镜头畸变使摄像机难以精确标定以及当系统发生变化时需要重新标定等因素的影响, 在实际应用时效果并不理想.

基于图像控制的无标定技术在不标定机器人参数及摄像机参数的情况下, 利用图像的特征变化得到反馈信息来完成机器人的控制, 并系统的误差收敛. 如图 1 所示, 在机器人的每个控制周期内, 对系统图像雅克比矩阵进行在线估计并建立系统的反馈控制机制^[1-2].

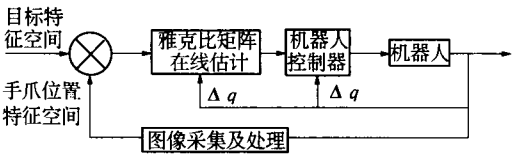


图 1 视觉机器人控制结构图
Fig.1 Control chart of visual robot

由于基于图像雅克比矩阵方法在每个控制周期内都需要当前的系统雅克比矩阵来拟合机器人控制的非线性关系. 笔者提出利用 Kalman 滤波方法对系统的雅克比矩阵进行在线估计, 并以“选择顺应性机器手臂”(SCARA)型四自由度机器人平台进行试验.

1 系统的雅克比矩阵

如图 1 所示, 视觉控制一般是使用图像雅克比矩阵来对系统的特征空间进行描述. 图形雅克比矩阵为机器人的运动控制空间和图像的特征空间的微分映射关系, 定义如下^[3]

$$\dot{f} = J_f(q) \cdot \dot{q} \tag{1}$$

式中: $f \in R^m$ 为系统图像特征参数矢量, $q \in R_n$ 为 n 自由度机器人关节速度矢量, $J_f(q) \in R_{m \times n}$ 为图像雅克比矩阵. 它反映了机器人关节运动与图像特征运动之间的关系^[4-5].

图 2 为视觉伺服系统结构示意图, 如图所示, 机器手爪在摄像头视野内做二维运动, 其在机器人基坐标系中的坐标为 (x_b, y_b, Z) , 其中 Z 是常量. 手爪在摄像机坐标系中的位置根据机器人齐次坐标变换可知

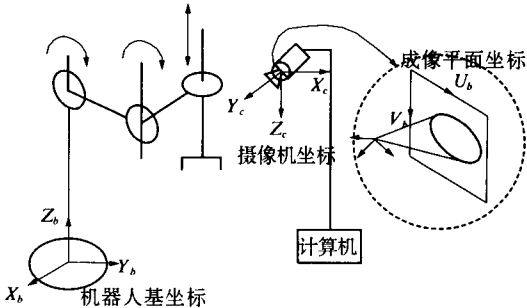


图 2 视觉机器人示意图
Fig.2 Chemes of visual robot

收稿日期:2012-10-12; 修订日期:2012-12-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61075083)

作者简介: 刘广瑞(1966-), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 主要从事机器人自动化控制研究, E-mail: lgrui2006@163.com.

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = T \cdot \begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $(x_c, y_c, z_c)^T$ 为手爪在摄像机坐标系中的坐标. T 为机器人坐标系到摄像头坐标系的齐次变换矩阵此时固定摄像机, 矩阵 T 为常数阵.

若设摄像机的焦距为 λ , 通过摄像机小孔成像原理可知

$$\begin{cases} u_b = \lambda \cdot x_c / z_c; \\ v_b = \lambda \cdot y_c / z_c. \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_b, v_b 为手爪在摄像机成像面的投影坐标.

定义手爪在 XY 平面内的坐标 (x_b, y_b) 为手爪的运动空间 $q_b(t) = (x_b(t), y_b(t))^T$, 再定义手爪在摄像机成像平面的投影位置为图像特征空间 $f_b(t) = (u_b(t), v_b(t))^T$, 根据式(1)可知:

$$\dot{f}_b(q_b) = J_f(q_b) \cdot \dot{q}_b. \quad (4)$$

依照上述, 系统的图像雅克比矩阵可写为如下形式:

$$J_f(q_b) = \begin{bmatrix} \partial u_b / \partial x_b & \partial u_b / \partial y_b \\ \partial v_b / \partial x_b & \partial v_b / \partial y_b \end{bmatrix}. \quad (5)$$

对图像的特征空间求导可得图像的特征运动为

$$\dot{f}_b = \begin{bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{v}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda / z_c & 0 & -u_b / z_c \\ 0 & \lambda / z_c & -v_b / z_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \\ r_{31} & r_{32} \end{bmatrix} \cdot \dot{q}_b. \quad (6)$$

综上所述, 可求得本系统的图像雅克比矩阵如下:

$$J_f = \frac{1}{z_c} \cdot \begin{bmatrix} \lambda r_{11} - u_b r_{31} & \lambda r_{12} - u_b r_{32} \\ \lambda r_{21} - v_b r_{31} & \lambda r_{22} - v_b r_{32} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由上式可知, 手爪运动时系统的图像雅克比矩阵为时变矩阵, 受参数 z_c, u_b, v_b 影响. z_c 可利用伺服反馈通过齐次变换矩阵得到, 而 u_b, v_b 可通过图像处理得到.^[6]

2 雅克比矩阵的在线估计

我们将机器人系统描述为图像雅克比矩阵是静态非线性系统近似成时变线性系统. 卡尔曼滤波方法是一种误差方差最小的状态估计方法, 较适用于线性的离散动态系统. 故笔者对于图像雅克比矩阵的估计采用了 Kalman 滤波方法.

通过 Kalman 滤波利用图像雅克比矩阵的物理意义对其在线估计有两种方法: 一是对雅克比

矩阵的直接估计^[7]. 如机器人插轴入孔任务为典型的雅克比矩阵直接估计. 对于此类方法, 需要对已完成步骤的所有雅克比矩阵求逆, 即必须保证以前所有动作线性无关, 这在实际过程中是很难保证的. 二是对雅克比矩阵的增量 ΔJ 进行估计, 此方法可以避免第一种方法的弊端. 故笔者采用第二种方法对雅克比矩阵进行在线估计, 其方法如下:

将式(5)中图像雅克比矩阵中的四个元素组成一个四维矢量,

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (\partial u_b / \partial x_b, \partial u_b / \partial y_b, \partial v_b / \partial x_b, \partial v_b / \partial y_b)^T. \quad (8)$$

再将雅克比矩阵定义式(1)进行离散化, 可由 k 时刻的图像特征通过 k 时的雅克比矩阵以及机器人运动增量得到 $k+1$ 时刻的图像特征, 如下:

$$f(k+1) \approx f(k) + J(q(k)) \cdot \Delta q(k). \quad (9)$$

以 X 为系统状态, 以雅克比矩阵的增量 ΔJ 为系统输出, 可建立下列系统状态方程.

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + \eta(k) \\ y(k) = C(k) \cdot x(k) + v(k). \end{cases} \quad (10)$$

状态方程中 η, v 为期望为零且不相关的随机噪声, 可假定其为高斯白噪声, 矩阵

$$C(k) = \begin{bmatrix} w(k)^T & 0 \\ 0 & w(k)^T \end{bmatrix}_{2 \times 4}, \text{ 式中, } w(k) \text{ 为}$$

机器人动作增量 $\Delta q_b(k)$.

由此, 可以建立本系统的图像雅克比矩阵的 Kalman 滤波算法, 其形式如下:

$$\begin{cases} Q(k+1) = P(k) + R_\eta \\ K(k+1) = Q(k+1) \cdot C^T(k) \cdot [C(k) \cdot Q(k+1) \cdot C^T(k) + R_v]^{-1} \\ P(k+1) = [I - K(k+1) \cdot C(k)] \cdot Q(k+1) \\ x(k+1) = x(k) + K(k+1) \cdot [y(k+1) - C(k) \cdot x(k)]. \end{cases} \quad (11)$$

式中: R_η 为状态噪声方差矩阵; R_v 为图像的观察噪声方差矩阵; $Q(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的过程激励噪声协方差矩阵; K 和 P 分别为 Kalman 滤波过程中的增益矩阵及估计均方误差矩阵.

雅克比矩阵的白推导需要初值. 其初值可由最小二乘法得到在二维模式下, 其雅克比矩阵为二维矩阵, 可在机器人运动之初, 任意做两步线性无关的动作. 通过伺服控制系统可以得到两个不相关的动作增量 $(\Delta q_{b1}, \Delta q_{b2})$, 同时利用图像处理方法得到两个图像特征变化 $(\Delta f_{b1}, \Delta f_{b2})$, 由雅克比矩阵定义可知, 雅克比矩阵初值可由下式获得.

$$J_f(0) = (\Delta f_{b1} \ \Delta f_{b2}) \cdot (\Delta q_{b1} \ \Delta q_{b2}) \quad (12)$$

在得到 $J_f(0)$ 后,根据式(11)可对后续所有动作过程中的雅克比矩阵进行估计,而后续追踪过程中估测雅克比矩阵不再需要做额外动作。

3 仿真与实验

可以利用 Matlab 平台对图像雅克比矩阵的在线估计进行仿真. 定义任务如下:机器人手爪做二维平移运动,跟踪工作平面上的运动目标. 目标在工作平面内做圆周运动. 仿真参数如下所述:目标位于工作平面 OXY 内,手爪运动平面高于 OXY 平面 120 mm,可得机器人基坐标与摄像头坐标转换矩阵如下

$$T = \begin{bmatrix} 0.080 \ 5 & 0.272 \ 0 & -0.958 \ 9 & 600 \\ -0.011 \ 2 & 0.962 \ 2 & 0.272 \ 0 & 300 \\ 0.996 \ 7 & -0.212 \ 0 & 0.080 \ 5 & 600 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

摄像头焦距 $f_g = 15 \text{ mm}$,在摄像机平面内添加均值为 0,最大 3 个像素的噪声,系统周期设为 50 ms,手爪的最大平移速度为 0.6 m/s. 目标的初始位置为(200,50),线速度为 0.1 m/s,手爪初始位置为(0,0). 则系统仿真轨迹以及误差统计如下图所示。

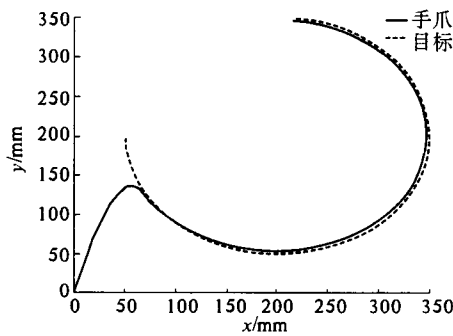


图 3 仿真追踪曲线

Fig.3 Curve of the simulation tracking

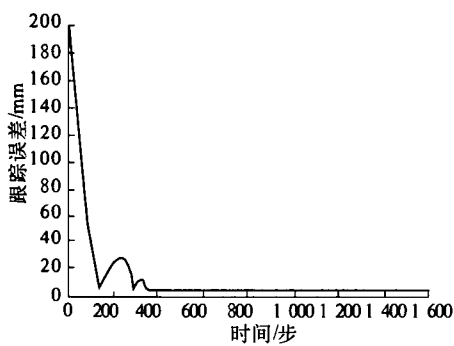


图 4 仿真追踪误差曲线

Fig.4 Error curve of the simulation tracking

由图 3 可知,手爪在跟踪初期快速向目标接近,随后能够持续有效的对做圆周运动的目标进行跟踪. 从图 4 可以得跟踪开始后目标与手爪间的误差呈急剧下降态势,在接近目标后出现小范围的震荡最后随着跟踪步数的增加震荡减弱,并在最后收敛至较小范围. 综上所述,此种非标定方法能够实现手爪对目标的平稳跟踪,从跟踪路径上分析系统的响应速度还有待提高,可以加入一些前瞻算法来补偿跟踪过程中的静差. 从误差曲线上来看,虽然误差最后实现了较好的收敛,但是前期误差震荡较大,这也有待提高。

笔者所用的实验平台为哈工大博实公司的 RBT-4S01S SCARA 四自由度机器人,其终端始终做二维运动,手爪可以上下伸缩运动,其视觉部分为一台的彩色 CCD 摄像头,摄像头位置固定,图像窗口为 512×512 像素. 工作平面为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$. 目标为一绿色圆柱状金属块,其在工作平面内做无规则运动,初始位置为(93,167). 为便于提取手爪特征,将手爪置为红色,其初始位置为(120,176). 实验所得手爪和目标运动轨迹以及误差统计如图 5 所示。

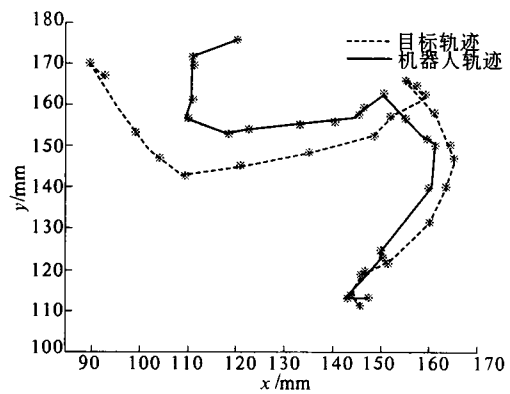


图 5 目标与机器人轨迹

Fig.5 The track of target and Robot

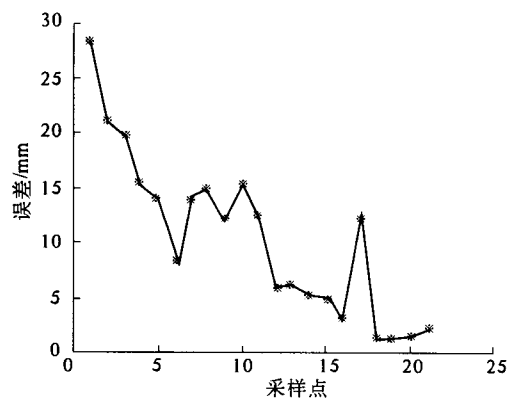


图 6 轨迹误差变化

Fig.6 The variations of track error

由图 5 可知,在跟踪过程中,机器手爪始终向目标靠近,并且其在追踪随机运动目标的路线也较为合理,能够较好地完成跟踪任务.由图 6 误差曲线可以看出其跟踪误差随着跟踪过程逐渐下降并最终收敛至可以接受的范围,在其跟踪过程中误差震荡较大,其跟踪过程平稳程度较差.造成这种情况主要有以下两种原因:一是实际运用中,图像特征噪声较大易造成特征提取出错而造成控制律误判;二是和图像处理速度有关,可以通过加强硬件处理速度以及优化图像处理方法提高跟踪的平稳程度.

4 结论

笔者在分析了系统图像雅克比矩阵物理意义的基础上结合视觉伺服理论提出利用 Kalman 滤波方法对机器人系统的图像雅克比矩阵进行在线估计. Matlab 仿真结果以及二维平面内的目标跟踪实验都显示了此方法对于图像雅克比矩阵在线估计的有效性,为下一步的多目视觉提供了理论支持.

参考文献:

[1] 时少旺,谭守林.基于 Unscented 科尔曼滤波的目标

跟踪仿真分析[J]. 郑州大学学报:工学版,2008,29(3):47-50.

- [2] ZHOU Na, HAO Kuang-rong, GUO Chong-bin. Visual Servo Control System of 2-DOF Parallel Robot[C]// Proceedings of 2010 International Conference on Broadcast Technology and Multimedia Communication (Volume 3). Hong Kong: International Communication Sciences Association, 2010: 207-210.
- [3] 徐雅田. 机器人视觉伺服半实物仿真研究[D]. 保定:河北大学电子信息工程学院,2010.
- [4] LI Hai-feng, LIU Jing-tai, LU Xiang. Visual servo uncalibrated eye-in-hand system with time-delay compensation[C]// World Congress Intelligent Control and Automation (WCICA). Jinan, 2010: 1322-1328.
- [5] 郭蓝彬,杨延西. 基于图像雅克比矩阵的智能机器人视觉跟踪[J]. 智能系统学报,2006,1(1):57-61.
- [6] XU Guang, JIA Xiao, SHI Hong, et al. Visual servo control for wheeled robot trajectory tracking[C]// Proceedings of 2010 International Conference on Test and Measurement (ICTM2010), Hong Kong: International Industrial Electronics Center, 2010: 275-278.
- [7] 陈善本,林涛. 智能化焊接机器人技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006:32-40.

Tracking of Two Dimensional Based On Kalman Filtering

LIU Guang-rui¹, HUANG Zhen¹, HAN Li-li², BI Jing-kai¹

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Mechanical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: The control of the visual-servo robot is feedback controlled through presenting the feature space of robot system by the graphic Jacobimatrix of the system. A SCARA robot system is established firstly. In view of the physical meaning of the system Jacobianmatrix, the system state equation would be built according to the incremental of Jacobionmatrix, then the Jacobian matrix would be estimated on-line through the Kalman filtering. This method is analyzed based on the MATLAB simulation and applied to the tracking of the two dimensional target, and the validity of this method was tested finally.

Key words: Kalman filtering; Jacobimatrix; estimated on line