

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2018.3.04

机器人无标定手眼协调系统视觉跟踪

秦伟洋, 岳晓峰*, 吴焕新, 张鹏飞

(长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 利用雅可比矩阵及机器人手爪与目标相对位姿图像来估算机器人的期望运动, 给出了雅可比矩阵的推导过程和雅可比矩阵的在线辨识算法。实现了在机器人工作空间对平面内运动目标的跟踪, 仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词: 机器人; 雅可比矩阵; 视觉跟踪; 手眼协调系统

中图分类号: TP 242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2018)03-0233-05

Visual tracking of robotic calibration-free hand-eye coordination system

QIN Weiyang, YUE Xiaofeng*, WU Huanxin, ZHANG Pengfei

(School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: With Jacobian matrix, the relative pose image of robot's gripper to the target is used to estimate its expected motion. We give the Jacobian matrix derivation process and the on-line identification algorithm. The in-plane tracking of the robot is realized, and simulation results verify the effectiveness of the algorithm.

Key words: robot; Jacobian matrix; visual tracking; hand-eye coordination system.

0 引言

手眼协调控制是机器人系统重要的控制手段。相比传统的在标定条件下使用的手眼协调系统, 无标定视觉手眼协调系统具有更高的灵活性与适应性, 是机器人伺服控制系统未来重要的发展方向和研究热点^[1]。Herve^[2]阐述了图像信息从图像空间映射变换到机器人任务空间的可操作性。Cooperstock J 等^[3]在手眼关系无标定的情

况下, 利用神经网络方法实现机器人的控制, 进行了机器人的静态定位和抓取目标物体的实验。神经网络方法具有强大的函数拟合能力, 能够比较准确地拟合机器人任务空间和图像空间之间的非线性关系, 根据系统的动态特性建立控制率^[4-5], 神经网络的缺点是必须进行大量的样本学习, 相对来说, 较为繁琐和复杂、计算量较大。苏剑波等利用 ADRC 方法来设计控制器^[6-7], 其原理是将机器人手眼协调系统近似地看成一个简单的线性

收稿日期: 2018-03-21

基金项目: 吉林省科技攻关计划项目(20170204010GX)

作者简介: 秦伟洋(1992-), 男, 汉族, 山东济宁人, 长春工业大学硕士研究生, 主要从事机器视觉及智能检测方向研究, E-mail: 20149737@qq.com. * 通讯作者: 岳晓峰(1971-), 男, 汉族, 吉林通化人, 长春工业大学教授, 博士, 主要从事机器视觉及智能检测方向研究, E-mail: yuexiaofeng@ccut.edu.cn.

系统,将对该系统有影响的各种因素归为外部干扰,对其进行在线补偿,以此来实现系统的动态反馈。但这种方法由于系统响应初期误差较大,而且参数的选取大多是靠累积的经验,运动目标跟踪结果并不理想。Sutanto 等通过研究实时估计图像雅可比矩阵来实现无标定手眼协调的方法^[8-9]。

文中研究基于雅可比矩阵的无标定手眼协调系统视觉跟踪问题,提出一种改进的 Kalman 滤波算法对雅可比矩阵进行在线估计,并推导出相应的雅可比矩阵在线估计算法,在 Matlab 平台上进行仿真,验证了文中雅可比矩阵在线估计算法的可行性。

1 雅可比矩阵

假设 $f \in R^m$ 为图像特征参数向量, $r \in R^n$ 为机械手在机器人工作空间中的位姿向量, m 为图像特征空间维数, n 为任务空间维数,则图像雅可比矩阵可以描述从机器人工作空间到图像特征空间的变换,其表达式如下:

$$\dot{f} = J_i(r) \cdot \dot{r} \quad (1)$$

其中

$$J_i(r) = \left[\frac{\partial f}{\partial r} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(r)}{\partial r_1} & \cdots & \frac{\partial f_1(r)}{\partial r_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m(r)}{\partial r_1} & \cdots & \frac{\partial f_m(r)}{\partial r_n} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (2)$$

式中: \dot{f} ——相应的图像特征变化率;

\dot{r} ——机器人末端执行器的速度矢量;

$J_i(r)$ ——图像雅可比矩阵, $J_i(r) \in R^{m \times n}$ 。

此模型首先由 Weiss^[10] 提出,它反映了机器人工作空间和图像特征空间的映射变换关系,又被称为特征敏感度矩阵^[11-13]。

另一方面,机械手的速度矢量 \dot{r} 与关节角速度向量 $\dot{\theta}$ 之间的变换关系为:

$$\dot{r} = J_r(\theta) \cdot \dot{\theta} \quad (3)$$

式中 $\dot{\theta}$ —— p 自由度机器人关节角速度向量, $\dot{\theta} \in R^p$;

\dot{r} ——机器人末端执行器的速度向量, $\dot{r} \in R^n$;

$J_r(\theta)$ ——机器人雅可比矩阵, $J_r(\theta) \in R^{n \times p}$ 。

$$J_r(\theta) = \left[\frac{\partial r}{\partial \theta} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1(\theta)}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial r_n(\theta)}{\partial \theta_p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_n(\theta)}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial r_n(\theta)}{\partial \theta_p} \end{bmatrix}_{n \times p} \quad (4)$$

通过式(1)和式(3)可以推导出图像特征空间向量 \dot{f} 与机器人关节角速度向量 $\dot{\theta}$ 之间的变换关系:

$$\dot{f} = J_i(r) \cdot \dot{r} = J_i(r) \cdot J_r(\theta) \cdot \dot{\theta} \quad (5)$$

令

$$J = J_i(r) \cdot J_r(\theta)$$

则可以写为:

$$\dot{f} = J \cdot \dot{\theta} \quad (6)$$

其中, J 为雅可比矩阵,即为某一时刻下机器人的关节角速度向量 $\dot{\theta}$ 与图像特征变化率 \dot{f} 之间的映射变换关系,那么可以根据机器人工作空间的关节角与该时刻的图像特征空间的映射变换关系来设计机器人手眼协调系统的控制律。

雅可比矩阵不是定常矩阵^[14],随着机器人的位姿改变,机器人运动空间和图像特征空间会发生相对变化,雅可比矩阵也会随之变化,因此雅可比矩阵具有时变的特点。所以,对雅可比矩阵进行实时估计是非常重要的。

2 图像雅可比矩阵的在线辨识

构造一个系统,将系统的状态设为待估计的雅可比矩阵参数,那么对系统的观测即可得到雅可比矩阵的估计值。根据图像雅可比矩阵的表达式,将其离散化,则有:

$$f(k+1) \approx f(k) + J(r(k)) \cdot \Delta r(k) \quad (7)$$

设系统的观测向量 x 是一个 $mn \times 1$ 维矢量,定义如下:

$$x = \left[\frac{\partial f_1}{\partial r} \quad \frac{\partial f_2}{\partial r} \quad \cdots \quad \frac{\partial f_m}{\partial r} \right] \quad (8)$$

其中, $\frac{\partial f_i}{\partial r} = \left[\frac{\partial f_i}{\partial r_1} \quad \frac{\partial f_i}{\partial r_2} \quad \cdots \quad \frac{\partial f_i}{\partial r_n} \right]$ ($i=1, 2, \dots, m$) 为图像雅可比矩阵 $J(r)$ 的第 i 行向量。

令图像雅可比矩阵的观测向量 $x(k)$ 为系统状态,由机械手运动所引起的图像特征变化为系统输出,即 $y(k) = f(k+1) - f(k)$,得到如下状

态方程:

$$\begin{cases} x(k+1) = \Phi(k) \cdot x(k) + \Gamma(k) \cdot \eta(k) \\ y(k) = H(k) \cdot x(k) + \nu(k) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\eta(k), \nu(k)$ ——分别为状态噪声和图像观察噪声,假定为高斯白噪声。

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} \Delta r(k)^T & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \Delta r(k)^T \end{bmatrix}$$

根据系统特点和工程实际应用,建立简化的自适应 Kalman 滤波算法,将基于极大似然估计准则的 \mathbf{R} 和 \mathbf{Q} 矩阵的估计和调整问题转变成一个确定新息协方差矩阵 \mathbf{P}_v ,以及对应的自适应调整参数 α_k 的问题,其递推方程为:

状态预测:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k \hat{z}_k \quad (10)$$

观测噪声协方差阵:

$$\hat{\mathbf{R}}_k = \mathbf{P}_{v_k} - \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T \quad (11)$$

系统噪声协方差阵:

$$\hat{\mathbf{Q}}_k = \mathbf{\Gamma}_k^{-1} \mathbf{K}_k \mathbf{P}_{v_k} \mathbf{K}_k^T \mathbf{\Gamma}_k^{-T} \quad (12)$$

增益矩阵:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T + \hat{\mathbf{R}}_k]^{-1} \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \hat{\mathbf{Q}}_{k-1} \quad (14)$$

估计均方误差:

$$\mathbf{P}_k = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_{k,k-1} \quad (15)$$

新息协方差矩阵:

$$\mathbf{P}_{v_k} = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k v_i v_i^T \quad (16)$$

式中: v_k ——系统实际值与估计值之差, $v_k = y_k - \hat{y}_{k,k-1}$;

N ——平滑窗口的宽度。

状态估计方程:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k [\hat{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{x}_{k,k-1}] \quad (17)$$

其中,自适应调整参数 α_k 为对应量测量的方差值,即当对 \mathbf{R} 矩阵进行估计时,调整参数 $\alpha_k = R_{kk}$;当对 \mathbf{Q} 矩阵进行估计时,调整参数 $\alpha_k = Q_{kk}$ 。

而图像雅可比矩阵的初值 $\hat{\mathbf{J}}(0)$ 可以在机械手的初始位置任意让机械手做 n 步线性无关的试探运动 $\Delta r_1, \Delta r_2 \cdots \Delta r_n$,观察由机械手运动引起的图像特征的变化 $\Delta f_1, \Delta f_2 \cdots \Delta f_n$,那么图像雅可比矩阵的初值即为:

$$\hat{\mathbf{J}}(0) = [\Delta f_1 \Delta f_2 \cdots \Delta f_n] \cdot [\Delta r_1 \Delta r_2 \cdots \Delta r_n]^{-1} \quad (18)$$

然后用 $\hat{\mathbf{J}}(0)$ 来构造系统的状态估计初值 $\hat{x}(0)$ 。在雅可比矩阵的整个迭代过程中,只需要在机械手的初始位置给出 n 步试探运动,即可完成整个迭代过程。

3 视觉控制器设计

设运动目标在图像平面的图像特征坐标系为 $f^0(t) = [u_0(t) \quad v_0(t)]^T$,机器人末端位置坐标系为 $f^g(t) = [u_g(t) \quad v_g(t)]^T$,定义系统误差为图像误差 $e_g(t) = f^g(t) - f^0(t)$,控制量 $u_g(k) = \Delta r^g(k+1) = r^g(k+1) - r^g(k)$,引入 PI 控制策略:

$$u_g(k+1) = J_g^{-1} \cdot (c_1 e_g(k) + c_2 \sum_{i=0}^k e_g(i)) \quad (19)$$

式中: c_1, c_2 ——分别为 PI 控制器的比例与积分系数。

成像系统中,从世界坐标系变换到图像像素坐标系过程如下:

1)从世界坐标系到相机坐标系

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (20)$$

其中, \mathbf{R} 为 3×3 的旋转矩阵, \mathbf{T} 为 3×1 的平移矩阵:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} = [T_x \quad T_y \quad T_z]^T$$

2)从相机坐标系变换到图像物理坐标系

$$\begin{cases} x = f \frac{X_c}{Z_c} \\ y = f \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (21)$$

式中: f ——摄像机焦距。

3)从图像物理坐标系变换到图像像素坐标系

$$\begin{cases} u = f_u x + u_0 \\ v = f_v y + v_0 \end{cases} \quad (22)$$

式中: f_u, f_v ——分别为图像平面上 X 和 Y 轴方向上单位距离内的像素数;

u_0, v_0 ——分别为图像物理坐标系的中心坐标。

过程 1)中的 \mathbf{R}, \mathbf{T} 一般被称为摄像机的外部

参数。2)中的方程一般被称为摄像机的针孔模型。3)中的 f_u, f_v, u_0, v_0 以及 2)中的 f 则是摄像机的内部参数。

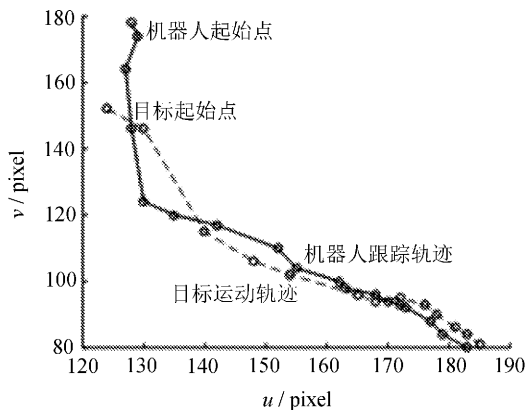
4 仿 真

在 Matlab 平台上对手眼协调系统运动目标跟踪过程进行仿真,任务定义为:机器人末端执行器作二维平面运动,跟踪在工作平面上运动的点目标。使机器人末端执行期保持始终在目标点正上方。仿真参数设置如下:目标运动平面为机器人基坐标系的 xoy 平面,手抓运动平面高于 xoy 平面 60 mm。手上摄像机相对于机器人末端坐标系设定为

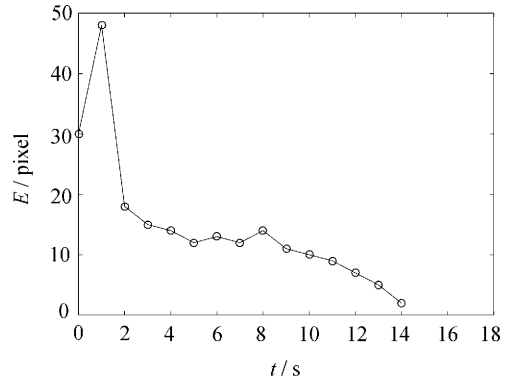
$$R = \begin{bmatrix} 0.677 & 0 & -0.468 & 2 & 0 \\ -0.468 & 2 & -0.677 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$T = [0 \quad 0 \quad -50]^T$$

摄像机焦距为 $f = 6 \text{ mm}$ 。试探运动分别为 x 方向和 y 方向的运动; $\Delta p_1 = (-0.02, 0), \Delta f_1 = (-4, 0); \Delta p_2 = (0, -0.02), \Delta f_2 = (0, -4)$ 。由此可得图像雅可比矩阵的初始估计值为 $\hat{J}(0) = [\Delta f_1; \Delta f_2] \cdot [\Delta r_1; \Delta r_2]^{-1} = \begin{bmatrix} 200 & 0 \\ 0 & 200 \end{bmatrix}$,在图像平面添加零均值,最大为 3 个像素的观测噪声,系统的周期为 50 ms,设置机器人执行器的最大运动速度为 0.6 m/s。运动目标在图像坐标的起始位置是 (118, 123),手抓初始位置是 (90, 178),手上眼 PI 控制器的参数为 $c_1 = 1.5, c_2 = -0.2$,在仿真中,考虑误差 E 在 5 个 pixel 范围内视为已跟踪上目标,平面的仿真跟踪轨迹和跟踪误差变化如图 1 所示。



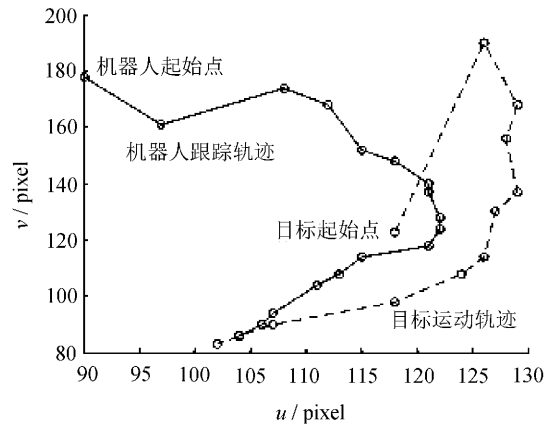
(a) 目标与机器人运动轨迹



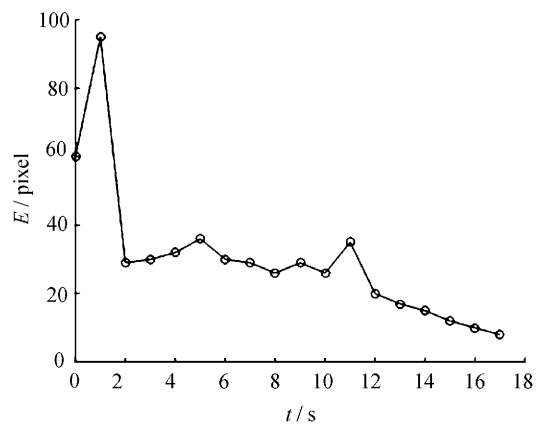
(b) 误差变化曲线

图 1 改进的卡尔曼滤波算法的跟踪轨迹和跟踪误差

利用 Kalman 滤波算法对图像雅可比矩阵进行估计,对其进行相同条件的仿真,平面的仿真跟踪轨迹和跟踪误差变化如图 2 所示。



(a) 目标与机器人运动轨迹



(b) 误差变化曲线

图 2 卡尔曼滤波算法的跟踪轨迹和跟踪误差

从图 1(a)和图 2(a)可以看出,比较利用

Kalman滤波算法和文中提出的算法对图像雅可比矩阵进行在线辨识,文中提出的算法鲁棒性更好,机器人跟踪运动目标的准确率更高;从图1(b)和图2(b)可以看出,利用改进的Kalman滤波算法,跟踪误差较小且收敛速度较快。

5 结 语

分析了工业机器人手眼协调系统的原理,研究了世界坐标系、相机坐标系以及图像坐标系之间的变换关系,分析了图像雅可比矩阵的定义以及在线辨识算法,并提出了一种改进的Kalman滤波算法对其进行在线辨识,实现了机器人工作空间内跟踪运动目标,仿真结果验证了文中算法的有效性。

参考文献:

- [1] Papanikolopoulos N P, Nelson B J, Khosla P K. Six degree-of-freedom hand/eye visual tracking with uncertain parameters [J]. *Robotics & Automation IEEE Transactions on*, 1994, 11(5): 725-732.
- [2] Herve J Y, Sharma R, Cucka P. Toward robust vision-based control: hand/eye coordination without calibration[C]// *IEEE International Symposium on Intelligent Control*. [S.l.]: IEEE, 1991: 457-462.
- [3] Cooperstock J R, Milios E E. Self-supervised learning for docking and target reaching [J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 1993, 11(3/4): 243-260.
- [4] 潘且鲁, 苏剑波, 席裕庚. 基于神经网络的机器人手眼无标定平面视觉跟踪[J]. *自动化学报*, 2001, 27(2): 194-199.
- [5] 谢冬梅, 曲道奎, 徐方. 基于神经网络的机器人视觉伺服控制[J]. *微计算机信息*, 2006, 22(4): 4-6.
- [6] 马红雨, 苏剑波. 基于耦合 ADRC 原理的机器人无标定手眼协调[J]. *机器人*, 2003, 25(1): 39-43.
- [7] 刘晓丽. 基于优化 ADRC 的无标定机器人手眼协调[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [8] Sutanto H, Sharma R, Varma V. Image based autodocking without calibration[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. [s.l.]: Proceedings. IEEE, 1997, 2: 974-979.
- [9] 钱江, 苏剑波. 基于图像雅可比矩阵的无标定二维运动跟踪[J]. *模式识别与人工智能*, 2003, 16(3): 257-262.
- [10] Weiss L E, Sanderson A C, Neuman C P. Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback [J]. *IEEE Journal on Robotics & Automation*, 1987, 7(5): 404-417.
- [11] Espiau B, Chaumette F, Rives P. A new approach to visual servoing in robotics [J]. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 1992, 8(3): 313-326.
- [12] 钱江, 苏剑波. 图像雅可比矩阵的在线 Kalman 滤波估计[J]. *控制与决策*, 2003, 18(1): 77-80.
- [13] 曾祥进, 黄心汉, 王敏. 基于 Broyden 在线图像雅可比矩阵辨识的视觉伺服[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(9): 17-20.
- [14] 徐波, 王金生, 徐洲石. 智能巡检机器人调度与路线规划能力[J]. *长春工业大学学报*, 2016, 37(3): 269-272.