

机器人无标定视觉伺服系统设计与实现

彭叶予光¹, 武东杰²

(1. 厦门双瑞船舶涂料有限公司, 福建 厦门 361101; 2. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361102)

摘要: 为了实现手眼关系无标定情况下的机械臂末端定位, 针对单目手眼系统, 设计并实现了一个基于图像的无标定视觉伺服系统。进行模块化的系统设计, 使用卡尔曼滤波器在线估计关节-图像雅可比矩阵, 根据关节-图像速度数学模型设计图像视觉伺服控制器, 利用 C++ 多线程技术开发各个并行算法模块, 实现了在手眼关系完全无标定情况下机械臂末端的高精度定位。实验表明, 该系统的定位精度为 0.1 像素。

关键词: 无标定视觉伺服; 关节空间; 卡尔曼滤波; 机械臂末端定位

中图分类号: TN108.4

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.191114

中文引用格式: 彭叶予光, 武东杰. 机器人无标定视觉伺服系统设计与实现[J]. 电子技术应用, 2020, 46(6): 77-81.

英文引用格式: Peng Yeyuguang, Wu Dongjie. Design and implementation of robot uncalibrated visual servoing system[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(6): 77-81.

Design and implementation of robot uncalibrated visual servoing system

Peng Yeyuguang¹, Wu Dongjie²

(1. Xiamen Shuangrui Ship Coatings Co., Ltd., Xiamen 361101, China;

2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: To realize the end positioning of the manipulator with the hand-eye relationship uncalibrated, an image-based uncalibrated visual servoing system is designed and implemented for the monocular hand-eye system. The paper performs modular system design, uses the Kalman filter to estimate the joint-image Jacobian matrix online, designs the visual servoing controller according to the joint-image velocity mathematical model, and develops each parallel algorithm module by C++ multi-threading technology, which realizes the complete high-precision positioning of the arm end without calibration. Experiments show that the positioning accuracy of the system is 0.1 pixels.

Key words: visual servoing without calibration; joint space; Kalman filter; arm end positioning

0 引言

传统应用中, 机械臂手眼系统对目标物体的操作都是基于标定过程完成的, 标定工作包括: 相机内参数标定^[1]、机器人运动学参数标定和手眼关系标定^[2-4]。但标定具有一些明显缺点^[5-6], 例如: (1) 高温、强辐射等条件下无法进行标定; (2) 系统结构改变, 标定参数会发生变化, 需要定期进行再标定; (3) 标定过程繁复, 需要专业的人员和设备, 标定成本较高。这些标定工作严重限制了智能机器人的发展和进步, 因此研究人员开始深入研究无标定视觉伺服, 例如使用神经网络来拟合手眼关系, 基于卡尔曼滤波估计雅可比矩阵、基于 ADRC 的无标定视觉伺服控制等^[3]。

无标定视觉伺服(UVS)是在没有预先进行手眼关系标定的情况下, 利用视觉反馈的信号形成闭环控制系统, 引导机器人运动完成相关任务的技术^[2]。根据视觉系统反馈信号是纯图像信息还是估计出的位置, UVS 可分为基于图像的无标定视觉伺服(IBUVS)和基于位置的无

标定视觉伺服(PBUVS)^[7]。相较于 PBUVS, IBUVS 不需要相机参数, 可以实现完全的无标定视觉伺服控制, 使手眼系统具有更高的灵活性和智能性^[8-9]。

本文拟采用 IBUVS 控制方案实现完全无标定的机械臂末端定位操作, 从系统软硬件结构设计、关节-图像雅可比矩阵估计算法设计、控制器算法设计三方面展开论述, 最后通过实验说明该系统设计的有效性和可行性。

1 系统总体结构设计

视觉伺服系统由机器人子系统、视觉感知子系统和控制器模块三部分构成, 系统的主要硬件设备为机械臂、视觉传感器和计算机。整个视觉伺服系统的软硬件结构配置如图 1 所示, 其中, 实线表示实体, 虚线表示软件; $s \in \mathbf{R}^m$ 表示图像特征向量, $q \in \mathbf{R}^n$ 表示关节位置向量, $\dot{s} \in \mathbf{R}^m$ 表示图像特征向量的时间变化率, $\dot{q} \in \mathbf{R}^n$ 表示关节位置向量的时间变化率, $\hat{J} \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 表示雅可比矩阵的估计值, $I \in \mathbf{R}^{H \times W}$ 表示图像帧, $u \in \mathbf{R}^n$ 表示关节速度控制量。

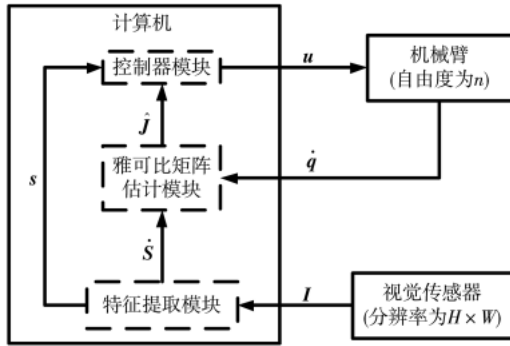


图1 系统总体结构设计

机械臂是系统的动作执行机构,它实时接收外部速度指令,其内部关节速度控制器控制各关节速度快速达到外部设定值。视觉传感器是系统的感知元件,它可以以较高的帧率获取外部环境的光学图像,为闭环系统的反馈环节提供丰富的外界信息。计算机是整个系统算法的实现载体,包括雅可比估计算法、控制算法、特征提取算法等。另外,控制模块和机械臂的数据传输是由RS232串口通信完成的,特征处理模块和相机的图像流传输是由USB数据线传输完成的,各算法模块间的数据交换是通过公共内存实现的。

针对机械臂末端定位任务的实际需要,本文利用C++多线程技术,实现特征提取模块、雅可比矩阵估计模块和控制器模块独立运行,降低图像处理的长延性对整个系统的不利影响^[10]。特征提取模块独立运行,它实时从视觉传感器获取图像帧、分割与识别目标物体、提取图像特征、构造图像特征向量,并将图像特征向量实时发布给控制器。雅可比矩阵估计模块独立运行,实时从特征提取模块和机械臂分别获取图像特征向量变化率和关节向量变化率,再根据估计算法对雅可比矩阵的值更新,保证线性控制模型的有效性,并将雅可比矩阵的估计值发布给控制器模块。控制器模块同样独立运行,实时获取雅可比矩阵的估计值和当前图像特征向量,根据控制算法计算得到机械臂的关节速度控制量,并按一定周期将速度指令发布给机械臂,控制图像特征误差逐渐收敛。

2 系统主要算法设计

2.1 关节-图像雅可比矩阵估计

令机器人各个关节变量 $q_i (i=1, \dots, n)$ 组成的 n 维列向量 $q=(q_1, \dots, q_n)^T$ 为机器人关节列向量,图像特征 $s_i (i=1, \dots, m)$ 组成的列向量 $s=(s_1, \dots, s_m)^T$ 为图像特征列向量,它们对时间的导数分别定义为 $\dot{q}$ 和 $\dot{s}$ 。定义关节-图像雅可比矩阵如下^[9]:

$$\dot{s} = J \cdot \dot{q} \quad (1)$$

$$J = \frac{\partial s}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial s_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial s_1}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial s_m}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial s_m}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

该矩阵描述了关节向量变化所引起的图像特征变化,是关节空间到图像空间复杂非线性映射关系在某一时刻和关节向量值下的局部线性化描述。这为视觉伺服控制器的设计提供了简洁的线性化模型,但在无标定的限制条件下,无法实时准确获得雅可比矩阵的值,需要进行在线估计获得^[6]。

在线估计雅可比矩阵的方法最早可追溯到1991年,HERVE J^[11]通过实验验证在非奇异点处,关节向量的变化不会引起雅可比矩阵的突变。这为雅可比矩阵的在线估计奠定了实验基础。实际应用当中,通过适当避免少数的奇异点可以进行雅可比矩阵的实时在线估计。本文将关节-图像速度模型进行离散化,使用线性离散卡尔曼滤波算法对雅可比矩阵进行实时在线估计^[12]。

设雅可比矩阵估计算法的采样周期为 T_e ,记时刻 kT_e 的关节向量为 q_k ,图像特征向量为 s_k ,关节-图像雅可比矩阵为 $J_k(q_k)$ 。将雅可比矩阵的各个元素看成是某一线性离散系统的状态变量,定义辅助系统的状态变量为:

$$x_k = [J_k^1, J_k^2, \dots, J_k^m]^T \in \mathbf{R}^{m \times n} \quad (3)$$

式中, $J_k^i (i=1, 2, \dots, m) \in \mathbf{R}^{1 \times n}$ 表示雅可比矩阵 J_k 的第 i 行。根据 HERVE J 的研究结论^[11]可知,在适当较短的采用周期内可以认为 $x_{k+1} \approx x_k$,设状态运动过程噪声为 $w_k \sim N(0, Q_k)$,得到辅助系统的过程方程为:

$$x_{k+1} = x_k + w_k \quad (4)$$

简记在时刻 $(k+1)T_e$ 的关节位置向量的增量为 $\Delta q_{k+1} = q_{k+1} - q_k$,记图像特征向量的增量为 $\Delta s_{k+1} = s_{k+1} - s_k$,有近似关系为:

$$\Delta s_{k+1} \approx J_{k+1} \cdot \Delta q_{k+1} \quad (5)$$

记测量值 $z_{k+1} = \Delta s_{k+1}$,辅助系统的测量噪声设为 $v_k \sim N(0, R_k)$,对上式化简后得到辅助系统的测量方程为:

$$z_{k+1} = C_{k+1} \cdot x_{k+1} + v_{k+1} \quad (6)$$

其中, $C_{k+1} = \text{diag}\{\Delta q_{k+1}^T, \dots, \Delta q_{k+1}^T\} \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 。

由以上建模便得到在线估计雅可比矩阵的线性离散化模型:

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + w_k \\ z_{k+1} = C_{k+1} \cdot x_{k+1} + v_{k+1} \end{cases} \quad (7)$$

式中, w_k 和 v_k 都假设为彼此独立的高斯白噪声,过程噪声协方差矩阵 Q_k 和测量噪声协方差矩阵 R_k 的取值通过实验数据确定,通常取为常值^[11-12]。

根据卡尔曼滤波算法基本理论和滤波公式^[13],设计了关节-图像雅可比矩阵的在线估计算法,如算法1所示。

算法1: 关节-图像雅可比矩阵估计算法

输入雅可比初始值 x_{010} 、误差协方差矩阵 P_{010} ;

for $k=0; k < N; k++$ do

$x_{k+1|k} = x_{k|k}; P_{k+1|k} = P_{k|k} + P_{k+1};$

更新 $\Delta q(k+1); C_{k+1} \leftarrow \Delta q(k+1);$

$K_{k+1} = P_{k+1|k} C_{k+1} [C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1}]^{-1};$

$$\mathbf{x}_{k+1|k+1} = \mathbf{x}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1}[\mathbf{z}_{k+1} - \mathbf{C}_{k+1}\mathbf{x}_{k+1|k}];$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1}\mathbf{C}_{k+1})\mathbf{P}_{k+1|k};$$

$$\mathbf{J}_{k+1|k+1} \leftarrow \mathbf{x}_{k+1|k+1};$$

输出最新的雅可比矩阵估计值;

end for

在算法 1 中, $\mathbf{x}_{k|k}$ 表示在 kT_e 时刻 $\mathbf{x}_k$ 的最优估计值, $\mathbf{x}_{k+1|k}$ 表示在 $(k+1)T_e$ 时刻 $\mathbf{x}_{k+1}$ 的预测值, $\mathbf{P}_{k|k}$ 表示在 kT_e 时刻的误差协方差矩阵, $\mathbf{K}_k$ 表示在 kT_e 时刻的最优卡尔曼增益, $\mathbf{x}_{0|0} \leftarrow \mathbf{J}_{0|0}$ 表示将雅可比矩阵转换为状态列向量的形式, $\mathbf{J}_{k+1|k+1} \leftarrow \mathbf{x}_{k+1|k+1}$ 表示将状态列向量形式转换为雅可比矩阵形式。 $\mathbf{J}_{0|0}$ 表示雅可比矩阵的初始值, 可取为单位矩阵, 或通过 n 步微小的试探运动计算得到一个粗略值^[9, 12]。

2.2 视觉伺服控制器

记期望的图像特征向量为 $\mathbf{s}^*$, 伺服控制系统的误差 $\mathbf{e}$ 定义为图像特征误差:

$$\mathbf{e} = \mathbf{s}^* - \mathbf{s} \quad (8)$$

考虑使用最简单的比例控制律:

$$\mathbf{u} = \lambda \mathbf{J}^+ \mathbf{e} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^n$ 表示机械臂的速度控制量; $\lambda > 0$ 表示比例系数; $\mathbf{J}^+ \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 表示 $\mathbf{J}$ 的伪逆矩阵^[14]; 工程应用中, 使用在线估计得到的 $\hat{\mathbf{J}}$ 代替式中的 $\mathbf{J}$ 。

为了进一步验证该控制系统的稳定性, 考虑如下的李雅普诺夫函数^[15]:

$$V(t) = \frac{1}{2} \|\mathbf{e}(t)\|^2 = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{e} > 0 \quad (\mathbf{e} \neq 0) \quad (10)$$

考虑关节-图像速度模型(1)和系统误差定义(8), 则该李雅普诺夫函数的导数为:

$$\dot{V}(t) = \mathbf{e}^T \dot{\mathbf{e}} = -\mathbf{e}^T \dot{\mathbf{s}} = -\lambda \mathbf{e}^T \mathbf{J} \mathbf{J}^+ \mathbf{e} \leq 0 \quad (\mathbf{e} \neq 0) \quad (11)$$

由李雅普诺夫稳定性理论知, 当 $\mathbf{J} \mathbf{J}^+$ 正定时, 闭环控制系统渐进稳定, 例如 $\mathbf{J}^{-1}$ 存在时; 当 $\mathbf{J} \mathbf{J}^+$ 半正定时, 无法通过该李雅普诺夫函数保证闭环系统渐近稳定, 该李雅普诺夫函数只能保证系统李雅普诺夫意义下的稳定。在实际中, 常常根据具体任务的需要, 通过限制各个关节的运动范围和构造适当的图像特征来保证 $\mathbf{J} \mathbf{J}^+$ 正定, 从而保证整个闭环系统渐进稳定。图 2 展示了整个闭环控制系统的控制流程。

控制算法采用定周期循环实现, 控制算法的基本流

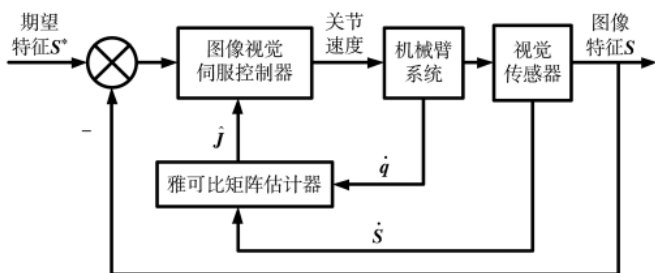


图 2 基于图像的无标定视觉伺服控制原理图

程如算法 2 所示。

算法 2: 无标定视觉伺服控制算法

输入比例系数 $\lambda > 0$;

输入期望的图像特征向量 $\mathbf{s}^*$; 输入控制周期 T_e ;

do

记录当前时刻值 t_0 ; 更新 $\mathbf{s}_k$; 更新 $\hat{\mathbf{J}}_k$;

$$\mathbf{u} = \lambda \cdot \hat{\mathbf{J}}_k^+ \cdot (\mathbf{s}^* - \mathbf{s}_k);$$

发送速度指令 $\mathbf{u}$ 到机械臂;

记录当前时刻值 t_1 ;

if $(t_1 - t_0 < T_e)$

等待 $T_e - (t_1 - t_0)$;

end

while $(\|\mathbf{s}^* - \mathbf{s}_k\| > 0.1)$

3 实验与结果

3.1 实验平台与实验任务

为了验证整个无标定视觉伺服系统设计的可行性和有效性, 本文针对机械臂末端定位任务搭建了真实的无标定视觉伺服系统进行验证。验证平台的配置情况如图 3 所示。

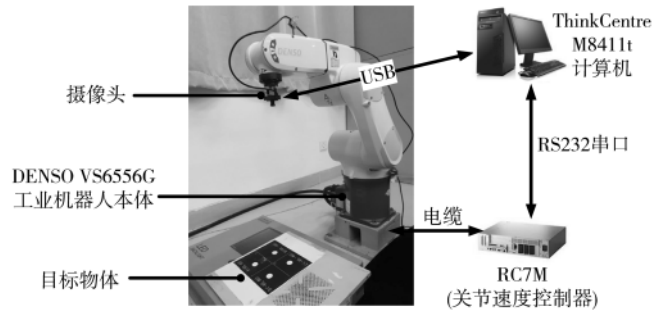


图 3 实验平台

实验平台中, 机械臂是六自由度工业机器人^[16], 通过电缆与 RC7M 关节速度控制器相连。摄像机安装在机械臂末端随着机械臂末端一同运动, 负责实时获取图像并通过 USB 数据线实时发布给计算机上的特征提取模块。计算机负责运行特征提取算法、雅可估计算法、控制算法、发布和接收数据等; 平面目标板由 4 个白色斑块组成, 4 个斑块依次编号为 A、B、C、D。整个实验过程中, 相机参数、机器人的运动学参数和手眼标定参数都是完全未知的。

实验任务: 使用图像处理获得的 4 个白色质点坐标值^[17], 控制相机相对于目标物体的 z 轴进行约 90° 纯旋转运动同时又沿着 z 轴进行了约 390 mm 平移运动, 使 4 个质心在图像平面内沿直线收敛到期望位置, 任务结束条件是质心坐标误差小于 0.1 个像素。定位开始时的图像特征向量的值为:

$$\begin{aligned} \mathbf{s} &= [x_A, y_A, x_B, y_B, x_C, y_C, x_D, y_D]^T \\ &= [296.968 \ 3, 174.740 \ 4, 389.318 \ 3, 177.325 \ 1, \\ &\quad 386.484 \ 4, 269.859 \ 2, 294.363 \ 0, 266.724 \ 6]^T \end{aligned} \quad (12)$$

计算机技术与应用 Computer Technology and Its Applications

期望的图像特征向量的值为:

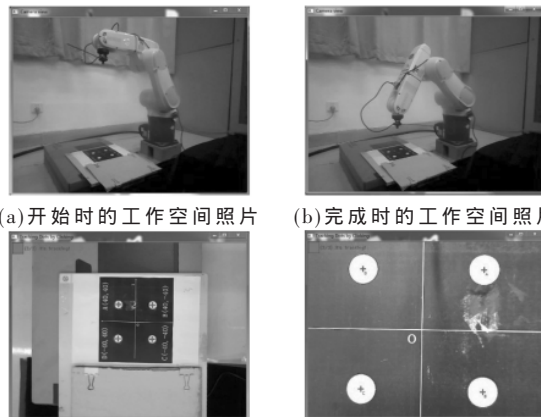
$$s^* = [x_A^*, y_A^*, x_B^*, y_B^*, x_C^*, y_C^*, x_D^*, y_D^*]^T$$

$$= [479.229\ 2, 76.626\ 1, 474.196\ 2, 410.972\ 1, 142.635\ 8, 402.437\ 5, 149.220\ 5, 73.821\ 4]^T \quad (13)$$

另外,测量噪声和状态噪声的方差是根据多次实验的效果确定的,最终选定图像特征的测量误差是服从标准差为0.2像素的高斯白噪声,状态误差服从标准差为2的高斯白噪声。实验过程中工作空间和图像平面的变化情况图4所示。

3.2 实验结果

实验中的无标定视觉伺服系统的雅可比矩阵估计算法的采用周期 $T_e=0.035\text{ s}$,控制算法的控制周期 $T_c=0.06\text{ s}$ 。多次重复实验都表明该系统达到了既定的设计目标,其中一次实验结果的详细实验数据如图5所示。

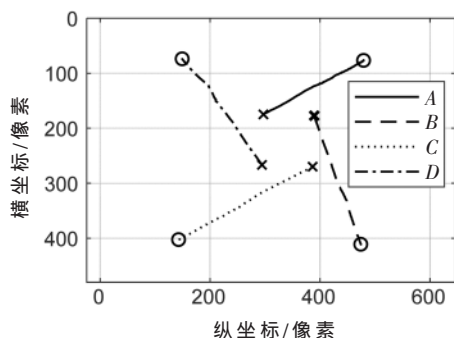


(a)开始时的 workspace 照片 (b)完成时的 workspace 照片

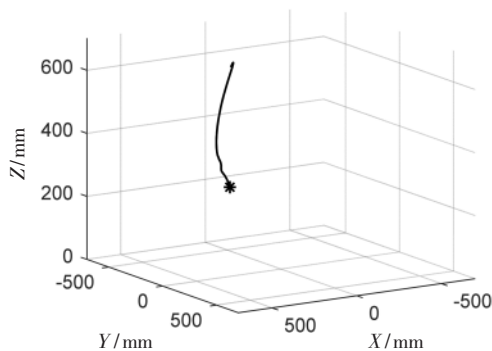
(c)开始时的相机照片 (d)完成时的相机照片

图4 实验中的照片

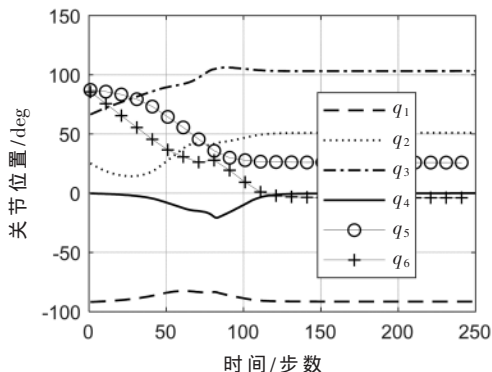
观察图5(a),4个质心在摄像机平面几乎沿着直



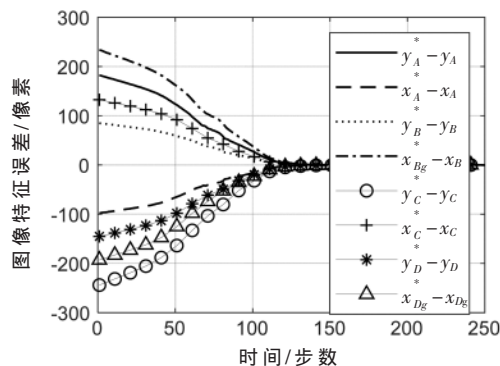
(a)图像点运动轨迹



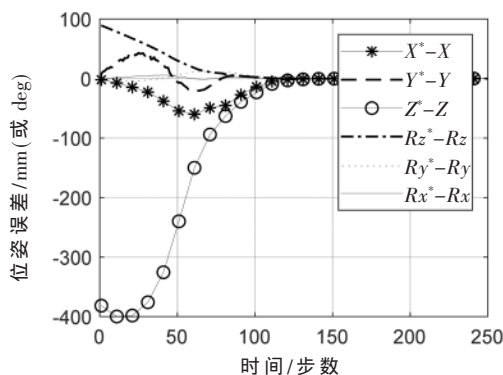
(c)相机运动轨迹



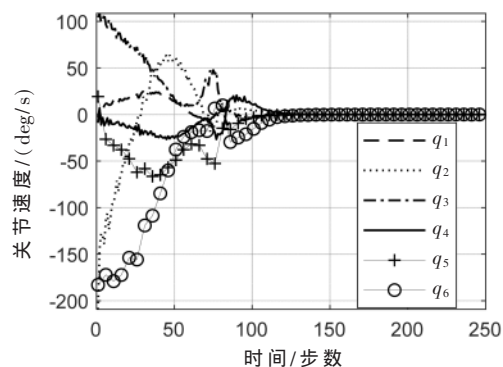
(e)关节角度变化曲线



(b)图像特征误差变化曲线



(d)位姿误差变化曲线



(f)关节速度控制量曲线

图5 实验结果图

计算机技术与应用 Computer Technology and Its Applications

线逐渐运动到各自的期望特征点,图像特征误差小于0.1个像素,其中叉号表示任务开始时的质心位置,圆圈的中心表示质点的期望位置。观察图5(c),机械臂末端由起始位置沿着曲线逐渐运动到设定的期望位置,其中星号表示期望的位置。图5(f)展示了控制量随时间的变化曲线,由关节速度变化曲线可以观察到各关节的控制量都在机械臂各关节电机的运动能力范围内,即 $-200\text{ deg/s} \sim 200\text{ deg/s}$ 。

4 结论

本文针对单目手眼机器人系统,介绍了一种基于图像的无标定视觉伺服系统设计方案,提出一种关节空间内速度控制的视觉伺服方法,使用卡尔曼滤波算法对关节-图像雅可比矩阵在线估计,使用C++多线程技术完成三大模块的独立运行,实现了在手眼关系完全无标定条件下的机器人末端高精度定位。实验表明该系统设计方案有效、可行,定位精度优于0.1像素。

参考文献

- [1] 党宏社,候金良,强华,等.基于视觉引导的SCARA机器人自动装配系统[J].电子技术应用,2017,43(5):21-24.
- [2] Wikipedia.Visual_servoing[EB/OL].(2019-09-19)[2019-10-22].https://www.en.wikipedia.org/wiki/Visual_servoing.
- [3] 苏剑波.机器人无标定手眼协调[M].北京:电子工业出版社,2010.
- [4] 方勇纯.机器人视觉伺服研究综述[J].智能系统学报,2008,3(2):109-114.
- [5] 贾丙西,刘山,张凯祥,等.机器人视觉伺服研究进展:视觉系统与控制策略[J].自动化学报,2015,41(5):4-16.
- [6] 陶波,龚泽宇,丁汉.机器人无标定视觉伺服控制研究进展[J].力学学报,2016,48(4):767-783.
- [7] LIU S, XIE W F, SU C Y. Image-based visual servoing using improved image moments[C]. International Conference on Information & Automation, 2009: 577-582.
- [8] ZHAO Y, XIE W F, Liu S. Image-based visual servoing using improved image moments in 6-DOF robot systems[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2013, 11(3): 586-596.
- [9] WU D, ZHONG X, ZHANG X, et al. Uncalibrated image-based visual servoing based on joint space and image moment[C]. Chinese Control Conference, 2018: 5391-5397.
- [10] Luoweifu. Visual studio-multi-threaded development[EB/OL]. (2016-05-18)[2019-08-20]. https://blog.csdn.net/luoweifu/article/details/51449364.
- [11] HERVE J, SHARMA R, CUCKA P, et al. Toward robust vision-based control: hand/eye coordination without calibration[C]. International Symposium on Intelligent Control, 1991: 457-462.
- [12] QIAN J, SU J. Online estimation of image Jacobian matrix by Kalman-Bucy filter for uncalibrated stereo vision feedback[C]. International Conference on Robotics and Automation, 2002: 562-567.
- [13] Wikipedia. Kalman filter[EB/OL]. (2019-08-10)[2019-10-22]. https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter.
- [14] 刘丁酉. 矩阵分析[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [15] MARK M W, SETH H, VIDYASAGAR M. 机器人建模和控制[M]. 贾振中, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [16] DENSO WAVE INCORPORATED. 编程手册 I 基础知识与指令[Z]. 2009.
- [17] Inria Rainbow team. Tutorial: Blob tracking[EB/OL]. (2019-08-15)[2019-10-22]. https://visp-doc.inria.fr/doxygen/visp-3.1.0/tutorial-tracking-blob.html.

(收稿日期: 2019-10-22)

作者简介:

彭叶予光(1992-),男,本科,助理工程师,主要研究方向:机械设计制造与自动化。

武东杰(1990-),通信作者,男,博士研究生,主要研究方向:机器人无标定视觉伺服。

(上接第76页)

子技术应用,2016,42(3):127-131.

- [14] SRI M R N, RAJINIKANTH, V, LATHA K. Otsu based optimal multilevel image thresholding using firefly algorithm[J]. Modelling & Simulation in Engineering, 2014, 4(2): 1-17.
- [15] JAGADEESAN R, SIVANANDAM S N. A novel clustering and classification based approaches for identifying tumor in MRI brain images[J]. International Journal of Computer Applications, 2013, 67(8): 16-21.
- [16] SAHOO P K, ARORA G. Image thresholding using two-dimensional Tsallis-Havrda-Charvát entropy[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(6): 520-528.
- [17] 冉清华, 龚劬, 王珂. 一类新的基于一维 Renyi 熵的图像分割迭代算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(2): 91-94.

(收稿日期: 2019-10-22)

作者简介:

徐浩(1989-),男,本科,助理工程师,主要研究方向:软件工程。

王霜(1980-),女,博士,主要研究方向:图像识别等。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所