

机器人视觉伺服研究进展: 视觉系统与控制策略

贾丙西^{1,2} 刘山^{1,2} 张凯祥^{1,2} 陈剑^{1,2}

摘要 视觉伺服控制是机器人系统的重要控制手段. 随着机器人应用需求的日益复杂多样, 视觉伺服的研究面临着挑战. 视觉伺服系统的设计主要包括视觉系统、控制策略和实现策略三个方面. 文中对视觉伺服中存在的主要问题进行了分析, 重点介绍了视觉系统中改善动态性能和处理噪声的主要技术手段, 阐述了处理模型不确定性和约束的控制策略的改进方案, 总结了提高视觉伺服系统的可实现性和灵活性的实现策略. 最后, 基于当前的研究进展对未来的研究方向进行了展望.

关键词 视觉伺服, 研究进展, 视觉系统, 控制策略

引用格式 贾丙西, 刘山, 张凯祥, 陈剑. 机器人视觉伺服研究进展: 视觉系统与控制策略. 自动化学报, 2015, 41(5): 861–873

DOI 10.16383/j.aas.2015.c140724

Survey on Robot Visual Servo Control: Vision System and Control Strategies

JIA Bing-Xi^{1,2} LIU Shan^{1,2} ZHANG Kai-Xiang^{1,2} CHEN Jian^{1,2}

Abstract Visual servo control is an important control strategy for robotic systems. With the increasing complication and diversification of robotic applications, the study of visual servo control faces challenges. The design of visual servo systems mainly involves vision systems, control strategies and implementation strategies. In this paper, existing problems in visual servo control are analysed. Approaches in vision systems to improve dynamic performance and to deal with noise are introduced, improvements in control strategies to deal with model uncertainties and constraints are summarized, and implementation strategies to improve the realizability and flexibility of visual servo systems are concluded. Finally, future work is outlined based on the current research progress.

Key words Visual servo control, research development, vision system, control strategy

Citation Jia Bing-Xi, Liu Shan, Zhang Kai-Xiang, Chen Jian. Survey on robot visual servo control: vision system and control strategies. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(5): 861–873

随着机器人技术的迅猛发展, 机器人承担的任务更加复杂多样, 传统的检测手段往往面临着检测范围的局限性和检测手段的单一性. 视觉伺服控制利用视觉信息作为反馈, 对环境进行非接触式的测量, 具有更大的信息量, 提高了机器人系统的灵活性和精确性, 在机器人控制中具有不可替代的作用.

视觉伺服控制系统是指使用视觉反馈的控制系统, 其控制目标是将任务函数 $e(\mathbf{s}^* - \mathbf{s}(\mathbf{m}(t), \mathbf{a}))$ 调节到最小, 其中 \mathbf{s}, \mathbf{s}^* 分别为系统的当前状态和期望状态. 与常规控制不同的是, \mathbf{s} 基于图像信息 $\mathbf{m}(t)$ 和系统参数 \mathbf{a} 构造, 比传统的传感器信息具有更高

的维度和更大的信息量, 提高了机器人系统的灵活性.

如图 1, 视觉伺服系统通常由视觉系统、控制策略和机器人系统组成, 其中视觉系统通过图像获取和视觉处理得到合适的视觉反馈信息, 再由控制器得到机器人的控制输入. 在应用中, 需要根据任务需求设计视觉伺服系统的实现策略. 本文从这三个方

收稿日期 2014-10-27 录用日期 2015-01-06
Manuscript received October 27, 2014; accepted January 6, 2015

国家自然科学基金 (61273133, 61433013), 青年千人计划资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61273133, 61433013) and The Recruitment Program of Global Youth Experts

本文责任编辑 周东华

Recommended by Associate Editor ZHOU Dong-Hua

1. 浙江大学工业控制技术国家重点实验室 杭州 310027 2. 浙江大学控制科学与工程学系 杭州 310027

1. State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027 2. Department of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

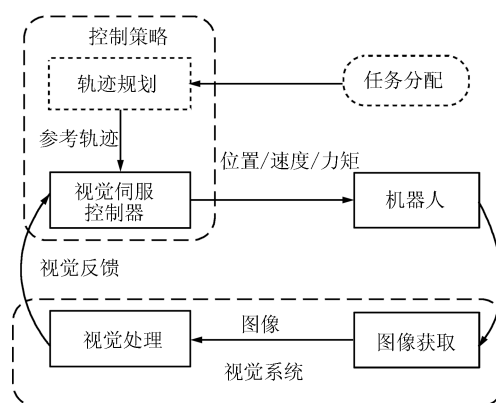


图 1 视觉伺服系统架构

Fig. 1 Framework of visual servo control system

面对视觉伺服中存在的主要问题和研究进展进行综述.

视觉伺服控制涉及计算机视觉、机器人技术和控制理论等多个领域,国内外学者在过去 20 余年中进行了广泛的研究. Hutchinson 等的三篇经典论文^[1-3]对视觉伺服控制的研究起到了引导作用. 近年来, Staniak 等^[4]和 Azizian 等^[5-6]分别对视觉伺服系统的结构及其在医疗机器人中的应用进行了综述. 在国内的研究中,林靖等^[7]、赵清杰等^[8]、薛定宇等^[9]、王麟琨等^[10]、方勇纯^[11]分别对视觉伺服控制进行了综述,总结了经典的视觉伺服控制方法.

随着计算机视觉和机器人技术的飞速发展,视觉伺服控制的研究也有了显著的进步. 相比于以往的综述,本文重点分析了视觉伺服系统设计中存在的主要问题及相应的解决方案. 如图 1 所示,设计视觉伺服系统时主要需要考虑视觉系统、控制策略以及实现策略三个方面. 在视觉系统方面,本文首先介绍了视觉系统的构造方法,并对动态性能的提升和噪声的处理进行了讨论. 在控制策略方面,主要针对视觉伺服系统中模型不确定性和约束的处理进行了分析. 另外,考虑到视觉伺服系统的可实现性和灵活性,文中对系统的实现策略进行了总结. 最后,基于当前的研究进展,对未来的研究方向进行了展望.

1 视觉伺服中的视觉系统

本节首先介绍视觉系统的组成,然后对视觉系统动态性能的优化和噪声的处理方法进行分析和总结.

1.1 视觉系统的组成

视觉系统由图像获取和视觉处理两部分组成,图像的获取是利用相机模型将三维空间投影到二维图像空间的过程,而视觉处理则是利用获取的图像信息得到视觉反馈的过程.

1.1.1 相机模型

如表 1,基本的相机模型主要包括针孔模型和球面投影模型,统一化模型是对球面模型的推广,将各种相机的图像映射到归一化的球面上. 此处需要强

调的是针孔模型的“相机撤退”问题和球面模型的旋转不变性.

针孔模型的“相机撤退”问题是指当旋转误差较大时,要使特征点在图像中沿直线运动到目标,相机会先旋转着远离目标,再旋转着接近目标,在工作空间的路径是曲折的. 对此可以使用极坐标系^[12]或圆柱坐标系^[13]来处理. 球面模型的旋转不变性是指球的旋转对物体在球面上投影的形状是没有影响的,一方面可以避免“相机撤退”问题^[14],同时也方便设计平移和旋转解耦的误差向量^[15-17]. 统一化模型^[18]的吸引力在于可以将各种相机的图像映射到统一的模型,从而在设计控制器时不需要考虑具体的相机模型,增强了系统的可扩展性. 另外也可以将常规的机器人传感器映射到球面,如重力向量、磁场向量或角速度等^[19],从而可以设计多传感器信息融合的机器人控制器.

1.1.2 视觉反馈

视觉伺服中的视觉反馈主要有基于位置、图像特征和多视图几何的方法. 其中,基于位置的方法将视觉系统动态隐含在了目标识别和定位中,从而简化了控制器的设计,但是一般需要已知目标物体的模型,且对图像噪声和相机标定误差较为敏感. 目标识别和跟踪可以参考相关综述^[42-43],下文中主要介绍基于图像特征和多视图几何的方法.

1) 基于图像特征的视觉反馈

如表 2 为常用的基于图像特征的视觉反馈构造方法,其中基于特征点的方法在以往的视觉伺服中应用较为广泛,研究较为成熟,但是容易受到图像噪声和物体遮挡的影响,并且现有的特征提取方法在发生尺度和旋转变化时的重复性和精度都不是太好^[44],在实际应用中存在较大的问题. 因此,学者们提出了基于全局图像特征的视觉反馈方法,利用更多的图像信息对任务进行描述,从而增强视觉系统的鲁棒性,但是模型较为复杂,控制器的设计较为困难,且可能陷入局部极小点. 目前针对这一类系统的控制器设计的研究还比较少,一般利用局部线性化模型进行控制,只能保证局部的稳定性.

表 1 相机模型
Table 1 Camera models

模型	应用范围	优点	缺点	代表性论文
针孔模型	透视相机	模型简单、图像畸变小	视野范围小、相机撤退	[2-3, 12-13]
球面模型	全景相机	视野较广、旋转不变性	图像畸变大、模型复杂	[14-17]
统一化模型	各种相机	旋转不变、归一化设计	图像畸变大、模型复杂	[18-19]

2) 基于多视图几何的视觉反馈

多视图几何^[45]描述了物体多幅图像之间的关系, 间接反映了相机之间的几何关系. 相比于基于图像特征的方法, 多视图几何与笛卡尔空间的关系较为直接, 简化了控制器的设计. 常用的多视图几何包括单应性、对极几何以及三焦张量, 如表 3. 需要强调的是, 两个视图之间的极点与相对姿态不是同构的, 当极点为零时不能保证二者姿态一致, 而只能保证二者共线, 一般使用两步法补偿距离误差^[37-38]. 单应性矩阵描述了共面特征点在两个视图之间的变换关系, 可以唯一决定二者的相对姿态. 对于非平面物体, 可以结合对极几何的方法进行处理. 文献 [46] 结合单应性矩阵和极点构造了在平衡点附近与姿态同构的误差系统. 文献 [47] 中采用类似的思路, 并利用图像配准的思想对几何参数进行估计. 但是, 由于模型复杂, 文献中只提出了局部稳定的控制律. 相比之下, 三焦张量是一种更加通用的方法, 对目标形状没有要求, 且不存在奇异性问题. 目前基于对极几何和三焦张量的方法还主要用于平面移动机器人的控制, 在六自由度控制中的应用有待进一步研究.

1.2 视觉系统动态性能的提升

相比于常规的机器人传感器, 视觉系统的采样频率较低, 视觉处理算法的时间延迟较大, 而且具有一定的噪声, 这对视觉伺服系统的动态性能有很大的影响. 近年来的研究主要从以下三个方面进行改进: 采用高速视觉系统, 提高处理速度和采样频率;

使用分布式的网络化架构, 提高算法的执行效率; 设计观测器, 处理视觉反馈中的噪声和延迟问题.

1) 高速视觉系统

常用的数字相机的采样频率较低, 一般在 30 fps 左右. 为了适应高速视觉伺服任务的需求, 近年来研究者开发出各种高速视觉系统^[48]. 高速视觉系统一般采用并行的结构, 图像检测和处理都是以高速进行, 从而可以达到高于 1 kHz 的频率, 方便进行高速运动物体的跟踪和柔性物体的识别, 常用于快速反应的系统^[49], 但是受到硬件设备的限制, 图像分辨率较低, 物体表面纹理不清晰, 难以描述复杂的场景, 且系统较为复杂, 开发和维护的成本高. 对于这一类的系统, 可以使用图像矩^[25]、核采样^[28]、互信息^[32]等全局图像特征, 不需要特征点的提取, 对图像分辨率的要求较低, 相比之下控制精度更高.

2) 分布式网络化的视觉系统

文献 [50] 中提出基于网络化分布式计算的视觉伺服控制系统, 从分布在不同部位的传感器 (如视觉传感器、光学传感器、雷达等) 采集的数据通过网络传送到处理器节点进行处理, 从而提高了视觉伺服系统的采样速度. 文献 [51] 中提出了视觉伺服系统中图像数据的传输协议及其调度策略. 分布式的实现策略充分利用了多个网络节点的计算资源, 从而更快地进行多传感器信息融合, 但是其效率很大程度上依赖于网络的速度, 并且网络化的系统增加了控制算法的复杂程度, 特别是针对网络延时、故障的处理.

表 2 基于图像特征的视觉反馈

Table 2 Visual feedback based on image features

方法	优点	缺点	代表性论文
图像特征点	模型简单、控制器设计方便	对噪声敏感、容错性差	[20-22]
光流场	反映运动状态、作为辅助控制信息	对噪声敏感、计算复杂	[23-24]
图像矩	自由度之间耦合较小、对噪声不敏感	针对平面目标、绕 x, y 的旋转自由度不好控制	[25-27]
核采样	无需图像分割、对噪声不敏感	针对平面目标、四自由度控制、需要参数整定	[28-29]
亮度	对噪声/部分遮挡的鲁棒性强、无需纹理信息	对光源变化敏感、局部极小	[30-31]
互信息	对噪声不敏感、可用于多模态图像	计算量较大	[32-33]

表 3 基于多视图几何的视觉反馈

Table 3 Visual feedback based on geometric constraints

方法	反馈构造方式	优点	缺点	代表性论文
单应性	矩阵元素/三维重构	无奇异性、计算简单	描述共面特征点、与目标模型有关	[34-36]
对极几何	极点	与目标无关、用于非平面场景	奇异性、平面上病态、与姿态非同构	[37-38]
三焦张量	张量元素/三维重构	与目标无关、不限场景、无奇异性	计算量大、模型较为复杂	[39-41]

3) 结合观测器的视觉系统

由于视觉设备的采样频率低, 并且具有噪声, 因此可以利用观测器对图像特征进行观测, 从而应对噪声和延迟对系统的影响. 在硬件条件限制下, 使用观测器是最有效的改善视觉系统性能的方法.

1) 卡尔曼滤波 (Kalman filter) 是一种常用的方法, 对于视觉伺服系统这种非线性对象, 可以使用扩展卡尔曼滤波器. 当噪声特征未知时, 可以使用自适应^[52]或自整定^[53]的方法. 另外, 由于视觉系统处理时间较长, 因此可能出现测量时间长于控制周期的情况, 可以使用双速率卡尔曼滤波的方法对系统状态进行观测^[54].

2) 粒子滤波 (Particle filter^[55]) 可以用于非高斯噪声下的非线性系统, 相比于卡尔曼滤波的方法更加适合于视觉伺服系统的应用. 其基本思想是通过随机采样获取概率分布, 基于这些观测值, 实际的概率分布可以通过调整采样的权重和位置得到.

3) 虚拟视觉伺服 (Virtual visual servo^[56]) 以重投影误差作为任务函数, 设计虚拟控制律使其最小化, 再将此控制律中得到的控制输入 (速度、加速度) 进行积分从而得到观测到的相机位置和速度, 省去了目标识别、定位等耗时的过程.

1.3 视觉系统噪声的处理

视觉系统的噪声主要来自于相机感光元件的噪声和视觉处理算法的误差, 对控制系统性能有较大影响. 视觉系统噪声的处理可以从以下 4 个方面入手:

1) 设计鲁棒的特征提取算法

图像噪声对图像特征的提取影响较大, 尤其是基于像素梯度的局部图像特征, 会出现特征点的误提取和误匹配, 直接导致系统状态变量的误差, 对控制系统的稳定性有很大的影响. 常用的去除例外点的方法有 RANSAC (Random sample consensus) 算法、霍夫变换、最小二乘法以及 M-estimators 算法等.

2) 使用观测器降低噪声的影响

对于含有噪声的特征向量, 可以利用观测器对其状态进行观测降低噪声的影响. 常用的方法有 Kalman 滤波^[52-54]、粒子滤波^[55]等. 另外, 在有些控制器中需要利用图像空间中的速度信息, 由于图像采样频率较低且噪声较大, 数值微分的方法存在较大的误差, 此时也可以利用观测器对其进行估计^[53].

3) 利用冗余的特征向量

对于冗余的特征向量, 可以利用每个特征点测量的统计特征描述该特征点的可靠性, 在设计控制

律时可以基于每个维度的可靠性设计加权矩阵^[57], 从而降低噪声较大或误匹配特征点对系统的影响. 另外, 也可以引入随特征点与图像边界距离递增的加权函数^[58]处理目标部分离开视野的情况, 保证控制律的连续性, 提高系统的容错性.

4) 提高对目标的感知力

图像对物体运动的感知力与特征点的选取以及物体姿态有关, 当存在图像噪声时, 不同的特征点选取对系统稳态误差有一定的影响, 因此可以利用优化的方法选取最佳的特征点对任务进行描述^[59]. 在控制的过程中, 可以利用图像雅可比矩阵的奇异值衡量对目标的感知能力^[60]. 文献 [61] 在任务零空间中优化轨迹以增强感知力, 从而提高控制性能.

2 视觉伺服中的控制策略

在视觉伺服控制器的设计中, 主要的问题在于模型不确定性和约束的处理. 这是由于视觉模型依赖于目标深度、相机参数等未知或不精确的信息, 并且在控制的过程中需要保证目标的可见, 对系统的稳定性和动态性能有较大的影响^[62-64].

2.1 视觉伺服中模型不确定性的处理

针对模型不确定性问题, 主要有三种解决方案, 分别为自适应算法、鲁棒算法和智能算法. 自适应算法通过自适应环节在线调整模型, 从而优化控制性能; 鲁棒算法基于最优估计参数设计控制器, 并保证对一定范围内参数摄动的稳定性; 智能算法一般基于学习的策略应对参数不确定性.

2.1.1 自适应视觉伺服控制

考虑到模型参数不确定带来的问题, 研究者提出了一系列自适应的方法对模型误差进行补偿. 自适应控制方法由控制律和自适应环节组成, 通过自适应环节的在线修正保证系统的稳定性. 自适应的方法可以分为参数自适应和雅可比矩阵自适应方法.

1) 参数自适应算法

由于特征点在图像空间的运动特性依赖于其深度和相机参数, 从而可以在控制过程中根据控制输入使用当前估计参数将运动投影到图像空间, 预测特征点的运动. 预测值与实际观测的特征点运动之间的差异作为估计投影误差, 可以通过迭代优化的方法使该投影误差最小化从而对参数进行在线估计. 一种常用的自适应方法是结合 Slotine 等^[65]的思想, 利用梯度法^[66]或其他搜索方法^[67]对特征点的估计投影误差进行在线最小化. 经典的自适应视觉伺服控制方法参见文献 [68].

当相机标定参数未知时, 一种思路是基于“深度

无关雅可比矩阵”的方法^[69], 将图像雅可比矩阵分为深度因子和深度无关的部分, 使用深度无关的部分设计反馈控制律, 从而在得到的闭环系统中相机参数是线性表达的. 对于深度信息未知的情况, 可以加入对深度的自适应环节增强其稳定性^[70-71]. 除了基于特征点的系统, 这种方法对一些广义特征也是有效的^[72], 只要深度无关雅可比矩阵对广义特征的未知几何参数是线性参数化的, 如距离、角度、质心等.

对于视觉伺服轨迹跟踪控制, 常规的方法需要加入图像空间中的速度作为前馈项^[66], 而图像中的速度一般是通过对图像坐标信息的数值微分得到的, 相比于关节空间的速度具有更大的噪声, 尤其是当采样频率较低时具有较大的误差. 因此, 一些学者提出不需要测量图像速度的方法^[73-75]. 这一类方法利用关节速度和估计的雅可比矩阵设计图像空间速度的观测器, 并加入对相机参数和深度的自适应. 因为机器人关节速度的测量是比较精确的, 因此可以较好地改善数值微分带来的问题.

2) 雅可比矩阵自适应算法

这一类的方法直接对雅可比矩阵进行在线辨识, 由递推的雅可比矩阵辨识算法和控制律组成. 常用的雅可比矩阵辨识方法如 Broyden 算法^[76]、加权递推最小二乘算法^[77]、Kalman 滤波^[78]等. Pari 等^[79]通过实验对比了使用递推最小二乘法估计的雅可比矩阵和使用解析形式的雅可比矩阵时的控制性能, 结果证明基于雅可比矩阵在线辨识的方法具有与基于解析形式雅可比矩阵的方法相差不多的控制效果和鲁棒性, 而基于雅可比矩阵在线辨识的方法不需要大量对系统的先验知识和复杂的模型推导过程, 但是其模型只在其训练的区域有效.

2.1.2 鲁棒视觉伺服控制

在基于图像的视觉伺服控制中, 由相机参数、目标深度以及机器人模型误差造成的图像雅可比矩阵的不确定性会对控制效果产生影响, 并可能造成控制器不稳定. 为了保证在参数摄动的情况下的控制器的稳定性, 可以在最优参数估计的基础上设计鲁棒控制器, 从而在一定的参数变化域内保证稳定性.

一种常用的思路是利用李雅普诺夫的方法设计鲁棒控制器, 从而克服深度和标定误差^[80]、机器人模型误差^[81]以及机器人执行速度指令时的量化误差^[82]带来的不确定性问题. 另一种思路是基于优化的方法, 通过对性能指标的在线优化 (如 H_2/H_∞ 指标^[83]、闭环系统的稳定域^[84]等) 得到在具有参数不确定性时的最优控制输入. 另外, 滑模控制也是一种常用的方法^[38], 通过构造与系统不确定性参数和扰

动无关的滑动面, 并设计控制律迫使系统向超平面收束, 从而沿着切换超平面到达系统原点. 由于常规的滑模控制产生的控制输入是不连续的, 可能造成系统的抖振, 可以使用二阶滑模 Super-twisting 控制的方法^[41]解决此问题.

虽然基于鲁棒控制的方法一般都具有对参数变化和扰动不敏感的优点, 但是通常需要较大的控制增益, 造成系统响应不光滑, 使执行器的损耗较大, 且可能造成系统的抖振. 在未来的研究中可以结合自适应控制的方法, 在模型细小变化时利用控制器的鲁棒性从而避免自适应机构过于频繁的调整, 当模型变化较大时, 则利用自适应的方法对其进行修正, 从而避免鲁棒控制方法过高的增益造成的问题.

2.1.3 智能视觉伺服控制

智能控制不需要精确的数学模型, 并且具有自学习能力, 适合于具有模型不确定性的视觉伺服系统控制. 智能视觉伺服控制方法有: 基于计算智能的方法^[85-86]、模糊控制^[87-88]、迭代学习控制^[89-91]等.

基于计算智能的方法一般利用人工神经网络^[85]、遗传算法^[86]等方法对视觉伺服系统模型进行拟合, 并利用学习到的模型进行控制. BP 神经网络是一种常用的方法^[85], 为了提高其收敛速度, 可以使用遗传算法设计其初值和参数^[86]. 这一类方法不需要复杂的建模过程, 但是需要预先进行离线训练, 而且当环境变化时又需要重新训练, 限制了其应用.

模糊控制利用模糊规则描述视觉伺服系统中各变量之间的关系, 不需要精确的系统模型, 但是需要一定的先验知识或离线学习. 在应用中, 可以直接设计模糊控制器^[88]或利用模糊规则对其他控制器参数进行更新^[87]. 但是, 对于多自由度的视觉伺服系统, 变量之间的关系复杂且耦合严重, 模糊规则的设计困难, 因此以往的研究主要针对低自由度的系统.

对于具有重复特性的视觉伺服任务, 迭代学习控制利用先前动作中的数据信息, 通过迭代找到合适的控制输入, 可以实现精确的轨迹跟踪. 这一类方法主要有两种思路, 一种是直接迭代学习控制, 使用迭代学习律得到控制输入的前馈量^[89], 并可以加入反馈辅助项提高收敛速度^[90]; 另一种是间接迭代学习控制, 使用迭代学习对模型参数进行更新^[91], 从而最终得到精确的模型用于跟踪控制. 这一类方法要求任务具有重复特性, 可以用于工业现场的流水线作业.

2.2 视觉伺服中约束的处理

针对约束下的视觉伺服控制问题,主要有以下三种解决思路:基于切换控制的视觉伺服、基于预测控制的视觉伺服以及结合轨迹规划的视觉伺服。

2.2.1 基于切换控制的视觉伺服

基于切换的视觉伺服控制将系统从时间轴上分割成一系列连续的子系统和一个离散的切换控制器^[92-94]。这一类方法有两种思路,一种是将被控变量的自由度在子系统中进行分割,由每个子系统控制一部分的自由度,从而更方便地处理特定的约束,再通过子系统的有序组合实现控制目标;另一种是在满足约束的前提下设计子系统的控制器,当约束条件即将触发时切换到其他控制器,从而保证在整个控制过程中满足约束。使用切换系统可以增加系统的稳定域,提高收敛速度。

针对非完整约束的移动机器人,有一系列的路径规划算法^[95]处理视野约束(Field of view constraints, FOV),约束下的最短路径由一系列的基本曲线组成。对于这些路径的跟踪可以使用切换控制的方法^[96],每个子控制器只需要控制一个或两个自由度跟踪一段曲线,从而克服了FOV约束和机器人本身的非完整约束。

考虑到基于位置的视觉伺服(Position-based visual servo control, PBVS)和基于图像的视觉伺服(Image-based visual servo control, IBVS)各自的特点^[2],可以设计PBVS和IBVS的切换控制器,综合利用二者的优势,其切换策略主要有以下几种:

- 1) 目标离图像边缘的距离^[92],保证物体在视野内;
- 2) 图像雅可比矩阵的奇异性^[93],避免IBVS中图像雅可比矩阵奇异性造成的问题。
- 3) 子控制器的李雅普诺夫函数^[94],保证图像空间误差和物理空间误差不会过大,从而保证FOV约束,并避免了IBVS的“相机撤退”现象。

需要注意的是,切换系统的稳定性并不能由子系统的稳定性保证^[97]。另外,基于切换控制的方法得到的结果一般是不连续的,而现实中我们希望机器人尽可能平滑地运动,因此基于切换控制的方法适用范围较小。

2.2.2 基于预测控制的视觉伺服

模型预测控制具有显式处理约束的能力,在工业中得到了广泛的应用。在视觉伺服控制中,物理约束可以描述为状态变量的约束,图像约束可以描述为输出约束,显式地体现在预测控制器中。由于视觉伺服系统本身是非线性的,在设计预测控制器时,可

以使用其局部线性化模型或全局非线性模型^[98-99]。为了保证模型预测控制系统的稳定性,一种常用的方法是在代价函数中加入预测时域末端状态误差的惩罚项^[100],并对约束问题增加末端状态约束。

当预测模型存在误差时,常规的预测控制器往往使用反馈校正的方法对模型进行在线调整。基于准最小最大模型预测控制(Quasi-min-max model predictive control)^[101]的视觉伺服控制方案,其控制目标是使“准最坏情况”的无限时域目标函数最小,以鲁棒的思想考虑参数变化域内的最坏情况并使其最小,对参数的不确定性具有较好的鲁棒性。

在实际中,模型预测控制的应用主要还限于线性或准线性过程,在非线性系统中的应用还不成熟^[102]。在基于预测控制的视觉伺服中,往往需要求解非线性优化问题,计算复杂度较高,难以满足机器人系统的实时性要求。随着模型预测控制及相关领域研究的不断深入,可以结合视觉伺服系统的特点进行进一步的研究,从而更好地处理约束问题。

2.2.3 结合轨迹规划的视觉伺服

这一类方法通过在轨迹规划中显式地考虑约束,得到满足约束的图像或笛卡尔空间内的优化轨迹,再使用常规的控制方案进行跟踪,从而可以简化控制器的设计。另外,在进行轨迹跟踪时,控制器的误差是较小的,因此可以更好地保证系统的稳定性。在视觉伺服系统中,常用的轨迹规划算法包括基于图像插值、基于优化以及基于势场的方法。需要强调的是,目前大部分轨迹规划算法都是针对已知静态环境的离线规划,在未知或动态环境下的实时规划问题还有待进一步研究。

1) 基于图像插值的轨迹规划

这一类的方法通过在初始图像与期望图像之间进行插值得到图像空间的路径。为了得到中间视图,通常可以使用对极几何^[103]或单应性矩阵的方法^[104]。为了保证视野约束,可以使随机选择的特征点在图像中直线运动^[105]。当相机参数已知时,可以通过单应性矩阵的分解得到目标姿态的旋转矩阵和包含未知的深度因子的平移矩阵,从而更方便地规划出物理空间中直线^[106]或螺旋形状^[107]的轨迹。

这一类方法实现较为简单,但是没有考虑机器人的物理约束,且规划得到的轨迹并不是最优的。

2) 基于优化的轨迹规划

基于优化的路径规划在机器人领域中得到了广泛的研究和应用,对于视觉伺服任务,其优化指标包括与图像边界的距离、机器人的路径长度、能量消耗等,但是由于视觉伺服系统的复杂性,目前的研究还主要局限于简单的场景和任务,且需要一定的先

验知识.

一种思路是将轨迹进行参数化表示, 并将其转化为优化问题进行求解. 常用的轨迹描述方法有多项式^[108]、罗德里格公式^[109]等, 其优化目标包括轨迹的长度、曲率等, 其约束包括视野约束以及机器人关节角度限制^[110]等. 当相机标定参数存在误差时, 实际执行时的轨迹与规划的轨迹有一定的差异, 可能会出现约束不满足的情况. 这种情况下可以利用鲁棒的思想, 在不确定参数的取值范围内生成一组轨迹, 并保证所有轨迹都满足约束^[111].

另一种思路是利用搜索的方法进行优化. 基于先验知识可以计算出目标可见区域和不可见区域的边界^[112], 然后利用机器人路径规划中的搜索算法得到满足约束的路径, 再将其投影到图像空间中. 常用的有基于 RRT^[113] 和概率地图^[114]的方法等. 基于搜索的方法在机器人的路径规划中应用已经比较成熟, 相比于参数优化的方式更加灵活, 便于实施.

特别地, 对于非完整约束的移动机器人, 由于运动学的非完整性, 在轨迹规划时还需要考虑物理可实现性. 在规划时, 通常使用物理可实现的基本曲线^[95], 并考虑视野约束^[95]和空间中的障碍物^[115]. 另外, 文献 [116] 中讨论了视野约束下非完整约束机器人的最短路径规划方法.

3) 基于势场的轨迹规划

在机器人路径规划中, 势场法被用于在约束的环境中实时规划出安全的避障策略. 在视觉伺服中, 可以将引力场定义在笛卡尔空间, 吸引机器人到目标姿态; 将斥力场定义在图像空间, 排斥目标物体远离图像边缘; 图像空间的轨迹使用迭代的方式在合力场中生成^[117]. 但是常规的势场法无法保证全局收敛性, 因此常用来对轨迹进行局部调整^[118]或作为次优结果进行再次优化^[93]. 另外, 文献 [119] 中提出了切换的方法避免局部极小点.

导航函数^[120]是一种特殊的势场函数, 在期望位置取得唯一最小值, 在边界处取最大值, 从而保证全局收敛, 且对于微分同胚映射具有不变性. 一种构造视觉伺服系统导航函数的思路为: 首先构造图像空间与模型空间的微分同胚映射, 并在模型空间构造导航函数, 最后将导航函数映射到图像空间. 其中模型空间导航函数由障碍物函数 (提供斥力) 和目标函数 (提供引力) 组成. 根据导航函数的梯度可以得到规划的图像空间轨迹. 文献 [121] 中将图像空间直接作为模型空间, 针对共线的三个点构造了导航函数, 只能进行三自由

度的控制. 文献 [122] 中考虑共面的 4 个点, 构造了图像空间与模型空间的映射, 保证在图像边缘处取最大值, 模型空间的导航函数保证在特征点的期望位置取最小值, 并实现了 6 自由度的控制.

3 视觉伺服中的实现策略

近 20 多年来, 机器人视觉伺服控制得到了广泛的研究, 但是在实际中的应用较少. 实际上, 视觉伺服的理论研究与实际应用有一定的脱节, 大部分的研究考虑理想的工作环境和任务, 并采用示教 (Teach-by-showing) 的方式. 这适合于静态环境下的重复性任务, 但是机器人的任务是复杂多样的. 近年来, 研究者提出了创新性的解决方案, 为视觉伺服系统的实施和应用提供了新的思路. 在实际中, 基于视觉伺服的系统主要有两种类型, 一种是机器人自主控制系统, 完全由机器人自身根据视觉反馈完成分配的任务; 另一种是人机协作系统, 在任务完成的过程中需要人为的干预, 其目的在于协助人更好地完成任务.

3.1 自主控制系统

视觉伺服在机器人系统中有广泛的应用, 如移动机器人的视觉导航和机械臂的末端控制等. 移动机器人的视觉导航可以描述为视觉伺服跟踪控制问题^[123]或一系列的视觉伺服调节控制问题^[124], 一般需要预先进行训练得到期望的图像序列. 工业机械臂常使用示教的策略, 以零件组装任务为例, 工程师需要先利用手操器对其进行编程, 机械臂再通过执行记录的驱动信号完成任务. 引入视觉伺服系统可以简化此过程, 只需要人在相机的监控下完成一次操作, 机械臂即可利用视觉反馈完成任务^[90].

传统的视觉伺服系统使用示教的方式, 其控制器的设定值为相机在期望位置处拍摄到的图像. 这种方法适合于在局部空间内执行重复性任务的工业机械臂, 但是对于大范围的移动机器人视觉导航任务显得实现成本较高. 学者们提出了以下几种改进策略:

- 1) 利用其他相机拍摄的图像作为设定值, 如 Teach-by-zooming 策略^[125];
- 2) 利用其他模态的图像作为设定值, 如基于互信息的方法^[32];
- 3) 利用几何信息定义视觉伺服任务^[126].

在现实生活中, 如果要告诉某人去某地, 可以提供该地点的照片或地图, 也可以描述该场景的几何特性. 实际上, 上述的三种策略分别对应了人类的这些行为习惯. 在未来的机器人应用中, 可以充分利用

互联网资源,如 Google 街景、Google 地图等,使其更灵活地为人类服务。

另外,大部分视觉伺服系统都要求目标在图像中持续可见(FOV 约束),这在实际任务中大大缩小了机器人的可达工作空间。Jia 等^[127]针对平面移动机器人提出了基于稀疏路标的视觉导航方法,利用“关键帧”策略放松了视野约束,从而优化了非完整约束机器人在工作空间中的轨迹。Li 等^[128]提出了机器人任务空间的全局控制器,利用各个区域性有效的反馈信息构造了连续的整体控制器,使得机器人在完成任务的过程中可以安全地穿过视觉感知盲区和奇异区域。

3.2 人机协作系统

目前大部分机器人的自主定位和导航任务都需要预先对任务进行精确描述,但是实际应用中的某些复杂任务难以用数学描述,且在任务完成的过程中需要进行智能决策,以当前的人工智能发展程度无法由机器人自主完成。因此可以构造人机协作系统,在任务执行过程中加入人类的判断,视觉伺服控制作为辅助系统,帮助人更轻松地完成一些复杂任务,形成半自动的系统。常见的人机协作系统有以下几种实现策略:

1) 人机串级控制,人负责上层的决策控制,视觉伺服系统负责底层的运动控制,如水下遥控机器人^[129]、半自动驾驶轮椅^[130]等。

2) 视觉伺服系统对操作对象施加运动约束,降低人需要操作的自由度,提高操作精度,如人机协作操作^[131]、手术辅助系统^[132]等。

3) 人机切换控制,将任务分为人主导的区域和机器人主导的区域,共同完成任务^[133]。

在医疗领域,学者们提出了一系列基于医疗成像设备的视觉伺服系统,对医生的手术操作起到协助作用,具体可参考相关综述^[5-6]。

4 研究展望

随着机器人技术的应用从工业领域向其他领域的延伸,机器人承担的任务也更加复杂多样,计算机视觉是机器人环境感知的重要工具,视觉伺服控制是机器人执行复杂任务的重要控制手段,对机器人作业性能的提升和应用场合的扩展有重要的意义。但是,以往关于视觉伺服的研究主要集中在简单静态环境下的视觉伺服任务,这在机器人的实际应用中是远远不够的。机器人任务的复杂性、灵活性和可靠性要求对视觉伺服控制的研究提出了进一步的需求。结合当前的研究进展,未来机器人视觉伺服的研究可以从以下几个方面展开:

1) 快速机器人系统的视觉伺服控制

由于视觉系统采样频率和处理速度的限制,视觉伺服系统的控制频率一般较低,且大部分为运动学层面的控制,主要应用于一些慢过程。对于实际中需要快速反应和执行的任務,可以利用高速视觉系统,设计机器人的动力学控制器,提高机器人的动态响应性能。

2) 多相机视觉系统的应用

由于单个相机的视野范围和分辨率有限,不仅限制了机器人的活动空间和作业精度,而且在控制的过程中需要牺牲控制性能来满足视野约束。使用多相机视觉系统可以扩展视野范围和机器人的活动空间,增强系统的容错性,提高系统的灵活性。未来可以针对基于冗余视觉系统的控制、无标定的多相机系统以及视觉伺服系统容错性展开研究。

3) 复杂动态环境下的视觉伺服

以往的研究主要针对理想静态环境下的视觉伺服任务,对于约束的处理也一般是假设环境已知,而真实的环境往往是复杂多变的。一方面,在实际的控制过程中存在较大的图像噪声、模型误差和控制延时,影响系统的动态性能和稳定性;另一方面,环境中的未知或动态障碍物体现为系统的未知动态约束,可能会造成目标的遮挡或机器人的碰撞。为了保证机器人在复杂环境下的可靠性,有必要针对这些问题做进一步的研究。

4) 广义视觉伺服系统的控制

以往的研究中视觉伺服控制器的设计主要针对基于图像特征点或单应性矩阵的系统,这一类系统模型较为简单,但是应用场景有限。对于使用其他视觉反馈的系统,现有的研究还主要倾向于视觉系统的设计,系统的控制性能还有进一步优化的空间,从而可以使视觉伺服系统得到更广泛的应用。

5) 多传感器融合的控制

机器人系统中常用的传感器主要有视觉设备、GPS、声纳、陀螺仪等,每种传感器有其应用场合和有效范围。视觉传感器的优势在于可以更加全面地体现环境信息,适合于任务级的控制。而陀螺仪、声纳等传感器适于机器人的姿态控制和避障控制。因此,复杂环境的任务中有必要融合其他传感器的信息,从而扩展机器人的有效工作空间,提高控制性能,并可以更加有效地处理工作空间约束。

6) 灵活的系统实现策略

目前视觉伺服应用的一个瓶颈在于需要 Teach-by-showing 的策略,其控制目标是预先在期望位置处拍摄的图像,在实际中增加了实现成本,而且在很多任务中这是无法满足的。因此,机器人视觉伺服任

务需要更加灵活的实现策略, 放松对目标图像的要求, 从而进行灵活的任务分配, 降低视觉伺服系统的实现成本, 扩展其应用。

7) 人机协作系统

目前人工智能的发展远未成熟, 用机器完全代替人的工作还为时尚早。机器人在执行复杂任务时会遇到一些不可预见的情况, 因此有必要加入人的控制行为与机器协作完成任务。以往的人机协作系统的研究主要倾向于系统结构设计层面, 在机器人控制层面, 尤其是视觉伺服控制中的研究较少。基于视觉伺服的人机协作系统在实际中具有很大的应用价值。

References

- Hutchinson S, Hager G D, Corke P I. A tutorial on visual servo control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, **12**(5): 651–670
- Chaumette F, Hutchinson S. Visual servo control I basic approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, **13**(4): 82–90
- Chaumette F, Hutchinson S. Visual servo control II advanced approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2007, **14**(1): 109–118
- Staniak M, Zieliński C. Structures of visual servos. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, **58**(8): 940–954
- Azizian M, Khoshnam M, Najmaei N, Patel R. Visual servoing in medical robotics: a survey, Part I: endoscopic and direct vision imaging — techniques and applications. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2014, **10**(3): 263–274
- Azizian M, Najmaei N, Khoshnam M, Patel R. Visual servoing in medical robotics: a survey, Part II: tomographic imaging modalities — techniques and applications. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2015, **11**(1): 67–79
- Lin Jing, Chen Hui-Tang, Wang Yue-Juan, Jiang Ping. Research on robotic visual servoing system. *Control Theory & Applications*, 2000, **17**(4): 476–481
(林靖, 陈辉堂, 王月娟, 蒋平. 机器人视觉伺服系统的研究. 控制理论与应用, 2000, **17**(4): 476–481)
- Zhao Qing-Jie, Lian Guang-Yu, Sun Zeng-Qi. Survey of robot visual servoing. *Control and Decision*, 2001, **16**(6): 849–853
(赵清杰, 连广宇, 孙增圻. 机器人视觉伺服综述. 控制与决策, 2001, **16**(6): 849–853)
- Xue Ding-Yu, Xiang Long-Jiang, Si Bing-Yu, Xu Xin-He. Classification of robotics visual servoing and its dynamics investigation. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2003, **24**(6): 543–547
(薛定宇, 项龙江, 司秉玉, 徐心和. 视觉伺服分类及其动态过程. 东北大学学报(自然科学版), 2003, **24**(6): 543–547)
- Wang Lin-Kun, Xu De, Tan Min. Survey of research on robotic visual servoing. *Robot*, 2004, **26**(3): 277–282
(王麟昆, 徐德, 谭民. 机器人视觉伺服研究进展. 机器人, 2004, **26**(3): 277–282)
- Fang Yong-Chun. A survey of robot visual servoing. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2008, **3**(2): 109–114
(方勇纯. 机器人视觉伺服研究综述. 智能系统学报, 2008, **3**(2): 109–114)
- Corke P I, Spindler F, Chaumette F. Combining Cartesian and polar coordinates in IBVS. In: Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. St. Louis, MO: IEEE, 2009. 5962–5967
- Iwatsuki M, Okiyama N. A new formulation of visual servoing based on cylindrical coordinate system. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, **21**(2): 266–273
- Corke P I. Spherical image-based visual servo and structure estimation. In: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage, AK: IEEE, 2010. 5550–5555
- Fomena R T, Tahri O, Chaumette F. Distance-based and orientation-based visual servoing from three points. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, **27**(2): 256–267
- Tahri O, Mezouar Y, Chaumette F, Corke P. Decoupled image-based visual servoing for cameras obeying the unified projection model. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, **26**(4): 684–697
- Tahri O, Araujo H, Chaumette F, Mezouar Y. Robust image-based visual servoing using invariant visual information. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, **61**(12): 1588–1600
- Geyer C, Daniilidis K. A unifying theory for central panoramic systems and practical applications. In: Proceedings of the 6th European Conference on Computer Vision. London, UK: Springer-Verlag, 2000. 445–461
- Corke P, Mahony R. Sensing and control on the sphere. In: Proceedings of the 14th International Symposium ISSR. Lucerne, Switzerland: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 71–85
- Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection. In: Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego, CA, USA: IEEE, 2005. 886–893
- Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91–110
- Bay H, Ess A, Tuytelaars T, Van Gool L. Speeded-up robust features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, **110**(3): 346–359
- Herrisse B, Hamel T, Mahony R, Russotto F X. Landing a VTOL unmanned aerial vehicle on a moving platform using optical flow. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, **28**(1): 77–89
- Malzahn J, Phung A S, Franke R, Hoffmann F, Bertram T. Markerless visual vibration damping of a 3-DOF flexible link robot arm. In: Proceedings of the 41st International Symposium on and 6th German Conference on Robotics. Munich, Germany: VDE, 2010. 1–8
- Tahri O, Chaumette F. Point-based and region-based image moments for visual servoing of planar objects. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, **21**(6): 1116–1127

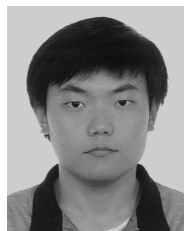
- 26 Bakthavatchalam M, Chaumette F, Marchand E. Photometric moments: new promising candidates for visual servoing. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, Germany: IEEE, 2013. 5241–5246
- 27 Bakthavatchalam M, Tahri O, Chaumette F. Improving moments-based visual servoing with tunable visual features. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong, China: IEEE, 2014. 6186–6191
- 28 Kallem V, Dewan M, Swensen J P, Hager G D, Cowan N J. Kernel-based visual servoing. In: Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, CA: IEEE, 2007. 1975–1980
- 29 Swensen J P, Kallem V, Cowan N J. Empirical characterization of convergence properties for kernel-based visual servoing. *Visual Servoing via Advanced Numerical Methods*. London: Springer-Verlag, 2010. 23–38
- 30 Collewet C, Marchand E. Photometric visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, **27**(4): 828–834
- 31 Caron G, Marchand E, Mouaddib E M. Photometric visual servoing for omnidirectional cameras. *Autonomous Robots*, 2013, **35**(2–3): 177–193
- 32 Dame A, Marchand E. Mutual information-based visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, **27**(5): 958–969
- 33 Dame A, Marchand E. Using mutual information for appearance-based visual path following. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, **61**(3): 259–270
- 34 Malis E, Chaumette F, Boudet S. 2D visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1999, **15**(2): 238–250
- 35 Lopez-Nicolas G, Gans N R, Bhattacharya S, Sagues C, Guerrero J J, Hutchinson S. Homography-based control scheme for mobile robots with nonholonomic and field-of-view constraints. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2010, **40**(4): 1115–1127
- 36 Benhimane S, Malis E. Homography-based 2d visual tracking and servoing. *The International Journal of Robotics Research*, 2007, **26**(7): 661–676
- 37 López-Nicolás G, Guerrero J, Sagüés C. Visual control of vehicles using two-view geometry. *Mechatronics*, 2010, **20**(2): 315–325
- 38 Becerra H M, López-Nicolás G, Sagüés C. A sliding-mode-control law for mobile robots based on epipolar visual servoing from three views. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, **27**(1): 175–183
- 39 López-Nicolás G, Guerrero J J, Sagüés C. Visual control through the trifocal tensor for nonholonomic robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, **58**(2): 216–226
- 40 Li Bao-Quan, Fang Yong-Chun, Zhang Xue-Bo. 2D trifocal tensor based visual servo regulation of nonholonomic mobile robots. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(12): 2706–2715 (李宝全, 方勇纯, 张雪波. 基于 2D 三焦点张量的移动机器人视觉伺服镇定控制. 自动化学报, 2014, **40**(12): 2706–2715)
- 41 Becerra H M, Sagüés C, Mezouar Y, Hayet J B. Visual navigation of wheeled mobile robots using direct feedback of a geometric constraint. *Autonomous Robots*, 2014, **37**(2): 137–156
- 42 Andreopoulos A, Tsotsos J K. 50 years of object recognition: directions forward. *Computer Vision and Image Understanding*, 2013, **117**(8): 827–891
- 43 Yang H X, Shao L, Zheng F, Wang L, Song Z. Recent advances and trends in visual tracking: a review. *Neurocomputing*, 2011, **74**(18): 3823–3831
- 44 Gil A, Mozos O M, Ballesta M, Reinoso O. A comparative evaluation of interest point detectors and local descriptors for visual SLAM. *Machine Vision and Applications*, 2010, **21**(6): 905–920
- 45 Hartley R, Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- 46 Silveira G, Malis E. Direct visual servoing: vision-based estimation and control using only nonmetric information. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, **28**(4): 974–980
- 47 Silveira G. On intensity-based nonmetric visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, **30**(4): 1019–1026
- 48 Ishii I, Tatebe T, Gu Q Y, Moriue Y, Takaki T, Tajima K. 2000 fps real-time vision system with high-frame-rate video recording. In: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage, AK: IEEE, 2010. 1536–1541
- 49 Namiki A, Senoo T, Mizusawa S, Ishikawa M. High-speed visual feedback control for grasping and manipulation. *Visual Servoing via Advanced Numerical Methods*. London: Springer-Verlag, 2010. 39–53
- 50 Wu H Y, Lou L, Chen C C, Hirche S, Kühnlenz K. A framework of networked visual servo control system with distributed computation. In: Proceedings of the 2010 11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision. Singapore: IEEE, 2010. 1466–1471
- 51 Wu H Y, Lou L, Chen C C, Hirche S, Kuhnlenz K. Cloud-based networked visual servo control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, **60**(2): 554–566
- 52 Janabi-Sharifi F, Marey M. A Kalman-filter-based method for pose estimation in visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, **26**(5): 939–947
- 53 Tsai C Y, Song K T, Dutoit X, Van Brussel H, Nuttin M. Robust visual tracking control system of a mobile robot based on a dual-Jacobian visual interaction model. *Robotics and Autonomous Systems*, 2009, **57**(6–7): 652–664
- 54 Nguyen B M, Ohnishi W, Wang Y, Fujimoto H, Hori Y, Ito K, Odai M, Ogawa H, Takano E, Inoue T, Koyama M. Dual rate Kalman filter considering delayed measurement and its application in visual servo. In: Proceedings of 13th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. Yokohama, Japan: IEEE, 2014. 494–499
- 55 Ibarguren A, Martínez-Otzeta J M, Maurtua I. Particle filtering for industrial 6DOF visual servoing. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014, **74**(3–4): 689–696
- 56 Dahmouche R, Andreff N, Mezouar Y, Ait-Aider O, Martinet P. Dynamic visual servoing from sequential regions of interest acquisition. *The International Journal of Robotics Research*, 2012, **31**(4): 520–537

- 57 Comport A I, Marchand E, Chaumette F. Statistically robust 2-D visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, **22**(2): 415–420
- 58 Garcia-Aracil N, Malis E, Aracil-Santonja R, Perez-Vidal C. Continuous visual servoing despite the changes of visibility in image features. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, **21**(6): 1214–1220
- 59 Chesi G. Optimal object configurations to minimize the positioning error in visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, **26**(3): 584–589
- 60 Iwatani Y. Task selection for control of active-vision systems. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, **26**(4): 720–725
- 61 Spica R, Giordano P R, Chaumette F. Coupling visual servoing with active structure from motion. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong, China: IEEE, 2014. 3090–3095
- 62 Malis E, Rives P. Robustness of image-based visual servoing with respect to depth distribution errors. In: Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, China: IEEE, 2003. 1056–1061
- 63 Malis E, Mezouar Y, Rives P. Robustness of image-based visual servoing with a calibrated camera in the presence of uncertainties in the three-dimensional structure. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, **26**(1): 112–120
- 64 Chaumette F. Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing. *The Confluence of Vision and Control*. London: Springer, 1998. 66–78
- 65 Slotine J J E, Li W P. On the adaptive control of robot manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 1987, **6**(3): 49–59
- 66 Chen J, Dawson D M, Dixon W E, Behal A. Adaptive homography-based visual servo tracking for a fixed camera configuration with a camera-in-hand extension. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, **13**(5): 814–825
- 67 Liu Ding, Wu Xiong-Jun, Yang Yan-Xi, Xin Jing. An improved self-calibration approach based on enhanced mutative chaos optimization algorithm for position-based visual servo. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(6): 623–631 (刘丁, 吴雄君, 杨延西, 辛菁. 基于改进变尺度混沌优化的自标定位视觉伺服. *自动化学报*, 2008, **34**(6): 623–631)
- 68 Hu G Q, Gans N, Dixon W E. Adaptive visual servo control. *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. New York: Springer, 2009. 42–63
- 69 Liu Y H, Wang H S, Wang C Y, Lam K K. Uncalibrated visual servoing of robots using a depth-independent interaction matrix. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, **22**(4): 804–817
- 70 Liang X W, Huang X H, Wang M, Zeng X J. Improved stability results for visual tracking of robotic manipulators based on the depth-independent interaction matrix. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, **27**(2): 371–379
- 71 Fan Cai-Zhi, Song Bao-Quan, Liu Yun-Hui, Cai Xuan-Ping. Adaptive visual servoing of a small scale autonomous helicopter. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(6): 894–900 (范才智, 宋宝泉, 刘云辉, 蔡宣平. 微小无人直升机自适应视觉伺服. *自动化学报*, 2010, **36**(6): 894–900)
- 72 Liu Y H, Wang H S, Chen W D, Zhou D X. Adaptive visual servoing using common image features with unknown geometric parameters. *Automatica*, 2013, **49**(8): 2453–2460
- 73 Wang H S, Liu Y H, Chen W D. Uncalibrated visual tracking control without visual velocity. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, **18**(6): 1359–1370
- 74 Wang H L. Adaptive visual tracking for robotic systems without visual velocity measurement. *Automatica*, 2015, **55**: 294–301
- 75 Lizarralde F, Leite A C, Hsu L, Costa R R. Adaptive visual servoing scheme free of image velocity measurement for uncertain robot manipulators. *Automatica*, 2013, **49**(5): 1304–1309
- 76 Jagersand M, Fuentes O, Nelson R. Experimental evaluation of uncalibrated visual servoing for precision manipulation. In: Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque, NM: IEEE, 1997. 2874–2880
- 77 Piepmeier J A, McMurray G V, Lipkin H. Uncalibrated dynamic visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, **20**(1): 143–147
- 78 Lv X D, Huang X H. Fuzzy adaptive Kalman filtering based estimation of image Jacobian for uncalibrated visual servoing. In: Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China: IEEE, 2006. 2167–2172
- 79 Pari L, Sebastian J M, Traslucheros A, Angel L. A comparative study between analytic and estimated image Jacobian by using a stereoscopic system of cameras. In: Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei, China: IEEE, 2010. 6208–6215
- 80 Hu G Q, Gans N, Dixon W. Quaternion-based visual servo control in the presence of camera calibration error. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2010, **20**(5): 489–503
- 81 Kim C S, Mo E J, Han S M, Jie M S, Lee K W. Robust visual servo control of robot manipulators with uncertain dynamics and camera parameters. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2010, **8**(2): 308–313
- 82 Tsai C Y, Song K T. Visual tracking control of a wheeled mobile robot with system model and velocity quantization robustness. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, **17**(3): 520–527
- 83 Tu Y W, Ho M T. Design and implementation of robust visual servoing control of an inverted pendulum with an FPGA-based image co-processor. *Mechatronics*, 2011, **21**(7): 1170–1182
- 84 Tarbouriech S, Souères P. Image-based visual servo control design with multi-constraint satisfaction. *Visual Servoing via Advanced Numerical Methods*. London: Springer-Verlag, 2010. 275–294
- 85 Li You-Xin, Mao Zong-Yuan, Tian Lian-Fang. Visual servoing of 4DOF using image moments and neural network. *Control Theory & Applications*, 2009, **26**(10): 1162–1166 (李优新, 毛宗源, 田联房. 基于图像矩与神经网络的机器人四自由度视觉伺服. *控制理论与应用*, 2009, **26**(10): 1162–1166)

- 86 Wang H B, Liu M. Design of robotic visual servo control based on neural network and genetic algorithm. *International Journal of Automation and Computing*, 2012, **9**(1): 24–29
- 87 Siradjuddin I, Behera L, McGinnity T M, Coleman S. Image-based visual servoing of a 7-DOF robot manipulator using an adaptive distributed fuzzy PD controller. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, **19**(2): 512–523
- 88 Bueno-López M, Arteaga-Pérez M A. Fuzzy vs nonfuzzy in 2D visual servoing for robot manipulators. *International Journal of Advanced Robotic System*, 2013, **10**(108), DOI: 10.5772/55593
- 89 Jiang P, Unbehauen R. Robot visual servoing with iterative learning control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2002, **32**(2): 281–287
- 90 Jia B X, Liu S, Liu Y. Visual trajectory tracking of industrial manipulator with iterative learning control. *Industrial Robot: An International Journal*, 2015, **42**(1), 54–63
- 91 Jiang P, Bamforth L C A, Feng Z, Baruch J E, Chen Y Q. Indirect iterative learning control for a discrete visual servo without a camera-robot model. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2007, **37**(4): 863–876
- 92 Kermorgant O, Chaumette F. Combining IBVS and PBVS to ensure the visibility constraint. In: Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). San Francisco, CA: IEEE, 2011. 2849–2854
- 93 Deng L F, Janabi-Sharifi F, Wilson W J. Hybrid motion control and planning strategies for visual servoing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, **52**(4): 1024–1040
- 94 Gans N R, Hutchinson S A. Stable visual servoing through hybrid switched-system control. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, **23**(3): 530–540
- 95 Bhattacharya S, Murrieta-Cid R, Hutchinson S. Optimal paths for landmark-based navigation by differential-drive vehicles with field-of-view constraints. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, **23**(1): 47–59
- 96 Lopez-Nicolas G, Gans N R, Bhattacharya S, Sagues C, Guerrero J J, Hutchinson S. Homography-based control scheme for mobile robots with nonholonomic and field-of-view constraints. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics*, 2010, **40**(4): 1115–1127
- 97 Branicky M S. Stability of hybrid systems: state of the art. In: Proceedings of the 1997 IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, CA: IEEE, 1997. 120–125
- 98 Cao Z C, Yin L J, Fu Y L, LIU T L. Predictive control for visual servo stabilization of nonholonomic mobile robots. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(8): 1238–1245
- 99 Allibert G, Courtial E, Chaumette F. Predictive control for constrained image-based visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, **26**(5): 933–939
- 100 Murao T, Kawai H, Fujita M. Visual motion observer-based stabilizing receding horizon control via obstacle avoidance navigation function. In: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Control Applications. Dubrovnik, Croatia: IEEE, 2012. 903–909
- 101 Wang T T, Xie W F, Liu G D, Zhao Y M. Quasi-min-max model predictive control for image-based visual servoing with tensor product model transformation. *Asian Journal of Control*, 2014, DOI: 10.1002/asjc.871
- 102 Xi Yu-Geng, Li De-Wei, Lin Shu. Model predictive control — status and challenges. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(3): 222–236
(席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制 – 现状与挑战. 自动化学报, 2013, **39**(3): 222–236)
- 103 Park J S, Chung M J. Path planning with uncalibrated stereo rig for image-based visual servoing under large pose discrepancy. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, **19**(2): 250–258
- 104 Mezouar Y, Chaumette F. Optimal camera trajectory with image-based control. *The International Journal of Robotics Research*, 2003, **22**(10–11): 781–803
- 105 Schramm F, Morel G. Ensuring visibility in calibration-free path planning for image-based visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, **22**(4): 848–854
- 106 Kyrki V, Kragic D, Christensen H I. New shortest-path approaches to visual servoing. In: Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Sendai, Japan: IEEE, 2004. 349–354
- 107 Allotta B, Fioravanti D. 3D motion planning for image-based visual servoing tasks. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain: IEEE, 2005. 2173–2178
- 108 Chesi G, Prattichizzo D, Vicino A. Straight line path-planning in visual servoing. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2007, **129**(4): 541–543
- 109 Chesi G. Visual servoing path planning via homogeneous forms and LMI optimizations. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, **25**(2): 281–291
- 110 Chesi G, Hung Y S. Global path-planning for constrained and optimal visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, **23**(5): 1050–1060
- 111 Chesi G, Shen T T. Conferring robustness to path-planning for image-based control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, **20**(4): 950–959
- 112 Tarabanis K, Tsai R Y, Kaul A. Computing occlusion-free viewpoints. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, **18**(3): 279–292
- 113 Kazemi M, Gupta K, Mehrandezh M. Global path planning for robust visual servoing in complex environments. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, Japan: IEEE, 2009. 326–332
- 114 Baumann M, Leonard S, Croft E A, Little J J. Path planning for improved visibility using a probabilistic road map. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, **26**(1): 195–200
- 115 Hayet J B, Esteves C, Murrieta-Cid R. A motion planner for maintaining landmark visibility with a differential drive robot. *Algorithmic Foundation of Robotics VIII*. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 333–347
- 116 Salaris P, Fontanelli D, Pallottino L, Bicchi A. Shortest paths for a robot with nonholonomic and field-of-view constraints. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, **26**(2): 269–281

- 117 Mezouar Y, Chaumette F. Path planning for robust image-based control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, **18**(4): 534–549
- 118 Chesi G, Vicino A. Visual servoing for large camera displacements. *IEEE Transactions on Robotics*, 2004, **20**(4): 724–735
- 119 Zhang Xue-Bo, Fang Yong-Chun, Ma Bo-Jun. A PFM-based global convergence visual servo path planner. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(10): 1250–1256
(张雪波, 方勇纯, 马博军. 基于虚拟势场法的全局收敛视觉路径规划. *自动化学报*, 2008, **34**(10): 1250–1256)
- 120 Koditschek D E, Rimon E. Robot navigation functions on manifolds with boundary. *Advances in Applied Mathematics*, 1990, **11**(4): 412–442
- 121 Cowan N J, Weingarten J D, Koditschek D E. Visual servoing via navigation functions. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, **18**(4): 521–533
- 122 Chen J, Dawson D M, Dixon W E, Chitrakaran V K. Navigation function-based visual servo control. *Automatica*, 2007, **43**(7): 1165–1177
- 123 Chen J, Dixon W E, Dawson D M, McIntyre M. Homography-based visual servo tracking control of a wheeled mobile robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, **22**(2): 406–415
- 124 Diosi A, Segvic S, Remazeilles A, Chaumette F. Experimental evaluation of autonomous driving based on visual memory and image-based visual servoing. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, **12**(3): 870–883
- 125 Mehta S S, Jayaraman V, Burks T F, Dixon W E. Teach by zooming: a unified approach to visual servo control. *Mechatronics*, 2012, **22**(4): 436–443
- 126 Mehta S S, Curtis J W. A geometric approach to visual servo control in the absence of reference image. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Anchorage, AK: IEEE, 2011. 3113–3118
- 127 Jia B X, Liu S. Homography-based visual predictive control of tracked mobile robot with field-of-view constraints. *International Journal of Robotics and Automation*, to be published
- 128 Li X, Cheah C C. Global task-space adaptive control of robot. *Automatica*, 2013, **49**(1): 58–69
- 129 Karras G C, Loizou S G, Kyriakopoulos K J. Towards semi-autonomous operation of under-actuated underwater vehicles: sensor fusion, on-line identification and visual servo control. *Autonomous Robots*, 2011, **31**(1): 67–86
- 130 Pasteau F, Krupa A, Babel M. Vision-based assistance for wheelchair navigation along corridors. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong, China: IEEE, 2014. 4430–4435
- 131 Hager G D. Human-machine cooperative manipulation with vision-based motion constraints. *Visual Servoing via Advanced Numerical Methods*. London: Springer-Verlag, 2010. 55–70
- 132 Bachtá W, Renaud P, Malis E, Hashimoto K, Gangloff J. Visual servoing for beating heart surgery. *Visual Servoing via Advanced Numerical Methods*. London: Springer-Verlag, 2010. 91–114

- 133 Li X, Cheah C C. Human-guided robotic manipulation: theory and experiments. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong, China: IEEE, 2014. 4594–4599



贾丙西 浙江大学控制科学与工程学系博士研究生. 主要研究方向为计算机视觉, 视觉伺服控制.

E-mail: bxjia@zju.edu.cn

(**JIA Bing-Xi** Ph.D. candidate in the Department of Control Science and Engineering, Zhejiang University. His

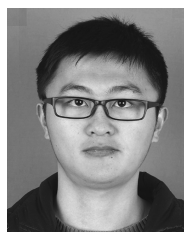
research interest covers computer vision and visual servo control.)



刘山 浙江大学控制科学与工程学系副教授. 2002 年获得浙江大学控制科学与工程学系博士学位. 主要研究方向为学习控制, 视觉伺服控制, 机器人技术. 本文通信作者.

E-mail: sliu@iipc.zju.edu.cn

(**LIU Shan** Associate professor in the Department of Control Science and Engineering, Zhejiang University. He received his Ph.D. degree from Zhejiang University in 2002. His research interest covers learning control, visual servo control, and robotics. Corresponding author of this paper.)

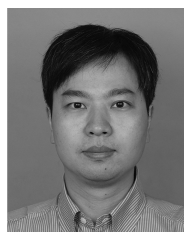


张凯祥 浙江大学控制科学与工程学系博士研究生. 主要研究方向为计算机视觉, 视觉伺服控制.

E-mail: kaixiangzhang@zju.edu.cn

(**ZHANG Kai-Xiang** Ph.D. candidate in the Department of Control Science and Engineering, Zhejiang University. His research interest covers computer vision and visual

servo control.)



陈剑 浙江大学控制科学与工程学系教授. 2005 年获得美国克莱姆森大学电子与计算机工程学系博士学位. 主要研究方向为计算机视觉, 非线性系统, 燃料电池系统集成与控制.

E-mail: jchen@zju.edu.cn

(**CHEN Jian** Professor in the Department of Control Science and Engineering, Zhejiang University. He received his Ph.D. degree from Clemson University, USA in 2005. His research interest covers computer vision, nonlinear systems, and integration and control of fuel cell systems.)