

ADRC 理论和技术在机器人无标定 视觉伺服中的应用和发展

苏剑波

(上海交通大学 自动化系, 上海 200240)

摘要: 针对 Active disturbance rejection controller (ADRC) 理论和方法在机器人无标定视觉伺服研究领域中的应用及取得的成果进行综述. 剖析了机器人无标定视觉伺服研究的本质特性和关键问题, 说明其与 ADRC 理论和思想在方法论上的一致性, 特别以机器人无标定手眼协调这一典型应用为例, 展示了 ADRC 理论和技术用于处理机器人无标定手眼协调问题的合理性. 给出了控制器的基本设计过程, 并在已有成果的基础上讨论了控制器的收敛性以及 ADRC 设计中的参数整定方法. 最后讨论了一些尚未解决的问题, 指出了今后继续研究的方向.

关键词: 机器人; 视觉伺服; 手眼协调; 无标定; 自抗扰控制器

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Robotic uncalibrated visual serving based on ADRC

SU Jian-bo

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China. E-mail: jbsu@sjtu.edu.cn)

Abstract: The strategy of active disturbance rejection controller (ADRC) and its applications in robot uncalibrated visual serving is summarized. The philosophy of ADRC is shown to be consistent with the characteristics of the uncalibrated visual serving problem. Then the procedure of controller design is thoroughly illustrated for robotic hand-eye coordination based on ADRC principles, as well as the convergence and parameter tuning of the controller on ADRC strategy. Some issues that are still left unsolved are discussed, which will be the future directions in this strategy.

Key words: robot; visual servoing; hand-eye coordination; uncalibrated; active disturbance rejection controller

0 引言

自机器人诞生起, 如何让它能模仿人类智能和行为一直是人们长期以来的梦想之一. 随着机器人应用的工作环境从最初的室内和工业流水线, 逐步拓展到野外(深海、太空)、军事、医疗康复、救灾等领域, 机器人控制手段必须能在越来越复杂的环境中实施动态不确定任务^[1]. 人类和动物行为中的“眼观察-手操作”这一典型的体现闭环反馈控制方式的手眼协调动作, 是生命智能中最普遍存在的行为, 因此, 让机器人能在任意环境中针对任务完成“传感器感知-执行器操作”这一类体现基本仿人智能的行为, 便构成了机器人视觉伺服的主要研究内容, 至今已有 20 多年的历史^[2].

机器人视觉伺服的核心是利用视觉反馈信息规

划机器人运动, 从而完成机器人的视觉定位、跟踪和/或抓取目标任务. 视觉伺服行为是从视觉传感到执行器操作的映射. 视觉观察是在视觉空间进行的, 对目标和环境信息的描述都是在视觉坐标系里完成的; 而机器人执行器的操作, 例如手爪要跟踪或抓住某个目标物, 是在手爪坐标系实现的. 因此在执行器进行操作之前, 必须要把对目标的位置和运动状态的描述从视觉坐标系转换到执行器坐标系上, 即建立视觉传感坐标系与机器人执行器坐标系之间的转换关系, 这就是机器人-视觉系统标定 (Calibration) 的主要研究内容. 这个研究领域, 从为机器人引入外部传感器开始就一直一直是机器人学的主要研究内容之一^[3].

由于机器人本身是个强非线性系统, 其作为被控对象的运动学和动力学模型的建立一直是长期困扰

收稿日期: 2014-04-01; 修回日期: 2014-06-18.

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目(61221003).

作者简介: 苏剑波(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 从事机器人控制、人机交互等研究.

机器人学和控制理论领域的一个难题;另一方面,传感器,特别是作为视觉传感器的摄像头,对外界信息的传感模型其本质也是非线性的,模型的精度更受制于制作材料、工艺、建模方法以及传感环境(噪声、光照)对建模数据采集的影响,建立的模型精度总是不能满足实际系统越来越高的对控制性能的要求,因此,这一问题至今仍是传感器和机器人研究领域的主要研究问题之一^[4].而需要在机器人模型和传感器模型基础上才能完成的视觉传感-执行器之间的转化关系模型,其精度一定比机器人系统模型和传感器传感模型的精度都差,实际应用中至少低一个数量级^[5].这些问题严重制约了机器人视觉伺服技术和行为在机器人完成实际任务中的应用.

鉴于机器人手眼协调系统模型建立的难处,20世纪90年代初,人们开始了机器人无标定手眼协调问题的研究^[6-7].

无标定手眼协调技术的核心是在机器人执行器与视觉传感之间的关系模型,甚至是摄像机模型未知或不精确的情况下,利用摄像机反馈回来的机器人执行器操作状态和任务执行状态,设计规划机器人的控制以完成设定的任务.由于机器人手眼协调技术的广泛应用,更由于无标定手眼协调技术,使得机器人视觉伺服不再受制于繁杂的机器人和摄像机系统建模的局限中,从而使得无标定手眼协调技术具有了巨大的应用潜力,各国学者都对它进行了不懈的研究,其中最基本的、也是研究最多的是基于图像雅可比矩阵方法^[8-15].在每一个时刻用线性图像雅可比矩阵实时估计机器人手眼之间的非线性映射关系,据此得出机器人下一时刻的运动控制量.然而,目前的估计方法均存在滞后性、奇异性、是否收敛以及收敛速度等问题,特别在动态环境下更为突出,难以应用于动态场合,种种问题制约了图像雅可比矩阵在线估计方法的应用.

基于雅可比矩阵的机器人无标定手眼协调的本质是用瞬时局部的线性关系的时空组合来逼近静态全局的非线性关系,因此,把系统误差从视觉传感空间映射到机器人控制空间的线性雅可比矩阵,在机器人空间及任务实现的过程中一定是不断变化的,需要在线实时估计.这就需要机器人在完成执行任务操作的同时,还需要执行为估计雅可比矩阵而不得不增加的试探运动.因此,在线准确有效地估计雅可比矩阵是这个策略下的控制方法是否有效的关键.特别是为了提高任务完成的效率,必须把机器人完成任务的操作与在线实时估计雅可比矩阵的试探运动尽可能地

统一起来.该要求在很大程度上取决于具体的任务,并没有统一的设计思路,因此构成了这个策略应用中最主要的研究和系统开发内容.迄今的研究表明,雅可比矩阵的估计方法和过程依赖于机器人系统的物理配置和具体的待完成任务,估计精度与机器人在工作空间的位置及视场有关.如前所述,目前的估计方法仍存在估计滞后、奇异性、是否收敛以及收敛速度的问题,至今还难以给出一般的估计理论和手段,特别在动态环境和/或任务不确定情况下,上述问题更加突出.

利用人工神经网络(ANN)学习映射图像雅可比矩阵关系,完成视觉定位和跟踪任务^[16-18],是对雅可比矩阵估计方法的一个有益补充,对机器人无标定手眼协调系统的性能提高取得了一定的成效^[19].但雅可比矩阵本质上是局部和线性的,制约了神经网络逼近全局非线性输入输出关系的能力,且估计雅可比矩阵需要的试探运动这一本质上影响任务执行效率的问题并没得到解决.文献[20]研究了直接用神经网络映射视觉观察误差与机器人控制之间的非线性模型的方法,是对无标定手眼协调研究的一项突破,但神经网络的离线训练需要采集尽可能遍历机器人运动工作空间的大量的训练样本点数据,工作量极大,在工程上不一定可行.另外,研究发现,基于神经网络的机器人无标定视觉伺服和手眼协调性能与机器人视觉系统的配置(单眼&多眼、眼固定&眼在手上)、待完成任务以及所采用的神经网络的类型和结构(隐层数和节点数、递推学习方法)也有很密切的关系,尽管已有取得了较满意协调性能成果的报道^[20-22],但仍制约了该方法的实用和推广.

综上所述,机器人无标定视觉伺服就是要寻找在视觉系统与机器人控制系统之间关系未知的情况下,从视觉系统感知的视觉空间的系统误差,获得消除机器人操作空间误差的有效的控制策略和技术手段,以完成指定任务.而这个控制策略和技术手段应该与机器人系统配置以及机器人所需要完成的任务无关,同时要满足完成指定任务所需要的精度和速度要求.因此,寻找与任务无关的机器人无标定视觉伺服和手眼协调策略和技术实现手段便构成了近年来机器人无标定视觉伺服研究的主要目标和任务^[23].

自抗扰控制器(ADRC)是一种针对不确定系统的非线性控制器^[24],它通过对系统未建模动态和外部扰动的估计,采用扩展状态观测器(ESO)对控制量进行实时补偿,以实现不确定系统的控制^[25].因此,如果把视觉反馈到机器人执行器之间的未知映射关系

看成是系统的未建模动态, 则能利用自抗扰控制器的思想和技术手段设计机器人视觉伺服和手眼协调控制器. 这样的机器人无标定手眼协调策略有望与机器人视觉伺服系统的具体配置以及系统要完成的任务都无关, 从而具有更广泛的应用价值.

1 视觉伺服模型

以机器人手爪跟踪抓起一个运动目标为例. 如果机器人手爪在其控制系统中的位置为 W , 在摄像机图像平面的位置为 P , 目标在摄像机的图像平面的位置为 P^* , 则对于机器人跟踪和抓取目标任务而言, $P = P^*$ 即为控制目标.

机器人视觉伺服系统的控制模型是在视觉观察与机器人运动控制之间建立映射关系, 即寻找 W 与 P 之间的关系, 以控制 W 的运动, 实现 $P = P^*$. 显然, P 与 P^* 之间的映射关系与机器人系统的运动学模型、摄像机的成像模型以及机器人与摄像机之间的关系模型有关, 其精度与机器人本体的模型精度、摄像机标定精度以及手眼关系标定精度都有关, 通常很难获得精确的模型. 无标定手眼协调的出发点, 是在上述关系模型未知的情况下, 直接把他们之间的映射关系表达为

$$P = f(W), \quad (1)$$

其中 $f(\cdot)$ 表示机器人模型、摄像机模型和它们之间关系模型的综合因素.

机器人控制中常采用各关节的速度量作为输入, 因此, 对式 (1) 微分便得到系统的控制模型

$$\begin{cases} \dot{W} = U, \\ \dot{P} = g(W)U. \end{cases} \quad (2)$$

其中: U 是机器人在机器人控制坐标系中的速度矢量, $g(W)$ 是 $f(W)$ 的微分. 线性化后称为雅克比矩阵^[2,6-7]. 式 (2) 描述了机器人的微小运动在视觉坐标系和机器人控制坐标系中的映射关系. 考虑机器人在实际控制中受到的干扰, 式 (2) 可转化为

$$\begin{cases} \dot{W} = U, \\ \dot{P} = \hat{g}(W)U + A(t). \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\hat{g}(W)$ 是对 $g(W)$ 的一个估计, 实际应用中可以简单取作 $g(W)$ 在机器人完成任务过程中所有可能值的平均值或中值; 而

$$A(t) = (g(W) - \hat{g}(W))\dot{W} + \xi(t)$$

是对系统建模误差部分 $g(W) - \hat{g}(W)$ 及系统所受到的外界干扰 $\xi(t)$ 的一个综合描述.

式 (3) 给出了面向 ADRC 的机器人无标定视觉伺服模型, 由于引入了外界干扰 $\xi(t)$, 对系统输入输出

关系的描述能更加全面.

2 控制器设计

用 ADRC 原理设计机器人无标定视觉伺服控制器最初是从一些特定的应用任务开始的, 例如定位、运动跟踪等^[26-29]. 在获得一系列结果后, 可将 ADRC 理论在机器人无标定手眼协调任务中的应用技术推广成为机器人视觉伺服的一般理论^[30-31]. 文献 [27] 对 ADRC 在机器人无标定手眼协调问题的控制器设计进行了完整的讨论, 展现了 ADRC 用来解决这个问题潜力和良好性能.

针对式 (3) 表示的被控系统, 简单地用常规的 ADRC 理论设计其控制器.

1) 跟踪微分器 (TD).

跟踪微分器用于跟踪系统的输入信号 P^* . 一个二阶跟踪微分器为

$$\begin{cases} \dot{X}_1(t) = X_2(t), \\ \dot{X}_2(t) = -r \text{fal}(X_1(t) - P^*(t), \Psi_0, \Delta_0). \end{cases} \quad (4)$$

其中: r 是跟踪加速度上限, 满足 $|\ddot{P}(t)| \leq r$; 而

$$\text{fal}(\epsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\epsilon|^\alpha \text{sign}(\epsilon), & |\epsilon| > \delta; \\ |\epsilon|/\delta^{1-\alpha}, & |\epsilon| \leq \delta; \end{cases} \quad (5)$$

跟踪微分器的输出信号 $X_1(t)$ 能跟踪系统输入信号 $P^*(t)$.

2) 扩展状态观测器 (ESO).

设计一个二阶 ESO 用于估计系统模型不确定性和外界干扰的综合效应, 即

$$\begin{cases} \dot{Z}_1(t) = Z_2(t) - B_1 \cdot \text{fal}(Z_1(t) - P(t), \Psi_1, \Delta_1) + \hat{g}(W)U(t), \\ \dot{Z}_2(t) = -B_2 \cdot \text{fal}(Z_1(t) - P(t), \Psi_2, \Delta_2). \end{cases} \quad (6)$$

其中: B_1, B_2 都是针对估计性能的可选参数; $Z_1(t)$ 给出 $P(t)$ 的估计, $Z_2(t)$ 给出 $A(t)$ 的估计, 即系统未建模动态和所有外部干扰的综合效应.

3) 非线性状态误差反馈控制 (NLSEF).

定义系统跟踪状态误差为

$$E(t) = P^*(t) - Z_1(t), \quad (7)$$

系统控制输入可由下式的非线性状态误差反馈 (NLSEF) 获得:

$$\begin{cases} U_0(t) = K \cdot \text{fal}(E(t), \Psi_3, \Delta_3), \\ U(t) = \\ U_0(t) - (\hat{g}^T(W)\hat{g}(W))^{-1}\hat{g}^T(W)Z_2(t). \end{cases} \quad (8)$$

3 收敛性分析

在对机器人无标定手眼协调的控制问题采用 ADRC 方法进行研究时, 秉承把系统中的不确定量用

其估计值消掉,使得系统变为线性时不变系统的思想,设计出跟踪微分器、扩张状态观测器以及非线性状态误差反馈控制策略,取得了相比其他的机器人无标定视觉伺服方法所不能获得的优越性能^[29-31],但这些成果还缺少充分的理论来支撑。

事实上,ADRC控制方法的理论基础在20多年来一直都处于不明朗的地步。基于ADRC思想的控制系统的收敛性证明,一直到最近几年才通过Guo团队的工作获得了大的进展^[32-34],全面揭示了这一理论对多输入输出系统的前因后果,终于使得自抗扰控制技术有了坚实的理论基础,能够完整从容地展现在世人面前。

针对机器人无标定视觉伺服和手眼协调系统的收敛性证明工作也取得了一些成果。文献[31, 35]给出了这方面成果的详细介绍,把文献[36]研究ADRC收敛性的结果直接映射于以机器人运动控制的某一维作为考察对象的机器人无标定手眼协调系统上。当为该维运动控制设计的ESO对这一维的未建模动态和未知干扰的估计是收敛的,即当

$$\dot{p}_x = -r \cdot \text{fal}(p_x - p_x^*, \psi_{0x}, \delta_{0x}) \quad (9)$$

成立时,该维上的运动控制就能收敛。

定理 1 对于任何有界可积函数 $p_x^*(t)$ 和任何常数 $T > 0$, 系统(9)满足

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \int_0^T |p_x(t) - p_x^*(t)| dt = 0, \quad (10)$$

即当 r 趋于无穷时, p_x 能跟踪 p_x^* 。

定理 1 成立的条件是式(9)成立,即ESO收敛。而对ESO的估计是否能收敛却没有保证性的结论,因此定理 1 是不全面的。另外,更为重要的是,机器人运动跟踪任务并不仅仅取决于控制各维分别收敛就能完成的,即各个分量方向的ESO收敛,并不能保证式(6)能为整体系统未建模动态提供一个好的估计,使得全局系统模型满足类似于式(9)的形式,全局收敛需要各维的控制同时达到收敛才能保证。这个问题的证明迄今尚没有明确的思路,期待Guo团队和其他同行的研究成果能对ADRC在机器人无标定手眼协调方面的应用和性能评价带来新的认识和研究思路。

4 参数整定

在ADRC控制器中,由于TD、ESO、NLSEF三个部分都引入了非线性,需要调整的参数很多^[24]。而对于机器人无标定手眼协调任务,各个参数对于控制效果的贡献也不尽相同^[37]:有些参数对于系统有着决定性作用,稍微变化就会造成系统的不稳定;而有的参数在很大变化范围内对整体性能影响微乎其微。因

此,ADRC中各组成部分的参数整定理论和方法一直是ADRC理论研究中的重要组成部分^[38],也是它得以更广泛应用的重要前提^[39]。

TD的作用是给系统设计理想的过渡过程,并给出该过渡过程的微分信号。其中 r 关系到TD中跟踪速度:若要使跟踪速度加快,则应适当增大 r ,但增大 r 又会使系统的微分跟踪信号产生振荡;另外, r 的选择同样要随着跟踪信号的幅值增大而相应增大。ESO的稳定是ADRC稳定的必要条件^[36],这是ESO参数整定的基本条件。式(6)中: B_1 影响ESO的估计精度; B_2/B_1 越大,或者 Δ_1 、 Δ_2 越小,系统的收敛速度越快。对于NLSEF中的参数,增大式(8)中 K 值,在一定程度上会使系统跟踪精度提高,改善系统的动态性能。

近年来,现代参数优化算法,如粒子群算法^[40]等,也已应用于ADRC的参数整定研究。针对机器人无标定视觉伺服的应用,又特别研究了诸如基于自适应免疫算法的参数整定理论和技术^[41],这些成果极大地丰富了ADRC的理论成果,同时也为基于ADRC的机器人无标定视觉伺服的更复杂、更广泛的应用提供了重要的理论依据和技术支持。

5 网络环境下的机器人无标定视觉伺服

随着机器人视觉伺服系统技术的成熟,其应用领域也越来越广。机器人视觉伺服技术也可以借助于网络控制的拓展,使其应用范围不再受物理区域的约束。在大多数实际系统中,特别是遥操作系统,控制命令的传送和控制效果的传感反馈都存在一定程度的时间延迟。事实上,网络控制系统的非经典数据传输模式,如数据传输的随机延迟、传输过程中的数据丢失、非因果性(后发数据可能先被接受)等,都会对传统的控制理论和技术带来极大的挑战。因此,网络传输环境下的机器人无标定视觉伺服理论和技术也一定会有全新的问题值得研究^[42]。

显然,视觉反馈如果存在延迟,则当前时刻的系统控制误差将不能为系统控制器所用,这必然会导致系统控制的不精确,甚至控制失败。迄今为止,网络控制的理论和技术研究已取得了相当的研究成果,一定程度上都可以在网络环境下的机器人视觉伺服任务上使用。但由于图像特征的不准确和延迟,这类方法的效果十分有限,无法实现快速的动态控制。Nakadokoro等^[43]通过预测图像的变化来补偿这部分时延,取得了一定的效果,他建立了机器人工作空间中当前的运动和通过预测获得的图像空间中机器人运动之间的非线性映射关系。但其假定在时延期间机器人运动的图像特征的加速度不变,且对图像特征运

动本身还没有非常准确的预测方法, 所以这种方法存在很大的局限性, 不适合实际动态控制系统。

高振东等^[42]提出了一种基于多项式拟合的带有延补偿的图像雅可比矩阵估计方法, 研究视觉反馈存在延迟情况下的机器人无标定手眼协调问题, 是对这个问题的一个初步探索, 取得了一定的成果, 但并没有从根本上为视觉到控制之间存在延迟这一类系统控制提供解决方案. 尤其是对于基于 ADRC 的机器人无标定视觉伺服研究, 上述结果没有太大的参考价值^[14,44].

视觉传感到控制的延迟一定会给 ADRC 中跟踪微分器、扩展状态估计器和非线性状态误差控制的设计都带来重要的影响. 即如果式 (4) 给出的 $X_1(t)$ 不再能跟踪 $P^*(t)$, 而是存在一个随机延迟时, 或者式 (6) 给出的 $Z_1(t)$ 也不能及时估计 $P(t)$, 则式 (8) 给出的控制还能消除系统的误差么? 上面给出的定理 1 中式 (10) 还成立么? 文献^[45-46]试图对回答上述问题作出初步的努力, 但还远远没有得到根本解决。

6 与 DOB 的比较

基于干扰观测器 (DOB) 的鲁棒控制也是一种对模型失配和系统受到的外界干扰进行估计和抑制的控制方法^[47], 从 20 世纪 80 年代诞生以来得到了飞速的发展. 干扰观测器由受控对象标称模型的逆模型和低通滤波器构成. 由于对干扰和噪声的抑制性能及对模型摄动的鲁棒性均决定于低通滤波器 (低通滤波器 $Q(s)$ 不仅使逆模型在物理上可实现, 还能抑制检测噪声并保证系统对模型失配的鲁棒稳定性), 低通滤波器设计是干扰观测器设计的关键. 目前这个领域的研究主要集中在: 1) 建立能直接用于低通滤波器设计过程的优化评价函数, 且能反映包括相对阶次条件和内模阶次条件在内的具体设计指标和频率特性; 2) 系统性的干扰观测器设计方法^[48]. 另外, 时域下的系统收敛性分析及其在非线性系统中的应用, 以及保证控制器的闭环鲁棒稳定, 也是 DOB 需要解决的问题。

ADRC 本身也有类似于 DOB 的一些基本理论问题需要深入研究, 如 ESO 对于模型不确定性的鲁棒性, ESO 的阶次选取以及扰动抑制性能等. 此外, 考察并比较 DOB 与 ADRC 在抑制不同类型模型失配和外界干扰的性能, 对系统不同控制指标的影响效果, 以及比较相同控制性能下采用不同控制策略的代价. 这些研究结果对于不同应用选择最佳的控制策略以获得最优控制效果是非常有意义的。

事实上, 从干扰观测器的角度来考察机器人无标定视觉伺服任务是很直接的^[49]. 未知的手眼关系, 未

知的机器人运动学动力学模型, 未知的摄像机传感模型, 都可以看成是通过在各自标称模型上的参数摄动而获得的. 所以, 完全可以设计低通滤波器 (Q -滤波器) 以估计机器人视觉伺服系统中的无标定模型部分, 并据此设计鲁棒控制器, 解决伺服控制问题^[50]. 这种控制策略一定会对机器人无标定视觉伺服问题提出新的解决思路, 获得新的结果, 并在新的应用邻域得到很好的实现. 事实上, Q -滤波器的设计有基于传统的 Butterworth 模型、二项系数模型的设计方法; DOB 的实现更有了基于鲁棒控制理论, 如 H_∞ 控制理论的设计方法等. 考察这些已有的研究成果在机器人无标定视觉伺服问题上的应用及其适用性, 并根据任务的特点, 给出具有针对性的 Q -滤波器和 DOB 的设计策略, 无论是对于机器人无标定视觉伺服系统设计和实现, 还是丰富 DOB 的理论研究, 都是至关重要的^[51-52].

在此基础上, 再来比较基于 DOB 和基于 ADRC 的机器人无标定视觉伺服 (手眼协调) 的控制性能, 以及这两种控制策略对该应用中不同任务的解决程度和代价, 并在不同性能指标驱动下挑选不同的控制器设计策略, 以达到丰富完善各自理论体系的目的, 这将具有重要的学术意义^[53-56]. 实际上, 基于 ADRC 的控制器设计和分析是在时域内完成的, 而 DOB 是在频域内完成的, 两者针对具体应用和任务实现是否存在明确的性能对应关系, 如系统收敛性、对外界干扰的鲁棒稳定性等, 这些问题很值得深入探讨。

7 结 论

把 ADRC 用于机器人无标定视觉伺服, 这个问题的研究对提高机器人控制性能, 乃至拓展机器人仿人智能具有重要的价值. 在对 ADRC 的研究仍处于不断进取不断丰富的当下, 通过对机器人无标定手眼协调这一典型任务的考察及其性能拓展都是提升机器人无标定视觉伺服系统性能, 从而进一步拓展其应用领域的重要途径^[57], 同时也是丰富 ADRC 理论的重要手段之一. 人们期待着在用 ADRC 提升机器人无标定手眼协调任务控制性能的同时, 寻找设计出能大大丰富 ADRC 控制器设计手段, 提高控制器鲁棒性的机器人无标定视觉伺服任务的应用案例^[58-61]. 人们在寻找从根本上提升机器人无标定视觉伺服性能的视觉特征方面做了一些工作^[62], 但控制器的设计也一定需要相对应的手段. 期待未来在基于 ADRC 控制思想的机器人无标定视觉伺服控制器设计方面的工作, 能为不同应用下的各类机器人无标定视觉伺服问题带来最根本、最彻底的统一解决方案。

参考文献(References)

- [1] 谭民, 王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报, 2013, 39(7): 963-972.
(Tan M, Wang S. Research progress on robotics[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(7): 963-972.)
- [2] 苏剑波. 机器人无标定手眼协调[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 20-40.
(Su J B. Robotic uncalibrated hand-eye coordination[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 20-40.)
- [3] Tsai R Y, Lenz R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 345-358.
- [4] Su Jianbo. Camera calibration based on receptive fields[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(10): 2837-2845.
- [5] Andreff N, Horaud R, Espiau B. Robot hand-eye calibration using structure-from-motion[J]. Int J of Robotics Reserch, 2001, 20(3): 228-248.
- [6] Hager G D, Chang W C, Morse A S. Robot feedback control based on stereo vision: Towards calibration-free hand/eye coordination[C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. San Diego, 1994: 2850-2856.
- [7] Yoshimi B H, Allen P K. Alignmeng using an uncalibrated camere system[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1995, 11(4): 516-521.
- [8] 苏剑波, 席裕庚, 汤善同. 无标定机器人/视觉系统的平面运动跟踪[J]. 系统工程与电子技术, 1998, 9(4): 45-50.
(Su J B, Xi Y G, Tang S T. Planar motion tracking with an uncalibrated robot/vision system[J]. J of System Engineering and Electronics, 1998, 9(4): 45-50.)
- [9] 苏剑波, 席裕庚. 机器人/视觉系统非标定的平面运动跟踪[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(6): 50-53.
(Su J B, Xi Y G. Robot/visual system uncalibrated planar motion tracking[J]. J of System Engineering and Electronics, 1999, 21(6): 50-53.)
- [10] 苏剑波, 席裕庚. 与标定无关的机器人手眼系统的平面运动跟踪[J]. 模式识别与人工智能, 1999, 12(4): 467-472.
(Su J B, Xi Y G. Calibration-free coordination of robotic hand-eye system on dynamic planar tracking[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1999, 12(4): 467-472.)
- [11] 苏剑波, 席裕庚. 基于无标定全局视觉反馈的三维运动目标的图象跟踪方法[J]. 高技术通讯, 2000, 10(7): 85-87.
(Su J B, Xi Y G. Image tracking for a 3D moving object based on uncalibrated golbal visual feedback[J]. High Technology Letters, 2000, 10(7): 85-87.)
- [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.
(Qian J, Su J B. Online estimation of image Jacobian matrix based on Kalman filter[J]. Control and Decision, 2003, 18(1): 77-80.)
- [13] 钱江, 苏剑波. 基于图象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.
(Qian J, Su J B. Uncalibrated 2D motion tracking based on image Jacobian matrix[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2003, 16(3): 257-262.)
- [14] Su Jianbo, Zhang Yanjun, Luo Zhiwei. Online estimation of image Jacobian matrix for uncalibrated dynamic hand-eye coordination[J]. Int J of Systems, Control and Communications, 2008, 1(1): 31-52.
- [15] Qian Jiang, Su Jianbo. Online estimation of image Jacobian matrix by Kalman-Bucy filter for uncalibrated stereo vision feedback[C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Washington, 2002, 5: 562-567.
- [16] 潘且鲁, 苏剑波, 席裕庚. 基于立体视觉的机器人手眼无标定三维视觉跟踪[J]. 机器人, 2000, 22(4): 293-299.
(Pan Q L, Su J B, Xi Y G. Uncalibrated 3D robotic visual tracking based on stereo vision[J]. Robot, 2000, 22(4): 293-299.)
- [17] 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.
(Pan Q L, Su J B, Xi Y G. Uncalibrated 2D robotic visual tracking based on artificial neural network[J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(2): 194-199.)
- [18] 潘且鲁, 苏剑波, 席裕庚. 眼在手机器人手眼无标定三维视觉跟踪[J]. 自动化学报, 2002, 28(3): 371-377.
(Pan Q L, Su J B, Xi Y G. Eye-in-hand 3D robotic visual tracking without calibration[J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(3): 371-377.)
- [19] Su Jianbo, Pan Qielu, Xi Yugeng. Dynamic coordination of uncalibrated hand/eye robotics system based on neural network[J]. J of System Engineering and Electronics, 2001, 12(3): 45-50.
- [20] Su Jianbo, Xi Yugeng, Hanebeck U D, et al. Nonlinear visual mapping model for 3-D visual tracking with uncalibrated eye-in-hand robotic system[J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, Part B, 2004, 34(1): 652-659.
- [21] Su Jianbo, Pan Qielu, Xi Yugeng. Nonlinear visual mapping model and neural network based controller for

- uncalibrated visual servoing[C]. Proc of the 4th Asian Conf on Robotics and Its Applications. Singapore, 2001: 80-85.
- [22] Su Jianbo. Performance analysis for uncalibrated hand-eye coordination with neural network[C]. Proc of the 22nd Annual Conf on the Robotics Society of Japan. Tsukuba, 2004, 9: 3c17.
- [23] 韩京清. 控制理论—模型论还是控制论[J]. 系统科学与数学, 1989, 9(4): 328-335.
(Han J Q. Control theory, is it a model analysis approach or a direct control approach[J]. J of System Sciences & Mathematics Sciences, 1989, 9(4): 328-335.)
- [24] Han J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [25] Gao Z, Huang Y, Han J. An alternative paradigm for control system design[C]. Proc of the 40th IEEE Int Conf on Decis Control. Florida, 2001, 5: 4578-4585.
- [26] 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.
(Ma H Y, Su J B. Uncalibrated robotic hand-eye coordination based on theory of coupled ADRC[J]. Robot, 2003, 25(1): 39-43.)
- [27] 苏剑波, 邱文彬. 基于自抗扰控制器的机器人无标定手眼协调[J]. 自动化学报, 2003, 29(2): 161-167.
(Su J B, Qiu W B. Robotic calibration-free hand-eye coordination based on auto disturbances rejection controller[J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(2): 161-167.)
- [28] 马红雨, 苏剑波, 刘成刚. 基于耦合自抗扰控制器的无标定手眼协调[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(11): 1385-1388.
(Ma H Y, Su J B, Liu C G. Calibration-free hand-eye coordination based on coupled auto-disturbance rejection controller[J]. J of System Engineering and Electronics, 2003, 25(11): 1385-1388.)
- [29] 马红雨, 苏剑波. 基于自抗扰控制器的机器人无标定三维手眼协调[J]. 自动化学报, 2004, 30(3): 400-406.
(Ma H Y, Su J B. Uncalibrated robotic 3D hand-eye coordination based on auto disturbance rejection controller[J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(3): 400-406.)
- [30] Su Jianbo, Ma Hongyu, Qiu Wenbin, et al. Task-independent robotic uncalibrated hand-eye coordination based on the extended state observer[J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, Part B, 2004, 34(4): 1917-1922.
- [31] Su Jianbo, Qiu Wenbin, Ma Hongyu, et al. Calibration-free robotic eye-hand coordination based on an auto disturbance-rejection controller[J]. IEEE Trans on Robotics, 2004, 20(5): 899-907.
- [32] Guo B Z, Zhao Z L. On convergence of tracking differentiator[J]. Int J of Control, 2011, 84(4): 693-701.
- [33] Guo B Z, Zhao Z L. On the convergence of extended state observer for nonlinear systems with uncertainty[J]. Systems and Control Letters, 2011, 60(6): 420-430.
- [34] Guo B Z, Zhao Z L. On convergence of the nonlinear active disturbance rejection control for MIMO systems[J]. SIAM J on Control and Optimization, 2013, 51(2): 1727-1757.
- [35] Su Jianbo. Convergence analysis for the uncalibrated robotic hand-eye coordination based on the unmodeled dynamics observer[J]. Robotica, 2010, 28(4): 597-605.
- [36] Huang Y, Han J. Analysis and design for the second order nonlinear continuous extended states observer[J]. Chinese Sciences Bulletin, 2000, 45(21): 1938-1944.
- [37] 马红雨, 苏剑波. 自抗扰控制器 ADRC 的参数调整[J]. 电气自动化, 2002, 24(增): 10-13.
(Ma H Y, Su J B. Parameter adjustment for ADRC[J]. Electrical Automation, 2002, 24(S): 10-13.)
- [38] Gao Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]. Proc of the 2003 American Control Conf. Denver, 2003: 4989-4996.
- [39] 张荣, 韩京清. 用模型补偿自抗扰控制器进行参数辨识[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(1): 79-81.
(Zhang R, Han J Q. Parameter identification by model compensation auto disturbance rejection controller[J]. Control Theory & Applications, 2000, 17(1): 79-81.)
- [40] 史永丽, 侯朝桢, 苏海滨. 基于粒子群优化算法的自抗扰控制器设计[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 433-436.
(Shi Y L, Hou C Z, Su H B. Auto-disturbance-rejection controller design based on particle swarm optimization algorithm[J]. J of System Simulation, 2008, 20(2): 433-436.)
- [41] 辛菁, 刘丁, 杨延西, 等. 基于自适应免疫整定的机器人无标定自抗扰视觉伺服控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(4): 546-552.
(Xin J, Liu D, Yang Y X, et al. An uncalibrated disturbance-rejection visual servoing control for a robot based on adaptive immune tuning[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(4): 546-552.)
- [42] 高振东, 苏剑波. 带有时延补偿的图像雅克比矩阵估计方法[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(1): 23-27.
(Gao Z D, Su J B. Estimation of image Jacobian matrix with time-delay compensation for uncalibrated visual servoing[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(1): 23-27.)

- [43] Nakadokoro M, Komada S, Hori T. Stereo visual servo of robot manipulators by estimated image features without 3D reconstruction[C]. Proc of IEEE Conf on Systems, Man and Cybernetics. Boston, 1999, 1: 571-576.
- [44] Gao Zhengdong, Su Jianbo. Stable switch method based on fusion in uncalibrated visual servoing[J]. J of Shanghai Jiaotong University: Science, 2007, 12 E(5): 584-591.
- [45] Gao Zhendong, Su Jianbo. Switch images based on fusion in uncalibrated visual servoing[C]. Proc of IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems(IROS). Beijing, 2006, 10: 3803-3808.
- [46] 苏剑波. 无标定手眼协调跟踪系统性能分析与改进[C]. 第26届中国控制会议. 长沙, 2007, 5: 141-144.
(Su J B. Performance investigation and improvement for the uncalibrated hand-eye coordination system[C]. Proc of the 26th Chinese Control Conf(CCC). Changsha, 2007: 141-144.)
- [47] Ohishi K, Ogino Y, Hotta M. High performance motion control based on model following acceleration joint control method[C]. Proc of IEEE Int Conf on Robot Automation. Scottsdale, 1989, 3: 1792-1798.
- [48] 尹正男, 苏剑波. 保证闭环系统鲁棒稳定性的干扰观测器系统性设计方法[J]. 自动化学报, 2012, 38(1): 12-22.
(Yin Z N, Su J B. Systematic design method of disturbance observer guaranteeing closed-loop system's robust stability[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(1): 12-22.)
- [49] Yun Jong Nam, Su Jianbo, Kim Yong Il, et al. Robust disturbance observer for two-inertia system[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2700-2710.
- [50] Yun Jong Nam, Su Jianbo. A design of servo control system based on robust scheduled disturbance observer[J]. IEEE Trans on Control System Technology, 2014, 22(2): 809-815.
- [51] Yao X M, Guo L. Composite anti-disturbance control for Markovian jump nonlinear systems via disturbance observer[J]. Automatica, 2013, 49(8): 2538-2545.
- [52] Chen W H. Disturbance observer based control for nonlinear systems[J]. IEEE/ASME Trans on Mechatron, 2004, 9(4): 569-577.
- [53] Chen W H, Ballance D J, Gawthrop P J, et al. Nonlinear disturbance observer for robotic manipulators[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 932-938.
- [54] Jia Q W. Disturbance rejection through disturbance observer with adaptive frequency estimation[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2009, 45(6): 2675-2678.
- [55] Kim K S, Rew K H. Reduced order disturbance observer for discrete-time linear systems[J]. Automatica, 2013, 49(4): 968-975.
- [56] Jo N H, Joo Y J, Shim H. A study of disturbance observers with unknown relative degree of the plant[J]. Automatica, 2014, 50(6): 1730-1734.
- [57] 项祯祯, 苏剑波, 马哲. 仿人机器人上基于无标定手眼协调的人机交互[C]. 第33届中国控制会议. 南京, 2014: 8438-8443.
(Xiang Z Z, Su J B, Ma Z. Uncalibrated hand-eye coordination based HRI on humanoid robot[C]. The 33rd Chinese Control Conf(CCC). Njing, 2014: 8438-8443.)
- [58] Su Jianbo, Xi Yugeng. ADRC-based uncalibrated robotic eye-hand coordination[C]. Proc of the 8th IEEE Int Conf on Mechatronics and Machine Vision in Practice. Hongkong, 2001: 162-167.
- [59] Su Jianbo, Xi Yugeng. Uncalibrated hand/eye coordination based on auto disturbance rejection controller[C]. Proc of IEEE Int Conf on Decision and Control. Las Vegas, 2002, 10: 923-924.
- [60] Ma Hongyu, Su Jianbo. Uncalibrated robotic 3-D hand-eye coordination based on the extended state observer[C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Taipei, 2003, 9: 3327-3332.
- [61] Su Jianbo, Ma Hongyu, Luo Zhiwei. Robotic uncalibrated hand-eye coordination based on the extended state observer[C]. Proc of the 5th Asian Control Conf. Melbourne, 2004, 7: 989-996.
- [62] 马哲, 苏剑波. 机器人视觉伺服中的特征完备性[C]. 第31届中国控制会议. 合肥, 2012: 5109-5112.
(Ma Z, Su J B. Feature completeness in visual servoing[C]. Proc of the 31st Chinese Control Conf(CCC). Hefei, 2012: 5109-5112.)
- [63] 邱文彬, 苏剑波, 席裕庚. 基于在线识别的机器人动态手眼协调[J]. 机器人, 2001, 23(3): 222-226.
(Qiu W B, Su J B, Xi Y G. Robot dynamic hand-eye coordination based on online recognition[J]. Robot, 2001, 23(3): 222-226.)

(责任编辑: 李君玲)