



申请代码	F030106
受理部门	
收件日期	
受理编号	6160021794



# 国家自然科学基金 申 请 书

(2016 版)

资助类别：	青年科学基金项目		
亚类说明：			
附注说明：			
项目名称：	基于图像的视觉伺服机械臂控制系统时滞补偿及优化研究		
申 请 人：	王新梅	电 话：	02787175128
依托单位：	中国地质大学（武汉）		
通讯地址：	中国地质大学（武汉）自动化学院		
邮政编码：	430074	单位电话：	027-67885043
电子邮箱：	wangxm@cug.edu.cn		
申报日期：	2016年03月04日		

国家自然科学基金委员会



## 基本信息

申请人信息	姓名	王新梅	性别	女	出生年月	1979年12月	民族	汉族
	学位	博士	职称	讲师	每年工作时间（月）		7	
	电话	02787175128		电子邮箱		wangxm@cug.edu.cn		
	传真			国别或地区		中国		
	个人通讯地址	中国地质大学（武汉）自动化学院						
	工作单位	中国地质大学(武汉)/自动化学院						
	主要研究领域							
依托单位信息	名称	中国地质大学（武汉）						
	联系人	田永常	电子邮箱		516938292@qq.com			
	电话	027-67885043	网站地址		http://kjc.cug.edu.cn/			
合作研究单位信息	单位名称							
	华南理工大学							
项目基本信息	项目名称	基于图像的视觉伺服机械臂控制系统时滞补偿及优化研究						
	英文名称	Research on time-delay compensation and optimization for image-based visual servo manipulator control system						
	资助类别	青年科学基金项目				亚类说明		
	附注说明							
	申请代码	F030106. 时滞系统控制						
	基地类别							
	研究期限	2017年01月 -- 2019年12月				研究方向：时滞系统优化控制设计		
	申请经费	26.8200万元						
中文关键词		目标图像时滞补偿估计；视觉控制时滞补偿及优化；机械臂时滞反馈优化控制						
英文关键词		object image estimation with time-delay compensation ; visual control with time-delay compensation and optimization; time-delay feedback optimization control for manipulator						



中文摘要	<p>针对时滞对基于图像视觉伺服机械臂系统控制精度产生影响展开内外环控制时滞补偿与优化研究。对外环,提出目标运动中噪声相关性消除方法,构建Kalman有色噪声滤波器解决目标图像时滞补偿问题,通过优化系统采样及执行时间优化Kalman滤波步数,结合目标运动实际情况对目标图像进行时滞补偿估计及融合,提升目标图像及图像雅可比矩阵估计精度进而提升外环系统控制精度;对内环,构建机械臂时滞反馈动力学模型,针对其无限维、非线性、部分关节周期运动的特征,将其线性化结合低通滤波时间连续近似法转换为有限维不显含时滞反馈动力学模型,建立其前后两个离散时间状态间映射矩阵,寻求映射矩阵同反馈增益的关联,由系统稳定性获得反馈增益空间,提出改进Pareto排序和Vague集决策法找到兼顾系统稳定性和控制精度的多目标优化反馈增益,实现系统内环控制时滞补偿及优化。最后构建相应实验平台验证所提方法有效性,对该类系统设计提供重要指导</p>
英文摘要	<p>Research on time-delay compensation and optimization for the inner and outer loop control of image-based visual servo manipulator will be expanded in this project for the precision of manipulator control is affected by time delay. For the outer loop control, a method will be proposed for the elimination of the cross-correlation between the process noise and observation noise in the object motion process, then a Kalman colored noise filter will be constructed to estimate the object image with time-delay compensation, here the Kalman filtering steps will be optimized by optimizing the sampling and execution time of the system, the object image will be estimated with time-delay compensation and merged by considering the actual motion characteristic of the object movement, thus the control precision of the outer loop control system will be enhanced for the object image and the image Jacobian matrix estimation is enhanced. For the inner loop control, the kinetic model with time-delay feedback for manipulator will be constructed, for its infinite dimensional, nonlinear, joint periodic motion problem, through linearizing the model and combining lowpass-filter continuous time approximation, the model can be converted to a finite-dimensional feedback dynamics model with time delay is not noticeable, through establishing the mapping matrix between the former discrete time state and the later discrete time state, and seeking the relationship between the mapping matrix and the feedback gain, the feedback gain space can be obtained by the model stability analysis, the optimal feedback gain can be obtained by the improved Pareto sorting algorithm and Vague-sets decision method under the multi-objective optimal model which is at the basis of ensuring the stability, control precision of the system, then effective inner loop control with time-delay compensation and optimization will be achieved. Finally, the corresponding experimental platform will be constructed to verify the validity of the proposed method, and the project will provide important guidance for the design of this type system.</p>



## 项目组主要参与者（注：项目组主要参与者不包括项目申请人）

编号	姓名	出生年月	性别	职 称	学 位	单位名称	电话	电子邮箱	证件号码	每年工作 时间（月）
1	魏武	1970-02-16	男	教授	博士	华南理工大学	13926013970	weiwu@scut.edu.cn	430103197002161059	3
2	刘峰	1972-02-12	男	教授	博士	中国地质大学(武汉)	15071427258	ifpost@163.com	422226197202120032	4
3	魏龙生	1981-12-04	男	讲师	博士	中国地质大学(武汉)	13437184026	weilongsheng@163.com	340823198112043113	3
4	崔浩	1989-10-27	男	硕士生	学士	中国地质大学(武汉)	13781239046	895875691@qq.com	130982198910272910	10
5	叶春台	1992-03-17	男	硕士生	学士	华南理工大学	13570470553	yect1992@163.com	440781199203178917	10
6	殷翔	1991-07-22	男	硕士生	学士	中国地质大学(武汉)	13978215621	912392096@qq.com	42082119910722021X	10
7	上官星辰	1994-07-09	男	硕士生	学士	中国地质大学(武汉)	13164689207	sgstar001@163.com	411522199407095739	10

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生
8	2	2				4



## 国家自然科学基金项目资金预算表

项目申请号/项目批准号: 6160021794

项目负责人: 王新梅

金额单位: 万元

序号	科目名称	金额
1	一、项目资金	26.8200
2	(一) 直接费用	22.6000
3	1、设备费	4.5000
4	(1) 设备购置费	1.50
5	(2) 设备试制费	3.00
6	(3) 设备改造与租赁费	0.00
7	2、材料费	2.00
8	3、测试化验加工费	0.50
9	4、燃料动力费	1.50
10	5、差旅费	3.00
11	6、会议费	1.00
12	7、国际合作与交流费	3.50
13	8、出版/文献/信息传播/知识产权事务费	3.60
14	9、劳务费	3.00
15	10、专家咨询费	0.0000
16	11、其他支出	0.0000
17	(二) 间接费用	4.2200
18	其中: 绩效支出	1.0550
19	二、自筹资金	0.00



## 预算说明书（定额补助）

（请按《国家自然科学基金项目资金预算表编制说明》中的要求，对各项支出的主要用途和测算理由及合作研究  
  研究外拨资金、单价 $\geq 10$ 万元的设备费等内容进行详细说明，可根据需要另加附页。）

本项目共申请经费26.82万元，具体预算如下：

（一）直接费用：22.6万元

1、设备费：4.5万元

（1）设备购置费：升级仿真及控制软件、摄像机、视频采集卡，约1.5万元。

（2）设备试制费：试制系统、通信接口板及传感器转接板等，约3万元。

2、材料费：2.0万元

控制系统、打印机以及其他日常使用费用，每年约0.7万元。

3、测试化验加工费：0.5万元

计算机仿真与控制算法测试的费用。

4、燃料动力费：1.5万元

实验室水电等能源/动力费，按每年0.5万元计算。

5、差旅费：3.0万元

每年2~3人次左右的调研和国内学术交流费用，每次约3000元。

6、会议费：1.0万元

课题组内部组织会议产生费用，每年组织约1~2次，每次约3000元。

7、国际合作与交流费：3.5 万元

境外专家来华及项目组成员出国交流费用，其中，境外专家来华交流1-2人次，项目组成员参加国际学术会议1-2次费用，每次约10000元。

8、出版/文献/信息传播/知识产权事务费：3.6 万元

图书文献、复印打印、出版、网络等费用，每年约1.2万。

9、劳务费：3.0万元

按每年发给硕士生1.0万元劳务费计算。具体地，按每年每位研究生0.25万元，三年共计3.0万。

（二）间接费用：4.22万元

其中：绩效支出：1.055万元



## 报告正文

### （一）立项依据与研究内容：

1. 项目的立项依据（研究意义、国内外研究现状及发展动态分析，需结合科学研究发展趋势来论述科学意义；或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录）

视觉伺服控制越来越广泛应用于机器人控制系统中。随着机器人承担任务复杂多样化，对机器人的检测与控制提出了更高要求，因传统机器人末端执行器位姿检测受制于传感器安装、空间布局、检测范围和手段的局限，且对标定误差和空间模型误差敏感，所以寻求新的检测方法一直是研究人员的追求目标，而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，提高机器人系统的灵活性、准确性和定位精度，在机器人控制中具有不可替代的作用。国内外学者过去 20 余年对视觉伺服控制进行广泛研究<sup>[1-3]</sup>，Hutchinson 等的经典论文<sup>[1,2]</sup> 对视觉伺服控制的研究起了引导作用。视觉伺服中，基于图像的视觉伺服<sup>[4,5]</sup>具有不需要三维重建、对标定误差和空间模型误差不敏感、适应大多数非结构化的环境等优点，能提升机器人对环境的自主适应性。

基于图像的视觉伺服机械臂控制系统通常采用如图 1 所示的双闭环系统结构：

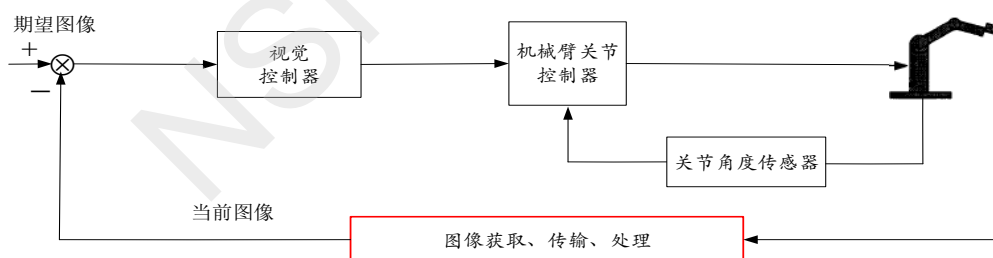


图 1 基于图像的视觉伺服机械臂控制系统图

其中内环由机械臂关节伺服控制和关节角度传感器组成，可实现高速率采样，通过关节角度反馈来控制机械臂运动；外环由视觉控制器和图像获取、传输、处理环节组成，以比较低的采样速率完成关节角设定，其误差信号直接用图像特征来定义图像平面坐标（非任务空间坐标）的函数，由该误差信号计算出控制量，并将其变换到机械臂运动空间的关节角度控制量（计算机控制中通常取关节角度增量），最后通过机械臂的内环伺服控制系统完成末端执行器任务。双环结构将机械臂机械运动奇异性与视觉控制器隔离，把机械臂看作理想笛卡尔运动元件，简化了设计过程，同时由于现存机械臂通常预留了接收笛卡尔给定速度或位置增量指令的接口，双环结构简单易行，因此被广泛采用。



突出的问题是：现有基于图像的视觉伺服机械臂控制研究基本未考虑系统存在的时滞对控制系统带来的影响。基于图像的视觉伺服机械臂控制系统内、外环均存在时滞，时滞来源是系统采样及执行时间，主要是视觉系统采样周期、视觉伺服处理周期和机械臂离散化控制周期。实际上，时滞对内、外环控制具有很大影响，主要原因是：①因图像采集、传输及处理产生时滞，使含有当前目标的图像延迟，因而使描述机械臂末端执行器在图像空间中的变化到工作空间中的变化的图像雅可比矩阵产生估计误差，从而导致视觉控制器输出（关节角度增量）产生误差，该误差进一步传递给内环伺服控制机构，影响机械臂的控制精度；②机械臂关节传动机构的侧隙、标定误差等以及机械臂控制中信号的采集传输、运动解算、执行响应、控制算法实现等均可产生时滞。时滞一方面可导致机械臂动力学特性发生复杂变化，具体来说，机械臂时滞动力学系统具有非线性、无限维、部分关节周期运动特征，控制变量需响应动力学特性复杂的变化，使机械臂时滞动力学系统的静、动态特性的分析、控制算法更为复杂；另一方面，作用于关节的控制量因时滞产生误差，从而使各关节力矩不能按控制所需作用于各关节，不仅影响控制精度甚至导致失稳。

因此，研究消除系统中时滞对机械臂控制产生的影响问题，具体来说研究时滞作用下内、外环控制的时滞补偿来消除其影响，对提升机械臂控制精度、保障系统稳定性、简化控制具有深远的意义。

目前，国内外对基于图像的视觉伺服机械臂控制方面的研究，基本上没有考虑时滞问题，国内外研究现状总结如下：

#### 系统采样及执行时间对视觉控制和机械臂控制精度产生的影响研究方面：

文献[6,7]等结合国内外研究成果对机器人视觉伺服的研究进展进行了综述，提到视觉系统优化方面的问题。近年来的研究主要采用高速视觉系统<sup>[8]</sup>提高处理速度和采样频率、使用分布式的网络化架构<sup>[9,10]</sup>提高算法的执行效率、结合滤波器（观测器）对目标图像进行估计从而应对噪声和时滞对系统的影响，文献中指出采用高速视觉系统、使用分布式的网络化架构的不足，提出在硬件条件限制下，结合观测器（滤波器）一定程度上可以改善视觉系统的性能<sup>[11,12]</sup>。

对于图 1 所示的系统，系统中存在的采样及执行时间由视觉系统采样、视觉伺服处理、机械臂离散化控制周期三部分组成，它们是系统时滞的主要来源，时滞使得目标图像信息产生延迟。影响机械臂控制精度的主要因素是当前时刻目标图像信息，因为目标图像信息经过





视觉控制器得到机械臂的关节角度增量，关节角度增量传递给机械臂的内环伺服控制系统，由伺服电机完成控制。

传统的基于图像的视觉伺服机械臂控制中，对于目标图像部分的讨论，主要集中在图像处理算法上，很少涉及到分析系统的采样及执行时间对目标图像信息的影响，即系统采样及执行时间对系统控制精度产生的影响方面的研究工作很少深入展开。

#### 控制系统外环伺服时滞控制补偿方法研究方面：

影响系统外环伺服控制的主因是目标图像及图像雅可比矩阵的估计。对于图像雅可比矩阵估计，传统方法采用 Broyden 估计器进行估计<sup>[13]</sup>，利用每一步机械臂的运动和相应的图像特征变化，确定每一个时刻图像雅可比矩阵的估计值；此外还有 Kalman 滤波、神经网络、粒子滤波、鲁棒信息滤波器等估计方法<sup>[14-19]</sup>。神经网络估计方法，通过学习机械臂关节角变化与目标图像变化之间的映射关系获得图像雅可比矩阵估值，但神经网络结构选择困难，且训练计算量大，难应用于在线实际系统中；粒子滤波估计方法，主要处理非高斯噪声情况，需已知实际系统噪声分布特性，也难应用于实际系统；Kalman 滤波估计方法，以图像雅可比矩阵作为系统状态变量，机械臂末端运动引起的图像特征变化为系统观测变量，经过 Kalman 滤波可得到图像雅可比矩阵估计值。

上述研究基本上没有考虑时滞问题，通常忽略系统中存在的时滞将对末端执行器目标图像和图像雅可比矩阵的估计带来误差，从而影响机械臂的控制精度。

为消除时滞影响，传统方法大多是从控制角度提出的，虽然适当的控制方法可以在一定程度上改善系统的稳定性，减小稳态误差，但由于目标图像时滞对外环伺服控制影响的根源问题没有解决，这类方法产生的效果十分有限。事实上，只有从图像特征空间来克服时滞的影响才可以直接有效地减小上述误差，从而提高控制精度并保证系统稳定性，但目前相关研究工作非常少且存在局限性。目前查阅到的文献有：Nishio<sup>[20]</sup> 和 Nakadokoro<sup>[21]</sup>通过预测图像的变化来补偿时滞，它通过建立机械臂工作空间中当前时刻的运动和通过预测获得的图像空间中机械臂运动之间的非线性映射关系来补偿时滞带来的影响，但需假定在时滞期间机械臂的运动图像特征的加速度不变，这种方法存在局限性；高振东<sup>[22]</sup>采用基于多项式的局部拟合方法估计图像雅可比矩阵，但该方法尚未考虑系统中存在的噪声，与实际系统存在一定的差距；刘文芳<sup>[23]</sup>通过对目标特征点进行运动建模，利用常规 Kalman 滤波估计当前时刻目标在图像空间中的位置和速度，从而估计出较为准确的图像雅可比矩阵，该算法中需对过程噪声



和观测噪声的方差固定，与实际噪声分布特点存在一定的差距，同时未估计时滞期间的观测向量。

### 机械臂内环伺服时滞控制的补偿与优化研究方面：

对于机械臂内环控制通常可分为轨迹控制和力控制两类。机械臂的轨迹控制包括点位控制和连续轨迹控制，机械臂的力控制是指除了对机械臂末端精确定位外，还要控制机械臂末端的力或力矩。机械臂的运动控制由于不考虑动力学特性，控制律简单，便于实现。但当机械臂对速度和精度要求较高时，运动控制难以保证系统静态和动态的性能要求<sup>[24]</sup>。应用在机械臂的控制方法较多，主要包括传统的 PID 控制<sup>[25,26]</sup>、变结构控制<sup>[27]</sup>、神经网络控制<sup>[28,29]</sup>、模糊控制<sup>[30]</sup>等。随着控制系统速度的提高，控制回路的时滞已不是相对小的量。机械臂控制系统对内环时滞非常敏感，时滞使得系统的静态和动态特性分析、控制量的设计变得复杂，同时使得控制系统的性能降低。

然而，现有的文献对机械臂的时滞控制的研究不多，因时滞下的机械臂系统具有多自由度、非线性、无限维的特征，因此对这样的系统进行控制，难度较大。目前国内外对此方面的研究成果不多，进展缓慢，成果也主要集中在对柔性机械臂的时滞控制研究方面。蔡国平等对机械臂时滞问题的理论和实验展开了研究<sup>[31-34]</sup>，但主要对单时滞、多时滞柔性机械臂控制律方面进行了理论研究，因在含时滞项的动力学方程转换成形式上不含时滞项的方程中采用了积分变换，使得控制律设计中包含有积分项，不便于控制律的实现；同时，控制力的计算中需构架模态坐标函数，模态信息难以直接通过物理测量获得，需另行处理。文献[35]针对具有时滞的柔性关节机械臂自适应位置和力控制问题进行了研究。通过坐标变换得出降维的位置/力控制模型，将时间滞后近似表示成一阶滞后，进行时滞补偿，采用反步控制技术设计机械臂位置/力控制器，取得了一定的效果；文献[36]以柔性关节机器人为研究对象，提出模糊输入时滞耗散控制和模糊输入时滞非脆弱耗散控制方法，利用 T-S 模糊模型并根据平行分布补偿原则(PDC)设计模糊输入时滞控制器，但其中涉及到的模糊控制系统规则和模糊隶属函数及加权矩阵的选择有一定难度。国外机械臂的时滞控制的研究成果也不多见，主要见于遥操作机械臂<sup>[37]</sup>、水下机器人机械手<sup>[38]</sup>方面。

目前国内外在考虑时滞影响的基于图像的视觉伺服机械臂控制系统方面的研究进展缓慢，具体表现为：其一、系统中视觉系统采样周期、视觉伺服处理周期、机械臂内环离散化控制周期对系统内外环控制产生的影响尚未深入展开研究；其二、控制系统外环伺服时滞控制补偿方面的研究，目前已有相当多的文献对图像雅可比矩阵的估计做了研究，然而，绝大多数文献研究中都忽略了时滞因素的影响，且各方法均有相应的局限性；其三、目前很少针



对多自由度、非线性、无限维的机械臂系统展开时滞补偿的研究，同时，很少进行分析和研究时滞作用下兼顾机械臂系统稳定性和控制精度的控制参数的优化问题，这样很难保证机械臂内环控制的精度提高和系统稳定性。

综上所述，现有时滞影响下基于图像的视觉伺服机械臂控制系统方面的研究非常少，且存在不足和局限性，深入展开其研究是非常必要的，本项目重点解决以下几个问题，研究将对提升机械臂控制精度、保障控制系统的稳定性、简化控制系统，推广基于图像的视觉伺服机械臂控制系统的应用具有重要意义，具体包括：

(1) 研究视觉系统采样周期、视觉伺服处理周期、机械臂内环离散化控制周期对系统内外环控制产生的影响，并展开视觉采样周期及机械臂内环离散化控制周期取值空间与优化调整策略研究，从时滞根源上实现控制系统的优化和调整，以期达到提高目标图像预测精度及机械臂控制精度的目标。

(2) 研究系统外环伺服控制时滞补偿方法。申请人从图像特征空间的角度来补偿系统时滞对目标图像和图像雅可比矩阵估计的误差<sup>[39,40]</sup>，并在六足仿生机器人实验平台上得到了初步验证。但研究中目标图像运动状态模型单一、噪声处理常规化、Kalman 滤波器滤波步数粗略估计（因决定滤波步数的外环时滞准确辨识难度较大），为进一步提升目标图像及图像雅可比矩阵的估计精度，本项目将结合实际机械臂视觉伺服控制及目标图像实际运动特性，进行目标图像多运动模式下基于 Kalman 的有色噪声滤波器的构建，并结合系统采样及执行时间进行 Kalman 滤波步数的优化及确定，最后进行多运动模式下目标图像时滞补偿估计的有效融合，完成目标图像及图像雅可比矩阵较准确的时滞补偿估计。此部分的研究将使时滞情况下的视觉控制器输出较准确的关节角度增量，为后面的关节控制提供较准确的输入量。

(3) 研究机械臂内环伺服控制时滞的补偿与优化，构建机械臂带反馈的时滞动力学模型，实现非线性、无限维、显含时滞的复杂控制反馈动力学系统向线性化、有限维不显含时滞的反馈动力学系统的转换，简化控制系统；综合考虑时滞动力学系统的稳定性及控制精度，应用多目标优化方法获得优化的反馈增益，从而使得系统获得较准确的关节力矩，驱动机械臂达到期望的位姿。

最后，通过实验和仿真进行项目中所提方法的验证。构建基于图像的视觉伺服机械臂系统的实验平台，并将所提方法应用到实际系统控制中，验证其有效性，为实际应用提供支持。

## 参考文献

- [1] F. Chaumette, S. Hutchinson. Visual servo control I basic approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, 13(4): 82-90



- [2] F. Chaumette, S. Hutchinson. Visual servo control II advanced approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2007, 14(1): 109-118
- [3] M. Staniak, C. Zielinski. Structures of visual servos. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58(8): 940-954
- [4] O. Tahri, H. Araujo, F. Chaumette, Y. Mezouar. Robust image-based visual servoing using invariant visual information. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, 61(12): 1588-1600
- [5] O. Tahri, Y. Mezouar, F. Chaumette, P. Corke. Decoupled image-based visual servoing for cameras obeying the unified projection model. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, 26 (4): 684 - 697
- [6] 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
- [7] Y.C . Fang. A survey of robot visual servoing. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2008, 3(2): 109-114
- [8] I. Ishii, T. Tatebe, Q. Y. Gu, Y. Moriue, T. Takaki, K. Tajima. 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
- [9] H. Y. Wu, L. Lou, C. C. Chen, S. Hirche, K. Kuhnlenz. A framework of networked visual servo control system with distributed computation. In: *Proceedings of the 2010 11<sup>th</sup> International Conference on Control Automation Robotics & Vision*, Singapore: IEEE, 2010: 1466-1471
- [10] H. Y. Wu, L. Lou, C. C. Chen, S. Hirche, K. Kuhnlenz. Cloud-based networked visual servo control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(2): 554-566
- [11] B. M. Nguyen, W. Ohnishi, Y. Wang, et al. 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
- [12] A. Ibarguren, J. M. Martinez-Otzeta, I . Maurtua. Particle filtering for industrial 6DOF visual



- serving. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014, 74(3-4): 689-696
- [13] A. Shademan, A. Farahmand, M. Jagersand. Robust Jacobian estimation for uncalibrated visual serving. *2010 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Anchorage: IEEE, 2010: 5564-5569
- [14] J. Xin, L. Bai, D. Liu. Adaptive Kalman filter-based robot 6DOF uncalibrated vision positioning. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(3): 586 – 591
- [15] J. Zhang, D. Liu. Online estimation of image Jacobian Matrix based on robust information filter. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2011, 27(2): 133 – 138
- [16] H. X. Li, Y. H. Shi, G. R. Wang. Visual guidance of welding robot using SVR-Jacobian estimator. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(7): 19– 25
- [17] X.G. Zhong, X.Y. Zhong, X.F. Peng. Robots visual servo control with features constraint employing Kalman-neural-network filtering scheme. *Neurocomputing*, 2015, 151(1): 268-277
- [18] X.G. Zhong, X.Y. Zhong, X.F. Peng. Robust Kalman filtering cooperated Elman neural network learning for vision-sensing-based robotic manipulation with global stability. *Sensors*, 2013, 13(6): 13464–13486
- [19] J.Climent, R. A. Hexsel. Online estimation of image Jacobian Matrix based on particle filter. *Neurocomputing*, 2012, 42(5): 614-623
- [20] D. Nishio, M. Nakamura, S. Komada, et al. Tracking of moving object by manipulator using estimated image feature and its error correction on image planes. *Advanced Motion Control*, Kawasaki, Japan, 2004: 653-657
- [21] M. Nakadokoro, S. Komada, T. Hori. Stereo visual servo of robot manipulators by estimated image features without 3D reconstruction. *IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 1999:571-576
- [22] Z.D.Gao, J.B.Su. The estimation of image Jacobian matrix with time-delay compensation for uncalibrated visual serving. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(1): 23 – 27
- [23] W.F.LIU, Z.G.Bing, S.L.Lu, et al. Online estimation of image Jacobian matrix with time-delay compensation. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(21): 181 – 184
- [24] M. Tan, S. Wang. Research Progress on Robotics. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(7):



963-972

- [25] J.Armendariz, V. Parra-Vega, R. Garc ía-Rodr íguez, S. Rosales. Neuro-fuzzy self-tuning of PID control for semiglobal exponential tracking of robot arms. *Applied Soft Computing*, 2014, 25(2):139-148
- [26] A. Zavala-R ó, M.Mendoza , V. Santib áñez , F. Reyes. An Output-Feedback PID-type Global Regulator for Robot Manipulators with Bounded Inputs. *SYROCO 2015-11th IFAC Symposium on Robot Control*, 2015, 48(19):87-93
- [27] T.Madani, B. Daachi, A. Benallegue. Adaptive variable structure controller of redundant robots with mobile/fixed obstacles avoidance. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, 61(6): 555-564
- [28] Y.X. Wu, C.Wang. Adaptive neural network control and learning for uncertain robot. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(8): 990-997
- [29] Y.X. Wu, C.Wang. Deterministic Learning Based Adaptive Network Control of Robot in Task Space. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(6):806-815
- [30] N. Mendes, P. Neto. Indirect adaptive fuzzy control for industrial robots: A solution for contact applications. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(22): 8929-8935
- [31] Y. Y. Teng, G.P. Cai. Active Control for Flexible Manipulator with Time Delay. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2007, 24(3): 399-403
- [32] 蔡国平, 陈龙祥. 时滞反馈控制的若干问题. *力学进展*, 2013, 43(1): 21-28
- [33] L. X. Chen, G P. Cai. Experimental study of variable structure control in time-delay for a flexible beam under forced vibration. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2009, 41(3): 410-416
- [34] W. Xu, C. Cai, M. Yin, Y. Zou. Time-varying force tracking in impedance control. *IEEE Conference on Decision and Control*, Maui, Hawaii: IEEE, 2012: 344 – 349
- [35] 陈明金, 李树荣, 曹乾磊. 时滞柔性关节机械臂自适应位置/力控制. *控制理论与应用*, 2015, 32(2): 217-223
- [36] F. Wang. Parameter identification and fuzzy control for flexible-joint robot. Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012
- [37] D. Sun, F. Naghdy, H. P. Du. A novel approach for stability and transparency control of nonlinear bilateral teleoperation system with time delays. *Control Engineering Practice*, 2016,



47(1):15-27

- [38] H.N. Esfahani, V. Azimirad, M. Danesh. A Time Delay Controller included terminal sliding mode and fuzzy gain tuning for Underwater Vehicle-Manipulator Systems. *Ocean Engineering*, 2015, 107(1): 97-107
- [39] X. M. Wang, W. Wei, F. Liu, L. S. Wei, Z. H. Liu. Online Estimation of Image Jacobian Matrix with Time-delay Compensation. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 2016, 20(2): 1-8.
- [40] 王新梅, 魏武, 刘玮, 刘峰, 袁银龙. 鲁棒卡尔曼滤波下的图像雅可比矩阵带时延补偿的估计. *控制理论与应用*, 2015, 32(8): 1052-1057.
- [41] B. Song, J. Q. Sun. Lowpass filter-based continuous-time approximation of delayed dynamical systems. *Journal of Vibration and Control*, 2011, 17(8): 73-84
- [42] 魏武, 袁银龙, 王新梅. 基于影响系数原理的六足机器人运动状态分析. *系统工程与电子技术*, 2016, 38 (2): 375-381
- [43] 魏武, 姜莉, 王新梅. 基于最小类内方差的蛇形机器人多阈值分割. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2013, 41(5): 9-14
- [44] 魏武, 孙洪超. 蛇形机器人桥梁缆索攀爬步态控制研究. *中国机械工程*, 2012, 23(10): 1230-1236
- [45] 魏武, 贺钿. 基于安全性目标多足爬壁机器人足力优化分配. *系统仿真学报*, 2013, 25(5): 921-925
- [46] 魏武, 李金龙, 任回兴. 基于吸盘负压吸附的六足爬墙机器人关节转矩优化分配. *中国机械工程*, 2013, 24(10): 1289-1295

## 2. 项目的研究内容、研究目标, 以及拟解决的关键科学问题。(此部分为重点阐述内容)

### 2.1 研究目标

(1) 完成外环视觉控制时滞补偿及优化研究, 主要研究包括: ①结合目标运动的实际特性, 提出基于 Kalman 有色噪声滤波器的构建完成对目标图像的时滞补偿估计, 涉及过程噪



声及观测噪声互相关性的消除、滤波器时滞期间观测向量的估计研究，②结合时滞来源优化调整视觉系统采样周期和机械臂离散化控制周期进而优化 Kalman 有色噪声滤波器的预测步数，③多运动模式下的目标图像运动状态估计结果融合，提升目标图像预测效果。通过研究达到的目标：对当前时刻目标图像运动状态及图像雅可比矩阵提供更为准确的估计，为内环控制提供更准确的控制量，进而达到提高机械臂控制精度的目标。

(2) 完成机械臂内环控制的时滞补偿与优化研究，主要研究包括：①构建机械臂的时滞反馈动力学模型并进行不显含时滞模型的转换，获取此模型稳定下的反馈增益空间，②结合获得的反馈增益空间，通过建立兼顾系统稳定性及控制精度的多目标优化模型，进行多目标优化下的反馈增益的优化求解。通过研究达到的目标：获得更为准确的关节力矩，更为精确地驱动机械臂到达期望位姿，以达到提高时滞作用下机械臂伺服控制精度的目标。

本项目在理论研究的基础上，通过构建实验平台并进行实验分析验证相关方法的可行性及有效性，在实际应用上将对基于图像的视觉伺服机械臂系统的控制设计提供重要指导。

## 2.2 研究内容

本项目研究内容框图如图 2 所示。

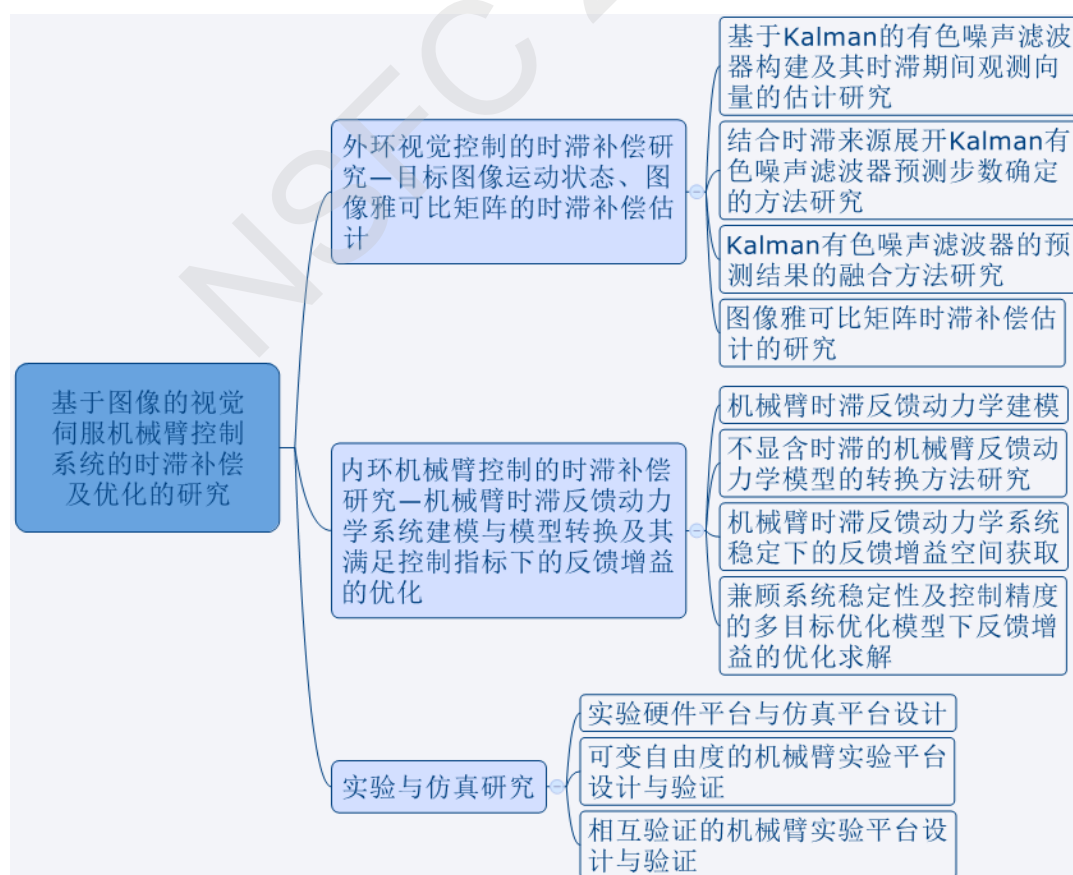


图 2 研究内容框图

图 2 中，外环视觉控制的时滞补偿研究将为内环机械臂控制的时滞补偿研究提供更为准





确的控制输入，同时，实验与仿真研究部分是对前两部分的研究进行验证。具体内容如下：

### 1) 外环视觉控制的时滞补偿研究—目标图像运动状态、图像雅可比矩阵的时滞补偿估计

传统基于图像的视觉伺服机械臂控制的相关文献研究，基本没有考虑目标图像、图像雅可比矩阵时滞补偿估计，实际中当前时刻目标图像产生偏差，从而使视觉控制器输出的关节角度增量产生偏差，该偏差在内环中传递，导致内环输出偏离期望值，从而影响内、外环控制精度。传统的目标图像运动状态估计方法包括支持向量机、神经网络、贝叶斯估计方法等，本项目拟提出基于 Kalman 的滤波器进行目标图像的时滞补偿估计，主要原因是：①Kalman 滤波器估计方法较传统方法具有更好的在线处理能力；②Kalman 滤波器估计方法较传统方法更方便处理过程噪声与观测噪声；③与大部分传统目标图像运动状态估计方法不同，Kalman 滤波器方法无需事先知道目标图像运动状态的概率分布。

为此，围绕基于 Kalman 有色噪声滤波器的目标图像运动状态时滞补偿估计展开深入研究，包括：①基于 Kalman 的有色噪声滤波器构建及其时滞期间观测向量的估计研究，有效实现对目标图像运动状态的时滞补偿估计；②展开 Kalman 有色噪声滤波器预测步数确定的方法研究，从时滞来源上优化滤波器的预测步数；③展开 Kalman 有色噪声滤波器的预测结果的融合研究，提高目标图像时滞补偿估计精度；④进行图像雅可比矩阵时滞补偿估计。

#### ◆ 基于 Kalman 的有色噪声滤波器构建及其时滞期间观测向量的估计研究

传统 Kalman 滤波器只处理高斯白噪声，而实际过程中目标图像运动的观测噪声更符合有色噪声，传统 Kalman 滤波方法不适合用于目标图像运动状态的时滞补偿估计，为此，本项目结合目标图像实际运动特性，研究并构建基于 Kalman 的有色噪声滤波器，有效解决目标图像运动状态的时滞补偿估计问题。

**Kalman 有色噪声滤波器的构建：**对于系统过程噪声为高斯白噪声，而观测噪声为有色噪声情况，对应有色噪声下的观测方程描述，按常规 Kalman 滤波中的观测方程形式进行整理，分离出相应的噪声部分，考虑分离后的观测噪声及过程噪声的统计相关性，对过程方程进行重新构建，以获得新的过程噪声和观测噪声之间的关联，由 Kalman 滤波噪声数学特性可以获取新的过程噪声及观测噪声在此关联下实现噪声相关性消除所涉及的参数，依最优估计理论，构建基于 Kalman 的有色噪声滤波器。

**Kalman 有色噪声滤波器中时滞期间观测向量估计：**对于构建的 Kalman 有色噪声滤波器，为解决对时滞期间无法获取的观测向量进行估计的难题，提出结合目标实际运动特性的多项式来有效解决该难题，具体思路是：建立前后两个时刻目标运动状态的关联，并采用部分已观测到的数据拟合出这种关联下的多项式，实现时滞期间观测向量的全域估计。



#### ◆ 结合时滞来源展开 Kalman 有色噪声滤波器预测步数确定方法研究

Kalman 有色噪声滤波器预测步数与时滞来源有关，具体来说视觉系统采样周期、视觉伺服处理周期、机械臂离散化控制周期决定滤波步数，并对目标图像时滞补偿估计产生影响，且图像雅可比矩阵的估计也对内环输入的关节角度增量产生影响。为此，重点研究以下两个方面的问题：①结合 Kalman 滤波适用条件、关节角度增量估计误差寻求视觉系统采样周期和机械臂离散化控制周期的取值空间；②在该取值空间下，研究其调整策略，以期获得较理想的视觉系统采样周期、机械臂离散化控制周期，为 Kalman 滤波预测步数的优化提供支持，达到提高目标图像估计精度进而提高机械臂控制精度的目标。

视觉采样及机械臂离散化控制周期取值空间的确定：本项目在 Kalman 滤波适用条件下、关节角度增量估计误差范围内，确定视觉采样及机械臂离散化控制周期的取值空间。一方面：Kalman 滤波有其适用的条件，即前后两步的预测结果的差值应该在一定的范围内，由于视觉伺服处理周期不需调整，这里需主要寻找 Kalman 滤波适用条件下的视觉系统采样周期、机械臂离散化控制周期的取值空间，以保证外环的控制精度；另一方面：影响内环控制精度的一个主要因素是外环视觉控制输出的关节角度增量，所以本项目寻求满足关节角度增量估计误差范围内的视觉系统采样周期、机械臂离散化控制周期的取值空间，拟采用具体实现方法是通过在机械臂上加装传感器，测量实际控制中机械臂关节角度增量，通过对比实际值和通过本项目对视觉控制进行时滞补偿后获得的关节角度增量估计值来获得取值空间。

视觉采样及机械臂离散化控制周期优化调整策略：从时滞来源上优化控制系统。首先，在分析视觉系统采样周期、视觉伺服处理周期和机械臂离散化控制周期对目标图像预测产生影响的基础上，对机械臂离散化控制周期不便调整情况，提出视觉系统采样周期的独立优化调整策略，以降低目标图像预测步数、提高目标图像预测精度；然后，提出视觉采样及机械臂离散化控制周期联合优化调整策略，以期获得保证目标图像预测精度及关节角度增量估计误差范围内的最佳视觉系统采样和机械臂离散化控制周期。

#### ◆ Kalman 有色噪声滤波器的预测结果的融合方法研究

针对目标图像运动模型不确定性，提出基于改进的自由搜索算法的图像融合方法，进一步提升图像的预测精度。针对多运动模式下基于 Kalman 的有色噪声滤波器的预测结果，拟结合自由搜索算法(FS)并对其加以改进，寻求多运动模式下目标图像运动状态预测结果的有效融合，提高目标图像时滞补偿估计的准确度。针对本项目，需达到融合后的目标运动状态估计值与实际值的偏差越小越好，考虑融合后的目标位置预测值与实际值，结合衡量偏差的指标构建目标函数，提出改进的 FS 算法完成优化目标函数下的更有效的权值寻优。



**搜索半径的设置、动态调整及搜索步的动态调整的研究:**搜索半径的设置一直是影响 FS 算法性能的关键因素。基本 FS 算法并没有保证种群在搜索的初始阶段最大程度上覆盖所求的解空间。本项目针对此不足,将对初始化阶段的种群的分配策略和个体的搜索半径进行合理的设置,尽可能的使种群在搜索初始阶段最大程度上覆盖所求的解空间,避免算法早期陷入局部最优。同时,本项目拟采用动态调整方法,对搜索步和搜索半径在迭代过程中进行动态调整,达到较优的个体加速搜索步和搜索半径的变化进程,进行小范围的精细搜索,较差的个体减缓搜索步和搜索半径的变化进程,仍然进行粗粒度的大范围搜索。

**个体搜索起点和位置分量的更新及位置的最终确定:**此部分需结合项目的需要,调整目标函数的适应度,以每轮搜索中目标函数取得最佳适应度为指导,确定个体位置分量的更新及位置的最终确定。针对标准 FS 算法的不足,提出除最差个体外的其余个体搜索起点的更新策略,同时对最差个体进行改善,有效帮助群体中的个体跳出局部最优,同时有利于个体向群体最优解靠拢,提高算法的收敛速度。

#### ◆ 图像雅可比矩阵时滞补偿估计的研究

在目标图像时滞补偿估计的基础上,完成图像雅可比矩阵的时滞补偿估计,本项目拟采用递推最小二乘法估计当前时刻的图像雅可比矩阵,其中涉及到的参数均可以通过上述对目标图像运动状态的时滞补偿估计方法得到。为完成递推最小二乘法估计,此部分研究包括以下内容:拟通过机械臂运动学或者机械臂里程计在小时滞或实时的情况下得到机械臂在笛卡尔空间中的位置变化量。通过基于 Kalman 的有色噪声滤波器构建及其时滞期间观测向量的估计研究可以获得当前时刻与上一时刻的目标图像以及当前时刻目标图像的变化率。

依据实验结果对模型进行验证并对估计模型进行修正,为了便于验证,可在机械臂上增加一些传感器辅助得到机械臂的实际运动状态,然后通过与图像雅可比矩阵时滞补偿估计后计算得到的机械臂运动状态估计数据进行对比、综合可得到有效的修正方法。

### 2) 内环机械臂控制的时滞补偿研究—机械臂时滞反馈动力学系统建模与模型转换及其满足控制指标下的反馈增益的优化

时滞的存在可导致机械臂控制变量对动力学特性复杂的变化响应变得更为困难,由于时滞的存在,控制需要更长时间(相对来说)才能反映到系统上,导致传统的控制器参数不易选取,容易造成系统控制品质下降,严重时会导致受控机械系统失稳。现有的文献对机械臂时滞控制的研究不多,机械臂的时滞控制是一富有挑战的课题,主要原因有两个方面:其一,时滞下的机械臂系统是多自由度、非线性、无限维系统,对这样的系统进行时滞补偿控制难度大;其二,机械臂在力的作用下,部分关节呈现周期运动,很难找到合适的



Lyapunov-Krasovskii 泛函研究其稳定性，同时兼顾稳定性和准确性的系统反馈增益的获取及优化富有挑战性。需指出的是，在机械臂关节电机伺服控制中广泛采用 PID 控制，包括安川、西门子、ABB、三菱、发那科等伺服电机常用 PID 控制，在机械臂的控制中 PID 的方法是有效的，而且控制简单，所以本项目以 PID 控制为例展开分析。

为此，本项目在建立机械臂时滞反馈动力学模型基础上，针对原因一，通过机械臂时滞反馈动力学模型的建立及其向不显含时滞机械臂反馈动力学模型的转换，实现机械臂时滞反馈动力学系统从无限维模型到有限维模型的转换，解决时滞补偿控制难题；针对原因二，首先研究不显含时滞机械臂反馈动力学模型稳定下的反馈增益空间获取，然后研究兼顾系统稳定性及控制精度的多目标优化模型下反馈增益的优化与求解，解决反馈增益的获取与优化这一富有挑战的问题。

#### ◆ 机械臂时滞反馈动力学建模

拉格朗日方法是一种严谨的分析力学方法，在能量守恒的基础上从标量函数推导出动力学方程，该方法解决了建立动力学微分方程的本质问题。本项目拟采用拉格朗日方法建立多自由度机械臂的动力学模型，同时考虑控制回路的时滞，在动力学模型基础上构建带反馈的时滞动力学模型。

#### ◆ 不显含时滞的机械臂反馈动力学模型的转换方法研究

研究表明机械臂在力的作用下，部分关节呈现周期运动，寻找合适 Lyapunov-Krasovskii 泛函研究其稳定性是非常困难的；同时，它还具有多自由度、非线性、无限维的特征。对于此类系统的稳定性研究，需寻找模型的有限维映射，本项目提出的转换方法主要思路是：对于非线性机械臂时滞反馈动力学系统，在平衡点附近求其雅可比矩阵，即在平衡点附近将其线性化；针对线性化后的系统，拟采用低通滤波时间连续近似法将其转换为有限维不显含时滞的模型（低通滤波时间连续近似法参见文献[41]），达到方便此模型稳定性研究的目标。

#### ◆ 机械臂时滞反馈动力学系统稳定下的反馈增益空间获取

拟提出的方法是：由转换后的不显含时滞的系统模型，以离散化的时间间隔建立起系统前后两个离散时间状态间的映射矩阵，系统的稳定性将由映射矩阵的特征值确定，同时，由于不显含时滞的系统模型中隐含了反馈增益，故可以建立系统矩阵同反馈增益间的联系，也就可以建立映射矩阵同反馈增益间的联系，可以获得系统稳定下的反馈增益空间，为后续反馈增益的优化提供基础。

#### ◆ 兼顾系统稳定性及控制精度的多目标优化模型下反馈增益的优化求解

为实现反馈增益优化求解，本项目采用多目标优化方法，拟从以下两方面展开研究：



**反馈增益空间下多目标优化模型建立：**综合考虑系统稳定性及衡量控制精度的相关指标（超调量、峰值时间、积分误差），考虑线性化后系统的特征值的最大值、超调量、峰值时间、积分误差等指标，并将它们的最小化作为目标函数，以反馈增益为设计变量，建立多目标优化模型。

**多目标优化模型下反馈增益的优化求解：**由上述得到的反馈增益空间，将其作为多目标优化模型中的不等式约束，提出一种基于 Pareto 排序的多目标进化算法，拟在算法中使用干扰集刺激优化非支配集的构成，同时拟根据 Pareto 等级、精英保留策略、极端集改进交叉算子和变异算子，改善算法的收敛性和解集的分布性，获得 Pareto 最优解集及相应的 Pareto 前沿，通过对 Pareto 前沿中的相关指标属性值进行合理设置，保留满足相应指标属性值在满意值范围内的 Pareto 最优解对应的方案并以此构造决策矩阵，结合综合权重的 Vague 集决策方法对保留的方案进行模糊评价和优选，找到最终满意解。

### 3) 实验与仿真研究

本项目以机械臂为研究对象，拟设计的实验与仿真方案及研究内容如下：

#### ◆ 实验硬件平台与仿真平台设计

以本项目参与人员及其团队已研究开发的 SSCUT-II 正交关节蛇形机器人和 ML6-QJ-I 型六足爬壁机器人（参见文献[42-46]）为基础，构建基于图像的视觉伺服机械臂系统的实验平台，并将所提方法应用到实际系统控制中，验证其有效性；同时，拟通过 Webots 主流机器人软件开发平台（全球 1000 多所高校采用的主流机器人软件开发平台）已开发的 SSCUT-II 正交关节蛇形机器人和 ML6-QJ-I 型六足爬壁机器人仿真平台，结合 Matlab/Simulink 仿真软件，分析系统的控制补偿及优化特性，验证理论研究的正确性和有效性。

#### ◆ 可变自由度的机械臂实验平台设计与验证

拟采用的 SSCUT-II 正交关节蛇形机器人采用模块化结构设计，自由度范围可达 2-30 个自由度，蛇头安装有摄像头并采用类似云台控制的 P 和 R 关节对摄像头进行控制，各关节采用基于 PID 控制的伺服电机驱动，设置蛇尾关节固定在机座上，该蛇形机器人相当于可从 2 到 30 可调自由度的机械臂，可方便实现对 2 到 30 个自由度的多自由度机械臂的实验模拟。

#### ◆ 相互验证的机械臂实验平台设计与验证

拟采用 ML6-QJ-I 型六足爬壁机器人，共 6 条腿，每条腿有 5 个关节并由伺服电机驱动，在每条腿的足端加装摄像头，每条腿相当于 5 自由度的机械臂，一方面分别对 6 条腿建立机械伺服控制系统来分别验证本项目提出的理论和方法；另一方面，通过 6 条腿建立机械伺服控制系统联合起来可有效实现对本项目中所提理论和方法的相互验证。



## 2.3 拟解决的关键问题

本项目拟解决的关键问题包括：

1) 如何在系统噪声互相关下进行基于 Kalman 有色噪声滤波器的构建，并对其进行时滞期间观测向量的估算，如何结合时滞来源及时滞对内、外环控制产生的影响，进行视觉系统采样周期和机械臂内环离散化控制周期取值空间的寻求及优化调整，指导优化 Kalman 滤波的步数，进而对目标图像进行时滞补偿估计，并实现多运动模式下的目标图像时滞补偿估计结果的有效融合，这是需要解决的第一个关键问题；

2) 如何对机械臂动力学系统进行时滞反馈动力学系统建模，针对其多自由度、非线性、无限维的特征，进行有限维不显含时滞模型的转换，并建立其前后两个离散时间状态间的映射矩阵，通过系统矩阵、映射矩阵及反馈增益间的关联，寻求系统稳定下的反馈增益空间，建立兼顾系统稳定性及控制精度的多目标优化模型，寻求反馈增益的最终满意解，这是需要解决的第二个关键问题；

通过构建可变自由度的机械臂实验平台和相互验证的机械臂实验平台，检验并修正项目中所提方法，完成系统控制的时滞补偿及优化，提高系统的控制精度。

## 3. 拟采取的研究方案及可行性分析（包括有关方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明）

本项目从提高时滞下的系统内、外环控制精度的目标出发，进行系统外环视觉控制及内环伺服控制时滞补偿及优化的研究。整体研究工作包括两方面：理论研究、仿真和实验，具体的研究方法和技术路线如下。

### 1) 外环视觉控制的时滞补偿研究—目标图像运动状态、图像雅可比矩阵的时滞补偿估计

#### ◆ 基于 Kalman 的有色噪声滤波器构建及其时滞期间观测向量的估计研究

本项目考虑基于图像特征空间进行目标图像、图像雅可比矩阵的时滞补偿估计，实现系统的视觉控制时滞补偿。

针对当前时刻末端执行器（目标）的运动状态估计，在每个采样周期内，末端执行器的运动状态可以近似为两种情况：(1)匀速运动；(2)每个采样周期内以一定加速度  $a_i$  运动 ( $i=1,2,\dots,N$ ，若采样  $N$  个周期)。由于目标在图像空间中的运动模型一般无法准确确定，此部分将考虑针对目标分别进行当前时刻状态(1)和(2)下的运动状态估计。针对运动状态(2)，将目标的加速度看作系统的一种随机噪声，与模型的误差合起来作为系统的动态噪声，拟将该



动态噪声作为高斯白噪声处理，针对运动状态(1)，过程噪声也处理为高斯白噪声。为了模型描述形式更接近真实环境，此部分考虑模型中观测噪声的描述为有色噪声描述。故本部分研究中，系统过程噪声处理为高斯白噪声，而观测噪声为有色噪声；最后考虑两种情况下的预测结果的最佳融合。此部分的技术方案框图如下：

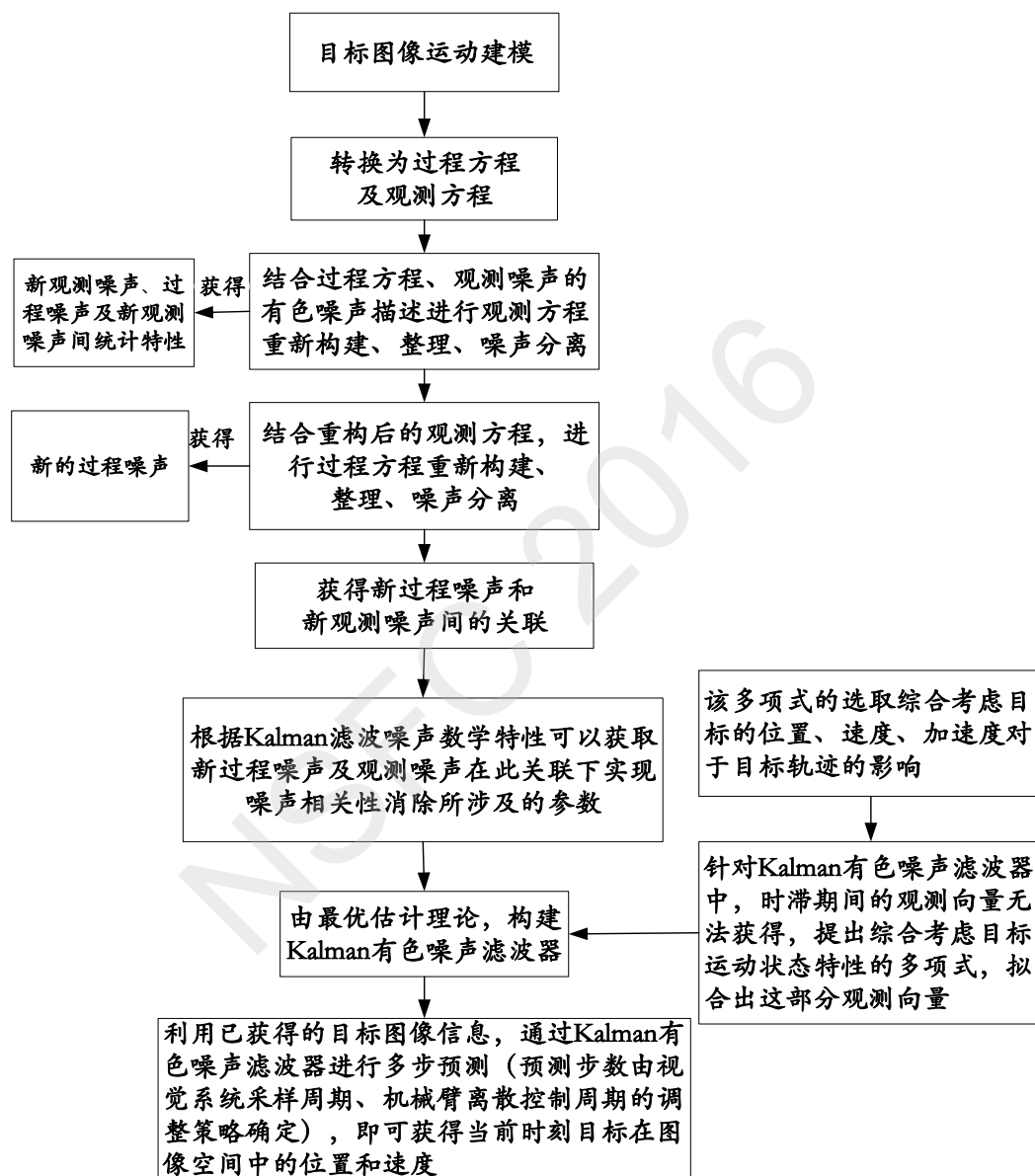


图 3 基于 Kalman 有色噪声滤波器的目标图像运动状态时滞补偿估计

框图部分说明如下：

a) 由于系统观测噪声的描述形式是有色噪声，而系统过程噪声是高斯白噪声，传统 Kalman 滤波不适用，需对过程方程和观测方程进行重构，使得重构后的观测噪声和过程噪声满足传统 Kalman 滤波噪声的数学特性。提出结合过程方程及观测噪声的有色噪声描述，进行观测方程的重构、整理、噪声分离，获得过程噪声及新观测噪声间的统计特性，为满足 Kalman



滤波噪声条件，考虑结合重构后的观测方程，重构过程方程，分离出相应的噪声部分，可以获得包含过程噪声、新观测噪声的新过程噪声，结合已获得的过程噪声及新观测噪声间的统计特性，获取新过程噪声及新观测噪声满足 Kalman 滤波噪声数学特性所涉及到的参数，实现噪声相关性消除。

b) 对于建立的基于 Kalman 的有色噪声滤波器而言，时滞期间系统的观测向量无法获得，需对此期间的观测向量进行相应估算；拟考虑采用部分已观测到的数据进行拟合，建立一个多项式，使得每一时刻目标的运动轨迹参照前一时时刻目标运动中的位置、速度、加速度（位置、速度、加速度均设置相应的权系数），寻找这样一组权系数，使得由此建立的多项式的拟合残差最小。

#### ◆ 结合时滞来源展开 Kalman 有色噪声滤波器预测步数确定的方法研究

Kalman 有色噪声滤波器预测步数与时滞来源即采样及执行时间有关，具体来说决定于视觉系统采样周期  $T_1$ 、视觉伺服处理周期  $T_2$  和机械臂离散化控制周期  $T_3$ 。Kalman 滤波的步数将极大影响目标图像估计精度。通常情况下， $T_1$  和  $T_3$  可以根据实际系统的要求进行调整， $T_2$  因对图像处理及滤波计算的耗时基本恒定，可通过实验获取，无需调整。目前查阅的视觉伺服系统的相关文献，还没有发现上述系统的采样及执行时间对系统控制精度影响的分析，实际上， $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  的取值及三者间关系，将对系统内外环控制产生很大的影响，这里主要参考影响系统内外环控制的两个因素（目标图像估计精度、关节角度增量的估计精度）来寻找  $T_2$  基本恒定下的  $T_1$ 、 $T_3$  的取值空间以及满足取值空间下的  $T_1$ 、 $T_3$  的调整策略，从而确定并优化 Kalman 滤波预测步数，提高目标图像估计精度、进而提高关节角度增量估计精度。拟采用的具体技术路线如下：

##### 视觉采样及机械臂离散化控制周期的取值空间的确定：

**Kalman 滤波适用条件下视觉采样及机械臂离散化控制周期的取值空间的确定：**影响外环控制精度的主要因素为目标图像、图像雅可比矩阵的时滞补偿估计，目标图像的预测，依靠 Kalman 滤波完成，由于  $T_1$ 、 $T_2$  是系统时滞产生的原因，结合  $T_3$  的值确定 Kalman 滤波的步数，进而影响 Kalman 滤波的结果，通过设置 Kalman 滤波相邻两步间预测结果的差值范围，运用理论和实验的方法寻求 Kalman 滤波适用条件下的  $T_1$ 、 $T_3$  的取值空间。

**关节角度增量估计误差范围内视觉采样及机械臂离散化控制周期的取值空间的确定：**影响内环控制精度的一个主要因素是由外环视觉控制输出的关节角度增量，由于  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  的取值对于目标图像预测产生影响，它们也将对图像雅可比矩阵的估计产生影响，通过视觉控制器将转换为对关节角度增量估计的影响，可以通过在机械臂上加装传感器，通过传感器获





得实际控制中机械臂的关节角度增量,同时,通过本项目中目标图像、图像雅可比矩阵的时滞补偿估计,可以获得关节角度增量的估计值,对比实际值和估计值,寻求满足关节角度增量估计误差范围内的  $T_1$ 、 $T_3$  的取值空间。

此部分  $T_1$ 、 $T_3$  取值的初值空间由视觉系统硬件特性、机械臂系统机械特性确定。

#### 视觉采样及机械臂离散化控制周期优化调整策略:

**视觉采样的独立优化调整策略研究:** 在实际的机械臂控制中,通常机械臂的离散化周期比视觉采样周期要小,所以  $T_3 < T_1 + T_2$  满足。下面对  $T_1$ 、 $T_2$  的关系分两种情况讨论:①  $T_1 < T_2$ , 图像采集时间小于图像处理的时间,图像信息处理来不及,从第二个时刻开始,图像处理的开始时间将会无形中延迟。若希望每次采集的图像信息应用于当前时刻机械臂控制中去,除第一个时刻的图像外,后面时刻的图像需预测的步数会越来越多,控制精度不能保证,此部分将考虑采用自定义的采样方式,使得  $T_1$  尽可能等于  $T_2$ ,调节  $T_1$  到  $T_2$  附近,尽可能达到每个时刻的图像采集完就可以进行处理;②  $T_1 > T_2$ , 图像采集时间大于图像处理时间,每个时刻的图像信息都来得及处理。

对  $T_1$  和  $T_2$  关系的讨论,只是针对图像信息的处理进行了分析,若根据上述讨论进行了  $T_1$  部分的调整,  $T_3 < T_1 + T_2$  情况下,整个系统,由图像采集及处理产生的时滞将是  $\tau_c = T_1 + T_2$ , 对系统进行控制时,图像预测的步数将由  $\tau_c$ 、 $T_3$  之间的关系确定,图像预测的步数是取  $\tau_c / T_3$  的整数部分还是多预测一步,可以根据实验的结果进行分析。

上述的讨论是针对  $T_3$  不便调整的情况,因为对于某些类型的机器人的伺服电机的驱动而言,它的离散化周期会受到伺服电机底层驱动的固定化的通讯设置的约束,这样的情况下  $T_3$  取设定值,不便调整。

**视觉采样及机械臂离散化控制周期的联合优化调整策略研究:** 针对上述情况,提出  $T_1$ 、 $T_3$  同时可以方便调整的优化调整策略,为获得尽量好的视觉采样周期及机械臂离散化控制周期,达到兼顾 Kalman 滤波适用条件、关节角度增量估计误差小的目标。此处  $T_1$ 、 $T_3$  联合调整方案如下:

在满足 Kalman 滤波适用条件和关节角度增量估计误差范围内的  $T_1$ 、 $T_3$  的取值空间中,寻求这样一组( $T_1$ 、 $T_3$ ),使得此种组合下的 Kalman 滤波预测的误差达到设定范围内的最小或者关节角度增量估计误差达到设定范围内的最小。如果找不到最优的这组( $T_1$ 、 $T_3$ ),继续寻求这样的次优解,此部分将主要通过实验进行。

此种情况下,一旦找到最优或者次优的( $T_1$ 、 $T_3$ ),视觉采样周期和机械臂离散化控制周



期就可以确定下来，由前所述，T2 可知，则根据 T1、T2、T3 的关系，可以确定系统时滞大小及目标图像预测的步数。

无论是采用视觉采样的独立优化调整策略还是采用视觉采样及机械臂离散化控制周期的联合优化调整策略，都可以为优化 Kalman 滤波预测步数提供支持。

#### ◆ Kalman 有色噪声滤波器的预测结果的融合方法研究

针对两种运动模型下的预测结果进行最佳融合以获得目标当前时刻运动状态的最终预测值，这里需要对分别预测的结果进行相应的权值分配，权值系数需进行寻优处理。为了获得最佳的权值分配，拟对标准自由搜索算法进行改进以适应该项目的参数寻优。针对两种模型下的预测结果，需达到融合后的目标运动状态预测值与实际值的偏差越小越好，以目标的位置预测为例，考虑目标位置预测值与实际值的偏差的均方误差作为目标函数，目标函数为：

$$f = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i^{rel} - X_i^{pre})^2} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i^{rel} - (X_{1i}^{pre} \times \alpha + X_{2i}^{pre} \times \beta))^2} \quad (3.1)$$

$X_i^{rel}$  表示位置实际值向量中的第  $i$  个分量， $X_i^{pre}$  表示位置预测值向量中的第  $i$  个分量。此处需要通过一定的算法，对  $\alpha$ 、 $\beta$  进行寻优。

本项目拟针对近年来提出的自由搜索算法(FS)，寻找两种预测模型下的目标运动状态预测结果的权值分配，即获得  $\alpha$ 、 $\beta$ ，结合已有的一些改进模型，通过分析其优缺点并基于此，拟针对标准的 FS 算法进行以下几个方面的改进，以提高算法的性能。

此部分对 FS 算法的改进的框图如图 4 所示。

框图部分补充说明如下：

个体在搜索过程中，个体位置分量的更新及位置的最终确定可以借鉴标准的 FS 算法，即搜索个体  $k$  附近的  $T$  个目标，找到  $T$  小步内的目标函数的最佳适应度，即找到了此轮搜索中目标函数最好的解。这里需指出，标准的自由搜索算法是为求取最大值而提出的，而本项目的预测模型需要使得预测值与实际值的误差越小越好，因此是求取最小值的，考虑目标函数如 (3.1) 所示，搜索过程中，目标函数的适应度需调整为：

$$f_{tk} = f(x_{tki}), f_k = \min f_{tk} \quad (3.2)$$

这里， $x_{tki}$  是第  $k$  个个体在搜索空间第  $i$  维变量空间处于  $t$  小步时的位置， $f_k$  为个体  $k$  搜索到的  $T$  个新位置中对应的目标函数最佳值，为调整后的目标函数最佳适应度。

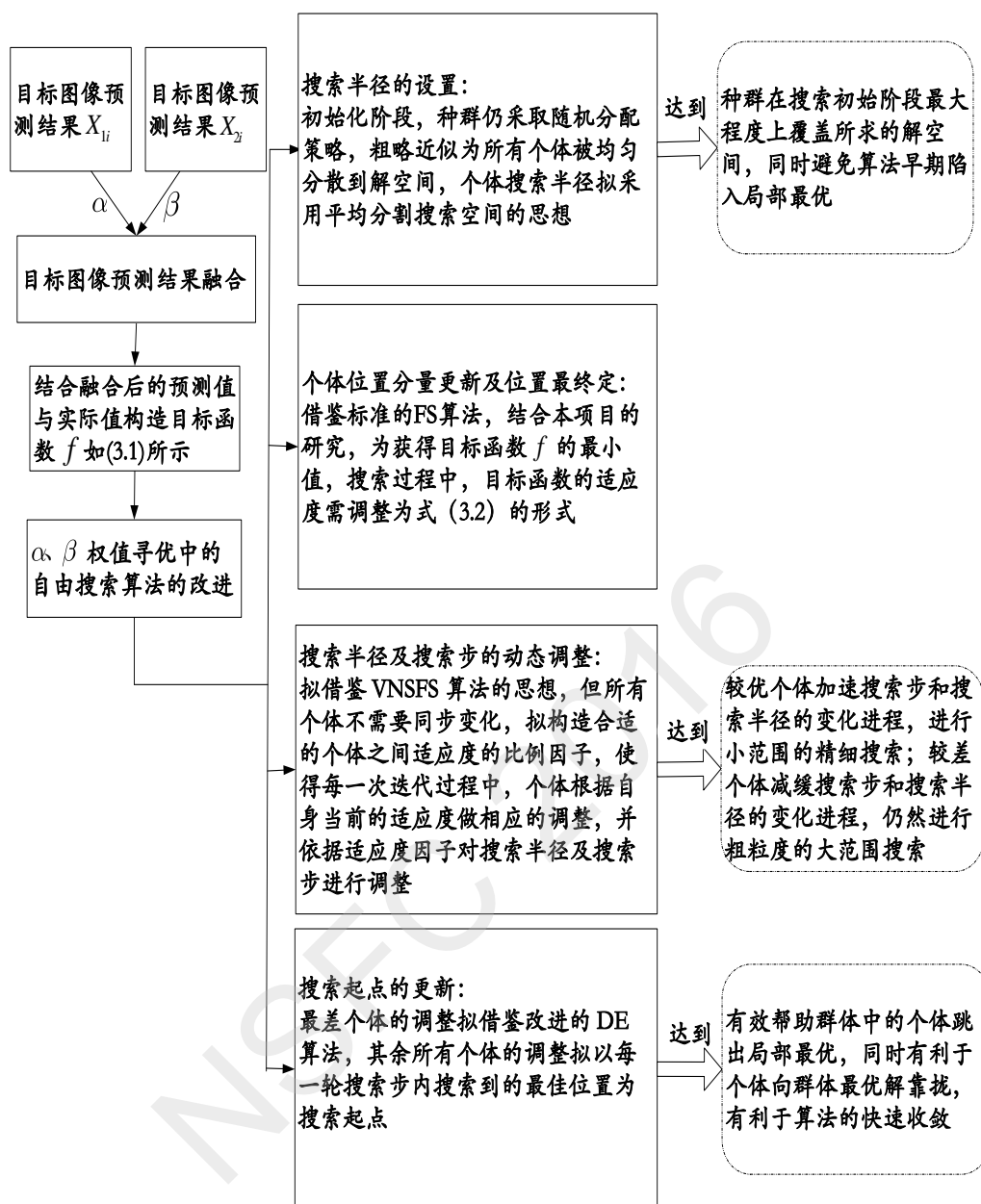


图 4 改进的自由搜索算法

综上，通过两种运动状态下的基于 Kalman 的有色噪声滤波器进行多步预测并进行有效融合，可获得目标在图像空间中当前时刻位置的估计。

#### ◆ 图像雅可比矩阵时滞补偿估计的研究

本项目中，当前时刻图像雅可比矩阵的获得，拟通过递推最小二乘法进行，这里，可以通过机械臂运动学或者机械臂里程计在小时滞或者实时的情况下得到机械臂在笛卡尔空间中的位置变化量，还需获得当前时刻及上一时刻的目标图像，以及当前时刻目标图像的变化率，通过课题中提到的方法，时滞期间的目标图像均可得到有效估计，完全能够通过递推最小二乘法估计出当前时刻的图像雅可比矩阵。

由此，我们可以得到当前时刻目标在图像空间中的位置，同时也能较为准确的估算出图



像雅可比矩阵，实现外环视觉控制时滞补偿。

对外环视觉控制器进行时滞的补偿，是为了获得较为准确的机械臂关节角度增量，为内环控制提供较为准确的控制输入；由于机械臂的机械结构特性以及对时滞的敏感性，下面进一步讨论内环伺服控制的时滞补偿。

## 2) 内环机械臂控制的时滞补偿研究—机械臂时滞反馈动力学系统建模与模型转换及其满足控制指标下的反馈增益的优化

### ◆ 机械臂时滞反馈动力学建模

拉格朗日(Lagrange)方法、牛顿-欧拉(Newton-Euler)方法、高斯(Gauss)方法、凯恩(Kane)方法等是建立动力学模型的常用方法，这些方法都有自己的适用范围。拉格朗日方法是一种严谨的分析力学方法，在能量守恒的基础上从标量函数推导出动力学方程，该方法解决了建立动力学微分方程的本质问题。

以  $n$  自由度机械臂为例，利用拉格朗日方法建立  $n$  自由度机械臂的动力学方程，即确定  $n$  自由度机械臂各关节的关节转角、转角速度、转角加速度与关节力矩之间的关系(这里用  $\tau$  代表关节力矩，关节转角即视觉控制器输出的关节角度增量)，获得机械臂的动力学方程如：

$$D(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau \quad (3.3)$$

由前所述，机械臂内环伺服控制回路中是存在时滞的，考虑在上述模型(3.3)中加入时滞反馈控制：

$$\tau = K_p x(t - \tau_d) + K_d \dot{x}(t - \tau_d) \quad (3.4)$$

这里  $\tau_d$  为机械臂内环控制中存在的时滞。

结合(3.3)、(3.4)，将带时滞反馈控制的系统动力学方程改写成矩阵形式时滞动力学方程：

$$\dot{x} = A_d x(t) - B_d K x(t - \tau_d) + H_d \quad (3.5)$$

这里， $x = [x_1, x_2, \dots, x_{2n}]$ ,  $x_1 = \theta_1, \dots, x_n = \theta_n, x_{n+1} = \dot{\theta}_1, \dots, x_{2n} = \dot{\theta}_n$ 。

时滞动力学方程(3.5)中存在需要优化的参数  $K_{p1} \sim K_{pn}, K_{d1} \sim K_{dn}$ ，同时需兼顾系统的性能指标，主要为系统的稳定性及衡量控制精度的相关指标，涉及到多目标优化问题，应用多目标优化设计方法对反馈增益进行优化。

### ◆ 不显含时滞反馈动力学模型的转换及稳定下的反馈增益空间的获取研究

进行多目标优化设计时，针对系统(3.5)，考虑从两方面确定多目标优化中的目标函数。首先需保证系统稳定性，已有相当多的文献对机械臂的关节运动进行了研究，研究表明机械臂在力作用下，部分关节呈现周期运动，对此类系统，很难找到合适的 Lyapunov-Krasovskii



泛函研究其稳定性；同时系统兼有非线性、无限维的特征，为进行系统稳定性研究，需寻找该模型的有限维映射，此处系统的稳定性研究方法拟采用时间连续近似法里的低通滤波时间连续近似法<sup>[41]</sup>，由于时滞动力学系统(3.5)是非线性的，提出在平衡点附近求其雅可比矩阵，即在平衡点附近将其线性化，考虑线性化后的系统，结合低通滤波时间连续近似法，将动力学方程(3.5)最后转换为不显含时滞的状态方程。

在离散的时间域内，有等式(3.6)成立。

$$\left(\frac{1}{2}+r\right)\dot{x}(t-\tau_i)+\left(\frac{1}{2}-r\right)\dot{x}(t-\tau_{i+1})=\frac{1}{\Delta\tau}[x(t-\tau_i)-x(t-\tau_{i+1})] \quad (3.6)$$

这里， $\Delta\tau=\tau_d/N, \tau_i=i\Delta\tau, i=0,1,2,\dots,N$ ，则动力学方程(3.5)可转换为不显含时滞的状态方程如表达式(3.7)。

$$H_{LPCTA}\dot{y}(t)=F_{LPCTA}\cdot y(t) \quad (3.7)$$

$$H_{LPCTA}=\begin{bmatrix} I & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \left(\frac{1}{2}+r\right)I & \left(\frac{1}{2}-r\right)I & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \left(\frac{1}{2}+r\right)I & \left(\frac{1}{2}-r\right)I \end{bmatrix}, F_{LPCTA}=\begin{bmatrix} A_i & 0 & \cdots & \cdots & A_{di} \\ \frac{1}{\Delta\tau}I & -\frac{1}{\Delta\tau}I & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \frac{1}{\Delta\tau}I & -\frac{1}{\Delta\tau}I \end{bmatrix}$$

$A_i$ 、 $A_{di}$ 是结合低通滤波时间连续近似法得到的离散化系数矩阵，其余参数这里不再赘述。

系统(3.7)在 $[t_j, t_{j+1}]$ 时间间隔内产生映射矩阵 $y_{i(j+1)}=\Phi y_{ij}$ ，系统的稳定条件由映射矩阵的特征值决定。系统由无限维模型离散为有限维不显含时滞的系统模型，离散化系数矩阵隐含了反馈增益，通过映射矩阵与系数矩阵的关联，可以寻求映射矩阵同反馈增益间的关联，由于系统的稳定性由映射矩阵的特征值确定，通过稳定性下映射矩阵所需满足的条件，可以获得系统稳定下的反馈增益空间，为后续反馈增益优化提供基础。

#### ◆ 兼顾系统稳定性及控制精度的多目标优化模型下反馈增益的优化求解

**反馈增益空间下多目标优化模型建立：**为兼顾系统的稳定性及控制精度，采用多目标优化方法获得优化的反馈增益，考虑线性化后系统特征值的最大值 $\lambda_{\max}$ 、超调量 $\sigma_p$ 、峰值时间 $t_p$ 及积分误差 $e_{ss}$ 最小作为优化目标，由于被控系统是 $n$ 自由度机械臂，则超调量 $\sigma_p$ 、峰值时间 $t_p$ 、积分误差 $e_{ss}$ 选择 $n$ 套，分别对应关节 $1\sim n$ 。当前控制律下建立多目标优化模型为：

$$\min_K\{\sigma_{p1}, t_{p1}, e_{ss1}, \cdots, \sigma_{pn}, t_{pn}, e_{ssn}, \lambda_{\max}\}$$



**多目标优化模型下反馈增益的优化求解：**由前得到的反馈增益空间，将其作为多目标优化模型中的不等式约束，提出一种基于 Pareto 排序的多目标进化算法获得关于反馈增益的 Pareto 最优解集及 Pareto 前沿  $\sigma_{p1}, t_{p1}, e_{ss1}, \dots, \sigma_{pn}, t_{pn}, e_{ssn}, \lambda_{\max}$ ，对 Pareto 前沿  $\sigma_{p1}, t_{p1}, e_{ss1}, \dots, \sigma_{pn}, t_{pn}, e_{ssn}, \lambda_{\max}$  中的各指标提供一个合适的满意值，只有当每个指标的属性值均不劣于对应的满意值时该 Pareto 最优解对应的方案才被保留，以保留的方案为基础，构造决策矩阵，利用综合权重的 Vague 集决策方法对保留方案进行模糊评价和优选，找到最终满意解。

本项目拟提出一种基于 Pareto 排序的多目标进化算法，在算法中使用干扰集刺激优化非支配集的构成，同时在交叉算子的构造中，针对传统文献的不足，拟在精英保留机制的进化算法基础上，重新定义交叉算子中的参数  $\lambda$ ，让其与个体在群体中所处的等级相关联，实现交叉过程中的自适应调整，在变异算子的构造中，在引用差分算法的基础上，拟引用每代中的极值点，并与当前代个体所在 Pareto 等级相联系，从整体上实现变异算子的自适应操作，以此改善算法的收敛性和解集的分布性，获得反馈增益的最优解集。此部分技术方案图如下：

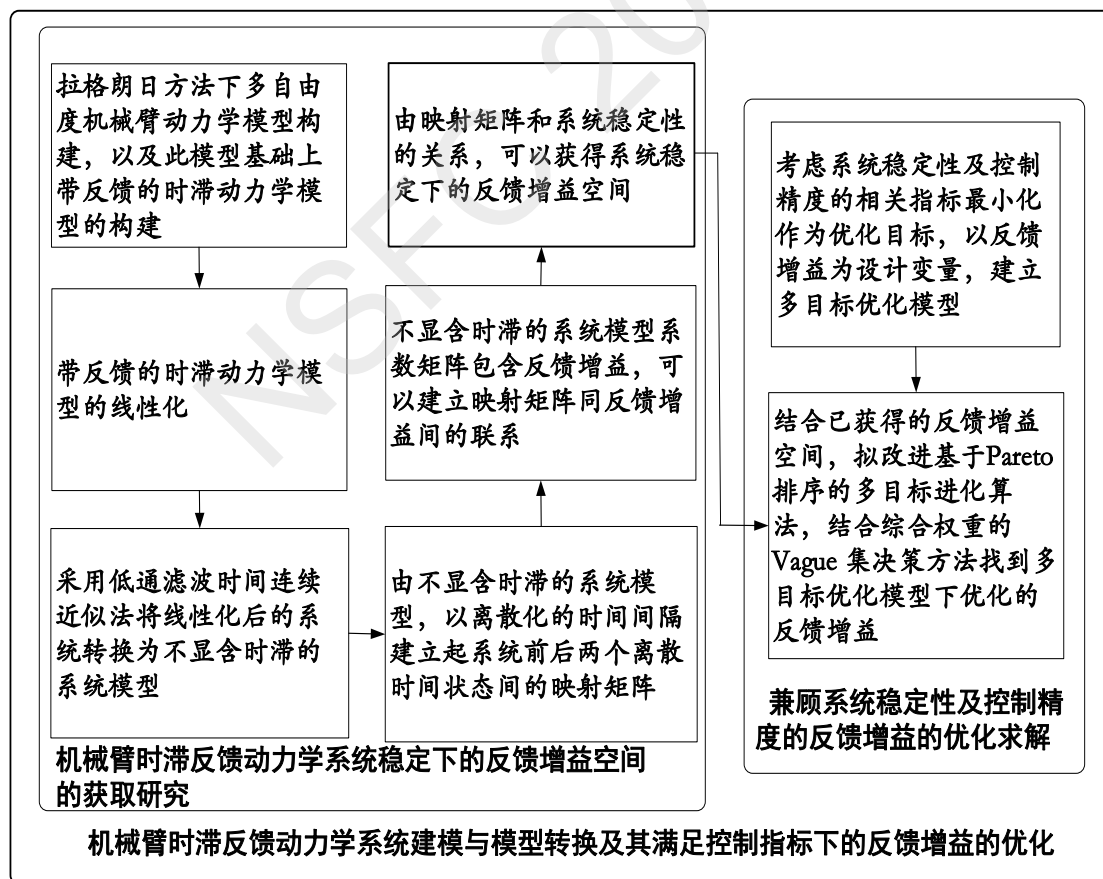


图 5 内环机械臂时滞补偿研究



### 3) 实验与仿真研究

在完成理论研究的基础上,本项目针对以上研究内容,开展计算机仿真和基于图像的视觉伺服机械臂系统控制时滞补偿方面的实验研究。

#### ◆ 实验硬件平台与仿真平台设计

由研究内容部分中实验与仿真部分的阐述,通过构建可变自由度的机械臂实验平台和相互验证的机械臂实验平台,检验并修正项目中所提方法,完成系统的控制时滞补偿及优化,提高系统的控制精度。

#### ◆ 实验与仿真研究工作流程

给定期望目标物体质心图像坐标,主控程序计算其与由 DSP 图像处理系统反馈的质心图像坐标值的差值,判断系统是否已到达伺服位,若已到达,则结束伺服过程;否则,求解图像雅可比矩阵逆阵,得到机械臂各关节应转动的角度增量值,将其输出给嵌入式系统 STM32 运动控制器,STM32 运动控制器按运动程序计算并输出转矩指令给伺服控制器,由它直接控制机械臂关节电机的运转,通过编码器检测关节的位置,反馈给伺服控制器(伺服控制器对编码器信号进行处理后为内环控制提供实际角度增量的反馈输入),同时在关节上加装角度检测传感器,检测角度增量,为外环算法验证、时滞来源的调整和优化提供数据来源。CCD 摄像头跟随机械臂运动,摄取目标物体图像,通过 DSP 图像处理程序处理后求得目标物体质心图像坐标,通过串口通讯或 CAN 总线传递给主控程序作为视觉反馈量,形成视觉伺服循环。

#### 可行性分析

为使以上研究工作顺利展开,本项目研究团队已经做了一些前期研究,并取得了一定的成果,通过分析和研究,论证了上述方法、技术路线和实验方案是切实可行的。具体从技术路线可行性分析、相关理论研究及课题支持、实验和仿真条件支持来分析可行性。

#### ◆ 技术路线可行性分析

首先,系统存在的采样及执行周期  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  对图像预测、图像雅可比矩阵估计、系统控制性能是有影响的,本项目从基于图像的视觉伺服机械臂控制的原理及实际应用出发,结合本项目的 Kalman 有色噪声滤波器下目标图像的时滞补偿估计,拟通过理论分析结合实验进行满足 Kalman 滤波适用条件、关节角度增量估计误差范围内的  $T_1$ 、 $T_3$  取值空间及优化调整的研究,为 Kalman 滤波步数的优化及确定提供支持,预期能达到提高目标图像预测精度的目标。

其次,申请人从图像特征空间的角度来补偿系统时滞对目标图像和图像雅可比矩阵估计的误差<sup>[39,40]</sup>,并在六足仿生机器人实验平台上得到了初步验证。但研究中目标图像运动状态



模型单一、噪声处理常规化、Kalman 滤波器滤波步数粗略估计（因决定滤波步数的外环时滞准确辨识难度较大），本项目将结合目标图像的实际运动特性和机械臂的实际控制过程，对目标图像运动状态模型进行综合考虑、对系统噪声进行更切合实际的处理，并结合实验进行 T1、T3 的优化调整，从而对 Kalman 滤波步数进行优化和确定，针对目标图像运动状态模型的不确定性，进行多运动模式下的目标图像时滞补偿估计的有效融合，提升目标图像及图像雅可比矩阵的时滞补偿估计精度。

再次，在机械臂的时滞控制设计中，目前机械臂关节电机伺服控制广泛采用 PID 控制，在 PID 控制中，反馈增益的优化是控制的关键，而反馈增益的选择往往同系统的动态性能指标及稳定性有关，这些目标函数总是矛盾的，反馈增益的选择就涉及到多目标优化问题，目前，多目标优化问题的成果比较丰富，预期可实现反馈增益的优化。

最后，本项目组通过构建可变自由度的机械臂实验平台和相互验证的机械臂实验平台，利用 Matlab/Simulink 软件进行相关算法的仿真研究，后续研究及算法的改善提高在相关实验平台和理论可行性的基础上，预期可以得到实现和验证。

#### ◆ 相关理论研究及课题支持

研究团队在本项目相关理论研究方面进行了大量工作，发表了近 50 篇相关论文，特别在时滞系统控制、机器视觉和图像处理、机器人动力学建模、机械臂伺服控制、机器人动力学仿真与实验、机器人伺服控制实验等研究方面积累了大量成果（参见申请书个人简历，只列出部分研究成果），为本项目的理论和实验研究奠定了基础。

本项目申请人承担的课题有：中央高校基金优秀青年基金“基于图像的视觉伺服网络机器人系统中时延问题的研究”(CUGL130223)；参加的项目有：国家自然科学基金面上项目“基于互联网的混合型复杂网络的分叉与混沌研究”(61073026)、国家自然科学基金面上项目“基于基因调控网络的复杂网络多样性演化算法及应用”(61472374)、交通运输部科技项目西部重点项目“基于机器人平台的桥梁沿程扫描式无损检测技术及系统装备研发”(2011 278 49A 400)等项目。这些项目研究涵盖时滞控制、机器视觉、图像处理、机器人伺服控制、机器人运动学等与本项目有关联的研究内容，为本项目研究奠定了坚实的基础。

本项目主要研究人员承担的课题有：国家自然科学基金面上项目“基于弹性包络的正交关节蛇形机器人螺旋攀爬运动力学建模与步态优化研究”(61573148)、广东省重大科技专项“建筑墙体检测服务机器人研发与产业化”(2015B010919007)、交通运输部科技项目西部重点项目“基于机器人平台的桥梁沿程扫描式无损检测技术及系统装备研发”(201127849A400)、国家自然科学基金面上项目“基于基因调控网络的复杂网络多样性演化算法及应用”(6147





2374)等项目；参与过国家自然科学基金重点资助项目“高速平台多模检测识别动目标的理论与关键技术”、国家“863”计划资助项目“高分辨率光学遥感图像星上高效目标预识别技术”等项目。这些项目研究成果为本项目研究奠定了良好基础。

#### ◆ 实验和仿真条件支持

本项目以主要参与人员及其团队已研究开发的 SSCUT-II 正交关节蛇形机器人和 ML6-QJ-I 型六足爬壁机器人及其仿真平台为基础展开研究。以下是蛇形机器人和六足机器人的实体图和三维图：

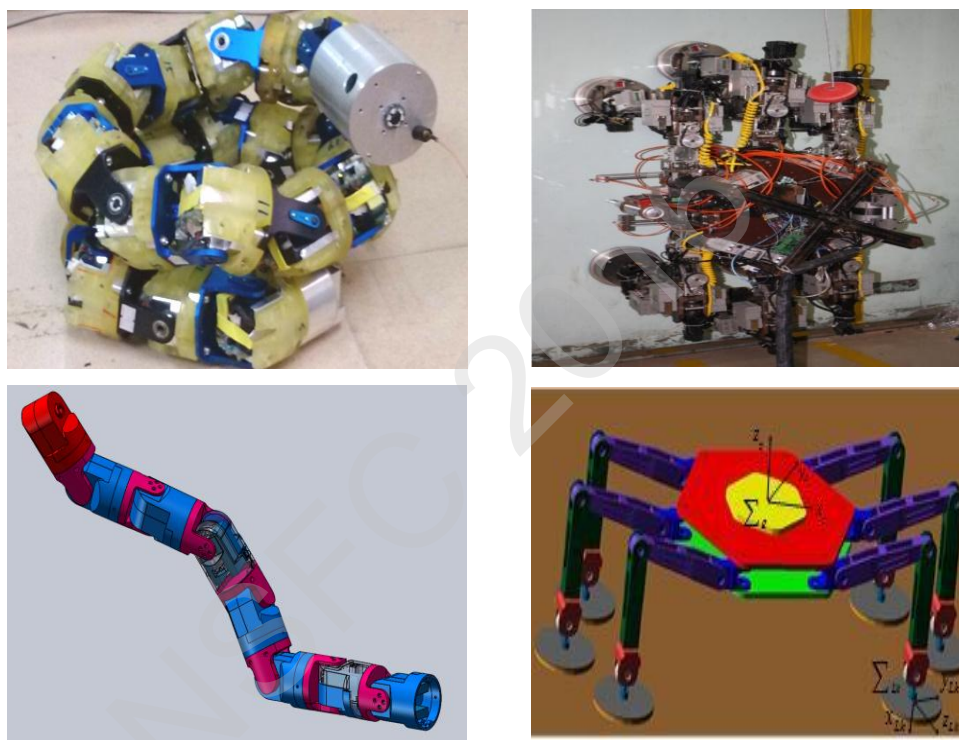


图 6 蛇形机器人和六足机器人的实体图和三维图

## 4. 本项目的特色与创新之处

(1) 针对目标图像运动过程中过程噪声为高斯白噪声、观测噪声为有色噪声的情形，传统 Kalman 滤波方法受限，提出结合噪声统计特性并满足 Kalman 滤波噪声数学特性下的过程噪声及观测噪声的关联的构建，进行噪声相关性的消除，率先依据视觉采样及机械臂离散化控制周期优化调整策略实现 Kalman 滤波步数的优化，提出结合目标运动实际特性的多项式获得滤波器时滞期间无法获取的观测向量的估计从而实现对观测向量的全域估计，提升目标图像及图像雅可比矩阵的时滞补偿估计的精度，达到提高系统的控制精度的目标。

(2) 针对机械臂时滞动力学系统非线性、无限维、部分关节周期运动的特征，寻找合适的 Lyapunov-Krasovskii 泛函进行其稳定性分析非常困难的问题，借鉴低通滤波时间连续近似



法的思想完成该无限维模型向不显含时滞的有限维模型的转换，方便了机械臂时滞反馈动力学模型的稳定性研究；依据不显含时滞模型的系数矩阵和反馈增益的联系来获得映射矩阵同反馈增益间的联系，从而获得系统稳定下的反馈增益空间，为反馈增益的优化提供基础；提出改进 Pareto 排序算法和 Vague 集决策方法实现兼顾系统稳定性和控制精度的多目标优化模型下的反馈增益获取，实现系统内环控制时滞有效补偿，有效提升机械臂的控制精度。

## 5、年度研究计划及预期研究结果

### 5.1 年度研究计划

2017.1-2017.12

(1) 前期准备

(2) 基于 Kalman 的有色噪声滤波器的构建

(3) 寻求保证 Kalman 滤波适用条件、关节角度增量估计误差在一定范围内的视觉系统采样周期和机械臂内环离散化控制周期的取值空间及优化调整，优化 Kalman 滤波步数

(4) 多运动模式下的目标图像预测结果的融合

2018.1-2018.12

(1) 机械臂时滞反馈动力学建模

(2) 不显含时滞反馈动力学模型的转换及稳定性下的反馈增益空间的获取

(3) 兼顾系统稳定性和控制精度的多目标优化模型下的反馈增益的优化求解

2019.1-2019.12

(1) 可变自由度、相互验证的机械臂实验平台设计与验证

(2) 方法的修正、完善及提高

(3) 项目总结，成果申报

### 5.2 预期研究成果

通过本项目的研究，预期将取得下述研究成果：

(1) 完成系统外环控制的时滞补偿及优化。包括 Kalman 有色噪声滤波器的构建、视觉采样及机械臂离散化控制周期优化调整下的 Kalman 滤波步数的确定、多运动模式下目标图像预测结果的有效融合，获得目标图像、图像雅可比矩阵的时滞补偿估计，提升外环控制精度。

(2) 完成机械臂内环控制的时滞补偿及优化研究。主要完成机械臂时滞反馈动力学系统建模、不显含时滞模型的转换及此模型稳定性下的反馈增益空间的获取，以系统稳定性和控制精度的相关指标为多目标优化函数，以反馈增益为设计变量，获得多目标优化下的反馈增



益，达到机械臂内环控制的时滞补偿及优化。

(3) 完成可变自由度、相互验证的机械臂实验平台的设计与验证，对所提方法的修正、完善及提高提供支持。

(4) 提交《基于图像的视觉伺服机械臂控制系统时滞补偿及优化研究》的总结报告，在国内外知名学术刊物或国内外重要学术会议上发表被 SCI 或 EI 检索的论文 4-6 篇，培养硕士研究生 2-3 名。

## （二）研究基础与工作条件

### 1. 工作基础（与本项目相关的研究工作积累和已取得的研究工作成绩）

申请人于 2009 年博士毕业于华南理工大学自动化学院，师从裴海龙教授。从事的研究方向为时滞系统的稳定性分析及控制、机器人视觉伺服、切换系统。相关的研究成果已发表在《Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics》、《控制理论与应用》、《控制与决策》、《信息与控制》等上面。同时，申请人是《Journal of The Franklin Institute》、《控制理论与应用》等多个国际和国内重要期刊的审稿人。目前，申请人跟随国家杰青、长江学者何勇教授从事时滞系统方面的理论和应用研究。

申请人通过已结题的中央高校基金优秀青年基金“基于图像的视觉伺服网络机器人系统中时延问题的研究”的研究工作，在系统的视觉控制时滞补偿方面取得了一定的成果。通过此项目的研究，申请人从图像特征空间的角度来补偿系统时滞对目标图像和图像雅可比矩阵估计的误差，并在六足仿生机器人实验平台上得到了初步验证，相关的研究成果目前已经录用或发表在《Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics》、《控制理论与应用》上；但研究中目标图像运动状态模型单一、噪声处理常规化、Kalman 滤波器滤波步数粗略估计（因决定滤波步数的外环时滞准确辨识难度较大），本项目将针对已有的研究成果，结合实际的机械臂视觉伺服控制中存在的问题即目标图像运动状态模型的不准确性、目标运动过程中的观测噪声更符合有色噪声、滤波步数应结合时滞来源即视觉系统采样周期、视觉伺服处理周期和机械臂离散化控制周期来共同确定，进行目标图像多运动模式下基于 Kalman 的有色噪声滤波器的构建，并结合视觉系统采样周期、机械臂离散化控制周期的优化调整策略进行 Kalman 滤波步数的优化及确定，最后进行多运动模式下目标图像时滞补偿估计的有效融合，完成目标图像及图像雅可比矩阵较准确的时滞补偿估计。同时，通过该项目的研究，申请人对基于图像的视觉伺服网络机器人系统的混杂建模、时滞预测、系统离散化周期与控制增益之间的关系等问题展开了相关研究。



申请人参与的交通运输部科技项目西部重点项目“基于机器人平台的桥梁沿程扫描式无损检测技术及系统装备研发”（包括多足机器人和蛇形机器人），主要进行了基于视觉的桥梁三维重构、基于图像的蛇形机器人步态识别、机器人动力学分析的研究，研究成果及实验过程将对目标图像、图像雅可比矩阵的时滞补偿估计实验的修正及分析提供指导，也将对机械臂时滞动力学建模提供良好的基础。

对于时滞系统的稳定性分析及控制的研究方面，申请人积累了一定的研究成果，相关论文发表在《控制理论与应用》、《控制与决策》、《信息与控制》上，部分研究成果针对时滞系统进行了稳定性分析及时滞反馈控制的研究，研究成果对本项目中时滞反馈动力学系统兼顾稳定性分析及控制精度下的反馈增益的优化获取研究奠定了良好的基础。

课题组主要研究人员魏武老师及其团队主要从事机器人技术、人工智能、检测技术、模式识别等领域研究工作。建立了 SSCUT-II 正交关节蛇形机器人和 ML6-QJ-I 型六足爬壁机器人动力学系统的模型，并对实体机器人在 Adams 虚拟仿真软件下展开了相应的模型仿真，提出了基于 PID 的机器人内环离散化伺服控制方法，实现了机器人复杂任务；对机器人的姿态通过机器视觉的方式进行了估计，并用机器视觉的方式实现对机器人周围环境的三维重构，提出基于最小类内方差的多阈值分割结合运动图像特征的算法实现了机器人步态的识别。相关研究基础为本项目所研究的机械臂系统时滞动力学建模、机械臂视觉伺服时滞控制、机械臂系统的仿真及实验等问题的研究提供良好基础。

课题组主要研究人员刘峰老师针对复杂网络和非线性动力学系统中，由于时滞等诱导参数变化引起的系统失稳、分叉、混沌等动力学行为，采用时滞状态反馈控制获得系统期望的动态性能，讨论了时滞和反馈增益对系统特性的影响，获得了系统稳定性边界下的时滞和反馈增益间的关联，并用系统数值仿真方法研究系统动力学演化过程。为目前研究的这个项目进行机械臂时滞动力学系统的性能分析及模型优化、系统数值仿真积累了一定的经验。

课题组成员魏龙生老师，博士毕业于华中科技大学图像识别与人工智能研究所，长期从事视觉注意机制和模式识别的研究。在动态视觉注意领域，构建了基于局部复杂度的动态视觉注意模型，提出降低特征图灰度级的方法提高算法的运行速度，进而提高目标图像识别的速度，降低时滞对系统控制带来的影响，研究成果也为本项目的研究奠定良好的基础。

本项目组拥有机器人、时滞系统、非线性与复杂系统、图像处理等领域从事科学研究，由教授、讲师、硕士生组成的中青年科研队伍，学术气氛浓厚，具有积极向上的科研精神。



## 2. 工作条件（包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径，包括利用国家实验室、国家重点实验室和部门开放实验室等研究基地的计划与落实情况）

学院建立的校级 C 类学术创新基地“复杂系统先进控制与智能地学仪器研究中心”，该平台拥有国内一流的各种先进控制设备、成像设备及信息处理软硬件设备；除必要的图像数据获取、存储及处理设备外，学院拥有轮式机器人、固高机械臂等，在设备上可为本项目的研究提供支持。

同时，申请人所在的研究组内的教师和研究生从事相近或相关课题的研究，具有良好的学术和合作氛围。研究组重要成员所在实验室开发了 SSCUT-II 正交关节蛇形机器人和 ML6-QJ-I 型六足爬壁机器人仿真平台，适合本项目进行可变自由度的机械臂实验平台设计与验证、相互验证的机械臂实验平台设计与验证。项目组将使用 Webots 主流机器人软件开发平台（全球 1000 多所高校采用的主流机器人软件开发平台），Adams 下运动仿真平台，采用 Matlab/Simulink 仿真软件分析系统控制补偿及优化特性，验证理论研究正确性和有效性。实验室网站<http://robotscut.com/>，部分信息未更新。

研究组目前已经建立了一些比较完善的非线性系统模型，拥有动力学仿真软件包一套、以及相关的数据库一套，并和我院信息网络中心合作进行多项实验。目前我院的非线性与复杂系统中心拥有智能与复杂系统研究基地和混合动力系统建模与仿真实验室，混合动力系统建模与仿真实验室有一批高性能计算设备和软件。此外，申请人团队成员与华中科技大学的非线性与复杂系统研究中心保持良好的合作研究关系。

最后，本院拥有湖北省省级信息技术教学实验示范中心，设有嵌入式系统实验室、计算机图像处理实验室、高性能计算实验室、3G 无线通信平台实验室、科研工作室等，中心将在人力、物力和工作时间等基本条件方面对项目组提供全力支持。

以上条件为我们进行理论研究和实验验证提供了良好的工作条件。

## 3. 承担科研项目情况（申请人正在承担或参加科研项目的情况，包括自然科学基金的项目。要注明项目的名称和编号、经费来源、起止年月、与本项目的关系及负责的内容等）

[1] 校级中央高校基本科研业务费专项资金优秀青年基金“基于图像的视觉伺服网络机器人系统中时延问题的研究”，项目批准号：CUGL130223，2013.01-2015.12，6 万

通过该项目，申请人对基于图像的视觉伺服网络机器人系统的混杂建模、时滞预测、系统离散化周期与控制增益之间的关系、目标图像及图像雅可比矩阵的时滞补偿估计等问题展



开了相关研究，为本项目提供了良好基础，申请人为主持人。

4. 完成自然科学基金项目情况（对申请人负责的前一个已结题科学基金项目（项目名称及批准号）完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系加以详细说明。另附该已结题项目研究工作总结摘要（限 500 字）和相关成果的详细目录）

无

### （三）其他需要说明的问题

1. 申请人同年申请不同类型的国家自然科学基金项目情况（列明同年申请的其他项目的项目类型、项目名称信息，并说明与本项目之间的区别与联系）。

无

2. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在同年申请或者参与申请国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，申请或参与申请的其他项目的项目类型、项目名称、单位名称、上述人员在该项目中是申请人还是参与者，并说明单位不一致原因。

否

3. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在与正在承担的国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，正在承担项目的批准号、项目类型、项目名称、单位名称、起止年月，并说明单位不一致原因。

否

4. 其他。

无



## 王新梅 简历

中国地质大学（武汉），自动化学院，讲师

**教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：**

1. 2006/09 - 2009/06， 华南理工大学， 控制理论与控制工程， 博士，  
导师：裴海龙

2. 2003/09 - 2006/07， 武汉理工大学， 计算机技术与应用， 硕士， 导师：尹朝庆

3. 1999/09 - 2003/07， 武汉理工大学， 计算机技术与应用， 学士， 导师：张明

**科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：**

1. 2014/07-至今，中国地质大学（武汉），自动化学院，讲师

2. 2009/07-2014/06，中国地质大学（武汉），机械与电子信息学院，讲师

**曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）：**

**主持或参加科研项目（课题）及人才计划项目情况（按时间倒序排序）：**

1、国家自然科学基金面上项目，61573325，性能相关事件驱动间歇控制系统分析与综合及鲁棒性设计，2016/01-2019/12，85.8万，在研，参加（署名第二）

2、国家自然科学基金面上项目，61472374，基于基因调控网络的复杂网络多样性演化算法及应用，2015/01-2018/12，81万，在研，参加（署名第三）

3、中央高校基本科研业务基金优秀青年教师基金，CUGL130223，基于图像的视觉伺服网络机器人系统中时延问题的研究，2013/01-2015/12，6万，已结题，主持

4、国家自然科学基金面上项目，61073026，基于互联网的混合型复杂网络的分叉与混沌的研究，2011/01-2013/12，33万，已结题，参加（署名第四）

**代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）**

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称（或会议论文集名称及起止页码）、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“\*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

### 一、期刊论文

#### 1. 第一作者论文

(1) **王新梅<sup>(#)</sup>(\*)**，魏武，刘玮，刘峰，袁银龙，鲁棒卡尔曼滤波下的图像雅可比矩阵带时延补偿的估计，控制理论与应用，2015，32（8）：1052-1057。





(2) **Xinmei Wang**<sup>(#)(\*)</sup>, Wu Wei, Feng Liu, Longsheng Wei, Zhihui Liu, Online Estimation of Image Jacobian Matrix with Time-delay Compensation, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2016, 20 (2) : 1-8.

(3) **王新梅**<sup>(#)(\*)</sup>, 魏武, 裴海龙, 贺良华, 一类具有区间时变多状态时滞系统的稳定性分析, 控制理论与应用, 2010, 27 (06) : 786-792.

(4) **王新梅**<sup>(#)(\*)</sup>, 裴海龙, 一类区间时变输入时滞与状态时滞线性系统的稳定性研究, 控制与决策, 2009, 24 (10) : 1549-1554.

(5) **王新梅**<sup>(#)(\*)</sup>, 裴海龙, 魏武, 输入时滞不确定切换系统的稳定性分析与控制, 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37 (10) : 49-54.

(6) **王新梅**<sup>(#)(\*)</sup>, 魏武, 贺良华, 裴海龙, 一类有界区间时变时滞系统的稳定性分析与研究, 信息与控制, 2009, 38 (5) : 526-531.

## 2. 既非第一作者又非通讯作者论文

(1) 魏武<sup>(#)(\*)</sup>, 袁银龙, **王新梅**, 基于影响系数原理的六足机器人运动状态分析, 系统工程与电子技术, 2015, 38 (2) : 375-381.

(2) 魏武<sup>(#)(\*)</sup>, 姜莉, **王新梅**, 基于最小类内方差的蛇形机器人多阈值分割, 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41 (5) : 9-14.

(3) Feng Liu<sup>(#)(\*)</sup>, Xiang Yin, **Xinmei Wang**, Wei Liu, Longsheng Wei, Hua O Wang, Stability Analysis and Hopf Bifurcation Control for a Wireless Network Model, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2016, 20 (2) : 36-46.

(4) Longsheng Wei<sup>(#)(\*)</sup>, Wei Liu, **Xinmei Wang**, Feng Liu, Dapeng Luo, Objective Image Quality Assessment Based on Saliency Map, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2016, 20 (2) : 21-27.

(5) Longsheng Wei<sup>(#)(\*)</sup>, Dapeng Luo, **Xinmei Wang**, Active Contour Texture Image Segmentation Based on Anisotropic Diffusion, Journal of Computational Information Systems, 2014, 10 (6) : 2613-2620.

(6) 魏龙生<sup>(#)(\*)</sup>, 罗大鹏, **王新梅**, 引入视觉注意机制可变分辨率的遥感图像压缩, 计算机工程与应用, 2014, 50 (20) : 5-9.

## 二、会议论文

### 1. 第一作者论文

(1) **Xinmei Wang**<sup>(#)(\*)</sup>, Wu Wei, Feng Liu, Longsheng Wei, Yinlong Yuan, The Estimation of Image Jacobian Matrix with Time-delay Compensation, Proceedings





of 4th International Workshop on Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics Part 2 (IWACIII Part 2 2015), 113-120, 2015.10.23-2015.10.25。

(2) **Xinmei Wang**<sup>(#)(\*)</sup>, Wu Wei, Stabilization analysis for a class of multiple interval time-varying delays system, Proceedings of the 2012 24th Chinese Control and Decision Conference, 2012.5.23-2012.5.25。

(3) **Xinmei Wang**<sup>(#)(\*)</sup>, Wu Wei, Unbiased H-infinity filtering for a class of multiple time-varying delays system, 2011 International Conference on Transportation and mechanical & Electrical Engineering, 2011.12.16-2011.12.18。

(4) **Xinmei Wang**<sup>(#)(\*)</sup>, Hailong Pei, Wu Wei, Robust Fault-Tolerant Control Studies of State and Control Time-Delay System Based on T-S Fuzzy Model, 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2008.10.20-2008.10.22。

(5) **Xinmei Wang**<sup>(#)(\*)</sup>, Hailong Pei, Wu Wei, Hongbo Zhou, Robust Stabilization of Switched Systems with Uncertain Input Delays, 2008 ISECS International Colloquium on computing communication control and management, 2008.8.3-2008.8.4。

## 2. 既非第一作者又非通讯作者论文

(1) Longsheng Wei<sup>(#)(\*)</sup>, Wei Liu, **Xinmei Wang**, Dapeng Luo, Perceptual Image Quality Assessment Based on Visual Attention, Proceedings of 4th International Workshop on Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics Part 2 (IWACIII Part 2 2015), 2015.10.23-2015.10.25。

(2) Wei Liu<sup>(#)(\*)</sup>, Yong Wang, **Xinmei Wang**, The Application of Cortex Visual Cognitive Model on Road Environment Perception, The 4th International Congress on Image and Signal Processing, 2011.10.15-2011.10.17。

## 三、会议特邀学术报告

(1) Feng Liu<sup>(#)(\*)</sup>, **Xinmei Wang**, Xiang Yin, Hua O Wang, Stability Analysis and Bifurcation Control for A Wireless Network Model, Proceedings of 4th International Workshop on Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics Part 2 (IWACIII Part 2 2015), 2015.10.23-2016.10.25。



## 魏武（参与者） 简历

华南理工大学，自动化科学与工程学院，教授

**教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：**

- 1.1997/09 - 2001/01, 华中科技大学, 控制理论与控制工程, 博士, 导师: 黄心汉
- 2.1994/09 - 1997/07, 长沙理工大学, 汽车工程, 硕士, 导师: 周萼秋
- 3.1988/09 - 1992/07, 长沙理工大学, 机械设计及自动化, 学士, 导师: 李标

**科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：**

1. 2005/09 - 至今, 华南理工大学, 自动化科学与工程学院, 教授
2. 2004/09 - 2005/07, 长沙理工大学, 汽车与机械工程学院, 教授
3. 2003/05 - 2004/07, 香港理工大学, 机电系, 博士后
4. 2001/01 - 2003/03, 清华大学, 自动化系, 博士后

**曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）**

无

**主持或参加科研项目(课题)及人才计划项目情况(按时间倒序排序)：**

1、国家自然科学基金面上项目, 61573148, 基于弹性包络的正交关节蛇形机器人螺旋攀爬运动力学建模与步态优化研究, 2016/01-2019/12, 74.8万, 在研, 主持

2、广东省重大科技专项, 2015B010919007, 建筑墙体检测服务机器人研发与产业化, 2015/06-2018/06, 960万(省科技厅500万,企业460万), 在研, 主持

3、交通运输部科技项目西部重点项目, 201127849A400, 基于机器人平台的桥梁沿程扫描式无损检测技术及系统装备研发, 2011/01-2015/12, 850万(交通部200万,企业650万), 已结题, 主持



## 代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称(或会议论文集名称及起止页码)、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“\*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

### 一、期刊论文

#### 1. 第一作者论文

(1) **魏武**(#)(\*)，袁银龙，王新梅. 基于影响系数原理的六足机器人运动状态分析. 系统工程与电子技术, 2016, 38 (2): 375-381.

(2) **Wu Wei**(#)(\*), Junxia Yu, Weihe Lin, Risheng Mai, Chunxu Chen, Zhenyong He and Zhong Li. Structure Design of Climbing Snake-like Robot for Detection of cable-stayed bridge. Applied Mechanics and Materials, 2014, 29(5): 610-618.

(3) **魏武**(#)(\*)，姜莉，王新梅. 基于最小类内方差的蛇形机器人多阈值分割. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 9-14.

(4) **魏武**(#)(\*)，李金龙，任回兴. 基于吸盘负压吸附的六足爬墙机器人关节转矩优化分配. 中国机械工程, 2013, 24(10): 1289-1295.

(5) **魏武**(#)(\*)，贺钊. 基于安全性目标多足爬壁机器人足力优化分配. 系统仿真学报, 2013, 25(5): 921-925.

(6) **魏武**(#)(\*)，孙洪超. 蛇形机器人桥梁缆索攀爬步态控制研究. 中国机械工程, 2012, 23(10): 1230-1236.

(7) **魏武**(#)(\*)，蔡钊雄，邓高燕. 基于能耗目标优化的多足爬墙机器人足力控制研究. 中国机械工程, 2012, 23(9): 1099-1104.



## 2.既非第一作者又非通讯作者论文

(1) Xinmei Wang(#)(\*), **Wu Wei**, Feng Liu, Longsheng Wei, Zhihui Liu. Online Estimation of Image Jacobian Matrix with Time-delay Compensation. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2016, 20(2): 1-8 (样稿).

(2) 王新梅(#)(\*), **魏武**, 刘玮, 刘峰, 袁银龙. 鲁棒卡尔曼滤波下的图像雅可比矩阵带时延补偿的估计. 控制理论与应用, 2015, 32(8): 1052-1057.

(3) 王新梅(#)(\*), **魏武**, 裴海龙, 贺良华. 一类具有区间时变多状态时滞系统的稳定性分析. 控制理论与应用, 2010, 27 (6): 786-792.

(4) 王新梅(#)(\*), 裴海龙, **魏武**. 输入时滞不确定切换系统的稳定性分析与控制. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(10): 49-54.

(5) 王新梅(#)(\*), **魏武**, 贺良华, 裴海龙. 一类有界区间时变时滞系统的稳定性分析与研究. 信息与控制, 2009, 38(5): 526-531

## 二、会议论文

### 1. 第一作者论文

(1) **Wu Wei**(#)(\*), Junxia Yu, Weihe Lin, Risheng Mai, Chunxu Chen, Zhenyong He, Zhong Li. Structure design of climbing snake-like robot for detection of cable-stayed bridge. The 4th International Conference on Mechanics, Simulation and Control, ICMSC 2014, 2014: 610-618

### 2.既非第一作者又非通讯作者论文

(1) Xinmei Wang(#)(\*), **Wu Wei**, Feng Liu, Longsheng Wei, Yinlong Yuan. The Estimation of Image Jacobian Matrix with Time-delay Compensation. Proceedings of 4th International Workshop on Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics Part 2 (IWACIII Part 2 2015), 2015.10.23-25, 113-120.

(2) Xinmei Wang (#)(\*), **Wu Wei**. Stabilization analysis for a class of multiple interval time-varying delays system. Proceedings of the 2012 24th Chinese Control and Decision Conference, 2012.5.23-25, 2309-2312.

(3) Xinmei Wang (#)(\*), **Wu Wei**. Unbiased H-infinity filtering for a class of



multiple time-varying delays system. 2011 International Conference on Transportation and Mechanical & Electrical Engineering, 2011.12.16-18, 3721-3724.

### 三、授权发明专利

(1) 魏武, 袁银龙, 余俊侠, 陈望美, 任回兴, 韩学伟, 曹峰. 一种基于移动平台的桥梁钢筋分布检测系统. 中国, 专利号: 201410193812.2

(2) 魏武, 何振勇, 陈然, 赵亦璇. 基于蛇形机器人的分布式机载直流供电系统. 中国, 专利号: 201310136949.X

(3) 魏武, 何振勇, 林维河, 任回兴, 韩学伟, 张洪华, 马颖. 一种基于正交关节蛇形机器人及其螺旋攀爬运动控制方法. 中国, 专利号: 201310422150.7

(4) 魏武, 陈然, 何振勇, 赵亦璇. 基于带电源隔离的CAN 总线的蛇形机器人通信系统. 中国, 专利号: 201310136996.4

(5) 魏武, 任回兴, 何震勇, 林维河, 韩学伟, 张洪华, 马颖. 一种基于正交关节蛇形机器人. 中国, 专利号: 201320573824.9

(6) 韩学伟, 任回兴, 魏武, 林声, 陈新, 李金龙. 一种桥检用无线控制多功能混凝土钢筋检测装置. 中国, 专利号: 201210494995.2



## 刘峰（参与者） 简历

中国地质大学（武汉），自动化学院，教授

**教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：**

1. 2004/09-2008/03，华中科技大学，控制理论与控制工程，博士，导师：关治洪，王华
2. 2000/09-2003/06，武汉理工大学，机械与电子工程，硕士，导师：谭跃钢
3. 1992/09-1996/06，武汉科技学院，自动化，本科

**科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：**

1. 2014/12-至今，中国地质大学(武汉)，自动化学院，教授
  2. 2010/01-2014/11，中国地质大学(武汉)，机械与电子信息学院，副教授
  3. 2011/06-2012/07，美国波士顿大学，机械工程系，访问学者，合作导师：Wang Hua O
  4. 2009/02-2011/03，华中科技大学，信息与通信工程，博士后，合作导师：朱光喜
- 曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）**

无

**主持或参加科研项目(课题)及人才计划项目情况(按时间倒序排序)：**

- 1、国家自然科学基金面上项目，61472374，基于基因调控网络的复杂网络多样性演化算法及应用，2015/01-2018/12，81万，在研，主持
- 2、中央高校基本科研业务基金优秀青年教师基金，CUGL130223，基于图像的视觉伺服网络机器人系统中时延问题的研究，2013/01-2015/12，6万，已结题，参加
- 3、国家自然科学基金面上项目，61073026，基于互联网混合型复杂网络的混沌分叉的研究，2011/01-2013/12，33万，已结题，主持
- 4、国家自然科学基金，60973039，基于多智能体的混合型复杂网络群集动力学及算法研究，2011/01-2013/12，34万，已结题，参加
- 5、中国博士后科学基金，20090460947，复杂网络的动力学分析与控制研究，2009/03-2011/7，3万，已结题，主持





## 代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称(或会议论文集名称及起止页码)、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“\*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

### 一、期刊论文

#### 1. 第一作者论文

(1) **Feng Liu**(#)(\*), Xiang Yin, Xinmei Wang, Wei Liu, Longsheng Wei, Hua O Wang. Stability Analysis and Hopf Bifurcation Control for a Wireless Network Model. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2016, 20(2): 1-11.

(2) **Feng Liu**(#)(\*), Hua O Wang, Zhihong Guan. Hopf Bifurcation Control in the XCP for the Internet Congestion Control System. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2012,3(13): 1466-1479. (SCI 检索)

(3) **Feng Liu**(#)(\*), Zhihong Guan, Hua O Wang. Stability and Hopf Bifurcation Analysis in a TCP Fluid Model. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2011, 1(12): 353-363.(SCI检索)

(4) **Feng Liu**(#)(\*), Zhihong Guan, Hua O Wang. Controlling Bifurcations and Chaos in TCP-UDP-RED. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2010, 3(11): 1491-1501.(SCI 检索)

(5) **Feng Liu**(#)(\*), Zhihong Guan, Hua O Wang. Impulsive Control of Bifurcation. Mathematics and Computers in Simulation, 2009, 79(10): 2180-2191. (SCI 检索)

(6) **Feng Liu**(#)(\*), Zhihong Guan, Hua O Wang. Controlling bifurcations and chaos in Small-world networks. Chinese Physics B, 2008,7(7): 2405-2411. (SCI 检索)



## 2. 既非第一作者又非通讯作者论文

- (1) 王新梅(#)(\*), 魏武, 刘玮, **刘峰**, 袁银龙. 鲁棒卡尔曼滤波下的图像雅可比矩阵带时延补偿的估计. 控制理论与应用, 2015, 32(8):1052-1057
- (2) Yonghong Wu(#)(\*), Zhihong Guan, Gang Feng, **Feng Liu**. Passivity-based control of hybrid impulsive and switching systems with singular structure. Journal of The Franklin Institute, 2013, 350(6):1500-1512. (SCI 检索)
- (3) Xiaowei Jiang(#)(\*), Zhihong Guan, Xianhe Zhang, Dingxue Zhang, **Feng Liu**. Stability and neimark-sacker bifurcation analysis of a food-limited population model with a time delay. Chinese Physics B, 2013, 22(3):030204. (SCI 检索)

## 二、会议论文

### 1. 第一作者论文

- (1) **Feng Liu**(#)(\*), Xiang Yin, Guang Ling, Zhihong Guan, Hua Wang. Stability and Hopf bifurcation analysis in a delay Swarms model. The 34th Chinese Control Conference (CCC2015), 2015, July 28-30, 1049 -1053.
- (2) **Feng Liu**(#)(\*), Gaoxiang Xiong, Zhihong Guan, Hua Wang. Stability and Bifurcation Analysis of Genetic Regulatory Networks with Two Delays. The 33th Chinese Control Conference (CCC2014), 2014, July 28-30, 2244 -2248.





## 魏龙生（参与者） 简历

中国地质大学（武汉），自动化学院，讲师

**教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：**

1. 2007/09 - 2011/06，华中科技大学，图像识别与人工智能研究所，博士，导师：桑农

2. 2005/09 - 2007/06，华中科技大学，数学与统计学院，硕士，导师：周晓阳

3. 2001/09 - 2005/06，安徽大学，数学科学学院，学士，导师：徐常青

**科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：**

1. 2014/07 - 至今，中国地质大学（武汉），自动化学院自动控制系，讲师

2. 2011/07 - 2014/06，中国地质大学（武汉），机械与电子信息学院自动控制系，讲师

**曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）**

无

**主持或参加科研项目(课题)及人才计划项目情况(按时间倒序排序)：**

1. 国家自然科学基金青年基金项目，61503349，基于生物视觉启发特征和遮挡模型的复杂道路环境目标检测方法研究，2016/1-2018/12，22万元，在研，参加

2. 国家自然科学基金青年基金项目，61302137，基于弱线性回归树在线学习的自适应视频目标检测算法研究，2014/1-2016/12，25万元，在研，参加

3. 中央高校基本科研业务费专项资金项目，CUG110818，基于动态和静态的视觉注意计算模型的研究，2011/11-2013/12，4万元，已结题，主持

**代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）**

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称(或会议论文集名称及起止页码)、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第



一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“\*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。)

## 一、期刊论文

### 1. 第一作者论文

(1) **Longsheng Wei**(#)(\*), Liu Wei, Xinmei Wang, Feng Liu and Dapeng Luo. Objective Image Quality Assessment Based on Saliency Map. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 20(2): 1-7, 2016

(2) **Longsheng Wei**(#)(\*), Dapeng Luo, A biologically inspired computational approach to model top-down and bottom-up visual attention, Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 126(5): 522-529, 2015

(3) **Longsheng Wei**(#)(\*), Dapeng Luo, A biologically inspired spatiotemporal saliency attention model based on entropy value, Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 125(21): 6422-6427, 2014

(4) **Longsheng Wei**(#)(\*), Dapeng Luo and Xinmei Wang, Active Contour Texture Image Segmentation Based on Anisotropic Diffusion, Journal of Computational Information Systems, 10(6): 2613-2620, 2014

(5) **魏龙生**(#)(\*), 罗大鹏, 王新梅, 引入视觉注意机制可变分辨率的遥感图像压缩, 计算机工程与应用, 50(20), 5-9, 2014

(6) **Longsheng Wei**(#), Nong Sang(\*), Yuehuan Wang and Qingqing Zheng. A dynamic saliency attention model based on local complexity. Digital Signal Processing, 22(5): 760-767, 2012

(7) **Longsheng Wei**(#)(\*), Nong Sang, and Yuehuan Wang. A biologically inspired object-based visual attention model. Artificial Intelligence Review, 34(2): 109-119, 2010

## 二、会议论文

### 1. 第一作者论文

(1) **Longsheng Wei**(#)(\*), Liu Wei, Xinmei Wang and Dapeng Luo. Perceptual Image Quality Assessment Based on Visual Attention. Proceedings of 4th International Workshop on Advanced Computational Intelligence and Intelligent



Informatics Part 2 (IWACIII Part 2 2015), 2015.10.23-25, 137-141

(2) **Longsheng Wei**(#)(\*), Nong Sang, and Yuehuan Wang. A spatiotemporal saliency model of visual attention based on maximum entropy. Proceedings of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Commission I 2010 Symposium, 2010.06.15-18, 3: 1-5

(3) **Longsheng Wei**(#)(\*), Nong Sang, Yuehuan Wang, Dengwei Wang and Fang Wang. Variable Resolution Image Compression Based on a Model of Visual Attention. The Sixth SPIE International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition, 2009.10.30-11.01, 7495P: 1-7

## 2. 既非第一作者又非通讯作者论文

(1) Nong Sang(#)(\*), **Longsheng Wei** and Yuehuan Wang. A Biologically-inspired Top-down Learning Model Based on Visual Attention. IEEE Proceedings of the 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2010.08.23-26, 910: 3736-3739

## 三、授权发明专利

(1) **魏龙生**, 桑农, 王岳环. 一种基于信息熵的时空显著性视觉注意方法, 2012.2, 中国, ZL 2010 1 0192240. 8

(2) 桑农, **魏龙生**, 王岳环等. 一种生物激励的自顶向下的视觉注意方法, 2011.11, 中国, ZL 2010 1 0229180. 2



## 附件信息

序号	附件名称	备注	附件类型
1	录用证明	Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics 录用证明	代表性论著

NSFC 2016



## 签字和盖章页

申请人：王新梅

依托单位：中国地质大学（武汉）

项目名称：基于图像的视觉伺服机械臂控制系统时滞补偿及优化研究

资助类别：青年科学基金项目

亚类说明：

附注说明：

### 申请人承诺：

我保证申请书内容的真实性。如果获得资助，我将履行项目负责人职责，严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定，切实保证研究工作时间，认真开展工作，按时报送有关材料。若填报失实和违反规定，本人将承担全部责任。

签字：

### 项目组主要成员承诺：

我保证有关申报内容的真实性。如果获得资助，我将严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定，切实保证研究工作时间，加强合作、信息资源共享，认真开展工作，及时向项目负责人报送有关材料。若个人信息失实、执行项目中违反规定，本人将承担相关责任。

编号	姓名	工作单位名称	证件号码	每年工作时间（月）	签字
1	魏武	华南理工大学	430103197002161059	3	
2	刘峰	中国地质大学(武汉)	422226197202120032	4	
3	魏龙生	中国地质大学(武汉)	340823198112043113	3	
4	崔浩	中国地质大学(武汉)	130982198910272910	10	
5	叶春台	华南理工大学	440781199203178917	10	
6	殷翔	中国地质大学(武汉)	42082119910722021X	10	
7	上官星辰	中国地质大学(武汉)	411522199407095739	10	
8					
9					

### 依托单位及合作研究单位承诺：

已按填报说明对申请人的资格和申请书内容进行了审核。申请项目如获资助，我单位保证对研究计划实施所需要的人力、物力和工作时间等条件给予保障，严格遵守国家自然科学基金委员会有关规定，督促项目负责人和项目组成员以及本单位项目管理部门按照国家自然科学基金委员会的规定及时报送有关材料。

依托单位公章

日期：

合作研究单位公章1

日期：

合作研究单位公章2

日期：