

自然科学奖公示内容：项目名称、推荐单位（专家）意见、项目简介、客观评价、代表性论文专著目录、主要完成人情况、完成人合作关系说明、知情同意证明。

项目名称：仿生机器鱼高效与高机动控制的理论与方法

推荐单位意见：

该项目立足解决国家重大需求和国际学术前沿的科学问题，将鱼类游动推进模式引入水下机器人的仿生设计与推进控制，创新性地提出了仿生机器鱼高效与高机动控制的理论和方法，为兼具效率和机动性的水下航行器开发与应用提供了关键理论与核心方法。

该项目组的重要发现点包括：（1）首次提出了描述鱼体周期性形变运动的“基波”概念，建立了仿生机器鱼高效运动的鱼体波模型；（2）率先提出基于 C 曲线的动态轨迹法来实现仿生机器鱼的高机动转弯运动，在国际上首次实现了机器海豚的滚翻和跃水等高机动运动；（3）创新性地提出了仿生机器鱼的机构优化方法；（4）系统地提出并实现了多仿生机器鱼协作框架和协作控制方法。

相关成果发表在如 IEEE Transactions on Robotics 等领域权威期刊上。8 篇代表作 Web of Science 他引 673 次。相关成果也得到本领域专家、学者的正面评价和广泛引用，推动了本学科的发展。该项目部分研究成果曾获得北京市科学技术一等奖（基础研究类）。

该项目推荐材料真实有效，相关栏目符合填写要求，项目公示无异议。

经评审，建议推荐该项目为国家自然科学奖二等奖。

项目简介

本项目属于机器人控制学科。

鱼类历经千万年的进化，适应了复杂的水下环境，形成了高效率、高机动性、低噪声的游动推进运动模式，其运动学、水动力学的研究对于高效、低噪、节能、高机动性的新型高性能水下运载器具有重要而深远的影响。

本项目深入研究如何将鱼类游动推进模式引入仿生机器鱼的设计与控制，提出了仿生机器鱼建模与控制的理论和方法，为新型高效、低噪、高机动性的仿生机器鱼系统开发提供了理论基础。主要科学发现为：

1. 首次提出包含形变描述和线密度描述的“基波”概念，建立仿生机器鱼的鱼体波模型，形成多关节仿生机器鱼稳定游动推进的控制方法体系，并利用研制完成的仿生机器鱼验证鱼类游动推进机理，实现了高效、稳定的游动。
2. 率先提出基于 C 曲线的动态轨迹法来实现仿生机器鱼的高机动转弯运动，构建了仿生机器鱼三维空间复杂机动运动的智能控制方法体系框架，系统地验证了浮潜、定深、快速启动、急转弯、转向等仿生机器鱼的运动控制，并首次实现了机器海豚滚翻运动和跃水运动。
3. 提出仿生机器鱼的多连杆机构优化指标设计方法，推导了仿生机器鱼稳态游动下的受力描述，提出基于神经网络模型的机构优化方法并证明了该方法的全局指数稳定条件，通过机构优化有效提升了仿生机器鱼游动性能。
4. 构建了多仿生机器鱼系统基于局部信息感知和有限通讯条件的协作框架和协调机制，提出分布式鲁棒自适应神经网络控制方法，证明了有限通讯条件下多仿生机器鱼系统同向游动的充要条件，实现了多仿生机器鱼系统协作完成编队、搬运、监控等作业。

8 篇代表作 Web of Science 他引 673 次。引文来自 IEEE Transactions on Robotics 等本领域国际权威学术刊物，引文作者包括 MIT、哈佛大学等大学、研究机构的学者，30 余位 IEEE Fellow。撰写专著 3 部，获授权发明专利 30 项，获中国科学院优秀博士论文一次、北京市优秀博士论文一次。研制的系统在 University of Hamburg、Deakin University、University of Glamorgan 等大学用于科研工作。本项目组 1 人作为学术带头人主持国家自然科学基金委创新群体项目，2 人获得国家杰出青年基金项目，1 人获得国家优秀青年基金项目。本项目的部分研究结果获得 2013 年度北京市科学技术一等奖（基础研究类）。

客观评价

本项目成果被本领域研究人员大量引用

引文作者来自麻省理工、加利福尼亚大学、大阪大学等著名大学、研究机构，涵盖了美国、英国、法国、德国、日本等 20 余个国家和地区。引文作者包括本领域的著名学者（其中包括 30 位 *IEEE Fellow*），引文中均对本项目研究工作给予了正面评价。代表性评价如下：

- 2006 年,美国 Massachusetts Institute of Technology 大学 Kamal Youcef-Toumi 教授在 ASME JDSMC (2006, vol. 128, pp. 3-13)上发表文章引用【**代表性论文 1**】，认为“*the number of degrees of freedom increases the sophistication of control techniques needed [8]*”（**增多的自由度需要复杂的控制技术**），他列举的 3 个最具代表性的仿生机器鱼系统中，“*Anderson's robotic tuna achieved a maximum velocity of 1.2 ms^{-1} (0.6 BLs^{-1}) (body lengths per second), Kumph's robotic pike achieved a maximum velocity of 0.09 ms^{-1} (0.1 BLs^{-1}), and Yu's carangiform swimmer (我们研制的机器鱼) achieved a maximum velocity 0.32 ms^{-1} (0.8 BLs^{-1}) [8]*”，**我们研制的机器鱼是他列举的最具代表性的系统之一**。2009 年, Kamal Youcef-Toumi 教授在 Experiments in Fluids (2009, vol. 47, pp. 927-939)上再次引用【**代表性论文 1**】，介绍我们的研究工作。
- 2010 年,美国 University of Illinois at Urbana-Champaign 大学的 Douglas L. Jones 教授(*IEEE Fellow*)和美国 Northwestern University 大学的 Chang Liu 教授(*IEEE Fellow*) 在 Review of Scientific Instruments (2010, vol. 81, 015104)上发表的文章中引用【**代表性论文 1**】，认为“*the signal recovery method can be applied to biomimetic studies on autonomous underwater vehicles [22]*”（**将信号恢复方法应用于自治型水下机器人的仿生研究**），其中文献[22]指【**代表性论文 1**】。
- 2016 年, 澳门大学的 Philip Chen 教授（*IEEE Fellow*, *IEEE SMC* 学会前主席, *IEEE TSMC* 现任主编）在 IEEE Transactions on Cybernetics (2016, vol. 46, pp. 9-19)上发表论文，评价【**代表性论文 2**】是一项**重要的**工作，同时我们**最先**考虑了智能体动力学中的不确定性。(In [41] and [42], an **important** adaptive neural approach was proposed for the leader-following control of multiagent systems. In this result, it is **first** to take into account the uncertainty in the agent's dynamics with timevarying and the proposed algorithm for each following agent is only dependent on the information of its neighbor agents. 其中文献 [42]指【**代表性论文 2**】)。
- 2013 年, 德国汉堡大学的 J.Kurths 教授（欧洲科学院院士, 马其顿科学与艺术学院院士）在 IEEE Transactions on Cybernetics (2013, vol. 43, pp. 358-370)上发表论文，评价【**代表性论文 4**】中的结果给出了在噪声影响下，算法可达到一致的充分必要条件，该方法可降低保守性 (Also, the fourth one is to develop sufficient and necessary conditions under stochastic effects [65] to reduce conservativeness [42], [66]. 其中文献[66]指【**代表性论文 4**】)。
- 2011 年, 美国 University of Texas 的 Frank L. Lewis 教授(*IEEE Fellow*, *IFAC Fellow*)对我们提出的方法【**代表性论文 5**】给予了重点介绍，我们的论文标号在该论文的正文中前后出现达 10 次之多，他们直接应用了我们提出的投影方法进行参数矩阵自适应控制律的设计(we employ the projection method for the adaptive law of parameter matrix [18], [25])，在推导过程中也多次直接利用了我们的一些结果，其中文献[25]指【**代表性论文 5**】。

- 2014 年，南非比勒陀利亚大学 X. Xia 教授（南非科学院/工程院两院院士，IEEE Fellow）在 *Neurocomputing* (2014, vol. 143, pp. 80-89) 上发表论文评述完成人**首次**提出了可在有限时间内求解优化问题的神经网络模型（There are also some neural network models for solving optimization problems, which can efficiently deal with time delays [34–38]....In order to deal with the convex optimization problem in finite time, the authors **firstly** presented a recurrent neural network with a continuous function in [39], 其中文献[36]指代【代表性论文 6】，文献[39]指代【代表性论文 6】的后续工作）。

【检索结论】：8 篇代表作 Web of Science 他引 673 次。

2、本项目研究工作通过国家项目的验收并获得好评

本项目组完成的**国家自然科学基金重点项目（No. 60635010）**被评为**优秀（A）**，验收专家组评价“.....研究工作取得突出进展.....”。

本项目组完成的国家 863 计划课题（No. 2001AA422370）顺利通过验收，验收专家组评价我们开发的仿生机器鱼系统“.....性能稳定，易于使用。.....显示了良好的应用前景.....”。

本项目组成员 1 人担任国家自然科学基金委创新群体学术带头人，2 人获得国家杰出青年基金项目，1 人获得国家优秀青年基金项目。本项目相关部分成果获得北京市科学技术一等奖（2013，基础研究类）。

3、本项目受邀参加的国际组织和国家重大活动

项目组成员通过英国皇家学会和德国洪堡基金会评审，获邀开展仿生机器鱼方面的国际合作研究。学生论文获得 IEEE ROBIO, ISABMEC 等仿生机器人领域国际会议的最佳论文奖。项目成员担任 **IEEE 神经网络技术委员会委员**，并在 2006-2009 期间担任该委员会副主席。同时，项目组成员要受邀担任 IEEE TRO, TNNLS, TMech, CIM, TCYB 编委。

仿生机器鱼方面的研究成果作为国家高技术研究的代表性成果之一参加 2005 年“十五”重大科技成就展、2006 年科技成就重大创新展；2007 年，参加在莫斯科举办的“俄罗斯中国年”重大外事活动；2015 年，参加北京大型科普博览—全国科技活动周暨北京科技周开幕以及 2015 世界机器人博览会等多个重要科技展览会，展现了我国在该领域的领先技术和科技实力。

4、本项目研究工作获得国家发明专利授权 30 项并实现成果转化

本项目在仿生机器鱼的机构、智能控制方法等方面申请了多项国家发明专利，目前已授权的国家发明专利 30 项，涉及仿生机器鱼的尾鳍、胸鳍、波动鳍的结构和智能控制方法。3 件专利已转让并实现产业化，该转化成果获 2015 中科院科技成果转化二等奖，服务国家海洋战略。

代表性论文专著目录

序号	论文专著 名称/刊名 /作者	影响因子	年卷页码 (xx年 xx卷 xx页)	发表时间 年月日
1	Development of a biomimetic robotic fish and its control algorithm/IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part B: Cybernetics/Junzhi Yu, Min Tan, Shuo Wang, Erkui Chen	4.943	2004 Vol. 34 No. 4 pp. 1798-1810	2004.08.01
2	Neural-network-based adaptive leader-following control for multiagent systems with uncertainties/IEEE Transactions on Neural Networks/Long Cheng, Zeng-Guang Hou, Min Tan, Yingzi Lin, W.J. Zhang	4.854	2010 Vol. 21 No. 8 pp. 1351-1358	2010.08.01
3	Adaptive control of a class of nonlinear pure-feedback systems using fuzzy backstepping approach/IEEE Transactions on Fuzzy Systems/Anmin Zou, Zeng-Guang Hou, Min Tan	6.701	2008 Vol. 16 No. 4 pp. 886-897	2008.08.01
4	Necessary and sufficient conditions for consensus of double-integrator multi-agent systems with measurement noises/IEEE Transactions on Automatic Control/Long Cheng, Zeng-Guang Hou, Min Tan, Xu Wang	2.777	2011 Vol. 56 No. 8 pp. 1958-1863	2011.08.01
5	Decentralized robust adaptive control for the multiagent system consensus problem using neural networks/ IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part B: Cybernetics / Zeng-Guang Hou, Long Cheng, Min Tan	4.943	2009 Vol. 39 No. 3 pp. 636-647	2009.06.01
6	A neutral-type delayed projection neural network for solving nonlinear variational inequalities/IEEE Transactions on Circuits and Systems/Long Cheng, Zeng-Guang Hou, Min Tan	1.136	2008 Vol. 55 No. 8 pp. 806-810	2008.08.01
7	A simplified propulsive model of bio-mimetic robot fish and its realization/Robotica/Junzhi Yu, Shuo Wang, Min Tan	0.824	2005 Vol. 23 pp.101-107	2005.02.01
8	On a bio-inspired amphibious robot capable of multimodal motion/IEEE-ASME Transactions on Mechatronics/Junzhi Yu, Rui Ding, Qinghuai Yang, Min Tan, Weibing Wang	3.851	2012 Vol. 17 No. 5 pp. 847-856	2012.10.01

主要完成人情况

六、主要完成人情况表

完成人：谭民； 排名：1； 行政职务：无； 技术职称： 研究员； 工作单位：中国科学院自动化研究所； 完成单位：中国科学院自动化研究所； 对本项目贡献：项目负责人，是四个发现点的提出者，【代表性论文 1-8】的作者，在发现点 1 中提出了“基波”概念和模仿鱼类推进的控制算法、在发现点 2 中构建了仿生机器鱼高机动运动智能控制方法体系框架，在发现点 3 中提出了仿生机器鱼机构的优化方法，在发现点 4 中设计并提出了多仿生机器鱼协作框架。

完成人：侯增广； 排名：2； 行政职务：国重副主任； 技术职称： 研究员； 工作单位：中国科学院自动化研究所； 完成单位：中国科学院自动化研究所； 对本项目贡献：项目主要完成人，是四个发现点的提出者，【代表性论文 2、3、4、5、6】的作者，在发现点 3 中提出了仿生机器鱼基于神经网络的系统优化方法，在发现点 4 中提出了多仿生机器鱼系统协作控制器设计方法。

完成人：喻俊志； 排名：3； 行政职务：无； 技术职称： 研究员； 工作单位：中国科学院自动化研究所； 完成单位：中国科学院自动化研究所； 对本项目贡献：项目主要完成人，是【代表性论文 1、7、8】的作者，在发现点 1 中提出了鱼体波模型和机器人的推进控制方法，在发现点 2 中提出了转弯、俯仰等仿生机器鱼高机动运动智能控制方法，在发现点 3 中提出了仿生机器鱼机构的优化指标。

完成人：程龙； 排名：4； 行政职务：无； 技术职称： 研究员； 工作单位：中国科学院自动化研究所； 完成单位：中国科学院自动化研究所； 对本项目贡献：项目主要完成人，是【代表性论文 2，4，5，6】的作者。在发现点 2 中提出了仿生机器鱼高机动运动智能控制方法，在发现点 3 中提出了仿生机器鱼基于神经网络的系统优化方法，在发现点 4 中提出了多仿生机器人协作控制器设计方法。

完成人：王硕； 排名：5； 行政职务：无； 技术职称： 研究员； 工作单位：中国科学院自动化研究所； 完成单位：中国科学院自动化研究所； 对本项目贡献：项目主要完成人，是【代表性论文 1、7】的作者，在发现点 1 中提出了鱼体波模型参数调整与推进控制方法、在发现点 2 中提出了定深、倒游等仿生机器鱼高机动运动智能控制方法。

完成人合作关系说明

一、合作基础

- 本项目五位完成人均在中国科学院自动化研究所先进机器人课题组从事科研工作，具有坚实的合作基础。
- 1991.03，谭民研究员在疏松桂研究员指导下在中国科学院自动化研究所获得博士学位。博士毕业后留在中国科学院自动化研究所工作至今。
- 1999.08，侯增广研究员从中国科学院系统科学研究所系统控制实验室博士后出站进入中国科学院自动化研究所工作至今。
- 1998.09-2001.06，王硕研究员在谭民研究员指导下在中国科学院自动化研究所攻读博士学位。博士毕业后王硕研究员留在中国科学院自动化研究所工作至今。
- 2001.09-2004.03，喻俊志研究员在谭民研究员指导下在中国科学院自动化研究所攻读博士学位。2006.05，喻俊志研究员从北京大学博士后出站进入中国科学院自动化研究所工作至今。
- 2004.09-2009.07，程龙研究员在侯增广研究员指导下在中国科学院自动化研究所攻读博士学位。博士毕业后程龙研究员留在中国科学院自动化研究所工作至今。

本项目的五位完成人之间存在非常密切的师生关系，目前均在同一个课题组内工作，相互合作，协同攻关，共同完成本项目。

二、合作成果

本项目的五位完成人之间存在非常密切的合作关系。项目完成人通过共同完成基础研究项目（例如基金委重点项目“水下移动传感器网络的关键技术研究”（60635010）），联合培养研究生等多种方式开展实质性合作，取得了丰硕成果。

8篇代表性论文全部由项目完成人合作完成。喻俊志研究员、王硕研究员和谭民研究员合作完成代表性论文 1、7；喻俊志研究员和谭民研究员合作完成代表性论文 8；程龙研究员、侯增广研究员和谭民研究员合作完成代表性论文 2、4、5、6；侯增广研究员和谭民研究员合作完成代表性论文 3。

五位完成人共同荣获 2013 年度北京市科学技术一等奖“仿生机器鱼高效与高机动控制的理论与方法”。

国家自然科学基金 知情同意说明

项目名称	仿生机器鱼高效与高机动控制的理论与方法	
候选人	谭民 侯增广 喻俊志 程龙 王硕	
<p>声明: 本项目参加 2017 年度国家自然科学基金评审, 我作代表作 3 的第一作者, 知悉此事, 同意使用该论文报奖, 本人不作为候选人报奖。</p>		
提交的代表性论文不是候选人情况		知情同意签名
代表性论文	非候选人	
Adaptive control of a class of nonlinear pure-feedback systems using fuzzy backstepping approach	Anmin Zou	 2017.1.10