



海洋仿生机器人领域 规划与研究态势分析

陈芳* 李东巧 韩涛 王溯

中国科学院文献情报中心 北京 100190

*通信作者 E-mail: chenfang@mail.las.ac.cn

[摘要] 海洋仿生机器人是通过研究某些海洋生物的构造原理和机能并在工程技术上加以模仿后得到的仿生机器人。美国麻省理工学院仿金枪鱼结构成功研制了世界上第一条真正意义上的机械鱼。此后各国纷纷效仿,制定了一些相关的水下机器人或者机器鱼的相关规划,设立了一些项目以支持该领域的发展。该文调研了国内外海洋仿生机器人的发展现状、各主要国家的规划和支持项目,并对该领域的资助金额进行了分析。通过文献计量学方法对全球海洋仿生机器人的研究文献进行了分析,并对支持项目和产出文献进行了关联分析。最后对该领域的主要研究案例进行了汇总。该文通过全景分析为中国海洋仿生机器人领域的发展提供借鉴。

[关键词] 海洋仿生 仿生机器人 机器鱼 基金规划

DOI: 10.15978/j.cnki.1673-5668.201806002

1 引言

生物在自然界经过了亿万年的进化与筛选,每种生物都有其独特的适应环境的能力与适应环境的结构。仿生学作为一门独立学科于1960年由美国的J. E. Steele首先提出^[1],1963年我国将“Bionics”译为“仿生学”,主要指模仿生物建造技术装置的科学,主要研究生物体结构、功能和工作原理,并将这些原理移植于工程技术之中,用来发明性能优越的仪器、装置,创造新技术。

海洋仿生学通过研究某些海洋生物的构造原理和机能及工程技术上的模仿实现实际应用。近10年来,某些海洋动物的行为和生理机能引起广泛关注,如海军和航

海部门对鲸类的游泳速度和效率很感兴趣,他们希望通过对鲸类体形的研究改进船舶、舰艇和水下机器的设计。

2 海洋仿生机器人的发展现状

2.1 美国

美国在“海洋仿生”领域的前沿研究非常活跃。1994年美国麻省理工学院仿金枪鱼结构成功研制了世界上第一条真正意义上的机械鱼“Robotuna”,开启了水下仿生机器人研制的先河。Robotuna有40根肋骨、肌腱以及带有椎骨的节状脊椎,全身零部件数量高达2 843个。这种鱼形机器人可以容易地潜入传统潜水艇无法进



人的水域。大批量的机械鱼可用来探测水底物体并进行环境污染监测或生态研究^[2]。

位于美国东北部的美国海军海洋学中心成功研制了机器龙虾。该机器龙虾的外形酷似真龙虾，长着能够感知障碍物的触须，能游泳、爬行且非常灵活，8条腿允许它们朝着任意一个方向移动，爪子和尾巴则帮助它们在湍急的水流以及其他环境中保持身体的稳定性。

2011年，美国弗吉尼亚大学研制的仿生蝠鲼质量为55.3 g，该仿生蝠鲼的鳍条采用人工肌肉产生驱动力，水池游动试验测定其速度可达0.4 cm/s^[3]。此外，美国哈佛大学也进行了柔性驱动的相关研究，并研制了利用柔性胸鳍进行推动的水下机器鱼^[4]。

2012年，美国弗吉尼亚理工学院研制出机器人水母“Cyro”。它是一台中性浮力机器人，宽1.7 m，重177 kg，它能够保持水母物种的外型特征和运动学特性，可独立在水中游动，同时可收集、存储、分析和传达敏感数据，用于自动检测海洋环境，监视、绘制海底地图或其他工作^[1]。有6条腿类似螃蟹的机器人是美国最近研制的新型扫雷机器蟹，该机器人已经在美国海军作战中心进行了演示，分别在陆地和浅水中模拟了扫雷任务，实验取得了成功^[5]。

2.2 日本

日本是一个海洋性国家，鉴于海洋仿生技术的重要潜在应用价值，日本开展了大量仿生机器鱼的研究。

1999年，日本名古屋大学的福田敏男教授等研制出采用压电陶瓷（PZT）驱动的微型双鳍鱼形机器人^[6]。它的长度是50 mm，整个身体是放大机构，PZT位移量的放大比率为326倍。一年后，福田敏男教授等人还研制出采用PZT驱动的两自由度微机器人^[7]，以及研制了形状记忆合金（SMA）驱动的身体波动式微型机器鱼^[8]。

日本东京工业大学于2004年发明了一种蛇形机器人^[9]。它由3节组成，长1.2 m，重25 kg。遇到障碍物时，它可以扭动身体躲开或越过，头部的数码相机可捕捉前方各种画面。

日本的郭书祥等人分别在2007年和2010年研制出导电离子聚合物材料驱动的微型机器鱼^[10]和仿生水母^[11]。

其功能是负责监视桥梁安全同时跟踪鱼群生计状况。据悉，这条眼睛凸出的机械鱼由罗美工程公司研制，外形酷似日本传说中长着虎头鱼身的金虎鱼。

2.3 欧盟

欧盟国家也在积极从事海洋仿生机器人的研究工作。欧盟第七框架计划（7th Framework Programme, FP7）中，有一个著名的专门针对水下仿生鱼类研究的子计划，即FILOSE (Robotic Fish Locomotion and Sensing)。在类似计划的支持下，欧盟产生了不少关于海洋机器人的研究成果。

德国不莱梅弗劳恩霍夫与德国DFKI人工智能研究中心于2009年合作开发带有灵敏触觉的仿章鱼水下机器人。这种仿章鱼机器人配备了应变仪，能在遇到障碍物时产生电阻变化，应变仪被印在机器人身上，宽10 μm，约为人体头发直径的一半，由雾化粒子构成，极其敏感。

2008年汉诺威工业展览会上德国费斯托工程公司展示了其所研发的机器水母。机器水母的球形身体是用激光烧结制成的密封舱，它长着8根触须，连着柔性的表面，表面分成2个腔，可分别调整压力使整个触须向某个方向弯曲^[12]。

英国埃塞克斯大学（Essex）于2005年研制的机器鱼外形完全按照生物鱼的原型设计，运动方式也像鱼类一样依靠胸鳍和尾鳍的摆动完成直线运动和转向^[13]。

2.4 中国

水下仿生机器人目前已经成为我国水下仪器调控一体化的最高端控制系统，在军事行动、水下研究等方面发挥着重要作用，具有很好的发展前景。中国开展水下仿生机器人研究的主要机构有北京航空航天大学、中国科学院自动化研究所、中国科学院沈阳自动化研究所、国防科技大学以及哈尔滨工程大学等。

北京航空航天大学2004年研制的“SPC-II”仿生机器鱼，身长1.21 m，最高时速可达1.5 m/s，能够在水下连续工作2~3 h^[14]。2011年，北京航空航天大学机器人研究所又研发了仿生牛鼻鲼样机。

中科院自动化所研制了尾鳍推进和波动鳍推进的仿

生机器鱼，其最新研制的仿海豚机器鱼灵活性强，能实现快速小半径转弯^[15]。另外，中国科学院沈阳自动化研究所的蛇型机器人^[16]具有较高环境适应能力。其身長1.44 m，体重3 kg，行走速度最快可达0.4 m/s，头部装有微型摄像机，可实时采集现场图像并用无线传输发回监控台。

国防科技大学2009年采用多直鳍条方式，研制了水下仿生机器人“Cownose ray I”，长0.3 m，展宽0.5 m，质量1 kg，实现了0.13 m/s的前进速度和0.15 m/s的后退速度^[17]。

哈尔滨工程大学机电工程学院的研究人员研制了一种两栖仿生机器蟹。仿生蟹能够按照双四足步态在平坦的地面上实现前进、后退、横行、左右转弯等动作；在水中运动时，需将机器蟹整体放入根据其外形定制的柔性皮套内，即采用整体包裹的防水方式^[18]。

3 方法及数据来源

该论文通过一方面收集资助项目和基金数据分析全球的资助情况，另一方面通过采集文献，分析其资金与产出论文的情况。

在资助项目和基金数据方面，通过两个途径进行数据的检索和采集，其一，通过各国的主要的基金计划的网站进行收集，由于各个国家的情况略有不同，所以在采集的时候未必完整；其二，通过中国科学院文献情报中心战略研究信息集成服务平台中的资助项目数据库。通过检索式¹，采集了该领域的主要国家公开的主要的资助项目信息，筛选后共采集海洋仿生相关的项目4 100余条，主要涉及的国家有美国、中国、加拿大、英国、德国等。

在基础研究论文方面，通过检索式²在*Web of Science*

数据库中检索海洋仿生相关的论文，并提取其中的基金数据分析，共计检索到了4 329篇论文（时间跨度1976–2017年），其中涉及到的基金信息的条目有1 215条，对这部分数据进行分析。

所采用的主要分析工具为科睿唯安的数据分析工具DDA (Derwent Data Analyzer) 和VOSviewer，采集时间：资助项目和基金数据在2016年12月份完成，WOS数据在2017年5月份。

4 海洋仿生机器人领域的基金项目分析

4.1 资助项目的国家分布

海洋仿生机器人领域世界主要国家资助项目数量见图1，从中可以看出，排名前5位的国家分别是美国、中国、加拿大、英国和德国。其中美国是海洋仿生机器人领域资助数量最多的国家，共资助3 118项，约是中国在该领域资助数量的8.5倍。

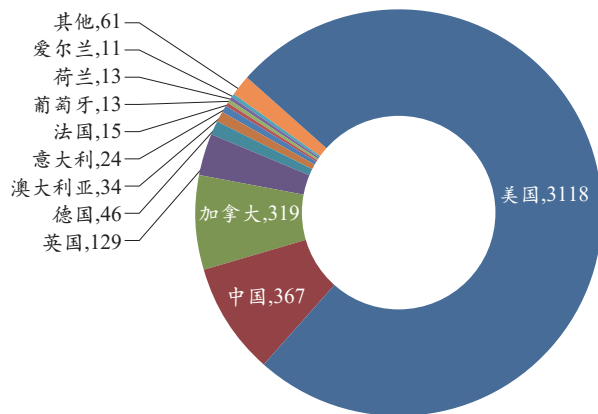


图1 海洋仿生领域主要国家资助项目数量情况

¹ ((Bionic* or biomimetic*) near (ocean* or marine* or underwater* or submarine* or sea or undersea* or (glider* or vehicle*) near (underwater* or undersea*)) or (Bionic* or biomimetic* or robot*) and (turtle* or lobster* or crawfish* or crab* or fish)) 检索时间2016年12月份；受到该数据库更新时间影响，目前采集的最新数据到2016年3月份；各个国家主要采集的资助来源有所不同，主要限定在国家级资助项目，地方项目不在采集之列。

² TS=((Bionic* or biomimetic*) AND (ocean* or marine* or underwater* or submarine* or sea or undersea* or turtle* or lobster* or Dolphin* or crawfish* or crab* or boxfish or fish or Eel or eels or Cyro or Tuna or Tunas or Jellyfish or (glider* or vehicle*) and (underwater* or undersea*))) or (Bionic* or biomimetic*) and ((robot* or glider* or vehicle* or sensory* or algorithm*) and (turtle* or lobster* or Dolphin* or crawfish* or Cyro or eels or Tuna or Tunas or Jellyfish or Eel or crab* or "marine animal*" or "ocean animal*" or "sea animal*" or boxfish or fish and (Bionic* or biomimetic*))) 检索时间2017年5月份。



对所收集到的基金项目的金额进行加和计算, 可得到海洋仿生机器人领域各国资助金额情况, 见表1。从资助金额来看, 排名前5位的国家分别是美国、中国、加拿大、英国和德国, 资助金额分别是115 576万美元、13 375万人民币元、2 071万加元、9 460万欧元、8 362万美元, 说明美国在该领域的投入远超过其他国家。

表1 主要国家资助金额

序号	国家	资助金额/万	单位
1	美国	115577	USD
2	中国	13375	RMB
3	加拿大	2071	CAD
4	英国	9460	EUR
5	德国	8362	EUR
6	澳大利亚	1718	USD
7	意大利	6046	EUR
8	法国	1803	EUR
9	荷兰	1437	EUR
10	葡萄牙	1542	EUR
11	爱尔兰	1521	EUR
12	日本	2881	JPY

4.2 资助项目的年代分布

海洋仿生机器人领域资助项目的年代分布见图2。最早的资助项目出现在1974年, 1996年之前每年的资助数量均不足50项, 1987和1988年除外; 从1997年开始,

资助数量逐年上升, 2009年达303项, 约是1997年的6倍。2010年下降至239项后2011年反弹升至291项, 2012年以来资助数量有所下降。

4.3 资助机构分布

海洋仿生机器人领域资助机构的分布情况如表2所示。从全球资助机构的分布来看, 资助机构主要分布在美国, 机构数量是4个, 分别是美国国立卫生研究院、国家自然科学基金会、美国国防部的种子基金SBIR/STTR和美国能源部, 资助项数分别是2 144、744、54和28项, 其中美国国立卫生研究院的资助金额高达56 619万美元。中国国家自然科学基金委员会以288项排名资助数量第3位。

4.4 受资助机构分布

海洋仿生机器人领域国外受资助机构的分布情况如表3所示。获得资助项目数量排名前10位的机构均分布在美国, 其中斯坦福大学以88项位列资助项目数量第一位, 南加州大学以6 143万美元居项目资助金额首位。

海洋仿生机器人领域国内受资助机构的分布情况如表4所示。其中, 浙江大学在项目数量和资助金额上均遥遥领先。中国科学院自动化研究所、华南理工大学和南京大学并列项目数量第10位。中国在该领域的主要资助机构为国家自然科学基金委员会。

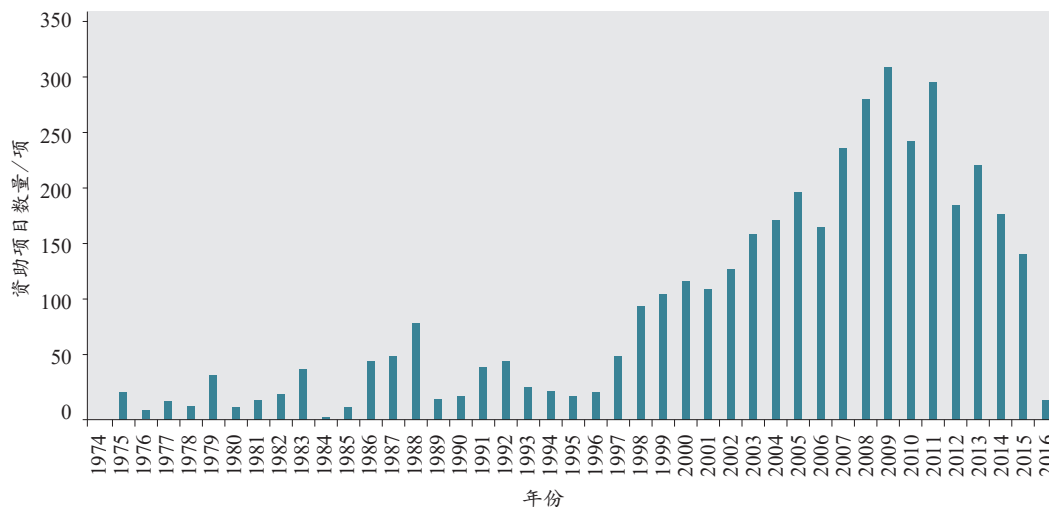


图2 资助项目数量的年度变化 (2016年数据滞后)



表2 资助数量排名前10位的资助机构

序号	资助机构	资助项数	资助金额/万	核算货币(近似)	国家
1	美国国立卫生研究院(NIH)	2144	56619	USD	美国
2	美国国家自然科学基金委员会(NSF)	744	39594	USD	美国
3	中国国家自然科学基金委员会(NSFC)	288	13373	RMB	中国
4	加拿大自然科学与工程技术研究理事会(NSERC)	195	1188	USD	加拿大
5	欧洲共同体及其协议国框架方案(FP)	194	35966	EUR	欧州
6	美国国防部的种子基金(SBIR/STTR)	54	6078	USD	美国
7	生物技术和生物科学研究理事会(BBSRC)	34	1395	USD	英国
8	澳大利亚国家健康与医学研究委员会(NHMRC)	28	1718	USD	澳大利亚
9	美国能源部(DOE)	28	14333	USD	美国
10	英国工程和自然科学研究委员会(EPSC)	15	2962	EUR	英国

表3 受资助项目数量排名前10的国外机构

序号	受资助机构	项目数	资助金额/万美元	国家
1	斯坦福大学	88	1354	美国
2	麻省理工学院	65	2165	美国
3	西北大学	64	5422	美国
4	明尼苏达大学	61	4464	美国
5	南加利福尼亚大学	57	6143	美国
6	凯斯西储大学	55	1594	美国
7	威斯康星大学	54	1581	美国
8	加利福尼亚大学旧金山分校	51	480	美国
9	密歇根大学	51	1051	美国
10	约翰斯·霍普金斯大学	49	1194	美国

表4 受资助项目数量排名前10的国内机构

序号	受资助机构	项目数	资助金额/万人民币	资助机构
1	浙江大学	22	1265	基金委
2	南京航空航天大学	15	533	基金委
3	吉林大学	13	614	基金委
4	华中科技大学	12	383	基金委
5	上海交通大学	11	336	基金委
6	清华大学	10	500	基金委
7	北京航空航天大学	10	289	基金委
8	中国科学技术大学	9	461	基金委
9	西北工业大学	9	404	基金委
10	中国科学院自动化研究所	8	552	基金委
10	华南理工大学	8	200	基金委
10	南京大学	8	448	基金委



5 海洋仿生机器人领域的基础研究态势分析

5.1 海洋仿生机器人领域的基础研究总体趋势

海洋仿生机器人领域论文年代分布见图3，有基金资助的论文最早发表于2001年，比无基金记录的论文晚了30年。无基金记录的论文自1990年以来逐年上升，2015年超过500篇。2006年后有基金资助的论文数量明显增多，并且快速增长，至2016年论文发表数量接近200篇，基本接近无基金资助的论文发表数量（SCI论文的基金标引受到数据库加工程度的影响，近年来的标引

比较完善，早期论文很多没有标注）。

海洋仿生机器人领域论文量的国家分布见图4。由图中可以看出论文量排名前18位的国家均有基金资助，居前10位的国家分别是美国、中国、日本、韩国、意大利、英国、西班牙、德国、新加坡和法国。其中美国是海洋仿生领域发表论文数量最多的国家，中国在该领域的发文总量虽然没有美国多，但是基金论文的数量高于美国，说明中国在该领域的研究论文的标注信息比较完整，也表明近年来中国加大了对该领域的资助。

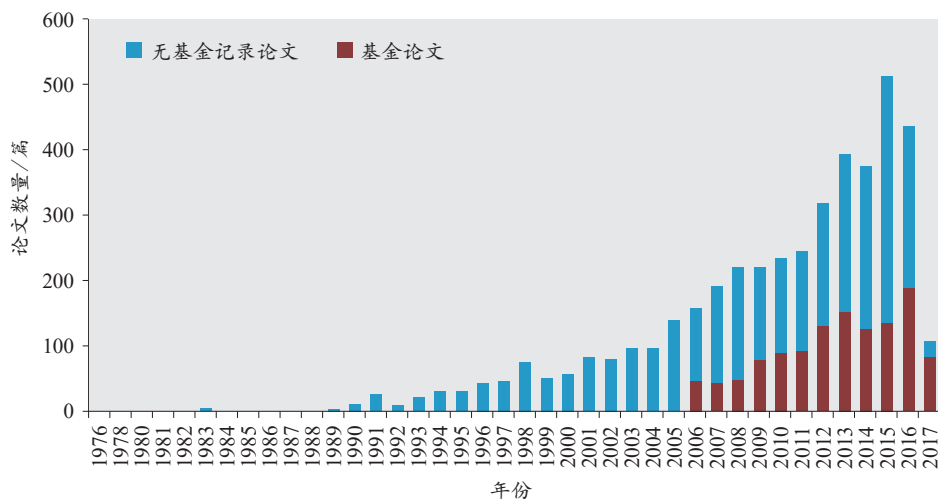


图3 基础研究论文的年度数量变化

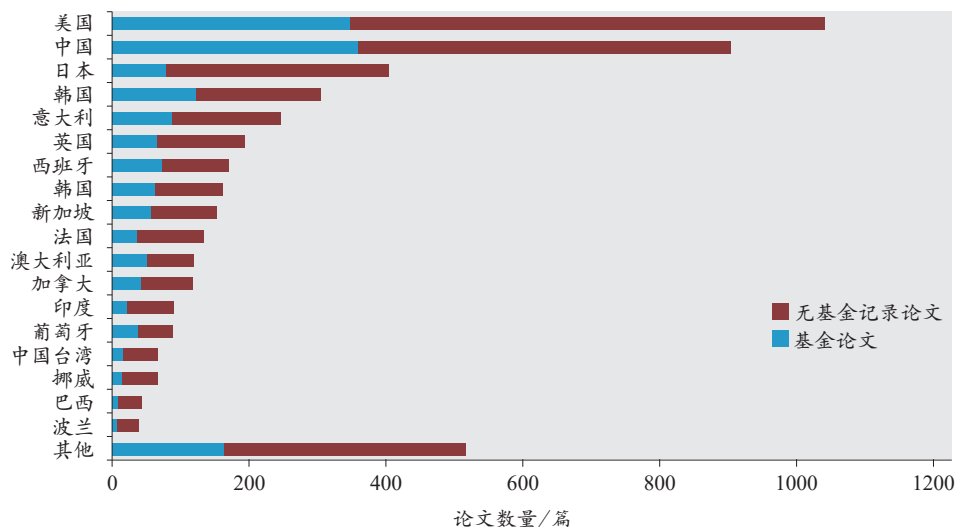


图4 海洋仿生领域论文国家/地区分布 (基金信息受到数据库标引的影响)



5.2 文献资助信息分析

海洋仿生领域主要机构/计划资助论文情况如表5所示。中国国家自然科学基金委员会、美国国家自然科学基金委员会、美国海军研究办公室、欧洲联盟委员会（FP7 框架计划）、北京自然科学基金会、中国863计划、韩国国家基金会、中国973计划、美国国家航空航天局、美国国家海洋大气局等机构/计划资助下产出的论文量居全球前10位。

从所有的资助信息中进一步筛选涉及防务类的基金，整理成表6。从表中可以看出防务类基金论文数量排名前10位的资助机构基本都来自美国，分别是美国海军研究办公室（ONR）、美国国家航空航天局（NASA）、美国陆军研究办公室（Army Research Office）、美国国家防卫科技工程院（NDSEG）、美国国防部（Department of Defense）等。其中美国海军研究办公室资助论文数量最多，共110篇。

表5 海洋仿生领域主要机构/计划资助论文情况

序号	资助机构	资助论文数量/篇
1	中国国家自然科学基金委员会 (NSFC)	231
2	美国国家自然科学基金委员会 (NSF)	178
3	美国海军研究办公室 (ONR)	110
4	欧洲共同体及其协议国框架第七方案 (FP7)	93
5	北京市自然科学基金	38
6	中国国家863计划	33
7	韩国国家研究基金会 (NRF)	29
8	中国国家973计划	27
9	美国国家航空航天局 (NASA)	25
10	美国海洋暨大气总署 (NOAA)	22
11	加拿大自然科学与工程研究理事会 (NSERC)	19
12	中国博士后科学基金	15
13	中国中央高校基本科研专项资金	15
14	澳大利亚研究委员会 (ARC)	14
15	葡萄牙科学技术基金会 (FCT)	10

表6 海洋仿生领域主要资助机构/计划资助防务类论文情况

序号	资助机构	资助论文数量/篇
1	美国海军研究办公室 (ONR)	110
2	美国国家航空航天局 (NASA)	25
3	美国陆军研究办公室 (ARO)	5
4	美国国防科学与工程研究生基金 (NDSEG)	4
5	美国国防部基金 (Department of Defense)	3
6	中国科学院国防科技创新基金	3
7	韩国国防科学研究所 (Agency for Defense Development, Korea)	2
8	美国国防采办计划管理局 (Defense Acquisition Program Administration)	2
9	空军科学研究局 (AFOSR)	2
10	美国国防采购计划管理中心水下航行器研究中心 (Underwater Vehicle Research Center of Defense Acquisition Program Administration)	2

6 海洋仿生机器人研究论文的热点研究方向

6.1 热点主题聚类分析

为了进一步揭示该领域的整体研究主题分布，分析该领域的研究热点、研究方向等的布局情况，采用文本聚类的方法对所检索的SCI论文进行聚类分析，聚类结果见图5。进一步通过人工判读和文本分析，对具体的研究主题/研究方向进行总结，见表7。

从图5可以看出，通过计算不同主题的文本共现关联性，机器将该领域的文本主题自动聚类成7个簇。其中，处于聚类中间位置的两大类主题为：（1）以 locomotion、fin、motion、actuators 等主题词为代表，主要是关于运动机理及其机构实现的相关主题（红色部分）；（2）以 underwater robot、navigation、system、mobile robot 等主题词为代表，主要与水下系统及其技术相关（绿色）。其他主题包括：以 behavior、motion model 等为代表的关于形态与行为的簇（蓝色），以 neural network、machine learning、calibration、algorithm 等为代表的关于算法、控制的智能技术主题簇（紫色），以及 microrobot、microactuator、amphibious robot 等聚成的簇（黄色）。

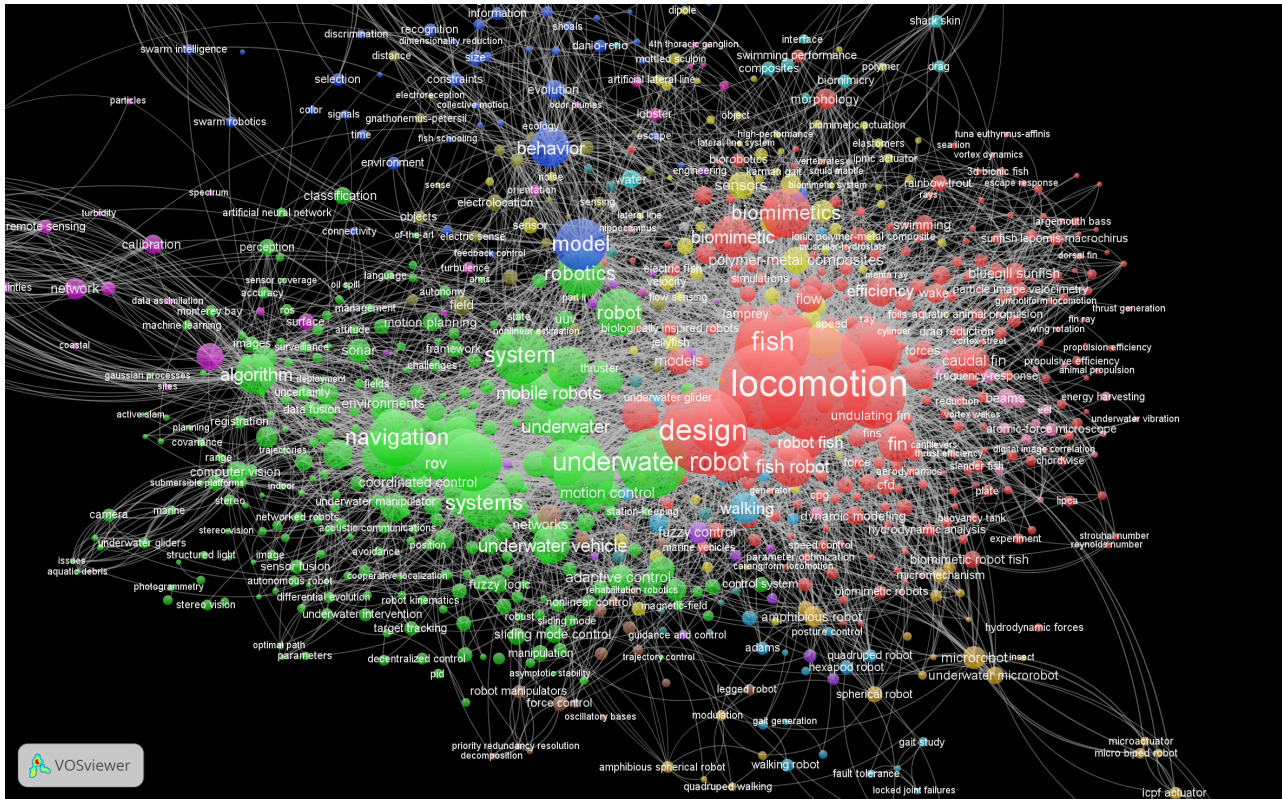


图5 海洋仿生领域论文的主题聚类图

注：气泡代表文本主题，连线代表其相关性，不同颜色代表不同的聚类簇。

6.2 热点主题分布

整体而言，通过机器自动聚类形成的主题簇揭示了该领域的研究主题分布。基于此，进一步通过人工对主题词进行筛选分类，生成研究主题的详细分类，如表7。该表将主题词分为了7大类（与机器聚类有所区别）。从词频的分布来看，总体主题词类的词频最高，主要是关于机器鱼、仿生的主题词，由于该类主题虽然词频很高但不能揭示该领域的具体研究方向，因此分在总体类；第2类，运动机理及其机构实现类，该类主题包括locomotion、fin、motion、actuators等，与机器聚类效果相比较为温和，词频变化跨度较大一些，代表着该领域的主流研究方向；第3类，海洋仿生形态与行为类，这类主题从词频上看明显低于第2类，但在机器聚类中也较为明显，说明该类主题是该领域研究的重要方向；第4类，仿生感知技术类，该类主要包括sensors、optimization、vision system等，也出现在机器聚类中，

也是该领域的重要研究方向，报道较多；第5类，仿生智能技术类，包括target tracking、neural network、algorithm等，是该领域研究较多的方向，其中有一些词，比如machine learning是较新的词，可能代表着新的研究方向；第6类，仿生材料主题，这类的主题在该领域词频较低，在机器聚类中也不明显，说明在该领域中这个方向的研究较少，属非热门主题；第7类，仿生物种主题，这个主题类是人工分类的，在机器聚类中并没有聚成一类，非常分散。其中，只有机器鱼(fish)是较高词频，并且在机器聚类中有很好的体现，其他的物种词频较低，说明研究开展得较少，也没有形成突出的研究方向。

6.3 研究机构与研究热点的对比分析

通过上述的主题聚类，进一步与主要的研究机构进行交叉分析，可以看出各个研究机构的研究偏好和布局情况(图7)。从主题分布来看，中科院自动化所



表7 海洋仿生领域热点主题分布

主题词	词频	主题词	词频
一、总体主题词			
robotic fish	461	biomimetics	205
underwater robot	342	marine bionics	104
underwater vehicles	303	amphibious robot	39
robotic system	257	soft robotics	19
二、运动机理及其机构实现			
locomotion	384	motion	83
fin	197	actuators	78
propulsion	142	kinematics	71
robot navigation	120	manipulator	68
hydrodynamics	116	central pattern generator	40
dynamic modeling	107	CFD	38
三、海洋仿生形态与行为			
behavior	59	fish swimming	20
motion	52	motion planning	15
walking	40	architecture	10
path planning	39		
四、仿生感知技术			
underwater localization	98	kalman filter	32
vision system	64	sensor fusion	11
optimization	53	acoustic sensor	4
sensors	44	piezoelectric actuators	4
五、仿生智能技术			
target tracking	74	genetic algorithm	27
neural network	68	swarm intelligence	21
simultaneous localization and mapping (slam)	37	visual tracking	9
六、仿生材料主题			
polymer-metal composites	38	biomaterials	20
artificial muscles	37	nanocomposites	5
ionic polymer-metal composite	34	fiber-composite	4
shape memory alloy	27		
七、仿生物种类主题			
fish	713	turtle	16
sunfish	30	jellyfish	15
crabster	11	lobster	8

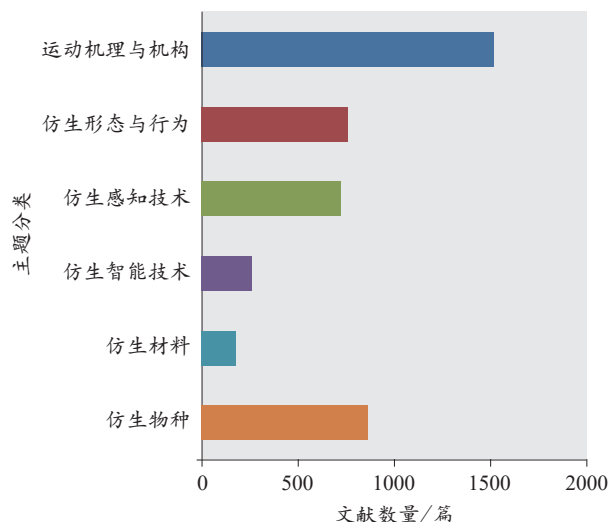


图6 海洋仿生领域热点主题发文情况

(含沈阳自动化所)在运动机理与机构、仿生形态与行为、感知技术、仿生智能等领域都有较为明显的优势,但基本没有涉及仿生材料的研究报道。麻省理工学院在各个领域比较均衡。北京大学与中科院自动化所的表现类似,在前四类主题中的研究较多,没有涉及仿生材料。哈尔滨工程大学在仿生形态与行为主题方向相对报道较多,有一定优势。南洋科技大学在运动机理与机构主题方向有较为明显的优势。密歇根大学在仿生感知技术与仿生材料方向明显比其他机构有优势。在涉及物种的研究机构中,除了中科院自动化所外,其他报道较多的依次是北京大学、纽约大学、北京航空航天大学 and 密歇根大学。

6.4 研究机构与研究热点的聚类分析

将该领域的所有机构根据其合作情况进行聚类,展示如图8。从图中可以看出,处于中央大陆区域的主要包括以中国科学院、麻省理工学院、意大利研究理事会等机构为核心形成的合作岛链,并且相互串在一起,说明这些机构之间有着较好的合作关系,在研究内容上也有较多的相关性。其他的比如哈尔滨工程大学与北京理工大学、东京理工大学之间有少量的合作,韩国高等科技研究院与韩国机器机械与材料研究所具有较强的合作关系。



序号	机构	运动机理与机构类主题	仿生形态与行为类主题	仿生感知技术类主题	仿生智能技术类主题	仿生材料类主题	仿生物种类主题
1	中国科学院自动化研究所	70	43	25	11		62
	中国科学院沈阳自动化研究所	13	8	3	2	1	2
2	麻省理工学院	26	9	11	2	2	10
3	北京大学	31	16	16	4		30
4	哈尔滨工程大学	22	17	11	7	4	7
5	南洋理工大学	34	12	10	5		17
6	密歇根大学	30	6	19	1	14	22
7	纽约大学	25	20	11	3	8	28
8	新加坡国立大学	31	15	5	2		10
9	香川大学	35	17	8	2	8	10
10	北京航空航天大学	30	11	7		3	25
11	哈尔滨工业大学	22	13	4	2	4	15
12	中国国防科技大学	30	10	2	4		18
13	赫罗纳大学	6	3	9			
14	东京大学	6	1	1	2	1	3
15	加拿大麦吉尔大学	3		4	1		
16	台湾大学	13	7	4	6		7
17	北京理工大学	14	7	5	1	4	12
18	佐治亚理工大学	10	2	4	2	6	10
19	韩国建国大学	17	2	2		3	18
20	日本九州工业大学	14		2	1		

图7 主要研究机构的研究布局

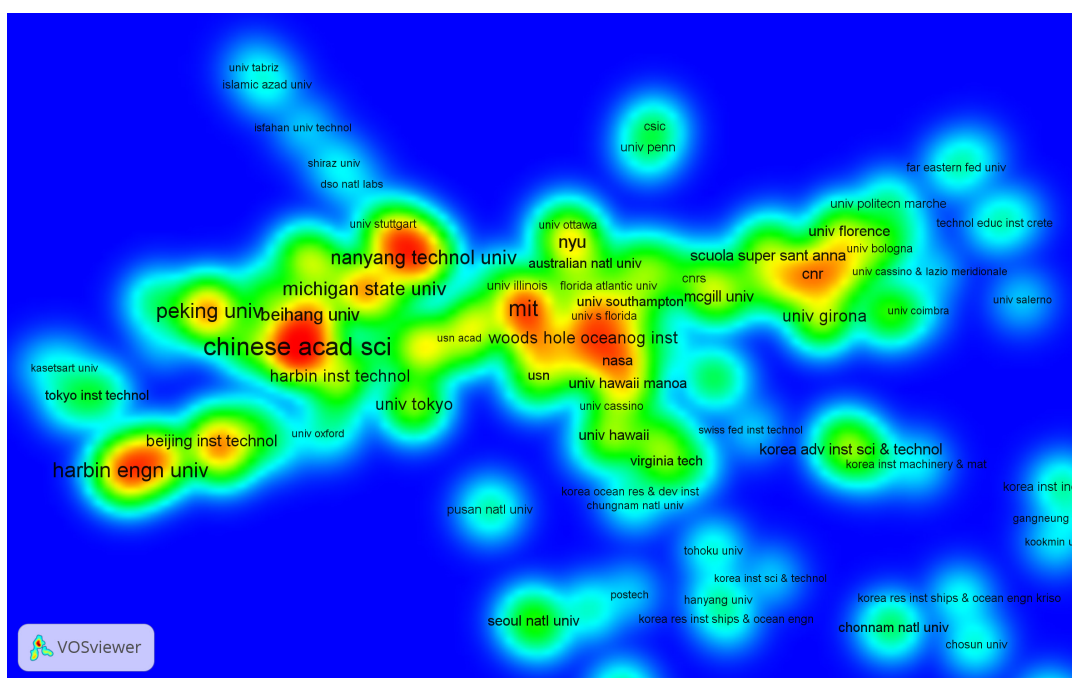


图8 海洋仿生领域机构的合作聚类地图



7 结论与展望

目前,随着生物结构和功能逐渐被认知和掌握,仿生机器人技术已逐渐应用于军事、生产生活、康复医疗等诸多领域。仿生机器人研究的前提是对生物本质的深刻认识以及对现有科学技术的充分掌握,研究涉及多学科的交叉融合,其发展趋势应该是将现代机构学和机器人学的新理论、新方法与复杂的生物特性相结合,实现结构仿生、材料仿生、功能仿生、控制仿生和群体仿生的统一,以达到与生物更加近似的性能,适应复杂多变的环境,最终实现宏观和微观相结合的仿生机器人系统,从而实现广阔的应用。

(1) 仿生机理研究由宏观向微观发展

认识生物原型的特性是仿生学的前提。随着生物学、化学、物理学、机械学等多学科在仿生机理研究上的应用,仿生机理研究将跨越宏观、微观乃至纳观尺度的多层次结构和功能,由表及里逐渐深入,通过建立更为逼真的数学模型,为仿生机器人的设计提供理论基础。

(2) 仿生结构由刚性结构向刚柔一体化结构发展

仿生刚柔性混合结构成为目前机构设计的发展趋势之一,仿生结构的设计从刚性结构转向刚柔混合结构,既可具有生物刚性的支撑结构又可具有柔性的自适应结构。通过改进现有的机械设备和工具,或设计制造新型的仿生高效机械设备和工具,仿生机器人将实现结构轻便、质量小、精密程度更高的特点。此外,变结构的复合仿生机构可针对不同环境约束的变化具有更好的适应能力,因此研究模拟生物运动过程中开链、闭链结构的相互转换、复合,设计创新的非连续变约束复合仿生新机构,是仿生机构的另一个重要发展方向^[19]。

(3) 仿生材料由传统材料向结构、驱动、材料一体化方向发展

基于智能材料与仿生结构,开展材料、结构、驱动一体化的高性能仿生机构研究,建立验证平台,实现一

体化设计关键技术验证,解决航空航天、国防武器、抢险救灾等特种机器人典型复杂机构设计的瓶颈问题,是未来的发展趋势之一。仿生机器人的材料将逐渐淘汰钢材、塑料等传统材料,使用与生物性能更加接近的仿生材料,从而获得低能耗、高效率、环境适应性强的性能特点。以水下机器人的研究为例,在传统的研究中,采用刚性材料制作成的尾鳍无法和真正的鱼一样实现尾部灵活摆动,而通过采用新型的柔性材料进行仿生鱼的设计,可以更好地实现仿生鱼游动速度快、运动灵活的特点。此外,在驱动方面,仿生机器人的驱动方式将采用人工肌肉等仿生驱动形式,并实现与结构、材料一体化,使仿生机器人与被模仿生物的形态更加接近。

(4) 仿生控制由传统控制方式向神经元精细控制发展

在未来的发展中,仿生机器人将摒弃传统的机器人控制方式,重点研究生物系统的微观机电和理化特性,在现有基础上进一步深入研究肌电信号控制、脑电信号控制等仿生控制方式,通过神经元进行仿生机器人的精细控制,并在多感知信息融合、远程监控、多机器人协调控制等方面获得突破,实现更加精确、适应性更高、响应更加快速的控制过程及良好的环境感知能力。此外,仿生机构的稳定性和鲁棒性日益成为研究的前沿,从而实现更为逼真的运动仿生。

(5) 生物能量由低效的机械能转换向高效的生物能转换发展

随着机械系统能源问题的日益突出,机构节能、环保理念的深化,高效能的仿生机构必然成为现代机构学的发展趋势之一。生物能量的研究要在生物学、化学、物理学的多学科交叉的基础上,寻求生物能量高效利用的原理,研究生物能量传递和转换机理及其与生物组织之间的关系,并在新能源、新型能量转换装置等方面进行研究。研究目标集中在功能、效率、质量、损耗这四个方面,从而提高仿生机器人的能量利用率,降低能耗^[20]。



参考文献

- [1] 宋红生, 王东署. 仿生机器人研究进展综述[J]. 机床与液压, 2012, 40(13):179-183.
- [2] 麻省理工学院发布新款机械鱼. <http://www.cnbeta.com/articles/91918.htm>. [2009-08-26]
- [3] 王国彪, 陈殿生, 陈科位, 张自强. 仿生机器人研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13):27-44.
- [4] 吉爱红, 戴振东, 周来水. 仿生机器人的研究进展[J]. 机器人, 2005, 27(3):284-288.
- [5] 邱玉泉, 王子旭, 王宽, 等. 仿生机器人的研究进展及其发展趋势[J]. 物联网技术, 2016, 6(8):58-59.
- [6] Fukuda T, Kawamoto A, Ami F, et al. Mechanism and swimming experiment of Micromobile robot in water [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Diego, USA, 1994: 814-819.
- [7] Fukuda T, Kawamoto A, Arai F, et al. Steering mechanism of underwater micromobile robot [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya, Japan, 1995: 363-368.
- [8] Fukuda T, Hosokai H, Kikuchi I. Distributed type of actuators by shapememory alloy and its application to underwater mobile robotic mechanism [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Cincinnati, USA, 1990: 1316-1321.
- [9] 许宏岩, 付宜利, 王树国, 等. 仿生机器人的研究[J]. 机器人, 2004, 26(3):283-288.
- [10] Guo S, Sugimoto K, Hata S, et al. A new type of underwater fish-like microrobot [C]. IEEE/RSJ, International Conference on Intelligent Robots and Systems. Takamatsu, Japan, 2000: 867-872.
- [11] Guo S, Shi L, Ye X, et al. A new jellyfish type of underwater micro robot [C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China, 2007: 509-514.
- [12] 德国研制出逼真机械水母模拟真实动物行为. <http://tech.qq.com/a/20100428/000123.htm>. [2010-04-28]
- [13] 王扬威, 于凯, 闫勇程. BCF推进模式仿生机器鱼的研究现状与发展趋势[J]. 微特电机, 2016, 44(01):75-80+89.
- [14] 梁建宏, 邹丹, 王松, 等. SPC-II 机器鱼平台及其自主航行实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(7):709-713.
- [15] Yu J Z, Su Z S, Wang M, et al. Control of yaw and pitch maneuvers of a multilink dolphin robot [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(2): 318-329.
- [16] Guo X, Ma S G, Li B, et al. Modelling and optimal torque control of a snake-like robot based on the fiber bundle theory [J]. Science China Information Sciences, 2015, 58(3): 032205(13).
- [17] Yang S B, Qiu J, Han X Y. Kinematics modeling and experiments of pectoral oscillating propulsion robotics fish [J]. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6(2): 174-179.
- [18] 刘陈方, 宋少云. 仿生机器人的研究综述[J]. 武汉轻工大学学报, 2010, 29(4):21-25.
- [19] 文轩. 仿生机器人的现状与未来发展探讨[J]. 散文百家: 新语文化, 2016(1).
- [20] 国家自然科学基金委王国彪谈仿生机器人发展趋势. <http://www.wx135.com/articles/20160329/56f9e381-5e60-4071-a353-191c02734e20.html>. [2016-03-29]

Research on the Scientific Plans and Trends of Marine Bionic Robots

Cheng Fang*, Li Dongqiao, Han Tao, Wang Su

National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

* Corresponding Author, E-mail: chenfang@mail.las.ac.cn

[Abstract] The marine bionic robot is obtained by studying the construction principles and functions of certain marine organisms and imitating them in engineering technology. Massachusetts Institute of Technology's imitation tuna structure has successfully developed the world's first true robot fish, which further pushed on the study and development in marine bionics. Plans and projects on underwater robots or robotic fish have been made to support the development of this field in many countries. This paper investigates the development status of marine bionic robots, plans and support projects in major countries. And then the amount of funding in this field is analyzed. Subsequently, bibliometrics is used to analyze the research literatures of global marine bionic robots. The correlation analysis between supporting projects and output literature is carried out. Finally, the main research cases in marine bionics or robot fishes are summarized. Through the panoramic analysis of this article, some suggestions for China's development in this field are provided.

[keywords] marine bionics, biomimetic robot, robot fish, scientific plans