一种基于注意力机制的 AUV 控制层指令理解方法

李岳明^{1,2}, 万磊^{1,2}, 孙玉山^{1,2}, 张国成^{1,2}

(1. 哈尔滨工程大学水下机器人技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为了更好地衔接水下机器人(AUV)规划层与控制层,参考Itti视觉注意力模型,提出了基于注意力机制的规划指令理解模型,建立了规划指令理解与再次规划环节.通过使用模糊推理的方法对指令元素特征、指令元素显著性进行分析处理,得到规划指令注意力聚焦;根据注意力聚焦进行再次规划,保证规划层关注的状态得到优先执行.仿真实验表明文章提出的规划指令理解环节实现了对规划层指令意图的获取,使规划指令得到更好地执行,有效地改善运动控制效果,提高了控制层的智能水平.

关键词:水下机器人(AUV);指令理解;注意力模型;规划

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2012)-04-0406-05

A Method of Instruction Understanding for AUV Control Layer Based on Attention Mechanism

LI Yueming^{1,2}, WAN Lei^{1,2}, SUN Yushan^{1,2}, ZHANG Guocheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Science and Technology on Autonomous Underwater Vehicle, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to maintain an appropriate relationship between the planning layer and the control layer of autonomous underwater vehicle (AUV), with Itti visual attention model considered as a reference, a planning instruction understanding (PIU) model based on attention mechanism is presented, and the processes of PIU and the secondary planning are established. The attention focus of planning instruction is obtained using fuzzy reasoning for analyzing the feature and significance of instruction element. Furthermore, the secondary planning is implemented adopting attention focus, which can ensure a higher priority execution of the state concerned by the planning layer. The simulation results demonstrate that the proposed PIU process can not only realize the acquisition of the instruction intention of planning layer, and the planning instruction can be executed more effectively, but also the motion control effect is heightened and the intelligence level of control layer is improved.

Keywords: autonomous underwater vehicle (AUV); instruction understanding; attention model; planning

1 引言 (Introduction)

采用分层递阶体系结构的机器人^[1],规划层集中体现机器人智能性,能够根据作业任务与环境信息进行智能决策,向控制层发送目标指令;控制层着重研究控制理论的应用,克服环境干扰,调节执行器输出,控制机器人到达规划层期望的状态.水下机器人是空间6自由度运动,具有非线性、多自由度耦合特点,其运动的精确数学模型难以获得,同时由于作业环境干扰强烈,水下机器人精确运动控制成为水下机器人关键技术之一^[2].

规划指令体现了复杂环境下作业规划与决策的

智能性,而较少考虑载体的运动特性.而运动控制系统集中解决具有非线性耦合、难以建立数学模型的机器人运动控制问题,缺少对规划目标的理解.为了充分发挥AUV智能性,使运动控制系统更好地实现规划系统的期望目标,可以在运动控制层增加指令理解环节.文[3]将指令理解划分为速度控制和位置控制2个部分加以解决:当机器人定速航行时,通过采用视线跟踪^[4]的方法,结合机器人运动能力来选择合适的艏向前进;而进行位置控制时,通过设置虚拟传感器系统^[5],达到纵向运动、横向运动以及艏向运动相协调,实现对目标轨迹的跟踪.但是,由于速度控制和位置控制采取了不同的理解方

式, 导致应用复杂。

针对上述方法的不足, 本文提出了基于注意力机制的指令理解方法, 通过对目标指令和机器人运动状态的综合分析, 得出规划系统最为关注的自由度目标状态, 然后进行再次规划, 保证该自由度目标能够以最有效的方式执行, 从而提高运动控制层的智能水平。最后通过仿真实验验证了新方法的可行性与有效性。

2 控制层规划指令理解与再次规划 (Planning instruction understanding and secondary planning in the control layer)

本文研究对象“XX”AUV^[6]采用分层递阶软件体系结构^[1], 如图 1 所示。该系统可分为规划层和控制层 2 个部分: 规划层负责接收任务使命并对其进行分解, 在对传感器信息融合理解基础上获取环境特征信息, 根据任务需求进行路径规划, 向控制层发送规划指令; 控制层负责接收处理传感器信息, 根据规划指令和传感器反馈的机器人状态信息完成机器人运动的闭环控制。

图 1 “XX” AUV 体系结构

Fig.1 Architecture of the “XX” AUV system

规划指令是规划系统根据任务需要并通过分解任务获得的, 较少考虑机器人载体运动特性、运动状态及运动能力。而水下机器人是空间 6 自由度运动, 并且具有多自由度耦合影响, 加之环境干扰多变, 运动控制系统不可能同时达到规划指令要求的多个自由度目标状态。因此, 在控制层的运动控制模块中增加指令理解环节, 对规划指令进行分析理解, 可以确定规划系统对于哪个自由度的运动状态要求较为迫切, 然后根据机器人自身的运动特点进行再次规划, 调整控制策略, 优先保证该自由度目标指令的执行。可见指令理解环节提高了控制层的智能水平, 能够根据规划指令及运动状态的变化作出反应, 改变了控制层机械地执行规划指令的模式, 使规划指令得到更有效地执行。

3 AUV 规划指令理解 (Planning instruction understanding for AUV)

Itti 等人提出的 Itti 注意力模型^[7-8], 是经典的视觉注意力模型之一。其基本思想是通过提取图像的颜色、方向、亮度特征, 构建特征地图, 结合特征地图做归一化处理, 得到图像特征的显著图, 对显著图进行融合得到显著图, 根据显著图确定图像的显著区域, 完成注意力的聚焦。参考该注意力模型的思想, 作者提出基于注意力机制的指令理解模型 (见图 2), 包括以下 3 个功能层次: 规划指令元素特征提取、指令元素显著性获得、注意力聚焦。

图 2 规划指令理解模型

Fig.2 Planning instruction understanding model

为了便于引入先验知识, 基于注意力机制的指令理解采用模糊语言描述及模糊推理方法。

3.1 指令元素特征提取

指令元素包含目标大小 E 和变化率 $\dot{E}$ 两个主要特征。目标大小可根据指令元素与机器人当前状态的差来获得。而变化率可根据对当前目标与历史目标的分析得到。使用 s, ψ, z, u 表示机器人当前位置、艏向、深度、速度状态, $\bar{s}, \bar{\psi}, \bar{z}, \bar{u}$ 表示规划层指令中包含的位置、艏向、深度、速度目标信息。则:

$$\begin{cases} E = [e_1 \ e_2 \ e_3 \ e_4]^T = [\bar{s} - s \ \bar{\psi} - \psi \ \bar{z} - z \ \bar{u} - u] \\ \dot{E} = [\dot{e}_1 \ \dot{e}_2 \ \dot{e}_3 \ \dot{e}_4]^T \end{cases} \quad (1)$$

指令元素特征模糊集合定义为 $\{NB, NS, ZO, PS, PB\}$ 。针对每个指令元素选择合适论域, 采用图 3 所示三角隶属度函数对 E 和 $\dot{E}$ 进行模糊化。

3.2 指令元素显著性获取

定义指令元素显著性模糊集合为 $O = \{UK, FO, ST, PS, PB\}$, 分别表示指令元素显著性为未知状态、跟随状态、保持状态、较显著、非常显著, 其隶属度

函数如图 4 所示。

图 3 指令元素特征隶属度函数

Fig.3 Membership function of instruction element feature

图 4 指令元素显著性隶属度函数

Fig.4 Membership function of instruction element saliency

采用 IF-THEN 方式描述模糊控制规则，例如：
IF e is e_i and $\dot{e}$ is $\dot{e}_j$ THEN o is o_k
由 25 条规则构成的模糊规则库见表 1。

表 1 期望指令元素显著性规则表

Tab.1 Rules list for desired instruction element saliency

		$\dot{e}$				
		NB	NS	ZO	PS	PB
e	NB	PB	PB	PB	PS	PS
	NS	PB	PS	ST	FO	UK
	ZO	UK	FO	ST	FO	UK
	PS	UK	FO	ST	PS	PB
	PB	PS	PS	PB	PB	PB

3.3 注意力聚焦

根据机器人特点，将指令分为 2 类，速度控制模式和位置控制模式，考虑到深度与艏向控制彼此独立，将注意力聚焦分为以下 4 个方面进行：深度与位置、艏向与位置、深度与速度、艏向与速度。定义注意力模糊子集为 $A = \{FI, FD, UK, AD, AI\}$ ，分别表示两个指令元素之间关系为后者重要、后者主导、未知、前者主导、前者重要，其隶属度函数类似于图 3。采用 IF-THEN 方式描述模糊控制规则，例如：

IF o_1 is o_{1i} and o_2 is o_{2j} THEN a is a_k

由 25 条规则构成的模糊规则库见表 2。

使用重心法对注意力 A 进行反模糊化，得到注意力聚焦状态，提供给再次规划作为参考。

4 再次规划 (Secondary planning)

根据对规划指令理解的结果，可以知道规划层最关注、迫切实现的期望状态，根据这一点控制层

对规划指令进行调整，保障优先执行，以便于尽快地满足规划系统的要求。

表 2 注意力聚焦规则表

Tab.2 Rules list for attention focus

		o_2				
		UK	FO	ST	PS	PB
o_1	UK	UK	UK	UK	AD	AI
	FO	UK	UK	UK	AD	AI
	ST	UK	UK	UK	AD	AI
	PS	FD	FD	FD	FD	FD
	PB	FI	FI	FI	FI	FI

位置控制模式下，在深度与艏向保持良好的条件下，可将目标点适当远离，或者将目标点直接设置为规划期望的目标点，使机器人迅速向目标点移动。当深度或艏向保持不好，并且此时规划系统对与深度或艏向要求较为严格时，令目标点适当接近机器人，使其速度降低，为调整深度或艏向创造条件，必要时将目标点设置为当前位置，将速度降到最低，避免发生危险。

定速航行模式，在深度与艏向保持良好的条件下，机器人以规划指令要求的航速航行。当深度或艏向保持不好，并且此时规划系统对于深度或艏向要求较为严格时，应该适当地减小航行速度，极端情况下可将目标速度直接设置为 0，或者切换至定位控制模式，在深度或艏向调整完毕后再切换至定速航行状态，并且将速度逐步加至规划指令要求的航速。

4.1 再规划目标指令计算

为了尽快执行获得注意力聚焦的指令元素，必须对未获得注意力聚焦的指令元素进行抑制。以艏向与位置指令元素注意力聚焦结果为例，当艏向获得注意力时，使用最有利于实现转艏的目标位置（如机器人当前位置）代替当前规划层的位置指令；当位置获得注意力时，可以将正对目标位置的方向作为艏向目标。对于指令元素 e_1 和 e_2 ，存在抑制对方的期望目标 e_2^* 和 e_1^* ，当前注意力聚焦度为 $a_{1,2}$ 时，再规划目标指令 e_{s1} 和 e_{s2} 使用如下公式进行计算：

$$\begin{cases} e_{s1} = (1 - S(a_{1,2}))e_1 + S(a_{1,2})e_1^* \\ e_{s2} = (1 - S(a_{1,2}))e_2 + S(a_{1,2})e_2^* \end{cases} \quad (2)$$

其中， $S(a) = a / (|a| + \delta)^{[9]}$ 。该函数值域范围为 $[-1, 1]$ ， δ 为待调参数。

4.2 期望目标 e^* 的选择

相对于获得注意力聚焦的指令元素，其他指令

元素期望目标 e^* 按照表 3 规则选择. 表中 $\varphi_{\min}$ 表示指向目标位置的艏向, $\downarrow u$ 表示降低目标航速. 例如, 当位置指令获得注意力聚焦时, 表示当前规划系统对于机器人位置状态最为关注, 那么为了尽快地移动至目标位置, 可将艏向对准目标, 而深度保持规划系统的期望值即可; 当艏向获得注意力聚焦时, 为了尽快转艏至规划系统期望的目标艏向, 在位置控制时可将目标位置设为当前位置, 待转艏结束后再继续前进, 而当定速航行时, 可降低目标航速, 以便于转艏.

表 3 期望指令元素规则表

Tab.3 Rules list of desired instruction element

聚焦元素	s^*	φ^*	z^*	u^*
$\bar{s}$	$\bar{s}$	$\varphi_{\min}$	z	—
$\bar{\varphi}$	s	$\bar{\varphi}$	—	$\downarrow u$
$\bar{z}$	s	—	$\bar{z}$	$\downarrow u$
$\bar{u}$	—	φ	z	$\bar{u}$

对于可能出现的冲突, 可按照优先级的高低进行协调. 指令元素 z 、 φ 、 s 、 u 优先级依次降低. 例如在位置控制中, 可能出现如下情况, 注意力在深度与位置之间聚焦于位置指令上, 而在艏向与位置之间聚焦于艏向指令上, 那么按照优先级顺序, 再次规划按照艏向指令注意力聚焦进行.

5 仿真实验 (Simulation)

为了验证本文提出方法的有效性, 在“XX”自主水下机器人仿真实验平台进行仿真实验^[10]. 仿真信息流程如图 5 所示.

图 5 仿真实验流程图
Fig.5 Simulation flow chart

由于篇幅所限, 只给出位置控制模式下的比较实验结果.

初始状态为: 位置坐标 (0m,0m), 深度 0m, 艏向 0°.

规划指令为: 位置坐标 (10m,10m), 深度 3m, 艏向 90°.

首先不使用指令理解环节, 单独使用控制器控制机器人运动. 然后使用指令理解, 依次进行艏向深度锁定 (规划指令艏向和深度元素始终保持不变)、

(a) 不带指令理解控制结果

(b) 艏向深度锁定指令理解控制结果

(c) 艏向跟随、深度锁定指令理解控制结果

(d) 深度控制效果

图 6 仿真结果

Fig.6 Results of simulation

艏向跟随深度锁定实验(规划指令艏向元素跟随机器人实际艏向变化,深度元素始终保持不变).实验结果如图6所示,图6(a)~(c)分别显示了3个实验的机器人位置和艏向信息,图中箭头的位置和方向代表机器人的位置和艏向,两个箭头时间间隔为5s,图6(d)给出了3次实验的深度变化曲线,分别使用1、2、3加以区别.图7、8给出了实验2和实验3注意力变化曲线,图中实线代表深度和位置指令元素的注意力聚焦结果(*Dep_Att*),虚线代表艏向和位置指令元素的注意力聚焦结果(*Yaw_Att*).

图7 实验2注意力变化结果

Fig.7 Attention curves in the second simulation

图8 实验3注意力变化结果

Fig.8 Attention curves in the third simulation

实验结果分析:

(1) 由图6(a)可以看出,不使用指令理解情况下,水平面各自由度变化按照控制力大小顺序依次进行,纵向控制力最大,所以纵向响应最快,其次是艏向,最后是横向.

(2) 由图6(b)可以看出,使用指令理解环节后,首先机器人原地进行转艏,到达期望艏向后开始移动,在运动过程中通过选取合适的再规划目标点,实现纵向运动和横向运动的协调,使机器人在移动过程中能够严格保证艏向.

(3) 由图6(c)可看出,艏向跟随条件下,指令理解首先将艏向对准目标位置,然后以较高的速度驶向目标点.

(4) 由图6(d)可看出,实验2和实验3在指令理解作用下首先进行原地定深,到达目标深度后开始移动,而实验1在行进中定深.机器人真实运动中,考虑垂向推力器推力减额及节约能源,一般不会在行进中下潜.

(5) 图7显示了实验2规划指令元素艏向和深度锁定条件下,开始时艏向和深度获得注意力聚焦,随着艏向和深度偏差的减小,注意力逐渐减弱.图8显示了实验3规划指令元素艏向跟随、深度锁定条件下,深度首先获得注意力,原地下潜至目标深度过程中,注意力逐渐减弱.到达目标深度后,注意力转移至位置控制上,使得位置目标优先执行,接近期望位置后,注意力逐渐减弱.

由以上可以看出,对于同样的规划目标,针对不同的指令变化过程,指令理解能够得到规划系统较为关心的目标状态,在此基础上进行再次规划,保证该目标状态能够尽快地实现.由此可见指令理解与再次规划显著地增加了控制层的智能水平,使控制层能够更好地执行规划层指令.

6 结论 (Conclusion)

本文借鉴视觉Itti注意力模型,提出了基于注意力机制的规划指令理解模型,根据该模型构建了水下机器人控制层规划指令理解环节.通过对比仿真实验可以看出,指令理解环节能够有效地获得不同规划指令的侧重点,完成具有针对性的再次规划,从而实现对规划指令的智能理解,可以更加有效地执行规划指令,高效地衔接了规划层与控制层,提高了控制层智能水平,改善了控制效果.

参考文献 (References)

- [1] 徐玉如, 庞永杰, 甘永, 等. 智能水下机器人技术展望 [J]. 智能系统学报, 2006, 1(1): 9-16.
Xu Y R, Pang Y J, Gan Y, et al. AUV state-of-the-art and prospect[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2006, 1(1): 9-16.
- [2] 李岳明, 庞永杰, 万磊. 水下机器人自适应S面控制 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(2): 195-200.
Li Y M, Pang Y J, Wan L. Adaptive S plane control for autonomous underwater vehicle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(2): 195-200.
- [3] 甘永. 水下机器人运动控制系统体系结构的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
Gan Y. Research on motion control system architecture of underwater vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.

(下转第417页)

超、东南大学的夏丹、苏州科技学院的蒋明。

参考文献 (References)

- [1] Alvarado P V Y. Design of machines with compliant bodies for biomimetic locomotion in liquid environments[D]. Massachusetts, MA, USA: Department of Mechanical Engineering of MIT, 2006.
- [2] Alvarado P V Y, Youcef-Toumi K. Design of machines with compliant bodies for biomimetic locomotion in liquid environments[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2006, 128(1): 3-13.
- [3] Epps B P, Alvarado P V Y, Youcef-Toumi K, et al. Swimming performance of a biomimetic compliant fish-like robot[J]. *Experiments in Fluids*, 2009, 47(6): 927-939.
- [4] 杨焱. 锦鲤常规自由游动的流动物理研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
Yan Y. Flow physics of freely routine swimming of koi carp[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.
- [5] Wu G H, Yang Y, Zeng L J. Kinematics, hydrodynamics and energetic advantages of burst-and-coast swimming of koi carps (*Cyprinus carpio koi*)[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2007, 210(12): 2181-2191.
- [6] 夏丹. 鲭科仿生原型自主游动机理的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
Xia D. Study on mechanism of thunniform bio-inspired mode swimming under self propulsion[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [7] Wen L, Wang T M, Liang J H, et al. A novel method based on a force-feedback technique for the hydrodynamic investigation of kinematics effects on robotic fish[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 203-208.
- [8] 王兴松, 许家林. 仿生机器鱼: 中国, 201240497[P], 2009-05-20.
Wang X S, Xu J L. Bio-mimetic robotic fish: China, 201240497 [P], 2009-05-20.
- [9] Ang S J. Numerical simulation of moving problems with application to fish swimming[D]. Singapore: National University of Singapore, 2007.
- [10] Wang X Y, Yeo K S, Chew C S, et al. A SVD-GFD scheme for computing 3D incompressible viscous fluid flows[J]. *Computers & Fluids*, 2008, 37(6): 733-746.

作者简介:

万 宏 (1979-), 男, 博士生. 研究领域: 机器人动力学, 运动控制技术, 数值仿真.
王兴松 (1965-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人动力学与控制, 运动控制理论与数控技术, 传感技术与智能仪表.

(上接第 410 页)

- [4] Naeem W, Sutton R, Ahmad S M, et al. A review of guidance laws applicable to unmanned underwater vehicles[J]. *Journal of Navigation*, 2003, 56(1): 15-29.
- [5] 刘学敏, 庞永杰, 徐玉如. 一种基于虚拟传感信息的轨迹跟踪模糊控制方法 [J]. 机器人, 1998, 20(suppl.): 73-78.
Liu X M, Pang Y J, Xu Y R. A fuzzy trajectory tracking method based on virtual sensor information[J]. *Robot*, 1998, 20(suppl.): 73-78.
- [6] 甘永, 王丽荣, 刘建成, 等. 水下机器人嵌入式基础运动控制系统 [J]. 机器人, 2004, 26(3): 246-249.
Gan Y, Wang L R, Liu J C, et al. The embedded basic motion control system of autonomous underwater vehicle[J]. *Robot*, 2004, 26(3): 246-249.
- [7] Itti L, Koch C. Computational modeling of visual attention[J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2001, 2(3): 194-203.
- [8] 张杰, 魏维. 基于视觉注意力模型的显著性提取 [J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(11): 109-113.
Zhang J, Wei W. Saliency extraction based on visual attention model[J]. *Computer Technology and Development*, 2010, 20(11): 109-113.
- [9] 李岳明, 郭冰洁, 庞永杰. 滑模变结构控制削弱抖振的一种方法 [C]//第 27 届中国控制会议. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 145-149.
Li Y M, Guo B J, Pang Y J. A method for weakening the chattering of sliding mode controller[C]//Proceedings of the 27th Chinese Control Conference. Beijing: BeiHang University Press, 2008: 145-149.
- [10] 常文君, 刘建成, 于华南, 等. 水下机器人运动控制与仿真的数学模型 [J]. 船舶工程, 2002(3): 58-60.
Chang W J, Liu J C, Yu H N, et al. A mathematical model for motion control and simulation of underwater vehicle[J]. *Ship Engineering*, 2002(3): 58-60.

作者简介:

李岳明 (1983-), 男, 博士生. 研究领域: 智能水下机器人运动控制.
万 磊 (1964-), 男, 研究员. 研究领域: 水下机器人控制系统设计.