

混合仿人智能图式的无人艇自主驾控系统设计

吴恭兴, 万 磊, 邹 劲, 庄佳园, 廖煜雷

(哈尔滨工程大学 水下智能机器人技术国防科技重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对高度动态、不可预测的海洋环境, 开展了无人艇智能运动控制系统的设计研究. 首先本文利用认知学科的“图式”概念来分析人体运动控制系统的结构, 提出一种混合式分层递阶结构, 把人类的先验知识、专家经验融入到该结构中, 并在实践中不断学习和完善, 则形成了一种混合仿人智能图式; 然后根据该图式的思想, 设计了自主驾控系统的体系结构, 并编制成简单实用、逻辑性强、能实时运行的控制流程; 最后进行了无人艇的航线跟踪和安全自主航行的半实物仿真试验, 仿真结果表明该无人艇可以安全的避开其他船舶并尽量跟踪航线.

关键词: 自主驾控; 仿人智能图式; 混合式分层递阶结构; 无人艇; 协商式避碰; 反应式避碰

中图分类号: TP24; U661.33 **文献标识码:** A

Design of the autonomous pilot system for the unmanned surface vehicle based on the hybrid human simulated intelligent schema

WU Gong-xing, WAN Lei, ZOU Jin, ZHUANG Jia-yuan, LIAO Yu-lei

(National Defence Key Laboratory of Autonomous Underwater Vehicle Technology,
Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: We study the intelligent motion control system for the unmanned surface vehicle(USV) in high-dynamic uncertain ocean environment. Firstly, the structure of human motion control system is analyzed by using the 'schema' concept in the cognize domain; the concept of hybrid hierarchical structure is proposed. If the structure has human a priori knowledge and expert experience which are developed in practice, then it will evolve into a hybrid human-simulated intelligent schema. According to this human-simulated intelligent structure, the autonomous pilot system for USV is designed. The control flow is programmed, which is practically applicable, logically structured and real-time operative. Finally, the semi physical simulation tests for the USV course tracking and the safe autonomous-pilot are carried out. Simulation results show that the USV safely keeps away from other ships and tracks the course.

Key words: autonomous pilot; human-simulated intelligent schema; hybrid hierarchical structure; USV; deliberative obstacle avoidance; reactive obstacle avoidance

1 引言(Introduction)

水面无人艇能够在一定海洋环境下自主航行并完成设定的任务, 特别是在超视距, 遥控不能发挥作用的情况下, 它能够自主的进行环境探测、目标识别、自主路径规划、自主避障与驾控, 以及自动完成制定使命等. 由于不受“人”这个因素的限制, 无人艇可以进入含有核辐射、生物或化学等物质的高危环境区域进行探测、作业与研究; 另外, 在未来的濒海作战和非对称立体战争中, 无人艇可以在发生冲突的区域开展长期的反潜作战和反水雷战, 已经被欧美证明具有非常出色甚至不可替代的作用^[1].

在高度动态和不可预测的海洋环境里, 为了达到

高度自治, 无人艇需要可靠的规划、避障、导航、控制技术来确保其他船只与自身的安全. 在海上航行, 也有交通规则, 如何确保无人艇也能够按照海上交通规则航行, 是设计自主驾控系统的重要内容. 同时, 从加强无人艇的适应性与自主性, 改善无人艇工作性能的观点来看, 控制系统还应该具备良好的自适应、自学能力与自组织功能, 从而需要引入人工智能来设计无人艇的智能控制系统. 近几年来, 仿人智能控制在适应环境变化的过程中模仿人和动物所表现出来了优秀的控制能力. 仿人智能控制主要强调对人的控制功能和行为的综合性模仿, 它的基本思想是采用多层递阶结构, 模仿人的学习、在线特

收稿日期: 2009-11-30; 收修改稿日期: 2010-09-18.

基金项目: 国防“973”计划资助项目(61311101); 国家自然科学基金资助项目(50579007); 水下智能机器人技术国防科技重点实验室开放基金资助项目(2008001).

征记忆与识别、直觉推理和多模态控制策略等行为和功能^[2]。但是人的运动控制策略是灵活多变的,不同的控制对象、不同的运动环境,人的运动控制策略就会做相应的改变。如何在结构上模仿人体控制系统的体系结构,并在实践中高度仿效它,具有重大意义。本文利用仿人智能图式的思想并结合人控制策略的灵活性来设计无人艇的自主驾控系统,使之拥有船舶驾驶员的熟练驾控能力,从而实现无人艇能够在海洋环境中自主安全航行。

2 自主驾控系统简介(Introduction of the autonomous pilot system)

本项目所研究的无人艇系统是基于喷水推进方式的刚性充气滑翔艇,该无人艇的自动驾驶系统包括:柴油机子系统、喷水推进子系统、液压操舵子系统(包含喷嘴电动泵、液压管、液压油缸、舵角传感器等)、油门控制子系统(包含油门电动机、减速齿轮箱、油门控制器等)、倒车斗控制子系统(包含倒车电动机、减速齿轮箱、倒车传感器等)、导航及环境信息感知子系统(包含罗经、雷达、GPS、摄像机、红外仪、风速风向仪等),如图1所示。

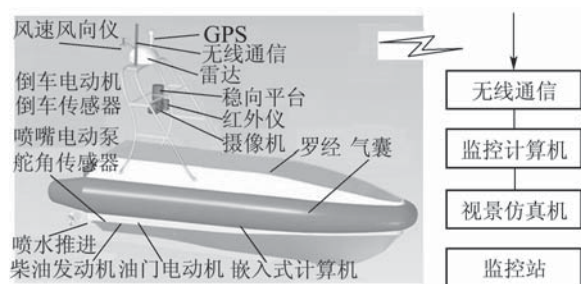


图1 无人艇系统组成

Fig. 1 Compose of the USV

无人艇地面操纵人员利用监控界面,通过无线通讯系统对无人艇进行任务下载和监控。在基地的监控计算机上,有各种直观的虚拟仪表、数字仪表、声色报警器来实时显示无人艇的运动状态和各种设备的状态信息;在电子海图上,可以通过选择不同的显示模式来了解无人艇与周边环境的相对运动关系,可以手动编辑航线,也可以自动规划航线等等,所有这些都可以通过人机交互界面编辑作业任务并下达指令,使无人艇完成定航线、自主规划、自主避障等运动,可实现的功能有巡逻(如码头、港口、石油钻井平台等近海设施的防护)、保护航道、情报的侦察与监视等。

3 混合仿人智能图式的思想(The idea of the hybrid-HSIS)

人体的运动控制系统是一个相当复杂和完善的自学习、自适应控制系统。有足够的证据表明:人脑

是迄今最为聪明的控制系统^[3]。因此,如何模仿人类在实践中积累经验和知识,并对已有的知识进行泛化和推广,如何模仿人类根据环境或条件的变化而灵活地改变控制策略,如何在结构上模仿人体控制系统的体系结构,是当前研究智能控制系统的重要内容。

3.1 人体运动控制系统与智能图式(Human motion control system and HSIS)

通过对体操运动员、跳水运动员、杂技演员、舞蹈演员等人类运动过程的分析,文献[3]认为人体运动控制系统由有形的运动肢体和无形的内部模型组成,其内部结构如图2所示。内部模型是指人类大脑对自身和外界事物的一种无形描述或知识表示,它由一系列模型构成,如世界模型、身体模型、轨道模型等等。各种内部模型都是通过反复学习、不断实践而形成的,这种内部模型也称为动觉智能图式。所谓的图式,就是一种行为的结构或组织;人类等高级动物将自己与控制对象、外部环境整合在一起,形成一种抽象化、模块化和符号化的内部模型(就是对控制对象的结构或组织的一种描述),通过这个内部模型,人类就可以实现对各种各样的控制对象进行巧妙、精确的控制。

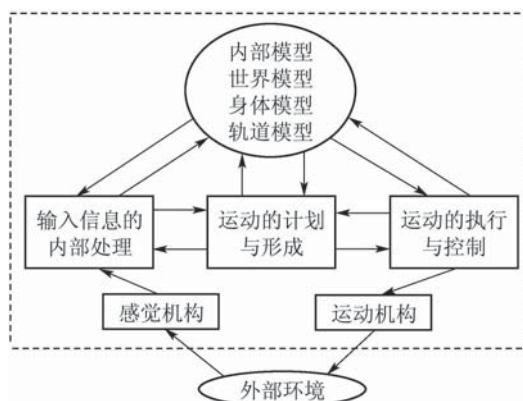


图2 人体运动控制系统的内部结构

Fig. 2 Inner structure of the human motion control system

3.2 混合式分层递阶控制结构(Hybrid hierarchical structure)

人体的运动是极为复杂的,各种巧妙高难度的动作是受控制于复杂多样性的人体运动控制系统。从总体上来看,人体运动控制系统的功能结构是一种分层递阶结构。可以认为人体的运动控制系统是由三级神经中枢和外周神经系统组成,三级中枢从高到底分别是大脑运动皮层、小脑及脑干下行系统和脊髓^[3]。较低级的中枢具有控制精度高、智能化程度低的运动;而高级中枢具有目的的、智能化程度高的运动,同时高级中枢能够控制较低级的中枢。通过

这种分工明确、相互制约的分层递阶控制结构, 人类才能够完成各种复杂的高精度活动。

这种“精度随智能提高而降低”的分层递阶控制方法, 是由Saridis教授提出的, 他强调智能控制系统应该具有追求目标的功能, 并人为地把分层递阶控制系统分为: 组织级, 协调级, 执行级^[4]。虽然分层递阶控制系统具有较高的智能, 但是该系统的可靠性、鲁棒性、反应性较差。然而, 人体运动控制系统的可靠性、鲁棒性、反应性是极好的。

通过对人体各种运动的分类, 大致可分为: 反射运动、节律运动以及随意运动^[3]。反射运动通常是由某种特异的感觉刺激引起的, 它不受意识的控制; 节律运动不需要意识控制, 但也可以被意识控制, 如人的呼吸、咀嚼、行走等; 随意运动一般是指为了达到某种目的而产生的运动, 它是一种高级的智能活动, 可以由感觉刺激产生, 也可由人的主观意识而产生, 如读书、写字等。在认知学科中, 这些人体运动都可以用图式来表示, 反射运动和部分节律运动是通过遗传得到的图式, 而大多数的随意运动是通过不断学习和完善得到的图式, “熟能生巧”就是人体中具有某种定型的图式, 使人达到不用思考就可以熟练的完成复杂的动作。因此, 人体的运动控制系统是在分层递阶结构的基础上, 附加有其他控制结构, 如: 反应式控制结构、进化式控制结构, 并行控制结构等等。

由此可以看出, 一种高级的智能控制系统是以分层递阶的智能结构为主体, 并融合多种其他控制结构, 可以称之为混合式分层递阶结构。该混合式分层递阶结构会根据外部环境、控制对象、初始条件或目标结果的变化, 而自组织、自适应的选择一种

或多种控制结构, 通过在实践中不断学习和改进, 就形成各种智能图式。例如人类可以一边走路一边思考, 该行为完美地结合了节律运动和随意运动。把人类现有的知识、专家经验融入到该混合分层递阶结构的系统中, 并在实践中不断完善, 就形成了一种混合仿人智能图式。具有该图式功能结构的系统, 其优越性主要表现在: 具有控制行为的并行性、具有适应环境的突变性、具有严密的计划性和程序控制性、具有趋向目标的智能性。

4 无人艇自主驾控系统设计(Design of the autonomous pilot system)

为了实现无人艇在实际海洋环境中的自主安全航行, 需要各种功能模块有序协调的组织在一起共同完成, 该无人艇的功能模块结构图如图3所示。无人艇监控人员通过在母船或岸上的监控计算机对无人艇下达任务, 并通过电子海图、雷达图像、视屏图像监控无人艇的航行状态和任务的执行状态; 路径规划器根据电子海图数据从初始点规划一条最优路径到达目的地; 协商式避碰是根据雷达数据和简化的电子海图数据, 并按照“国际海上航行规则”^[5]来修改当前航线, 以避免与其他船舶发生碰撞; 反应式避碰将以最佳的速度和方式避开障碍物并尽量向当前航点或目标点靠近, 它将不考虑“国际海上航行规则”的约束; 紧急避碰主要解决当船舶进入紧迫局面时, 采取快速灵活的避碰操纵, 它将不考虑原航线或目标点的约束而采取最快的速度方向避开该障碍物; 导航模块的主要功能是根据GPS等信息以最小的偏航误差跟踪已知的航线; 驾控模块主要是根据导航控制指令计算出各执行机构的指令。

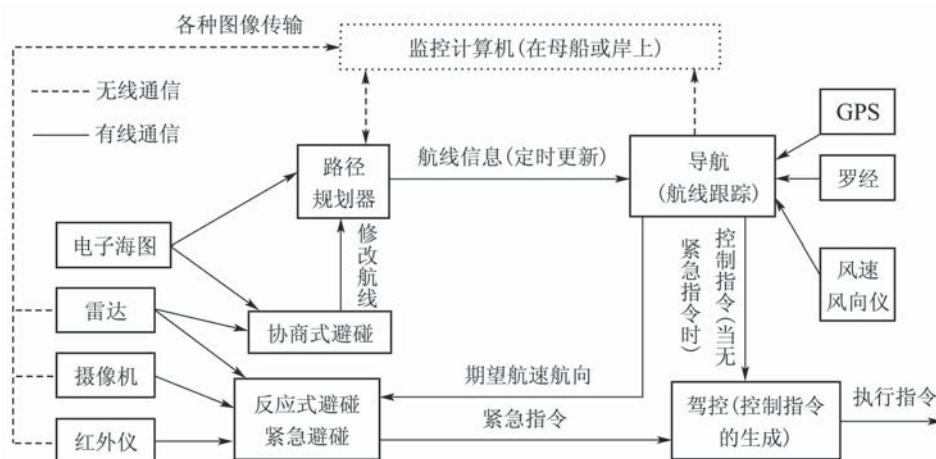


图 3 无人艇功能模块结构图

Fig. 3 Structure diagram of the function model for USV

4.1 基于混合式分层递阶结构的自主驾控系统结构(The autonomous pilot system based on hybrid hierarchical structure)

无人艇作为海上的自主航行平台,其自主驾控系统就是它的“驾驶员”,为了能够安全自主的航行,自主驾控系统必须具备“驾驶员”的熟练操作

能力,即“驾驶员”通过后天学习到的各种智能图式,比如:航线跟踪图式、避碰图式、导航图式等等.第3节通过对人体运动控制系统内部结构的描述,提出了混合式仿人智能图式,在这里,根据该思想为无人艇的自主驾控系统设计如图4所示的软件体系结构图.

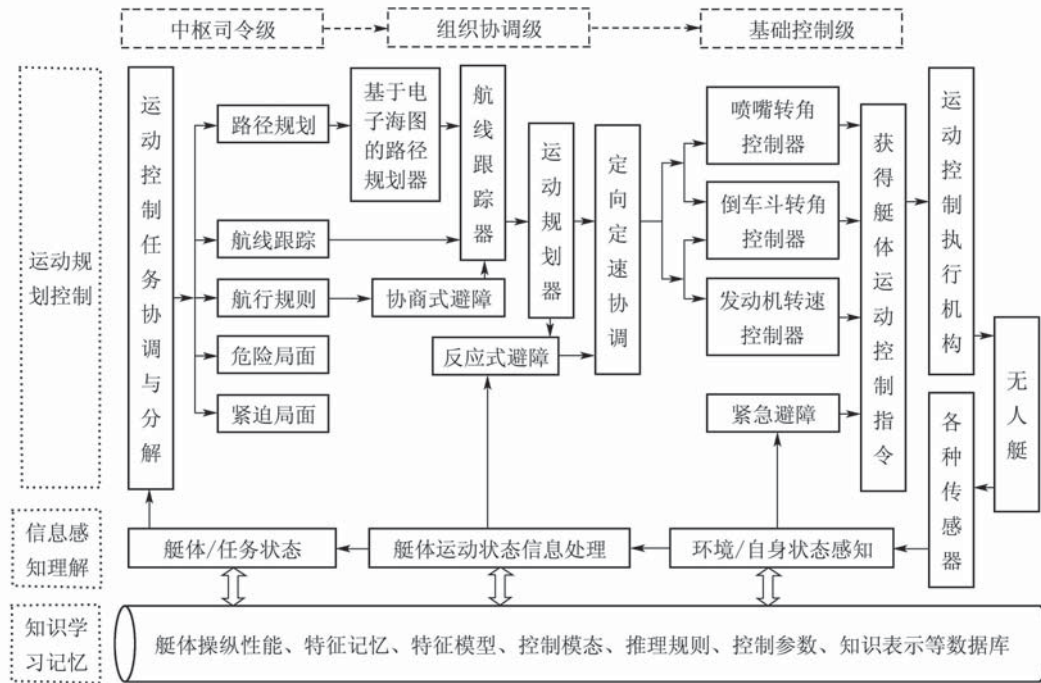


图4 基于混合式分层递阶结构的自主驾控系统体系结构图

Fig. 4 Software architecture of the autonomous pilot system based on hybrid hierarchical structure

该结构图大致分为3行3列,3行为:运动规划控制、信息感知理解、知识学习记忆;3列为:中枢司令级、组织协调级、基础控制级。“运动规划控制”行是无人艇产生各种动作的功能模块;“信息感知理解”行是无人艇的递阶反馈感知过程,该递阶反馈在不同层次把期望值与实际达到的效果进行比较,从而不断产生各层次的反馈信号,用以不同层次的控制和学习,它利用各种反馈信息重显外部世界,形成无人艇的“内部模型”,通过它则可以控制程序的执行流程;“知识学习记忆”行是无人艇的知识库,保存了艇体的操纵性能参数,各种特征记忆、特征模型、控制模态、推理规则,各种航行规则,并保存各种优化的控制参数等等.基于分层递阶控制的思想主要体现在3列中,即:中枢司令级、组织协调级、基础控制级.中枢司令级主要负责运动控制任务的协调与分解,它是无人艇的“大脑”,是智能的体现;组织协调级具有根据上级的运动任务,组织不同的功能模块,并协调

各功能模块的作用,达到自组织、自适应、自决策的目的.基础控制级是无人艇运动控制的最底层,它具有最高的控制精度.

根据项目要求,在中枢司令级把运动控制任务分解为路径规划、航线跟踪、航行规则、危险局面、紧迫局面.它根据“信息感知理解”行的“内部模型”来确定无人艇所处的状态,从而执行相应的运动控制任务.按运动任务级别的高低排序为:紧迫局面、危险局面、航行规则、航线跟踪、路径规划,当有高级别的任务出现时,即执行较高级别的任务.紧迫局面的任务级别最高,当无人艇与它船处于紧迫局面时,将不考虑原航线或目标点的约束而采取最快的速度 and 方向避开该船舶或障碍物,它相当于人类的反射运动;危险局面的级别仅次于紧迫局面,但它还考虑前航点或目标点的约束,采用反应式避碰,它介于反射运动和随意运动之间;航行规则的任务是在航行过程中,当有船舶需要避让时,就要采取协商式避碰行动,这相

当于人类的随意运动, 由感知信息刺激而产生, 是需要不断的学习和积累并调整各种参数, 以达到最佳的避让效果, 不至于使无人艇进入危险局面甚至紧迫局面; 航线跟踪任务相当于人类的节律运动, 不停的反复的跟踪一段段航线; 而路径规划任务属于高级的随意运动, 由无人艇监控人员的主观意愿而产生。

从认知学科角度来看, 中枢司令级中的各种运动任务与“信息感知理解”行构成一个个智能图式, 由反馈的信息触发相应的智能图式; “知识学习记忆”行根据对反馈信息的理解并与控制效果相比较, 不断的积累知识、更新参数, 从而完善各种智能图式中的操作, 达到学以致用目的, 这相当于人类大脑的学习记忆功能。

由上所述可知, 该无人艇的体系结构属于混合式分层递阶结构, 主体上是分层递阶结构, 在各层中兼容了反应式控制结构、进化式控制结构。从人体学科上来说, 该结构包含了人类的3大运动, 即: 反射运动、节律运动和随意运动。

4.2 混合仿人智能图式的自主驾控系统 设计(Design of the autonomous pilot system based on hybrid-HSIS)

无人艇的自主驾控系统相当于人类的中枢神经系统, 控制着无人艇的运动, 为了实现各种运动, 就需要把基于仿人智能的混合式分层递阶结构程序化, 变成各种智能图式(如路径规划图式、航线跟踪图式、避碰图式、导航图式等等), 并在图式中融入船舶驾驶员的驾驶经验和技巧, 便于计算机运行^[6]。

根据仿人智能图式的混合式分层递阶结构, 将模拟构建了无人艇的自主驾控系统, 图4已经将该自主驾控系统的各种功能进行模块化, 接下来需要将各功能模块符号化。首先, 把该系统划分为3级: 中枢司令级CC、组织协调级OC、基础控制级BC。各级中都有各自的感知图式、关联图式和运动图式, 不同级别, 有高低级图式之分。感知图式主要负责处理来自传感器的环境信息和自身状态信息, 通过特征模型的识别来了解自身的状态和所处的环境; 关联图式是连接感知图式和运动图式的中间桥梁, 它根据感知图式的识别结果来启发或选择控制模式, 它是由一套推理规则集组成; 运动图式是动觉智能图式的核心部分, 是产生决策和控制输出的地方, 一般由多个控制模式组成。

无人艇安全自主驾驶的智能过程可以由下式表示:

$$D = D_{CC}D_{OC}D_{BC}. \quad (1)$$

式中: D 为无人艇自主驾控系统的动觉智能图式, D_{CC} 为自主驾控系统的高阶动觉智能图式(或称为中枢司令级), D_{OC} 为中阶动觉智能图式(或称为组织协调级), D_{BC} 为低阶动觉智能图式(或称为基础控制级)。该自主驾控智能图式如图5所示(图中虚线箭头表示由信息感知触发相应的运动控制任务, 相当于人类的感觉刺激), 下面简单介绍各阶动觉智能图式的功能和组成:

1) 高阶动觉智能图式 D_{CC} 是与其他智能体交互的窗口, 主要负责任务的理解、产生决策和模块分解。它具有任务自适应的功能, 当运动控制任务变更、控制环境 T_{FM} 发生变化时, 该动觉智能图式能够选择新的策略(图式)。对于该无人艇的自主驾驶过程, 就是根据任务或环境的需求, 选择不同的航行模式。 T_{RB} 和 T_{DB} 分别是无人艇的任务规则库和数据库, 是根据项目要求预先设定的, 类似于航行专家库。解决特征模型的辨识、控制规则的推理、控制模式的选择等问题。该动觉智能图式可用符号表示为

$$D_{CC} = \{T_{CI}, T_{IE}, T_{MC}\}, \quad (2)$$

T_{CI} 式中: 为运动控制任务的高阶感知图式, 是与任务有关的辨识器, 负责对外界环境和自身状态进行评估; T_{IE} 为高阶关联图式, 负责规则推理, 选择不同的控制模式; T_{MC} 为高阶运动图式, 就是决策的过程, 使无人艇进入某种控制模式(比如: 路径规划、航线跟踪、航行规则、危险局面、紧迫局面)。

2) 中阶动觉智能图式 D_{OC} 是根据不同的控制模式组织和协调不同的模块进行问题的求解, 它是智能体现的中心。该智能单元群包括路径规划单元、协商式避障单元、航线跟踪单元以及反应式避障单元等。由于定义控制模式较多, 这些智能单元群的不同组合构成了一个动觉智能图式群, 该动觉智能图式群可用符号表示为

$$D_{OC} = \{[M_P], [M_{DO}], [M_T], M_M, [M_{RO}], (M_D, M_S)\}, \quad (3)$$

式中的符号按顺序分别为: 基于电子海图的路径规划单元、协商式避障单元、航线跟踪单元、运动规划单元、反应式避障单元、定向协调控制单元和定速协调控制单元。

3) 低阶动觉智能图式 D_{BC} 是无人艇的最底层基础控制级, 它主要产生精确、定量的控制输出, 其控制输出直接面向运动执行机构. 这里的智能单元包括紧急避碰单元 C_{EO} 、喷嘴转角控制单元 C_J 、倒车斗转角控制单元 C_D 和发动机转速控制单元 C_E . 各智能单元中又有各自的低级感知图式、低级关联图式和低级运动图式. 这3个控制单元可分别取如下所示:

$$A_J = 2.0 / (1.0 + e^{(-k_{J1}x_J - k_{J2}y_J)}) - 1.0, \quad (4)$$

$$A_D =$$

$$A_{D0} + K_{DI} [2.0 / (1.0 + e^{(-k_{D1}x_D - k_{D2}y_D)}) - 1.0], \quad (5)$$

$$A_E =$$

$$A_{E0} + K_{EI} [2.0 / (1.0 + e^{(-k_{E1}x_E - k_{E2}y_E)}) - 1.0]. \quad (6)$$

A_J, A_D, A_E 分别为喷嘴转角控制单元、倒车转角控制单元、发动机转速控制单元的输出^[7];

x, y : 表示各单元输入的偏差和偏差变化率;

k : 表示各单元S面控制器的控制参数 k_1, k_2 ^[8];

A_{D0}, K_{DI} : 分别为上一控制节拍倒车转角控制单元的输出以及控制器的积分系数;

A_{E0}, K_{EI} : 分别为上一控制节拍发动机转速控制单元的输出以及控制器的积分系数.

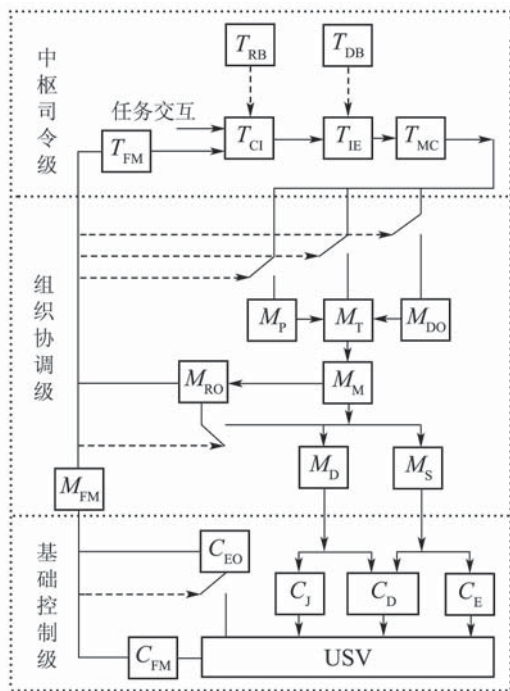


图5 基于仿人智能图式的自主驾控系统
Fig. 5 The autonomous pilot system based on human-simulated intelligent schema

5 无人艇安全自动驾驶半实物仿真(Semi Physical Simulation)

为了验证该基于仿人智能图式所设计的自主驾控系统的可行性和可靠性, 进行了大量的半实物仿真实验^[9]. 该半实物仿真系统主要包括地面监控计算机、OCTANE仿真工作站、传感器数据转换器、嵌入式自主驾控计算机、视频转换器、嵌入视觉处理计算机. OCTANE仿真工作站负责无人艇的水动力和运动视景仿真(根据无人艇的六自由度操纵运动数学模型计算, 得到艇体的运动状态信息, 如速度向量、相对位置等); 传感器数据转换器类似于集成了无人艇大部分传感器的计算机, 它接收来自于仿真工作站的所有数据信息, 再转化成实际传感器的数据格式, 然后按各自的接口协议转发给嵌入式自主驾控计算机. 例如, 将无人艇的相对位置信息转化成大地理坐标下的经纬度信息, 再格式化GPS的数据形式, 通过RS232串口发送给自主驾控计算机.

5.1 航线跟踪仿真(Tracking simulation)

航线跟踪是无人艇最基本的功能, 在广阔的海洋中航行, 大部分时间是处于航线跟踪状态. 该航线跟踪仿真试验的参数为: 喷嘴转角控制单元的参数

$$k_{J1} = 2, k_{J2} = 5,$$

倒车转角控制单元的参数

$$k_{D1} = 3, k_{D2} = 2.5, K_{DI} = 0.1,$$

发动机转速控制单元的参数

$$k_{E1} = 2, k_{E2} = 2.5, K_{EI} = 0.1,$$

航线跟踪控制的参数: 最大艇速为15 m/s, 最大停车距离为200 m, 艇体最小回转半径为8 m, 航点间的切换距离为50 m. 航线跟踪仿真的目的是验证无人艇能否流畅地切换航线, 并使航线偏差最小化. 图6(a)为某次航线跟踪过程图, 图中虚线表示待跟踪的航线, 实线为艇体的实际航迹, 圆点为航点. 为了实时跟踪设定的航线, 无人艇必须不断地改变艇体的航向和航速, 来抵消风浪流的影响, 达到航线跟踪偏差最小. 图6(b)(c)分别为无人艇的航向和航速跟踪过程, 随着航线的变化, 期望航向和航速随之改变, 而艇体的航向和航速必须实时跟踪期望值; 对于底层运动执行机构来说, 航线跟踪就是不断地精确调整喷水推进器的喷射角和倒车角来实现的, 它们的变化过程如图6(d)所示.

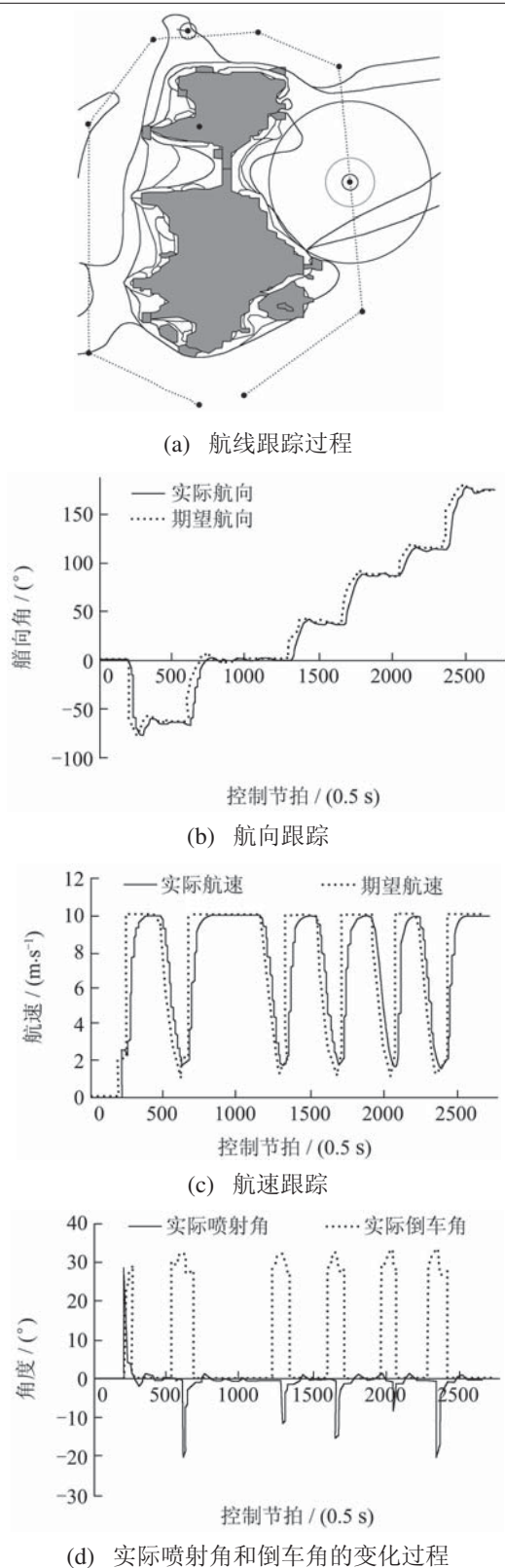


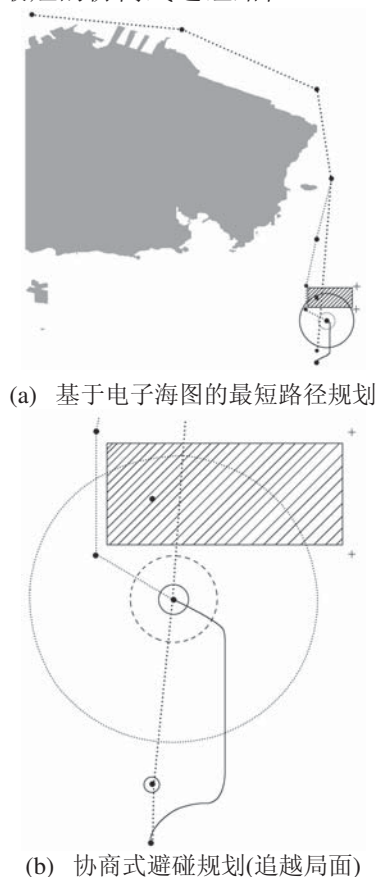
图 6 无人艇航线跟踪控制分析

Fig. 6 Analysis of the USV course tracking control

5.2 自主航行仿真(Autonomous pilot simulation)

无人艇的安全自主航行是本项目该阶段的目标, 为了确保它船和本艇的安全, 本项目通过3个模块来确保无人艇不会与它船或障碍物发生碰

撞, 即: 协商式避障、反应式避障和紧急避障, 协商式避障距离为300~1000 m, 反应式避障距离为100~300 m, 当障碍物到无人艇的距离小于100 m时, 就触发紧急避障模块. 无人艇的安全自主航行仿真过程如下: 首先通过监控计算机下达航行的目的地, 路径规划器将生成一条航线, 无人艇将沿着这条设计好的航线航行, 当遇到障碍物(如: 其他船舶、漂浮物等)时, 就进行自主根据避碰级别运用不同的算法进行避碰(如: 协商式避碰、反应式避碰和紧急避碰). 图7(a)中的灰色区域为不可航区域, 是路径规划器根据电子海图数据的建模结果; 图中带三圆圈的图形代表无人艇, 其外围的实线圈、虚线圈、点线圈, 分别代表协商式避碰区域、反应式避碰区域、紧急避碰区域; 图中的黑圆点表示航点, 点划线段表示设计好的航线, 而实线代表无人艇的实际航迹; 核心表示障碍物, 障碍物的速度大小和方向可以通过核心(障碍物)周围的多边形大小表现出来; 图7(b)中的多边形是协商式避碰的建模结果(根据该船舶与无人艇所构成的不同会遇局面进行建模, 该建模形状包含了“国际海上航行规则”), 表示动态的不可航区, 该多边形顶点的外沿都有一个绿色十字符号, 是对动态不可航区的膨化结果, 表示可观点, 用于搜索最短的协商式避碰路径.



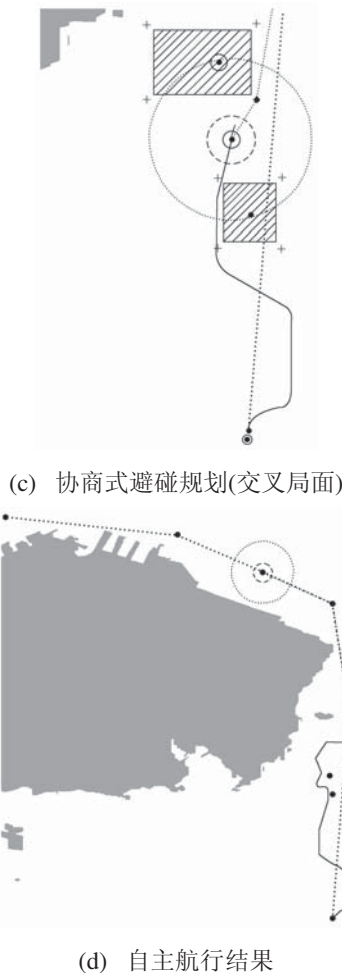


图7 无人艇安全自主航行过程分析

Fig. 7 Analysis of the USV autonomous pilot

6 结论(Conclusion)

本文在分析、总结人体运动控制系统结构的基础上,提出一种仿人智能的混合式分层递阶结构;然后运用该结构设计了无人艇的自主驾控系统,并通过智能图式的表示方法,把该自主驾控系统的混合式分层递阶结构抽象化、模块化和符号化;最后通过对无人艇进行了航线跟踪和安全自主航行的半实物仿真试验,试验结果表明,该自主驾控系统可实现无人艇的安全自主航行并达到航线跟踪的目的,验证了基于混合仿人智能图式的自主驾控系统的可行性和工程实用性。

参考文献(References):

- [1] 徐玉如, 苏玉民, 庞永杰. 海洋空间智能无人运载器技术发展展望[J]. 中国舰船研究, 2006, 1(3): 1-4.

- (XU Yuru, SU Yumin, PANG Yongjie. Expectation of the development in the technology on ocean space intelligent unmanned vehicles[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2006, 1(3): 1-4.)
- [2] 王武, 蔡子亮, 张元敏. 仿人多模态双容水箱控制系统研究[J]. 微计算机信息, 2007, 23(8): 72-73.
(WANG Wu, CAI Ziliang, ZHANG Yuanming. Study of 2-water container tank control system based on human-simulated multi-mode control[J]. *Micro-Computer Communication*, 2007, 23(8): 72-73.)
- [3] 李祖枢, 涂亚庆. 仿人智能控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
(LI Zhushu, TU Yaqing. *Human-Simulated Intelligent Control*[M]. Beijing: The Defense Industry Publishing House, 2003.)
- [4] 张华. 基于动觉智能图式的多级摆系统仿人智能运动控制[D]. 重庆: 重庆大学, 2006, 4.
(ZHANG Hua. *Research of multi-pendulum system human simulated intelligence motion control based on sensory-motor schema*[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006, 4.)
- [5] LEE S M, KWON K Y, JOH J. A fuzzy logic for autonomous navigation of marine vehicle satisfying COLREG guidelines[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2004, 2(2): 171-181.
- [6] 刘立君, 吴林. 遥控焊接力觉仿人智能参数校正级控制研究[J]. 机器人, 2005, 27(5): 464-468.
(LIU Lijun, WU Lin. Human-simulated intelligent parameter-adjusting level control of force sensing in remote welding[J]. *Robot*, 2005, 27(5): 464-468.)
- [7] 吴恭兴, 邹劲, 万磊, 等. 喷水推进无人艇的基础运动控制系统设计[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(2): 257-262.
(WU Gongxing, ZOU Jin, WAN Lei, et al. Design of the basic motion control system for water-jet-propelled unmanned surface vehicle[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(2): 257-262.)
- [8] 李晔, 庞永杰, 万磊, 等. 水下机器人S面控制器的免疫遗传算法优化[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(增刊): 324-330.
(LI Ye, PANG Yongjie, WAN Lei, et al. Immune-genetic optimization of underwater vehicles S surface controller[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2006, 27(Suppl): 324-330.)
- [9] 甘永, 毛宇峰, 万磊, 等. 水下机器人半实物运动仿真系统的设计[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(7): 2026-2029.
(GAN Yong, MAO Yufeng, WAN Lei, et al. Design of semi physical motion simulation system of underwater vehicle[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(7): 2026-2029.)

作者简介:

吴恭兴 (1983—), 男, 博士, 目前研究方向为船舶操纵与智能控制, E-mail: wugongxing-163@163.com;

万磊 (1966—), 男, 研究员, 目前研究方向为机器人智能运动控制, E-mail: wanlei2006@126.com;

邹劲 (1966—), 男, 研究员, 目前研究方向为船舶总体设计, E-mail: zoujing19@163.com;

庄佳园 (1985—), 男, 博士, 目前研究方向为船舶智能路径规划, E-mail: zhangjiayuan@163.com;

廖煜雷 (1985—), 男, 博士, 目前研究方向为船舶控制, E-mail: liaoyulei@hrbeu.edu.cn.