

DOI:10.11918/202002050

载人潜水器虚拟潜航员作业姿态仿真优化

王文中^{1,2},张树生¹,叶 聪³,陈登凯¹,樊 皓¹

(1. 工业设计与人机工效工信部重点实验室(西北工业大学),西安 710072; 2. 陕西科技大学 设计与艺术学院, 西安 710021; 3. 中国船舶科学研究中心,江苏 无锡 214082)

摘 要:为减少潜航员在深海复杂环境下的误操作,提高人因可靠性,优化载人潜水器舱室空间是一项非常重要的方法。狭小密闭空间的布局方法是通过建立仿真模拟器来进行系列优化研究与评估。以蛟龙号为例,构建基于多目标博弈下的潜航员作业姿态仿真模型,在虚拟的舱室环境中,多个目标、任务及潜航员的关节姿态、舒适性、平衡性等因素之间进行博弈。根据 MAS(multi-agent system)合作式博弈框架模型,一个行为模式层级动作就意味着完成多次微分博弈,博弈算法采用梯度下降的方法,搜索步长以前一次的子行为为基准,能快速得到虚拟潜航员的最佳工作状态。潜航员多元目标冲突问题在协商的基础上,经多次行为模式的微分博弈达到最佳均衡,其结果累加最终可获得满足多种利益的最佳均衡状态 Pareto 最优解集。仿真结果表明,潜航员在高强度、长时间作业环境下能修正自身行为,表现出良好的适用性,验证了技术的可行性和有效性。仿真得到的系列动态数据为优化潜水器舱室布局,提高人因可靠性提供了一种思路和途径。

关键词:载人潜水器; MAS 合作式博弈; 仿真优化; 作业姿态; 多目标优化; 人因可靠性

中图分类号: U662 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)08-0163-08

Simulation and optimization for operating attitudes of virtual submariners of manned submersibles

WANG Wenzhong^{1,2}, ZHANG Shusheng¹, YE Cong³, CHEN Dengkai¹, FAN Hao¹

(1. Key Laboratory of Industrial Design and Ergonomics (Northwestern Polytechnical University), Ministry of Industry and Information Technology, Xi'an 710072, China; 2. College of Art and Design, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China; 3. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, Jiangsu, China)

Abstract: To reduce the misoperation of submariners in the complex deep-sea environment and improve the reliability of human factors, the optimization of the cabin space of manned submersibles is a key method. A series of optimization research and evaluation have been carried out for the layout of small and confined space by constructing simulators. Taking Jiaolong as an example, a simulation model for the operating attitudes of submariners was built based on multi-objective game. In the virtual cabin environment, the multiple targets, tasks, and factors such as the joint attitude, comfort, and balance of submariners were regarded as a game. According to the cooperative game framework model of multi-agent system (MAS), a behavior mode hierarchical action meant to complete multiple differential games. The game algorithm adopted the method of gradient descent and searched the sub-behavior of the previous step size as the benchmark, so as to quickly obtain the optimal working state of the virtual submariner. On the basis of negotiation, the Pareto optimal solution set of the optimal equilibrium state satisfying multiple interests could be obtained by accumulating the results of the optimal equilibrium state through the differential game of multiple behavior modes. Simulation results show that the submariners could modify their behaviors under the high-intensity and long-time working environment, exhibiting good applicability, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed technology. The series of dynamic data obtained by simulation provides a means to optimize the cabin layout of submersibles and improve the reliability of human factors.

Keywords: manned submersible; cooperative games based on MAS; simulation and optimization; operating attitude; multi-objective optimization; human factor reliability

收稿日期: 2020-02-18

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0300600); 陕西省特支计划
领军人才项目(No. w099115); 复合仿真机制支持下深海载人
运载器舱室人因优化设计方法研究(31020190504007)

作者简介: 王文中(1975—),男,博士研究生;
张树生(1956—),男,教授,博士生导师;
陈登凯(1975—),男,教授,博士生导师

通信作者: 陈登凯, chendengkai@nwpu.edu.cn

狭小、密闭舱室空间的优化布局,通常是以操作
员为中心,建立仿真模拟器来进行系列优化研究与
评估,广泛用于航空宇航、飞行器及载人潜水器空间
布局中。国外的波音公司早在 1969 年研发的
BOEMAN 项目,创建人体模型进行工效分析,用于
飞机舱室布局。进入 21 世纪,随着虚拟仿真技术的

发展,美国 NASA 航空宇航的 A³I 项目、北约飞行器的 AGARD 项目以及荷兰 NLR 实验室的 GRACE 飞机驾驶舱项目^[1],都是通过仿真模拟器来研究如何优化空间布局,达到降低人为因素导致失误率的目的。国内的研究起步相对较晚,研究主体是国内的航空航天类大学,代表性的研究有科技部 973 项目、工信部十二五计划民机专项,主要是针对驾驶舱人机工效综合仿真及评估方面的研究。

载人潜水器是探索深海、开发海洋的一种神兵利器,需要潜航员在密闭、狭小的潜水器舱室进行高强度、高精度作业。如何在极度压缩的空间里进行舱室布局,符合诸多人机工程学要求,让潜航员们高效、舒适的完成潜水器作业任务,一直以来就是海洋强国研究的热门课题。本文基于虚拟仿真技术,构建潜水器舱室虚拟场景,以潜水器任务为导向,仿真实际工作中潜航员的人体生物力学参数及作业行为,经多方博弈后达到潜航员的最佳均衡状态,得到系列动态仿真数据用于人机工效综合分析与评估,为优化舱室布局提高人因可靠性提供一种探讨途径。

1 载人潜水器舱室布局

1.1 载人潜水器深潜与任务

载人潜水器深潜的操作流程简化为下潜、坐底、巡航、工作、上浮 5 个部分。蛟龙号潜水器采用无动力上浮下潜方式,出水带自动定位功能^[2],如图 1 所示。潜水器任务可简化为测量、取样、设备布放、检测等多种作业任务。

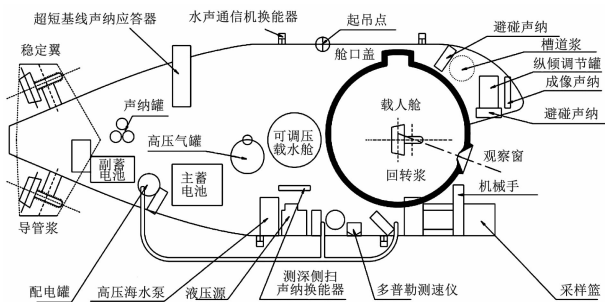


图 1 “蛟龙号”总布置图

Fig. 1 General layout of Jiaolong

1.2 潜水器舱室分割与布局

载人潜水器舱室近似椭圆形球体,如图 1 的粗线框球形。球形舱内径 2.1 m,能容纳包括一名操作员、两名科学家共 3 名潜航员,以及座椅、监视器、操纵器等其他设备。工作舱按功能可分为主控区、显示区、生保区、工作区及其他设备区,如图 2(a)所示。3 名潜航员工作区域重叠,其任务活动空间集中在舱室前部,一人主操作,一人辅助观察,一人监视。舱室后半部分用于放置大型设备,舱室壁放置

显示器和监视器等,如图 2(b)所示就是基于潜航员的舱室分割布局。

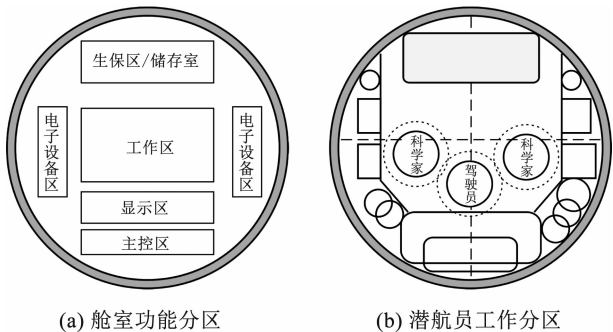


图 2 基于潜航员的舱室分割布局

Fig. 2 Cabin layout decomposition based on submariners

2 构建多目标博弈下的潜航员作业姿态仿真模型

博弈论又称为对策论 (Game Theory),主要分为合作博弈与非合作博弈,是研究具有竞争性质个体之间相互作用的数学理论和方法。1956 年 Blackwell 将向量函数的零和博弈称为多目标博弈模型,1959 年 Shapley 在多目标博弈问题中定义了均衡点^[3]。博弈论常根据多个个体行为来研究其优化策略,广泛应用于现代科学中。构建多目标博弈下的潜航员作业姿态仿真模型,得到舱室环境、潜水器任务与潜航员人机工学诸多要素之间相互作用的动态仿真数据,是评估潜航员人因可靠性的一种有效方法^[4]。

2.1 潜航员肢体系统简化模型

构建作业姿态仿真模型,首先把潜航员肢体可以看作是自由度很高的多关节链状结构,肢体运动通过相邻肢体转动来实现,不同范围运动肢体的舒适度不同。潜航员肢体模型简化为 15 个刚体、14 个关节^[5],如图 3(a)所示,潜航员上肢及局部坐标如图 3(b)所示。

2.2 潜航员舱室作业仿真路线规划

载人潜水器舱室布局依据图 2 构建仿真模型如图 4(a)所示,舱室的底部是连体座椅,座椅内部是能源及电子设备,舱室后面是氧气及储物柜,最上面是生命保障物资及进出口。根据潜水器任务,将舱室作业路线规划成 4 个阶段(因为舱室空间狭小,作业主要由一个潜航员来操作,其余两位科学家在仿真中隐去)。为避免在其他空间的随机搜索,有效提高作业效率,本文把潜航员作业路线集中在 4 个阶段。1)操作台操控、作业及监视;2)打开座椅维修、取放物品;3)打开后部维修、取放物品;4)打开顶部取放物品及进出舱室,运动规划路线图如图 4(b)所示。

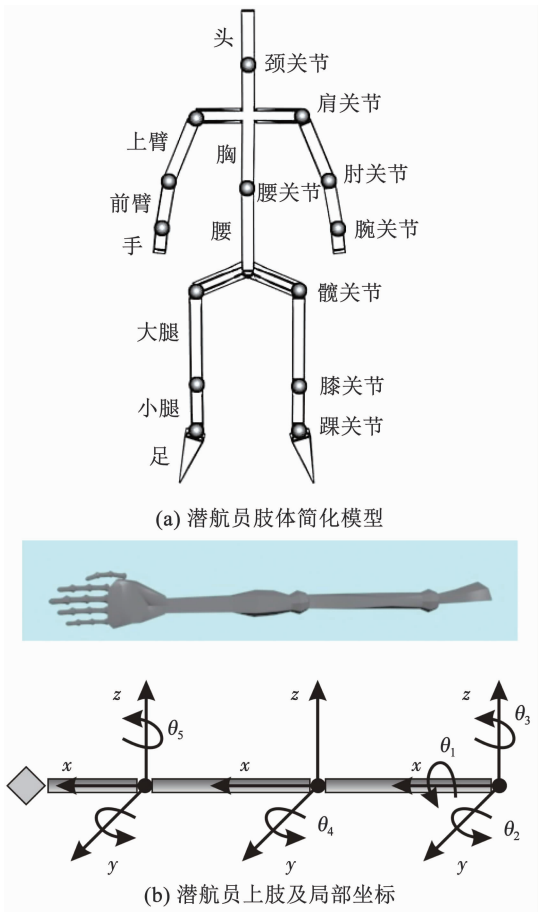


图 3 潜航员肢体系统简化模型

Fig. 3 Simplified model of submeriner body system

潜水器球型舱室内白色区域是虚拟潜航员的
活动空间,实线是规划路线,灰色区域是约束空间。虚
拟潜航员沿实线在白色区域内进行运动规划,分别
可以得到路径点 M 和 N 。重复上述步骤,最终完成
4 个阶段路径的整个运动规划。

2.3 构建潜航员舱室作业姿态仿真模型

假定潜水器舱室布局非常完美:既能完成潜水
器任务,又能满足潜航员可视性、可达性、舒适性等
人因工程要求。把潜航员的最佳舒适状态作为一个
多目标博弈模型来研究,即构建多目标博弈下的潜
航员作业姿态仿真模型解空间,也就是潜航员在潜
水器舱室完成任务的过程中,包含所有可能影响潜
航员作业姿态因素所组成的集合^[6]。

$$X = \{ \mathbf{x} | f_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, 2, 3, \dots, m \} \subset R^m \quad (1)$$

式中: X 为潜航员在载人潜水器舱室的作业姿态集
合,是一组 m 维空间; $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ 为潜航员
作业姿态向量;分量 $x_i \in \mathbf{x} (i = 1, 2, 3, \dots, m)$ 为潜航
员工作状态参数,如潜航员的舒适性、平衡性、可达
性及关节弯曲等。潜航员舱室作业姿态 $\mathbf{x} \in X$ 应满
足约束条件 $f_i(\mathbf{x}) \leq 0 (i = 1, 2, 3, \dots, m)$,约束包括

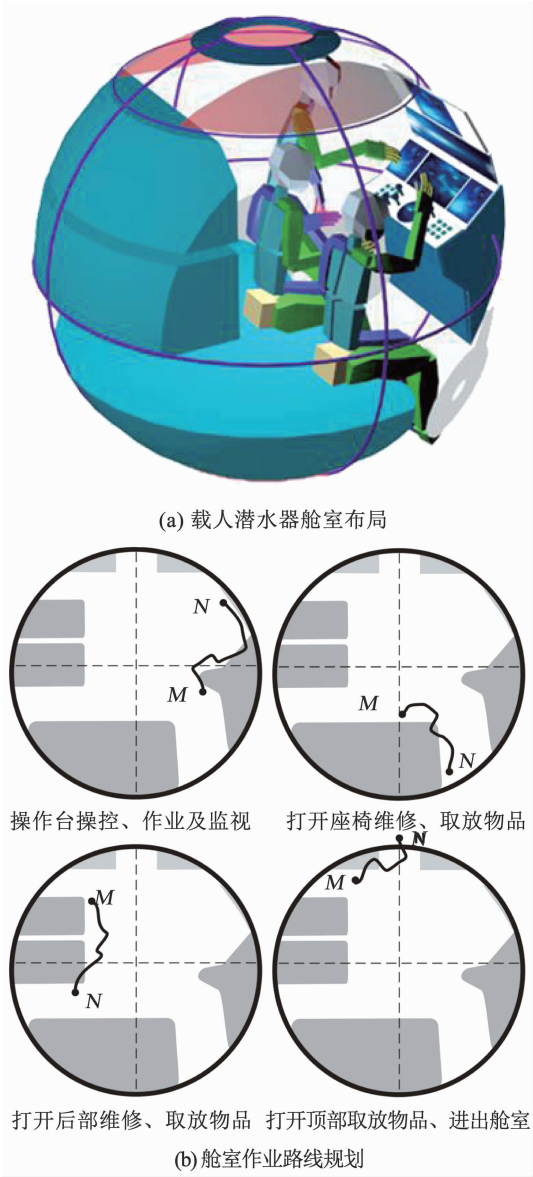


图 4 潜航员在潜水器舱室空间路线规划

Fig. 4 Route planning of submeriners in the cabin space of the submersible

潜航员肩、肘、腕关节的活动范围、可视性、舒适度、
平衡性等。

由此构建基于潜航员作业的多目标博弈模型,
潜航员在潜水器舱室作业姿态的数学模型^[7]可表
述如下:

$$\begin{cases} \max \{ \boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{\mu}(\mathbf{x}) \} = \max_{\mathbf{x} \in D} \left\{ \sum_{i=1}^m \omega_i \times u_i(x_i) \right\} \\ \text{s. t. } f_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, 2, 3, \dots, m \\ \boldsymbol{\omega} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m] \text{ 且 } \sum_{i=1}^m \omega_i = 1 (\omega_i \geq 0) \\ \boldsymbol{\mu}(\mathbf{x}) = [u_1(x_1), u_2(x_2), \dots, u_m(x_m)]^T \in [0, 1]^m \end{cases} \quad (2)$$

式中:潜航员作业姿态 $\mathbf{x}$ 的舒适度函数设为 $\boldsymbol{\mu}$,也就

是说分量 $u_i(x_i) \in \mu(x)$ 是 $x_i \in x (i = 1, 2, \cdots, m)$ 的舒适度评估函数, 用来评判潜航员在舱室作业姿态的舒适程度; $\omega \cdot \mu(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i \times u_i(x_i)$ 为潜航员在舱室完成潜水器任务舒适度的总体评估函数; ω 为权向量, 表征潜航员在舱室作业是否舒适的权重, 当然, 随着潜航员的个性差异其取值也不一样, 具体情况见表 1。由潜航员在潜水器舱室作业状态的数学模型可知, 潜航员最佳作业状态 X 就是舒适度评估函数最优解集。

表 1 不同偏好下各项人机因素指标权重
Tab. 1 Weight of human-machine factors under different preferences

偏好类型	ω_{balance}	ω_{load}	ω_{fatigue}	$\omega_{\text{reachability}}$
平衡性	0.631	0.126	0.119	0.124
关节负荷	0.121	0.614	0.112	0.153
疲劳性	0.136	0.108	0.625	0.131
关节舒适	0.128	0.126	0.137	0.609

2.4 多目标博弈下的潜航员作业人机工学约束

潜航员连续维持长达十几个小时高强度的作业姿态, 需要克服人体生理因素的影响。由人机工学可知, 关节是通过肌肉的运动实现的, 与运动量和作业时间成正比。在人因工程的约束下, 基于模糊多目标博弈理论^[8], 将式(2)中各评估函数 $u_i(x_i) \in \mu$ 表示为潜航员在载人潜水器舱室工作状态分量 $x_i \in x$ 的舒适度模糊最优集, 关节舒适度的评估函数为

$$u_i(x_i) = 1 - \frac{\int_0^{T_{\text{lim}}} g_i(x_i, t) dt}{g_i^{\text{max}} \cdot T_{\text{lim}}} \in [0, 1] \quad (3)$$

由式(3)可以得出, 当 $t = 0$ 时, 即潜航员刚开始执行任务时, 舒适度 $u_i = 1$, 也就是潜航员保持最舒适状态(超常状态舒适度也看成是 1); 当 t 趋近 T_{lim} 时, 即疲劳等生理数值达到潜航员的极限值时, 舒适度 $u_i = 0$, 也就是潜航员不能再工作。因此, 舒适度评估函数 u_i 的评估范围为 $[0, 1]$, 关节承受的负荷 g_i 是肩、肘、腕关节转动角度 x_i 和时间 t 的函数, 式(3)通常时间越长, 由疲劳等生理因素导致的 g_i 是递减的, 关节负荷 g_i 在一定时间范围内的积分表达疲劳效应。 g_i^{max} 是肩、肘、腕关节能承受的最大负荷, T_{lim} 是潜航员在完成某一项潜水器任务所需的时间。

μ 的模糊 Pareto 最优解集简化为梯形模糊函

数^[9], 如图 5(a)所示, 关节转角为横坐标; 关节舒适度为纵坐标。潜航员肩、肘、腕关节梯形函数见式(4)。具体关系如图 5(b)所示, 舒适度值越高则说明关节转角呈现的姿态越好。

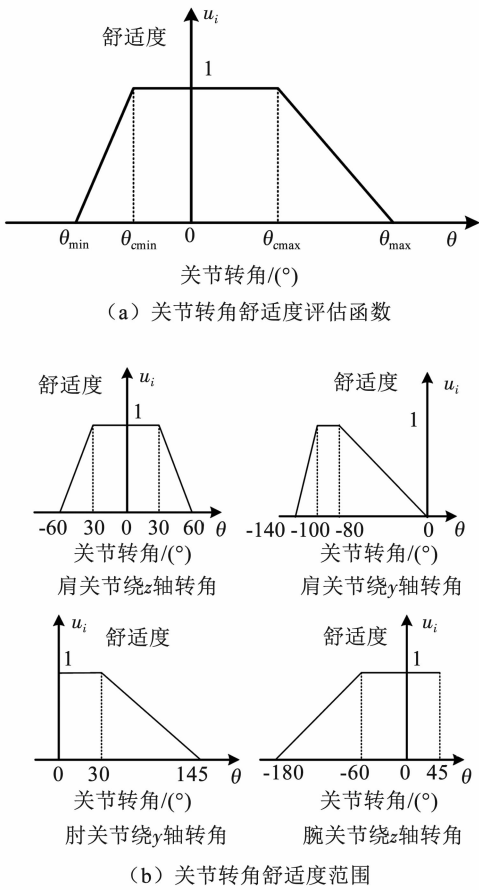


图 5 关节舒适度评估函数与范围

Fig. 5 Joint comfort assessment function and its range

$$u_i(x_i) = \begin{cases} \frac{x_i - \theta_{\min}}{\theta_{\text{cmin}} - x_i}, & \theta_{\min} \leq x_i \leq \theta_{\text{cmin}} \\ 1, & \theta_{\text{cmin}} \leq x_i \leq \theta_{\text{cmax}} \\ \frac{\theta_{\max} - x_i}{x_i - \theta_{\text{cmax}}}, & \theta_{\text{cmax}} \leq x_i \leq \theta_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\theta_{\min}$ 、 $\theta_{\max}$ 分别为关节转角的最小值和最大值; θ_{cmin} 、 θ_{cmax} 分别为关节转角处于舒适状态的最小值和最大值。潜航员作业姿态的舒适性优化模型具有以下优点: ①将潜航员在载人潜水器舱室作业姿态设定为一个多目标优化模型, 其目的是提高潜航员的人因可靠性, 向量 x 代表潜航员的多种行为状态。②量纲一的处理各分量函数 u_i , 在一个模型内整合不同类型的潜航员作业姿态参数, 线性加权方式评估潜航员作业姿态效果。③由于不同潜航员在潜水器舱室完成作业任务时带有自身等主观因素, 所以引进权向量 ω , 表征个体的差异性, 权向量的取值差异用来协调参数之间均衡^[10], 见表 1。

3 虚拟潜航员作业姿态的优化算法

3.1 3 层虚拟潜航员作业姿态结构

虚拟潜航员作业姿态优化到最佳,要分类研究潜航员在潜水器舱室的动作特点与行为方式。构建 3 层结构的虚拟潜航员行为模型,在密闭狭小舱室特殊环境下,从潜水器作业任务入手,将潜航员的行为动作分解成 3 个层级:即原子动作层级、子行为层

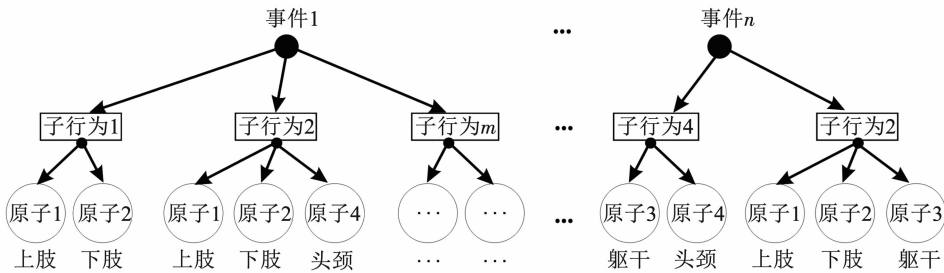


图 6 3 层虚拟潜航员作业姿态结构

Fig. 6 Three-level virtual submariner operating attitude structure

3.2 基于潜航员的 MAS 合作式博弈框架

基于 MAS 虚拟潜航员优化作业行为仿真框架^[12],构建载人潜水器舱室模型,如图 7 所示。

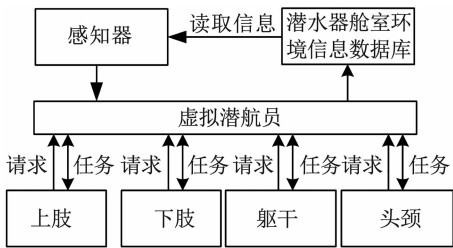


图 7 MAS 合作式博弈框架

Fig. 7 Cooperative game framework based on MAS

3.3 潜航员作业姿态多目标博弈下的 Pareto 最优解

虚拟潜航员作业姿态算法基于 MAS 合作式博弈框架,是潜航员在潜水器舱室进行多个目标和任务之间的博弈与平衡;包括潜航员必须完成的多个作业任务、潜航员在潜水器舱室的作业姿态、舒适性、平衡性等因素的博弈^[13];让虚拟潜航员状态达到最优是所有博弈的最终目标。由 MAS 合作式博弈框架得知,一个子行为层级动作就可以看做是完成了一次微分博弈,一个行为模式层级动作就意味着完成多次微分博弈,同理,多次行为模式博弈结果累加可得虚拟潜航员最终行为状态。

根据 MAS 合作博弈框架模型,因为多目标冲突的问题,虚拟潜航员所有目标评估值 $\mu_i \in \mathbf{x} (i = 1, 2, \dots, m)$ 不可能同时达到最佳,其最佳作业姿态是多元目标在协商的基础上达到最佳均衡^[14]。因此,所有参与博弈的目标 $X_i \in \mathbf{x} (i = 1, 2, \dots, m)$ 都必须

级以及行为模式层级^[11]。原子动作作为最小的行为单元,代表潜航员肢体的运动,基本形式有两种:正向运动和逆向运动。一组原子动作组合就构成一个子行为;完成一次子行为层级动作,也就是说在多个原子动作目标中完成了一次博弈算法。将相同潜水器作业任务的子行为再归类到同一行为模式,具体关系如图 6 所示。

遵守的谈判底线可以表示为

$$\bar{\mu} = [\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2, \dots, \bar{\mu}_m]^T \in [0, 1]^m \tag{5}$$

所谓潜航员作业姿态评估博弈的 Pareto 最优解是指:存在 $\mathbf{x}^* \in X$,使得 $\mu(\mathbf{x}^*) \geq \bar{\mu}$,即

$$\mu_i(\mathbf{x}^*) \geq \bar{\mu}_i, (i = 1, 2, \dots, m) \tag{6}$$

则 $\mu(\mathbf{x}^*)$ 是潜航员姿态评估的 Pareto 最优解,而 $\mathbf{x}^*$ 是一个满意的潜航员作业姿态,也是潜航员作业状态的 Pareto 最优解。

3.4 潜航员作业姿态在 MAS 合作式博弈下的优化算法

求解多目标决策,也就是寻求潜航员最佳的行为状态,是一组动态博弈^[15]。本文博弈算法采用梯度下降的方法,搜索步长以前一次的子行为为基准,这样就能以最快的速度得到虚拟潜航员的最佳工作状态。

步骤 1 潜航员舱室工作舒适度评估。博弈参与者分别为潜航员上肢、下肢、躯干、头颈等舒适度评估。综合评估结果表示为 $\mu_i(\mathbf{x}) = [\mu_1, \mu_1, \dots, \mu_m]$,由博弈仲裁(虚拟潜航员)计算总体舒适度 $\omega \cdot \mu_i(\mathbf{x})$ 。

步骤 2 潜航员工作满意程度的评判。潜航员舱室工作满意程度的评判标准是:潜航员姿态评估 $\mu_i(\mathbf{x})$ 满足 $\mu(\mathbf{x}^*) \geq \bar{\mu}$ 所有的 Pareto 最优解。当潜航员行为状态 $\mathbf{x}$ 满足需求时,结束算法。判断潜航员总体舒适度是否最佳,通常是令潜航员总体舒适度 $C(\mathbf{x}) = \omega \cdot \mu_i(\mathbf{x})$,若下式成立:

$$|C(\mathbf{x}) - C(\mathbf{x}^*)| \leq \varepsilon \tag{7}$$

则算法结束。 $\mathbf{x}^*$ 为潜航员舱室最佳作业姿态; ε 为潜航员在潜水器舱室作业姿态舒适度评估的容许误差。

步骤 3 确定梯度搜索步长。虚拟潜航员最佳的作业姿态 $\mathbf{x}^* \in X$, 则梯度搜索步长为:

1) 假设当前潜航员工作状态 $\mathbf{x}^*$ 的评估结果为 $\mu_i(x_i) \leq \bar{\mu}_i$, 则触发博弈各方的谈判底线, 按照 MAS 合作博弈框架, 博弈各方 x_i 请求调整其自身的行为状态, 达到改善潜航员舱室工作状态, 提高其舒适度。

2) 博弈仲裁根据各目标权向量的重要程度, 将参与博弈的各方(潜航员上肢、下肢、躯干、头颈)组成谈判序列。

3) 确定梯度搜索步长, 并按照优先权原则从队列 x_i 的议题中, 来寻找提高潜航员舱室作业舒适度 $\omega \cdot \mu_i(x)$ 最佳的子行为。

步骤 4 执行上面寻找的子行为, 博弈参与者被博弈仲裁分配给相应功能的原子动作任务, 让参与博弈的各方完成一次博弈合作。

步骤 5 在子行为执行完毕后, 如步骤 1 一样对新的潜航员舱室工作状态进行评估, 并分析得到的结果。假如合作失败, 则子行为博弈失败, 返回重新进入博弈流程。假如合作成功, 则子行为博弈成功, 显示博弈动画。

然后返回步骤 2 循环执行, 直到满足式(6)、

(7) 的条件为止。也就是说虚拟潜航员舱室作业姿态达到满意, 得到一组 Pareto 最优解。

4 虚拟潜航员仿真实验及结果分析

4.1 虚拟潜航员仿真实验

基于虚拟潜航员的作业姿态仿真, 在 windows/VC6.0/OpenGL 平台上开发了虚拟潜航员作业姿态仿真系统。本系统提供了如图 4(a) 所示的虚拟载人潜水舱室, 在舱室内创建了潜水器舱室设备、3 名潜航员的几何模型及人体骨骼控制系统^[16]。这此基础上, 构建基于多目标博弈下的虚拟潜航员作业姿态仿真模型, 可以实现虚拟潜航员博弈参与者的自动协调^[17]。

系统还能对虚拟潜航员的不同作业姿态进行比较评估, 并得出其优劣的具体数据, 如图 4(b) 所示, 4 个阶段虚拟潜航员要完成的作业任务, 系统为 4 个阶段的作业姿态进行评估并得出结论。

4.2 虚拟潜航员仿真实验结果分析

为保证算法的稳定性, 本文选取图 4 中 4 个阶段的规划路线, 用它们的仿真实例来验证。如图 8 所示, 每个阶段的仿真能生成 100 ~ 300 帧动画, 从动画序列帧中选取代表性关键帧来展示虚拟潜航员的典型作业姿态。在每组实例中, 完成的工作任务不同, 潜航员的作业姿态也不一样。

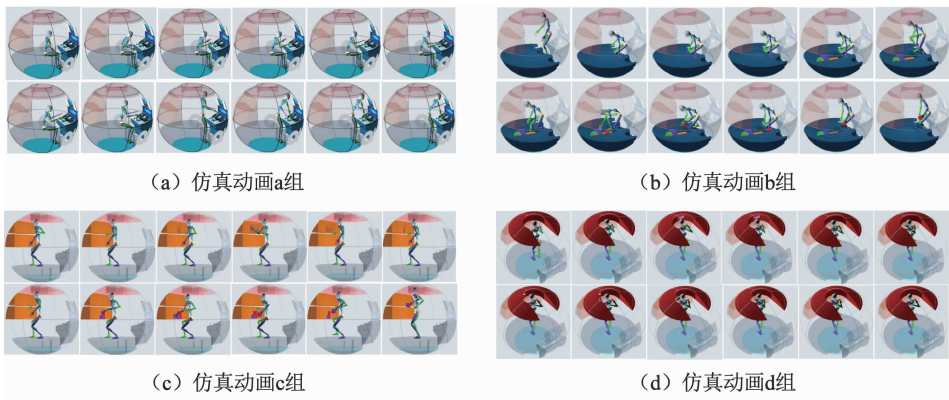


图 8 4 组虚拟潜航员作业姿态仿真

Fig. 8 Simulation of operating attitudes of four groups of virtual submariners

尽管仿真平台和潜水器舱室潜航员实际作业之间存在不同, 但仿真系统能生成真实感较强的虚拟潜航员作业仿真动画, 它展示了潜航员作业行为的基本姿态, 跟现实中潜航员在舱室完成的任务一样, 最终工作姿态合理自然。

仿真实例选择仿真动画 c 组, 如图 8、9 所示, c 阶段仿真共生成 195 帧动画, c 阶段仿真包括潜航

员在舱室后部, 执行开箱、维修和取放物品等作业的仿真动画。由图 9(c) 所示, 自 0 ~ 195 帧, 仿真算法处于打开后部物品储存箱进行维修和取放物品模式, 实现了虚拟潜航员来到潜水器舱室后部, 打开物品储存箱, 进行维修和取出所需物品作业。在仿真实例 c 阶段, 系统测评虚拟潜航员舒适度及参与博弈分量的舒适度, 在开始阶段保持舒适状态, 一段时

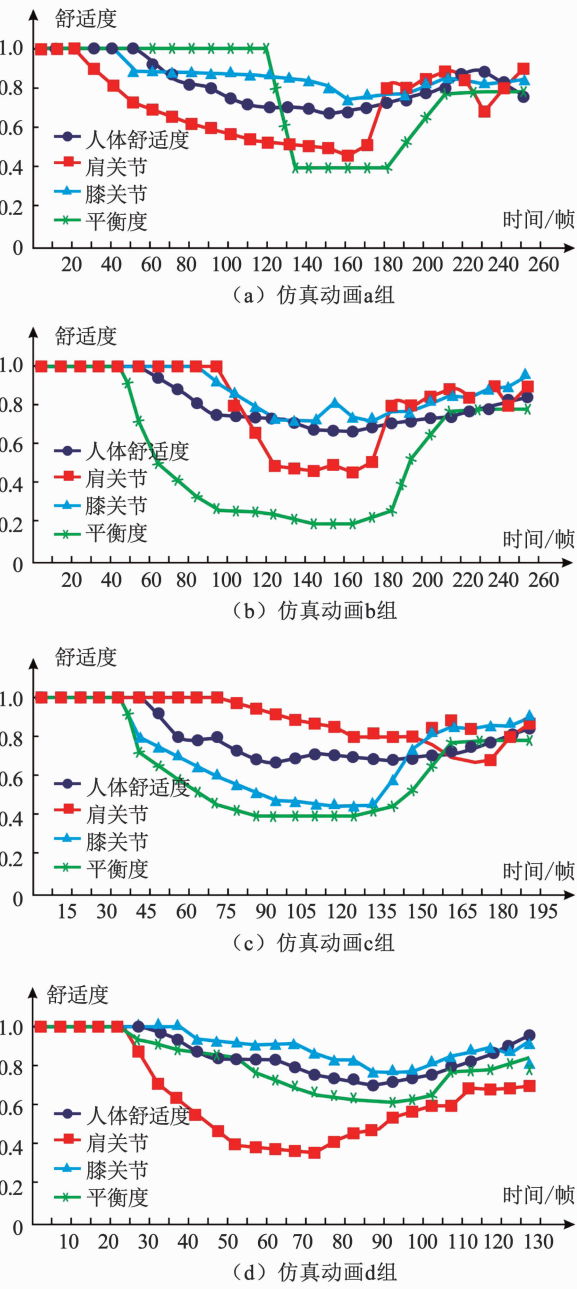


图 9 潜航员舒适度评估变化趋势

Fig. 9 Change trend of submariner comfort assessment

间后都呈下降趋势。拐点在 135 帧, 潜航员总体舒适度、肩关节、膝关节和潜航员平衡性为相对低位, 分别是 0.683 5, 0.796 2, 0.425 3 和 0.405 8。从仿真动画得到的数据看, 人体平衡性和膝关节状态是导致影响潜航员舱室作业总体舒适度不高的主要原因。随后, c 阶段的仿真动画从相对低点的 135 帧到 195 帧结束为止, 虚拟潜航员处于自动优化模式, 优化算法导致总体舒适度、肩关节、膝关节和潜航员平衡性曲线呈上升趋势。最终, 参与博弈的各分量数值为: 总体舒适度为 0.824 4、肩关节为 0.883 6、膝关节为 0.850 6 和平衡性为 0.781 6。由数据可知参与博弈的各分量状态都得到很大改善。潜航员

在载人潜水器舱室的工作状态满足博弈论的预设条件, 是一组多目标博弈下的 Pareto 最优解。

5 结 论

1) 仿真模型在潜航员自身参数、行为感知及模糊决策基础上得到的结果, 不需要潜航员复杂生理及动作数据, 大大简化和缩短仿真周期。

2) 根据 MAS 合作式博弈框架模型, 经多次行为模式的微分博弈达到最佳均衡, 其结果累加最终获得满足多种利益的最佳均衡状态 Pareto 最优解集。

3) 多个目标与任务之间建立的博弈机制, 搜索步长以前一次的子行为为基准, 能快速得到潜航员随时间变化的各种参数趋势曲线, 行为动画和仿真数据能直观评估人因可靠性, 也为优化舱室空间布局提供一种思路和途径。

4) 仿真博弈算法只是主观从潜航员自身行为入手, 仿真系统设置不完善, 在下一步将加入疲劳等生理约束因素, 引进仿生及其他算法来完善此方法, 能得到更精确更实际的虚拟潜航员仿真。

参考文献

[1] ABATE A F, GUIDA M, LEONCINI P, et al. A haptic-based approach to virtual training for aerospace industry[J]. Journal of Visual Languages and Computing, 2009, 20: 318. DOI: 10.1016/j.jvlc.2009.07.003

[2] 任玉刚, 刘保华, 丁忠军, 等. 载人潜水器发展现状及趋势[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(2): 114

REN Yugang, LIU Baohua, DING Zhongjun, et al. Research on the current status and development trend of manned submersibles[J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(2): 114. DOI:10.3969/j.issn.1003-2029.2018.02.019

[3] QIU Shiguang, HE Qichang, FAN Xiumin, et al. Virtual human hybrid control in virtual assembly and maintenance simulation[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(3/4): 867

[4] 孙守迁, 吴群, 吴剑锋. 虚拟人技术及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 6

SUN Shouqian, WU Qun, WU Jianfeng. Virtual human technology and application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 6

[5] 韩端峰, 韩海辉, 刘峰, 等. 载人潜水器驾驶舱三维布局优化研究[J]. 船舶工程, 2013, 35(1): 76

HAN Duanfeng, HAN Haihui, LIU Feng, et al. Research on 3D layout optimization of HOV cabin[J]. Ship Engineering, 2013, 35(1): 76. DOI:10.13788/j.cnki.cbge.2013.01.018

[6] WANG Wenzhong, ZHANG Shusheng, YE Cong, et al. A new method for optimizing the cabin layout of manned submersibles[J]. Complexity, 2020, 2020: 6626602. DOI: 10.1155/2020/6626602

[7] BOULIC R, MAUPU D, THALMANN D. On scaling strategies for the full-body postural control of virtual mannequins[J]. Interacting with Computers, 2009, 21(1/2): 11. DOI: 10.1016/j.intcom.2008.10.002

[8] 王朝晖, 陈恳, 朱心雄. 一种虚拟人作业行为的自主优化模型[J]. 软件学报, 2012, 23(9): 2358

WANG Zhaohui, CHEN Ken, ZHU Xinxiong. Automatic

- optimization model for virtual human's working behaviors[J]. Journal of Software, 2012, 23(9): 2358. DOI: 10.3724/SP.J.1001.2012.04174
- [9] 张帅, 何卫平, 陈登凯, 等. 载人潜水器舱室空间舒适性复合评估方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(10): 83
ZHANG Shuai, HE Weiping, CHEN Dengkai, et al. Compound evaluation method for the space comfort of manned submersible[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(10): 83. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201810148
- [10] 王朝晖. 虚拟人自适应行为的多 Agent 决策模型与人机工程仿真[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2009
WANG Zhaohui. Multi-agent based decision making for adaptive behavior of virtual human and ergonomic simulation[D]. Beijing: Beihang University, 2009
- [11] 武维维, 叶林梅, 邵晓东, 等. 基于多目标遗传算法的虚拟人作业姿态仿真[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 155
WU Weiwei, YE Linmei, SHAO Xiaodong, et al. Working posture simulation method for virtual human based on multi-objective genetic algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 155. DOI: 10.13196/j.cims.2019.1.015
- [12] 杨宇盟, 聂斌, 方红根, 等. 虚拟人手臂避障抓取运动规划[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(8): 1362
YANG Yumeng, NIE Bin, FANG Honggen, et al. Planning collision-free grasping actions of virtual human[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(8): 1362
- [13] 陈登凯, 范昱, 张帅, 等. 舱内功能及人机工效导向的载人潜水器工作舱布局设计方法[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(2): 41
CHEN Dengkai, FAN Yu, ZHANG Shuai, et al. Manned submersible working cabin layout design method under cabin function system constraints and ergonomic constraints[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(2): 41. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2018.02.006
- [14] 王文中, 张树生, 余隋怀. 基于粒子群优化的 BP 神经网络图像复原算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(4): 709
WANG Wenzhong, ZHANG Shusheng, YU Suihui. Image restoration by BP neural based on PSO[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(4): 709
- [15] 叶聪, 宗立成, 陈登凯. 虚拟设计在潜水器舱室布局设计中的研究与应用[J]. 机械设计, 2015, 32(1): 6
YE Cong, ZONG Licheng, CHEN Dengkai. Research and application on virtual design in cabin layout design of deep submergence vehicle[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(1): 6. DOI: 10.13841/j.cnki.jxsj.2015.01.002
- [16] 张帅, 叶聪, 何卫平, 等. 载人潜水器坐底过程人因失效预测[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 39(2): 290
ZHANG Shuai, YE Cong, HE Weiping, et al. Research on method of human failure prediction in the process of landing manned submersibles[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 39(2): 290. DOI: 10.11990/jheu.201609053
- [17] 姜健, 赵杰, 臧希喆. 基于并列选择遗传算法的多机器人协作探测[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(5): 1218
JIANG Jian, ZHAO Jie, ZANG Xizhe. Coordinated multi-robot exploration based on parallelism selection genetic algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(5): 1218. DOI: 10.16208/j.issn1000-7024.2008.05.083

(编辑 张 红)

(上接第 108 页)

本文算法仍存在以下不足之处: 1) 在相似且特征单一的场景中, 定位误差较大, 如对称的车道等; 2) 平均定位误差只达到了分米级, 尚未达到厘米级。利用定位过程中的误差信息作为反馈对制图过程进行干预, 即利用众包技术提高地图表征能力, 降低定位误差, 将是本文下一阶段的重点研究计划。

参考文献

- [1] 吴文静, 陈润超, 马芳武, 等. 车辆对行人速度障碍自主避碰的驾驶方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(9): 74
WU Wenjing, CHEN Runchao, MA Fangwu, et al. A driving method of autonomous collision avoidance for the velocity obstacle of pedestrians[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(9): 74. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201804180
- [2] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(3): 239. DOI: 10.1109/34.121791
- [3] RUSU R B, MARTON Z C, BLODOW N, et al. Learning informative point classes for the acquisition of object model maps[C]// 2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision on IEEE. Hanoi: IEEE, 2008: 643. DOI: 10.1109/ICARCV.2008.4795593
- [4] ZHANG J, SINGH S. LOAM: lidar odometry and mapping in real-time[C]// Robotics: Science and Systems Conference. Berkeley: [s. n.], 2014: 1. DOI: 10.15607/RSS.2014.X.007
- [5] ZHANG J, SINGH S. Low-drift and real-time lidar odometry and mapping[J]. Autonomous Robots, 2017, 41(2): 401. DOI: 10.1007/s10514-016-9548-2
- [6] BAY H, TUYTELAARS T, GOOL L. SURF: speeded up robust features[C]// Computer Vision-ECCV 2006. Berlin: [s. n.], 2006: 404. DOI: 10.1007/11744023_32
- [7] RUBLEE E, RABAU D V, KONOLIGE K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF[C]// 2011 International Conference on Computer Vision on IEEE. Barcelona: IEEE, 2011: 2564. DOI: 10.1109/iccv.2011.6126544
- [8] 刘国忠, 胡钊政. 基于 SURF 和 ORB 全局特征的快速闭环检测[J]. 机器人, 2017, 39(1): 36
LIU Guozhong, HU Zhaozheng. Fast loop closure detection based on holistic features from SURF and ORB[J]. Journal of Robot, 2017, 39(1): 36. DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2017.0036
- [9] MARQUARDT D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1963, 11(2): 431. DOI: 10.2307/2098941
- [10] HIMMELSBACH M, HUNDELSHAUSEN F V, WUENSCH H J. Fast segmentation of 3D point clouds for ground vehicles[C]// 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium on IEEE. San Diego: IEEE, 2010: 560. DOI: 10.1109/ivs.2010.5548059
- [11] BOGOSLAVSKIY I, STACHNISS C. Fast range image-based segmentation of sparse 3D laser scans for online operation[C]// 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems on IEEE. Daejeon: IEEE, 2016: 163. DOI: 10.1109/iros.2016.7759050
- [12] TAO Qianwen, HU Zhaozheng, HUANG Gang, et al. LiDAR-only vehicle localization based on map generation[C]// Transportation Research Board (TRB) 2019 Annual Meeting. Washington DC: [s. n.], 2019

(编辑 苗秀芝)