Journal of Computer Applications
计算机应用,2021,41(8):2466－2472
ISSN 1001-9081
CODEN JYIIDU
2021-08-10
http://www.joca.cn

文章编号:1001-9081(2021)08-2466-07
DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2020101551

船舶狭小空间虚拟人维修姿态建模技术

罗明宇[1],骆晓萌[2],朱文敏[1],张　磊[1,2],范秀敏[1*]
(1.上海交通大学 机械与动力工程学院,上海 200240;　2.上海船舶工艺研究所,上海 200032)
(*通信作者电子邮箱 xmfan@sjtu.edu.cn)

摘　要:针对现有虚拟人仿真技术在船舶狭小空间维修作业中存在的效率低下、需要较多人工干预、仿真成本高等问题,提出一种虚拟人姿态混合建模仿真技术。根据狭小空间中人体维修作业的特点,将虚拟人姿态建模分为虚拟人躯干及下肢姿态建模与虚拟人手臂姿态建模两部分。首先,提出一种基于姿态库的狭小空间姿态自动匹配算法,以确定虚拟人在狭小空间中的操作位置与姿态;在此基础上,建立多目标优化模型对手臂姿态进行求解,并实现维修仿真姿态的生成。以某型船舶机舱罐体阀门维修为例的实验结果表明,所提方法可以实现虚拟人姿态的自动定位与生成,且可有效提高维修仿真效率。

关键词:虚拟人建模;狭小空间;姿态库;空间匹配;多目标优化

中图分类号:TP391.9　　**文献标志码:**A

Modeling technology for maintenance posture of virtual human in narrow space of ship

LUO Mingyu[1], LUO Xiaomeng[2], ZHU Wenmin[1], ZHANG Lei[1,2], FAN Xiumin[1*]
(1. *School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai* 200240, *China*;
2. *Shanghai Shipbuilding Technology Research Institute, Shanghai* 200032, *China*)

Abstract: To solve the problems of the existing virtual human simulation technology in the ship's narrow space maintenance operations, such as the inefficiency, the need for many manual interventions, and the high cost of simulation, a virtual human posture hybrid modeling and simulation technology was proposed. According to the characteristics of human body maintenance operations in a narrow space, the virtual human posture modeling was divided into two parts: virtual human torso and lower limb posture modeling and virtual human arm posture modeling. Firstly, a narrow space automatic posture matching algorithm based on the posture library was proposed to determine the operation position and posture of the virtual human in narrow space. On this basis, a multi-objective optimization model was established to solve the arm posture and realize the maintenance simulation posture generation. Experimental results with a certain type of ship engine room tank valve maintenance as an example show that the proposed method can realize the automatic positioning and generation of virtual human posture, and can effectively improve the efficiency of maintenance simulation.

Key words: virtual human modeling; narrow space; posture library; space matching; multi-objective optimization

www.joca.cn

0　引言

船体和设备在营运过程中都会有自然损耗,会随着时间的推移暴露出某些缺陷,引发船体结构受损。为了保证能够继续安全使用,必须有计划地进行修理船舶维修。由于船舶机械结构复杂,空间利用率高且设备产品众多,维修场景多为狭小受限空间,例如船舱底层格子作业间,顶部封闭且空间狭小,严重影响维修效率、造成维修困难。然而目前很多船厂在工艺设计阶段缺乏便捷高效的船舶狭小空间虚拟人维修姿态建模技术,辅助完成狭小空间维修作业的人机工程评价验证,导致工艺设计方案依赖个人经验,很难进行仿真验证,在实际维修作业中时常出现工人维修操作可达性差、空间不足活动受限、盲装作业、疲劳作业等现象。

虚拟人姿态建模技术的核心是基于各种条件约束的前提下,在虚拟人关节空间中寻找到某一特定的姿态最优匹配点[1],由于人体关节空间的高维度、运动高复杂度和任务姿态多样性,无法直接定义简单函数对姿态关节进行求解计算。目前从虚拟人姿态建模底层生成机理角度,可将虚拟人姿态建模分为以下三种方法。

1)手工建模方法(hand-driven method)。

手工调节生成人体动作姿态是最早也是最直接的方法,用户通过手动调节虚拟人关键姿态,如杨飞等[2]在研究拖拉机驾驶室人机工程评价时,将虚拟人模型手动装配到驾驶室适配位置。但简化的虚拟人模型全身自由度也有20~50个,还有空间定位的6自由度,通过手工调节给出空间定位和每个关键姿态的所有关节角度是非常费时费力且困难的,且需要用户具有丰富的人体姿态制作经验和技巧才能生成逼真的关键姿态。焦庆龙等[3]通过改进的聚类算法将作业核心姿态

收稿日期:2020-10-10;**修回日期:**2020-12-06;**录用日期:**2020-12-14。　**基金项目:**工业和信息化部项目。

作者简介:罗明宇(1995—),男,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向:虚拟现实、计算机辅助装配;　骆晓萌(1983—),女,江苏沛县人,工程师,博士,主要研究方向:船舶智能制造;　朱文敏(1992—),男,湖北洪湖人,博士研究生,主要研究方向:虚拟维修/装配、人机工程;　张磊(1993—),男,陕西咸阳人,工程师,硕士研究生,主要研究方向:船舶智能制造;　范秀敏(1971—),女,福建南平人,教授,博士,主要研究方向:虚拟维修、数字化工厂、智能制造。

构建成姿态库,然后根据具体任务选取姿态库中的姿态再进行手工调整,虽能一定程度上简化了建模流程,而且可以通过直接改变关节角的方式满足各种约束需求,但该方法进行虚拟人建模仍非常繁复,效率低下。

2)模型建模方法(model-driven method)。

模型建模方法将人体动作姿态生成过程转化为某些复杂的数学参数模型。根据数学模型特点,模型建模方法有动力学模型建模、运动学模型建模、生物力学模型建模等。运动学模型研究较多,技术较为成熟。杨宇盟等[4]结合 FABRIK(Forward And Backward Reaching Inverse Kinematics)算法、碰撞检测、Bi-RRT(Bidirectional Rapidly-exploring Random Tree)算法实现了虚拟人手臂无碰撞抓取物体。Qiu 等[5]通过构建包含工程属性的语义参数化模型以及虚拟人姿态自动推理模型实现了装配维修场景虚拟人姿态建模。运动学模型虽然能很快地得到虚拟人姿态,但并未考虑舒适性等人机工程学因素,导致模型缺乏协调性。动力学模型与生物力学模型可以优化出更合理、协调的运动姿态,但求解复杂且操作环境较为开放,碰撞检测要求不高。

多种建模模型融合是今后发展的方向。顾岩等[6]结合运动学模型与动力学模型,采用 Bi-RRT 算法和基于肘圆的逆向运动学的规划方法对手臂路径进行规划,并以最大关节舒适度对手臂路径进行优化。武维维等[7]将人机因素目标函数与姿态参数映射,构建姿态仿真多目标优化问题,通过多目标遗传算法求解最优解。王建鹏等[8]基于生物力学构建虚拟人运动控制系统完成虚拟人建模。Sultan 等[9]提出一种基于反馈线性化的非线性鲁棒技术,并构建了非线性生物力学模型用于进行虚拟人姿态控制。动力学与运动学结合求解姿态:易获得协调的上肢运动姿态,但建模过程复杂,且上肢自由度较少;直接用动力学和运动学结合求解只适用于低自由度问题,并不适用于多自由度的全身姿态求解。

3)数据建模方法(data-driven method)。

数据建模方法通过外部采集设备对人体进行跟踪,直接将跟踪结果赋予虚拟人完成虚拟人姿态建模。Kronfeld 等[10]通过机电输入设备数据驱动虚拟人,并通过运动序列实现虚拟人运动仿真。Lippi[11]通过模块化控制的方式,构建姿态学习预测器的机器学习模型,通过模型数据结果构建虚拟人姿态。邱世广等[12]通过外设采集数据人体关节角度数据,之后以人体关节极限角度和前后帧的角度变化幅值作为判断准则过滤噪声,之后以灰色系统理论建立噪声补偿模型补偿过滤噪声而过滤掉的帧的信息完成虚拟人驱动。外设采集虽然能真实地获取人体运动姿态,但受硬件限制较大,存在设备精度限制、环境遮挡限制、噪声扰动等问题。

针对船舶设备众多、机械结构复杂、维修场景多为狭小空间等特点,手工建模方法虽然能满足各种约束需求,但手工操作繁复,效率低下;模型建模方法对多自由度问题求解复杂,且基本适用于开放环境,对碰撞检测要求低;数据驱动很难满足特定维修任务的多约束需求。基于现有虚拟人建模技术优缺点的分析,结合船舶狭小空间的环境特征,本文提出一种将基于姿态库的维修姿态狭小空间匹配算法和基于多目标问题求解的手臂建模方法相结合的维修姿态混合建模方法,将虚拟人关节根据运动复杂度分为躯干下肢和手臂两部分分别进行姿态建模。最后结合某型船舱内部罐体阀门维修作业姿态建模案例验证了该方法的有效性。

1　总体方案

本文针对船舶狭小空间虚拟人维修姿态建模问题,通过对维修过程肢体活动复杂度进行分析,将虚拟人维修姿态仿真分为两部分:第一部分是面向活动复杂度较低的躯干及下肢部位的虚拟人躯干及下肢维修姿态建模;第二部分是面向活动复杂度较高的手臂部位的虚拟人手臂维修姿态建模。针对虚拟人躯干及下肢维修姿态仿真,提出了基于维修姿态库的狭小空间维修姿态匹配算法,包含基于八叉树的未碰撞区域搜索算法和维修姿态库与未碰撞空间匹配问题求解方法;针对虚拟人手臂维修姿态建模,提出了基于多目标问题求解的虚拟人手臂建模方法,包含虚拟人手臂多目标优化模型分析与构建、基于遗传算法的手臂姿态多目标问题求解。总体方案如图 1 所示。

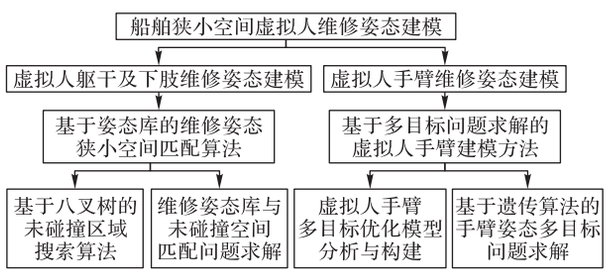


图 1　船舶狭小空间虚拟人维修姿态建模总体方案

Fig. 1　Overall scheme for modeling maintenance posture of virtual human in narrow space of ship

2　基于姿态库的维修姿态狭小空间匹配算法

维修作业过程中人体躯干及下肢关节相比手臂关节运动简单、复杂度低,并且与环境的交互干涉相对简单,因此采取基于姿态库的姿态狭小空间维修姿态匹配算法,包含基于八叉树的未碰撞区域搜索算法、维修姿态库与未碰撞空间匹配优化方程分析与建立。

2.1　基于八叉树的未碰撞区域搜索算法

记 L_{arm} 为虚拟人手臂长,以 $2L_{arm}$ 为边长,以维修对象坐标为中心,初始化一个正方形空间搜索块 $B_{OT\text{-}orig}$。以手掌宽度 W_{hand} 定义最小分割阈值 T_{OT},结合八叉树(划分结构如图 2 所示)与碰撞检测技术对 $B_{OT\text{-}orig}$ 进行分割,具体步骤如下。

步骤 1　对所有 B^i_{search}($B^i_{search}\in S_{under_detect}$)与 S_{env} 进行碰撞检测。

步骤 2　若未发生碰撞,B^i_{search} 存入 S_{not_coll};若发生碰撞:

若 $a^i_{search}\geqslant T_{OT}$,将 B^i_{search} 由八叉树结构分为 8 个子块,存入 S_{under_detect},返回步骤 1;若 $a^i_{search}<T_{OT}$,舍弃 B^i_{search}。

其中:S_{under_detect} 表示待检测搜索块集合,S_{env} 表示狭小空间全部物体集合,a^i_{search} 表示 B^i_{search} 的边长,S_{not_coll} 表示未碰撞搜索块集合。以 S_{not_coll} 定义为搜索空间,离散成空间点集 S_{loc_point},计算虚拟人当前位置与 S_{loc_point} 之间的刚性变换搜索空间记为 S_{search}。

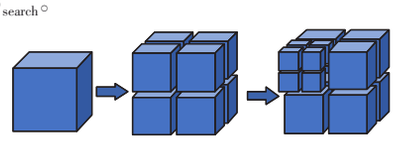


图 2　八叉树结构划分结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of octree structure division structure

www.joca.cn

2.2 维修姿态库与未碰撞空间匹配优化方程分析与建立

1）虚拟人与狭小空间碰撞比例计算。

记虚拟人模型三角面片第i个顶点为$\boldsymbol{V}_i$，O_n为S_{env}中的任一三维物体，$\boldsymbol{t}_m$为S_{search}中的任一刚性变换，并计算其有符号距离场D[13]。其中，$\boldsymbol{t}_m$下$\boldsymbol{V}_i$到O_n的最小距离d_{i,m,O_n}可以通过如下方程表示：

$$d_{i,m,O_n} = D(\boldsymbol{t}_m, \boldsymbol{V}_i) \tag{1}$$

当$\boldsymbol{V}_i$存在于O_n内部时$d_{i,m,O_n}<0$，计算虚拟人与狭小空间环境的碰撞比例：

$$P_{m,O_n} = N_{d<0}/N_d \tag{2}$$

其中：$N_{d<0}$为d_{i,m,O_n}小于0的顶点数，N_d为总共顶点数。

2）虚拟人与维修对象有效距离计算。

对于可达性一般通过手臂移动，末端手掌可达最远位置构成的可达曲面进行描述[14]，即在关节转动范围内，从每个手臂以肩部为中心，臂长为距离构成等距面；在描述双手可达性中简化成以脖颈节点到维修对象的距离作为评估参数L_i，再以L_{arm}定义标准差σ，参考高斯分布函数计算虚拟人与维修对象有效距离$D_{\text{effective}}$，并对函数结果进行归一化，计算公式如下：

$$D_{\text{effective}} = \exp\left(-\frac{(L_i - L^S)^2}{s^2}\right) \tag{3}$$

其中：L^S为脖颈到操作对象的最适距离。

3）虚拟人作业姿态舒适度评价。

虚拟人作业姿态评价是针对姿态库中躯干及下肢关节的评价，采用Hignett等[15]提出的REBA（Rapid Entire Body Assessment）分析中关于Trunk和Legs的评价标准计算姿态库中姿态评分V_{comfort}。

根据现实生活维修工作中人与维修对象、人与维修环境的交互情况，提出了虚拟人姿态与狭小空间匹配的三个原则：虚拟人与维修对象之间距离尽可能小，以保证后续手臂姿态的可达性；虚拟人与维修环境之间的碰撞尽可能少，以保证仿真中作业人员的安全性和仿真的真实性；虚拟人自身维修姿态尽可能舒适。

基于以上3个原则，将虚拟人姿态与狭小空间匹配问题化为一个优化方程：

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{t}_{\text{opt}} = \text{argmin}(P_{m,O_n} + \alpha D_{\text{effective}} - \beta V_{\text{comfort}})\\ &\text{s.t. } \boldsymbol{t}_m \in S_{\text{search}}\end{aligned} \tag{4}$$

其中：α与β是有效距离与姿态舒适度的权重值，优化方程的三项分别对应本文提出的匹配3个原则。计算在S_{search}中任意刚性变换$\boldsymbol{t}_m$下P_{m,O_n}、$D_{\text{effective}}$、V_{comfort}，满足$(P_{m,O_n} + \alpha D_{\text{effective}} - \beta V_{\text{comfort}})$最小的$\boldsymbol{t}_m$即为所求的最优刚性变换$\boldsymbol{t}_{\text{opt}}$。

3 基于多目标问题求解的虚拟人手臂建模方法

实际维修作业过程中人体手臂相比躯干、下肢等部位运动复杂，并且与环境的碰撞干涉相对复杂，不适用于姿态库匹配的方式进行建模仿真，因此采取基于多目标问题求解的虚拟人手臂建模方法。

3.1 虚拟人手臂多目标问题分析与构建

狭小空间维修作业中手臂姿态建模不仅要保证手臂关节转角舒适、手臂末端能够触及维修对象，还要避免与狭小空间环境相碰撞，但各目标之间存在矛盾，难以同时达到全面最优的姿态解。因此以肩（上摆下摆、外展内收、外旋内旋）、肘（弯曲过伸、旋内旋外）、手腕（桡偏尺偏、背伸掌屈）共7个旋转角为参量，分别将人体左右手臂作业姿态构建成多目标优化问题：

$$\begin{aligned}&\min f_m(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_7);\ m = 1, 2, \cdots, M\\ &\text{s.t. } g_k(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_7) \leqslant 0, k = 1, 2, \cdots, K\\ &\theta_i^{\text{L}} \leqslant \theta_i \leqslant \theta_i^{\text{U}}, i = 1, 2, \cdots, 7\end{aligned} \tag{5}$$

其中：θ_i是第i旋转角的转角值，θ_i^{L}和θ_i^{U}分别表示θ_i的上边界值与下边界值，$f_m(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_7)$是关节转角、可达性评估弱约束目标评估函数，$g_k(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_7)$是碰撞检测等强约束目标评估函数。

3.1.1 关节转角评估函数

手臂关节结构复杂，关节转角角度直接影响相关肌群的紧张度，从而影响人整个手臂的舒适度。人体各个关节由于自身结构都存在舒适活动范围和最大活动范围，并且关节转角越趋于最优活动角度θ_i^c关节越舒适，所以引入高斯分布对各关节转角进行归一化量化评估，评估函数如下：

$$f_{\text{rot}}(\theta_i) = 1 - \exp\left(-\frac{(\theta_i - \theta_i^c)^2}{2\sigma_i^2}\right) \tag{6}$$

其中：σ_i表示第i个关节角的舒适活动角度范围大小。$f_{\text{rot}}(\theta_i)$代表关节角越接近最佳值，舒适度越好，评估函数如图3所示。

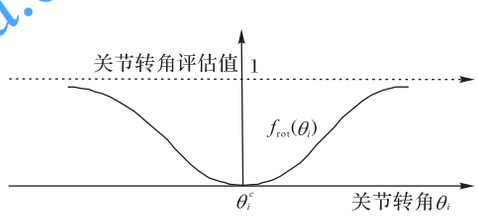


图3 关节转角评估函数

Fig. 3 Joint rotation angle evaluation function

3.1.2 碰撞检测评估函数

在狭小空间内手臂的活动空间有限，在进行维修作业时极易与环境发生碰撞。以手臂与环境的碰撞检测结果作为碰撞检测的评估函数$g_{\text{collision}}$：若发生碰撞则$g_{\text{collision}}$取1，若未发生碰撞，则$g_{\text{collision}}$取零。

3.1.3 手臂末端可达性评估函数

定义世界坐标系下手臂末端的旋转平移矩阵$\boldsymbol{M}_{\text{term}}$，维修目标的旋转平移矩阵为$\boldsymbol{M}_{\text{target}}$，计算$\boldsymbol{M}_{\text{term}}$与$\boldsymbol{M}_{\text{target}}$的旋转平移变换矩阵$\boldsymbol{M}$：

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_{\text{term}}^{-1} * \boldsymbol{M}_{\text{target}} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{R} & \boldsymbol{T}^{\text{T}}\\ (0,0,0) & 1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1\\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2\\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{7}$$

其中$\boldsymbol{R}$表示矩阵中的旋转矩阵、$\boldsymbol{T}$表示矩阵中的平移矩阵，计算$\boldsymbol{R}$对应四元数$\boldsymbol{Q}(x, y, z, w)$：

$$x = \frac{r_{32} - r_{23}}{4w} \tag{8}$$

$$y = \frac{r_{13} - r_{31}}{4w} \tag{9}$$

www.joca.cn

$$z = \frac{r_{21} - r_{12}}{4w} \tag{10}$$

$$w = \frac{1}{2}\sqrt{1 + r_{11} + r_{22} + r_{33}} \tag{11}$$

其中:x、y、z存储旋转变换中旋转轴信息;w存储旋转角信息,以w评估旋转偏移量$Diff_{\mathrm{R}}$。

基于2-范数计算T表示的平移偏移量$Diff_{\mathrm{T}}$:

$$Diff_{\mathrm{T}} = \|\boldsymbol{T}\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2} \tag{12}$$

综合评估旋转偏移量与平移偏移量,计算出手臂末端可达性评估函数f_{access}:

$$f_{\mathrm{access}} = Diff_{\mathrm{R}} + \alpha Diff_{\mathrm{T}} \tag{13}$$

其中α为$Diff_{\mathrm{R}}$与$Diff_{\mathrm{T}}$之间的权重参量。f_{access}越小,说明$Diff_{\mathrm{R}}$与$Diff_{\mathrm{T}}$越小,手臂末端与目标位姿差异越小,说明可达性越好。

3.2　基于NSGA-Ⅱ的手臂姿态多目标问题求解

3.2.1　NSGA-Ⅱ算法

本文采用第二代非支配排序遗传算法NSGA-Ⅱ(fast and elitist Non-dominated Sorting of Genetic Algorithm)[16]求解该多目标优化问题的Pareto最优解集,该算法时间复杂度低,全局搜索能力强,保证了较高的种群多样性,采用的精英策略保证了优势个体的保留、算法的稳定性和鲁棒性。NSGA-Ⅱ算法流程如图4所示。

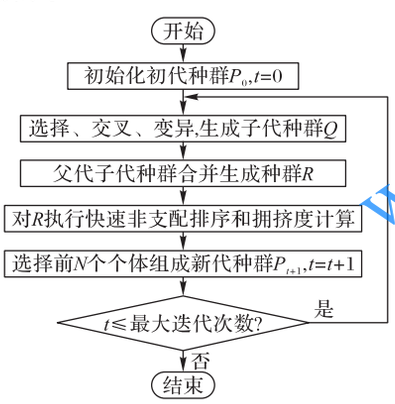


图4　NSGA-Ⅱ算法流程

Fig. 4　NSGA-Ⅱ algorithm flow chart

3.2.2　基于NSGA-Ⅱ求解手臂姿态多目标问题

针对虚拟人手臂姿态的NSGA-Ⅱ算法步骤如下:

1)基因编码。

采用实数的编码方式,利用式(14)线性变换将各关节转角值θ_i映射到[0,1]区间上的实数u_i作为染色体的编码信息:

$$u_i = (\theta_i - \theta_i^{\mathrm{L}})/(\theta_i^{\mathrm{U}} - \theta_i^{\mathrm{L}}) \tag{14}$$

其中:u_i称为染色体的基因编码,$[u_1, u_2, \cdots, u_7]$构成该优化问题中个体的染色体。

2)种群初始化。

设定进化代数$t_{\mathrm{evo}} = 1$,设定种群规模为N,通过随机函数生成$7 \times N$个随机数$u_j^i (i = 1, 2, \cdots, N, j = 1, 2, \cdots, 7)$作为当前种群中第$i$个体的第$j$个基因值,生成父代种群$P_t$。

3)遗传算子操作。

选择操作算子采用随机联赛,交叉操作算子选用模拟二进制交叉算子,变异操作算子选用多项式变异算子,对种群P_t进行选择交叉变异,生成子代Q_t。

4)子代父代种群合并。

将P_t与Q_t合并成规模为$2N$的合成种群R_t。

5)快速非支配排序和拥挤度计算。

将R_t中u_j^i值代入式(14)可得各基因编码对应的θ_i,再将θ_i代入目标函数可得$f_{\mathrm{rot}}(\theta_i)$、$f_{\mathrm{access}}$,并通过碰撞检测计算$g_{\mathrm{collision}}$,之后对$R_t$全部个体进行快随非支配排序,并计算各非支配成个体的拥挤度。根据非支配关系和拥挤度选取前J个体作为新父代种群P_{t+1}。

6)循环运行步骤3)~5),直到达到预先设定的最大进化次数,完成多目标问题求解,求出最优手臂姿态。

4　实验研究与应用实例

在Unity 2019引擎下,首先进行基于多目标遗传算法的建模方法[7]与本文建模方法的对比实验,进行本文算法优势讨论;然后基于本文建模方法,自主开发了船舶狭小空间虚拟人维修姿态建模模块,以某型船舶机舱区域罐体阀门维修作业进行了验证实验,验证本文方法的适用性和有效性。

4.1　虚拟人姿态库构建

虚拟人的选取:以我国95%人体百分位的男性人体尺寸[17]调整虚拟人模型的身高比例,作为虚拟人模型。

姿态库构建:根据人机工程学[17]中的受限空间作业姿态与徐达等[18]构建的维修虚拟人姿态库,在手臂不影响平衡性的姿态中将手臂贴近身体两侧尽量避免对虚拟人躯干及下肢姿态建模中手臂碰撞检测的影响,构建了虚拟人躯干及下肢姿态库(如图5所示)。

图5　虚拟人躯干及下肢姿态库

Fig. 5　Virtual human torso and lower limb posture library

4.2　基于多目标遗传算法的建模方法与本文方法对比实验

为了进行本文所提姿态建模方法的优势讨论,选取基于多目标遗传算法的虚拟人姿态建模方法[7]与本文方法姿态建模方法进行比较,该方法主要优化目标有平衡因素、关节转动因素、可达性因素等。在两种建模方法中设置作业目标点距地面1 100 mm。

(a) 水平距离300 mm　(b) 水平距离500 mm　(c) 水平距离750 mm

图6　不同作业目标距离下基于多目标遗传算法的虚拟人姿态建模结果

Fig. 6　Virtual human posture modeling results based on multi-objective genetic algorithm under different target distances

通过设置不同水平距离运用基于多目标遗传算法进行姿

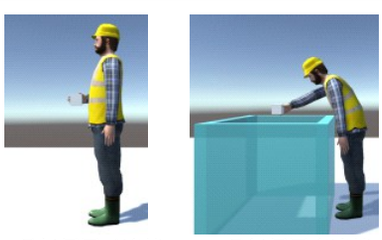
www.joca.cn

态建模，通过设定维修对象后运用本文方法进行姿态建模，选取建模过程中特征关节——上躯干、下躯干、肩关节、肘关节进行分析，肩关节、肘关节采用第3章关节转角评估函数，下躯干及上躯干参考文献[14]中关节最优角、同样运用转角评估函数进行评估，实验结果如表1(评估分值越低关节转角越接近最优值；最后一行是本文建模方法图7(a)结果)。

表1 不同水平距离虚拟人姿态评估结果

Tab. 1 Posture evaluation results of virtual humans at different horizontal distances

水平距离/mm	下躯干	上躯干	肩		肘	综合评估
			上摆下摆	外展内收	弯曲过伸	
200	0.00	0.00	0.00	0.21	0.27	0.48
300	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.44
400	0.00	0.00	0.13	0.20	0.15	0.48
500	0.11	0.07	0.30	0.18	0.02	0.68
600	0.16	0.11	0.42	0.16	0.00	0.85
700	0.20	0.13	0.60	0.17	0.00	1.10
800	0.33	0.17	0.58	0.13	0.00	1.21
900	0.41	0.17	0.62	0.13	0.00	1.33
278	0.00	0.00	0.00	0.20	0.27	0.47



(a) 目标周围无遮挡 (b) 目标周围有遮挡

图7 本文建模方法的建模结果

Fig. 7 Modeling results of the proposed modeling method

在基于多目标遗传算法的建模方法中，需提前确定虚拟人的位置，然后针对每个位置进行全身的多目标优化求解，获得指定位置下的全身最优Pareto解。本文提出的建模方法通过姿态库与空间匹配的贪心算法的方式完成了虚拟人初始位置定位及躯干姿态建模，之后通过多目标遗传算法完成了手臂姿态建模，能更好地解决狭小空间中虚拟人姿态建模过程中的初始定位问题，且综合评估接近于不同水平距离多目标遗传算法建模实验中的最优解，满足建模需求。

在单一的基于多目标遗传算法的建模方法中，平衡因素作为多目标之一，而本文提出的建模方法，对于除上肢外关节采用姿态库匹配的方式，因为姿态本身满足平衡性的要求，且除上肢外身体部分重量占整个身体重量的90%，基本可忽略手臂运动对身体平衡性的影响，所以手臂进行多目标优化中无需考虑平衡性因素；且本文建模方法引入碰撞检测作为多目标之一，可以有效地解决狭小空间中虚拟人易与环境发生碰撞干涉的问题。

4.3 虚拟人躯干及下肢维修姿态建模应用实例

初始化设定维修任务约束，维修对象为图8实线框所示罐体，维修部位为图8虚线框所示阀门。以虚拟人上臂长和下臂长和手长总和作为L_{arm}定义初始正方形空间搜索块边长，初始搜索块如图9所示；计算未碰撞区域，结果如图10所示。

图8 维修对象及维修部位示意图

Fig. 8 Maintenance object and part

图9 罐体阀门维修任务空间初始搜索块

Fig. 9 Initial spatial search block of tank valve maintenance task

图10 罐体阀门维修任务未碰撞区域的空间搜索结果

Fig. 10 Spatial search results of un-collision area for tank valve maintenance task

进行姿态库与维修空间的匹配运算，匹配过程中未匹配刚性变换下的姿态和最优刚性变换t_{opt}下姿态如图11所示，满足在船舶狭小空间中的合理姿态选取，以及根据姿态与空间匹配计算出合理的刚性变换t_{opt}满足虚拟人与维修对象极少碰撞发生、虚拟人正方向面对维修对象且维修对象处在虚拟人良好的操作位置。

www.joca.cn

(a) 姿态不合适且存在碰撞

(b) 姿态距离维修对象太远

(c) 最终躯干下肢建模结果

(d) 最终躯干下肢建模结果

图 11　虚拟人躯干及下肢维修姿态匹配过程及建模结果

Fig. 11　Virtual human torso and lower limb maintenance posture matching process and modeling results

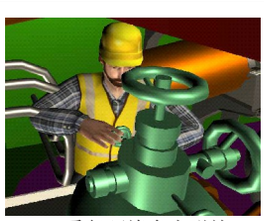
4.4　虚拟人手臂维修姿态建模

通过表 2 建立关节转角评估函,通过 Unity 引擎完成对手臂与环境的碰撞检测,对手臂姿态建模的多目标问题运用 NSGA-Ⅱ进行求解,求解过程中手臂不良姿态和最终结果姿态如图 12。如图所示,最终计算结果满足手臂末端执行器与维修对象间的可达性要求、手臂与周围环境不存在碰撞且手臂姿态处于相对舒适自然的姿态。

表 2　虚拟人手臂关节活动转角

Tab. 2　Rotation angle range of virtual human arm joint

关节	自由度	最大活动角度范围/(°)	舒适活动角度范围/(°)	最优活动角度/(°)
肩关节	上摆下摆	−180.000~45.000	−63.000~15.750	−23.650
	外展内收	−40.000~90.000	−14.000~31.500	8.750
	内旋外旋	−30.000~105.000	−10.500~36.750	13.125
肘关节	弯曲过伸	−140.000~0.000	−49.000~0.000	−24.500
	旋内旋外	−80.000~110.000	−28.000~38.500	5.250
腕关节	桡偏尺偏	−30.000~50.000	−15.000~25.000	5.000
	背伸掌屈	−90.000~80.000	−45.000~40.000	−2.500


(a) 手与环境发生碰撞

(b) 手臂末端可达性不足

(c) 最终手臂姿态建模结果

(d) 最终手臂姿态建模结果

图 12　虚拟人手臂姿态建模过程及建模结果

Fig. 12　Virtual human arm maintenance posture matching process and modeling results

5　结语

本文针对船舶狭小空间维修作业姿态建模问题,从实际维修姿态关节运动复杂度出发,将建模问题分为虚拟人躯干及下肢姿态建模和虚拟人手臂姿态建模,通过基于姿态库的狭小空间维修姿态匹配算法实现躯干及下肢姿态建模;通过基于多目标问题求解的建模方法完成虚拟人手臂建模。通过与基于的多目标优化遗传算法的建模方式进行比较实验和某型船舶机舱罐体阀门维修案例的结果表明,特别是针对狭小空间,该建模方法能够自动初始化虚拟人位置、针对维修任务进行虚拟人维修姿态建模,满足了维修任务约束、碰撞检测的要求,建模过程包含人因因素影响,无需繁琐的建模过程。

基于空间匹配的虚拟人躯干姿态建模采用的是贪心算法,没考虑与后续手臂姿态建模的耦合关系,下一步将对此问题进行进一步研究;下一步也将继续研究如果获得更为自然、逼真、实用、可靠的维修姿态库,考虑姿态空间匹配和多目标问题中其他可能的因素指标以及如何对手部姿态进行精准建模,以便构建出更符合实际的虚拟人维修作业姿态。

参考文献 (References)

[1] 李石磊,梁加红,吴冰,等. 虚拟人运动生成与控制技术综述[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(9):1758-1771. (LI S L, LIANG J H, WU B, et al. Survey of virtual character motion generation and control[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(9): 1758-1771.)

[2] 杨飞,史庆春,万小玲,等. 基于 Pro/E Manikin 的拖拉机驾驶室人机工程评价方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9):32-38. (YANG F, SHI Q C, WAN X L, et al. Ergonomics evaluation method of tractor cab based on Pro/E Manikin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(9): 32-38.)

[3] 焦庆龙,徐达. 关于虚拟人体维修作业姿态库设计研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(4):324-329, 444. (JIAO Q L, XU D. Research on the design method of virtual human body maintenance posture examples[J]. Computer Simulation, 2019, 36(4): 324-329, 444.)

[4] 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):1362-1373. (YANG Y M, NIE B, FANG H G, et al. Planning collision-free grasping actions of virtual human[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2014, 26(8):1362-1373.)

[5] QIU S G, HE Q C, FAN X M, et al. Virtual human hybrid control in virtual assembly and maintenance simulation[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(3):867-887.

[6] 顾岩,何其昌,范秀敏,等. 狭小空间虚拟人手臂装配运动规划及智能寻优[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(6):1447-1455. (GU Y, HE Q C, FAN X M, et al. Motion planning and intelligent optimization of virtual human arm for narrow space assembly simulation task[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(6):1447-1455.)

[7] 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):155-164. (WU W W, YE L M, SHAO X D, et al. Working posture

www.joca.cn

simulation method for virtual human based on multi-objective genetic algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1):155-164.)

[8] 王建鹏,秦文虎,孙立博. 基于生物力学的虚拟人运动控制及行走仿真[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(6):1110-1117.(WANG J P, QIN W H, SUN L B. Motion control and walking simulation of virtual human based on biomechanics[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2018, 30(6):1110-1117.)

[9] SULTAN N, NAJAM UL ISLAM M, MAHMOOD MUGHAL A. Nonlinear robust compensator design for postural control of a biomechanical model with delayed feedback[J]. Measurement and Control, 2020, 53(3/4):679-690.

[10] KRONFELD T, BRUNNETT G. An electro-mechanical input device for the manipulation of virtual human motion[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2019, 16(6):1070-1083.

[11] LIPPI V. Prediction in the context of a human-inspired posture control model[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 107: 63-70.

[12] 邱世广,武殿梁,范秀敏,等. 基于船舶人机工程的虚拟人操作驱动建模仿真技术[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(9): 1366-1370.(QIU S G, WU D L, FAN X M, et al. Ship ergonomics evaluation based on virtual human real-time driven modeling technology[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(9):1366-1370.)

[13] JONES M W, BAERENTZEN J A, SRAMEK M. 3D distance fields: a survey of techniques and applications[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(4):581-599.

[14] 杨云飞. 船舶复杂区域焊接工艺可行性人机工程仿真评价技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2016: 62-63.(YANG Y F. Research on ergonomics simulation and evaluation technology of ship complex area welding[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016:62-63.)

[15] HIGNETT S, McATAMNEY L. Rapid Entire Body Assessment (REBA)[J]. Applied Ergonomics, 2000, 31(2):201-205.

[16] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-Ⅱ[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[17] 丁玉兰. 人机工程学[M]. 4版. 北京:北京理工大学出版社, 2011:4.(DING Y L. Ergonomics[M]. 4th ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011:4.)

[18] 徐达,焦庆龙. 基于改进花朵授粉算法与*K*-means算法的人体姿态库构建方法研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(12):2459-2469.(XU D, JIAO Q L. Research on the construction method of human body posture examples based on improved flower pollination algorithm and *K*-means[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(12):2459-2469.)

This work is partially supported by Program of the Ministry of Industry and Information Technology.

LUO Mingyu, born in 1995, M. S. candidate. His research interests include virtual reality, computer aided assembly.

LUO Xiaomeng, born in 1983, Ph. D., engineer. Her research interests include ship intelligent manufacturing.

ZHU Wenmin, born in 1992, Ph. D. candidate. His research interests include virtual maintenance/assembly, ergonomics.

ZHANG Lei, born in 1993, M. S. candidate., engineer. His research interests include ship intelligent manufacturing.

FAN Xiumin, born in 1971, Ph. D., professor. Her research interests include virtual maintenance, digital factory, smart manufacturing.

www.joca.cn