

# 一种虚拟人作业行为的自主优化模型<sup>\*</sup>

王朝晖<sup>1+</sup>, 陈 愿<sup>1</sup>, 朱心雄<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

<sup>2</sup>(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

## Automatic Optimization Model for Virtual Human's Working Behaviors

WANG Zhao-Hui<sup>1+</sup>, CHEN Ken<sup>1</sup>, ZHU Xin-Xiong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

<sup>2</sup>(School of Mechanical Engineering and Automation, BeiHang University, Beijing 100191, China)

+ Corresponding author: E-mail: wangzhaohui72@sohu.com

Wang ZH, Chen K, Zhu XX. Automatic optimization model for virtual human's working behaviors. *Journal of Software*, 2012, 23(9): 2358-2373 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4174.htm>

**Abstract:** Simulation of humanoid adaptive behaviors is a prerequisite of ergonomic evaluation. To overcome the shortages of existing technologies, an autonomic optimization model of virtual human's working behaviors is presented based on multi-agent cooperative games. In this model, the humanoid adaptive behaviors in working environment is defined as multi-objective optimization problem, and the definitions of mannequin workspace and behavior elements are proposed for discretization of human behaviors. A simulation algorithm based on fuzzy multi-objective games theory is presented to solve this model. With fuzzy multi-objective Nash negotiation theory, a grads-up method is adopted to search the Pareto optimizing solutions of human's working posture. Case studies show that the human's comfortable working posture can be derived by the new strategy even in cases with only insufficient data and better adaptability of the method in engineering domain can be reached.

**Key words:** virtual human; behavior element; multi-agent; cooperative games; ergonomics

**摘 要:** 人体自适应行为仿真是实现人机工程学评估的前提条件. 针对已有技术存在的不足, 提出了一种基于多 Agent 合作式博弈的虚拟人作业行为自主优化模型. 该模型将工作环境中人体自适应行为定义为一个多目标优化问题, 提出了人体工作状态空间和人体行为元素的概念, 以实现人体行为的离散化, 设计了人体行为仿真算法以求解上述模型. 算法采用梯度上升的策略来搜索满足模糊多目标 Nash 谈判条件的人体作业姿态的 Pareto 最优解. 仿真实验表明, 该方法可以在缺少相关数据的情况下推导出舒适的人体工作姿态, 在工程领域中表现出较好的适用性.

**关键词:** 虚拟人; 行为元素; 多 Agent; 合作博弈; 人机工程学

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

在航空、航天和汽车制造等领域, 往往在设计阶段就需要充分考虑产品结构的复杂性给人的装配、维修和

\* 基金项目: 国家自然科学基金(50975148); 国家高技术研究发展计划(863)(2009AA043701); 摩擦学国家重点实验室资助项目(SKLT09A03)

收稿时间: 2011-07-26; 修改时间: 2011-09-02; 定稿时间: 2011-12-31

使用带来的不利影响.这些与人有关的设计问题也被称作人因问题.人因问题通常很难在产品设计阶段被发现,只有在人实际操作产品时,此类设计问题才能逐步显露出来.起初,人们使用物理样机和假人模型来检验产品的人机性能,然而这种方法的灵活性差、成本高、周期长,极大地影响了产品的市场竞争能力.

如何在设计阶段尽早发现产品的人因问题是一个亟需解决的重要课题.“以人为中心”的设计思想认为,设计工作需要得到人机工程学理论的充分指导,应将人机工程评估贯穿于产品设计的全过程.因此,基于虚拟人技术的计算机辅助人机工程设计成为国内外研究的热点.虽然虚拟人相关技术被广泛地应用于自然人机交互、军事体育仿真训练、舞蹈编排和计算机互动游戏等多个领域,但是实现基于虚拟人技术的计算机辅助人机工程设计仍是一项十分困难的工作,此类系统的研发需要涉及 CAD/CAM 技术、系统仿真、生物力学、人机工程学等多方面的专业知识.大多数现有的计算机辅助人机工程设计系统均难以直接使用,其主要原因如下:

人体运动系统具有很高的自由度,实现虚拟人体行为合理的仿真控制具有很大的难度.工程应用的实际需要也为该领域的研究提出了许多挑战性的课题:首先,此类技术应适应多样化设计工作的需求.产品的功能和结构千差万别,因此人与各种产品的交互行为也是丰富多彩的.人体行为仿真能否灵活高效地适应多样化的产品及其环境,是实现计算机辅助人机工程设计的前提;其次,此类技术应适应动态变化的产品设计过程.产品设计工作需要经常需要反复修改和完善,人体行为仿真技术是否简便易行、能否与用户的设计活动实时互动,是该技术是否成熟和实用化的关键;最后,人机工程学关注人体行为与环境之间的关系,包括与行为有关的环境和生理等多方面的因素.建立这些因素与人体行为之间的内在关系,有利于人们发现设计中的人因问题及问题机理,为更好地改进设计方案提供理论依据.

总之,实现基于虚拟人技术的计算机辅助人机工程设计的目的,是为设计者提供了一个全新的交互体验.设计者不必详细了解虚拟人技术的细节,也不必掌握过多的人体行为编辑的技巧,只需专注于与自己专业有关的设计工作,在系统自动仿真、评估和提示下完成产品的人机工程评估和人机环境设计优化.为此,本文面向航空制造领域提出了一种支持虚拟人自主智能行为的计算机辅助人机工程仿真设计原型系统 AASVF(adaptive actions simulator-virtual factory),它从底层到高层完全基于人体行为的组织结构及人机交互的行为特征来设计,行为仿真具有良好的适应性和灵活性,支持高级语义事件的处理和管理,简化了用户实施产品人机工程仿真和评估的过程.

## 1 相关研究

目前,已有诸如 SAMMIE,JACK,RAMSIS 和 SAFEWORK 等商业化的虚拟人工具,它们大都集成于 UG, DELMIA 等产品开发平台中,成为计算机集成制造系统的重要组成部分.目前,虚拟人工具的实际应用效果并不理想,多数虚拟人工具仅提供了基本的运动学方法来控制虚拟人的行为,用户需要掌握专门的经验和技能方能合理地编辑虚拟人的行为.对于复杂作业环境和作业任务而言,手工编辑虚拟人行为是一项繁重的工作,不能适应复杂产品开发的需要.

随着高精度人体运动捕捉设备的出现,许多研究者试图通过捕获人体作业行为的样本数据,高效率和高质量地实现人体作业行为仿真.Abate 等人<sup>[1]</sup>和 Goussous 等人<sup>[2]</sup>构建了用于维修仿真的虚拟环境,系统通过一个触觉交互设备实现了人对虚拟环境中对象的感知和操作,手的操作行为被实时捕获并重建于虚拟环境中,系统综合触觉和视觉反馈信息来辅助分析装配或维修工作的可行性.类似的,Jayaram 等人<sup>[3]</sup>将沉浸式虚拟现实技术与已有的虚拟人工具 Jack 进行系统集成,该系统能够实时捕捉人体与虚拟环境的交互动作,所获得的行为数据被同步到 Jack 系统中,用来实时驱动虚拟人 Jack,使之做出与真人同样的行为,最后使用 Jack 系统的工效模块对虚拟人行为进行人机工程评估.该成果已能实现对真人的躯干和上肢运动的捕获、重建和评估.Boulic 等人<sup>[4]</sup>试图通过有标记的光学捕捉技术来实现对人体全身运动的捕捉,以实时驱动虚拟人全身的运动来协助人机工程评估,但此项成果的人机交互性能并不完善,用户无法获取从虚拟环境反馈的信息.

上述研究成果是基于在线人体运动捕捉数据的人体行为实时仿真技术,其虚拟环境的真实感和良好的沉浸效果是保证使用者行为合理的关键.现有技术虽然能提供较为逼真的视觉感受,但对于现实环境的物理和功

能等属性以及环境的空间深度感仍然难以全面真实地构建.另外,佩戴各种运动捕捉设备也增加了人体的负担,使人体行为容易出现偏差.

另外一种研究思路是离线捕捉人体运动数据,建立完善的人体运动数据库,通过对人体运动数据的重定向<sup>[5]</sup>、编辑<sup>[6]</sup>与合成<sup>[7]</sup>来实现数据的重用,以达到在虚拟环境中生成新的动作的目的.运动捕捉技术能够提供大量真实可信的人体运动数据.近 10 年来,此类研究在体育训练、舞蹈编排和影视制作等领域得到广泛的应用,许多学者也试图将此项技术应用于工程设计之中.例如:Badler 等人<sup>[8]</sup>所提出的基于 PaT-Net 技术采用了并行逻辑方式组织人体运动数据,以实现自主和交互式的人体运动仿真.类似的,Kuo 等人<sup>[9]</sup>亦通过行为的语义逻辑来组织人体作业行为的数据片段.

对于产品设计而言,上述基于离线人体运动数据的各种合成技术也存在不少缺陷:(1) 特定条件下捕获的人体运动数据不具备广泛的适用性,只能仿真与数据类似的人体行为,难以适应与多样环境交互的需求;(2) 在产品设计阶段,由于物理产品尚不存在,不便预先设定人体与产品交互的行为,使捕捉新的人体行为数据难以实施;(3) 由于人体运动数据的获取、分析与合成技术复杂,构建完善的数据库成本和周期较长,使之经常不能适应新的仿真需要;(4) 人体运动数据所记录的仅是人体运动现象,对于现象的成因缺乏系统的解释,造成对这些数据的分析和使用存在困难.

总之,已有的行为仿真技术多采用基于实例数据的计算模型.然而,任何单一的计算模型都难以充分地表现行为内在的复杂机制.因此,采用一种能够集成多种方法和多个子系统的计算模型显然是必要的.Agent 是一种具有自主能力和心智态度的拟人化软件模型,其内部功能的运行具有天然的并发性,便于集成多种类型的计算方法.本文将博弈机制与 Agent 技术思想相结合,从多目标优化的角度开展人体自适应行为仿真研究,提出一种基于动态博弈机制的虚拟人作业姿态的自主优化方法.该方法借鉴机器人领域的成果,通过自主感知、评估和决策控制来生成非预设的类人的行为仿真,便于解释行为与其成因的内在关系,生成具有更为广泛适应能力的行为仿真.

## 2 问题描述

人体运动系统可视为一个具有高维自由度的复杂生物机构.本文提出的人体简化模型如图 1 所示.其中:图 1(a)所示为人体表面几何模型;图 1(b)所示为人体运动系统的整体模型,该模型将人体简化为 17 个刚体和 35 个关节自由度组成的多分支运动机构;图 1(c)所示为 D-H 法<sup>[10]</sup>表示的人体各运动分支系统模型,如上肢简化为肩关节、肘关节和腕关节组成的空间运动机构,上肢主要关节被简化为铰链或铰链组合形式,而上肢主要部件则被简化为连杆.将图 1(c)所示的上肢、下肢、头颈和躯干等人体运动分支系统视为人体运动系统模型中可以独立控制的运动单元,分别采用正向运动学或逆向运动学方法对它们进行运动控制.

引起人体自适应行为的因素是多方面的,各因素之间既存在矛盾又相互协调,行为适应环境的本质是优化人体的工作姿态,以满足工作和舒适性的要求.因此,我们将人体自主适应环境的行为现象作为一个多目标优化问题来研究.首先定义该多目标优化问题的解空间.在某工作环境中,所有可能的人体工作状态组成的集合是人体工作状态空间,即

$$X = \{\bar{x} \mid g_i(\bar{x}) \leq 0, i=1,2,\dots,p\} \subset R^m \quad (1)$$

其中,人体工作状态空间  $X$  是一个  $m$  维的实空间; $\bar{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m] \subset X$  为人体工作状态特征向量,用于描述人体工作状态;分量  $x_i \in \bar{x} (i=1,2,\dots,m)$  为人体状态参数,如人体姿态参数和感知参数,人体姿态参数描述人体平衡性或主要关节转角等状态,感知参数描述视角、视距和环境干涉等状态; $g_i(\bar{x}) \leq 0 (i=1,2,\dots,p)$  为人体工作状态  $\bar{x} \subset X$  应满足的一组约束条件,如人体关节的转动范围、人的视力范围和其他环境约束等.

人机环境的优劣是一个相对性的概念.若某一产品设计方案优于另一设计方案,则意味着在该方案中能够实现的人体最优作业姿态比另一方案中的人体最优姿态更令人舒适和满意.对产品的工作环境作人机工程评估,其本质就是对环境中的最优的人体工作姿态进行评估.因此,找到最优的人体工作姿态是实现人机环境评估的前提.公式(1)定义的空间  $X$  即为人体作业姿态优化问题的解空间,可将其中的人体最优工作状态  $\bar{x}^* \subset X$  用于

评价人机环境的优劣.

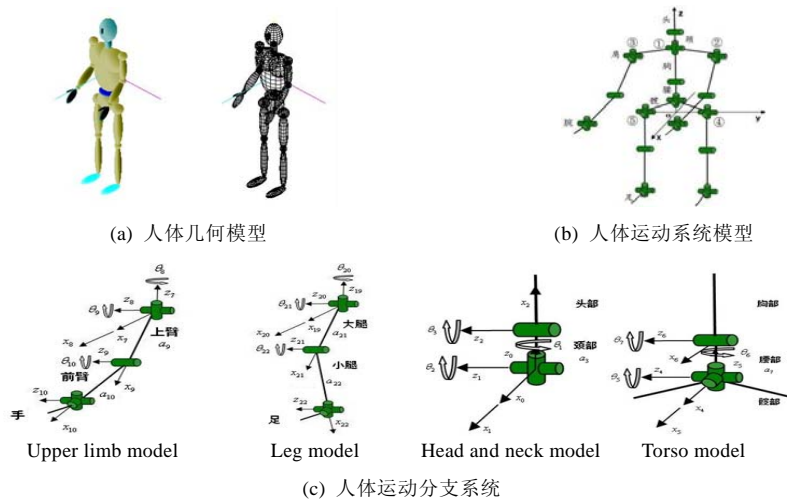


Fig.1 Virtual human models

图 1 虚拟人体模型

为在空间  $X$  中搜索人体最优工作状态,需要建立评价人体工作状态的多目标评估体系.人体工作状态  $\bar{x}=[x_1, x_2, \dots, x_m]$  中的各状态分量具有不同的属性和度量标准,蕴含了不同类型的评估目标.因此,需要将针对不同类型目标的评估整合到同一评估体系中,使它们之间可以相互类比及综合.其次,由于环境和人体自身约束的存在,人体工作状态  $\bar{x}=[x_1, x_2, \dots, x_m]$  中各分量的状态通常难以同时得到优化,即评估目标之间存在冲突.例如:在有限空间中,很难保证既能完成操控任务,同时又能保证身体平衡性、关节姿态舒适性和操作可观察性等目标理想化.因此,在选择人体工作姿态时,需要通过人体各部分相互协调配合来均衡各种目标的利益,以保证人体综合状态最优或接近最优.虽然行为协调策略看似随机,但却是理性思考的结果,借助博弈模型可以解释许多行为现象的规律和根源.

### 3 人体工作状态优化模型

#### 3.1 人体工作状态的多目标优化

根据上述分析,提出一个基于多 Agent 模糊多目标合作博弈的人体工作状态优化模型.对空间  $X$  中的人体优化自身工作状态问题给出如下数学表示:

$$\max \{ \bar{\omega} \circ \bar{\mu}(\bar{x}) \} = \max_{X \in D} \left\{ \sum_{i=1}^m \omega_i \times u_i(x_i) \right\} \quad (2)$$

$$\text{Subject to: } g_i(\bar{x}) \leq 0, i = 1, 2, \dots, p \quad (3)$$

$$\bar{\omega} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m] \text{ 且 } \sum_{i=1}^m \omega_i = 1 (\omega_i \geq 0) \quad (4)$$

$$\bar{\mu}(\bar{x}) = [\mu_1(x_1), \mu_2(x_2), \dots, \mu_m(x_m)]^T \in [0, 1]^m \quad (5)$$

其中,向量函数  $\bar{\mu}(\bar{x})$  是人体工作状态向量  $\bar{x}$  的舒适度综合评估函数,其分量  $\mu_i(x_i) \in \bar{\mu}(\bar{x})$  是人体状态参数  $x_i \in \bar{x}$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 的舒适度评估函数,用来评价参数  $x_i$  当前状态的优劣;  $\bar{\omega} \circ \bar{\mu}(\bar{x}) = \sum_{i=1}^m \omega_i \times \mu_i(x_i)$  是对人体工作状态  $\bar{x}$  的舒适度总体评估;  $\bar{\omega}$  为权向量,其分量  $\omega_i$  表示  $\mu_i$  在人体舒适度总体评估中的重要性,权向量  $\bar{\omega}$  的不同取值表示个人偏好的差异;函数  $g_i(\bar{x})$  的含义同公式(1).公式(2)表明,空间  $X$  中的最佳人体工作姿态应满足舒适度总体评估最大化.

基于人体生物力学<sup>[11]</sup>和模糊多目标博弈理论<sup>[12]</sup>的成果,将公式(5)中各评估函数  $\mu_i(x_i) \in \bar{\mu}$  表示为人体状态分量  $x_i \in \bar{x}$  的舒适度模糊最优集<sup>[13,14]</sup>.例如,关节姿态的舒适度评估函数定义为

$$\mu_i(x_i) = 1 - \frac{\int_0^{T_{lim}} f_i(x_i, t) dt}{f_i^{max} \cdot T_{lim}} \in [0, 1] \quad (6)$$

其中,  $\mu_i$  是关节  $i$  状态的舒适度评估结果,评估值域为  $[0, 1]$ ;  $f_i$  是关节  $i$  转角为  $x_i$  时关节  $i$  所能承受的负荷,  $f_i$  是关节转角  $x_i$  和时间  $t$  的函数,疲劳导致  $f_i$  在时间域内呈单调下降趋势,通过对  $f_i$  在时间域中积分以体现负荷  $f_i$  带来的疲劳效应;  $f_i^{max}$  是  $i$  关节在其转动范围内能够承担的最大负荷;  $T_{lim}$  是工作姿态需要维持的时限.

将公式(6)简化为梯形模糊数表示的模糊最优集.以如图 2 所示的上肢关节舒适度评估为例:图中横坐标表示关节转角范围,纵坐标表示关节转角对应的评估值,评估值域为  $[0, 1]$ ;舒适度较好的关节姿态将在值域中取得较高的评估值.对向量  $\bar{\mu}$  的各分量均采用类似的模糊最优集的形式来定义.

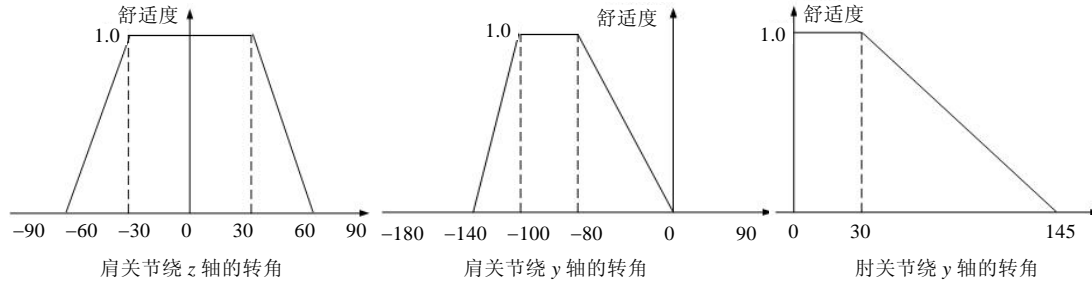


Fig.2 Comfort evaluation function of upper limb

图2 虚拟人上肢关节舒适度评估函数

上述人体工作状态优化模型具有如下特点:(1) 将人体自适应行为作为一个多目标优化问题来研究,表明人体自适应行为是由某些不舒适的状态所引起的,行为的目标就是消除这些不舒适状态,模型采用人体工作状态向量  $\bar{x}$  表示不同类型的行为目标;(2) 向量函数  $\bar{\mu}$  的各分量  $\mu_i$  均采用公式(6)的无量纲处理,将不同类型的人体状态参数能整合在同一评估模型中,采用线性加权的方法对人体作业姿态的总体效用进行评估;(3) 用权向量  $\bar{\omega}$  表示参与评估的各目标在总体评估中的重要性,权向量的不同取值用于体现人在行为过程中的主观偏好等因素,可根据权重的差异来协调目标之间的利益均衡和消解冲突.

### 3.2 多Agent合作式博弈框架

求解公式(2)~公式(6)表示的优化问题是一个在空间  $X$  中寻优的过程,本文将将其作为多目标条件下多 Agent 合作式博弈问题来考虑.博弈的基本框架如图 3 所示.该博弈系统包含两种类型的 Agent:功能 Agent 和协调 Agent.如图 1(c)所示,人体运动系统被划分为上肢、下肢、头颈和躯干等可以独立控制的运动单元.将这些运动单元作为参与博弈的主体,分别抽象为可以独立决策 Agent,即功能 Agent.功能 Agent 是博弈的参与者,包括 arm\_agent, leg\_agent, body\_agent 和 headneck\_agent 等,它们分别负责人体各个运动单元的状态评估、基本运动控制和决策,并参与人体总体姿态优化的协商.协调 Agent 负责调度功能 Agent 之间的利益协调,包括 human\_agent 和 sensor\_agent. human\_agent 是博弈的仲裁者,负责将人体各运动单元的基本运动功能组合成复杂行为. sensor\_agent 负责获取人体外部环境信息,建立虚拟人行为系统与外部环境的信息交流.

虚拟人体工作姿态的优化是通过上述 Agent 之间的多次博弈来实现的,基本思想是:首先,各功能 Agent 评估其所对应的人体运动单元的工作状态,若某状态参数  $x_i \in \bar{x}$  的评估结果不满意则触发相应事件,将事件所包含的请求信息作为一个议题提交博弈仲裁者 human\_agent. human\_agent 可能同时收到来自多个功能 Agent 提出的若干不满意事件,将按照事件的重要性对其排序并优先处理最重要的事件.一般针对某个触发事件将有多个行为策略供选择,所谓行为策略描述了功能 Agent 的协作方式.由 human\_agent 选择出能够最快改善人体舒适度的策略,并将该策略通知各功能 Agent.各功能 Agent 执行该策略,并判断策略是否可行:若不可行,则通知

human\_agent 重新选择策略,若可行则接受该策略的执行效果.上述过程反复执行,直至找到最优人体工作状态.此时,将没有新的待处理事件被功能 Agent 提出,则博弈过程结束.

基于上述思想,本文将提出一个具体的算法实现.

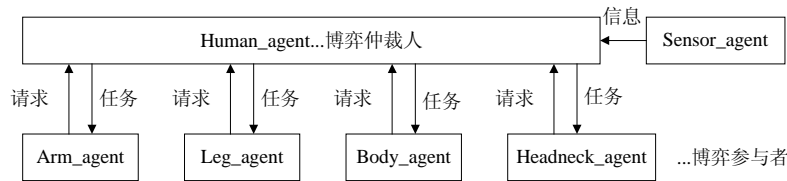


Fig.3 Framework of multi-agent cooperative games (virtual human's behavior system)

图3 多 Agent 合作式博弈框架(虚拟人行为系统)

### 3.3 多目标博弈的Nash谈判解

由于多目标冲突的存在,多目标优化问题一般不存在类似于单目标最优问题的单一的全局最优解.在现实中,多目标优化问题仅存在若干非劣解,亦称作满意解或 Pareto 最优解.同样,在求解公式(2)~公式(6)的多目标问题过程中,也难以获得使所有目标评估值 $\mu_i(i=1,2,\dots,m)$ 同时最大化的理想工作状态.根据多目标多人合作博弈的 Nash 谈判模型<sup>[12]</sup>,人体满意的作业姿态是多元目标在协商的基础上达到利益均衡的结果.因此,本文提出公式(2)~公式(6)模型的 Nash 谈判解的概念:假设谈判底线是所有参与博弈的目标  $x_i \in \bar{x} (i=1,2,\dots,m)$  都认为不能让步的利益底线,表示为

$$\bar{\mu} = [\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2, \dots, \bar{\mu}_m]^T \in [0,1]^m \tag{7}$$

所谓人体作业姿态评估的 Nash 谈判解是指:存在  $\bar{x}^* \subset X$ ,使得

$$\bar{\mu}(\bar{x}^*) \geq \bar{\mu}, \text{即 } \mu_i(x_i^*) \geq \bar{\mu}_i (i=1,2,\dots,m) \tag{8}$$

则  $\bar{\mu}(\bar{x}^*)$  是人体姿态评估的 Nash 谈判解,而  $\bar{x}^*$  是一个满意的人体作业姿态.公式(8)表明,人体满意姿态  $\bar{x}^*$  的舒适度综合评估结果  $\bar{\mu}(\bar{x}^*)$  应高于公式(7)所设定的阈限.由于多目标合作条件下的 Nash 谈判解满足 Pareto 最优性,我们也称  $\bar{x}^*$  为人体作业状态的 Pareto 最优解.

## 4 算法实现

### 4.1 多Agent仿真环境

设计了一个基于多 Agent 系统(multi-agent system)和事件驱动的虚拟人自适应行为仿真环境,用以检验基于本文模型的虚拟人自主行为能力和与用户交互的能力,如图4所示.

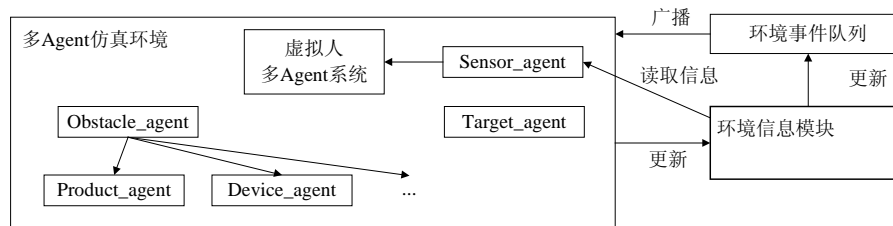


Fig.4 Multi-Agent simulation system for ergonomic design

图4 面向人机工程设计的多 Agent 仿真系统

在人机工程设计过程中,虚拟仿真环境中一般会有人物、工具设备和作业对象等虚拟实体.Agent 是对虚拟实体的抽象,封装了虚拟实体所具有的几何信息、认知信念和行为策略等基本属性和功能.Agent 通常具有以下

特性:(1) 感知外部环境的能力;(2) 自主行为并适应环境的能力;(3) 协同工作和从环境中学习的能力.一般来说,简单的虚拟实体可用单个 Agent 来抽象.在图 4 所示的仿真环境中,将简单的虚拟实体归纳为两类:虚拟障碍物(obstacle\_agent)和虚拟操控目标(target\_agent).其中,obstacle\_agent 用来派生出一些更具体的对象,如虚拟产品(product\_agent)、设备(device\_agent)等实体,它们具有环境干涉检测和通信等基本功能;虚拟操控目标(target\_agent)是虚拟人抓取和操控的对象,几何上用球状几何体表示,target\_agent 封装了操控目标的位置、姿态、运动形式和通信等基本功能.复杂的虚拟实体用多个 Agent 来抽象,例如,我们使用一个多 Agent 系统来抽象表示虚拟人的行为系统,详见图 3 所示.

在图 4 所示的系统中,环境信息模块和环境事件队列是虚拟人识别虚拟环境中的其他对象并与之交流的途径.环境信息模块用于存储虚拟环境中的各种信息,即保存了当前虚拟环境的状态;它由层次化的复杂数据结构组成,包括容器、向量组、信息单元、检索树等.其中:容器代表虚拟环境中的特定区域,大型虚拟环境可由若干区域组成,容器用类 container 来定义;每个容器包含一个向量组,其中的每个向量存储某一类型的虚拟实体的信息,例如:product\_vector 是存储虚拟产品(product\_agent)信息的向量,target\_vector 是存储虚拟操控目标(target\_agent)信息的向量;向量元素为基本的信息单元,基本信息单元存储虚拟环境中某个实体的具体信息.如,一个 product\_agent,device\_agent 或 target\_agent 的信息都可以存储为一个单独的基本信息单元;对环境信息模块的检索是通过检索树来实现的,本文不作详述.

多 Agent 仿真环境的运行是由环境事件驱动的.环境事件相对于虚拟人而言分成内部事件和外部事件.内部事件是人体自身状态引起的事件,外部事件是虚拟人周围环境变化引起的事件.外部事件由类 CEvent 定义,仿真系统以广播的形式向虚拟环境中的各个 Agent 发送外部事件生成的通知.环境事件队列是当前环境触发的各种外部事件的优先级队列.事件驱动的仿真环境总体运行机制包括:(1) 若用户对虚拟环境做出修改,比如修改了环境中虚拟实体的布局、尺寸或增加了新的虚拟实体,则环境信息模块将会同步记录下新的环境状态,随后,系统触发相应的外部事件并生成通知,外部事件将进入环境事件队列供虚拟人检索;(2) 虚拟人通过 sensor\_agent 获取外部信息,sensor\_agent 得到广播通知后主动检索环境事件队列,并根据事件提供的启发式信息检索环境信息模块,将新的环境信息读入 human\_agent 的认知模块中,在认知模块中构建对虚拟环境状态的信念,以供虚拟人行为决策使用;(3) 虚拟人工作姿态的优化是由内部事件来推动的,内部事件将触发虚拟人行为系统(图 3)内部 Agent 之间通过协商选择下一步优化自身状态的行为策略.

## 4.2 行为构成元素

我们采用梯度上升的搜索策略求解公式(2)~公式(6)定义的人体作业姿态优化模型.在空间  $X$  中搜索人体工作状态的满意解或 Pareto 最优解,其本质是图 3 中多 Agent 系统内部多次反复博弈的过程.每次博弈都是基于当前人体工作状态做出的一小步改善人体姿态的尝试,所选择的行为策略应使系统以最快速度接近人体满意作业姿态  $\bar{x}^*$ ,该策略即为搜索的梯度步长.

将人体工作状态的 Pareto 最优解的梯度搜索步长定义为

$$d\bar{x}_{grad} = [dx_1, dx_2, \dots, dx_m] \quad (9)$$

$$\text{Subject to: } \max\{d(\bar{\omega} \circ \bar{\mu}(\bar{x}))\} \quad (10)$$

公式(9)中,  $d\bar{x}_{grad}$  是梯度搜索步长,它以微分的形式表示人体工作姿态的变化,其分量  $dx_i (i=1, 2, \dots, m)$  表示人体一个微小的基本动作.  $d\bar{x}_{grad}$  的执行满足公式(10)所示条件,即人体姿态的微分变化  $d\bar{x}_{grad}$  应使人体舒适度总体评估结果以最快速度上升.公式(9)和公式(10)表明,一个梯度搜索步长包含行为的一系列基本动作,是当前改变人体工作状态的佳策略.

与大多数自然现象一样,人体行为也是由若干基本元素构成的.行为元素可以拥有不同的尺度大小和层次等级,但一般都具有一定基本功能、目的和内涵,其组织形式也要服从一定逻辑规则并具有层次化的结构体系.虽然行为元素数量有限,但其可能的组合形式却极为丰富,因而有可能组成灵活多样的复杂行为.例如,语言就是人类行为的一种典型代表,它由单字、词汇、语句和段落等语言要素组成,通过语义语法规则组织起来,其丰富程度难以想象.人类其他类型的行为也有类似的组织形式.除去少量条件反射行为之外,大多数行为都有明确

的目的和意义.完整的行为过程通常是在若干意图引导下将具有相关内涵或语义的行为元素按照特定规则组织而成的,并能在最终满足一系列子目标的前提下达到总体行为目标.因此,本文提出了一个层次化的人体行为结构模型,如图 5 所示.该模型从行为的基本运动功能、语义内涵和语义范畴的角度,将人体自适应行为分解为原子动作、子行为和行为模式等不同层次.

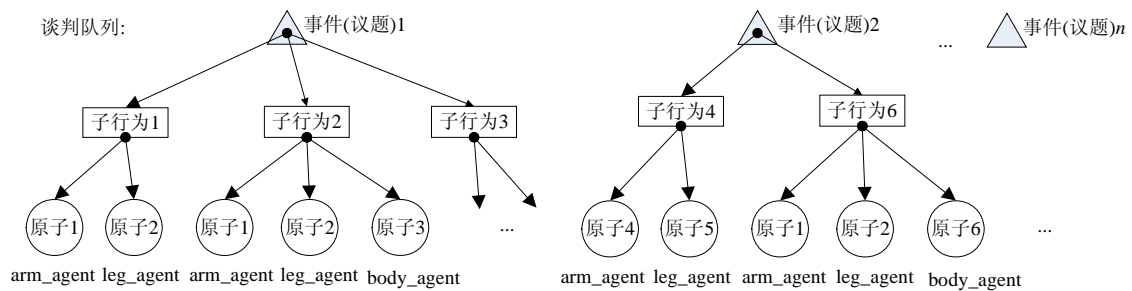


Fig.5 Basic elements of human adaptive behavior

图 5 人体自适应行为的基本元素

**定义 1(原子动作(atom)).** 原子动作是组成人体自适应行为的最小单位,表示人体运动系统的基本运动功能,如人体转身、腰部转动、向目标伸出手臂或屈膝等动作.本文亦将原子动作称为人体单位运动,分为正向原子动作和逆向原子动作两大类,分别表示为

$$Do(Action,Param) \text{ 和 } Do(Action,Target),$$

其中, $Do(\cdot)$ 是原子动作执行函数; $Action$  是对原子动作描述,比如腰关节正向运动或目标引导的上肢逆向运动等; $Param$  为正向运动单位,是人为指定的一个小的运动量.例如,若腰关节正向运动单位是  $3^\circ$ ,则每次执行函数  $Do(\cdot)$ 腰关节均需转动  $3^\circ$ ; $Target$  是引导逆向原子动作的目标,定义了目标的位置和姿态.

原子动作是人体各个运动分支系统基本功能,作为  $arm\_agent, leg\_agent, body\_agent$  和  $headneck\_agent$  等功能 Agent 的先验知识存储于各自的信念模型中,以供功能 Agent 在行为决策时选择.原子动作不包含明确的目的或意图,只是对人体基本运动机能的物理描述.

**定义 2(子行为(sub behavior)).** 子行为亦称作人体广义单位运动,是具有最基本语义信息的行为元素,即包含了行为最基本的目的或意图.子行为由若干原子动作组成,规定了原子动作的执行方式.子行为可以用产生式规则的形式来表示,例如:

If ( $Asked(comfort\ aim \cap task\ aim) | limit\ factors$ )  
Then Executed( $atom1, atom2, \dots$ ); by rules)

...

规则的条件部分包含了子行为的语义信息,即子行为的目的和意图,如  $comfort\ aim$  是子行为执行后期望达到的舒适度目标,  $task\ aim$  是作业任务目标,  $limit\ factors$  是环境约束条件;  $Executed(\cdot)$  为子行为执行函数,其参数  $atom1, atom2, \dots$  为待执行的若干原子动作,  $by\ rules$  为原子动作的执行方式,如同步、异步等.

子行为有如下特性:

- (1) 子行为中的原子动作可以来自不同的功能 Agent,如  $arm\_agent, leg\_agent$  等,因此,不同的子行为定义了功能 Agent 的不同的合作关系,即行为策略;
- (2) 子行为是对环境的内部事件的响应,当某目标评估函数  $\mu_i(x_i) \leq \bar{\mu}_i$ ,表明目标  $x_i \in \bar{x}$  的状态评估不满意,于是触发相应的内部事件  $e_i$ ,请求改善目标  $x_i$  的舒适度;
- (3) 对应一个内部事件,一般有若干子行为以供选择,子行为的一次执行即为人体状态的一次微分变化,可以表示为公式(9)的形式,其中,满足公式(10)条件的子行为就是当前的最优策略,即梯度搜索步长.

**定义 3(行为模式(behavior pattern)).** 行为模式是划分子行为类别的语义范畴.将意图相关的子行为归到



同一语义范畴内,便于存储管理和实现行为仿真的自动化.本文将人体自适应行为分成 3 个阶段:环境漫游(roaming)模式、抓取目标(grasping)模式和状态优化(optimizing)模式.行为模式(含子行为)及其转换关系保存为先验知识库,作为博弈仲裁者 human\_agent 的信念模型.

- 环境漫游(roaming)模式:若作业目标与虚拟人当前站立位置之间存在设备或建筑设施等障碍物,则虚拟人通过在环境中漫游来到作业目标前的.在 Roaming 模式中,我们实现了基于障碍物包围盒可视点的最短路径规划方法<sup>[13]</sup>;
- 抓取目标(grasping)模式:若虚拟人与作业目标间没有障碍物,则执行 Grasping 模式.规定抓取成功的标志为虚拟手的局部坐标系与目标对象的局部坐标系重合.在 Grasping 模式中,我们提出了一种改进的 Mamdani 算法<sup>[14]</sup>,使虚拟人以尽量少的肢体运动为代价接近作业目标,以实现作业目标的抓取;
- 状态优化(optimizing)模式:虽然虚拟人在 Grasping 模式中已成功抓取到作业目标,但人体工作状态通常不是最优状态,因此需要协调控制肢体动作使人体作业姿态合理化,以使总体舒适度在满足约束条件下最大化.针对第 3 节提出的优化模型,本文第 4.3 节提出了一种基于多 Agent 合作式博弈的人体工作状态优化算法,以求得人体工作状态的 Pareto 最优解.

行为模式之间的相互转化关系如图 6 所示.图中各行为模式之间的转换条件用集合  $T=\{A,B,C,D,E,F,G\}$  表示,具体含义为:

- A:人与目标间存在障碍;
- B:人与作业目标间不存在障碍;
- C:环境被修改,人与目标间出现新障碍物;
- D:手抓取到目标,但不满足作业姿态最优条件;
- E:姿态优化过程中,手与作业目标脱离;
- F:手抓取到目标,并满足姿态最优条件;
- G:手抓取到目标,但重新不满足姿态最优.

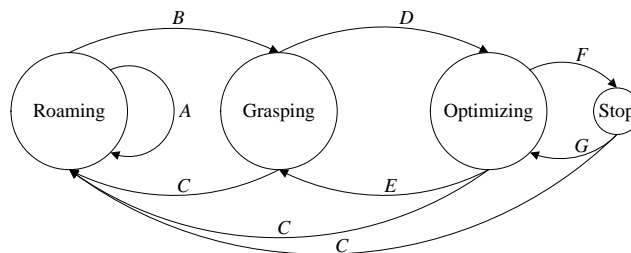


Fig.6 Translation of behavior pattern  
图 6 行为模式转换

上述定义解决了如何确定算法步长等基本问题.Roaming 和 Grasping 模式中的方法已有文献介绍,本文不再详述,下面仅对 Optimizing 模式中的人体工作状态优化算法加以详细论述.

### 4.3 人体工作状态优化算法

#### 4.3.1 多 Agent 谈判机制

基于多 Agent 合作式博弈框架(图 3),提出了一个多 Agent 谈判机制,规定了多 Agent 谈判过程需要遵循的一系列基本原则.

**定义 4(谈判议题集合(bargaining topic set)).** 若某人体状态参数  $x_i \in \bar{x}(i=1,2,\dots,m)$  的舒适度评估结果  $\mu_i(x_i) < \bar{\mu}_i$ , 即舒适度不满意,则状态  $x_i$  将被作为一个议题提出.在当前人体工作状态  $\bar{x}$  下,所有被提出议题的集合被称作谈判议题集合  $\{x_i\}_{topic}$ .

我们也将议题称作谈判目标.谈判议题集合  $\{x_i\}_{topic}$  是所有人体状态参数集合  $\{x_i\}_{i=1,2,\dots,m}$  的一个子集,  $\{x_i\}_{i=1,2,\dots,m}$  是待选议题的集合.  $\{x_i\}_{topic}$  中的议题分别由 `arm_agent`, `leg_agent`, `body_agent` 和 `headneck_agent` 等博弈参与者提出,以内部事件的形式提交给博弈仲裁者 `human_agent`.

**定义 5(优先权原则(priority principle)).** (1) 当前重要性最大的议题  $x_i^{priority}$  优先被处理,其舒适度的改善可以以牺牲其他议题或待选议题的利益为代价;(2) 通常,每个议题都有若干待选的行为策略(如图 5 所示),即子行为;应优先执行能使人体总体舒适度  $\{\bar{\omega} \circ \bar{\mu}(\bar{x})\}$  改善得最快的策略,即梯度搜索步长;(3) 若最优策略执行失败,方可考虑次优的策略.如此依次尝试所有可能的策略;(4) 议题  $x_i$  的重要性由其相应的权值  $\omega_i \in \omega(i=1,2,\dots,m)$  大小来确定.

多 Agent 谈判意味博弈参与者之间可以讨价还价,谈判包括竞争和妥协两个方面.定义 5 是对竞争法则的描述,表明通常权重大的议题优先得到利益,权重小的议题则需要做出妥协.然而,一次谈判的成功有时需要各方在竞争的同时都要做出适当妥协,即妥协亦适用于大权重议题向小权重议题做出让步.为此,本文对多目标多人合作博弈的 Nash 谈判模型<sup>[12]</sup>做出修正,提出一种基于双阈向量的讨价还价模型,描述如下:

已知公式(7)定义了多 Agent 谈判过程中所有谈判议题( $\{x_i\}_{i=1,2,\dots,m}$ )都认为不能让步的利益底线,即谈判底线,公式(11)定义谈判过程中所有谈判议题的愿望,即谈判上线.

$$\hat{\mu} = [\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2, \dots, \hat{\mu}_m]^T \in [0, 1]^m \quad (11)$$

其中,  $\hat{\mu}_i$  是谈判议题  $x_i$  的愿望,愿望是一种喜好,表示谈判议题  $x_i$  希望自己的舒适度满足  $\mu_i(x_i) > \hat{\mu}_i$ ,但不要求一定要实现.对多 Agent 谈判的讨价还价空间做如下定义:

**定义 6(讨价还价空间(bargaining space)).** 已知在多 Agent 谈判中,向量  $\bar{\mu}$  是谈判的底线,向量  $\hat{\mu}$  是谈判的上线,则区域  $[\bar{\mu}, \hat{\mu}] \in R^m$  是多 Agent 讨价还价的空间.

讨价还价过程为:将当前谈判议题依权重大小排序,组成谈判队列.参与博弈者将按照权重值从大到小的顺序依次对议题展开谈判.若当前的议题是  $x_i^{current}$ ,即  $x_i^{current} = x_i^{priority}$ ,则需要在其舒适度满足  $\mu_i(x_i^{current}) > \hat{\mu}_i$  后才能转向其他议题.这意味着在此期间,将持续优化  $x_i^{current}$  的舒适度,直至达到  $x_i^{current}$  的愿望,即  $\mu_i(x_i^{current}) > \hat{\mu}_i$ ;若  $x_i^{current}$  与权重较低谈判目标  $x_j$  发生利益冲突,则  $x_j$  应无条件做出让步;若  $x_i^{current}$  与权重较高谈判目标  $x_h$  发生利益冲突,则  $x_h$  应做出有条件的让步,即让步的底线为  $\bar{\mu}$ ,不容许  $\mu_h(x_h) < \bar{\mu}_h$ .

讨价还价是通过子行为实现的,即算法每执行一步搜索就是进行了一次讨价还价.子行为定义了博弈参与者的一次联合行动.在一个子行为定义的合作中,提出当前议题  $x_i^{current}$  的 Agent 将获利,即  $x_i^{current}$  状态及其舒适度得到改善,而其他 agent 可能需要为此做出让步.例如,在有限空间中执行某子行为,使膝关节(`leg_agent`)舒适度得到改善,同时以腰关节(`body_agent`)舒适度下降为代价.若子行为的所有原子动作都执行成功,子行为才算执行成功,即博弈参与者进行了一次成功合作.在子行为执行后,若出现以下情况,则被认为博弈参与者之间的一次合作失败.

**定义 7(合作失败准则(cooperation failure rule)).** (1) 虚拟人体与周围虚拟环境发生干涉;(2) 虚拟人的某关节超出生理上容许的范围;(3) 虚拟人无法保持对作业目标(`target_agent`)的操控;(4) 当前议题  $x_i^{current}$  舒适度评估  $\mu_i(x_i^{current})$  的提高导致比该议题更重要的议题  $x_h$  的舒适度评估  $\mu_h(x_h)$  的下降,并且降至  $\mu_h(x_h) < \bar{\mu}_h$ ,则博弈参与者之间的一次讨价还价失败.

**定义 8(回退机制(backspace mechanism)).** 若根据定义 7 判定某子行为执行失败,则应取消该子行为执行后的人体行为状态,回到原来状态,重新选择次优的子行为来尝试.

回退机制是用一个双层行为数据存储结构来实现的,双层结构包括备份层和更新层.每层由一个数据链表组成,用于存储人体工作状态( $\bar{x}$ )及其评估结果( $\bar{\mu}(\bar{x})$ ).备份层存储子行为执行前的人体工作状态及其评估,更新层则存储子行为执行后的此类数据.若子行为执行成功,则用更新层的数据覆盖备份层的数据;否则,用备份层的数据覆盖更新层的数据,以实现人体工作状态的回退.

### 4.3.2 基于多 Agent 谈判的优化算法

对基于多 Agent 谈判的人体工作状态优化算法作完整描述:

输入:自然站立的人体状态  $\bar{x}^*$ ,作业目标和作业环境布局;

输出:人体工作状态的 Pareto 最优解  $\bar{x}^*$ ,满足  $\bar{\mu}(\bar{x}^*) \geq \bar{\mu}$ .

Step 1. 评估当前人体工作状态的舒适度.

博弈参与者 `arm_agent`,`leg_agent`,`body_agent` 和 `headneck_agent` 分别负责人体四肢、躯干、头颈和人体平衡等舒适度评估,综合评估结果表示为  $\bar{\mu}(\bar{x}) = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m]^T$ ,由博弈仲裁者 `human_agent` 计算人体总体舒适度  $\{\bar{\omega} \circ \bar{\mu}(\bar{x})\}$ .

Step 2. 判定人体工作状态的满意程度.

博弈参与者根据多目标 Nash 谈判条件,判断人体作业姿态的满意程度.若综合评估结果  $\bar{\mu}(\bar{x})$  满足公式(8)所示的 Nash 谈判条件,则人体工作状态  $\bar{x}$  令人满意,本算法结束.此外,博弈仲裁者 `human_agent` 根据式(12)判断人体总体舒适度是否最大化.令人体总体舒适度  $Q(\bar{x}) = \bar{\omega} \circ \bar{\mu}(\bar{x})$ ,若下式成立:

$$|Q(\bar{x}) - Q(\bar{x}^*)| \leq \varepsilon \quad (12)$$

则算法结束.其中,  $\bar{x}^*$  是人体理想姿态,可选择人体自然站立的姿态作为理想姿态; $\varepsilon$ 是人体姿态舒适度评估的容许误差.

Step 3. 选择梯度搜索步长.

若公式(8)和公式(12)的条件均未满足,则需搜索人体满意的作业姿态  $\bar{x}^* \in X$ .

确定梯度搜索步长的步骤如下:

1. 对于当前人体工作状态  $\bar{x}$ ,若评估结果  $\mu_i(x_i) \leq \bar{\mu}_i$ ,则相关的博弈参与者提出议题  $x_i$ ,同时触发行为请求事件  $e_i(i=1,2,\dots,m)$ ,请求调整  $x_i$  的状态值以改善其舒适度;
2. 博弈仲裁者 `human_agent` 将当前所有博弈参与者(`arm_agent`,`leg_agent`,`body_agent` 和 `headneck_agent`) 提出的谈判议题依权重大小排序,组成谈判队列;
3. `human_agent` 根据优先权原则(priority principle)从谈判队列选取当前议题  $x_i^{current}$ ,并确定梯度搜索步长,即改善人体总体舒适度  $\{\bar{\omega} \circ \bar{\mu}(\bar{x})\}$  最快的子行为;

Step 4. 执行该子行为,`human_agent` 将子行为中的原子动作作为任务分配给具有相应功能的博弈参与者,使博弈参与者之间达成一次合作.即肢体之间通过配合完成一次广义单位运动.

Step 5. 在子行为执行完毕后,如 Step 1 一样对新的人体工作状态进行评估,并根据基于双阈向量的“讨价还价模型”与合作失败准则(cooperation failure rule)对执行结果进行分析;

Step 6. 若合作失败准则成立,则子行为执行失败,执行回退机制(backspace mechanism);否则,子行为执行成功,显示执行动画;

至此,返回步骤 2 循环执行,直到公式(8)或公式(12)的条件满足为止.即人体作业状态达到满意.若因约束条件限制无法达到这两个优化条件,则选择一个接近优化条件的姿态来结束计算.

## 5 仿真实验

### 5.1 仿真实验流程

本研究的目标是模拟工作中人体的自适应行为过程,为设计人员进行快速的人机工程评估提供一种简单有效的工具.基于本文方法,在 Windows/VC6.0/OpenGL 平台上研发了人体自适应行为仿真原型系统,通过在该平台上实施仿真实验来验证本文方法的有效性.在现实中,抓取空间目标是具有共性的常见行为,我们以抓取目标为目的的人体行为仿真为例来验证本文方法的效果.以图 7 所示例子来说明仿真实验的基本流程.用户可循环使用下面步骤,以达到完善设计的目的:

步骤 1. 布置或修改虚拟场景

图 7(a)所示为仿真的初始场景.设计者在虚拟环境中按照需要布置好各种产品和设备,导入虚拟人模型,指

定虚拟人站立的位置,最后设定作业点(target\_agent)的位置和姿态.作业点是虚拟人手工操控的目标,可以在虚拟环境中设置多个作业点,虚拟人将依次完成对各个作业点的抓取.本系统使用球状几何体作为作业点的可视化模型.

步骤 2. 启动仿真计算

启动人体工作状态优化算法,系统将自动完成搜索人体最优工作姿态的计算,随之输出连续人体仿真动画.人体最终姿态如图 7(b)所示,虚拟人以满意姿态完成对作业点 1 的抓取.

步骤 3. 输出仿真数据

图 7(c)所示为系统的仿真数据输出窗口,与人体动画同步输出各种仿真数据.

步骤 4. 人体舒适度的趋势

仿真过程中,人体总体舒适度变化趋势如图 7(d)所示,图中横坐标表示动画的时序关键帧序列,纵坐标表示舒适度值.该曲线表明,此次仿真生成 65 帧连续动画,在此过程中,人体总体舒适度变化趋势呈先下降后逐步上升的趋势.最后,人体满意工作状态的舒适度为 0.83.由此可见,本文算法在虚拟人总体舒适度下降的情况下对人体姿态的调整起到了舒适度优化的作用.

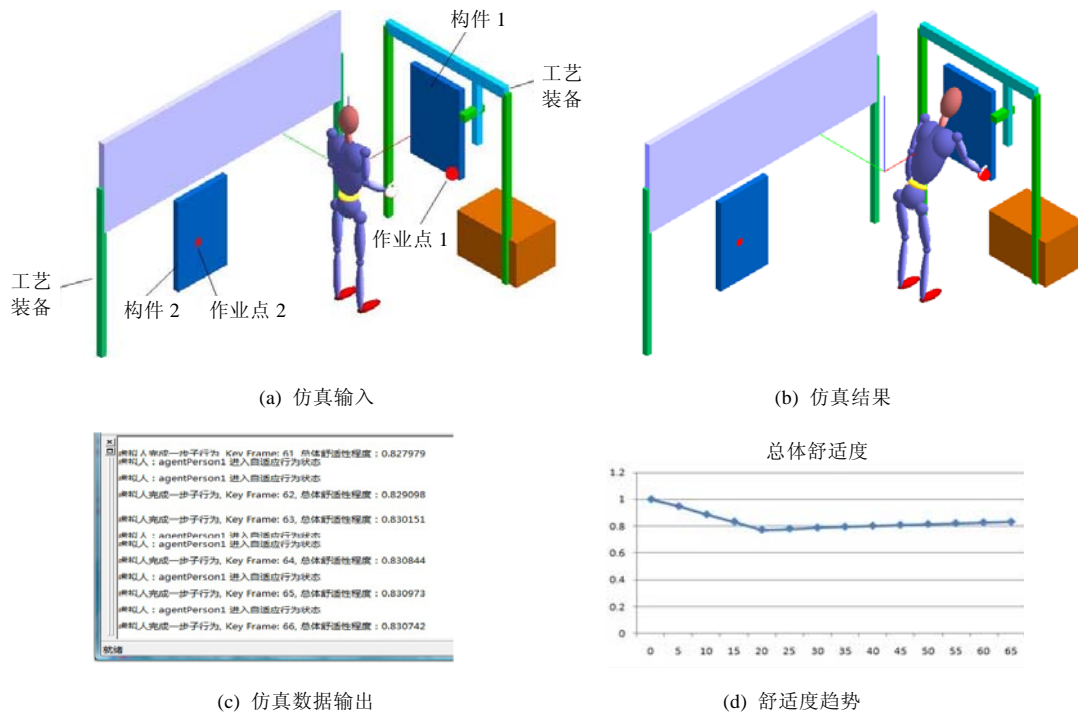


Fig.7 Simulation flow

图 7 仿真流程

5.2 仿真实例分析

通过一组仿真实验来验证算法的稳定性,本文选取其中的 4 个实例,如图 8 所示.每个实例生成动画序列约 100~200 余帧,图 8 仅提供了代表性的关键帧,分别从两个角度展示仿真效果.仿真的目标是抓取工作台上的作业点.在每个实例中,工作台高低尺寸不同,作业点在工作台上的位姿也不同.

本文算法具有较好的稳定性.虽然作业平台和作业目标的布局存在差异,但仿真系统均能自动生成连续的自适应行为仿真动画,虚拟人的行为总体上表现出较强的真实感.仿真动画体现了人体自适应行为的基本发展趋势,人体最终的工作状态也比较合理自然,符合人们的日常经验.

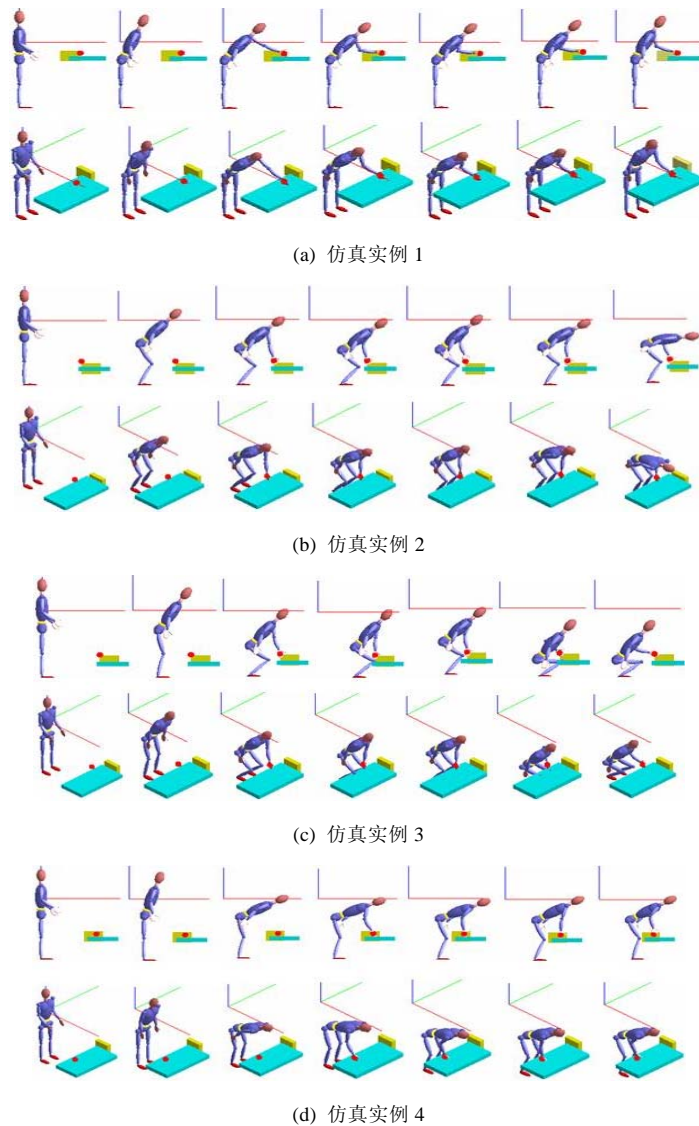


Fig.8 Simulation examples of human's adaptive behaviors

图 8 人体自适应行为仿真实例

图 9 所示为图 8 仿真实例的人体舒适度发展趋势曲线,其中,菱形标记曲线为人体总体舒适度的发展趋势,其他曲线为一些状态分量状态变化的评估曲线.由图 9 可知,在每个仿真实例中,人体总体舒适度均呈先下降随后波动式上升的趋势,体现出算法搜索人体最优工作状态的稳定性.其他类型曲线也显示出类似的稳定性.此外,各种曲线均表现出一定的波动性,这是目标之间利益博弈的效果.参与博弈的 Agent 之间讨价还价,导致获利时舒适度曲线上升,让步时舒适度曲线下降.因此,曲线呈现出在讨价还价空间附近波动的态势.

以图 8 和图 9 所示的仿真实例 3 为例加以详细说明.该实例共生成 195 帧动画,图 8(c)仅展示其中若干代表性的关键帧.由图 9(c)可知,自 0~105 帧,仿真算法处于 Roaming 和 Grasping 模式,实现了虚拟人经漫游接近目标并抓取目标.这一阶段可以检验目标的可达性,人体总体及各状态分量的舒适度均呈下降趋势.至 105 帧,人体总体舒适度、肩关节、膝关节和人体平衡性舒适度分别为 0.5532,0.7012,0.2315 和 0.3308.从数据来看,影响人体总体舒适度的因素是膝关节状态和人体平衡性不佳.自 105~195 帧,仿真算法处于 Optimizing 模式,执行第 4.3.2

节的优化算法,各曲线呈波动上升趋势.最终,人体总体舒适度、肩关节、膝关节和人体平衡性舒适度分别为 0.9244,0.6536,0.7806 和 0.7519,人体总体和各分状态的评估结果都得到极大改善.此时,人体工作状态的满足预设的 Nash 谈判条件,是多目标条件下的一个 Pareto 最优解.

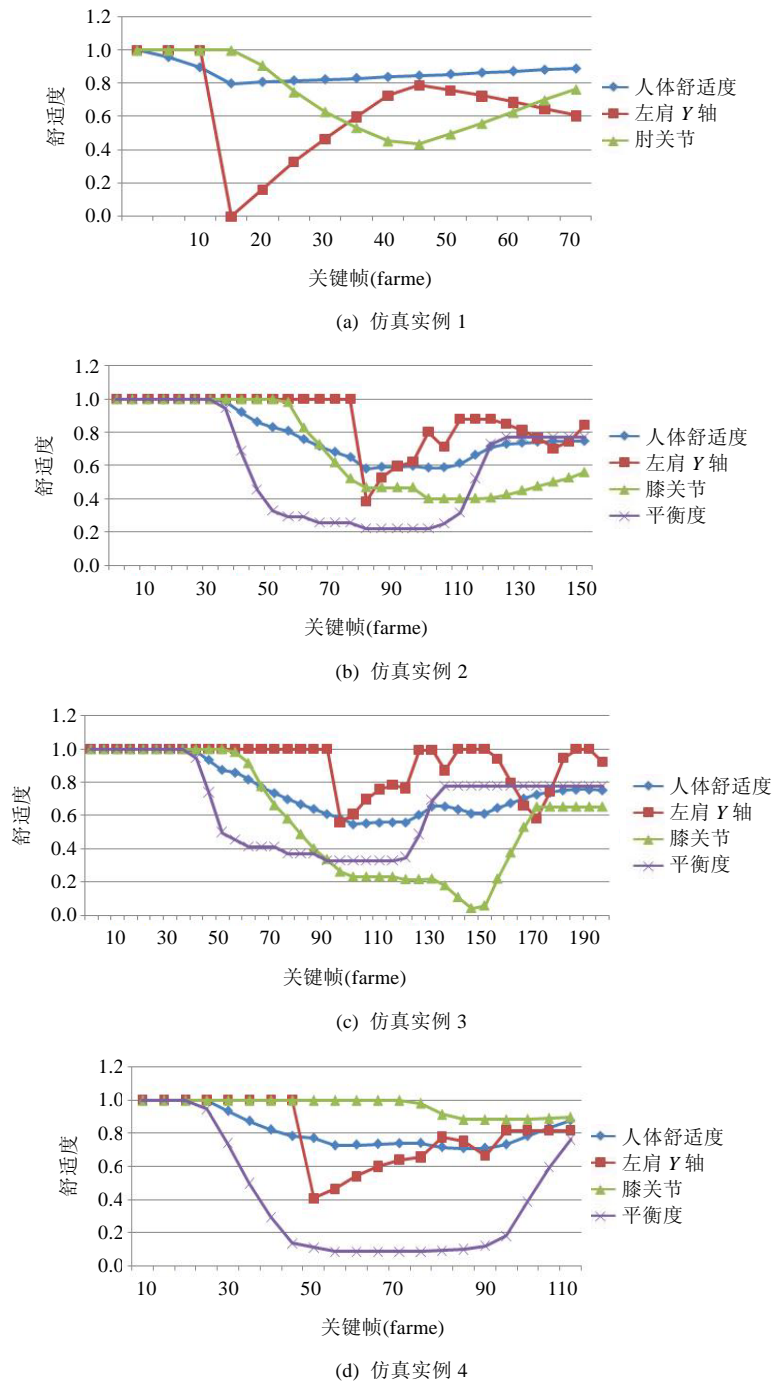


Fig.9 Tendency chart of human's comfort evaluations

图 9 人体舒适度评估的变化趋势

## 6 结 论

针对产品以人为中心设计的需要,本文提出了一个智能化虚拟人行为仿真的研究思路,将多目标动态博弈的理论思想引入到人体自适应行为建模的工作中来,并对人体最优作业行为的求解策略和解的形式进行了深入的理论探讨,提出了人体作业姿态的 Pareto 最优解的概念.在此基础上,设计实现了一个基于多 Agent 技术三维虚拟人体行为仿真软件,以此验证了本文方法的有效性.本文方法具有以下特点:

- (1) 人体行为仿真是系统在感知、评估、决策和行为控制基础上自动推理的结果,不需依赖运动捕捉技术获取的人体运动数据,便于在产品的设计阶段即展开人机工程仿真和分析,从而降低了产品的技术成本和研发周期;
- (2) 将连续自然的人体自适应行为离散化为基本的行为元素,建立行为的多目标博弈机制,将有限的行为元素组织成复杂的自适应行为.该方法对于在复杂多变的虚拟环境中生成适应性行为仿真具有较好的灵活性和可靠性;
- (3) 将人体自适应行为仿真与人机工程评估有机结合在一起.在仿真过程中,行为推理和人机工程评估交替进行,行为动画和仿真评估数据实时同步,有助于使用者分析行为产生的内在原因.

本文研究还存在一些不足.为了算法处理方便,主观定义了几种行为模式,并将这些行为模式绝对分开,导致仿真过程中行为过渡有时出现不自然的现象.在后续工作中,需要考虑设计一种有效的行为过渡机制;其次,需要进一步完善虚拟场景模型,建立更为完善的大型制造场景的语义模型,以便于虚拟人对环境的认知;最后,需考虑在仿真中引入工人的专业技术动作及其协调机制,以提高虚拟人完成特殊任务的能力.此外,对虚拟人手掌的操作行为还需进一步研究与开发.

### References:

- [1] Abate AF, Guida M, Leoncini P, Nappi M, Ricciardi S. A haptic-based approach to virtual training for aerospace industry. *Journal of Visual Languages and Computing*, 2009,20:318–325. [doi: 10.1016/j.jvlc.2009.07.003]
- [2] Goussous F, Marler T, Abdel-Malek K. A new methodology for human grasp prediction. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, 2009,39(2):369–380. [doi: 10.1109/TSMCA.2008.2010090]
- [3] Jayaram U, Jayaram S, Imtiyaz S, Shaikh I, Kim YJ, Palmer C. Introducing quantitative analysis methods into virtual environments for real-time and continuous ergonomic evaluations. *Computers in Industry*, 2006,57(3):283–296. [doi: 10.1016/j.compind.2005.12.005]
- [4] Boulic R, Maupu D, Thalmann D. On scaling strategies for the full-body postural control of virtual mannequins. *Interacting with Computers*, 2009,21:11–25. [doi: 10.1016/j.intcom.2008.10.002]
- [5] Luo ZX, Zhuang YT, Liu F, Pan YH. Space-Time constraints based motion editing and motion retargeting. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2002,14(12):1146–1151 (in Chinese with English abstract).
- [6] Liu L, Wang ZQ, Zhu DM, Xia SH. Motion editing based on the reconstruction of constraint trajectory. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2006,18(16):1613–1618 (in Chinese with English abstract).
- [7] Liu GD, Pan ZG, Cheng X, Li L, Zhang MM. A survey on machine learning in the synthesis of human motions. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2010,22(9):1619–1627 (in Chinese with English abstract).
- [8] Badler NI, Palmer MS, Bindiganavale R. Animation control for real-time virtual humans. *Communications of the ACM*, 1999,42(8):64–73. [doi: 10.1145/310930.310975]
- [9] Kuo CF, Wang MJ. Motion generation from MTM semantics. *Computers in Industry*, 2009,60:339–348. [doi: 10.1016/j.compind.2009.01.006]
- [10] Huo W. *Robot Dynamics and Control*. Beijing: Higher Education Press, 2005 (in Chinese).
- [11] Chapman AE, Wrote; Jin JC, Trans. *Biomechanical Analysis of Fundamental Human Movements*. Beijing: Beijing Sport University Press, 2010 (in Chinese).
- [12] Li DF. *Fuzzy Multiobjective Many-Person Decision Makings and Games*. Beijing: Defence Industry Press, 2003 (in Chinese).

- [13] Wang ZH. Multi-Agent based decision making for adaptive behavior of virtual human and ergonomic simulation [Ph.D. Thesis]. Beijing: BeiHang University, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [14] Wang ZH, Zeng GL, Zhu XX. Fuzzy multi-objective assessment and simulation for virtual human's adaptive action. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008,20(2):213-219 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献:

- [5] 罗忠祥,庄越挺,刘丰,潘云鹤.基于时空约束的运动编辑和运动重定向.计算机辅助设计与图形学学报,2002,14(12):1146-1151.
- [6] 刘莉,王兆其,朱登明,夏时洪.基于约束轨迹重构的运动编辑.计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(16):1613-1618.
- [7] 刘更代,潘志庚,程熙,李灵,张明敏.人体运动合成中的机器学习技术综述.计算机辅助设计与图形学学报,2010,22(9):1619-1627.
- [10] 霍伟.机器人动力学与控制.北京:高等教育出版社,2005.
- [11] Chapman AE,著;金季春,译.人体基本运动的生物力学分析.北京:北京体育大学出版社,2010.
- [12] 李登峰.模糊多人多目标决策与对策.北京:国防工业出版社,2003.
- [13] 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[博士学位论文].北京:北京航空航天大学,2009.
- [14] 王朝晖,郑国磊,朱心雄.虚拟人自适应行为的多目标模糊评估与仿真.计算机辅助设计与图形学学报,2008,20(2):213-219.



王朝晖(1972—)男,浙江黄岩人,博士,助理研究员,主要研究领域为虚拟现实,人工智能,多 Agents 系统和复杂系统建模与仿真.



朱心雄(1933—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为自由曲线曲面造型技术,数控加工刀具轨迹生成,科学计算可视化,CAD/CAM/CAE 系统开发.



陈曦(1954—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为机器人及制造自动化,特种机器人及其应用,机电系统设计与控制,制造系统集成与信息化.