

基于虚拟维修仿真的人体关节动态受力分析

吕治国, 李焱, 贺汉根

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对某些慢操作的维修作业, 提出将维修作业视为一组有序的静态姿势, 通过计算每个静态姿势下的人体关节力矩, 可以分析整个作业过程中人体关节力矩变化。最后以装甲车维修任务为例, 将静态受力分析和动态仿真进程绑定, 在 JACK 平台上设计和实现了虚拟维修仿真过程中人体关节力矩的动态分析, 并采用 NIOSH81 评价准则对维修作业过程中人体操作姿势的合理性进行实时评价。

关键词: 虚拟人; 维修性; 人素; 受力分析; 关节力矩

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2007)05-0092-03

Dynamic Force Analysis of Human Joints Based on Virtual Maintenance Simulation

Lv Zhiguo, Li Yan, He Hangen

(School of Mechanical Engineering and Automation, National University of Defense Technology, ChangSha 410073, China)

Abstract Changing on virtual human joint moments in simulation is significantly meaningful to analyze the productions maintainability. For some maintenance work it requires slow operations, and the simulation process can be viewed as a sequence of static postures. Changes of joint moments during the whole process can be observed by computing each static posture joint moments. Taking the example of armor vehicle maintenance task, binding static human force model to simulation process, the design and implement of computing human joint moments online based on Jack platform are introduced, and the feasibility of human work postures is online evaluated by adopting the guideline of NIOSH81.

Key words: virtual human; maintainability; human factor; force analysis; joint moments

1 背景知识

随着现代工业技术的发展, 人机工程学在汽车、船舶、航空等领域已得到广泛应用, 现代维修技术也越来越重视维修中人的因素。虚拟人是人在计算机生成空间中的几何特性与行为特性的表示^[1], 可以广泛应用于人机交互、人机工效、游戏娱乐、军事训练等领域。维修性是指产品在规定的条件和规定的时间内完成维修的性能, 也指使用人员在对产品进行保养或修理时的便利程度^[2]。人素是人-机-环境系统设计的重要考虑因素, 无论是工具设计、作业环境设计, 还是作业量以及作业方式的安排都应该符合人的生理与心理特征^[3]。因此, 人素分析是产品维修性的一个重要方面。在虚拟维修仿真过程中, 人体的操作姿势和

身体负荷会随着仿真过程的推进而变化, 如何实时地计算人体关节所受力矩的变化, 在线评价人体操作姿势的舒适度, 以及实现动态人素分析, 对于分析维修作业的强度、调整维修作业的姿势以及分析作业对维修人员肢体可能造成的损伤都有非常重要的意义。对于某些需要慢操作的重维修作业或者精细维修作业, 人体加速度等动力学特性对人体受力负荷影响较小, 可以忽略, 将维修作业视为一组有序静态姿势, 通过计算每个静态姿势下人体关节所受力矩值, 可以分析整个维修作业过程中关节力矩的变化, 实现动态仿真过程中的人素分析功能。

JACK^[1]是由宾夕法尼亚大学研制开发的人机分析评价软件, 将人-机-环境系统的仿真集成于一体, 具有多种人机分析和评价方法, 包括视域分析、可及度

收稿日期: 2007-07-20

作者简介: 吕治国(1978-), 男, 山西万荣人, 国防科技大学博士生, 主要研究方向为虚拟人技术和计算机辅助设计。

分析、静态施力分析、NIOSH 提升分析、RULA 分析等, 已在航空、汽车、军事等领域得到广泛应用。由于 JACK 的人体受力树 (Human Force Tree, 简称 HFT) 分析模块只能实现人体静态姿势下的受力分析, 无法动态分析维修仿真过程中人体关节受力变化, 不能自动检测仿真过程中虚拟人操作的不当姿势。针对这一问题, 本文提出了一种人体关节动态受力分析方法, 并在 JACK 平台上设计和实现其动态仿真过程, 人体关节力矩变化的计算, 并依据 NIOSH81^[4]评价准则对维修作业操作的合理性进行了评价。

2 受力分析系统设计和实现

2.1 静态受力树分析流程

HFT (human force tree) 分析单元是嵌入在 JACK 软件中的一个模块, 可以实现人体静态受力树分析。该单元根据人体的工作姿势及双手的负载参数, 分析指定人体部位的受力以及关节的力矩。表 1 是 HFT 受力分析身体段和关节列表。HFT 分析过程可以分为如下步骤。

表 1 HFT 受力分析身体段和关节

Table 1 Segments and joints related with HFT

| 可选择人体部位 | | 可选择关节 |
|---------|---------------|----------------------|
| 右臂 | 右上臂 | 右肩关节 |
| | 右前臂 | 右肘关节 |
| | 右手掌 | 右腕关节 |
| 左臂 | 左上臂 | 左肩关节 |
| | 左前臂 | 左肘关节 |
| | 左手掌 | 左腕关节 |
| 右腿 | 右大腿 | 右胯关节 |
| | 右小腿 | 右膝关节 |
| | 右足 | 右踝关节 |
| 左腿 | 左大腿 | 左胯关节 |
| | 左小腿 | 左膝关节 |
| | 左足 | 左踝关节 |
| 后背 | 上腰部 (l_4) | Spine l_5/l_4 |
| | 下腰部 (l_5) | Spine l_4/l_3 |
| | 颈部 (t_2) | 颈 (Spine t_2/t_1) |

2.1.1 初始化操作

初始化操作主要对人体的受力树进行初始化设置, 将人体的手部负载转化为 HFT 受力条件。由于对人体下肢的 HFT 分析取决于人体的姿势 (站姿或坐姿), 因此需要对人体的姿势进行判断。初始化阶段的具体操作如下:

1) 受力树初始化。对选定分析人体, 清空已有的受力树。

2) 读取 HFT 受力条件。将手部负载参数转化为对身体段上特定基点 (site) 的受力矢量, 即 HFT 受力条件。受力矢量是三维矢量 ($f(x), f(y), f(z)$) 在全

局坐标系下的描述。

3) 人体姿势判别。根据人体的基点位置判断人体姿势是站姿还是坐姿, 当人体基点位于 lower_torso 时, 判断为坐姿, 否则为站姿。

2.1.2 创建受力树

受力树通过起始基点和若干末端段来描述, 末端段定义了受力树的分支。根据待分析的人体部位和关节的不同, 创建不同类型的受力树。HFT 中的受力树分为如下几类: 1) 上身受力树, 分析范围限定为人体上躯干和上肢; 2) 单腿受力树, 分析范围限定为人体下肢; 3) 全身受力树, 分析范围为人体躯干和四肢, 主要用于分析人体上身或坐姿情况下的下肢的受力。

2.1.3 设置受力条件

将 HFT 受力条件附加到人体上是基于受力树分析的前提。受力条件的设置分为两种情况: 1) 附加外力, 来源于手部负载参数; 2) 附加重物, 来源于附着于人体的重物。

2.1.4 执行受力分析

受力分析过程, 依待分析人体部位的不同而不同。如果待分析的人体部位是上躯干、上肢, 则通过基本的受力分析可直接得到结果; 如果分析对象是下肢, 而且人体处于站姿, 则上躯干及上肢的受力、重量等将作用到下肢, 作为下肢受力计算的依据。

2.2 动态受力树分析系统

2.2.1 系统设计框图

动态受力树分析系统框图如图 1 所示。

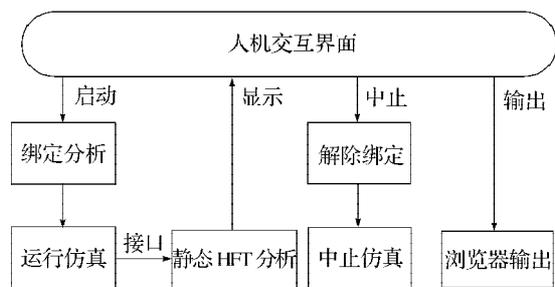


图 1 动态受力树分析系统框图

Fig. 1 Frame of dynamic human force tree system

系统启动分析后绑定 HFT 分析模块, HFT 模块随着仿真过程推进在线从仿真系统获取人体姿势、手部负重等受力分析参数, 对当前人体姿势进行关节受力分析, 并在界面上更新显示结果。绑定分析机制编程实现采用 Tcl 语言^[5], 嵌入在启动命令响应过程中。

2.2.2 与仿真系统接口

动态 HFT 分析单元与仿真系统的接口参数见表 2。

2.2.3 分析流程

图 2 是动态受力树分析流程图。首先通过交互界面选定分析人体和分析关节; 其次, 激活受力树分析组件并启动仿真系统运行, 受力树组件以设定的采样

时间间隔不断地从仿真系统中获取分析参数，并对选定分析关节进行力矩计算。

表2 HFT与仿真系统接口参数

Table2 Interface parameter between HFT and simulation system

| 序号 | 参数名 | 含义 |
|----|-------|---------|
| 1 | robj | 右手操作对象 |
| 2 | rtool | 右手操作工具名 |
| 3 | lobj | 左手操作对象 |
| 4 | ltool | 左手操作工具名 |

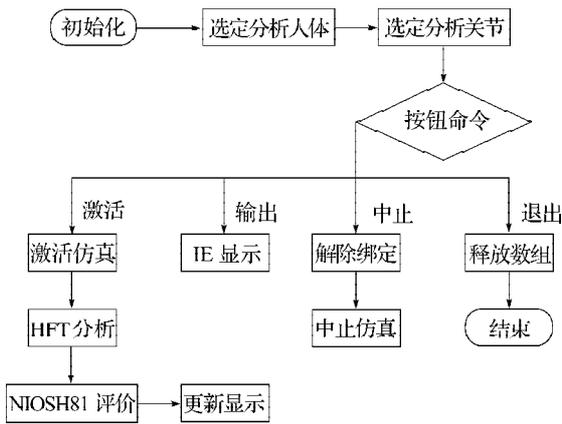


图2 动态受力树分析流程

Fig. 2 Flow program of dynamic HFT system

2.3 维修操作评价

维修仿真操作是否合理直接影响到仿真结果的可信度。人体在维修过程中，可能因操作姿势不正确或负重过大而承受较重的负荷，有造成身体伤残的危害。因此，如何检测仿真过程中可能造成肢体或关节损伤的动作，对于降低潜在的风险和避免事故的发生具有重要意义。本文采用NIOSH81评价准则对人体维修操作时低背 L_4/L_5 身体段受压进行评价。NIOSH81规定 L_4/L_5 身体段受压的两个极限值为：动作单元极限值AL (Action Limit) 为3 400 N，低于该值意味着75%的女性劳工和99%的男性劳工可以完成此操作，高于该值意味着操作存在不可接受的风险；最大承受极限值MPL (Maximum Permissible Limit) 为6 400 N，高于该值意味着少于25%的男性劳工和低于1%的女性劳工可以完成此操作。当激活分析后，HFT分析单元在线计算人体低背 L_4/L_5 身体段的压力值，并依据NIOSH81准则在线更新评价结果。

3 仿真实例

仿真实验以装甲车维修(见图3)仿真为例，分析了维修操作过程中人体右手腕关节所受的力矩变化曲线(见图4，由于腕关节仅两个自由度，图中只绘出绕x, y轴的力矩)，同时，在线计算低背受压，并依据NIOSH81准则评价操作姿势的合理性，见图5。

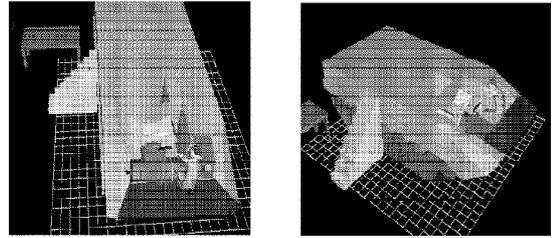


图3 装甲车拆卸示意图

Fig. 3 Intercept pictures of disassembling the armored vehicle

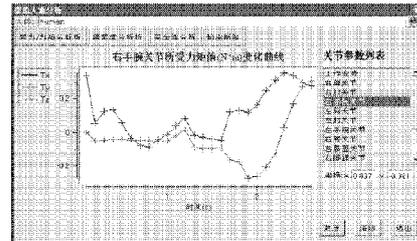


图4 右手腕关节力矩变化曲线

Fig. 4 Curves of dynamic joint moments of right wrist

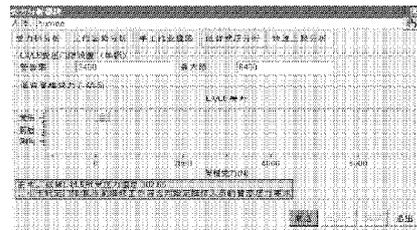


图5 低背 L_4/L_5 身体段受压分析结果(正常)

Fig. 5 Pressure analysis to L_4/L_5 segment of low back

4 结语

本文提出了一种面向慢作业维修操作的人体关节动态受力分析计算方法，并在JACK平台上设计和实现了在线计算维修仿真操作人员的关节动态受力，并依据NIOSH81评价准则，实时对维修仿真人员的低背受压进行评价。研究动态关节受力分析可以分析虚拟维修人员在仿真操作中的身体负荷状况，对于评价维修仿真的合理性和改进维修仿真过程的设计都有重要的意义。

参考文献:

- [1] Badler N I. Virtual humans for animation, ergonomics, and simulation[J]. IEEE Proceedings of Non-Rigid and Articulated Motion Workshop, 1997, 6: 28-36.
- [2] 马麟, 吕川. 虚拟维修技术探讨[J]. 计算机辅助设计和图形学学报, 2005, 17(12): 2729-2733.
- [3] 吴当时, 盛炬芳, 童和钦. 以人为本的维修-人类工效学在维修中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [4] Thomas R Waters Ph D, Vern Putz-Anderson Ph D, Arun Garg Ph D. Applications manual for the revised NIOSH lifting equation[R]. [S.L.]: U.S. Department of Health and Human Services, 1994.
- [5] John E Grayson. Python与TKinter编程[M]. 陈文志, 高垒, 缪瑾, 等译. 北京: 国防工业出版社, 2002.