

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201708100

# 基于模糊逻辑的快速上肢评估方法 (RULA) 改进

赵 川, 余隋怀, 初建杰, 李文华

(陕西省工业设计工程实验室(西北工业大学), 西安 710068)

**摘要:** 为更加有效地进行人机工效评估, 基于模糊逻辑, 对快速上肢评估 (RULA) 方法进行改进, 以避免因为不精确的关节角度输入, 产生差异较大的评估结果. 利用梯形函数对关节角度、负荷和肌肉使用进行模糊化处理, 利用三角形函数对 RULA 中间得分和最终得分进行模糊化表示, 并选取重心平均法进行去模糊化. 随机选取 29 个姿势进行相关性验证, 结果表明: 该方法和 RULA 的相关性为 0.937 ( $p < 0.01$ ), 和工作体位分析系统 (OWAS) 相关性为 0.725 ( $p < 0.01$ ), 能够良好地反应真实结果. 通过运动捕捉实验, 模拟控制台捕捉实验, 获取 12 个操作姿势的精确关节数据进行分析, 验证了该方法能够有效地改进 RULA 评估方法, 并具有较高的可靠性, 更有利于实现人机工效评估.

**关键词:** 快速上肢评估法; 模糊逻辑; 人机工效; 肌肉骨骼损伤

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)07-0087-07

## Improvement of rapid upper limb assessment (RULA) based on fuzzy logic

ZHAO Chuan, YU Suihuai, CHU Jianjie, LI Wenhua

(Shaanxi Engineering Laboratory for Industrial Design (Northwestern Polytechnical University), Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Abstract: To prevent ergonomic injuries, proper assessment of ergonomic risk is a key to identify risk factors and modify work practice in a timely manner, and a fuzzy logical approach to posture-based ergonomic evaluation tools is proposed. Rapid Upper Limb Assessment (RULA) is selected as a case study to describe the fuzzy logic modelling of RULA scoring systems. The trapezoidal functions are used to represent the angle ranges of the inputs as well as the force and muscle use imposed on the worker, and the triangular functions are used for intermediate variables which represent the RULA intermediate scores and the final RULA total score. The results of validation reveal that the proposed system produces high correlation coefficients with RULA (0.937,  $p < 0.01$ ) and OWAS (0.725,  $p < 0.01$ ). By taking the control console of a enterprise as a case, two participants completed six separate operation tasks, the model was used to analyze 12 tasks. The result indicated that the model had high reliability and could help to minimize human errors in observation for reliable on-site ergonomic assessment.

**Keywords:** Rapid Upper Limb Assessment, Fuzzy Logical, Ergonomics, Work-related musculoskeletal disorders

工业 4.0 是德国高科技战略计划的重要项目之一, 其中“智能生产”强调人机互动和满足人机工效的智能工厂. 人机工效作为工业 4.0 重要组成之一, 受到越来越多的关注<sup>[1]</sup>. 其中, 与工作相关的肌肉骨骼损伤 (work-related musculoskeletal disorders, WMSD) 成为研究的热点问题. 汽车制造、搬运作业等劳动密集型产业, 广泛存在 WMSDs 的不良问题, 如高负荷、快节奏、高重复、强迫体位等工作状态, 由此所导致的 WMSDs 已成为该行业作业工人的主要健康问题<sup>[2-4]</sup>. 研究发现, 因为 WMSDs 损失的年保险赔偿费用可高达上百亿美元, 其中加拿大每年因 WMSDs 而导致的直接和间接经济损失高达

近千亿美元<sup>[5]</sup>. 大型制造企业已经把 WMSDs 作为产品制造、装配和维修过程中重要组成部分, 尝试改变工作姿势和优化工作场所, 减少 WMSDs 的发病率.

通过有效的人机工效评估避免工作过程中的人机工效风险, 是目前减少 WMSDs 发病率主流的研究方向. 具有代表性的评估方法可以分为自我评估法、作业姿势评估法和直接测量法<sup>[6]</sup>. 在以上三类方法中, 自我评估法与其他方法相比, 通常准确性较低. 直接测量法虽然能够提供更高精度的数据, 但是受工作环境的影响, 一些可穿戴设备限制了动作的自由性, 由于技术和资金的限制直接测量法样本量通常较少<sup>[7]</sup>. 观察法具有简便性、有效性、时间和花费成本较低, 是应用最为广泛的人机工效评估方法. 常用的作业姿势评估分析工具包括快速上肢评估法 (Rapid Upper Limb Assessment, RULA)<sup>[8]</sup>、全身快速评估 (Rapid Entire Body Assessment, REBA)<sup>[9]</sup>、

收稿日期: 2017-08-25

基金项目: 工信部民机专项 (MJ-2015-F-018); 高等学校学科创新引智计划 B13044 资助

作者简介: 赵 川 (1988—), 男, 博士研究生;

余隋怀 (1962—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 余隋怀, ysuihuai@vip.sina.com

工作体位分析系统(Ovako Working posture Analysing System OWAS)<sup>[10-11]</sup>、上肢负荷评估(loading on the upper body assessment, LUBA)<sup>[12]</sup>、美国职业安全与卫生研究所提出的抬举方程 NIOSH<sup>[13]</sup>方法。

在作业姿势评估分析中,人机工效评估的可靠性取决于研究人员对输入变量的精确程度。输入变量的模糊性让研究人员很难获得精确的分析结果,本文提出一种基于模糊逻辑系统的 RULA 评估方法,用于处理由人类直觉引起的输入变量的不精确性。然后分析了该方法评估结果和普通 RULA 评估结果及 OWAS 评估结果的相关性,最后通过运动捕捉实验,完成控制台操作任务的人机工效分析,进一步验证该方法的实用性。

## 1 作业姿势人机工效评估

作业姿势人机工效评估主要利用评估模型及核查表,分析受试者在工作状态中肌肉骨骼损伤风险的大小。这类评估方法通常以被试的工作姿势为主,并结合工作频率、持续时间等,然后得出总体的风险评估结果。通常要求输入身体关节角度、搬运物体重量、任务频率等。但是这些评估方法通常会定义输入变量的边界范围,如果研究人员无法清晰地得到输入变量的值,或者输入变量的值在边界范围上就会产生不精确的分析结果。表 1 展示了 5 种常用的作业姿势人机工效评估方法。

在以上评估方法中,关节角度作为重要的输入变量对最终结果产生重要的影响,特别是关节角度处于边界范围时,主观确定的输入变量对输出结果的精确性和可靠性都会产生差异。

## 2 RULA 评估方法

快速上肢评估法(Rapid Upper Limb Assessment, RULA),主要针对操作姿势、受力状态以及肌肉施力状况进行分析,以评估上肢肌肉受伤风险<sup>[8]</sup>。

其详细操作方式是通过关节角度进行初始分数确定(确定 A、B 得分),初始分数可通过查表得到;根据负荷和肌肉使用情况确定中间分数(确定 C、D 得分);最后通过中间分数计算最终得分,得到最终评估结果,评估框架如图 1 所示。在评估过程中身体每个部分被认为是相对独立的,根据不同身体部位(上臂、前臂、腕部、颈部、躯干)单独计算相应得分,然后得到最终结果。最终得分(1 分-8 分)代表了任务的风险等级,较低的分数表示该任务符合人机功效的评估,并且在工作中 WMSDs 的风险较小。如果分数较高则表示在此类工作中容易对肌肉骨骼产生

损伤,需要对此类工作进行调整。

表 1 作业姿势人机工效评估

Tab.1 Example of posture-based assessment tools

评估方法	输入变量	变量范围	输入数量范围
RULA <sup>[8]</sup>	上臂	-90°180°	5
	前臂	0°180°	3
	腕部	-90°90°	4
	颈部	-45°90°	4
	躯干	60°120°	4
	负重	0~10 kg	3
REBA <sup>[9]</sup>	颈部	-45°90°	3
	躯干	60°120°	5
	腿部	0°180°	3
	上臂	-90°180°	5
	前臂	0°180°	3
	腕部	-90°90°	3
OWAS <sup>[10-11]</sup>	负重	0~10 kg	3
	背部	动作类型	4
	手臂	动作类型	3
	腿部	动作类型	10
	负重	动作类型	3
LUBA <sup>[12]</sup>	头部	动作类型	5
	腕部	0°60°	3
	肘部	0°120°	3
	肩部	0°150°	4
	颈部	0°45°	3
NIOSH 提举方程 <sup>[5,13]</sup>	背部	0°60°	4
	水平系数	0 mm 635 mm	17
	垂直系数	0 mm 1778 mm	16
	距离系数	0 mm 1778 mm	13
	旋转角度	0°135°	10
	频率系数	0 h 8 h	6

目前约有 120 多位人机工效专家验证了 RULA 的可靠性及有效性<sup>[13]</sup>。但是部分研究发现当关节角度处于边界范围时,RULA 的结果会产生较大差异<sup>[3]</sup>。在某些特殊作业环境下,运动捕捉设备和关节角度仪的安装和使用非常复杂,研究人员获得的大多是视频或图片资料,因此估计的关节角度可能存有误差。但是 RULA 评估方法在关节范围的变化中具有明确的界限,这就导致了评估过程的不精确性。

分别设置 3 个虚拟人的关节角度和姿势,如图 2 所示。根据相应的姿势和关节角度分别计算出 RULA 得分,见表 2。通过对比姿势 1 和姿势 2 可以

看出虽然关节角度和受力情况不同,但是最终结果却相同. 姿势 2 和姿势 3 的动作非常接近,两种姿势的关节角度也比较接近,但是 RULA 得分差别很大.

通过对比可以看出,当关节角度差别非常小,RULA 最终结果也会差别较大. 这种差异是由于所选的关节角度更接近于边界范围.

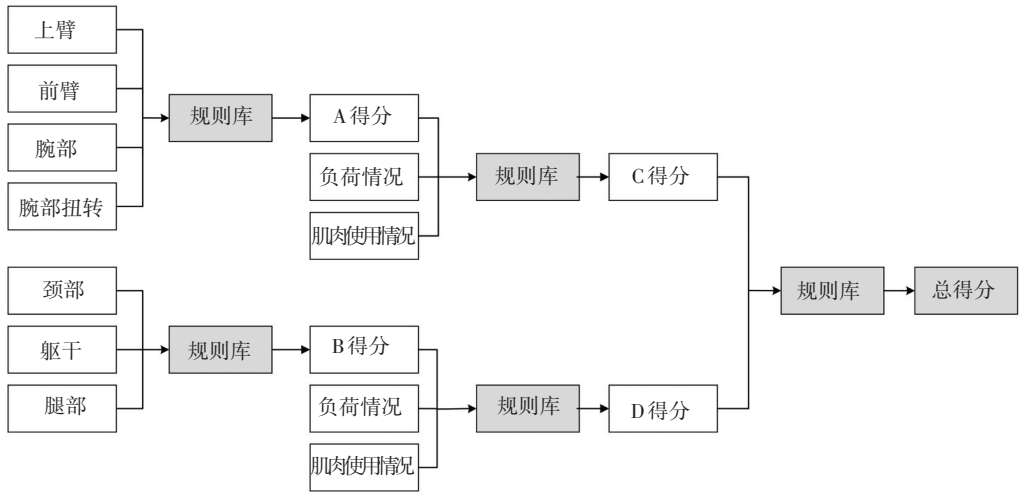


图 1 RULA 评估框架

Fig.1 Structure of the RULA system

表 2 RULA 得分

Tab.2 RULA scores for three sets of inputs

姿势分类	上臂	前臂	腕部	腕部旋转	颈部	躯干	腿部	负荷	肌肉使用	RULA 得分
姿势 1	95°	46°	3°	-7°	12°	21°	2°	0	0	3
姿势 2	90°	60°	22°	12°	13°	59°	2°	0	0	3
姿势 3	91°	60°	22°	12°	13°	61°	2°	0	0	6

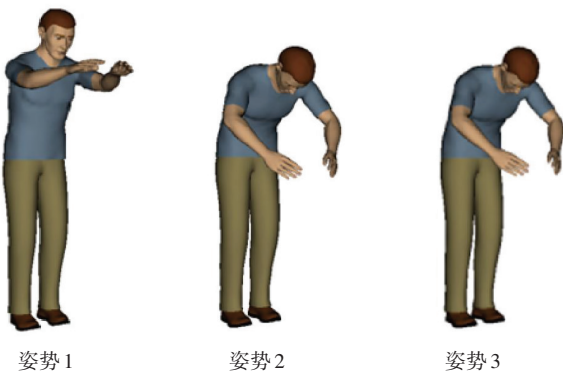


图 2 虚拟人姿势

Fig.2 Postures of virtual person

当前臂和腕部角度固定时,上臂关节角度从-90°到+160°,RULA 整体得分情况如图 3 所示. 上臂的关节角度在边界范围时,得分会发生显著的变化,特别是在-20°、+20°和+45°时. 考虑到研究人员对关节角度输入的不精确性,评估结果也会相应的不准确. 本研究主要解决的是关节角度在边界范围时 RULA 得分的不精确性,尝试通过逐渐改变某个关节的得分,避免了得分突然变化,提高该方法的精确性.

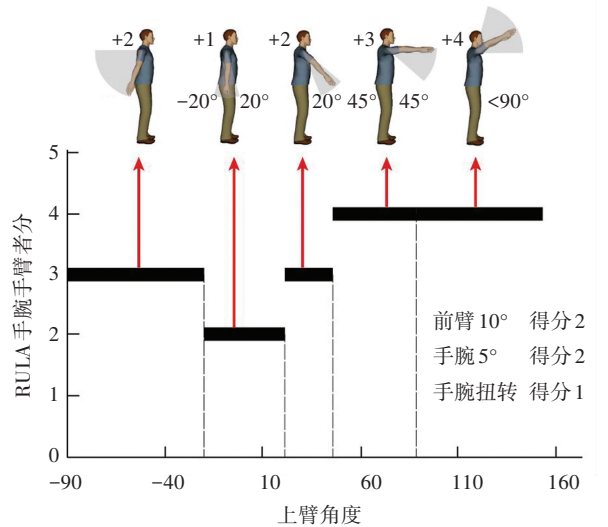


图 3 上臂关节角度对手臂和腕部的评估结果的影响

Fig.3 The impact of upper arm posture categories on intermediate results of arm and wrist score

### 3 基于模糊逻辑的 RULA 评估法

#### 3.1 模糊逻辑结构

模糊逻辑是一种处理近似而非精确的数学工具. 它摒弃了原有的二值逻辑简单的肯定或否定,

把客观逻辑世界看成是具有连续灰度等级变化的,它允许一个命题存在着部分肯定和部分否定,只不过是隶属程度不同而已<sup>[15]</sup>. 根据 L. A. Zadeh<sup>[16]</sup>著名的“不相容定理”,随着系统复杂性的增加,人们对其进行精确描述的能力下降,直至达到这样一个界限,即精确地描述失去意义. 由于在人机工效领域中存在主观的不确定性决策过程,“模糊”的描述对于那些无法进行精确分析的问题提供了新的解决方法.

模糊逻辑模型通常包括输入量模糊化、数据库、规则库、推理机和输出量反模糊化等 5 部分. 本研究的 RULA 模糊逻辑模型为 11 个输入、1 个输出、5 个规则块,45 个成员函数,以及 272 个 if-then 规则,

如图 1 所示. 模糊逻辑模型在输入和输出之间起着非线性映射作用,其输入和输出都是确定的实数值. 模糊化是将输入转换为模糊集合,即将实测物理量转化为在该语言变量相应论域内不同语言值的模糊子集,对于模糊逻辑模型的多个输入,每个输入量的模糊化过程都是一样的,进行模糊推理的前提是输入都必须通过模糊化处理. 因此,模糊化即为模糊逻辑模型的输入接口,作用就是将确定的实数输入量转换为模糊量,即模糊集合及其相应的隶属度. 推理机使用数据库和规则库产生模糊结论. 反模糊化则将模糊结论转换为确定实数输出,即将推理机得到的模糊量转化为一个清晰确定的值,如图 4 所示.

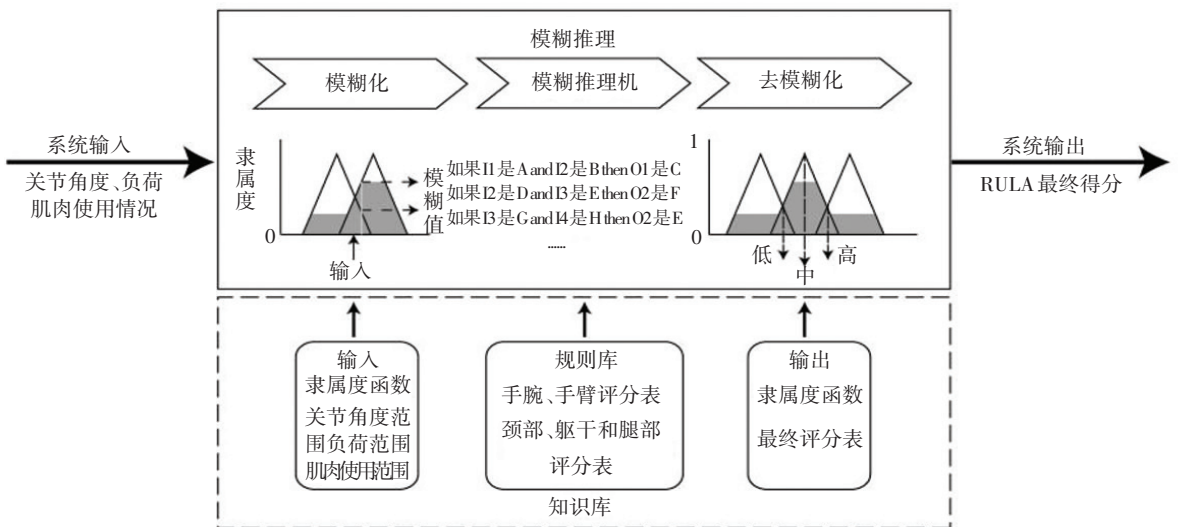


图 4 RULA 模糊逻辑模型结构图

Fig.4 Structure of the Fuzzy RULA expert system

### 3.2 模糊评估模型建立

由于隶属函数与所研究的实际问题的自然属性密切相关,极大地依赖于实际应用的背景,而且隶属度函数的确定目前还没有一套成熟有效的方法. 常用的方法有:模糊统计法、例证法、指派方法、二元对比排序法等,这些方法在不同程度上都具有一定的局限性. 隶属函数的确定实质上是人们对客观事物中过渡的描述,这种描述本质上是客观的. 本文借助于指派方法的思想来确定隶属度函数. 即根据问题的性质套用现成的某些形式的模糊分布,常用的模糊分布有三角形、矩形、梯形、 $k$ 次抛物线型、 $\Gamma$ 型、岭形,每一种分布又分为戒上型、中间型、戒下型 3 种形式. 由于三角形和梯形隶属度函数计算的有效性足以表达模糊化过程,还能极大简化计算过程<sup>[17]</sup>. 本研究中利用梯形函数对关节角度、负荷和肌肉使用进行模糊化,利用三角形函数对 RULA 中间得分进行模糊化. RULA 最终得分也是由三角形

隶属度函数表示.

梯形隶属度函数为

$$\mu(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x < a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ 1, & b \leq x \leq c; \\ \frac{x-c}{d-c}, & c \leq x \leq d; \\ 0, & x > d. \end{cases} \quad (1)$$

三角形隶属度函数为

$$\mu(x; a, b, c) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c; \\ 0, & x < a \text{ 或 } x > c. \end{cases} \quad (2)$$

式中  $a, b, c, d$  均为实数.

针对关节角度、负荷和肌肉使用,相邻的两个隶属度函数的重叠区域被设置为 0.5,可以使变量之间逐渐过渡. 如图 5 所示,上臂隶属度函数及关节角

度变化相应得分.

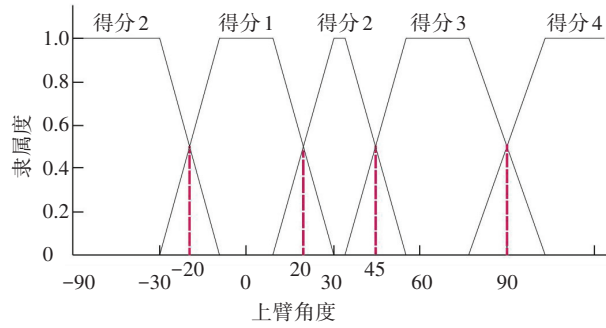


图 5 上臂隶属度函数重叠交点

Fig.5 Example of point of intersection for upper arm input variable

模糊规则库是模糊逻辑系统的核心,它由一系列 If-Then 形式的模糊规则组成,定义输入变量到输出变量的逻辑关系. 基于模糊逻辑的 RULA 评估方法的 If-Then 规则是 3 个独立的表格. 表 3 展示了颈部、躯干、腿部得分,以及根据调查表得到的 B 组得分. If 躯干分值是 3;颈部分值是 2;腿部分值是 1; Then 躯干、颈部和腿部的综合分值是 4.

表 3 颈部、躯干和腿部得分查询表

Tab.3 Neck, trunk, and leg score table and example of an if-then rule

颈部得分	躯干得分											
	1		2		3		4		5		6	
	腿部分值	腿部分值	腿部分值	腿部分值	腿部分值	腿部分值	腿部分值	腿部分值	腿部分值	腿部分值	腿部分值	腿部分值
1	1	3	2	3	3	4	5	6	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	6	6	7	7	7
3	3	3	3	4	4	5	6	6	6	7	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	8	8
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9

去模糊化是将模糊值转换成实际的精确值,可以理解为模糊空间到清晰空间的一种映射. 本研究采用最常用也是较为合理的重心平均法进行逆模糊化,重心平均法是取隶属度函数曲线与横坐标围成面积的重心为最终输出值,具体的计算公式为

$$Z = \frac{\int \mu(x) x dx}{\int \mu(x) dx}$$

表 4 相关性分析

Tab.4 The results of correlation analysis

评估方法	姿势 1	姿势 2	姿势 3	姿势 4	姿势 5	.....	姿势 27	姿势 28	姿势 29	相关性分析
基于模糊逻辑理论的 RULA	6.20	4.45	2.22	4.21	6.73	.....	5.96	6.12	3.20	0.937 (p < 0.01)
RULA	7	3	2	4	7	.....	7	5	2	

式中  $\mu(x)$  为输出变量的隶属度值,最后按照最大隶属度原则取隶属度最大的模糊子集出.

在 RULA 评估中,不精确的关节角度输入到模糊逻辑模型中可以减少评估结果的差异性. 针对关节角度的变化利用模糊逻辑理论可以产生稳定的过度结果,最终评估得分也会逐渐过渡. 这种方法避免了 RULA 评估得分突然变化,提高了该方法的可靠性. 根据已确定的输入变量、输出变量及其隶属函数以及模糊规则,通过 MATLAB 中的 Fuzzy logic 模糊逻辑工具箱,建立和验证基于模糊逻辑的 RULA 模型,如图 6 所示,为该模型中上臂和前臂的关节角度变化对 RULA 最终得分的影响,其中 input 1 为上臂关节角度变化,input2 为前臂关节角度变化, output1 为 RULA 最终得分.

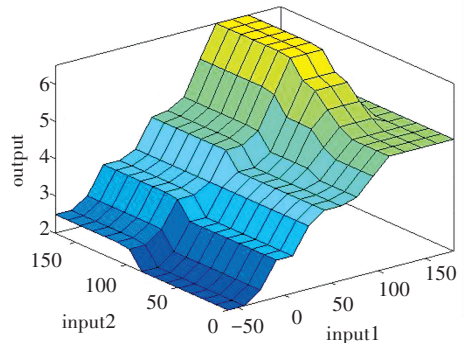


图 6 上臂和前臂关节角度对 RULA 最终得分影

Fig.6 The upper arm and forearm joint angle affect the score of RULA

### 3.3 准确性和有效性验证

为了验证基于模糊逻辑理论的 RULA 评估方法的准确性和有效性,首先需要分析该方法评估结果和普通 RULA 评估结果的相关性,其次分析该方法评估结果与 OWAS 评估结果的相关性. 在互联网上随机选取了 29 组不同的作业任务照片,作为关节角度的输入变量,分别得到 RULA 和基于模糊逻辑理论的 RULA 评估结果. 采用 Spearman 等级相关,验证相关性. 结果表明 2 种方法的相关性系数  $r = 0.937$ ,通过查询《Spearman 秩相关系数临界值表》<sup>[18]</sup>,当样本数  $n = 29$ ,相关性系数  $r > 0.475$  时,有 99% 的置信度认为两个随机变量相关. 所以在  $p = 0.01$  的置信水平上来看,RULA 和基于模糊逻辑理论的 RULA 评估结果是等级相关的,见表 4.

OWAS 是由芬兰的 Ovako Oy 钢铁公司提出的人机工效评估工具<sup>[10-11]</sup>, 广泛应用于高劳动强度的作业评估中. 通过进一步分析基于模糊逻辑理论的 RULA 评估结果与 OWAS 的相关性, 验证该方法的有效性. 根据选取的 29 组输入变量, 利用 JACK 软

件得到相应的 OWAS 评估结果. Spearman 相关系数  $r = 0.725$ , 查询《Spearman 秩相关系数临界值表》<sup>[18]</sup>, 结果表明在  $p = 0.01$  的置信水平上来看, OWAS 与基于模糊逻辑理论的 RULA 具有显著的相关性, 见表 5.

表 5 相关性分析

Tab.5 The results of correlation analysis

评估方法	姿势 1	姿势 2	姿势 3	姿势 4	姿势 5	……	姿势 27	姿势 28	姿势 29	相关性分析
基于模糊逻辑理论的 RULA	6.20	4.45	2.22	4.21	6.73	……	5.96	6.12	3.20	0.725 ( $p < 0.01$ )
OWAS	4	1	1	1	4	… …	3	2	1	

### 4 实例验证

通过实例说明该方法的应用过程, 并进一步验证该方法的有效性. 借鉴某研究所关于控制室控制台的整体构型和布局方案, 并模拟某项目中的舱室作业任务. 利用瓦楞纸以 1:1 的比例搭建控制台, 选取 2 名研究生分别完成 6 项操作任务. 任务 1, 通过移动式操作曲柄完成精确调节; 任务 2, 通过旋转式操作手轮完成精确调节; 任务 3, 通过旋转式操作旋塞完成粗调节; 任务 4, 通过按压式操作按钮完成开关调节; 任务 5, 通过移动式操作杠杆电键完成不同工位的调节; 任务 6, 通过摆动式操作拨动开关完成不同工位的调节.

实验过程中采用 OptiTrack 运动捕捉系统采集运动学信息. 实验对象运动的肢体关节上贴有标记点, OptiTrack 系统的红外摄像头发射的红外光被标记点反射后再由摄像头再次接收. 全身动作捕捉需要配置 6 个摄像头, 当 3 个以上的摄像头接收到反射光线后就会产生相应标记点的三维空间坐标  $(x, y, z)$ . 根据坐标关系建立关节中心与局部坐标系

的关系, 然后进行矢状面关节旋转角度计算<sup>[19]</sup>. 以前臂关节角度为例具体的计算公式为

$$\theta = \arccos\left(\frac{a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2}}\right),$$

式中  $\theta$  为前臂关节角度,  $a_1, a_2, a_3$  为前臂标记点的向量,  $b_1, b_2, b_3$  为上臂标记点向量.

通过关节处相邻的两个标记点的向量, 可以得到相应的关节角度. 表 6 中显示了不同任务相应的关节角度. 以表 6 中被试 1 的任务 1 的关节角度为例, 输入到基于模糊逻辑理论的 RULA 评估方法中, 上臂、前臂、腕部和腕部旋转总得分为 5.2, 颈部、躯干和腿部总得分为 2.83, 该姿态最终得分为 4.55, 如图 7 所示. 将其他操作任务的关节角度分别输入到 RULA 和基于模糊逻辑理论的 RULA 评估方法中, 得到最终评估结果, 见表 6. 两种方法的 Spearman 相关性系数  $r = 0.817$ , 通过查询《Spearman 秩相关系数临界值表》<sup>[18]</sup>, 当样本数  $n = 12$ , 相关性系数  $r > 0.727$  时, 有 99% 的置信度认为两个随机变量相关. 所以在  $p = 0.01$  的置信水平上来看, 该方法能够作为 RULA 评估方法有效的改进, 并具有较高的可靠性.

表 6 实例验证评估结果

Tab.6 The evaluation result of instance verifies

被试	任务类别	上臂	前臂	腕部	腕部旋转	颈部	躯干	腿部	负荷	肌肉使用	RULA 得分	模糊 RULA
被试 1	任务 1	124.5°	17.6°	20.6°	6.2°	5.1°	14.5°	2	1	0	4	4.55
	任务 2	61°	92.5°	16.1°	2.5°	10.3°	15.14°	2	0	0	3	4.19
	任务 3	120.6°	23.4°	18.9°	0°	3.6°	12.5°	2	1	0	3	4.32
	任务 4	39.2°	62.4°	5.2°	0°	18.6°	9.7°	2	0	0	3	4.4
	任务 5	134.1°	18.4°	18.5°	4.2°	3.2°	13.4°	2	1	0	4	4.53
	任务 6	52.3°	85.5°	2.6°	3.4°	19.5°	12.2°	2	1	0	3	4.48
被试 2	任务 1	137.3°	12.3°	24.7°	10.7°	6.3°	23.8°	2	1	0	5	6
	任务 2	44.5°	92.3°	18.2°	5.1°	16.2°	12.2°	2	0	0	3	4.48
	任务 3	133.6°	20.5°	15.1°	0°	2.7°	21.2°	2	1	0	5	5.5
	任务 4	61.2°	19°	2.4°	0°	28.2°	15.4°	2	0	0	3	4.46
	任务 5	139°	10.1°	20.1°	6.5°	7.6°	25.6°	2	1	0	5	6.48
	任务 6	42.6°	23.2°	13.2°	3.2°	18.5°	10.8°	2	1	0	3	4.8



图7 基于模糊逻辑理论的RULA实例验证结果

Fig.7 The results of fuzzy logical-based RULA analysis of instance

## 5 结论

本研究通过模糊逻辑理论,处理快速上肢评估方法(RULA)评估过程中的关节角度非精确性描述问题,建立一种更为合理和具有广泛适用性的人机工效评估方法,识别、预防手工操作中不安全姿势,减少工作中的WMSDs。通过29组不同的作业任务照片和控制台操作任务运动捕捉实验,验证了基于模糊逻辑理论的RULA评估方法结果的准确性和有效性,表明该方法和普通RULA评估方法的Spearman相关性系数较高( $r = 0.817$ ),而且关节角度处于边界范围时,基于模糊逻辑理论的RULA更具优势。后续工作中,将尝试采用不同模糊逻辑函数进一步优化模型。REBA、LUBA等基于作业姿势的人机工效评估方法也可以通过模糊逻辑理论进行优化,将针对不同的基于作业姿势的人机工效评估方法提出相应的模糊逻辑改进方法。

## 参考文献

- [1] 陶俐言,王志峰,聂清,等.考虑人因的单元设施布局优化设计方法[J].计算机集成制造系统,2014,20(12):2973-2979.  
TAO Liyan, WANG Zhifeng, NIE Qing, et al. Optimization design method of unit facilities layout considering human factors[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(12): 2973-2979.
- [2] 王忠旭,王伟,贾宁,等.汽车制造男性作业工人多部位肌肉骨骼损伤的横断面研究[J].环境与职业医学,2017,34(1):8-14.  
WANG Xuzhong, WANG Wei, JIA Ning, et al. Cross-sectional study of multisite musculoskeletal disorders among male auto manufacture workers[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2017, 34(1):8-14.
- [3] GOLD J E, D'ERRICO A, KATZ J N, et al. Specific and non-specific upper extremity musculoskeletal disorder syndromes in automo-

bile manufacturing workers[J]. American Journal of Industrial Medicine, 2010, 52(2):124-132.

- [4] KADIKON Y, RAHMAN M N A. Manual material handling risk assessment tool for assessing exposure to risk factor of work-related musculoskeletal disorders: a review [J]. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016, 100(10): 2226-2232.
- [5] GOLABCHI A, HAN S U, FAYEK A R. A fuzzy logic approach to posture-based ergonomic analysis for field observation and assessment of construction manual operations[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2016, 43(4):294-303.
- [6] LI G, BUCKLE P. Current techniques for assessing physical exposure to work-related musculoskeletal risks, with emphasis on posture-based methods[J]. Ergonomics, 1999, 42(5): 674-695.
- [7] SPIELHOLZ P. Two posture analysis approaches and their application in a modified rapid upper limb assessment evaluation[J]. Ergonomics, 2007, 50(12):2118-2136.
- [8] MCATAMNEY L, NIGEL C E. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders[J]. Applied Ergonomics, 1993, 24(2):91.
- [9] HIGNETT S, MCATAMNEY L. Rapid entire body assessment (REBA)[J]. Applied Ergonomics, 2000, 31(2):201-205.
- [10] KARHU O, KANSI P, KUORINKA I. Correcting working postures in industry: A practical method for analysis[J]. Applied Ergonomics, 1977, 8(4):199-201.
- [11] KARHU O, HÄRKÖNEN R, SORVALI P, et al. Observing working postures in industry: examples of OWAS application [J]. Applied Ergonomics, 1981, 12(1):13-17.
- [12] KEE D, KARWOWSKI W. LUBA: an assessment technique for postural loading on the upper body based on joint motion discomfort and maximum holding time [J]. Applied Ergonomics, 2001, 32(4):357-366.
- [13] WATERS T R, PUTZ-ANDERSON V, GARG A, et al. Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks [J]. Ergonomics, 1993, 36(7):749-76.
- [14] MANGHISI V M, UVA A E, FIORENTINO M, et al. Real time RULA assessment using Kinect v2 sensor[J]. Applied Ergonomics, 2017, 65:481-491.
- [15] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M].北京:清华大学出版社,2003.  
WANG Lixin. A Course in fuzzy systems and control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [16] ZADEH L A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1973, 1100: 38-45.
- [17] POVEDA C A, FAYEK A R. Predicting and evaluating construction trades foremen performance: fuzzy logic approach [J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2009, 135(9):920-929.
- [18] Spearman 秩相关系数界值表[EB/OL].(2014-06-26)[2018-01-10].https://wenku.baidu.com/view/ba8471aaaf8941ea76e05d0.html.
- [19] 陈江城,张小栋.人体下肢行走关节连续运动表面肌电解码方法[J].西安交通大学学报,2016,50(6):61-67.  
CHENG Jiangcheng, ZHANG Xiaodong. Surface electromyography decoding for continuous movement of human lower limb during walking [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(6):61-67.

(编辑 王小唯)